

유체-고체 연성해석을 통한 풍력 터빈 블레이드 손상률 해석

김재형[†], 이정희^{*}, 김창완^{**}

Wind Turbine Blade Damage Analysis using Fluid-Structure Interaction

J. H. Kim, J. H. Lee and C. W. Kim

Key Words : Wind turbine, Blade, CFD, FEM, Fatigue, Stress, Damage

Abstract

풍력발전에 사용하는 풍력터빈의 블레이드는 적어도 20 년 이상의 설계수명이 요구된다. 블레이드는 바람에 의한 압력, 지지대 구조에 의해서 가해지는 힘과 모멘트에 의해 블레이드에 변형이 가해진다. 특히 바람에 의해 블레이드는 연속적인 하중을 받아서 재료를 손상시킨다. 본 연구에서는 블레이드와 허브로 구성된 모델을 이용하여, 전산유체해석을 일차적으로 수행하여 블레이드 주변의 압력분포를 구하였다. 계산된 압력을 이용하여 다음 단계로 유한요소해석을 수행하여 블레이드 재료에 발생하는 응력을 계산하여 피로해석을 수행하였다. 피로해석을 통해 재료에 미치는 손상률을 구하였다. 다양한 블레이드 피치 각도와 바람의 속도에 따라 해석결과를 비교 분석하였다

해석결과를 비교 분석하였다

1. 서론

풍력발전에 사용하는 풍력터빈의 블레이드는 적어도 20 년 이상의 설계수명이 요구된다. 블레이드는 바람에 의한 압력, 지지대 구조에 의해서 가해지는 힘과 모멘트에 의해 블레이드에 변형이 가해진다. 특히 바람에 의해 블레이드는 연속적인 하중을 받아서 재료를 손상시킨다. 본 연구에서는 블레이드와 허브로 구성된 모델을 이용하여, 전산유체해석을 일차적으로 수행하여 블레이드 주변의 압력분포를 구하였다. 계산된 압력을 이용하여 다음 단계로 유한요소해석을 수행하여 블레이드 재료에 발생하는 응력을 계산하여 피로해석을 수행하였다. 피로해석을 통해 재료에 미치는 손상률을 구하였다. 다양한 블레이드 피치 각도와 바람의 속도에 따라

2. 해석 개념 및 절차

2.1 풍력터빈의 블레이드 유동해석

본 연구에서는 풍력발전에 사용되는 블레이드는 풍력에 의한 응력과 지지대 구조에 의해 가해지는 응력으로 구분된다. 특히 풍력에 의해 가해지는 응력은 유체역학적인 관점에서 살펴보아야 하는 물리량으로서 전산유체 해석이 요구된다. 전산유체 해석을 수행할 때 블레이드가 정지해 있지 않고 회전하는 현상을 고려해서 해석을 수행해야 한다. 해석을 통해 블레이드의 표면에 생성되는 압력이 재료의 변형을 가하게 된다.

2.2 풍력터빈의 블레이드의 응력해석

전산유체해석에서 구해진 압력은 블레이드의 표면에 외력으로 작용하여 재료의 변형 및 응력을 일으킨다. 이를 해석하기 유한요소해석을 수행하였다. 실제로 풍력이 연속적으로 계

[†] 서울대학교 기계공학과

^{*} 평선베이(주)

^{**} 건국대학교 기계설계학과 goodant@konkuk.ac.kr

속 발생하지 않고 불연속적으로 발생하므로 비정상 해석 및 정상 해석을 동시에 수행하였다.

2.3 풍력터빈의 블레이드의 피로해석

블레이드의에 생성된 응력은 재료를 노화시킨다. 그 결과 일정한 시간이 지나면 가해진 응력에 의해 재료가 손상이 되는 현상이 발생한다. 이러한 피로해석을 수행하기 위해 블레이드에 발생된 응력이 20 년의 수명을 보장하는지 여부를 판단하기 위해 피로해석을 수행하였다.

2.4 모델 및 절차

본 연구에서 치각도가 큰 3 개의 모델을 사용하였다. CFD 를 이용해서 전산유체해석을 수행한 후 블레이드의 기하학적인 모양 및 압력 분포를 파일로 출력하였다. 이 파일을 가지고 FEM 을 이용한 구조해석을 수행하여 상용 프로그램 FEMFAT 을 이용한 피로해석을 위해 데이터 파일을 만들었다. 20 년 수명을 고려하여 피로해석을 수행한 후 결과를 비교하였다. Table 1 에 해석에 사용한 블레이드의 물성을 나타내었다.

