

전산유동해석을 통한 산악 지역의 고해상도 풍력자원 특성에 관한 수치연구

이 순 환*

부산대학교 환경연구원, 609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30

A Numerical Study on the Characteristics of High Resolution Wind Resource in Mountainous Areas Using Computational Fluid Dynamic Analysis

Soon-Hwan Lee*

Institute of Environment Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract: The purpose of this paper is to evaluate the wind energy resources with high spatial resolution in Sunghak and Guduck mountains in Busan Metropolitan area under the various atmospheric stabilities. The numerical model used in this research is A2C (Atmosphere to CFD), mainly applied to assess the regional scale and microscale meteorological phenomenon. Wind under the strong atmospheric stability moves around mountain side smoothly due to the strong potential energy. On the other hand, the cavity region on the lee side of mountain tends to be created and expanded as the atmospheric stability decrease. Annually the average distribution of wind power density, turbulence kinetic energy, and vertical wind shear help to explain quantitatively that wind resource near the northern side of Guduck mountain top is more suitable to establish wind energy complex than that in any other regions in the target area.

Keywords: wind resources, computational fluid dynamics, atmospheric stability, turbulence kinetic energy

요약: 전산유동 수치모형을 이용하여 다양한 대기안정도 상태하에서 부산광역시내 송학산과 구덕산의 초고해상도 풍력자원을 평가하였다. 연구에 사용된 수치모형은 중규모와 미규모 기상현상의 재현에 널리 사용되는 전산유동 수치모형인 A2C이다. 대기안정도가 강할 때, 위치에너지의 크기가 상대적으로 강해지기 때문에 산을 넘어가는 경향이 나타난다. 반면 대기안정도가 약해지면서 산악후면의 후류 발생이 증대되며, 난류에너지가 증가한다. 그리고 연평균 풍력밀도, 난류운동에너지, 연직 바람전단력 분석을 통하여 구덕산 정상 남쪽 부근이 다른 구역보다 가용 풍력자원이 풍부함을 확인하였다.

주요어: 풍력자원, 전산유체역학, 대기안정도, 난류운동에너지

서 론

급격한 인구증가와 산업화의 진척에 따른 에너지 소비의 증가는 기존 화석연료의 고갈과 지구온난화에 의한 기후변화를 유발하고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 각국에서는 신재생에너지 개발에 박차를 가하고 있다. 신재생에너지 중 풍력에너지는 기술적 성숙도가 높고, 발전단가가 낮기 때문에 현재 가장 경제성이 우수하다는 화력자원에 필적할 만하다

(김현구와 최재우, 2002; 한국에너지기술연구원, 2005). 그리고 지식경제부는 '제2차 신재생에너지 기술개발 및 이용 보급 기본계획'에서 2020년에는 한국내 에너지 자원의 9.4%를 풍력에너지를 통하여 공급하겠다는 계획을 수립하였으며, 선진국수준의 풍력발전단지 개발을 위하여 풍력 발전단지의 개발을 위한 다양한 프로젝트를 가동하고 있다(방형준, 2007; 지식경제부, 2009).

이러한 풍력자원의 개발을 위해서는 먼저 지역내 풍력자원의 분포를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 한반도는 종관적으로 경압성이 강하기 때문에 풍력자원이 우수한 것으로 판단되며, 정부는 2007년부터 한

*Corresponding author: withshlee@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-583-2651
Fax: +82-51-583-2651

반도 풍력자원 분포를 조사하여 현재 다양한 해상도의 풍력에너지 분포 정보를 제공하고 있다(한국에너지기술연구원, 2010). 한반도 풍력자원지도 작성과정에서는 관측 자료의 2차원 공간 보간법과 등지기법을 통한 중규모 수치모의법 등 다양한 형태의 접근방법이 시도되었으며, 한국에너지기술연구원에서 제공하는 풍력자원지도의 경우, 현재 현업 기상예보에 적용되는 3차원 대기 역학 수치모형을 바탕으로 다양한 관측 및 위성자료 동화 기술을 접목하여 작성되었다(이순환 외, 2007; Lee et al., 2008; 김현구 외, 2008; 이화운 외, 2009; 한국에너지기술연구원, 2010).

이순환 외(2009)는 1 km 해상도의 수치모형실험을 통하여, 한반도의 경우 계절적인 변동성이 크기는 하지만, 전체적으로 태백산맥을 중심으로 한 산악지역과 도서지방을 포함한 연안 해상영역에서 높은 풍력 자원이 형성되고 있음을 보였으며, 허철운 외(2010)는 2004년부터 2008년까지 5개년 동안의 지상 관측 자료를 바탕으로 이를 증명하였다. 이러한 수치 및 관측 자료를 바탕으로 현재 태백 등 높은 고산지역에서 다수 풍력단지가 운용중이며 새만금 지역 등 해상풍력 단지의 개발이 진행되고 있다.

그러나 이들 발전단지 개발에 기초자료가 되는 한반도 국가 풍력 자원 지도는 해상도가 낮다. 현재 국가 연구기관이 제공하는 바람자원 지도의 최고 공간 해상도는 1 km×1 km이다. 실제 풍력 발전단지의 개발은 이보다 높은 공간 해상도를 요구한다. 그러나 현재 중규모 수치모의에 의한 바람 자원 지도 평가는 공간해상도 이하 크기의 건물이나 산악에 의한 효과를 격자 내의 평균화된 상수 값으로 취급하여 계산하는 한계를 가지고 있고, 복잡한 산악지형을 충분한 수평해상도로 표현하기에 한계가 있다. 최근 들어 광역 분포 뿐 아니라 실질적으로 발전 단지 개발이 가능한 도심규모의 바람자원 평가의 중요성이 대두된다. 교외지역의 대단위 풍력단지 뿐 아니라 에너지 손실을 최소화하기 위해 도심지의 풍력발전에 관한 전망을 하고 있다(Knight, 2004; Westerholm, 2004). 그리고 이러한 도심 근교의 육상 풍력 발전 단지는 소음 등 환경 문제를 동시에 고려하여야 하기 때문에 복잡한 산악지역내의 최적지 높은 공간 정밀도로 설정하여야한다.

