

블레이드 성능예측을 위한 실속지연 모델 적용

신 형기^{★1)}, 박 지웅²⁾, 김 호건³⁾, 이 수갑⁴⁾, 김 석우⁵⁾

Application of stall delay model to wind turbine blade

Hyunki Shin, Jiwoong Park, Hogeon Kim, Soogab Lee, Seokwoo Kim

Key words : Stall delay(실속지연), blade(blade), Wind turbine(풍력발전기), steady load(하중 예측)

Abstract : BEMT나 wake method와 같이 2-D 에어포일의 데이터를 성능과 하중 해석에 이용하는 기법의 경우 에어포일 데이터의 정확도는 전체 결과에 큰 영향을 미친다. 풍력 블레이드와 같은 회전익에서는 2-D 에어포일 데이터를 실험 등을 통하여 정확히 얻어서 적용 시키더라도 예측 결과는 실제값과 큰 차이를 보이는 경우가 많다. 이는 회전익의 유동 특성에 의해 발생하는 실속 지연의 효과로 인한 것이며 이것은 입력에 사용되는 에어포일 데이터에는 반영되지 않으므로 자체적인 보정이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 현재 제시되어 있는 실속 지연 모델을 살펴보고 이를 블레이드의 성능과 하중 해석에 적용시켜 보아 그 유효성에 대하여 살펴보았다.

1. 서론

풍력 터빈에서 최대 출력을 정확히 예측하는 것은 실용적인 관점에서 매우 중요하다. 예측된 최대 출력은 발전기의 용량과 다른 기계적인 요소 부품의 설계와 선택에 많은 영향을 주며 이는 전체 시스템의 단가 및 풍력 발전기의 전력 생산 단가에 영향을 주게 된다[1]. 그러나 불행히도 현재 상용화 되어 있는 설계프로그램에서 많은 경우 최대 출력은 실제 테스트 상에서 나타나는 것 보다 작은 값을 예측하는 경향이 있다.

현재 국내에서 가장 많이 사용되는 G.H.의 BLADED의 경우 실속 지연 모델이 포함되어 있지 않기 때문에 이것이 강하게 작용하는 환경에서는 그림 1에서와 같이 실험값에 비해 상당히 작은 값을 나타내게 된다.

이것은 특히 실속 제어 타입의 풍력 발전기에서 정격 풍속에서 목표한 정격 용량을 지나치게 상회하는 블레이드를 설계하게 만든다. 이러한 결과는 결국 시스템의 단가를 높게 만든다. 따라서, 블레이드에서의 정확한 최대 출력의 예측은 실용적인 관점에서 무척 중요한 일이다[2].

이와 같은 BEMT와 와동 후류법에서 최대 출력에서 작은 값을 예측하게 주요 원인은 실속 지연 효과에 있다. 고정익과는 다른 회전익의 공력 특성 가운데 하나는 코리올리스의 힘 등에 의한 뿌리(root) 부분의 실속지연이다. 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. 실속 지연 모델(stall delay model)

2.1 Corrigan 실속 지연 모델

Corrigan 모델[4][5]은 형상 함수와 곡부 고

★ 1) 에너지기술연구원 풍력발전연구원

E-mail : hkeewind@kier.re.kr

Tel : (042)860-3748

2),3) 서울대학교 기계항공공학부

4) 서울대학교 기계항공공학부 교수

5) 에너지기술연구원 풍력발전연구원

형비(solidity)를 바탕으로 한다. 국부 고행비는 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.

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

K는 박리점과 관련된 속도 구배 그리고 c/r 에 의해 정의 되며 다음 식과 같이 표현 된다.

$$\frac{c}{r} = 0.1517K^{-1.084} \quad (2)$$

Corrigan의 연구에 의하면 n값은 실험결과의 연관관계에 의해 0.8과 1.6사이의 값을 가지는 것으로 알려져 있고 n이 1일때 대부분의 경우에 좋은 결과를 보였다. 이런 Corrigan의 결과를 토대로 본 연구에서는 n이 1 일때를 사용하였다.

