

수평축 풍력터빈 블레이드의 공력해석 및 설계에 관한 연구

김정환* · 김범석** · 윤수한*** · 이영호****

A Study on Design of Wind Turbine Blade and Aerodynamic Analysis

J. H. Kim, B. S. Kim, S. H. Yoon, Y. H. Lee

Key Word: CFD(Computational Fluid Dynamics), Wind turbine(풍력터빈), flap(플랩), Angle of attack(영각), BEM(Blade element method : 날개요소이론)

ABSTRACT

The wind turbine blade is the equipment converted wind into electric energy. The effect of the blade has influence of the output power and efficiency of wind turbine. The design of blade is considered of lift-to-drag ratio, structure, a condition of process of manufacture and stable maximum lift coefficient, etc. This study is used the simplified method for design of the aerodynamic blade and aerodynamic analysis used blade element method. This process is programed by delphi-language. The program has any input values such as tip speed ratio, blade length, hub length, a section of shape and max lift-to-drag ratio. The program displays chord length and twist angle by input value and analyzes performance of the blade.

1. 서론

풍력발전이란 바람이 가지는 운동에너지를 이용하여 로터 블레이드를 회전시키고, 이때 발생하는 회전력의 공기역학적(aerodynamic) 특성을 이용하여 발전기를 구동시켜 전기에너지를 생

산하는 청정 무공해 에너지발전 방식이다. 1970년대 초반 석유파동이라는 최대의 에너지 위기를 겪은 이후 전 세계적으로 안정적인 에너지의 공급을 위한 대책 마련이 절실히 필요하였으며, 오랫동안 화석연료에 크게 의존해오던 에너지 공급원에 대한 새로운 대안이 필요하게 되었다. 이에 따라, 1970년대 초반부터 각 국의 연구기관들은 신 대체 에너지에 대한 연구를 본격적으로 시작하였으며, NASA에 의해 100kW급 풍력발전 시스템이 설계된 것을 시작으로 풍력발전 시스템에 대한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되어

* (주)IIT 연구원
** 한국해양대학교 대학원 기계공학과
*** 동명정보대학교 로봇시스템공학과
**** 한국해양대학교 기계·정보공학부
E-mail : * jhkim@pivlab.net,

현재 약 10,153MW의 전력을 생산하기에 이르렀으며, 이는 전 세계 에너지생산량의 약 0.16%에 해당한다^[4]. 한편, CFD는 지난 수 십년간 다양한 분야에서 사용되어 왔으며, 풍력발전 시스템을 구성하는 핵심 요소인 로터 블레이드(rotor blade)의 유동해석에도 사용되기 시작하는 추세이나, 풍력터빈의 3차원 유동구조 및 성능평가에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 풍력발전용 터빈의 3차원 유동에 대한 해석 및 성능평가를 목적으로, 네덜란드 델프트 대학(Delft University)의 풍력에너지 연구그룹^[5]에 의해 설계된 500 kW급 풍력발전용 로터 블레이드(T40/500)를 대상으로 하였고, 상용CFD 코드는 CFX-TASCflow를 이용하여 계산을 수행하였으며, 또한 한국해양대학교 실정에 맞는 소형풍력발전용 터빈로터를 설계하고, 형상에 대한 공력해석에는 날개요소이론(blade element method)을 사용하였으며, 공력해석에는 팁손실이론(Tip loss theory)을 이용하였다. 그리고 이것을 프로그램화하였으며 프로그램에 사용된 언어는 델파이를 사용하였다. 그리고 설계된 블레이드에 고양력시스템인 플랩을 장착하여 성능해석을 하였다.

