# 풍하중 효과를 고려한 MW급 풍력발전기 타워의 지진응답 해석

## Seismic Response Analysis of a MW Class Wind-Turbine Considering Applied Wind Loads

최 현 철* 김 동 현† 김 동 만* 박 강 균*
Choi, Hyun-Chul Kim, Dong-Hyun Kim, Dong-Man Park, Kang-Kyun

요 지

본 논문에서는 CFD와 FEM에 기초한 진보된 전산해석 기법을 적용하였고 지진에 의한 수평 및 수직방향 기반가진 및 풍하중 효과를 동시에 고려하여 MW급 풍력발전기의 지진응답 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 실용적인 응답특성 파악을 위해 시간영역 수치해석기법을 적용하였으며, 지진기반하중 및 풍하중에 의한 영향을 상호 비교하였다. 본 연구의 결과를 통해 관성 특성이 매우 큰 초대형 풍력발전기가 정상작동 조건 중 지진이 유발되는 경우가 타워에 유발되는 응력특성에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 중요하게 고려될 필요성이 있음을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 지진응답해석, 지진가진, 유한요소법, 전산구조동역학, 전산유체역학

Abstract

In this study, seismic response analyses of a MW class wind-turbine have been conducted considering applied wind-loads using advanced computational method based on CFD and FEM. Typical lateral and vertical acceleration levels induced by earthquake is also considered herein. Practical numerical method for seismic response analysis of wind-turbine tower models are presented in the time-domain and the effects of wind load and seismic excitation for responses are compared to each other. It is importantly shown that possible earthquake effect during typical operating conditions should be taken into account in the design of huge wind-turbine tower systems because of its enormous inertia characteristics for induced maximum stress level.

***Keywords*** *: seismic response analysis, seismic excitation, finite element method, computational structure dynamics, computational fluid dynamics*

## 1. 서 론

풍력발전기의 설치량이 점점 증가됨에 따라 개발되는 풍력발전기의 구조적인 안정성 또한 필연적으로 중요한 문제로 나타나고 있으며, 내진설계에 대한 필요성도 증가되고 있다. 현재 우리나라는 지진에 대하여 비교적 안정적인 상태이나 자연적 또는 인위적인 환경의 변화로 인하여 앞으로 예상하지 못한 재해가 발생할 수도 있다.

우리나라의 지진발생 현황은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 해마다 평균적으로 증가하고 있는 상황으로 판단된다. 지진발생 분포를 나타낸 Fig. 2는 국내의 지진발생 현황이 주로 동해산간지역에서 발생하고 있음을 보여준다. 또한 이들 지역은 비교적 평균풍속이 높은 편에 속하는 특성이 있어 풍력발전기의 설치 및 운영이 유리하므로 지진응답에 관한 사전연구 또한 검토가 필요할 것으로 판단된다. Table 1은 현재까지 나타난 우리나라의 대표적인 지진발생 사례이다. 자료를 보면 우리나라에서도 지진의 규모가 진도 5내외로 대략 0.04g의 가속도를 가지는 지진이 수차례 발생하였음을 알 수 있다. 이 정도 규모의 지진은 거의 모든 사람이 느낄 수 있는 수준으로 건물의 벽이 갈라질 수도 있으나 비교적 큰 위험은 발생하지 않는 것으로 알려져 있다.

하지만 풍력발전기의 경우는 지진의 영향으로 인한 추가적인 관성하중 특성으로 구조물에 예상이 못한 파손이 초래될 수 있기 때문에 지진가진 효과를 추가로 고려한 구조해석을

† 책임저자, 경상대학교 기계항공공학부 및 공학연구원 교수
Tel: 055-755-2083 ; Fax: 055-755-2081
E-mail: dhk@gnu.ac.kr
* 경상대학교 기계항공공학부 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

