보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )
국토교통기술사업화 지원사업 제2차연도 최종보고서

발간등록번호
11-1613000-001383-01

R&D/15TBIP-C074045-02

국토교통기술사업화 지원사업 R&D Report

해상 3MW급 이상 풍력터빈타워의 진동저감을 위한 진동제어장치 개발 최종보고서

2016. 08. 12.

주관연구기관 / (주)티 이 솔 루 션
협동연구기관 / 한국전력기술(주)
/ (주)비 코 시 스 템

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘해상 3MW급 이상 풍력터빈타워의 진동저감을 위한 진동제어장치 개발’(연구개발 기간 : 2015.06.02~ 2016.06.01) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2016 . 08 . 12 .

주관연구기관명 : (주)티이솔루션 (대표자) 김 윤 석
협동연구기관명 :
참여기관명 : 한국전력기술(주) (대표자) 박 구 원
(주)비코시스템 (대표자) 김 윤 석

주관연구기관책임자: (주)티이솔루션 김윤석
협동연구기관책임자:
참여기관책임자: 한국전력기술(주) 김종관
(주)비코시스템 이승우

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>15TBIP-C074045-02</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td colspan="2">2015.06.02.~
2016.06.01</td><td>단계구분</td><td>2/2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="5">국토교통기술사업화 지원사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="5">중소기업 보유기술 사업화 분야</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="5">해상 3MW급 이상 풍력터빈타워의 진동저감을 위한 진동제어장치 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">김 윤 석</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총: 34명
내부: 34명
외부: 0명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td colspan="2">정부: 420,000천원
기업: 280,000천원
정부 외: -천원
계: 700,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총: 68명
내부: 68명
외부: 0명</td><td>총 연구개발비</td><td colspan="2">정부: 685,000천원
기업: 456,700천원
정부 외: -천원
계:1,141,700천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">㈜티이솔루션 대표이사</td><td colspan="3">참여기업명 : 한국전력기술(주), ㈜비코시스템</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명: 해당없음</td><td colspan="3">상대국 연구기관명: 해당없음</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명: 고려대학교,
㈜델타텍코리아</td><td colspan="3">연구책임자: 한상윤(고려대학교),
기우용((주)델타텍코리아)</td></tr>
<tr><td colspan="4">본 연구의 목표는 국내에 설치 예정인 3MW급 이상(3MW급 및 7MW급)의 대형 풍력 타워의 진동을 저감시키는 제진장치를 개발하는 것임. 본 연구에 의한 성과는 다음과 같음.

- 3MW급 이상의 풍력터빈타워용 질량형 제진장치 설계 기술
- 3MW급 이상의 풍력터빈타워용 질량형 제진장치 제작/설치 기술
- 3MW급 이상의 풍력터빈타워용 질량형 제진장치 유지관리 기술
- 3MW급 및 7MW급 풍력터빈타워 진동저감기술 국제인증
- 대형 해상 풍력터빈타워 설계기술
- 제진장치를 활용한 풍력터빈타워 최적화 설계기술
- 제진장치 진동저감에 따른 구조적, 경제적 효과 분석 및 활용 기술
- 풍력터빈타워의 작용하중 및 진동 응답 파악기술
- 풍동실험을 이용한 풍력타워 풍진동 추정기술
- 풍력터빈타워의 축소스케일 시험체를 이용한 질량형 제진장치 성능평가기술
- 3MW급 이상 풍력터빈타워용 축소스케일 질량형 제진장치 시제품
- 3MW급 및 7MW급 풍력터빈타워용 실스케일 질량형 제진장치 시제품</td><td colspan="3">보고서 면수</td></tr>
</table>

국 문 요 약 문

연구의 목적 및 내용	전 세계적으로 대형화 및 해상화 추세에 있는 풍력 터빈 타워의 구조 안전성과 피로 하중 감소를 통한 설계 수명 향상이 요구됨. 이에 맞춰 국내에 설치 예정인 3MW급 이상(3MW급 및 7MW급)의 대형 풍력 타워의 진동을 저감시키는 제진장치를 개발하는 것이 본 기술 개발의 목표임.
연구개발성과	- 3MW급 이상의 풍력터빈타워용 질량형 제진장치 설계 기술 - 3MW급 이상의 풍력터빈타워용 질량형 제진장치 제작/설치 기술 - 3MW급 이상의 풍력터빈타워용 질량형 제진장치 유지관리 기술 - 3MW급 및 7MW급 풍력터빈타워 진동저감기술 국제인증 - 대형 해상 풍력터빈타워 설계기술 - 제진장치를 활용한 풍력터빈타워 최적화 설계기술 - 제진장치 진동저감에 따른 구조적, 경제적 효과 분석 및 활용 기술 - 풍력터빈타워의 작용하중 및 진동 응답 파악기술 - 풍동실험을 이용한 풍력타워 풍진동 추정기술 - 풍력터빈타워의 축소스케일 시험체를 이용한 질량형 제진장치 성능평가기술 - 3MW급 이상 풍력터빈타워용 질량형 제진장치 시작품 (축소스케일) - 3MW급 및 7MW급 풍력터빈타워용 질량형 제진장치 시제품 (실스케일)
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	▼ 활용방안 - 개발기술 지적 재산권 확보 - 개발기술 국제 인증 - 개발기술의 실용화 및 실제 설계 적용 - 개발기술 사업화 - 개발기술의 신뢰도 확보를 통한 보급 확대 ▼ 기술적 기대효과 - 풍력터빈타워용 질량형 제진장치 설계/제작/설치/성능시험/유지관리 기술 확보 - 제진장치의 설치에 따른 단지배치 최적화 기술 확보 - 상부 풍력발전기와 수중기초와 안정적인 연계기술 확보 - 제진장치의 설치를 고려한 해상 대형 풍력터빈타워 설계 최적화 기술 확보 - 풍력터빈타워 시험체를 이용한 제진장치 성능평가기술 확보 - 대형 풍력터빈타워의 진동 원인별 진동 추정 기술 확보 - 해상 풍력터빈타워의 진동저감에 따른 효과 분석 기술 확보 ▼ 사회·경제적 기대효과 - 진동저감에 의한 대형 해상 풍력터빈타워의 장수명화 - 진동저감에 의한 대형 해상 풍력터빈타워의 유지관리비용 절감 - 진동저감에 의한 대형 해상 풍력터빈타워의 가동률 확대 - 해상 풍력터빈타워의 대형화를 통한 발전 효율 증대 - 해상 풍력터빈타워의 설치 가능 수심 확대 - 해상 풍력터빈타워의 해외 수출 경쟁력 확보 - 신재생에너지의 확대를 통한 화석 연료 사용 절감 - 신재생에너지의 확대를 통한 대기 오염 감소

핵심어	진동제어장치	풍력발전	풍력터빈	신재생에너지	동조질량형 제진장치

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	With the recent trend of wind turbine towers becoming bigger and being built offshore, there is a need to increase design life through ensuring structural safety and reduction of fatigue load. With this regards, the goal of this research is to develop a vibration control device that can reduce the vibration on large wind turbine towers over 3MW (3MW and 7MW planned to be built in Korea).
Results	- Design technology of mass type vibration control device for wind turbine tower over 3MW - Fabrication / installation technology of mass type vibration control device for wind turbine tower over 3MW - Maintenance technology of mass type vibration control device for wind turbine tower over 3MW - International certification on the vibration control technology of 3MW and 7 MW wind turbine tower - Design technology of large offshore wind turbine tower - Design technology for optimization of wind turbine tower utilizing the vibration control device - The analysis on the application of the technology and its structural and economical effects - Analytic technology on applied load and vibration response of the wind turbine tower - Wind-induced vibration evaluation technology on wind turbine tower using wind tunnel test - Mass vibration control device efficacy evaluation technology using small scale testing model of wind turbine tower - Mass vibration control device prototype for wind turbine tower over 3MW (Compressed scale) - Mass vibration control device pilot product for 3MW and 7MW wind turbine tower (Actual scale)
Expected Contribution	▼ Application Plan - Secure intellectual property on developed technology - Obtain international certification on developed technology - Actualization of developed technology and implementation on actual design - Commercialization of developed technology - Expansion of distribution through securing confidence in technology development ▼ Expectation Effectiveness on Developed Technology - Secure design / fabrication / installation / performance test / maintenance technology - Secure linking technology of upper wind turbine and lower sea level base - Secure design optimization technology of large turbine tower with respect to installation of vibration control device - Secure performance test technology of vibration control device using wind turbine tower model - Secure vibration evaluation technology from different causes on large wind turbine tower - Secure effectiveness analysis technology from reduction of vibration on the wind turbine tower ▼ Social · Economical Expectation Effectiveness - Longevity of the large wind turbine tower due to reduction of vibration - Reduction of maintenance cost of the wind turbine tower due to reduction of vibration - Increase service rate of the wind turbine tower with reduction of vibration - Reduction in fossil fuel usage with increase use of renewable energy - Reduction in air pollution with increase use of renewable energy

Keywords	Vibration control device	Wind power generation	Wind turbine	New renewable energy	Tuned mass damper

< Contents >

1. Introduction of the Research ····· 1
2. Status of the Research ····· 4
3. Research Details and Achievements ····· 15
4. Achievement Level and Contribution in the Related field ····· 207
5. Commercialization Plan for Achieved Results ····· 210
6. Information from Abroad Gathered During Research ····· 211
7. Research Development Potential and Security ····· 212
8. Research Facility and Equipment Registration Status on NTIS ····· 213
9. Safety Measure Records in Facilities During Research ····· 214
10. Major Result from the Research ····· 215
11. Miscellaneous ····· 216
12. Reference ····· 217

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 4
3. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 15
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 207
5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 210
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 211
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 212
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 213
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 214
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 215
11. 기타 사항 ····· 216
12. 참고 문헌 ····· 217

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

전 세계적으로 대형화 및 해상화 추세에 있는 풍력 터빈 타워의 구조 안전성과 피로 하중 감소를 통한 설계 수명 향상이 요구됨. 이에 맞춰 국내에 설치 예정인 3MW급 이상의 대형 풍력 타워의 진동을 저감시키는 제진장치를 개발하고 시제품을 제작하여 성능을 검증하는 것이 본 기술 개발의 목표임.

2. 연구개발의 필요성

최근 전 세계적으로 신재생에너지의 역할이 증대 되고 있고, 그중 한 분야인 풍력 발전시장 또한 지속적으로 성장하는 추세이며, 전 세계적으로 203,500MW 용량의 상업용 발전기가 설치되어 있으며, 향후 5년 동안 100,000MW의 발전용량이 증가할 것으로 예측됨.



[세계 총 풍력 시스템 발전용량 현황]

풍력발전의 효율 향상을 위하여 풍력터빈의 대용량화와 해상 설치가 급증하고 있으며, 이러한 대형 풍력 발전기는 경제성 및 내구성 확보를 위해 경량화가 필수 요소가 됨. 하지만 경량화로 인하여 해상에 설치되는 대형 풍력 터빈 타워에 작용하는 바람과 파도 등의 외부 하중 증가되고 설치 깊이와 타워 높이의 증가로 인하여 진동에 더욱 취약해짐. 구조 연한의 증대와 전력품질 향상을 위하여 진동을 효과적으로 저감시키기 위한 질량형 제진장치를 개발하고자 함.

가. 본 연구의 주관 기관인 ㈜티이솔루션은 국가연구개발사업 수행 및 자체 연구개발을 통하여 수동형 및 능동형 진동제어기술을 확보하고 있음.

나. 고층빌딩, 사장교 주탑, 굴뚝과 같은 타워형 구조물에 적용된 진동제어기술을 응용하면 풍력 터빈타워와 같은 타워형 구조물에 적합한 질량형 제진장치의 개발이 가능함.

다. 해상에 설치되는 대형 풍력 터빈 타워의 진동저감은 풍력 터빈 타워의 구조안정성 및 수명 증가, 심해 지역 등 설치 가능 지역의 확대 등을 위하여 반드시 필요한 기술이나, 개발 비용 및 국제 인증 등의 리스크를 감안할 때 개별 기업에서 독자적인 개발은 기대하기 힘든 상황임.

라. 최근 급증하고 있는 신재생에너지의 수요를 충족하기 위해서는 대형 풍력 터빈의 해상 설치가 반드시 필요한 상황이며, 바람이나 파도 등에 의한 진동 문제를 해결하기 위해서는 제진장치의 개발이 필수적임. 또한, 국내에서 개발한 해상 풍력 타워의 해외 수출을 위해서도 풍력 타워의 진동제어기술 개발이 절실하게 요구되고 있음.

3. 연구개발 범위

가. 풍력터빈타워 구조해석 및 진동조사

(1) 3MW급 및 그 이상의 풍력터빈타워 구조 모델 조사
(2) 해상 대형 풍력타워 구조해석(고유치해석 포함)
(3) 주요 진동 원인(바람, 파도, 조류 등)별로 기존 풍력터빈타워의 진동 조사
(4) 공탄성모형을 이용한 풍동실험을 통해 풍력터빈타워의 풍진동 응답 산정
(5) 구조 및 피로검토를 통한 풍력터빈타워의 허용 진동을 조사
(6) 풍력터빈의 작동 상태에 따른 진동 특성 분석

나. 제진장치 설계 사양 결정

(1) 풍력터빈타워에 질량형 제진장치를 설치할 수 있는 공간과 풍력터빈타워의 경제성을 고려한 질량형 제진장치의 허용 비용 등 질량형 제진장치 설치의 제약 조건 조사
(2) 풍력 터빈의 성능을 고려한 제진장치 설계 사양 결정

다. 기존 기술(state of practice) 조사

(1) 국내외 해상 풍력터빈 타워에 적용된 실적이 있는 제진장치의 효과 분석
(2) 풍력타워에 설치가 가능한 수동형, 능동형, 반능동형 유형별 장단점 분석 및 국내 풍력타워 제진에 가장 적합한 형식 선정

라. 풍력타워 축소스케일 시험체를 이용한 제진장치 성능평가기술 개발

(1) 3MW급 이상 풍력타워의 동특성(일반화질량, 고유진동수, 구조감쇠비 등)을 상사한 축소스케일 시험체 설계 및 제작
(2) 제진장치의 성능을 검증하기 위해 가진 장치 개발

(3) 축소스케일 시험체를 이용한 제진장치 성능평가기술 개발

마. 풍력터빈타워의 축소스케일 시험체용 제진장치 개발 (1/3~1/6 축척)

(1) 제진성능 시뮬레이션을 통한 최적의 질량형 제진장치 동특성 파악
(2) 3MW급 이상 풍력타워의 축소스케일 시험체용 제진장치 설계 및 제작 (2type)
(3) 제진장치 동특성 시험
(4) 가진장치를 이용한 풍력터빈타워 축소스케일 시험체용 제진장치 성능시험 (유효 감쇠비, 제어율)

바. 풍력터빈타워 시험체 개발 (1:1 축척)

(1) 3MW급 및 7MW급 해상 풍력타워에서 제진장치가 설치되는 부분을 재현하되, 풍력터빈타워 전체의 동특성(일반화질량, 고유진동수, 구조감쇠비 등)을 상사하도록 풍력터빈타워 실스케일 시험체 설계 및 제작
(2) 제진장치의 성능을 검증하기 위해 가진 장치 개발
(3) 풍력터빈타워 실스케일 시험체의 동특성 시험

사. 풍력터빈타워 실스케일용 제진장치 개발 (1:1 축척)

(1) 제진성능 시뮬레이션을 통한 최적의 질량형 제진장치 동특성 파악
(2) 3MW급 및 7MW급 풍력터빈타워의 제진장치 설계 및 제작
(3) 제진장치 동특성 시험
(4) 풍력터빈타워 실스케일용 제진장치 성능시험 (유효감쇠비, 제어율)
(5) 3MW급 및 7MW급 풍력터빈타워 진동저감기술의 국제인증

아. 제진장치의 설치를 고려한 풍력터빈타워 설계기술 개발

(1) 풍력타워 3차원 설계기법 개발 (설계기준 검증 및 하중 산정, 구조해석 포함)
(2) 풍력터빈타워 진동저감에 따른 구조적, 경제적 효과 분석
(3) 제진장치 설치에 의한 진동하중감소를 고려한 타워 최적화 설계기술 개발

자. 기술의 표준화 및 사업화

(1) 풍력터빈 제진장치 시공법 개발
(2) 풍력터빈 제진장치 유지관리 기준 개발
(3) 3MW급 이상 풍력타워 진동저감기술(제진장치) 특허
(4) 3MW급, 7MW급 풍력타워 진동저감기술(제진장치) 국제인증

제2장. 국내외 기술 개발 현황

최근 널리 쓰이는 풍력 발전 터빈은 수평 축으로 회전하는 3날개 방식으로 발전 용량 증가를 위해 터빈의 직경이 커지고 있는 추세임. 2008년 1.6MW에서 2012년1.8MW로 증가하였고 (Navigant, 2013) 그중 해상 풍력의 경우, 2008년 3MW였던 평균용량이 2012년 4MW에 이르게 되었음. 현재 최대 직경 127m에 7.5MW급의 해상 풍력 터빈이 상용화 되었고 향후 터빈의 대형화는 계속 이어질 전망임. 풍력 터빈의 유지관리 및 신뢰도의 일반적인 지표인 가동률은 유럽의 경우 대부분 90%이상이며 계속된 기술향상으로 2013년엔 95% 수준을 나타내고 있음(GL Garrad Hassan, 2013). 하지만 터빈의 대형화, 기후변화 및 원해 설치에 따른 동적 하중 증가는 풍력 터빈의 진동 위험을 증가시켜 가동률을 저하시킴. 이는 유지보수 비용의 증가로 이어져, 부유식 기초와 수직형 터빈과 같은 새로운 풍력 발전 시스템의 도입이 필요로 하게 됨. 이런 새로운 시스템은 구조물의 특성상 기존 시스템에 비해 진동 대책이 더욱 요구되고 있음.

1. 제진장치 기술동향

가. 동조 액체기둥 감쇠기(Tuned Liquid Column Damper, 이하 TLCD)

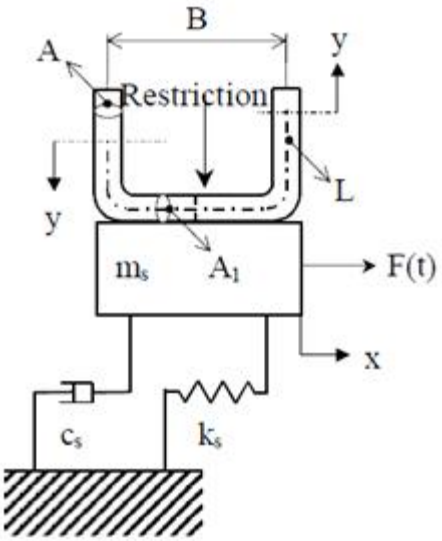
네덜란드 MECAL社에서 제안된 TLCD는 그림 2.15과 같이 U자형 튜브 안의 액체가 이동하면서 발생하는 힘을 이용하여 구조물의 진동을 저감시킴. 3MW급 풍력 터빈에 적용할 경우 TLCD의 질량은 구조물의 전체 유효질량의 2% 인 3톤이 필요함. 기초에 전달되는 하중은 TLCD를 적용하면 6%가량 감소가 되어 터빈 설계를 용이하게 하고 제작에 필요한 재료의 양을 줄일 수 있음. 또한 현장 조건에 맞게 감쇠기를 동조시켜 제어 효과를 기대할 수 있고 모듈화를 통해 기존에 설치된 해상 풍력 터빈에 적용할 수 있음.

나. 진자형 액체기둥감쇠기 (Pendulum Type Liquid Column Damper, 이하 PLCD)

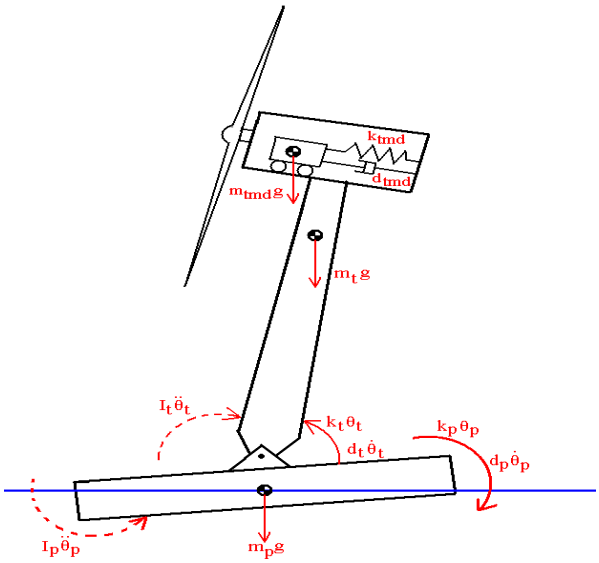
노르웨이 University of Stavanger 의 Arunjyoti Sarkar (2013)는 그림 2.2와 같이 구조물에 매달린 U자 튜브에 액체를 넣어 튜브가 흔들릴 때 내부 액체의 출렁임으로 발생하는 감쇠를 이용하여 해상 풍력 터빈 제진 장치(PLCD)를 제안하였음. 앞서 제안된 TLCD와 유사한 원리로 해상 풍력 터빈과 같이 세장한 캔틸레버 구조물에 적합한 진동 제어 방법을 소개하였고, 풍력 터빈 내부의 협소한 공간에서 쓸 수 있도록 연구 중임.

다. 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, 이하 TMD)

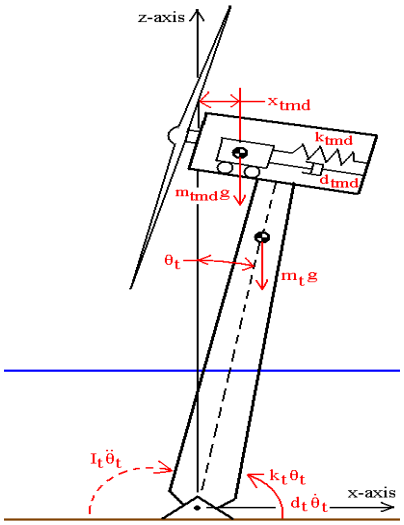
해상 풍력 터빈은 그림 2.3과 같이 단일 말뚝식, 바지식, 뜬 기둥식, 인장 케이블 플랫폼식 크게 4종류로 분류되며 이에 대한 각각의 구조물 특성을 고려한 TMD의 적용이 가능함. 해상 풍력 발전이 점점 육지에서 멀고 수심이 깊은 곳에 설치가 됨에 따라 그에 따른 새로운 풍력 터빈 플랫폼 개발이 요구되고 있음. 수심이 깊어질수록 시공의 어려움과 공사비의 증가 되고 유지 보수의 어려움이 커지기 때문에 플랫폼 형식에 적합한 최적의 진동 제어 대책이 필요한 것으로 판단됨.



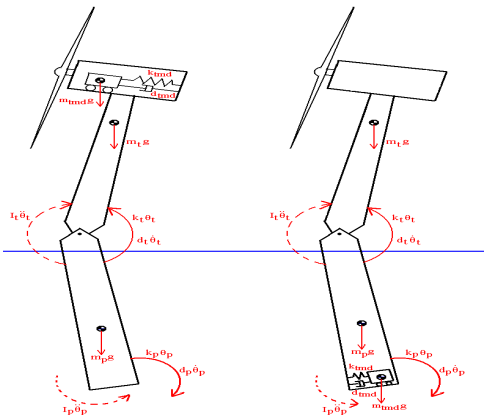
[TLCD 개념도]



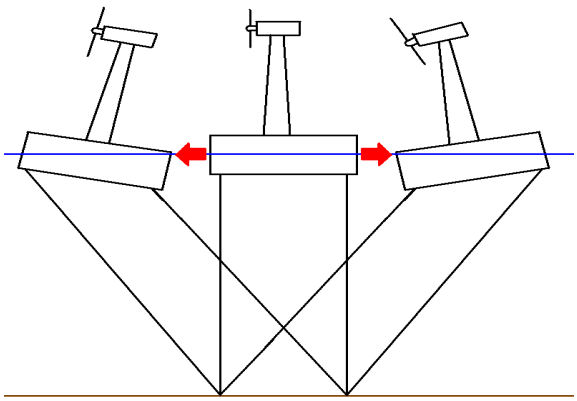
[monopile model]



[model for barge]



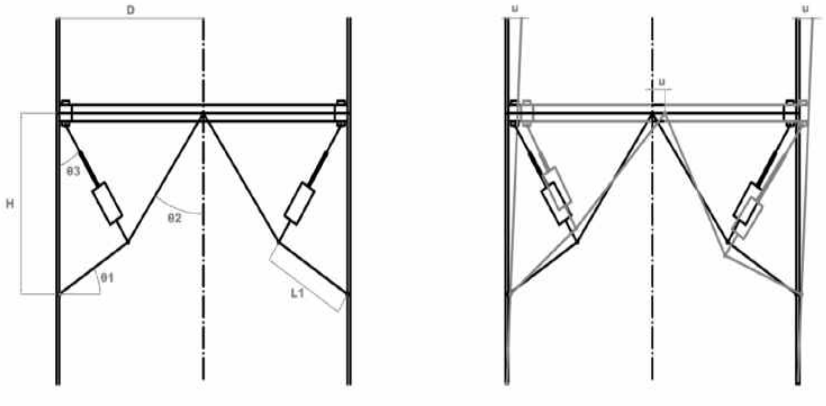
[TMD(nacelle) and TMD(spar)]



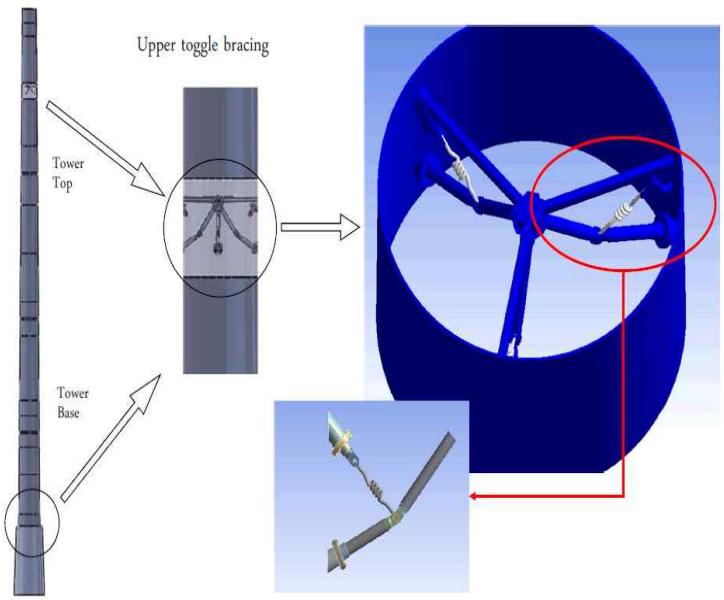
[TLP due to mooring line]

라. 토글형 감쇠기(Toggle Brace Damper, 이하 TBC)

프랑스의 ALSTOM社는 강성이 매우 큰 풍력 터빈 타워에 작은 수평변위에도 충분한 진동 저감 효과를 기대할 수 있는 TBC를 제안함 (그림 2.4~2.5). 제안된 TBC는 다양한 범위의 구조물 변형과 진동수에서도 충분히 에너지를 소산시킬 수 있고, 제작이 용이하고 풍력 터빈이 설치된 현장에서 조립이 가능하며, 내구성이 강해 장기간 사용할 수 있음. 수치해석 결과, 본 TBC를 상용화된 풍력 터빈(ECO 100t, 90m - hybrid)에 적용 할 경우, 구조물 중량을 최대 31.5t을 줄일 수 있고, 제작에 필요한 부재도 약 13% 절약할 수 있으며 반복 하중에 의한 구조물의 피로 파괴에 대한 안전율이 약 11% 증가하는 것으로 나타남. 향후 TBC가 적용됨으로써 기초 보강에 필요한 공사비를 상당히 아낄 수 있고 수심이 25m 이상 되는 해상에서도 동적 하중의 감소로 풍력 터빈의 수명을 늘릴 수 있을 것으로 기대됨.



