

200 W급 자이로밀형 수직축 풍력터빈 로터 블레이드 형상설계 및 유동해석

조우석¹ · 김현수² · 최영도[†]

(원고접수일 : 2013년 1월 2일, 원고수정일 : 2013년 2월 12일, 심사완료일 : 2013년 3월 14일)

Shape design and flow analysis on a 200W-class gyromill type vertical axis wind turbine rotor blade

Woo-Seok Cho¹ · Hyun-Su Kim² · Young-Do Choi[†]

요약: 본 연구는 200 W급 자이로밀형 소형 수직축 풍력터빈 로터 블레이드의 형상설계 및 유동해석에 의한 성능 검토에 관한 내용을 정리한 것이다. 2차원 형상의 로터 블레이드에 대하여 단일유관이론을 적용하여 설계하였으며, 설계 결과에 대해서 2차원 수치유동해석을 수행하여 해석결과의 검토로부터 3차원 로터 블레이드 기본 형상을 결정하고, 3차원 수치유동해석을 통하여 풍력터빈 로터 블레이드의 형상 결정 및 성능 검토를 하였다. 본 연구의 결과로부터 상대적 저풍속에서 200 W급 자이로밀형 수직축 풍력터빈 로터 블레이드의 형상을 도출하였고, 수치유동해석으로부터 정격출력 200 W를 확보할 수 있음을 확인하여, 본 연구에서 적용한 설계법의 타당성을 확보하였다.

주제어: 수직축풍력터빈, 자이로밀형, 로터 블레이드, 형상설계, 전산유동해석

Abstract: This study is focused on the shape design and flow analysis on a 200 W-class Gyromill type vertical axis wind turbine rotor blade. Single tube theory is adopted for the shape design of the turbine blade. 2-dimensional CFD analysis is conducted to examine the turbine performance with basic shape, and then 3-dimensional shape is determined from the examination of the performance. By the CFD analysis on the 3-dimensional shape of the wind turbine, performance of the turbine is examined and also, shape of the wind turbine rotor blade is determined accordingly. From the results of this study, a 200 W-class Gyromill type vertical axis wind turbine rotor blade is designed and the reliability of the design method is confirmed by CFD analysis.

Keywords: Vertical axis wind turbine, Gyromill type, Rotor blade, Shape design, CFD

1. 서론

소형풍력터빈은 주택, 빌딩, 농장, 소규모 기업에 서 전기요금을 절약하기 위하여 사용되거나 계통과 연결하기 어려운 원격지에서 사용되는데[1]-[4], 대형풍력터빈과 유사한 점과 상이한 점이 공존하기 때문에 도입 및 설계 시에 용도에 따라 검토되어야

한다.

국내에서는 저풍속의 풍황조건에 적합한 풍력터빈에 대한 연구개발이 활발하게 진행되고 있으며[5], 수평축 및 수직축 풍력터빈의 성능특성을 고려하여 형식별로 최적의 풍력터빈을 개발하기 위해 노력 중이다.

† 교신저자: (534-729) 전라남도 무안군 청계면 영산로 1666,

목포대학교 기계공학과, E-mail: ydchoi@mokpo.ac.kr, Tel: 061-450-2419

1 (주)디앤디이, E-mail: wscho@dnde.co.kr, Tel: 051-920-2486

2 동아대학교 기계공학과, E-mail: kimhsa@dau.ac.kr, Tel: 051-200-7651

한편, 수직축 풍력터빈은 저풍속에서 저속 회전으로 운전이 가능한 장점이 있기 때문에 풍속이 상대적으로 낮은 지역에서도 풍력발전에 의한 전력생산이 가능하다. 수직축 풍력터빈의 구조에서 기계적 부품과 전기적 구성 부품의 역할은 수평축과 근본적인 차이는 많지 않지만, 기계적 부품의 형상면에서 특히 블레이드의 형상이 큰 차이를 나타낸다.

