

# 상용 CFD 프로그램을 이용한 풍력터빈 축소모델 출력계수 검증 및 후류 해석

## Validation of Power Coefficient and Wake Analysis of Scaled Wind Turbine using Commercial CFD Program

김병수\* · 백인수\*\*† · 유능수\*\*\*

Kim Byoungsu\*, Paek Insu\*\*† and Yoo Neungsoo\*\*\*

(Received 8 December 2014 ; accepted 17 February 2015)

**Abstract** : A numerical simulation on the wake flow of a wind turbine which is a scaled version of a multi-megawatt wind turbine has been performed. Two different inlet conditions of averaged wind speed including one below and one above the rated wind speed were used in the simulation. Steady-state pitch angles of the blade associated with the two averaged wind speeds were imposed for the simulation. The steady state analysis based on the Reynolds averaged Navier-Stokes equations with the method of frame motion were used for the simulation to find the torque of the rotor and the wake field behind the wind turbine. The simulation results were compared with the results obtained from the wind tunnel testing. From comparisons, it was found that the simulation results on the turbine power are pretty close to the experimental values. Also, the wake results were relatively close to the experimental results but there existed some discrepancy in the shape of velocity deficit. The reason for the discrepancy is considered due to the steady state solution with the frame motion method used in the simulation. However, the method is considered useful for solutions with much reduced calculation time and reasonably good accuracy compared to the transient analysis.

**Key Words** : 풍력터빈(Wind turbine), 전산유체역학(Computational fluid dynamics), 유동해석(Flow analysis), 출력계수(Power coefficient), 후류(Wake)

\*\*† 백인수(교신저자) : 강원대학교 기계메카트로닉스공학과  
E-mail : paek@kangwon.ac.kr, Tel : 033-250-6379

\*김병수 : 강원대학교 융합시스템공학과

\*\*\*유능수 : 강원대학교 기계메카트로닉스공학과

\*\*† Paek Insu(corresponding author) : Department of Mechanical and Mechatronics Engineering

E-mail : paek@kangwon.ac.kr, Tel : 033-250-6379

\*Kim Byoung-Su : Department of Convergence System Engineering, Kangwon National University

\*\*\*Yoo Neung-Soo : Department of Mechanical and Mechatronics Engineering

## 1. 서 론

해상풍력의 경우 육상풍력에 비해 터빈을 해상에 설치하기 위하여 지지구조물을 추가로 설치해야하고, 이외에도 해상 변전소, 단지 내부/외부 해저 케이블 설치 등으로 인해 발전 단가가 육상풍력 보다 수배 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 발전 단가를 줄이기 위하여 일반적으로 육상풍력 보다 대규모 풍력단지로 구성한다. 또한 해상풍력의 경우 육상과 달리 지형에 따른 풍속변화 및 설치지점의 제한이 없어, 육상풍력보다 규칙적인 배열로 설치되는 특성을 갖는다. 이와같은 대규모 해상 풍력발전단지의 경우 상류에 있는 터빈에 의해서 생긴 후류로 인하여 단지의 전체 발전량의 10-20% 정도의 손실이 야기된다고 알려져 있다. 따라서, 이와 같은 후류로 인한 손실을 줄이기 위하여 일반적으로 주풍방향과 나란히 설치되는 풍력터빈의 경우 터빈 직경의 7배 이상의 이격거리를 두고 설치하는 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>.

이와같은 후류에 대한 명확한 이해를 위해 많은 연구들이 수행되어 왔다. 하지만, 실제 해상풍력발전단지 내의 대형 MW 풍력터빈을 대상으로 후류를 측정하는 것은 현실적으로 여러 가지 어려움이 따르기 때문에 축소모형을 이용한 풍동실험 또는 수치해석적인 방법으로 연구가 진행되어 왔다.