[고효율 토글형 감쇠장치]

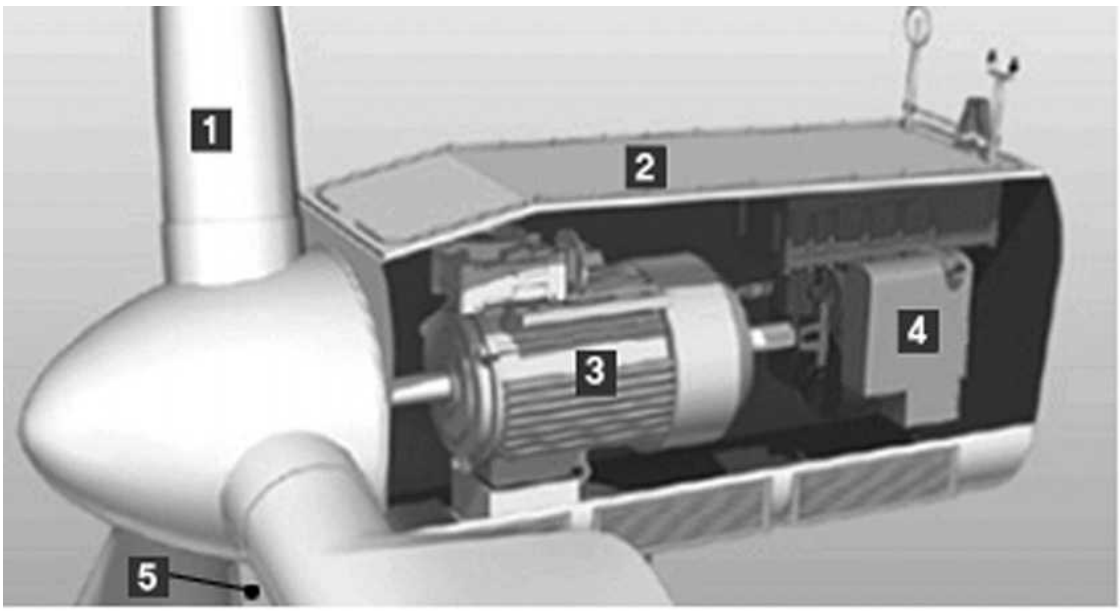


[토글형 감쇠장치의 설치 (ECO100t, 90m - hybrid)]

2. 풍력터빈타워 개발 현황

가. 풍력터빈 타워의 구성

(1) 풍력발전기(HATG : Horizontal Axis WindTurbine Generator)의 구조는 바람으로 부터 회전에너지를 만드는 ①로터 블레이드(Rotor Blade), ②너셀(Nacelle), ③회전자(Rotor)의 회전에너지를 발전기로 전달하는 구동장치(Drive Train)와 기어박스(Gear Box), ④전기를 생산하는 동기발전기(Synchronous Generator),이러한 주요 장치를 지(해수)면으로부터 정격풍속(VR) 높이에 위치시키기 위한 ⑤타워(Tower) 등으로 구성됨.)



[풍력발전기의 구조]

(가) 너셀(Nacelle) : 너셀은 회전자와 발전기를 연결하는 회전축을 지지하기 위한 구조물로서 용접공정으로 제작되며, 바람 하중에 의한 굽힘응력이 가장 크게 작용하므로 돌풍에 의한 극한하중, 20년 이상의 운전에 따른 피로하중을 견디기 위해 하중을 분산시킬 수 있는 구조로 설계함.

(나) 타워(Tower) : 타워는 풍력터빈의 회전자, 구동장치, 발전기 등 모든 기계장치를 지(해수)면으로부터 정격풍속(VR) 높이에 위치시키는 구조물이며, 타워는 동적 하중에 가장 취약하며, 고유진동수를 계산하여 운전시 공진을 피하는 방향으로 설계하고 또한, 좌굴에 의한 붕괴의 위험이 있으므로 좌굴해석에 의한 타워 설계가 요구됨. (수 10m~150mH)

(2) 타워 구조물의 기계적 하중 완화는 구조물의 진동 증가 제어 기법에 달려있으며, 이러한 관점에서 타워댐퍼를 효율적으로 설계하는 것이 무엇보다 중요하며, 이러한 해상풍력의 설치 기초 구조는 크게 4가지 유형으로 분류할 수 있음.

(가) 콘크리트 케이슨 타입(Concrete caisson type):

① 지상 또는 지중에 구축한 중공의 철근콘크리트 구조물을 그 저부의 흙을 굴착하면서 자중 또는 별도의 하중을 가하여 소정의 지지층까지 침하시킨 후 그 저부에 콘크리트를 쳐서 설치하는 기초형식. 우물통(오픈케이슨), 공기케이슨, 박스케이슨 등이 있음.

② 콘크리트 케이슨 타입(Concrete caisson type)은 제작 및 설치가 용이하여 초기 해상풍력발전단지에 사용된 타입으로 Vindeby, Middelgrunden, Nysted 해상풍력발전단지 등에 주로 적용되고 있음.

③ 비교적 얕은 6~10m의 수심에서 사용가능하며 자중과 해저면의 마찰력으로 위치를 유지하며, 기초 직경은 12~15m이며 불량지반에서는 편심경사로 안정성 문제를 유발할 가능성 존재.

(나) 모노파일 타입(Monopile type):

① 모노파일 타입(Monopile type)은 현재 가장 많이 쓰이고 있는 해상풍력발전단지 기초 방식이며 25~30m의 수심에 설치가 가능한 방법임.

② Horns Rev, North Hoyle, Scroby Sands 해상풍력발전단지 등에 적용되었으며 해저면에 대구경의 파일(pile)을 항타(Driving) 또는 드릴링(Drilling)하여 고정하는 방식으로 대단위 단지에 이용하는 경우 경제성이 좋은 것으로 알려져 있음.

③ 다만, 기초 직경이 부피가 크고 3~3.5m로 부재에 대한 피로 하중이나 부식 문제가 있음.

(다) 자켓 타입(Jacket type)

① 자켓 타입(Jacket type)은 현재 해상풍력발전단지 보유국에서 많은 관심을 보이고 실증 중에 있는 타입으로 수심 20~80m에 설치가 가능한 방법임.

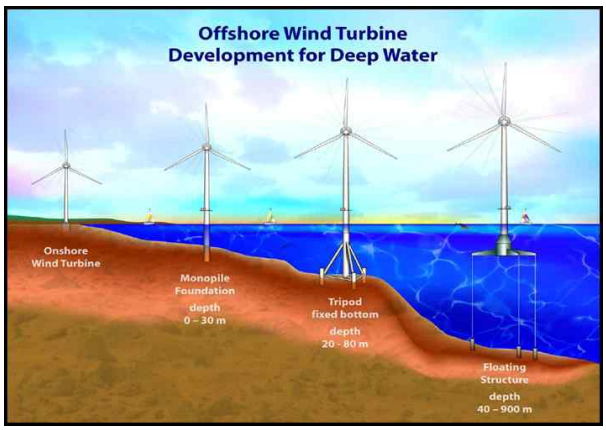
② 영국의 "The Talisman Beatrice Wind Farm Demonstrator" 프로젝트에서 적용된 이 타입은 자켓식 구조물로 지지하고 말뚝 또는 파일(pile)로 해저에 고정하는 방식임.

③ 대수심 해양의 구조물이고 실적이 많아 신뢰도가 높은 편이며 모노파일 타입과 마찬가지로 대단위 단지 조성에 이용하는 경우 경제성이 좋은 기법임.

(라) 부유식 타입(Floating type)

① 부유식 타입(Floating type)은 수심 40~900m에 설치가 가능하도록 많은 풍력회사에서 연구 중에 있는 기법임.

(3) 하부구조물의 형식은 고정식과 부유식으로 구분되며, 일반적으로 모노파일(Monopile), 콘크리트 중력식(Gravity Base)이 가장 많이 이용함. 최근에는 자켓(Jacket), 트라이포트(Tripod), 트라이파일(Tirpile)이 적용되고 있으며, 심해상 풍력발전 필수 과제인 부유식 개발 중에 있음.(설치수심 40~900m)



[해상풍력터빈 심해 개발 방법]

(마) 고정식 구조물

① 콘크리트 중력식 구조물

㉮ 제작 및 설치가 용이하여 초기 해상풍력단지에 사용

㉯ 비교적 얕은 수심에서 사용 : 6~10m

㉰ 자중과 해저면의 마찰력으로 위치 유지

㉱ 불량지반에서는 편심경사로 안전성 문제 유발

㉲ 적용단지 : Vindeby(91), Middelgrunden(00), Nysted(03), Thornton Bank(08, 수심 30m)



[Concrete caisson type (Gravity base type)]

② 모노파일

㉮ 현재 가장 많이 쓰이고 있는 해상 풍력단지 기초 : 설치 수심 25~30m

㉯ 해저면에 대구경 파일(Pile)을 항타(Driving) 또는 드릴링(Drilling)하여 고정

㉰ 대단위 단지의 경우 경제성 양호 (기초 직경 : 3~3.5m)

㉱ 적용 단지 : Horns Rev(02), Arklow Bank(03), Scroby Sand(04), Barrow(06)



[Monopile type]

③ 자켓 구조물

㉮ 현재 해상 풍력단지 보유국에서 많이 관심을 보이고 실증 중 : 설치수심 20~80m

㉯ 자켓(Jacket)식 구조물로 지지하고 말뚝 또는 파일(Pile)로 해저에 고정

㉰ 대수심 해양의 구조물이고 실적이 많아 신뢰도 높은 편

㉱ 대단위 단지의 경우 경제성 양호

㉲ 적용단지 : Alpha Ventus(09)



[Jacket type]

④ 기타

㉮ Tripod : 자켓과 유사하게 직경 1~5m의 원형강관을 용접하여 제작
자켓보다 강재는 더 많이 소요되나 제작성과 시공성이 좋음
적용단지 – Alpha Ventus Areva Multibrid(6기)

㉯ High-rise Pile Cap : 중국 상하이 동해대교 풍력발전단지 적용된 형식
현장타설말뚝기초 형식



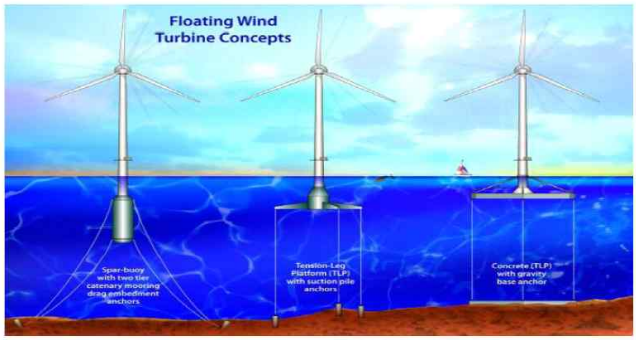
[Tripod, High rise pile cap]

(바) 부유식 구조물

① 미래 심해상 풍력발전 필수 과제 : 설치 수심 40~900m

② 많은 풍력회사에서 상용화 연구가 진행되고 있음

③ 적용 타입 : Tri-Floater, Spar Buoy, Tension-Leg Platform, Multi-Turbine Floater 등



[Floating Wind Turbine Concepts]

㉮ Spar Buoy(Europe)

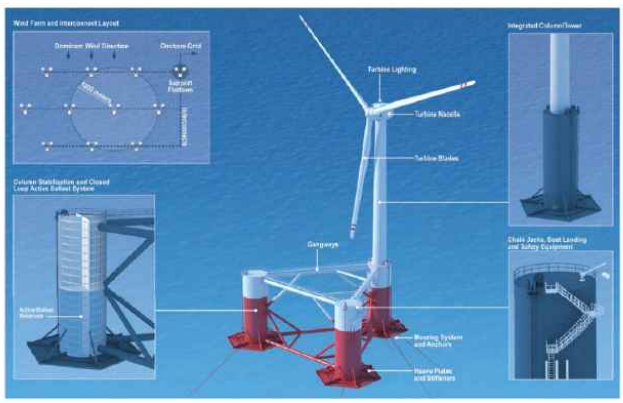
- 2.3MW급 Pilot Plant 1기(7,900만$ 투자)
- 발전기 : Siemens
- 구조물 : Technip
- Mooring : Nexans
- 운용 : Haugland Power
- 2009년부터 2년간 실증 시작
- 설치수심 : 120~170m(부유체 길이 : 100m, 타워 높이 : 62m)




[Monopile type]

㉯ WindFlat Platform(USA)

- 5MW급 Conceptual Design(Principle Power社)
- Semi-Submersible Type
- 설치수심 : 50m 이상
- 선체(Hull) 중량 : < 2,500톤 (터빈 중량 : 400톤, 타워 중량 : 400톤)





[Semi-Submersible type]

㉰ Hexa-Float(Japan)

- 10kW급 Prototype 개발 완료 : 2002년 11월 (류큐 대학)
- 소재 : 콘트리트
- 목표 : 5MW
- 대형 부체식 구조물(Mega-Float)를 개선, 자세제어를 중시
- 구조물 크기에 따라 비용 증가
- 큐슈 대학에서도 유사한 시스템 개발 중



[Hexa-Float Type]

3. 지지구조물 개발 사례

가. 영국 Offshore Wind Accelerator(OWA)

(1) OWA 프로그램은 해상풍력발전 개발비용 절감을 위해 영국에서 2008년부터 시작.
(2) 신개념 지지구조물 아이디어 도출, 최종 4개 아이디어 Round 3 프로젝트에 적용.

(가) Gravity Base : 수심 30~45m, Slip-Forming Stem 방식
(나) Twist Jacket : 수심 30~60m, 기존 Jacket 타입보다 강재량 감소, 급속시공 가능
(다) Monopile Suction Bucket(MBO) : 수심 30~60m, 파일링과 별도 운송선이 불필요
(라) Tri-Bucket : Self Installing Wind Turbine 형식, 저소음/저진동 친환경 공법

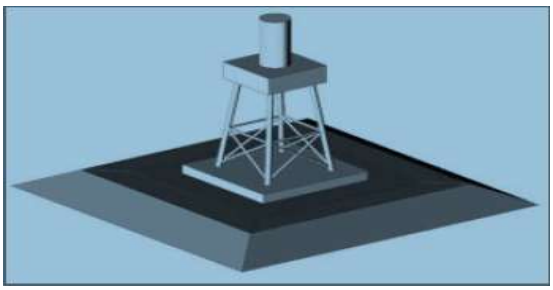


[신개념 지지구조물 아이디어(OWA 프로그램)]

나. 일본 NEDO 프로젝트

(1) 일본정부 산하 New Energy and Industrial Technology Development Organization
(2) 일본해역(태풍, 해일, 지진 등)에서 풍력발전설비의 안전성, 신뢰성, 경제성 분석
(3) 일본 고유의 해상풍력 설계기술 조기 확립을 목표

(가) 1단계는 해상풍력발전 실증연구 F/S 조사(2008년)
(나) 2단계는 해상풍황 관측시스템 실증연구(2009~2013년)
(다) 3단계는 해상풍력발전 시스템 실증연구(2010~2013년)



[NEDO 프로젝트 실증연구 모형]

다. 서남해 해상풍력 Substructure

(1) 국가간 기술경쟁이 점차 치열해지고 있는 해상풍력 시장에서 Substructure 구조시스템 설계/제작/설치 관련 핵심기술 선점

(가) 서남해 2.5GW 해상풍력발전 실증단지용 Substructure Test-Bed 구축 기술

(나) Substructure 기초구조물 지반지지력 확보 기술

(다) Substructure 제작 생산성 향상 및 친환경 급속설치 기술

(2) 유럽의 해상풍력단지는 대부분 지지력이 양호한 사질토 지반으로서 모노파일 기초 형식이 적합함.(시공된 기초의 약 65%가 모노파일)

(가) 최근 단지확장에 따른 수심증가로 경제성을 고려한 Jacket Type과 신개념 형식 개발

(나) 서남해 해상풍력 실증단지 기초형식 선정 기준

구분	Mono pile	Gravity Type	Jacket	강관 pile	Suction Pile
입지특성	수심:양호 지반:불량	수심:불량 지반:불량	수심:불량 지반:양호	수심:양호 지반:양후	수심:양호 지반: 검토필요
기초특성	천해용 기초	천해용 기초	심해용 기초	대심도 연약층가능	대심도 연약층가능
경제성	약20억원	검토제외	약45억원	약32억원	약15억원
시공성	항타장비 미보유 대형선박 필요 시공경험 없음	대형단면 필요 대형바지 선 필요	시공경험 다수 전문인력, 장비보유 해상작업 최소화	대형 항타장비 불요 시공경험 및 전문인 력 보유	전문기술인 력 미보유 시공품질 확보 어려움
기타	항타중 소 음발생	부유사 발생	항타중 소음	항타중 소음	접속방안 검토 필요
검토결과	△	×	◎	◎	△

[서남해 해상풍력 실증단지 지지구조물 선정 평가 지표]

(다) 실증단지 하부구조물 Type 선정은 입지특성, 경제성 및 시공성 등 종합적 고려하여, 강관

Pile 및 Jacket Type 중심으로 검토 중에 있으며, 단지배치 확정 후 지질조사 결과를 반영하여 하부구조물 상세 설계 시 확정 예정임.

라. 해상풍력 타워-지지구조 설계기준

(1) 해상풍력 타워-지지구조 연결부란, 너셀을 지지하는 타워와 하부구조물 사이에서 타워의 하중을 하부구조물로 전달시키는 부분을 의미함.

(2) 해상풍력 발전설비에 대한 국내 설계기준으로는 한국선급(KR)에서 발간한『해상 풍력발전 시스템의 기술 기준(2011)』이 있음.

(3) 해외 기준으로는 노르웨이 선급(DNV)의『DNV-OS-J101』와 미국 API의 『API 2A-WSD』가 사용되고 있음.

(4) 해양 플랫폼에 관련 된 설계기준으로 ISO에서 발간한 『ISO 19902』와 『ISO 19903』가 있으며, 육상풍력 발전설비에 대한 설계기준으로는 일본토목학회(JSCE)의 『풍력발전설비 지지구조물 설계지침 · 동해설(2010)』이 적용되고 있음.

[국내·외 해상풍력 타워-지지구조 연결부 설계기준 비교 및 분석]5)

설계기준	KR	DNV	API	ISO 19902	ISO 19903	JSCE
설계법	한계상태 설계법	한계상태 설계법	허용응력 설계법	한계상태 설계법	한계상태 설계법	허용응력 설계법
사용재료	steel 타워 + steel 지지구조	steel 타워 + steel 지지구조	steel 타워 + steel 지지구조	steel 타워 + steel 지지구조	콘크리트 지지구조	steel 타워 + 콘크리트 지지구조
연결방법	볼트, 용접, 그라우팅	볼트, 그라우팅	볼트, 용접	볼트, 용접, 그라우팅	명시하지 않음	앵커볼트, 앵커링
대상	강구조	강구조	강구조	해상 플랫폼 (강구조)	해상 플랫폼 (강구조)	육상풍력
주요 특징						
해상풍력 타워-지지구조 연결부를 위해 KR, DNV, API, ISO 19902 기준은 Steel 타워와 Steel 지 지구조를 대상으로 하고 있음 ISO 19903 기준은 해상 콘크리트 플랫폼 설계기준을 다루고 있음 JSCE 기준은 Steel 타워와 콘크리트 지지구조를 이용한 1∽2MW 용량의 육상풍력발전설비를 대상으로 하고 있음 KR, DNV는 ISO는 허용응력 설계법을 적용하고 있는 반면, API와 JSCE는 허용응력 설계법을 적용하고 있음						

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 풍력타워 구조 및 진동해석

가. 풍력타워 일반사항

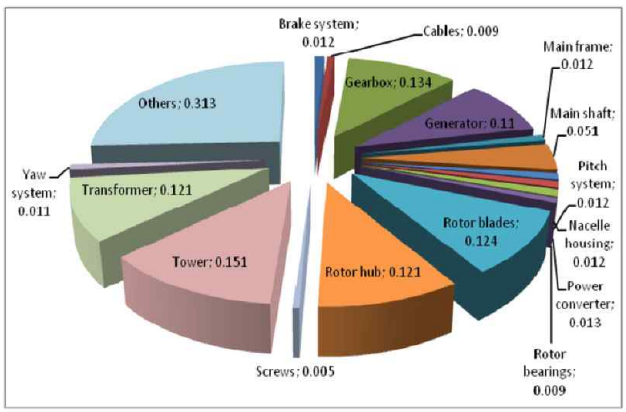
(1) 개요

(가) 풍력발전시스템에서 전기에너지를 생산하는 터빈구조물을 지지하기 위한 풍력타워는 너셀과 로터 등의 상부구조물을 일정 높이에 지지하여 풍부한 바람자원을 공급받을 수 있도록 함.

(나) 바람자원을 공급받기 위한 로터의 회전 시, 회전축의 역할을 수행하기도 하며 리프트나 전기설비 등에 대한 공간을 제공함.

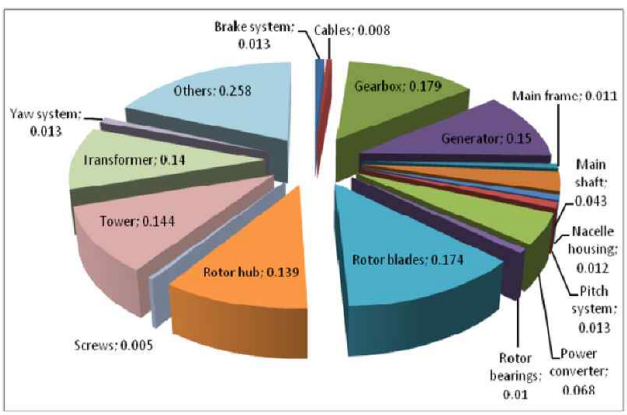
(다) 풍력발전시스템은 전력을 생산하기 위한 발전기 계통의 전기적 설비시설과 블레이드나 허브 등의 기계적 요소, 전체 시스템의 구조적 안전성을 확보하기 위한 구조적 요소 등으로 이루어짐.

(라) 전체 시스템을 구성하는 모든 요소들이 각각의 역할을 충분히 수행할 때 안정적인 전력생산이 가능하며 풍력발전시스템을 구성하는 요소들은 다양한 요인에 의해 결함이 발생함.



ID	Sub-assemblies	Failure rate (1/year)
1	Brake system	0.012
2	Cables	0.009
3	Gearbox	0.134
4	Generator	0.110
5	Main frame	0.012
6	Main shaft	0.051
7	Nacelle housing	0.012
8	Pitch system	0.012
9	Power converter	0.013
10	Rotor bearings	0.009
11	Rotor blades	0.124
12	Rotor hub	0.121
13	Screws	0.005
14	Tower	0.151
15	Transformer	0.121
16	Yaw system	0.011
	Others	0.313
$\lambda_{onshore}$		1.22

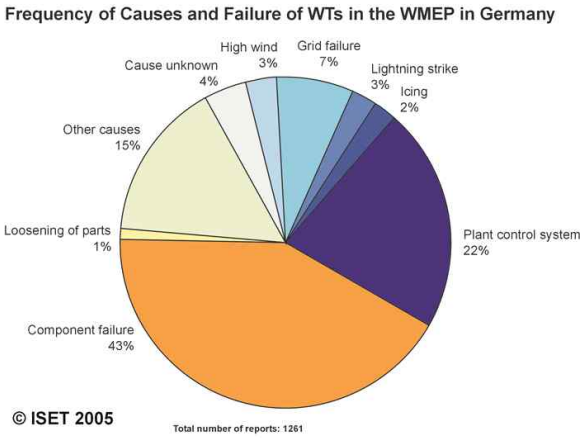
[육상풍력시스템 구성요소의 결함 발생률]



ID	Sub-assemblies	Failure rate (1/year)
1	Brake system	0.013
2	Cables	0.008
3	Gearbox	0.179
4	Generator	0.150
5	Main frame	0.011
6	Main shaft	0.043
7	Nacelle housing	0.012
8	Pitch system	0.013
9	Power converter	0.068
10	Rotor bearings	0.010
11	Rotor blades	0.174
12	Rotor hub	0.139
13	Screws	0.005
14	Tower	0.144
15	Transformer	0.140
16	Yaw system	0.013
	Others	0.258
$\lambda_{offshore}$		1.38

[해상풍력시스템 구성요소의 결함 발생률]

(마) 풍력발전시스템의 고장이나 사고를 유발하는 요인들 가운데 구조적 측면으로는 구조적 요소의 결함, 전기 · 기계적 측면에서는 발전기 제어계통의 오류나 전력망의 손상 등이 있으며, 외적 요인으로는 강풍이나 낙뢰 등이 있음.



[풍력발전시스템의 주요 결함 요인]

(바) 풍력발전시스템을 구성하는 요소들 가운데 타워 구조물은 모든 시스템을 안정적으로 지지하는 구조적 요소로써 풍력타워의 파괴는 곧 시스템의 전체 파괴를 유발함.



[풍력타워 붕괴사례]

(사) 풍력타워구조의 특성상 다른 구조물에 비해 세장하며 지속적이고 불규칙적인 횡방향 풍하중이 작용하는 관계로 잦은 진동이 발생함.

(아) 타워에 발생되는 진동은 볼트 연결부에 대해 지속적인 하중을 작용시키며 볼트의 풀림 또는

피로파괴를 유발할 수 있음.

(자) 풍력타워의 용접부는 용접재 뿐만 아니라 취성화된 용접부 주변에 대해 피로파괴에 취약한 특성이 있으며 용접부에 크랙이 발생하기 시작하면 더 큰 응력집중을 유발시키며 구조물의 피로수명을 현저히 단축시킬 수 있음.

(차) 크랙이 발생한 용접부는 타워의 진동으로부터 더욱 큰 영향을 받아 성장하며 일정 크기 이상의 크랙은 타워구조물의 붕괴를 유발함.

(카) 타워에 발생되는 진동은 볼트 연결부와 용접 접합부 등 피로에 취약한 요소들에 대해 손상을 누적시키게 되며 볼트, 용접 연결부의 풀림과 파괴를 유발할 수 있음.

(타) 본 연구에 의한 제진장치를 이러한 풍력타워에 적용하면, 풍력터빈타워의 구조적인 안전성과 피로하중감소를 통한 내구성을 향상 시킬 수 있음.



(a) Tower fractured section.

(b) Fracture of connected bolts on flange.

(c) Scattered bolts of collapsed tower.

(d) Fractured bolts.

[볼트 전단에 의한 타워 사고사례(2008, Taiwan)]



[타워 용접부에 발생한 크랙]



[용접부의 피로파괴로 인한 붕괴]

(2) 풍력타워의 형태

(가) 풍력타워는 일반적으로 Lattice Type, Tubular Type, Hybrid Type의 형태로 설계됨.
(나) 최근 개발 중인 대용량 풍력타워의 경우 Tubular Type의 타워를 선호함.

① Lattice Tower
㉮ 트러스나 프레임구조가 볼트와 용접에 의해 접합된 구조.
㉯ 재료의 소요량이 적어 초기비용이 적은 반면, 접합부가 많아 시공비와 유지관리비가 크게 소요됨.

② Tubular Tower
㉮ Hollow Section을 가진 Pipe 단면을 가지는 구조.
㉯ 리프트나 전기설비의 보관 등에 대한 중공부의 활용성이 우수함.
㉰ Lattice Type에 비해 초기비용이 많이 소요되지만 연결부에 대한 의존성이 적어 유지관리가 수월함.
㉱ 미관적으로 우수함.

③ Hybrid Tower
㉮ Steel Tubular, Concrete, Truss, Wire 등 여러 가지 복합적인 구조로 결합된 타워임.
㉯ 설치지역 주변환경의 영향을 고려하여 설계되며 다양한 형태로 개발이 진행되고 있음.


[Lattice Tower]


[Tubular Tower]


[Hybrid Tower]

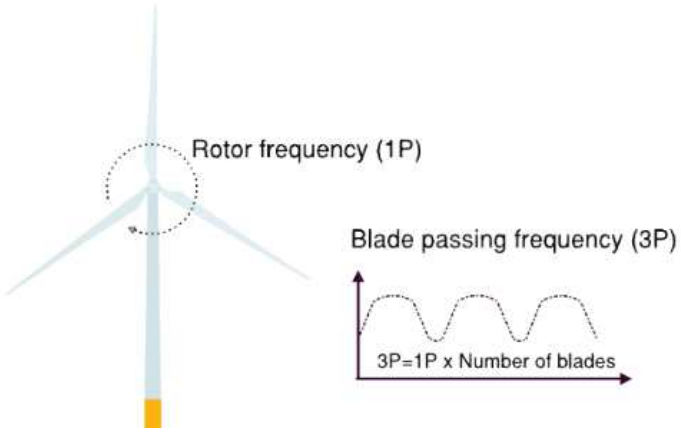
(3) 제조사 별 풍력터빈 개발 현황
(가) 국내외 풍력터빈 제조사들에 의해 3MW급 이상의 다양한 풍력터빈이 개발되고 있으며 터빈의 대용량화가 진행되고 있음 (출처 : 4C Offshore).
(나) 대부분의 풍력터빈은 로터직경이 80m이상, 로터회전수는 4~20 rpm, 터빈의 작동풍속은 4~25m/s의 범위에 포함되고 있음.

