



[2017-12-WD-002]

수직축 풍력터빈을 위한 풍력타워에서의 속도증가에 대한 실험적 연구

조수용^{1)*} · 임채환²⁾ · 최상규³⁾ · 김진균³⁾ · 박성경⁴⁾

Experimental Study on the Augmented Velocity within a Wind Power Tower for the Vertical Axis Wind Turbine

Soo-Yong Cho^{1)*} · Chae Whan Rim²⁾ · Sang Kyu Choi³⁾ · Jin Gyun Kim³⁾ · Sung Kyung Park⁴⁾

Received 4 April 2016 Revised 1 December 2017 Accepted 11 December 2017

ABSTRACT An experimental study was conducted to augment the performance of VAWTs (vertical axis wind turbine). To enhance the wind velocity, a wind power tower was applied. The velocities within the wind power tower was measured in a wind tunnel with a test section is 2 m in height and 2.2 m in width. The experiment was conducted with two different velocities according to Reynolds number, 2.1×10^5 and 1.7×10^5 , based on the length of the guide wall. The measured velocities within the wind power tower were compared with those measured without a wind power tower. The wind power tower was rotated so that the effect of the wind direction was considered. Therefore, the velocities within the wind power tower were measured for various azimuth angles. The pressures were measured at the upstream and downstream of the wind power tower. The total pressure loss occurred by installing of the wind power tower was estimated. The inner and outer radii of the guide wall were varied to measure the effect depending on the size of the wind power tower. The measured velocity within the wind power tower showed the periodical variation along the azimuth direction. Based on the near center location where the variation of the velocity was insignificant, the experimental results showed that the wind velocity was augmented more than 15% by the wind power tower.

Key words Guide Wall(안내벽), Vertical Axis Wind Turbine(수직축풍력터빈), Wind Power Tower(풍력타워), Wind Velocity Enhancement(풍속증가), Wind Tunnel Test(풍동시험)

Nomenclature

L : length of guide wall
 h : height
 m : measuring loction

P : pressure [Pa]
 R_i : inner radius of guide wall
 R_o : outer radius of guide wall
 Re : Reynolds number [$V_{in}L/\nu$]
 V : wind velocity
 X : flow direction
 Y : side direction
 Z : upward direction
 θ : azimuth angle
 ν : kinematic viscosity [m^2/s]

1) Gyeongsang National University (ReCapt)

2) Kyungwoon University, Dept of Aero-Mechanical Engineering

3) Korea Institute of Machinery and Materials

4) Odin Energy Co. Ltd.

*Corresponding author: sycho@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1586 Fax: +82-55-772-1580

1. 서론

재생에너지의 중요성이 점차적으로 확대되고 있는 추세이며, 이러한 에너지원으로는 태양열, 지열, 바이오매스, 해양, 폐열, 풍력 등이 있다. 풍력의 경우는 풍력이 가지고 있는 에너지를 풍력터빈을 이용하여 회전운동인 기계적 에너지로 변환하며 이를 다시 발전기를 사용하여 전기에너지로 변환된다. 풍력터빈은 크기에 따라 아주 다양한 출력을 얻을 수 있으며, 또한 그 형태도 수평축이나 수직축 외에도 다양한 종류의 풍력터빈이 적용되고 있다.

수직축 풍력터빈의 경우는 저소음에서 작동하며, 요(yaw) 장치가 없으므로 비교적 간단한 구조로 만들어 진다. 또한 발전기를 낮은 위치에 설치할 수 있는 장점 등이 있으므로 도심에서도 쉽게 볼 수 있다. 하지만 터빈 블레이드가 풍향에 대하여 수직하게 형성되므로 회전을 하는 경우에 앞선 블레이드에서 형성된 와류의 영향을 받아서 출력 저하가 발생된다. 뿐만 아니라 스스로 기동할 수 있는 장치가 없으므로 낮은 속도에서는 낮은 성능특성을 보인다.

풍력에너지의 크기는 풍속에 의하여 영향을 받게 되지만 풍속은 환경적, 지리적 요인에 의하여 달라지게 된다. 따라서, 주어진 지리적인 조건에서는 주어진 풍속에서 얼마만큼 효율적으로 풍력에너지를 기계적인 에너지로 변환하는가가 풍력터빈의 성능에 중요한 인자다. 따라서 풍력터빈 성능향상을 위한 가장 기본적인 연구로는 풍력에너지를 효율적으로 회전운동으로 변환하는 블레이드에 대한 연구^[1-6]가 많이 수행되었다. 이러한 연구에서는 기존의 높은 Reynolds 수에서 설계되어진 항공용 에어포일 과는 달리, 풍력터빈이 작동하는 Reynolds 수를 기준으로 새로운 익형들을 제시하였다.

수직축 풍력터빈의 경우에는 터빈블레이드가 중력방향으로 설치되므로 풍향과는 대체적으로 무관하다, 하지만 출력은 블레이드의 위치에 따라 달라진다. 이러한 것은 회전위치에 따라 블레이드에서의 받음각이 달라지기 때문이다. 따라서 블레이드에서 출력을 증대할 수 있는 받음각을 형성하면 성능을 향상할 수 있다. 이러한 방법으로 풍력터빈 앞부분에 가이드베인^[7-9]을 설치하여 성능 향상을 하기도 하였다. 이러한 경우에 가이드베인을 풍향에 맞도록 조정이 되도록 한 연구^[10]도 있다.

풍력터빈에서 풍속을 증가하기 위한 연구로는 풍력터빈의 출구에 확산관을 설치하는 것이다. 확산관에 의하여 확산관 밖에서 형성된 낮은 압력으로 풍력터빈의 출구에서 낮은 압력이 형성되므로 풍력터빈 전후에서 더 많은 압력차가 형성된다. 따라서 이러한 압력차의 증가는 풍력터빈에서 더 많은 에너지를 생산할 수 있게 하므로 출력의 향상^[11-13]을 얻는다. 하지만, 수직축 풍력터빈의 경우에는 수직축을 기준으로 회전운동을 하므로 풍력터빈의 출구에 확산관을 설치하는 것은 용이하지 않다. 따라서 풍력터빈의 외부에 집풍관 구조를 만들고 그 구조물의 중심에 풍력터빈을 설치하여 보다 많은 풍량을 얻어서 성능향상을 하고자 하는 연구도 수행^[14-15]되었다. 이 외에도 풍력터빈의 위치를 높이던가, 건물간의 중간영역에서 형성되는 높은 풍속을 이용하던가, 높은 위치에 집풍관을 설치하는 등의 방법^[16-17]들이 적용되고 있다. 이와 같은 다양한 방법으로 풍력터빈의 성능을 향상하는 연구들이 수행되고 있다.

