

수직축 풍력터빈 블레이드의 공기역학적 특성

신지영† · 손영석* · 차득근** · 이철균** · 황이철***

(원고접수일 : 2006년 8월 25일, 심사완료일 : 2006년 10월 10일)

Aerodynamic characteristics of a vertical axis wind turbine blade

Jee-Young Shin† · Young-Seok Son* · Duk-Guen Cha** · Cheol-Gyun Lee** · I-Cheol Hwang***

Abstract : The objective of this study is to investigate the aerodynamic characteristics of a vertical axis wind turbine blade as the basic study of a design of a vertical axis wind turbine. The lift and drag coefficients of the various shape of the vertical axis wind turbine blades are analyzed and compared using the CFD code Fluent. To validate the numerical analysis, the predicted results of the Fluent are compared with those of the Xfoil code and the experimental results. We conclude that the program Fluent can be used to predict the aerodynamics of the wind turbine blade. By comparing the predicted results of the aerodynamic characteristics of the different shape of the blades, an appropriate shape of the blade is suggested to design the vertical axis wind turbine blade.

Key words : Vertical axis wind turbine(수직축 풍력터빈), Blade shape(블레이드 형상), Aerodynamic characteristics(공기역학적 특성), Numerical analysis(수치해석)

기호설명

A	: 면적, m^2	V	: 속도, m/s
AOA	: 영각(Angle of attack), $^\circ$	p	: 압력, Pa
c	: 코드 길이, m	x	: x축 좌표, m
C_D	: 항력계수		그리스 문자
C_L	: 양력계수	ρ	: 밀도, kg/m^3
C_p	: 압력계수		하첨자
D	: 항력, N	∞	: 자유유동
L	: 양력, N		

† 책임저자(동의대학교 기계공학과), E-mail: jyshin@deu.ac.kr, Tel: 051)890-1650

* 손영석(동의대학교 기계공학과)

** 차득근, 이철균(동의대학교 전기공학과)

*** 황이철(동의대학교 메카트로닉스공학과)

1. 서 론

기존의 에너지가 고갈되고 지구환경 문제에 대한 의식이 높아지면서 재생 가능한 자연에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 관점에서 풍력발전 시스템은 전 세계적으로 비중이 높아지고 있는 유망한 재생 가능 에너지 시스템이다.

풍력터빈에는 수평축 및 수직축 두 가지 종류가 있으며 그 성능에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 김동건 등⁽¹⁾은 수직축 터빈의 구조설계 및 실험을 통한 터빈 성능의 평가를, 김유탉 등⁽²⁾은 수평축 풍력터빈의 성능평가 및 유동해석을 수행하였으며, 김준모 등⁽³⁾은 블레이드의 풍동실험을 통해 최적설계에 대한 방향을 제시하였다.

위의 연구자들이 풍력터빈 전체에 대한 유동실험을 통한 성능평가를 주로 한 반면에, Drela & Giles⁽⁴⁾는 익형 주위의 유동분석을 위한 점성/비점성 해석방법을 개발하였으며, Fukudome 등⁽⁵⁾은 영각이 비교적 큰 수직축 터빈 날개의 박리를 조절하기 위한 연구를 수행하였다. Kamoun 등⁽⁶⁾은 풍력터빈 날개를 설계하기 위하여 익형을 따라 와류를 분포시키는 해석방법을 완성하였다. Giguere & Selig⁽⁷⁾는 실험을 통해 양력/항력비를 조사하여 최적의 날개형상을 결정하고자 하는 연구를 수행하였으며, Zhang⁽⁸⁾은 수직축 풍력터빈 날개를 설계하기 위한 방법을 정립하였다.

수직축 풍력터빈(Vertical axis wind turbine: VAWT)은 기존의 수평축 풍력터빈(Horizontal axis wind turbine: HAWT)에 비해 몇 가지 장점이 있다. HAWT는 바람의 방향에 따라서 효율이 달라지기 때문에 날개의 회전 평면을 제어해야 하지만, VAWT는 바람의 방향과 무관하게 작동한다. 터빈 축이 수직으로 설치되기 때문에 발전기나 기어박스과 같은 무거운 부품들을 지표면에 설치할 수 있으므로 초기 건설비용이나 유지보수비용이 적게 든다. 또한 HAWT에 비해 더 낮은 선단 속도비에서 최대 동력계수를 얻을 수 있고 유동 소음도 더 적다는 장점이 있다. 그러나 VAWT는 유체역학적 특성이 불분명하다는 단점이 있다. 일정한 바람이 불더라도 수직축 날개에 상대

적인 유동방향과 속도는 1회전하는 동안 주기적으로 변화하며 이러한 주기적인 유동은 공기역학적 성능을 감소시킨다. 또한, 큰 기동 토크를 요구할 뿐만 아니라 풍력 에너지 회수율이 낮아 넓은 전용 면적이 필요하다는 단점을 가지고 있다⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾.

