

## 대형 풍력터빈 모형의 공력 성능 및 후류 유동장에 대한 비교 연구

정두원\* · 원영수\* · 강승희\*\*†

### Comparison Study on Aerodynamic Performance and Wake Flow Field for a MW-Class Wind Turbine Model

Duwon Jeong\*, Young Soo Won\* and Seung-Hee Kang\*\*†

**Abstract** A comparison study between computational-fluid-dynamics simulation and wind tunnel test for a megawatt-class wind turbine is conducted. For the study, flow-field in wake, basic aerodynamic performance, and effect of the yaw error for a 1/86 scaled-down model of the NREL offshore 5 MW wind turbine are numerically calculated using commercial software “FloEFD” with  $k-\epsilon$  turbulence model. The computed results are compared to the wind tunnel test performed by the constant-velocity mode for the model. It is shown that discrepancy are found between the two results at lower tip-speed ratio and higher yaw angle, however, the velocity-deflection distribution in the wake, the torque coefficient at moderated and high tip-speed ratios are in good agreement with the wind tunnel test.

**Key Words** : NREL 5 MW wind turbine(NREL 5 MW 풍력터빈), FloEFD, Aerodynamic analysis(공력 해석), Wake Flow Field(후류 유동장), Yaw error(요 오차)

#### 1. 서론

최근 대용량 수평축 풍력터빈은 5 MW 급 이상이 실용화 되고 있으며 20 MW 급 대용량 풍력터빈의 설계가 시도되고 있다<sup>[1]</sup>. 또한, 풍황 조건이 우수한 지역에서는 대용량의 전력 생산이 가능하

도록 대단위 풍력단지가 조성되고 있다.

풍력단지에서 풍력터빈이 다른 풍력터빈의 후류에 놓이게 되거나, 바람이 풍력터빈의 로터 회전면에 수직하게 흐르지 않는 경우 출력 감소가 발생되어 전력 생산량 감소가 발생된다. 또한, 풍력터빈에 비정상 및 비대칭 하중 변동 등에 따른 진동 발생으로 부품의 수명 감소를 유발시켜 풍력터빈의 유지보수 비용을 증가시킬 수 있게 된다. 바람의 비대칭성이 발생하는 경우 풍력터빈은 출력 손실을 줄이기 위해 요 시스템(yaw system)을 가동시켜 블레이드 축이 바람의 방향에 일치되도록 제어한다. 그러나 작은 요각(yaw angle) 변화에 무거운 풍력터빈을 민감하게 반응하는 경우 오히려 관

---

† Department of Aerospace Engineering,  
Chonbuk National University

E-mail: ksh@jbnu.ac.kr

\* DeltaES Co., Ltd.

\*\* Department of Aerospace Engineering,  
Chonbuk National University

---

런 부품의 손상 등의 문제가 발생할 수도 있다고 알려져 있다. 따라서 MW급 풍력터빈으로 조성되는 풍력단지인 경우 20년 이상의 운용 보장 뿐 아니라 최적의 전력 생산을 위해서는 다양한 풍황 조건에서의 기본적인 성능뿐 아니라 요각 변화에 따른 성능에 대한 연구가 선행되어야 한다.<sup>[2-7]</sup>

이러한 대형 풍력터빈의 성능 예측에 대한 연구는 실증시험 결과를 활용한 연구, 풍동시험을 이용한 연구와 그리고 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 이용한 연구가 주로 이루어지고 있다. 실증시험의 경우 실제 운용 조건에서의 시험이 이루어진다는 장점이 있으나, 시험 결과에는 기본적인 공력 성능뿐 아니라 바람 속도 및 방향 변화, 난류도 변화와 기계적 마찰 성분 등이 포함되어 있어 정확한 공력 성능만을 확인하기 어렵다는 단점이 있다. 풍동시험의 경우는 균일한 흐름 뿐 아니라 다양한 풍황 조건 등 설계 조건의 풍황 조건이 정확히 모사된 상태에서 시험 수행이 가능하며, 정밀한 시험 수행으로 정확한 자료 제공이 가능하다는 장점이 있지만, 모형의 설계 및 제작에 상대적으로 많은 시간이 소요되며, 풍동 시험부 크기의 제약 등으로 축소모형을 사용하여 시험해야 한다는 단점이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>[8]</sup> 이에 반해 전산유체역학을 이용한 연구는 모사된 점성 유동 및 격자 생성 등에 일부 제약이 있지만 실물에 대한 성능 자료 제공이 가능하다는 장점이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>[9,10]</sup>