특히, 실험 결과 및 풍력터빈의 제원이 문헌상에 제시되어있는 NREL Phase VI 풍력터빈에 대한 수치해석 결과가 많이 제시되고 있으며, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

1) Barthelmie, R. J., Frandsen, S.T., Nielsen, M. N., Pryor, S. C., Rethore, P. E., and Jorgensen, H. E. Modeling and measurements of power losses and turbulence intensity in wind turbine wakes Middelgrunden offshore wind farm, *Journal Wind Energy*, Vol.10, No 6, pp. 517~528, 2007

수식을 이용한 정상상태 해석 또는 LES를 이용한 과도 해석 결과들이 제시되고 있다. 하지만 NREL Phase VI 풍력터빈은 Stall 제어 방식의 날개를 갖고 있으며, 2개의 날개로 이루어져 있어, Active Pitch 제어 방식과 3개의 날개로 이루어진 대형 풍력터빈과는 다른 공력특성을 보이게된다. 또한 후류에 대한 비교 분석 보다는 NREL Phase VI 모델을 대상으로 실험한 결과를 이용하여 출력의 비교 검증을 수행한 논문이 주를 이루고 있다<sup>2)3)</sup>.

따라서, 본 논문에서는 실제 대형 MW 풍력터빈과 유사한 Active Pitch 제어방식의 풍력터빈을 대상으로 출력 및 후류 예측을 위해 수치해석 프로그램의 적용 타당성을 알아보는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 실제 MW 풍력터빈과 공기역학적 유사성을 갖는 축소형 풍력터빈을 대상으로 정격 이전과 정격 이후의 두가지 평균풍속에 대하여 Frame Motion (프레임 운동)기법을 이용한 정상상태 전산유동해석을 수행하고, 이를 동일한 축소모형을 이용한 풍동실험 결과와 비교 검증하였다<sup>4)</sup>.

## 2. 모델링

### 2.1 축소형 풍력터빈 및 실험환경

본 연구에서 사용된 대상 터빈은 MW급 대형 풍력터빈의 공기역학적 유사성을 고려하여 축소한 모델이고, 그림 1에 실제 모델의 모습

- 2) Jang-Oh Mo, Amanullah Choudhry, Maziar Arjomandi, Young-Ho Lee, Large eddy simulation of the wind turbine wake characteristics in the numerical wind tunnel model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 112, pp. 11~24, 2013
- 3) R. Lanzafame, S. Mauro, M. Messina, Wind turbine CFD modeling using a correlation-based transitional model, *Renew. Energy*, Vol 52, pp. 31~39, 2013
- 4) B. S. Kim, I. S. Paek, N. S. Yoo, Scaled Wind Turbine modeling and CFD analysis, *Proceedings of KSPE 2014 Autumn conference*, Vol. 10, pp. 842, 2014

과 3D CAD 모델을 제시하였다. 또한 표 1은 축소형 풍력터빈의 주요사양을 나타낸 것으로, 직경은 약 1.9m, 허브 높이는 1.8m, 정격 풍속은 5.78m/s, 정격 회전속도는 381rpm, 정격 출력은 127W 이다<sup>5)</sup>.



Fig. 1 Scaled Wind turbine: Actual model(left), CAD model(right)

Table. 1 Specification of scaled Wind Turbine

Item	Description
Number of blades	3
Rotor diameter [m]	1.91
Hub height [m]	1.78
Rated wind speed [m/s]	5.78
Rated rotor speed [rpm]	381
Rated Power [W]	127
Power regulation	Pitch

본 연구에 검증 데이터로 사용된 실험이 이루어진 풍동을 그림 2에 제시하였다. 이탈리아 밀라노에 있는 풍동으로, 폭13.8m 높이 3.8m, 길이 36m이고, 최대풍속은 14m/s이다. 난류 생성기를 이용하여 대기 경계층 모델링이 가능하다<sup>5)</sup>.

