

CFD에 의한 수평축 풍력발전용 터빈의 유동해석 및 성능예측에 관한 연구

김정환† · 김범석* · 김진구** · 남청도*** · 이영호****

(원고접수일 : 2003년 6월 26일, 심사완료일 : 2003년 10월 30일)

A Study on Flow Analysis and an Estimate of Performance for HAWT by CFD

Jeong-Hwan Kim† · Beom-Seok Kim* · Jin-Gu Kim** · Chung-Do Nam*** · Young-Ho Lee****

Key words : HAWT(Horizontal Axis Wind Turbine, 수평축 풍력발전용 터빈), power coefficient(동력계수), stall(실속), TSR(Tip Speed Ratio, 주속비), wake(후류)

Abstract

The purpose of this 3-D numerical simulation is to evaluate the application of a commercial CFD code to predict 3-D flow and power characteristics of wind turbines. The experimental approach, which has been main method of investigation, appears to be its limits, the cost increasing with the size of the wind turbines, hence mostly limited to observing the phenomena on rotor blades. Therefore, the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques and Navier-Stokes solvers are considered a very serious contender. The flow solver CFX-TASCflow is employed in all computations in this paper. The 3-D flow separation and the wake distribution of 2 and 3 bladed Horizontal Axis Wind Turbines (HAWTs) are compared to Heuristic model and smoke-visualized experimental result by NREL(National Renewable Energy Laboratory). Simulated 3-D flow separation structure on the rotor blade is very similar to Heuristic model and the wake structure of the wind turbine is good consistent with smoke-visualized result. The calculated power of the 3 bladed rotor by CFD is compared with BEM results by TU-Delft. The CFD results of which is somewhat consist with BEM results, under an error less than 10%.

† 책임저자((주)IIT 기술개발실) E-mail:jhkim@pivlab.net, T : 051)410-4293
* 한국해양대학교 대학원 기계공학과
** 충북과학대학 컴퓨터응용기계과
*** 한국해양대학교 해사대학 기관공학부
**** 한국해양대학교 기계·정보공학부

1. 서 론

최근 에너지 문제의 심각성을 인식한 선진 국가들을 중심으로, 에너지 문제를 극복하기 위하여 대체 에너지개발에 관한 연구가 급속도로 진행되고 있으며, 이에 따라 풍력발전에 대한 관심도 또한 급격히 증가하고 있다. 풍력발전은 바람의 운동에너지를 이용하여 회전자를 통해 전기에너지를 생산하는 발전 방식이므로, 풍력터빈이 설치 될 위치의 풍황자원 특성에 따라 최적의 로터 블레이드(rotor blade)를 설계하는 것이 필수적이다. 세계적으로 상용화되고 있는 풍력터빈의 로터 블레이드 직경은 수 십미터에 이를 정도로 대형화되는 추세이다. 이에 따라, 보다 가볍고 우수한 성능의 로터 블레이드를 설계하고자, 공기역학적(aerodynamic)인 최적설계에 관한 관심이 더욱 증가하였다.^[1] 지금까지 설계자들은 설계된 로터 블레이드의 유동해석 및 성능예측을 위하여 매번 대규모 풍동(wind tunnel)실험을 거쳐야만 하는 커다란 불편함이 있었다. 이는 상당한 경제적 지원이 없으면 거의 불가능 한 일이다. 따라서, 설계자들의 최대 관심 분야 중 한가지는, 보다 효율적으로 설계변수의 신속한 피드백(feed back)이 가능한 유동해석 및 성능예측 방법을 찾는 것이며, 이에 따라, Riso(Denmark), DTU(Denmark), DLR(Germany), FFA(Sweden)등의 연구소를 중심으로 풍력발전용 터빈의 유동해석 및 성능예측을 위한 상용 CFD 코드의 적용성 평가에 관한 연구가 진행되고 있다. 따라서, 본 연구의 목적은 풍력발전용 로터 블레이드의 3차원적 유동특성에 관한 해석과 성능예측을 위한 CFD 코드의 적용성 평가에 있으며, 이를 바탕으로 보다 효율적으로 우수한 성능을 가지는 풍력터빈을 설계함에 있다. 본 연구의 모든 수치계산은, 회전체 유체기계에 대하여 비교적 정확한 결과를 제시한다고 알려진 CFX-TASCflow를 이용하였다.