한편, 풍력터빈의 설계 시 수직축 풍력터빈의 경우 로터 블레이드의 형상에 따라서 성능이 매우 큰 차이를 나타내게 되고, 풍향 조건에 따른 설계법도 각 로터 블레이드의 형상에 따라서 달라지기 때문에 각 형상별 풍력터빈의 설계에 의한 고성능 풍력터빈의 개발이 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 수직축 풍력터빈 중 블레이드가 직선형으로서 그 단면형상이 일정하기 때문에 상대적으로 저비용으로 제작이 가능하고, 양력형 로터 블레이드의 채용에 의해 성능이 양호한 자이로밀형 수직축 풍력터빈의 로터 블레이드에 대한 형상을 결정하기 위하여 설계를 수행하였다. 또한, 본 연구에서 적용한 설계법의 타당성을 확보하기 위하여 3차원 유동해석에 의해 풍력터빈의 성능을 검토하였다.

2. 형상설계 및 유동해석법

2.1 수직축 풍력터빈 형상설계법

수직축 풍력터빈의 형상설계법으로서의 공기역학적특성을 고려한 이론적 방법이 주로 이용되고 있으며, 대표적인 이론으로서는 단일유관이론, 다중유관이론 그리고 각운동량이론 등이 있다[6]. 이러한 이론은 기본적으로 자연바람으로부터 확보할 수 있는 풍력에너지를 운동량 보존법칙을 적용해서 구하는 방법이며, 각 이론에 의해 구해진 성능으로서 출력계수는 차이가 거의 없다고 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 단일유관이론[7]을 적용하여 로터 블레이드를 설계하였다.

특히, 로터 블레이드의 설계에서 상대유입풍속 V_R 을 결정하는 방법이 매우 중요하며 단일유관이론에 따르면 다음과 같이 구할 수 있다.

풍력터빈 로터 블레이드를 통과하는 기류를 하나

의 유관으로서 가정하면 풍력터빈의 속도감소율에 대한 관계로부터 **Figure 1**과 같이 나타낼 수 있다.

풍력터빈에 작용하는 항력 F_x 는 속도감소율 a 와 의 관계로부터 유입풍속 V_∞ , 풍력터빈 수평면적 S_w , 공기밀도 ρ 에 의해 다음의 **식(1)**로 구해진다.

$$F_x = 2\rho V_\infty^2 S_w (1-a)a \quad (1)$$

또한, 풍력터빈 항력계수 C_{FX} 를 다음의 **식(2)**에서 정의한다.

$$F_x = \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 C_{FX} S_w \quad (2)$$

식(1)과 **식(2)**로부터 속도감소율 a 는 다음의 2차 식으로 된다.

$$a^2 - a + \frac{C_{FX}}{4} = 0 \quad (3)$$

즉, 속도감소율 a 는 다음의 **식(4)**로 된다.

$$a = \frac{1}{2}(1 - \sqrt{1 - C_{FX}}) \quad (4)$$

또한, 상대유입풍속 V_R 은 주속비 λ^* 로부터 **식(5)**로 된다.

$$V_R = (1-a)\sqrt{1 - 2\lambda^* \sin\phi + \lambda^{*2}} \quad (5)$$

여기서, 주속비 λ^* 는 다음의 **식(6)**으로 되며, R 과 ω 는 각각 풍력터빈 회전반경과 회전각속도이다.

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1-a}, \quad \lambda = \frac{R\omega}{V_\infty} \quad (6)$$

Table 1은 본 연구에서 적용한 단일유관이론에 의해 설계된 200 W급 자이로밀형 수직축 풍력터빈에 대한 상세 사양을 나타내고 있다. 블레이드는 NACA 63145를 사용하였으며 NACA 63145는 캠버 익형이며 구조적인 특성과 공력특성을 모두 고려하

여 선택하였다. 특히, 저속 회전에서도 정격출력을 달성할 수 있도록 설계되었으며, 채용될 발전기의 회전수를 고려하여 로터 블레이드의 설계 회전수는 상대적으로 저속으로 설정하여 200 rpm로 설계하였다.

