[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 30, No. 6, 2010
ISSN 1598-6411

IEC 61400 풍력표준을 적용한 제주도 김녕 난류강도 특성분석

김현구*, 정태윤**, 장문석***

*한국에너지기술연구원(hyungoo@kier.re.kr), **한국에너지기술연구원(jty@kier.re.kr),
***한국에너지기술연구원(msjang@kier.re.kr)

Analysis on Turbulence Intensity Characteristics at Gimnyeong, Jejudo by Applying IEC 61400 Wind Turbine Standards

Kim, Hyun-Goo* Jeong, Tae-Yoon** Jang, Moon-Seok***

*Korea Institute of Energy Research(hyungoo@kier.re.kr), **Korea Institute of Energy Research(jty@kier.re.kr),
***Korea Institute of Energy Research(msjang@kier.re.kr)

Abstract

Analysis on turbulence intensity profile depending on wind speed is an important process to set up design condition of wind turbine in terms of fatigue load. This paper tests goodness of fit of turbulence intensity empirical equations suggested by the IEC 61400 Standards with Jejudo Gimnyeong met-tower measurement, which is erected at a seashore. Therefore sea breeze and land breeze coexist. Sea breeze case showed apparent increasing trend of turbulence intensity in a high wind speed regime due to increase of sea surface roughness. However, neither inland wind turbine standard IEC 61400-1 nor offshore wind turbine standard IEC 61400-3 fit such a trend adequately. On the other hand, the modified empirical equation of turbulence intensity of IEC 61400-3 derived from Germany FINO1 application study by considering turbulence intensity behavior in a high wind speed regime showed good agreement with the measurement. Therefore, we can reconfirm and conclude that IEC 61400-3 Ed.1 legislated in 2009 needs to be modified.

Keywords : 난류강도(Turbulence intensity), 해수면 거칠기(Sea surface roughness), IEC 61400-1, IEC 61400-3

1. 서 론

풍력발전기 설계기준 및 기종선택에 있어서 난류강도는 피로하중 측면에서 중요한 인자이다. 그렇기 때문에 풍황탑 및 원격탐사 장비를 풍력발전 후보지역에 설치하여 난류특성에 대한 상세한 측정분석을 수행하여야 한다.

최근 해상풍력에 대한 관심이 고조되고 있는데,

투고일자 : 2010년 9월 13일, 심사일자 : 2010년 9월 21일, 게재확정일자 : 2010년 12월 15일
교신저자 : 김현구(hyungoo@kier.re.kr)

육상풍과 달리 해상풍의 특징 중 하나는 해수면과 풍속의 상호작용에 있다. 즉, 육상에서는 지형지물이 고정되어 있기 때문에 지면조도가 일정한 반면 해상은 조수와 해류 등의 다양한 영향으로 주기적인 파형과 파고를 가지며, 특히 바람에 의해 생성되는 잔물결에 기인한 해면조도(sea surface roughness)의 변화가 난류특성에 상당한 영향을 미친다.[1] 풍속 증감과 해면조도의 상관관계는 Charnock의 고전적인 관계식으로 표현되는데,[2] 일반적으로 풍속 증가는 해면조도를 증가시키며 이는 경계층 전단력 증가에 의한 난류강도 상승으로 나타나게 된다.

한국에너지기술연구원에서는 2008년 말 지식경제부 신재생에너지기술개발사업으로 제주도 김녕 해안에 국산 풍력발전기의 국제표준 인증을 위한 육상풍력실증연구단지를 구축하였으며,[3] 현재는 두산중공업에서 개발한 3MW급 풍력발전기의 성능평가가 진행 중에 있다.

우리나라 해안지역은 기상학적으로 해륙풍 특성을 가지므로 전술한 육상풍과 해상풍의 상이한 특성이 공존하게 된다. 이에 본 연구에서는 김녕 육상풍력실증연구단지에 설치된 70m 높이 풍황탑의 측정자료를 이용하여 해상풍 또는 육상풍에 따른 난류특성을 분석하였다. 풍력발전기 설계 및 성능평가 등 제반 풍력에 대한 국제표준인 IEC 61400에서는 난류에 의한 하중을 평가함에 있어 풍속의 표준편차 분포의 90% 백분위를 적용한다. 이에 본 연구에서는 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission; 이하 IEC) 풍력표준에서 제시하는 난류강도 관계식을 적용함에 있어 육상풍력 IEC 표준과[4] 해상풍력 IEC 표준을[5] 비교분석하였다.