2. 형상모델링 및 계산격자

2.1 형상모델링

본 연구의 수치해석 대상으로 사용된 로터 블레

이드는 서로 다른 두 가지 형태이며, 3 블레이드형 로터와 2 블레이드형 로터로 구분된다. 3 블레이드형 로터는 직경 40m, 정격출력 500kW의 수평축 풍력터빈이며, 네덜란드 델프트 대학(TU-Delft) 풍력에너지 팀에서 설계된 실속제어형로터이다. 계산격자를 생성하기 위한 초기 형상화 작업은 실제 설계 모델의 3차원 좌표를 이용하여 이루어졌다. 하나의 단일 블레이드는 Du-91-W-250, Du-93-W-210, NACA 63618의 모두 세 가지 익형 단면으로 구성되며, 모델링 된 3차원 형상을 Fig.1에 나타내었다.

또한, 2 블레이드 형 수평 축 로터 또한 마찬가지로, 델프트 대학 풍력에너지 팀에 의해 설계되었으며, 직경 1.2m, 시위길이(chord length) 0.08m, 허브 연결부(root cutout) 길이 0.018m를 가진다.^[2] 이 로터 블레이드는 NACA 0012 익형으로 구성되어 있으며, 블레이드 끝단의 팁 부분부터 허브 방향으로 0.06m 지점까지의 비틀림 각은 0°이며, 0.06m 이후부터 허브 부분까지의 비틀림 각은 다음의 식에 따라 정의된다.

$$\theta(r/R) = (6^\circ + \theta_{Tip}) - 6.67 r/R \quad (1)$$

여기서, θ : 비틀림 각

θ_{Tip} : 팁 부분 비틀림 각

r, R : 국소반경 및 반경

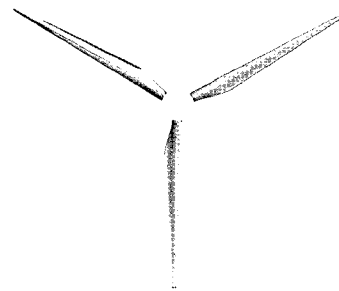


Fig. 1 Configuration of 3 bladed type rotor.

모델링된 2 블레이드형 풍력터빈의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

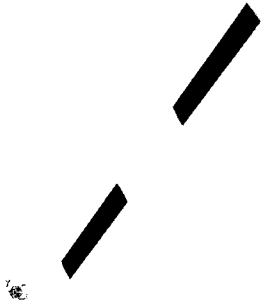


Fig. 2 Configuration of 2 bladed type rotor.

2.2 계산격자

수치해석 결과의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나가 계산격자의 품질이다. 계산격자를 생성함에 있어 저 레이놀즈 수 난류모델을 적용함에 따라, 신뢰성 있는 해석결과를 확보하기 위하여 벽 근처 격자 밀집도에 상당히 주의 할 필요가 있다.^[3] 따라서 본 연구에 사용된 격자계에서 로터 블레이드 표면에 집중된 첫 번째 격자점은 선행연구자들의 결과를 참조하여 $y^+ \leq 2$ 로 하였다. 계산격자는 모두 ICEM-CFD를 이용하여 생성하였으며, 계산의 효율성을 고려하여 블레이드 주변은 O-Type, 외부는 H-Type 격자로 구성하였다. 전체 격자계는 정렬 다중블록격자계(structured multi-block grid)이며, 3 블레이드형 로터는 약 800,000 개, 2 블레이드형 로터는 약 540,000개의 격자점으로 구성되었다. Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5에 3 블레이드형과 2 블레이드형 로터의 계산격자 전체모습과 블레이드 주변의 확대모습을 각각 나타내었다.

