

풍력발전 단지조성을 위한 바람환경 분석

Analysis of Wind Environments for Siting a Wind Farm

김현구* · 최재우 · 손정봉¹⁾ · 정우식²⁾ · 이화운²⁾
포항산업과학연구원, ¹⁾포항가속기연구소, ²⁾부산대학교
(2003년 7월 3일 접수, 2003년 10월 31일 채택)

Hyun-Goo Kim*, J.O. Choi, J.B. Son¹⁾, W.S. Jung²⁾ and H.W. Lee²⁾
Research Institute of Industrial Science & Technology,
¹⁾*Pohang Accelerator Laboratory,* ²⁾*Pusan National University*
(Received 3 July 2003, accepted 31 October 2003)

Abstract

An analysis of wind environments using computational fluid dynamics and an evaluation of wind resources using measurement data obtained from meteorological observation sites at Homi-Cape, Pohang have been carried out for siting a wind farm. It was shown that a numerical simulation using computational fluid dynamics would provide reliable wind resource map in complex terrain with land-sea breeze condition. As a result of this investigation, Homi-Cape wind farm with 11.25 MW capacity has been designed for maximum power generation and 25.7 GWh electricity production is predicted.

Key words : Wind Environment, Wind Farm, Wind Resource

1. 서 론

산업자원부는 1997년 12월 「대체에너지기술 개발 및 이용·보급촉진법」을 개정한 이후 2000년 4월 「대체에너지 개발 보급 3개년 계획」을 수립하여 제도적인 기반을 확충하였으며, 2002년 5월 「대체에너지이용 발전전력의 기준가격 지침」을 시행하여 대체에너지 생산 전력을 보상·지원함으로써 국내에서도 본격적인 대체에너지 시대가 시작되었다. 최근에는 지방자치단체를 중심으로 대체에너지 보급이 활발하

게 진행되고 있으며, 특히 풍력발전 분야의 약진이 두드러지고 있다(김현구와 최재우, 2002b). 참고로 표 1은 한국전력거래소(2003)의 발전설비 설치현황과 2003년 1월 이후 주요 일간지에 보도된 관련 기사를 참조하여 정리한 우리나라의 풍력발전 단지 조성 계획이다.

일반적으로 바람은 지형조건과 기후특성에 영향을 받는데, 특히 우리나라와 같이 국토의 70%가 산지로 구성되어 있으며 사계절이 분명하고 반도 기상 특성으로 인해 해륙풍(land-sea breeze)이 존재하는 조건에서의 국지풍계는 예측하기 힘든 매우 복잡한 양상을 보이게 된다. 따라서 풍력발전 단지조성과 같이 바람환경에 민감한 사업을 수행함에 있어서 단순

* Corresponding author
Tel : +82-(0)54-279-6615, E-mail : hyungoo@rist.re.kr

Table 1. Wind farm installation plans of Korea.

Target year	Location	Capacity (MW)	Cost (million ₩)	Production (GWh)
2003	제주도 북제주군 행원리	(10)	(20,300)	22
2004	강원도 평창군(대관령)	98*	145,000	200
2004	제주도 북제주군 용수리	6	9,000	-
2005	경상북도 포항시(호미곶)	11* (0.66)	17,400 (1,200)	26
2005	경상북도 영덕군 창포리	40	60,000	-
2005	경상남도 양산시 원동면	6	9,000	-
2005	충청남도 당진군(간척지)	10	17,000	-
2005	전라북도 군산시(새만금)	40	75,000	-
2006	전라남도 신안군 임자도	297	480,000	800
2006	강원도 태백시(매봉산)	10	24,500	-
2007	제주도 북제주군(해상)	20	26,500	-

() 기설치, * 확정

히 대상지역 내 특정지점에서 단기간 관측한 기상자료를 이용하여 설계할 경우 심각한 오류가 초래될 수 있으므로 반드시 사전에 신뢰성 있는 바람환경 분석이 선행되어야 한다.

본 연구는 경상북도 동해안 중 바람환경이 풍력발전기에 적합한 것으로 조사된(한국화이바, 2002, 2001; 김현구와 최재우, 2002a; 오철수 등, 1992) 포항 호미곶 일대의 바람환경을 전산유동해석 기법 및 측정지점간 기상요소의 상관분석법을 이용하여 분석하고 풍력자원을 평가함으로써 대상지역의 풍력발전 단지 조성의 타당성을 검증하였다.

2. 호미곶의 지형특성과 바람환경 분석

2.1 지형 특성

포항은 경상북도 동해안에 위치한 항구도시로 형산강 하구 평탄한 지형에 시가지와 산업단지가 밀집되어 있으며 호미곶에 의해 둘러싸인 영일만은 북동쪽으로 바다를 향해 열려있는 지형특성을 가진다(그림 1). 호미곶은 해발고도 120~180m의 5~6개 산봉우리들이 밀집한 남쪽을 제외하고는 삼면이 바다로 둘러싸인 완만한 구릉성 산지지형으로, 포항공항, 국도와 지방도로가 연계된 기존 도로망, 임도(林道)는 물론 인근의 구룡포항, 대보항의 항만여건이 확보되어 추가적인 인프라 투자 없이 풍력발전 단지조성이 용이한 입지여건을 가진다. 또한 해안 고압 송전소로의 전력계통 연계가 유리하며 풍력발전 단지와의

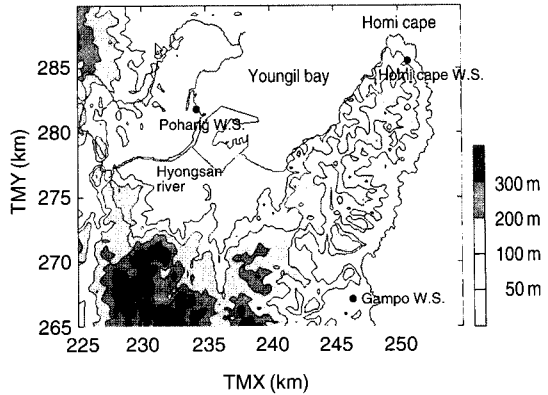


Fig. 1. Topographic map of Pohang area and weather stations.

호미곶 복단에 조성된 해맞이 공원을 연계함으로써 풍력에 대한 교육·홍보효과 뿐만 아니라 문화·관광의 시너지 효과도 기대된다.