2. CFD에 의한 3Blades HAWT의 평가

2.1 T40-500 로터 블레이드 3-D 모델링

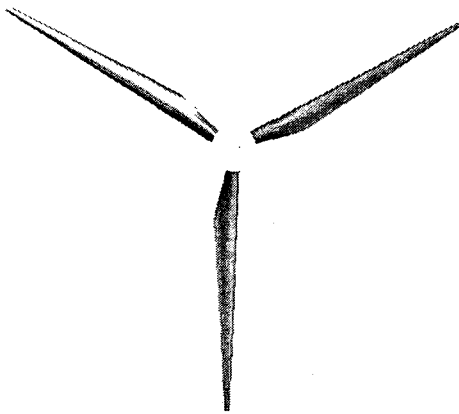


Fig. 1 3-D Rotor blade configuration (T40/500)

본 연구의 수치해석 대상으로 사용된 로터 블레이드는 직경이 40 m 이고 정격출력이 500 kW 인 3 블레이드 수평축 풍력발전용 터빈(HAWT)이다. T40/500의 출력제어 방식은 실속제어형(stall regulated)이며, 이는 현재 상용화되고 있는 풍력발전기의 대다수가 정격풍속 이상의 바람이 불어 올 경우, 안정성을 확보하기 위하여 블레이드 허브부분으로부터 서서히 3차원 실속을 발생시켜 전체 시스템의 출력을 제어하는 방식이다. 계산 격자를 생성하기 위한 초기 모델링 작업은 실제 모델의 3차원 좌표 점을 통해 이루어졌으며, 계산의 정확성을 고려하여 블레이드를 허브로부터 팁 부분까지 모두 10개의 단면으로 분할 한 후, 분할된 2차원 단면을 스플라인(spline)으로 연결하여 3차원 블레이드를 생성하였다. 실제 풍력발전용 로터 블레이드의 In-board section은 전체적인 시스템의 출력특성에 큰 영향을 미치지 않으므로, 수치적 방법을 이용한 출력특성을 예측하는 부분에 있어서는 고려대상이 되지 않는 것이 일반적이다. 하지만, 보다 정확한 풍력발전 시스템의 출력특성을 예측하고, 블레이드 전체에 걸쳐 작용하는 복잡한 구조의 3차원 유동현상을 정확하게 예측하기 위하여 본 연구에서는 In-board section을 포함한 전체 블레이드에 대한 수치해석을 수행하였다. 블레이드를 구성하는 익형의 형태는 블레이드의 In-board section의 허브 부분으로부터 팁 부분까지 DU-91-W-250, DU-93-W-210, NACA 63618 등의 익형으로 구성되어 있다. 격자생성을 위한 로터 블레이드의 3차원 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 계산격자의 생성

수치해석을 하는데 있어서 해의 정확도를 좌우하는 가장 중요한 부분의 하나가 계산격자이며, 우수한 품질의 격자를 생성하기는 그리 쉽지가 않다. 본 연구에서는 격자를 생성하는 과정에서 복잡한 형상에 대하여 상당히 우수한 3차원 정렬 격자를 생성할 수 있는 ICEM-CFD Hexa 모듈을 이용하였다. 격자를 생성하는 과정에서 블레이드주위에서 우수한 격자를 확보하기 위하여 전체 도메인을 56 블록으로 나누었으며, 해석결과의

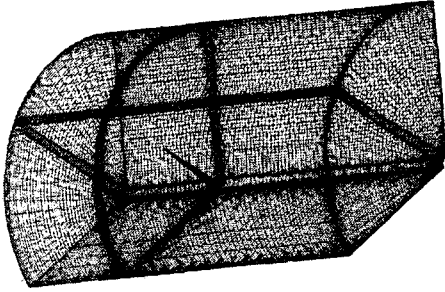


Fig. 2 Computational grid

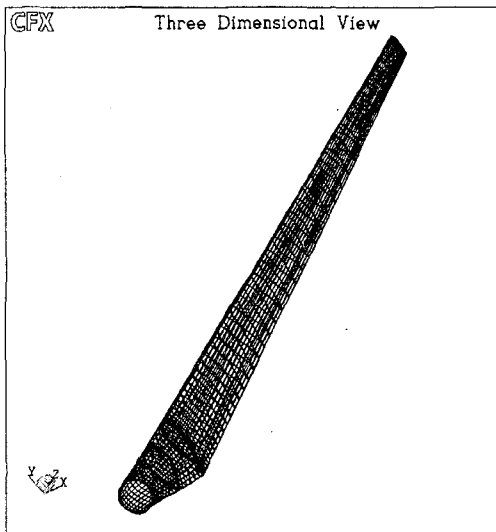


Fig. 3 Computational grid near the rotor

신뢰성을 고려하여 블레이드 주위에 격자를 집중 배치하였다. 전체 도메인의 격자수는 약 800,000 cell 이며, Fig. 2와 Fig. 3에 생성된 격자를 나타내었다.

