

碩士學位論文

제주도의 풍력자원에 적합한 소형 풍력터빈용 Blade의 최적설계



鄭 承 鉉

2001年 12月

제주도의 풍력자원에 적합한 소형 풍력터빈용 Blade의 최적설계

指導教授 許 鐘 哲

鄭 承 鉉

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



鄭承鉉의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2001年 12月

Optimal Design of Small Wind Turbine Blade
suitable for Wind Potential in Jeju Island

Sung-Hyun Jung

(Supervised by professor Jong-Chul Huh)



A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Master of
Engineering

Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

December 2001

목 차

NOMENCLATURE	i
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 풍력자료의 측정 및 분석	4
2-1 풍력자료 측정장비	4
2-2 풍황분석 및 정격풍속의 결정	5
1) 풍속분포	5
2) 정격풍속	9
III. Blade의 공기역학	13
3-1 운동량이론	13
1) Actuator disk 이론	14
2) Annular momentum이론	18
3-2 날개요소이론	19
3-3 Strip이론	22
3-4 Tip loss factor	23
3-5 최적 Blade	28

IV. Blade의 최적설계	30
4-1 날개수의 결정	30
4-2 익형의 선정	31
4-3 평면형 설계	31
4-4 Blade의 크기	33
4-5 Blade설계 프로그램	34
4-6 설계결과	36
V. Blade의 공력해석	39
5-1 성능해석의 방법	39
5-2 PROP-PC	40
5-3 성능해석의 결과	41
VI. 결 론	44
VII. 참고문헌	45

NOMENCLATURE

Roman

A	: Swept area
a	: Axial interference factor
a'	: Angular interference factor
B	: Number of blade
C	: Scale parameter
C_D	: Drag coefficient
C_L	: Lift coefficient
C_p	: Power coefficient
C_q	: Torque coefficient
C_t	: Thrust coefficient
c	: Chord length
dD	: Local drag force
dL	: Local lift force
$d\dot{m}$: Local mass flow
dQ	: Local torque
dT	: Local thrust

F	: Prandtl's correction factor
F_H	: Prandtl's correction factor of hub loss
F_T	: Prandtl's correction factor of tip loss
$F(V)$: Probability curve
K	: Shape parameter
P	: Power of wind turbine
P_0, P_1	: Atmospheric pressure
P_2	: Rear pressure of swept area
P_3	: Front pressure of swept area
$P(V)$: Power curve
P_r	: Rated power
P_w	: Wind energy density
Q	: Torque
R	: Span
r	: Local span
T	: Thrust
u	: Axial velocity
u_1	: Outlet velocity
V_0	: Free stream velocity
V_i	: Cut-in wind speed



V_o	: Cut-off wind speed
V_r	: Rated wind speed
\bar{V}	: Average wind velocity
W	: Relative velocity
X	: Tip speed ratio
x	: Local tip speed ratio.

Greek Symbol

α	: Attack angle
Γ	: Gamma function
η_g	: Generator efficiency
η_m	: Mechanical efficiency of power transmission device
θ	: Pitch angle
ρ	: Air density
σ	: Solidity
σ_r	: Local solidity ($\frac{B \cdot c}{\pi r}$)
ϕ	: Flow angle
$\cos \phi$: Power factor
Ω	: Angular velocity
ω	: Angular velocity of wake

SUMMARY

Wind turbine generator system is the resource of the antipollution using unlimited wind. Recently it takes a growing interest in all around the world. A blade is one of the main part of the wind turbine generator system. It directly influences the rate of annual electric energy production, the rate of operation, and the economic efficiency of system. Generally, a blade for wind turbine generator system is designed by considering maximum lift-to-drag ratio, conditions of structure, manufacturing process, stable maximum lift coefficient in stall, and a reduction of noise.

This thesis presents an optimal design of a blade for small horizontal-axis wind turbine generator system that is based on the result of the wind potential research on a specific region in Jeju Island. In designing the blade, we used the strip theory with momentum and blade element theories. The Prandtl's tip loss theory was also used to consider the finite number of the blades.

The blade design code calculates the chord length and the twist angle according to the values of input data, and shows two dimensional and three dimensional shapes of the designed blade. We used FX S 03-182 airfoil in order to prevent the effect of decreasing the performance due to dust or insects. PROP-PC code was used to analyze the characteristics of the designed blade.

I. 서론

풍력발전시스템은 무한한 바람자원을 이용하는 무공해 에너지원으로 최근 전 세계적으로 관심이 고조되고 있는 시스템이다. 그러나 풍력에너지는 불규칙적이고 간헐적이어서 이용자에게는 사용하기 불편하며, 또한 출력규모도 화력발전이나 원자력발전에 비해 현저히 낮다. 이러한 단점에도 불구하고 최근 풍력발전설비의 도입이 점점 늘어가고 있는 것은 풍력발전시스템이 무공해 에너지원이기 때문이다. 즉, 풍력에너지는 화석연료와 같이 CO₂ 등의 공해물질을 배출하지 않고 핵연료처럼 방사선 폐기물을 산출하지 않으며, 고갈하지 않는 재생가능 에너지자원이기 때문이다[松官 輝, 2000]. 따라서 풍력에너지는 에너지 위기 이후 학문적 이론을 바탕으로 신기술의 도입과 집중 투자(R&D)에 의해 소형에서부터 MW급 발전시스템에 이르기까지 많은 연구 결과를 남겼고 이러한 연구 결과들은 상업화로 이어져 그 수요가 날로 증가하고 있으며 여러 나라에서 자체 개발 연구에 노력하고 있다[이춘식 등 1989].

풍력발전시스템은 크게 수평축 풍력터빈(Horizontal axis wind turbine : HAWT)과 수직축 풍력터빈(Vertical axis wind turbine : VAWT)으로 구별할 수 있는데, 보통 중/대형 풍력터빈에는 성능 및 구조적 효율성 때문에 수평축 형태가 사용된다[Spera, 1994]. 수평축풍력터빈의 구성물 중 풍력을 기계적 힘으로 변환시키는 부분이 회전날개(Rotor blade)인데, 이는 풍력터빈의 핵심부분으로 시스템의 출력특성 및 연간 전력에너지 생산량과 가동률 외에 시스템의 경제성에도 직접적인 영향을 미치는 중요 인자이므로 터빈 효율을 증가시키는 연구가 계속되

고 있다[Abbott와 Von Doenhoff, 1959]. 일반적으로 풍력터빈용 익형은 큰 양항비, 구조 및 가공조건을 고려한 블레이드 두께, 실속(Stall)에서의 안정적인 최대 양력계수, 소음 발생을 고려한 최대 유속점의 억제 등을 고려하여 설계되어야 한다.

블레이드의 공력설계에 앞서 수행되어야 할 점이 풍력자원조사이다. 풍력자원은 풍력발전시스템의 경제성에 있어 절대적인 영향을 미치므로 그 중요성은 이미 잘 알려져 있다. 이론적으로 풍속의 측정에서 10%의 오차가 있다면 풍력에너지에서는 약 33%의 오차가 생기게 되며, 실제의 풍력발전기의 발전 출력량에서도 약 20% 정도의 차이가 생기게 되므로 정확한 풍속자원의 측정은 거의 절대적으로 이루어져야 할 사항이다[김건훈 등 1999].

블레이드의 공력해석을 위한 이론은 운동량이론, 날개요소이론 및 3차원 날개이론 등이 있다. 운동량이론은 풍력터빈의 블레이드를 지나는 유관(Stream tube)으로 구성된 검사 체적에 대하여 유동에 의한 날개의 회전면에 작용하는 힘을 계산하는 것으로 이상적인 효율과 유속을 예측하는데 유용하지만 날개의 형상에 관한 자료는 제공하지 못한다. 날개요소이론은 3차원 날개의 반경방향 하나의 위치에서 날개단면에 작용하는 양력과 항력을 2차원 날개이론에 의하여 계산하여 반경방향으로 적분함으로써 전체 블레이드에 작용하는 힘을 계산하고 3차원 수정을 거쳐 공력을 계산할 수 있다. 그러나 이 방법은 전체 유동장에 의한 간섭에 관한 정보를 얻을 수 없다. 근래에 들어 회전날개로부터 발생하는 자유선회류(Free vortex) 개념을 도입한 3차원 날개이론을 이용하여 포텐셜 유동장을 계산함으로써 블레이드에 작용하는 공력을 비교적 정확하게 계산할 수 있으나 계산비용 및 시간이 많이 필요한 단점과 점성 및 난류의 영향을 고려치 못함에 의한 약간의 부정확성을 포함하는 문제점이 있다. 따라서 블레이드의 공력형상설계 및 성능해

석은 어느 한가지 방법만으로는 어려우므로 서로 연계하여 작용력 및 유동장에 대한 정보를 교환함으로써 정확한 해석과 설계가 가능하다.

본 논문에서는 블레이드의 공기역학적 최적설계에 운동량이론과 날개요소이론을 함께 사용하는 Strip 이론을 사용하였고, 유한한 개수의 날개를 고려하기 위하여 Prandtl의 Tip loss 이론을 사용하였다. 또한 모든 설계과정을 프로그래밍화하여 설계형상을 2차원과 3차원으로 나타낼 수 있게 하였다. 즉 설계자의 요구사항(익형, 블레이드의 개수, 허브반경, 주속비, 받음각, 출력, 정격풍속 등)을 직접 입력하여 입력된 설계조건에 따라 기본적으로 블레이드설계에 필요한 날개제원인 익현길이(Chord length), 비틀림각(Twist angle) 및 블레이드의 반경을 구하고 이를 토대로 최적설계를 수행한 후 CAD file로 변환하여 CAM 공정에 필요한 정보를 파일로 저장할 수 있게 되어 제작에 바로 적용할 수 있도록 하였다. 또한 설계된 형상에 대한 공력해석에는 PROP-PC code를 사용하여 설계된 블레이드의 성능 분석을 하고자 한다.

II. 풍력자료의 측정 및 분석

풍력발전 시스템은 풍력에너지를 풍력터빈이라는 매개체를 통해 전력을 얻는 것이므로 출력에 미치는 풍력의 영향은 절대적이며 풍력자료의 측정 및 분석은 풍력터빈의 크기 및 정격풍속을 결정하는데 중요한 요소이다.

2-1 풍력자료 측정 장비

측정용 폴(pole)과 계측장비의 설치는 가급적 인근지역에 큰 장애물이 없는 지점을 선택하여 설치하여야 한다. 측정높이는 최고 높이인 30m와 15m에서 풍속자료를 측정하고, 풍향은 30m 높이에서만 측정하였다. 풍력자료의 측정은 폴의 지상 15m 및 30m 높이에 풍속과 풍향을 측정할 수 있는 풍속계 및 풍향계를 설치하고, 지상의 데이터로거(Data logger, 미국, NRG #9300)에 의해 지속적으로 풍력자료를 수집하게 된다. 풍속, 풍향 및 기상자료는 표준 측정방식에 의해 매초간 측정된 자료의 매시간 평균치를 구하여 이를 매시간의 대표치로 산정하여 메모리 카드에 저장하게 된다. 저장된 자료는 데이터로거의 통신 포트(Port)와 컴퓨터를 통해 파일화하여 매시간의 풍속, 풍향자료 및 기상자료에 대한 정보를 얻게 된다. 획득한 기상 자료는 다음에서 언급될 분석법과 풍력자료분석용 프로그램인 WEAP(Wind energy analysis program)에 의해 풍력자료의 분석이 이뤄진다. 다음의 Fig. 2-1은 풍력자료 측정 장비인 데이터로거의 전경이다[허종철 등 2000].



