

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(2), 114-123(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.2.114

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 풍력타워의 효율적인 설계변수에 대한 실험적 연구

조수용\*, 최상규\*\*, 김진균\*\*, 조종현\*\*\*

## An Experimental Study for Efficient Design Parameters of a Wind Power Tower

Soo-Yong Cho\*, Sang-Kyu Choi\*\*, Jin-Gyun Kim\*\* and Chong-Hyun Cho\*\*\*

Dept. of Aerospace Engr. (ReCAPT), Gyeongsang National University\*

Dept. of System Reliability, Korea Institute of Machinery and Materials\*\*

Technology R&amp;D Center, Suntech Ltd.\*\*\*

## ABSTRACT

Wind power tower (WPT) has been used to augment the performance of vertical axis wind turbine (VAWT). However, the performance of the WPT depends on several design parameters, such as inner and outer radius, or number of guide walls. Therefore, an experimental study was conducted to investigate efficient design parameters on the WPT. A wind tunnel was utilized and its test section dimension was 2m height and 2.2m width. One story model of the WPT was manufactured with seven guide walls and a VAWT was installed within the WPT. Three different sizes of guide walls were applied to test with various design parameters. The power coefficients were measured along the azimuthal direction in a state of equal inlet velocity in order to compare its performance relatively. The experimental results showed that the gap between the inner radius of the WPT and the rotating radius of the VAWT was a major parameter to improve the performance of VAWT within the WPT.

## 초 록

풍력타워는 수직형 풍력터빈의 성능을 향상하기 위하여 사용되어진다. 하지만 풍력타워의 성능은 내부반경, 외부반경, 안내벽의 개수 등의 설계변수에 의하여 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 풍력타워의 효율적인 설계변수를 찾기 위하여 실험적인 연구를 수행하였다. 실험에 사용된 풍동의 시험부는 높이 2 m, 폭 2.2 m이며, 7개의 안내벽을 가진 풍력타워의 한 층을 모델로 제작하고, 그 내부에 풍력터빈을 설치하였다. 다양한 설계변수에 대하여 실험을 하기 위하여 세 가지 종류의 안내벽을 사용하였다. 상대적인 성능평가를 위하여 동일한 입구속도에서 풍력타워를 원주방향으로 회전이동하여 출력계수를 측정하였다. 실험의 결과에서 풍력타워의 내부반경과 풍력터빈의 회전반경과의 간격이 풍력터빈의 성능을 향상하는데 가장 큰 영향을 미치는 변수임을 보였다.

**Key Words** : Wind Power Tower(풍력타워), Vertical Axis Wind Turbine(수직형 풍력터빈), Performance Augment(성능향상), Wind Tunnel Test(풍동실험)

† Received : June 1, 2017      Revised : December 26, 2017      Accepted : January 4, 2018

\* Corresponding author, E-mail : sycho@gnu.ac.kr

## 1. 서 론

재생에너지의 중요성은 화석연료의 고갈과 기후변화에 따라 점차적으로 확대되고 있다. 따라서 화석연료를 사용하지 않으면서 에너지를 얻기 위한 다양한 연구들이 많이 수행되고 있다. 이러한 에너지원으로 풍력, 태양열, 지열, 바이오매스, 폐열, 해양 등이 있다. 풍력 에너지를 활용하기 위하여 풍력터빈으로부터 회전운동을 얻고, 이를 발전기에 전달하여 전기에너지를 얻는다. 풍력터빈은 크기에 따라 아주 적은 출력을 얻는 미니어치급에서 메가와트의 출력을 생산하는 대형풍력터빈까지 다양하게 사용되고 있다. 아울러 그 종류도 수평축이나 수직축 외에도 다양한 형태의 풍력터빈이 사용되고 있다.

수직축 풍력터빈의 경우는 상대적으로 저소음에서 작동되며, 풍향과는 무관하므로 요(yaw)장치가 필요 없다. 따라서 비교적 간단한 구조로 만들어지며, 또한 발전기를 낮은 곳에 장착할 수 있는 장점이 있으므로 도심에도 설치되어져 사용되고 있다. 하지만 터빈 블레이드가 풍향에 대하여 수직하게 장착되므로 회전하는 앞선 블레이드에서 형성된 와류가 뒤따르는 블레이드에 영향을 미쳐서 출력 저하가 발생된다. 뿐만 아니라 스스로 기동할 수 있는 장치가 없으므로 낮은 속도영역에서는 낮은 성능의 결과를 보인다.

풍력에너지의 크기는 풍속의 3승에 비례한다. 따라서 풍력에너지에 있어서 풍속은 중요한 인자이다. 하지만 풍속은 지리적, 환경적 요인에 의하여 달라진다. 그러므로 주어진 지리적인 조건에서는 이미 결정되어진 풍속을 이용하여 얼마만큼 효율적으로 풍력에너지를 기계적 에너지로 변환할 수 있는가 하는 것이 풍력터빈 활용에 중요한 핵심이다. 따라서 풍력터빈 성능향상을 위한 가장 기본적인 연구로 풍력에너지를 효율적으로 회전운동으로 변환하는데 핵심이 되는 블레이드에 대한 연구가 많이 수행되었다[1~4].

수직축 풍력터빈의 경우에는 터빈블레이드가 중력방향으로 설치되어지므로 바람의 방향에는 무관하다. 하지만 터빈에서의 출력은 블레이드의 회전 위치에 따라 달라진다. 이러한 이유는 회전 위치에 따라 블레이드에서 형성되는 받음각이 달라지기 때문이다. 따라서 블레이드에서 출력을 증대할 수 있는 받음각으로 유동 방향을 만들면 터빈의 성능을 향상할 수 있다. 이를 위하여 풍력터빈 앞부분에 가이드베인을 설치하여 성능 향상을 하기도 하였다[5~7]. 이러한 경우에 가이드베인을 풍향에 맞도록 자동조정이 되도록 한 연



Fig. 1. View of wind power tower with VAWTs

구도 있다[8].