2.3 수치해석 및 계산조건

CFX-TASCflow는 3차원 레이놀즈 평균 (Reynolds averaged) 나비에 스토크스 (Navier-stokes) 방정식을 적용하며, 지배방정식은 유한체적법에 의하여 이산화되며, 수치해석은 3차원 비압축성 정상상태 조건에 의하여 수행되었다. 일반적으로 상용CFD코드에서 기본으

로 제공하는 표준 $k-\epsilon$ 모델의 경우, 표면이나 벽면에서의 유동박리를 정확하게 예측하지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 블레이드 표면에서 발생하는 3-D 실속현상에 대한 영향을 반영하여 해석 결과의 정확도를 확보하기 위해 $k-\omega$ 모델 [6]을 적용하였으며, 대류항의 이산화 기법으로는 2차 정도의 정확도를 가지는 수정(Modified) LPS 기법을 사용하였다.

그리고 본 연구에서는 무차원 수인 TSR을 이용하여 유입 풍속을 고정하고 로터 블레이드의 회전속도만 변화시켜 가면서 수치해석을 수행하였다. 유입 풍속은 5m/s이며, 회전 속도는 30~100rpm으로 변화시켜, 모두 8가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 이때 TSR은 2.89~9.63의 범위를 가진다. 계산조건으로 선정한 TSR의 범위는 BEM에 의해 해석된 TSR 범위와 정확히 일치하며, Table 1에 전체 계산조건을 요약하여 나타내었다. 모든 계산은 Pentium 4 PC (1.7 GHz, 1Gb)에서 수행되었다. 정상상태 계산은 모두 Iteration이 200 번 정도일 때 수렴하였으며, 계산 소요시간은 각 케이스별로 최소 8시간에서 최대 12 시간이 소요되었다. 계산을 수행하기에 앞서 원활한 해의 수렴성과 안정성을 확보하기 위하여, 초기에 약 120,000 Cell의 격자 수를 가지는 도메인을 가지고 계산을 수행한 후 U, V, W 방향의 속도 성분과 대략적인 유동장의 기본정보를 획득하였으며, 실제 계산을 하기 위한 초기조건의 값으로 사용하였다.

Table 1 Calculating conditions

	$V_i (m/s)$	RPM	TSR
Case 1	5	30	2.89
Case 2	5	40	3.85
Case 3	5	50	4.82
Case 4	5	60	5.78
Case 5	5	70	6.74
Case 6	5	80	7.71
Case 7	5	90	8.67
Case 8	5	100	9.63

2.4 결과 및 고찰

일반적으로, 실속(stall)은 대부분의 경우, 반드시 피해야만 할 문제로써 생각되고 있으나, 풍력발전에 있어서는 이러한 실속이 출력을 제어하는 방법의 하나로 이용된다. 이러한 방법을 실속 제어형이라 하며, 풍력발전용 터빈의 운전범위가 정격출력을 넘어서게 될 때, 블레이드의 표면에 강한 3차원 실속을 발생시키게 하여, 안전한 회전수 내에서 최적의 출력을 낼 수 있게 제어하는 방법이다. 실제, 풍력발전용 로터 블레이드에서 발생하는 3차원 유동은 Fig. 4에서 스케치 한 것처럼 상당히 복잡하다. 로터 블레이드의 허브 쪽에서 발생하는 박리에 의해 분리된 기류는 로터 블레이드의 원심력과 반경방향으로의 압력 분포에 의하여, 블레이드의 허브쪽에서 팁부분으로 이동하게된다. 이러한 기류가 Outboard-Section의 블레이드 표면에 부착되어 θ 방향으로 흐르는 기류를 통과하는 동안 3차원 실속을 발생시키며, 임의의 지점에서 θ 방향으로 분리된다. 반경방향으로 흐르는 기류는 블레이드 전체에 걸쳐 익형의 전연과 후연에서도 발생 할 수 있으며, 그 발생원인에 대한 정량적인 데이터의 제시는 거의 불가능하지만, 익의 전·후연에서 발생하는 기류의 영향 또한 크다고 보고되어 있다[7]. Fig. 5에 블레이드의 TSR이 변화하는 경우에 대해 표면에 발생하는 3차원 실속영역의 범위 및 유동패턴을 나타내었다. TSR이 증가할수록 블레이드 표면 쪽으로 3차원 실속영역이 점점 축소되고 있음을 알 수 있다.

