

풍력발전 기술의 현황과 동향 ②

본 내용은 2002년 9월9일부터 12일까지 대전 소재 한국에너지기술연구원이 개최하고 독일의 풍력연구소(DEWI)가 주관한 “풍력기술 강습회”의 기술적 내용을 전력기술인들이 접할 수 있도록 하기 위하여 연재합니다.

- 에너지 대안 선택 감사 기우봉 기술사 -



목 차

- I. 개요
- II. 풍력터빈 기술
- III. 풍력터빈의 공기유체역학
- IV. 풍력터빈에 대한 표준과 추천 및 각종 하중과 그에 따른 손상
- V. 풍력자원 입지 선정
- VI. 해양풍력단지 현황기
- VII. 전기계통 및 풍력 발전설비의 전력품질
- VIII. 풍력과 디젤발전기의 혼합시스템

2. 풍력터빈의 공기유체역학

(1) 바람이 보유하는 운동에너지(Kinetic Energy)와 파워(Power)

Wind Turbine Techniques 2

Power in the wind

Kinetic energy of a moving mass m with the velocity v

$$E = \frac{m}{2} v^2 \quad [E]: \text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{Nm} = \text{Joule} = \text{J}$$

The power P derives from the energy per time $\dot{E} = \frac{dE}{dt}$

$$P = \dot{E} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m}{2} v^2 \right) \quad [P]: \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = \text{Watt} = \text{W}$$

Using the mass flow

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad [\dot{m}]: \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

with ρ as the air density in kg/m^3 and A as a control area

$$P = \frac{\rho}{2} A v^3$$

For standard meteorological conditions (at temperature 15°C and at pressure 1013 hPa) the air density is 1.225 kg/m³

© Deutscher Windenergie-Verband GmbH

(2) 풍력터빈에 의한 파워의 도출 (그림 III-6)

Wind Turbine Techniques 2

Power in the wind

Kinetic energy of a moving mass m with the velocity v

$$E = \frac{m}{2} v^2 \quad [E]: \text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{Nm} = \text{Joule} = \text{J}$$

The power P derives from the energy per time $\dot{E} = \frac{dE}{dt}$

$$P = \dot{E} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m}{2} v^2 \right) \quad [P]: \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = \text{Watt} = \text{W}$$

Using the mass flow

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad [\dot{m}]: \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

with ρ as the air density in kg/m^3 and A as a control area

$$P = \frac{\rho}{2} A v^3$$

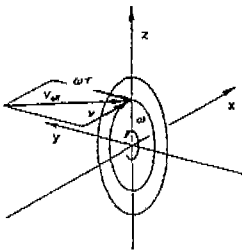
For standard meteorological conditions (at temperature 15°C and at pressure 1013 hPa) the air density is 1.225 kg/m³

© Deutscher Windenergie-Verband GmbH

위의 (그림 III-6) 에서 풍력터빈 회전날개 쪽으로 흘러 드는 공기의 기류가 와류를 일으키지 않고 정류로 흘러 들어온다고 가정했을 때, 터빈이 에너지를 얻을 수 있는 것은 터빈의 앞쪽 바람이 가지고 있는 에너지와 터빈을 통과한 바람의 에너지가 차이가 나기 때문이라 할 수 있다.

전항 (그림 III-3-1)의 마지막 식에서 바람의 밀도가 ρ 이고 풍속이 v m/s인 바람이 가지고 있는 파워는 $p = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$ 이라는 것을 알았다. 터빈을 통과한 풍속이 0이라면 터빈이 이 식에 표시되는 파워를 전량 흡수하겠지만 실제로는 터빈을 통과한 풍속이 상당히 남아 있으므로, 터빈이 흡수할 최대 이론적 파워는 바람이 갖고 있는 파워의 59.3%밖에 되지 않는다. 여기다가 기계효율 등을 감안하면 실제 우리가 활용할 수 있는 파워는 45% 정도 밖에 되지 않는다. 이상을 고려하여 실제로 얻을 수 있는 파워를 산출하기 위하여 출력계수 (cp)라는 상수를 사용하며 이는 풍력터빈의 총합 효율이라고도 할 수 있다. 식으로 나타내면 $cp = P / (1/2 \cdot (\rho \cdot A \cdot v^3))$ 로 표시 할 수 있다. 여기서 P는 터빈의 출력을 말한다.