프로펠러 블레이드(propeller blade)를 사용하는 수평축 풍력발전시스템은 작은 기동 토크에서도 운전이 가능하고, 수직축 풍력시스템보다 풍력에너지 회수율이 높다. 그러나 수평축형은 소음 공해가 심하며, 바람의 방향이 변할 때 마다 출력 변동이 크게 발생한다는 점이 매우 큰 단점으로 지적되고 있다.

따라서 위의 문제를 해결할 수 있는 개방형 풍력터빈 및 풍력발전 시스템의 개발이 우리나라의 풍황에서 절실하게 요청되고 있는 실정에 있다고 할 수 있다. 이러한 측면에서 수직축 또는 수평축 하나의 방식을 선택하기에는 앞서 서술한 문제점을 극복하기가 쉽지 않다. 이러한, 수직축 및 수평축 날개 방식 풍력발전 시스템의 단점을 극복하기 위해서, 본 연구팀은 수직축 풍력터빈과 수평축 풍력터빈의 발전시스템 구조를 융합하는 복합방식의 풍력발전 시스템에 대한 연구를 수행하고 있다. 서로 회전수와 토크 등이 다른 두 터빈의 출력 결합 시 발생할 수 있는 손실을 최소화할 수 있는 시스템에 대하여 연구 중이다. 복합형 터빈은 상부에 수평축 터빈을 하부에 수직축 터빈을 설치하여, 두 터빈에서 나오는 기계적 에너지를 기계적 방식을 이용하거나 유압을 이용하여 결합한 구조를 가지고 있다.

본 연구는 복합형 터빈 중 수직축 터빈 날개의 설계를 위한 기초연구로서, 수직축 터빈의 날개 형상에 대한 공기역학적 특성을 살펴보는데 그 목적이 있다. 기존의 연구들이 주로 정해진 터빈 날개 형상을 기준으로 풍력터빈에 장착하고 터빈의 성능을 검토하는 방법을 택하고 있기 때문에, 터빈 날개 형상이 변화함에 따라 공기역학적 특성이 어떻게 변화하는가에 대한 기초연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 다양한 형상의 터빈 날개에 작용하는 항력과 양력을 열유동해석 전용 프로그램인 Fluent⁽¹²⁾를 이용하여 수치해석으로 구하고자 한다. 계산결과를 2차원 익형해석 전용 프로그램인

Xfoil^{[4],[13]}의 계산결과와 비교하였으며, Fukudome 등^[5]의 실험결과와도 비교하여 Fluent 해석결과의 타당성을 검토하였다.

해석결과를 바탕으로 익형(airfoil), 평판(flat plate), 반원(semi circle), 원호(circular arc) 모양의 서로 다른 4가지 날개 형상의 항력과 양력을 Fluent를 이용하여 해석하였다. 그 결과를 비교하여 수직축 풍력터빈에 적합한 모델을 제시할 수 있는 방법론을 검토하였다.

2. 해 석

2.1 해석 프로그램

본 연구에서는 다양한 형상의 수직축 풍력터빈 날개에 작용하는 항력과 양력을 수치해석적으로 구하기 위해 열유동해석 전용 프로그램인 Fluent를 이용하였으며, Fluent 해석결과의 타당성을 검토하기 위한 보조 프로그램으로 2차원 익형해석 전용 프로그램인 Xfoil을 사용하였다.

Fluent는 유한체적법(finite volume method)을 이용하여 질량, 운동량, 에너지 보존방정식의 해를 구하며, 비압축성 영역에서 극초음속 영역 전반에 걸친 모든 영역에 적용할 수 있는 범용 전산 열유동해석 프로그램이다. Fluent는 향상된 수렴성을 갖는 multigrid 방법을 이용하고 다양한 해석 기법을 채택하여 광범위한 속도영역의 유동장 해석에 있어 최적의 효율과 정확성을 갖는다^[12].