수직축 풍력터빈의 출력은 풍력에너지를 증가하면 증대되므로, 풍속을 증가하기 위한 방법으로 풍력터빈의 출구에 확산관을 설치한 연구들이 있다. 확산관을 설치하면 출구에 낮은 압력이 형성되므로 풍력터빈 전후에서 더 큰 압력차가 형성된다, 따라서 증대된 압력차를 이용하여 출력을 향상하기도 한다[9~11]. 하지만, 수직축 풍력터빈의 경우에는 확산관이 풍향에 맞추어 회전하여야 하므로 이를 활용하는 것은 적절하지 않다. 따라서 풍력터빈 외부에 바람을 집풍할 수 있는 구조물을 만들고 그 구조물의 중심에 풍력터빈을 설치하여 보다 많은 풍량을 얻어서 성능을 향상하고자 하는 연구도 수행되었다[12,13]. 이 외에도 풍력터빈의 작동위치를 높이던가, 건물간의 중간영역에서 형성되어지는 높은 풍속을 이용하던가, 빌딩 옥상에 집풍관을 설치하는 등의 방법들이 적용되고 있다[14,15]. 이와 같은 다양한 방법으로 풍력터빈의 성능을 향상하는 연구들이 수행되고 있다.

풍력타워를 사용하는 경우에 집풍 구조물의 층수를 쌓아 빌딩으로 형성한 Fig. 1의 풍력타워는 풍력터빈의 작동위치를 높일 수 있는 장점이 있으며, 풍력타워의 각 층수마다 풍력터빈을 설치할 수 있는 장점이 있다. 특히 풍력타워의 층간 지지구조물인 안내벽은 풍력타워 내부에서의

풍향을 변경하게 된다. 따라서 풍력타워 내에서 작동되는 풍력터빈에서의 받음각 형성에 영향을 미치게 되어 풍력터빈의 성능을 향상할 수 있다. 하지만 풍력타워의 설치 유동의 흐름을 간섭하게 되므로 역효과도 있을 수 있다. 또한 안내벽으로 인한 유동 방향의 변경은 때에 따라서는 블레이드에 낮은 토크를 형성하도록 할 수도 있다. 그러므로 본 연구에서는 풍력타워의 집풍구조와 관련한 변수들이 풍력터빈 성능향상에 미치는 영향에 대하여 실험적인 연구를 수행하고자 한다. 이를 위하여 풍동에서 풍력타워의 한 층과 그 내부에 풍력터빈을 설치하고, 풍력타워의 설계변수를 변경하면서 풍력터빈의 성능을 측정한다. 최종적으로 이 결과를 바탕으로 효율적인 풍력타워의 설계변수를 찾고자 한다.

## II. 실험장치 및 계측기

본 실험에 사용된 풍동은 송풍기 출력이 130 KW이며 시험부의 크기는 높이 2 m, 폭 2.2 m이다. 시험부의 제한된 크기를 고려하여 수직형 풍력터빈을 제작하였으며, 블레이드는 NACA 0018 형상으로 알루미늄으로 제작하였다. 코드 83 mm, 스패ن 575 mm인 3개의 블레이드를 장착하였으며, 회전반경은 250 mm이다. 회전축은 직경 18 mm의 스테인리스 봉으로 제작하였으며, 축과 블레이드의 조립을 위한 strut은 두 군데의 위치에서 직경 8 mm의 알루미늄 봉을 사용하였다. 풍동에서의 수직형 풍력터빈에 의한 폐쇄율은 6.5% 수준이다.

풍력터빈은 풍력타워의 중앙에 설치하였다. 풍동의 시험부 크기의 제한으로 풍력타워도 풍력터빈과 같이 한 개층만 설치하였다. 풍력타워의 안내벽 개수는 풍력터빈의 성능향상에 효과적인 7개로 선정하였다. 안내벽의 높이( $h_g$ )는 600 mm로 고정하고, 안내벽의 길이( $L$ )를 변경하여 형상비( $h_g/L$ )가 1.6 (LGW), 1.85 (MGW), 2.18 (SGW)인 3종류를 제작하였다. 또한, 안내벽은 반경방향으로 이동될 수 있도록 하여 안내벽의 내부반경( $R_i$ )과 외부반경( $R_o$ )의 변화에 대한 풍력터빈 성능향상의 효과를 고려할 수 있도록 하였다. 풍력타워의 설치에 따른 폐쇄율은 안내벽의 외경에 따라서 15~20% 수준이었다. 실험 결과에서 폐쇄율에 따른 보상은 하지 않았다. 하지만, 동일한 조건에서 실험을 수행하여 얻어진 결과들로부터 비교 평가를 통하여 풍력타워의 설계변수가 풍력터빈의 성능에 미치는 영향을 조사하였다.

Figure 2는 풍력타워의 중앙 수평면에서 본 단면으로 안내벽의 기하학적 형상과 풍력터빈의

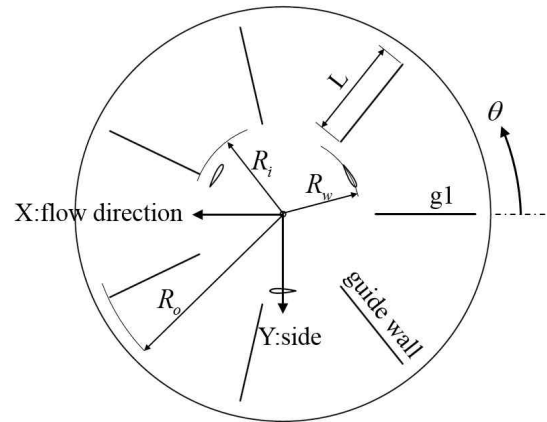


Fig. 2. Guide walls of the wind power tower and a wind turbine in the center plane

형상을 보여주고 있다. 풍력타워는 턴테이블 위에 설치되어 있어서 전체 장치의 회전이 가능하며, 회전은 스텝핑 모터에 의하여 정밀제어가 가능하다. 수직축 풍력터빈의 성능은 풍향에 대하여 무관하다. 하지만 풍력타워는 안내벽이 있으므로 안내벽과 풍향의 상대적인 관계에 따라서 풍력터빈의 성능에 차이를 보이게 된다. 이러한 점을 고려하여 풍력타워를 원주방향으로 회전하여 각각의 위치에서 풍력터빈의 성능을 측정하였다. 실험에서 요구되는 최대 회전각도는 안내벽의 개수에 따라서 한 주기가 되는 각도( $\theta_p$ )가 되므로 7개의 안내벽을 가진 풍력타워의 실험에서는  $\theta_p = 51.4^\circ$ 가 된다. 회전각도( $\theta$ )의 기준점은 Fig. 2에서 보여주는 것과 같이 풍향과 가장 앞서 맞서는 안내벽(g1)이 풍향과 일치하는 경우를  $\theta = 0^\circ$ 로 설정하고 한 주기의 각도까지 13군데의 회전각도에 대하여 정상상태에서 풍력터빈의 성능측정이 이루어졌다.

