

풍력블레이드 비정상 공력하중 해석을 위한 자유후류기법 개발 및 실험적 연구

신 형기^{1*)}, 박 지웅²⁾, 김 호건³⁾, 이 수갑⁴⁾

New Free Wake Method Developement for Unsteady Aerodynamic Load on HAWT Blade and Experimental Ananlysis

Hyungki Shin, Jiwoong Park, Hogeon Kim, Soogab Lee

Key words : horizontal axis wind turbine(HAWT), free wake, finite vortex element, stall delay, unsteady loading

Abstract : A critical issue in the field of the rotor aerodynamics is the treatment of the wake. The wake is of primary importance in determining overall aerodynamic behavior, especially, a wind turbine blade includes the unsteady airloads problem. In this study, the wake generated by blades are depicted by a free wake model to analyse unsteady loading on blade and a new free wake model named Finite Vortex Element(FVE hereafter) is devised in order to include a wake-tower interaction. In this new free wake model, blade-wake-tower interaction is described by cutting a vortex filament when the filament collides with a tower. This FVE model is compared with a conventional free wake model and verified by a comparison with NRELand SNU wind tunnel model. A comparison with NREL and SNU data shows validity and effectiveness of devised FVE free wake model and an efficient.

Nomenclature

- α : angle of attack
- Φ : velocity potential
- σ : source strength
- μ : doublet strength
- Ω : rotational speed
- q : lift coefficient
- q_d : drag coefficient
- q_N : normal force coefficient
- c : chord length
- R : blade radius
- r : sectional radius

1. 서론

풍력 발전기의 블레이드는 바람과 대기 상태, 그 외의 다른 구조물, 작동 조건에 의해 끊임없이 비정상 하중을 받게 된다. 이러한 비정상 하중의 대표적인 외적 요인으로는 지표에서의 경계층에 의한 수직방향의 풍속 구배, 대기의 난류, 요 에러(yaw-error)에 의한 로터 축에서 어긋난 유입류, 그리고 풍력 발전 단지를 구성할 때 다른 풍력 발전기의 후류 또는 다른 장애물에 의한 영향 등이다. 이와 같은 비정상적인 외부 조건은 특정한 경우에 발생하는 것이 아닌, 풍력 발전기 블레이드가 작동할 때 항상 겪게 되는 일반적인 조건이며 이

1) 서울대학교 기계항공공학부 박사과정

E-mail : hkeewind@gmail.com

Tel : (02)876-7383 Fax : (02) 875-4360

2) 서울대학교 기계항공공학부 박사과정

3) 서울대학교 기계항공공학부 석사과정

4) 서울대학교 기계항공공학부 교수

하중은 풍력 발전기의 성능에 영향을 미칠 뿐 아니라 블레이드에 반복적인 하중을 가하여 피로하중과 같은 문제를 유발하여 구조 설계 및 블레이드의 수명에 많은 영향을 준다. 따라서 풍력 발전기 블레이드의 공력 설계 및 성능과 하중 해석을 위해서는 이러한 비정상 하중의 고려는 필수적이다.

본 연구에서는 수평축 풍력발전기 블레이드의 비정상 하중 및 성능 예측을 위한 기법을 개발하였다. 현재 실용적으로 사용될 수 있는 자유 후류법을 기본으로 하여 후류와 풍력 발전기 타워의 상호 간섭의 고려가 가능한 FVE(Finite Vortex Element) 자유후류 모델을 개발하였으며 실속 영역의 정확한 해석을 위하여 다양한 실속 지연 모델을 적용하였다. 개발된 방법은 미국 NREL에서 수행한 NASA AMES 풍동에서의 실험과 서울대학교에서 공군사관학교 풍동에서 실험한 데이터로 검증하였다.

