



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](#)

박사학위논문

파라메트릭 배열 기반 초음파 시스템
개발 및 응용

제주대학교 대학원

해양시스템공학과

이 재 일

2015년 8월

Development of Ultrasonic Systems based on
Parametric array and its Applications

Jaeil Lee

(Supervised by Professor Chong Hyun Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Doctor of Philosophy

2015. 8.

Department of Ocean System Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

파라메트릭 배열 기반 초음파 시스템 개발 및 응용

지도교수 이 종 현

이 재 일

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2015년 8월

이재일의 공학박사 학위논문을 인준함

심사위원장 배진호 印

위 원 이종현 印

위 원 조일형 印

위 원 도양희 印

위 원 최영철 印

제주대학교 대학원

2015년 8월

요 약

본 논문에서는 파라메트릭 배열 현상을 이용한 고지향 음향 시스템 설계 및 고지향 통신, 지형조사 그리고 지향성 스피커의 응용 분야에 대하여 각 시스템을 설계하고 성능 향상을 위한 알고리즘을 적용하여 실험을 통해 검증하였다. 파라메트릭 배열기반 음향 시스템 설계를 위해 비선형이 고려된 SONAR 모델을 소개하고 시스템의 송신음압감도와 음원준위와의 관계 그리고 수신음압감도와 음원준위와의 관계로부터 시스템의 이론적인 성능 예측 방법을 정리하였다. 고지향 통신 시스템의 전송률 향상을 위해 파라메트릭 배열의 QPSK 방식과 다중사용자 환경을 고려한 주파수 분할 방식을 적용한 통신 시스템을 제안 후 실험을 통해 검증하였다. 제안된 통신 시스템은 LabView를 기반으로 프로그래밍 하였으며 MSI사의 F82 파라메트릭 트랜스듀서와 DAQ 보드(USB-6361, NI)를 이용하여 구현하였다. 파라메트릭 배열 현상을 이용한 탐지 시스템의 탐지 성능 향상을 위해 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 대역 확장 기법과 다중 대역을 이용한 탐지 알고리즘을 제안 후 공중용, 수조 및 해상실험을 통해 검증하였다. 공중용 지층탐지 시스템은 TR-2436/150(MASSA) 초음파 트랜스듀서 배열(8x2)과 PXI-6259(NI)를 이용하여 구현 후 잠수함 모형 및 스테인레스 파이프 탐지 실험을 수행하였다. 해저지층탐사 시스템은 BII-7541(Benthowave) 파라메트릭 트랜스듀서 배열과 DSP 등을 이용하여 구현 후 2차원 수조 실험 및 실험실 실험을 수행하였다. 또한 수조실험 및 실험실 실험 결과와 시스템의 수신음압감도를 적용하여 파라메트릭 배열 성분의 초기 음원준위(SL)를 추정 및 요구되는 1차 주파수의 음원준위(SL)와 송신전압을 예측하였다. 마지막으로 파라메트릭 배열 기반 지향성 음향 시스템의 빔 조향을 위해 VSB(Vestigial Side Band)변조 기반의 디지털 Beam-steering 시스템을 설계하였다. 제안된 시스템의 성능 평가를 위해 강당에서 전파 특성, 빔 패턴 그리고 빔 조향 실험을 수행하였다.

목 차

제 1 장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구내용	2
제 2 장 파라메트릭 배열기반 음향 시스템 설계	4
2.1 파라메트릭 배열의 비선형 모델	4
2.2 비선형성이 고려된 SONAR 모델	9
2.2.1 파라메트릭 배열의 음향학적 설계 변수	9
2.2.2 파라메트릭 배열 신호의 SONAR 모델	13
제 3 장 파라메트릭 배열 기반 통신 시스템 및 응용	18
3.1 서론	18
3.2 파라메트릭 배열기반 디지털 통신 시스템	19
3.2.1 파라메트릭 배열기반 디지털 통신 변조	19
3.2.2 파라메트릭 배열기반 디지털 통신 시스템 구성	22
3.3 파라메트릭 배열기반 통신 시스템의 전송률 향상기법	25
3.3.1 파라메트릭 배열기반 QPSK 변복조	25
3.3.2 파라메트릭 배열기반 주파수분할 통신 시스템	27
3.4 수조 실험 및 결과	30
3.4.1 PSK기반 통신 시스템의 실험결과	31
3.4.2 QPSK기반 통신 시스템의 실험결과	37
3.4.3 주파수분할 통신 시스템의 실험결과	40
3.5 결론	51
제 4 장 파라메트릭 배열기반 탐지 시스템 및 응용	53
4.1 서론	53
4.2 파라메트릭 배열의 탐지 신호처리	55

4.2.1 파라메트릭 배열 송수신 신호처리	55
4.2.2 탐지 시스템의 성능향상 기법	59
4.3 공중용 탐지 시스템	62
4.3.1 공중용 탐지 센서	62
4.3.2 실험 치구 설계	65
4.3.3 탐지 실험 및 결과	66
4.4 해저지층탐사 시스템	70
4.4.1 시스템 구성	70
4.4.2 수조실험 및 결과	75
4.4.3 해상실험 및 결과	90
4.4.4 실측시스템의 음원 준위 추정	104
4.4.5 일반적인 해저지층탐사 장비와의 성능 비교	109
4.5 결론	117
제 5 장 파라메트릭 배열기반 지향성 음향 시스템	120
5.1 서론	120
5.2 파라메트릭 배열 음향 시스템 설계	121
5.2.1 디지털 Beam-steering 시스템 구성	121
5.2.2 디지털 Beam-steering 프로그램	125
5.3 파라메트릭 배열 음향 빔 조향 실험 및 결과	128
5.3.1 거리전달 특성 측정 실험	128
5.3.2 빔 패턴 측정 실험	130
5.3.3 빔 조향 실험	132
제 6 장 결론	135
참고문헌	138

그 림 목 차

2.1 파라메트릭 배열 음원의 좌표	7
2.2 1차 주파수에 따른 캐비테이션 한계와 열적한계	12
2.3 트랜스듀서의 등가회로	14
3.1 파라메트릭 배열기반 DPSK 변조기 블록도 및 부호화기의 진리표.	20
3.2 KZK 수치해석에 의한 파라메트릭 배열 PSK변조 신호의 파형	21
3.3 파라메트릭 배열기반 통신 시스템 블록도	22
3.4 파라메트릭 배열 ASK 복조기 블록도	23
3.5 파라메트릭 배열 FSK 복조기 블록도	24
3.6 KZK에 의한 파라메트릭 배열 PSK 변조신호의 정합필터 출력	24
3.7 파라메트릭 배열기반 QPSK 복조기 블록도	26
3.8 1 차 주파수 N에 대한 파라메트릭 배열 성분의 경우의 수 예	28
3.9 다중 접속 사용자 2를 가정한 파라메트릭 배열 성분(N=3)	29
3.10 파라메트릭 배열기반 다중 접속 기법의 복조기 블록도(다중 접속 사용자 2)	29
3.11 파라메트릭 배열기반 디지털 수중 통신 수조실험 환경	30
3.12 파라메트릭 배열기반 이진 PSK신호의 정합필터 출력	31
3.13 파라메트릭 배열기반 이진 PSK 복조 결과	32
3.14 각도에 따른 BER 계산결과.	32
3.15 각도에 따른 신호성상도 (a) 수신각도: 0°, (b) 수신각도: 10°	33
3.16 파라메트릭 배열기반 이진 PSK 복조 결과(2kbps)	34
3.17 파라메트릭 배열기반 이진 PSK 복조 결과(5kbps)	34
3.18 파라메트릭 배열기반 이진 PSK의 전송률에 따른 문자열 수신결과 (a) 전송률: 1kbps, (b) 전송률: 2kbps, (c) 전송률: 5kbps	35
3.19 파라메트릭 배열기반 이진 PSK의 전송률에 따른 이미지 수신결과 (a) 전송 이미지, (b) 전송률: 2kbps, (c) 전송률: 5kbps	36
3.20 파라메트릭 배열기반 QPSK 신호의 정합필터 출력(2kbps)	37

3.21 파라메트릭 배열기반 QPSK 신호의 신호성상도(2kbps)	38
3.22 파라메트릭 배열기반 QPSK 신호의 신호성상도(4kbps)	38
3.23 파라메트릭 배열기반 QPSK 신호의 신호성상도(10kbps)	39
3.24 파라메트릭 배열 성분이 중첩된 신호의 스펙트럼	41
3.25 반송파 중첩환경에서의 주파수반할 통신의 복조 (사용자의 1)	
(a) 20kHz 반송파의 수신신호 산란도, (b) 신호성상도	42
3.26 반송파 중첩환경에서의 주파수반할 통신의 복조 (사용자의 2)	
(a) 10kHz 반송파의 수신신호 산란도, (b) 신호성상도.	43
3.27 파라메트릭 배열 성분이 중첩되지 않는 신호의 스펙트럼	44
3.28 반송파 중첩되지 않는 환경에서의 주파수반할 통신의 복조 (사용자의 1)	
(a) 20kHz 반송파의 수신신호 산란도, (b) 신호성상도.	45
3.29 반송파 중첩되지 않는 환경에서의 주파수반할 통신의 복조 (사용자의 2)	
(a) 30kHz 반송파의 수신신호 산란도, (b) 신호성상도	46
3.30 주파수반할 통신의 신호 성상도(1kbps) (a) 사용자 1, (b) 사용자 2.	48
3.31 주파수반할 통신의 신호 성상도(2kbps), (a) 사용자 1, (b) 사용자 2.	49
3.32 주파수반할 통신의 신호 성상도(5kbps) (a) 사용자 1, (b) 사용자 2.	50
4.1 수신 신호처리 블록도	57
4.2 Chirp신호의 송수신 파형 (a) 송신신호, (b) 정합필터 출력	57
4.3 수신 신호처리 과정의 예	58
4.4 파라메트릭 배열 Chirp의 대역 확장 기법의 개념도 (a) 일반적인 파라메트릭 배열 Chirp 신호, (b) 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 신호	59
4.5 다중 대역 탐지 알고리즘의 블록도	61
4.6 공기중 지층탐사를 위한 송신 센서 배열과 수신 센서	63
4.7 공기중 송신 센서 배열의 빔 패턴 (a) 수평방향, (b) 수직방향	64
4.8 제작된 공기중 실험 치구	65
4.9 파라메트릭 배열 기반 공중용 지층탐사 시스템 블록도	66
4.10 공기중 탐지 실험 환경	67
4.11 수신신호의 대역통과필터 출력	68
4.12 수신신호의 정합필터 및 포락선 출력	68

4.13	잠수함 모형의 B-scan 이미지	69
4.14	잠수함 모형과 파이프의 C-scan 이미지	69
4.15	해저지층탐사 시스템 블록도 및 시스템 사진	70
4.16	BII -7541배열 구조	71
4.17	센서 치구의 수신센서 위치	72
4.18	파라메트릭 배열 SONAR 시스템	74
4.19	전파 특성 분석을 위한 수조실험 환경	75
4.20	파라메트릭 배열 성분의 전파특성 실험 결과	77
4.21	1차 주파수 성분의 전파 특성 실험 결과	78
4.22	대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp의 수조 실험 환경	79
4.23	파라메트릭 배열 Chirp의 대역폭에 따른 송신 파형 (a) 파라메트릭 배열 Chirp 송신신호(대역폭: 7.5kHz), (b) 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 송신신호(대역폭: 15kHz)	80
4.24	기존 파라메트릭 배열 Chirp(22.5~30kHz) 수신 신호	81
4.25	파라메트릭 Chirp 수신 신호의 스펙트럼 (a) 아크릴 및 진흙에 의한 반사 신호의 스펙트럼, (b) 철판에 의한 반사 신호의 스펙트럼	82
4.26	파라메트릭 배열 Chirp 신호의 정합필터 및 포락선 출력 결과	83
4.27	대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp(15~30kHz) 수신 신호	84
4.28	대역 확장 파라메트릭 Chirp 수신 신호의 스펙트럼 (a) 아크릴 및 진흙에 의한 반사 신호의 스펙트럼, (b) 철판에 의한 반사 신호의 스펙트럼	85
4.29	대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 정합필터 및 포락선 출력 결과	86
4.30	다중 대역을 이용한 탐지 실험 환경	87
4.31	수신 신호의 Dechirp 결과 (a) 파라메트릭 배열 성분, (b) 1차 주파수 성분	88
4.32	다중 대역을 이용한 탐지 결과	89
4.33	제주대학교 조사선(아라2호)	90
4.34	센서 특성 실험에 사용된 센서 치구	91
4.35	센서 특성 실험이 수행된 내항의 위치	91
4.36	A 지점에서 수신된 파라메트릭 배열(20kHz) 성분	92
4.37	A 지점에서 수신된 파라메트릭 배열 Chirp(22.5~30kHz) 성분	93

4.38 A 지점에서 수신된 파라메트릭 배열 성분의 정합필터 출력 비교	94
4.39 실험 해역 및 측정 경로 (수심 15m 구간)	95
4.40 각 수신 채널의 정합필터 출력 결과(수신 채널 1~4, 13.7m 지점)	96
4.41 각 수신 채널의 정합필터 출력 결과(수신 채널 5~6, 13.7m 지점)	97
4.42 정합필터 출력으로부터 수신 배열 처리한 결과(13.7m 지점)	98
4.43 경로 A의 단일 센서 수신 처리 결과(1차 주파수)	99
4.44 경로 A의 8개의 배열 센서 수신 처리 결과(1차 주파수)	99
4.45 경로 A의 단일 센서 수신 처리 결과(파라메트릭 배열)	100
4.46 경로 A의 8개의 배열 센서 수신 처리 결과(파라메트릭 배열)	100
4.47 실험 해역 및 측정 경로 (수심 30~80m 구간)	101
4.48 1차 주파수 측정결과	102
4.49 파라메트릭 배열 성분 측정 결과	103
4.50 지층탐사 실험 해역 (탐사 경로 및 시료 채취 정점)	109
4.51 경로 a1-a3의 지층탐사 및 시료 채취 결과(Chirp-3)	110
4.52 일반적인 해저지층탐사기(Chirp-3) 외형 및 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사기의 실험 치구	111
4.53 a1 정점에서의 Chirp-3 장비 수신결과(2~7kHz, UpChirp)	
(a) 수신 파형, (b) 스펙트로그램, (c) 정합필터 출력	112
4.54 a1 정점에서의 1차 주파수 수신결과(207.5~215kHz, UpChirp)	
(a) 수신 파형, (b) 스펙트로그램, (c) 정합필터 출력	113
4.55 a1 정점에서의 파라메트릭 배열 성분 수신결과(22.5~30kHz, UpChirp)	
(a) 수신 파형, (b) 스펙트로그램, (c) 정합필터 출력	114
4.56 a1 정점에서의 Chirp-3의 정합필터 라인 출력 결과	115
4.57 a1 정점에서의 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의 정합필터 라인 출력 결과 (a) 1차 주파수 성분, (b) 파라메트릭 배열 성분	116
5.1 파라메트릭 배열 디지털 Beam-steering 시스템	121
5.2 트랜스듀서 배열 구조	122
5.3 트랜스듀서의 주파수 응답	123
5.4 다채널 전력증폭기	123

5.5 16채널 전력증폭기의 주파수 응답	124
5.6 디지털 Beam-steering 프로그램의 블록다이어그램	127
5.7 시스템의 거리전달 특성 측정 결과	129
5.8 빔 패턴 측정 실험 환경	130
5.9 시스템의 빔 패턴 측정 결과	131
5.10 빔 조향 실험 환경	132
5.11 1차 주파수의 이론적인 빔 패턴과 결합 빔 패턴	132
5.12 조향각 0°에서의 측정된 방사패턴	133
5.13 조향각 10°에서의 측정된 방사패턴	134
5.14 조향각 20°에서의 측정된 방사패턴	134

표 목 차

2.1 Sea state에 따른 Knudsen 모델 계수	16
3.1 파라메트릭 배열기반 QPSK 수신 결과	16
3.2 파라메트릭 배열기반 주파수분할 변조방식의 수신 결과(사용자1)	47
3.3 파라메트릭 배열기반 주파수분할 변조방식의 수신 결과(사용자2)	47
4.1 퇴적층의 물성	76
4.2 각 시료의 반사계수	76
4.3 거리에 따른 수신 전압(수조 실험)	105
4.4 거리에 따른 수신 전압(해상 실험)	105
4.5 음원준위 추정결과(수조 실험)	106
4.6 음원준위 추정결과(해상 실험)	106
4.7 수조실험 환경에서의 음원준위	107
4.8 거리에 따른 1차 주파수의 음원준위 및 입력전압 예측 결과	108
4.9 Chirp-3와 PA-SBP 장비의 실험환경 변수	111
5.1 실험 환경변수	128

제 1 장 서론

1.1 연구배경

수중에서 지형 조사 및 통신에서는 전자기파에 비해 감쇠가 적은 음향신호가 사용된다. 초기 수중 통신은 군사적 목적으로 연구되어 왔으며 해양 환경 모니터링, 잠수정 제어, 그리고 수중 통신망 구성 등 그 활용범위가 확대되고 있다. 이러한 수중 통신시스템에서 신뢰할 수 있는 정보를 고속으로 전송하는 것은 중요한 목표중 하나이다. 그러나 수중 통신 채널은 배경잡음, 전달손실 그리고 도플러 효과 및 다중 경로에 의한 급격한 페이딩 등 복잡한 특성을 갖는다^[1]. 특히 천해 환경에서 수평 채널은 거리가 증가함에 따라 다양한 다중경로 특성을 보이며 전송률에 따라 수십 심볼에 걸친 간섭을 발생시켜 성능을 저하시킨다^[2]. 다중경로 문제를 극복하기 위해 채널 등화기^[2], 배열 센서를 이용한 빔 형성^[3], 그리고 다이버시티 기법^[4] 등이 적용되고 있다.

복잡한 수중 통신 채널 문제에 대한 하나의 극복방안으로 파라메트릭 배열 현상을 이용한 방식이 적용되었다^[5]. 파라메트릭 배열 현상은 높은 음압의 1차 주파수(primary frequency) f_1 과 f_2 를 동일한 방향으로 방사시킬 때 매질의 비선형 현상에 의해 1차 주파수이외에 차 주파수($|f_1 - f_2|$), 합 주파수($f_1 + f_2$) 등 여러 배음현상이 발생되고 이중 차 주파수 성분을 의미한다. 여러 배음현상 중 고 주파수 성분은 전달거리가 증가함에 따라 주파수의 자승에 비례하는 감쇠효과로 급격히 소멸하고 상대적으로 낮은 차 주파수 성분만이 1차 주파수의 고지향 특성을 갖고 가장 원거리까지 전파되는 특성을 갖는다^[6]. 파라메트릭 배열 현상에 의해 간접적으로 생성된 차 주파수는 낮은 에너지효율을 갖지만 고 주파수용 트랜스듀서의 작은 방사 면적으로 부엽이 적은 고지향 빔을 형성할 수 있다. 이는 동일한 주파수 신호를 직접 구동하여 얻어지는 지향성 빔 생성 방법에 비해 트랜스듀서의 크기, 질량 그리고 비용 측면에서 이득을 얻을 수 있다^[6,7].

파라메트릭 배열 현상은 1960년 Westervelt^[8,9]의 물리적 개념에 대한 수학적 정

리와 Bellin & Beyer^[10,11]의 실험적 검증 이후 파라메트릭 배열의 비선형적 특성에 대하여 Berklay^[12,13], Moffett & Mellen^[14-16], Muir^[17,19], Blackstock^[7,18], 그리고 Tjotta^[19-21] 등에 의해 이론과 실험적으로 연구되어 왔다. 파라메트릭 배열 현상의 응용은 주로 수중에서의 고지향 통신^[1,5,22], 해저 지형조사^[23,24] 및 매설/포설 물체 탐지^[25-27], 그리고 공기 중의 지향성 스피커^[28,29] 구현 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

1.2 연구내용

본 논문에서는 파라메트릭 배열 현상을 이용한 고지향 음향 시스템 설계, 고지향 통신 시스템 설계 및 전송률 향상을 위한 기법, 탐지 시스템 설계 및 탐지 성능 향상 기법 그리고 지향성 음향 시스템 설계 및 디지털 빔 조향 기법에 관한 내용을 다룬다.

파라메트릭 배열 현상을 이용한 음향 시스템의 설계 및 각 시스템의 성능향상을 위한 연구내용은 다음과 같다.

제 2장에서는 파라메트릭 배열 현상 해석을 위한 비선형 모델을 소개한 후 본 논문에서 특성 분석 및 모의실험에 사용되는 KZK(Khokhlov, Zabolotskaya, Kuznetsov) 수치 모델에 대하여 소개한다. 시스템 설계 및 성능 예측을 위해 수치해석 모델에 비해 계산량이 적은 비선형이 고려된 SONAR 모델을 소개하고 시스템의 송신음압감도와 음원준위와의 관계 그리고 수신음압감도와 음원준위와의 관계로부터 시스템의 이론적인 성능 예측 방법을 정리한다.

제 3장에서는 고지향 통신 시스템 설계 및 성능 향상을 위해 파라메트릭 배열 기반 디지털 변복조 방식을 소개하고 전송률 향상을 위한 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 변조 방식 과 주파수분할 다중화 전송 방식을 제안한다. 제안된 고지향 통신 시스템은 LabView와 DAQ(USB-6361, NI, USA)보드를 기반으로 구현되며 수조 실험을 통해 성능 검증 실험을 수행한다.

제 4장에서는 고지향 음향 신호를 이용한 탐지 시스템 설계 및 분해능 향상을 위해 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 대역 확장 기법과 다중 대역을 이용한 탐지

알고리즘을 제안한다. 제안된 탐지 시스템은 Benthowave 사의 파라메트릭 배열용 트랜스듀서와 증폭기 등으로 센서부와 시스템부를 구성하고 송수신 신호처리는 Labview PXI 또는 DSP 보드를 기반으로 각각 개별적인 시스템을 구현한다. 탐지 시스템의 검증을 위해 해상 실험에 앞서 실험이 용이한 공기중 환경에서 실험 치구를 설계하여 지층탐사 신호처리 기법에 대한 검증 실험을 수행한다. 탐지 성능 향상을 위한 제안된 알고리즘은 수조 실험을 통해 검증한 후 제주도 북부 근해에서 해상 실험을 수행한다.

제 5장에서는 파라메트릭 배열 기반 지향성 음향 시스템의 빔 조향을 위해 VSB(Vestigial Side Band)변조 기반의 디지털 Beam-steering 시스템을 설계한다. 제안된 빔 조향 시스템은 다공진 트랜스듀서 배열과 다 채널 전력증폭기로 센서부와 시스템부를 구성하고 LabView PXI를 기반으로 신호처리 부를 구현한다. 시스템의 성능 평가를 위한 실험은 본교 오션홀에서 거리전달 특성, 빔 패턴 그리고 빔 조향 실험을 수행한다.

제 2 장 파라메트릭 배열기반 음향 시스템 설계

파라메트릭 배열 현상에 의해 간접적으로 생성된 저주파 성분의 높은 지향성과 광대역 그리고 거리 전달 특성 등 물리현상에 대한 해석을 위해 유체역학에 학문적 근원을 두고 다양한 수학적 모델들이 유도^[7]되었으며 이러한 모델의 타당성 검증을 위해 다양한 실험들이 수행되었다. 본 장에서는 파라메트릭 배열의 수치해석 모델인 비선형 모델들과 수치해석 비용을 줄이기 위한 비선형성이 고려된 SONAR 모델을 소개한다. 또한 시스템의 송신음압감도(TVR: Transmitting Voltage Response)와 수신음압감도(RVS: Receiving Voltage Sensitivity)를 이용한 성능 예측 방법을 정리한다.

2.1 파라메트릭 배열의 비선형 모델

비선형 현상인 파라메트릭 배열 현상을 해석하기 위해서는 비선형 모델 미분 방정식이 요구된다. 비선형 음향 현상은 유체의 거동 중의 하나이기 때문에 유체역학에 학문적 근원을 두고 있다. 수학적 모델은 Navier-Stokes Equation에서 출발하며 가정을 하나씩 취해가는 과정을 통해 여러 가지 비선형 음향 모델들이 유도되었다. 일반적으로 점성 유체의 경우 질량보존, 모멘텀 보존, 엔트로피 균형 그리고 열역학 등 네 가지 방정식으로 부터 운동이 기술된다^[7]. 직접적으로 복잡한 네 가지 방정식을 해석하여 음파의 운동을 기술하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 다양한 가정에 의한 비선형 음향 모델을 유도한 후 이를 이용하여 비선형 음향의 전파 특성을 해석해 왔다. 이러한 모델에는 Mach number의 2차 항까지만 고려한 2차 Navier-Stokes Equation, 유체의 국부적 효과(local effect)는 무시하고 거리를 진행하면서 누적되는 효과(cumulative effect)만 고려한 Westervelt Equation, 음파의 회절 효과를 제외한 비선형과 감쇠효과만 고려한 Burgers Equation 그리고 1차 음파의 고지향성과 거리에 따른 느린 변화를 가정한 KZK(Khokhlov, Zabolotskaya, Kuznetsov) Equation이 존재 한다.

2차 Navier-Stoke Equation은 Mach number의 2차 항 까지만 근사화한 식으로 Mach number($M = u_0/c_0$)란 음속(c_0)에 대한 매질의 입자속도 크기($u_0 = P/\rho_0 c_0$)의 비를 의미한다. 입자속도 크기는 일반적으로 음속에 비해 작기 때문에($M \ll 1$) Mach number의 3차 이상의 항은 무시할 수 있다. 여기서 Mach number의 1차 항만 고려하게 되면 선형 파동 방정식이 된다. $M = 10^{-2}$ 을 만족하기 위해서는 공기 중에서는 음압이 약 157dB(re $20 \mu\text{Pa}$), 수중에서는 음압이 약 267dB(re $1 \mu\text{Pa}$)가 되어야 하지만 일반적으로 이 이상의 음압을 갖는 음파는 존재하기 어려우므로 $M \ll 1$ 인 가정은 만족된다. 2차 Navier-Stoke Equation은 식(2.1)과 같이 정리된다 [7].

$$\square^2 p + \frac{\delta}{c_0^4} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} = - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} - \left(\nabla^2 + \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) L \quad (2.1)$$

여기서, p 는 음압, ρ_0 는 밀도, t 는 시간, $\square^2 = \nabla^2 - c_0^{-2}(\partial^2/\partial t^2)$ 는 d'Alembertian 연산자로 3차원적인 공간변화와 누적되는 효과에 대한 항, $L = 0.5(\rho_0 u^2 - p^2/\rho_0 c_0^2)$ 는 2차 Lagrangian 밀도로 공간상의 한 지점에서 강하게 발생하는 비선형적 효과인 국부적 효과에 대한 항, β 는 비선형 계수로 공기 중에서는 1.2 해수에서는 3.8 그리고 담수에서는 3.6의 값을 갖으며 비선형 영향에 대한 항이다. 그리고 δ 는 음의 확산도(diffusivity)로 감쇠효과에 대한 항이며 식(2.2)와 같다[7].

$$\delta = \nu \left(\frac{4}{3} + \frac{\mu_b}{\mu} + \frac{\gamma - 1}{\text{Pr}} \right) \quad (2.2)$$

여기서, $\nu = \mu/\rho_0$ 는 동점성(kinematic viscosity), μ 는 전단점성(shear viscosity), μ_b 는 체적점성(bulk viscosity), $\gamma = c_p/c_v$ 는 정압비열(specific heat at constant pressure) c_p 과 정적비열(specific heat at constant volume) c_v 의 비, $\text{Pr} = \mu c_p/\kappa$ 는 Prandtl number로 κ 는 열전도율(thermal conductivity)이다.

Westervelt Equation은 진행파에서 비선형 현상이 누적되는 효과가 국부적 효과보다 지배적인 특성을 이용하여 2차 Navier-Stoke Equation의 국부적 효과를 무시하여 간단화한 모델이다. 진행파에서 국부적 효과를 무시할 경우 $p = \rho_0 c_0 u$ 가 성립되어 식(2.1)의 Lagrangian 밀도 $L=0$ 이 된다. Westervelt Equation을 정리하면 식(2.3)과 같다^[7].

$$\square^2 p + \frac{\delta}{c_0^4} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} = - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

파라메트릭 배열 현상은 트랜스듀서에 인가된 1차 음파가 거리를 진행하면서 비선형적 상호작용에 의해 차 주파수의 가상음원(virtual sources)이 음파 진행방향을 따라 선 배열 형태로 생성되어 간접적으로 발생하는 현상으로 가상음원의 분포에 따라 비선형 효과가 점점 누적되어 국부적 효과보다 큰 값을 갖는다. Westervelt Equation은 2차 Navier-Stoke Equation에 비해 수치해석이 간단한 장점이 있으며 회절현상을 무시한 원통형의 선 배열 음원의 가정^[9]과 원거리 가정^[13]을 통해 이론 해를 계산할 수도 있다.

Burgers Equation은 일차원 단방향 진행파의 비선형 효과와 감쇠효과만을 고려한 가장 단순한 비선형 모델로 1차원의 Westervelt Equation을 이용하여 유도될 수 있다. 우선 음파의 진행은 z 방향으로 전파된다는 가정을 통해 식(2.3)의 d'Alembertian 연산자는 $\square^2 = \partial^2/\partial z^2 - c_0^{-2}(\partial^2/\partial t^2)$ 가 되고 식의 단순화를 위해 음압은 $p = p(z_1, \tau)$ 로 가정하여 새로운 변수 z_1 과 τ 는 각각 $z_1 = Mz$ 와 $\tau = t - z/c_0$ 로 가정한다. 여기서, τ 는 retarded time으로 음파가 음속 c_0 로 진행하면서 발생하는 비선형과 감쇠의 영향을 관찰하기 위한 변수이고 z_1 는 진행거리에 따라 비선형과 감쇠 효과에 의한 변형이 적다고 가정하여 $M \ll 1$ 인 상수를 곱한 변수이다. 위 가정을 식(2.3)에 적용하여 Mach number의 2차 항까지 정리한 후 τ 에 대하여 적분한 후 정리하면 식(2.4)와 같은 1차원의 Burgers Equation을 얻게 된다^[7].

$$\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} = \frac{\beta p}{\rho_0 c_0^3} \frac{\partial p}{\partial \tau} \quad (2.4)$$

Burgers Equation은 가장 단순한 비선형 모델로 해석이 간단하고 알려진 이론해도 존재한다. 하지만 방향성 빔에 대한 해석만이 가능하고 음원의 회절효과를 고려하지 않기 때문에 다양한 음원 분포에 대한 해석이 불가능하며 음원 중심축에 대한 음압 분포만이 해석 가능한 단점이 있다. Burgers Equation에서 구형파(spherical wave)와 원통파(cylindrical wave) 음원을 고려한 일반화된 Burgers Equation은 식(2.5)와 같다^[7].

$$\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{m}{r}p \mp \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} = \pm \frac{\beta p}{\rho_0 c_0^3} \frac{\partial p}{\partial \tau} \quad (2.5)$$

여기서, m 는 평면파, 원통파 그리고 구형파 음원에 대하여 각각 0, 0.5, 1로 표현되고 상단부호는 +진행방향 그리고 하단부호는 -진행방향을 의미한다.

KZK Equation은 단방향의 비선형 음향 빔의 전파를 수학적으로 잘 묘사한 모델로 비선형 음향 빔 해석에 일반적으로 사용되고 있다. KZK Equation은 Burgers Equation에 회절 효과에 의한 영향을 추가하여 지향성 빔의 회절, 감쇠, 그리고 비선형 효과를 고려한 모델이다. 그림 2-1과 같은 좌표계에서 음원이 xy 평면에 위치한 후 z 방향으로 방사될 때 1차 음파의 고지향성과 거리에 따른 음파의 변형이 적음을 가정하여 음압을 $p = p(x_1, y_1, z_1, \tau)$ 로 가정한다.

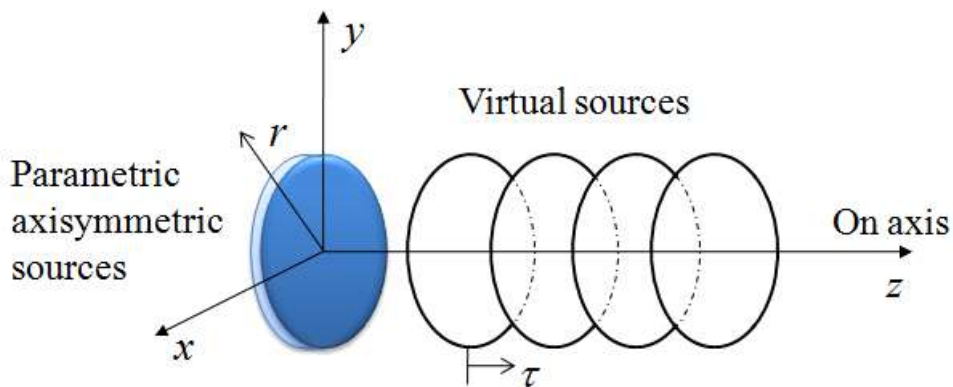


그림 2-1 파라메트릭 배열 음원의 좌표

여기서, τ 는 Burgers Equation의 가정과 동일하게 음파가 음속 c_0 로 진행하면서 발생하는 비선형과 감쇠의 영향을 관찰하기 위한 retarded time이고 공간적 변수 x, y, z 에서 z 축 방향의 변화는 xy 축 방향의 변화보다 더욱 느리게 발생되므로 \sqrt{M} 의 스케일 변화를 고려하여 $(x_1, y_1, z_1) = (\sqrt{M}x, \sqrt{M}y, Mz)$ 으로 가정한다. 위 가정을 식(2.3)에 적용하여 Mach number의 2차 항까지 정리하면 식(2.6)과 같다^[7].

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial \tau} = \frac{c_0}{2} \nabla_{\perp}^2 p + \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} + \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2} \quad (2.6)$$

여기서, 우변의 첫 번째 항의 $\nabla_{\perp}^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ 는 음파 진행방향 z 축에 수직인 방향의 Laplacian 연산자를 의미하며 xy 축 방향으로의 회절효과를 나타내는 항이며 만약 $\nabla_{\perp}^2 p = 0$ 으로 가정할 경우 회절을 고려하지 않은 Burgers Equation이 유도된다. 두 번째 항은 감쇠효과 세 번째 항은 비선형 효과를 표현한다. KZK Equation은 지향성 빔을 가정한 모델로 약한 지향성 빔에 대한 해석결과는 부정확한 한계가 있으며 음파 진행방향에 대해 30°이상의 영역에서는 오차가 큰 단점이 있다. 그러나 지향성 빔의 회절, 감쇠 그리고 비선형 효과를 모두 고려한 모델로 3차원적 해석이 가능하고 수치해석 기법중 비교적 계산 비용이 적으며 원거리에서 상당히 정확한 모델로 파라메트릭 배열 특성 분석에 대표적으로 사용되고 있다^[21,30-32]. 본 논문에서는 특성 분석 및 모의실험을 위해 KZK Equation의 수치해석 알고리즘 중 Lee^[30]의 축대칭 음원에서 발생된 파형의 빔 해석을 위해 개발된 Texas Austin 대학의 공개 코드를 이용하였다.

2.2 비선형성이 고려된 SONAR 모델

파라메트릭 배열 현상은 높은 음압의 1차 주파수 f_1 과 f_2 의 비선형적 상호작용에 의해 차 주파수가 발생하는 현상이다. 차 주파수는 1차 주파수의 음압이 강하게 유지되는 영역을 음원으로 가지며 이를 가상음원(Virtual source) 또는 상호작용영역(Interaction region)이라 한다^[6]. 가상음원의 크기는 1차 주파수, 차 주파수, 트랜스듀서의 반경 그리고 음향학적 방사전력에 따라 영향을 받으며 이를 음향학적 설계변수^[22]라 한다. 이러한 음향학적 설계변수에 따라 차 주파수의 음압준위(SPL: Sound Pressure Level)를 최대화 하는 조건이 결정된다. 파라메트릭 배열 기반의 효율적인 음향 시스템 설계를 위해 다양한 음향학적 변수 환경에 대하여 비선형 모델의 수치해석 기법을 적용하기에는 수치해석 비용이 높은 단점이 있다. 한편 Berkay^[12,13], Mellen & Moffett^[14], 그리고 Pederson^[33] 등은 Westervelt와 Fellone의 제안기법을 기반으로 1차 주파수의 음원준위(SL: Source Level)에 비선형 항을 고려하여 차 주파수의 음원준위를 비교적 간단한 수식으로 계산하였다.

시스템 설계 과정에서 비선형성이 고려된 SONAR 모델을 적용하여 초기 설계 변수를 결정하고 설계된 변수에 대하여 수치모델을 적용하는 것이 주어진 환경에서 최적의 차 주파수 생성조건을 탐색하는 효율적인 방법이 될 수 있다. 본 절에서는 차 주파수의 음원준위를 기반으로 계산된 비선형성이 고려된 SONAR 모델의 유도과정을 소개하고 시스템의 송신음압감도(TVR)와 수신음압감도(RVS)를 이용한 시스템의 성능 예측방법을 정리한다.

2.2.1 파라메트릭 배열의 음향학적 설계 변수

파라메트릭 배열 현상에 의해 발생하는 차 주파수의 음압은 1차 주파수의 음원준위와 가상음원의 크기에 의해 결정된다. 가상음원은 1차 주파수가 높은 음압을 유지하는 영역에서 차 주파수의 음원이 비선형적 상호작용에 의해 생성되는 구간으로 음압이 누적되어 증가한다. 그러나 가상음원의 영역을 벗어나면 1차 주

파수의 음압은 감소하고 더 이상 차 주파수의 음압은 증가하지 않는다. 1차 주파수 음압의 감소 원인은 흡음(absorption)손실, 구면확산(spherical spreading)손실, 그리고 충격파 생성에 의한 제약이다. 각각에 대한 감소거리는 감쇠거리(Absorption range: R_A), 회절거리(Rayleigh distance: R_R), 그리고 충격거리(Shock distance: R_S)로 정의하고 다음과 같이 계산된다^[22].

$$R_A = \frac{1}{\alpha_p} \quad (2.7)$$

$$R_R = \frac{k_p a^2}{2} \quad (2.8)$$

$$R_S = \frac{c_0 \lambda_p}{4\beta u} \simeq \frac{1}{\beta k_p M} \quad (2.9)$$

여기서, α_p 는 1차 주파수 평균($f_p = (f_1 + f_2)/2$)의 흡음계수(absorption coefficient)로 본 논문에서 흡음계수의 계산은 Bass 모델^[34]을 사용하였다. k_p 는 1차 주파수 평균의 파수(wave number), a 는 트랜스듀서의 반경, λ_p 는 1차 주파수 평균의 파장을 의미한다. 가상음원의 크기는 3가지 감소거리의 관계에 따라 결정된다.

감쇠거리(R_A)가 가장 짧은 경우는 회절거리에 도달하기 전 1차 주파수의 음압이 감쇠하는 현상으로 Westervelt 이론해의 가정^[9]에 해당된다. 주파수와 트랜스듀서 반경에 비례하여 증가하는 회절거리보다 주파수의 제곱에 비례하여 감소하는 감쇠거리가 짧은 경우로 차 주파수에 비해 매우 높은 1차 주파수를 사용할 때 발생하는 현상이다. 예를 들어 해수환경에서 0.1m 반경의 트랜스듀서로 1.2MHz 이상의 1차 주파수를 구동하는 경우이며 1차 주파수의 크기만이 중요한 설계 변수가 된다.

회절거리(R_R)가 가장 짧은 경우는 트랜스듀서의 반경이 작거나 낮은 1차 주파수를 사용할 때 발생하는 현상으로 Berklay&Leahy의 가정^[13]에 해당된다. 예를 들어 해수환경에서 0.1m 보다 작은 반경의 트랜스듀서 또는 1MHz 이하의 1차 주파수를 구동하는 경우이며 1차 주파수와 트랜스듀서의 반경이 중요한 설계 변수

가 된다.

마지막으로 충격거리(R_s)가 가장 짧은 경우는 충격파가 발생할 정도의 매우 강한 음압을 트랜스듀서에 인가할 때 발생하는 현상으로 Mellen&Moffett^[14]의 가정에 해당된다. 충격거리 진행 이후 강한 비선형 현상에 의해 1차 주파수의 음압은 급격히 감소한다. 이 경우 흡수, 확산, 충격 손실 모두를 고려해야하는 가장 복잡한 환경으로 1차 주파수, 트랜스듀서 반경, 그리고 음향학적 방사전력이 중요한 설계 변수가 된다.

파라메트릭 배열 기반의 음향 시스템에서 차 주파수의 음압은 1차 주파수, 차 주파수, 트랜스듀서 반경, 그리고 음향학적 방사전력에 영향을 받으며 이를 음향학적 설계 변수라 한다. 트랜스듀서의 반경은 음향학적으로 크기에 비례하여 높은 음압과 지향성이 확보되며 이는 음향학적 제약보다는 물리적인 제약을 받는다. 따라서 요구되는 빔폭(*beamwidth*) 및 구동거리에 따라 결정한다. 구동거리와 트랜스듀서 반경이 결정되었을 경우 1차 주파수에 따른 최적의 차 주파수가 존재 한다. 마지막으로 최대의 차 주파수 음압을 얻기 위해 고려해야할 설계인자는 방사전력이다. 방사전력은 캐비테이션(*cavitation*) 한계, 트랜스듀서의 열적(*thermal*) 한계 그리고 포화(*saturation*) 한계에 의해서 제약을 받는다^[22].

캐비테이션 현상은 음향학적 동적 압력이 정적 압력을 넘어 설 때 트랜스듀서 표면에 공기방울이 발생하는 현상으로 에너지가 낭비되고 트랜스듀서 표면에 손상을 입힌다. 따라서 방사된 음파의 에너지가 캐비테이션 한계를 넘지 않도록 설계되어야 한다. 캐비테이션의 한계는 식(2.10)과 같이 계산 된다^[35].

$$I = W_0/S = 2f_p^2 \times 10^{-4} \quad (2.10)$$

여기서, I 는 1차 주파수의 음향세기(*intensity*), $W_0 = (W_1 + W_2)/2$ 는 1 차 주파수의 평균 음향전력, $S = \pi a^2$ 는 트랜스듀서 방사면적, 그리고 f_p 의 단위는 kHz이다.

트랜스듀서의 열적 한계는 매우 큰 진폭 변위로 트랜스듀서가 구동될 경우 압전체 내부 감쇠(*damping*) 효과에 의해 열을 받게 되어 트랜스듀서 자체의 성질이 변하거나 손상을 받게 된다. 트랜스듀서의 열적 한계는 트랜스듀서 설계 형태에

따라 차이가 있다. 일반적으로 100kHz 이상 급의 트랜스듀서에서 주로 사용하는 plate 형태로 볼 때 트랜스듀서의 최대 에너지 밀도를 $1 W/cm^3$ 라고 가정하면 트랜스듀서의 열적 한계는 식(2.11)과 같이 계산 된다^[22].

$$I = W_0/S = 2/f_p \quad (2.11)$$

그림 2-2는 1차 주파수에 따른 음향 세기의 캐비테이션 한계와 열적한계를 나타낸다. 방사전력 한계는 100kHz를 기준으로 저주파대역은 캐비테이션 한계에 의해 제한되고 고주파대역은 열적 한계에 의해 제한된다.

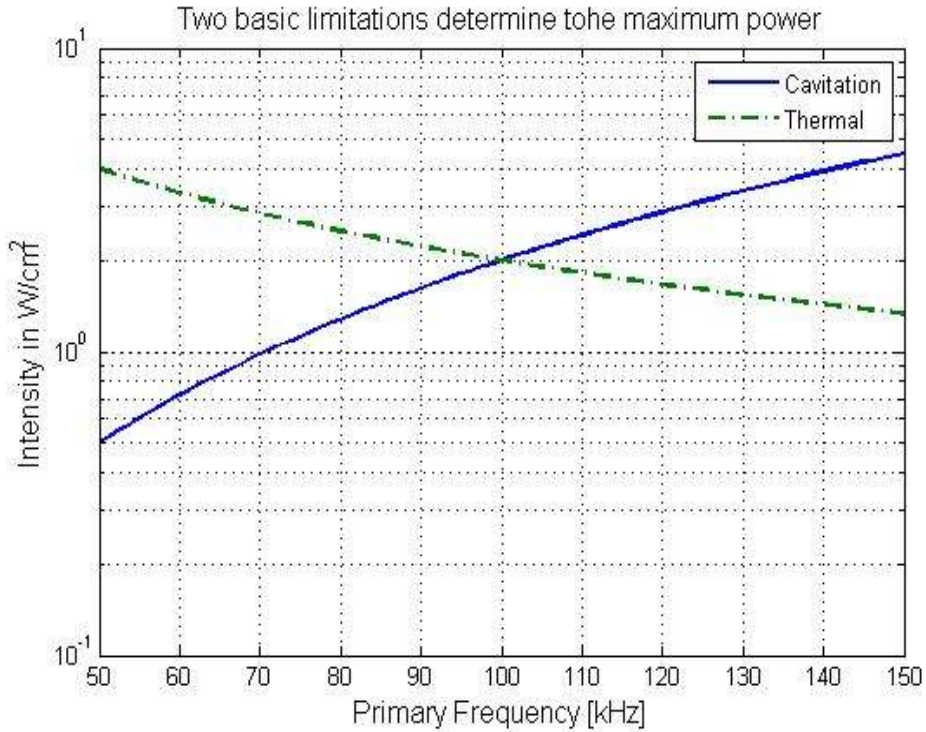


그림 2-2 1차 주파수에 따른 캐비테이션 한계와 열적한계

마지막으로 고려해야할 방사전력 한계는 포화 한계이다. 1차 주파수의 음압이 일정이상 가해질 때 비선형 현상에 의해 충격파가 발생되게 된다. 이 때 공간상의 급격한 압력 구배에 의해 감쇠효과가 급격히 발생되어 차 주파수의 음압이

감소한다. 따라서 포화 현상이 발생하지 않는 범위에서 구동하는 것이 중요하며 포화현상의 한계는 식(2.12)와 같이 계산 된다^[22].

$$I = W_0/S = 9L^2 10^{15.5} / (16\pi^3 a^4 f_p^4) \quad (2.12)$$

여기서, $L = \exp(-(\pi/2\beta L)) = 4.5(\alpha_p R_R/\beta L)$ 은 1차 주파수와 트랜스듀서 반경의 함수이며 α_p 는 평균 1차 주파수의 흡음률, R_R 는 회절거리, 그리고 β 는 비선형계수를 나타낸다.

2.2.2 파라메트릭 배열 신호의 SONAR 모델

특정 거리에서의 차 주파수의 SNR은 비선형이 고려된 차 주파수의 음원준위(SL), 전달손실(TL: Transmission Lose), 잡음준위(NL: Noise Level), 지향지수(DI: Directive Index), 그리고 대역폭의 관계식으로 계산된다^[22,35]. 그리고 차 주파수의 음원준위는 1차 주파수의 음원준위와 비선형 효과에 의한 관계식으로 계산된다. 1차 주파수의 음원준위는 트랜스듀서에 공급되는 전력과 트랜스듀서의 전력효율 그리고 지향지수에 따라 계산된다. 음파가 구면파로 전파된다고 가정할 때, 음향 세기는 $I(R) = W_0/4\pi R^2$ 로 계산된다. 또한 평면파와 원거리 수신을 가정할 때 음향 세기는 $I(R) = p^2(R)/\rho c$ 와 같이 음압으로 표현된다. 이때, 1m에서의 전송 음압은 식(2.13)과 같이 계산된다^[36].

$$p^2 = \frac{\rho c}{4\pi} \beta_e W_{act} G_d \quad (2.13)$$

여기서, β_e 는 트랜스듀서의 전기음향 전력효율(Electroacoustics Power Efficiency)로 음향전력 W_0 과 입력전력 W_{ei} 의 비로 계산되고 전형적인 $\beta_e = W_0/W_{ei}$ 의 값은 트랜스듀서의 공진주파수 대역에서 0.2~0.7의 값을 갖는다. W_{act} 는 트랜스듀서의 능동전력으로 트랜스듀서를 그림 2-3과 같이 등가회로로 표현할 때 부하저항 R_p 에 의한 출력 전력을 나타내며 $W_{act} = V^2/R_p$ 와 입력전압과 부하저항의 관계식으

로 계산된다. 그리고 G_d 는 지향성 트랜스듀서에서 획득되는 공간적 이득으로 지향이득(Directivity Gain)을 나타낸다.

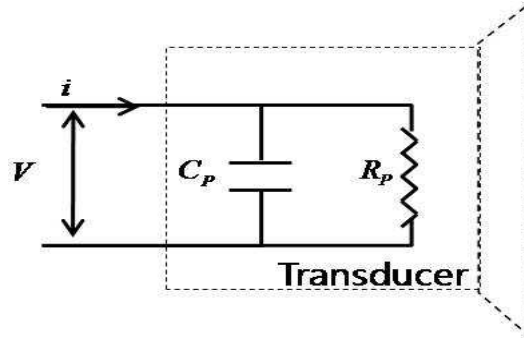


그림 2-3 트랜스듀서의 등가회로

트랜스듀서로부터 1m거리에서 측정되는 1차 주파수의 음원준위는 식(2.14)와 같이 계산된다^[36].

$$SL_p = 170.8 + 10\log_{10}(W_{act}) + 10\log_{10}\beta_e + DI \quad (2.14)$$

여기서, 지향지수(DI)는 $DI = 10\log_{10}G_d = 10\log_{10}(4\pi S/\lambda_p^2)$ 로 계산된다. 전형적인 음원준위는 170dB에서 240dB의 값을 갖는다. 입력전압이 V일 때, 음원준위는 식(2.15)와 같이 송신음압감도(TVR), 전기음향 전력효율 β_e , 지향지수 DI 그리고 트랜스듀서 부하저항(R_p)의 관계식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} SL_p &= TVR + 20\log_{10}(V) \\ &= 170.8 - 10\log_{10}(R_p) + 10\log_{10}\beta_e + DI + 20\log_{10}(V) \end{aligned} \quad (2.15)$$

여기서, 송신음압감도는 트랜스듀서 입출력 전압 또는 음압으로 표현되는 전기-음향 변환을 수량적으로 표현하는 민감도로 1V 기준 전압을 가할 때 1m에서 측정되는 기준 음압(p_{ref})대비 특정 입력 전압을 인가할 때 1m에서 측정되는 음압(p_V)의 비로 표현된다^[36].

$$TVR = 20\log_{10}\left(\frac{p_V}{p_{ref}}\right) (dB\ ref\ 1\mu Pa/1V@1m) \quad (2.16)$$

또는 식(2.17)과 같이 입력전압과 측정 음압의 관계식으로 표현될 수 있다^[36].

$$TVR = 20\log_{10}\left(\frac{p}{p_{ref}} \times \frac{V_{ref}}{V}\right) \quad (2.17)$$

여기서, p 는 측정 음압, p_{ref} 는 기준 음압으로 수중에서는 $1\mu Pa$ 그리고 공기중에서는 $20\mu Pa$ 의 값을 갖는다. V 는 트랜스듀서에 인가되는 전압 그리고 V_{ref} 는 기준 전압으로 1V이다. 또한 N개의 배열로 구성할 때 송신음압감도(TVR_N)는 식(2.18)과 같이 계산된다^[36].

$$TVR_N = TVR + 20\log_{10}N \quad (2.18)$$

1차 주파수의 음압준위로부터 차 주파수의 음원준위는 식(2.19)과 같이 계산 된다^[33].

$$SL_d = 2SL_p + 20\log(f_d) + 20\log_{10}\Delta - 287 \quad (2.19)$$

여기서, SL_d 는 차 주파수의 음원준위, 287dB는 수중환경에서의 스케일 상수로 공기중에서는 160dB의 값을 갖는다^[15]. f_d 는 차 주파수로 단위는 kHz이다. Δ 는 감쇠거리와 회절거리에 의한 파라메트릭 배열 현상의 효과로 식(2.20)와 같이 표현된다^[33].

$$\Delta = E_1\left(\alpha_T R_p \frac{f_p}{f_d}\right) \exp\left(\alpha_T R_p \frac{f_p}{f_d}\right) \quad (2.20)$$

여기서, $\alpha_T = 2\alpha_p - \alpha_d$ 는 평균 1차 주파수의 흡음률(α_p)과 차 주파수의 흡음률(α_d)의 관계식을 나타내고 $E_1(\cdot)$ 는 1차 지수적분을 나타낸다.