그러므로 본 연구는 실제대기의 중규모 또는 국지 순환을 고려함과 동시에 전산유체역학 기술을 포함하

여 미세규모 지형에 의한 유동장을 동시에 재현할 수 있는 수치모형을 사용하여 부산 산악지역의 초고 해상도 풍력자원 평가를 실시하였다. 그리고 실제 산악지형에서 풍력발전 단지가 설계될 경우 단순히 풍속의 절대량 뿐 아니라 지형 강제력에 의해 발생하는 산 후면의 난류와 연직 시어 등도 실제 풍력자원 개발에 중요한데, 본 연구에서는 부산내 복잡 산악지형인 승학산과 구덕산을 초고해상도로 분해하고 이들 지형에 의해 발생하는 후면의 난류와 연직 시어를 고려하여 풍력 자원 최적입지산정 방법을 제시하고자 한다. 이러한 연구는 한반도 풍력자원 개발을 위한 실질적인 기초자료를 제공할 것으로 판단한다.

실험 방법

연구대상지역

본 연구의 대상지역인 승학산-구덕산은 해발고도가 각각 496 m와 565 m이며, 부산광역시의 서쪽에 위치하고, 남쪽으로 바다, 동쪽으로 낙동강에 접해있다. 이들 두 산지는 서로 접해 있으며 주변으로는 도심이 발달하여 전형적인 도심지내의 산악지역으로 분류된다. Fig. 1은 연구대상지역 주변의 위성사진과 수치계산 영역을 나타낸 것이다. 고해상도의 풍력자원 평가를 위해서는 지형자료의 정확도가 중요한데, 본 연구의 지형고도 자료는 NASA의 SRTM(the Shuttle Radar Topography Mission) 3초(약 90 m)자료를 사용하여 실제 지형고도와 ±10 m내의 오차를 보여 매우 정확히 표현되었다. 전체지형은 단순한 중형산악지역이 아니고 말발굽형태의 U 지형으로 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 따라서 이들 지형에 의해 생성되는 바람장 역시 매우 복잡하게 나타난다.

지상관측장비에서 관측한 자료를 바탕으로 작성된 80 m 고도의 평균 지상 관측 자료에 근거한 고도 80 m의 평균풍속을 나타낸 것이 Fig. 2이다(기상청, 2010). 관측자료에 따르면, 구덕산지역의 평균 풍속은 8.2m/s 이며, 풍력 발전 가능 풍속인 5 m/s 이상의 풍속이 전체 88%를 차지하고 있다. 또한 이들 지역의 풍력 자원은 관측지점 88개 중 4위를 기록하여 매우 우수한 풍력에너지가 나타난다는 것이 확인되었으며, 또한 수치모의에 근거한 저해상도 바람지도에 따르면 이 지역은 풍력밀도 500 w/m²의 우수한 풍력자원이 잠재하고 있다(에너지기술연구원, 2010). 그리고 이러한 산악지형에 발전단지가 들어설 경우

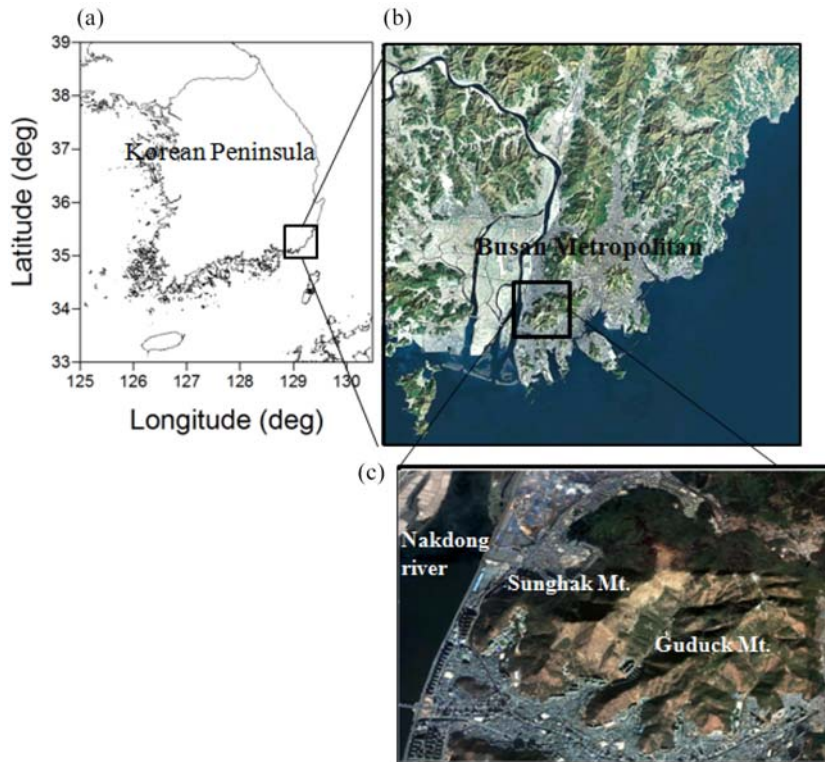


Fig. 1. Location and satellite images of (c) Sunghak and Guduck mountains in (b) the Busan Metropolitan situated in the south-eastern part of (a) the Korean Peninsula. The satellite images are provided by Google Earth System.

인근 도심이 그 전력 소비자가 되어 발전 효율은 극대화 될 수 있는 잠재성이 있다.

수치모형과 실험 설계

본 연구에서 사용된 모형은 Yamada Sience and Art Corporation의 A2C(Atmosphere to CFD)로 중규모 기상 모형인 HOTMAC(Higher-Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation)에 전산 유체역학 기술을 접목하여 다양한 규모의 바람유동장 해석에 사용된다. A2C 모형은 물리 방정식을 이용하여 바람, 온도, 습도, 기압 등의 3차원 공간분포를 평가하고, 대기경계층의 열과 운동량 확산에 대한 정확도가 높다. 그리고 난류 모수화는 2.5차 Mellor-Yamada second-moment 난류 종결 모델(Mellor and Yamada, 1982)을 사용하고 있다. 또한 본 모델 내 상세 지형 주변의 흐름을 모의하기 위해 사용된 방법은 HSMAC (Highly Simplified Marker and Cell) 방법을 적용하였다(Hirt and Cox, 1972). 등지 격자 적용이 가능하기 때문에 다양한 규모의 공간해상도 계산이 동시에

가능하다. 특히 지형효과에 의한 열적 강제력을 잘 표현하고 있기 때문에 다양한 중규모와 미규모 기상 현상 재현에 다양하게 적용되고 있다(Yamada and Bunker, 1989; Yamada, 2004; Wu et al., 2006; Du, 2009; Koo et al., 2010).