Xfoil은 점성-비점성 상호작용 기법(viscous-inviscid interaction technique)을 사용하는 2차원 익형 설계 및 해석 전용 프리웨어(freeware)로서, 컴퓨터에서 사용이 용이하고 민감도 분석을 하는데 많은 장점을 갖고 있다. Xfoil은 다양한 형상의 익형에 대해 다양한 Reynolds 수와 영각(angle of attack)에서 공기역학적 성능을 해석할 수 있다. Xfoil의 수치해석 방법은 익형에 대해 점성 경계층 형성과 자유 층류-난류 천이모델이 결합된 비점성 패널방법(inviscid panel method)에 기초를 두고 있다^[4, 13].

2.2 모델 및 해석방법

해석에 사용한 4가지 VAWT 날개 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 익형 모델은 NACA 시리즈 중 코드 길이가 1 m인 NACA0018을 대상으로 선정하였다. VAWT 날개의 형상에 따른 성능비교를 위한 다른 형상으로는 평판, 반원, 원호 모양을 선정하였으며, 평판, 반원, 원호 모양의 두께는 5 cm, 코드 길이는 1 m로 통일하였다. 영각은 그림에서와 같이 왼쪽 위에서 바람이 불어올 때를 양(+)으로 정의하였다.

Fluent에서는 1 m 길이의 해석 대상에 대하여 29x20 m의 계산영역을 설정하였으며, 각각의 형상에 대하여 격자수가 다소 다르기는 하지만 약 50,000~60,000개의 격자를 생성하였다.

유동은 2차원 난류 k-epsilon 모델을 사용하였고, 계산영역 내 입구경계는 균일한 속도, 출구경계는 압력이 대기압과 같다는 조건을 주었다. Reynolds 수는 3.0×10^5 로 설정하였으며, 영각은 0°에서 20°까지 변화시켰다.

또한 Fluent 계산결과의 타당성을 검증하기 위해, NACA0018 익형을 대상 날개 형상으로 하여 Xfoil을 이용하여 계산을 수행하였다. Reynolds 수는 비교를 위해 Fluent로 계산한 경우와 동일하게 적용하였으며, 마찬가지로 영각도 0°에서 20°까지 변화시키면서 익형에 대한 양력계수, 항력계수, 압력계수 분포를 계산하고, 그 결과를 Fluent 계산결과와 비교하였다.

3. 결 과

3.1 해석결과의 비교

Fluent 해석결과의 타당성을 입증하기 위하여 날개형상이 익형인 NACA0018 형상에 대해 영각을 0~20°로 변화시켜 가면서 항력계수와 양력계수를 계산하였고 그 결과를 Xfoil계산결과와 Fukudome 등의 실험결과^[5]와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다.

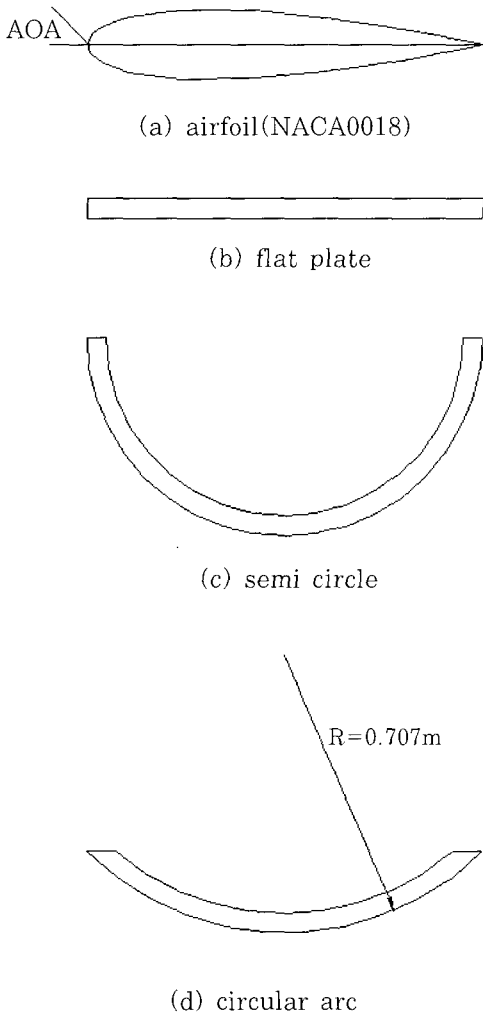


Fig. 1 Shape of the VAWT blade

항력계수와 양력계수의 정의는 다음과 같다.

