

후류와 타워의 영향을 고려한 수평축 풍력발전기 블레이드의 비정상 하중 예측을 위한 새로운 자유후류기법의 연구

신행기*, 박지웅, 이수갑, 김주언

Development of a new free wake model considering a wake-tower interaction for a horizontal axis wind turbine

Hyunki Shin, Jiwoong Park, Soogab Lee, Jueon Kim

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.

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

* 서울대학교 기계항공공학부

■ Seoul National Univ., Shinrim-Dong, Gwanak-Gu, Seoul, Korea

■ E-mail : hkeewind@gmail.com ■ Tel : (02)876-7383 ■ Fax : (02) 875-4360

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 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 NASA의 AMES 풍동 실험결과 및 서울대학교가 공군사관학교 풍동에서 수행한 실험결과를 통해 검증하였다.

2. 수평축 풍력발전기 공력 해석 기법의 고찰

수평축 풍력 발전기 블레이드의 공력 해석을 위한 방법으로 상대적으로 가장 단순한 기법인 BEMT(Blade Element Momentum Theory)⁽¹⁾에서 가장 복잡한 형태를 취하고 있는 Navier-Stokes Eqn.에 기반을 둔 CFD⁽²⁾와 그것의 중간적인 복잡성을 가지는 Vortex Wake Method와 같은 다양한 기법들이 존재한다. BEMT의 경우 기법의 단순함에 기인한 빠른 계산 시간과 오랫동안의 경험에서 축적된 노하우로 인해 산업계에서 지금까지 표준적인 해석 및 설계 코드로 자리 잡고 있다. 그러나 BEMT는 기본적으로 불완전한 가정에서 출발하고 있는 관계로⁽³⁾ 많은 경우 실험값과 경험식에 의한 보정이 필요하다. 이와 같은 이유로 현재 산업계에서는 BEMT를 대신할 수 있는 이론적으로 올바른 모델을 요구하고 있다⁽⁴⁾. CFD의 경우 물리적으로 가장 사실적인 이론에 기초하고 있기 때문에 미래에는 표준적인 해석 코드로 자리 잡을 것으로 기대되고 있다. 하지만 그 방법의 복잡성에서 기인한 장시간의 계산시간으로 인해 현 단계에서 블레이드 설계에의 적용은 어려운 실정이며, 비정상 하중의 해석 역시 쉽지 않은 단계이다. 또한, 블레이드 끝단 와류의 소산은 CFD의 문제점으로 나타나고 있다^(5,6). BEMT와 CFD의 가교 역할을 하는 기법으로는 와동 후류(vortex wake) 기법이 있다⁽⁷⁾. 이 방법은 지난 20여년간 회전익 공력 해석 분야에서 널리 사용되었으며, 현 단계에서 회

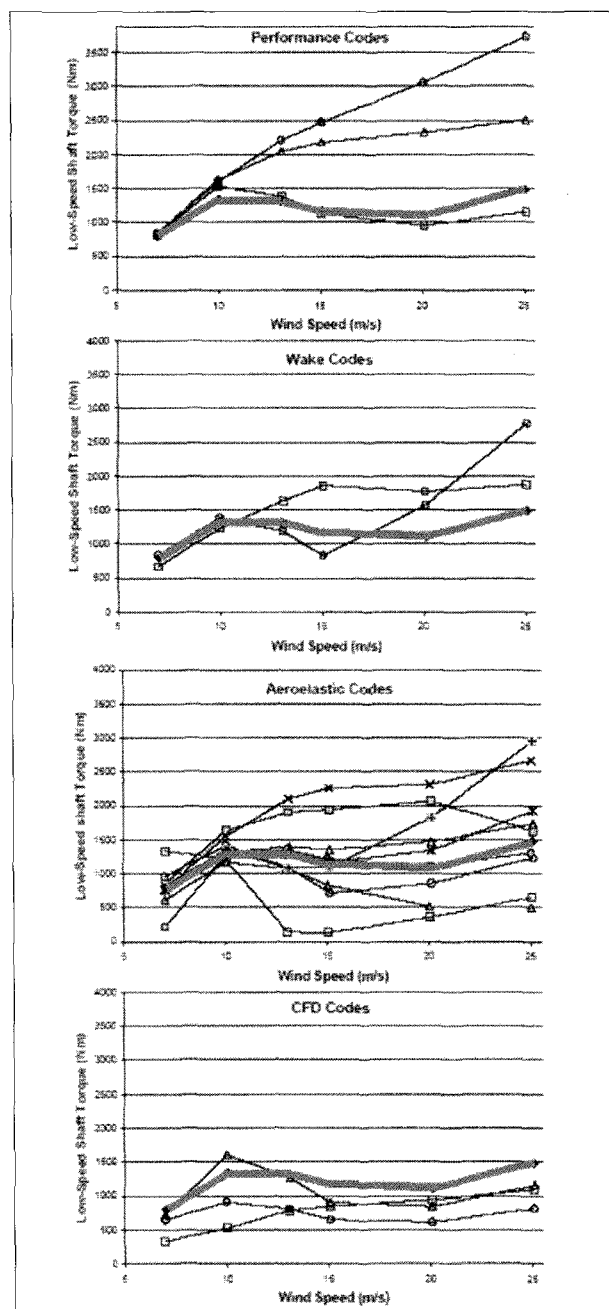


Fig. 1 NREL Blind Comparison Results

전익의 비정상 하중과 성능 해석의 실용적인 방법으로 생각되고 있다⁽⁸⁾.

