

그린에너지 활용을 위한 대학건물 옥상설치형 소형풍력발전

이유석*, 김재용**

Small Wind Turbine Installed at the University Building Rooftop for Green Energy Utilization

You Suck Lee* and Jae Yong Kim**

Abstract

As the world supply of fossil fuel sources decreases, the need for efficient energy conservation and developing green energy technologies becomes critical. Because of the high cost of the foundation for large turbines and optional high wind speed (over 12 m/s), it is very difficult to be located at inland city. For the solution above mentioned problem, we have been experimented about that not only using the adaption of wind power system on buildings for improving turbine efficiency, but also applying a wound rotor type induction generator for a small wind turbine. In this research, we try to find out the wind direction and wind speed those were measured every 1 min., during operation period, using the anemometers which consist of horizontally spinning cups on a vertical post. Performance testing for small wind turbine generating system was carried out by using the induction motor and inverter. Finally, we measured the power of 1 kW wind turbine system with the clamp meter and a voltmeter.

Key words

Small Wind Power(소형풍력), Green Energy(그린에너지), Magnetization(자화), Wound Induction Generator(권선형 유도발전기), Wind Condition Monitoring(풍향 모니터링)

(접수일 2014. 8. 6, 수정일 2014. 9. 4, 게재확정일 2014. 9. 4)

* 충북대학교 환경공학과 석사과정 (Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University)

■ E-mail : senselys@naver.com ■ Tel : 010-2011-8554 ■ Fax : (043)271-8635

** 충북대학교 환경공학과 교수 (Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University)

■ E-mail : jykim4@korea.com ■ Tel : (043)261-2471 ■ Fax : (043)271-8635

1. 서론

최근 화석연료의 고갈과 화석연료의 사용으로 인한 이상 기후현상이 발생하고 있으며, 일본의 대지진으로 인한 원자력발전사고의 위험성의 대중적 인식과 더불어 국제 원유가격의 지속적인 상승세로 인하여 경제적으로나 환경적으로 풍력 발전 에너지를 비롯한 신재생에너지의 개발 및 보급이

시급하다.⁽¹⁾ 또한 세계최대의 NGO중 하나인 그린피스에서도 향후 신재생에너지의 1순위를 풍력발전으로 내세우고 있는 상황이다.

국내에서는 제주도를 비롯하여 해안가 및 강원도 등의 여러 산간지역에 실증화단지 설치되어 운영 중에 있으며, 풍력발전의 실용화에 초점을 두고 여러 기업 및 연구기관에서 계속해서 연구 개발이 진행 중에 있다.

하지만 대부분의 풍력발전연구의 초점은 경제성을 최우선으로 하기 때문에 발전 설비의 대형화와 집약화 그리고 위치의 제한성을 지니고 있다. 국내의 경우 강원 98MW, 영덕 39.6MW, 제주한경 6MW, 전북새만금 7.9MW 등으로 대부분의 발전 설비가 제주도를 비롯한 풍황이 풍부한 산간지역과 해안지역에 주로 분포되어 있음을 볼 수 있다.⁽²⁾ 이처럼 국내에서 풍력발전기의 대형화와 풍력단지의 건설에만 초점이 맞추어져 가고 있으며 정격풍속이 12m/s 이상의 발전기를 주로 이용하고 있기 때문에 해상풍력을 대세로 여기어 대기업 및 여러 연구기관에서 연구를 진행 중에 있으며 실증을 통한 실용화에 힘쓰고 있는 실정이다. 하지만 전력수급이 대부분 이루어지는 내륙지역과 거리가 멀 뿐 아니라 전력수송 시설비등도 경제적인 면에서 빼 놓고 생각할 수 없는 부분임은 거론하지 않을 수 없다. 원전가동 중지로 인한 전기요금의 인상으로 독일에서는 2010년 4000여대의 소형풍력발전기를 설치하였고, 미국의 Southwest Windpower사는 유럽 각지에 400W급 풍력발전기를 판매하고 있다.⁽³⁾ 이와같이 개인단위의 소형풍력발전의 보급이 각광받고 있으며, 국내에서도 소형풍력발전의 필요성을 느끼고 뒷늦게나마 보급하려 노력하고 있지만 기상청의 자료 등으로 내륙지역은 풍황조건이 사업실시에 부족하여 사업에 참여하지 못하는 상황이다. 국내의 풍황에 맞는 소형풍력발전에 관하여 한국해양대, 강원대학교, 제주대 등에서 각 지역별로 연구한 바 있지만 풍속의 경우에 대하여 주야간에 따른 세부적인 상황은 연구한 바 없다.⁽⁴⁻⁶⁾ 또한 한국에너지기술연구원에서 한반도 풍력자원의 특성을 파악할 수 있는 공간해상도 1km, 시간해상도 1시간 간격의 국가바람지도를 제공하고 있다.⁽⁷⁾ 하지만 국가바람지도는 MW급의 대형 풍력발전기의 사전타당성 평가에는 효과적이지만 소형 풍력발전기의 사전타당성 평가를 위해서는 보다 높은 시공간 해상도의 바람지도가 필요하다. 그리고 기존의 바람장미가 나타내는 자료로는 평균치만을 표시하기 때문에 시시각각 변하는 바람의 충분한 자료가 되지 못하므로 보다 더 세밀한 풍력·풍향자료의 측정과 연구는 필히 선행되어야만 한다. 따라서 이제까지는 실제 건물에 소형풍력발전기를 설치하여 운영 및 분석을 진행한 연구가 없었기에, 본 연구를 통하여 건물옥상의 장애물을 통과하는 과정에서 수시로 변하는 풍황에 따른 풍력발전기 설치 및 가동 가능성을 조사하는 기초 연구를 시범적으로 수행하고자하였다. 내륙지역인 충청북도에 위치하고 있는 충북대학교 9층 건축물 옥상에서