집풍관을 여러개 형성한 Fig. 1의 풍력타워는 고층으로 풍력터빈의 작동위치를 높일 수 있는 장점이 있으며, 풍력타워의 층수마다 풍력터빈을 설치할 수 있는 장점이 있다. 이러한 풍력타워는 기존의 건물에 연계하여 설치하는 경우



Fig. 1. View of wind power tower with VAWTs

에는 효율적인 부분뿐만 아니라, 공간의 효율성, 미적인 부분까지도 증대하게 되므로 설치비용에 대비 경제성이 있음을 보여주었다^[18]. 하지만 풍력타워는 유동방향에 능동적인 대처가 되지못하므로 풍력타워의 설계변수에 따라서 역효과도 있을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 풍력타워의 집풍구조와 관련한 설계변수에 따른 집풍효과에 대한 실험적인 연구를 수행하고자 한다. 이를 위하여 풍동에서 풍력타워를 설치한 경우와 풍력타워가 없는 경우에 대하여 동일한 위치에서 유속을 측정하여 풍력타워의 설치에 따른 집풍효과가 어느 정도인지를 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 계측기

본 실험에 사용된 풍동은 송풍기 출력이 130KW이며 시험부의 크기는 높이 2m, 폭 2.2m이다. 풍력타워는 시험부의 제한된 크기로 한 개 층만 설치하였다. 풍력타워의 안내벽의 개수는 풍력터빈의 성능향상에 효과적인 7개로 선정하였다. 안내벽의 형상비(h_g/L)는 1.6으로 선정하였으며, 안내벽은 반경방향으로 이동이 가능하도록 설계하였다. 따라서 안내벽의 내부반경(R_i)과 외부반경(R_o)이 변경되도록 하여, 풍력타워의 설계변수 변화에 대한 집풍효과를 고려할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 풍력타워의 위에서 본 단면으로 안내벽과 측정위치(m)를 보여주고 있다. 풍력타워 내부에서의 측정위치

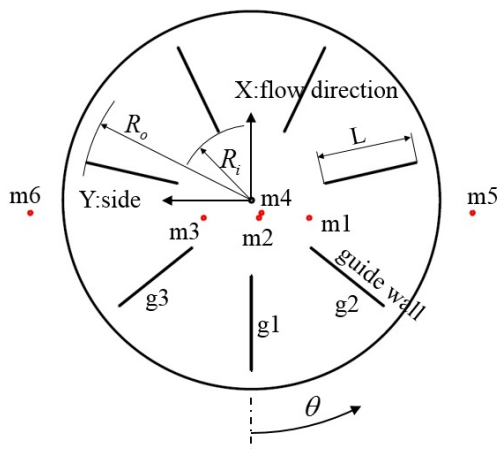


Fig. 2. Guide walls of the wind power tower and measuring locations from top view

는 그림에서 보여주는 것과 같이 4군데(m1~m4)에서 측정을 하였다. 풍력타워 내부에서의 유동은 안내벽과 풍향과의 상대적 위치에 따라 풍향이 바뀌어지게 되므로 방향성을 갖는 계측기는 사용이 불가능하다. 따라서 이러한 점을 고려하여 m1~m3은 유동의 방향성이 없는 hot sphere를 사용하여 풍속을 측정하였다. m4의 위치는 풍력타워의 중심 근처에 위치하고 있으므로 안내벽과 풍향과의 상대적인 위치에 대하여 민감하지 않으므로 피토크관을 사용하여 측정하였다. 또한 풍력타워의 설치로 인하여 풍력타워의 측면으로 빠져나가는 풍속의 변화를 확인하기 위하여 양 측면(m5, m6)의 위치에서도 풍속을 측정하였다. 이들의 정확한 측정위치는 Table 1에서 보여주고 있다.

좌표의 기준점은 풍력타워의 중심으로 풍동의 하판과 만나는 지점으로 하였다. 풍향의 유동방향을 X로 하였으며, Y는 측면으로 향하는 방향이며, Z는 수직으로 향하는 방향이 된다. 안내벽과 풍향과의 상대적인 위치를 고려하기 위하여 회전각(θ)를 Fig. 2에서 보여주고 있는데, 풍향과 가장 앞서 맞서는 안내벽(g1)이 풍향과 일치하는 경우를 $\theta = 0^\circ$ 로 하였다.

Fig. 3은 풍력타워의 앞부분에서 보았을 때의 측정위치를 보여주고 있다. 풍력타워는 Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 풍동의 하단부에서 $h_t/L = 1.34$ 의 높이에 설치되었으며, 이를 위하여 9개의 봉을 이용하여 풍력타워를 지지하였다. Fig. 4는 풍력타워와 계측기의 위치에 대한 사진을 보여주고 있다.

풍력타워의 내부 및 주위의 측정위치(m1~m6) 외에도 풍력타워의 앞부분과 출구부분에서도 측정이 이루어졌다.

Table 1. Location of measuring points

location	X/L	Y/L	Z/L
m1	-0.19	-0.61	2.17
m2	-0.19	-0.08	2.17
m3	-0.19	0.51	2.17
m4	-0.13	-0.11	2.39
m5	-0.13	-2.35	2.14
m6	-0.13	2.35	2.14
X_{in}	-12.0	average	average
X_r	-4.53	0	2.21
X_{ex}	49.0	0	0.1

