한국신·재생에너지학회 2008년도 춘계학술대회논문집 pp.307~310

비선형 구속 와류 보정법을 이용한 수평축 풍력 발전기의 공력 해석

*김 호건[1], 이 승민[2], **이 수갑[3]

Aerodynamic Analysis of Horizontal Axis Wind Turbines using Nonlinear Bound Vortex Correction Method

*Hogeon Kim, Seungmin Lee, **Soogab Lee

Key words : Wind Turbine Aerodynamics, Vortex Lattice Method, Nonlinear Bound Vortex Correction

Abstract : Nonlinear Vortex Strength Correction Method is developed for improvement of vortex lattice method which can't calculate the separated flow conditions and the viscous effect. In this method, the vortex strength on the blade surface is determined by matching the lift force from vortex lattice method with the lift force from aerodynamic coefficients table as the same circulation is added to or subtracted from all chord wise vortices. For considering the nonlinearities due to the neighboring blade sections, sophisticated Newton-Rapson algorithm is applied. The validation of this method was done by comparing the simulations with the measurements on the NREL Phase-VI horizontal axis wind turbine(HAWT) in the NASA Ames wind tunnel under uniform conditions. This method gives good agreements with experiments in most cases.

Nomenclature

Ω : rotational velocity, rad/s
C_N : normal force coefficient
C_T : tangential force coefficient
c : chord length
dA : strip area

subscrip

HAWT : horizontal axis wind turbine
UVLM : unsteady vortex lattice method
NVCM : nonlinear vortex correction method

1. 서 론

풍력 에너지는 높은 기술성숙도와 경제성으로 인해 빠르게 성장하고 있는 신·재생에너지원 중에 하나이다.(1) 그러나 기존의 에너지원인 원자력, 화석 에너지원과의 경제성에서는 뒤지고 있는 것이 현실이다. 기존 에너지원과 대비하여 가격 경쟁력을 확보하기 위해서는 다분야 최적 설계와 같은 기법을 활용하여 COE를 낮출 수 있는 풍력 발전 시스템의 설계가 필요하다. 풍력 시스템의 각분야중 공력 분야는 에너지 획득과 시스템에 작용하는 하중을 예측하고 시스템 설계에 있어서 중요한 분야 중 하나이다.

공력 분야에 있어서 설계를 위한 공력 해석 툴은 대부분 BEMT(blade element momentum theory)를 이용하여 왔다. 계산비용이 저렴하다는 장점이 있지만 비정상상태예측이 어렵고, 블레이드 각 섹션들 간의 상호 영향, 후류의 영향 등을 고려하는 것이 어렵다는 단점이 있다. 이에 비해 CFD는 최소한의 물리적 가정을 기반으로 한 지배방정식을 이용하기 때문에 BEMT로 계산하기 어려운 조건에서도 공력 하중을 예측할 수 있다. 하지만 CFD를 이용한 공력 설계에는 막대한 양의

1) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부
E-mail : hgmania1@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7545 Fax : (02)875-4360
2) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부
E-mail : vitamin1@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7545 Fax : (02)875-4360
3) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부
E-mail : solee@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7384 Fax : (02)875-4360

계산 비용이 필요하기 때문에 제약이 있다. 계산 환경이 향상된다면 최종적으로는 CFD가 풍력 에너지의 공력 설계 분야에 이용될 수 있을 것이다. 이에 비해 포텐셜 유동을 기반으로 하는 볼텍스 기법은 BEMT와 CFD기법의 중간 단계로서 공력 설계 툴로 이용하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 VLM은 특이점을 블레이드의 시위선에 분포 시킬 수 있으며 Surface Panel기법보다 계산시간이 빠르다는 장점이 있기 때문에 설계툴로 용이하다.