5) Bottasso, C. L., Filippo C., and Vlaho P, Wind tunnel testing of scaled wind turbine models: Beyond aerodynamics, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 126, pp.1~10, 2011

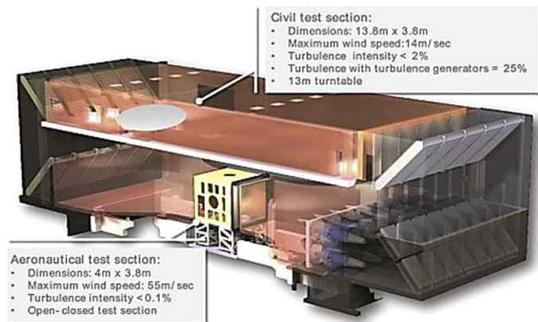


Fig. 2 Wind tunnel at Politecnico di milano used for experimental tests.

## 2.2 유동장 모델링

축소형 풍력터빈을 이용한 풍동실험과 동일한 실험환경에 대한 유동장 해석을 위해 풍동 실험에 사용된 터빈을 실제 사이즈로 모델링하고, 주변 유동장에 정렬 격자를 생성하였다.

해석영역은 그림 3 과 같이 실제 풍동의 폭과 높이를 반영하여 모델링 하였다. 로터직경 약 1.9m를 기준으로 유동장 폭은 7.2RD (Rotor Diameter)인 13.8m, 높이는 2RD(3.8m)이고, 로터를 중심으로 상류 6.3RD(12m), 하류 12.6RD(24m)로 입구와 출구의 경계조건이 풍력터빈 주변의 유동해석 결과에 직접적인 영향을 주지 않도록 하였다 또한 격자생성과 경계조건의 대입의 편의성을 위하여 해석영역을 로터회전영역(Rotor Rotation Region), 근접영역(Near Field Region), 원거리영역(Far Field Region) 등 3 가지 영역으로 분할하였다.

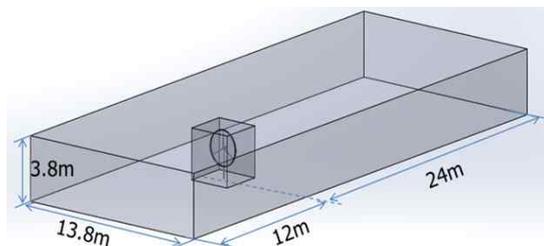
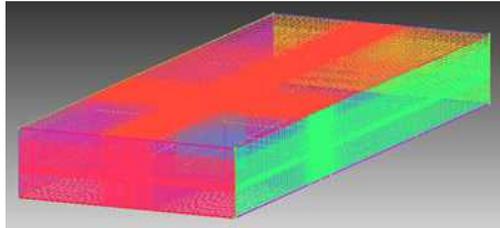
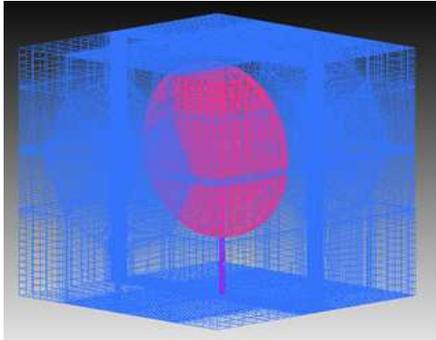


Fig. 3 Wind tunnel modeling

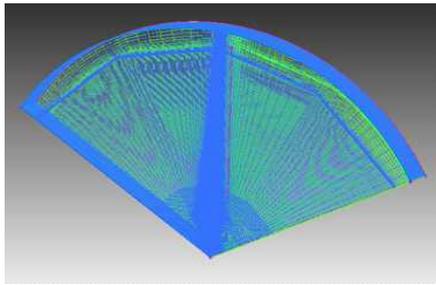
분할된 3격자는 격자전용 생성 프로그램인 ICEM CFD를 이용하여 전 해석 영역을 Hexa type의 격자로 제작하였고 이를 그림 4에 나타내었다.