본 연구에서 2개의 등지 격자를 상정하고, 먼저 연구대상지역을 포함한 부산광역시의 바람장 특성을 보기 위하여 부산광역시 전체를 제 1 등지로 설정하였다. 제 1 영역의 격자간격은 300 m이고, 격자수는 75×75로 하였다. 그리고 제 2 등지는 송학산과 구덕산을 중심으로 설정하였으며 이때 격자 간격은 100 m로 하고 수평 격자수는 51×51로 설정하였다. 그리고 각 등지격자는 모두 연직으로 30개의 층으로 이루어져 있으며, 모형의 최상층은 고도 6 km로 설정하였다. 지표면 가까이에서 열과 운동량의 교환이 크기 때문에 지면에 가까울수록 격자가 조밀한 부등격자를 이용하였다. 본 연구는 다양한 기상조건에 따른 상세 바람자원지도의 모의가 주목적이기 때문에 대기안정도는 전영역에 동일하게 설정하였다.

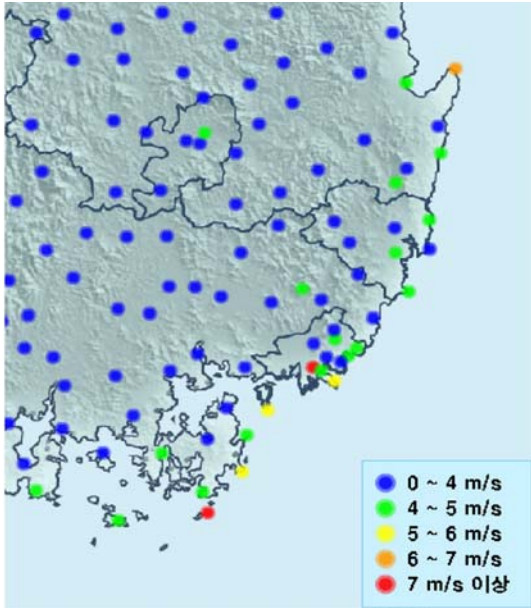


Fig. 2. Annual mean wind speed at meteorological observation sites controlled by Korea Meteorological Administration. closed circles are the location of AWS observation sites and their color indicate the wind speed. This figure is presented by KMA (2010).

본 연구에서는 총 2가지의 서로 다른 조건에서 연구대상지역의 풍력자원 분포를 살펴보았다. 먼저 주 풍향에 대한 수치실험으로 승학산-구덕산의 풍상측 사면과 풍하측 사면에서 바람의 특성을 비교하기 위해 초기 풍향을 연구대상지역의 주풍인 북서풍으로 설정하고 다양한 대기상태를 가정하였다. 이때 대기안정도는 초기 연직온위 분포를 달리하여 조절하였다. 연구에 적용된 초기 연직 온위 경도는 고도 2000 m 까지 각각 0 K/m(case NEUTRAL), 0.001 K/m(case ST-WEAK), 0.003 K/m(case ST-STRONG)으로 설정하고, 2000 m 이상에서는 0.003 K/m로 하였다. 초기 연직 바람분포는 승학산-구덕산의 실제 주풍인 북서풍이 1, 5, 9 m/s로 분다고 가정하였다.

두 번째는 관측자료를 바탕으로 확인된 풍향자료를 바탕으로 연구대상지역의 연간 평균 풍력 자원 평가에 대한 수치실험을 실시하였다. 실제 복잡한 지형 특성상 풍향에 따라 다양한 풍력자원 분포 특성이 나타난다. 이러한 수치자료를 바탕으로 실제 관측 자료상의 풍향빈도를 고려하여 연간 풍력 자원을 산정하고 풍력자원 최적지를 선정하였다.

결 과

다양한 대기상태에서의 풍력 분포

작은 공간 규모 산악의 풍력자원 상세 분석은 유체역학적인 접근이 요구된다. 본 연구에서는 안정도와 풍속의 관계를 설명하는 Froude 수에 따른 유체 흐름장을 중심으로 살펴보았다. Froude 수는 산악 높이에서의 위치에너지와 기체흐름이 가지는 운동에너지의 비로서 강제대류에 있어서 부력 특성을 표현하는 무차원 수이며 아래와 같이 구할 수 있다(장욱과 전혜영, 2008).

$$Fr = \frac{\bar{M}}{N_{BV}W_T} \quad (1)$$

여기서 N_{BV} 는 Brunt-Vaisala 진동수이며, W 는 산의 높이이며, \bar{M} 는 평균 풍속을 의미한다. 그리고 Brunt-Vaisala 진동수는 대기안정도의 함수로 아래와 같이 나타낸다(Holton, 2004).

$$N_{BV}^2 = \frac{g}{\theta_v} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z} \quad (2)$$

따라서 Froude 수는 장애물을 통과하는 대기의 상태를 알 수 있다. Froude 수가 클수록 장애물을 넘어가는 경향이 강하며, 이 수치가 작을수록 장애물을 돌아가는 흐름이 형성된다. 따라서 Froude 수는 수평 바람속도, 부력진동수, 산의 모양에 따라 달라지는데, Froude 수가 1 보다 큰 가 작은가에 따라 산악 주변의 흐름이 달라진다. 본 연구에서는 다양한 대기안정도와 수평 바람을 적용하여 서로 다른 Froude 수의 대기흐름 속에서 산악지역 풍력 자원 분포특성을 살펴보았다.

Fig. 3은 약한 대기안정도(case ST-WEAK)에서 각 초기 풍속에 대한 바람 분포를 나타낸 것이다. 대기안정도에 따른 초기 풍속별 바람 분포를 나타낸 것이다. 풍속이 1 m/s일 때 서쪽에서 유입된 바람은 모두 승학산과 구덕산을 부드럽게 돌아가는 것을 볼 수 있다. 이때 Froude 수는 0.34이기 때문에 전체적으로 안정대기의 위치에너지가 크다고 볼 수 있다. 따라서 산을 돌아 넘어가는 흐름이 발생한 것으로 판단된다. 그러나 유입 풍속이 5 m/s가 되면 Froude 수가 1.17이 된다. 이때 승학산의 남쪽부근에서는 산악을 부드럽게 넘어가는 바람이 나타나지만 북쪽부근

