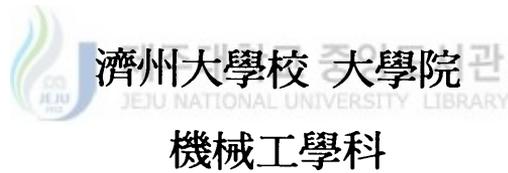


碩士學位論文

수평축 풍력터빈용 회전익의
최적 공력설계에 관한 연구



洪 詳 弼

110.467

2000年 12月

수평축 풍력터빈용 회전익의 최적 공력설계에 관한 연구

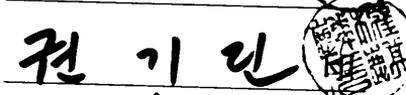
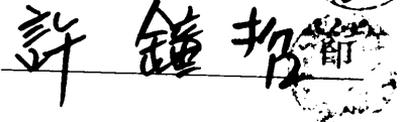
指導教授 許 鐘 哲

洪 詳 弼

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



洪詳弼의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 
委 員 
委 員 

濟州大學校 大學院

2000年 12月

A Study on the Optimal Aerodynamic Design of Horizontal Axis Wind Turbine Blade

Sang-Pill Hong

(Supervised by Professor Jong-Chul Huh)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

December 2000

목 차

NOMENCLATURE	i
SUMMARY	iii
I. 서 론	1
II. 풍향분석 및 정격풍속	3
2-1. 풍속분포와 정격풍속	3
III. 회전익의 공기역학	6
3-1. 운동량이론	6
3-1-1. Actuator disk 이론	7
3-1-2. Annular momentum이론	11
3-2. 회전익요소이론	14
3-3. 스트립이론	18
3-4. 최적 회전익이론	23
IV. 회전익의 공력설계	26
4-1. 익형의 선정	26
4-2. 평면형 설계	29
V. 설계결과	31
VI. 결 론	45
VII. 참고문헌	46

NOMENCLATURE

V_0 : Free stream velocity

u : Axial velocity

u_1 : Outlet velocity

A : Swept area

P_0, P_1 : Atmospheric pressure

P_2, P_3 : Front and rear pressure of swept area

ρ : Air density

T : Thrust



dT : Local thrust

a : Axial interference factor

a' : Angular interference factor

P : Power

C_p : Power coefficient

C_t : Thrust coefficient

C_q : Torque coefficient

Ω : Angular velocity

ω : Angular velocity of wake

Q : Torque

dQ : Local torque

X : Tip speed ratio
 x : Local tip speed ratio
 R : Span
 r : Local span
 L : Lift force
 dL : Local lift force
 C_l : Lift coefficient
 D : Drag force
 dD : Local drag force
 C_d : Drag coefficient
 θ : Pitch angle
 α : Attack angle
 ϕ : Flow angle
 W : Relative velocity
 B : Number of blade
 c : Chord length
 α_s : Attack angle when stall occurs
 C_{ds} : Drag coefficient for α_s
 C_{ls} : Lift coefficient for α_s
 AR : Aspect ratio
 σ_r : Local solidity
 F : Prandtl's correction factor



SUMMARY

The design of blade has been considered that lift-to-drag ratio, conditions of structure and process manufacture and stable maximum lift coefficient, etc.

The process of aerodynamic blade design are gets the optimum shape at a design for present condition and then revises the optimum shape connection for the structure design.

The design of aerodynamic blade has been used many methods. The momentum theory can be predicted total performance around the rotor but the momentum theory can't be considered blade weight, distribution of induced velocity, effect of blade number and a section of blade shape. The blade element theory can be analyzed that a section of blade shape, effect of blade number, Reynolds number and mach number, etc., but can't be explained the interference of all blades and effect of wake.

This study is used the simplified method for design of the optimum aerodynamic blade and aerodynamic analysis is used PROP-PC code.

This process is programed by C-language. This program shows both two dimensional shape and three dimensional shape by any input values such as tip speed ratio, blade length, hub length, a section of shape and maximum lift-to-drag ratio. The program displays chord length and twist angle by input values and analyzes performance of the blade.

I. 서 론

풍력발전시스템은 수평축풍력터빈(HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine)과 수직축풍력터빈(VAWT : Vertical Axis Wind Turbine)으로 구별될 수 있으며, 보통 500~600kW급 이상의 중·대형 풍력터빈에는 성능 및 구조적 효율성 때문에 수평축형태가 일반적으로 사용되고 있다[1].

풍력발전시스템에서 풍력에너지를 기계적인 에너지로 변화시켜주는 장치를 회전익(Blade)은 풍력시스템의 출력특성, 연간 전력에너지 생산량, 가동률, 경제성에도 영향을 미치는 중요 인자이므로 터빈 효율을 증가시키기 위하여 회전익 연구가 계속되고 있다. 즉, 풍력발전의 핵심부분은 유체와 접하여 기계적인 일을 주거나 받는 역할을 하는 회전익이라 할 수 있으며, 이것은 유동장내의 유체가 가진 동력을 기계에너지로 변환시키거나, 이의 역변환 과정 모두에서 회전익이 가장 근원적인 역할을 담당하고 있는 것을 의미한다[2]. 그러므로 기존 풍력발전시스템에 대한 연구들은 회전익의 형상설계를 그 주요과제로 수행되어 왔다. 일반적으로 풍력터빈용 익형은 큰 양항비, 구조 및 가공조건을 고려한 회전익의 두께, 실속에서의 안정적인 최대 양력계수, 소음 발생을 고려한 최대 유속점의 억제 등을 고려하여 설계되고 있다.

회전익의 공력설계 과정은 주어진 설계조건에 대하여 공기역학적으로 최적의 형상을 얻은 후 구조설계와 연계하여 수정한 다음 다시 공력해석을 한 후 구조설계를 하는 반복과정을 거치게 된다[3]. 공력해석 방법에는 여러 가지 방법이 연구되어 왔는데 연구초기에는 프로펠러나 로터의 성능을 해석하기 위해 개발된 이론들 즉, 운동량이론(Momentum theory), 회전자요소이론(Blade element theory),

스트립이론(Strip theory) 등이 사용되었다. 운동량이론은 회전면에서의 속도를 균일하게 가정함으로써 전체적인 성능을 예측할 수 있으나 회전익의 하중이나 유도속도의 분포등의 자세한 결과나 회전익의 수, 회전익의 단면 형상에 의한 영향등을 고려할 수 없었다. 회전요소이론에서는 회전익 단면의 형상이나 회전익 수의 영향, 레이놀드수, 마하수 등을 고려하여 비교적 정확히 로터 면에서의 유동을 해석할 수 있지만 회전익 사이의 간섭이나 후류의 영향에 의해 발생하는 회전익 끝에서의 손실에 의한 하중분포를 고려할 수 없는 단점이 있다[4].

본 연구에서는 최적화이론과 스트립이론 Prandtl 보정계수(Tip loss factor)를 고려한 모든 설계과정을 프로그램화하여 설계형상을 2차원과 3차원으로 나타내고, 설계자의 요구사항 즉, 주속비(TSR : Tip speed ratio) 회전익의 길이, 허브길이, 단면형상, 최대 양항비 등을 직접 입력할 수 있게 하여 입력된 설계조건에 따라 기본적으로 날개설계에 필요한 회전익 제원인 익현길이(Chord length)와 비틀림각(Twist angle)을 나타내고 또한 성능을 분석할 수 있도록 하고자 하고, 또한 설계된 형상에 대한 공력해석에는 PROP-PC code를 사용하여 설계된 회전익에 대한 성능분석을 하고자 한다.

II. 풍황분석 및 정격풍속

풍력발전시스템은 풍력에너지를 풍력터빈의 회전익을 매개체로 하여 전력을 얻는 것으로 출력에 미치는 풍속의 영향은 절대적이며 시스템을 설치할 장소를 선정하거나 시스템의 용량을 결정하는데 기초자료가 되므로 우선적으로 풍황에 관한 조사가 선결과제이다.

2-1. 풍속분포와 정격풍속

풍속분포의 수학적 모델중 가장 적절하게 이용되고 있는 2변수 weibull 분포 함수는 다음과 같다.



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

여기서, V 는 풍속을 나타내고 C 는 scale parameter로서 분포되는 풍속의 평균치와 관계하며, K 는 shape parameter로서 분포된 풍속의 편차와 관계하는 상수이다. 또한, 평균 풍속의 정의를 다음과 같이 정리하면,

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

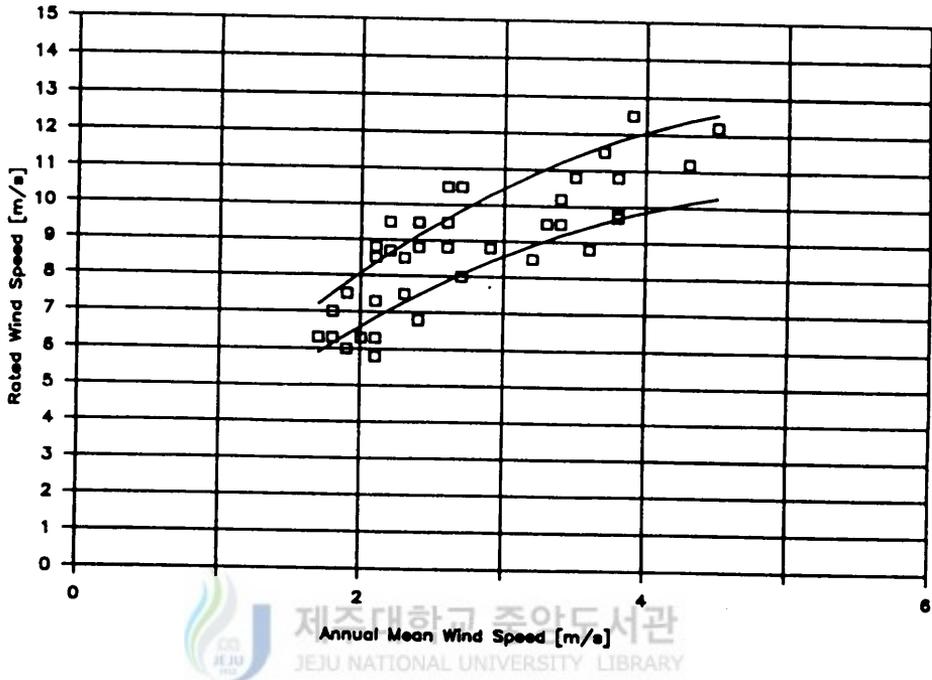


Fig. 2-1 Relation to annual mean wind speed and Rated wind speed

식 (2-2)에서 다음과 같은 일반식이 도출된다.

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

따라서, 위의 관계식에서 측정된 평균풍속 \overline{V} 및 $\overline{V^3}$ 값에 의해 C와 K의 값이 계산된다.

Fig. 2-1은 풍속의 분포를 예측하기 위해서 여러 연구의 결과로서 식 (2-1), 식 (2-2), 식 (2-3)을 이용하여 국내 주요지역의 지표로부터 10m되는 위치의 풍속특성과 분포를 나타내고 있다[3].