실험장치에서의 좌표 기준점은 풍력타워 회전축 중심이 턴테이블과 만나는 지점으로 하였다. 풍향의 유동방향을 X로 하였으며, Y는 측면으로 향하는 방향이며, Z는 수직으로 향하는 방향이 된다. Fig. 3은 풍력타워의 상류에서 보았을 때의 기하학적 치수를 보여주고 있다. 풍력타워는 턴테이블에서  $h_t/h_g = 0.84$ 의 높이에 설치되었으며, 블레이드의 팁과 풍력타워 상판이나 하판간의 팁간극은 블레이드 스패인의 2%로 하였다. Fig. 4는 풍력터빈을 설치한 풍력타워의 사진을 보여주고 있다.

풍력타워의 축은 턴테이블을 지나 토크센서와 직결식으로 연결되어 있으며, 토크센서의 다른 축은 최종적으로 발전기와 직결식으로 연결되었다. 발전기에서 얻어지는 전력은 저항을 사용하여 소

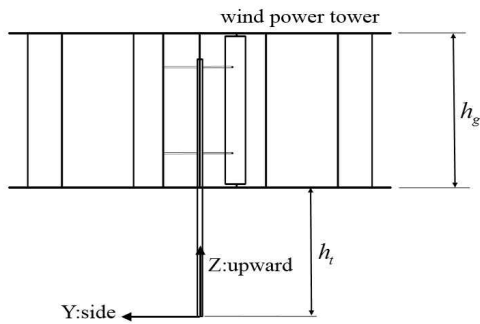


Fig. 3. Wind power tower and wind turbine viewing upstream

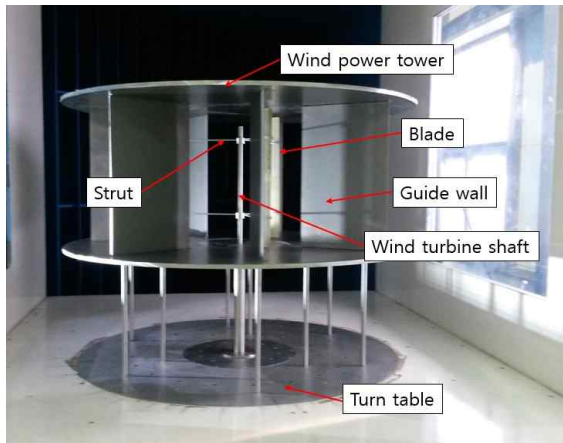


Fig. 4. Picture of wind power tower and a vertical axis wind turbine

모하였으며, 로드뱅크의 저항은 가변저항으로 설치하여 풍력터빈에서의 출력을 제어하는데 사용되었다. 아울러 실제 발전 전력의 측정을 위하여 파워메터를 설치하였으며, 바람의 온도, 회전수, 토크 등 각각의 측정값은 DAQ를 사용하여 정상상태에서 측정값을 얻었다. Fig. 5는 풍력터빈 축이 토크센서와 발전기로 직결된 형상을 보여준다.

풍력타워를 설치하는 경우에 유동의 폐쇄로 인하여 상류의 수직 단면에서의 결과라 하더라도

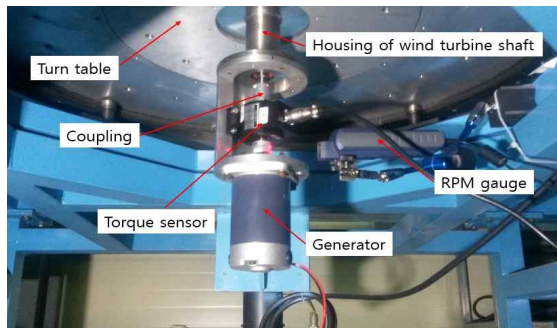


Fig. 5. Picture of components connected with a vertical axis wind turbine

측정위치에 따라서 유속에 차이가 발생할 수 있다. 이러한 변화는 입구유속을 정확히 정하는 데 어려움이 있으므로, 본 실험에서는 풍력타워의 중심으로 부터  $X/h_g = -7.5$  인 상류위치에서 입구유속의 측정이 이루어졌다. 유속계는 풍동의 단면 중심을 비롯하여 상하좌우의 4방향으로 중심과 벽면의 중간위치에 또 다른 4개의 피토티관을 설치하여 총 5개의 유속계로부터 측정된 결과로부터 식(1)과 같은 방법으로 평균하여 입구속도( $V_\infty$ )뿐만 아니라, 입구에서의 전압력( $P_{t_\infty}$ )과 정압력( $P_{s_\infty}$ )도 동일하게 측정하였다.

$$V_\infty = \sum_i^N (V_i) / N \quad (1)$$

여러 유속과 압력들의 측정을 동시에 수행하기 위하여 PSI사의 다채널유속측정치를 사용하였으며, 측정을 위하여 사용된 계측기의 모델 및 정확도는 Table 1에 나타나 있다.

풍력타워가 대기 상태에 설치된 경우라면 풍력타워를 지난 하류에서의 정압력은 동일하지만 풍동 내부에 이를 설치하여 실험을 수행하게 되면 대기 상태에서 발생하는 현상은 일치하지 않을 수 있다. 풍동에서 동일한 속도를 입구에 유지하여도, 풍력타워가 없는 경우에 비하여 풍력타워가 설치되어 있으면 이로 인하여 유로에서 압력손실이 발생된다. 따라서 풍력타워를 설치하면 전압력의 손실이 증대하게 된다. 풍력타워 외경의 변화에 따른 전압력 변동을 측정하기 위하여 의 풍력타워 하류  $X/h_g = 31$ 의 위치에서 전압력( $P_{t_{ex}}$ )과 정압력( $P_{s_{ex}}$ )을 측정하였다.