이러한 다양한 기법들에 대한 흥미로운 검증이 NREL에서 수행되었다⁽⁹⁾. NREL에서는 실험 조건만을 공개한 채 세계의 우수 기관에 시뮬레이션 결과를 제공 받아 블라인드 테스트 (Blind test)를 수행하였다. 그 결과는 그림 1에서 볼 수 있는 것

과 같이 여러 가지 해석 방법은 다양한 결과를 보여준다. 바람을 정면으로 받는 정상 하중인 상황에서의 토크 해석에서조차, 가장 복잡한 기법인 CFD가 언제나 가장 정확한 결과를 보여주는 것은 아니며, 어떤 경우에는 가장 단순한 기법인 BEMT에 근거한 방법이 가장 정확한 결과를 보여준다. 하지만 정확한 결과를 보여주는 톨의 경우도 개발자가 밝히기를 다른 실험과의 결과에서 항상 정확하게 일치하는 것은 아니라고 한다. 또한, 요(yaw)각이 있는 경우와 같은 비정상 하중 해석의 경우 기법의 한계 또는 계산 시간의 한계로 인하여 공탄성이 결합된 BEMT 기법과 후류법(vortex wake method)만이 결과를 제공하였다.

NREL의 블라인드 테스트는, 현재의 단계에서 어느 기법이 가장 정확한 결과를 보여준다고 말하기는 쉽지가 않으며, 가장 단순한 경우조차 정확한 공력 해석은 쉽지가 않음을 말해준다.

3. 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.

3.1 FVE(Finite Vortex Element)를 이용한 자유후류모델

회전익에서 후류는 전체 성능과 하중의 해석에서 가장 중요한 위치를 차지하는 것 가운데 하나이다. 와동 후류(Vortex wake) 기법은 크게 규정후류법(prescribed wake method)과 자유후류법(free wake method)로 나뉜다⁽¹⁰⁾. 규정후류법의 경우 후류 구조가 잘 알려진 경우의 해석에는 적합하지만 설계 단계에서와 같이 다양한 형태의 블레이드 해석에는 적합하지 않다. 자유후류의 경우 계산 시간이 규정후류에 비해 오래 걸리는 단점이 있지만, 다양한 경우의 해석에 유리하다. 이러한 자유후류법의 유효성에 대해서는 오랜 시간 동안 회전익의 해석에서 검증되어 왔다⁽¹¹⁾. 일반적으로 자유후류법에서 후류는 후류패널(wake panel) 또는 직선이나 곡선형 와동(vortex)로 묘사된다. 그러나 이러한 기법은 블레이드 뒤쪽에 타워와

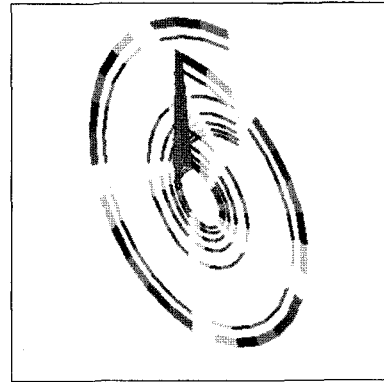


Fig. 2 initial FVE wake geometry

같은 장애물의 해석에 어려움을 갖는다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 이 연구에서는 FVE 자유 후류법을 개발하였다⁽¹²⁾.

그림 2에서 서로 다른 톤(색)은 각각의 와동 요소(vortex element)를 나타낸다. 이 와동 요소는 같은 강도를 가지며 각각 끝단이 연결되어 있다. 이러한 와동 요소들은 흐름을 따라 내려가다가 타워에 부딪힐 경우 와동링과 말굽형 와동으로 분리되어 내려간다(그림 3). 이 과정은 계속해서 반복되며 후류와 타워의 상호 작용을 묘사하며 유동장을 시뮬레이션 한다.

기본적으로 유동장은 속도 포텐셜 ϕ^* 로 지배된다.

$$\nabla^2 \phi^* = 0 \tag{1}$$

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

$$\phi^*(x,y,z) = \frac{1}{4\pi} \int_{body + wake} \sigma \nabla(1/r) ds - \frac{1}{4\pi} \int_{body} \omega(1/r) ds + \phi_\infty \tag{2}$$

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 참고문헌 13에 잘 나타나 있다⁽¹³⁾.

