

LabVIEW 를 이용한 풍력발전기 모니터링 시스템 개발

남윤수#, 김형기*, 유능수**, 이정완**

Development of a Wind Turbine Monitoring System using LabVIEW

Yoonsu Nam[#], Hyunggi Kim^{*}, Neungsoo Yoo^{**}, Jungwan Lee^{**}

ABSTRACT

A wind turbine monitoring system is essential equipment for the performance evaluation and mechanical load analysis of a wind turbine. A monitoring system using LabVIEW is developed in this study. This system monitors signals from a meteorological mast, wind turbine generator, and tower. The discrete signals which are sampled at 1 Hz are automatically saved on a data file in the unit of a day. Besides these basic functions, the developed monitoring system has the other several capabilities. One of them is the information access from a remote PC through the internet. A vision image of the test site area and data files that are produced by LabVIEW software can be uploaded to the main computer located in a remote site. An emergency backup system using UPS for the power loss on the monitoring HW is also prepared. A detail explanation for the developed wind turbine monitoring system is presented in this study.

Key Words : Wind Turbine (풍력 발전기), Monitoring System (계측 시스템), LabVIEW (랩뷰), Meteorological Mast (풍향계측 매스트), Sensor Calibration (센서 신호교정)

1. 서론

태양이 생성하는 총 에너지의 (1.5×10^{18} kWh) 2%만이 지구의 대기권 내부로 흡수되며, 또한 이 에너지의 0.013%인 4×10^{12} kWh의 에너지가 지구대기의 이동에 사용된다. 대기의 이동이 갖는 에너지, 즉 풍력 에너지(wind energy)는 연간 지구에서 생산하는 총 에너지량의 100 배에 해당한다¹. 풍력 에너지는 고갈되지 않고 재사용할 수 있으며, 화석 에너지와는 달리 지구온난화의 주요 요인인 CO₂ 발생이 없는 청정 에너지이다. 따라서, 구미의 선진제국들은 풍력을 포함한 대체 에너지 기술

개발과 보급에 많은 투자를 하고 있는 상태이다. 유럽연합의 경우, 풍력 에너지에 연관된 사업은 1993년부터 1998년까지의 자료를 기준으로 할 때 매년 40% 정도의 성장을 계속하고 있다. 또한, 전세계적으로 향후 25년 이내로 대체에너지가 지구 총생산 에너지의 10% 정도를 담당하게 될 것으로 예상되고 있다². 우리나라도 80년대 중반이후 '대체에너지 기술개발 기본계획('88-'01)'을 수립하여 정부차원의 육성정책이 추진되고 있다. 특히, '97년도 선진국 온실가스 감축에 관한 '토쿄 의정서' 채택 이후, 대체에너지에 대한 중요성을 재인식하면서 '대체에너지 개발 및 이용보급 촉진법 개정

^{1,2} 2002년 11월 4일 접수
[#] 교신저자, 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부
Email nys@cc.kangwon.ac.kr Tel. (033)250-6376
^{*} 강원대학교 대학원 메카트로닉스 전공
^{**} 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

('02. 3. 25)'을 통하여 이 분야에 관한 기술개발 활성화 및 제도개선에 많은 노력을 하고 있다³. 이러한 정부 주도의 기술개발 활성화 사업중에 하나가 '풍력 실증연구 사업'으로서 강원도 대관령 지역에 풍력실증 연구단지를 건설하고, 풍력 발전기에 관한 여러 기술분야, 즉 시스템 성능 실증, 구조/진동/소음 해석, 그리고 전기 품질 및 계통연계에 대한 연구를 수행하는 사업이다⁴. 이 사업은 현재 1 차년도 연구사업이 진행중이며, 2004 년도 10 월에 종료된다.

본 연구에서는 위에서 언급된 풍력 발전에 관한 여러 연구분야에 사용되는 WT(Wind Turbine) 관련 실증 데이터들을 계측/저장하는 WT 모니터링 시스템 개발에 대한 연구결과를 소개한다. 이 시스템은 WT 과 관련된 수십 개의 정보, 즉 풍향 데이터, WT 전력 데이터, WT 블레이드의 회전속도 및 요잉각, 구조 관련 데이터들을 일정한 주기로 정확히 계측하고, 그 결과를 데이터 파일로 저장하는 기능을 갖는다. 이외에도 원거리에 있는 중앙 컴퓨터와 데이터 파일이나, 그래픽 이미지를 송수신할 수 있는 기능, 그리고 전원 차단에 대한 대처기능도 갖고 있다. 따라서, WT 모니터링 시스템이 설치된 곳을 굳이 가지 않더라도, 원거리의 중앙 컴퓨터로부터 WT 의 작동상태라든지 계측결과를 수신받아서 해석작업을 수행할 수 있다.