Fig. 2-1 Picture of data logger



2-2 풍황분석 및 정격풍속의 결정

1) 풍속분포

풍속분포를 예측하기 위하여 여러 가지의 분포함수 중 풍속의 전 범위에 걸쳐 비교적 잘 Fitting 되는 다음의 Weibull 분포함수를 이용한다.

$$F(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \text{ ----- (2-1)}$$

또한, 평균 풍속을 다음과 같이 정의하면,

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} F(V) \cdot V dV \quad \text{-----} \quad (2-2)$$

다음과 같은 일반식이 도출된다.

$$\bar{V}^n = C^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{K}\right), \quad 1 + \left(\frac{n}{K}\right) > 0 \quad \text{-----} \quad (2-3)$$

따라서, 풍속이 측정된 지역의 \bar{V} 및 \bar{V}^3 값에 의해 Weibull 분포함수의 척도 계수인 C 와 형상계수인 K 의 값이 계산되어지며 계산된 C 와 K 의 값을 알면 식 (2-1)의 확률밀도함수로부터 특정풍속인 V_x 까지 적분하여 누적확률밀도함수를 다음과 같이 구할 수 있다.



$$\begin{aligned} F(V \leq V_x) &= \int_0^{V_x} \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] dV \\ &= 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_x}{C}\right)^K\right] \quad \text{-----} \quad (2-4) \end{aligned}$$

또한, C 와 K 를 이용하여 풍력에너지가 갖는 에너지 밀도를 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{1}{2} \rho A \int_0^{\infty} V^3 F(V) dV \\ &= \frac{1}{2} \rho A C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{K}\right) \quad \text{-----} \quad (2-5) \end{aligned}$$

Table 2-1은 미국 NREL의 Wind Resource Assessment Handbook에서 발췌한 것으로 측정높이가 각각 30, 50m일 때 그 높이에서 측정된 연평균풍속 또는 풍속자료로부터 풍력에너지밀도를 산출했을 때의 등급을 나타내고 있다. 여기서 3등급 이상인 경우 풍력발전시스템의 설치가 가능하고 4등급 이상인 경우에는 풍력자원이 대단히 우수한 지역으로 평가할 수 있다.

Table 2-2는 제주도내 특정지역의 풍속자료와 식 (2-3)을 이용하여 각 지역의 지표로부터 30m되는 위치의 C 와 K 값 및 연평균풍속을 제시한 것이다. 측정지점을 보면 동부해안지역인 우도, 김녕, 섭지와 서부해안지역의 일과리, 하모리 중산간지역인 우보악, 납읍목장 등 총 7개 지역이며, 측정기간은 섭지지역이 2년이고 나머지 지역은 1년이다. 연평균풍속은 우도지역이 7.38m/s로 타지역에 비해 월등히 좋으며 우보악지역이 가장 낮고, C 와 K 값이 연평균풍속에 비례한 값으로 나타남을 알 수 있다.

Fig. 2-2는 여러 측정지점의 풍속확률분포를 나타낸 것인데 우보악인 경우 풍속분포가 왼쪽으로 치우쳐 저풍속에 주로 분포하며 또한 풍력에너지등급이 1등급 밖에 되지 않아 풍력터빈의 설치에는 부적합하다. 이에 비해 우도지역은 풍력터빈의 시동풍속인 4m/s 이상의 풍속분포가 높고 풍력에너지등급도 4등급이 되어 풍력터빈의 설치에 적지라 평가되어 진다. 이외의 지역 중 섭지, 일과리, 납읍목장은 풍력에너지등급이 2등급으로서 풍력터빈의 설치 고려 지역이며 김녕과 하모리 지역은 3등급으로서 풍력터빈의 설치 가능 지역이다.

Table 2-1 Wind power class according to wind speed and power density

Wind power class	30m		50m	
	Wind power density (W/m ²)	Wind speed (m/s)	Wind power density	Wind speed (m/s)
1	160	5.1	200	5.6
2	240	5.9	300	6.4
3	320	6.5	400	7.0
4	400	7.0	500	7.5
5	480	7.4	600	8.0
6	640	8.2	800	8.8
7	1600	11.0	2000	11.9



Table 2-2 Shape parameter, scale parameter, and annual mean wind speed

Point	<i>C</i>	<i>K</i>	Annual mean wind speed (m/s)	Term of measurement
Woodo	8.449	1.941	7.38	'99. 01. 04 ~ 2000. 01. 03
Kimnyung	7.490	1.835	6.53	'99. 07. 27 ~ 2000. 07. 26
Subji	7.312	1.753	6.35	'97. 12. 31 ~ '99. 12. 29
Ilgwari	7.385	1.923	6.41	'99. 05. 07 ~ 2000. 05. 06
Hamori	7.899	1.884	6.88	'99. 03. 01 ~ 2000. 02. 29
Uboak	6.634	1.564	5.82	'99. 03. 09 ~ 2000. 02. 29
Napeup 2	7.401	1.812	6.42	'99. 03. 02 ~ 2000. 02. 29

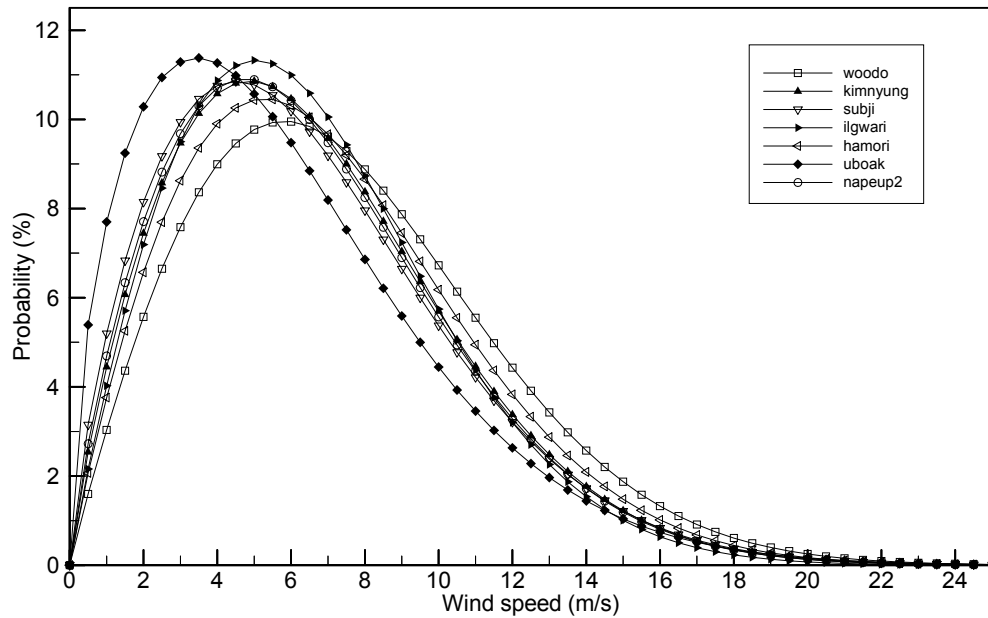


Fig. 2-2 Wind probability distribution of a specific region in Jeju Island



2) 정격풍속

풍력터빈의 설계풍속은 풍력발전시스템 전체의 효율과 경제성을 좌우하는 중요한 변수이다. 일반적으로 시동풍속은 풍력터빈의 내부저항에 의해 4m/s 정도가 되며 정지풍속은 연간출력과 구조강도에 의한 경제성을 고려할 때 통상 20~25m/s로 한다. 또한 최적정격풍속을 결정하기 위해서는 입지의 주어진 풍속조건에서 정격풍속의 변화에 따른 풍력발전 시스템의 연간 출력의 변화를 비교·검토하여 단위면적당 연간 출력이 가장 큰 정격풍속을 설계풍속(최적정격풍속)으로 한다.

연간 단위면적당 풍력발전 시스템의 출력은,

$$P/A = [\int_0^{\infty} F(V) P(V) dV \times 8760] / A \quad \text{-----} \quad (2-6)$$

로 계산할 수 있다. 이러한 풍력발전 시스템의 출력예측을 위해서는 우선 풍력발전 시스템의 구성요소별로 수학적인 모델링을 하고 풍속자료를 입력함으로써 그 출력을 예측할 수 있다. 그러나 세부설계가 되지 않은 상태에서의 출력예측을 위해서는 풍속에 대한 출력 또는 시동풍속, 정격풍속과 정격출력을 이용하여 출력 특성을 다항식으로 표현하여 계산에 사용한다.

Fig. 2-3은 출력제어를 하는 풍력발전 시스템의 출력특성곡선으로서 풍력발전 시스템은 내부의 기계적 마찰저항으로 인하여 풍속이 일정속도(시동풍속, V_i) 이상이 되지 않으면 출력이 없으며 풍속이 증가하여 V_r 이상이 될 때 시스템의 출력은 P_r 로 일정하게 된다. 이때의 출력과 풍속을 각각 정격출력, 정격풍속이라고 한다. 그 이후 풍속이 V_o (정지풍속) 이상이 되면 회전날개의 파손방지나 내부시스템의 안정을 위해 피치제어를 이용하여 공회전상태가 되어 더 이상 발전을 하지 않는다.

이러한 출력특성의 모델링은 Justus[1976]에 의한 2차 방정식이나 Musgrove [1988]에 의한 3차 방정식이 사용된다. 그러나 그동안의 다른 연구결과[이춘식 등 1988]에 의하면 두가지 방법에 의한 차이가 거의 없다. 따라서 본 논문에서는 식 (2-7)로 표현되는 Justus[1976]에 의한 2차 방정식을 사용하였다.

$$P(V) = \begin{cases} 0 & (0 \leq V \leq V_i) \\ P_r(A + BV + CV^2) & (V_i \leq V \leq V_r) \\ P_r & (V_r \leq V \leq V_o) \\ 0 & (V_o \leq V) \end{cases} \quad \text{---} \quad (2-7)$$

여기서 각 계수는 다음과 같다.

$$A = -BV_i - CV_i^2$$

$$B = [(V_m^2 - V_i^2) - (V_m/V_r)^3(V_r^2 - V_i^2)]/D$$

$$C = [(V_m/V_r)^3(V_r - V_i) - (V_m - V_i)]/D$$

$$D = (V_r - V_i)(V_m^2 - V_i^2) - (V_m - V_i)(V_r^2 - V_i^2)$$

$$V_m = (V_r + V_i)/2$$

따라서 출력은 식 (2-6)과 식 (2-7)에 의해 구할 수 있다.

Fig. 2-4는 정격출력을 30kW로 가정했을 경우 각 지역에 대한 정격풍속의 변화에 따른 단위면적당 연간출력의 변화를 계산한 결과인데 이 그림에서 제주도의 최적정격풍속을 결정할 수 있다. 지금까지 측정된 데이터와 계산된 값들에 의해 풍력발전시스템의 경제성을 고려할 경우 섬지와 우보악지역을 제외한 우도, 하모리, 일과리, 김녕, 남읍목장을 풍력발전시스템의 설치예정지역으로 가정하였다. 따라서 이들 지역의 풍속특성을 제주도의 대표값으로 하여 설계를 수행할 예정인데, 그림에서 보는 바와 같이 우도지역의 최적정격풍속은 12.5m/s로서 가장 높게 나타났으며 하모리, 김녕, 남읍목장은 12m/s이고, 일과리 지역의 최적정격풍속은 11.5m/s이므로 제주도의 최적정격풍속은 11.5m/s~12.5m/s의 범위에 있음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시동풍속 4m/s, 정지풍속 22m/s, 최적정격풍속 12m/s로 하여 블레이드의 설계를 수행하고자 한다.

