



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

제주도 육해상 환경특성을 고려한  
풍력단지 개발 프로세스에 대한 연구

濟州大學校 大學院

風力特性化大學院

高 定 佑

2013年 7月

# 제주도 육해상 환경특성을 고려한 풍력단지 개발 프로세스에 대한 연구

指導教授 李秉杰

高定佑

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2013年 7月

高定佑의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 이 동 인

委 員 허 종 철

委 員 고 경 남

委 員 이 동 옥

委 員 이 병 걸

濟州大學校 大學院

2013年 7月

The Process for Wind Farm Development  
Considering Coastal Environment  
Characterizing in Jeju Island

Ko, Jung-Woo

(Supervised by Professor Byung-Gul Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Doctor of Engineering

2013. 7.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, *Amogh*, Prof. of Atmospheric Sciences.  
Thesis director, *Amogh*, Prof. of Mechanical Engineering.  
Thesis director, *Koh*, Prof. of Graduate School of  
Specialized Wind Energy.  
Thesis director, *DW Lee*, Prof. of Civil Engineering.  
Thesis director, *Byung-Gul Lee*, Prof. of Civil Engineering.

July. 2013

Graduate School of Specialized Wind Energy  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

목 차 .....	i
List of Figures .....	vii
List of table .....	xiii
Summary .....	xvi
1. 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 방법 .....	4
1.3 연구 범위 .....	7
2. 연구 지역 및 자료 .....	16
2.1 연구 지역 .....	16
2.2 제주 지역 풍황 특성 분석 자료 .....	16
2.3 제주 지역 조도계수 산정에 사용된 풍황 자료 .....	18
2.4 해양파의 spectrum 분석에 이용된 풍속 자료 .....	21
2.5 영상분류에 사용된 인공위성 영상 .....	21
2.6 지형자료 분석에 사용된 수치지형도 .....	22
2.7 해양조건 분석에 사용된 자료 .....	22
2.7.1 파랑 및 조석 관측 자료 .....	23
2.7.2 연속 조류 관측 자료 .....	24
2.7.3 해양파의 Spectrum 분석 자료 .....	24
2.7.4 STFT 분석 자료 .....	25
3. 연구대상지역의 공간 분석 .....	26

3.1 공간분석 기법 .....	26
3.2 지도투영과 좌표변환 .....	26
3.3 지형고도자료 생성 .....	36
3.3.1 수치지도의 등고선도 .....	36
3.3.2 DEM생성과 등고선 추출 .....	37
3.4 입지 분석 .....	43
3.4.1 개발 제한지역 .....	43
3.4.2 배제 분석 시 포함 지역 .....	44
3.4.3 수심에 따른 개발 한계 구역 .....	46
3.5 제주 연안 개발 가능 지역 추출 .....	47
3.6 제주 북동부 연안 지역의 특성 검토 .....	48
3.7 기타 개발 제한 조건 분석 .....	47
3.7.1 군통신 영향 지역 .....	50
3.7.2 그림자 영역 지역 .....	52
3.7.3 가시화 영역 및 시계영역 지역 .....	55
3.8 Remote Sensing 기술을 이용한 영상 분류 .....	57
3.8.1 영상 보정 기법 .....	58
3.8.1 무감독 분류 .....	60
3.8.2 최빈값 필터를 이용한 영상 필터링 .....	63
4. 풍황 자료 분석 .....	67
4.1 풍황자료 분석의 이론적 배경 .....	67
4.1.1 극한 풍속 산출 방법 .....	67
4.1.2 Gumbel 확률분포의 파라미터 산출 방법 .....	68
4.1.2.1 모멘트법 .....	69
4.1.2.2 최소제곱근법 .....	69
4.1.2.3 EWTS II의 방법 .....	72
4.1.3 난류강도 .....	73

4.1.3.1	난류강도 이론적 배경 .....	73
4.1.3.2	IEC 61400-1의 난류강도 .....	74
4.1.4	풍속의 확률분포 .....	76
4.1.4.1	Rayleigh 확률분포 .....	77
4.1.4.2	Weibull 확률분포 .....	77
4.1.4.3	Weibull 확률분포의 파라미터 산출 방법 .....	78
4.1.4.3.1	모멘트법을 이용한 Weibull 변수 구하기 .....	78
4.1.4.3.2	최소제곱근법을 이용한 Weibull 변수 구하기 .....	79
4.1.4.3.3	WAsP 알고리즘을 이용한 Weibull 변수 구하기 .....	80
4.1.4.3.4	Maximum likelihood 알고리즘을 이용한 Weibull 변수 구하기 .....	81
4.1.5	Wind Shear 분석 .....	82
4.1.5.1	대수법칙 .....	84
4.1.5.2	멱법칙 .....	85
4.1.5.3	대기경계층의 일변환 .....	86
4.1.6	Wind Rose .....	88
4.2	제주 북동부 지역의 풍황 특성 .....	89
4.2.1	Wind Rose .....	91
4.2.2	제주 북동부 지역의 Weibull 확률분포의 특성 .....	93
4.3	제주 북동부 지역의 풍황 특성 .....	99
4.3.1	WTGS classes .....	99
4.3.2	제주 북동부 지역 $V_{ref}$ .....	101
4.3.3	제주 북동부지역 난류강도 .....	102
4.4	제주 지역에 적합한 지면 조도계수 산정 .....	107
5.	장기 풍황 보정 .....	111
5.1	장기 풍황 보정의 필요성 .....	112
5.2	Quality Check .....	113

5.2.1	결속구간 보정 .....	113
5.2.2	시간 지연 보정 .....	115
5.3	MCP .....	115
5.3.1	상관성 분석 .....	116
5.3.2	MCP 모델 선정 기준 .....	119
5.4	장기 풍황 특성 기초 연구 .....	121
5.4.1	장단기 풍황의 AEP 및 CF비교 .....	121
5.5	장기 풍황 예측의 정확성 향상 .....	123
5.5.1	주파수 영역 처리의 이론적 배경 .....	123
5.5.1.1	Power Spectrum .....	123
5.5.1.2	Band Stop Filter .....	124
5.5.2	풍황 데이터의 시계열 특성 분석 .....	125
5.5.3	풍황 데이터의 Power Spectrum 분석 .....	127
5.5.4	풍황 데이터의 계절별 Power Spectrum 분석 .....	128
5.6	풍황 데이터에 BSF 적용 .....	128
5.6.1	관측 전 기간에 적용 .....	128
5.6.2	일부 계절 적용 .....	131
6.	풍력자원지도 .....	133
6.1	풍력자원지도 생성과정 .....	133
6.2	대기밀도와 풍력 에너지 밀도 .....	134
6.2.1	대기압력 .....	134
6.2.2	대기온도 .....	135
6.2.3	대기밀도 .....	136
6.2.4	표준 공기밀도와 관측 공기밀도 .....	137
6.2.5	풍력에너지 밀도 .....	138
6.2.6	Energy Pattern Factor .....	139
6.2.7	Wind Power Density .....	139



6.2.8 공기밀도의 변화와 풍력에너지 밀도 .....	140
6.3 유력후보지 선정 단계의 풍력자원지도 .....	141
6.4 단기풍력자원지도 정확성 향상 .....	142
6.5 장기풍력자원지도 정확성 향상 .....	144
7. 해양환경자료 분석 및 평가 .....	147
7.1 DLC .....	147
7.1.1 중력파에 의한 하중 .....	148
7.1.2 안전 상태 응답 범위 .....	150
7.1.3 Campbell Diagram .....	153
7.2 해양 환경 하중의 이론적 배경 .....	154
7.2.1 해양파의 특성 .....	155
7.2.2 시계열 분석 .....	156
7.2.2.1 파동의 기본 용어 .....	156
7.2.2.2 개별파 .....	157
7.2.2.3 개별파를 이용한 통계적인 대표파 .....	158
7.2.2.4 개별파의 확률적 특성 .....	159
7.2.3 주파수영역 분석 .....	162
7.2.3.1 Fourier 급수와 계수 .....	163
7.2.3.2 조석의 조화 분해 .....	164
7.2.3.3 조류의 조화 분해 .....	169
7.2.3.4 유효 주파수 범위 .....	170
7.2.3.5 Fourier Transform .....	172
7.2.3.6 Short-Time Fourier Transform .....	174
7.2.4 풍파의 성장과정 .....	177
7.2.5 Spectrum .....	180
7.2.6 취송류 .....	182
7.3 제주 북동부 연안의 해양 환경 하중 .....	183

7.3.1	파랑	185
7.3.2	조석	189
7.3.3	연속조류	193
7.4	해양파의 Power Spectrum 분석	197
7.5	STFT분석 결과	204
8.	결론	207
9.	참고문헌	212
10.	부록	219
	A. Data Quality Check	219
	B. Matlab code	224

## List of Figure

Fig 1.1 Development of Onshore wind farms in Jeju coastal zone flow chart .....	4
Fig 1.2 Development of offshore wind farms in Jeju coastal zone flow chart .....	6
Fig 1.3 Wind Speed Map for Republic of Korea .....	9
Fig 1.4 The process of creating the Surface Roughness Map .....	11
Fig 1.5 The process of creating Contour Map. ....	12
Fig 1.6 Short-term Wind Resource Analysis Process. ....	13
Fig 1.7 Long-term Wind Resource Analysis Process. ....	14
Fig 2.1 The Study Area. ....	16
Fig 2.2 Met-mast & AWS location in the northeast Jeju Island. ....	17
Fig 2.3 Specification of Met-Mast .....	18
Fig 2.4 Anemometric Mast Location (Handong, Pyeongdae, Udo). ....	18
Fig 2.5 Met-mast location around Jeju Island. ....	19
Fig 2.6 Spot-5 Image around Jeju Island. ....	22
Fig 2.7 Digital Map Data around Jeju Island. ....	22
Fig 2.8 Wave, Tidal, Continuous current Observation Position. ....	23
Fig 2.9 Wave Logger Installation view. ....	24
Fig 3.1 Digital Map's Metadata. ....	27
Fig 3.2 rotational ellipsoids .....	28
Fig 3.3 Geodetic longitude and latitude & Geocentric reference ellipsoid. ....	29
Fig 3.4 TM Projective Schematic and distortion. ....	30
Fig 3.5 Geodetic longitude and latitude, UTM & TM Coordinate System. ....	31
Fig 3.6 Transverse Mercator Projection. ....	31
Fig 3.7 Projection Result .....	32
Fig 3.8 Coordinate Transformation .....	33
Fig 3.9 Concept of Coordinate Transformation Parameters .....	34
Fig 3.10 Movement of point along an Axis .....	34
Fig 3.11 Rotation of point along an Axis .....	35
Fig 3.12 Edge Match of two maps .....	35
Fig 3.13 Discontinuities of the contour interval and solidarity. ....	37
Fig 3.14 Electronic navigation chart .....	37
Fig 3.15 Problems and Solutions using Digital Maps. ....	38
Fig 3.16 DEM around Jeju Island_1. ....	39

Fig 3.17 TIN around Jeju Island. ....	40
Fig 3.18 DEM around Jeju Island_2 ....	40
Fig 3.19 Problem of Contour Map around Jeju Island. ....	41
Fig 3.20 DEM for working with Micro-siting. ....	41
Fig 3.21 TIN for working with Micro-siting. ....	42
Fig 3.22 Contour Map Error Check. ....	42
Fig 3.23 contour map for Micro-Siting. ....	43
Fig 3.24 Regional Development Limited around Jeju Island. ....	44
Fig 3.25 Analysis of Social Exclusion Area around Jeju Island_1. ....	44
Fig 3.26 Analysis of Social Exclusion Area around Jeju Island_2. ....	45
Fig 3.27 Analysis of Social Exclusion Area around Jeju Island_3. ....	45
Fig 3.28 Analysis of Social Exclusion Area around Jeju Island_4. ....	46
Fig 3.29 Analysis of Social Exclusion Area around Jeju Island_5. ....	46
Fig 3.30 Depth - 30m ~-60m around Jeju Island (approximate lowest low water standards) ....	47
Fig 3.31 Available area in the development around Jeju Island. ....	48
Fig 3.32 Available area in offshore Wind Farm development in the northeast Jeju Island. ....	49
Fig 3.33 DEM in the northeast Jeju coastal region. ....	49
Fig 3.34 Analyze of slope and slope direction in the northeast Jeju coastal region ....	50
Fig 3.35 DEM & DSM ....	51
Fig 3.36 Digital Elevation Model(Source : IMU KOREA) ....	52
Fig 3.37 Digital Surface Model ....	52
Fig 3.38 Analysis of military communication problems_1. ....	53
Fig 3.39 Analysis of military communication problems_2. ....	53
Fig 3.40 Analysis of the shadow area_1. ....	54
Fig 3.41 Analysis of the shadow area_2. ....	54
Fig 3.42 Analysis of the shadow area_3. ....	55
Fig 3.43 Analysis of the shadow area_4. ....	55
Fig 3.44 View Analysis (Source : IMU KOREA). ....	56
Fig 3.45 3D analysis visible area. ....	56
Fig 3.46 RGB band Image. ....	57
Fig 3.47 Image applied Ocean area. ....	59
Fig 3.48 Filtered Image about village and vinyl houses. ....	59
Fig 3.49 Shadow effect of Spot-5 Image. ....	60
Fig 3.50 Filtered Image about Shadow. ....	60
Fig 3.51 Image Classification Map. ....	63

Fig 3.52 Process of Majority Filter. ....	64
Fig 3.53 Filtered Image of the Jeju Island. ....	64
Fig 3.54 Roughness contours' from the WASP. ....	65
Fig 3.55 Surface Roughness Map Error Check. ....	66
Fig 3.56 Surface Roughness vector map of the Jeju Island. ....	66
Fig 4.1 Annual maximum wind Speeds. ....	67
Fig 4.2 Return Period of $V_{ref}$ ....	69
Fig 4.3 Annual maximum wind speed of the relative frequency and cumulative relative frequency. ....	70
Fig 4.4 Linearized Cumulative Distribution. ....	71
Fig 4.5 Sophisticated Gumbel fit algorithms. ....	71
Fig 4.6 EWTS II Method. ....	73
Fig 4.7 The Scatterplot of the Turbulence Intensity. ....	74
Fig 4.8 IEC standard 61400-1 2nd Edition Turbulence Intensity categories. ....	76
Fig 4.9 IEC standard 61400-1 3rd Edition Turbulence Intensity categories. ....	76
Fig 4.10 Atmospheric boundary layer. ....	82
Fig 4.11 A linear least squares algorithm for Log Law. ....	84
Fig 4.12 A linear least squares algorithm for Power Law. ....	86
Fig 4.13 Hourly Wind Shear_1. ....	87
Fig 4.14 Hourly Wind Shear_2. ....	88
Fig 4.15 Frequency by direction. ....	88
Fig 4.16 Wind Speed and Total Energy Available for Direction. ....	89
Fig 4.17 Met-mast & AWS location in the northeast Jeju Island. ....	90
Fig 4.18 Hub height and Met-mast height difference. ....	101
Fig 4.19 The turbulence intensity at 80m height at the Pyeondae Met-Mast. ....	105
Fig 4.20 Changes in the height of the turbulence intensity. ....	106
Fig 4.21 Changes in the height of the turbulence intensity for IEC 61400-4 2nd & 3rd. ....	106
Fig 4.22 Diagram of User-specified Radius and Sector Definitions Overlaid on Land Cover Grid Cells(US Environmental Protection Agency). ....	107
Fig 4.23 Surface Roughness Domain and Sectors & Spot-5 Image at Geumdeung. ....	108
Fig 4.24 Surface Roughness Domain and Sectors & Spot-5 Image at Wollyeong. ....	108
Fig 4.25 Surface Roughness Domain and Sectors & Spot-5 Image at Handong. ....	108
Fig 4.26 Exclusion criteria. ....	109
Fig 5.1 Met-mast & AWS location (Handong, Pyongdae, Kujwa) ....	112
Fig 5.2 Wind speed data gap ....	113

Fig 5.3 Wind direction data gap .....	114
Fig 5.4 Time delay .....	115
Fig 5.5 Hallim AWS long term wind speed data .....	116
Fig 5.6 Overlap time wind speed .....	117
Fig 5.7 Wind speed scatter plot .....	117
Fig 5.8 Positive correlation .....	118
Fig 5.9 Negative correlation .....	118
Fig 5.10 BSF concept .....	125
Fig 5.11 Diurnal wind speed profile .....	125
Fig 5.12 Wind speed seasonal profile_1 .....	126
Fig 5.13 Wind speed seasonal profile_2 .....	126
Fig 5.14 Wind speed seasonal profile_3 .....	127
Fig 5.15 Wind speed power spectrum analysis .....	127
Fig 5.16 Seasonal wind power spectrum analysis .....	128
Fig 5.17 60m, 30m & 10m wind speed power spectrum analysis .....	129
Fig 5.18 Linear least square algorithm result with height above ground .....	130
Fig 5.19 Linear least square algorithm result result(10m wind speed using BSF) .....	131
Fig 5.20 Linear least square algorithm result(Autumn and spring 10m wind speed using BSF) .....	131
Fig 6.1 Wind Speed and Wind Density Map Generative Processes. ....	133
Fig 6.2 Approximates the Air Pressure of the International Standard Atmosphere up to an Elevation .....	135
Fig 6.3 Approximates the Air Temperature of the International Standard Atmosphere up to an Elevation .....	136
Fig 6.4 Approximates the Air Density of the International Standard Atmosphere up to an Elevation. ....	137
Fig 6.5 Atmosphere at the Handong and Pyeondae Met-Mast. ....	137
Fig 6.6 Calculating Atmosphere at the same height. ....	138
Fig 6.7 Calculating the Mean Wind Power Density at 50m. ....	140
Fig 6.8 Wind Speed Map in the Jeju Island .....	141
Fig 6.9 Wind speed map of the Northeastern Jeju Island using online data .....	143
Fig 6.10 Wind speed map of the Northeastern Jeju Island using remote sensing technique	143
Fig 6.11 The result of designing energy map using Handong and Gujwa Data .....	145
Fig 6.12 The result of designing energy map using Handong and filtered Gujwa Data	145
Fig 7.1 Shallow Water Wave & Deep Water Wave concept (Source : unknown) .....	149

Fig 7.2 Quasi-static response (DUWIND, TUDelft) .....	151
Fig 7.3 Beating phenomena .....	151
Fig 7.4 Resonance (Source : DUWIND, TUDelft) .....	152
Fig 7.5 Inertia dominated or Over excited (Source : DUWIND, TUDelft) .....	152
Fig 7.6 The concept of a wind turbine system 1p, 2p & 3P (해상풍력발전시스템 설치를 위한 파 랑 해석과 해양구조물 설치를 위한 기초연구-두산중공업보고서 2012) .....	153
Fig 7.7 Campbell diagram (DUWIND, TUDelft) .....	154
Fig 7.8 The concept of ocean wave .....	157
Fig 7.9 Zero-up crossing method .....	158
Fig 7.10 Concepts of the theory of Fourier .....	163
Fig 7.11 The cause of tides .....	164
Fig 7.12 For the cause of spring tide and neap tide .....	165
Fig 7.13 Tidal changes according to age .....	166
Fig 7.14 Definition of water levels( ) .....	167
Fig 7.15 The concept of tidal current .....	169
Fig 7.16 Sampling rate(Nyquist frequency) .....	171
Fig 7.17 Aliasing problem .....	171
Fig 7.18 Narrow band frequency .....	172
Fig 7.19 Sliding window CTFT .....	175
Fig 7.20 The tiling diagram .....	176
Fig 7.21 Problems of power spectrum .....	176
Fig 7.22 STFT analysis_1 .....	177
Fig 7.23 STFT analysis_2 .....	177
Fig 7.24 Factors affecting wind wave development .....	178
Fig 7.25 Wind wave, swell and wave Spectrum .....	179
Fig 7.26 Changes according to the distance spectrum of fetch .....	180
Fig 7.27 Fetch spectral changes over time .....	181
Fig 7.28 Spectral changes due to wind .....	181
Fig 7.29 Observation point position .....	184
Fig 7.30 Significant wave height and period(Period 1) .....	185
Fig 7.31 Maximum wave height and period(Period 1) .....	185
Fig 7.32 Mean wave height and period(Period 1) .....	186
Fig 7.33 Significant wave height and period(Period 2) .....	187
Fig 7.34 Max wave height and period(Period 2) .....	187
Fig 7.35 Mean wave height and period(Period 2) .....	188

Fig 7.36 Changes in sea level pressure(Period 1) .....	189
Fig 7.37 The first survey (tidal) .....	190
Fig 7.38 The main four kinds Tidal component(Period 1) .....	190
Fig 7.39 Secondary research (tidal) .....	191
Fig 7.40 The main four kinds Tidal component(Period 2) .....	191
Fig 7.41 Ocean Water levels .....	192
Fig 7.42 Tidal current speed and direction scatter plot .....	196
Fig 7.43 Tidal current speed and direction time-series plot (Period 1) .....	196
Fig 7.44 Tidal current speed and direction time-series plot (Period 2) .....	196
Fig 7.45 Current ellipse (Period 1) .....	197
Fig 7.46 Current ellipse (Period 2) .....	197
Fig 7.47 Offshore met-mast 70m high wind speed (Typhoon sanba period) .....	198
Fig 7.48 Typhoon sanba period wave logger data_1 (2012. 9. 15 AM) .....	198
Fig 7.49 Typhoon sanba period wave logger data_2 (2012. 9. 15 PM) .....	198
Fig 7.50 Typhoon sanba period wave logger data_3 (2012. 9. 16 AM) .....	198
Fig 7.51 Wave logger power spectrum analysis_1(September 15, 2012 0:00 to 0:30) .....	199
Fig 7.52 Wave logger power spectrum analysis_2(September 15, 2012 0:30 to ~01:00) .....	199
Fig 7.53 Wave logger power spectrum analysis_3(September 15, 2012 01:00 to 01:30) .....	200
Fig 7.54 Wave logger power spectrum analysis_4(September 15, 2012 04:00 to 04:30) .....	200
Fig 7.55 Wave logger power spectrum analysis_5(September 17, 2012 01:00 to 02:00) .....	201
Fig 7.56 Wave logger power spectrum analysis_6(September 17, 2012 02:00 to 03:00) .....	201
Fig 7.57 Wave logger power spectrum analysis_7(September 17, 2012 06:00 to 07:00) .....	202
Fig 7.58 Wave logger power spectrum analysis_8(September 17, 2012 08:00 to 09:00) .....	202
Fig 7.59 Wave logger power spectrum analysis_9(September 17, 2012 9:00 to 10:00) .....	203
Fig 7.60 Wave logger power spectrum analysis_10(September 17, 2012 10:00 to 11:00) .....	203
Fig 7.61 Power spectrum & PM spectrum comparison .....	204
Fig 7.62 Around the Jeju new harbor STFT analysis_1(August 8, 2010 00 pm and 20 minutes 0.5 seconds) .....	205
Fig 7.63 Around the Jeju new harbor STFT analysis_2(August 8, 2010 02 pm and 20 minutes 0.5 seconds) .....	205
Fig 7.64 Around the Jeju new harbor STFT analysis_3(August 8, 2010 04 pm and 20 minutes 0.5 seconds) .....	206
Fig 7.65 Around the Jeju new harbor STFT analysis_4(August 8, 2010 06 pm and 20 minutes 0.5 seconds) .....	206



## List of Table

Table 2.1 Met-mast and AWS Location in the northeast Jeju Island. ....	17
Table 2.2 Met-mast and AWS Description in the northeast Jeju Island. ....	17
Table 2.3 Met-mast Location around Jeju Island. ....	19
Table 2.4 Met-mast Description around Jeju Island. ....	20
Table 2.5 Woljeong-ri Offshore Met-mast Location. ....	21
Table 2.6 Woljeong-ri Offshore Met-mast Description. ....	21
Table 2.7 Wave, Tidal, Continuous current Observation Position .....	23
Table 3.1 Domestic Projected Coordinate .....	32
Table 3.2 Cluster Distance. ....	61
Table 3.3 Cluster Mean. ....	61
Table 3.4 Cluster Variance. ....	62
Table 3.5 Land Cover and RGB value. ....	62
Table 4.1 Turbulence Categories defined in IEC 61400-1 2nd Edition. ....	75
Table 4.2 Turbulence Categories defined in IEC 61400-1 3rd Edition .....	75
Table 4.3 Met-mast and AWS Location in the northeast Jeju Island. ....	90
Table. 4.4 Met-mast and AWS Description. ....	90
Table 4.5 Wind Frequency Rose in the northeast Jeju Island. ....	91
Table 4.6 Total Wind Energy in the northeast Jeju Island. ....	92
Table 4.7 Wind Speed Distribution Analysis of Pyeongdae in 30m height. ....	93
Table 4.8 Wind Speed Distribution Analysis of Pyeongdae in 40m height. ....	93
Table 4.9 Wind Speed Distribution Analysis of Pyeongdae in 50m height. ....	93
Table 4.10 Wind Speed Distribution Analysis of Pyeongdae in 60m height. ....	94
Table 4.11 Wind Speed Frequency Distribution of Pyeongdae. ....	94
Table 4.12 Wind Speed Distribution Analysis of Handong in 10m height. ....	95
Table 4.13 Wind Speed Distribution Analysis of Handong in 30m height. ....	95
Table 4.14 Wind Speed Distribution Analysis of Handong in 40m height. ....	95
Table 4.15 Wind Speed Distribution Analysis of Handong in 50m height. ....	95
Table 4.16 Wind Speed Distribution Analysis of Handong in 60m height. ....	96
Table 4.17 Wind Speed Frequency Distribution of Handong. ....	96
Table 4.18 Wind Speed Distribution Analysis of Udo in 30m height. ....	97
Table 4.19 Wind Speed Distribution Analysis of Udo in 40m height. ....	97
Table 4.20 Wind Speed Distribution Analysis of Udo in 50m height. ....	97

Table 4.21 Wind Speed Distribution Analysis of Udo in 60m height. ....	97
Table 4.22 Wind Speed Frequency Distribution of Udo. ....	98
Table 4.23 The variation in the shape parameter with height above ground. ....	99
Table 4.24 The variation in the scale parameter with height above ground. ....	99
Table 4.25 IEC 61400-1 2nd WTGS class ....	100
Table 4.26 IEC 61400-1 3rd WTGS class. ....	100
Table 4.27 Short-term $V_{ref}$ Analysis in the northeast Jeju Island. ....	101
Table 4.28 Long-term $V_{ref}$ Analysis in the northeast Jeju Island. ....	102
Table 4.29 Turbulence Intensity versus wind speed of Pyeongdae. ....	103
Table 4.30 Turbulence Intensity versus wind speed of Handong. ....	103
Table 4.31 Turbulence Intensity versus wind speed of Udo. ....	104
Table 4.32 Turbulence Intensity versus wind direction. ....	104
Table 4.33 WaSP Manual's Roughness length. ....	109
Table 4.34 Calculated Roughness length. ....	110
Table 4.35 Introduction to wind energy's Power law exponent. ....	110
Table 4.36 Calculated Power law exponent. ....	110
Table 5.1 Time delay of correlation analysis ....	119
Table 5.2 Linear Least Square Algorithm ....	120
Table 5.3 Short-term AEP & CF ....	122
Table 5.4 Long-term AEP & CF ....	122
Table 5.5 MCP result using linear least square algorithm_1 ....	129
Table 5.6 MCP result using BSF ....	130
Table 5.7 Correlation of Gujawa AWS wind speed data and different height(60m, 40m, 10m) wind speed data at Handong ....	132
Table 5.8 Correlation of filtering Gujawa AWS wind speed data and different height(60m, 40m 10m) wind speed data at Handong ....	132
Table 6.1 Calculating the mean wind power density ....	141
Table 6.2 Comparing predicted and measured values of wind speed ....	144
Table 7.1 Gravitational Wave Characteristics of Ocean_1 ....	149
Table 7.2 Gravitational Wave Characteristics of Ocean_2 ....	150
Table 7.3 Proposal of Longuet-Higgins ....	162
Table 7.4 Tidal component ....	166
Table 7.5 Form Factor ....	168
Table 7.6 Site survey position. ....	183
Table 7.7 Site survey photos. ....	184

Table 7.8 Significant, Maximum & Mean wave height and period Incidence(Period 1) .....	186
Table 7.9 Significant, Maximum & Mean wave height and period Incidence(Period 2) .....	188
Table 7.10 Tidal constant and ocean Water levels .....	193
Table 7.11 Tidal current speed and direction (Period 1) .....	194
Table 7.12 Tidal current speed and direction (Period 2) .....	194
Table 7.13 Tidal current speed analysis .....	195

## Summary

The wind energy industry is associated with many major research fields not only basic studies but also engineering application research. In engineering research field, wind farm developers roles are very important based on the accumulation of basic studies and observed data in real area. In this study, we developed a developmental flowchart from the developer's position, which included a basic and the actual research. We checked the error of input data and gave a way to improve its accuracy by conducting a study of WindPro and WAsP softwares, which are widely used in wind energy research fields. We also offered Micro-siting roughness coefficient map and contour map in Jeju Island which is very important role to estimate wind resources and wind energy estimations.

When conducting the MCP, we improved the AWS data accuracy using numerical techniques such as digital filtering and other statistics tools. It was found that the wind data estimation process for converting the short period data to the long term one was very successful. Finally, for the first time in our country, we implemented coastal wind farm design process based on the observed data of tide and tidal current, and wind wave under an extreme ocean conditions like Typhoon and severe wind conditions. After analyzing wave frequency estimation, we found that PM spectrum pattern is very similar to the observed wind wave frequency one in Jeju coastal area. It means that the correlation between the two wave spectrum were fairly strong. From the study, we found that PM spectrum can be given overestimated values for the design of offshore wind turbine substructure in a coastal area. Also, in the analysis of wave data, wave spectrum showed the double peaks in a observed period. It can be also an important thing to design coastal structure of wind farm.

In this study, we proposed the design processes of wind farm of the land as well as the coastal areas of Jeju island. Also, we gave some useful numerical skills to improved the accuracy of the observed wind and wave data. The processes and the skill can be widely used for wind farm design and its related researches, particularly, for the development of an offshore wind power complex in coastal area.

# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

최근 환경 친화적인 자원개발이 선진 국가들을 중심으로 활발하게 이루어지고 있다. 자원개발 중 대체에너지로서 풍력자원이 주목받고 있으며, 이 자원에 대한 평가를 시도하고 있다. 이를 위해 우리나라뿐만 아니라 해외의 많은 나라들이 풍력자원지도를 구축하고 이를 대체 에너지 중의 하나로써 풍력자원을 활용하기 위해 풍력발전 입지의 기초자료로써 활용하고 있다(성효현 외, 2009). 이런 풍력자원 지도의 경우 풍황탑(Meteorology Mast; Met-Mast)의 설치 위치 결정에 중요한 역할을 한다. 풍력자원 지도는 생성에 필요한 풍황 데이터는 기상청의 AWS (Automatic Weather System, 무인 관측) 혹은 기상대(유인 관측)의 자료를 활용하여 생성된다. 풍력자원지도 생성이 기본이 되는 풍황 특성은 해외의 연구 성과를 이용하여 우리나라에 적용을 하고 있다. 이런 특성이 우리나라에도 적용이 가능한지에 대한 기초연구는 거의 간과되고 있다. 또한 우리나라의 경우 풍황탑이 설치되어 주풍향에 분석이 이루어진 이후 발전단지의 Layout이 결정되어야 하지만 발전단지의 Layout이 결정된 이후 풍황탑을 설치하고 있다.

우리나라는 국토가 좁고 활용 가능한 토지가 제한되어 있기 때문에 실제 개발과 보전이 공존하기 어렵다. 토지의 보상가가 높아 적절한 입지를 찾는 것도 쉽지 않다. 그러나 보급의 경제성과 기술 개발에 대한 정책에 모든 초점이 맞추어졌으며 환경적·사회적 이슈 등에 대해서는 거의 간과하고 있다(한국환경정책평가연구원, 2008). 제주지역의 경우 “제주특별자치도 풍력발전 사업허가 및 지구지정 등에 관한 조례”에서 개발의 불가능한 지역에 대해 제시하고 있지만 풍력사업 개발자의 입장에서 개발 가능지역에 대한 연구 역시 미비한 실정이다.

풍력발전단지 입지 선정을 위해서는 가장 먼저 풍력자원 평가가 이루어져야 한

다. 오늘날 풍력자원평가는 풍력자원 해석 프로그램인 WaSP, WindPRO, WindSim 등을 통하여 이루어지고 있다. 어떠한 풍력자원 해석 프로그램이라도 해석을 위해서는 해석의 기초가 되는 입력 데이터가 필요하며, 입력데이터의 정확도는 전체 풍력 자원 해석의 정확도를 좌우하기 때문에 풍력자원 해석을 수행하는 데 있어 매우 중요한 요소이다(Jackyoon Woo). 이 프로그램들은 풍력자원 분석을 위해 기본적으로 풍황자료, 지형고도지도 그리고 지면조도지도를 필요로 한다. 하지만 대부분의 풍력자원 평가의 정확성 향상의 연구는 풍황자료의 정확성향상에 집중되어 있다. 국내의 경우 “WRF기상에측자료를 이용한 풍황분석 타당성 연구”에서 토지피복도를 활용한 지면조도지도생성에 대한 연구를 진행 하였고 지형고도지도의 정확성에 향상에 대한 연구하였다(허수영, 2012). 하지만 이 연구에서 사용된 토지 피복도의 경우 환경지리원에서 2000년에 총 7개로 분류하여 생성한 토지 피복도를 사용하였다. 이는 영상의 촬영연도는 2000년 이전으로 Landsat TM 영상을 이용한 영상 분류로 Landsat TM 영상은 중해상도 위성영상으로서 도시지역과 비도시지역을 구분하는 데는 많이 사용되지만, 30m의 낮은 공간해상도를 가지고 있어 분류의 정확성이 떨어진다. 현재의 도시팽창등과 같은 토지 피복의 정도를 정확히 적용하지 못하는 한계를 보이고 있다. “무빙필터 기법을 적용한 제주 우도 지역의 풍력자원지도 작성에 대한 연구”에서는 환경부의 토지피복도에 영상필터링 기법중 하나인 무빙필터를 적용함으로써 작업의 효율성 및 작업시간의 단축에 대한 연구를 진행 하였다(문서정 외, 2012). “風力資源地圖 作成을 위한 人工衛星 映像의 監督分類 技法에 관한 研究”에서는 GIS를 이용하여 지형고도지도 생성의 정확성 향상과 IKONOS 위성영상을 이용하였고 영상의 토지피복분류 방법은 감독(supervised)분류 중 가장 정확한 분류방법으로 알려진 Maximum Likelihood Method를 적용했고, 환경부의 대분류 7단계 토지 피복분류체계를 기준으로 연구를 진행 하였다. 하지만 제주 일부지역에 대상으로 한 한계를 지니고 있다(문서정, 2012). 이 연구들에서는 조도계수(Surface Roughness length & Power law Exponent)의 적용 역시 유럽 지형의 영향을 고려한 “The guideline for assigning roughness length value(European Wind Atlas, 1989)” European Wind Atlas (Troen and Peterson, 1989)에서 제시하는 값을 사용하고 있다. 여러 국가에서는 그 지역에 맞는 조도

계수를 산정하고 있지만 우리나라의 경우 “제주 북동부 지역의 지형과 대기변수에 따른 AEP계산의 정확성에 대한 연구”에서 본 저자가 제주지역에 적합한 조도계수 산출을 위한 연구를 진행 하였으나 북동부에 한정되는 한계와 공유수면, 농작지, 농촌마을, 해양에 대한 조도계수 값을 산출하는 한계를 보이고 있다(고정우, 2012).

#### IEC 61400-1

. IEC

61400-1에서는 풍력단지 안의 각각의 풍력발전시스템의 허브 높이에서의 50년 재현주기의 10분 기준 평균 풍속( $V_{ref}$ )과 허브 높이에서의 난류강도에 따라 등급을 나누고 있다. 허브 높이에서의 10분 기준 평균 풍속( $V_{ref}$ )은 Wind Shear를 이용하여 허브높이의 풍속을 보정한 후 극한풍속(Extreme Wind speed)에측을 시행하면 되지만 허브높이의 난류강도 산정은 허브높이의 표준편차 보정에 대한 연구는 미비한 실정이다.

풍력발전시스템의 경우 제조사별 발전시스템 모델별 제원이 다양하고 이에 따라 풍력발전시스템의 회전에 의해 생성되는 공진인 1P와 3P의 풍속에 따른 변동과 하부구조물 종류에 발전시스템의 허브높이 따라 해상 풍력발전시스템의 고유진동 역시 다양해 질수 있다. 해상의 경우 IEC 61400-1의 육상기준과 IEC 61400-3에서 해상기준을 조합하여 공진 및 피로 분석을 통해 공진과피와 풍력발전시스템의 기대수명 계산을 수행하도록 하고 있다. 해상의 경우에는 추가적으로 풍파의 영향을 고려하여야 한다. 이는 풍파에 성장과정에 의한 파의 주파수 변화에 대한 연구가 진행 되어야 하지만 우리나라 해상특성이 적합한 풍파의 스펙트럼 연구를 위한 실관측 데이터들과 이에 대한 연구 및 해양 지역에서 동시간대 한 구역에서 관측된 조석, 연속조류, 유의파고, 유의 주기 등의 해양환경하중의 실관측 데이터도 미비한 실정이다.

풍력발전단지의 개발에 대한 개발 흐름도에 대한 연구는 한국환경정책평가연구원에서 2008년에 발행한 “환경성을 고려한 태양광, 풍력발전소 입지선정 가이드라인”과 산업자원부에서 2006년에 발생한 “풍력발전단지 건설을 위한 지침서 및 지역 수용성 제고방안 연구”등 여러 연구가 진행 중이지만 해상풍력발전단지 개발 주최의 입장에서 개발 기간을 최소화하기 위한 풍력발전개발 흐름도에 대한 연구는 미비한 실정이다.

## 1.2 연구 방법

본 연구는 제주 연안역의 육·해상 풍력발전단지의 개발을 위한 흐름도를 제시하였고 이를 기준으로 연구를 하였다. 이 흐름도는 제주 연안역의 풍력발전단지 개발과정을 발전단지의 개발 주최의 입장에서 개발 기간을 최소화하고 의사결정에 도움을 주기한 방법에 대한 연구이며 특히, 해상풍력발전단지의 하부구조물 검토를 위한 제주 북동부 지역의 해양환경 하중의 실관측데이터 분석데이터도 포함하고 있다. 제주특별자치도 풍력발전 사업허가 및 지구지정에 관한 조례, IEC 61400-1 그리고 IEC 61400-3을 기준으로 한 제주 연안역의 육상과 해상의 풍력발전 개발 흐름도를 작성하였다. 풍력개발사업의 흐름도에 공사장비의 검토, 예비경제성 평가, 하부구조물 설계, 경제성 평가, 시공성 평가 등 여러 가지 요인이 추가되어야 하지만 본 논문에서 연구한 내용만을 중심으로 작성하였다. 먼저 육상의 풍력발전 개발 흐름도 Fig 1.1과 같다.

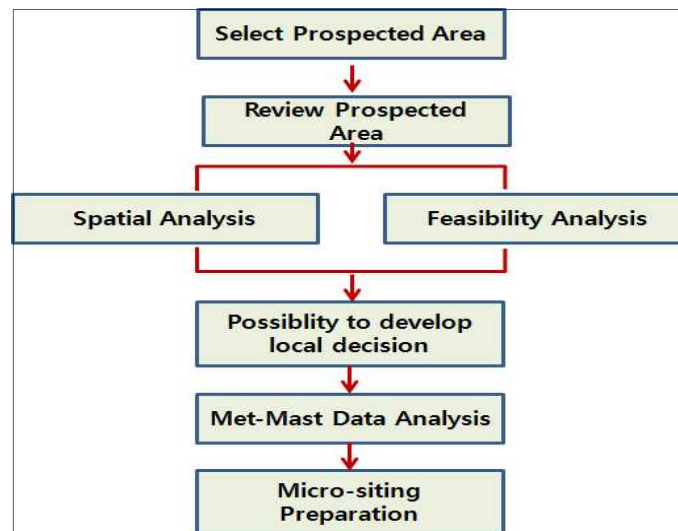


Fig 1.1 Development of onshore wind farms in Jeju coastal zone flow chart.

1. 유력 후보지 선정 : 유력후보지(Selected Prospect Area) 단계는 풍력발전단지 개발을 위한 예비 조사이다. 풍력자원 지도를 이용하여 풍력에너지가 높



을 것으로 판단되는 유력 후보지들을 선정하는 단계이다.

2. 유력 후보지 검토 : 유력후보지(Review Prospected Area) 단계는 유력 후보지 선정에서 선택된 지역들의 도면상 검토와 지역 경제 파급효과 분석, 관련 법규 분석, 승인 여부 등 정책적 사업개발 가능성에 대한 분석 단계이다.
3. 공간 분석 : 공간분석(Spatial Analysis) 단계는 유력 후보지 검토에서 선택된 지역들의 주민 수용성을 만족 시킬 수 있는 개발 가능 구역을 찾는 단계이다. 개발을 제한하는 구역과 토지 수용성을 고려한다. GIS의 중첩과 배제분석 기법을 이용하여 유력 후보지 검토의 후보지들의 부지 면적을 추출하는 과정이다.
4. 실현 가능성 분석 : 실현 가능성 분석(Feasibility Analysis) 단계는 극한기상 조건 검토, 건설 조건상 중장비 출입, 풍력발전시스템의 이송 문제, 전력망 연계와 단지 부지와 용량에 대한 기준을 수립하여 유력 후보지 선정의 후보지를 축소하는 단계이다.
5.  : (Possibility to develop local decision) 단계는 실현 가능성 분석을 거쳐 최종 후보지들의 부지 면적을 통한 예비 전력 용량과 풍력발전시스템을 결정하고 수익률, 이자율, 회수기간, 재원 조달 가능성을 평가 하는 단계이다.
6. 풍황탐 자료 분석 : 풍황탐 자료 분석(Met-Mast Data Analysis) 단계는 개발 가능지역 결정에서 최종 선택된 지역의 발전 단지 영역에 대한 개발 승인과 그 지역의 풍황 특성을 대표할 수 있는 지역을 결정한다. 또한 기상탑의 높이, 위치와 센서의 종류 및 개수를 검토하며 풍황탐 설계 안의 IEC 61400-12 .
7. 풍황에 의한 풍력발전시스템 최적 배치 : 풍황에 의한 풍력발전시스템 최적

배치 단계(Micro-siting Preparation) 단계는 풍황탐 설치되어 풍황 데이터를 얻는 과정이다. 관측 되고 있는 풍황 데이터의 Data Quality Check를 한다. 또한 단기 관측에 의한 불확실성을 줄이기 위해 실시되는 장기 풍황 보정의 Reference 데이터들을 조사가 이루어지며 Micro-Siting 시 필요한 지형고도지도 그리고 지면조도지도의 정확성 평가가 이루어져야 한다.

해상의 풍력발전 개발 흐름도 Fig 1.2와 같다. 육상의 풍력발전 개발 흐름도의 기본 틀에서 해양환경하중 측정 단계와 하부 구조물 검토가 추가 되었다.

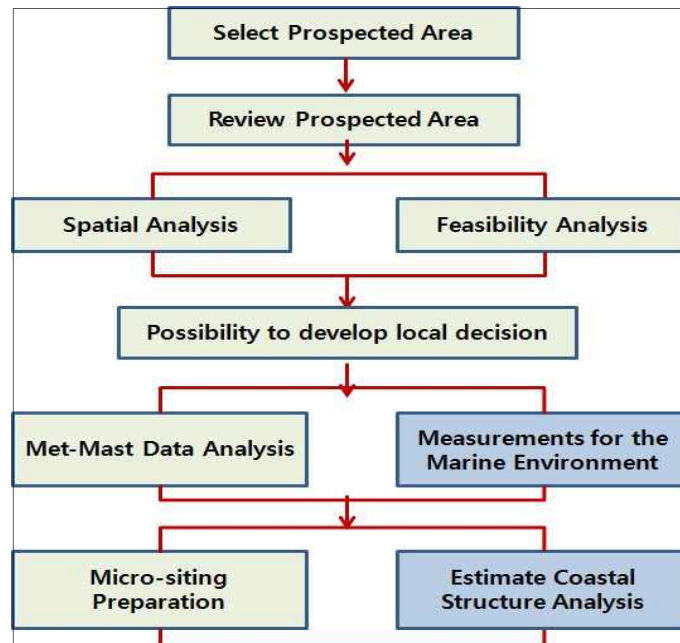


Fig 1.2 Development of offshore wind farms in Jeju coastal zone flow chart.

8. : (Measurement for the Marine Environment) 단계는 g해상에 풍황탐 설치 이후 하부 구조물 설계에 필요한 해양 환경 하중을 관측하는 단계이다. IEC 61400-1과 IEC 61400-3을 기준으로 DLC (Design Load Case)상에 해양 풍력발전단지의 개발치 추가적으로 관측되어야 할 연속 조류, 조위, 해양파의 통계치 등의 해양환경 하중에 대한 관측을 실시한다.

9. 하부 구조물 검토 : 하부 구조물 검토(Estimate Coastal Structure Analysis) 단계는 IEC 61400-1과 IEC 61400-3을 기준으로 DLC를 분석해 보면 풍력발전단지의 경우 극한파괴, 공진파괴, 피로파괴에 대한 검토로 요약할 수 있다. 특히, 해상풍력발전 단지의 경우에는 풍파의 성장과정과 이로 인한 주파수의 피크치의 이동은 공진파괴와 공진파괴의 경우까지는 도달하지 않더라도 해상 풍력구조물의 공진 주기들과 겹칠 경우 구조물의 생애 주기에 상당한 영향을 미치게 된다. 이에 대한 검토를 통하여 하부 구조물 종류의 선택과 설계 목표를 제시하는 단계이다.

### 1.3 연구 범위

일반적으로 해상풍력의 경우 태풍, 해일, 선박이동 등을 고려하여 구조물의 높이(해저로부터)와 구조물 보호 방법, 풍력발전시스템 간의 후류효과에 의한 생애주기 감소를 최소화 하는 풍력발전시스템 간의 이격거리의 안전구역으로 관리하여야 한다. 또한, 풍력발전지구 내에 설치되는 풍력발전시스템은 IEC 61400-3의 풍력발전시스템 계급에 따른 극한풍속, 난류강도, 해상조건 및 해상구조물의 적합성이 입증되어야 한다. 이러한 측면에서 본 논문의 연구 범위는 앞절에서 언급한 연구방법에서 제시한 해상의 풍력발전 개발 흐름도를 기준으로 연구를 진행하였다. 일부 단계에서는 기존의 풍황 특성이 제주지역에도 적용이 가능한지 실 관측 데이터로 확인하는 기초 연구를 수행 하였다. 또한, 풍력발전시스템 선정에 시 중요 결정 요인이 되는 IEC 61400-1의 허브 높이에서의 10분 기준 평균 풍속( $V_{ref}$ ) ( $I_{15}$ )의 산출과정을 정리하고 제주지역 실 관측 데이터들의 높이별 변동을 분석하여 개발 주최의 입장에서 개발 기간을 최소화하고 의사결정에 도움을 주기 위한 높이별 변화 패턴을 제시 하였다. IEC 61400-1과 IEC 61400-3을 기준으로 해상풍력발전시스템의 DLC를 연구 하였으며 진동에 대한 검토는 Delft University of Technology의 Michiel Zaaijer 의해 2010년에 개발된

프로그램을 중심으로 해양과의 스펙트럼 변화에 대한 연구를 진행 하였다.

1. 유력 후보지 선정 : 우리나라의 경우 풍력자원지도는 기상청과 한국 에너지기술 연구원 등에서 연구를 수행해 왔다. 김현구 등(2009, 2010)은 국가바람지도 KIER-WindMaP등 풍력자원에 대한 주제도들을 구축하였다. 이들 기관에서 사용한 풍황데이터는 기상청의 AWS 기상청 자료 혹은 주변의 기 측정 자료를 활용하고 있다. AWS 혹은 기상대 데이터는 높이별로 풍속과 풍향데이터가 없으므로 풍속 분포는 Rayleigh 분포라고 가정을 하며 우리나라 전역을 대상으로 한 풍황자료 지도를 제공하는데 목적이 있다. 이에 공간해상도는 중해상도 수준이다. 공간해상도라 어떤 한 넓이를 하나의 픽셀로 나타내며 공간해상도가 작을수록 공간을 실세계와 유사해 진다. 원격탐사(RS; Remote Sensing)분야에서는 일반적으로 m급 이하 단위의 영상을 고해상도 영상이라고 한다. Fig 1.3은 국가바람지도 KIER-WindMaP의 우리나라 전역과 제주지역의 풍속지도를 보여 주고 있다. 풍속 분포는 Rayleigh 분포라고 가정 임의의 고도에 풍속 혹은 에너지 밀도를 생성할 시 조도계수와 임의의 한 고도의 풍속만 있으면 계산이 가능하다. 일반적으로 풍속은 Weibull 분포를 따른 다고 알려져 있지만 형상계수와 척도계수라는 두 개의 파라미터를 가지고 있으며 형상계수가 2인 경우가 Rayleigh 분포이다. 풍속은 어떤 고도에서도 형상계수가 2와 근접한 값을 보인다고 해외의 연구 결과 알려져 있고 척도계수의 경우 고도에 따라 선형적으로 증가한다고 알려져 있다. 이런 풍황의 특성이 가정되어 풍력자원지도가 생성되게 된다. Rayleigh 분포는 하나의 파라미터만을 가지며 임의의 고도에 대한 경우 Wind Shear의 대수법칙 혹은 멱법칙을 이용하여 임의의 고도의 척도계수를 계산하여 그 고도의 풍속의 확률분포를 계산한다. 이에 본 논문에서는 제주지역 풍황 역시 이런 일반적 특성을 나타내고 있는지에 대한 기초 연구를 실시하였다.

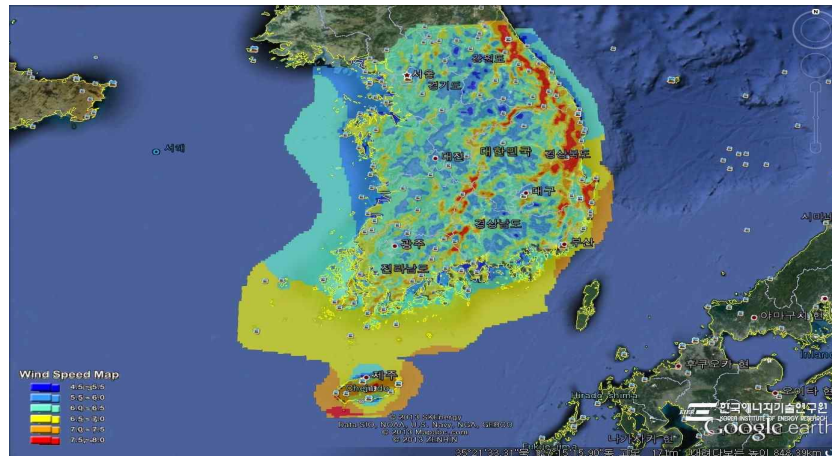


Fig 1.3 Wind Speed Map for Republic of Korea (Source : KIER).

2. 공간 분석 : 본 논문에서는 제주특별자치도 풍력발전 사업허가 및 지구지정에 관한 조례를 기준으로 배제 분석을 실시하였다. 해상풍력발전의 개발 불가능 지역은 해양공원, 항만시설지역, 어항시설지역, 해저케이블 설치지역 및 해안경관을 현저히 해치는 해역 등에서는 해상풍력 발전시설의 설치를 제한 받을 수 있으며 또한 제주지역 특수성을 감안하여 바닷가(지적공무선)에서 바다 쪽으로 최단거리 1km 미만 해역에는 개발사업 시행승인을 제한 받는다. 또한 군통신 문제, 그림자 효과, 가시권영역 분석은 증강 현실을 이용하여 검토방법을 제시하였다. 증강 현실(AR; Augmented Reality)은 가상현실(Virtual Reality)의 한 분야로 실제 환경에서 가상 사물이나 정보를 합성하여 원래의 환경에 존재하는 사물처럼 보이도록 하는 컴퓨터 그래픽 기법이다. 공사비에 따라 수심의 경계 역시 변경이 있을 수 있으나 본 논문에서는 -60m(약 최저 저조면 기준)를 한계로 지정하여 수심에 따른 개발 한계 구역, 배제 분석 시 포함 지역, 개발 제한지역을 GIS의 기술을 이용하여 제주 연안역의 개발가능 지역을 추출하였다. 제주 북동부 연안 지역의 DEM(Digital Elevation Model)자료를 이용하여 해상의 경사 방향도와 경사도를 분석 하였다. 전력망 연계 시 기초자료를 활용할 수 있도록 제시 하였다. 또한 부록에 수심측량에 사용되는 GPS기법과 음파측량의 원리를 정리하였다.

3. Micro-Siting 준비 : 풍력자원을 평가하기 위해서는 기본적으로 풍황 자료, 지형고도 자료, 지면조도 자료가 필요하다. 입력데이터의 정확도는 전체 풍력 자원 해석의 정확도를 좌우하기 때문에 각각의 방법에 대한 정확성 향상방법에 대한 연구를 진행하였다.

3. 1. : .  
관측 되고 있는 풍황 데이터의 Data Quality Check를 한다. 풍황 데이터의 검토시 검토되어야 하는 사항은 결속구간(Gap), Scale factor, absolute offset, Tower Distortion Dead bend . Data Quality Check

3. 2. 지면조도지도 : 일반적으로 항공사진을 이용하여 시각적으로 토지이용 상태를 판별하여 작업자가 직접 디지털화(Digitizing)하는 주관적인 방법을 사용하여 얻게 된다. 이는 작업시간이 많이 소요되는 불편함과, 주관적이고 정확도가 떨어지는 단점을 보인다. 지면조도 값을 정확하게 평가하기 위해서는 직접 후보지를 방문·조사하는 과정이 필요하다. 하지만, 현장조사가 충분히 이루어지지 않아, 예상 후보지의 토지피복상태를 잘못 분류하거나 지면조도 값을 정확하게 적용하는 것이 어렵다(문서정, 2012). 고도에 따른 풍속에 측의 불확실성은 지표조도에 영향을 받으며 지형의 분류에 의한 특성 뿐 아니라 육풍과 해풍의 영향, 계곡풍과 같은 지역의 높이특성에 따라 같은 지형적 분류를 보이더라도 지역마다차이를 보이게 된다. 또한 계절적 요인으로 인한 식물의 식생에 생육 등의 영향에 따라 변화하게 되면 같은 지형이라도 지역에 따라 차이를 보이게 된다. 외국의 경우 이런 요인들을 고려하여 각지역에 적합한 조도계수가 존재한다. 따라서 우리나라도 지역에 적합한 조도계수를 산정할 필요가 있다(고정우, 2012). 이에 제주지역의 기존에 설치되었거나 운영 중인 기상탑 데이터를 이용하여 제주지역에 적합한 조도계수를 산정 하였으며 현재의 도시팽창등과 같은 토지 피복의 정도를 정확히 적용하기 위하여 무감독 분류는 순차적 군집화 기법을 이용하여 직접 연상 분류를 실시하였다. 영상분류 결과를 최빈값 필터를 적용한 후 제주지역에 적합한

벡터 형식의 지표면 조도지도를 생성하였다. 위의 과정을 도식으로 나타내면

Fig 1.4

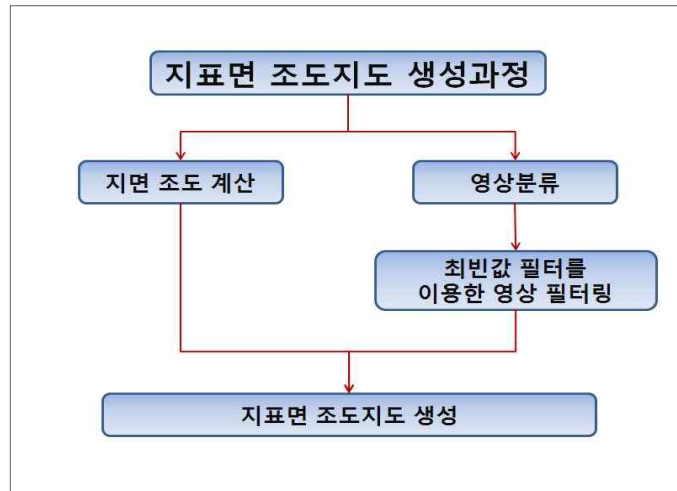


Fig 1.4 The process of creating the Surface Roughness Map.

3. 3. 지형 고도 지도 : 지형고도자료의 경우 국가 공간 정보 유통 시스템의 수치 지형도의 경우 등고선 지도의 불연속점이 존재하며 해안선 자료의 경우 자료의 결속으로 해안선이 불명확화와 등고선 간격 사의 변고기 심한 지역의 경우 점 데이터로 고도 값이 표현되어 있다. 이에 본 연구에서는 해안선의 경우 결속 구간은 디지털화 기법을 이용하여 결속 구간을 보정 하였고 고도 값을 나타내는 점, 선, 면 데이터를 추출하여 DEM데이터를 생성한 후 등고선 지도를 생성하였다. 또한 WaSP에서 지형 고도 모델로 사용되는 TIN(Triangulated Irregular Network : 불규칙 삼각망)의 이용의 주의 사항에 대해서도 언급하였다. 위의 과정을 도식으로 나타내면 Fig 1.5와 같다.

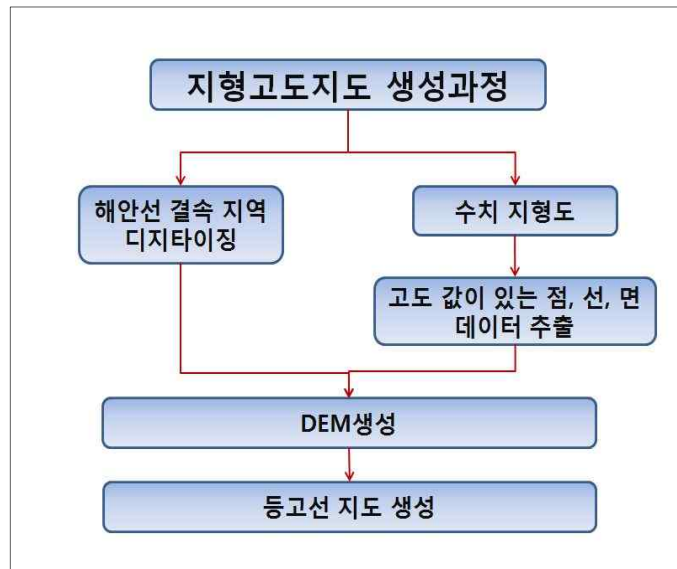


Fig 1.5 The process of creating Contour Map.

3. 4. 풍력에너지 밀도 : 풍력에너지 밀도계산시 사용되는 공기밀도는 압력과 온도를 관측하여 계산되어지기도 하지만 일반식을 이용하여 계산되어지기도 한다. 표준대기밀도와 대기압력 및 대기온도에 따른 오차의 정도를 비교하였다.

3. 5. 단기 풍황 분석 : 보정된 등고선 지도와 원격탐사기법을 적용한 지표면 조도지도를 적용하여 최대 빈도 필터를 처리한 지면 조도 지도의 타당성을 검토하기 위하여 제주 북동부 지역 풍속 지도를 생성하였다. Online에서 제공 되는 지면조도지도와 본 연구에서 제시한 지면 조도 지도를 이용하여 각각의 풍속지도를 생성하여 검증하였다. 위의 과정을 도식으로 나타내면 Fig 1.6 .





Fig 1.6 Short-term Wind Resource Analysis Process.

3. 6. 장기 풍황 분석 : 장기적 연평균 풍속을 관측하였을 때 관측된 년 평균 풍속 값은 장기 평균값의  $\pm 15\%$ 의 범위에 놓이게 된다. 이는 단기 관측된 데이터가 그 지역에 기댓값에 비하여 풍속이 낮거나 높은 경우 풍력발전시스템의 기대 수명 20년을 기준으로 보았을 때 상당한 수익성 차이를 보이게 된다. 이런 불확실성을 줄이기 위해 MCP(Measure-Correlate-Predict)기법을 이용하고 있다. 평균 AWS 높이인 지상 10m와 높이와 30m 60m 풍속을 FFT(Fast Fourier Transform)을 이용하여 비교하였고 저면에서만 발생하는 주기적인 일주성분을 찾아내었다. 이는 24시간주기로 육풍과 해풍의 영향으로 판단되었다. BSF (Band-Stop Filter)를 이용하여 24시간주기의 일주성분을 제거하여 장기풍속보정 결과를 보정 전과 비교 하였다. 적용 가능성을 확인 하고자 한동과 구좌AWS의 데이터를 이용하여 풍력 에너지 밀도 지도를 생성하여 비교 하였다. 위의 과정을 도식으로 나타내면 Fig 1.7과 같다.

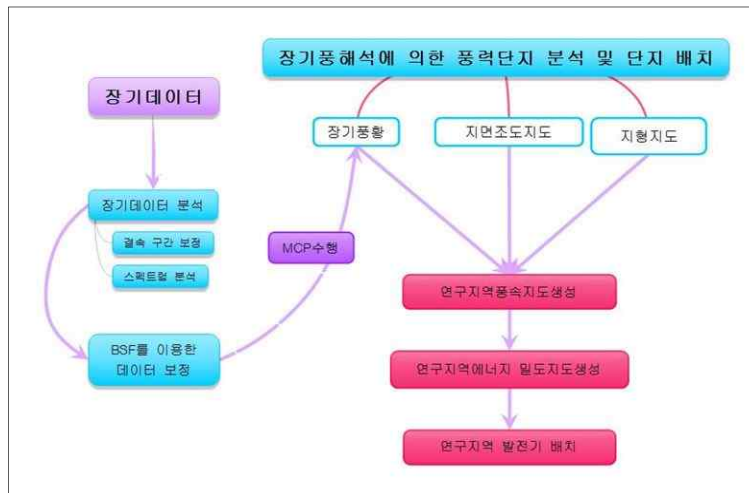


Fig 1.7 Long-term wind resource analysis process.

4. 해양환경하중 측정 : 해상 풍력 구조물은 육상에서 고려하는 하중 조건 이외에도 해상에서 작용하는 해양환경하중이 추가적으로 작용하게 된다. 해상에서 고려하여야 할 해양환경 하중으로는 조석과 조류 해류와 파랑이 있다. 제주특별자치도의 풍력발전 사업허가 및 지구지정 등에 관한 조례에 해상 환경하중은 IEC 61400-3 규정을 따르도록 되어 있다. 또한 제주특별자치도 풍력발전 사업허가 및 지구지정에 관한 조례에서 또한 해상풍력의 경우 태풍, 해일, 선박이동 등을 고려하여 구조물의 높이(해저로부터)와 해저로부터 날개 길이를 합한 거리의 안전구역으로 관리 하여야 한다. 이를 위한 해양환경의 기초연구로서 제주 북동부 지역의 월정 주변의 실관측 데이터를 바탕으로 해양환경 하중 조석, 풍파 및 조류에 대하여 관측을 실시하여 정리 하였다.

5. 하부 구조물 검토 : IEC 61400-1과 IEC 61400-3을 기준으로 해상풍력발전시스템의 DLC의 요소가 되는 해양 환경 하중에 대하여 해양파의 시간영역 분석(time domain analysis)과 주파수 영역분석(frequency domain analysis)에 의한 해양환경하중인 조석, 풍파 및 조류의 정의와 산출 방법, 조석의 원인 분석, 풍파의 성장과정과 너울, 풍파의 Spectrum방법, 중력파의 특성에 대한 기초 연구를 진행 하였다. 이를 통해 조석의 조화상수와 비조화 상수를 산출하고 조위면도를 작성 하였으며 창조류와 난조류 산출방법도 정리 하였다. 풍파에 의해 파

가 발달 과정을 Power Spectrum 산출하였고 해당 지역의 해상 기상탑 데이터의 풍속을 이용하여 PM Spectrum 산출하여 비교하였다. STFT기법을 이용하여 제주지역 해역의 Spectrum 특성을 확인 하였다.

## 2. 연구 지역 및 자료

### 2.1 연구 지역

본 연구에서는 Fig 2.1과 같이 제주도 전체 지역을 연구대상지역으로 선정하였으며 E 126° 05' 10" N부터 E 126° 58' 37" N, E 33° 06' 31" E부터 E 33° 35' 55" E 사이에 위치하고 있다. 제주도의 평면상의 형태는 동서방향 장축이 남북방향 단축보다 2.4배가 긴 타원에 가까운 형태이며 장축이 위도에 대하여 북동방향에서 남서방향으로 약 15° 가량 기울어진 모습으로 동서 장축의 길이가 약 74km, 34km, 1,850km<sup>2</sup> 해안선의 길이는 약 254km이다. 또한 한라산을 정점으로 하여 동서사면은 완만(3~5°)하고 남북사면은 동서보다 급경사(5~10°)를 이루고 있다.



Fig 2.1 The study area.

### 2.2 제주 지역 풍향 특성 분석 자료

본 연구에서는 풍향 데이터 분석에는 Fig 2.2와 같이 제주도 북동부 지역인 우

도, 평대, 한동 지역의 설치되었거나 운영 중인 풍황탐 데이터와 구좌와 우도지역의 AWS 데이터를 이용하였고 그 좌표와 고도는 Table 2.1에 표현 하였고 관측기간과 풍향계 풍속계의 설치 높이는 Table 2.2에 나타내었다.

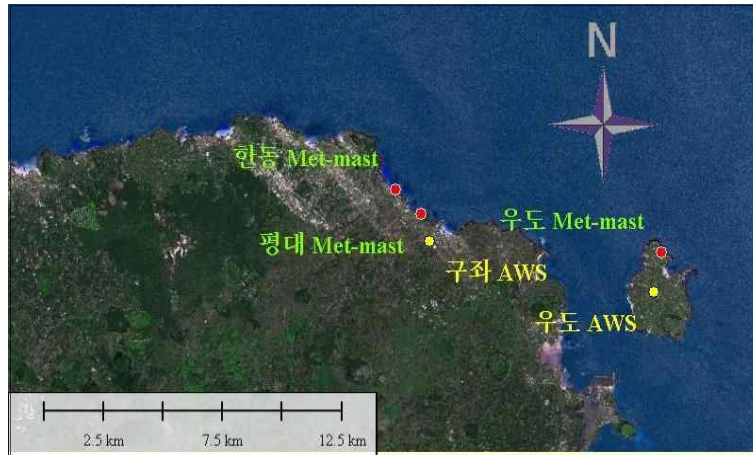


Fig 2.2 Met-mast & AWS location in the northeast Jeju Island.

Table 2.1 Met-mast and AWS Location in the northeast Jeju Island

Name	Location		Elevation
Handong Met-mast	33° 32' 26.0459" N	126° 50' 9.8711" E	5m
Pyeongdae Met-mast	33° 31' 55.7335" N	126° 50' 52.1728" E	19m
Udo Met-mast	33° 31' 14" N	126° 57' 24" E	20m
Udo AWS	33° 30' 23.438" N	126° 57' 12.101" E	39.43m
Kujwa AWS	33° 31' 21.401" N	126° 51' 06.714" E	25.3m

Table 2.2 Met-mast and AWS Description in the northeast Jeju Island

Name	Anemometer Height	Anemoscope Height	Measurement duration
Handong Met-mast	60m, 50m, 40m, 30m, 10m	60m, 40m, 10m	2010. 12. 20 ~ 2012. 12. 31
Pyeongdae Met-mast	60m, 50m, 40m, 30m	60m, 40m	2010. 02. 06 ~ 2011. 07. 03
Udo Met-mast	60m, 50m, 40m, 30m	60m, 40m	2010. 04. 30 ~ 2011. 07. 03
Udo AWS	10m	10m	2010. 01. 01 ~ 2012. 12. 31
Kujwa AWS	10m	10m	2010. 01. 01 ~ 2012. 12. 31

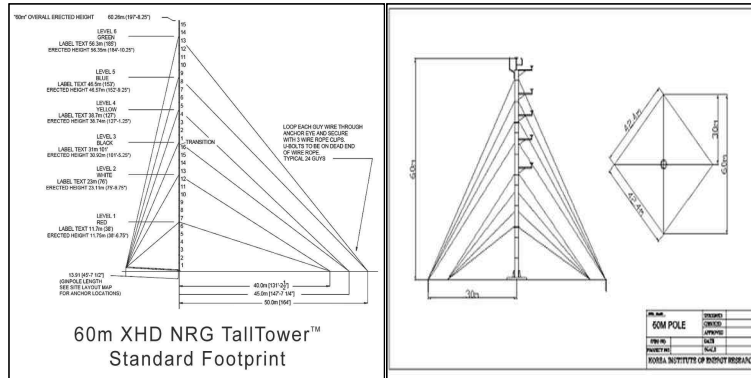


Fig 2.3 Specification of Met-mast.

Fig 2.3 IEC61400-12 60m . IEC 61400-12기준에는 기상탑에 의한 풍속과 풍향데이터의 오차를 최소화하기 위해 관측장비와 타워의 최소길이에 대하여 정의 하고 있다. Fig 2.4은 한동, 평대, 우도의 풍향탑의 설치 모습이다.



Fig 2.4. Anemometric Met-Mast Location (Handong, Pyeongdae, Udo).

### 2.3 제주 지역 조도계수 산정에 사용된 풍향 자료

. Fig 2.5 에 표시 된 것과 같이 총 24곳의 실관측 데이터를 바탕으로 계산 하였다.

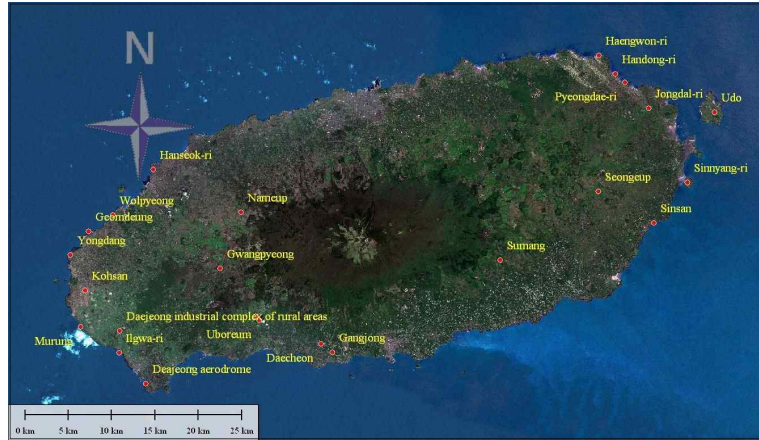


Fig 2.5 Met-mast location around Jeju Island.

Table 2.3은 조도계수 산정에 사용된 제주도 북동부 지역에 설치되었거나 운영 중인 풍황탑의 설치위치에 대한 정보이다. 관측기간과 풍향계 풍속계의 설치 높이는 Table 2.4 .

