

# 동해안지역에 적합한 風力發電시스템에 관한 조사

오철수\* · 강창수\*\* · 권순홍\*

(\*경북대 전기공학과 · \*\*동 대학교 기계공학과)

## 1. 서 론

현재 우리나라 發電의 에너지원별로 분류하면 원자력, 기름과 가스, 석탄, 수력등인데 국내자원으로 충당되는 부분은 석탄의 일부와 수력이며 이는 발전량기준으로 볼 때 전체의 7%에 해당될 뿐이며, 전기에너지의 해외 의존도는 지극히 높다. 따라서 대체에너지 개발문제는 오늘에 처한 우리 모두의 지상과제라 느껴지고, 특히 우리나라와 같은 에너지 자원이 빈약한 곳 일수록 그 절감도는 크리라 생각된다.

우리나라의 전기에너지원의 다변화는 타 선진국에 비해서 월등히 뒤지고 있으며, 이는 기존의 화석연료(석유, 석탄), 수력과 원자력에다 공해가 없는 태양열, 풍력, 조력, 지열에너지로 확장하는 것을 의미한다.

우리나라는 3면이 바다로 접해 있는 半島로서 해안지방의 海風을 이용하는 길이 풍력에너지 이용의 첩경이고, 경북지역의 해안의 풍향조건을 조사하여 이에 적합한 풍력발전시스템을 설계하는 것이 바람직한 일로 여겨진다.

전 세계적으로 볼 때 풍력에너지 개발에 많은 자금을 쏟아 일부 국가에서는 특히 단위 용량이 수 MW 급에 이르는 대용량 발전기에 박차를 가하고 있다. 현재 세계 최대 용량은 Canada의 Eole기가

Darrieus Type 4MW 급으로 1986에 건설되어 상업 운전에 들어가 있으며 1MW 이상급이 1985년 현재로 11대가 있으며 미국이 7대, 스웨덴이 2대, 덴마크, 독일이 1대씩 가지고 있다[5~7].

위의 사례들을 살펴보고 알 수 있는 것은 단위 용량이 점차 대형화되어 기존의 화력, 원자력과 경쟁력을 찾는 길로 나아가고 있으며, 또한 송전계통에 연결시켜 전력생산에 본격 이바지하고 있는 현실이다.

## 2. 동해안지역의 풍력자원 조사

일반적으로 지표에서의 풍향의 수직으로 받는 단위면적에서의 풍력에너지밀도는 풍속에 따라 다음과 같이 나타난다[7].

표 1. 풍속에 따른 에너지밀도

풍속(m/s)	에너지밀도(W/m <sup>2</sup> )	년간전기량(kWh)
4	100	876
5	150	1,314
6	250	2,190
7	400	3,504
8	600	5,256
9	920	8,059

표 2. 각종 풍차형식의 최대효율

이상적 풍력터빈	0.59
High Speed Propeller	0.45
Darrius	0.35
Savonius	0.30
Windmill	0.15

표 3. 각 지역의 기상적 조건

	북 위	동 경	표 고
장기갑	36° 04'	129° 34'	10m
울릉	37° 29'	130° 54'	221m
울진	36° 59'	129° 25'	46m
포항	36° 23'	129° 23'	6m
울산	35° 33'	129° 19'	32m
부산	35° 06'	129° 02'	69m

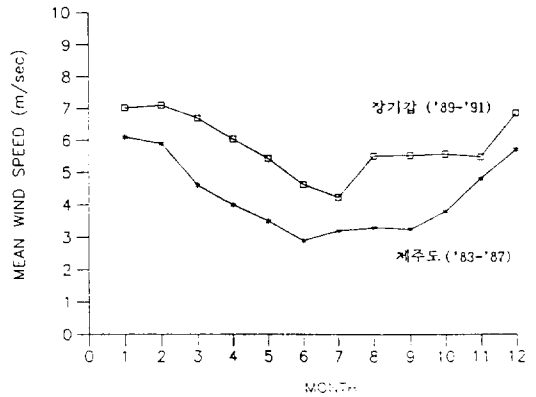


그림 1. 장기갑 및 제주의 월평균풍속('89~'91)

