

# 풍력타워의 형상이 수직축 풍력터빈의 성능에 미치는 영향에 관한 수치적 연구

조수용<sup>1)\*</sup> · 임채환<sup>2)</sup> · 최상규<sup>2)</sup> · 김진균<sup>2)</sup> · 남주석<sup>2)</sup> · 박상경<sup>3)</sup>

## Numerical Analysis on the Performance of Vertical Axis Wind Turbine Affected by the Configuration of the Wind Power Tower

Soo-Yong Cho<sup>1)\*</sup> · Chae Whan Rim<sup>2)</sup> · Sang Kyu Choi<sup>2)</sup> · Jin Gyun Kim<sup>2)</sup> · Ju Seok Nam<sup>2)</sup> · Sung Gyoung Park<sup>3)</sup>

Received 2 June 2015 Revised 12 June 2015 Accepted 16 June 2015

**ABSTRACT** A wind power tower can be applied to enhance the output power on the vertical axis wind turbine (VAWT). Usually, the wind power tower can be constructed as a multi-story building to increase the frontal area of wind stream. Hence, multiple sets of the VAWT can be installed within the wind power tower, and also they can be operated at high elevation. Many different types of wind power tower can be used in the field. In this study, a wind power tower with circular column shape was applied, and the VAWT was installed at the center of the wind power tower. Seven guide walls were used as a strut between the floors of the wind power tower. These guide walls were utilized not only to increase the wind velocity within the wind power tower but also to adjust the wind direction for making better working condition on the VAWT. Hence, some important design variables, such as the distance between the wind turbine and the guide wall, the outer diameter of the wind power tower, the direction of the guide wall against the wind direction, were studied to find optimum dimension by the numerical analysis obtained at the transient state. The results showed that the output power of the VAWT obtained using the wind power tower was increased compared to them obtained without the wind power tower. In addition, they showed that the increased output power on the wind turbine was greatly depended on the dimension of the guide wall.

**Key words** Wind Power Tower(풍력타워), Vertical Axis Wind Turbine(수직축풍력터빈), Turbine Performance(터빈성능), CFD(전산유체), Transient Analysis(비정상해석)

### Nomenclature

$A$  : projection area [ $2HR_w$ ]

$c$  : chord of blade

$C_p$  : power coefficient [ $P/(\rho AV^3/2)$ ]

$H$  : rotor blade height

$N$  : number of bade

$P$  : output power [ $I\omega$ ]

$R_i$  : inner radius of guide wall

$R_o$  : outer radius of guide wall

$R_w$  : radius of wind turbine

$V$  : wind velocity

$\beta$  : angle of guide wall

1) 경상대학교 항공기부품기술연구소, 항공공학과  
E-mail: sycho@gnu.ac.kr  
Tel: +82-55-772-1586 Fax: +82-55-772-1580

2) 한국기계연구원 기술사업화실 E-mail: cwrin@kimm.re.kr  
Tel: +82-42-868-7250 Fax: +82-42-868-7477

3) 오딘에너지(주) E-mail: parksk@odinenergy.co.kr  
Tel: +82-70-7209-5330 Fax: +82-2-884-8857

- $\epsilon$  : non-dimensional gap [  $(R_i - R_w)/R_w$  ]
- $\theta$  : circumferential angle
- $\lambda$  : tip speed ratio [  $R_w \omega / V$  ]
- $II$  : periodic average torque [N.m]
- $\sigma$  : solidity [  $cN/2R_w$  ]
- $\tau$  : torque [N.m]
- $\omega$  : angular velocity of rotor [rad/s]

## 1. 서론

화석연료의 고갈에 따라 재생에너지의 중요성이 점차적으로 확대되고 있다. 따라서 화석연료를 사용하지 않으면서도 에너지를 얻기 위한 연구들을 활발히 수행하고 있으며, 태양열, 지열, 바이오매스, 해양, 폐열, 풍력 등 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 풍력에 관한 연구로서 특히 풍력터빈의 성능을 향상하기 위한 연구를 수행하였다. 풍력이 가지고 있는 에너지의 크기는 풍속에 의하여 좌우되는데, 풍속은 지형, 위도, 고도, 시간 등에 따라 다르다. 풍력터빈은 풍력에너지를 기계적 에너지로 변환하며 이를 다시 발전기를 사용하여 회전운동을 전기에너지로 변환하는 장치이다. 따라서 수Watt 급의 미니어처형에서 수MW의 출력을 내는 대형풍력터빈까지 다양하게 개발되고 있다. 본 연구에서는 kW급의 출력을 생산하는 수직축 풍력터빈을 풍력타워 내부에 설치하였을 때, 풍력터빈 성능향상에 영향을 미치는 풍력타워의 형상에 관한 연구를 수행하였다.

풍속은 환경적 요인에 의하여 결정되므로 풍력터빈의 성능은 주어진 풍속에 효과적으로 대응하는 블레이드에 의하여 좌우된다. 따라서 새로운 블레이드의 개발에 관한 연구<sup>1-6)</sup>가 많이 수행되었다. 풍력터빈에 많이 적용되고 있는 항공용 익형은 레이놀드수가 풍력터빈에 비하여 10배 이상 되는 값을 기준으로 개발된 형상이다. 그러므로 풍력터빈에 맞는 레이놀드수를 기준으로 새로운 익형들이 제시되었다. 풍력터빈의 새로운 익형 개발은 주어진 풍향에 대하여 기본적으로 양항비를 최대화하는 것이지만, 풍력터빈의 앞부분에 베인을 설치하여 풍향을 변경하게 되면 블레이드에서 받음각이 변경되어 성능이 향상될 수 있다. 따라서 풍력터빈 앞부분에

가이드베인<sup>7-9)</sup>을 설치하여 성능을 향상하는 것도 가능하다.

수직축 풍력터빈의 경우에는 터빈블레이드가 중력방향으로 설치되어 회전하므로 풍향과는 무관하다. 따라서 수직축 풍력터빈과 같은 요(yaw)방향을 조정하는 장치는 필요 없지만, 가이드베인을 요방향으로 조정이 되도록 하여 성능향상을 한 연구<sup>10)</sup>도 있다. 또 다른 방법으로는 풍력터빈의 출구에 확산관을 설치하는 경우이다. 확산관에 의하여 풍력터빈의 출구에서 압력이 낮아지게 되므로 풍력터빈 전후에서 더 많은 압력차가 형성된다, 따라서 이 압력차를 이용<sup>11-13)</sup>하여 출력을 향상하기도 한다.