(3) 회전자 날개에서 본 풍속 (그림 III-7)



회전자 날개가 정지해 있을 때라면 날개에 부딪히는 풍속은 불어오는 바람 자체의 풍속이 영향을 주겠지만 터빈이 운전중일 때는 날개가 빠른 속도로 회전하기 때문에 회전방향에서 바람이 불어오는 것과 같은 효과를 가져오게 되어 날개에 작용하는 풍속을 말할 때는 터빈 정면에서 불어오는 실제 바람의 풍속과 날개가 회전함으로서 날개가 받는 원주상 회

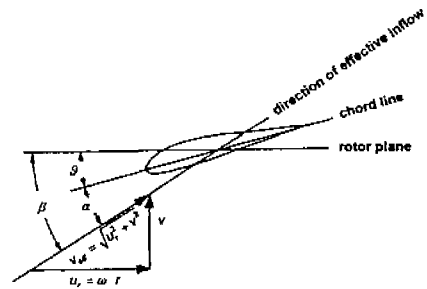
전풍속의 벡터적인 합계가 실제로 날개에 작용하는 풍속이라 할 수 있다. 이를 실효 풍속 (Veff)라 한다. 실효풍속의 벡터 적인 합은 (그림 III - 7)에서 알 수 있으며 실효풍속의 크기는 $V_{eff} = (U_r^2 + V^2)^{1/2}$ (즉 실 풍속과 원주풍속의 각각을 제곱하여 합계하고 그 합계의 제곱근이 된다는 말이 된다)로 나타낼 수 있다. U_r 는 원주속도로 ωR 이며 ω 는 회전자의 각속도이고 R는 회전체의 반지름을 말한다. 날개에 가해지는 역학적인 해석을 할 때는 이 실효 풍속이 중요하다.

(4) 팁-속도비 (Tip-Speed Ratio)

팁-속도비 (Tip-Speed Ratio)란 날개의 원주속도를 바람의 풍속으로 나눈 비율을 말하며 다음 식으로 표시된다.

$$\lambda = \omega R / V_1$$

(5) 뒤틀림각(Twist Angle), 흐름각(Flow Angle), 및 공격각(Angle of Attack) (그림 III-8)



- 1) Twist Angle (뒤틀림각도) - β
터빈 회전면과 날개의 Chord(코드)선과의 각도를 말한다.
- 2) Flow Angle (흐름각도) - β
터빈 회전면과 실효풍속 방향과의 각도를 말한다.
- 3) Angle of Attack (공격각도) - α
터빈 날개의 Chod선과 실효풍속과의 각도를 말한다.

(6) 터빈 날개에 가해지는 각종 힘의 분석

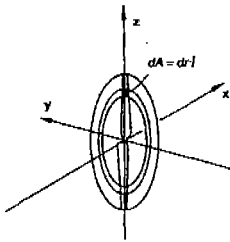
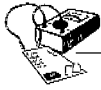


그림 III-9

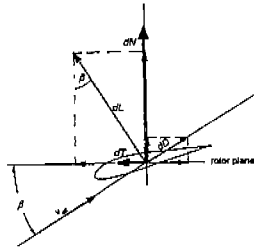


그림 III-10

1) 양력 (Lift Force)

양력은 실효 풍속과 직각 방향으로 나타나며 그 크기는 다음 식으로 나타낼 수 있다. (그림 III-9 및 그림 III-10 참조)

