

풍력발전용 블레이드의 유동/구조 연성해석

김 윤기¹⁾, 김 경천²⁾

Computation of Fluid-Structure Interaction on a Blade Used in Wind Power

Yun Gi Kim, Kyung Chun Kim

Key words : HAWT(수평축 발전기), Aerodynamic characteristics(공력특성), Wind Turbine(풍력발전), Fluid-Structure Interaction(유동/구조 연성해석)

Abstract : 본 연구에서는 풍력발전용 블레이드에 대한 일방향 유동/구조 연성해석을 하였다. 계산에 사용된 모델은 100kW급 풍력발전기 블레이드이며 정격용량은 42rpm이다. 유동영역에 대한 계산은 블레이드 표면에 작용하는 압력데이터를 얻기 위하여 행해지고 구조해석에서는 같은 모델에 대하여 얻어진 압력데이터를 하중조건으로 적용하여 풍력발전기의 변위 및 최대응력값을 계산한다. 계산결과 최대응력이 발생하는 지점은 날개의 후면 허브부분인 것으로 나타났다. 입구속도가 증가할수록 전면과 후면에 작용하는 압력차로 인해 출력과 최대변위는 포물선 형태로 증가함을 알 수 있었다.

Nomenclature

V : wind speed, m/s

subscrip

HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine

FSI : Fluid-Structure Interaction

1. 서 론

풍력발전 시스템은 1기당 설비용량이 1MW급 이상의 대형화 추세에 있다. 국외의 경우 현재 유럽을 중심으로 시스템의 대형화 및 해상용에 초점을 두고 2MW는 보급단계이며 3~4MW급은 실증단계이며, 최대 5MW급 풍력발전기를 개발중이다. 국내에서도 2012년까지 초대형급 3MW 풍력발전기 개발 및 상용화와 서해안, 남해안, 제주도 근해를 중심으로 한 해상풍력 단지 보급확산을 목표로 많은 예산이 투입되고 있는 실정이다.

풍력발전기에 장착된 기계장치들 중 로터 블레이드는 발전기의 효율을 결정짓는 핵심적인 구조물이다. 풍력발전시스템의 대형화로 인해 로터 블레이드는 직경이 수십미터에 이르는 큰 구조물로 설계된다.

이에 따라 보다 가볍고 우수한 성능을 가진 로터 블레이드의 제작을 위한 공기역학적 최적설계 뿐만 아니라 경량화에 따른 구조물의 안정성 평가에 대한 관심이 더욱 증가하였다.

국내에서는 공¹⁾등이 상용코드를 이용하여 유한요소법을 이용한 파라메트릭 연구를 통해 블레이드의 구조형상을 설계하였다. 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 정격풍속조건, 정격풍속에서 extreme gust가 더해지는 조건, 정지풍속에서의 조건, 폭풍이 부는 조건등 4가지 설계 하중에 대한 응력해석이 수행되었다. 그러나 입력하중은 동일한 조건에서 유동해석의 결과 얻어지는 표면압력데이터를 이용하지는 않았다. 본 연구에서는 이러한 기존의 구조해석의 한계를 극복하고 더 신뢰성있는 해석을 위해 유동/구조 연성해석을 수행하여 이러한 기술의 풍력발전

1) 부산대학교 기계공학과 대학원

E-mail : yygkim@pusan.ac.kr

Tel : (051)510-1536 Fax : (051)515-7866

2) 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

Tel : (051)510-2324 Fax : (051)512-9835

기의 설계에 대한 적용가능성을 제시하였다.

2. 블레이드에 대한 FSI 해석절차

유동/구조 연성해석은 크게 One Way FSI, Two Way FSI 두가지 해석방법으로 분류할 수 있다.

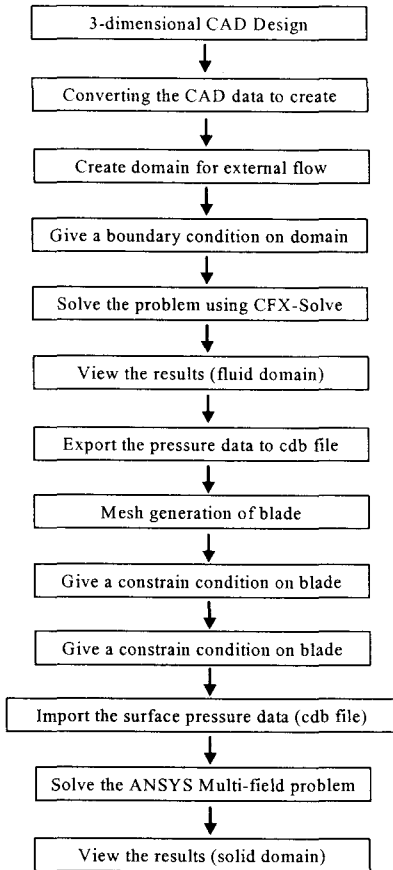


Fig. 1 The procedure of One Way FSI analysis

One Way FSI는 유동에 의한 변형량이 크지 않은 경우에 사용하고, Two Way FSI는 혈관과 같이 유동의 영향을 많이 받는 유연한 구조물에 대한 해석을 수행할 경우에 사용하며 여러 번의 반복계산을 필요로 하는 기법이다. 풍력발전기의 경우 바람에 대한 로터블레이드의 변형량은 크지 않으므로 One Way FSI 기법을 적용하여 해석하는 것이 바람직하다. Fig. 1에서 본 연구의 유동/구조 연성해석의 과정을 나타내었다. 전체적인 진행은 유동해석을 통해 로터 블레이드에 작용하는 외력을 구한 후에 이에 대한 정보를 추출하여 구조해석에 적용하여 결과를 얻는 것이다.