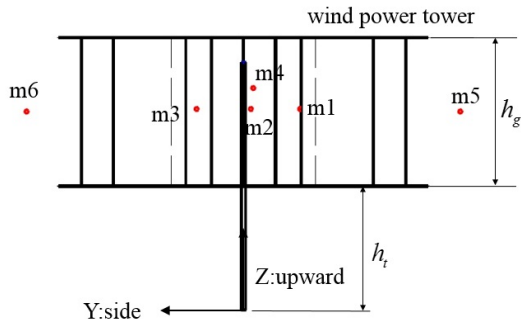


Fig. 3. Wind power tower and measuring locations from front view

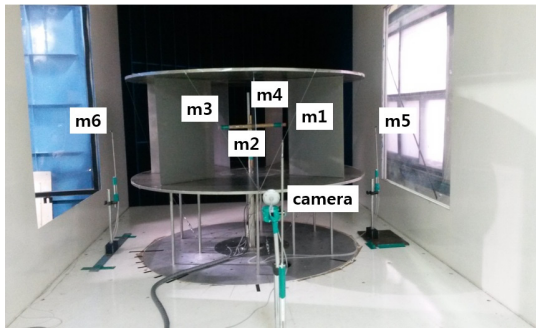


Fig. 4. Picture of wind power tower and measuring instruments

이는 풍력타워의 설치로 인한 유동의 변화를 측정하기 위하여서다. 풍력타워 입구부에서의 변화를 확인하기 위하여, 풍력타워의 중심으로 부터 $X/L = -12$ 인 상류위치(X_{in})에서 측정이 이루어졌다. 유속계는 풍동의 단면 중심을 비롯하여 상하좌우의 4방향으로 중심과 벽면의 중간위치에 또 다른 4개의 피토관을 설치하여 총 5개의 유속계로부터 측정된 물성치로부터 식 (1)과 같이 평균하여 속도(V_{in})뿐만 아니라 전압력($P_{t,in}$)과 정압력 ($P_{s,in}$)을 측정하였다.

$$V_{in} = \sum_i^N (V_i) / N \quad (1)$$

일반적으로 풍속은 어떤 물체를 만나게 되면 정체점에 가까이 갈수록 그 속도는 점차적으로 감소하게 된다. 이를 고려하기 위하여 풍력타워 상류 $X/L = -4.53$ 의 위치(X_f)에서 풍동의 단면 중심에 5공 프로브를 설치하여 풍향과 풍속을 측정하였다. 이를 위하여 5공 프로브는 정밀장치를 이용하여 교정을 수행하였다. Fig. 5는 X_{in} 과 X_f 위치에서의

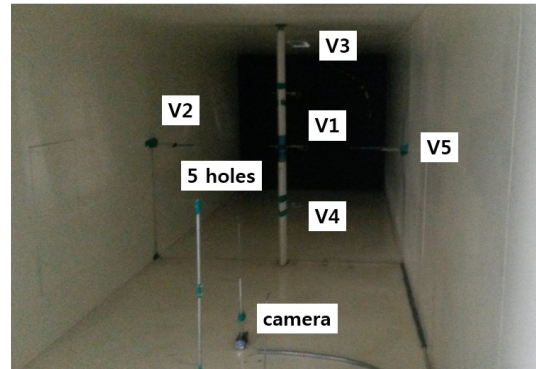


Fig. 5. Picture of measuring instruments in front of wind power tower

Table 2. Model and accuracy of instruments

Instruments	Model	Accuracy	Remarks
micro-manometer	Furness FCO510	$\pm 0.25\%$	only for reference
Pressure scanners	PSI9016	$\pm 0.15\%$	pitot tube
Multi channel Anemomaster	Kanomax Model 1560	± 0.2 m/s	hot Sphere

측정장치에 대한 사진을 보여주고 있다.

풍력타워가 대기 상태에 설치된 경우라면 풍력타워를 지난 하루에서는 정압력이 동일하지만 풍동의 내부에 이를 설치하여 실험을 수행하게 되면 대기 상태에서 발생하는 현상과는 일치하지 않을 수 있다. 풍동에서 동일한 속도를 입구에 유지하게 되면 풍력타워가 없는 경우에 비하여 풍력타워가 설치되어 있으면 이로 인한 유로에서 압력손실이 발생된다. 따라서 풍력타워를 설치하면 전압력의 손실이 발생된다. 풍력타워의 설치에 따른 전압력의 변동을 고려하기 위하여 풍력타워 하류 $X/L = 49$ 의 위치에 있는 적은 시험부 위치(X_{ex})에서 전압력($P_{t,ex}$)과 정압력($P_{s,ex}$)을 측정하였다.

측정을 위하여 사용된 계측기의 모델 및 정확도는 Table 2에 나타나있다.

3. 측정결과 및 분석

풍력타워에서 안내벽의 역할은 풍향과의 상대적인 위치에 따라 상당히 달라지게 된다. 따라서실험에서는 풍향의

변화를 고려하기 위하여 풍력타워를 회전하여 안내벽의 방향이 바뀌도록 하였다. 풍력타워에 사용된 안내벽 개수가 7개 이므로 회전각 θ 가 51.4° 를 지나게 되면 풍력타워내에서의 유동장은 주기적으로 변하게 된다. 따라서 풍향의 변화를 고려하기 위하여 θ 를 변경하면서 유속을 측정하였다.

풍력타워는 내부에 설치되는 풍력터빈을 효과적으로 작동하기 위한 보조장치이므로 적절한 크기로 설계되어야 한다. 풍력타워의 외경을 키운다고 하여 더 많은 유량이 풍력타워의 내부로 들어가는 것은 아니다. 또한 풍력타워 안내벽의 내경은 풍력타워로 들어온 바람의 방향에 영향을 미치게 되어 수직풍력터빈의 성능에 많은 영향을 미치는 인자이다. 따라서 안내벽의 내부반경(R_i)과 외부반경(R_o)의 변화에 따른 측정을 수행하였다.

풍력타워로 향하는 풍속의 변화에 대한 영향을 고려하기 위하여 두 개의 다른 풍속에서 실험을 하였다. 안내벽의 길이(L)를 기준으로 Reynolds 수($V_{in}L/\nu$)가 2.1×10^5 과 1.7×10^5 인 두 경우에 대하여 측정을 수행하였다.

풍력타워모델의 크기에 따라서 풍동에서 유로에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서 세 종류의 안내벽을 사용하였으므로 각각의 실험에 따라 폐쇄율이 다르게 된다. 가장 큰 안내벽을 사용한 경우에 최대 13.7%의 폐쇄율을 보였다. 수직형 풍력터빈의 실험에서 폐쇄율이 14% 인 경우에도 성능의 차이를 무시할 수 있다고 한 연구^[19]가 있으므로 본 연구에서는 속도의 보정을 수행하지 않았다. 하지만 폐쇄율에 대한 오차를 상쇄하기 위하여 절대값의 측정보다는 비교측정에 의한 결과를 나타내었다.