풍력터빈의 설계풍속은 풍력이용시스템 전체의 효율과 경제성을 좌우하는 중요한 변수이다. 일반적으로 시동풍속은 풍력터빈의 내부저항에 의해서 4m/s정도 되며, 정지풍속은 연간출력과 구조강도에 의한 안전성을 고려할 때 통상 15~20m/s 정도로 한다.

Fig. 2-1에서 보는바와 같이 풍력에너지 이용면에서 유리한 연평균 풍속 4m/s 이상인 경우 최적정격풍속은 10~12m/s의 범위에 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시동풍속 4m/s, 정지풍속 20m/s, 최적정격풍속 11m/s, 설치높이 10m인 범위내에서 회전익의 설계를 수행하고자 한다.



III. 회전익의 공기역학

최적회전익의 설계를 위해서는 정확한 공력해석을 할 수 있는 방법의 확립이 필요하다. 회전익의 해석을 위한 이론은 크게 두 가지로 볼 수 있는데 하나는 운동량이론이며 다른 하나는 회전익요소이론이다.

최근에는 회전익으로부터 발생하는 자유선회류의 개념에 의해 유동속도를 계산함으로써 계산의 정확성을 높일 수 있는 방법이 개발되고 있다. 그러나 이러한 계산방법은 후류에 의한 유도속도와 후류의 형상을 계산하는데 상당한 시간과 계산비용이 필요하여 계산시간이 적게 들고 정확한 해석법을 개발하기 위해 간단한 후류모델들이 사용되고 있다[5].

회전익의 공력특성을 해석하고 형상을 설계하는데는 어느 한 이론만으로는 어려우며 서로 연계하여 유동장에 대한 정보를 교환함으로써 정확한 해석과 설계가 가능하다. 또한 회전익의 운전 영역 중에는 이론을 적용하기 어려운 부분이 있으므로 이 부분에 대해서는 실험을 통한 보완이 필요하다.

본 연구에서는 회전익의 설계와 공력해석을 위하여 최적화이론 및 운동량이론과 회전자요소이론의 조합인 스트립이론을 사용하였고, 유한한 개수의 회전익을 고려하기 위하여 Prandtl의 손실보정 계수 사용하였다[4].

3-1. 운동량이론

운동량이론은 Rankine[6]에 의해서 최초로 개발되어 Froude[7]에 의해서 개선되었다. 이 이론은 Fig. 3-1과 같은 유체유동의 검사체적에 대해서 유동에 의해 회전익의 회전면에 작용하는 힘을 계산하는 것으로 이상적인 효율과 유속을 예측

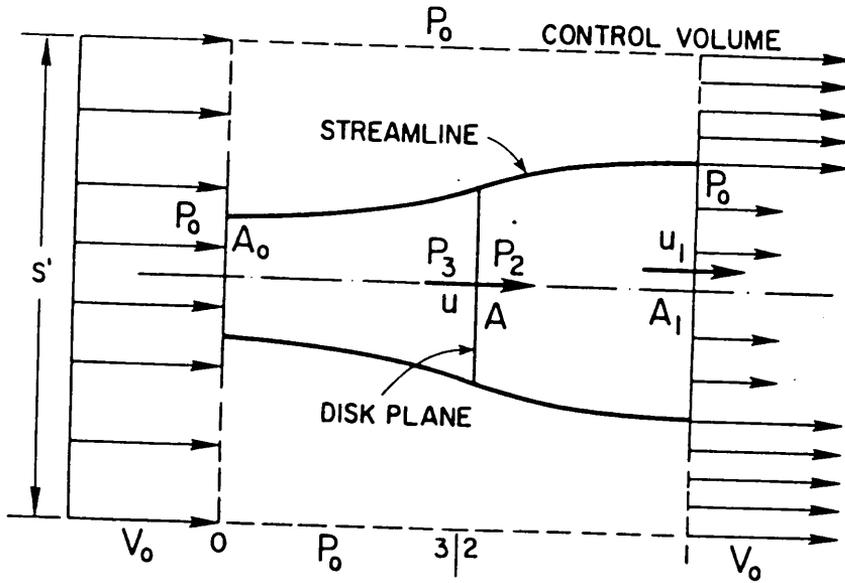


Fig. 3-1 Flow fields around actuator disk



하는데 유용하지만 회전익 주위에서의 자세한 풍속분포와 작용하는 힘의 분포를 계산할 수 없고 단지 일반적인 값을 계산할 수 있으므로 풍력터빈의 특성을 이론적으로 계산할 때 많이 사용하는 이론이다.

3-1-1. Actuator Disk 이론

풍력터빈은 회전익을 이용하여 바람의 운동량 변화를 일으켜 이것으로 발생하는 힘을 이용하여 에너지를 얻는 것으로 이에 대한 과정은 Fig. 3-1에 잘 나타나 있다. 여기에서 회전익은 무한개로 이루어진 것으로 가정하여 하나의 Disk로 가정하여 이상화하였다. 그리고 운동량 이론을 적용하여 풍력터빈의 공력특성을 계산하기 위하여 실제 발생하는 복잡한 물리현상을 아래와 같은 가정을 이용하여 단순화하였다.

- 1) 회전면에서의 풍속은 일정하다.
- 2) 바람은 비압축성이며 바람의 유동은 정상상태이다.
- 3) 회전익에 의한 와류는 없다.
- 4) 회전익의 마찰력에 의한 저항력은 없다.
- 5) 회전익은 무한개의 회전익으로 이루어진 하나의 Disk로 단순화하였다.

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

회전익이 받는 힘(Thrust)은 압력차이로 발생하는 힘이므로

$$T = (P_3 - P_2)A$$

이다. Bernoulli 정리를 Disk 전후의 유선을 따라서 적용하면

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = P_3 + \frac{1}{2} \rho u^2$$

$$P_2 + \frac{1}{2} \rho u^2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2$$

이다. 이 식에서 P_0 와 P_1 을 대기압으로 가정하면 회전익 전후에서의 압력강하는 다음과 같이 표시될 수 있다.

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

따라서 Disk가 받는 항력은

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

이다. Fig. 3-1에서 유선에 대하여 연속방정식을 적용하여 Stream tube에 대하여 축방향 운동량 이론을 적용하면 회전익에 작용하는 항력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = \rho A u (u_1 - V_0) \quad (3-2)$$

회전면에서의 풍속을 구하기 위하여 식 (3-1)과 식 (3-2)을 사용하면

$$u = \frac{1}{2} (V_0 + u_1)$$

이다. 이것은 입구와 출구에서 두 풍속의 산술평균이다. 그리고 상류측의 풍속에 대한 회전면을 통과할 때의 풍속 감소율은 축간섭계수라고 하고 이를

$$a = \frac{(V_0 - u)}{V_0} \quad (3-3)$$

로 정의하면 회전면과 출구면에서의 속도는

$$u = V_0(1 - a) \quad (3-4)$$

$$u_1 = V_0(1 - 2a)$$

이다. 출력은 단위 시간당 회전면으로부터 얻을 수 있는 에너지(단위 시간당 운동에너지의 변화량)로서 회전면을 통과한 질량유량에 운동량 변화를 곱한 값으로 식 (3-4)와 출력계수(C_p)의 정의를 사용하여 출력과 출력계수를 구하면

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

그리고 C_p 는

$$\begin{aligned} C_p &= P / (1/2 \rho A V_0^3) \\ &= 4a(1-a)^2 \end{aligned}$$

이다. 이론적으로 최대 풍력터빈의 효율을 구하기 위해서 C_p 를 a 에 관하여

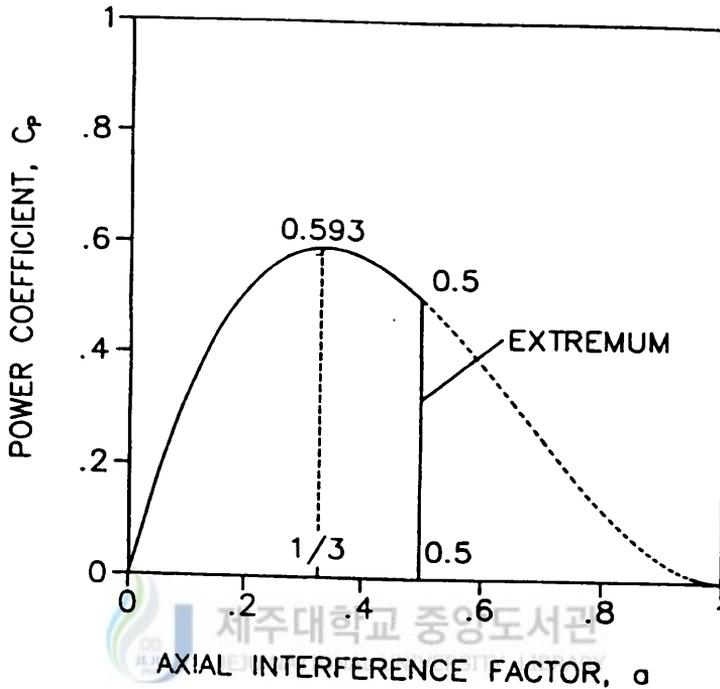


Fig. 3-2 Relation to axial interference factor and power coefficient
at momentum theory

미분하면 a 가 $1/3$ 일 때 출력계수는 최대가 되며, 그 때의 출력계수는 $16/27$ 로서 59.3%가 된다. 이것을 Betz계수라 하며 Fig. 3-2와 같이 나타난다.

3-1-2. Annular momentum 이론

Actuator disk 이론을 유도할 때 두 가지 가정 즉, 회전익의 회전이 유동에 미치는 영향과 회전면에서 속도변화가 없다는 것은 실제 현상과 다르다. 즉, 회전익 주위에서 발생하는 와류의 각속도는 회전익의 각속도 보다는 작은 값이지만 존재하며 이것은 에너지 손실이므로 풍력터빈의 출력을 높이기 위해서는 와류의 크기

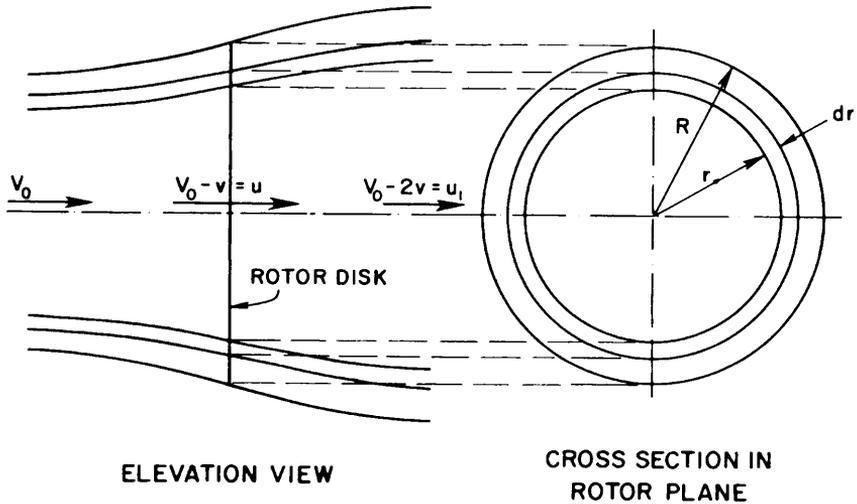


Fig. 3-3 Annular stream tube



를 줄여야 한다. 그러나 와류에 관한 식은 간단하지 않으므로 풍력터빈의 출력을 계산하기 위해서는 필수적으로 이에 관한 식을 가정하여야 한다.