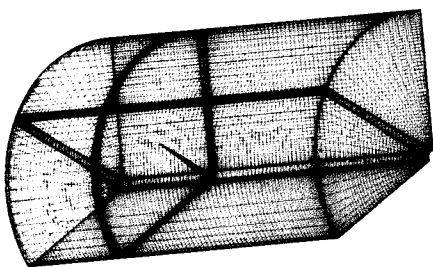


Fig. 3 Computational grid (3 bladed type).

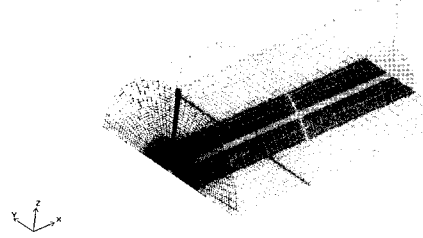


Fig. 4 Computational grid (2 bladed type).

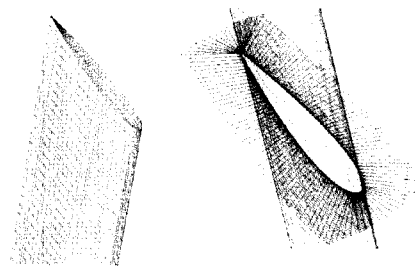


Fig. 5 Computational grid near the rotor.

3. 수치해석기법 및 계산조건

3.1 수치해석기법

CFX-TASCflow는 3차원 레이놀즈 평균 나비에 스토크스 (Raynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 적용하며, 지배방정식은 유한체적법에 (Finite Volume Method) 의하여 이산화 된다. 본 수치계산은 3차원 비압축성 정상상태 유동조건에서 수행되었다. 상용 CFD 코드에서 기본적으로 제공되는 표준 $k-\epsilon$ 모델은, 저 레이놀즈 수를 갖는 유동의 표면박리 현상을 정확하게 예측할 수 없는 단점을 가지고 있다고 보고되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 로터 블레이드 표면에서 발생하는 3차원적 유동박리 현상에 대한 영향을 반영하기 위해, 표준 $k-\epsilon$ 모델, 표준 $k-w$ 모델에 비하여 비교적 정확한 예측이 가능하다고 알려져 있는 SST (Shear Stress Transport) $k-w$ 모델을 적용하였다. 대류항의 이산화 기법으로는 2차정도의 정확도를 가지는 MLPS (Modified Linear Profile Skew)를 적용하였다.

3.2 경계조건

입구조건으로서 균일속도 유입조건을 주었으며, 출구 조건은 출구영역으로 정의된 부분에 대기압력 조건을 부여하였고, 전체 격자계는 블레이드와 허브를 포함하는 부분에 대해 회전하는 상대 좌표계로 설정하였다. 효율적인 계산을 위하여, 하나의 블레이드를 포함하는 영역에 대해서만 계산을 수행하였으며, 분할된 경계면은 주기조건으로 처리하였다.

3.3 계산조건

풍력터빈의 성능을 나타내는데 있어서 가장 보편화된 방법은 주속비(TSR, λ)의 변화에 따른 동력계수(C_p)의 변화를 나타내는 것이며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$TSR(\lambda) = \frac{R\Omega}{V_i} \quad (2)$$

- 여기서, V_i : 유입속도
- R : 블레이드 반경
- Ω : 회전각속도

본 연구에서는 3 블레이드형 로터의 경우, 유입 풍속을 5m/s로 하고, 로터 블레이드의 회전속도를 30~100rpm 까지 10rpm씩 증가시키며, 모두 8가지 경우에 대한 계산을 수행하였으며, 이때 주속비의 범위는 2.89~9.63의 범위를 가지며, 이는 델프트 대학에서 BEM법에 의해 예측된 결과의 조건과 정확히 일치하는 범위이다. 2 블레이드 로터의 경우도 주속비의 변화에 따른 계산을 수행하였으며, 델프트 대학 실험결과의 주속비와 정확히 일치하게 계산 조건을 설정하였다. 모든 계산은 Pentium 4 PC (1.7GHz, 1GB Ram)에서 수행되었으며, 반복계산 200번 후 원활히 수렴하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유동해석

