

100kW용 풍력발전기의 블레이드에 대한 유동/구조 연성해석

김윤기* · 김경천†

Analysis of Fluid Structure Interaction on 100kW-HAWT-blade

Yun Gi Kim and Kyung Chun Kim

Abstract. In this study, one-way fluid structure interaction analysis(FSI) on wind turbine blade was performed. Both a quantitative fluid analysis on 3-bladed wind turbine and a structural analysis using the surface pressure data resulting from fluid analysis were carried out. Streamlines and angle of attack was easily acquired from analysis results, we showed the inlet velocity that the stall begins to occur. In the structural analysis, structural displacement and maximum stress of the two comparative models was calculated. The location that has maximum stress was found. The pressure difference between back and front part of the blade increases as the inlet velocity increase. The torque and maximum with regard to inlet velocity was also presented.

Key Words : Horizontal axis wind turbine(수평축 발전기), Aerodynamic characteristics(공력특성), Wind Turbine(풍력발전), Fluid Structure Interaction(유동/구조 연성해석)

기호설명

V : wind speed, m/s

L : lift

D : Drag

C_p : Power coefficient

Q : Torque acting on blade

TSR : tip speed ratio(=ΩR/V₀)

1. 서 론

풍력발전 시스템은 1기당 설비용량이 1MW급 이상의 대형화 추세에 있다. 국외의 경우 현재 유럽을 중심으로 시스템의 대형화가 이루어지고 있고 5MW급 해상용 풍력발전기 개발중에 있다. 국내에서도 2012년까지 초대형급 3MW 풍력발전기 개발 및 상용화와 서해안, 남해안, 제주도 근해를 중심으로 한 해상풍력단지 보급확산을 목표로 많은 예산이 투입되고

있는 실정이다.

풍력발전기에 장착된 기계장치들 중 로터 블레이드는 발전기의 효율을 결정짓는 핵심적인 부품이다. 풍력발전시스템의 대형화로 인해 대용량 풍력발전기에 사용되는 로터 블레이드는 직경이 100m에 가까운 큰 구조물로 설계된다. 이에 따라 보다 가볍고 우수한 성능을 가진 로터 블레이드의 제작을 위한 공기역학적 최적설계 뿐만 아니라 시스템의 경량화에 따른 구조물의 안정성 평가에 대한 관심이 더욱 증가하였다.

국내에서 공⁽¹⁾등은 풍력발전 시스템에 관련된 IEC61400-1 국제규격과 GL 규격에 정의된 다양한 load case를 고려하여 이러한 하중들을 효과적으로 견딜수 있는 특별한 복합재 구조형상을 제안하였고, 이에 대한 유한요소해석을 상용코드를 이용하여 해석하였다. 블레이드의 설계시 스킨의 두께, 스파 프렌지의 두께 및 폭, 전방 및 후방 스파 웹의 위치 및 길이를 변수로 하여 설계요구조건을 가장 잘 만족하는 형상을 결정하였다. 그리고 결정된 모델에 대해 정격풍속 조건, 정격풍속에서 9 m/s의 강력한 돌풍이 가해지는 조건, 정지풍속에서의 조건, 폭풍이 부는 조건등 4가지 설계 하중에 대한 응력해석이 수행되었다.

†부산대학교 기계공학부

E-mail: kckim@pusan.ac.kr

*부산대학교 기계공학과 대학원

유동/구조 연성해석이란 CFD해석을 통해 구해진 표면에 대한 압력값을 그대로 FEM해석의 하중조건으로 주어 해석하는 coupling 기법이다. 종래의 유동/구조 연성해석은 컴퓨터 성능의 한계로 인해 이론적으로만 접근할 수 있었던 분야였다. 하지만 최근 컴퓨터 성능의 혁신적인 향상 및 프로그램 개발에 힘입어 새롭게 이를 이용한 많은 연구가 진행중에 있다. 본 연구에서는 유동/구조 연성해석 이용하여 로터 블레이드의 공력학적 특성을 구조해석에 대한 고찰과 병행하여 알아보았다.