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<sup>14,15)</sup>되었다. 이 외에도 풍력터빈의 위치를 높이던가, 건물간의 중간영역에서 형성되는 높은 풍속을 이용하던가, 높은 위치에 집풍관을 설치하는 등의 방법<sup>16,17)</sup>도 적용되고 있다. 이와 같이 다양한 방법으로 풍력터빈의 성능을 향상하는 연구들이 있지만, 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이



Fig. 1. View of wind power tower with VAWTs

고층의 풍력타워를 이용하여 수직축 풍력터빈의 성능을 향상하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 따라서 풍력타워의 층수마다 풍력터빈을 설치할 수 있고, 작동위치를 높일 수 있는 장점을 활용할 수 있다. 하지만 풍력타워의 설치시 유동의 흐름을 간섭하게 되므로 역효과도 있을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 풍력타워의 집풍구조와 관련한 변수들의 변경에 따른 성능변화를 수치해석적인 연구를 통하여 분석하고, 또한 성능향상을 할 수 있는 최적의 변수를 찾자 한다.

## 2. 수치해석방법

풍력타워의 설치로 인하여 풍력터빈의 성능에 영향을 미치는 전면부는 넓어지지만 풍력타워의 구조물은 유동의 흐름을 방해하는 부정적인 역할도 한다. 따라서 이러한 유동의 특성을 고려하여 계산영역의 입구부는 경계조건을 전압력으로 설정한다. 출구부는 정압력으로 설정하면, 유동이 입구부에서 풍력타워로 접근할수록 풍압은 증가하게 되고 풍속은 저하되는 자연현상을 모사할 수 있게 된다. 바닥면은 non-slip 조건이 적용되고 그 외 측면과 위면은 풍력타워의 영향이 없는 거리까지 확대하여 slip 조건을 적용한다. 유동장의 계산을 위하여 상용코드인 CFX<sup>18)</sup>를 사용하였으며, 난류모델은 SST모델을 적용하였다.

Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 풍력터빈의 성능을 향상하기 위하여 설치위치를 4층부터 설치하였으며 11층까지 총 8기의 풍력터빈이 동시에 작동 되도록 하였다. 풍력타워의 설치에 따른 유동장 해석을 위한 계산 영역은 입구영역은 풍력타워 높이를 기준으로 타워의 중심에서 1.32배, 각 측면까지는 1.7배, 위면은 3.56배, 출구는 2.37배로 확대된 육면체 공간으로 정하였다. 격자의 개수를 조정하기 위하여 계산 영역을 6개 영역으로 하여, 3백만개 정도의 요소로 격자를 형성하였다. 내부에 풍력터빈을 설치하지 않고 다만 풍력타워에 의한 유동장을 확인하였으며, 입구에서의 전압력은 출구에서의 정압력보다 상대적으로 40Pa 크게 설정하였다.

Fig. 2는 풍력타워의 중심을 지나는 수직평면에서의 유선분포를 보여주고 있다. 유속분포에서 보여주는 것과 같이 아래영역은 타워가 있으므로 접근하는 풍속은 타워가

없는 상층부의 경우에 비하여 속도 감소가 보이며, 타워 내부부를 통과하는 유속은 타워에 의하여 집풍되어져 증가됨을 보여주고 있다. 타워내부의 유속 증가가 풍력터빈의 성능을 향상하는지는 다음절에서 다루기로 한다. 풍력타워의 뒷부분은 전형적인 원통형 물체 후류의 유동장 형태를 보여주고 있다.

풍력타워에서의 유동장은 타워에서의 높이나 풍향과 안내벽과의 상대적 위치에 따라 복잡한 유동장의 결과들을 보여주었으며, 타워의 바깥영역에서는 유동이 타워 주위를 돌아가면서 유속은 증가함을 보여주었다. Fig. 3은 풍력타워의 중간층에 해당되는 8층의 위치에서, 층의 중간인 수평면에서의 유선분포를 보여주고 있다. 타워의 안내벽이 유동과 대칭이므로 대칭인 유선분포를 보여주고 있다. 타워에서 낮은 위치나 옥상에 가까운 위치일수록 더 복잡한 유동장을 보여주었다.

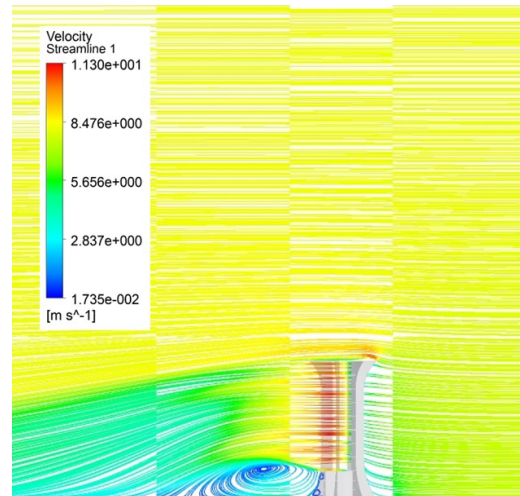


Fig. 2. Streamlines at the vertical plane passing the tower center

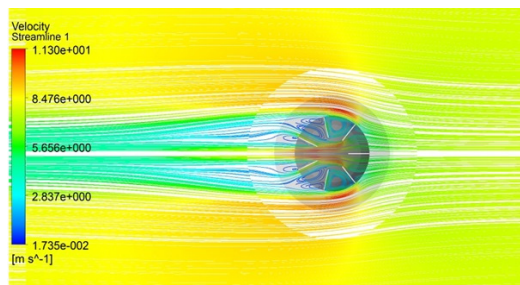


Fig. 3. Streamlines at the horizontal plane in the mid of eighth floor

풍력타워의 집풍구조에 의하여 풍력타워 내부에서 풍속이 증가하였다고 하여도, 압력의 감소가 있으므로 이러한 현상이 풍력터빈의 출력을 증가하는지는 판단할 수 없다. 더구나 내부에 풍력터빈이 운전되면 유동장은 상당히 달라질 것이다. 또한 풍력타워내에 설치된 안내벽의 크기뿐만 아니라 풍향과의 상대적인 위치도 출력에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 이러한 영향을 파악하기 위하여 타워전체를 기준으로 비정상해석을 수행하는 것은 계산의 시간적인 제한으로 불가하다. Fig. 3의 결과가 보여주는 것처럼 중간층의 경우는 수직방향으로의 변화가 다소 약하다. 따라서 수직방향의 짧은 거리만 고려하여 수치해석을 수행하고, 그 결과를 전체 블레이드 높이로 환산하였다. 그러므로 계산의 결과는 실제적으로 팁부분에서의 손실이나, 전체유동장 계산에서 나타날 수 있는 블레이드 규모의 와류에 의한 3차원 유동장의 영향은 포함되지 않는다. 하지만 본 연구에서는 동일한 운전조건에서 얻어진 결과를 바탕으로 상대적인 비교평가를 통하여 풍력타워의 영향성과 관련 변수들의 특성을 파악하는 것이 목적이므로 이러한 방식을 채택하였다.