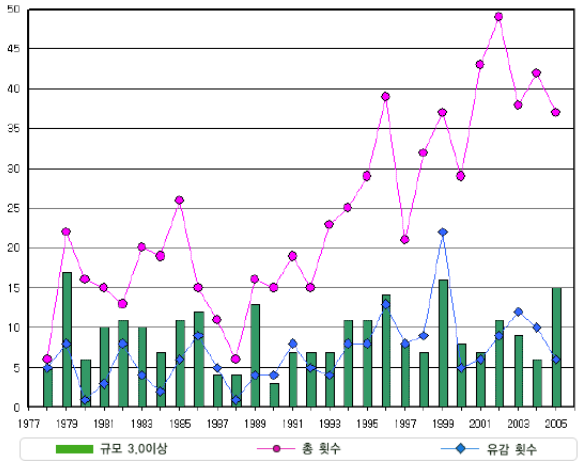



Fig. 1 Earthquake history in Korea

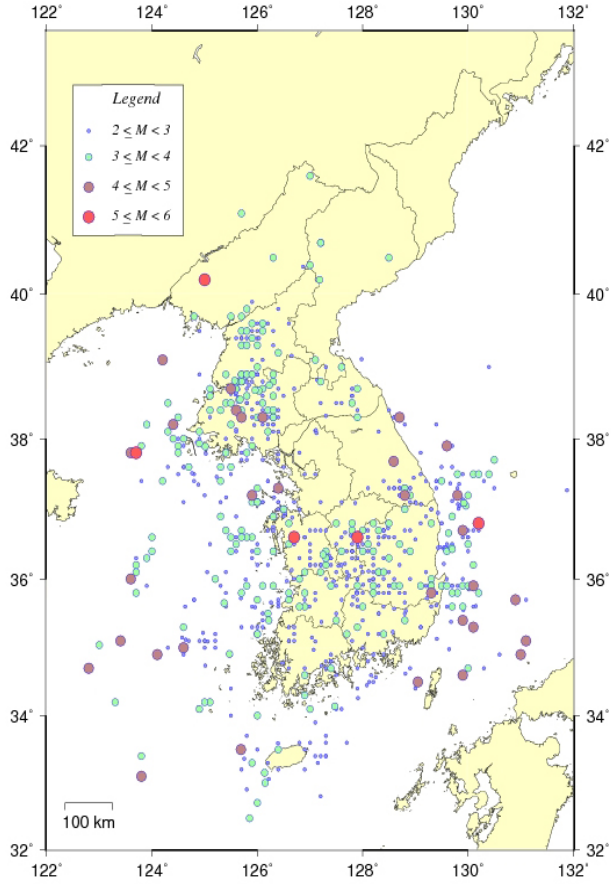



Fig. 2 Earthquake Distribution of Korea

수행하고 안정성을 검토할 필요성이 있다.

일반적인 건축물에 대한 지진진동 특성을 계산하는 전형적인 방법은 응답스펙트럼해석(Response Spectrum Analysis, RSA)기법과(Ritschel 등, 2003) 시간이력해석기법(Time History Analysis, THA) 등이 있다. 지진에 따른 진동특성을 연구한 기존 사례를 살펴보면 RSA기법을 활용할 경우 해석

Table 1 Summarized earthquake history in Korea

| 발생시기 | 규모 | 위 치 |
|---|---|---|
| 1978.09.15 | 5.2 | 충북 속리산 |
| 1978.10.07 | 5.0 | 충남 홍성군 |
| 1980.01.08 | 5.3 | 평북 의주/삭주 |
| 1981.04.15 | 4.8 | 경북 포항시 동쪽 65km 해역 |
| 1982.03.01 | 4.7 | 경북 울진군 북동쪽 45km 해역 |
| 1994.07.26 | 4.9 | 전남 홍도 서북서쪽 100km 해역 |
| 2003.03.23 | 4.9 | 전남 홍도 북서쪽 50km 해역 |
| 2003.03.30 | 5.0 | 인천 백령도 서남서쪽 80km 해역 |
| 2004.05.29 | 5.2 | 경북 울진 동쪽 80km 해역 |
| 2007.01.20 | 4.8 | 강원 평창군 |

시간을 줄일 수 있으나 시간에 따른 물리적인 진동특성을 파악하기는 곤란하다(이동근 등, 1998). 따라서, 본 논문에서는 고풍속 고하중 상황에서 운용중인 풍력발전기 설치지역에 지진이 발생하였을 경우의 추가적인 특성을 물리적으로 파악해 보고자 시간영역에서 진동응답해석을 수행하여 보았다. 유한요소해석 기반의 천이응답해석은 SAMCEF_Ver. 6.3을 활용하였으며(SAMTECH Co., 2007), 지진발생에 따른 기반가진 효과와 더불어 블레이드 및 타워에 미치는 풍하중 효과를 추가로 고려한 연구를 수행하였다.