호미곶(虎尾串)이란 지명은 조선시대 중기 격암남사고 선생의 동해산수비결에서 조선을 호랑이 형상으로 보고, 꼬리에 해당되는 명칭인 호미를 언급한 것에서 유래를 찾을 수 있다. 이 지역의 지명은 지답(삼국시대), 기립(통일신라시대), 장기(고려시대 초기-조선시대 말기) 등으로 변천되어 왔으며 현재에는 구룡포읍, 장기면, 대보면으로 구성되어 있지만 역사, 문화, 지리적인 동질성을 지닌 권역을 묶어서 지칭할 수 있는 적절한 지명으로 호미곶이란 명칭이 최근 들어 공식적으로도 널리 사용되고 있다. 이 지역에 전해지는 “내 밥 먹고 구만바람 쇠지 마라”라는 말은 호미곶의 선단부인 구만리의 바람이 예로부터 매우 강하였음을 미루어 짐작하게 한다.

2.2 기상 특성

영일만 해안에 위치한 포항기상대에서 10년간(1991~2000년) 관측한 지면기상과 라디오존데로 측정된 표준압력면 1,000 hPa에서의 상층기상을 비교하면(그림 2), 포항지역 상층의 주풍향은 서풍계열이지만 지면에서는 호미곶의 차폐효과로 주풍향이 영일만이 열린 방향인 남서풍으로 변곡되어 있음을 알 수 있다. 그러나 해풍의 주풍향은 두 경우 모두 북북동풍으로 나타났다.

호미곶 복단의 호미곶 자동기상관측소에서 1993

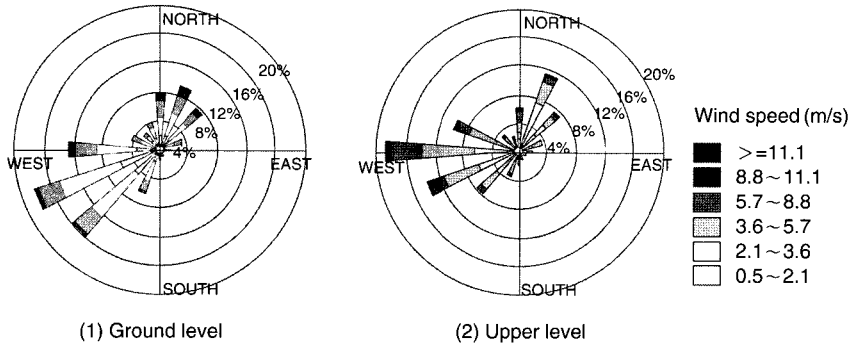


Fig. 2. Wind roses at Pohang Weather Station.

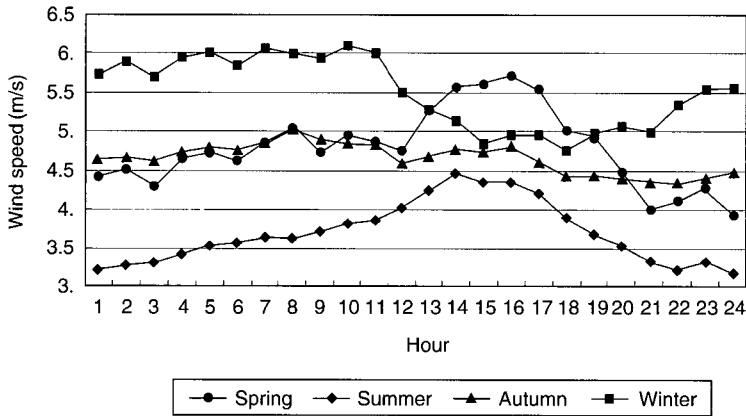


Fig. 3. Monthly variations of maximum/average/minimum wind speed at Homi-Cape.

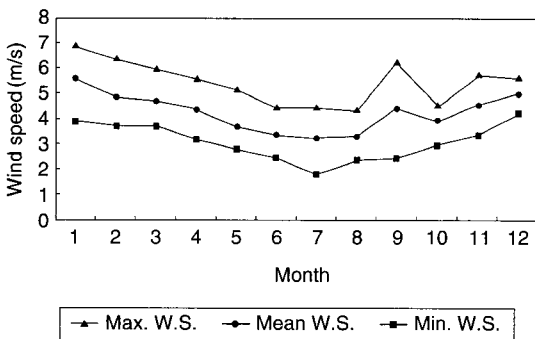


Fig. 4. Seasonal variations of wind speed at Homi-Cape.

~2001년까지 9년간 관측한 지면기상의 분석결과에 의하면, 그림 3의 월별 풍속변화에서 볼 수 있듯이

하계와 동계의 뚜렷한 차이가 나타난다. 즉, 10월부터 풍속이 서서히 증가하여 12월과 1월에 최고에 달하고 다시 7월까지 서서히 감소하는 경향이 관찰된다. 12월에서 3월까지의 5 m/s 이상의 평균풍속이 측정되었지만 5월에서 8월까지의 평균풍속 4 m/s 이하로 나타났으며, 월별 최대/최소풍속은 평균풍속 4.5 m/s에서 $\pm 1 \sim 1.5$ m/s의 변동폭을 보이고 있다. 그림 4의 시간대별 풍속변화에서도 하계와 동계는 반대경향을 보이고 있다. 즉, 동계에는 야간에 강한 풍속으로 유지되다가 주간에는 풍속이 감소하는 경향을 보이는 반면 춘계와 하계에는 15~16시경에 풍속이 상승하며 추계는 거의 일정한 풍속이 유지되고 있다. 따라서 동계 야간시간대에 풍력발전에 의한 에너지가 집중될 것으로 판단된다.

2.3 지면바람장 전산유동해석

풍력자원을 개발함에 있어서 국지적인 풍속 공간 분포의 정확한 파악은 풍력발전의 성패를 결정하는 매우 중요한 사안이며 따라서 현재 풍력을 이용하는 대부분의 국가에서는 국토 전체에 대한 풍력자원지도(wind resource map)를 작성하여 (Troen and Peterson, 1989) 풍력발전 단지설계를 비롯한 각종 바람환경 이용 사업에 적극적으로 활용하고 있음을 고려할 때 국내에서도 신뢰성이 확보된 풍력자원 지도의 구축이 시급한 과제라고 사료된다.