특정 거리에서의 차 주파수의 음압준위(SPL_d)은 식(2.21)과 같이 계산 된다.

$$SPL_d = SL_d - TL_d \quad (2.21)$$

여기서, TL_d 는 차 주파수의 전달손실로 $TL_d = \alpha_d R + 20 \log_{10} R$ 로 계산된다. 또한 차 주파수의 SNR_d 은 식(2.22)와 같이 계산 된다^[22].

$$SNR_d = SL_d - TL_d - NL_d + DI_d - 10 \log_{10}(B_d) \quad (2.22)$$

여기서, DI_d 는 지향지수로 $DI = 10 \log_{10}(4\pi S/\lambda_d^2)$ 로 계산되고 NL_d 는 차 주파수의 잡음준위로 차 주파수 대역을 1kHz~100kHz로 한정할 경우 Knudsen 모델의 적용이 가능하며 Sea state에 따라 $NL_d = NL_{1k} - 17 \log_{10} f_d$ 로 계산된다^[36]. NL_{1k} 는 Sea state에 따른 Knudsen 모델 계수로 표 2-1과 같다. 본 논문에서는 Sea state 0를 가정한다.

표 2-1 Sea state에 따른 Knudsen 모델 계수

Sea state	0	0.5	1	2	3	4	5	6
NL_{1K} [dB]	44.5	50	55	61.5	64.5	66.5	68.5	70

B_d 는 파라메트릭 배열의 대역폭으로 Quality factor(Q) 1.5에 대하여 $B_d = 0.6f_d$ 로 계산된다.

또한 수신기의 수신음압감도(RVS)를 이용하여 파라메트릭 배열 신호의 음원준위(SL)를 추정할 수 있다. 특정 거리에서 수신된 전압에 수신음압감도를 적용하여 음압준위(SPL)를 계산한 후 전달손실(TL)을 보상하여 파라메트릭 배열 신호

의 음원준위(SL)를 다음과 같이 계산된다.

수신음압감도는 트랜스듀서 입출력 전압 또는 음압으로 표현되는 전기-음향 변환을 정량적으로 표현하는 민감도로 $1\mu\text{Pa}$ 기준 음압대비 하이드로폰에 인가되는 특정 음압의 비로 식(2.23)와 같이 표현된다.

$$RVS = 20\log_{10}\left(\frac{V_{Rx} \text{ Sensitivity}}{1 \text{ V}/1\mu\text{Pa}}\right) \quad (2.23)$$

예를 들어 수신 센서의 RVS가 -200dB (ref $1\text{V}/1\mu\text{Pa}$)인 경우 센서의 민감도는 $100\mu\text{V}/\text{Pa}$ 로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} -200 &= 20\log_{10}\left(\frac{\text{Sensitivity}}{1 \text{ V}/1\mu\text{Pa}}\right) \\ 10^{-10} &= \frac{\text{Sensitivity}}{1 \text{ V}/1\mu\text{Pa}} \\ \text{Sensitivity} &= 100\mu \text{ V}/\text{Pa} \end{aligned} \quad (2.24)$$

수신 센서의 민감도를 적용하여 수신 센서에 입력되는 전압(V_{Rx})에 대한 음압준위(SPL_d)를 식 (2.25)와 같이 계산할 수 있다.

$$SPL_d = 20\log_{10}\left(\frac{P_{in}}{1\mu\text{Pa}}\right), P_{in} = V_{Rx}/\text{Sensitivity} \quad (2.25)$$

여기서, P_{in} 는 수신 센서에서 측정되는 음압을 나타낸다. 또한 음압준위(SPL_d)에 전달손실(TL_d)을 적용하여 초기 음원준위를 식(2.26)과 같이 추정할 수 있다.

$$SL_d = SPL_d + TL_d, TL_d = 20\log_{10}R + \alpha_d R \quad (2.26)$$

제 3 장 파라메트릭 배열 기반 통신 시스템 및 응용

3.1 서론

한반도 주변의 해양 환경은 동해 외해를 제외하고 주로 수심 150m 이하의 천해 환경으로 수중 통신 채널은 다중경로에 의한 급격한 페이딩 특성을 보인다. 특히 천해의 수평 채널은 거리가 증가함에 따라 다양한 다중경로 특성을 보이며 전송률에 따라 수심 심볼에 걸친 간섭을 발생시켜 성능을 저하시킨다^[1,2]. 다중경로 문제를 극복하기 위해 채널 등화기^[2], 배열 센서를 이용한 빔 형성^[3], 그리고 다이버시티 기법^[4] 등이 적용되어 왔다. 또한 다중경로 영향에 강인한 송신 특성을 갖는 파라메트릭 배열 현상을 적용한 전송방법이 연구되었다^[1,5].

Quazi와 Konrad는 수중통신 채널에서 다중경로에 의한 왜곡 영향을 해결하기 위해 파라메트릭 배열 현상을 이용한 통신 방식을 제안하여 주파수 도약(hopping) FSK(Frequency Shift Keying) 방식으로 음성과 이미지 파일을 전송하여 통신 가능성을 제시하였다^[5]. Coates 연구진은 ‘BASS 50 PARACOM’과 ‘BASS 300 PARACOM’ 연구를 통해 DPSK(Difference Phase Shift Keying) 방식을 이용한 수중 통신 결과를 발표하였다^[1,39,40]. Kopp는 비선형성이 고려된 SONAR 모델로부터 파라메트릭 배열의 SNR을 계산한 후 통신성능 분석을 위해 차 주파수와 통신거리에 따른 채널용량을 계산하였다^[22].

본 논문에서는 파라메트릭 배열기반 통신 시스템의 전송률 향상을 위해 파라메트릭 배열의 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 방식과 다중사용자 환경을 고려한 주파수분할 방식을 적용한 통신 시스템을 제안한다. 2절에서는 디지털 통신 시스템 구성을 위해 기본적인 변·복조 방식에 대해 소개하고 3절에서는 본 논문에서 제안하는 전송률 향상 기법에 대한 내용을 보인다. 4절에서는 제안된 시스템의 성능 검증을 위한 수조 실험 결과를 보이고 마지막 5절에서 본장의 결론을 맺는다.

3.2 파라메트릭 배열기반 디지털 통신 시스템

3.2.1 파라메트릭 배열기반 디지털 통신 변조

수중 통신 시스템의 성능은 안정적이고 높은 전송률에 의해 결정 된다. 그러나 신호의 변화를 불러일으키는 다중경로와 심볼간 간섭(Inter Symbol Interference)으로 인해 성능이 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 파라메트릭 배열 현상을 이용한 전송 기법이 적용되고 있다. 파라메트릭 배열 현상을 이용할 경우 고지향 빔 특성에 의해 다중 경로에 의한 영향을 줄일 수 있다. 파라메트릭 배열 현상을 이용한 대표적인 디지털 통신의 변조방식으로는 진폭 천이 변조(ASK: Amplitude Shift Keying), 주파수천이 변조(FSK), 위상 천이 변조(PSK: Phase Shift Keying) 그리고 차동 위상천이 변조(DPSK: Differential PSK)방법이 있다.

파라메트릭 배열의 ASK 방식은 정보 데이터에 의하여 1차 주파수의 진폭을 결정하는 변조 방식으로 이진 ASK 신호는 식(3.1)와 같이 표현된다.

$$s(t) = \begin{cases} s_1(t) = A[\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)] & \text{for binary 1} \\ s_2(t) = A\cos(2\pi f_1 t) & \text{for binary 0} \end{cases} \quad (3.1)$$

여기서, f_1, f_2 는 1차 주파수이고 심볼 주기는 T_b 이다. 송신 신호에 대하여 $f_d = |f_1 - f_2|$ 의 파라메트릭 배열 신호가 생성된다.

파라메트릭 배열의 FSK은 정보 데이터에 의해 1차 주파수의 주파수 스펙트럼이 천이되도록 하는 전송 방식으로 이진 FSK 신호는 식(3.2)와 같이 표현된다.

$$s(t) = \begin{cases} s_1(t) = A[\cos(2\pi f_c t) + \cos(2\pi f_1 t)] & \text{for binary 1} \\ s_2(t) = A[\cos(2\pi f_c t) + \cos(2\pi f_2 t)] & \text{for binary 0} \end{cases} \quad (3.2)$$

여기서, f_c 는 반송파 주파수, f_1, f_2 는 1차 주파수를 나타내고 파라메트릭 배열 주파수는 각각 $f_{d1} = |f_c - f_1|$, $f_{d2} = |f_c - f_2|$ 가 된다. FSK 신호는 진폭이 일정

하기 때문에 채널의 진폭 왜곡에 강인한 특성이 있다.

파라메트릭 배열의 DPSK 변조에서 현재 심볼의 위상은 이전 심볼의 위상과 비교하여 동작하게 된다. 즉 정보 비트가 ‘0’인 경우 반송파의 위상을 변화시키지 않고, 정보 비트가 ‘1’인 경우 반송파의 위상을 변화시켜 전송한다. 그림 3-1은 DPSK 변조기의 블록도와 부호화기의 진리표를 나타낸다.

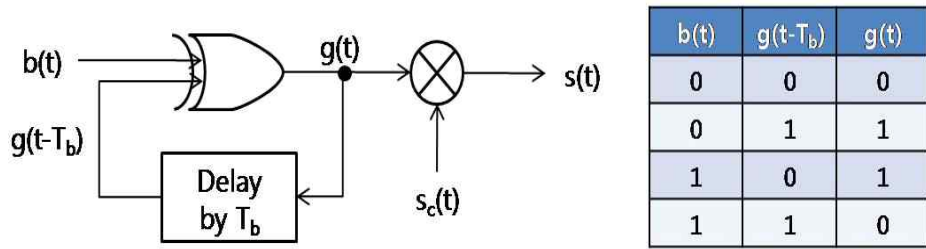


그림 3-1 파라메트릭 배열기반 DPSK 변조기 블록도 및 부호화기의 진리표.

여기서, $s_c(t) = A[\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t)]$ 는 파라메트릭 배열 신호 생성을 위한 반송파, $b(t)$ 는 전송 비트, $g(t)$ 는 부호화기 출력 그리고 $s(t)$ 는 파라메트릭 배열기반 DPSK 변조신호이다.

파라메트릭 배열의 PSK는 정보 데이터 심볼 값에 따라 1차 주파수의 위상이 천이되도록 하는 전송 방식으로 이진 PSK 신호는 식(3.3)와 같이 표현된다.

$$s(t) = \begin{cases} s_1(t) = A[\cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + \cos(2\pi f_2 t)] & \text{for binary 1} \\ s_2(t) = A[\cos(2\pi f_1 t + \theta_2) + \cos(2\pi f_2 t)] & \text{for binary 0} \end{cases} \quad (3.3)$$

여기서, θ_1, θ_2 는 데이터 심볼 값에 따른 위상 천이 값이 되며 이진 데이터에서는 $\pi, -\pi$ 가 된다. PSK 변조 신호는 ‘0’과 ‘1’ 비트에 따라 1차 주파수 f_1 의 위상을 변조한다. 최종적으로 트랜스듀서에 인가되는 송신 신호는 전송 비트에 대하여 90° 의 위상차를 갖게 된다. 매질을 전파하면서 비선형적으로 발생하는 파라메트릭 어레이 신호는 Self-Demodulation 되어 전송 신호의 포락선 성분이 수신된다. 결과적으로 수신 신호는 입력신호의 포락선 위상차 π 가되어 수신된다.

PSK 변조기의 성능을 검증하기 위해 KZK 수치해석 모델^[30]을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 위한 환경 변수는 다음과 같다. 1차 주파수 f_1 과 f_2 를 각각 96kHz와 104kHz로 설정하여 8kHz의 파라메트릭 배열 신호 10비트를 생성하였다. 이때 신호의 표본화 주파수는 1MHz 그리고 전송률은 1kbps를 가정한다. 그림 3-2는 KZK 모의실험 결과로 10m 지점에서의 PSK의 송신 신호 중 비트가 변화는 구간의 신호 파형의 예를 보인다. 비트가 변경되는 구간에서 송신 신호의 위상은 90° 의 위상 차이를 보이지만 송신 신호의 포락선 측면에서는 180° 위상 반전된 신호의 특성을 보인다.

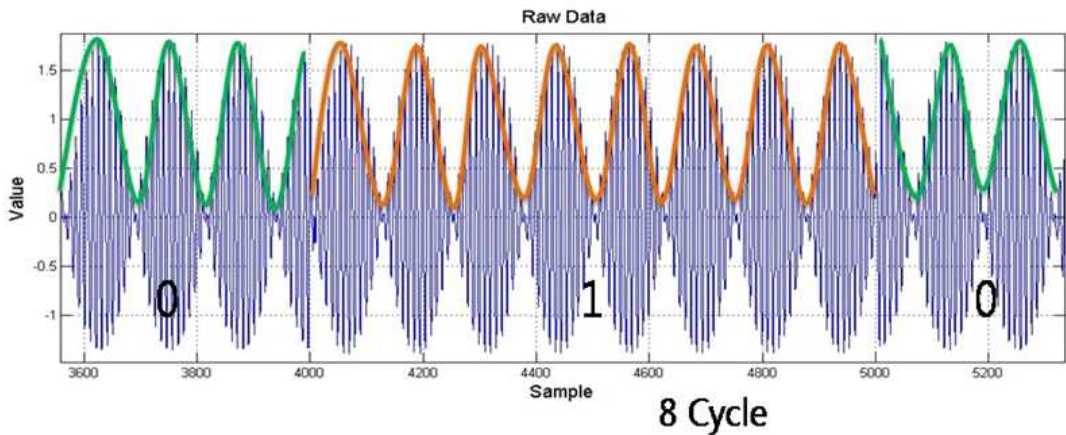


그림 3-2 KZK 수치해석에 의한 파라메트릭 배열 PSK변조 신호의 파형.

3.2.2 파라메트릭 배열기반 디지털 통신 시스템 구성

파라메트릭 배열 기반 통신 시스템 구현을 위해 ASK, FSK 그리고 PSK 변복조 방식을 이용한 통신 시스템을 설계하였다. 그림 3-3은 파라메트릭 배열 기반 통신 시스템의 기본적인 블록도를 나타낸다.

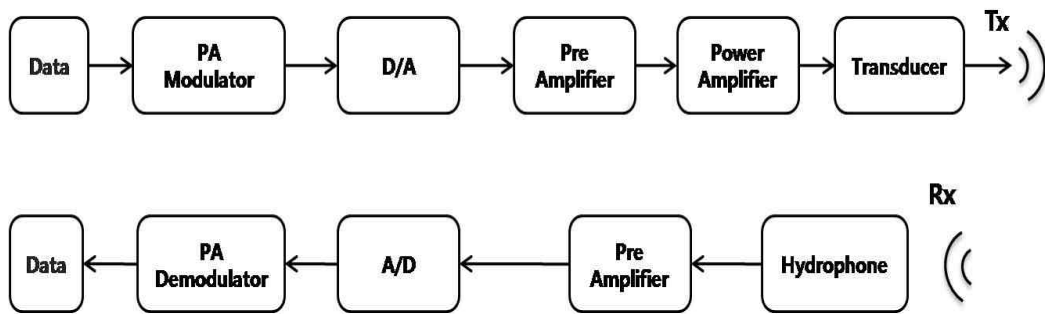


그림 3-3 파라메트릭 배열기반 통신 시스템 블록도.

송신부에서는 전송될 디지털 데이터를 파라메트릭 배열 변조 방식에 따라 변조된 디지털 신호를 생성하고 디지털 아날로그 컨버터(D/A)를 거쳐 아날로그 신호를 전치 증폭기에 전달한다. 각 통신 방식에 따라 변조된 정보 신호는 전치 증폭기 통해 전력 증폭기와 PC 디바이스 사이 임피던스 정합되어 전력 증폭기에 전달된다. 전력 증폭기에서는 트랜스듀서가 파라메트릭 배열 현상이 발생할 수 있도록 충분한 전력 신호로 증폭하여 트랜스듀서에 전달한다. 트랜스듀서를 통해 방사된 파라메트릭 배열 신호는 수신부의 하이드로폰을 통해 측정된다. 수신 신호는 전치 증폭기를 통해 수신 신호 준위를 증폭한 후 아날로그 디지털 컨버터(A/D)를 거쳐 디지털 신호를 복조기에 전달한다. 파라메트릭 배열 복조기에서는 각 변조 방식에 따라 수신 신호를 복조하여 정보 데이터를 복원한다. 파라메트릭 배열 디지털 통신 시스템은 LabView 2011기반으로 프로그래밍 하였으며 A/D, D/A 컨버터는 DAQ 보드(USB-6361, NI, USA)를 이용하여 구현하였다.

ASK의 동기식 복조기는 신호의 시작 시점을 검출하는 에너지 계산기, 동기식 복조를 위해 위상을 검출하는 위상 검출기, 수신 신호와 반송파($f_d = |f_1 - f_2|$)와의 상관값을 구하기 위한 정합필터, 정합필터된 신호의 고주파 성분 제거를 위한

저역통과필터 그리고 비트 복원을 위한 판정부로 구성된다. 파라메트릭 배열 신호의 ASK 동기식 복조기 구조는 그림3-4와 같이 구성된다.

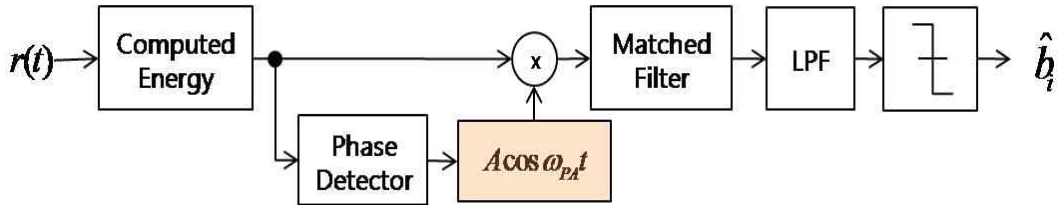


그림 3-4 파라메트릭 배열 ASK 복조기 블록도.

파라메트릭 배열 특성 중 고지향성에 의해 다중경로 영향이 없는 환경을 가정할 때 하이드로폰으로 측정되는 수신신호 $r(t)$ 는 정보신호 $s(t)$ 와 잡음신호 $n(t)$ 가 함께 측정되어 $r(t) = A's(t-\tau) + n(t)$ 로 표현된다. 여기서, A' 는 통신 채널 게인(Gain) 그리고 τ 는 송수신기간 거리에 따라 발생하는 채널지연 시간을 의미한다. 구현된 복조기에서는 채널지연 시간을 추정하기 위해 수신신호 에너지를 계산하여 특정 문턱값 이상의 신호가 검출되는 시점을 이용하여 채널지연 시간을 계산하였다. 동기식 복조를 위해 위상검출기를 사용하여 수신 신호와 반송파와의 위상오차를 계산한 후 반송파의 위상을 보상하였다. 수신 신호에 위상 보상된 파라메트릭 배열 반송파($A\cos(2\pi f_d t + \theta)$)를 곱한 후 정합필터를 이용하여 기저대역 신호와의 상관값을 계산한다. 정합필터는 입력신호와 기저대역 신호의 합성곱(Convolution) 연산으로 구현된다. 정합필터 결과는 저역통과필터를 이용하여 고주파 성분을 제거하며 저역통과필터는 1kHz의 차단 주파수를 갖는 128차의 FIR(Finite Impulse Response)필터를 사용하였다. 최종적으로 비트 판정부에서 심볼 주기 T_b 시점 마다 송신 데이터를 복조 한다.

FSK 동기식 복조기는 에너지 계산기, 수신 신호와 반송파($f_{d1} = |f_c - f_1|$, $f_{d2} = |f_c - f_2|$)의 위상을 각각 검출하는 두 개의 위상 검출기, 두 개의 정합필터, 저역통과필터 그리고 비트 복원을 위한 판정부로 구성된다. 에너지 계산기와 위상검출기 그리고 정합필터의 기능 및 구현은 ASK 복조기와 동일하다. 파라메트릭 배열 신호의 FSK 동기식 복조기 구조는 그림3-5와 같이 구성된다.

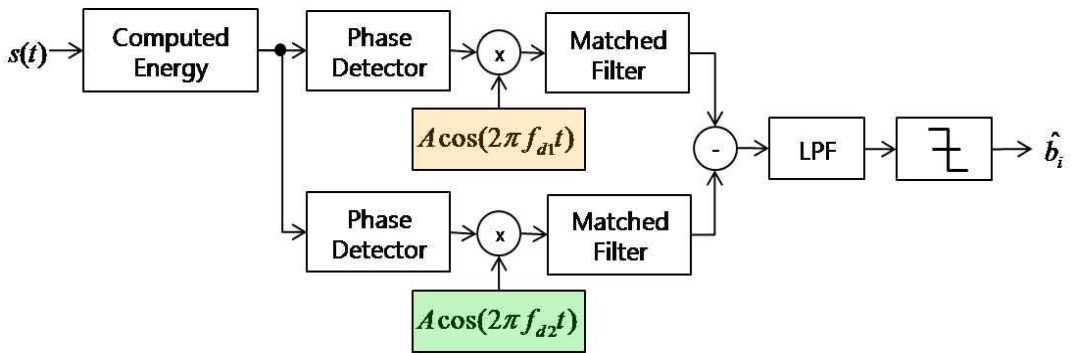


그림 3-5 파라메트릭 배열 FSK 복조기 블록도.

두 개의 파라메트릭 배열 반송파에 대하여 각각의 정현파 신호와 수신신호와 상관을 구하고 결과의 차를 이용하여 복조기를 구현하였다. 이때 비트 판정부의 문턱값은 '0'이 된다.

PSK 복조기 구조는 ASK 동기식 복조기와 동일한 구조를 갖으며 수신 신호와 반송파($f_d = |f_1 - f_2|$)와의 상관값을 출력하는 정합필터 결과는 '1' 또는 '-1'의 값을 출력한다. PSK 복조기의 성능 검증을 위해 KZK 수치해석 모델^[30]을 이용하여 모의실험을 수행하였다. 표본화 주파수 1MHz와 전송률 1kbps 환경에서 1차 주파수 f_1 과 f_2 를 각각 96kHz와 104kHz로 설정하여 8kHz의 파라메트릭 배열 신호 10비트를 생성하였다. 그림3-6는 정합필터 출력결과로 비트 변화에 따라 정확한 상관값을 출력하고 있다.

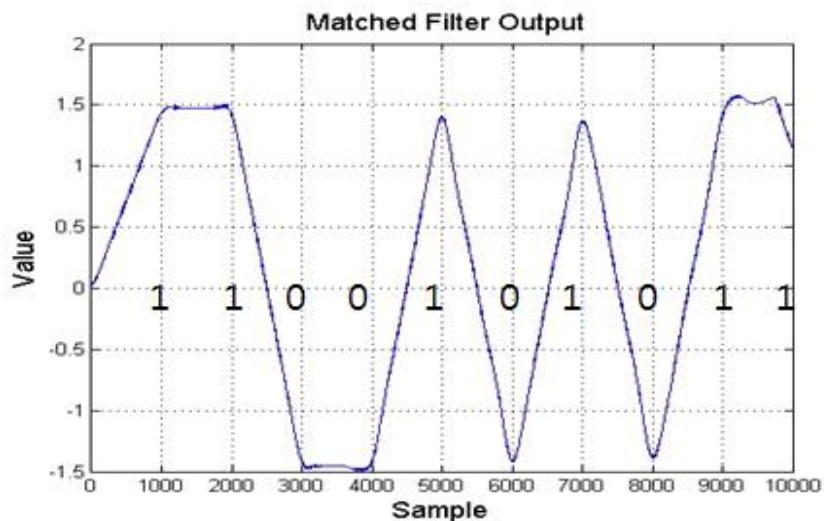


그림 3-6 KZK에 의한 파라메트릭 배열 PSK 변조신호의 정합필터 출력.

3.3 파라메트릭 배열기반 통신 시스템의 전송률 향상기법

3.3.1 파라메트릭 배열기반 QPSK 변복조

이진 변조에서는 비트 단위로 두 종류의 신호 중 하나가 전송되므로 대역폭 효율은 전송률 R_b 를 신호 대역폭 B 로 나눈 값이 된다. 그러나 여러 비트를 모아 한 개의 심볼을 구성하여 심볼 단위로 신호를 전송하면 전송률을 향상시킬 수 있다. 이진 PSK 변조방식은 기저대역 신호를 \cos 또는 \sin 함수를 사용하여 변조한다. 여기서 반송파 \cos 과 직교하는 \sin 반송파를 사용하여 동시에 전송하더라도 수신기에서는 두 기저대역 신호를 분리할 수 있다. 이는 전송률이 R_b 인 이진 PSK 신호를 전송하는데 필요한 대역폭을 가지고 직교 반송파를 사용하는 두 개의 이진 PSK 신호를 전송하여 전송률을 두 배로 증가시키는 방식이다^[38]. 이와 같은 전송기법을 직교 위상천이(QPSK) 변조 방식이라 하며 이를 파라메트릭 배열 신호에 적용할 경우 송신 신호는 식(3.4)와 같이 표현될 수 있다.

$$s_{QPSK}(t) = \begin{cases} s_{00}(t) = A[\cos(2\pi f_1 t + \frac{3\pi}{4}) + \cos(2\pi f_2 t)] & \text{for } (b_P b_Q) = 00 \\ s_{01}(t) = A[\cos(2\pi f_1 t - \frac{3\pi}{4}) + \cos(2\pi f_2 t)] & \text{for } (b_P b_Q) = 01 \\ s_{10}(t) = A[\cos(2\pi f_1 t + \frac{\pi}{4}) + \cos(2\pi f_2 t)] & \text{for } (b_P b_Q) = 10 \\ s_{11}(t) = A[\cos(2\pi f_1 t - \frac{\pi}{4}) + \cos(2\pi f_2 t)] & \text{for } (b_P b_Q) = 11 \end{cases} \quad (3.4)$$

여기서, 1차 주파수 f_1 의 직교 반송파 \cos 과 \sin 함수를 이용하여 전송 심볼을 생성하고 최종적으로 1차 주파수 f_2 와 더해져 송신 신호를 생성한다.

수신된 파라메트릭 배열 성분은 $\cos(2\pi f_d t)$ 와 $\sin(2\pi f_d t)$ 를 사용하여 각각 독립적으로 복조된다. 두 반송파의 직교성에 의하여 수신기의 상관기 출력에 두 이진 PSK 신호는 상호 영향을 미치지 않는다. 파라메트릭 배열 기반 QPSK 복조기는 그림 3-7와 같이 설계된다.

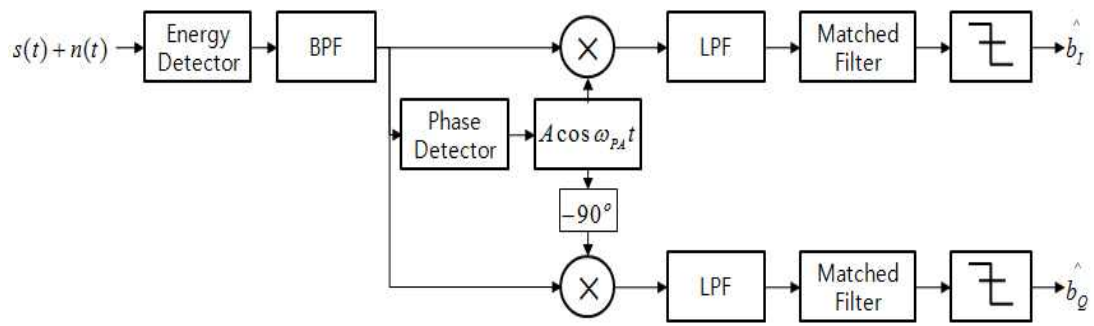


그림 3-7 파라메트릭 배열기반 QPSK 복조기 블록도.

3.3.2 파라메트릭 배열기반 주파수분할 통신 시스템

다중화(Multiplexing)란 동일한 통신 채널을 통해 동시에 여러 신호를 전송하는 방법이다. 다중화 방식으로는 주파수분할 다중화, 시분할 다중화, 코드 분할 다중화 등이 있다. 이중 주파수 분할 다중화(FDM: Frequency Division Multiplexing)는 주파수 대역을 분할하여 여러 신호가 서로 다른 반송파를 사용하여 전송 하는 방식이다. 이를 위해 신호마다 서로 다른 반송파를 사용하여 변조하며, 신호의 스펙트럼이 겹치지 않도록 반송파간 간격을 분할해야 한다.

수신단에서는 통신 채널을 통해 수신된 여러 신호 중에서 원하는 신호의 반송파 주파수를 중심으로 하는 대역통과 필터를 사용하여 신호를 선택한다. 이러한 다중화 기법을 파라메트릭 배열 통신에 적용할 경우 동시에 다수의 사용자에게 정보를 전송하거나 또는 하나의 사용자에게 다중화 반송파 수에 비례하여 전송률을 향상 시킬 수 있다. 다중화 기법을 파라메트릭 배열 통신에 적용하기 위해서는 1차 주파수간 서로의 차 주파수 성분이 서로 중첩되지 않는 조건의 1차 주파수 조합을 선정해야 한다. 따라서 전송 1차 주파수에 따른 배음 특성에 대한 분석이 이루어 져야하고 동시 접속 사용자 수에 비례하여 선택되는 1차 주파수 조합과 각 조합 쌍에 의해 간접적으로 생성되는 파라메트릭 배열 성분의 조합에 대한 분석도 이루어 져야한다.

1차 주파수 N개의 조합에 대하여 생성되는 파라메트릭 배열 성분의 경우의 수는 식(3.5)와 같이 조합(combination)으로 계산된다.

$$PAC = {}_N C_2 = \frac{N P_2}{2!} = \frac{N!}{2!(N-2)!} \quad (3.5)$$

예를 들어 그림 3-8과 같이 1차 주파수 N=3,4,5에 대하여 각각 3가지, 6가지, 그리고 10가지의 파라메트릭 배열 성분 조합이 가능하다.

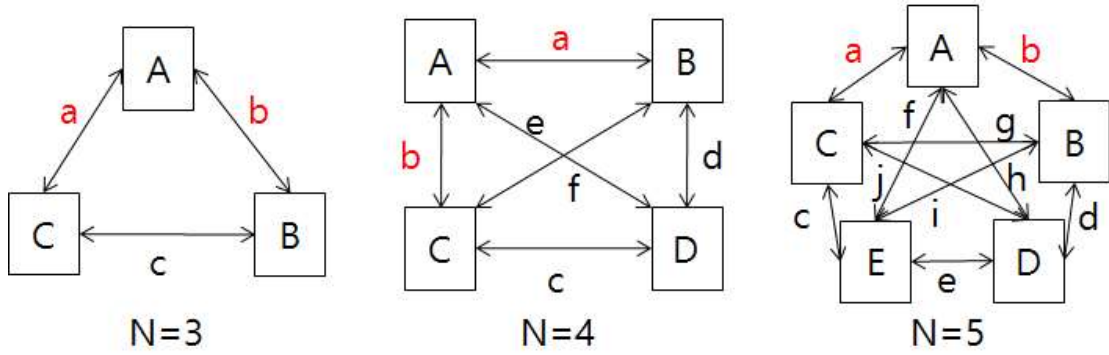


그림 3-8 1 차 주파수 N에 대한 파라메트릭 배열 성분의 경우의 수 예.

여기서 최대 다중 접속 사용자 수는 1차 주파수 N개에 대하여 공통된 반송파 주파수 1을 제외하여 N-1의 주파수에 데이터를 변조하여 전송할 수 있다. 따라서 정보를 갖는 N-1개의 차 주파수와 $PA_C - (N-1)$ 개의 무의미한 더미 차 주파수를 생성하게 된다. 즉 N이 3인 경우 최대 다중 접속 사용자 수는 2가 되고 1개의 더미 차 주파수 성분이 생성되고 N이 4인 경우 최대 다중 접속 사용자 수는 3 그리고 3개의 더미 차 주파수를 생성한다. 이와 같은 환경에서 각 다중 접속 사용자가 최대의 통신 성능을 획득하기 위해서는 더미 주파수 성분이 데이터 전송에 사용되는 파라메트릭 배열 성분과 중첩되지 않게 전송하는 것이 중요하다.

1차 주파수 선택에 따라 생성되는 배열은 Bi-frequency 신호에 대하여 비선형성을 고려한 배열해석 기법인 Fenlon Solution을 조합 쌍으로 대입하여 계산할 수 있다. 식(3.6)은 Fenlon Equation^[7]을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 p(\sigma, r) = & p_0 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2}{ln_a \sigma} J_l(ln_a P_a \sigma) J_0(ln_a P_b \sigma) \sin l \omega_a \tau & (3.6) \\
 & + p_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{m n_b \sigma} J_0(m n_b P_a \sigma) J_m(m n_b P_b \sigma) \sin m \omega_b \tau \\
 & + p_0 \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{N_{bm}^+ \sigma} J_l(N_{bm}^+ P_a \sigma) J_m(N_{bm}^+ P_b \sigma) \sin N_{bm}^+ \omega \tau \\
 & + p_0 \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{2}{N_{bm}^- \sigma} J_l(N_{bm}^- P_a \sigma) J_m(N_{bm}^- P_b \sigma) \sin N_{bm}^- \omega \tau
 \end{aligned}$$

여기서, 식(3.6)의 첫 번째 항은 1차 각주파수 w_a 의 배음 성분, 두 번째 항은 1차 각주파수 w_b 의 배음 성분, 세 번째 항은 합 주파수의 배음 성분, 그리고 마지막 항은 차 주파수의 배음 성분을 나타낸다. 또한 기본 각주파수 w 에 대하여 1차 각주파수는 각각 $w_a = n_a w$ 와 $w_b = n_b w$ 로 표현될 수 있다.

다중 접속 사용자 2를 가정할 때 그림 3-9와 같은 주파수 조합을 생성할 수 있다. 여기서 데이터는 1차 주파수 F1과 F2로 변조하여 1차 주파수 Fc와 합해져 PA1과 PA2의 파라메트릭 배열 성분을 생성하고 추가적인 더미 주파수 PA3을 생성한다.

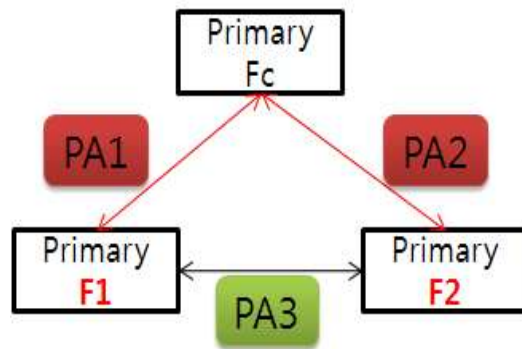


그림 3-9 다중 접속 사용자 2를 가정한 파라메트릭 배열 성분(N=3).

다중 접속 사용자 2에 대한 신호의 복조는 각각의 파라메트릭 배열 성분을 중심으로 하는 대역통과 필터를 사용하여 복조기를 구성하며 다중 접속기법의 복조기 블록도는 그림 3-10과 같다.

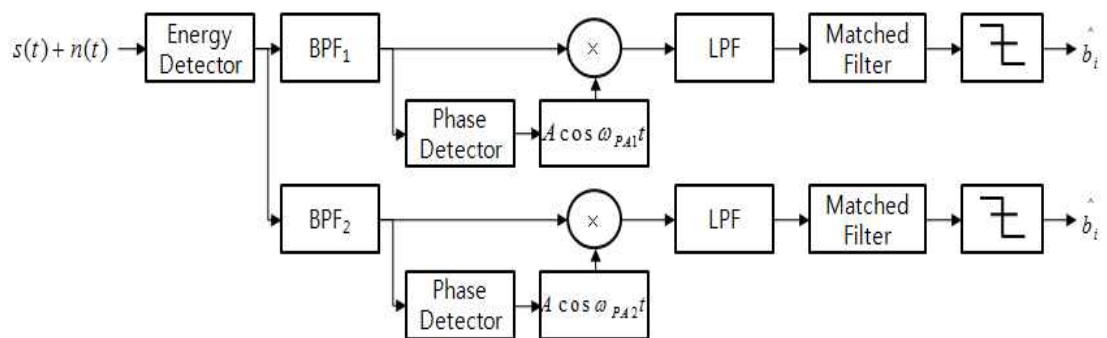


그림 3-10 파라메트릭 배열기반 다중 접속 기법의 복조기 블록도.

(다중 접속 사용자 2)

3.4 수조 실험 및 결과

파라메트릭 배열 기반 수중통신 시스템의 성능을 검증하기 위해 진해 국방과 학연구소의 수조에서 실험을 수행하였다. 수조실험은 파라메트릭 배열의 PSK 변조 방식과 전송률 향상을 위한 QPSK 변조 방식 그리고 주파수분할 방식에 대하여 수행하였다. 그림 3-11는 통신 실험 환경을 나타낸다.

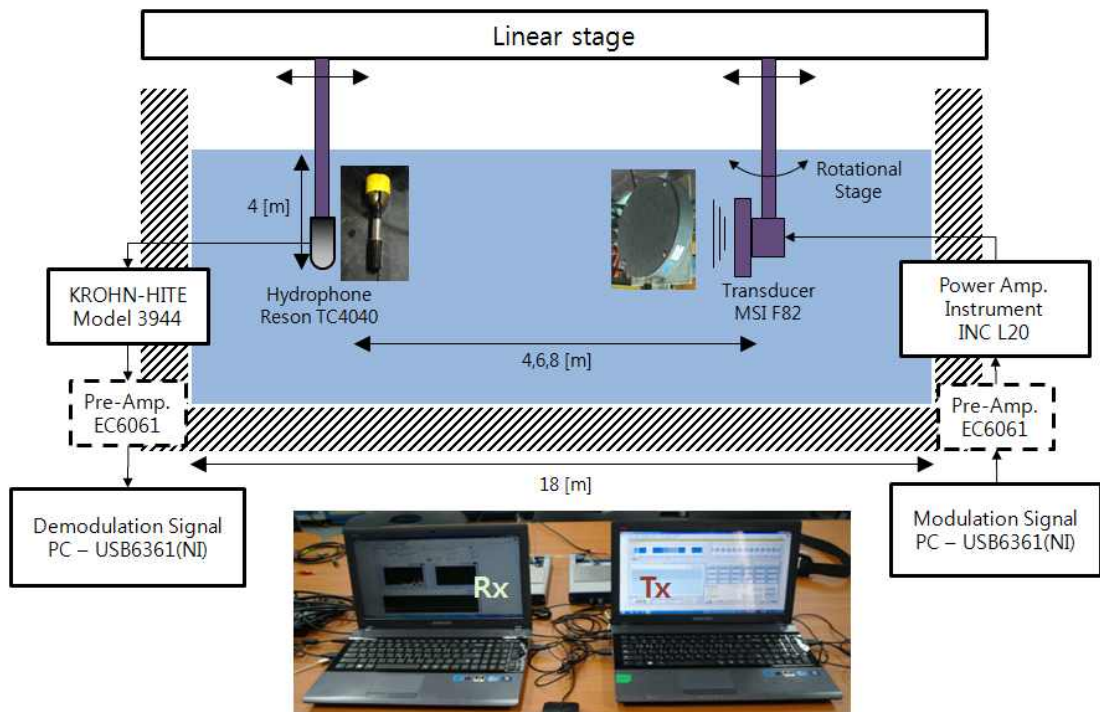


그림 3-11 파라메트릭 배열기반 디지털 수중 통신 수조실험 환경.

통신 프로그램에서 생성된 파라메트릭 배열 변조 신호는 디지털 아날로그 컨버터(USB-6361, NI, USA)를 거쳐 전치 증폭기(EC6061, Reson)를 통해 전력 증폭기와 디지털 아날로그 컨버터와의 임피던스 정합을 한 후 전력 증폭기(L20, Instrument INC)에 전달된다. 전력 증폭기는 트랜스듀서(F82, MSI)에서 파라메트릭 배열 현상이 발생될 수 있도록 전력을 증폭하여 트랜스듀서에 전달한다. 최종적으로 파라메트릭 배열 변조신호는 트랜스듀서를 통해 방사된다. 수신부의 하이드로폰(TC4040, Reson)에서 신호를 수신하여 전치증폭기(EC6061, Reson)를 통해

신호를 증폭한 후 아날로그 디지털 컨버터(USB-6361,NI, USA)거쳐 통신 프로그램에서 데이터를 복조한다.

3.4.1 PSK기반 통신 시스템의 실험결과

파라메트릭 배열 기반 이진 PSK 변조 방식을 이용하여 각도와 전송률 변화에 따른 BER을 계산하여 성능 평가 실험을 수행하였다. 실험 환경변수는 다음과 같다.

- PSK 변조
 - 1차 주파수: $f_1(110\text{kHz})$, $f_2(130\text{kHz})$
 - 파라메트릭 배열 주파수: 20kHz
- 실험 변수
 - 샘플링 주기: 1MHz
 - 트랜스듀서 인가전압: 309Vpp , 인가전류: 22.7App

수심 4m, 송수신 거리 9m에서 전송률 1kbps로 고정한 후 각도 변화에 따라 1,000bit씩 100회 전송하여 PSK의 BER을 계산하였다. 그림 3-12은 정합필터 출력을 나타낸다. 여기서, 전송 비트에 대하여 '0'값을 기준으로 +와-의 상관값을 갖는다.

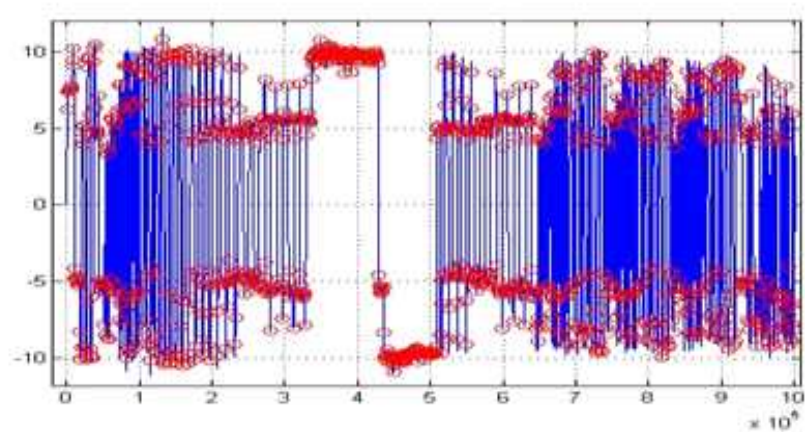


그림 3-12 파라메트릭 배열기반 이진 PSK신호의 정합필터 출력.

그림3-13는 수신된 1000bit에 대한 산란도를 나타낸다. 문턱값 ‘0’을 기준으로 100% 복조되는 결과를 보인다.

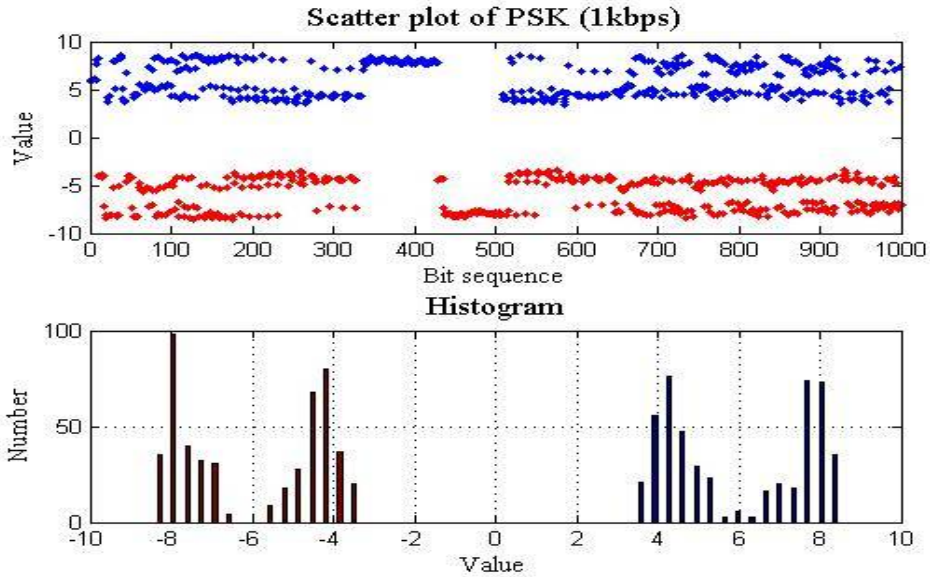


그림 3-13 파라메트릭 배열기반 이진 PSK 복조 결과

그림 3-14는 각도에 따른 BER 계산결과로 6° 까지 100% 복조되는 결과를 보이고 8° 이내에서 10^{-3} 이하의 BER 성능을 보인다.

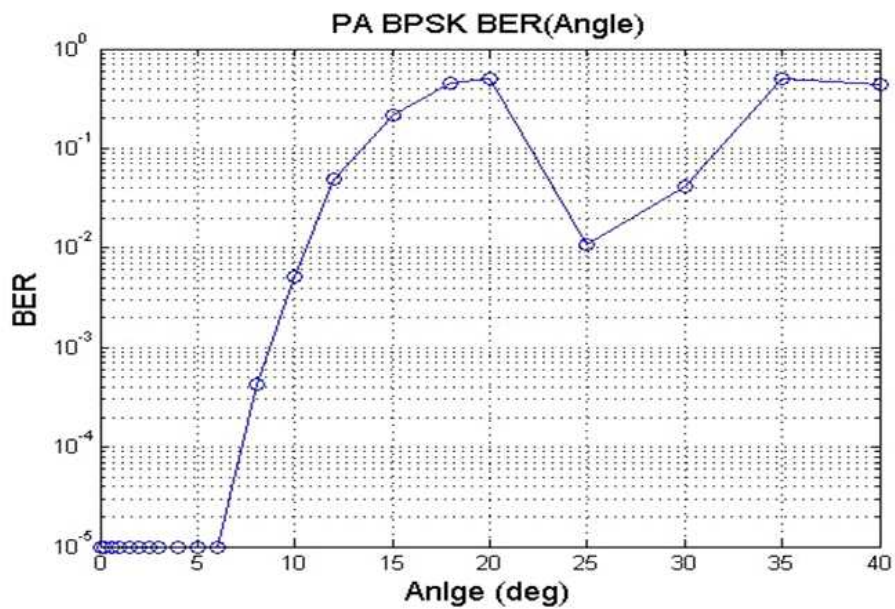
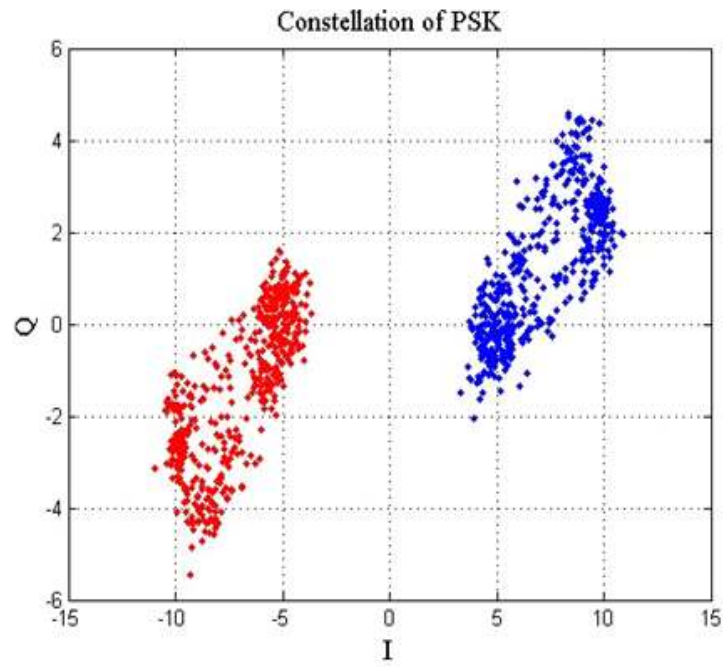
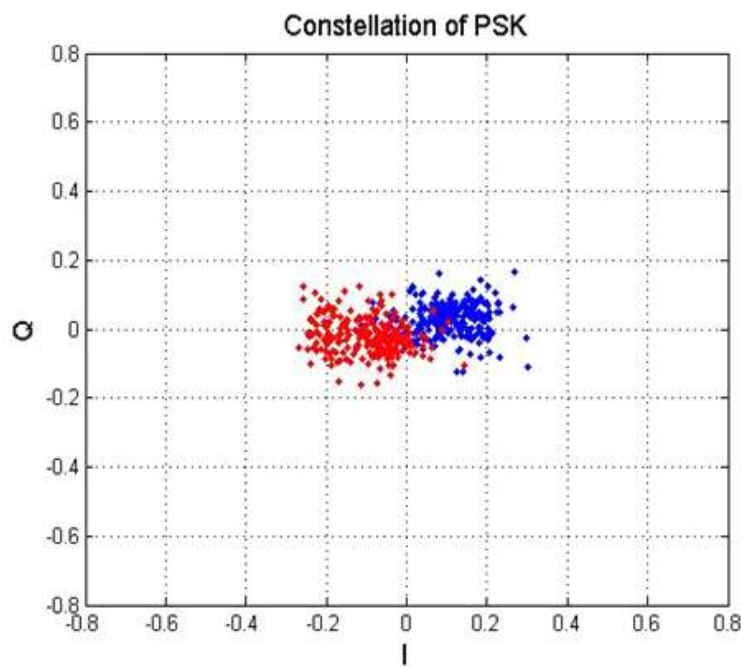


그림 3-14 각도에 따른 BER 계산결과.



(a)



(b)

그림 3-15 각도에 따른 신호성상도 (a) 수신각도: 0° , (b) 수신각도: 10°

수심 4m, 송수신 거리 9m에서 전송률을 2kbps, 5kbps로 변화하여 1,000bit씩 5회 전송하였다. 그림 3-16과 3-17은 전송률 2kbps와 5kbps의 수신신호의 산란도를 보이며 5kbps까지 100% 수신된 결과를 보인다.