2. 측정자료

본 연구에서는 제주도 구좌읍 김녕리 육상 풍력실증연구단지에 설치된 70m 높이의 풍황탑에서 2008년 3월 28일부터 2009년 5월 6일까지 1년 이상 측정한 풍황자료를 사용하였다. 풍속은 지면고도 35m, 68m 그리고 70m에서 측정되었으며 풍향은 65m 높이에서 측정되었다. 본 연구에서는 측정지역의 난류강도 특성을 분석하기 위해 MW급 풍력발전기의 설계고도 즉 허브높이(hub height)에 해당하는 70m 높이에서 측정된 풍속자료를 이용하였다. 그림 1은 김녕 육상풍력실증연구단지의 전경 및 풍황탑(met-mast)의 설치위치를 보여주고 있다. 풍황탑은 풍향각 260°~0° 그리고 0°~80° 구간에서는 해안선으로부터 400~500m 떨어져 있으므로 해풍의 영향을 직접적으로 받을 것으로 예상되며 풍향각 80°~260° 구간은 반대로 육풍의 영향권으로 판단된다.

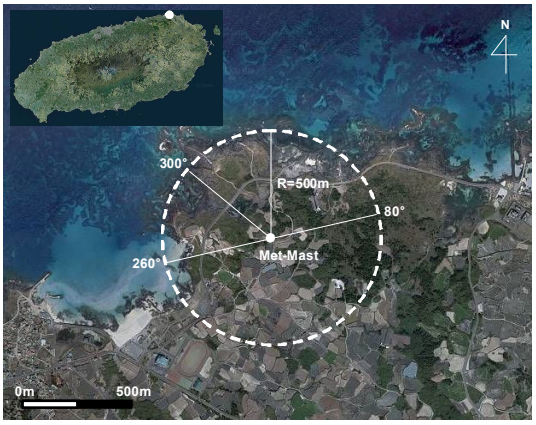


그림 1. 김녕 육상풍력실증연구단지 내 풍황탑 설치위치

3. 분석방법: IEC 61400

풍력발전기는 설계, 제작 및 설치가 완료되어 전력생산을 위한 운영단계에 들어가기까지 IEC 풍력표준에 따라 GL, DEWI-OCC, DNV, UL 등 인증기관의 시험평가를 통하여 각 단계별 인증서(certificate)를 획득하여야 한다.[6] IEC 풍력표준은 산학연 전문가로 구성된 산하 풍력발전 기술위원회(TC88)에서 제

정 또는 개정하는데 여타 국제표준과 마찬가지로 보수적인 입장에서 신중하게 실증된 기술만을 풍력표준에 반영한다.

본 연구에서는 육상 풍력발전에 대한 IEC 61400-1과[4] 최근 제정된 해상 풍력발전에 대한 IEC 61400-3[5] 및 독일 FINO1 해상풍황탑 해석을 위한 IEC 61400-3 수정안을[7] 적용하여 난류강도 특성을 분석하였다. 참고로 IEC 61400-3은 해상풍력 보급이 가속화됨에 따른 국제표준의 필요성에 의해 2009년에 초판이 제정된 해상 풍력발전기 설계요구조건에 대한 표준이다.

3.1 IEC 61400-1

IEC 61400-1은 기본적으로 육상 풍력발전기 설계요구조건에 대한 표준이지만 최근까지 해상 풍력발전기에 대한 별도의 표준이 없었기 때문에 해상 풍력발전기에도 적용되어 왔다.

IEC 61400-1 Ed.2에서는 난류강도에 따른 구조하중을 표 1과 같이 4개 등급으로 구분하고 각각의 등급은 표 1에 명시된 참조 난류강도 특성값인 I_{ref}와 풍속에 따른 난류강도를 기울기 a로 표현되는 선형식으로 표현한다. 참고로 난류강도는 $I=\sigma_u/U$와 같이 수평방향 평균풍속 U와 그 표준편차 σ_u로 정의된다.

표 1. 풍력발전기 등급

IEC 61400-1 Ed.3		
등급	I_{ref}	a
A	0.16	3
B	0.14	3
C	0.12	3
S	설계자 지정	

한편 IEC 61400-1 Ed.3에서는 많은 실측연구 결과로부터 Ed.2의 풍속과 난류강도 관계식의 과소평가 경향을 보완하여 다음과 같은 특성난류(characteristic turbulence) 분포식을 제시하였다.

$$\sigma_{u90}=I_{15}\left[\frac{15m/s+aV_{hub}}{1+a}+1.28\times 1.44m/s\right] \quad (1)$$

여기서 σ_{u90}은 표준편차의 90% 백분위(percentile), I_{15}는 풍속 15m/s에서의 난류강도 특성값이다.

