

## 유동해석을 통한 수직축 풍력발전 터빈의 성능 예측

김종호\* · 김종봉\*\*† · 오영록\*\*\*

\* 서울과학기술대학교 기계시스템공학과, \*\* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과, \*\*\* 에너윈코리아(주)

### Performance Prediction of Wind Power Turbine by CFD Analysis

Jong-Ho Kim\*, Jong-Bong Kim\*\*† and Young-Lok Oh\*\*\*

\* Dept. of Mechanical System Design, Seoul Nat'l Univ. Sci. Tech.,

\*\* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. Sci. Tech.,

\*\*\* Enerwinkorea.

(Received November 1, 2012 ; Revised January 3, 2013 ; Accepted January 7, 2013)

**Key Words:** Wind Power Generator(풍력발전기), CFD(전산유체역학), Vertical-type Turbine(수직축 터빈)

**초록:** 수직축 풍력발전기의 발전 전력을 유동해석을 이용하여 예측하였다. 해석은 블레이드 회전 속도를 고정하고 그 회전 속도에서 토크를 반력으로 추출하였다. 여러 경우의 블레이드의 회전 속도에 대해 토크를 구하고 발전 용량을 계산하였다. 회전 속도에 따른 발전 토크와 발전 용량을 계산함으로써 최적의 발전기와 그 때의 회전 속도를 선정할 수 있었다. 또한, 블레이드의 개수와 블레이드의 형상에 대해 해석을 수행하여 그 영향을 분석하였다. 마지막으로 실험을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

**Abstract:** The performance of a vertical-type wind power generator system was predicted by CFD analysis. In the analysis, the reaction torque was calculated for a given rotational speed of the blades. The blade torque of a wind power system was obtained for various rotational speeds, and the generation power was calculated using the obtained torque and the rotational speed. The optimum generator specification, therefore, could be decided using the relationship between the generated power and the rotational speeds. The effects of the number of blades and blade shapes on the generation power were also investigated. Finally, the analysis results were compared with the experimental results.

### 1. 서론

최근 선진국을 중심으로 화석 에너지의 고갈과 환경 문제로 인해 친환경 에너지원원에 대한 관심이 크게 증가하였다. 친환경 대체 에너지로 풍력, 수력, 태양열 에너지가 대표적으로 연구되고 있다. 본 연구는 이 중에서 풍력에너지를 에너지 변환 효율의 예측에 관한 것이다. 풍력 에너지를 활용하기 위한 풍력 발전기 관련 연구가 최근 많이 진행되었다. 기존에는 대형 위주의 수평축 풍력터빈이 많이 연구되었지만, 최근에는 풍력 발전기의 많은 보급을 위해 소형에 대한 연구도 많이 진행되고 있다.

소형에서 보다 효율이 좋은 풍력 터빈을 개발하기 위해 여러 가지가 시도되고 있는데, 항력을

활용하는 수직축 풍력 터빈이 그 중 하나이다.

김중윤<sup>(1)</sup>은 수직축 풍력 터빈에서 효율에 영향을 주는 인자를 찾고 최대 효율을 얻을 수 있는 터빈의 날개 수, 날개폭 비, 날개의 각도 등을 제시하였다. 강원태와 신병록<sup>(2)</sup>은 수직축 터빈에 대하여 풍동실험 및 수치해석을 통한 에너지 변화 효율과 성능평가에 관하여 검토하고 풍속에 따른 최적 운전 조건에 대하여 검토하였다. 박준용 등<sup>(3)</sup>은 바람을 터빈 안쪽으로 유도해 주는 안내익(Guide Vane)의 입출구 면적비와 로터의 날개 받음각(Angle of Attack)의 효과를 실험적으로 분석하여 최적의 형상을 제안하였다. 류경중과 김동현<sup>(4)</sup>은 실험과 해석을 병행하여 해석 방법에 대한 검증을 수행하고, 자체 개발한 에어포일을 사용하여 풍력발전 시스템을 제작하여 그 효율성을 연구하였다.

이 외에 양력을 이용하는 수평축 풍력발전기에

† Corresponding Author, [jbkim@seoultech.ac.kr](mailto:jbkim@seoultech.ac.kr)

대한 연구도 많이 수행되었다. 김범석 등<sup>(5)</sup>은 2D로 에어포일에 대한 해석을 수행하고, 3D로 풍력 터빈의 효율을 예측하였다. 김홍관 등<sup>(6)</sup>은 복합재 블레이드의 안정성 확보를 위해 실규모 구조 시험과 해석을 수행하였고, 김덕수 등<sup>(7)</sup>은 소형풍력 터빈의 블레이드 체결부에 대한 응력해석을 수행하여 구조 안정성에 대한 연구를 하였다.