Table 2.3 Met-mast Location around Jeju Island

Name	Location	
Handong-ri	33° 32' 26.0459" N	126° 50' 9.8711" E
Pyeongdae-ri	33° 31' 55.7335" N	126° 50' 52.1728" E
Udo	33° 30' 14.4" E	126° 57' 34.8" E
Haengwon-ri	33° 33' 36" N	126° 48' 54.36" E
Jongdal-ri	33° 30' 21" N	126° 52' 40.48" E
Sinnyang-ri	33° 25' 43.48" N	126° 55' 40.48" E
Sinsan	33° 23' 9" N	126° 53' 15.36" E
Seongeup	33° 25' 1.48" N	126° 49' 4.48" E
Sumang	33° 20' 36.18" N	126° 41' 52.48" E
Gangjong	33° 14' 33.2" N	126° 29' 34.7" E
Daechenon	33° 15' 5.3" N	126° 28' 45.3" E
DAEYOOLAND Shorting	33° 16' 42" N	126° 23' 51.36" E
Uboreum	33° 16' 28.48" N	126° 24' 6.36" E
Deajeong aerodrome	33° 12' 18" N	126° 15' 49.12" E
Ilgwa-ri	33° 14' 12" N	126° 13' 48" E
Daejeong industrial complex of rural areas	33° 15' 34.12" N	126° 13' 46.48" E
Murung	33° 15' 45.36" N	126° 10' 53.24" E
Gwangpyeong	33° 19' 38.24" N	126° 21' 7.48" E
Kohsan	33° 18' 3" N	126° 11' 8.24" E
Yongdang	33° 20' 15" N	126° 09' 58.48" E
Geomdeung	33° 21' 46.12" N	126° 11' 15.36" E
Nameup	33° 23' 13.48" N	126° 22' 34.48" E
Wolpyeong	33° 22' 50.24" N	126° 13' 2.24" E
Hanseok-ri	33° 25' 46" N	126° 15' 58" E

Table 2.4 Met-mast Description around Jeju Island

Name	Anemometer Height	Anemometer Height	Measurement duration
Handong-ri	60m, 50m, 40m, 30m	60m, 40m	2010. 12. 20 ~ 2012. 11. 30
Pyeongdae-ri	60m, 50m, 40m, 30m	60m, 40m	2010. 02. 06 ~ 2011. 07. 03
Udo	60m, 50m, 40m, 30m	60m, 40m	2010. 04. 30 ~ 2011. 07. 03
Haengwon-ri	60m, 50m, 40m, 30m	60m, 40m	2002. 01. 10 ~ 2009. 07. 23
Jongdal-ri	45m, 30m, 15m	45m	2002. 03. 19 ~ 2004. 03. 12
Sinnyang-ri	45m, 30m, 15m	45m	정보 없음
Sinsan	30m, 15m	30m	1999. 03. 11 ~ 1999. 12. 30
Seongeup	45m, 30m, 15m	45m	2001. 06. 01. ~ 2003. 05. 31
Sumang	60m, 50m, 40m, 30m	45m	2005. 06. 17 ~ 2009. 06. 28
Gangjong	45m, 30m, 15m	45m	2010. 05. 01 ~ 2011. 04. 30
Daechenon	45m, 30m, 15m	45m	2010. 05. 02 ~ 2011. 05. 01
DAEYOOLAND Shorting	30m, 15m	30m	1998. 01. 02 ~ 1998. 06. 25
Uboreum	45m, 30m, 15m	45m	1999. 08. 31 ~ 1999. 12. 30
Deajeong aerodrome	30m, 15m	30m	1999. 07. 15 ~ 1999. 12. 30
Ilgwa-ri	45m, 30m, 15m	45m	1998. 05. 31 ~ 1999. 12. 30
Daejeong industrial complex of rural areas	45m, 30m, 15m	45m	2010. 05. 01 ~ 2011. 04. 30
Murung	30m, 15m	30m	1999. 08. 01 ~ 2000. 07. 31
Gwangpyeong	30m, 15m	30m	1999. 07. 15 ~ 1999. 12. 30
Kohsan	30m, 15m	30m	2001. 11. 13 ~ 2002. 02. 27
Yongdang	45m, 30m, 15m	45m	2002. 03. 20 ~ 2004. 05. 16
Geomdeung	45m, 30m, 15m	45m	2001. 08. 15 ~ 2002. 08. 15
Nameup	30m, 15m	30m	1999. 07. 15 ~ 1999. 12. 31
Wolpyeong	30m, 15m	30m	2002. 05. 01 ~ 2003. 04. 30
Hanseok-ri	60m, 50m, 40m, 30m	45m	2005. 03. 01 ~ 2009. 07. 23



## 2.4 해양파의 spectrum 분석에 이용된 풍속 자료

풍속에 의한 Wave spectrum 분석에 사용된 풍황 데이터는 월정 해상풍력 실증단지에 있는 해상 기상탑의 2012년 9월 5일부터 2013년 1월 8일 풍황 데이터도 추가 하여 분석을 실시하였다. 관측기간과 관측위치는 Table 2.5 Table 2.6 과 같다.

Table 2.5 Woljeong-ri Offshore Met-mast Location

Name	Location	
Woljeong-ri ocean Met-Mast	33° 34' 49" N	126° 47' 05" E

Table 2.6 Woljeong-ri Offshore Met-mast Description

Name	Anemometer Height	Anemoscope Height	Measurement duration
Woljeong-ri ocean Met-Mast	70m, 68m, 58m, 48m, 38m, 31m	68m, 58m, 48m	2012. 09. 05 ~ 2013. 01. 08

## 2.5 영상분류에 사용된 인공위성 영상

Fig 2.6는 제주지역에 적합한 지표면 조도지도 생성을 인공위성영상을 이용하였다. 영상분류에 사용된 SPOT-5 영상은 2007년~2008년 사이에 촬영된 영상이며 공간 해상도는 2.5m이다.

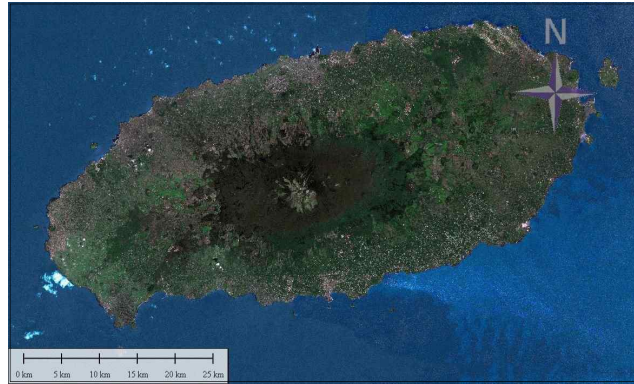


Fig 2.6 Spot-5 Image around Jeju Island.

## 2.6 지형자료 분석에 사용된 수치지형도

1:25,000 ( : 336082, 336083, 336084, 336071, 336072, 336073, 336074, 336081, 336082, 336083, 336084, 336101, 336102, 336103, 336104, 336111, 336112, 336113, 336114, 336121, 336122 ) . Fig 2.7 1:25,000 .

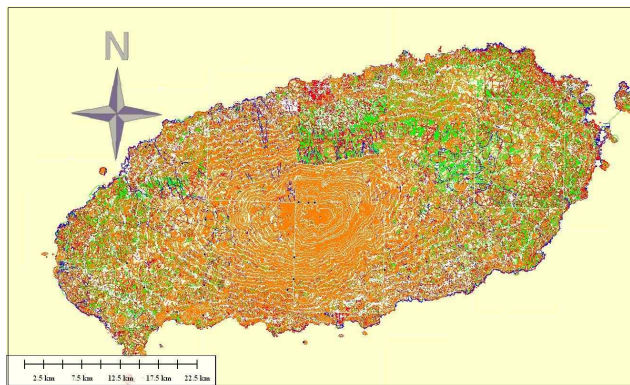


Fig 2.7 Digital map data around Jeju Island.

## 2.7 해양조건 분석에 사용된 데이터

해양조건 분석에 사용된 데이터는 제주광역경제권육성사업의 일환으로 “제주도

해상풍력발전단지 개발을 위한 해양환경 측정 및 분석기술 개발 계획”의 연구수행 과정에서 획득한 자료이다. 또한 파랑과 조석 관측 데이터의 일부는 수압식 파고계를 추가 설치하여 획득한 데이터를 이용하여 분석 하였다. 파랑, 조위, 연속 조류는 다음 Table 2.7과 Fig 2.8에 도식되어 있는 위치에서 관측 하였으며 제주 월정에 위치한 해상풍력발전 실증단지의 두산중공업의 WinDS 3000 설치 지점 주변이다. 관측치 해상 구조물의 영향에 의한 데이터 오차를 줄이기 위해 1차, 2차 관측시 모두 WinDS 3000 발전시스템으로부터 최소 100m이상 떨어진 곳에 각 장비를 설치하여 데이터를 회수 하였다.

Table 2.7 Wave, Tidal, Continuous current Observation Position

Geographic(WGS-84)	
위도	경도
33° 34' 32.1"	126° 47' 23.6"



Fig 2.8 Wave, Tidal, Continuous current observation position.

2.7.1 파랑 및 조석 관측 데이터

년 9월 5일 ~ 2012년 10월 5일), 2차 조사 (2013년 1월 11일 ~ 2013년 2월 12일)를 하였고 조위의 경우 1차 조사( 2012년 9월 5일 ~ 2012년 10월 5일), 2차 조사 (2013년 1월 11일 ~ 2013년 2월 12일) 관측하였다.

### 2.7.2. 연속 조류 관측 자료

연속 조류의 경우 1차 조사( 2012년 9월 5일 ~ 2012년 9월 20일), 2차 조사 (2013 1 11 ~ 2013 1 30 ) 15 .

### 2.7.3. 해양파의 Spectrum 분석 자료

풍속에 의한 Wave spectrum 분석에 사용된 파랑데이터는 2012년 9월 14일 ~ 2012년 10월 29일, 2012년 11월 04일 ~ 2012년 12월 13일까지 관측하였다. 수압식 파고 조위계를 해저면에 고정시킨 후 관측을 실시하였다. 파고계는 프레임을 이용하여 해저면에 안착시켜 기록하였다. Fig 2.9는 해저면에 안착된 수압식 파고계를 설치 당시를 수중 촬영한 사진이다.

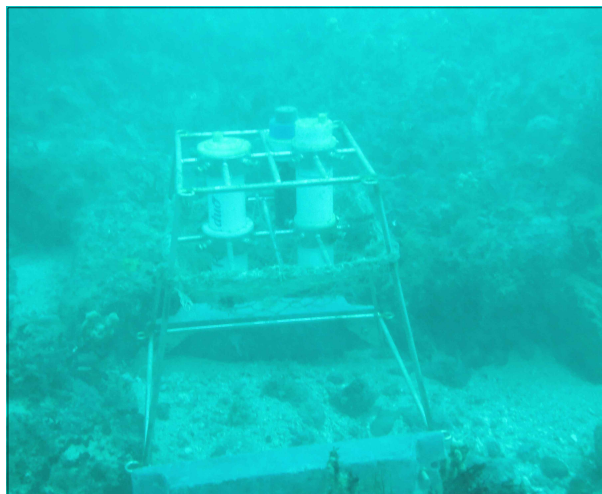


Fig 2.9 Wave logger installation view.

#### 2.7.4. STFT분석에 자료

제주 외항 항만 공사 기간 중에 관측된 파고계 데이터를 이용하였다. 기간은 2010년 8월 8일 데이터를 사용하였으며 매회 2시간 간격으로 20분간 관측되어 유의파고, 최대파고 등 단기파랑의 통계적 처리가 되어 있는 데이터와 매 20분간 관측된 압력 데이터를 이용하였다.

### 3. 연구대상지역의 공간 분석

#### 3.1 공간분석 기법

육·해상 풍력단지 개발에 따른 여러 가지 배제분석조건 및 풍력발전시스템 설치에 따른 통신망에 대한 문제 등을 고려하면서 개발 가능한 입지를 분석하는 기술은 지리정보시스템(GIS: Geographic Information Systems)의 기술 중 공간 분석기법이 매우 유용하다. 공간 분석의 기능 중 중첩(overlay), 버퍼(Buffer)의 기술로 개발 가능 지역의 추출이 가능하며 해안경관이 현저히 해치는 지역의 경우 3차원 GIS프로그램에서 제공하는 가시권 영역분석으로 균통신의 문제는 레이더 영향권 문제로 해결할 수 있으며 수심데이터와 풍속지도 혹은 에너지 밀도지도 대한 가중치를 달리하여 해상 풍력단지 개발 등급지도 제작이 가능하며 균통신 문제는 3차원 GIS프로그램에서 제공하는 레이더 영역분석으로 통하여 개발 가능지역의 추출이 가능하나 해상풍력발전 사업의 초창기로 인한 제한 조건의 부재와 정보의 미흡으로 초기적 분석을 하였다. 분석조건을 해도의 수심을 기준으로 수심 60m 이내의 지역이며 각종 규제 조건 중 배제분석을 시행하여야 하는 곳을 제외 하였다. 수집한 자료는 메타데이터(Metadata)의 부재로 인하여 배제분석 조건 지역의 변경이 있을 수 있다. 수심의 경우 육상의 평균 해수면이 아닌 약최저저조면을 기준으로 하였다. 약최저저조면의 기준은 7.2.3.2절의 조석 조화 분해 부분에서 설명하였다. 선박의 항해 지역은 정보의 부족으로 제외하였다.

#### 3.2 지도투영과 좌표변환

우리가 보는 지도는 일반적으로 2차원 지도이나 실제로 우리가 생활하는 지구는 3차원 이다. 2차원 지도를 생성하기 위해서는 우선 좌표계에 대한 이해가

필요하다. 국가마다 자신의 나라를 가장 잘 표현 할 수 있는 좌표계를 쓰고 있다. 하지만 GPS기술이 발달과 무역 등의 이유로 좌표계의 통합 움직임이 활발히 이루어지고 있고 우리나라의 경우도 베셀타원체에서 GRS80 타원체로의 기준 타원체 변화가 있었다. 또한 해양의 경우 WGS84 타원체를 사용함으로써 지도간의 좌표변환의 문제가 발생한다. 뿐만 아니라 수치지도의 메타데이터(데이터의 데이터; 생성시기, 생성자, 투영법 등에 대한 정보)를 제공하고 있으나 이에 대한 관리는 제대로 이루어지지 않고 있다. 같은 투영법과 타원체 법을 사용한다고 하더라도 생성연도에 따라 보정 상수들이 존재한다. 이 정보는 국토지리원에서 제공하고 있지만 메타데이터의 이해와 관리의 중요성에 대한 이해 부족으로 잘못된 보정 상수를 이용한 주제도를 사용하고 있는 실정이다. Fig 3.1은 전자해도의 메타데이터를 보여 주고 있다.

```

dc24400_1006.txt - 메모장
파일(F) 편집(E) 서식(O) 보기(V) 도움말(H)

CARIS for Windows: DISPHEAD U 4.4 a Date: 17-Jul-2001
Copyright (c) 2002, Universal Systems Ltd., Fredericton, N.B. Canada.

===== Header =====
1. Title W2440
2. File ID 2440_B0R 3. Horizontal coord system NEMR
4. Header length 198 5. Vertical coord system MR
6. Descriptor length 16 7. Sounding, Spot Ht units MR,M2
8. Coordinate resolutions 9. Coordinate shifts
XY 0.0500000000 X 0.00000000
Y 0.00000000
Z 0.0010000000 Z 0.00000000
10. Projection UH 11. Central meridian 129-00-00.000E
12. Scale 5000.00 13. Scaling lat 1 0-00-00.000N
14. Scaling Factor 0.999600 15. UTM Zone # 52
16. Ellipsoid WGS84 17. Vertical datum MSL
18. N/A 19. N/A
20. Graphic extent (5340371,72410450,5418532,72471773) (system)
21. Heatline corners (metres) 21. Heatline corners Lat,Long
E= 271502.429 N= 3678818.398 33-13-27.000N 126-32-53.000E
E= 274042.580 N= 3678740.623 33-13-27.000N 126-35-02.000E
E= 274900.288 N= 3681235.970 33-14-48.000N 126-35-02.000E
E= 271561.001 N= 3681313.745 33-14-48.000N 126-32-53.000E
22. Format ID 5 23. Last edited 9-JUL-2010 17:45
24. False North 0.000 25. False East 500000.000

disphead completed
Header in: D:\work\CARIS\Tt\244\201006_rp\dc24400_1006

Date: 09-Jul-2010 17:45:57
※ 본 수치해도는 수료업무법 제36조에 의거하여 보호를 받으며, 항해용으로는 사용할 수 없습니다.

```

Fig 3.1 Digital map's metadata.

Micro-Siting 관련 논문들은 서로 투영법과 타원체가 주제도를 사용하며 이에 대한 좌표변환과 투영의 정확도를 알 수 있는 메타데이터와 좌표변환 파라미터

개수에 대한 언급이 없다. 또한 Micro-Siting 관련 보고서들에서도 정확한 좌표 투영 및 생상연도에 따른 보정 상수를 사용하고 있는 지에 대한 언급이 없는 실정이다. 좌표변환 방식에는 상대좌표변환과 절대 좌표변환이 있다. 상대좌표변환은 특정 점의 좌표들을 기준으로 도면상의 값을 이동 회전 시키는 방법이며 정확도는 절대 좌표변환에 비해 떨어지며 절대 좌표변환에서는 좌표변환 파라미터 개수에 따라 정확도가 상의 하다.

우리나라의 경우 수치지도는 국립지리원에서 제작하며 베셀타원체, GRS80타원체(2007년 변경)를 기준으로 투영법은 국가기본도에서 채택한 TM투영법 이용하여 생성된 주제도들이 혼용되어 사용되고 있으며 직각좌표계 원점 및 가원점의 변화과정에 절대적 위치는 변하지 않지만 상대적 위치가 변하는 문제를 내포한다. 우리나라의 전자해도의 경우 해양조사원에서 제작하며 WGS84타원체 기준으로 투영법은 UTM투영을 이용한 주제도가 사용되고 있다.

지구를 정확하게 표현할 수 있는 수학적 모델은 없으며 제일 근접하게 표현할 수 있는 방법이 회전 타원체를 이용하는 방법이다. 좌표계는 이런 회전 타원체를 의미한다. 좌표계는 이용되는 범위에 따라 분류하기도 하는데 전 지구적 차원에서 사용되는 세계적(global) 좌표계와 국부 지역(local)에서만 사용하는 지역적 좌표계로 구분한다. Fig 3.2는 서로 상의 한 국부타원체를 보여 주고 있다.

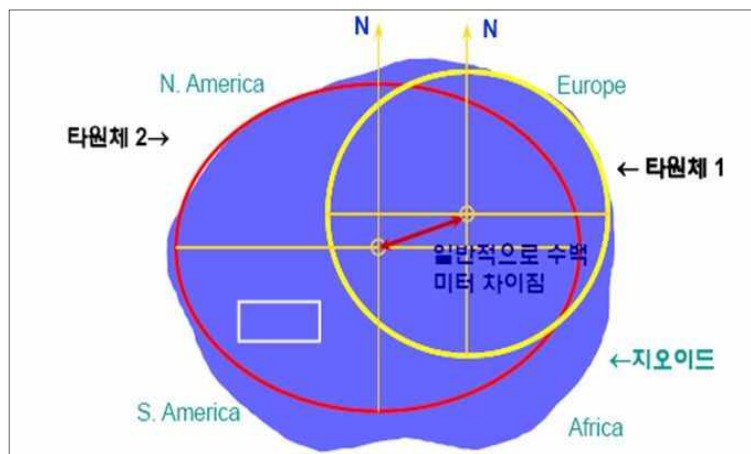


Fig 3.2 Rotational ellipsoids (Source: IMU KOREA).

GRS80



타원체로 타원체의 변경 하였다. 또한 해양의 지도는 세계적 타원체의 한 종류인 WGS84 타원체를 사용하고 있다. 타원체는 일반적으로 위도-경도-높이 체계 (latitude-longitude-height system) (prime meridian, 또는 그리니치 자오선)면과 적도면을 기준면으로 한다. Fig 3.3은 경위도 타원체와 지심타원체의 개념을 설명하고 있다.

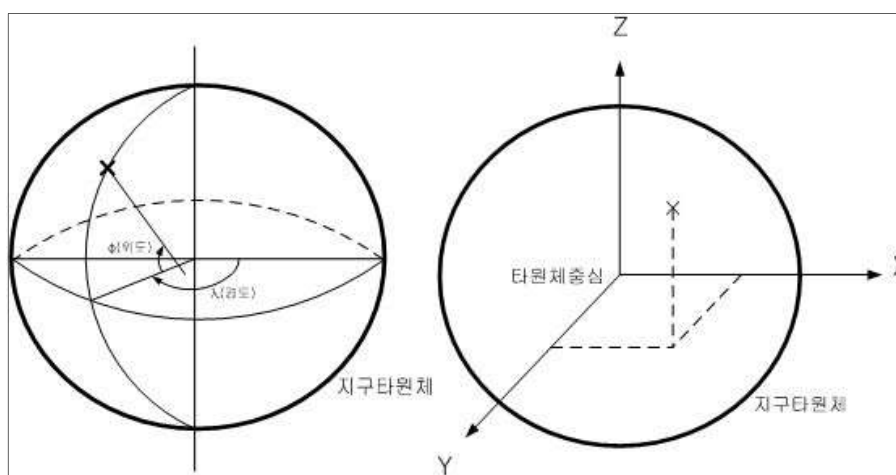


Fig 3.3 Geodetic longitude and latitude & Geocentric reference ellipsoid (Source: NGII).

(ECEF X, Y, Z - Earth Centered, Earth Fixed X, Y, Z 기준으로 하는데 지심좌표계는 m단위로 3차원의 위치 정보를 표시한 것을 의미한다.

지도 투영이란(Map projections) 지구타원체 상에 있는 3차원 객체들을 2차원 평면지도에 표시하기 위한 방법으로 투영법 또는 도법이라고 한다. 투영법에도 등각투영(Conformal or Orthomorphic Projection), 등거투영(Equidistance Projection), 등적투영(Equal area or Equivalent Projection) 등 여러 방법이 있다. 또한 곡면인 지구상의 3차원 표면을 2차원 평면으로 나타냄으로 투영할 때 한 가지 이상의 왜곡(distortion)이 발생하며 왜곡이 존재하지 않는 투영법은 존재 하지 않는다.

등각 투영 중 원통 투영이란 네덜란드 지도학자 메르카도에 의해 고안된 정각도법으로 접선부분(적도)에서 왜곡이 적고 극지방에서 왜곡이 심한 단점이 있으나 중앙자오선에서 멀어질수록 왜곡이 심해진다. 우리나라는 등각투영의 일종인 TM투영을 지도 제작의 기본 투영법으로 사용하고 있다. Fig 3.4는 투영과정 모식도와 왜곡현상에 대한 모식도 나타내고 있다.

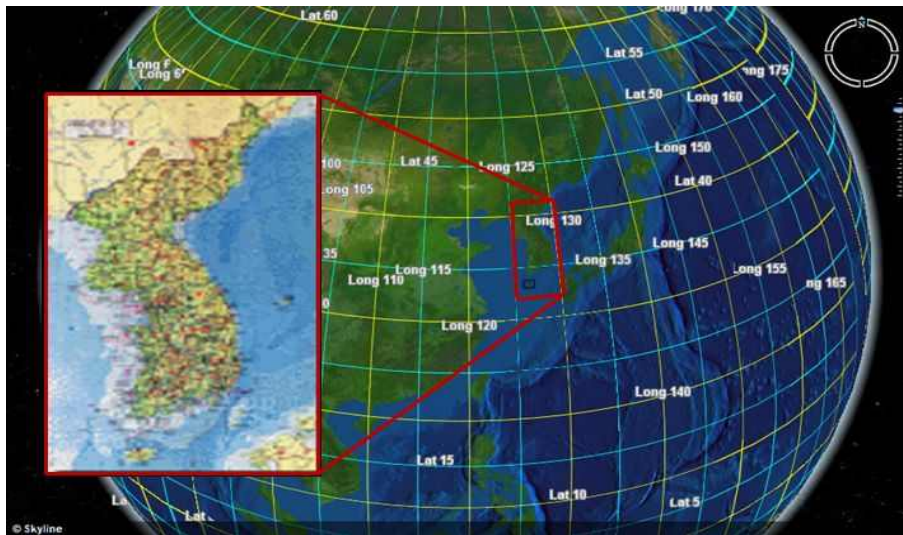


Fig 3.4 TM project characteristics.

투영원점이란 타원체의 한 점과 생성되는 지도가 접하는 점을 의미하며 선중대율(scale fater)란 접점을 기준으로 작성하여 접점으로부터 멀어질수록 오차가 발생함을 의미한다. 우리나라의 이런 오차를 줄이기 위해 4개의 접점 즉, 투영원점을 두고 있으며 이 투영원점을 직각평면좌표상의 0,0좌표로 놓고 있다. 남북상 38°상에 원점을 두면 대부분이 지역이 음의 값을 가짐으로 임의로 투영된 모든 값에 임의의 값을 더하도록 하는데 이를 가상원점이라고 한다. Fig 3.5는 경위도좌표계, UTM좌표계(Universal Transverse Mercator Coordinate System), TM좌표계(Transverse Mercator Coordinate System)를 설명하고 있다. 또한, Fig 3.6

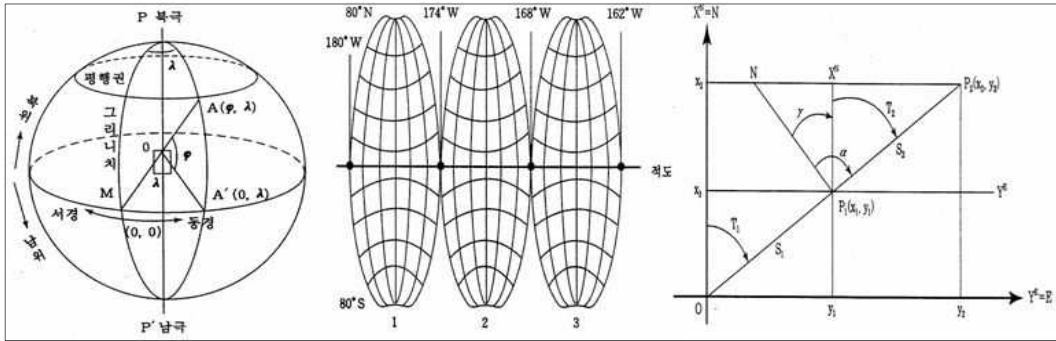


Fig 3.5 Geodetic longitude and latitude, UTM & TM coordinate system(Source : Unknown).

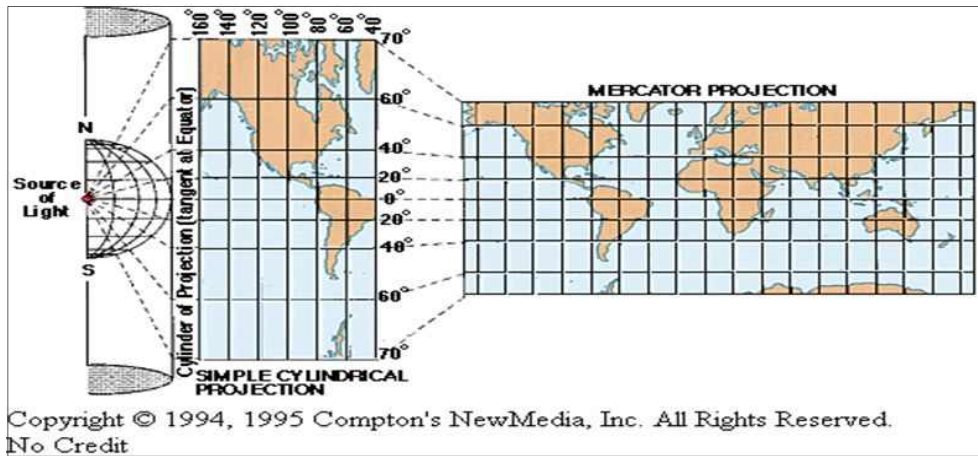


Fig 3.6 Transverse mercator projection.

2007년 이전 까지 우리나라는 국부타원체인 베셀 타원체를 사용하였고 그 이후에는 GRS80타원체를 사용하고 있으며 가원점 2007년 이전의 지도 중 투영원점의 변화와 2007년에서 2010년 사이에 생성된 지도에는 가원점의 변화를 가져왔던 지도들이 있으므로 이런 정보를 포함한 메타데이터의 확인은 필수적인 사항이다. Table 3.1은 변화된 평면직각 좌표계를 정리하였다.

Table 3.1. Domestic projected coordinate

기준계	Tokyo Datum (베셀타원체)	ITRF (한국경위도 원점)
타원체	베셀타원체 1841	GRS 80
국가평면직각좌표계 원점	서부(38°,125°) 중부(38°,127°) 동부(38°,129°) 동해(38°,131°) 제주(38°,127°)	동일
원점 좌표계 (가원점)	지도(500,000m, 200,000m) 단, 제주도 (550,000m, 200,000m)	지도(600,000m, 200,000m)
중앙경선 축척계수 (Scale factor)	1	1

Fig 3.7은 동부원점, 중부원점, 서부원점, 동해원점의 직각좌표원점을 무시하고 모두 중부원점 기준으로 투영한 제주도 경계의 모습과 가원점 확인 실수로 인한 투영의 결과이다.

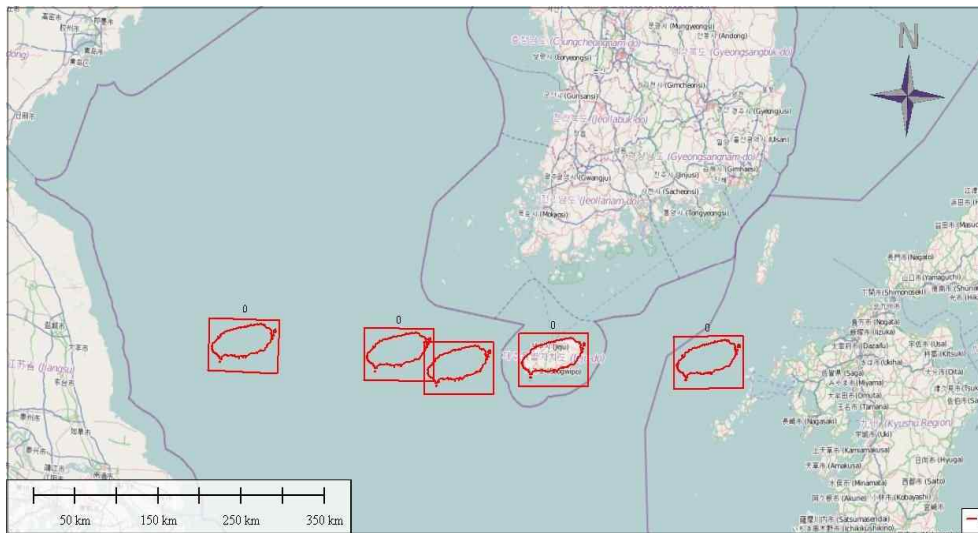


Fig 3.7 Map projection types of Jeju island.

좌표변환이란 지심좌표계에서 지심좌표계로의 변환을 의미하며 타원체상의 크기차와 X, Y, Z방향으로의 회전과 이동을 고려하여야 한다. 지도의 좌표변환이란 임의의 투영법에 의한 지도의 객체들을 위경도 좌표로 변환한 후 위·경도 좌표를 지심 좌표로 변환하고 지심좌표에서 변환 하려는 지심 좌표로 변환한 후 지심좌표를 위경도 좌표로 변경하여 해당 투영법으로 투영하는 과정이다. Fig 3.8은 좌

표변환의 기본 개념을 도식하였다.

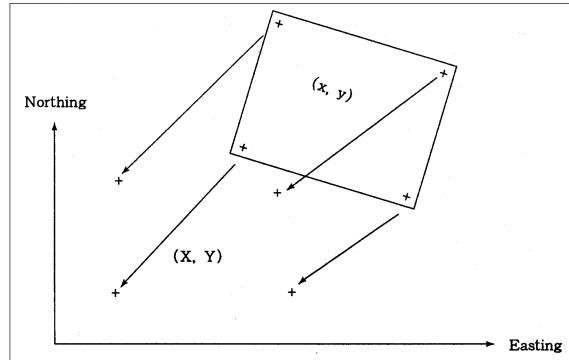


Fig 3.8 Coordinate transformation

(Source: NGII).

$$\begin{aligned}
 (\Phi, \lambda, h) &\rightarrow (X, Y, Z) & (3-1) \\
 X &= (\nu + h) \cos \Phi \cos \lambda, \quad Y = (\nu + h) \cos \Phi \sin \lambda \\
 Z &= (\nu(1 - e^2) + h) \sin \Phi \\
 \nu &: \text{radius of curvature in the prime vertical} \\
 \nu &= \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \Phi)^{1.5}}
 \end{aligned}$$

지심좌표에서 지심좌표사이의 변환 공식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = S R_x R_y R_z \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

$$R_x R_y R_z = \begin{bmatrix} \cos \Phi \cos K & \cos \varpi \sin K + \sin \varpi \sin \Phi \cos K & \sin \varpi \sin K - \cos \varpi \sin \Phi \cos K \\ -\cos \Phi \sin K & \cos \varpi \sin K + \sin \varpi \sin \Phi \sin K & \sin \varpi \sin K + \cos \varpi \sin \Phi \sin K \\ \sin \Phi & -\sin \varpi \cos \Phi & \cos \varpi \sin \Phi \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

Fig 3.9 ~ Fig 3.11까지는 좌표변환에 사용되는 파라미터들의 개념을 설명하고

있다.

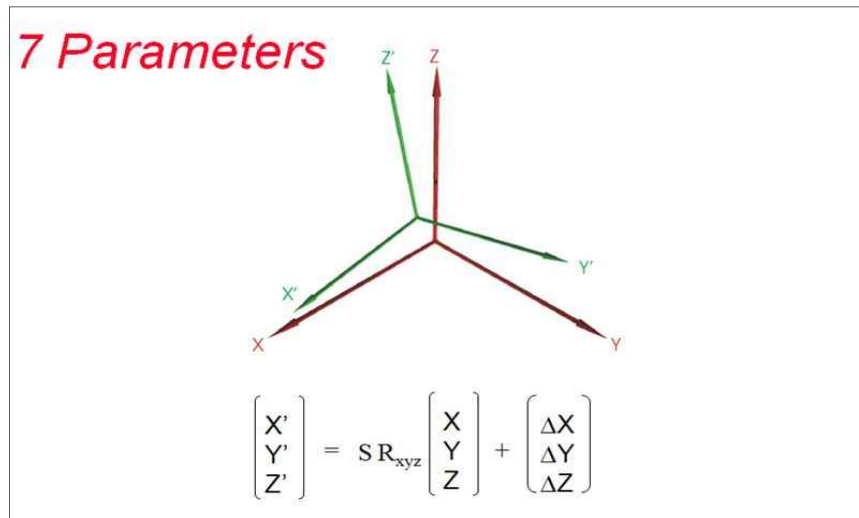


Fig 3.9 Concept of coordinate transformation parameters.

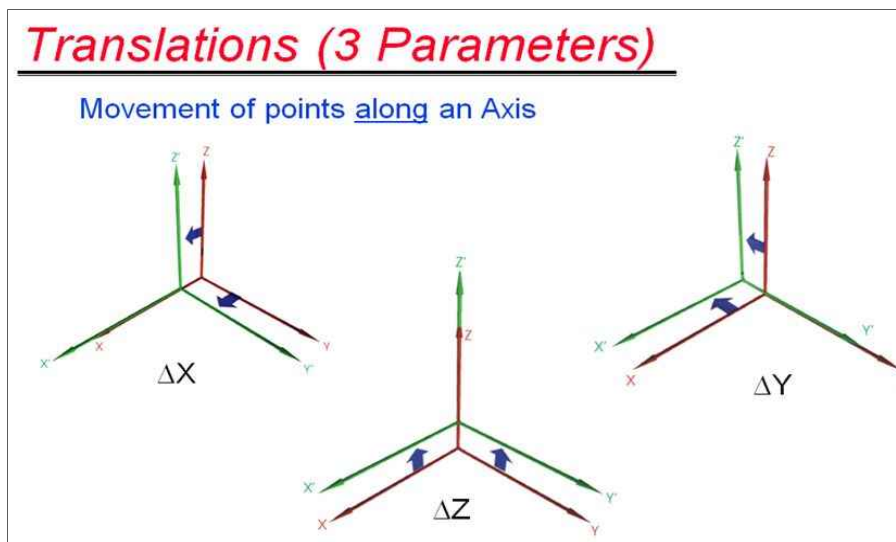


Fig 3.10 Movement of point along an axis.

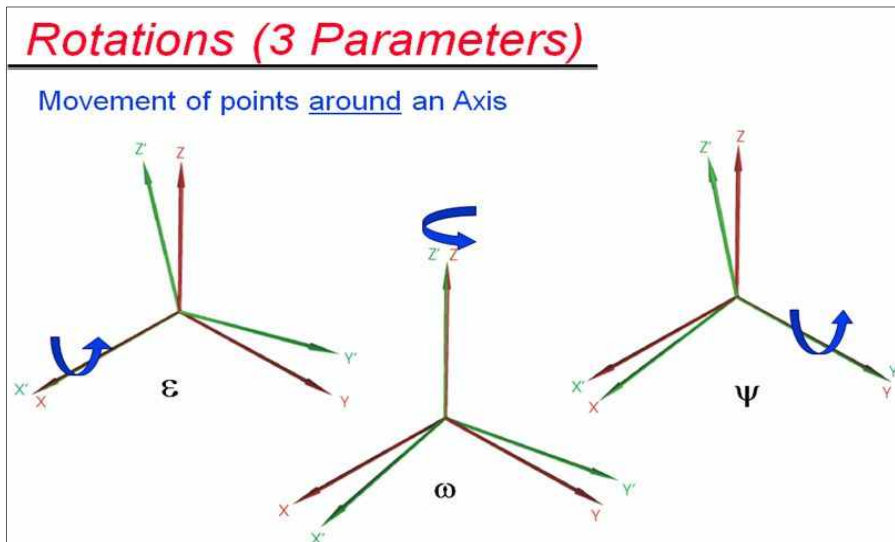


Fig 3.11 Rotation of point along an axis.

평면 직각 좌표계는 X, Y에 대한 기준이면 Z(수직 위치를 정의 하는 좌표체계)에 대한 기준은 수준원점을 기준으로 하고 있으며 인하공전 내에 설치되어 있으며 인천만의 평균해수면을 기준으로 하고 있다. 맵매칭(Map-matching) 기술은 원점의 경계 부분에서는 인접도엽의 좌표계 체계가 상이함으로 인해 두 도엽이 같은 정보에 대한 연속성을 문제를 야기한다. (Edge Matching) 동일한 좌표원점을 사용하는 상하 도면의 경우는 도엽의 인접에 문제가 없으나, 다른 원점을 사용하는 좌우 도면의 경우는 좌표계의 차이로 인해 연계를 시킬 수 없게 된다. 또한 같은 원점의 경우에도 주제도 생성연도의 차이로 인한 보정 상수의 변화로 발생하기도 한다. 그 개념은 Fig 3.12에서 도식하였다.

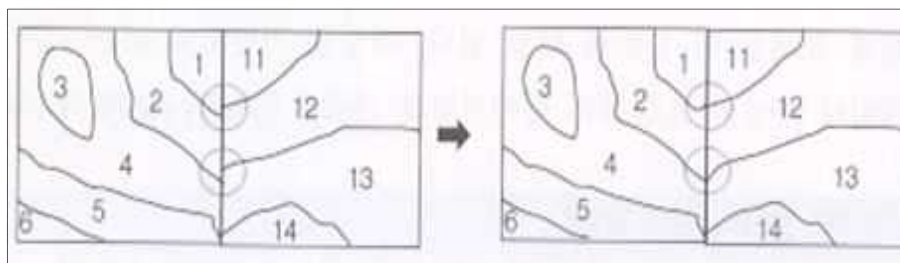


Fig 3.12 Edge match of two maps.

### 3.3 지형고도자료 생성

#### 3.3.1 수치지도의 등고선도

우리나라의 경우 국가 수치지도 제작 사업을 1995년 이후부터 시행해 온 결과 현재 전국에 걸쳐 수치 지형도가 거의 구축되었다. 이러한 수치지형도는 CAD의 기본 포맷인 DXF(Drawing Exchange Format)로 제작되어 있다. 수치 지형도의 모든 지리 정보들은 각각의 레이어(layer)로 구축되어 있으며, 대분류→중분류→소분류 체계로 되어 있다. 레이어 별로 지형지물은 1에서 9까지 대분류하고 있는데 1=철도, 2=하천, 3=도로, 4=건물, 5=지류, 6= 시설물, 7=지류, 8=행정경계, 9=주기로 되어 있다(이희연, GIS지리정보학). 대분류의 7번은지형고도를 나타내는 레이어이며 2번에는 해안의 경계와 섬지역의 경계가 나타나있다. 지리정보 중 도형 정보의 유형에는 벡터데이터와 레스터 데이터가 있다. 캐드는 벡터데이터이며 벡터의 점, 선, 면의 형태로 분류된다. 일반적으로 풍력자원 평가 시 수치 지형도에서 선의 형태인 등고선만을 가지고 분석을 실시하며 이로 인하여 문제가 발생한다. 또한 수치지형도는 도엽별로 구축되어 있기 때문에 인접한 두 도엽 사이의 경계 부분에 오류가 나타나며 이에 따른 수정 작업이 수행 되어야 한다. 또한 등고선 중 불연속점과 자료의 결속 구간이 존재한다. 또한 해안선 역시 많은 결속구간과 불연속점을 가지고 있다. Fig 3.13은 등고선 지도에서 나타나는 불연속점과 결속구간을 보여 주고 있다.



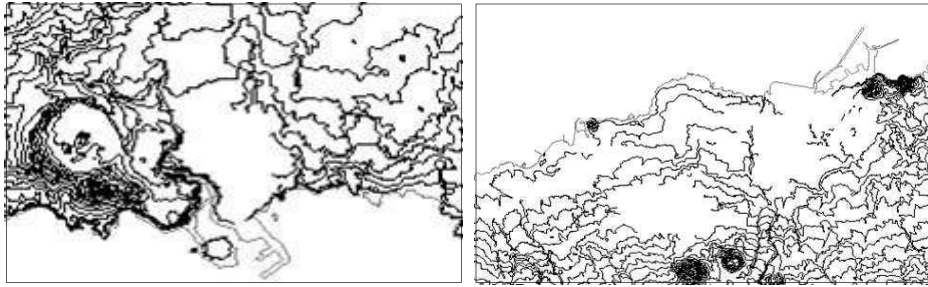


Fig 3.13 Discontinuities of the contour interval and solidarity.

### 3.3.2 DEM생성과 등고선도 추출

풍력자원 평가 시 사용되는 수치 지형도의 문제점과 해결방안은 Fig 3.15와 같다. 또한 점, 선, 면 데이터 중 선 데이터만을 사용하게 되는데 일반적으로 지형도에 축척에 따라 등고선 간격은 정해져 있으며 이 등고선 간격 사이의 변화가 심한 지점에 점 데이터의 형태로 고도정보를 포함하고 있다. 또한 전자해도의 경우 수심에 대한 정보는 등고선이 아니 점고법으로 전달된다. Fig 3.14는 전자해도를 보여 주고 있다. 수심에 따른 개발 제한 구역 선정 시에도 이 점고법으로의 점 데이터를 이용하여 DEM을 생성 후 제한 지역의 수심을 추출한다.

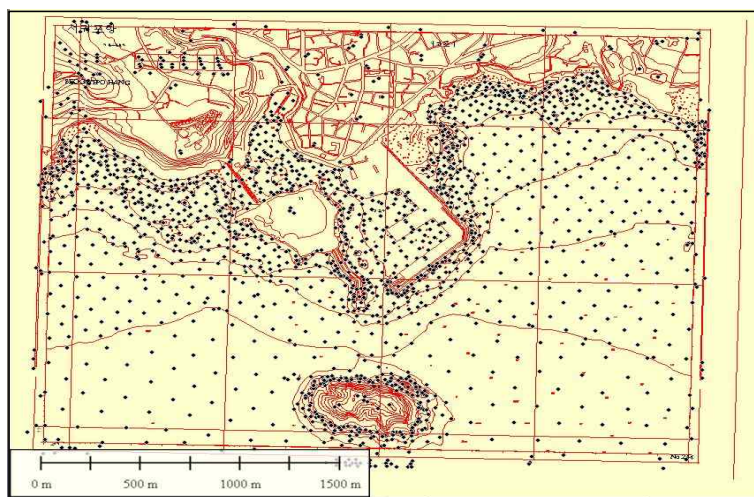


Fig 3.14 Electronic navigational chart.

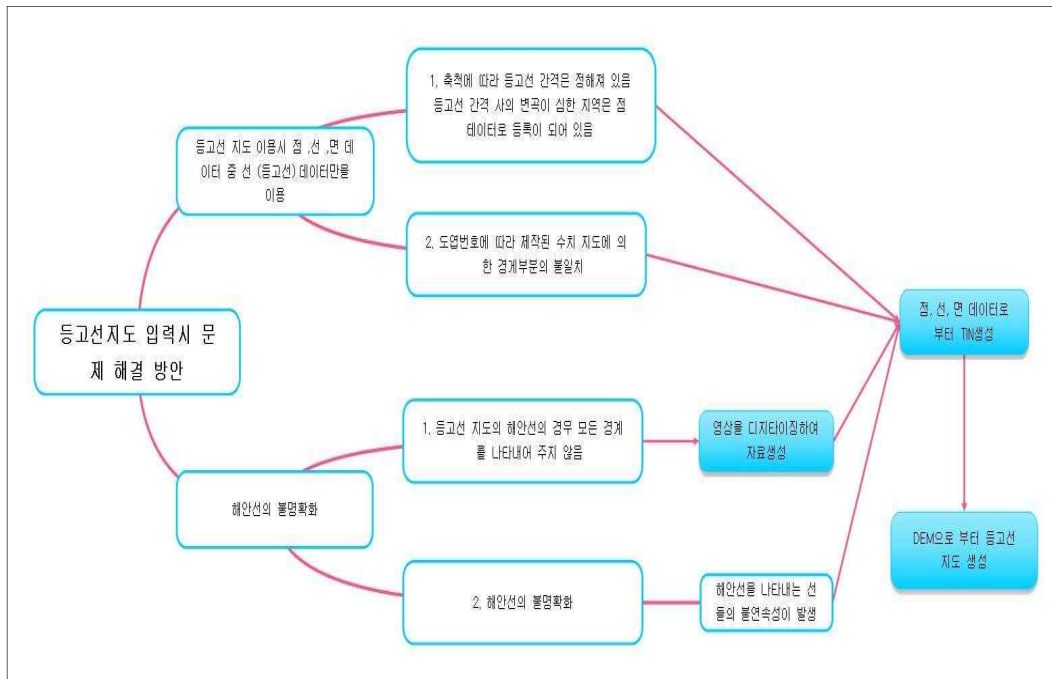


Fig 3.15 Problems and solutions using digital maps.

Fig 3.15에서 설명 하듯이 해안선의 경우 SPOT5의 영상을 이용하여 디지털링을 통하여 해안선의 불명확화를 해결하였다. 디지털링이란 좌표정보가 부여된 영상(래스터) 정보를 이용하여 영상의 도형정보에서 좌표값이 부여된 원하는 정보를 추출하는 과정이다. 도엽의 집합문제는 GIS소프트웨어인 ArcView를 이용하여 해결 하였다. 그 후 획득된 모든 수치 데이터로부터 TIN을 생성한다. 지구표면의 3차원 모델로는 DEM과 TIN등이 있다. 수치적 수치 표고 모형(DEM, Digital Elevation Model)이란 규칙적인 격자 행렬에 고도값을 생성하여 지형기복을 나타내는 방법이다. DEM( Digital Elevation Model)은 1955년경 Miller, C. L. 교수 (미국MIT공대)에 의하여 처음 연구가 시작된 이래 주로 도로설계와 같은 일반 도로 분야에서 응용되어 왔으나, 오늘날 고성능 전산기가 발달함에 따라 일반 토목 분야는 물론, 지도 제작 분야 및 기타 산업 분야로 확대 발전되었다.

DEM  
DEM , (Point  
Model) GIS

에 사용하는 형식이다. 이 지형 정보는 경사 방향, 경사도, 3차원 투시도 등의 지형 특성을 표현하는 데 사용된다. 즉, 수치지형 또는 수심 측량 데이터에 대한 표고정보를 이르는 용어로 식생과 인공지물을 포함하지 않는 데이터이다. 정규격자 방식의 고도 행렬 데이터를 의미한다.

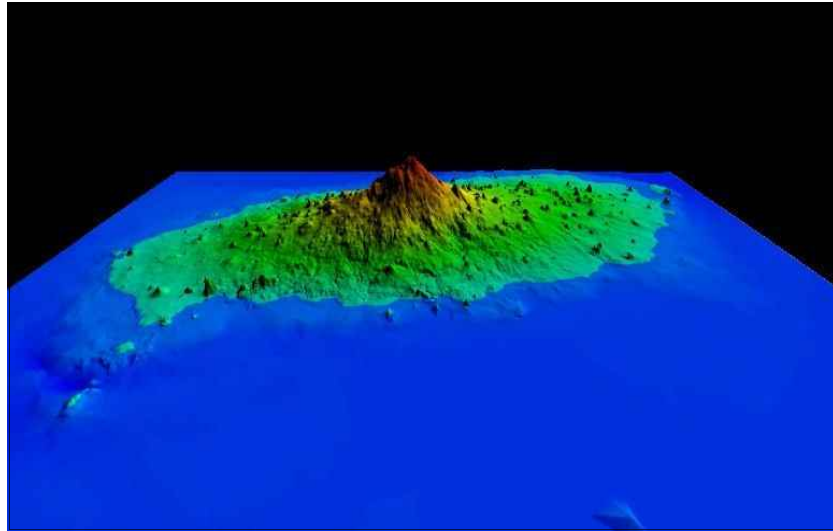


Fig 3.16 DEM around Jeju Island\_1.

불규칙 삼각망(TIN; Triangulated Irregular Network)란 불규칙 삼각망을 활용하여 지형의 표현하는 방법이다. 기복이 심한 지역에 효과적으로 사용된다. DEM 방식은 지형자료의 처리 방법 중 가장 일반화된 방법으로서 동일한 밀도와 크기를 갖는 격자를 사용하여 표고 값을 나타낸다. 그러나 이 방법은 격자의 크기가 작을 때에는 단순한 지역임에도 상대적으로 자료의 양이 늘어나고, 큰 격자를 사용하였을 때에는 자료의 크기가 작아지는 반면 변이가 심한 지면의 상태를 정확하게 표현하지 못하는 단점을 갖고 있다. 이에 반해 불규칙하게 분포된 위치에서 표고를 추출하여 이들의 위치를 삼각형의 형태로 표현하는 TIN에 의한 방법은 적은 양의 자료를 사용하여 복잡한 지형을 상세히 나타낼 수 있다는 장점이 있다. 삼각형을 구성하는 선분의 길이는 다양하므로 복잡한 지형의 경우 작은 면적의 삼각형을 이용하여 자료의 밀도가 높은 TIN을 구성할 수 있고 계곡이나 골짜기 등은 자료의 밀도를 높임으로써 지표면의 형태를 비교적 정확하게 기록할

수 있다(김계현, 1998).

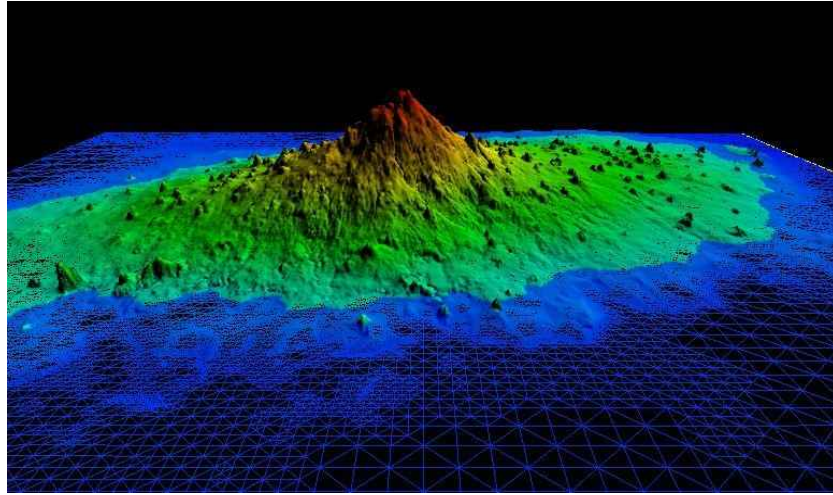


Fig 3.17 TIN around Jeju Island.

전자해도와 수리지형도의 고도데이터를 이용하여 Fig 3.17과 Fig 3.18 같이 TIN과 DEM을 생성하였다. 해안선의 경계가 없을 경우 Fig 3.19과 같이 제주 비양도와 같이 본섬에 가까운 섬의 경우 분리되어 있음에도 서로 연결되는 문제가 발생하며 이 문제는 Clip기능을 이용하여 각각을 분리 DEM을 생성한 후 등고선을 각각 생성하여 문제를 해결 하였다.

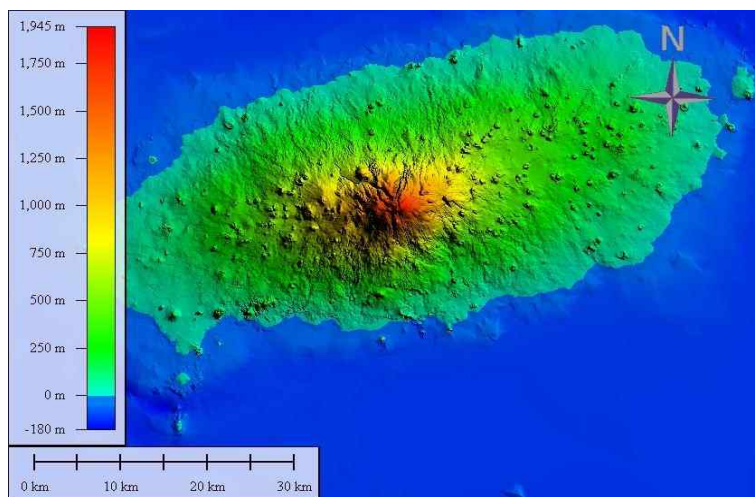


Fig 3.18 DEM around Jeju Island\_2.

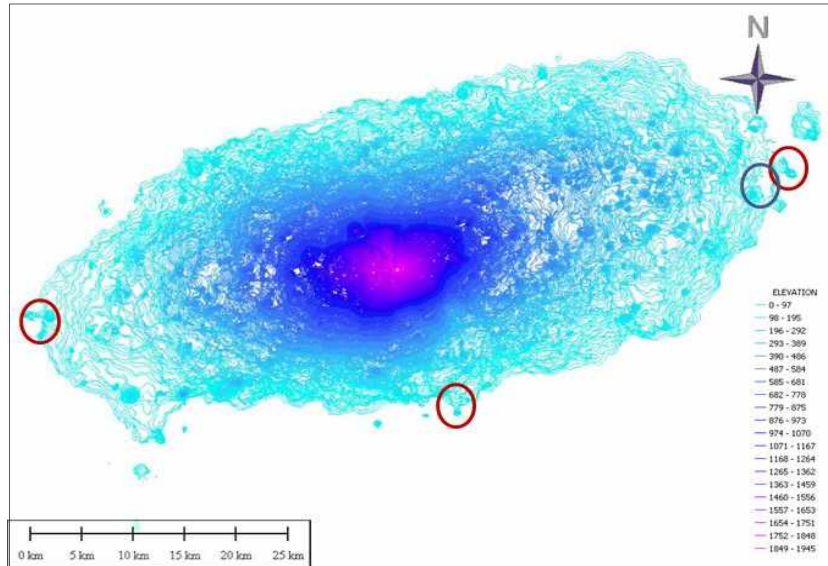


Fig 3.19 Problem of contour map around Jeju Island.

이에 본 연구에서도 각 축척에 따른 대분류 7번의 점, 선, 면의 고도관련데이터와 2번의 해안선 및 섬 지역 해안선데이터와 디지털라이징 데이터로 만든 해안선 데이터를 바탕으로 DEM과 TIN을 생성하였고 Fig 3.20과 Fig 3.21과 같다. Micro-siting시 작업의 편의와 오차 방지를 위해 UTM좌표로 변환과 해양의 고도 0으로 작업하였다.

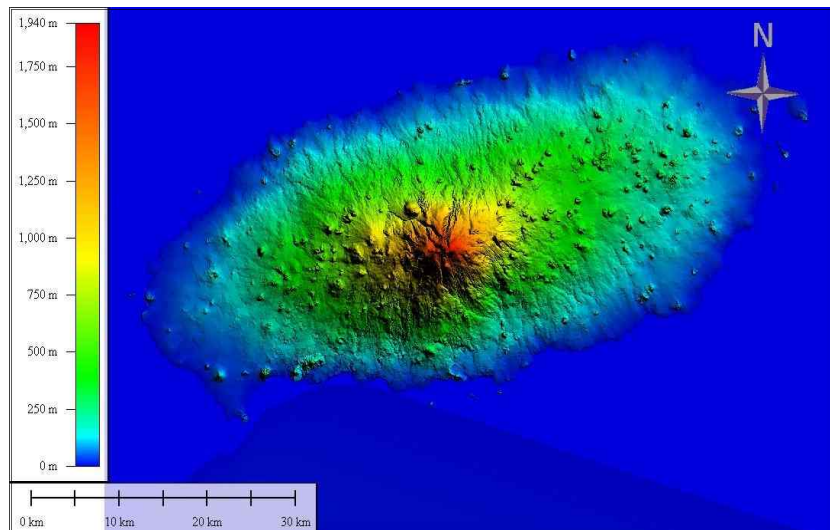


Fig 3.20 DEM for working with Micro-siting.

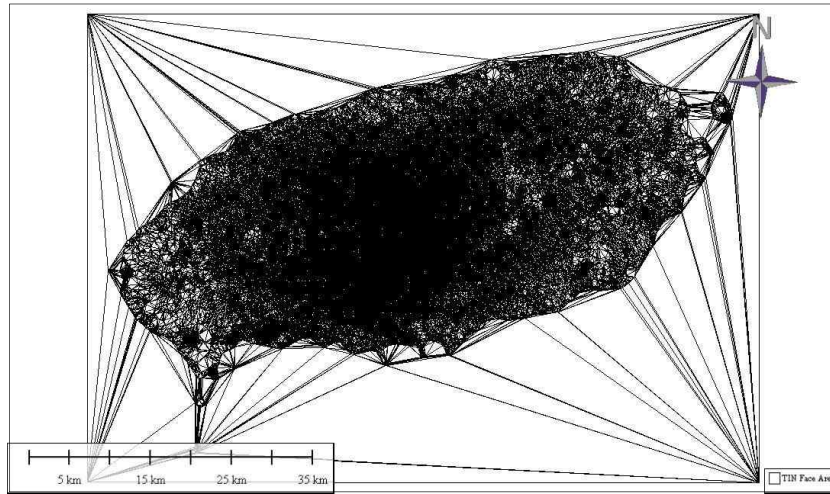


Fig 3.21 TIN for working with Micro-siting.

그 후 등고선은 추출하였다. WindPro의 경우 Micro-Siting 시 수심(음의 고도)은 인식을 하지 않았다. 이에 바다의 영역 경계가 0이 되는 등고선을 추가하여 Micro-Siting을 위한 등고선 지도를 생성하였고 Fig 3.23와 같다. Micro-Siting 시 입력데이터의 오차확인 은 WASP Map Editor를 이용하여 확인하였다. 이는 Fig 3.22

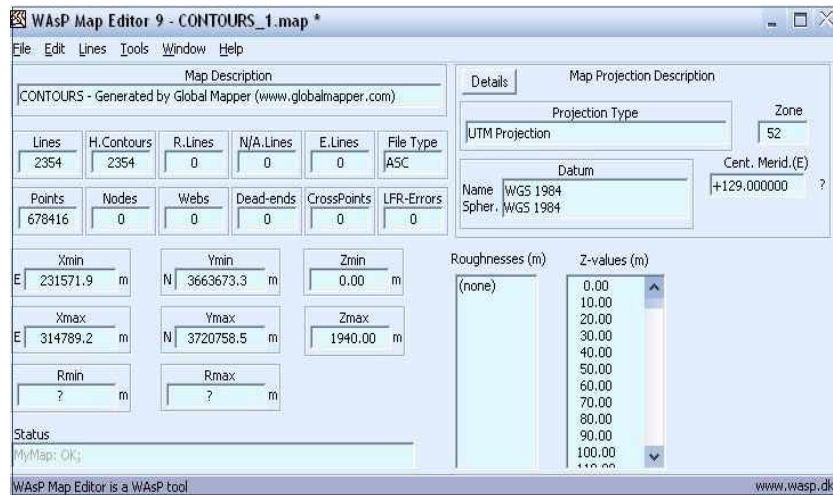


Fig 3.22 Contour map error check.

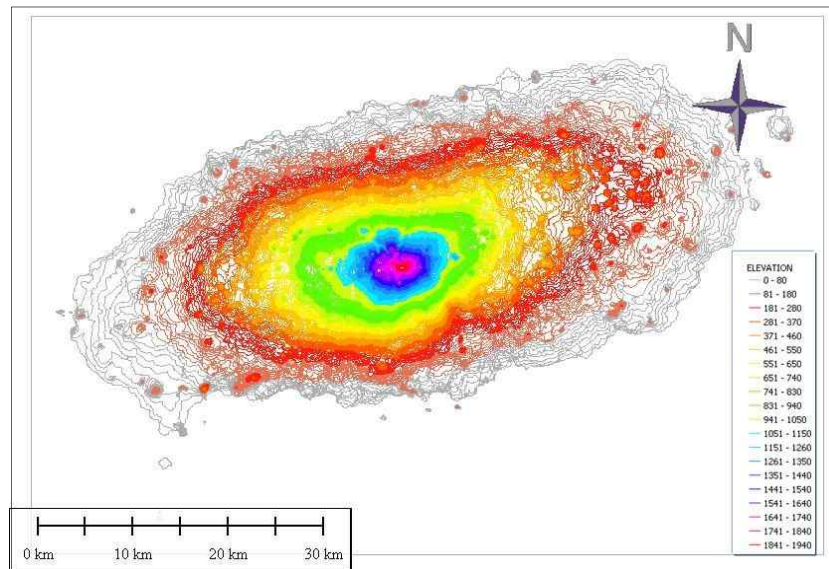


Fig 3.23 Contour map for Micro-Siting.

### 3.4 입지분석

#### 3.4.1 개발 제한지역

일반적으로 풍력발전 사업허가 및 지구지정 등에 대한 자료에 따르면 바닷가에서 바다 쪽으로 최단거리 1Km미만의 해역에는 개발 사업의 승인 제한이라는 조항은 지적 공무선으로부터 1Km이상 떨어진 곳이라 변경되었으며 이는 지적도상의 경계 중 해안가와 접하는 최초의 지적경계선을 의미한다. 이를 위해 버퍼라는 기술을 이용하였다. 버퍼(Buffer)란 공간 형상의 둘레에 특정한 폭을 가진 구역(zone)을 구축하는 것으로, 버퍼를 생성한 결과는 모구 폴리곤으로 표현 된다(이희연, 2009). 특정지점 또는 선형으로 나타나는 공간 형상 주변지역의 특징을 평가 하거나 보호구역 설정 취약지역 설정 등에 이용되는 분석 기법이다. 지적공무선과 주변 도서 지역의 지적 공무선을 기준으로 1km부분을 버퍼 구역을 주제도로 생성 하였고 Fig 3.24과 같다.

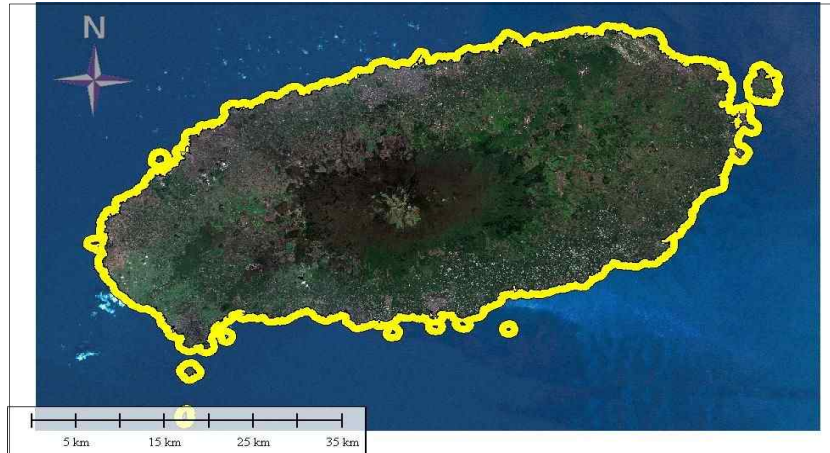


Fig 3.24 Regional development limited around Jeju Island.

### 3.4.2 배제 분석 시 포함 지역

군사시설 등은 일반적으로 개발에 제한이 따르면 특히, 제주도의 경우 제주특별자치도 조례에 따르면 제주 연안역의 해상 풍력 개발을 위해서는 해양 공원, 항만시설 지역, 어항시설지역에 대한 특별히 고려해야 된다. 이러한 부분에 대한 주제도를 작성하면 Fig 3.25 ~ Fig 3.29과 같이 나타낼 수 있다.

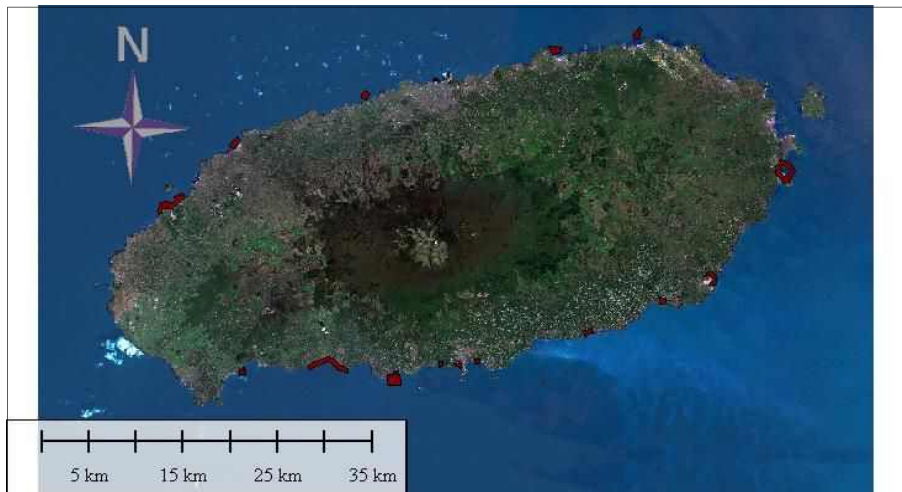


Fig 3.25 Analysis of social exclusion area around Jeju Island\_1.





Fig 3.26 Analysis of social exclusion area around Jeju Island\_2.

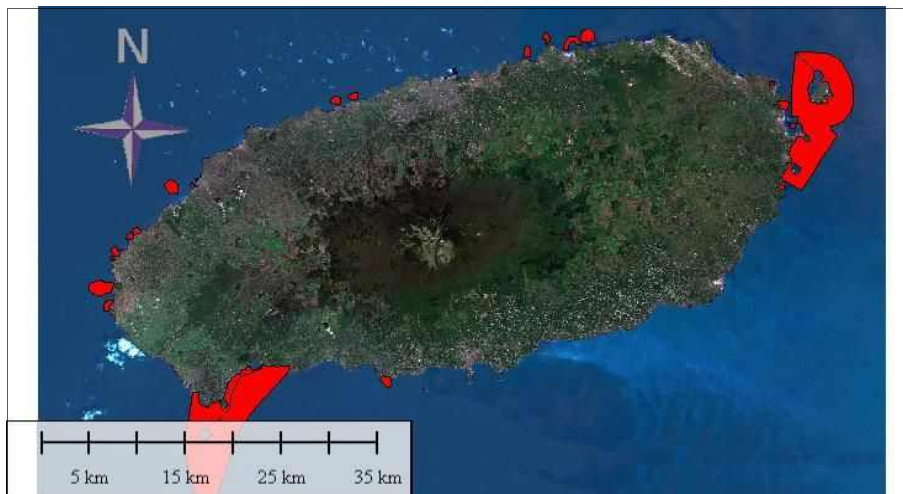


Fig 3.27 Analysis of social exclusion area around Jeju Island\_3.



Fig 3.28 Analysis of social exclusion area around Jeju Island\_4.



Fig 3.29 Analysis of social exclusion area around Jeju Island\_5.

### 3.4.3 수심에 따른 개발 한계 구역

개발 제한 구역은 수심만을 고려하였고 토질 특성에 따라 제한 될 수 있다. 또한 공사비에 따라 수심의 경계 역시 변경이 있을 수 있으나 본 논문에서는 - 60m를 한계로 지정하여 분석을 실시하였다. 제주도는 섬 전지역에 걸쳐 급격히 경사가 깊어지는 특성을 보이고 있었다. 또한 수심에 따른 외곽경계의 주제도는

-30m에서 -60m 까지 10m간격으로 제작 하였으며 점고법으로 되어 있는 수심 데이터를 이용하여 DEM을 생성한 후 특정 등고선만(-30 ~ -60)을 추출하였다. 그 결과는 Fig 3.30와 같다. 수심은 전자해도의 데이터를 기준으로 작업하였으며 해도의 수심은 점고법으로 표시 되어 있으며 약최저저조면이 기준 고도가 된다.

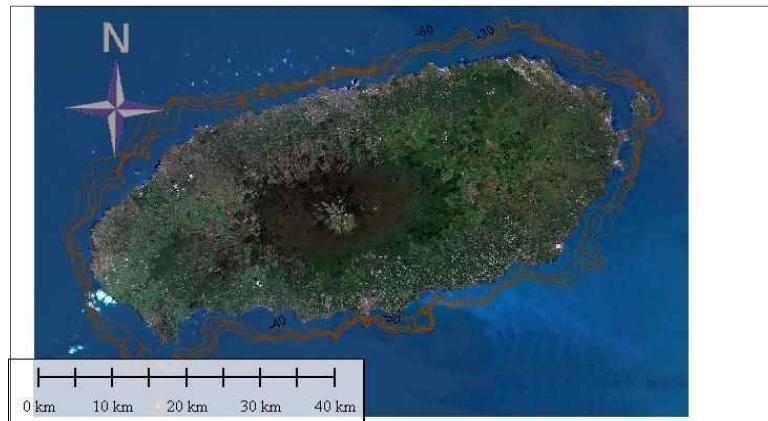


Fig 3.30 Depth -30m ~ -60m around Jeju Island (approximate lowest low water standards).

### 3.5 제주 연안 개발 가능 지역 추출

앞 절에서 언급한 수심에 따른 개발 한계 구역, 배제 분석 시 포함 지역, 개발 제한지역을 중첩(overlay)시킨 후 클립(Clip) 기능을 이용하여 개발가능 지역을 추출하였다. 중첩이란 하나의 커버리지에 다른 커버리지들을 올려놓고 두 개 이상의 커버리지에 나타나는 현상들 간의 관계를 분석하는 것이며 클립(Clip)이란 두 번째 커버리지 B는 이용하여 첫 번째 커버리지 A를 잘라내는 기능이다. 많은 가정이 들어가고 규정 및 자료의 부재가 존재하지만 개발 가능 구역은 약 342  $km^2$ 가 나오고 있었다. 그 결과는 Fig 3.31과 같다.

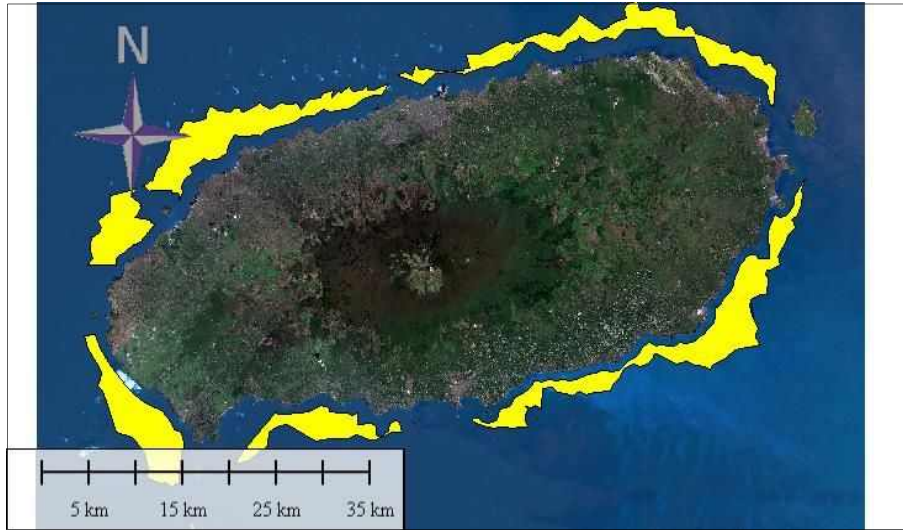


Fig 3.31 Available area in the development around Jeju Island.

### 3.6 제주 북동부 연안 지역의 특성 검토

전력연계를 위한 해저 그리드 공사 시 지면의 경사도의 정도는 설계의 중요한 요소로 작용하게 된다. 이에 제주 지역의 수치지도와 제주 북동부 지역의 수심측량을 통해 얻은 자료를 보강하여 제주 북동부 연안 지역의 경사도를 검토 하였다. Fig 3.21에서 북동부 연안을 확대한 그림은 Fig 3.32와 같고 수심 -30m에서 -60m 10m .



Fig 3.32 Available area in offshore wind farm development in the northeast Jeju Island.

DEM(Digital Elevation Model)은 지형을 격자로 구분하여 그 격자들의 평균 고도를 대표 값으로 하여 저장된 3차원 행렬 형태의 데이터로 격자 간격이 조밀할수록 현실세계를 보다 정확하게 분석할 수 있다. DEM을 이용하는 이유는 데이터의 저장과 공간 정보 분석이 용이 하여 널리 사용되고 있다. DEM을 이용한 공간 분석 응용분야로는 경사도와 경사 방향도, 수계 및 유역 경계 분석, 수계 및 유역 경계 분석 등 여러 분야에서 활용되고 있다. Fig 3.33는 수심데이터를 이용하여 생성한 제주 북동부 연안 지역의 DEM이다.

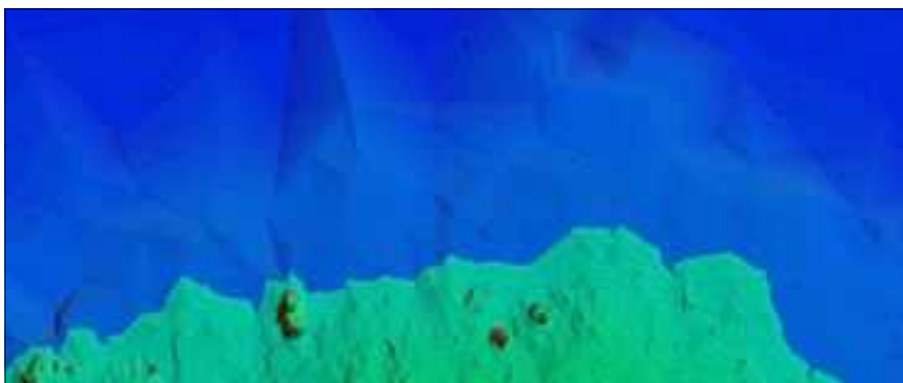


Fig 3.33 DEM in the northeast Jeju coastal region.