년간 전력량은 단순히 환산된 에너지이며 이용에 너지는 이에 각종 효율을 곱하여야 한다. 우선 풍력 터빈의 효율(동력전달계수)은 그 풍차의 형식에 따라 다른데, 각 형식의 최대효율을 개략적으로 보면

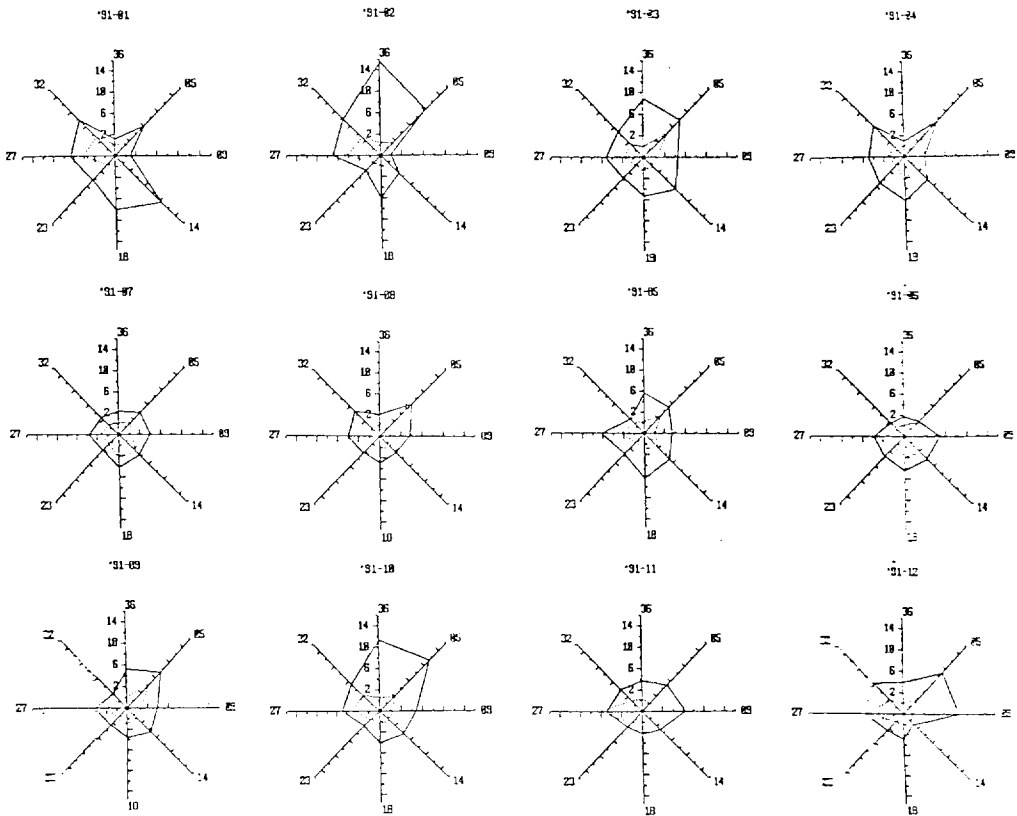


그림 2. 장기갑의 일 평균풍속의 방향별 Rose Diagram ('91.1-'91.12)

다음과 같다[5].

공력이론에 의하면 날개면의 평균속도  $v$ 는 풍차상류의 속도  $V_{\infty}$ 와 하류속도  $V_2$ 와의 평균치, 즉  $(V_{\infty} + V_2)/2$ 가 된다. 날개면에서 바람이 가지고 있는 에너지를 얻을 수 있는 비율, 즉 최대효율은 이론적으로 0.59이며, 이를 Betz상수라고 한다. 이에 대해서는 뒷장 공력해석에서도 다루겠지만, 다만 풍력발전 종합효율은 위의 풍차효율에다 증속기 효율, 발전기 효율, 전력변환기 효율등을 순차적으로 곱한 값으로 나타난다.