풍력자원지도를 작성하는 방법은 크게 네 가지로 분류되는데 첫 번째로는 단순히 기상관측소의 측정 자료를 선형적으로 보간하는 방법으로 가장 손쉽게 작성이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 일반적으로 국내 기상관측소가 서로 떨어진 거리는 최소 십여 km 이상으로 이러한 공간해상도에서는 관측지점 간의 기상학적 상관성이 없기 때문에 (김현구와 최재우, 2002c) 보간방식의 물리적인 타당성을 입증하기 어렵다. 두 번째로는 Jackson과 Hunt의 선형이론을 바탕으로 한 유동모델을 이용하는 방법이 (김현구 등, 1997) 현재 가장 보편적인 풍력자원지도 작성법이다 (Troen and Peterson, 1989). 그러나 선형이론은 국지지형의 경사 및 변화율이 매우 큰 대표적인 산지국가인 우리나라에는 부적합한 것으로 평가된다 (Kim and Patel, 2000; Kim *et al.*, 2000) 세 번째로는 종관풍의 풍향별로 3차원 전산유동해석을 수행하여 풍향별 풍속과 빈도에 따라 해석결과를 중첩함으로써 공간분포를 산출하는 방법으로, 국내에서는 대관령 풍력발전 단지설계에 최초로 적용되어 복잡지형에서도 신뢰도 높은 결과를 제공함이 검증되었다. 그러나 이 방법은 지형에 의한 대기유동 변화특성의 정확한 모사는 가능하나 시간에 따라 비정상, 비선형적으로 변화하는 대기유동 특성이 무시되는 단점이 있다. 마지막으로 본 연구에서 제안하는 방법은 대상 지역의 국지풍계를 분류하고 비정상(unsteady) 대기유동을 수치모의한 후 각각의 사례를 빈도별로 가중평균하는 것으로, 앞서 세 가지 방법과 비교하여 기상학적으로 실제 현상의 재현성이 가장 높으므로 풍력자원 공간분포의 신뢰도 및 정확도가 가장 우수할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 호미곶을 포함한 포항지역의 지면바람장 특성분석 및 풍력자원지도 작성을 위해 국지

풍계를 분류하고 전산유동해석(CFD: computational fluid dynamics) 기법 (김현구 등, 1998)을 이용하여 수치기상모의를 실시하였다. 기상 통계분석에 의하면 포항지역의 국지순환계는 해륙풍계와 종관풍계로 대별되는데, 상층기상 요소를 이용하여 판별한 바에 의하면 지난 10년간 해륙풍일은 연간 50.6일이며 그 외 기간에는 주풍향인 남서풍에 해륙풍계가 혼합되어 나타나는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 전형

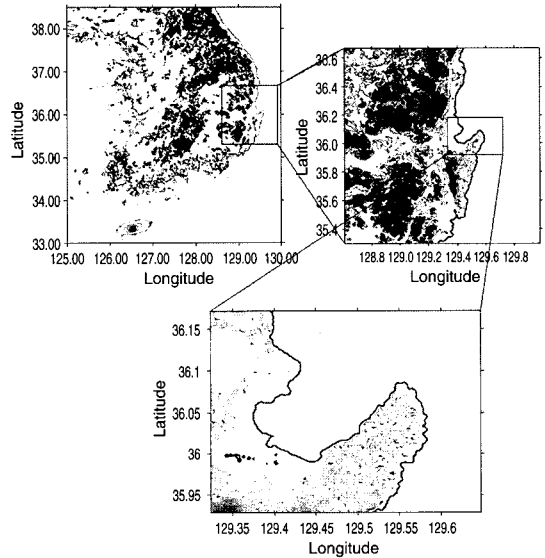


Fig. 5. Computational domains by nesting technique.

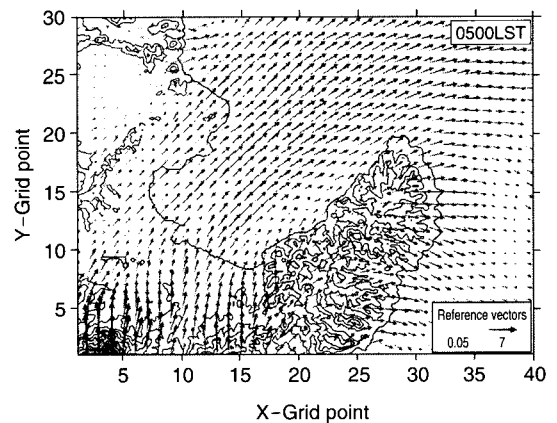
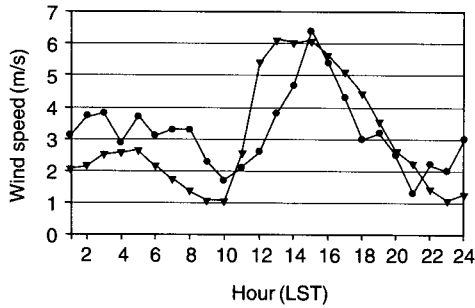
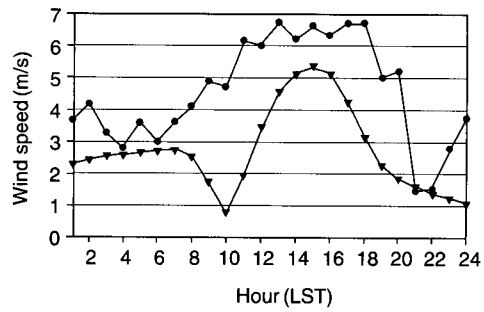


Fig. 6. Ground-level wind field predicted by numerical model in Pohang area.

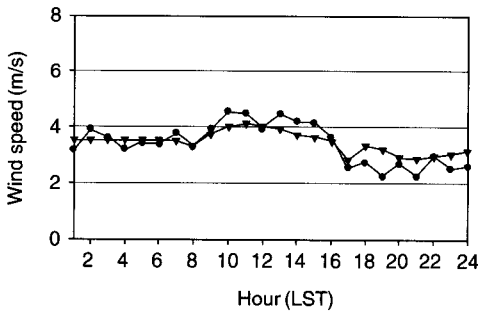


(1) Pohang Weather Station

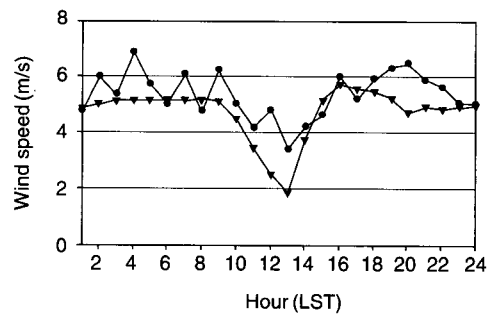


(2) Homi-Cape Automatic Weather Station

Fig. 7. Comparisons of observed and predicted wind speed.
(land-sea breeze case; -●- : observation, -▼- : prediction)



(1) Pohang Weather Station



(2) Homi-Cape Automatic Weather Station

Fig. 8. Comparisons of observed and predicted wind speed.
(south-westerly wind case; -●- : observation, -▼- : prediction)

적인 해륙풍일과 남서풍일에 대하여 수치기상모의를 수행하여 지면바람장 특성을 파악하고 풍속 공간분포를 산출하여 바람환경을 평가하였다. 수치기상모의에 사용된 전산유동해석 모델은 기상요소의 지배방정식을 지형변화를 고려하여 수치적으로 해석하는데, 국지기상은 중규모(meso-scale) 기상의 영향권에 포함되므로 그림 5와 같이 중규모 해석영역으로부터 국지규모로 해석범위를 좁혀가는 중첩(nesting) 계산법을 적용하여 예측결과의 정확도를 향상시키고 경계조건 의존도를 최소화 하였다.