제주 북동부 연안역 지역의 DEM을 이용하여 해상의 경사 방향도와 경사도를 분

석 하였다. DEM 생성은 해도자료와 용역에서 획득한 수심측량 데이터를 추가하여 분석하였다. 분석 결과 일부 구간에서 경사 45° 이상의 지역이 나타나고 있다. Fig 3.34에 그 결과를 나타내었다.

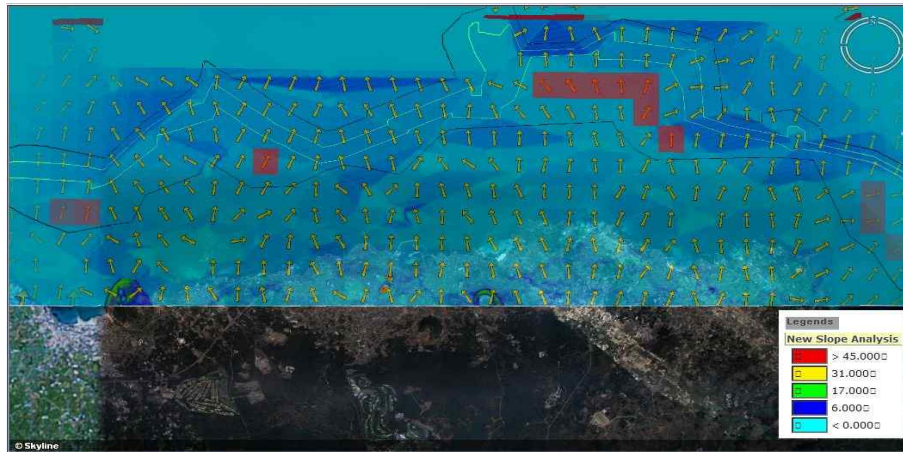


Fig 3.34 Analyze of slope and slope direction in the northeast Jeju coastal region.

### 3.7 기타 개발 제한 조건 분석

DEM (Digital Elevation Model)과 DSM(Digital Surface Model) 데이터를 이용하여야 한다. DSM이란 자연 및 인공 지형, 지물을 표현된 표고모형을 말한다. 각 건물 객체에 대한 좌표와 3D모델이 존재해야 한다. 현재 국가 수치지도의 제작은 사진측량 장비와 LiDAR 측량 장비를 항공기에 탑재하여 이루어지고 있다. 이를 통해 정사 사진 측량과 DEM 및 DSM데이터의 생성이 가능하다. 이 데이터는 제주도에서 관리하고 있지만 보안 등급상의 문제로 확보할 수 없었다. 증강현실로 지물을 생성하여 분석의 가능성을 확인하였다. Fig 3.35 DEM DSM

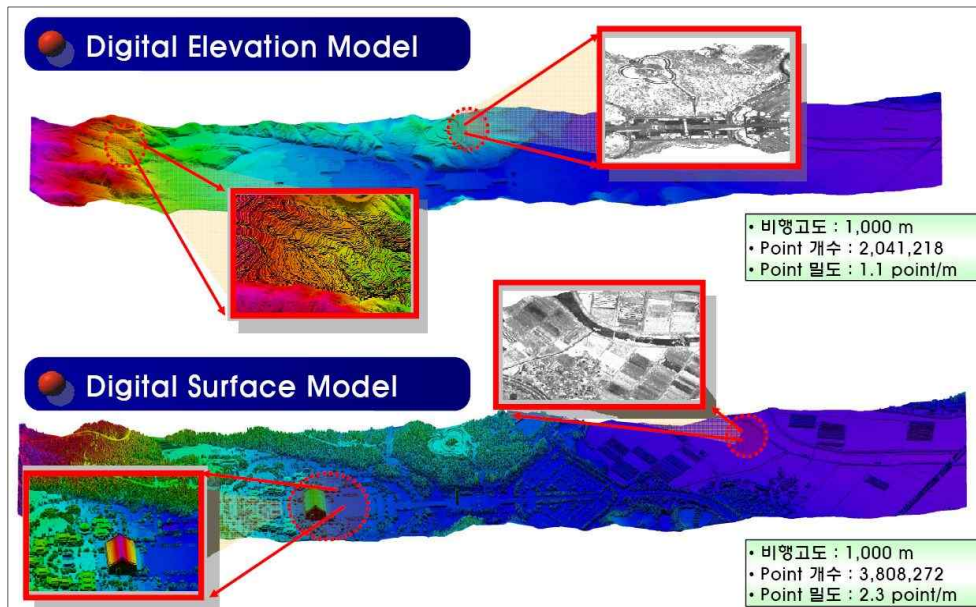


Fig 3.35 DEM & DSM (Source : IMU KOREA).

증강현실을 이용하여 분석 하였다. 증강 현실(Augmented Reality, AR)은 가상 현실(Virtual Reality)의 한 분야로 실제 환경에 가상 사물이나 정보를 합성하여 원래의 환경에 존재하는 사물처럼 보이도록 하는 컴퓨터 그래픽 기법을 말한다. 군사 레이더 기지가 오름 중간에 위치하고 있다고 가정한 후 임의 지역에 풍력 발전시스템을 설치하여 기타 제한 조건 분석을 실시하였다. DEM모델 위에 항공 사진을 정사 보정한 영상을 퓨전(Fusion)시킨 경우가 실제 환경이 된다. Fig 3.36은 DEM모델 위에 정사 사진 영상은 퓨전 시킨 것이다.



Fig 3.36 Digital elevation model(Source : IMU KOREA).

DEM모델 위에 정사 사진 영상은 퓨전 시킨 후 지물과 지모를 3D모델로 생성하여 입력하면 증강현실이 완성된다. 그 결과는 Fig 3.37과 같다. 하지만 제주지역의 3D모델의 실제 정보의 보안상의 이유로 정보의 수집이 어려워 임의적 3D모델을 입력하여 분석을 실시하였다.



Fig 3.37 Digital surface model(Source : IMU KOREA).

### 3.7.1 군통신 영향 지역

군통신 문제 역시 해상 풍력 사업의 제한 조건으로 작용한다. 풍력 발전시스템



의 위치 선정에 많은 영향을 미치는 요소이나 정확한 제한 요소가 발표되어 있지 않은 상황이다. 일반적으로 알려진 발전 제한 요소는 오름 등에 의한 차폐 효과에 의한 영향은 인정한다고 하였다. 이는 아래 그림과 같이 오름에 의하여 전파가 전달되지 않을 경우 영향권 안에 있어도 개발이 가능하다. 또한 전파에 영향권에 있다고 하더라도 허브높이를 변경하여 전파 통신에 문제가 없다고 한다면 개발이 가능하다. 영향권 안에 들어온다고 하더라도 차폐 각도가 1.5° 안이면 개발이 가능하다. 레이더 분석은 지형분석의 한 종류이다. Fig 3.38과 Fig 3.39은 군통신분석의 예이다.



Fig 3.38 Analysis of military communication problems\_1.

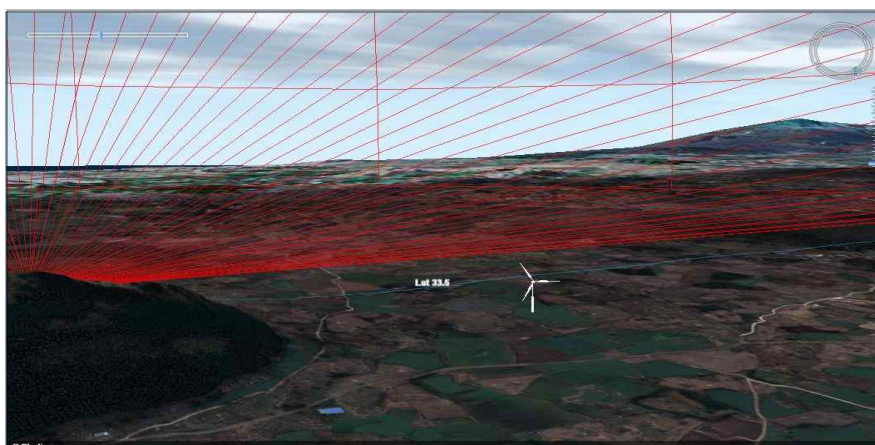


Fig 3.39 Analysis of military communication problems\_2.

### 3.7.2 그림자 영역 지역

그림자 영역분석은 변화에 따라 풍력발전시스템으로 인하여 생성된 그림자 영향의 범위를 분석하는 것으로 로터에 의한 회전에 의한 그림자 효과는 육상 풍력에서 문제를 야기하고 있으나 제주의 경우 바닷가에서 바다 쪽으로 최단거리 1km미만의 해역에는 개발 사업의 승인 제한이라는 조항으로 인하여 주거지의 영향을 없을 것으로 판단된다. 그림자 영역분석은 표면을 가상의 광원으로부터 조명한 상태를 계산하여 시각적으로 표현한 지형분석의 한 종류이다. Fig 3.40 ~ Fig 3.43



Fig 3.40 Analysis of the shadow area\_1.



Fig 3.41 Analysis of the shadow area\_2.



Fig 3.42 Analysis of the shadow area\_3.



Fig 3.43 Analysis of the shadow area\_4.

### 3.7.3 가시화 영역 및 시계영역 지역

해안경관을 현저히 해치는 해역 등에서는 해상풍력 발전시설의 설치를 제한 받을 수 있다. 가시화 영역 분석을 위해서는 DEM데이터가 아닌 DSM(Digital Surface Model)데이터를 이용하여야 한다. DSM이란 자연 및 인공 지형, 지물을 표현된 표고모형을 말한다. 각 건물 객체에 대한 좌표와 3D모델이 존재해야 하고 제주도에서 관리하고 있지만 보안 등급상의 문제로 분석을 실시 할 수 없어

DEM 데이터로 그 가시화 영역 분석의 가능성을 확인하였다. 지도상 붉은 색 영역은 풍력 발전시스템이 보이지 않는 영역을 의미한다. 가시화 영역분석은 지형 분석 중 일정 위치로부터 보이는 영역에 대한 확인을 하는 시계(View) 분석의 한 종류이다. Fig 3.44은 시계분석의 개념도를 Fig 3.45는 풍력발전시스템을 이용한 시계분석을 실시한 결과이다.

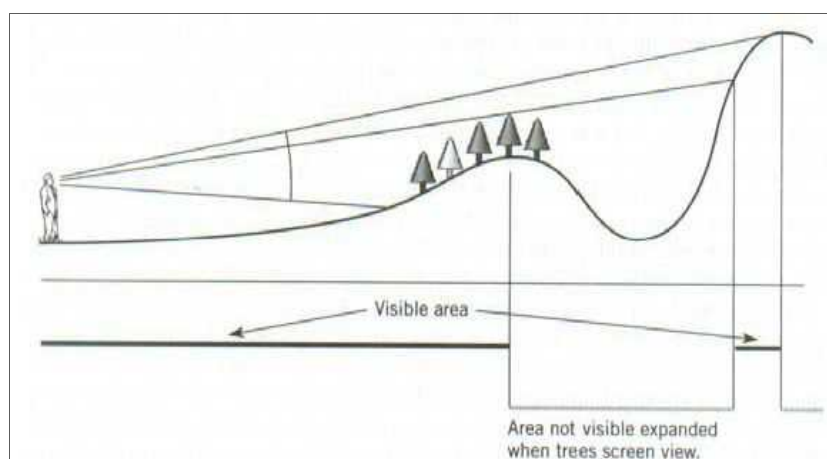


Fig 3.44 View analysis (Source : IMU KOREA).



Fig 3.45 3D analysis visible area.

### 3.8 Remote Sensing 기술을 이용한 영상 분류

영상이란 공간좌표(x, y)위치에 밝기 값을 가진다. 즉 임의의 점 (x, y) 위치에서 그 점에서의 영상의 밝기(intensity) 또는 회색도(gray level)라 불린다. (x,y) 및 그 크기의 값 f의 크기 값이 모두 유한하고 이차적인 값일 때, 우리는 그 영상을 디지털 영상(digital image)이라 하라 부른다. 물체에서 방사되는 전자파는 진동수에 따라 파장대별로 특성을 지닌다. 개개의 특정 파장대를 밴드라고 하며 우리가 일반적으로 보는 칼라 영상(Color Image)역시 RGB밴드의 조합이다. 원격 탐사(RS;Remote Sensing)물체에 대한 다양한 정보를 취득하기 위해 여러 파장대의 영상을 활용하여 이미지 처리 기술로 원하는 정보를 추출하는 과정(영상분류)이다.

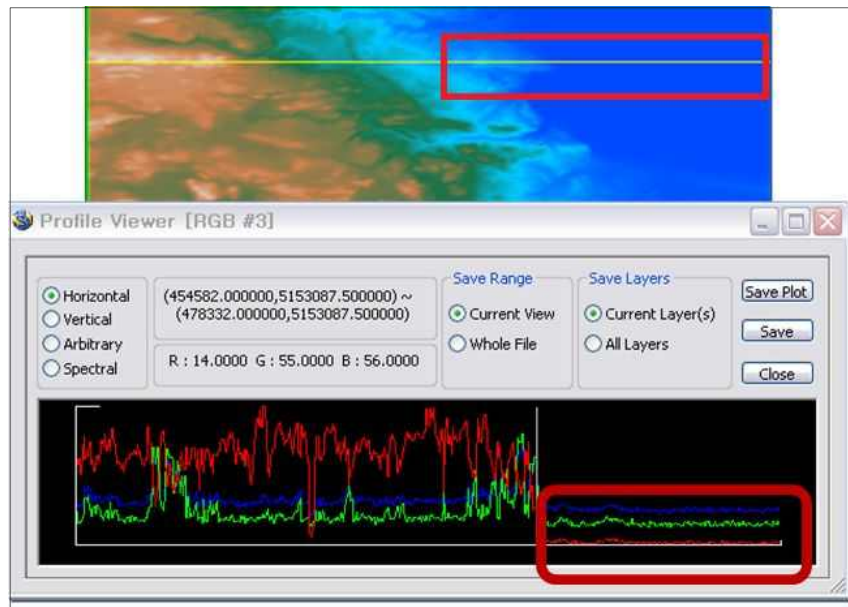


Fig 3.46 RGB band image.

Fig 3.46는 어느 호수지역의 영상이다. RGB영상 회색조 중 R과 G밴드 값이 호수 부분에서 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이런 물체에서 방사되는 전자파의 특성을 이용하여 영상을 분류하게 된다. 원시 위성 영상 자료는 고유의

방사해상도에 따라 결정되는 기록 가능한 수치 화소값의 범위에 비하여 매우 좁은 범위의 자료값 분포를 보이는 경우가 많다. 따라서, 영상의 수치 화소값을 그대로 밝기로 대응시켜 영상화하는 경우에 너무 어둡거나 대비(contrast)가 좋지 않아서 시각적으로 식별하기에 좋지 않은 영상으로 표현 된다. 이 경우 영상 전체에 대한 보정을 실시하며 또한 항공사진으로 인하여 구름에 영향이나 건물의 그림자에 의하여 일부부분이 어둡거나 밝게 나타난 부분은 부분보정(Local Enhancement)을 실시한다. 따라서 분류의 효율성과 정확도를 높이기 위해 영상 처리를 진행한다. 영상분류의 방법은 크게 무감독분류(Unsupervised Classification)와 감독분류(Supervised Classification)로 구분된다. 무감독분류는 영상에서 나타나는 화소값들의 통계적 특성만을 이용하여 컴퓨터에 의해 자동으로 분류되는 기법으로, 군집화(Clustering)이라고도 불린다. 분류할 집단의 개수와 분광집단의 한계거리만을 지정해주면 분류가 가능하다.

### 3.8.1 영상 보정 기법

무감독분류를 수행하기 전에 SPOT-5 영상에 대한 보정을 진행 하였다. 토지피복분류 작업에 앞서 분류의 효율성과 정확도를 높이기 위해 영상 처리를 진행하였다. 영상처리란 영상을 컴퓨터를 이용하여 목적에 맞게 가공하여 사용하는 것을 의미한다. SPOT-5 영상은 2007년~2008년 사이에 촬영된 영상이며 공간 해상도는 2.5m이다. 연안부근에 파도의 백파현상으로 인한 화소값들이 영상에 많이 분포해있었다. 이는 추후 영상분류 작업을 할 경우 오분류의 우려가 있다. 이를 방지하기 위해서 포토샵을 이용하여 해안선을 따라 수역이 위치한 부분을 동일한 화소값으로 영상 처리하였다(Seo-Jeong Moon, 2012). 해양부분을 처리 결과는 Fig 3.47으로 나타내었다.

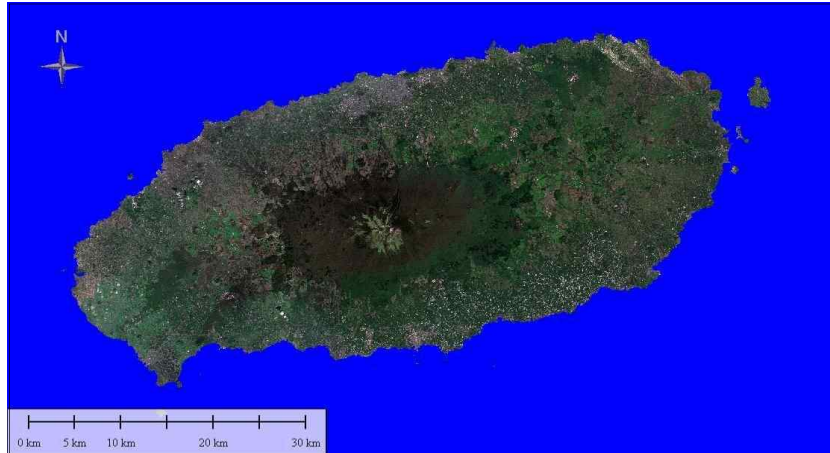


Fig 3.47 Image applied ocean area.

도심 지역역시 군집화 경향이 낮았다. 지면 조도 값은 지표면의 마찰이 풍속에 영향을 주는 지표이다. 비닐하우스의 경우 농작지 보다는 마을로 분류하는 것이 지면 조도지도에 생성에 적합할 것으로 판단하였다. 농작지 주변의 비닐하우스의 경우 마을과 같이 분류하기 위해 같은 색상으로 변경하였다. 그 결과는 Fig 3.48에서 보여지고 있다.

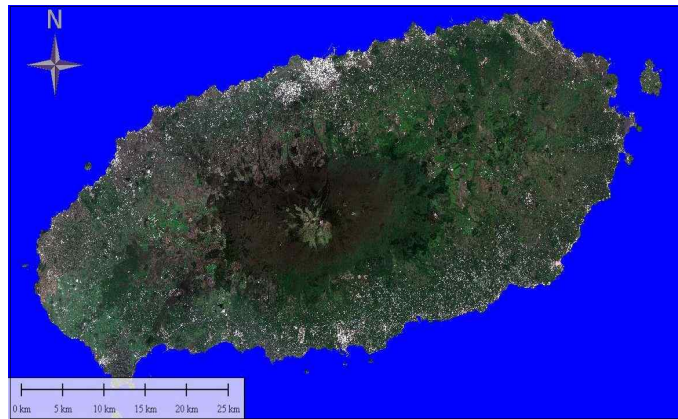


Fig 3.48 Filtered image about village and vinyl houses.

Fig 3.49

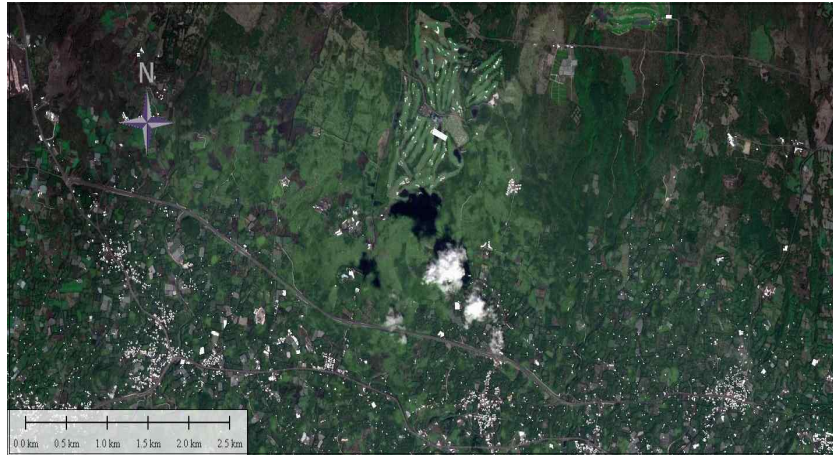


Fig 3.49 Shadow effect of Spot-5 image.

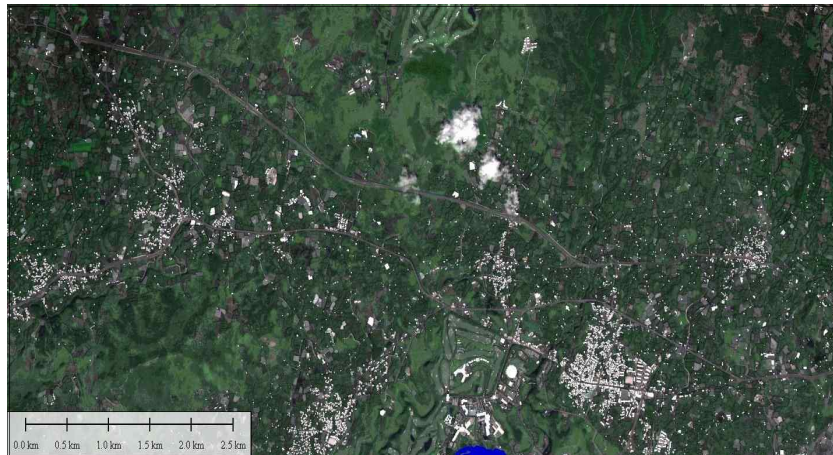


Fig 3.50 Filtered image about shadow.

이런 경우 농작지를 산림으로 오판 할 수 있다. 이를 보정하기 위해 그림자 영역 부분을 포토샵을 이용하여 주변의 농도와 비슷하게 변경하였다. 그 결과는 Fig 3.50

### 3.8.1 무감독 분류

무감독 분류는 순차적 균집화 기법을 사용 하였다. 순차적 영상내의 모든 화소들을 순서대로 읽어 들여 기존의 균집 중심과의 분광 거리를 계산하게 된다. 최



대 군집 계수는 9개, 군집의 최대 반경을 20, 군집당 화소개수는 100로 선정하였다. 이를 바탕으로 농작지와 부분과 산림 부분을 통합하여 아래 그림과 같은 지면 조도에 적합한 토지피복도를 획득하였다. 영상 분류를 위해 원격탐사용 소프트웨어인 PG-STEAMETR 4.2를 사용하였다.

Table 3.2은 9개 군집의 분광거리를 나타낸다. Table 3.3와 Table 3.4은 9개 군집의 밴드별 평균값과 분산을 나타낸다. 필터링한 영역에서는 분산 값이 작게 나타나는 특성을 보여 주고 있다.

Table 3.2 Cluster distance.

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	144.98	284.06	127.17	311.17	167.13	123.56	138.28	148.67
2	144.98	0	229.97	46.79	364.34	192.91	90.55	72.09	37.34
3	284.06	229.97	0	216.05	345.37	231.09	206.18	235.69	243.14
4	127.17	46.79	216.05	0	317.57	146.19	44.04	35.57	38.99
5	311.17	364.34	345.37	317.57	0	171.54	273.99	301.39	344.43
6	167.13	192.91	231.09	146.19	171.54	0	102.47	133.23	175.11
7	123.56	90.55	206.18	44.04	273.99	102.47	0	44.67	77.58
8	138.28	72.09	235.69	35.57	301.39	133.23	44.67	0	43.39
9	148.67	37.34	243.14	38.99	344.43	175.11	77.58	43.39	0

Table 3.3 Cluster mean.

Cluster	Band 1	Band 2	Band 3
1	33	28.01	175
2	30.94	41.71	30.68
3	255	0	0
4	58.35	68.78	57.24
5	245.9	244.19	244.08
6	147.65	145.56	143.85
7	88.26	88.74	82.67
8	52.24	103.63	60.84
9	27.65	78.61	35.31

Table 3.4 Cluster variance.

Cluster	Band 1	Band 2	Band 3	# of Pixels
1	0.29	0.38	0.35	63875
2	105.6	149.66	97.97	33744
3	0.23	0.31	0.48	1962
4	77.3	51.73	37.69	17450
5	299.4	389.94	405.07	1242
6	633.9	540.44	619.38	2278
7	180.28	152.59	144.11	10211
8	108.73	30.77	64.57	2296
9	7.64	114.32	21.76	2651

9 “Utilizing principal component analysis in unsupervised classification based on remote sensing data” ( , 2003) “Landslide Susceptibility Analysis Using Landsat Image & GIS Technics in Jeju”(Quan He Chun, 2009)의 제주지역 영상 분류 결과를 바탕으로 통합 하였다. 산림 지역의 붉은 빛이 강하게 나타나는 지역과 진초록 부분이 강하게 나타나는 부분을 통합 하였는데 이는 SPOT-5의 영상의 주기 해상도 차이로 인한 것으로 판단된다. 또한 농작지의 부분은 표와 같이 지면 조도의 경우 초지와 농작지의 값에는 큰 차이가 없다. 그러므로 본 연구에서는 초지와 농작지로 분류된 결과를 통합 하였다. 군집별 통합과 RGB 값은 Table 3.5과 같다.

Table 3.5 Land cover and RGB value.

Color	Name	Land Cover
RGB(0,0,255)	Cluster 1	Ocean
RGB(0,64,0)	Cluster 2	Forest
RGB(128,128,128)	Cluster 3	Load
RGB(0,255,0)	Cluster 4	Agriculture & Grassland
RGB(254,0,0)	Cluster 5	Farming villige
RGB(0,255,0)	Cluster 6	Agriculture & Grassland
RGB(0,255,0)	Cluster 7	Agriculture & Grassland
RGB(0,255,0)	Cluster 8	Agriculture & Grassland
RGB(0,64,0)	Cluster 9	Forest

Fig 3.51은 Table 3.4의 분류 결과를 바탕으로 제주지역의 지면 조도를 위한 영상분류지도이다.

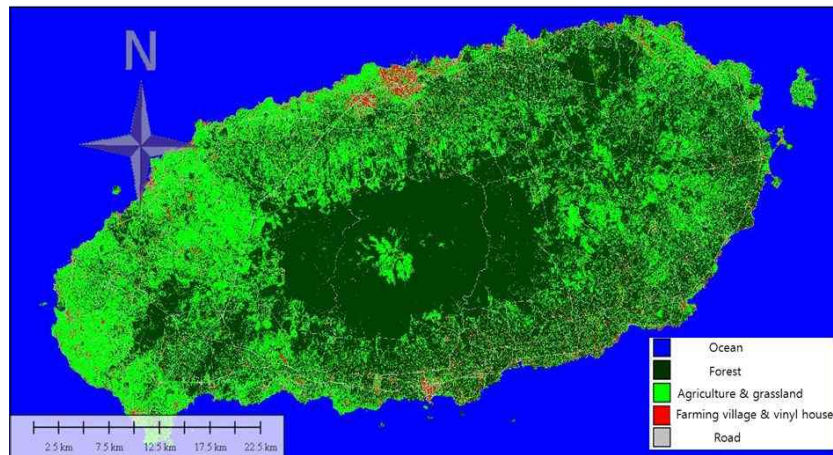


Fig 3.51 Image classification map.

### 3.8.2 최빈값 필터를 이용한 영상 필터링

지면조도지도 생성 결과 점과 선 객체들의 수가 많아 작업시간이 오래 걸리는 단점을 보였다. 이를 보완하기 위해, 지면조도지도 생성 시 토지피복지도에 영상 필터링 기법을 적용하였다. 많은 선행 연구 (Morten Nielsen 외, 2004; Collin G. Homer 외, 1997; Seo-Jeong Moon 외, 2012)에서와 같이 최대 빈도 필터 (Majority Filter)를 사용하였다. 최대 빈도 필터를 이용한 영상의 처리는 약간의 오차를 발생시키기는 하지만 풍력자원 평가 시 계산 속도를 상당 부분 단축 시켜준다. 최대 빈도 필터(Majority Filter)는 마스크 내의 각 수치 화소값의 빈도를 계산해서 가장 많은 빈도수를 보이는 수치 화소값을 마스크의 중앙에 위치한 화소의 수치 화소값으로 결정하는 필터이다. 본 연구에서는 5×5 필터를 사용하였고 Matlab

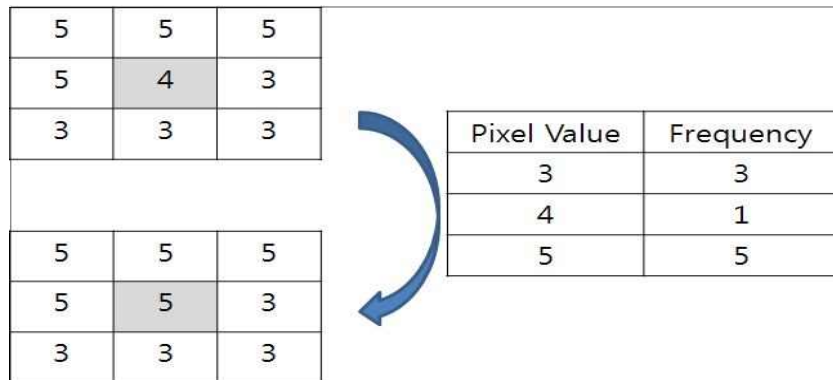


Fig 3.52 Process of majority filter.

Fig 3.52는 3×3 최대 빈도 필터의 원리를 설명하고 있다. 그림에서 보여 지듯이 원 영상에 주변의 픽셀 중 최빈값이 50% 이상이 경우 그 중앙의 값을 최빈값으로 치환하는 과정이며 5×5 필터의 경우 13개 이상의 최빈값이 나오면 치환되게 된다. Fig 3.53은 Fig 3.51의 영상을 최대 빈도 필터로 필터링한 결과이다.

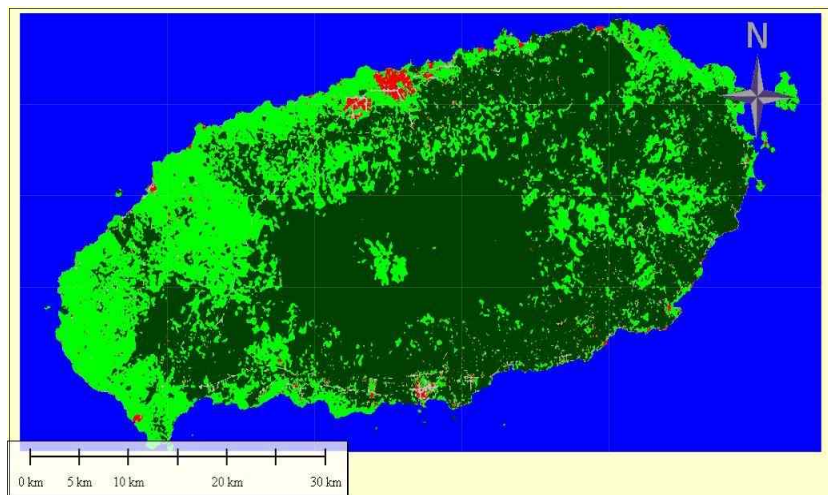


Fig 3.53 Filtered image of the Jeju Island.

도형정보(Graphic information) 이란 공간객체의 형상을 2차원 혹은 3차원으로 표현하는 것으로 영상과 같은 Raster 데이터 역시 도형 정보에 포함된다. Raster 데이터 뿐만 아니라 CAD와 같이 도형 정보를 점, 선, 면으로 표현하기도 하는데 이를 Vector 데이터라고 한다. 벡터 데이터는 현상적 자료 구조의 표현이 용이, 축약된 자료 구조, 네트워크 연계로 위상 관계 구축이 용이, 정확도

가 높음, 위치, 속성의 검색, 갱신, 일반화가능이라는 장점을 가지고 있으며 자료 구조가 복잡, 지도 중첩이 복잡, 공간 분석이 복잡하다는 장점도 가지고 있다. 레스터 자료는 자료 구조가 간단, 지도 중첩이나 원격탐사 자료와의 연결이 용이, 다양한 공간분석이 용이, Simulation이 용이하다는 장점과 그래픽 자료의 양이 방대, 자료 축약 시 정보의 손실 크다는 단점을 가지고 있다. 풍력자원 해석 프로그램인 WaSP, WindPRO에서의 입력데이터 형식은 벡터 형식이다. Fig 3.52는 레스터 데이터이므로 레스터 데이터를 벡터로 변환하는 벡터라이징 실시하였다. WaSP 벡터 데이터의 개념은 Fig 3.54에 도식하였다.

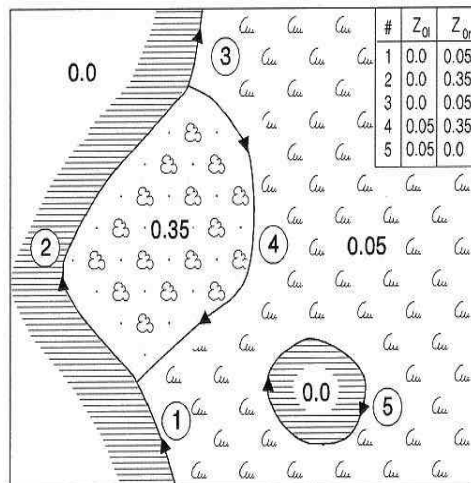


Fig 3.54 Roughness contours' from the WASP.

4장 4.4절의 제주지역의 적합한 조도계수 산정 값을 이용하여 벡터의 좌우에 속성값을 입력하여 Fig 3.56와 같은 제주지역 지표면 거칠기 길이 벡터 지도를 생성하였다. Micro-Sitin시 입력데이터의 오차확인은 WASP Map Editor를 이용하여 확인하였다. 이는 Fig 3.55과 같다.

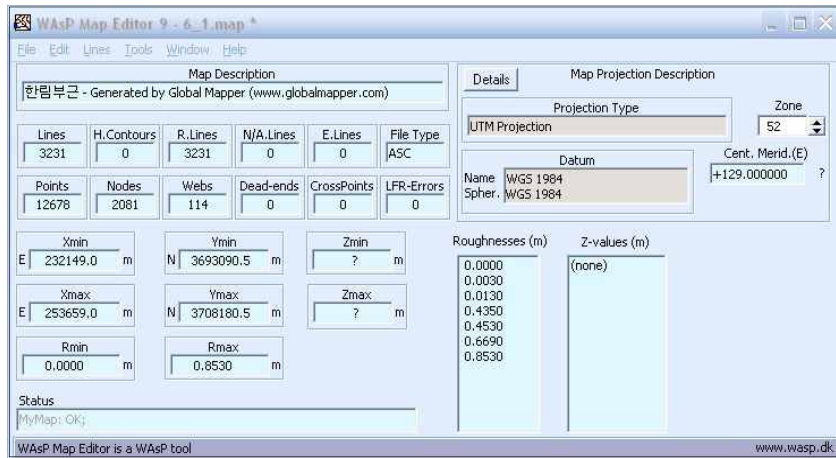


Fig 3.55 Surface roughness map error check.

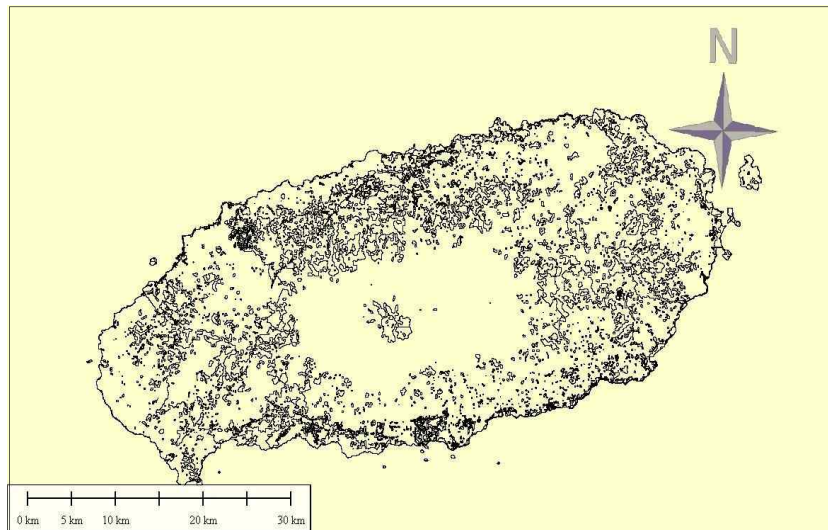


Fig 3.56 Surface roughness vector map of the Jeju Island.

## 4. 풍황 자료 분석

### 4.1 풍황자료 분석의 이론적 배경

#### 4.1.1 극한 풍속 산출 방법

극한풍속(Extreme Wind Speed)는 매년의 최대 풍속을 이용하여 장기간의 극한 풍속을 예측하는 방법이다. 50년 재현 주기의 극한 풍속은 Gumbel Distribution  $V_{ref} = 10 \cdot (V_{ref})^{0.1}$  50년 재현 주기의 10분 평균 풍속을 유추하는 방법으로 허브 높이의 풍속을 계산한 이 후 극한 풍속을 계산하여 얻어진다. 계산 절차는 매년 최대 풍속 데이터로부터 Gumbel Distribution의 파라미터를 구하여 계산 한다. 매년 최대 풍속 데이터의 획득 과정은 Fig 4.1과 같다.

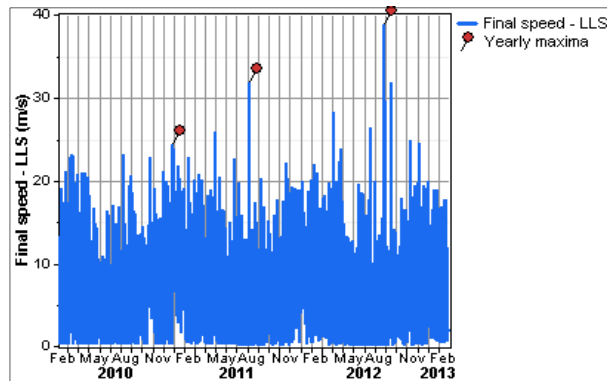


Fig 4.1 Annual maximum wind Speeds.

Gumbel Distribution의 파라미터를 산출하는 과정은 Weibull Distribution의 산출과정과 유사하다. 확률의 모멘트 법(적률)과 최소 제곱근법이 EWTS II 방법 등이 있다.

#### 4.1.2 Gumbel 확률분포의 파라미터 산출 방법

Gumbel Distribution (4-1) . Gumbel Distribution parameter는 Scale parameter는  $\beta$ 와 Mode parameter는  $\mu$ 가 있다.

$$f(x) = \exp\left\{-\exp\left\{\frac{-(x-\mu)}{\beta}\right\}\right\} \times \exp\left\{\frac{-(x-\mu)}{\beta}\right\} \times \frac{1}{\beta} \quad (4-1)$$

Gumbel Distribution (4-2) .

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left\{\frac{-(x-\mu)}{\beta}\right\}\right\} \quad (4-2)$$

재현주기의 변환을 확률적으로 발생하는 현상이 어떤 정해진 값을 넘을 확률을 계산하는 초과확률(Probability of exceedence)와 관계되어진다. Gumbel Distribution은 년별 극한풍속을 대표한다. Gumbel Distribution의 누적분포함수의 임의의 값은 100%에서 그 확률을 뺀다. 년 중 그 확률을 넘을 확률이 되면 그 확률의 역수가 재현주기가 된다. 50년 재현주기는  $50=1/0.02$ 이며 50년 재현주기의 극한 풍속은 식 (4-3)으로 구할 수 있다.

$$V_{ref_{50}} = \mu - \beta \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{50} \right) \right] \quad (4-3)$$

재현 주기에 대한 극한 풍속의 산출 방법은 Fig 4.2와 같다.



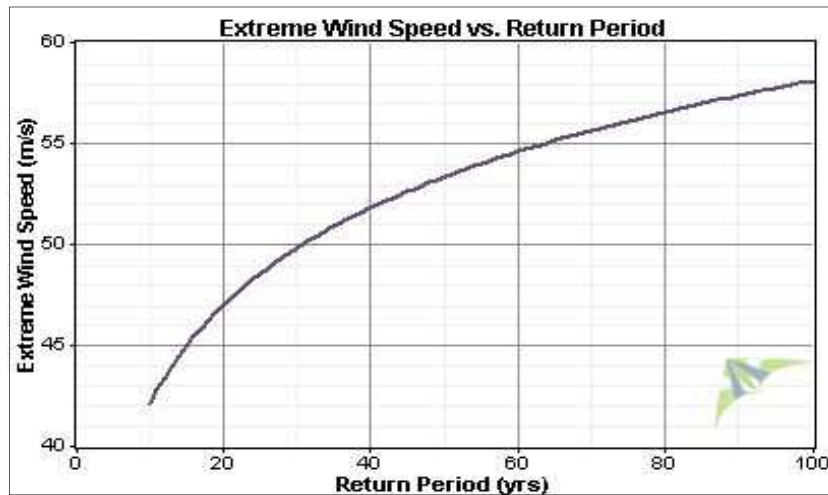


Fig 4.2 Return Period of  $V_{ref}$ .

#### 4.1.2.1 모멘트법

확률의 적률을 이용한 방법은 최대 풍속데이터들의 평균을  $\bar{X}$ 라 하고 표준 편차를  $\sigma_X$ 라 하면 Scale Parameter는  $\beta = (\sigma_X \sqrt{6}) / \pi$ 로 정의 되며 Mode Parameter는  $\mu = \bar{X} - 0.577\beta$ 로 정의 되어 진다.

#### 4.1.2.2 최소제곱근법

매년 최대 풍속 데이터들의 상대도수를 구한 후 이를 누적시킨다. 상대 도수와 누적상대도수를 작성한다. 그 결과는 다음 Fig 4.3과 같다.

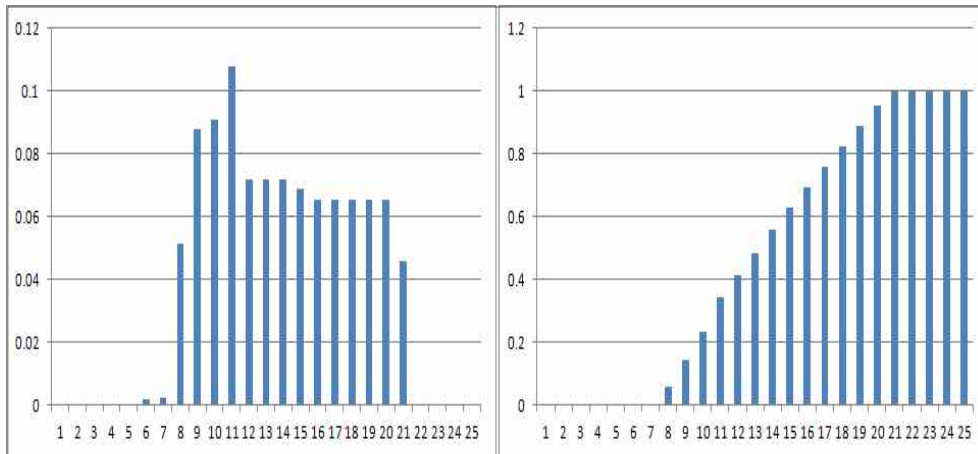


Fig 4.3 Annual maximum wind speed of the relative frequency and cumulative relative frequency.

Y축의 누적상대도수의 각 bin의 해당하는 값을  $-\ln[-\ln F(x)]$ 로 변환하여 한다. Y축에 대응하는 풍속을 X축에 대응시킨 후 최소제곱근법을 이용하여 오차가 최소가 되는 기울기와 절편을 구한 후 Gumbel Distribution의 파라미터인 Scale parameter와 mode parameter 구한다. Gumbel Distribution의 누적분포함수를 구하는 최소제곱근 방식은 식 (4-4)와 같다. 또한 Fig 4.4에 이 개념을 도식하였다.

$$-\ln[-\ln F(x)] = \left(\frac{1}{\beta}\right)x - \frac{\mu}{\beta} \quad (4-4)$$

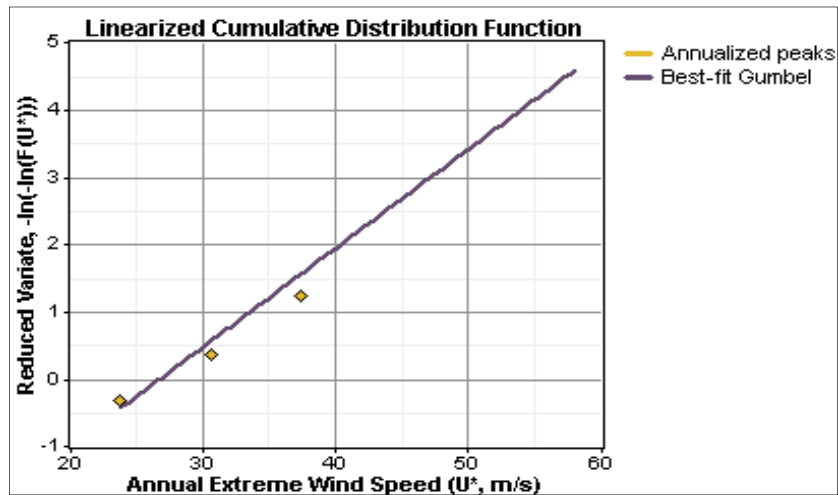


Fig 4.4 Linearized Cumulative Distribution.

하지만 일반적으로 관측된 데이터의 경우 1월 1일을 기준으로 한 년 단위 데이터를 받는 경우는 드물다. 이에 관측 기간을 변경하여 극한 풍속을 산출하는 연구가 진행 되었으며 Harris은, 1996년과 1999년 이 방법에 대한 결과를 발표하였다. 그 결과에 대해 Fig 4.5에 도식 하였다.

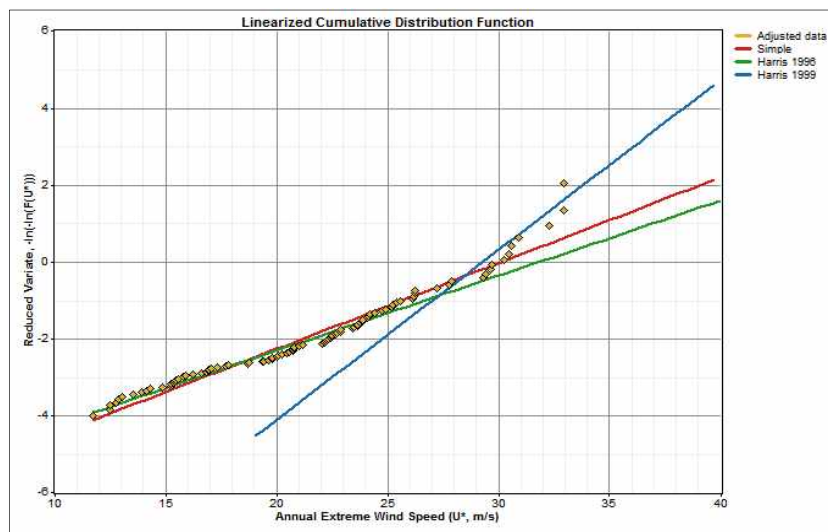


Fig 4.5 Sophisticated Gumbel fit algorithms(Source : windograper manual).

#### 4.1.2.3 EWTS II의 방법

극한 풍속 추정방법에는 EWTS II의 방법이 있다. 이는 ECN에서 99년에 발표된 극한 풍속 추정 방식으로 The European Wind Turbine Standards II, (Dekker and Pierik, 1998) . EWTS II Exact, Gumbel, Davenport이 있다. 이 세 방법은 허브 높이의 Weibull k파라미터를 이용하는 방법이다. Exact방법의 식 (4-5)와 같다.

$$\frac{V_{ref}}{V_{ave}} = \frac{1}{k\Gamma(1+1/k)} \left[ -\ln \left\{ -\exp \left( \frac{\ln(1+1/T_r)}{n} \right) \right\} \right]^{1/k} \quad (4-5)$$

Gumbel (4-6) .

$$\frac{V_{ref}}{V_{ave}} = \frac{(\ln n)^{\frac{1}{k}-1}}{k\Gamma(1+1/k)} [k \ln n - \ln \{-\ln(1-1/T_r)\}] \quad (4-6)$$

Davenport (4-7) ~ (4-9) .

$$\frac{V_{ref}}{V_{ave}} = \frac{(\ln n)^{\frac{1}{k}-1}}{c_1 k \Gamma(1+1/k)} [c_1 c_2 k \ln n - \ln \{-\ln(1-1/T_r)\}] \quad (4-7)$$

$$c_1 = 1 + \frac{k-1}{k \ln n} \quad (4-8)$$

$$c_2 = 1 + \frac{\ln \left[ k \Gamma(1+1/k) (\ln n)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{k \ln n - (k-1)} \quad (4-9)$$

여기서,  $T_r$ 은 재현주기이며 50년 재현 주기일 경우  $T_r$ 은 50이다.

EWTS II의 방법에서 Weibull k에 대한  $V_{ref}/V_{ave}$ 의 값은 Fig 4.6에 도식 하였다.

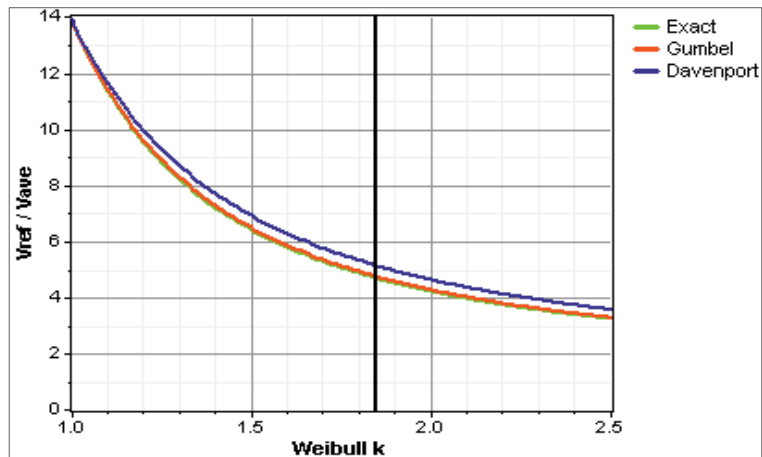


Fig 4.6 EWTS II Method(Source : windograper manual).

### 4.1.3 난류강도

#### 4.1.3.1 난류강도 이론적 배경

(PBL:planetary boundary layer) (ABL:atmospheric boundary layer)은 지면을 둘러싸고 있는 대기층에서 지면 영향을 받는다. 공기층의 움직임은 지면과 가까울수록 지면과의 마찰로 속도가 느려지고, 이 공기층은 바로 위의 공기층에 영향을 미친다. 이와 같이 공기층은 차례로 위에 있는 공기층에 영향을 미쳐 바람의 난류가 발생하게 된다. 보통 고도 1Km이내의 지역을 말하며 그 이상의 지역은 지면에 의한 효과가 없고 풍속이 일정하며 층류의 흐름을 보이는 근중립 경계층이라 한다. 일반적으로 난류는 대기가 불안정하고 지표면이 거칠수록, 또한 풍속이 클수록 강해지며 지표면의 열, 수증기, 공기 밀도가 높을수록 그 세기가 커진다고 알려져 있다.

난류 강도는 평균풍속에 대한표준편차의 비로 정의 되면 풍력의 경우 10분 평균 풍속에 대한 10분 평균의 풍속의 표준편차로 계산되어진다. 난류강도에 대한 식은 (4-10)과 같다.

$$I = \frac{\sigma_i}{U_i} \quad (4-10)$$

여기서  $U_i$ 는 10분 평균풍속을  $\sigma_i$ 는 10분 평균의 표준 편차를 의미한다.

Fig 4.7

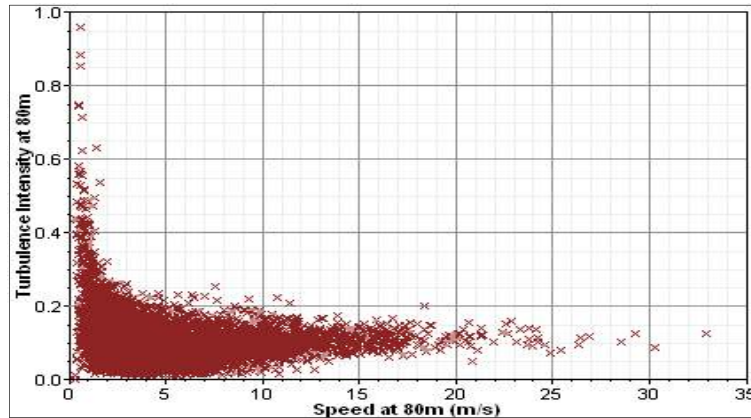


Fig 4.7 The Scatterplot of the Turbulence Intensity  
(Source : windograper manual).

#### 4.1.3.2 IEC 61400-1의 난류강도

난류는 풍력발전시스템에 있어 순간적으로 하중의 변화를 유발하며 결국 풍력발전시스템의 피로에 영향을 미치고 결국 기대수명을 줄어지게 한다. 그 중 IEC 61400-1에서 하중분석(DLC : Design Load Case) 분석요소 중 풍력터빈의 피로 하중을 나타내는 주요 파라미터는 난류 및 풍속 극한 풍속 등이 있다. IEC (International Electro-technical Commission) 국제전기기술위원회는 전기 기술에 관한 표준을 국제적 통일과 조정을 목적으로 설립된 기구로서 풍력발전에 대한 국제규정을 제정한다. 그 중 IEC 61400-1 “Wind Turbine Design Requirement”는 풍력발전에 관한 사항을 규정하고 있다. 풍력발전단지의 경우 설치 사이트에 따라 풍속의 세기와 난류강도의 정도가 다르게 되며 이에 따라 풍력발전시스템의 난류에 대한 파라미터를 정의하고 있다. 그 기준은 Table 4.1과 Table 4.2에

나타내었다.

Table 4.1 Turbulence Categories defined in IEC 61400-1 2nd Edition

Category	Characteristic TI at 15 m/s
S	> 0.18
A	0.16-0.18
B	0-0.16

Table 4.2 Turbulence Categories defined in IEC 61400-1 3rd Edition

Category	Mean TI at 15 m/s
S	> 0.16
A	0.14-0.16
B	0.12-0.14
C	0-0.12

풍력발전에서의 난류강도는 15m/s의 값을 이용하여 난류강도의 평균에 표준편차를 이용하여 계산하게 된다. 특히 IEC 61400-1에서는 난류분포는 정규분포 형태를 따른다고 가정하여 정규 분포의 표준화 정리를 이용하여 산출하게 된다. 그 식은 (4-11)와 같다.

$$I = \mu + \sigma \times Z \quad (4-11)$$

여기서,  $\mu$ 는 관측된 각 10분들의 난류강도들의 평균이며  $\sigma$ 는 관측된 각 10분들의 난류강도들의 표준편차를  $Z$ 는 표준화 확률변수를 의미한다. IEC 61400-1 2<sup>nd</sup> Edition에서는 84% 백분위수 일 때를 IEC 61400-1 3<sup>rd</sup> Edition에서는 90% 백분위수일 때의 난류강도를 요구한다. IEC 61400-1 2<sup>nd</sup> Edition에서는  $\sigma \times Z$  대신에 0.0113을 더하면 되고 IEC 61400-1 3<sup>rd</sup> Edition에서  $Z$ 는 1.28이다. 일반적으로 풍속의 증가하면 감소하는 영향을 보인다고 알려져 있다. Fig 4.8과 Fig 4.9에 IEC 61400-1 2<sup>nd</sup> Edition IEC 61400-1 3<sup>rd</sup> Edition의 풍속별 난류강도의 등급별 범위를 보여주고 있다.

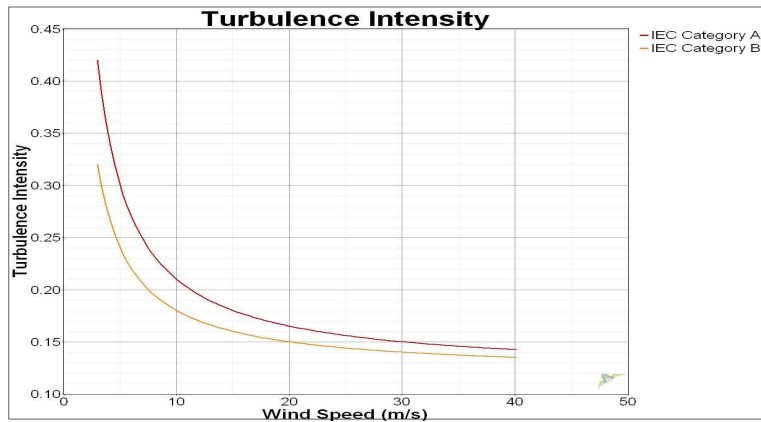


Fig 4.8 IEC standard 61400-1 2nd Edition Turbulence Intensity categories(Source : windograper manual).

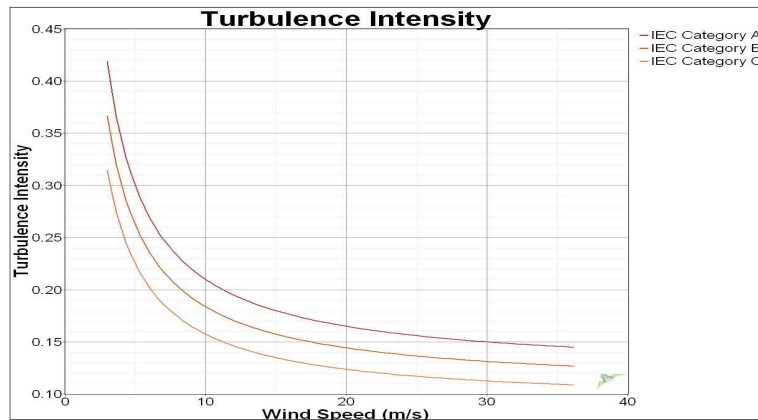


Fig 4.9 IEC standard 61400-1 3rd Edition Turbulence Intensity categories(Source : windograper manual).

IEC 61400-1 2<sup>nd</sup> Edition의 경우 허브높이에서의 표준편차의 경우 식 (4-12)에 의하여 구할 수 있다.

$$\sigma_1 = I_{15} \frac{15m/s + a \overline{V_{hub}}}{a + 1} \quad (4-12)$$

#### 4.1.4. 풍속의 확률분포

풍속의 확률분포는 Weibull Distribution 혹은 Rayleigh Distribution 따른다고



알려져 있다. Rayleigh Distribution는 Weibull Distribution의 형상 계수 k가 2인 경우이다. 풍속의 확률분포의 산출은 구간에 따른 연간 풍속 시간을 예측하여 전력생산량을 예측하기 위함이다.

#### 4.1.4.1 Rayleigh 확률분포

개별 데이터의 분산 혹은 2차 모멘트를  $V_{rms}$  (the root-mean-squared)만 산출하면 Rayleigh 확률분포를 계산 할 수 있으며 Weibull 확률분포의 특수한 경우 (k=2) .  $V_{rms}$ 를 이용하여 레일리 분포를 다시 정의 하면 식(4-13) ~ 식(4-14)과 같다.

$$f(v) = \begin{cases} \frac{2v}{V_{rms}^2} \exp\left(-\left(\frac{v}{V_{rms}}\right)^2\right) & v \geq 0 \\ 0 & v < 0 \end{cases} \quad (4-13)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (4-14)$$

#### 4.1.4.2 Weibull 확률분포

전통적으로 풍속의 확률분포는 Weibull Distribution을 따른다고 알려져 있고 풍황 관련 연구에서 가장 많이 활용되고 있다. Weibull Distribution의 정의는 식(4-15) .

$$f(V) = \begin{cases} 0 & V < 0 \\ \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) & V \geq 0 \end{cases} \quad (4-15)$$

$k > 0, c > 1$

, k : (shape parameter : unitless), c : (scale parameter : m/s)이다. 풍속의 Weibull 계수의 결정 방법은 적률(모멘트법)을 이용한 방법, 최소제곱근을 이용한 방법, WAsP 알고리즘을 이용한 방법 등이 있다.

#### 4.1.4.3 Weibull 확률분포의 파라미터 산출 방법

##### 4.1.4.3.1 모멘트법을 이용한 Weibull 변수 구하기

확률에서의 모멘트(적률)는 다음과 같이 정의가 되어 진다. 확률변수 X의 n차 moment (4-16) .

$$E[X^n] = \int_{-\infty}^{\infty} x^n f_x(x) dx \quad (4-16)$$

n차 적률에 대하여 1차 적률은 그 확률변수의 평균(mean)이라고 하고 2차 적률은 mean square value라고 한다. 위의 적률 식은 X의 n차 원점 적률(moment about origin) (Central Moment)라 한다. 2차 중심적률을 분산이라고 하며 3차 중심적률은 분포가 어느 한쪽으로 치우친 정도를 나타내는 왜도(skewness) 4차 중심적률을 분포의 모양의 뾰족한 정도를 나타내는 첨도(kurtosis)라고 한다. 모멘트를 이용한 방법은 Weibull Distribution의 평균을 감마함수를 이용하여 계산할 수 있다. 계산과정은 식(4-16)와 같으며 이를 이용하여 Weibull 계수의 결정식은 식(4-18)과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \int_0^{\infty} V \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) dV \\ &= \int_0^{\infty} \frac{k}{c} V \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \left\{ \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) dV \right\} \end{aligned}$$

$$= \int_0^{\infty} \left(\frac{V}{c}\right)^{1/k} = CT \left(1 + \frac{1}{K}\right), 1 + \frac{1}{K} > 0 \quad (4-17)$$

$$k = (\sigma/\bar{V})^{-1.086}, \quad C = \bar{V}/\Gamma(1+1/k) \quad (4-18)$$

#### 4.1.4.3.2 최소제곱근법을 이용한 Weibull 변수 구하기

이 방법을 LN-least법이라고도 한다. 이 방법은 관측된 데이터로 부터 상대 도수를 구하고 누적 확률분포를 만든 다음 그 확률을  $\text{Ln}[-\text{Ln}(1-F(V))]$ 을 구하고 풍속에 대하여 자연로그를 ( $\text{Ln}(V)$ ) 취하면 다음의 식을 얻을 수 있다. 풀이과정은 식(4-19)과 식(4-20)과 같다.

$$x_i = \text{Ln } V_i \quad (4-19)$$

$$y_i = \text{Ln}[-\text{Ln}(1-F(V))] \quad (4-20)$$

관측된 데이터로 부터 상대 도수를 구하고 누적 확률분포를 만든 다음 그 확률을  $\text{Ln}(-\text{Ln}F(V))$  ( $\text{Ln}(V)$  취하면 두 변수는 최소제곱근 적 선형문제가 되면 이를 최소화 하는 a, b를 구하는 문제가 된다. 최소제곱근의 풀이 과정은 다음과 같다. Weibull 계수의 결정식은 식(4-21)과 같다.

$$y = ax + b$$

$$y_i = ax_i + b$$

$$y_i - ax_i - b = \varepsilon_i$$

$$\Sigma \varepsilon_i^2 = \Sigma (y_i - ax_i - b)^2$$

$$= \Sigma (y_i^2 - 2ax_i y_i + 2abx_i - 2by_i + b^2 + a^2 x_i^2)$$

$$\frac{\partial \Sigma \varepsilon_i^2}{\partial a} = \Sigma (-2x_i y_i + 2bx_i + 2ax_i^2) = 0$$

$$\frac{\partial \Sigma \varepsilon_i^2}{\partial b} = \Sigma (2ax_i - 2y_i + 2b) = 0$$

$$\begin{aligned}
& -2\Sigma x_i y_i + 2b\Sigma x_i + 2a\Sigma x_i^2 = 0 \\
& 2a\Sigma x_i - 2\Sigma y_i + 2Nb = 0 \\
& -\Sigma x_i y_i + b\Sigma x_i + a\Sigma x_i^2 = 0 \\
& a\Sigma x_i - \Sigma y_i + Nb = 0 \\
& b = \frac{\Sigma y_i - a\Sigma x_i}{N} \\
& -\Sigma x_i y_i + \left(\frac{\Sigma y_i - a\Sigma x_i}{N}\right)\Sigma x_i + a\Sigma x_i^2 = 0 \\
& -\Sigma x_i y_i + \frac{\Sigma x_i \Sigma y_i}{N} - \frac{a\Sigma x_i \Sigma x_i}{N} + a\Sigma x_i^2 = 0 \\
& a\left(\frac{\Sigma x_i \Sigma x_i}{N} - \Sigma x_i^2\right) = -\Sigma x_i y_i + \frac{\Sigma x_i \Sigma y_i}{N} \\
& a = \frac{\frac{\Sigma x_i \Sigma y_i}{N} - \Sigma x_i y_i}{\frac{\Sigma x_i \Sigma x_i}{N} - \Sigma x_i^2} \\
& C = \exp(-a/b) \\
& k = b
\end{aligned} \tag{4-21}$$

#### 4.1.4.3.3 WASP 알고리즘을 이용한 Weibull 변수 구하기

평균 풍력에너지 밀도를 이용하여 계산하는 방법이다. 공기밀도가 일정하다고 가정하였을 때, Weibull Distribution를 따른다면 공식을 이용한 평균 풍력에너지 밀도(mean power density (WPD))는 다음 식(2-22)과 같이 정의 할 수 있다.

$$WPD = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right) \tag{2-22}$$

실관측 된 데이터로부터 WPD를 구하면 식(2-23) 과 같다.

$$WPD = \frac{1}{2N} \rho \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (2-23)$$

식(2-10)과 식(2-11)을 이용하여 식(2-24)을 유도할 수 있다.

$$c = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^3}{N \Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right)}} \quad (2-24)$$

누적확률을 이용하여 평균의 확률을 이용하면 다음의 식(2-25)을 얻을 수 있다.

$$-\ln(1 - F(\bar{U})) = \left( \frac{\bar{U}}{\sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^3}{N \Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right)}}} \right)^k \quad (2-25)$$

식(2-12)와 식(2-13)이 최소가 되는 c와 k를 구하면 된다.

#### 4.1.4.3.4 Maximum Likelihood Algorithm을 이용한 Weibull 변수 구하기

Stevens and Smulders (1979) . (4-26), (4-27) .

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^N U_i^k \ln(U_i)}{\sum_{i=1}^N U_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N U_i^k}{N} \right) \quad (4-26)$$

$$c = \left( \frac{\sum_{i=1}^N U_i^k}{N} \right)^{1/k} \quad (4-27)$$

#### 4.1.5 Wind Shear 분석

역학적으로 대류권을 구분하면, 대기경계층(atmospheric boundary layer)과 자유대기(free atmosphere)로 구분할 수 있고, 또 대기경계층은 접지층(surface boundary layer) (Ekman boundary layer) . Fig 4.10

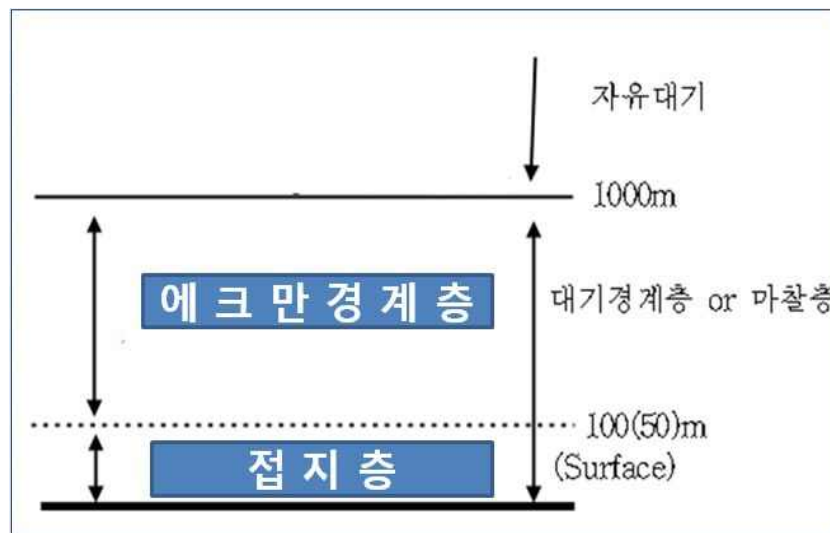


Fig 4.10 Atmospheric boundary layer.

(PBL:planetary boundary layer) (ABL : atmospheric boundary layer) 이라고 하며, 지면을 둘러싸고 있는 대기층에서 지면의 영향을 직접 받는 부분이다. 공기층의 움직임은 지면과 가까울수록 지면과의 마찰로 속도가 느려지고, 이 공기층은 바로 위의 공기층에 영향을 미친다. 이와 같이 공기층은 차례로 위에 있는 공기층에 영향을 미쳐 바람의 난류가 생기

는데, 난류가 생기지 않으면 지면의 마찰 영향력은 높이가 2m밖에 안되지만, 일단 난류가 생기면 그 영향력은 수백 m에서 수 km 높이에까지 이른다.(S. PAL ARYA, 미기상학 개론) 이와 같은 영향이 나타나는 대기층을 대기경계층이라 한다. 기압차에 의하여 바람이 발생 되었을 경우에도 지표면은 움직임이 없게 된다. 이런 지표면의 영향과 유체에 점성에 의하여 고도별 풍속이 차가 발생하게 되는데 이를 Wind Shear란 한다. 즉, Wind Shear란 지표면 위의 고도에 따른 풍속 변화를 말하며 Wind shear profile이라고도 말한다. 이런 고도에 따른 풍속의 변화에 대한 수학적 모델링 방법은 대수법칙(logarithmic profile (log law))과 멱법칙(power law profile (power law))이 있다. 이러한 수학적 방법을 이용한 Wind Shear 모델링을 제시하기 위해서는 최소한 지표면 위 높이가 다른 풍속 센서에서 관측된 두 개 이상 자료를 가지고 있어야 한다.

대수법칙과 멱법칙의 파라미터는 지형 피복 상태와 많은 상관성을 가지고 있다. 일반적으로 풍력발전 단지의 유효성 조사시 기상청의 AWS자료나 주변의 풍황탑 자료를 이용하여 풍력자원을 평가하고 개발 계획 사이트의 대표되는 지역에 풍황탑을 설치하게 된다. AWS는 보통 지표면에서 10m 지점에만 풍향계와 풍속계가 존재한다. 이 데이터를 이용하여 풍력발전시스템의 허브 높이의 풍속을 예측하게 된다. 이 때, 대수법칙과 멱법칙의 파라미터의 지표면 거칠기 길이와 멱지수가 이용된다. 또한 풍력발전 개발 예정지의 풍황탑을 가지고 주변의 풍황 상황을 예측하는 데도 이 조도계수(지표면 거칠기 길이와 멱지수)를 이용하게 된다. 지면조도계수의 경우 “제주도 풍력발전단지 설계를 위한 조도계수 산정에 대한 연구”(고정우, 2012)에서 나타난 결과와 같이 위도의 차이와 지형적인 영향으로 인하여 그 지역마다 차이를 보이고 있다. 국내의 경우 일반적으로 지면조도의 경우 일반적으로 WindPRO 매뉴얼을 참고하여 거칠기 값을 정의 하고 있다(Oh Hyun-Seok, 2009). 해외의 경우 지형적인 영향에 의한 조도 계수 값의 범위에 대해서는 예정지 주변의 풍황탑 데이터를 바탕으로 주변의 조도계수 값들이 정리 되어 있다. 유럽의 경우 “The guideline for assigning roughness length value” (European Wind Atlas, 1989) 발표 등 예정지역에 맞는 지면 조도의 값을 이용하고 있다. 이에 본 연구에서는 제주 전역에 설치되어 있었거나 운영 중

인 Met-mast 데이터를 이용하여 제주지역에 적합한 지면 조도 계수 값을 구하였다.

#### 4.1.5.1 (Logarithmic profile using Karman's constant)

(4-28)

$$V_z = V_h \left( \ln \frac{z}{z_0} / \ln \frac{h}{z_0} \right) \quad (4-28)$$

여기서  $V_z, V_h$ 는 지상에서 부터의  $z$  및  $h$ 에서의 풍속이고  $z_0$ 는 조도 길이이다.

Fig 4.11은 오른쪽 그림은 관측된 풍속데이터와 그에 대응하는 고도에 대하여 자연로그를 취해 풍속과 고도를 선형화 시킨다. 그 후 선형 최소 제곱근법을 이용하여 절편을 구한 후 자연로그를 풀어 주면 대수법칙의 지표면 조도 길이 (Roughness length)를 구할 수 있다. Fig 4.11의 왼쪽 그림은 높이별 풍속에 대한 관측치와 대수법칙을 예측치를 보여 주고 있다.