상당히 빠른 속도로 회전하는 로터 블레이드 후

류에는 성능에 영향을 주는 날개 끝 와류(wing tip vortex) 및 실속(stall) 등이 발생한다. 회전하는 로터 블레이드에는 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)의 압력차에 의해 블레이드 팁 부분에서 날개 끝 와류가 발생하게 된다. 이러한 날개 끝 와류에 대한 영향으로 블레이드 주위의 순환(circulation) 분포가 감소함으로써 양력(lift force) 손실을 초래하게 되며, 이러한 손실은 성능저하로 나타나게 된다.

Fig. 6은 2 블레이드 로터의 주속비 변화에 따른 날개 끝 와류의 수치해석 결과를 나타낸 그림이다. 주속비의 정의에 따라, 주속비가 큰 값을 가질수록 회전속도가 빨라지므로, 주속비가 3, 5인 경우에 비해 익형의 전연 부분에서 미소한 와류가 발달하는 것을 볼 수 있다. 주속비가 증가할수록 로터 블레이드의 회전속도 또한 빨라지게 됨으로, 압력면과 흡입면사이의 압력차는 점점 커지게 되고, 팁 부분에서 발생하는 와류의 구조는 점점 복잡한 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 와류는 익형의 전연부분을 시작으로, 소용돌이 형상으로 말려 올라가며 회전 반대방향으로 강하게 발달하게 됨을 알 수 있다.

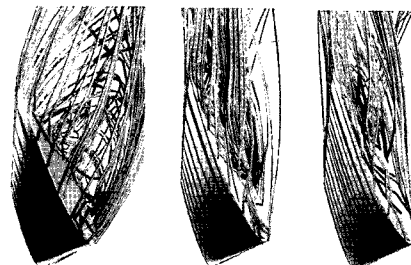


Fig. 6 Tip vortex (TSR : 1, 3, 5).

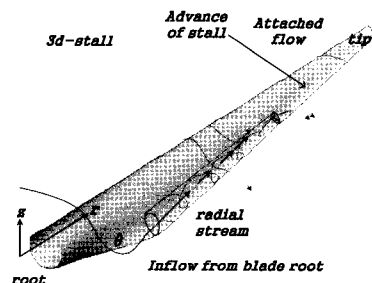


Fig. 7 Sketch of blade surface vortex structure^[4].

Fig. 7은 로터 블레이드 표면 주위에서 발생하는 와류의 구조를 스케치한 것이다.

그림에서 볼 수 있듯이 로터 블레이드 표면에서 발생하는 와류는 상당히 복잡한 구조를 가진다. 회전하는 로터 블레이드의 압력면으로 유입되는 바람은, 허브 부분에서 박리되어 원심 가속력과, 팁과 허브부분의 압력차에 의한 영향으로 팁 끝단으로 블레이드 표면을 따라 점진적인 이동을 하는 흐름을 형성하게 된다. 이러한 흐름은 전연에서 후연 끝단까지 흐르는 기류의 원활한 흐름을 방해하며, 블레이드 표면에서 강제로 복잡한 구조의 와류를 발생하게 된다. 그 후, 이러한 반경방향 흐름은 블레이드의 어떤 지점에서 회전반대방향으로 이탈하게 된다. 이러한 반경방향 흐름은 블레이드 전연과 후연에서도 발생 할 수 있으며, 이 영향 또한 무시할 수 없다고 보고 되어 있다.^[4]

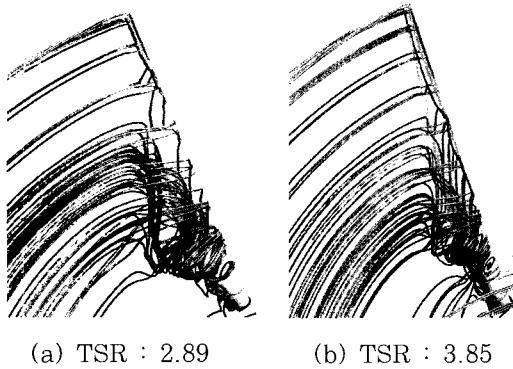


Fig. 8 Surface vortex distribution on a 3 bladed type.

