



풍력터빈 블레이드 설계

제14주

수평축 풍력터빈 블레이드 최적설계

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

- **풍력발전용 로터 블레이드 설계 사양**

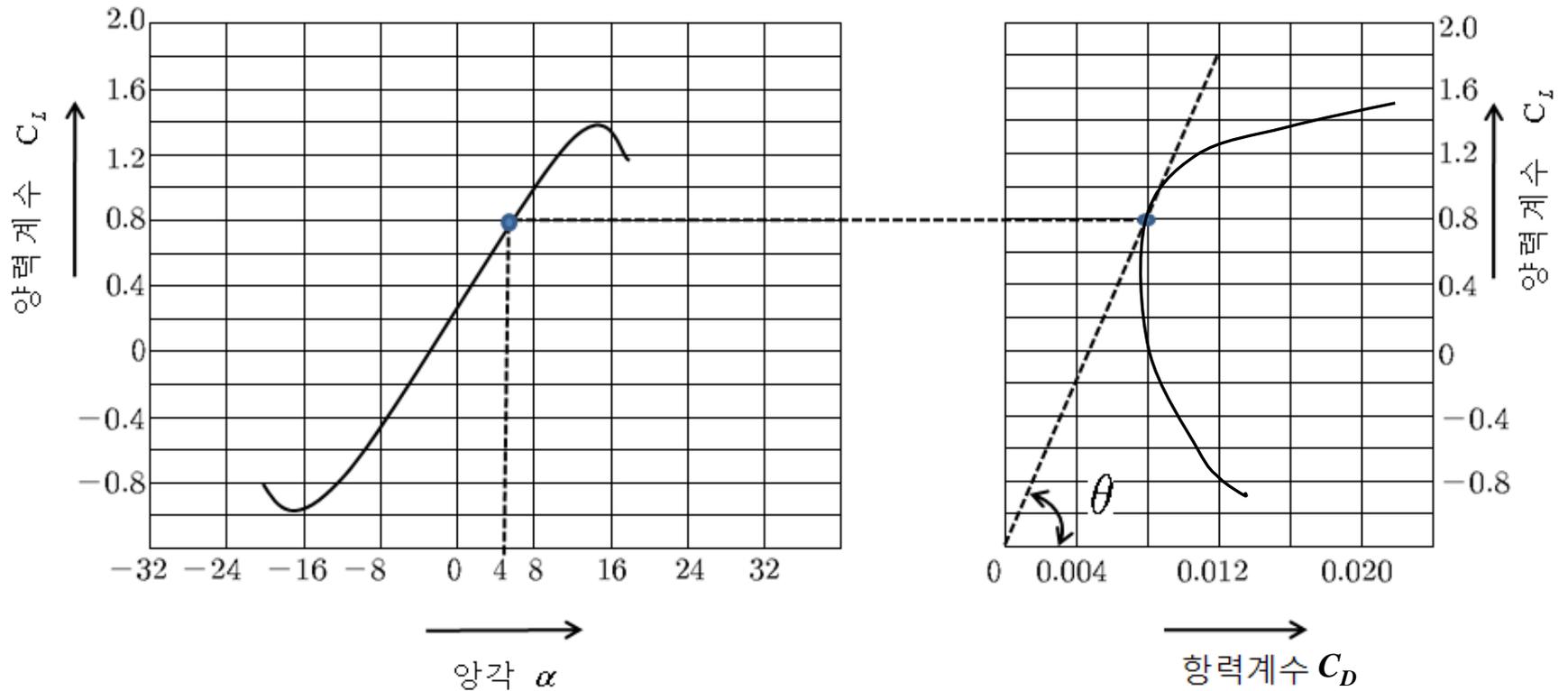
- 블레이드 : 3매

- 로터직경 : $D=4\text{m}$

- 주속비 : $\lambda = \omega R/v = 6$

- 블레이드 익형 : NACA4418

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

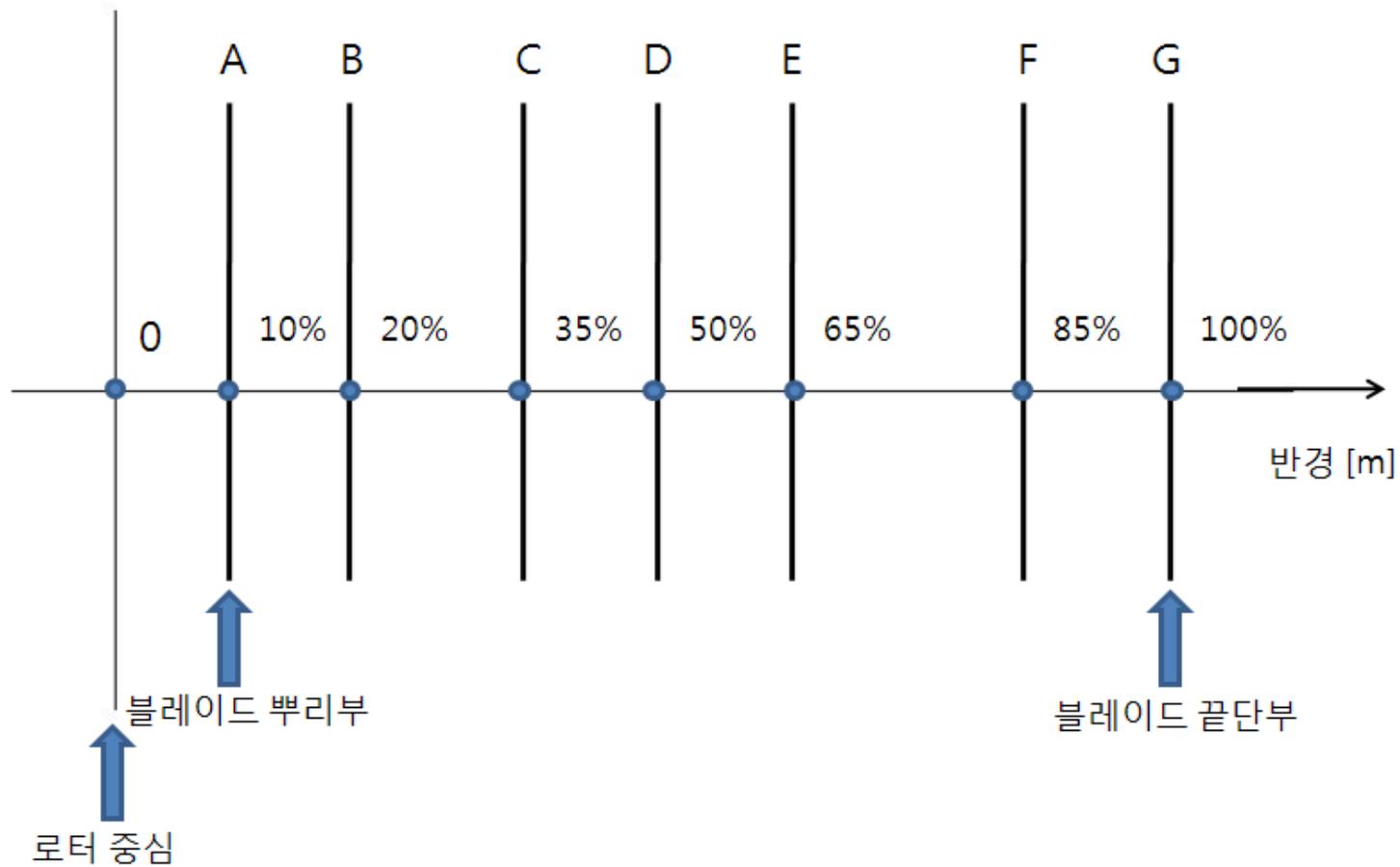


NACA4418의 양항곡선

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

- 먼저, 그림에 보이는 NACA4418의 양향곡선으로부터 양항비 C_L/C_D 가 최대로 되는 양각을 구함.
- $C_L/C_D = \tan \theta$ 이고, C_L/C_D 가 최대로 되는 C_L 의 최대값은 0.8 이기 때문에, 이 $C_L = 0.8$ 에 대응하는 양각 α 를 $C_L - \alpha$ 곡선으로부터 구하면 $\alpha = 4^\circ$ 가 됨.

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서



블레이드상의 각 위치에서의 국소 주속비 λ_r

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

- 블레이드 상의 각 위치에서의 국소 주속비의 λ_r 을 구함.

λ_r 은 그 정의로부터 다음과 같음.

$$\lambda_1 = \lambda \frac{r}{R} = \lambda \frac{r}{(D/2)}$$

분할점	A	B	C	D	E	F	G
λ	0.6	1.2	2.1	3.1	3.9	5.1	6.0

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

- 다음으로 유입각 ϕ 를 구하면,

$$\phi = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{1}{\lambda}\right)$$

- 또한, 설치각(비틀림각) θ 는 $\theta = \phi - \alpha + \alpha_0$ 로 되고, $\alpha_0 = 0^\circ$ 로 가정해서 $\alpha = 4^\circ$

이기 때문에, 다음의 관계가 얻어 짐.