Table 1. Model and accuracy of instruments

Instruments	Model	Accuracy	Remarks
micro-manometer	Furness FCO510	±0.25%	only for reference
Pressure scanners	PSI9016	±0.15%	pitot tube
Torque sensor	Dacell TRD-2KC	±0.2% load /10°C	Max. 2kgf.cm
Power-meter	YOKOGAWA WT-1600	±0.1%	-
RPM gauge	ONO SOKKI HT-5500	Displayed value*±0.02 %±1 count	-
DAQ	OMRON ZR-RX45	±0.1% F.S	Voltage
Generator	SPG S9D60-90C	-	rated torque 2kgf.cm



### III. 측정결과 및 분석

풍력타워가 풍력터빈 성능향상에 미치는 영향을 파악하기 전에 우선적으로 풍력타워를 설치하지 않은 상태에서 풍력터빈의 성능을 측정하였다. 풍력터빈의 성능측정은 소형의 모형을 사용하였으므로 장치에 사용된 베어링의 개수, 장치의 구성요소, 성능 측정장치, 모형의 제작 정확도, 익형의 재질/형상 등 다양한 요소에 의하여 동일한 시험조건이나 설계변수를 적용한다고 하여도 결과는 달라질 수 있다.

풍력터빈이 소형이므로 장치에 의하여 소모되는 동력은 풍력에 의하여 발생하는 출력에 비하여 실제모델과는 달리 상당히 크다. 따라서 풍력터빈 장치에 연결된 발전기 대신에 모터를 사용하여 장치를 회전하여 장치에서 소모되는 동력을 측정하였다. 장치의 회전에 의한 소모동력을 측정할 때 1 m/s의 바람을 불어주어서 블레이드에 의한 반류(wake)가 블레이드 회전영역에 머물지 않도록 하였다. 이는 뒤따라오는 블레이드가 앞선 블레이드에서 발생한 반류에 의하여 소모동력이 증가되지 않도록 하기 위함이다. 또한 발전기의 무부하 회전 시 소모되는 동력을 측정하였으며, Fig. 6은 발전기의 소모동력을 측정하는 장치들을 보여주고 있다.

풍력터빈의 시험에서 시험과 관련된 변수로는 입구풍속과 발전기에서의 발전부하가 있다. 입구풍속을 일정한 상태로 유지하면서 부하를 증가하게 되면 풍력터빈의 끝단속도비는 큰 값에서 점차적으로 감소하게 된다. 또한 부하를 일정하게 하고, 풍속을 증가하게 되면 끝단속도비는 적은 값에서 큰 값으로 변하게 될 것이다. 따라서 시험방법에 따라 여러 성능곡선을 얻게 될 것이다.

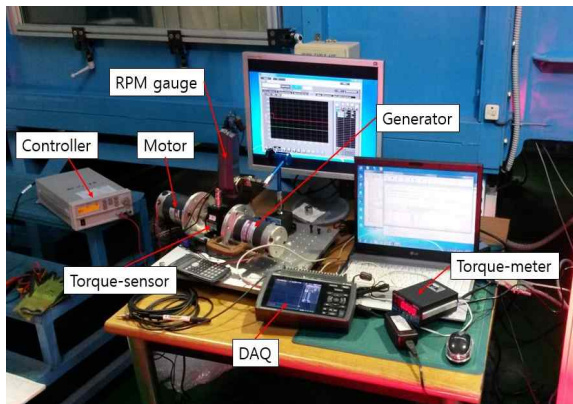


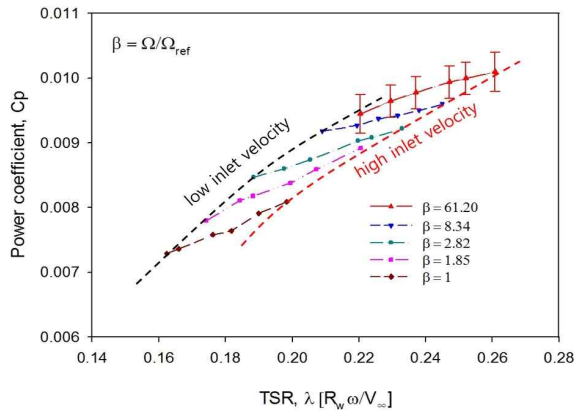
Fig. 6. Picture of devices to measure the power loss on a generator

### 3.1 풍력터빈 단독

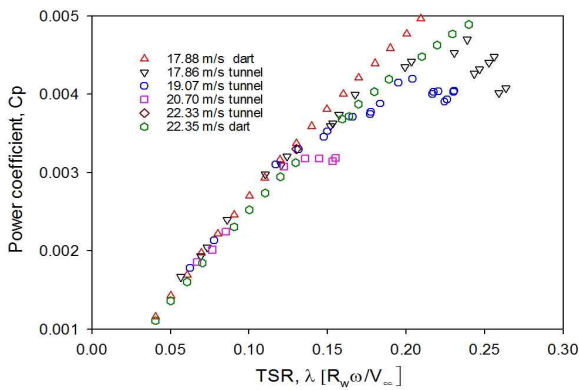
Figure 7(a)는 동일한 부하를 유지하면서 입구풍속을 변경하였을 경우에 얻어진 결과를 보여주고 있다. 그림에서의  $\beta$ 는 본 실험에서 발전부하를 최대로 하는 저항( $\Omega_{ref}$ )을 기준으로 적용된 저항( $\Omega$ )의 비를 나타낸 것이다. 발전부하에서 로드뱅크의 저항을 적게 하는 것이 부하를 증대하는 것이다. 따라서  $\beta = \Omega/\Omega_{ref}$ 는 발전부하를 감소하게 되면 큰 값으로 변경된다. Fig. 7(a)에서 출력계수 ( $c_p = (\tau w)/0.5\rho AV^3$ )의 결과는 토크센서에 의하여 얻어진 출력에서 장치의 손실을 보상하여 얻어진 결과이다. 전반적으로 아주 낮은 끝단속도비와 낮은 출력계수를 나타내고 있는데, 이는 본 실험에서 레이놀즈수는 코드기준으로  $4.6 \times 10^4$ 였으므로 실제 사용되는 수직풍력터빈의 경우에 비하여 10배 이상의 차이가 있었기 때문이다. 블레이드에서 발생하는 토크는 블레이드에서 형성되는 양력에 비례하는데 양력은 블레이드의 코드에 비례하면서 풍속의 제곱에 비례하여 증가한다. 따라서 모델의 경우에는 코드가 실제 모델보다는 상당히 적으므로 블레이드에서 얻을 수 있는 토크는 상당히 적기 때문에 낮은 회전수를 얻게 된다. 따라서 회전수를 증가하기 위하여서는 풍속을 실제모델에서의 작동속도보다 2-3배 올려서 실험을 한 경우도 있다[19]. 하지만 이렇게 풍속을 올려도 모델에서의 코드영향으로 낮은 끝단속도비와 낮은 출력계수가 얻어졌음을 Fig. 7(b)에서 보여주고 있다. 본 실험에서 풍속은 실제모델의 정격속도로 설정하였다. 비록 낮은 속도비의 결과가 얻어졌다고 할지라도, 실험에서 불확도에 의한 영향을 충분히 고려한 상태에서 측정결과가 일관된 성능특성을 보여주었다. 따라서 상호비교에 의한 방법으로 풍력타워의 효율적인 설계변수를 선정하는데에는 문제가 없는 것으로 판단된다. Fig. 7(a)에서 출력계수의 error bar는 발전부하가 가장 적은 경우에만 나타내었다. 나머지의 결과에서도 비슷한 수준이었기 때문에 결과의 확인을 쉽게 하기 위하여 다른 결과에는 생략하였으며, 뒤따른 그림에서도 동일하게 표현하였다.