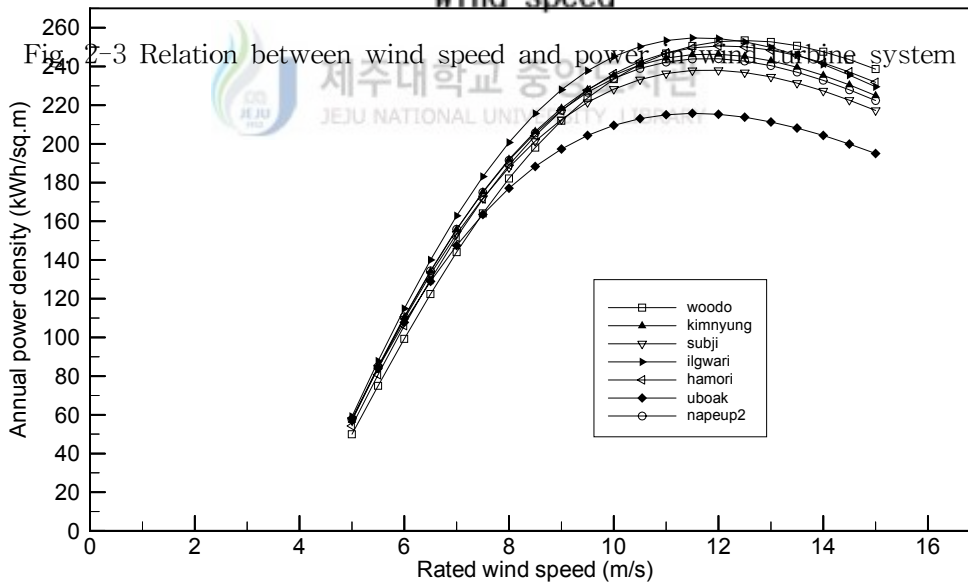
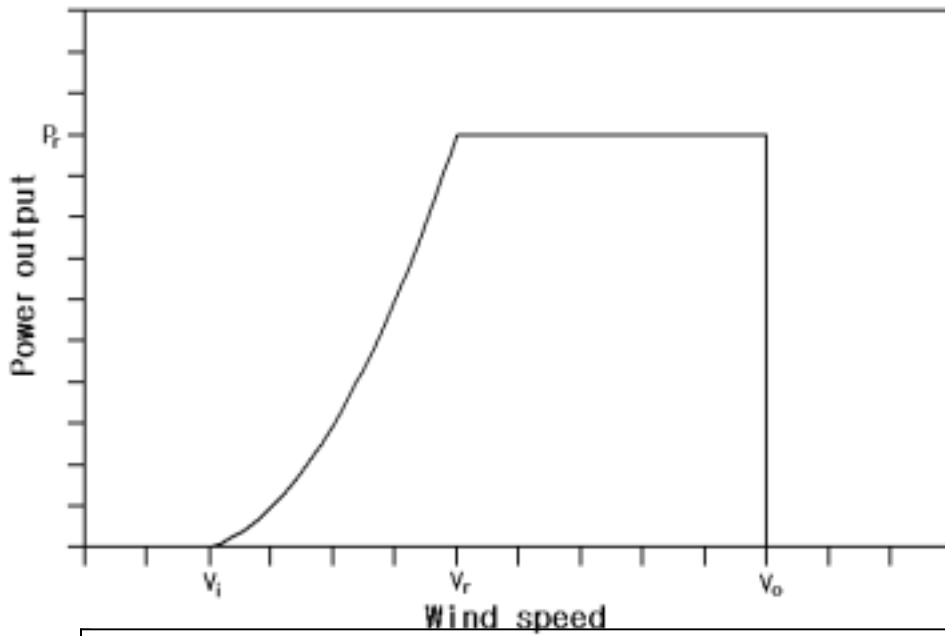


Fig. 2-4 Relation between rated wind speed and annual power density

Ⅲ. Blade의 공기역학

최적 블레이드의 설계를 위해서는 정확한 공력해석을 할 수 있는 방법의 확립이 필요하다. 블레이드의 해석을 위한 이론은 크게 두가지로 볼 수 있는데, 하나는 운동량이론이며 다른 하나는 날개요소이론이다.

3-1 운동량이론

운동량이론은 Rankine[1965]에 의해서 최초로 개발되어 Froude[1889]에 의해 개선되었다. 이 이론은 Fig. 3-1과 같은 유체유동의 검사체적에 대해서 유동에 의해 날개의 회전면에 작용하는 힘을 계산하는 것으로 풍력터빈의 특성을 이론적으로 계산할 때 많이 사용하는 이론이다.

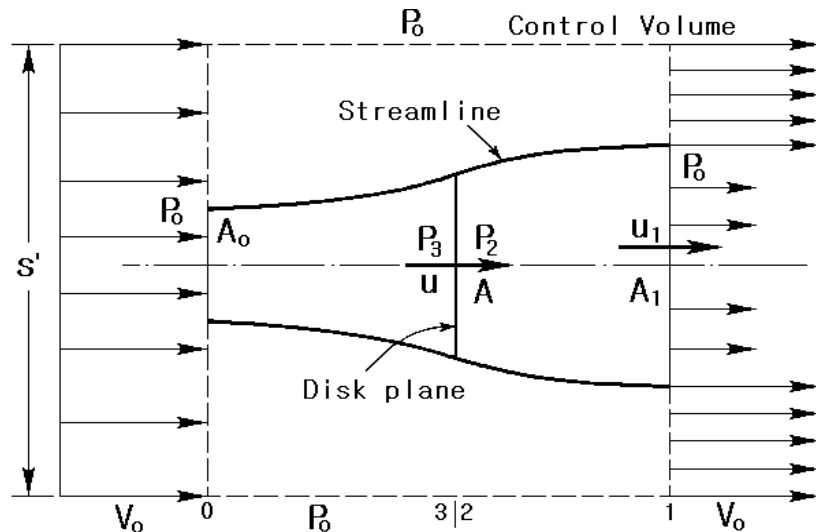


Fig. 3-1 Flow fields around actuator disk

1) Actuator disk 이론

풍력터빈은 블레이드를 이용하여 바람의 운동량 변화를 일으켜 이것으로 발생하는 힘을 이용하여 에너지를 얻는 것으로 이에 대한 과정은 Fig. 3-1에 잘 나타나 있다. 여기에서 블레이드는 무한개의 날개로 이루어진 하나의 디스크(Disk)로 가정하여 이상화하였다. 그리고 운동량이론을 적용하여 풍력터빈의 공력특성을 계산하기 위해 실제 발생하는 복잡한 물리현상을 아래와 같은 가정을 이용하여 단순화하였다.

- ① 회전면에서의 풍속은 일정하다.
- ② 바람은 비압축성이며 바람의 유동은 정상상태이다.
- ③ 블레이드에 의한 와류는 없다.
- ④ 블레이드의 마찰력에 의한 저항력은 없다.
- ⑤ 블레이드는 무한개의 날개로 이루어진 하나의 디스크로 단순화하였다.

이상과 같은 가정으로 풍력터빈을 해석하기 위하여 블레이드 주위를 검사체적으로 하였으며 Fig. 3-1은 이것을 도시한 것이다. 그림에서 속도 V_0 인 바람이 회전면을 통과하면서 일부 에너지는 블레이드에 흡수되고 이를 통과한 후의 풍속은 운동에너지 감소로 u_1 으로 감속된다. 이때 블레이드 전후에서 속도손실로 인하여 유선의 확장과 압력강하 $P_3 - P_2$ 가 생기며 이것은 블레이드가 받는 항력으로서 베르누이 정리와 운동량이론으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

블레이드가 받는 힘(Thrust)은 압력차이로 발생하는 힘이므로,

$$T = (P_3 - P_2)A \quad \text{-----} \quad (3-1)$$

이다. 베르누이 정리를 디스크 전후의 유선을 따라서 적용하면,

$$\begin{aligned} P_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 &= P_3 + \frac{1}{2} \rho u^2 \\ P_2 + \frac{1}{2} \rho u^2 &= P_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 \end{aligned} \quad \text{-----} \quad (3-2)$$

이므로, 이 식에서 P_0 와 P_1 을 대기압으로 가정하면 블레이드 전후의 압력강하는,

$$P_3 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - u_1^2) \quad \text{-----} \quad (3-3)$$

이다. 따라서 디스크가 받는 항력은 다음과 같이 표시될 수 있다.



$$T = \frac{1}{2} \rho A (V_0^2 - u_1^2) \quad \text{-----} \quad (3-4)$$

이와는 별개로 Fig. 3-1에서 유선에 대한 연속방정식 ($V_0 A_0 = u A = u_1 A_1$)을 적용한 후, 유관에 대하여 축방향 운동량이론을 적용하면 블레이드에 작용하는 항력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = \rho A u (V_0 - u_1) \quad \text{-----} \quad (3-5)$$

식 (3-4)과 (3-5)를 사용하여 회전면에서의 풍속을 구하면 다음과 같다.

$$u = \frac{1}{2} (V_0 + u_1) \quad \text{-----} \quad (3-6)$$

이것은 입구와 출구에서 두 풍속의 산술평균임을 말해준다. 여기서, 상류층의 풍속에 대한 회전면을 통과할 때의 풍속 감소율 즉, 축간섭계수(Axial interference factor)를

$$a \equiv \frac{(V_0 - u)}{V_0} \quad \text{-----} \quad (3-7)$$

로 정의하면 회전면과 출구면에서의 속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= V_0(1-a) \quad \text{-----} \quad (3-8) \\ u_1 &= V_0(1-2a) \end{aligned}$$



출력은 단위 시간당 회전면으로부터 얻을 수 있는 에너지로서 축방향의 힘(항력)에 회전면에서의 속도를 곱한 값이다. 따라서 식 (3-8)과 출력계수의 정의를 사용하여 출력과 출력계수를 구하면

$$\begin{aligned} P &= T \cdot u = \frac{1}{2} \rho A (V_0^2 - u_1^2) u \\ &= \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4 a (1-a)^2 \quad \text{-----} \quad (3-9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_p &\equiv \frac{P}{\left(\frac{1}{2} \rho A V_0^3\right)} \\ &= 4 a (1-a)^2 \quad \text{-----} \quad (3-10) \end{aligned}$$

이다. 이론적인 풍력터빈의 최대효율을 구하기 위해 C_p 를 a 에 관하여 미분하면

$$\frac{dC_p}{da} = (3a-1)(a-1) = 0 \quad \text{-----} \quad (3-11)$$

$$a = \frac{1}{3} \quad \text{or} \quad a = 1$$

이 되고, 여기서 후자는 실제의 물리현상에서 불가능한 값이므로 a 가 1/3일 때 C_p 는 최대가 되며, 그 때의 출력계수는 16/27로서 59.3%가 된다. 이것을 Betz 계수라 하며 Fig. 3-2와 같이 나타난다.