본 연구에서는 MW급 풍력발전기의 허브높이인 z_{hub}=70m에서 측정된 10분-평균 풍속의 표준편차 및 평균풍속 V_{hub}를 이용하여 특성난류를 계산하였다.

3.2 IEC 61400-3

식 (1)의 특성난류 분포식이 난류강도 실측자료와 일치하지 않는 경우가 많기 때문에 이를 이용하여 풍력발전기 등급을 구분하는 것은 다소 무리가 있는 것이 사실이다. 특히 대규모 풍력단지의 경우 풍력발전기 후류에 의한 난류증가 누적효과로 인하여 상기 기준을 초과하는 경우가 발생하며, 해상의 경우에는 오히려 난류강도 특성값이 작아지는 경우도 있다.[8]

IEC 61400-1 관계식 (1)는 표 1에 정의된 계수에 따라 난류강도 분포가 고정되며 V_{hub}의 증가에 따라 난류강도는 지속적으로 감소하는 특성을 갖게 된다. 육상의 경우에는 난류강도가 풍속증가에 따라 감소하기 때문에 관계식 (1)과 표 1을 적용하더라도 문제가 없다고 볼 수 있다.

반면 해상풍은 풍속의 증가에 따라 해수면 거칠기 z_o가 증가하게 되며, 이로 인해 난류강도가 증가한다. 풍속에 따른 해수면 거칠기의 변화를 반영하기 위하여 IEC 61400-3에서는 식 (2)와 같이 σ_{u90}을 정의하였다.

$$\sigma_{u90}=\frac{V_{hub}}{\ln(z_{hub}/z_0)}+1.28\times 1.44m/s\times I_{15} \quad (2)$$

식 (2)는 대기안정도를 중립으로 가정하여 풍속의 대수분포식을 식 (1)에 적용한 것이다. 풍

속에 따른 해수면 거칠기의 변화는 Charnock의 고전적인 관계식 (3)을 이용한다.[9)]

$$z_0 = \frac{au_*^2}{g} \quad (3)$$

위에서 g는 중력가속도이다. 마찰유속 u_*는 풍속의 표준편차와의 관계식 $\sigma_u = 2.5u_*$로부터 산출할 수 있으며, IEC 61400-3에서는 실험상수 $\alpha = 0.011$로 가정하고 있다. 본 연구에서는 해상풍 특성이 뚜렷하게 나타나는 풍향각 범위에 대하여 식 (3)을 적용하였다.

3.3 IEC 61400-3 수정안

Türk와 Emeis는 독일 FINO1 해상풍황탑 측정결과에 IEC 61400-3 식 (2)를 적용하여 만족할만한 일치 경향을 얻지 못하기에 식 (4)와 같은 수정안을 제시하였다.[7)]

$$\sigma_{u90} = \frac{k \cdot V_{hub}}{\ln(z_{hub}/z_0)} + \frac{V_{ti,\min}}{V_{hub}} \times 1.44m/s \times I_{15} \quad (4)$$

난류강도가 대수분포를 따른다는 가정은 실제 측정결과와 오차를 보였으므로, 이를 수정하기 위하여 경험적 실험상수 k와 비례계수 1.28 대신 $V_{yi,\min}/V_{hub}$를 적용하여 IEC 61400-3 식 (2)를 수정하였다. 여기서 $V_{yi,\min}$는 난류강도 10% 백분위가 최소값일때의 풍속이다. $V_{yi,\min}/V_{hub}$ 항에 의해 저풍속 고풍속 구간으로 진행함에 따른 기계적 난류혼합의 영향을 적절하게 반영할 수 있게 된다.

4. 분석결과

김녕 육상풍력실증연구단지는 해안에 조성되었으며 북쪽 반경은 교란되지 않은 해상풍을 직접적으로 맞게 되므로 IEC 61400 풍력표준을 적용함에 있어 육상풍 또는 해상풍 표준 중 어떤 표준을 적용하여야 하는지에 대한 논란이 제기될 수 있다. 이에 IEC 61400 풍력표준에서 제시된 3가지의 특성난류 분포식에 대하여 김녕 난류강도 측정자료를 적용하여 그 적합성을 분석하였다.