2. 해석 기법

본 연구에서는 다른 기법들과 비교하여 비정상 하중의 해석에 유리하고 실용적인 방법으로 생각되는 자유후류해석 기법을 채택하였다. 또한 후류와 타워의 상호작용을 고려하기 위해 FVE 모델을 개발하였으며 이것에 실속 지연 모델을 적용하였다.

2.1 FVE(Finite Vortex Element)를 이용한 자유후류모델

일반적으로 자유후류법에서 후류는 후류패널(wake panel)[1] 또는 직선이나 곡선형 와동(vortex)로 묘사된다.[2] 그러나 이러한 기법은 블레이드 뒤쪽에 타워와 같은 장애물의 해석에 어려움을 갖는다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 이 연구에서는 FVE 자유 후류법을 개발하였다.[3]

블레이드에서 짧은 직선형 와동 요소의 연결로 볼텍스 필라멘트를 만들어 후류를 묘사하고 이러한 와동 요소들은 흐름을 따라 내려가다가 타워에 부딪힐 경우 와동링과 말굽형 와동으로 분리되어 내려간다(그림 1). 이 과정은 계속해서 반복되며 후류와 타워의 상호 작용을 묘사하며 유동장을 시뮬레이션 한다.

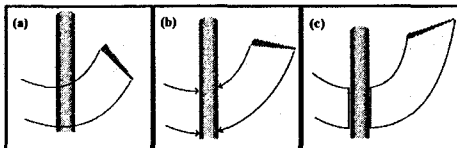


Fig. 1. Blade-wake-tower interaction (a) before vortex filaments hit the tower (b) vortex filaments strike against the tower (c) vortex elements are separated into vortex ring and horse-shoe vortices

기본적으로 유동장은 속도 포텐셜 ϕ^* 로 지배된다.

$$\nabla^2 \phi^* = 0 \quad (1)$$

식 (1)은 그린 정리에 의해 소스텀(σ)과 더블릿텀(μ)으로 나타내어진다.

$$\phi^*(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{volume}} \mu n \nabla \cdot (1/r) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{\text{surface}} \sigma (1/r) dS + \phi_\infty(2)$$

식(2)는 노이만 경계조건과 쿠타 컨디션(Kutta condition)에 의해 그 해가 결정된다.

자유후류의 경우 앞서 설명했던 FVE 모델과 CVC(Constant Vorticity Contour)에 의해 묘사된다. CVC에 대한 좀 더 자세한 내용은 참고문헌에 잘 나타나있다.[4]

2.2 실속 지연 모델 (stall delay model)

회전익의 공력 특성 가운데 하나는 코리올리스의 힘 등에 의한 뿌리(Root) 부분의 실속지연이다. 적절한 실속 지연 모델을 적용하지 않을 경우 해석 결과는 실제보다 작은 값으로 성능을 예측하게 된다. 이것은 특히 실속 제어 타입의 풍력 발전기에서 정격 풍속에서 목표한 정격 용량을 지나치게 상회하는 블레이드를 설계하게 되어 운전시 설계 단계에서 예상한 것보다 넓은 풍속 영역 동안 실속 영역에서 운전하게 만들게 된다. 이러한 결과는 블레이드의 진동과 피로도를 증가 시켜 수명과 소음 등에 악영향을 주게 된다.[5] 따라서 BEMT[6] 또는 와동후류법(vortex wake method)에서는 적절한 실속 지연 모델의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 Corrigan 실속 지연 모델[7][8]과 Du & Selig 실속 지연 모델[9]의 두 가지 경우의 실속 지연 모델과 실속 지연 모델이 적용되지 않은 경우의 해석을 비교해 보았다.