동해안지역의 유력후보지로 장기갑, 울릉, 울진, 포항, 울산, 부산 등의 6개 분석하여 풍력에너지의

이용의 적정성 여부를 판정하고자 한다. 위 에너지 밀도에서 살펴 본 바, 각 지역의 풍속조사로부터 년간 평균 에너지분포를 구하여야 한다. 이 에너지분포의 최대가 나타나는 풍속의 값에 그곳의 풍차의 설계 정격치를 취하여야 한다. 우선 이 지점들의 기상적 조건은 다음과 같다.

한편, 기상청에서 사용하고 있는 풍속에 대한 정의는 다음과 같다.

가) 최대풍속 : 임의의 10분간의 평균풍속중 최대값

나) 순간최대풍속 : 어느 임의의 한순간에 나타난 풍속중 최대값

다) 일 평균풍속 : 일 4회 정기적 관측치의 평균값 장기갑의 일평균풍속으로부터 '89-'91 기간동안의 월평균 풍속을 계산한 결과를 그림 1에 나타내고 있으며, KIST에서 설치한 제주도 월항의 '83-'87기간 동안의 월평균 풍속과 비교하였다[6].

이어서 '91.1-'91.12 기간동안의 장기갑 일 평균풍속의 방향별 Rose Diagram을 그림 2에 나타내었다. 점선으로 나타낸 값은 방향 빈도의 100분율을 1/10

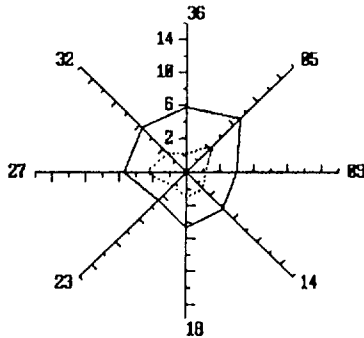
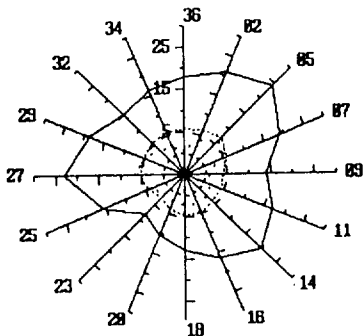


그림 3. 장기갑 년 평균풍속의 Rose Diagram ('91)

Rose Diagram ('91)  
·1991년 최대/평균풍속/인도 (장기갑)



— 최대 ..... 평균풍속 — 빈도

그림 4. 년 평균풍속과 년 최대 풍속의 비교 ('91)

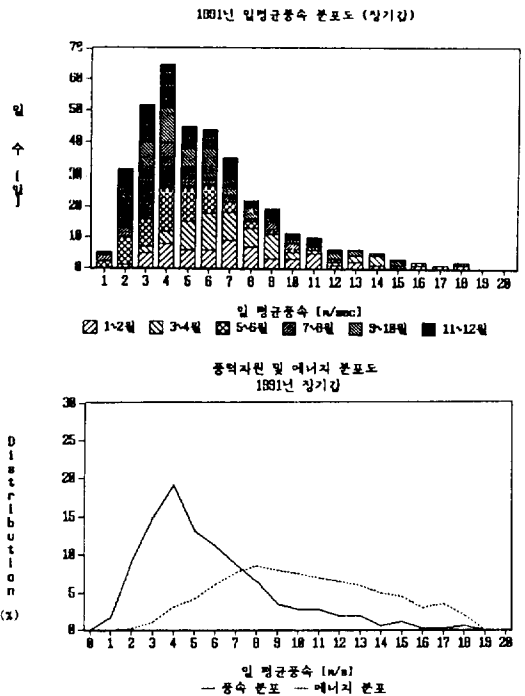


그림 5. 평균풍속 및 에너지분포도 (장기갑 '91)  
(풍속확율은 풍속이 나타난 일수/365일)