양력 L 은

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{eff}^2 \cdot dA \cdot C_l$$

2) 항력 (Drag Force)

항력은 실효 풍속과 평행 방향으로 나타나며 그 크기는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

항력 D 는

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{eff}^2 \cdot dA \cdot C_d$$

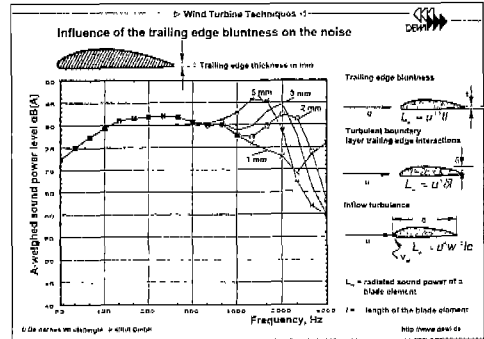
(7) 최적 날개 폭 (Chord Length)

계산에 의하면 날개의 최적 폭은 다음 식으로 표시된다. 날개의 폭을 l 이라 하면 $l = 16/9 \cdot (\pi / z \cdot c_l) \cdot (V_1^2 / r \cdot \omega^2)$ 로 나타낼 수 있다. 이 식에서 보면 반경 r 이 클수록 그리고 회전 수 ω 가 클수록 날개 폭이 좁아지는 것을 알 수 있다.

3. 공기유체역학에 영향을 주는 사항

- 날개의 회전 앞쪽 부분의 거칠기와 부식에 의한 영향
- 별래나 곤충이 부딪쳐서 부착했을 때
- 비가 올 때
- 얼음이 얼었을 때
- 제조 결함

4. 날개 후미 두께가 소음에 끼치는 영향 (그림 III-11)



날개 뒤 끝이 얇으면 소음이 적다는 것을 알 수 있다.

5. 컨트롤 방식과 터빈 회전 수에 따른 출력곡선

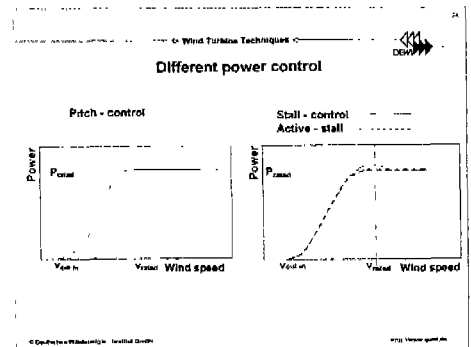


그림 III-12

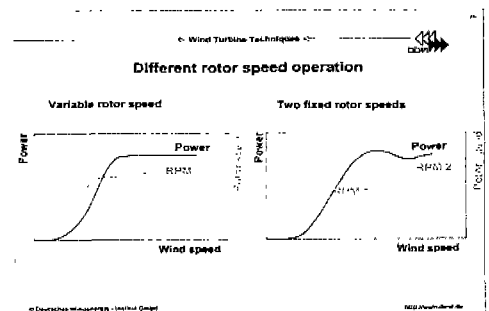


그림 III-13

6. 스톱 컨트롤과 피치 컨트롤

풍력터빈에게 요구되는 것은 바람이 가지고 있는 에너지를 유효하게 전력으로 변환시키는 것이 가장 중요하다. 그러나 바람이라는 것

은 인위적으로 조종할 수 있는 것이 아니다. 상시에도 변덕이 심할 뿐 아니라 폭풍이 불 때면 견잡을 수 없는 횡포를 부린다는 것은 우리가 잘 알고 있다. 이러한 폭풍에도 터빈과 모든 시스템이 안전하게 견뎌내어야 하고, 전력계통에 연결되어 있을 때는 회전수가 제 멋대로 상승할 수는 없지만 발전기에 과부하를 가져오거나 지지 구조물에 과도한 힘을 주어 이를 손상하게 해서도 안되며, 그리고 전력계통에서 해열(Cut-Off) 되었을 때 위험한 속도까지 상승하지 못하도록 하여야 한다.