이러한 계산의 방식에 대한 검정으로 Takao et al.<sup>10)</sup>에 의하여 수행되었던 수직축 풍력터빈의 실험결과와 비교하여 보았다. 실험에 적용된 풍력터빈의 사양은 참고문헌에 상세히 수록되어 있으므로 본고에서는 지면상 생략하도록 한다. Fig. 4는 실험에서 속도비( $\lambda$ )가 1.4인 경우에 대하여 얻어진 토크선도이다. 각각의 블레이드에서 얻어진 토크를 합하면 실제 회전하면서 얻어지는 토크가 된다. 하지

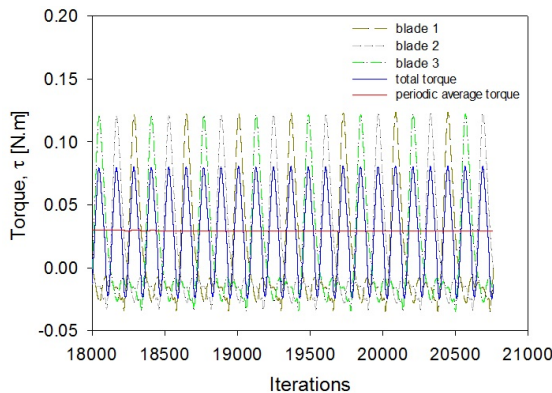


Fig. 4. Calculated torque for comparing with the experimental result<sup>10)</sup>

만 이는 회전위치에 따라 주기적으로 변하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이를 주기평균토크로 계산하면 일정한 결과를 얻게 된다. 이를 기준으로 출력계수를 구하여 비교한 결과는 Fig. 5에서 보여주고 있다. 계산의 결과가 다소 좋은 결과를 예측하고 있음을 알 수 있으며, 이는 앞 절에서 언급한 것처럼 3차원 유동에 따른 손실들이 포함되지 않아서 발생된 것으로 예측이 된다.

### 3. 풍력타워의 영향성

Fig. 6은 풍력타워의 수평단면에서 본 형상으로 안내벽의 개수는 여러 실험결과를 참조하여 7개로 설정하였다. 벽의 두께는 타워구조물을 기준으로 결정되었으며, 풍력터빈 회전반경( $R_w$ )의 6.25%가 되었다. 따라서 성능과 관련

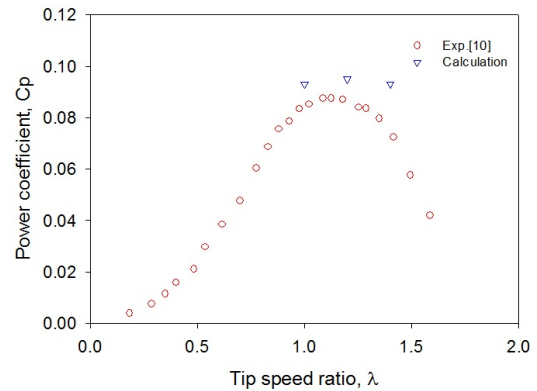


Fig. 5. Comparison of the power coefficient with the experimental result<sup>10)</sup>

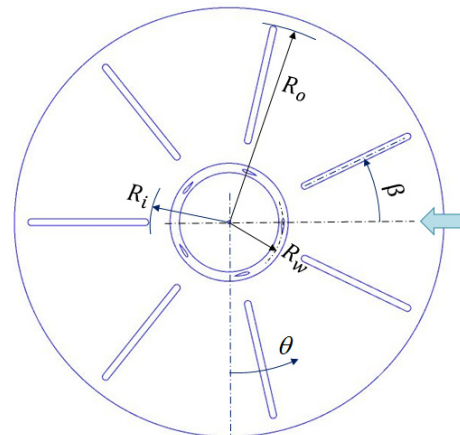


Fig. 6. Geometrical parameters within the wind power tower

된 주요변수로는 안내벽의 내부반경( $R_i$ ), 안내벽의 외부반경( $R_o$ ), 풍향에 대한 안내벽의 상대적 위치( $\beta$ ), 풍력터빈의 회전반경과 안내벽간의 간격들이 될 것이다. 비정상해석을 수행하는데 있어서 풍력블레이드는 회전하므로 회전방향의 위치( $\theta$ )는 풍향과 블레이드의 회전방향이 맞는 위치를 Fig. 6과 같이 기준점으로 설정하였다.

본 연구에서의 풍력터빈 현절비( $\sigma = cN/2R_w$ )는 0.6875이며, 블레이드 높이는 회전반경대비 2.3배이다. 익형은 NACA0018이 사용되었으며, 회전수 84RPM을 기준으로 성능평가를 하였다. 풍력타워의 설계변수들의 영향을 검토하는 것이므로 수직방향의 일부만을 선정하였지만 다른 부분의 계산영역은 터빈의 회전반경을 기준으로 터빈축에서 앞부분과 측면으로는 30배 확대하고, 출구는 50배로 확대하여, 풍력터빈에서의 계산된 유동의 영향이 경계에 미치지 않도록 하여 설정한 경계조건이 합당하도록 하였다.

Fig. 7은 계산에 사용된 격자의 형태를 보여주고 있으며 계산을 통하여 격자 개수의 독립성을 확인한 후에 계산을 수행하였다. 계산에서 비정상해석을 수행하기 전에 풍력터빈과 타워에서 정상상태의 결과가 충분히 수렴되도록 한 후에 비정상해석을 수행하였다. 비정상해석에서 터빈의 회전이동은 0.5도로 하였다.

Fig. 8은 동일한 조건에서 안내벽을 설치하지 않은 경우에 각각의 블레이드에서 얻어진 토크의 변화를 보여주고 있으며, 각 블레이드에서의 토크는 일정한 주기로 변화되고 있음을 보여주고 있다. 아울러 발생된 토크를 합한 경우에 터빈의 회전위치에 따라서 약간의 변동이 발생됨을 보여주고 있다.