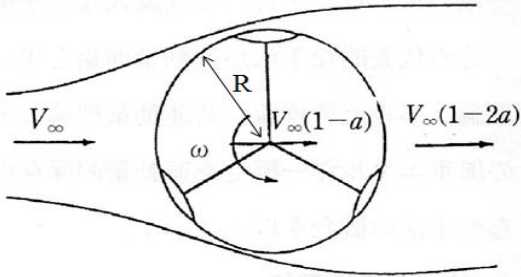


Figure 1: Schematic view of single tube theory for the vertical axis wind turbine design.

Table 1: Design specification of 200 W-class Gyromil type vertical axis wind turbine.

Rotor type	Gyromill
Blade profile	NACA 63415
Rated wind velocity	10 m/s
Blade number	3
Rotor radius	0.63 m
Blade height	2.0 m
Rotational speed	200 rpm
Blade chord length	0.23 m

2.2 유동해석법

2.2.1 계산 격자

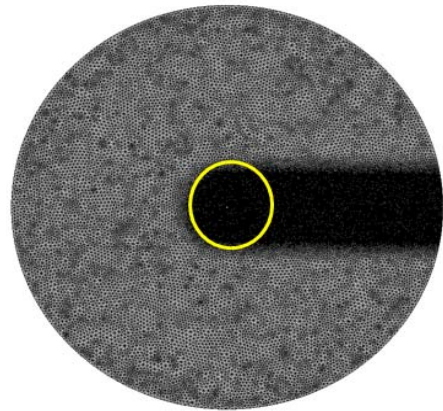
설계가 완료된 풍력터빈 기본형상에 대하여 2차원 유동해석을 수행하여 성능을 검토하고, 그 결과로부터 3차원 형상의 로터 블레이드 형상을 결정하기 위하여 3차원 유동해석 수행을 위한 2차원 및 3차원 계산격자를 생성하였다.

Figure 2는 풍력터빈 전체 유동장에 대한 2차원 및 3차원 유동장 격자를 보이고 있다. 2차원 계산격

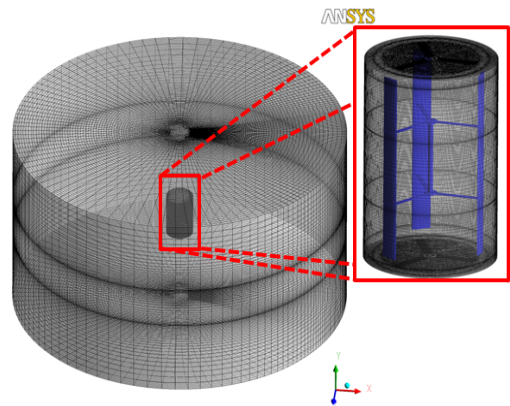
자는 사면체 (Tetrahedral) 격자와 프리즘 (prism) 격자의 복합형태로 생성하였으며, 격자의 노드수는 약 30만개이다. 또한 3차원 유동장 격자는 유동장 및 블레이드 전체를 육면체 (Hexahedral), 사면체 (Tetrahedral), 삼각기둥 (Wedges) 격자를 사용하여 생성하였으며, 격자의 전체 노드수는 약 980만개이다.

2차원 및 3차원 유동장 전체에 대하여 벽면까지의 무차원거리 $y^+ \leq 15$ 로 설정하여 계산의 수렴성을 고려한 격자를 생성하였다.

전체 유동장 격자 중 내부의 로터가 포함된 영역은 회전 영역, 그 외의 외부 영역은 비회전 영역으로 구분하여 다중 블록으로 생성하였다.



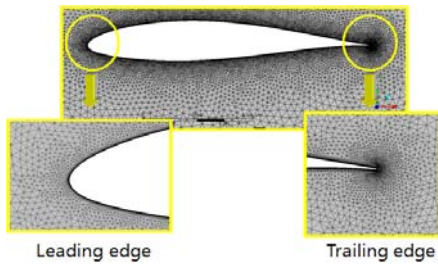
(a) 2-D numerical grid



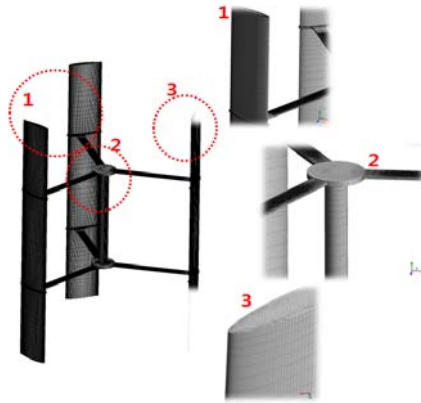
(b) 3-D numerical grid

Figure 2: Whole view of 2-D and 3-D numerical grids for the CFD analysis on a wind turbine flow field