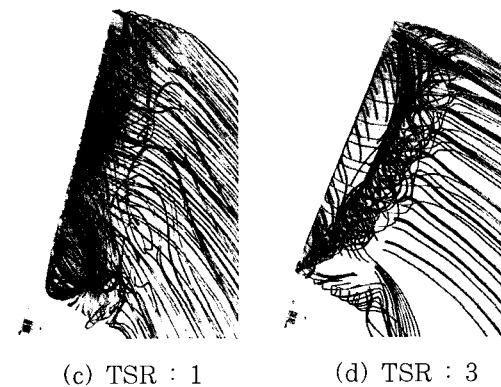


Fig. 9 Surface vortex distribution on a 2 bladed type.

Fig. 8은 3 블레이드형 로터 표면 부근에서 발생하는 와류의 수치해석 결과를 나타낸 것이다.

앞서 설명한 로터 블레이드 표면에서 발생하는 와류의 구조와 유사한 패턴의 흐름을 발생시키고 있음을 알 수 있으며, 상당히 복잡한 형태의 와류가 블레이드 표면에서부터 강하게 발생하고 있음을 확인 할 수 있다. 이때, 이러한 와류가 심하게 발생하는 경우를 실속(stall)이라 하며, 양력의 급격한 손실에 따른 블레이드 전체적인 성능 저하를 초래한다. 주속비가 2.89에서 3.85로 증가할수록 블레이드 표면에서 발생하는 와류는 점점 블레이드 표면으로 접근하는 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 2 블레이드형 로터의 표면 부근에서 발생하는 와류의 수치해석 결과를 나타낸 것이다. 이 결과 역시, Fig. 7에 스케치된 모델의 흐름과 상당히 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있으며, 주속비가 1인 경우 허브 부근에서 분리된 기류가 블레이드 표면을 타고 팁 쪽으로 진행하며, 복잡한 구조의 와류를 발생시키고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 주속비가 1인 경우 블레이드 주위의 흐름은 전연 부분에서 흐름이 이탈하여 표면 부착류(attached flow)를 형성하지 못하므로, 블레이드 전체에 걸쳐 실속이 발생하고 있음을 알 수 있으며 상당한 성능저하가 예상된다. 주속비가 3인 경우, 와류의 구조는 점점 소용돌이 형태의 모습을 띄며 블레이드 표면으로 부착되고 있음을 알 수 있다. 주속비 1인 경우에 비하여, 블레이드 표면을 타고 흐르는 흐름이 비교적 명확하게 나타나고 있다.

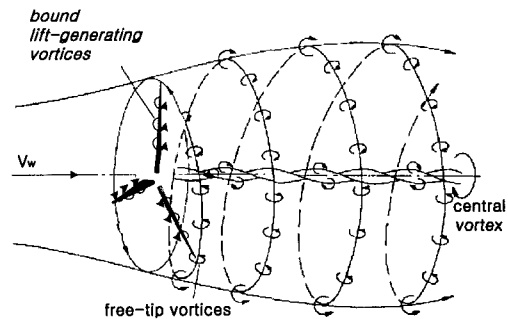
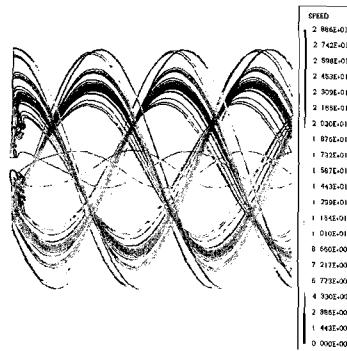
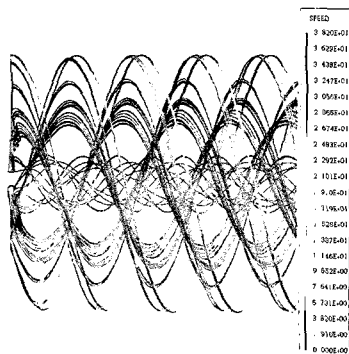


Fig. 10 Sketch of wake structure^[4].