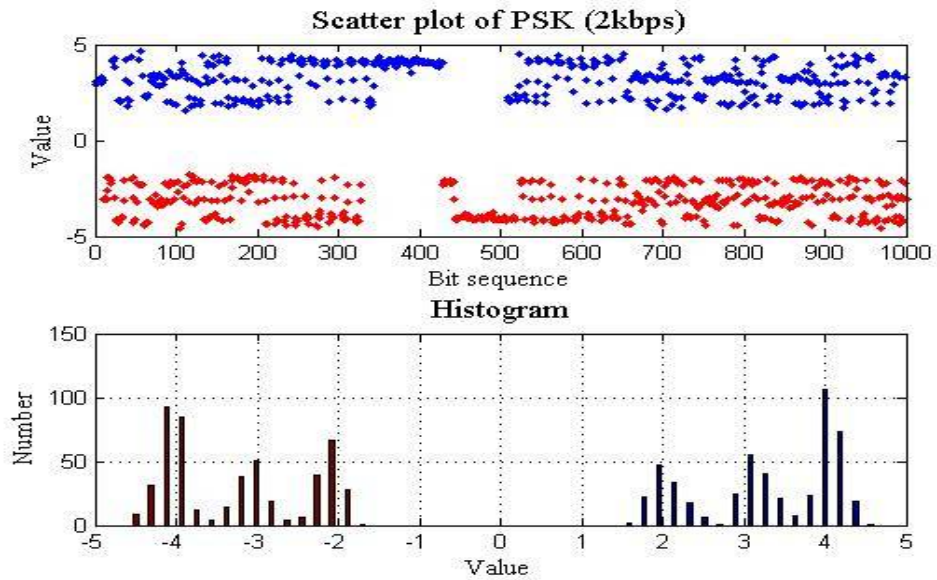


그림 3-16 파라메트릭 배열기반 이진 PSK 복조 결과(2kbps)

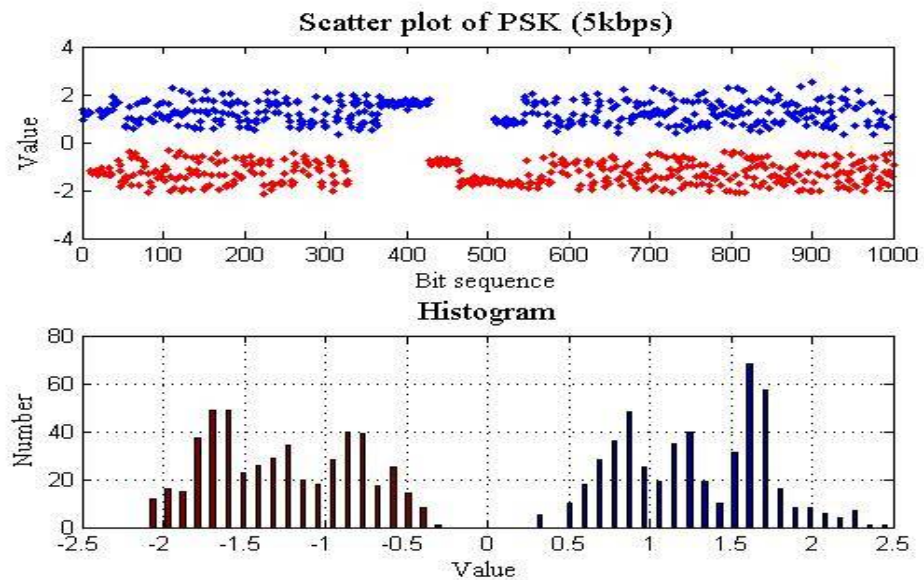
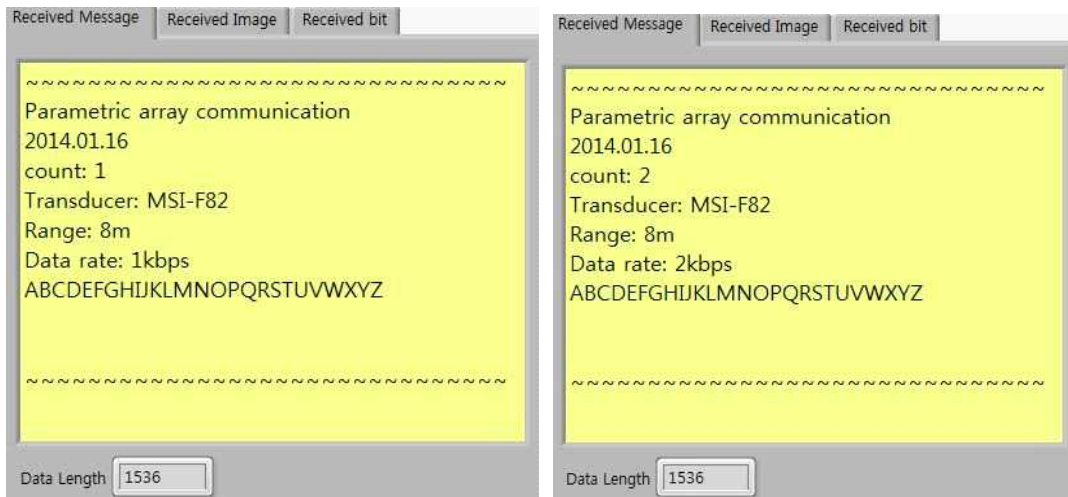


그림 3-17 파라메트릭 배열기반 이진 PSK 복조 결과(5kbps)

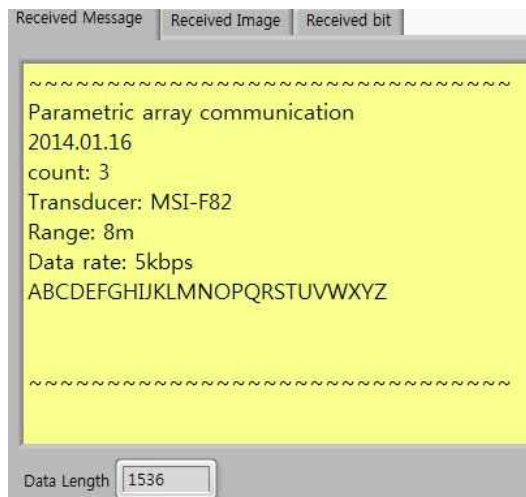
수심 4m, 송수신 거리 8m에서 전송률을 1kbps, 2kbps, 5kbps로 변화하여 1,536bit의 문자열을 3회 전송하였다. 문자열 수신결과 1kbps와 2kbps에서는 오류 없이 100% 수신하였으며 5kbps에서는 전체 4608bit중 1bit에서 오류관정을 보였다.

그림 3-18은 수신 GUI 화면 중 전송률에 따른 문자열 수신결과를 보인다.



(a)

(b)



(c)

그림 3-18 파라메트릭 배열기반 이진 PSK의 전송률에 따른 문자열 수신결과
(a) 전송률: 1kbps, (b) 전송률: 2kbps, (c) 전송률: 5kbps

다음은 수심 4m, 송수신 거리 8m에서 전송률 2kbps와 5kbps에 대한 이미지 전송결과를 보인다. 전송 이미지는 4bit gray scale의 256 x 256 pixel의 'cameraman' 사진을 사용하였다. 이미지 수신결과 2kbps에서는 오류 없이 100% 수신하였으며 5kbps에서는 전체 262,144bit중 11bit에서 오류판정을 보였다.

그림 3-19은 전송 이미지 및 전송률에 따른 수신 결과를 보인다.

Transmission Image



(a)

Received Image(2kbps)



(b)

Received Image(5kbps)



(c)

그림 3-19 파라메트릭 배열기반 이진 PSK의 전송률에 따른 이미지 수신결과

(a) 전송 이미지, (b) 전송률: 2kbps, (c) 전송률: 5kbps

3.4.2 QPSK기반 통신 시스템의 실험결과

전송률 향상을 위한 파라메트릭 배열 기반 QPSK 통신 기법에 대한 검증 실험을 위해 수심 4m, 송수신 거리 8m에서 심볼율을 1ksps, 2ksps, 5ksps로 변화하여 각각 2kbps, 4kbps, 10kbps의 전송률에 대한 통신 실험을 수행하였다. 각 전송률에 대하여 1000bit의 비트열을 5회 반복 송수신하였다. 실험 환경변수는 다음과 같다

- QPSK 변조
 - 1차 주파수: $f_1(110\text{kHz})$, $f_2(130\text{kHz})$
 - 파라메트릭 배열 주파수: 20kHz
- 실험 변수
 - 샘플링 주기: 1MHz
 - 트랜스듀서 인가전압: 309Vpp, 인가전류: 22.7App

그림 3-20은 전송률 2kbps의 파라메트릭 배열 QPSK 수신 신호에 대하여 20kHz의 cos과 sin함수에 대한 정합필터 수신 결과를 보인다. 각 정합필터 수신기에서 '0'을 기준값으로 전송비트에 대하여 +와-의 상관값을 보인다.

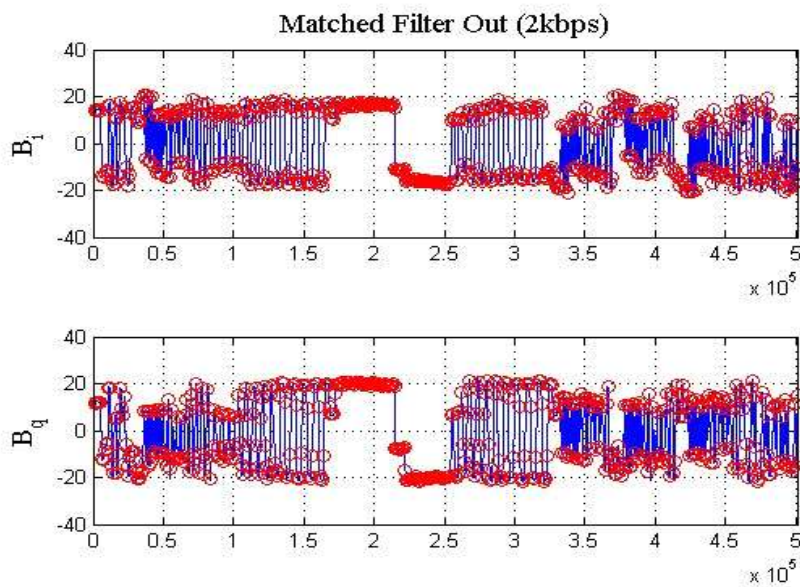


그림 3-20 파라메트릭 배열기반 QPSK 신호의 정합필터 출력(2kbps).

그림 3-21에서 3-23은 각각 전송률 2kbps, 4kbps, 10kbps에 대한 파라메트릭 배열 QPSK 수신신호의 신호 성상도를 보이며 4개의 심볼을 확인할 수 있다.

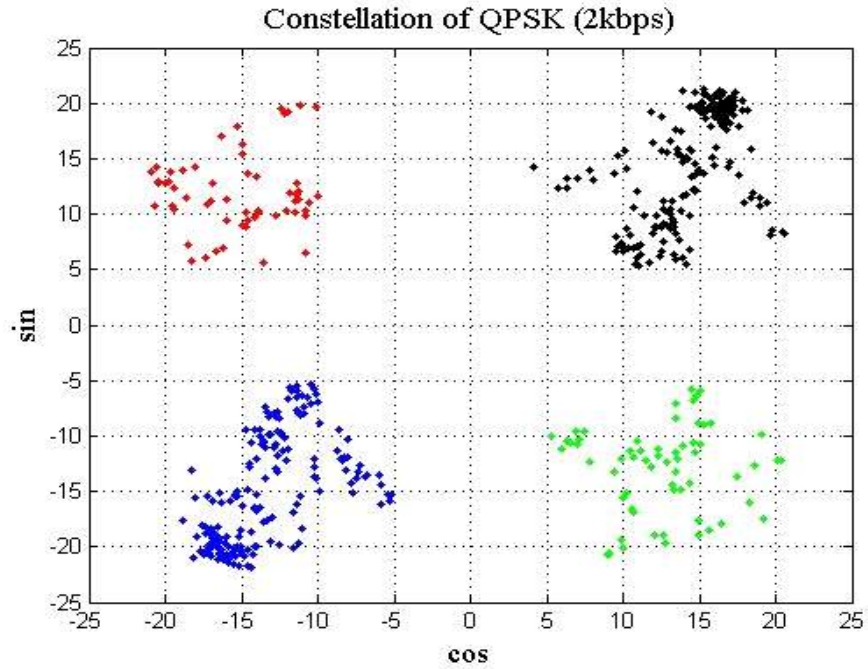


그림 3-21 파라메트릭 배열기반 QPSK 신호의 신호성상도(2kbps).

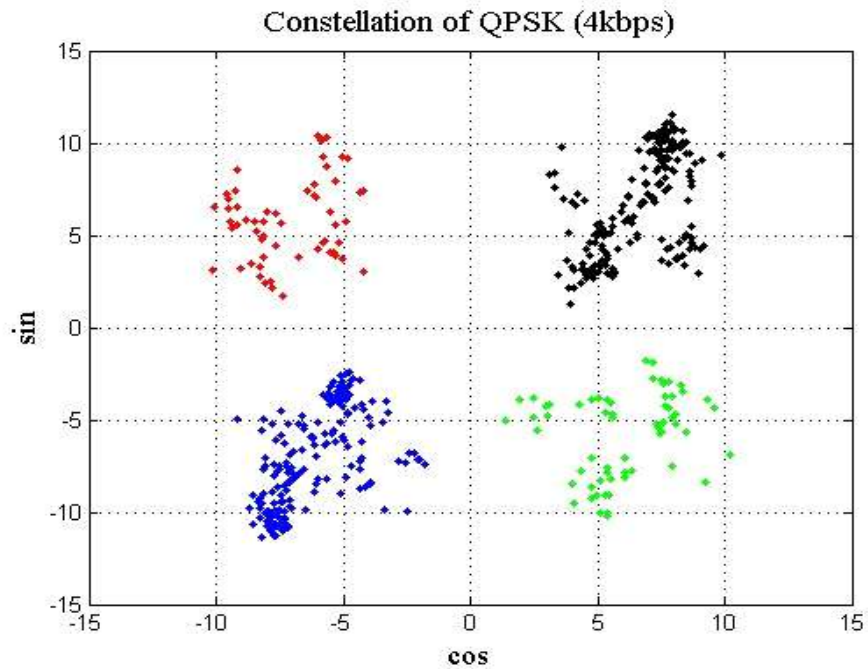


그림 3-22 파라메트릭 배열기반 QPSK 신호의 신호성상도(4kbps).

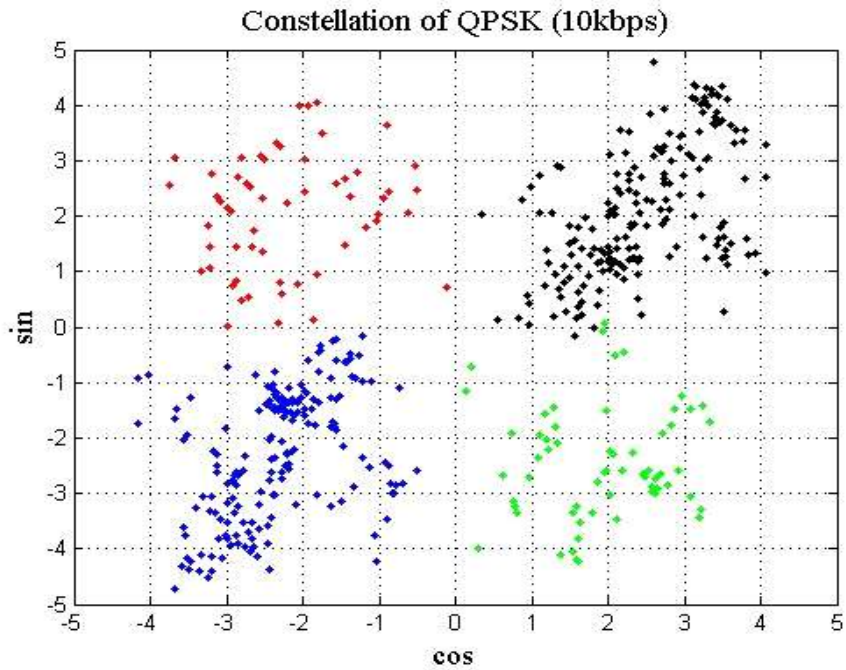


그림 3-23 파라메트릭 배열기반 QPSK 신호의 신호성상도(10kbps).

신호 성상도의 퍼짐은 수조 실험 환경에서 수조 벽면에 반사된 신호에 의한 다중경로 영향으로 크기와 위상이 왜곡된 결과를 보이며 향후 채널추정을 통해 극복될 수 있다. 파라메트릭 배열 기반 QPSK 변조 방식에 대한 수신 결과 전송률 2kbps와 4kbps에서는 전체 5000bit를 오류판정 없이 100% 수신하였으며 10kbps에서는 22bit에서 오류판정을 보였다. 일반적인 디지털 통신결과와 같이 이진 PSK기법 대비 동일한 전송대역폭 환경에서 2배의 전송률 이득을 확인하였다.

표 3-1 파라메트릭 배열기반 QPSK 수신 결과

전송률	전송비트(bit)	오류비트(bit)	BER
2kbps	5000	0	0
4kbps	5000	0	0
10kbps	5000	22	2.2×10^{-3}

3.4.3 주파수분할 통신 시스템의 실험결과

다중 사용자 환경에 대한 주파수 분할 통신 기법의 성능 검증을 위해 다중 사용자 2명을 가정하여 N=3인 환경에서 1차 주파수 조합에 따라 발생하는 파라메트릭 배열성분이 중첩되는 경우와 중첩되지 않는 경우의 환경을 설정하여 통신 실험을 수행하였다. 여기서, 1차 주파수(f_c, f_1, f_2)의 조합으로 생성되는 파라메트릭 배열 성분 중 각 사용자의 정보를 갖는 PA1($|f_c - f_1|$), PA2($|f_c - f_2|$) 주파수 성분과 더미 주파수 PA3($|f_1 - f_2|$)가 중첩되는 경우와 중첩되지 않는 경우의 1차 주파수를 선택하였다. 또한 중첩되지 않는 환경에서 전송률 1kbps, 2kbps, 5kbps의 변화에 따른 통신 실험도 함께 수행하였다. 성능비교 및 전송률 분석 실험은 PSK 변조실험과 동일한 수조환경에서 수심 4m, 송수신 거리 8m에 송수신 센서를 위치시킨 후 각 환경에서 1000bit의 비트열을 5회 반복 전송하였다. 실험 환경 변수는 다음과 같다

- 파라메트릭 배열 성분이 중첩되는 환경
 - 1차 주파수: $f_c(100\text{kHz}), f_1(120\text{kHz}), f_2(110\text{kHz})$
 - 파라메트릭 배열 주파수: PA1(20kHz), PA2(10kHz), PA3(10kHz)
- 파라메트릭 배열 성분이 중첩되는 않는 환경
 - 1차 주파수: $f_c(100\text{kHz}), f_1(120\text{kHz}), f_2(130\text{kHz})$
 - 파라메트릭 배열 주파수: PA1(20kHz), PA2(30kHz), PA3(10kHz)
- 파라메트릭 배열 성분이 중첩되는 않는 환경에서의 전송률 변화 실험
 - 1차 주파수: $f_c(105\text{kHz}), f_1(120\text{kHz}), f_2(130\text{kHz})$
 - 파라메트릭 배열 주파수: PA1(15kHz), PA2(25kHz), PA3(10kHz)
- 실험 변수
 - 샘플링 주기: 1MHz
 - 트랜스듀서 인가전압: 309Vpp, 인가전류: 22.7App

가) 파라메트릭 배열 성분이 중첩되는 환경

파라메트릭 배열 성분이 중첩되는 환경을 설정하기 위해 1차 주파수의 공통된 반송파 주파수는 $100\text{kHz}(f_c)$ 를 사용하고 다중 사용자 1과 2의 정보는 각각 $120\text{kHz}(f_1)$ 와 $110\text{kHz}(f_2)$ 를 반송파로 하여 이진 PSK 변조하였다. 이 경우 정보를 갖는 파라메트릭 배열 주파수 PA1과 PA2는 각각 20kHz 와 10kHz 가 되고 사용자 1과 2의 정보가 합성된 10kHz 의 더미 주파수 PA3가 생성되어 사용자 2의 데이터 정보와 사용자 1과 2의 정보가 합성된 성분이 서로 간섭을 일으키게 된다. 그림 3-24는 중첩되는 환경에서의 수신 신호의 스펙트럼으로 PA2와 PA3가 중첩된 결과를 확인할 수 있다. 각 사용자의 파라메트릭 배열 성분은 대역통과필터를 이용하여 주파수 성분을 추출한 후 복조된다.

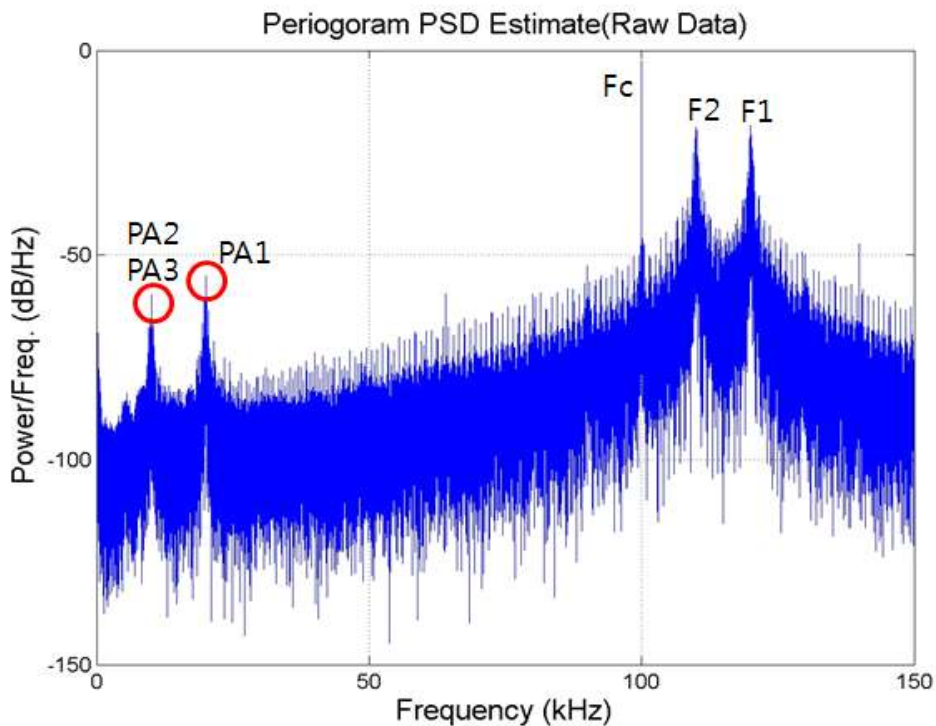
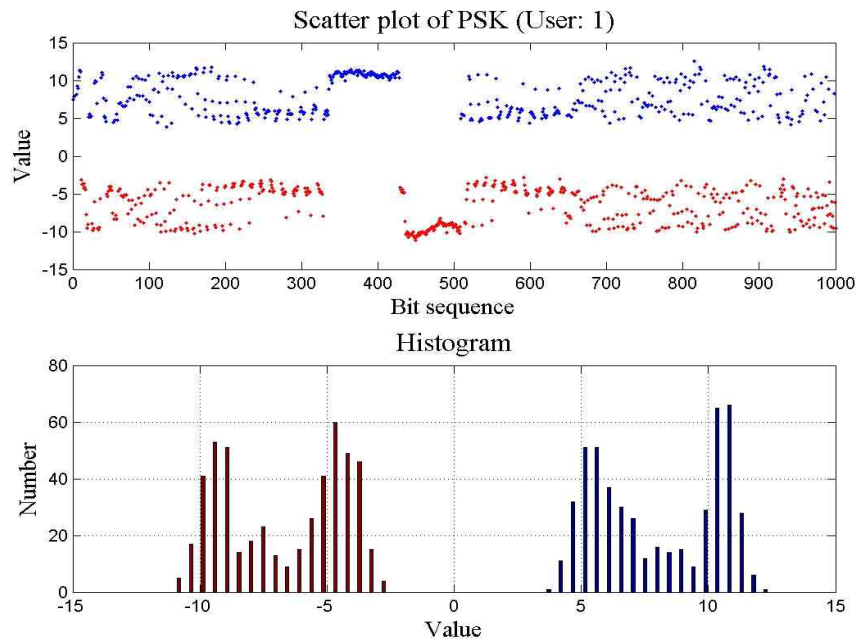
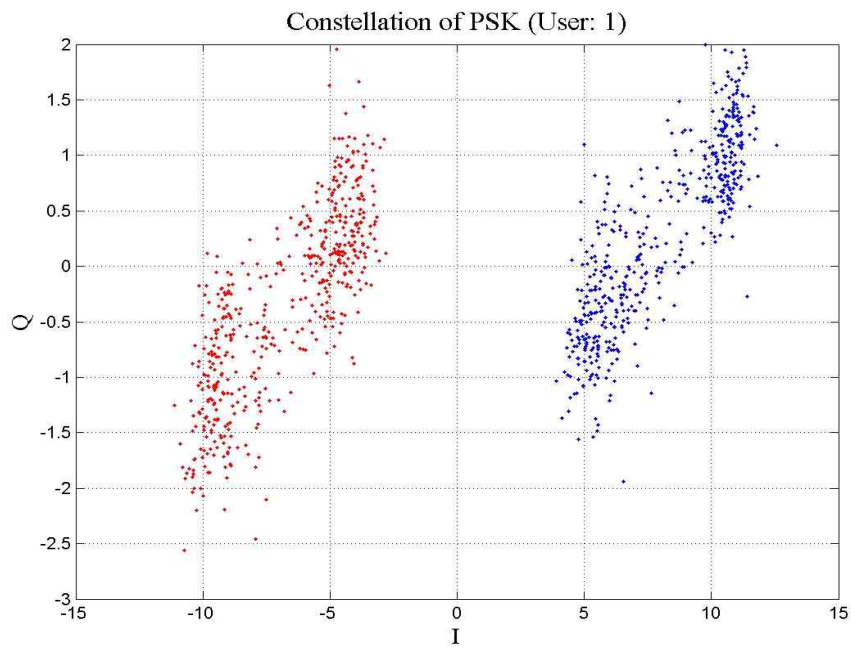


그림 3-24 파라메트릭 배열 성분이 중첩된 신호의 스펙트럼

그림 3-25는 PA1(20kHz)를 반송파로 사용하는 사용자 1의 복조결과를 보인다.



(a)

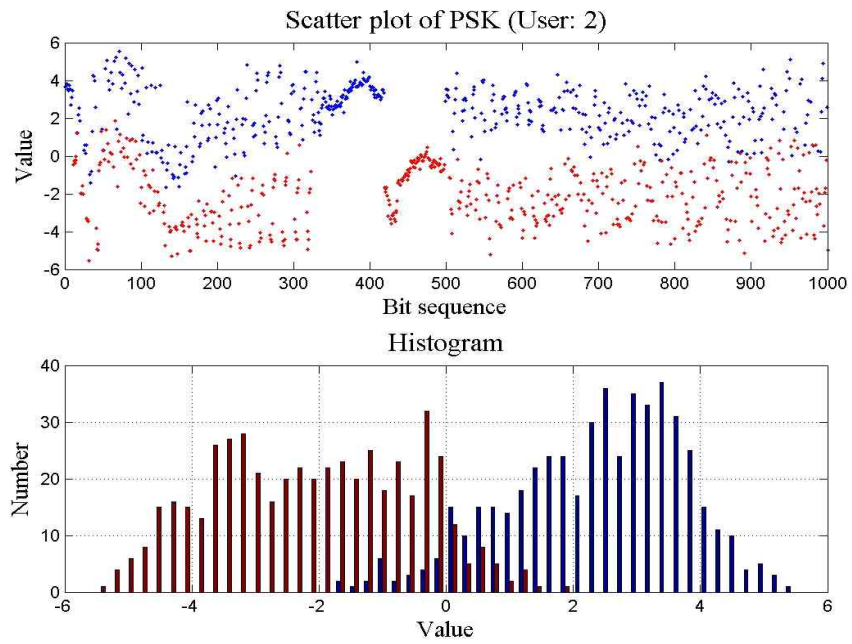


(b)

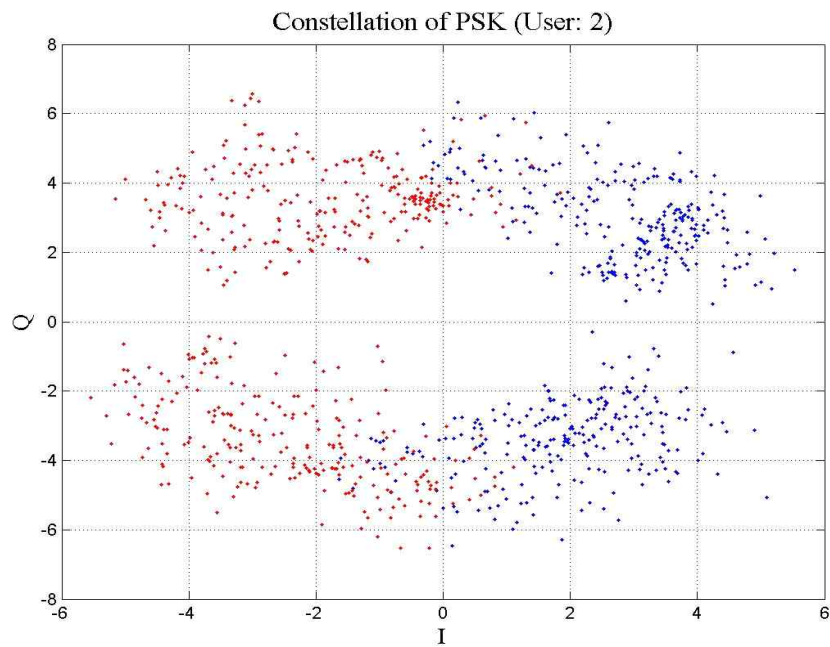
그림 3-25 반송파 중첩 환경에서의 주파수반할 통신의 복조 (사용자의 1),

(a) 20kHz 반송파의 수신신호 산란도, (b) 신호성상도.

그림 3-26는 PA2(10kHz)를 반송파로 사용하는 사용자 2의 복조결과를 보인다.



(a)



(b)

그림 3-26 반송파 중첩 환경에서의 주파수반할 통신의 복조 (사용자의 2),

(a) 10kHz 반송파의 수신신호 산란도, (b) 신호성상도.

수신 신호 복조 결과 PA1(20kHz)를 반송파로 사용하는 사용자 1는 전체 5000bit중 오류 없이 100% 수신하였지만 PA2(10kHz)를 반송파로 사용하는 사용자 2는 411bit(BER:8.2x10⁻²)에서 오류 판정하였다.

나) 파라메트릭 배열 성분이 중첩되지 않는 환경

파라메트릭 배열 성분이 중첩되는 않는 환경을 설정하기 위해 1차 주파수의 공통된 반송파 주파수는 100kHz(f_c)를 사용하고 다중 사용자 1과 2의 정보는 각각 120kHz(f_1)와 130kHz(f_2)를 반송파로 하여 이진 PSK 변조하였다. 이 경우 정보를 갖는 파라메트릭 배열 주파수 PA1과 PA2는 각각 20kHz와 30kHz가 되고 사용자 1과2의 정보가 합성된 10kHz의 더미 주파수 PA3가 생성되어 사용자 1과 사용자2의 정보가 서로 간섭을 일으키지 않는다. 그림 3-27는 수신 신호의 스펙트럼으로 PA1, PA2와 PA3이 중첩되지 않는 결과를 확인할 수 있다.

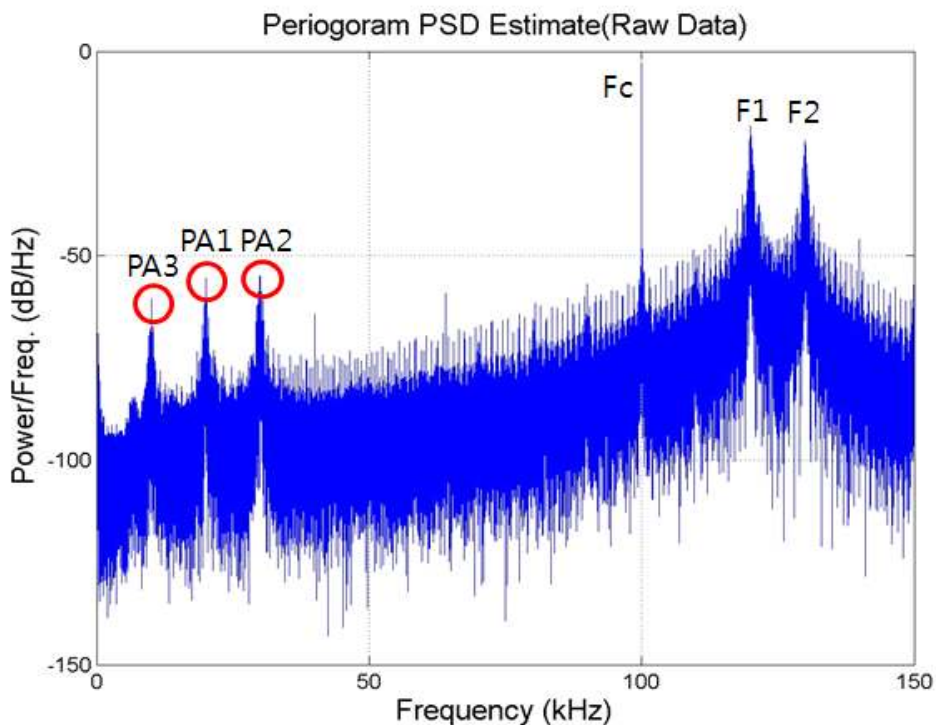
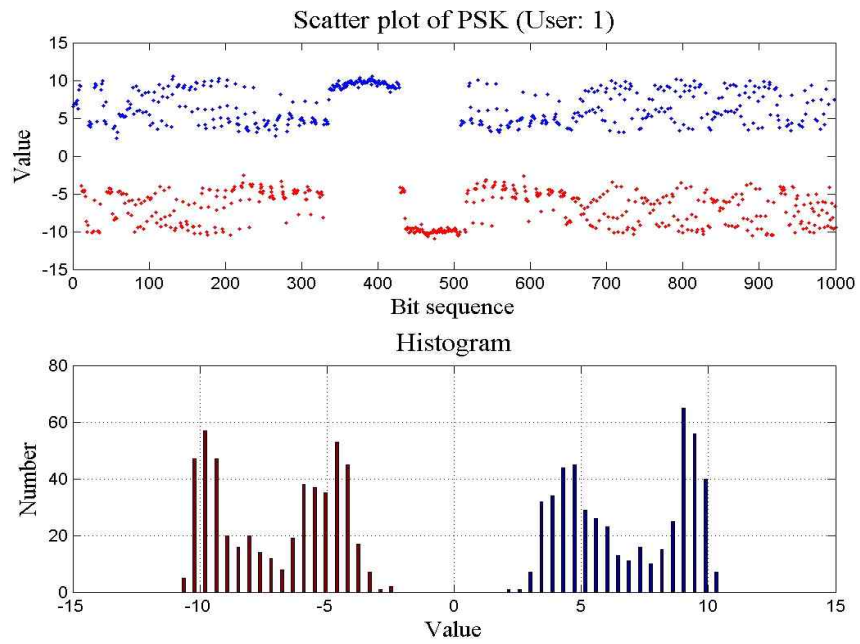
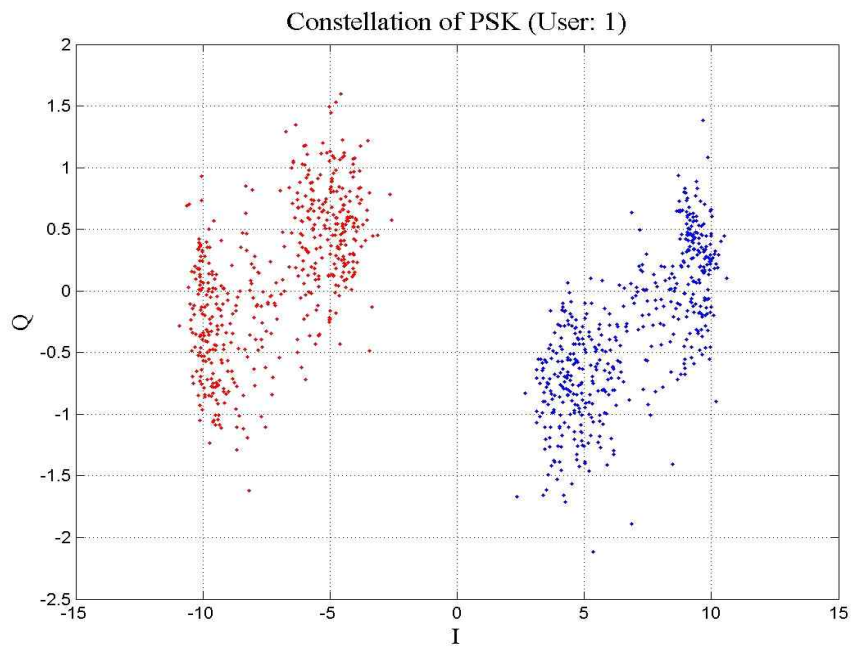


그림 3-27 파라메트릭 배열 성분이 중첩되지 않는 신호의 스펙트럼

그림 3-28는 PA1(20kHz)를 반송파로 사용하는 사용자 1의 복조결과를 보인다.



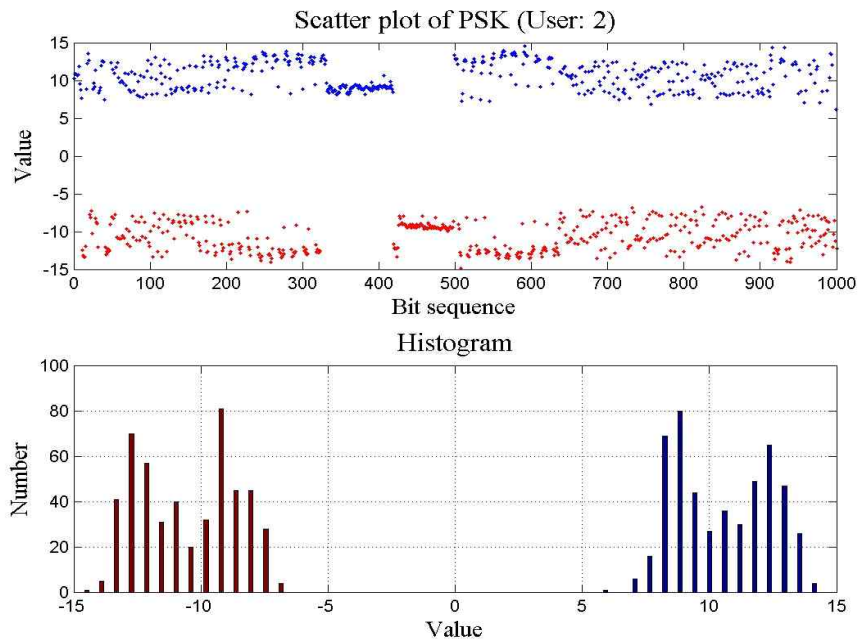
(a)



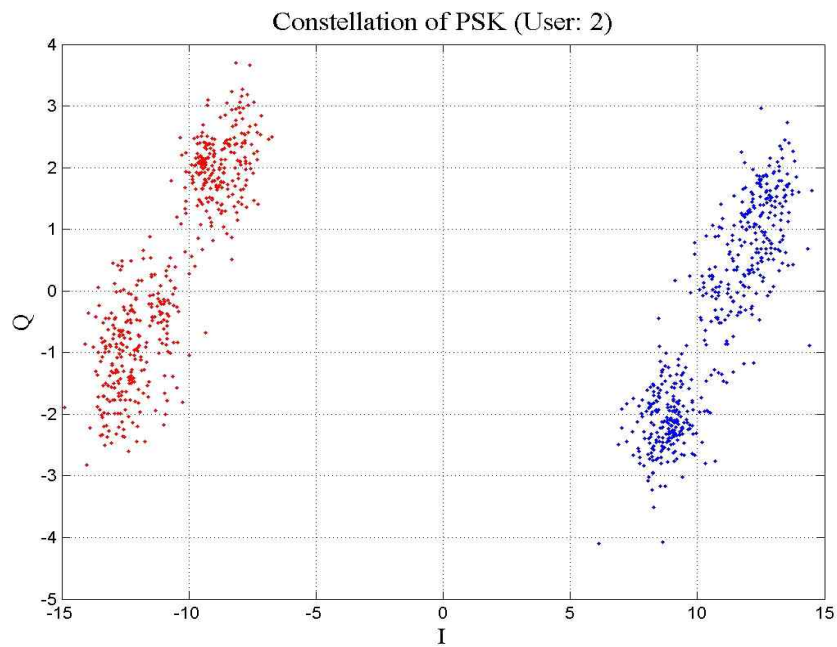
(b)

그림 3-28 반송파 중첩되지 않는 환경에서의 주파수반할 통신의 복조 (사용자의 1), (a) 20kHz 반송파의 수신신호 산란도, (b) 신호성상도.

그림 3-29는 PA2(30kHz)를 반송파로 사용하는 사용자 1의 복조결과를 보인다.



(a)



(b)

그림 3-29 반송파 중첩되지 않는 환경에서의 주파수반할 통신의 복조 (사용자의 2), (a) 30kHz 반송파의 수신신호 산란도, (b) 신호성상도.

수신 신호 복조 결과 사용자 1과 사용자 2에서 각각 전체 5000bit중 오류 없이 100% 수신하였다.

다) 전송률에 따른 주파수분할 변조방식 실험결과

파라메트릭 배열 기반 주파수분할 변조방식의 전송률 변화 실험을 위해 1차 주파수의 공통된 반송파 주파수는 105kHz(f_c)를 사용하고 다중 사용자 1과 2의 정보는 각각 120kHz(f_1)와 130kHz(f_2)를 반송파로 하여 이진 PSK 변조하였다. 이 경우 정보를 갖는 파라메트릭 배열 주파수 PA1과 PA2는 각각 15kHz와 25kHz가 되고 사용자 1과 2의 정보가 합성된 10kHz의 더미 주파수 PA3가 생성된다. 수신 결과 전송률 1kbps와 2kbps에서는 오류 없이 100% 수신하였으며 5kbps에서는 전체 5000bit중 사용자1은 32bit 그리고 사용자2는 10bit에서 오류관정을 보였다. 표 3-2와 표3-3는 각각 사용자1과 2의 전송률에 따른 복조결과를 보인다.

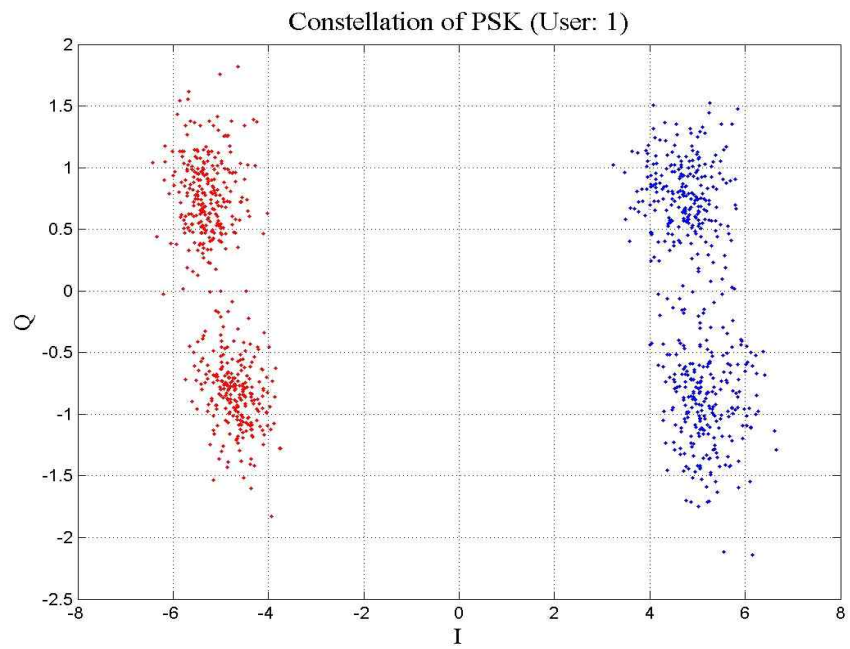
표 3-2 파라메트릭 배열기반 주파수분할 변조방식의 수신 결과(사용자1)

전송률	전송비트(bit)	오류비트(bit)	BER
1kbps	5000	0	0
2kbps	5000	0	0
5kbps	5000	32	6.4×10^{-3}

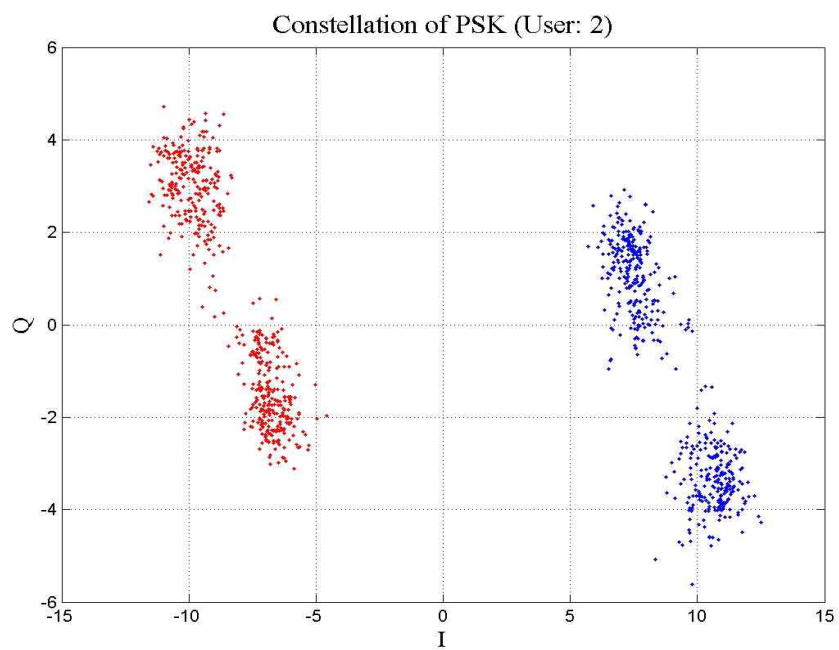
표 3-3 파라메트릭 배열기반 주파수분할 변조방식의 수신 결과(사용자2)

전송률	전송비트(bit)	오류비트(bit)	BER
1kbps	5000	0	0
2kbps	5000	0	0
5kbps	5000	10	2.0×10^{-3}

그림 3-30는 전송률 1kbps에서의 사용자 1과 2의 신호 성상도를 보인다.



(a)

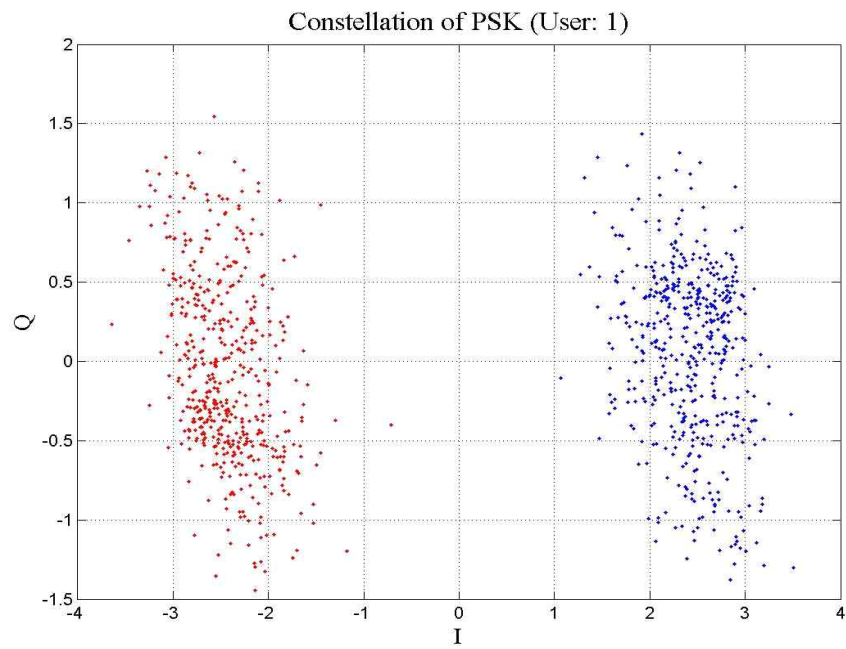


(b)

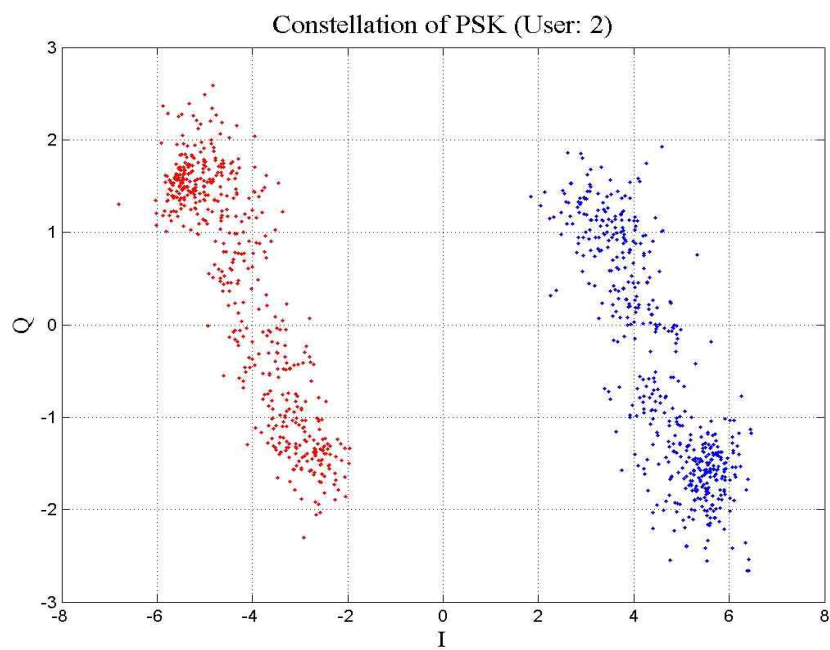
그림 3-30 주파수반할 통신의 신호 성상도(1kbps),

(a) 사용자 1, (b) 사용자 2.

그림 3-31는 전송률 2kbps에서의 사용자 1과 2의 신호 성상도를 보인다.