분할점	A	B	C	D	E	F	G
θ	39.3°	26.5°	17.0°	12.3°	9.6°	7.4°	6.3°

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

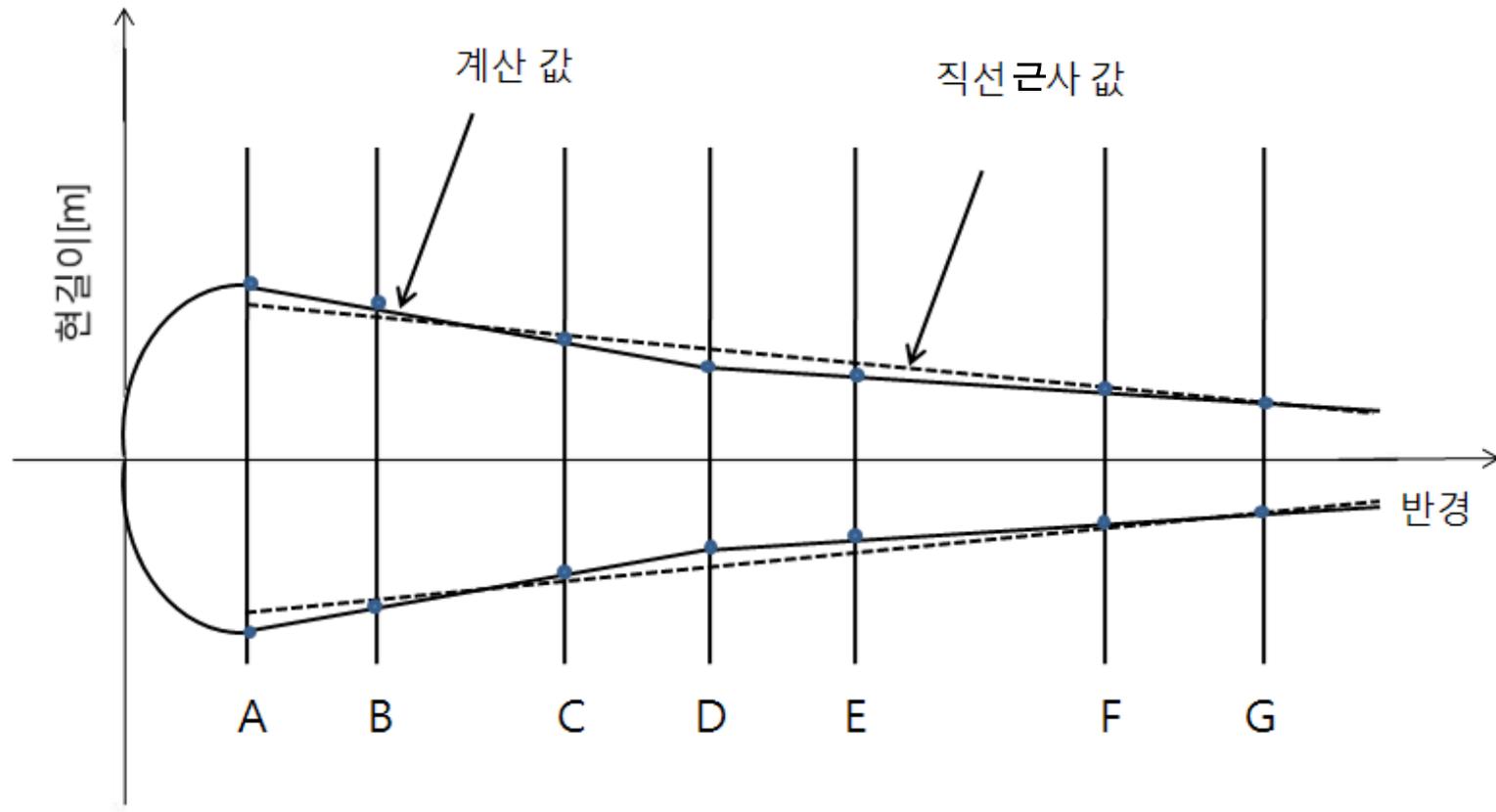
- 마지막으로, 현의 길이 C 는 다음 식으로 구해짐.

$$C = \frac{8\pi r}{ZC_L} (1 - \cos \phi)$$

- 이것으로부터 다음의 관계가 얻어짐.

분할점	A	B	C	D	E	F	G
C	0.475	0.440	0.366	0.240	0.190	0.160	0.125

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

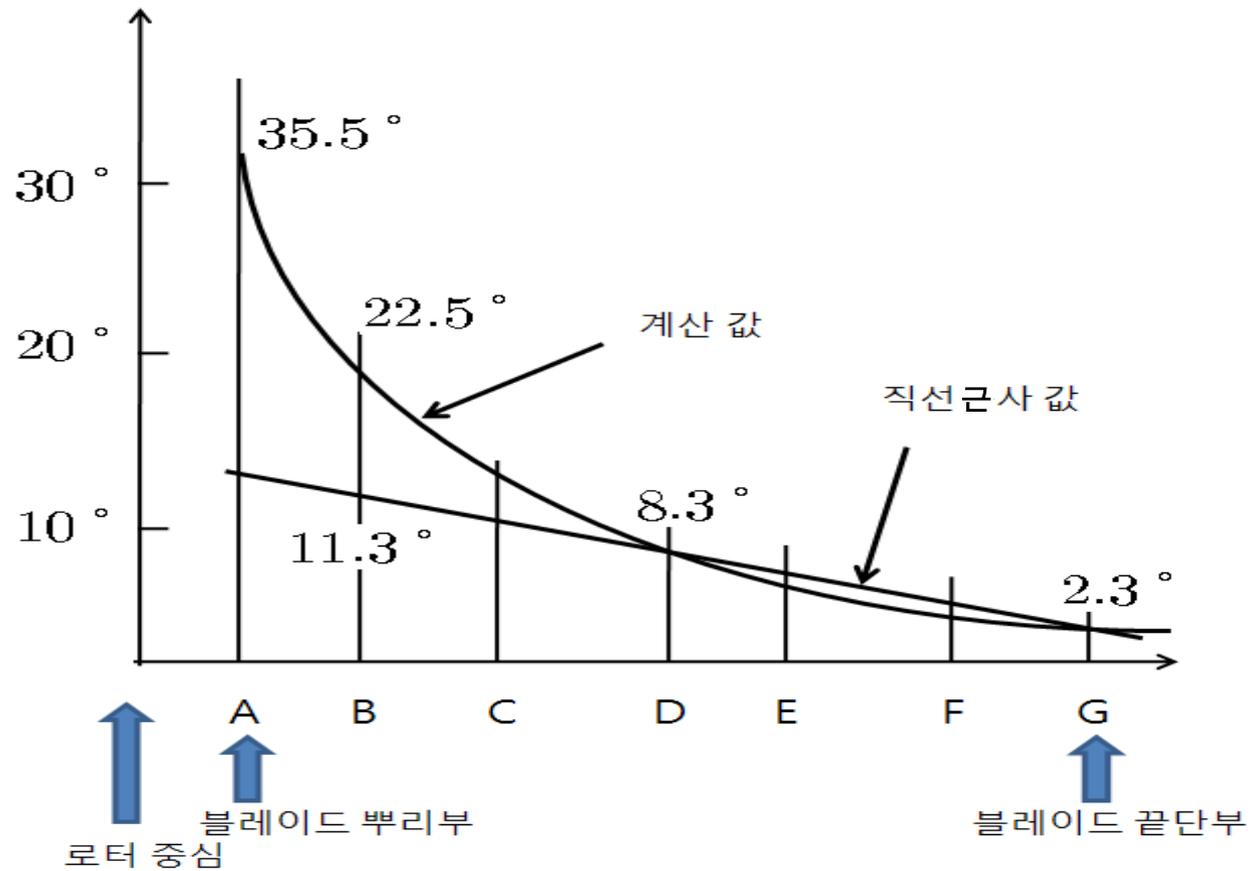


블레이드 현길기와 비틀림의 관계

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

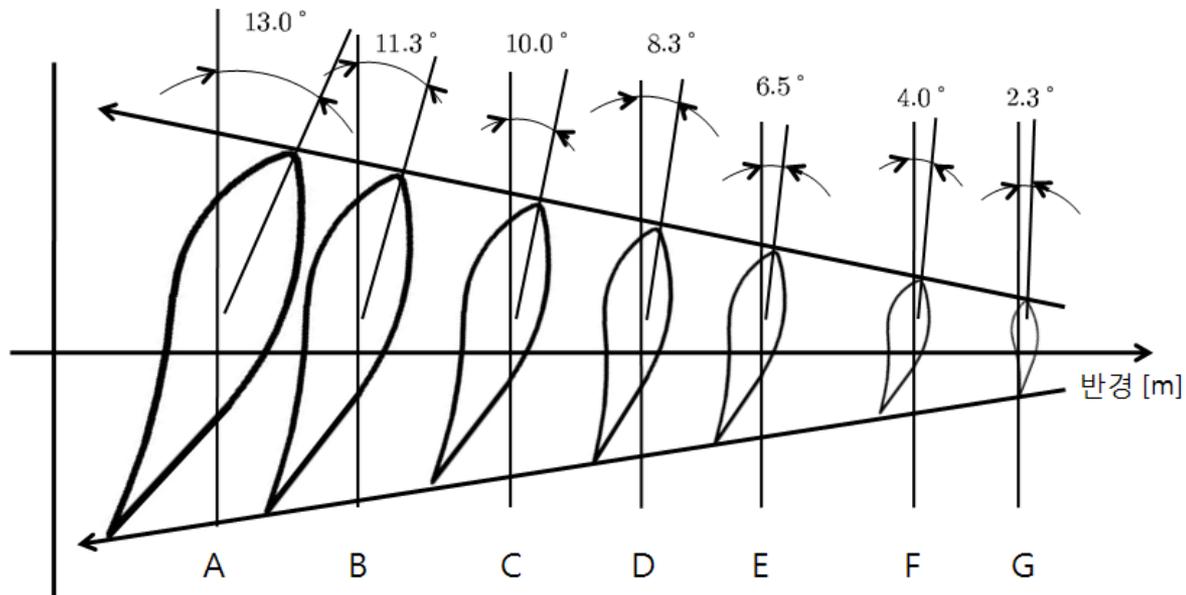
- 따라서, 블레이드 현의 길이와 비틀림의 관계는 앞의 그림과 같이 되고, 허브에 가까이 갈수록 크게 되어, 이대로는 실제로 제작이 어려움.
- 그래서, 풍력터빈의 성능에 가장 기여하는 블레이드 반경방향 75% 근방을 중심으로 선형화를 행함.
- 이렇게 해서 구한 블레이드 각 위치에서의 날개 단면과 비틀림각의 모양을 다음 그림에서 보임.

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서



풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

분할점	A	B	C	D	E	F	G
θ	13.0°	11.3°	10.0°	8.3°	6.5°	4.0°	2.3°
c	0.340	0.320	0.280	0.240	0.210	0.170	0.125



블레이드 각 위치에서의 날개 단면과 비틀림각의 모양

풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

- 3매 블레이드의 전 면적 S 는,

$$S = 3 \times \frac{0.340 + 0.125}{2} \times 1.80 = 1.25[m^2]$$

- 수평면적 A 는

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 12.7m^2$$

- 솔리디티 σ 는

$$\sigma = \frac{S}{A} = 0.09$$

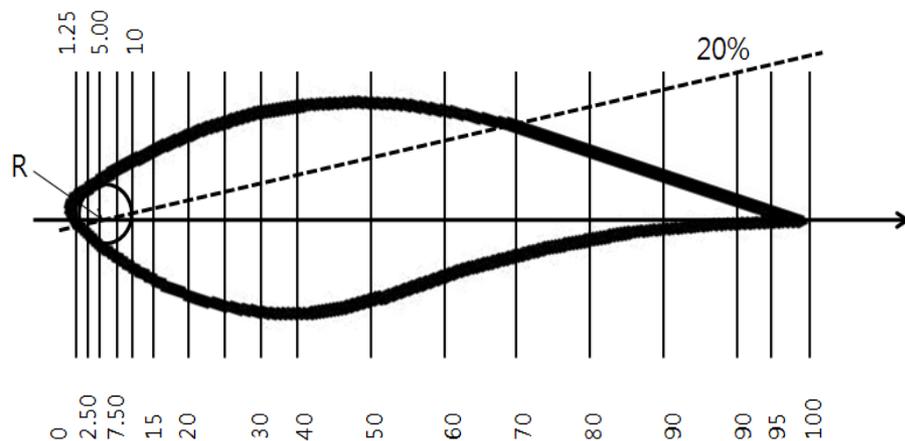
풍력터빈 블레이드 간이 설계 프로세서

NACA4418 단면형상 데이터

분할점	종좌표	
	상측	하측
0.00	...	0.00
1.25	3.76	-2.11
2.50	5.00	-2.99
5.00	6.75	-4.06
7.50	8.06	-4.67
10.00	9.11	-5.06
15.00	10.66	-5.49
20.00	11.72	-5.56
25.00	12.40	-5.49
30.00	12.76	-5.26
40.00	12.70	-4.70
50.00	11.85	-4.02
60.00	10.44	-3.24
70.00	8.55	-2.45
80.00	6.22	-4.67
90.00	3.46	-0.93
95.00	1.89	-0.55
100.00	(0.19)	(-0.19)
100.00	...	0.00