2.3 NREL 풍동 실험

미국 NREL의 실험에 사용된 풍동 모델은 지름 10.1m의 두 개의 블레이드를 가진 72rpm 고정 스톱 제어 타입의 수평축 풍력 발전기이다. 실험은 NASA Ames의 풍동에서 수행되었다.[10]

2.4 서울대학교 풍동 실험

서울대학교 풍동 모델의 경우 블레이드의 반지름 0.53m의 맞바람 형식의 풍력발전기이다. 블레이드 팁의 코드길이 11mm, 테이퍼비 0.25, 트윈스택 각 15.6°의 세 개의 블레이드를 가진 형태이다. 타워의 반지름은 0.072m이며 로터 뒤쪽 0.245m에 위치하여 있다. 실험은 공군사관학교의 풍동에서 수행 되었으며, 가변 피치 타입으로 풍속 13~15m/s에서 RPM 과 토크 측정, 후류 측정을 수행하였다. (그림2)

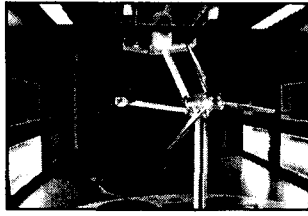


Fig. 2. The model wind turbine in wind tunnel at Korea Air Force Academy

3. 결과 및 토의

3.1 wake analysis

개발된 FVE의 검증을 위하여 서울대학교 모델에 대하여 Hot-wire probe를 이용하여 측정된 tip vortex의 궤적과 블릭스 피치 각과의 비교를 수행하였다. 그림 3. 에서와 같이 궤적과 피치각에 대하여 예측값과 측정값이 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서 이것은 수치 해석에 사용되는 후류 모델을 무리 없이 적용할 수 있음을 보여준다.

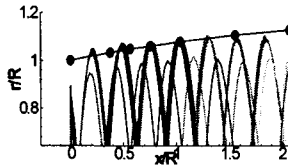


Fig. 3. Wake geometry comparison

3.2 Head-on Flow

그림 4-a)는 NREL 모델에 대한 후류형상을 보여준다. 각 섹션별 힘의 분포는 블레이드 위의 순환(circulation)의 분포와 후류에 의해 계산된 유효 받음각을 이용하여 2-D 에어포일의 공격 각을 참고하여 계산한다.

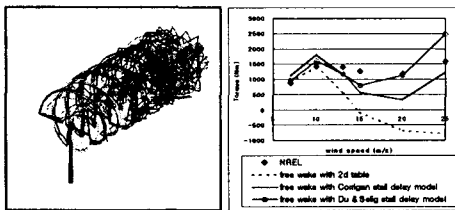


Fig. 4. a) Wake geometry b) Torque comparison of NREL Blade

그림 4-b)는 축의 토크값의 비교를 보여준다. 저속에서는 실속 지연 모델의 적용여부와 관계없이 실험치와 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 하지만 고풍속 영역에서는 블레이드의 상당부분 혹은 전 영역이 실속 상태에 들어가 실속 지연 모델이 중요해진다. 이와 같은 이유로 2-D 에어포일 값을 그대로 적용하는 경우는 고풍속 영역에서 상당히 작은 값으로 예측한다. Du & Selig 실속 지연 모델을 적용한 경우 25m/s를 제외한 곳에서

는 10%의 오차 범위 내에서 실험치와 잘 일치함을 나타내고 있다.

블레이드 길이 방향의 하중 분포를 살펴보면 실속 지연 모델의 중요성에 대해 알 수 있다. 그림 5.를 살펴보면 블레이드 탑에서의 값은 세가지 경우 모두 큰 차이를 나타내지 않지만 풍속이 높아질 수록 특히 블레이드의 뿌리 부분에서 많은 차이를 나타낸다. 2D 에어포일 데이터를 그대로 이용한 결과의 경우 블레이드 뿌리 부분에서 실험치에 비해 상당히 작은 값을 보여준다. Du & Selig 모델의 경우 전체적으로 만족스러운 결과를 나타내며 특히 고풍속 영역에서 실험치와의 경향이 가장 잘 일치하는 것을 보여준다. 따라서 고안된 FVE후류 모델에 Du & Selig 실속 지연 모델을 적용시키는 것이 가장 정확한 해를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

SNU model.