Meheri 등<sup>(8)</sup>은 이론적인 수식과 유한요소해석을 연동하여 해석하는 방법으로 블레이드의 굽힘-꼬임(Bend-Twist)를 해석하였고, 남운수 등<sup>(9,10)</sup>은 발전기 주축 및 날개의 부하를 측정하고 모니터링 하는 과정에서 부하의 보정 및 불확실성에 대해 연구하였고, 터빈 날개의 작동 조건 변화에 따른 발전 시스템의 동적을 해석하였다. 문채주 등<sup>(11)</sup>은 우리나라 지형 특성을 고려하여 풍력발전의 타당성을 분석하였고, 이명성 등<sup>(12)</sup>은 지형에 따른 발전기의 배치가 발전 효율에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 수직축 풍력 터빈의 날개의 개수와 터빈 내부에 바람의 관통 경로의 유무에 따른 유동해석을 수행하여 그 효과를 분석하였다. 안내익(Inlet Guide Vane)의 형상과 날개의 형상은 고정하였다. 또한 실험을 수행하여 해석의 결과와 비교하였다. 해석과 실험을 통해 CFD 해석으로 풍력 터빈의 효율을 비교적 잘 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

## 2. 터빈 형상 및 해석 모델

본 연구에서 제작 및 해석한 수직축 풍력 터빈의 날개는 Fig. 1과 같이 수직 방향으로 일정한 단면을 가진다. Fig. 1에 보인 날개의 아래와 위는 원판으로 막아 일체로 회전하는 구조이다. 그렇기 때문에 해석은 2차원으로 수행하였다. 터빈의 직경은 1.04 m, 높이는 1.0 m 이다. Fig. 2는 2차원 해석 모델을 보여준다. 터빈의 맨 앞쪽(위쪽)에 1차 안내익(Guide Vane 1)이 있고, 터빈으로 들어가는 바람의 힘을 최대한 활용하기 위해 그 안쪽에 2개의 2차 안내익(Guide Vane 2)을 추가하였다.

직사각형 내부를 해석 영역으로 설정하였고, 터빈의 안내익과 날개는 유체와 고체의 경계면을 묘사하는 Rigid wall로 처리하였다. 사각형 해석 영역의 위 부분은 바람이 불어오는 입구이고 속

도 경계조건(Velocity inlet)으로 하였고, 나머지 3면은 압력 경계조건 (Pressure outlet)으로 처리 하



Fig. 1 Shape of wind turbine blade

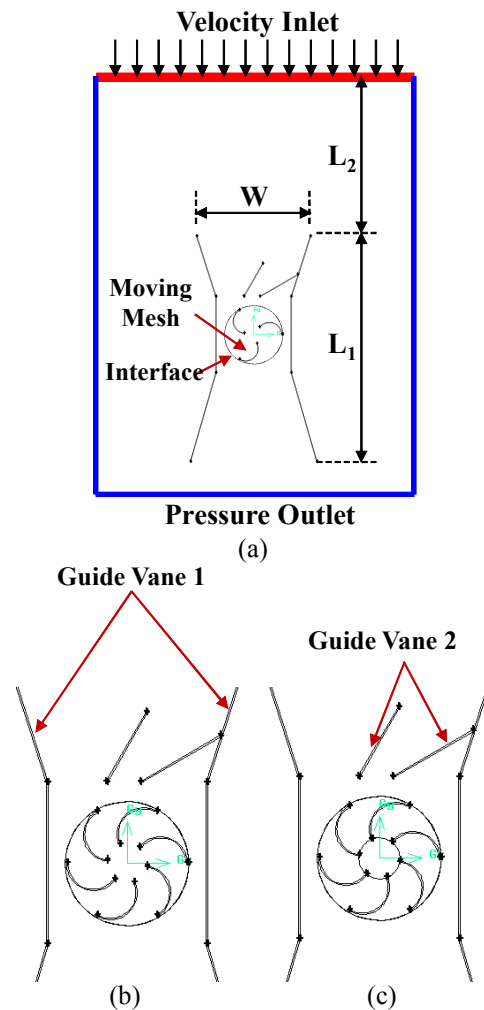


Fig. 2 2-dimensional analysis model: (a) Number of blades=3, open inside, (b) number of blades=6, open inside, (c) number of blades=6, closed inside