Table 1 Material property of wind turbine blade(AL6005T5)

Poisson's Ratio	0.33
Modulus of Elasticity	69GPa
Shear Modulus	26GPa
Fatigue Strength	100MPa at 5E+9 cycle
density	2700 kg/m3

3. 해석방법

유동해석

풍력터빈의 블레이드를 고체영역의 벽으로 지정하고 회전시켰다. 해석하고자 하는 유체영역을 지정한 후에 경계조건을 가해서 해석을 수행하였다. 유동영역은 공기의 물성을 가지고 해석하였다.

3.1.1 경계조건

입구경계조건은 풍력터빈의 전면 방향에서 일정한 속도로 4, 8 및 12 m/s 로 유입되는 것으로 하였고 난류강도는 5%로 가정하여 해석하였다. 또한 블레이드가 20RPM 으로 회전하고 있다고 가정하였다. 그 외 다른 영역에서는 유동이 자유롭게

면을 통해 이동할 수 있도록 open 경계조건을 주어 처리하였다.

또한 풍력터빈과 유체가 만나는 면에서의 경계는 벽 점착조건을 주어 처리하였다.

3.1.2 난류모델

풍력터빈과 유체과의 상호 작용에 의해 발생하는 유동은 입구속도와 피치각도에 의해 후류 영역에서 유동이 역압력 구배로 인해 와류가 발생하고 vortex shedding 이 형성되는 등 매우 복잡한 난류 특성을 보이고 있다. 따라서 일반적으로 널리 사용되는 표준 k-e 모델에서는 경계층의 박리현상을 명확히 표현하지 못하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 역 압력구배에 의한 와류의 크기와 박리 현상을 비교적 잘 해석할 수 있다고 알려진 SST(shear stress model)을 이용하여 해석하였다.

3.1.3 피치각도의 영향

일반적으로 유동과 풍력터빈의 날개 사이의 피치각도에 따라 유동의 날개의 상단과 하단의 속도 차이를 발생시키고 이에 따라 상단과 하단의 압력 차이를 발생시키는 주요 요인이 된다. 따라서 이 영향에 의해 터빈 날개에 전달되는 힘이 달라지고 생성되는 에너지 양이 결정되므로 매우 중요한 파라미터이다. 피치각은 30, 60, 90 로 변화해 가면서 수행하였다. 여기서 피치각은 블레이드는 반경방향을 회전축으로 한 각도이다. 0 도 피치각은 블레이드가 바람과 정면으로 마주하는 각도로서 풍속과 90 도의 각을 가진다.

응력해석

유동해석에서 구해진 압력은 블레이드의 표면에 외력으로 작용한다. 이 외력은 블레이드의 변형을 가져오면 응력을 일으킨다.

풍력에 의해 발생된 압력에 의한 정상상태의 압력분포를 구하기 위해 Static 해석을 수행하였다. 연속적으로 풍력이 발생할 경우 시간이 지남에 따라 Static 해석의 결과로 응력이 수렴이 되지만 불연속적인 풍력은 순간적인 응력의 증가를 일으켜서 실질적으로 블레이드의 손상을 일으킨다고 가정하였다. 이때에 Static 해석의 응력분포에 곱해지는 계수에 따라 블레이드의 손상분포를 계산하였다.

피로해석

블레이드에 가해지는 응력은 피로를 발생시켜 재료를 손상시킨다. 특히 풍력이 불연속적으로 가해지고 순간적으로 강한 응력이 발생하는 점을 고려해서 Static 해석의 응력에 계수를 곱해서 사용하였다. 실제적으로 피로해석에 사용되는 응력은

응력분포에 계수를 곱해서 만들어진 응력이 피로를 일으킨다. 블레이드가 1 회전 할 때 강한 응력 집중이 1 회 발생된다고 가정하고 20년 동안의 피로해석을 수행한 후 재료의 손상에 대하여 살펴보았다. 계수가 실제로 얼마나 적용해야 할 지는 응력측정실험과 피로해석과의 관계에서 추후로 살펴보아야 할 주제이다.