본 실험에서 추구하고 하는 주요한 목적은 풍력타워의 설치로 풍력타워 내부에서 풍속이 얼마나 증가하는지에 대한 것이다. 따라서 타워를 제거한 상태에서 얻어진 풍속의 결과값(V_{mi})을 기준으로 동일한 측정위치에서 풍력타워를 설치한 경우에 얻어진 결과값($\overline{V_{mi}}$)을 비교하여 나타내었다. 풍력타워를 제거한 측정에서 풍력타워의 상판과 안내벽만 제거하고 하판은 설치한 상태에서 측정을 하였다. 이러한 이유는 풍동에서 실험장치로 인한 폐쇄율의 영향을 비슷하게 하기 위한 것이다. 이로 인하여 하판 근처의 측정 위치에서는 하판의 영향을 미소하게 받았지만 올바른 비교를 위하여서 동일한 측정 위치에서 얻어진 결과값을 기준으로 식(2)와 같이 속도증가율을 구하였다.

$$Growth\ rate = \frac{(\overline{V_{mi}} - V_{mi})}{V_{mi}} \times 100 [\%] \quad (2)$$

식 (2)에서의 하첨자 i 는 각각의 측정위치를 의미한다.

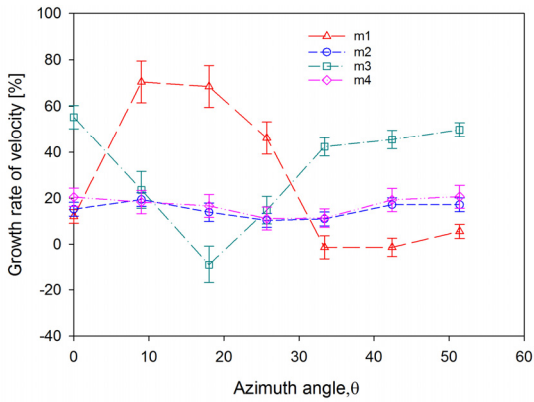
풍력타워의 회전은 텐테이블을 이용하여 회전각 θ 를 주기의 반이 되는 25.7° 까지는 9° 씩 증가하고 이 이후 영역은 대칭관계가 되도록 51.4° 에서 9° 씩 감소하였다. 각각의 측정 위치에서는 풍력타워를 회전한 후, 유동이 충분히 안정된 상태에서 40개 이상의 데이터를 얻어서 평균하였다. 또한 풍력타워를 반대로 회전하면서도 동일 방법으로 측정하였다.

Fig. 6은 풍력타워 입구(X_{in})에서의 유동속도를 $Re = 2.1 \times 10^5$ 으로 설정하고 안내벽의 반경과 회전각(θ)을 바꾸면서 측정된 풍력타워 내부에서의 속도 증가율을 보여주고 있다. 측정된 결과들은 주기를 갖고 변화됨을 보여주고 있으며, 풍력타워의 회전방향에 따른 결과값의 차이는 없었다.

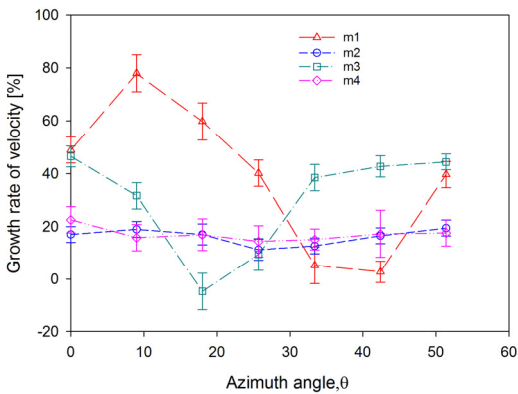
Fig. 6에서 안내벽이 풍향과 일치하는 $\theta = 0^\circ$ 의 위치에서 안내벽 내부반경(R_i)이 증가하는 경우에($R_i/L = 0.8$ 에서 $R_i/L = 1.0$ 으로 증가), 측정위치 m1에서의 속도증가율이 12.1%, 49.0%, 54.9%로 증가함을 보여주고 있다. 반면에 측정위치 m3에서의 속도증가율은 55.3%, 46.6%, 33.3%로 감소하는 특징을 보여주고 있다. 반면에 m2의 위치에서는 속도증가율이 12.1%, 17.0%, 24.2%로 m1이나 m3 위치에서의 결과에 비하여 미약함을 알 수 있다. 이러한 차이는 풍력타워 내부에 형성되어지는 유동장이 안내벽의 내부 반경(R_i)과 밀접한 관련이 있기 때문이다.

그림에서 측정된 결과를 표시하는데 있어서 측정 결과의 95% 불확도를 에러바로 나타내었다. 아울러 이 후에 기술된 그림에서 나타나는 에러바의 의미도 동일하다.

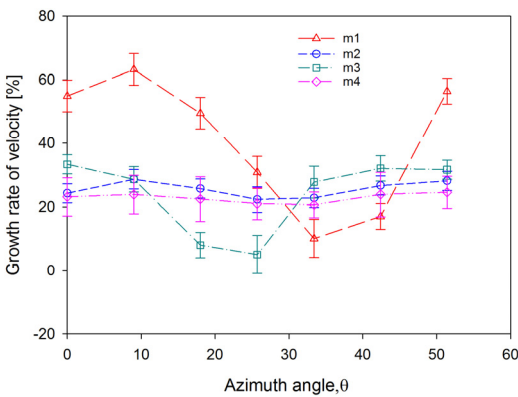
풍력타워에서의 풍속 증가에 영향을 미치는 안내벽의 내부반경의 영향을 정성적으로 확인하기 위하여 실제 모델에서 CFX에서 유동해석을 수행하여 얻어진 속도유동장^[20]을 Fig. 7에서 보여주고 있다. 본 계산에서는 Reynolds 수가 2.6×10^6 이며, 벽면 근처에서의 격자는 $y+ 50$ 이하로 automatic 벽함수를 적용하는데 문제가 없도록 하였다. 난류계산은 SST k- ω 모델을 사용하였으며, 대류항은 high resolution 방법을 적용하였다. 경계조건으로는 입구에는 전압력의 조건을 주었으며, 출구에서의 조건은 정압력을