(4) 풍력타워의 진동특성
(가) 풍력발전시스템은 로터와 너셀을 포함한 전력생산구조물인 상부구조물과 타워, 하단의 기초구조물로 구성됨.
(나) 타워에 작용하는 주요 하중은 블레이드에 작용하는 풍하중과 타워에 직접적으로 작용하는 풍하중, 해상풍력의 경우 파랑하중이 작용할 수 있으며, 지진발생위험지역에서는 지진하중

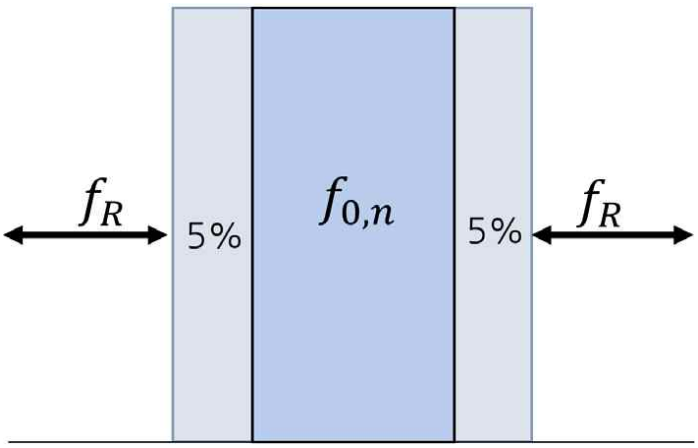
이 작용하게 됨.

(다) 풍력발전타워의 진동에 대한 설계는 일반구조물과 다르게 터빈운용 중 주기적인 하중으로 인한 공진을 회피하여 설계함.

(라) GL Wind Guideline에서는 풍력타워의 설계 시 아래와 같이 블레이드 회전에 따른 운용하중과의 공진을 회피할 수 있도록 요구하며, 풍력터빈의 RPM(Revolution per Minute)을 기준으로 로터가 한 바퀴 회전하는 진동수를 1P, 3개의 블레이드 통과 진동수를 3P라고 정의함.



[회전주파수 1P 및 3P의 정의]



[터빈 진동수에 따른 안전율 및 공진 회피 진동수]

$$\frac{f_R}{f_{0,n}} \le 0.95 \quad \text{or} \quad \frac{f_R}{f_{0,n}} \ge 1.05 \qquad (6.6.1)$$

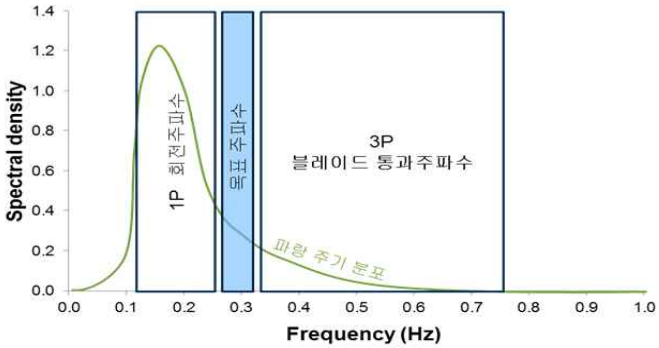
$$\frac{f_{R,m}}{f_{0,n}} \le 0.95 \quad \text{or} \quad \frac{f_{R,m}}{f_{0,n}} \ge 1.05 \qquad (6.6.2)$$

where:

f_R maximum rotating frequency of the rotor in the normal operating range

$f_{R,m}$ transition frequency of the m rotor blades

$f_{0,n}$ n-th natural frequency of the tower



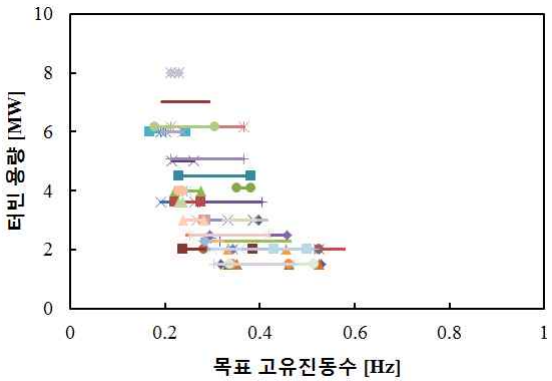
[터빈의 회전 주파수에 따른 타워의 공진회피 목표 주파수]

(마) Vestas사의 V90-3.0MW Specification에서는 아래 표와 같이 1P 및 3P Rotor 주파수 범위를 규정함.

[Vestas사에서 규정한 Rotor 회전 주파수]

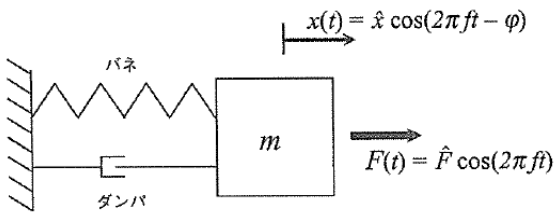
Rotor Rotation	1P	3P
Frequency [Hz]	0.17~0.27	0.51~0.81

(바) 3MW급 이상의 터빈에 대해 목표 고유진동수를 조사한 결과는 아래 그림과 같으며, 터빈이 대용량화 될수록 목표 고유진동수대역이 좁아지는 경향을 보임.



[터빈의 용량별 목표 고유진동수]

(사) 풍차 구조의 동특성 모델은 아래 그림과 같이 질량-스프링-댐퍼의 1자유도계로 표현할 수 있음.



[1자유도의 질량-스프링-댐퍼계]

(아) 질량에 조화 가진력 F(t)가 재하되는 경우, 그 결과로서 얻어지는 변위 x의 크기와 위상은 가진 주파수 f의 영향을 강하게 받게 되며, 아래 그림에 나타낸 것처럼 정상 상태의 응답에 따라 3개의 영역으로 분류됨.

① 준정적

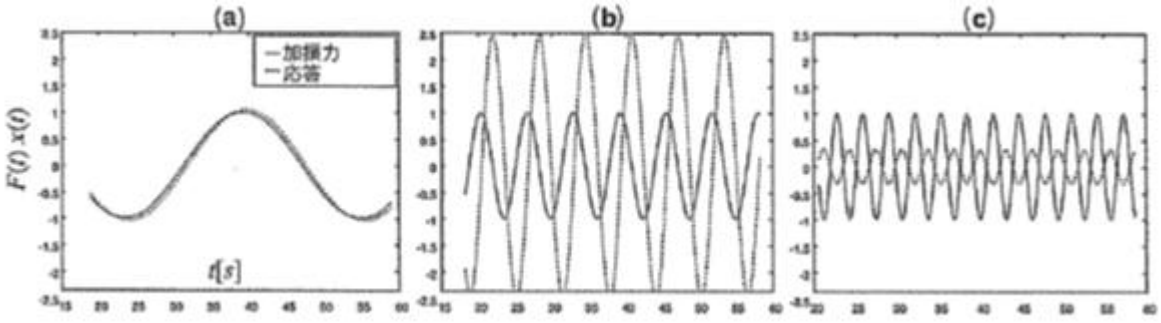
– 가진주파수가 계의 고유진동수보다 충분히 작은 경우, 아래 그림(a)와 같이, 준정적인 응답이 되며, 질점의 변위는 정적인 하중에 응답하는 것과 같이 하중의 시간변화에 즉각 응답함.

② 공진

– 아래 그림(b)에 계의 고유진동수 부근의 인접한 주파수로 가진한 경우의 일반적인 응답을 나타낼 수 있으며, 이 영역에서는 강성력과 관성력이 거의 상쇄되어, 응답이 정적인 경우의 수배에 달함. 이 때의 진폭은 계의 감쇠에 좌우됨.

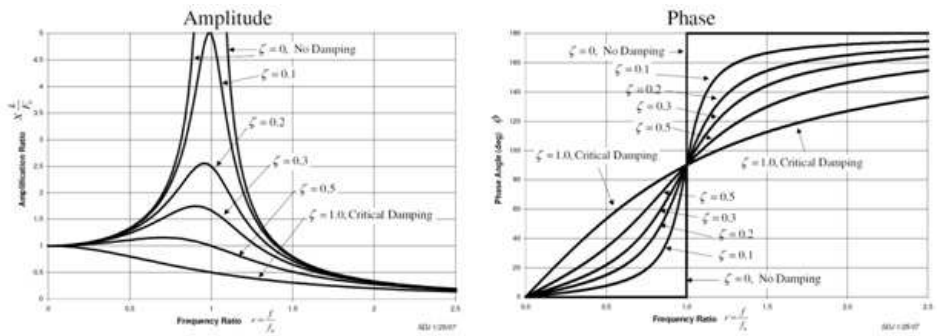
③ 관성지배

– 가진주파수가 고유진동수보다 충분히 큰 경우에는 응답은 가진을 추종할 수 없음. 그 경우 아래 그림(c)와 같이 역위상의 작은 응답이 되며, 이 경우 관성항이 지배적임.



[가진진동수와 응답의 관계]

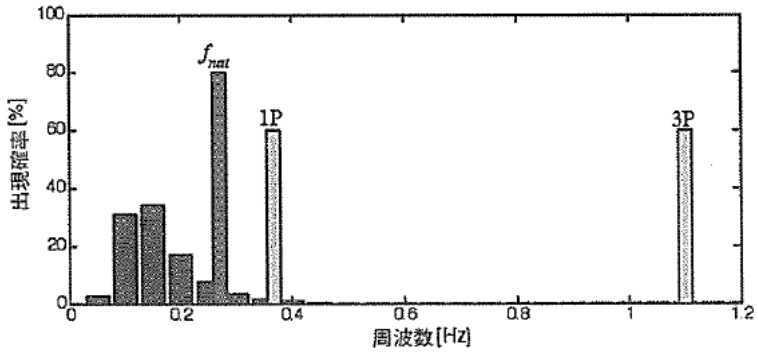
(자) 아래 그림은 선형계의 정상상태에서 입력(정현파)에 대한 출력의 진폭과 위상 변화의 일반예임. 선형계의 응답의 크기와 위상의 특성은, 동적증폭률(DAF: Dynamic Amplification Factor)과 대응하는 위상지연으로 나타낼 수 있음. 여기서, DAF는 동일 하중의 정적응답에 대한 동적응답의 비를 나타냄. 아래의 그림에서 피크는 구조계의 고유진동수에 대응함. 또한, 피크의 크기는 감쇠에 의해 결정되기 때문에, 바람직하지 않은 공진은 적당한 감쇠를 부가하는 것에 의해 억제할 수 있음. 동특성에 있어서는 진폭과 마찬가지로 주파수가 중요하고 공진시의 거동에 의해 심한 하중을 발생시켜, 고장의 원인이 될 가능성도 있지만, 가장 우려되는 것은 피로손상임. 동적인 거동이 문제를 일으킬 가능성이 있는 구조에서는 가진주파수와 고유진동수에 관한 상세한 정보가 중요함.



[동증폭계수와 위상 지연]

(차) 해상풍력타워는 파랑에 의해서도 가진되며, 일반적으로, 파의 주파수는 로터 속도보다도 낮으며 다양한 주기의 성분을 갖음. 네덜란드 연안의 파랑의 평균주파수의 분포를 아래 그림에 나타냈으며 막대 그래프는 각 주파수성분의 1년간 상대적인 출현 빈도를 보여줌. 아래

그림에서 파랑의 주요 진동수는 1P 아래에 분포되어 있어, 블레이드 회전과의 공진을 피하기 위해 풍력타워의 고유진동수를 회전속도보다 낮게 설계하면, 이 경우 파랑과 공진이 중요하게 됨. 본 연구에서 대상으로 하는 풍력타워의 고유진동수는 1P와 3P 사이로 설정하고 있으므로, 파랑에 의한 가진은 풍하중에 의한 가진에 비해 중요하지 않다고 할 수 있음.



[파랑 진동수와 풍력타워의 진동수]

(카) 장기간의 관측값에 따라, 풍속의 시간변화는 년에서 초에 상당하는 주파수 스펙트럼으로 표현할 수 있음. 이것을 Van der Hoven Spectrum이라 하여 아래 그림과 같이 나타냄.

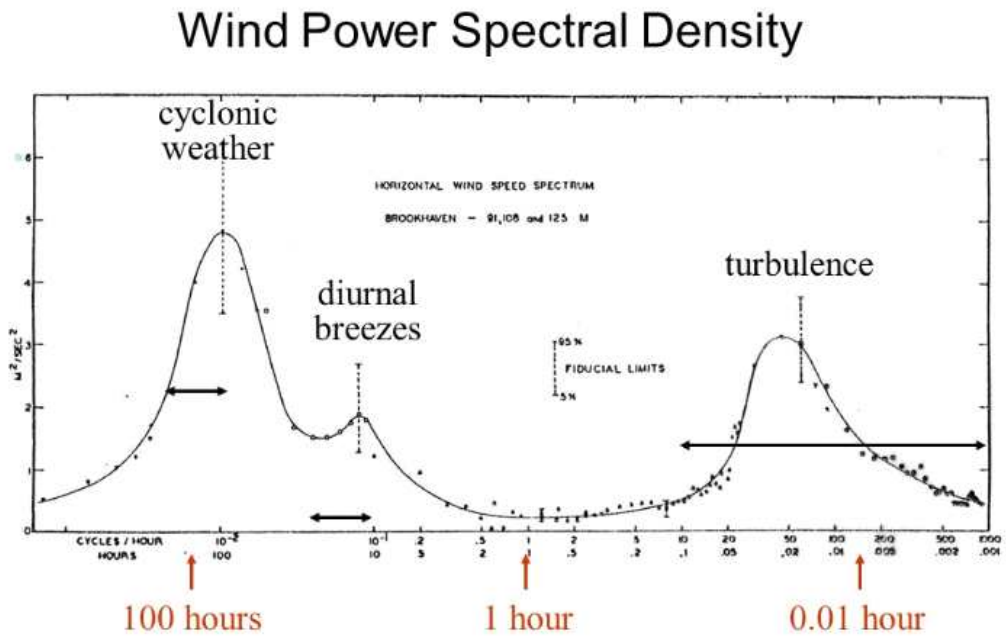


그림8-13 풍속의 주파수 스펙트럼

그림 좌측의 영역에는 연변화, 기압변화, 주야의 변화가 보이며, 또한 우측의 영역에는 난류의 영향이 보임 주기의 1시간 근방의 Van der Hoven의 Gap은 스펙트럼 갭으로 알려져, 이것에 의해 변화의 느림과 빠름이 구별됨. 위의 그림과 같이 바람의 스펙트럼은 매우 넓은 주파수 범위에 분포하고 있어, 풍력타워 설계시 공진영역을 피하여 설계하는 것을 불가능함. 이에 따라, 풍력타워 설계 후 풍하중에 대한 풍응답을 검토하는 것이 필수적임.

나. 풍력타워 해석모델

-3MW 및 7MW급 풍력터빈타워가 상용화되고 설계 중인 모든 타워 구조물에 일반화된 풍력터빈타워모델을 설계하기에는 어려움이 존재함으로, 본 연구과제에는 3MW급의 경우, 국내·외에서 가장 큰 점유율을 차지하고 있는 Vestas사의 3MW급 풍력터빈타워 중에 대형 풍력터빈의 80%를 차지하고 있는 간접 구동 형석(Geared Type)으로 구성된 V90-3.0MW를 모델로 채택하였고, 7MW급의 경우, 풍력터빈타워의 사양 및 규격을 상대적으로 수집하기 용이하고 본 연구과제의 국내 사업화를 위해 삼성중공업에서 개발한 Samsung Heavy Industries -7.0MW를 선정하여 진행함.

(1) Vestas V90-3.0MW 풍력터빈

(가) 풍력터빈타워 제원 및 특성

① Rotor
- Diameter: 90 m
- Swept area: 6362 m2
- Speed, nominal power: 16.1 RPM Speed, Dynamic operation range
- rotor: 9.9 - 18.4 RPM
- Rotational direction: Clockwise (front view)
- Orientation: Upwind
- Tilt: 6°
- Blade coning: 4°
- Number of blades: 3
- Aerodynamic brakes: Full feathering

② Hub
- Type: SG Cast Iron
- Material: GJS-400-18U-LT
- Weight: 8500 kg

③ Blades
- Principle: Airfoil shells bonded to supporting beam
- Material: Fibreglass reinforced epoxy and carbon fibres
- Blade connection: Steel root inserts
- Air foils: RISØ P + FFA-W3
- Length: 44 m
- Chord at blade root: 3.512 m
- Chord at blade tip: 0.391 m
- Twist (blade root/blade tip): 17.5°

④ Bearings

- Type: 4-point ball bearing

⑤ Sensors

㉮ Lightning Detector

- Appellation: Lightning detector
- Signal: Optical Analogue

㉯ Wind Sensor

- Appellation: Ultrasonic wind sensor, (2 units)
- Signal: RS485/optical
- Accuracy: +/- 0.1 m/s, less than 5 m/s
  +/- 2%, more than 5 m/s

㉰ Smoke

- Appellation: Smoke detector
- Signal: Digital 24 V

㉱ Movements and Vibrations

- Appellation: Accelerometer, tower
- Signal: RS485

⑥ Generator(60Hz)

Rated power	3.0 MW
Type	Asynchronous with wound rotor, slip rings and VCRS
Voltage	1000 VAC
Frequency	60 Hz
No. of poles	4
Class of protection	IP54
Rated speed	1758
Rated power factor, default at 1000 V	1.0
Power factor range at 1000 V	0.98CAP - 0.96IND

⑦ Transformer

Type	Cast resin
Rated Power	3160 kVA
High voltage	10 - 34.5 kV
Frequency	60 Hz
Vector group	Dyn
HV - Tappings	±2 x 2.5%
Low voltage	1000 V
Power at 1000 V	3326 kVA
Low voltage	400 V
Power at 400 V	168 kVA

⑧ Switch Gear Electrical Characteristics

㉮ Feeder Function

Rated voltage [kV] (Max. system voltage)	27	38
Rated current [A]	600	600
Short time withstand current (1 or 3 s) [kA]	25	25
Power frequency (1 min) [kV]	50	50
Lightning impulse [kV]	125	150
Making capacity [kA]	40	40
Mainly active current [A]	600	600

㉯ Circuit Breaker Function

Rated voltage [kV] (Max. system voltage)	27	38
Rated current [A]	600	600
Short time withstand current (1 or 3 s) [kA]	25	25
Power frequency (1 min) [kV]	50	50
Lightning impulse [kV]	125	150
Making capacity [kA]	40	40
Breaking capacity [kA]	25	25

⑨ Yaw System

- Type: Plain bearing system with built-in friction
- Material: Forged yaw ring heat-treated. Plain bearings PETP
- Yawing speed: < 0.5° /sec

⑩ Yaw Gears

- Type: 4-step planetary gear with motor brake
- Motor: 2.2 kW, 4 pole, asynchronous

⑪ Gearbox

- Type: 2 planetary stage + 1 helical stage
- Type no.: EF901AE55-K1
- Shaft distance: 461 mm
- Ratio: 1:109.0 (60 Hz)

⑫ Parking Brake

- Type: PZ.I.4420.2802.10
- Brake Pad type: MPM 030
- Supply: Separate hydraulic pump unit

⑬ Hydraulics

- Pressure: 250 bar
- Placement: The complete hydraulic system is mounted in the hub

⑭ Cooling System

Gear oil cooling	2 water/air cooling units located above the transformer room. Connected to the oil/water heat exchanger located by the gear oil tank
Generator cooling	2 water/air coolers located above the transformer room
Nacelle cooling	Cooling of the nacelle is done by leading air through the glassfibre floor behind the tower.

⑮ Nacelle Bedplate

Front part	Spheroidal graphite iron GJS 400 18U LT, Foundation for gear, generator, yaw bedding, crane-girders and rear foundation
Weight	8500 kg
Rear part	Welded gratings integrated with crane girders,Foundation for electrical panels, transformer and cooling room

⑯ Nacelle

- Material: Fibreglass

⑰ Tower

Type	Conical tubular
Material	S355
Surface treatment	Painted
Corosion class, outside	C4 (ISO 12944-2)/offshore C5-M
Corosion class, inside	C3 (ISO 12944-2)/offshore C4
Top diameter for all towers	2.3 m
Bottom diameter for all towers	3.98 m
3-parted, modular tower(hub height)	80 m

The exact hub height listed includes 0.55 m distance from the foundation section to the ground level and 2.0 m distance from the tower top flange to the hub center

⑱ Weight and Dimensions

㉮ Nacelle

• Including hub and nose cone

Length	13.25 m
Width	3.6 m
Height	4.05 m
Weight	88000 kg +/- 3000 kg

• Without hub and nose cone

Length	9.65 m
Width	3.6 m
Height	4.05 m
Weight	68000 kg +/- 2000 kg

㉯ Gearbox

Length	2100 mm
Diameter	2600 mm
Weight max	23000 kg

㉰ Generator

Length max	2800 mm
Diameter max	1100 mm
Weight max	8500 kg

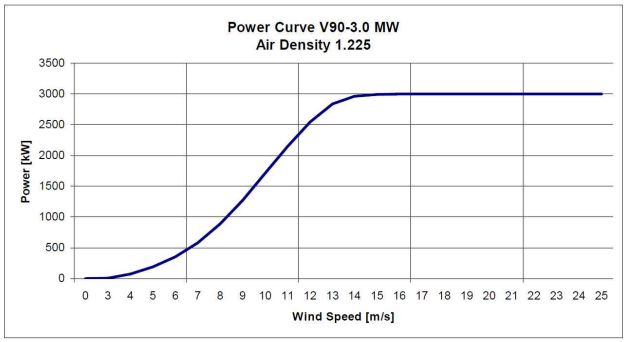
㉱ Transformer

Length	2340 mm
Diameter	1090 mm
Height	2150 mm
Weight max	8000 kg

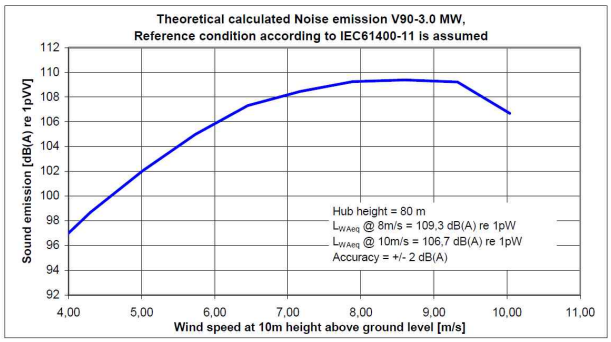
㉲ Rotor Blades

Length	44 m
Weight	6600 kg/pcs +/- 400 kg.

⑲ Vestas V90-3.0MW급 풍력터빈타워에서 60MW, 109.4dB(A) 조건에서의 풍속 별 Power 출력 사양과 Noise Emission는 아래의 그래프와 같음.



[Power Curve for Vestas V90-3.0MW(60Hz,109.4dB(A))]



[Noise Emission for Vestas V90-3.0MW(60Hz,109.4dB(A))]

(나) 타워모델

① 풍력타워의 경우 동일한 터빈 구조물을 지지하기 위한 경우라도 주변 환경과 지역 조건을 고려하여 상이하게 설계될 수 있음.
② 타워의 구조해석을 위한 기본 모델로써 Vestas사의 3MW급 터빈을 지지하는 풍력타워를 선정.
③ 타워는 총 길이 76.11m, 27개의 구간으로 나누어진 Beam요소를 이용하여 모델링하였으며 상부 구조물 RNA(Rotor Nacelle Assembly)은 147.3ton의 질량을 가짐.

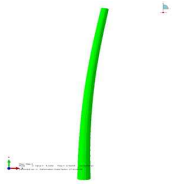
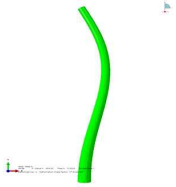
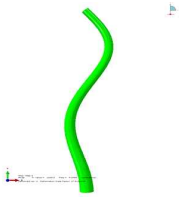
[타워 모델에 대한 기본사항]

Young's Modulus	Density	RNA Mass	Total Height
[Gpa]	[kg/m3]	[ton]	[m]
210	7850	147.3	76.11

(다) 대상모델 고유치 해석

① 해당 풍력타워의 목표 고유진동수대역은 약 0.32 ~ 0.41Hz이며, 상기 해석모델을 바탕으로 고유진동수 해석을 수행함.
② 해석에 사용된 프로그램은 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS이며, 상단의 터빈구조는 집중질량, 하단 지점 부는 고정단의 경계조건을 사용함.
③ 풍력타워 해석모델의 고유진동수 해석 결과 1차 고유진동수는 약 0.3616Hz로 목표 고유진동수 대역인 0.32 ~ 0.41Hz 사이에 있으며 로터 회전과의 공진에 대해 안전한 것으로 확인됨.

[고유치해석 결과]

FEM 해석모델 (3MW급 모델)	1st Mode (0.3616Hz)	2nd Mode (3.2014Hz)	3rd Mode (9.0984Hz)
			

④ RNA / Tower 질량비에 따른 고유진동수 비교실시

㉮ 풍력터빈 및 타워는 제작사나 설계자에 따라 다양한 질량을 가질 수 있음.

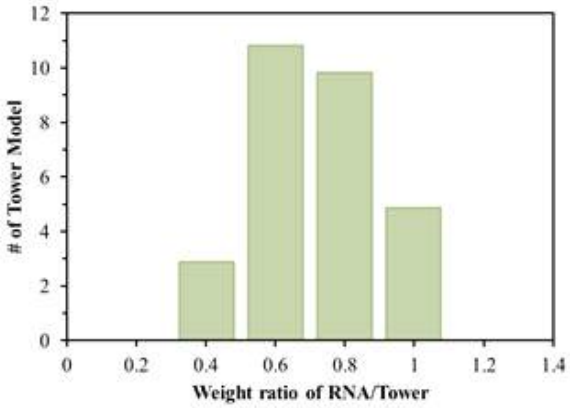
㉯ 설치된 강재 풍력타워 30가지에 대해 RNA와 타워의 질량비를 분석해본 결과 RNA/Tower 질량비는 0.4 ~ 1 사이에 분포함.

㉰ 기존의 타워에 제진장치(TMD)가 설치되는 경우 RNA 질량이 증가하게 되며 이러한 질량비가 고유진동수에 미치는 영향을 살펴보기 위해 질량비 0.4 ~ 1.2 에서의 고유치해석(매개변수해석)을 수행함.

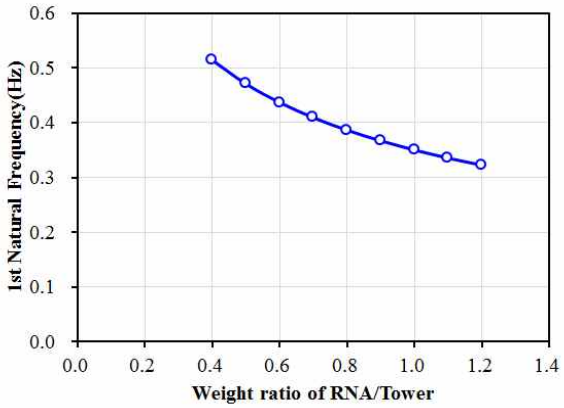
㉱ 2차 이상의 진동모드에 대해 RNA와 타워의 질량비의 차이는 큰 영향을 미치지 않음

㉲ 1차 고유진동수의 경우 RNA와 타워의 질량비에 따라 민감하게 변화함.

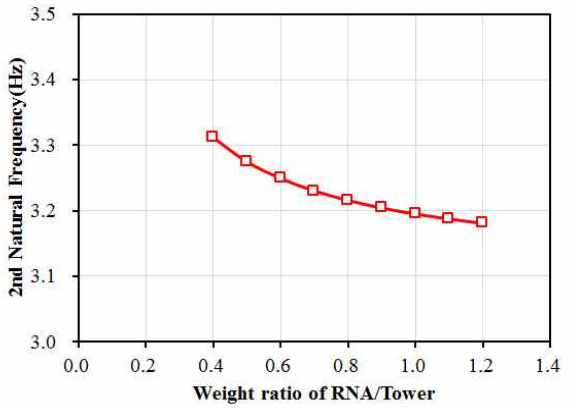
㉳ 타워의 진동모드 가운데 고차모드에 비해 1차 모드의 중요성이 크기 때문에 기존의 시공된 타워의 경우 RNA의 질량을 조절하는데 주의가 요구됨.