### 3.2 풍력타워 성능

풍력타워에서 안내벽의 역할은 풍향과의 상대적인 위치에 따라 달라진다. 따라서 어떤 상대적인 위치에서 풍력터빈의 성능곡선은 풍속뿐만 아니라 부하변동에 따라 얻어진 성능결과를 필요로 한다. 하지만 풍력터빈 단독의 실험결과에서 출



(a) at  $Re=4.6 \times 10^4$



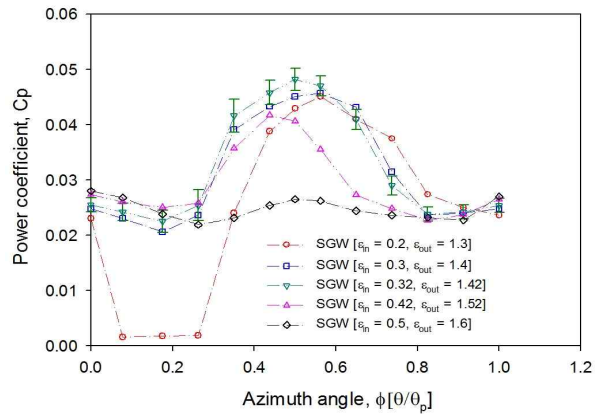
(b) at  $Re=1.5 \sim 1.9 \times 10^5$  [16]

Fig. 7. Variation of power coefficients on a vertical axis wind turbine

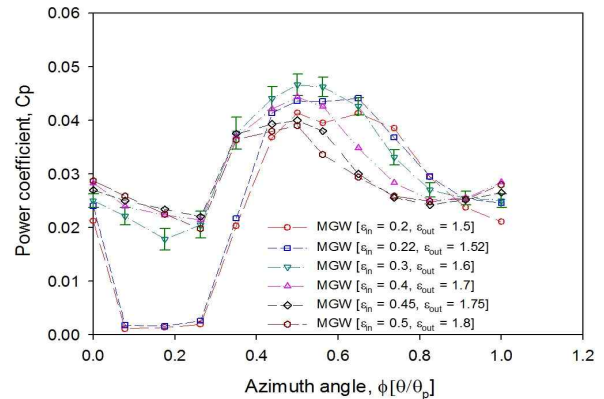
력계수 선도의 변화는 입구속도를 동일하게 설정한 후에 부하를 변동하거나, 부하를 일정하게 하고, 입구속도를 변동하여도 출력계수 선도는 상호 교차하지 않음을 Fig. 7(a)에서 보여주었다.

따라서 풍력타워를 설치한 실험에서는 상호비교를 통한 성능향상의 효과를 파악하기 위한 것이므로 각각의 회전각도에 대하여 성능곡선도를 구하지 않았다. 수직형 풍력터빈은 풍향에 무관하지만, 풍력타워의 경우는 풍향에 따라 성능이 달라진다. 따라서 풍력타워의 설계변수에 대한 영향을 파악하기 위하여, 동일한 입구속도와 동일한 부하를 기준으로 풍력터빈의 출력계수를 얻는다. 다음으로 풍향에 대한 영향을 배제하기 위하여 최종적으로 풍력타워의 회전각에 대하여 평균출력계수를 얻었다.

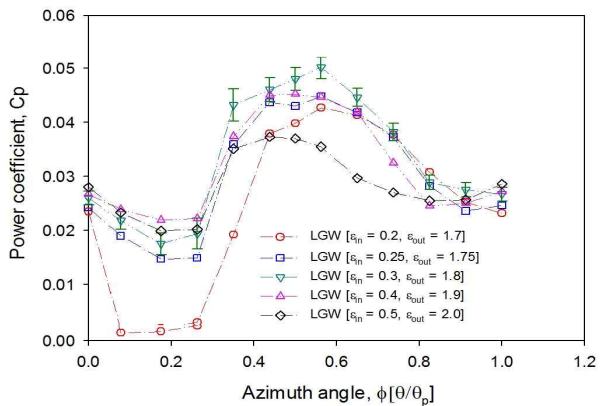
풍력타워를 설치한 실험에 적용된 입구속도 ( $V_\infty$ )는 풍력터빈 단독의 실험(풍력타워 없이)에서 사용된 최대속도( $V_{max}$ ) 기준으로 입구속도비 ( $\delta = V_\infty / V_{max}$ )를 90%로 설정하였다. 부하를 최소로 하기 위하여 부하저항비( $\beta$ )를 61로 설정하였다.