(1) 피치컨트롤 (Pitch Control)

피치컨트롤은 운전 중에 날개의 각도를 회전시켜 가장 효율적인 운전을 할 수 있을 뿐 아니라 필요에 따라 출력을 조정할 수 있고 고풍속 또는 이상 풍속 시 쉽게 정지시킬 수도 있다. 날개의 설계 시에도 최대한의 효율을 낼 수 있도록 설계할 수 있게 해준다. 다만 대형기체인 풍력터빈에 가동부분이 있어 취약점이 될 수 있고 무엇보다 얼마간의 투자비 증가가 불가피하며 소형일수록 경제적인 부담이된다. 최근 대형기에서는 피치컨트롤의 추가비용이 차지하는 비율이 크지않고 효율적인 설계와 운전이 가능하고, 비상시 대비능력이 우수한 점을 고려하여 최근의 대형기는 거의 이 방식을 채용하는 경향이다.

(2) 스톨컨트롤 (Stall Control)

스톨컨트롤 터빈은 효율성을 희생하더라도 날개의 설계를 정격부하 근처의 풍속 이상에서는 추가 출력이 나오지 않게 설계한 풍력터빈이다. 스톨컨트롤 터빈은 가격이 저렴하고 날개에 운전중의 가동부가 없어 고장율을 줄일 수 있는 등의 장점이 있으나 이상풍속이나 폭풍 시 대비에 한계가 있다. 터빈 설계에서 출력을 최대한으로 유지하도록 정격출력 근처에서 약간의 오버스윙을 허용하도록 설계한다.

(3) 능동 스톨컨트롤 (Active Stall Control)

이상의 스톨컨트롤의 단점을 보완하고 피치컨트롤의 이점도 어느 정도 살릴 수 있게 능동 스톨컨트롤 방식을 증대형기에 채용하고 있다. 이것은 최대부하시 및 위급시에 연속적이 아니지만 출력을 조정하거나 비상시 정지가 가능하게 하고 폭풍 시에 안전을 도모할 수 있도록 하는 컨트롤 방식이다.

8. 풍력터빈 날개의 형상 (그림 III-14)

터빈의 날개는 각 부하 특히 정격출력 근처에서 최고 효율을 내면서 그 이상으로는 출력이 증가하지 않도록 배려하며 기기 및 시설을 보호할 수 있도록 날개가 뒤틀리도록 설계 제작된다. (그림 III-14, III-3-(5), III-3-(7)항 참조) 따라서 날개형상은 날개 뿌리에 가까울수록 뒤틀림 각이 크고 멀어질수록 뒤틀림 각이 작아지며, 날개 뿌리에 가까울수록 날개 폭이 크고 멀어질수록 날개 폭이 작아진다.

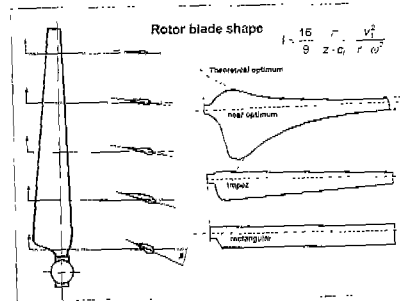
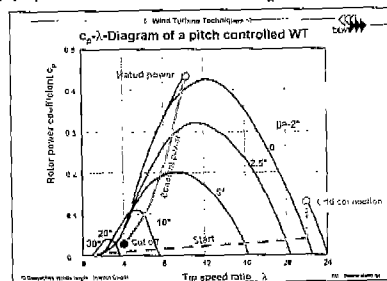


