

포항 호미곶의 풍환경 분석

김 현 구*·최 재 우**·정 우 식***

Analysis of Wind Environments at Homi-Cape, Pohang

Hyun-Goo Kim*, Jae-Ou Choi** and Woo-Sik Jung***

Key Words: Exposure Category(노풍도), Wind Profile Exponent(풍속분포지수), Pohang(포항), Homi-Cape(호미곶)

Abstract

In the present paper, the practicability of Commentray on Wind Loads of Korean Standard Design Loads for Buildings, which has been enacted in Ministry of Construction and Transportation in June 2000, is validated by using the meteorological data measured at Homi-Cape, Pohang. Assuming that the vertical wind profile follows the power-law in a quasi-steady state, wind profile exponents are calculated by seasons by using wind data as collected through four monitoring towers. According to the Commentray on Wind Loads, Pohang is classified with its exposure category being B and the wind profile exponent being 0.22, while it is identified that the average wind profile exponent as calculated in this study is 0.26. Also, in this paper, a cross-correlation method is suggested in order to identify any meteorological correlation between measurement sites quantitatively.

1. 서 론

대기오염물질의 확산예측과 같은 대기환경영향평가 그리고 공항, 송전설비, 풍력발전단지를 비롯한 건축구조물의 위치선정 및 구조설계를 위해서는 지표면 풍환경을 이해하고 예측할 수 있어야 한다. 그러나 지표면의 풍향, 풍속은 지역 및 지형특성에 따라 시공간변화가 매우 크므로 정확하게 예측하기는 힘들다.

일반적으로 대상지역의 풍환경을 파악하기 위해서는 대상지역 인근에 위치한 기상대 또는 기상관측소의 일기상통계자료를 활용하게 되는데, 일기상통계표의 기상요소는 보통 지면고도 10m에서 관측되므로 이 자료만으로는 바람의 연직구조를 이해 할 수 없다. 한편 주요 대기배출업소에서는 배출연기의 회석효과를 증대시키기 위하여 연돌 높이를 50m 이상으로 설치하므로 이를 대기배출시설에 의한 대기확산예측을 위해서는 연돌 높이에서의 기상요소가 입력되어야 한다. 또한 건축구조물에 작용하는 풍하중(wind load)은 고도에 따라 증가하는 풍속의 제곱에 비례하여 그 영향도가 급증하게 되므로, 특히 풍력발전기와 같이 풍환경에 민감한 구조물의 설계를 위해서는 풍속분포의 연직구조를 정확하게 파악해야 한다.

대기경계층(atmospheric boundary-layer)은 난류경계층의 일종 이므로 풍속의 연직분포는 로그법칙(logarithmic-law) 또는 지수법칙(power-law)으로 표현될 수 있으나, 공학적인 용도에는 주로 다음과 같은 지수분포식이 사용된다.[1]

$$V(z) = V_R \left(\frac{z}{z_R} \right)^\alpha \quad (1)$$

Eq. (1)에서 V 는 지면고도 z 에서의 풍속이고 V_R 은 기준고도 z_R 에서의 풍속이며 α 는 풍속분포지수(wind profile exponent)이다. 일반적으로 풍속의 연직분포 형상을 결정짓는 풍속분포지수는 준정상 상태(quasi-steady state)를 가정할 때 지면조도(terrain roughness)에 의해 결정되므로, 만일 대상지역에 해당하는 풍속분포지수 값을 알고 있다면 Eq. (1)을 이용하여 임의고도에서의 풍속을 산출할 수 있다.