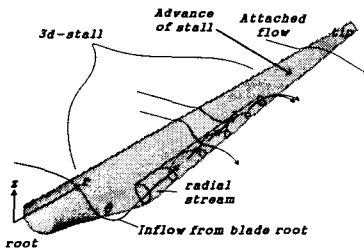
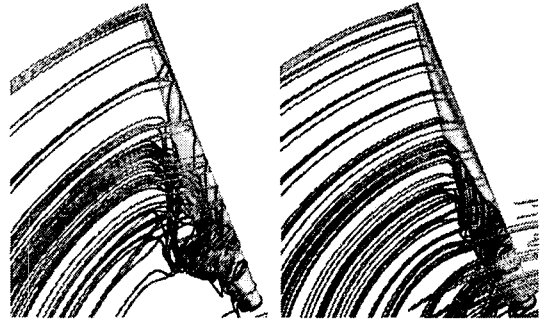


Fig. 4 Sketch of 3-d stall at blade surface



(a) TSR : 2.89 (b) TSR : 5.78

Fig. 5 3-D stall phenomena near blade

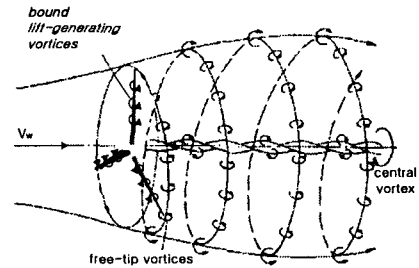
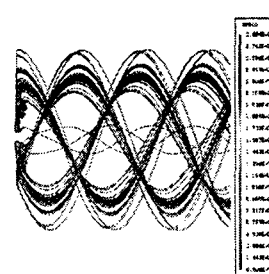
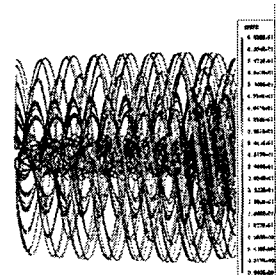


Fig. 6 Sketch of wake structure



(a) TSR : 2.89



(b) TSR : 5.78

Fig. 7 Wake distribution of 3 bladed type

Fig. 6은 로터후류에서 발생하는 볼텍스의 형상을 이론적으로 스케치한 그림이고, Fig. 7은 블레이드 후방으로 발달하는 후류의 구조와 속도 분포를 2가지의 TSR의 변화에 따라 나타낸 것이다. 로터 블레이드로 유입되는 바람은 회전하는 블레이드에 대한 영향으로 하류(down stream)쪽으로 발달되는 후류를 발생시키게 된다. 이때 발생하는 후류는 허브와 가까운 위치에서 발달하는 중심와류(central vortex)와 팁 부분에서 발생하는 팁 와류(tip vortex)의 두 가지로 구분된다. 일반적으로 로터 블레이드 후방으로 발달되는 후류 구조는 로터의 회전 속도가 빨라질수록 팁 와류의 간격이 점점 좁아지게 되며, 상당히 복잡한 구조의 3차원 와류를 발생시키게 된다. Fig. 7에 유선으로 나타낸 후류의 구조는, Fig. 6에서 제시된 이론적인 구조와 잘 일치함을 알 수 있으며, 복잡한 3차원 후류를 정성적, 정량적으로 명확하게 보여주고 있다.

