

시계열 풍속벡터의 유사성을 이용한 포항지역 바람권역 분류

Classification of Wind Sector in Pohang Region Using Similarity of Time-Series Wind Vectors

김현구*† · 김진솔** · 강용혁*** · 박형동****

Kim Hyun-Goo*† , Kim Jinsol** , Kang Yong-Heack*** and Park Hyeong-Dong****

(Received 18 December 2015; accepted 04 February 2016)

Abstract : The local wind systems in the Pohang region were categorized into wind sectors. Still, thorough knowledge of wind resource assessment, wind environment analysis, and atmospheric environmental impact assessment was required since the region has outstanding wind resources, it is located on the path of typhoon, and it has large-scale atmospheric pollution sources. To overcome the resolution limitation of meteorological dataset and problems of categorization criteria of the preceding studies, the high-resolution wind resource map of the Korea Institute of Energy Research was used as time-series meteorological data; the 2-step method of determining the clustering coefficient through hierarchical clustering analysis and subsequently categorizing the wind sectors through non-hierarchical K-means clustering analysis was adopted. The similarity of normalized time-series wind vector was proposed as the Euclidean distance. The meteor-statistical characteristics of the mean vector wind distribution and meteorological variables of each wind sector were compared. The comparison confirmed significant differences among wind sectors according to the terrain elevation, mean wind speed, Weibull shape parameter, etc.

Key Words : 바람권역(Wind sector), 풍계(Wind system), 포항(Pohang), 시계열 풍속벡터(Time-series wind vector), 풍력자원지도(Wind resource map). 평균 풍속벡터(Mean wind vector)

*† 김현구(교신저자) : 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터

E-mail : hyungoo@kier.re.kr, Tel : 042-860-3376

**김진솔 : 미국 버클리대학교 지구행성과학과

***강용혁 : 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터

****박형동 : 서울대학교 에너지자원공학과 교수

*† Kim Hyun-Goo(corresponding author) : New-Renewable Energy Resource Center, Korea Institute of Energy Research
E-mail : hyungoo@kier.re.kr, Tel : 042-860-3376

**Kim Jinsol : Department of Earth and Planetary Science, University of California, Berkeley

***Kang Yong-Heack : New-Renewable Energy Resource Center, Korea Institute of Energy Research

****Park Hyeong-Dong : Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University

1. 서 론

포항은 경상북도 동해안에 위치한 항구도시이자 산업도시이며, 형산강 하구 평탄한 지형에 시가지와 철강산업단지가 밀집되어 있다.

포항의 영일만은 동쪽이 120~180m의 구릉성 산지로 형성된 호미곶에 의해 둘러싸여 있으며 북동쪽의 동해를 향해 열려있는 지형적 특성을 가진다(Fig. 1).

우리나라의 겨울철 종관풍은 북서풍이지만 포항은 북서쪽과 남동쪽이 내륙 산지로 막혀있으며 안강, 경주를 통해 유입된 종관풍이 북동쪽으로 열려있는 영일만을 통해 배출되는 종관풍계가 형성될 지형적 조건을 가지고 있다.¹⁾



Fig. 1 Topographic map of Pohang region

포항 호미곶의 풍력자원에 대해 분석한 선행연구에 의하면, 풍향 편차를 보정하였을 경우 호미곶 능선을 따라 설치된 기상탑에서 측정된 풍속의 상관계수가 0.9 이상으로 매우 높게 나타났기 때문에 호미곶을 동일한 바람권역으로 분석한 바 있다.²⁾

포항지역 국지순환계는 해륙풍계와 종관

풍계로 구분되며, 상층기상자료를 이용하여 판별한 바에 의하면 연간 51일 정도 해륙풍계가 나타난다. 해륙풍 사례일에 대한 수치모의에 따르면 영일만을 통해 남서풍으로 환기되는 육풍과 북동풍으로 침투하는 해풍의 변환시기에 복잡한 국지풍계가 형성됨을 확인하였다.³⁾

포항의 대단위 철강산업단지에서 배출되는 대기오염물질에 의한 환경영향은 포항지역에 있어서 중요한 사회환경적 이슈이다. 이에 환경부는 포항지역에 다수의 대기환경측정소를 설치하여 운영하고 있는데, 정확한 대기오염 현황을 측정할 수 있는 측정소의 위치선정은 중요한 문제이다. 정종현 등(2008)은⁴⁾ 포항지역의 지면기상자료를 이용하여 K-평균 군집분석을 통해 바람권역을 분류하였다. 그러나 6개소의 기상관측소 위치를 기준으로 5개의 바람권역으로 구분하고 있어, 단순한 영역구분에 불과한 실용성이 매우 약한 결과라고 사료된다.