본 연구에서는 CAD 프로그램 및 자동 격자 프로그램이 내장되어 있어 격자 생성에 많은 노력이 불필요하다고 알려진 상용 소프트웨어인 FloEFD<sup>[11]</sup>을 사용하여 풍동시험 결과와 비교하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 NREL 5MW 해상풍력터빈(NREL offshore 5 MW baseline wind turbine) 로터 블레이드의 축소 모형의 풍동시험이 수행된 결과와 공력성능을 비교하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 풍력터빈의 기본적인 공력 성능 및 요각 변화에 따른 성능 변화와 후류 유동장에서 속도 결핍을 수치적으로 계산하여 풍동시험 결과와 상호 비교하였다. 또한, 후류 유동장의 수치적 가시화를 통하여 요각 변화에 따른 풍력터빈의 후류 유동장 구조 변화를 연구하였다.

## 2. 풍력터빈 모형 형상 및 수치적 기법

본 연구에 사용된 블레이드는 NREL 의 5 MW 해상풍력터빈 형상의 1/86 축소 모형이다<sup>[8,12]</sup>. 이 풍력터빈의 실물 직경은 126 m이며 세 개의 블레이드로 구성되어 있는 수평축 풍력터빈이다. 시동 풍속, 정격풍속 그리고 정지풍속은 각각 3 m/s, 11.4 m/s 그리고 25 m/s이다. 블레이드를 구성하는 에어포일은 원형실린더, 델프트 대학교(Delft University of Technology)에서 제시된 5개의 에어포일과 NACA 64 계열 에어포일 하나가 사용되었다. 본 연구에서 사용된 형상은 실물의 1/86 크기이며, 블레이드의 끝단은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 유선 형태로 페어링(fairing) 되어 있다. 허브의 길이와 직경은 각각 0.152 m과 0.180 m인 타원형 형태로 설계, 제작되었다. 페어링 부분을 제외한 블레이드 반경(R)은 0.72 m이다. Fig 2에서 보는 바와 같이 풍동시험 모형은 블레이드의 회전과 토크 및 회전수를 측정하기 위한 시험 장치가 폭과 높이가 각각 0.18 m인 사각형 형상의 나셀 안에 설치되어 있다. 모형에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [8]에 제시되어 있다.

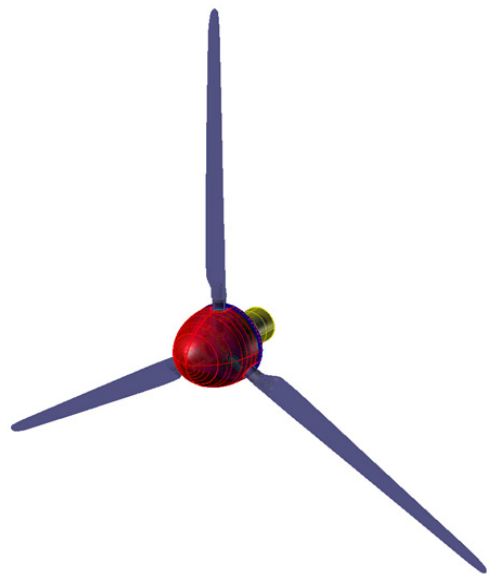


Fig. 1. Blade-model configuration of the NREL offshore 5 MW wind turbine<sup>[8]</sup>.

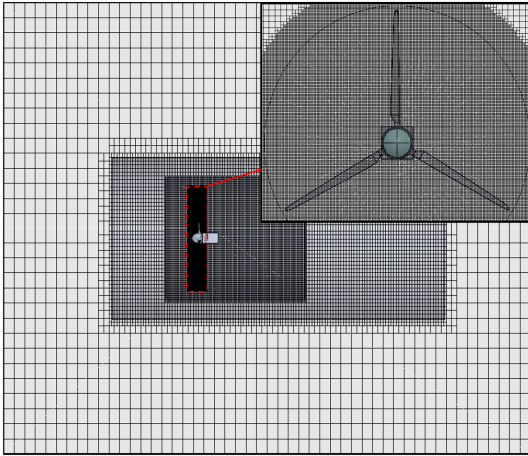


Fig. 2. The grid around the wind turbine model.