Figure 3은 2차원 및 3차원 로터 블레이드 계산격자를 보이고 있다. 2차원 격자에서는 전연과 후연의 블레이드 표면과의 경계면에 대해서 매우 균일한 분포의 사면체 격자를 생성하여 계산결과와 신뢰성이 향상 될 수 있도록 하였다. 또한, 3차원 격자에 대해서는 블레이드 압력면과 부압면 표면에 매우 균일한 간격의 육면체 격자를 생성하여 계산의 수렴성을 향상시키고자 하였다. 그리고, 블레이드 상부 및 하부 측면에 대해서는 사면체 격자를 생성하였다.



(a) 2-D numerical grid



(b) 3-D numerical grid

Figure 3: 2-D and 3-D numerical grids of a wind turbine rotor blade.

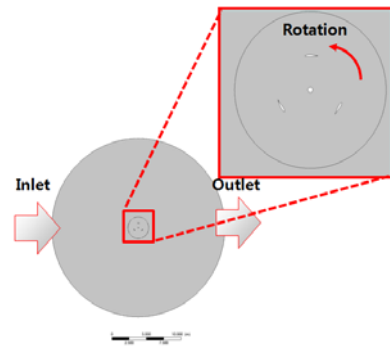
2.2.2 경계조건

Figure 4는 본 연구에서 설계된 자이로밀형 수직축 풍력터빈의 수치해석을 위한 2차원 및 3차원 유동장에 대해서 경계조건을 설정한 것이다. 또한, Table 2는 2차원 및 3차원 유동장에 대한 경계조건을 각각 보이고 있다.

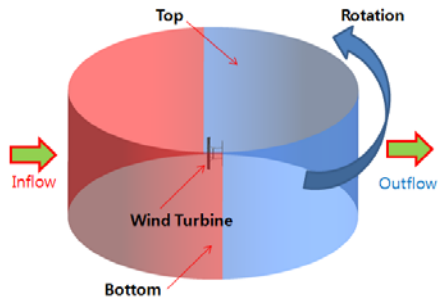
3차원 유동장에서 블레이드는 회전운동만 하기

때문에 블레이드 주위의 회전영역과 그 외의 고정영역으로 구분하는 경계조건을 입력하였다. 회전영역과 고정영역을 동시에 포함하는 유동해석 기법 중 유동 데이터를 두 영역에 서로 전달하기 위한 경계 조건으로 GGI Interface 기법을 적용하였다. 원통형 유동장의 반쪽 영역은 입구, 그 반대에는 출구영역으로 설정하였다. 입구에는 풍속 10 m/s를, 출구와 유동장 윗면과 바닥면에는 opening 조건을 주었고, 내부 회전영역은 200 rpm으로 회전하도록 설정하였다.

유동해석 난류모델은 풍력발전 유동해석 분야에서 널리 사용되며 층류로부터 난류로의 천이영역에 대한 높은 신뢰성을 가진 $k-\omega$ 모델 기반의 SST(Shear Stress Transport) 모델을 적용하였으며, 비정상상태(Unsteady state)로 계산하였다. 2차원 해석 유동장에 대한 경계조건에 대해서도 Table 2에서 나타내고 있다. 풍력터빈 유동장에 대한 수치해석 Solver로서는 상용코드 ANSYS CFX[8]를 적용하였다.



(a) 2-D boundary conditions



(b) 3-D boundary conditions

Figure 4: Boundary conditions of a numerical flow field.