BEMT와 CFD에 비해 여러 장점을 가지는 VLM은 비점성, 비압축성 유동을 가정하고 있기 때문에 기본적으로 박리유동과 형상 항력 등을 계산할 수가 없다. 박리가 발생하거나 실속이 발생할 때는 2차원 익형의 공력 계수를 이용하여 공력을 계산하게 된다. 이때 필요한 레이놀즈수와 유효 받음각은 VLM을 통해 구하게 된다. 하지만 이때 블레이드의 볼텍스의 분포는 실속이나 박리를 고려하지 않기 때문에 유효받음각 계산에 있어서 오차를 가지게 된다. 특히 약한 실속 영역에서는 받음각의 변화에 대해 공력이 급격히 변하기 때문에 적절한 받음각 예측이 필요하다.

본 연구에서는 위에서 언급한 VLM의 단점을 개선하기 위해 비선형 구속 와류 보정법을 고안하였다. 이 기법은 3차원 실속 지연 모델이 적용된 익형의 공력 계수 테이블로부터 구하는 양력과 VLM에서 구하는 양력의 크기가 같게 되도록 블레이드 위의 볼텍스 강도가 결정된다. 블레이드 각 섹션들 간의 상호 작용을 고려하기 위해서는 각 섹션들에서의 matching problem이 비선형 방정식 시스템이 되는데 이런 비선형 방정식 시스템을 풀기 위해 본 연구에서는 Newton-Rapson 기법을 이용하였다. 이렇게 고안된 비선형 구속 와류 보정법의 검증을 위해 NREL Phase VI rotor의 실험 결과와[(2)(3)(4)] 비교하였다.

2. 수치 기법

2.1 비정상 와류 격자 기법(UVLM)

비선형 구속 와류 보정법을 적용하기 위해 비정상 와류 격자 기법을 이용하게 된다. 이 기법은 비압축성, 포텐셜 유동을 바탕으로 하고 있으며 지배 방정식은 라플라스 방정식이다. 양력선 이론과 달리 특이점을 시위선에 분포 시킬 수 있고 코드 방향으로의 힘도 구할 수 있다.

볼텍스 강도는 블레이드 와류 격자의 제어점에 적용되는 노이만 경계 조건으로부터 구할 수 있다.

$$\left[\sum_{j=1}^{n} a_{i,j}\Gamma_j + (\vec{U}_{wind} + \vec{w}_{wake} + \vec{r}\times\vec{\Omega})_i\right] \cdot \vec{n}_i = 0 \tag{1}$$

식(1)은 고체표면을 격자로 나누었을 때 특정 시간에서 i 번째 패널에서의 비침투 조건식이다. n은 패널 수, $a_{i,j}$는 j번째 패널에 의한 i번째 패널에 미치는 영향 계수이다. $\vec{U}_{wind}$는 자유흐름 속도, $\vec{w}_{wake}$는 후류에 의한 속도 이다. $\vec{n}_i$은 패널의 수직방향 벡터를 의미한다.

공력은 Kutta-Joukowski이론을 통해 각 패널에서 계산할 수 있으며 비정상 조건은 시간 전진 자유 후류를 통해 적용하였다. 자유 후류는 자유흐름과 블레이드와 다른 후류들로부터 유도되는 속도의 합으로 이동하게 된다. (자세한 내용은 참고문헌 [5,6]에서 확인 할 수 있음)

2.2 익형 공력 테이블 Look-Up

NVCM을 위해 공력 테이블에서 공력 계수를 찾는 것이 필요하다(이하 Table Look-Up). 유효 받음각과 레이놀즈수, 국부 속도는 VLM으로부터 계산된다. 2차원 익형의 공력 계수는 3차원 실속 지연 모델로 수정 된 값을 사용하게 되며 본 연구에서는 NREL의 AirfoilPrep의 3D 실속 워크시트를 이용하여 수정하였다. VLM에서 유효 받음각은 앞전 패널의 앞전 선의 중심점에서 계산된다. Table Look-Up을 통해 계산되는 양력은 깃이론을 통해 구해진다.