본 연구에서 풍력터빈의 공력 성능 및 후류 유동장 해석을 위해 사용된 소프트웨어는 FloEFD ver 17<sup>1111</sup>이다. 이 소프트웨어는 1980년대 러시아에서 항공우주 분야에 사용하기 위해 개발된 프로그램으로 3D CAD 프로그램 및 육면체의 자동격자 생성 기능이 내장되어 있어, 형상설계 및 수정, 격자 생성, 계산 및 후처리 과정이 모두 가능한 동시병행 전산유체역학 프로그램으로 알려져 있다. 이 프로그램은 다양한 열·유동 해석이 가능할 뿐 아니라 다양한 재료 물성치 및 데이터베이스 제공으로 다양한 수치해석이 가능한 것으로 알려져 있다. 또한, 설계자가 자신이 사용하고 있는 CAD 프로그램과 연계하여 설계 중에 다양한 형상변화를 반영하여 성능해석이 가능하다는 장점이 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 NREL의 5MW 해상 풍력터빈 축소모형의 풍동시험 결과와 동일한 대기 조건과 균일한 입구 속도 조건으로 계산을 수행하였다. 난류 모델은 프로그램에서 제공하는 Standard  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며, 블레이드의 회전은 sliding 기법을 사용하여 모사하였다. 사용된 셀 수는 약 2.9 백만개이며, Fig. 2에 FloEFD에 내장된 자동격자 프로그램을 사용하여 생성된 풍력터빈 모델 주변 격자를 나타내었다.

### 3. 결과 검토

FloEFD를 사용하여 NREL 5 MW 해상 풍력터

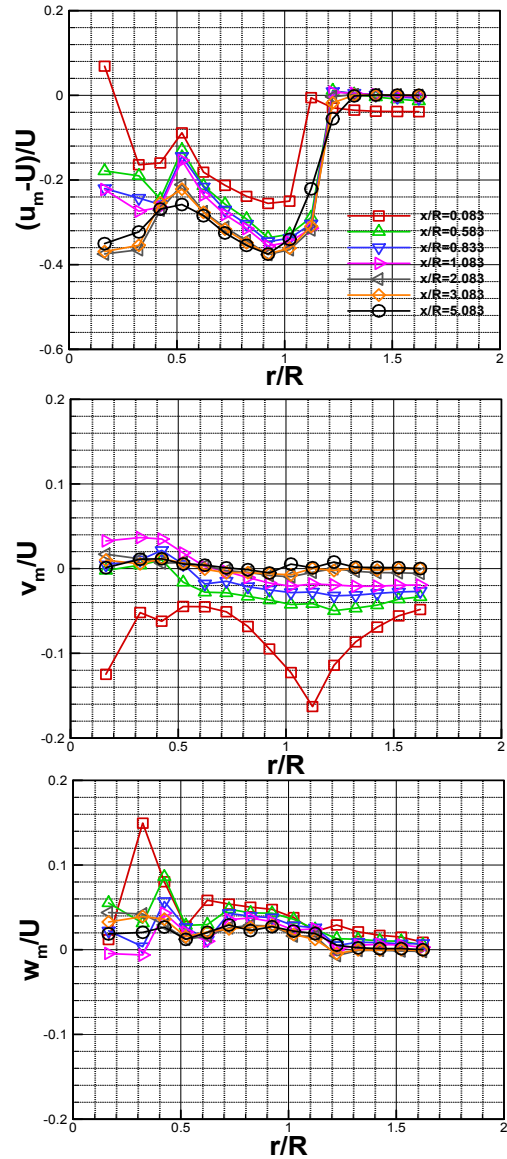


Fig. 3. Normalized mean velocity change in the wake (Wind tunnel test [8])

빈의 후류 유동장에서의 3차원 속도분포를 계산하여 풍동시험 결과와 비교하였다. 풍동시험은 블레이드 윗면과 아랫면의 시위의 각 10% 지점에 경계층을 천이시킨 형상으로 정격풍속 조건인 풍속 11.4 m/s에서 회전속도 1,045 rpm으로 수행되었다. 풍동시험은 3차원 열선풍속계를 사용하여 각 지점에서 속도를 측정한 후 그 평균값을 나타낸