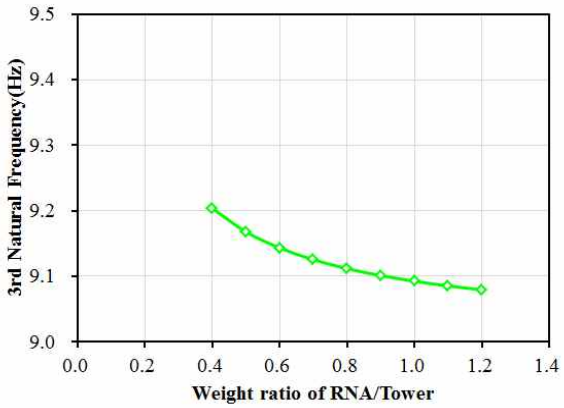
[RNA/Tower 질량비 분포]



[RNA/Tower 질량비에 따른
1차 고유진동수 분포]



[RNA/Tower 질량비에 따른
2차 고유진동수 분포]



[RNA/Tower 질량비에 따른
3차 고유진동수 분포]

(2) Samsung Heavy Industries -7.0MW 풍력터빈

(가) 풍력터빈타워 제원 및 특성

① Generator/ Converter

㉮ Nominal Operating Condition for Generator

Item	Unit	Value
Type of generator	-	PMG
Rated power output of generator (at point F according Figure 7)	MW	7.350
Nominal terminal voltage	V	3300
Power factor	-	0.93
Efficiency	%	98.3% (at rated)
Rated generator speed	rpm	400
Maximum instantaneous output shaft speed while generating	rpm	480
Maximum instantaneous output shaft speed not generating	rpm	600
Rated torque of generator	kNm	179
Cooling type	-	IC86W
Survival temperature	° C	-20 to 60
Operating temperature	° C	-10 to 50
IP protection	-	IP 54
Insulation class/Temp. rise	-	F/80K
Duty cycle	-	S1(continuous)

㉮ Cooling System

Voltage	380~420[Vac]
Speed	1,465[rpm]
Mechanical power	5.5[kW]
Current	11.4[A]
Power factor	0.82

㉯ Converter

Item	Unit	Value
Nominal grid voltage (at point C according Figure 7)	kV	3.3
Nominal power (at point C according Figure 7)	MW	7.0
Nominal grid frequency	Hz	50/60
Voltage variation (at point A according Figure 7)	%	+/- 10
Frequency variation (at point A according Figure 7)	%	+/- 2.5
Overload current	A	1600
Type	-	IGCT
Switch frequency	Hz	0~1000
du/dt filter	V/us	1500
Location	-	Tower
IP protection	-	IP 54
Efficiency	%	97.7 (at rated)
Cooling water inlet temperature (Power derating according Figure 8)	° C	-10 to 55
Converter room temp for operation	° C	-10 to 50
Brake chopper resistor rating	MJ	2 X 15

② Gear box

Item		Specification
Gearbox type		Medium output speed (400 rpm) 3-stages (2 differential + 1 planetary)
Gear ratio		37.74
Type of Lubrication		Forced oil circulation for both gearbox and main bearings
Mounting interface	To main shaft	Partially (1st & 2nd stage) inserted into the main shaft with rigid connection
	To main frame	Torque reaction flange

③ Pitch System

Item	Value
Certification requirement	IEC 61400-3 : Design requirements for offshore wind turbines
Type	Electric, 400V(3-phase), 60Hz
Pitch drive	Inverter controlled AC motor and gearbox with pinion gear
Actuator control type	IPC
Travel range during operation	0 to 90 deg
Travel range during assembly	360 deg
Number of pitch drives per turbine	6

④ Transformer

Item	Value
Type	3 phase, Dry Type/Cast Resin
Transformation relation	33,000V/3,300V
Nominal power	8560 [kVA]
Frequency	60[Hz]
Connection group	YNd11
Insulation class (HV/LV)	H/H
E/C/F class	E2/C2/F1
BIL (HV/LV)	170 / 40kV
Weight (approx.)	13,000 [kg]
Standard	IEC 60076-11

⑤ Yaw bearing

Item	Specification
Yaw bearing type	Double row ballbearing (external gear)
Yaw bearing lubrication	- Manual greasing
Yaw gear teeth lubrication	- Yaw open gear pinion: 4 EA Progressive auto lubrication system for yaw gear teeth

⑥ Yaw drive

Item	Specification
Yaw drive type	Multi-stage planetary gearbox with electrical motor
Gear Ratio	1:1477
Motor protection grade	IP54
Number of yaw drive	10 EA

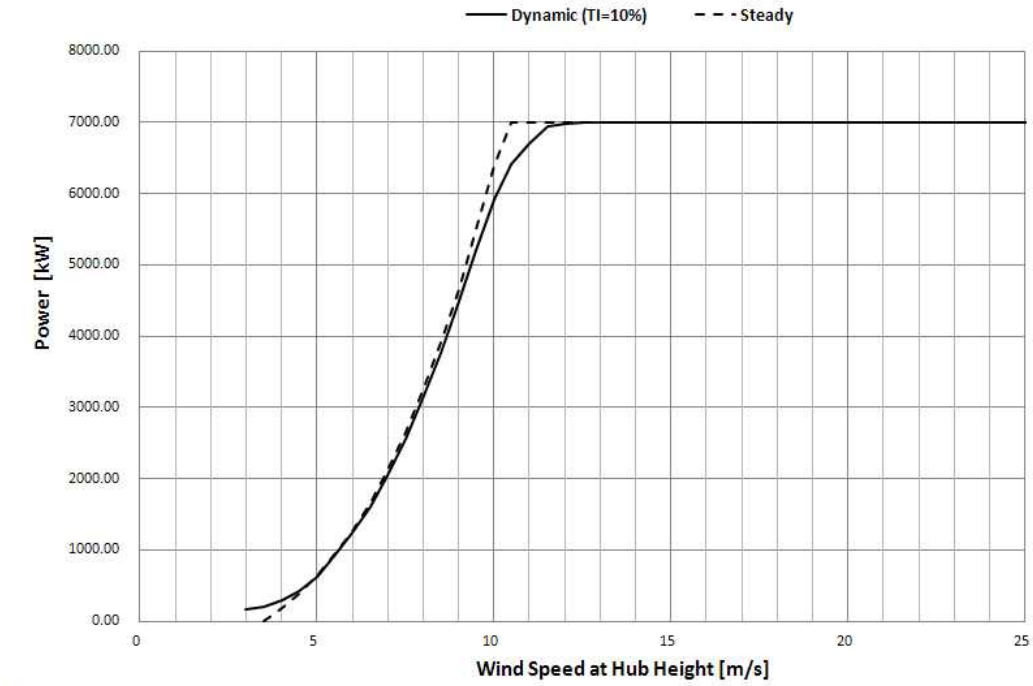
⑦ Tower

Height	Weight	Shape	Diameter	# of Sections
80m	450 ton	Conical	5,880mm @top 7,000mm @Bot	2 (Upper 36.5m/Lower 43.5m)

⑧ WTG size and Weight

Item		Dimension	Weight
Hub height		110m (m.s.l)	-
Rotor diameter		171.2m	-
Main Component	Blade	83.5m	116.3 ton
	Hub	5.15m x 4.85m x 4.5m	56.0 ton
	Gearbox	Φ3.96m x 3.48m	63.7 ton
	Generator	3.2m x 3.0m x 3.4m	27.5 ton
	Main bearing	3.25m x 3.68m x 0.205m	9.9 ton
	Main frame	8.16m x 7.05m x 5.16m	73.9 ton
Rotor Assembly		5.15m x 4.85m x 4.5m	95 ton
Nacelle Assembly		17m x 9m x 8m	327 ton
Top Head Mass		-	538 ton
Tower Assembly		80m	484 ton
WTG Total		-	1,022 ton

⑨ Samsung Heavy Industries -7.0MW급 풍력터빈타워에서 풍속 별 Power 출력 사양과 Noise Emission는 아래의 그래프와 같음.



[Power Curve for Samsung Heavy Industries-7.0MW]

V_{Hub} [m/s]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
PWL [dBA]	101.1	101.8	105.1	107.9	110.6	113.2	113.9	112.8	112.9	113.5	113.6	113.7

· V_{Hub} : Hub height wind speed, PWL : Sound Power Level

[Noise Emission for Samsung Heavy Industries-7.0MW)]

(나) 타워모델

① 타워의 구조해석을 위한 기본 모델로써 삼성 중공업의 7MW급 터빈을 지지하는 풍력타워를 선정함.

② 타워는 총 길이 80m, 허브 길이 110m(m.s.l : mean sea level), 너셀 높이는 8m이며, 상부 구조물 RNA(Rotor Nacelle Assembly)의 질량은 538ton, 타워 질량은 484ton(타워 순 질량 450ton, 타워 내 비구조물 34ton)임.

[타워 모델에 대한 기본사항]

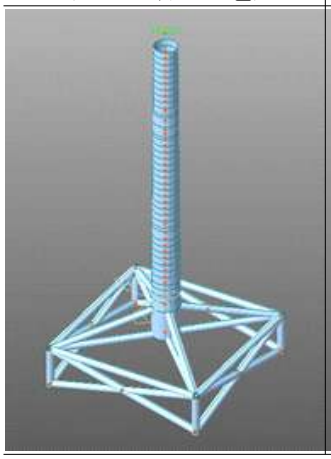
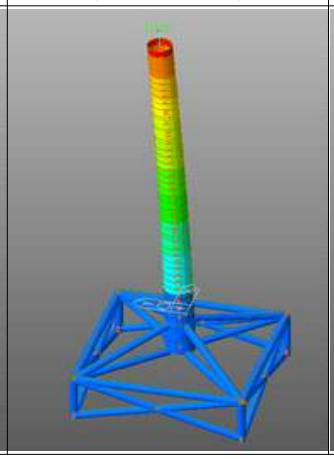
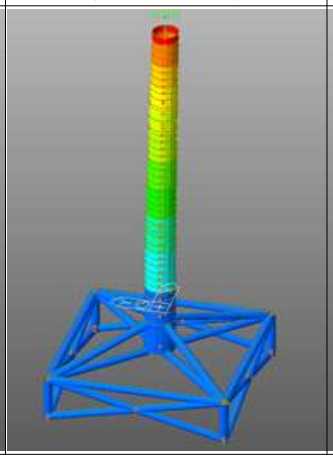
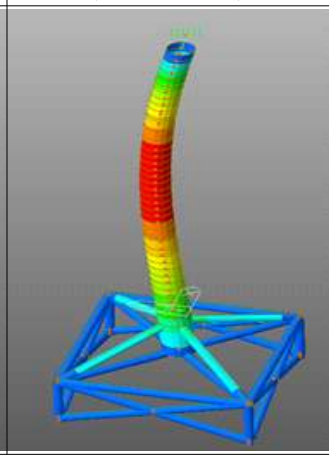
Young's Modulus	Density	RNA Mass	Total Height
[Gpa]	[kg/m3]	[ton]	[m]
210	7850	538	80

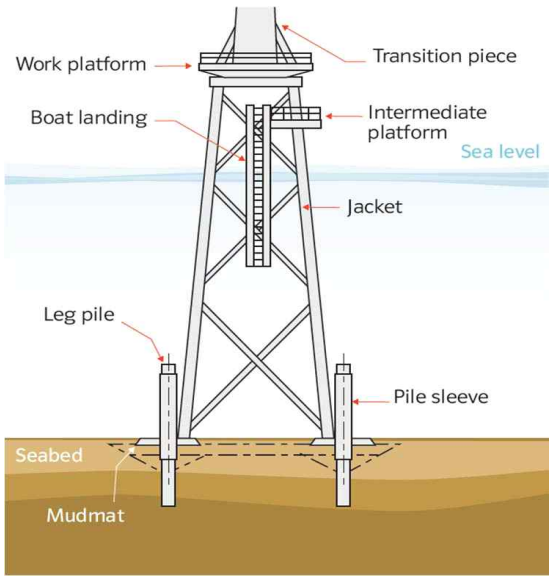
(다) 대상모델 고유치해석

① 해당 풍력타워의 목표 고유진동수대역은 약 0.18~0.3Hz이며, 상기 해석모델을 바탕으로 고유진동수 해석을 수행함.

② 해석에 사용된 프로그램은 구조해석 프로그램인 Midas Gen이며 상단의 터빈구조는 집중질량, 하단 지점 부는 타워를 지지하는 자켓 기초 설치하여 고정단의 경계조건을 사용함.

③ 풍력타워 해석모델의 고유진동수 해석 결과 1차 고유진동수는 약 0.2879Hz로 목표 고유진동수 대역인 0.18 ~ 0.3Hz 사이에 있으며 로터 회전과의 공진에 대해 안전한 것으로 확인됨.

FEM 해석모델 (7MW급 모델)	1st Mode (0.2879Hz)	2nd Mode (0.2879Hz)	3rd Mode (2.5397Hz)
			



[해상풍력타워에서의 자켓 기초]

다. 풍하중 산정을 위한 풍력타워 풍동실험

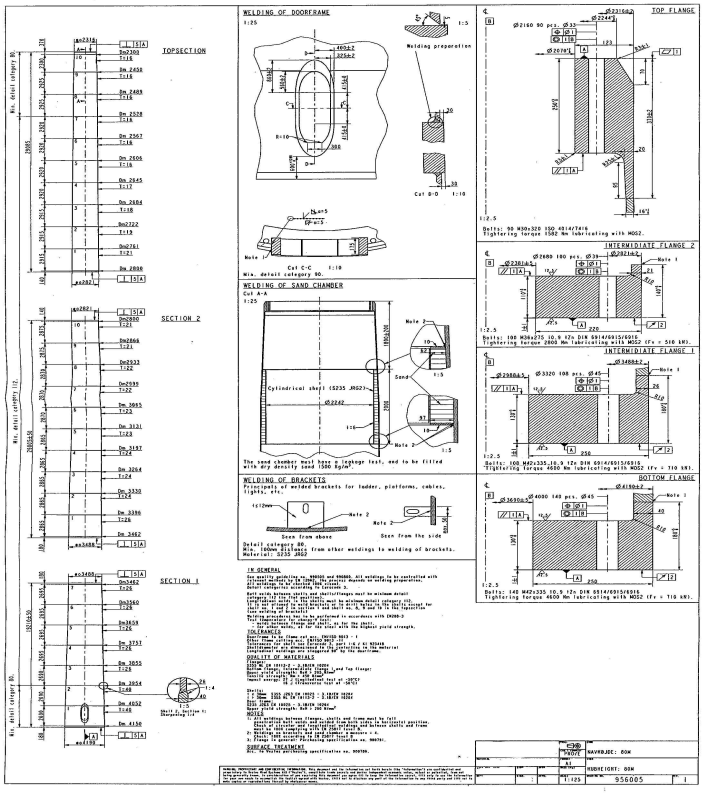
(1) 풍력터빈타워 제원

(가) 풍동실험 모형으로써 Vestas사의 3MW급 해상풍력터빈타워을 적용함.

(나) 전체질량 : 약 150톤, 로터직경 : 90m, 타워높이 : 80m



[풍동실험 대상 풍력터빈타워의 제원]

품명	제원 [m]			질량 [ton]
	L	W	H	
너셀 (기어박스, 발전기 및 변압기 포함)	9.65	3.6	4.05	107.5
너셀 (기어박스, 발전기, 변압기, 허브 및 노우즈콘 포함)	13.25	3.6	4.05	127.5
블레이드 1개	44	약 2.4	Chord at blade root : 3.512 Chordatbladetip:0.391	6.6
	Twist (blade root/blade tip) : 17.5도			
타워				약 150

(2) 풍동실험 조건

(가) 실험 CASE

타워작동 조건	블레이드 피치각[도]	허브높이 풍속[m/s]	허브높이 난류강도[%]	블레이드 회전각[도]	풍향[도]
정상상태 사용조건	0	15	ESDU (sea)	0, 20, 40, 60	0~180(10도 간격)
극한상태 사용조건	93	50년 재현주기풍속	ESDU (sea)	0, 20, 40, 60	0~180(10도 간격)

(나) Wind profile

① 모형제작

㉮ Blade-Nosecorn 일체모형

- Blade 피치 0°, 93° 각각 제작
- 3-D 가공 요함
- Blade-nosecorn 일체모형은 타워 너셀부에 탈부착, 로타면으로 회전이 가능한 형태

㉯ Tower-nacelle 일체모형

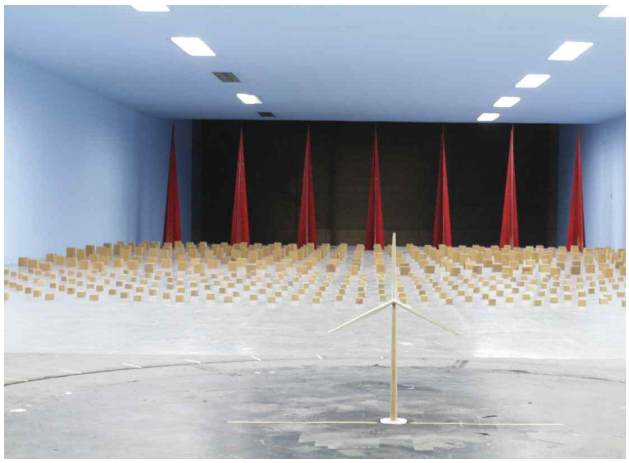
- Tower는 경량이며 강성이 최대한 크게 제작함.

[데이터 계측 조건]

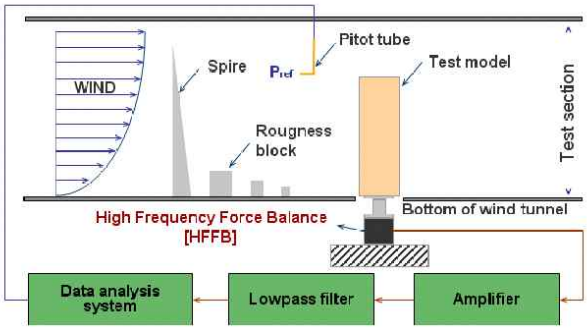
항 목	값	비고
모형 스케일	1/200	-
속도 스케일	1/4.5	Prototype : 15m/s
시간 스케일	1/44.44	Prototype : 600sec
Sampling Frequency	360Hz	Prototype : 0.0028sec
Reynold's number	Re >8,000	-
계측 횟수	5	-
총 Data 수	24,300	-

② 대형 풍동의 제원

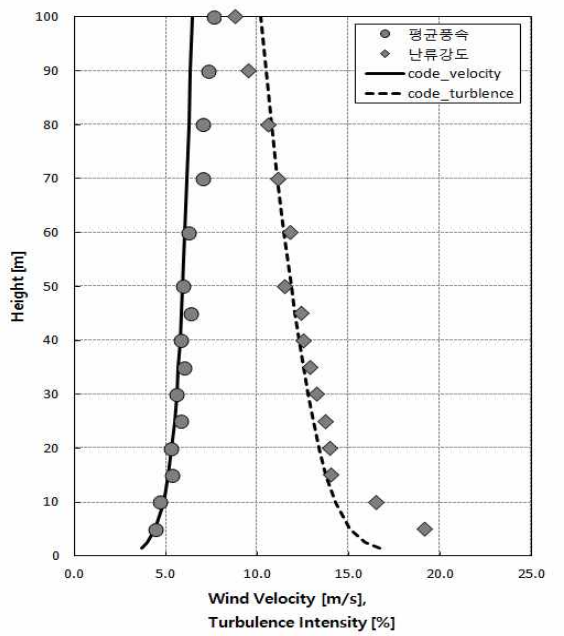
항 목	제 원
송풍방식	흡입식 (132kw×3대)
측정부의 크기 [m]	8.0(W) × 2.5(H) × 23.0(L)
풍속범위 [m/s]	0.3 ~ 11.0
난류강도 [%]	0.5 미만
풍속분포의 편차 [%]	±1.0 이하



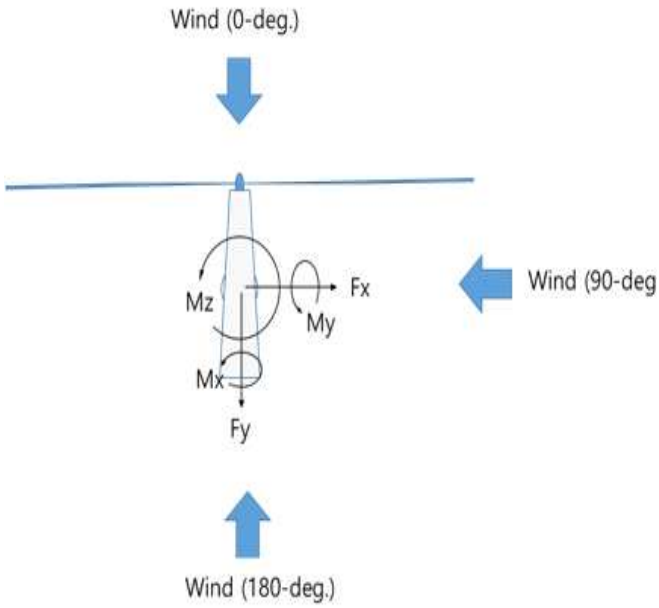
[풍동실험 전경]



[풍력 측정시스템]



[평균풍속 및 난류 강도 분포(지표면조도 B)]



[구조축 및 풍 방향 정의]

(3) 풍동실험 결과

(가) 각 풍향에 대한 평균 풍력계수를 구함.
(나) 정상상태 조건과 극한상태의 조건에서의 분석을 실시함.
(다) 블레이드 방향 별 각각 분석을 실시함.
(라) 해상풍력타워에 사용 될 Fy 방향에 대한 풍력계수 값은 정상상태 조건에서의 0도일 때를 선정하여 풍하중 산정 parameter에 사용함.
(마) 블레이드의 회전각이 0도일 때, 정상상태에서의 풍력계수(Fy) 값은 2.611을 가짐.

[블레이드 회전각 0도 일 때 각 풍향에 대한 풍력계수(정상상태)]

Azimuth	Mean					STD				
	CFx	CFy	CMx	CMy	CMz	CFx'	CFy'	CMx'	CMy'	CMz'
0	-0.128	2.611	-2.374	0.123	1.340	0.242	0.483	0.415	0.152	0.881
10	0.021	2.533	-2.351	0.255	-0.122	0.205	0.477	0.407	0.146	0.901
20	0.208	2.297	-2.208	0.371	-1.859	0.242	0.450	0.379	0.168	0.941
30	0.535	2.154	-2.143	0.488	-2.228	0.244	0.439	0.370	0.167	0.919
40	0.754	1.852	-1.932	0.572	-1.985	0.255	0.435	0.366	0.181	0.868
50	0.818	1.461	-1.649	0.628	-1.937	0.247	0.382	0.321	0.178	0.871
60	0.967	1.194	-1.458	0.684	-2.062	0.280	0.417	0.345	0.200	0.856
70	1.027	0.866	-1.208	0.701	-1.400	0.317	0.493	0.425	0.238	0.856
80	1.108	0.319	-0.734	0.739	-0.892	0.297	0.366	0.329	0.225	0.792
90	1.181	-0.283	-0.154	0.776	-0.736	0.265	0.356	0.320	0.199	0.868
100	1.097	-0.785	0.318	0.708	-0.260	0.235	0.429	0.365	0.175	0.955
110	1.059	-1.171	0.619	0.693	0.521	0.235	0.394	0.326	0.177	1.018
120	1.011	-1.565	0.905	0.694	0.256	0.232	0.347	0.288	0.175	1.016
130	0.940	-1.968	1.221	0.677	0.903	0.251	0.357	0.300	0.165	0.953
140	0.765	-2.231	1.465	0.582	0.976	0.233	0.398	0.331	0.175	0.902
150	0.525	-2.435	1.660	0.468	0.624	0.221	0.408	0.338	0.157	0.879
160	0.334	-2.678	1.870	0.375	0.657	0.208	0.398	0.336	0.157	0.849
170	0.061	-2.725	1.921	0.199	0.550	0.208	0.429	0.376	0.157	0.848
180	-0.191	-2.774	1.998	0.012	-0.152	0.197	0.381	0.331	0.150	0.821

[블레이드 회전각 20도 일 때 각 풍향에 대한 풍력계수(정상상태)]

Azimuth	Mean					STD				
	CFx	CFy	CMx	CMy	CMz	CFx'	CFy'	CMx'	CMy'	CMz'
0	-0.103	2.591	-2.285	0.138	3.947	0.215	0.474	0.410	0.135	0.839
10	0.031	2.480	-2.257	0.263	1.162	0.203	0.445	0.378	0.138	0.843
20	0.271	2.380	-2.232	0.402	-1.712	0.226	0.409	0.348	0.149	0.850
30	0.542	2.087	-2.039	0.466	-2.492	0.239	0.417	0.357	0.155	0.866
40	0.734	1.802	-1.861	0.552	-2.294	0.251	0.431	0.363	0.173	0.881
50	0.851	1.524	-1.653	0.639	-2.067	0.243	0.384	0.322	0.170	0.819
60	0.919	1.078	-1.331	0.635	-2.263	0.246	0.389	0.318	0.183	0.769
70	1.001	0.778	-1.095	0.671	-1.751	0.289	0.439	0.374	0.217	0.829
80	1.162	0.292	-0.690	0.769	-0.846	0.241	0.356	0.313	0.184	0.770
90	1.135	-0.319	-0.151	0.737	-0.622	0.257	0.328	0.288	0.189	0.726
100	1.101	-0.791	0.305	0.710	0.228	0.258	0.414	0.353	0.180	0.785
110	1.085	-1.202	0.613	0.705	0.727	0.222	0.362	0.300	0.169	0.735
120	1.014	-1.608	0.879	0.686	0.630	0.219	0.311	0.259	0.157	0.735
130	0.926	-2.029	1.203	0.662	1.059	0.241	0.344	0.295	0.164	0.795
140	0.760	-2.301	1.459	0.593	0.976	0.231	0.372	0.313	0.169	0.820
150	0.538	-2.440	1.615	0.466	0.677	0.220	0.406	0.343	0.156	0.846
160	0.316	-2.643	1.794	0.358	0.670	0.195	0.404	0.350	0.147	0.797
170	0.062	-2.749	1.887	0.195	0.444	0.191	0.377	0.332	0.143	0.765
180	-0.200	-2.777	1.940	-0.002	-0.237	0.185	0.414	0.360	0.135	0.793

[블레이드 회전각 40도 일 때 각 풍향에 대한 풍력계수(정상상태)]

Azimuth	Mean					STD				
	CFx	CFy	CMx	CMy	CMz	CFx'	CFy'	CMx'	CMy'	CMz'
0	−0.098	2.499	−2.252	0.120	−0.240	0.215	0.431	0.364	0.147	0.922
10	0.068	2.459	−2.235	0.232	−1.101	0.206	0.433	0.369	0.145	0.852
20	0.262	2.290	−2.132	0.315	−2.514	0.220	0.405	0.348	0.152	0.929
30	0.461	2.109	−2.023	0.423	−2.211	0.249	0.424	0.364	0.174	0.913
40	0.701	1.815	−1.828	0.504	−2.427	0.265	0.419	0.349	0.186	0.944
50	0.802	1.444	−1.543	0.566	−2.278	0.255	0.410	0.342	0.187	0.907
60	0.908	1.026	−1.225	0.624	−2.510	0.273	0.392	0.320	0.205	0.875
70	1.056	0.681	−0.943	0.690	−2.231	0.287	0.369	0.307	0.213	0.900
80	1.168	0.261	−0.600	0.749	−1.345	0.267	0.327	0.281	0.195	0.809
90	1.181	−0.243	−0.168	0.762	−0.388	0.250	0.311	0.266	0.188	0.792
100	1.139	−0.675	0.240	0.725	0.800	0.242	0.358	0.299	0.173	0.823
110	1.131	−1.101	0.553	0.736	1.134	0.236	0.352	0.287	0.178	0.802
120	1.070	−1.545	0.893	0.711	0.557	0.257	0.337	0.280	0.187	0.845
130	1.018	−2.034	1.263	0.717	1.787	0.278	0.358	0.306	0.200	0.875
140	0.795	−2.301	1.482	0.622	1.761	0.244	0.392	0.327	0.185	0.853
150	0.555	−2.364	1.634	0.480	0.788	0.229	0.398	0.338	0.171	0.846
160	0.354	−2.631	1.864	0.368	0.714	0.205	0.435	0.378	0.155	0.834
170	0.114	−2.737	1.960	0.206	0.526	0.193	0.427	0.376	0.146	0.891
180	−0.153	−2.695	1.990	0.015	−0.052	0.185	0.452	0.396	0.137	0.893

[블레이드 회전각 60도 일 때 각 풍향에 대한 풍력계수(정상상태)]