2.3 비선형 구속 와류 보정법(NVCM)

VLM의 박리나 실속 조건에서 발생했던 문제점을 해결하기 위해 NVCM에서는 VLM과 Table Look-Up에서 구할 수 있는 양력 값이 서로 일치하게 되는 구속 와류를 재계산하게 된다. VLM은 시위방향으로 여러 개의 구속와류를 가지게 된다. 하지만 VLM과 Table Look-Up을 통해 양력이 같아지도록 구속 와류의 강도를 조정하게 되는 matching 문제의 변수는 한 단면당 한 개밖에 설정할 수 없다. 따라서 VLM을 통해 구할 수 있는 시위 방향으로의 구속와류분포를 바탕으로 각 섹션에서 코드 방향으로의 구속와류들에게 동일한 크기의 순환의 증감을 변수로 설정하였다. 개략적인 설명은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} &Initial\ \ stage:\ F = |dL_{VLM} - dL_{Table\ Look-Up}| \neq 0 \\ &\qquad\qquad then\ \ \Gamma_{intial} \pm \triangle\Gamma \rightarrow \Gamma_{corrected} \\ &Final\ \ stage:\ \text{if}\ F = 0,\ then\ use\ \Gamma_{corrected} \end{aligned}$$

VLM의 구속와류와 Table Look-Up에서 필요한 유효 받음각은 서로 비선형관계이고 또한 주변의 섹션과도 영향을 주고받기 때문에 비선형성이 존재하게 된다. 이런 비선형성을 고려하기 위해 블레이드 전체 섹션에 대한 비선형 방정식 시스템을 풀어야 한다.

$$\begin{aligned} &F_1(\vec{x}) = |dL_{VLM} - dL_{Table\ Look-Up}|_1 \\ &F_2(\vec{x}) = |dL_{VLM} - dL_{Table\ Look-Up}|_2 \\ &\vdots \qquad\qquad \vdots \\ &F_n(\vec{x}) = |dL_{VLM} - dL_{Table\ Look-Up}|_n \\ &\vec{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_n),\ x_1 = \triangle\Gamma_1, x_2 = \triangle\Gamma_{2,\cdots,} x_n = \triangle\Gamma_n \end{aligned} \tag{2}$$

n은 단면의 개수 이고 위의 식은 벡터 형태로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{F}(\vec{x}) = 0 \tag{3}$$

위 식을 풀기 위해 Newton-Rapson 기법을 적용하였다. 테일러 전개를 통해 위식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_i(\vec{x}+\delta\vec{x}) = F_i(\vec{x}) + \sum_{j=1}^{n}\frac{\partial F_i}{\partial x_j}\delta x_j + O(\delta x^2) \quad (4)$$

두 번째 항의 편미분은 자코비안 행렬로 표현된다. 본 연구에서는 자코비안 행렬을 해석적으로 구하는 것이 어렵기 때문에 유한 차분법을 이용하였다. 식(4)의 좌변항을 0으로 두고 우변의 3번째 항을 무시하면 선형 방정식이 되어 δx를 구할 수 있다.

$$J \bullet \vec{\delta x} = -\vec{F}, \quad \vec{x}_{new} = \vec{x}_{old} + \vec{\delta x} \quad (5)$$

새로 업데이트된 $\vec{x}_{new}$가 식(3)을 만족시키게 되면 계산을 마치게 되고 그렇지 않다면 반복계산을 수행하게 된다.

3. 해석 결과

비선형 구속 와류 보정법의 검증을 위해 NASA Ames 풍동실험실에서 수행한 NREL Phase VI rotor의 실험 결과와[(2)(3)(4)] 비교하였다. 요에러가 없을 때 풍속 7, 10, 13, 15, 20, 25m/s 조건에서 출력 곡선과 블레이드 길이방향으로의 C_N, C_T 분포 등에 대하여 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. NREL Phase VI 로터의 S809 익형의 2차원 공력 계수는 참고문헌[7]을 참조하였다.