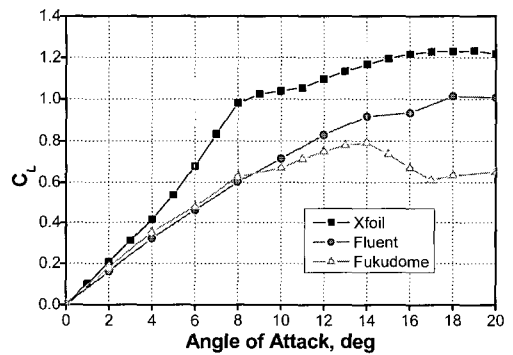
$$C_D = \frac{D}{\rho V^2 A/2} \tag{1}$$

$$C_L = \frac{L}{\rho V^2 A/2} \tag{2}$$

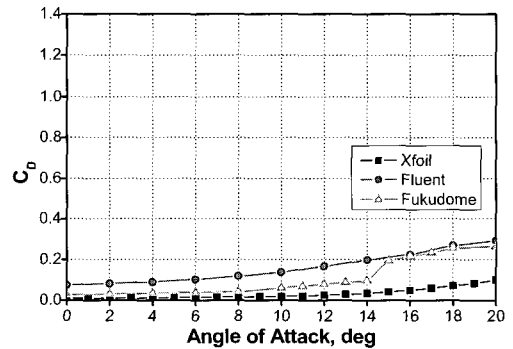
Fukudome 등의 실험결과에 의하면 영각 9° 근처에서 유동박리를, 영각 12°~16° 부근에서 대규모 박리를 관찰할 수 있는 것으로 나타나고 있다. Fluent와 Xfoil은 유속과 익형의 형상, 영각 등의

주어진 조건에서 유동 진행방향의 양력/항력계수의 변화, 박리점의 위치 등을 예측하는데는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나, Fig. 2에 나타낸 것이 국소적인 양력/항력계수가 아니라 영각이 변화할 때 양력/항력계수의 평균값이라는 것을 고려하면, 박리의 강도, 이후의 유동 형태 등에 의해 영향을 받는 실험결과까지 수치해석으로 정확하게 예측해 낼 수는 없는 것으로 판단된다.

계산된 항력계수와 양력계수의 값과 그 변화 경향을 관찰하여 볼 때, Fluent와 Xfoil이 실험결과를 어느 정도 잘 반영하고 있는 것으로 보이며, 양력계수는 Fluent가 좀 더 정확히 예측하는 것으로 판단된다. 한편, Xfoil은 익형에 대해서만 계산 가능한 프로그램이기 때문에 다른 형상에 대해서도 계산 가능한 Fluent를 이용하여 연구를 진행하였다.



(a) Lift coefficient



(b) Drag coefficient

Fig. 2 Lift/drag coefficient of NACA0018 with angle of attack

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\rho V^2 / 2} \quad (3)$$

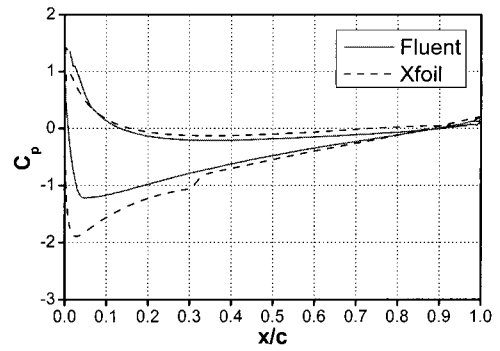
국소 영역에서 두 계산 결과가 비교적 일치하고 있으나 익형의 선단부에서는 많은 차이를 보이고 있다. 이는 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하는 Fluent보다 비점성 패널방법을 이용하는 Xfoil이 유동의 변화가 급격하게 일어나는 선단부에서의 유동형태를 예측하는 것이 미흡하기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 날개 형상의 비교