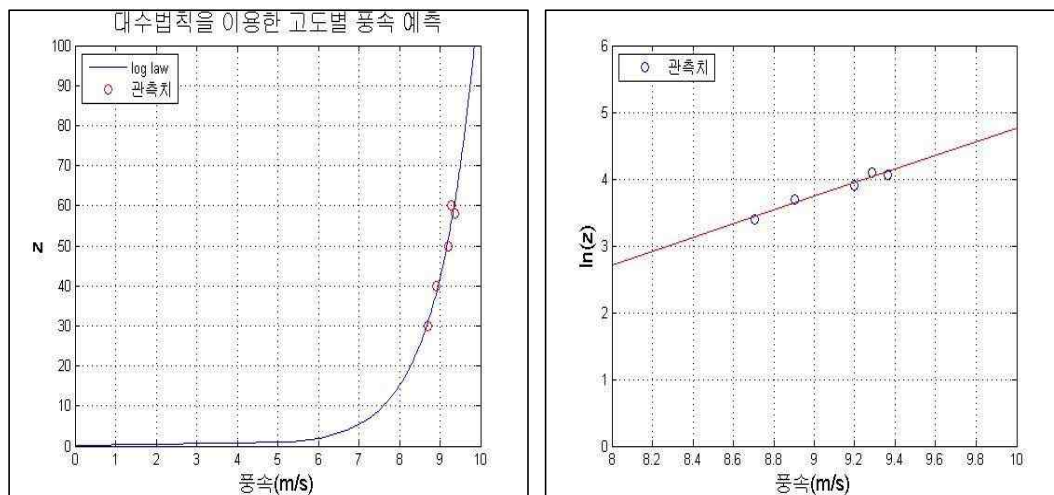


Fig 4.11 A linear least squares algorithm for Log Law.



Fig 4.11에 설명된 지표면 조도 길이(Roughness length)를 공식으로 나타내면 식 (4-29)

$$b = \frac{\sum \ln(z)_i - a \sum v_i}{N}, z_0 = \exp(b) \quad (4-29)$$

여기서 N은 관측 높이의 계수이며 a는 높이에 자연로그를 취하였을 때 오차를 최소화한 기울기이며 b는 그 기울기가 X축과 만나는 지점의 Y값이다. 즉 b는 다시 말해 풍속이 0이 되는 지점을  $\ln(z)$ 값을 의미하며  $\ln(z)$ 값을 풀어 주면 그 값이 지표면 조도 길이 값이 된다.

#### 4.1.5.2. (Power Law)

아래의 (4-30) 식은 멱법칙을 나타내는 식이다.

$$V_z = V_h \left( \frac{z}{h} \right)^{1/n} \quad (4-30)$$

여기서  $V_z, V_h$ 는 지상에서 부터의 z 및 h에서의 풍속이고 n은 멱지수이다.

Fig 4.12은 오른쪽 그림은 관측된 풍속데이터와 그에 대응하는 고도에 대하여 각각 자연로그를 취해 풍속과 고도를 선형화 시킨다. 그 후 선형 최소 제곱근법을 이용하여 기울기를 계산하면 멱지수를 구할 수 있다. Fig 4.12의 왼쪽 그림은 높이별 풍속에 대한 관측치와 멱법칙을 이용한 예측치를 보여 주고 있다.

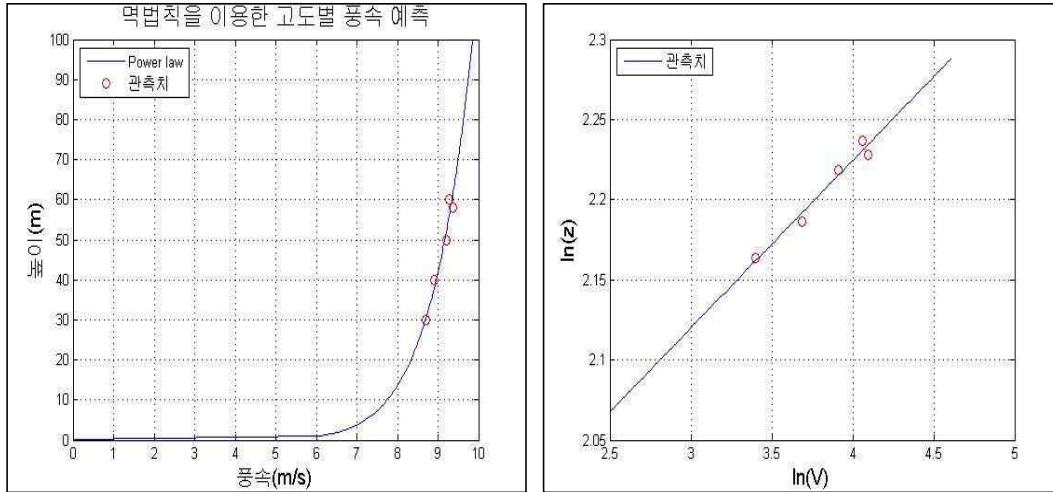


Fig 4.12 A linear least squares algorithm for Power Law.

Fig 4.12에 설명된 멩지수를 구하는 공식은 식(4-31)와 식(4-32)와 같다. 식 (4-31)는 높이별 풍속과 고도를 입력하여 최소제곱근 풀이를 이용하여 기울기를 구한다. 이 기울기의 역수가 식(4-32)와 같이 멩지수를 구하는 공식이다.

$$a = \frac{\frac{\sum \ln(v)_i \sum \ln(z)_i}{N} - \sum \ln(z)_i \ln(z)_i}{\frac{\sum \ln(v)_i \sum \ln(v)_i}{N} - \sum \ln(z)_i^2} \quad (4-31)$$

식에 따라 멩지수  $n$ 으로 나타내기도 하고  $a$ 로 나타내기도 하는데  $n$ 과  $a$ 의 관계는 아래와 같다.

$$1/n = \alpha = a \quad (4-32)$$

#### 4.1.2. 대기경계층의 일변화

대기의 온도와 지표면의 온도 차이로 인해 시간에 따라 대기가 연직적 상승 혹은 하강을 하면서 흐름이 발생한다. 이를 대기의 안정도라고 한다. Wind Shear의 대수멩칙이나 멩법칙이 임의 고도에 대한 풍속 예측은 기온감률과 단열 감률이 같아 공기 덩어리의 상승 또는 하강이 일어나지 않는 중립상태일 경우에

정확하다고 말할 수 있다. 대기층의 일변화에 의한 높이별 풍속변화는 Fig 4.13과 Fig 4.14에 도식하였다.

맑은 날 낮의 경우 : 지표면의 태양 가열에 반응 → 지표 위의 공기를 상대적으로 가열 → 플룸, 열기포, 먼지 회오리와 같은 다양한 대류 순환 발생 → 직접 연직 방향으로 운동량과 열 전달 → 부력 발생 난류를 발생 → 운동량의 활발한 혼합 → PLB 내의 평균 바람 시어 약화 또는 평균 바람 시어의 제거 ⇒ 주간 대류 경계층의 많은 부분에서 거의 균일한 풍속과 풍향

맑은 날의 저녁과 밤의 경우 : 지표면의 장파 복사에 반응 → 지표 냉각 → 접지 역전 형성, 발달 → 부력은 역전층 내의 연직 운동량 교환 억제 → 이 역전층 내에서는 풍속과 풍향 시어가 뚜렷함

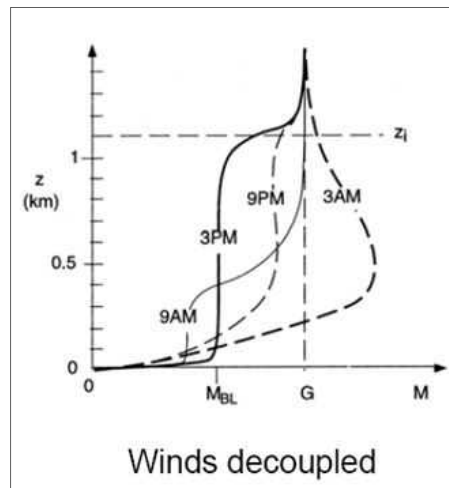


Fig 4.13 Hourly Wind Shear\_1.

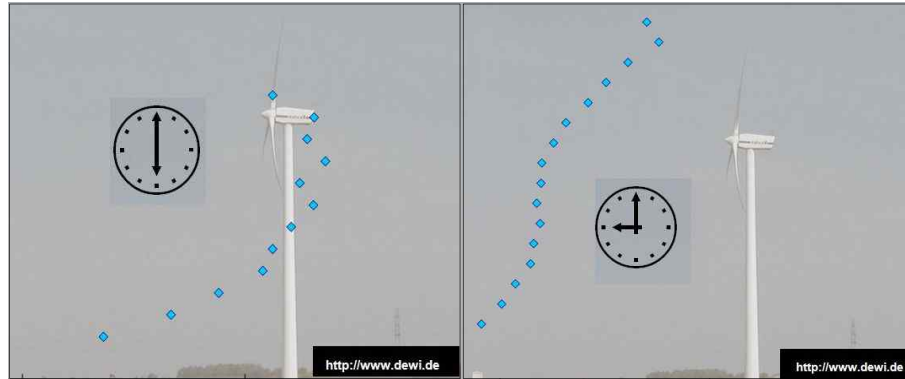


Fig 4.14 Hourly Wind Shear\_2.

#### 4.1.6 Wind Rose

풍향이 시시각각으로 바뀔 때 빈도가 가장 높은 바람의 방향을 주풍향 (prevailing wind)이라고 한다. 바람장미(wind rose)는 시시각각으로 방향이 변하는 바람에 대해 각각의 방향에 대한 백분율을 나타냄으로써, 주풍향을 표현하는 한 가지 방법이다. Wind Rose는 Frequency by Direction(방향별 출현빈도), Mean value by direction(방향별 평균 풍속), Total energy by direction(방향별 풍력에너지 밀도)을 주로 확인한다. 이 주풍향에 풍력발전시스템의 수직 배열이 전력생산량을 최대로 얻을 수 있는 풍력발전시스템의 배치 방법 된다.

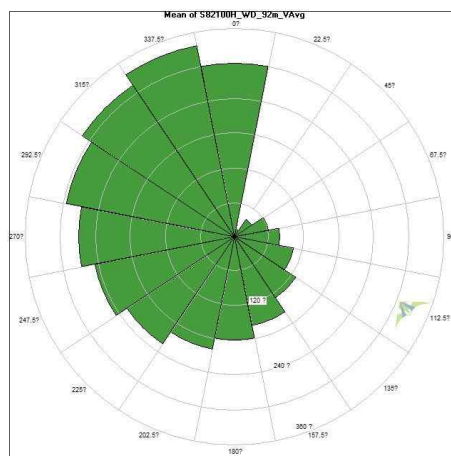


Fig 4.15 Frequency by direction.

Fig 4.15에서는 방향별 출현빈도 Fig 4.16에서는 방향별 풍력에너지 밀도를 도식하였다.

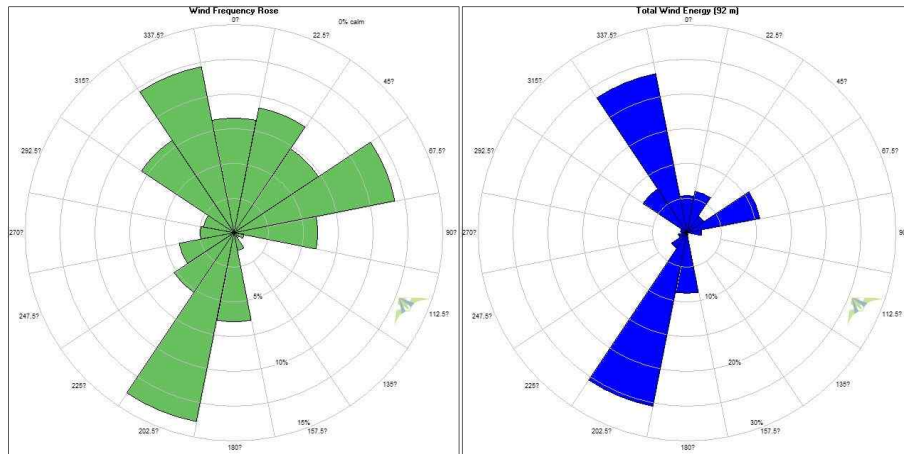


Fig 4.16 Wind Speed and Total Energy Available for Direction.

일반적으로 Frequency by Direction, Total energy by direction이 강하게 나타나는 곳이 주풍향의 방향과 유사한 방향이다. Micro-siting프로그램에서 Frequency by Direction, Total energy by direction의 주방향을 기준으로 좌우각도를 조절하며 단지 배치를 해보면서 효율이 제일 큰 방향이 주방향을 결정하게 된다.

#### 4.2 제주 북동부 지역의 풍황 특성

제주 북동부 지역의 풍황 특성을 검토하기 위해 사용된 AWS와 Met-mast의 위치는 Table 4.3과 Fig 4.17에 나타내었으며 관측 센서와 고도에 대한 정보는 Table 4.4 .

Table 4.3 Met-mast and AWS Location in the northeast Jeju Island

Name	Location		Elevation
Handong Met-mast	33° 32' 26.0459" N	126° 50' 9.8711" E	5m
Pyeongdae Met-mast	33° 31' 55.7335" N	126° 50' 52.1728" E	19m
Udo Met-mast	33° 31' 14" N	126° 57' 24" E	20m
Udo AWS	33° 30' 23.438" N	126° 57' 12.101" E	39.43m
Kujwa AWS	33° 31' 21.401" N	126° 51' 06.714" E	25.3m

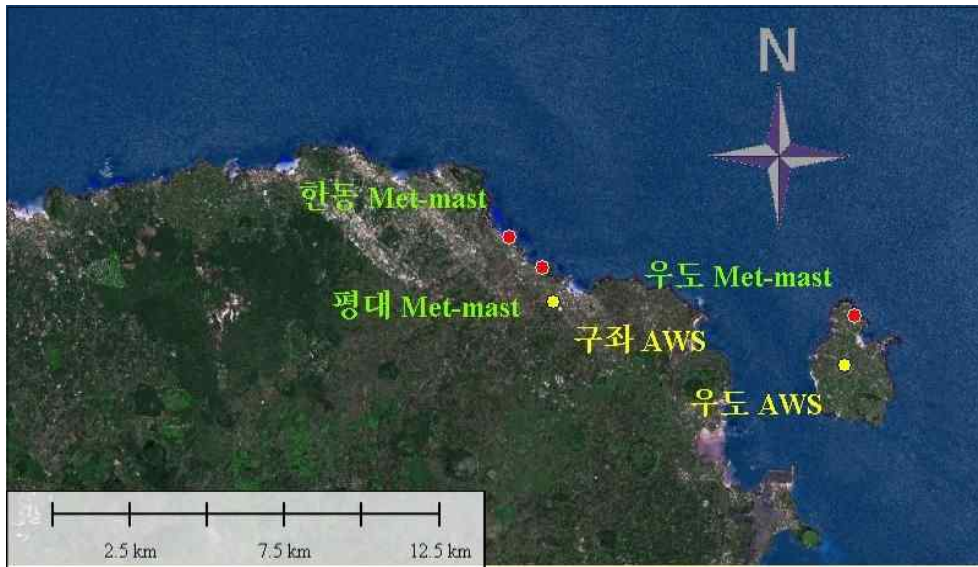


Fig 4.17 Met-mast & AWS location in the northeast Jeju Island.

Table 4.4 Met-mast and AWS Description

Name	Anemometer Height	Anemoscope Height	Measurement duration
Handong Met-mast	60m, 50m, 40m, 30m, 10m	60m, 40m, 10m	2010. 12. 20 ~ 2012. 12. 31
Pyeongdae Met-mast	60m, 50m, 40m, 30m	60m, 40m	2010. 02. 06 ~ 2011. 07. 03
Udo Met-mast	60m, 50m, 40m, 30m	60m, 40m	2010. 04. 30 ~ 2011. 07. 03
Udo AWS	10m	10m	2010. 01. 01 ~ 2012. 12. 31
Kujwa AWS	10m	10m	2010. 01. 01 ~ 2012. 12. 31

#### 4.2.1 제주 북동부 지역의 Wind Rose 분석

Table 4.5에서는 연구대상지역의 풍향계의 방향을 16개 방향으로 나누어 출현율을 나타내었다. 16개 방향별 출현율을 파악하였을 때 주로 제주북동부 지역은 주방향이 북서풍을 보이고 있었으며 고도가 높아질수록 시계 방향의 회전영향을 받고 있었다. 이는 코리올리 힘에 의한 영향이라 생각된다. Table 4.6에서는 연구대상지역을 16개 방향별로 나누어 풍력에너지 밀도의 분포율을 나타내었다.

Table 4.5 Wind Frequency Rose in the northeast Jeju Island

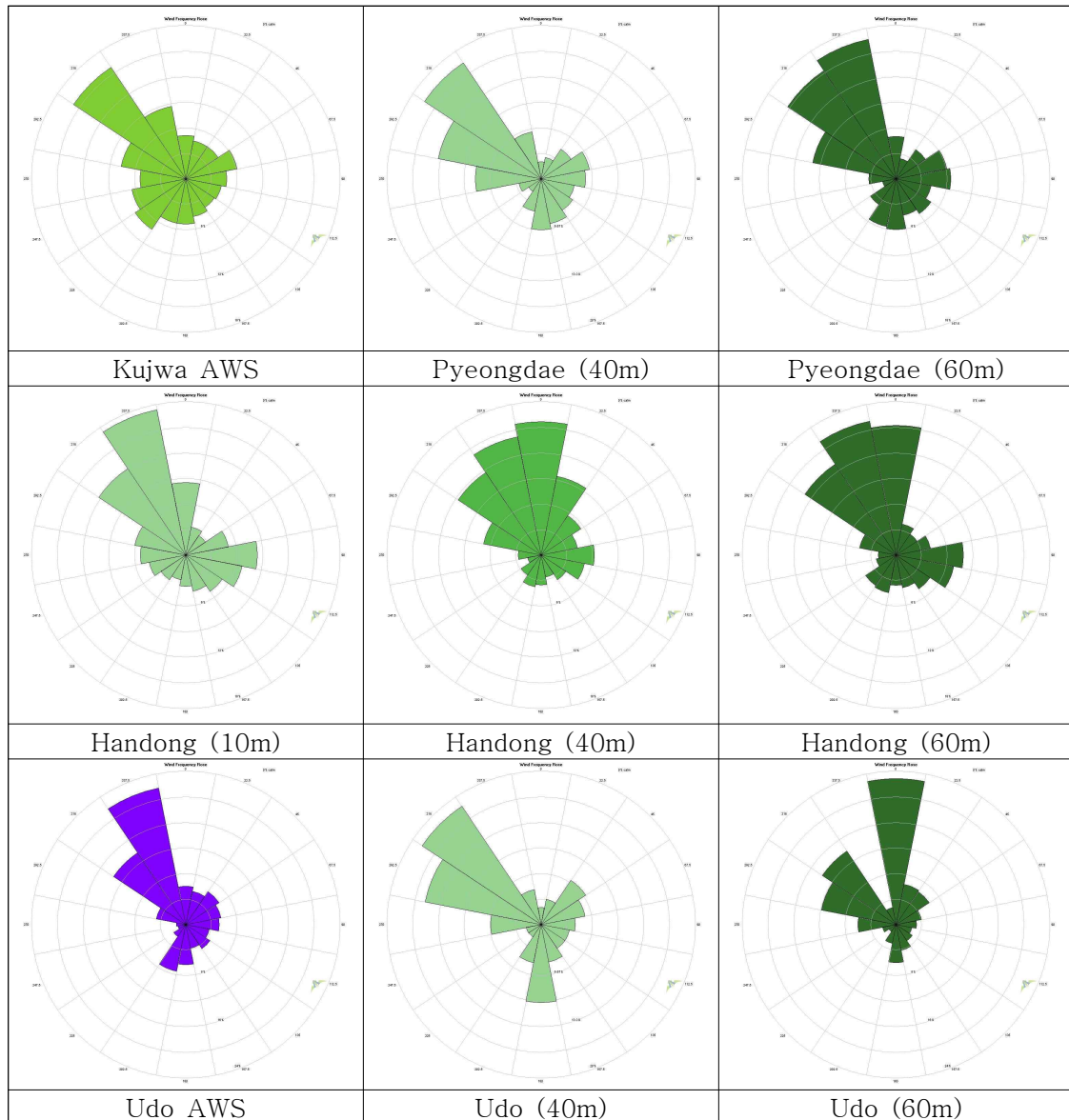
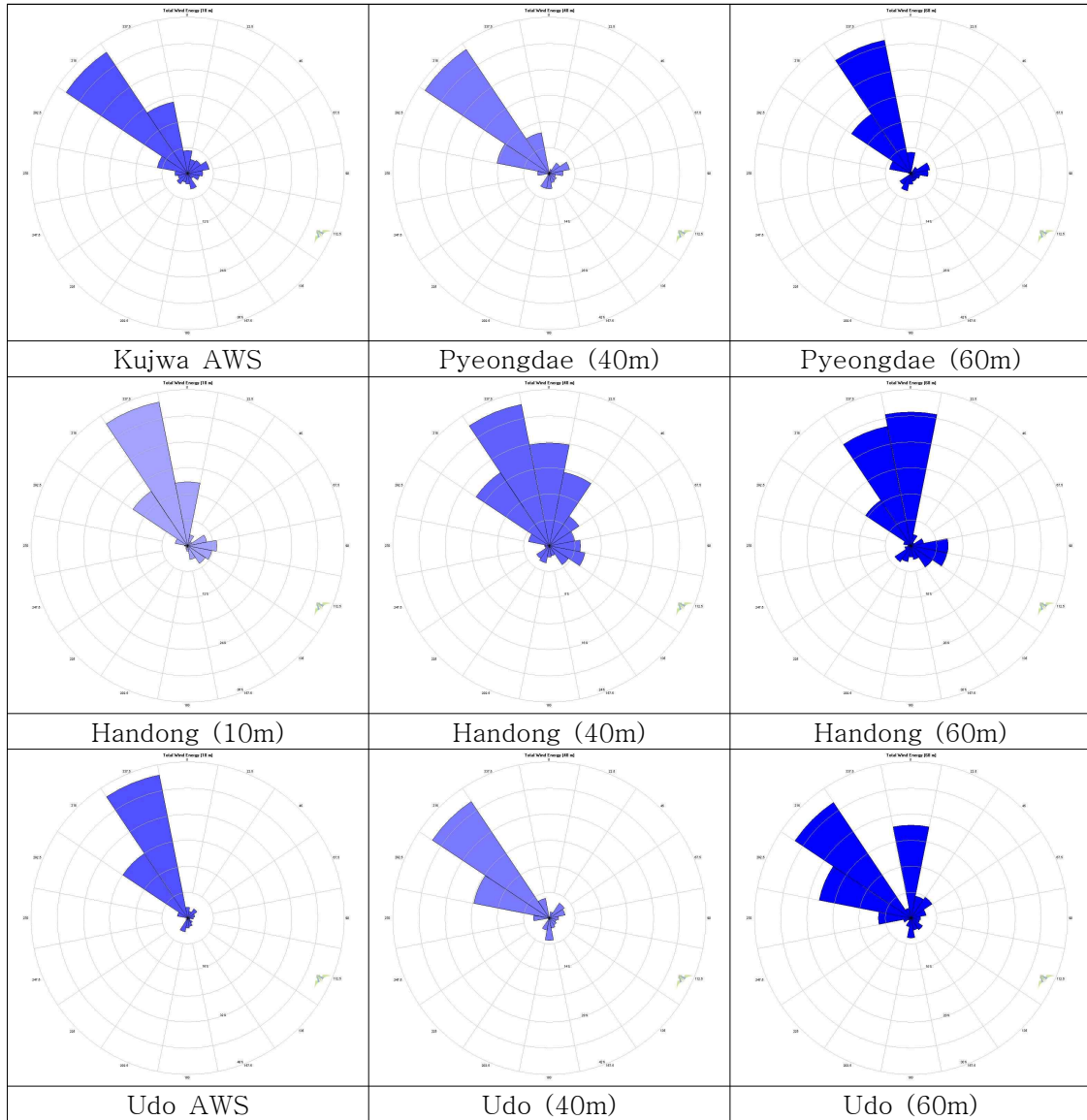


Table 4.6 Total Wind Energy in the northeast Jeju Island



16개 방향별 풍력에너지 밀도의 분포를 방향별 출현율과 같이 복서풍을 보이고 있었다. 또한 방향별 출현율과 같이 고도가 높아질수록 시계 방향의 회전영향을 받고 있었다. 하지만 주방향은 방향별 출현율 보다는 반시계 방향으로 약간의 회전이 있음을 알 수 있었다. 하지만 미기상에서의 지구자전에 의한 풍향의 변화는 높이별로 무시 하는 가정의 타당성을 확인 할 수 있었다.



#### 4.2.2 제주 북동부 지역의 Weibull 확률분포의 특성

Table 4.7에서 Table 4.10까지는 평대지역의 고도 30m에서 60m까지의 풍속의 확률분포 특성을 보여 주고 있다. 데이터에서 보여 지듯이 Maximum likelihood Algorithm, 최소제곱근을 이용한 방법, WAsP Algorithm 모두 높은 상관성을 보여 주고 있다.

Table 4.7 Wind Speed Distribution Analysis of Pyeongdae in 30m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.94	8.584	7.612	532.4	0.99107
Least squares	1.855	8.659	7.69	576.1	0.98933
WAsP	2.017	8.651	7.666	522.5	0.9897
Actual data			7.632	522.5	

Table 4.8 Wind Speed Distribution Analysis of Pyeongdae in 40m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.978	8.933	7.919	587.3	0.99288
Least squares	1.9	8.999	7.985	628.1	0.9915
WAsP	2.053	9.004	7.977	578.7	0.99142
Actual data			7.935	578.7	

Table 4.9 Wind Speed Distribution Analysis of Pyeongdae in 50m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.987	9.123	8.086	622.3	0.99141
Least squares	1.903	9.189	8.153	667.4	0.99008
WAsP	2.056	9.185	8.136	613.2	0.99016
Actual data			8.101	613.1	

Table 4.10 Wind Speed Distribution Analysis of Pyeongdae in 60m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	2.008	9.348	8.284	662.4	0.99076
Least squares	1.921	9.416	8.353	710.5	0.98963
WAsP	2.141	9.502	8.415	653.3	0.98621
Actual data			8.299	653.3	

Table 4.11은 평대 지역의 연구 대상 지역인 평대 지역의 관측된 풍속의 상대도수와 Maximum likelihood Algorithm, 최소제곱근을 이용한 방법, WAsP 알고리즘을 이용한 방법으로 구한 Weibull 확률분포들을 보여주고 있다.

Table 4.11 Wind Speed Frequency Distribution of Pyeongdae

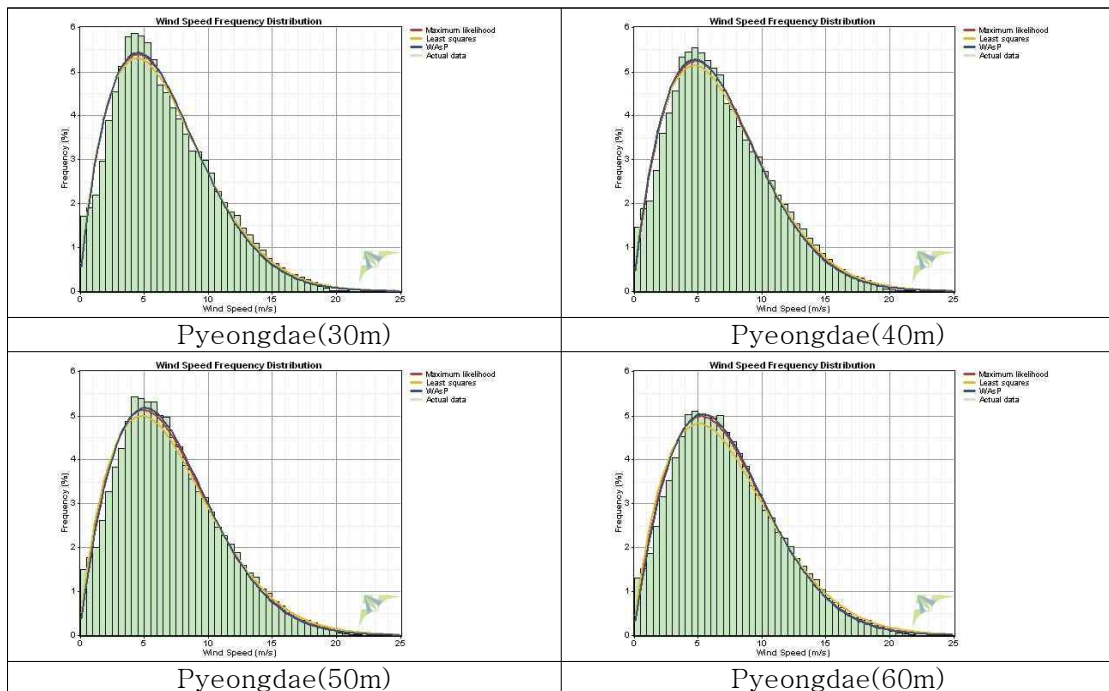


Table 4.12에서 Table 4.16까지는 한동 지역의 고도 10m에서 60m까지의 풍속의 확률분포 특성을 보여 주고 있다. Maximum likelihood Algorithm, 최소제곱근을 이용한 방법, WAsP Algorithm 모두 높은 상관성을 보여 주고 있다.

Table 4.12 Wind Speed Distribution Analysis of Handong in 10m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.667	6.362	5.685	264.3	0.96527
Least squares	1.599	6.44	5.774	292.9	0.96621
WAsP	1.829	6.546	5.817	253.4	0.95704
Actual data			5.712	253.4	

Table 4.13 Wind Speed Distribution Analysis of Handong in 30m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.837	7.515	6.677	381.1	0.98782
Least squares	1.762	7.599	6.765	416	0.98428
WAsP	1.937	7.645	6.78	376.8	0.98915
Actual data			6.698	376.8	

Table 4.14 Wind Speed Distribution Analysis of Handong in 40m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.858	7.779	6.908	416.8	0.98442
Least squares	1.765	7.881	7.016	463	0.97842
WAsP	1.925	7.862	6.974	412.6	0.98754
Actual data			6.933	412.6	

Table 4.15 Wind Speed Distribution Analysis of Handong in 50m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.856	8.052	7.151	462.7	0.9742
Least squares	1.75	8.173	7.279	522.4	0.96618
WAsP	1.96	8.191	7.263	457.5	0.97948
Actual data			7.179	457.4	

Table 4.16 Wind Speed Distribution Analysis of Handong in 60m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.877	8.275	7.346	495.6	0.9716
Least squares	1.752	8.42	7.499	570.5	0.9607
WASP	1.999	8.44	7.48	489.7	0.97868
Actual data			7.379	489.7	

Table 4.17 Maximum likelihood Algorithm, 최소제곱근을 이용한 방법, WASP Algorithm을 이용한 방법으로 구한 Weibull 확률분포들을 보여주고 있다.

Table 4.17 Wind Speed Frequency Distribution of Handong

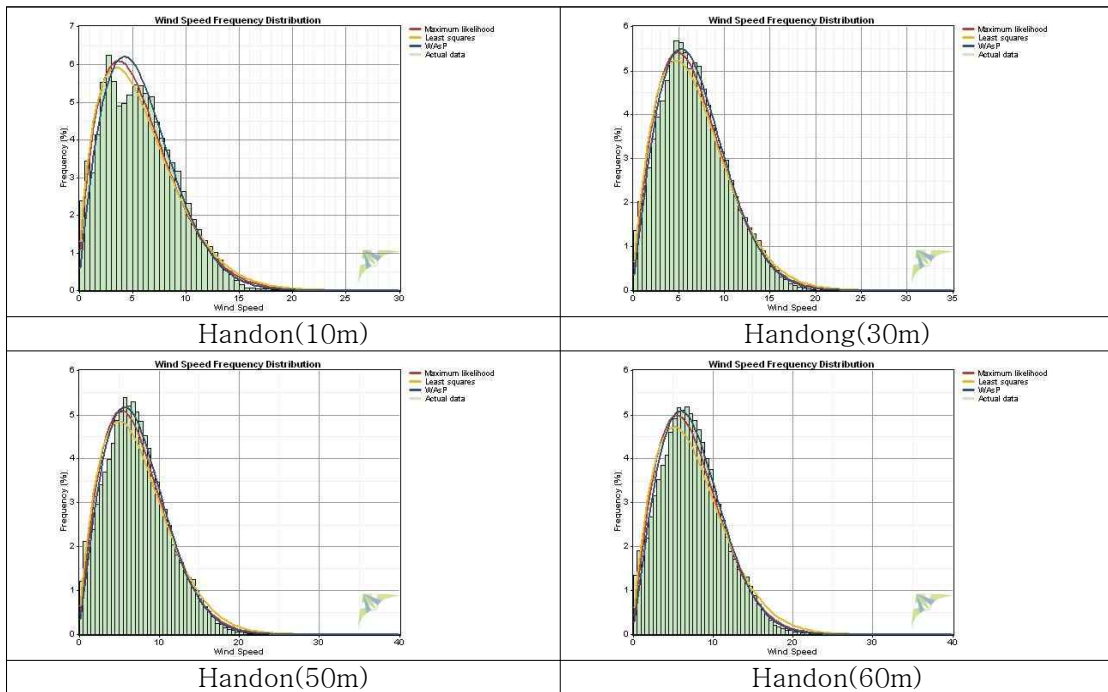


Table 4.18에서 Table 4.21까지는 우도 지역의 고도 30m에서 60m까지의 풍속의 확률분포 특성을 보여 주고 있다. 데이터에서 보여 지듯이 Maximum likelihood Algorithm, 최소제곱근을 이용한 방법, WASP Algorithm 모두 높은 상관성을 보여 주고 있다.

Table 4.18 Wind Speed Distribution Analysis of Udo in 30m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.94	8.584	7.612	532.4	0.99107
Least squares	1.855	8.659	7.69	576.1	0.98933
WAsP	2.017	8.651	7.666	522.5	0.9897
Actual data			7.632	522.5	

Table 4.19 Wind Speed Distribution Analysis of Udo in 40m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.978	8.933	7.919	587.3	0.99288
Least squares	1.9	8.999	7.985	628.1	0.9915
WAsP	2.053	9.004	7.977	578.7	0.99142
Actual data			7.935	578.7	

Table 4.20 Wind Speed Distribution Analysis of Udo in 50m height

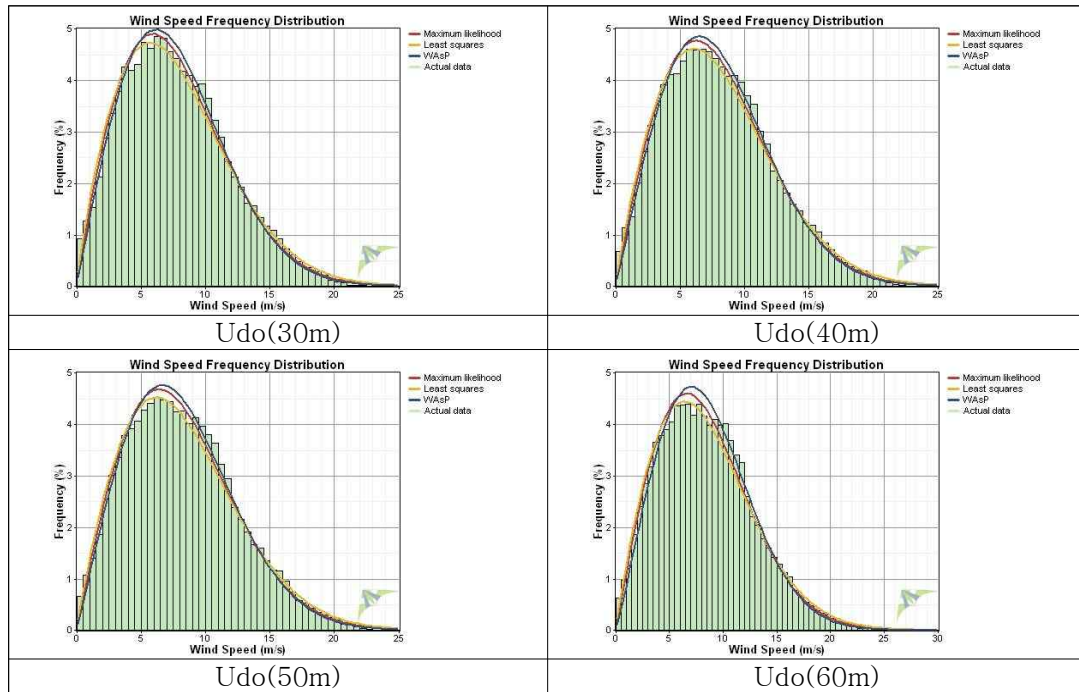
Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	1.987	9.123	8.086	622.3	0.99141
Least squares	1.903	9.189	8.153	667.4	0.99008
WAsP	2.056	9.185	8.136	613.2	0.99016
Actual data			8.101	613.1	

Table 4.21 Wind Speed Distribution Analysis of Udo in 60m height

Algorithm	Weibull k	Weibull c (m/s)	Mean (m/s)	Power Density ( $W/m^2$ )	R Squared
Maximum likelihood	2.008	9.348	8.284	662.4	0.99076
Least squares	1.921	9.416	8.353	710.5	0.98963
WAsP	2.141	9.502	8.415	653.3	0.98621
Actual data			8.299	653.3	

Table 4.22는 우도 지역의 연구 대상 지역인 평대 지역의 관측된 풍속의 상대도수와 적Maximum likelihood Algorithm, 최소제곱근을 이용한 방법, WAsP 알고리즘을 이용한 방법으로 구한 Weibull 확률분포들을 보여주고 있다.

Table 4.22 Wind Speed Frequency Distribution of Udo



Weibull  $k$  : (shape parameter : unitless),  
 $c$  : 척도계수 (scale parameter : m/s)가 존재한다. 일반적으로 같은 지점에서 고도가 증가하면 지면의 마찰효과가 감소하고 이로 인하여 평균 풍속의 증가하게 된다. 풍속의 확률분포의 파라미터 역시 고도의 변화에 따라 변화를 하게 된다.

“ AEP ”

(고정우, 2012)의 결과와 일반적으로 알려진 바와 같이 이 두 변수 중 형상계수의 경우 고도에 따른 변화가 거의 없지만 척도계수의 경우 고도가 증가하면 증가하는 경향을 보인다. 일반적으로 평균 풍속과 형상계수 및 척도계수의 관계는 식(2-33)와 같다.

$$\bar{U} = c \Gamma \left( \frac{1}{k} + 1 \right) \quad (2-33)$$

Weibull 확률분포의 파라미터들의 높이별 변화를 Table 4.23과 Table 4.24로 나타내었다.

Table 4.23 The variation in the shape parameter with height above ground

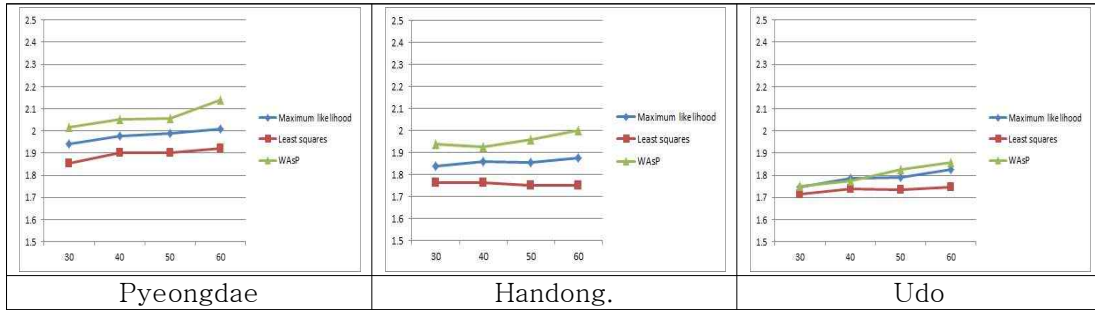
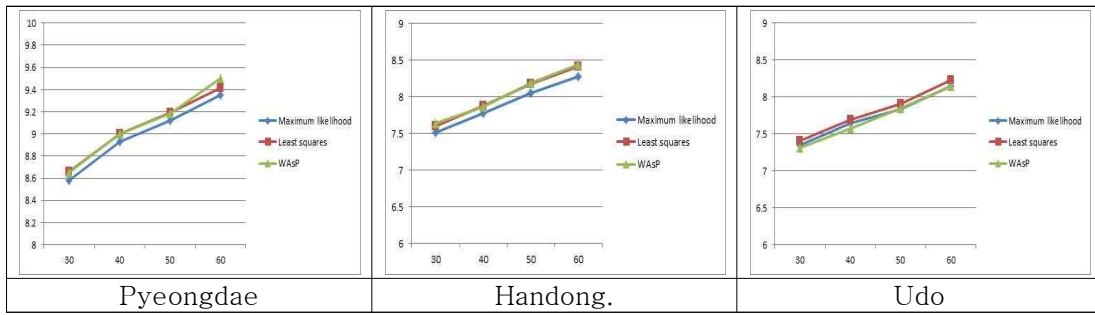


Table 4.24 The variation in the scale parameter with height above ground



Weibull 확률분포의 파라미터들의 높이별 변화를 통하여 형상계수와 척도 계수 모두 높이의 증가에 따라 계수들의 증가하는 경향을 보이고 있었다. 형상계수의 경우 그 증가 폭이 매우 작았으며 척도계수의 경우 높이에 따라 확연하게 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한 형상계수  $k$ 는 2에 근접한 값들을 보임을 확인 할 수 있었다. 이는 지형 분류에 따른 먹지수나 지표면 조도값이와 기상청의 기상대나 AWS의 고도 10m의 풍속만을 가지고 풍력자원지도가 생성되는 풍력자원지도의 신뢰도를 나타낸다.

### 4.3 제주 북동부 지역의 풍황 특성

#### 4.3.1 WTGS classes

대하여 검토 하였다. 풍력발전시스템의 설계 기준은 IEC 61400-1을 따른다. IEC 61400-1 3<sup>rd</sup> 2<sup>nd</sup>과 3<sup>rd</sup>이 혼용 되어 사용되고 있다. Table 4.25는 IEC 61400-1 2<sup>nd</sup>의 WTGS class를 Table 4.26은 IEC 61400-1 3<sup>rd</sup>의 WTGS class의 기준을 보여 주고 있다.  $V_{ref}$ 는 50년 재현주기 10분 평균 풍속의 극한 풍속을  $I_{15}$ 는 15m/s에서의 난류강도를 의미한다.

Table 4.25 IEC 61400-1 2nd WTGS class

WTGS class	I	II	III	IV	S
$V_{ref}$ (m/s)	50	42.5	37.5	30	Values to be specified by the designer
$V_{ave}$ (m/s)	10	8.5	7.5	6	
A $I_{15}$ (-)	0.18	0.18	0.18	0.18	
a(-)	2	2	2	2	
B $I_{15}$ (-)	0.16	0.16	0.16	0.16	
a(-)	3	3	3	3	

Table 4.26 IEC 61400-1 3rd WTGS class

WTGS class	I	II	III	S
$V_{ref}$ (m/s)	50	42.5	37.5	Values to be specified by the designer
A $I_{ref}$ (-)	0.16			
B $I_{ref}$ (-)	0.14			
C $I_{ref}$ (-)	0.12			

대부분의 경우 풍력발전 시스템의 허브 높이와 Met-mast의 최상단 풍속풍향 센서의 높이는 차이를 보이게 되는데 이는 Met-mast의 풍속과 풍속의 표준편차를 허브 높이로 변환해 주어야 됨을 의미한다. 높이의 차의 개념을 Fig 4.18에 도식 하였다.



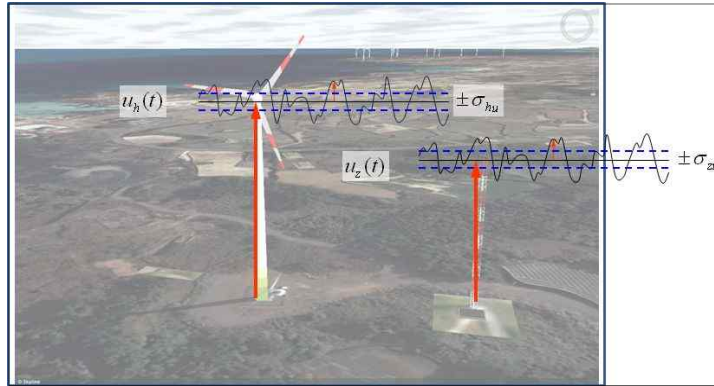


Fig 4.18 Hub height and Met-mast height difference.

#### 4.3.2 제주 북동부지역 $V_{ref}$

극한 풍속 예측 방법에 대한 결과는 Table 4.27에 나타나있다. 선택된 년 평균 데이터에 따라 Periodic Maxima법과 Method of Independent Storms법은 예측값의 큰 변동을 보이고 있었다.

Table 4.27 Short-term  $V_{ref}$  Analysis in the northeast Jeju Island

Method	평대 60m	한동 60m	월정기상탑 90m
	Vref(50yr) (m/s)		
Periodic Maxima	40.536	50.531	48.860
Method of Independent Storms	41.345	47.798	47.419
EWTS II (Exact)	31.386	31.191	34.578
EWTS II (Gumbel)	31.808	31.611	35.045
EWTS II (Davenport)	34.504	34.293	38.071

일반적으로 기상탑을 설치하여 풍황데이터를 관측할 경우 1년이상 관측된 데이터와 구좌 AWS데이터를 이용하여 3년 데이터로 변환하여 분석하였다. 분석 방법에 따라 많은  $V_{ref}$  예측에 많은 차이를 보임을 알 수 있다. 관측된 데이터와 구좌 AWS데이터를 이용하여 11년 데이터로 변환하여  $V_{ref}$ 를 예측하였다. 각 방

법에 대한 결과는 Table 4.28에 나타나있다.

Table 4.28 Long-term  $V_{ref}$  Analysis in the northeast Jeju Island

Method	평대 60m	한동 60m	월정기상탑 70m
	Vref(50yr) (m/s)		
Periodic Maxima	55.081	55.343	64.627
Method of Independent Storms	57.936	54.537	66.889
EWTS II (Exact)	32.145	30.535	37.044
EWTS II (Gumbel)	32.578	30.948	35.544
EWTS II (Davenport)	35.342	33.613	40.742

#### 4.3.3 제주 북동부 지역의 난류강도

Table 4.29 Table 4.30와 Table. 4.31에 나타내었다. 높이별 난류강도 특성을 비교해 본 결과 고독 높아짐에 따라 난류강도가 감소함을 확인 할 수 있었으며 일반적으로 알려진 대로 풍속이 증가할수록 난류강도가 감소하고 있었으나 해안가에 가까울수록 난류강도가 강해짐을 알 수 있었으며 정격풍속구간 또한 해안에 가까울수록 난류가 감소되지 않고 일정한 값을 보이거나 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다.

Table 4.29 Turbulence Intensity versus wind speed of Pyeongdae

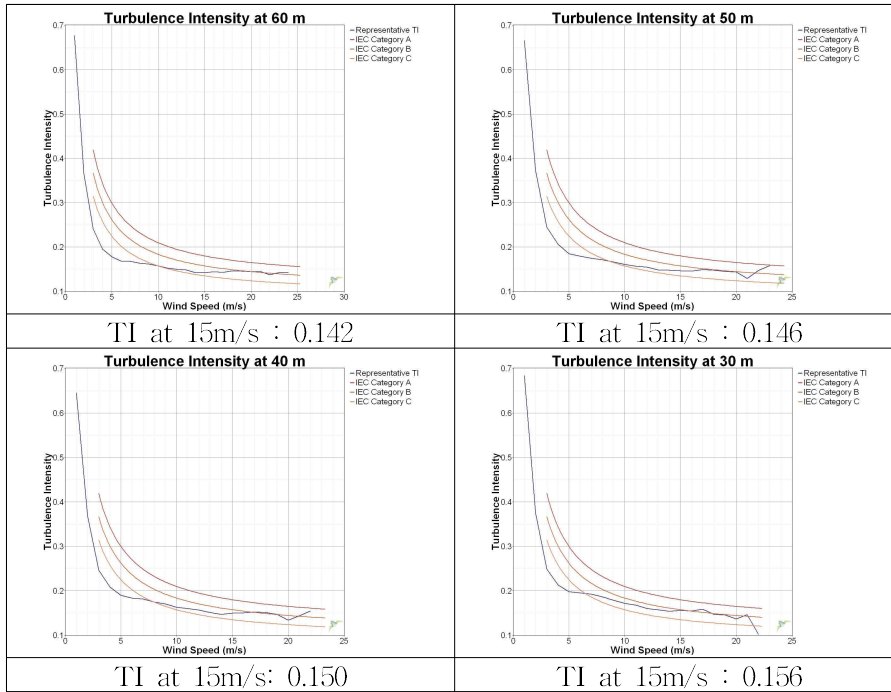


Table 4.30 Turbulence Intensity versus wind speed of Handong

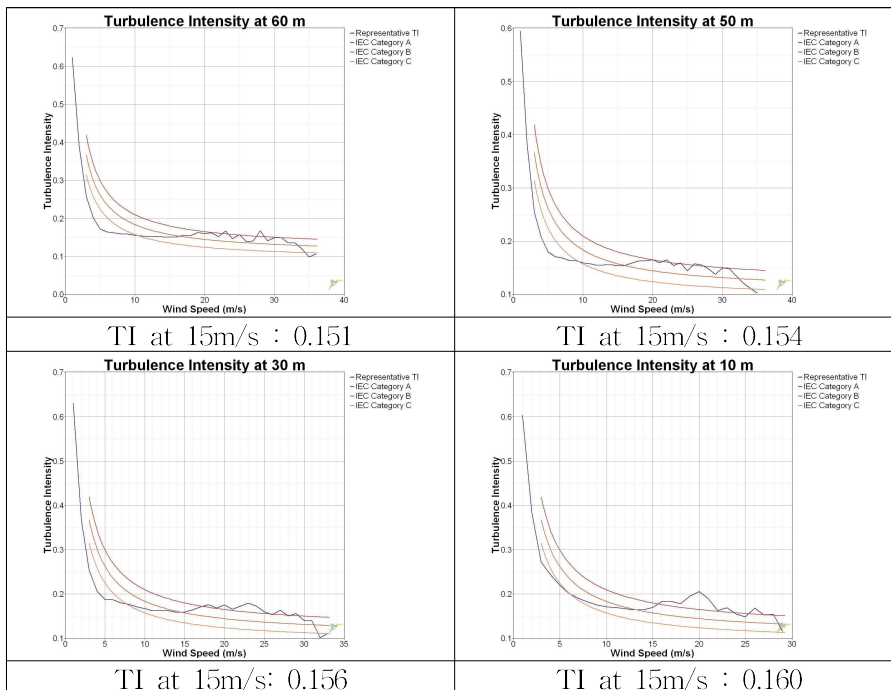


Table 4.31 Turbulence Intensity versus wind speed of Udo

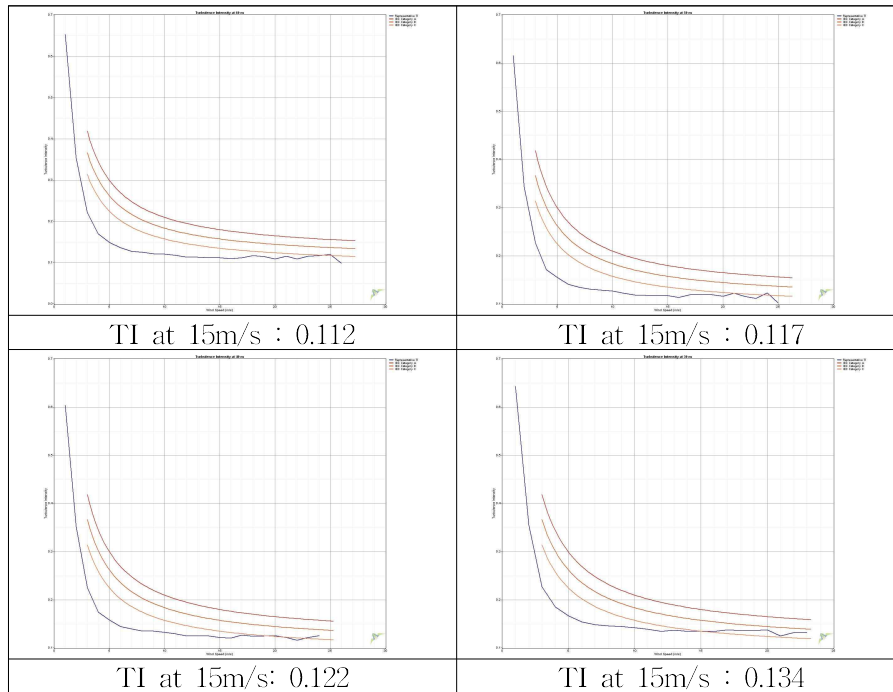


Table 4.32 Turbulence Intensity versus wind direction

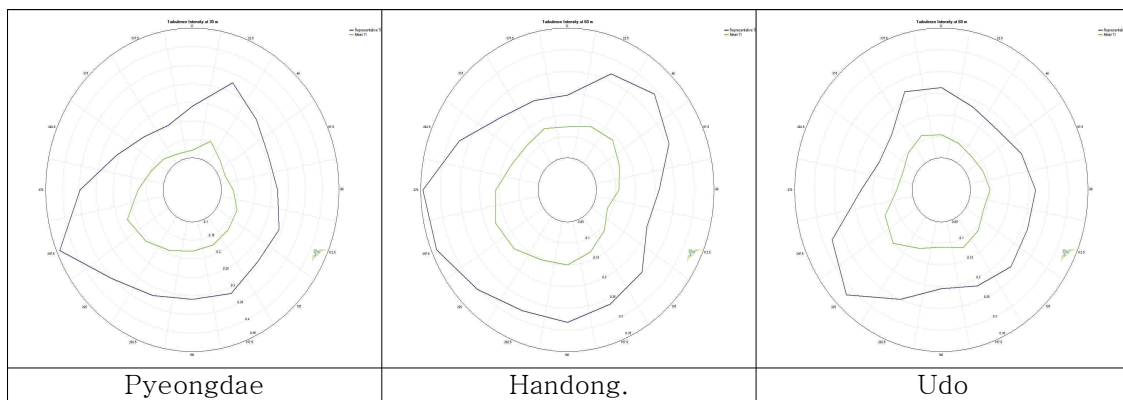


Table 4.32에는 풍향별 난류강도 값을 보여 주고 있다. 전체적으로 주방향에 대한 난류강도는 감소하는 경향을 보이지만 해안에 가까울수록 전체적인 난류강도의 증가를 보여 주고 있다.

2013년에 출시된 Windographer 3.1에서는 허브 높이의 풍속은 Wind Shear를

통하여 생성하고 표준편차는 Met-mast의 최상단에 위치한 풍속계의 표준표차를 사용하여 허브 높이의 난류강도를 계산하라고 제안하고 있다.

2012년 9월 5일부터 2013년 1월 8일까지 약 4.1개월간의 월정 해상 실증 단지의 실관측 데이터를 이용하여 90m의 풍속을 생성하여 난류강도를 분석 하였다. IEC 61400-1 3rd을 기준으로 0.114로 C단계가 나오고 있었다. 또한 한동 기상탑 지역의 2010년 12월 20일부터 2012년 12월 31일까지의 기상탑 데이터를 이용하여 80m의 풍속을 생성한 후 분석 하였다. 난류 강도를 분석한 결과 0.146로 C 단계가 나오고 있었다. 2012년 2월 6일부터 2011년 7월 3일 까지의 평대의 기상탑 데이터를 이용하여 80m의 풍속을 생성한 후 분석 하였다. 역시 0.140의 C단계가 나오고 있어 제주 북동부 지역은 난류 강도 C 이다. Fig 4.19에 그 결과를 도식하였다.

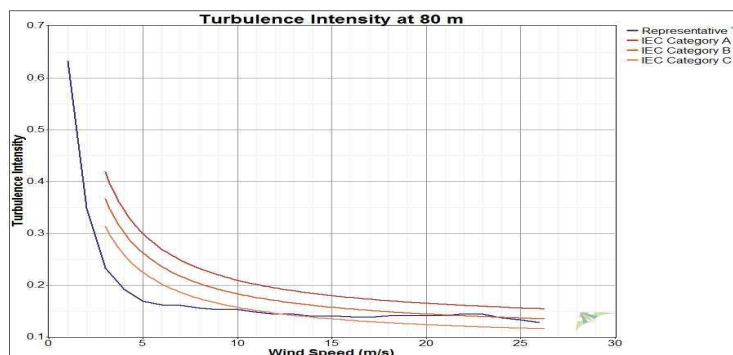


Fig 4.19 The turbulence intensity at 80m height at the Pyeondae Met-Mast.

일반적으로 난류는 대기가 불안정하고 지표면이 거칠수록, 또한 풍속이 클수록 강해지며 공기 밀도가 높을수록 그 세기가 커진다고 알려져 있다. 공기밀도의 경우 고도가 높아질수록 낮아지는 경향이 있다. 이는 난류강도의 감소를 의미한다. 제주지역 북동부에 설치되어 있는 육상 Met-mast의 경우 IEC 61400-1의 2<sup>nd</sup> 와 3<sup>rd</sup>의 방식으로 높이별 난류강도를 계산하였다. 그 결과 고도가 높아질수록 난류 강도는 작아지는 경향을 보였다. Met-mast는 같은 지점에 고도에 따라 풍속계가 있어 10분 평균풍속과 그에 따른 표준편차를 제공한다. IEC 61400-1의 경우 허

브 높이에서의 난류강도 계산을 요구한다. 하지만 대부분의 경우 Fig 4.18과 같이 Met-mast의 최상단 풍속계의 고도와 풍력발전시스템의 허브 높이는 고도차를 보인다. IEC 61400-1의 2<sup>nd</sup>에서는 허브 높이의 난류강도 보정 방법을 식 (4-12)

IEC 61400-1 3<sup>rd</sup>에서는 간략계산식을 제안하지 않았다. Fig 4.20은 제주 북동부 육상 지역의 높이별 IEC 61400-1 난류강도의 변화를 Fig 4.21은 제주 북동부 해상 지역의 높이별 IEC 61400-1 난류강도의 변화를 보여주고 있다.

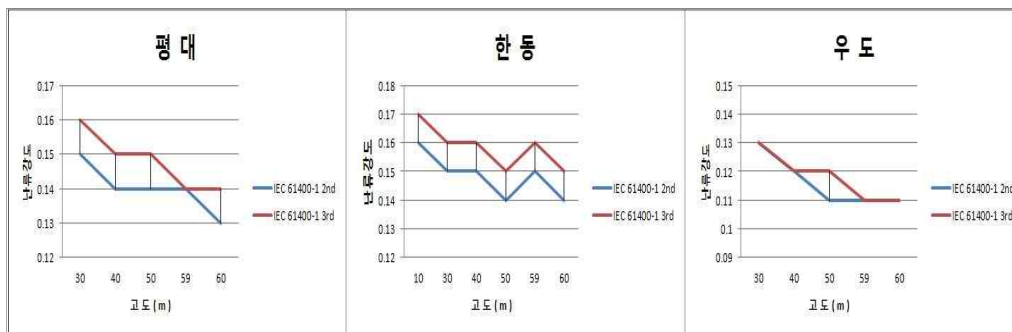


Fig 4.20 Changes in the height of the turbulence intensity.

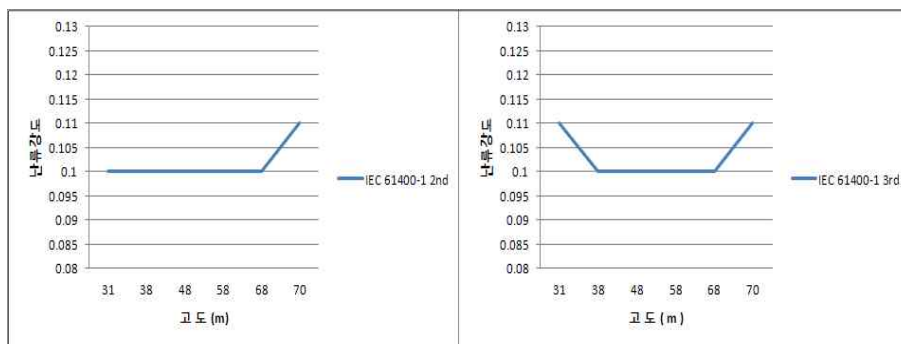


Fig 4.21 Changes in the height of the turbulence intensity for IEC 61400-4 2<sup>nd</sup> & 3<sup>rd</sup>.

Fig 4.21에 도식 되어 있듯이 월정 해상실증단지의 기상탑의 경우에는 약 4개월 데이터만을 분석하였지만 고도가 높아짐에 따라 난류강도가 감소하는 경향을 보이지 않고 있다.

#### 4.4 제주 지역에 적합한 지면 조도계수 산정

미국 환경 보호국(US Environmental Protection Agency)의 토지피복도를 이용한 지면 조도 산정에 대한 보고서(2008)와 “Variation Of Urban Momentum Roughness Length With Land Use In The Upwind Source Area, As Observed in Two U.K. Cities” (Rooney, G. G., 2005) 100m~1Km 범위의 원형 범위를 경계로 잡는다. 그 후 토지 피복에 따른 각도를 정하여 부채꼴 모양 안에 가장 많은 토지 피복 상태를 나타내는 화소에 따라 지면 조도의 경계를 정하여 지면 조도를 계산 한다. 이에 본 연구에서는 경계 범위를 500m로 선정하였다. 그리고 제주지역의 관측 중이거나 관측 되어 있는 Met-mast 자료를 이용하여 지형에 따른 조도계수를 계산 하였다.

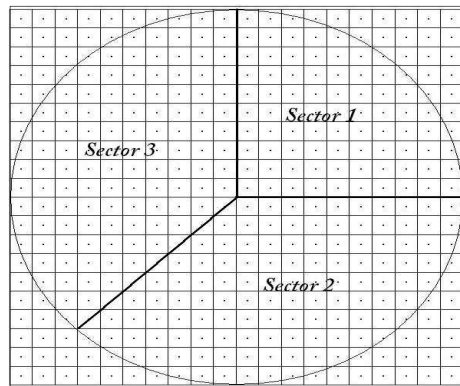


Fig 4.22 Diagram of User-specified Radius and Sector Definitions Overlaid on Land Cover Grid Cells(US Environmental Protection Agency).

Fig 4.22는 Met-mast 위치를 중심으로 3장 3.8.2절의 지면조도지도를 이용하여 지면 조도 범위 계산 구역을 정하는 개념을 설명하고 있다.

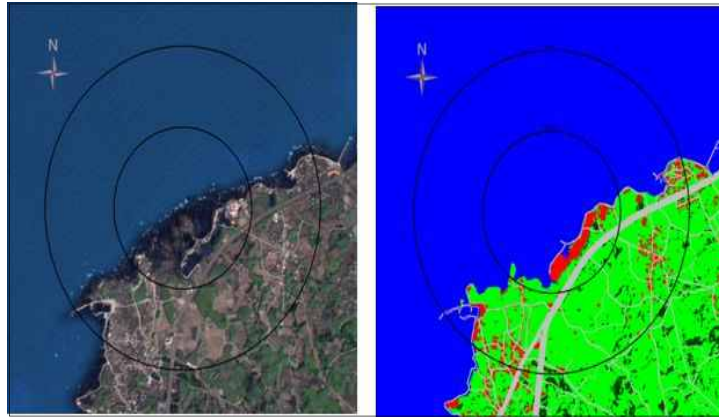


Fig 4.23 Surface Roughness Domain and Sectors & Spot-5 Image at Geumdeung.



Fig 4.24 Surface Roughness Domain and Sectors & Spot-5 Image at Wollyeong.

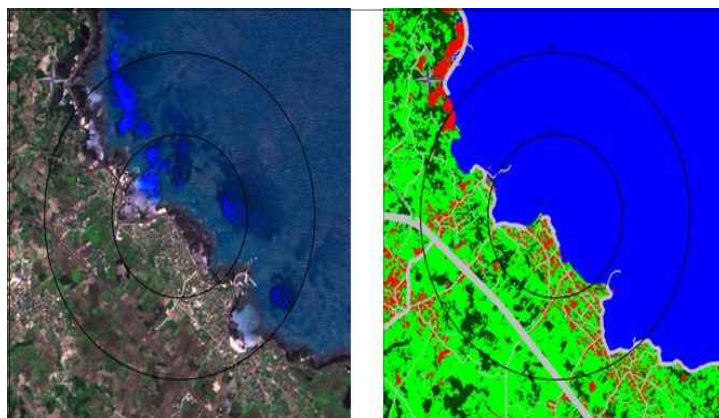


Fig 4.25 Surface Roughness Domain and Sectors & Spot-5 Image at Handong.



Fig 4.23, Fig 4.24, Fig 4.25는 본 연구에서 지면 조도 범위 계산을 위해 적용한 지역 중 Geumdeung, Wollyeong, Handong, 지역의 Met-mast 위치를 중심으로  $1km^2$  SPOT-5 .

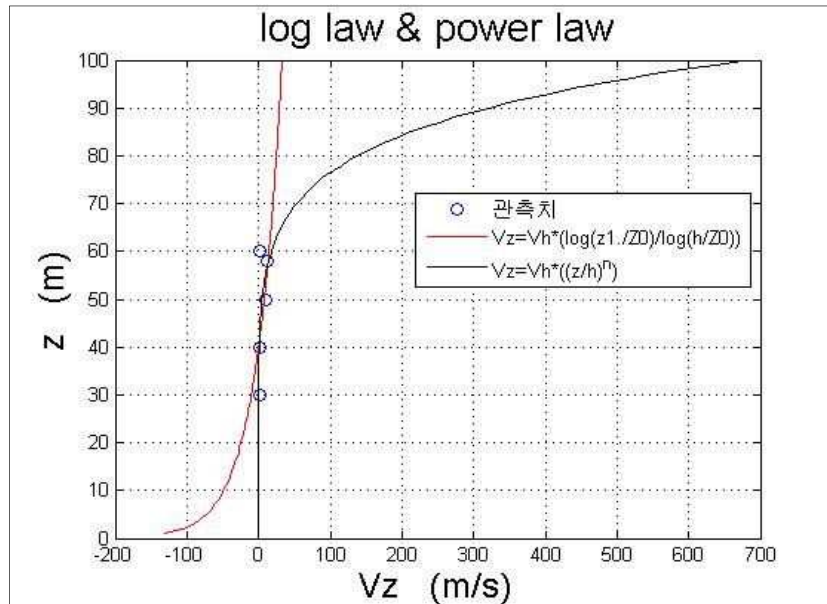


Fig 4.26 Exclusion criteria.

방향별 조도계수 계산 시 일부 구간은 Fig 4.26과 같이 풍속이 직선에 가까운 형태이거나 혹은 Negative Wind Shear 형태를 보였다. 이는 대기층의 일변화로 이해를 했으며 회수율이 낮은 방향과 관측 값이 24시간에 골고루 분포 되어 있지 않을 경우 산정에서 제외하였다. 또한 부록 10.1 풍향데이터 Data Quality Check부분에 언급 된 것처럼 기계 오작동으로 인한 부분을 계산에서 제외 하여 산출 하였다. 산출은 Matlab을 이용하였다.

Table 4.33 WaSP Manual's Roughness length

Land cover type	Roughness length
Water area	0.0002
Mixed water and land area or very smooth land	0.0024
Villages, small town, Forest	0.4

Table 4.34 Calculated Roughness length

Land cover type	Range	Mean Value
Ocean	0.00115~0.0208	0.012717
Agriculture & grassland	0.2781~0.5434	0.43495
Forest	0.4146~1.2309	0.853067
Farming villige & vinyl house	0.4706~0.8677	0.66915

Table 4.33 WaSP Manual

Table 4.34

는 제주지역의 Met-mast 자료를 이용하여 계산한 조도 길이 이다. 제주지역의 Met-mast 자료와 비교 할 때 해양, 마을, 산림의 경우 계산 값이 크게 나왔으며 농작지의 경우 비슷한 결과가 나왔다.

Table 4.35 Introduction to wind energy's Power law exponent

Land cover type	Power law exponent
Water area	0.1
Mixed water and land area or very smooth land	0.14
Villages, small town, Forest	0.25

Table 4.36 Calculated Power law exponent

Land cover type	Range	Mean Value
Ocean	0.1046~0.1308	0.1206
Agriculture & grassland	0.2312~0.2737	0.25535
Forest	0.2488~0.353	0.307033
Farming villige & vinyl house	0.2633~0.3141	0.2887

Table 4.35는 풍력공학 입문에서 제공하는 멱지수이고 Table 4.36 는 본 연구에서 계산된 값이다. 지면조도 길이 비교와 유사 하게 제주지역의 Met-mast 자료와 비교 할 때 해양, 마을, 산림의 경우 계산 값이 크게 나왔으며 농작지의 경우 비슷한 결과가 나왔다.

## 5. 장기 풍황 보정

풍력발전단지 예정지에 설치된 기상탑의 단기 관측된 풍황 데이터를 사용하여 경제성 평가를 실시한다. 장기적 연평균 풍속을 관측하였을 때 관측된 년 평균 풍속 값은 장기 평균값의  $\pm 15\%$ 의 범위에 놓이게 된다. 이는 단기 관측된 데이터가 그 지역에 기댓값에 비하여 풍속이 낮거나 높은 경우 풍력발전시스템의 기대 수명 20년을 기준으로 보았을 때 상당한 수익성 차이를 보이게 된다. 이런 불확실성을 줄이기 위해 MCP(Measure-Correlate-Predict)기법을 이용하고 있다. MCP 기법 수행을 위해 주변의 장기의 풍황 자료가 존재하였을 때 기상탑의 단기 관측데이터와 주변의 장기 데이터간의 상관성으로부터 공식을 생성하여 예정지의 데이터를 장기데이터로 변환하는 방법이다. 우리나라의 경우 장기데이터로 기상청에서 제공하는 AWS(Automatic Weather Station)를 사용하고 있다.

AWS자료는 지상에서 약 10m 높이에 위치하고 있어 지표면의 육풍과 해풍에 의한 일주성분, 기온의 일변화에 의한 영향을 많이 받는 자료이다. 이에 본 연구에서는 평균 AWS 높이인 지상 10m와 높이와 30m 60m 풍속을 FFT(Fast Fourier Transform)을 이용하여 비교하였고 저면에서만 발생하는 주기적인 일주성분을 찾아내었다. 이는 24시간주기로 육풍과 해풍의 영향으로 판단되었다. BSF (Band-Stop Filter)를 이용하여 24시간주기의 일주성분을 제거하여 장기풍속보정 결과를 보정 전과 비교 하여 상관성 정확성 향상 및 전체적으로 SSE(least squares errors)가 작아지는 것을 확인하였다. 또한 육풍과 해풍의 경우 밤과 낮의 온도차가 많이 발생하며 그로 인한 육지와 해상의 열전도율 차이가 많은 봄과 가을이 특히 많이 24시간 주기의 성분의 일주 성분이 발달이 많이 이루어지는 것을 확인 할 수 있었다.

## 5.1 장기 풍황 보정의 필요성

풍력발전단지의 경제성 평가는 풍력발전시스템의 생애 주기 동안의 풍속을 예측하여 계산된 연간전력생산량(AEP ; Annual energy predict)을 기초로 한다. 이를 위해 풍력발전단지의 예정 지역의 풍황 데이터를 대표할 수 있는 지역에 기상탑을 설치하여 풍황 데이터를 관측한다. 하지만 풍력발전시스템의 생애주기인 20년간의 관측은 경제적으로 불가능하다. 이에 일반적으로 1년에서 3년 동안 관측된 풍황 데이터와 주변의 장기 풍황 데이터의 상관성을 이용하여 두 풍황 데이터 간의 관계로부터 공식을 유도한다. 이 후 기상탑 지역의 풍황을 장기 풍황으로 변환하여 장기풍황에 대한 연간전력생산량의 예측하게 된다. 이를 MCP(Measure Correlate Predict) .

풍황 데이터의 관측 지점은 제주도 북동부 지역의 평대리와 한동리 지역의 풍황탑 자료와 구좌의 AWS자료이다. 그 위치는 WGS타원체를 기준으로 각각의 경위도 좌표계는 한동(N33°31'55", E126°50'52"), 평대(N33°31'55", E126°50'52"), 구좌(N33°31'21", E126°51'06")이며, 한동과 평대사이의 거리는 약1.54km 정도, 한동과 구좌 2.09km 정도 평대와 구좌 1.2km 정도 떨어져 위치하고 있다. 한동과 평대의 중첩기간은 약 6.4개월, 한동과 평대는 약 2년이고 평대와 구좌의 1년 5개월의 중첩 데이터를 이용하였다. Fig 5.1에 관측지점을 도식하였다.

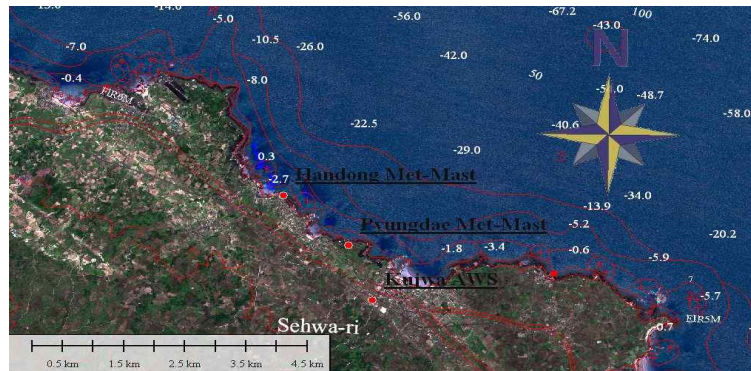


Fig 5.1 Met-mast & AWS location (Handong, Pyongdae, Kujwa).