Azimuth	Mean					STD				
	CFx	CFy	CMx	CMy	CMz	CFx'	CFy'	CMx'	CMy'	CMz'
0	−0.211	2.228	−2.024	0.044	−0.499	0.390	0.387	0.340	0.343	0.989
10	−0.041	2.088	−1.930	0.171	−0.923	0.389	0.366	0.318	0.341	0.988
20	0.249	2.025	−1.908	0.327	−2.126	0.333	0.377	0.330	0.270	0.980
30	0.578	1.935	−1.862	0.484	−1.780	0.269	0.387	0.342	0.192	0.910
40	0.774	1.600	−1.628	0.551	−1.967	0.258	0.372	0.324	0.183	0.907
50	0.948	1.467	−1.527	0.669	−2.006	0.269	0.388	0.326	0.203	0.879
60	1.093	1.173	−1.271	0.747	−1.991	0.302	0.408	0.347	0.225	0.967
70	1.131	0.744	−0.914	0.746	−1.285	0.311	0.382	0.325	0.233	0.926
80	1.232	0.251	−0.532	0.783	−0.532	0.266	0.330	0.274	0.196	0.798
90	1.206	−0.222	−0.146	0.782	−0.276	0.247	0.304	0.251	0.188	0.691
100	1.225	−0.631	0.221	0.796	0.357	0.254	0.315	0.261	0.183	0.809
110	1.191	−1.106	0.592	0.790	0.570	0.252	0.335	0.284	0.189	0.892
120	1.113	−1.499	0.890	0.766	0.772	0.277	0.363	0.311	0.209	0.991
130	1.015	−1.813	1.163	0.723	1.627	0.290	0.380	0.332	0.212	1.015
140	0.884	−2.068	1.422	0.671	1.634	0.272	0.403	0.344	0.212	1.007
150	0.571	−2.125	1.486	0.510	0.950	0.250	0.387	0.333	0.191	0.904
160	0.414	−2.408	1.751	0.431	0.959	0.203	0.355	0.311	0.157	0.937
170	0.190	−2.425	1.764	0.283	0.571	0.196	0.373	0.329	0.149	0.922
180	−0.054	−2.322	1.715	0.107	0.242	0.195	0.377	0.330	0.148	0.916

[블레이드 회전각 0도 일 때 각 풍향에 대한 풍력계수(극한상태)]

Azimuth	Mean					STD				
	CFx	CFy	CMx	CMy	CMz	CFx'	CFy'	CMx'	CMy'	CMz'
0	−0.218	1.245	−1.023	0.000	−0.515	0.419	0.287	0.204	0.349	0.667
10	0.097	1.210	−1.010	0.294	−0.195	0.349	0.269	0.190	0.289	0.676
20	0.466	1.141	−0.966	0.601	−0.509	0.356	0.255	0.178	0.280	0.736
30	0.833	1.007	−0.880	0.860	−0.580	0.335	0.239	0.168	0.270	0.691
40	1.198	0.829	−0.776	1.101	−0.011	0.332	0.262	0.178	0.277	0.638
50	1.408	0.559	−0.609	1.250	0.467	0.329	0.239	0.162	0.275	0.606
60	1.547	0.321	−0.436	1.352	0.211	0.344	0.241	0.176	0.289	0.607
70	1.677	0.114	−0.294	1.420	0.520	0.366	0.223	0.163	0.299	0.625
80	1.835	−0.148	−0.142	1.484	0.504	0.356	0.223	0.163	0.295	0.638
90	1.734	−0.369	−0.002	1.428	0.221	0.360	0.239	0.168	0.298	0.640
100	1.682	−0.580	0.126	1.381	0.462	0.341	0.231	0.163	0.283	0.648
110	1.658	−0.816	0.269	1.334	0.489	0.332	0.229	0.170	0.273	0.678
120	1.562	−1.028	0.402	1.243	0.445	0.338	0.237	0.177	0.265	0.711
130	1.500	−1.203	0.503	1.199	0.892	0.363	0.250	0.186	0.278	0.738
140	1.344	−1.312	0.579	1.101	0.717	0.357	0.277	0.196	0.279	0.758
150	1.121	−1.346	0.611	0.982	0.487	0.411	0.292	0.207	0.329	0.805
160	0.935	−1.418	0.649	0.867	0.629	0.491	0.295	0.218	0.426	0.848
170	0.489	−1.481	0.706	0.462	0.249	0.397	0.257	0.184	0.335	0.747
180	−0.058	−1.437	0.742	−0.034	1.161	0.385	0.253	0.179	0.334	0.698

[블레이드 회전각 20도 일 때 각 풍향에 대한 풍력계수(극한상태)]

Azimuth	Mean					STD				
	CFx	CFy	CMx	CMy	CMz	CFx'	CFy'	CMx'	CMy'	CMz'
0	−0.243	1.258	−1.008	−0.028	−0.008	0.385	0.280	0.204	0.322	0.646
10	0.081	1.199	−0.983	0.257	0.353	0.324	0.250	0.175	0.277	0.642
20	0.433	1.102	−0.943	0.538	−0.696	0.312	0.238	0.170	0.256	0.639
30	0.815	0.949	−0.875	0.786	−0.712	0.313	0.232	0.161	0.252	0.615
40	1.172	0.719	−0.740	1.025	−0.149	0.322	0.240	0.161	0.263	0.596
50	1.385	0.475	−0.581	1.203	0.193	0.334	0.219	0.151	0.272	0.574
60	1.572	0.256	−0.434	1.319	0.109	0.346	0.232	0.168	0.284	0.551
70	1.674	0.027	−0.266	1.375	0.658	0.354	0.227	0.167	0.289	0.564
80	1.763	−0.238	−0.102	1.414	0.846	0.333	0.227	0.166	0.270	0.543
90	1.803	−0.452	0.031	1.409	0.563	0.340	0.222	0.159	0.279	0.565
100	1.760	−0.622	0.131	1.378	0.960	0.327	0.220	0.160	0.273	0.590
110	1.736	−0.861	0.247	1.358	1.029	0.339	0.222	0.158	0.285	0.625
120	1.698	−0.989	0.356	1.341	2.800	0.324	0.234	0.161	0.267	0.642
130	1.476	−1.135	0.458	1.242	4.630	0.342	0.238	0.172	0.275	0.698
140	1.193	−1.200	0.526	1.110	5.818	0.338	0.266	0.183	0.274	0.729
150	1.077	−1.216	0.517	0.986	3.479	0.378	0.282	0.204	0.320	0.741
160	0.899	−1.369	0.616	0.858	2.250	0.399	0.287	0.209	0.353	0.697
170	0.467	−1.511	0.703	0.434	0.231	0.327	0.240	0.178	0.287	0.642
180	−0.070	−1.523	0.740	−0.069	−0.236	0.350	0.244	0.175	0.313	0.601

[블레이드 회전각 40도 일 때 각 풍향에 대한 풍력계수(극한상태)]

Azimuth	Mean					STD				
	CFx	CFy	CMx	CMy	CMz	CFx'	CFy'	CMx'	CMy'	CMz'
0	−0.295	1.255	−1.000	−0.060	0.294	0.386	0.269	0.188	0.318	0.705
10	0.038	1.217	−0.985	0.227	0.698	0.331	0.244	0.174	0.280	0.676
20	0.374	1.078	−0.918	0.469	−0.185	0.322	0.243	0.169	0.264	0.659
30	0.740	0.950	−0.876	0.749	1.458	0.312	0.237	0.156	0.254	0.616
40	1.078	0.721	−0.737	0.963	1.268	0.307	0.235	0.159	0.251	0.559
50	1.267	0.416	−0.568	1.106	−0.348	0.313	0.243	0.172	0.259	0.537
60	1.392	0.158	−0.418	1.218	−0.174	0.321	0.245	0.178	0.269	0.558
70	1.538	−0.087	−0.239	1.313	0.466	0.331	0.244	0.181	0.280	0.562
80	1.691	−0.345	−0.071	1.383	0.552	0.362	0.274	0.213	0.309	0.588
90	1.705	−0.534	0.029	1.362	0.365	0.357	0.309	0.247	0.300	0.638
100	1.762	−0.683	0.108	1.400	0.736	0.347	0.287	0.224	0.291	0.633
110	1.767	−0.893	0.199	1.401	0.748	0.336	0.261	0.202	0.279	0.680
120	1.654	−1.063	0.296	1.325	0.404	0.354	0.249	0.186	0.297	0.724
130	1.537	−1.252	0.408	1.259	0.827	0.358	0.252	0.186	0.289	0.784
140	1.367	−1.365	0.493	1.158	0.481	0.374	0.270	0.195	0.312	0.806
150	1.076	−1.392	0.533	0.992	−0.021	0.427	0.301	0.222	0.367	0.861
160	0.825	−1.538	0.663	0.777	0.196	0.362	0.284	0.201	0.318	0.756
170	0.407	−1.606	0.713	0.402	0.037	0.336	0.251	0.189	0.291	0.777
180	−0.110	−1.603	0.756	−0.069	−0.156	0.386	0.247	0.179	0.341	0.777

[블레이드 회전각 60도 일 때 각 풍향에 대한 풍력계수(극한상태)]

Azimuth	Mean					STD				
	CFx	CFy	CMx	CMy	CMz	CFx'	CFy'	CMx'	CMy'	CMz'
0	−0.294	1.106	−0.866	−0.062	−0.216	0.396	0.270	0.196	0.317	0.740
10	0.075	1.050	−0.848	0.273	−0.048	0.349	0.221	0.152	0.289	0.678
20	0.608	0.889	−0.796	0.656	−0.606	0.365	0.229	0.157	0.294	0.604
30	1.074	0.692	−0.722	0.959	−0.373	0.370	0.213	0.145	0.303	0.591
40	1.368	0.545	−0.643	1.158	0.095	0.378	0.222	0.158	0.313	0.595
50	1.503	0.367	−0.542	1.291	0.155	0.374	0.223	0.161	0.303	0.584
60	1.663	0.238	−0.462	1.402	0.089	0.379	0.232	0.168	0.314	0.570
70	1.824	0.084	−0.353	1.503	0.417	0.400	0.233	0.174	0.330	0.558
80	1.845	−0.108	−0.238	1.461	0.294	0.365	0.225	0.171	0.303	0.533
90	1.837	−0.314	−0.114	1.428	−0.369	0.378	0.235	0.174	0.311	0.574
100	1.843	−0.483	−0.022	1.421	−0.070	0.367	0.236	0.181	0.295	0.573
110	1.837	−0.729	0.092	1.427	−0.075	0.387	0.269	0.211	0.315	0.673
120	1.688	−0.938	0.210	1.339	−0.258	0.379	0.284	0.223	0.314	0.887
130	1.523	−1.120	0.317	1.265	0.352	0.389	0.272	0.213	0.320	0.983
140	1.269	−1.240	0.402	1.121	0.063	0.389	0.270	0.202	0.328	0.964
150	0.902	−1.300	0.473	0.877	0.180	0.375	0.258	0.186	0.324	0.874
160	0.554	−1.406	0.590	0.590	0.254	0.334	0.246	0.172	0.297	0.718
170	0.089	−1.463	0.632	0.182	−0.213	0.326	0.231	0.172	0.293	0.724
180	−0.311	−1.415	0.628	−0.194	−0.518	0.411	0.225	0.165	0.373	0.875

라. 풍하중 작용 시의 타워 진동 해석

(1) 풍하중의 산정

(가) 풍하중 작용 시의 풍압력은 아래와 같은 식으로 계산됨.

Wind Pressure : $q\ G\,C_f\,A_f$ ... (ASCE7-05)

여기서, q_z : 설계속도압 $(=\frac{1}{2}\rho V_z^2)$

ρ : 공기밀도 $(=0.123(kgf \cdot s^2/m^4)$, at 15℃, 760mmHg)

V_z : z(m)높이에서의 풍속

G : 거스트 영향계수

C_f : 풍력계수

A_f : 유효수압계수

(나) 거스트 영향계수의 경우, Rigid Structure로 간주하여 0.88로 가정함.

(다) 풍력계수의 경우, 풍동실험을 의한 결과 값 2.611로 가정함.

(라) 유효수압계수는 1로 가정함.

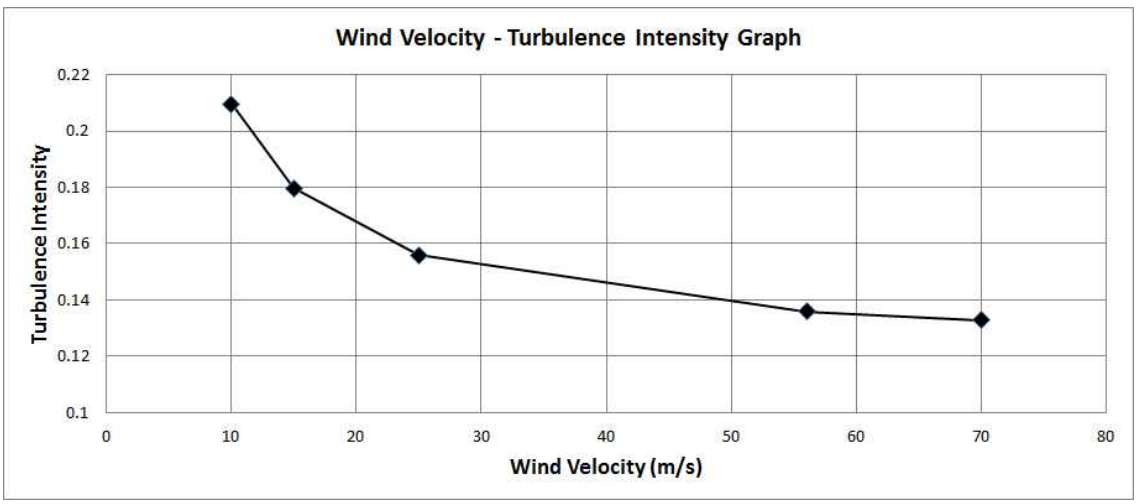
(마) IEC 61400-1에서는 풍력터빈의 등급별로 기준풍속(V_{ref})을 제시하고 있으며 Class I의 기준풍속을 이용하여 평균풍속과 극한풍속을 산정하고 그에 상응하는 난류강도를 결정함.

[터빈 등급별 기준풍속 및 극한풍속]

Wind Turbine Class	I	II	III
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5

V_{avg}	$0.2\,V_{ref}$	10
V_{e50}	$1.4\,V_{ref}(z/z_{hub})^{0.11}$	70
V_{e1}	$0.8\,V_{e50}(z)$	56

[풍속 별 난류 강도]



(바) 블레이드에 작용하는 풍하중을 타워에 적용하기 위하여 블레이드의 면적을 3MW급 풍력타워의 경우, 150 로, 7MW급 풍력타워의 경우에는 $300m^2$로 가정함.

(사) 본 연구는 Cut in Wind Speed 인 25m/s까지 진동제어의 목표를 두었으며, 풍속이 작용할 때, 타워에 가해지는 동적 풍하중을 산정하기 위해 Iwatani method를 이용하여 작성한 풍속 산정 프로그램을 사용함.

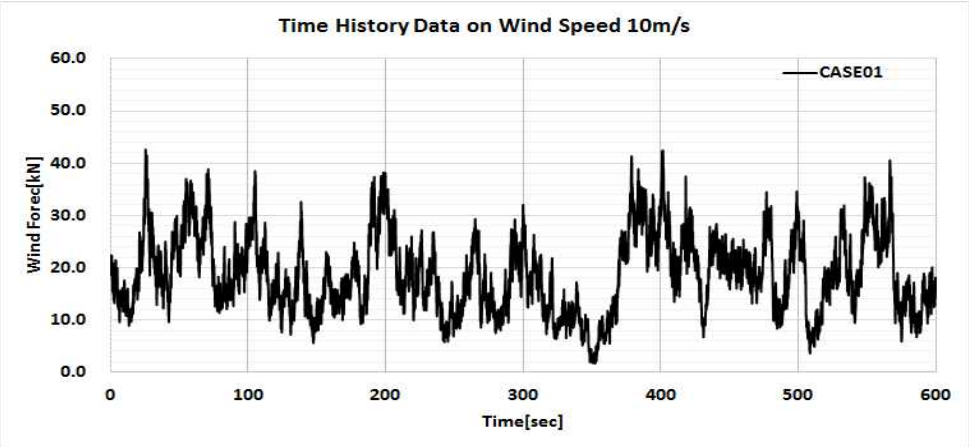
(아) 10m/s, 15m/s, 25m/s의 3가지의 풍속 산정을 위해 600sec의 평가시간과 0.1초의 시간간격으로 결정함.

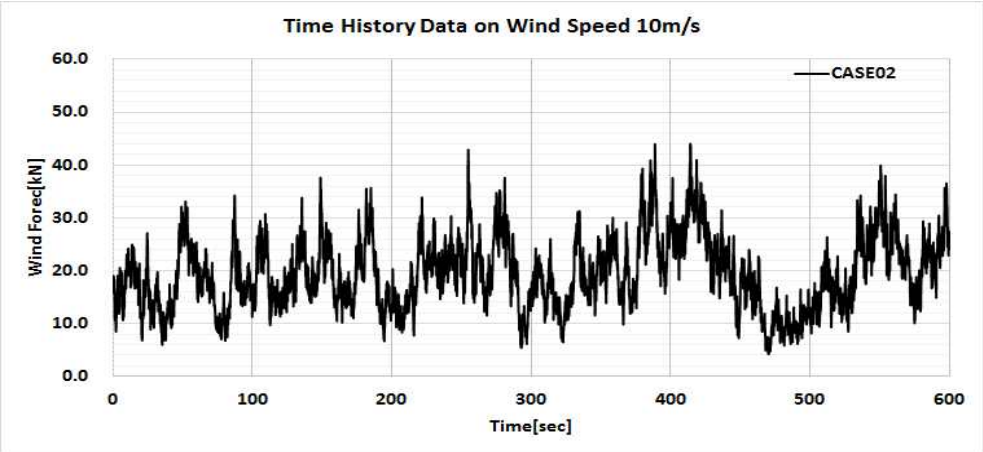
(2) 시간 이력 풍하중 데이터

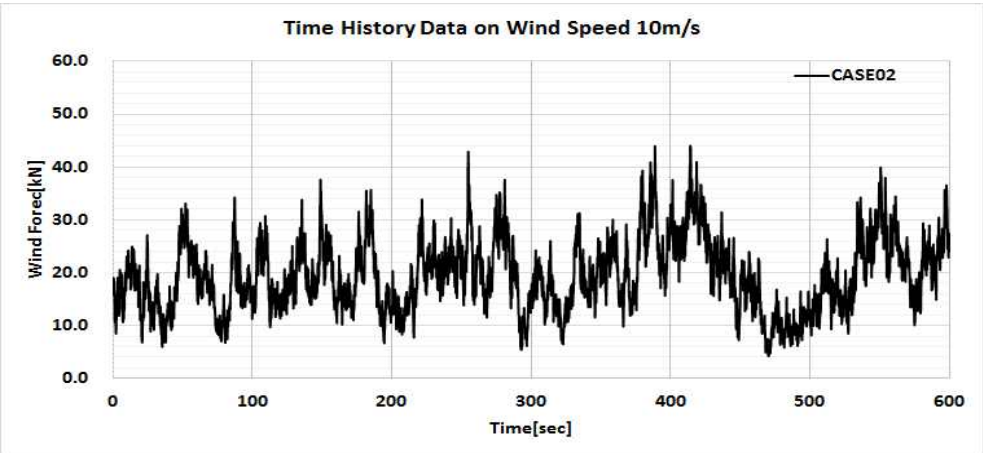
(가) 3MW급 풍력타워에 대한 풍하중을 10m/s, 15m/s, 25m/s에 대해 정확성과 신뢰성을 위한 방법으로 풍속 별 각각 5개씩 산정하여 Modal Wind Load로 변경함.

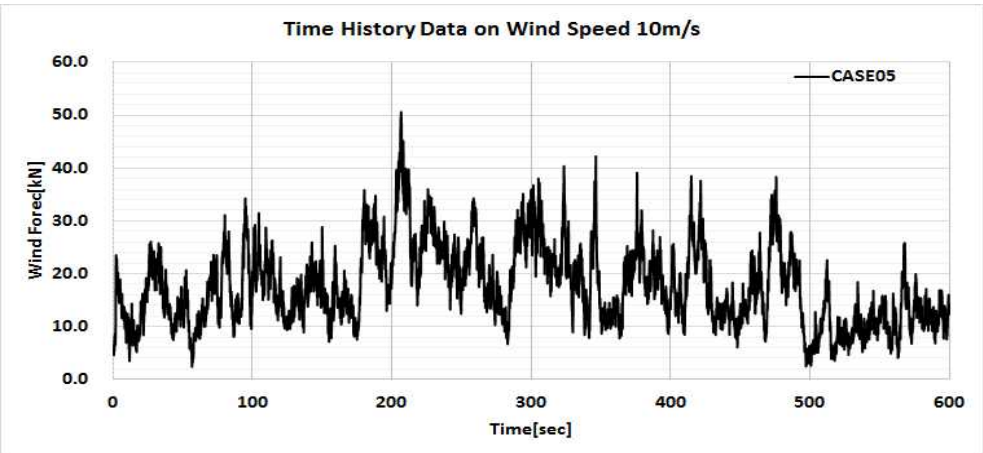
[3MW급 풍력타워 Iwatani input 데이터]

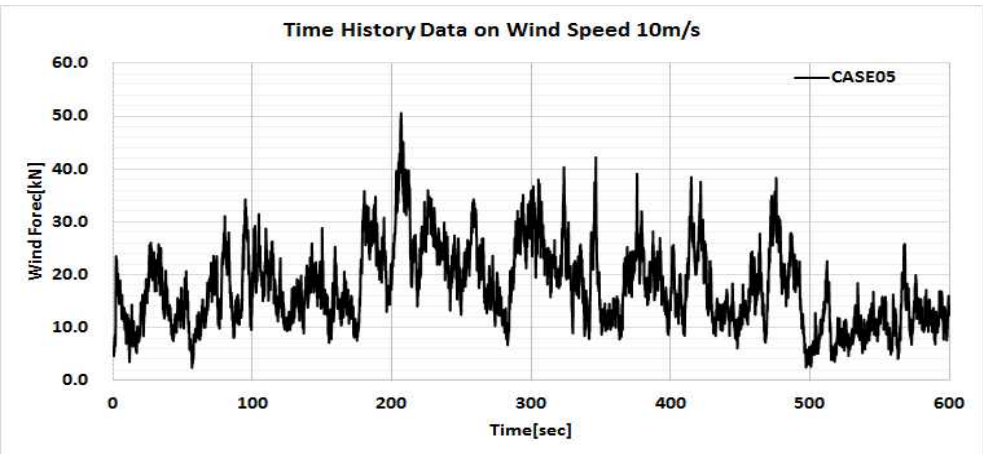
Parameters	Wind Speed(m/s)		
	10m/s	15m/s	25m/s
데이터 수	6000	6000	6000
해석 시간 간격(sec)	0.1	0.1	0.1
타워 최대 높이(m)	76.11	76.11	76.11
타워의 평균 지름(m)	3.253	3.253	3.253
난류 강도	0.2096	0.1797	0.1558
지상고 10m의 평균풍속(m/s)	7.99910m/s	11.99865m/s	19.99776m/s



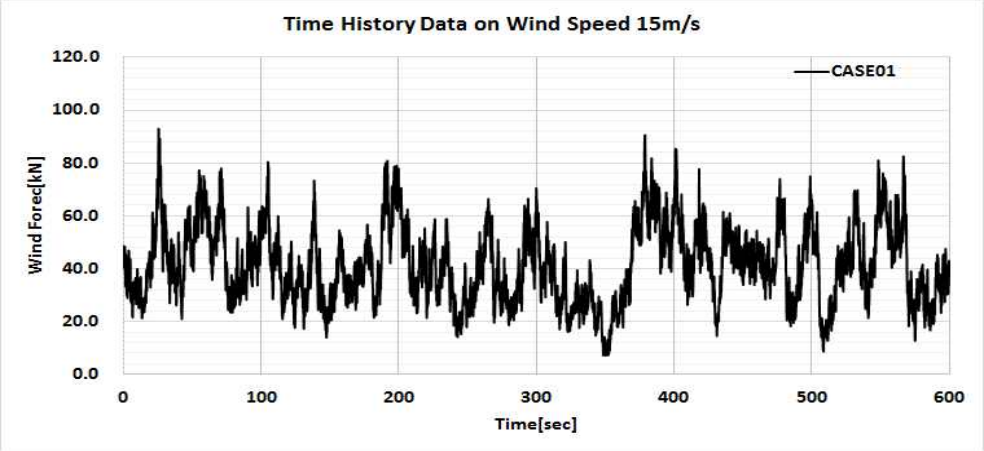


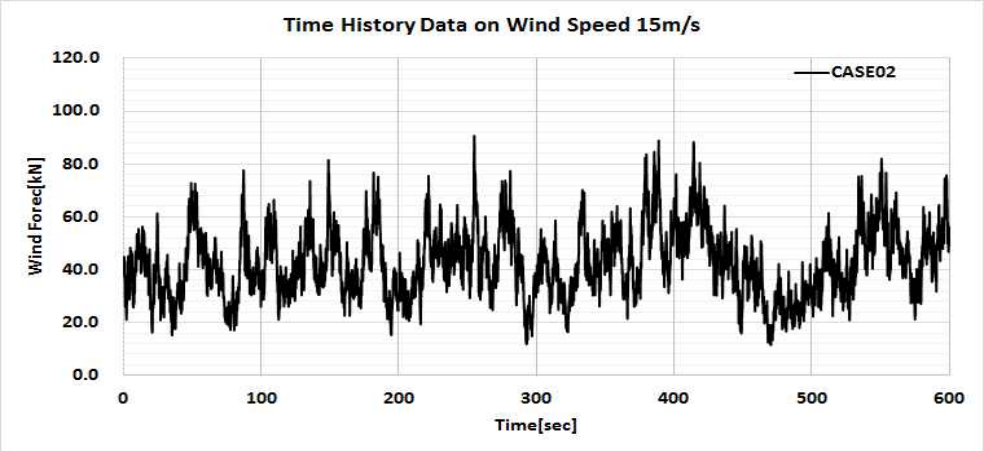


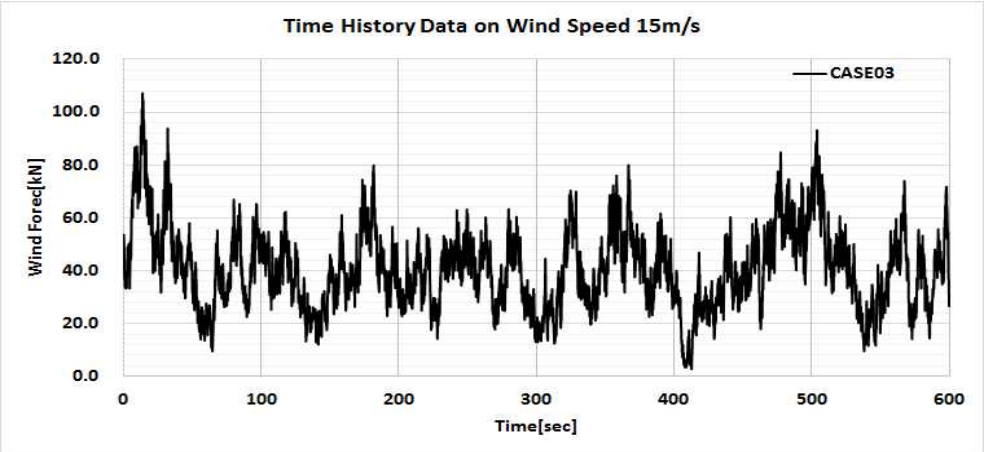


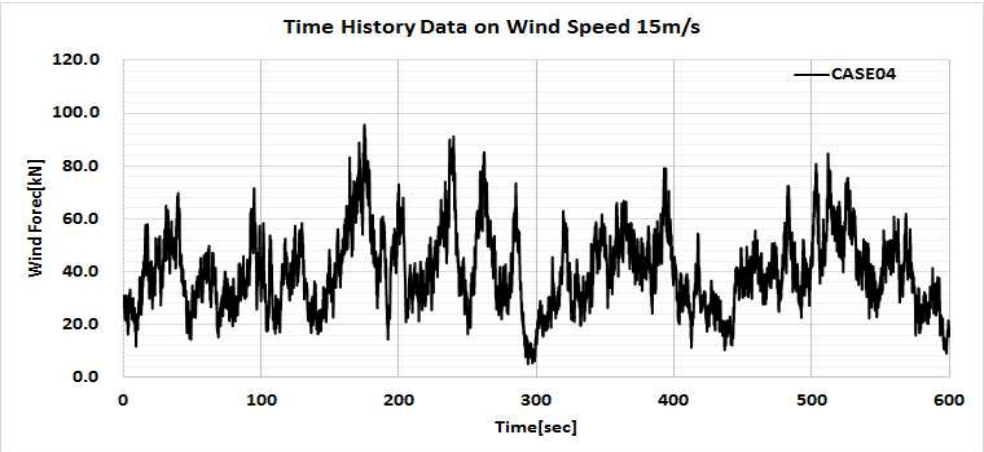


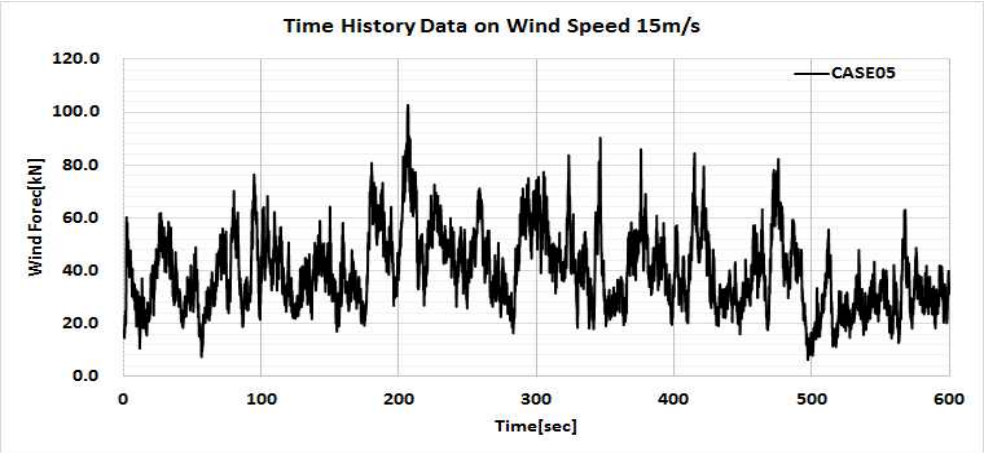
[3MW 풍력타워에 대한 풍속 10m/s 에서의 모달 풍하중 5CASE]