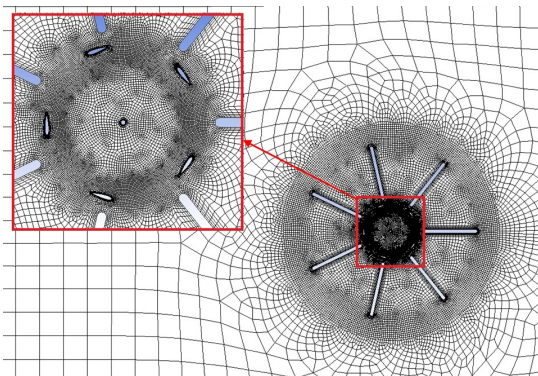


Fig. 7. Grids in a vertical plane (reduced for better view)

Fig. 9는 안내벽이 있는 경우에 각각의 풍력터빈 블레이드에서 회전에 따라 얻어지는 토크 선도와 그것을 합한 경우의 총토크 선도를 보여주고 있다. 전반적으로 총토크의 크기는 증가된 결과를 보여주지만 안내벽이 없는 경우에 비하여 토크의 변동이 심하게 발생되므로 구조적으로 안정성이 확보되도록 설계되어야 함을 알 수 있다. 총토크선도가 회전위치에 따라 변화하므로 식 (1)과 같이 주기평균토크( $\Pi$ )를 이용하여 비교하였다.

$$\Pi = \frac{\int_0^{2\pi n} (\sum \tau) d\theta}{2\pi n} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\tau$ 는 각 블레이드에 얻어진 토크를 의미한다. 따라서 풍력터빈의 출력은 이들을 합하여야 하므로, 주기평균토크는 이들을 합하여 회전에 따른 평균으로 나타내었다.

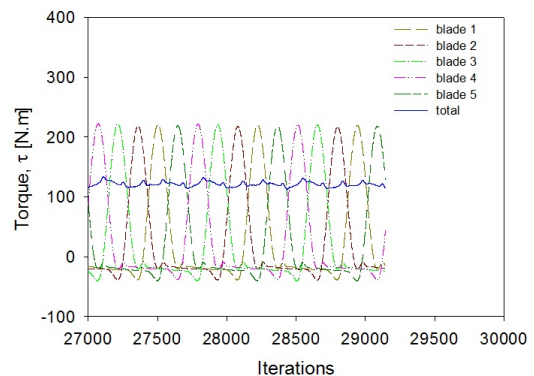


Fig. 8. Variation of torque generated at each blade without guide wall

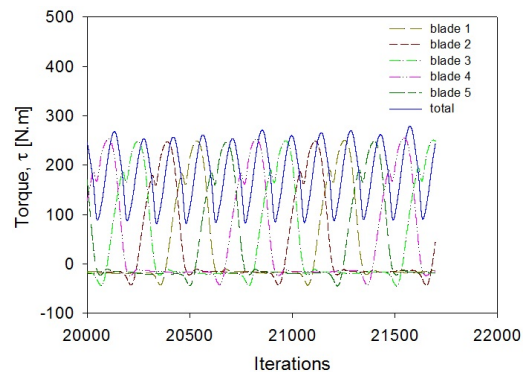


Fig. 9. Variation of torque generated at each blade ( $\epsilon = 0.5, R_o/R_w = 7.5, \beta = 0^\circ$ )

안내벽이 있는 경우와 없는 경우를 기준으로 주기평균토크를 비교하여 보면 안내벽이 없는 경우에는 133.6N.m를 나타내며, Fig. 5와 같이 안내벽이  $R_i/R_w = 1.5$ ,  $R_o/R_w = 7.5$ ,  $\beta = 0^\circ$ 의 조건으로 설치된 경우에는 189.3N.m가 얻어졌다. 또한 계산영역 입구에서의 질량유량 평균속도는 안내벽이 없는 경우에는 8m/s가 얻어졌지만, 안내벽이 있는 경우에는 타워에 의한 폐쇄에 의하여 7.3m/s로 낮아졌다.

#### 4. 안내벽의 위치에 따른 영향

3절에서의 안내벽은 풍향에 대하여 대칭적이면서 안내벽 하나가 풍향과 일치( $\beta = 0^\circ$ )하는 경우였다. 따라서 이 경우에는 타워가 풍향을 가장 많이 받을 수 있는 위치가 된다. 반면에 Fig. 6과 같이 안내벽이  $\beta = 25.71^\circ$ 가 되는 경우에는 타워내부로 들어가는 풍량이 가장 적어지는 전면부를 갖게 되어 출력의 감소가 예상된다.

Table 1은 안내벽이 풍향과의 각도를 갖는 경우에 주기평균토크의 결과를 보여주고 있다. 안내벽이  $\beta = 25.71^\circ$ 가 되는 경우에는 주기평균토크가 안내벽이 없는 경우에 비하

Table 1. Periodic average torque with different guide wall locations

	$\beta = -12.86^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 12.86^\circ$	$\beta = 25.71^\circ$	w/o guide
$\Pi$ [N.m]	137.9	189.3	177.57	112.1	133.6

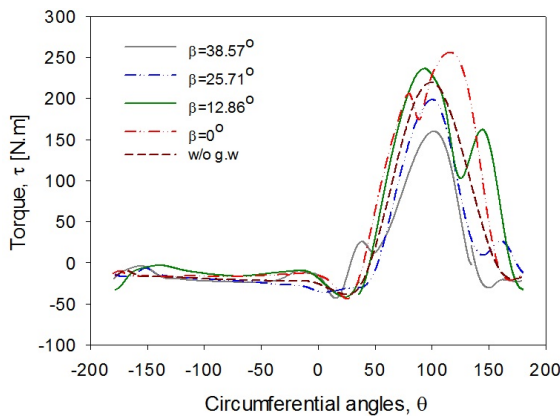


Fig. 10. Variation of torque along the circumferential direction ( $R_o/R_w = 7.5$ ,  $\epsilon = 0.5$ )

여 출력이 오히려 감소되는 현상이 발생됨을 알 수 있다. 따라서 풍력타워에서 현 상태의 구조로 안내벽을 설치하면 풍향에 따라서 출력의 감소가 예상된다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 터빈과 안내벽간의 거리를 변경하여 개선점을 찾아야 할 것이다.

Fig. 10은 풍력터빈의 임의의 블레이드가 1회전하는 동안에 얻어지는 토크를 회전위치에 따라 변하는 과정을 보여주고 있다. 풍력터빈의 출력은 풍력터빈이 바람을 맞는 전면부에서 형성되고 있음을 알 수 있다. 하지만 세부적인 토크의 결과는 안내벽의  $\beta$ 값에 따라서 안내벽이 없는 경우에 비하여 빨리 생성되기도 하고 또한 빨리 소멸되기도 함을 보여준다.  $\beta$ 값이 낮을수록 회전하는 토크가 빨리 생성되면서도, 아울러 빨리 소멸됨을 알 수 있다. 이는 안내벽의 위치에 따라 내부 유동의 변화가 있기 때문임을 알 수 있다. 또한 안내벽이 있는 회전방향 위치에 따라서 유동의 흐름이 변화되는 위치가 변동됨에 따라, 토크가 중간영역에서 변동이 발생하는 구간이 형성됨을 Fig. 10에서 보여주고 있다. Table 2는 토크의 생성과 소멸, 그리고 변동되는 회전각도를 보여주고 있는데 이러한 변화의 특성에 대한 이유는 다음절에서 다루기로 한다.