## 5.2 Quality Check

### 5.2.1 결속구간 보정

MCP 분석을 위해서는 풍력 발전 개발 예정지(Target site)의 풍황 데이터와 주변의 참조 지역(Reference site)의 풍황 데이터가 관측의 중복되는 기간이 필요하다. 또한 두 풍황 데이터 모두에 결속구간이 없어야 한다. 결속구간이란 관측이 안 되었거나 관측이 되어 있는 데이터 일지라도 일시적 센서의 고장 및 관측 장비의 전압이상 등의 이유로 그 데이터 값을 신뢰 할 수 없을 경우 엔지니어에 의해 데이터를 삭제함으로써 발생하는 구간을 의미한다. 기상청의 무인 풍황 관측 장비인 AWS나 유인 관측 장비인 기상대의 풍황 데이터를 이용할 경우 Fig 5.2 ~ Fig 5.3과 같이 상당한 결속구간이 존재하므로 반드시 결속구간 처리가 필요하다.



Fig 5.2 Wind speed data gap.

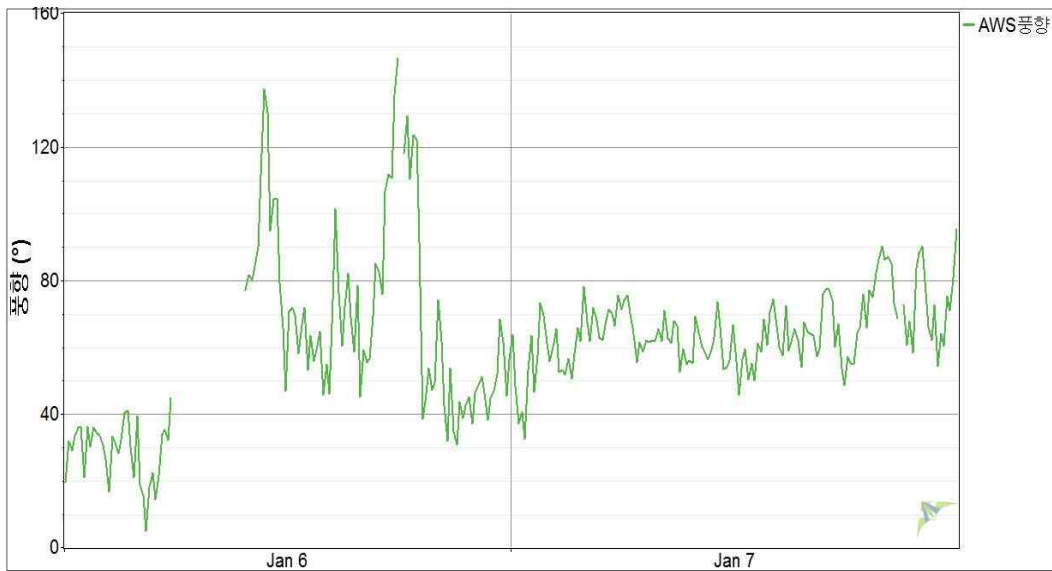


Fig 5.3 Wind direction data gap.

결속구간에 대한 보정 방법은 주기적으로 일어나는 패턴과 비주기적인 성분 보정을 이용하여 보정하는 것이 일반적인 방법이다. 주기적인 방법이란 계절적 변화(seasonal pattern)와 6.4절에서 설명되어진 일주변화(Diurnal Pattern)을 먼저 제거해 준다. 제거된 후 남아있는 변화패턴의 경우 비주기적 성분이지만 시간의 변화에 따른 변화 패턴을 보인다. 이를 위해 일반적으로 사용되는 일반적인 방법은 First-order Markov transition matrix를 이용하여 비주기적인 성분의 결속구간을 예측하는 한다. 그 후 제거되었던 일주 변화와 계절적 변화의 패턴을 이용하여 결속구간의 예측치를 구한 후 First-order Markov transition matrix 방법에 의해 예측된 값과 결합한다. 풍향의 경우 풍향과 동 시간대의 풍속을 이용하여 동서 방향과 남북방향의 두 개의 벡터(남북과 동서방향)로 분할한 이후 위의 결속 구간 처리과정을 수행하여 결속 구간을 보정하고 남북과 동서 방향 벡터로부터 방향을 추출한다. 본 논문에서는 AWS데이터의 결속구간 처리는 Windograper

### 5.2.2 시간지연 보정

풍력 발전 개발 예정지(Target site)의 풍황 데이터와 주변의 참조 지역(Reference site)의 풍황 데이터의 경우 두 관측지점 간 거리가 떨어져 있다. 이로 인하여 풍속에 대한 시간지연의 문제가 있을 수 있다. 보다 정확한 분석을 위해 시간지연(Time offset)에 대하여 검토 하였다. 시간 지연의 문제는 두 시계열 데이터를 시간이동을 시키면서 상관성 분석을 실시하며 상관성이 높이 나오는 시간의 차이를 계산하게 된다. 이런 방법을 Cross-correlation이라고 하며 식 (5-1)과 같다.

$$R_{12}(t) = \int_0^t X_1(t-\tau)X_2(t)d\tau \quad (5-1)$$

본 논문에서 검토 결과 한동, 평대 지역은 -20분의 시간 지연이 한동과 구좌 AWS지역의 -10분의 시간 지연이 일어나고 있음을 알 수 있었고 평대와 구좌 AWS사이에는 시간지연이 없음을 알 수 있었다. Fig 5.4에 시간지연 현상을 도식하였다.

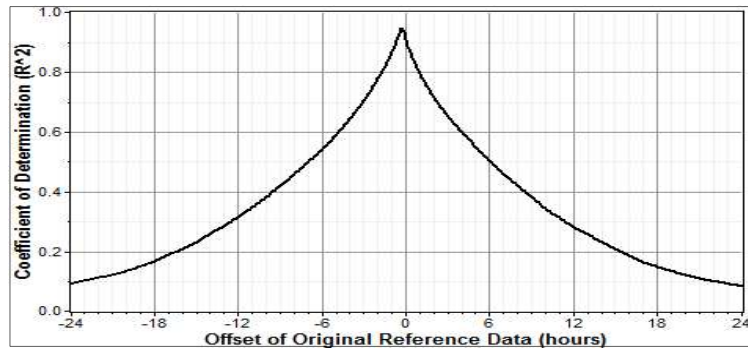


Fig 5.4 Time delay.

### 5.3 MCP

Fig 5.5는 제주 한림AWS의 10년 동안의 연평균 풍속이다. 장기 연평균 풍속을 계산 해 본 결과 3.483m/s의 연평균 풍속이 기대 되는 지역이다. 그림에서 보듯이 만약 2003년에 기상탑을 설치했고 단기 풍황 데이터만으로 AEP를 계산했다면 수익성의 관대 예측을 보일 것이며 2006년에 기상탑을 설치했다면 수익성의 상당한 과소 예측을 보일 것이다. 이러한 풍력 사업의 불확실성을 제거하는 방법이 MCP기법이다. Fig 5.5에 한림 AWS데이터의 장기연평균 풍속변화를 도식하였다.

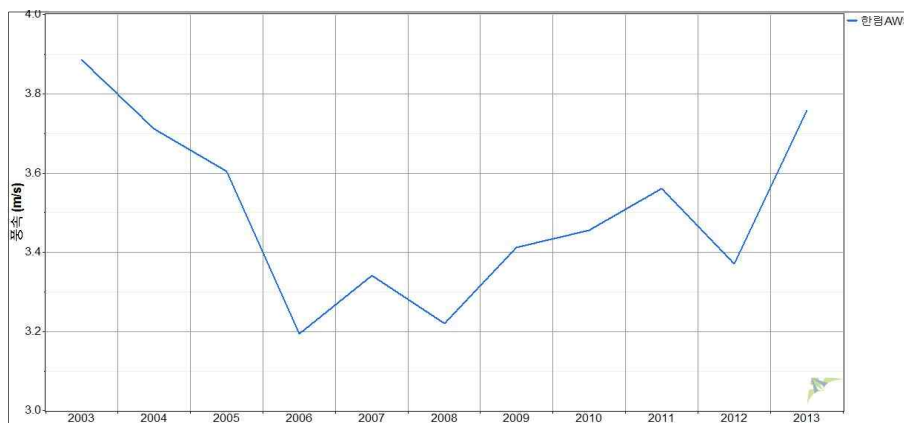


Fig 5.5 Hallim AWS long term wind speed data.

### 5.3.1 상관성 분석

(Overlap time)에 대하여 풍향과 풍속 상관성을 계산하게 된다. Fig 5.6에 중첩관측기간의 두 풍속의 변화를 도식하였다.



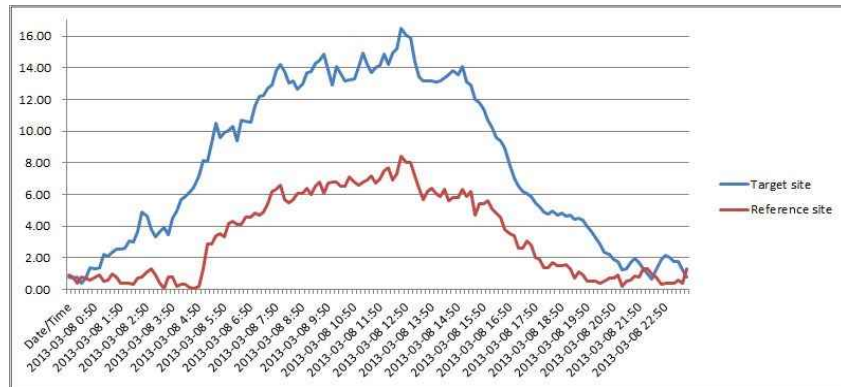


Fig 5.6 Overlap time wind speed.

상관분석(correlation analysis)는 두 시계열 데이터들 간의 연관성을 파악하기 위한 기법 중 하나로 변 간의 선형관계 정도를 분석하는 통계기법이다. 상관분석은 두 시계열 데이터의 공분산(Covariance)분석으로부터 시작한다. 먼저 두 시계열 데이터간의 동시간대의 개별 관측치들을 점으로 나타낸다. 이를 산포도(scatter diagram)이라고 한다. 이를 통해 하나의 변수가 증가함에 따라 다른 변수가 증가하는지 감소하는지 여부를 판단할 수 있다. Fig 5.7에 두 풍속간 산포도를 도식하였다.

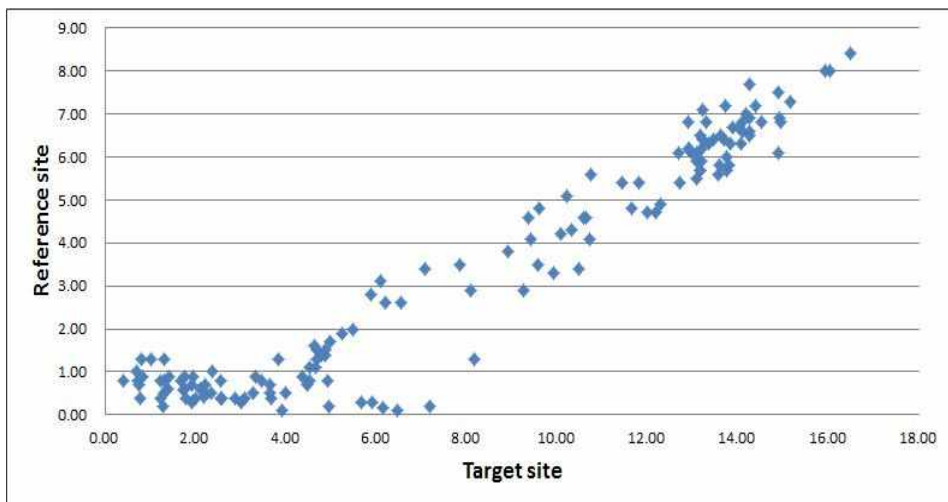


Fig 5.7 Wind speed scatter plot.

두 시계열 데이터를 편의상 X와 Y로 가정 한다. 공분산의 계산은 X의 평균에

시계열 X값들을 빼고 Y의 평균에 시계열 Y값들을 뺀 후 각각을 곱한다. 이 값이 양의 값이면 두 변수 간에는 증가하는 성향을 음의 값이면 감소하는 성향을 보인다. 공분산의 계산식은 식(5-2)와 같다. Fig 5.8에 두 풍속 양의 상관관계를 Fig 5.9

$$COV(X, Y) = \frac{\sum(\bar{X} - X_i)(\bar{Y} - Y_i)}{n} \quad (5-2)$$

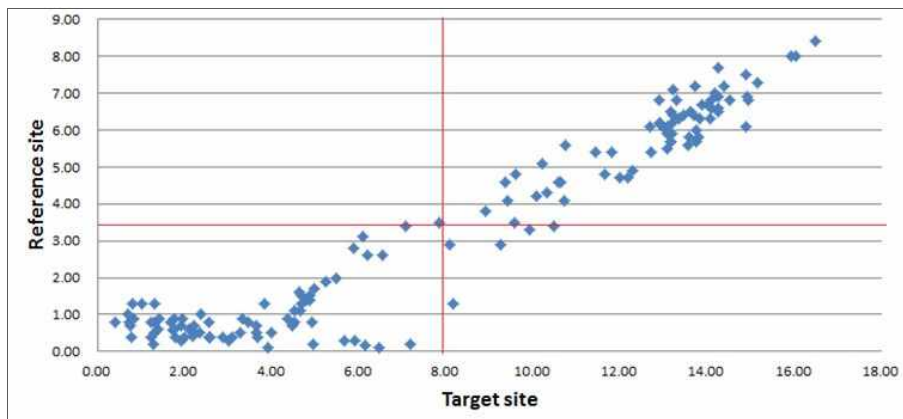


Fig 5.8 Positive correlation.

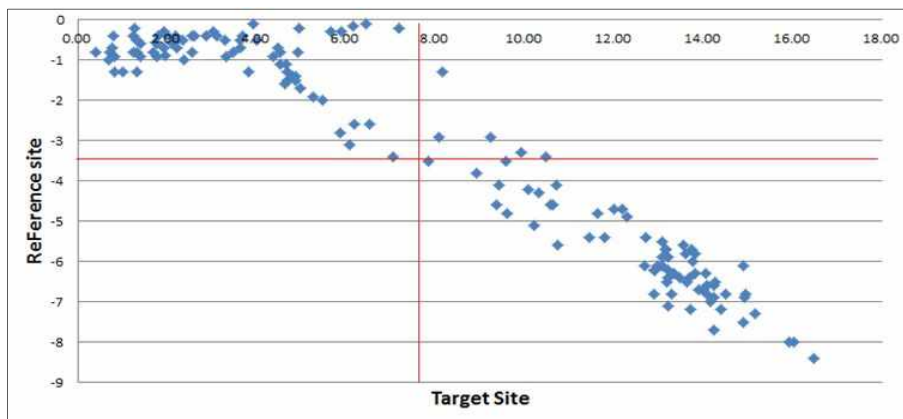


Fig 5.9 Negative correlation.

공분산은 척도의 크기 및 개수에 영향을 받는다. 이런 영향을 제거하기 위해 그 변수의 표준편차를 나누어 표준화 시킨 방법을 상관계수(Correlation

coefficient) (5-3)

$$Corr(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{var(X)} \sqrt{var(Y)}} \quad (5-3)$$

상관계수는 두 변수간의 선형관계 정도와 수학적 수치로 정량화한 방법으로 +1에서 -1간의 변동을 가진다. +1 혹은 -1을 가질 때 두 변수는 완전한 상관관계를 가지며 0인 경우에는 두 시계열 데이터간의 상관이 없는 무상관이라고 한다. 일반적으로 풍력 발전 개발 예정지(Target site)의 풍황 데이터와 주변의 참조 지역(Reference site)의 거리가 가까울수록 두 풍황 데이터 간의 상관성이 높아진다고 알려져 있다. 본 논문에서도 거리가 제일 가까운 한동과 평대의 60m에서의 풍속과 풍향의 상관성은 0.909, 0.963이었으며 제일 거리가 먼 한동과 구좌의 경우 풍속과 풍향의 상관성은 0.847, 0.862이었다. 또한 시간 지연을 적용하였을 경우 풍속과 풍향에 대한 상관성은 모든 경우에서 상승하고 있었으며 그 결과는 Table 5.1과 같다.

Table 5.1 Time delay of correlation analysis

$R^2$	Handong & Pyeongdae		Handong & Kujwa	
	speed	direction	speed	direction
Correlation analysis	0.909	0.963	0.894	0.954
Correlation analysis (Apply time delay)	0.947	0.981	0.932	0.976

### 5.3.2 MCP모델 선정 기준

MCP에서 상관성이 높다고 판단된 풍황 데이터를 이용하여 풍력발전예정지의 풍황을 장기풍황으로 변환하는 식은 Linear Least Square Algorithm, Total Least Square Algorithm, Variance Ratio Algorithm, Vertical Slice Algorithm, Weibull Fit Algorithm, Matrix time Series Algorithm 등이 존재한다. 일반적으로

로 정확성이 높아 주로 사용되는 방법은 Linear Least Square Algorithm과 Matrix time Series Algorithm이다. Linear Least Square Algorithm은 두 풍황 데이터간의 상관성이 높은 경우 주로 사용이 되며 Matrix time Series Algorithm는 두 풍황 데이터 사이의 상관성이 다소 떨어지는 경우에 주로 사용이 된다. 본 논문에서는 Linear Least Square Algorithm를 기준으로 MCP작업을 수행하였다. Linear Least Square Algorithm의 경우에도 크게 다음 표의 4가지 방법으로 나누어지게 된다. 국내외의 수많은 선행 연구와 본 저자의 “MCP기술과 BSF를 이용한 풍력자원평가”, “제주도 북동부 한동지역의 MCP 회귀모델식을 적용한 AEP계산에 대한 연구” 등의 선행 연구에서도 선형 1차 방정식의 정확도가 제일 높게 나타나고 있어 이 방법을 이용하여 분석하였다.

Table 5.2 Linear Least Square Algorithm(Source : Regression Models in WindPRO)

Model description	Model eq., f(x)
Constant	$Y = X + b$
Linear 1st order polynomial	$Y = aX$
Linear regression, Though(0,0)	$Y = aX + b$
2nd order polynomial	$Y = aX^2 + bX + c$
2nd order polynom. Though(0,0)	$Y = aX^2 + bX$

장기풍황보정은 미래의 풍황을 예측하는 것이 아니라 과거의 풍황을 예측하는 것이다. 이런 과거의 풍황이 미래에도 반복 될 것이라는 가정이 수반되어 있다. MCP모델의 선정 방법은 상관성이 높은 관측된 풍황 데이터와 주변의 장기 풍황 데이터의 상관성 분석 후 각각의 모델식을 이용하여 관측 중복기간의 주변의 장기 풍황 데이터로 풍력 발전 개발 예정지의 풍황 데이터를 예측한다. 관측된 개발 예정지의 데이터를 참값이라고 가정하고 예측 값과의 차이를 이용하여 MCP 모델을 결정하게 된다. 이때 오차의 확인은 일반적으로 통계에서 널리 사용되고 있는 Absolute Relative Error(ARE), Sum of Square Error(SSE), Mean Square Error(MSE), Root Mean Square Error(RMSE), Mean Absolute Error(MAE), Mean bias error(MBE) Weilbull

Error가 사용되고 있다. 이 중 Mean bias error(MBE)는 예측값에 비하여 평균 얼마 정도의 풍속을 과대 혹은 과소 예측하는지를 의미하며 Root Mean Square Error(RMSE)는 오차의 분포의 조밀성 여부를 판단하는 기준이 된다. 두 오차분석 방법 모두 0에 가까울수록 모델 예측력이 우수함을 의미한다.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - f(X)) \quad (5-4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - f(X))^2} \quad (5-5)$$

## 5.4 장기 풍황 특성 기초 연구

### 5.4.1 장단기 풍황의 AEP 및 CF 비교

국가태풍센터의 데이터를 참고하면 우리나라는 평균 3.1회 태풍이 영향을 받고 있다. 하지만 2012년의 경우 5회의 태풍의 영향으로 인하여 평년에 비하여 풍속이 높았다. 한동 풍황탐의 2011년 9월 22일부터 2012년 9월 20일 까지 1년 풍황 데이터를 이용하여 단기 AEP를 예측하다. 그 결과는 Table 5.3에 나타내었다. 구좌지역의 AWS 풍속자료를 이용하여 한동 지역의 풍속을 4.7년의 장기풍황으로 보정한 후 AEP를 예측하였다. 그 결과는 Table 5.4에 나타내었다.

Table 5.3 Short-term AEP &amp; CF

	Valid Data	Hub Height Wind Speed	Time At Zero Output	Time At Rated Output	Mean Net Power Output	Mean Net Energy Output	Net Capacity Factor
Month	Points	(m/s)	(%)	(%)	(kW)	(kWh/yr)	(%)
Jan	4,464	9	2.2	3.23	1,097.80	816,796	36.6
Feb	4,176	9.56	3.57	6.18	1,243.40	835,556	41.4
Mar	4,464	9.06	6	3.49	1,162.90	865,225	38.8
Apr	4,320	8.46	9.61	7.66	963.1	693,448	32.1
May	4,464	6.39	15.28	0	585.7	435,792	19.5
Jun	4,320	6.84	14.28	2.92	671.1	483,224	22.4
Jul	4,464	5.2	30.49	1.5	409.5	304,655	13.6
Aug	4,464	8.02	11.18	3.65	740.7	551,073	24.7
Sep	4,201	7.1	10.43	1.93	636.6	458,374	21.2
Oct	4,464	6.95	11.38	0.13	682.4	507,687	22.7
Nov	4,320	7.5	12.45	2.73	815.5	587,181	27.2
Dec	4,464	9.32	5.22	2.22	1,240.10	922,609	41.3
Overall	52,585	7.78	11.04	2.95	853.3	7,475,281	28.4

Table 5.4 Long-term AEP &amp; CF

	Valid Data	Hub Height Wind Speed	Time At Zero Output	Time At Rated Output	Mean Net Power Output	Mean Net Energy Output	Net Capacity Factor
Month	Points	(m/s)	(%)	(%)	(kW)	(kWh/yr)	(%)
Jan	22,320	9.38	2.75	5	1,190.60	885,829	39.7
Feb	20,448	9.34	3.53	5.06	1,190.40	799,918	39.7
Mar	22,320	8.84	6.34	3.8	1,100.80	818,977	36.7
Apr	21,600	7.89	10	4.79	864.6	622,490	28.8
May	22,320	6.47	15.47	1.62	592	440,446	19.7
Jun	21,600	5.99	18.18	1.45	498	358,536	16.6
Jul	22,320	5.74	26.99	2.24	501.2	372,926	16.7
Aug	22,320	6.46	16.33	2.09	506.1	376,522	16.9
Sep	20,106	7.42	9.84	2.24	649.3	467,517	21.6
Oct	17,856	7.31	8.83	0.39	746.5	555,406	24.9
Nov	17,280	8.05	9.38	2.34	932	671,035	31.1
Dec	17,856	9.13	5.3	3.03	1,184.50	881,270	39.5
Overall	248,346	7.64	11.31	2.87	822.5	7,204,938	27.4

단기풍황에 의한 AEP를 예측한 결과 연간 약7,475MW를 예측 하였으나 장기풍황 보정을 통하여 예측한 결과 연간 약 7,204MW를 예측하고 있었고 약 3.6%의

예측오차를 보였다. 이로 인해 연간 271MW의 에너지 생산량의 차이를 발생 시킨다. 풍력발전시스템의 생애주기인 20년을 비교 하였을 때 5,420MW의 차이를 나타내며 이는 약 9개월 정도의 에너지 생산량과 비슷한 수준이다.

## 5.5 장기 풍황 예측의 정확성 향상

### 5.5.1 주파수 영역 처리의 이론적 배경

#### 5.5.1.1 Power spectrum

시계열 데이터  $x(t)$ 에 대하여 특정 주파수성분의 분석을 위해 많이 사용되는 방법이 Power Spectrum법이다. 시계열 데이터들의 주기적인 정현파 성분들의 합으로 이루어졌다는 가정이 가는 하고 그 주파수 성분에 대하여  $\tilde{x}(t) = A \exp[j(\omega_0 t + \theta)]$ 로 표현 가능하다면 시계열 데이터는 주파수  $f_0$ 값에 대한 A와  $\theta$ 에 의해서 완전히 규정될 수 있기 때문에 주파수 영역표현으로 표현이 가능하다. 주파수 f의 함수인 진폭 A와, f의 함수인  $\theta$ 를 표현하는 두 가지 그래프 형태를 가질 수 있다. 주기를 알고 있을 경우 Fourier 급수와 계수를 이용하여 계산이 가능하며 비주기 신호는 Fourier변환을 이용하여 계산한다.  $\hat{f}(\omega)$ 를 식 (5-6)

$$\hat{f}(\omega) = \text{Re}\hat{f}(\omega) + j\text{Im}\hat{f}(\omega) = |\hat{f}(\omega)| e^{j\Phi(\omega)} \quad (5-6)$$

여기서  $\text{Re}\hat{f}(\omega)$ 와  $\text{Im}\hat{f}(\omega)$ 는 각각  $\hat{f}(\omega)$ 의 실수부와 허수부를 의미한다. 또한,  $|\hat{f}(\omega)|$  와  $\Phi(\omega)$ 를 각각 f(t)의 진폭스펙트럼(amplitude spectrum)과 위상스펙트럼(phase spectrum)이라 한다. 이들은 연속스펙트럼들(continuous spectrums)이다.

$$\begin{aligned}
\text{Re}\hat{f}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\cos\omega t dt & (5-7) \\
\text{Im}\hat{f}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\sin\omega t dt \\
\text{Re}\hat{f}(\omega) &= \text{Re}\hat{f}(-\omega), \quad \text{Im}\hat{f}(\omega) = -\text{Im}\hat{f}(-\omega)
\end{aligned}$$

복소수인  $\hat{f}(\omega)$ 의 크기는  $\sqrt{\text{Re}\hat{f}(\omega)^2 + \text{Im}\hat{f}(\omega)^2}$  이고 위상은  $\tan^{-1}\frac{\text{Im}\hat{f}(\omega)}{\text{Re}\hat{f}(\omega)}$ 이다. 주파수 영역 변환에 대한 보다 자세한 내용은 본장의 7장에 설명 하였다. 위의 방법에서 계산 되어진 주파수 별 진폭 값에 제곱으로 시계열 데이터의 자기상관함수의 Fourier변환을 Power Spectrum이라 한다.

#### 5.5.1.2. Band Stop Filter

시계열 데이터를 주파수 영역으로 바꾸는 이유 중 하나는 주기적 신호 중 특정 성분을 강조하거나 제거하는 Filter의 개발에 있다고 할 수 있다. 일주 주기의 특정 일주 성분은 고도가 높아짐에 따라 그 성분 진폭이 약해지고 있으며 풍력 발전시스템의 대형화로 허브 높이가 높아짐에 따라 허브 높이의 풍황에는 이런 일주성분이 나타나지 않을 것으로 판단되어진다. 참조데이터로 주로 사용되는 기상대 혹은 AWS 데이터는 지면에 가까운 곳에 위치하여 일주성분이 강하게 나타남으로 이 성분을 제거하여 장기 풍황을 생성하는 것이 예측의 정확도 향상에 도움이 될 것이라 판단하였다.

필터란 원하지 않는 주파수 성분을 걸러내는 것으로 특정 주파수 대역의 신호만을 걸러내는 필터를 대역저지 필터(Band Stop Filter)라 한다. 푸리에 변환에 의해 생성된 주파수 역영 중 특정 주파수에 0을 곱하여 Fourier 역변환을 통하여 시계열 데이터를 생성할 때 그 주파수 성분의 진폭을 크게 감소시키거나 제거하는 방법이다. 아래 Fig 5.10은 BSF의 개념도이다.



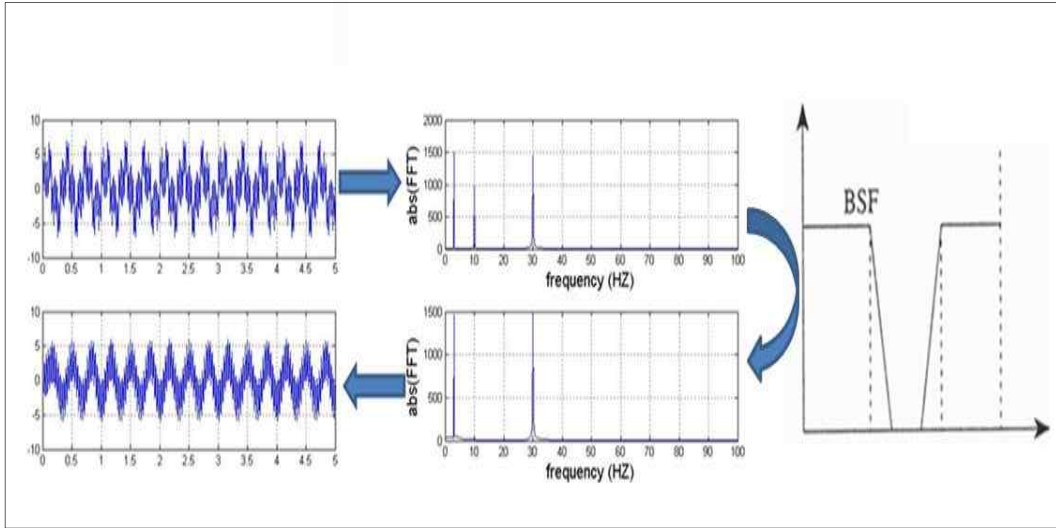


Fig 5.10. BSF concept.

### 5.5.2 풍황 데이터의 시계열 특성 분석

한동 지역의 풍황탐자료를 일주변화 분석한 결과 12시쯤이 풍속이 가장 강하였으며 최대 시간별 평균풍속과 최소 시간별 평균풍속 고도가 낮을수록 그 차이가 많이 남을 알 수 있었다. Fig 5.11에 그 결과를 도식 하였다.

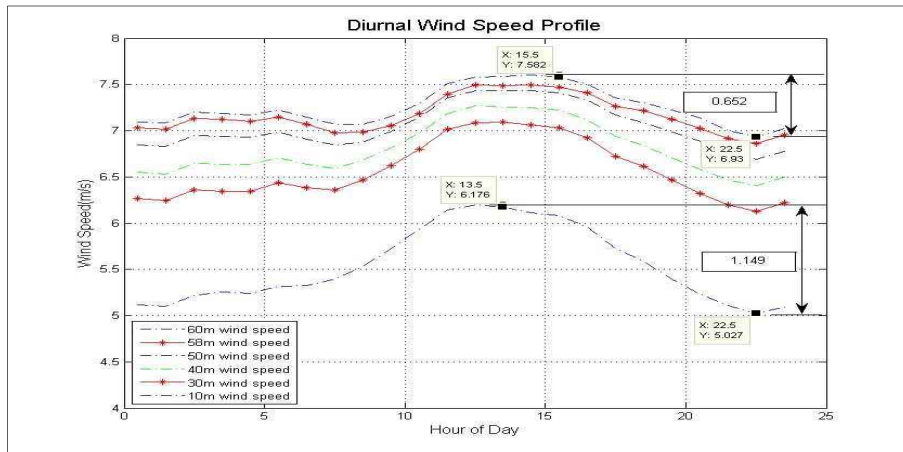


Fig 5.11 Diurnal wind speed profile.

한동 지역의 풍황탐자료를 계절별로 분리하여 일주평균으로 분석한 결과 12시 쯤이 풍속이 최대 시간별 평균풍속과 최소 시간별 평균풍속 고도 차이 및 패턴에 많이 달라짐을 확인 할 수 있었다. 그 결과는 Fig 5.12에서 Fig 5.14에 그 결과를 도식 하였다.

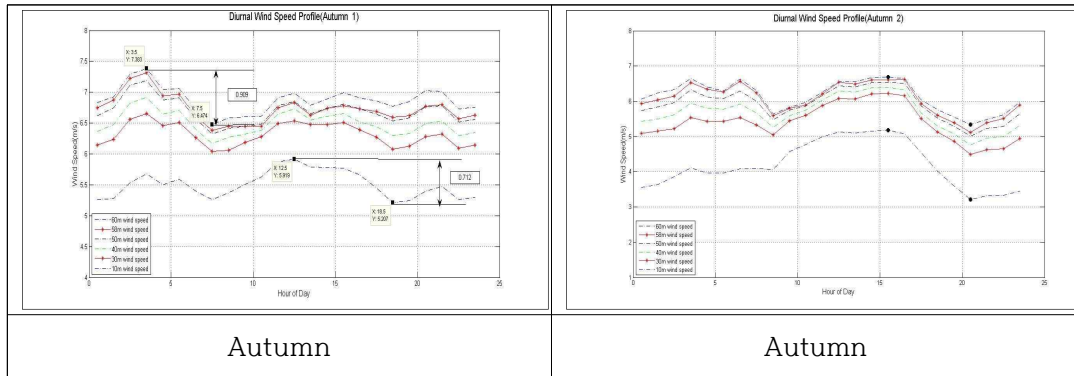


Fig 5.12 Wind speed seasonal profile\_1.

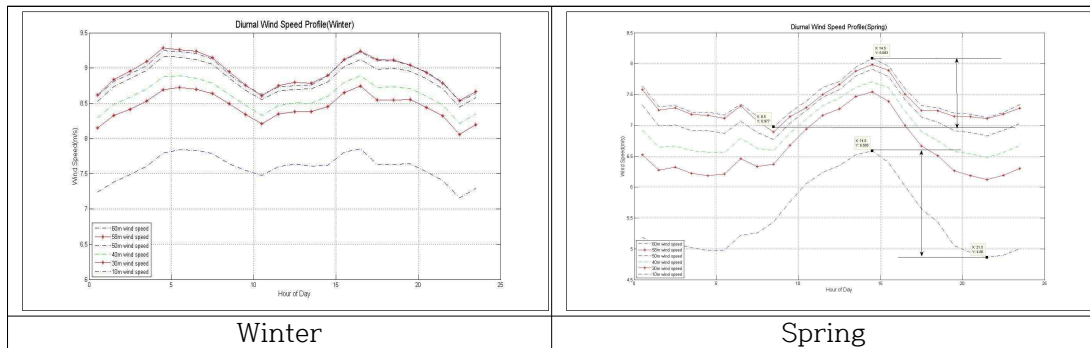


Fig 5.13 Wind speed seasonal profile\_2.

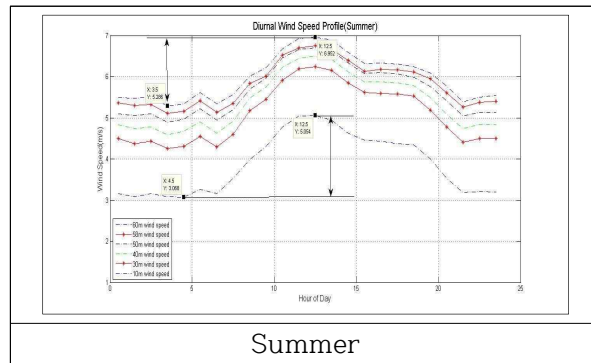


Fig 5.14 Wind speed seasonal profile\_3.

### 5.5.3 풍황 데이터 Power spectrum 분석

Power Spectrum 분석 결과 약 24시간 주기의 정현파 성분의 저면에 가까울수록 강한 에너지를 가지고 존재 하고 있었다. 그 결과는 Fig 5.15에 도식하였다.

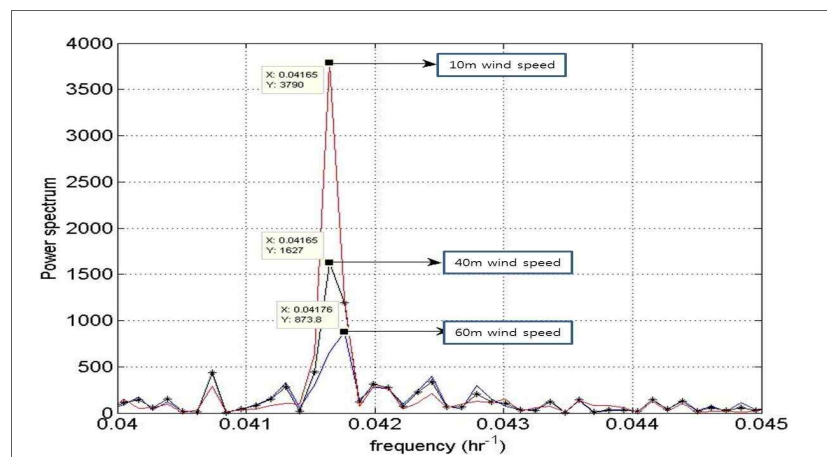


Fig 5.15 Wind speed power spectrum analysis.

풍력발전시스템의 허브의 높이는 해상의 경우 90m이상이므로 24시간주기의 성분을 제거하여 풍황을 예측하는 것이 타당할 것으로 판단되어 진다.

#### 5.5.4 풍황 데이터의 계절별 Power spectrum 분석

전 기간에 걸쳐서 20시간 주기의 육풍과 해풍이 존재하나 여름과 겨울에는 고도 60m지점 까지 고르게 영향을 주고 있지만 봄과 가을에는 상대적으로 고도가 적은 지역에만 영향을 나타내고 있었으며 60m에는 영향이 없는 것으로 판단되어진다. 그 결과는 Fig 5.16에 도식하였다.

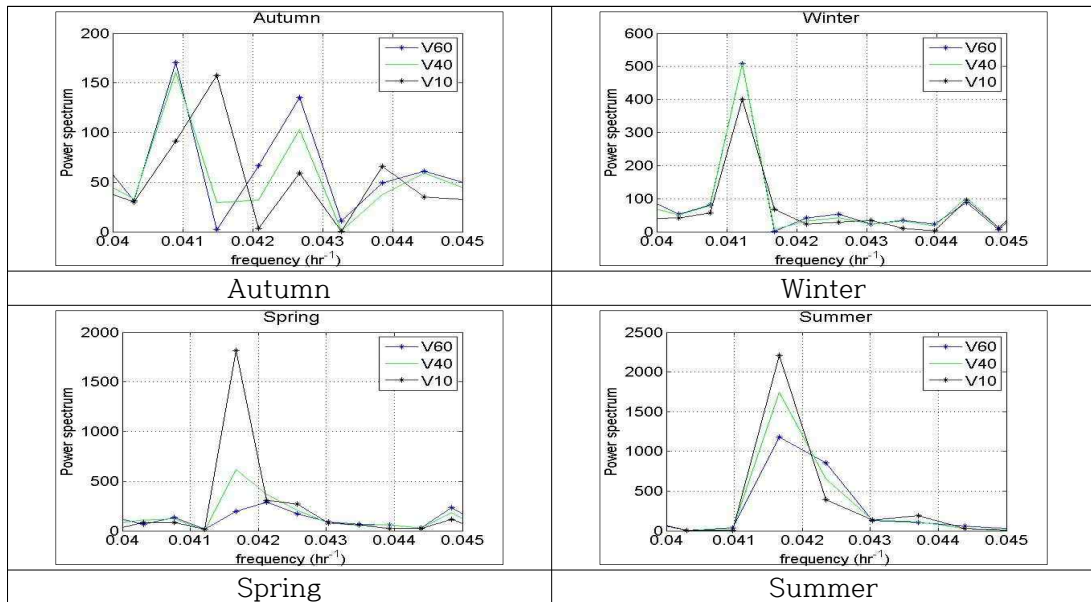


Fig 5.16 Seasonal wind power spectrum analysis.

해상 풍력 단지의 풍력발전시스템의 허브의 높이는 90m이상이다. AWS는 지상에서 평균 10m 위치에 위치해 있으므로 봄과 가을의 육풍과 해풍 성분이 24시간 성분을 제거하여 장기풍속을 생성 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

### 5.6 풍황 데이터에 BSF 적용

#### 5.6.1 관측 전 기간에 적용

한동 풍황탑의 60m, 30m, 10m 풍속계의 전 구간에 걸쳐 power spectrum 분석을 실시하였다. 그 결과는 Fig 5.17에 도식하였다. 특히 0.041 부분에서만 주파수 성분이 확연히 다름을 확인할 수 있었다.

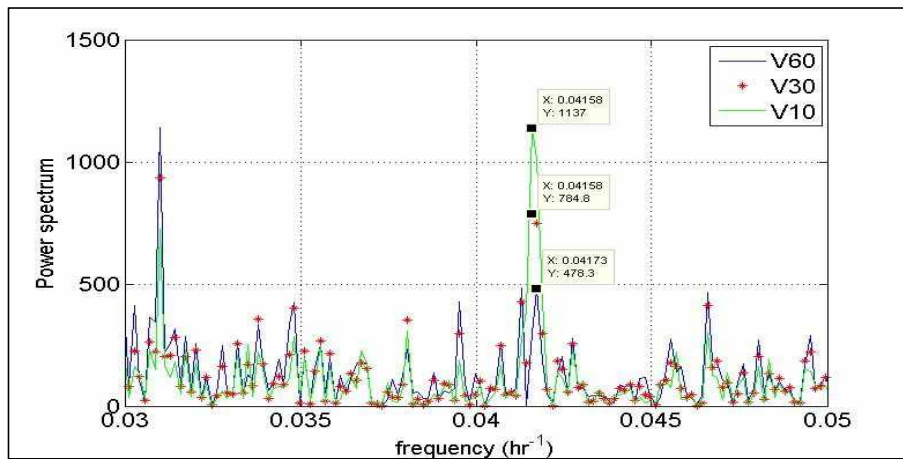


Fig 5.17 60m, 30m & 10m wind speed power spectrum analysis.

나이퀴스트 주파수(Nyquist Frequency)등을 제외한 의미 있는 협대역 부분을 확인한 결과 주파수  $0.04158hr^{-1}$  또는 약 24시간 주기의 주기적인 영향이 지표면으로 가까울수록 더욱 강해지는 것을 확인할 수 있었다. BSF 적용 전후의 상관성 변화를 확인 하였다. Table 5.5는 적용 전의 각 높이에 대한 상관성과 MCP 선형 모델식 산출 결과이며 Fig 5.18을 산포도와 모델식을 도식하였다.

Table 5.5 MCP result using linear least square algorithm\_1

10m & 60m wind speed			10m & 30m wind speed		
Model	SSE	$R^2$	Model	SSE	$R^2$
$Y=0.8319X-0.3274$	$-1.1250 \times 10^{-13}$	0.836	$Y=0.9149X-0.3708$	$-2.0359 \times 10^{-14}$	0.930
$Y=0.7973X$	-0.0631		$Y=0.8723X$	-0.074	
$Y=0.0062X^2+0.7285X+0.0183$	$1.1485 \times 10^{-13}$		$Y=0.0085X^2+0.7824X+0.0338$	$2.8034 \times 10^{-14}$	

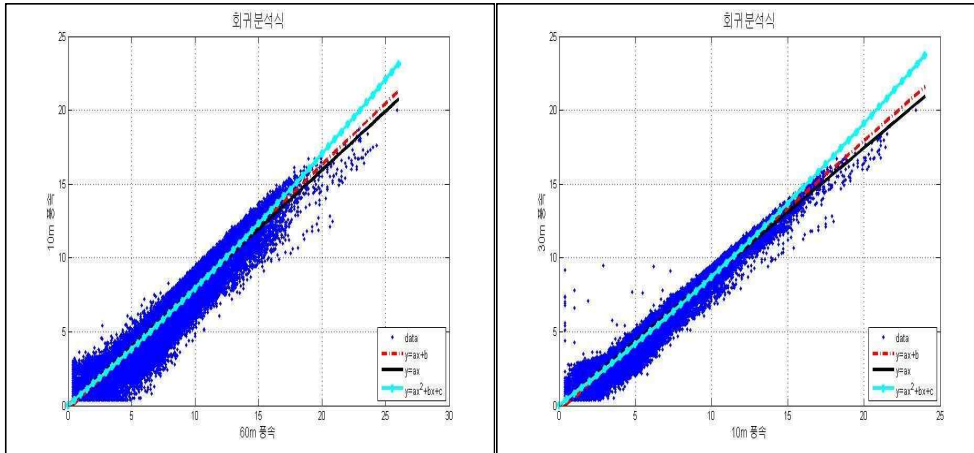


Fig 5.18 Linear least square algorithm result with height above ground.

풍력발전시스템의 허브의 높이는 Power Spectrum에서 확인된 것과 24시간 주기의 육풍과 해풍의 영향이 적은 지역이므로 이 주파수대의 10m 풍속을 차단한 후 30m와 60m의 풍속과 상관성 분석 및 MCP예측 비교를 수행 하였다. Table

5.6

MCP

Fig

5.19

Table 5.6 MCP result using BSF

10m & 60m wind speed			10m & 30m wind speed		
Model	SSE	$R^2$	Model	SSE	$R^2$
$Y = 0.8255X - 0.2788$	$5.4302 \times 10^{-14}$	0.909	$Y = 0.9022X - 0.2834$	$-3.8317 \times 10^{-14}$	0.950
$Y = 0.7960X$	-0.0538		$Y = 0.8698X$	-0.0566	
$Y = 0.0050X^2 + 0.7412X + 0.0029$	$5.209 \times 10^{-14}$		$Y = 0.0062X^2 + 0.8063X + 0.0097$	$-3.0539 \times 10^{-14}$	

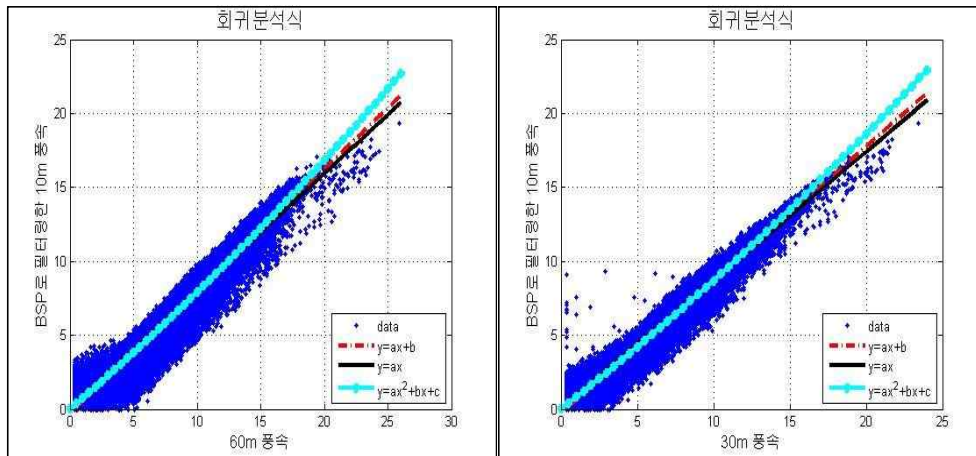


Fig 5.19 Linear least square algorithm result result(10m wind speed using BSF).

### 5.6.2 일부 계절 적용

앞 절에서 계절별 주기 패턴을 확인 하였고 이에 계절별로 24시간 주기의 성분이 강한 지역만 BSF의 적용 가능성을 확인 하였다. 그 결과는 Fig 5.20과 같다.

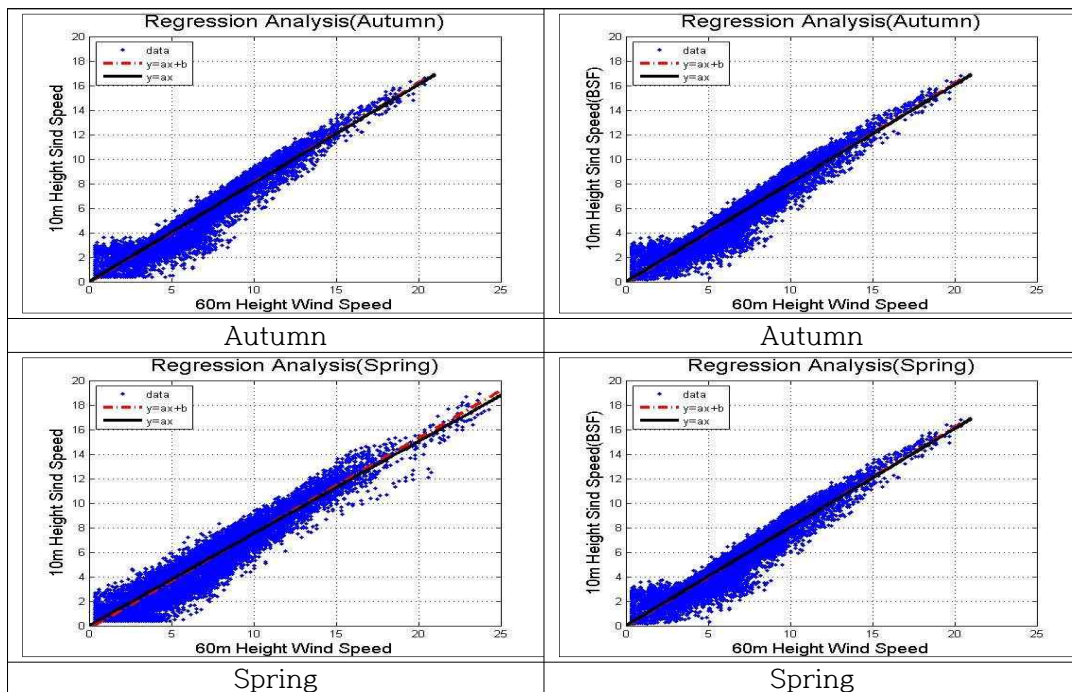


Fig 5.20 Linear least square algorithm result(Autumn and spring 10m wind speed using BSF).

산점도 분석에서 구좌 AWS 풍속에 일주성분을 제거 전 후의 한동의 60m 높이에서의 중첩기간의 풍속간의 산점도이다. 참조데이터에 일주성분을 제거하였을 때가 보다 조밀하게 모여 있다는 것을 알 수 있다. BSF를 적용 전 상관성은 Table 5.7 BSF Table 5.8 .

Table 5.7 Correlation of Gujwa AWS wind speed data and different height(60m, 40m 10m) wind speed data at Handong

$R^2$	60m wind speed	40m wind speed	10m wind speed
Gujwa AWS wind speed	0.7900	0.8156	0.8407

Table 5.8 Correlation of filtering Gujwa AWS wind speed data and different height(60m, 40m 10m) wind speed data at Handong

$R^2$	60m wind speed	40m wind speed	10m wind speed
Gujwa AWS Wind speed to using BSF for spring and autumn season	0.7959	0.8188	0.8390

봄과 가을에 구좌 AWS 풍속에 BSF를 적용한 결과 60m는 0.74%상관계수 증가 효과와 40m는 0.4%증가 효과를 보이고 있었고 10m에서는 -0.2% 하락효과를 보이고 있었다. 10m에서의 상관계수 하락은 지면에 24시 주기의 성분이 강하게 나타나고 있는데 이를 제거하여 분석하였기 때문이다.



## 6. 풍력자원지도 생성의 정확성 향상에 대한 연구

### 6.1 풍력자원지도 생성과정

풍력발전 단지의 개발과정에서 먼저 유망 후보지를 선정하게 된다. 이때의 사용되는 자료로는 풍속지도와 풍력 에너지 지도가 있다. 이를 풍력자원 지도라 한다. 풍력자원지도는 풍황 자료와 지면조도지도와 지형고도지도가 사용된다. 본 장에서는 앞 장에서 제시한 보정된 등고선 지도와 원격탐사 기법을 적용한 지면조도지도의 적용성을 확인하고자 풍력자원지도를 생성하여 검증하였다. 또한 풍력에너지 밀도계산시 사용되는 공기밀도는 압력과 온도를 관측하여 계산되어지기도 하지만 일반식을 이용하여 계산되어지기도 한다. 본 장에서는 각각이 예측 오차를 비교 하였다. Fig 6.1은 풍력자원 지도 생성 과정을 도식하였다.

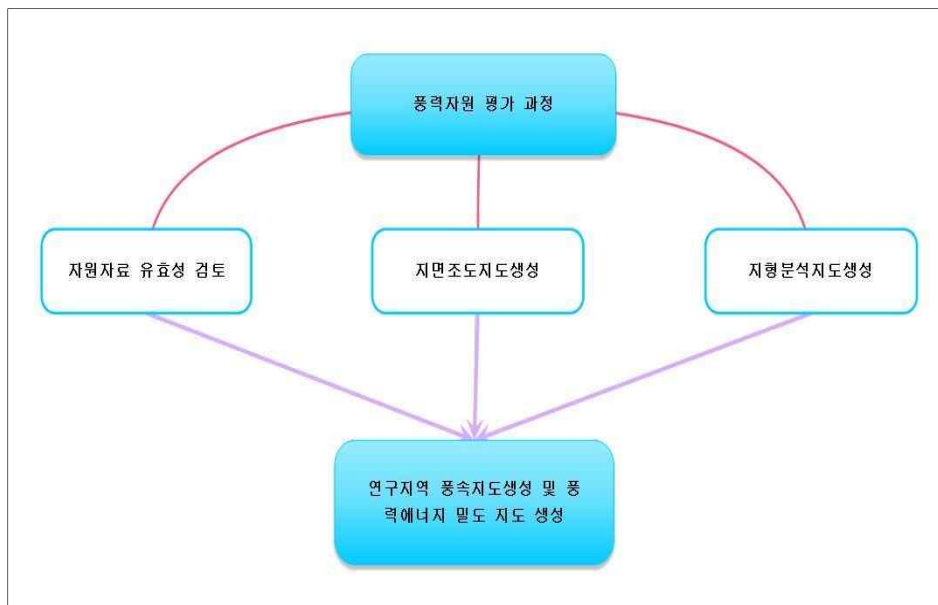


Fig 6.1 Wind Speed and Wind Density Map Generative Processes.

## 6.2 대기밀도와 풍력 에너지 밀도

공기밀도에 따라 풍력발전기에서 생산되는 발전량은 차이를 보인다. 또한, 공기밀도 양에 따라 풍력 에너지 밀도와 Wind Power Class의 계산 값이 영향을 받는다. 일반적으로 공기밀도가 높은 수록 높은 전력에너지를 생산한다. 공기 밀도의 경우 압력과 온도를 관측한 후 계산 되어 진다. 공기 압력과 온도 센서가 설치 되어 있지 않을 경우 풍력공학의 기본서인 “Wind Energy Explained“를 이용하여 일반적 높이에 대한 공기밀도를 이용하고 있다. 해외의 많은 선행 연구들과 특히, 에너지 기술 연구원의 김현구 박사의 연구 결과를 참조 할 때 압력 센서와 온도계를 설치한 경우와 그렇지 않을 경우 풍력 에너지 밀도의 예측량과 AEP의 예측량은  $\pm 3\%$  정도의 오차를 보이는 것으로 알려져 있다.

### 6.2.1 (Air Pressure)

대기의 압력의 경우 고도가 높을수록 감소하는 경향이 있으며 해수면에서의 일반적인 공기 압력은 101.29kPa로 알려져 있다. 표준 대기상황에서의 고도에 따른 압력의 변화는 식 (6-1)과 같다. 또한 높이별 대기압력 변화는 Fig 6.2에 도식하였다.

$$p = 101.29 - (0.011837)z + (4.793 \times 10^{-7})z^2 \quad (6-1)$$

여기서,  $p$ 는 공기의 압력(kPa),  $z$ 는 평균해수면을 기준으로 한 높이(m)이다.

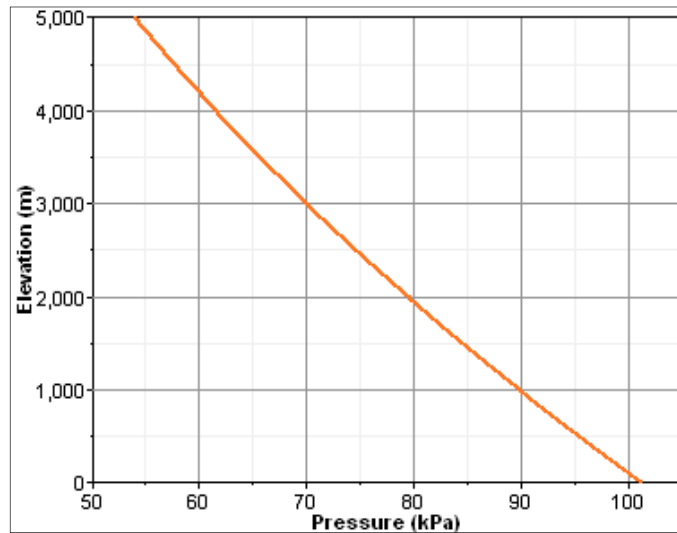


Fig 6.2 Approximates the Air Pressure of the International Standard Atmosphere up to an Elevation (Source : Windographer).

### 6.2.2 (Air Temperature)

대기의 온도 역시 풍력 에너지 밀도와 Wind Power Class의 계산 값이 영향을 미치며 관측치가 없을 경우 대부분의 풍력 관련 소프트웨어에서는 표준 대기 온도를 사용하고 있다. 일반적으로 평균해수면에서의 평균대기온도는 15.010°C이다, 표준 대기상황에서의 고도에 따른 대기온도의 변화는 식(6-2)와 같다. 또한 높이 별 대기온도 변화는 Fig 6.3에 도식하였다.

$$T = T_0 - Bz \quad (6-2)$$

여기서,  $z$ 는 평균해수면을 기준으로 한 높이(m),  $T_0$ 는 표준해수면 온도 [288.16K],  $B$ 는 Standard lapse rate [0.00650K/m]이다.

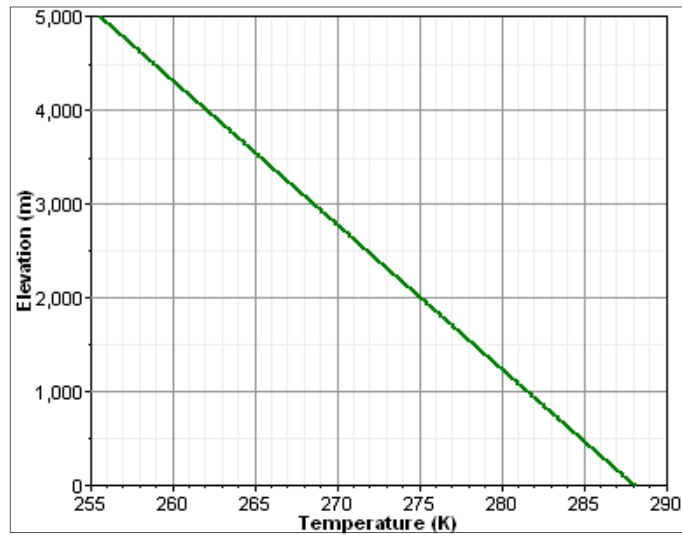


Fig 6.3 Approximates the Air Temperature of the International Standard Atmosphere up to an Elevation (Source : Windographer).

### 6.2.3 (Air Temperature)

공기의 밀도의 경우 압력과 온도의 함수로 계산이 가능하다. 관측 자료가 없을 경우 평균 해수면에서 15°C를 기준으로 공기밀도 상수는  $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 를 사용하고 있으며 대기압과 기온이 모두 측정되었을 경우 Manwell et. Al(2002)에 의해 제안된 식(6-3)으로 계산한다. 또한 높이별 대기밀도 변화는 Fig 6.4에 도식하였다.

$$\rho = \frac{M}{R} \frac{p}{T} = 3.4837 \frac{p}{T} \quad (6-3)$$

, (p) kPa (K) .

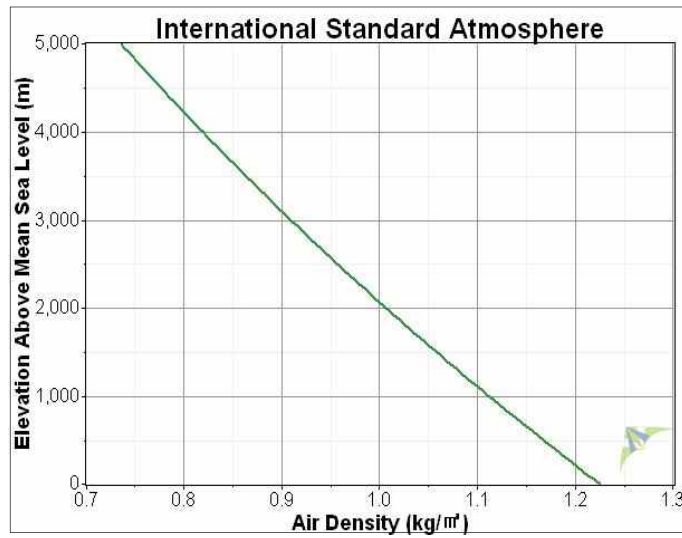


Fig 6.4 Approximates the Air Density of the International Standard Atmosphere up to an Elevation (Source : Windographer).

#### 6.2.4 표준 공기밀도와 관측 공기밀도

한동의 경우 평균 해수면에서 7m 높이, 평대의 경우 21m 높이에 온도계와 압력계가 설치되어 있다. 일반적으로 육상 Met-Mast의 경우 지상에서 2m 지점에 온도와 압력센서가 설치되어 있다. 각 높이의 의한 온도, 압력, 공기 밀도의 변화는 Fig 6.5와 같다.

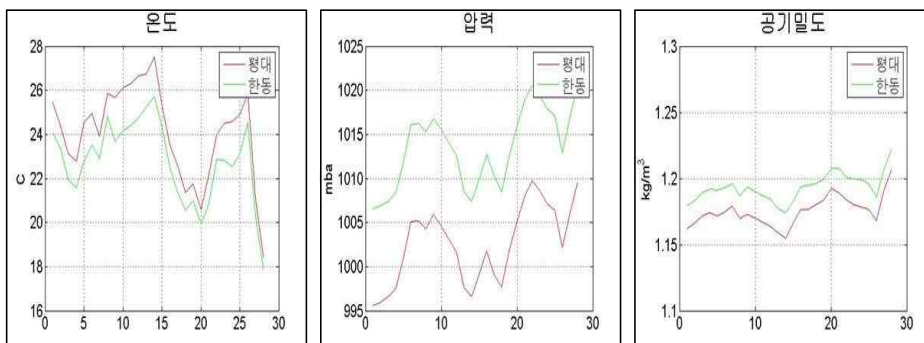


Fig 6.5 Atmosphere at the Handong and Pyeondae Met-Mast.

Manwell et. Al(2002)에 의해 제안 된 압력과 온도의 높이에 대한 감률 비율 이  
 용하여 각각 관측된 온도, 압력을 높이별 감률로 평균 해수면에서 7m로 높이 보  
 정후의 결과는 Fig 6.6과 같았다.

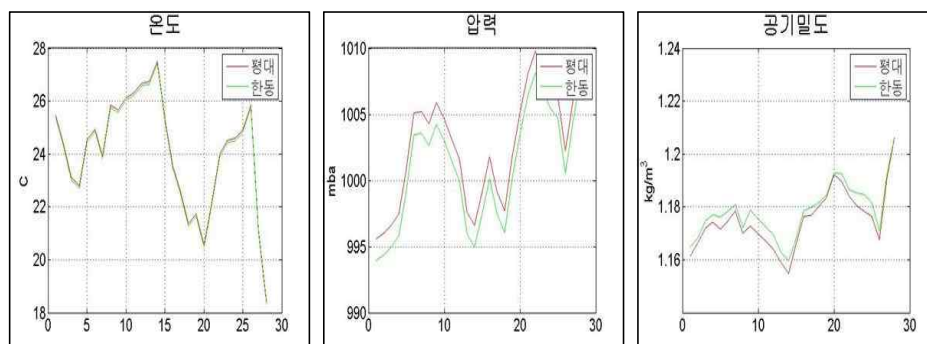


Fig 6.6 Calculating Atmosphere at the same height.

위 식에서 평대와 한동 지역의 온도와 압력의 변화의 높이 보정으로 상당부분  
 일치하는 결과를 얻었고 제주 지역의 경우도 일반적인 온도와 압력의 높이에 따  
 른 감률 적용이 제주 지역에 가능하다는 것을 확인하였다. “제주 북동부 지역의  
 지형에 따른 AEP계산의 정확성에 대한 연구”(고정우 외, 2012)에서 관측데이터  
 를 이용하여 높이별 표준 대기 밀도값을 이용 AEP 계산한 결과와 관측값을 이  
 용한 고도 보정 한 대기 밀도값을 이용 AEP계산의 결과를 비교한 결과하면 여  
 름 기간에는 높이별 표준 대기 밀도값을 이용하여 계산 한 결과가 관측치 보다  
 높게 나왔으며 겨울기간에는 관측치가 높이별 표준 대기 밀도값을 이용한 계산  
 치 보다 더 크기 나왔다. 이는 에너지 기술 연구원의 김현구 박사의 연구 결과와  
 같은 범위 안의 오차를 보이고 있다.

#### 6.2.5 (Wind Power Density)

(6-4)

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (6-4)$$

여기서,  $P/A$ 는 단위 면적당 풍력에너지 밀도이다.[ $W/m^2$ ],  $\rho$ 는 공기의 밀도이다.  $U$ 는 평균풍속을 이야기 한다. 일반적으로, 기상탑 데이터의 경우 10분 평균을 관측하게 되어 있다. 각각의 10분 평균들에 대한 공기밀도와 풍속데이터로 10분간의 풍력에너지밀도를 구하여 평균을 하면 그 지역의 풍력에너지 밀도가 된다.

### 6.2.6 Energy Pattern Factor

관측된 각 10분간의 평균을 데이터(공기압력, 대기온도, 풍속)를 이용하여 풍력에너지 밀도를 구한 후 이를 평균한 것이 그 지점의 평균에너지 밀도가 된다. 평균풍속의 3승과 평균에너지 밀도와의 차이를 Energy Pattern Factor라 하고 식 (6-5)

$$K_e = \frac{1}{N\bar{U}} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (6-5)$$

,  $N$ 은 관측된 총 개수를 의미하며  $U_i$ 는 각 관측 평균 풍속을 의미하며  $\bar{U}$ 는 평균 풍속을 의미한다.

$$\text{Energy Pattern Factor} \quad (6-6)$$

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^3 K_e \quad (6-6)$$

### 6.2.7 Wind Power Density

50m의 Wind Power Density계산 방법은 다음과 같다. 먼저 각 높이에서의 Energy Pattern Factor를 고려한 풍력에너지 밀도를 구한다. 만약 같은 높이에

두 개 이상의 풍속이 관측되었다면 각각의 풍력에너지밀도를 구한 다음 평균을 낸다. 높이별 풍속변화는 대수법칙(logarithmic Profile)이라 가정을 한다. X축을 자연로그를 이용한 높이 축으로(The natural logarithmic of height) Y축은 그 높이에 대응하는 풍력에너지 밀도를 입력한다. 각 데이터로부터 최소제곱법을 이용한 선형방정식을 만들며 50m에 대응하는 풍력에너지 밀도를 계산하면 50m의 풍력에너지 밀도를 계산 하게 된다. 그 개념을 Fig 6.7에 도식 하였다.

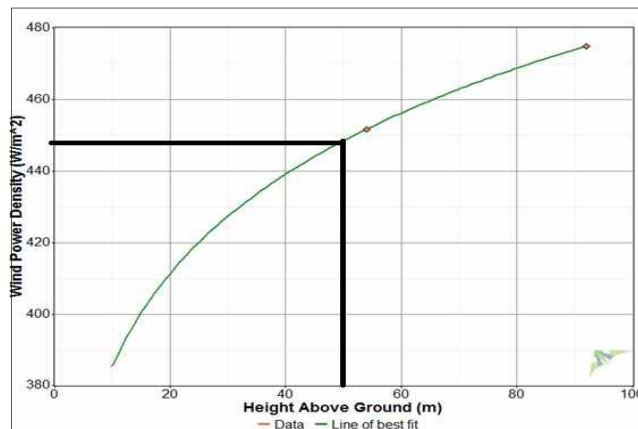


Fig 6.7 Calculating the Mean Wind Power Density at 50m.

#### 6.2.8 공기밀도의 변화와 풍력에너지 밀도

한동 지역의 2010년 12월 20에서 2012년 21월 31일까지의 데이터를 이용하여 공기압력과 온도를 계측치를 이용한 공기밀도와 일반식에 의한 공기밀도를 계산한 후 높이별 풍력에너지 밀도를 계산 하였다. 그 결과는 Table 6.1과 같다. 표에서 보여 지듯이 압력보다 온도가 예측정확성에 더 많은 영향을 주고 있었고 일반식을 이용하였을 경우 높이별로 약  $4 W/m^2$ 를 과소예측하고 있었고 온도 계측치를 사용하고 압력은 일반식을 사용하였을 경우 약  $0.5 W/m^2$ 를 과소예측하고 있었다. 또한, 대기압력 계측치를 사용하고 온도는 일반식을 사용하였을 경우 약  $3.8 W/m^2$ 를 과소예측하고 있었다.



Table 6.1 Calculating the mean wind power density

	To calculate measured air pressure and temperature data	To calculate International Standard Atmosphere	To calculate only measured air temperature data	To calculate only measured air pressure data
Height (m)	Wind Power Density ( $W/m^2$ )			
60	488	484	488	485
58	483	479	483	479
50	457	452	456	452
40	412	408	411	408
30	376	372	376	372
10	248	245	247	245

### 6.3 유력후보지 선정 단계의 풍력자원지도

Fig 6.8은 한국에너지 기술 연구원에서 제공하는 국가 바람지도 중 제주지역만을 그림이다. 한국에너지 기술 연구원이나 기상청에서 제공하는 유력후보지 선정 단계에서의 풍력자원지도는 우리나라 전역을 대상으로 하기는 하지만 공간 해상도가 큰 편이다. 이에 유력 후보지 선정 단계에서 의사결정을 내리기에는 미흡한 점이 있다.

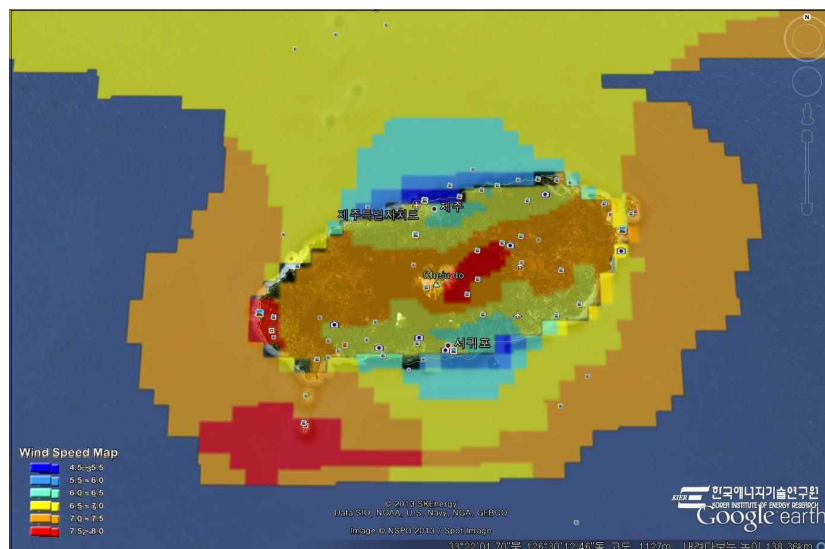


Fig 6.8 Wind Speed Map in the Jeju Island.

#### 6.4 단기풍력자원지도 정확성 향상

본 논문의 3장과 4장에서 제시한 보정된 등고선 지도와 원격탐사기법을 적용한 지표면 조도지도를 적용하여 최대 빈도 필터를 처리한 지면 조도 지도의 타당성을 검토하기 위하여 제주 북동부 지역 풍속 지도를 생성하였다. 한동, 평대, 우도의 Met-mast자료 중 관측 기간이 중복되는 2010년 12월 21일 ~ 2011년 5월 31일 까지 약 5개월의 데이터를 이용하였다. 한동과 우도의 풍향 데이터를 이용하여 풍속 지도를 생성하고 평대의 Met-mast자료는 검측 데이터로 사용하였다. 지면에서 60m의 풍속 지도를 생성하였다. 지면 조도 입력방법은 사진 지도 영상을 엔지니어가 디지털화하여 입력하는 방법, Online에서 제공 되는 지면조도지도를 이용하는 방법과 사용자가 제작한 지면조도지도를 이용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 지면 조도 입력방법은 사진 지도 영상을 이용하는 방법은 엔지니어의 경험에 따라 그 결과가 상의함으로 배제하였다. Online에서 제공 되는 지면조도지도와 본 연구에서 제시한 지면 조도 지도를 이용하여 각각의 풍속지도를 생성하였다. 현재 WindPRO의Online 서비스에서 제공 되는 지면조도지도는 최소공간의 면적은  $1km^2$  ~  $500m^2$ 인 토지피복도를 제공하고 있으며 이 토지피복도에 기존에 연구되어 있는 지역들의 조도계수를 선택하여 입력하여 지면조도지도를 생성하게 되어 있다.