Time History Data on Wind Speed 15m/s
CASE01
Wind Forec[kN]
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
0
100
200
300
400
500
600
Time[sec]

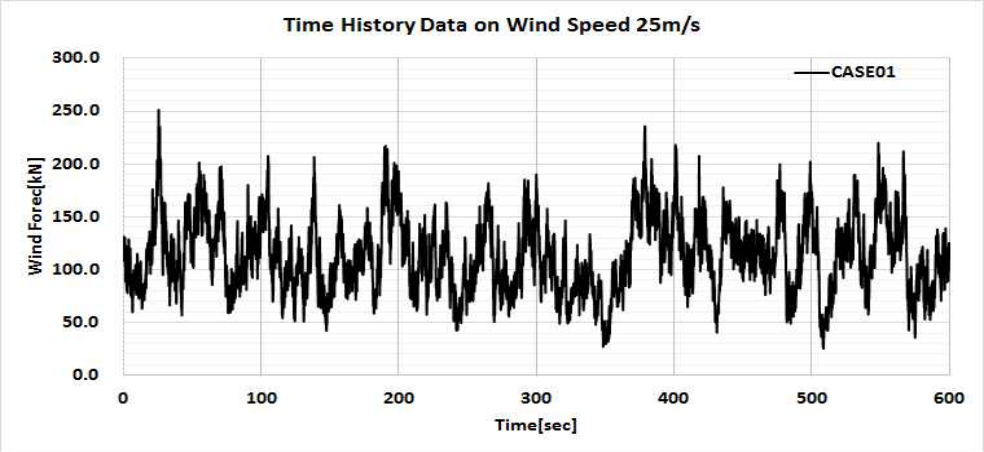

Time History Data on Wind Speed 15m/s
CASE02
Wind Forec[kN]
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
0
100
200
300
400
500
600
Time[sec]

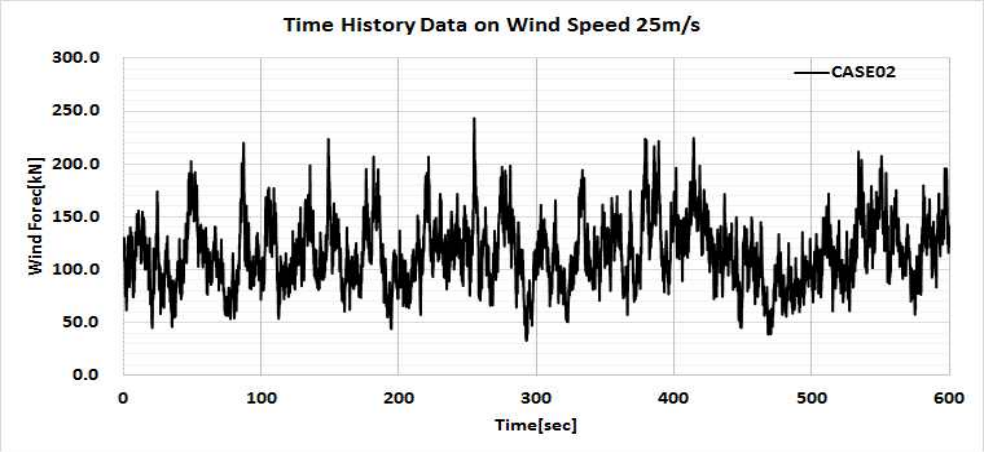

Time History Data on Wind Speed 15m/s
CASE03
Wind Forec[kN]
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
0
100
200
300
400
500
600
Time[sec]

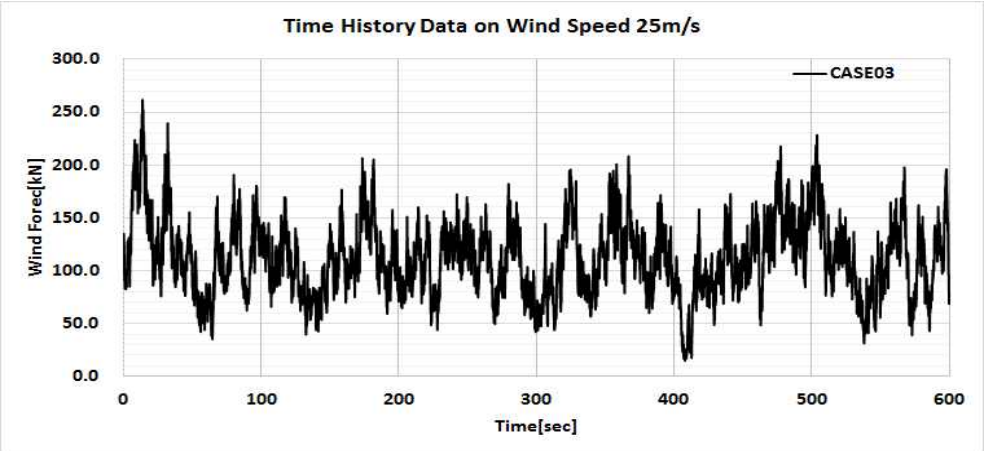

Time History Data on Wind Speed 15m/s
CASE04
Wind Forec[kN]
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
0
100
200
300
400
500
600
Time[sec]

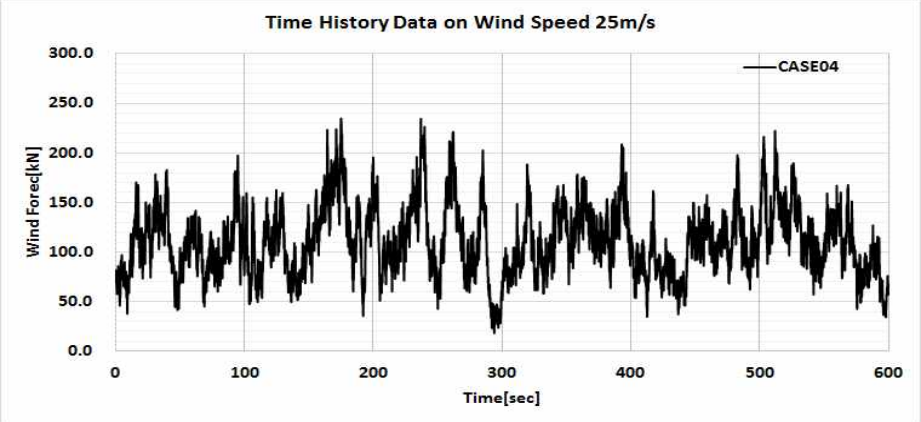


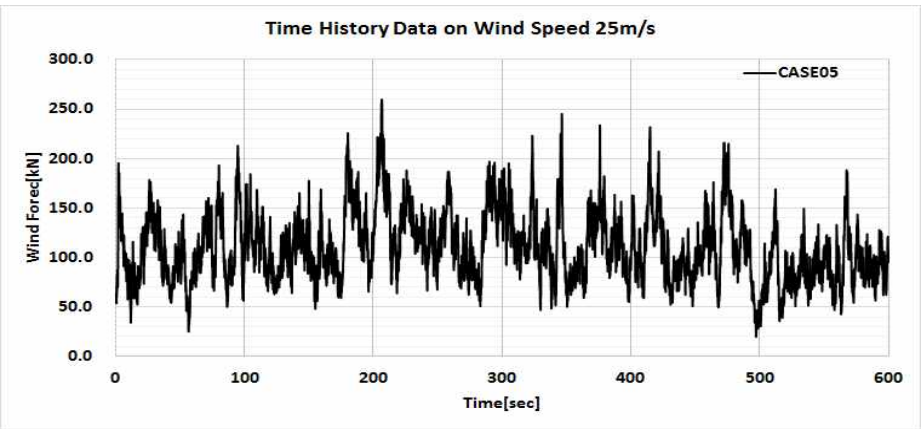
[3MW 풍력타워에 대한 풍속 15m/s 에서의 모달 풍하중 5CASE]









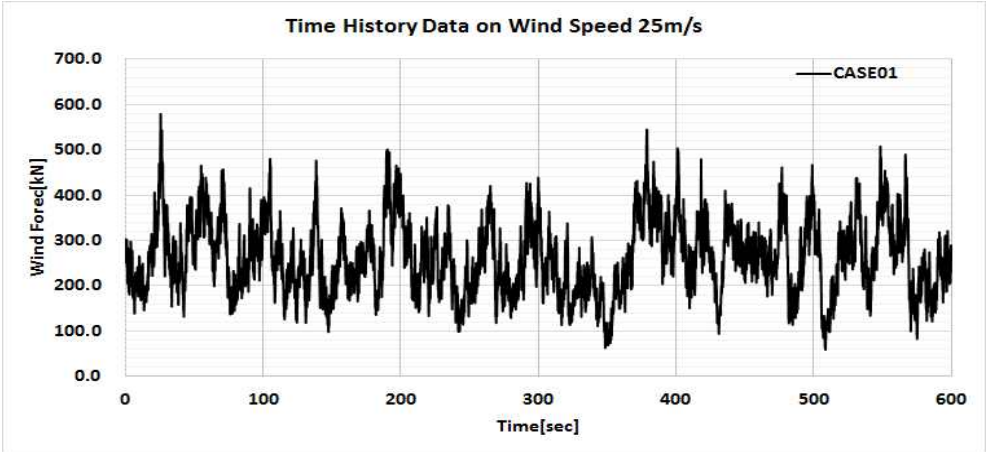


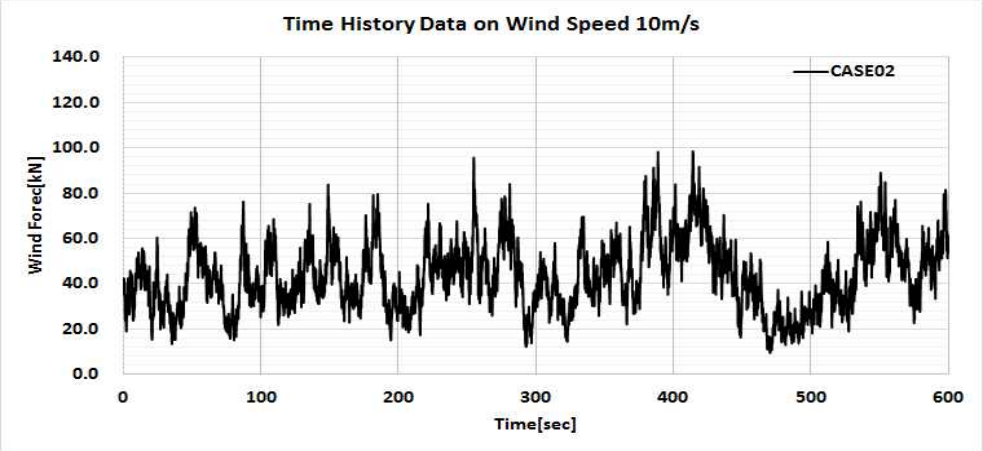
[3MW 풍력타워에 대한 풍속 25m/s 에서의 모달 풍하중 5CASE]

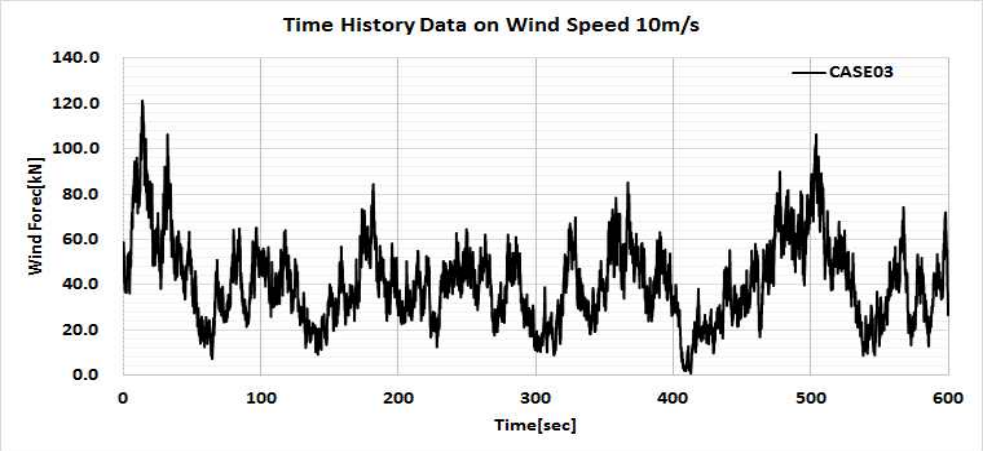
(나) 7MW급 풍력타워 또한, 풍하중을 10m/s, 15m/s, 25m/s에 대해 정확성과 신뢰성을 위한 방법으로 풍속 별 각각 5개씩 산정하여 Modal Wind Load로 변경함.

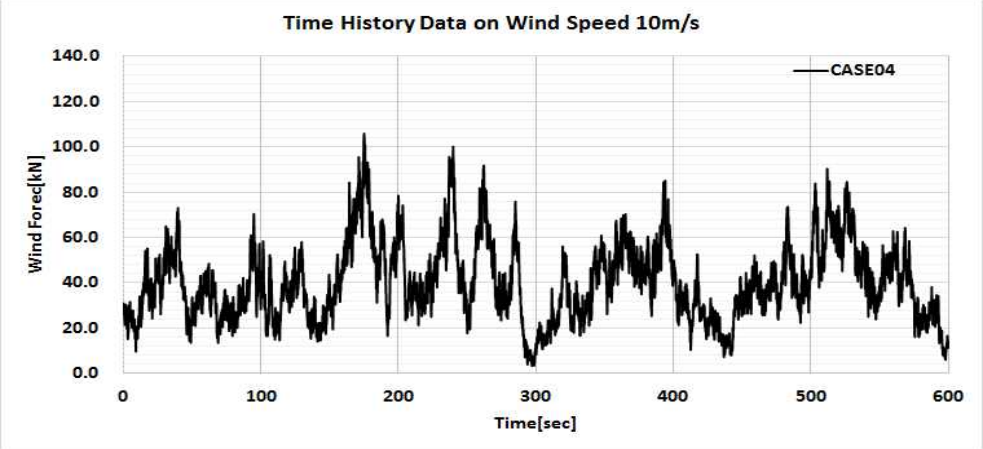
[7MW급 풍력타워 Iwatani input 데이터]

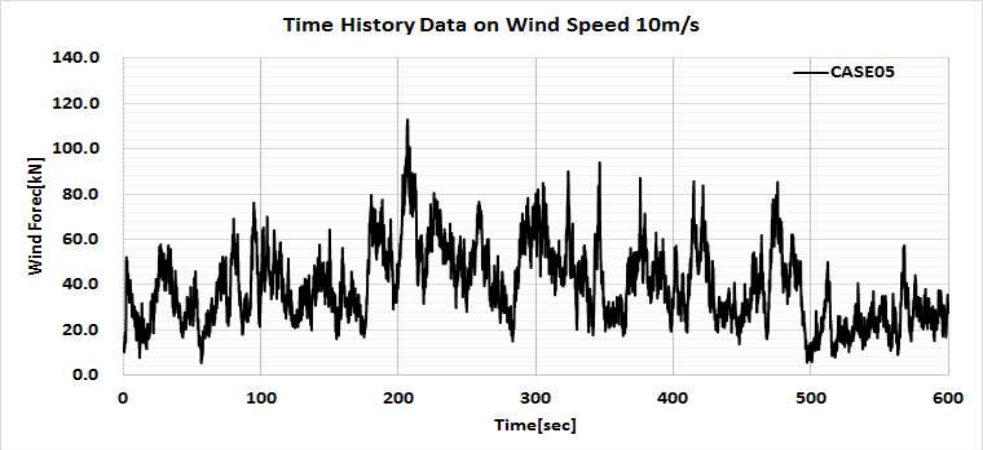
Parameters	Wind Speed(m/s)		
	10m/s	15m/s	25m/s
데이터 수	6000	6000	6000
해석 시간 간격(sec)	0.1	0.1	0.1
타워 최대 높이(m)	84	84	84
타워의 평균 지름(m)	6.44	6.44	6.44
난류 강도	0.2096	0.1797	0.1558
지상고 10m의 평균풍속(m/s)	7.99910m/s	11.99865m/s	19.99776m/s



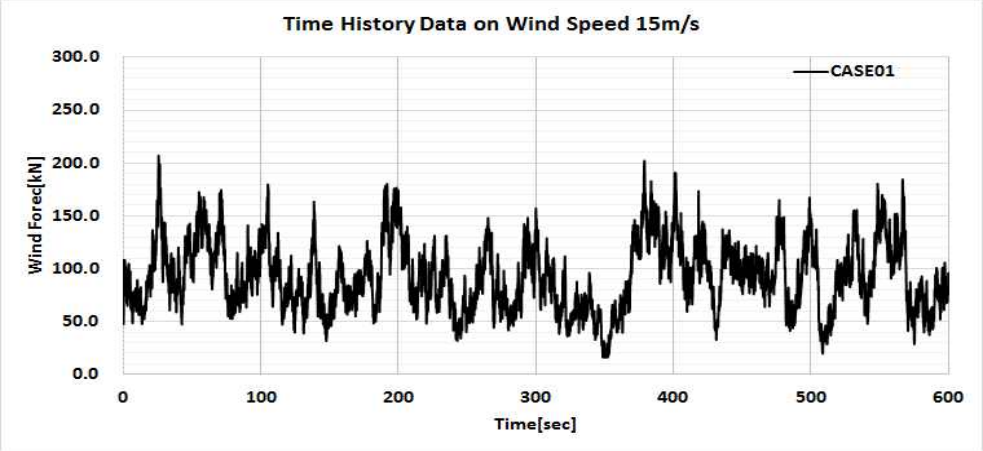


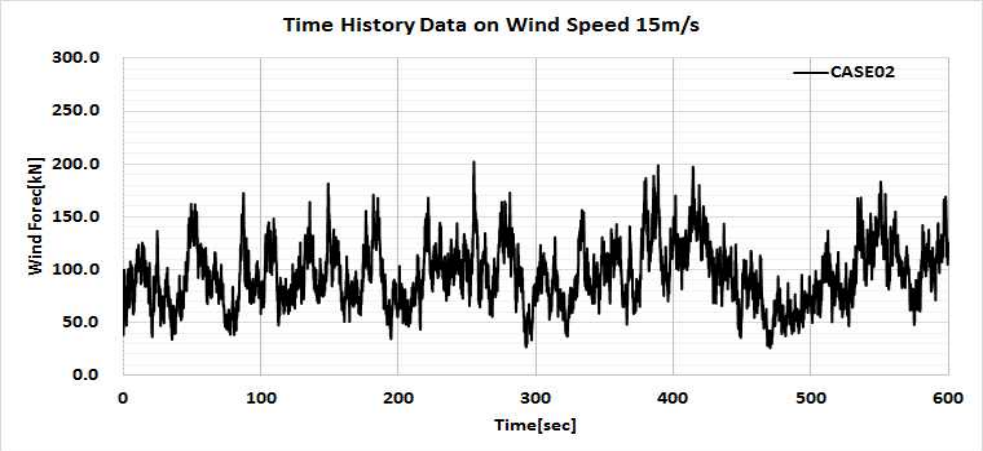


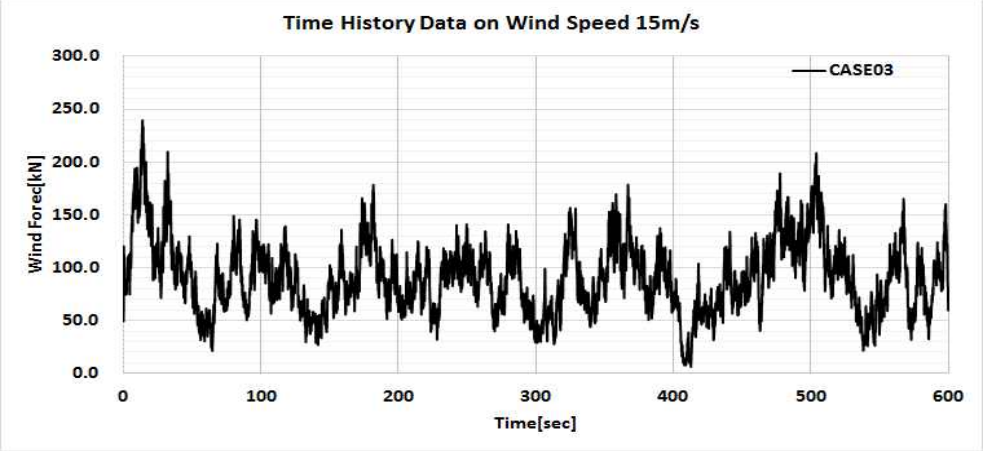


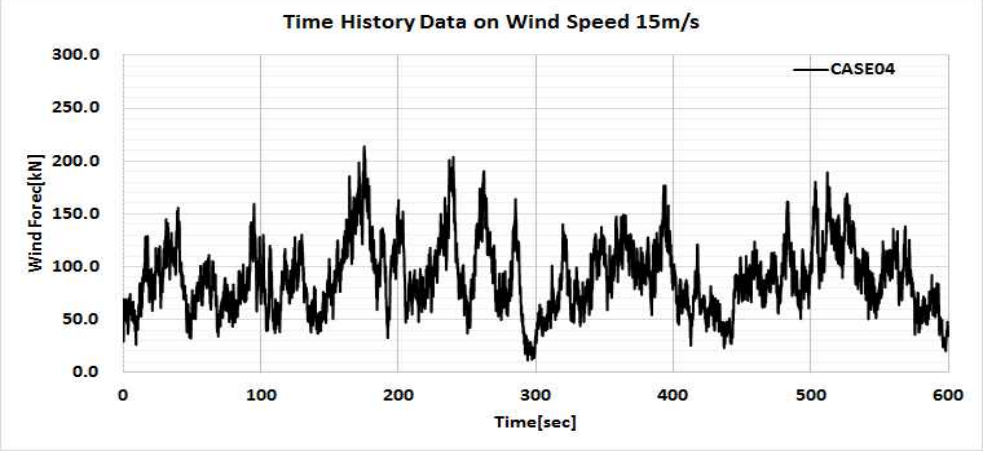


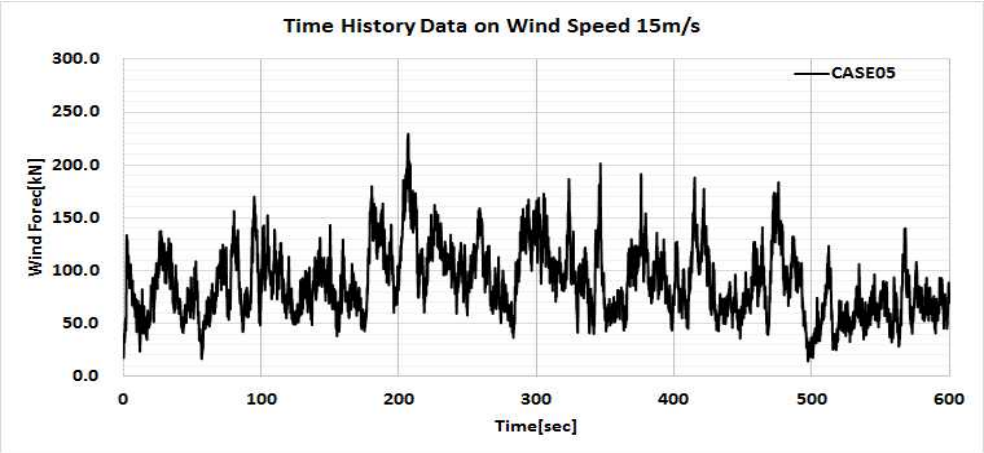
[7MW 풍력타워에 대한 풍속 10m/s 에서의 모달 풍하중 5CASE]


Time History Data on Wind Speed 15m/s
CASE01
Wind Forec[kN]
300.0
250.0
200.0
150.0
100.0
50.0
0.0
0
100
200
300
400
500
600
Time[sec]

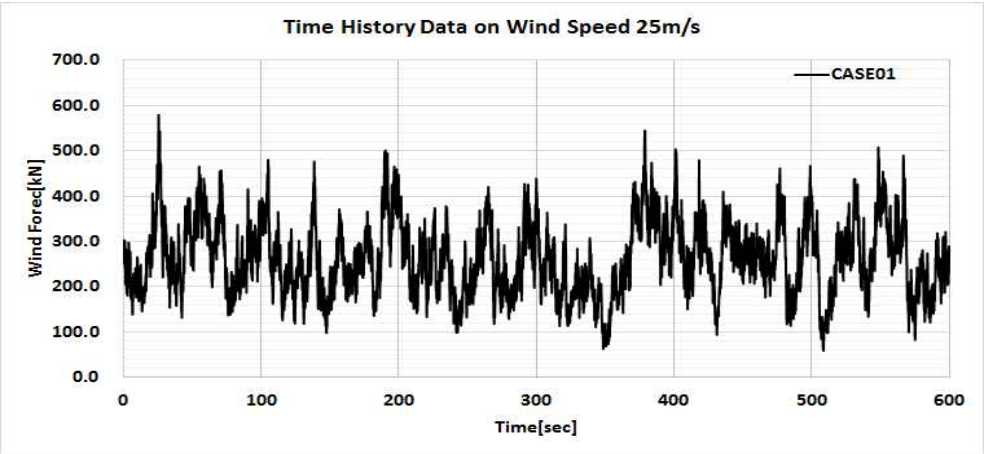

Time History Data on Wind Speed 15m/s
CASE02
Wind Forec[kN]
300.0
250.0
200.0
150.0
100.0
50.0
0.0
0
100
200
300
400
500
600
Time[sec]

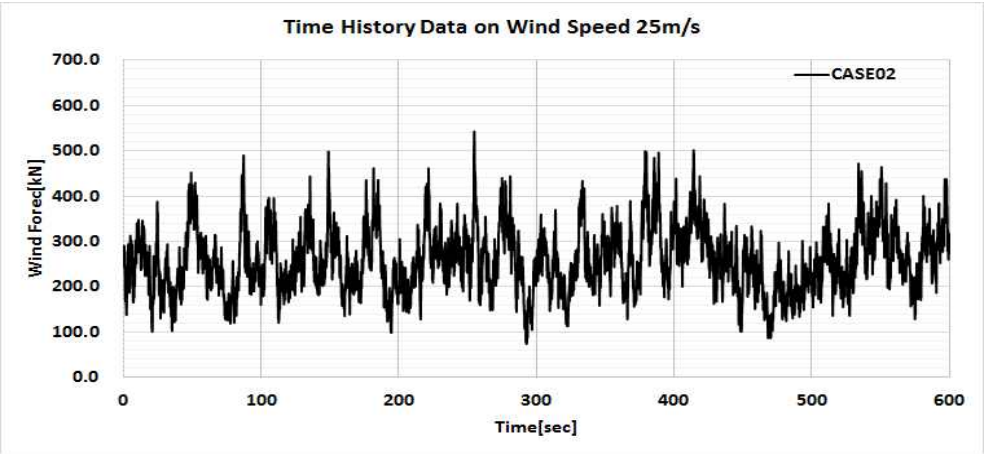

Time History Data on Wind Speed 15m/s
CASE03
Wind Forec[kN]
300.0
250.0
200.0
150.0
100.0
50.0
0.0
0
100
200
300
400
500
600
Time[sec]