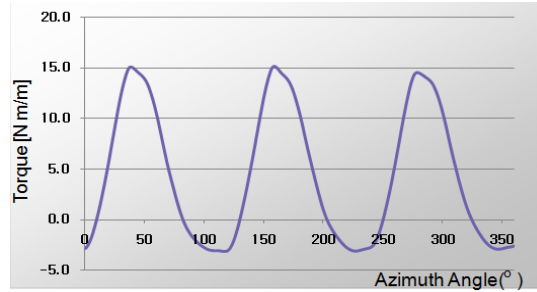
Table 2: Boundary conditions of 2-D and 3-D CFD analysis for a 200 W-class Gyromil type vertical axis wind turbine.

Item	2-D	3-D
Inlet	10.0 m/s	
Outlet	0 Pa	
Rotational speed	200 rpm	
One cycle	360 deg.	360 deg.
Total simulation	The times of cycle	The times of cycle
Time step size	1 deg.	1 deg.
RS interface	GGI interface	GGI interface
Wind turbine	No slip (wall)	No slip (wall)
Top and bottom	opening	opening
Analysis type	Transient	Transient

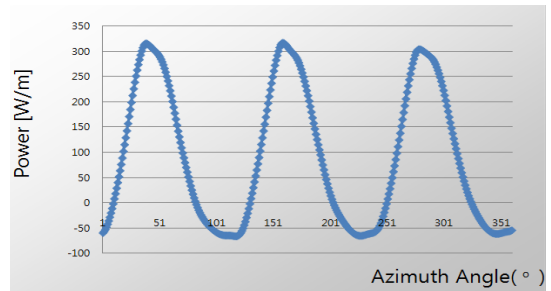
3. 결과 및 고찰

3.1 출력 해석

Figure 5는 2차원 유동해석에 의한 토크 및 출력을 방위각에 따라 나타낸 것이다. Figure 5(a)에서 방위각이 변화함에 따라서 토크는 주기적으로 일정하게 변화함을 알 수 있다. 또한 토크의 주기는 방위각 120°주기로 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 블레이드가 3개이고 하나의 블레이드로부터 다음 블레이드가 위치하는데 120°이기 때문이다. Figure 5 (b)는 2차원 유동해석 결과에 대하여 단위 길이당 평균출력을 나타낸 것이며 단위 길이당 129 W의 출력이 계산되었다. 따라서 블레이드 길이가 2 m이므로 2차원 유동해석 결과로는 258W의 출력이 계산되어 200 W 이상의 출력이 나타났다. Figure 5 (a)에서 방위각 100°근처에서 음의 값을 가지는 토크가 발생하는데 이는 블레이드의 항력이 너무 커서 오히려 풍력발전기의 회전을 방해하는 힘이 발생된 것이다.



(a) Output torque



(b) Output power

Figure 5: Output torque and output power with the variation of azimuth angle by 2-D CFD analysis.

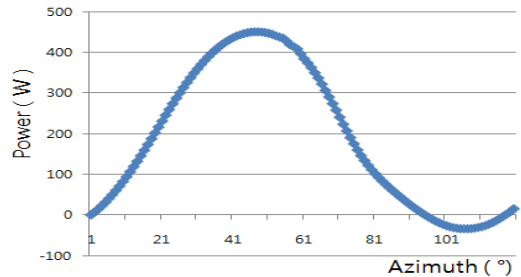


Figure 6: Output power with the variation of azimuth angle by 3-D CFD analysis.

한편, Figure 6은 3차원 유동해석에 의한 200 W급 사이로밀형 수직축 풍력발전기 출력곡선을 나타낸 것이며, 총 120°의 방위각에 대해서 비정상계산을 수행한 결과이다. 3차원 유동해석에 의한 평균출력은 211 W이다. 하지만 2차원 유동해석에 의하여 얻어진 출력 258 W와는 차이가 있다. 이는 스트럿의 영향과 블레이드의 축방향 끝단에서의 3차원 유동에 의한 차이로 판단된다. 하지만 2차원과 3차원 형상에 대한 출력은 최초 설계출력인 200 W이상인 258 W와 211

W로써 로터 블레이드 설계의 타당함을 확인하였다.