풍력터빈의 회전익이 회전할 때 회전익의 각속도를 Ω 라 하면 회전 간섭 계수 (Angular interference factor)를 정의할 수 있는데, 회전 간섭 계수는 회전익에 의해 발생하는 토크에 영향을 주는 미끄럼 흐름의 상태를 표시할 수 있는 계수로써 회전익의 각속도에 대한 회전면을 통과하는 바람 각속도의 비에 관한 식으로 다음과 같이 표시된다.

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (3-5)$$

위에서 언급한 것처럼 회전익의 반경 방향으로의 속도변화가 존재하므로 Fig. 3-3과 같이 검사체적을 원형 미소면으로 나누고 이 미소면에 대하여 선형 운동량 이론과 각 운동량 이론을 적용하면 각 원형 미소면에 대한 추력과 회전 토크를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$dT = \rho u 2\pi r (u_1 - V_0) dr$$

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

위의 두 식을 식 (3-4)와 식 (3-5)를 이용하면 $u_1 = (1 - a) V_0$ 이고, $\omega = a' 2\Omega$ 이므로

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a(1 - a) dr$$

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

로 표현할 수 있다. 또한 이론적으로 풍력터빈으로부터 얻을 수 있는 출력은 원형 미소요소에 대한 출력을 허브에서 회전익 끝까지 적분한 것이므로

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

주속비($X = \frac{R\Omega}{V_0}$)와 국부주속비($x = \frac{r\Omega}{V_0}$)로부터 $dr = \frac{V_0}{\Omega} dx$, $\frac{V_0}{\Omega} = \frac{R}{X}$

이므로

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

이다. 또한 출력계수는

$$C_p = \frac{8}{X^2} \int_{x_*}^X a' (1-a) x^3 dx \quad (3-6)$$

이다.

3-2. 회전익요소이론

운동량 이론은 풍력터빈의 회전익보다는 로터 전체를 고려하여 풍력터빈의 특성을 해석한 것이므로 회전익 단면에 관한 정보나 단면 변화에 관한 출력변화의 해석은 어려운 반면, 회전익요소이론은 회전익 단면의 형상, 크기, 단면변화에 대한 출력변화와 같은 계산을 할 수 있으므로 풍력터빈의 특성을 해석할 수 있는 유용한 이론이라 할 수 있다. 회전익요소이론은 Fig. 3-4와 같이 회전자요소에 작용하는 양력과 항력을 계산하여 회전익에 작용하는 힘을 계산할 수 있다. 이 이론은 회전익의 형상에 따른 힘을 계산할 수 있으나 유동장에 대한 정보를 얻을

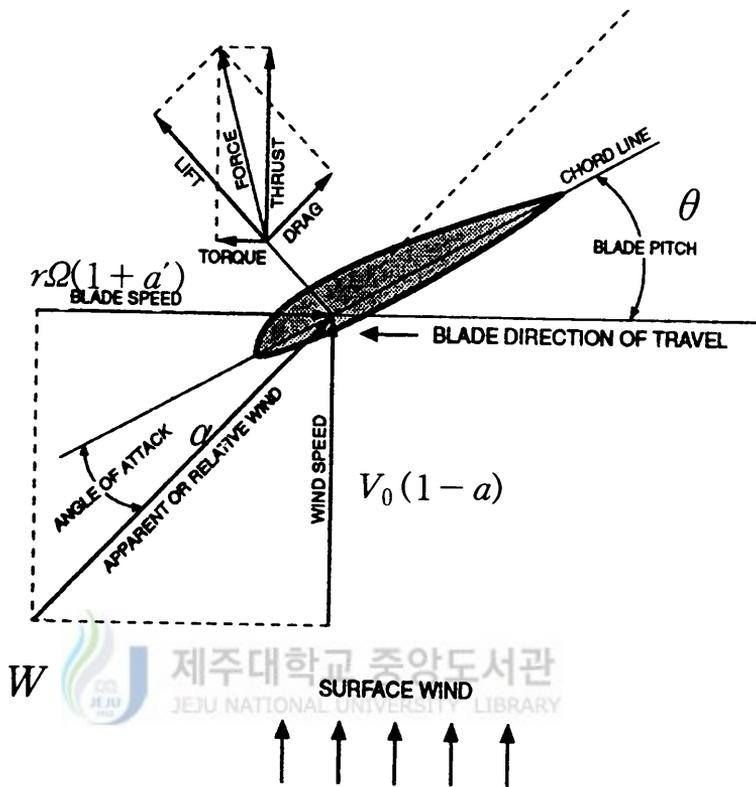


Fig. 3-4 Blade element and velocity triangle

수 없다. Fig. 3-4는 피치각이 θ 인 회전익단면에 기준을 둔 상대좌표를 사용하여 속도 삼각형을 그린 것이고 합성속도는 수직인 두 방향의 상대속도를 합성한 것이다. 양력과 항력은 합성속도에 대해서 각각 평행한 성분과 수직인 성분의 힘으로서 항력계수와 양력계수를 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$dD = B c C_d \frac{1}{2} \rho W^2 dr$$

$$dL = B c C_l \frac{1}{2} \rho W^2 dr$$

여기서 합성속도는 회전익의 회전에 의한 속도와 회전면에 수직으로 불어오는 바람속도에 의해 다음과 같이 표현되어진다.

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

이다. 또한 속도 삼각형을 이용하여 미소회전익 요소에 작용하는 미소 추력과 미소 토크를 구하면 다음과 같다.

$$dT = Bc \frac{1}{2} \rho W^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dr \quad (3-7)$$

$$dQ = Bc \frac{1}{2} \rho W^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r dr \quad (3-8)$$

여기서 ϕ 는 유입각도(Inflow angle)이고 속도 삼각형에서 구하면

$$\phi = \tan^{-1} \frac{(1-a)}{(1+a')x} \quad (3-9)$$

이고, 받음각은

$$\alpha = \phi - \theta \quad (3-10)$$

이다. 식 (3-7)과 식 (3-8)에서 양력계수와 항력계수는 실속(Stall)이후의 영역에 대한 자료가 거의 없다. 따라서 이 영역에서 추력과 회전력을 정확히 계산하기

위해서는 실속 상태에서 양력계수와 항력계수를 계산할 수 있는 식이 필요하다. 즉, 실속이 발생할 때의 받음각을 α_s , 이 받음각에 대한 항력계수, 양력계수를 C_{ds} , C_{ls} 그리고 형상비(Aspect ratio)를 $AR = \frac{c}{R}$ 라고 할 때 항력계수를 $C_{d_{max}} = 1.11 + 0.018AR$ 이라고 가정하면 실속이후의 항력계수는

$$C_d = B_1 \sin^2 \alpha + B_2 \cos \alpha$$

이다. 여기에서

$$B_1 = C_{d_{max}}$$

$$B_2 = \frac{1}{\cos \alpha_s} (C_{ds} - C_{d_{max}} \sin^2 \alpha_s)$$

그리고 실속 이후의 양력계수는

$$C_l = A_1 \sin^2 \alpha + A_2 \cos^2 \alpha / \sin \alpha$$

여기에서

$$A_1 = B_1 / 2$$

$$A_2 = (C_{ls} - C_{d_{max}} \sin \alpha_s \cos \alpha_s) (\sin \alpha_s / \cos^2 \alpha_s)$$

이다.

3-3. 스트립 이론

스트립 이론은 앞에서 설명한 운동량이론과 회전익요소이론을 이용하여 풍력터빈의 공력해석을 할 수 있는 유용한 식을 얻을 수 있는 이론이다.

먼저 회전익의 중심축에서 r 만큼 떨어지고 폭이 dr 인 미소 회전익에 대한 운동량이론으로부터 구한 미소추력과 회전익요소이론으로부터 구한 미소추력을 같다고 하면

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

이 되고, 이 식을 이용하여 회전익 단면형상과 축 방향 유동조건과의 관계를 나타내는 축간섭계수를 구하면 다음과 같다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\begin{aligned} a(1-a) &= \frac{BcW^2(C_l\cos\phi + C_d\sin\phi)}{8\pi rV_0^2} \\ &= \frac{\sigma_r W^2(C_l\cos\phi + C_d\sin\phi)}{8V_0^2} \\ &= \frac{1}{8}\sigma_r(C_l\cos\phi + C_d\sin\phi)\frac{(1-a)^2}{\sin^2\phi} \\ \frac{a}{1-a} &= \frac{\sigma_r(C_l\cos\phi + C_d\sin\phi)}{8\sin^2\phi} \end{aligned} \quad (3-11)$$

이다. 같은 방법으로 허브에서 r 만큼 떨어진 미소 회전익에 대하여 운동량 이론과 회전익요소이론에서 계산한 미소 토크를 같게 놓고 회전간섭계수를 구하면

$$4\pi r^3 \rho V_0 a' (1-a) \Omega dr = B c \frac{1}{2} \rho W^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r dr$$

$$\begin{aligned} a' (1-a) &= \frac{B c W^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r}{8\pi r^3 V_0 \Omega} \\ &= \frac{\sigma_r (1+a')^2 r \Omega (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi)}{8 V_0 \cos^2 \phi} \end{aligned}$$

$$W = \frac{r \Omega (1+a')}{\cos \phi} \text{에서 } \frac{1+a'}{\cos \phi} = \frac{W}{r \Omega} \text{이므로}$$

$$\begin{aligned} a' (1-a) &= \frac{\sigma_r W^2 r \Omega (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi)}{8 V_0 (r \Omega)^2} \\ &= \frac{\sigma_r W (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) (1+a')}{8 V_0 \cos \phi} \\ &= \frac{\sigma_r (1-a) (1+a') (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi)}{8 \sin \phi \cos \phi} \end{aligned}$$

$$\frac{a'}{(1+a')} = \frac{\sigma_r (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi)}{8 \sin \phi \cos \phi} \quad (3-12)$$

이다. 그리고 회전요소이론으로부터 풍력터빈의 특성에 관한 이론식을 구하면

추력계수 $C_t = Thrust / (\frac{1}{2} \rho V_0^2 A)$ 이므로

$$dT = B c \frac{1}{2} \rho W^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dr$$

$$\int_{R_a}^R dT = \int_{R_a}^R B c \frac{1}{2} \rho W^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dr$$

용적비(Solidity)의 정의와 속도삼각형으로부터 $Bc = \sigma_r \pi r$, $W = \frac{V_0(1-a)}{\sin \phi}$

이므로

$$T = \int_{R_a}^R \sigma_r \pi r \frac{1}{2} \rho \left(\frac{V_0(1-a)}{\sin \phi} \right)^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dr$$

위 식을 주속비에 대하여 표현하면



$$\begin{aligned} T &= \frac{\rho \pi r V_0^2}{2} \int_{x_a}^x \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) \frac{V_0}{\Omega} dx \\ &= \frac{\rho \pi R^2 V_0^2}{2X} \int_{x_a}^x \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dx \\ C_l &= \frac{1}{X} \int_{x_a}^x \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) dx \quad (3-13) \end{aligned}$$

이다.