Fig. 8은 풍력터빈의 성능해석을 위하여 델프트 대학 풍력에너지 팀에서 제공한 3 블레이드 수평축 풍력터빈 로터의 BEM(blade element met-

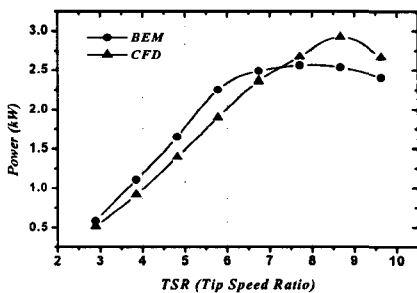


Fig. 8 Comparison of calculated and BEM power characteristics for the scaled T40/500

hod) 계산 데이터와 본 연구의 수치해석 결과를 통해 얻은 데이터를 비교하였다. BEM 법은 단일 블레이드를 허브부터 팁까지 여러 단면으로 분할하여, 각 지점에서의 익형의 양·항력 데이터를 가지고 전체적인 로터의 성능을 예측하는 방법이며, 풍력터빈의 성능을 예측하는데 상당히 보편화되어있다. 그래프에서 보면, 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 BEM 법에 의한 예측 결과 값은 대부분의 주속비 범위 내에서 약 10% 범위의 오차를 가지고 서로 일치하고 있다. 실제 실속 전 익형의 공력성능을 예측하는 것은 비교적 정확하게 예측할 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.

3. 소형 수평축 풍력터빈

3.1 로터블레이드의 설계 및 공력해석

블레이드의 설계는 공력특성이 우수한 익형을 선정하여 성능계산을 통한 날개외형을 결정한 후 작용하는 부하를 계산하여 날개의 강도 및 진동 특성을 고려한 구조설계를 해야하며 이 과정은 설계요구사항을 만족할 때까지 수정·반복하게 된다. 본 연구에서는 최적의 익형을 선정하여 날개 요소이론(Blade element theory)으로부터 날개를 설계하였고, 팁손실이론(Tip loss theory)를 통해서 성능을 해석하였으며, 블레이드에 대한 공력해석을 수행하기 위해서는 다음과 같은 과정을 거치게 된다.

- Given r/R , chord, $C_L(\alpha)$, $C_D(\alpha)$, θ , U
- Guess a and a'
- Calculate ϕ
- Calculate a
- Calculate C_L and C_D .
- Calculate a and a'
- Go back to step b and repeat until a , a' are converged

위의 과정을 토대로해서 델파이 언어를 사용해서 프로그램화하였다.

그리고 양력계수와 항력계수는 실속이후에서의

영역에 대한 자료가 거의 없기 때문에 실속이후의 영역에 대해서 정확히 계산하기 위해서는 실속 상태에서 양력계수와 항력계수를 계산할 필요가 있다.

본 연구에서는 Viterna-Corrigan이 제안한 식을 사용하여 실속이후의 양력계수와 항력계수를 구하였으며, Fig. 9은 Viterna-Corrigan의 제안식을 토대로 하여 프로그램을 작성하였다[8].

공력해석 프로그램은 사용자의 요구에 따라 Fig. 10에서와 같이 Dialogue box에서 익형에 대한 양력과 항력계수의 데이터 파일을 불러 올 수 있게 되었으며 블레이드의 개수, 블레이드의 길이, 허브의 길이, 주속비 등을 자유자재로 입력할 수 있게 되어 있다. 그리고 이 입력값을 토대로 하여 동력계수 등의 입력값에 의해서 자동 계산할 수 있다.

3.2 고양력장치

고양력장치 중에 하나인 플랩은 익형의 후연 아랫면에 부착되어 익형의 공력특성 향상에 기여하는 장치이다. 보통 이러한 고양력 장치는 항공 산업에서 항공기의 이착륙시 활주거리를 짧게 하기 위하여 사용되나, 풍력발전에서는 풍황자원이 충분하지 못한 지역에 대하여, 고효율의 로터 블레이드 설계시 이용된다.

보통 플랩의 크기가 코드길이(chord length) 비해서 과다하게 크다면 양력의 증가범위보다 항력의 증가 범위가 더욱 커지게 되어, 익형 공력 특성 지표인 양항비가 나빠지게 되므로, 적절한 플랩의 크기(height)를 찾는 것이 중요하다.