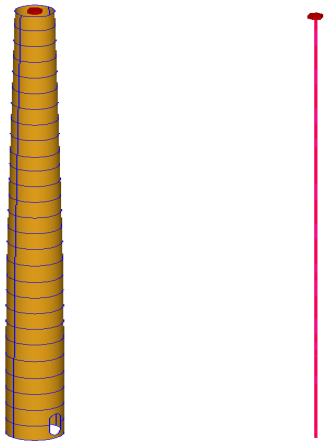
## 2. 타워 모델링 및 지진응답해석 기법

본 논문에서 고려한 풍력발전기 모델은 MW급 규모의 초대형 풍력발전기에 대한 것이다. 풍력발전기는 크게 로터 및 허브, 낫셀과 타워로 구성되어 있으며, 본 모델의 경우 낫셀은 지면으로부터 약 80m 지점에 위치해 있다. 지진기반해석을 위한 풍력발전기의 모델은 타워는 shell 요소의 유한요소로, 로터 및 낫셀은 집중질량으로 모델링하여 풍하중 및 자중을 부가하였다. 타워 반지름은 최상부에서 약 1.5m이고 최하부에서 약 2.3m이며, 구조두께는 18mm에서 48mm로 분포되어 있다. 타워의 총 질량은 약 210ton정도이며, 로터 및 낫셀 시스템의 총 질량은 180ton을 가정하였다. 풍력발전기 타워의 재질은 일반 구조용 강재(steel)로 고려하였으며, E=210GPa, $\rho$=7,850kg/m$^3$, $\nu$=0.3이며, 구조 감쇠비는 $\zeta$=0.03을 가정하였다.

타워 구조모델은 하단 출입구 형상을 고려한 3차원 쉘(3D shell) 구조 모델과 동적 지진응답해석을 효과적으로 수행하기 위한 등가 보(equivalent beam) 모델의 2가지로 구성하였다(Fig. 3). 지진기반해석을 위한 풍력발전기 타워 모델은 타워 자체구조는 보(beam) 요소로 고려하였으며, 낫셀과 로터시스템에 해당하는 구조물들은 관성하중 특성을 효과적으로 고려하기 위해 집중질량으로 모델링하여 타워 최상부에

연결하여 모델링하였다. 또한 3차원 쉘구조 타워모델의 등가 모델 구성을 위해 길이방향으로 총 27등분의 부분(section)으로 나누어 모델링하였다. 타워구조의 경우는 블레이드 구조에 비해 등가모델을 구성하는 것이 상대적으로 용이한 편이며, 등가모델링 기법 및 응용에 대한 세부적인 내용은 관련 논문(김동현 등, 2008; 김요한 등, 2008)을 참조하기 바란다. 타워하부의 경계조건은 타워 하부의 6자유도를 모두 구속하였다. 타워 하단부 모델링의 경우 보다 엄밀하게는 지반의 탄성지지 효과를 고려할 수 있도록 수직, 수평방향 및 회전방향 스프링을 등가적으로 부가하는 것이 더 정확할 수 있으나, 본 연구를 수행할 당시에는 관련 자료가 부족하여 일반 완전지지 조건을 부가하였다.

유한요소법에 근거하여 지진응답해석 또는 지진 기반가진 응답해석을 수행하기 위한 전형적인 기법은 예상되는 지진강도에 따른 가속도 가진 조건을 바탕으로 이를 동적모델에 부가하는 방법을 필요로 한다. 일반적인 방법은 유한요소 타워구조 모델의 집중질량 정보를 바탕으로 가속도에 질량을 곱한 관성력을 해당 질량요소에 등가적으로 시간이력으로 부가하는 것이다. 이 방법을 적용하기 위해서는 비교적 질량정보가 명확하고 개수가 적은 모델을 구성하는 것이 효과적인데 등가 보를 활용한 타워모델은 수치해석 시간도 단축할 수 있어 지진 기반해석을 위해 매우 유용한 구조모델이 된다. 등가 보 모델에 대한 기반가진 진동해석을 수행한 후 시간이력에 대한 보 모델의 내력을 구한 후 이를 다시 3차원 쉘 구조 모델에 하중으로 부가하면 각 부분에 대한 세부적인 응력수준을 재계산 할 수 있으며 본 연구에서는 이 방법을 적용하였다. 또 다른 방법은 3차원 유산요소 모델에서 질량 모델링 부분을 lumped mass로 수행하고 기반 가속도 정보가 부가되도록 하는 방법과 가속도를 적분하여 시간에 대한 속도나 변위이력을 만들어 실제 지진현상과 유사하게 직접 기반운동으로 가진 하는 방법이 있을 수 있다.