표 4. 각 지역의 풍력자원 이용도 판정을 위한 비교우위 분석표

	최대 빈도 (m/s)	풍속 상위 (%)	6m/s이 상풍속 (%)	에너지 최대점 (m/s)	+50% 풍속 (m/s)	+50% 에너지 (%)	+00 에너지 (%)	6m/s이 상 에너지 (%)
장기갑	4.0	75	42.2*	8	12.0	44.0	74.0	74.0*
울릉	3.0	74	23.5*	7	10.5	49.6	58.1	69.0*
울진	3.5	88	17.0*	5	7.5	55.0	70.0	61.2*
포항	2.5	92	8.5	5	7.5	47.0	70.0	56.1
울산	2.0	66	1.6	4	6.0	45.0	71.0	40.0
부산	3.5	86	16.9*	5	7.5	58.0	78.0	60.0*

- 주1. 최대빈도 : 최대빈도 년 평균풍속임
- 주2. 풍속상위 : 최대빈도이상 풍속이 나타나는 확률임
- 주3. 6m/s이상 : 일평균풍속이 6m/s이상으로 나타는 확률임
- 주4. 에너지 최대점 : 에너지분포의 최대의 년 평균풍속임
- 주5. +50% 풍속 : 에너지최대점에서 50% 가산한 풍속값임
- 주6. +50% 에너지 : 에너지최대점에서 -50% 사이의 에너지분포면적율
- 주7. +00 에너지 : 에너지최대점에서 풍속 끝까지의 에너지분포면적율
- 주8. 6m/s 에너지 : 풍속 6m/s부터 풍속 끝까지의 에너지 면적율

로 취한 값이다. 이 기간동안의 년 평균풍속의 방향별 Rose Diagram을 그림 3에 나타내었다. 점선으로 나타낸 값은 위와 같다.

위 기간동안의 장기갑 년 평균풍속과 년 최대풍속과의 방향별 비교를 Rose Diagram으로 그림 4에 나타내었고, 이때 방향빈도는 년 평균풍속의 방향빈도이며 년중 100%의 1/4로 취한 값이다.

그림 2~4까지의 분석으로 알 수 있었던 바로는, 겨울철 12월부터 2월까지 바람이 많고 이때 서풍으로 치우친 반면, 그외 기간 동안에는 전 방향으로 고루 분포되어 있음을 알 수 있고, 또한 풍속의 분포가 평균풍속보다 큰 값에도 많이 위치하고 있음을 알 수 있다.

장기갑의 '91 기간중 평균풍속 및 에너지분포도는 (식(1), (2) 참조) 그림 5와 같다. 그외 타 지역, 울릉, 울진, 포항, 울산, 부산의 1년간('90.11-'91.10) 평균풍속 및 에너지분포도는 그림 6과 같다.

이들 그림에서 얻은 결과를 표4의 분석표에 그 평가를 수록한 바, 각 지역의 에너지분포의 최대점에 해당되는 풍속은 장기갑이 가장 높고, 울릉, 울진, 부산의 순이며, 이 4곳 중에서 이 풍속과 50% 초과하는 풍속 사이의 에너지분포율은 부산이 가장 높

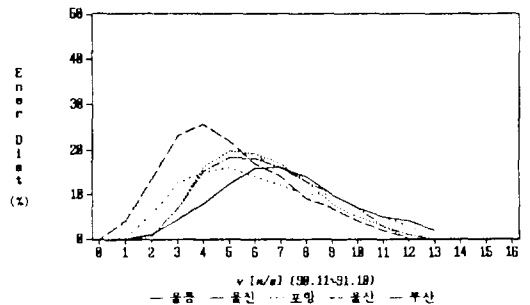
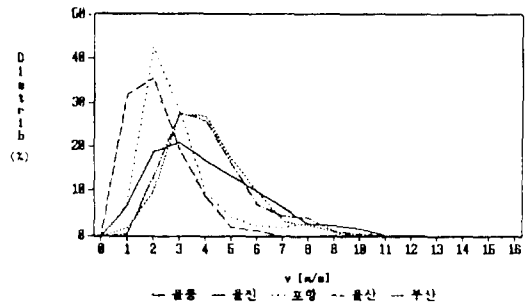