(a) SGW (small guide wall)



(b) MGW (mid-size guide wall)



(c) LGW (large guide wall)

Fig. 8. Variation of power coefficient for the different inner gaps

이러한 설정은 풍력터빈의 회전에 대하여 풍력터빈이 운전되는데 문제가 없도록 하기 위한 것일 뿐만 아니라, 풍력타워 상하류에서 측정된 전압차가 풍력타워만의 시험에서 얻어진 전압차와 비슷하게 작동하도록 하기 위함이다. Fig. 8은 안내벽 세 가지 종류를 적용하여 회전각도를 변경하면서 얻어진 출력계수의 결과를 보여주고 있다. 회전각도( $\phi = \theta / \theta_p$ )는 안내벽의 개수를 기준으로 한 주

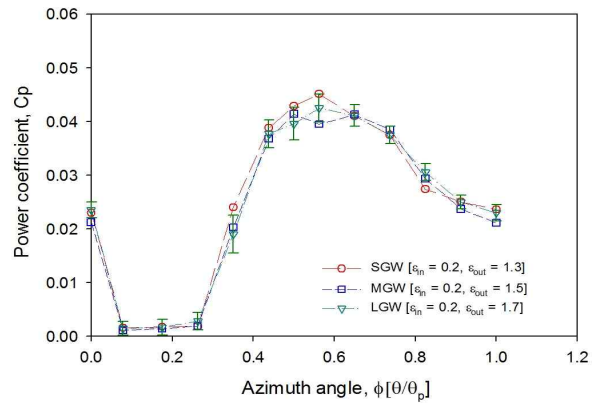
기가 되는 각도( $\theta_p$ )를 기준으로 무차원화하여 나타내었다. 안내벽의 장착 위치를 변경하면 풍력타워의 내부반경( $R_i$ )과 외부반경( $R_o$ )이 동시에 변경되어진다. 따라서 이들의 변화를 풍력터빈 회전반경( $R_w$ )을 기준으로 무차원화한 내측간격( $\epsilon_{in} = (R_i - R_w)/R_w$ )과 외측거리( $\epsilon_{out} = (R_o - R_w)/R_w$ )로 나타내었다.

길이가 다른 세 가지 종류 안내벽의 실험에서 각각의 안내벽의 결과는 내측간격의 변화에 대하여 상당히 비슷한 출력계수 선도의 결과를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 풍력타워를 회전하면 출력계수는 점차적으로 감소하고, 회전각도비  $\phi = 0.2$  영역에서 낮은 출력계수를 나타내었다가, 풍력타워의 회전이 더 이루어지면 급격히 출력계수가 증가하게 되고, 회전각도비  $\phi = 0.5$  영역에서 최대 출력계수가 얻어지는 현상을 보여주고 있다. 이 후 풍력타워를 더 회전하면 출력계수는 감소하게 되는데, 내측 간격에 따라 출력계수는 감소하였다가 한 주기가 되는 영역 근처에서 다시 증가하기도 하는 결과를 보여주었다.

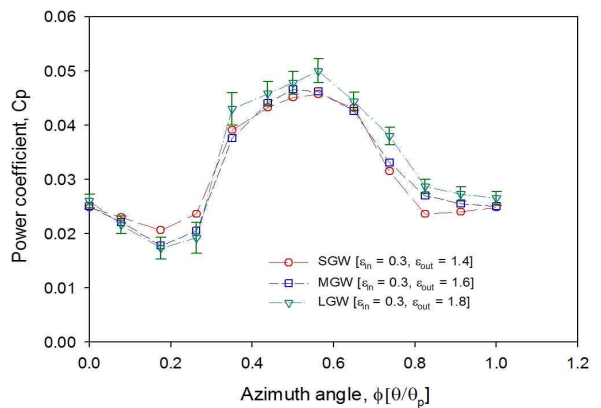
특히, 내측간격이 줄어들어  $\epsilon_{in} = 0.2$  근처로 접근하게 되면 회전각도비  $\phi = 0.2$  전후에서 출력계수가 아주 미약하게 되는 영역이 존재하고 있음을 보여주고 있다. 안내벽의 내부반경이 풍력터빈의 회전반경에 너무 가깝게 되면 풍력터빈의 성능에 상당한 역효과가 발생하는 것으로 알 수 있다. 따라서 내측 간격을 증가하게 되면 회전각도에 대한 출력계수 선도의 변화는 완화되어지는 것을 보여주고 있다. 결국 무한히 내측간격이 커지면 회전각도에 따른 출력계수는 일정한 값을 가질 것이다.

동일한 회전각도에서 출력계수의 크기는 내측 간격에 따라 다르다. 하지만 내측간격이  $\epsilon_{in} = 0.3$  인 경우와  $\epsilon_{in} = 0.4$ 의 경우에는 출력계수선도가 각각 다른 안내벽을 사용한 실험에서도 회전각도의 변화에 대하여 대부분의 영역에서 양호한 결과를 나타내고 있다. 따라서 전체회전각에 대하여 최대 출력을 얻을 수 있는 최적의 내측간격이 있음을 알 수 있다.

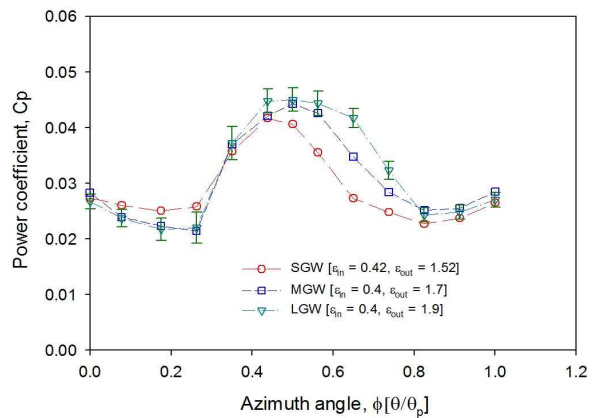
동일한 내측간격을 기준으로 출력계수를 비교하기 위하여 세 가지 종류의 안내벽에 대한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)에서 보여주는 내측간격  $\epsilon_{in} = 0.2$ 인 경우에는 안내벽의 형상비에 따라 외측거리가 달라짐에도 불구하고 상당히 비슷한 결과를 나타내었다. 이 경우에는 내측간격의 영향력이 풍력터빈의 성능을 지배하므로 외측거리의 영향력은 무시되고 있음을 알 수 있다.



(a)  $\epsilon_{in} = 0.2$



(b)  $\epsilon_{in} = 0.3$



(c)  $\epsilon_{in} = 0.4$  and  $0.42$

Fig. 9. Comparison of power coefficients at the equal inner gap

각 실험에서는 안내벽의 길이가 일정하므로 내측간격의 변화는 외측거리의 변경을 동반한다. 그럼에도 불구하고 외측거리의 영향이 나타나지 않는 것은 외측거리는 수직축 풍력터빈의 성능에 직접적인 영향을 미치지 못하고 내부 풍속의 증가에 약간의 영향을 미치기 때문이다. 하지만 내측 간격은 풍력터빈 블레이드에 형성되는 받음

각을 변화시키므로 풍력터빈의 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 안내벽의 형상비가 다르다고 하여도 동일한 내측 간격에서 내측간격의 영향이 아주 크게 되면 비슷한 출력계수 선도의 변화를 얻게 되었다.