였고 대기압 조건을 부여하였다. Fig. 2(b)와 (c)도 같은 방법으로 모델링 하였고, 편의상 터빈의 형상만 도시하였다. 안내익을 포함한 터빈의 길이 ( $L_1$ )는 3.4m 이고 터빈 입구 폭(W)은 1.8 m이다. 안내익과 속도 경계조건이 주어진 지점 사이의 거리( $L_2$ )는 해석 결과에 큰 영향을 준다. 속도 경계조건은 그 지점에서 강제로 바람을 불어주기 때문에 안내익에 가깝게 하면 발전기의 효율이 크게 나오고, 멀게 하면 효율이 적게 나온다. 실제 현상에서는 바람이 속도가 넓은 공간에서 부여되고, 터빈에 가까워지면 속도가 저항으로 인해 속도가 줄어들게 된다. 그래서 정확하게 해석하기 위해서는 충분한 거리를 두고 해석을 수행해야 한다. 본 연구에서는 안내익과 속도경계조건 지점 사이의 거리를 바꾸어 가면서 해석을 수행하여 해석에 영향을 주지 않는 충분한 거리 ( $L_2/W=1.67$ )로 설정을 하였다.

날개의 회전 효과를 고려하기 위해 Fig. 2(a)의 원형 내부를 Moving Mesh로 하고 회전 속도를 주었고, 원으로 표시된 경계 부분은 Interface로 처리하였다. 실제 풍력발전기에서는 바람이 불면 발전기 토크와 바람에 의한 토크가 평형을 이루는 속도로 블레이드가 회전한다. 해석에서 이와 같은 현상을 구현하는데 어려움이 있어, 블레이드의 속도를 고정하고 그 속도에서 블레이드를 회전시키는 반력의 개념으로 토크를 구하였다. 이렇게 해석할 경우, 반력으로 계산된 값의 토크를 가지는 발전기를 사용하면 그 때 지정해준 속도로 회전한다고 분석할 수 있다. 이와 같은 방법으로 여러 가지 경우의 회전속도에 대해서 반력 토크를 구함으로써 발전 특성을 구할 수 있다. 해석은 Fluent로 수행하였고, 난류 모델로는 standard k- $\epsilon$  모델을 사용하였다.

### 3. 해석 결과

터빈의 날개 형상은 고정하였고, 날개의 개수와 속도에 대해 Table 1에 보인 경우에 대해 해석을 수행하였다. 최적의 블레이드 설계를 위해서는 블레이드 형상 최적화, 날개의 개수 최적화 등이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 최적화에 대한 부분은 수행하지 않았고, 개념 설계 과정에서 제안된 형상에 대해 발전 성능만을 우선적으로 확인하고자 하였다. 풍속에 대해서도 기동속도 부근인 5 m/s와 최고속도 부근인 12.5 m/s에서

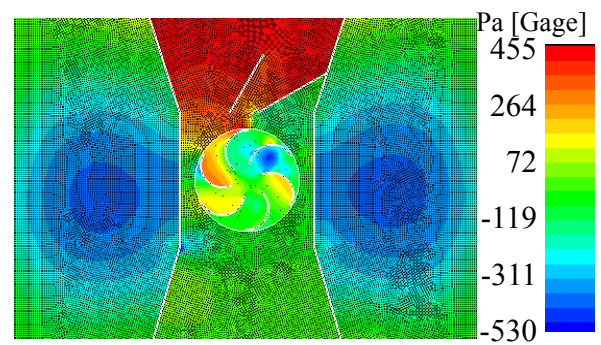
만 발전성능을 확인하였다. 본 논문은 개념설계 단계에서 발전 성능에 대한 예측 수준이기 때문에 이 정도 해석으로 검토가 가능하다고 판단된다. 풍속에 따른 발전기 제어 등의 상세설계가 필요한 경우에 추가적인 해석이 필요할 것이다.

풍속이 5 m/s인 경우에는 터빈의 회전속도를 50, 75, 100, 125, 150 rpm으로 설정하고 해석을 수행하였고, 풍속이 12.5 m/s인 경우에는 터빈의 회전속도를 50, 100, 150, 200, 250 rpm으로 설정하고 해석을 수행하였다.