#### 5. 내부 간격의 영향

터빈의 출력에 영향을 미치는 요소가 풍량, 풍압, 풍속 등이 있는데 안내벽은 풍속과 풍향의 변화를 타워내부에서 발생되도록 하므로 타워가 없는 경우에 비하여 출력의 증대나 감소가 발생하였음을 4절에서 보여주었다. 이러한 풍속과 풍향의 변화는 안내벽의 내부반경( $R_i$ )과 터빈의 회전반경( $R_w$ )의 간격에 따라서도 많은 변화가 발생할 수 있을 것이다. 따

Table 2. Circumferential location ( $\theta$ ) when the torque is changed

	$\beta = -12.86^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 12.86^\circ$	$\beta = 25.71^\circ$	w/o guide
$\tau \geq 0$	28,9	39,9	45,4	52,6	45,8
$\tau$ down	38,3	80,1	144,2	161,5	-
$\tau$ up	49,5	88,5	125,3	144,8	-
$\tau \leq 0$	133,8	157,5	168,8	174,1	155,9

라서 본 절에서는 이 간격을 조절하여 풍력터빈의 성능변화를 확인하고자 한다. 무차원간격( $\epsilon = (R_i - R_w)/R_w$ )을 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6으로 조절하면서 동일한 계산을 수행하였으며 그 외의 조건은 앞 절에서 적용한 조건과 동일하게 설정하였다. 따라서 안내벽은  $R_o/R_w = 7.5, \beta = 0^\circ$ 로 동일하게 유지하였다. Fig. 11은 비정상해석에서 터빈의 총회전수를 10회전 이상 수행하여 얻어진 주기평균토크의 결과를 기준으로 얻어진 출력계수의 변화를 보여주고 있다. 결과에서 보듯이  $\epsilon = 0.2$ 에서 최고의 출력이 얻어지고 있음을 알 수 있다. 비정상해석에서 풍력타워가 없는 경우에는 Fig. 4에서처럼 주기평균토크는 일정한 값을 가지게 되나, 풍력타워가 있는 경우에는 주기평균토크가 주기성을 나타내었다. 외부에 안내벽이 7개가 설치되었으므로 이에 대한 영향으로 3.5회전 주기로 주기평균토크가 변화

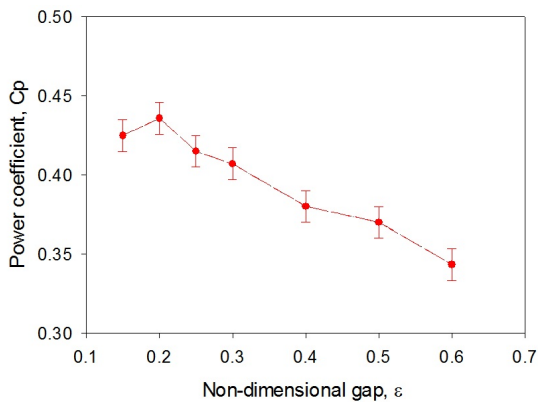


Fig. 11. Comparison of periodic average torque with various gap distances ( $R_o/R_w = 7.5, \theta = 0^\circ$ )

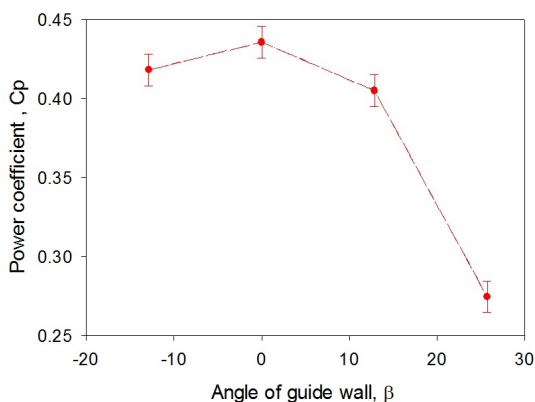


Fig. 12. Comparison of periodic average torque with different circumferential locations ( $R_o/R_w = 7.5, \epsilon = 0.2$ )

하였다. 따라서 아주 많은 회전수에서 주기평균결과를 얻게 되면 동일한 결과를 얻게 되나 사용하는 회전주기회수에 따라 결과에 차이를 나타내었는데 이에 대한 변동폭을 나타내었다.

Fig. 11에서 최대의 출력이 얻어진  $\epsilon = 0.2$ 를 기준으로 풍향과 안내벽과 다르게 형성되는 경우를 고려하여  $\beta$ 값을 변경하면서 동일한 계산을 수행하였다. 이때의 주기평균토크의 결과로 부터 얻어진 출력계수의 변화를 Fig. 12에서 보여주고 있다. 전체적으로 안내벽이 없는 경우의 출력계수 0.261보다는 크므로 이 경우가 풍향과 무관하게 출력 증대를 할 수 있음을 알 수 있다.

## 6. 유동장 비교분석

앞서 계산되어진 경우에서 안내벽의 형상이나 풍향과의 상대적 위치에 따라서 출력이 달라짐을 보여주었다. 그 중에서도  $\epsilon = 0.2, \beta = 0^\circ$ 인 경우에 가장 높은 출력을 나타내고,  $\epsilon = 0.5, \beta = 25.71^\circ$ 인 경우에 가장 낮은 출력을 나타내었다. 이러한 차이점의 비교하기 위하여  $\epsilon = 0.5, \beta = 0^\circ$ 의 경우와 안내벽이 없는 경우도 같이 비교하였다. 이러한 각각의 경우에 대하여 임의의 터빈블레이드 하나를 기준으로 회전각도를 따라서 얻어진 토크의 변화를 Fig. 13에서 보여주고 있다. 결과에서 보듯이 그 차이점이 주기평균토크의 크기와 명확하게 관련이 있음을 보여주고 있다.