다변하는 풍속 및 풍향을 측정 분석하기 위하여 모니터링 시스템을 설치하였으며, 같은 위치에 권선형 유도발전기를 적용한 소형풍력발전기를 설치 적용하여 전력효율을 측정하고 평가하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 수평축 발전 형태로 장치 모식도는 Figure 1과 같다. 연구에 이용된 타워는 각종 변화류 및 돌풍에 의한 영향을 고려하여 타워 높이를 안전에 영향을 미치지 않는 선에서 최대한 낮추어 설치 하였으며, 높이가 3.8m의 타워를 세웠다. 증속기는 일본 S사의 V모델 제품으로 블레이드 RPM대비 5배 증속을 할 수 있도록 설계 되었다. 블레이드는 길이 1.5m 3엽식을 본 실험에 적용하여 실험 하였다. 발전기의 전격 발전용량은 1kW이며, 저장장치로는 자동차용 배터리(12V, 90A)를 사용하였다. 풍속과 풍향을 측정하기 위하여 DAVIS사의 Weather link를 사용하였다.

2.2 풍황 분석 방법

풍황 분석은 충북대학교 9층 건물 옥상에서 2011년 4월~2012년 4월까지 총 13개월에 걸쳐 이루어 졌다. 정확한 풍황 분석을 위하여 설치지역의 파노라마사진을 첨부하였다. 또한

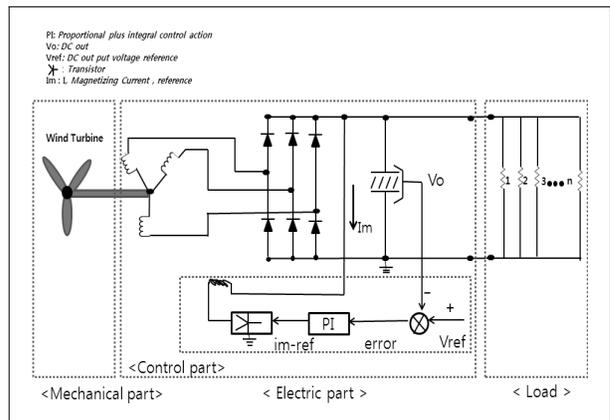


Fig. 1 Diagram of Small Wind Turbine Generator System

기존의 청주지역의 평균풍속과의 비교를 위하여 청주기상대의 자료를 활용하였다. 2012년 4월 한 달간은 기존의 10분 단위 측정치가 아닌 1분 단위 측정치로 변경 분석하였으며, 이를 풍속 풍향 시간의 3차원 그래프로 나타내어 시간별 변동되는 풍속 풍향을 정리하였다. 그리고 1분 단위 풍속 측정치를 분산형 그래프로 작성하고 하루 중 발전가능 시간을 분석하였다.

2.3 발전기 자화시험

발전기의 특성을 실험하기 위하여 내부 실험 장치를 구성하였다. 본 연구에서는 권선형 유도교류발전기를 이용하였고, 여자전류를 외부에서 공급하여 초기자화를 시킨 후 자화 유지 RPM을 알아보는 실험을 실시하였다.