그림 III-15

9. 팁풍속비와 출력계수의 관계선도

(1) 피치컨트롤 풍력터빈의 $C_p-\lambda$ 선도



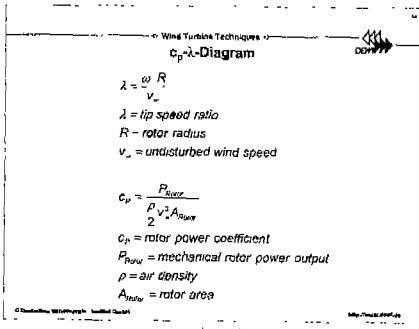
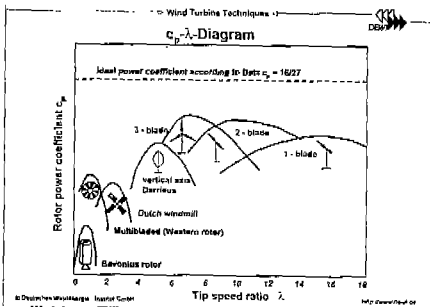


그림 III-16

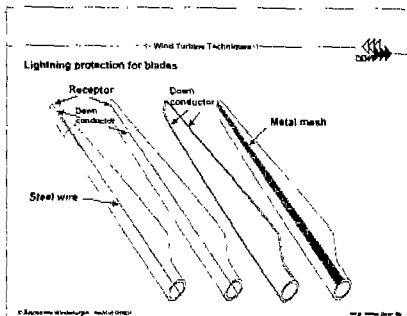
(2) 터빈 형식에 따른 Cp-λ 선도



IV. 풍력터빈에 대한 표준과 추천 및 각종 하중과 그에 따른 손상

국제표준 및 추천과 풍력터빈에 대한 수명과 직결되는 각종 부위의 피로열화 등은 설계자나 깊이 연구하는데 필요한 사항이며 비 전문가로서는 이해도 어렵고 필요하지도 않는 것 같아 간단히 몇 개사항만 열거하기로 한다.

1. 날개의 피뢰대책 (그림 III-17)



2. IEC-풍력터빈 등급

Basic parameters for IEC - WTGS classes

WTGS class	I	II	III	IV	V
V_{ref} (m/s)	4.4	4.5	4.5	5.0	5.5
V_{ref} (m/s)	17	2.2	2.5	3.0	3.5
λ_{ref}	7.11	6.16	6.16	6.16	6.16
λ_{ref}	3	3	3	3	3
λ_{ref}	1.11	0.16	0.16	0.16	0.16
λ_{ref}	3	3	3	3	3

where:
 V_{ref} the virtual supply of hub height, and
 V_{ref} reference wind speed measured over 10 min,
 V_{ref} annual average wind speed at 10 m height,
 V_{ref} wind speed at hub height averaged over 10 min,
 λ_{ref} the category for light turbulence or microturbulence,
 λ_{ref} the category for heavy turbulence characteristics,
 λ_{ref} the characteristic value of the turbulence intensity at 10 m,
 λ_{ref} the slope parameter to be used for $\lambda_{ref} > 3.5$ and $\lambda_{ref} > 10$

V. 풍력자원과 입지 선정

1. 고도에 따른 풍속 분포(그림 V-1)

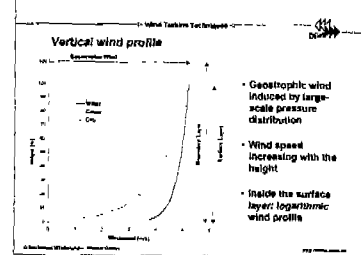
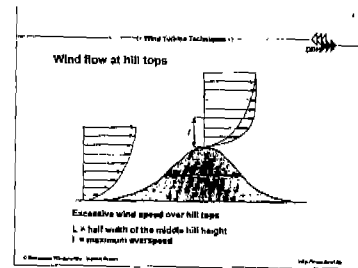
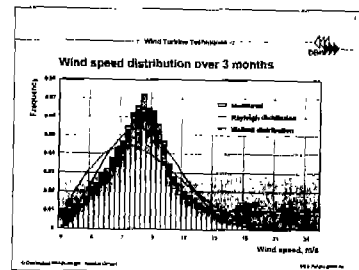