현재 우리나라의 지역별 노풍도 및 풍속분포지수에 대한 유일한 근거자료는 2000년 개정된 건설교통부의 「건축물의 구조기준 등에 관한 규칙」에서 건축물 설계시 풍하중의 계산방법을 참조하도록 제시하고 있는 대한건축학회의 「건설교통부 제정 건축물 하중기준 및 해설」이다.[2,3] 풍하중 해설에서도 고도에 따른 풍속은 기본적으로 Eq. (1)의 지수식에서 정의된 풍속분포지수를 사용하여 계산하도록 명시하고 있으며, 이때 풍속분포지수는 Table 1과 같이 지역별 노풍도(exposure category) 분류기준에 따른 값을 제시하고 있다.

개정된 풍하중 해설은 지난 45년간의 기상관측 자료와 도시화에 따른 지면조건의 변화를 고려하여 우리나라 각 지역의 노풍도를 재분류한 것으로 보고되었지만[4] Table 1에 제시된 지면조도에 따른 노풍도 및 풍속분포지수 분류기준은 미국 풍하중기준(U.S. Wind Load Standards) ANSI/ASCE-7-98과 동일하다.[5]

Table 1. Wind profile exponents depend on exposure category.

Exposure Category	Wind Profile Exponent	ABL Thickness	Terrain Roughness
A	1/3.0 = 0.33	500m	Urban district with high buildings, central area of a large city
B	1/4.5 = 0.22	400m	Urban and suburb areas, well wooded area
C	1/7.0 = 0.15	300m	Open terrain with scattered obstructions
D	1/10 = 0.10	250m	Flat terrain, unobstructed area

* 포항산업과학연구원, hyungoo@rist.re.kr

** 포항산업과학연구원, jochoi@rist.re.kr

*** 부산대학교, wsjung1@pusan.ac.kr

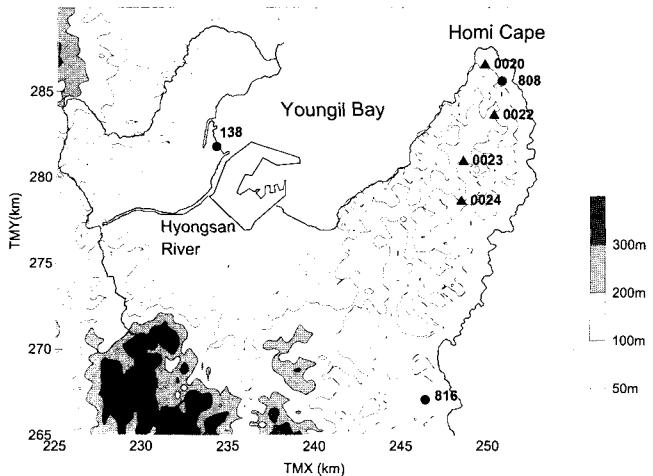


Fig. 1. Topographic map of Pohang area.

그런데 평지 및 도시로 대별되는 미국의 지형특성과 전 국토의 68%가 구릉성 산지로 구성된 우리나라의 지형특성은 매우 상이하기 때문에 미국의 지형 및 기상특성에 의해 결정된 분류 기준을 그대로 우리나라의 경우에도 적용할 수 있는지 확인할 필요가 있으며, 아울러 개정된 풍하준 관련 분류방법의 실효성을 실증자료를 이용한 실증적 검증이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 에너지관리공단의 지역에너지 사업으로 수행된 포항 호미곶 대체에너지 시범단지조성 타당성 조사 연구용역 [6,7]의 일환으로 관측된 풍향자료를 이용하여 포항지역의 노풍도 및 풍속분포지수를 산정 함으로써 개정된 풍하준 해설에서 제시하는 지역별 노풍도 분류에 따른 풍속분포지수의 타당성을 실증적으로 검토하고자 한다.

2. 포항 호미곶의 풍향특성

포항은 경상북도 동해안에 위치한 항구도시로, Fig. 1의 지형도와 같이 영일만과 인접한 해안은 평탄한 지형이며 북북동 방향으로 뻗어있는 호미곶은 해발고도 200m 이하의 구릉성 산지로 이루어져 있다. 현재 호미곶 일대에는 대규모 풍력발전 단지조성을 위한 타당성 조사의 일환으로 풍향측정망이 구축되어 운영 중에 있다.

