

풍력자원 계측자료 분석용 상용 소프트웨어 비교분석

김현구*

Comparative Analysis of Commercial Softwares for Wind Climate Data Analysis

Hyun-Goo Kim*

Abstract

This paper reviews three commercial softwares for wind climate data analysis in wind resource assessment; WAsP/Observed Wind Climate, WindRose and Windographer. Windographer is evaluated as the best software because of its variety of input data format, analysis functions, easiness of user interface, etc. For a quantitative understanding of uncertainty depending on software selection, a benchmark is carried out with the met-mast observation dataset at the Gimnyeong Wind Turbine Performance Test Site. It is found that Weibull parameter calculation and air density correction have a dependency on the software so that such uncertainty should be considered when an analysis software is selected. It is confirmed that annual energy production calculated by WAsP using a statistical table of frequency of occurrence may have some error compared to a time-series calculation method used by the other softwares.

Key words

Wind Resource Assessment(풍력자원평가), WAsP, Windographer, WindRose

(접수일 2010. 4. 21, 수정일 2010. 6. 8, 게재확정일 2010. 6. 8)

* 한국에너지기술연구원 풍력연구센터

■ E-mail : hyungoo@kier.re.kr ■ Tel : (042)860-3376 ■ Fax : (042)860-3543

1. 서론

풍력발전 단지개발에 따른 경제성 타당성을 평가하기 위해서는 풍력발전단지의 연간에너지생산량(AEP; Annual Energy Production) 예측이 필요하여, 이때 반드시 대상지에서의 풍향계측 자료를 사용하여야 한다. 풍향계측은 IEA(International Energy Agency)에서 제시하는 풍향계측 방법⁽¹⁾ 또는 IEC(International Electrotechnical Commission)의 풍력발전기 성능평가 표준인 IEC61400-12-1에서 제시하는 풍속계측 방법

⁽²⁾을 최대한 준수하여야 한다. 즉, 단지조성 대상지역 내에 풍력발전기 허브(hub) 높이의 최소 2/3 이상 높이로 최소 1기 이상의 풍향탑(met-tower) 또는 풍향-마스트(met-mast)을 설치하여 결손자료 없이 최소 1년 이상을 계측하여야 하며, 계측과 관련된 제반 불확도(uncertainty) 분석 및 평가를 수행하여야 한다.

풍향-마스트로부터 계측자료가 확보되면 다음 단계로 풍력발전 단지설계 소프트웨어를 이용하여 단지조성 대상지역의 상세 풍력자원 분포지도를 작성하고 풍력발전기 레이아웃에 따른 연간에너지생산량을 산출하게 된다. 이를 국소배치

(micrositing)라고 한다.

풍력발전 단지설계용 상용 소프트웨어로는 덴마크 Risoe Laboratory의 WAsP, 덴마크 EMD사의 WindPro, 영국 Garrad-Hassan사의 Wind Farmer 등이 주류를 이루고 있다. 이들 소프트웨어는 풍황-마스트 계측자료의 기상통계분석 모듈과 지리정보분석 모듈 그리고 풍력자원 분포도 작성을 위한 대기유동 해석 모듈, 환경영향평가 모듈 및 경제성 평가 모듈 등으로 구성되어 있다. 보다 엄밀하게는 EMD WindPro, Garrad-Hassan Wind Farmer는 대기유동해석 모듈로 WAsP를 이용하되 전문적인 나머지 기능을 부가적으로 제공하는 WAsP 응용프로그램(suite program)이다. WAsP는 대기유동장의 지배방정식인 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 중립대기(neutral atmosphere)에서 지형경사도의 변화가 적다고 가정하여 선형화한 수학적 방정식으로 대기유동장을 예측하는 프로그램이다. 참고로 WindPro의 경우에는 WAsP 뿐만 아니라 고차의 대기유동장 해석법인 전산유동해석을 이용하는 WindSim AS의 WindSim을 풍력자원 분포지도 작성용 대체 모듈로 선택할 수 있다. 그런데 이들은 모두 고가의 전문가용 소프트웨어이므로 일반 사용자가 간편하게 활용하기에는 많은 제약이 따른다.