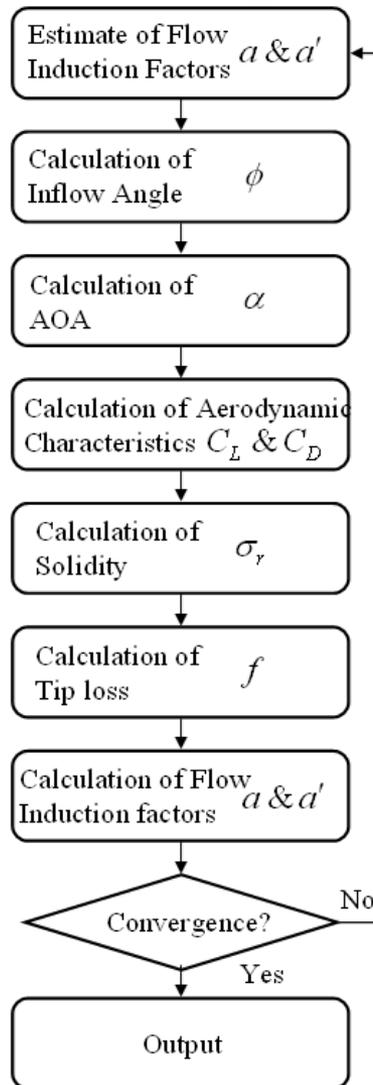
전연반경 : 3.26%C 전연경사각 : 20%

분할점과 종좌표는 날개 현의 길이를 100%로 할 때의 %로서 표시함



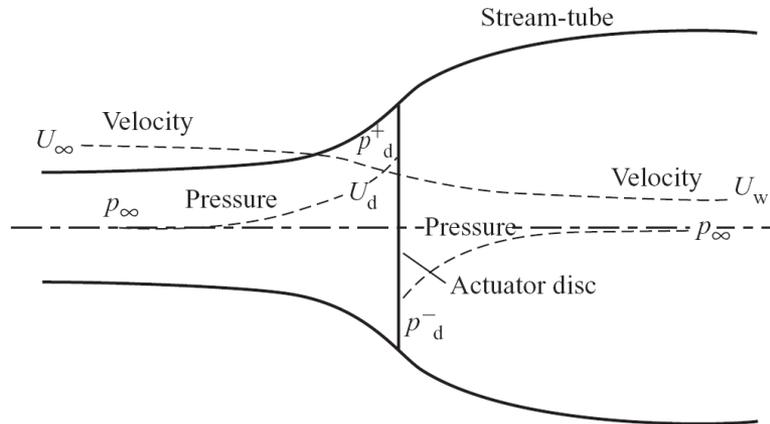
수평축 풍력터빈 블레이드 최적설계

Procedure of Optimum Design

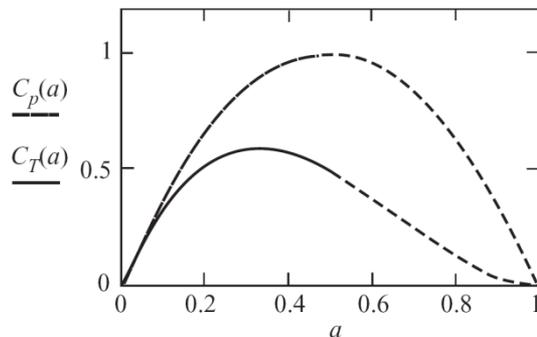


수평축 풍력터빈 블레이드 최적설계

1. Actuator disc theory



An Energy Extracting Actuator Disc and Stream-tube



Variation of C_p and C_T with Axial Induction Factor a

Momentum theory

Rate of change of momentum = $(U_\infty - U_{wake})\rho A_{disk}U_{disk}$

$$U_{disk} = U_\infty - aU_\infty, \quad a : \text{axial flow induction factor}$$

Power coefficient

$$Power = FU_{disk} = 2\rho A_{disk}U_\infty^3 a(1-a)^2$$

$$C_P = \frac{Power}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_{disk}}$$

Betz limit

$$\frac{dC_P}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0, \quad a = 1, 0.333$$

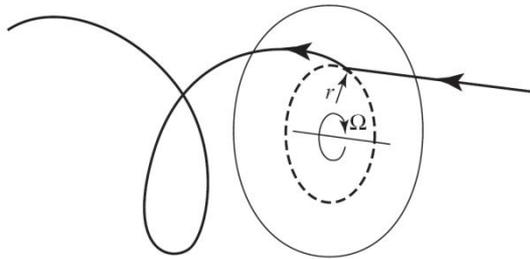
$$C_{P,max} = \frac{16}{27} = 0.593$$

Thrust coefficient

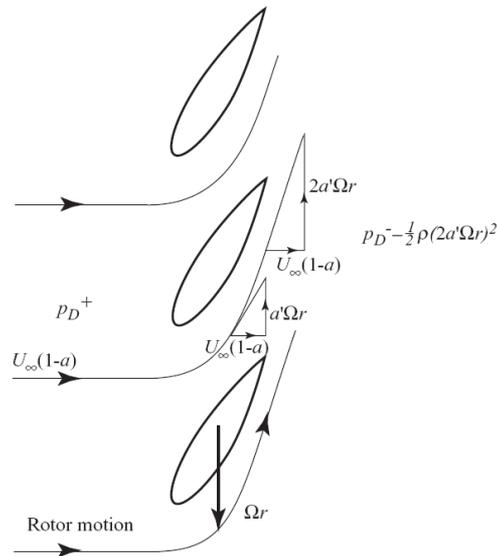
$$C_T = \frac{Power}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_{disk}} \quad C_T = 4a(1-a)$$

수평축 풍력터빈 블레이드 최적설계

2. Rotor disc theory



The Trajectory of an Air Particle Passing Through the Rotor Disc



Tangential Velocity Grows Across the Disc Thickness

Angular momentum theory

Torque = rate of change of angular momentum

= mass flow rate \times change of tangential velocity \times radius

$$\delta Q = \rho \delta A_{disk} U_\infty (1-a) 2\Omega a' r^2, \quad \delta P = \delta Q \Omega$$

$$\frac{2\rho \delta A_{disk} U_\infty^3 a(1-a)^2}{\text{Power from axial thrust}} = \frac{\rho \delta A_{disk} U_\infty (1-a) 2\Omega^2 a' r^2}{\text{Power from torque}}$$

$$\frac{d}{d\mu} C_P = 8(1-a)a'\lambda^2\mu^3, \quad \lambda = \Omega R / U_\infty$$

Maximum power

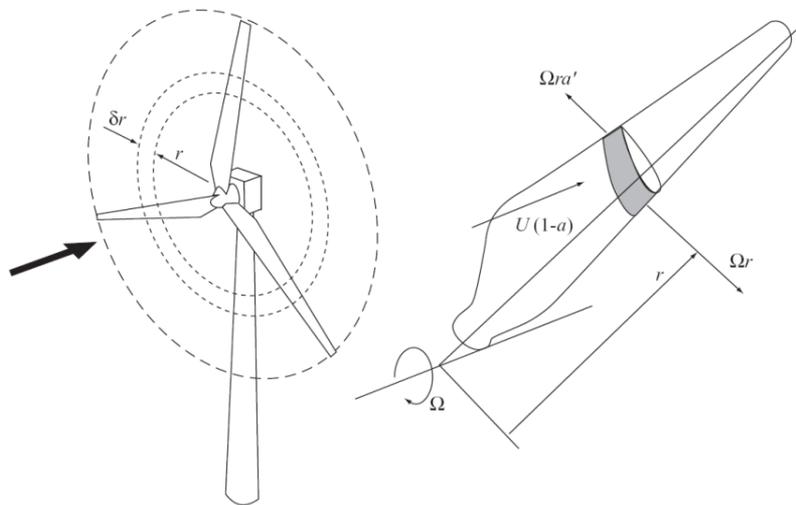
$$a = \frac{1}{3}, \quad a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2}$$

$$C_P = \int_0^1 8(1-a)a'\lambda^2\mu^3 d\mu$$

$$C_P = 4a(1-a)^2 = \frac{16}{27}$$

수평축 풍력터빈 블레이드 최적설계

3. Blade element theory



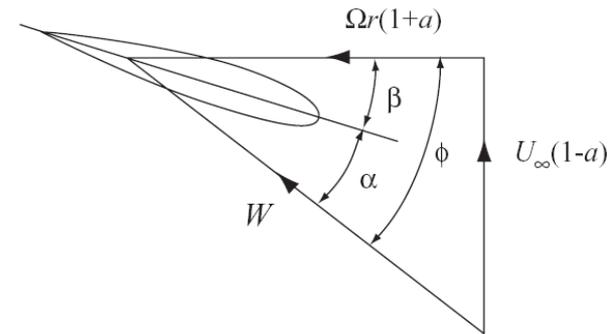
A Blade Element Sweeps Out an Annular Ring

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2}$$

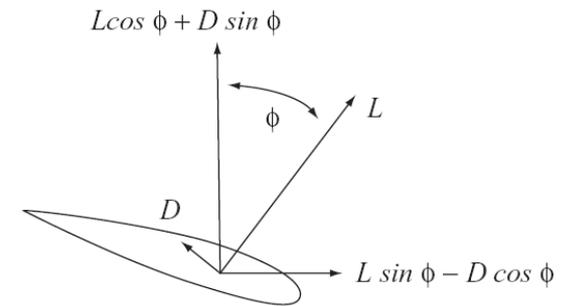
$$\sin \phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{W}, \quad \cos \phi = \frac{\Omega r(1+a')}{W}, \quad \alpha = \phi - \beta$$

$$\delta L = \frac{1}{2} \rho W^2 C C_L \delta r$$

$$\delta D = \frac{1}{2} \rho W^2 C C_D \delta r$$



(a) Velocities



(b) Forces

Blade Element Velocities and Forces

수평축 풍력터빈 블레이드 최적설계

4. Blade element-momentum (BEM) theory

The component of aerodynamic force on N blade elements resolved in the axial direction

$$\delta L \cos \phi + \delta D \sin \phi = \frac{1}{2} \rho W^2 N C (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) \delta r$$

The rate of change of axial momentum of the air passing through the swept annulus

$$\rho U_\infty (1-a) 2\pi r \delta r \times 2a U_\infty = 4\pi \rho u_\infty^2 a(1-a) r \delta r$$

Using the following equations, values for flow induction factors a and a' can be obtained by an iterative process