Figure 9(b)에서 보여주는 내측 간격이  $\epsilon_{in} = 0.3$ 인 경우에는 외측거리의 영향이 미소하게 나타남을 보여주고 있다. 내측간격이  $\epsilon_{in} = 0.4$ 로 증가한 경우를 보여주는 Fig. 9(c)에서는 내측간격의 증가로 풍력터빈에 미치는 영향력이 다소 완화되어져 외측간격의 효과가 점차적으로 증대되었음을 알 수 있다. 이와 같이 내측간격의 영향력이 점차적으로 약화되어지면 외측거리가 큰 것이 출력계수를 상승하는데 유리할 것으로 보여진다. 이는 풍력터워 외경의 증가로 집풍효과가 증대할 것이기 때문이다. 따라서 내측간격이 어느 이상으로 증가하게 되면 풍력터워 안내벽에 의한 풍력터빈 성능향상의 효과는 사라지게 되면서 회전각도에 따른 출력계수도 점차적으로 비슷하게 되어짐을 알 수 있다.

수직형 풍력터빈이 풍력터워 내에 설치되는 경우에 풍향의 영향을 받으므로 풍력터워에 의한 전체적인 효과를 파악하고자 하면 원주방향의 회전각 각각에 대한 성능을 식(2)와 같이 적분평균 하여야 한다. 하지만 성능계수의 측정이 회전각에 대하여 13군데에서 측정되었으므로 이를 평균하여 구하였다. 동일하게 각각의 회전각도에서 측정된 전압력의 차와 입구속도비도 식(2)의 방식으로 평균 전압력 차와 평균 입구속도비를 구하였다.

$$\overline{C_p} = \frac{\int_0^{2\pi} C_p d\theta}{\int_0^{2\pi} d\theta} \quad (2)$$

Figure 10은 풍력터워 내측간격에 따라 적용된 안내벽의 종류에 대하여 성능계수를 보여주고 있다. 세 가지 종류의 안내벽으로부터 가장 성능이 좋은 내측 간격이  $\epsilon_{in} = 0.3$  근처에서 형성되고 있음을 알 수 있다. 안내벽이 SGW의 경우에는  $\epsilon_{in} = 0.32$ 에서 실험이 이루어졌는데, 이 경우가  $\epsilon_{in} = 0.3$ 의 결과보다는 향상된 결과를 보여주고 있다. 이러한 것이 입구에서의 전압력 상승으로 인한 효과일 수 있으나, 다음에 보여줄 평균 전압력차의 변동에서는 동일한 안내벽을 사용하는 경우에는 내부간격의 변동에 대하여 전압력차를 무시할 정도이므로 가장 좋은 내측간격은  $\epsilon_{in} = 0.3$  과  $\epsilon_{in} = 0.4$  사이에 있을 것으로 예상된다. 이

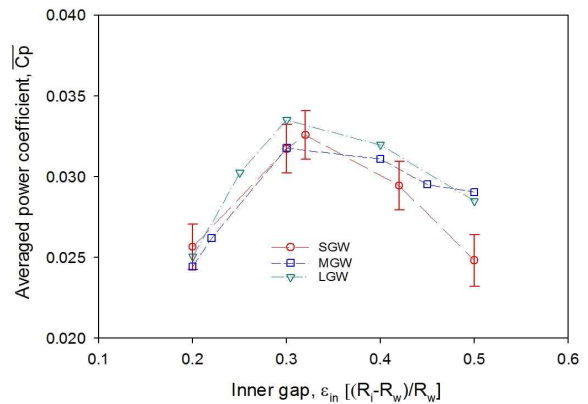


Fig. 10. Variation of averaged power coefficient with various inner gaps

러한 결과는 2.5-D의 수치해석[17]으로 예상한 최적의 내측간극 0.2 보다는 다소 큰 값을 나타내었다. 수치해석에서는 팁에서의 손실과 strut에 의한 손실들이 포함되지 않았으므로 보다 더 적은 간격을 예측한 것으로 보여진다. 하지만 실험의 결과나 예측의 결과 모두 내측간격의 설계변수가 풍력터빈의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 것을 보여주고 있다.

Figure 11의 경우는 세 가지 종류의 안내벽을 사용한 실험에서 평균전압력의 차를 보여주고 있다. 실험에서 동일한 안내벽이라고 하여도 내부간격이 증가하게 되면 풍력터워의 외경이 증대하므로 전압력의 증가가 발생할 수 있다. 하지만 동일한 안내벽을 사용하는 경우에 외측거리의 변화가 있어도 동시에 내측간격의 변화가 발생되므로 전압력의 차이는 무시할 정도임을 보여주고 있다. 반면에 안내벽의 길이가 커지는 경우에는 동일한 내측 간격이라도 외측거리가 증대하였으므로 전압력차가 상승되었음을 알 수 있다. 이는 풍력터워에서 안내벽이 큰 경우가 유로의 폐쇄에

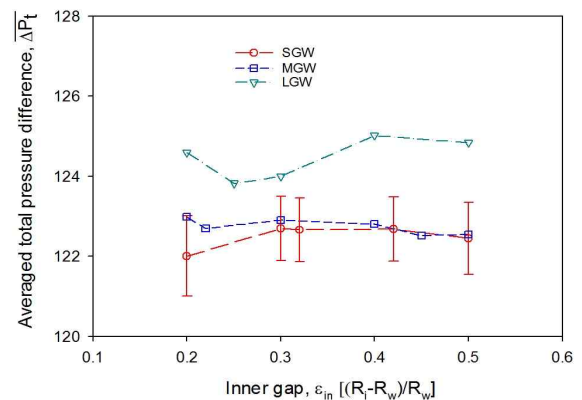


Fig. 11. Variation of averaged total pressure difference with various inner gaps



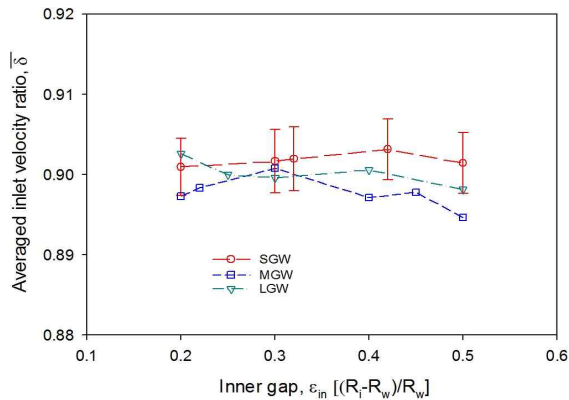


Fig. 12. Variation of inlet velocity ratio with various inner gaps

더 큰 영향을 미치므로 전압력의 상승이 발생된 것으로 보여진다.