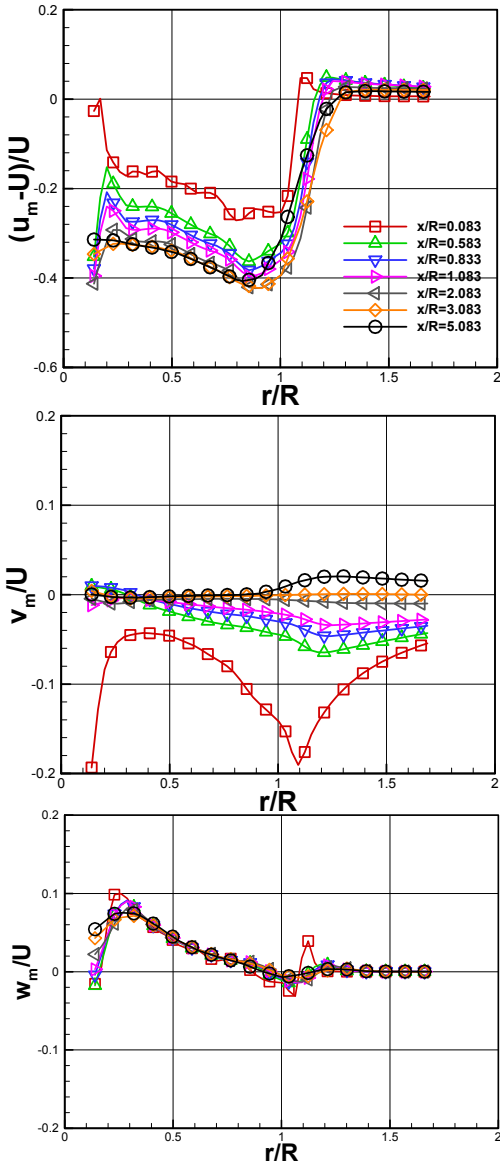


Fig. 4. Normalized mean velocity change in the wake (FloEFD)

것이다. 속도분포는 길이방향(x)으로 반경의 0.083 배에서 5.083 배까지, 반경 방향으로는 0.16에서 1.62 배까지 측정되었다. FloEFD의 입력조건은 풍동시험과 동일한 조건으로 계산을 수행하였다. 풍동시험 결과[8]를 Fig. 3에 FloEFD로 해석된 결과를 Fig. 4에 각각 나타내었다. 그림에서 r은 블레이드 회전축을 중심으로 반경방향 거리를 R은 블레이드

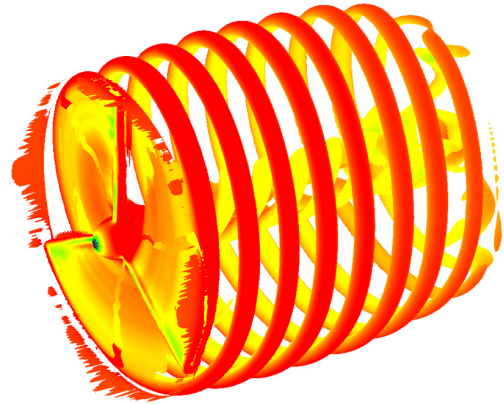


Fig. 5. Vorticity contour around the wind turbine model ( $\psi=0^\circ$ ,  $U=11.4$  m/s,  $\Omega=1,045$  rpm)

이드의 반경을 나타낸다. 삼차원 평균속도  $u_m$ ,  $v_m$  그리고  $w_m$ 은 후류에서의 속도이며 그림에서는 자유흐름과의 속도차인 결핍속도를 풍속  $U$ 로 무차원화 된 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 속도결핍 현상이 블레이드의 끝단 부근과 허브에 근접한 부분에서 크게 나타나며, 길이 방향으로 멀어질수록 속도가 점차적으로 회복되는 현상이 FloEFD를 사용하여 계산된 결과와 풍동시험 결과가 매우 유사하게 나타남을 볼 수 있다. 또한, 반경 방향과 길이 방향으로 결핍된 속도가 회복되는 경향도 두 결과가 유사하게 나타남을 볼 수 있다. Fig 5에서 FloEFD를 사용하여 계산된 후류 유동장의 와도분포를 보면 블레이드에서 발생하는 와류 생성 및 후류 방향으로 전파되는 경향이 매우 적절하게 묘사된 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig 3과 Fig 4에서 보는 바와 같이 반경의 0.5배 이내의 매우 근접한 후류 영역에서는 수치적으로 계산된 결과가 풍동시험과 결과와 약간의 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 이는 풍동시험이 블레이드 윗면과 아랫면에 흐름을 난류로 천이 시켰으나, FloEFD에서 제공하는 난류 모델이 이를 적절히 묘사 시키지 못해 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 6에 요각  $0^\circ$ 의 정격속도 조건에서 고정된 풍속에서 회전속도를 변화시켜 계산된 기본 형상에 대한 토크계수( $C_Q$ ) 변화를 풍동시험 결과와 비교하여 나타내었다. 풍동시험은 풍속을 고정시키고 블레이드의 회전수를 300 rpm ~ 2,000 rpm