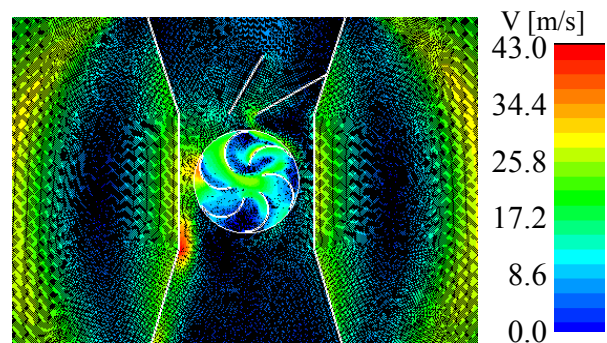
Fig. 3은 풍속이 12.5 m/s이고, 터빈의 날개의

Table 1 Analysis cases

No.	Number of blades	Wind velocity (m/s)	Inside wind path
1	3	5	Open (Fig.2 (a))
2	3	12.5	Open (Fig.2 (a))
3	6	5	Open (Fig.2 (b))
4	6	12.5	Open (Fig.2 (b))
5	6	12.5	Closed (Fig.2 (c))



(a) Pressure distribution

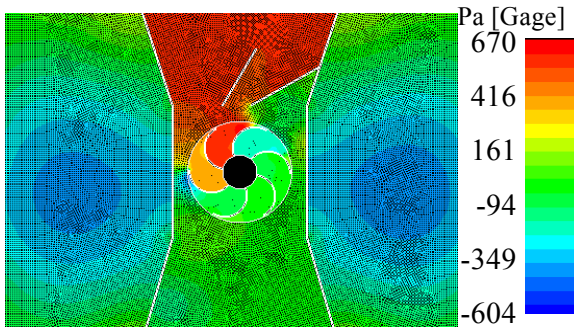


(b) Velocity vector plot

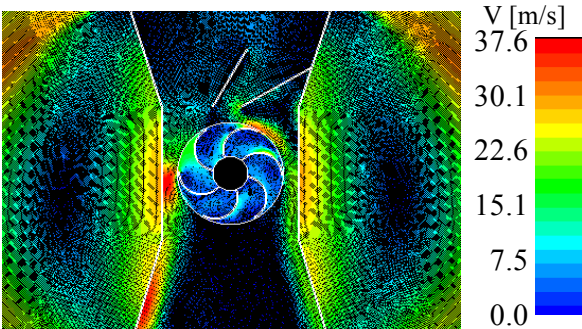
Fig. 3 Pressure and velocity vector plots (wind velocity=12.5 m/s, number of blades=6, open inside)

갯수가 6개, 날개의 회전속도 50 rpm, 그리고 날갯수가 6개, 날개의 회전속도 50 rpm, 그리고 날개 안쪽이 개방(Fig. 2(b))되어 있는 구조의 경우 해석한 결과이다. 날개 안쪽이 개방되어 있어서 바람이 앞쪽에서 뒤쪽으로 통과할 수 있는 구조이다. 결과를 보다 잘 볼수 있게 하기 위해 터빈 부분만 확대하여 도시하였다. 앞 장에서 언급하였듯이, 터빈에서 속도입구 (Velocity Inlet) 위치까지 거리(L<sub>2</sub>)가 짧은 경우 속도입구 부분의 압력이 대기압 보다 높았고, 입구쪽에 대한 L<sub>2</sub>의 길이의 비(L<sub>2</sub>/W)를 1.67로 했을 때는 속도입구 부분의 압력이 대기압과 같았다. 그래서 해석은 L<sub>2</sub>/W=1.67로 진행하였다. 터빈의 입구와 날개 사이의 압력이 높게 형성되고 옆 부분과 뒤 부분은 압력이 낮게 형성됨을 알 수 있다. 또한, 속도장 분포로부터 바람의 방향과 크기를 알 수 있다.

Fig. 4는 날개 안쪽이 막혀있는 경우(Fig. 2(c))의 압력과 속도 분포를 보여준다. Fig. 3과 비교했을 때 차이가 많이 남을 알 수 있다. Fig. 3(a)의 경우 날개 안쪽에서 바람을 받는 부분만 압력이 높아 날개를 회전시키려는 모멘트가 클 것으로 예측이 되지만, Fig. 4(a)의 경우는 날개 안쪽



(a) Pressure distribution



(b) Velocity vector plot

Fig. 4 Pressure and velocity vector plots (wind velocity=12.5 m/s, number of blades=6, closed inside)

전체가 압력이 높아서 날개를 회전시키려는 모멘트는 상쇄되어 크기 않을 것으로 예측이 된다. 그리고, Fig. 3(b)에서는 바람이 날개를 관통해서 지나가면서 날개를 회전시키는 것으로 보이고, Fig. 4(b)에서는 대부분의 바람이 케이스와 터빈의 사이로 지나감을 알 수 있다.