3. 형상모델링 및 계산격자

본 연구에서 사용된 모델은 직경 20m, 정격출력 100kW급 수평축 풍력터빈이며 모델링 된 3차원 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 이 풍력발전기는 유럽에서

널리 설치된 풍력발전기로서 그 성능이 이미 검증된 모델이다. 로터 블레이드의 회전속도는 42rpm이며 무게는 270kg이다. 블레이드는 구상후연으로 되어 있으며 탄성계수는 120GPa이다.

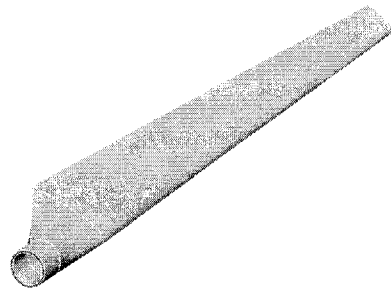


Fig. 2 The design of rotor blade

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 난류 모델을 적용함에 따라, 신뢰성 있는 해석결과를 확보하기 위하여 벽 근처 격자 밀집도에 상당한 주의를 할 필요가 있다. 로터 블레이드 표면에는 얇은 프리즘 메쉬가 있고 벽에서 먼 영역은 적절히 큰 tetra메쉬로 구성되었으며 전체 격자개수는 약 80만개의 요소(element)를 가지고 있다. 도메인의 옆면은 symmetry조건을 주어 해석시간을 단축하였다.

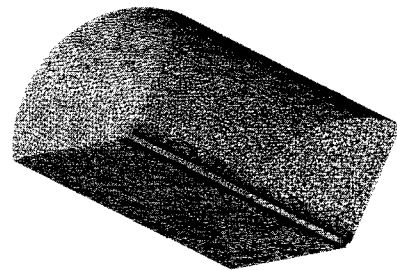


Fig. 3 Computational Grid around blade

4.2 수치해석 기법 및 계산조건

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

Table 1 Given boundary condition

Inflow	Uniform normal speed (1m/s - 25m/s, 12cases)
Outflow	Average Static Pressure Reference pressure = 0 [Pa]
Blade & Hub	Smooth wall (no slip condition)
Surrounding	Opening
Interface	Symmetry

Boundary Condition의 적용과 계산에 대한 표를 Tabel. 1에 나타내었다. Table. 1에서 알 수 있듯이 유동/구조 연성해석을 위해 12개의 입구속도에 대한 유동해석의 해를 구하였다. 로터 블레이드 표면은 매끈해야 하므로 Smooth wall 조건을 적용하였다.

4.3 계산결과

Fig.4는 입구속도가 25m/s일때 가장 큰 압력이 걸리는 고체 표면상의 점을 기준으로 하여 유동방향을 따른 압력분포를 구한 결과이다. 무차원된 x/D가 0인 지점이 블레이드의 위치이다. Fig. 4에서 입구속도가 커질수록 전위면과 후위면의 압력차는 커짐을 확인할 수 있다.

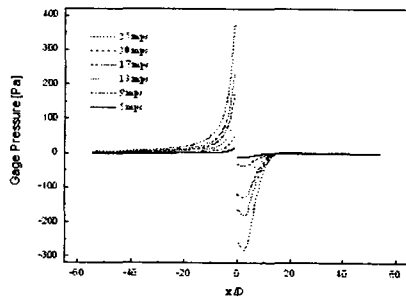


Fig. 4 The pressure profile along flow direction

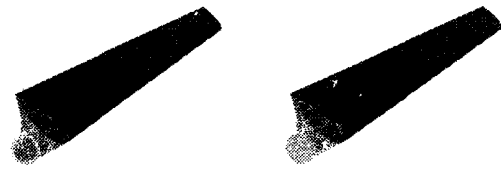
5. 로터 블레이드에 대한 구조해석

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

Fig. 4는 본 연구에서 도입된 로터 블레이드의 형상이다. Fig. 4(a)는 실제 쓰이는 모델로서 안쪽이 비어 있고 Fig. 4(b)는 안쪽이 채워져 있는 경우이다. 두 경우 모두 형상만 다를 뿐 압력하중이 걸리는 위치는 동일하다. 그림에서 진하게 표현되어 있는 부분이 바로 압력하중이 적용되는 위치를 나타낸다.

Fig. 6은 입구속도가 25m/s일 때 얻어진 두 모델에 대한 블레이드 표면의 응력분포를 나타낸다. Fig. 4에서와 마찬가지로 Fig. 5(a)는 실제 모델의 응력분포를 나타내며 Fig. 5(b)는 비교모델의 응력분포를 나타낸다. 최대응력은 실제모델에서는 앞면에서 나

타지만, 비교모델에서는 뒷면에서 나타난다.