토크계수 $C_q = Torque / (\frac{1}{2} \rho V_0^2 AR)$ 이므로 회전익요소이론으로부터

$$dQ = Bc \frac{1}{2} \rho W^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r dr$$

$$\int_{R_a}^R dQ = \int_{R_a}^R B c \frac{1}{2} \rho W^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r dr$$

$$Q = \int_{R_a}^R \sigma_r \pi r \frac{1}{2} \rho \frac{V_0^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r dr$$

$$= \frac{1}{2} \rho \pi \frac{V_0^5}{\Omega^3} \int_{X_a}^X \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) x^2 dx$$

주속비 $X = \frac{R\Omega}{V_0}$ 로부터 $\Omega = \frac{V_0 X}{R}$ 이므로 $\frac{V_0^5}{\Omega^3} = \frac{V_0^2 R^3}{X^3}$ 이다. 따라서 위 식은

$$Q = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{V_0^2 R^3}{X^3} \int_{X_a}^X \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) x^2 dx$$

$$C_q = \frac{1}{X^3} \int_{X_a}^X \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) x^2 dx \quad (3-14)$$

이다.

지금까지 살펴본 스트립 이론으로부터 회전익에 대한 성능을 계산해 낼 수가 있는데 그 과정을 요약하면 다음과 같다.

- (1) a, a' 을 가정한다.
- (2) 식 (3-9)로부터 유입각(ϕ)을 계산한다.
- (3) 설계된 회전익으로부터 피치각(θ)을 얻고 (2)에서 구한 유입각(ϕ)으로부터 받음각(α)을 계산한다.

- (4) (3)에서 구한 받음각에 대한 C_d 와 C_l 을 구한다.
- (5) 식 (3-11)과 식 (3-12)로부터 a 와 a' 을 계산한다.
- (6) (1)에서 가정한 a , a' 값과 비교하여 같지 않으면 a 와 a' 을 다시 가정하고 (2)로 간다.
- (7) 가정한 a , a' 이 계산된 것과 같으면 그 값을 이용하여 C_l , C_d 그리고 C_p 를 구한다.

이와 같이 반복적인 계산과정을 통하여 풍력터빈의 출력특성을 구할 수 있다. 그러나 실제의 풍력터빈에 대한 계산을 할 경우 많은 회전익 수에 의한 영향을 고려해야한다. 이를 위하여 본 연구에서는 Plandtl의 손실보정계수를 사용하였다.

보정계수는



$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f}$$

$$f = \frac{B(R-r)}{2r \sin \phi}$$

이다. 이 보정계수를 이용하여 a 와 a' 를 다시 구하면

$$a = \frac{P}{1+P} \quad (3-15)$$

$$P = \frac{\sigma_r (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)}{8 F \sin^2 \phi}$$

이고, a' 은

$$a' = \frac{P'}{1 - P'} \quad (3-16)$$

$$P' = \frac{\sigma_r (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)}{8 F \sin \phi \cos \phi}$$

로 표시된다. 식 (3-15)와 식 (3-16)에서 구한 a , a' 값을 이용하여 스트립 이론에서 설명한 것과 같은 방법으로 하면 유한 회전익 수를 가진 풍력터빈에 대한 특성도 계산할 수 있다.

3-4. 최적 회전익이론

일반적으로 회전익의 설계에서 익형은 따로 설계하지 않고 기존의 자료로부터 구한다. 그러므로 회전익의 최적화는 공력특성이 주어진 익형에 대해서 수행된다.

최적 회전익은 출력이 최대가 되는 형상을 말하며 이를 구하기 위해서 식 (3-6)의 출력계수를 최대로 하는 형상을 구하는 것이다. 그러므로 $(\partial Cp / \partial a) = 0$ 가 되는 조건을 만족하는 방정식을 구하면

$$\left(\frac{r}{XR} \right) (1-a) (1-3a) - \left(\frac{C_D}{C_L} \right) (1-2a) \left(\frac{x^2 + 2a(1-a)}{X^2} \right) = 0 \quad (3-17)$$

이다. 또한 용적비와 회전간섭계수는 식 (3-18)과 식 (3-19)와 같이 표현된다.

$$\sigma = \frac{8a(1-a)}{XC_L \sqrt{(1-a)^2 + \frac{(1+a')^2 X^2 r^2}{R^2}}} \quad (3-18)$$

$$a' = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{4a(1-a)}{\left(r \frac{X}{R}\right)^2}} \right] \quad (3-19)$$

Fig. 3-5는 회전익의 최적형상을 설계하는 계산과정의 흐름도이다. 그 과정은 주어진 익형의 양력, 항력 특성을 이용하여 식 (3-17)을 만족하는 축간섭계수를 구한 후에 식 (3-18), 식 (3-19) 그리고 식 (3-9)를 이용하면 용적비와 유입각을 구할 수 있다. 또한 주어진 익형의 공력특성 자료로부터 양항비가 최대가 되는 받음각을 구하여 식 (3-10)으로부터 반경방향으로의 피치각을 구할 수 있다.



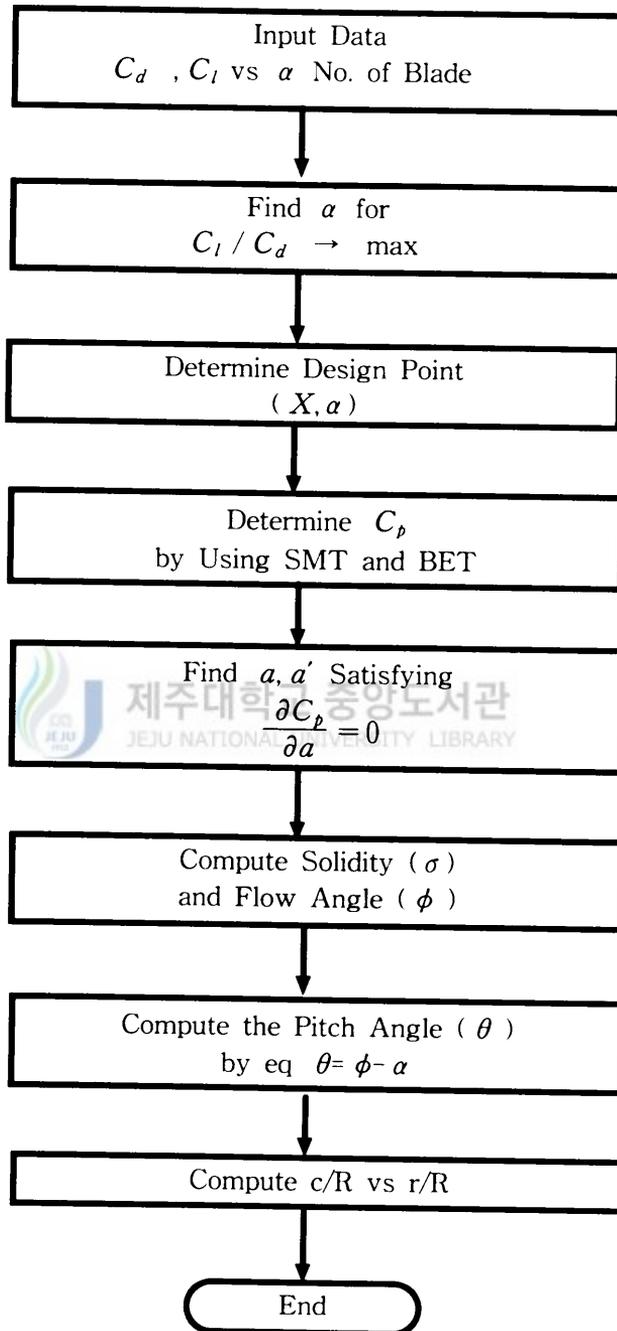


Fig. 3-5 Flow chart of optimum design

IV. 회전익의 공력설계

회전익의 설계는 공력특성이 우수한 익형을 선정하여 성능계산을 통한 회전익 외형을 결정한 후 회전익에 작용하는 부하를 계산하여 회전익의 강도 및 진동특성을 고려한 구조설계를 해야하며 이 과정은 설계 요구사항을 만족할 때까지 수정·반복하게 된다. 본 연구에서는 회전익의 익형을 선정하여 최적 회전익이론과 스트립이론으로부터 회전익을 설계하였고, PROP-PC code을 이용하여 성능을 해석하였다.

회전익의 성능특성은 익형, 회전익의 두께, 회전익의 수, 익형의 길이, 비틀림각 및 회전직경에 의해 결정된다.



4-1. 익형의 선정

풍력터빈의 회전익 단면 형상은 새로이 설계하는 것보다 자료가 잘 알려져 있는 익형 중에서 선정하여 사용한다. 여러 익형 중에서 NACA- 계열의 익형이 항공기 익형으로서 충분한 자료와 신뢰성을 가지고 있다[8].

익형의 성능은 최대양력계수($C_{l,max}$), 양항비(C_l / C_d), 실속각 등으로 대표되므로 이들을 비교 평가하여 익형을 선정한다. 풍력터빈의 운전 영역은 풍속으로 약 4m/s~20m/s로서 그 범위가 크기 때문에 양력계수의 변화 폭도 커지게 되어 넓은 범위의 양력계수에 대해서 양항비가 큰 익형이 바람직하다. 또한 익형의 선정에는 이것 이외에 표면의 상태, 제작의 용이성 등을 고려해야만 한다. Fig. 4-1은 여러 가지 익형에 대한 최대 양항비값들이다. 여기서 Liebeck의 익형이 가장 큰 값을 가지고 있으나 이 익형단면 형상이 제작과 구조적인 문제로 풍력터빈용