회전각도  $128^\circ$ 전후의 영역에서 토크의 차이가 크게 발생

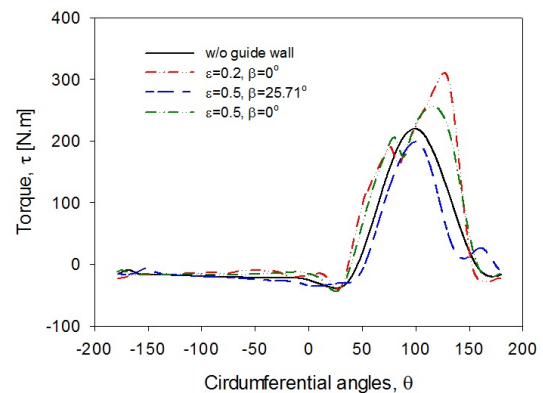
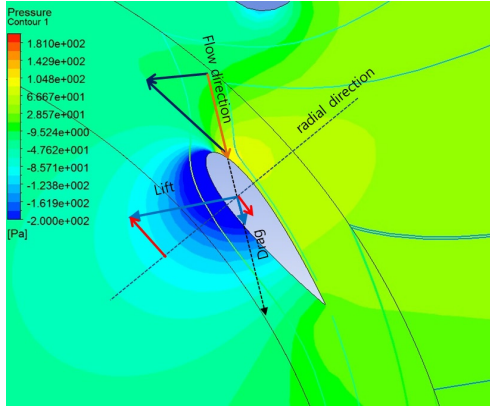
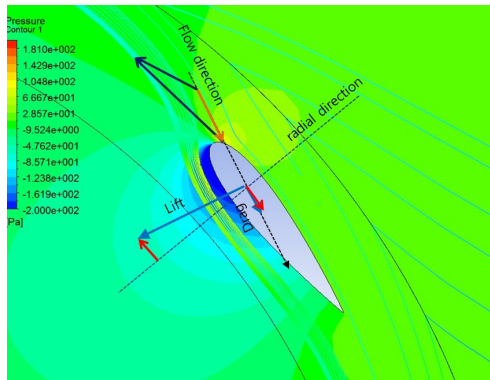


Fig. 13. Comparison of torque along the circumferential direction

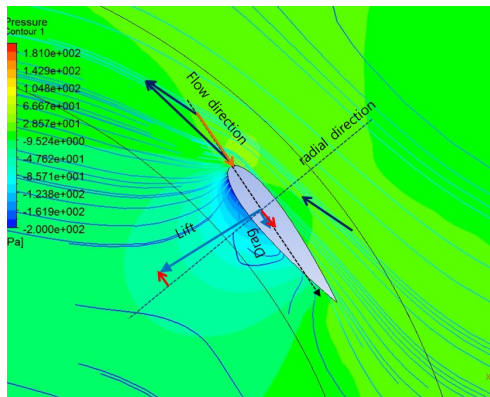
되므로 이 때의 유동장과 정압력의 분포를 Fig. 14에서 비교하여 보여주고 있다. 엄밀히 블레이드 정체점에서의 절대풍향속도를 정할 수는 없지만 블레이드에서의 상대유선으로부터 정체점과 상대유동의 방향을 알 수 있으므로 회전속도와 함께 상대유속을 정할 수 있다.



(a)  $\epsilon = 0.2, \beta = 0^\circ$



(b) without guide wall

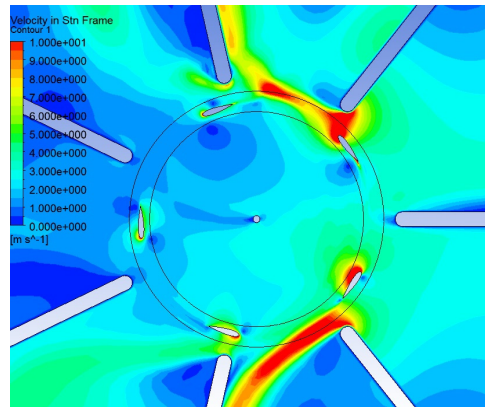


(c)  $\epsilon = 0.5, \beta = 25.71^\circ$

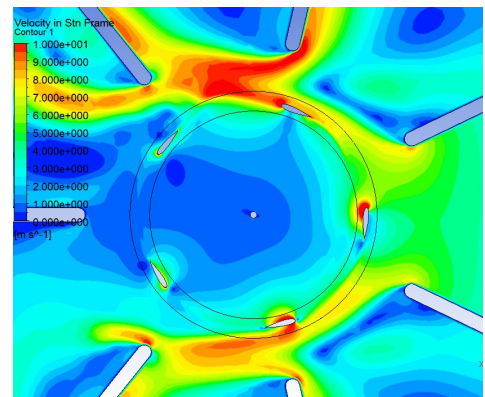
Fig. 14. Comparison of the streamlines and relative static pressure at  $\theta = 128^\circ$

블레이드는 동일한 회전속도를 가지고 있으므로 원주방향 속도는 동일하다. 따라서 블레이드에 형성되는 받음각은 상대속도의 방향에 의하여 정하여지지만, 최종적으로는 이를 결정하는 절대속도의 크기와 방향이 중요하다. Fig. 14(a)의 경우  $\beta = 51.41^\circ$ 에 설치되어 있는 안내벽으로 인하여 타워로 들어온 유동이 풍력의 중심으로 향하도록 하는 역할을 하므로 이 안내벽이 받음각의 증가에 기여를 한다.

Fig. 14(c)의 경우는  $\beta = 25.71^\circ$ 에 설치되어 있는 안내벽은 타워로 들어온 유동을 타워 중심으로 향하도록 하지만, 이 안내벽과  $\beta = 77.14^\circ$ 에 설치된 안내벽과의 사이에 형성된 큰 와류에 의하여 블레이드가 회전하는 위치에 있는 유동은 타워중심으로 향하지 못하고 반경방향으로 형성되도록 하고 있다. 그러므로 블레이드에 형성되는 받음각은 안내벽이 없는 경우보다도 오히려 적어지게 되었다. 만일 이



(a)  $\epsilon = 0.2, \beta = 0^\circ$



(b)  $\epsilon = 0.5, \beta = 25.71^\circ$

Fig. 15. Comparison of velocity contours

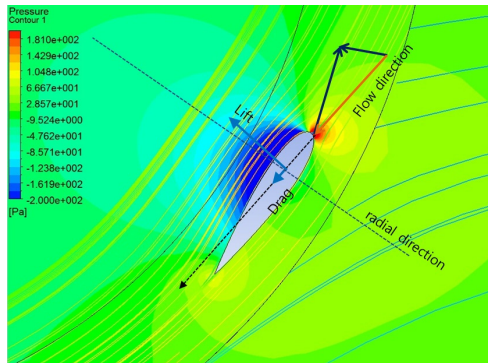


경우에 안내벽의 내경을 축소하여 간격이  $\epsilon = 0.2$ 로 줄어든 경우에는 유동장은 큰 차이가 없지만, 블레이드가 안내벽의 내부반경이 있는 위치에 근접하여 회전하게 되므로 급격히 반경방향으로 향하는 유동장의 영역을 피하게 되어 안내벽이 없는 경우보다도 높은 출력을 얻게 되었다.