(a)

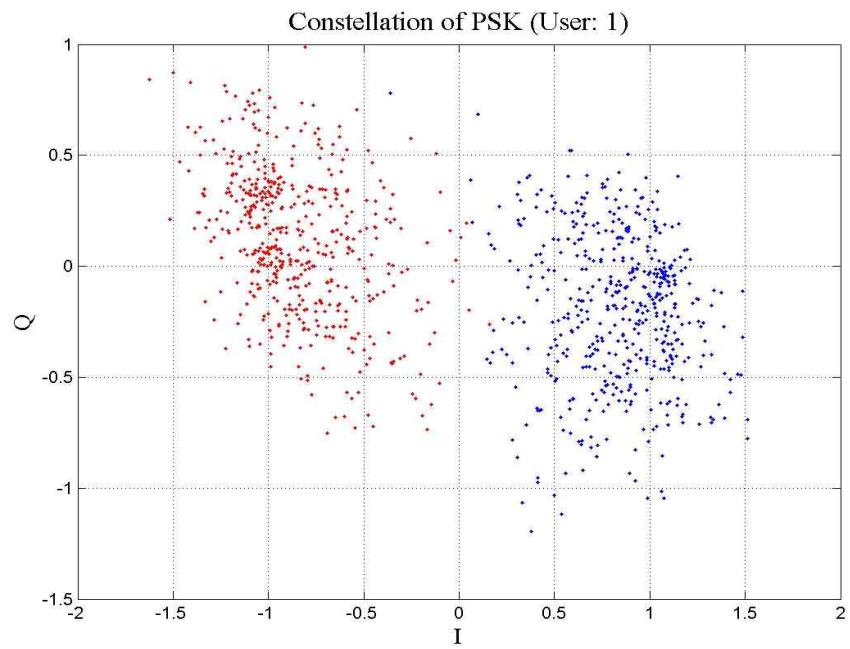


(b)

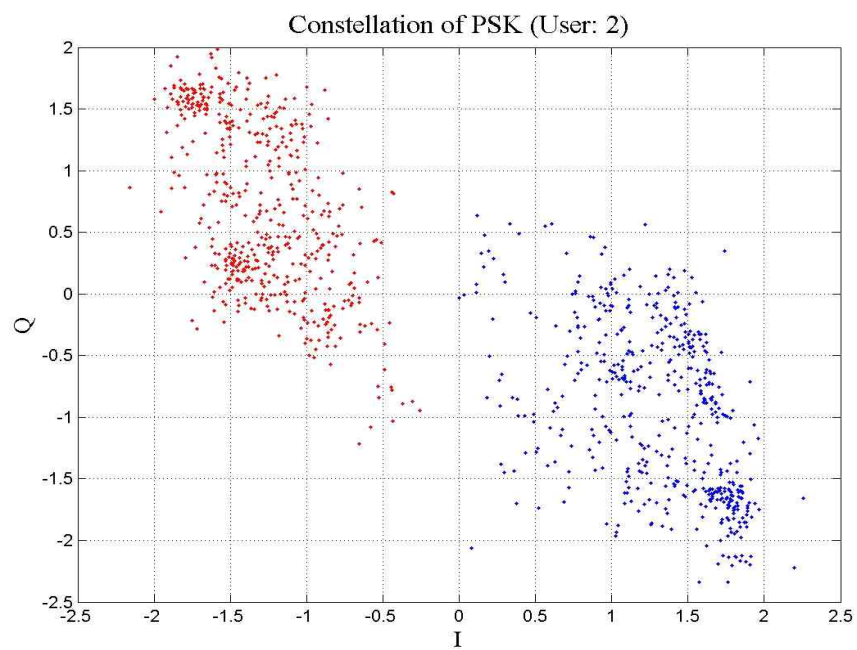
그림 3-31 주파수반할 통신의 신호 성상도(2kbps),

(a) 사용자 1, (b) 사용자 2.

그림 3-32는 전송률 5kbps에서의 사용자 1과 2의 신호 성상도를 보인다.



(a)



(b)

그림 3-32 주파수반할 통신의 신호 성상도(5kbps),

(a) 사용자 1, (b) 사용자 2.

3.5 결론

본 논문에서는 파라메트릭 배열 현상을 이용한 고지향 통신 시스템의 전송률 향상을 위해 파라메트릭 배열의 QPSK 방식과 다중사용자 환경을 고려한 주파수 분할 방식을 적용한 통신 시스템을 제안하였다. 파라메트릭 배열기반 통신 시스템 구현을 위해 기본적인 변복조 방식에 대하여 정리한 후 각 전송방식에 대한 통신 시스템은 LabView를 기반으로 프로그래밍 하였으며 MSI사의 F82 파라메트릭 트랜스듀서와 DAQ 보드(USB-6361, NI, USA)를 이용하여 구현하였다. 파라메트릭 배열기반 고지향 통신 시스템의 성능 검증을 위해 진해 국방과학연구소 수조에서 파라메트릭 배열의 PSK 방식과 전송률 향상을 위한 QPSK 방식 그리고 주파수분할 방식에 대하여 수조실험을 수행하였다.

파라메트릭 배열기반 이진 PSK 변조 방식을 이용하여 각도와 전송률 변화에 따른 성능평가 실험을 수행하였다. 전송률 1kbps 환경에서 지향성 특성 실험결과 6° 이내에서 전체 100,000bit를 100% 복조하였으며 8° 이내에서 10^{-3} 이하의 BER 성능을 보여 높은 지향 특성을 확인하였다. 전송률 2kbps와 5kbps 환경에서 4608bit의 문자열과 4bit gray scale의 256 x 256 pixel(262,144bit)의 이미지를 전송하였다. 전송률에 따른 수신결과 2kbps 환경에서는 문자열과 이미지를 오류판정 없이 100%로 복조하였으며 5kbps 환경에서는 문자열 1bit와 이미지 11bit에서 오류판정을 보였다. 또한 전송률 향상을 위한 파라메트릭 배열기반 QPSK 변조 방식의 수신결과 전송률 2kbps와 4kbps 환경에서 전체 5000bit를 오류판정 없이 100% 수신하였으며 10kbps 환경에서 22bit의 오류판정을 보였다. 오류판정은 수조 실험환경에서 수조 벽면에 반사된 신호의 다중경로 영향으로 신호 정상도의 퍼짐 현상을 보이며 이는 향후 채널추정을 통해 극복될 수 있다. PSK기법 대비 동일한 전송대역폭 환경에서 2배의 전송률 이득을 확인하였다.

주파수분할 통신 기법의 성능 검증을 위해 다중 사용자 2명을 가정하여 파라메트릭 배열 성분이 중첩되는 환경과 중첩되지 않는 환경을 설정하여 수조실험을 수행하였다. 중첩되는 환경의 경우 파라메트릭 배열 성분이 독립적인 사용자 1는 전체 5000bit를 오류판정 없이 100% 수신하였지만 파라메트릭 배열 성분이 중첩되는 사용자 2는 411bit에서 오류판정을 보였다. 그러나 중첩되지 않는 환경

의 경우 사용자 1과 2에서 오류판정 없이 100% 수신하였다. 또한 파라메트릭 배열 성분이 중첩되지 않는 환경에서 전송률 1kbps, 2kbps, 5kbps의 수신 결과 1kbps와 2kbps에서는 사용자 1과 2 모두에서 오류판정 없이 100% 수신하였으며 5kbps에서는 전체 5000bit중 사용자 1은 32bit 그리고 사용자 2는 10bit에서 오류판정을 보였다. 1차 주파수의 조합 쌍을 파라메트릭 배열 성분이 중첩되지 않는 환경이 되도록 선택하는 것이 중요하며 파라메트릭 배열 기반 주파수분할 통신 기법을 통해 다중 사용자 통신 및 전송률 향상 가능성을 확인 하였다.

제 4 장 파라메트릭 배열기반 탐지 시스템 및 응용

4.1 서론

해저지층탐사는 송신 파형과 퇴적물의 배치 형태에 따라 반사된 수신 신호를 이용하여 해저지층단면을 가시화 하는 기술이다. 해저지층탐사를 위해 일반적으로 Burst 또는 Ricker Pulse와 같은 짧은 펄스폭의 신호를 사용하거나 수신 신호 압축을 위한 Chirp 신호등이 사용된다. 이중 고해상도의 신호 품질을 획득하기 위한 Chirp SONAR 기술은 LeBlanc과 Mayer 연구진에 의해 Chirp SONAR 시스템^[43]이 개발된 후 해저 지형 및 매질물 탐지, 퇴적물의 특성 분석 등 다양한 분야에서 응용 연구되고 있다. 일반적인 Chirp SONAR 시스템은 운용 주파수에 따른 침투 성능 제한을 극복하기 위해 낮은 주파수 대역을 사용하고 있다. 저주파 SONAR 시스템은 높은 침투 성능을 보이지만 넓은 지향각에 의해 수심(z)와 지향각(θ)에 비례하는 넓은 수평방향 분해능($z\theta$)을 가지며 탐지범위 내 다양한 반사 신호가 함께 수신되는 단점이 있으며 탐지범위의 지형구조가 급경사, 불규칙 그리고 굴곡진 형태일 경우 두드러진 왜곡신호를 발생시킨다. 이러한 이유로 작은 고주파용 트랜스듀서를 이용하여 광대역의 저주파를 고지향으로 생성할 수 있는 파라메트릭 배열 기반 해저지층탐사(PA-SBP)장비가 개발되어 성능을 개선하였다. 대표적인 파라메트릭 배열 해저지층탐사기는 Kongsberg사의 TOPAS PS 18, TOPAS PS 40, TOPAS PS 120 제품과 MSI사의 F82트랜스듀서를 이용한 SBP 그리고 Innomar 사의 SES-2000 장비 등이 상용화 되었다.

파라메트릭 배열 현상을 이용한 지층탐사기는 낮은 에너지 변환 효율을 갖는 단점이 있지만 부엽이 적은 높은 지향성 빔을 생성하여 수직과 수평방향의 높은 해상도를 제공^[6,24]하여 해저에 매설된 자원 및 소형 물체의 탐지 및 위치 추정에 매우 높은 성능을 보인다^[24,26,27,36]. Konrad는 220dB의 높은 파라메트릭 배열 음원 준위를 갖는 고풍력 파라메트릭 SONAR 시스템을 개발하여 해저 지층탐사의 가능성을 실험적으로 제시하였다^[44]. William은 해수와 모래 경계조건에서 20kHz의

파라메트릭 배열 성분이 침투되는 임계 지표각(25.8°)을 이론과 실험적으로 검증하였다^[23]. Wunderlich은 Innomar사의 음향측심기(SES-96)와 지층탐사기(SES-2000)를 이용하여 해저 매몰지역 탐사 및 매설물 탐지를 수행하여 높은 탐지 성능을 보였다^[24,45,46].

파라메트릭 배열 기반 지층탐지 시스템의 성능은 수직/수평 분해능에 의해 결정된다. 수평 방향 분해능은 시스템의 송신 빔폭과 측정 수심의 관계식으로 계산되고 빔폭은 구동 주파수와 트랜스듀서 직경 또는 트랜스듀서 배열 형상에 의해 결정된다. 또한 수직 방향 분해능은 Chirp 신호를 송신 신호로 사용할 경우 대역폭에 의해 결정되고 신호의 대역폭은 송신 트랜스듀서의 대역폭 영역으로 제한된다.

본 논문에서는 파라메트릭 배열 현상을 이용한 탐지 시스템 설계 및 탐지 성능 향상을 위해 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 대역 확장 기법과 다중 대역을 이용한 탐지 알고리즘을 제안한다. 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 대역 확장 기법은 두 개 이상의 개별적인 대역폭을 갖는 고주파 트랜스듀서 환경에서 각 대역폭의 Chirp 신호를 생성하여 간접적으로 발생하는 파라메트릭 배열 성분의 대역폭을 양쪽 대역만큼 확장시키는 기법이다. 또한 다중 대역을 이용한 탐지 방법은 주파수의 자승에 비례하는 감쇠효과 등의 원인으로 1차 주파수 성분을 활용하지 않는다. 그러나 수십m 수심의 천해 환경에서 높은 음압의 1차 주파수 성분은 파라메트릭 배열 성분에 비해 높은 음압을 유지하고 있어 고해상도의 표층 정보를 제공한다. 높은 침투 성능을 갖는 파라메트릭 배열 성분과 1차 주파수 성분을 함께 활용할 경우 기존 장비보다 다양한 정보 획득 및 표층 신호에 대하여 명확한 위치 정보를 획득 할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 탐지 시스템의 송수신 신호처리 기법과 제안된 성능 향상 기법에 대해 소개하고 3절에서는 공기중 환경에서의 탐지 시스템 설계 및 물체 형상 탐지 실험결과를 보인다. 4절에서는 Benthowave 사 파라메트릭 트랜스듀서를 이용한 해저지층탐사 시스템 설계 및 제안된 시스템의 성능 검증을 위한 실험결과를 소개하고 실측 자료를 기반으로 파라메트릭 배열 성분의 초기 음원준위 추정 및 요구되는 1차 주파수의 음원준위와 송신전압을 예측한다. 마지막 5절에서 본장의 결론을 맺는다.

4.2 파라메트릭 배열의 탐지 신호처리

4.2.1 파라메트릭 배열 송수신 신호처리

Radar 및 SONAR를 이용한 탐지 시스템에서 고해상도의 신호 품질을 얻기 위해 Chirp 펄스를 사용하고 있다. Chirp 신호는 시간에 따라 주파수가 증가하는 sweep 신호로 퇴적층에서 반사 및 투과된 후에도 대역폭이 유지되어 일정한 거리 분해능을 제공하며 수신된 반사 신호는 정합 필터링(Matched Filtering)과정을 통해 수신 파형을 압축하여 해상도를 향상시키는 장점이 있다. SONAR 시스템에서 트랜스듀서와 표적간의 거리는 방사된 펄스가 표적에 반사되어 돌아오는 잔향 신호의 시간을 측정하여 거리를 얻는다. 표적의 위치 정확도는 수직방향 분해능에 따라 결정되고 이러한 수직방향 분해능은 Chirp 신호를 사용할 경우 방사한 펄스의 대역폭에 따라 결정된다. 수직방향 분해능(δ_R)은 음속(c_0)과 대역폭(B)의 관계에 의해 계산^[36]되고 정합필터에 의해 펄스 압축된 신호의 first-null은 $1/B$ 에 위치한다.

송신 Chirp 펄스의 파형은 선형주파수변조(LFM)의 순시주파수 함수와 Chirp 신호 포락선의 가중치를 조절하여 설계할 수 있다. 여기서 가중치 함수는 퇴적물 침투 깊이와 해상도에 영향을 주는 인자로 Sine-Square, Blackman-Harris, Gaussian, 그리고 Chi 등의 가중치 기법이 있으며, 순시주파수 함수는 선형 변조, Quadratic 변조 그리고 Logarithmic 변조 방식이 있다^[47]. 비선형적 상호작용에 의해 간접적으로 발생하는 파라메트릭 배열의 Chirp 펄스 형상을 직접적으로 설계하는 기술은 현재 존재하지 않지만 1차 주파수의 파형을 제어하여 간접적으로 설계할 수 있다. 파라메트릭 배열 현상을 이용한 Chirp 신호($u_C(t)$)는 식(4.1)과 같이 생성된다.

$$u_C(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t) + A_2 \cos(2\pi f_0 t + \pi \alpha_c t^2), 0 \leq t \leq \tau_c \quad (4.1)$$

여기서, τ_c 는 펄스폭을 나타내고 f_1 는 1차 주파수, f_0 는 Chirp신호의 최소 주파

수, α_c 는 Chirp rate으로 $|f_1 - f_{chirp\ range}|$ 으로 sweep하는 차 주파수가 생성된다. 최종적으로 변조된 송신 신호 $s(t)$ 는 (4.2)와 같이 포락선 함수와 곱하여 생성한다. 여기서, $w(t)$ 는 포락선 함수를 나타낸다.

$$s(t) = w(t)u_c(t) \quad (4.2)$$

이러한 Chirp 신호는 목표물에 의한 반사 또는 잔향신호를 압축하여 높은 수직 분해능을 제공한다. Chirp 수신기의 펄스 압축 기법은 중첩되어 있는 근접한 반사 신호를 분리하여 SNR를 개선시키고 분해능을 향상 시킨다. 이러한 DeChirp 기법은 정합필터 처리 과정으로 구현할 수 있다. 여기서 정합필터는 잡음 환경에서도 정확한 펄스 압축 성능을 제공하는 장점이 있다. 정합필터 기법에는 frequency-domain 모델과 time-domain 모델이 있으며 frequency-domain 모델의 경우 수신된 반사 또는 잔향 신호를 고속 푸리에 변환(FFT)하여 스펙트럼을 계산한 후 송신 Chirp 신호를 기준 신호로 FFT한 후 공액(Conjugate) 연산을 취한 기준 신호와 곱한다. 최종적으로 역변환(IFFT)을 취하여 시간 축에서 펄스 압축된 정합 필터 출력을 계산한다. 목표물의 거리정보는 정합필터 출력 결과에서 반사된 신호의 지연 시간을 계산하여 획득한다. 수신 신호 $r(t)$ 그리고 파라메트릭 배열대역의 송신 신호 $s_d(t)$ 에 대하여 정합필터 출력 $y(t)$ 는 식 (4.3)과 같이 계산된다.

$$y(t) = IFFT[conj[FFT[s_d(t)]] \times FFT[r(t)]] \quad (4.3)$$

time-domain 모델의 경우 수신 신호 $r(t)$ 는 송신 신호 $s_d(t)$ 의 공액과 합성곱을 취하여 정합필터 출력 $y(t)$ 를 식(4.4)와 같이 계산된다.

$$y(t) = r(t) * s_d^*(t) \quad (4.4)$$

본 논문에서 반사 신호의 수신 신호처리를 위해 time-domain 모델을 사용하며 그림 4-1은 수신 신호처리 과정의 블록도를 보인다. 수신신호는 대역통과필터를

이용하여 신호 대역을 취한 후 파라메트릭 배열 Chirp 신호 성분을 기준 신호로 정합필터를 취하여 펄스압축한 후 최종적으로 정합필터 출력 값의 포락선 성분을 Hilbert 변환을 통해 추출한다.

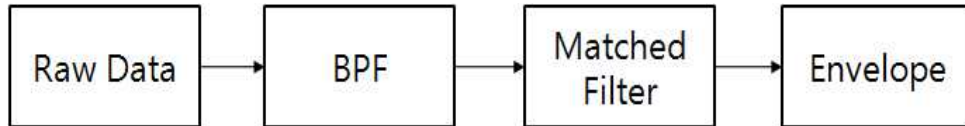


그림 4-1 수신 신호처리 블록도

그림 4-2는 송신 Chirp신호와 수신 신호의 정합필터 출력의 예를 보인다.

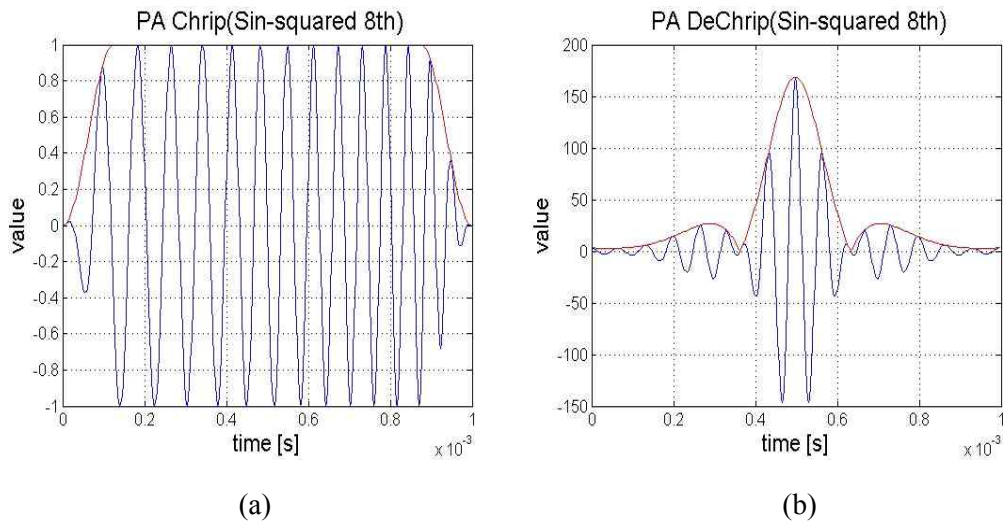


그림 4-2 Chirp신호의 송수신 파형, (a) 송신신호, (b) 정합필터 출력

일반적인 해저지층탐사기는 해저면에 반사된 수신 신호를 Dechirp 기법으로 펄스 압축한 후 포락선 검출기를 거쳐 각 퇴적물에 대한 반사 신호의 크기를 색상 등급을 주어 해저단면을 출력한다. 그림 4-3는 수신된 Chirp 신호를 이용한 수신 신호처리 과정의 예를 보인다. 여기서, (a)는 수신 신호로서 사각형 부분은 반사된 신호를 나타내고 (b)는 반사 신호를 DeChirp한 결과, 그리고 (c)는 DeChirp 결과를 포락선 검출한 결과를 보인다.

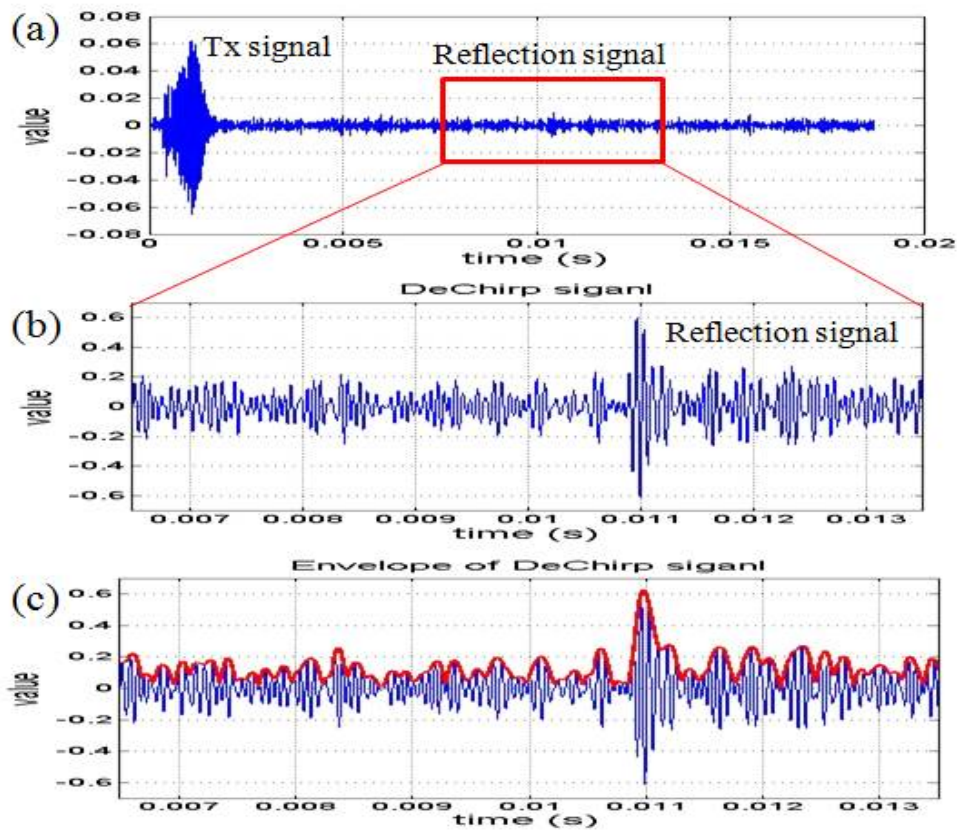


그림 4-3 수신 신호처리 과정의 예

4.2.2 탐지 시스템의 성능향상 기법

가) 파라메트릭 배열 Chirp의 대역 확장 기법

Chirp 신호를 이용한 지층 탐지 시스템의 수직 방향 분해능은 신호의 대역폭에 비례하여 향상된다. 그러나 1차 주파수의 운용에 의해 간접적으로 발생하는 파라메트릭 배열 성분의 대역폭은 1차 주파수의 대역폭에 의해 제한된다. 광대역의 고주파 트랜스듀서를 이용할 경우 파라메트릭 배열 성분의 대역폭을 충분히 확보할 수 있지만 광대역의 트랜스듀서를 확보하기에는 어려움이 따른다. 일반적으로 다공진 트랜스듀서 또는 두 개 이상의 고주파 트랜스듀서를 이용하여 파라메트릭 배열기반 시스템이 설계된다. 이 경우 파라메트릭 배열의 대역폭을 확장하기 위한 방법이 필요하며 두 개의 개별적인 1차 주파수 대역폭을 활용하여 확장시킬 수 있다. 그림 4-4는 파라메트릭 배열 Chirp의 대역 확장 방법에 대한 개념도이다.

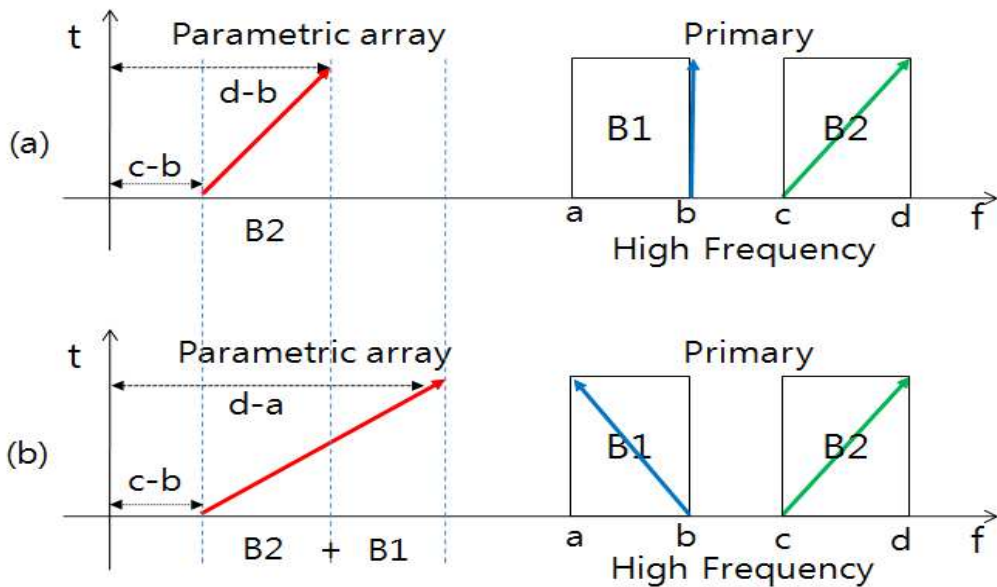


그림 4-4 파라메트릭 배열 Chirp의 대역 확장 기법의 개념도

- (a) 일반적인 파라메트릭 배열 Chirp 신호,
- (b) 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 신호

B1과 B2의 대역폭($B1 \ll B2$)을 갖는 다공진 트랜스듀서 또는 두 개 이상의 개별적인 트랜스듀서를 가정할 경우 일반적으로 파라메트릭 배열 Chirp 신호는 그림 4-4의 (a)와 같이 하나의 단일 주파수와 Chirp 주파수를 이용하여 최대 B2의 대역폭을 갖는 차 주파수 Chirp 성분을 생성한다. 그러나 그림 4-4의 (b)와 같이 각 대역폭에서 Chirp 신호를 생성할 경우 파라메트릭 배열 Chirp의 최대 대역폭은 $B1+B2$ 로 확장될 수 있다. 대역 확장된 파라메트릭 배열 Chirp 신호는 식(4.5)과 같이 생성된다.

$$u_C(t) = A_1 \cos(2\pi f_{01}t - \pi\alpha_{c1}t^2) + A_2 \cos(2\pi f_{02}t + \pi\alpha_{c2}t^2) \quad (4.5)$$

여기서, ‘-’ 부호는 Down-Chirp, ‘+’ 부호는 Up-Chirp, f_{0n} 는 Chirp신호의 최소 또는 최대 주파수, α_{cn} 는 Chirp rate을 의미한다.

나) 다중 대역을 이용한 탐지 알고리즘

수십 m의 수심을 갖는 천해 환경에서 수백kHz의 1차 주파수 성분은 주파수에 반비례하는 침투 성능을 보이지만 파라메트릭 배열 성분에 비해 높은 음압을 유지하고 있어 고해상도의 표층 정보를 제공한다. 이러한 이유로 1차 주파수 성분과 높은 침투 성능을 갖는 파라메트릭 배열 성분을 함께 이용할 경우 일반적인 파라메트릭 배열 탐사 장비보다 다양한 정보를 획득 할 수 있으며 특히 해저 표층 신호에 대하여 명확한 위치 정보를 제공한다.

다중 대역을 이용한 지층 탐지 알고리즘은 각 주파수대역의 대역통과 필터, 정합필터, 포락선 검출기, 국부적 최대값 검출기, 잔향신호 제거과정으로 구현할 수 있다. 그림 4-5은 다중 대역을 이용한 탐지 알고리즘의 블록도 이다. 여기서 반사체에 의해 수신된 신호는 1차 주파수와 파라메트릭 배열 대역의 대역통과 필터링 후 각 주파수 대역의 송신 신호를 기반으로 정합필터링 하여 수신 신호를 펄스 압축한다. 펄스 압축된 신호의 크기를 정규화한 후 포락선을 검출한다. 포락

선 신호의 문턱값 0.2를 기준으로 국부적 최대값을 검출하여 반사 신호의 위치를 탐지한다. 각 주파수 대역의 위치 탐지 결과로부터 인접한 반사 신호의 거리를 비교하여 해수면과 해저면 또는 퇴적층 내부 반사 등의 잔향 신호를 제거하여 최종적인 결과를 얻는다.

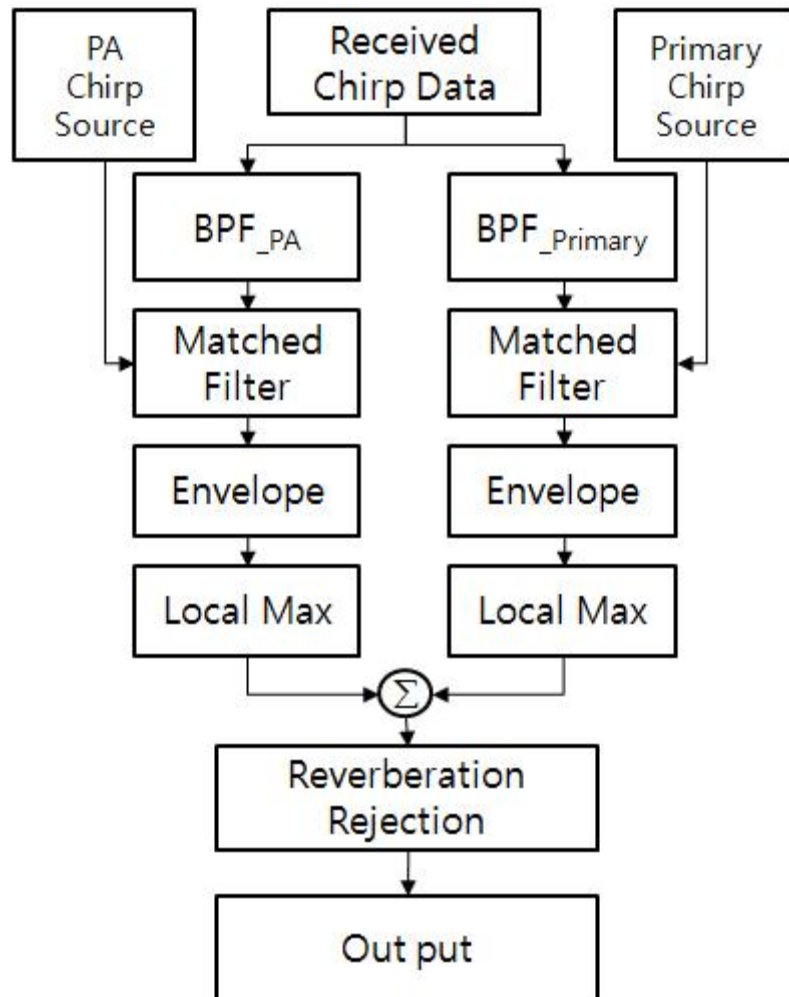


그림 4-5 다중 대역 탐지 알고리즘의 블록도

4.3 공중용 탐지 시스템

본 절에서는 파라메트릭 배열을 이용한 해저지층 탐사 시스템 개발에 앞서 탐사 시스템의 송수신 신호처리 기법에 대한 성능 검증을 위해 해상에 비해 실험이 용이한 공중용 탐지 시스템 설계 및 실험결과를 보인다. 공중용 탐지 시스템은 150kHz에 공진 주파수를 갖는 MASSA사의 TR-2436/150 트랜스듀서 배열을 이용하여 10kHz에서 20kHz 대역의 UpChirp 파라메트릭 배열 신호를 생성한다. 물체 탐지 실험을 위해 2개의 선형 스테이지를 이용하여 X축 3.8m와 Y축 2.5m 거리를 프로그램적으로 이동 가능한 실험 치구를 설계하여 잠수함 모형과 파이프 탐지실험을 수행하였다.

4.3.1 공중용 탐지 센서

파라메트릭 배열 신호는 두 개의 1차 주파수 f_1 과 f_2 를 높은 음압으로 동일한 방향에 발생시킬 때 매질의 비선형 현상에 의해 발생하는 여러 배음현상 중 차 주파수 성분을 의미한다. 간접적으로 발생하는 차 주파수 신호를 효율적으로 생성하기 위해서는 광대역의 초음파 트랜스듀서를 사용하거나 2개 이상의 공진을 갖는 다공진 초음파 트랜스듀서가 사용된다. 공기중 탐사 실험을 위해 본 논문에서는 100kHz 이상 대역에서 공진 주파수를 갖는 광대역의 초음파 트랜스듀서 중 150kHz에서 공진 주파수를 갖는 MASSA사의 TR-2436/150 소자를 이용하여 송신 센서 배열을 구성하였다. 또한 파라메트릭 배열 신호 측정을 위해 G.R.A.S.사의 40AM 마이크로폰을 수신 센서로 이용하였다. 다음은 송수신 센서의 제원을 보인다.

■ 송신 센서: MASSA TR-2436/150

공진 주파수: 150kHz, 대역폭: 18kHz(-6dB)

빔 폭: 23°(-6dB), 센서 직경: 18.1mm

■ 수신 센서: G.R.A.S. 40AM Free-field type

- 민감도: 12.5 mV/Pa, 주파수 대역: 3.15Hz ~ 40kHz(±3dB)

- 센서 직경: 12.7mm(0.5in)

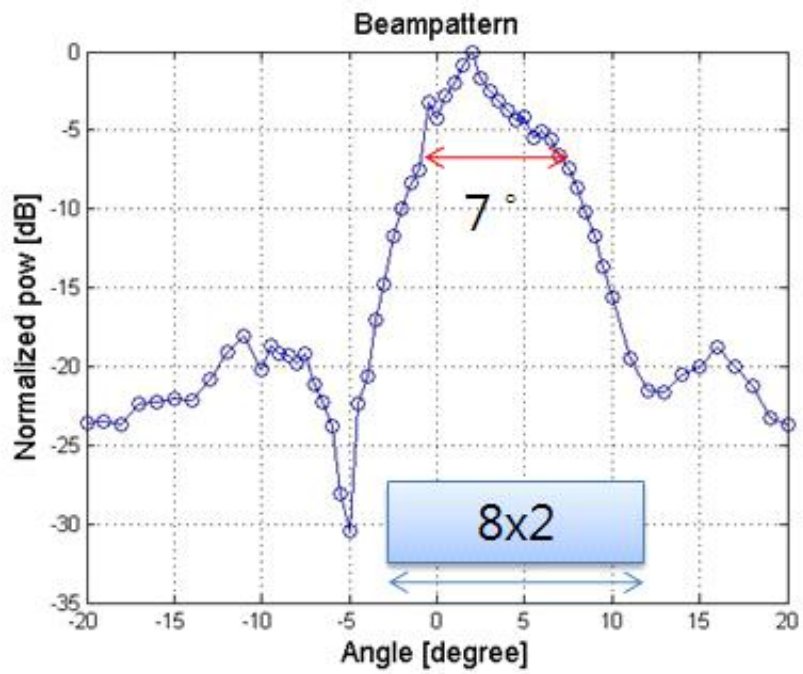
간접적으로 생성되는 파라메트릭 배열 신호의 음압은 구동에 사용된 1차 주파수에 비해 일반적으로 30dB 이상 낮게 측정된다^[6,7]. 또한 퇴적층에 의해 반사되어 수신되는 신호는 퇴적층의 반사계수와 전달손실에 등의 영향으로 송신 신호 전력 보다 10dB 이하로 측정된다^[36]. 낮은 전압으로 측정되는 반사 신호의 전압 이득을 획득하기 위해 초음파 트랜스듀서 16개를 그림4-6과 같이 8x2 배열로 구성하였다.



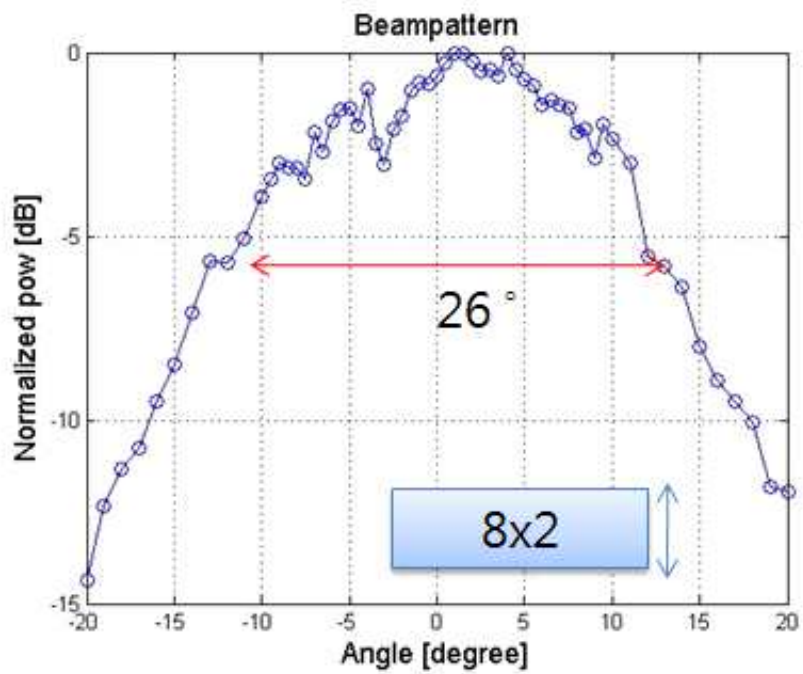
그림 4-6 공기중 지층탐사를 위한 송신 센서 배열과 수신 센서

1차 주파수 150kHz와 160kHz에서 170kHz 대역의 Chirp 신호를 이용하여 10kHz에서 20kHz 대역의 파라메트릭 배열 Chirp 신호를 간접적으로 생성하여 시스템 탐지 신호로 사용하였다. 센서 배열에 따른 송신 빔 형상을 확인하기 위해 1차 주파수 150kHz와 165kHz를 이용하여 15kHz의 파라메트릭 배열 신호를 생성하여 수평 배열(8개의 소자)과 수직 배열(2개의 소자)에 대하여 -20° ~ 20° 까지 빔 패턴을 측정하였다. 여기서, 송신 센서 배열의 등가 음원의 반경 4.51cm와 공기중 반사계수 $\beta=1.2$ 그리고 초기 음원준위(SL) 120dB를 고려하여 회절거리(R_R), 감쇠거리(R_A), 충격거리(R_S)를 이론적으로 계산하면 각각 $R_R=2.92\text{m}$, $R_A=1.76\text{m}$ 그리고 $R_S=3.23\text{m}$ 로 감쇠거리에 의해 가상음원의 길이가 결정된다.

그림 4-7는 측정된 빔 패턴을 나타낸다. 여기서, 수평방향 배열에 대한 빔폭은 약 7° 그리고 수직방향 배열에 대한 빔폭은 약 26° 로 측정되었으며 수신 거리 1.7m를 고려할 때 수평방향 분해능($r\theta$)은 각각 20.7cm와 77.1cm로 계산된다.



(a)



(b)

그림 4-7 공기중 송신 센서 배열의 빔 패턴, (a) 수평방향, (b) 수직방향

4.3.2 실험 치구 설계

공기중에서 지층탐사 실험을 위해 2개의 선형 스테이지(M50, Thomson, USA)를 이용하여 프로그램적으로 XY축 이동이 가능한 실험 치구를 설계하였다. 실험 치구는 송수신 센서부, 기구부 그리고 제어부로 구성된다. 여기서, 송수신 센서부는 송신 배열 센서와 수신 마이크로폰으로 구성되고 기구부는 X,Y 선형 스테이지, 스텝 모터, LM 가이드, 알루미늄프로파일 구조물 등으로 구성된다. 마지막으로 제어부는 프로그램적으로 스텝모터를 제어하기 위한 컨트롤 박스와 PC로 구성된다. 실험 치구는 송수신 센서부의 무게를 10kg 내외를 고려하여 송수신부의 이송 거리를 X축 4m와 Y축 2.5m로 설계하였다. 실제 제작된 실험 치구의 탐지 범위는 X축 3.8m, Y축 2.5m로 1인치(약 2.6cm) 단위로 이동하며 최대 이동 속도는 10.4cm/s 이다. 또한 탐지 실험을 위한 송수신부의 이동은 프로그램적으로 제어되어 격자형 이동 및 연속 이동하여 측정 실험이 수행하였다. 그림 4-8은 제작된 실험 치구를 보인다.



그림 4-8 제작된 공기중 실험 치구

4.3.3 탐지 실험 및 결과

제작된 실험 치구 및 공중용 지층탐사 시스템의 탐지 성능을 검증하기 위해 잠수함 모형과 파이프 형상 탐지 실험을 수행하였다. 그림 4-9은 공중용 지층탐사 시스템의 블록도를 나타낸다.

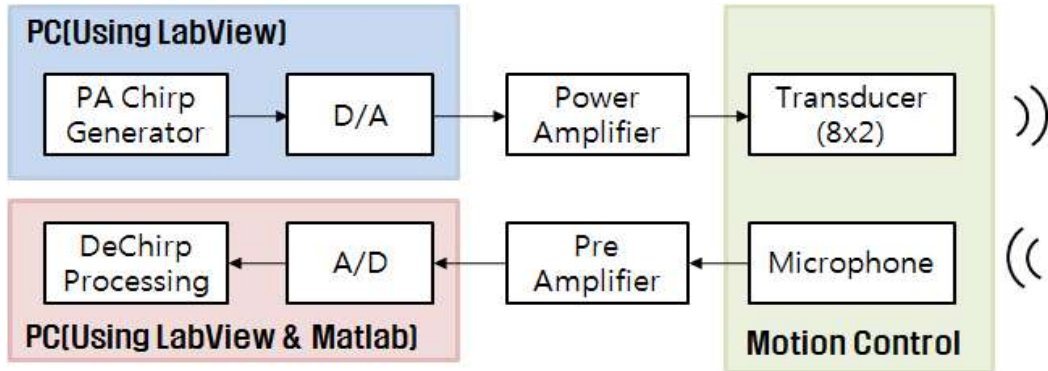


그림 4-9 파라메트릭 배열 기반 공중용 지층탐사 시스템 블록도

송신부 PC에서는 LabView를 이용하여 포락선 변조된 파라메트릭 배열 Chirp 신호를 생성한 후 DAQ(PXI-6259, NI, USA)로 디지털 아날로그 변환하여 전력증폭기(HVA-400, TOYO, Japan)에 인가한다. 파라메트릭 배열 Chirp 신호를 생성하기 위한 1차 주파수는 150kHz와 160kHz에서 170kHz로 Sweep하는 주파수를 Sine-squared 8th 포락선 변조하여 최종적으로 10kHz에서 20kHz 대역의 파라메트릭 배열 Chirp 신호를 간접적으로 생성하며 펄스폭은 1ms로 설정 하였다. 전력증폭기에서는 파라메트릭 배열 현상을 일으킬 수 있도록 증폭한 전력 신호를 초음파 트랜스듀서 배열(TR-2436/150, MASSA, USA)에 인가한다. 트랜스듀서를 통해 방사된 파라메트릭 배열 Chirp신호는 퇴적층 또는 물체에 반사되어 수신부의 마이크로폰(Type 40AM, G.R.A.S., Denmark)를 통해 측정된다. 여기서, 실험 치구의 스텝 모터는 프로그램적으로 제어된 XY 이동을 수행하여 반사 신호를 측정한다. 수신된 반사 신호는 전치 증폭기(VP1000, Reson, UK)를 통해 수신 신호 준위를 증폭한 후 아날로그 디지털 변화기(A/D: PXI-6133, NI, USA)를 거쳐 디지털 신호를 수신부 PC에 기록한다. 수신부 PC에서는 Matlab를 이용하여 DeChirp 과

정을 거쳐 탐지 물체를 가시화한다.

그림 4-10은 물체 탐지 실험 환경을 나타낸다. 여기서, 길이 96cm x 폭 11cm x 높이 12cm의 잠수함 모형과 길이 125cm x 직경 10cm의 스테인레스 파이프를 그림과 같이 바닥면에 배치한 후 2.6cm 단위로 가로(Y축) 62포인트(0~161.2cm) 세로(X축) 65포인트(0~169cm)로 송·수신 센서를 이동하여 반사 신호를 취득하였다. 여기서, 송수신 센서와 바닥까지의 거리는 약 1.92m이다.

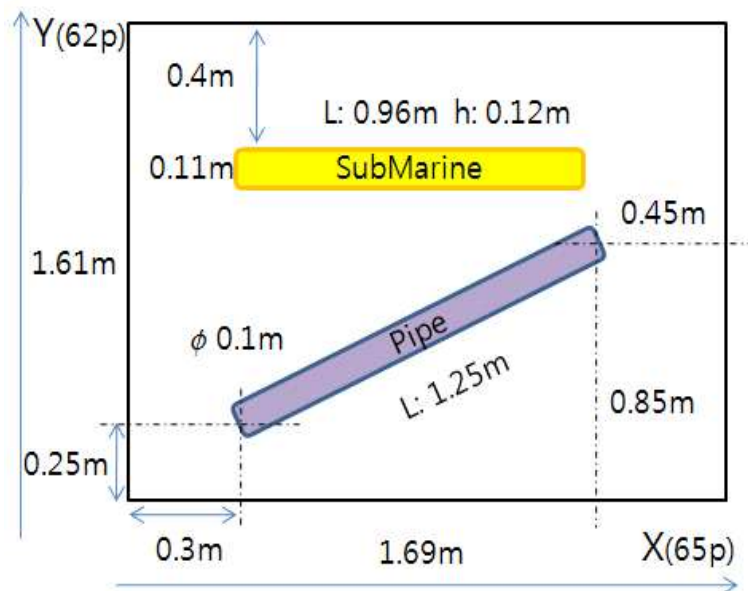


그림 4-10 공기중 탐지 실험 환경

그림 4-11와 4-12은 잠수형 모형에 의해 반사되어 수신된 신호의 대역통과필터 출력과 정합필터 및 포락선 출력을 보인다. 그림4-9의 $s(t)$ 는 파라메트릭 배열대역의 송신신호로 펄스폭은 17cm이고 그림4-10의 $y(t)$ 는 이상적인 정합필터 출력으로 수직 방향 분해능(δ_R)은 10kHz 대역폭에 대하여 1.7cm($c_0 = 340m/s$)이다. 펄스압축된 파형으로부터 잠수함 모형의 높이 12cm를 확인할 수 있다. 여기서 바닥신호는 송신배열의 빔폭($7^\circ, 26^\circ$)에 의해 측정된 신호로 보인다.

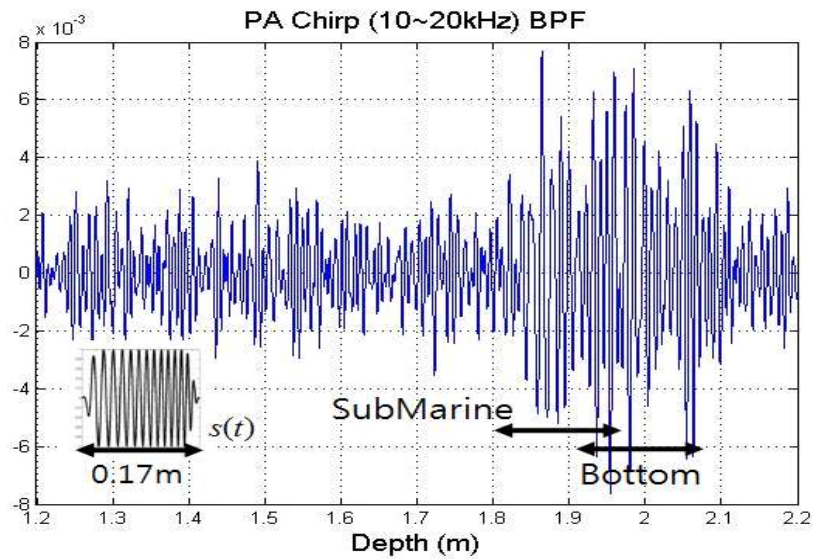


그림 4-11 수신신호의 대역통과필터 출력

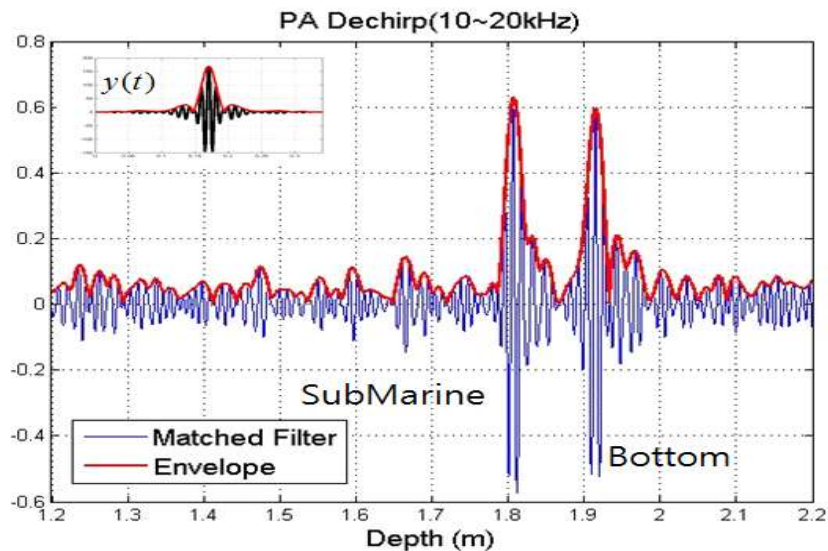


그림 4-12 수신신호의 정합필터 및 포락선 출력

그림 4-13는 Y축 45포인트 지점의 B-Scan 이미지 출력 결과로 잠수함 모형의 윗 면과 꼬리면이 반사 신호 및 윗면의 높이 12cm를 확인 할 수 있다

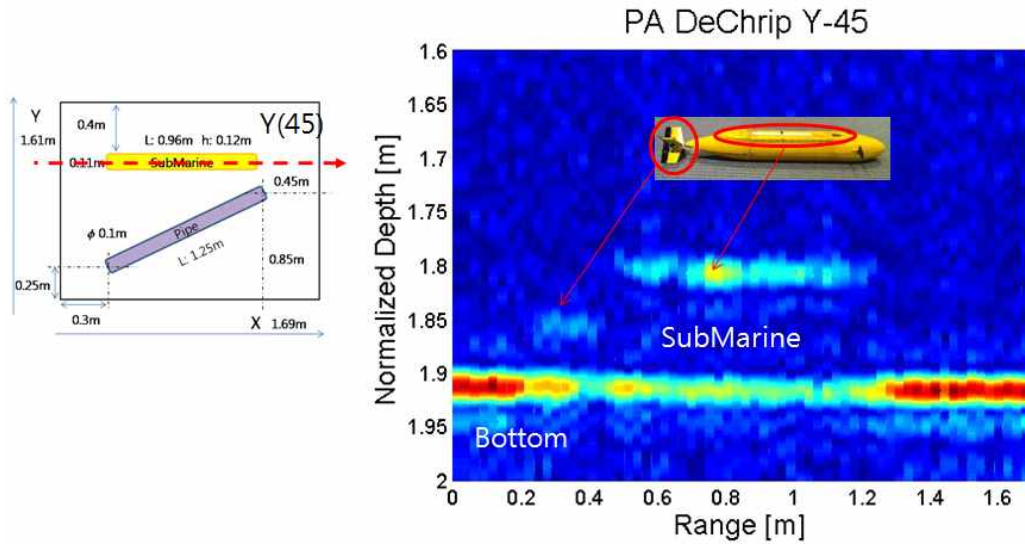


그림 4-13 잠수함 모형의 B-scan 이미지

그림 4-14는 깊이 179.9cm 지점의 C-Scan 이미지 출력 결과로 잠수함 모형의 윗면 반사 신호와 파이프 반사 신호가 XY 좌표축에서 비교적 정확히 확인 된다. 여기서, 검출된 잠수함과 파이프 직경은 각각 35cm와 28cm로 실제 모형과 각각 24cm와 18cm 차이를 보이며 이는 수평 방향 분해능의 영향으로 보인다.