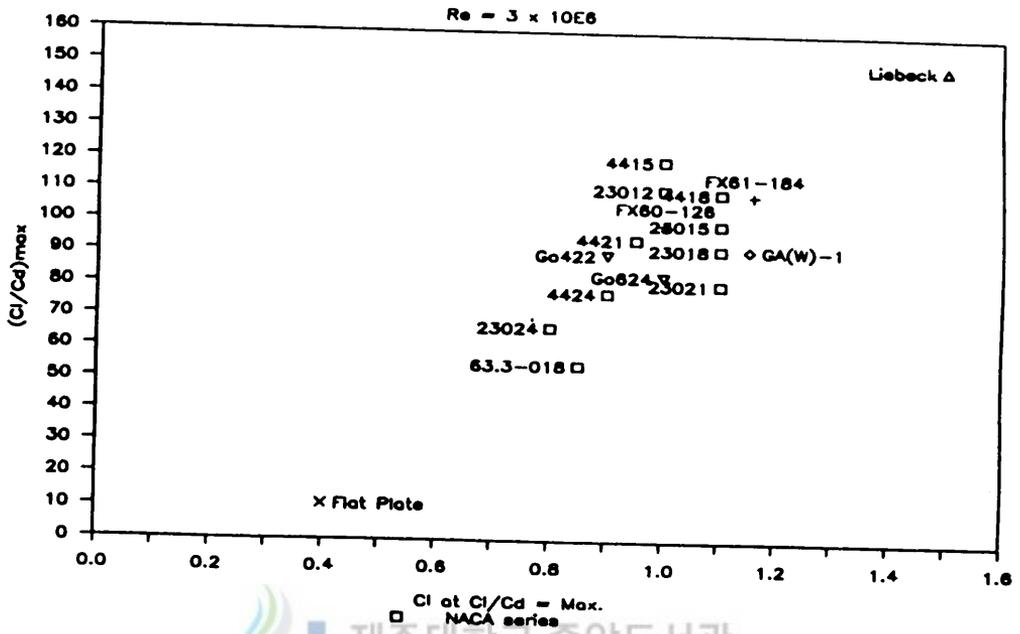


Fig. 4-1 Relation to lift coefficient and lift-to-drag ratio

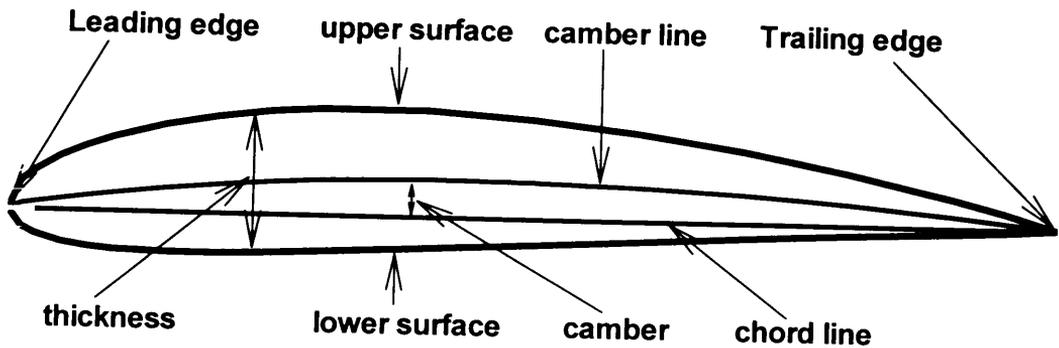


Fig. 4-2 Section shape of NACA 4415

Table 1 Section coordinates of NACA 4415

X(upper)	Y(upper)	X(lower)	Y(lower)
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.01250	0.03070	0.01250	-0.01790
0.02500	0.04170	0.02500	-0.02480
0.05000	0.05740	0.05000	-0.03270
0.07500	0.06910	0.07500	-0.03710
0.10000	0.07840	0.10000	-0.03980
0.15000	0.09270	0.15000	-0.04180
0.20000	0.10250	0.20000	-0.04150
0.25000	0.10920	0.25000	-0.03980
0.30000	0.11250	0.30000	-0.03750
0.40000	0.11250	0.40000	-0.03250
0.50000	0.10530	0.50000	-0.02720
0.60000	0.09300	0.60000	-0.02140
0.70000	0.07630	0.70000	-0.01550
0.80000	0.05550	0.80000	-0.01030
0.90000	0.03080	0.90000	-0.00570
0.95000	0.01670	0.95000	-0.00360
1.00000	0.00000	1.00000	0.00000

Leading edge radius=2.48

Slope of radius=0.2

회전익의 단면으로는 적당하지 않다. NACA230-계열과 44-계열의 익형을 보면 NACA4415, NACA4418과 NACA23012가 다른 익형보다 양항비가 좋다. 그러므로 본 연구에서는 최대양력계수와 실속 특성 면에서 우수한 NACA4415를 기본 익형으로 선정하였으며, 그 단면형상은 Fig. 4-2에 나타내었고, Table 1은 단면좌표이다.

4-2. 평면형 설계

회전익의 평면형은 익현의 분포, 비틀림각에 의해서 결정된다. 그러나 회전익이 모든 풍력터빈의 운전범위에서 효율이 좋을 수는 없다. 이것은 운전조건의 변화에 따라 실속의 발생과 풍력터빈 정지상태 등이 나타나기 때문이다. 그러므로 회전익의 설계에는 먼저 설계점으로서의 주속비(X)를 결정해야 한다. 주속비는 회전익의 크기, 회전수, 풍속에 의해 변화하며 회전익의 크기와 회전수는 회전익의 효율특성에 따라 변화하는 관계로 인하여 반복계산에 의해 결정된다.

일반적으로 발전용 풍력터빈의 경우 설계 주속비는 7~8로 하며, 본 연구에서는 최대의 출력계수를 얻기 위해 설계주속비를 8로 하였다. 최적의 평면형의 설계는 "3-4. 최적 회전익이론"에서 설명한 방법으로부터 구할 수 있다.

Fig. 4-3은 주속비의 변화에 따른 최적의 축간섭계수(a)값을 보여주고 있으며, $X = 0$ 일 때 $a = 1/4$ 이고, $X = \infty$ 일 때 $a = 1/3$ 에 가까워짐을 보여준다.

Fig. 4-4는 받음각(α)에 따른 NACA4415 익형의 양항비의 분포이며, 양항비는 점차적으로 증가하다가 $\alpha = 6^\circ$ 를 기점으로 급격히 감소한다. 양항비가 최대인 지점에서 풍력터빈은 좋은 성능특성을 보인다. 따라서 본 연구에서는 출력 성능과 회전익의 효율을 증대하기 위해 최대 양항비값을 갖는 받음각을 $\alpha = 6^\circ$ 로 설정하여 설계를 수행하였다.

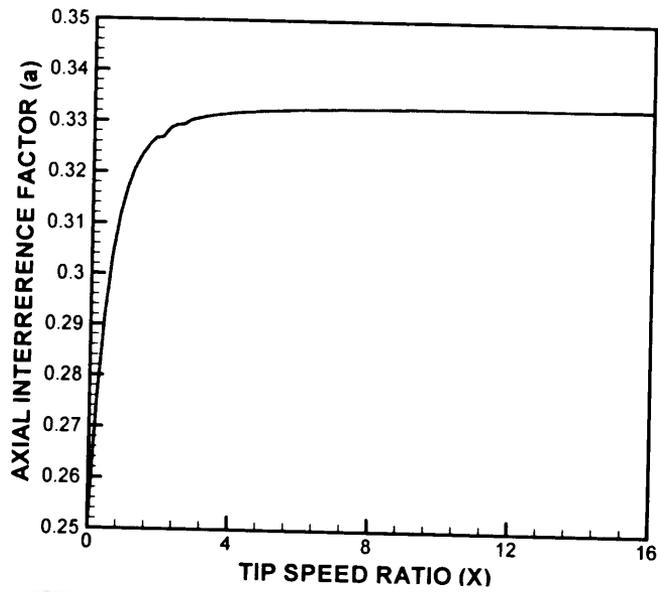


Fig. 4-3 Optimum value of axial interference factor

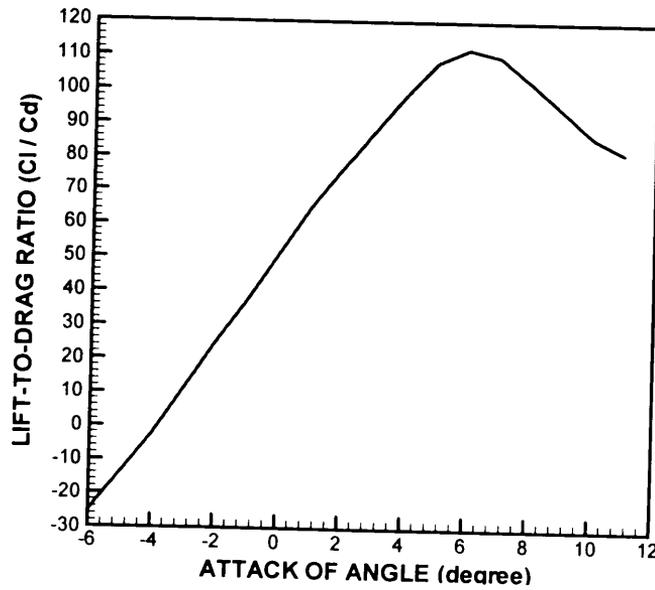


Fig. 4-4 Relation to attack of angle and lift-to-drag ratio

V. 설계 결과

회전익의 설계는 중요한 공기역학적인 힘의 발생이나 유동현상에 대한 보다 정확한 방법의 사용이 필요하다. 본 연구에서는 운동량이론과 회전익요소이론이 함께 적용되는 스트립이론과 회전익 끝의 손실을 고려하여 외형을 설계하였으며, 제 4-1절에서 선정한 NACA4415를 기본 익형으로 선정하고 최대의 효율을 얻기 위해 설계주속비를 8로 하여 회전익을 설계하였다. 또한 설계된 회전익 공력해석은 계산의 정확도가 높은 PROP-PC code에 의해 수행되었다. Table 2는 설계주속비에서의 회전익의 제원을 나타낸 도표이며, 회전익 설계의 결과 성능계수는 Table 3과 같이 나타났고, 성능해석의 결과 Fig. 5-1에서 보듯이 주속비가 7~9 사이에서 높은 효율을 보이고 있다. Fig. 5-2는 주속비에 따른 추력계수의 변화이며, 주속비가 증가할수록 점차로 증가하다가 주속비 10을 기점으로 서서히 감소한다. 토크계수는 Fig. 5-3에서와 같이 주속비의 증가함에 따라 증가하다가 주속비가 5이상이면 급격히 감소한다. 즉, 출력계수와 추력계수는 주속비와 용적비, 양항비가 증가할 때 증가하고, 비틀림각이 감소할 때 증가한다. 즉, 용적비가 증가할 때 최고치의 출력계수와 추력계수는 낮은 주속비에서 발생하기 때문에 저속의 풍력 터빈(Multibladed type)은 많은 수의 날개를 가지게 되고, 고속의 풍력 터빈(Propeller-type)은 적은 수의 날개를 갖는다.

최고치의 출력계수는 같은 용적비에 대하여 Table 3에서와 같이 최고 추력계수일 때의 주속비 보다는 낮은 주속비에서 발생하고, 토크계수는 주속비의 증가와 함께 감소하며, 낮은 주속비에서 용적비의 증가와 함께 증가한다. 그래서 상대적으로 저속의 풍력 터빈은 높은 시동 토크가 필요하고 고속의 풍력 터빈은 낮은 시동 토크가 필요하게 된다.