그림 6은 0500시의 지면바람장(지면고도 10 m)의 예측결과로 영일만을 통하여 바다로 환기되는 포항 지역의 대표적인 국지풍계를 잘 보여주고 있다. 영일만으로 빠져나온 바람은 호미곶 선단을 지나며 중관

기상(synoptic meteorology)의 영향으로 서풍으로 변곡되고 있음이 관찰된다. 예측결과는 해석영역내 기상관측소 측정자료와의 비교를 통하여 신뢰도를 검증하였다. 즉, 그림 7과 8은 포항기상대 및 호미곶 자동기상관측소의 관측자료와의 비교를 보여주는데 풍속의 일변화가 발생하는 시간대와 최대, 최소 풍속 값을 비교적 정확하게 예측함을 확인할 수 있다.

그림 9는 포항지역의 전형적인 남서풍일 풍속의 공간분포를 산출한 결과로서 포항 해안지역 중 일평균 풍속이 가장 높은 지역은 호미곶의 선단지역과 북부 해안지역인 것으로 나타나고 있다. 참고로 그림 9에 제시된 포항지역의 풍력자원 지도는 전형적인 남서풍일때를 대상으로 작성된 것이므로 정확한 풍력자원의 평가를 위해서는 해륙풍일 및 남서풍 이외의 중

관풍인 경우에 대한 해석결과도 중첩되어야 한다.

3. 호미곶 풍력자원 분석

3.1 호미곶 기상측정망

호미곶에는 풍력자원의 정밀계측을 위하여 표 2와 같이 특별 기상관측망이 구축되어 측정이 진행 중에 있다(한국화이바, 2001, 2002).

풍력발전 단지조성의 타당성을 검증하고 실제 단지설계를 위한 풍력자원을 산출하기 위하여 현장실측은 반드시 필요하지만 실측에는 다음과 같은 제약성이 수반된다. 즉, 측정개소의 공간해상도 제약에

의해 지역/지형의 대표성이 결여되며 연직방향 측정 높이의 한계로 인해 대기유동의 수직구조를 파악하

Table 2. Meteorological observation sites installed in Homi-Cape.

Site	Code	Obs. period	Obs. height	Obs. interval
Guman-Ri	[0020]	1999. 6 ~	20,30 m	10 min.
Dumpsite	[0022]	2001. 1 ~	20,30 m	10 min.
Fire guard	[0023]	2001. 3 ~	5,12 m	10 min.
Guryongpo	[0024]	2001. 3 ~	20,30 m	10 min.
Pohang*	[138]	1960. 1 ~	15 m	60 min.
Homi-Cape**	[808]	1993. 1 ~	10 m	60 min.

* 기상청 소속 포항기상대, ** 기상청 소속 호미곶 자동기상측정소

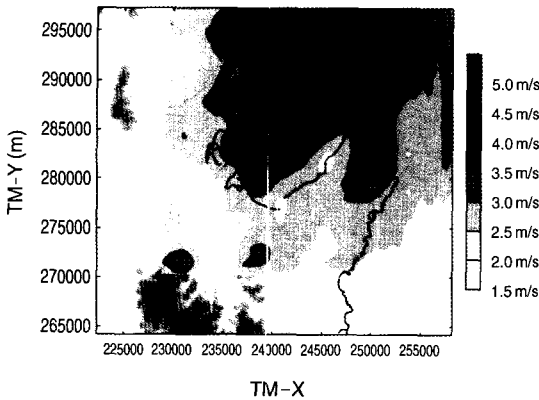


Fig. 9. Predicted wind speed for the south-westerly wind case in Pohang area.

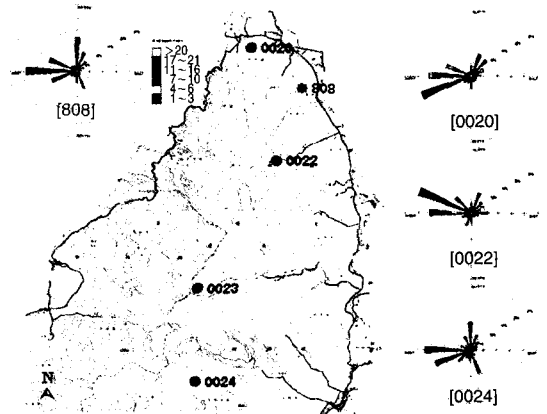


Fig. 10. Locations of meteorological observation sites in Homi-Cape.

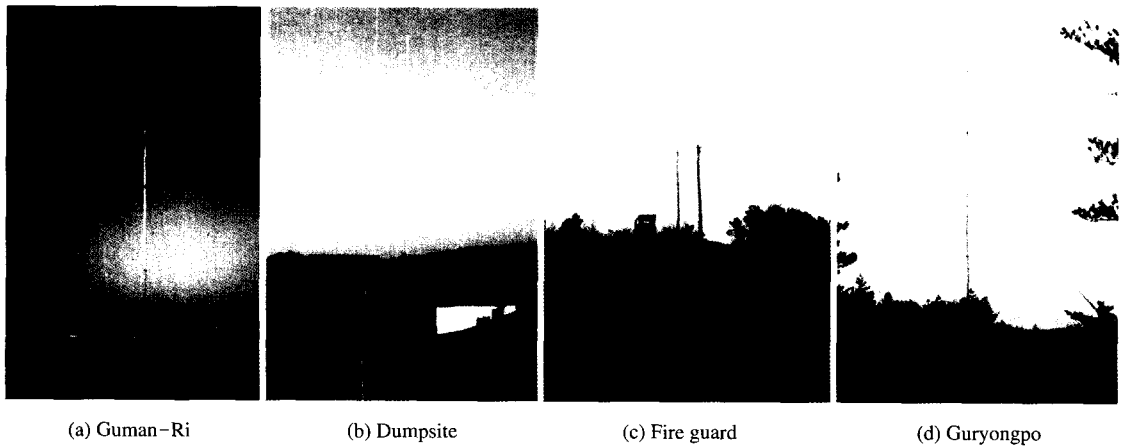


Fig. 11. Meteorological observation towers installed in Homi-Cape.

기 힘들다. 또한 측정기간의 제약에 의해 기상개황 파악 및 예측에 불확실성이 내포된다. 본 연구에서는 이러한 풍황실측의 단점을 극복하기 위하여 바람환경 평가결과의 비교와 측정지점간의 기상요소 상관 분석을 수행하여 기상측정망의 지형/지역 대표성 및 유효성을 검증하였다.