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} \left[C_x - \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} C_y^2 \right], \quad \frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \phi \cos \phi}$$

$$C_L \cos \phi + C_D \sin \phi = C_x, \quad C_L \sin \phi - C_D \cos \phi = C_y$$

Moreover, blade solidity is defined as total blade area divided by the rotor disc area

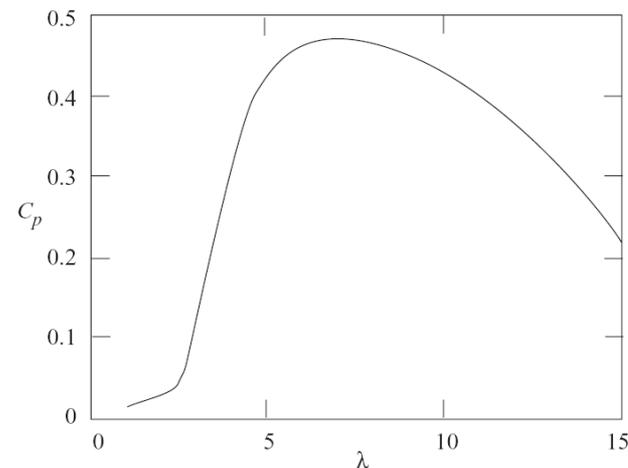
$$\sigma_r = \frac{NC}{2\pi r} = \frac{N}{2\pi} \frac{C}{R}$$

The complete rotor develops a total Torque Q

$$Q = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \pi R^3 \lambda \left(\int_0^R \mu^2 \left(8a'(1-a)\mu - \frac{W}{U_\infty} \frac{N}{\pi} \frac{C}{R} C_D (1+a') \right) d\mu \right)$$

The power coefficient is

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 \pi R^2}$$



Performance curve of power coefficient vs. tip speed ratio

수평축 풍력터빈 블레이드 최적설계

◆ 중·대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

1.1 설계 풍속의 결정

- 풍력발전용 로터 블레이드 설계는 풍력터빈이 설치될 장소에서 다년간의 풍향·풍속 데이터를 통한 신뢰성 있는 정격풍속 (rated wind speed, V_R) 및 설계풍속(design wind speed, V_D)의 결정으로부터 시작.
- 정확한 설계풍속의 결정과 신뢰성 있는 형상설계를 위해서는 설치 입지에서의 다년간 기상 데이터를 바탕으로 한 풍향자원 조사가 필수적으로 선행되어야만 하지만, 국내 실정상 원하는 입지에서 다년간의 풍향·풍속 데이터를 쉽게 확보할 수 없는 실정.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 해상풍력발전 단지의 경우 로터 블레이드의 표면도색 및 코팅작업 공정의 결정을 위해 설치위치에서 공기의 염분함유량에 관한 데이터까지 필요한 경우가 있음.
- 현재까지의 국내 기상관련 측정 데이터로부터 이러한 관련정보를 얻기란 사실상 불가능한 일.
- 설계자료 확보를 위한 풍력터빈의 입지를 해안선 근방으로 가정.
- 정격풍속을 결정하기 위해 국내의 일정 지역에서 12개월 동안 측정된 풍황자원 데이터를 이용하여 풍력터빈 로터 허브 설치 높이에서의 풍속데이터 보정.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 측정된 풍속데이터로부터 Weibull 분포를 적용하여 얻은 지상으로 부터 45m 높이에서의 정격풍속은 10.13m/s.
- 설계된 로터 블레이드는 로터 허브의 높이가 지상으로부터 60m 정도의 위치에 설치된다고 가정.
- 지면으로부터 수직방향으로의 속도구배 영향을 고려하여 허브위치에서의 보정풍속을 결정하면 약 12m/s.
- 형상설계에 적용될 정격풍속은 12m/s로 결정.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 설계풍속은 일반적으로 정격풍속보다 1.3~1.5배 낮은 범위에서 결정되며 이 경우 10m/s.

정격풍속	$V_R = 12\text{m/s}$
설계풍속	$V_D = 10\text{m/s}$
시동풍속	$V_{Cut_in} = 3\text{m/s}$
정지풍속	$V_{Cut_out} = 25\text{m/s}$

설계풍속 계산 결과

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

1.2 로터 블레이드 직경 및 정격 회전수의 결정

- 로터 블레이드 직경의 결정을 위하여 식 (4.1)을 이용.
- 추정동력계수는 0.45, 동력전달계통장치(power train)와 발전기(generator)의 효율은 0.9로 가정.

$$D = \sqrt{\frac{8P_r}{\eta C_p \rho \pi V_D^3}} = 54.5m \quad (4.1)$$

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- η (동력전달 장치 및 발전기의 효율)는 0.9로 가정.
- C_p (출력계수)는 0.45, ρ (공기밀도)는 1.225kg/m^3 의 조건을 가짐.
- 로터 블레이드의 정격 회전수를 결정하기 위하여 식 (4.2)를 적용 하였으며, 설계 TSR은 7.5.

$$N_{rpm} = 60 \left(\frac{V_D}{\pi D} \right) \lambda = 26rpm \quad (4.2)$$

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

1.3 날개 끝 손실계수의 보정

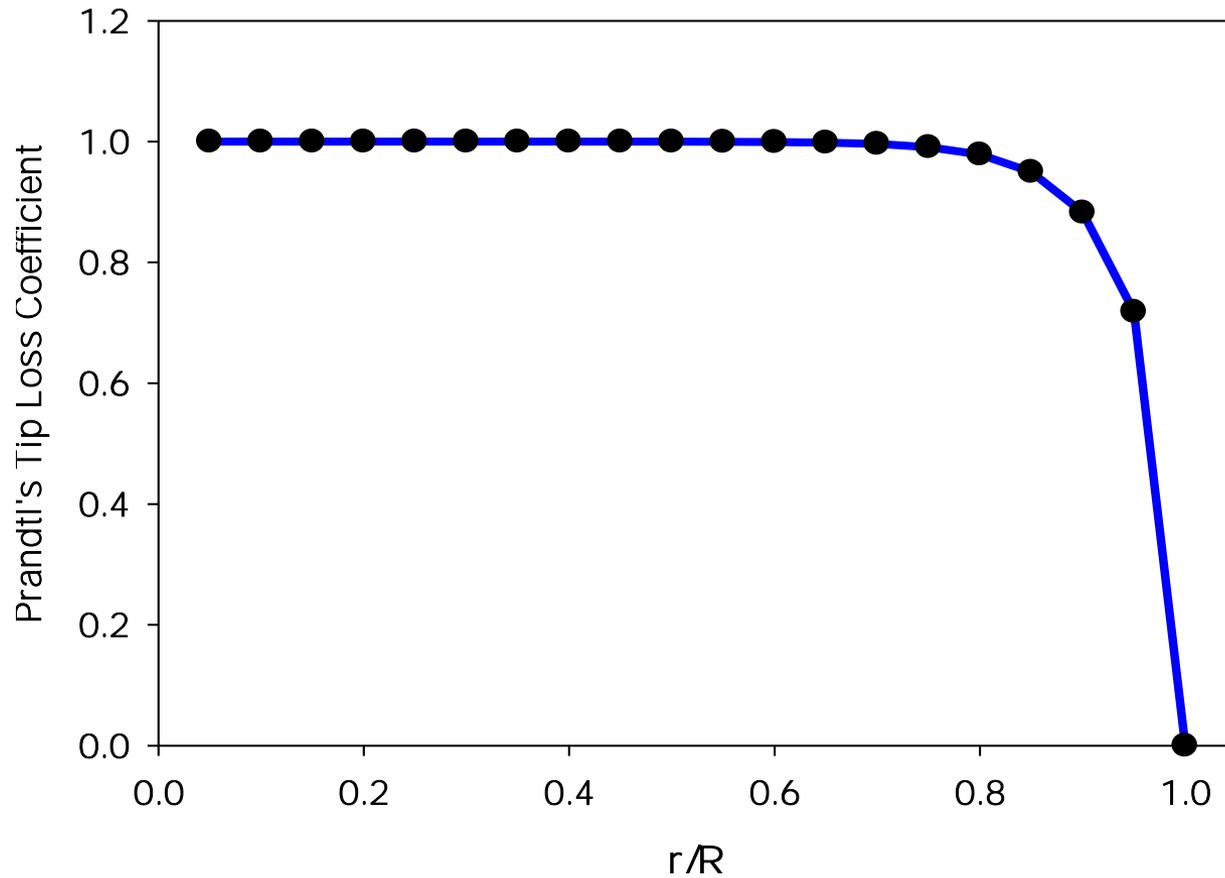
- 회전하는 로터 블레이드는 (tip vortex)의 발생으로 인해 순환(circulation)분포가 감소.
- 이로 인한 날개 끝 손실 (tip loss)이 발생.
- 이를 예측하기 위한 해석적인 방법으로 1919년 에 Ludwig Prandtl이 제안한 식 (4.3)과 같은 날개 끝 손실 예측모델 을 적용.

$$f_{(\mu)} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[e^{-\left[\left(\frac{N}{2} \right) (1-\mu) / \mu \right] \sqrt{1 + (\lambda\mu)^2 / (1-a)^2}} \right] \quad (4.3)$$

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- μ 는 허브로부터 팁까지 블레이드 국부 위치를 무차원화 한 변수.
- 0.05(hub)부터 1(tip)까지 등 간격으로 0.05씩 증가 하도록 설정.
- 로터 블레이드는 허브부터 팁까지 모두 20 요소로 구획.
- 식 (4.3)에서 사용되는 축 흐름 유도계수는 초기설계단계부터 BEMT에 의한 반복계산을 통해 결정하기가 불가능.
- 공기역학적 항력에 의한 손실이 없고 블레이드 날개 수가 무한하다는 가정.
- 유도되는 운동량 이론에서 풍력터빈이 이론적 최대효율을 얻을 수 있는 경우의 축 흐름 유도계수 a 를 설계에 반영.
- 이 값은 Betz의 이론으로부터 유도되는 이상적인 값과 동일.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계