3.2 실속 지연 모델 (stall delay model)

고정익과는 다른 회전익의 공력 특성 가운데 하나는 코리올

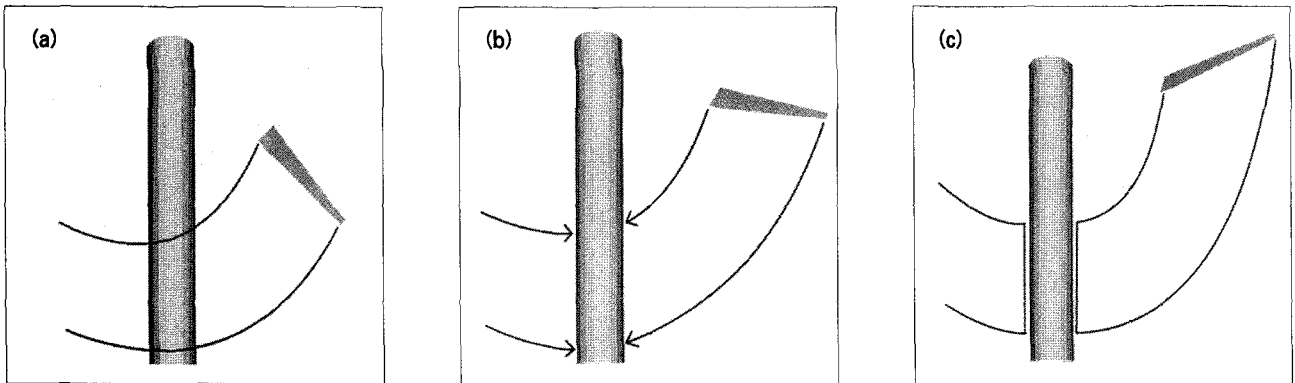


Fig.3 Blade-wake-tower interaction (a) before vortex filaments hit the tower (b) vortex filaments strike against the tower (c) vortex elements are separated into vortex ring and horse-shoe vortices

리스의 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 타워의 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 증가시켜 수명과 소음 등에 악영향을 주게 된다⁽¹⁴⁾. 따라서 BEMT 또는 와동후류법(vortex wake method)에서는 적절한 실속 지연 모델의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 두 가지 경우의 실속 지연 모델을 적용하여 실속 지연 모델이 적용되지 않은 경우의 해석과 비교해 보았다.

3.2.1 Corrigan 실속 지연 모델

Corrigan 모델^(15,16)은 형상 함수와 국부 고형비(solidity)를 바탕으로 한다. 국부 고형비는 실속 지연과 블레이드의 국부 시위를 회전중심에서 국부지점까지의 거리로 나눈값(c/r)과의 관계를 설명해 준다. 지연된 실속각의 계산은 프롭로터와 헬리콥터의 실험에서 얻어진 상관관계에 의해 다음의 식과 같이 얻어진다.

$$\Delta\alpha = (\alpha_{q,max} - \alpha_{q=0}) = \left[\left(\frac{K\theta_{T,E}}{0.136} \right)^n - 1 \right]$$

K 는 박리점과 관련된 속도 구배 그리고 c/r 에 의해 정의되며 다음 식과 같이 표현 된다.

$$\frac{c}{r} = 0.1517K^{-0.184}$$

Corrigan의 연구에 의하면 n 값은 실험결과의 연관관계에 의해 0.8과 1.6사이의 값을 가지는 것으로 알려져 있고 n 이 1일 때 대부분의 경우에 좋은 결과를 보였다. 이런 Corrigan의 결과를 토대로 본 연구에서는 n 이 1일때를 사용하였다.

3.2.2 Du & Selig 실속 지연 모델

Du & Selig 모델⁽¹⁷⁾은 블레이드의 회전좌표계에서 얻어진 3차원 층류 경계층 적분 방정식을 기본으로 하고 있다. 이 모델에서는 3차원 양력, 항력계수는 다음의 식과 같이 표현 된다.

$$\begin{aligned} C_{l,3D} &= C_{l,2D} + \Delta C_l \\ C_{d,3D} &= C_{d,2D} + \Delta C_d \end{aligned}$$

기본적인 익형 이론과 실속 지연 원리를 기초로 하여 양력계수의 증가량과 항력계수의 감소량은 다음의 식과 같다

$$\begin{aligned} \Delta C_l &= f_l(C_{l,p} - C_{l,2D}) \\ \Delta C_d &= f_d(C_{d,D} - C_{d,0}) \end{aligned}$$

여기서 $\Delta C_{l,p} = 2\pi(\alpha - \alpha_0)$ 이며 $C_{d,0} = C_{d,2D}(\alpha = 0)$ 이다. 함수 f_l 과 f_d 는 박리계수에 의해 모델링 되며 이의 식은 다음과 같다.

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1.6(c/r)}{0.1267} \frac{a-(c/r) \frac{d}{\Lambda} \frac{R}{r}}{b+(c/r) \frac{d}{\Lambda} \frac{R}{r}} - 1 \right]$$

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1.6(c/r)}{0.1267} \frac{a-(c/r) \frac{2\Lambda}{r}}{b+(c/r) \frac{d}{\Lambda} \frac{R}{r}} - 1 \right]$$

$$\Lambda = QR / \sqrt{V_w^2 + (QR)^2}$$

여기서 a, b, d는 실험적 보정 계수이다. Du & Selig의 연구에서는 이 값들을 1로 고정했으며, 본 연구에서도 이 값을 사용하였다.