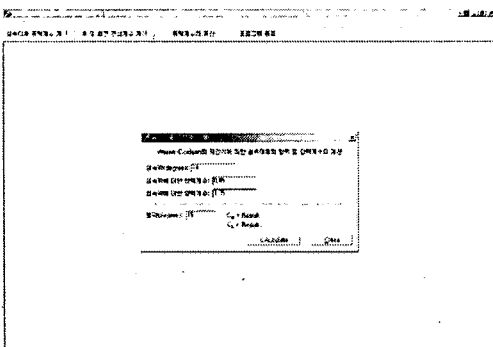


Fig. 9 Dialogue box of Viterna-Corrigan equation

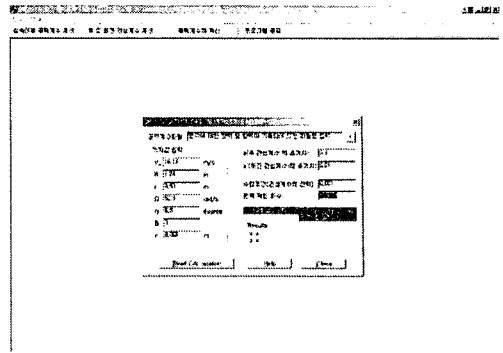


Fig. 10 Dialogue box of Aerodynamic Analysis

3.3 결과 및 고찰

Fig. 11은 날개요소이론을 이용해서 풍력터빈의 동력계수를 구하였다. 그리고 실제로 3차원의 항공기 날개에서는 날개 상면과 하면의 압력차에 의하여 날개끝에서 와류(vortex)가 발생하여 날개주위의 순환분포가 감소되기 때문에 날개끝 부분에서부터 손실이 발생하며, 풍력터빈에서도 이런 현상이 나타난다. 이를 보통 날개끝 손실이라고 하는데 날개끝 손실을 고려하기 위해서 본 연구에서는 Prandtl과 Goldstein이 제시한 Tip loss theory를 적용하였다. 그리고 Fig. 11은 플랩각도의 변화에 따른 주속비에 대한 동력계수 값을 각각 나타내고 있다. 플랩길이 2%, 플랩각도 10°를 제외하고 모든 플랩길이와 플랩영각에 대해서 주속비 5이하에서는 플랩을 장착하지 않을 때보다는 장착했을 때 높은 동력계수 값들이 나타나다가 주속비 5이상에서 급격히 동력계수 값이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그런데 플랩길이 2%, 플랩각도 10°에서는 전영역의 주속비에 대해서 플랩을 장착하지 않은 경우보다 높은 동력계수 값을 나타내고 있는 것을 미루어 짐작할 때 플랩길이 2% 플랩각도 10° 이하로 설계했을 때 풍력터빈의 성능을 향상시킬 수 있는 플랩의 형상임을 예측할 수 있다.

4. 결론

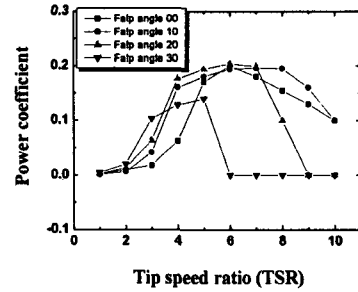
본 연구에서는 네덜란드 델프트 대학에서 자체적으로 설계된 T40/500 로터 블레이드에 대한 수치해석을 통하여 블레이드 주위에서 발생하는

복잡한 3차원 유동특성과 성능평가를 수행하였고, 공기역학적 이론을 적용하여 풍력터빈의 블레이드를 설계하였다. 그리고 또한 고양력장치인 플랩을 장착하여 성능해석을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