그림 6. 평균풍속 및 에너지분포도  
울릉 울진 포항 울산 부산 ('90.11-'91.10)

고, 울진, 울릉, 장기갑의 순이고, 또한  $+\infty$ 까지의 풍속과의 사이에 들어오는 에너지분포율은 부산이 가장 높고, 장기갑, 울진, 울릉의 순으로 나타나고 있다. 포항과 울산은 최대빈도의 평균풍속이 낮음으로서 일차적으로 후보지에서 탈락시키고 그외 4지점(표 4의 에너지 \* 표시지역)을 후보지로 선정하여 아래와 같이 종합판정 할 수 있겠다.

에너지 분포는 다음과 같은 풍속 V에 대한 출력 P(v)와 에너지 분포 확률 f(E)에 의거하여 계산하였다. 1)

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta v^3 \quad (1)$$

$$f(E) = \frac{P(v)}{\sum P(v)} \times 100\% \quad (2)$$

( $\rho$  공기밀도, A는 풍차회전면적,  
Cp 풍차출력계수,  $\eta$  후속기계종합효율)

종합적으로 보건데, 울릉은 비교적 높은 풍속에 맞추어 설계할 수 있으며 에너지가 비교적 좁은 풍속의대에 밀집되어 있고, 울진, 부산은 비교적 낮은 풍속대에 맞추어 설계할 수 있으며, 에너지가 높은 풍속대에 적게 분포되어 있으며, 장기갑의 경우 높은 풍속에 맞추어 설계될 수 있고 에너지 또한 높은 풍속대에 많이 분포되어 있음을 알 수 있겠다.

### 3. 풍력터빈 일반

일반적으로 풍력 발전에 이용되는 풍력원동기로는

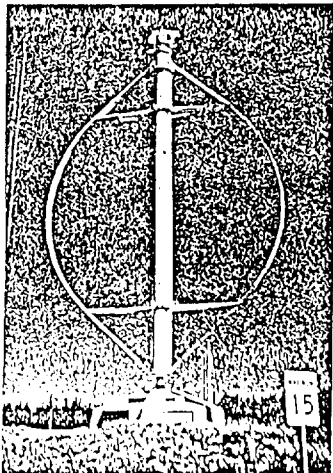


그림 7. Darrieus식 (Canada, Cap Chat, 4 MW)

수평축 Propeller형과 수직축 Darrieus형이 주로 쓰인다. Darrieus식은 회전관성을 얻기까지의 동력에너지가 소요되어야 하는 단점이 있는 반면, 풍향에 무관하여 風向追尾裝置가 필요치 않고 대용량의 전기를 얻을 수 있는 잇점이 있다. Propeller식은 외부 동력으로 회전관성 에너지를 투입시켜줄 필요가 없이 자기起動式인 잇점이 있는 반면, 풍향에 민감하여 고정장치의 회전에 따른 기계적 설계의 어려움과 이 기어장치의 국내 기술로 해결의 어려움이 따르고 있다. Darrieus식의 사진을 Canada의 예를 그림 7에 제시하였다.

### 4. 수직축 풍력터빈의 순간 토크 해석

특정한 회전각  $\theta$ 에 대한 날개의 단면을 그림8에 나타내었다.  $r\Omega$ 는 날개의 회전속도이며, r은 날개축의 반경이고,  $\Omega$ 는 각속도이다. 회전속도  $r\Omega$ 와 풍속 V를 벡터적으로 합성하면 날개축에 작용하는 합성속도 U와 영각  $\alpha$  (익력과 항력벡터가 이루는 각, angle of attack)를 얻을 수 있다.