Prandtl's tip loss coefficient $f(\mu)$

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

1.4 새로운 흐름 유도계수들의 결정

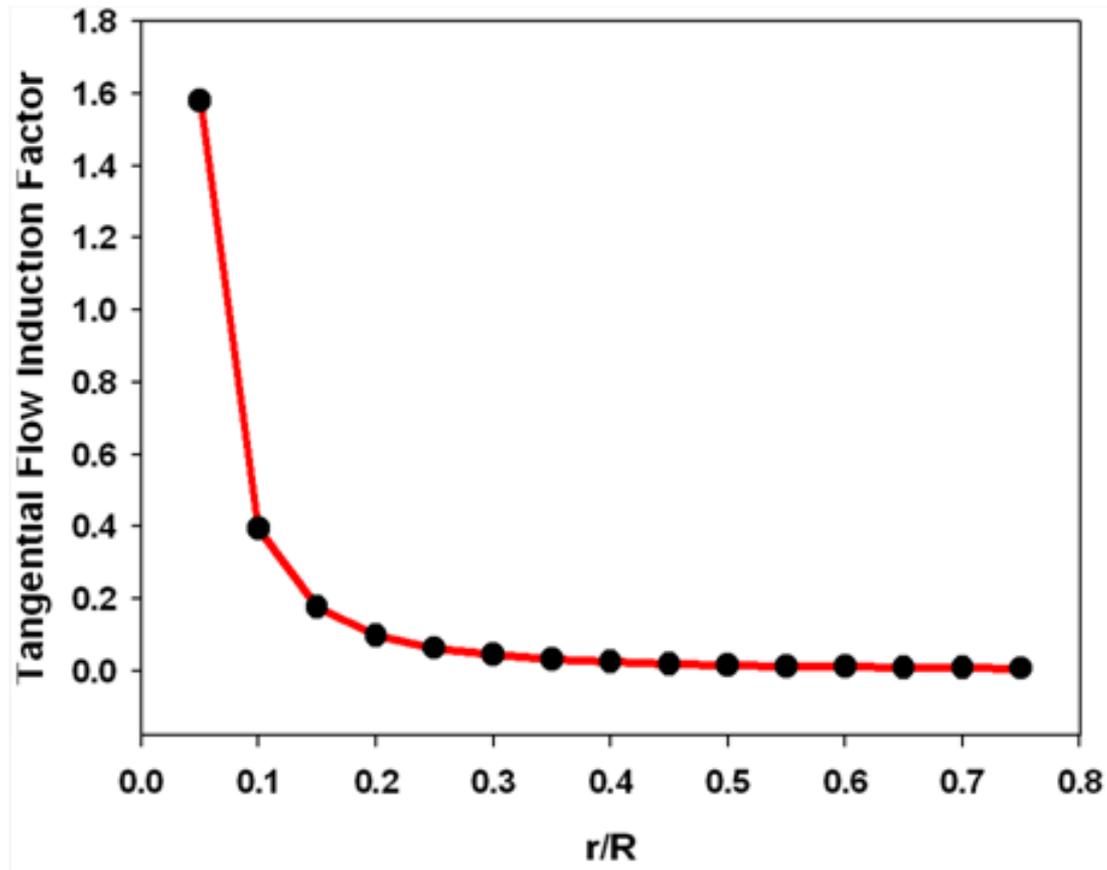
- 블레이드 국부 위치 변화에 따른 날개 끝 손실을 예측하기 위해 사용된 식 (4.3)의 변수 a 는 운동량이론으로부터 구할 수 있는 이론적 최대값.
- 날개 끝 손실의 발생은 블레이드 국부위치에서의 축 흐름 유도계수 변화를 초래.
- 이를 반영한 축 흐름 유도계수와 회전 흐름유도계수를 계산하기 위하여 BEMT로부터 유도된 식에서 항력 항을 무시.
- 식 (4.3)의 날개 끝 손실 계수를 적용하면 식 (4.4)와 같이 표현.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

$$a = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}f - \frac{1}{3}\sqrt{1-f+f^2}, \quad a' = \frac{a(1-\frac{a}{f})}{\lambda^2 \mu^2} \quad (4.4)$$

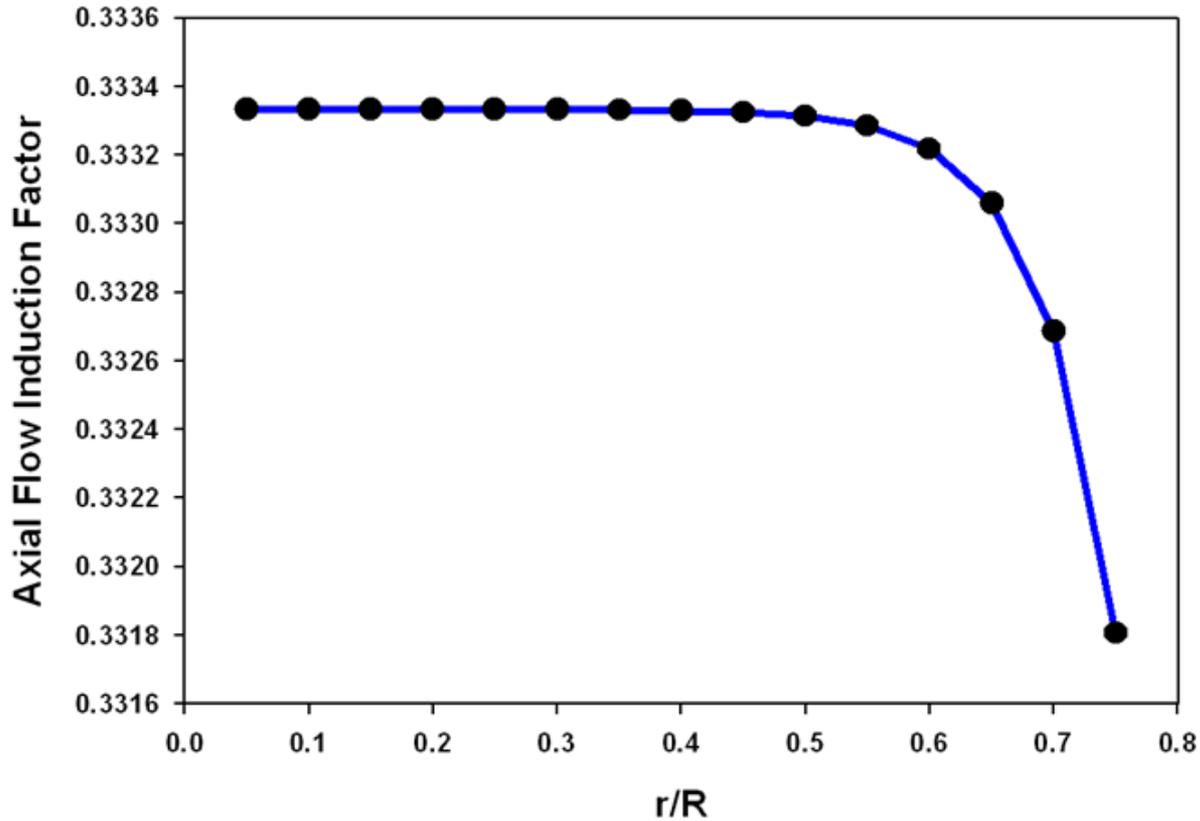
- 식 (4.4)를 이용하여 블레이드 곡부위치 변화에 따른 축 흐름 유도계수 및 회전 흐름 유도계수를 다시 계산하면, 그림 4.2(a), 그림 4.2 (b)와 같음.
- 설계 TSR이 30이상인 경우 식 (4.4)를 이용하여 비교적 정확한 결과를 예측 할 수 있다고 알려져 있음.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계



Tangential flow induction factor

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계



Axial flow induction factor

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

1.5 무차원 현의 길이 결정

- 반경방향 국부위치에서 무차원 현의 길이를 각각 결정하기 위해서는 우선 블레이드 날개 끝 부분에 사용될 익형의 선정이 필요.
- 선정된 날개 끝 익형의 공력특성 데이터를 확보하고 익형의 최대 양항비를 나타내는 받음각에서의 양력계수, 축 흐름유도 계수, 회전 흐름유도계수, 블레이드 개수, 설계 TSR 등을 이용.
- 식 (4.5)를 통해 국부 위치에서의 무차원 현의 길이를 각각 계산.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

$$\frac{C}{R} = \frac{2\pi}{N\lambda C_l} \times \frac{4\lambda\mu^2 a'}{\sqrt{(1-a)^2 + [\lambda\mu(1+a')]^2}} \quad (4.5)$$

- 사용된 날개 끝 익형은 NACA 63(2)-415이며 최대 양항비를 나타내는 지점에서의 양력계수와 항력계수 값들을 표 4.2 에 나타내었음.

RE	α	C_L	C_D	$C_{L/D}$
3,000,000	3.5°	0.7704	0.00568	135.6338

Aerodynamic characteristics - NACA 63(2)-415, X-FOIL

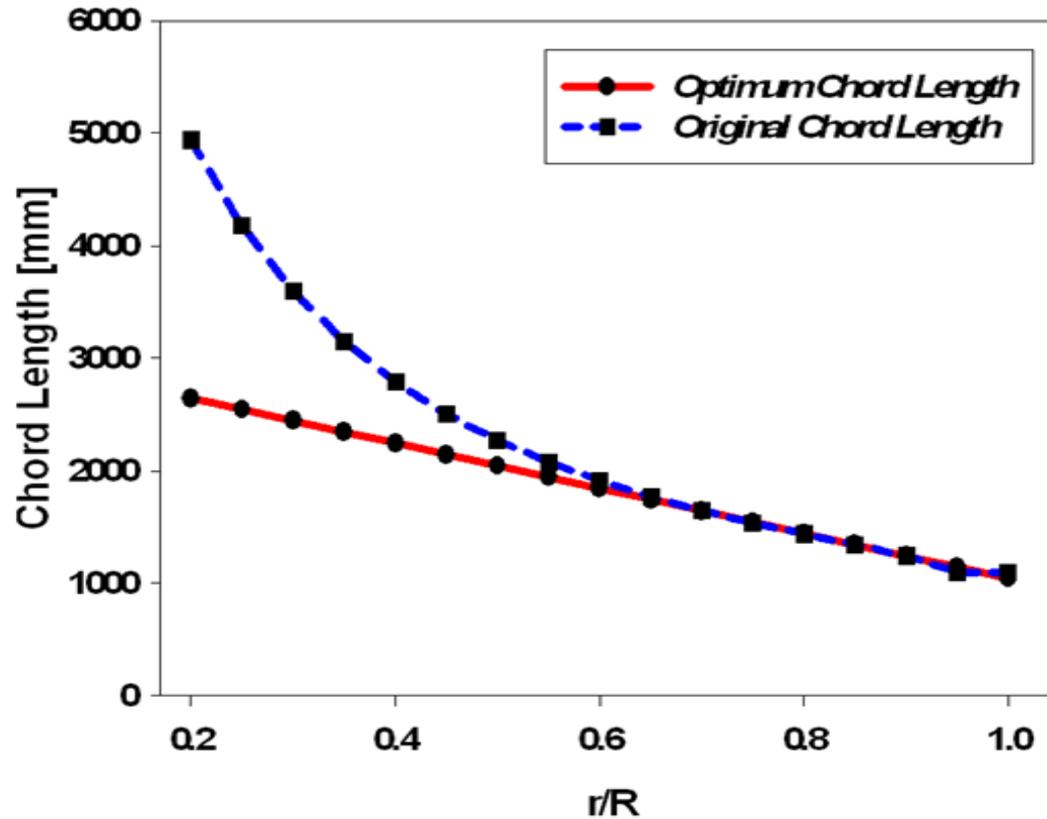
중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 식 (4.5)에 의해 계산된 현의 길이분포는 블레이드 허브 부분으로 갈수록 급격히 증가하는 특징을 나타내고 있으나,
- 로터 블레이드 성능을 크게 좌우하는 영역은 허브로부터 70% 위치에서 블레이드 팁 까지, 약 30% 정도의 영역에 지나지 않음.
- 이 영역에 대한 정확한 형상 설계 데이터의 반영만 이루어지면 됨.
- 허브로부터 30% 까지의 영역은 성능을 고려한 설계법 보다는 구조적으로 안정된 블레이드 지지를 위한 설계방법을 고려하여야 하는 부분.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 우수한 성능을 확보하기 위한 설계적 관점을 고려.
- 실제로는 식(4.5)로부터 얻은 현의 길이분포를 정확하게 반영한 블레이드를 제작하는 것이 이상적.
- 블레이드 제작 용이성 및 제작비용 절감을 위해 성능에 큰 영향을 미치는 영역인 허브로부터 70% ~ 90% 사이의 영역을 기준으로 1차 방정식에 의한 선형 근사화를 통해 전체 블레이드 국부위치에서의 현의 길이 분포를 재구성.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계