풍하중 산출을 위한 우리나라의 기본풍속분포도[8]에 의하면 포항의 노풍도를 B로 분류되며, 노풍도에 따른 풍속분포지수를 제시한 Table 1에 의해 포항의 풍속분포지수는 0.22에 해당한다. Table 1에 따르면 노풍도 B는 도시변두리 및 교외지역, 산림지역에 해당되며 실제로 포항의 지형특성은 이와 부합되는 면이 많다. 참고로 개정이전의 분류에 따르면 포항은 개방된 평지, 초지, 해면에 해당하는 노풍도 C등급이었다.[2]

현재 포항 호미곶에는 총 4기의 기상관측타워가 설치되어 있고 그 외에 무인기상관측소(808)와 포항기상대(138)가 위치하

Table 2. Measurement sites at Homi-Cape, Pohang.

Site Code	Site Name	Measurement Starting Date	Measuring Height	Measuring Interval
[0020]	Gumanri	1999.6 ~	20, 30m	10min.
[0022]	Reclamation	2001.1 ~	20, 30m	10min.
[0023]	Fire Guard	2001.3 ~	5, 12m	10min.
[0024]	Guryongpo	2001.3 ~	20, 30m	10min.
[808]	Jangi-Cape	1993.1 ~	10m	60min.

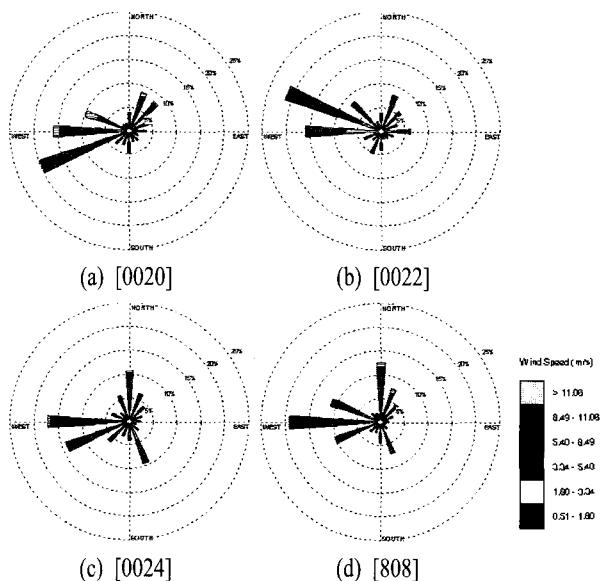


Fig. 2. Annual wind roses at measurement sites.

고 있다. Table 2는 포항 호미곶의 풍향측정망을 정리한 표이며 측정지점의 위치는 Fig. 1에 표시하였다. 측정지점 [0020]은 영일만을 통과한 남서풍 계열의 바람이 서풍으로 변곡하여 동해로 빠져나가는 선단에 해당되며 측정지점 [0022], [0023], [0024]는 호미곶 중앙을 따라 발달한 산지 능선의 임도 주변에 설치되어 있으므로 이곳에서는 언덕효과에 의한 바람의 가속(speed-up)이 기대된다. 참고로 Fig. 1의 세로축 상방향은 정북이며 동부 원점을 기준으로 한 TM(Transverse Mercator) 좌표로 나타내었다. 측정지점에는 30m 높이의 NRG NOW-System 기상측정타워를 설치하고 Table 2에 제시된 측정높이에 풍향, 풍속 측정센서를 부착하였다. 각 센서에서 출력된 신호는 10분 평균값을 기록하였다. 참고로 기상청 무인기상관측소(808)의 측정기록은 1시간 평균값이다.