이후 정종현 등(2012)은⁵⁾ 지면기상자료에만 의존한 단순한 바람권역 분류의 한계성을 보완하기 위해 계절별 종관일에 대한 수치기상모의를 수행하고 이를 바탕으로 국지풍계를 재분류하였으나, 군집분석 방법에 대한 구체적인 방법을 제시하지는 않았다.

본 연구는 풍환경의 정확한 이해가 요구되는 포항지역의 국지풍계에 따라 바람권역을 분류하되, 선행연구의 기상자료의 한계성과 분류방법의 문제점을 극복하고자 한다. 이를 위한 해석자료로는 신뢰도가 검증된 한국에너지기술연구원의 풍력자원지도를, 분류방법으로는 시계열 풍속벡터 유사성을 이용한 군집분석을 적용하였다.⁶⁾ 또한 분류된 바람권역별 기상학적 특성을 비교분석함으로써 바람권역 분류의 타당성을 검증하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 풍력자원지도

본 연구에서는 한국에너지기술연구원의 풍력자원지도 데이터베이스로부터 포항지역 격자점에 대한 시계열 풍속벡터를 추출하여 해석자료로 이용하였다.

본 연구에서는 한국에너지기술연구원의 중해상도 풍력자원지도를 사용하였는데, 이는 3km x 3km 수평면 공간해상도와 1시간-간격 시간해상도로 2005년부터 2007년까지의 기간에 대해 중규모 수치기상예측(numerical weather prediction) 모델 MM5(Mesoscale Model 5)로 해석한 자료이다.

풍력자원지도는 IEC 61400-12에 의거하여 수행된 기상탑 측정자료의⁷⁾ 검증, 지상기반 원격탐사인 LiDAR에 의한 연직방향 풍속분포에⁸⁾ 대한 검증, 위성기반 원격탐사인 SAR 위성영상 추출 해상풍에⁹⁾ 대한 검증 등을 통하여 예측 불확도를 정량 평가하였을 뿐 아니라, 해외 풍력자원 컨설팅회사의 상업용 풍력자원지도와의 비교검증을 통해서도 신뢰도를 확인한 바 있다.¹⁰⁾

2.2 바람권역 분류

군집분석(cluster analysis)은 객체의 유사성이 높은 집단을 분류하는 통계기법으로, 이를 위하여서는 먼저 객체 간의 유사성 또는 비유사성의 척도를 나타내는 거리를 정의해야 한다.

본 연구에서는 두 격자점(node) A와 B 간의 시계열 풍속벡터의 유사성을 나타내는 척도로 유클리디안(Euclidean) 거리를 Eq. (1)과 같이 정의하였다.

$$d_{AB} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sqrt{(\tilde{u}_{Aj} - \tilde{u}_{Bj})^2 + (\tilde{v}_{Aj} - \tilde{v}_{Bj})^2} \quad (1)$$

여기서 j는 시계열 바람벡터가 정의되는 시각을 나타내며, N은 시계열 자료의 총 개수(8,760시간 x 3년)이다.