Distributions of chord length at each section

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

1.6 입구유입 유동각 및 비틀림 각의 설정

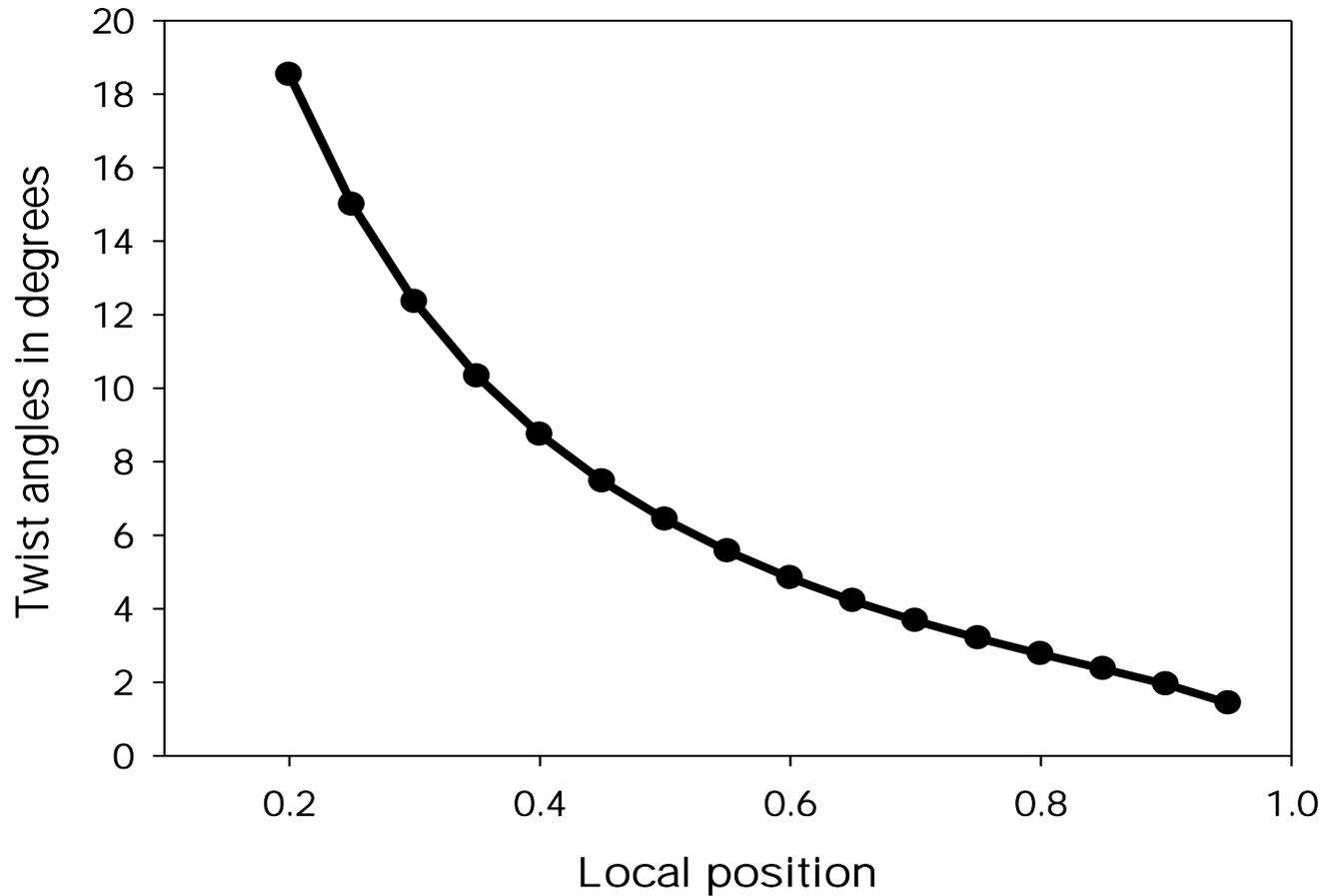
- 입구유입 유동각(inflow angle) ϕ 는 식 (4.6)을 통해 결정될 수 있으며 비틀림 각 (twist angle)의 계산에 사용.

$$\tan \phi = \frac{1 - a}{\lambda \mu (1 + a')} \quad (4.6)$$

- 비틀림 각은 앞서 계산된 ϕ 와 α 의 관계를 통해 식 (4.7)에 의해 간단히 계산.

$$\theta = \phi - \alpha \quad (4.7)$$

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계



Twist angle distribution

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 최종 블레이드 형상은 식 (4.8), 식 (4.9)에 의해 결정.
- 이 수식 들은 항력에 대한 영향과 날개 끝 손실의 영향을 고려한 BEMT 모델로부터 유도된 수식.

$$\frac{af}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} \left(C_x - \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} C_y^2 \right) \frac{1-a}{1-af} \quad (4.8)$$

$$\frac{a'f}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \phi \cos \phi} \frac{1-a}{1-af} \quad (4.9)$$

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

1.7 로터 블레이드 익형 선정 조건

- 풍력터빈 로터 블레이드용 익형의 설계는 우수한 성능을 가지는 풍력터빈의 연속적인 개발을 위해 필수적인 분야.
- Fuglsang과 Madsen은 익형의 최적설계 관련 연구에서 적절한 공력성능을 가진 익형은 에너지 생산단가 저감에 중요한 역할을 한다고 발표.
- 오늘날 풍력터빈 블레이드 설계에 사용되는 익형의 종류는, 고전적인 비행기 날개 익형으로 사용되는 NACA 시리즈와 효율적인 에너지 추출을 위해 풍력터빈용으로 설계된 다수의 전문 익형 시리즈로 구분.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 풍력터빈 익형은 설계점과 탈설계점에서의 공력성능, 구조적 특징 등의 부분에서 항공기용 익형과 구분.
- 풍력터빈용 익형의 개발에 대한 연구는 1980년대 중반부터 시작되어 현재까지 활발히 진행되고 있음.
- Tangler, Somers, Bjork, Timmer, van Rooy, Hill, Garrad, Chaviatopiulos 등과 같은 연구자들에 의해 많은 연구결과들이 발표.
- 현재까지 대다수의 풍력터빈용 익형은 역설계기법을 이용하여 개발이 진행되어 왔음.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 익형에 관한 수많은 설계법은 Henne과 Dulik-ravich의 연구 결과에 자세히 언급.
- 원리적으로 가장 이상적인 풍력발전용 익형의 공력성능은 설계되는 로터 블레이드의 운전조건에 따라 가변적.
- 다수의 풍력발전용 터빈 설계시에 일반적으로 다음과 같은 특성이 요구.
- 최대 출력을 발생하기 위한 조건으로 블레이드 외부(outer part)에 적용되는 익형의 양항비가 우수해야 함.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 출력제어 방식으로 피치 제어 방식이나, 능동 실속제어를 사용하는 경우, 블레이드 외부영역에 적용되는 익형의 양항비는 설계 운전조건에서 가장 높은 값을 갖도록 설계되어야만 .
- 실속 제어형 출력제어 방법을 적용하는 경우 양항비는 전체 터빈의 작동 범위에 걸쳐 높은 값을 유지하도록 설계되어야만 함.
- 받음각의 변화가 최대 양력계수를 발생하게 하는 범위 이하로 결정되어야 한다는 의미.
- 로터 블레이드의 내부영역(in-board part)에서는 양항비가 외부영역에 비해 크게 중요 하지는 않음.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 블레이드가 차지하는 면적을 줄이기 위한 목적으로 최대 양력계수가 높은 익형의 선정이 필요.
- 풍력터빈 설계시 블레이드를 구성하는 익형의 양력계수가 가장 높은 조건에서 운전되도록 최적 운전 설계점의 신중한 결정이 필요.
- 보통 광범위한 운전영역을 가지는 풍력터빈 로터 블레이드는 받음각의 변화 폭이 크기 때문에, 탈설계점에서 우수한 공력특성을 확보하는 것 또한 중요.
- 만약, 익형의 전연으로부터 박리가 진행된다면 급격한 실속현상이 초래.
- 실속유도진동(stall induced vibration) 등의 주된 원인이 됨.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 이에 따른 위험을 최소화하기 위한 목적으로, 실속 제어형 풍력터빈의 경우, 최대 양력이 발생하는 시점으로부터 발생하는 흐름의 박리현상이 후연으로부터 서서히 진행되도록 설계되어야 함.
- 깊은 실속영역에서 양력곡선의 변화가 급격히 발생하지 않는 익형의 사용이 터빈 안정성 확보에 도움이 됨.
- 자연적인 운전조건에서 벌레와 오염물질들이 로터 블레이드 전연에 부착되면, 익형 전연부의 미소한 형상 및 표면 거칠기 변화가 발생.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 공력특성 감소에 의한 운전효율이 저감되기도 함.
- 블레이드 전연의 표면 거칠기는 층류에서 난류로 확장되는 천이영역의 발생시점을 앞당기게 되고 경계층 두께의 급격한 확장을 초래.
- 최대양력의 감소와 익형 표면 마찰계수의 증가는, 결론적으로 에너지 생산량의 감소로 이어지기 때문.
- 실속형 출력제어방식을 채용한 터빈의 경우 표면 마찰계수의 변화에 따른 최대 양력계수의 변화 폭이 크지 않은 익형을 주의 깊게 선정 할 필요가 있음.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 풍력터빈 블레이드의 허브근방 영역에 배치되는 익형은 제한된 블레이드 재질의 무게와 팁에서 발생하는 처짐 및 비틀림 변위를 충분히 견딜 수 있을 정도의 강성을 확보할 수 있어야 함.
- 이러한 강성을 확보하기 위해 보통 양항비와 같은 공력특성을 희생하고 익형의 최대 두께를 증가시킬 수 있는 두꺼운 익형 시리즈를 채택.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 일반적으로 풍력발전용 터빈 블레이드를 구성하는 익형은 높은 양항비를 가지는 두꺼운 형상.
- 전연부의 표면 거칠기에 상관 없이 높은 최대 양력계수를 유지 할 수 있을 것
- 모든 운전 영역에 걸쳐 높은 양항비를 유지할 수 있을 것
- 실속 후 급격한 공력특성의 저하현상을 보이지 않을 것 등의 요구조건을 만족해야 함.
- 이러한 모든 조건을 충족시키는 익형을 설계하기란 여간 까다로운 일이 아닐 수 없음.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

1.8 2차원 익형 공력특성의 예측

- 정확한 로터 블레이드 형상설계 및 성능예측을 위해서는 로터 블레이드를 구성하는 익형의 신뢰성 있는 공력특성 데이터의 확보가 필수적.
- 수많은 종류의 익형에 대한 신뢰성 있는 실험 공력특성 데이터의 확보는 현실적으로 거의 불가능 한 실정.
- 신속한 피드백(feed back)에 의한 효율적인 설계의 진행을 위해 설계자는 다양한 익형의 공력특성 데이터를 쉽게 확보 할 수 있어야 함.