최근 풍력발전이 전세계적으로 각광을 받기 시작하면서 풍황-마스트 계측자료의 통계분석 및 간략한 풍력발전량 예측을 위한 일반 사용자용 소프트웨어가 개발되었다. 본 논문에서는 이들 풍황분석용 소프트웨어 중 WAsP/OCW, WindRose, Windographer에 대하여 기능적 측면에서 장단점을 분석함과 아울러 실제 풍황계측자료의 분석결과간 차이를 정량적으로 비교함으로써 사용자에게 소프트웨어 선택을 위한 참고정보를 제공하고자 한다.

2. 풍황계측자료 분석용 소프트웨어

2.1 WAsP/Observed Wind Climate

덴마크 Risoe Laboratory에서 개발된 WAsP(Wind Atlas Analysis and Application Program)는 앞서 설명한 선형이론⁽³⁾에 기반을 둔 풍력발전 단지설계 프로그램이다. WAsP의 부속 프로그램인 OWC(Observed Wind Climate)는 풍황-마스트 계측자료 즉, 시계열 풍향, 풍속자료로부터 최대 36개

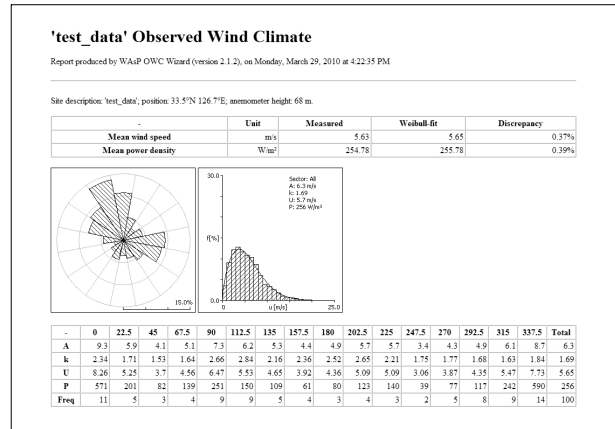


그림 1. Analysis result of WAsP/OWC v2.1.2.

풍향구간 및 1m/s 간격의 50개 풍속구간에 대한 출현빈도(frequency of occurrence)의 통계분석표 및 풍속분포의 와이불 계수(Weibull parameter)를 저장한 tab 파일을 생성한다. 참고로 WAsP 프로그램은 측정지점의 풍향, 풍속 출현빈도 통계로부터 수평, 수직방향으로의 풍황조건을 외삽계산하여 국소배치를 위한 국소바람지도를 생성한다.

OWC은 WAsP를 구매하지 않더라도 사용할 수 있는 무료 프로그램이며 풍황-마스트의 제원, 위치정보 및 이상치 여부를 확인할 수 있는 간략한 시각적 분석기능을 제공한다. 그러나 WAsP에서는 한 높이에의 풍황-마스트 계측자료를 요구하므로 풍속연직분포 분석은 할 수 없다.

그림 1은 WAsP/OWC 분석결과 화면으로, 바람장미와 와이불 분포 그리고 주요 해석결과를 보여주는 간단한 구성으로 되어있다.

2.2 WindRose

그리스 Centre for Renewable Energy Sources(CRES)에서 개발된 WindRose는 마이크로소프트 엑셀의 애드인(add-in) 프로그램으로 개발되었으며, 시계열 풍향, 풍속, 기온 및 태양복사 자료의 각종 통계분석 및 IEC 61400-12-1 기준에 의거한 연간에너지생산량 계산까지 제공한다⁽⁴⁾.

마이크로소프트 엑셀 내에서 작동하여 각종 그래프와 해석결과를 엑셀 자료형식으로 제공한다는 점이 가장 큰 장점이며, 기타 주요 기능은 다음과 같다.