(a) 3D model (b) Equivalent beam model

Fig. 3 Dynamic finite element models of wind-turbine tower

## 3. 해석결과 및 검토

### 3.1 공력하중해석

본 연구에서는 회전하는 로터 블레이드에 작용하는 공력하중해석을 정확하게 계산하기 위해 3차원 전산유체역학(CFD) 기법을 적용하였다. 또한 회전하는 블레이드에 대한 효율적인 공력해석을 위해 MRF(multiple rotating reference frames) 기법을 활용하였다. 로터 블레이드 모델의 유동해석 격자는 Fig. 4와 같으며 유동 해석조건은 25m/s의 풍속을 가정하였고, 공기의 밀도 1.225kg/m$^3$, 로터 블레이드의 회전속도는 20rpm을 가정하였다. 이는 바람의 하중효과를 고려하기 위해 비교적 높은 운용하중 조건에 해당하는 조건으로 볼 수 있다. 본 논문에서는 지면관계상 한 가지의 풍하중 조건을 고려하였으나, 실제 모델의 설계상 안전성 검토에서는 지진이 유발되는 상황에서 추가적인 풍하중 조건들에 대한 시나리오가 필요할 것이다.

일반적으로 블레이드에 작용하는 분포 공력하중을 적분하여 허브(hub) 하중으로 전환하면 3개의 방향하중(Fx, Fy, Fz)과 3개의 모멘트하중(Mx, My, Mz)으로 생성되는데, 회전효과 때문에 블레이드의 방위각(azimuth angle)에 따라 변동하는 형태로 나타나게 된다. 본 연구에서는 블레이드의 방위각에 대한 하중 조건 중 최대 값을 추출하여 적용하였다. 여기서 x-방향이 바람이 흘러가는 방향이며, y-방향은

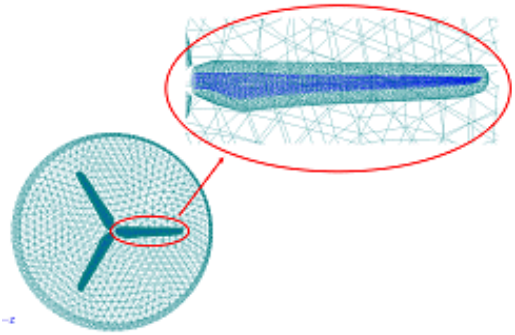


Fig. 4 Computational grid of wind turbine blade

Table 3 Aerodynamic loads for CFD analysis

| | | |
|---|---|---|
| concentrated load | Fx(N) | 692,600 |
| | Fy(N) | -552 |
| | Fz(N) | 61.995 |
| moment | Mx(N · m) | -360,027 |
| | My(N · m) | -84,275 |
| | Mz(N · m) | -37,635 |

바람의 수직방향이며 z-방향은 타워의 높이 방향이다. 본 연구에서 고려한 풍력발전기 블레이드 모델에 대한 x, y, z 방향에 대한 공력하중의 예를 Table 3에 나타내었으며, 이를 풍력발전기 로터의 질량중심에 부가하였다.