그림 10은 호미곶 기상측정망의 위치도와 함께 바람장미를 도시한 것으로 구만리 [0020]는 영일만을 통과한 남서풍 계열의 바람이 서풍으로 변곡되어 동해로 빠져나가는 선단에 해당되며 매립장 [0022], 산불감시초소 [0023], 구룡포 [0024]는 호미곶 중앙을 따라 남북으로 발달한 구룡 능선을 연결하는 임도변에 설치되어 있으므로 언덕효과에 의한 풍속가속이 예상된다.

4곳의 측정지점에는 그림 11과 같이 30 m 높이의 NRG NOW-System 기상측정탑을 설치하고 표 2에 제시된 측정높이에 풍향, 풍속 및 기온 측정센서를 부착하여 10분 평균값을 기록하였다. 참고로 기상청 산하 기상대는 1시간 평균자료이다.

3.2 측정지점간 기상상관분석

호미곶은 풍력발전 단지조성 대상지역이기 때문에 측정지점간 기상학적 상관관계의 정확한 파악은 매우 중요한 의미를 갖는다. 일반적으로 풍력발전의 효율성 및 운영 편이성을 위해서는 풍력단지 전체가 동일한 국지풍계에 포함되는 것이 유리하기 때문이다. 본 연구에서는 측정지점간의 기상학적 상관도의 정량화 척도로 교차상관계수(cross-correlation coefficient)를 이용하였다. 식에서 $V_1(t)$, $V_2(t)$ 는 각기 다른 지점의 시간함수이고 τ 는 위상차, T 는 충분히 긴 평균시간으로 2001년의 연간 기상자료를 이용하였으므로 1년이 된다.

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} V_1(t) \cdot V_2(t + \tau) dt \quad (1)$$

측정된 풍향(ϕ), 풍속(V)은 각각 서→동방향 풍속 성분(U)과 남→북방향 풍속 성분(W)으로 분리하여 각각의 교차상관계수를 산출하였다. 이때 풍향은 정북을 기준으로 시계방향 각도로 정의하였다. 한편 측정지점 간의 평균 풍향편차($\Delta\phi$)를 보정한 풍속 성분(U^* , W^*)은 표 3에 정의된 바와 같이 산출하였다.

본 연구에서는 기상학적 상관도의 또 다른 척도로

Table 3. Meteorological correlations among observation sites in Homi-Cape.

R_{12}	[Pohang]	[Guman-Ri]	[Guman-Ri]	[Dumpsite]	
	[Homi-Cape]	[Dumpsite]	[Guryongpo]	[Fire guard]	
$U = V \cos \phi$	0.66	0.95	0.84	0.84	
$W = V \sin \phi$	0.74	0.87	0.86	0.74	
$U^* = V \cos(\phi + \Delta\phi)$	0.69	0.95	0.93	0.93	
$W^* = V \sin(\phi + \Delta\phi)$	0.61	0.90	0.87	0.92	
$\Delta\phi$	29	-6	22	31	
wind dir. comparison	Same	66%	93%	85%	82%
	Opposite	9%	2%	2%	1%
	Irrelevant	25%	5%	13%	17%

기준지점 대비 비교지점 풍향을 일치(Same; $|\Delta\phi| \leq \pi/2$), 반대(Opposite; $\pi/2 < |\Delta\phi| < 3\pi/2$), 무관(Irrelevant; $3\pi/2 \leq |\Delta\phi|$)의 세 등급으로 분류한 풍향 일치 확률을 산출하였다(김유근 등, 2001).

표 3에 정리된 호미곶에 위치한 기상관측지점 간의 기상학적 상관도를 살펴보면 기상청 소속 기상관측소를 제외한 기상관측지점 간의 교차상관계수는 평균 0.85로 매우 높게 나타났으며 지점간의 풍향편차를 보정하였을 때의 상관계수는 0.92로 상관도 1.0에 근접하고 있다. 한편 측정지점간 상관도의 시간적 위상차는 없는 것으로 분석되었는데, 이는 측정지점이 남북으로 뻗은 구룡정상에 일렬로 위치하고 있기 때문에 주풍향인 서풍의 영향을 동시에 받기 때문인 것으로 해석된다. 풍향 일치확률의 경우에도 평균 87%의 높은 일치도를 보이고 있어 상관분석 결과를 종합하여 볼 때 측정지점은 모두 동일한 국지풍계에 의해 지배됨을 확인할 수 있다. 이는 호미곶 일대의 주풍향인 서풍의 출현빈도가 높고 해륙풍이 존재하지만 종관풍에 의한 평균풍속이 강하기 때문인 것으로 풀이된다.

한편 포항기상대와 호미곶 자동기상관측소는 약 0.7의 상당한 상관도와 66%의 풍향 일치확률을 보이고 있다. 전산유동해석 결과를 살펴보면 두 지점간의 풍향 반대확률 9%는 해륙풍에 의해 풍향이 변곡될 때의 시간차에 기인한 것으로 분석된다. 풍력단지 설계와 같이 장기간의 기상개황이 필요한 경우 이러한 상관분석법을 이용하여 높은 상관도를 갖는 인근 기상측정소의 장기 측정자료를 외삽(extrapolation)하여 예측함으로써 실측기간의 단기성에 의한 한계

를 극복할 수 있다.

3.3 연직방향 풍속분포

일반적으로 대상지역의 바람환경을 파악하기 위하여 인근에 위치한 기상관측소의 일기상통계표를 활용하게 되는데, 기상요소는 보통 지면고도 10m에서 관측되므로 그 이상의 지면고도에 대해서는 연직방향 풍속분포도를 가정하여 외삽하게 된다. 한편 건축물에 작용하는 풍하중은 높이에 따라 증가하는 풍속의 제곱에, 풍력은 세제곱에 비례하므로 풍속 연직구조의 정확한 파악은 바람환경 분석시 매우 중요한 사항이 된다. 예를 들어 설명하면, 외삽에 의한 풍속 예측에 10%의 오차가 포함되었다면, 풍하중은 20%, 풍력은 30%의 오차로 증폭된다(실제 풍속을 5 m/s로 가정한 경우).

대기경계층은 난류경계층의 일종이므로 풍속 연직분포는 로그법칙 또는 지수법칙으로 표현할 수 있으며, 공학적인 응용분야에서는 간편한 지수법칙이 선호된다.

$$\text{Power-Law: } V(z) = V_r(z/z_r)^\alpha, V_r = V(z_r) \quad (2)$$

$$\text{Logarithmic-Law: } V(z) = u_* / \kappa \cdot \ln(z/z_0) \quad (3)$$

식에서 V 는 지면고도 z 에서의 풍속이며 아래첨자 r 은 참고지점을 의미한다. 로그법칙에서 u_* 는 마찰속도, κ 는 본 칼만(von Kármán) 상수(=0.41), z_0 는 지면거칠기 높이이다.