3.3 SNUWT의 개발

앞서 설명하였던 FVE 자유후류모델과 실속 지연 모델을 결합하여 SNUWT(Seoul National University Wind turbine aerodynamic performance & unsteady load analysis Tool)을 개발하였다. 타워와 블레이드를 모두 포함하여 모델링하였으며 후류의 경우 FVE와 CVC를 결합하여 시뮬레이션하였다. 블레이드 위의 하중 계산은 블레이드에서 순환 강도의 분포를 이용하여 Joukowski law에 의해 계산되는 힘과 유효 받음각에 기초한 2-D 에어포일값의 실속 지연 모델에 의한 보정을 이용하였다. 전체적인 도해는 그림 4와 같다.

3.4 NREL 풍동 실험

미국 NREL의 실험에 사용된 풍동 모델은 지름 10.1m의 두 개의 블레이드를 가진 72rpm고정의 스톤 제어 타입의 수평축 풍력 발전기이다. 실험은 NASA Ames의 풍동에서 수행되었다. 자세한 사항은 참고 문헌 9에 잘 나타나 있다.

3.5 서울대학교 풍동 실험

서울대학교 풍동 모델의 경우 블레이드의 반지름이 0.54m이며 맞바람 형식의 풍력발전기이다. 블레이드 팁의 코드길이는 11mm, 테이퍼비는 0.25, 트위스트 각은 15.6°의 세 개의 블레이드를 가진 형태이다. 타워의 반지름은 0.072m이며 로터 뒤쪽 0.245m에 위치하여 있다. 실험은 공군사관학교의 풍동에서 수행되었다. 가변 피치 타입으로 제작되었으며 풍속 13~16m/s에서 RPM과 토크 측정을 수행하였다(그림 5).

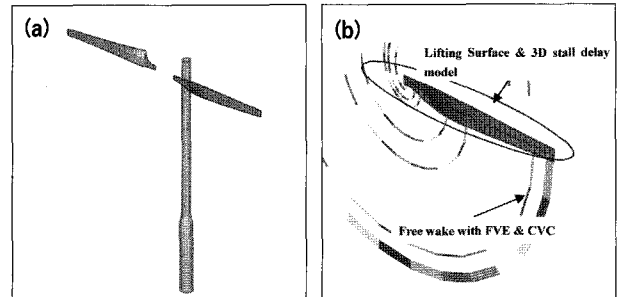


Fig. 4 schematics of free wake analysis

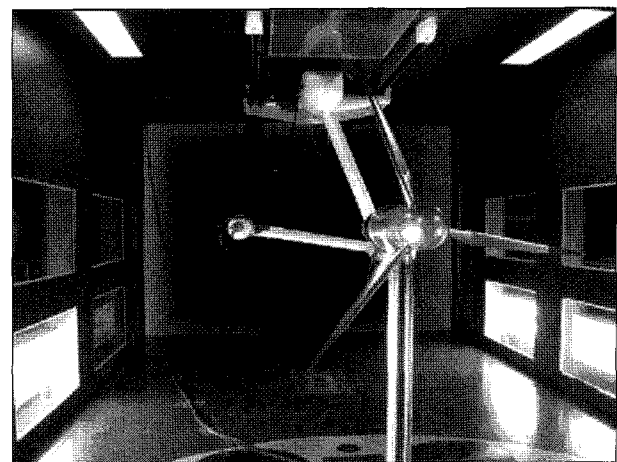


Fig. 5 The model wind turbine in wind tunnel at Korea Air Force Academy

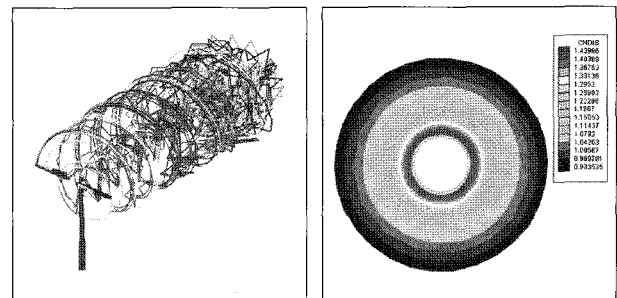


Fig. 6 wake geometry and normal force coefficient distribution for the NREL model

4. 결과 및 토의

앞서 설명한 기법을 검증하기 위해 예측 결과를 NREL의 실험값과 서울대학교의 실험 결과와 비교하였다. 예측 결과는 실속 지연 모델이 적용된 경우와 그렇지 않은 경우, 타워를 포함하는 FVE 방법과 타워를 포함하지 않는 일반적인 자유후류법에 대해 계산 되었으며, 요 각이 0도와 30도에 대해 토크, 루트에서의 힘 모멘트, C_N값의 분포 비교를 하였다. 토크와 힘 모