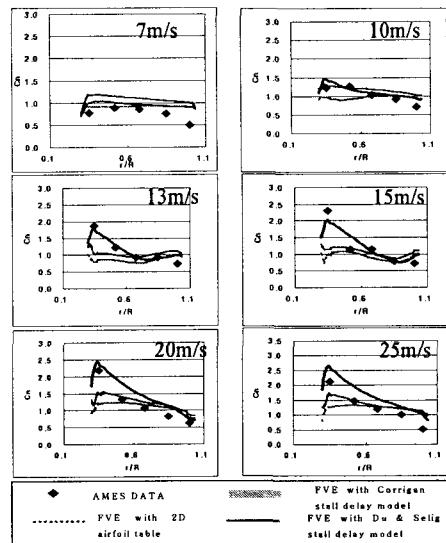


Fig 5. Spanwise distribution of normal force coefficients for the NREL model

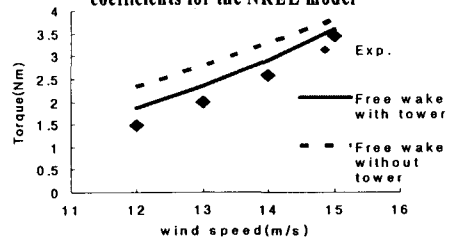


Fig. 6. Torque comparison for SNU Blade

서울대학교 모델의 경우 타워의 직경이 블레이드의 반경에 비해 큰 관계로 FVE를 이용한 해석의 경우 타워에 의한 효과가 뚜렷이 나타난다. 이 경우 NREL의 모델과는 달리 타워에 의한 영향이 잘 나타남을 알 수 있다. 서울대학교 모델의 경우 타워를 포함하지 않는 일반적인 자유 후류 모델과 타워를 포함하는 FVE 자유후류 모델에 의한 계산 결과를 실험치와 비

교하였다. 이 결과는 그림 6.에서 보여진다. 전체적으로 FVE 자유후류 모델에 의한 값이 일반적인 자유후류 모델에 의한 결과보다 좀 더 정확한 결과를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 타워와 후류에 의한 영향이 타워가 위치한 근처의 방위각에서 블레이드의 순환강도(circulation strength)의 분포와 유효 받음 각에 영향을 주어 FVE모델의 결과는 일반적인 모델의 결과에 비해 작은 값을 나타내며 실험치와 좀 더 잘 일치하는 것으로 생각된다.

3.3 Yawed flow

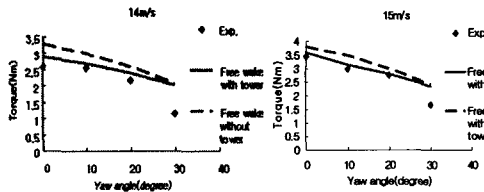


Fig 7. Torque comparison of SNU BLADE-yawed case

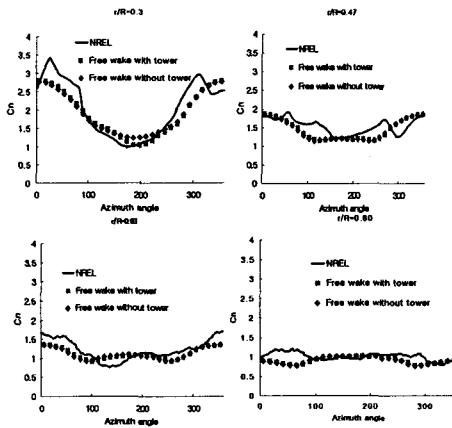


Fig. 8. Sectional Normal Force comparison of NREL blade at yaw 30 degree

요각이 있는 경우의 계산은 앞서 설명했던 것과 같이 타워를 포함하는 FVE 자유후류법과 타워를 포함하지 않는 일반적인 자유후류법에 대해 수행하였다.