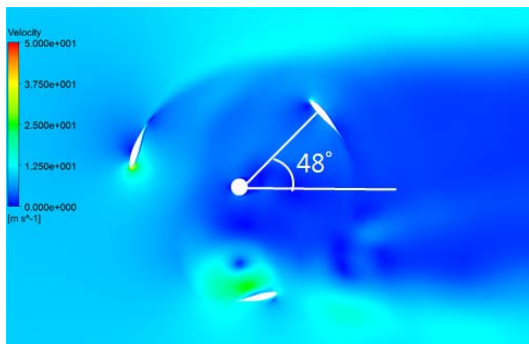
3.2 속도 및 압력 분포

3.2.1 속도선도

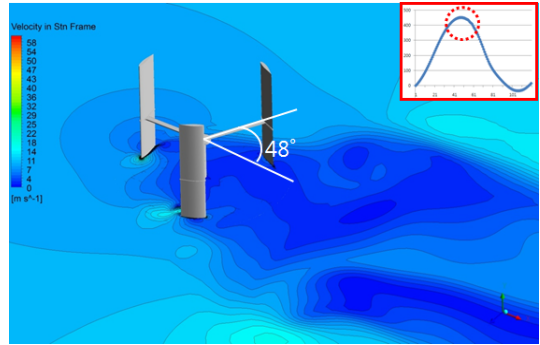
Figure 7은 2차원 및 3차원 유동해석 결과 중 속도선도를 나타낸 것이다. **Figure 7 (a)**의 2차원 속도선도에서는 블레이드의 각 방위각 위치에서 속도분포가 블레이드의 전연 및 후연이 유동장 유입측 유입속도에 따라서 속도선도의 분포가 확연하게 차이를 나타냄을 알 수 있다.

유입측 상부 블레이드에서는 전연에서 낮은 유속이 형성되며, 부압면측에서 속도가 증가함을 알 수 있다. 또한, 유입측 하부의 블레이드에서는 후연이 유입흐름과 접촉하게 되어 유속이 감소하지만, 로터 블레이드 내부측에서는 매우 높은 유속이 형성됨을 알 수 있다. 그러나, 로터 블레이드의 유출측에 위치한 블레이드 주위에서는 후류의 영향으로 매우 낮은 유속이 형성되며, 이것은 유입측에서의 블레이드를 통과하는 흐름의 유속이 블레이드의 회전에 필요한 양력으로 변환되어 유속이 크게 감소한 결과라고 판단된다.

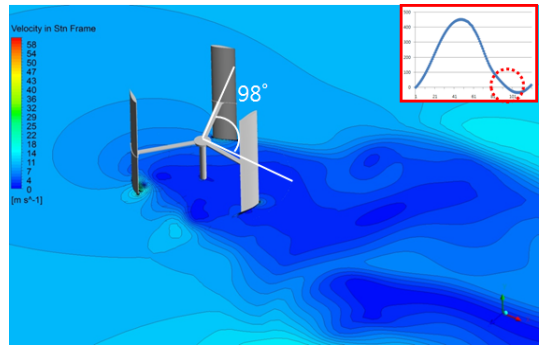
한편, **Figure 7(b)**와 **Figure 7(c)**는 3차원 유동해석 결과에 따른 속도선도를 나타내며, 로터 블레이드의 중간 높이 위치에서의 속도분포를 나타내고 있다. 로터 블레이드의 방위각에 따라서 블레이드의 각 위치에서 형성된 유동장은 블레이드의 전연과 후연이 유동장 유입측 유입흐름과 접촉하는 유입각도에 따라서 블레이드 표면 주위의 속도선도가 변화를 나타낸다.



(a) 2-D (azimuth angle of 48 deg.)



(b) 3-D (azimuth angle of 48 deg.)



(c) 3-D (azimuth angle of 98 deg.)

Figure 7: Velocity contours by 2-D and 3-D CFD analysis.