2. 회전익모델 및 공력학적 특성분석

Fig. 1는 피치각이 θ 인 날개단면에 기준을 둔 속도 삼각형으로 V_0 는 풍속, α 는 받음각(Angle of attack), W 는 수직인 두 방향의 상대속도를 합성한 속도로 회전면에 대해서 φ 만큼 경사진 것을 보여주고 있다. 회전면에서의 풍속이 일정하다고 가정하면 양각 α 와 미소양력 dL 과 미소항력 dD 는 식(1), 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$dL = BcC_L \frac{1}{2} \rho W^2 dr \tag{1}$$

$$dD = BcC_D \frac{1}{2} \rho W^2 dr \tag{2}$$

여기서, B 는 날개개수, c 는 코드길이를 나타낸다.

Fig. 1로부터 회전익 요소에 작용하는 회전면에 대한 접선 방향의 힘, 즉 토크를 발생시키는 날개 회전방향의 힘 t 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

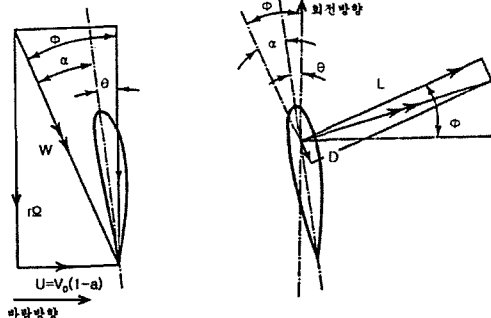


Fig. 1. Relative flow velocities

$$t = dL \sin \phi - dD \cos \phi \tag{3}$$

여기서 t 는 날개의 회전면에 대해 접선방향으로 작용하는 힘을 나타낸다. 따라서 회전익 전체에 작용하는 토크 Q 는 다음과 같다.

$$Q = \frac{1}{2} \rho B \int_0^R W^2 c (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) r dr \tag{4}$$

식(4)에서 R 은 회전익의 반경, ρ 는 공기밀도이며, 여기서 W 는 풍속과 회전면의 속도의 벡터차이며 ϕ 는 속도 W 와 회전면 사이의 각도를 나타낸다. 여기서, 미소양력 C_L 과 미소항력 C_D 는 Glauert의 와류이론으로 구한다.

또한 회전자에서 발생하는 출력계수(C_p)는 식(4)식 또는 수치해석을 통해 구할 수 있다.⁽³⁾ 즉

$$C_p = \frac{\text{회전자 동력}}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A} = \frac{Q \Omega}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A} \tag{5}$$

여기서, Ω 는 로터의 회전속도를 의미하며 단위는 rad/s 이다.

무차원 변수인 주속비(Tip Speed Ratio : λ_R)과 국부 주속비(local speed ratio : λ)는 (6)식과 같이 정의된다.

$$\lambda_R = \frac{R \Omega}{V}, \lambda = \frac{r \Omega}{V} \tag{6}$$

(5)식에 (4)식과 (6)식을 대입하면 회전자에서 발생하는 출력계수(C_p)는 날개의 각속도와 바람의 속도비로 나타내는 국부주속비(λ)와 피치각(θ)의 함수가 되어 다음과 같다.

$$C_p = \frac{8}{\lambda_R} \int_0^{\lambda_R} a' (1-a)^2 \lambda^3 d\lambda \tag{7}$$

여기서, a 는 축방향 간섭계수, a' 은 와류에 의해 발생하는 회전간섭계수로서 피치각 θ 의 함수로 표현되어진다.

2. 블레이드에 대한 FSI 해석절차

유동/구조 연성해석은 크게 Direct coupled FSI, one way FSI 그리고 two way FSI 기법으로 분류할

수 있다. **Direct coupled** 기법은 유동 및 구조해석을 유동해석 tool 자체적으로 수행하는 기법으로서 고체는 강체로 간주된다. **one way FSI**는 유동해석 결과를 구조해석의 하중조건으로 적용하는 기법으로서 경계면에서의 전달은 한번만 이루어진다. **one way FSI**는 대상모델의 변위가 유체의 흐름에 큰 영향을 미치지 않을 때 즉 지속적인 반복계산이 필요없는 기법이다. 반면, **two way FSI**는 지속적인 반복계산이 필요한 기법으로서 바람에 잎새가 흔들리는 것처럼, 변위가 유동의 영향을 많이 받고 유동또한 모델의 이동에 따라 그 양상이 많이 달라지게 될 때 적용하는 기법이다. 풍력발전기의 경우 바람에 의한 변위가 크지 않아 구조물의 변위가 유동에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 가정하여 **one way FSI** 기법을 적용하여 해석하는 것이 바람직하다. Fig. 2에서 **one-way FSI** 계산 과정을 나타내었다.