두 격자점의 시계열 풍속벡터의 차이를 정량적으로 계산하기 위하여 풍속벡터를 동서방향 풍속성분(u)과 남북방향 풍속성분(v)으로 분리(decomposition)하였다. 그리고 각각의 풍속성분을 평균풍속(S)으로 나누어 줌으로써 풍속을 정규화(normalization)하였다.

$$S = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sqrt{u_j^2 + v_j^2} \quad (2)$$

$$\tilde{u}_j = \frac{u_j}{S}, \quad \tilde{v}_j = \frac{v_j}{S} \quad (3)$$

정우식 등(2009)은¹¹⁾ 바람권역 분류 시 Eq. (3)과 같이 풍속을 정규화하지 않았으며, 그에 따라 풍속은 다르나 풍향이 같은 두 격자점 사이의 유클리디안 거리를 크게 산정하여 유사성을 낮게 반영한 반면, 본 연구에서는 시계열 풍속을 정규화 하였기 때문에 풍향이 동일한 경우 유사성의 비중을 더 크게 고려하도록 하였다.

본 연구에서는 군집분석에 의한 바람권역 분류를 다음과 같이 두 단계로 구성하였다.¹²⁾

첫 번째 단계에서는 계층적 군집분석(hierarchical clustering)을 통해 다음 단계에서 이용할 적합한 군집개수와 초기 중심점을 선택한다. 두 군집 사이의 거리는 각 군집에서 가장 거리가 먼 두 관측 값들 사이의 거리를 두 군집 사이의 거리로 정의하는 최장연결법을 사용하였으며, Eq. (1)을 이용하여 거리를 계산하였다. 적합한 군집개수는 병합되는 두 군집 사이의 거리와 군집개수에 대해 도시한 그래프를 이용하여 선정한다. 병합되는 두 군집 사이의 거리가 크게 증가할 때에 비유사성이 큰 두 군집

이 병합됨을 의미한다. 따라서 이때가 병합이 중지되어야 할 시점으로, 적합한 군집개수를 나타낸다. 초기 중심점은 계층적 군집분석을 통해 생성된 각 군집의 중심점으로 설정한다.

두 번째 단계에서는 비계층적 군집분석(non-hierarchical clustering)에 해당하는 K-평균(K-means) 군집분석을 통해 바람권역 분류를 수행한다.

K-평균 군집분석은 앞서 결정된 군집개수 K의 군집중심을 선택하고, 각 항목을 가장 가까운 중심점을 갖는 군집에 할당하여 전체 자료를 상대적으로 유사한 K개의 군집으로 분류하는 방법이며, 두 군집 사이의 거리는 Eq. (1)로 정의한다.

비계층적 방법인 K-평균 군집분석은 사전에 설정한 군집개수와 초기 중심점에 따라 군집분석 결과가 달라진다는 단점을 가지고 있다.

정우식 등(2006)은¹³⁾ 군집 내 개체간의 거리 척도인 pseudo-F와 pseudo-t2 통계량을 비교하여 군집 개수의 증감에 따라 민감한 변화를 보이는 군집 개수를 선택하였으나, 군집의 초기 중심점에 따라 분석결과가 달라지는 문제점은 해결하지는 못하였다.

본 연구에서는 계층적 군집분석을 사용함으로써 군집의 초기 중심점에 무관하게 최종적으로 유의한 군집 개수를 결정할 수 있도록 함으로써 이러한 문제를 해결하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 바람권역 분류

풍계분류의 첫 번째 단계에서 계층적 군집분석을 통하여 적절한 군집개수를 결정하였다.

Fig. 2는 군집개수에 따른 군집 중심점간의 거리를 나타낸 그래프로, 군집의 중심점간의 거리가 가장 가까운 인군 군집을 결합하여 군

집개수를 줄어나감에 따라 개별 군집의 크기가 커지게 되므로 군집간의 거리도 점차로 증가하게 된다.

적정한 군집개수는 군집개수를 줄이더라도 중심점의 거리가 증가하지 않다가 다시 급격하게 증가할 때이다. Fig. 2에서는 군집개수 8개를 기점으로 중심점간의 거리가 급격하게 증가하였기 때문에 8개를 적절한 군집개수로 판단하였다.