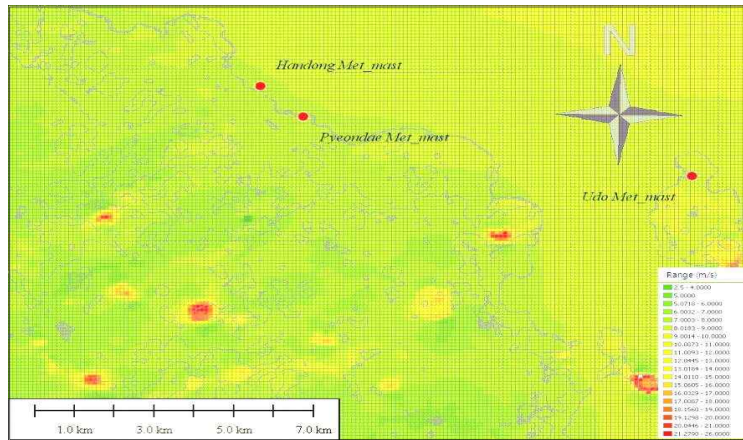


Fig 6.9 Wind speed map of the Northeastern Jeju Island using online data.

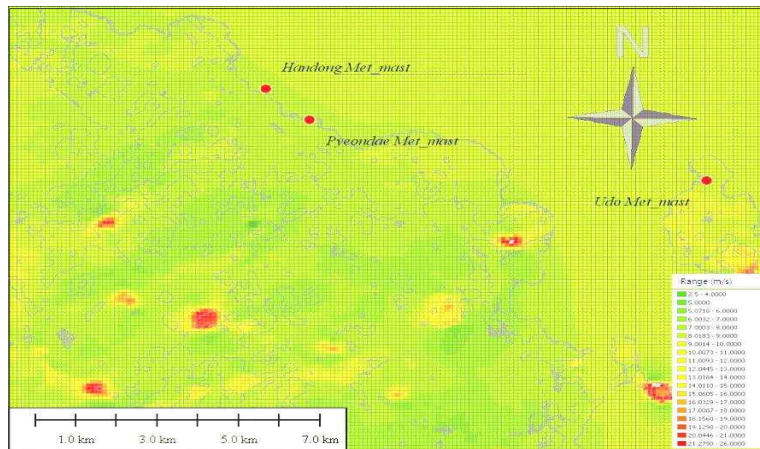


Fig 6.10 Wind speed map of the Northeastern Jeju Island using remote sensing technique.

풍속지도 Fig 6.9은 WindPRO의 Online 서비스를 이용하여 지표면조도지도를 생성하여 풍속지도를 생성한 결과이며 풍속지도 Fig. 6.10는 본 연구에서 제한한 영상분류와 제주지역 조도계수를 계산하여 생성한 지표면 조도지도를 입력하여 생성한 풍속 지도이다. 평대의 Met-mast 위치를 참 값으로 하였을 때 WindPRO의 Online 서비스를 이용하였을 때와 본 연구에서 제안한 방법에 의한 평대 지역의 풍속 예측 값은 Table 6.2와 같다.

Table 6.2 Comparing predicted and measured values of wind speed

	Measured values of wind speed	Predicted values of wind speed	
		WindPRO's Online	Using remote sensing technique
60m height wind speed at Pyeongdae	8.73m/s	8.51m/s	8.69m/s

WindPRO에서 제공하는 지면조도지도를 활용하였을 경우 평대 Met-mast 위치에서 8.51m/s를 예측 하였고 본 연구에서 제시한 지면 조도 지도를 활용하였을 경우 8.69m/s의 풍속을 예측 하였다. 평대의 Met-mast의 중첩기간의 풍속은 8.73m/s을 나타내었다. Online에서 제공 되는 지면조도지도를 활용하였을 경우 약 2.52%의 예측오차를 보였지만, 본 연구에서 제시한 지면 조도 지도를 활용하였을 경우 약 0.46%의 예측오차를 보였다. 풍력에너지는 풍속의 3승에 비례하므로 풍력에너지 밀도지도를 생성 하였을 시에는 그 오차의 정도는 더 크다고 할 수 있다.

### 6.5 장기풍력자원지도 정확성 향상

5장의 5.6절의 결과를 바탕으로 참조 데이터의 BSF의 적용 가능성을 확인하고자 한동과 구좌AWS의 데이터를 이용하여 풍력 에너지 밀도 지도를 생성한 결과는 다음과 같다. 구좌AWS데이터를 이용하여 에너지 지도 생성시와 봄과 가을에 BSF를 처리한 결과를 이용하여 에너지 지도를 생성한 결과 BSF를 처리한 결과가 에너지 밀도가 더 높게 나타나고 있었다. Fig 6.11은 일반적인 방법을 이용하여 생성한 에너지 밀도 지도이며 Fig 6.12는 본 논문에서 제시한 BSF를 적용하여 생성한 에너지 밀도 지도이다.

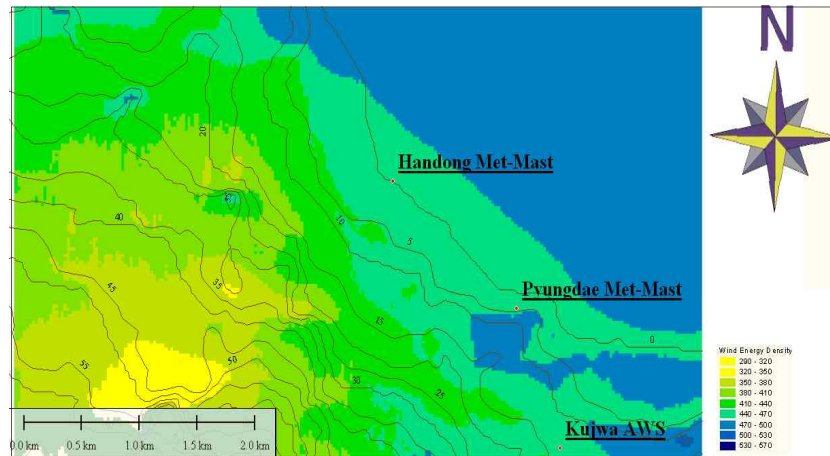


Fig 6.11 The result of designing energy map using Handong and Gujwa Data.

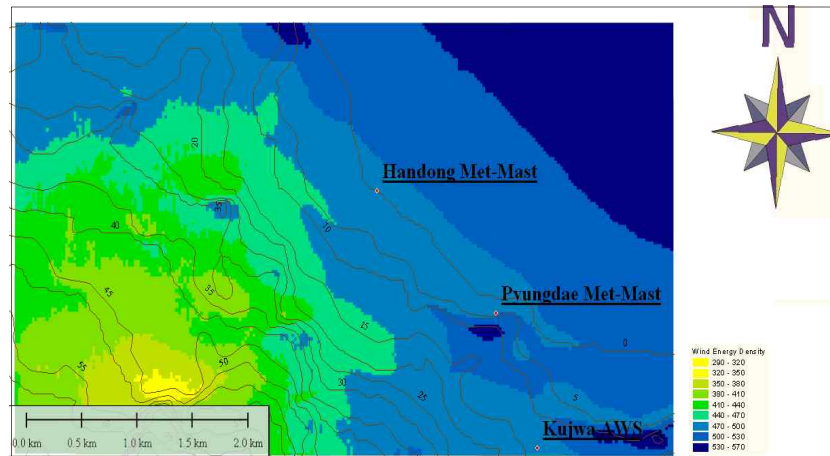


Fig 6.12 The result of designing energy map using Handong and filtered Gujwa Data.

정확성 검증을 위해 필터링 전후의 에너지지도의 평대 Met-Mast위치에서의 에너지 밀도와 평대의 고도 60m에서 풍속을 이용하여 풍력 에너지 밀도를 생성한 후 비교하였다. 실관측된 평대의 동기간의 에너지 밀도 값을 참값으로 가정하였다. 구좌 AWS자료만을 가지고 에너지 지도를 생성 하였을 때의 평대 Met-Mast 위의 에너지 밀도는 458.7988W/이었고 구좌 AWS자료를 봄과 가을 기간에 대하여 BSF를 적용한 경우 에너지 밀도는 495.3456W/이었다. 평대 Met-Mast위치의 60m의 에너지 밀도를 계산 한 결과 532.705W/이었다. 결과적

으로 BSF를 적용하지 않은 경우 14%의 풍력에너지의 예측 오차를 보였지만 봄과 가을에 BSF를 적용한 경우 7%의 예측오차를 보여 제안한 BSF를 적용한 경우가 관측치에 더욱 근접 값을 예측하고 있었다. 이 결과는 장기 AWS데이터에 BSF

## 7장 해양환경자료 분석 및 평가

### 7.1. DLC

풍속에 의해 풍력 터빈에 직접 하중이 작용하는 부분은 블레이드, 나셀, 타워 등이 있으며 정하중과 반복하중, 순간하중(transient load), 확률하중(stochastic loads), 결합하중 등으로 나누어진다(황병선). 또한 IEC 61400-1에서는 이런 하중 조합과 풍력발전시스템의 정상발전 시 뿐만 아니라 긴급정지 시, 고장 시 및 각종 비정상 풍속의 설계하중 케이스를 가정하고 있다. 육상의 경우 풍력발전시스템의 상태와 외부조건 조합으로 정의 하는 설계하중케이스(DLC; Design Load Cases)는 약 1000가지가 넘는다. IEC 61400-3에서는 IEC 61400-1의 DLC에 해상에서 일어나는 하중조건을 조합하여 안정성을 계산하라고 하고 있다. 이 경우 해상풍력발전시스템의 DLC와 계산에 걸리는 시간은 2배 이상 증가하게 된다. 또한 경제적인 이유로 인하여 해상의 하부지지 구조물의 설계 개념은 Soft-stiff 구조물(구조물의 1차 고유 주파수가 1P와 3P 사이에 있는 구조물)로 설계 되고 있다. 또한 풍력발전시스템은 더 많은 에너지 효율을 얻기 위하여 고정 속도 발전 시스템에서 가변 속도 발전시스템으로 변화하고 있으며 Soft-Stiff 설계를 위한 간격이 좁아지는 것을 의미한다. 해상 풍력발전시스템의 경우 그 설계기준이 매우 까다롭고 오랜 계산시간이 필요함을 의미한다. 해상풍력발전시스템은 지지구조물의 설계는 토목, 해양, 전기, 기계의 전공에 대한 이해를 필요로 하는 복합학문이다. 현재 우리나라의 경우 통합하중으로 해석을 하여야 함에도 각 분야 별로 연구가 진행되고 있다. 하지만 풍력발전시스템은 각 분야별 기준에 의한 계산 결과의 합산과는 다른 경향을 보인다. 또한 해상풍력발전시스템의 경우 해양환경하중의 중요한 하중요건으로 포함 됨에도 이에 대한 기초연구 및 해양환경하중조사는 미비한 실정이다. 해상풍력발전시스템은 지지구조물의 설계는 극한 하중해석, 고유 진동수 해석과 피로 강도 해석으로 크게 분류할 수 있다.

### 7.1.1 중력파에 의한 하중

IEC 61400-3

취송류, 중력파에 의한 하중이 추가적으로 포함된다. 바람에 의한 흐름인 취송류, 조석, 조류는 임의 알려진 공식에 의하여 실관측으로 계산이 되지만 중력파에 의한 하중은 해저면의 변화에 따라 에너지의 변화를 보일 수 있다. 해상 풍력발전 시스템의 구조물에 의한 파랑해석을 하기 위해서는 기본적으로 중력파의 성격을 우선적으로 이해해야 된다. 중력파는 풍파의 일종이다. 풍파(Wind wave)란 바람에 의해서 발생하는 파이다. 기본적으로 중력파(Gravity wave)로서 가장 일반적으로 이용되는 이론은 미소진폭파이론(small amplitude wave theory)이다. 지구의 중력의 복원력으로 작용하는 파이다. 해양에서는 또한 파장과 수심의 상대적인 비율로 천해파와 심해파로 구분하여 사용한다. 또한 해양의 수심변화에 따라 상대적 속도 변화에 의한 파의 굴절(Wave Refraction)과 파고의 성장인 천수계수(Shoaling coefficient) 및 구조물 혹은 섬에 의한 회절(Diffraction) 역시 하중 계산 시 파의 에너지의 변화 및 파고에 영향을 줄 수 있다. 이 부분에 대한 자료를 Table 7.1과 7.2에 정리하였다. 수심에 따라서 파의 위상속도와 파의 군속도가 변화함을 알 수 있고 풍력구조물에 미치는 파의 에너지, 파의 속도 등을 계산할 수 있다. 또한 Fig 7.1에서 천해파, 중간파, 심해파의 개념을 나타내었다. 일반적으로 수심이 낮은 경우를 천해파 영역이라 인식하고 있는데 천해파와 심해파의 구분은 상대수심의 차이이며 파고에 의해 그 경계영역이 변화된다고 이해하는 것이 정확하다.



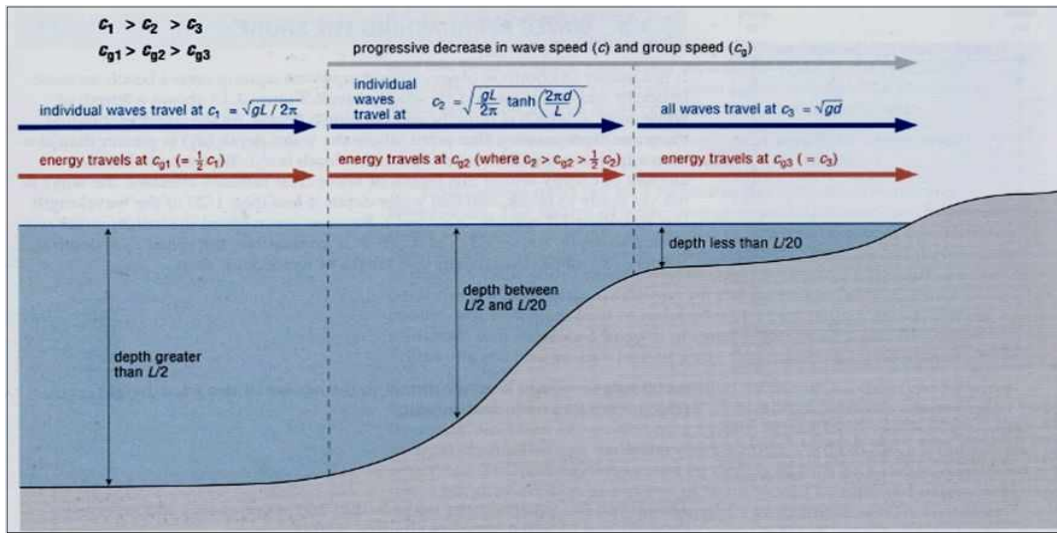


Fig 7.1 Shallow Water Wave & Deep Water Wave concept (Source : unknown).

Table 7.1 Gravitational Wave Characteristics of Ocean\_1

Relative Depth	$\frac{H}{L} \leq \frac{1}{25}$ (Shallow Water Wave)	$\frac{1}{25} \leq \frac{H}{L} \leq \frac{1}{2}$ (Transitional Water Wave)	$\frac{H}{L} \geq \frac{1}{2}$ (Deep Water Wave)
$\tanh(kH)$	$kH$	-	1
Phase Speed	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gH}$	$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi H}{L}\right)$	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
Wave length	$L = \sqrt{gH} T$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi H}{L}\right)$	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$
	$L \approx \frac{gT^2}{2\pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{4\pi^2 H}{T^2 g}\right)}$ Enkant(1952)		
Group Wave Speed	$C_g = \frac{L}{T} = \sqrt{gH}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi H}{L \sinh(4\pi H/L)}\right] C$	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$
Water Particle Speed	$u = a \sqrt{\frac{g}{H}} \cos\theta$ $w = \frac{h\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{H}\right) \sin\theta$	$u = a \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+H)/L]}{\cosh[2\pi H/L]} \cos\theta$ $w = a \frac{gT}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+H)/L]}{\cosh[2\pi H/L]} \sin\theta$	$u = \frac{\pi h}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos\theta$ $w = \frac{\pi h}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin\theta$

Table 7.2 Gravitational Wave Characteristics of Ocean\_2

Relative Depth	$\frac{H}{L} \leq \frac{1}{25}$ (Shallow Water Wave)	$\frac{1}{25} \leq \frac{H}{L} \leq \frac{1}{2}$ (Transitional Water Wave)	$\frac{H}{L} \geq \frac{1}{2}$ (Deep Water Wave)
Wave Energy	$E = \frac{1}{2} \rho g a^2$ (L: 파장, a:진폭, u: x-방향유속, v: y방향유속, g: 중력가속도, h: 파고, H: 전체수심, z: 임의의 수심, T: 주기, C: 위상속도, Cg: 군속도)		
Water Particle Acceleration	$a_x = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{H}} \sin\theta$ $a_z = -2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 \left(1 + \frac{z}{H}\right) \cos\theta$	$a_x = \frac{g\pi h}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+H)/L]}{\cosh[2\pi H/L]} \sin\theta$ $a_z = -\frac{g\pi h}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+H)/L]}{\cosh[2\pi H/L]} \cos\theta$	$a_x = 2h\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin\theta$ $a_z = -2h\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos\theta$
	$\text{천수계수 } K_s = \sqrt{\frac{C_{R2}}{C_{R1}}}$ $\text{Snell's law } \frac{\sin\theta_0}{\sin\theta} = \frac{L_0}{L} = \frac{C_0}{C}$ $\text{회절계수 } K_r = \sqrt{\frac{b_o}{b}} = \sqrt{\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta}} = \sqrt{\frac{(1 - \sin\theta_0)}{(1 - \sin\theta)}}$		

### 7.1.2 안전 상태 응답 범위

구조물은 질량과 탄성이 존재하며 외부하중이 작용하였을 때 하중이 감소되며 고유한 주파수로 반복 운동을 하려는 특성을 가진다. 이때의 진동을 구조물의 고유주파수(Natural frequency)라 한다. 시계열 외부 하중이 주기성을 가지게 되면 이를 가진(excitation)하중이라고 한다. 가진 하중이 구조물에 작용하면 가진 하중의 주파수의 영역에 따라 구조물의 하중에 대한 응답의 형태는 Quasi-static (준정적 상태), Resonance (공진 상태), Inertia dominated (관성 지배 상태)로 반응을 하게 된다.

◎ Quasi-static (준정적 상태) : 시계열 조화 하중(가진 하중)의 주파수가 구조물의 고유주파수보다 작은 경우로 시간에 따라 변화하는 힘에 구조물이 즉각적으로 반응한다. Fig 7.2는 준정적 상태를 도식 하였다.

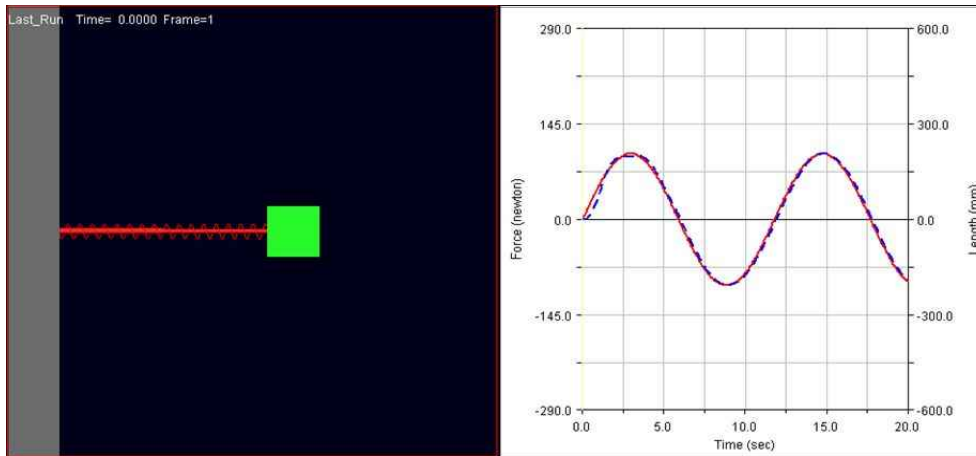


Fig 7.2 Quasi-static response (DUWIND, TUDelft).

◎ Resonance (공진 상태) : 시계열 조화 하중(가진 하중)의 주파수가 구조물의 고유주파수와 비슷한 영역일 경우 두 개의 주기의 파의 합성과 같은 현상이 일어나게 되고 Fig 7.3과 같이 시간이 긴 주기성 파동의 형태로 하중이 증가 하게 된다(맥놀이 현상).

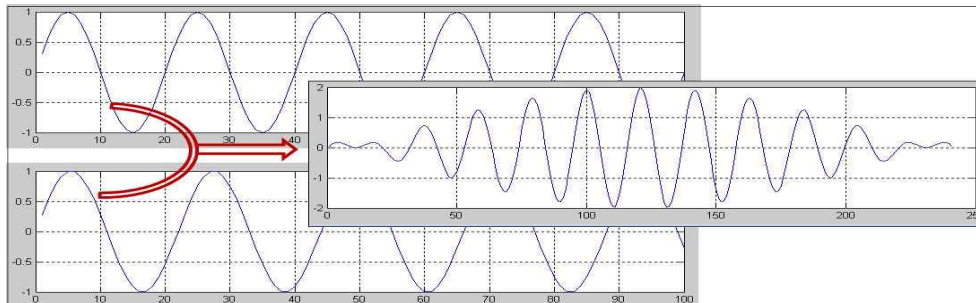


Fig 7.3 Beating phenomena.

이런 맥놀이 현상이 일어나는 경우를 공진이라고 하며 구조물은 외부에서 관측된 하중보다 몇 배 강하게 작용하는 것처럼 느끼며 하중의 변화가 급격히 커지므로 인하여 구조물의 피로파괴에 영향을 준다. 이로 인하여 구조물의 기대 수명이 짧아지며 순간적으로 허용응력 이상의 응력을 받아 손상과 심지어 파괴까지도 일어날 수 있다. Fig 7.4는 공진 상태를 도식하였다.

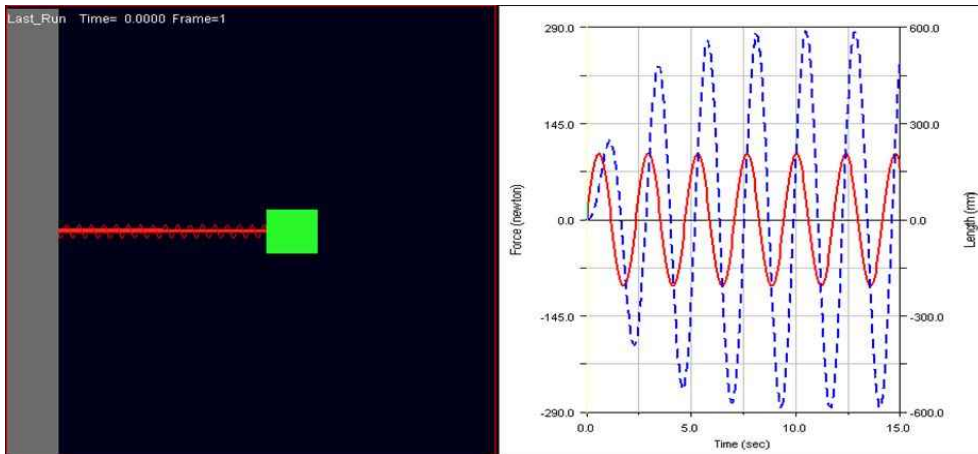


Fig 7.4 Resonance (Source : DUWIND, TUDelft).

◎ Inertia dominated (관성 지배 상태) : 시계열 조화 하중(가진 하중)의 주파수가 구조물의 고유주파수보다 훨씬 길 때의 구조물의 동적응답은 가진 하중보다 작은 하중이 구조물에 작용하는 것과 같은 효과를 나타내게 된다. Fig 7.5는 관성 지배 상태를 도식하였다.

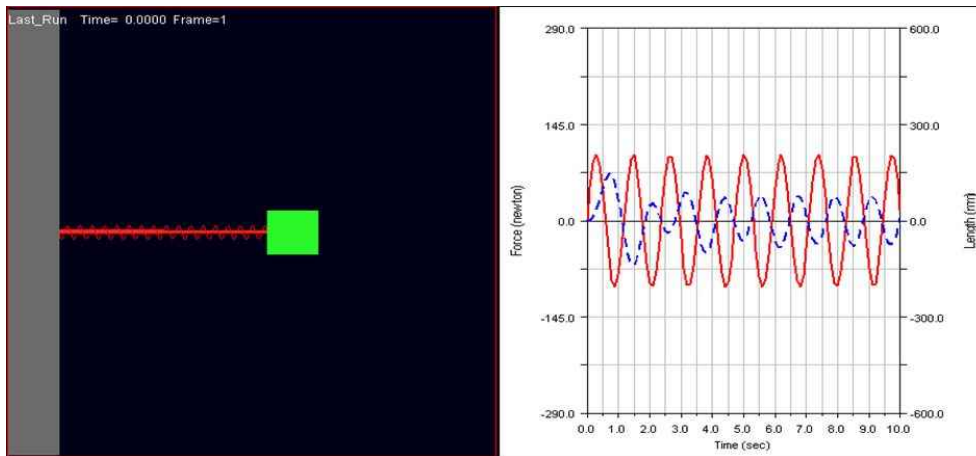


Fig 7.5 Inertia dominated or Over excited (Source : DUWIND, TUDelft).

시계열 하중의 주파수 영역에 따라 구조물의 동적응답 상태가 실제 하중보다 다르게 나타나게 되는 현상을 가진(excitation)이라고 한다. 풍력발전시스템의 경우 블레이드의 회전과 Wind Shear로 인한 풍하중의 불균형에 의해 주기적인 진동

을 발생하게 된다. 브레이드가 120° 회전 하면서 발생하는 가진을 1P, 240° 회전 하면서 발생하는 가진을 2P, 360° 회전 하면서 발생하는 가진을 3P라 한다. 이 개념을 Fig 7.6에 도식 하였다.

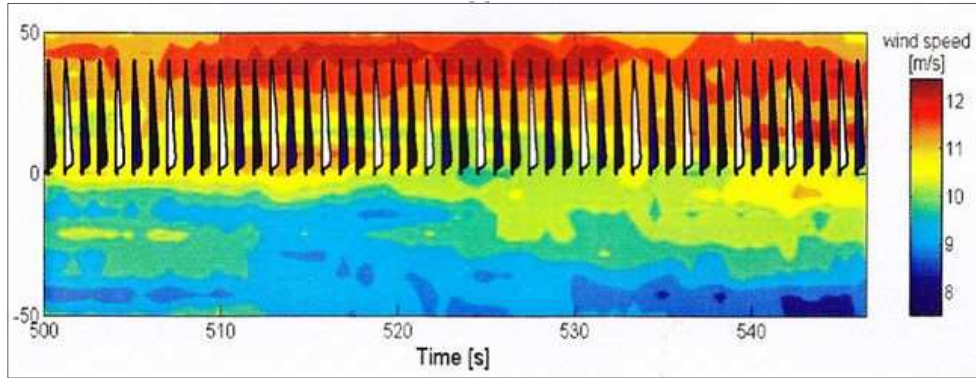


Fig 7.6 The concept of a wind turbine system 1p, 2p & 3P  
(해상풍력발전시스템 설치를 위한 파랑 해석과 해양구조물 설치를 위한 기초연구-두산중공업보고서 2012).

또한 해상의 경우 해양환경하중 중 풍파에 성장에 의한 Wave Spectrum이 이런 가진 현상을 야기 시킬 수 있다.

### 7.1.3 Campbell Diagram

진동은 구조물의 동적응답 상태에서 공진에 의한 파괴와 피로파괴에 의한 구조물의 기대수명 단축에 영향을 준다. 풍력공학에서는 이런 공진에 구조물의 고유주파수에 대한 설계 요구조건은 공진선도(Cambell Diagram)을 이용하여 검토하고 있다. Delft University of Technology의 Michiel Zaaijer 의해 2010년에 개발된 프로그램은 해상 풍력발전시스템의 공진선도(Cambell Diagram)를 개략적으로 검토할 수 있게 개발 되었다. 하지만 해양의 스펙트럼은 PM Spectrum만 적용이 가능하며 구조물의 고유진동 역시 지반 조건에 따라 변할 수 있지만 이런 부분에는 한계를 드러낸다. 하지만 풍속에 따른 PM Spectrum의 변화, 수심의 변화, 풍력발전시스템 모델에 따른 무게, 1P와 3P의 변화, 모노파일의 제원 등을

통하여 고유주파수 설계 기본 검토 및 하부 구조물의 허용응력검토와 좌굴에 대한 검토가 가능하다. Campbell diagram을 Fig 7.7에 도식 하였다.

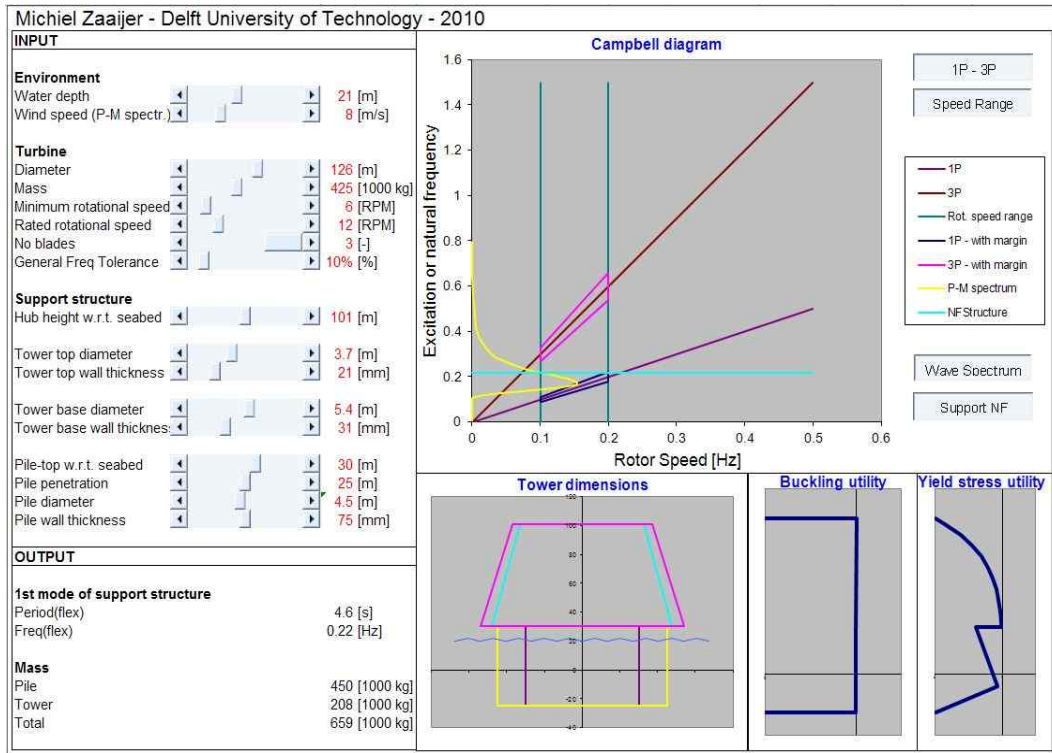


Fig 7.7 Campbell diagram (DUWIND, TUDelft)

## 7.2 해양 환경 하중의 이론적 배경

해상 풍력 구조물은 육상에서 고려하는 하중 조건 이외에도 해상에서 작용하는 해양환경하중이 추가적으로 작용하게 된다. 해상에서 고려하여야 할 해양환경 하중으로는 조석과 조류 해류와 파랑이 있다. 수심, 파랑, 염해 등의 영향을 예측하지 못한 독일의 경우 해상풍력발전시스템이 무용지물이 되어 막대한 경제적 손실을 입었고, 해양생태계에 심각한 문제를 야기 시켜 설치중인 해상풍력단지의 중단뿐만 아니라, 캐나다의 온타리오 주 정부는 2011년 추가적인 과학적 연구가 이루어질 때까지 해상풍력 발전 불허를 선언하였다.

### 7.2.1 해양파의 특성

이런 파동의 특성은 시계열 자료이다. 시계열 자료란 시간의 흐름에 따라 관측되는 자료로써, 이러한 시계열 자료를 토대로 시계열이 생성되는 과정을 체계적으로 이해하고 미래를 예측하기 위해 분석하는 것을 시계열 분석이라고 한다. 이런 시계열 분석의 기본적인 방법은 시간영역 분석(time domain analysis)과 주파수 영역분석(frequency domain analysis)이다. 이 두 방법은 접근 방법에서 서로 구분 되지만 서로 배타적 이론이 아니라 상호 보완적인 방법이다. 일반적으로 해양의 파를 관측하는 방법으로 수압식 파고계를 이용하여 압력을 수심으로 변환하게 된다. 압력을 수심으로 변환하는 관측된 압력데이터에서 대기압을 제거해준다.

$$pressure = p - Atmospheric \ (dBar) \quad (7-1)$$

압력은 수심의 증가함에 따라 증가하는 경향이 있다. 이를 이용하여 압력으로부터 깊이를 산출한다. 설치된 파고계는 움직임이 없으므로 예산된 깊이는 해면의 수직 운동 높이의 변화를 의미하고 즉 파고가 된다. 파고 계산식은 식(8-2)와 같다.

$$depth = \frac{pressure}{0.98065\rho} \ (m) \quad (7-2)$$

여기서,  $\rho$ 는 해수의 밀도가 된다. 일반적으로 압력계에서 파고로의 변환은 UNESCO (UNESCO Technical Paper in Marine Science No. 44. UNESCO 1983)의 사용된다. 이 방법은 먼저 위도를 이용하여 그 지역의 중력가속도를 구하고 파고를 산출한다.

$$\begin{aligned}
 x &= \sin(\text{latitude}) & (7-3) \\
 g &= 9.780318(1 + 5.2788e - 3x^2 + 2.36e - 5x^4) \\
 &\quad + 1.092e - 6\text{pressure}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{depth} &= \frac{1}{g} \sum_{i=1}^4 c_i \text{preesure} & (7-4) \\
 \text{where, } c_1 &= 9.72659 & c_2 = -2.2512e - 5 \\
 c_3 &= 2.279e - 10 & c_4 = -1.82e - 15
 \end{aligned}$$

## 7.2.2 (Time domain analysis)

### 7.2.2.1 파동의 기본 용어

해양의 파는 규칙적 혹은 불규칙한 해면의 승강운동으로 이런 시계열 자료로부터 파고와 주기를 어떻게 정의 하는가 하는 문제가 발생한다. 이를 위해 먼저 파동의 기본적인 정리가 필요하다. 해면의 가장 높은 꼭대기를 마루(crest), 가장 낮은 골짜기를 골(trough), 인접한 두 마루와 마루 사이의 거리 또는 골과 골 사이의 거리를 파장(wave length,  $\lambda$ ), 파장의 역수를 마루(wave number,  $k$ ), 마루와 골 사이의 연직거리를 파고(wave heght), 평균 해면으로부터 마루 또는 골까지의 연직거리를 진폭(amplitude,  $a$ )이라 한다. 진폭은 파고의 절반(1/2)과 같다. 연속된 두 마루가 고정점을 통과하는데 걸리는 시간을 주기(period,  $T$ )라하고 주기의 역수를 주파수(frequency,  $f$ ), 주파수에  $2\pi$ 를 곱한 것을 각주파수(angular frequency,  $\omega$ )

speed,  $C$ )

Fig 7.8



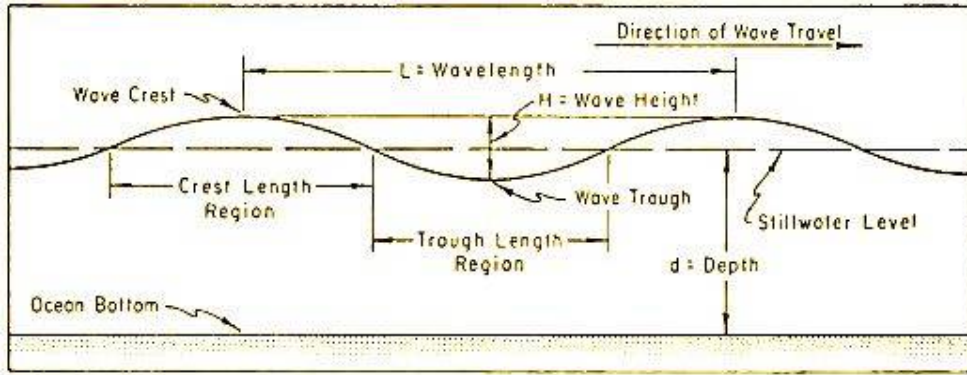


Fig 7.8 The concept of ocean wave.

#### 7.2.2.2 개별파

해양의 파는 아래의 그림과 같이 불규칙적인 신호와 같다. 그림에서 횡축은 시간에 따른 파면(wave elevation)의 변화를 나타낸다. 이런 불규칙한 파의 시계열 정보로부터 유의 파고, 최대 파고들을 구하기 위해서는 개별파고를 구하여야 한다. 개별파고를 구하는 방법에는 Zero-up crossing method와 Zero-down crossing method이 가장 많이 사용된다. 그림에서 정의된 것과 같이 영점을 음에서 양으로 교차하는 점을 Zero-up crossing point라 한다. Zero-up crossing point Zero-up crossing point Zero-up crossing period . Zero-up crossing point (Positive Amplitude), 가장 낮은 진폭을 음의 진폭(Negative Amplitude)이라 하고 양의 진폭과 음의 진폭간의 높이차를 파고(Wave height)라 정의한다. 이들 각각의 파고와 주기를 개별파의 파고와 주기라 한다. Zero-up crossing method의 기본 개념을 Fig 7.9에 도식하였다.

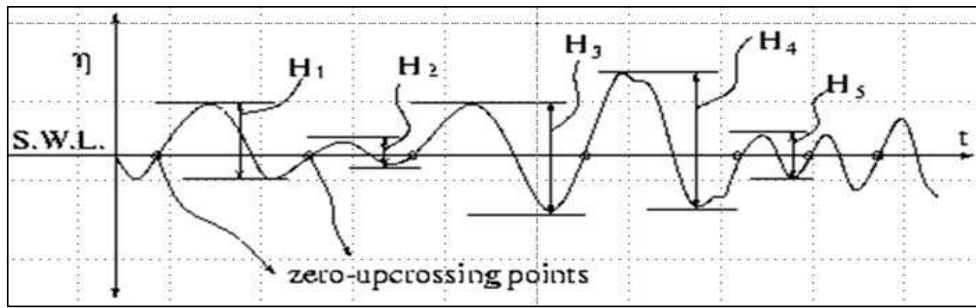


Fig 7.9 Zero-up crossing method.

여기서, Still water level이란 관측된 파고계 데이터에서 주기적 성분인 조석성분을 제거한 후 데이터들의 평균을 의미한다.

### 7.2.2.3 개별파를 이용한 통계적인 대표파

Zero-up crossing method 혹은 Zero-down crossing method 방법을 이용하여 구한 개별파를 이용하여 얻어진 개별파들을 이용하여 통계적인 대표파를 정의하여 공학적 해석에 이용된다. 통계적인 대표파에는 주로 다음의 최고파, 1/10 최대파, 유의파, 평균파의 4가지 파로 나타낸다.

- ◎ 최대파고( $H_{\max}$  ; highest wave height) : 개별파들 중의 최고의 파, 어떤 지점에서 관측된 일련의 파중 파랑이 가장 파의 파고
- ◎ 최대파주기( $T_{\max}$  ; highest wave period) : 개별파들 중의 최고의 파고의 파의 주기
- ◎ 1/10 ( $H_{1/10}$  ; the one-tenth wave height) : 개별파들을 파고의 순서대로 정렬하여 큰 순에서부터 개별파의 파수 N개 중 1/10에 해당하는 차들의 평균치
- ◎ 1/10 ( $T_{1/10}$  ; the one-tenth wave period) : 1/10 최대파고에 대응하는 개별파들의 주기의 평균
- ◎ 유의파고 ( $H_{1/3}$  ; significant wave height) : 개별파들을 파고의 순서대로 정

렬하여 큰 순에서부터 개별파의 파수 N개 중 1/3에 해당하는 차들의 평균치

◎ 유의파주기 ( $T_{1/3}$  ; significant wave period) : 유의파고에 대응하는 개별파들의 주기의 평균

◎ 평균파고 ( $\bar{H}$  ; mean wave height) : 모든 개별파들을 파고의 평균치

◎ 평균파주기 ( $\bar{T}$  ; mean wave period) : 모든 개별파들을 파주기의 평균치

#### 7.2.2.4 개별파의 확률적 특성

개별파의 분산 혹은 2차 모멘트를  $H_{rms}$  (the root-mean-squared sea surface elevation) .  $H_{rms}$ 를 이용하여 레일리 분포를 다시 정의 하면 다음과 같다.

◎ Rayleigh pdf정의

$$f(h) = \begin{cases} \frac{2h}{H_{rms}^2} \exp\left(-\left(\frac{h}{H_{rms}}\right)^2\right) & h \geq 0 \\ 0 & h < 0 \end{cases} \quad H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i^2} \quad (7-5)$$

◎ Rayleigh cdf정의

$$F(h) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{H_{rms}}\right)^2\right) & h \geq 0 \\ 0 & h < 0 \end{cases} \quad (7-6)$$

◎ Rayleigh poe정의

$$Q(h) = \begin{cases} \exp\left(-\left(\frac{h}{H_{rms}}\right)^2\right) & h \geq 0 \\ 0 & h < 0 \end{cases} \quad (7-7)$$

◎ Rayleigh distribution mean

어떤 함수의 적분은 초등함수로 나타낼 수 없지만 특정한 구간에서의 적분값은 계산할 수 있다. 이를 이용하여 Rayleigh distribution 의 평균을 유도하면 다음과 같다.

$$\int_0^{\infty} \exp(-x^2) dh = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (7-8)$$

$$\int f(x)g(x)dx = f(x) \int g(x)dx - \int f(x)' \left( \int g(x)dx \right) dx \quad (7-9)$$

$$\begin{aligned} \mu = \bar{H} &= \int_0^{\infty} hf(h)dh & H_{rms} &= \frac{2\mu}{\sqrt{\pi}} \\ &= \int_0^{\infty} \frac{2h^2}{H_{rms}^2} \exp\left(-\left(\frac{h}{H_{rms}}\right)^2\right) dh \end{aligned} \quad (7-10)$$

$$\begin{aligned} X &= \frac{h}{H_{rms}} & dX &= \frac{1}{H_{rms}} dh \\ &= \int_0^{\infty} \frac{2h^2}{H_{rms}^2} \exp\left(-\left(\frac{h}{H_{rms}}\right)^2\right) H_{rms} \frac{1}{H_{rms}} dh \\ &= H_{rms} \int_0^{\infty} \frac{2h^2}{H_{rms}^2} \exp\left(-\left(\frac{h}{H_{rms}}\right)^2\right) \frac{1}{H_{rms}} dh \\ &= H_{rms} \int_0^{\infty} 2X^2 \exp(-X^2) dX \end{aligned} \quad (7-11)$$

$$\begin{aligned}
&= H_{rms} \int_0^{\infty} 2X^2 \exp(-X^2) dX = H_{rms} \int_0^{\infty} X \exp(-X^2) dX^2 \quad (7-12) \\
&= -H_{rms} \int_0^{\infty} X \exp(-X^2) dX \\
&= -H_{rms} \left[ X \exp(-X^2) \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} \exp(-X^2) dX \right] \\
&= H_{rms} \int_0^{\infty} \exp(-X^2) dX = \frac{\sqrt{\pi}}{2} H_{rms}
\end{aligned}$$

확률변수 H를  $H/\bar{H}$  로 변경하여 레일리 분포(Rayleigh distribution)를 다시 정의하면 다음과 같다. 이 같은 형태를 무차원한 파고의 레일리 분포라 한다. 이 형태를 가장 많이 사용하고 있다. 해양의 개별파가 레일리 분포를 따른다고 가정되었을 경우 개별파의 분산, 유의 파고, 최대 파고는 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$H_{1/10} = 2.03\bar{H} \quad (7-13)$$

$$H_{1/3} = 1.60\bar{H} \quad (7-14)$$

$$H_s = 1.13\bar{H} \quad (7-15)$$

$$H_{2\%} = 2.23\bar{H} \quad (7-16)$$

해양의 파는 조석의 경우 정규분포(Normal distribution) 형태를 띠며 풍파의 경우 레일리(Rayleigh distribution)분포를 띠는다고 알려져 있다. 스펙트럼의 영역에서 주파수의 작은 지역을 차지하는 경우를 보통 협대역 스펙트럼일 경우라고 하며 이 경우는 레일리(Rayleigh distribution)분포를 스펙트럼의 영역에서 주파수의 넓은 지역을 차지하는 경우를 광대역 스펙트럼(Wide spectrum)이라 하고 이 경우 정규분포(Normal distribution) 형태를 따른다고 한다. Longuet-Higgins에 의해 광대역과 협대역의 분류 공식은 확률의 적률을 이용하여 제안 하였고 그

식은 식(7-17)과 Table 7.3과 같다.

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (7-17)$$

Table 7.3 Proposal of Longuet-Higgins

spectrum width parameter	wave height distribution
$\epsilon = 0$ narrow spectrum	Rayleigh distribution
$\epsilon = 1$ wide spectrum	Normal distribution

또한 시간 개념에서 파의 통계적 특성을 볼 경우 20분에서 3시간 이하의 경우는 단기관측(Short-term)이라 하고 그 분포는 레일리(Rayleigh distribution)분포를 따르며 20년 정도의 장기 관측(Long-term)은 정규분포(Normal distribution)를 따른다. 또한 해상풍력 발전 기준에(IEC-61400-3) 의하면 Extreme sea state (ESS) 3

### 7.2.3. (Frequency domain analysis)

해양의 파에 대한 주파수 영역분석은 통신이론의 디지털 신호처리 기술을 이용하여 발달해 왔다. 임의의 복합 파동을 단순차동으로 나누고, 그것들을 공식으로 나누고, 그것들을 공식으로 나타낸 후, 이러한 단순 파동을 합한 형태로 복합 파동 공식으로 표현할 수 있다. 이것을 푸리에 급수 공식(Fourier Series Formula)이라 한다. 이는 프랑스 수학자 푸리에가 밝힌 수학적 이론으로 신호를 구성하는 정현파들의 주파수와 각 주파수의 크기로 표현이 가능하다. 즉, 어떤 파형도 정현파의 합으로 표현될 수 있다.

### 7.2.3.1 Fourier 급수와 계수

Fourier 정의의 기본 개념은 주기적 신호에서부터 시작한다. 모든 신호 성분은 각기 다른 주파수를 가진 정현파들의 합으로 표현할 수 있고 그것을 다음과 같은 수식으로 표현 하였다.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (7-18)$$

그리고 각각의 주파수의 계수는 다음과 같다. 이 때 각각의 주파수들은 기본 주파수의 정수배이어야 한다. 파의 시계열과 주파수 개념과의 관계는 Fig 7.10에 도식 하였다.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (7-19)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos \frac{n\pi x}{T} dx, n = 1, 2, 3, \dots$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin \frac{n\pi x}{T} dx, n = 1, 2, 3, \dots$$

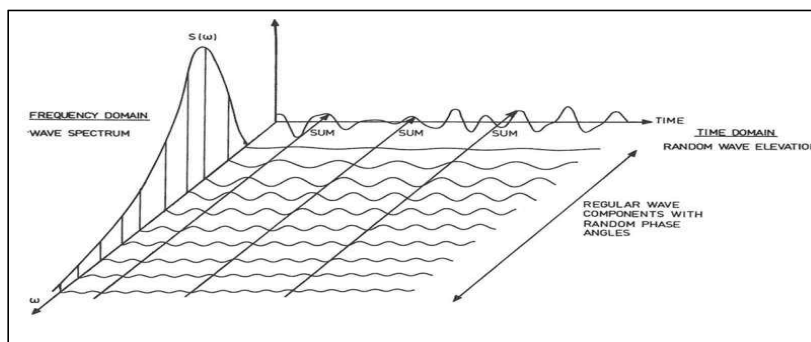


Fig 7.10 Concepts of the theory of Fourier.

### 7.2.3.2

### (Tidal harmonic analysis)

Fourier 계수 급수는 해양환경 하중에서 조석과 조류 및 스펙트럼 분석의 기본이 된다. 조석과 조류의 발생은 태양과 달과 지구의 회전 운동에 의해 발생한다. 많은 선행 연구들에 의하여 조화분조들의 주기와 각속도는 지구의 어느 지역에도 거의 변화가 없다고 알려져 있다. 조화분해는 결국 알려져 있는 분조들의 진폭을 구하는 과정이라 할 수 있다. 즉, 조석이란(Tide)이란 달과 태양의 인력 즉, 기조력(tide generating force)에 기인한 해면 높이의 주기적 변화를 나타낸다. 이러한 해면의 변화는 달과 태양의 인력(기조력) 원심력에 의하여 발생한다. 조석을 결정하는 주된 요소는 달의 위상, 위도, 지구자전축의 경사 계절적 등이 있다. 또한 관측 지점 주변의해저면의 지형적 영향 및 지구의 자전에 의한 편향력(Coriolis force)등의 복합적 요소들의 작용한다. 이 개념을 Fig 7.11에 도식하였다.

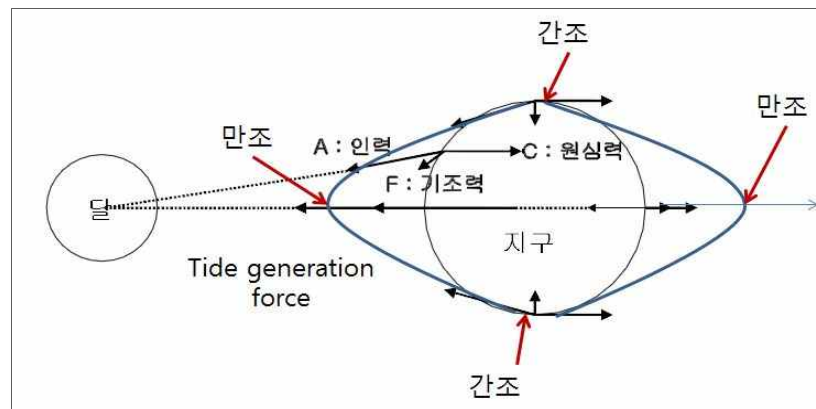


Fig 7.11 The cause of tides.

조류는 이런 조석의 고도 차이에 의해 발생하는 물의 흐름이다. 즉, 기조력과 원심력이 해수에 작용하고 조석변동을 일으켜 야기되는 흐름이라 할 수 있다. 조류는 조석과 마찬가지로 예보가 행해지며 국립해양조사원 사이트에서 확인이 가능하다. 그러나 이런 조류의 흐름은 대륙과 해륙분초나 해저지형의 영향을 받아 굴절, 반사 및 마찰에 따른 에너지 감소 등으로 변형되며 진행속도가 변하게 되



어 어떤 지역에서는 이런 조석 영향에 의한 조류의 흐름이 나타나지 않는 지역도 존재한다. 이런 여러 가지 요인에 의하여 조석과 조류의 예측을 힘들게 한다. 그래서 IEC 61400-3에서는 현장 관측을 추천하고 있다. 조류의 주기는 통상의 파랑에 비해 매우 길기 때문에 장파로 취급되며 지형이 평탄한 장소에서는 유속의 연직 분포는 거의 일정하다고 인정 되고 있다.

해면이 최고로 되었을 때를 만조 또는 고조(high water), 최저가 되었을 때를 간조 또는 저조(lower water)라고 한다. 만조부터 간조까지를 썰물(ebb tide), 간조로부터 만조까지를 밀물(flood tide)라고 한다. 만조로부터 다음의 만조까지의 주기는 약 1일 2회 이며 약 12시간 25분이다. 또한 만조위와 간조위의 차를 조차(tidal range)라 한다. 1일 2회조의 지역의 조차는 월령에 따라 변화하고 최대의 조차는 만월의 2~3일 후에 발생하고(대조 ; spring tide), 최소의 조차는 상현 및 하현 후 1~3 일째에 발생한다(소조 ; neap tide). 대조기와 소조기에 대한 원리는 아래 그림에서 설명되었다. 월령은 1일을 단위로 하여 그믐 또는 신월로부터 경과한 시간을 의미한다. 대조와 소조의 발생 원인을 Fig 7.12에 도식하였고 시간에 따른 조석 변화를 Fig 7.13에 도식하였다.

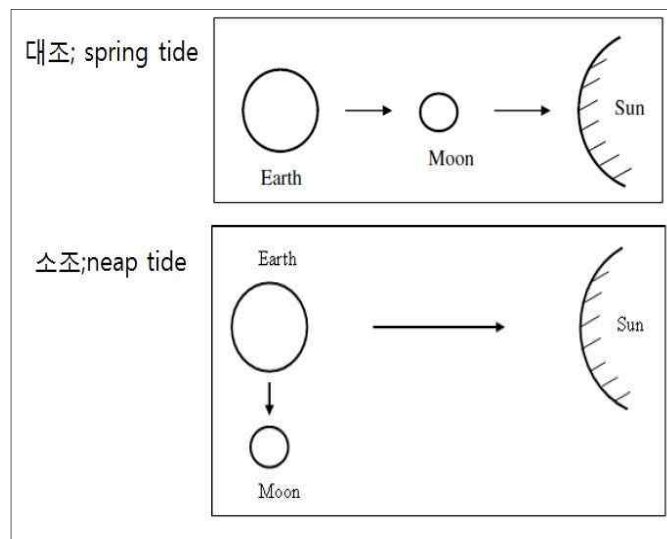


Fig 7.12 For the cause of spring tide and neap tide.

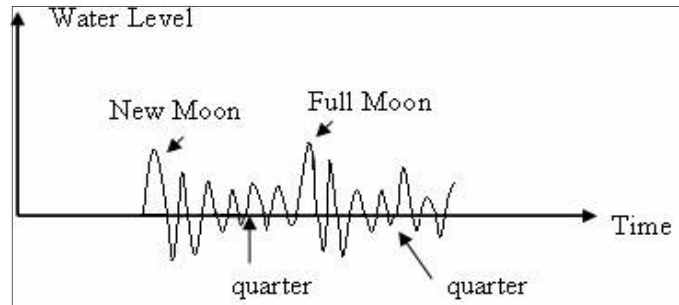


Fig 7.13 Tidal changes according to age.

조석 변동이 어떠한 주기 성분(분조 ; Tidal component)은 많은 선행 연구로 알려져 있다. 분조에는 약 반일의 주기(12시간)와 일주의 주기(24시간)로 구별 될 수 있고 16개 이상의 분조가 알려져 있으나 일반적으로 4개 분조가 조석현상에 가장 큰 영향을 끼치는 분조로 알려져 있다. 분조의 주기와 각속도는 지구의 어느 곳에서도 변화가 없으며 단지 진폭의 차이만 있다. 4대 분조의 각속도와 주기를 Table 7.4에 표시하였다.

Table 7.4 Tidal component

분조 및 이름	각속도(도/hr)	주기
M 2 주태음반일주조	28.9841042	12.4206012
S 2 주태양반일주조	30.0000000	12.0000000
O 1 주태음일주조	13.9430346	25.8193417
K 1 일월합성일주조	15.0410686	23.9344697

조차(Tidal range)를 측정하는 기준이 되는 해수면의 통리를 조위기준면(tidal datum)이라 한다. 계산 방법에 대한 모식도는 아래 그림과 같다. 여기서  $H_m$ 은 주 태음 반일주조의 진폭을  $H_s$ 는 주태양 반일주조의 진폭을  $H'$ 은 일월합성일주

조의 진폭을  $H_0$ 는 주태음일주도의 진폭을 의미한다. 4대 분조의 조화상수로부터 얻어지는 비조화상수의 조위면도를 Fig 7.14에 도식 하였다.

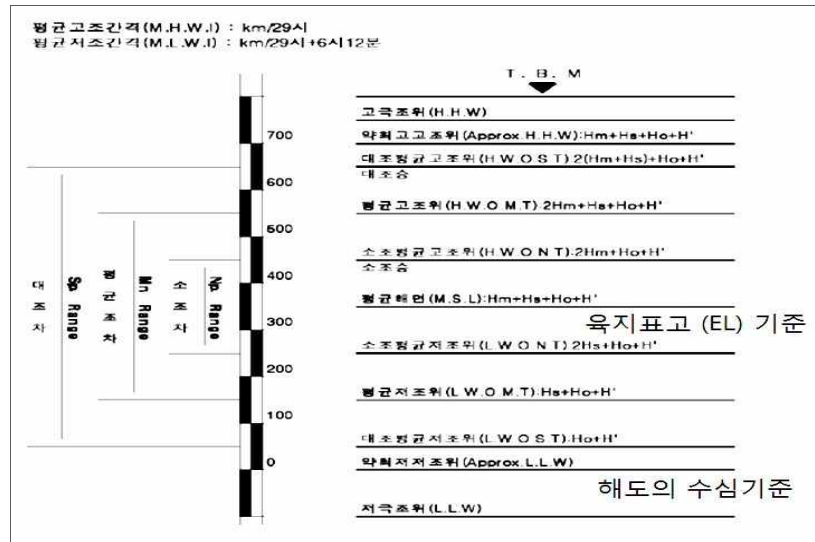


Fig 7.14 Definition of water levels  
(항만 및 어항공사 표준시방서)

- ◎ 대조차 : 대조의 평균조차 =  $(H_m + H_s)/2$
- ◎ 소조차 : 소조의 평균조차 =  $(H_m - H_s)/2$
- ◎ 평균조차 : 조차의 평균 =  $2H_m$
- ◎ 평균만조간격 : 만조간격의 평균치

일주조와 반일주조의 상대적인 세기를 비교하는 조석 형태수(tide Form Factor)는 주요 4대 분조 조화상수들의 진폭(amplitude)의 관계로 다음과 같이 정의된다 (Foreman 1996, ; Pugh, 2004). 일조부등은 고조와 다음의 고조의 높이가 다른 것으로 반일주조가 탁월하지 않은 경우이다. 이를 식(7-20)과 Table 7.5에 표시 하였다.

$$Form\ Factor, F = \frac{H_{K_1} + H_{o_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}} \quad (7-20)$$

Table 7.5 Form Factor

범 위	성향
0 ~ 0.25	반일주조
0.25 ~ 1.5	혼합조 반일주 우세
1.5 ~ 3	혼합조 일주조 우세
> 3	일주조

4대 분조 (M2, S2, K1, O1)의 진폭의 합은 우리나라의 조석기준면을 결정에 필수적으로 사용되는 값이다. 우리나라의 수심측량 및 해도작성을 위해 사용되는 기본수준면은 평균해면(Mean Sea Level)에서 4대 분조의 합을 뺀값으로 약최저저조면(Approx. lower water, Approx. L.L.W.) 또는 Indian Spring Low Water(I.S.L.W)로 통용되고 있으며, 이 I.S.L.W는 G.H. Dawin 이 인도양 주변의 조석을 표시하기 위해 최초로 사용하였으며, 우리나라와 일본 등에서 현재까지 사용되고 있다(강용덕 등, 2004). 본 연구의 조석조화분해에 사용한 T\_tide 프로그램은 캐나다의 IOS 해양연구소(Institute of Ocean Science)의 Foreman이 FORTRAN 기반으로 개발한 조화분해 패키지(IOS Tidal Package)를 MATLAB® 기반으로 바꾼 프로그램이다(Pawlowicz et al., 2002). 이 프로그램은 최소자승법 사용하며 각 분조의 신뢰구간도 동시에 계산한다. 또한, 사용자들이 손쉽게 조석과 조류자료의 조화분해에 활용할 수 있어 최근 해양학자들과 전문 연구기관에서 많이 사용되고 있다(유학렬 등, 2006; 정우진, 2008; Leffler, 2009; Wang, 2009).

(8-21)

$$H_t = A_0 + \sum f H \cos(V_0 + \mu + nt - K) \quad (7-21)$$

여기서  $A_0$ 는 평균해면,  $n$ 은 분조의 각속도,  $t$ 는 시각,  $H$ 는 분조의 반조차,  $K$ 는 분조의 지각,  $f$ ,  $V_0$ ,  $\mu$ 는 천문상수이다.

7.2.3.3

(Tidal Current harmonic analysis)

조류의 경우 지구가 자전이 없다고 한다면 아래 그림의 왼쪽과 같은 현상이 일어나게 되고 시간에 따라 동서방향의 흐름만 존재하게 된다. 하지만 오른쪽 그림과 같이 지구좌전의 효과로 정확한 동서 방향이 아닌 경사 가진 유속 흐름이 나타나게 된다. 이 개념을 Fig 7.15에 도식 하였다.

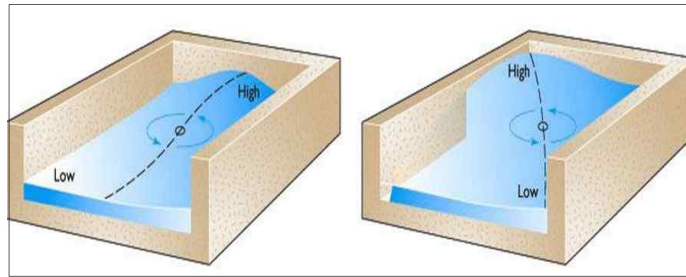


Fig 7.15 The concept of tidal current.

조류는 다시 두 가지로 분류할 수 있다. 고조에서 저조로 가는 동안을 낙조라 하며 저조에서 고조로 가는 동안을 창조라고 한다. 해수유동 특성은 관측 자료의 일반적인 통계분석, Scatter plot, 조류타원도등을 통해 그 특징을 파악할 수 있다. 해수유동 성분 중 조석에 의해 생기는 수평방향의 해수의 주기적 운동을 조류(Tidal current)라 하며 해수유동 자료를 조화분해하면 이 성분을 분리할 수 있다. 관측 자료는 유속과 유향이 관측 되면 동서 방향 벡터 U 성분과 남북 방향 벡터 V 벡터 성분으로 나누어 조류 조화분해를 한다. 조류 조화분해는 식 (7-22)

$$V_i = C_0 + \sum f_i H_i \cos [(V_0 + \mu) + n_i t + K_i] \quad (7-22)$$

여기서  $C_0$ 는 항류,  $n$ 은 분조의 각속도,  $t$ 는 시각,  $V$ 는 분조의 유속,  $K$ 는 분조의

지각,  $f$ ,  $V_0$ ,  $\mu$ 는 천문상수이다. 장축성분(Semi major axis) 및 단축성분(Semi minor axis, 위상(Phase), 경사도(Inclination)값을 구하였다. 이 결과를 통해 조류 타원도를 작성하였다. 조류의 흐름특성을 분류할 때 왕복성 조류(Reversing current)와 회전성 조류(Rotary current)로 나눌 수 있다. 왕복성 조류는 대체로 외해에서 나타나며 그 흐름에 영향을 끼치는 장애물이 존재하지 않아 정조(Slack water)가 존재하지 않고 지속적으로 그 흐름이 존재하며 유향이 지속적으로 바뀌는 흐름을 의미한다. 북반구에서는 지구의 회전에 영향을 받아 시계방향의 흐름을 남반구에서는 반시계방향의 흐름이 나타난다. 최강 창조류(Maximum flood current) (Ebb current)는 해안선이나 연안의 조위가 고조에서 저조로 가면서 낮아질 때 연안에서 멀어지는 조류의 흐름을 의미하고 최강낙조(Maximum ebb current)는 낙조가 지속되는 동안에 유속이 가장 큰 흐름이다(NOAA, 2000).

#### 7.2.3.4 유효 주파수 범위

일반적으로 관측 되는 연속신호는 대역제한(band limited)되고 각 샘플들이 그 신호에서 가장 높은 주파수와 연관되어 충분히 샘플링율로 취해진다면 그 샘플링 집합은 유일하게 그 신호를 나타내며 완전하게 복원 될 수 있다. 이 원리가 같은 압력계 데이터를 이용하지만 조석과 파랑관측 데이터의 구분 기준이 된다. 관측데이터 복원을 위한 최소 샘플링 주파수를 Niquist 주파수라 하며 이를 Fig 7.16

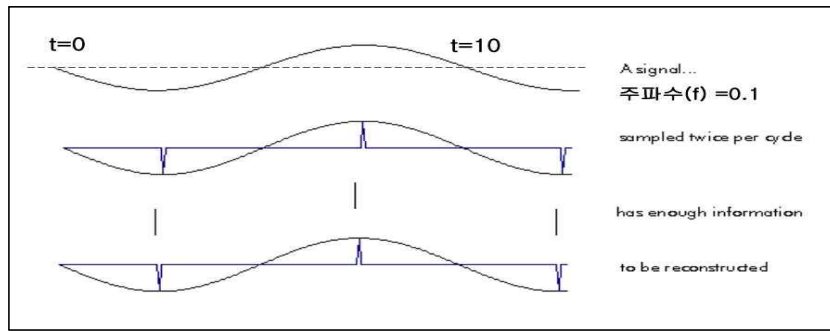


Fig 7.16 Sampling rate(Nyquist frequency).

연속신호를 이산 신호인 디지털 신호로 변경시  $\Delta t$ 간격으로 샘플링이 되었다고 하면 인식 할 수 있는 최소 정형파의 주기는  $2\Delta t$ 이며 이때는 파의 최고점과 최저점의 위치와 샘플링 시간이 일치 하여야 하며 최대 정형파의 주기는 관측 시간  $T$ 이다. 이 구간을 제외한 영역의 주파수의 진폭 성분을 해석할 경우 고주파 성분이 저주파 성분으로 변화 되거나 다른 두 신호를 같은 신호로 인식 할 수 있다. 이런 문제를 Aliasing이라고 한다. 이를 Fig 7.17에 도식 하였다. 이런 문제로 부터 관측 간격과 최소 관측시간이 정해지게 된다. 일반적으로 최소 관측 시간은 풍파의 데이터는 1 ~2 Hz로 관측이 되며 조석은 10분에서 30분 평균 압력 데이터로 관측이 되어 진다.

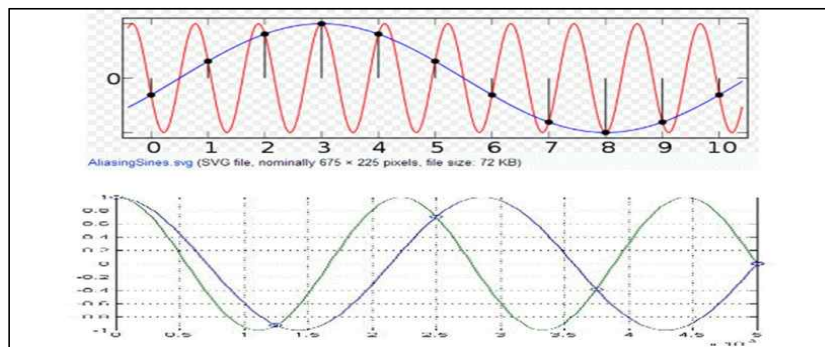


Fig 7.17 Aliasing problem.

최대 관측시간은 분조 관측시 분조들의 주파수 영역 변환시 주파수 간섭이 일어나지 않고 각 주파수의 진폭의 정도를 정확히 파악 할 수 있는 기간을 의미한다. 즉, 주태음반일주조와 주태양 반일주조의 주기는 약 12기간이고 주태음반일주조와

일월합성일주조의 주기는 약 24시간이다. 관측기간이 짧을 경우 이 주파수들의 비슷한 주파수대에 각 주파수들의 진폭이 합성 성분이 나타나게 되며 이를 정확히 분류할 수 있는 최소 관측기간이 필요하며 이에 약 15일 혹은 30일 동안 연속관측을 수행 하게 된다. 즉, 나이퀴스트 주파수대를 피하면서 주파수간섭에 의한 오차를 줄이기 위한 최소 기준이 관측 샘플링 주기와 관측 연속 시간이다. 이를 협대역 주파수대라 하며 Fig 7.18에 도식 하였다.

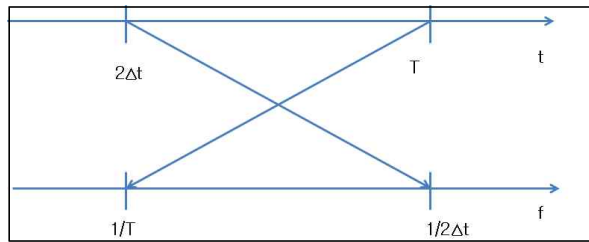


Fig 7.18 Narrow band frequency.

#### 7.2.3.5 Fourier Transform

모든 신호가 같은 시간에 발생되고 각 주파수들의 기본 주파수의 정수배가 되는 경우는 자연 현상에서 찾기란 극히 힘들다. 이에 주기는 모르지만 시간을 무한히 반복하다 보면 모든 신호는 반복을 한다는 가정하에 비주기적 신호를 해석하는 방법이 Fourier 변환이다. 충분한 관측 시간에 관측이 되었다면 푸리에 변환에 의한 주파수들의 진폭의 상대적 비율은 비슷하게 된다. 푸리에 변환 역시 푸리에 계수 급수로부터 유도 되었다. 먼저 복소지수를 포함하는 또 다른 형태의 푸리에 급수를 오일러 공식에 이용하여

$$\sin(n\omega_0 t) = \frac{e^{jn\omega_0 t} - e^{-jn\omega_0 t}}{2j} \quad (7-23)$$

$$\cos(n\omega_0 t) = \frac{e^{jn\omega_0 t} + e^{-jn\omega_0 t}}{2}$$



정리하면 식(7-24)~식(7-30)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 f(t) &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{e^{jn\omega_0 t} + e^{-jn\omega_0 t}}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \frac{e^{jn\omega_0 t} - e^{-jn\omega_0 t}}{2j} & (7-24) \\
 &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} (a_n - jb_n) e^{jn\omega_0 t} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} (a_n + jb_n) e^{-jn\omega_0 t}
 \end{aligned}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (7-25)$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T \{x(t)e^{jn\omega_0 t} + f(t)e^{-jn\omega_0 t}\} dt$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_0^T \{f(t)e^{jn\omega_0 t} - f(t)e^{-jn\omega_0 t}\} dt$$

$$A = a_n \quad X = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)e^{jn\omega_0 t} dt \quad (7-26)$$

$$B = jb_n \quad X = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)e^{-jn\omega_0 t} dt$$

$$A = X + Y, \quad B = X - Y$$

$$\frac{1}{2} (a_n - jb_n) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)e^{jn\omega_0 t} dt = A_n \quad (7-27)$$

$$\frac{1}{2} (a_n + jb_n) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)e^{-jn\omega_0 t} dt = B_n$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{jn\omega_0 t} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-jn\omega_0 t} \quad (7-28)$$

$A_n e^{jn\omega_0 t}$ 에서  $n=0$ 일 때

$$A_0 e^0 = A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)e^0 dt = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = a_0 \text{ 이다.}$$

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{jn\omega_0 t} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-jn\omega_0 t} \quad (7-29)$$

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{jn\omega_0 t} + \sum_{n=1}^{-\infty} B_{-n} e^{jn\omega_0 t}$$

$$B_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$$

$$B_{-n} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{jn\omega_0 t} dt = A_n$$

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{jn\omega_0 t} + \sum_{n=1}^{-\infty} A_n e^{jn\omega_0 t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t} \quad (7-30)$$

푸리에 변환과 푸리에 역변환은 비 주기적 신호의 시계열 데이터를 주파수 영역으로 변환하고 주파수 영역의 데이터를 주기적 영역으로 변환하는데 있다. 그 식은 식(7-31)~식(7-32)와 같다.

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{2\pi i f t} dt \quad (7-31)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{-2\pi i f t} df \quad (7-32)$$

#### 7.2.3.6 (Short-Time fourier Transform; STFT)

푸리에 변환에 의한 스펙트럼 분석은 전 시간 구간에 신호가 연속적으로 존재하여야 하지만 파동은 그렇지 않다. 신호처리에서도 이러한 문제가 발생하였고 그해결책으로 제시된 것이 Short-Time Fourier Transform(STFT)이다.

$$(7-33)$$

$$X_{STFT}(\Omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau)e^{-i\Omega t} dt \quad (7-33)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} X_{STFT}(\Omega, \tau)w(t-\tau)e^{i\Omega t} dt$$

여기서  $w(t)$ 는  $\int (|w(t)|)^2 dt = 1$ 이다.

이  $w(t)$ 에 의하여 연속푸리에 변환 (Continue-Time Fourier Transform; CTFT)와 구분되어 진다. 이  $w(t)$ 를 "슬라이딩 윈도우 CTFT" 이라 한다. 국소 푸리에 변환은 (STFT)는  $X_{STFT}(\Omega, \tau)$ 와  $\tau$  시간에 대한  $w(t)$  창의 센터 이동과 윈도우 입력 신호 그리고 CTFT의 계산 결과를 계산하게 된다. 이 개념을 Fig 7.19 .

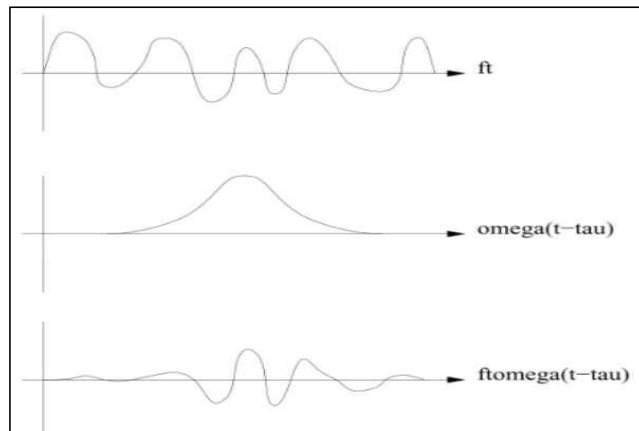


Fig. 7.19 Sliding window CTFT.