날개가 합성풍속 U인 유동속에 놓이면 영각의 함수인 양력 L(Lift)과 항력 D(Drag)가 발생하며, L과 D, 그리고 토크 T와의 관계는 다음과 같다. 9)

$$L = \frac{1}{2} \rho C_l U^2 S \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho C_d U^2 S \quad (2)$$

$$T = L \cos \alpha - D \sin \alpha \quad (3)$$

( $\rho$ : 공기밀도,  $C_l$ : 양력계수  
 $C_d$ : 항력계수, S: 날개의 투영면적)

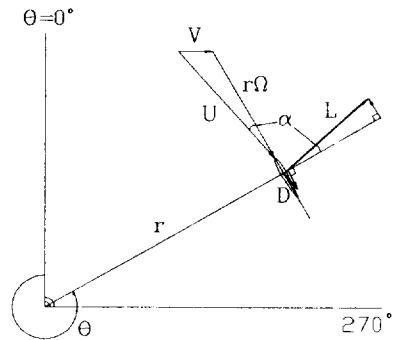


그림 8. 다리우스풍차의 회전 날개단면

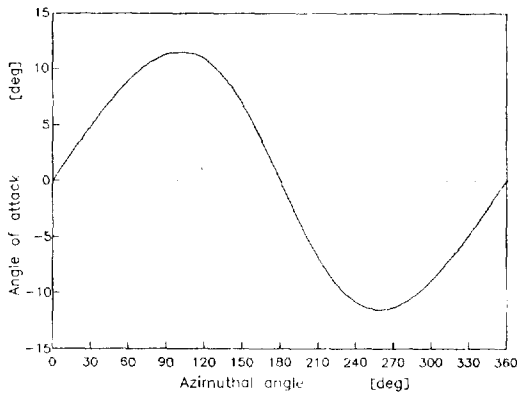


그림 9. 속도비 4에서의 회전각에 따른 영각

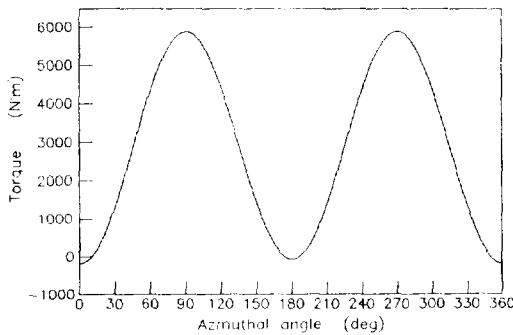


그림 10. 10m 다리우스풍차의 회전각에 따른 토오크

양력과 항력은 바깥으로 작용하는 축 성분의 힘과 전면으로 작용하는 접선 성분의 힘으로 분해할 수 있다. 양력의 전면 방향 성분이 항력을 증가하면 토오크는 회전 방향으로 작용한다. 날개속도  $r\Omega$ 가  $V$ 보다 아주 크면( $r\Omega/V > 3$ ), 비교적 높은 양력과 항력의 비를 가지는 영각의 범위에서 날개는 움직이게 될 것이다. 날개의 속도가 풍속에 비해 낮은 회전속도에서는 날개의 영각이 크게되어, 움직이지 않게 된다. 영각이  $\pm 13^\circ$  이상이 되면 양력과 항력의 비가 감소하여 좋지 못한 운전 상태에 이르게 된다. 영각이  $\pm 13^\circ$ 를 넘지 않은 범위에서 운전하려면 속도비( $r\Omega/V$ )가 4 이상 되어야 한다. 그림 9는 속도비 4에서의 회전각에 따른 영각을 계산하여 나타내었으며, 영각은  $0 \sim \pm 13^\circ$ 의 영역 내에 있다[10].

회전각  $\theta$ 에 따른 순간 토오크는 위에서 계산한 영각에 따른  $C_l$ 과  $C_d$ 를 그림 4에서 구한후, 식(1)과

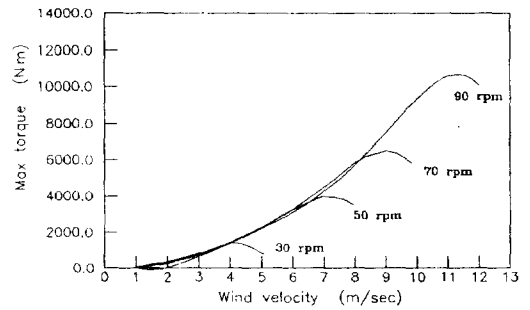


그림 11. 10m 다리우스 풍차의 회전속도에 따른 최대 토오크와 풍속과의 관계

(2)를 사용하여 양력  $L$ 과 항력  $D$ 를 구하고, 식(3)을 사용하여 구한다.