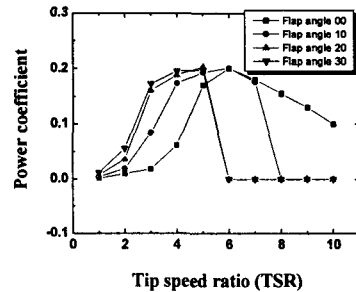
1. 로터 블레이드 표면에서 발생하는 와류와, 팁 와류, 후류 등에 대한 유동해석을 수행하였으며, 각각의 경우 모두 스케치된 모델의 경우와 정성적으로 상당히 잘 일치하며, NREL의 실험결과와 본 연구에서의 수치해석 결과를 비교해볼 때 본 계산에 의한 유동해석은 비교적 만족스러운 결과를 제시하고 있음을 알 수 있다.
2. 3 블레이드형 로터에 대한 성능비교를 수행하였으며, CFD와 BEM 법 사의 오차는 전 주속비에 걸쳐 약 10% 미만이며, 정성적, 정량적으로 비교적 만족스러운 결과를 제시하고 있음을 알 수 있다.
3. 고양력장치인 플랩을 설치하여 공력성능을 측정된 결과 5이하의 주속비에서는 플랩이 장착된 경우가 장착되지 않은 경우보다 월등한 성능을 나타내었다.
4. 플랩길이 2%, 플랩각도 10° 이하에서는 전체 주속비에 걸쳐서 높은 성능을 나타내고 있었다.
3. 범용 CFD 코드를 이용하여 풍력터빈의 유동해석 및 성능해석을 수행하는 것이 가능함을 알 수 있었으며, 보다 정확한 예측을 통한 결과는 향후, 풍력터빈 설계자들에게 상당히 효율적인 작업을 가능하게 할 것이라 사료되며 CFD와 PIV실험을 수행하여 익형의 종류와 최적의 플랩의 관계와 유동메카니즘을 규명할 예정이다.

후 기

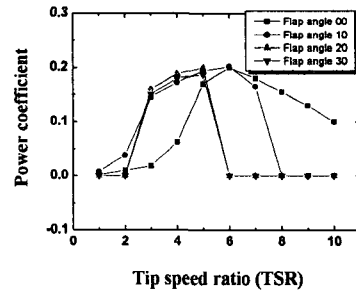
본 논문은 에너지관리공단 학술진흥사업과제 지원연구비(2003-03-0049-0-000)에 의해 수행되었습니다.



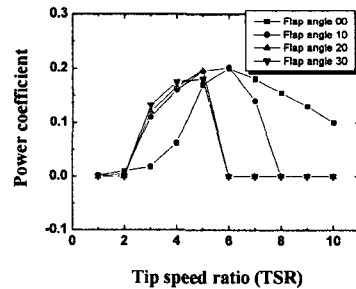
(a) Flap length 2%



(b) Flap length 10%



(c) Flap length 20%



(d) Flap length 30%

Fig. 11 Flap length and flap angle effect for power coefficient curve

참고문헌

1. 김유택, 김정환, 김범석, 남청도, 이영호, "CFD에 의한 500kW급 수평축 풍력발전용 터빈의 성능평가 및 유동해석에 관한 연구", 유체기계저널, 제5권 제4호, pp. 32~39, 2002.
2. B. S. Kim, J. H. Kim, K. Kikuyama, R. Rooij, Y. H. Lee, "3-D Numerical Predictions of Horizontal Axis Wind Turbine Power Characteristics for the Scaled Delft University T40/500 Model", The 5th JSME-KSME Fluids Eng. Conf., pp. 323, 2002.
3. 김범석, 김정환, 남청도, 이영호, "수평축 풍력발전용 터빈의 유동해석을 위한 상용 CFD 코드의 적용성 평가에 관한 연구", 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 95~101, 2002.
4. Erich Hau, Wind turbines, Springer Verlag (2000).
5. <http://windenergy.citg.tudelft.nl>
6. Jess A. Michelsen and Niels N. Sorensen, Current Developments in Navier-Stokes Modelling of Wind Turbine Rotor Flow, Proceedings of EWEC, Denmark (2001), p.367~372.
7. Gustave P. Corten, INVISCID STALL MODEL, Proceedings of EWEC, Denmark (2001), pp. 466~469.
8. Viterna, L. A. and Corrigan, R. D., "Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines, Cleveland, Ohio, Inc., 1966.