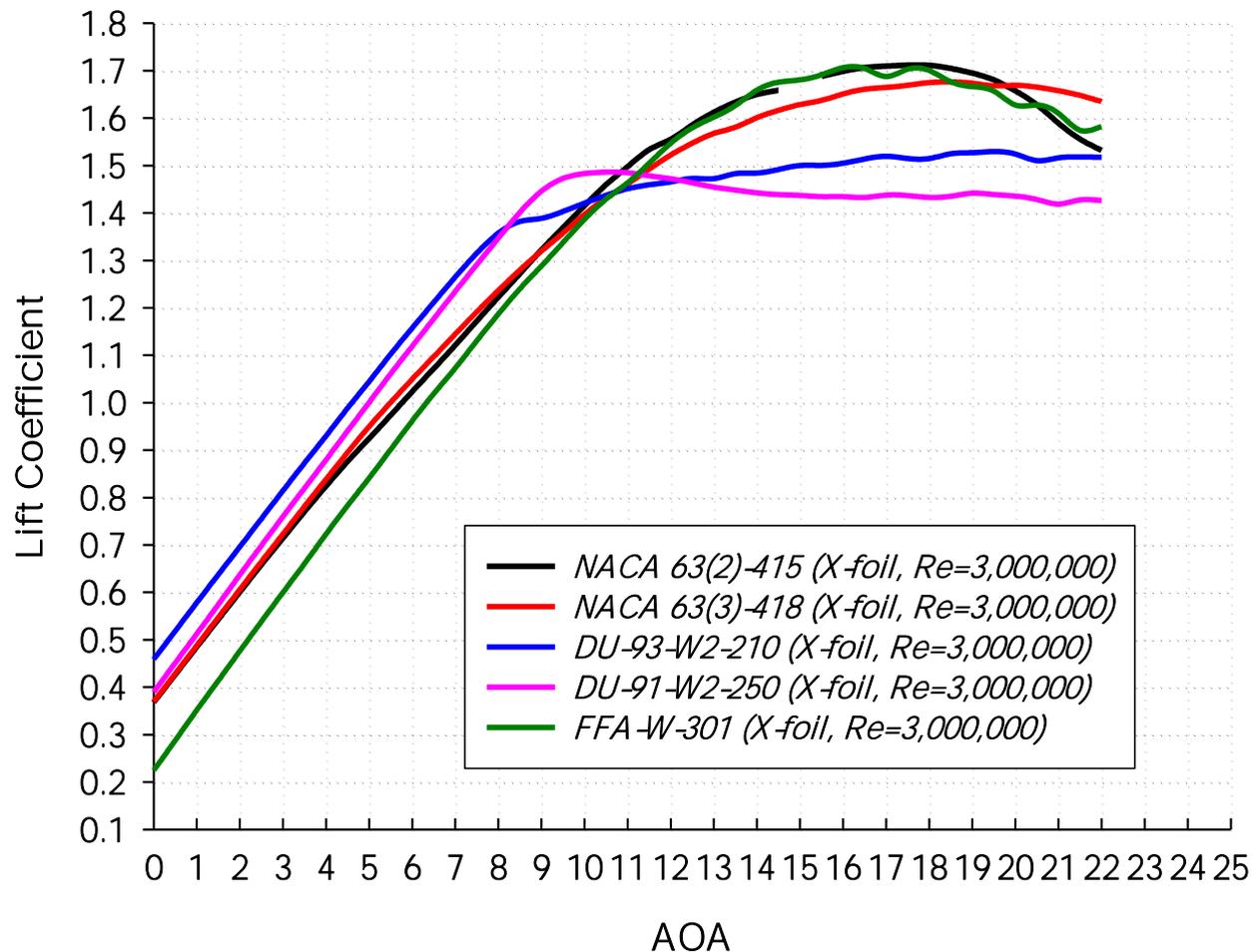
중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 풍력 선진국가에서는 일반적으로 X-Foil(MIT Aero&Astro)과 같은 수치해석 소프트웨어를 이용하여 2차원 익형 공력특성데이터를 확보하고 있음.
- 최근 들어 전산해석 기법의 발달에 힘입어 CFD 기법을 활용한 사례들도 활발히 보고되고 있음.
- X-Foil은 2차원 panel method를 기본으로 하고, CFD에 비해 상당히 신속한 해석이 가능.
- 실속영역 이전의 받음각 변화에 대해서 비교적 신뢰성 있는 공력특성데이터의 확보에 상당한 도움이 됨.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 사용된 익형의 종류는 날개 끝단으로부터 NACA 63(2)-415, NACA 63(2)-418, DU 93W2-210, DU 91W2-250, FFAW-301.
- 보통 풍력발전용 익형은 날개 끝부분에서 30% 위치까지 NACA 5, 6자리계열 익형을 사용.
- 그 이하의 영역에서는 구조적 안정성, 높은 받음각, 익형 표면 거칠기 등의 변화를 적절히 고려.
- 공력 특성의 변화가 급격히 발생하지 않는 두꺼운 익형 시리즈를 주로 사용.
- 일반적으로 팁에서 허브부분으로 갈수록 익형 두께가 두꺼워 지는 형태의 프로파일 공력특성데이터의 분석을 통해 적절히 선정하는 것이 중요.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

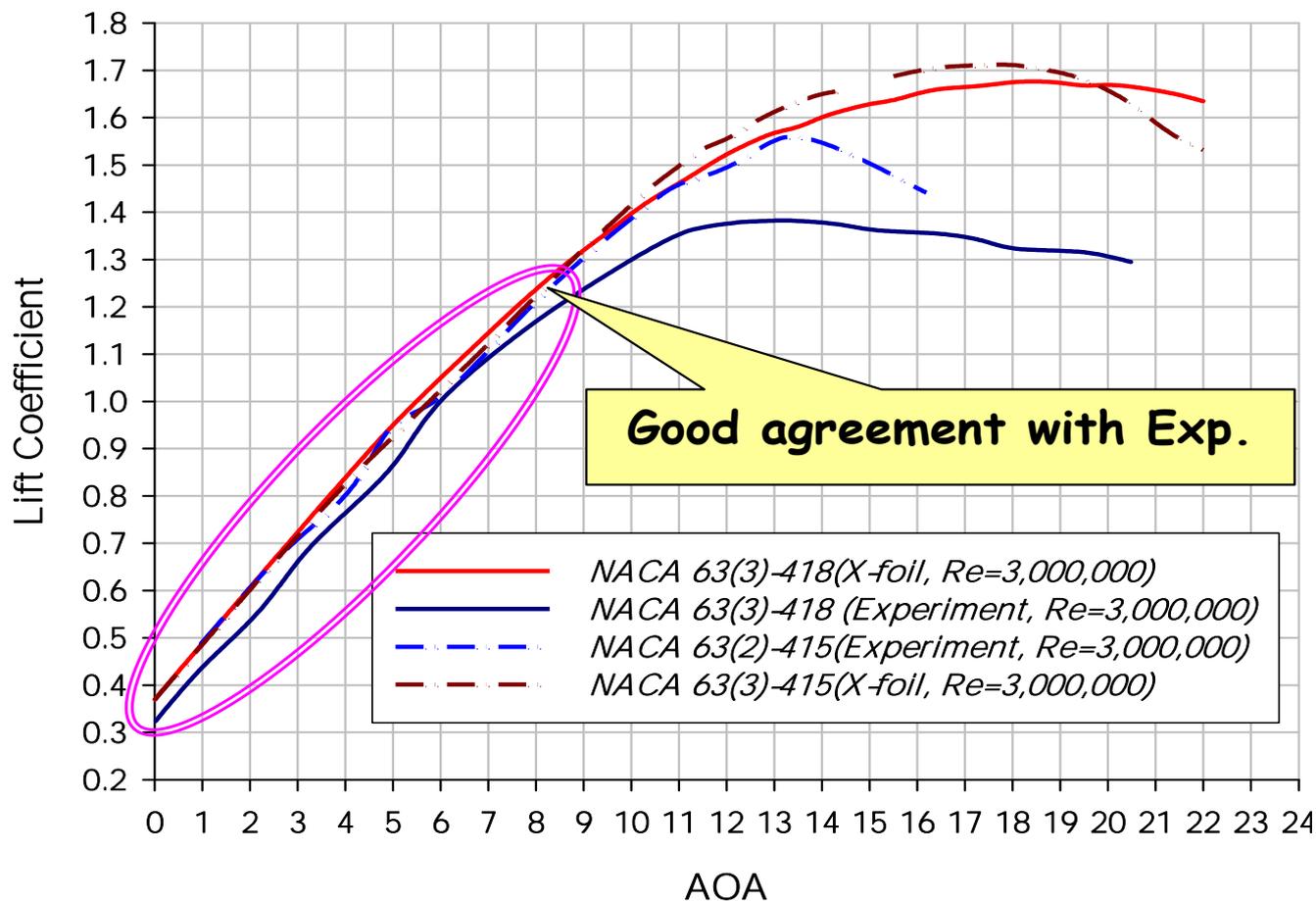


Estimation of the lift coefficients for several airfoils by X-Foil

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 그림 에 나타낸 양력계수 분포는 모두 X-Foil에 의해 계산된 데이터이며, 실속 이후 특정 받음각 범위에서 실험데이터와 비교할 때 다소 오차가 발생.
- 일반적으로 실험데이터와 수치해석 데이터의 오차범위는 익형의 표면 경계층 박리지점 및 천이 영역의 부정확한 예측에 의한 수치해석 기법상의 특징에 의해 발생.
- 이로 인해 수치해석 데이터는 실속현상이 지연되는 특징을 나타냄에 따라, 실속 영역 이후의 공력 특성 데이터들은 실험데이터와 비교했을 때 비교적 정확하지 못한 값을 예측하는 것이 일반적.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계