(a) $R_i/L=0.8, R_o/L=1.8$



(b) $R_i/L=0.87, R_o/L=1.87$



(c) $R_i/L=1.0, R_o/L=2.0$

Fig. 6. Variation of velocity within the wind power tower with different radii of guide wall ($Re=2.1 \times 10^5$)

일정하게 설정^[21]하였다. 비록 Reynolds 수가 다르므로 실험과의 직접적인 비교는 어렵지만 Fig. 7의 속도유동장에서 실험과 관련한 측정위치로부터 안내벽의 내부반경에 의한 영향력은 확인할 수 있다. 회전각 θ 가 0° 인 경우에 측정 위치에 영향을 미치는 높은 속도 영역은 붉은색으로 나타

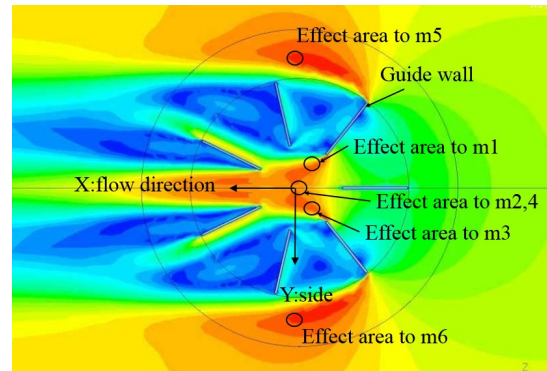


Fig. 7. Velocity contour at the center plane within the wind power tower

나 있다. $Y/L = -0.61$ 의 위치에 있는 m1에서는 안내벽의 내부반경이 적은 경우에 높은 속도장의 중심부에 벗어나 있다가 안내벽의 내부반경이 증가하게 되면 높은 속도장의 영역이 m1에 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 영향으로 측정위치 m1에서는 안내벽의 내부반경이 증가하게 되면 속도증가율이 증가하는 결과를 얻게 되었음을 알 수 있으며, 이러한 결과를 실험의 결과에서 보여주고 있다.

측정위치 m3의 경우에는 Y 방향의 위치가 $Y/L = 0.51$ 이다. 따라서 안내벽의 내부반경이 적은 경우에 이미 높은 속도장의 영역에 있으므로 높은 속도를 나타내고 있으나 안내벽의 내부 반경이 증가하게 되면서 이 높은 속도장의 영역이 안내벽을 따라 Y 의 방향으로 이동하게 되어서, 측정위치 m3에서는 안내벽의 증가에 따라 낮은 속도로 변경되어졌다.

m2와 m4의 측정위치는 풍력타워의 중심부에 있으므로 안내벽의 내부반경이 증가하여도 이들의 이동이 대칭적으로 변경되어졌으므로 풍력타워 중심부에서의 유동장은 안내벽 내부반경의 증가에 따른 영향을 크게 받지 않았다. 따라서 상대적으로 측정위치 m1과 m3에서의 속도 증가율보다는 그 변화율이 상당히 줄어들었다. 하지만 내부반경의 증가에 따라 m3에서의 속도증가율이 증가한 이유는 안내벽의 내부 반경이 증가하면 동시에 외부반경도 증가를 하게 되므로 풍력타워의 측면으로 흐르는 유량이 줄어들게 되어 유동은 풍력타워의 내부로 유입되었다. 이 때 풍력타워의 내부면적도 증가하였으므로 유속은 동일 할 수 있지만 내부면적으로 증가로 인한 압력손실이 줄어들게 되어 속도 증가가 발생된 것이다. 이러한 현상에 대하여서는 Fig. 8에서 보여주는 측정위치 m5과 m6에서의 결과를 보면 그

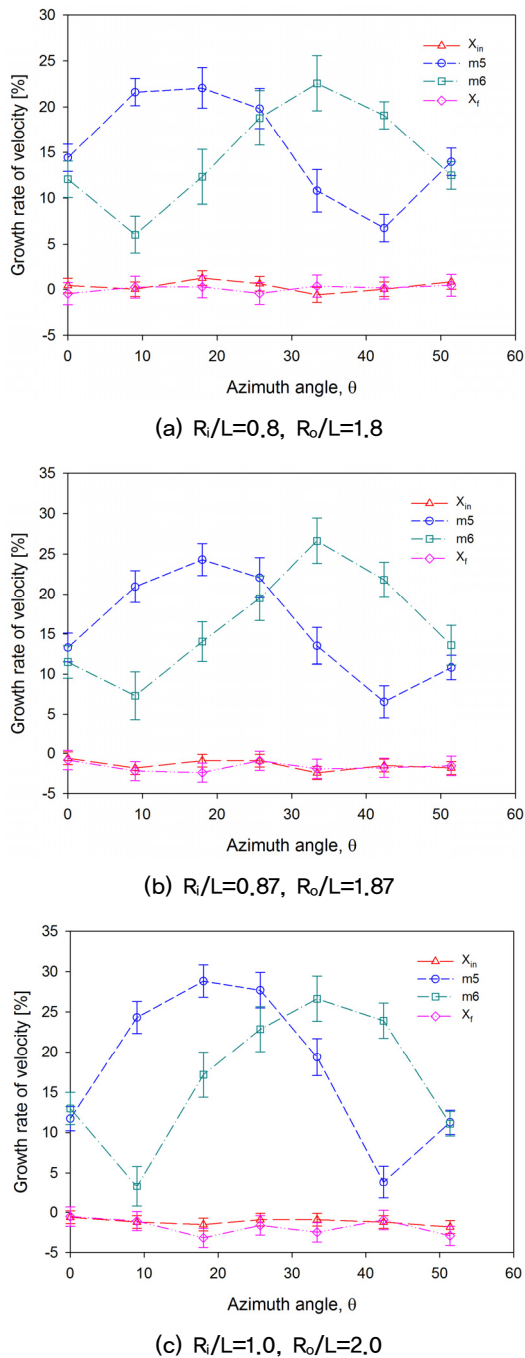


Fig. 8. Variation of velocity at the side and inlet of the wind power tower with different radii of guide wall ($Re=2.1 \times 10^5$)

이유가 보다 명확하여 진다. 하지만 이러한 결과는 제한된 유로를 가진 풍동 실험에서 얻어진 것으로 대기상태에서 실험을 한다면 다소 다를 수 있다.