그림 10은 실제로 날개단면이 NACA 0012이고, 익현이 0.5m이고, 회전면적이  $10m \times 10m$ 인 straight-blade형 풍차가 8m/s의 풍속에서 70rpm으로 회전할 때를 가정하여 회전각에 따른 토오크를 계산하였다. 이 그래프는 다리우스풍차의 대표적인 토오크 형태임을 보여준다.

그림 11은 위에 적용된 다리우스풍차의 회전속도에 따른 최대 토오크와 풍속과의 관계를 나타내었는데, 각각의 회전속도에 따라 풍속변화에 대한 토오크는 일정풍속 이상에서 감소함을 알 수 있다.

## 7. 결 론

동해안의 6개 예정입지 지점의 다년간 기상데이터를 분석한 결과, 3개지점 정도의 우수한 후보지를 발견하였다. (표 4) 특히, 장기갑의 평균풍속은 제주도 월항지역 보다 더 우수한 결과를 얻었다. (그림 1)

이 지역에 설치할 수 있는 풍력터빈의 형식으로 수직축 Darrieus Type을 검토한 결과 무리가 없음을 알 수 있었다. 수직축 터빈은 풍속 6m/s 이상이면 정격의 발전모드에 진입하니, 3개 지역의 분석결과 년 4000시간 이상의 발전은 가능하리라 사료된다.

(그림 5, 6 및 표 4)

단위 풍력발전 용량은 향후 상세설계가 뒤따라야 하겠지만, 대략 150~200kW로 산정되며 년간 단위 기계에서 600~800Mwh의 전력을 얻을 수 있으리라 예상된다.

이 연구는 1991년 동일문화재단 학술연구비 지원에 의한 것임

(10) M. L. Robinson, The Darrieus wind turbine for electrical power generation, Aeronautical Journal, pp 244~255, June, 1981.

참 고 문 헌

- (1) 한·독 태양-풍력 복합발전에 관한 연구 한국 과학 기술원 연구보고, 1988.12.
- (2) 古屋善正, 流體力學1, 共立出版株式會社, 1973
- (3) D. J. De Renzo, Wind Power, Recent Development, Noyes Data Corporation, 1979.
- (4) Golding, E. W. The Generation of Electricity by Wind Power, London. E. & F. Spon Ltd., 1977.
- (5) J. W. Michel, Energy Engineering. John Wiley & Sons, 1983, p. 290
- (6) Cs. S. Lee, et. al. Experiences on Wind Energy Converter in Jeju Island in Republic of Korea, Asian and Pacific Area Wind Energy Conference, 1988.8. Shanghai China, 한국과학기술원 연구보고, 1989, p. 775
- (7) International Energy Agency (IEA). Renewable Sources of Energy, 1987.3. p. 176-181
- (8) 한국동력자원연구소, 신·재생에너지 기술동향 제 4권 1호(1990) 등
- (9) Ira H. Abbot & Albert E. von Doenhoff, Theory of Wing Section, Dover Publications, 1959



오철수(吳哲洙)

1938년 8월 26일생. 1966년 독일 슈투트가르트 공대 Dipl. Ing. 1989년 영남대학교 대학원 전기공학과(공학박사), 1973~1978 단국대학교 전기공학과 조교수, 1984~현재 경북대학교 전기공학과 부교수



강창수(姜昌壽)

1928년 2월 6일생. 1953년 서울대학교 공과대학 조선 공학과졸업, 1976년 부산대학교 대학원 기계공학과(공학박사), 현재 경북대학교 기계공학과 교수



권순홍(權純弘)

1967년 9월 13일생. 1991년 경북대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 현재 경북대학교 대학원 전기공학과 석사과정