Figure 2는 발전기 실험 구성도이며, 실험에는 저압 3상 유도전동기를 이용하여 풍력을 대신하였고, 발전기에서 나오는 출력 DC 전력은 부하에 연결하였다. 전동기의 컨트롤은 AC 가변속 드라이버를 이용하였고, 전류와 전압은 각각 CLAMP METER와 MULTIMETER를 이용해 측정하였다.

발전기와 3상 유도전동기를 1:1 비율로 연결하고, AC 가변속 드라이버를 이용하여 3상 유도전동기의 회전수를 10RPM 단위로 늘려가며 초기자화 유지 RPM을 알아보는 실험과 함께 자화유지 시점으로부터도 10RPM씩 늘리며 전압 및 전류를 측정하였다.

2.4 발전기 전력량 측정

본 연구에 사용된 실험 장치는 1kW 소형풍력발전기로 영구자석식 발전기가 아닌 권선형 유도발전기로서 초기에 발전

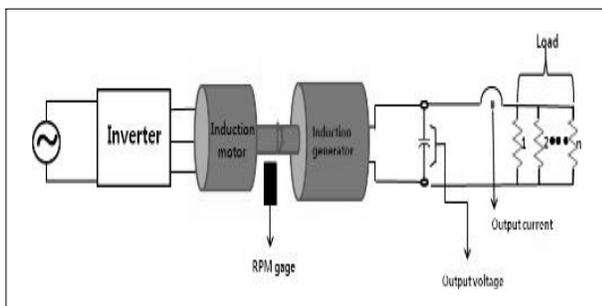


Fig. 2 Schematic Diagram of Performance Test Equipment

기 외부로부터 여자전류를 주입해 발전기 내부에 자화를 걸고 일정 RPM 이상이 되면 내부발생 자력으로 자화되어 발전하는 시스템을 이용하였다. 발전되어 출력된 AC전기는 다이오드를 이용해 정류하여 DC 12~14V의 출력전압으로 12V 축전지에 충전시키고 라이트를 부하로 사용하여 발전량을 측정하였다. Figure 3은 외부가동중인 풍력발전기와 내부 부하의 모습이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 풍향자료 분석결과

실제 충북대학교 공학관 옥상에 설치한 풍속측정기의 2011년 4월부터 2012년 4월까지의 13개월간의 풍속측정 결과는 Table 1과 같다. 그 중 옥상의 풍속 중 2012년 3, 4월경의 평균풍속이 가장 높았음을 알 수 있었으며 최대풍속은 조사 기간 중 23.7m/s를 나타냈다. Table 2는 청주기상대의 자료로 월 평균풍속은 평균 1.5m/s로 나왔으며 월 최대 풍속의 평균은 4.4m/s로 나타났다. 둘을 비교분석한 결과 두곳 모두 봄철에 주로 강한 바람이 불었고, 주 풍향은 서로 비슷하였다. 하지만, 옥상에서 측정된 바람의 평균풍속은 청주기상대가 높고, 반대로 최대 평균풍속은 옥상이 높았다. 이는 풍력발전기 설치지역의 특성상 옥상에 나와있는 두 개의 기둥 구조물로 인해 바람의 유체역학적 기둥을 스치는 와류가 심해

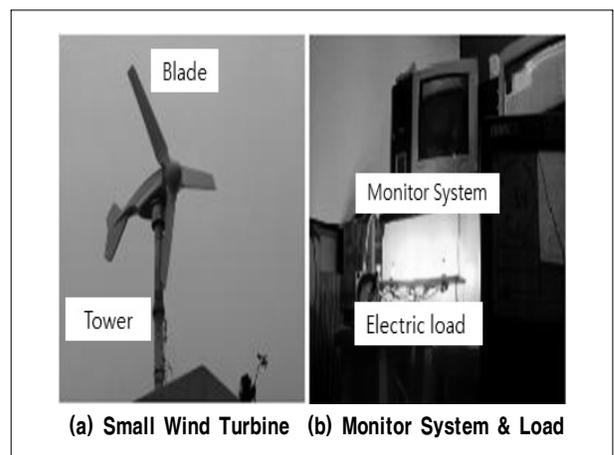


Fig. 3 External Wind Turbine & Electrical Load in Lab.