3. 형상모델링 및 계산격자

스틀식 발전기는 스톨원리에 의해 로터블레이드를

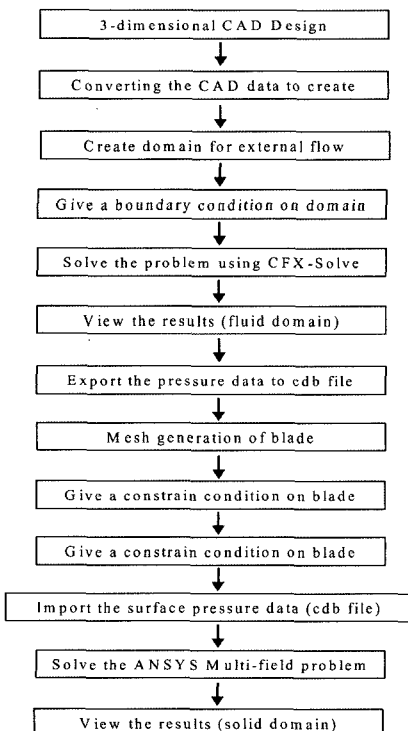


Fig. 2. The procedure of One Way FSI analysis.

돌리는 힘이 자연적으로 조절되기 때문에 복잡한 제어장치가 필요하지 않은 장점이 있다. 스톨원리란 날개단면을 지나는 유체가 높은 영각에 의해 날개후면에 박리가 생기면 압력의 손실이 커져 양력이 떨어지는 현상을 말한다. 본 연구에서 사용된 모델은 스톨식 발전기로서 직경이 20 m, 정격출력 100kW급 수평축 풍력터빈이며 디자인은 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 본 모델은 유럽에서 널리 사용되었던 검증된 모델이다.

4. 로터 블레이드 주위의 유동해석

4.1 외부유동에 대한 계산격자

수치해석 결과의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 요소중의 하나가 계산격자의 품질이라고 할 수 있다. 계산격자를 생성함에 있어 저 레이놀즈 수 난류모델을 적용함에 따라, 신뢰성 있는 해석결과를 확보하기 위하여 벽 근처 격자 밀집도에 상당한 주의를 할 필요가 있다. 로터 블레이드 표면에는 얇은 사면체 격자가 있고 벽에서 먼 영역은 적절히 큰 사면체 격자로 구성되었으며 전체 격자계는 약 80만개의 요소(element)를 가지고 있다. 3익풍력발전기의 특성을 이용하여 도메인은 하나의 풍력발전기를 중심으로 주기경계조건(periodic boundary condition)을 주어 해석시간을 단축하였다.

4.2 수치해석 기법 및 계산조건

CFX Solver는 3차원 레이놀즈 평균 나비에 스톨스(Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식을 적용하며, 지배방정식은 유한체적법(Finite Volume Method)에 의하여 이산화된다. 본 수치계산은 압축성 정상상태 유동조건 하에서 수행되었으며 에너지방정식은 고

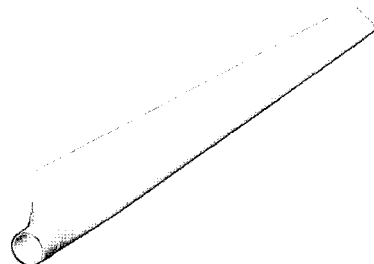


Fig. 3. The design of rotor blade

려대상에서 제외하였다.

풍력발전기 주위의 공기역학적 계산은 다음의 두가지 측면에서 진행되었다. 첫째, 풍력발전기의 안정성 평가를 위해 블레이드가 정지해 있다고 가정하고 입구속도가 정지해 있을때로부터 태풍이 불때의 평균풍속(55 m/s로 가정)까지 변할때의 날개 주위의 압력분포 및 속도분포를 구하는 것이다. 둘째, 블레이드가 회전하고 있을때 즉 풍속이 cut-in 조건(입구속도 5 m/s로 가정)과 cut-out 조건(입구속도 25 m/s로 가정)의 범위에 있을때 각 풍속에서의 회전익주위의 영각(Angle of attack)의 변화, 실속(stall)의 발생여부의 판단, 토크등을 알아봄으로서 풍력발전기에 대한 공력특성을 파악하고자 하였다.