Table 2 Solidity, Chord and Twist angle at design point

Blade radius = 5m , Tip speed ratio = 8, Attack angle = 6° Lift coefficient = 1.01, Drag coefficient = 0.009			
r/R	Chord (mm)	Solidity	Twist angle (°)
0.2	687.9	0.135	25.2
0.3	461.4	0.091	16.7
0.4	346.0	0.068	12.5
0.5	276.4	0.054	10.0
0.6	229.9	0.045	8.3
0.7	196.7	0.039	7.1
0.8	171.8	0.034	6.3
0.9	152.4	0.030	5.6
1.0	136.8	0.027	5.0

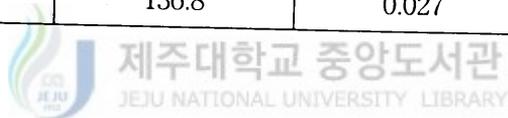


Table 3 Relation to tip speed ratio and performance coefficients

Blade radius = 5m , Pitch angle = 0°			
Tip speed ratio	Power coefficient	Thrust coefficient	Torque coefficient
3	0.104	0.155	0.035
4	0.206	0.261	0.051
5	0.286	0.354	0.057
6	0.337	0.422	0.056
7	0.363	0.470	0.052
8	0.372	0.498	0.047
9	0.371	0.515	0.041
10	0.359	0.524	0.036
11	0.339	0.525	0.031
12	0.312	0.522	0.026

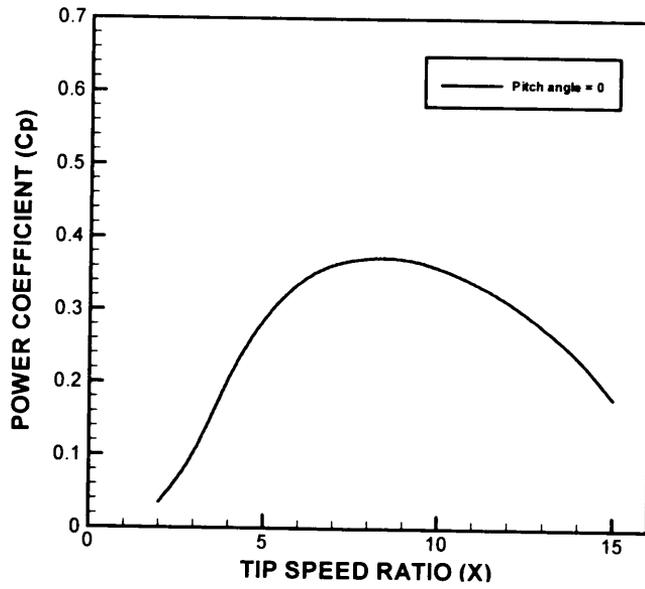


Fig. 5-1 Relation to tip speed ratio and power coefficient

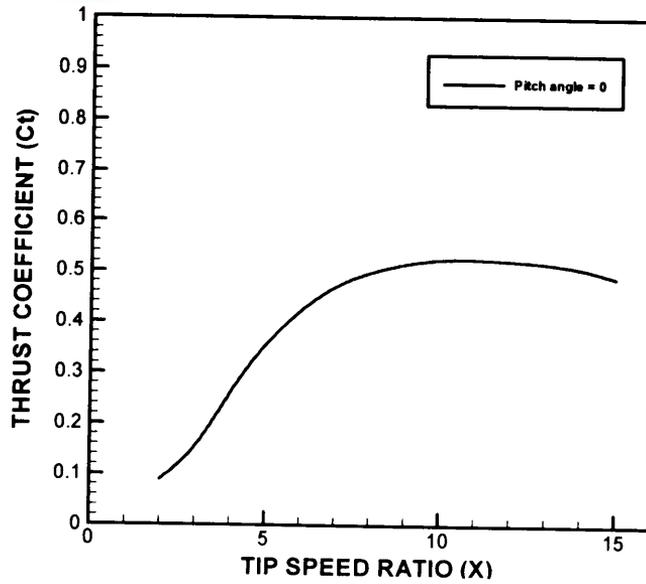


Fig. 5-2 Relation to tip speed ratio and thrust coefficient

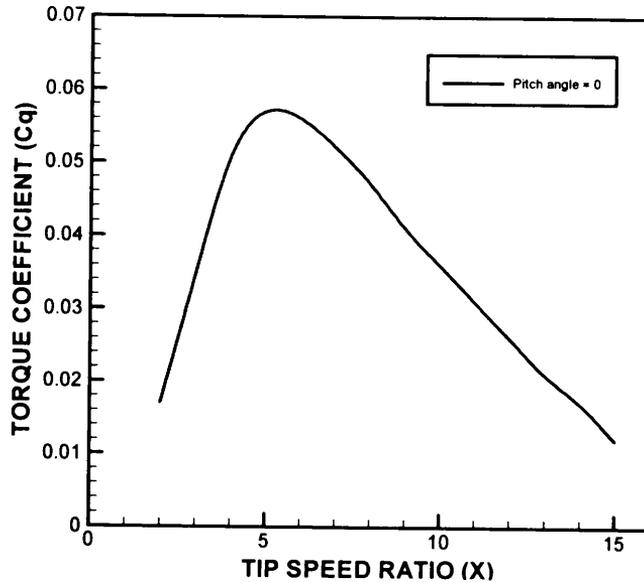


Fig. 5-3 Relation to tip speed ratio and torque coefficient

용적비와 유입각은 Fig. 5-4와 Fig. 5-5에서와 같이 주속비에 크게 관계됨을 알 수 있으므로 운전 조건에 따라 최적 회전익의 형상을 다르게 설계해야 한다.

Fig. 5-6은 주속비에 따른 용적비의 분포로서 운전속도가 증가함에 따라 용적비는 감소함을 보여준다. Fig. 5-7, Fig. 5-8, Fig. 5-9는 설계점에서의 최적 용적비의 분포와 유입각의 분포 그리고 익현길이의 분포로서 저속에서 회전을 시작하기에 충분한 토크를 얻기 위해 허브부근에서 넓은 면적과 큰 설치각을 갖고 있다.

Fig. 5-10과 Fig. 5-11, Fig. 5-12는 회전익의 성능특성 해석결과로서 주속비와 회전익의 피치각 ($\theta_{0.75R}$)의 변화에 따른 출력계수, 토크계수, 추력계수의 변화이며, 피치각이 커질수록 성능계수는 감소하고 있다.

성능특성은 설계주속비인 $X = 8$ 에서 최대효율을 나타내고 있지만 설계점을

지나 주속비가 증가하게되면 추력계수가 1.0보다 커지는 풍력터빈 정지상태가 된다. 이러한 현상은 피치각이 0° 보다 작은 경우 발생하게되며 이러한 운전상태가 되지 않기 위해서는 최소피치각을 0° 로 유지하는 것이 바람직하다.

Fig. 5-13, Fig. 5-14, Fig.5-15는 양항비 변화에 따른 성능계수의 변화를 나타낸 것으로서 양항비가 클수록 성능계수는 증가한다.

Fig. 5-16, Fig. 5-17, Fig. 5-18은 주속비에 따른 회전익 끝의 손실을 고려하지 않을 때의 성능계수를 비교한 결과이다. 손실을 고려하지 않았을 경우 설계주속비인 $X=8$ 에서 출력계수는 14%증가하였고, 추력계수는 1%증가하였으며, 토크계수는 10%가 증가하였다.

회전익은 지상 10m의 높이에 설치를 목적으로 하였고, 또한 회전익의 반경은 구조적인 안전성과 회전익의 하중을 고려하여 통상적으로 허브 설치높이의 45%~55%인 범위내에 있으므로 본 연구에서는 회전익의 반경을 5m로 설정하였다. 허브부는 회전익 반경의 20%로 하였으며, 또한 NACA 4415의 양항력 특성 곡선으로부터 최대 양항비일 때의 양력계수는 1.01, 항력계수는 0.009이었고, 그때의 양항비는 112.22 받음각은 6° 였다.

Fig. 5-19는 설계된 Blade의 2차원 모형으로써 비틀림각에 의한 회전익의 익현의 변화를 나타내고 있고, Fig. 5-20은 회전익의 3차원 모형이다.

