

# 풍력터빈 블레이드 공력설계 및 성능예측

김철완\* · 조태환\*

## Aerodynamic Design and Performance Prediction of Wind Turbine Blade

Cheolwan Kim\* · Tae-hwan Cho\*

### ABSTRACT

Characteristics of vertical and horizontal axis wind turbines are explained. The speed and direction of wind on the blade of the Darrieus type turbine changes very severely. Therefore dynamic stall happens periodically and the wake from the front blade deteriorates the performance of rear blades. Blade element momentum theory(BEMT) is widely utilized for aerodynamic design and performance prediction of horizontal axis wind turbine(HAWT). Computation analysis and wind tunnel test are also performed for the performance prediction.

### 초 록

수직축 및 수평축 풍력터빈의 특성 및 공력성능예측 방법에 대해 고찰하였다. Darrieus형 수직축 풍력터빈은 블레이드에 유입되는 바람의 속도 및 받음각의 변화가 매우 심해 Dynamic Stall 현상이 발생하고 앞면에서 발생한 Wake가 후면 블레이드의 공력특성에 영향을 준다. 수평축은 BEMT를 활용하여 형상설계 및 성능예측이 가능하고 전산해석 및 풍동시험을 통해 공력성능예측이 수행되고 있다.

Key Words: Vertical/Horizontal Wind Turbine(수직/수평축 풍력발전기), Blade Element Momentum Method(BEMT), Wind Turbine Performance Prediction(풍력발전기 성능예측)

### 1. 서 론

지구 온난화로 인해 야기된 친환경 에너지에 대한 관심은 풍력, 태양광 등 다양한 재생에너지에 대한 연구로 이어졌고 전 세계적으로 많은 투자가 이뤄지고 있다. 다양한 재생 에너지 원

가운데 풍력과 태양광은 그 잠재성과 효율성이 높아 집중적인 관심과 연구개발이 이뤄지고 있다. 풍력에너지를 활용하기 위한 연구는 다양한 풍력터빈 발전기의 개발을 가능하게 했는데 가로등의 전원을 공급할 수 있는 소형발전기부터 5MW이상의 전력을 생산할 수 있는 대형 발전기까지 그 종류는 매우 다양하다. 지구의 자전과 온도차에 의해 생성된 풍력에너지를 이용하려는 노력은 고대부터 이뤄졌는데 1980년대 이후 풍

\* 한국항공우주연구원 공력성능팀  
† 교신저자, E-mail: cwkim@kari.re.kr

력에너지를 전기에너지로 전환하여 활용하려는 노력은 유럽과 미국을 중심으로 이뤄져 왔고 덴마크나 독일은 전체 전력소비의 많은 부분을 풍력에너지에 의존하고 있다. 국내에서도 1990년대부터 풍력에너지 활용에 대한 연구가 대학을 중심으로 진행되었고, 2000년대에는 중공업 산업체를 중심으로 풍력발전에 대한 개발이 매우 활발히 진행되고 있다. 또한 정부도 풍력에너지 분야의 중요성을 인식하고 풍력산업을 육성하기 위해 많은 노력을 기울여 왔다.

일반적으로 풍력 발전기는 터빈의 회전축과 바람의 방향이 일치하는 수평축(Horizontal Axis Wind Turbine)과 회전축과 바람의 방향이 수직인 수직축(VERTICAL Axis Wind Turbine)으로 나뉜다. 수평축은 블레이드 단면에 발생하는 양력을 주로 이용하여 회전력을 확보하는데, 바람의 방향과 회전축의 방향이 일치하도록 터빈을 회전시켜줘야 한다. 따라서 수평축 터빈은 높은 에너지 효율을 갖지만 바람의 방향에 따라 요각을 조절하고 바람의 세기에 따라 피치각을 조절하는 등 보조 운용 장치가 필요하여 소형보다는 대형 터빈에 주로 활용되고 있다. 수평축 터빈 블레이드를 설계하기 위해서는 바람의 세기, 난류도, 오염 등에 대한 고려가 필요하며 발전단지를 설계하고 발전기를 효율적으로 활용하기 위해서도 풍자원에 대한 정확한 자료가 필요하다. 반면 수직축은 바람방향에 따른 성능의 변화가 없고 일반적으로 작은 풍속에서도 구동이 가능하다. 그러나 수평축에 비해 발전효율이 낮고 터빈을 지날 유동의 진동이 심해 높은 소음과 피로하중을 발생시킨다. 수직축 터빈은 블레이드 단면에 발생하는 양력을 이용하는 Darrieus 형과 항력을 이용하는 Savonius형으로 나뉜다.