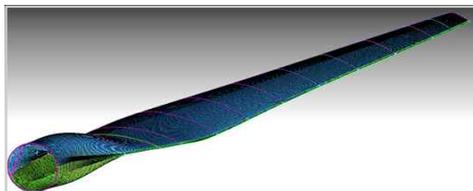
(a) Far-field region



(b) Near-field region



(c) 1/3 rotor rotation region



(d) Blade surface

Fig. 4 Mesh appearance by regions

그림4에 제시된 격자 생성 시 난류모델에 따라 적절한  $y^+$  값을 만족시켜야 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. 따라서 CFD 해석 시 난류 모델의 선택과 격자생성이 중요하다. 여기서  $y^+$ 란 점성저층영역(Viscous Sublayer)과 그 위쪽의 영역에 대하여 속도분포와 벽 전단 응력이 벽법칙(Law of the Wall)의 관계에 의해 결정된 경험식으로 식 (1)과 같이 계산 된다.

$$y^+ = \frac{y_1 U_\tau}{\nu} \quad (1)$$

식 (1)에서  $y_1$ 은 벽면으로부터 첫 번째 격자 점의 거리,  $U_\tau$ 는 마찰속도(Friction velocity),  $\nu$ 는 동점성계수를 나타낸다.

블레이드 표면의 경우 영역에 따라 층류와 난류, 그 사이의 천이영역 모두를 포함하게 된다6). 따라서 천이 난류 모델인 Transition SST 난류모델을 선택하였고, Transition SST 난류 모델의 경우  $y^+ \leq 1$ 를 만족시키는 적절한 격자를 생성하여야 공력해석의 정확도를 높일 수 있다78). 이를 고려하여, 본 논문을 위해 생성된 격자의 정보는 표 2에 나타내었다.

- 6) R. B. Langtry, J. Gola, F. R. Menter., Predicting 2D Airfoil and 3D Wind Turbine Rotor Performance using a Transition Model for General CFD Codes, 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno 2006
- 7) F. R. Menter, R. Langtry, S. Völker, Transition Modelling for General Purpose CFD Codes, Flow Turbulence Combust, Vol.77, pp.277~303, 2006
- 8) T. H. Lee, C. W. Kim, Sensitivity Study of Turbulence Models and Mesh Resolutions for the Airfoil of a Wind Turbine Blade, Korean Society for Aeronautical and Space Sciences fall conference, pp. 1166~1171, 2011.11.

Table. 2 Number of element by region

Region	Number of element
Far region	1,575,310
Near region	1,697,966
Rotation region	13,488,261
Total	16,761,537

### 2.3 경계조건

풍동실험결과와 해석결과를 비교하기 위하여 각 영역 별 경계조건은 그림 5에 제시된 것과 같이, 입구 풍속은 허브 높이 기준으로 정격이전 4.78m/s, 정격이후 6.35m/s로서, 바닥면으로부터 높이에 따른 풍속 변화를 나타내는 윈드 쉬어(Wind Shear) 효과를 고려하여 적용하였다. 윈드 쉬어 계수는 풍동에서의 높이별 측정값을 통해 얻어진 0.26 값을 이용하였다. 그 예로 정격 이전, 높이에 따른 입력 풍속을 그림 6과 같이 나타내었다. 난류 강도는 풍동실험의 평균 난류강도를 반영하여 정격이전 8.44%, 정격 이후 8.8%로 설정하였다. 또한 풍력터빈의 피치각은 정격풍속보다 낮은 입력풍속인 4.78 m/s의 경우 대상 풍력터빈 축소모델의 우수피치인  $-1.75^\circ$ , 정격풍속보다 높은 6.35m/s의 입력풍속의 경우 정상상태 피치제어 피치각인  $6.5^\circ$ 를 각각 적용하였다. 또한 출구 조건은 축소모델에서 하류방향으로 로터직경의 12배에 해당하는 출구에서의 압력을 대기압으로 가정하였고, 양쪽 벽면과 윗면, 아랫면 모두 풍동의 벽면과 같은 No slip 조건을 부여하였다. 난류 모델의 경우 앞서 언급했던 것과 같이 Transition SST를 사용하였고, 정상상태 해석을 하였다. 정지영역과 회전영역사이의 interface는 Frame motion조건을 부여하였다. 또한 Rotor의 회전속도는 정격 이전과 정격 이후 모두 풍속에 알맞은 381.88rpm으로 설정하였다. 본 연구에 적용된 Frame motion 조건이란 Frozen rotor 방식으로 회전