Table 1. Wind Speed Data (C University, 9th Bld. Rooftop)

(Unit : m/s)

	2011									2012				AVG
	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	
Mean mothly wind speed	2,1	1,4	1,2	1,3	0,8	1,2	0,8	1,0	1,1	1,1	1,4	2,5	1,6	1,3
Maximum instantaneous wind speed	16,5	15,2	20,1	15,2	16,5	12,5	14,8	15,2	12,5	12,5	16,1	21	23,7	16,3
Maximum mean mothly wind speed	8,5	9,0	5,4	6,7	4,9	4,9	6,3	3,8	3,8	3,7	4,6	4,1	2,9	5,3
Main wind direction	WSW	WSW	WSW	SSE	SSE	NNE	NNW	W	NW	NW	NW	W	WNW	

Table 2. Meteorological Wind Speed Data (Cheoung-ju)

(Unit : m/s)

	2011									2012				AVG
	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	
Mean mothly wind speed	1,7	1,7	1,7	1,5	1,4	1,4	1,1	1,3	1,2	1,2	1,3	1,8	1,9	1,5
Maximum mean mothly wind speed	4,0	3,9	3,5	3,6	3,5	3,5	2,9	5,2	5,2	4,6	4,9	6,0	6,8	4,4
Main wind direction	WSW	WSW	WSW	SSE	SSE	NNE	NNW	NE	NW	NW	NW	W	WSW	

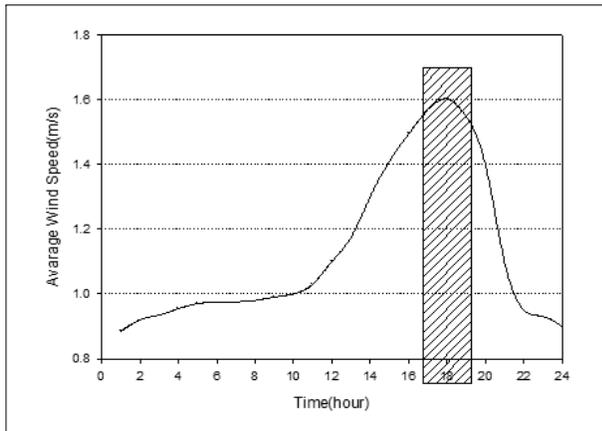


Fig. 4 Hourly Average Wind Speed

지고, 서로 상쇄되어 평균풍속이 낮게 나온것으로 보인다. 하지만 돌풍으로 인한 최대풍속은 옥상지역이 높게 나왔다.

본 연구에서는 내륙 지역에서의 풍향 자료에 대한 실제적 내용을 알아보고자 하였으며, 옥상설치 풍력측정기를 통하여 1년간의 조사 기간동안 시간대별 평균 풍속을 살펴 본 결과로 Figure 4와 같은 데이터를 얻을 수 있었다.

위의 결과와 같이 1년간의 평균치 데이터에서 살펴본바 풍속의 증가 구간은 대부분 12시 이후였고 또한 17시와 19시 사이에 최고조를 나타냈다. 이후 풍속은 감소하여 새벽시간에 풍속은 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 전반적으로 평균풍

속이 낮은 이유인 야간의 풍속이 낮거나 바람이 없는데 근거한 평균풍속의 저하로 볼 수 있다.

Figure 5에서는 2012년 4월 1일과 2일 양일의 데이터를 기존의 방법과 다르게 시간, 풍속, 풍향 세 가지 변수를 하나의 그래프로 3차원으로 표현하여 1분 단위 시간변화에 따른 풍속, 풍향의 실시간 변화량을 알아보았다.

Table 1에서 나타난 바와는 전혀 달리 평균값이 아닌 실시간 자료를 보여줌으로써, 실제로는 바람장미의 데이터만 가지고는 풍량과 풍향을 풍력발전에 고려할 수 없다는 결론을 유출할 수 있었다. 그리고 Figure 6과 같이 본 소형풍력발전기가 설치된 공학관의 구조를 살펴보면 옥상위에 두 개의 큰 구조물이 있으며, 1번 구조물 위에 풍력발전기가 설치되어있다. 두 구조물의 높이는 각각 3.3m, 8.5m이다. 또한 주위에 둘러진 추락방지 벽의 높이는 3.1m 이다. 그에 따른 바람의 역방향 즉 맞바람과 상승류 및 돌풍과 같은 각종 변화류가 생성되어 풍향이 매우 급변한다. 특히 4월 1일 자의 경우를 보면 풍속이 비교적 높아 변화류의 영향이 크게 작용하며, 풍향이 매우 불규칙적으로 나타냄을 알 수 있다. 4월 2일의 경우 풍속이 낮아 변화류의 영향이 적고 비교적 잔잔한 형태의 결과그래프를 나타내었다. 이와 같은 사실을 고찰해보면, 반드시 향후 풍력발전시스템에 관한 연구는 보다 상세한 풍황을 다룬 자료가 필수적임을 알 수 있다.