또한 동일 풍하중 조건에서 타워(tower)에 가해지는 공력하중도 CFD 해석을 통하여 구할 수 있다. 타워 형상에 대한 CFD 격자 생성시 타워면을 높이 방향으로 적절하게 분할하여 각 분할면에 대한 분포하중을 적분된 형태의 하중으로 추출할 수 있도록 준비해 두면 편리하게 각 부분별로 적분된 풍하중을 추출하여 등가 보 타워구조 모델에 적용하기가 용이해 진다. 다른 방법으로는 CFD 해석에서 구해진 압력정보를 표면보간 기법을 활용하여 유한요소 격자계로 면적 적분하고 하중으로 전환하여 가하는 방법이 있을 수 있는데, 이는 보다 적문적인 수치해석 기법이 요구된다.

본 연구에서는 타워 표면 격자 생성시 등가 보 모델과 유사하게 높이 방향으로 27개의 부영역으로 나누어 생성한 후 면적분을 통해 타워의 각 부분별 풍하중을 추출하였다. 예를 들어 본 해석조건의 경우 타워의 가장 윗부분 부영역에 부가되는 풍하중은 Fx가 2570N정도이며, 타워에 작용하는 풍하중의 경우 나머지 두 방향 및 3방향 모멘트는 무시할 정도로 작다. 참고로 원형단면 형상의 경우 레이놀즈 수 조건에 따라 유동 흐름에 수직한 방향으로의 하중도 크게 형성될 수 있음에 유의할 필요는 있다.

### 3.2 고유진동해석

풍력발전기 타워의 기본적인 동적 특성을 파악하기 위해 고유진동해석을 수행하였다. Fig. 5는 등가 보 타워 모델의

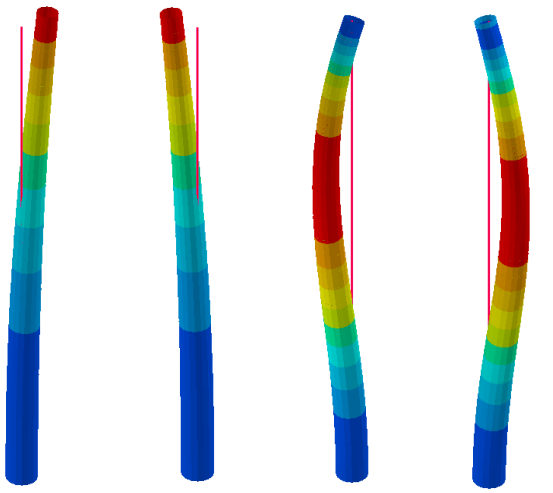



Fig. 5 Natural frequencies of wind turbine tower

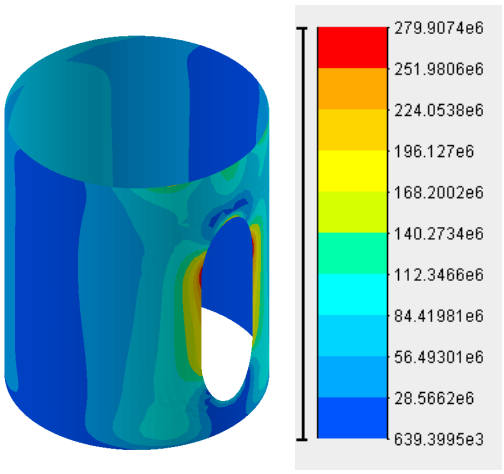
Table 4 Comparison of natural frequencies between the equivalent beam model and the 3D shell model

| beam model frequency (Hz) | | shell model frequency (Hz) | |
|---|---|---|---|
| 1st mode | 0.39 | 1st mode | 0.39 |
| 2nd mode | 0.40 | 2nd mode | 0.40 |
| 3rd mode | 2.69 | 3rd mode | 2.72 |
| 4th mode | 3.38 | 4th mode | 3.36 |

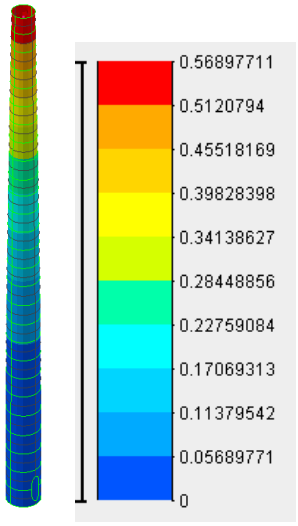
고유진동수와 고유모드를 나타내고 있으며, Table 4에서는 등가 보(beam) 모델과 3D shell 모델과의 고유진동수를 상호 비교하여 등가 보 모델을 검증하였다. 결과를 살펴보면 등가 보 모델의 고유진동수가 3차원 쉘 유한요소 모델의 고유진동수와 거의 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 공력하중을 이용한 타워 구조해석