영역과 정지영역의 상대적인 위치는 고정되지만, 회전 영역 내부에 별도의 Frame을 두어 해석하는 방식으로 회전하는 물체의 정상상태 해석 시 널리 사용된다.

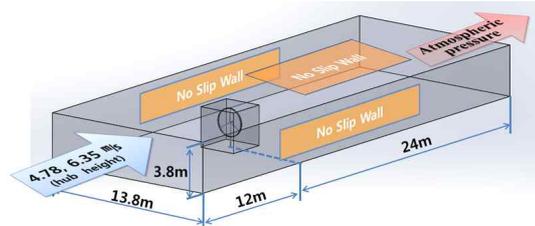


Fig. 5 Boundary conditions for simulation

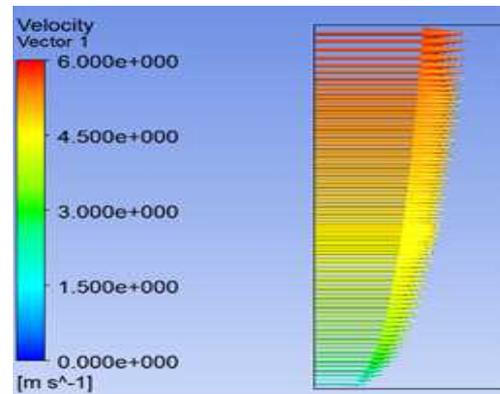


Fig. 6 inlet wind speed distribution (below rated)

### 3. 해석 결과

본 연구에서는 풍력터빈 축소모델을 정격이전과 이후의 두가지 다른 평균풍속에 대하여 피치각을 변화시켜 모델링을 하고, 풍력터빈 주변 유동장 해석을 수행하였다.

유동장 해석 결과 얻어진 로터의 회전방향 토크와 로터의 회전각속도를 이용하여, 축소형 풍력터빈의 출력을 계산하고, 출력과 함께 로터 평면으로 들어오는 풍속의 평균 및 공기 밀도를 이용하여, 축소형 풍력터빈의 출력계수 ( $C_p$ : Power coefficient)를 계산하였다.

Table. 3 Simulated and measured power coefficients

Wind Speed (m/s)	Cp (Sim)	Cp (Exp)	Error(%)
4.78	0.487	0.477	2.10
6.35	0.295	0.290	1.71

표 3은 정격 전후의 두가지 다른 풍속에 대해 유동해석에서 얻어진 축소형 풍력터빈의 출력계수와 풍동실험의 결과 얻어진 출력계수를 비교하였다. 표 3에서 살펴보면 정격 이전 및 이후의 두가지 다른 풍속에 대해 유동해석 결과와 풍동실험결과의 오차가 3% 이내인 것으로 보아 CFD 해석이 풍동실험의 결과를 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

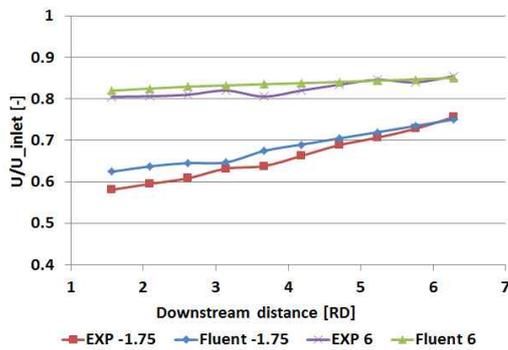


Fig. 7 Downstream wind speed variation.