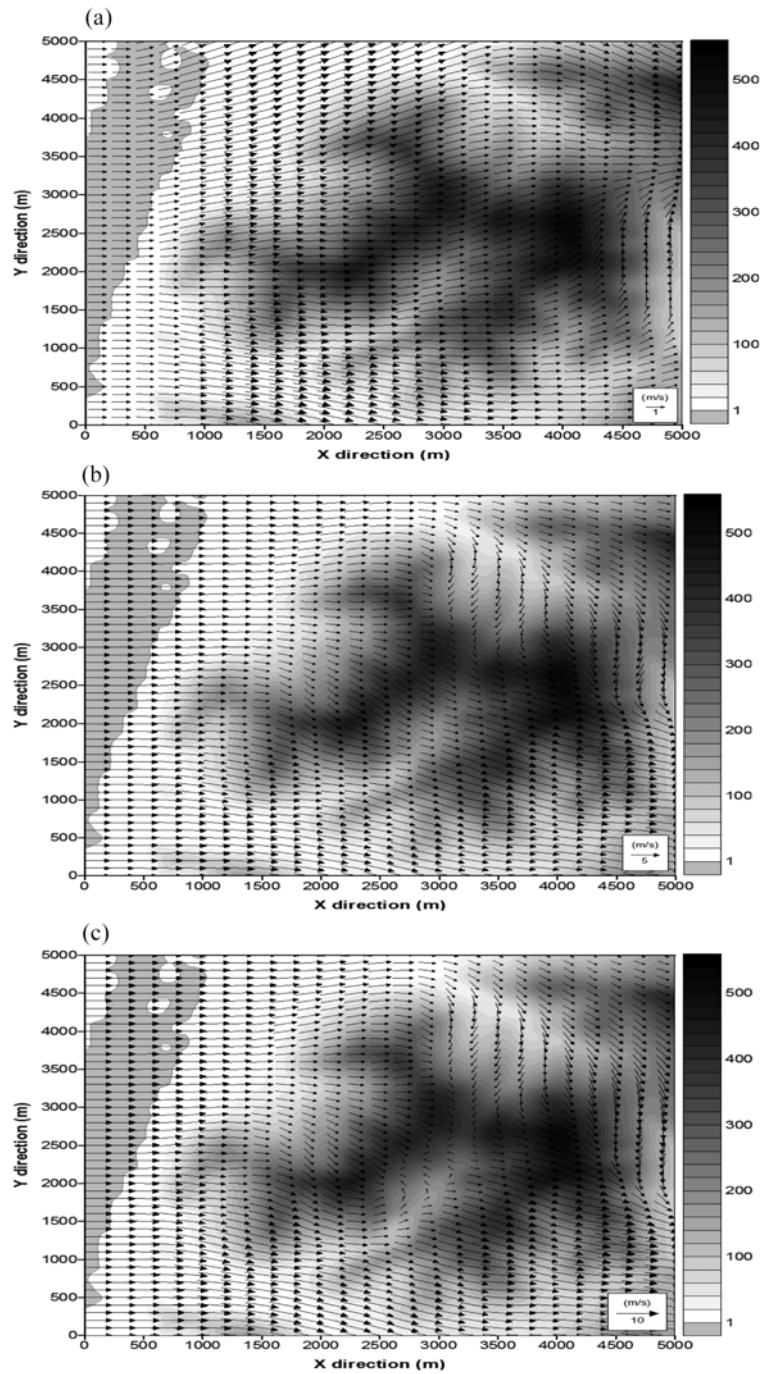


Fig. 3. Estimated wind fields in case ST-WEAK (vertical potential temperature raps rate is 0.001K/m) with different initial wind speed for (a) 1 m/s, (b) 5 m/s and (c) 9 m/s. Shading indicate the topography in target area.

에서 산악을 따라 휘어지는 바람을 볼 수 있다. 바람의 강도가 강해지면서 운동에너지가 증가하고 이는 산악의 장애물효과의 증대로 이어진다. 따라서 산악

을 따라 휘어지는 흐름이 나타난다.

여기서 중요한 점은 동일한 기류조건 즉 Froude 수라고 할지라도 승학산의 남쪽과 북쪽의 기류흐름이

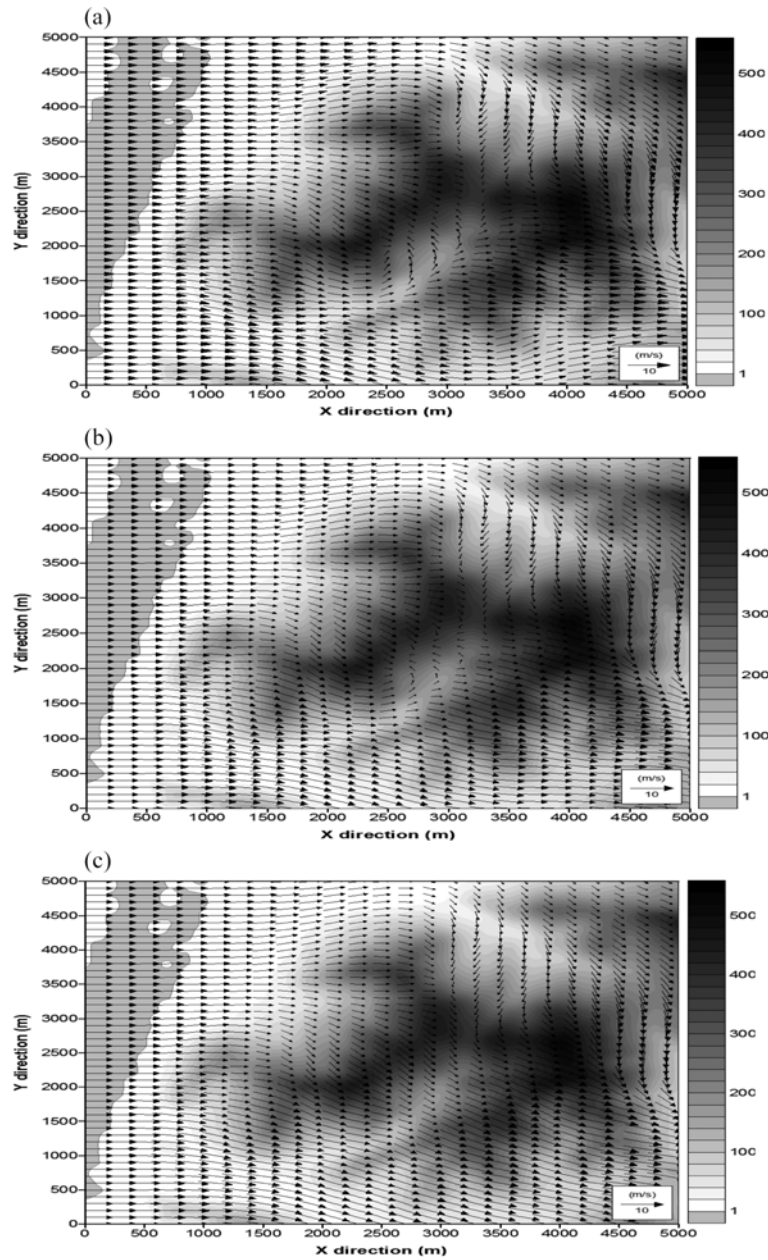


Fig. 4. Estimated wind fields for (a) case NEUTRAL, (b) case ST-WEAK, and (c) case ST-STRONG with 9 m/s initial wins speed. Shading indicate the topography in target area.