앞서 계산된 로터 및 타워의 풍하중을 타워구조에 부가하




(a) Stress level




(b) Displacement level

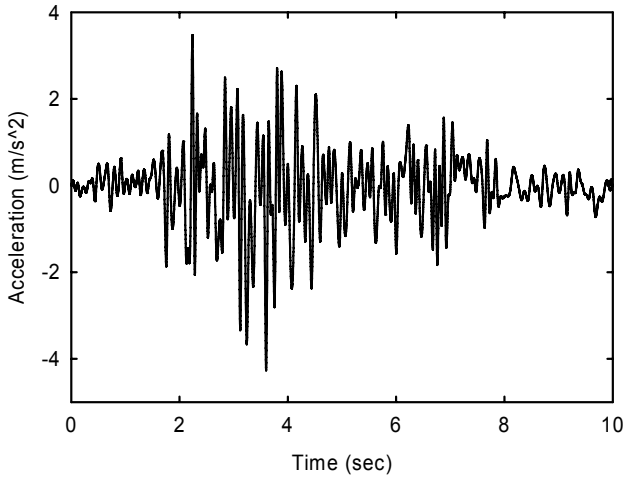
Fig. 6 Structural analysis of tower due to wind load.

여 기본적인 구조물의 건전성을 평가해 보았다. 타워 구조는 일종의 외팔보 형태로 구조응력은 지면 근처의 하단 지지부에서 가장 크게 유발되게 되어 있다. 따라서 구조적으로 가장 취약할 것으로 판단되는 타워 하부에 위치한 출입문 부위에 대한 해석을 위해 등가 보 타워 구조모델에서 내력으로 구해진 전단력과 굽힘 모멘트를 3차원 쉘 모델에 부가하였다. Fig. 6은 풍하중에 의한 구조해석 결과를 나타내고 있으며, 타워 상부의 최대변위는 0.569m이고 유발되는 최대응력 수준은 280MPa로 타워 하부의 출입문 부분에서 발생하였다. 일반적인 구조강의 인장강도 수준인 440MPa을 고려했을 때 공력하중만 고려한 경우 안전여유가 충분함을 알 수 있다.

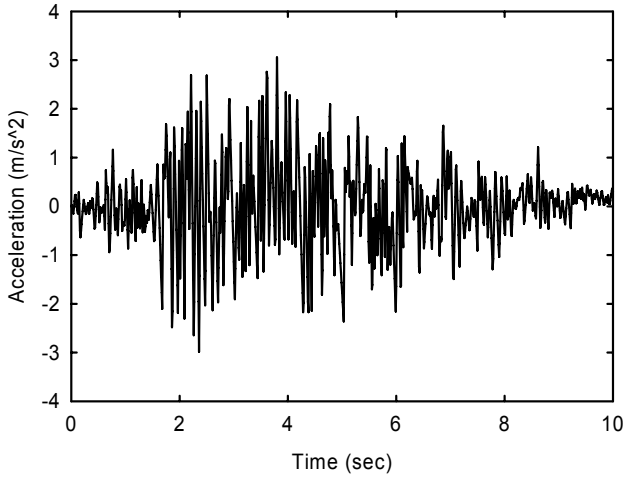
### 3.4 지진 기반가진 진동응답해석

풍력발전기가 운용 중 지진이 발생하는 경우에서 풍하중을 받는 상황을 고려하였다. 지진하중은 시간에 따른 가속도를 부가하여 기반 가진 효과를 적용하였다. 본 연구에서 고려한 입력지진파는 전형적인 댐 구조의 지진 안전성해석에 사용하는 수평 및 수직방향 가속도 수준이다(Fig. 7). 이 지진파의 수직방향 하중과 수평방향 하중 모두 고려하여 지진하중을 타워에 가하여 해석을 수행하였으며, 이를 통해 타워의 구조안정성을 검토하였다. Fig. 7을 보면 전형적인 지진 조건에서 유발될 수 있는 수평 및 수직방향 가속도 수준은 불규칙적인 특성이 있으며, 수평방향의 경우 최대치는 약 4.27m/s$^2$(0.43g), 수직방향의 경우 최대치는 약 3.06m/s$^2$(0.3g) 정도가 된다. 이러한 지진가진 특성을 시간에 따른 가속도에 기인한 관성하중으로 전환하여 타워 전체에 부가하여 구조물의 동적응답해석을 수행하였다.