Fig. 2는 각 측정지점의 2001년도 연평균 바람장미(wind rose)를 도시한 것으로 호미곶 일대의 연간 주풍향이 서풍계열임을 보여주고 있다. 출현빈도로 보면 서풍, 서북서풍, 서남서풍 등 서풍계열이 40% 이상을 차지하며, 서풍을 기준 주풍향으로 볼 때 지점별로 국지지형에 의한 다소간의 풍향편차가 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 포항 호미곶의 풍향특성은 수치예측 결과를 도시한 Fig. 3의 지면 바람장에 확실하게 나타나 있다. 즉, 우리나라의 전반적인 주풍향은 북서풍이지만 포항지역은 지형적

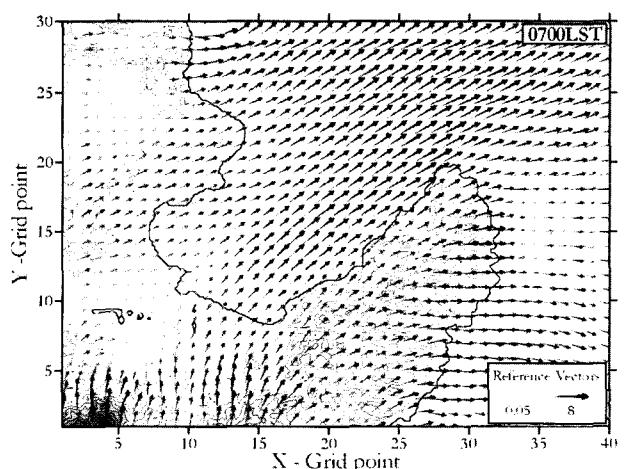


Fig. 3. Prediction result of the wind field over Homi-Cape.

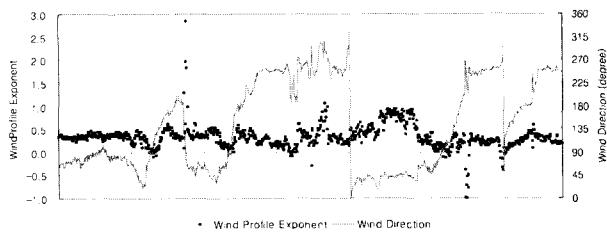


Fig. 4. Time variation of wind profile exponents depend on wind direction (line: wind direction, symbols: wind profile exponent).

인 특성에 의하여 남동-북서방향으로 바람통로가 형성되어 있는 관계로 주풍향이 남서풍으로 편향되며 영일만을 벗어난 바람은 호미곶 북단에서 서풍으로 변곡되는 특성을 잘 보여주고 있다.

3. 풍속분포지수의 산정

포항 호미곶 풍황측정망은 측정지점 [0023]을 제외하면 지상 20m 및 30m, 두 높이에서 계측이 수행되었으므로 각각의 높이에서 측정된 풍속을 Eq. (1)에 대입하면 풍속분포지수는 다음과 같이 산출된다.

$$\alpha = \frac{-\ln[V(20)/V(30)]}{\ln[20/30]} \quad (2)$$

Eq. (2)에서 $V(20)$ 과 $V(30)$ 은 각각 지상 20m 및 30m 높이에서 측정된 풍속이다.

본 연구에서는 풍속분포지수를 산정함에 있어서 다음과 같은 가정을 사용하였다. 즉, 풍속분포의 연직구조는 Eq. (1)의 지수법칙을 따르는 것으로 가정하였으며, 급작스러운 풍향변화 등의 비정상(unsteady) 요인에 의한 것으로 판단되는 풍속분포지수는 제외하고 $0 \leq \alpha \leq 0.5$ 범위 내의 값만을 유효값으로 인정하였다. 실제로 유효범위를 벗어나는 풍속분포지수가 산출되는 경우의 측정기록을 살펴보면 Fig. 4에 제시된 바와 같이 급작스럽게 풍향이 바뀌는 경우가 대부분임을 확인할 수 있었다.