다르다. 이는 승학산의 모양이 이상적인 형태가 아니라 복잡하기 때문으로 판단된다. 즉 승학산의 북쪽사면의 임계 Froude 수는 1 부근 이라고 할 수 있으나 남쪽사면의 경우 임계 Froude 수가 1 보다 크다고 볼 수 있다. 따라서 산악의 형태에 따라 일반적인 임계 Froude 수를 적용한 흐름과 다르게 나타날 수 있

음을 확인하였다.

운동에너지가 더욱 강한 9 m/s의 초기 유입바람을 가진 경우(Froude 수는 3.08), 승학산의 북쪽 뿐 아니라 남쪽에서도 산악을 따라 휘어지는 흐름이 나타난다. 따라서 안정도가 동일할 경우 풍속이 증가함에 따라 산악 후면의 바람이 달라진다.

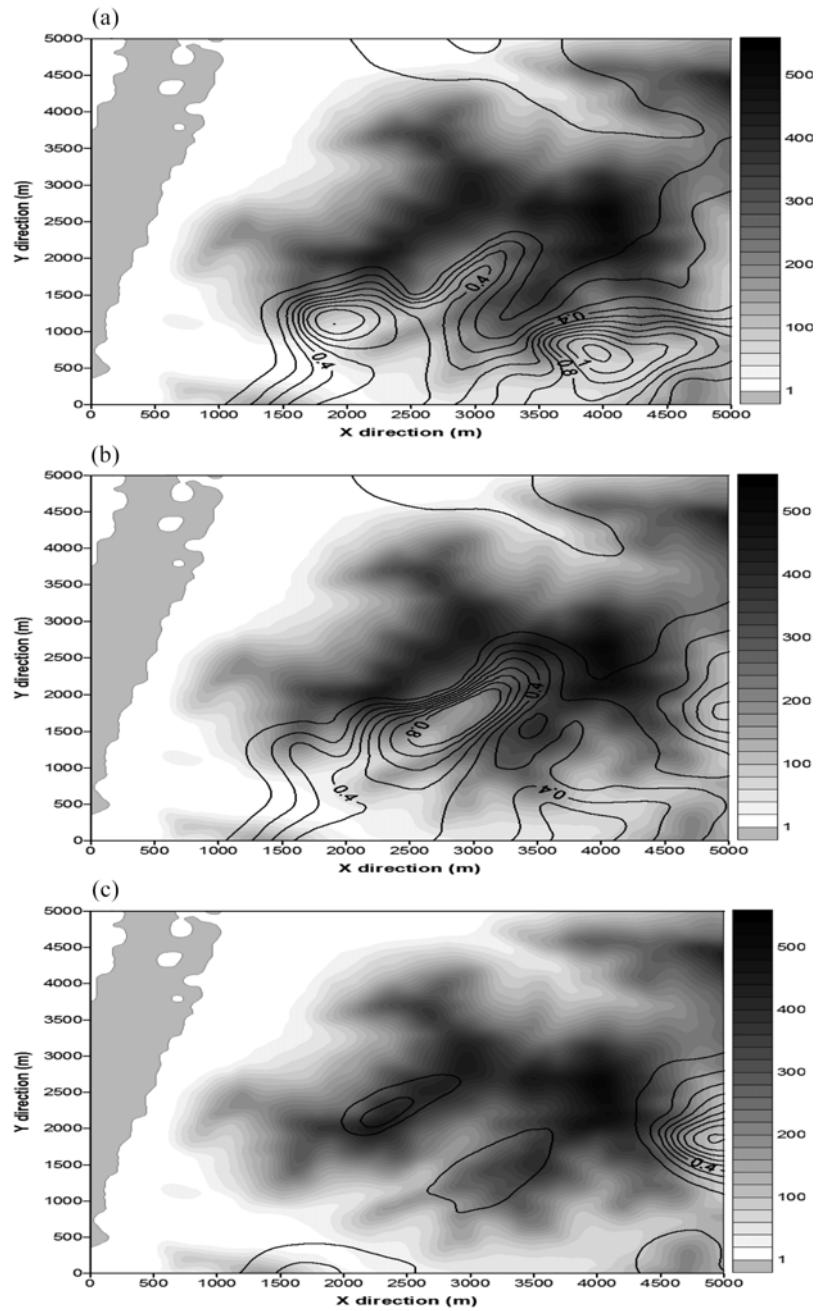


Fig. 5. Distribution of TKE (Turbulence Kinetic Energy) for case Neutral, (b) ST-WEAK, and (c) ST-STRONG Shading indicate the topography and contours interval is unit of contour is $0.1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$.

서풍이 9 m/s 로 강하게 불 때 안정도에 따라 승학산-구덕산 주변으로 흐름 변화가 발생하는 모습을 Fig. 4에 나타내었다. 안정도가 강해질수록 산 주변으로 흐름 변화가 발달함을 알 수 있다. 중립(case NEUTRAL)의 경우(a) 승학산과 구덕산 남쪽 부근의

바람이 강하게 수렴되는 것을 볼 수 있다. 그러나 안정도가 강해질수록 수렴의 강도가 약해지고 강한 안정(case ST-STRONG)의 경우(c) 승학산 남쪽 부근의 수렴이 나타나지 않는다.