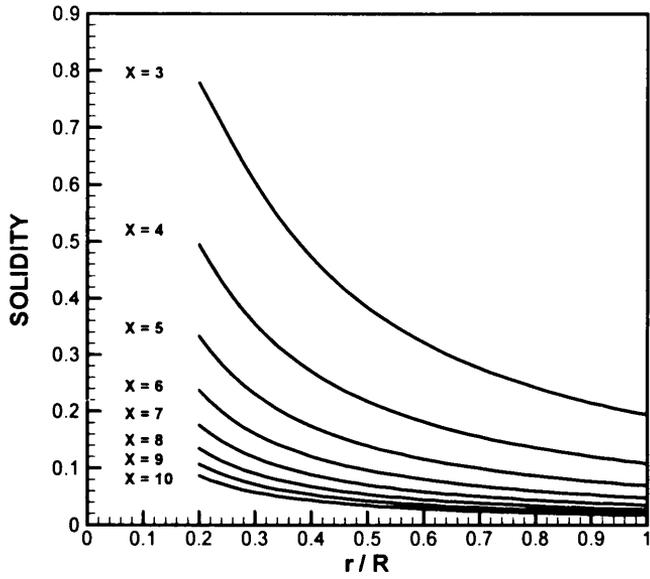


Fig. 5-4 Relation to tip speed ratio and solidities

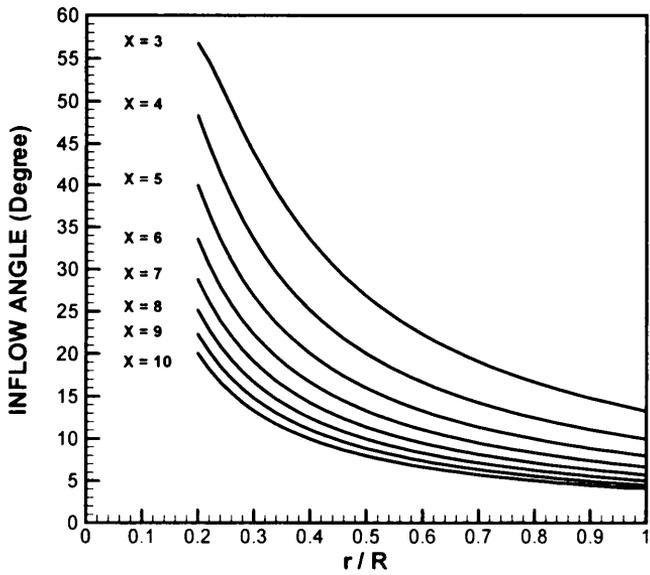


Fig. 5-5 Relation to tip speed ratio and inflow angles

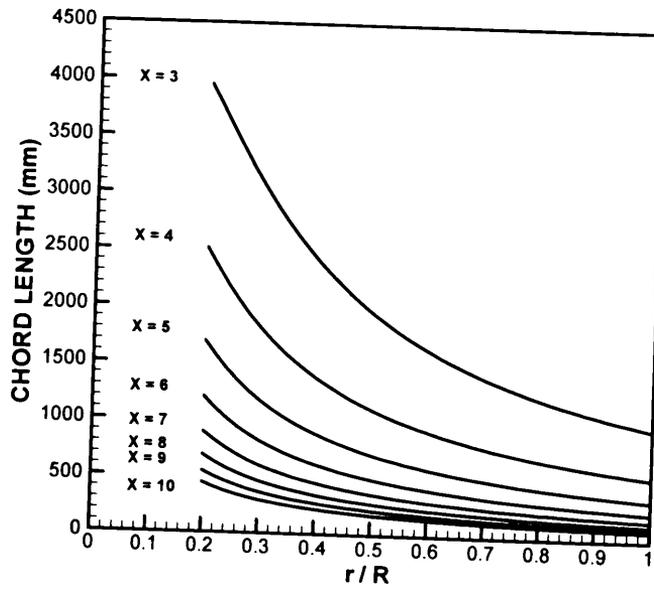


Fig. 5-6 Relation to tip speed ratio and chord lengths

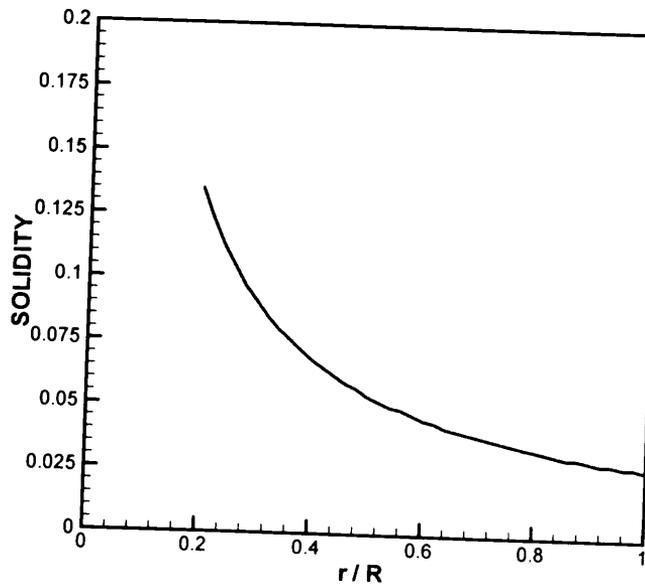


Fig. 5-7 Distribution of solidity at design point

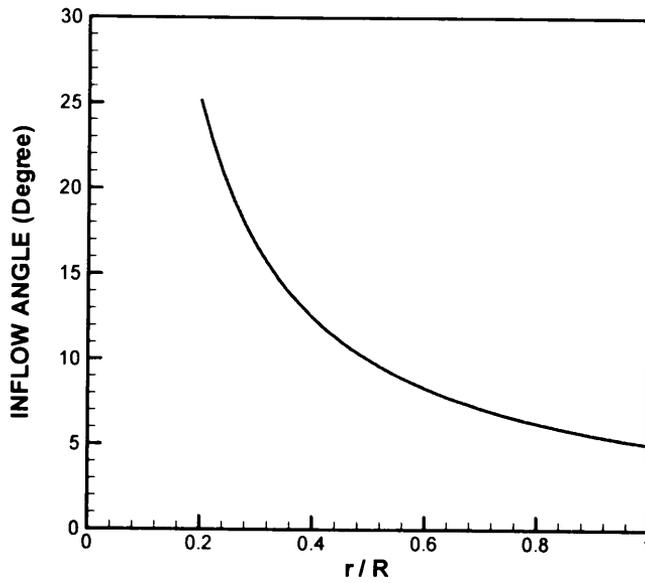


Fig. 5-8 Distribution of inflow angle at design point

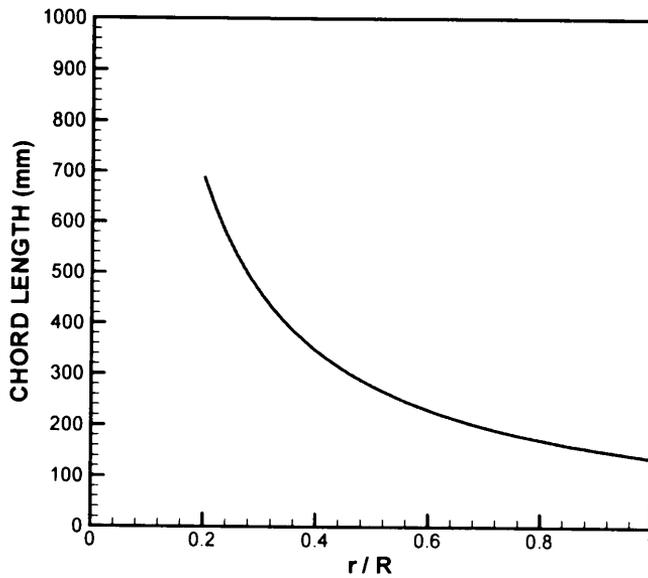


Fig. 5-9 Distribution of chord length at design point

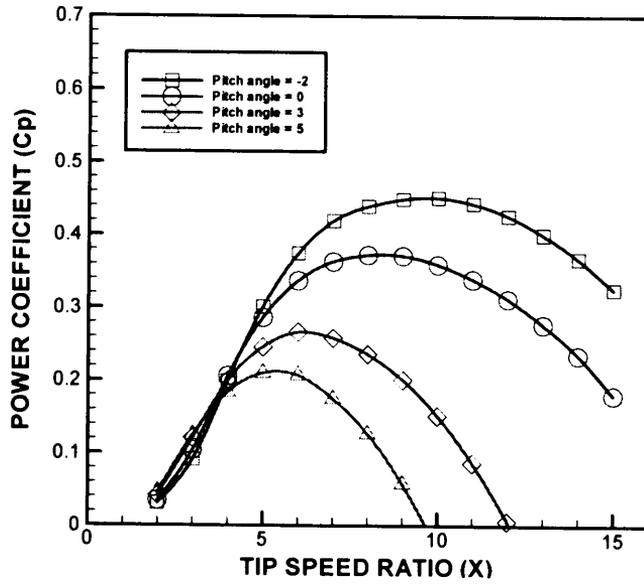


Fig. 5-10 Relation to pitch angles and power coefficients

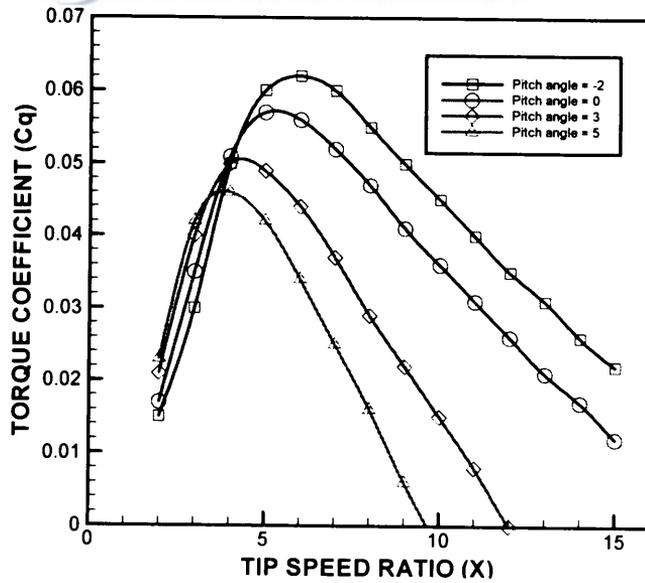


Fig. 5-11 Relation to pitch angles and torque coefficients

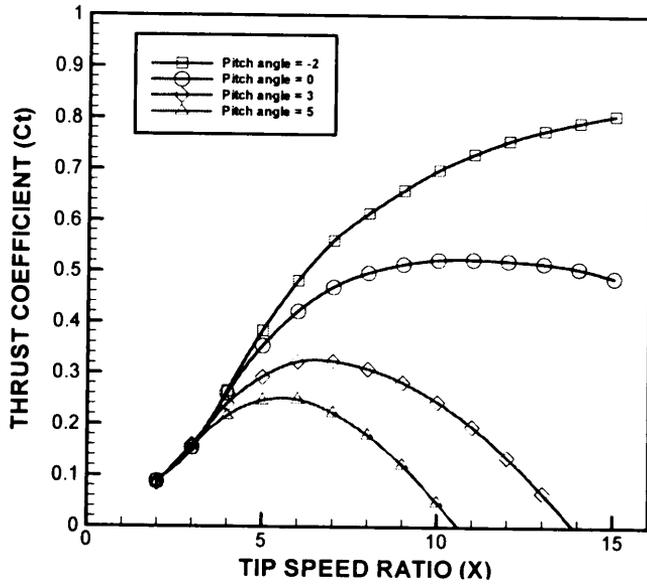


Fig. 5-12 Relation to pitch angle and thrust coefficients

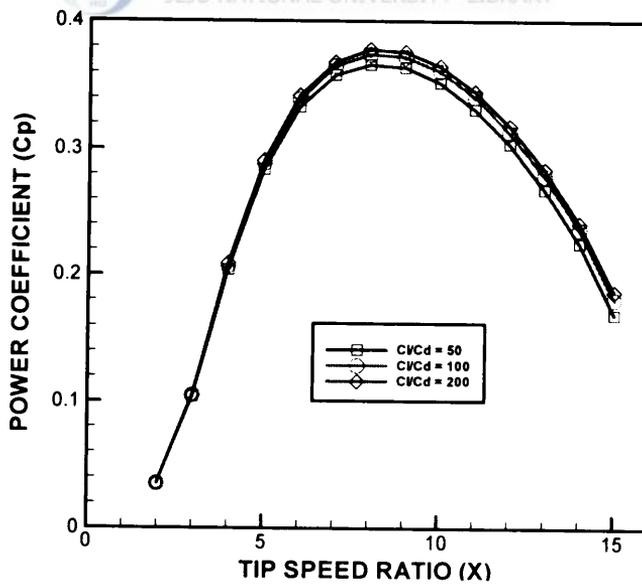


Fig. 5-13 Relation to lift-to-drag ratio and power coefficients

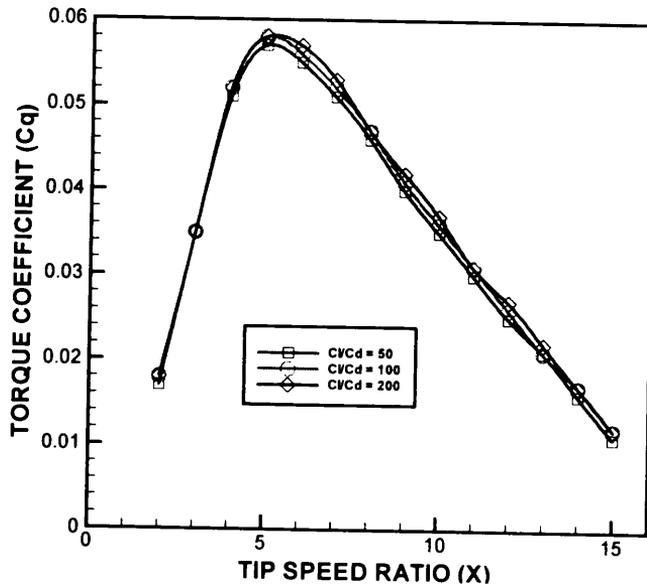


Fig. 5-14 Relation to lift-to-drag ratio and torque coefficients

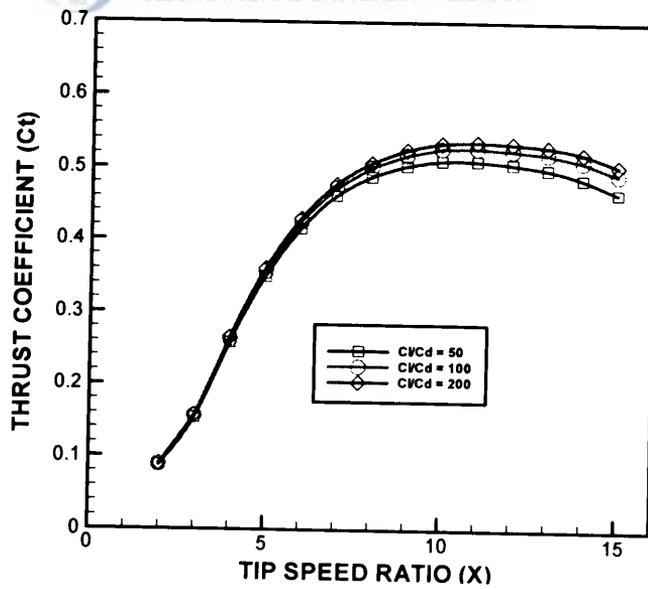


Fig. 5-15 Relation to lift-to-drag ratio and thrust coefficients

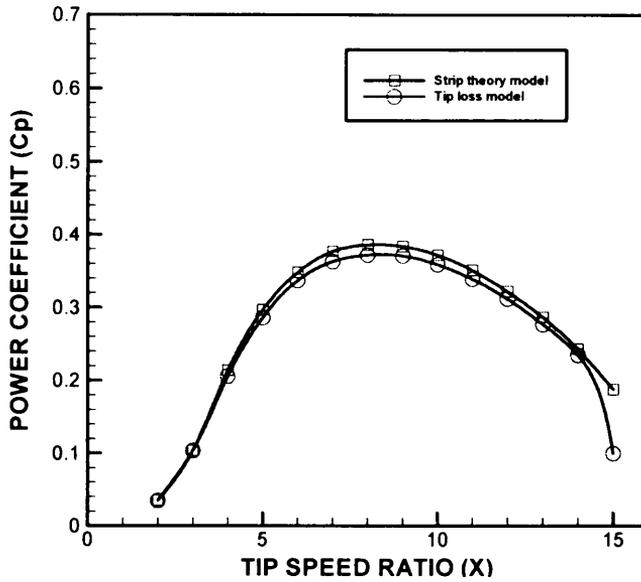


Fig. 5-16 Comparison of strip theory and prandtl tip loss for power coefficient

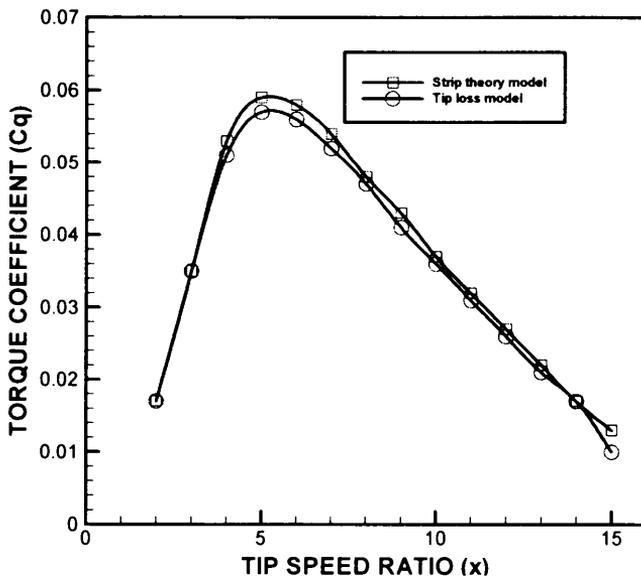


Fig. 5-17 Comparison of strip theory and prandtl tip loss for torque coefficient

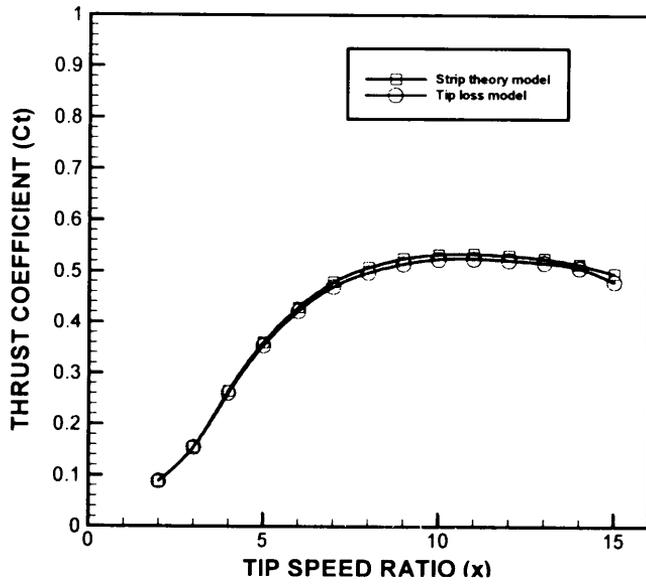


Fig. 5-18 Comparison of strip theory and prandtl tip loss for thrust coefficient

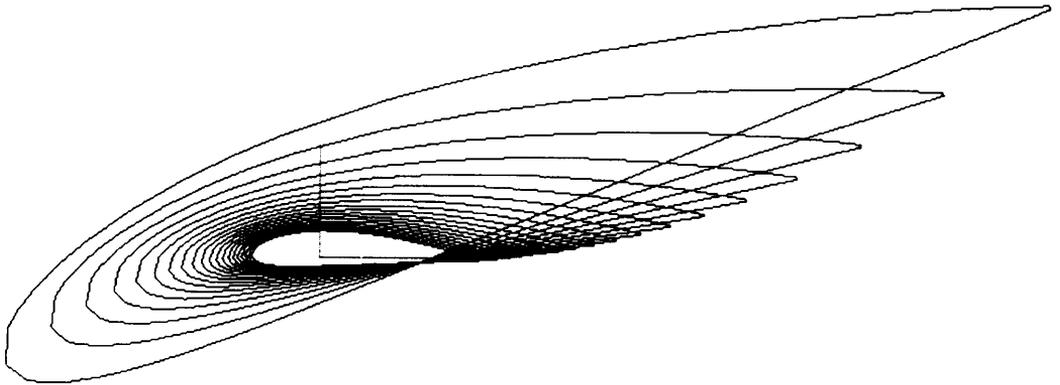


Fig. 5-19 Two dimensional shape in design blade



Fig. 5-20 Three dimensional shape in design blade

VI. 결 론