Table 3은 풍속분포지수를 계절별로 산출한 결과로, 모든 측정지점에서 공통적으로 풍속분포지수 값의 크기가 여름(6, 7, 8 월) > 봄(3, 4, 5 월) > 가을(9, 10, 11 월) > 겨울(12, 1, 2 월) 순서로 나타나고 있다. 이는 식물생장이 활발한 봄, 여름이 가을, 겨울에 비하여 지면조도가 증가하기 때문인 것으로 분석된다.

Fig. 5 (a)와 (b)는 각각 풍향별 풍속분포지수, 그리고 지면조도와 풍속분포지수의 실험식[9]을 이용하여 산출한 지면조도를 장미도표(rose diagram)로 도시한 것으로, 삼면이 개방된 초지에 설치된 [0020]의 지면조도가 다른 측정지점에 비하여 월등히 작은 것을 확인할 수 있다. 한편 [0022]와 [0024]는 특정방위의 지면조도가 크게 나타나고 있는데 이는 주변지형에 의한 차폐효과에 기인하는 것으로 생각된다.

Table 3에 의하면 실측을 통하여 산출한 포항 호미곶의 연

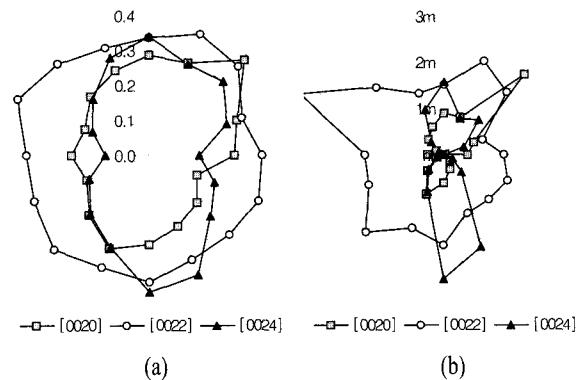
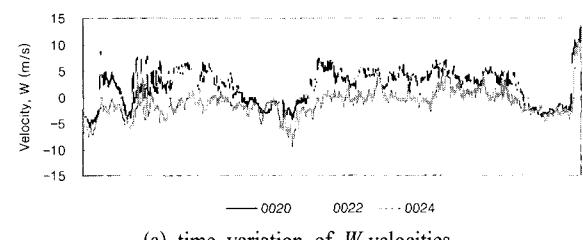


Fig. 5. Rose diagrams of (a) wind profile exponent and (b) surface roughness at the monitoring sites.

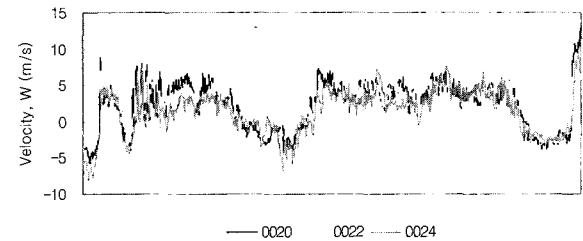
평균 풍속분포지수는 0.26이며, 이 값은 건축기준에 따른 포항지역의 풍속분포지수 0.14와는 2배에 가까운 차이를 보인다. Table 1의 분류에 의하면 본 연구에서 실측을 통하여 산출된 풍속분포지수 0.26은 노풍도 A와 B의 중간에 해당하며, 계절별로는 봄, 여름(0.27, 0.29)은 노풍도 A(0.33)에 가깝고, 가을, 겨울(0.26, 0.21)은 노풍도 B(0.22)에 해당된다. 한편 포항의 대기안정도에 따른 풍속분포지수의 산출결과[10] 역시 전형적인 도시특성값을 보였으며 이는 본 연구 결과의 타당성을 간접적으로 뒷받침하는 것으로 사료된다.