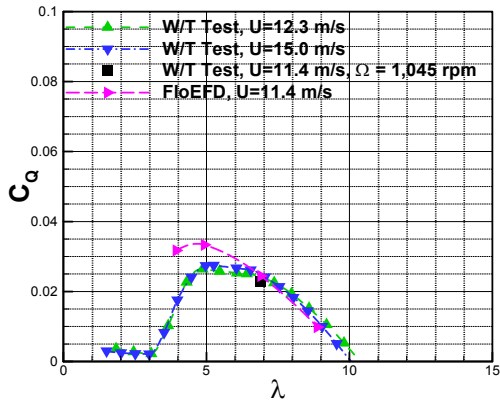


Fig. 6. Torque coefficient curve for the wind turbine model.

으로 변화시켜 수행된 결과이다. 이때 블레이드 반경 70%에서의 시위 기준 레이놀즈 수는  $6.4 \times 10^4 \sim 4.4 \times 10^5$  이다. 그림에서 보는 바와 같이 날개 끝 속도비 ( $\lambda$ )가 약 6 이상에서는 FloEFD를 사용하여 계산된 결과가 풍동시험 결과와 매우 일치되는 경향을 보이지만, 날개 끝 속도비가 6 이하에서는 풍동시험 결과보다 큰 토크 계수를 보임을 알 수 있다. 이는 풍동시험이 수행된 레이놀즈 수가 천이 등의 복잡한 유동을 보이는 영역이지만, 낮은 날개 끝 속도비 조건에서 수행된 계산에는 Standard k- $\epsilon$  난류 모델이 풍동시험이 수행된 유동장을 제한적으로 모사되어 그 차이가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 낮은 날개 끝 속도비까지 정확한 블레이드 표면 위에서의 유동 모사를 위해서는 블레이드 상의 유동 천이 등을 보다 적절히 모사 할 수 있는 난류 모델 등의 추가가 필요할 것으로 판단된다.

FloEFD을 사용하여 풍력터빈의 요각(yaw angle) 변화에 따른 성능 변화를 해석하였다. 계산은 풍동시험과 동일하게 정격속도 11.4 m/s, 회전속도 1,045 rpm 조건에서 수행되었다. 풍동시험시 요각에 따른 토크계수만 제공되어 요각 변화에 따른 후류 유동장을 계산하여 요각 0°에서 후류 유동장에서의 와도 분포를 Fig. 7에 요각 15°에서의 와도 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유입되는 흐름각 변화에 따라 후류의 비대칭

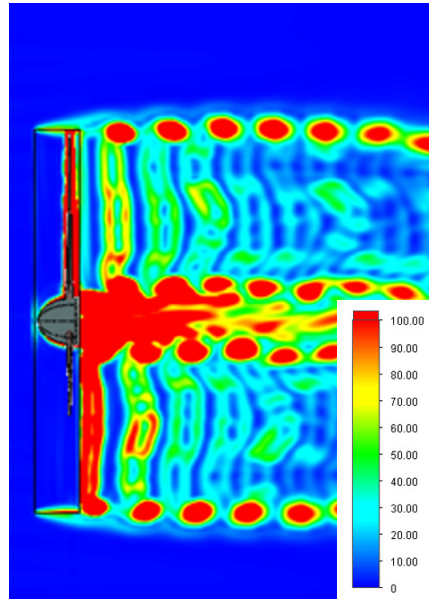


Fig. 7. Vorticity contour of the wake field (top view,  $\psi=0^\circ$ ,  $U=11.4$  m/s,  $\Omega=1,045$  rpm)