4. 해석결과

유동해석 및 응력해석 결과

피치각도가 30 도일 때 풍속이 4m/sec, 8m/sec, 12m/sec 일 때의 풍력에 의한 압력에 의한 변형률 및 응력을 Figure 1~Figure 6 에 나타내었다. 대체적으로 블레이드의 중앙에 응력이 집중됨을 알 수 있다. Table 1 에 각각의 경우에 최대 응력을 나타내었다. 풍속이 크고 피치각이 작을수록 압력이 커짐을 알 수 있다.

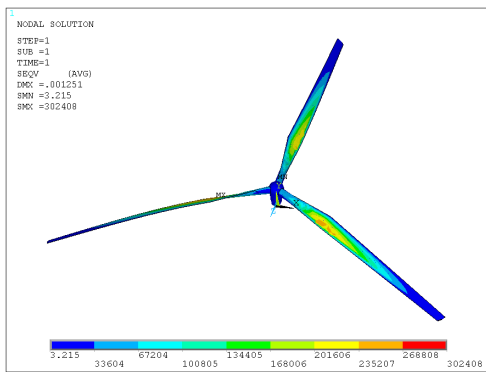


Fig. 1 Von mises Stress at 30degree pitch angle and wind velocity 4m/sec

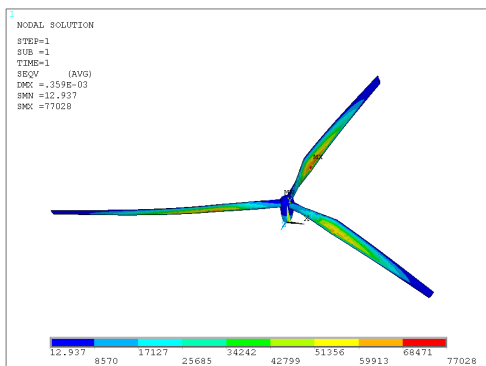


Fig. 2 Von mises Stress at 60degree pitch angle and wind velocity 4m/sec

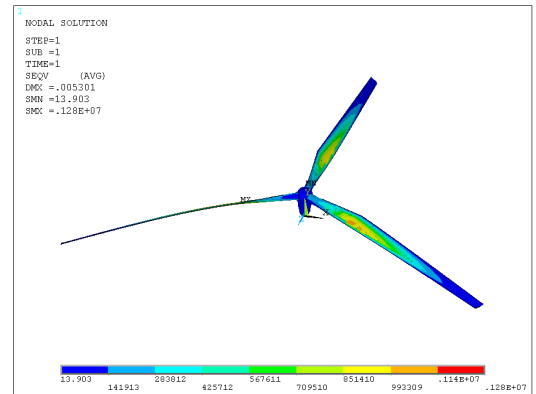


Fig. 3 Von mises Stress at 30degree pitch angle and wind velocity 8m/sec

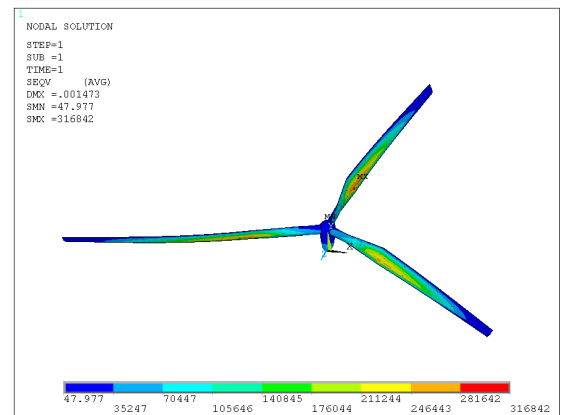


Fig. 4 Von mises Stress at 60degree pitch angle and wind velocity 8m/sec

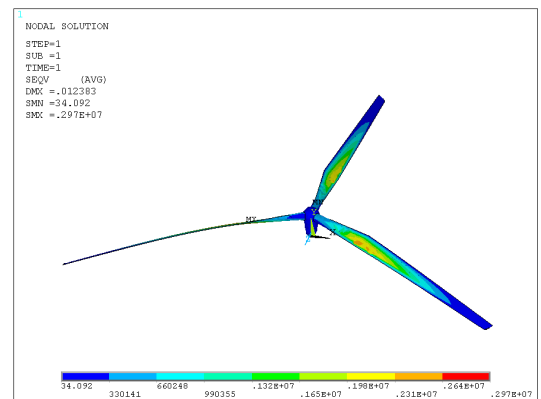


Fig. 5 Von mises Stress at 30degree pitch angle and wind velocity 12m/sec

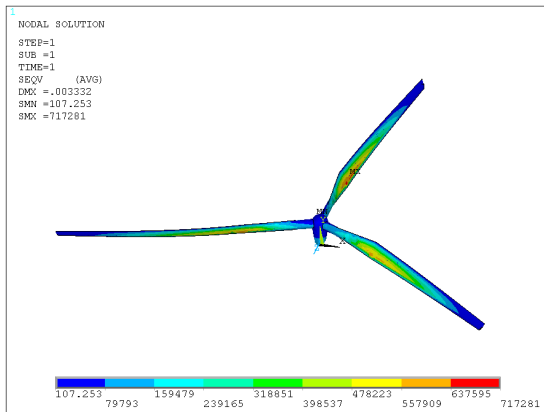


Fig. 6 Von mises Stress at 60degree pitch angle and wind velocity 12m/sec

Table 2 Maximum stress at the blade

Wind Velocity(m/sec)	Pitch angle(degree)	Maximum Stress(Pa)
4	30	302408
4	60	77028
4	90	2285
8	30	1280000
8	60	316842
8	90	8144
12	30	2970000
12	60	717281
12	90	19575

피로해석결과

각각의 응력에 대하여 피로해석을 수행하여 손상분포를 구하였다. 20 년의 수명을 예상하고 1 회전에 1 번의 응력집중이 생기는 것을 가정하여 2.1E+9 회의 응력이 가해지는 것을 가정하였다.