본 논문에서는 수직축과 수평축 터빈 블레이드의 공기역학적인 특성을 고찰하고 공력성능 예측 방법에 대해 논하고자 한다.

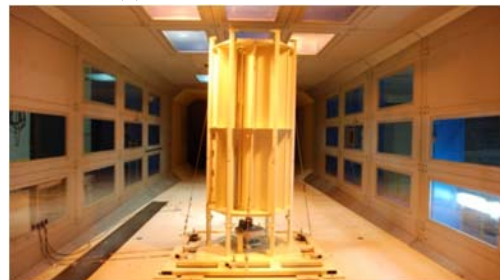
## 2. 수직축 풍력터빈 블레이드

수직축 풍력터빈의 공력특성을 고찰하기 위해 국내에서 개발된 Darrieus형과 Savonius형 풍력

터빈을 관찰하였다. Fig.1은 풍동시험을 통해 성능 측정중인 수직형 풍력터빈을 보인 것이다. Darrieus형 터빈은 블레이드 단면이 익형이며 블레이드에서 발생하는 양력을 활용하여 회전력을 발생시킨다. 총 5개의 블레이드로 이뤄져있으며 블레이드 양 끝단은 Winglet과 같은 역할을 할 수 있는 Fence가 설치되어 있다. Savonius형 풍력터빈은 Guide Vane을 활용하여 블레이드 효율을 높인 것으로 소음이 작고 회전하는 블레이드가 외부에 노출되지 않은 장점을 가지고 있다.



(a) Darrieus형 풍력터빈



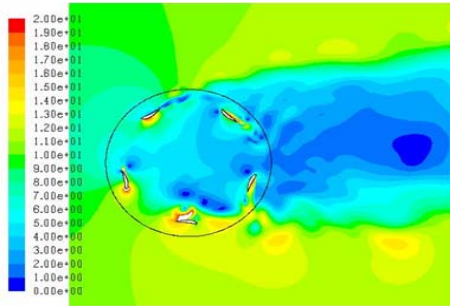
(b) Savonius형 풍력터빈

Fig. 1 수직축 풍력터빈

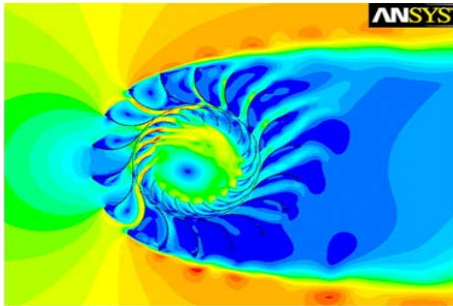
Figure 2는 수직축 풍력터빈 단면의 속도분포를 나타낸 것이다. 바람은 터빈의 왼쪽에서 유입되어 터빈을 지나 오른쪽으로 흐르는데 Darrieus형은 앞면의 블레이드에서 유도된 Wake가 후면의 블레이드의 공력특성에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 물론 끝단 회전 속도비(Tip Speed Ratio)에 따라 특성이 변화하지만 전체적인 특성은 유사하다. 따라서 터빈의 회전력은 블레이드가 앞면에 위치할 때 발생하고 그 외의 위치에서는 Wake에 의한 진동을 유발함을 알 수 있다. Savonius형은 Guide Vane을 통과한 바람이 내부의 블레이드, 특히 앞면의 블레이드에

유도되어 회전력을 발생시키는데 뒷면은 앞면에서 발생한 Wake에 의해 회전력 생성에 도움을 주지 못한다.