본 논문에서는 실증연구의 대상인 프랑스 Jeumont 사의 WT 에 대한 간략한 소개와 함께, 실증연구의 여러 세부분야에 대한 소개를 하였다. 아울러, WT 모니터링에 사용되는 여러 센서들을 소개하고, 그 특성을 정리하였다. 특히, National Instruments 사의 HW 와 LabVIEW SW 로 구성된 WT 모니터링 시스템에 대한 자세한 소개를 한다. WT 모니터링을 위하여 사용된 각종 센서들이 어떻게 모니터링 시스템 HW 와 연결되어 있고, 이 신호들이 어떤 방법으로 샘플링되어 내장형 PC 에 저장되는가에 대한 설명이 포함되어 있다. 또한, 개발된 WT 모니터링 시스템이 실증단지에 설치되어 운영되기 전까지 실험실에서 수행한 모의실험 결과들이 설명되었다. 대부분의 경우, WT 모니터링 시스템과 이 시스템에 연결된 센서들간의 거리는 일반적으로 수 미터에서 수백 미터에 달한다. 따라서, 센서출력 신호선의 길이 증대에 따른 노이즈 영향에 대한 분석이 매우 중요한 문제로 대두 된다. 풍향계측에 관한 주요 센서인 풍속 및 풍향센서에 대한 모의실험 결과가 자세히 소개되었다.

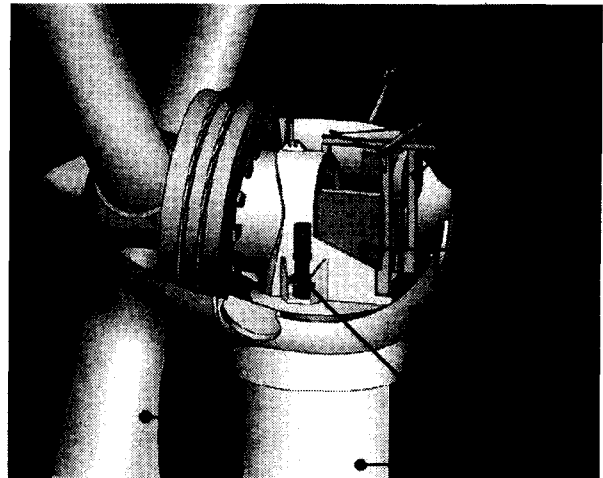


Fig. 1 Schematics of the J48 750 kW wind turbine

2. J48 Wind Turbine

2.1 J48 Wind Turbine

Fig. 1 은 대관령 풍력실증 단지에 설치된 프랑스 Jeumont 사의 750kW J48 풍력발전기에 대한 개략도이다. 발전기 날개(blade)의 실속(stall) 현상과 가변속 로터 블레이드회전으로 발전기의 출력량을 제어하며, 또한 날개가 발전기의 회전자인 영구자석에 직결된 형태로 작동되는 직접구동형 풍력발전기(direct drive wind turbine)이다. 균일한 60 Hz 의 출력전력을 얻기위하여, AC-DC-AC 변환장치가 사용된다. 이 발전기에 대한 대표적인 사양은 Table 1 에 나타내었다.

2.2 Wind Turbine 에 관한 실증연구 분야

WT 에 관한 실증연구는 다음과 같이 크게 3 개 분야로 세분화된다.

2.2.1 WT 성능실증 연구분야

WT 은 풍력에너지를 전기에너지로 변환하는 장치이다. 주어진 풍향조건에 대한 WT 의 출력 전력에 관한 상관관계를 실증하는 연구분야로서, 정확한 성능실증을 위하여는 전 세계적으로 통일된 기준 규격서인 IEC 61400-12 가 사용된다⁵. WT 의 풍향조건은 풍속계 (anemometer), 풍향계(wind vane), 대기 압력계, 온도계, 강우량계 등이 통합 설치된 풍향계측 매스트(meteorological mast)에 의하여 계