회전익의 설계는 중요한 공기역학적인 힘의 발생이나 유동현상에 대한 보다 정확한 방법의 사용이 필요하다. 본 연구에서는 측후소의 풍속특성을 기초로 하여 최적화이론 및 운동량이론과 회전익요소이론이 함께 적용되는 스트립이론으로 회전익을 설계하였고, 최적화이론에서 최적상태를 찾아가는 과정과 스트립이론 및 국소순환방법을 프로그램화하였다. 프로그램은 사용자의 요구사항에 맞게 주속비와 회전익의 길이, 회전익의 개수, 허브 길이, 회전익 단면 형상에 대하여 최대 양항비에서의 양력과 항력계수, 최적의 받음각을 입력하여 회전익의 평면형 설계에 필요한 익현길기와 비틀림각을 계산하였고, PROP-PC code를 이용하여 회전익의 성능계수 즉, 출력계수, 추력계수, 토크계수를 계산하였다. 그 결과 설계된 회전익은 정격운전시 공력효율이 37.2%로 설계되었다.

그러나 공력특성은 설치장소의 입지조건에 따라 크게 변화하므로 설치장소의 입지조건을 최우선으로 선결해야만 한다. 최적화 이론에 의한 회전익 설계와 성능해석을 통해 산출된 값은 실험에 의한 수정이 필요하고, 또한 정확한 와류에 대한 고려가 필요하며, 여러 설계 방식과의 비교 검토를 통해 최적의 회전익을 설계하는 방법에 대한 고찰이 필요하다. 그리고 향후 연구를 위해서는 구조역학 및 재료 역학적인 측면에서의 고려가 공력해석과 함께 병행되어야 한다.

VII. 참고문헌

- [1] Spera, D. A. 1994, Wind Turbine Technology, ASME Press, pp.488-589.
- [2] Abbott, I. H. & Von Doenhoff, A. E., 1959, Theory of Wing Sections, Dover Publications, New York.
- [3] 이춘식, 1989, “소형 수평축 풍차 및 풍력발전시스템 개발에 관한 연구”, 한국과학기술연구원.
- [4] Eggleston, D.M. & Stoddard, F.S., 1987, Wind Turbine Engineering Design, Van Nosreand Reinhold Company, New York.
- [5] 남궁홍, 1998, “수평축 풍차의 최적 공력설계에 관한 연구”, 한국항공대학교 석사학위 논문.
- [6] Rankine, W. J. M., 1965, Transactions, Institute of Naval Architects, Vol.6, p.13.
- [7] Froude, R. E., 1889, Transactions, Institute of Naval Architects, Vol.30, p.390.
- [8] Riegels, F. W., 1961, Aerofoil Sections, Butterworth, London.
- [9] Eric Ravon, 1997, “Design of a 10kW Horizontal wind turbine axis rotor”, 한국에너지기술연구소.
- [10] Giguere, P. and Selig, M. S., 1999, “Design of a Tapered and Twisted Blade for the NREL Combined Experiment Rotor”, 한국에너지기술연구소.

감사의 글

2년 동안의 대학원 과정에 길을 잡아주시고 충고와 조언으로 인도해 보람된 결실을 맺을 수 있도록 도와주신 분들께 진심으로 감사 드립니다.

보잘 것 없는 저에게 언제나 많은 조언과 격려로 지도하여 주신 허종철 지도교수님께 깊은 감사를 드리며, 학과장이신 권기린 교수님, 김귀식 교수님, 현명택 교수님, 임종환 교수님, 정동원 교수님, 조경호 교수님 그리고 최경현 교수님 정말 고맙습니다.

힘들고 어려웠던 과정에서 공부와 생활을 같이 하며 많은 도움을 주신 창수와 동현, 승현 그리고 동기 여러분과 선·후배님 정말 고맙습니다. 여러분께서 뜻하는 바를 모두 이루시고 모든 일에 항상 기쁨이 가득하기를 진심으로 기원합니다. 또한 언제나 밝은 웃음으로 항상 제 곁에 있어준 길웅, 정호, 경범, 은주와 모임 시그마 여러분께도 진심어린 감사의 말씀을 전합니다.

무엇보다도 항상 저를 걱정해주시고 도와주신 부모님과 동생 선희에게 진심으로 고마움을 표합니다. 앞으로 더욱 노력하여 이 은혜에 보답하고자 합니다.

끝으로 사랑하는 부모님께 이 논문을 바칩니다.

2000. 12. 홍 상 필