(a) TSR : 2.89



(b) TSR : 3.85

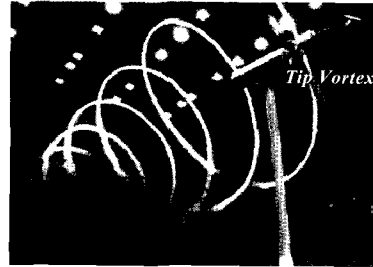
Fig. 11 Wake distribution of 3 bladed type.

회전하는 로터 블레이드의 압력면으로 유입되는 바람은 로터 블레이드를 통과하면서 후방으로 강한 후류(wake)를 발달시킨다. 이때, 로터 블레이드 허브쪽의 영향으로 중심 와류가 나선형 구조를 가지고 후방으로 발달하게 되며, 블레이드 팁 부분의 영향으로 팁 와류 또한 커다란 나선형 구조를 그리며 후방으로 빠져나가게 된다.

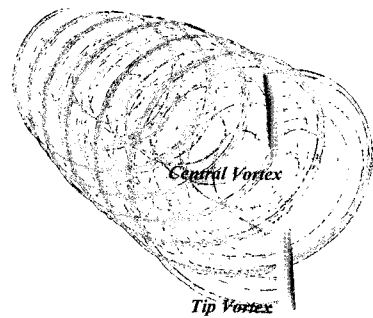
Fig.11에 대표적으로 주속비가 2.89와 3.85인 경우의 결과를 나타내었다. Fig. 10에 스케치한 후류의 구조와 정성적인 측면에서 상당히 유사한 구조를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12에 2 블레이드형 로터에 대한 수치해석 결과와 NREL(National Renewable Energy Lab.)에서 수행된 가시화 결과를 비교하여 나타내었다. NREL의 실험결과는 날개 끝 와류의 가시화만을 했기 때문에 중심와류의 구조는 살펴볼

수 없으나, 본 수치해석 결과에서는 중심 와류의 구조를 명확하게 나타내고 있으며, 두 결과가 정성적으로 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) Wake visualization (tip vortex) 10 m HAWT by NREL^[5]



(b) Wake simulation result of 2 bladed HAWT
Fig. 12 Comparison of experimental and simulation result on wake distribution.

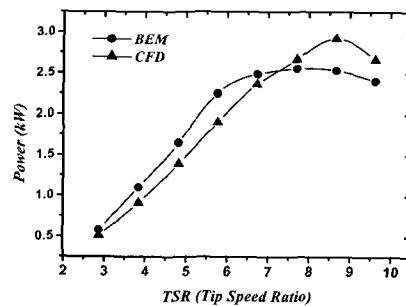


Fig. 13 Comparison of calculated and BEM power characteristics for the 3 bladed type rotor.

4.2 성능해석

풍력터빈의 성능해석을 위하여 델프트 대학 풍

력에너지 팀에서 제공한 3 블레이드형 로터의 BEM(blade element method) 계산 데이터와 본 연구의 수치해석 결과를 통해 얻은 데이터를 비교하였다. BEM 법은 단일 블레이드를 허브부터 팁까지 여러 단면으로 분할하여, 각 지점에서의 익형의 양·항력 실험데이터를 가지고 전체적인 로터의 성능을 예측하는 방법이며, 풍력터빈의 성능을 예측하는데 상당히 보편화 되어있다.