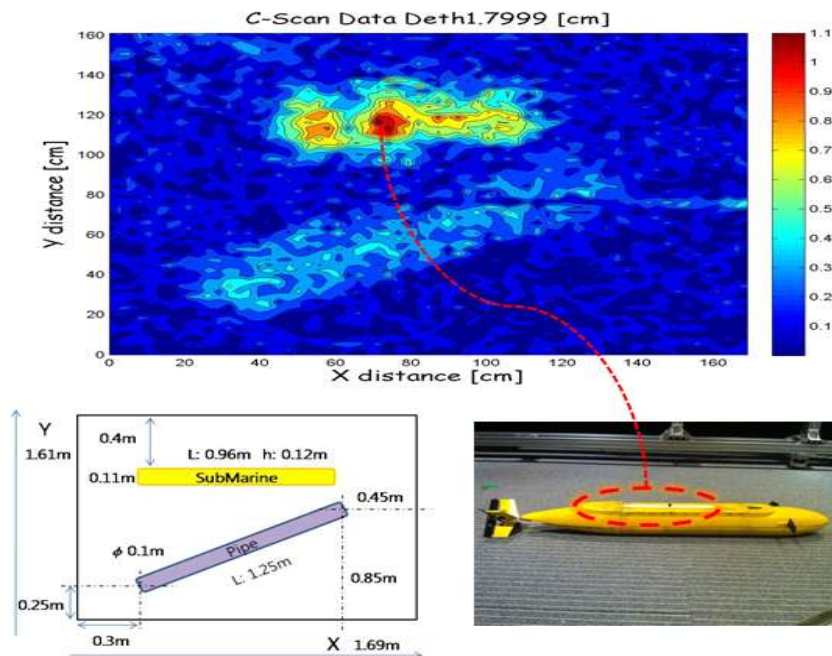


그림 4-14 잠수함 모형과 파이프의 C-scan 이미지

4.4 해저지층탐사 시스템

4.4.1 시스템 구성

파라메트릭 배열 현상을 이용한 고지향 해저지층탐사 시스템은 신호생성 및 수집을 위한 신호처리 부 송신 신호 전력 증폭 및 임피던스 정합 그리고 수신 신호 증폭을 위한 하드웨어 부 그리고 송수신 센서 부로 구성된다.

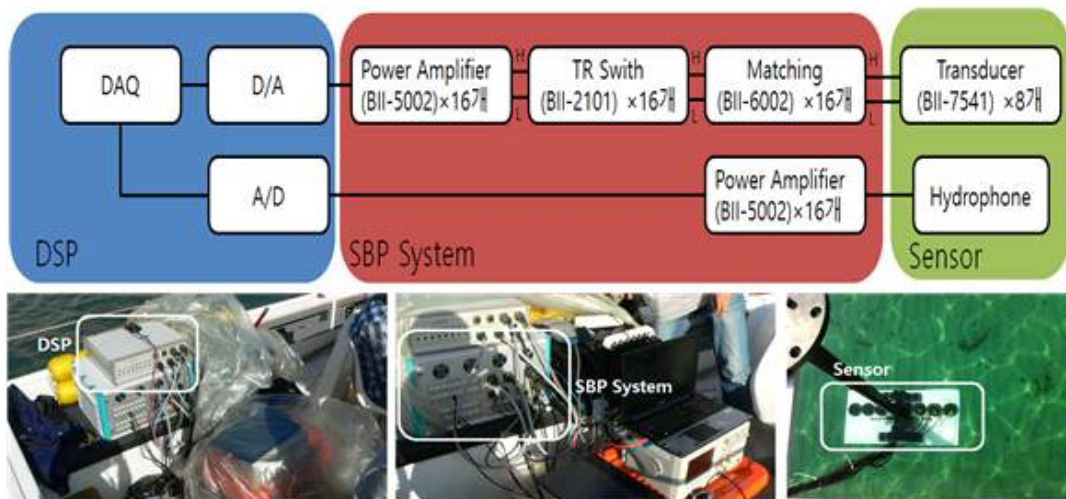


그림 4-15 해저지층탐사 시스템 블록도 및 시스템 사진

신호처리 부에서는 DSP 보드와 PC로 구성되고 송신신호 생성 및 퇴적층 반사 신호 수집, 그리고 수신 신호처리를 수행한다. 여기서, 송신신호는 단일 주파수의 파라메트릭 배열 신호 또는 파라메트릭 배열 Chirp 신호를 생성하고 수신 신호처리에서는 수신된 반사 신호로부터 파라메트릭 배열 신호 대역을 여과하는 대역 통과 필터, 수신 신호로부터 신호의 상관값 검출 및 펄스 압축을 위한 정합필터 그리고 검출된 반사 신호의 포락선 검출을 위한 Hilbert 변환기로 구성된다. 하드웨어 부는 전력증폭기(BII-5002) 16개, 임피던스 정합(BII-6002) 16개 그리고 전치 증폭기(BII-1001) 16개로 구성된다. 여기서, 파라메트릭 배열 신호를 생성하기 위한 1차 주파수의 High 주파수와 Low 주파수는 각각 전력증폭기, TR 스위치 그리고 임피던스 정합되어 송신 센서(BII-7541)에 인가되어 방사된다. 센서 부의 송신 센서는 파라메트릭 배열 신호 생성을 위한 HF(High Frequency)와 LF(Low Frequency) 포트를 갖는 트랜스듀서(BII-7541) 8개로 구성되고 수신 센서는 배열

센서(BII-7013) 8개 또는 단일 센서(TC-4013)로 구성된다.

가) 센서부

파라메트릭 배열 신호를 생성하기 위해서는 일반적으로 두 개 이상의 공진을 갖는 다공진 트랜스듀서 또는 두 개의 고주파용 트랜스듀서가 사용된다. 본 논문에서는 Benthowave 사의 파라메트릭 배열용 트랜스듀서인 BII-7541를 송신센서로 사용하였다. BII-7541은 185~192.5kHz의 LF대역과 207.5~215kHz의 HF대역을 갖으며 LF와 HF대역의 1차 전력 주파수를 이용하여 파라메트릭 배열 성분을 생성하게 된다. BII-7541의 제원은 다음과 같다.

- 송신음압감도(TVR): 164.8dB(ref 1uPa/1V @ 1m)
- 최대 음압준위: 220dB(uPa @ 1m)
- 송신 주파수: LF(185~192.5kHz), HF(207.5~215kHz)
- 차 주파수: 15~30kHz
- 빔 폭(-3dB): 3°~12°
- 크기($\phi D \times H$): 90×50mm
- 탐지 거리: 500m

그림 4-16은 센서 치구에 부착된 BII-7541의 배열 구조를 보인다. 각 센서의 직경은 9cm로 8개의 센서를 9.5cm간격으로 배치하였다.

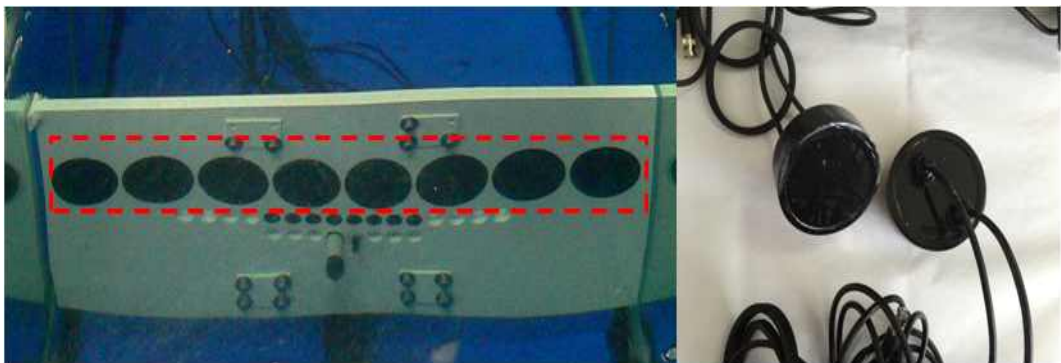


그림 4-16 BII -7541배열 구조

파라메트릭 배열 성분을 수신하기 위한 수신 센서는 Benthowave 사의 배열 센서인 BII-7013와 Reson사의 광대역 수신 센서인 TC-4013을 사용하였다. 각 센서의 제원은 다음과 같다.

□ 배열 센서 (BII-7013)

- 수신음압감도(RVS): -198.1dB(ref 1V/1uPa)
- 주파수 대역: 0.1Hz ~ 40kHz
- 수평 지향각 : 전방향 ± 2 dB @ 35kHz
- 수직 지향각 : $230^\circ \pm 3$ dB @ 35kHz

□ 단일 센서 (TC-4013)

- 수신음압감도(RVS): -211dB ± 3 dB(ref 1V/1uPa)
- 주파수 대역: 1Hz~170 kHz
- 수평 지향각: 전방향 ± 2 dB at 100kHz

그림 4-17은 센서 치구에 부착된 수신 센서를 보인다. 여기서, 수신 센서 배열은 직경 2.2cm의 BII-7013센서 8개를 2.8cm 간격으로 배치하였다.

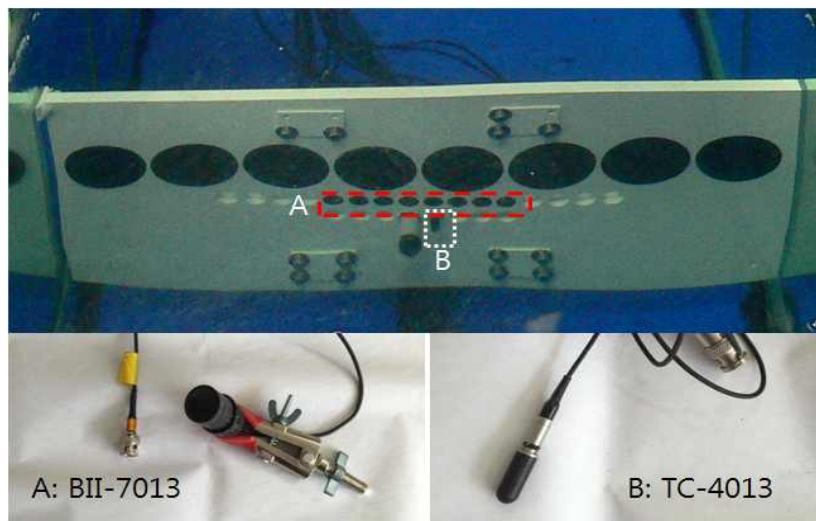


그림 4-17 센서 치구의 수신센서 위치

나) 증폭부

파라메트릭 배열 해저지층탐사 시스템의 증폭부는 송신부와 수신부로 구분된다. 8채널의 송신 배열센서 구동을 위해 각각 16개의 전력증폭기(BII-5002, Benthowave), 그리고 임피던스 정합기(BII-6000, Benthowave)로 구성되고 이중 8개씩 HF와 LF 구동에 사용된다. 또한 수신부는 16개의 전치증폭기(BII-1001, Benthowave)로 구성되며 실험에서는 8개의 수신 배열센서를 위해 8개의 전치증폭기가 사용된다. 각 장치의 제원은 다음과 같다.

□ 전력증폭기 (BII-5002)

전력 증폭기는 Benthowave사의 BII-5002모델이 사용되며 제원은 다음과 같다. 본 시스템에서는 20VDC에서 24VDC의 전압을 공급하였다.

- 가용 음원준위(SL): 192.1+ DI dB(ref 1uPa)
- 공급 전압 범위: 8~36VDC
- 최대 출력전류: 5A
- 증폭비: 29dB
- 입력 임피던스: 200 k Ω || 7pF
- 전력 용량: 96Watt @ +24VDC
- 대역폭: 200 kHz @ +24VDC

□ 임피던스 정합기(BII-6002)

임피던스 정합기는 전력증폭기(BII-5002)와 파라메트릭 배열 트랜스듀서(BII-7541)의 임피던스 정합에 사용되고 Benthowave사의 BII-6002모델을 파라메트릭 배열 트랜스듀서의 HF채널과 LF채널에 따라 주문 제작하였다.

- BII-6002 HF의 대역폭: 200kHz~215kHz
- BII-6002 LF의 대역폭: 185kHz~200kHz

□ 전치 증폭기(BII-1001)

전치 증폭기는 Benthowave사의 BII-1001모델로 하이드로폰(BII-7013)의 수신 신호

호 증폭에 사용되고 시스템에서는 24dB의 증폭이득이 사용된다. 다음은 전치 증폭기의 제원을 나타낸다.

- 최대 이득: 32dB
- 3dB 대역폭: 250kHz @32dB gain
- 입력 잡음: $28(\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}})$
- 소모전류: 1.0mA @+4.5~ +24VDC
- 입력 임피던스: $44\text{M}\Omega$

그림 4-18은 파라메트릭 배열 시스템의 증폭부를 하나의 장치로 구성한 Parametric Array Sonar(PAS) 시스템을 나타낸다.



그림 4-18 파라메트릭 배열 SONAR 시스템

4.4.2 수조실험 및 결과

해저지층탐지 시스템의 성능 검증을 위해 가로 20m 세로 0.8m 폭 0.8m의 2차원 수조에서 실험을 수행하였다. 수조 실험은 퇴적층이 존재하는 환경에서의 파라메트릭 배열 성분 전파 특성 분석 실험, 두 개의 1차 주파수 Chirp을 이용하여 파라메트릭 배열의 대역폭을 확장시킨 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 신호, 그리고 1차 주파수의 Chirp 대역을 함께 적용한 다중 대역 탐지 알고리즘에 대한 검증 실험을 수행하였다.

가) 파라메트릭 배열 신호의 전파 특성

파라메트릭 배열 신호의 퇴적층 투과 성능 및 전파 특성 분석을 위해 그림 4-19의 실험환경을 구축하여 실험을 수행하였다. 여기서, 송신 센서로부터 거리 약 7.1m에 20cm와 50cm 두께의 아크릴 박스를 이용하여 20cm 아크릴 박스에 진흙을 채우고 50cm의 아크릴 박스에 5cm 두께의 진흙 판을 추가하여 25cm의 퇴적층을 배치하였다. 실제 퇴적층의 두께는 아크릴 박스의 두께와 박스내부 압력 증가에 의해 박스 중심부가 팽창되어 약 30cm의 두께를 보였다.

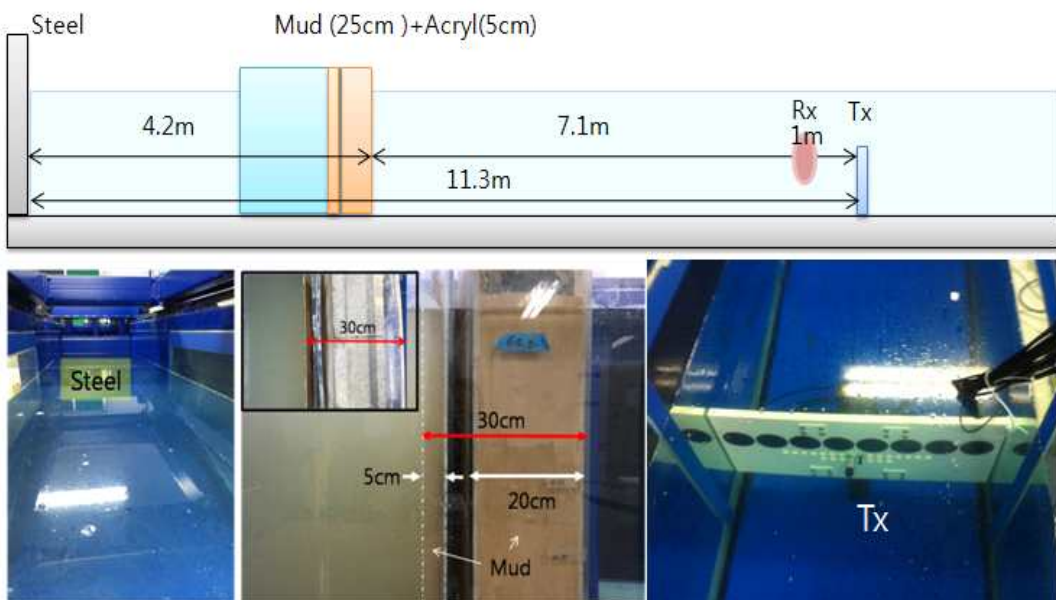


그림 4-19 전파 특성 분석을 위한 수조실험 환경

여기서, 수조의 수심을 0.7m로 조절한 후 송신 센서를 바닥면으로부터 약 0.35m에 위치시켰다. 수신 센서는 송신 센서로부터 1m 앞에 위치하며 이 경우 반사 신호는 각각 왕복거리 13.1m와 21.6m 시점에서 수신된다.

실험에 사용된 퇴적층 시료의 음향 물성은 표 4-1와 같다^[48,49].

표 4-1 퇴적층의 물성

	담수	진흙	아크릴판	철판
밀도[kg/m ³]	1000	1500	1180	7800
음속[m/s]	1500	1515	2610	5900

각 시료에 대하여 단일 경계면을 가정할 경우 반사계수는 표 4-2와 같이 계산되며 여기서 부호는 위상을 나타낸다.

표 4-2 각 시료의 반사계수

	담수	진흙	아크릴판	철판
담수	-	0.2048	0.3449	0.9369
진흙	-0.2048	-	0.1508	0.9059
아크릴판	-0.3449	-0.1508	-	0.8745
철판	-0.9369	-0.9059	-0.8748	-

전파 특성 분석을 위한 송신 신호는 1ms의 펄스폭을 갖는 1차 주파수 190kHz와 210kHz를 이용하여 20kHz의 단일 차 주파수 성분을 생성하였다. 또한 20kHz의 파라메트릭 배열 성분의 이론적인 전파 특성을 확인하기 위해 실험환경 변수를 가정하여 KZK 모의실험을 수행하였다.

그림 4-20은 파라메트릭 배열 신호의 수신 신호와 KZK 모의실험 결과를 보인다. 여기서 파란 실선은 측정된 수신 신호로부터 푸리에 변환을 통해 파라메트릭 배열 주파수 성분을 취한 실험데이터를 나타내고 붉은 점선은 KZK 모의실험 결과를 나타낸다. 검정색 점선은 첫 번째 퇴적층과 벽면의 위치를 나타내며 수조 실험 결과(파란 실선) 각 퇴적층의 위치에서 파라메트릭 배열 성분이 확인된다. 여기서, KZK 모의실험 결과 파라메트릭 배열 성분의 가상음원 거리는 약 16m이다. 첫 번째 퇴적층이 위치하는 13.1m 부분의 실측값(-86.94dB)과 KZK 모의실험 결과 값(-74.5dB)의 비율을 비교하면 0.2388의 값을 가지며 이는 담수와 진흙 경계면에서의 반사계수 0.2048과 유사한 값을 갖는다.

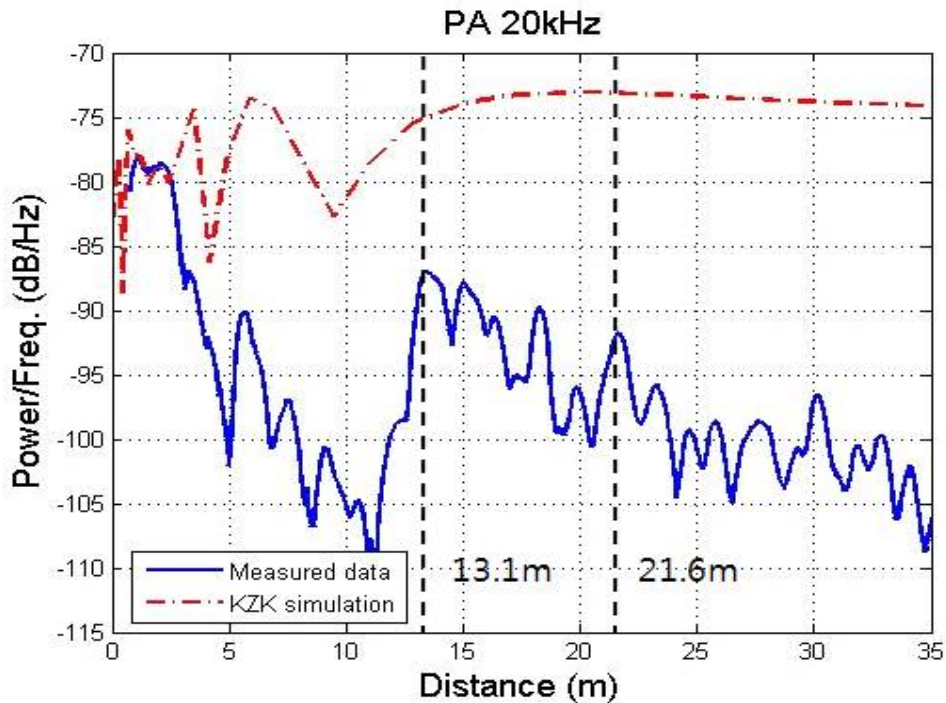


그림 4-20 파라메트릭 배열 성분의 전파특성 실험 결과

그림 4-21은 1차 주파수 성분의 실측값과 KZK 모의실험 결과를 보인다. 수조 실험 결과(파란 실선) 1차 주파수의 경우 13.1m의 첫 번째 퇴적층이 위치하는 부분에서 각 주파수 성분이 확인되지만 벽면이 위치하는 21.6m 부근에서는 각 주파수 성분이 확인 되지 않는다. 첫 번째 퇴적층이 위치하는 부분의 실측값과 KZK 모의실험 결과 값의 비율을 비교하면 210kHz의 경우 0.2113(-45dB, -31.5dB), 190kHz의 경우 0.2148(-43.86dB, -30.5dB)의 값을 가지며 담수와 진흙 경계면에서의 반사계수 0.2048과 유사한 값을 갖는다.

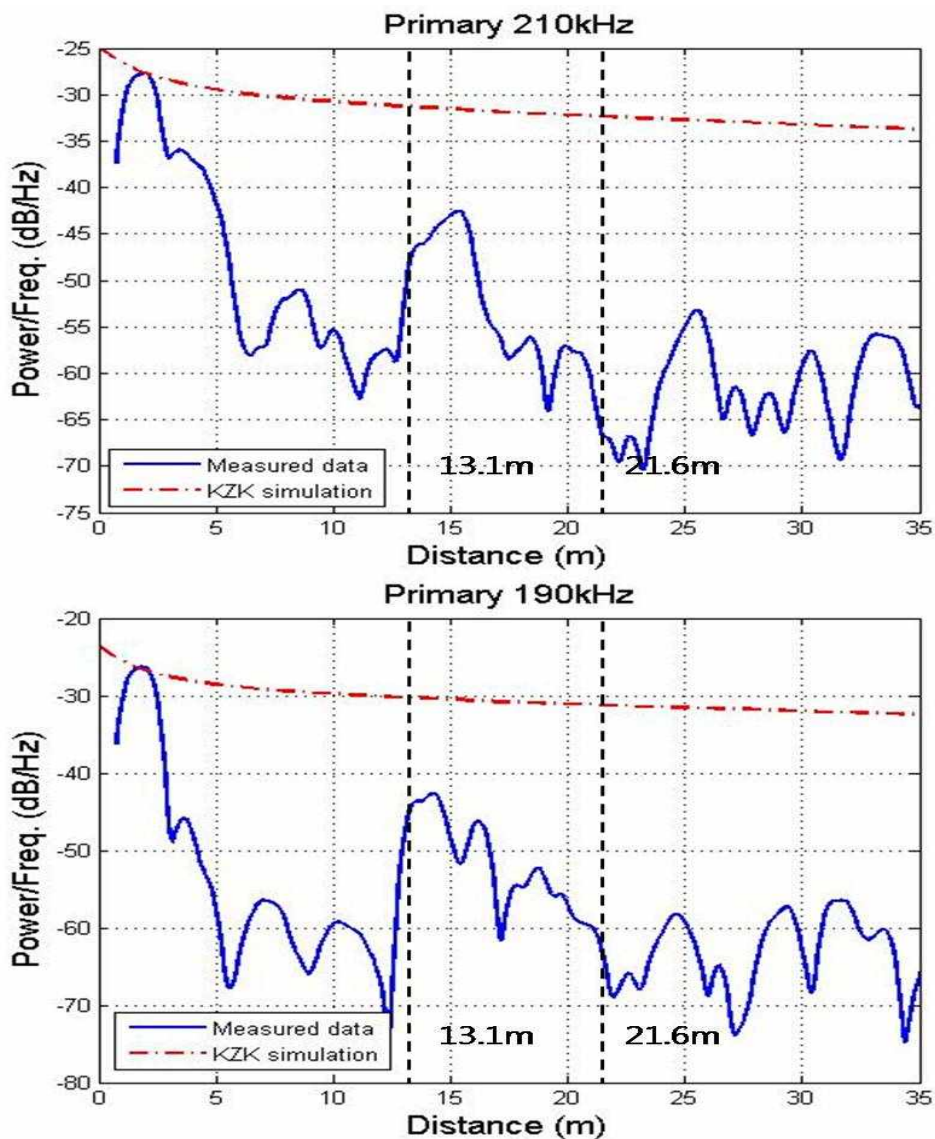


그림 4-21 1차 주파수 성분의 전파 특성 실험 결과

나) 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 송신

해저 지층탐사 시스템의 수직 방향 분해능은 대역폭에 비례($\delta_R \approx c_0/2B$)하여 향상된다. 본 논문에서는 한정된 대역을 갖는 트랜스듀서 환경에서 두 대역의 1차 Chirp 대역을 이용하여 기존 파라메트릭 배열 Chirp 대역을 확장시켜 수직 방향 분해능을 향상 시키는 방법을 제안하였다. 다음은 기존 파라메트릭 배열 Chirp과 제안된 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 신호 생성을 위한 환경변수를 보인다.

□ 파라메트릭 배열 Chirp 신호

1차 주파수(F1): 185kHz

1차 Chirp 대역(F2): 207.5~215kHz(Up Chirp), 대역폭 - 7.5kHz

파라메트릭 배열 Chirp 신호(PA): 22.5~30kHz(Up Chirp), 대역폭 - 7.5kHz

□ 대역 확장 파라메트릭 Chirp 신호

1차 Chirp Low 대역(F1): 192.5~185kHz(Down Chirp), 대역폭 - 7.5kHz

1차 Chirp High 대역(F2): 207.5~215kHz(Up Chirp), 대역폭 - 7.5kHz

파라메트릭 배열 Chirp 신호(PA): 15~30kHz(Up Chirp), 대역폭 - 15kHz

그림 4-22은 제안된 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp의 성능 비교를 위한 실험환경을 나타내며 송수신 센서는 동일한 곳에 위치한다.

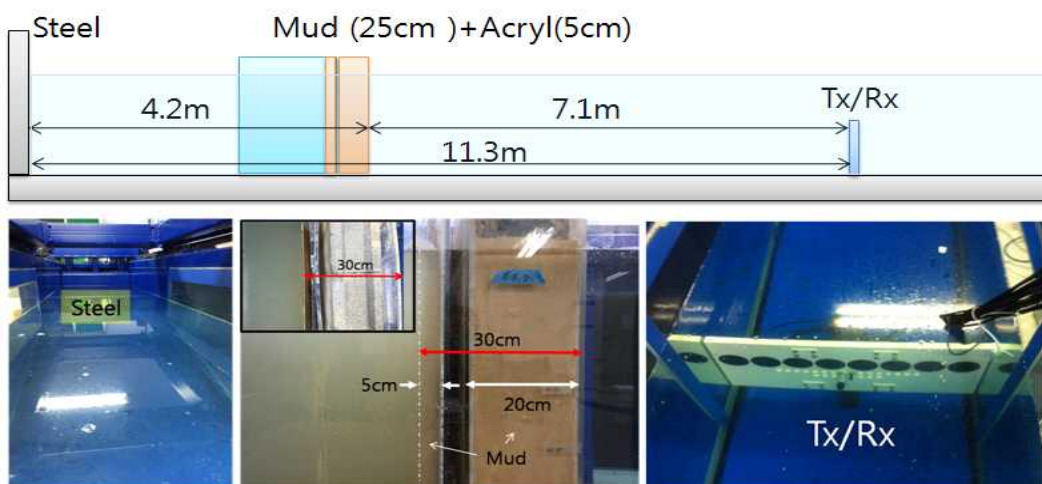


그림 4-22 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp의 수조 실험 환경

그림 4-23은 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 대역폭에 따른 송신 신호의 예를 보이며 펄스폭은 0.5ms이다. 다음과 같은 송신파형에 대하여 수중 음속 1500m/를 가정할 경우 수직 방향 분해능은 각각 (a) 0.149m와 (b) 0.073m로 계산된다.

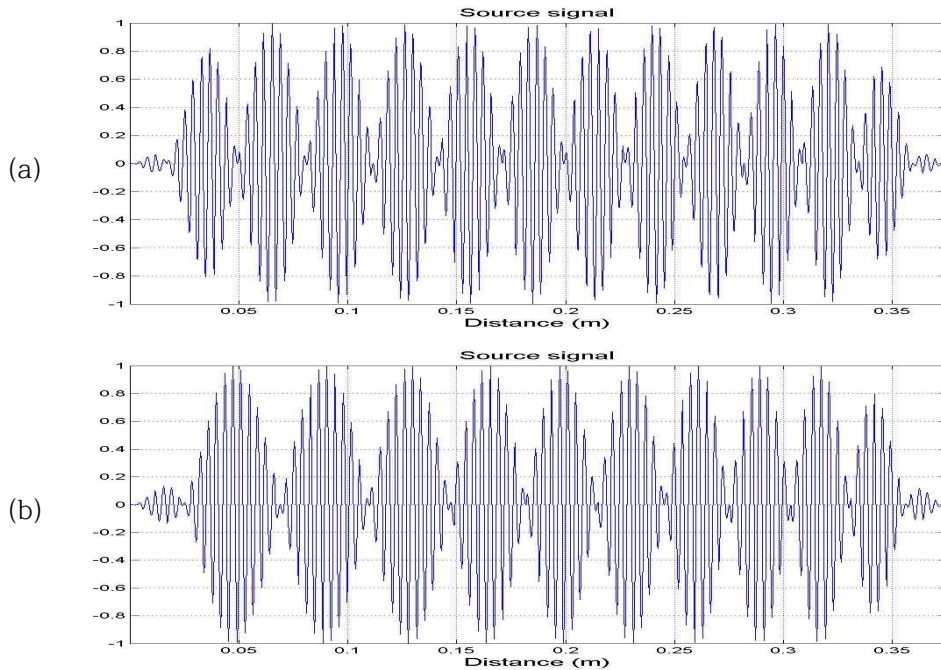


그림 4-23 파라메트릭 배열 Chirp의 대역폭에 따른 송신 파형

(a) 파라메트릭 배열 Chirp 송신신호(대역폭: 7.5kHz)

(b) 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 송신신호(대역폭: 15kHz)

그림 4-24는 22.5~30kHz 대역을 갖는 단일 파라메트릭 배열 Chirp의 수조 실험 결과로 수신 파형과 대역통과 필터 출력 결과를 보인다. 여기서, 두 개의 송신 트랜스듀서(BII-7541)를 이용하여 송신 신호를 전송하였으며 $\pm 3V$ 의 입력전압에 대하여 각 전력증폭기 평균 출력 전압은 162.2Vrms이다. 또한 수신단은 TC-4013 수신 센서를 사용하였으며 전치증폭기 이득은 26dB를 사용하였다. 첫 번째 퇴적 층에 의한 최대 수신 전압은 4.15V이고 이중 파라메트릭 배열 Chirp 성분은 24.5mV 그리고 1차 주파수 Chirp 성분은 2.99V로 수신되었다. 간접적으로 발생되는 파라메트릭 배열 성분은 1차 주파수 대역에 비해 약 40dB 낮은 전압을 갖지만 두 대역 모두에서 첫 번째 반사 신호를 확인 할 수 있다. 그러나 25cm두께의

진흙층을 투과하고 7.1m를 더 진행 후 수신되는 벽면(11.3m)의 반사 신호는 파라메트릭 배열 성분에서만 확인되며 이때 측정된 최대 수신 전압은 8.6mV 이다.

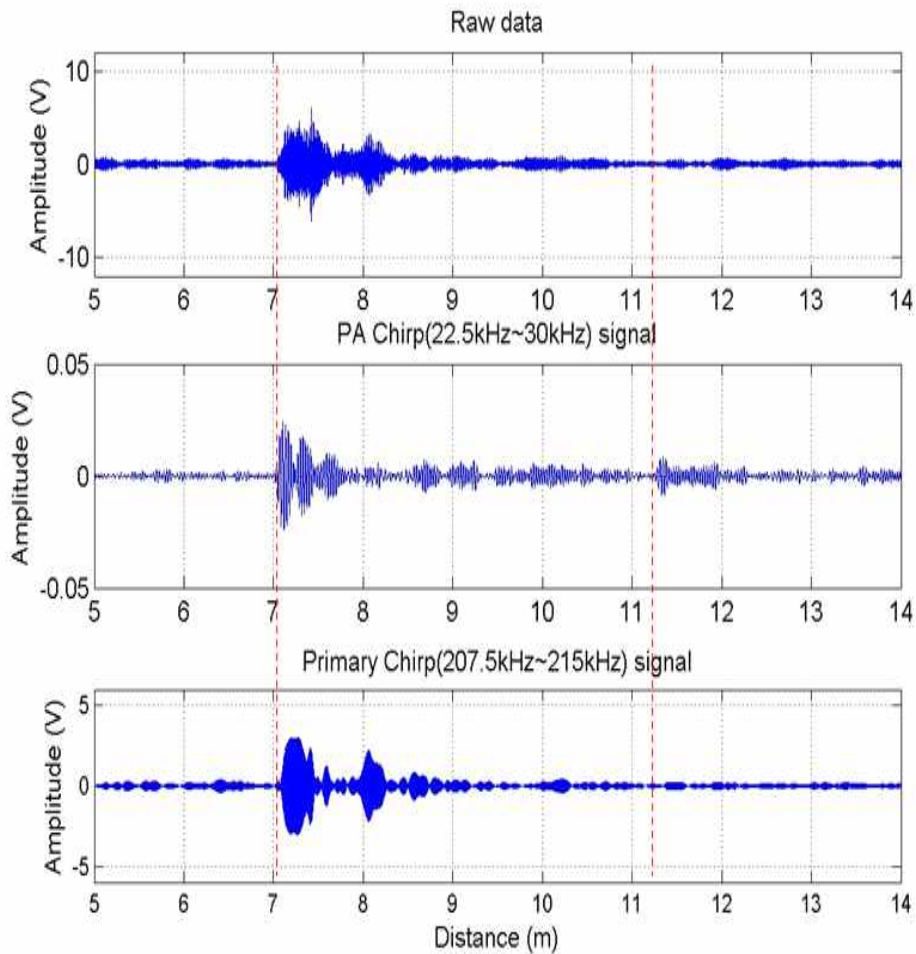


그림 4-24 기존 파라메트릭 배열 Chirp(22.5~30kHz) 수신 신호

그림 4-25는 각 퇴적층에 의한 반사 신호의 스펙트럼을 보인다. 여기서, 붉은 사각상자는 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 주파수 대역을 나타낸다. 벽면 반사 신호에서 1차 주파수 대역의 경우 첫 번째 반사에 비해 약 25dB 감소하였으나 파라메트릭 배열 성분의 경우 -76.17dB에서 -82.66dB로 약 6dB 감소하였다.

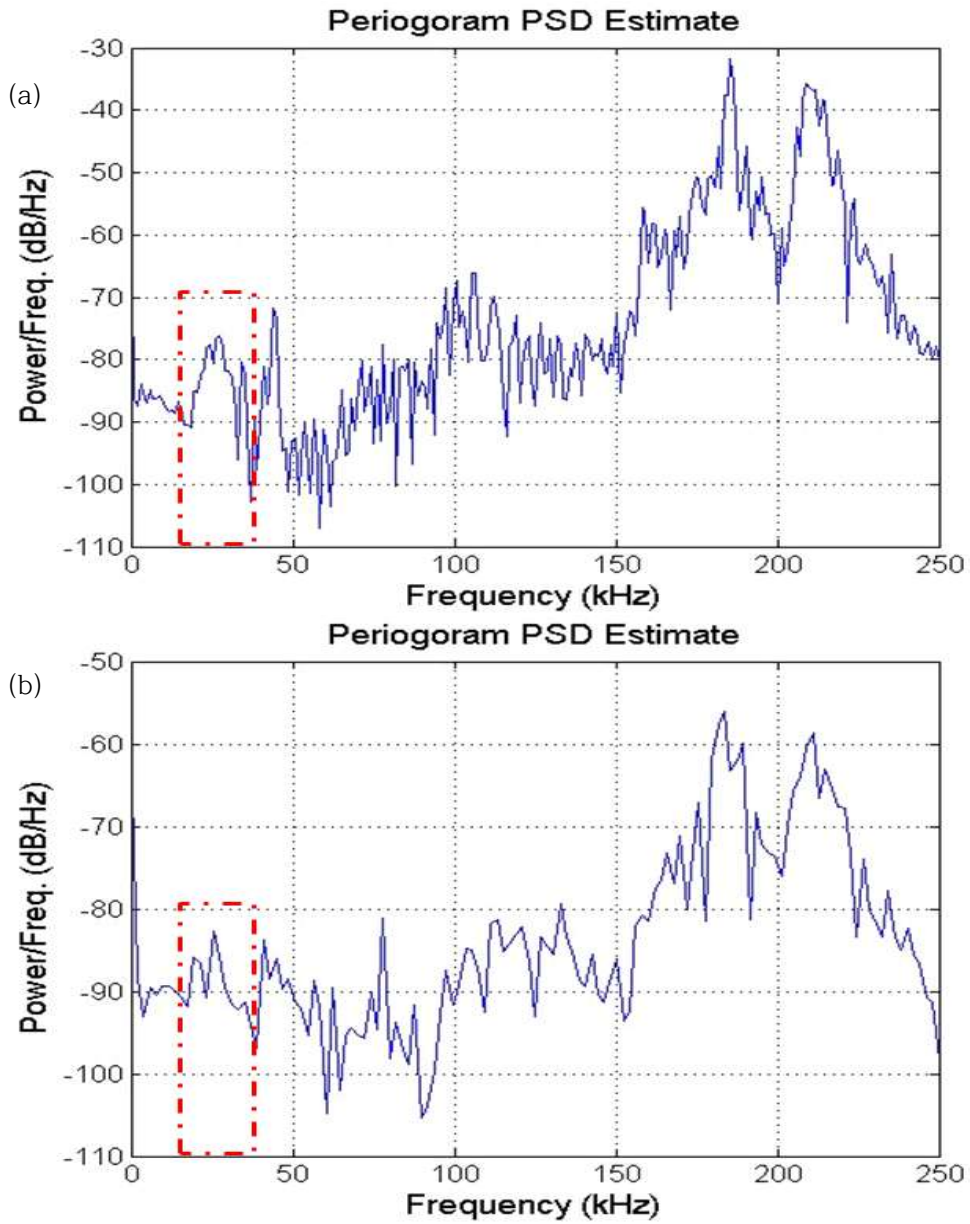


그림 4-25 파라메트릭 Chirp 수신 신호의 스펙트럼
 (a) 아크릴 및 진공에 의한 반사 신호의 스펙트럼,
 (b) 철판에 의한 반사 신호의 스펙트럼

그림 4-26는 정합필터 및 포락선 출력 결과를 나타낸다. 여기서, 검은 점선은 20cm두께의 진흙층과 철판 재질의 수조 벽면을 나타내고 주황 점선은 50cm 두께의 아크릴판을 나타낸다. 첫 번째 반사 신호에 대한 수조 벽면 반사 신호의 정합필터 출력 결과의 비를 계산 하면 1차 주파수의 경우 $61.8/1029.6$ 으로 0.06의 비율을 나타내고 파라메트릭 배열 성분의 경우 $1.88/6.08$ 로 약 0.31의 비율로 파라메트릭 배열 성분이 낮은 감쇠 특성을 갖고 퇴적층을 투과함을 확인 할 수 있다.

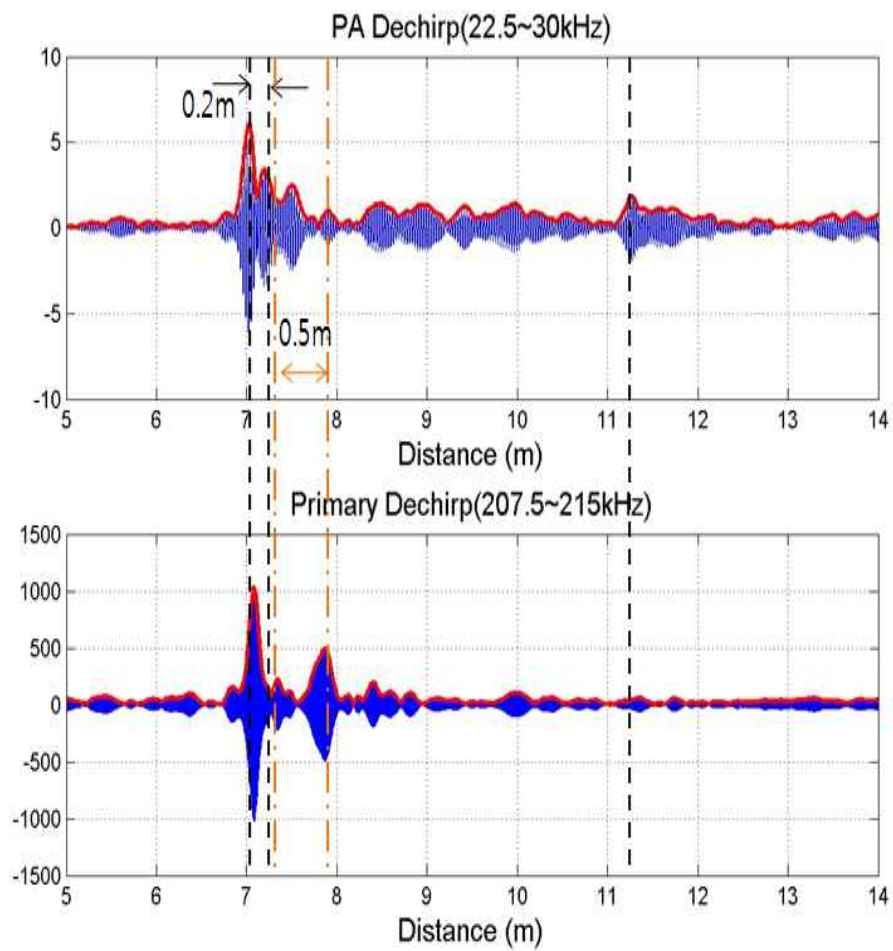


그림 4-26 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 정합필터 및 포락선 출력 결과

그림 4-27는 두 대역의 1차 주파수 Chirp을 이용하여 15~30kHz 대역으로 확장된 파라메트릭 배열 Chirp의 수신 파형 및 대역통과 필터 출력 결과를 보인다. 실험환경은 단일 파라메트릭 배열 Chirp 실험환경과 동일하다. 첫 번째 퇴적층에 의한 최대 수신 전압은 6.78V이고 이중 1차 주파수 Chirp(207.5~215kHz) 성분은 3.47V, 1차 주파수 Chirp(192.5~185kHz) 성분은 2.40V 그리고 파라메트릭 배열 Chirp 성분은 31.3mV로 수신되었다. 모든 대역의 Chirp에서 첫 번째 반사 신호를 확인 할 수 있으나 11.3m에 위치하는 철판의 반사 신호는 파라메트릭 배열 성분에서만 확인 되고 측정된 최대 수신 전압은 10.2mV 이다.

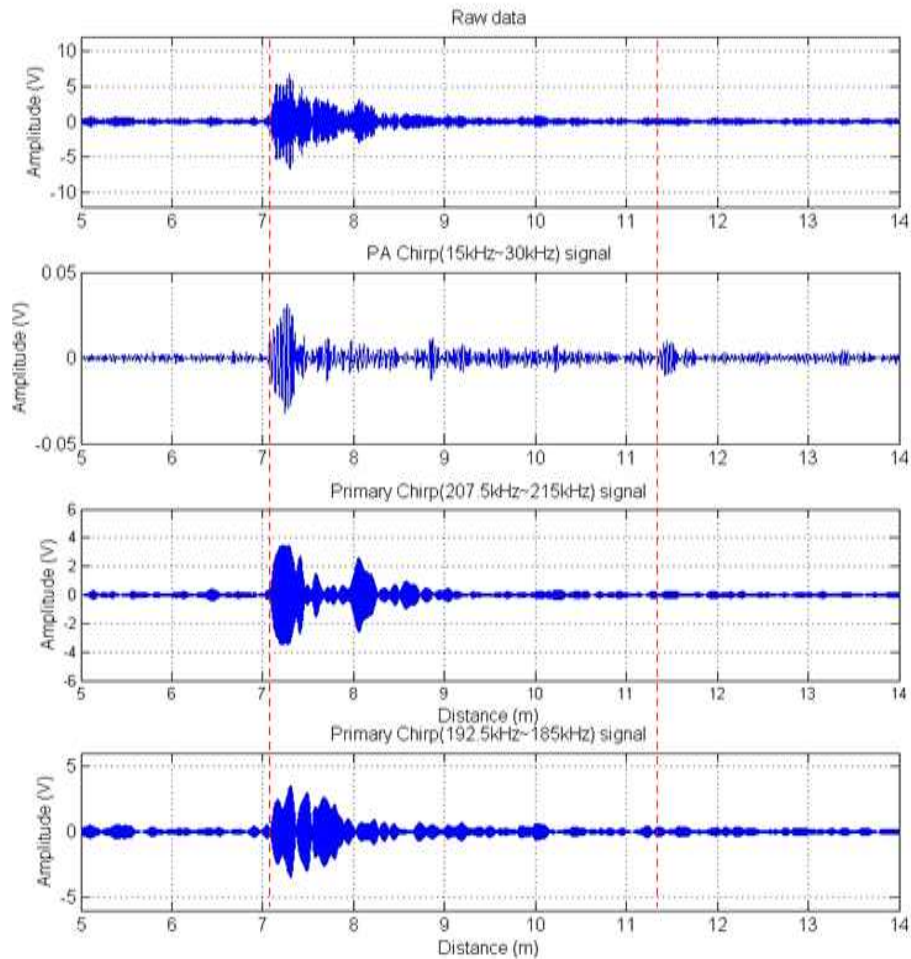


그림 4-27 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp(15~30kHz) 수신 신호

그림 4-28는 각 퇴적층에 의한 반사 신호의 스펙트럼을 보인다. 여기서, 붉은 사각상자는 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 주파수 대역을 나타낸다. 1차 주파수 대역의 경우 첫 번째 반사에 비해 벽면의 반사 신호는 평균적으로 약 17dB 감소하였으나 파라메트릭 배열 성분의 경우 -77.63dB에서 -85.05dB로 약 8dB 감소하였다.

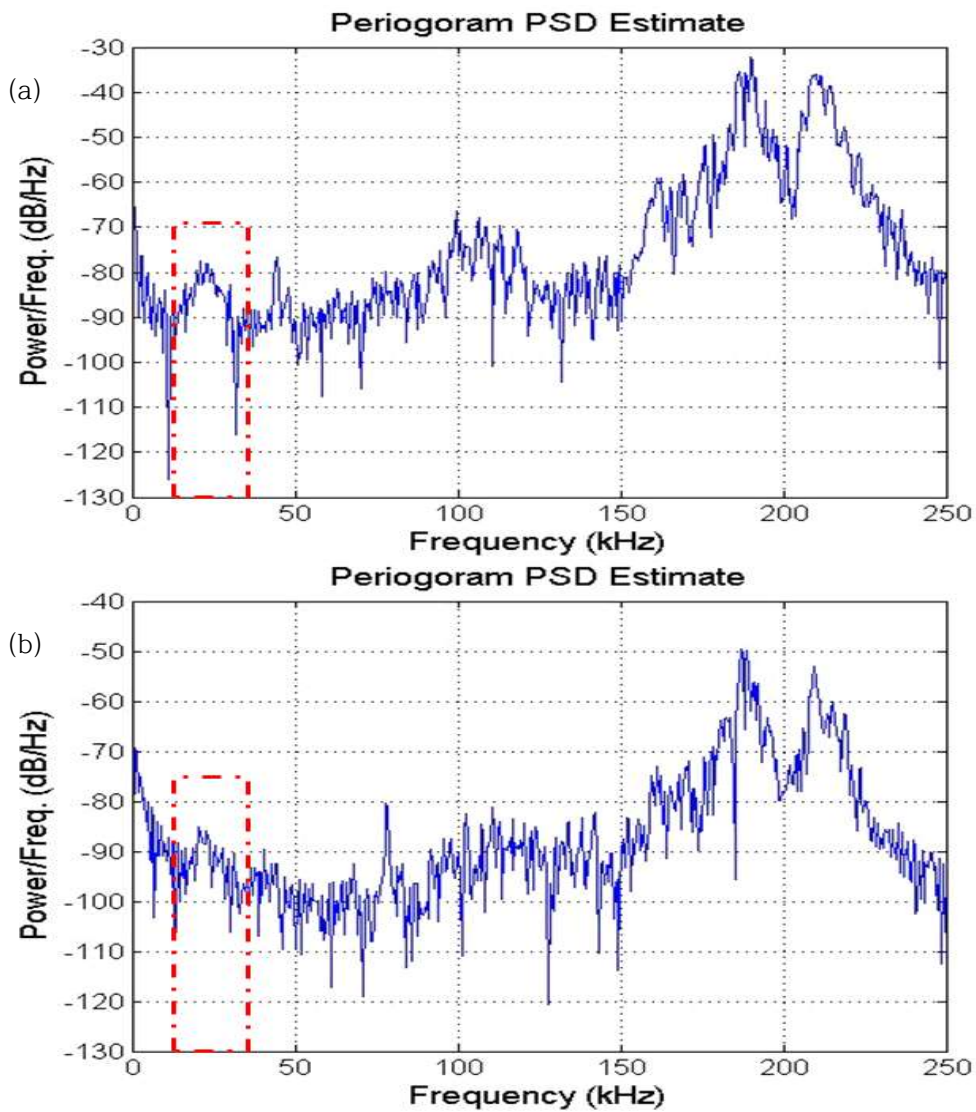


그림 4-28 대역 확장 파라메트릭 Chirp 수신 신호의 스펙트럼

(a) 아크릴 및 진흙에 의한 반사 신호의 스펙트럼

(b) 철판에 의한 반사 신호의 스펙트럼

그림 4-29은 각 대역의 정합필터 및 포락선 출력 결과를 나타낸다. 여기서, 검은 점선은 20cm두께의 진흙층과 철판 재질의 수조 벽면을 나타내고 주황 점선은 50cm 두께의 아크릴판을 나타낸다. 첫 번째 반사 신호에 대한 수조 벽면 반사 신호의 정합필터 출력 비율을 계산 하면 1차 주파수 207.5~215kHz 대역의 경우 56.528/1157.72으로 0.05의 비율을 보이고 1차 주파수 192.5~185kHz 대역의 경우 97.98/824.67로 0.11의 비율을 갖는다. 파라메트릭 배열 성분의 경우 2.12/8.94로 약 0.24의 비율을 보이며 대역 확장 파라메트릭 배열 성분에서도 낮은 감쇠 특성을 갖고 퇴적층을 투과함을 확인 할 수 있다.