Comparison of lift coefficients calculated by X-FOIL with experiments

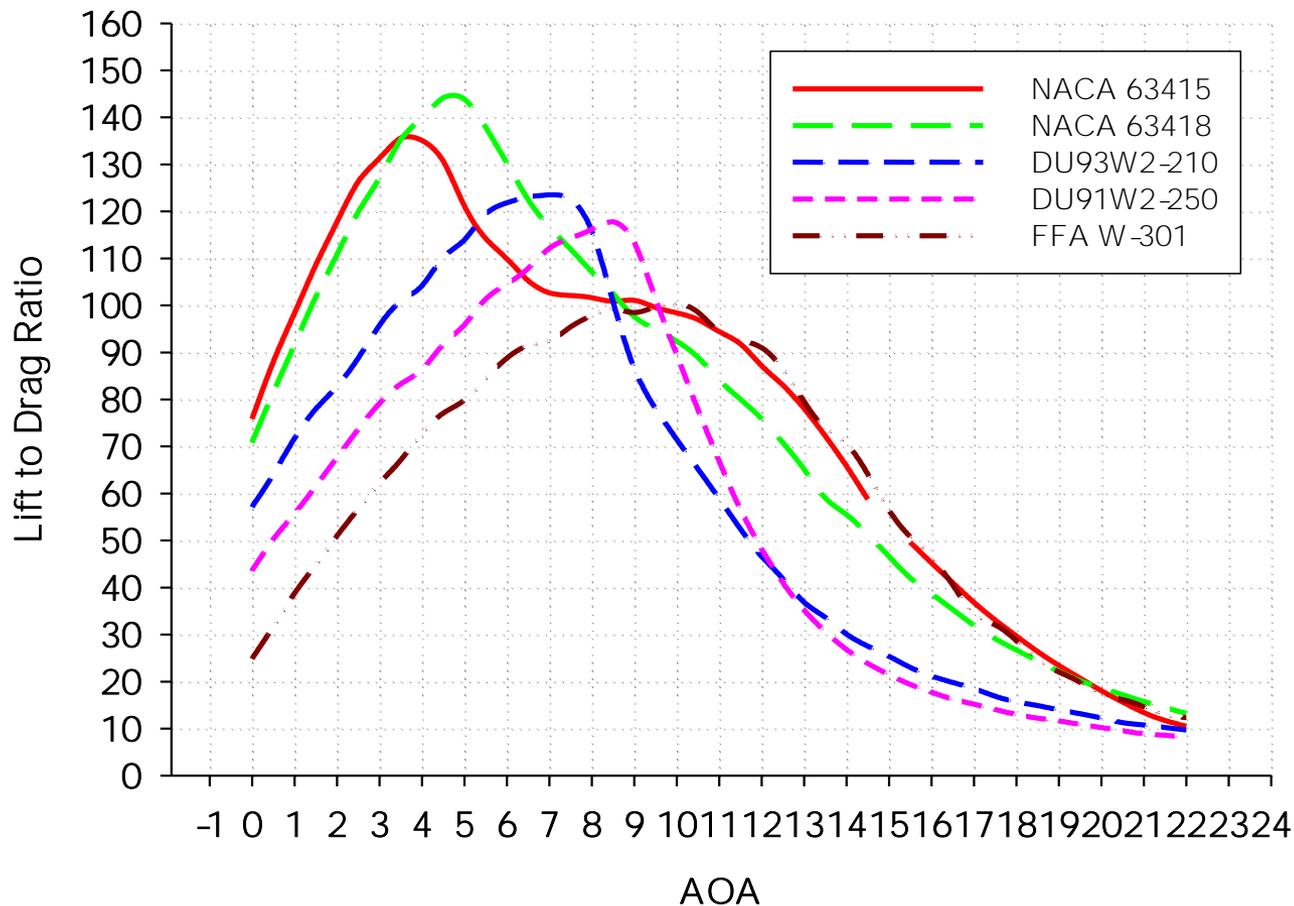
중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 두 결과가 실속 전 해당 받음각 영역 내에서 상당히 잘 일치하고 있음.
- 로터 블레이드 설계 및 성능해석 과정에서 X-Foil에 의한 수치해석 데이터를 사용하여도 충분한 신뢰성을 확보할 수 있을 것이라 사료.
- 이를 통해 신속하게 다양한 익형의 공력특성 데이터를 확보할 수 있고 설계자는 상당히 효율 적으로 설계를 진행할 수 있음.
- 보통 익형의 양력계수 값이 상승한다고 하더라도 양력계수의 증가분 보다 항력계수의 증가분이 더 크다면 양력과 항력의 비로 나타내어지는 익형의 양항비는 양력 계수가 상승함에도 불구하고 오히려 감소하는 경우가 발생.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 정확한 익형의 공력성능을 예측하기 위해서는 블레이드 국부 위치에서의 익형 공력특성을 양항비로 나타낼 필요성이 있음.
- 블레이드 성능에 큰 영향을 미치는 허브로부터 70% ~ 100%까지 범위 내의 양항비는 반드시 100 이상 에서 결정될 수 있도록 하는 점이 우수한 출력성능 확보를 위해 중요.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계



Comparison of lift to drag ratios, calculated by X-Foil

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 각각의 블레이드 국부 위치에서의 양항비는 FFA 익형을 제외하고 설정 받음 각의 범위 내에서 모두 100을 넘는 값을 가짐.
- FFA 익형의 양항비가 100을 넘지 못하는 이유는 블레이드의 공력 성능에 기여하는 영역에 적용될 익형이 아니라, 블레이드와 허브의 구조적인 연결부분의 지지 익형으로 적용되기 때문에 양항비가 다른 익형들에 비해 다소 낮은 경향을 나타냄.
- 지지 익형인 FFA의 양항비가 거의 100에 근접.
- 날개 끝 70% ~ 100% 범위에서 익형의 양항비는 거의 140에 육박하는 수치를 나타내고 있음.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

- 이러한 조합의 익형을 사용하면 전체적으로 상당히 우수한 성능을 가지는 이상적인 블레이드 설계가 가능 할 것이라 사료.
- 상기 기술한 BEMT 모델의 적용에 의해 최종적으로 설계된 3차원 로터 블레이드 형상을 바탕으로 가시적 이해를 돕기 위해 너셀, 타워, 스피너(spinner), 허브 등의 구조적 요소를 포함하는 1MW 풍력터빈 전체 시스템 3차원 모델링을 수행.

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계

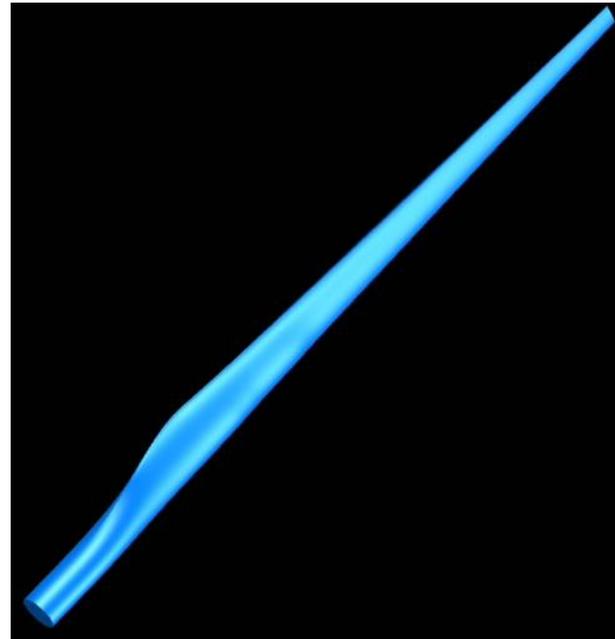
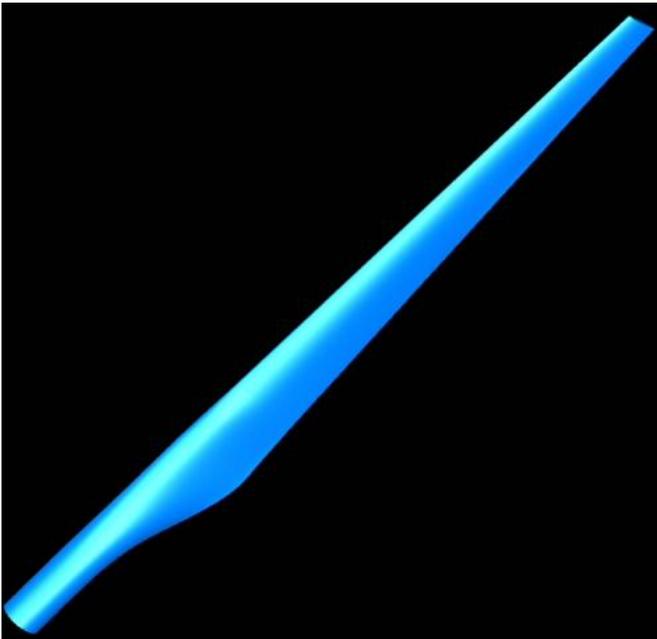
ROOT ●

Local Position	Twist(deg)	Position(mm)	Chord (mm)	Airfoil series
0.20	17.9	5450	2629.25	FFA-W-301
0.25	14.4	6812	2524.09	FFA-W-301
0.30	11.7	8175	2418.94	FFA-W-301
0.35	9.73	9537	2313.79	FFA-W-301
0.40	8.14	10900	2208.63	DU91-W2-250
0.45	6.87	12262	2103.48	DU91-W2-250
0.50	5.83	13625	1998.32	DU93-W2-210
0.55	4.97	14987.5	1893.17	DU93-W2-210
0.60	4.24	16350.0	1788.01	DU93-W2-210
0.65	3.62	17712.5	1682.86	DU93-W2-210
0.70	3.08	19075.0	1577.71	NACA63(2)-418
0.75	2.60	20437.5	1472.55	NACA63(2)-418
0.80	2.17	21800.0	1367.4	NACA63(2)-418
0.85	1.77	23162.5	1262.24	NACA63(2)-418
0.90	1.35	24525.0	1157.09	NACA63(2)-415
0.95	0.83	25887.5	1051.93	NACA63(2)-415
1.00	0.83	27250.0	946.78	NACA63(2)-415

TIP ●

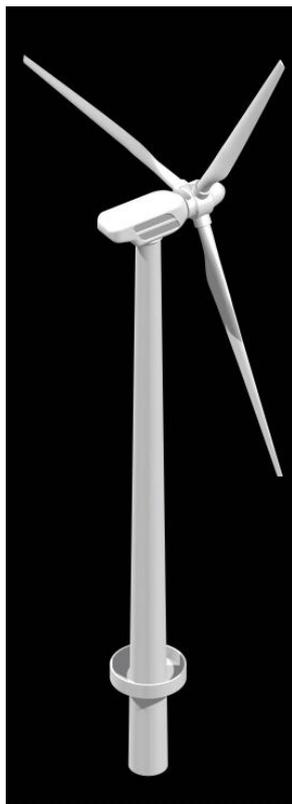
Summarization of 1MW HAWT design parameters

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계



Isometric view of 3D rotor model

중 · 대형(1MW) 로터 블레이드 최적설계



Full 3D FIL-1000 wind turbine system modeling

감사합니다 !