실제로 피로해석에 사용되는 응력은 Static 해석의 결과인 응력분포에 계수가 곱해져서 사용된다. 계수를 1 로 하여 Static 해석의 응력이 그대로 피로해석에 사용될 경우 피로손상이 일어나지 않았다. 그러나 실질적으로 풍력터빈에 가해지는 응력은 Static 해석의 응력보다 크고 불연속적이라는 점을 고려할 경우 적절한 계수가 사용되어야 한다. 본 연구에서는 계수를 200 로 하여 피로해석을 수행하였고 손상이 나타나지 않을 경우 계수를 크게하여 손상률의 분포를 구해 보았다.

Table 2 에 응력집중을 200 으로 사용할 경우 각각의 모델에 대한 손상율을 표로 나타내었다. 손상률이 100%인 지점은 피로하중을 넘어선 부분을

나타낸다.

풍속이 4m/sec 인 경우 계수가 200 에서 손상이 일어나지 않았다. 피치각도 30 도로 하고 계수를 200 로 하여 계산한 손상률 분포를 Figure 10 에 나타내었다. 피치각도 60 도로 하고 계수를 1000 로 하여 계산한 손상률 분포를 Figure 11 에 나타내었다. 피치각도 90 도로 하고 계수를 100000 로 하여 계산한 손상률 분포를 Figure 12 에 나타내었다.

풍속이 8m/sec 의 경우 피치각도고 30 도일 경우에만 계수 200 에서 손상률이 19.6% 계산되었으며 손상률 분포를 Figure 13 에 나타내었다. 피치각도 60 도에 대하여 계수를 200 로 하여 계산한 손상률 분포를 Figure 14 나타내었다. 피치각도 90 도에 대하여 계수를 10000 으로 하여 계산한 손상률 분포를 Figure 15 에 나타내었다.

풍속이 12m/sec 인 경우 피치각도가 30 도와 60 에서만 계수가 200 일 때 손상율이 각각 34.93%, 8.981%로 나타났다. 각각에 대하여 Figure 16 과 Figure 17 에 손상율 분포를 나타내었다. 피치각도 90 도에 대하여 계수를 5000 으로 하여 계산한 손상률 분포를 Figure 18 에 나타내었다.

계수가 곱해진 Static 해석의 응력이 재료에 피로를 일으킬 때 발생하는 손상률의 분포를 보면 응력이 가장 크게 나타난 부분에서 손상이 많이 생김을 알 수 있다. 실제 실험을 통해 Static 해석에서 구해진 응력과 실제 Blade 에 가해지는 응력사이의 관계를 나타내는 계수에 대한 연구가 향후 진행되어야 함을 알 수 있었다.