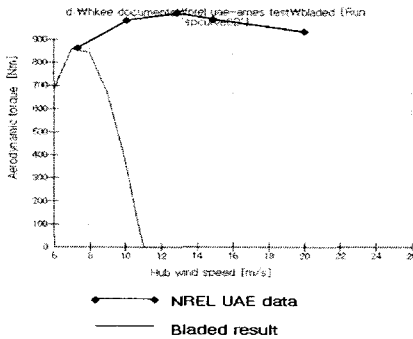


Fig. 3 comparison of Bladed results to measurement

2.2 Du & Selig 실속 지연 모델

Du & Selig 모델[6]은 블레이드의 회전좌표계에서 얻어진 3차원 층류 경계층 적분 방정식을 기본으로 하고 있다. 이 모델에서는 3차원 양력, 항력계수는 다음의 식과 같이 표현 된다.

$$C_{l,3D} = C_{l,2D} + \Delta C_l \quad (3)$$

$$C_{d,3D} = C_{d,2D} - \Delta C_d \quad (4)$$

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

$$\Delta C_l = f_l(C_{l,p} - C_{l,2D}) \quad (5)$$

$$\Delta C_d = f_d(C_{d,2D} - C_{d,0}) \quad (6)$$

여기서

$$C_{l,p} = 2\pi(\alpha - \alpha_0), \quad C_{d,0} = C_{d,2D} (=0)$$

이다.

함수 f_l 과 f_d 는 박리계수에 의해 모델링되며 이의 식은 다음과 같다.

$$f_l = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1.6(c/r)a - (c/r)^{\frac{d.B}{\Lambda r}}}{0.1267 b + (c/r)^{\frac{d.B}{\Lambda r}}} - 1 \right] \quad (7)$$

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1.6(c/r)a - (c/r)^{\frac{d.B}{\Lambda r}}}{0.1267 b + (c/r)^{\frac{d.B}{\Lambda r}}} - 1 \right] \quad (8)$$

$$\Lambda = \Omega R / \sqrt{V_\infty^2 + (\Omega R)^2} \quad (9)$$

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

3. 실속지연모델의 적용

앞의 단원에서 설명한 실속지연모델의 적용과 효율성을 보기 위하여 NREL의 UAE 실험에 대하여 적용하였다[7]. 본 연구의 계산에서는 S809 에어포일의 c_l , c_d 값에 대하여 각각의 실속지연 모델을 적용하여 블레이드의 분포 하중 계산에서 보정치로 사용하였다. NREL 블레이드의 해석을 위한 에어포일 데이터는 오하이오 대학의 실험치[8]를 사용하였다(그림 2). 그림 3은 Corrigan 실속 지연 모델이 적용된 S809 에어포일의 공력 계수를 보여주고 있다. Corrigan 실속 지연 모델의 경우 에어포일 공력 데이터에 대해 직접 적용시킬 수 있어 보정된 공력 계수의 값을 입력값으로 사용할 수 있다. 이에 반해 Du & Selig 실속 지연 모델의 경우 각 섹션에서의 값을 그때 그때 계산하여 주어야 한다.

유동 해석을 위해서는 기본적으로 자유 후류 기법을 개량한 FVE 모델[9],[10]을 사용하였으며 이에 대한 보정으로 앞서 이야기한 실속 제어 모델을 적용하였다.

4. 결과 분석

Head-on flow에서 NREL 모델의 실험은 풍속 7m/s, 10m/s, 13m/s, 15m/s, 20m/s, 25m/s에 대하여, 각각 회전수 71.9RPM, 72.1RPM, 72.1RPM,

72.1RPM, 72RPM, 72.1RPM에서 수행 되었다. 이 실험 조건에서 실속지연 모델을 자유후류법과 결합하여 그 해석 결과에 대하여 대한 결과는 토크와 $r/R=0.3, 0.47, 0.63, 0.80, 0.95$ 에서 측정된 Normal force coefficient와 비교 분석하였다.