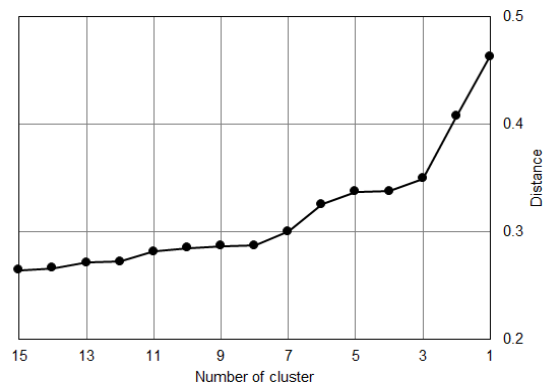


Fig. 2 Distance measure for each number of clusters

풍계분류의 두 번째 단계에서는 K-평균 군집분석을 수행하여 포항지역을 Fig. 3과 같이 8개의 국지풍계 권역으로 분류하였다.

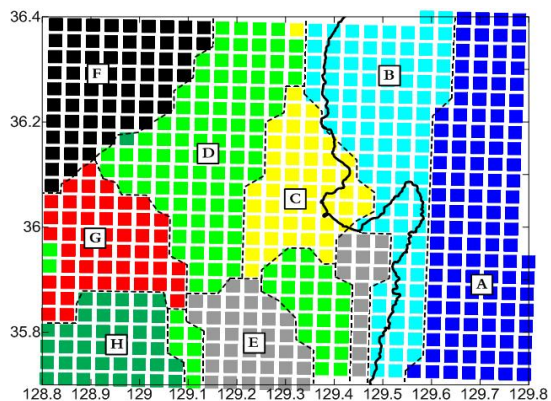


Fig. 3 Classified wind sectors in Pohang region

3.2 바람권역 풍특성

일반적으로 풍속은 지형고도에 따라 증가한다. 또한 산지지형은 바람장의 형성에 지배적인 영향을 미친다. 포항지역의 지형과 풍계의 상관성을 고찰하기 위해 Fig. 4와 같이 지형고도에 바람권역을 중첩하여 나타내었다.

예상과 같이 지형고도와 바람권역 사이에 뚜렷한 상관성이 나타난다. 즉, 지형의 영향이 없는 바다는 해안선을 경계로 바람권역이 분류되었으며, 내륙은 안강(G), 경주(D) 그리고 포항의 도심평지(C)가 산지지형(D, F)과 별도의 바람권역으로 분류되었다.

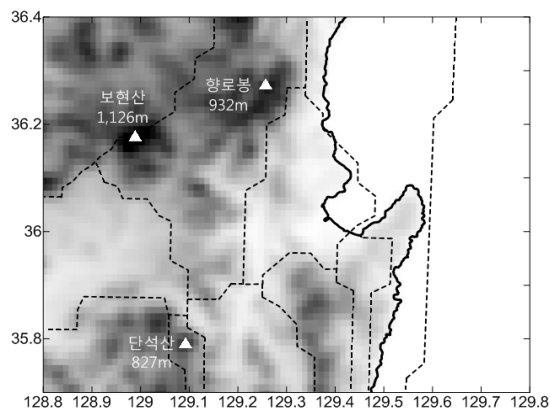


Fig. 4 Terrain elevation in Pohang region (m)

Fig. 5는 포항지역의 평균풍속 분포도를 보여준다. 특징적으로 북쪽의 보현산과 남쪽의 단석산에 의해 남북방향의 차단된 안강 내륙 평야(G, Fig. 3의 풍계번호)의 풍속이 가장 낮게 나타난 반면, 포항북구의 보현산(F)을 거쳐 항로봉(D)에 이르는 고산지대의 풍속이 가장 높게 나타났다. 따라서 포항지역 풍속분포는 바람권역에 따라서 유의한 차이가 있음을 알 수 있다.

풍속분포의 확률밀도함수인 와이블 형상계수(Weibull shape factor)를 도시한 Fig. 6을 보면, 평균풍속 분포도와 동일하게 안강 평야

(G)에서 작은 값(1.0~1.2)을 보이고 해상(A)에서는 큰 값(1.8~2.0)을 보인다.