Fig. 8은 $Re=2.1 \times 10^5$ 에서 풍력타워의 양측면에 있는 m5과 m6에서의 속도증가율을 나타내고 있다. 풍동 시험

에서 풍속을 일정하게 설정하였으므로 풍량은 일정하다. 하지만 풍력타워의 설 치로 인하여 풍력타워 주위로 빠른 유속이 형성된다. 또한 풍력타워를 회전하게 되면 풍력타워 안내벽의 각도도 변경되므로 풍력타워의 내부 유로 단면적도 변경된다. 따라서 풍력타워 측면에서의 유동에도 변화가 발생된다. 풍력타워에서의 가장 앞선 안내벽(g1)이 유동방향과 일치하는 $\theta=0^\circ$ 의 경우에는 측정위치 m5와 m6에서의 풍력타워의 설치로 인한 속도증가율이 12.5% 정도로 동일하게 나타났었다. 회전각을 $\theta=0^\circ$ 로 유지한 상태로 안내벽의 외부반경(R_o)을 증가하였을 때, 내부반경(R_i)도 증가하는 관계로 풍동의 시험부에서 풍력타워에 의한 폐쇄율은 동일하므로, Y 방향에 대하여 대칭으로 설치된 m5과 m6에서의 속도증가율도 동일하게 얻어졌다.

풍력타워를 설치한 터테이블이 회전하는 경우에 풍향과 안내벽의 상대적인 위치가 달라지게 된다. 이 경우에는 풍향에 대한 풍력타워 안내벽간의 대칭관계가 형성되지 않으며 주기의 반이 되는 $\theta=25.7^\circ$ 의 위치에서 다시 대칭관계를 형성하고, 한주기가 되는 $\theta=51.5^\circ$ 의 위치에서 다시 대칭관계가 된다. 초기에 $\theta=0^\circ$ 에서부터 회전각을 증가하게 되면, Fig. 2에서 보여주는 풍력타워의 안내벽(g2)이 유동을 막게 되는 쪽으로 형성되어진다. 따라서 측정위치 m5에서는 속도증가율이 증가하게 된다. 반면에 m6와 영향을 미치는 안내벽(g3)은 풍향과 일치하는 방향으로 형성되어 오히려 유동의 흐름을 덜 막게 되는 방향으로 이동하게 된다. 이로 인하여 초기 회전에서는 m6에서는 속도증가율이 감소하는 방향으로 측정결과가 얻어졌다. 회전각이 $\theta=25.7^\circ$ 에 도달할 때까지 풍력타워의 내부로 흐르는 유로 면적은 줄어들게 되므로 $\theta=25.7^\circ$ 에서는 m5와 m6에서의 속도 측정의 결과는 대칭적으로 얻어졌지만, 내부유로의 감소로 인하여 둘 다 높은 속도증가율을 보였다. 회전각이 $\theta=25.7^\circ$ 를 지난 후에는 안내벽과 풍향과의 위치가 앞서와는 반대로 되어 m5와 m6에서는 속도증가율은 $\theta=25.7^\circ$ 를 기준으로 앞에서의 결과와는 대칭관계로 속도증가율이 얻어졌다.

Fig. 8에서 X_{in} 의 위치($X/L=-12$)에서 측정된 V_{in} 과 X_f 의 위치($X/L=-4.53$)에서 측정된 V_f 의 속도변화율을 보여주고 있다. 풍력타워를 설치한 경우에 이로 인하여 입구에서 풍속이 감소하였는데 X_{in} 의 위치에서나 X_f 의 위치에서의 속도감소율이 2.0% 이내의 수준임을 보여주고 있

다. 앞서 언급한 것처럼 풍력타워가 없는 경우와 풍력타워를 설치한 경우에 대하여 동일한 Reynolds 수에서 실험을 하였으므로 풍력타워로 향하는 입구에서의 풍속은 큰 차이를 보이지 않았다. 이렇게 미소한 변화는 풍동에서 실험한 결과이므로 얻어진 결과이다.

일반적으로 대기 상태에서의 시험에서는 시험물체의 하류에서는 동일한 정압을 가지게 된다. 만일 물체가 설치된 경우에도 동일한 풍량이 흘러가려면 입구에서의 전압력이 상승하여야 할 것이다. 이를 고려하여 X_{in} 의 위치($X/L = -12$)에서 압력을 측정하였으며, 풍력타워의 하류 X_{ex} 의 위치($X/L = -49$)에서도 압력을 측정하여 식 (2)와 같이 압력에 대한 변동량을 얻었으며, 이를 Fig. 9에서 보여주고 있다.

Fig. 9에서 보여주는 것과 같이 풍동시험에서는 풍력타워가 설치된 경우에는 입구부에서의 압력 감소는 미약하고 반면에 출구부에서의 압력감소가 형성되어 풍력타워가 있는 경우에 유로에서의 압력손실이 증가하였음을 알 수 있다. 이를 다시 풍력타워가 없는 경우와 동일하게 출구에서의 압력을 동일하게 하고 입구에서의 압력변동율을 구하면 Fig. 10처럼 나타내어지게 된다.

Fig. 10의 결과로부터 풍력타워의 설치로 인하여 동일한 풍량이 보내어지는 경우에 입구에서의 전압력이 1.6% 정도 증가하였음을 알 수 있다. 그러므로 풍력타워에서의 속도증가율은 입구위치(X_{in})에서의 전압력이 1.6%가 추가되어져 나타난 결과이다. 아울러 대기상태와 같은 조건으로 다시 맞추기 위하여서는 입구의 풍속을 낮추어 동일한 전압력이 되도록 하여함을 알 수 있으며, 이는 앞으로

추가실험이 되어야 할 것으로 판단된다. 이론적으로는 이상유체로 가정하여 속도증가량(δV_{in})을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 전압력을 1.6%로 감소하게 되면 V_{in} 의 속도는 3.8% 정도 감소를 하여야 할 것으로 판단되어진다.

$$\frac{\delta V_{in}}{V_{in}} \cong \frac{0.016}{2(1 - P_{s_{ex}}/P_{t_{in}})} \quad (3)$$

입구에서의 풍속을 다소 완화하여 $Re=1.7 \times 10^5$ 로 하여 얻어진 결과를 Fig. 11에서 보여주고 있다. 이 경우에도 앞서와 마찬가지로 풍력타워의 회전각과 안내벽의 내경과 외경을 변경하면서 측정을 수행하였다. 입구에서의 풍속을 증가하여 측정하였던 $Re=2.1 \times 10^5$ 에서의 결과와 차이가 없었다. 이는 Reynolds 수의 차이가 현격하지 않으므로 Reynolds 수에 따른 차이가 나타나지 않았다. 오로지 풍속의 변화만큼 측정지점에서도 동일하게 하게 그 차이를 나타내었다. Fig. 11은 안내벽의 내부반경과 외부반경이 $R_i/L=0.87$ 와 $R_o/L=1.87$ 인 경우에 대하여 속도증가율과 압력변화를 보여주고 있다.