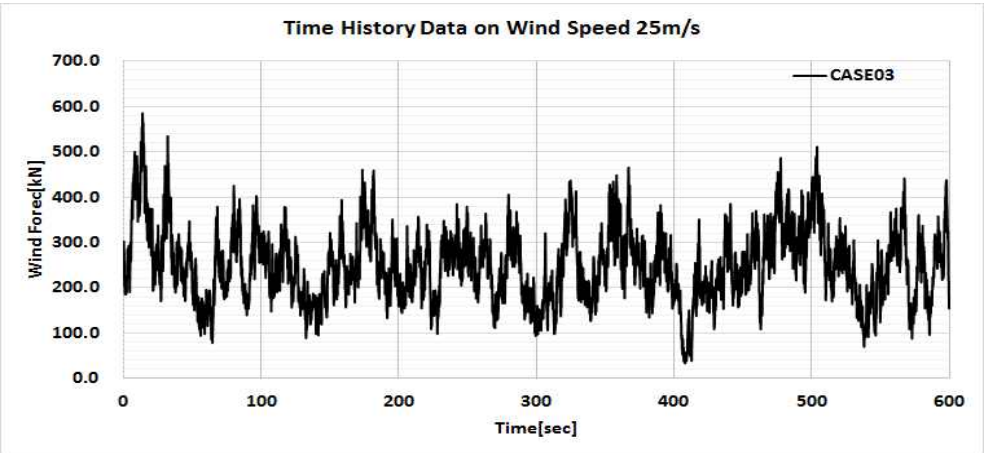

Time History Data on Wind Speed 15m/s
CASE04
Wind Forec[kN]
300.0
250.0
200.0
150.0
100.0
50.0
0.0
0
100
200
300
400
500
600
Time[sec]

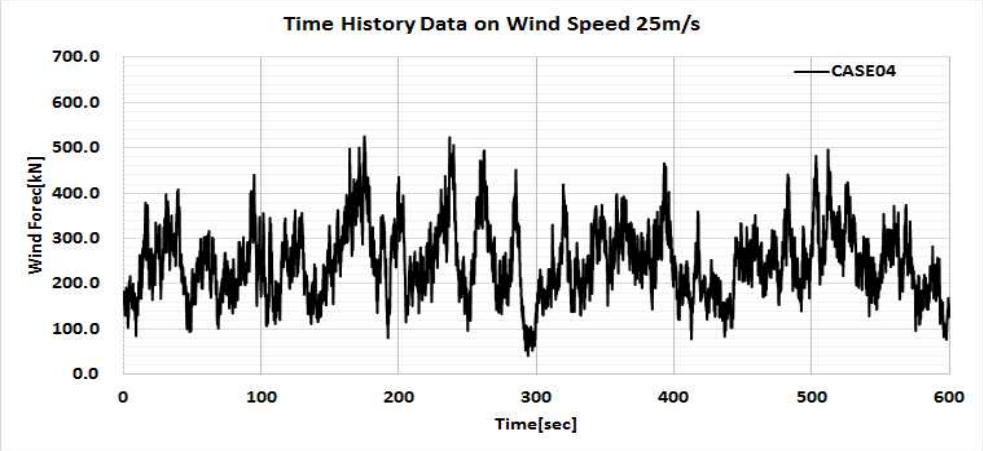


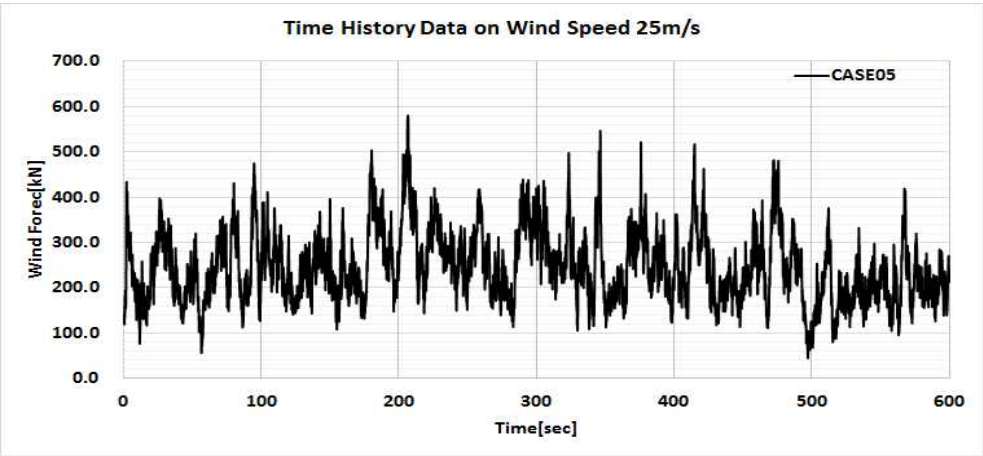
[7MW 풍력타워에 대한 풍속 15m/s 에서의 모달 풍하중 5CASE]











[7MW 풍력타워에 대한 풍속 25m/s 에서의 모달 풍하중 5CASE]

(3) 풍하중에 따른 진동 해석 및 결과

(가) 풍하중 해석을 위하여 자체적으로 작성한 Matlab 수치해석 프로그램을 이용하여, 풍속에 따른 3MW 급 풍력타워의 최대 정적+동적 변위, 최대 가속도 응답을 분석함.

[3MW 풍력타워에 대한 최대 정적+동적 변위 및 최대 가속도 응답]

Wind Speed(m/s)	No. CASE	Max. Displacement(m) (Static+Dynamic)	Max. Acceleration (/s)
10	CASE 01	0.061	0.197
	CASE 02	0.056	0.174
	CASE 03	0.059	0.174
	CASE 04	0.064	0.217
	CASE 05	0.058	0.216
15	CASE 01	0.131	0.427
	CASE 02	0.119	0.379
	CASE 03	0.121	0.381
	CASE 04	0.140	0.484
	CASE 05	0.126	0.465
25	CASE 01	0.355	1.240
	CASE 02	0.323	1.075
	CASE 03	0.323	1.081
	CASE 04	0.390	1.388
	CASE 05	0.346	1.292

(나) 25m/s 풍속까지 제어목표를 위해 해당 풍속에 대한 3MW 급 풍력타워의 최대 동적 변위응답을 분석함.

[3MW 풍력타워에 대한 풍속 25m/s 최대 동적 변위 응답]

Wind Speed(m/s)	No. CASE	Max. Dynamic Displacement(m)
25	CASE 01	0.254
	CASE 02	0.220
	CASE 03	0.223
	CASE 04	0.291
	CASE 05	0.247

(다) 풍하중 해석을 위하여 자체적으로 작성한 Matlab 수치해석 프로그램을 이용하여 풍속에 따른 7MW 급 풍력타워의 최대 정적+동적 변위, 최대 가속도 응답을 분석함.

[7MW 풍력타워에 대한 최대 정적+동적 변위 및 최대 가속도 응답]

Wind Speed(m/s)	No. CASE	Max. Displacement(m) (Static+Dynamic)	Max. Acceleration ($/s$)
10	CASE 01	0.059	0.107
	CASE 02	0.059	0.118
	CASE 03	0.058	0.095
	CASE 04	0.062	0.118
	CASE 05	0.059	0.135
15	CASE 01	0.129	0.228
	CASE 02	0.126	0.255
	CASE 03	0.114	0.220
	CASE 04	0.126	0.255
	CASE 05	0.122	0.290
25	CASE 01	0.338	0.619
	CASE 02	0.339	0.714
	CASE 03	0.288	0.678
	CASE 04	0.338	0.716
	CASE 05	0.323	0.806

(라) 25m/s 풍속까지 제어목표를 위해 해당 풍속에 대한 7MW 급 풍력타워의 최대 동적 변위응답을 Matlab프로그램과 Midas 프로그램을 이용하여 분석함.

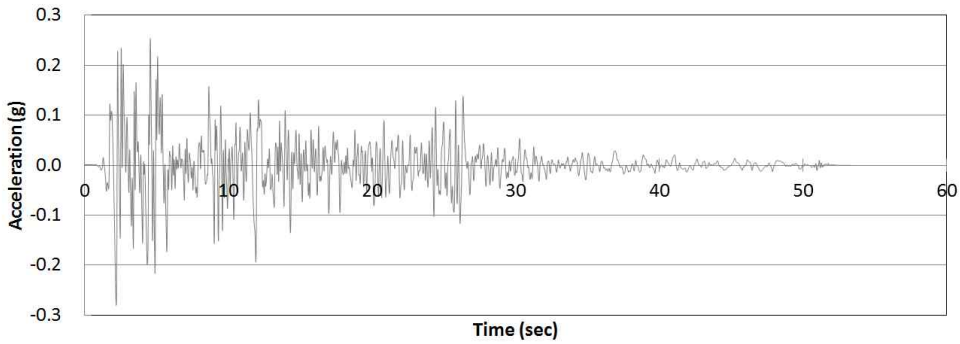
[7MW 풍력타워에 대한 풍속 25m/s 최대 동적 변위 응답]

Program	Wind Speed(m/s)	No. CASE	Max. Dynamic Displacement(m)
Matlab	25	CASE 01	0.254
		CASE 02	0.242
		CASE 03	0.224
		CASE 04	0.245
		CASE 05	0.282
Midas	25	CASE 01	0.289
		CASE 02	0.299
		CASE 03	0.300
		CASE 04	0.261
		CASE 05	0.293

(마) 3MW급 풍력타워의 경우, 터빈의 Cut out 풍속 25m/s에서의 동적응답을 5가지 경우로 비교해 볼 때 최대변위 0.291m, 동적 평균변위 0.247m로 나타남.
(바) 7MW급 풍력타워의 경우, 터빈의 Cut out 풍속 25m/s에서의 동적응답을 5가지 경우로 비교해 볼 때 Midas 프로그램으로 해석한 응답값이 상대적으로 컸으며, 그 값은 최대변위 0.300m, 동적 평균변위 0.289m로 나타남.

마. 지진하중 작용 시의 3MW급 풍력타워 진동 해석

(1) 지진하중은 우발적인 하중으로써 발생의 규모와 빈도를 예측하기 어려우며 발생 시 고소구조물인 풍력타워에 큰 위험요소로 작용할 수 있음.
(2) 해석에는 1940년에 발생한 강진 기록인 6.9 규모의 El Centro 지진데이터(N-S)를 이용함.



[El Centro N-S 지진파]

(3) 타워의 감쇠비는 풍력타워의 설계기준에서 일반적으로 제시하는 1% Critical Damping Ratio를 적용함.
(4) 지진발생 후 약 14.4초 지점에서 최대 변위(약 0.398m)가 발생하며 지진파 작용이 종료된 후의 진동감쇠속도가 느림.

바. 3MW급 풍력타워 허용진동 조사

(1) 타워의 최대 허용변위

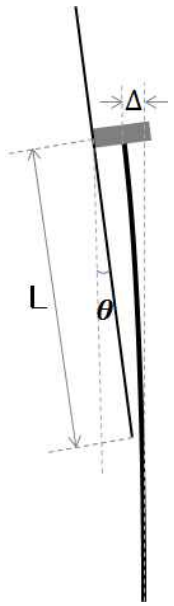
(가) 풍력타워는 전력을 생산하는 터빈구조물을 지지하기 위한 구조물로써 거주용으로 사용되는 구조물이 아님.
(나) 풍력타워의 설계에 사용되는 국외 설계기준(DNV, GL, IEC)에서는 타워 자체의 최대 처짐 등에 대한 허용변위는 제시하지 않음.
(다) 타워의 변위는 블레이드의 변위와 결합하였을 때 구조적 안전성을 확보할 수 있도록 설계되어야 함.

(2) 타워단 변위에 따른 블레이드 단부의 변위

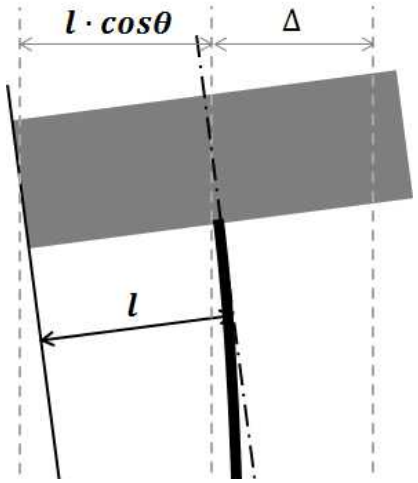
(가) 블레이드에 휨변형이 발생하지 않는다고 가정한 후 타워의 상단 변위를 △, 각변위를 , 블레이드의 길이를 L이라 할 때, 블레이드 단부에는 $\sin\theta$만큼의 변위가 발생함.

(나) 너셀과 타워의 결합부로부터 너셀과 블레이드의 결합부까지의 길이를 l이라 할 때, 너셀과 블레이드의 결합부는 변형 전 타워의 축으로부터 $\triangle + l\cos\theta$만큼 멀어지게 됨

(다) 타워의 휨변형으로 인해 발생하는 블레이드 단부의 변위 $L\sin\theta$는 $\triangle + l\cos\theta - D/2$보다 작아야 함 ($D$: 블레이드 단부 높이에서의 타워 직경).



[블레이드 단부의 변위]



[너셀과 타워 결합부의 변형]

(3) 타워-블레이드 충돌에 대한 타워 상단변위의 영향

(가) 타워의 휨강성 산정

① 타워구조물의 휨강성은 탄성계수(E)와 단면2차모멘트(I), 길이(L)의 함수로 나타낼 수 있음.

② 구조물이 탄성영역 내에서 거동하며 변위가 발생하는 동안에 단면의 변화와 길이의 변화가 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정할 경우, 휨강성은 발생 변위에 영향을 받지 않는 상수로 표현될 수 있음.

③ 풍력타워 해석모델의 휨강성을 산정하기 위해 타워상단에 변위를 가하여 거동을 살펴봄.

④ 1m의 변위발생 시 타워 상단에 발생되는 반력은 8.551x10 N ($8.551\text{x}10^2$kN)이며 타워의 휨강성은 $8.551\text{x}10^2$kN/m로 계산됨.

(나) 타워상단의 발생 변위에 따른 회전각

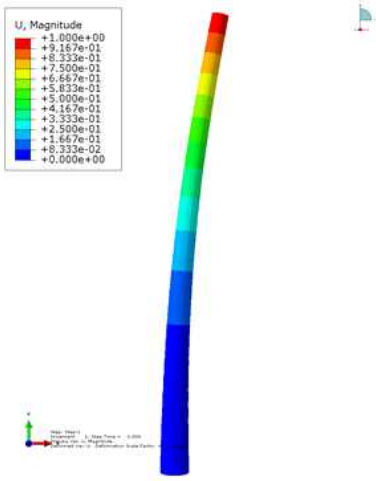
① 타워 상단에 1m의 변위발생 시 $2.529\text{x}10^{-2}$rad의 회전각이 발생함.

② 타워 상단에 발생하는 각변위는 하중(P)과 탄성계수(E), 단면2차모멘트(I)와 길이(L)의 함수로 나타낼 수 있음.

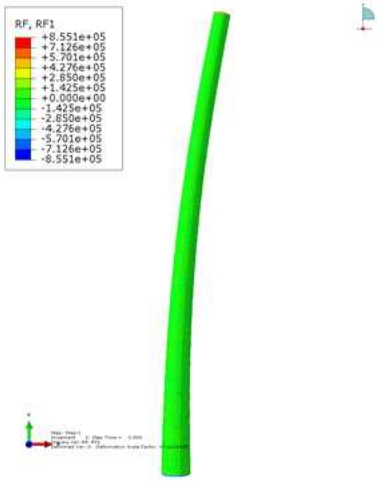
③ 구조물이 탄성영역 내에서 거동하며 변위가 발생하는 동안에 단면의 변화와 길이의 변화가 무

시할 수 있을 정도로 적다고 가정할 경우, 변위와 하중, 회전각 사이에는 선형의 관계가 성립함.

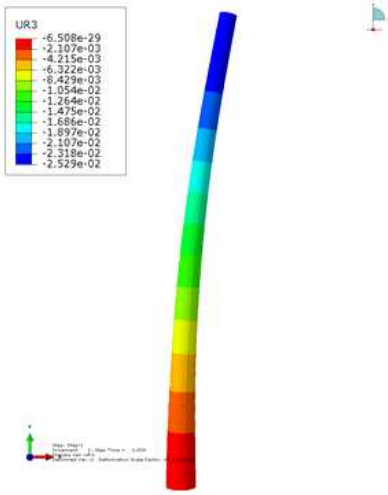
④ 타워 상단의 회전각( ) = (2.529x10 ^{2}) · (△)로 표현할 수 있음.



[휨강성 산정을 위한 변위가력]



[1m 변위가력시의 반력]



[1m 변위가력시의 회전각]

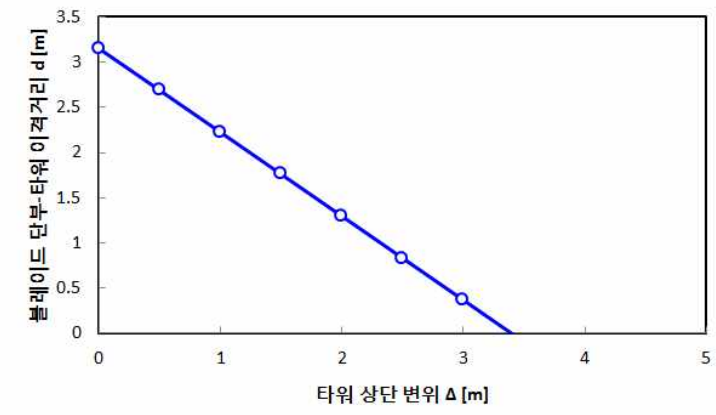
(다) 타워 상단 변위에 따른 타워-블레이드 충돌가능성

① 타워에 휨변형이 발생한 경우 블레이드 단부와 변형 전 타워 축 사이의 이격거리(d)는 $\Delta + l\cos\theta - \sin\theta$로 나타낼 수 있으며 $d \leq 0$인 경우 타워와 블레이드간 충돌이 발생함.

② 블레이드의 길이(L)가 44m, 너셀과 타워의 결합부로부터 너셀과 블레이드의 결합부까지의 길이(l)가 5m이고 블레이드 단부 높이의 타워 직경이 3.7m일 때 타워 상단 변위에 따른 타워-블레이드 충돌가능성을 살펴봄.

③ 블레이드가 충분히 Rigid하며 휨변형이 발생하지 않는다고 가정하였을 경우, 타워상단변위가 약 3.5m일 때 타워-블레이드간 충돌이 발생함.

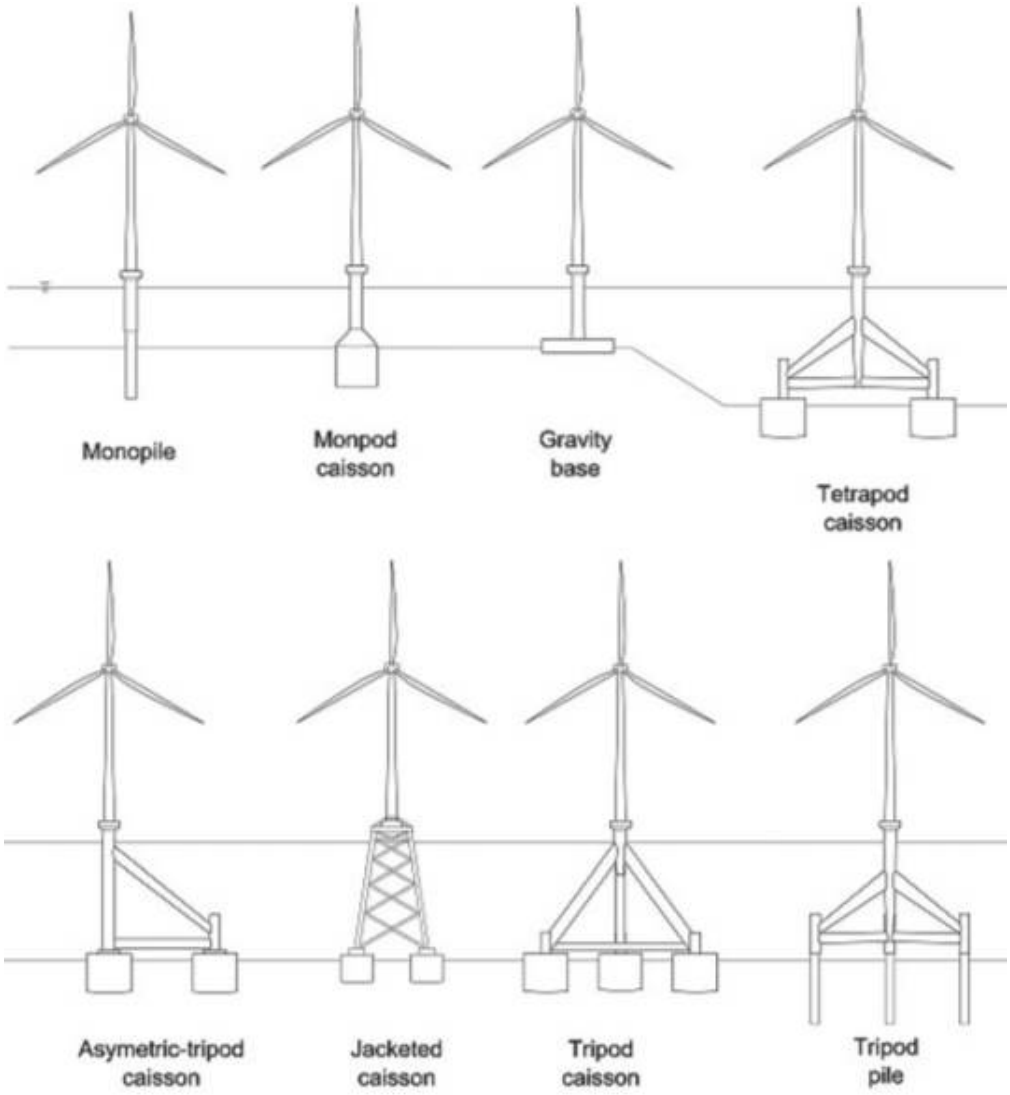
④ 블레이드에 휨변형이 발생할 경우, 블레이드와 타워간 이격거리는 좁아지게 되며 블레이드의 휨변형을 고려한 충돌가능성 분석이 요구됨.



[타워 상단 변위에 따른 타워-블레이드 충돌가능성]

(4) 풍력타워 하부 구조물 변화에 따른 분석

(가) 해상풍력타워에는 다양한 종류의 하부구조물이 사용되며 모노파일 형식과 자켓식, 중력식 기초가 가장 많은 비중을 차지함.



[Different types of foundations(S. Bhattacharya, 2014)]

[해상풍력 기초의 종류]

기초형식	Gravity Base	Mono-Pile	Jacket	Tripod
적용수심	0m~15m	10m~30m	20m~50m	20m~50m
지반조건	-단단한 지반이나 -지반이 좋은 곳	-토적토사 -연암지반	-연약층	-연약층
특징	-경제적임 -불량한 지반에서는 안정성이 떨어짐	-대단위 단지 적합 -피로와 부식문제	-강성 우수 -가벼움 -파하중이 작음	-대용량 터빈사용가능 -전도의 저항성 우수 -경제성이 낮음

(나) 해상풍력타워의 지지구조물 설계 시, 지반조사가 이루어져야 함. 지질학적 역사 및 조사범위을 결정하는 지질학적 조사가 실시되고, 특정지역의 정밀조사와 지형의 층 분포를 이해해야하며, 실내 및 현장실험을 통하여 지반 공학적 조사가 이루어져야 함.

[지반 공학적 조사 방법]

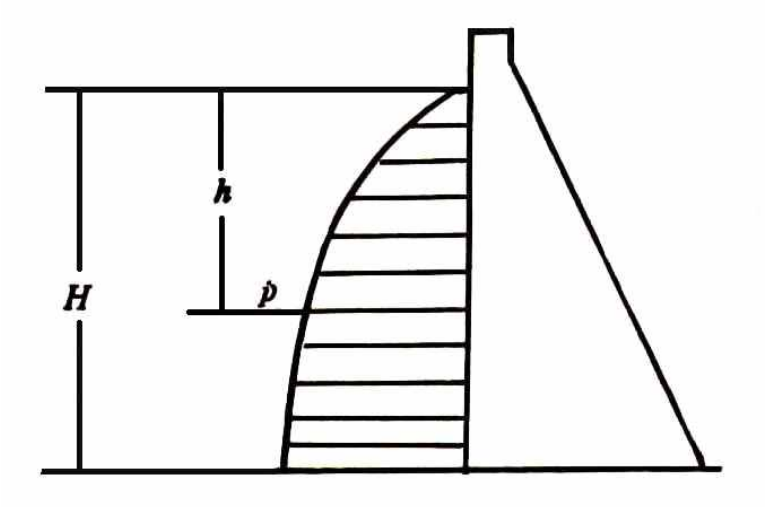
지반공학적 조사	조사 항목
실내실험 조사	-Classification and index tests -Permeability tests -Consolidation tests -Static test for determination of shear strength parameter -Triaxial test (UU, CIU, CAU, K0) -Direct simple shear -Test for determination of remoulded shear strength (UU, CU) -Cyclic tests for determination of strength and stiffness parameters -Triaxial test (CIU, CAU) -Direct simple shear -Resonant column -Shear wave velocity measurement
현장실험 조사	-Cone penetrometer test (CPT) -. most commonly used -Remote Vane -Pressuremeter -Radioactive well logging -Shear wave velocity required system -Dilatometer

(다) 해상풍력타워의 FEM 구조해석을 위해 토적 토사 및 연약층의 지반 조건으로 설정하여 모노 파일의 기초 형식 선정함. 수심은 적용 수심 10m~30m안에 수렴하는 25m(D-)로 가정함. 직경은 타워 하단부 직경과 동일하며 50mm의 두께를 갖는 모노파일로 적용함.

(라) 육상 풍력타워의 경우 별도의 하부구조물을 모델링하지 않고 타워 하단부를 고정단으로 고려하여 해상 풍력타워의 경우와 비교 분석함.

(마) 부가수질량(Added mass)

① 해상풍력타워의 하부구조물인 모노파일의 경우 거동 시 유체 동수압의 영향을 받음.



[Hydro-dynamic pressure on the dam surface]
(임세종, 2010)

② Westergaard는 파동방정식으로부터 댐에 작용하는 동수압을 아래와 같이 산정하였으며, 구조물에 가해지는 동수압은 유체의 질량과 가속도 항, 추가적인 수치의 곱으로 구성됨.

$$\frac{7W_0}{8g} a_0 \quad H \cdot h$$

(여기서, W_0:물의 단위체적당 중량, a_0:입력 가속도 진폭, H:전체 수심, h:수심)

③ 동수압을 구성하는 식에서 가속도항을 분리하면 질량 차원의 식을 얻을 수 있으며 해당 식이 구조물에 작용하는 유체의 질량이라 가정하면 구조해석 시 구조물에 추가적인 질량을 적용하여 수중 유체의 동적효과를 적용할 수 있음.

$$m_d = \frac{7W_0}{8g}\sqrt{H \cdot h}$$

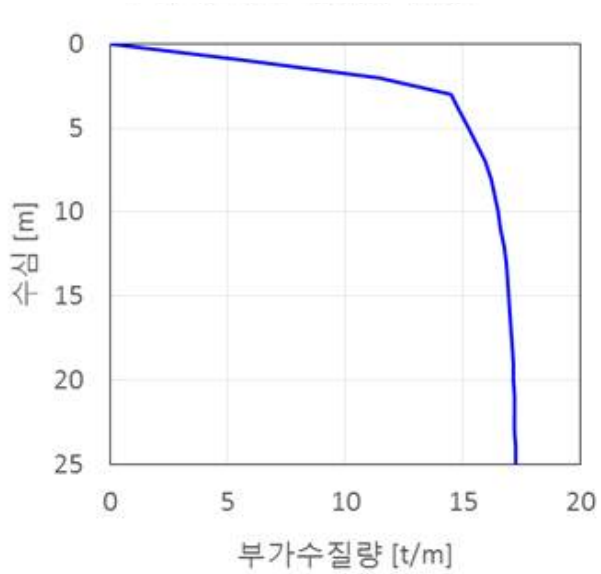
④ 모노파일에 작용하는 동수압의 계산을 위해 상수도시설기준(2010)에 적용된 Bessel 함수를 이용한 취수탑 외부 동수압 계산식을 이용할 수 있음.

$$p_2(z_2) = A_h \cdot \gamma_0 \cdot \pi a_2^2 \cdot K \begin{pmatrix} z_2 \\ h_2 \end{pmatrix}$$

(여기서, A_h:설계수평가속도계수, γ_0:물의 단위체적당 중량, a_2:취수탑 외부 반경, K:Bessel 함수, h_2:취수탑 외부수심, z_2:취수탑 외부저면으로부터의 높이)

⑤ 동수압 계산식을 통해 도출된 모노파일 외부에 가해지는 단위 높이 당 부가수질량은 아래와 같음.

$$m_{d2}(z_2) = \rho_0 \cdot \pi a_2^2 \cdot K\left(\frac{z_2}{h_2}\right)$$

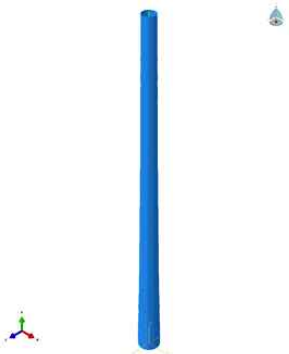
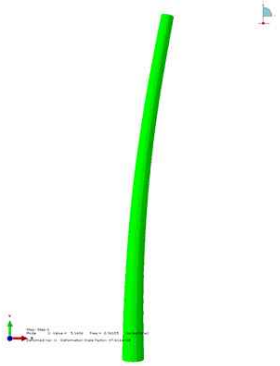
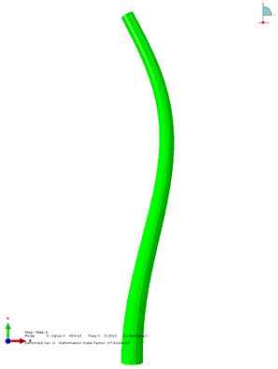
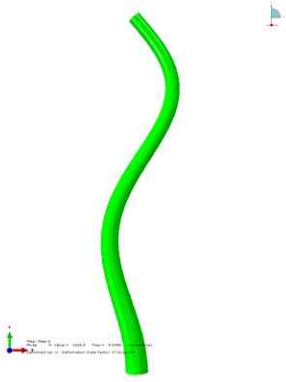


[모노파일에 가해지는 부가수질량]

(바) 하부 구조물 변화 시 고유치 해석

① 해석 대상모델인 모노파일로 설계된 해상에서의 풍력타워 FEM모델링을 통해 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 고유치해석을 수행하였으며 1차~3차 진동모드에 대한 고유진동수를 추출함.