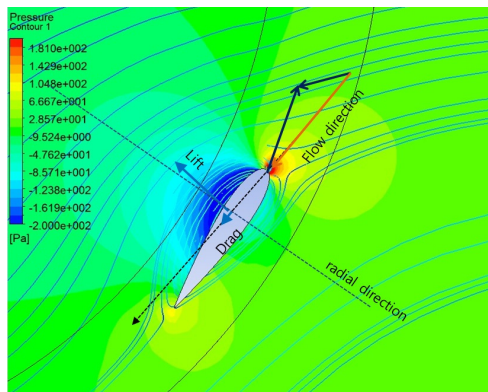
실질적으로 절대유동속도의 차이는 비슷하지만 절대유동방향의 차이가 상대유동속도의 크기와 방향을 다르게 형성하게 되었다. 따라서 Fig. 14의 상대정압력의 분포를 보면  $\epsilon = 0.2$ ,  $\beta = 0^\circ$ 의 경우에 받음각이 가장 클 뿐만 아니라 상대유동속도도 가장 크다는 것을 알 수 있으며, 이를 상대정압력의 분포로부터 알 수 있다.

Fig. 15는 동일한 스케일로 속도분포를 보여 주고 있다. 풍력터워로 들어오는 풍속은  $\epsilon = 0.5$ ,  $\beta = 25.71^\circ$ 의 경우가 입구면적이 적으므로  $\epsilon = 0.2$ ,  $\beta = 0^\circ$ 의 경우보다는 크다는 것을 보여주고 있다. 하지만 풍력터워의 전면부를 지나 하류로 흐르는 풍속을 비교하여 보면  $\epsilon = 0.5$ ,  $\beta = 25.71^\circ$ 의

경우 측면에 있는 안내벽간의 중간통로를 통하여 전면부에서 들어온 풍량의 상당량이 빠져나감을 알 수 있다. 이로 인하여 후면부( $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ )에서의 속도가  $\epsilon = 0.2$ ,  $\beta = 0^\circ$ 의 경우보다는 상당히 낮아졌음을 보여주고 있다. 이러한 낮은 풍력에너지로 인하여 후면부에서의 토크도 낮아졌음을 Fig. 13에서 보여 주었다. 토크가 생성되어지는 영역에서 발생토크의 차이가 있는 회전각도가  $\theta = 55^\circ$ 인 위치의 경우에도 유동장을 비교하여 보면 앞서와 동일한 현상이 발생됨을 Fig. 16에서 보여주고 있다.  $\epsilon = 0.5$ ,  $\beta = 25.71^\circ$ 의 경우가  $\epsilon = 0.2$ ,  $\beta = 0^\circ$ 의 경우보다는 절대유동방향이 반경방향으로 형성됨으로 인하여 상대유동속도는 오히려 약간 증가하였지만 받음각이 작게 형성됨으로 인하여 풍력터워를 회전시킬 수 있는 토크는 적게 생성됨을 알 수 있다. 따라서 풍력터워의 출력 향상은 받음각변화에 따른 양항비의 증가가 주요한 인자임을 알 수 있다.



(a)  $\epsilon = 0.2$ ,  $\beta = 0^\circ$



(b)  $\epsilon = 0.5$ ,  $\beta = 25.71^\circ$

Fig. 16. Comparison of the streamlines and relative static pressure at  $\theta = 55^\circ$

## 7. 안내벽의 외경에 의한 영향

동일한 전압력을 가진 유동에서 디퓨저를 설치한다고 출구에서 많은 유량이 얻어지는 것은 아니다. 유동이 흐름을 방해하는 물체로 인하여 압력 감소가 발생되기 때문이다. 따라서 본 절에서는 안내벽의 외경을 변경하였을 경우에 터빈의 출력에 어떤 변화가 발생되는지에 대하여 계산하여 보았다. 안내벽과 관련한 다른 변수는  $\epsilon = 0.2$ ,  $\beta = 0^\circ$ 로 동일하게 하고 외경비 ( $R_o/R_w$ )를 6, 6.5, 7, 7.5로 변경하여 계산을 수행하였다. Table 2는 풍력터워의 외경을 변경하였을 경우에 주기평균토크의 차이를 보여주고 있다. 최대의 출력은  $R_o/R_w = 7$ 일 때 얻어졌다.

Fig. 17은 풍력터워의 외경 변화에 대하여 유동의 차이를 비교하기 위한 위치를 보여주고 있는데 유선장으로부터 front의 위치에서나 rear 위치에서 유동은 하류방향으로만 형성되고 있음을 알 수 있다. Fig. 18은 평균속도에 대한

Table 3. periodic average torque with different outer diameter

	$R_o/R_w = 6.0$	$R_o/R_w = 6.5$	$R_o/R_w = 7.0$	$R_o/R_w = 7.5$
$T$ [N.m]	211.7	211.2	227.7	222.9

결과를

보여주고 있는데, 출구와 입구에서는 질량유량은 동일한데 출구에서 속도가 증대한 것처럼 나온 것은 여기서의 속도는 면적에 수직한 성분의 속도가 아니기 때문이다. 따라서 출구에서는 풍력타워에 의하여 형성된 와류로 인한 성분이 포함되어 있기 때문이다. 풍력타워의 외경이 커지면 타워에 의한 유동의 폐쇄로 입구에서의 속도가 줄어들고 있음을 보여주고 있다. 이러한 영향은 front에서도 동일하게 나타난다. 수치결과에서 블레이드의 위치에 따라 속도의 변화가 크게 나타나는 rear의 위치에서는 속도변화폭을 나타내었다.

압력선도를 보여주는 Fig. 19에서는 풍력타워의 외경이 증가함에 따라 입구와 front에서 정압력이 증가함을 보여준다. 이로 인하여 속도의 감소가 있었다. Rear영역에서는 풍력터빈에 의한 출력으로 인하여 정압력의 감소가 발

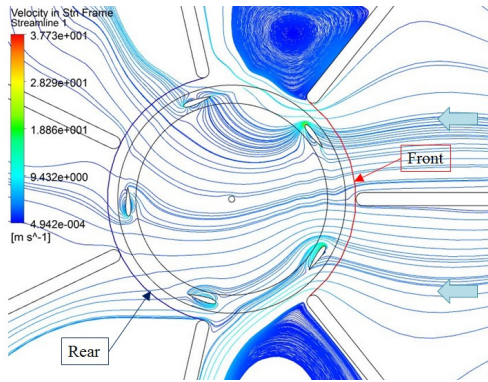


Fig. 17. Locations for comparing the flow properties and streamlines with  $R_o/R_w = 7.0$

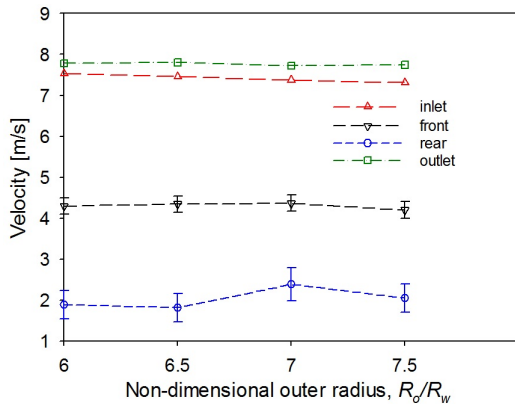


Fig. 18. Comparison of the magnitude of velocity for different outer diameters

생되었다. 이 전압력 감소의 크기는 출력과 관련되어 있으며, 또한 외경의 크기와도 관련이 있다. Rear 영역에서의 정압력의 감소는 타워를 우회하는 유동에 의하여 타워의 하류에 낮은 압력을 형성하게 되어 타워가 없는 경우보다는 출력을 향상하게 되는 원인이 되었다. 아울러 낮은 정압력을 형성하게 되는 경우에 rear영역에서 속도 증가의 원인이 되었다. 하지만 외경의 변화에 따른 출력의 변동은 다른 변수에 비하여 그다지 커지 않는다. 또한 Fig. 19에서 정압력의 변동폭을 블레이드의 위치에 따른 변동폭을 표시하여 두었다.