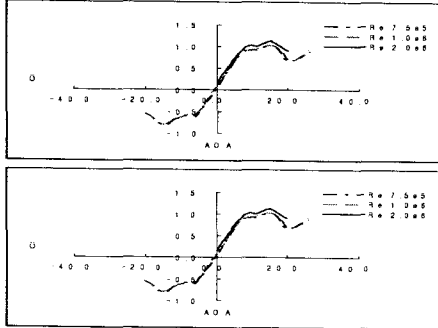


Fig. 2 lift and drag coefficient curve for S809 airfoil(experimental data)

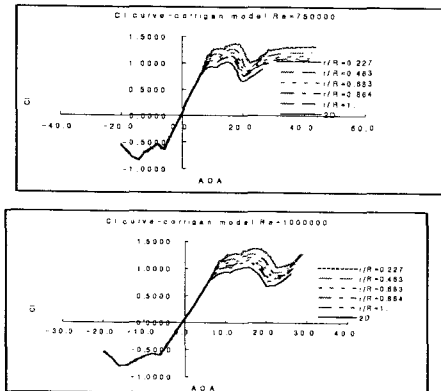


Fig. 3 S809 lift coefficient curves adjusted for Corigan stall delay model

자유후류모델에는 Corigan 실속 지연 모델과 Du & Selig 실속 지연 모델의 2가지 실속 지연 모델을 적용한 경우와 실속 지연 모델을 적용시키지 않은 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 토크의 비교는 그림 4에서 볼 수 있다. 풍속 7m/s와 10m/s의 경우 어느 경우나 큰 차이를 보이지 않으며, 실험치와 잘 일치한다. 그러나 풍속이 증가하면서 실험치와 각각의 해석값의 차이는 상당히 커진다. 특히, 실속 지연 모델이 적용되지 않은 경우는 풍속 15m/s이상에서 토크가 음(-)의 값을 보이고 있다. 또한 실속 지연 모델을 적용시킨 경우라도 실속 지연 모델의 종류에 따라 상당한 차이를 보인다. 이와 같은 원인은 그림 5에서 보여주는 것과 같이 각 풍속에서의 유효 받음각

을 살펴 보면 알 수 있다. 유효 받음각은 자유 후류에 의해서 유도된 속도와 풍속, 블레이드의 회전속도를 모두 고려하여 계산된 값이다. 풍속 7m/s와 10m/s의 경우 유효 받음각이 15도 이하로 대체로 실속 받음각 이하이다. 이 경우는 속도도 포텐셜에 기반한 블레이드의 패널과 자유 후류가 모두 잘 적용되는 경우이며 보정에 사용되는 에어포일의 공력 계수도 무리없이 적용되는 경우이다. 따라서 10m/s이하의 풍속에서는 실속 지연 모델 여부에 관계없이 실험치와 계산치가 잘 일치하는 것을 보여준다. 그러나 풍속이 증가함에 따라 정속 회전 실속 제어형 블레이드의 특성으로 블레이드의 피치각과 회전수가 고정되어 있어 블레이드의 유효 받음각이 점차로 증가하여 일부 영역에서는 블레이드의 유효 받음각이 40도에 육박하게 된다. 회전익의 경우 코리올리의 힘 등에 기인하여 실속 지연 효과가 강하게 나타나기 때문에 2-D 에어포일의 데이터를 그대로 적용할 경우 결과에서 알 수 있듯이 실제값보다 상당히 작은 값을 예측하게 된다. 이것은 초기 실속 제어형 블레이드의 설계 및 운영에서 잘 알려진 현상이다. 그림 6의 각 섹션에서의 수직 하중 계수의 비교는 이것을 좀 더 자세히 알 수 있다. 풍속 7m/s에서는 어느 경우나 큰 차이 없이 측정값과 유사한 성향을 보임을 알 수 있다. 전체적으로 볼 때 블레이드의 팁 부분에서의 값은 어느 경우나 실험치와 그리 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 블레이드의 루트 부분은 풍속이 증가함에 따라 각 경우에서 큰 차이를 보인다. 실속 지연 모델이 적용되지 않은 경우는 풍속 10m/s에서는 이미 블레이드의 루트 부분에서 실험치나 다른 계산치에 비해 상당히 작은 값의 수직 하중 계수를 갖는 것을 볼 수 있다. Corigan 실속 지연 모델의 경우 실속 지연 모델이 적용 되지 않은 경우에 비해서는 좀 더 큰 값을 가지지만 실험치와의 경향에서 어느 정도 차이를 갖는다. Du & Selig 모델의 경우 전체적으로 실험치와 경향성에서 잘 일치함을 보여주며 전체 성능에서도 실험치와 가장 잘 일치함을 보여준다. Du & Selig 실속 지연 모델을 적용한 경우 다른 모델의 경우에 비해 블레이드 루트 부근에서 실험치와의 경향성이 잘 일치하고 있다. 이것으로 보아 자유후류법에 Du & Selig 실속 지연 모델의 적용이 성능 및 하중 분포 예측에 가장 적절한 기법으로 판단된다.