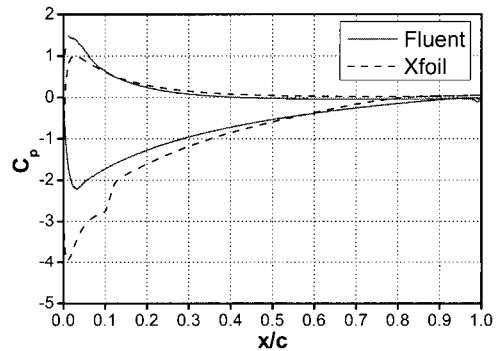
VAWT에 사용되는 날개 형상에 대한 공기역학적 특성을 살펴보기 위해, 4가지의 날개 형상에 대해 영각이 0° , $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$ 인 경우에 항력과 양력을 Fluent로 계산한 결과를 Table 1과 Fig. 4에 나타내었다. NACA0018 익형과 평판은 코드길이에 대해 대칭이어서 영각의 부호에 관계없이 항상 같은 양의 값이 나오기 때문에 하나의 값만을 표시하였다.

반원과 원호 형상의 경우 영각이 -10° , -20° 일 때 양력계수가 음의 값을 보이고 있다. 이는, 자유유동의 면적이 반원과 원호 형상의 볼록한 면에서 줄어들기 때문에 유동속도가 빨라지고, 따라서 압력이 낮아지기 때문에 오목한 쪽에서 볼록한 쪽으로 양력이 발생한다는 것을 뜻한다. 이때는 바람의 반대 방향으로 양력이 작용하여, 날개가 바람이 부는 반대 방향으로 움직이려고 한다는 것을 뜻한다. 즉, NACA0018 익형과 평판 형상의 날개는 바람의 방향에 관계없이 항상 양의 양력계수를 갖는 반면에, 반원과 원호 형상의 날개는 바람의 방향에 따라 양력은 음의 양력계수를 갖는다는 것을 알 수 있다.

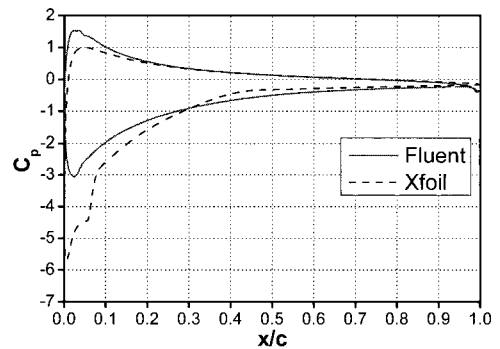
음의 양력계수를 발생시키는, 즉 바람이 부는 반대 방향으로 움직이려고 하는 반원과 원호 형상의 날개를 VAWT에 장착하여도 전체적인 원하는 성능은 얻을 수 있다. 예를 들어 반원형 날개 2개가 대칭으로 설치된 VAWT에 대하여 고려해보자. 영각이 -10° 라면 양력계수가 -0.490 인데 반대편 날개는 영각이 $+10^\circ$ 이므로 양력계수가 1.631 이고, 두 날개를 움직이는 양력의 합력은 양의 값을 갖게 되어 결국 바람이 부는 방향으로 작용하게 된다.



(a) AOA = 6°



(b) AOA = 12°



(c) AOA = 18°

Fig. 3 Comparison of the pressure coefficient

VAWT에 장착되는 날개는 양력이 크고 양력과 항력의 비율이 클수록 발전에 유리하다. 이러한 관점에서 각 형상의 특징을 살펴보면 NACA0018 익형이나 평판 형상보다는 반원이나 원호 형상의 날개가 양력이 더 크다는 것을 알 수 있다. 반원이나

원호 형상의 날개는 바람의 방향에 따라 음의 양력이 발생할 수 있지만, 앞서 설명한 바와 같이 VAWT에 대칭적으로 설치되기 때문에 양의 양력과 음의 양력의 합력은 NACA0018 익형이나 평판 형상보다 더 크게 나와서 전체적인 성능은 더 우수하게 된다. 양력과 항력의 비율은 원호 형상의 날개가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 반원 형상의 경우 원호 형상에 비해 양력계수는 그다지 작은 편이 아니지만 항력계수가 크기 때문에 양력과 항력의 비율은 원호 형상보다 작게 나타난다. 그러므로 본 연구에서 수행한 계산범위 내에서는 4가지 형상의 날개 중 원호 형상의 날개가 VAWT에 장착되었을 때 가장 우수한 성능을 낼 것으로 판단된다.