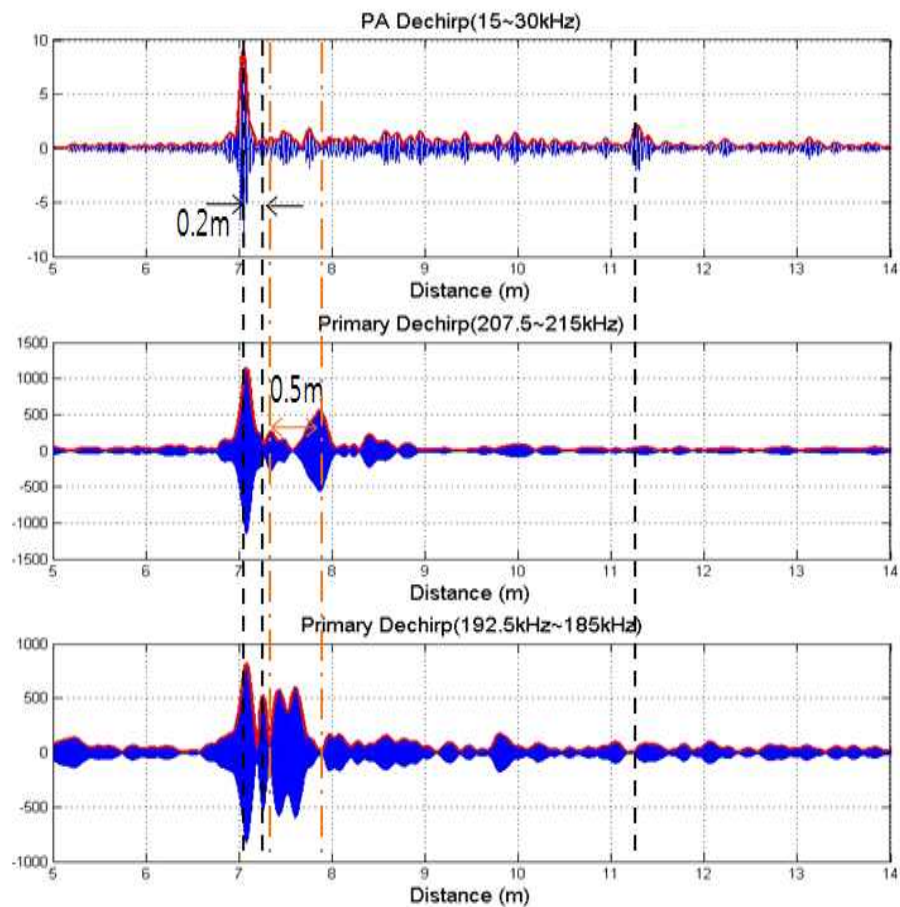


그림 4-29 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 정합필터 및 포락선 출력 결과

다) 다중 대역을 이용한 퇴적층 탐지 실험

일반적인 파라메트릭 배열 기반 해저지층탐사 장비에서는 침투 성능이 좋은 파라메트릭 배열 성분만을 수신 신호 분석에 사용하고 있다. 그러나 수십m 수심의 천해환경에서 수백kHz 대역의 1차 주파수 성분은 파라메트릭 배열 성분에 비해 높은 음압을 유지한다. 비록 침투 성능은 낮지만 표층 지역에서 높은 해상도의 정보를 제공할 수 있다.

그림 4-30은 다중 대역을 이용한 퇴적층 탐지 실험환경을 나타내며 송수신 센서는 동일한 곳에 위치한다. 여기서 퇴적층으로 사용된 물체는 0.2m 두께의 아크릴 박스와 스테인리스 재질의 판 그리고 수조의 철 재질의 벽면이며 각각의 위치는 송수신 센서로부터 5.2m, 7.2m 그리고 12.2m에 위치한다. 1차 주파수 185kHz와 1차 주파수 Chirp(207.5~215kHz)신호를 이용하여 7.5kHz 대역의 파라메트릭 배열 Chirp(22.5~30kHz) 신호를 생성하였으며 1차 주파수 Chirp과 파라메트릭 배열 Chirp 성분이 다중 대역을 이용한 퇴적층 탐지 신호로 사용된다.

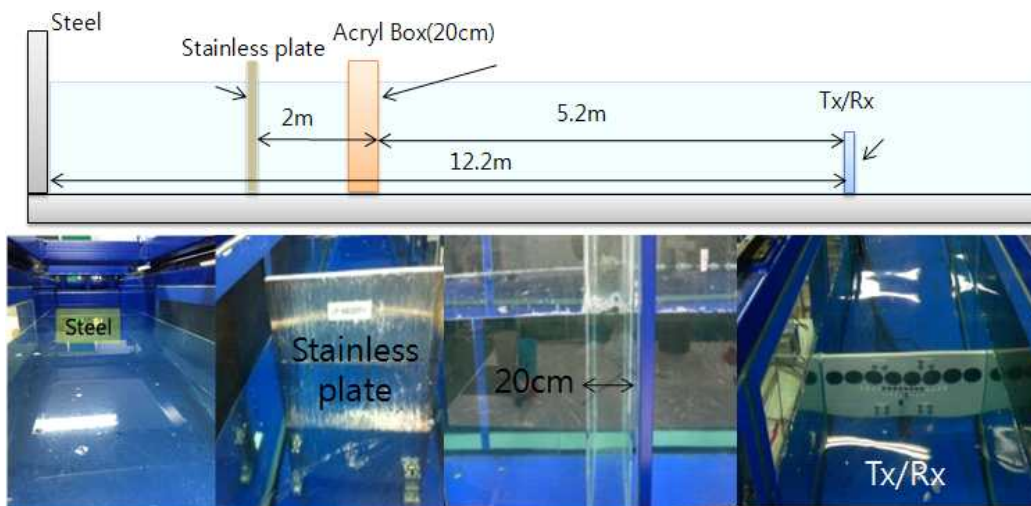


그림 4-30 다중 대역을 이용한 탐지 실험 환경

그림 4-31는 각각 파라메트릭 배열과 1차 주파수의 DeChirp 결과를 보인다. 여기서, 붉은 선은 정규화된 포락선 검출 결과 그리고 검정 원은 다중 대역 탐지 알고리즘의 국부적 최대값 검출 결과로 5.2m와 5.4m에 위치한 아크릴 박스, 7.2m에 위치한 스테인리스 판 그리고 12.2m에 위치한 벽면의 반사 신호를 확인 할 수 있다. 또한 6m 부근의 아크릴 박스 내부 반사에 의한 잔향 신호(녹색 점원)등 7.5m와 12.5m 이상 부분에서 잔향 신호를 확인 할 수 있다.

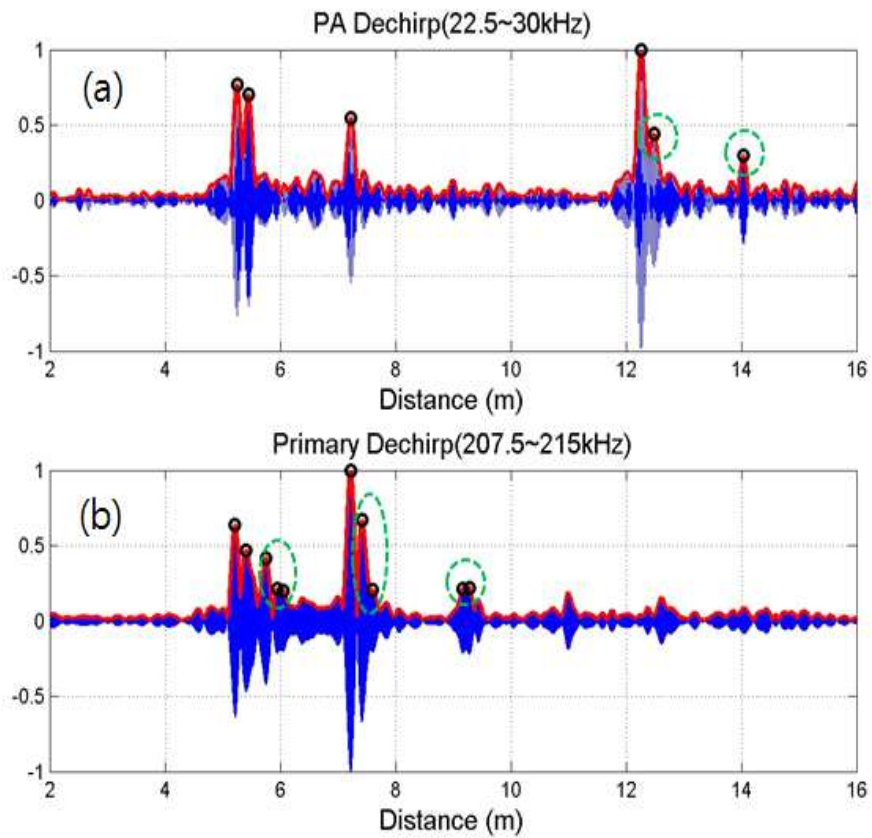


그림 4-31 수신 신호의 Dechirp 결과
(a) 파라메트릭 배열 성분, (b) 1차 주파수 성분

그림 4-32는 각 대역의 위치 검출 결과로부터 잔향 성분을 제거한 최종 출력 결과이다. 실험 결과 1번과 2번째 반사 신호는 아크릴 박스의 두께 0.2m를 표현하고 있으며 3번째 반사 신호에서 스테인리스 판의 질량벽 특성을 1차 주파수 결과로부터 확인 할 수 있다. 마지막으로 4번째 벽면 신호는 침투 성능이 좋은 파라메트릭 배열 성분에서 확인된다.

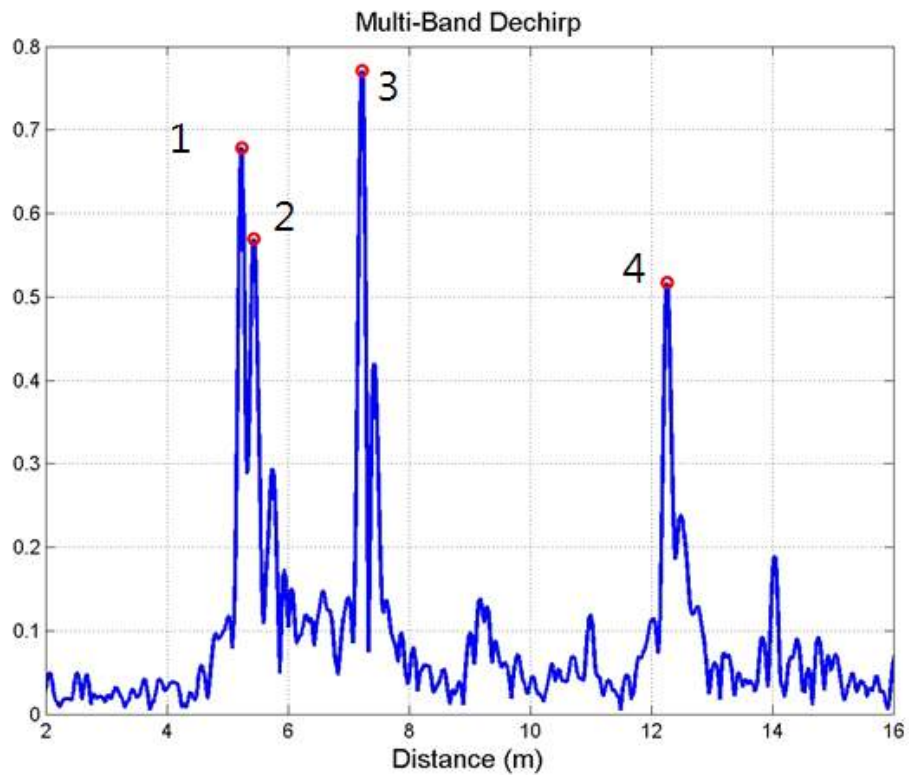


그림 4-32 다중 대역을 이용한 탐지 결과

4.4.3 해상실험 및 결과

파라메트릭 배열 해저지층탐사 시스템의 성능을 검증하기 위해 제주도 북부앞 근해에서 실험역 실험을 수행하였다. 실험역 실험은 제주대학교의 조사선인 아라 2호를 이용하여 수행하였다. 해상실험은 시스템의 센서 특성 실험, 수신 배열 처리 그리고 퇴적층 탐지 실험을 수행하였다.

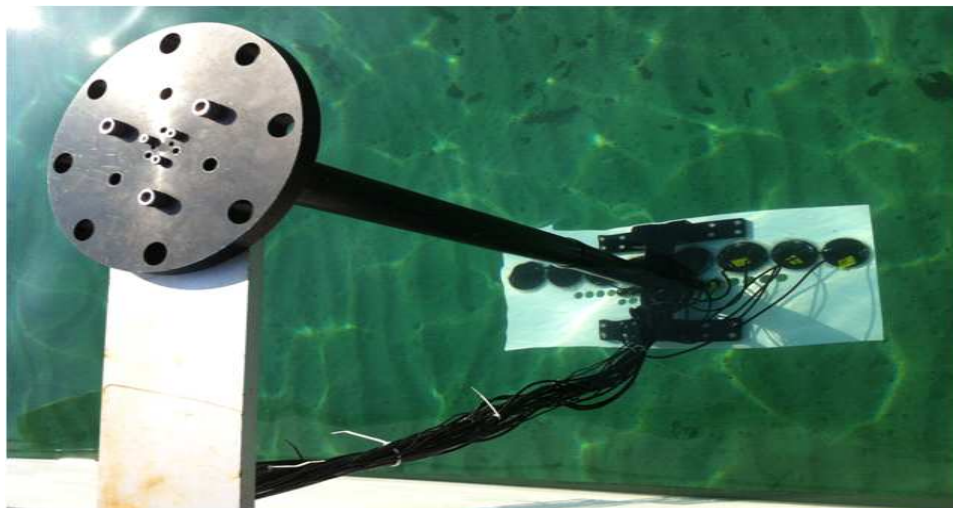


그림 4-33 제주대학교 조사선(아라2호)

우선 선착장에서 수행된 센서 특성 실험에 대하여 소개한다. 센서 특성 실험에 사용된 센서는 파라메트릭 배열 성분 생성을 위한 송신 센서(BII-7541) 1개와 수신 센서(BII-7013)를 사용하며 그림 4-34과 같이 배열 하였다. 여기서, Tx는 송신 센서 Rx는 수신센서를 의미하고 수신 센서는 왼쪽부터 1에서 8번을 부여한다. 또한 송수신 시스템의 송신 표본화 주파수는 3MHz 그리고 수신 표본화 주파수는 500kHz 이다.

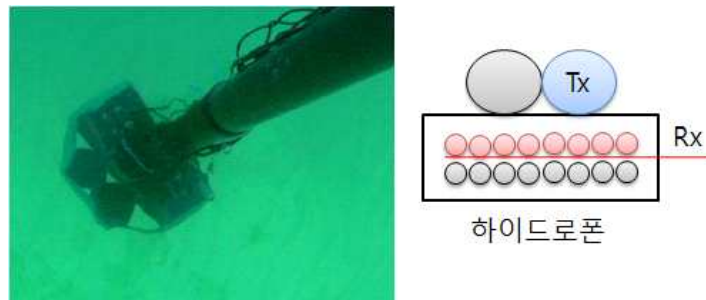


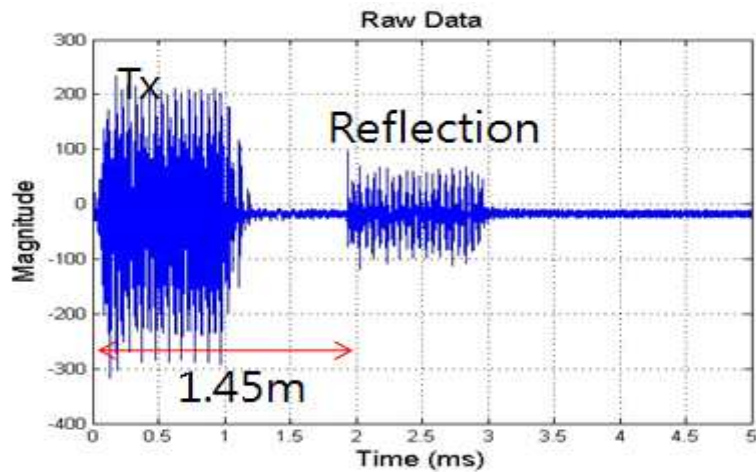
그림 4-34 센서 특성 실험에 사용된 센서 치구

그림 4-35는 센서 특성 실험이 수행된 내항의 위치를 나타내고 실험 당일 수심은 약 2m로 송수신 센서와 지면의 거리는 약 1.5m이다. A 지점에서는 송신(BII-7541) 센서와 수신(BII-7013) 센서를 이용하여 20kHz의 단일 주파수 파라메트릭 배열 성분과 파라메트릭 배열 Chirp(22.5~30kHz) 성분에 대한 실험을 수행하였다.

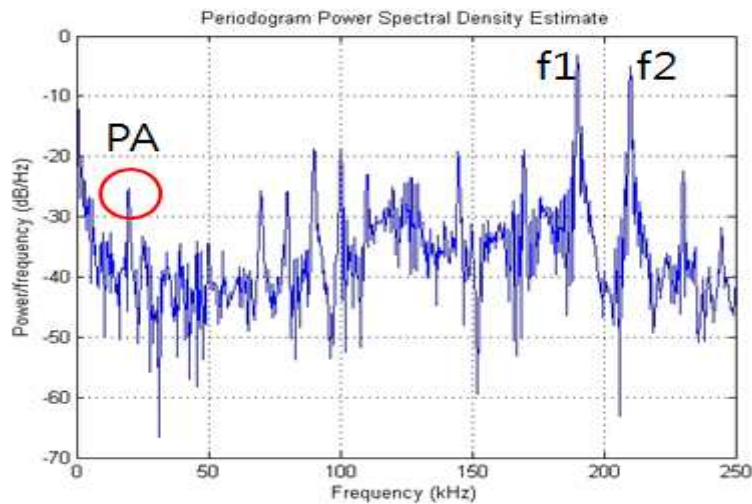


그림 4-35 센서 특성 실험이 수행된 내항의 위치

그림 4-36 (a)는 수신 센서 6번 채널에서 수신된 20kHz의 단일 파라메트릭 배열 성분으로 1차 주파수는 190kHz와 210kHz를 사용하였으며 펄스폭은 1ms 이다. 여기서, 송신 센서에 인가한 전압은 42.4Vrms로 2ms 지점에서 수신된 반사 신호의 전압은 31.1mVrms이다. 그림 4-36 (b)는 반사 신호의 FFT 결과로 20kHz 대역의 파라메트릭 배열 성분이 확인된다. 여기서, 파라메트릭 배열 성분은 -25.37dB의 값을 갖고 1차 주파수 190kHz는 -3.16dB, 210kHz는 -5.09dB의 값을 보인다.



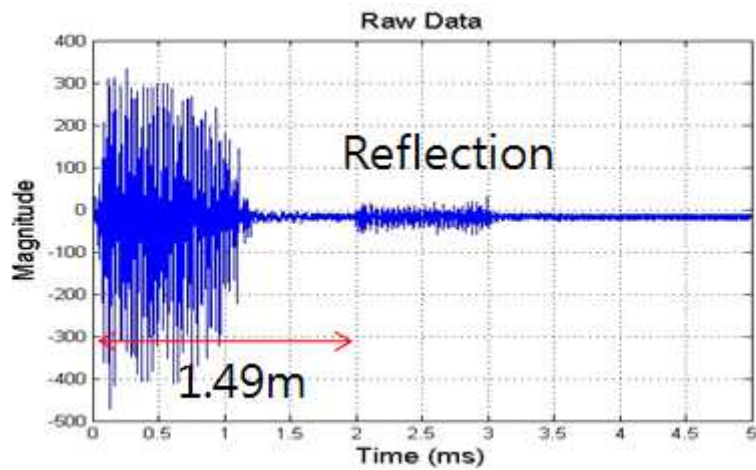
(a) 수신 파형



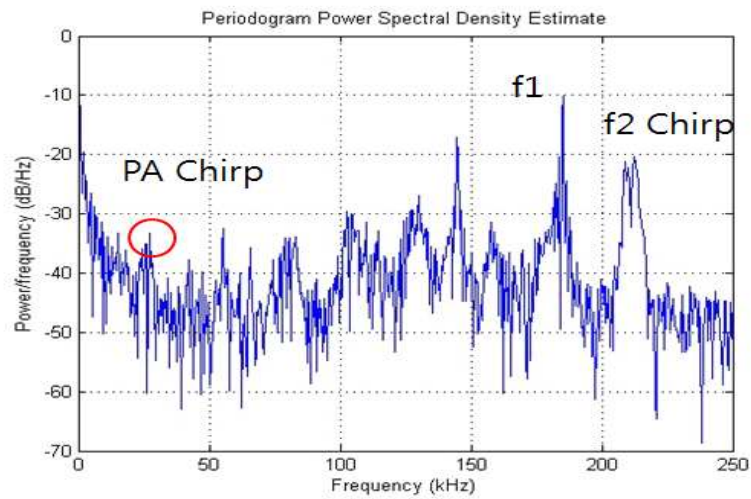
(b) 반사 신호의 FFT 결과

그림 4-36 A 지점에서 수신된 파라메트릭 배열(20kHz) 성분

그림 4-37 (a)은 수신 센서 6번 채널에서 수신된 22.5~30kHz 대역의 파라메트릭 배열 Chirp 성분으로 1차 주파수는 185kHz와 207.5~215kHz의 Up Chirp 신호를 사용하였으며 펄스폭은 1ms 이다. 여기서, 송신 센서에 인가한 전압은 42.4Vrms로 2ms 지점에서 수신된 반사 신호의 전압은 10.6mVrms이다. 그림 4-37 (b)는 반사 신호의 FFT 결과로 파라메트릭 배열 Chirp 성분이 확인된다.



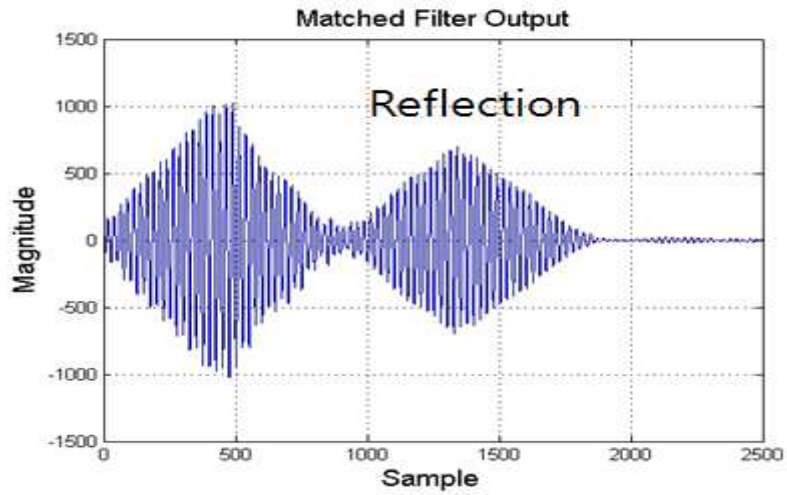
(a) 수신 파형



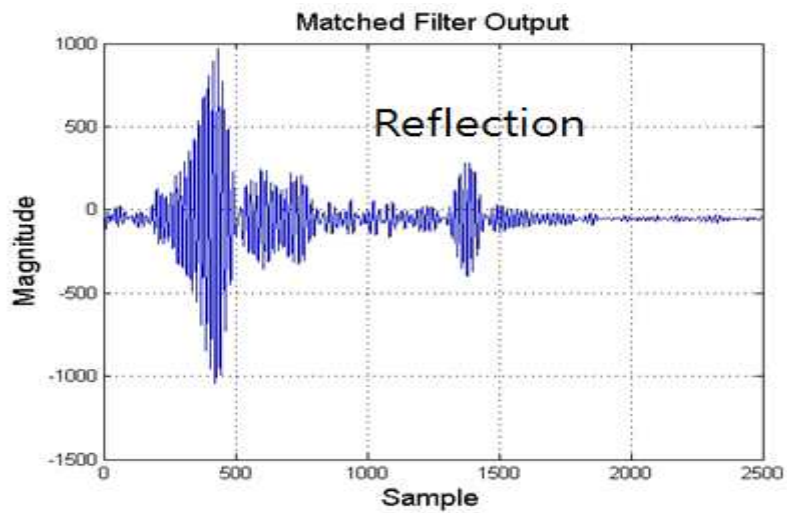
(b) 반사 신호의 FFT 결과

그림 4-37 A 지점에서 수신된 파라메트릭 배열 Chirp(22.5~30kHz) 성분

그림 4-38은 수신된 파라메트릭 배열의 단일 주파수 성분과 Chirp 성분의 정합 필터 출력 결과를 보인다. 정합 필터 출력 결과 1300 Sample 위치에서 반사 신호에 대한 최대 상관값이 출력되고 Chirp 성분에서 펄스 압축되어 수직 방향 분해능이 향상된 결과를 확인 할 수 있다.



(a) 20kHz의 정합필터 출력



(b) Chirp(22.5~30kHz) 성분의 정합필터 출력

그림 4-38 A 지점에서 수신된 파라메트릭 배열 성분의 정합필터 출력 비교

다음은 함덕 해수욕장 근해에서 송신(BII-7541) 센서 배열(8x1)과 수신(BII-7013) 센서 배열(8x1)을 이용한 지층탐지 결과를 소개한다. 1차 주파수 185kHz와 1차 주파수 UpChirp(207.5~215kHz)신호를 이용하여 7.5kHz 대역의 파라메트릭 배열 Chirp(22.5~30kHz) 신호를 생성하였으며 신호의 펄스폭은 20ms로 설정하였다. 또한 각 송신 센서에 42.4Vrms의 입력전압을 인가하였다. 그림 4-39는 측정경로 및 선박에 부착된 송수신 센서 배열을 보인다. 경로 A의 이동경로는 약 1km이며 선박은 3knot(1.54m/s) 이하의 속도로 이동하였다. 실험 해역의 평균 수심은 약 15m이며 해상은 파도와 너울의 영향이 강한 환경으로 선박의 Roll, Pitch, Yaw 방향 움직임이 심한 날씨였다. 관측결과 수심은 음속 1500m/s를 가정하여 시간을 수심단위로 정규화 하였다.

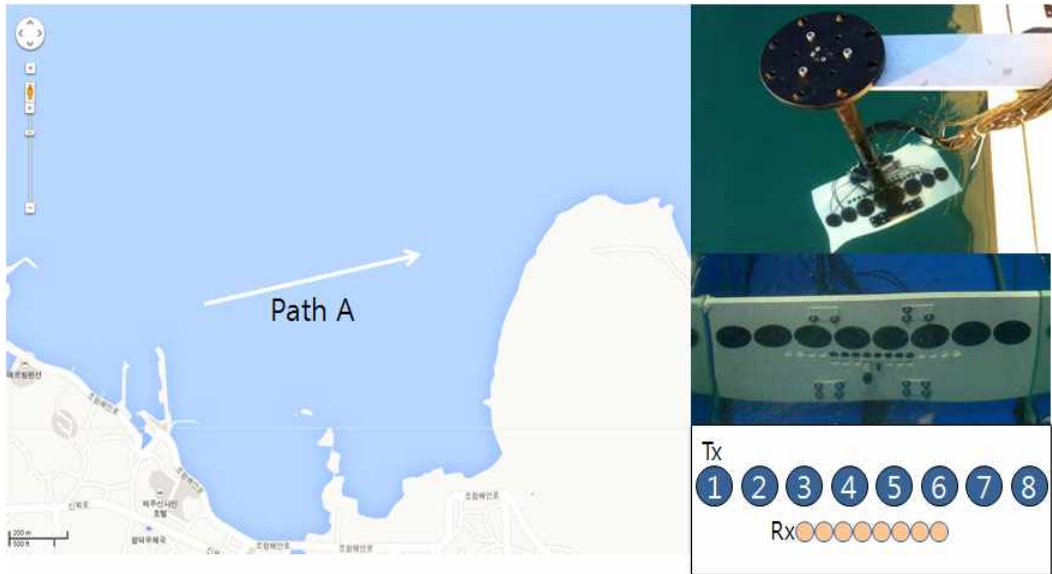


그림 4-39 실험 해역 및 측정 경로 (수심 15m 구간)

그림 4-40과 4-41은 각 수신 채널에서 수신된 정합필터 출력 결과의 예로 측정 수심은 약 13.7m 이다. 파라메트릭 배열 성분의 정합필터 출력의 경우 수신 센서 3번~8번 채널에서 해저면의 반사 신호가 확인 된다.

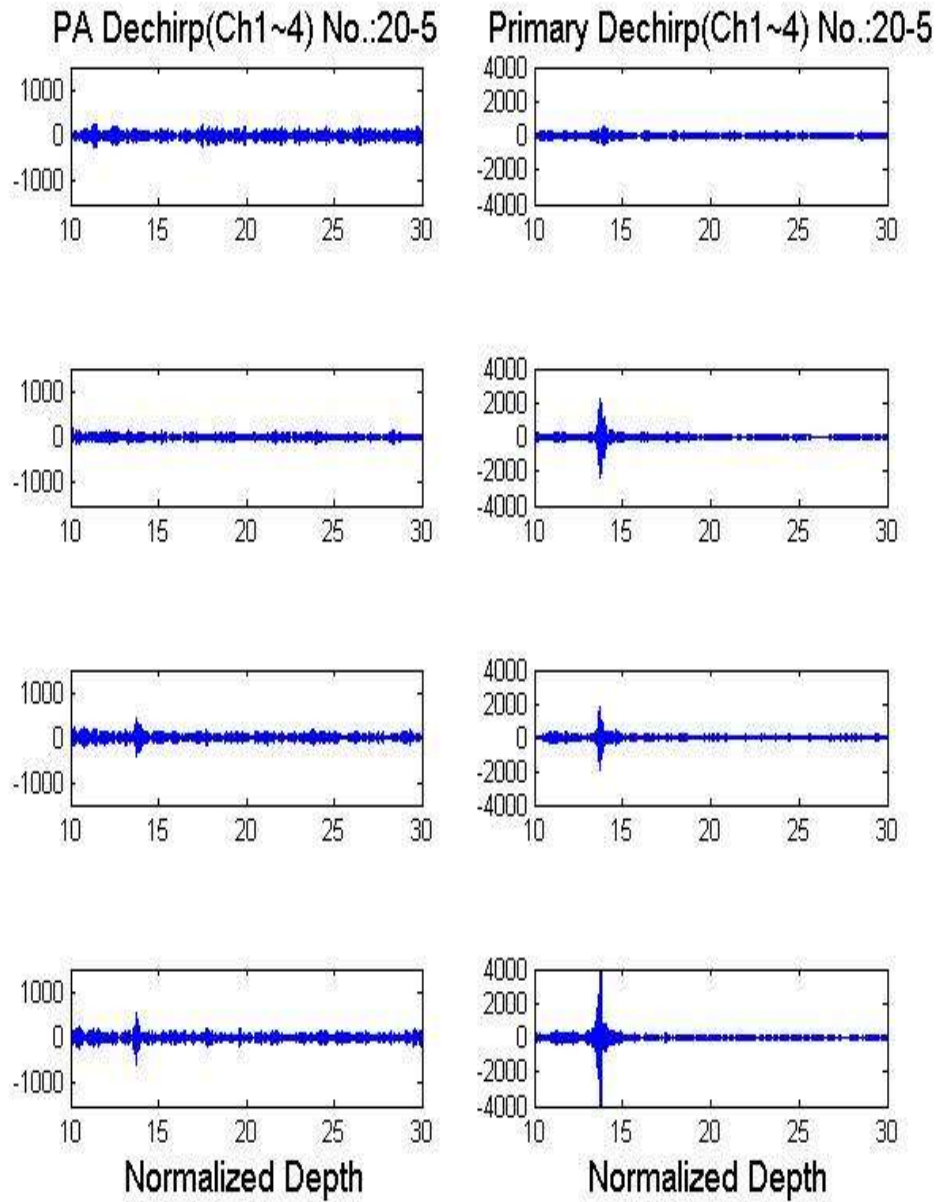


그림 4-40 각 수신 채널의 정합필터 출력 결과(수신 채널 1~4, 13.7m 지점)

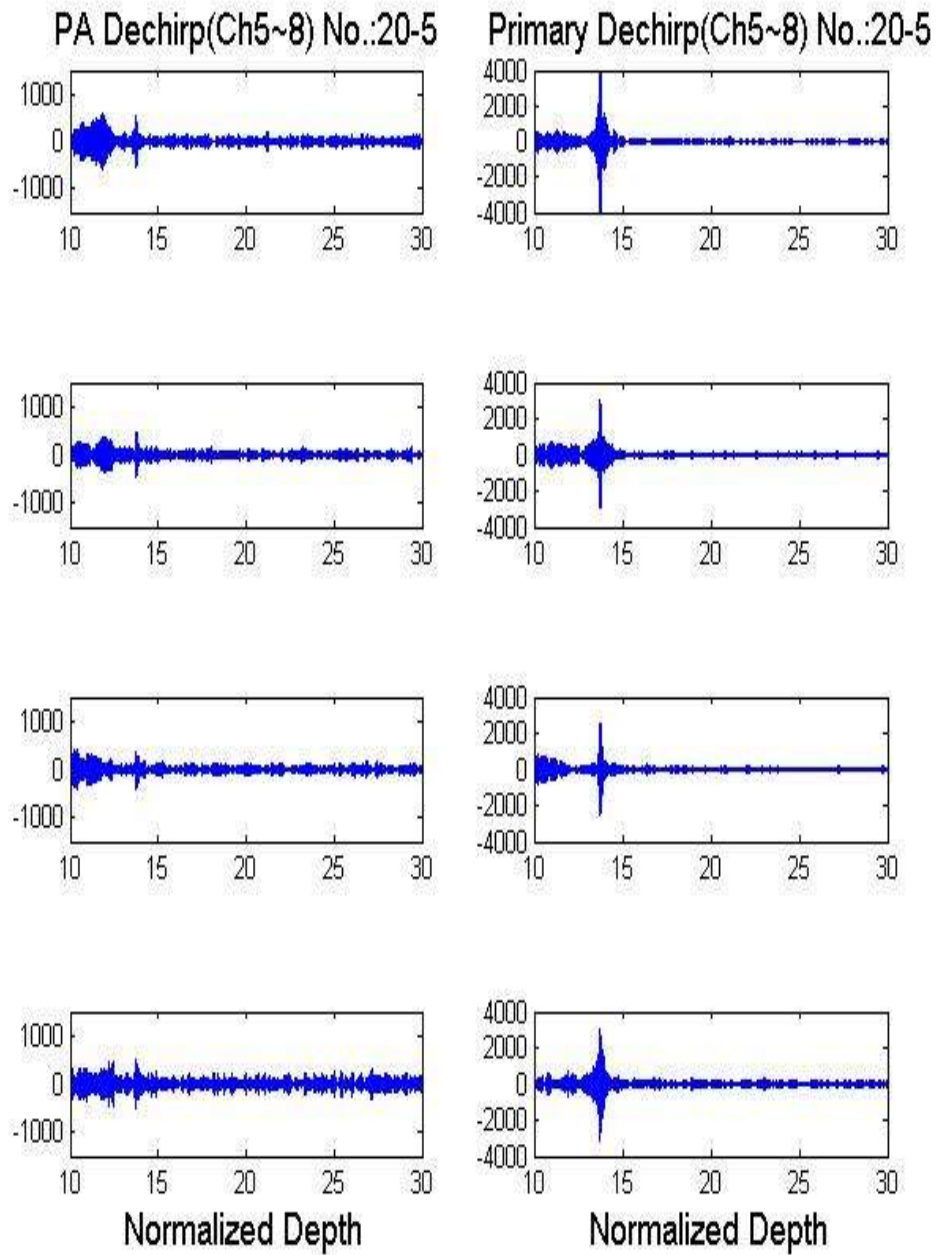


그림 4-41 각 수신 채널의 정합필터 출력 결과(수신 채널 5~6, 13.7m 지점)

그림 4-42은 각 수신 센서의 정합필터 출력결과로부터 거리 지연을 보정한 후 각 출력을 합한 결과로 단일 채널(4번) 출력에 비해 파라메트릭 배열 성분은 4.4배(합: 2424, 단일: 549.4), 그리고 1차 주파수 성분은 3.5배(합: 17090, 단일: 4855)의 이득을 얻었다.

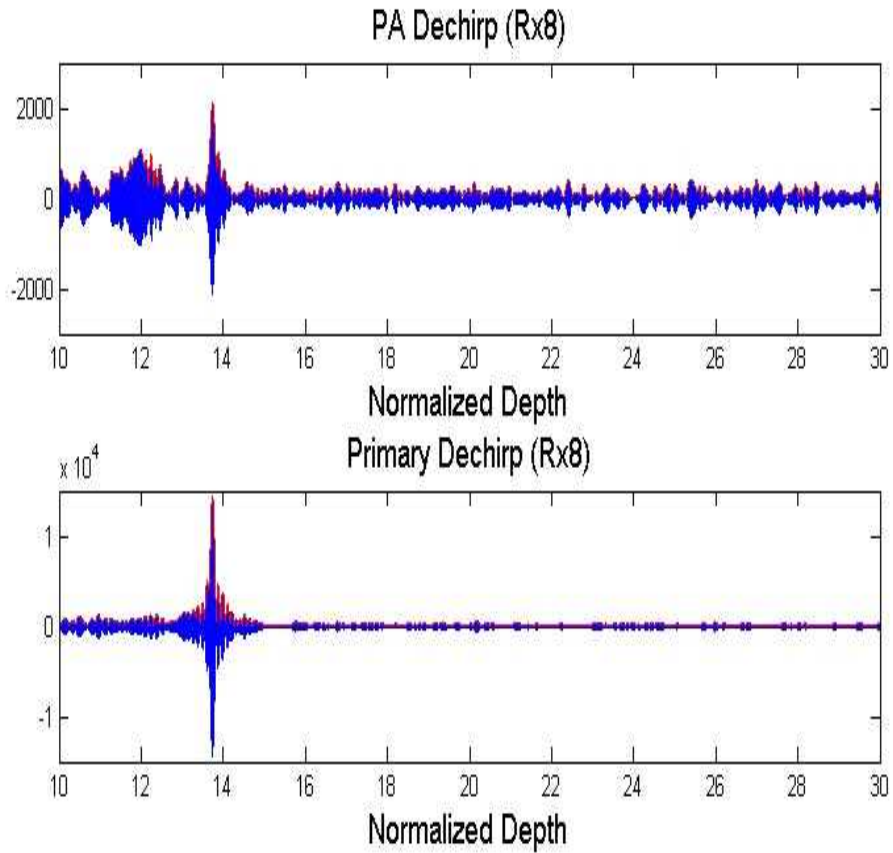


그림 4-42 정합필터 출력으로부터 수신 배열 처리한 결과(13.7m 지점)

그림 4-43과 4-44는 각각 1차 주파수 성분의 단일(4번) 수신 센서 및 8채널 배열 센서 처리 결과를 보인다. 불규칙한 해저면의 표층 반사 신호가 확인되고 하부 반사 신호는 확인되지 않는다.

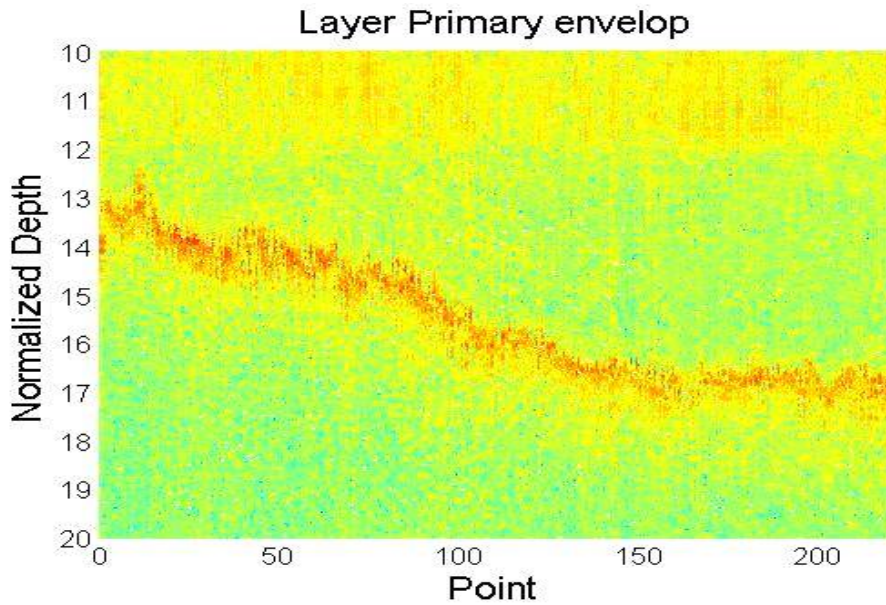


그림 4-43 경로 A의 단일 센서 수신 처리 결과(1차 주파수)

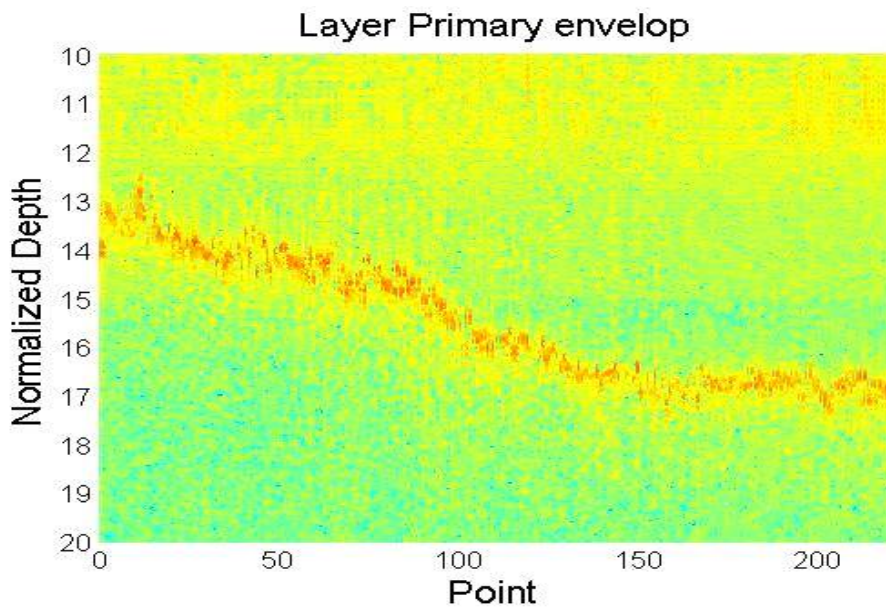


그림 4-44 경로 A의 8개의 배열 센서 수신 처리 결과(1차 주파수)

그림 4-45와 4-46는 각각 파라메트릭 배열 성분의 단일(4번) 수신 센서 및 8채널 배열센서 처리 결과를 보인다. 8개의 수신 센서를 이용한 결과에서 수심 12m 이내의 영역에 존재하는 잡음 특성이 개선된 결과를 보인다. 파라메트릭 배열 신호 성분에서도 1차 주파수 결과와 같이 불규칙한 해저면의 표층 반사 신호만이 확인된다.

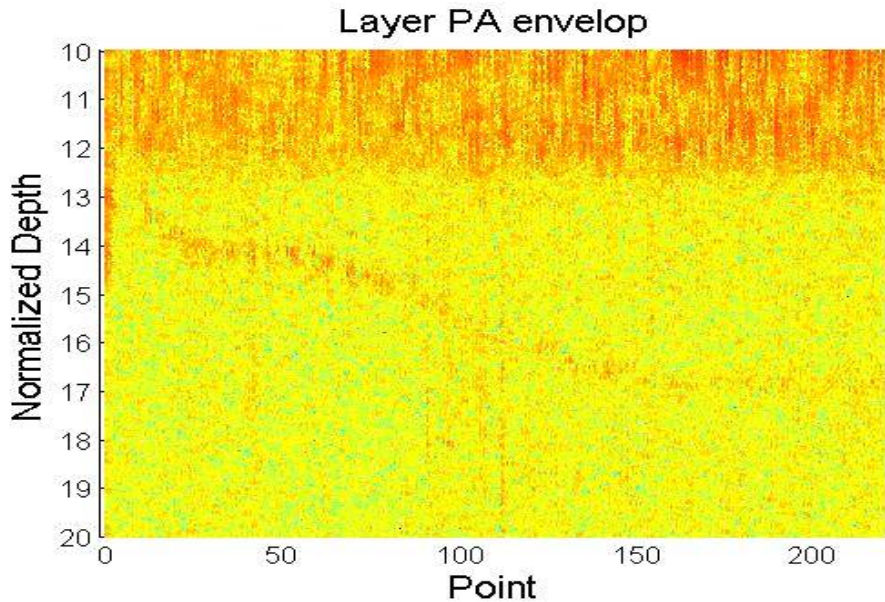


그림 4-45 경로 A의 단일 센서 수신 처리 결과(파라메트릭 배열)

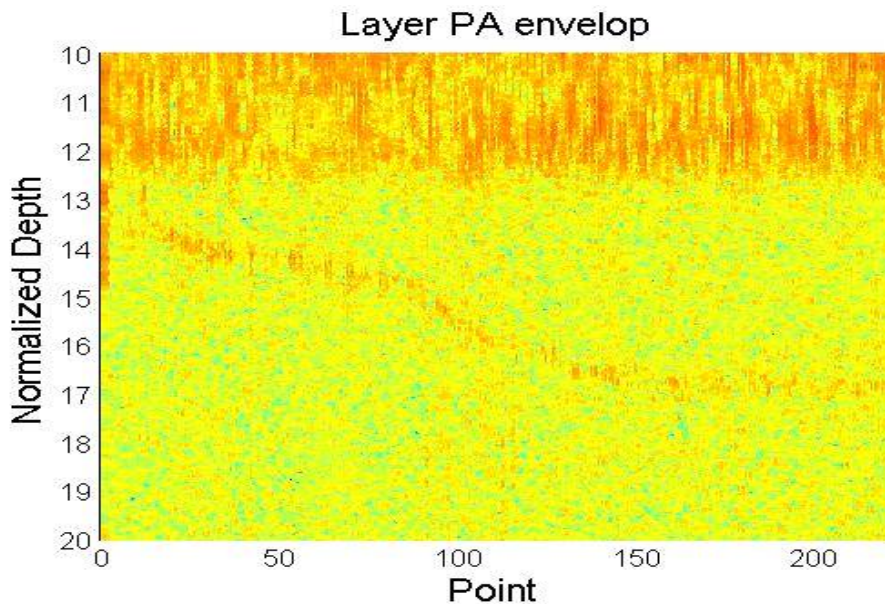


그림 4-46 경로 A의 8개의 배열 센서 수신 처리 결과(파라메트릭 배열)

다음은 함덕 해수욕장 근해에서 송신(BII-7541) 센서 배열(1x8)과 수신(TC-4013) 센서를 이용한 지층탐지 결과를 소개한다. 1차 주파수 185kHz와 1차 주파수 UpChirp (207.5~215kHz)신호를 이용하여 7.5kHz 대역의 파라메트릭 배열 Chirp (22.5~30kHz) 신호를 생성하였으며 신호의 펄스폭은 20ms로 설정하였다. 또한 각 송신 센서에 42.4Vrms의 입력전압을 인가하였다. 그림 4-47은 측정경로 및 선박에 부착된 송수신 센서 배열을 보인다. 경로 A의 이동경로는 약 1.8km이며 선박의 이동 속도는 초기 약 0.5km 이내 구간을 3knot(1.54m/s), 약 0.5~1.3km 구간을 4~8knot(2.05~4.11m/s) 속도로 이동하였다. 실험 해역은 수심 약 28~75m의 급경사 해역 특성을 보였으며 해상은 파도와 너울이 잔잔한 날씨였다.

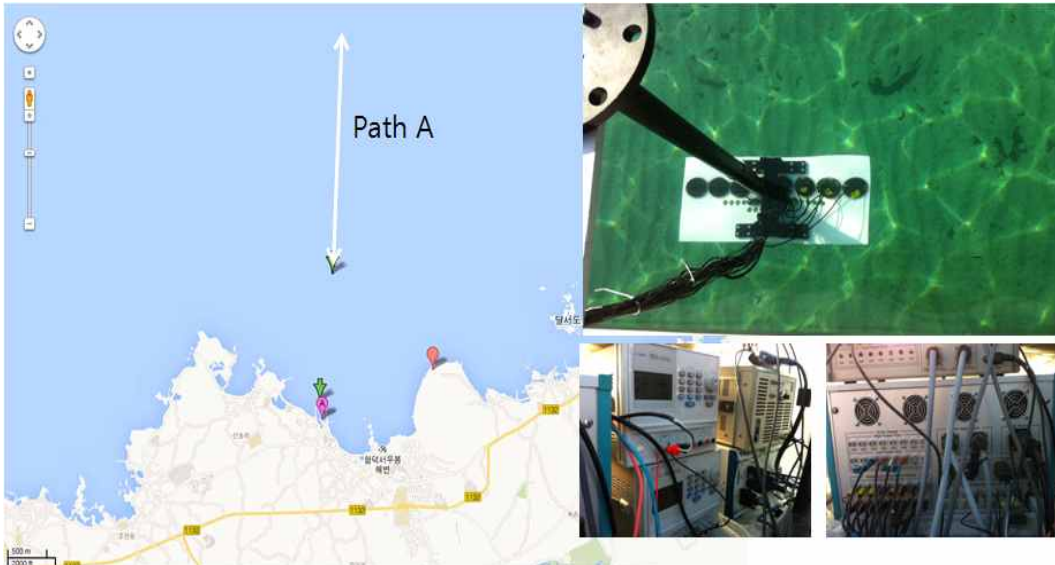


그림 4-47 실험 해역 및 측정 경로 (수심 30~80m 구간)

그림 4-48은 1차 주파수의 정합필터 출력 결과를 나타낸다. 1차 주파수의 측정 결과 해저면은 급경사지고 수심 75m 까지 해저 표면반사가 관측되며 하부반사 신호는 확인되지 않는다. x축 80에서 100 포인트 위치에서 구릉형태의 해저구조가 확인된다. 수심 55m 이하에서 확인되는 두 번째 반사 신호(x축의 0~70포인트)는 첫 번째 반사 신호가 표층에 반사되어 수신된 잔향 신호이다.

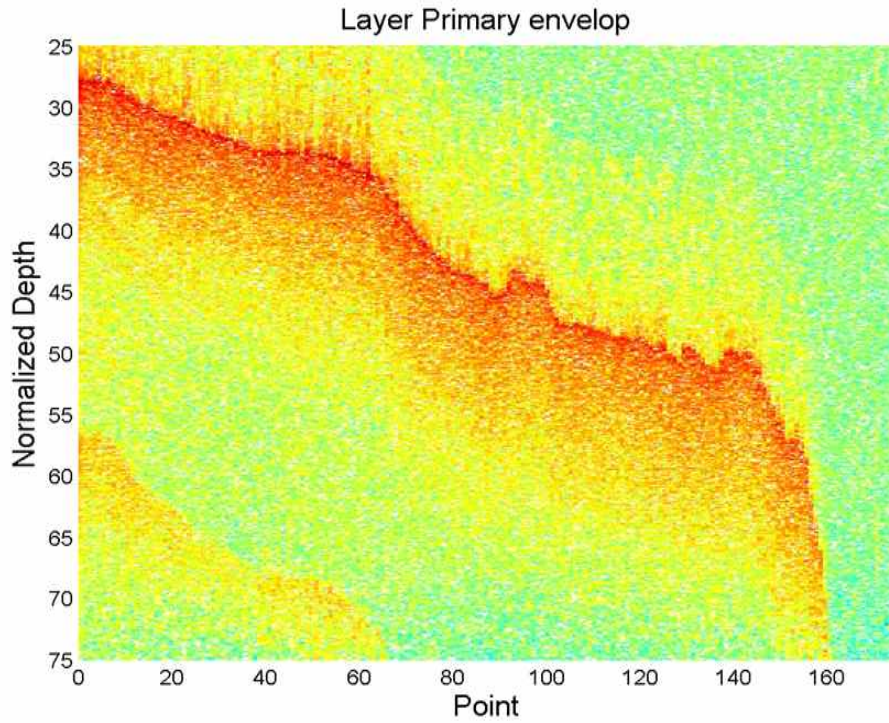


그림 4-48 1차 주파수 측정결과

그림 4-49는 파라메트릭 배열 신호의 정합필터 출력 결과를 나타낸다. 1차 주파수의 측정결과와 대체로 유사한 특성을 보이고 저속 이동구간(x축 0~60포인트)의 경우 1차 주파수의 해저면 반사 신호보다 뚜렷한 표면반사 신호가 확인되고 해부 반사 신호는 확인되지 않는다. 60포인트 이상의 고속 이동구간의 주요 잡음 원인은 선박의 이동속도 증가에 의해 발생되었던 모터 잡음영향이다.