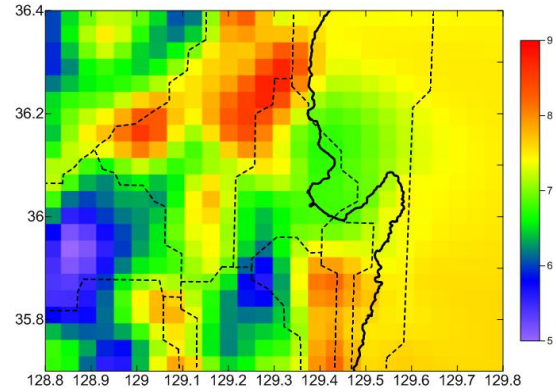


Fig. 5 Mean wind speed distribution (m/s)

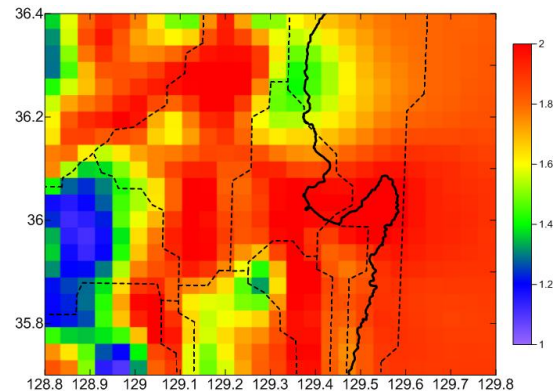


Fig. 6 Weibull shape factor distribution

와이블 형상계수 값이 크다는 것은 평균풍속의 출현빈도가 높아짐을 의미하며, 상대적으로 평균풍속 이하의 저풍속 및 이상의 고풍속 구간의 출현빈도가 낮아지게 된다. 반대로 작다는 것은 저풍속 및 고풍속의 출현빈도가 높다는 것을 의미한다.

지형고도 상승에 따라 풍속이 증가하는 고산지역(D)과 지형강제력이 사라지는 해상(A) 및 해안(B)에서 와이블 형상계수는 큰 값을 나타낸다.

그런데 안강 평야(G)로부터 경주 북단(D)을 지나 포항 북구와 남구 경계의 평지(C)로 연결되는 평지에서도 높은 와이블 형상계수를 보이고 있다. 이는 앞서 분석한 바와 같이 남-북으로는 산지지형으로 차단되고 서-동 방향으로 평지가 연결되는 채널효과로 인한 풍속 가속이 발생함에 따라 평균풍속의 출현빈도가 높아지는 것으로 풀이된다.

평균바람벡터(mean vector wind)를 도시한 Fig. 7을 보면, 해상에서는 동계 종관풍인 북서풍의 영향이 탁월하게 나타나는 반면, 내륙에서는 복잡한 산지지형에 의해 다양한 풍계가 발달하며, 앞서 분석한 바와 같이 안강 평야로부터 서-동으로 발달한 저지대를 따라 바다로 배출되는 바람 길이 형성되었음을 알 수 있다.

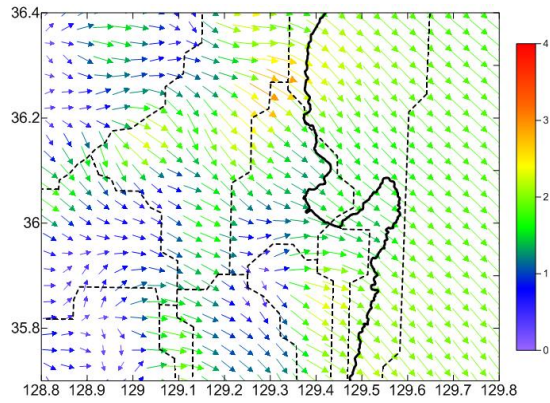


Fig. 7 Mean vector wind (m/s)