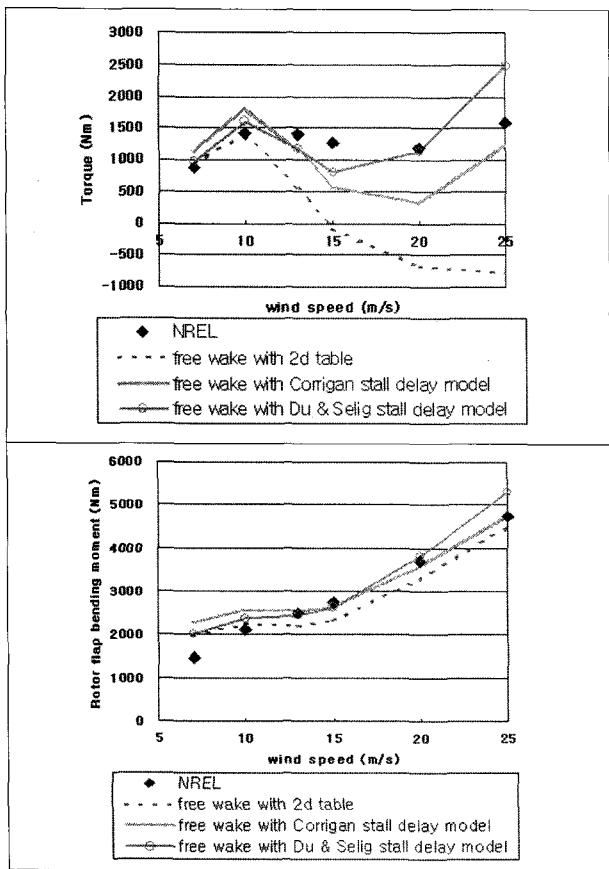


Fig. 7 Comparison of measured and computed results for the NREL model.- shaft torques & root flap moments.

멘트의 경우 마지막 한바퀴의 계산 결과를 평균하였으며 각 힘의 분포는 마지막 한 바퀴의 계산에서 각 방위각에서의 값을 나타낸다.

4.1 Head-on Flow

그림 6은 NREL 모델에 대한 후류형상과 블레이드의 하중 분포를 보여준다. 각 섹션별 힘의 분포는 블레이드 위의 순환(circulation)의 분포와 후류에 의해 계산된 유효 받음각을 이용하여 2-D 에어포일의 공력 값을 참고하여 계산한다.

그림 7은 축의 토크값과 뿌리에서의 휨 모멘트의 비교를 보여준다. 저속에서는 실속 지연 모델의 적용여부와 관계없이 실험치와 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 하지만 고품속 영역에서는 블레이드의 상당부분 혹은 전 영역이 실속 상태에 들어가 실속 지연 모델이 중요해진다. 이와 같은 이유로 2-D 에어포일 값을 그대로 적용하는 경우는 고품속 영역에서 상당히 작은 값으

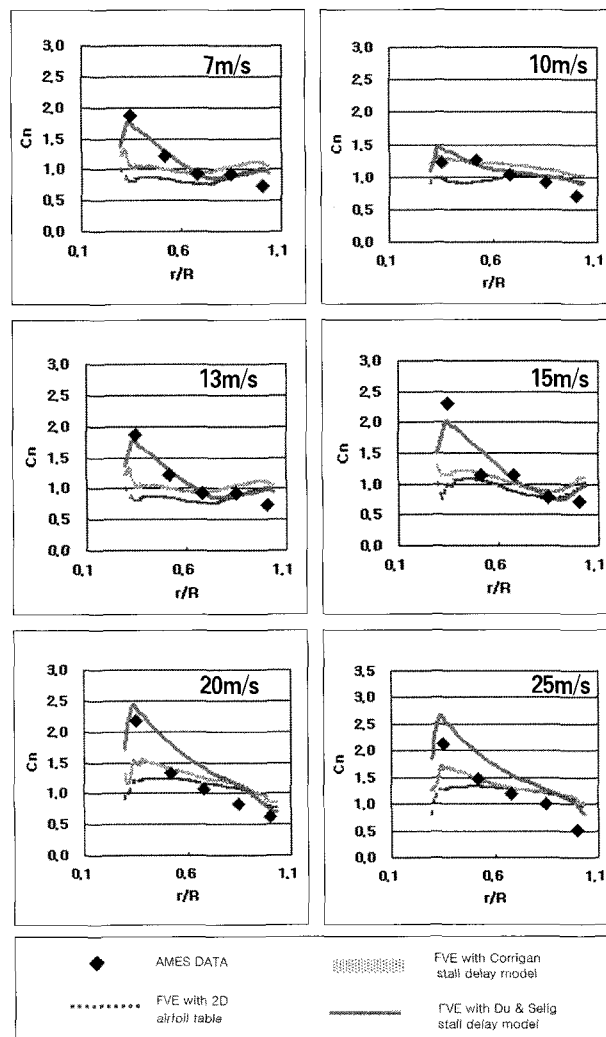


Fig. 8 Spanwise distribution of normal force coefficients for the NREL model

로 예측한다. Du & Selig 실속 지연 모델을 적용한 경우 25m/s를 제외한 곳에서는 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 8을 살펴보면 블레이드 팁에서의 값은 세가지 경우 모두 큰 차이를 나타내지 않지만 풍속이 높아질수록 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 고품속 영역에서 실험치와의 경향이 가장 잘 일치하는 것을 보여준다.