본 연구에서는 지진하중이 가해지는 상황에서 풍하중이 있는 경우와 없는 경우를 검토하였다. 또한 풍하중과 지진하중을 동시에 고려한 결과와 지진하중만을 고려한 결과를 비교하였다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 로터 및 타워에 작용하는 풍하중의 영향으로 인한 초기 변위의 차이가 발생하였고 지

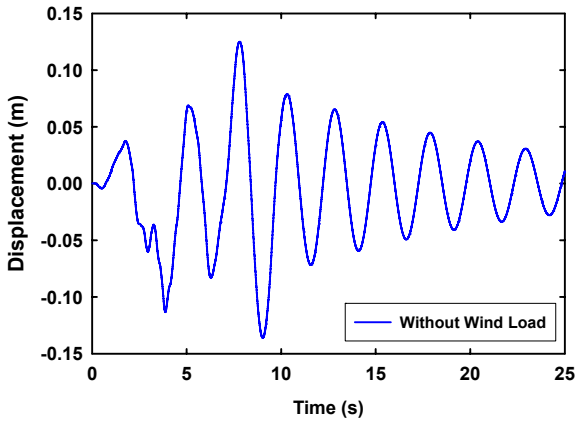



(a) Lateral direction

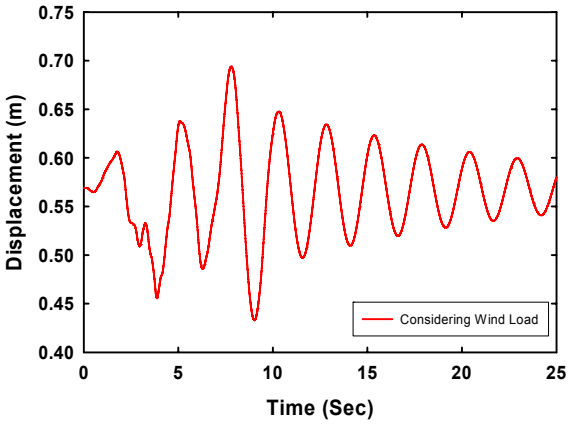



(b) Vertical direction

Fig. 7 Typical seismic acceleration data




(a) Without wind load




(b) With wind load

Fig. 8 Comparison of displacement response due to seismic excitation at the tower top position.

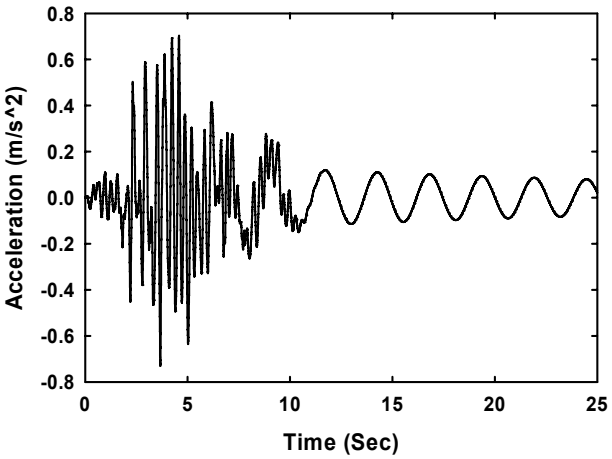
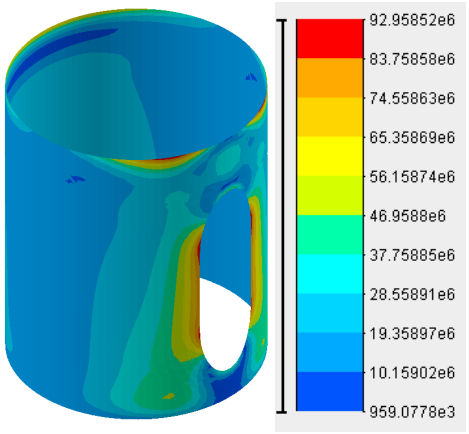
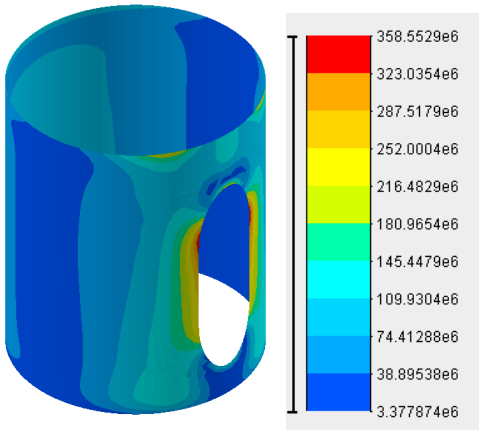