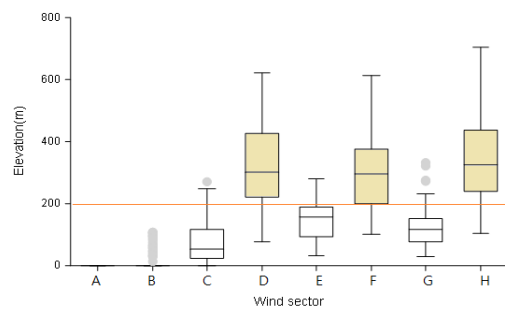
참고로 평균바람벡터 V 는 다음과 같이 정의된다.¹⁴⁾

$$V = (\tilde{u}, \tilde{v}) \quad (4)$$

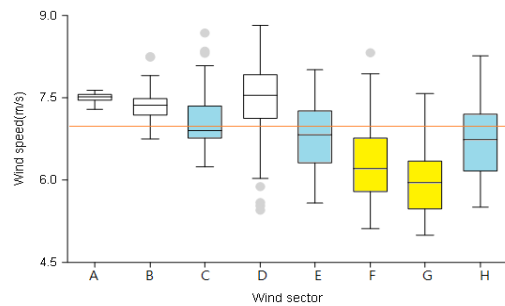
$$\tilde{u} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{u}_j, \quad \tilde{v} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{v}_j \quad (5)$$

Fig. 8은 바람권역별로 지형고도, 평균풍속,

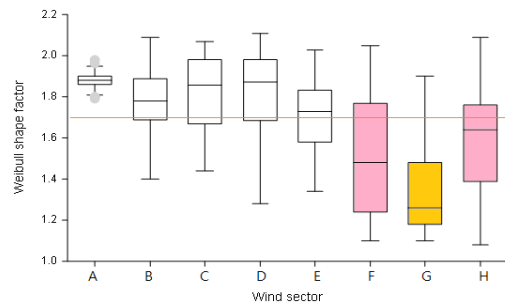
풍속의 표준편차 및 와이블 형상계수의 분포 특성을 비교한 상자그림(box plot)이다. 즉 각각의 바람권역 내에서 기상 요소값의 통계특성을 상자그림으로 도시하여 바람권역 간의 유의한 차이점을 판별하고자 하였다. 참고로 평균 및 산포가 유사한 범위 내에 있는 군집은 동일한 상자 색상으로 표시하였다.



(1) Elevation (m)



(2) Wind speed (m/s)



(3) Weibull shape factor

Fig. 8 Box plots of meteorological variables by wind sector

지형고도의 경우, 해상(A, B), 해발고도 200m 이하의 저지대(C, E, G), 200m 이상의 고지대(D, F, H)로 구분된다. 평균풍속의 경우, 7.5m/s 풍속대(A, B, D), 7.0m/s 풍속대(C, E, H), 6.0m/s 풍속대(F, G)로 구분된다. 와이블 형상계수의 경우, 1.7~1.9 범위(A, B, C, D, E), 1.5~1.7 범위(F, H), 1.2~1.5 범위(G)로 구분된다.

상자그림을 통해 분석한 기상요소별 통계특성을 종합하면, 바람권역은 지형고도, 평균풍속 그리고 와이블 형상계수의 조합에 의한 특성으로 설명됨을 알 수 있다.

4. 결 론

한국에너지기술연구원의 풍력자원지도의 시계열 풍속자료를 이용하여 포항지역의 바람권역을 분류하였다. 또한 바람권역의 국지풍계 특성을 기상요소의 통계분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 바람권역 분류를 계층적 군집분석으로 적절한 군집개수를 결정한 후 비계층적 군집분석으로 바람권역을 분류하는 2단계로 체계화 하였으며, 군집분석의 유사성 척도로서 시계열 풍속벡터의 유클리디안 거리를 사용하였다. 또한 풍속벡터를 정규화함으로써 풍향이 동일한 경우 유사성의 비중을 더 크게 반영하도록 하였다.
- (2) 평균 풍속벡터 분포도를 이용함으로써 바람권역별 국지풍계의 기상학적 특성에 대한 설명력을 높일 수 있었다. 즉, 복잡지형에서 지형효과로 인하여 상이하게 전개되는 국지풍계의 특성을 효과적으로 설명할 수 있었으며, 이는 대기오염의 이송 및 확산, 바람길 과 같은 풍환경 분석, 풍력단지 설계 등 다양한 분야에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

- (3) 바람권역별 기상요소에 대한 통계분석을 통하여 포항지역 바람권역은 지형고도, 평균풍속 그리고 와이블 형상계수 등 기상변수의 조합에 따라 유의한 차이가 있음을 확인하였다. 이 중 국지풍계에 가장 큰 영향인자는 지형고도이므로 보다 정확하며 상세한 바람권역 분류를 위해서는 고해상도 풍력자원지도가 필요할 것으로 판단된다.