Figure 12는 회전각도에 대하여 평균하여 얻어진 입구속도비의 변화를 보여주고 있다. 입구에서의 속도는 설정된 값에서 내측간격에 따라 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 아울러 전압차가 크다고 하여 입구에서의 풍속이 증가하는 것은 아님을 알 수 있다. 오히려 안내벽이 길이가 적은 SGW를 적용한 경우에 전압차가 적어서 풍속이 미약하지만 증가한 것처럼 보인다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 수직축풍력터빈의 성능향상을 위한 풍력타워에서의 최적 설계변수를 찾기 위한 실험을 수행하였다. 실험은 모형을 제작하여 풍동에서 수행되었다. 풍력타워의 안내벽 개수는 7개로 선정하였다. 풍력타워에서 수직축 풍력터빈의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 설계변수는 무차원 내측간격이며, 최적의 무차원 내측간격은  $\epsilon_{in} = 0.3$ 과  $\epsilon_{in} = 0.4$  사이에 있었다. 내측간격을  $\epsilon_{in} = 0.2$ 와 같이 너무 작게 설정하게 되면 안내벽에 의한 유동의 간섭으로 성능향상은 미약하게 되었으며, 내측 간격을  $\epsilon_{in} = 0.2$ 에서  $\epsilon_{in} = 0.3$ 으로 증가하였을 때 출력계수의 증가율은 30% 정도가 되었다. 무차원 외측거리는 내측간격에 비하여 상대적으로 성능에 미치는 효과가 미약하였다. 비록 동일한 내측간격에서 풍력타워 외경의 증가는 성능향상에 도움이 되지만, 내측간격이  $\epsilon_{in} = 0.3$ 인 경우에 외측거리의 증가에 따른 출력계수의 증가율은 5% 수준이었다. 따라서 최적의 내측간격에서 외측거리의 설정은 풍력타워의 구조적인 문제와 경제성을 고려하여 설정하는 것이 타당하다.

#### 후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20143030021150)

#### References

- 1) Tangler, J. L. and Somers, D. M., "NREL Airfoil Families for HAWTs," Proceeding Windpower '95, Washington D.C., 1995, pp.117~123.
- 2) Björk, A., "Coordinates and Calculations for the FFA-W1-xxx, FFA-W2-xxx and FFA-W3-xxx Series of Airfoils for Horizontal Axis Wind Turbines," FFA TN 1990-15, 1990, Stockholm, Sweden.
- 3) Fuglsang, P. and Bak, C., "Design and Verification of the New Risø-A1 Airfoil Family for Wind Turbines," 2001, AIAA-2001-0028.
- 4) Kang, S. H. and Ryu, K. W., "A Comparison Study on Aerodynamics Validation in Design Process of an Airfoil for Megawatt-Class Wind Turbine," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 44, No. 11, 2016, pp.933~940.
- 5) Colley, G., Mishra, R., Rao, H. V. and Woolhead, R., "Computational Flow Field Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine," 2011, ICREPQ'11.
- 6) Park, J., Lee, S., Sabourin, T. and Park, K., "A Novel Vertical Axis Wind Turbine for Distributed & Utility Deployment," 2007, Ontario Sustainable Energy Association.
- 7) Kim, B. K., Kim, H. Y., Song, W. S., Lee, S., Nam, S. K., and Kim, S. M., "An Experimental Study on the Performance of the Vertical-Axis Wind Turbine," 2007, *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 10, pp.17~24.
- 8) Takao, M., Maeda, T., Kamada, Y., Oki, M. and Kuma, H., "A Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine with a Directed Guide Vane Row," *Journal of Fluid Science and Technology*, 2008, Vol. 3, pp.379~386.
- 9) Isensee, G. M. and Hayder A. R., "Modeling and Analysis of Diffuser Augmented Wind Turbine", *International Journal of Energy*

*Science*, 2012, Vol. 2, pp.84~88.

10) Phillips, D. G., Flay, R. G. J., Nash, T. A. and Ipena, M., "Aerodynamic Analysis and Monitoring of the Vortec 7 Diffuser-Augmented Wind Turbine," *EMCh Transactions*, Vol. 26, No. 1, 1999.

11) Phillips, D. G., Richards, P. J. and Flay, R. G. J., "CFD Modelling and the Development of the Diffuser Augmented Wind Turbine," *Wind and Structures*, Vol. 5, 2002, pp.267~276.

12) Nobile, R., Vahdati, M., Barlow, J. F. and Mewburn-Crook, A., "Unsteady Flow Simulation of a Vertical Axis Wind Turbine: a Two-Dimensional Study," Engineering Doctor Conference, 2013, 2nd July.

13) Chong, W. T., Poh, S. C., Fazlizan, A. and Pan, K. C., "Vertical Axis Wind Turbine with Omni-Directional-Guide-Vane for Urban High Rise Application," *Journal of Central*

*South University of Technology*, Vol. 19, 2012, pp.721~732.

14) Chen, L., Ponta, F. L. and Lago, L. I., "Perspectives on Innovative Concepts in Wind-Power Generation," *Energy for Sustainable Development*, Vol. 15, 2011, pp.398~410.

15) Allaei, D. and Andreopoulos, Y., "Invelox: Description of a New Concept in Wind Power and its Performance Evaluation," *Energy*, Vol. 69, 2014, pp.336~344.

16) Sanyer, W. E., "The Development of a Wind Turbine for Residential Use," MS Thesis, 2011, Raleigh Univ.

17) Cho, S. Y., Rim, C. W., Choi, S. K., Kim, J. K., Nam, J. S., and Park, S. G., "Numerical Analysis on the Performance of Vertical Axis Wind Turbine Affected by the Configuration of the Wind Power Tower," *New and Renewable Energy*, Vol. 11, 2015, pp.1~12.