Fig. 20은 입구의 전압력을 변경하여 얻어진 정압력의 결과를 보여주고 있다. 입구에서의 상대적 전압력으로부터 얻어진 질량평균속도는 전압력이 20Pa인 경우에 5.14m/s가 얻어졌으며, 60Pa에서는 8.96m/s가 얻어졌다. 전압력으로부터 얻어질 수 있는 이상적인 속도보다는 다소 낮은 값이 얻어진 것은 풍력타워에 의하여 유로가 폐쇄되었기 때문이다. 입구에서의 속도가 변경되면 터빈 회전수에 따라 풍력타워에서의 유동장도 어느 정도는 변화가 발생할 것이다. 블레이드의 토크와 직접적인 관련이 있는 정압력의 분포를 입구속도의 변화에 대하여 Fig. 20에서 보여주고 있다. 속도변화에 대하여 압력스케일을 변경하여 나타낸 정압력의 분포는 풍력타워내에서의 비슷한 현상을 보여주고 있다. 따라서 풍력타워의 설계변수 따른 성능을 예측하는데 있어서 입구속도가 변경된다고 하여도 앞서 예측한 경우와 동일한 현상이 얻어질 것으로 예상된다.

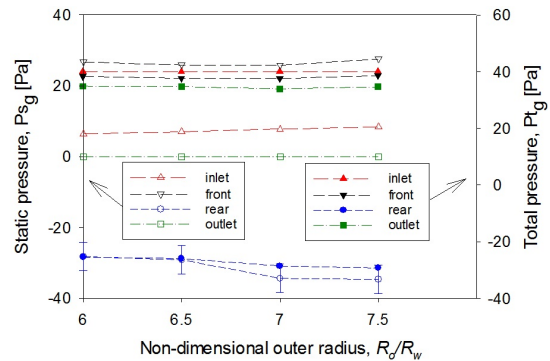
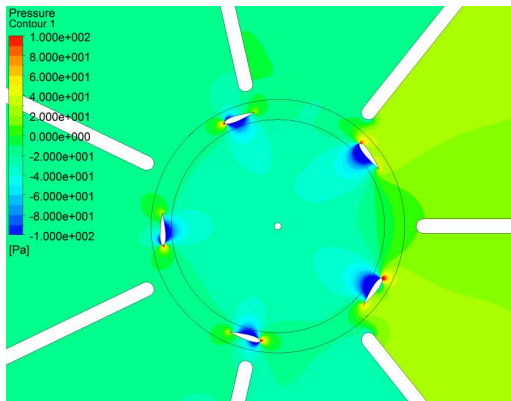
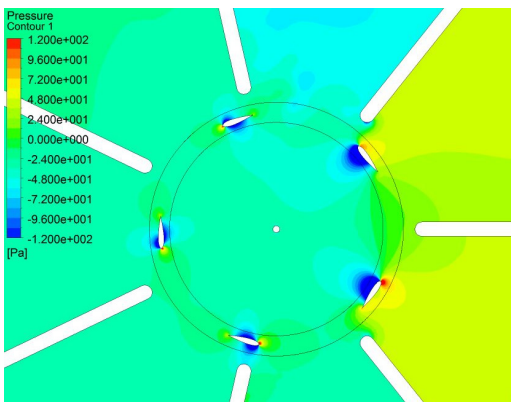


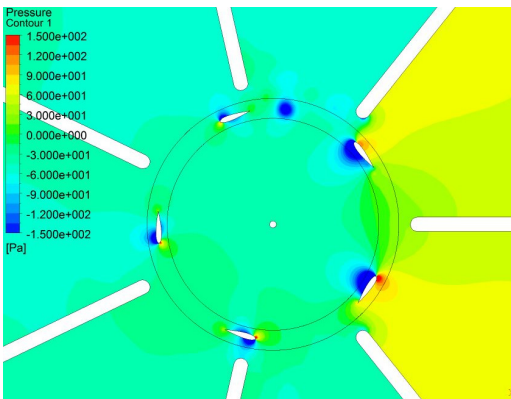
Fig. 19. Comparison of the static and total pressure for different outer diameters



(a) relative total pressure of 20 Pa



(b) relative total pressure of 40 Pa



(c) relative total pressure of 60 Pa

Fig. 20. Comparison relative static pressure for different velocities at  $\epsilon = 0.2$ ,  $\beta = 0^\circ$

## 8. 결론

본 연구에서는 풍력타워를 설치하여 수직축풍력터빈의 성능향상에 대한 수치적인 연구로 풍력타워내 안내벽의 기하학적인 변수를 변경하여 출력증대가 가능한 형상에 대해

여 연구를 수행하였다. 계산영역의 입구에서 전압력을 동일하게 주고, 수직풍력터빈의 비정상해석을 수행하였다. 풍력타워는 유동의 흐름을 방해하는 요인도 있지만 타워의 주위로 돌아가는 유동으로 인하여 풍력터빈의 출구영역의 정압력을 감소하는 효과가 있었다. 또한 풍력타워내의 안내벽은 풍향을 바꾸어주는 역할을 하게 되어 터빈블레이드에서 받음각을 증가하는 효과가 있었다. 따라서 풍력타워의 적용은 안내벽의 치수를 적절히 설정하면 풍력터빈의 출력을 증대하는데 도움이 될 수 있다. 7개의 안내벽을 사용하는 풍력터빈에서 경우에 안내벽의 외경과 내경이 각각  $R_o/R_w = 7$ ,  $(R_i - R_w)/R_w = 0.2$ 의 경우가 가장 좋은 조건이었다.

## 후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(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] 김병국, 김영호, 송우석, 이승배, 남상규, 김사만, 2007, "수직축 풍력터빈 성능개선에 관한 실험적 연구", 유체기계저널, 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] CFX, v.15, 2014, ANSYS Inc.