4.3. 유동계산결과

Fig. 4는 입구속도가 25 m/s일때 가장 큰 압력이 걸리는 고체 표면상의 점을 기준으로 하여 유동방향을 따른 압력분포를 구한 결과이다.

무차원된 x/D 가 0인 지점이 블레이드의 위치이다. 유체가 블레이드 근처로 접근하면서 압력이 서서히 커지다가 블레이드를 지나서는 가장 낮은 압력을 가지는 후류영역이 생기며 이 영역은 유체가 블레이드에서 멀어질수록 서서히 회복되는 현상을 관찰할 수 있다. 또한 입구속도가 커질수록 전위면과 후위면의 압력차는 커진다.

Fig. 5는 블레이드가 42rpm의 속도로 회전하고 있을 때 입구속도 V_0 에 따른 계산결과를 유선으로 나타낸 결과이다. 일반적인 시동속도(cut in velocity)인 5 m/s에서 유선은 매우 안정적으로 블레이드 단면을

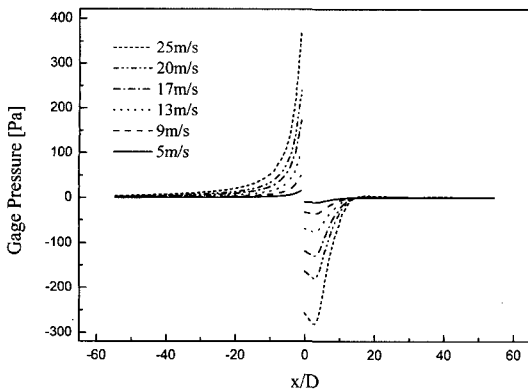


Fig. 4. The pressure profile along flow direction

지나감을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 입구속도가 10 m/s일때까지 나타나며 그 이후로 익형의 후면에 조그마한 박리영역이 생기게 된다. 정지속도(cut out velocity)인 25 m/s에서는 이미 스톨이 발생되어 양력이 감소되었고, 30 m/s에서는 스톨의 정도가 더 심해짐을 알 수 있다.

5. 로터 블레이드에 대한 구조해석

로터 블레이드에 대한 구조해석에 대해서는 비교를 위해 실제 블레이드에서처럼 내부가 비어있는 경우와 내부가 재료로 차 있는 2개의 모델을 계산에 적용하였다.