그림 7은 정격 이전 및 정격 이후의 두가지 다른 풍속에 대해 터빈 하류방향의 후류 풍속 변화를 나타내었고, 사용된 풍속데이터는 로터 직경 범위의 풍속평균이다. 수평축은 하류 방향의 거리를 로터 직경으로 무차원화하고, 수직축은 터빈 3m 앞의 풍속으로 하류방향의 풍속을 무차원화 하였다. 그림에서 살펴보면, 정격이전의 풍속에서의 결과는 블레이드 피치 각이 Fine Pitch에 해당하는  $-1.75^\circ$ 인 상태의 결과이며, 정격 이후 풍속에서의 결과는 출력제한을 위하여 피치각이  $6.5^\circ$ 인 결과를 나타낸다.

따라서 정격이전의 풍속인 경우 보다 정격이후의 경우 유입되는 바람의 에너지를 충분히 회수하지 않고 하류로 흘러보내기 때문에 유입풍속대비 후류풍속의 비가 큰 것을 알 수 있다. 또한 정격이후 풍속의 경우 전반적으로 CFD 해석의 결과가 풍속의 감소량을 저예측하였고, 하류방향으로 갈수록 풍동실험 결과와 오차가 줄어드는 것을 알 수 있으며, 정격 이하에서는 풍속에 감소가 더 많고, 회복이 빠른 것을 알 수 있다. 그림에서 살펴보면 정격 이전의 경우 하류방향으로 약 1.5D의 지점에서 최대 7.5%의 오차율을 보이고, 약 6.3D 부근에서는 0.7%의 오차율을 보인다. 또한, 그림 7의 경우 정격 이후의 경우 약 3.6D에서 최대 3.7%의 오차율을 보이고, 약 5.2D에서 0.3%의 오차율을 보인다.

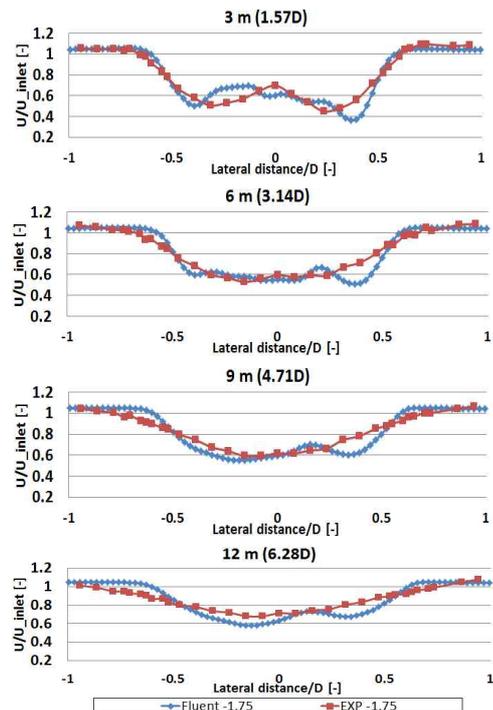


Fig. 8 Wake shape in lateral direction at various downstream distances (below rated wind speed).

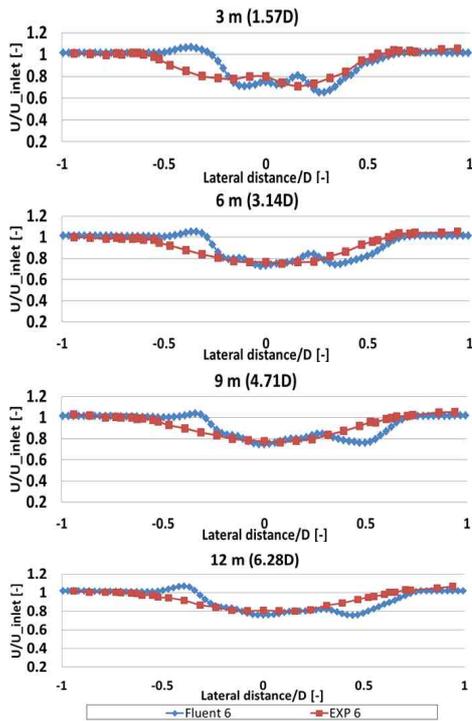


Fig. 9 Wake shape in lateral direction at various downstream distances (above rated wind speed).