Fig. 12는 안내벽의 내부반경과 외부반경을 각각 $R_i/L=0.8$ 와 $R_o/L=1.8$ 로 하여 풍력타워를 연속적으로 이동하면서 측정한 결과를 보여주고 있다. 풍력타워의 이동속도는 4.5×10^{-3} rad/s으로 하였다. 아울러 동적상태에서 측정한 결과와 비교하기 위하여 풍력타워를 정지한 상태에서 측정한 결과를 같이 나타내었다. 정적인 상태에서 측정한 것과 동적인 상태에서 측정한 결과에서 m2의 측정위치에는 두 경우 차이를 보이지 않았다. 이는 m2의 측정위치가 풍력타워의

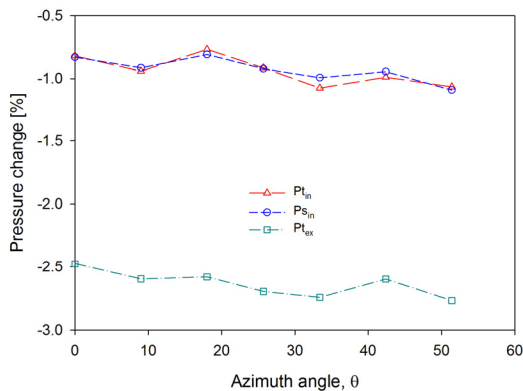


Fig. 9. Variation of pressure at the upstream and downstream the wind power tower ($Re=2.1 \times 10^5$, $R_i/L=0.8$, $R_o/L=1.8$)

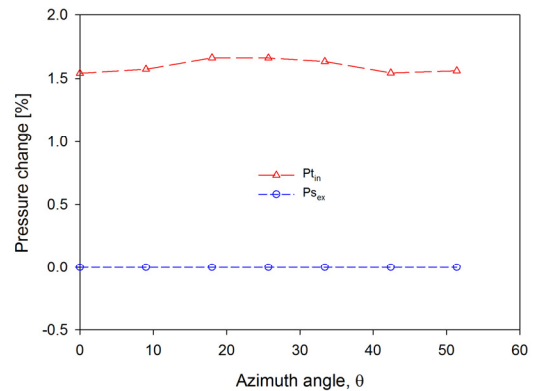
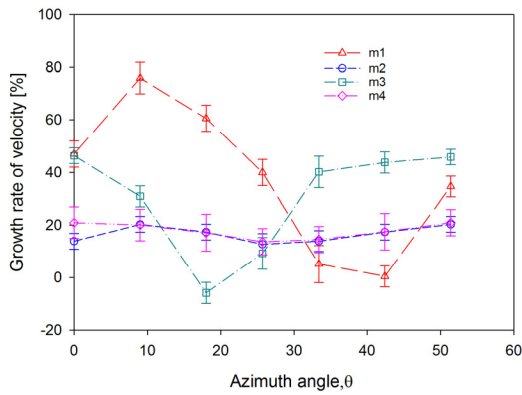
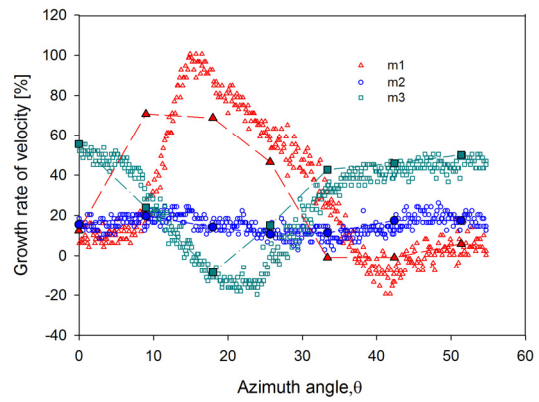


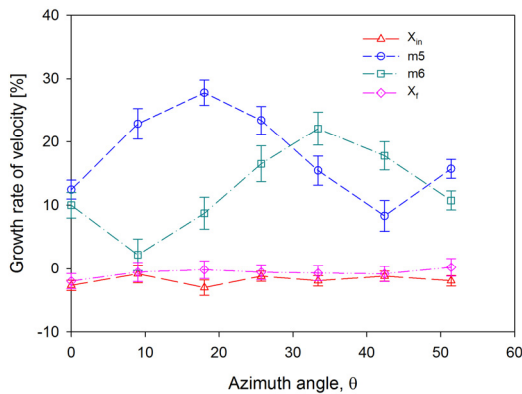
Fig. 10. Variation of pressure at the upstream the wind power tower based on equal downstream pressure ($Re=2.1 \times 10^5$, $R_i/L=0.8$, $R_o/L=1.8$)



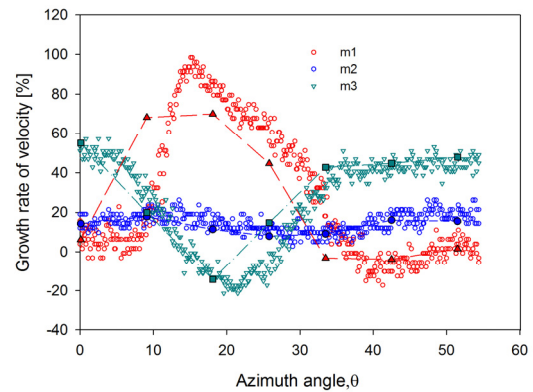
(a) within the tower



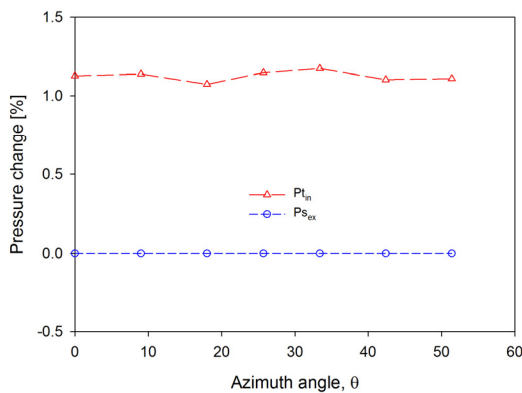
(a) $Re=2.1 \times 10^5$



(b) at the side and upstream



(b) $Re=1.7 \times 10^5$



(c) Pressure change

Fig. 11. Variation of velocity and pressure for different azimuth angles ($Re=1.7 \times 10^5$, $R_i/L=0.87$, $R_o/L=1.87$)