Table 3 Comparison of the lift and drag coefficient
(a) AOA=0°

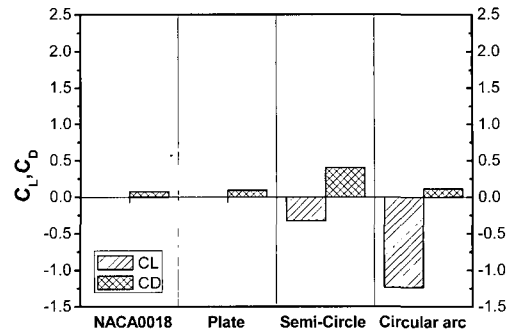
Shape	AOA	C _L	C _D	C _L /C _D
NACA0018	0	0	0.076	0
Plate	0	0	0.096	0
Semi circle	0	-0.322	0.405	0.80
Circular arc	0	-1.234	0.115	10.7

(b) |AOA|=10°

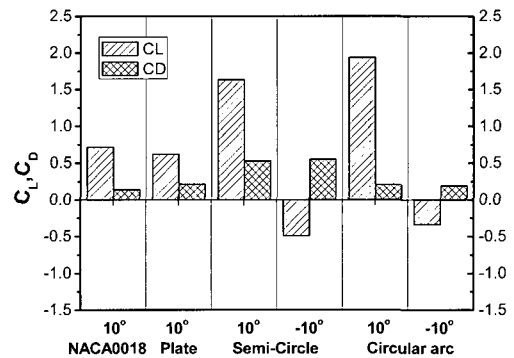
Shape	AOA	C _L	C _D	C _L /C _D
NACA0018	10	0.715	0.139	5.16
Plate	10	0.622	0.214	2.91
Semi circle	10	1.631	0.526	3.10
	-10	-0.490	0.551	0.89
Circular arc	10	1.939	0.210	9.21
	-10	-0.332	0.193	1.72

(c) |AOA|=20°

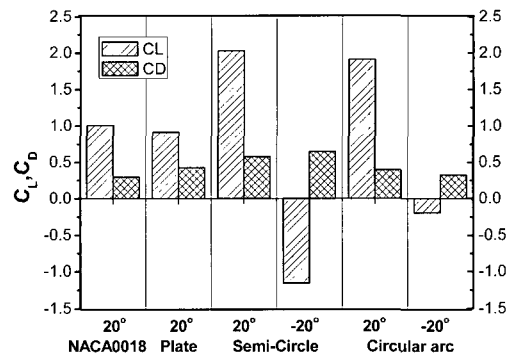
Shape	AOA	C _L	C _D	C _L /C _D
NACA0018	20	1.007	0.293	3.44
Plate	20	0.912	0.424	2.15
Semi circle	20	2.029	0.574	3.64
	-20	-1.157	0.644	1.79
Circular arc	20	1.912	0.396	4.83
	-20	-0.192	0.323	0.594



(a) AOA=0°



(b) AOA=10°(-10°)



(c) AOA=20°(-20°)

Fig. 4 Comparison of the lift and drag coefficient

4. 결 론

본 연구는 수평/수직축 복합형 풍력터빈을 개발하기 위한 기초단계로서, 수직축 터빈의 날개의 형상에 따른 공기역학적 특성을 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열유동해석 전용 프로그램인 Fluent를 사용하여 익형의 공기역학적 특성을 해석하였다. NACA0018 익형에 대한 양력과 항력 계산결과를 타 연구자의 실험결과 및 비점성 패널방법을 사용하는 소프트웨어인 Xfoil의 해석결과와 비교해본 결과 유사한 경향을 보였다.

(2) 익형 주위의 국소값의 비교를 위하여 Fluent와 Xfoil로 계산한 압력계수를 비교하였다. 국소 영역에서 두 계산 결과가 비교적 일치하고 있으나, 유동의 변화가 급격하게 일어나는 익형의 선단부에서는 Xfoil의 유동형태 예측이 다소 미흡하였다.

(3) 익형, 평판, 반원, 원호 등 4가지 서로 다른 형상에 대하여 영각이 0° , $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$ 인 경우에 양력계수와 항력계수를 살펴보았다. 원호 형상의 날개가 양력의 합력이 크고 양력계수와 항력계수의 비율도 비교적 크게 나타나는 것을 확인하였다. VAWT에 장착되는 날개는 양력이 크고 양력계수와 항력계수의 비율이 클수록 발전에 유리하다는 것을 고려할 때, 본 연구의 계산 범위에서는 4가지 형상의 날개 중 원호 형상의 날개가 가장 유리할 것으로 판단되나, 다른 형상과 다른 경계조건에 대해서도 후속 연구가 필요할 것으로 고려된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에 의거하여 기초전력연구원(R-2005-7-031)지원으로 수행된 과제임.