Fig. 5는 날개가 회전함에 따른 터빈에 걸리는 토크를 보여준다. 블레이드 토크는 블레이드 면에 걸리는 풍압, 면의 수직벡터, 그리고 회전축으로 부터 거리를 이용하여 Fluent에서 다음의 식으로 계산이 된다.

$$T = \int p \vec{n} \times \vec{R} dA \quad (1)$$

식 (1)에서  $p$ 는 압력,  $\vec{n}$ 는 미소면적의 수직 벡터, 그리고  $\vec{R}$ 은 회전축에서 미소면적까지의 거리 벡터이다. 날개가 회전함에 따라 토크의 변동이 있음을 알 수 있다. 실제로 발전에 이용되는 값은 이 값의 평균이다. 그래서 일정하게 반복이 되는 구간의 10회전 동안의 값을 평균을 구해서 발전기에 걸리는 토크로 하였다.

Fig. 6은 이렇게 구한 평균 토크와 일률을 보여준다. 일률은 토크와 회전속도를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$P = T \cdot \omega \quad (2)$$

식 (2)에서  $\omega$ 는 블레이드의 회전속도이다. 평균 토크는 회전속도가 빨라짐에 따라 점점 작아짐을 알 수 있다. 회전 속도가 빨라지면 바람이

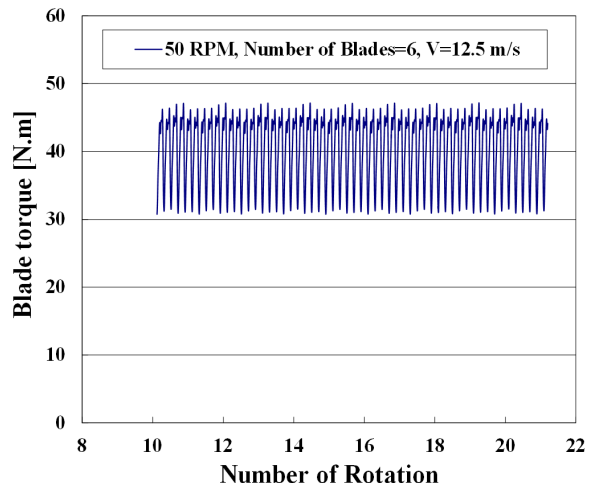


Fig. 5 Calculated blade torque (open inside)



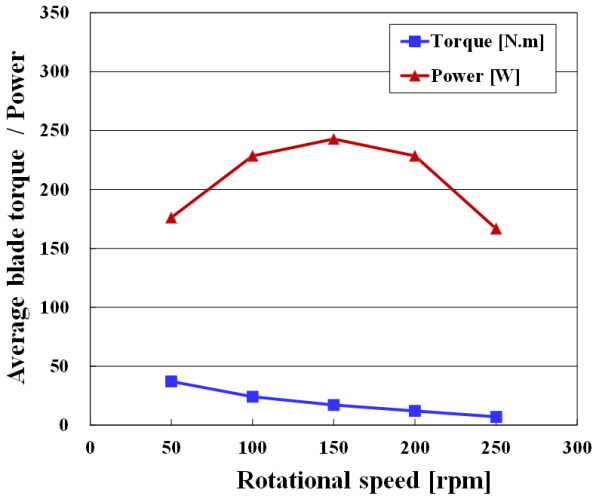
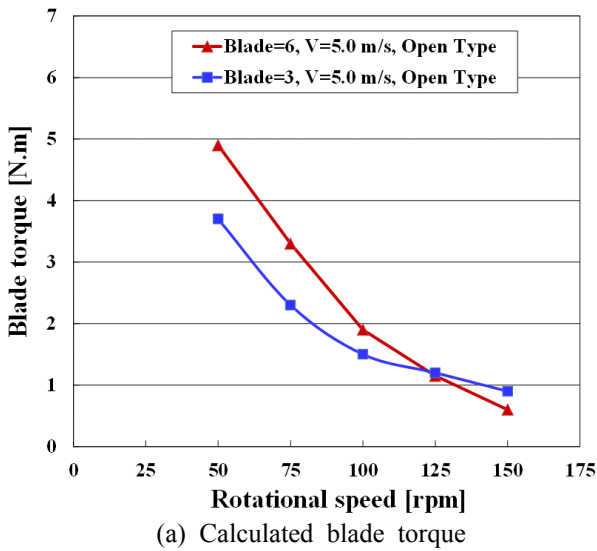
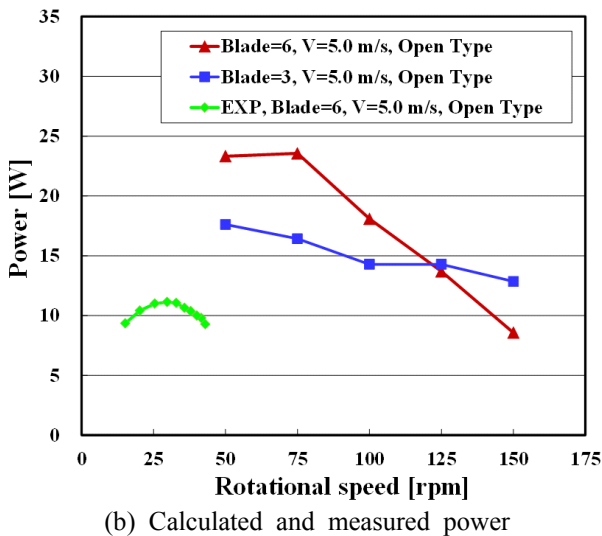