일반적으로 풍속 연직분포의 형상을 결정하는 풍속분포지수(wind profile exponent) α 는 준정상 상태를 가정할 때 지면거칠기에 의해 결정되므로, 만일 대상지역에 해당하는 풍속분포지수 값을 알고 있다면 지수법칙을 이용하여 임의고도에서의 풍속을 산출할 수 있다.

그림 12는 호미꽃 측정자료를 이용하여 대상지역의 풍속분포도를 곡선회귀로 작성한 그래프로 로그법칙에 비하여 지수법칙이 지면부근에서 풍속을 크게 예측하는 것을 제외하면 풍력발전 설계고도에서 두 식에 의한 오차는 무시할 정도임을 확인할 수 있다.

측정자료의 곡선회귀에 의해 산출된 각 측정지점에서의 풍속분포지수는 그림 13에 장미도표로 도시한 바와 같으며 지형 및 지면거칠기(surface roughness)에 따라 방위각별로 상이한 분포특성을 보인다. 참고로 산불감시초소는 측정기 고장으로 풍향측정이

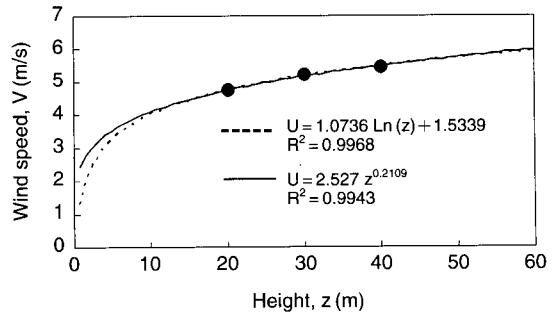


Fig. 12. Curve-fitted wind profiles using observed wind speed.

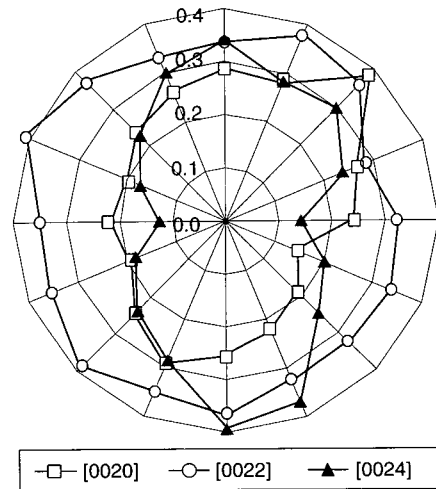


Fig. 13. Rose diagram of wind profile exponents by observation sites.

이루어지지 못하였다. 계절별로는 식물생장에 의한 지면거칠기의 변화에 의해 풍속분포지수는 여름 > 봄 > 가을 > 겨울 순의 크기를 가진다.

3.4 호미꽃 풍력자원 분석

측정지점별로 산출한 계절별 풍속분포지수와 풍속분포의 지수법칙을 이용하여 설계고도 50m에서의 풍속을 계산하여 표 4에 정리하였다. 전 지역의 연평균풍속은 풍력발전의 기본 요구조건인 5 m/s를 상회하며 계절적으로는 겨울철이, 측정지점 중에서는 구만리의 풍속이 가장 센 것을 확인할 수 있다.

풍속별 출현빈도를 나타내는 풍속 확률밀도함수

$f(V)$ 는 풍속분포의 평균값을 나타내는 형상계수(c)와 풍속분포 편차의 크기를 나타내는 등급계수(k)로 간략하게 표현되는 Weibull 분포를 적용하면 다음과 같이 계산된다.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right\} \quad (4)$$

풍력자원은 설계고도에서의 출력밀도(power density)로 평가할 수 있다. 출력밀도 $P [W/m^2]$ 는 풍속의 세제곱에 비례하는 적분식으로 정의되는데 Weibull 분포로 표현되는 풍속 확률밀도함수(probability density function)를 대입하면 감마함수(Γ)의 간단한 결과식을 얻게 된다.

$$P(V) = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty V^3 f(V) dV = \frac{1}{2} \rho \cdot c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (5)$$

그림 14는 풍속(상단)과 출력밀도(하단) 바람장미를 비교한 것으로, 매립장과 같이 풍향 출현빈도의 주풍향과 출력밀도의 주풍향이 다를 수 있음을 보여주고 있다. 참고로 출력밀도의 주풍향 분석은 풍력발전기의 배치를 결정할 때 필수적인 사항이다.

그림 15는 지면고도 30 m에서의 풍속 확률밀도와 출력밀도, 출력밀도 누적비율을 같이 비교한 그래프이다. 구만리의 경우 풍속 4.6 m/s에서 확률밀도가 12.4%로 최대이며 풍속 10.1 m/s에서 29.5 W/m²로 출력밀도 최대값을 가진다. 일반적인 cut-in 풍속인 4 m/s 이하의 출력밀도 누적비율은 3.5%로 나타났다.

외국의 경우 일반적으로 4~5 m/s에서 풍력발전을 시작하는 cut-in 풍속을 설정하여 정상운영 범위인 15~16 m/s에서 최대 에너지를 생산하고 25 m/s 이상에서는 발전을 중단하는 cut-out 풍속을 기준으로 정하고 있다. 반면에 호미곶의 풍력자원 분석결과에 의하면 cut-in 풍속은 3.5~4 m/s로, 정상운영 범위는 10~11 m/s, cut-out 풍속은 25 m/s가 적합한 것으로 파악되고 있다. 실제 풍력발전기의 설치고도인 지면 높이 50 m에서는 높이상승에 의해 대략 10~15%의

Table 4. Extrapolated wind speed at 50 m height above ground by observation sites.