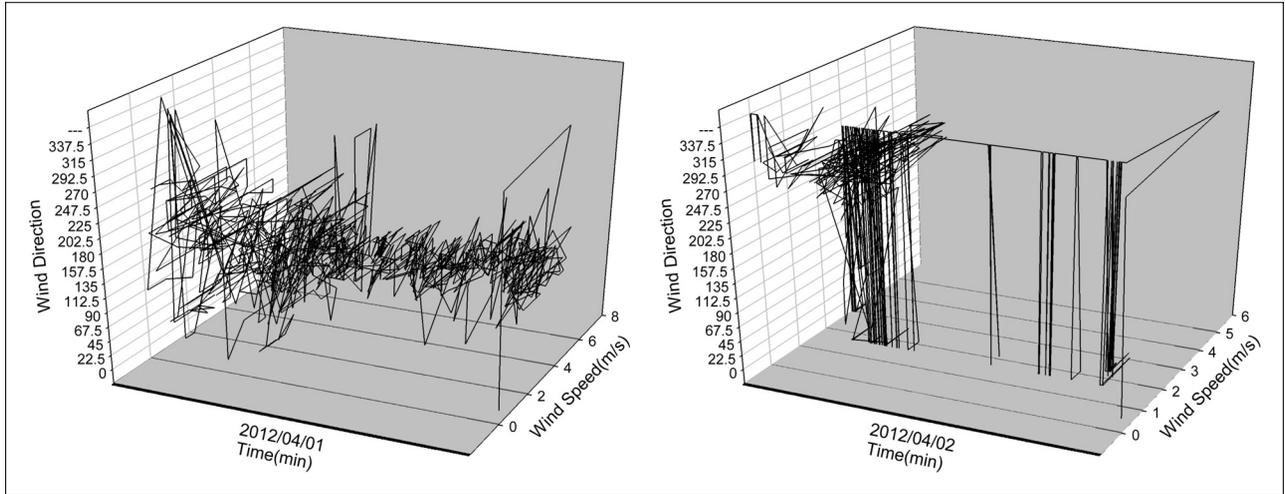


Fig. 5 Effect of Time on Wind Speed / Direction

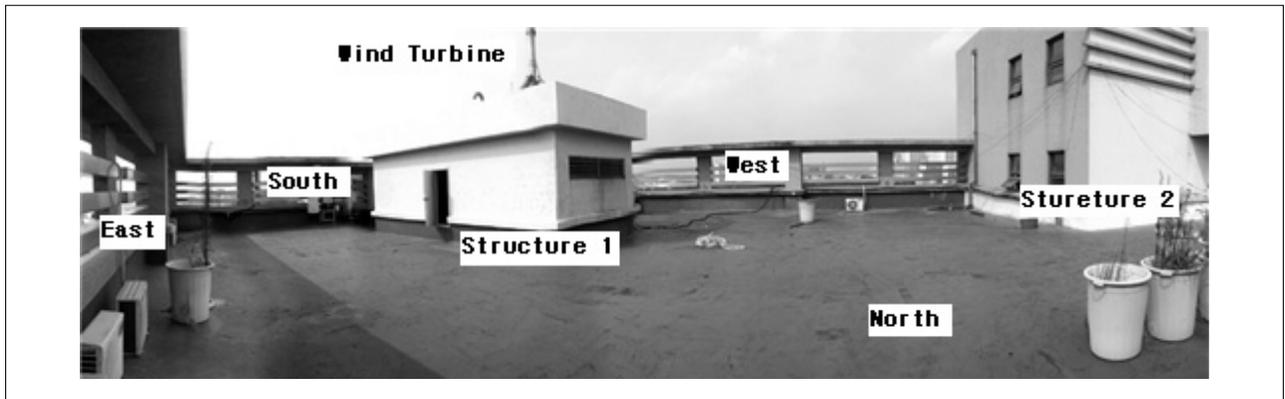


Fig. 6 Panorama Picture of Location Wind Condition Monitor installed on 9th Bld. Rooftop