5. 결론

위의 결과들은 BEMT 또는 vortex wake 기법을 사용하여 풍력 블레이드의 성능과 하중을 예측하는 방법에서 적절한 실속지연모델 적용의 중요성을 보여준다. 특히 정격 풍속 부근과 그 이상의 경우 실속 지연 모델의 적용 여부와 종류에 따

라 큰 차이를 보여주고 있다. 따라서 블레이드의 개발에 있어서 적절한 실속 지연 모델의 이해와 적용은 설계 단계에서 블레이드의 정확한 성능과 하중의 예측을 위해 필요하며, 실속제어형 풍력 발전기의 블레이드에 있어서는 그 중요성이 더 강조된다.

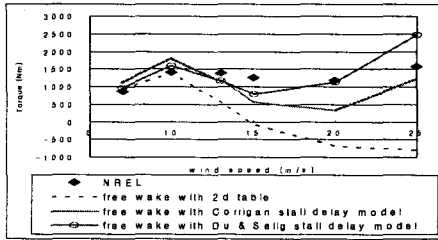


Fig. 4 Comparison of measured and computed results for the Shaft torques

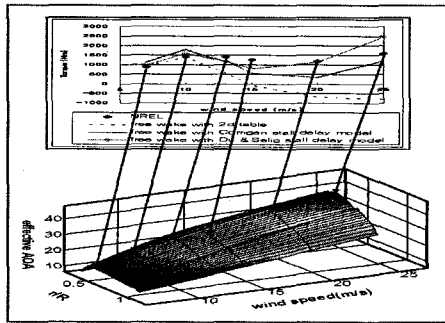


Fig. 5 effective AOA distribution at each wind speed

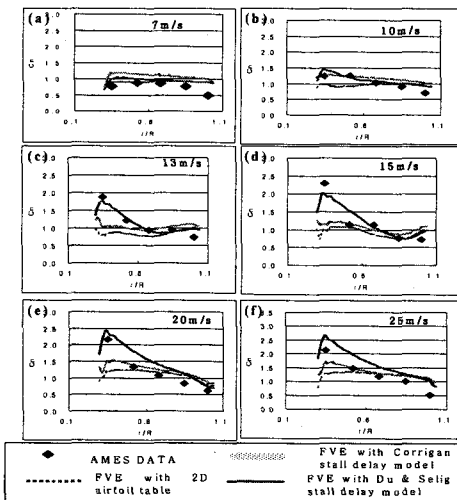


Fig. 6 Spanwise distribution of normal force coefficients

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 기본사업 (A6-2429)의 연구비 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌

- [1] 신형기, "수평축 풍력발전기 블레이드의 공력 성능 및 하중과 소음예측을 위한 수치적-실험적 연구", 서울대학교 박사학위 논문, 2005.
- [2] James L. Tangler, "Insight into wind turbine stall and post-stall aerodynamics", Wind energy, vol. 7, pp. 247-260, 2004
- [3] 신형기, 박지용, 이수갑, 김석우, "블레이드 성능과 하중예측을 위한 실속지연모델 적용에 대한 고찰", 한국풍력에너지학회 추계학술대회, 2006
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Zhaohui Du and Michael S. Selig, "A 3-D Stall-Delay Model for Horizontal Axis Wind Turbine Performance Prediction", AIAA-98-002
- [7] Simms D, Schreck S, Hand M, Fingersh L. "Unsteady aerodynamics experiment in the NASA-Ames wind tunnel: a comparison of predictions to measurements", NREL/TP-500-29494, 2001
- [8] Butterfield CP, Scott G and Musial W., "Comparison of wind tunnel aerofoil performance data with wind turbine blade data", Journal of Solar Energy Engineering, vol. 114, pp.119-124., 1992
- [9] Hyungki Shin, Jiwoong Park and Soogab Lee, "A new free wake model development for simulation of wind turbine performance", World wind energy conference, Beijing, China, 2004
- [10] 신형기, 박지용, 이수갑, 김석우, "수평축 풍력블레이드의 비대칭 환경에서의 공력 해석을 위한 자유후류기법에 대한 연구, 제4회 한국유체공학 학술대회, 2006