Site	Average wind speed (m/s)	Seasonal average wind speed (m/s)			
		Spring	Summer	Autumn	Winter
Guman-Ri	7.34	7.45	5.31	7.23	9.30
Dumpsite	6.45	6.64	5.03	6.25	7.82
Fire guard	6.79	7.30	5.87	6.51	7.37
Guryongpo	5.86	6.22	4.80	5.84	6.46

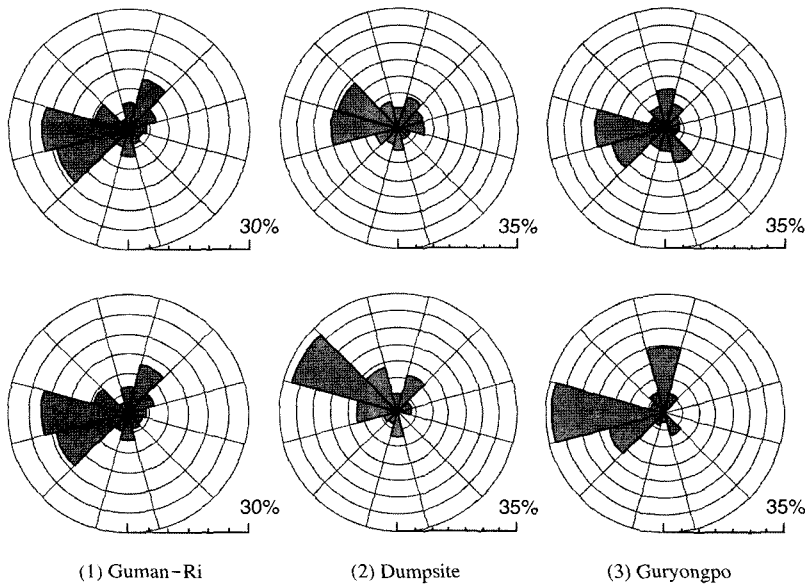


Fig. 14. Rose diagrams of wind speed (upper row) and power density (lower row) by observation sites.

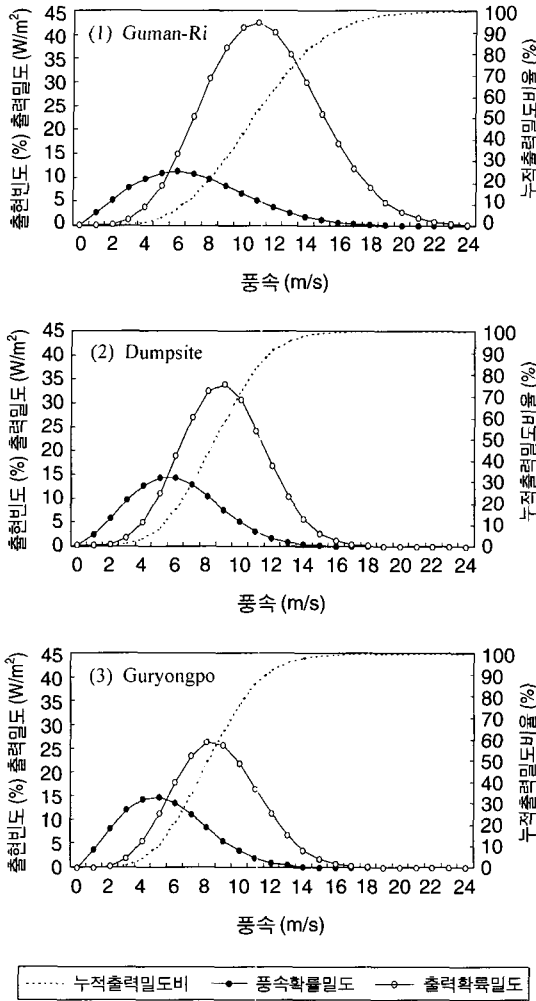


Fig. 15. Distributions of probability density, power density and cumulative power density by wind speed.

풍속상승이 기대되므로 실제적인 정상운영 범위는 12~13 m/s일 것으로 판단된다. 참고로 포항지역의 건축물 설계풍속은 지면높이 10 m에서 45 m/s이다.

표 5는 호미곶 측정위치별 지면높이 50 m에서의 풍력자원 분석결과를 정리한 것으로, 호미곶 북쪽 선단은 풍속등급(wind power class) 4등급으로 우수한(good) 등급으로 분류되며, 이는 해당지역의 바람환경이 풍력발전사업을 실시할 경우 경제성이 확보됨을 시사한다. 한편 호미곶 전 지역에서 풍력발전기의 가동효율과 관련된 cut-in 풍속 4 m/s 이상일 확률은

Table 5. Wind resources in Homi-Cape.

Site name	Power density (W/m^2)	Probability of < 4 m/s wind	Design wind speed (m/s)	Wind class
Guman-Ri	421	41.5%	12.3	4
Dumpsite	252	33.4(%)	10.6	2
Guryongpo	226	21.2(%)	10.0	2

60~80%인 것으로 분석되었다.

4. 호미곶 풍력발전 단지설계

호미곶 풍력발전 단지조성을 위하여 바람환경, 풍력자원 및 전과간섭 분석을 수행하였으며 건설상의 조건과 행정적, 환경적 요건을 만족하는 대상지역을 선별하였다. 풍력발전기의 배치는 최대 에너지수확이 가능하도록 풍력발전 단지설계 프로그램인 WAsP v8.0을 이용하여 결정하였다. 그림 16은 상기 과정의 최종결과로 도출된 호미곶 풍력단지 배치도로 총 11기의 풍력발전기로 구성된다. 그림에서 실선원은 AM 1 라디오 안테나의 영향권, 점선원은 행정적으로 이유로 해당지역이 우수한 풍속등급임에도 불구하고 풍력단지 조성이 불가능한 영역이다.

그림 17은 풍력발전 단지조성에 따른 예상 조감도로 각각 호미곶 해맞이광장에서 전경과 호미곶 중앙농신 임도에서의 전경을 보여주고 있다. 풍력발전 단지조성에 따른 총 발전용량은 11.25 MW이고 연간 전력생산량은 NEG-MICOM사의 750 kW, 1.0 GW, 1.5 GW급 풍력발전기를 기준모델로 산출한 바에 의하면 25.7 GWh일 것으로 예상된다. 참고로 발전기 배치에 따른 후류손실(wake loss)은 최대 5% 이내인 것으로 분석되었다. 생산전력의 매전(賣電; 107.66원/kWh)에 의한 수익이 연간 27.6억원이지만 풍력단지의 경제수명기간을 20년으로 적용한 발전원가 비교법에 의한 경제성 분석(한국에너지기술연구소, 1999) 방식에 따르면 연간 최대 6.48억원의 순수익이 발생하는 것으로 평가되었다. 참고로 설비 투자비는 174억원으로 추산하였다.