3.2 내부 자화실험 결과

내부 부하 실험에서는 자화전류의 투입시기 결정과 발전기 자화 멈춤 RPM 측정에 목적을 두고 실험이 진행되었으며, 발전기의 최대 출력점을 찾기 위해 유도전동기의 RPM을 최대로 증가시키며 실험을 실시하여 전력생산에 대한 결과를 얻었다. 본 실험에서 발전기의 자화전류 투입 회전속도를 알기위한 내부 부하 실험 시에는 전동기의 RPM을 10RPM 단위로 늘려가며 초기자화 후 발전기의 자화가 지속되는 RPM을 측정한다. 실험결과 890RPM에서 900RPM 대로 나타났으며, 그 결과는 Figure 7과 같다. 내부 실험 시 자화전류를 낮은 RPM에서 넣게 되면 순간적으로 감속이 되긴 하나 자화가 유지되지 않고, 부하가 걸리지 않은 상태로 회전만 유지하게 된다.

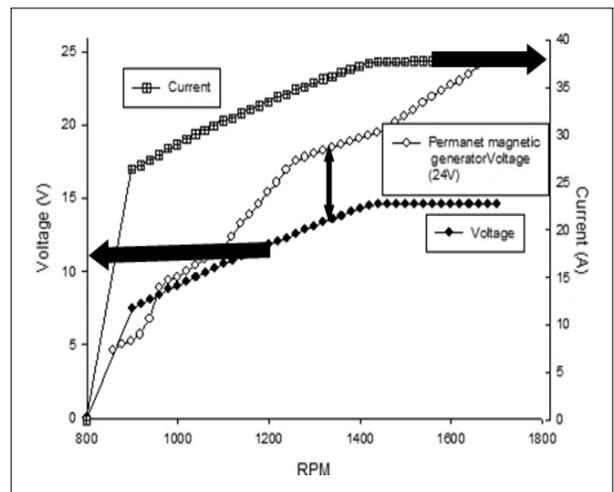


Fig. 7 Voltage and Current Measurements with RPM

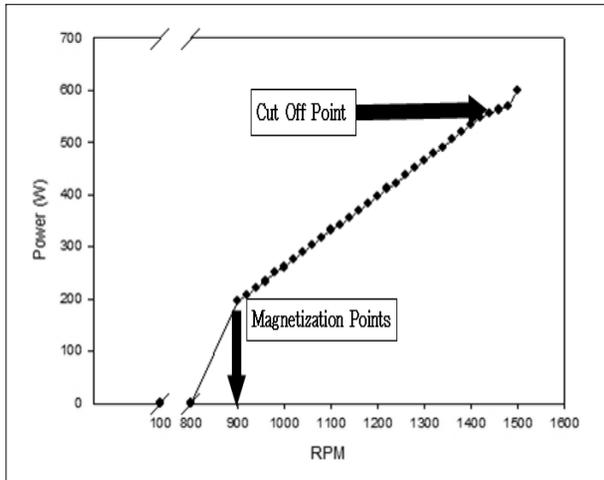


Fig. 8 Effect of RPM on Power

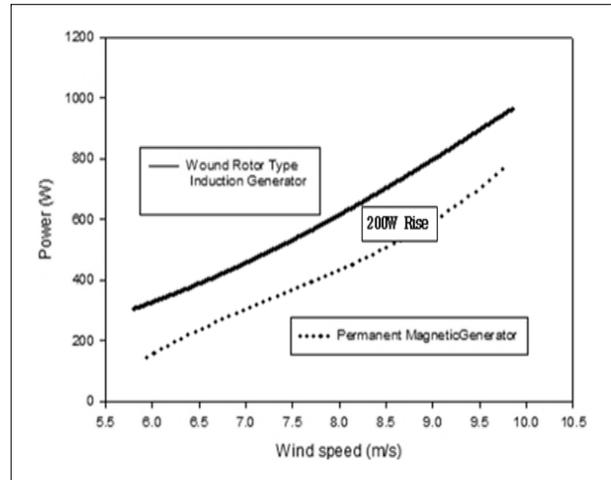


Fig. 9 Effect of Wind Speed on Electrical Power

다.^(8,10) 최고전압은 14.53V로 나타나는데 발전기에서 나오는 전력은 안전성을 고려하여 15V 이하로 고정하였기 때문에 그 이상의 전압은 나올 수 없다. 전류는 최고 90A 이내로 나오도록 고정시켰고 그에 따른 발전기 최대 용량은 1,080W로 책정되었다. 그리고 이번 내부 실험에서는 투입되는 전동기의 안정적 가동을 위하여 CUT OFF를 1500RPM 부분에서 실시하였다. 이를 통한 RPM과 전력량의 상관관계를 Figure 8에 나타내었다.