이렇게 안정도가 강해질수록 즉 Froude 수가 감소

하면서, 유입되는 바람이 산악지형에 의한 상하운동이 가능하여 산을 부드럽게 넘어가게 된다. 이러한 대기안정도는 산을 넘어가는 바람의 관성력에 도움을 주어 산을 잘 넘어가게 만든다. 반면 안정도가 약할수록 상대적으로 운동에너지가 증가하여 산악을 부드럽게 넘어가기보다는 돌아가기 때문에 산악후면에 난류의 발생 가능성이 증가되는 경향성이 있다.

이러한 대기안정도에 따른 산악주변의 흐름이 지표면 주변 공기의 난류형성에 영향을 미친다. 이러한 산악흐름에 따른 난류형성 강도를 파악하기 위하여 안정도에 따른 난류형성 강도를 분석하였다. Fig. 5는 초기 유입되는 바람이 9 m/s일 때 각 안정도별 승학산과 구덕산 부근에서 형성되는 난류운동에너지(Turbulnec Kinetic Energy, TKE)의 분포를 나타낸 것이다. 대기안정도가 중립인 경우(case NEUTRAL), 승학산과 구덕산 후면에 큰 난류 운동에너지가 나타난다. 특히 구덕산 후면에서는 최대 $1.3 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ 까지 나타난다. 그러나 대기가 약한 안정인 case ST-WEAK에서는 TKE의 분포 범위가 줄어들고, 난류 강도 역시 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 대기안정도가 가장 큰 경우, 승학산 남쪽에서 넓고 강하게 나타났던 난류에너지가 거의 사라지고 구덕산의 동쪽 부근에 일부만 남아 있다. 따라서 대기 안정도가 증가하면 산악후면의 난류형성은 억제되고 유입되는 일반류의 성질을 띠게 된다. 일반적으로 난류의 형성은 풍력발전기에 가해지는 기계적 하중을 증가시키는 요인으로 작용하기 때문에 불안정 상태의 난류 형성은 풍력 발전의 저해요소로 작용할 것이다.

풍력자원평가 및 최적 입지 선정 요소

산악지역의 풍력자원평가에는 단순히 풍속의 분포 뿐 아니라 앞에서 본 난류의 생성 강도와 연직 방향의 풍속차 등을 고려하여야한다. 특히 연직 방향의 풍속차이(Vertical Wind Shear)는 풍력 발전기 블레이드의 회전하중에 중요한 요소로 작용하기 때문에 이를 정량적으로 평가하여야한다. 본 연구에서는 이들 요소를 종합적으로 고려하여 승학산과 구덕산의 최적 입지를 산정하였다.

먼저 대상지역의 풍력에너지 밀도를 산출하였다. 풍력에너지 밀도(P)는 아래식에 의하여 계산된다.

$$P=1/2\rho V^3 \tag{3}$$

여기서 ρ 는 공기의 밀도(kg/m^3), V 는 풍속(m/s)을

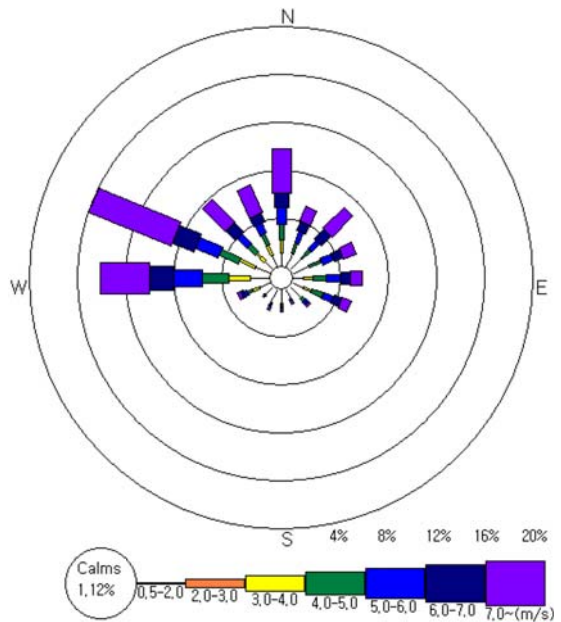


Fig. 6. wind rose observed in Guduck mountain for four years from 2004.

Table 1. Frequency of annually averaged wind direction detected at Guduck mountain for four years from 2004

Wind direction	Northerly	Easterly	Southerly	Westerly
Frequency (%)	44.6	17.5	7.4	30.5

나타낸다.

풍력에너지 밀도는 실제 장기간 동안의 수치모의를 통하여 산출하여야 하지만 좁은 지역을 대상으로 한 전산 유체역학 모형의 계산은 현재 계산기 기술로는 매우 어렵다 따라서 본 연구에서는 대표적인 종관 바람에 대한 산술적인 평균을 통하여 풍력에너지 밀도를 산출하였다. 즉 동서남북 4방향에서 각각 유입되는 바람을 가정하고 이들에 대한 일반적인 풍속 분포를 산출한다. 그리고 이들에 대한 발생빈도를 고려하여 전체적인 평균 풍속과 풍력 에너지 밀도를 산출하였다. Fig. 6은 구덕산 관측소에서 2004년부터 2008년까지 관측된 바람장미를 나타낸 것이다. 대체로 남풍을 제외한 바람이 골고루 나타나며, 북서풍 계열의 바람이 주로 많이 부는 것으로 나타났다. 계절적으로 여름철에는 다양한 풍향 분포를 나타내지만 겨울철에는 북서풍이 집중적으로 나타난다. Table 1은 바람장미에 의해 분석된 풍향별 발생 빈도를 수치적으로 나타낸다. 풍향 빈도는 북풍과 서풍이 각각 44.6%와 30.5%로 전체의 75% 정도를 차지한다. 따