두 경우 모두 실속 지연 모델은 Du & Selig 모델을 사용하였으며, SNU 모델의 풍속 14m/s, 요각 10~30도와 NREL 모델의 풍속 15m/s에서 요각이 30도인 경우의 데이터와 비교하였다. 그림 7.에서 볼 수 있는 것과 같이 이 경우 역시 대체로 FVE 모델에 의한 결과가 좀 더 정확한 값을 보여준다. 그러나 요각이 30도로 증가하면 둘 사이의 거의 차이가 없으며 실험치와 상당한 차이를 보여준다. 이는 요각이 증가하면서 방위각 90도와 270도 부근에서 스펀 방향 흐름의 영향이 강해져 이것에 대한 고려가 수치해석 기법에서 충분히 되지 않은 이유로 생

각된다. 이는 NREL의 측정결과에서 잘 알 수 있다. 그림 8.에서와 같이 방위각 0도와 180도에서의 수직 하중 계수는 잘 일치하는데 비해 90도와 270도 부근에서는 상당한 차이를 보여준다. 따라서 좀 더 발전된 모델의 개선을 위해 이 부분의 보완이 필요할 것을 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 후류와 타워의 상호 작용을 고려한 FVE 자유후류모델을 만들어내고 이를 이용하여 수평축 풍력 발전기 블레이드의 비정상 하중 해석이 가능한 코드를 개발하였다. 또한 이의 검증에 위하여 풍동 실험을 수행하였다. 두 가지 실속 지연 모델에 대해 검증하여 적절한 실속 지연 모델을 찾았으며 일반적인 자유후류모델과의 비교를 수행하였다.

NREL 모델과 서울대학교의 풍동모델의 결과와 비교해 볼 때 Du & Selig 실속 지연 모델을 결합하는 것이 적절한 것으로 보인다. 또한 블레이드의 반경에 비해 타워의 두께가 두꺼운 경우 FVE 자유후류모델이 일반적인 자유후류모델에 비해 좀 더 정확한 결과를 보여주었다. 이와 같은 결과는 후류와 타워의 간섭이 중요하게 작용하는 경우, 성능 및 비정상 하중의 예측에서 개발된 FVE 자유후류모델의 유효성을 보여주었다.

Reference

- [1] Cottet G-H, Koumoutsakos PD. Vortex Methods: Theory and Practice. Cambridge University Press: New York, 2000
- [2] W.J. McCroskey, Vortex Wakes of Rotorcraft, 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. 1995
- [3] Hyunki Shin, Jiwoong Park, and Soogab Lee, A new free wake model development for simulation of wind turbine performance, World wind energy conference, China, Beijing, Nov. 1-3, 2004
- [4] Quackenbush, T. R., Bliss, D. B., Wachspress, D. A., and Ong, C. C., Free-Wake Analysis of Hover Performance Using a New Influence Coefficient Method, NASA CR 4309, 1990
- [5] James L. Tangler, Insight into Wind Turbine Stall and Post-stall Aerodynamics, Wind Energy, vol.7 247-260, 2004
- [6] Hansen AV, Butterfield CP. Aerodynamics of horizontal-axis wind turbines. Annual Review of Fluid Mechanics 1993;25:115-149
- [7] Corrigan, J.J. and Schilling, J.J., "Empirical Model for Stall Delay Due to Rotation.", American Helicopter Society Aeromechanics Specialists Conf., San Francisco, CA, Jan. 1994
- [8] James L. Tangler and Michael S. Selig, "An Evaluation of an Empirical Model for Stall Delay due to Rotation for HAWTS", Windpower '97 Austin, Texas, June 15-18, 1997
- [9] Zhaohui Du and Michael S. Selig, "A 3-D Stall-Delay Model for Horizontal Axis Wind Turbine Performance Prediction", AIAA-98-002
- [10] D. Simms, S. Schreck, M. Hand and L.J. Fingersh, "NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel : A comparison of Predictions to Measurements", NREL/TP-500-29494, 2001.