Table 1 Specification of J48 wind turbine

WT Model & Manufacturer		J48, Jeumont
Rated Power		750 kW
Wind Speed Data	Cut-in Speed (m/s)	3
	Rated Speed (m/s)	13.5
	Cut-out Speed (m/s)	25
	Limit Speed (m/s)	70 (for 5 seconds)
Generator	Type	Permanent Magnet, Discoidal, Synchronous Generator
	Cooling	Water Cooling
Rotor	Diameter (m)	48
	Rotor Speed (rpm)	9 ~ 25 (variable speed)
	Swept Area (m ²)	1809
	Hub Height (m)	46
Brake System	Air Brake	Hydraulic
	Disk Brake	Hydraulic
	Electric Brake	Under certification
Power Regulation		Variable Rotor Speed and Stall
Weight (ton)	Tower	40
	Nacelle	30
	Rotor system	9
Converter		AC/DC/AC IGBT
Noise Level (H + D/2)		56dBA

측되며, WT 출력전력은 전력센서에 의하여 계측된다. 이와 같이 계측된 데이터를 통계적으로 처리하여 아래와 같은 WT 성능에 관한 특성 데이터를 산출하게 된다.

- 풍속과 출력전압간의 전력 특성도(power curve)
- 연간 에너지 출력(AEP: annual energy product)

2.2.2 WT 구조 안전성/ 소음 연구 분야

WT의 기계적 구조물인 WT 타워 및 블레이드에 대한 바람에 의한 피로 및 내구 특성 등, 주로 장기적인 작동 특성 그리고 강한 돌풍 등에 의한 기계적 손상, 즉 단기적인 작동 특성에 관한 연구를 수행한다. 이를 위하여 구조물에 스트레인 게이지, 그리고 가속도계 등을 설치하여 바람에 의한 기계적 구조물의 특성 변화 등을 기준 규격서인 IEC61400-13에 의거 분석 및 평가한다. 또한, IEC 61400-11에 근거하여 WT의 소음 방출 특성을 체계적으로 파악하는 것을 연구의 목표로 하였

다.

2.2.3 WT 전력계통 연구분야

WT이 생산하는 전력의 품질을 IEC 61400-21의 규격서에 근거하여 평가한다. WT이 정상작동할 때와 on/off 작동될 때, 출력전압의 천이영역 변화특성 그리고 고조파 전류 왜곡(high order harmonic current distortion)의 정도를 분석 평가한다. 또한, 생산된 전력이 배전계통에 투입되었을 때 어느 정도의 배전선 전압변동이 발생하는가에 대한 해석적 및 실증적인 연구가 수행된다.

2.3 J48 Wind Turbine에 사용된 센서 특성

WT 모니터링에 사용된 센서들에 관한 중요 데이터는 Table 2에 정리되었으며, 이들을 용도 별로 구분하면 아래와 같다.

- 풍황 데이터 계측 센서⁶⁾:

- √ 풍속계(anemometer): 발전기의 원리에 의하여 작동되는 센서이다. 즉, 바람의 세기에 비례하여 센서출력 전압의 주파수가 변화된다.
- √ 풍향계(wind vane): 바람이 부는 방향으로 정렬되는 수직 꼬리날개의 위치를 포텐시오미터의 원리로 계측한다.
- √ 온도계(temperature sensor)
- √ 압력계(pressure sensor)

- WT 성능 계측 센서:

- 출력 전력계(power meter): WT이 생성하는 출력 파워에 비례한 아날로그 신호가 출력된다.
- 요잉각 센서(yawing angle sensor): WT의 날개를 바람에 순응하는 방향으로 정렬시키는 메커니즘이 요잉제어 시스템이다. 두개의 갭 센서(gap sensor)가 요잉 메커니즘의 일부인 피동기어의 회전 잇수를 측정하여, 요잉 방향 및 각도를 결정하게 된다.
- 날개 회전속도 센서: 풍속에 따라 가변되는 날개의 회전속도를 계측한다. 갭 센서를 제너레이터의 고정자(stator)에 설치하여, 날개의 회전 정보를 추출한다.