- 풍력발전기 기종 선정 및 공기밀도 보정에 의한 연간에

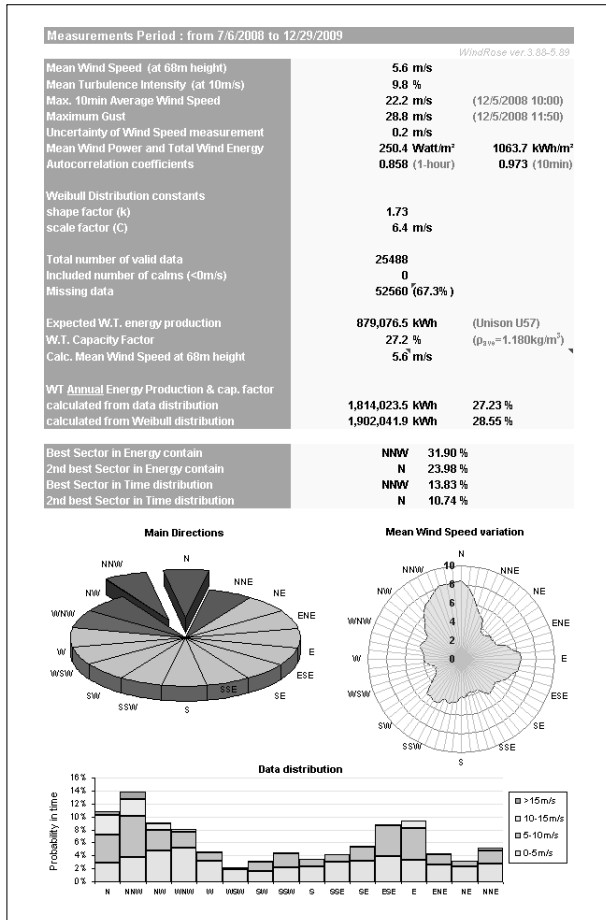


그림 2. Analysis result of WindRose v3.88-5.89.

너지생산량 계산

- 풍황-마스트 계측요소들의 시간별, 월별 통계분석 결과를 그래프 및 표로 제공
- 풍향별, 계측고도별 와이블 등급계수(c) 및 형상계수(k) 계산
- 다중고도 계측자료에 의한 풍속전단(wind shear) 분석 및 허브높이로의 외삽보정
- MCP(Measure-Correlate-Predict) 분석

그림 2는 WindRose의 주요 결과요약 엑셀시트(Excel sheet)이며 총 26개 시트의 분석결과를 제공한다.

2.3 Windographer

캐나다 Mistaya Engineering은 소규모 재생에너지원의 계통운영 최적화 프로그램인 HOMER의 개발사로, 이러한 경

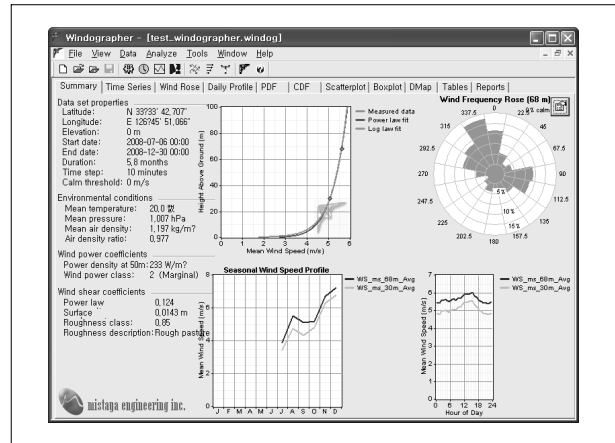


그림 3. Analysis result of Windographer v2.0.

험을 살려 풍황계측자료 통계분석프로그램인 Windographer를 개발하였다.

Windographer는 NRG Systems, SecondWind, Campbell Scientific 등 각종 풍황계측 센서 및 데이터로거(data logger), 소다(SODAR) 및 라이더(LIDAR) 자료형식을 변환과정 없이 읽어 들일 수 있다. 또한 직관적인 분석을 위한 그래프 제공 및 화면에서 보이는 자료를 이미지 또는 데이터 파일로 저장할 수 있는 유용한 기능을 제공한다. WindRose와 마찬가지로 공기밀도 보정 및 단일 풍력발전기에 의한 연간에너지생산량 산출이 가능하며, 그 외 Windographer의 특징적 장점은 다음과 같다.

- 극한풍속 해석: 풍력발전기 풍속등급 분석
- 데이터 품질관리 기능: 이상치 판별/제거를 위한 GUI (Graphic User Interface)
- 결손자료 보충: Markov 알고리즘을 이용한 결손자료 재생성
- 풍황-마스트 차폐영향(shading effect) 분석

그림 3은 Windographer 종합(summary) 화면으로 풍속 분포, 풍속의 월변화 및 시간변화 그리고 바람잠미 및 주요 분석결과를 보여준다. 총 8개의 탭(tab) 화면과 추가적인 분석메뉴를 제공한다.