Fig. 6 Calculated average torque and power for rotational speed (number of blades=6, open inside)



(a) Calculated blade torque



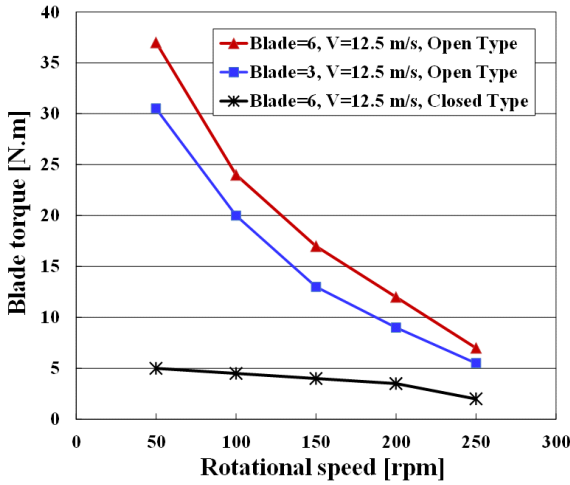
(b) Calculated and measured power

Fig. 7 Calculated torque and power for 5.0 m/s of wind velocity

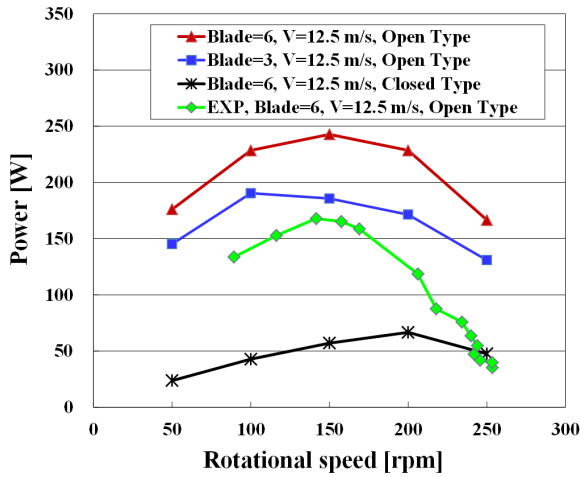
날개에 부딪히는 상대속도가 줄어들기 때문이다. 일률은 150 rpm까지 증가하다가 다시 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 결과로 보면, 풍속이 12.5m/s인 경우, 약 17 N.m의 토크가 걸리는 발전기를 사용하면 터빈은 150 rpm으로 회전하고 그때 발전량은 약 245 W임을 알 수 있다. 물론 전기적 손실과 기계적 손실을 무시했을 경우이다. 이와 같은 방법으로 다른 경우에도 해석을 수행하여 분석하였다.