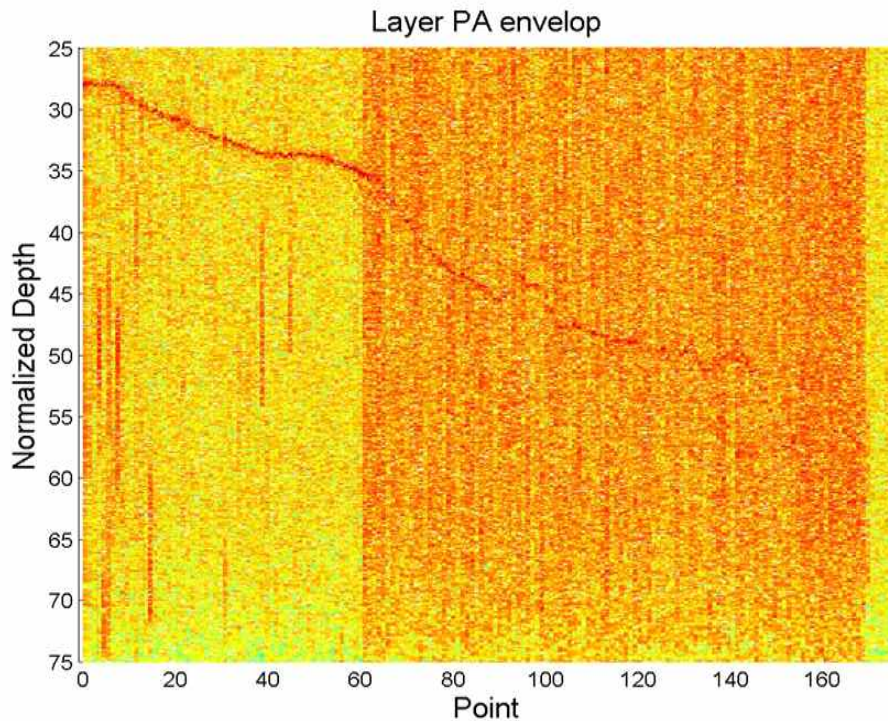


그림 4-49 파라메트릭 배열 성분 측정 결과

해상 실험결과 1차 주파수 및 파라메트릭 배열 성분에서 해저면의 반사 신호만 관측되고 하부반사 신호는 검출되지 않았다. 이는 실험해역인 제주도 해역이 용암류가 바다에 접하면서 형성된 전형적인 화산해안으로 주로 현무암이 분포하는 특성의 영향^[50]과 실험적으로 계산된 1차 주파수의 음원준위가 수조실험 환경보다 약 25dB 낮게 발생되었던 이유로 사료된다.

4.4.4 실측시스템의 음원 준위 추정

해저 지층탐사 시스템의 성능 평가를 위해 2차원 수조를 이용한 수조실험 및 제주도 북부앞 근해에서 실험역 실험을 수행하였다. 수조 실험결과 파라메트릭 배열 성분에서 아크릴 박스와 진흙 구조의 퇴적층 과 철 재질의 수조 벽면의 반사 신호를 측정하여 높은 투과 성능을 확인 하였다. 그러나 해상 실험결과 1차 주파수 및 파라메트릭 배열 성분에서 해저면의 반사 신호만이 검출 되고 하부반사 신호를 확인 할 수 없었다. 원인 분석을 위해 실측정보로부터 본 시스템의 음원준위(SL)를 추정하여 수조실험과 해상실험 환경의 차이를 확인하고자한다.

해저 지층탐사 시스템의 특성 분석을 위해 측정된 실험데이터와 수신 센서의 수신음압감도(RVS)를 적용하여 1차 주파수와 파라메트릭 배열 성분의 초기 음원준위(SL)를 식(2.23)~(2.26)을 이용하여 추정하였다. 여기서 1차 주파수 대역은 207.5~215kHz 이고 파라메트릭 배열 대역은 22.5~30kHz 이다. 송신측 전력 증폭기의 증폭 이득은 20dB 그리고 수신측 전치 증폭기의 증폭 이득은 24dB 이며 수신 센서는 BII-7013을 사용하였다. BII-7013의 수신음압감도(RVS)는 -198.1dB ref (1V/1 μ Pa)로 민감도를 계산하면 0.124mV/Pa를 갖는다. 또한 파라메트릭 배열 Chirp의 평균 주파수 26.25kHz에 대한 흡음계수는 담수와 해수에서 각각 1.8012×10^{-5} [Neper/m] (1.56x10-4dB/m)와 4.65×10^{-4} [Neper/m](4x10-3dB/m)로 계산되고 1차 주파수 Chirp의 평균 주파수 211.25kHz에 대한 흡음계수는 각각 1.2×10^{-3} [Neper/m] (10.4x10-3dB/m)와 8.9×10^{-3} [Neper/m](77.3x10-3dB/m)로 계산되어 측정거리에 따른 전달손실(TL(dB)=20logR+ α R)을 계산한 후 음압준위(SPL)에 더하여 초기 음원준위(SL)를 추정하였다.

표 4-3과 4-4는 수조 실험 및 해상 실험에서 수신된 신호의 전압을 나타낸다. 여기서 송신 전압(V_Tx)은 각 전력증폭기의 출력을 나타내고 수신전압(V_Rx)에서 ‘Raw’는 수신된 전압(1차 주파수 성분 + 파라메트릭 배열 성분), ‘PA’는 수신 전압 중 파라메트릭 배열 성분(Chirp)의 전압 그리고 ‘Primary’는 수신전압 중 1차 주파수 성분(Chirp)의 전압을 나타낸다. 수조 실험은 2차원 수조의 벽면에 대한 반사 신호를 나타내고 해상실험은 해저면에 의한 반사 신호를 나타낸다. 여기서 전압의 단위는 Vrms이다.

표 4-3 거리에 따른 수신 전압(수조 실험)

Distance	Tx Volt [Vrms]	Rx Volt [mVrms]		
		Raw	PA	Primary
5m	42.4	28.92	3.00	9.48
8m	42.4	34.15	3.26	7.50
10m	42.4	17.39	1.37	5.97
26m	42.4	8.13	0.52	1.82

표 4-4 거리에 따른 수신 전압(해상 실험)

Distance	Tx Volt [Vrms]	Rx Volt [mVrms]		
		Raw	PA	Primary
8m	42.4	1.11	0.06	0.21
17m	42.4	1.04	0.05	0.25
26m	42.4	0.65	0.04	0.08
30m	42.4	0.69	0.04	0.17
37m	42.4	0.54	0.03	0.11
40m	42.4	0.43	0.01	0.11
65m	42.4	0.39	0.02	0.04
70m	42.4	0.45	0.03	0.16

표 4-5과 4-6의 수신 전압에 민감도를 적용하여 음압준위(SPL)를 계산한 후 전달 손실(TL)을 더하여 초기 음원준위(SL)를 표 4-5와 4-6과 같이 추정하였다.

표 4-4 음원준위 추정결과(수조 실험)

Dist.	Tx Volt [Vrms]	SPL: dB ref 1 μ Pa		TL(dB)=20logR+ α R		SL: dB ref 1 μ Pa	
		PA	Primary	PA	Primary	PA	Primary
5m	42.4	147.67	157.66	13.98	14.03	161.65	171.69
8m	42.4	148.40	155.63	18.06	18.14	166.46	173.77
10m	42.4	140.88	153.65	20.00	20.10	160.88	173.75
26m	42.4	132.39	143.35	28.30	28.56	160.69	171.91

표 4-6 음원준위 추정결과(해상 실험)

Dist.	Tx Volt [Vrms]	SPL: dB ref 1 μ Pa		TL(dB)=20logR+ α R		SL: dB ref 1 μ Pa	
		PA	Primary	PA	Primary	PA	Primary
8m	42.4	113.18	124.37	18.09	18.68	131.27	143.05
17m	42.4	112.02	126.25	24.67	25.92	136.69	152.17
26m	42.4	110.83	116.70	28.40	30.30	139.23	147.00
30m	42.4	109.93	122.73	29.66	31.86	139.59	154.59
37m	42.4	106.25	119.20	31.51	34.22	137.76	153.42
40m	42.4	101.14	119.20	32.20	35.13	133.34	154.33
65m	42.4	104.95	109.10	36.51	41.28	141.46	150.38
70m	42.4	108.38	121.97	37.18	42.31	145.56	164.28

실측 데이터로부터 초기 음원준위 추정 결과 수조환경에서 파라메트릭 배열 성분의 평균 음원준위는 162.41dB, 1차 주파수 성분의 평균 음원준위는 172.78dB 이다. 송신 센서 BII-7541의 송신음압감도(TVR) 164.8dB ref (1 μ Pa/1V)를 고려하여 송신전압(42.4Vrms)에 대한 1차 주파수의 음원준위(SL)를 식(2.17)과 식(2.15)에 대입하여 계산하면 197.35dB로 측정된 값에 비해 약 25dB 낮게 측정되었지만 파라메트릭 성분의 경우 일반적인 파라메트릭 배열 신호 성분이 1차 주파수에 비해 약 40dB 낮게 생성되는 점을 고려할 때 157dB로 유사한 값을 갖는다. 여기서, 1차 주파수의 음원준위(SL) 예측 오차는 수신 센서 BII-7013의 주파수응답특성에 의한 영향으로 예상된다. 또한 실험 환경에서 파라메트릭 배열 성분의 평균 음원준위(SL)는 139.11dB, 1차 주파수 성분의 평균 음원준위(SL)는 152.40dB로 수조 환경보다 약 20~25dB 낮게 측정되어 수조 환경과 유사한 결과를 얻기 위해서는 약 25dB 높은 음원준위가 요구 한다.

수조 실험환경과 유사한 해상실험 환경을 모의하기 위해 수조환경을 기준으로 요구되는 음원준위(SL)를 계산하였다. 여기서, 단일 파라메트릭 배열 Chirp 환경에서 14.2m에 위치한 첫 번째 퇴적층(진흙 30cm)의 반사와 22.6m에 위치한 벽면 반사 신호를 기준으로 모의하였다. 표 4-7는 수조실험 환경을 나타낸다.

표 4-7 수조실험 환경에서의 음원준위

	Fist Layer Reflection	Wall Reflection
Distance [m]	14.2	22.6
Rx Volt [mV]	0.6	0.215
SPL [dB ref 1 μ Pa]	143.55	134.65
TL[dB]=20logR+ α R	22.92	27.04
SL [dB ref 1 μ Pa]	166.47	161.69

수조실험 환경에서 첫 번째 반사 신호 대비 벽면 반사 신호의 음원준위(SL) 예측 결과는 4.78dB 감쇠를 보인다.

실 해역에 수조실험과 동일한 환경의 퇴적층을 가정한 후 거리에 따른 요구되는 음원준위(SL)를 추정하였다. 여기서 첫 번째 퇴적층의 기준 음압준위(SPL)는 수조 실험환경에서 계산된 143.55dB를 가정한다. 여기서, TL_d 는 파라메트릭 배열성분의 전달손실, SL_d 는 예측된 파라메트릭 배열성분의 음원준위, SL_p 는 파라메트릭 배열성분의 음원준위 생성을 위해 요구되는 1차 주파수의 음원준위, Tx Volt는 1차 주파수의 음원준위 생성을 위해 요구되는 입력 전압을 나타낸다. 예를 들어 수심 100m에서의 수조 실험과 유사한 투과성능을 획득하기 위해 요구되는 1차 주파수의 음원준위는 223.55dB이며 시스템 관점에서 트랜스듀서에 인가되어야 할 입력전압은 0.866kVrms 이다.

표 4-8 거리에 따른 1차 주파수의 음원준위 및 입력전압 예측 결과

Distance [m]	TL[dB] 20logR+αR	SL_d [dB ref 1μPa]	SL_p [dB ref 1μPa]	Tx Volt [kVrms]
70	37.18	180.73	220.73	0.625
100	40	183.55	223.55	0.866
200	46.82	190.37	230.37	1.898
300	50.74	194.29	234.29	2.981
400	53.64	197.19	237.19	4.163

4.4.5 일반적인 해저지층탐사 장비와의 성능 비교

일반적인 해저지층탐사기와 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사기의 성능비교를 위해 제주대학교에 보유중인 해저지층탐사기(Chirp-3 Acoustic Profiling System, Teledyne Benthos)를 이용한 실험역 실험 결과를 소개한다. 제주도 근해 중 진흩퇴적층 분포가 보고^[51]된 제주도 차귀도 북서쪽 해상(가로 5.13km, 세로 4km)에서 제주대학교에서 보유중인 Chirp-3 장비를 이용하여 지층탐사 실험을 수행하였으며 15개 정점에서 Gravity Corer와 Van Veen Grab을 이용하여 해저 시료를 채취하였다. 여기서, Chirp-3 장비를 조사선(제라호)으로부터 약 20m 거리에서 예인하여 지층탐사 실험을 수행하였으며 송신 신호는 2~7kHz 대역의 Chirp 신호를 펄스폭 30ms로 방사하였다. 수신은 Chirp-3 장비와 추가적으로 Reson사의 TC-4032-1 하이드로폰을 이용하여 반사 신호를 측정하였다. 그림 4-50은 지층탐사 및 시료 채취 정점을 나타낸다. 여기서, 화살표는 지층탐사 이동경로, 원은 시료 채취 정점을 나타낸다.

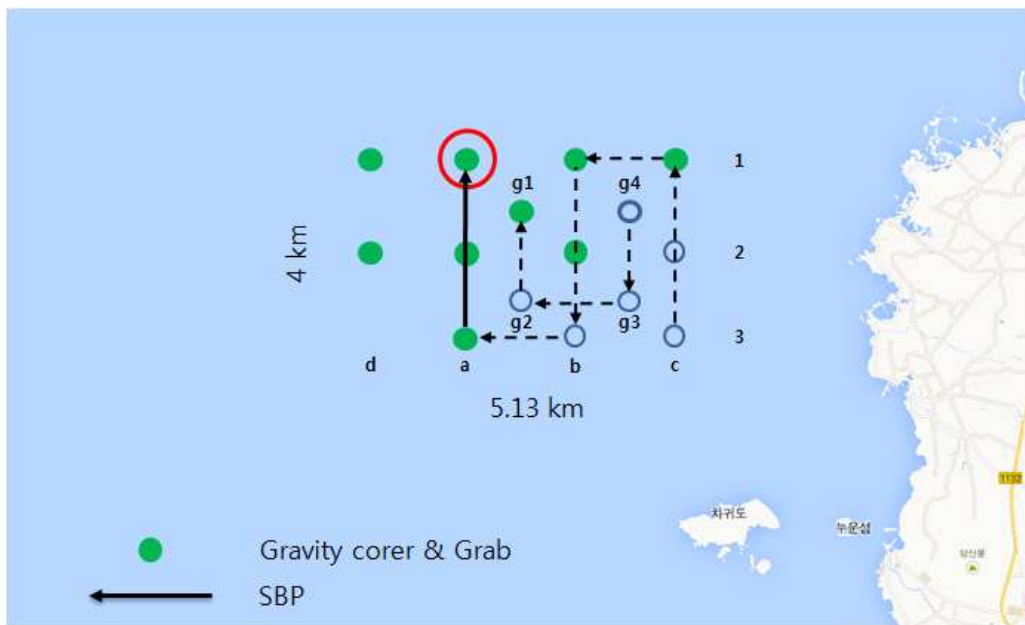


그림 4-50 지층탐사 실험 해역 (탐사 경로 및 시료 채취 정점)

실험 해역은 수심 약 70~90m의 완만한 경사 형태를 보였으며 경로 c1-b1와

a3-a1 경로에서 해저 표면 및 하부반사 신호가 확인되고 b1-b3와 g2-g1 경로에서 일부 하부반사 신호가 확인되었다. 그리고 나머지 c3-c1, g3-g2, g4-g3, b3-a3 경로에서는 해저 표면반사 신호만 관측되었다. 총 15개의 정점에서 시료 채취 결과 a1, a2, b1, b2, c1, c2, d1, d2, g1 등 총 9개의 정점의 Grab에서 진흙, 고운모래, 조개껍질 등으로 구성된 시료가 채취 되었으며 이중 a1, a2, b1, g1, d1, d2 등 총 5개의 정점에서 매우 고운모래와 진흙 구성을 확인하였다. 또한 Corer는 a2, a3, b1, b2, d1 등 총 5개의 정점에서 30~85cm 두께의 시료를 채취 하였다.

일반적인 해저지층탐사기와 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사기의 성능 비교는 하부반사 신호가 확인되는 경로 a1-a3 중 a1 정점에서 취득한 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의 수신 결과와 비교하였다. 그림 4-51은 경로 a1-a3의 Chirp-3를 이용한 지층탐사 결과 및 시료 채취 결과의 예로 수심 약 80~90m의 완만한 경사의 해저 표면 신호와 하부반사 신호가 확인된다.

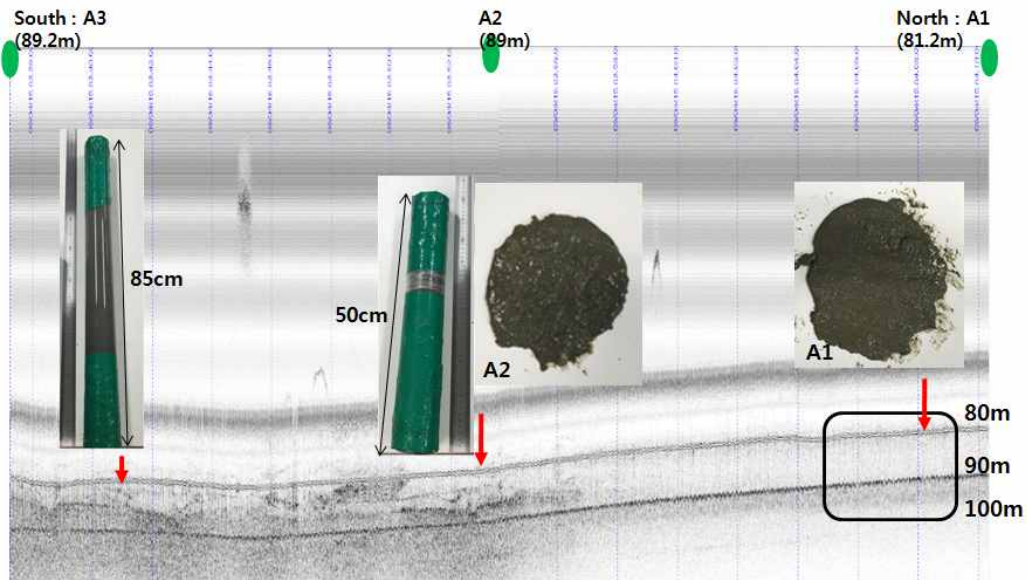


그림 4-51 경로 a1-a3의 지층탐사 및 시료 채취 결과(Chirp-3)

파라메트릭 배열기반 지층탐사는 해저 시료 취득을 위해 실습선이 정점에 머무는 동안 실험치구를 부이와 같이 부유시켜 수신 신호를 취득하였다. 실험치구는 시스템의 센서부, 알루미늄프로파일 구조 그리고 부력재를 이용하여 설계하였다. 그림 4-52은 성능비교 실험에 사용된 Chirp-3 장비와 파라메트릭 배열기반 해

저지층탐사기의 실험 치구를 보인다.



그림 4-52 일반적인 해저지층탐사기(Chirp-3) 외형 및 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사기의 실험 치구

표 4-9은 Chirp-3와 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의 실험 환경변수를 나타낸다. 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의 수신은 Reson사의 TC-4014 센서를 사용하였으며 전치증폭기의 증폭이득은 52dB로 설정하였다.

표 4-9 Chirp-3와 PA-SBP 장비의 실험환경 변수

	Chirp-3	PA-SBP
Chirp Frequency	2~7kHz	HF: 207.5~215kHz PA: 22.5~30kHz
Bandwidth	5kHz	7.5kHz
Beamwidth	45° (2x2 Array)	12° (8x1 Array)
Output Power(each Channel)	4kWatt	42.4Vrms
Vertical Resolution(-3dB)	0.18m	0.12m
Horizontal Resolution($r\theta$)	$r \times 0.785m$	$r \times 0.209m$

여기서, 수평 방향 분해능은 각 장비의 빔폭 45°와 12°에 수심 80m를 가정할

경우 Chirp-3는 62.83m 그리고 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사기는 16.75m로 고지향 특성에 의해 향상된 해상도를 보인다.

그림 4-53은 a1 정점 부근에서 수신된 Chirp-3 장비의 수신 결과로 수신 파형, 수신 파형의 스펙트로그램, 그리고 정합필터 출력을 나타낸다. 여기서, 수신된 반사 신호의 전압은 108.3mVrms이고 정합필터 출력 결과 수신 83m 부근의 해저 표면반사 신호와 93m 부근의 하부반사 신호가 확인된다.

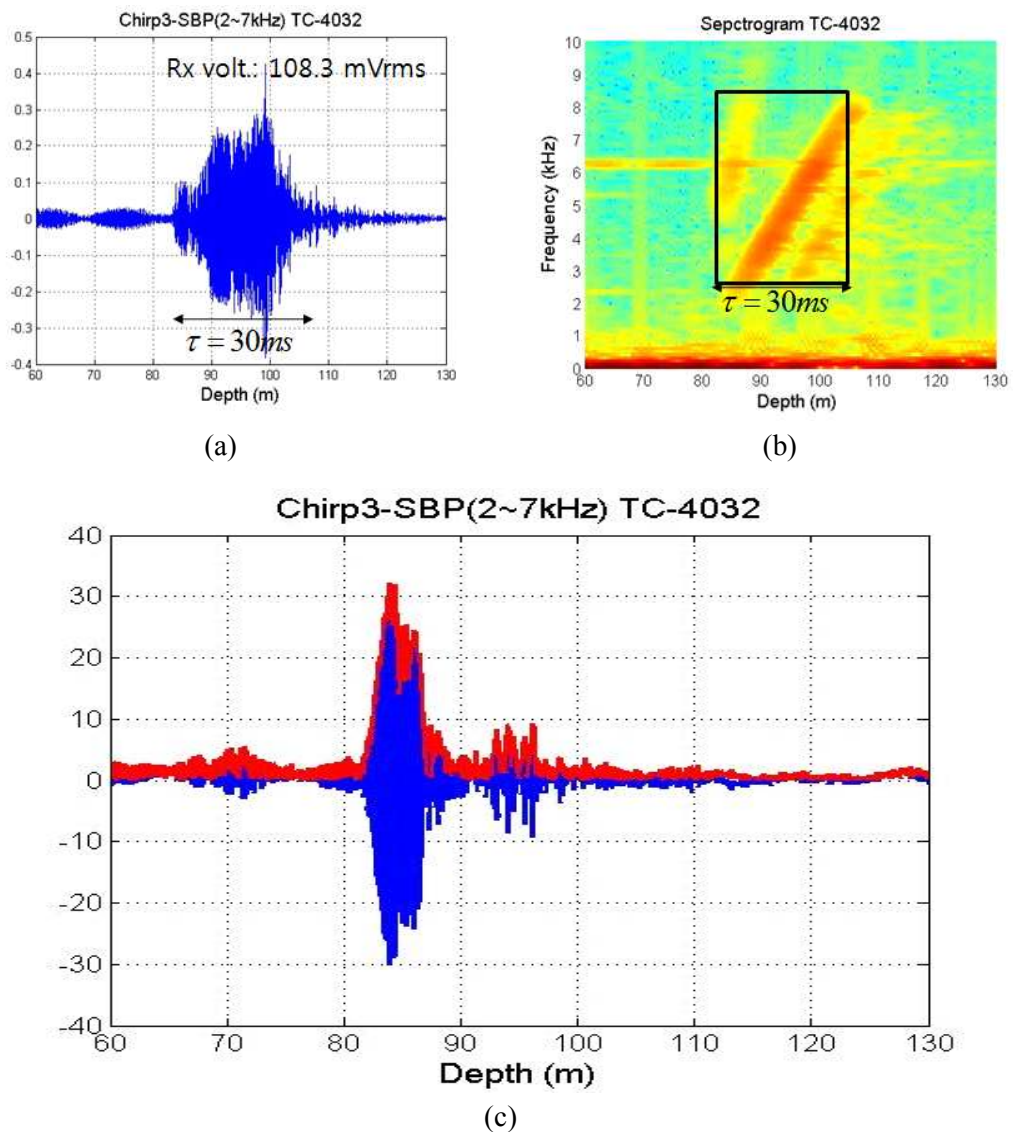


그림 4-53 a1 정점에서의 Chirp-3 장비 수신결과(2~7kHz, UpChirp)
 (a) 수신 파형, (b) 스펙트로그램, (c) 정합필터 출력

그림 4-54는 a1 정점 부근에서 수신된 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의 1차 주파수 수신 결과로 수신 파형, 수신 파형의 스펙트로그램, 그리고 정합필터 출력을 나타낸다. 여기서, 수신된 반사 신호의 전압은 1.7mVrms이고 정합필터 출력 결과 수심 87m 부근의 해저 표면반사 신호만 확인된다.

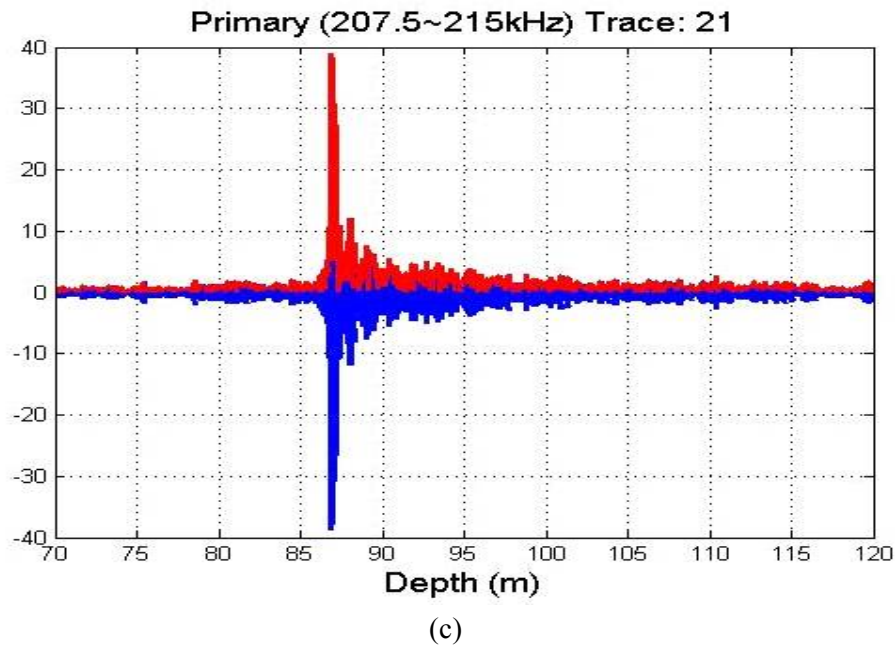
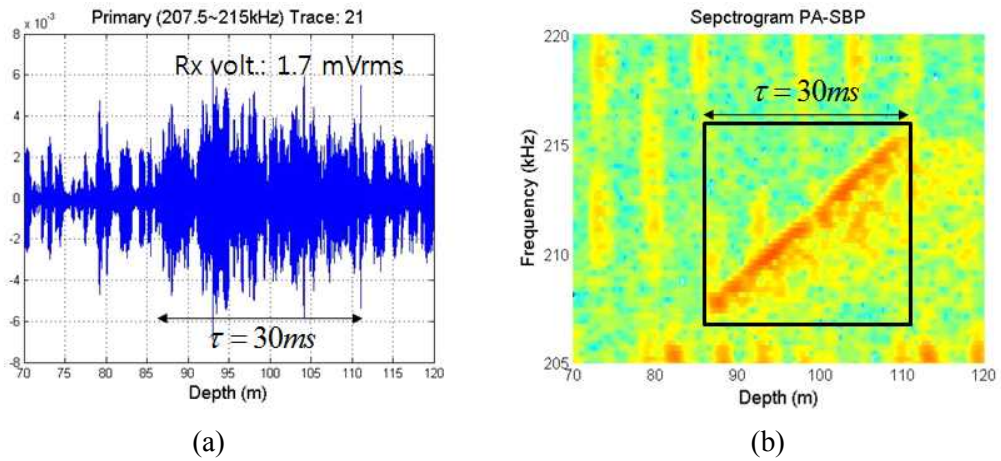
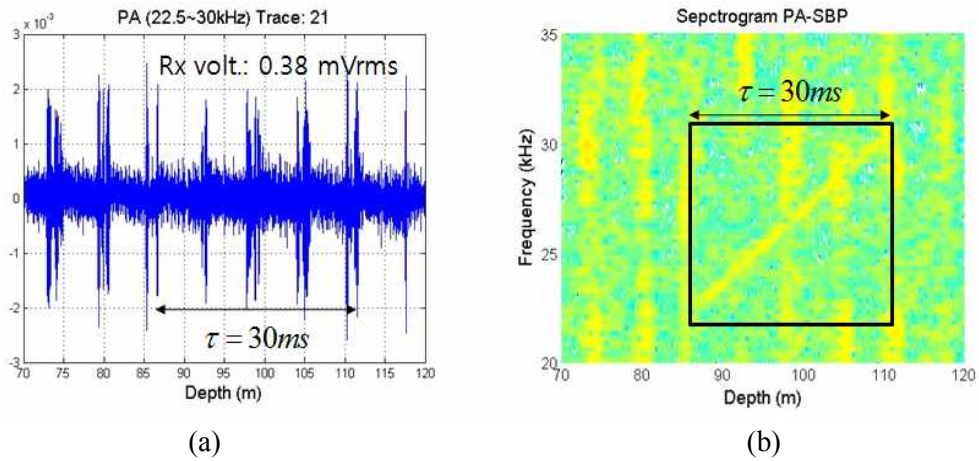


그림 4-54 a1 정점에서의 1차 주파수 수신결과(207.5~215kHz, UpChirp)

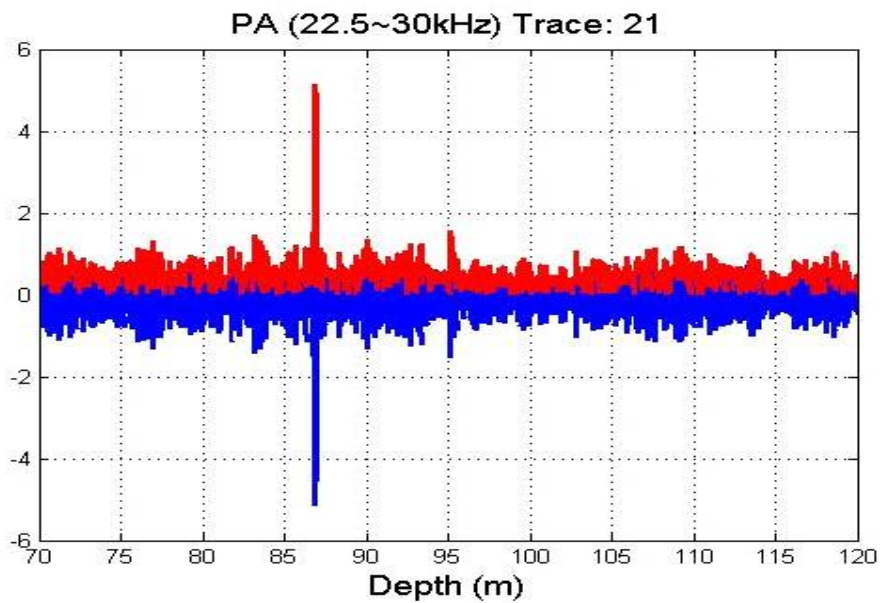
(a) 수신 파형, (b) 스펙트로그램, (c) 정합필터 출력

그림 4-55는 a1 정점 부근에서 수신된 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의 1차 주파수 수신 결과로 수신 파형, 수신 파형의 스펙트로그램, 그리고 정합필터 출력을 나타낸다.



(a)

(b)



(c)

그림 4-55 a1 정점에서의 파라메트릭 배열 성분 수신결과(22.5~30kHz, UpChirp)

(a) 수신 파형, (b) 스펙트로그램, (c) 정합필터 출력

여기서, 임펄스 형태의 시스템 잡음 환경에서 반사 신호로 추정되는 영역의 수신 전압은 0.38mVrms로 동일 영역의 스펙트로그램에서 22.5~30kHz의 UpChirp 성

분을 확인 할 수 있다. 정합필터 출력 결과 수심 87m 부근의 해저 표면반사 신호가 확인되고 하부반사 신호는 확인되지 않는다. 파라메트릭 배열의 수신결과 Chirp-3에 비해 낮은 수신전압 환경에서 정합필터 출력은 해저 표면반사 이외 하부반사 신호는 확인되지 않았지만 표면반사에서 1차 주파수의 정합필터 결과와 같이 높은 정확도의 수심 정보를 제공하였다.

그림 4-56과 4-57는 Chirp-3와 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의 해저 표면반사 위치의 정합필터 라인 출력 결과를 보인다. Chirp-3는 82~87m의 영역에서 해저 표층반사 신호가 표현되고 1차 주파수의 경우 87m 부근에서 해저 표층반사 신호가 확인된다. 여기서, 1차 주파수의 수심변화는 실험치구를 해수면에 부유시켜 측정했던 환경 영향으로 보인다. 파라메트릭 배열 성분의 정합필터 결과는 낮은 송신 전압 특성에 의해 일부 수직 입사조건이 만족되는 영역에서만 반사 신호가 확인되어 Trace20 부근에서 1차 주파수 출력과 같이 높은 정확도의 수심결과를 보인다.

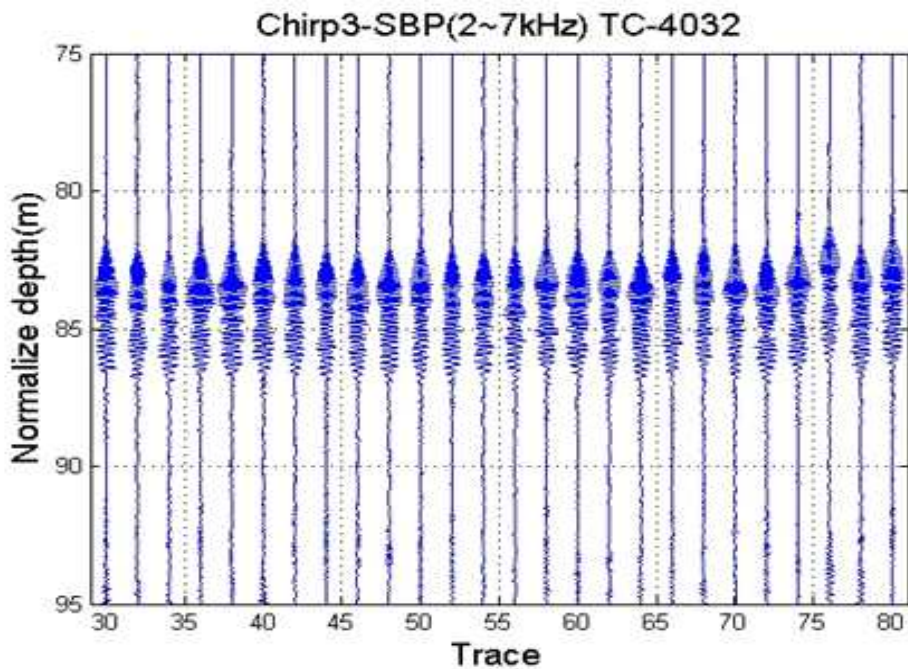
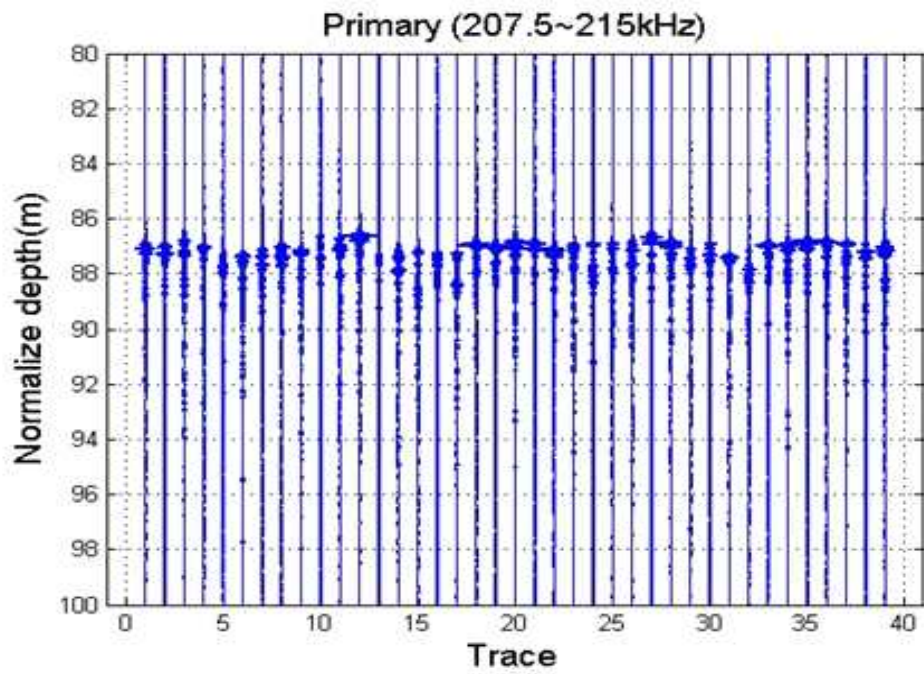
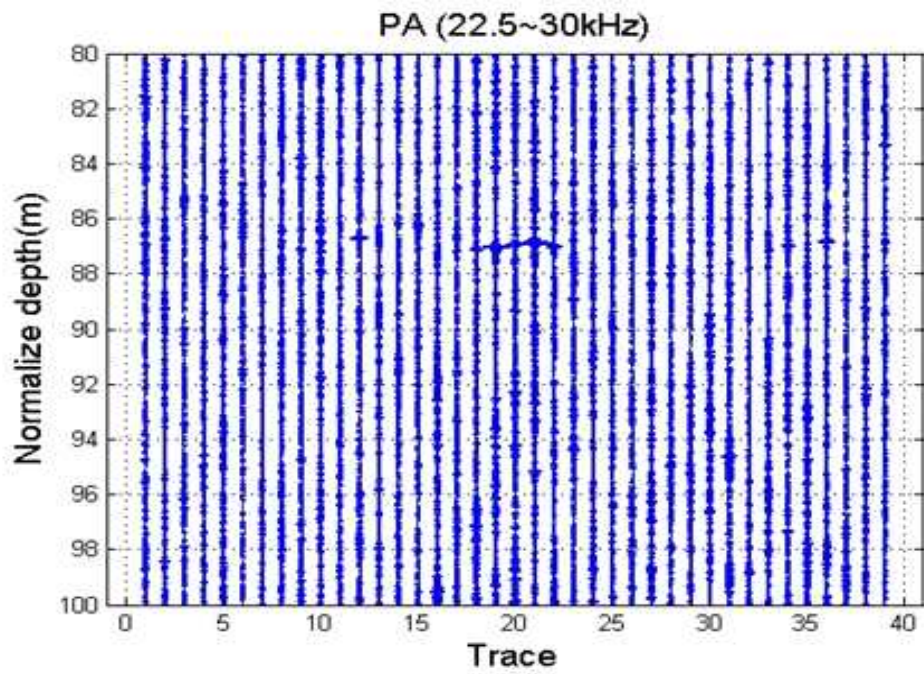


그림 4-56 a1 정점에서의 Chirp-3의 정합필터 라인 출력 결과



(a)



(b)

그림 4-57 a1 정점에서의 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의
정합필터 라인 출력 결과

(a) 1차 주파수 성분, (b) 파라메트릭 배열 성분

4.5 결론

본 논문에서는 파라메트릭 배열 현상을 이용한 탐지 시스템의 탐지 성능 향상을 위해 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 대역 확장 기법과 다중 대역을 이용한 탐지 알고리즘을 제안하였다. 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템 설계를 위해 Chirp 신호를 이용한 기본적인 송수신 신호처리 과정을 정리한 후 제안된 파라메트릭 배열기반 탐지시스템의 성능 기법에 대하여 소개하였다. 제안된 시스템은 공중용 탐지 시스템과 고지향 해저지층탐지 시스템을 개별적으로 설계하여 탐지실험을 수행하였다.

수중 실험에 비해 실험이 용이한 공중용 지층탐지 시스템은 송수신 신호처리 기법에 대한 성능 검증에 활용되며 TR-2436/150(MASSA, USA) 초음파 트랜스듀서 배열(8x2)과 DAQ(PXI-6259, NI, USA)를 이용하여 구현하였다. 또한 검증 실험을 위해 2개의 선형스테이지(M50, Thomson, USA), 스텝 모터, 알루미늄 프로파일 등을 이용하여 XY축 이동 가능한 실험 치구를 설계 하여 센서 배열로부터 1.92m 거리의 잠수함 모형 및 스테인레스 파이프 형상탐지 실험을 수행하였다. 여기서, 송신 신호는 1ms 펄스폭의 1차 주파수 150kHz와 160~170kHz Chirp 신호를 이용하여 10~20kHz의 파라메트릭 배열 Chirp 신호를 간접적으로 생성하였다. 송신센서 배열의 빔폭(가로 7°, 세로 26°)에 대한 이론적인 수평 방향 분해능($r\theta$)은 각각 23.4cm와 87.1cm로 계산되고 수직 방향 분해능은 1.7cm(ref $c_0 = 340m/s$)로 계산된다. 형상탐지 실험결과 B-Scan 이미지에서 잠수함 모형의 높이 12cm를 정확히 확인하였으며 C-Scan 이미지에서 잠수함과 파이프 모형을 비교적 정확히 확인되며 검출된 잠수함과 파이프 직경은 각각 35cm와 28cm로 실제 모형과 각각 24cm와 18cm의 오차를 보이며 이는 수평 방향 분해능의 영향으로 보인다.

해저지층탐사 시스템은 Benthowave 사의 BII-7541 파라메트릭 트랜스듀서 배열(8x1)과 DSP와 PXI-6259(NI) 등을 이용하여 구현하였다. 탐지 시스템의 성능 검증을 위해 2차원 수조 실험 및 제주도 북부앞 함덕 해수욕장 근해에서 실험역 실험을 수행하였다. 먼저 수조실험은 파라메트릭 배열 신호의 전파 특성, 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 그리고 다중 대역을 이용한 퇴적층 탐지 실험을 수

행하였다. 전파 특성 실험결과 20kHz의 파라메트릭 배열 성분에서 13.1m 거리의 첫 번째 퇴적층(아크릴과 진흙)과 21.6m 거리의 벽면(철) 반사 신호를 확인하여 높은 투과성능을 확인 하였다. 대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp 실험 결과 두 대역의 1차 주파수 Chirp(LF Chirp: 192.5~185kHz, HF Chirp: 207.5~215kHz)을 이용하여 기존 7.5kHz 대역(22.5~30kHz)에서 15kHz 대역(15~ 30kHz)으로 확장된 파라메트릭 배열 Chirp 신호를 생성하였다. 대역 확장에 의한 이론적인 수직 방향 분해능은 14.9cm에서 7.3cm로 계산되고 퇴적층 탐지 결과 낮은 감쇠 특성을 갖고 퇴적층을 투과함을 확인 하였다. 다중 대역을 이용한 퇴적층 탐지 실험을 위해 1차 주파수 185kHz와 207.5~215kHz Chirp를 이용하여 22.5~30kHz의 파라메트릭 배열 Chirp를 생성한 후 20cm 두께의 아크릴 박스, 스테인리스 판, 그리고 수조 벽면을 각각 송수신 센서로부터 5.2m, 7.2m 12.2m에 위치한 후 반사 신호를 수신하였다. 탐지 결과 파라메트릭 배열 성분만을 이용한 경우 보다 스테인리스 판의 질량벽 특성 등을 추가적으로 획득하였다.

실해역 실험은 20ms 펄스폭의 1차 주파수 185kHz와 207.5~215kHz Chirp 신호를 이용하여 22.5~30kHz 파라메트릭 배열 Chirp 신호를 생성하였으며 송신 센서 입력전압은 42.4Vrms를 인가하였다. 실해역 실험결과 1차 주파수 성분에서 수심 약 28~75m의 급경사 해저 표면반사와 수심 약 45m의 구릉형태 구조를 확인하였다. 파라메트릭 배열 성분에서는 1차 주파수와 동일한 해저 표면반사만 확인되고 하부반사 신호는 확인되지 않았다. 이는 실험해역이 주로 현무암등 화산암반암으로 구성된 특성과 실험적으로 계산된 1차 주파수의 음원준위(SL)가 수조실험 환경에 보다 약 25dB 낮게 발생되었던 이유로 보인다. 측정된 실측자료에 지층탐지 시스템의 수신음압감도(RVS)를 적용하여 파라메트릭 배열 성분의 초기 음원준위(SL)를 추정하였다. 수조환경과 실해역 환경의 초기 음원준위(SL) 추정결과 각각 162.4dB와 139.1dB로 실해역 환경에서 23.3dB 낮게 추정되었다. 또한 수조 실험환경과 유사한 해상실험 환경을 가정하여 요구되는 1차 주파수의 음원준위(SL)와 송신전압을 예측하였다. 수심 100m에서 수조 실험과 유사한 투과성능을 얻기 위한 파라메트릭 배열 성분의 음압준위(SPL)는 143.5dB로 요구되는 1차 주파수의 음원준위(SL)와 송신전압은 각각 223.5dB와 0.866kVrms이다. 마지막으로 제주도 근해 중 진흙 퇴적층 분포가 보고된 제주도 차귀도 북서쪽 해역에서 일

반적인 해저지층탐사기(Chirp-3 Acoustic Profiling System, Teledyne Benthos)를 이용한 지층탐사 및 해저 시료 채취를 수행하였다. 총 8경로 중 4경로에서 해저 표면반사 및 하부반사 신호를 확인하였다. 또한 총 15개의 정점 중 총 9개의 정점에서 진흙과 고운모래 등으로 구성된 시료가 채취되었다. 하부반사 신호가 확인되는 경로 중 진흙과 고운모래가 채취된 정점에서 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의 센서부를 해수면에 부유시켜 반사 신호를 수신하였다. 1차 주파수 성분의 정합필터 출력 결과 수심 87m 부근의 해저 표면반사 신호가 확인되고 파라메트릭 배열 성분은 일부 수직 입사조건이 만족되는 영역에서 해저 표면반사 신호를 확인할 수 있었다. 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의 송신 입력전압은 42.4Vrms로 Chirp-3의 송신전력 4kWatt 보다 매우 낮은 환경에서 해저 표층이외 하부반사 신호는 확인되지 않았지만 표층반사에서 매우 정밀한 수심정보를 확인 할 수 있었다. 이는 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 시스템의 빔폭(12°)이 Chirp-3의 빔폭(45°)보다 약 4배 좁은 고지향 특성의 영향으로 보인다.

제 5 장 파라메트릭 배열 기반 지향성 음향 시스템

5.1 서론

고지향 음향 신호를 생성할 수 있는 파라메트릭 배열은 소나 시스템, 해저 저층 탐사, 지향성 스피커 그리고 수중통신 등에 응용 연구되고 있다. Bennett^[18]의 공기 중 파라메트릭 배열 음향 실험 이후 고지향 특성을 갖는 지향성 스피커 및 초음파 거리측정기 등에 응용 연구되고 있다. 공기 중 파라메트릭 배열 시스템은 대부분 협대역의 40kHz 트랜스듀서를 이용한 것으로 수m에서의 해석결과가 발표되었다^[18,29,32].

본 논문에서는 다공진 초음파 트랜스듀서 배열을 이용하여 지향성 음원 생성 시스템 설계 및 VSB 변조 방식을 이용한 빔 조향 기법을 제안한다. 효율적인 파라메트릭 배열 신호를 생성하기 위해 (주)경원회라이트에서 제작된 다공진 초음파 트랜스듀서를 3×16 배열로 구성하였다. 트랜스듀서 배열에 전력을 공급하기 위해 16채널 다중 증폭기를 설계 하였으며 1차 주파수의 변조 신호 및 빔 형성을 위해 PXI 시스템과 LabView 소프트웨어를 이용하여 시스템을 구축하였다. 설계된 파라메트릭 배열 시스템의 성능 분석 및 검증을 위해 강당에서 거리에 따른 음압레벨 변화, 빔 패턴, 그리고 빔 조향 실험을 수행하였다.

5.2 파라메트릭 배열 음향 시스템 설계

5.2.1 디지털 Beam-steering 시스템 구성

파라메트릭 배열 음향 신호의 빔 조향을 위한 디지털 Beam-steering 시스템은 그림 5-1과 같이 구성된다. 빔 조향을 위한 배열 트랜스듀서와 16 채널 전력증폭기 그리고 Beam-steering 시스템 구현을 위한 SW/HW로 구성된다.

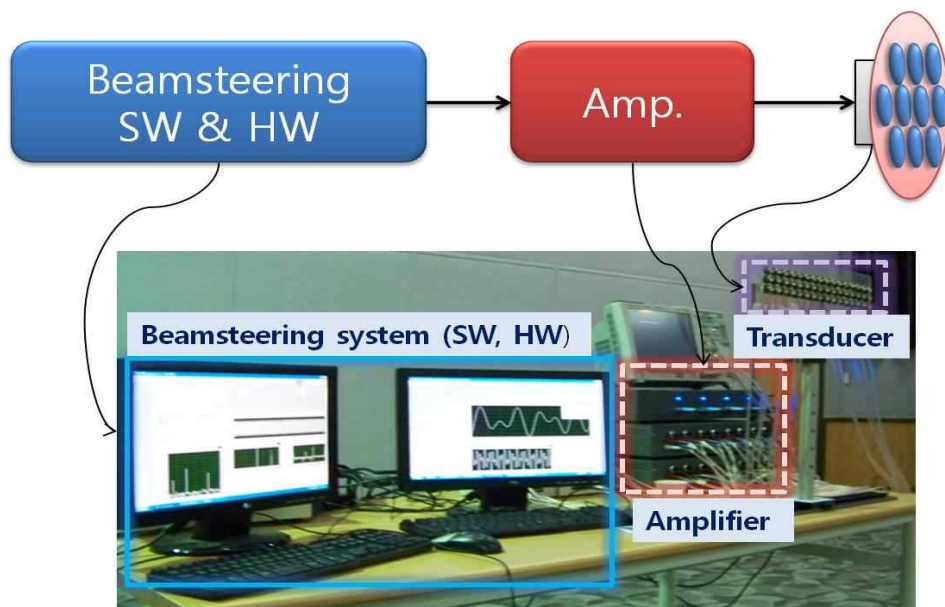


그림 5-1 파라메트릭 배열 디지털 Beam-steering 시스템

여기서 트랜스듀서(경원 웨라이트(주) 제품)는 두 개의 공진을 갖는 다공진 트랜스듀서로 각각 20 kHz와 32.5 kHz에 공진주파수를 갖는다. 전력증폭기는 16 채널 동시 구동을 OP-Amp. Chip(LM1875)을 기반으로 20W 용량으로 제작하였다. 16채널 동시 디지털 아날로그 변환(D/A) 가능한 DAQ보드(PXI-6259, NI, USA)와 DAQ보드 구동을 위한 PXI 시스템(임베디드 컨트롤러: PXI-8106, NI, USA, 슬롯샤시 : PXI-1042Q, NI, USA)로 구성되고 Beam-steering 프로그램은 LabView로 프로그래밍 하였다.