2.4 소프트웨어별 기능비교

표 2는 풍황계측자료 분석용 소프트웨어의 기능을 비교한 것으로, WAsP/OWC는 시계열 자료를 풍향, 풍속별 출현빈

표 1. Comparison of the software functions

Software	WASP/ OWC	Wind Rose	Windo grapher
Tower shading analysis	x	o	o
Wind shear analysis	x	o	o
Air density correction	x	o	o
Annual energy production calculation	o	o	o
Extreme wind analysis	x	x	o
Turbulence intensity analysis	x	o	o
MCP analysis	x	o	x
Data gap filling	-	x	o
Data export to tab/wvs	-	x	o

도로 변환하는 간단한 기능만을 제공함에 비해 WindRose와 Windographer는 다양한 분석기능을 제공하고 있다. 특히 Windographer는 극한풍속 분석, 결손치 재생성 및 WASP, WindSim 입력파일 형태로의 저장기능이 제공된다.

3. 풍황계측자료 분석결과 비교

풍황계측자료 통계분석용 소프트웨어는 내부 계산방식에 따라 예측값에 다소 차이가 발생함을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 동일한 풍황계측자료에 대한 소프트웨어별 분석결과를 비교함으로써 소프트웨어 선택에 따른 불확도 범위에 대한 사례를 제시하였다. 일반적으로 주요 계산식 및 계산방법은 기술문서 또는 도움말을 통하여 제시하고 있지만 소프트웨어간 예측값 차이의 원인을 정확하게 설명하기에는 어려움이 따른다.

소프트웨어의 비교분석을 위한 실제 풍황-마스트 계측자료로서는 지식경제부 제주도 김녕 육상풍력실증연구단지 조성을 위해 실시된 계측자료를 사용하였다. 이 자료는 풍력발전기 성능평가를 위한 제반 기준을 모두 만족하도록 IEC61400-12에 의거하여 계측되었기 때문에⁵⁾ 자료품질 측면에서 신뢰도가 보장되며, 따라서 소프트웨어 비교분석을 위한 분석자료로서 적합하다고 사료된다.

풍황-마스트에 의한 계측정보는 표 2에 제시된 바와 같다. 즉, 70m 마스트의 68m 높이에 설치된 풍향, 풍속계 계측자료를 이용하였으며, 손실없이 계측된 10분-평균 177일간의

자료를 비교분석에 사용하였다. 각 소프트웨어의 분석결과는 표 2에 정리하였다. 단, WindPro의 경우 연간에너지생산량 계산을 위한 국소바람지도는 WASP 또는 WindSim 해석결과를 이용하기 때문에 본 분석에서는 WindPro의 자체 풍황계측자료 분석기능만을 비교하였다.

3.1 공기밀도 보정에 따른 풍력밀도

평균풍속 및 최대풍속은 모든 소프트웨어가 동일한 결과를 제시하였으나 WindRose의 평균풍력밀도(mean wind power density) 계산결과만 차이가 있다. 이는 공기밀도 보정방법에 따른 차이로 판단된다. 비록 WASP/OWC와 Windographer의 평균풍력밀도는 동일하지만 WASP/OWC는 공기밀도를 상수($\rho_o=1.225\text{kg/m}^3$)로 가정한 결과이고 나머지 두 소프트웨어는 시계열 공기밀도를 계산하여 반영한 통계결과이다. 참고로 평균풍력밀도 $P/A[\text{W/m}^2]$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} \rho_i U_i^3 \right) \quad (1)$$

식에서 A는 풍력발전기 블레이드 회전면적이며 ρ_i 와 U_i 는 각각 시간단계 i 일때의 공기밀도 및 계측풍속이다.

Windographer는 대기압(p, kPa)과 기온(T, K)이 모두 측정되었을 경우 다음의 기체상태방정식으로부터 공기밀도를 계산한다.

$$\rho = \frac{M}{R} \frac{p}{T} = 3.4837 \frac{p}{T} \quad (2)$$

반면 WindRose는 위 식에서 대기압을 단열(adiabatic) 대기상태로 가정하여 기온감률의 함수로 표현한 계산식을 사용하는데, 이는 대기압 측정 없이 기온만으로 공기밀도를 보정하기 위함이다.