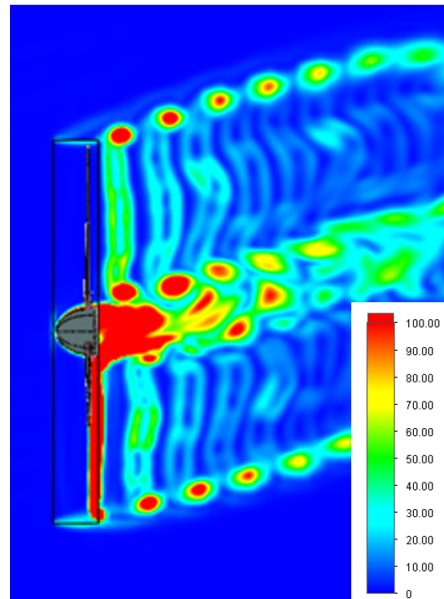


Fig. 8. Vorticity contour of the wake field (top view,  $\psi=15^\circ$ ,  $U=11.4$  m/s,  $\Omega=1,045$  rpm)

성을 관찰 할 수 있으며, 후류의 속도 결핍 정도는 상대적으로 크지 않음을 확인 할 수 있었다. 그러나 블레이드 끝단에서 발생하는 와류의 강도는 요각 15°의 경우가 빠르게 붕괴 되는 것을 확인할 수



있었다.요각을  $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 를  $5^{\circ}$  간격으로 변화 시키면서 성능을 계산한 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서  $C_{Q_0}$ ,  $C_{P_0}$ 는 요각  $0^{\circ}$ 일 때의 토크계수와 출력계수를 각각 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 풍동시험의 경우 요각이 증가할수록 토크계수가 감소되는 것을 볼 수 있다. 요각이  $10^{\circ}$  이내에서는 그 감소폭이 매우 적지만  $10^{\circ}$ 이상에서는 요각 변화에 따른 토크의 감소가 매우 큼을 볼 수 있다. FloEFD를 사용하여 해석한 결과 그 감소되는 경향은 풍동시험 결과와 유사하게 나타났지만, 요각  $10^{\circ}$  이상에서는 풍동시험 결과와 비교시 그 폭이 상당히 크게 나타남을 볼 수 있다. 이를 출력계수( $C_p$ )로 나타낸 Fig. 10의 경우에서 보는 것

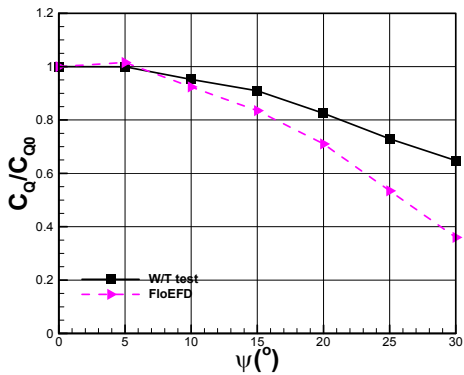


Fig. 9. Torque coefficient variation by yaw angle for the wind turbine model ( $U=11.4$  m/s,  $\Omega=1,045$  rpm).

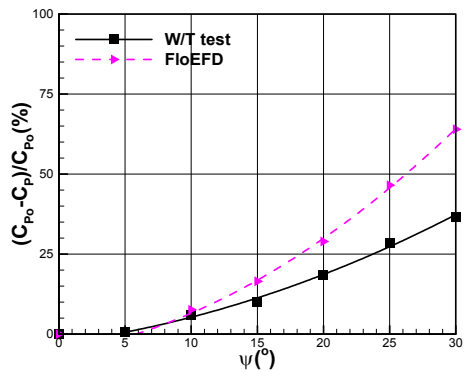


Fig. 10. Power coefficient reduction by yaw-angle variation for the wind turbine model ( $U=11.4$  m/s,  $\Omega=1,045$  rpm).