3.3 외부 발전기 전력량 측정결과

충북대학교 공학관 옥상의 설치된 소형풍력 발전기의 블레이드는 풍속 2.5m/s에서 구동을 시작하였으며 실내 실험을 통하여 890~900RPM 대에서의 자화가 유지됨을 이용하여 외부 실험기에 적용하였다. 그러나 내부 실험과는 다르게 890~900RPM 대에서 자화유지가 수월치 못하여 1000RPM에 맞추어 자화실험을 실시한 결과 발전이 가능하였고, 그때의 풍속은 5.8m/s였다. 5.8m/s보다 낮아지는 시점에는 자화 전류를 넣어도 RPM 저하에 따라 자화가 서서히 멈추었으나 5.8m/s 이상의 풍속을 유지하며 풍향이 일정할 때에는 풍속이 증가할수록 발전량이 증가하였다.

발전기의 출력은 풍속과 풍향에 따라 시시각각으로 변하여 측정이 어려웠으나, 발전기 내부 RPM 센서와 풍속계의 풍속을 실시간 분석하여 풍속대비 발전량을 산출하였다. 풍속 7.6m/s에서 1,500RPM의 회전 출력을 하였으며 14.56V의

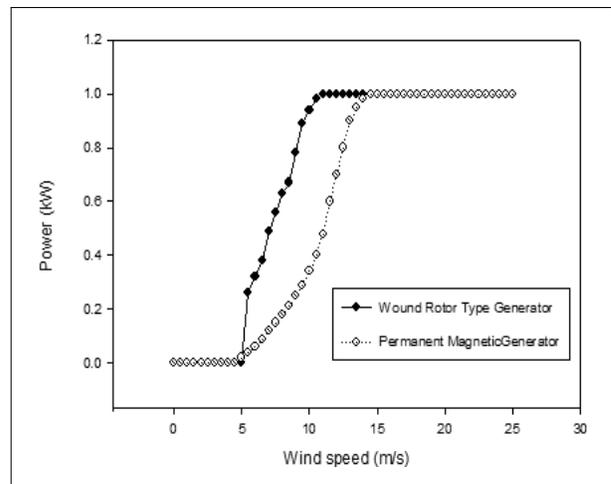


Fig. 10 Wound Induction Generator Power Curve

전압과 42A의 전류로 그 전력량은 602W였다. 평균 9.8m/s 풍속에서 2,000RPM의 출력을 보였고 정격 1kW에 거의 도달하는 980W 대의 발전량을 나타내었다. Figure 9에 풍속대비 전력량을 나타내었다. 영구자석식의 경우와 비교한다면 약 200W정도 높은 경향을 나타낸다. 내부 측정과 마찬가지로 실제적으로 외부 RPM을 모니터링 한 결과 풍속대비 RPM은 점차적으로 증가한다.

Figure 10은 본 연구에서 설치 측정된 발전기의 전력량을 그래프로 나타낸 것이며 같은 그래프 내에 발전용량이 같은 기존 영구자석풍력발전기의 효율과 비교하기 위하여 발전량을 나타내었다. Figure 10에서 보는 바와 같이 15m/s 이상의 고 풍속에서는 두 발전기의 발전량은 같다고 할 수 있으나 일

반적인 풍속구간인 5~10m/s에서 권선형식 풍력발전기가 영구자석식 발전기에 비하여 위의 풍속구간에서 발전기내 구조상 내부 저항의 조절로 발전효율이 높도록 설계 제작되어 보다 높은 발전량을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

그린에너지의 활용을 위한 기초연구로서 또한 대형 풍력발전기를 내륙도시에 설치하기 어려운 문제점에 대한 해결방안으로, 권선형 소형풍력 발전 시스템을 건물옥상에 설치 가능 후 얻어낸 결론은 다음과 같다.