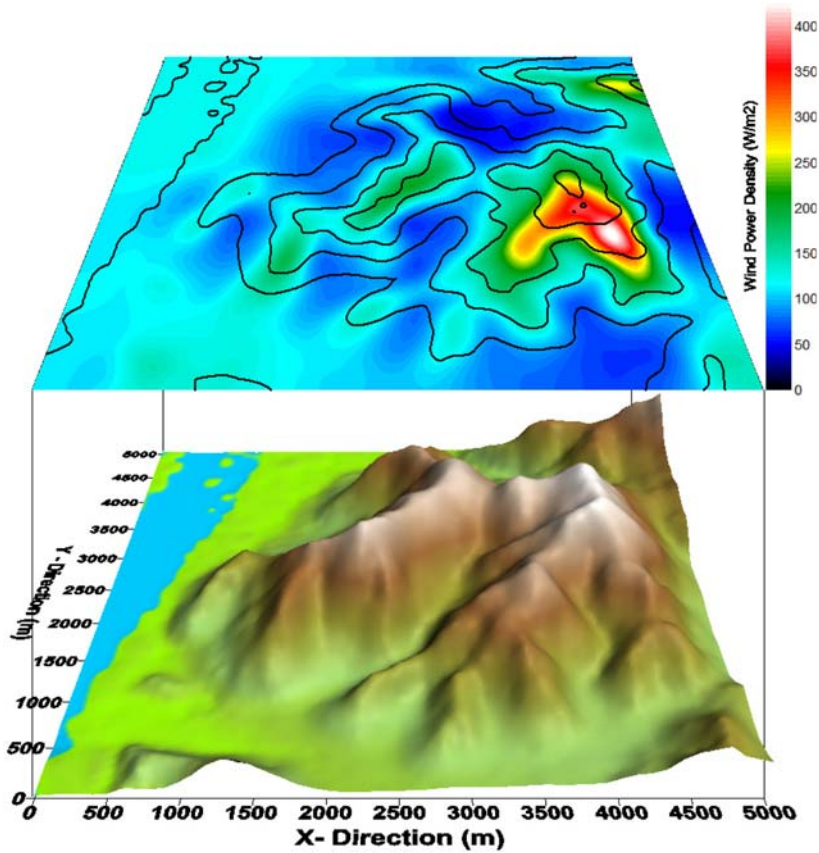


Fig. 7. Distribution of annually averaged wind power density at Sunghak and Guduck mountains. Contours of upper panel is topography and its interval is 100 m. Low panel is three dimensional topography image and blue in left side of low panel indicate the Nakdong river.

라서 본 연구에서 Table 1에 제시된 풍향 빈도를 가중 평균하여 풍력에너지 밀도를 산정하였다. 산정된 연구대상지역의 풍력에너지 밀도는 Fig. 7에 나타났다. 전체적으로 계곡의 경우 산악의 그림자 효과에 의하여 100 W/m^2 이하로 매우 낮게 나타났는데 비하여 승학산과 구덕산 정상 부근은 전체적으로 200 W/m^2 로 우수하게 나타났다. 특히 구덕산의 남쪽사면은 최대 455 W/m^2 로 나타나 풍력자원이 매우 우수한 것으로 판명되었다. 그리고 구덕산의 경우 주풍인 북서풍의 풍상측 보다는 풍하측이 우수하게 나타났다.

Fig. 8은 연간 풍향 빈도를 고려하여 계산된 90 m 고도의 (a)난류 운동에너지와 (b)연직 바람시어를 나타낸 것이다. 일반적인 터빈이 설치되는 고도인 90 m의 연구대상지역 연평균 난류운동에너지의 분포는 산악 후면에서 크게 나타나는 경향이 있다. 특히 승학산과 구덕산 사이의 계곡에서 크게 나타나고, 구덕산

의 북쪽 사면에서도 $0.03 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ 로 크게 나타난다. 산악후류효과에 의하여 산악의 후면 부에서 난류 생성이 유리한 환경이 조성되었다는 것을 의미한다. 또한 특징적으로 구덕산 정상의 남쪽과 북쪽사면에서도 크게 나타나는데, 이는 상대적으로 고도가 높은 구덕산의 정상을 둘러가는 흐름에 의해서 생성되는 난류에 의한 것으로 판단된다. 그리고 연직 바람시어의 경우 산악의 후면 특히 승학산과 구덕산 사이의 계곡에서 크게 나타난다. TKE 분포와 마찬가지로 계곡 사이에서 크게 나타난다. 그러나 전체적으로 승학산 계곡을 제외하고는 공간적인 분포차이가 크지 않다.

따라서 연구대상지역의 풍력 발전 단지 건설을 위해서는 풍력 에너지 밀도와 난류에너지의 분포를 고려하여 설정하여야 하며, 본 연구결과, 고도 500 m 부근의 구덕산 남쪽사면이 연간 풍력 에너지 밀도가 가장 크게 나타나고, 난류운동에너지의 생성가능성이

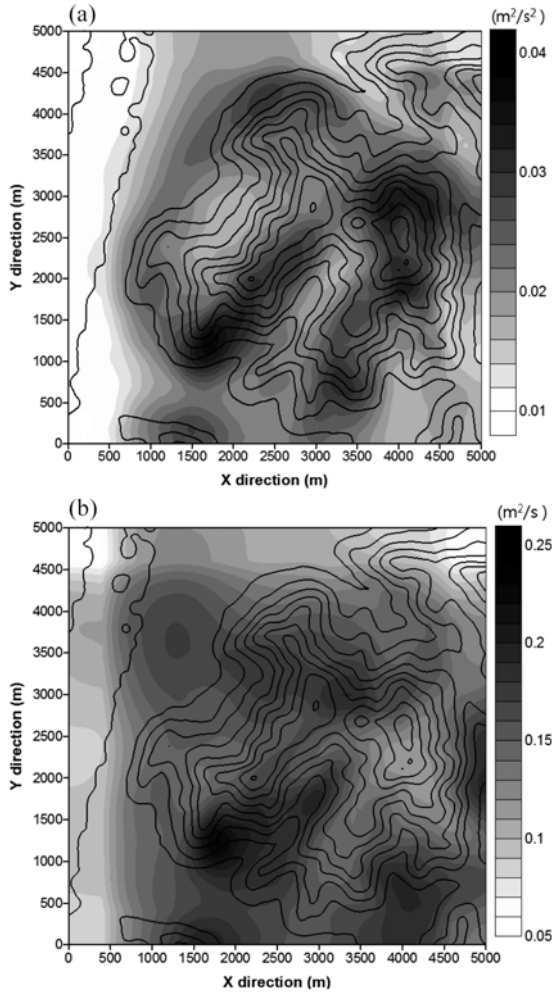


Fig. 8. Distribution of annually averaged (a) turbulence kinetic energy and (b) vertical wind shear at 90 m height. Contours lines indicate the topography with 50 m interval.

비교적 적기 때문에 가장 우수하다고 할 수 있다. 그러나 이러한 연구는 각 풍향 빈도에 의한 산술적인 평균을 통하여 산정된 것으로 정확한 풍력단지 선정을 위해서는 장기간에 걸친 연속적인 수치모의를 통하여 산정하는 과정이 필요하다.