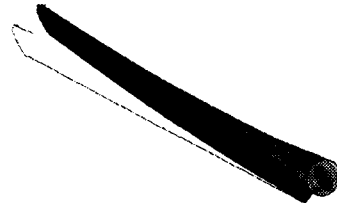


(a) Inner cut model (b) Inner filled model

Fig. 4 The application of pressure data about two comparative model



(a) Inner cut model



(b) Inner filled model

Fig. 5 Stress distribution of blade from each result files

실제모델에서 비어있는 내부에 어떤 응력분포가 나타나는지도 설계시 수행되어야 할 중요한 사항이다. Fig. 6은 실제모델의 내부면에 접하는 요소들에 대한 응력분포를 나타낸다. 그림에서 내부에는 큰 응력분포가 나타나지는 않음을 확인할 수 있다. Fig. 7은 풍속의 변화에 따른 최대응력의 변화를 나타낸다. 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.

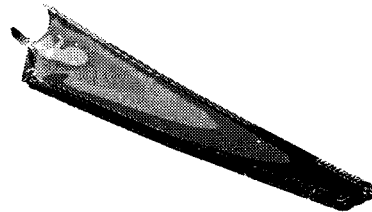


Fig. 6 Stress distribution of at inner part of rotor blade

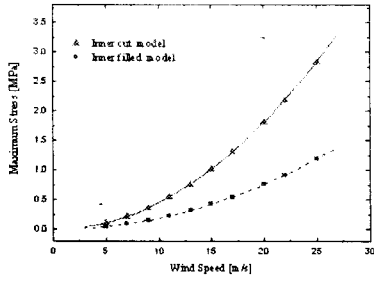


Fig. 7 Maximum Stress

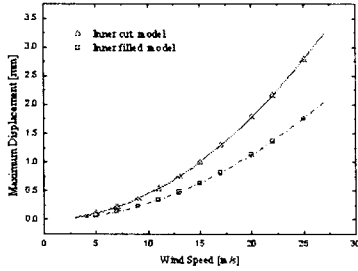


Fig. 8 The Maximum displacement

Fig. 8은 풍속의 변화에 따른 최대변위량을 나타내는데 이 그림도 Fig. 7에서와 마찬가지로 내부 cutting을 한 모델의 경우 더 큰 변위를 가짐을 알 수 있다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 속도가 클수록 블레이드 양단에 걸리는 압력차는 커지며 이 힘의 차에 의해 변위량이 증가하게 된다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 블레이드 양단에 걸리는 압력차와 최대응력, 그리고 같은 축에 대한 최대변위의 관계 나타내 준다. 이 그래프에서 알 수 있는 바는 압력차는 최대응력과 최대변위에 정비례한다는 사실이다. 계산에 의해 태풍이 부는 조건에서(55[m/s]) 양단에는 3kPa의 압력차가 생기는데 이때의 최대변응력과 최대변위는 Cut out 조건(25[m/s]) 일때보다 약 5배 크게 나타난다.

4. 결론

본 연구에서는 풍력발전용 블레이드에 대한 일방향 유동/구조 연성해석을 수행한 결과 다음

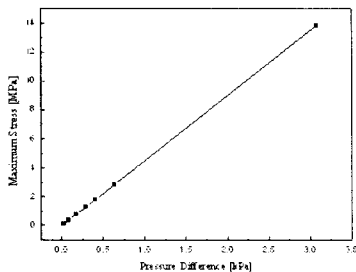


Fig. 9 Pressure difference-maximum stress curve

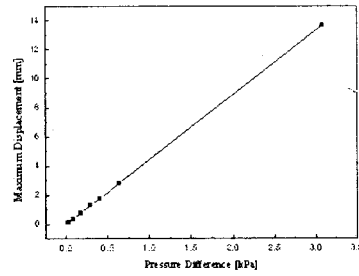


Fig. 10 Pressure difference-maximum displacement curve

과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 입구속도가 커질수록 블레이드의 양단에 걸리는 압력차는 많이 걸리며, 최대 응력과 최대 변위와 정비례하여 증가한다. 둘째, 실제모델에서 최대응력은 바깥면에서 발생하지만 내부에 걸리는 응력에 대해서도 고려해 주는 것이 필요하다. 셋째, 본 연구에 사용된 FSI기법을 이용하면 기존의 구조해석의 한계를 극복할 수 있으며 더 효율적인 풍력발전기의 설계가 가능하게 될 것이다.

후기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지기술학술진흥사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] 공창덕, 방조혁, 2002, " 피로 수명을 고려한 복합재 풍력터빈 블레이드의 구조설계 및 실물 정하중 시험에 관한 연구", 조선대 기계기술연구, 169-185
- [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] 김정환, 김범석, 김진구, 남청도, 이영호, " CFD에 의한 수평축 풍력발전용 터빈의 유동해석 및 성능예측에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제27권, 제7호, pp. 906-913, 2003