Fig. 7은 풍속이 5.0 m/s일 때 해석한 토크와 일률을 보여준다. 저속 회전의 경우 날개의 개수가 6개인 경우에 일률이 크지만, 회전 속도가 빨라져 150 rpm인 경우에는 날개 3개인 경우가 보다 좋을 수 있다. 그리고, 약 3.4 N.m의 발전 토크를 가지는 발전기를 이용할 때, 터빈은 75 rpm으로 회전하고 최대 24 W의 발전을 할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 7(b)에 실제로 풍동 실험에서 측정된 발전 전력을 도시하였다. 실험에서 측정된 발전 전력과 해석에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고, 실험에서 회전 속도도 매우 느렸다. 이것은 추후 분석하겠지만, 기계적 손실과 전력변환 손실이 원인으로 사료된다.

Fig. 8은 풍속이 12.5 m/s일 때 해석한 토크와 일률을 보여준다. 전체적으로 날개의 수가 6개인 경우가 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 앞서서도 언급했듯이 약 17 N.m의 발전 토크를 가지는 발전기를 이용할 때, 터빈은 150 rpm으로 회전하고 최대 245 W의 발전을 할 수 있음을 알 수 있다. 그리고, 터빈의 안쪽부분이 막혀 있는 경우는 효율이 매우 낮음을 알 수 있다. 압력 분포(Fig. 4(a))를 보면 터빈 날개 안에 약 600 Pa의 압력이 균일하게 형성이 되었다. 즉 600 Pa의 압력이 앞쪽에 위치한 날개에는 회전 방향으로 힘을 가하고 뒤따르는 날개에는 회전 반대 방향으로 힘을 가한다. 결과적으로 회전 방향으로 가해지는 힘이 감쇄되기 때문에 효율이 작은 것으로 분석된다. Fig. 8(b)에 풍동 실험에서 측정된 발전 전력을 함께 도시하였다. 실험에서 측정된 발전 전력과 해석에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 7에 보인 풍속이 5 m/s인 경우에는 해석과 측정치의 차이가 약 15 W이고, Fig. 8에 보인 풍속이 12.5 m/s인 경우에는 효율의 차이가 약 75 W(30%)이다. 풍속과 회전속도가 커지면서 측정치와 해석치의 차이가 커졌음을 알 수 있다. 하



(a) Calculated blade torque



(b) Calculated and measured power

Fig. 8 Calculated torque and power for 12.5 m/s of wind velocity

지만, 풍속 5 m/s인 경우는 값이 작아서 큰 차이가 나는 것처럼 보인다. 회전속도와 풍속이 커짐에 따라 실험치와 해석치의 차이가 커진 것으로 보아 기계적 효율과 발전 효율의 손실로 사료된다.

기계적 손실은 회전 속도와 무관한 기본 손실과 회전속도에 비례하는 손실이 있다. 풍속 5 m/s의 결과인 Fig. 7에서 최대 손실이 15 W(40%)였기 때문에 속도에 무관한 기본 손실은 그 이하로 볼 수 있다. 블레이드 회전속도가 증가하면서 마찰 손실과 블레이드의 진동에 의한 손실로 기계적 손실이 커졌다고 분석된다. 실제로 실험 중에 고속회전시 진동이 발생하여 떨림이 관찰되었고 이로 인해 손실이 증가했다고 사료된다. 또한, 발전기로 전달된 운동에너지가 전기에너지로 변

환되는 데 있어서도 손실이 발생한다. 전기에너지를 운동에너지로 변환하는 모터의 경우 효율이 약 85%이다.<sup>(13)</sup> 발전기도 비슷하다고 가정할 경우 효율이 약 85%로 볼 수 있다. 결과적으로 발전기 효율을 85%로 가정할 경우, 발전기 전체 효율은 70% (풍속 12.5 m/s인 경우 실험 결과와의 차이 30%)이기 때문에 기계적 효율은 다음의 식으로 약 82%로 유추할 수 있다.

$$E_M = \frac{E_T}{E_G} = \frac{0.70}{0.85} = 0.82 \quad (3)$$

식 (3)에서  $E_M$ 은 기계적 효율,  $E_T$ 는 전체 효율, 그리고  $E_G$ 는 발전기 효율이다. 해석한 효율이 실험치와 차이가 있지만(Fig. 8) 두 결과의 경향은 비슷함을 알 수 있다. 이상의 결과로 볼 때, 기계적 손실과 전기적 발전 효율을 알 수 있다면, 전산유체역학 해석을 통해서 풍력 발전기의 효율을 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 결론

풍력 터빈의 발전전력을 예측하기 위해 CFD 해석을 수행하였다. 터빈의 회전속도별 발전 토크를 계산하여 발전되는 전력을 계산하였다. 해석은 날개의 수와 터빈 내부에 바람의 관통 경로 유무에 대해서 수행하였다. 또한 실물을 제작하여 풍동에서 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 날개의 수가 3개보다는 6개인 경우가 발전 전력이 큼을 알 수 있었다.