- 1) 풍향 측정 결과 풍속 측정 시간대별로는 17~19시 사이에 평균풍속이 가장 높았으며, 2011년 4월~2012년 4월의 풍속 중 2012년 3, 4월의 평균 풍속이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 풍향 데이터를 세분화하여 1분 단위 시간, 풍속, 풍향의 3차원 그래프를 작성하여 분석해본 결과 건축물 옥상에서는 풍향의 변동이 매우 심하며 풍속의 변화 역시 일정하지 않았다. 따라서 이제까지의 바람장미는 풍력발전기 설계에 그다지 도움이 안되며, 국지적으로 부는 변동이 심한 바람에 대응할 수 있는 시스템해석이 절대적으로 필요함을 알 수 있었다.
- 3) 옥상과 청주기상대의 풍향데이터를 비교해본 결과 옥상은 청주기상대보다 평균 풍속은 낮게 나왔으나, 최대풍속은 높게 나왔다. 이는 옥상의 구조상 순간풍속이 높은 반면에 풍향이 일정하지 않아 서로 상쇄되어 평균풍속은 낮게 나온 것으로 보인다.
- 4) 내부 실험에서 초기자화가 이루어진 후 발전기의 자화 지속 가능 RPM은 890~900대로 확인되었지만, 실제 외부장치 적용시 1000RPM 이상시 전력이 순조롭게 생산되었다.
- 5) 풍속 7.6m/s에서 1,500RPM의 회전 출력을 하였으며 14.56V의 전압과 42A의 전류로 그 전력량은 602W였다. 평균 9.8m/s 풍속에서 2,000RPM의 출력을 보였고 정격 1kW에 거의 도달 하는 980W 대의 발전량을 나타내었다.
- 6) 옥상설치 실험에서 권선형 유도발전기를 소형풍력발전

적용하였고, 저 풍속구간에서도 작동이 원활함을 알 수 있었다.

옥상설치형 소형풍력발전기를 이용하여 국내환경에 적합한 저 풍속에서의 설치로 전력생산이 가능함을 확인할 수 있었고, 그린에너지로서의 활용을 기대할 수 있다. 향후 저 풍속에서 양질의 풍력발전을 가능케 할 수 있는 연구가 필요하다. 이외에 태양광과 풍력발전과의 연계, 즉 융합형과 같은 소형풍력발전에 대한 지속적인 연구가 절실하다 판단된다.

후 기

“이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2012)”.

References

- [1] J. C. Park, N. H. Kyung, A Study on the Application of Small Wind Power System in Apartment Housing, The Korean Solar Energy Society, 23, 21-32 (2003).
- [2] Small and Medium Business Administration, The Wind Energy Market Technical Report, Daejeon, Korea (2009).
- [3] M. S. Jang, H. J. Bang, The Current Status and the Prospects of Wind Energy, J. Environ. Sci., 18, 933-940 (2009).
- [4] J. W. Yang, On-site test of small power generator for roof-top of building, MS Thesis, Korea Maritime Univ, Busan, Korea (2008).
- [5] J. S. Jo, Estimation of Annual Energy Production for the Small Wind Turbine Generator System, MS Thesis, Kangwon Univ, Chuncheon, Korea (2006).
- [6] Y. H. Kim, Power Factor Control of Wound Rotor Induction Generator for Wind Power Generation, Cheju, MS Thesis, Jeju National Univ, Cheju, Korea (2000).
- [7] H. G. Kim, Y. H. Kang, The 2010 Wind Resource Map of the Korean Peninsular, WEIK., 16, 167-172 (2012).
- [8] J. W. Ahn and Y. M. Hwang, A Study on the End

- Excitation for CVCF Generation of Doubly-fed Induction Generator, Trans. KIEE, 40, 656-663 (1991).
- [9] M. S. Jang, H. J. Bang, The Current Status and the Prospects of Wind Energy, J. Environ.. Sci., 18, 933-940 (2009).
- [10] A. Mullance, M. O'Malley, The inertial response of induction-machine-based wind turbines, IEEE Trans. Pow. Sys., 20, 1496-1503 (2005).
- [11] J. Y. Byon, Y. J. Choi, and B. K. Seo, Characteristics of a Wind Map over the Korean Peninsula Based on Mesoscale Model WRF, Korean Meteorological Society, 20, 195-210 (2010).

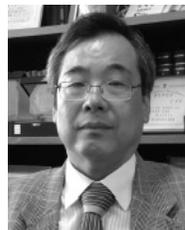
이 유 석



2014년 충북대학교 환경공학과 공학사

현재 충북대학교 환경공학과 석사과정 연구원
(E-mail : senselys@naver.com)

김 재 용



1981년 고려대학교 화학공학과 공학사
1983년 고려대학교 화학공학과 공학석사
1989년 고려대학교 화학공학과 공학박사
1995년 SUNY at Buffalo 화학공학과 방문교수
2004년 KUMAMOTO Univ. 전기화학과 초빙교수

현재 충북대학교 환경공학과 정교수
(E-mail : jykim4@korea.com)