처럼 요각  $10^{\circ}$ 에서는 약 1 % 이내 차이를 보이지만 요각  $30^{\circ}$ 에서는 그 차이가 약 27 %로 매우 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 요각 변화가 클수록 흐름의 박리 등 복잡한 유동 특성을 보이는 블레이드 부근의 경계층 내의 흐름을 사용된 난류 모델이 적절히 모사하지 못해 나타나는 현상으로 판단되며, 다양한 풍황 조건에서 보다 정확한 유동장 해석 결과를 제공하기 위해서는 FloEFD에서 난류 모델링 등에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

FloEFD를 사용하여 NREL 5 MW 해상풍력터빈의 1/86크기 풍력터빈 모형의 후류 유동장 및 성능을 계산하여 풍동시험 결과와 비교한 결과 풍력터빈의 후류에서의 속도결핍, 정격출력 이상의 날개 끝 속도비와 요각  $10^{\circ}$  이내의 낮은 요각에서의 토크 및 출력계수는 비교적 적절히 모사되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 후류 유동장등의 가시화 결과는 요각 변화에 따른 유동장의 구조 변화를 적절히 모사하는 것으로 판단된다. 그러나 낮은 날개 끝 속도비, 블레이드에 근접된 부근에서의 유동장 그리고 높은 요각 등에서도 신뢰도가 높은 해석 결과를 제공하기 위해서는 four- equation transition SST 난류 모형 등을 포함한 경계층 내의 천이 및 난류 유동을 적절히 모사할 수 있는 난류 모델의 추가 및 개발이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 CAD 프로그램 및 자동 격자 프로그램이 내장되어 있어 설계 단계에서 다양한 형상 후보군에 대해 빠른 성능 해석이 용이하다고 알려진 FloEFD 소프트웨어를 사용하여 NREL 5 MW 해상풍력터빈의 블레이드의 성능 및 후류 유동장 해석을 수행하여 풍동시험 결과와 비교하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 1/86 축소된 풍동시험 모형을 사용하여 수행된 풍동시험 결과와 계산 결과를 상호 비교하였다. 그 결과 풍력터빈 후류의 속도 결핍 현상, 정격출력 조건에서의 기본적인 성능 및 낮은 요각 범위에서의 성능 해석 결과는 풍동시험과 유사한 결과를 보이지만 낮은 날개 끝 속도비 및 높은 요각 범위에서는 풍동시험과 큰

차이를 보이고 있음을 볼 수 있었다. 추후 보다 높은 신뢰도의 계산 결과를 제공하기 위해서는 블레이드 부근의 경계층 내의 천이 및 난류를 적절히 모사할 수 있는 난류 모델 보완 등이 필요할 것으로 판단된다.

## REFERENCE

- 1) Brood, R., Ceyhan, Ö., Engels, W., Peeringa, J., and Winkel, G. de, "UPWIND 20MW wind turbine pre-design: blade design and control", ECN-E-11-017, 2011.
- 2) Boorsma, K., "Power and loads for wind turbines in yawed conditions: Analysis of field measurements and aerodynamic predictions," ECN-E-12-047, 2012.
- 3) Hansen, A. C., "Yaw Dynamics of Horizontal Axis Wind Turbines," NREL TP-442-4822, 1992.
- 4) Ouyang, T., Kusiak, A., and He, Y., "Predictive Model of Yaw Error in a Wind Turbine," Energy, Vol. 123, 2017, pp. 119~130.
- 5) Wan, S., Cheng, L. and Sheng, L., "Effects of Yaw Error on Wind Turbine Running Characteristics Based on the Equivalent Wind Speed Model," Energies Vol. 8, 2015, pp. 6286-6301.
- 6) Ribrant, J. and Bertling, L. M., "Survey of Failures in Wind Power Systems with Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997-2005," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 1, 2007.
- 7) Hwang, B. S., (Editor) An Understanding of Advanced Wind Turbine, A-Jin, 2009.
- 8) Kang, S.-H. and Ryu, K.-W., "An Experimental Study on Wake Flow-Field of NREL 5 MW Wind Turbine Model," J. of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 45, No. 2, 2007.
- 9) Vermeer, L. J., Sørensen, J. N., and Crespo, A., "Wind Turbine Wake Aerodynamics," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 39, 2003.
- 10) Martinez Tossas, L. A. and Leonardi, S., "Wind Turbine Modeling for Computational Fluid Dynamics," NREL/SR-5000-55054, 2013.
- 11) FloEFD Ver. 17, Technical Reference, Mentor Graphics Corp.
- 12) G., "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development; National Renewable Energy Laboratory," NREL TP-500-38060, 2009.