(2) 터빈 내부에 바람이 관통할 수 있는 경로가 있는 것이 발전 전력이 큼을 보였다. 바람의 관통 경로가 없는 경우 바람이 터빈 내에 적체되어 전방 날개를 회전시키려는 모멘트 외에 후방 날개를 뒤로 밀어서 회전 모멘트를 감소시키기 때문이다.

(3) 풍속이 5 m/s인 경우에는 기계적 손실과 발전기의 전기적 손실이 발전 전력과 비슷한 수준이어서 해석 오차가 크게 관찰되었다. 하지만, 풍속이 12.5 m/s인 경우에는 기계적 손실과 전기적 손실이 발전 전력에 비해 상대적으로 작아 해석 결과가 실험 결과와 비슷한 경향을 보였다. 이런 손실들로 인해 발전 전력을 정확하게 예측은 하지 못하였지만, 최적의 발전기 선정과 터빈의 설

계에는 충분히 활용이 가능하다고 판단이 된다.

### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Kum, J.-Y., 2005, Structure Design and Experimental Appraisal of the Drag Force Type Vertical Axis Wind Turbine, Busan National University, M. S. Thesis.
- (2) Kang, W. T. and Shin, B. R., 2010, "A Study on the Evaluation of Performance of Vertical Axial Type Wind Turbine," *Proceedings of the KSME fall Annual Meeting*, pp. 3397~3400.
- (3) Park, J.-Y., Lee, M.-J., Lee, S.-J., Lee and Lee, S., 2009, "An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of High-efficient, Small-Scale, Vertical-Axis Wind Turbine," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 33, No. 8, pp. 580~588.
- (4) Ryu, K. J. and Kim, D. H., 2011, "CFD Analysis and Experiment of a Ciromill Type Vertical-Axis Wind Turbine," *Proceedings of the KSCFE fall conference*, pp. 207~213.
- (5) Kim, B.-S., Kim, M.-E. and Lee, Y.-H., 2008, "Predicting the Aerodynamic Characteristics of 2D Airfoil and the Performance of 3D Wind Turbine using a CFD Code," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 32, No. 7, pp. 549~557
- (6) Kim, H. K., Kim, T. S., Lee, J. H., Moon, B. Y. and Kang, K. W., 2011, "Full Scale Structural Testing of Small Wind Turbine Composite Blade," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 11, pp. 1407~1413.
- (7) Kim, D. S., Jung, W. Y. and Jung, J., 2012, "Stress Analysis of the Blade Joint for a Small Wind Turbine," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 1, pp. 117~124.
- (8) Maheri, A., Noroozi, S. and Vinney, J., 2007, "Combined Analytical/FEA-Based Coupled Aero Structure Simulation of a Wind Turbine with Bend-Twist Adaptive Blades," *Renweable Energy*, Vol. 32, pp. 916~930.
- (9) Nam, Y. S., Park, M. Y. and Yoo, N. S., 2006, "A Calibration and Uncertainty Analysis on the Load Monitoring System for a Low Speed Shaft and Rotor Blade of a Wind Turbine," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 30, No. 5, pp. 560~567.
- (10) Nam, Y. S., Yoon, T. J. and Yoo, N. S., 2009, "Dynamic Characteristic Analysis of a Wind Turbine Depending on Varying Operational Conditions," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No. 1, pp. 42~48.
- (11) Moon, C.-J., Cheang, E.-H., Shim, K.-S., Jung, K.-S. and Chang, Y.-H., 2008, "Feasibility Study of Wind Power Generation Considering the Topographical Characteristics of Korea," *J. of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 28, No. 6, pp. 24~32.
- (12) Lee, M. S., Lee, S. H. and Hur, N. K., 2010, "A Numerical Study on the Effect of Mountainous Terrain and Turbine Arrangement on the Performance of Wind Power Generation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 34, No. 10, pp. 901~906.
- (13) Kim, B. T., 2011, "Efficiency Improvement Technology of Home Appliance Motor", *J. of the Korean Institute of Power Electronics*, Vo. 16, No. 6, pp. 39~44.