4.1 해상풍과 육상풍

김녕 육상풍력실증연구단지에 설치된 풍황기상탑의 70m 높이에서 측정된 풍황자료로부터 풍향각에 따른 해상풍과 육상풍의 특성을 분석하였다.

그림 2는 전체 풍향각에 대하여 풍속에 따른 난류강도 분포를 도시한 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 풍속 증가에 따라 난류강도 평균 및 90% 백분위는 감소하는 경향으로 보인다. 저풍속 영역인 7m/s 이하에서는 급격한 감소를 보이지만 7m/s 이상에서는 난류강도 0.1로 수렴하여 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 저풍속 영역에서는 난류의 생성이 지면거칠기에 의한 전단효과 보다 상대적으로 열효과에 의해 활발히 이루어지는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 풍속이 증가하게 되면 풍속 전단에 의한 기계적 혼합이 지배적으로 나타나게 된다. 전체 풍향각에 대한 분석결과인 그림 2에서는 해상풍 특성이 전혀 없기 때문에 김녕의 난류특성은 육상풍으로 판단할 수 있다.

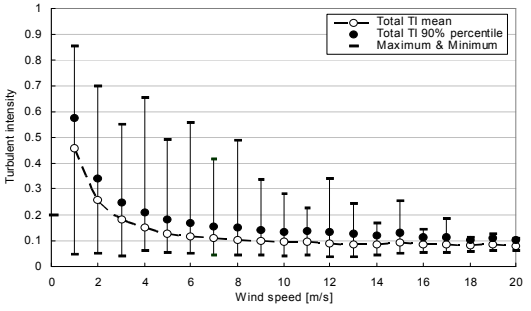


그림 2. 전체 풍향각에 대한 풍속에 따른 난류강도

그러나 해상풍에 해당하는 풍향각 260°~300°에 대한 분석결과를 보여주는 그림 3에서는 난류강도 평균과 90% 백분위가 풍속

10m/s 이상일 때 그 변화 경향이 바뀌는 것을 확인 할 수 있다. 즉, 해상풍에서는 풍속의 증가에 따라 해수면의 거칠기가 증가하며 이로 인한 난류 생성도 증가하여 결과적으로 난류강도가 증가하는 경향을 보이는 것이다. 이와 반대로 육상풍에 해당하는 풍향각 80°~260°에 대한 분석결과를 보여주는 그림 4는 그림 2와 마찬가지로 고풍속에서 난류강도가 일정하게 수렴하는 육상풍의 특성을 뚜렷이 확인할 수 있다.

해상풍의 특성이 나타나는 풍향각 260°~300° 구간의 출현빈도는 약 14%를 차지하며, 해수면 거칠기의 증가에 따라 풍속 18m/s에서 난류강도 90% 백분위는 0.22까지 증가하였다. 이는 전체 풍향각에서의 난류강도 90% 백분위가 0.10인 것에 비하여 두 배 이상 큰 값이다.

따라서 풍력 발전 후보지의 지역적인 특성과 시간의 변화에 대한 풍향집적도를 종합적으로 고려하여 본 연구와 같이 풍향각에 따른 난류강도 분석이 수행되어야 한다.

그림 3과 4에서 해상풍과 육상풍의 난류강도 분포의 차이가 분명히 나타나고 있으며, 기존에 난류강도 분석에 사용된 전체 데이터를 이용한 분석은(그림 2) 특정 풍향각의 난류강도 분포를 과소 평가 할 수 있다. 과소 평가된 난류강도는 발전기의 구조적 안정성에 심각한 문제를 초래할 수 있기 때문이다.