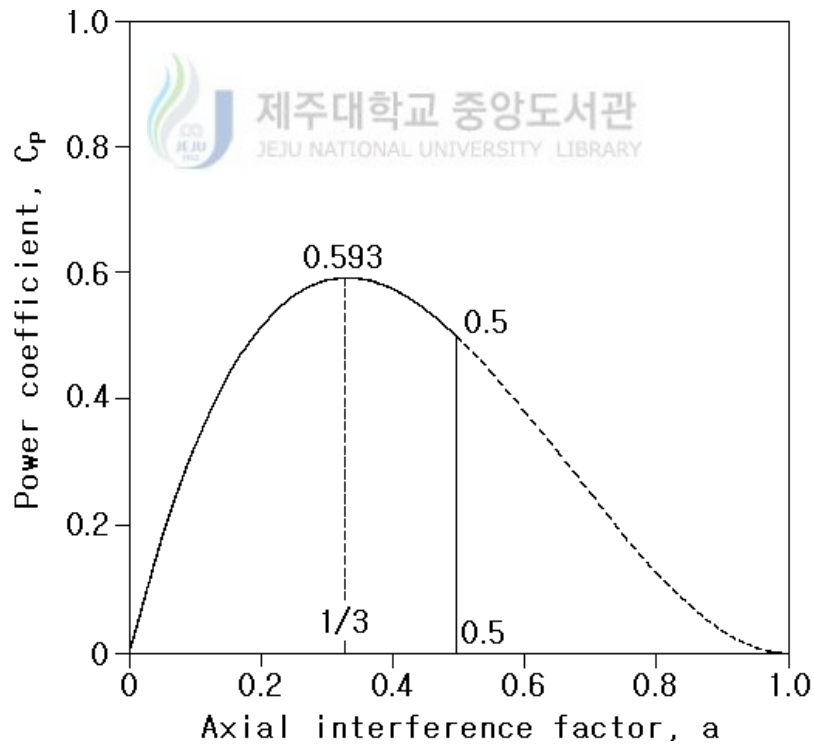


Fig. 3-2 Relation between axial interference factor and C_p

2) Annular momentum 이론

Actuator disk 이론을 유도할 때 두 가지 가정 즉, 블레이드의 회전이 유동에 미치는 영향과 회전면에서 속도변화가 없다는 것은 실제 현상과 다르고 블레이드 주위에서 발생하는 와류의 각속도는 블레이드의 각속도 보다는 작은 값이지만 존재하며 이것은 에너지 손실이므로 풍력터빈의 출력을 높이기 위해서는 와류의 크기를 줄여야 한다. 그러나 와류에 관한 식은 간단하지 않으므로 풍력터빈의 출력을 계산하기 위해서는 필수적으로 이에 관한 식을 가정하여야 한다.

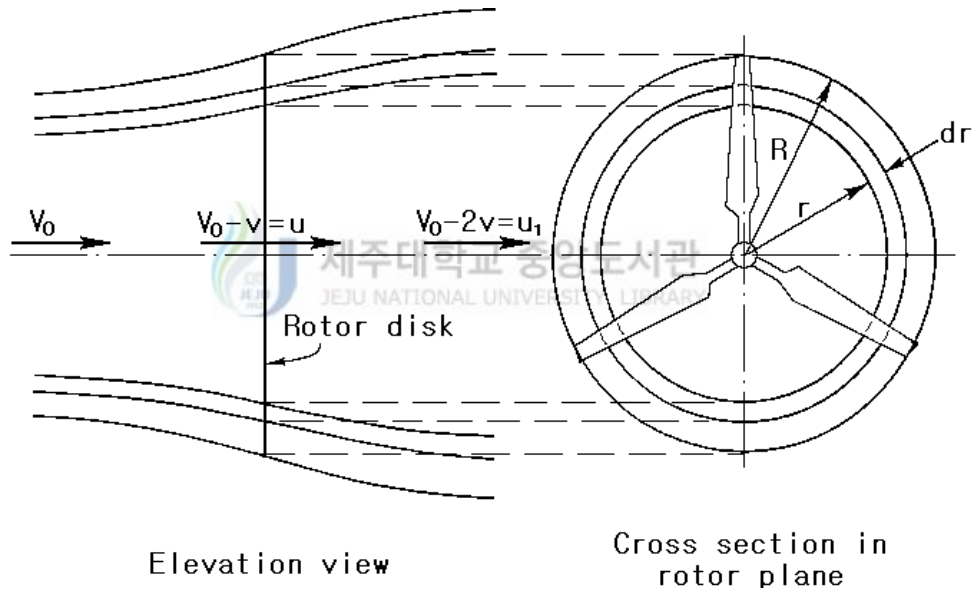


Fig. 3-3 Annular streamtube

풍력터빈의 블레이드가 회전할 때 블레이드의 각속도를 Ω 라 하면 회전간섭계수(Angular interference factor)를 정의할 수 있는데, 회전간섭계수는 회전자에 의해 발생하는 미끄럼 흐름의 상태를 표시할 수 있는 계수로서 블레이드의 각속도에 대한 회전면을 통과하는 바람 각속도의 비에 관한 식으로 다음과 같다.

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \text{ ----- (3-12)}$$

위에서 언급한 것처럼 블레이드의 반경 방향으로의 속도변화가 존재하므로 Fig. 3-3과 같이 검사체적을 원형 미소면으로 나누고 이 미소면에 대하여 선형 운동량이론과 각 운동량이론을 적용하면 각 원형미소면에 대한 추력과 회전 토크를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$dT = 2\pi r \rho u (V_0 - u_1) dr \text{ ----- (3-13)}$$

$$\begin{aligned} dQ &= r d\dot{m} v \\ &= 2\pi r^3 \rho u \omega dr \text{ ----- (3-14)} \end{aligned}$$

위의 두 식을 식 (3-8)과 식 (3-12)를 이용하여 다시 쓰면 다음과 같이 표현된다.

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a (1-a) dr \text{ ----- (3-15)}$$

$$dQ = 4\pi r^3 \rho V_0 a' (1-a) \Omega dr \text{ ----- (3-16)}$$

3-2 날개요소이론

운동량 이론은 풍력터빈의 블레이드보다는 회전면 전체를 고려하여 풍력터빈의 특성을 해석한 것이므로 블레이드 단면에 관한 정보나 단면 변화에 관한 출력변

화의 해석은 어려운 반면, 날개요소이론은 블레이드 단면의 형상, 크기, 단면변화에 대한 출력변화와 같은 계산을 할 수 있으므로 풍력터빈의 특성을 해석할 수 있는 유용한 이론이라 할 수 있다. 날개요소이론은 Froude[1878]에 의해 시작되어 Drzewiecki[1892]에 의해서 개발되었으며, Fig. 3-4와 같이 날개요소에 작용하는 항력과 양력을 계산하여 블레이드에 작용하는 힘을 계산할 수 있다. Fig. 3-4는 피치각이 θ 인 블레이드단면에 기준을 둔 상대좌표를 사용하여 속도 삼각형을 그린 것이고 합성속도는 수직인 두 방향의 상대속도를 합성한 것으로 회전면에 대해서 ϕ 만큼 경사진 것을 보여주고 있다.

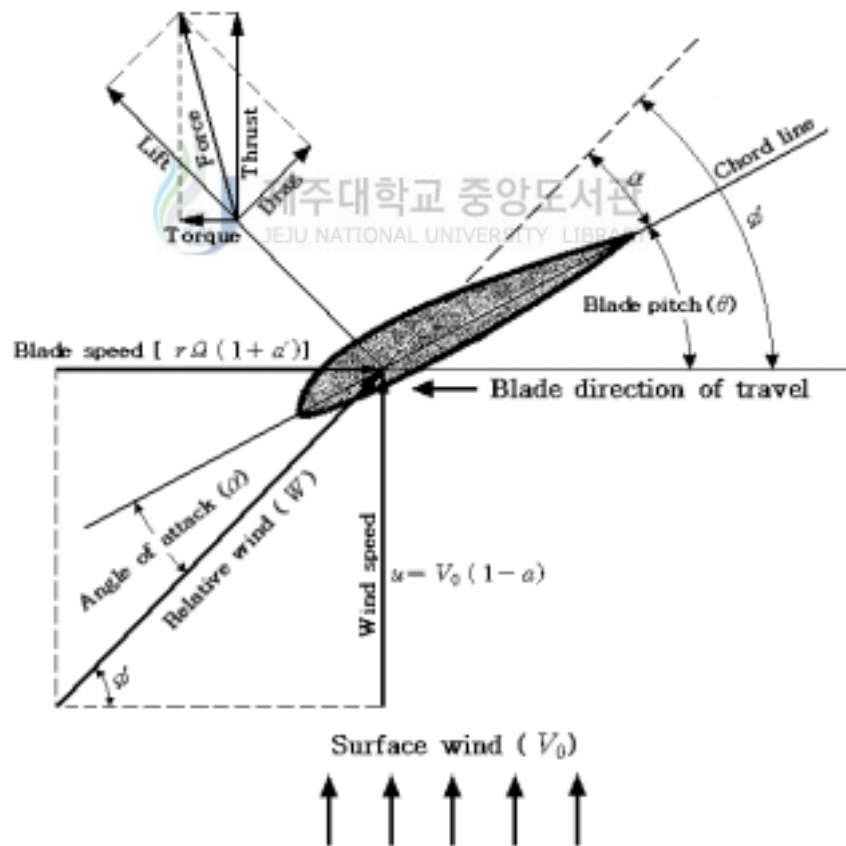


Fig. 3-4 Blade elements and velocity triangle

항력과 양력은 합성속도에 대해서 각각 평행한 성분과 수직인 성분의 힘으로서 항력계수와 양력계수를 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$dD = B c C_D \frac{1}{2} \rho W^2 dr \quad \text{-----} \quad (3-17)$$

$$dL = B c C_L \frac{1}{2} \rho W^2 dr \quad \text{-----} \quad (3-18)$$

여기서 W 는 블레이드의 회전에 의한 속도와 회전면에 수직으로 불어오는 바람속도의 합성속도로 다음과 같이 표현되어진다.

$$W = \sqrt{[V_0(1-a)]^2 + [r\Omega(1+a')]^2} \quad \text{-----} \quad (3-19)$$



속도 삼각형을 이용하여 미소날개요소에 작용하는 미소 추력과 미소 토크를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dT &= dL \cos \phi + dD \sin \phi \\ &= B c \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \quad \text{---} \quad (3-20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dQ &= (dL \sin \phi - dD \cos \phi) r \\ &= B c \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) r dr \quad \text{---} \quad (3-21) \end{aligned}$$

여기서 ϕ 는 유동각도로서 속도 삼각형에서 구하면

$$\phi = \tan^{-1} \frac{(1-a)}{(1+a')x} \quad \text{-----} \quad (3-22)$$

이고 받음각은 다음과 같다.

$$\alpha = \phi - \theta \quad \text{-----} \quad (3-23)$$

3-3 Strip이론

Strip이론은 앞에서 설명한 운동량이론과 날개요소이론을 이용하여 풍력터빈의 공력해석을 할 수 있는 유용한 직을 얻을 수 있는 이론이다.

먼저 블레이드의 중심축에서 r 만큼 떨어지고 폭이 dr 인 미소 날개에 대하여 운동량이론으로부터 구한 미소추력(식 3-15)과 날개요소이론으로부터 구한 미소 추력(식 3-20)을 등치 시키면

$$4 \pi r \rho V_0^2 a(1-a) dr = Bc \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr$$

이 된다. 여기서 다음과 같이 정의되는 국소 Solidity (σ_r)와 합성속도(W)를 이용하여 블레이드 단면형상과 축 방향 유동조건과의 관계를 나타내는 축간섭계수를 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_r = \frac{B c}{\pi r} \quad \text{-----} \quad (3-24)$$

$$W = \frac{V_0(1-a)}{\sin \phi} \quad \text{-----} \quad (3-25)$$

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)}{8 \sin^2 \phi} \quad \text{-----} \quad (3-26)$$

같은 방법으로 식 (3-16)과 식 (3-21)를 같게 놓고 회전간섭계수를 구하면

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_r (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)}{8 \sin \phi \cos \phi} \quad \text{-----} \quad (3-27)$$

이다.