Fig. 6은 계산에 사용된 로터 블레이드의 형상이다. Fig. 6(a)는 실제 쓰이는 모델로서 안쪽이 비어 있고

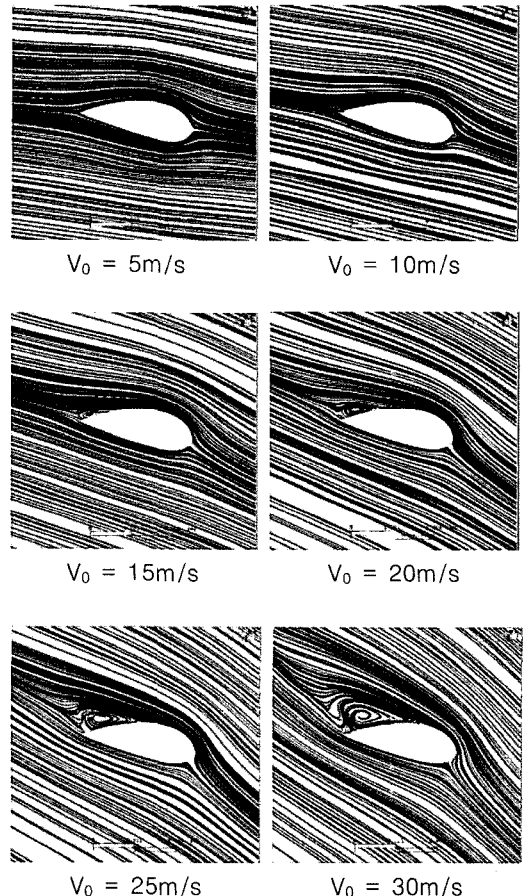


Fig. 5. The streamlines around moving blade

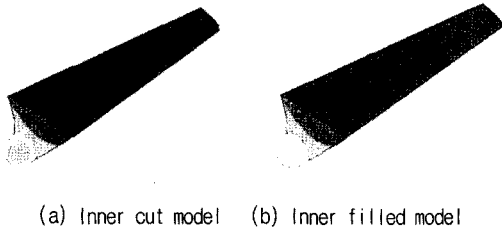


Fig. 6. The application of pressure data about two comparative model

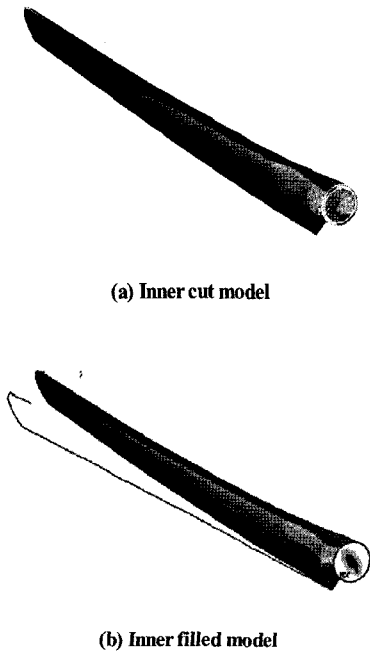


Fig. 7. Stress distribution of blade from each result files

Fig. 6(b)는 안쪽이 채워져 있는 경우이다. 두 경우 모두 형상만 다를 뿐 압력하중이 걸리는 위치는 동일하다.

Fig. 7은 입구속도가 25 m/s일 때 얻어진 두 모델에 대한 블레이드 표면의 응력분포를 나타낸다. Fig. 6에서와 마찬가지로 Fig. 7(a)는 실제 그래프에서 볼 때 풍속이 증가함에 따라 최대응력은 포물선 형태로 증가함을 알 수 있다. 내부 cutting을 한 모델의 경우가 그렇지 않은 모델보다 더 높은 응력을 가지며 이것은 물리적으로 타당한 결과이다. 모델의 응력분포를 나타내며 Fig. 7(b)는 비교모델의 응력분포를 나타낸다. 최대응력은 실제모델에서는 앞면에서 나타나지만, 비교모델에서는 뒷면에서 나타난다. Fig. 8은 풍속의 변

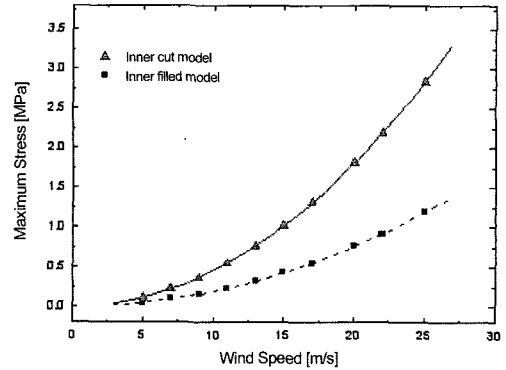


Fig. 8. Maximum Stress

화에 다른 최대응력의 변화를 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 로터의 회전익모델 및 공력학적 특성을 이용하여 풍력발전기 주위의 유동의 특성을 수치해석을 통해 알아보았다. 입구속도가 증가함에 따라 로터 전후면의 압력차는 증가하였고 영각 또한 증가하여 어느 속도를 지나면 스톨이 발생함을 유선을 통해 보였다. 유동해석의 결과 구해진 블레이드 표면의 압력데이터를 구조해석에 적용함으로써 블레이드에 대한 일방향 유동/구조 연성해석을 성공적으로 수행하였다. 실제모델에서 최대응력은 허브부분에서 발생한다. 본 연구에 사용된 FSI기법을 이용하면 기존의 구조해석의 한계를 극복할 수 있으며 더 효율적인 풍력발전기를 설계할 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 에너지기술학술진흥 사업의 지원으로 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) C. D. Kong, J. H. Bang, "A Study on the Structural Design and the Full-Static Test of Composite Wind Turbine Blade", Mechanical Engineering research of Joseon University, 2002
- 2) Sang-Su Kang, Seung-Kyun Kang, Jong-Hwan Lim, Jong-Chul Huh, "Pitch Control of Wind Turbine

- System”, Cheju Nat'l Univ. Res. Insti. Ind. Tech. Jour., Vol.10, No.1 pp. 40-48, 1999, 6
- 3) Sung-Hwan Boo, Jong-Hwan Lim, Jong-Chul Huh and Kun-Hoon Kim, “Torque Modeling of a Wind Turbine System”, Cheju Nat'l Univ. Res. Insti. Ind. Tech. Jour.. Vol.10, No.2 pp.16-21, 1999. 12
- 4) 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