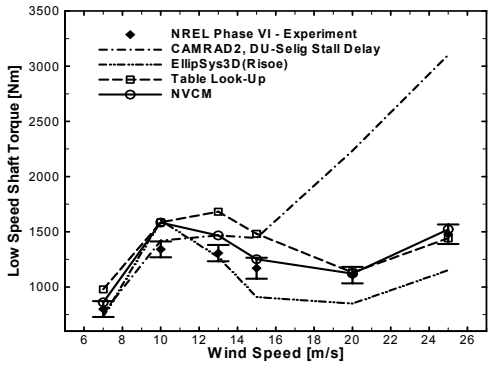


Fig. 1 Prediction of shaft torque with various methods

Fig. 1은 여러 기법에 따른 축토크를 비교한 것이다. NVCM과 Table Look-Up을 비교해 보면 박리가 발생하게 될 때 13, 15m/s에서 NVCM이 실험결과에 근접하게 됨을 알 수 있다. 본문에서도 언급하였지만 블레이드에서 부분적으로 박리가 발생하였을 때 Table Look-Up의 경우 부분적인 박리 상태를 고려하지 못한 볼텍스 분포를(매칭이 아닌 VLM으로만 계산) 통하여 받음각을 계산하게 되기 때문에 NVCM보다 낮은 받음각의 양력, 항력 계수를 Look-Up하게 된다.

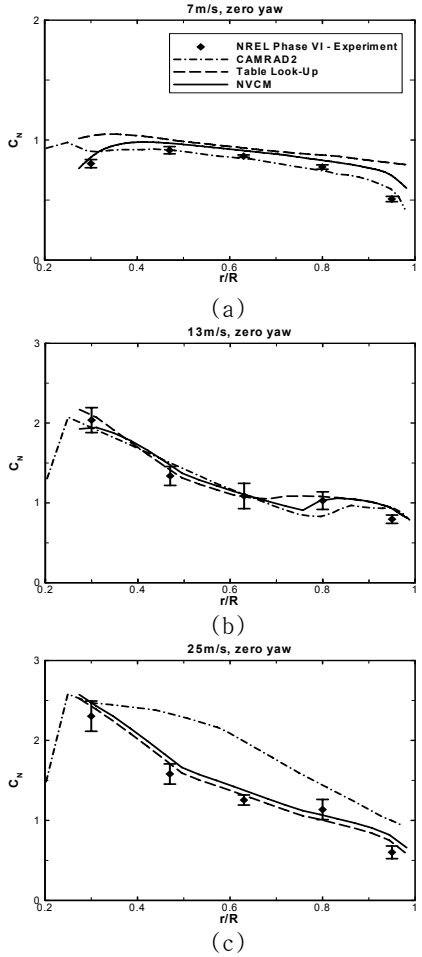
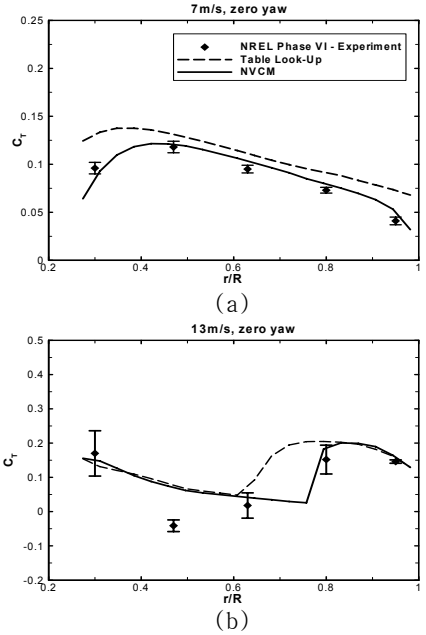
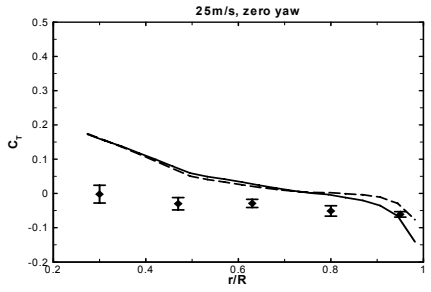


Fig. 2 Sectional normal force coefficient distribution





(c)