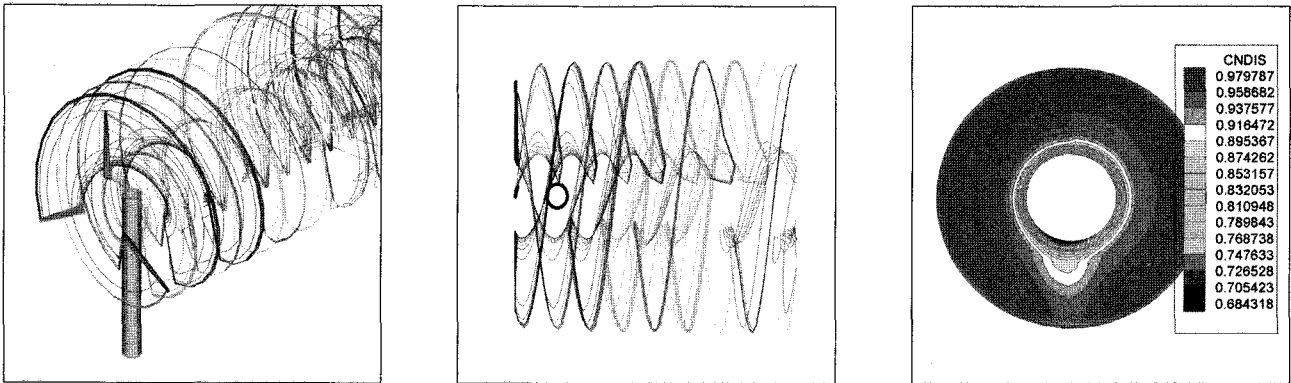


Fig. 9 wake geometry and normal force coefficient distribution for the SNU mode

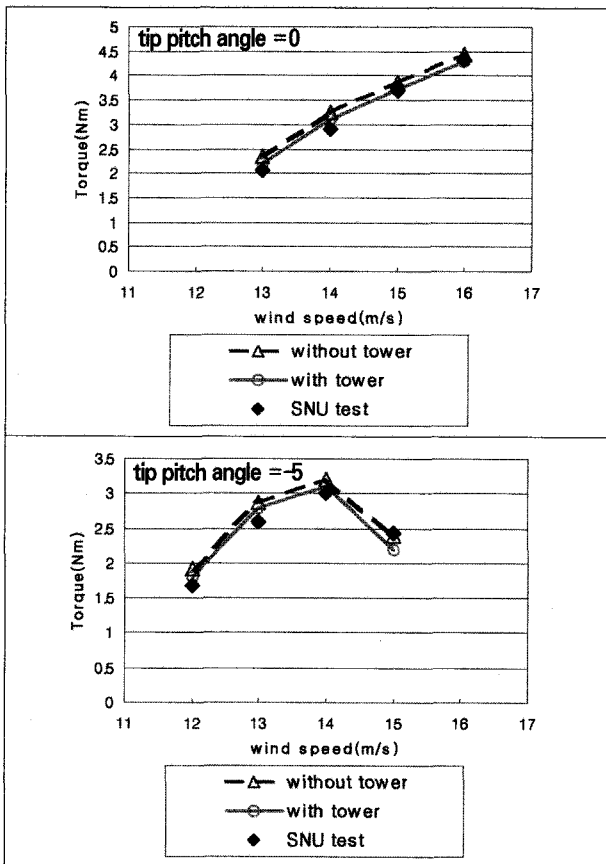


Fig. 10 Comparison of measured and computed results for the SNU model. (a) tip pitch angle=0, (b) tip pitch angle=-5

토크, 휨 모멘트와의 비교와 수직하중 계수 분포와의 비교 결과로 보아 FVE 자유후류법과 Du & Selig 실속 지연 모델의 결합은 성능 및 하중해석에 적절한 것으로 생각된다.

서울대학교 모델의 경우 타워의 직경이 블레이드의 반경에 비해 큰 관계로 FVE를 이용한 해석의 경우 타워에 의한 효과

가 뚜렷이 나타난다. 그림 9는 계산된 후류의 형상과 하중 분포를 보여 준다.

이 경우 NREL의 모델과는 달리 타워에 의한 영향이 잘 나타남을 알 수 있다. NREL 모델의 실험치와의 비교 결과 가장 유효한 것으로 나타난 Du & Selig 실속 지연 모델을 적용하였으며, 타워를 포함하지 않는 일반적인 자유 후류 모델과 타워를 포함하는 FVE 자유후류 모델에 의한 계산 결과를 실험치와 비교하였다.