그림 8과 9는 하류 방향의 후류형상을 비교하기 위하여 허브 높이 기준으로 풍속을 제시한 결과를 나타낸다. x축은 로터 측면 반경방향의 거리로서, 로터직경으로 나누어 무차원화 하였고, y축은 로터 3m 앞의 풍속으로 무차원화 하였다. 그림에서 살펴보면 전반적으로 로터 직경 안쪽의 후류의 형상과 풍속 감소량은 유사한 것을 알 수 있으나, 터빈 블레이드의 끝단 부근의 풍속의 오차가 비교적 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 8과 9의 후류형상에 대한 시뮬레이션 결과와 후류형상 실험결과의 차이는 그림 10에 보이는 것과 같이 후류영역 밖의 대기 풍속성분, 또는 후류의 내부영역의 풍속분포에 의한 결과이다. 실험의 경우 근접후류영역에 해당하는 풍력터빈의 하류방향으로 2RD 이내

의 영역에서는 블레이드 끝단 와류 (Blade tip vortex)에 의해 두 개의 피크(Peak)를 갖는 후류풍속분포를 갖는 것을 알 수 있으며, 이후부터는 점차 축대칭의 형태로 후류가 전과되는 것을 알 수 있다. 하지만 수치해석 결과는 실험결과처럼 명확한 근접후류에서의 피크형상과 이후 하류방향에서의 축대칭 형상을 보여 주지 않고 있다.

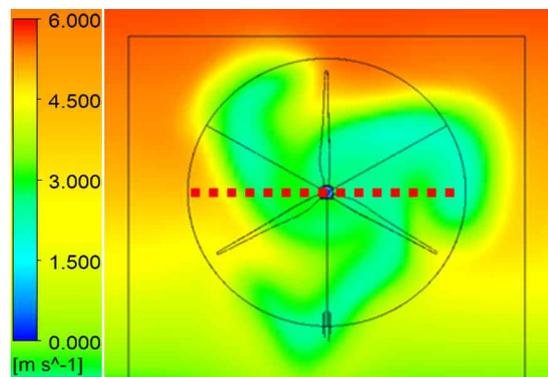


Fig. 10 Simulated wind distribution at 6m (3.14D) downstream

그 이유는 본 연구의 수치해석에서 적용한 프레임 운동(Frame motion)기법에 기인한 것으로, 이는 블레이드의 위치가 0°, 120°, 240°인 경우에 대해 정상상태 해석으로의 블레이드 회전에 의한 후류결과를 보여주기 때문이다. 따라서 실제 풍동에서의 후류실험의 경우 블레이드가 연속적으로 회전하는 조건하에서 하류 영역에서 일정시간 측정된 결과를 평균한 결과이기 때문에 수치해석 결과와는 다소 다른 후류형상을 보여주게 된다. 실제 풍동실험과 유사한 수치해석을 수행하려면 시간에 따라 블레이드의 위치를 조금씩 변화시키며 각각에 대한 유동해석을 수행하는 과도해석이 필요하지만, 이 경우 해석시간은 본 연구의 해석시간인 약 3.5일에 비해 수십 배 이상 증가

하게 되는 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서 적용한 프레임 운동기법의 경우 실험에 비해 후류형상을 정확하게 따라갈 수는 없지만 비교적 짧은 시간에 유사한 결과를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실제 Active Pitch 제어 블레이드를 갖는 풍력터빈 축소모델과 풍동을 실사이즈로 모델링하고 상용 CFD프로그램을 이용하여 피치각 변화에 따라 출력과 후류를 풍동결과와 비교 검증하였다.