참고문헌

[1] 김동건, 금중현, 윤순현, "수직축 항력식 풍력터빈의 구조설계 및 실험평가", 대한기계학회 논문집 B 제30권, 제3호, pp. 278-286, 2006.

[2] 김유택, 김범석, 김정환, 남청도, 이영호, "CFD에 의한 500kW급 수평축 풍력발전용 터빈의 성능평가 및 유동해석에 관한 연구", 유체기계저널, 제5권, 제4호, pp. 32-39, 2002.

[3] 김준모, 오세중, "풍력터빈 블레이드의 항공역

학적 최적설계 및 풍동실험을 통한 검증", 한국항공우주학회지, 제27권, 제7호, pp. 21-29, 1999.

- [4] M. Drela and M. B. Giles, "Viscous-Inviscid Analysis of Transonic and Low Reynolds Number Airfoils", AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1347-1355, 1987.
- [5] K. Fukudome, M. Watanabe, A. Iida, and A. Mizuno, "Separation Control of High Angle of Attack Airfoil for Vertical Axis Wind Turbines", 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2005.
- [6] B. Kamoun, D. Afungchui, and A. Chauvin, "A Wind Turbine Blade Profile Analysis Code Based on the Singularities Method", Renewable Energy, Vol. 30, pp. 339-352, 2005.
- [7] P. Giguere and M. S. Selig, "New Airfoils for Small Horizontal Axis Wind Turbines", Trans. ASME J. of Solar Energy Engineering, Vol. 120, pp. 108-114, 1998.
- [8] J. Zhang, "Numerical Modeling of Vertical Axis Wind Turbine(VAWT)", M. Sc. Dissertation, Technical University of Denmark, 2004.
- [9] R. Gasch and J. Tvele, Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, Earthscan, 2004.
- [10] P. Gipe, Wind Energy Basics: A Guide to Small and Micro Wind Systems, Chelsea Green, 1999.
- [11] H. Piggot, Windpower Workshop, CAT Publications, 2000.
- [12] Fluent 6.2 Fluent Inc. (www.fluent.com), 2006.
- [13] M. Drela, "XFOIL: An Analysis and

Design System for Low Reynolds Number Airfoils”, Low Reynolds Number Aerodynamics, T. J. Mueller (ed.), Lecture Notes in Engineering, Vol. 54, pp. 1-12. Springer-Verlag Berlin, 1989.



월 전기기술사

차득근 (車得根)

1951년 7월생. 1976년 영남대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1980년 동대학원 졸업(공학석사). 1989년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1979-1988년 포항대학 전기학과. 1988-현재 동의대학교 전기공학과 교수. 1989년8

저 자 소 개



신지영 (申智榮)

1967년 7월생. 1990년 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1992년 동대학원 졸업(공학석사). 1996년 동대학원 졸업(공학박사). 1996-1998년 현대엔지니어링 주식회사. 1998-1999년 서울대학교 정밀기계설계공동연구소. 1999-현재 동

의대학교 기계공학부 부교수.



이철균 (李哲均)

1967년 1월생. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1991년 동대학원 졸업(공학석사). 1998년 동대학원 졸업(공학박사). 1993-1999년 현대중공업 중앙연구소 선임연구원, 1999-현재 동의대학교 전기공학과 부교수.



손영석 (孫永洙)

1960년 5월생. 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1986년 연세대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1994년 미국 The University of Texas at Austin 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1986-1990년 한국원자력연구소 연

구원. 1994-1997년 한국원자력연구소 선임연구원. 1997-현재 동의대학교 기계공학부 부교수.



황이철 (黃貳鐵)

1961년 10월생. 1987년 부산대학교 기계설계공학과 졸업(공학사). 1991년 동대학원 졸업(공학석사). 1996년 오사카대 전자제어기계공학과 졸업(공학박사). 1997-1998년 삼성중공업. 1996-1998년 부산대학교 기계공학부 국책교수. 1998-현재 동의대학교 메카트로닉스공학과 부교수.