3-4 Tip loss factor

식 (3-26)과 식 (3-27)은 2차원 날개를 갖는 블레이드에서의 식이므로 블레이드의 설계시 적용하기가 곤란하다. 실제 3차원의 날개에서는 블레이드 상·하면의 압력차에 의하여 날개끝에서 와류(Vortex)가 발생하여 날개 주위의 순환(Circulation) 분포가 달라지므로 날개끝 부분에서부터 손실이 발생하게 된다. Fig. 3-5는 블레이드 날개끝과 허브에서의 손실흐름을 보여주고 있다.

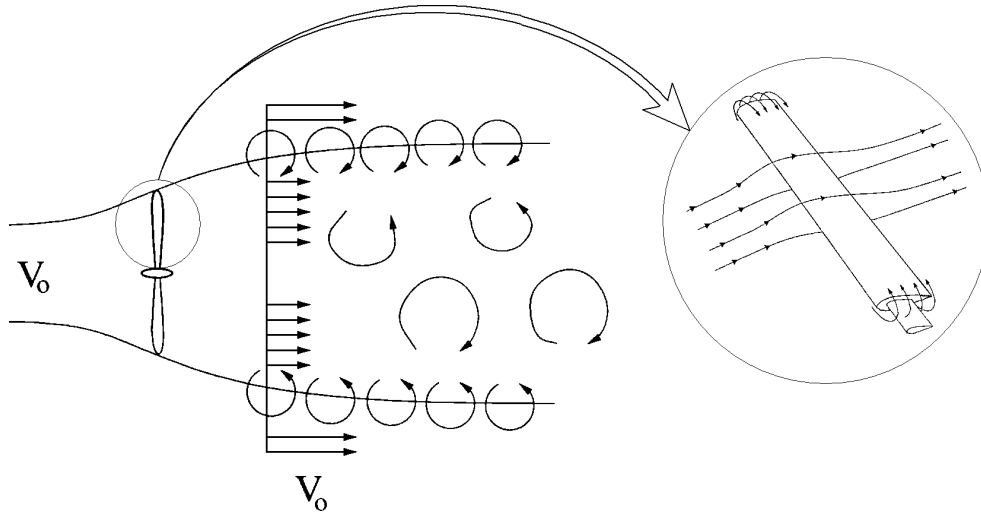


Fig. 3-5 Turbulent-wake state induced by the hub and tip loss

Fig. 3-5에서와 같이 날개끝과 허브에서 손실흐름이 발생하면 날개끝과 허브에서의 순환이 감소하여 블레이드에서 발생하는 양력이 감소하게 되며, 이러한 현상은 블레이드의 토크 및 동력계수의 감소를 수반하게 된다. 따라서, 블레이드의 날개끝과 허브의 손실을 해석할 필요가 있는데, 이를 해석하기 위한 방법에는 Goldstein과 Prandtl에 의한 방법이 있다. Goldstein 해석은 Prandtl의 해석에 비해 정확하지만 계산이 복잡하며, 큰 날개끝 속도비에서는 이 두방법이 커다란 차이를 나타내지 않는다. 또한 풍력발전용 블레이드는 보통 날개끝 속도비가 6~9 정도에서 운영되고 있으므로 Prandtl의 해석방법과 Goldstein의 방법사이의 차이가 적다. 따라서 본 연구에서는 Prandtl이 제안한 식을 사용하였다.

날개끝 손실에 대한 Prandtl의 보정계수 F_T 는 다음과 같다.

$$F_T = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f} \quad \left[\text{단, } f = \frac{B(R-r)}{2R \sin \phi} \right] \quad \text{--- (3-28)}$$

Prandtl의 보정은 블레이드 갯수가 2개 이상이고 날개끝 속도비가 높을 때 정확하게 적용된다. 블레이드의 성능예측시 고려해야 할 다른 요소는 블레이드 날개허브에서 발생하는 손실이다. 이러한 손실도 역시 날개끝 손실과 같은 개념으로 예측할 수 있다. 허브손실에 대한 Prandtl의 보정계수 F_H 는

$$F_H = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f} \quad \left[\text{단, } f = \frac{B(r-R_H)}{2 R_H \sin \phi} \right] \quad \text{--- (3-29)}$$

이며 R_H 는 허브반경을 나타낸다. 블레이드 날개에서 발생하는 손실은 날개끝 손실과 허브손실이므로 날개에서 발생하는 총 손실에 대한 보정계수 F 는

$$F = F_T \times F_H \quad \text{----- (3-30)}$$

이 된다. Prandtl의 보정계수를 운동량이론에서 구한 식 (3-15)와 식 (3-16)에 적용하면

$$dT = 4 \pi r \rho V_0^2 a (1-a) F dr \quad \text{----- (3-31)}$$

$$dQ = 4 \pi r^3 \rho V_0 a' (1-a) \Omega F dr \quad \text{----- (3-32)}$$

으로 되며 손실을 고려하지 않았을 때와 마찬가지로 Strip이론을 이용하여 a, a' 을 구하면

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)}{8 F \sin^2 \phi} \quad \text{-----} \quad (3-33)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_r (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)}{8 F \sin \phi \cos \phi} \quad \text{-----} \quad (3-34)$$

로 된다. 식 (3-33)과 식 (3-34)로부터 a 와 a' 은 익형의 공기역학적인 특성, 즉 C_L 과 C_D 를 알고 블레이드의 외형, 즉 σ_r 을 알면 구할 수 있다. 또한 a 와 a' 이 구해지면 날개요소이론으로부터 풍력터빈의 특성을 나타내는 추력계수와 토크계수를 구할 수가 있으며, 운동량이론의 식 (3-9)로부터 출력을 구할 수가 있다.

우선 추력과 추력계수를 구하기 위해 식 (3-20)에 식 (3-24)와 식 (3-25) 및 주속비 ($X = \frac{R\Omega}{V_0}$)와 국부주속비 ($x = \frac{r\Omega}{V_0}$)를 대입하여 전개하면

$$\begin{aligned} T &= \int_{R_H}^R B c \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \\ &= \frac{\rho \pi R^2 V_0^2}{2 X^2} \int_{X_H}^X \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) x dx \quad \text{---} \quad (3-35) \end{aligned}$$


$$\begin{aligned} C_t &= Thrust / \left(\frac{1}{2} \rho V_0^2 A \right) \\ &= \frac{1}{X^2} \int_{X_H}^X \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) x dx \quad \text{---} \quad (3-36) \end{aligned}$$

이다. 이와 마찬가지로 토크 및 토크계수를 식 (3-21)를 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
Q &= \int_{R_H}^R B c \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) r dr \\
&= \frac{\rho \pi R^3 V_0^2}{2 X^3} \int_{X_H}^X \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) x^2 dx \quad (3-37)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_q &= \text{Torque} / \left(\frac{1}{2} \rho V_0^2 A R \right) \\
&= \frac{1}{X^3} \int_{X_H}^X \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) x^2 dx \quad \text{---} \quad (3-38)
\end{aligned}$$

또한 풍력터빈으로부터 얻을 수 있는 출력은 운동량이론의 식 (3-9)으로부터 얻을 수가 있는데 이때 발생하는 출력은 원형 미소요소에 대한 출력을 허브에서 날개 끝까지 적분한 것이므로



$$\begin{aligned}
P &= \int \Omega dQ \\
&= \int_{R_H}^R 4 \pi r^3 \rho V_0 a' (1-a) \Omega^2 dr \quad \text{-----} \quad (3-39)
\end{aligned}$$

이다. 이를 주속비와 국부주속비를 이용하여 다시쓰면

$$\begin{aligned}
P &= \int_{X_H}^X 4 \pi \rho V_0^5 \frac{x^3}{\Omega^2} a' (1-a) dx \\
&= \frac{4 \pi \rho V_0^3 R^2}{X^2} \int_{X_H}^X a' (1-a) x^3 dx \quad \text{-----} \quad (3-40)
\end{aligned}$$

이며, C_p 는 다음과 같이 된다.

$$C_p = \frac{8}{X^2} \int_{X_H}^X a' (1-a) x^3 dx \quad \text{-----} \quad (3-41)$$

3-5 최적 Blade

최적블레이드는 출력이 최대가 되는 형상을 말하며 이를 구하기 위해서는 식 (3-41)의 출력계수를 최대로 하는 형상을 구하면 된다. 따라서 $(\partial C_p / \partial a) = 0$ 가 되는 조건을 만족하는 방정식을 구하면

$$\left(\frac{r}{XR}\right)(1-a)(1-3a) - \left(\frac{C_D}{C_L}\right)(1-2a)\left(\frac{x^2 + 2a(1-a)}{X^2}\right) = 0 \quad \text{-----} \quad (3-42)$$

이다. 또한 회전간섭계수와 Solidity는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$a' = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4a(1-a)}{(rX/R)^2}} - 1 \right] \quad \text{-----} \quad (3-43)$$

$$\sigma = \frac{8a(1-a)}{X C_L \sqrt{(1-a)^2 + \frac{(1+a')^2 X^2 r^2}{R^2}}} \quad \text{-----} \quad (3-44)$$

Fig. 3-6은 블레이드의 최적형상을 설계하는 계산과정의 흐름도이다. 그 과정을 보면, 우선 주어진 익형의 양력과 항력특성을 이용하여 (C_L / C_D) 가 최대가

되는 받음각 및 주속비를 결정한다. 그 다음 식 (3-42)를 만족하는 축간섭계수를 구한 후 식 (3-43)과 식 (3-44) 및 식 (3-22)를 이용하여 회전간섭계수와 Solidity 및 유동각(Flow angle)를 구한다. 또한 식 (3-23)을 이용하여 반경방향으로의 피치각을 계산한 후 허브반경에서부터 끝반경까지 임의의 반경위치에서의 익현길이를 구하면 모든 설계과정이 끝나게 된다.

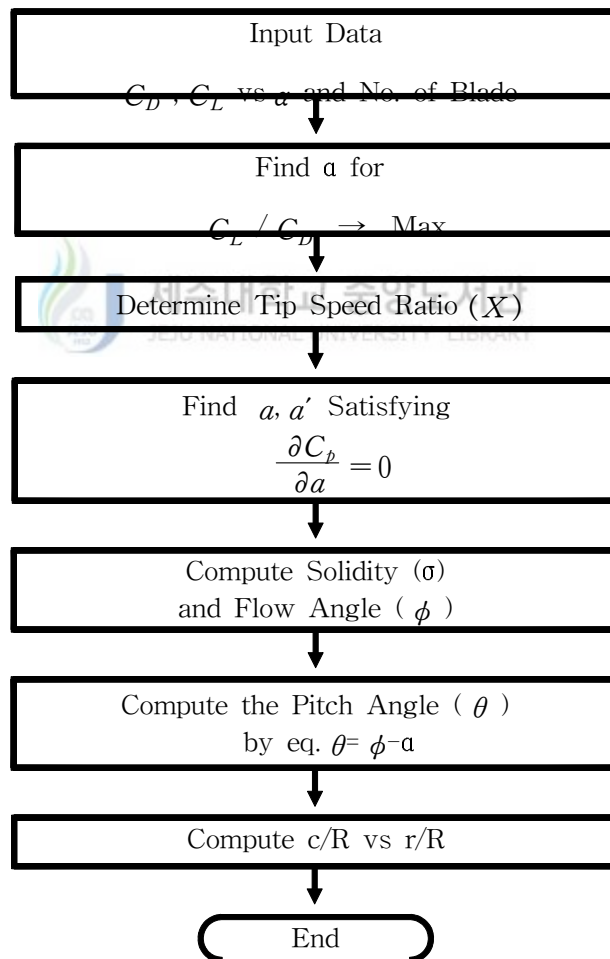


Fig. 3-6 Flow chart of optimal design

IV. Blade의 최적설계

블레이드의 설계는 공력특성이 우수한 익형을 선정 후 성능해석과 병행하여 모든 설계과정이 이뤄지며 이런 과정은 설계 요구사항을 만족할 때까지 수정·반복하게 된다. 블레이드의 성능특성은 익형, 블레이드의 두께, 블레이드의 수, 익형의 길이, 비틀림각 및 회전직경에 의해 결정된다.