Fig. 3 Sectional tangential force coefficient distribution

이와는 달리 NVCM의 경우 박리가 발생했을 때의 매칭을 통해 줄어든 순환분포를 찾아내어 Table Look-Up 보다 상대적으로 높은 받음각을 나타내게 된다. 이런 이유로 인해 매칭을 하지 않은 Table Look-Up의 경우 실험과 NVCM보다 토크를 과도하게 예측하게 된다. Fig. 2 와 3 에서도 이와 같은 현상을 확인할 수 있다. 높은 풍속에서 큰 차이가 발생하지 않은 이유는 강한 실속 조건에서는 받음각에 따라 공력 계수의 변화가 크기 않기 때문이다. 그림 2와 3은 블레이드 길이 방향으로의 C_N, C_T를 보여 주고 있다. 7m/s 에서 Table Look-Up과 NVCM이 차이 나는 이유는 본 연구에서 계산의 용이를 위해 캠버를 고려하지 않았고 시위 선상에 특이점을 위치 시켰기 때문이다. 캠버를 고려하지 않더라도 NVCM을 통해 실험결과와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 1의 고풍속 조건에서의 축토크 결과와 같이 높은 풍속에서는 Table Look-Up과 NVCM의 결과가 큰 차이가 없음을 Fig. 2 와 3의 C_N, C_T를 통해 확인 할 수 있다.

4. 결 론

적절한 계산 시간과 물리적 가정을 기반으로 하는 볼텍스 기법 중 VLM은 풍력 터빈의 공력 설계 툴로서 역할이 커지고 있다. 하지만 VLM은 형상 항력과 박리나 실속 발생 시 블레이드 위의 순환분포를 적절하게 예측하지 못하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 Table Look-Up에 의해 구해진 양력과 VLM으로부터 구하는 양력이 같아지도록 구속 와류의 강도를 조정하는 NVCM을 고안 하였다. 또한 블레이드 각 단면들 간의 상호작용을 고려하기 위해 비선형 방정식 시스템을 구성하여 Newton-Rapson 방법을 적용하여 구속 와류의 강도를 보정 하였다. 이 기법의 검증을 위해 NREL Phase VI 로터 균일 유동 실험 결과와 비교 하였다. 블레이드가 부분적으로 박리가 되거나 실속 상태에 있을 때 NVCM의 결과가 매칭을 통하지 않은 Table Look-Up에 비해 실험결과에 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 낮은 풍속에서는 캠버를 고려하지 않아도 NVCM의 경우 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

본 연구에서 검증된 결과를 바탕으로 추후에 NVCM을 이용하여 비정상 상태의 공력 조건과 후류 구조 분석에 대해서 연구를 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 출연금으로 수행한 최우수 실험실사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] Eurec. Agency/Eurosolar, WIP:Power of the world-A Common Concept

[2] D. Simms, S. Schreck, M. Hand and L.J. Fingersh, June 2001, “NREL Unsteady aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements”, NREL/TP-500-29494

[3] Chanin Tongchirpakdee, Sarun Benjanirat and Lakshmi N. Sankar, November 2005, “Numerical Simulation of the Aerodynamics of Horizontal Axis Wind Turbines under Yawed Flow Conditions”, Journal of Solar Energy Engineering; 127, pp.464-474,

[4] Earl P.N. Duque, Michael D. Burklund and Wayne Johnson, 2003, “NAVIER-STOKES AND COMPREHENSIVE ANALYSIS PERFORMANCE PREDICTIONS OF THE NREL PHASE VI EXPERIMENT”, AIAA-2003-0355, ASME Wind Energy Symposium, pp.1-19

[5] 김호건, 신형기, 박지웅, 이수갑, 2006, “ Upwind 형 수평축 풍력 발전기의 타워 영향에 의한 블레이드 공력 성능 및 하중 변화에 대한 고찰”, 2006년도 추계학술대회논문집, pp. 261~264, 한국신재생 에너지 학회

[6] 김호건, 신형기, 이수갑, 2007, “ 포텐셜 유동을 기반으로 한 풍력 터빈 블레이드의 공력 해석 및 후류 예측 기법에 관한 연구”, 2007년도 춘계학술대회논문집, pp. 414~419, 한국 신재생 에너지 학회

[7] C. Lindenburg, July 2003, “Investigation into Rotor Blade Aerodynamics, Analysis of the stationary measurements on the UAE phase-VI rotor in the NASA-Ames wind tunnel”, ECN-C--03-025, Energy research Centre of the Netherlands