현재 호미곶 해맞이공원에는 그림 18과 같이 2001년 3월 지역에너지사업으로 VESTAS V47 660kW급 풍력발전기 1기가 설치되어 운영 중에 있다. 그림 19는 2001년 8월부터 2002년 9월까지의 풍력발전에

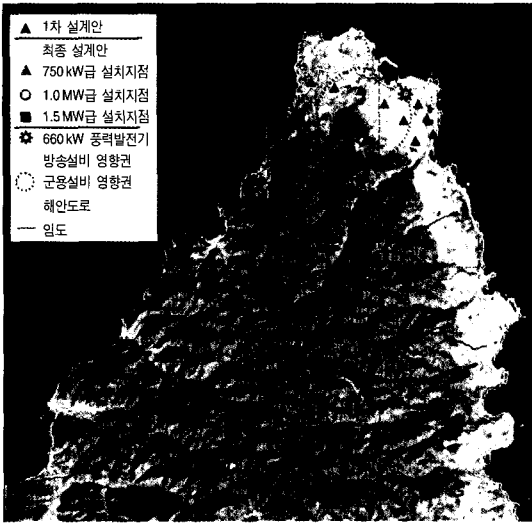


Fig. 16. Layout of Homi-Cape wind farm.



Fig. 17. Landscape views of Homi-Cape wind farm.

의한 월별 전력생산량 기록으로, 호미곶 자동기상관측소의 기상자료와 앞서 도출한 풍속분포지수를 이용하여 풍력자원 분석법으로 산출한 전력생산 예측량과 실제 발전량의 비교를 보여주고 있다. 전력생산 예측량은 최대오차 10% 이내에서 실제 발전량과 정확하게 일치함을 확인할 수 있으며, 그림 19의 비교 결과로부터 향후 호미곶 풍력발전 단지조성에 따른 예상 전력생산량과 경제성 평가결과의 신뢰성을 간접적으로 확인할 수 있다.

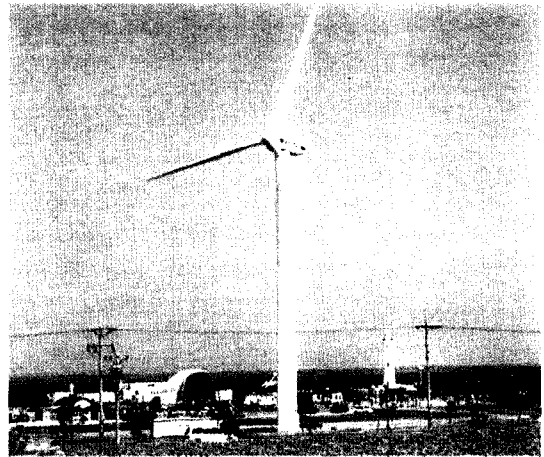


Fig. 18. Wind Turbine installed at Hamaji-Park in Homi-Cape.

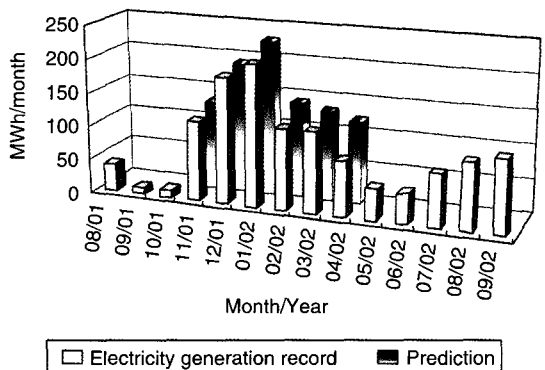


Fig. 19. Comparison between electricity generation record and prediction.

5. 결 론

국내의 바람환경은 국지지형에 의한 지면바람장의 비선형적 변화와 계절에 따른 중관기상의 영향을 받으며, 아울러 해안지역에서는 해륙풍에 의한 일중 풍향의 극단적인 변동이 존재하므로 풍력발전 단지 조성시 바람환경의 정밀분석이 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 포항 호미곶 일대에 풍력발전 단지 조성을 위한 측정지점간 기상상관분석, 전산유동 해석에 의한 3차원 바람장 예측 등의 통하여 국내

상황에 필수적인 바람환경 및 풍력자원 분석과 전파 환경 영향평가법 적용사례를 소개하였다.

바람환경 분석에 의하면 포항지역은 영일만을 거쳐 바다로 환기되는 남서풍계에 해륙풍계가 중첩된 국지풍계이며 호미곶 선단부에 고풍속대가 형성됨을 확인하였다. 풍황실측의 풍력자원 분석에 의하면 호미곶은 설계고도 50 m에서 평균풍속 5 m/s 이상이 유지되는 동일풍계로 풍력발전에 적합한 조건임이 확인되었다. 전파환경 영향평가를 비롯한 지리학적, 행정적 검토를 거쳐 총 11.25 MW 규모의 호미곶 풍력단지를 설계하였으며 연간 25.7 GWh의 전력생산으로 최대 27.6억원의 매전수익이 예상된다.

감사의 글

본 연구는 포항산업과학연구원 자율과제 (2002H016) 로 수행되어 경상북도청과 포항시에 제공되었으며, 산업자원부의 2003년도 지역에너지 시범사업으로 채택되었음.

참 고 문 헌

김유근, 이화운, 홍정혜 (2001) 부산지역 지표 바람장의 특성에 관한 연구, 환경과학회지, 10(2), 135-142.
 김현구, 이정목, 경남호 (1997) 언덕지형을 지나는 유동의 수

치해석적 연구, 한국대기보전학회지, 13(1), 65-77.
 김현구, 이정목, 노유정 (1998) 실지형을 지나는 대기유동에 대한 수치모델의 검증, 한국대기보전학회지, 14(3), 219-228.
 김현구, 최재우 (2002a) 경상북도 지역에너지 계획수립 연구-풍력에너지, 경상북도청, 340pp.
 김현구, 최재우 (2002b) 풍력에너지 이용 및 개발현황, RIST 연구논문, 16(4), 479-485.
 김현구, 최재우 (2002c) Calculation of Wind Profile Exponent in Pohang, 한국풍공학회지, 6(1), 47-52.
 오철수, 강창수, 권순홍 (1992) 동해안지역에 적합한 풍력발전시스템에 관한 조사, 전기학회지, 41(10), 3-9.
 한국에너지기술연구소 (1999) 풍력발전단지 건설 타당성 분석 연구, 1999-N-WD08-P-08, 산업자원부, 223 pp.
 한국전력거래소 (2003) 2003년도판 발전설비현황, 수급거래처, 155pp.
 한국화이바 (2001, 2002) 대체에너지 시범단지조성 타당성조사 연구용역 (I, II), 경상북도청, 253, 212pp.
 Troen, I. and Petersen, E.L. (1989) European Wind Atlas, Risoe National Laboratory, Denmark.
 Kim, H.G. and V.C. Patel (2000) Test of Turbulence Models for Wind Flow over Terrain with Separation and Recirculation, Boundary-Layer Meteorol., 94(1), 5-21.
 Kim, H.G., V.C. Patel, and C.M. Lee (2000) Numerical Simulation of Wind Flow over Hilly Terrain, J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn., 87, 45-60.