향후에는 보다 체계적인 바람권역별 국지풍계의 기상학적 차이점을 파악하기 위하여 주요 기상요소들에 대한 요인분석을 수행하고자 하며, 고해상도 풍력자원지도를 이용하여 지형효과에 대한 설명력을 향상시키고자 한다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (20143010071570)

Reference

1. Jung, W. S., Lee, H. W. and Kim, H. G., An Analysis and Numerical Simulation on Southwestern Prevailing Wind Phenomenon Around Pohang in Winter, Journal of the Korean Earth Science Society, Vol. 24, No. 6, pp. 533-548, 2003.
2. Kim, H. G., Choi, J. O., Son, J. B., Jung, W. S. and Lee, H. W., Analysis on Wind Environments for Siting a Wind Farm, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 19, No. 6, pp. 745-756, 2003.
3. Lee, H. W., Jung, W. S., Kim, H. G. and Lee, S. H., A Study of Atmospheric Field Around the Pohang for Dispersion Analysis of Air

- Pollutants - Numerical Simulation of Wind Field, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 20, No. 1, pp. 1-15, 2004.
4. Jung, J. H., Lee, H. H., Lee, H. W., Chang, H. S. and Shon, B. H., Analysis of Wind Sector Division for Pohang Area, Journal of Environmental Science International, Vol. 17, No. 4, pp. 385-396, 2008.
 5. Jung, J. H., Lee, H. D. and Shon, B. H., Assessment of Location of the Air Quality Monitoring Stations According to the Analysis of Wind Sector Division in Pohang, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 13, No. 4, pp. 1931-1938, 2012.
 6. Kim, J. S., Kim, H. G. and Park, H. D., Spatial Classification of Spatio-Temporal Wind Speed Data Using Pearson's Correlation, International Association for Mathematical Geoscience 2014, New Delhi, India.
 7. Kim, H. G., Jang, M. S. and Lee, E. J., Meteorological Analysis for Establishment of Jeju Wind Resource Database, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 17, No. 6, pp. 591-599, 2008.
 8. Kim, H. G., Cho, K. P., An, H. J. and Jeon, W. H., Comparative Validation of WindCube LIDAR and Metek SODAR for Wind Resource Assessment - Remote Sensing Campaign at Gimje Plane, Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 16, No. 1, pp. 23-49, 2012.
 9. Hwang, H. J. and Kim, H. G., Analysis on Offshore Wind Using SAR Satellite Imagery, Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 15, No. 4, pp. 67-71, 2011.
 10. Kim, H. G., Kang, Y. H. and Yun, C. Y., Comparative Analysis on Commercial Wind Resource Maps of South Korea, Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 19, No. 1, pp. 9-14, 2015.
 11. Jung, W. S., Lee H. W., Park J. K., Kim, H. G., Kim, E. B., Choi, H. J., Kim, D. H. and Kim, M. J., Classification of Wind Sector for Assessment of Wind Resource and Establishment of a Wind Map in South Korea, Journal of Environmental Science International, Vol. 18, No. 8, pp. 889-910, 2009.
 12. Davis, R. E., Kalkstein, L. S., Development of an Automated Spatial Synoptic Climatological Classification, International Journal of Climatology, Vol. 10, pp. 769-794, 1990.
 13. Jung, W. S., Lee, H. W. and Park, J. K., Analysis of Local Wind in Busan Metropolitan Area According to Wind Sector Division - Part III: Division of Local Wind Sector Over Busan, Journal of Environmental Science International, Vol. 16, No. 3, pp. 311-321, 2006.
 14. Fisk, C. J., Two-Way (Hour-Month) Time Section Plots as a Tool for Climatological Visualization and Summarization, 14th Conference on Applied Climatology, Seattle, US, 2004.