유의할 것은 표 2의 김녕 사례와 같이 평균화 과정에서 공기밀도 보정/미보정의 차이가 나타나지 않을 수도 있으나 누적 풍력발전량 예측결과에서는 상당한 차이가 발생하게 된다는 것이다. 즉, 표 2에서 공기밀도 보정/미보정 시의 연간에너지생산량을 비교해 보면, Windographer는 미보정 시 1.3%, WindRose는 2.1% 과대예측하고 있다. 이러한 사실로부터 풍력발전량 예측시 공기밀도 보정이 반드시 필요함을 확인할

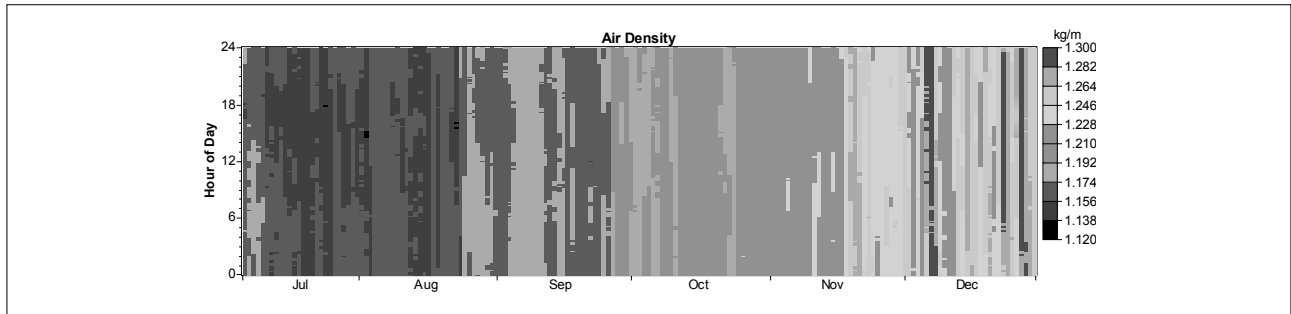


그림 4. Air density variation map during July to December.

수 있다. 그림 4의 공기밀도 시계열 변화지도를 보면 기온차에 의해 하계와 동계간 최대 16%의 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 참고로 소프트웨어간 풍력밀도 계산결과의 차이는 공기밀도 계산방식의 차이에 기인한 것으로 식 (2)에 의해 대기압 및 기온 측정값을 모두 이용하여 공기밀도를 산정하는 방식이 가장 정확한 것으로 판단된다.

일반적으로 풍력발전기 성능곡선(power curve)은 해수면 공기밀도(ρ_o)를 기준으로 하고 있으므로 피치제어(pitch control) 풍력발전기의 경우에는 IEC61400-12 권고에 따라 다음 식으로 계측풍속(U_o)을 보정을 한 후 연간에너지생산량을 계산하여야 한다.

$$U = U_o \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_o} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (3)$$

참고로 풍력발전량 예측을 위해서 허브높이가 68m인 유니슨 U57 피치제어식 750kW급 풍력발전기를 적용하였다. 풍력발전기를 U57로 선택한 이유는 허브높이로 풍속외삽에서 발생하는 오차를 제외하기 위함이다. 표 2에서 보듯이 WindRose와 Windographer는 풍속전단 분석값의 차이가 있기 때문에 풍력발전량 산출 시에는 허브높이로 풍속외삽 과정에서도 추가적인 차이가 발생할 것으로 판단된다.

3.2 풍속의 와이블 분포에 따른 AEP

그림 1을 보면 김녕의 풍속분포는 와이블 확률분포로 비교적 정확하게 곡선접합됨을 확인할 수 있다. 즉, WAsP/OWC로 계산한 경우, 와이블 분포 접합 또는 실제 계측자료간의 평균풍속 및 평균풍력밀도 산출결과의 오차는 각각 0.37%, 0.39%이다. 그럼에도 불구하고 소프트웨어간 와이블 분포계수

산출값에 차이가 발생하는 것은 내부적 계산방법 상의 차이로 판단된다. WindRose는 풍속 평균 및 표준편차 식에 의한 최소자승법(least squares algorithm) 또는 일반적인 와이블 페이퍼(Weibull paper) 곡선접합법을 사용하며, Windographer는 Stevens & Smulders 방법⁽⁶⁾을 사용한다.

한 가지 중요한 것은, WAsP에 의한 연간에너지생산량 예측값이 타 소프트웨어의 예측값에 비하여 2.3% 과대예측하고 있다는 것이다. 이는 전술한 와이블 분포를 산출하는 방법에 의한 차이와 더불어 WAsP가 시계열 풍향, 풍속 계측자료를 최대 36개(본 연구에서는 16개) 풍향구간, 1m/s 간격의 50개 풍속구간의 통계분포표로 재구성하여 풍력발전량을 산정하기 때문이다. 타 소프트웨어는 입력된 10분 평균 시계열 자료의 출력량을 합산하여 연간에너지생산량을 구하기 때문에 실제적 측면에서 WAsP의 통계적 계산방법은 시계열 계산방법에 비하여 통계적 평균화 과정에서 오차를 내재하게 된다는 점에 주목할 필요가 있다. 즉, 1m/s의 풍속구간 내의 모든 값은 그 구간의 대표값으로 평균화됨에 따른 오차가 포함된다.