4-1 날개수의 결정

날개수의 결정에 필요한 주요인자는 설계주속비, 가격, 무게, 출력계수에 대한 효과, 구조동역학 등이 있으며 날개수의 증가는 출력계수의 증가를 유도하지만 날개의 형상항력에 의해서 출력이 감소되는 부정적인 면이 있다. Miller[1978]에 의하면 날개수가 증가함에 따라 출력계수도 증가하나, 그 증가율은 1개에서 2개, 3개로 갈수록 점차 줄어든다. 또한 날개수의 증가는 건설비용이 크게 증가하게 되어 고속 풍력터빈의 경우 날개를 3개 이상으로 하는 경우는 드물다.

대부분의 현대적 풍력터빈의 경우 3개의 날개를 가지고 있다. 그 이유는 2-날개 풍력터빈의 경우 비용을 절약하고 무게를 줄일 수는 있지만, 3-날개 풍력터빈과 같은 에너지 출력을 내기 위해서 회전날개가 빠른 속도로 회전해야 하기 때문에 소음공해를 유발하기 때문이다. 또한 2-날개 풍력터빈은 탑을 지날 때 터빈에 큰 충격을 주므로 이것을 피하기 위한 추가 설계가 필요하다. 따라서 본 논문에서도 이러한 점을 고려하여 날개수를 3개로 하였다.

4-2 익형의 선정

익형의 성능은 최대양력계수, 양항비, 실속각등에 의해 달라지므로 이들을 비교 평가하여 익형을 선정한다. 풍력터빈의 운전영역은 풍속이 약 4m/s~25m/s 로서 그 범위가 크기 때문에 양력계수의 변화폭도 커지게 되어 넓은 범위의 양력계수에 대해서 양항비가 큰 익형이 바람직하다. 익형의 선정에서 종래에는 NACA 4xxx계열이 많이 쓰였으나 최근에는 NACA 65-xxx가 통상적으로 많이 사용되며, 장기간 사용으로 인한 먼지나 곤충에 의한 성능저하를 막기 위해 기존의 NACA Series를 개선한 SERI계열이나 FX S계열등 사용목적에 따라 특수한 익형이 사용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 위에서 언급한 모든 내용을 충족시킬 수 있는 FX S 03-182를 기본익형으로 택하였으며, 그 단면좌표는 Table 4-1에 나타내었다. Fig. 4-1은 FX S 03-182의 단면형상이다[Miley, 1982].

4-3 평면형 설계

블레이드의 평면형은 Fig. 3-6에서 보여줬듯이 익현길이의 분포와 비틀림각에 의해서 결정된다. 그러므로 블레이드의 설계에는 받음각 (α)와 설계점으로서의 주속비를 결정해야 한다.

Fig. 4-2는 받음각에 따른 FX S 03-182 익형의 양항비 분포이며, 양항비는 점차적으로 증가하다가 $\alpha = 6^\circ$ 를 기점으로 급격히 감소한다. 양항비가 최대인 지점에서 풍력터빈은 좋은 성능특성을 보이므로 본 논문에서는 받음각을 6° 로 설정하여 설계를 수행하였다.

Table 4-1 Section coordinates of FX S 03-182

X(upper)	Y(upper)	X(lower)	Y(lower)
.00000	.00000	.00000	.00000
.00422	.01300	.00422	-.00550
.01762	.02631	.01762	-.01483
.03802	.04054	.03802	-.02341
.06694	.05495	.06694	-.03176
.10330	.06897	.10330	-.03968
.14643	.08210	.14643	-.04696
.22221	.09910	.22221	-.05623
.30861	.11169	.30861	-.06229
.40243	.11803	.40243	-.06409
.49997	.11608	.49997	-.05962
.59750	.10258	.59750	-.04570
.69133	.08263	.69133	-.02833
.77773	.06102	.77773	-.01298
.85350	.04086	.85350	-.00209
.89644	.02920	.89644	.00217
.93299	.01937	.93299	.00414
.96192	.01139	.96192	.00416
.98291	.00533	.98291	.00275
.99571	.00144	.99571	.00093
1.00000	.00000	1.00000	.00000

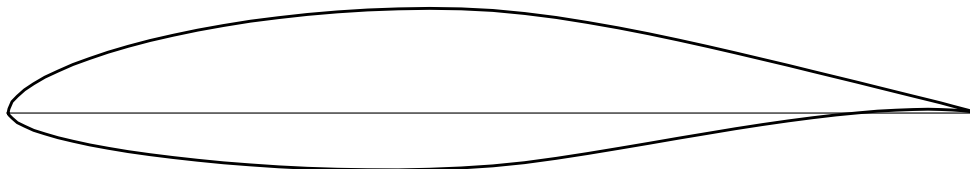


Fig. 4-1 Section shape of FX S 03-182

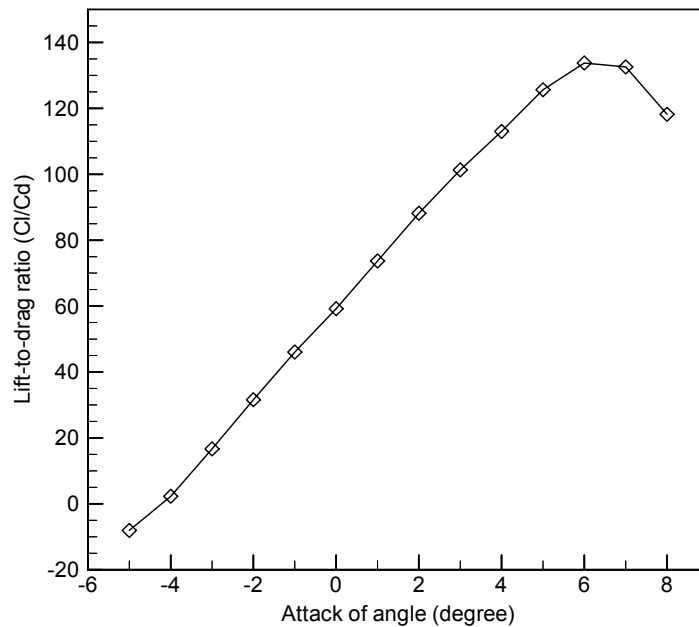


Fig. 4-2 Relation between attack of angle and lift-to-drag ratio



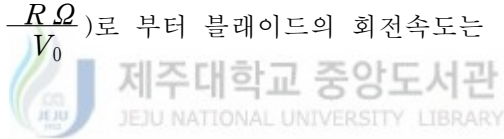
주속비는 블레이드의 크기, 회전수, 풍속에 의해 변화하며 블레이드의 크기와 회전수는 블레이드의 효율특성에 따라 변화하므로 성능해석과 병행한 반복계산에 의해 결정되게 된다. 일반적으로 발전용 풍력터빈의 경우 설계주속비를 7~8로 하며, 본 논문에서는 설계주속비를 8로 하여 설계를 수행한 후 성능해석의 결과와 비교하여 C_p 가 최대가 되는 주속비를 찾으려 한다.

4-4 Blade의 크기

풍력발전 시스템의 출력은 블레이드 크기, 풍속, 동력전달계통의 효율, 발전기 효율과 발전기 역률(Power factor)에 의해서 다음과 같이 결정되어 진다.

$$P = C_p \eta_m \eta_g \cos \beta \frac{1}{2} \rho A V_0^3 \quad \text{-----} \quad (4-1)$$

이 식으로부터 본 논문에서 목표로 하는 정격출력 30kW 풍력발전 시스템의 블레이드 직경을 구할 수 있다. 그러나 여기서는 동력전달계통과 발전기의 정확한 효율을 알 수 없으므로 풍력발전시스템의 설계시 일반적으로 사용되는 계수를 사용하기로 한다. 즉, $\eta_m = 0.75$, $\eta_g = 0.85$, $\cos \beta = 0.8$ 로 가정한다. 블레이드의 출력계수는 식 (3-41)로부터 정격풍속일 때 $C_p = 0.5624$ ($X = 8$ 일때)이므로 식 (4-1)에서 블레이드의 회전면적은 100.88 m^2 이며 회전자의 직경은 11.33 m 이다. 또한 정격풍속 12 m/s , 이때의 주속비 $X = 8$, 회전자 반경 5.67 m 와 주속비의 정의($X = \frac{R\Omega}{V_0}$)로부터 블레이드의 회전속도는 162 rpm (16.94 rad/s)이다.



본 논문에서는 허브반경(회전자 반경에서 블레이드 뿌리가 차지하는 비)을 20%로 가정한다. 이 값은 크게 보일지 모르지만 이 부분에서의 레이놀즈 수는 매우 낮아 출력에 거의 영향을 미치지 못하는 못한다.

4-5 Blade설계 프로그램

블레이드설계 프로그램은 C언어를 사용하였고, Fig. 4-3에서와 같이 대화상자(Dialogue box)에서 익형, 블레이드 개수, 허브반경, 주속비와 받음각을 사용자의 요구에 따라 입력할 수 있으며, 블레이드의 익형에는 AH계열, E계열, FX계열 및 NACA계열 등 약 100여 가지의 익형 형상을 포함하고 있다. 또한 목표로 하는 출력과 공기밀도 및 최적정격 풍속을 이용하여 블레이드의 반경을 구할 수가 있다.

4-6 설계결과

블레이드의 설계결과 Table 4-2는 설계 주속비에서의 블레이드 재원을 나타낸 도표이며 Fig. 4-4와 4-5는 비틀림각과 익현길이의 분포로서 블레이드가 저속에서 회전을 시작하기에 충분한 토크를 얻기 위해 허브부근에서 넓은 면적과 큰 설치각을 갖고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4-6은 설계된 블레이드의 2차원 형상으로서 비틀림각에 의한 익형의 변화를 나타내고 있고, Fig. 4-7은 블레이드의 3차원 형상이다.