가) 다공진 트랜스듀서 배열

높은 음압의 1차 주파수 f_1 과 f_2 에 의해 간접적으로 발생하는 파라메트릭 배열 성분을 효율적으로 생성하기 위해서는 두 개 이상의 공진을 갖는 다 공진 트랜스듀서가 이용된다. 본 논문에서는 파라메트릭 배열 음향 신호 생성을 위해 20kHz와 32.5kHz에 공진 주파수를 갖는 다공진 트랜스듀서(경원웨어라이트(주))를 이용하여 높은 음압을 획득하기 위해 48개의 트랜스듀서를 그림 5-2와 같이 3x16 배열로 구성하였다. 센서간 간격은 25mm 이다.

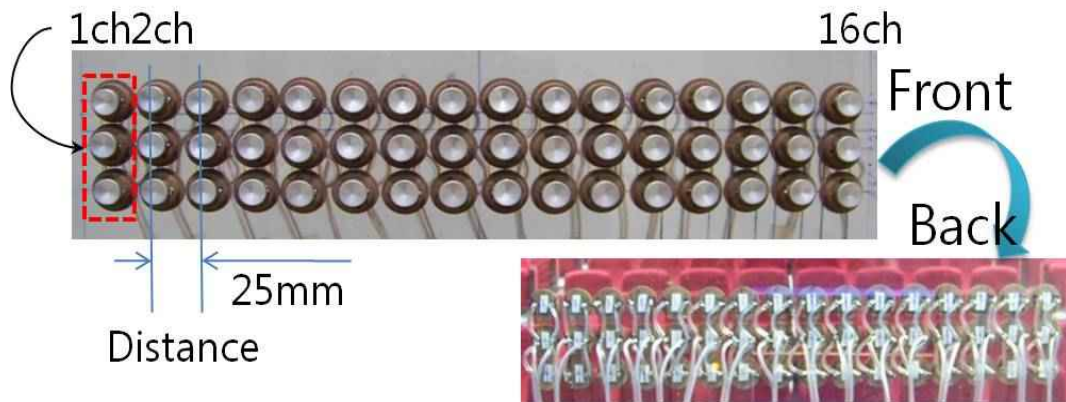


그림 5-2 트랜스듀서 배열 구조

트랜스듀서 배열의 주파수 특성을 분석하기 위해 $\pm 20V$ 의 전압을 인가하여 16kHz에서 35kHz까지의 단일 주파수 신호를 발생시키고 1m거리에서 측정하였다. 그림 5-3은 측정된 트랜스듀서의 주파수 특성 분석 결과를 나타낸다. 트랜스듀서 배열의 주파수 특성 분석결과 20.5kHz에서 104.4dB, 31kHz에서 95.87dB의 음압준위를 갖는 공진 주파수를 확인하였다. 그러나 31kHz와 31.5kHz 신호를 발생시켰을 때 저 주파수 대역에서 강한 트랜스듀서 왜곡 현상을 확인하여 본 시스템에서는 20kHz와 32.5kHz의 1차 주파수를 사용하여 12.5kHz의 차 주파수를 생성하였다.

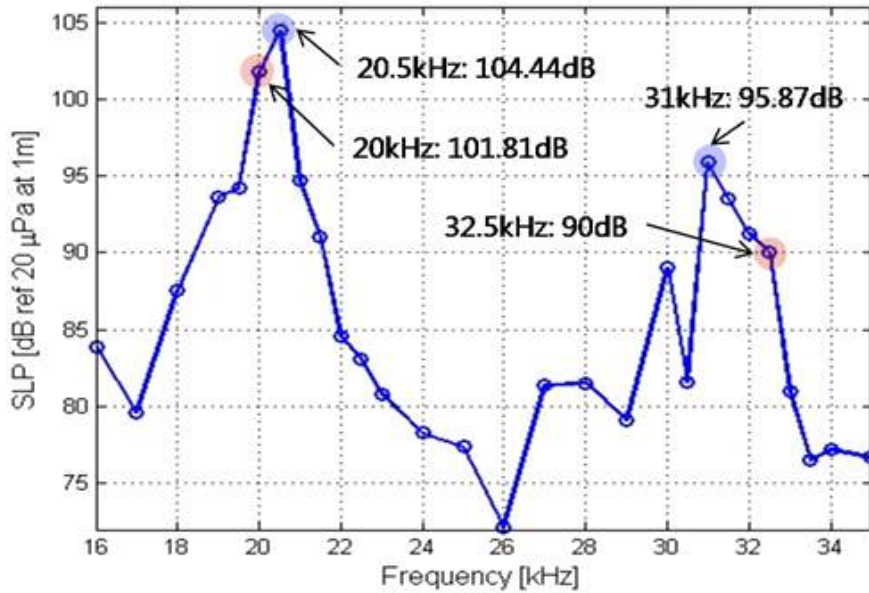


그림 5-3 트랜스듀서의 주파수 응답

나) 다채널 전력증폭기

트랜스듀서 배열에 원활한 전력을 공급하기 위해 LM1875 증폭기 소자를 이용하여 16채널 증폭기를 설계하였다. 그림 5-4는 제작된 다채널 증폭기 외관을 보이며 전력부와 증폭부로 구성된다.

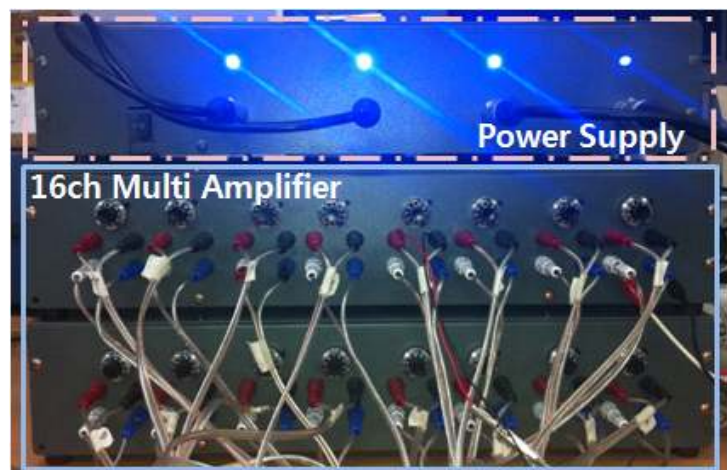


그림 5-4 다채널 전력증폭기

설계된 증폭기는 직류 $\pm 26\text{V}$ 공급 전압에 대해 최대 20Watt 출력과 최대 $\pm 23\text{V}$ 의 증폭기 출력을 갖도록 설계하였다. 또한 설계된 전원 공급기는 LM317T와 LM337T 전압 안정기 소자를 이용하여 직류 $\pm 26\text{V}$ 의 전압을 증폭기에 공급한다. 설계된 증폭기의 주파수 특성을 분석하기 위해 1V 입력 신호에 대해 증폭이득을 10dB 로 고정한 후 $2\sim 600\text{kHz}$ 까지의 주파수 변화에 따른 출력 전압을 측정하였다. 그림 5-5는 설계된 증폭기의 주파수 특성 곡선을 보이며 증폭기의 대역폭은 222kHz 로 시스템에 운용되는 20kHz 와 32.5kHz 를 왜곡 없이 증폭할 수 있다.

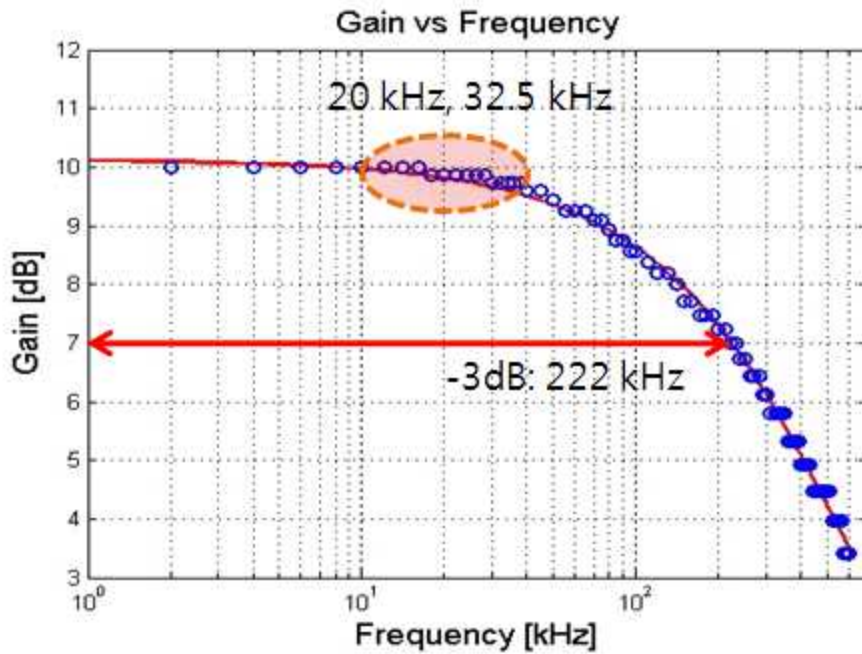


그림 5-5 16채널 전력증폭기의 주파수 응답

5.2.2 디지털 Beam-steering 프로그램

배열 트랜스듀서에 의한 Directional Factor는 식(5.1)과 같이 계산된다.

$$\Psi = \frac{\sin(N\frac{kd}{2}\sin\theta - \frac{N}{2}\phi)}{N\sin(\frac{kd}{2}\sin\theta - \frac{1}{2}\phi)} \quad (5.1)$$

여기서, Ψ 는 Directional Factor를 나타내고, N 는 트랜스듀서의 배열 수, k 는 주파수 상수를, 그리고 d 는 트랜스듀서의 배열 간격을 나타내며, θ 는 트랜스듀서의 지향각, ϕ 는 θ 방향으로 조향하기 위해 트랜스듀서에 인가되는 위상지연을 나타낸다. 이때 주엽은 Ψ 의 분모부분이 '0'이되는 부분으로 위상지연은 식(5.2)와 같이 계산된다.

$$\phi = kd\sin\theta = \frac{2\pi fd}{c_0}\sin\theta \quad (5.2)$$

여기서, f 는 트랜스듀서에서 방사되는 1차 주파수, c_0 는 음속으로 공기중에서는 343m/s를 사용하였다. 위상지연을 고려하여 정보 신호 $S_s(t)$, 반송파 $S_c(t)$ 를 다음과 같이 정의할 때

$$S_s(t) = A_s\cos(2\pi f_s t + \phi_s) \quad (5.3)$$

$$S_c(t) = A_c\cos(2\pi f_c t + \phi_c) \quad (5.4)$$

여기서, A_s 는 정보 신호의 진폭을 나타내고, f_s 는 정보 신호의 주파수를, ϕ_s 는 정보 신호의 위상지연을 나타내며 A_c 는 반송파의 진폭을, f_c 는 반송파의 주파수를 그리고 ϕ_c 는 반송파의 위상지연을 나타낸다. $A_s = A_c = 1$ 로 가정하고 식(5.3)과 (5.4)를 곱하여 진폭변조하면 식(5.5)와 같이 표현된다.

$$S_{DSB}(t) = \frac{1}{2}[(\cos(2\pi(f_c - f_s)t + \phi_c - \phi_s) + \cos(2\pi(f_c + f_s)t + \phi_c + \phi_s))] \quad (5.5)$$

정보신호의 대역폭을 B 라고 하면 변조된 신호의 대역폭은 2B가 된다. 변조된 신호의 스펙트럼 형태는 반송파를 중심으로 양쪽으로 두 개의 대역을 차지한다. 반송파 주파수 f_c 를 기준으로 $|f| > f_c$ 의 주파수대를 USB(Upper SideBand), $|f| < f_c$ 의 주파수를 LSB(Lower Sideband)라 하며 식(5.5)로부터 각각 다음과 같이 표현된다.

$$S_{USB}(t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi(f_c + f_s)t + \phi_c + \phi_s) \quad (5.6)$$

$$S_{LSB}(t) = \frac{1}{2} \cos(2\pi(f_c - f_s)t + \phi_c - \phi_s) \quad (5.7)$$

파라메트릭 배열 신호 생성을 위해 진폭 변조된 신호를 직접사용하게 되면 원하는 정보신호 이외에 반송파를 중심으로 하는 양쪽의 정보신호간 간섭으로 정보신호의 2배에 해당하는 왜곡성분이 함께 발생되어 신호 품질을 저하시킨다. 따라서 진폭변조 신호 중 한쪽의 대역만을 전송해야 한다. DSB 변조신호 중 한쪽의 SSB(Single Side Band) 신호만을 전송하는 방식을 SSB변조 방식이라 하며 SSB변조 방식은 동일한 정보를 전송하기 위해 필요한 대역폭이 정보신호의 대역폭과 동일하게 B가 되며 스펙트럼을 매우 효율적으로 사용하는 변조 방식이다. 이러한 SSB 변조방식을 구현하기 위해서는 Hilbert 변환 그리고 정교한 필터를 이용하여 구현할 수 있다. 이러한 SSB 변조 방식은 대역폭 효율이 좋은 방식이지만 광대역 신호에 대한 구현상에 어려움이 따른다.

본 논문에서는 DSB 변조된 신호를 필터를 통해 양 측파대중 원하지 않는 측파대를 완전히 제거하지 않고 그일 부를 잔류시키는 VSB(Vestigial Side Band)변조 방식을 구현하였다. 파라메트릭 배열 음향 조향을 위한 디지털 Beam-steering 프

로그램은 LabView로 구현하였으며 프로그램의 블록다이어그램은 그림 5-6와 같다.

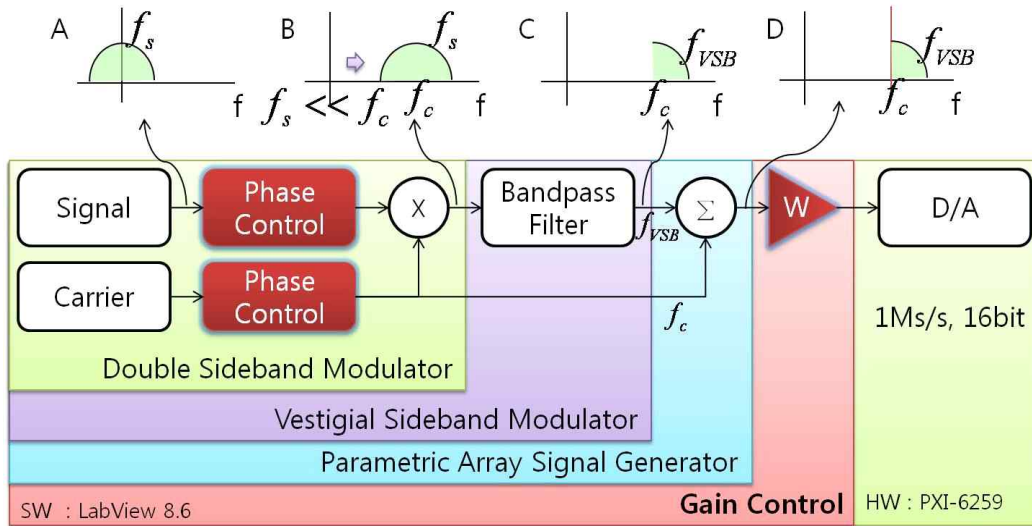


그림 5-6 디지털 Beam-steering 프로그램의 블록다이어그램

여기서 정보 신호의 대역폭이 그림 5-5의 A와 같을 때 위상지연은 식 (5.2)와 같이 연산하여 위상지연된 반송파와 곱해져 DSB변조 신호를 생성한다. 그림 5-5의 B는 DSB 변조된 신호로 신호의 대역폭이 반송파를 중심으로 친이된 결과를 보인다. DSB 변조된 신호는 대역통과필터를 거쳐 VSB 변조된 신호를 생성하며 VSB 변조신호는 그림 5-5의 C 와 같이 나타난다. VSB 변조 신호와 반송파신호를 합하여 Beam-steering된 파라메트릭 배열 신호를 생성한다. 그림 5-5의 D는 VSB 변조 신호와 반송파신호를 나타내며 비선형 현상에 의해 파라메트릭 배열 신호는 반송파와 VSB 변조 신호의 차주파수 성분이 된다. Gain control단은 전력 증폭기 및 트랜스듀서에 의한 왜곡 보상에 사용된다.

5.3 파라메트릭 배열 음향 빔 조향 실험 및 결과

파라메트릭 배열 음향 빔 조향 시스템의 성능 평가를 위한 실험은 제주대학교 해양과학대학 오션홀에서 거리전달 특성, 빔 패턴 그리고 빔 조향 실험을 수행하였다.

5.3.1 거리전달 특성 측정 실험

폭 4m, 너비 50m, 그리고 높이 약 3m 규모의 실내공간에서 트랜스듀서 배열로부터 음축상 0.4m에서 10m까지 마이크로폰을 이동하며 음압을 측정하였다. 이때 측정된 음압은 전압 값으로 기록되고 LabView에서 마이크로폰의 민감도(12.5 mV/Pa)를 고려하여 음압준위로 표현하였다. 표5-1은 측정환경 변수를 보인다.

표5-1 실험 환경변수

Parameter	Values [unit]
Sound velocity c	344 [m/s]
Density ρ	1.2 [kg/m ³]
Temperature T	15 [°C]
Humidity H	20 [%]
Nonlinearity parameter β	1.2

1차 주파수 $f_1(20\text{kHz})$ 와 $f_2(32.5\text{kHz})$ 의 흡음계수 α_{f_1} 과 α_{f_2} 는 각각 0.0554Np/m와 0.0412Np/m로 계산되고, 전 흡음계수 α_T 는 0.0645Np/m로 계산되어 식(2.7)로 계산된 감쇠거리 R_A 는 15.51m 그리고 식(2.8)로 계산된 회절거리 R_R 는 1.933m이다. 음압준위 측정환경에서 차 주파수의 가상음원 거리는 회절거리가 감쇠거리보다 짧기 때문에 회절거리까지 음압이 누적되어 증가된 후 회절거리 이후부터 확산 현상으로 감쇠하게 된다. 이와 같은 파라메트릭 배열 현상은 그림 5-7의 측정 결

과에서도 확인된다. 측정된 1차 주파수(f_1 과 f_2)와 차 주파수의 음압준위는 점으로 표현되고, KZK 모의실험한 차 주파수의 음압준위는 실선으로 표현된다. 그리고 거리에 따른 1차 주파수의 이론적인 음압준위는 점선으로 표현된다.

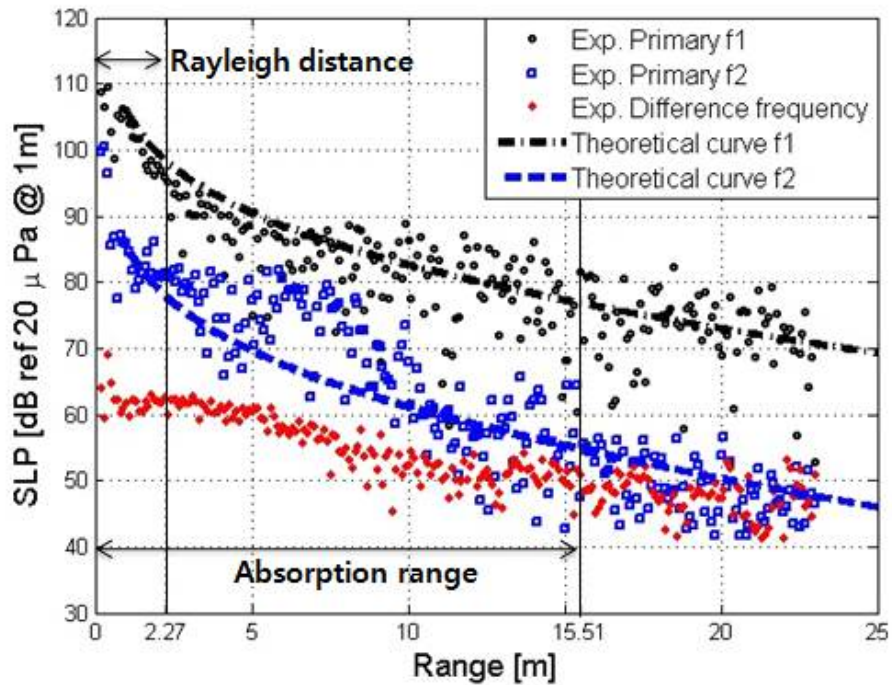


그림 5-7 시스템의 거리전달 특성 측정 결과

측정된 차 주파수의 음압준위는 이론적인 차 주파수의 가상음원 계산 결과와 같이 회절거리 이전 근거리 음장에서 1차 주파수의 비선형적 상호작용에 의해 음압이 누적되어 증가되고 회절거리 이후 원거리 음장에서 확산현상에 의해 감소되는 특성을 보인다.

5.3.2 빔 패턴 측정 실험

반경 20m와 내각 120°규모의 부채꼴 형태의 강당에서 배열 트랜스듀서로부터 13m 거리에 마이크를 배치한 후 음축상 $\pm 15^\circ$ 의 각도에서 배열 트랜스듀서를 1° 와 0.5° ($5^\circ \sim -5^\circ$)간격으로 회전시켜 빔 패턴을 측정하였다. 그림 5-8은 파라메트릭 배열 시스템의 빔 패턴 측정 실험환경을 나타낸다.

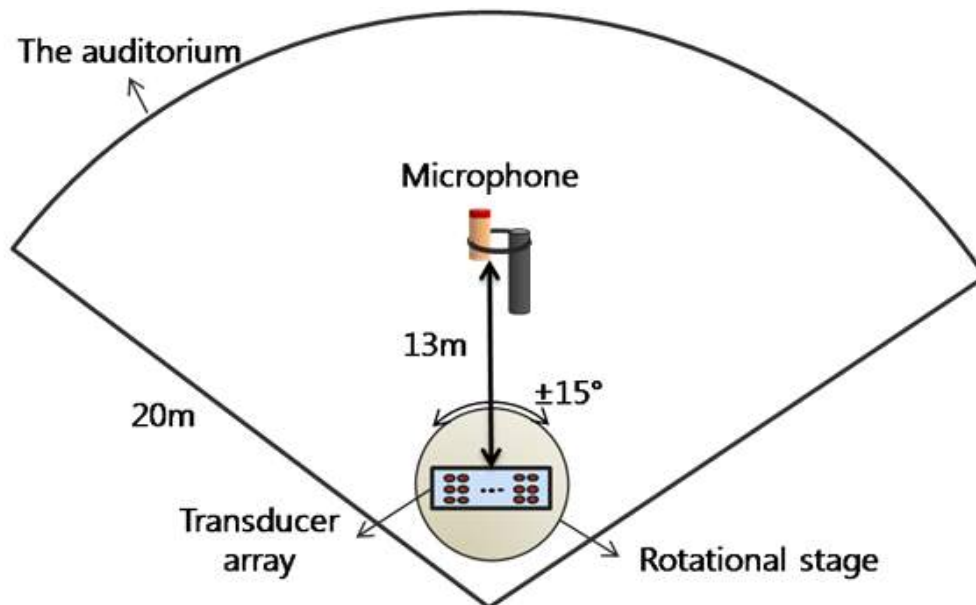


그림 5-8 빔 패턴 측정 실험 환경

파라메트릭 배열 신호는 동일한 방향으로 높은 음압의 1차 주파수(f_1 과 f_2)가 진행할 때 비선형적 현상에 의해 발생된다. 원거리 음장에서 파라메트릭 배열 신호의 빔 패턴은 두 개의 1차 주파수 빔 패턴의 선형 결합으로 표현할 수 있다. 그림 5-9는 시스템의 빔 패턴 측정결과로 1차 주파수 f_1 과 f_2 가 중첩되는 빔 패턴은 실선으로 표현되고 측정된 차 주파수의 빔 패턴은 점으로 표현된다. 또한 차 주파수와 동일한 주파수를 직접 방사할 때 획득 되는 이론적인 빔 패턴은 점선으로 표현된다. 측정된 차 주파수의 빔 패턴은 실선으로 표현된 1차 주파수(f_1 과 f_2)의 중첩된 빔 패턴과 유사하고 차 주파수와 동일한 주파수를 직접 방사한 빔 패턴 보다 좁다. 이는 동일한 방사면적에서 1차 주파수의 비선형적 현상으로

발생된 차 주파수 신호가 동일한 주파수로 직접 방사된 신호보다 지향성이 우수함을 의미한다.

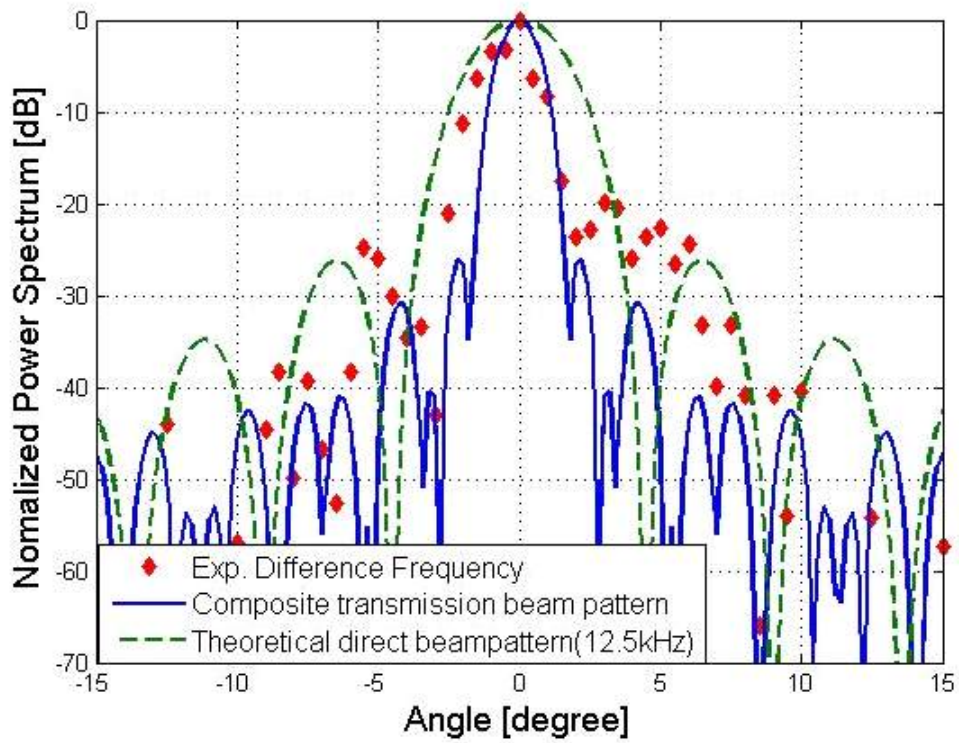


그림 5-9 시스템의 빔 패턴 측정 결과

5.3.3 빔 조향 실험

빔 패턴 측정환경과 동일한 공간에서 빔 조향 실험을 수행하였다. 배열 트랜스듀서는 25mm 간격의 3x16배열로 구성되며 16 채널의 각 열마다 0°, 10° 20°에 해당하는 위상 지연값을 인가하였다. 배열 트랜스듀서로부터 10m 거리에 마이크로폰을 배치한 후 지향각을 기준으로 $\pm(5^\circ\sim55^\circ)$ 는 2.5°단위로 배열 트랜스듀서를 회전하며 측정하였다. 또한 지향각 부분은 비교적 정확한 측정을 위해 트랜스듀서의 음파 방사축을 기준으로 좌우 $\pm 2.5m$ 범위를 0.1m(약 0.57°) 간격으로 마이크로폰을 이동시키며 측정하였다. 그림 5-10은 빔 조향 실험 환경을 나타낸다.



그림 5-10. 빔 조향 실험 환경

그림 5-11은 1차 주파수 20kHz와 32.5kHz의 이론적인 빔 패턴과 1차 주파수의 결합에 의한 빔 패턴을 나타낸다.

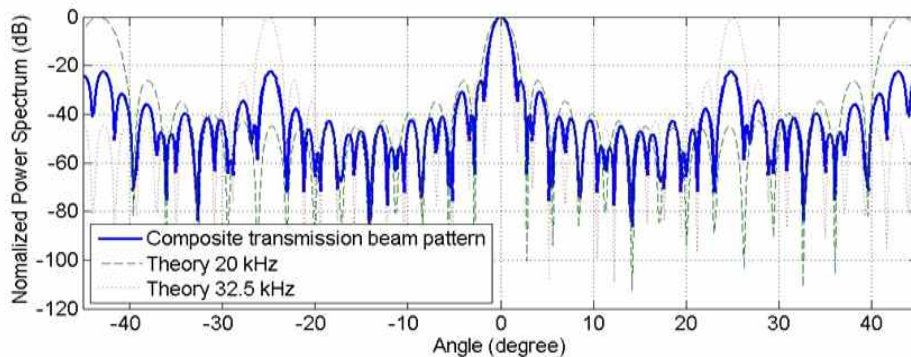


그림 5-11. 1차 주파수의 이론적인 빔 패턴과 결합 빔 패턴

여기서, 녹색 점선은 20kHz의 이론적인 빔 패턴을 나타내고 붉은 점선은 32.5kHz의 이론적인 빔 패턴을 그리고 푸른 실선은 1차 주파수의 결합 빔 패턴을 나타낸다. 배열 트랜스듀서의 배열 간격은 각 주파수의 반파장(20kHz : 8.6mm, 32.5kHz : 5.3mm)보다 약 3~4배 크기 때문에 Side lobe이 발생한다.

그림 5-12는 조향각 0°에서 측정된 빔 패턴 결과를 나타낸다.

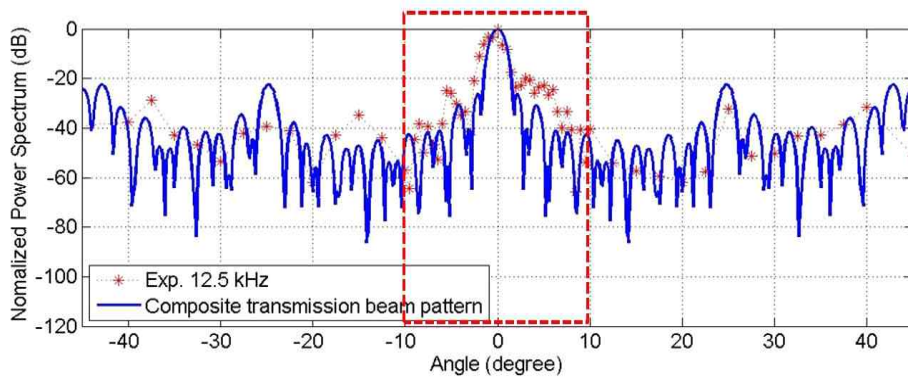


그림 5-12 조향각 0°에서의 측정된 방사패턴

여기서, 붉은 별표가 측정값을 의미하고 푸른 실선은 앞서 획득한 이론적인 1차 주파수의 결합 빔 패턴을 나타낸다. 붉은 상자는 지향각 기준 $\pm 10^\circ$ 의 주 관측 부분을 나타낸다. 붉은 점선이 푸른 실선을 따라 유사하게 분포됨을 확인 할 수 있다. 그림 5-13과 5-14는 각각 10° 와 20° 에서 측정된 빔 패턴 결과를 나타낸다. 여기서, 지향각 에 따른 측정 결과에서도 측정된 붉은 점선이 푸른 실선을 따라 유사하게 분포함을 확인 할 수 있다. 이는 파라메트릭 배열 음향 또한 디지털 Beam-steering 기법을 통해 조향 가능성을 실험적으로 확인 할 수 있는 결과이며 이때 발생하는 오차는 무향실 및 트랜스듀서의 회전 로테이션의 정밀 측정이 불가능했던 실험적인 오차로 생각된다.

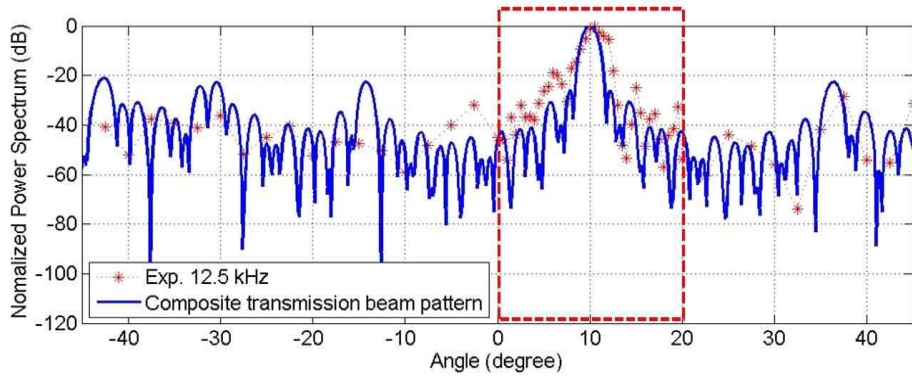


그림 5-13. 조향각 10°에서의 측정된 방사패턴

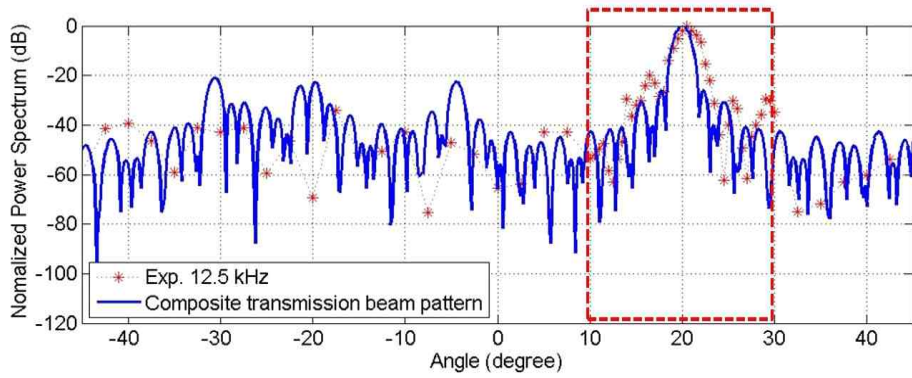


그림 5-14. 조향각 20°에서의 측정된 방사패턴

제 6 장 결론

본 논문에서는 파라메트릭 배열 현상을 이용한 고지향 음향 시스템 설계 및 고지향 통신, 지형조사 그리고 지향성 스피커의 응용 분야에 대하여 각 시스템을 설계하고 성능 향상을 위한 알고리즘을 적용하여 실험을 통해 검증하였다.

파라메트릭 배열 기반 음향 시스템 설계를 위해 우선 비선형 음향 신호의 특성 해석을 위한 비선형 모델을 및 본 논문에서 특성 분석 및 모의실험에 사용되는 KZK 수치 모델에 대하여 소개하였다. 또한 시스템 설계 및 성능 예측을 위해 수치해석 모델에 비해 계산량이 적은 비선형이 고려된 SONAR 모델을 소개하고 시스템의 송신음압감도와 음원준위와의 관계 그리고 수신음압감도와 음원준위와의 관계로부터 시스템의 이론적인 성능 예측 방법을 정리하였다.

파라메트릭 배열 현상을 이용한 고지향 통신 시스템의 전송률 향상을 위해 파라메트릭 배열의 QPSK 방식과 다중사용자 환경을 고려한 주파수 분할 방식을 적용한 통신 시스템을 제안하였다. 제안된 통신 시스템은 LabView를 기반으로 프로그래밍 하였으며 MSI사의 F82 파라메트릭 트랜스듀서와 DAQ 보드(USB-6361, NI)를 이용하여 구현 후 진해 국방과학 연구소 수조에서 성능 검증 실험을 수행하였다. PSK 변조 방식을 이용한 지향성 실험결과 6° 이내에서 100% 복조하였으며 8° 이내에서 10^{-3} 이하의 BER 성능을 보여 높은 지향 특성을 확인하였다. 전송률 2kbps와 5kbps 환경에서 문자열과 4bit gray scale의 이미지를 전송 결과 전송률 2kbps 환경에서는 문자열과 이미지를 오류판정 없이 100%로 복조하였으며 5kbps 환경에서는 문자열 1bit와 이미지 11bit에서 오류판정을 보였다. 전송률 향상을 위한 파라메트릭 배열기반 QPSK 변조 방식의 수신결과 전송률 2kbps와 4kbps 환경에서 전체 5000bit를 오류판정 없이 100% 수신하였으며 10kbps 환경에서 22bit의 오류판정을 보였다. 마지막으로 주파수분할 통신 기법의 성능 검증을 위해 다중 사용자 2명을 가정하여 파라메트릭 배열 성분이 중첩되는 환경과 중첩되지 않는 환경을 설정하여 수조실험을 수행하였다. 중첩되는 환경의 경우 독립적인 사용자 1는 오류판정 없이 100% 수신하였지만 중첩되는 사용자 2는 411bit에서 오류판정을 보였다. 그러나 중첩되지 않는 환경의 경우 사용

자 1과 2에서 오류판정 없이 100% 수신하였다. 중첩되지 않는 환경에서 전송률 1kbps, 2kbps, 5kbps의 수신 결과 1kbps와 2kbps에서는 사용자 1과 2 모두에서 오류판정 없이 100% 수신하였으며 5kbps에서는 사용자 1는 32bit 그리고 사용자 2는 10bit에서 오류판정을 보였다. 1차 주파수의 조합 쌍을 파라메트릭 배열 성분이 중첩되지 않는 환경이 되도록 선택하는 것이 중요하며 파라메트릭 배열 기반 주파수분할 통신 기법을 통해 다중 사용자 통신 및 전송률 향상 가능성을 확인하였다.

파라메트릭 배열 현상을 이용한 탐지 시스템의 탐지 성능 향상을 위해 파라메트릭 배열 Chirp 신호의 대역 확장 기법과 다중 대역을 이용한 탐지 알고리즘을 제안하였다. 제안된 시스템은 공중용 탐지 시스템과 해저지층탐지 시스템을 개별적으로 설계하여 탐지실험을 수행하였다. 공중용 지층탐지 시스템은 송수신 신호 처리 기법에 대한 성능 검증에 활용되며 TR-2436/150(MASSA) 초음파 트랜스듀서 배열(8x2)과 PXI-6259(NI)를 이용하여 구현하였다. 잠수함 모형 및 스테인레스 파이프 탐지 실험결과 B-Scan 출력에서 잠수함 모형의 높이 12cm를 정확히 확인하였으며 C-Scan 이미지에서 잠수함과 파이프 모형을 비교적 정확히 확인하였다. 해저지층탐사 시스템은 BII-7541(Benthowave) 파라메트릭 트랜스듀서 배열과 DSP 등을 이용하여 구현 후 2차원 수조 실험 및 실험실 실험을 수행하였다. 탐지 시스템의 성능 검증을 위해 2차원 수조 실험 및 제주도 북부앞 함덕 해수욕장 근해에서 실험실 실험을 수행하였다.

대역 확장 파라메트릭 배열 Chirp의 수조 실험 결과 두 대역의 1차 주파수 Chirp(LF Chirp: 192.5~185kHz, HF Chirp: 207.5~215kHz)을 이용하여 기존 7.5kHz 대역(22.5~30kHz)에서 15kHz 대역(15~30kHz)으로 확장된 파라메트릭 배열 Chirp 신호를 생성하여 낮은 감쇠 특성을 갖고 30cm 두께의 진흙 퇴적층을 투과 후 11.3m의 벽면(철재질) 반사 신호를 확인 하였다. 다중 대역을 이용한 탐지 실험을 위해 1차 주파수 185kHz와 207.5~215kHz Chirp를 이용하여 22.5~30kHz의 파라메트릭 배열 Chirp를 생성한 후 20cm 두께의 아크릴 박스, 스테인리스 판, 그리고 수조 벽면을 센서로부터 5.2m, 7.2m 12.2m에 배치 후 탐지한 결과 파라메트릭 배열 성분만을 이용한 경우 보다 스테인리스 판의 질량벽 특성 등을 추가적으로 획득하였다.

실해역 실험결과 1차 주파수 성분에서 수심 약 28~75m의 급경사 해저 표면반사와 수심 약 45m의 구릉형태 구조가 확인되고 파라메트릭 배열 성분에서는 1차 주파수와 동일한 해저 표면반사만 확인되고 하부반사 신호는 확인되지 않았다. 이는 실험해역이 주로 현무암등 화산암반암으로 구성된 특성과 실험적으로 계산된 1차 주파수의 음원준위(SL)가 수조실험 환경에 보다 약 25dB 낮게 발생되었던 이유로 보인다. 수조환경과 실해역 환경의 실측자료에 시스템의 수신음압감도(RVS)를 적용하여 파라메트릭 배열 성분의 초기 음원준위(SL)를 추정된 결과 각각 162.4dB와 139.1dB로 실해역 환경에서 23.3dB 낮게 추정되었다. 또한 수조 실험환경과 유사한 해상실험 환경을 가정하여 요구되는 1차 주파수의 음원준위(SL)와 송신전압을 예측하였다. 수심 100m에서 수조 실험과 유사한 투과성능을 얻기 위한 파라메트릭 배열 성분의 음압준위(SPL)는 143.5dB로 요구되는 1차 주파수의 음원준위(SL)와 송신전압은 각각 223.5dB와 0.866kVrms이다. 제주도 근해 중 진흙 퇴적층 분포가 보고된 제주도 차귀도 북서쪽 해역에서 일반적인 해저지층탐사기(Chirp-3, Teledyne Benthos)를 이용한 지층탐사 및 해저 시료 채취를 수행하였다. 하부반사 신호가 확인되는 경로 중 진흙과 고운모래가 채취된 정점에서 파라메트릭 배열기반 해저지층탐사 실험결과 1차 주파수에서 수심 87m 부근의 해저 표면반사 신호가 확인되고 파라메트릭 배열 성분은 일부 수직 입사조건이 만족되는 영역에서 해저 표면반사 신호를 확인할 수 있었다.

마지막으로 파라메트릭 배열 기반 지향성 음향 시스템의 빔 조향을 위해 VSB(Vestigial Side Band)변조 기반의 디지털 Beam-steering 시스템을 설계하였다. 제안된 시스템의 성능 평가를 위해 강당에서 1차 주파수 20kHz와 32.5kHz를 이용하여 12.5kHz의 파라메트릭 배열 성분을 생성한 후 전파 특성, 빔 패턴 그리고 빔 조향 실험을 수행하였다. 실험결과 시스템의 가상음원거리(1.93m)까지 음압이 증가 후 감소하는 전파 특성 및 이론적인 빔 패턴과 유사한 빔폭을 확인하였다. 또한 10°와 20°의 빔조향 결과 정확한 위치에 빔이 형성됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] R. Coates, M. Zheng, and L. Wang, "BASS 300 PARACOM: A Model Underwater Parametric Communications System," IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 21, No. 2, pp. 225-232, 1996.
- [2] M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, "Phase-Coherent Digital Communications for Underwater Acoustic Channels," IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 19, No. 1, pp. 100-111, 1994.
- [3] L. LeBlanc, and P. Beaujean, "Spatio-Temporal Processing of Coherent Acoustic Communication Data in Shallow Water," IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 25, pp. 40-51, 2000.
- [4] D. Kilfoyle, J. Preisig, and A. Baggeroer, "Spatial Modulation Experiments in the Underwater Acoustic Channel," IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 30, pp. 406-415, 2005.
- [5] A. Quazi, and W. Konrad, "Underwater acoustic communications," IEEE Commun. Mag. Vol. 20, pp. 24-30, 1982.
- [6] B. Novikov, O. Rudenko and V. Timoshenko, *Nonlinear Underwater Acoustics*, The American Institute of Physics, New York, 1987.
- [7] M. Hamilton and D. Blackstock, *Nonlinear Acoustics*, Academic press, 1998.
- [8] P. Westervelt, "Parametric end-fire array," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 32, pp. 934, 1960.
- [9] P. Westervelt, "Parametric Acoustic Array," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 35, pp. 535-537, 1963.
- [10] J. Bellin, P. Westervelt, and R. Beyer "Experimental Investigation of a Parametric End array," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 32, pp. 935, 1960.
- [11] J. Bellin, and R. Beyer, "Experimental Investigation of an End-Fire Array," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 34, pp. 1051-1054, 1962.
- [12] H. Berkta, "Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications," J. Sound Vib. Vol. 2, pp. 435-461, 1965.
- [13] H. Berkta, and D. Leahy, "Farfield performance of parametric transmitters," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 55, pp. 539-546, 1974.
- [14] M. Moffett, and R. Mellen, "Model for parametric acoustic sources," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 61, pp. 325-337, 1977.
- [15] H. Merklinger, R. Mellen, and M. Moffett, "Finite-amplitude losses in spherical sound waves," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 59, pp. 755-759, 1976.

- [16] M. Moffett, "Measurement of fundamental and second harmonic pressures in the field of a circular piston source," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 65, pp. 318-323, 1979.
- [17] T. Muir, and J. Willette, "Parametric Acoustic Transmitting Arrays," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 52, pp. 1481-1486, 1972.
- [18] M. Bennett, and D. Blackstock, "Parametric array in air," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 57, pp. 562-568, 1975.
- [19] B. Lucas, J. Tjotta, and T. Muir, "Field of a parametric focusing source," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 73, pp. 1966-1971, 1983.
- [20] G. Garrett, J. Tjotta, and S. Tjotta, "Nearfield of a large acoustic transducer, Part II: Parametric radiation," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 74, pp. 1013-1020, 1983.
- [21] C. Darvennes, M. Hamilton, J. Tjotta, and S. Tjotta, "Effects of absorption on the nonlinear interaction of sound beams," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 89, pp. 1028-1036, 1991.
- [22] L. Kopp, D. Cano, E. Dubois, L. Wang, B. Smith, and R. Coates, "Potential Performance of Parametric Communications," *IEEE J. Oceanic Eng.* Vol. 25, pp. 282-295, 2000.
- [23] K. Williams, L. Satkowiak, and D. Bugler, "Linear and parametric array transmission across a water-sand interface-Theory, experiment, and observation of beam displacement," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 86, pp. 311-325, 1989.
- [24] J. Wunderlich, G. Wendt, and S. Muller, "High-resolution echo-sounding and detection of embedded archaeological objects with nonlinear sub-bottom profiler," *Marine Geophysical Researches* Vol. 26, pp. 123-133, 2005.
- [25] K. Foote, D. Francis, and P. Atkins, "Calibration sphere for low-frequency parametric sonars," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 121, pp. 1482-1490, 2007.
- [26] D. Boulinguez, A. Quinquis, and M. Brussieux, "Classification of buried objects using a parametric sonars," *OCEANS'98. IEEE Proc.* Vol. 3, pp. 1264-1268, 1998.
- [27] M. Zakharia, C. Pollet, and E. Rigaud, "Combined Parametric Synthetic and Interferometric Sonar for the Detection of Buried Objects," *OCEANS' 2005-Europe. IEEE Proc.* Vol. 1, pp. 522-526, 2005.
- [28] M. Yoneyama, and J. Fujimoto, "The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 73, pp. 1532-1536, 1983.
- [29] C. Shi, and W. Gam, "Product directivity models for parametric loudspeakers," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 131, pp. 1938-1945, 2012.

- [30] Y. Lee, *Numerical solution of the KZK equation for the pulsed finite amplitude sound beams in thermoviscous fluids*, Ph.D. dissertation, The univ. Texas at Austin, 1993.
- [31] W. Gan, J. Yang, K. Tan, and M. Er, "A Digital Beamsteerer for Difference Frequency in a Parametric Array," *IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Processing*, Vol. 14, No. 3, pp. 1018-1025, 2006.
- [32] H. Ju, and Y. Kim, "Near-field characteristics of the parametric loudspeaker using ultrasonic transducers," *Applied Acous.* Vol. 71, pp. 793-800, 2010.
- [33] T. Pederson, "A Parametric SONAR performance calculator," *J. Phys. Colloques*, Vol. 40(C8), pp. 137-139, 1979.
- [34] H. Bass, L. Sutherland, A. Zuckeerwar, D. Blackstock and D. Hester, "Atmospheric absorption of sound: Further developments," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 93, pp. 680-683, 1995.
- [35] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd edition, McGraw-Hill, 1983
- [36] X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics Principles and Applications*, 2nd edition, Springer, 2010.
- [37] K. Benjamin and S. Petrie, "The design, fabrication, and measured acoustic performance off a 1-3 piezoelectric composite Navy calibration standard transducer," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 109, pp 1973-1978, 2001.
- [38]. J. Proakis, and M. Salehi, *Communication Systems Engineering*, 2nd edition, Prentice Hall, 2011.
- [39] R. Galvin, R. Coates, L. Wang, and R. Stoner, "Measured Channel Sounding Characteristics and their Relationship with the Performance of a Parametric Communication System," *OCEANS'96. MTS/IEEE Proc.* Vol. 2, pp. 826-831, 1996.
- [40] M. Zheng, R. Coates, L. Wang, and R. Stoner, "Underwater Acoustic Communication Utilising Parametric Transduction with M-ary DPSK Modulation," *OCEANS'96. MTS/IEEE Proc.* Vol. 2, pp. 832-838, 1996.
- [41] G. Loubet, F. Vial, A. Essebbar, L. Kopp, and D. Cano, "Parametric Transmission of Wide-band Signals," *OCEANS'96. MTS/IEEE Proc.* Vol. 2, pp. 839-844, 1996.
- [42] R. Galvin, and L. Wang, "Measured channel characteristics and the corresponding performance of an underwater acoustic communication system using parametric transduction," *IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation*, Vol. 147, pp. 247-253, 2000.

- [43]. L. LeBlanc, L. Mayer, M. Rufino, S. Schock, and J. King, "Marine sediment classification using the chirp sonar," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 91, pp. 107-115, 1992.
- [44] W. Konrad, and L. Carlton, "Design and Application of High Power Parametric SONARS," IEEE International Conference of Engineering in the Ocean Environment, pp. 310-315, 1973.
- [45] J. Wunderlich, and G. Wendt, "Advantages of parametric acoustics for the detection of the dredging level in areas with siltation," Proc. 7th Workshop on Dredging and Surveying, pp. 67-75, 2001.
- [46] S. Muller, and J. Wunderlich, "Detection of embedded objects using parametric sub-bottom profilers," International Hydrographic Review Vol. 4, pp. 76-82, 2003.
- [47] M. Gutowski, J. Bull, T. Henstock, J. Dix, P. Hoarth, T. Leighton, and P. White, "Chirp sub-bottom profiler source signature design and field testing," Marine Geophysical Researches, Vol. 23, pp. 481-492, 2002.
- [48] MetroTek Inc., Application Note 23.
- [49] *Handbook of Chemistry and Physics*, 45th Edition, Chemical Rubber Co., Cleveland Ohio, pg E-28
- [50] T. Kim, "Geomorphological Land Classification of Coastal Zones in Jeju Island," J. Geomorphological Asso. Korea, Vol. 10, pp. 33-46, 2003.
- [51] J. Youn, S. Kim, and G. Koh, "Sedimentological Characteristics of Surface Sediments in the Southwestern Sea off Cheju Island, Korea," J. Oceanological Soc. Korea, Vol. 24, pp. 132-147, 1989.