결론

복잡한 산악지역내 풍력 자원 분포와 안정도의 관계를 규명하고, 풍력 발전 단지 입지선정에 영향을 미치는 주요한 요인에 대한 특성을 수치모의를 통하여 살펴보았다. 수치연은 부산광역시 서부에 위치하

며 매우 복잡한 형태를 가진 승학산-구덕산을 대상으로 하였다. 연구에 이용된 수치모형은 중규모와 미규모 기상현상을 모의할 수 있는 A2C이다. 그리고 서로 다른 두가지 수치실험이 진행되었는데, 먼저 전산 유체역학적인 기류흐름에 영향을 미치는 대기안정도와 초기 유입 풍속을 달리하여, 지형에 따른 기류 변화를 살펴보았다. 두 번째는 다양한 유입장에 따른 전산유체역학적 흐름을 산술평균하여 승학산-구덕산의 연간 풍력자원을 간접적으로 산정하였다.

실험 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 동일한 대기 안정도에서는 유입 풍속이 증가함에 따라 산악 주변의 바람 특히 산사면의 흐름변화가 크게 나타난다. 즉 풍속 증가에 따른 운동에너지 증가가 산악 후면의 와류 발생을 유도한다.
- 2) 안정도가 강해지면 위치에너지가 증가하여 산악 후면에서 빠르게 안정화된다. 또한 강한 안정시(case ST-STRONG) 낮은 Froude 수에 의하여 산악을 부드럽게 넘어가는 바람이 우세하게 되며, 후면 난류 생성이 억제된다.
- 3) 임계 Froude 수는 승학산과 구덕산의 복잡한 지형에 의하여 1 보다 크게 나타난다. 따라서 임계 Froude 수는 지형의 복잡한 정도에 따라 달라진다.
- 4) 연평균 난류운동에너지 분석에서 산악지역내 계곡과 산사면에서 난류 운동에너지 생성이 용이한 환경이 제공된다.
- 5) 풍력 단지 산정에 있어서 풍력밀도에너지 뿐 아니라 난류운동에너지 생성량과 연직 바람시어도 중요한데, 관측풍향의 빈도에 따른 가중평균을 실시한 결과 산 정상부근에서 유리한 입지를 보였으며 특히, 승학산 정상에 비해 구덕산 정상부근이 우수한 입지를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2009-353-C00026)을 받아 수행된 연구입니다. 그리고 본 연구를 위해 도움을 준 박순영 님께도 감사를 전합니다.

참고문헌

기상청, 2010, 생활·산업기상 풍력자원순위. [http:// www.kma.go.kr/](http://www.kma.go.kr/) (검색일: 2010. 11. 1)

- 김현구, 최재우, 2002, 풍력에너지 이용 및 개발현황. RIST 연구논문, 16, 479-485.
- 김현구, 장문석, 이은정, 2008, 제주도 풍력자원 데이터베이스 구축을 위한 기상 통계분석. 한국환경과학회지, 17, 591-599.
- 방형준, 2007, 풍력 발전기술의 현황 및 전망. 한국태양에너지학회지, 6, 2-47.
- 지식경제부, 2009, 신재생에너지 백서 2008. 지식경제부, 470 p.
- 이순환, 이화운, 김동혁, 김현구, 2007, 한반도 풍력자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료 동화의 관계분석. 한국대기환경학회지, 23, 653-665.
- 이순환, 이화운, 김동혁, 김민정, 2009, 한반도 풍력자원 지도의 공간 해상도가 풍력자원 예측 정확도에 미치는 영향에 관한 수치연구. 한국환경과학회지, 18, 885-897.
- 이화운, 김민정, 김동혁, 김현구, 이순환, 2009, 풍력자원 평가를 위한 바람자원 동화 특성 평가. 한국대기환경학회지, 25, 1-14.
- 장욱, 전해영, 2008, 봄철 강릉지역에서 발생하는 강풍에 대한 연구. 대기, 18, 207-224.
- 한국에너지기술연구원, 2005, 풍력자원 정밀조사 및 풍력단지 개발 기술 증진 연구. 산업자원부 연구보고서, 329 p.
- 한국에너지기술연구원, 2010, 풍력자원 데이터베이스-국가 바람지도. <http://kier-wind.org/> (검색일: 2010. 11. 1.)
- 허철운, 이용섭, 이은정, 2010, 기상정보를 활용한 한반도 풍력자원지도 공간적 분포 특성. 대기, 20, 63-71.
- Du, M., Yonemura, S., Yamada, T., Zhang, X., LI, Y., GU, S., Zhao, L., and Tang, Y., 2009, A Numerical Simulation of the Influences of Local Circulation over Complex Terrain on Gas Dispersion on the Tibetan Plateau. Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics, 58-63.
- Hirt, C.W. and Cox, J.L., 1972, Calculating Three-Dimensional Flows around Structures and over Rough Terrain. Journal of Computational Physics, 10, 324-340.
- Holton, J., 2004, An introduction of dynamic meteorology. Academic press, NY, USA, 62 p.
- Knight, J., 2004, Urban wind power: Breezing into town. Nature, 430, 12-13.
- Koo, H.-S., Kim, H.-D., Yun, W.-T., and Lee, S.-H., 2010, Variation of regional circulations due to long-term change land-use in the Daegu Metropolitan region from 100 years. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science, 46, 53-64.
- Lee, S.-H., Kim, D.-H., and Lee, H.-W., 2008, Satellite-based Assessment of the Impact of Sea-Surface Winds on Regional Atmospheric Circulations over the Korean Peninsula. International Journal of Remote Sensing, 28, 331-354.
- Mellor, G.L. and Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Review of Geophysics and Space Physics, 20, 851-875.
- Westerholm, G., 2004, The wind energy frontier: Urban retail markets. Refocus, 5, 42-45.
- Wu, J., Lu, C.-H., Chang, S.J., Yang, Y.-M., Chang, B.-J., and Teng, J.-S., 2006, Three-dimensional dose evaluation system using real-time wind field information for nuclear accidents in Taiwan. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 565, 812-820.
- Yamada, T. and Bunker, S., 1989, A numerical model study of nocturnal drainage flows with strong wind and temperature gradients. Journal of Applied Meteorology, 28, 545-554.
- Yamada, T., 2004, Merging CFD and atmospheric modeling capabilities to simulate airflows and dispersion in urban areas. Computational Fluid Dynamics Journal, 47, 329-341.

2010년 12월 9일 접수
2011년 1월 10일 수정원고 접수
2011년 1월 31일 채택