Table 4-2 Chord length, solidity and inflow angle

Airfoil type = FX S 03-182, Tip speed ratio = 8, Attack angle = 6° Lift coefficient = 1.07, Drag coefficient = 0.008			
r/R	Chord length (mm)	Solidity	Inflow angle (°)
0.20	663	0.112	15.115
0.25	556	0.094	11.617
0.30	476	0.080	9.050
0.35	415	0.070	7.108
0.40	367	0.062	5.596
0.45	329	0.055	4.389
0.50	298	0.050	3.406
0.55	272	0.046	2.590
0.60	250	0.042	1.904
0.65	231	0.039	1.319
0.70	215	0.036	0.814
0.75	201	0.034	0.374
0.80	188	0.032	-0.012
0.85	177	0.030	-0.354
0.90	167	0.028	-0.659
0.95	158	0.027	-0.932
1.00	151	0.025	-1.179

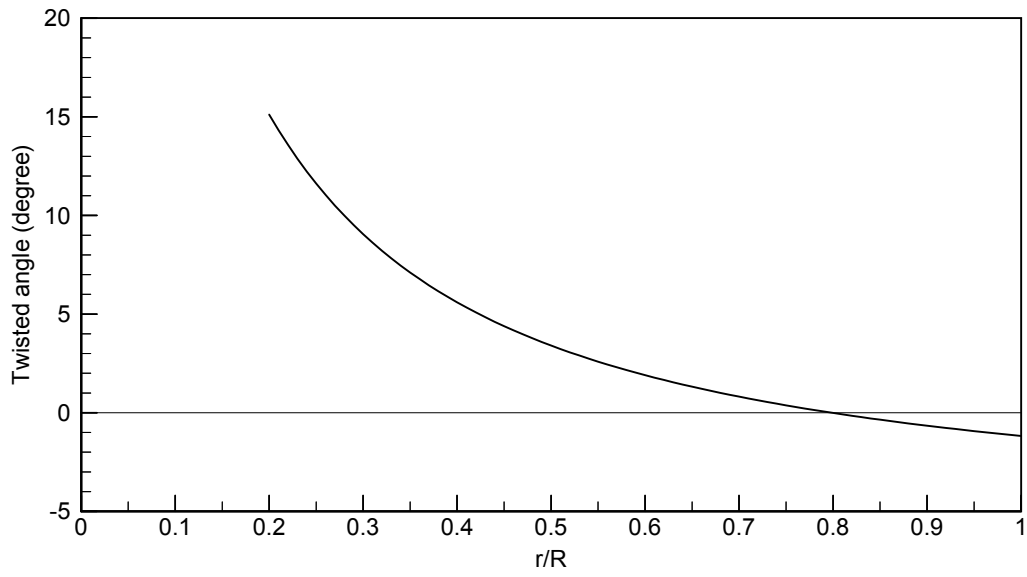


Fig. 4-4 Distribution of inflow angle

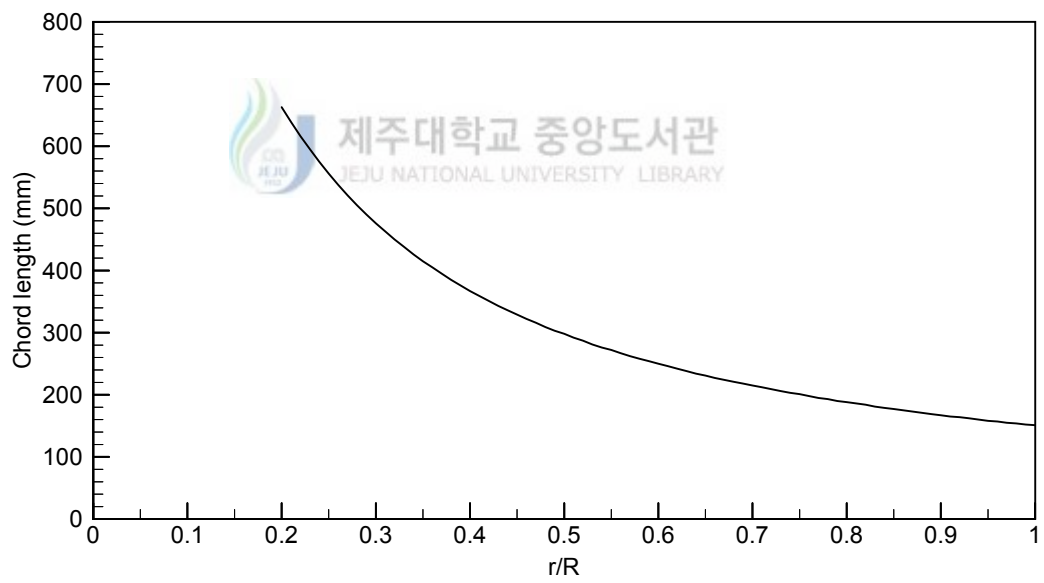


Fig. 4-5 Chord length distribution

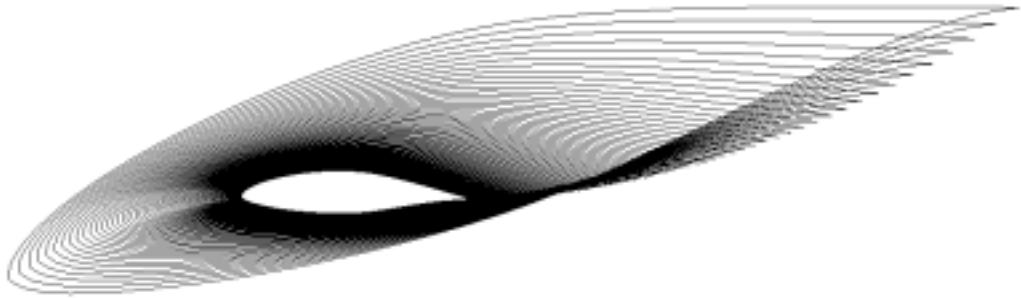


Fig. 4-6 Two dimensional shape of blade



Fig. 4-7 Three dimensional shape of blade

V. Blade의 공력해석

5-1 성능해석의 방법

지금까지 살펴본 운동량이론과 날개요소이론 및 Strip이론으로부터 블레이드에 대한 성능을 계산해 낼 수가 있는데 그 과정을 요약하면 다음과 같다.

- Step 1. a , a' 을 가정한다. 일반적으로 $a = a' = 0$ 으로 한다.
- Step 2. 식 (3-22)로부터 유동각(ϕ)을 계산한다.
- Step 3. 설계된 블레이드로부터 θ 를 얻고 식 (3-23)에서 국소받음각(α)을 계산한다.
- Step 4. Step 3 에서 구한 α 에 대한 C_D 와 C_L 을 선정된 익형에서 구한다.
- Step 5. 식 (3-33)과 식 (3-34)로부터 a 와 a' 을 계산한다.
- Step 6. Step 1 에서 가정한 a , a' 값과 비교하여 같지 않으면 Step 2 로 가서 허용오차의 범위에 들 때까지 위 계산과정을 반복한다.
- Step 7. 허용오차 범위의 a , a' 을 구하면 그 값을 이용하여 C_t , C_q 그리고 C_p 를 식 (3-36), 식 (3-38)과 식 (3-41)을 이용하여 계산한다.

이와 같이 반복적인 계산과정을 통하여 풍력터빈의 출력특성을 구할 수 있다 [Hansen, 2000]. 본 논문에서는 위에서 언급한 과정을 이용한 PROP-PC code를 이용하여 성능해석을 하고자 한다.

5-2 PROP-PC

PROP-PC code는 Strip이론에 따른 수평축 풍력터빈의 성능을 해석하기 위한 것으로 한번의 전산조작으로서 주속비와 피치각을 해석할 수 있는 매우 짧고 효율적으로 작성된 프로그램이다. 이 코드는 저속의 풍속해석을 위한 Glauert 근사치계산을 포함하고 있으며 다양한 날개형상에 관한 공기역학적 자료를 보다 쉽게 해석할 수 있다. 이 프로그램의 사용에는 다음의 몇 가지 인자가 필요하다.

- 회전자에 대한 기본자료(블레이드반경, rpm, 공기밀도, 날개의 수, cone 각).
- Prandtl의 손실모델 사용여부
- 소용돌이 억제모델
- 브레이크 상태모델
- 설치대수
- 블레이드의 기하학적 자료(블레이드의 익현길이, 뒤틀림각).
- 익형의 형상특성(받음각에 따른 양력 및 항력계수).
- 원하는 바의 다양한 피치각

PROP-PC code는 운동량이론과 날개요소이론 및 Strip이론으로 만족할 만한 예측조건을 찾기 위하여 반복계산법을 적용한다. 이와 같은 계산은 모든 피치각에 대하여 반복되고, 결과로서 주속비, 추력계수, 토크계수 및 출력계수등의 값을 주게된다[Ravon Eric, 1997].

5-3 성능해석의 결과

Fig. 5-1 ~ 5-3은 블레이드의 성능해석 결과로서 주속비와 피치각($\theta_{0.75R}$)의 변화에 따른 출력계수, 토크계수, 추력계수의 변화이다. Fig. 5-1에서 보면 설계 주속비에서 피치각이 커질수록 출력계수가 증가함을 알 수 있는데, 이는 피치각 조절에 의한 풍력터빈의 출력제어가 가능하다는 것을 의미한다. Fig. 5-3에서는 주속비가 설계점 이상으로 계속 증가할 때 추력계수가 1.0보다 커지는 풍력터빈 정지상태가 발생한다. 이러한 현상은 피치각이 5°보다 작은 경우 발생하므로 풍력발전시스템의 설계시 최소 피치각을 5°로 유지하는 것이 바람직하다.

Fig. 5-4는 주속비에 따른 날개끝 손실과 허브손실을 고려할 때와 고려하지 않았을 때의 출력계수를 비교한 결과이다. 설계주속비를 기준으로 4.02%의 출력오차를 보이고 있다.