표 2의 마지막 열에는 와이블 분포계수를 이용하여 산출한 AEP를 비교하였다. WAsP 결과값을 기준으로 WindRose 및 WindPro 결과값은 매우 근접하였으나 이와는 조금 다른 와이블 분포계수를 계산한 Windographer의 AEP는 약 2.2% 과소예측한 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 논문에서는 풍력자원평가 분야에서 사용되는 풍향계측자료 통계분석용 상용 소프트웨어 3종에 대한 기능을 비교·검

표 2. Comparison of analysis result of Waljeong met-mast data by the wind climate analysis softwares

Software	Windographer	WindRose	WAsP/OWC	WindPro
Measurement height (m)	68			
Valid records, N	25,488 (10min-averaged)			
Data recovery rate (%)	100			
Mean wind speed (m/s)	5,63			
Max wind speed (m/s)	22,22			
Weibull parameter k	1,709	1,725	1,71	1,76
Weibull parameter c (m/s)	6,322	6,413	6,4	6,42
Mean power density (W/m ²)	255	250	256	
1-hr autocorrelation coefficient	0,912	0,858	-	-
Wind shear	0,124	0,141	no	0,124
Annual Energy Production (MWh/yr)	1829	1815	-	-
AEP without density correction (MWh/yr)	1852	1854	1894	-
AEP calculated by Weibull parameters (MWh/yr)	1892 (-2,2%)	1939 (0,2%)	1935 (-)	1934 (-0,1%)

토하였다. 상용 소프트웨어의 통계분석 결과가 가질 수 있는 불확도를 정량적으로 판단하기 위하여 김녕 육상풍력실증연구단지 계측자료를 이용하여 분석결과를 상호비교하였다.

- (1) 소프트웨어의 기능 측면에서 자료입력, 분석기능 다양성, 편의성, 활용성 등을 고려한 평가순위는 Windographer > WindRose >> WAsP/OWC 로 판단된다.
- (2) 풍력밀도 산출결과는 공기밀도 보정방식에 따라 차이를 보였다. 비교분석에 사용한 제주도 김녕지역의 경우 계절에 따른 공기밀도 변화폭이 16%에 이르고 이에 따른 연간에너지생산량도 1~2% 수준의 오차가 발생함을 확인하였다. 따라서 풍력자원평가 시 공기밀도 보정은 필수적임을 확인하였다.
- (3) 와이블 분포계수의 계산방법에 따라 연간에너지생산량 계산결과에 2% 내외의 차이가 있을 수 있음을 확인하였다. 특히 풍향/풍속 구간별 통계분포를 사용하는 WAsP는 풍력발전량 산출 시 시계열 자료에 의한 정확한 계산값과는 다소 차이가 발생할 수 있음도 확인하였다.

로 수행되었습니다.

References

- [1] IEA(International Energy Agent) Annex 11, 1999, Wind speed measurement and use of cup anemometry, Recommended practices for wind turbine testing.
- [2] IEC(International Electrotechnical Commission), IEC61400-12-1, Power performance measurements of electricity producing wind turbines.
- [3] P.S. Jackson, J.C.R. Hunt, 1975, "Turbulent wind flow over a low hill", Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 101, pp. 929-955.
- [4] CRES(Centre for Renewable Energy Sources), WindRose User's Guide, 50p.
- [5] 고석환, 장문석, 주영철, 이운섭, 2009, "LabView를 이용한 풍력발전 성능평가용 모니터링 시스템 개발", 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 29, No. 6, pp. 69-74.
- [6] M.J.M. Stevens, P.T. Smulders, 1979, "The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes", Wind Engineering, Vol. 3, pp. 132-145.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 부처임무사업의 일환으

김 현 구



1997년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사
1998년 미국 아이오와대학교 IIHR 연구원
2000년 포항산업과학연구원 책임연구원
2005년 한국에너지기술연구원 책임연구원

현재 한국에너지기술연구원 풍력연구센터
(E-mail : hyungoo@kier.re.kr)