주파수 내용을 예측하기 위하여 연속푸리에 변환으로 분석을 실행한다. 근본적으로, STFT는 기초 성분을 이용한다.

$$b_{\Omega, \tau}(t) = w(t-\tau)e^{i\Omega t} \quad (7-34)$$

이것은 시간과 주파수의 이동을 위한 창함수  $\omega(t)$ 로 이해 할 수 있다. 즉 관측된 데이터를 관측데이터 보다 작은 관측시간으로 시간을 이동해가면서 분석을 수행하는 것이다. 이 개념을 Fig 7.20에 도식 하였다.

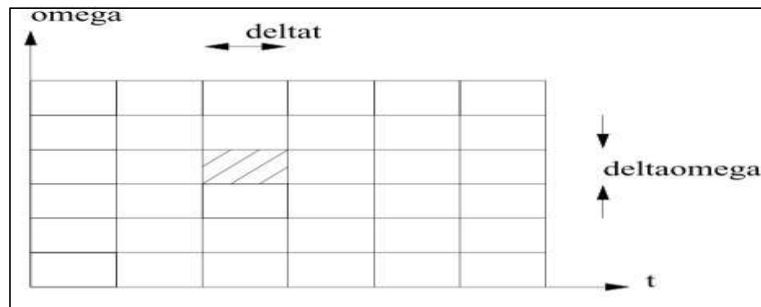


Fig 7.20 The tiling diagram.

Fig 7.21 Power spectrum 분석만을 이용할 경우 관측된 전체 시간에 대한 주파수대와 총 관측시간 동안의 각각의 주파수에 대응하는 에너지의 정도는 알 수 있으나 그 시간지속과 진폭의 정도는 알 수 없다.

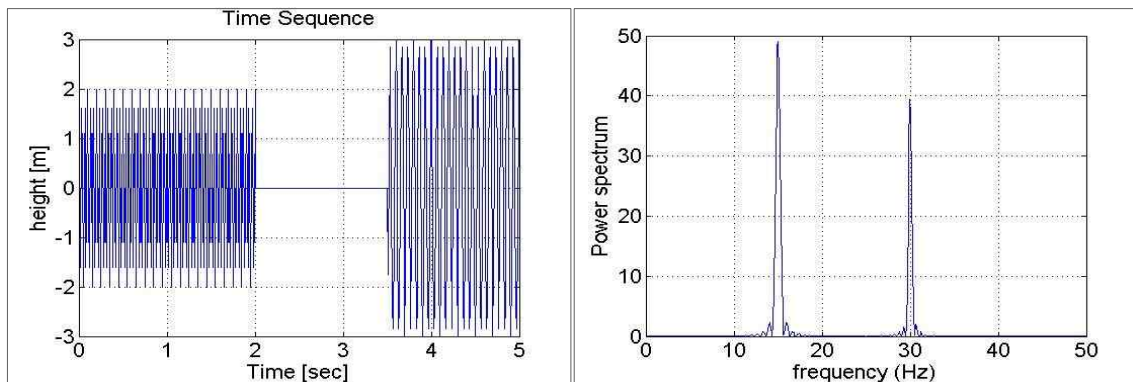


Fig 7.21 Problems of power spectrum.

STFT기법을 이용할 경우 아래 그림과 같이 지속시간과 그에 따른 에너지의 정도를 파악 할 수 있게 된다. 하지만 STFT의 경우 위도우 함수의 길이에 따라 지속시간에 대한 정확도를 확인 가능한 위도우의 길이는 상이하게 된다. Fig

7.22은 2초에서 3.5초 사이에 파가 존재 하지 않는 다는 것을 알 수 있지만 주파수대의 확인은 불명확하다.

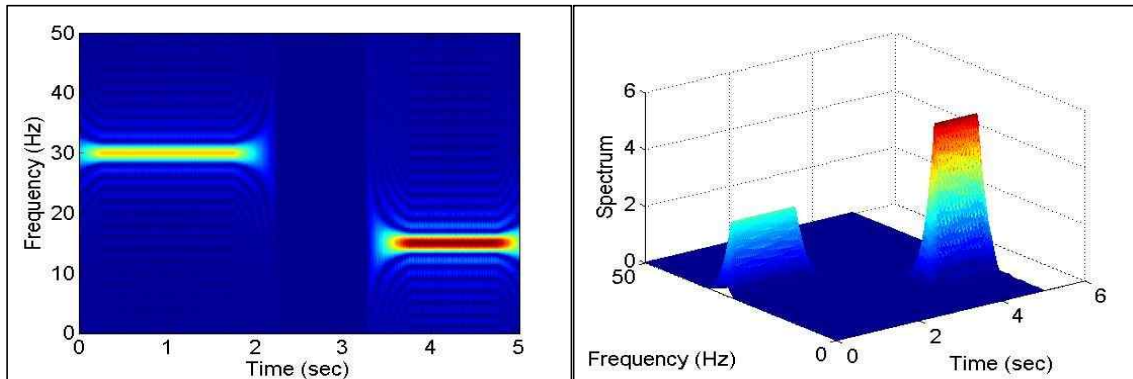


Fig 7.22 STFT analysis\_1

Fig 7.23은 주파수대에 대하여 명확히 알 수 있지만 각각의 파가 시작되고 끝나는 시간대에 대해서는 불명확하게 된다.

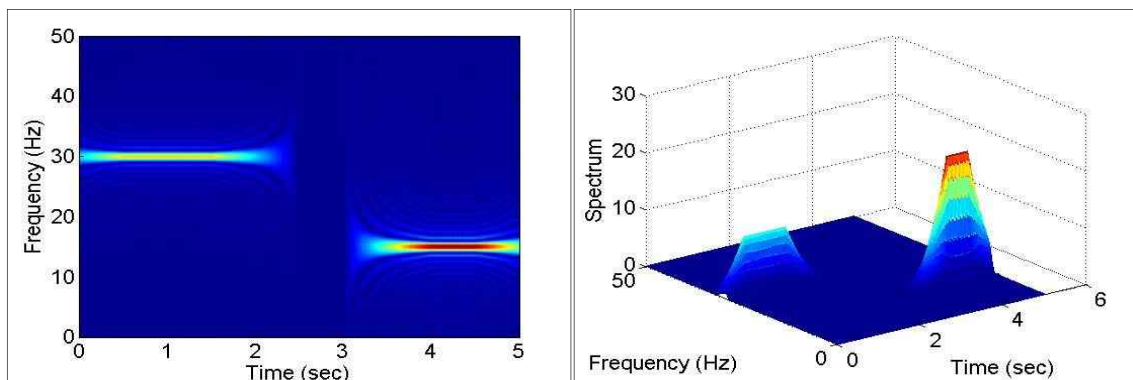


Fig 7.23 STFT analysis\_2

#### 7.2.4 (wind wave generation processes)

풍파란 해면의 바람에 의해 발생하는 파이고 이렇게 발생한 파가 풍력의 공급이 없이 진행 하는 것을 너울이라고 한다. 풍파의 성장에 영향을 미치는 요인으

로는 바람의 세기, 바람이 지속적으로 불어오는 시간인 취송시간과 바람의 영향을 받는 영역의 정도인 취송거리가 있다. 어떤 바람의 세기에 대응하여 파랑이 발달하여 더 이상 성장 하지 못할 때 이를 충분히 성장한 풍파라고 한다. 다시 말해, 바람에 의하여 생성되는 해면의 파동은 파고와 주기는 풍속  $U$ (m/s), 취송시간  $t$  및 바람이 불어오는 거리  $F$  즉, 취송거리에 비례하여 커지는데 이것을 풍파발달의 3요소라 한다. 즉, 파의 성장에 관여하는 3대 요소는 풍속(Wind Speed or Wind Strength), 취송시간(Wind duration or Fetch duration) 그리고 취송거리(Fetch or Fetch length)가 있다. 파의 성장에 관여하는 요소들에 대한 개념을 Fig 7.24

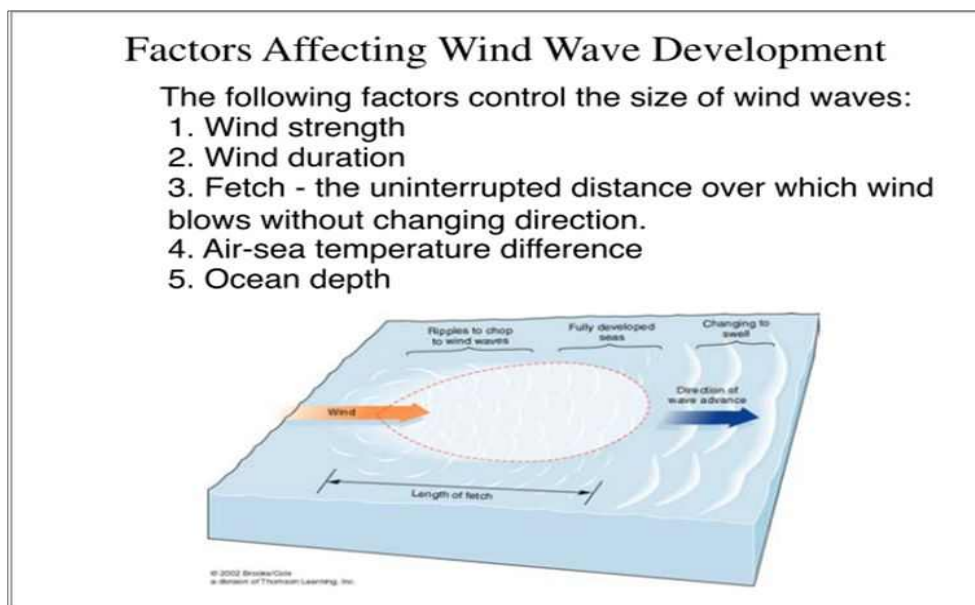


Fig 7.24 Factors affecting wind wave development.

풍파는 바람의 에너지가 해면에 전달되어 발생, 발달하는 것으로서 에너지의 전달기구는 난류전단응력과 압력의 형태로 전달된다. 풍파의 발생기구에 관하여는 Svedrup과 Munk(1947)의 압력과 전단응력에 의한 에너지 전달기구, Phillips(1957)의 난류 바람장에서 압력변동주기와 풍파주기의 공진이론 (공진 효과에 의하여 주기가 짧은 파가 생성) 및 Miles(1960)의 파의 풍상측과 풍하측에서의 압력차로 인한 에너지 전달기구로서 에너지 전달률은 파고의 제곱에 비례

하는 것으로 설명되며 혼란된 표면을 따라 공기의 흐름에 의한 마찰로 그 주기의 파는 성장을 계속 하게 되며 파령(wave age)의 한계(파장과 파고가 약1/7)이 상에 도달)하고 있다. Longuet-Higgins는 단파에서 장파에 에너지의 전달의 이론적 기초를 증명하였다. 풍파가 발달하여 파의 주기와 파고가 어느 정도 커지게 되어 파형경사(H/L)가 심해에서의 한계파형경사인 0.142보다 커지게 되면 파봉부터 파가 부서지는 백파(white cap)형태의 쇄파가 발생한다. 이때, 풍파는 에너지 공급과 쇄파로 인한 에너지감쇠가 평형상태에 달할 때까지 발달하게 되며 이러한 상태를 완전히 발달한 파(fully developed seas)라고 하며 파고와 주기가 시간의 경과에 따라 변하지 않는 정상상태가 된다. 한편, 정상상태에 이르기 전까지의 상태를 과도상태 또는 천이상태라고 한다. 정상상태에 달한 풍파가 풍역을 벗어나면 파고는 점차 작아지며 짧은 주기의 파동성분은 점성마찰로 인하여 소멸하고 긴 주기의 파동성분만이 먼 곳까지 전파해 나가는데 이것을 너울(swell)이라고 한다. 풍파와 너울에 대한 스펙트럼 변화를 Fig 7.25에 도식 하였다.

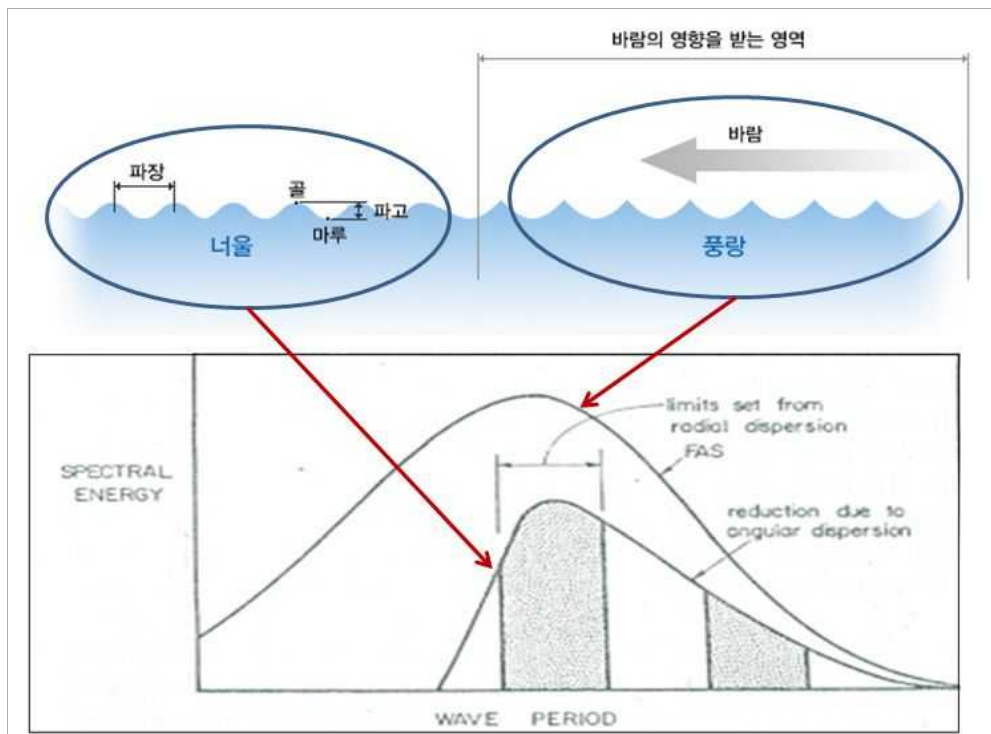


Fig 7.25 Wind wave, swell and wave Spectrum.

위의 그림은 어떤 풍속의 대응하여 파가 완전히 성장한 경우의 에너지 스펙트럼

이다. 아래에 줄어든 에너지 스펙트럼은 바람의 불어오는 방향과 다른 방향으로 진행되거나 너울로 인하여 전파되는 경우의 에너지 스펙트럼의 형태이다.

### 7.2.5 Spectrum

Fig 7.26은 어떤 풍속의 바람에 대하여 취송시간이 일정할 경우 취송 거리 변화에 따른 에너지 스펙트럼의 변화이다. 취송거리가 F1에서 F4로 길어지면서 에너지 스펙트럼역시 변화하는 모습을 볼 수 있다. 하지만 F4나 F5의 경우 취송거리가 길어지더라도 더 이상 에너지 스펙트럼의 성장을 하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이 상황을 완전히 발달한 상태라고 한다.

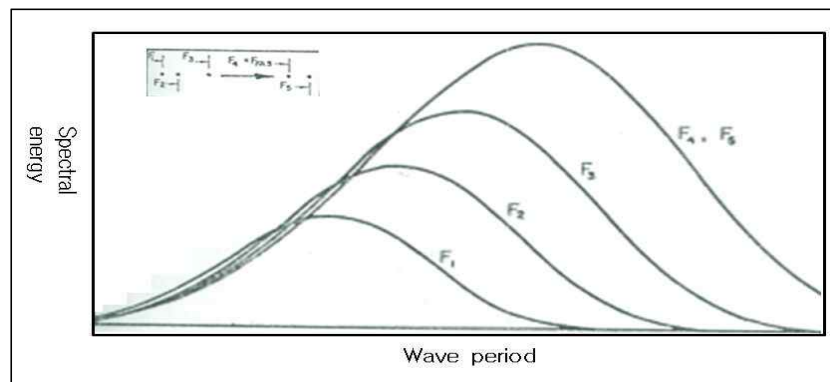


Fig 7.26 Changes according to the distance spectrum of fetch.

Fig 7.27은 어떤 풍속의 바람에 대하여 취송거리가 일정할 경우 취송 시간 변화에 따른 에너지 스펙트럼의 변화이다. 취송시간이 t1에서 t4로 길어지면서 에너지 스펙트럼역시 변화하는 모습을 볼 수 있다. 하지만 t4나 t5의 경우 취송시간이 길어지더라도 더 이상 에너지 스펙트럼의 성장을 하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이 상황을 완전히 발달한 상태라고 한다.



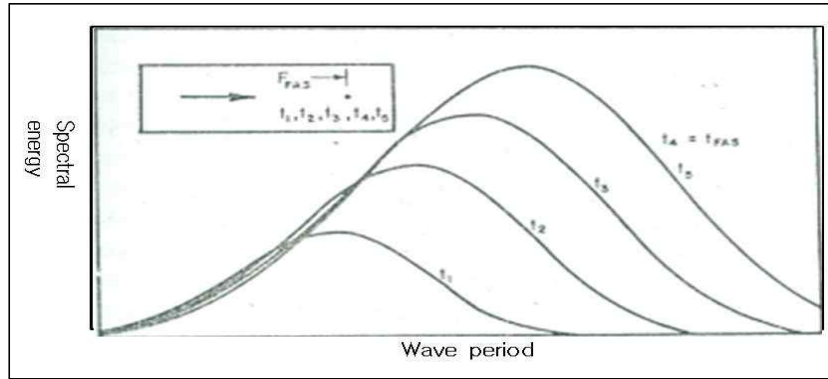


Fig 7.27 Fetch spectral changes over time.

아래의 Fig 7.28은 풍속에 따른 완전히 발달한 상태의 스펙트럼들을 보여 주고 있다.

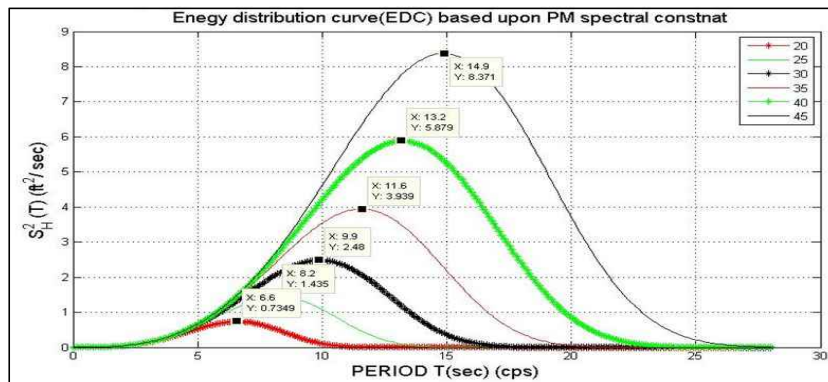


Fig 7.28 Spectral changes due to wind.

어떤 풍속에 대하여 완전히 성장한 상태에 대해서는 예측이 가능하며 이를 P-M spectrum (Pierson-Moskowitz spectrum)이라고 한다. 아래의 그림은 풍속의 변화에 따라 완전히 성장한 상태의 에너지 스펙트럼의 변화를 보여주고 있다. 또한 완전히 성장한 상태에 근접한 풍파에 대한 에너지 스펙트럼은 JONSWAP spectrum

© Pierson-Moskowitz (1964)

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_b}\right)\right]^{-4} \quad (7-35)$$

◎ JONSWAP 스펙트럼

$$E(f) = \left[ \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_b}\right)\right]^{-4} \right] \cdot \gamma^{\exp\left[\frac{-(f-f_b)^2}{2\sigma^2 f_b^2}\right]} \quad (7-36)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a & : f \leq f_b \\ \sigma_b & : f > f_b \end{cases} \quad (7-37)$$

침두주파수  $f_b$ 와 계수  $\alpha$ 는 크기를 나타내는 scale parameter로서,  $f_b$ 는 스펙트럼 최대치에서 주파수 그리고  $\alpha$ 는 Phillips의 비례상수이다. 나머지 3개의 파라미터는 스펙트럼의 모양을 정의하는데  $\gamma$ 는 peak enhancement factor로서 P-M 스펙트럼의 최대치에 대한 JONSWAP 최대 스펙트럼에너지의 비율이다. 그리고  $\sigma_a$ 와  $\sigma_b$ 는 스펙트럼 침두영역의 왼쪽과 오른쪽 폭을 각각 정의한다.

## 7.2.6 취송류

취송류(Wind driven current)란 바람에 의해 발생한 흐름을 말하는 것이며, 바다의 표면에서 흐르고 있는 흐름으로써 수평 순환 흐름이라고도 한다. 바람이 해 표면에 평행하게 부는 경우 바람에 의해 형성되는 취송류는 수심이 깊어짐에 따라 감소한다. 해수표층의 바로 아래층은 표층해수가 끌고 있고, 이들은 바람에 의한 힘인 응력이 같이 작용한다. 이때 해수 표층 바로 아래층은 해수표층보다는 약간속도가 떨어지지만 표층 해류 방향에서 약간 우측으로 흐른다. 해수의 속도는 표층에서 가장 크고 풍향에 대해서는 우측으로 45° 방향으로 흐른다. 그러나 수심이 깊어짐에 따라 속도가 감소하여 해류의 방향은 점차 오른쪽으로 바뀌게 된다. 그리하여 어떠한 수심에서는 비록 속도는 작지만 해류의 방향이 표층과 반대가 될 수 있다. 이것을 에크만 취송류 모형 또는 에크만나선(Ekman's spiral)

이라 한다.

### 7.3 제주 북동부 연안의 해양 환경 하중

제주광역경제권 선도 산업 R&D의 일환으로 제주도 해상풍력단지 개발을 위한 해양환경 측정 및 분석기술 개발이라는 연구과제에 참여하여 조사를 실시하였다. 파랑의 경우 1차 조사 ( 2012년 9월 5일 ~ 2012년 10월 5일), 2차조사 (2013년 1월 11일 ~ 2013년 2월 12일)를 하였고 조위의 경우 1차 조사( 2012년 9월 5일 ~ 2012년 10월 5일), 2차 조사 (2013년 1월 11일 ~ 2013년 1월 11일 ~ 2013년 2월 12일) 현장조사를 실시하였다. 연속 조류의 경우 1차 조사( 2012년 9월 5일 ~ 2012년 9월 20일), 2차 조사(2013년 1월 11일 ~ 2013년 1월 30일) 약 15일간 조류관측을 실시하였다. 위의 조사는 국토해양기술단과 공동 조사 내용이며 추가 적으로 2012년 9월 14일 ~ 2012년 10월 29일, 2012년 11월 04일 ~ 2012년 12월 13일까지 조석과 파랑에 대한 추가 조사를 실시하였다. 관측 위치는 월정 해상 풍력 실증단지에 설치되어 있는 두산중공업 풍력 발전시스템과 해상 기상탑 사이로 해양 구조물에 의한 간섭을 최소화하기 위하여 하부 구조물에서 100m 이상 떨어진 곳에 설치하였다. Table 7.6과 Fig 7.29는 관측위치좌표와 관측 위치를 도식 하였다. Table 7.7은 조사 당시의 현장 사진이다.

Table 7.6 Site survey position.

Geographic(WGS-84)	
위도	경도
33° 34' 32.1"	126° 47' 23.6"

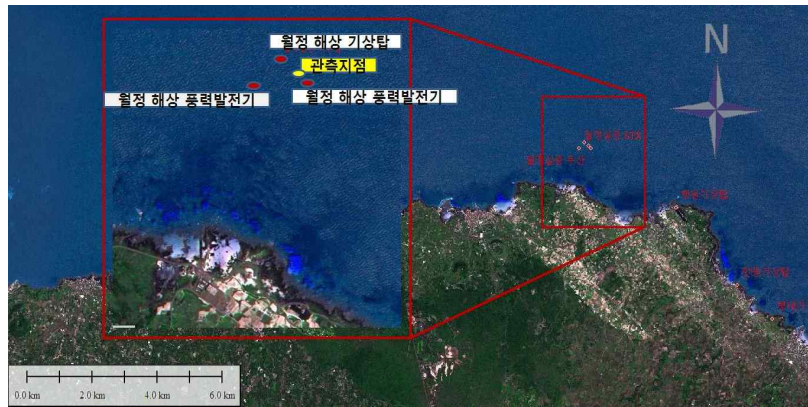








Fig 7.29 Observation point position.

Table 7.7 Site survey photos.

	
연구해역 전경 1	연구해역 전경 2
	
관측 장비 투하	관측 장비 투하
	
파고계 설치 모습	장비 설치 확인 다이빙

### 7.3.1 파랑

파랑 관측은 2Hz의 빈도로 수행하였고, 10분 간격으로 유의파고와 주기를 Zero-upcross법에 의해 계산하였다. 이를 통계분석하여 유의파고와 주기의 출현율제시 하였고, 최대파와 평균파에 대한 출현율도 함께 제시하였다. 또한, 이들의 시계열 변화를 나타내었다. Fig 7.30에서 Fig 7.32까지는 1차 조사 기간의 유의파고, 최대파고, 평균파고와 주기를 도식하였고 Table 7.8은 유의파고, 최대파고, 평균파고와 주기를 표로 나타내었다.

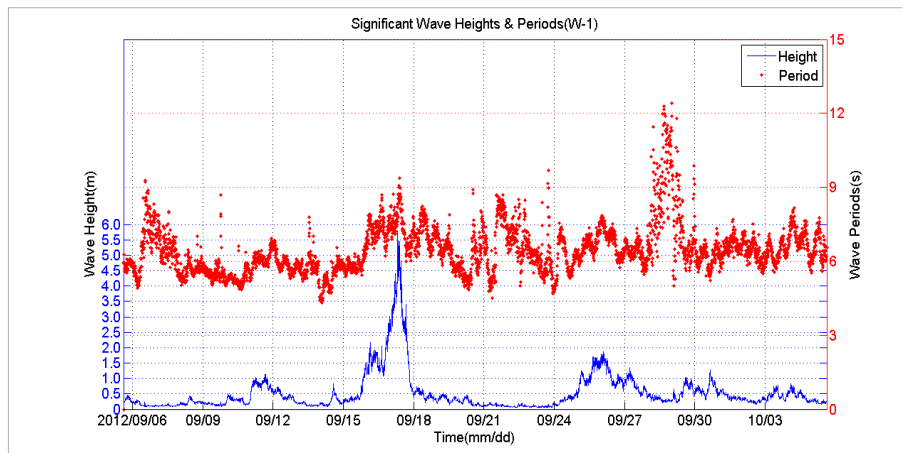


Fig 7.30 Significant wave height and period(Period 1).

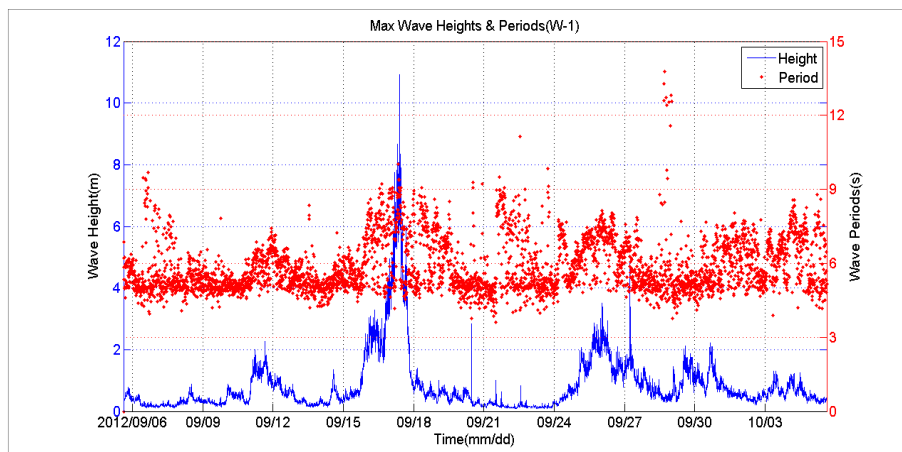


Fig 7.31 Maximum wave height and period(Period 1).

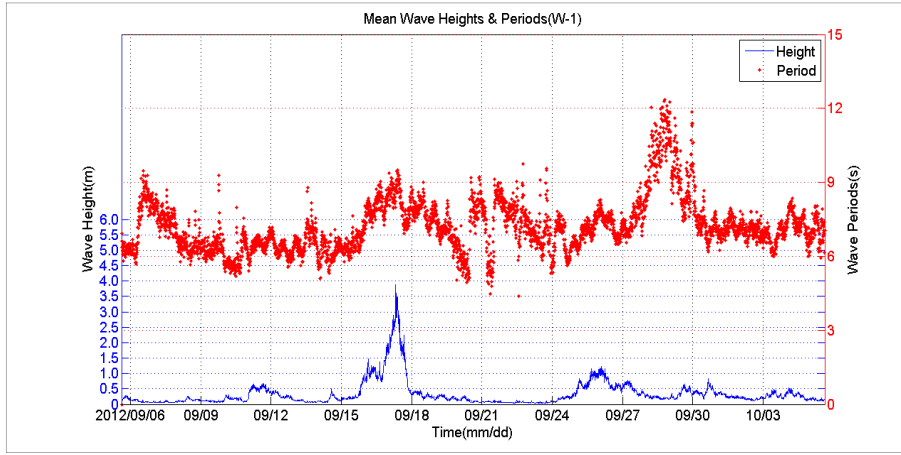


Fig 7.32 Mean wave height and period(Period 1).

Table 7.8 Significant, Maximum & Mean wave height and period Incidence(Period 1) (Unit : %)

파고(m) \ 주기(s)	≤3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12<	계
	유	≤1		2.20	33.74	36.17	11.83	2.59	1.02	0.53	0.46	0.07
	1.0~2.0			0.42	4.12	3.59	0.21					8.34
	2.0~3.0			0.02	0.39	1.00	0.09					1.50
	3.0~4.0				0.12	0.67	0.12					0.91
	4.0~5.0					0.14	0.35					0.49
	5.0<					0.02	0.08	0.05				0.15
	계	0.00	2.20	34.18	40.80	17.25	3.45	1.07	0.53	0.46	0.07	100
최	≤1	0.21	16.45	36.61	12.64	7.54	2.38	0.35		0.05	0.14	76.42
	1.0~2.0	0.02	1.64	6.62	4.77	2.62	0.19	0.02				15.88
	2.0~3.0		0.28	0.86	1.18	1.67	0.35	0.02				4.36
	3.0~4.0		0.09	0.21	0.16	0.51	0.23	0.05				1.25
	4.0~5.0		0.14	0.23	0.12	0.21	0.12	0.02				0.84
	5.0~6.0			0.14	0.00	0.21	0.05	0.02				0.42
	6.0~7.0		0.07	0.14	0.05	0.07	0.12	0.02	0.02			0.49
	7.0~8.0		0.02	0.00		0.07	0.09	0.05				0.23
	8.0~9.0			0.02			0.07					0.09
	9.0~10.0											0.00
	10.0<						0.02					0.02
	계	0.23	18.69	44.83	18.92	12.90	3.62	0.55	0.02	0.05	0.14	100
평	≤1		0.16	8.61	38.76	31.31	10.25	2.38	1.71	1.04	0.16	94.38
	1.0~2.0				0.12	2.48	1.53	0.02				4.15
	2.0~3.0				0.02	0.09	0.83	0.23				1.17
	3.0~4.0					0.02	0.09	0.19				0.30
	계	0.00	0.16	8.61	38.90	33.90	12.70	2.82	1.71	1.04	0.16	100

Fig 7.33에서 Fig 7.35까지는 2차 조사 기간의 유의파고, 최대파고, 평균파고와 주기를 도식하였고 Table 7.9은 유의파고, 최대파고, 평균파고와 주기를 표로 나타내었다.

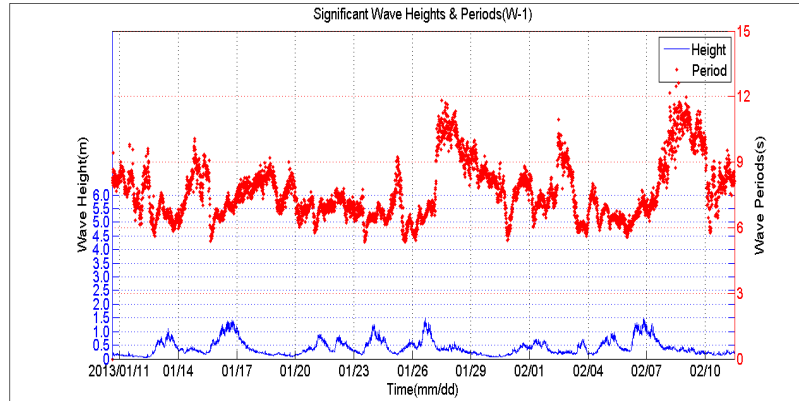


Fig 7.33 Significant wave height and period(Period 2).

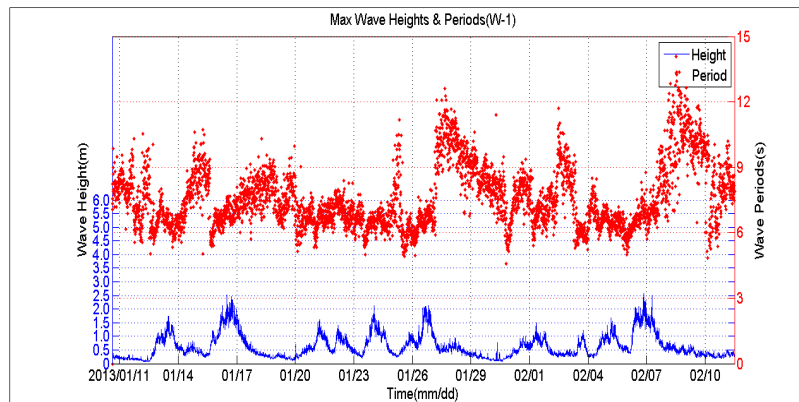


Fig 7.34 Significant wave height and period(Period 2).

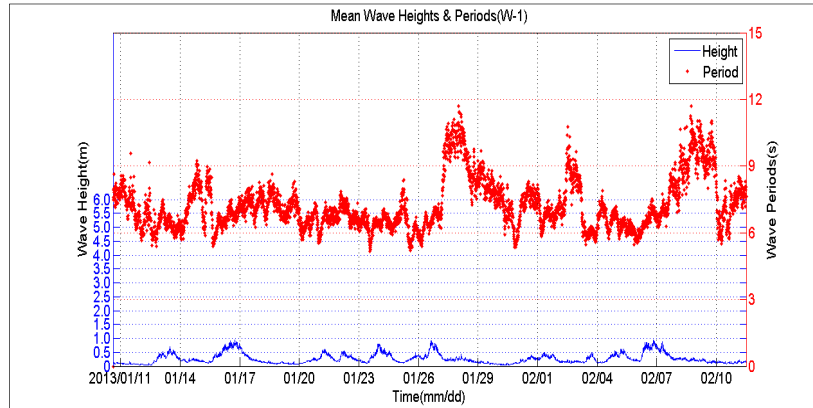


Fig 7.35 Mean wave height and period(Period 2).

Table 7.9 Significant, Maximum & Mean wave height and period Incidence(Period 2) (Unit : %)

파고(m) \ 주기(s)		≤3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12<	계
		≤1	1.0~2.0	계	≤1	1.0~2.0	2.0~3.0	계	≤1	계	계	계	계
유의파	≤1			5.14	31.50	24.95	18.07	6.80	5.53	1.85	0.07		93.91
	1.0~2.0				3.96	2.13							6.09
	계			5.14	35.46	27.08	18.07	6.80	5.53	1.85	0.07		100
최대파	≤1		0.12	7.50	24.07	19.38	15.14	8.06	4.65	1.94	0.51	0.09	81.46
	1.0~2.0			0.74	12.01	4.33	0.30						17.38
	2.0~3.0				0.79	0.37							1.16
평균파	계		0.12	8.24	36.87	24.08	15.44	8.06	4.65	1.94	0.51	0.09	100
	≤1			8.98	45.01	26.82	10.42	5.32	3.15	0.30			100.0
	계			8.98	45.01	26.82	10.42	5.32	3.15	0.30			100.0

, 1 1.0m 88.61% ,  
 주기는 5~6sec범위에서 40.80%로 가장 우세하였고 최대파고는 1.0m미만이 76.42%로 가장 크게 나타났으며, 주기는 4~5sec범위에서 44.83%로 가장 우세하였다.. 평균파고는 1.0m미만이 94.83%로 대부분을 차지하였으며, 주기는 5~6sec 범위에서 38.90%로 가장 우세하였다. 또한, 유의파고의 최대치는 5.80m이며, 이때의 주기는 8.32sec, 최대파고의 최대치는 10.91m이며, 이때의 주기는 8.93sec, 평균파고의 최대치는 3.88m이며, 이때의 주기는 8.67sec이다. 분석결과 1차조사시 각 시계열 그림에서 9월 17일경 peak 값이 발생하였는데 확인결과 9월 11일부터 9월 18일까지 발생한 16호 태풍 산바(SANBA)에 의한 것으로 사료되며, 이 기간



에 제주 동부 해상을 통과한 태풍의 저기압권에 의해 파고 및 풍속이 급격히 상승하였고, 해면기압은 급격히 감소한 것으로 판단된다. 이를 Fig 7.36에 도식하였다.

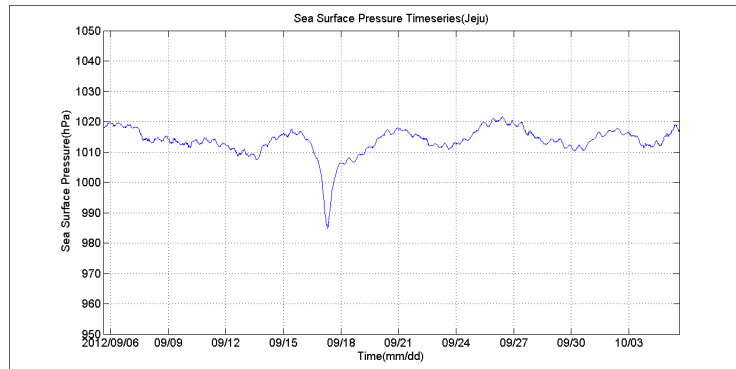


Fig 7.36 Changes in sea level pressure(Period 1).

2차 조사 시 유의파고는 1.0m이하가 93.91%로 가장 크게 나타났으며, 주기는 5~6sec범위에서 35.46%로 가장 우세하였고 최대파고는 1.0m미만이 81.46%로 가장 크게 나타났으며, 주기는 5~6sec범위에서 36.87%로 가장 우세하였다. 평균 파고는 1.0m미만이 100%로 대부분을 차지하였으며, 주기는 5~6sec범위에서 45.01%로 가장 우세하였고 또한, 유의파고의 최대치는 1.49m이며, 이때의 주기는 6.61sec, 최대파고의 최대치는 2.58m이며, 이때의 주기는 7.10sec, 평균파고의 최대치는 0.93m이며, 이때의 주기는 6.82sec이었다.

### 7.3.2 조석

조위계는 프레임을 이용하여 해저면에 안착시키고, 부이와 앵커를 이용하여 계류시켜 관측을 실시하였음. 또한, 관측된 조위 데이터를 조화 분해하여 관측점의 조위 특성을 살펴보았다. 각 분조의 지각은 T\_Tide Toolbox로 부터 한국표준시 자오선 기준의 값을 얻었고, 이를 관측지점 경도기준의 지각 값 및 그리니치 기준 지각 값으로 전환하여 함께 제시하였다. 조석조화분해 프로그램 T\_Tide

Toolbox를 사용하였고 Fortran으로 만들어진 Foreman 박사의 IOS package를 MATLAB MATLAB Toolbox , UBC Rich Pawlowicz, Bob Beardsley, Steve Lentz 교수 등에 의해 개발되어 현재 세계 많은 연구기관에서 사용되고 있으며 그 신뢰성 또한 높게 평가되고 있다. 관측한 데이터로부터 조위 시계열 분포를 도시하였고, 조석조화분해를 수행한 결과로부터 얻어진 조화상수 및 비조화상수 값을 제시하였으며, 관측결과로부터 조위면도와 주요 4대 분조의 변위를 나타내었다. Fig 7.37은 1차 조석 기간에 대한 관측값에서 4대 분조로 조석을 예측한 후 관측치와 예측치의 차를 도식하였다. Fig 7.38

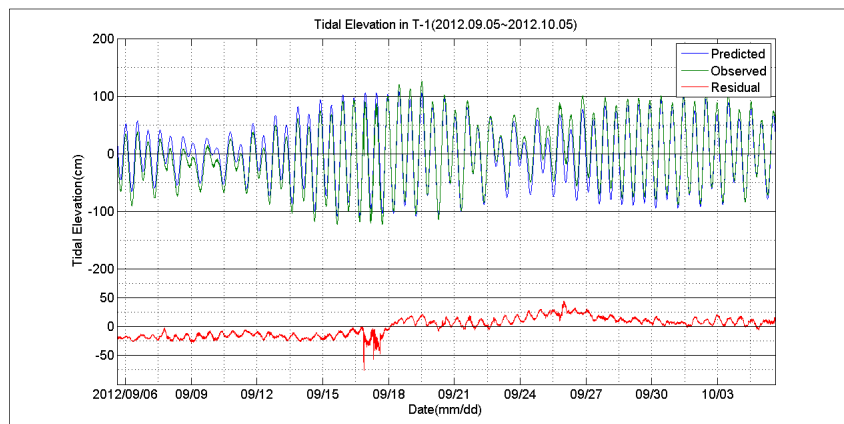


Fig 7.37 The first survey (tidal).

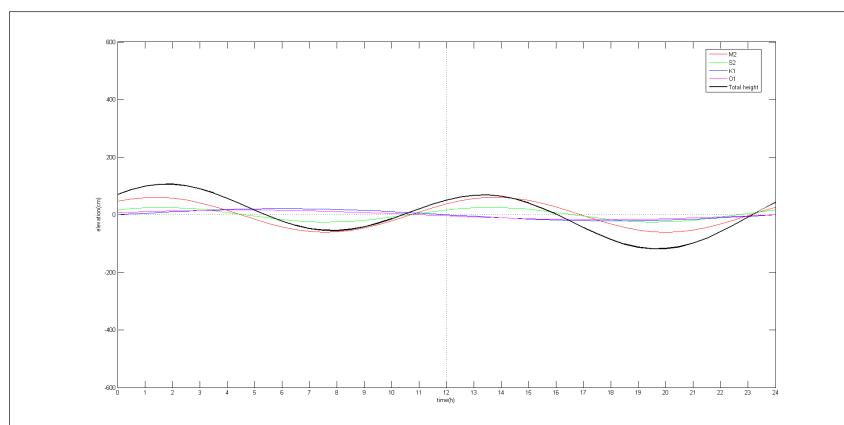


Fig 7.38 The main four kinds Tidal component(Period 1).

Fig 7.39은 2차 조시 기간에 대한 관측 값에서 4대 분조로 조석을 예측한 후 관측치와 예측치의 차를 도식하였다. Fig 7.40은 2차 조시 기간에 대한 4대 분조를 도식하였다.

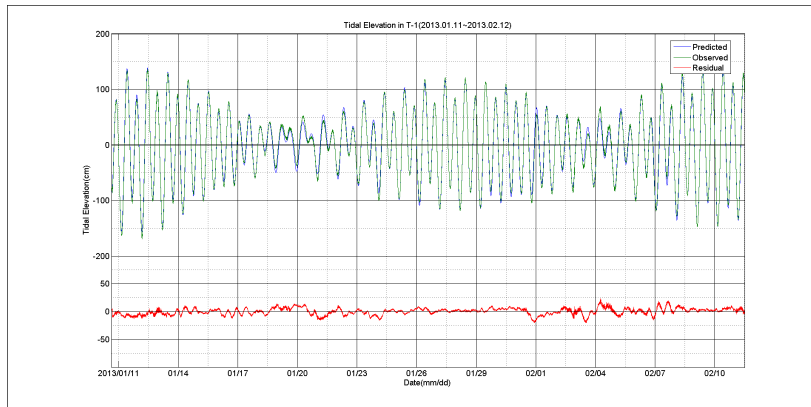


Fig 7.39 Secondary research (tidal).

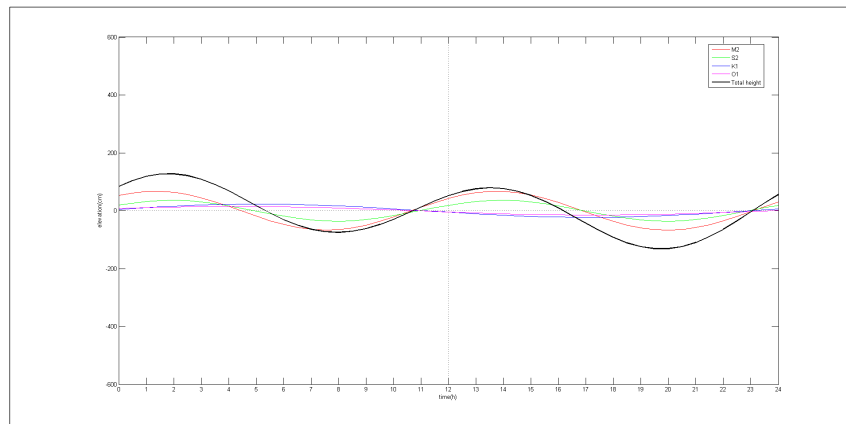


Fig 7.40 The main four kinds Tidal component(Period 2).

조위 분석결과 1차 조사 시 평균고조위는 184.7cm 대조차는 172.6cm, 평균조차는 121.6cm로 나타나고 있으며, 2차 조사 시 평균고조위는 207.8cm, 대조차는 205.8cm, 134.2cm .  $((K1+O1)/(M2+S2))$  는 1차, 2차 각각 0.44, 0.37으로 나타나 반일주조가 우세한 혼합조 조석 형태를 보이고 있다. 또한 같은 날 두 번의 만조 또는 간조의 높이가 서로 같지 아니한

현상인 일조부등 현상이 일어나고 있었다. 이는 반일조와 일일조가 동시에 존재하기 때문에 일어난다. 조위면도는 국토해양기술단에서 개발한 tidediagram을 이용하였다. 이를 Fig 7.41에 도식하였다. 또한 Table 7.10에 1차와 2차 기간에 대한 조석의 조화상수와 비조화 상수를 표현 하였다.

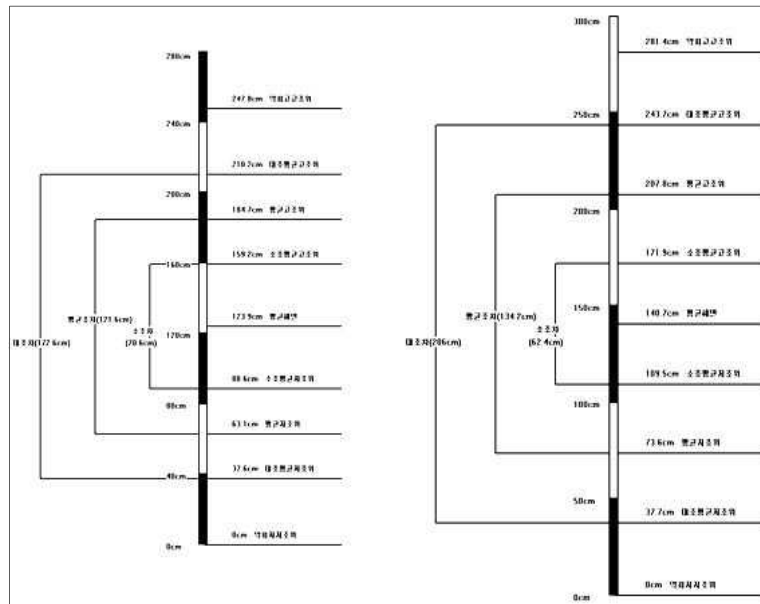


Fig 7.41 Ocean Water levels.

Table 7.10 Tidal constant and ocean Water levels

관측지점		T-1(1차조사)		T-1(2차조사)	
관측기간		2012.09.05 ~ 2012.10.05		2013.01.11 ~ 2013.02.12	
관측위치 (WGS-84)		126°47'23.60"E 33°34'32.10"N			
조화상수	항 목	진폭(cm)	지각 (°)	진폭(cm)	지각 (°)
	M2 주태음반일주조	60.8	300.7	67.1	299.6
	S2 주태양반일주조	25.5	319.3	35.8	328.1
	K1 일월합성일주조	21.1	226.9	22.9	212.6
	O1 주태음일주조	16.5	190.3	14.9	186.1
비조화상수	평균고조간격 (M.H.W.I)	10시간 22분		10시간 20분	
	평균저조간격 (M.L.W.I)	16시간 34분		16시간 32분	
	약최고고조위 (Approx.H.H.W.)	247.8cm		281.4cm	
	대조평균고조위 (H.W.O.S.T.)	210.2cm		243.6cm	
	평균고조위 (H.W.O.M.T.)	184.7cm		207.8cm	
	소조평균고조위 (H.W.O.N.T.)	159.2cm		172.0cm	
	평균해수면 (M.S.L.)	123.9cm		140.7cm	
	소조평균저조위 (L.W.O.N.T.)	88.6cm		109.4cm	
	평균저조위 (L.W.O.M.T.)	63.1cm		73.6cm	
	대조평균저조위 (L.W.O.S.T.)	37.6cm		37.8cm	
	대조차 (Spring Range)	172.6cm		205.8cm	
	소조차 (Neap Range)	70.6cm		62.6cm	
	평균조차 (Mean Range)	121.6cm		134.2cm	
	형태수 (Tide Factor)	0.44		0.37	

### 7.3.3 연속 조류

ADCP 유속계를 계류하고 매 10분 간격으로 15일간 유향과 유속을 측정하였으며, 관측한 데이터로부터 통계분석을 수행하였고, 유속 및 유향 출현율을 각각 16방위와 10cm/s 간격의 계급별로 출현율을 산출하였고 창·낙조시 최대 및 평균유속을 제시하였고, 상위 5%, 10%, 50% 유속 평균을 제시하였다. 1차조사시

창조류 최강유속은 139.3cm/s, 평균유속은 59.4cm/s로 조사되었고, 낙조류 최강 유속은 198.0cm/s, 평균유속은 75.4cm/s로 조사되었으며, 유향 출현율의 경우 E, WNW방향에서 각각 34.9%, 23.3%로 우세하게 조사되었으며, 유속 출현율의 경 우 50~80cm/s에서 9%로 내외의 분포를 보였다. 이를 Table 7.11과 7.12에 나 타내었다.

Table 7.11 Tidal current speed and direction (Period 1)(%)

유속 (CM/S)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	합계
0~10	0.19	0.09	0.09	0.19	0.05	0.19	0.05	0.09	0.23	0.14	0.19	0.05	0.42	0.51	0.42	0.28	3.18
10~20	0.37	0.42	0.51	1.07	0.46	0.23	0.28	0.09	0.05			0.09	1.25	1.35	1.21	0.83	8.21
20~30	0.14	0.23	0.37	0.79	1.11	0.32	0.19			0.05		0.05	0.65	2.64	1.07	0.14	7.75
30~40	0.05	0.09	0.09	1.07	1.58	0.42	0.09						0.79	2.97	0.70	0.05	7.90
40~50		0.05	0.05	0.93	1.62	1.25							1.21	3.01	0.19	0.00	8.31
50~60				0.74	2.78	1.16							1.76	2.64	0.09	0.05	9.22
60~70				0.56	3.01	0.93							1.95	2.64	0.09		9.18
70~80				0.23	3.66	1.16							1.95	2.13			9.13
80~90				0.14	3.43	0.93							2.04	1.72			8.26
90~100					4.04	0.70							1.86	1.44			8.04
100~110					3.53	0.19							1.99	1.16			6.87
110~120					2.92	0.19							1.30	0.88			5.29
120~130					2.18	0.23							0.88	0.19			3.48
130~140					1.72	0.05							0.51				2.28
140~150					1.30												1.30
150~160						0.81	0.05										0.86
160~170					0.49												0.49
170~180					0.17												0.17
180~190					0.04												0.04
190~200					0.04												0.04
합계	0.75	0.88	1.11	5.72	34.94	8.00	0.61	0.18	0.28	0.19	0.19	0.19	18.56	23.28	3.77	1.35	100

Table 7.12 Tidal current speed and direction (Period 2)(%)

유속 (CM/S)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	합계
0~10	0.37	0.11	0.33	0.22	0.33	0.37	0.18	0.11	0.15	0.18	0.18	0.29	0.44	0.29	0.48	0.41	4.44
10~20	0.29	0.29	0.33	0.88	0.92	0.37	0.11	0.04		0.07	0.07	0.15	1.22	0.85	0.41	0.48	6.48
20~30	0.04	0.04	0.29	0.74	1.77	0.63				0.07		0.07	1.14	2.21	0.37	0.15	7.52
30~40			0.07	0.81	1.95	0.26				0.04			1.91	2.21	0.33	0.04	7.66
40~50				0.66	1.99	0.55							1.91	2.50	0.11		7.72
50~60				0.29	3.24	0.88							1.95	1.84	0.04		8.24
60~70				0.07	3.98	0.85							3.17	2.21	0.04		10.3
70~80				0.04	3.28	0.63							2.76	1.58			2
80~90					3.31	0.44							3.61	1.10			8.29
90~100					3.94	0.37							3.72	0.55			8.46
100~110					3.76								3.24	0.26			8.58
110~120					2.54								1.77	0.15			7.26
120~130					2.84								1.25	0.04			4.46
130~140					3.02								0.48				4.13
140~150					1.55								0.06				3.50
150~160					0.81												1.61
160~170					0.41												0.81
170~180					0.11												0.41
180~190																	0.11
190~200																	0.11
합계	0.70	0.44	1.02	3.71	39.75	5.35	0.29	0.19	0.15	0.36	0.25	0.51	28.63	15.79	1.78	1.08	100

조사결과 창조에 비해 낙조류가 더 강하게 조사되었는데 이에 대한 분석결과 조사기간 중 통과한 16호 태풍 산바(SANBA)가 9월 17일경 제주 동부해상을 통과하면서 태풍의 저기압권으로 해류가 빠르게 이동하면서 이 기간에 조류의 peak 값이 발생하였고 2차조사시 창조류 최강유속은 141.9cm/s, 평균유속은 62.4cm/s로 조사되었고, 낙조류 최강유속은 174.2cm/s, 평균유속은 75.7cm/s로 조사되었으며, 유향 출현율의 경우 E, W방향에서 각각 39.8%, 28.6%로 우세하게 조사되었으며, 유속 출현율의 경우 60~70cm/s에서 10%로 내외의 분포를 보였다. 이를 Table 7.13에 표시하였다.

Table 7.13 Tidal current speed analysis

조사기간		구분	유속(cm/s)				
			최강유속	상위5%	상위10%	상위50%	평균
1차	Surface	전체	198.0	147.0	135.0	98.6	67.7
		창조시	139.3	124.3	117.7	87.6	59.4
		낙조시	198.0	156.6	145.7	107.3	75.4
2차	Surface	전체	174.2	145.3	136.4	100.5	69.2
		창조시	141.9	125.8	118.1	90.5	62.4
		낙조시	174.2	152.7	144.7	109.6	75.7

(Scatter plot)

를 Fig 7.42에 도시하고, 관측된 유향·유속을 시계열도와 벡터도로 나타냈다. 1차시에 태풍산파에 의한 풍파의 발달로 취송류가 발달하였고 이로 인해 조류의 방향과 취송류의 방향이 달라 분포도가 기간2보다 넓게 분포한 것으로 판단된다. Fig 7.43과 Fig 7.44는 관측된 1차 기간과 2차 기간의 연속조류의 남북방향과 동서방향 유속성분의 변화를 보여주고 있다. Fig 7.45과 Fig 7.46는 관측된 1차 기간과 2차 기간의 일주조와 반일주조의 조류 타원체도를 보여주고 있다.

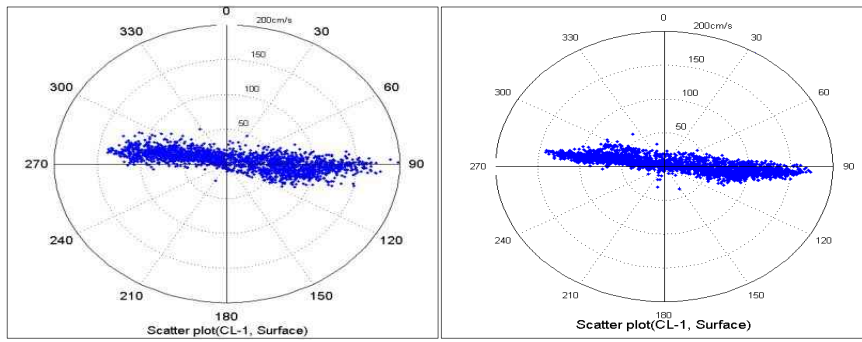


Fig 7.42 Tidal current speed and direction scatter plot.

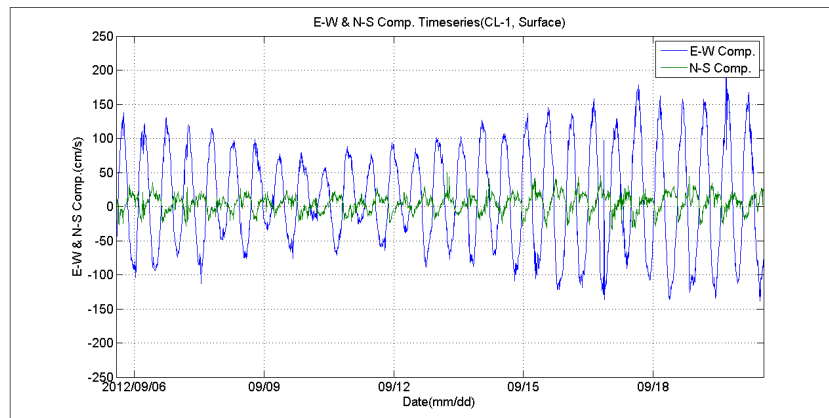


Fig 7.43 Tidal current speed and direction time-series plot (Period 1).

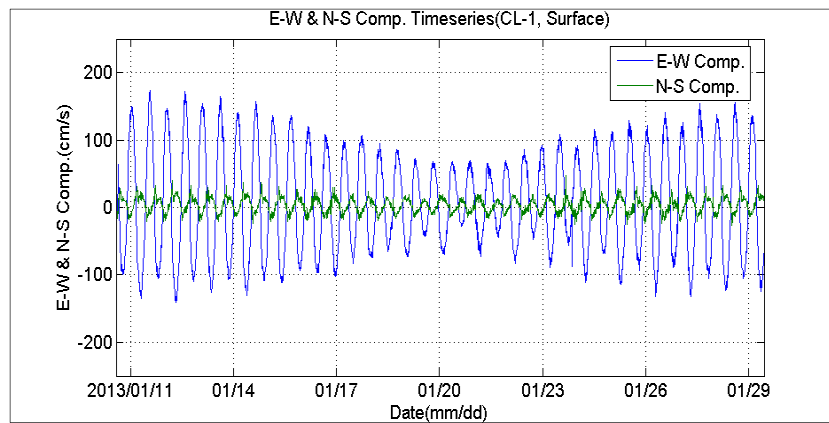


Fig 7.44 Tidal current speed and direction time-series plot (Period 2).



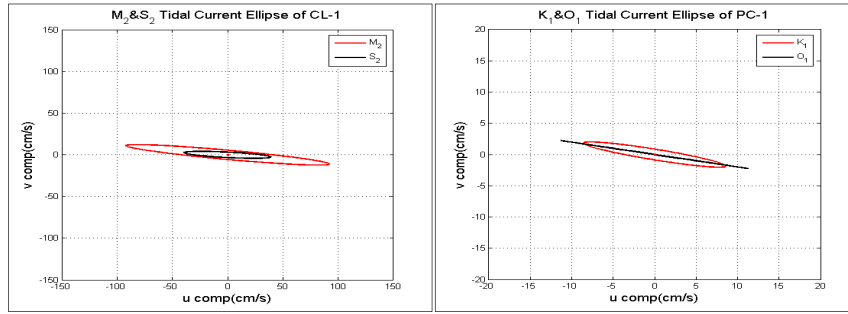


Fig 7.45 Current ellipse (Period 1).

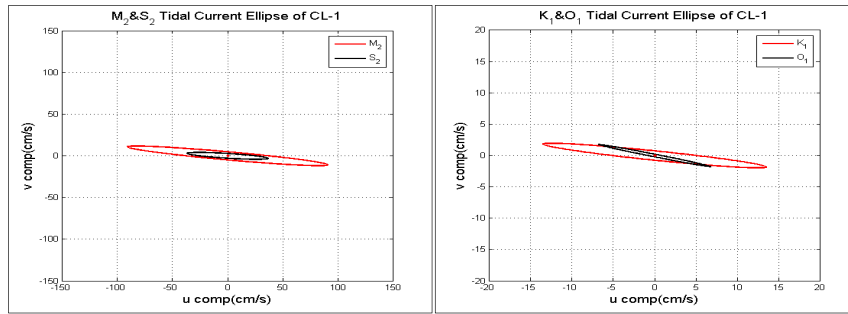


Fig 7.46 Current ellipse (Period 2).

#### 7.4 해양파의 Power Spectrum 분석

Fig 7.47은 태풍 산바가 제주를 지나가던 기간의 월정 해상 기상탑 70m에서 관측된 풍속 데이터이다. 15일과 16일 사이의 풍속과 수압식 파고계의 데이터를 비교해 보면 풍속의 강해 졌다 약해지는 것보다 수압식 데이터의 파고 변화의 폭이 감소는 시간이 지연이 발생 하는 것을 확인 할 수 있었다. Fig 7.48과 Fig 7.50 까지는 수압식 파고계 데이터의 변화를 보여 주고 있으며 조석성분과 특히 풍속이 강해짐에 따라 변동이 심해지며 파의 통계치(유의파고, 최대파고)가 상승 하는 것을 판단할 수 있다.

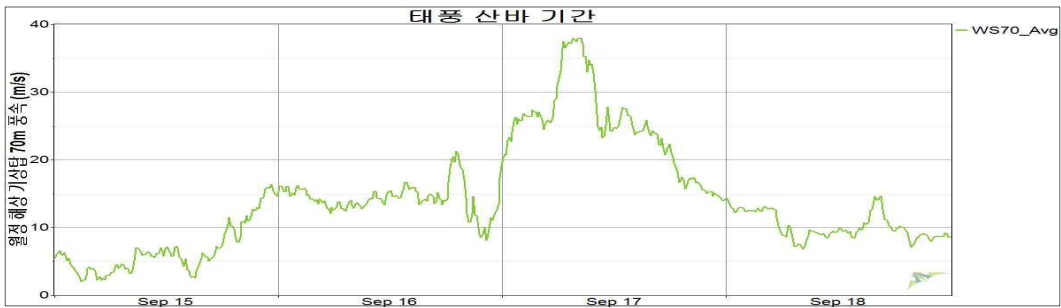


Fig 7.47 Offshore met-mast 70m high wind speed (Typhoon sanba period).

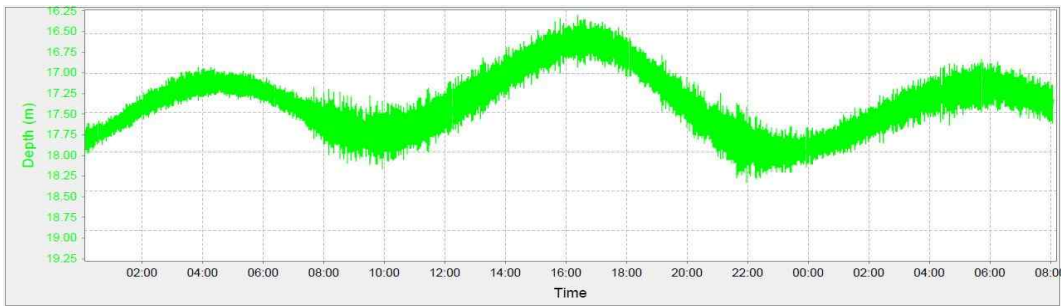


Fig 7.48 Typhoon sanba period wave logger data\_1 (2012. 9. 15 AM).

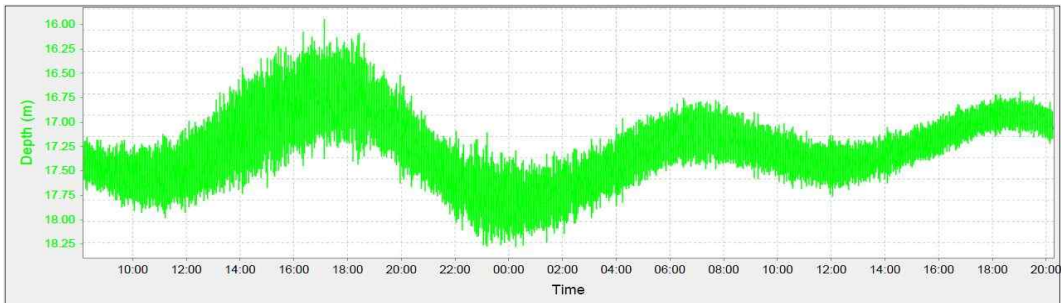


Fig 7.49 Typhoon sanba period wave logger data\_2 (2012. 9. 15 PM).

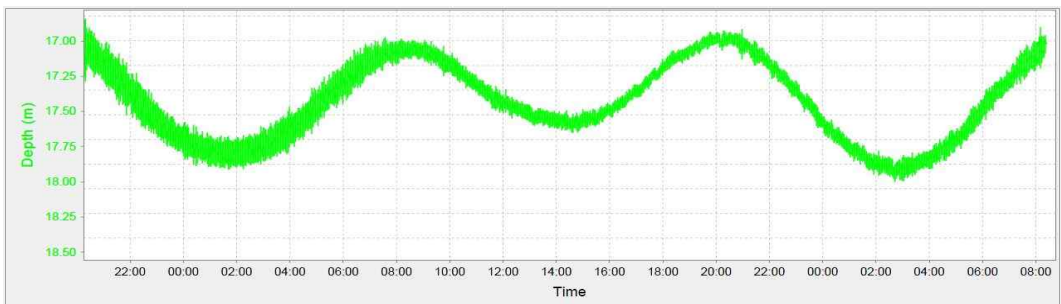


Fig 7.50 Typhoon sanba period wave logger data\_3 (2012. 9. 16 AM).

Fig 7.51에서 Fig 7.54까지는 수압식 파고계 데이터의 Power Spectrum분석의 결과이다.

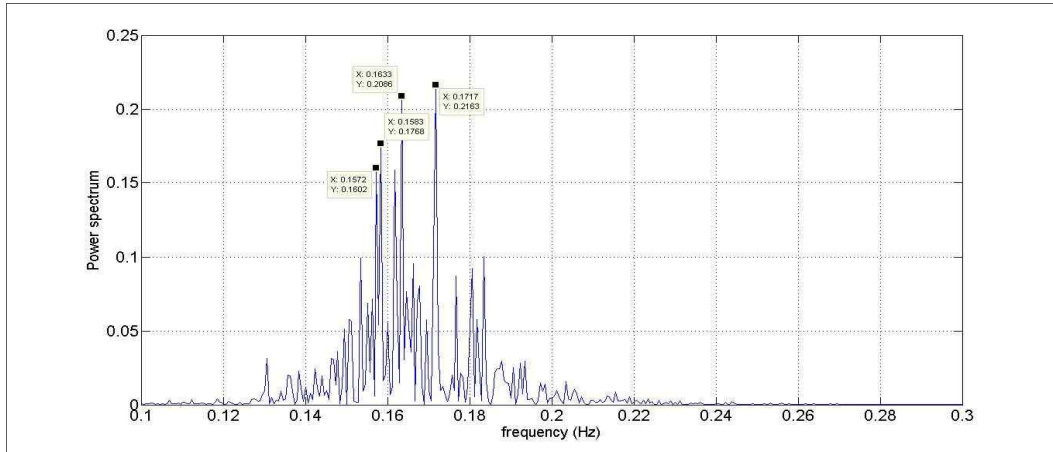


Fig 7.51 Wave logger power spectrum analysis\_1  
(September 15, 2012 0:00 to 0:30).

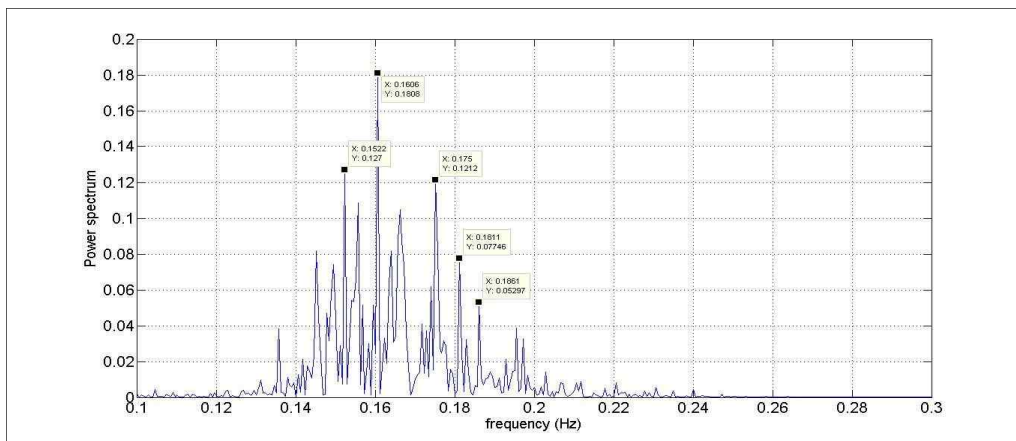


Fig 7.52 Wave logger power spectrum analysis\_2  
(September 15, 2012 0:30 to ~01:00).

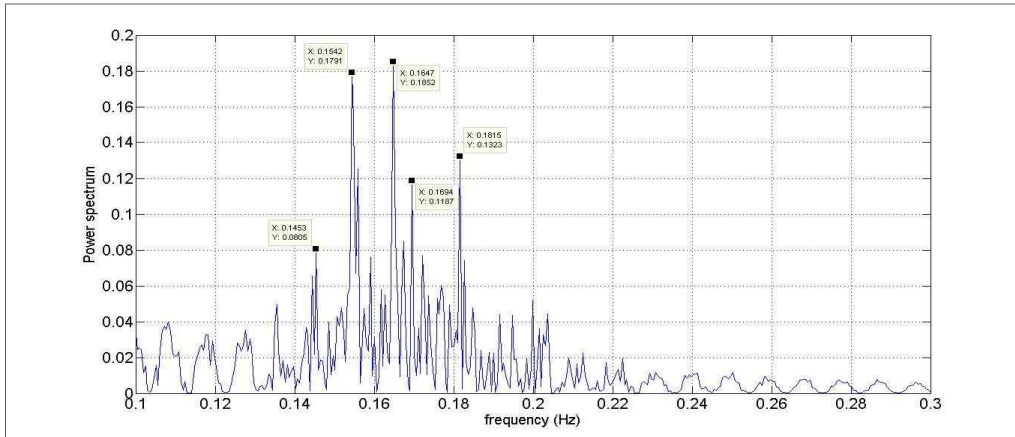


Fig 7.53 Wave logger power spectrum analysis\_3  
(September 15, 2012 01:00 to 01:30).

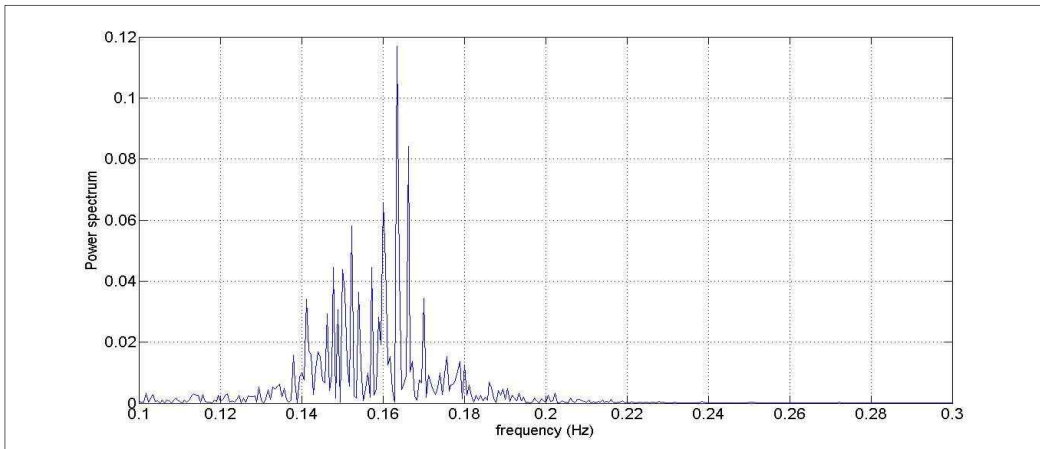


Fig 7.54 Wave logger power spectrum analysis\_4  
(September 15, 2012 04:00 to 04:30).

17, 1, 2, 6, 8, 9, 10 시의 1Hz 관측 단위의 1시간 연속 관측 데이터를 가지고 Power Spectrum을 분석을 실시하였다. 분석 결과 약 9.9초 주기에서 약 11.6초 주기까지 피크 주파수의 변화를 확인할 수 있었다. 이를 Fig 7.55에서 Fig 7.60에 도식하였다.