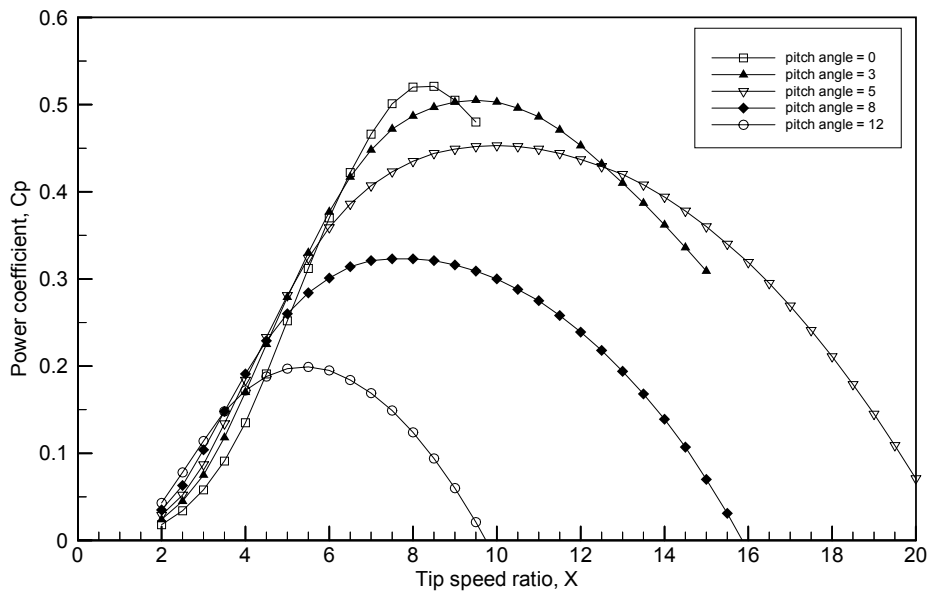


Fig. 5-1 Relation between pitch angles and power coefficients

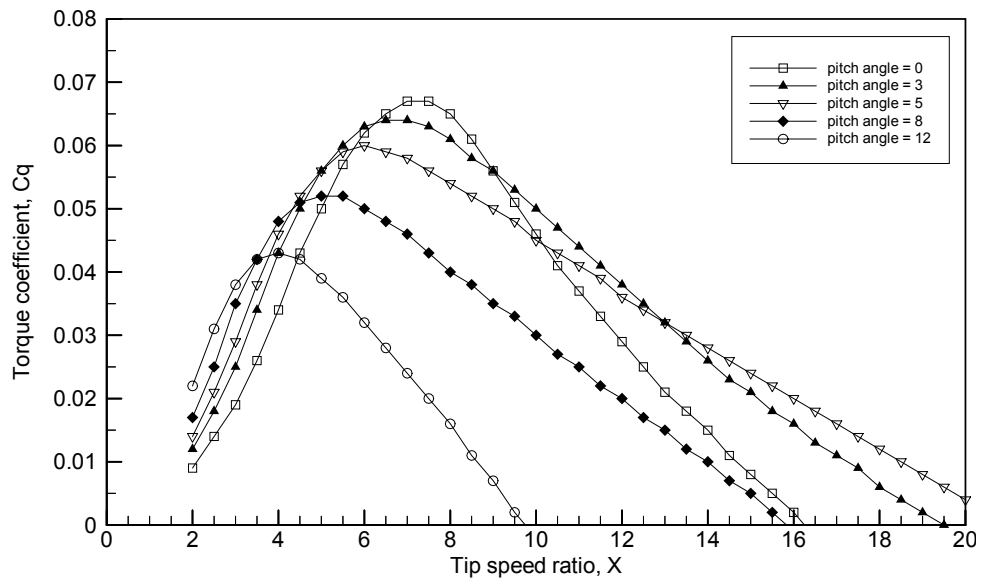


Fig. 5-2 Relation between pitch angles and torque coefficients

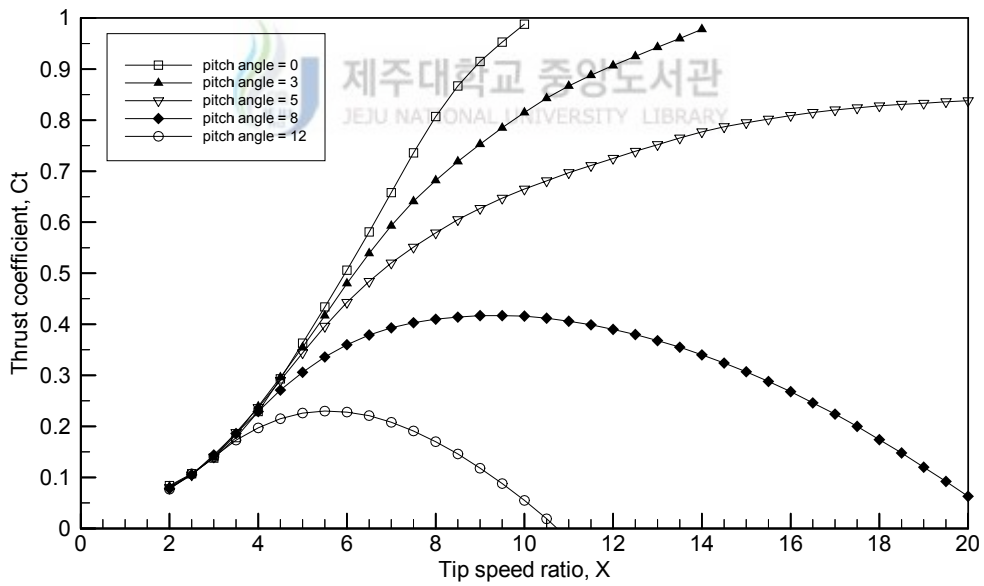


Fig. 5-3 Relation between pitch angles and thrust coefficients

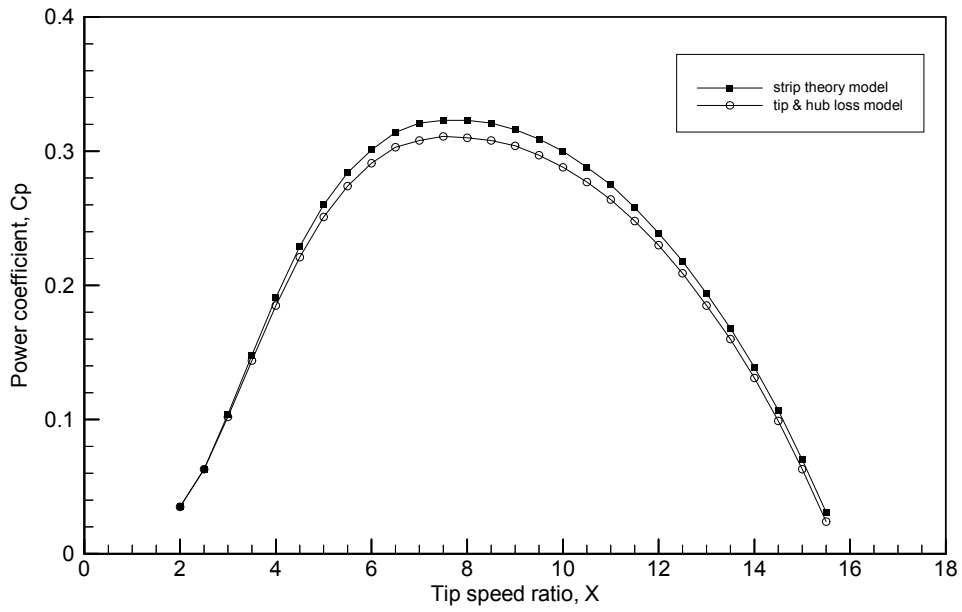
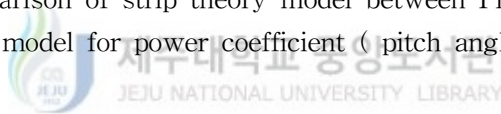


Fig. 5-4 Comparison of strip theory model between Prandtl's tip & hub loss model for power coefficient (pitch angle = 8°)



VI. 결론

본 논문에서는 제주도내 일부지역의 풍속특성을 기초로 하고 공기역학적 이론을 적용하여 블레이드를 설계하였으며, 설계된 블레이드의 성능해석에는 PROP-PC code를 이용하였다. 블레이드의 설계시 최적화이론에서 최적상태를 찾아가는 과정을 C언어로 프로그램화하였는데, 이 프로그램은 사용자의 요구사항에 맞게 익형, 블레이드의 개수, 허브반경, 그리고 주속비 및 받음각을 입력하여 블레이드의 평면형 설계에 필요한 익현길이와 비틀림각을 계산해준다. 또한 목표로 하는 출력과 공기밀도 및 최적정격 풍속을 이용하여 블레이드의 반경을 구할 수가 있다. 이 프로그램에서 출력된 결과를 기본 데이터로 하여 블레이드의 성능계수인 출력계수, 추력계수 및 토크계수를 계산하였다.

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 제주도내 일부지역(우도, 김녕, 섭지, 일과리, 하모리, 우보약, 납읍목장)의 풍력 자원조사 결과에 의하면 이 지역에 맞는 최적정격풍속은 12m/s 이다.
2. FX S 03-182 익형의 경우 받음각은 6°, 주속비는 8로 설계하는 것이 가장 타당하다.
3. 설계된 블레이드의 공력해석 결과 최소피치각은 5°로 유지하는 것이 바람직하며, 블레이드의 끝과 허브에서 약 4.02%의 손실이 발생한다.
4. 설계된 블레이드는 실험에 의한 수정이 필요하며 구조적 강도, 강성 및 피로수명에 관한 추가 설계가 있어야 할 것으로 사료된다.

VII. 참고문헌

- 김건훈, 김은일, “풍력발전단지 건설 타당성 분석 연구”, 산업자원부, 1999.
- 이동현, “풍력터빈용 날개의 공력해석 및 설계에 관한 연구”, 제주대학교 석사학위논문, 1999.
- 이춘식 외, “한·독 태양-풍력 복합발전에 관한 연구”, 과학기술처, 2N418-3400-2, 1988.
- 이춘식, 김광호, 최항철, 이영성, “소형 수평축 풍차 및 풍력발전시스템 개발에 관한 연구”, 한국전력공사 기술연구원, 1990.
- 한국화이바, “독립·연계운전용 대형 풍력발전시스템 개발 및 운용평가에 관한 연구”, 통상산업부, 1997.
- 허종철, 조경호, 김일환, 김건훈, “제주도내 풍력발전단지 종합건설 계획수립에 관한 연구”, 제주도, 1998.
- 허종철, 조경호, 김건훈, 김은일, “제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구 용역(II)”, 제주도, 2000.
- 홍상필, “수평축 풍력터빈용 회전익의 최적 공력설계에 관한 연구”, 제주대학교 석사학위논문, 2000.
- 松官 輝, 風力發電を巡る内外動向, 電学誌, 120卷 8/9号, 2000.
- Abbott, I. H. and Von Doenhoff, A. E., “Theory of Wing Sections”, Dover Publications, New York, 1959.
- Eggleston, D. M. and Stoddard, F. S., “Wind Turbine Engineering Design”, Van Nostrand Reinhold Company, New York, ISBN 0-442-22195-9, 1987.

- Froude, R. E., Transactions, Institute of Naval Architects, Vol. 30, p. 390, 1889.
- Giguere, P. and Selig, M. S., "Design of a Tapered and Twisted Blade for the NREL Combined Experiment Rotor", 한국에너지기술연구소, 1999.
- Hansen, Martin, O. L., Aerodynamics of Wind Turbines, Technical University of Denmark, ISBN 1 902916 06 9, 2000.
- Justus, C. G., Hargraves, W. R. and Mikhail, A., "Reference Wind Speed Distribution and Height Profiles for Wind Turbine Design and Performance Evaluation Applications", ORO/5108-76/4 UC 60, 1976.
- Miley, S. J., A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications, Department of Aerospace Engineering Texas A&M University, Contract No. DE-AC04-76DP03533, 1982.
- Miller, R. H., Dugundji, J., "Wind Energy Conversion", MIT Aeroelastic and Structures Research Lab TR-184-7 through TR-184-16, DOE Contract No. COO-4131-T1, distribution category UC-60, 1978.
- Musgrove, A. R. de L., "The Optimization of Hybrid Energy Conversion Systems Using the Dynamic Programming Model-RAPSODY", International Journal of Energy Research, Vol. 12, pp. 447-457, 1988.
- Rankine, W. J. M., Transactions, Institute of Naval Architects, Vol. 6, p. 13, 1965.
- Ravon, Eric, "Review on the design concepts and study of a small wind turbine with PROP-PC code", 한국에너지기술연구소, 1997.
- Spera, D. A., Wind Turbine Technology, ASME Press, pp. 488-589, 1994.

감사의 글

지난 2년의 시간은 아쉬움도 많지만 저에게 커다란 도약과 발전의 시간이었습니다. 대학원 과정을 마감하는 이때에 이 논문이 완성되기까지 많은 도움을 주신 분께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

언제나 고마움의 말을 전해드리고 싶었던 허종철 교수님, 저희들을 가족처럼 여기시고 지도하여 주신 은혜, 제자로서의 도리를 다하는 모습으로 보답하고 싶습니다. 대학4년과 대학원 생활을 하는 동안 항상 관심을 갖고 많은 충고와 조언을 주신 권기린 교수님, 김귀식 교수님, 현명택 교수님, 임종환 교수님, 정동원 교수님, 조경호 교수님, 최경현 교수님, 강철웅 교수님께도 감사드립니다.

기쁠 때나 슬플 때나 늘 같이 있었던 소중한 우리 실험실 식구들, 결혼하여 세상 누구보다 행복한 나날을 보내고 있는 창수형, 이 논문이 완성될 수 있도록 정말 많은 도움을 주신 동현이형, 믿음직한 모습으로 후배들을 돌봐주신 상필이형, 자신보다는 항상 남을 생각하는 착하기만 한 윤석이형, 후배로서 때로는 친구로서 모든 일을 열심히 하는 수환이, 최선을 다하는 모습을 보여주는 대욱이와 진오, 덩치는 크지만 귀엽기만 한 경윤이에게도 감사의 말을 전합니다. 대학원 동기로서 많은 것을 같이 했던 석우형, 상철이형, 남훈이, 그리고 프로그래밍 작업을 묵묵히 해준 경부형에게 무어라 감사의 말을 전해야 할지 모르겠습니다.

무엇보다도 소중한 우리가족들, 세분의 누님과 매형, 예쁘고 착한 조카들, 하나 밖에 없는 착한 동생 승도, 그리고 늘 곁에서 웃음과 사랑을 건네준 승미에게도 또 한번 감사의 말을 전합니다. 끝으로 자신들의 배움의 한을 아들에게서 풀어보 시려 했던 소중한 나의 아버지, 어머니께 이 논문을 바칩니다.

2001년 12월 성탄 즈음에. 정승현