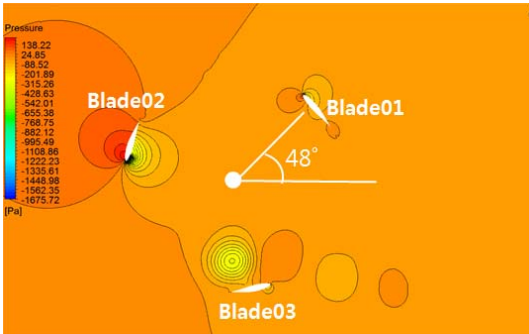
그러나, 전체적으로 로터 블레이드 내부유동장 및 하류측 유동장의 후류에 의한 속도선도는 방위각에 상관없이 거의 일정한 분포를 나타내고 있다. 이것은 3차원 해석이 비정상계산에 의해 진행되지만, 로터 블레이드의 임의 방위각에서 속도분포는 각 방위각에서의 속도분포가 거의 평균화되어서 나타내기 때문이다.

3.2.2 압력선도

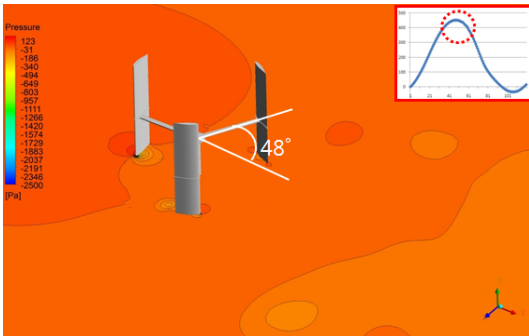
Figure 8은 **Figure 7**의 속도선도에서와 동일한 로터 블레이드 방위각 조건과 블레이드 높이에서의 2차원 및 3차원 유동장 압력선도를 나타내고 있다. 각 방위각 위치 및 블레이드 위치에 따라서 블레이드 주위의 압력분포는 변화하며, 유입유동이 전연과 접촉하는 경우에 압력면에서 높은 압력분포를 나타내면 토크의 증가에 기여하여 출력이 발생하는 것으로 판단된다.

한편, 로터 블레이드의 각 방위각 및 블레이드 위

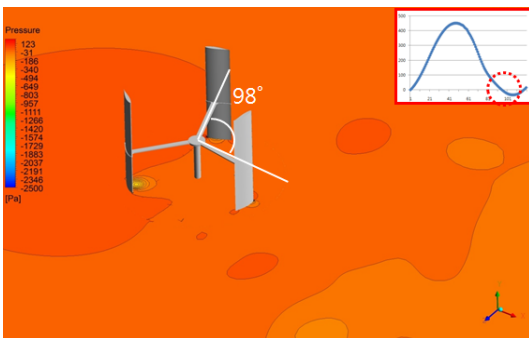
치에 따른 블레이드 표면에서의 압력분포를 검토하면 로터 블레이드의 방위각에 따라서 발생하는 블레이드에서의 출력을 예측할 수 있기 때문에 **Figure 9**의 그래프에서 각 조건별 블레이드 표면 압력계수를 나타내었다. 여기서 표현한 Blade01, 02, 03은 방위각에 위치한 Blade01을 기준으로 회전 방향에 따라서 Blade02, Blade03 순이다(**Figure 8 (a)**를 참조).



(a) 2-D (azimuth angle of 48 deg.)



(b) 3-D (azimuth angle of 48 deg.)



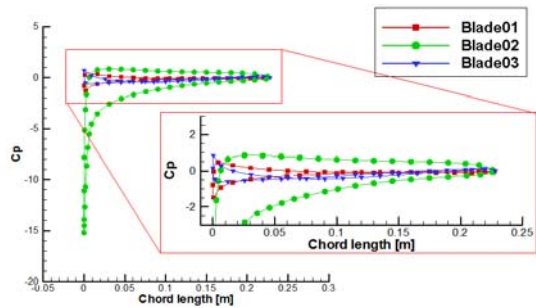
(c) 3-D (azimuth angle of 98 deg.)

Figure 8: Pressure contours by 2-D and 3-D CFD analysis.