중심부에 있으므로 안내벽의 이동에 대하여 유동이 영향을 받지 않았기 때문이다. 하지만 m1과 m3의 측정위치에서는 풍력타워가 회전하는 경우에 유동에 관성 효과가 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 측정의 결과가 시간적으로 이동된 것과 같은 결과를 얻게 되었다. 본 결과에서도 Reynolds 수의 차이에 의한 영향은 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 12. Variation of velocity with the wind power tower ($R_i/L=0.8$, $R_o/L=1.8$)

4. 결론

본 연구에서는 수직축풍력터빈의 성능을 향상하기 위하여 풍력타워를 설치할 때, 풍력타워에서의 속도 증가에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 측정위치에 따라서 풍력타워가 회전하는 경우에 속도증가율이 다르게 나타났었지만, 전체적으로 일정한 변화율을 나타내는 풍력타워 중심부에서의 속도증가율이 15%를 상회하였다. 두 개의 다른 풍속에서 실험을 수행하였으나 Reynolds 수의 차이가 크지 않아서 두 경우 동일한 결과를 얻었다. 실험이 풍동에서 이루어 졌으므로 풍력타워의 설치로 인하여 전압력손실의 영향이 나타났지만 이를 보정하여도 풍력타워에서의 유속 증가 효과는 충분히 얻을 수 있었다.

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., 1995, "NREL Airfoil Families for HAWTs," Proc. Windpower'95, Washington D.C., pp. 117-123.
- [2] Björk, A., 1990 "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, Stockholm, Sweden.
- [3] Fuglsang, P. and Bak, C., 2001, "Design and Verification of the New Risø-A1 Airfoil Family for Wind Turbines," AIAA-2001-0028.
- [4] Timmer, W. A., and Rooij, R.P.J.O.M. V., 2003, "Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils," AIAA-2003-0352.
- [5] Grasso, F., 2012, "Hybrid Optimization for Wind Turbine Thick Airfoils," AIAA 2012-1354.
- [6] Schubel, P. J. and Richard J. Crossley, R. J., 2012, "Wind Turbine Blade Design," Energies, No. 5, pp. 3425-3449.
- [7] Colley, G., Mishra, R., Rao, H. V. and Woolhead, R., 2011, "Computational Flow Field Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine," ICREPQ'11
- [8] Park, J., Lee, S., Sabourin, T. and Park, K., 2007, "A Novel Vertical Axis Wind Turbine for Distributed & Utility Deployment," Ontario Sustainable Energy Association.
- [9] Kim, B. K., Kim, H. H., Song, W. S., Lee, S. Nam, S. K. and Kim, S. M., 2007, "An Experimental Study on the Performance of the Vertical-Axis Wind Turbine," J. Fluid- machinery, Vol. 10. No. 3, pp.17-24.
- [10] Takao, M., Maeda, T., Kamada, Y., Oki, M. and Kuma, H., 2008, "A Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine with a Directed Guide Vane Row," J. of Fluid Science and Technology, Vol.3, No. 3, pp. 379-386.
- [11] Isensee, G. M. and Hayder Abdul-Razzak, H., 2012, "Modeling and Analysis of Diffuser Augmented Wind Turbine," International Journal of Energy Science, Vol. 2, No.3, pp. 84-88
- [12] Phillips, D. G., Flay, R. G. J., Nash, T. A. and Ipena, M., 1999, "Aerodynamic Analysis and Monitoring of the Vortec 7 Diffuser-Augmented Wind Turbine," EMCh, Transactions, Vol. 26, No. 1.
- [13] Phillips, D. G., Richards P. J. and Flay, R. G. J., 2002, "CFD Modelling and the Development of the Diffuser Augmented Wind Turbine," Wind and Structures, Vol. 5, pp. 267-276.
- [14] Nobile, R., Vahdati, M., Barlow, J. F. and Mewburn-Crook, A., 2013, "Unsteady Flow Simulation of a Vertical Axis Wind Turbine: a Two-Dimensional Study," EngD Conference, 2nd July.
- [15] Chong, W. T., Poh, S. C., Fazlizan, A. and Pan, K. C., 2012, "Vertical axis Wind Turbine with Omni-Directional-Guide-Vane for Urban High Rise Application," Journal of Central South University of Technology, Vol. 19, pp. 721-732.
- [16] Chen, L., Ponta, F. L. and Lago, L. I., 2011, "Perspectives on Innovative Concepts in Wind-Power Generation," Energy for Sustainable Development, Vol. 15, pp. 398-410.
- [17] Allaei, D. and Andreopoulos, Y., 2014, "Invelox: Description of a New Concept in Wind Power and its Performance Evaluation," Energy, Vol. 69, pp. 336-344.
- [18] Baek, Y. M., 2017, "Design of Guided Vane for Improving the Efficiency of a Vertically Layered Wind Turbine Generator," TR-2017, Odin Energy.
- [19] Van Bussell G. J. W., Mertens, S., Polinder, H. and Sidler, H. F. A., 2004, "The Development of Turby, A Small VAWT for the Built Environment," Global Wind Energy Conference 2004, Session Advanced Small Turbine Technology, March 30, 2004
- [20] Cho, S. Y. and Choi, H. S., 2015, "Numerical Analysis in a Prototype Wind Power Tower using CFD," KIMM-CR-2015-A0365.
- [21] Cho, S. Y., Rin, C., Choi, S. K., Kim, J. K. and Park, S. K., 2015, "Numerical Analysis on the Performance of Vertical Axis Wind Turbine Affected by the Configuration of the Wind Power Tower," New Renew. Energy, Vol. 11, No. 2, pp. 17-28.