- WT 구조 안전성 계측 센서:

WT 타워는 날개(wind turbine blade)에 작용된 공력하중에 의하여 영향을 받게 된다. 장기적으로는 공력하중에 의한 피로 특성 등이 해석되어야

Table 2 Sensor specifications used for the wind turbine monitoring

Sensor	Model	Sensitivity	Sensing range	Accuracy	Ext. power
Anemometer	NRG#40	0.764 (m/s)/ Hz	0.78 ~ 96 m/s	3 m distance constant	-
Wind vane	NRG#200 P	72°/ V	0~ 360° (8° dead band)	Max 1% nonlinearity	+ 5 V
Temperature	NRG#110 S	$^{\circ}C = 27.776 \times V - 86.39$	-40 ~ 52.5 $^{\circ}C$	Max ± 1.1 $^{\circ}C$	+ 5 V
Pressure	NRG#BP2 0	$kPa = 21.79 \times V + 10.55$	15 ~ 115 kPa	$\pm 1.5kPa$ offset, Max 0.1% nonlinearity	+15 V
Power meter	KTG320	188.2kW/ V	0 ~ 1882 kW	0.25 %	220 V
Yawing angle	Jeumont	162 pulses/ revolution	0 ~ 360°	2.2 %/ pulse	+5 V
Rotor speed	Jeumont	120 pulses/ revolution	LPF (80 rpm)	TBD	+5 V
Strain gage	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
Accelerometer	ADXL250	200 mV/g	± 10 g	Max $\pm 0.2\%$ FS	+ 5 V

하며, 단기적으로는 돌풍에 의한 타워 구조 물에서의 기계적 하중 변화 등을 해석 및 실험적으로 분석하여야 한다. 이를 위하여 타워의 표면에 다수의 스트레인 게이지 및 반도체형 가속도계를 부착시켜 타워 구조물의 기계적 변형을 계측하게 된다.

3. WT 모니터링을 위한 LabVIEW 응용

3.1 LabVIEW 모니터링 시스템 HW

앞 장에서 언급된 WT 실증연구에 사용되는 각 센서의 출력신호를 모니터링하기 위한 HW 구성이 Fig. 2 에 개략적으로 도시되어 있다. WT 모니터링 시스템의 기본 제어장치는 NI(national instruments) 사의 산업용 PC 인 NI-8176 이다. 이 내장형 제어기에 두 개의 이미지 처리 보드, 그리고 두 개의 다기능 입출력(MIO: multifunction input output) 보드인 PXI6040E 가 PXI slot 으로 결합되어 있다. 각 이미지 보드에는 한 대씩의 컬러 카메라가 연결되어 있어서, 작동중인 WT 의 상태나 대관령 단지의 영상을 실시간으로 모니터링 할 수 있다. 또한, PXI slot 에 두 개의 MIO 보드가 장착된 이유는 WT 에 관련된 신호들의 속성이 서로 다르기 때문이다. 즉, WT 모니터링에 관련된 신호중 풍속계(anemometer) 출력 신호는 주파수 변조(FM: frequency modulation) 된 신호이다. 따라서, 풍

속계 출력 신호에서 정확하게 주파수 정보를 알기 위하여는 매우 빠른 신호 샘플링이 요구된다. 한편, 풍속계 출력신호를 제외한 다른 신호들은 일반적인 아날로그 신호들이다. 풍속계 출력 신호들은 device 2 인 PXI6040E 보드를 통하여 5kHz, 그리고 나머지 신호들은 device 3 인 PXI6040E 보드를 통하여 1 Hz 로 샘플링되어 PC (NI-8176)으로 입력된다. 앞서 언급된 풍향계, 압력계, 온도계, 가속도계 출력 등은 32 채널 아날로그 입력보드인 SCXI 1102B 를 통하여 내장형 제어기인 PC 로 입력된다. 또한, WT 타워에 장착될 총 64 개의 스트레인 게이지로 구성된 16 개의 full bridge 회로 출력은 SCXI-1520 보드를 통하여 신호증폭 및 LPF