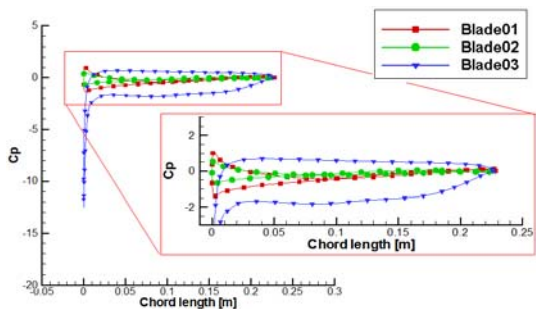
3.2.3 압력분포

Figure 9는 높이방향 중심단면에서 3차원 풍력터빈의 블레이드의 압력분포를 압력계수로 나타내고 있다. 블레이드의 압력면과 흡입면의 압력 차이에 의하여 출력이 발생하고 이는 최종적으로 풍력터빈의 효율로 나타난다.

Figure 9 (a)의 경우에는 3개의 블레이드 중에서 Blade02가 가장 큰 압력 차를 보이고 있으며 **Figure 9 (b)**에서는 Blade03이 큰 압력차를 보인다. 이 블레이드는 상대적으로 바람의 운동에너지를 풍력터빈의 회전력으로 변환하는데 주 역할을 하며 풍력터빈의 회전에 의하여 3개의 블레이드가 번갈아 가며 이러한 역할을 반복한다. 이러한 연속적인 현상은 풍력터빈이 지속적으로 회전을 할 수 있게 한다.



(a) 3-D (azimuth angle of 48 deg.)



(b) 3-D (azimuth angle of 98 deg.)

Figure 9: Pressure coefficient by 3-D CFD analysis

4. 결 론

본 연구는 200 W급 자이로밀형 소형 수직축풍력터빈 로터 블레이드의 형상설계 및 유동해석에 의

한 성능 및 내부유동에 대해서 검토한 결과이다. 수직축풍력터빈 설계법으로써 단일유관이론을 적용하였다. 2차원 형상의 로터 블레이드에 대한 설계 결과에 대해서 2차원 수치유동해석을 수행하여 단위 길이당 129 W의 출력을 얻었으며 길이가 2 m임을 고려하면 258 W의 출력을 나타내기 때문에 로터 블레이드의 설계가 타당함을 확인하였고, 해석 결과의 검토로부터 3차원 로터 블레이드의 형상을 결정하였다.

3차원 수치유동해석을 통한 풍력터빈 로터 블레이드의 형상에 의한 출력을 검토한 결과 211 W의 출력이 나왔으며 설계 시 설정한 출력을 달성할 수 있음을 확인하였기 때문에 설계법의 타당성을 확보할 수 있었다.

참고문헌

- [1] S. Eriksson, H. Bernhoff and M. Leijon, "Evaluation of different turbine concepts for wind power," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 5, pp. 1419-1434, 2008.
- [2] M. Islam, D. S. K. Ting and A. Fartaj, "Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 4, pp. 1087-1109, 2008.
- [3] G. J. W. V. Bussel, S. Mertens, H. Polinder and H. F. A. Sidler, "TURBY® : concept and realisation of a small VAWT for the built environment," *Proceedings of The European Academy of Wind Energy / The European Wind Energy Association Special Topic conference - The Science of making Torque from Wind*, pp. 509-516, 2004.
- [4] M. Wahl, *Designing an H-rotor type Wind Turbine for Operation on Amundsen-Scott South Pole Station*, M.S. Thesis, Department of Engineering Sciences, Uppsala University, Sweden, 2007.
- [5] Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning, *Green Energy Strategic Roadmap [Windpower]*, Seoul, Korea, 2009 (in Korean).
- [6] K. Seki and I. Ushiyama, *Vertical Axis Wind Turbine*, Tokyo, Japan : Power Company Limited, 2008 (in Japanese).
- [7] R. J. Templin, *Aerodynamic Performance Theory for the NRC Vertical-Axis Wind Turbine*, Report LTR-LA-160, National Research Council of Canada, Canada, 1974.
- [8] ANSYS CFX Documentation, <http://www.ansys.com>, Accessed December 10, 2011.