그림 V-1

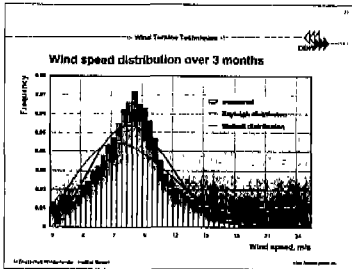
2. 풍속에 대한 장애물의 영향



3. 풍속 실측치와 시험식에 의한 예측 분포도



4. 풍력터빈의 에너지 회수 (도표 V-1)



5. 풍속과 출력과의 관계

풍력터빈이 바람으로부터 얻어지는 출력은 출력식에 의하여 풍속의 3제곱에 비례하게 됨으로 아래 표와 같이 풍속의 변화에 비하여 출력의 변화는 막대함을 알 수 있다.

풍속의 증가(5m/s 기준)	출력의 증가	비고
10%	20%	
20%	45%	

6. 풍력자원과 입지

풍력단지의 입지선정에 있어서는 다음과 같은 사항을 고려하여야한다.

- 풍력잠재력
- 주요 기초시설 (도로, 송전선/변전소 등)
- 국토의 유효한 이용
- 자연보호
- 녹지등

7. 풍력단지의 터빈 배치와 출력감쇠율

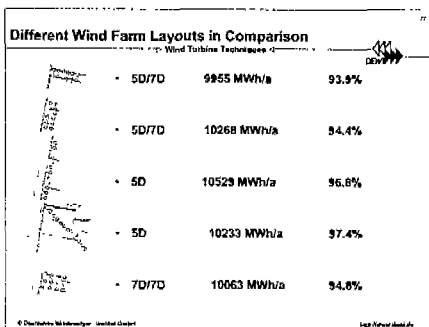


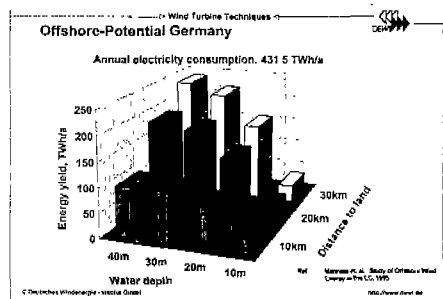
그림 V-2

VI. 해양풍력단지 현황

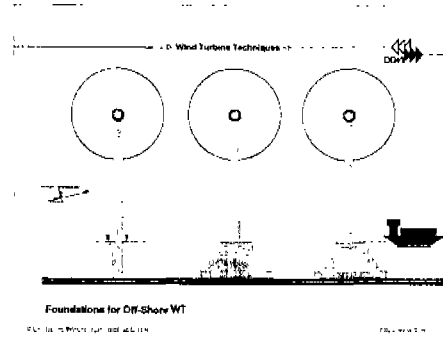
1. 유럽에서의 해상풍력단지 현황

Location	Year	Turbine Count	Capacity
Norgersund	SE 1990	1 x 200kW	0.2MW
Vindeby	DK 1991	11 x Bonus 450kW	5MW
Lely	NL 1994	4 x NedWind 550kW	2MW
Tuns Knob	DK 1995	10 x Vestas 500kW	5MW
Bockstigen	SE 1998	5 x 550kW	2.8MW
Blyth	GB 2000	2 x Vestas 2MW	4MW
Middelgrunden	DK 2000	20 x Bonus 2MW	40MW
Utgrunden	SE 2000	7 x Enron 1.5MW	10.5MW

2. 독일의 해상풍력자원 추정



3. 해상풍력터빈의 기초



다음호에 계속됩니다

인간의 진정한 재산은 그가 이세상에서 행하는 선행인 것이다.

-마호메트(이슬람교의 개조(開祖), 571~632)-