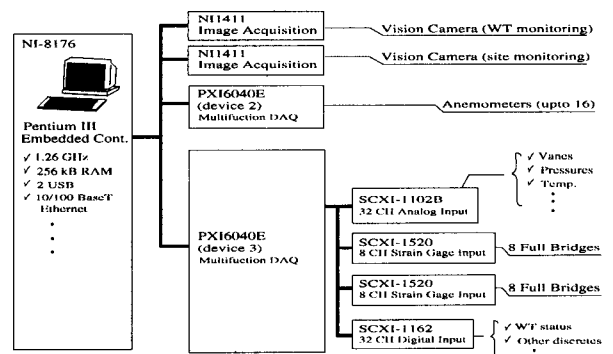


Fig. 2 Schematics of J48 WT monitoring system

의 어레이(array) 구조로 합쳐져 데이터 파일에 저장된다. Fig. 4의 중앙 및 하단부는 1 Hz의 단위로 생성되는 데이터를 파일에 저장하고, 데이터 파일을 관리하기 위하여 사용된 LabVIEW SW 블록을 나타낸다. Fig. 5는 LabVIEW SW에 의하여 생성된 파일의 구조의 샘플을 보여주고 있다. 시간 데이터와 함께 계측된 데이터들이 1 초 간격으로 저장되고 있다. 이 파일은 인터넷으로 원격 전송되어, 중앙 컴퓨터의 MATLAB 등을 이용하여 WT의 성능해석, 또는 구조 분석 연구 등에 사용된다.

4. 모니터링 시스템의 모의실험 결과

일반적으로 풍황계측 타워로부터 WT 모니터링 시스템이 설치된 곳까지의 거리는 수 백미터에 달한다. 따라서, 따라서, 신호 연결선에 의한 저항 증가로 발생할 수 있는 신호의 특성 변화 및 노이즈 영향등이 분석되어져야 한다. Fig. 6은 신호선 길이 변화에 따른 풍속계 출력신호의 영향을 보여주고 있다. Fig. 6의 첫 번째 플롯은 풍속계 출력 신호선의 길이가 2 m, 두 번째 플롯은 150 m일 때, 그리고 마지막 플롯은 150 m 출력신호를 10 Hz의 차단주파수로 2 차 LPF(low pass filtering) 한 결과이다. 신호선의 길이가 길어지면, 60 Hz의 전원 노이즈가 신호에 포함되어 나타나고 있다. Fig. 6의 두 번째 신호로부터 주파수 성분을 추출하면, 실제 풍속정보인 3.6 Hz 대신 60 Hz로 결정될 확률이 커지게 된다. 약간의 위상 지연이 발생되지만, LPF를 적용하면 실제 풍속정보를 충실하게 재현할 수 있게 된다. 풍력 발전기의 성능실증을 위하여는 10 분단위의 평균데이터가 사용되기 때문에 이 정도의 시간 지연은 무시될 수 있을 정도로 작은 량에 해당한다⁵. 위에서 언급된 60 Hz의 전원 노이즈 문제는 풍황계측 타워에 설치된 모든 센서, 즉 풍향계, 압력계, 온도계등에서 공통적으로 나타나게 된다. 따라서, 풍속계에 적용된 동일한 LPF 구조가 다른 센서 출력에도 그대로 사용되었다.

풍황계측 센서들중에서 유일하게 실험실 단위에서 캘리브레이션이 가능한 센서는 풍향계이다. 이에 대한 실험결과가 Fig. 7에 정리되어 있다. 이 그림에서 첫 번째 플롯은 인위적으로 설정된 날개(vane)의 변위에 대하여 150m 신호선을 거쳐 입력된 풍속계의 출력 전압을 그린 것이다. 앞서 언급된 60 Hz의 노이즈 영향으로 센서 출력신호