Fig. 13은 양 데이터를 그래프로 나타내었다. 주속비가 약 7.2인 지점을 기준으로 7.2 미만인 경우 CFD 결과가 BEM 보다 다소 낮은 출력을 예측하며, 7.2 이상의 경우 CFD 결과가 다소 높은 출력 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. CFD와 BEM법에 의한 예측 결과 값은 대부분의 주속비 범위내에서 약 10% 범위의 오차를 가지고 서로 일치하고 있다. 실제 실속 전 익형의 공력 성능을 예측하는 것은 비교적 정확하게 예측 할 수 있으나, 실속 후 공력특성을 예측하는 것은 상당한 어려움이 따른다. 따라서, 블레이드 표면에서 발생하는 복잡한 3차원 실속현상을 정확하게 반영하여 해석할 수 있는 다양한 난류 모델의 적용 및 검토가 필요하며, 보다 정확한 계산조건을 찾고 계산격자의 최적화를 통한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 풍력터빈의 유동해석과 성능해석에 대한 범용 CFD 코드의 적용성 평가에 목적을 두며, 다음과 같이 결론을 요약 할 수 있다.

1. 로터 블레이드 표면에서 발생하는 와류와, 팁 와류, 후류 등에 대한 유동해석을 수행하였으며, 각각의 경우 모두 스케치된 모델의 경우와 정성적으로 상당히 잘 일치하며, NREL의 가시화결과와 비교해볼 때, 본 계산에 의한 유동 해석 결과는 만족스럽다는 것을 알 수 있다.
2. 3 블레이드형 로터에 대한 성능비교를 수행하였으며, CFD와 BEM 법 사의의 오차는 전 주속비에 걸쳐 약 10% 미만이며, 정성적, 정량적으로 비교적 만족스러운 결과를 제시하고 있음

을 알 수 있다.

3. 범용 CFD 코드를 이용하여 풍력터빈의 유동 해석 및 성능해석을 수행하는 것이 가능함을 알 수 있었으며, 보다 정확한 예측을 통한 결과는 향후 풍력터빈 설계자들에게 상당히 효율적인 작업을 가능하게 할 것이라 사료된다.

후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1] Jess A. Michelsent and Niels N. Sorensent, 2001, "Current Developments in Navier-Stokes Modelling of Wind Turbine Rotor Flow," Proc. of the EWEC, pp.367-372
- [2] L.J Vermeer, 2001, "A Review of Wind Turbine Wake Research at TUDELFT," AIAA-2001-0030
- [3] CFX-TASCflow Users Documents, AEA Technology Engineering Software
- [4] Gustave P. Corten, 2001, "Inviscid Stall Model," Proc. of EWEC, pp.466-469
- [5] Simoes, F. J and Graham, J.M.R., 1990, "A Free Vortex Model of the Wake of a HAWT," Proc. of 12th British WEAC, pp.131-165

저 자 소 개



김정환 (金貞煥)

1968년 2월생, 1998년 부경대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2000년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2002년~2003년 일본큐슈공업대학 기계시스템공학과 특별연수생(일본학술진흥재단 지원), 2003년 8월 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 당학회 정회원, 관심분야 : PIV, CFD, 풍력발전, 파력발전, 유체기계

**김범석 (金範錫)**

1975년 11월생. 2001년 한국해양대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2003년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 한국해양대학교 대학원 박사과정 재학중. 당학회 정회원. 관심 분야 : PIV, CFD, 풍력발전, 유체기계

**남청도 (南靑都)**

1949년 10월생. 1972년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1987년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1992년 동대학원 기계공학과 졸업(박사). 1997~1998 영국웨일즈 대학교 교환교수. 1984~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수. 당학회 기획이사. 관심 분야 : 풍력발전

**김진구 (金鎭九)**

1957년 12월생. 1982년 한국해양대학교 기관공학과 (공학사) 졸업, 1991년 한국해양대학교 선박기계공학과 (공학석사) 졸업, 1997년 한국해양대학교 기관공학과(공학박사) 졸업, 1986-1998년 사단법인 한국선급 기관검사원, 1998년 현재 도립 충북과학대학 컴퓨터응용 기계과 교수, 당학회 정회원

**이영호 (李英浩)**

1958년 2월생. 1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1986~1989년 일본동경대학 기계공학과(공학박사), 1980~현재, 한국해양대학교근무(기계·정보공학부, 교수), 2003. 3~현재, 조선·해양기자재 연구센터 소장, 2001. 5~현재, (재)부산테크노파크 분소장(운영위원), 관심 분야 : PIV, CFD, 환경 에너지, 유체기계