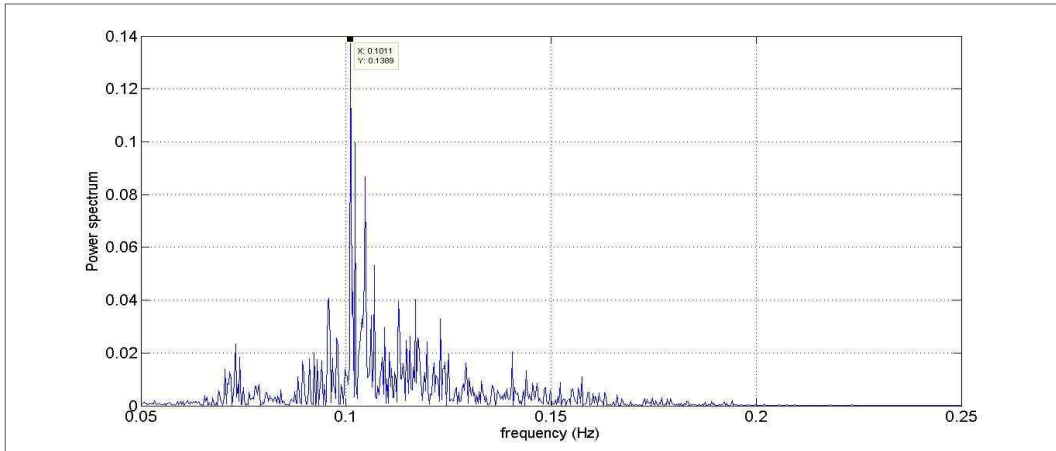


Fig 7.55 Wave logger power spectrum analysis\_5  
(September 17, 2012 01:00 to 02:00).

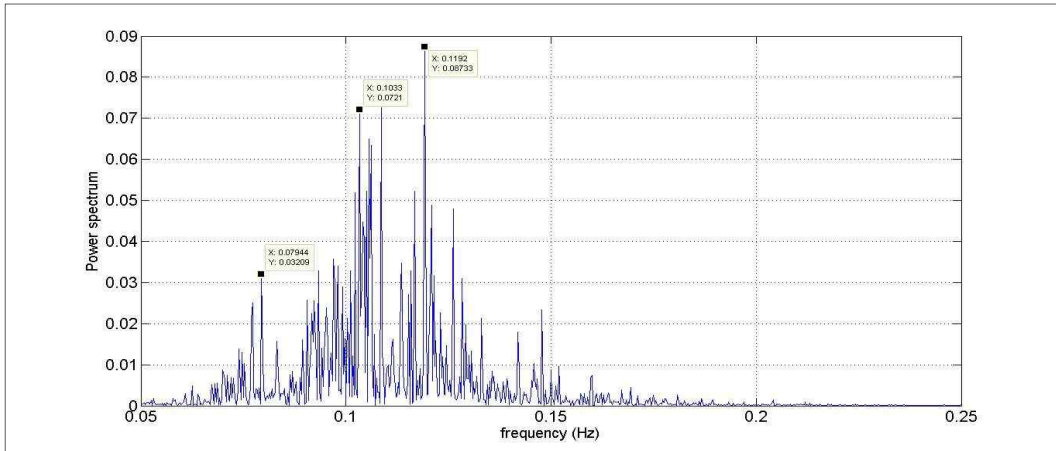


Fig 7.56 Wave logger power spectrum analysis\_6  
(September 17, 2012 02:00 to 03:00).

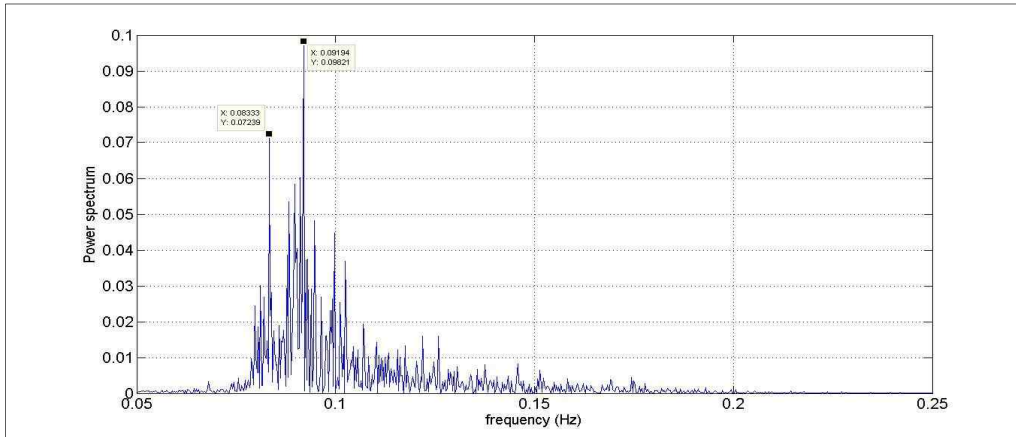


Fig 7.57 Wave logger power spectrum analysis\_7  
(September 17, 2012 06:00 to 07:00).

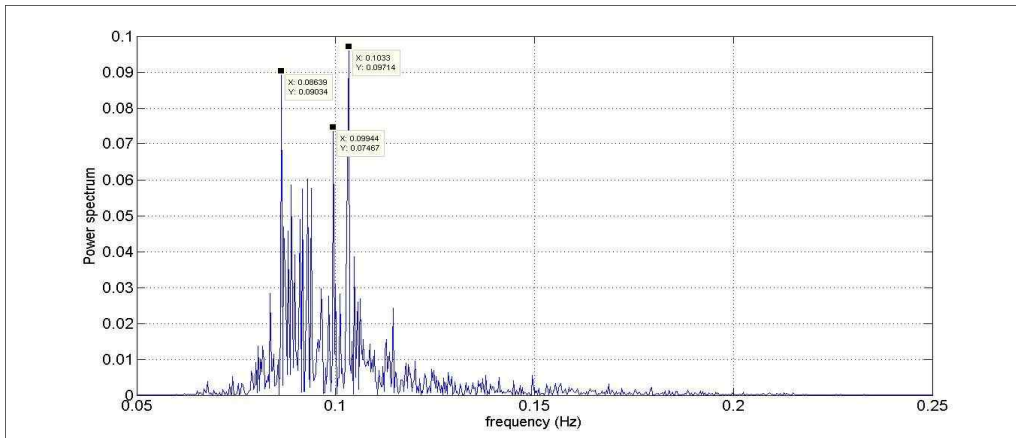


Fig 7.58 Wave logger power spectrum analysis\_8  
(September 17, 2012 08:00 to 09:00).

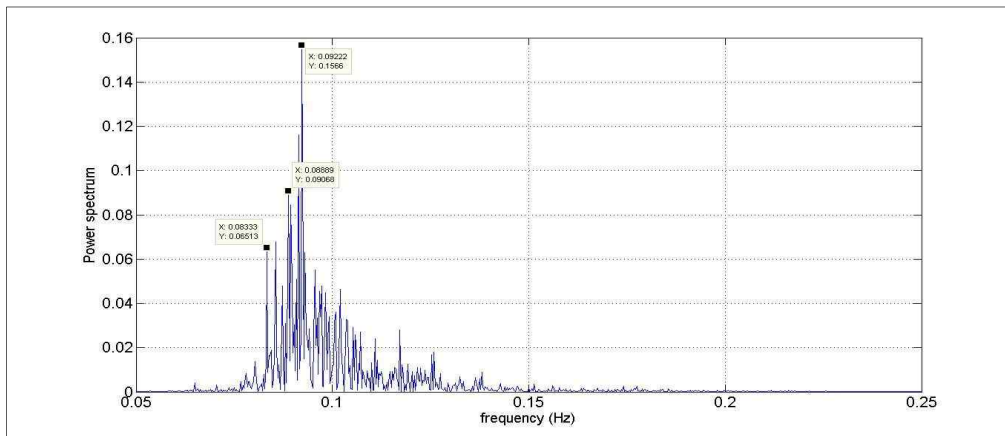


Fig 7.59 Wave logger power spectrum analysis\_9  
(September 17, 2012 9:00 to 10:00).

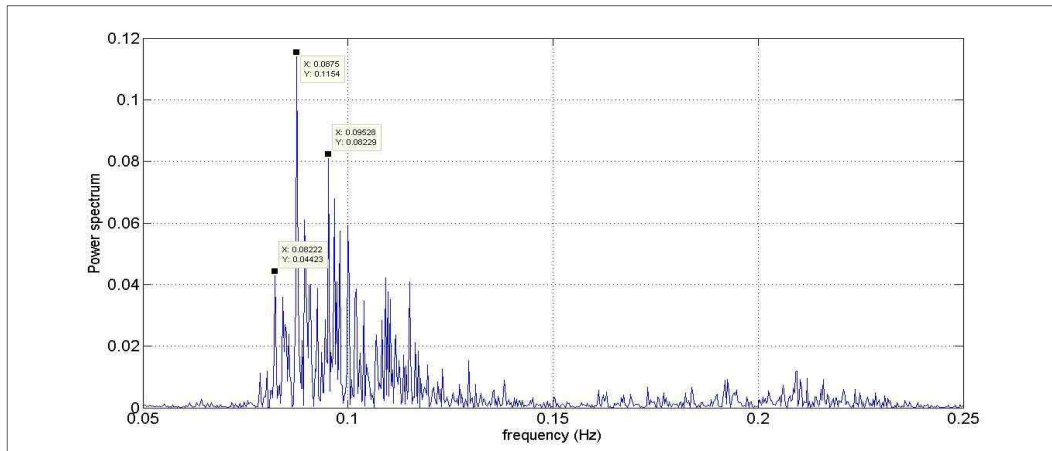


Fig 7.60 Wave logger power spectrum analysis\_10  
(September 17, 2012 10:00 to 11:00).

풍파에 의해 파가 발달하고 있는 15일 수압식 파고계 데이터를 이용하여 Power Spectrum 분석을 실시하였다. 15일 0시부터 30분 간격으로 4Hz로 관측된 데이터를 분석한 결과는 Fig 7.61과 같다. 해양의 파의 성장과정과 같이 계속적인 에너지원(풍속)이 유입으로 초기 5.8초에서 6.3초 사이의 주기의 파가 5.5초에서 7초대 까지 다양한 범위에서 피크치를 보이고 있으며 단주기파에서 장주기 파로 변화면서 진폭이 작아졌다 점점 증대되는 효과를 확인 할 수 있었다. 또한 풍속이 약해 졌던 4시에서 4시 30분경에는 주파수의 변화 없이 진폭만 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다.

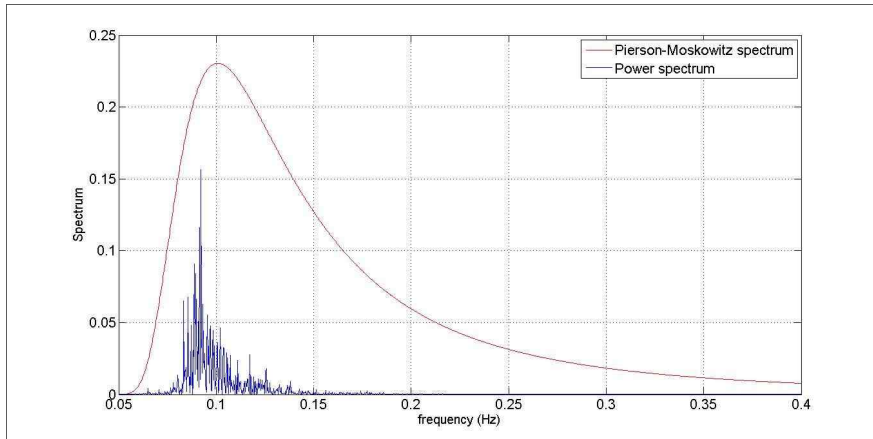


Fig 7.61 Power spectrum & PM spectrum comparison.

풍속의 방향과 파의 진행방향의 상의함 혹은 수심의 변화로 인한 에너지의 감소가 원인일 수 있다. 이는 결과적으로 PM스펙트럼의 기준 고도로 풍속을 변환하여 분석을 하였다. 1시간 평균 풍속을 기준으로 하였다. 풍속의 변동에 따라 같은 주파수대가 발달하여 갔으며 주파수의 변동이 없는 지역에서 Power spectrum과 PM spectrum을 비교 하였다. 그 결과 PM spectrum의 적용 할 경우 진폭에 대한 과대 예측을 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 7.5 STFT분석 결과

제주의 경우 태풍에 의한 너울성 파랑이 전달되는 과정에서 연속적으로 태풍이 전파되어 오는 경우가 있으며 이 때 파의 스펙트럼이 쌍봉을 이룰 것이라는 가정하에 제주 외항의 수압식 파고계 데이터를 분석 하였다. Fig 7.62에서 Fig 7.65까지는 이런 현상이 일어나고 있을 것이라 판단되는 기간에 대한 STFT분석 결과이다.



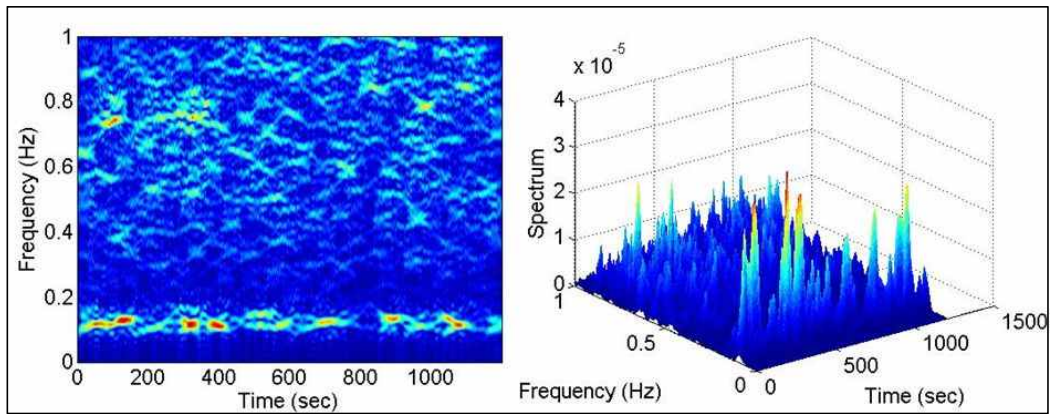


Fig 7.62 Around the Jeju new harbor STFT analysis\_1  
(August 8, 2010 00 pm and 20 minutes 0.5 seconds).

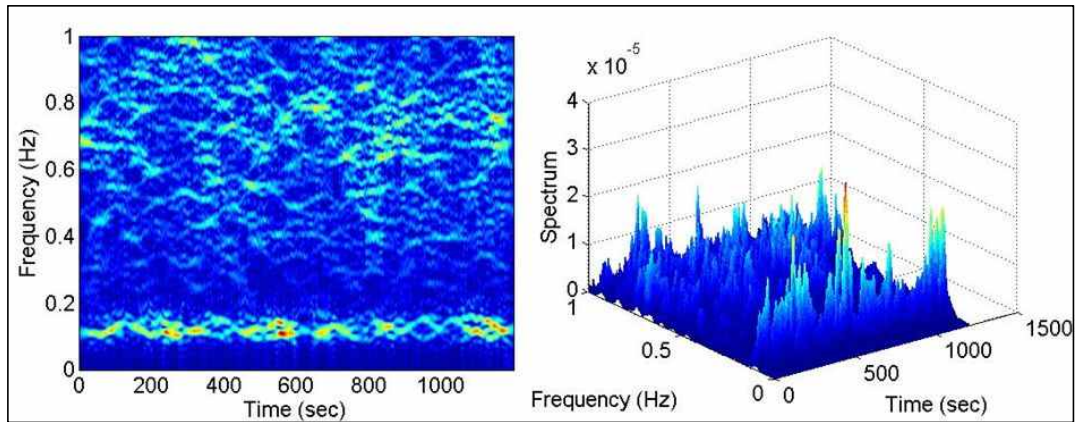


Fig 7.63 Around the Jeju new harbor STFT analysis\_2  
(August 8, 2010 02 pm and 20 minutes 0.5 seconds)..

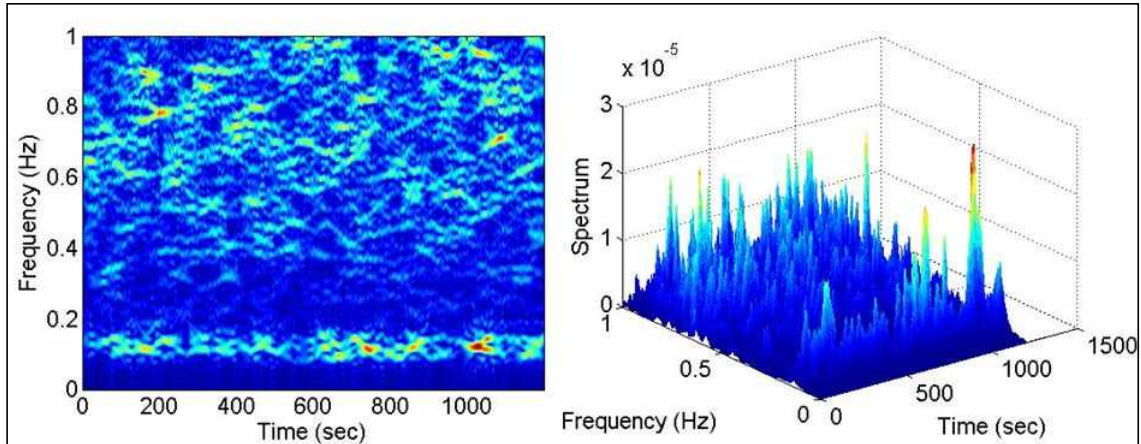


Fig 7.64 Around the Jeju new harbor STFT analysis\_3  
(August 8, 2010 04 pm and 20 minutes 0.5 seconds).

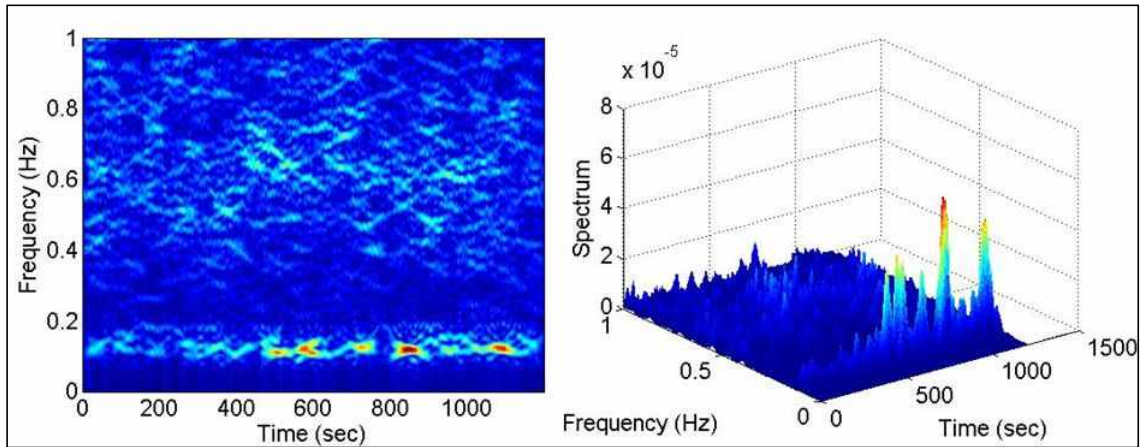


Fig 7.65 Around the Jeju new harbor STFT analysis\_4  
(August 8, 2010 06 pm and 20 minutes 0.5 seconds).

STFT분석 결과 0.2Hz이하의 조석의 의한 영역의 주파수대 에너지는 계속적으로 관측이 되고 있으며 풍파의 성장과정에서 파의 주기와 파고가 어느 정도 커지게 되어 파형경사(H/L)가 심해에서의 한계파형경사인 0.142보다 커지게 되면 파봉부터 파가 부서지는 백파(white cap)형태의 쇄파가 발생한다. 이때, 풍파는 에너지공급과 쇄파로 인한 에너지감쇠가 평형상태에 달할 때까지 발달하는 과정에 대한 관측이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 또한 해양파의 스펙트럼 역시 피크치가 두 곳에서 발생하는 쌍봉형태가 나타남을 알 수 있었다.

## 8. 결 론

본 연구에서는 제주 연안역의 육·해상 풍력발전단지의 개발을 위한 흐름도를 제시하였고 이를 기준으로 연구를 하였다. 이 흐름도는 제주 연안역의 풍력발전단지 개발과정을 발전단지의 개발 주최의 입장에서 개발 기간을 최소화하고 의사결정에 도움을 주기한 방법에 대한 연구이며 특히, 해상풍력발전단지의 하부구조물 검토를 위한 제주 북동부 지역의 해양환경 하중의 실관측데이터 분석데이터도 포함하였다. 풍력개발사업의 흐름도에 공사장비의 검토, 예비경제성 평가, 하부구조물 설계, 경제성 평가, 시공성 평가 등 여러 가지 요인이 추가되어야 하지만 본 논문에서 연구한 내용만을 중심으로 작성하였다.

본 연구는 제주 연안역의 풍력발전단지 개발을 위한 풍황 자원 분석과 해양환경 하중을 검토를 위한 기초연구이다. 풍력발전 입지의 기본이 되는 풍황 자료 분석과 처리 방법, Micro-siting의 입력데이터의 정확성 향상의 응용연구 분야, 현대 측량 기법을 활용한 주민 수용성을 만족 시킬 수 있는 개발 가능 구역의 추출방법, 실관측을 통하여 해상 풍력 발전단지에 적용 가능한 해양환경하중 제시, 그리고 제주 해상의 DLC상황에 대한 기초 연구로 분류 할 수 있다.

1. 공간 분석 단계 : Micro-siting 과정에서 필요한 데이터는 풍황, 지형고도지도, 조도지도가 있다. 어떤 프로그램이라고 입력데이터의 정확성은 결과 값에 많은 영향을 준다. Micro-siting 과정에서 제일 중요한 정보는 풍황 자료이다. 하지만 지형고도지도, 조도계수지도 역시 산출 결과에 영향을 준다.

가. 본 논문에는 지형고도지도와 투영, 좌표변화에 대한 문제와 그 해결법에 대한 기초연구를 수행 했으며 GIS기술을 이용하여 Micro-siting에 적합한 등고선 지도 생성과정을 제시하였고 제주도의 Micro-siting을 위한 등고선 지도를 제시하였다. RS기술을 활용하여 조도계수 생성과 자동화에 대한 많은 해외의 선행 연구가 있으나 국내의 경우 이런 시도가 거의

없었다. 본 논문에서는 또한 Micro-siting에 적합한 조도계수 지도의 생성과정의 소개와 제주지역에 적합한 Micro-siting에 적합한 영상분류를 실시하였다. 또한 제주 전역의 기 관측되었거나 관측 중인 풍황탑 자료를 이용하여 산출한 조도계수를 이용하여 제주도의 Micro-siting을 위한 조도계수 지도를 제시하였다.

나. 풍력발전 단지에 대한 주민 수용성을 만족 시킬 수 있는 개발 가능 구역을 GIS와 증강현실 기법을 이용하여 해결책을 제시 하였다. 많은 정보의 부재가 존재 하지만 GIS의 배제 분석 기술을 이용하여 경과보호구, 항만 기능구, 해양생태계보호구, 해양문화자원기능구, 군사시설 등 개발이 불가능한 지역과 수심을 고려한 제주 연안의 개발 가능한 지역을 산출하였다.

다. 군통신, 그림자 효과, 가시화 및 시계영역 분석 등 주민 수용성과 안보와 관련 되어 개발 제한이 될 수 있는 조건에 대하여 증강현실을 이용한 관리 방안에 대해 제시하였다.

2. 풍황 자원 분석 : 국·내외에 많은 풍력발전단지 개발 흐름도가 존재 하지만 국내 현실은 풍황탑이 설치되기 전에 발전 단지의 경계구역이 결정되어 있다. 지역에 따라 특수성이 존재 함에도 우리 지역에 대한 풍황의 기초 관측 및 분석은 미흡한 실정이다. 이에 본 논문에서는 제주지역의 풍황의 특성에 관한 기초 연구를 실시하였다.

가. 극한풍속 산출 방법에 대하여 정리하였고 제주 북동부 지역의 극한 풍속을 산출하였다. 풍력은 유럽이 발달해 있어 이 지역에서 관측된 자료의 특성으로 만들어진 공식들을 사용하고 있다. 하지만 극한 풍속 산출 결과 국내의 태풍의 영향으로 산출방법에 따라 과대 예측 혹은 과소 예측을 할 우려가 있었다. 장기 풍황 관측으로 인한 국내에 적합한 산출 공식과 관측기간 및 보정 방식이 필요하다고 판단된다.

나. 풍황탐의 정보만으로 발전단지의 수직과 수평 풍속과 풍황을 예측한다. 풍속의 확률 특성은 높이별 풍속 변화의 예측과 밀접한 관련이 있다. 또한 풍속의 확률 특성을 산출하는 많은 방법이 존재한다. 본 논문에서는 이런 방법 중 Maximum Likelihood Algorithm, 최소제곱근을 이용한 방법, WASP 알고리즘을 이용한 방법을 이용하여 제주의 풍황 특성을 확인하였으며 풍속의 가정에 상당한 신빙성이 있음을 증명하였다. Weibull 확률분포의 파라미터들의 높이별 변화를 통하여 높이별 풍속 변화 공식의 적용의 신빙성을 확인 하였다. 또한 AWS와 같은 한 지점의 풍속 정보만으로 임의의 지점의 풍속을 예측할 때 사용되는 Rayleigh 분포의 가정 조건인 Weibull 확률분포의 형상계수가 2라는 가정의 적합성을 확인하였다.

3. 장기 풍황 보정 : 장기 풍황 관측치 분석 보고서들을 보면 연평균 풍속은 장기 연평균 풍속과 비교하여 15%이상 변동한다. 풍력발전시스템의 전력생산은 이런 변동의 3승에 비례하므로 관측 하는 기간의 그 지역의 평균 풍황의 아닐 경우 상당한 경제적 영향을 줄 수 있다. 이에 MCP를 수행하여 장기 풍황에 의한 불확실성을 감소시킨다.

가. 장기풍황 보정 과정의 방법에 대하여 정리 하였으며 상관성 증가 및 결속 구간 보정 등 풍황 데이터의 Quality check방법을 정리하였다.

나. 장기 풍황 보정 시 주변의 장기 풍황이 존재해야만 보정이 가능하며 관측지역과 참조 지역의 상관성의 정도가 향후 풍력발전단지의 예상 수익의 불확도 평가에 상당한 영향을 미친다. 본 논문에서는 이런 상관성과 예측의 신뢰성을 향상시키기 위한 연구를 진행 하였다. 장기 풍황 자료로 주로 활용되는 AWS는 지면과 가까운 곳에 위치에 하였으며 지면과 가까울수록 24시간 주기의 일주 성분이 강함을 확인 하였고 계절별로 그 정도의 차이가 있음을 확인 하였다.

다. BSF를 이용한 장기 풍황자료의 일주성분 제거 시 상관성 및 예측 오차의 감소를 확인하였다..

4. 풍력 자원 지도 : 풍력자원지도는 풍황탐 설치 위치 확인을 위한 기본 데이터로써 활용되어야 하지만 국내의 풍력단지 개발 과정에 비추어 보면 발전단지 개발을 위한 중요 자료로 활용되고 있다. 특히 해상의 경우 주변의 기 설치된 풍황탐 자료가 획득의 문제로 풍황 자원 지도의 정보의 활용성은 상당하다고 판단된다.

가. 국내의 풍황 자원 지도는 전국도를 대상으로 하기에 일부 지역에 대한 공간 해상도가 많이 떨어지며 발전단지 개발을 위한 중요 자료로 활용되기 어려운 측면이 있다.

나. 본 논문에서 제시한 Micro-siting을 위한 조도계수 지도와 Micro-siting용 등고선 지도 이용할 경우 풍황 자원 지도의 정확성이 향상됨을 확인하였다.

다. 본 논문에서 제시한 BSF를 적용하여 장기풍황을 보정할 경우 장기 풍황 자원 지도 생성시 정확성을 향상 시킬 수 있음을 확인 하였다.

5. 해양환경하중 분석 및 평가 : 제주 지역의 해상 실증단지인 월정의 해상에 실관측을 통한 태풍시의 극한 해양하중을 관측 하였으며 해상 기상탑의 풍황 데이터와 연관하여 풍파의 특성을 분석하였다.

가. 국내에 많은 해양관측 자료가 존재 하지만 개발 가능한 해상풍력발전단지에 태풍기간과 같은 극한 상황에서의 조류, 조석, 파고데이터 획득에 성공하였으며 이를 정리 하였다.

나. 해양환경하중인 조석, 연속 조류, 파랑의 개념과 하중조건 산출방식에 대

하여 정리하였다.

다. 해양환경 하중 중 풍파는 구조물의 피로 파괴 혹은 공진 파괴에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 풍파의 연구에는 풍속데이터와 파고데이터가 동시에 존재하여야 하며 상당히 가까운 곳에 동시간대에 관측되어야 한다. 해상풍력발전시스템의 입지 조건과 같은 지역에 특히 태풍과 같은 극한 환경에서 관측에 성공하였다.

라. 풍파의 분석 결과 기존의 PM 스펙트럼과 주파수의 경우 상당한 상관성을 보이며 파가 성장하고 있음을 확인 하였고 진폭의 경우 PM 스펙트럼을 이용할 경우 과대하중을 적용할 수 있음을 확인하였다.

마. 제주외항의 관측 데이터로부터 일부 기간에는 풍파의 스펙트럼이 두 군대에서 피크치를 보임을 확인 하였다. 이는 풍파에 의해 전달되어 오는 너울의 주파수와 풍속에 의한 주파수 성장이라 판단된다.

본 논문은 육해상의 환경특성을 고려한 기초와 응용연구를 동시에 진행 하였으며 특히 해상풍력발전단지의 개발에 기초자료로 활용 될 수 있을 것이라 판단 된다.

## 참 고 문 헌

- 강현배, 김개경, 서진근, 2001, 웨이블릿이론과 응용, 대우학술총서
- 고경남, 허종철, 2007, 풍력공학입문, 문운당, pp. 55-61.
- 고정우, 2010, 국소푸리에변환을 이용한 파동스펙트럼 분석, 석사학위논문, 제주대학교
- 고정우, 문서정, 이병걸, 2012, 제주도 북동부 한동지역의 MCP 회귀모델식을 적용한 AEP 계산에 대한 연구, 한국해양환경안전학회지, Vol. 18, No. 6, pp. 545-550.
- 고정우, 이병걸, 2012, 회귀분석기법을 이용한 제주 북서부 지역의 MCP 예측, 2012, , , pp.33 - 38
- 권영한, 김지역, 이민주, 2008, 환경성을 고려한 태양광, 풍력발전소 입지선정 가이드라인, 한국환경정책 평가연구원정책보고서
- 권옥현, 2009, Matlab을 이용한 디지털 신호처리, GNGAGE Learning
- 김경수, 김태식, 2008, 신호처리 및 이미지처리, 아진
- 김남신, 2005, GIS실습, 한올아카데미
- 김도영, 2009, 대진폭 해양파의 특성에 대한 연구, 한국해양환경공학회지, Vol.12, No.2, pp. 61-67.
- 김도영, 2010, 비선형 해양파의 통계적 특성에 대한 해석, 한국해양환경공학회지, Vol. 13, No. 2, pp. 112-120.
- 김진경 외, 2010, 공학도를 위한 통계학, 자유아카데미
- 김해경, 김태수, 2003, 시계열분석과 예측 이론
- 김현구, 2009, 국가바람지도, 대한설비공학회 설비저널, Vol. 38, No. 7, pp. 4-7.
- 김현구, 송규봉, 황선영, 윤진호, 황효정, 2009, 국가바람지도 및 지리정보시스템 기반의 해상풍력단지 입지전략 연구, 한국환경과학회지, Vol. 18, No. 8, pp. 877-883.
- 김현구, Jia-HuaLee, 2011, WindSim을 이용한 싱가포르 바람지도작성,



한국환경과학회지, Vol. 20, No. 7, pp.839-843.

문서정, 2012, 풍력자원지도작성을 위한 인공위성의 감독분류기법에 관한 연구, 석사학위논문, 제주대학교, pp. 3-15.

문서정, 고정우, 이병걸, 2012, 무빙필터기법을 적용한 제주 우도지역의 풍력자원지도 작성에 대한 연구, 한국지형공간정보학회지, Vol. 20, No. 4, pp. 29-36.

산업자원부, 2006, 풍력발전단지건설을 위한 지침서 및 지역 수용성 제고방안 연구 최종보고서

서현수, 경남호, 김현구, 해상풍력구조물설계를 위한 제주도 월정지역 풍황특성 분석, 한국풍공학회논문집, 제14권, 제3호, pp.161-167

성호현, 박옥준, 2000, 토지피복변화에 따른 식생지수(NDVI)분포 및 변화에 관한 연구: 성남시를 중심으로, 한국GIS학회지, Vol. 8, No. 2, pp. 275-288.

연상훈, 2001, 원격탐사입문, 구미서관

유동훈, 2005, 연안·항만공학, 도서출판 새론

유학렬 외, 2006, MATLAB을 이용한 해양자료처리, 도서출판 아진

응인요, 박수홍, 2010, Matlab을 이용한 해양파도 표면의 해석, 한국전자통신학회 논문지, Vol. 5, No. 3, pp. 281-287.

이남경, 김은주, 유관우, 2003, 스펙트럼을 이용한 해양파 구현, 한국정보과학회 가을학술발표 논문집, Vol. 30, No. 2, pp. 679-681.

이승환, 윤동한, 2002, 알기쉬운 웨이블렛 변환, 진한도서

이재원 외, 2009, 공학인증을 위한 확률과 통계, 한티미디어

이종남 외, 1995, 해양수리학, 동명사

이철희, 신호와 시스템, 다성출판사

이태홍, 김기두, 장수영, 권희훈, 문대철, 2000, 신호와 시스템, 한산

이훈영, 2006, 이훈영교수의 통계학 제 2판, 도서출판 청람

제주지방기상청, 2010, 제주도상세기후특성집

최병선, 2001, Fourier 해석 입문, 세경사

최윤호, 2012, 강구조물을 이용한 해상풍력발전구조물의 진동 및 내진 해석에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교

- 하정우, 김수덕, 2005, 대관령 풍력단지의 풍력발전량 및 경제성 분석, 에너지공학회지, 제14권, 제2호, pp123-132
- 한국중부발전(주), 2006, 풍력발전단지 건설 타당성 조사, 한국에너지 기술 연구원
- 한승희, 2013, GIS이론 및 실습, 구미서관
- 해양수산부 국립해양조사원, 1998, 1998년 조석표(한국연보)
- 홍우용, 박완용, 송현승, 정철훈, 어양담, 김성준, 2010, 공개된 토지피복도를 활용한 위성영상 분류, 한국군사과학기술학회지, Vol. 13, No. 1, pp. 147-155.
- 환경부, 2002, 토지피복지도 제작 지침안
- 황철수, 구자용, 1999, 국가수치지형도를 이용한 DEM 생성, 대한지리학회지, Vol. 34, No. 3, pp. 319-336.
- AERSURFACE User's Guide, 2008, U. S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division, Air Quality Modeling Group, Research Triangle Park, North Carolina, pp.1-18.
- Anthony L. Rogers., John W. Rogers., James F. Manwel, 2005, Uncertainties in Results of Measure-Correlate-Predict Analyses, American Wind Energy Association
- Anthony L. Rogersa., John W. Rogersb, James F. Manwell, 2005, Comparison of the performance of four measure - correlate - predict algorithms, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 93, NO. 3, pp. 243 - 264.
- Bin Yong, 2008, A STUDY OF INVERSE SHORT-TIME FOURIER TRANSFORM, Chair of System Theory and Signal Processing, University of Stuttgart, Germany ICASSP 2008, pp. 3541-3544
- Burton, Tony, Jenkins, Nick, Sharpe, David, Bossan, 2011, Wind Energy Handbook, WILLY
- Byung-Gul lee, 2003. Utilizing principal component analysis in unsupervised classification based on remote sensing data, Thesis for the Degree of Doctor of engineering, The Graduate School Pusan National University, pp. 36-56.

- Chengyong Zhao, Mingfeng He, Xia Zhao, 2004, Analysis of Transient Waveform BAsed on Combined Short Time Fourier Transform and Wavelet Transform, 2004 International Conference on Power System Technology, pp. 1122-1126
- Collin G. Homer, 1997, Landscape cover-type modeling using a multi-scene thematic mapper mosaic , Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 63(1), pp.59-67.
- DNV/Riso, 2001, Guideline for design of Wind Turbine
- E. Simiu, N.A. Heckert, J.J. Filliben, S.K. Johnson, 2001, Extreme wind load estimates based on Gumbel distribution of dynamic pressures: an assessment, Structural Safety, Vol. 23, No. 3, pp. 221-229.
- E. Sreevalsan, Siddarth Shankar Das, R. Sasikumar and M.P. Ramesh, 2007 Wind Farm Site Assessment Using Measure - Correlate-Predict(MCP) Analysis, WIND ENGINEERING, Vol. 31, No. 2, pp. 111 - 116
- E. Sreevalsan, Siddarth Shankar Das, R. Sasikumar and M.P. Ramesh, 2007, WIND ENGINEERING Vol. 31, No. 2, pp. 111-116
- Gareth Loy, Digital Image Computing Techniques and Applications, Department of Systems Engineering Research School of Information Sciences and Engineering Australian National University, pp. 1-6
- Gyeong-Il Kwak., Kyung-Boo Yang., Kyung-Nam Ko, Jong-Chul Hu, 2010, A Comparison of Measure-Correlate-Predict Method in Jeju Island, Journal of Wind Energy, Vol.1, No.1, pp. 79-86.
- Henry W. Tieleman, 2003, Roughness estimation for wind-load simulation experiment, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 91, pp. 1163-1173
- IEC Standard 61400-1 3rd Edition, 2005, Wind turbine generator systems - Part 1: Design requirements
- John Twidell, Gaetano Gaudiosi, 2009, Offshore Wind Power, Multi-Science Publishing Co.

- Julieta Silva, Carla Ribeiro, Ricardo Guedes, 2007, ROUGHNESS LENGTH CLASSIFICATION OF CORINE LAND COVER CLASSES, EWEC2007.
- Kim, Hyungoo, 2005, Analysis of Wind Shear Patterns and Application of Measure-Relate-Predict at Pohang Region, The Korean Society For New And Renewable Energy, Vol. 1, No. 2, pp. 26-33.
- Kim, Hyun-Goo, 2008, Application of Neural Network For Long-Term Correction Of wind Data, J. Wind Eng. Lng, Aerodyn., Vol 98, pp. 466-471.
- Ko Jung-Woo, Quan He Chun, Lee Byung-Gul, 2012, The Study on Assessment of Roughness Coefficient for Designing Wind Farm in Jeju Island, Journal of the Korean Society for Geospatial Information System, Vol.20 No.2 pp.15-22.
- Ko, Jung-Woo, Byung-Gul Lee, 2012, An Accuracy Estimation of AEP Based on Geographic Characteristics and Atmospheric Variations in Northern East Region of Jeju Island, Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography, Vol. 30, No. 3, pp. 295-303.
- Lee, Hee-Yeon, 2003, Geographic Information System, Bobmusa, pp. 527-568.
- Levy, R., Snyder, R.V., Shin, S. 2006, Bandstop Filters With Extended Upper Passbands, IEEE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS, Vol.54, No.6, pp. 2503-2515.
- Lütftiye Durak, Orhan Arikan, 2003, Short-Time Fourier Transform : Two Fundamental Properties and an Optimal Implemrntation, IEEE TRANSACTIONS ONSIGNAL PROCESSING, Vol. 51, NO. 5
- Manwell JF, Mc Gowan JG, and Rogers AL, 2002, Wind Energy Explained, John Wiley & Sons Limited, pp. 54-61
- Manwell JF, Mc Gowan JG, and Rogers AL, 2002, Wind Energy Explained, John Wiley & Sons Limited. pp. 33-39.
- Mistaya Engineering, 2008, Wind Energy Reference Manual at [www.windpower.org](http://www.windpower.org).
- Morten Nielsen, 2004, Satellite information for wind energy application, Risø

National Laboratory, pp.14-18.

National Typhon Center, 2012, Typhon Records, <http://typ.kma.go.kr>.

Nilsson, E. & Bergstrom, H., 2009, Fram Matt Vind Till Vindklimat, Normalaskorrigering. Stockholm: Elforsk AB.

Per Nielsen, 2010, WindPRO 2.7 USER GUIDE 3. edition., EMD International A/S.

Pixoneer geomatics, PG-STEAMER Tutorials.

Prtenjak, M.T., Pasaric, Z., Orlic, M., Grisogono, 2008, Rotation of sea/land breezes along the northeastern Adriatic coast, *Annales geophysicae*, Vol.26, No.7, pp.1711-1724.

Quan He Chun, 2009, Landslide Susceptibility Analysis Using Landsat Image & GIS Technics in Jeju, Thesis for the Degree of Doctor of engineering, The Graduate School Jeju National University, pp. 39-41.

Robert G. DEAN & Robert A. DALRMPLE, 2001, Coastal processes with Engineering Application, CAMBRIDGE UNVERSITY PRESS

Robin T. Clarke, 2002, Estimating time trends in Gumbel-distributed data by means of generalized linear models, *WATER RESOURCES RESEARCH*, Vol. 38, No. 7, pp. 16-1 - 16-11.

Rooney, G. G., Longley, I. D., Barlow, J. F., 2005, Variation Of Urban Momentum Roughness Length With Land Use In The Upwind Source Area, As Observed in Two U.K. Cities, *Boundary-layer meteorology*, Vol.115 No.1 pp.69-84.

R.SLVESTER, 1974, Coastal Engineering, ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY Amsterdam-Oxford-New York

Stevens MJM, Smulders PT, 1979, The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes, *Wind Engineering* 3 edition, pp 132-145

The guideline for assigning roughness length value, 1989, European Wind Atlas.

Tom Lambert, 2008, Wind Energy Reference Manual-Filling Gaps, Mistaya Engineering Inc.

TOWARDS A REGIONAL METHODOLOGY FOR WIND ENERGY SITE SELECTION, 2006, REPORT 3 :Methodology REPORT 2: LANDSCAPE ASSESSMENT, Strategic Initiative to Introduce Commercial Land Based Wind Energy Development to the Western Cape, Provincial Government of the Western Cape, pp.14-53.

U.S ARMY Coastal Engineering Research Center, 1975, Shore Protection Manual Volume I

U.S ARMY Coastal Engineering Research Center, 1984, Shore Protection Manual Volume II

W. E. BARDSLEY, B. F. J. MANLY, 1983, Regression Based Estimation Long-Term Mean and Variance of Wind Speed at Potential Aerogenerator Sites. Journal of Applied Meteorology, Vol. 22, pp. 323-327.

Wang Yuegang, Ji Shao, Xu Hongtao, 2007, Non-stationary Signals Processing Based on STFT, The Eight International Conference on Electronic Measurement and Instruments, pp. 3-301 - 3-304

Wind Energy Reference Manual last accessed, <http://www.windpower.org>

Wind Energy Reference Manual, 2008, Wind Shear, Surface Roughness, Power Law Exponent, Negative Wind Shear, [www. windpower. org](http://www.windpower.org).

Wind Energy Resource Atlas of the United States, <http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/tables/A-8T.html>.

Woo Jaekyoon, 2011, Micrositing and selection of wind turbine for maximization of AEP, Thesis for the Degree of Master , The Graduate School Kangwon National University, pp. 3-15

## DATA Quality Check

풍황자료란 풍속에너지로부터 얻을 수 있는 전력에너지를 예측하기 위해 필요한 관측데이터들을 말한다. 이런 관측 데이터에는 풍속, 풍향, 대기압력, 대기온도, 습도계 등이 있다. 풍력발전 단지의 개발을 위해서는 Met-mast를 설치하여 풍황데이터를 관측하게 되어 있다(IEC 61400-1). 결속구간의 보정과 센서의 관측 과정에서 발생하는 정오차의 소거와 부정오차의 최소화 과정이라 할 수 있다. 이 모든 과정을 Data Quality Check라 한다.

- 1) Met-mast 설치 관련 : IEC 61400-12에서는 Met-mast관련 설치 기준이 제시되어 있다. 이는 각 계측기가 Met-mast의 mast에 의한 데이터 왜곡을 최소화하는 기준이다. 이를 흔히 Installation Report라 부른다. 또한 구조물의 진동에 의한 풍황데이터 왜곡이 발생할 수 있다. 이에 Met-mast의 구조 설계에 대한 검증 역시 필요하다.
- 2) 센서 관련 : 관측된 데이터들의 신빙성 문제이다. 센서에 사양 혹은 신호 처리과정에서 발생 되는 문제로 센서 관련 오차로는 Scale, Offset 등이 있다.
  - Scale : 센서에서 인식하는 값이 어떤 비율로 크거나 작게 나타남(기계적 오류).
  - Offset : 센서가 일정한 값만큼 이동하여 연속적으로 오차를 보임(풍향계 설치시 읽음 오차, 풍속계의 경우 일반적으로 Installation Report에 명시).
- 3) Tower Distortion : meteorological tower에 의하여 공기의 흐름이 변화되어 발생하거나 혹은 각 계측기간의 높이가 적당하지 않음으로 발생한다. 이 경우는 같은 높이에 두 개이상의 풍속계를 설치하여 소거할 수 있다.

4) 결속 구간 보정 : 결속구간의 정의는 본 논문의 5장에 설명되어 있다. 결속구간은 번개에 의한 센서 고장, Met-mast의 전력 불안정 등의 원인으로 발생한다. 이 경우 보정 절차는 아래와 같다.

- 임의의 한 고도의 데이터 결속의 경우 다른 고도의 데이터들과의 상관성을 이용하여 보정
- 모든 고도의 풍속 결속 주변의 기상탑 혹은 AWS와 상관성이 높을 경우 이를 통한보정
- 주변 데이터가 없는 경우 월별, 일별, 계절별 패턴을 이용한 보정

본 논문에 사용된 한동 데이터의 경우 대기 압력계가 장기간 600mbar에서 변동하였으며 이에 평대와의 압력계로부터 고도 차이를 보정하여 이용하였음. 대기 압력계의 경우 태풍이 지나갈 경우 급속히 낮아졌다 상승하는 경향이 있지만 일반적으로 평균 해수면에서의 표준 대기압력은 1012.9 mbar이다.

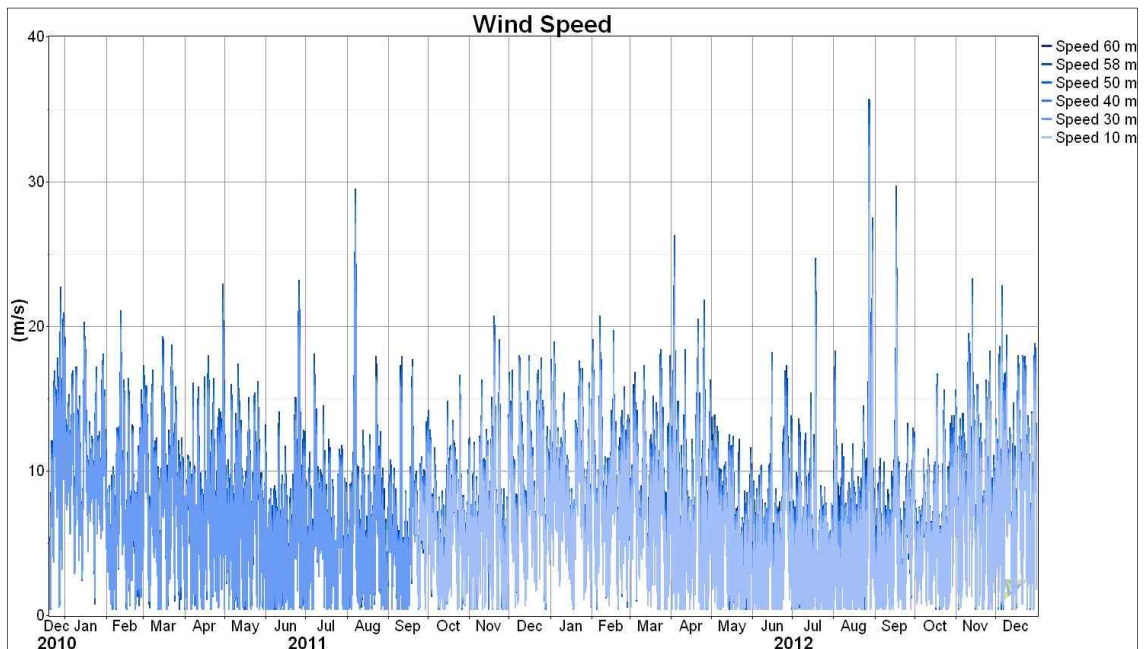


Fig 1. Wind Speed



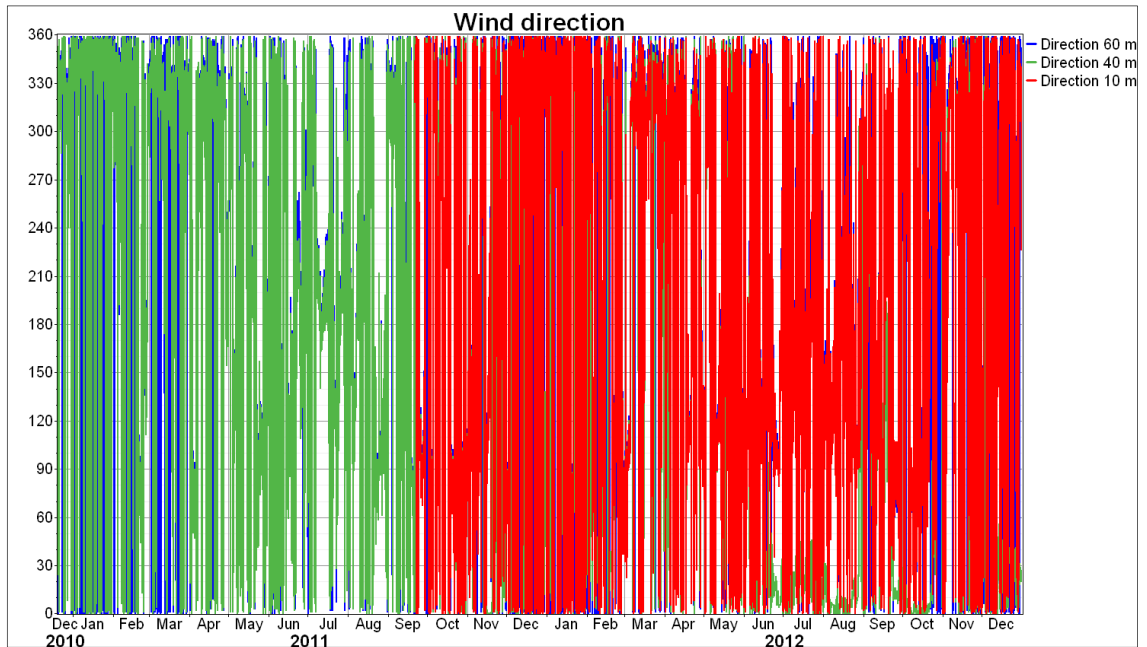


Fig 2. Wind Drection



Fig 3. The gap of atmospheric pressure and temperature



Fig 4. The Section of correction

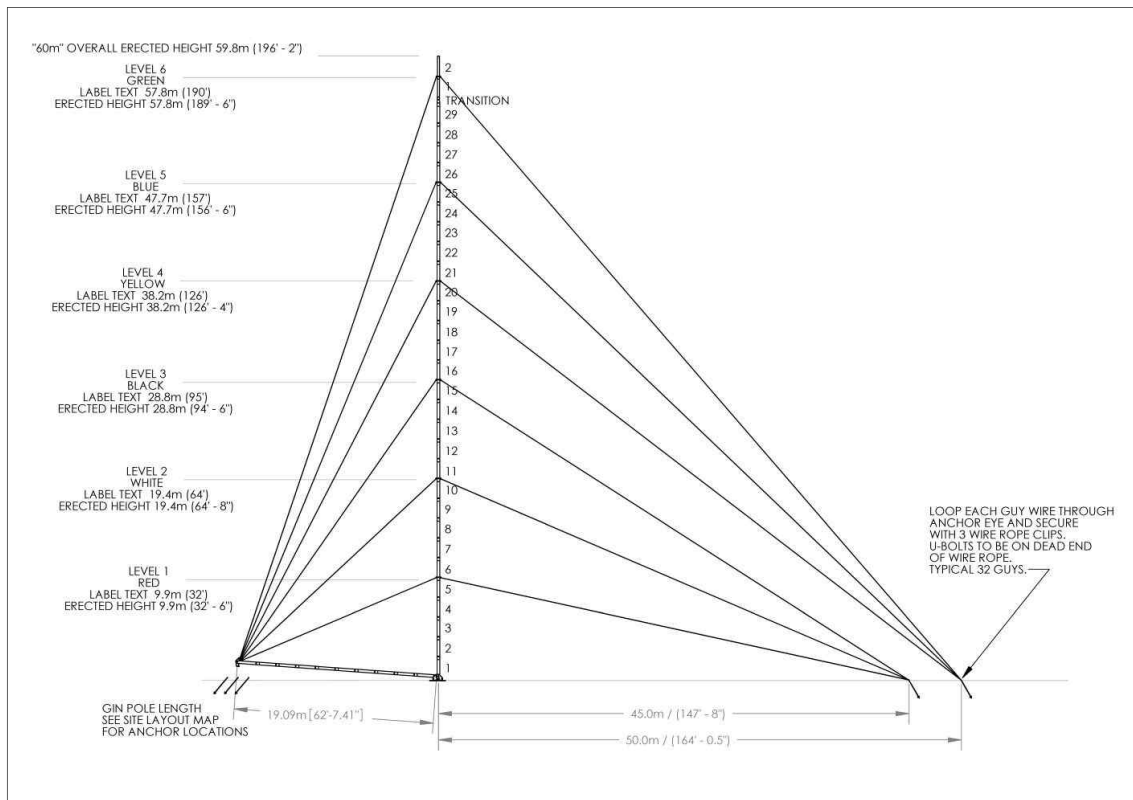


Fig 5. Tower Layout

Site Name		제주도 제주시		
Date of Completion		10-12-		
Mast Position	Latitude	N 33° 32'		
	Longitude	E 126° 50'		
	Way of measure	GPS (5M)		
Mast Height	60m			
Anemometer No.1	Calibration Certificate	Serial No.160508	Slope 0.757	Offset 0.430
	Height	60m		
	Mounting boom Direction	270°		
	Channel No.	1		
	Movement check result	O.K.		
Anemometer No.2	Calibration Certificate	Serial No.160511	Slope 0.762	Offset 0.390
	Height	58m		
	Mounting boom Direction	270°		
	Channel No.	2		
	Movement check result	O.K.		
Anemometer No.3	Calibration Certificate	Serial No.160504	Slope 0.757	Offset 0.440
	Height	50m		
	Mounting boom Direction	270°		
	Channel No.	3		
	Movement check result	O.K.		
Anemometer No.4	Calibration Certificate	Serial No.160505	Slope 0.759	Offset 0.410
	Height	40m		
	Mounting boom Direction	270°		
	Channel No.	4		
	Movement check result	O.K.		
Anemometer No.5	Calibration Certificate	Serial No.160414	Slope 0.758	Offset 0.400
	Height	30m		
	Mounting boom Direction	270°		
	Channel No.	5		
	Movement check result	O.K.		
Wind Vane No.1	Height	60m		
	Mounting boom Direction	360°		
	Channel No.	7		
	Movement check result	O.K.		
Wind Vane No.2	Height	40m		
	Mounting boom Direction	360°		
	Channel No.	8		
	Movement check result	O.K.		
Temperature	Height	2.0m		
	Channel No.	9		
	Movement check result	O.K.		
	Pressure	Calibration Certificate	Serial No.	
Height		2.0m		
Channel No.		10		
Movement check result		O.K.		
Data Logger	Logger Type	Symphonie		
	Serial No.			
Note				

Fig 6. Install Report

- B-

## Matlab code

### Matlab code (weibull\_M.m)

```
W_M=mean(X);      % 평균
W_s=std(X);       % 표준편차
W_max=max(X);     % 최대값

S_W_S=0; % start wind speed
E_W_S=ceil(max(X)); %
W_D=[S_W_S:X_R:E_W_S];

M_k=(W_s/W_M)^(-1.086);
M_c=W_M/gamma(1+1/M_k);

M_weibull=wblpdf(W_D,M_c,M_k);

figure(4)
bar(W_D,XR_hist,'g')
hold on
plot(W_D,M_weibull,'r','MarkerSize',12,'LineWidth',1);
hold off
grid
```

### Matlab code (LN-least.m)

```
cdf=zeros(1,NN);
for i=1:NN;
    if i==1;
        cdf(1,i)=XR_hist(1,i)*X_R;
    else i>1;
        cdf(1,i)=XR_hist(1,i)*X_R+cdf(1,i-1);
    end
end

LN_X=log(W_D);
LN_Y=log(-log(1-cdf));
X=LN_X(2:NN-2);

Y=LN_Y(2:NN-2);
Rsm
LN_X_1=[LN_X(2:NN-2)];
LN_Y_1=[LN_Y(2:NN-2)];
LN_CK=polyfit(LN_X_1,LN_Y_1,1);
LN_k=LN_CK(1,1); % or LN_k=a
LN_CK=LN_CK(1,2); % or LN_k=b
LN_c=exp(-LN_CK/LN_k);
LN_weibull=wblpdf(W_D,LN_c,LN_k);

figure
bar(W_D,XR_hist,'g')
hold on
```

```
plot(W_D, LN_weibull, 'k', 'MarkerSize', 12, 'LineWidth', 1); hold off grid
```

### Matlab code (WAsP Algorithm.m)

```
Me=mean(V);
VN=length(V);
S=sum(V.^3)/VN;
bin=0.05; % bin간격은 작게 유지

x_SN=[size(V)];
x_N=x_SN(1,2);
W_max=max(V); % 최대값
W_min=min(V); % 최소값
S_W_S=0; % start wind speed
E_W_S=ceil(W_max); % 최대풍속값 올림
W_D=[0:bin:E_W_S+bin];
SN=[size(W_D)];
N=SN(1,2);
A_1=zeros(1,N);
for i=1:x_N;
    for j=1:1:N;
        if V(1,i)>=bin*(j-1) & V(1,i)<bin*(j) ;
            A_1(1,j)=A_1(1,j)+1;
        end
    end
end
A_2=A_1./sum(A_1);

for j=1:1:N;
    if j==1;
        CDF(1,j)=A_2(1,1);
    else
        CDF(1,j)=CDF(1,j-1)+A_2(1,j);
    end
end

NN=find( Me-bin / 2 < W_D & Me+bin / 2 > W_D);
CDF(1,NN);
X=1-CDF(1,NN);
X1=-log(X);

k=1:0.001:3;
kN=length(k);
for i=1:kN;
    KK(i)=(Me/((S/(gamma(1+3/k(i))))^(1/3))))^k(i)-X1;
end
KK2=abs(KK);
indicies=find(min(KK2)==KK2);
wasp_k=k(1,indicies);
wasp_c=(S/(gamma(3/wasp_k+1)))^(1/3);

S_W_S=0; % start wind speed
E_W_S=30; % 최대풍속값의 올림
W_D=[S_W_S:0.5:E_W_S];

wasp_weibull=wblpdf(W_D,wasp_c,wasp_k);
```

## Matlab code (Fourier.m)

```

clear all
load X
N=300;
X=X(1,1:N);
L=length(X);
ST=0.5; % chang (샘플링 간격)
T=1:ST:ST*L+ST;

w0=(2*pi/(ST*L));
for i=1:5;
a(1,i)=(2/(ST*L))*ST*sum(X.*cos(i
*w0*T));
b(1,i)=(2/(ST*L))*ST*sum(X.*sin(i
*w0*T));
end

a0=(1/(ST*L))*sum(X)*ST;
Cn=(a.^2+b.^2).^0.5;

```

## Matlab code (example signal.m)

```

clear all
dt=.5;
T=1000;
t=[0:dt:T-1]; % Time: sampe rate
0.01

% example signal T & F
% [Hz] 각 주파수 rad/s로 바꾼다.
T1=500; f1=2*pi/T1;
T2=200; f2=2*pi/T2; T3=100;
f3=2*pi/T3;
% 위상각의 이동
e1=2; e2=1.2; e3=2.4;
% example signal
x1=3*sin(f1*t+e1);
x2=3*sin(f2*t+e2);
x3=2*sin(f3*t+e3);
R=random('Normal',0,0.4,1,length(
t));

X=x1+x2+x3+R;
% figure(1)

% plot(t,X);
% grid on
% title('Signal', 'fontsize',16)
% xlabel('Time[t]',
'fontsize',16)
% ylabel('Magnititude[h]', 'fontsize',
16)
% set(gca, 'fontsize', 16);

figure(2)
subplot(4,1,1)
plot(t,x1);
grid on
title('Signal', 'fontsize',16)
subplot(4,1,2)
plot(t,x2);
grid on
subplot(4,1,3)
plot(t,x3);
grid on
subplot(4,1,4)
plot(t,X);
grid on

```

```

%           xlabel('Time[t]',      16)
'fontsize',16)           % set(gca, 'fontsize', 16);
%
ylabel('Magnitude[h]','fontsize',

```

### Matlab code (Characteristic Wave.m)

```

mean_H=mean(H)           significant_H=mean(y(1,1:signific
mean_T=mean(T)           ant_N))
max_H=max(H);           significant_T=mean(T(1,i(1,1:sign
indices = find(H==max_H); %파고에서   ificant_N))
최대파고의 위치를 찾는다.           one_tenth_N=round(N/10);
max_T=T(1,indices);     one_tenth_H=mean(y(1,1:one_tenth_
N=length(H);           N))
significant_N=round(N/3); one_tenth_T=mean(T(1,i(1,1:one_te
[y,i]=sort(H, 'descend'); nth_N))

```

### Matlab code (zero-up-crossing function.m)

```

%-----%
% zero-up-crossing method to identify individual wave
% and then find individual wave height and wave period
% find zero_up_crossing point from wave record
% fist, find zero_up_crossing individual wave period
%-----%
% s : wave record's height
% t : time of the wave record
% s_r : wave record's sampling rate [Change]

W_L=length(s);           else
s_r=1; %[Change]         I_T(i)=-1;
M_S=mean(s);           end
s=s-M_S;               end

for i=1:s_r:W_L;         I_T1=[I_T(2:W_L),0];           % a
if s(i)>0               shift of eta by 1 step
I_T(i)=1;             I_P=I_T+I_T1;

```

```

for j=1:s_r:W_L;
if I_P(j)==0 & I_P(j+1)>0
IWP(j)=0.5;
else
IWP(j)=0;
end
end

indices = find(IWP);
I_W_P=indices;
I_W_P_L=length(I_W_P);

A=zeros(1,I_W_P_L);

figure(2)
plot(t,s,I_W_P,A,'r*')
grid on

I_W_P_L; % number of waves

B=zeros(1,I_W_P_L-1);

H=B; % initialization,

T=H;

for n=1:I_W_P_L-1;
start=I_W_P(n); % starting index
for the n-th wave
endd=I_W_P(n+1); % ending index
for the n-th wave
peak=max(s(start:endd));
valley=min(s(start:endd));
H(n)=peak-valley;
T(n)=I_W_P(n+1)-I_W_P(n);
end

T*s_r

H

```

### Matlab code (.M)

```

clear all
q=imread('무감독분류_30m.tif'); %
이미지 읽기 %

figure(1), imshow(q) % figure(3)
[X,map] = rgb2ind(q,128); % imshow(A,map)
figure(2)
imshow(X,map) % save 10_NE_classification_1 A
[x y z]=size(q) map
A=X; %
% 경계부분 처리 % close all
% for i=1:1:x; % clear all
% for j=1:1:y; %
% if X(i,j,:)==0; % load 10_NE_classification_1
% A(i,j,:)=3; % % figure(1)
or X(i,j,:)=4
% else A(i,j,:)=X(i,j,:);
% end
% end

```



```

% imshow(A,map)

Q=A(:)';
Ama=max(Q);
Ami=min(Q);
x=[Ami:Ama];
mask_height=5; % 마스크 크기
mask_width=5; % 마스크 크기
Q2=A;

[R, C]=size(A);

for i=1:R-4;
for j=1:C-4;
Q1=A(i:i+4,j:j+4);      Q1=Q1(:)';
N=length(Q1);
n=zeros(1,6);
for k=1:N;
if Q1(k)==x(1,1);
n(1,1)=n(1,1)+1;
elseif Q1(k)==x(1,2);
n(1,2)=n(1,2)+1;
elseif Q1(k)==x(1,3);
n(1,3)=n(1,3)+1;
elseif Q1(k)==x(1,4);
n(1,4)=n(1,4)+1;
elseif Q1(k)==x(1,5);
n(1,5)=n(1,5)+1;
else n(1,6)=n(1,6)+1;
end
end
g=max(n);
if g>=13;
Q2(i+2,j+2)=x(1,(find(n == g)));
else
Q2(i+2,j+2)=Q2(i+2,j+2);
end
end
end

figure(2)
subplot(1,2,1)
imshow(A,map)
subplot(1,2,2)
imshow(Q2,map)

imwrite(Q2,map,'10_NE_5x5_1.bmp')
;
% figure(3)
% imshow('udo_filter_5x5.tif');

```

### Matlab code (Cov\_Cor.m)

```

% X Y 정의 해야함
x=mean(X);
y=mean(Y);
xy=mean(X.*Y);
sx=mean(X.^2);

var_x=X-x;
var_y=Y-y;

cov=mean(var_x.*var_y);
cor=cov/((mean(var_x.^2)*mean(var_y.^2)).^0.5)

```

### Matlab code (MCP\_regression.m)

```

clear all

load V
SSE=zeros(2,3);
Cor=zeros(1,3);
for i=1:3;
Y=V(i,:);
X=V(4,:);

x1=mean(X);
y1=mean(Y);

var_x=X-x1;
var_y=Y-y1;

cov=mean(var_x.*var_y);
cor=cov/( (mean(var_x.^2)*mean(var_y.^2))^.5)
Cor(1,i)=cor^2;
N=length(X);
XY=sum(X.*Y);

% 1차 선형식
a1=( (sum(X)*sum(Y))/N-XY)/(sum(X)*sum(X)/N-sum(X.^2));
b1=(sum(Y)-a1*sum(X))/N;

%1차 선형식 절편 0
a2=XY/sum(X.^2);

% 2차식
XM=mean(X);          XS=X.^2;
XSM=mean(XS);
YM=mean(Y);          XSY=(X.^2).*Y;
XSYM=mean(XSY);
XSS=X.^4;            XSSM=mean(XSS);
XSs=X.^3;

XSsM=mean(XSs);          XY=X.*Y;
XYM=mean(XY);

a3_1=XSYM*XSM-XSYM*(XM^2)+XM*YM*X
SsM-XYM*XsM-XSM*YM+XYM*XM;
a3_2=XSSM*XSM-XSSM*(XM^2)+XM*XSM*
XSsM-(XSsM^2)-(XSM^2)+XSsM*XM;

a3=a3_1/a3_2;
b3=(a3*((XM*XSM)-XSsM)-(XM*YM)+XYM)/(XSM-(XM^2));
c3=YM-(a3*XSM)-(b3*XM);

%2차식 절편 0
% XY=sum(X.*Y);
%
a4=(sum(X.^2.*Y)*sum(X.^2)-XY*sum(X.^3))/(sum(X.^4)*sum(X.^2)-(sum(X.^3))^2)
% b4=(XY-a4*sum(X.^3))/sum(X.^2);

x=[ceil(min(X))-1:0.5:ceil(max(X))];
y1=a1*x+b1;
y2=a2*x;
y3=a3*x.^2+b3*x+c3;
% y4=a4*x.^2+b4;

N=length(V(1,:));
SSEY1=(sum(Y-a1*X-b1)/N)^2;
SSEY2=(sum(Y-a2*X)/N)^2;
SSEY3=(sum(Y-a3*X.^2-b3*X-c3)/N)^2;
SSE(i,1)=SSEY1;    SSE(i,2)=SSEY2;
SSE(i,3)=SSEY3;

figure(2)
plot(X,Y,'b.')
hold on
plot(x,y1,'r-.','LineWidth',3)
hold off

```

```

hold on
plot(x,y2,'k-', 'LineWidth',3)
hold off
hold on
plot(x,y3,'c*-', 'LineWidth',3)
hold off
% hold on
% plot(x,y4,'bd-')
% hold off
grid on

legend('data','y=ax+b','y=ax','y=
ax^2+bx+c', 4)
ylim([0 30])
xlim([0 20])
xlabel('m/s','fontsize',14)
ylabel('m/s','fontsize',14)
% title('회귀분석식','fontsize',17)

pause

end

```

### Matlab code (DIV.m)

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
% ===코드 링크 순서도===
% (1) Wind_D_mat.m
% (2) DV8.m
% (3) RVanalysis.m
% =====데이터 형식=====
% xls파일 ;시트=지역; 순서 : 60 58 50 40 30 60D
% V = xlsread('data','지역'); 지역명=(Udo , Handong , Fungdea)
% =====변수명=====
% SN = TN = 높이별 풍속+60m방향 정보의 [열] 길이
% WSD_숫자 = Wind Speed Direction 의 약자 [숫자 : 방향번호]
% UD8.mat = Wind Speed Direction 저장
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
%                               DiV8                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%

clear all
close all

load data

SN=length(ana(1,:));

WSD_1 = zeros(5,SN);
WSD_2 = zeros(5,SN);
WSD_3=zeros(5,SN);
WSD_4 = zeros(5,SN);
WSD_5 = zeros(5,SN);
WSD_6=zeros(5,SN);
WSD_7 = zeros(5,SN);
WSD_8=zeros(5,SN);

```

```

for i=1:SN;
    if ana(6,i)>=0 & ana(6,i)<45 ;
        WSD_1(1:5,i)=ana(1:5,i);
    elseif ana(6,i)>=45 &
ana(6,i)<90;
        WSD_2(1:5,i)=ana(1:5,i);
    elseif ana(6,i)>=90 &
ana(6,i)<135;
        WSD_3(1:5,i)=ana(1:5,i);
    elseif ana(6,i)>=135 &
ana(6,i)<180;
        WSD_4(1:5,i)=ana(1:5,i);
    elseif ana(6,i)>=180 &
ana(6,i)<225;
        WSD_5(1:5,i)=ana(1:5,i);
    elseif ana(6,i)>=225 &
ana(6,i)<270;
        WSD_6(1:5,i)=ana(1:5,i);
    elseif ana(6,i)>=270 &
ana(6,i)<315;
        WSD_7(1:5,i)=ana(1:5,i);
    else ana(6,i)>=315 &
ana(6,i)<360;
        WSD_8(1:5,i)=ana(1:5,i);
    end
end
TN=SN;
UD8= [WSD_1; WSD_2; WSD_3; WSD_4;
WSD_5; WSD_6; WSD_7; WSD_8];
save data8 UD8 TN

```

### Matlab code (Loglaw.m)

```

LMS
legend('관측치','Y=a*X+b',2);
xlabel('Vz (m/s)','FontSize',18)

XX=[min(X)-0.5:0.5:max(X)+0.5];
YY=a*XX+b;
ylabell('ln(z) (m)','FontSize',18)

Z0=exp(b);
grid on

h=exp(YY(1,1));
Vh=XX(1,1);
figure(2)
z1=[0:1:100];
plot(Vz,z1,'r-',X,Z,'bo');
title('wind shear-log law','FontSize',18);
Vz=Vh*(log(z1./Z0)/log(h/Z0));
legend('Vz=Vh*(log(z/Z0)/log(h/Z0))','관측치',2);
figure (1)
plot(X,Y,'bo',XX,YY,'r-');
xlabel('Vz (m/s)','FontSize',18);
title('최소자승법','FontSize',18)
ylabel('z (m)','FontSize',18);
grid on

```

## Matlab code (Powerlaw.m)

```
LMS
n=1/a;
P_Y=[min(Y)-0.5:0.1:max(Y)+0.5];
P_X=(P_Y-b)/a;
PY=[0:1:100];
P_X = ( exp ( P_X ( 1 , 1 0 ) ) ) * (
(PY/exp(P_Y(1,10))) .^n);
figure (3)
plot(X,Y, 'bo', P_X, P_Y, 'r') %);
title('최소자승법', 'FontSize', 20);
legend('ln(U), ln(Z)', 'XX=(YY-b)/a', 0);
xlabel('Vz (m/s)', 'FontSize', 18)
ylabel('ln(z) (m)', 'FontSize', 18)
grid on
figure(4)
plot(exp(X), exp(Y), 'bo', PX, PY, 'r-');
title('wind shear-Power law', 'FontSize', 20);
legend('Vh*((z/h)^n)', '관측치,');
xlabel('Vz (m/s)', 'FontSize', 18)
ylabel('z (m)', 'FontSize', 18)
grid on
```