Fig. 9 Acceleration response at the tower top position.




(a) Result of stress without wind load




(b) Result of stress considering wind load

Fig. 10 Comparison of maximum stress response due to seismic excitation.

진하중이 작용하는 과정에서 발생하는 진동 패턴은 거의 유사함을 알 수 있다.

Fig. 9는 타워 끝단에서 시간에 따른 가속도 응답을 나타내고 있다. 10초 이후 지진하중이 사라졌으나 낫셀에서 나타나는 진동이 바로 사라지지는 않고 한동안 감쇠되면서 지속되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 진동현상은 타워 상부의 집중 질량의 관성특성이 크면 클수록 좀 더 지속적으로 유지되는 특성을 보일 수 있다. 보다 정확하게는 이러한 기반가진 특성 때문에 회전하는 로터의 진동특성이 함께 병합되어 풍하중이 함께 비정상적으로 변화될 수 있는데, 이에 대한 고난도의 연구내용 까지는 본 연구에서 고려하지는 않았다. 특히 초대형 풍력발전기의 경우 로터블레이드의 비상정지에 소요되는 시간도 최소한 10초 이상이나 된다. 따라서 지진가진이 갑자기 들어오게 되더라도 블레이드가 정격속도 수준으로 회전하고 있는 상황은 충분히 존재할 수 있고 이를 고려한 해석이 필요하다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 MW 급 대형 풍력발전기의 타워에 대하여 풍하중과 지진하중의 영향을 동시에 고려하여 구조진동 응답특성을 검토하였다. 시간에 따른 지진하중을 타워하부에 가속도에 의한 관성력 형태로 부가하여 구조진동 응답 특성을 효과적으로 해석하였다. 지진에 의한 기반가진 효과가 발생되는 경우에 추가로 풍하중이 작용하였을 상황에서 타워의 하단부에 유발되는 응력수준이 상당부분 상승할 수 있음을 보였다. 타워 설계 시 지진 가진에 의한 동적 효과이외에도 풍하중 효과를 추가로 고려하여 타워의 설계 안전성 검토를 수행할 필요성이 있음을 제시하였다.

## 감사의 글

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업과 5MW급 대형 해상풍력발전 시스템 개발 과제의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.

## 참 고 문 헌

**김동현, 박효근, 김동만** (2008) 대형 풍력발전용 복합재료 블레이드의 개선된 등가 모델링 기법, 유체기계공업학회, 11(4), pp. 32~37.

**김요한, 박효근, 김동현, 김동만, 황병선, 박지상, 정성훈** (2008) CAE 기법을 활용한 3MW급 풍력발전기 로터의 구조 및 진동해석, 유체기계공업학회, 11(4), pp.22~31.

**이동근, 김태호** (1998) 응답스펙트럼 해석법을 이용한 건축구조물의 바닥진동해석, 한국지진공학회 논문집, 2(4), pp.169~178.

**Ritschel, U., Warnke, I., Kirchner, J., Meussen, B.** (2003) Wind Turbine and Earthquake, World Wind Energy Conference.

**SAMTECH Co.** (2007) SAMCEF Ver 12.1, User's Manual.

● 논문접수일 2010년 2월 2일
● 논문심사일
1차 2010년 2월 8일
2차 2010년 3월12일
● 게재확정일 2010년 3월15일