수치해석 방법으로 프레임 운동(Frame motion) 기법과 RANS 수식을 이용한 정상상태 해석을 수행하였으며, 정격이전 정격이후 두 풍속에 대해 풍력터빈의 출력을 풍동실험과 비교한 결과 정격 이전 출력계수의 오차율은 2.1%, 정격이후의 오차율은 1.7%를 보였다. 또한 터빈 하류방향으로 허브 높이에서 거리에 따른 후류의 형상을 확인 한 결과 로터 직경 영역의 평균 풍속은 풍동실험 결과와 유사하지만, 후류의 형상에서는 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 후류 형상에서 해석결과와 실험결과가 차이를 보이는 이유는 본 연구에서 적용한 프레임 운동 기법에 있으며, 프레임 운동기법의 경우 해석 시 회전영역을 벗어난 후류의 형상은 정지영역의 Frame에 맞추어지고 후류가 고정된 블레이드 위치에 의해 발생된 형상을 가지고 하류로 흘러가기 때문에, 실제 로터가 회전하면서 발생하는 후류 풍속을 일정시간 평균한 결과와 다소 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 따라서 프레임운동 기법으로 비정상상태 해석의 시간 평균 후류 데이터와 비교하기 위해서는 초기 블레이드 위치를 변화시켜 해석한 결과들의 평균을 취해야 할 것으

로 판단되지만, 이 경우 수십 배에 이르는 계산시간을 고려해야 한다. 따라서, 풍력터빈의 출력이나, 풍력터빈하류에 있어서의 후류의 정확한 형상이 아닌, 후류의 평균풍속등의 유사해를 얻기 위해서는 프레임 운동기법을 적용하는 것이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 "10MW급 부유식 과력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발"과제의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 본 논문의 초기 성과는 2014년 한국정밀공학회 추계학술대회에서 발표되었습니다.

#### Reference

1. Barthelmie, R. J., Frandsen, S.T., Nielsen, M. N., Pryor, S. C., Rethore, P. E., and Jorgensen, H. E, Modeling and measurements of power losses and turbulence intensity in wind turbine wakes Middelgrunden offshore wind farm, Journal Wind Energy, Vol.10, No 6, pp. 517~528, 2007
2. Jang-Oh Mo, Amanullah Choudhry, Maziar Arjomandi, Young-Ho Lee, Large eddy simulation of the wind turbine wake characteristics in the numerical wind tunnel model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 112, pp. 11~24, 2013
3. R. Lanzafame, S. Mauro, M. Messina, Wind turbine CFD modeling using a correlation-based transitional model, Renew. Energy, Vol 52, pp. 31~39, 2013
4. B. S. Kim, I. S. Paek, N. S. Yoo, Scaled Wind Turbine modeling and CFD analysis, Proceedings of KSPE 2014 Autumn conference, Vol. 10, pp. 842, 2014

5. Bottasso, C. L., Filippo C., and Vlaho P, Wind tunnel testing of scaled wind turbine models: Beyond aerodynamics, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 126, pp.1~10, 2011
6. R. B. Langtry, J. Gola, F. R. Menter., Predicting 2D Airfoil and 3D Wind Turbine Rotor Performance using a Transition Model for General CFD Codes, 44<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno 2006
7. F. R. Menter, R. Langtry, S. Völker, Transition Modelling for General Purpose CFD Codes, Flow Turbulence Combust, Vol.77, pp.277~303, 2006
8. T. H. Lee, C. W. Kim, Sensitivity Study of Turbulence Models and Mesh Resolutions for the Airfoil of a Wind Turbine Blade, Korean Society for Aeronautical and Space Sciences fall conference, pp. 1166~1171, 2011.11.