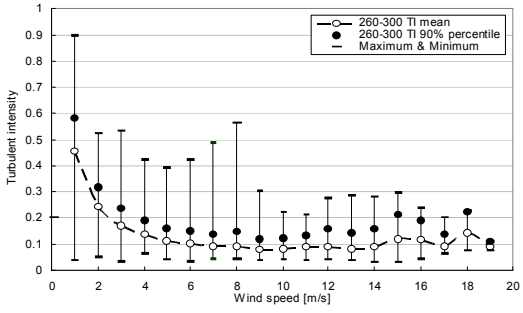


그림 3. 해상풍 풍향각(260°~300°)에 대한 풍속에 따른 난류강도

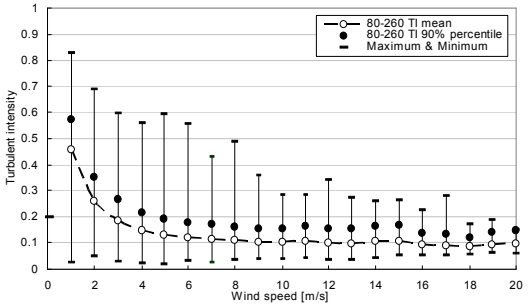


그림 4. 육상풍 풍향각(80°~260°)에 대한 풍속에 따른 난류강도

4.2 IEC 61400-1 적용분석

그림 5는 김녕 측정자료로부터 산출한 육상풍(80°~260°) 및 해상풍(260°~300°) 풍향각에서의 난류강도 90% 백분위와 함께 표 1의 풍력등급별 IEC 61400-1 Ed.3 난류강도 관계식 (1)을 선 그래프로 도시한 것이다.

IEC 61400-1의 풍력등급 분류를 위한 난류강도 그래프와 김녕 측정결과는 앞서 언급한 바와 같이 특히 해상풍의 경우 상당한 불일치를 보인다. 저풍속 영역에서는 육상풍 및 해상풍 모두가 C 등급 이하의 낮은 난류강도 값을 보이지만 고풍속 영역에서는 육상풍은 B 등급에 근접하며 해상풍은 모든 풍력등급을 초과하는 것을 확인할 수 있다.

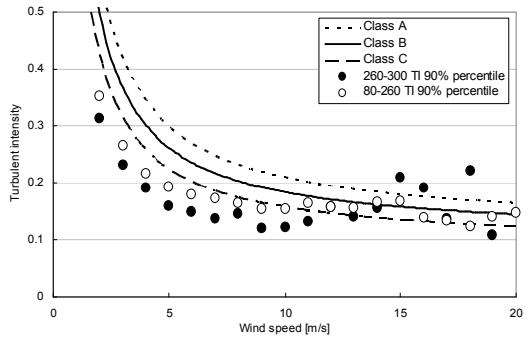


그림 5 IEC 61400-1 Ed.3 적용분석

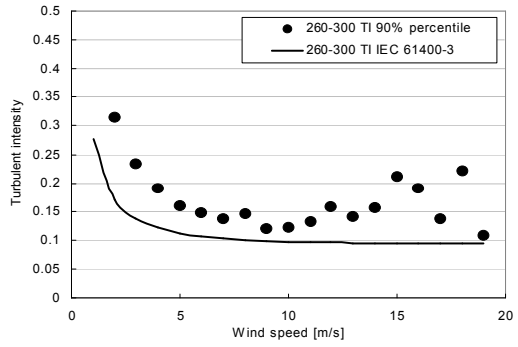
4.3 IEC 61400-3 적용분석

해상 풍력표준인 IEC 61400-3의 관계식

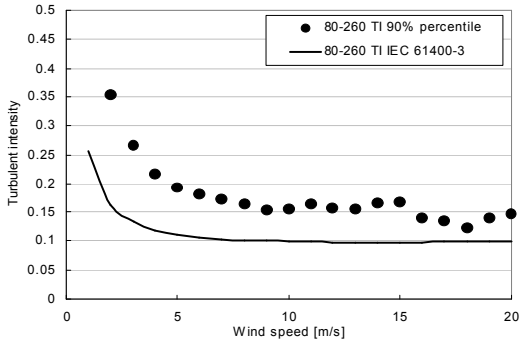
(2)는 중립대기에서 난류강도의 대수분포를 가정하여 표면조도와 풍속 15m/s에서의 난류강도 특성값 I15의 함수로 표현된 것이다.

그림 6 (a)와 (b)는 각각 해상풍 및 육상풍인 경우로, 김녕 측정결과는 해상풍 및 육상풍 모든 경우에 IEC 61400-3의 관계식 (2)와 일치하지 않는 것을 알 수 있다.

이러한 불일치의 원인은 김녕지역의 난류강도 연직분포가 대수식을 따르지 않거나 또는 마찰유속 산출식의 오차를 생각해 볼 수 있다. 참고로 선행연구에서 지형지물의 상태에 따라 마찰유속과 풍속 표준편차 관계식의 계수가 큰 폭으로 변함을 보고한 바 있다.[10),11)]



(a) 해상풍 풍향각 분석결과



(b) 육상풍 풍향각 분석결과

그림 6. IEC 61400-3 Ed.1 적용분석

4.4 IEC 61400-3 수정안 적용분석

김녕과 같이 해안에 설치된 풍황탑이 아닌 독일 FINO1 해상풍황탑의 측정결과에서도 4.3절에서 분석한 바와 같은 불일치 문제가 발생하였기에 실측결과와의 적합성을 높이기 IEC 61400-3을 수정하여 적용한 바 있다.[7)]