Table 2 Maximum stress at the blade

Wind Velocity(m/sec)	Pitch angle(degree)	Damge(%)
4	30	0
4	60	0
4	90	0
8	30	19.6
8	60	0
8	90	0
12	30	34.93

12	60	8.981
12	90	0

풍속이 4m/sec, 8m/sec, 12m/sec 에 대하여 해석을 수행한 결과 풍속이 크고 피치각이 작아서 풍속의 영향이 크게 작용할 경우 피로 손상률이 크게 나타났다. Static 해석의 응력에 실제 풍력터빈에 가해진 응력을 고려하기 위해 사용된 계수에 대한 연구가 필요함을 알 수 있었다.

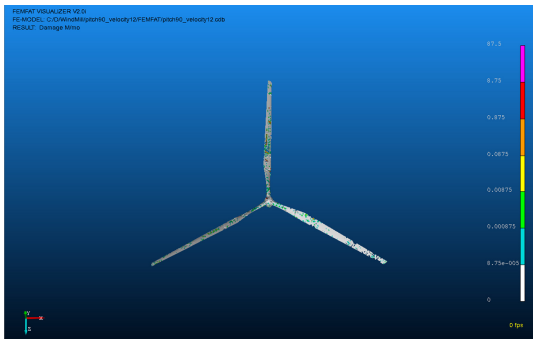


Fig. 7 Damage at 30degree pitch angle and wind velocity 4m/sec

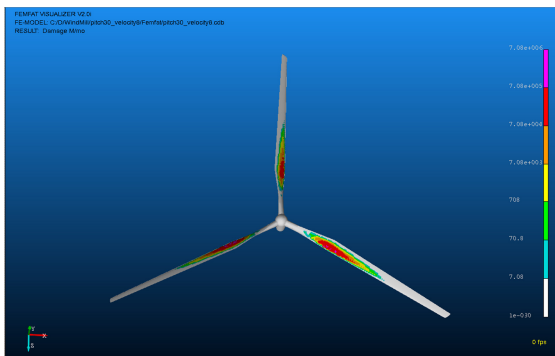


Fig. 8 Damage at 30degree pitch angle and wind velocity 8m/sec

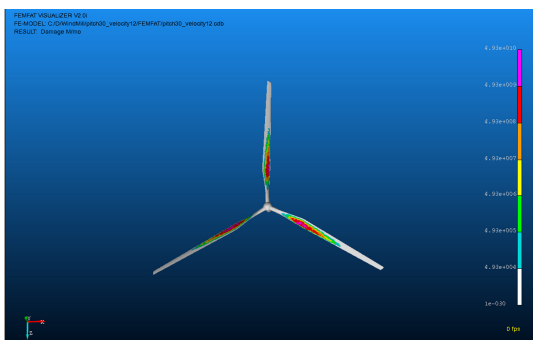


Fig. 9 Damage at 30degree pitch angle and wind velocity 12m/sec

참고문헌

- (1) R.P.L. Nijssen, "Fatigue Life Prediction and Strength Degradation of Wind Turbine Rotor Blade Composites", KC-WMC and Delft University, 2006.
- (2) A. Puck and H. Schurmann, "Failure analysis of FRP Laminates by Means of Physically Based Phenomenological Models", Composite Science and Technology, 58, pp. 1045-1067, 1998.
- (3) IEC 61400-1, "Wind Turbines Part 1: Design Requirements", 2005
- (4) 음학진, 김만응, 김범석, 원종범, "풍력발전시스템의 설계적합성 평가", 한국풍력에너지학회 추계학술대회 논문집, pp. 72-76, 2007.
- (5) R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens and H.O. Fuchs, "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley&Sons, Inc., 2001.
- (6) E. A. Bossanyi, "GH Bladed Theory Manual", Garrad Hassan and Partners Ltd., 2007.
- (7) FEMFAT User's Manual Ver. 4.6 (2007) MAGNA Prowetrain Inc.

5. 결론

유동해석을 통하여 구해진 압력을 가지고 풍력터빈의 블레이드에 가해지는 응력을 계산하여 피로 해석을 수행하였다.