4. 측정지점간의 상관분석

포항 호미곶은 향후 대규모 풍력발전단지조성 대상지역이므로 풍황 측정지점 사이의 기상학적 상관관계를 파악하는 것은 매우 중요한 의미를 갖는다. 일반적으로 효율적인 풍력발전을 위해서는 풍력발전단지 전체가 균일한 풍황특성을 갖는 것이 바람직하며 이러한 풍황특성은 상관분석을 통하여 정량적으로 확인이 가능하다. 본 연구에서는 측정지점간 기상학적 상관관계를 파악하기 위하여 기상관측타워에서 계측된 풍향(ϕ), 풍속(V)을 각각 남-북방향 풍속성분 ($U = V \cos \phi$)과 서-동방향 풍속성분 ($W = V \sin \phi$)으로 분리하고 시간에 따른 변화특성을 고찰하여 보았다. 주의할 것은 풍향은 정북을 기준으로 시계방향으로의 각도로 정의된다.



(a) time variation of W -velocities



(b) After correcting deviations of wind direction

Fig. 6. Comparisons of time variation of W -velocities between the monitoring sites.

Table 3. Mean wind profile exponents by seasons.

Season	Site Code [0020]	Site Code [0022]	Site Code [0023]	Site Code [0024]	Seasonal Avg.
Spring	0.25	0.35	0.25	0.23	0.27
Summer	0.26	0.35	0.27	0.27	0.29
Autumn	0.23	0.37	0.24	0.22	0.26
Winter	0.18	0.29	0.20	0.18	0.21
Annual	0.23	0.34	0.24	0.23	0.26

Table 4. Cross-correlation coefficients between the monitoring sites.

Correlated Site Codes	Correlation Coefficient				$\overline{\Delta\phi}$ (deg.)
	U	W	U*	W*	
[0020]-[0022]	0.95	0.87	0.95	0.90	-6
[0020]-[0024]	0.84	0.86	0.93	0.87	22
[0022]-[0024]	0.84	0.74	0.93	0.92	31

Fig. 6 (a)는 각 측정지점에서의 서-동방향 풍속성분 W 의 시간변화 그래프로 일주일간의 측정기록이다. 그래프를 보면 풍속의 변화가 서로 위상차가 거의 없이 진행되고 있으며, 단지 측정지점 [0024]의 풍속이 (-)방향으로 이격되어 있다. 이와 같이 풍속변화의 위상차가 나타나지 않는 이유는 측정지점들이 주 풍향인 서풍과 수직의 구조를 이루는 호미곶 중앙을 따라 북북동 방향으로 뻗은 산지의 능선에 일렬로 위치하고 있기 때문인 것으로 해석된다. 한편 Fig. 5 (b)는 측정지점 간의 풍향편차를 보정한 서-동방향 풍속성분 즉, $W^* = V \sin(\phi + \overline{\Delta\phi})$ 의 시간변화 그래프로, 여기서 $\overline{\Delta\phi}$ 는 측정지점간 풍향편차의 연평균 풍향편차이다. 그래프에서 확인하게 보이듯이 풍향편차를 보정한 각 측정지점의 시간에 따른 풍속성분은 거의 동일하게 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 참고로 측정지점간 평균 풍향편차의 산출결과는 Table 4에 제시하였다.

본 연구에서는 측정지점 사이의 기상학적 상관성을 정량화하기 위하여 각 측정지점 간의 상호상관계수(cross-correlation coefficient)를 산출하여 비교하였다. 시간함수 $V_1(t)$, $V_2(t)$ 의 상호상관함수는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} V_1(t) V_2(t+\tau) dt \quad (3)$$

Eq. (3)에서 T 는 충분히 긴 시간으로 본 연구에서는 1년의 기간에 대해서 풍속성분의 상관계수를 산출하였다.