실험치와는 각각 팁 피치각이 0도와 -5도의 경우와 비교하였으며 이 결과는 그림 10에서 보여진다. 전체적으로 FVE 자유후류 모델에 의한 값이 일반적인 자유후류 모델에 의한 결과보다 좀 더 정확한 결과를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 그림 9에서 알 수 있듯이 타워와 후류에 의한 영향이 타워가 위치한 근처의 방위각에서 블레이드의 순환강도(circulation strength)의 분포와 유효 받음각에 영향을 주어 FVE모델의 결과는 일반적인 모델의 결과에 비해 약간 작은 값을 나타내며 실험치와 좀 더 잘 일치하는 것으로 생각된다.

4.2 Yawed flow

요각이 있는 경우 블레이드에는 주기적인 하중이 계속적으로 작용하게 된다. 이런 이유로 적절한 하중의 해석은 블레이드의 수명과 구조 설계에 중요한 역할을 차지한다.

자유후류법의 해석에서는 요각이 있는 경우 역시 기본적으로 정면에서 유동이 오는 것과 같은 방법으로 계산을 수행하며 단지 풍향의 수정과 블레이드 팁에서의 보정만을 수행한다. 이것은 다양한 조건에서의 계산을 가능하게 해주는 자유후류법의 장점이다.

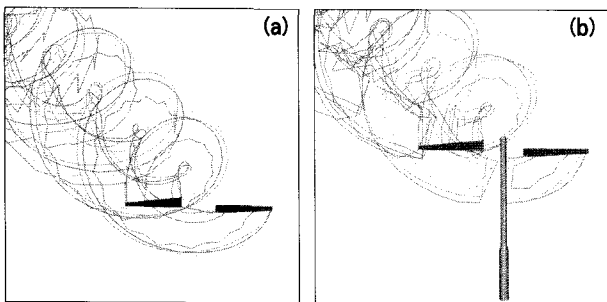


Fig. 11 wake geometry for the NREL model (a) conventional free wake without tower, (b) FVE free wake with tower

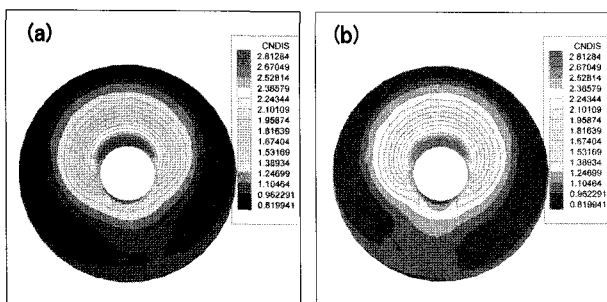


Fig. 12 normal force distribution for the NREL model (a) conventional free wake without tower, (b) FVE free wake with tower

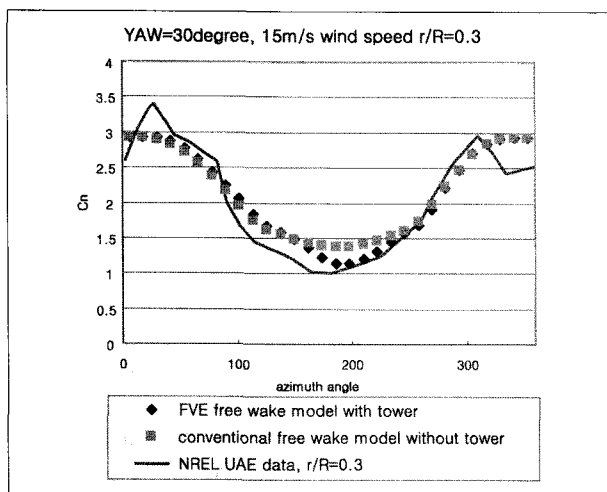


Fig. 13 Comparison of measured and computed results for the NREL model

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, NREL 모델의 풍속 15m/s에서 요각이 30도인 경우의 데이터와 비교하였다.

그림 11은 각각의 경우에 대한 후류 형상을 보여 주며 그림 12은 이 경우의 수직 하중 계수의 분포를 보여준다. 그림 13의 수

직하중계수의 비교는 블레이드의 안쪽의 경우 타워의 두께가 두껍지 않은 NREL의 모델에서도 FVE모델과 일반적인 자유후류모델의 결과가 차이를 나타냄을 보여준다. 다른 방위각에서는 거의 같은 값을 가지지만 방위각 180도 부근, 즉 타워가 있는 위치 부근에서의 수직하중계수의 값의 경우 FVE 모델에 의한 값이 일반적인 자유후류모델의 값보다 작게 나오며 실험 값과 좀 더 잘 일치함을 알 수 있다. 이것은 FVE모델의 경우 타워를 포함하며 후류와 타워의 간섭으로 인해 타워 부근의 후류 형상이 달라짐으로 인해 블레이드 위의 유효 받음각과 순환 분포가 변화해 되고 이는 그림 12에서 볼수 있듯이 타워 근처의 방위각에서 하중의 분포를 변화 시켜 나타나는 결과이다.