일반적으로 Savonius형은 터빈의 형태도 다양하고 공력특성의 변화도 심하여 체계적인 분석이 어려운 반면 Darrieus형에 대한 공력특성 분석은 다양하게 시도되었다[1].



(a) Darrieus형 풍력터빈



(b) Savonius형 풍력터빈

Fig. 2 수직축 풍력터빈 단면의 속도 분포

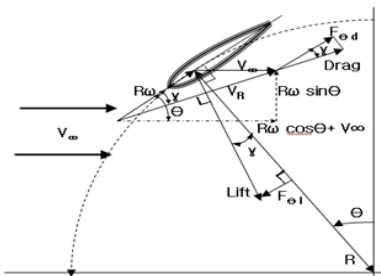


Fig. 3 회전하는 블레이드 단면도

Figure 3은 회전하는 블레이드 단면도이다. 이 때,  $\theta$ 는 방위각이고  $\omega$ 는 각속도,  $V_R$ 은 익형에 대한 바람의 상대속도,  $\alpha$ 는 받음각,  $\beta$ 는 블레이드 불임각(Pitch Angle),  $F_\theta$ 는 회전방향 힘 그리

고  $\lambda$ 는 끝단속도비( $R\omega/V_\infty$ , Tip Speed Ratio)이다. 그리고 익형에 대한 상대속도 및 받음각은 다음과 같다 .

$$V_R = V_\infty \sqrt{(1 + \lambda \cos \theta)^2 + (\lambda \sin \theta)^2} \quad (1)$$

$$\gamma = \theta - \tan^{-1} \left( \frac{\lambda \sin \theta}{1 + \lambda \cos \theta} \right) \quad (2)$$

식(1)과 (2)는 끝단속도비의 함수로서 끝단속도비에 따라 매우 다양한 특성을 나타낸다. Fig. 4는 방위각 및 끝단속도비에 따른 익형의 상대속도를 나타낸 것인데 방위각의 크기가 180도 이하에서는 속도가 감소하고 이후에는 증가하는 감속과 증가가 주기적으로 이뤄짐을 알 수 있다. Fig. 5에 의하면 끝단속도비가 1이하의 경우에는 앞면에서 양의 받음각을, 후면에서는 음의 받음각을 갖는다. 또한 받음각 변화도 매우 크다.

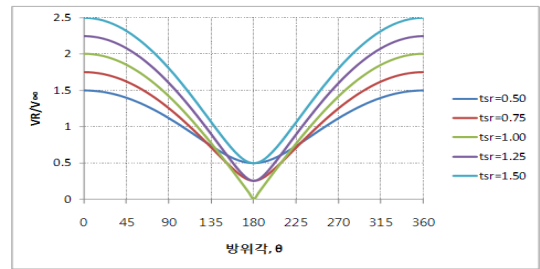


Fig. 4 방위각 및 TSR에 따른 익형의 상대속도

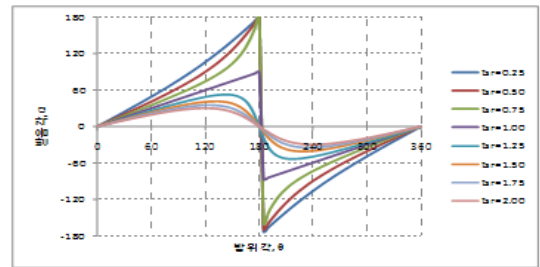


Fig. 5 방위각 및 TSR에 따른 익형의 받음각

### 3. 수평축 풍력터빈 블레이드

수평축 풍력터빈 블레이드의 성능예측은 일반적으로 3가지로 분류할 수 있는데 BEMT(Blade Element Momentum Theory), CFD 및 풍동시험이다. BEMT는 Fig. 6에 표현된 것처럼 블레이

드를 다수의 Element로 나누고, 단일 Element내에서는 회전속도 및 바람의 속도가 일정하고 익형의 공력특성도 일정하다고 가정한 후 Element에 발생하는 공력성능을 예측하여 이 값들을 합하여 블레이드의 공력성능을 예측하는 방법이다. 따라서 Element의 수가 많을수록 그 예측의 정확도는 증가하지만 블레이드 Span 방향 흐름에 의한 영향은 고려하지 못하는 단점이 있다. 이 방법을 활용하기 위해서는 Element별 익형의 공력특성을 예측하는 것이 필요한데 이 또한 전산해석과 풍동시험으로 예측할 수 있다.