시간차 τ 를 변화시켜가며 산출한 측정지점간 풍속성분의 상호상관계수의 결과에 의하면 시간차가 없을 때 ($\tau=0$) 상관계수가 가장 크게 나타났으며 시간차가 커질수록 상관계수는 일차원적으로 감소하는 경향을 보였고 이는 측정지점간 풍향의 위상차가 없음을 의미하는 것이다. Table 4는 풍향편차를 보정하기 이전의 풍속성분 (U, W)와 보정하였을 때의 풍속성분 (U^*, W^*)의 상호상관계수를 비교한 것으로, 풍향보정 이후의 상관계수는 거의 1에 수렴하는 경향을 보이고 있다. 이는 포항 호미곶의 서풍 출현빈도가 높고 평균풍속이 강하기 때문에 풍향 측정망 전체가 동일한 바람장의 지배영역권에 속하기 때문인 것으로 풀이된다.

5. 결 론

본 연구에서는 대체에너지 시범단지조성 타당성 조사 연구의 일환으로 포항시 호미곶에 구축된 기상측정타워의 풍향 실측

자료를 이용하여 풍속 연직분포의 형상을 결정하는 풍속분포지수를 계절별, 풍속등급별 그리고 방위각별로 산출하였다. 미국 풍하중 기준을 단순 차용한 개정 이전의 분류체계에 의하면 포항은 노풍도 C, 풍속분포지수 0.14에 해당되나 본 연구에서 실측 자료의 분석을 통하여 산출한 풍속분포지수는 0.26으로 두 배에 가까운 차이를 보였다. 만일 이러한 풍하중 기준에 따라 지면고도 10m에서 관측된 풍속으로 50m 높이에서의 풍속을 산출하면 실제 풍속보다 20% 이상 과소 예측하게 되며 이에 따라 풍하중은 50% 가까이 감소되는 예측오차가 발생하게 된다.

한편 도시화에 따른 지면조건의 변화 및 지형조건을 고려하여 개정된 풍하중 관련 분류기준에 의하면 포항지역은 노풍도 B에 풍속분포지수 0.22로, 본 연구에서 산출한 풍속분포지수 0.26과 상당한 일치를 보이고 있다. 결론적으로 본 연구를 통하여 개정된 풍하중 관련 노풍도 및 풍속분포지수 분류기준을 포항지역에 한정되지만 실증적으로 검증하였으며 향후 이러한 실증적 연구결과를 반영하여 풍하중 관련 분류기준의 지속적인 수정 및 보완이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 포항산업과학연구원 자체 연구비로 수행되었으며, 포항 호미곶의 풍황 측정자료는 경상북도청 과학기술진흥과 및 (주)한국화이바로부터 제공받았기에 관계기관에게 감사를 표합니다.

참고문헌

- [1] Liu, H. (1991) Wind Engineering: A Handbook for Structural Engineers, Prentice-Hall
- [2] 건설교통부, 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙 (1982, 1993, 1996, 2000), 건설교통부 고시 제2000-153호
- [3] 대한건축학회 (2000) 건설교통부 제정 건축물 하중기준 및 해설, 태림문화사
- [4] 하영철 (2000) 2000년 건설교통부 제정 건축물 하중기준의 풍하중 해설, 대한건축학회지, 14(8)
- [5] ANSI/ASCE-7-98 (2000) Minimum Design Loads for Building and Other Structures, American National Standard Institute, Inc., New York
- [6] (주)한국화이바 (2000) 대체에너지 시범단지조성 타당성조사 연구용역(I), 경상북도
- [7] (주)한국화이바 (2001) 대체에너지 시범단지조성 타당성조사 연구용역(II), 경상북도
- [8] 하영철, 김종락, 김규석 (1998) 건축물 설계용 기본풍속분포도, 대한건축학회논문집 구조계, 14(8), 75-83
- [9] Krohn, S. (2000) Guided Tour on Wind Energy, Danish Wind Industry Association
- [10] 김현구, 최재우 (2001) 포항지역의 대기안정도에 따른 풍속지수, 한국대기환경학회 추계학술대회