5. 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 검증을 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 보여준다. 특히, 요각이 있는 경우 타워의 두께에 관계없이 FVE 자유후류모델의 결과가 좀 더 유효함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 후류와 타워의 간섭이 중요하게 작용하는 경우, 성능 및 비정상 하중의 예측에서 개발된 FVE 자유후류모델의 유효성을 보여준다.

앞으로의 연구에서는 지표에서의 속도구배를 고려한 비정상 하중의 예측에 대해 수행할 예정이며(이 부분에 대해서는 이미 개발된 코드에서 수행이 가능하지만 적절한 실험 데이터를 구하지 못한 관계로 본 논문에서는 제외되었다), 공탄성 부분의 결합 등을 통해 개발된 틀의 완성도를 높일 예정이다. 이렇게 개발된 틀은 풍력 발전기의 성능 예측과 블레이드 공력 설계 뿐 아니라 적절한 비정상 하중의 예측을 통해 블레이드의 구조 설계 및 피로 하중 저감을 위한 방법 등에 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

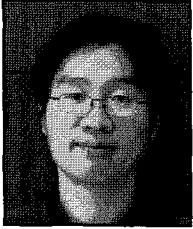
Nomenclature

- α : angle of attack
- Φ : velocity potential
- σ : source strength
- μ : doublet strength
- Q : rotational speed
- c_l : lift coefficient
- c_d : drag coefficient
- c_N : normal force coefficient
- c : chord length
- R : blade radius
- r : sectional radius
- V_w : blade tip speed

References

1. Hansen AV, Butterfield CP. Aerodynamics of horizontal-axis wind turbines. Annual Review of Fluid Mechanics 1993;25:115-149
2. Duque EPN, van Dam CP, Hughes SC. Navier-Stokes simulations of the NREL Combined Experiment phase II rotor, a collaboration. AIAA Paper 99-0037, 1999
3. B. Montgomerie, The need for more measurements, Proc. 4th Int. Energy Agency(IEA) Aerodynamics Symp., Rome, Italy, 1990
4. J. Whale, C. G. Anderson, R. Bareiss, S. Wagner, An experimental and numerical study of the vortex structure in the wake of a wind turbine, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 84(2000) 1-21
5. Wind energy. Vol. 5. number 2/3 2002, J. Gordon Leishman, Challenges in Modelling the Unsteady aerodynamics of wind turbines
6. Frank N. Coton, Tongguang Wang, Roderick A.McD. Galbraith, An Examination of Key Aerodynamic Modelling Issues Raised by the NREL Blind Comparison. Wind Energy. Vol.5 No.2/3 2003
7. Cottet G-H, Koumoutsakos PD. Vortex Methods: Theory and Practice. Cambridge University Press: New York, 2000
8. Wind turbine wake aerodynamics, L. K. Vermeer, J. N. Srensen, A. Crespo. Progress in Aerospace Sciences 39(2003) 467-510
9. 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.
10. Bliss, D. B., Quackenbush, T. R., and Bilanin, A. J., A New Methodology for Helicopter Free Wake Analyses, 39th Annual Forum of the American Helicopter Society, May 1983.
11. W.J. McCroskey, Vortex Wakes of Rotorcraft, 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan, 1995
12. Hyungki 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
13. 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
14. James L. Tangler, Insight into Wind Turbine Stall and Post-stall Aerodynamics, Wind Energy, vol.7 247-260, 2004
15. 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
16. 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
17. Zhaohui Du and Michael S. Selig, "A 3-D Stall-Delay Model for Horizontal Axis Wind Turbine Performance Prediction", AIAA-98-002

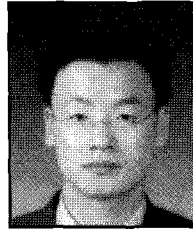
신형기



1998 : 서울대학교 기계항공공학부 학사
 2000 : 서울대학교 기계항공공학부 석사
 2002 : 서울대학교 기계항공공학부 박사 수료

 현재 박사과정(서울대학교 기계항공공학부),
 한국풍력기술개발사업단 사무국장
 (E-mail : urbung2@sun.ac.kr)

박지웅



2003 : 부산대학교 항공우주공학과 학사
 2005 : 서울대학교 기계항공공학부 석사

 현재 박사과정(서울대학교 기계항공공학부)
 (E-mail : pjw77@sun.ac.kr)

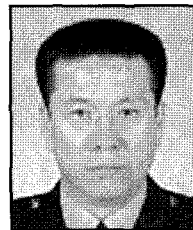
이수갑



1983 : 서울대학교 항공공학 학사
 1985 : 서울대학교 항공공학 석사
 1992. 6 : 미국 스탠포드대학교 공력소음공학 박사

 현재 교수(서울대학교 기계항공공학부),
 한국풍력기술개발 사업단장
 (E-mail : solee@plaza.sun.ac.kr)

김주언



1983 : 서울대학교 항공공학 학사
 1987 : 미국 해군대학원 항공공학 석사
 1994.5 : 미국 메릴랜드대 항공공학 박사

 현재 부교수(공군사관학교 항공공학과),
 공군사관학교 공학처장
 (E-mail : jukim@afa.ac.kr)