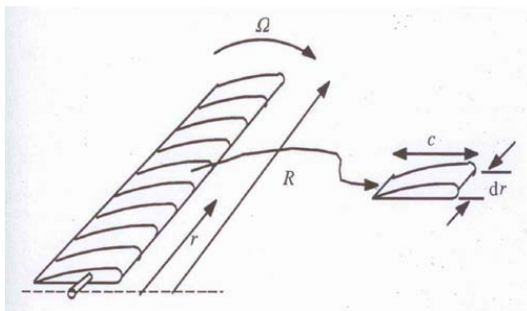


Fig. 6 블레이드 Element Method의 개략도

Figure 7은 블레이드 단면의 형상과 공력 분석을 위한 개략도이다. 블레이드에 유입되는 바람의 크기는 Axial Induction Factor(=a)가 고려된  $U(1-a)$ 이고 회전력은 식(3)과 같다. 이때 B는 블레이드 수이고  $a'$ 은 블레이드에서 생성된 Wake에 의한 Tangential Induction Factor이다.

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) \quad (3)$$

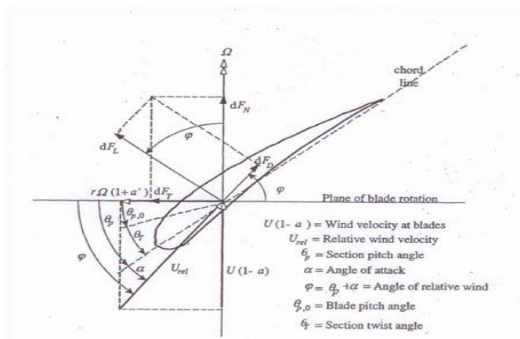


Fig. 7 블레이드 단면과 공력분석 개략도

익형 및 풍력터빈의 공력성능 예측은 CFD를 활용하여 수행될 수 있는데 블레이드의 크기나 경계조건의 제약이 없어 향후 활발히 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만 정상운행 조건에서도 블레이드 일부에서는 유동의 박리가 발생하는데 박리영역에 대한 난류모델의 부정확성으로 인해 예측된 성능의 정확도가 감소할 수 있다.

풍동시험은 항공기의 공력특성 분석 등에 활용되는 매우 신뢰성 있는 방법으로 공기력과 관련된 다양한 분야의 연구 개발에 활용되고 있다. 풍력터빈의 성능 예측을 위해서도 유용한 방법이지만 MW급 대형 블레이드의 공력특성 예측에는 어려움이 있는데 이는 블레이드 모델의 크기 차이 때문이다.

#### 4. 결 론

풍력터빈은 수직축과 수평축으로 크게 나뉘며 수직축은 주로 소형터빈에 활용되고 대형터빈은 수평축의 형태를 갖는다. 공력설계 및 분석에는 BEMT, 전산해석 및 풍동시험이 주로 이용되는데 형상설계 및 성능예측을 위해서는 각 방법의 장단점을 파악하고 활용하는 것이 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(2009T100200854)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

#### 참 고 문 헌

1. Paraschivoiu, I., "Wind Turbine Design with Emphasis on Darriues Concept", Ploy-technic International Press
2. Lindenburg, C., 2004, "Modeling of rotational augmentation based on engineering considerations and measurements", ECN-RX-04-132

3. Schepers, J. G., and Snel, H., 2007, "Model Experiments in Controlled Conditions, Final report", ECN-E-07-042, Energy Research Center of the Netherlands, ECN
4. Simms, D., Schreck, S., Hand, M., Fingers, L. J., 2001, "NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements", NRELTP-500-29494, The National Renewable Energy Laboratory, NREL