그림 7은 IEC 61400-3 수정식 (4)를 각각 육상풍 및 해상풍 풍향각 사례에 적용한 것으로, 해상풍 사례는 k=0.7, I_{15}=0.12, V_{min}=9m/s를, 육상풍 사례는 k=2, I_{15}=0.107, V_{min}=11m/s를 적용하였다. 그림 7에서 확인되듯이 수정식과 김녕 측정자료의 적합도는 앞서의 IEC 61400-1 및 IEC 61400-3 보다 훨씬 우수하다. 특히 해상풍 사례에서는 풍속 증가에 따른 고풍속 영역에서 난류강도 90% 백분위의 점진적 증가경향을 정확하게 표현하고 있음을 확인할 수 있다.

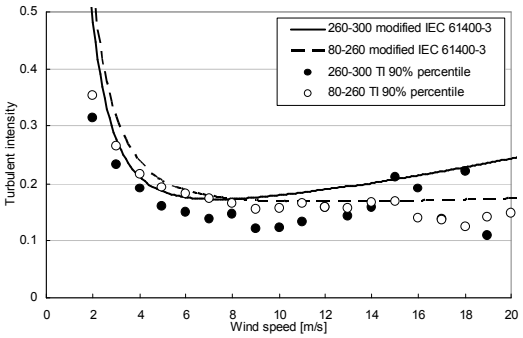


그림 7. IEC 61400-3 수정식 적용분석

5. 결 론

본 연구에서는 해안에 설치되어 해상풍과 육상풍의 영향이 공존하는 제주도 김녕 풍황탑에서 측정된 난류특성을 국제풍력표준 IEC 61400-1 및 IEC 61400-3이 적합하게 표현하는 가를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) Türk와 Emeis(2010)의 해상기상탑 연구사례와는 달리 본 연구는 김녕 해안풍황탑임에도 불구하고 풍속증가에 따른 해수면 거칠기 증가로 인하여 난류강도 상

승함을 분석하였다. 따라서 해안에 설치되는 풍력발전기의 설계하중을 설정할 때에는 육상풍 및 해상풍을 풍향각에 따라 개별적으로 고려하여야 한다는 중요한 시사점을 도출하였다.

(2) 육상 풍력표준인 IEC 61400-1과 해상 풍력표준인 61400-3의 난류강도 분포식은 모두 해상풍 특성이 분명하게 나타나는 김녕 측정자료를 적절히 표현하지 못하였다. 그러나 FINO1 사례분석을 통하여 제안된 IEC 61400-3 수정식은 풍속 증가에 따른 해수면 거칠기 상승으로 난류가 증가하는 해상풍의 특성을 최대한 일치시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 2010년도 한국에너지기술연구원 부처임무사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Csanady, G. T., Air - Sea Interaction. Cambridge University Press Cambridge, New York, 2001.
2. Charnock, H., Wind stress on a water surface, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol.81, pp.639 - 640, 1955.
3. 한국에너지기술연구원, 육상풍력발전실증단지 조성, 지식경제부 신재생에너지기술개발사업, 2009.
4. IEC(International Electrotechnical Commission), IEC Standard 61400-1, Wind turbines - Part 1: Design requirements, 3rd Ed., 2005.
5. IEC(International Electrotechnical Commission), IEC Standard 61400-3, Wind Turbines - Part 3 : Design requirements for offshore wind turbines, 1st Ed., 2009.
6. 음학진, 김만응, 김범석, 원종범, 풍력발전 시스템의 설계적합성 평가, 한국풍력에너지학회 추계학술대회, 2007.
7. Türk, M., Emeis, S., The dependence of offshore turbulence intensity on wind speed, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.98, pp.466 - 471, 2010.
8. Garratt, J. R., Review of drag coefficients over oceans and continents. Mon. Weather Rev. Vol.105, pp.915 - 929, 1977.
9. Charnock, H., Wind stress on a water surface, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol.81, pp.639 - 640, 1955.
10. Acevedo, O. C., Moraes, O. L. L., Degrazia, G. A., Fitzjarrald, D. R., Manzi, A. O., Campos, J. G., Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes?, Agricultural and Forest Meteorology, Vol.149, pp.1-10, 2010
11. 김현구, 정태윤, 언덕지형과 지표상태에 따른 대기경계층 풍속분포 관측 분석, 한국풍공학회 학술발표회논문집, pp. 216-221, 2010