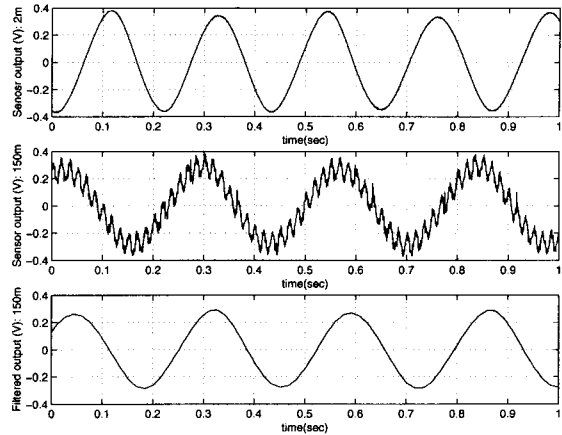


Fig. 6 Variation of an anemometer signal output due to the change of wire length

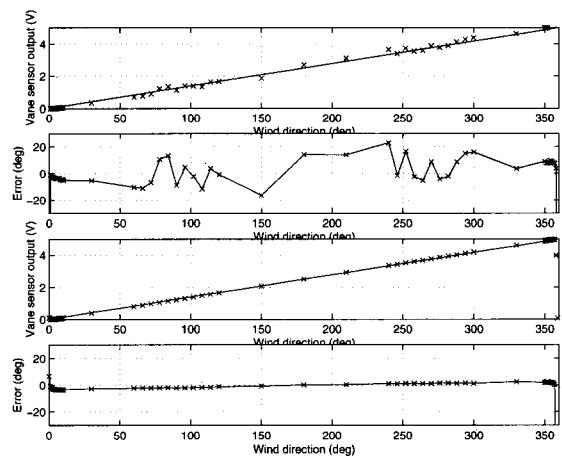


Fig. 7 Calibration of wind direction sensor

의 선형성(linearity)이 크게 훼손 되었음을 알 수 있다. Table 2에 명시된 풍향계 감도를 사용하여, 이것을 방향각 오차로 환산하여 나타낸 그림이 Fig. 7의 두 번째 플롯이다. 한편, Fig. 7의 하위 두 플롯은 LPF를 적용한 경우에 대한 결과를 보여주고 있다. 풍향센서 오차의 크기가 $\pm 3^\circ$ 이내로 상당히 감소 되었음을 볼 수 있다. 대관령 실증단지 경우 주풍이 동서 방향(90° 또는 270°)이므로, 풍향센서의 오차정도는 최대 3.3% 정도에 해당한다.

LabVIEW 모니터링 시스템에 연결된 전원이 차단되면, 작업중인 데이터 파일이 손상을 입게

된다. 외부 전원의 상태를 감지하는 디지털 신호를 만들어서 Fig. 2 의 SCXI-1162 보드로 입력시키면, 전원 차단 여부를 확인할 수 있다. UPS 배터리가 작동되는 시간인 5 분동안 전원이 회복되지 않으면, WT 모니터링 시스템은 중앙 컴퓨터에 전원 불량에 의한 작업중단 상태를 알리는 신호를 보내고, 안정적인 셧다운(shut down) 단계를 밟게 된다. 또한, 전원이 다시 회복되면 모니터링 시스템은 외부의 조작없이 자동적으로 정상동작 모드로 전환되어, 정상적인 신호 모니터링 및 데이터 관리등의 작업을 재개하게 된다.

5. 결론

LabVIEW 를 기반으로 하는 WT 모니터링 시스템이 본 연구를 통하여 개발되었다. 이 시스템은 WT 의 성능 실증연구, 그리고 WT 의 기계적 구조물에 대한 안전성 연구에 필수적인 장비이다. 풍황 계측센서, 전력측정 센서, WT 구조물의 기계적 변형상태를 측정하는 스트레인 게이지 및 가속계 등을 비롯한 수 십가지의 센서들이 이 시스템에 의하여 모니터링 된다. 모든 센서 출력신호들은 1 Hz 단위로 샘플링되어, 모니터링 시스템 내부의 하드 디스크에 하루 단위로 자동적으로 저장된다. 이러한 기본적인 기능외에, 개발된 모니터링 시스템은 인터넷을 통하여 원격관리가 가능하다. 따라서, 비전 카메라등을 사용하여 WT 의 작동상태를 원거리에서 감시할 수 있으며, 모니터링 시스템에 저장된 데이터 파일을 원거리에 있는 중앙 컴퓨터로 전송시킬 수 있다. 개발된 WT 모니터링 시스템은 현재 실험실에서 시험 운전중이며, 몇 달후에는 실제 WT 에 연결되어 실증연구에 사용될 예정이다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 풍력실증연구사업 지원연구비로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Hau, E., Windturbines Fundamentals, Technologies, Application and Economics, Springer, 2000.

2. Wagner, A, "Prospects for Wind Energy in the European Union by 2010," '99 European Wind Energy Conference, pp. 13-17, 1999.
3. Won Jang Mook, "Technology Development and Commercialization on Wind Energy," 1-st Workshop on Wind Energy Certification, Kangwon National University, 2002.
4. Yoo Neung Soo, Kim Seock Hyun, Nam Yoon Su, Lee, Jung Wan, Lee, Byung Hee, Kim Kwang Ho, "A Study on Wind Turbine Certification for the Taekwanryung Site," Korea Institute of Energy Research, 2002.
5. "Wind Turbine Generator Systems. Part 12: Wind Turbine Power Performance Testing," 1st Ed., IEC 61400-12, 1988.
6. NRG systems, Inc., 9300SA Stand Alone Logger: Customer Guide, 1996.
7. SCXI-1520 User Manual, National Instrument, 2001.
8. Doebelin, E., Measurement Systems, Application and Design, McGraw-Hill Publishing Company, 1990.