[하부 구조물 변화 시 고유치해석 결과]

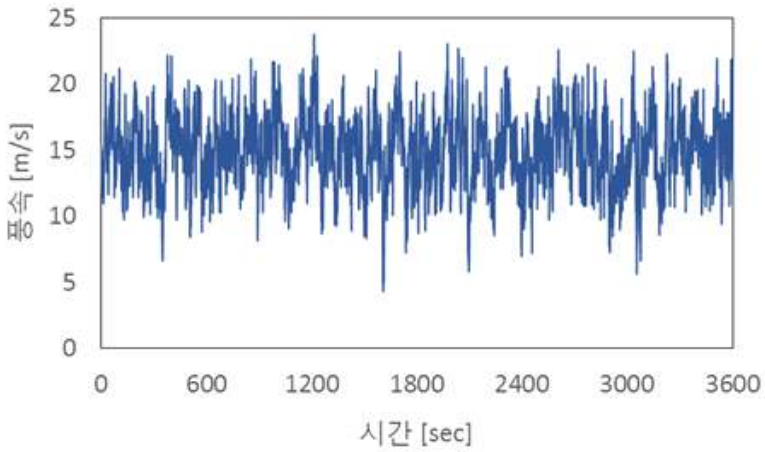
FEM 해석모델 (3MW급 모델)	1st Mode (0.3018Hz)	2nd Mode (2.0002Hz)	3rd Mode (4.7070Hz)
			

② 해상풍력타워모델의 경우 일반 육상풍력타워에 비해 낮은 강성을 가지며 부가수질량의 적용으로 인해 질량이 증가하게 되므로 모든 진동모드에 대해 낮은 고유진동수를 가짐.

(5) 감쇠비에 따른 풍력타워 진동저감 효과 분석

(가) 일반사항

① 제진장치는 다양한 형식과 성능으로 설계되어 구조물에 발생하는 진동을 저감시킴.
② 제진장치의 성능이 구조물에 발생하는 진동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 구조물의 감쇠비에 따른 응답을 살펴봄.
③ 풍력타워 설계기준에서는 동적 구조해석 수행 시 일반적으로 1%의 감쇠비를 고려하도록 제시하고 있으며 진동저감 효과 분석에는 0.5%~15%의 타워 감쇠비를 적용함.
④ 일반 육상 3MW 풍력타워 모델과 모노파일의 하부를 지닌 해상풍력타워에 대한 비교 실시함.
⑤ 평균풍속인 15m/s의 풍속 작용 시, 타워에 가해지는 풍압은 119.407 m 이며, 블레이드에 작용하여 타워 최상단에 전달되는 하중은 26.867kN.
⑥ 풍속 결정 조건은 다음 아래와 같음.
- 작용 풍속의 평균은 대상 풍력터빈 Vestas V90-3.0MW의 정격풍속인 15m/s를 적용
- 15m/s의 평균풍속을 갖는 시간이력 풍속 데이터는 Iwatani 프로그램을 이용하여 생성된 것으로 0.17973의 난류강도, 2.696m/s의 난류 절대강도 값을 가짐.
- 생성된 풍속의 적용 높이는 대상 풍력터빈의 높이인 76.11m이며 시간간격은 1초, 총 3600초 동안의 시간이력 풍속데이터를 이용함.



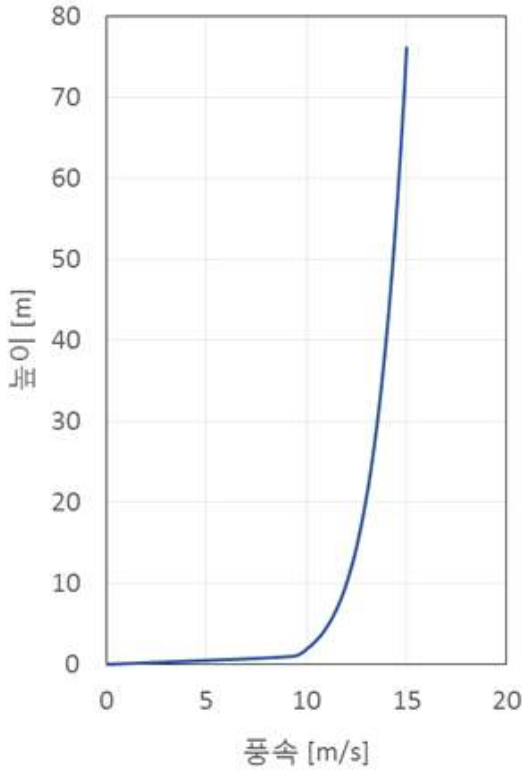
[작용 풍속(평균 풍속 = 15m/s)]

- 높이에 따른 풍속의 분포는 지수법칙에 따라 아래와 같은 관계를 가짐.

$$V/V_{hub} = z/z_{hub})^{0.11}$$

여기서, z_{hub} : 터빈 높이,

V_{hub} : 터빈 높이에서의 풍속

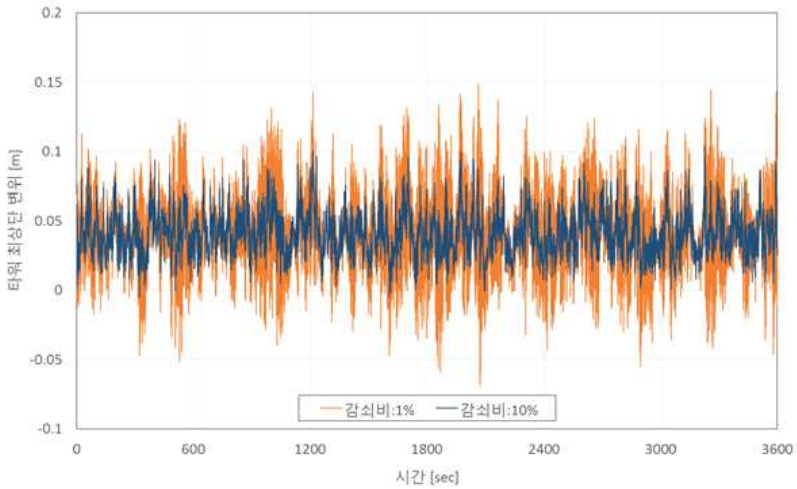


[높이에 따른 풍속 분포]

(나) 육상풍력타워에서의 진동저감효과

– 앞서 정립된 육상풍력타워의 FEM모델과 평균풍속 15m/s의 값을 가지는 시간이력 풍속 데이터를 통해 풍력타워 구조물에 감쇠비를 상이하게 적용시켜 1초 간격으로 총 1시간의 시간이력 진동 해석을 수행함.

① 타워 최상단 변위

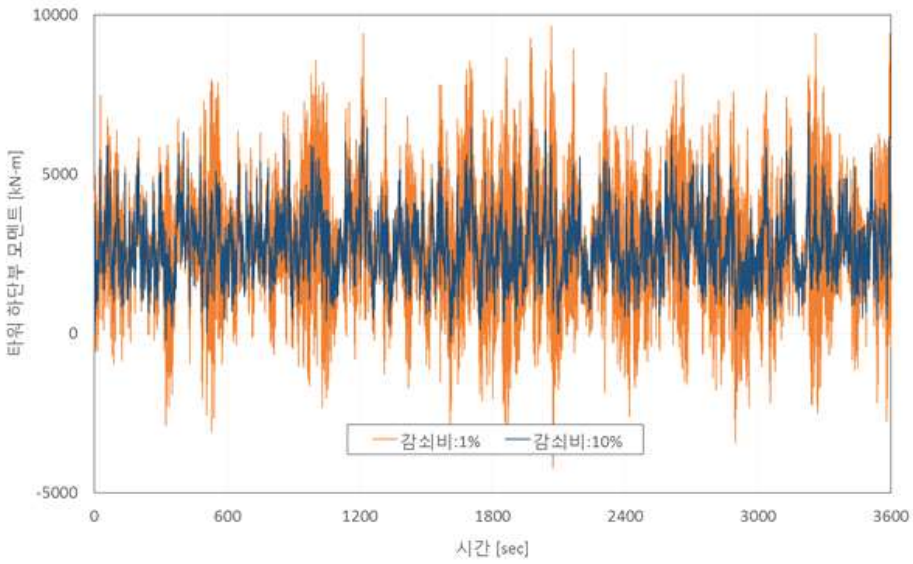


[시간이력 타워 최상단 변위응답 (감쇠비:1%, 10%)]

- 15m/s의 평균풍속이 작용할 때, 1%의 감쇠비를 적용한 경우 타워 최상단에 0.148m의 최대변위가 발생하였고, 10%의 감쇠비를 적용한 경우 0.104m의 최대변위가 발생.

– 육상풍력타워 구조물이 10%의 감쇠비를 확보할 경우 1%의 감쇠비를 가질 때 보다 타워 최상단 변위의 최대응답을 약 29.78% 저감시킬 수 있음.

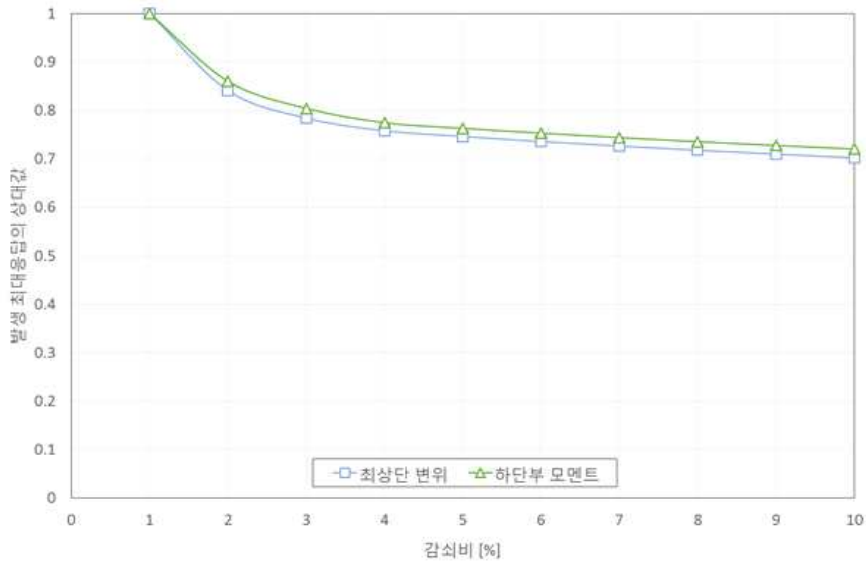
② 타워 최하단 모멘트



[시간이력 타워 하단부 모멘트응답 (감쇠비:1%, 10%)]

– 15m/s의 평균풍속이 작용할 때, 1%의 감쇠비를 적용한 경우 타워 하단에 9625.36kN · m의 최대모멘트가 발생하였고, 10%의 감쇠비를 적용한 경우 6933.43kN · m의 최대모멘트가 발생
– 육상풍력타워 구조물이 10%의 감쇠비를 확보할 경우 1%의 감쇠비를 가질 때 보다 타워 하단 모멘트의 최대응답을 약 27.97% 저감시킬 수 있음

③ 감쇠비에 따른 최대응답의 감소율



[감쇠비에 따른 발생 최대응답의 상대값]

[감쇠비에 따른 최대응답의 감소율]

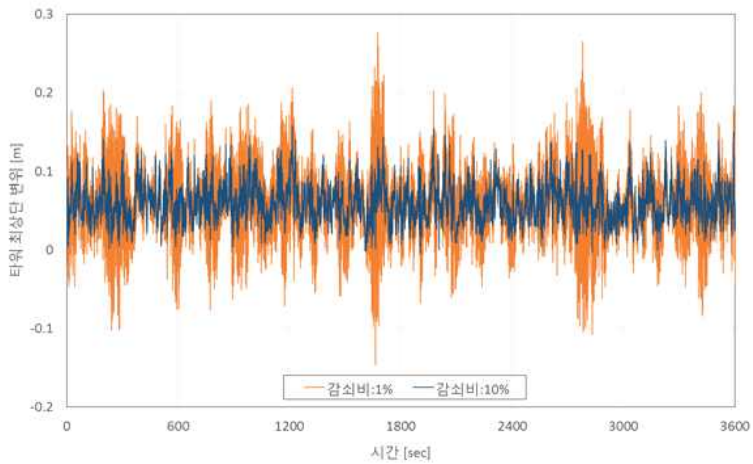
감쇠비 (%)	발생 최대응답		최대응답의 감소율 [%]		감쇠비 1%대비 최대응답 감소율 [%]	
	최상단 변위 [m]	최하단 모멘트 [kN · m]	최상단 변위	하단부 모멘트	최상단 변위	하단부 모멘트
1	0.1481	9625.36	–	–	–	–
2	0.1246	8278.68	15.90%	13.99%	15.90%	13.99%
3	0.1162	7740.86	6.75%	6.50%	21.58%	19.58%
4	0.1123	7455.88	3.34%	3.68%	24.19%	22.54%
5	0.1105	7344.98	1.56%	1.49%	25.38%	23.69%
6	0.1090	7248.38	1.38%	1.32%	26.41%	24.69%
7	0.1076	7160.63	1.27%	1.21%	27.35%	25.61%
8	0.1063	7079.49	1.19%	1.13%	28.22%	26.45%
9	0.1051	7003.93	1.12%	1.07%	29.02%	27.23%
10	0.1040	6933.43	1.06%	1.01%	29.78%	27.97%

- 풍력타워에 적용된 감쇠비가 증가할수록 발생하는 최대응답이 감소함.
- 육상풍력타워모델에서 최상단 변위와 하단부 모멘트응답의 경우 5%의 감쇠비가 적용될 때부터 최대응답 값의 감소율이 1%대로 떨어지며 감쇠비에 따른 발생 최대응답이 수렴하는 경향을 나타냄.
- 육상풍력타워구조물이 5~6%의 감쇠비 성능을 확보할 경우 1%의 성능을 가질 때 대비 약 25%의 발생 최대응답저감 효과를 기대할 수 있음.

(다) 해상풍력타워에서의 진동저감효과

- 정립된 해상풍력타워의 FEM모델과 평균풍속 15m/s의 값을 가지는 시간이력 풍속 데이터를 통해 육상풍력타워에서의 해석과 마찬가지로 감쇠비를 상이하게 적용시켜 1초 간격으로 총 1시간의 시간이력 진동 해석을 수행함.

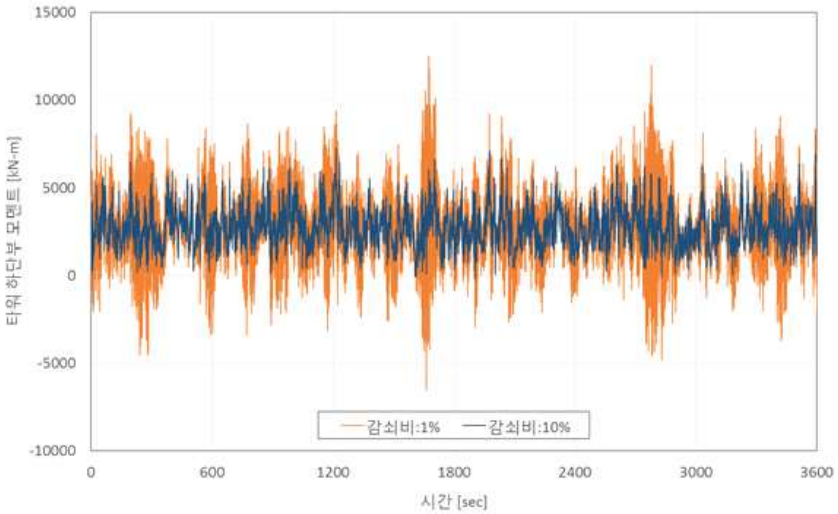
① 타워 최상단 변위



[시간이력 타워 최상단 변위응답 (감쇠비:1%, 10%)]

- 15m/s의 평균풍속이 작용할 때, 1%의 감쇠비를 적용한 경우 타워 최상단에 0.276m의 최대변위가 발생하였고, 10%의 감쇠비를 적용한 경우 0.157m의 최대변위가 발생.
- 해상풍력타워 구조물이 10%의 감쇠비를 확보할 경우 1%의 감쇠비를 가질 때 보다 타워 최상단 변위의 최대응답을 약 43.2% 저감시킬 수 있음.

② 타워 최하단 모멘트



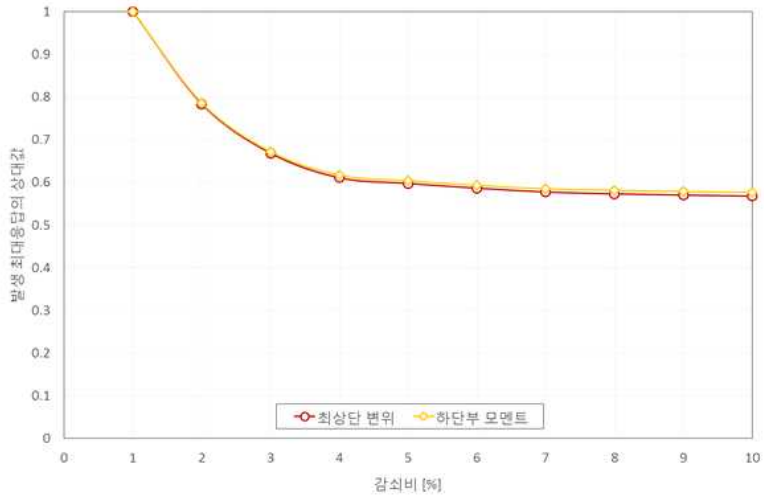
[시간이력 타워 하단부 모멘트응답 (감쇠비:1%, 10%)]

- 15m/s의 평균풍속이 작용할 때, 1%의 감쇠비를 적용한 경우 타워 하단에 12499.8kN · m의 최대모멘트가 발생하였고, 10%의 감쇠비를 적용한 경우 7201.36kN · m의 최대모멘트가 발생함.
- 해상풍력타워 구조물이 10%의 감쇠비를 확보할 경우 1%의 감쇠비를 가질 때 보다 타워 하단 모멘트의 최대응답을 약 42.4% 저감시킬 수 있음.

③ 감쇠비에 따른 최대응답의 감소율

[감쇠비에 따른 최대응답의 감소율]

감쇠비 (%)	발생 최대응답		최대응답의 감소율 [%]		감쇠비 1%대비 최대응답 감소율 [%]	
	최상단 변위 [m]	최하단 모멘트 [kN · m]	최상단 변위	하단부 모멘트	최상단 변위	하단부 모멘트
1	0.2759	12499.80	–	–	–	–
2	0.2162	9824.95	21.63%	21.40%	21.63%	21.40%
3	0.1844	8398.16	14.72%	14.52%	33.17%	32.81%
4	0.1685	7712.76	8.60%	8.16%	38.92%	38.30%
5	0.1648	7546.61	2.20%	2.15%	40.26%	39.63%
6	0.1618	7411.97	1.82%	1.78%	41.35%	40.70%
7	0.1593	7310.22	1.54%	1.37%	42.25%	41.52%
8	0.1581	7268.30	0.76%	0.57%	42.69%	41.85%
9	0.1573	7232.66	0.50%	0.49%	42.98%	42.14%
10	0.1566	7201.36	0.44%	0.43%	43.23%	42.39%

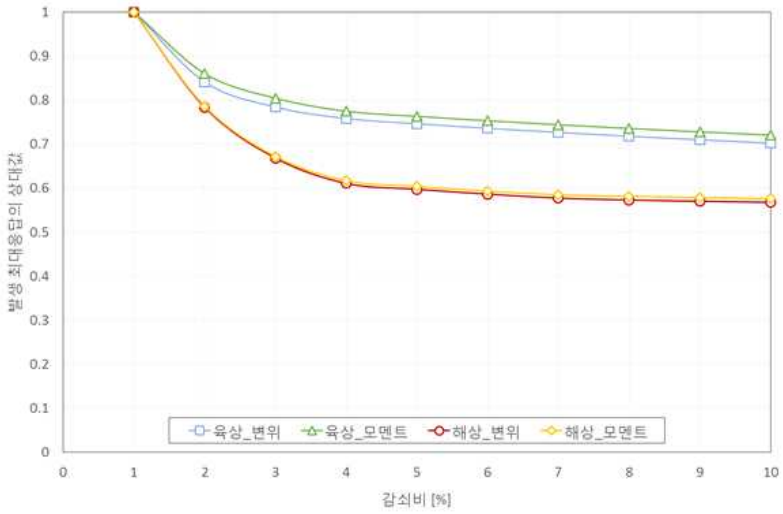


[감쇠비에 따른 발생 최대응답의 상대값]

- 풍력타워에 적용된 감쇠비가 증가할수록 발생하는 최대응답이 감소함.
- 해상풍력타워모델에서 최상단 변위와 하단부 모멘트응답의 경우 6%의 감쇠비가 적용될 때부터 최대응답 값의 감소율이 1%대로 떨어지며 감쇠비에 따른 발생 최대응답이 수렴하는 경향을 나타냄.
- 해상풍력타워구조물이 4~5%의 감쇠비 성능을 확보할 경우 1%의 성능을 가질 때 대비 약 40%의 발생 최대응답저감 효과를 기대할 수 있음.

(라) 결과 분석

- 구조물의 감쇠 성능을 증가시킬수록 구조물에 발생하는 최대응답이 줄어들지만 일정 감쇠 성능을 확보할 경우 최대응답의 감소율이 줄어 수렴하게 됨.
- 해석에 사용된 풍력타워모델은 육상에 적용할 경우 5~6%의 감쇠비 성능을 확보하여 약 25%의 진동저감 효과를 기대할 수 있으며, 해상에 적용할 경우 4~5%의 감쇠비 성능을 확보하여 약 40%의 진동저감 효과를 기대할 수 있음.



[감쇠비에 따른 육·해상 풍력타워 발생 최대응답]

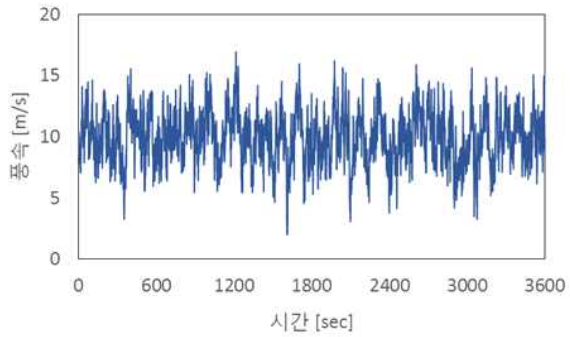
- 동일한 구조감쇠비에 대해 육상풍력타워모델에 비해 해상풍력타워모델의 진동저감 효과가 우수하며, 감쇠비에 따른 발생 최대응답의 수렴구간이 늦게 나타나 제진장치의 성능에 영향을 많이 받는 것으로 나타남.

(6) 감쇠비에 따른 풍력타워의 피로손상저감 효과

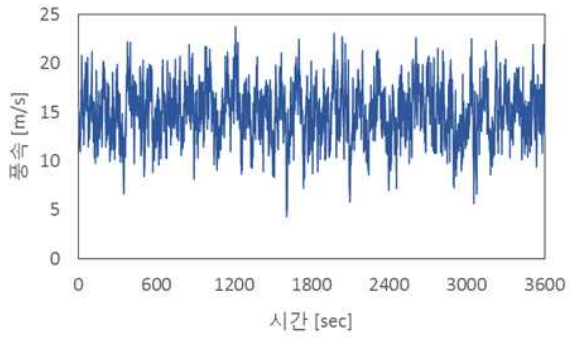
- 구조감쇠의 증가로 인해 응답의 Peak value뿐만 아니라 지속적으로 발생하는 진동에서의 진폭저감 효과를 기대할 수 있음.
- 제진장치의 성능이 지속적으로 발생하는 진동을 저감시킴에 따라 구조물에 발생하는 피로손상에 미치는 영향을 살펴보기 위해 구조물의 감쇠비에 따른 피로손상을 살펴봄.

(가) 적용 풍하중

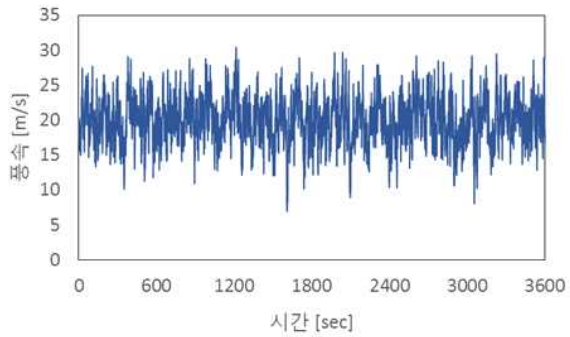
- 풍력타워의 피로손상 검토에는 Iwatani 프로그램을 통해 생성된 10m/s, 15m/s, 20m/s, 25m/s의 평균풍속을 가지는 풍속데이터를 이용하였으며, 각각의 난류강도는 0.2096, 0.17973, 0.1648, 0.15584, 난류 절대강도는 2.096, 2.696, 3.296, 3.896m/s의 특징을 가짐.
- 생성된 풍속의 적용 높이는 대상 풍력터빈의 높이인 76.11m이며 시간간격은 1초, 총 3600초(1시간) 동안의 시간이력 풍속데이터를 이용함.



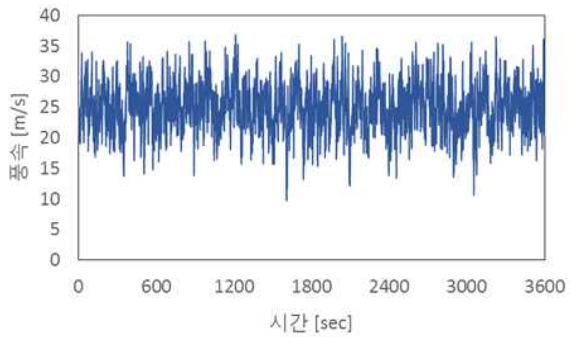
[적용 풍속(평균 풍속 = 10m/s)]



[적용 풍속(평균 풍속 = 15m/s)]

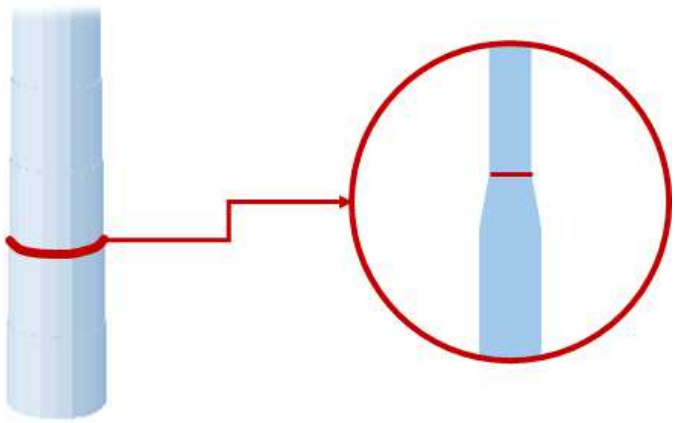


[적용 풍속(평균 풍속 = 20m/s)]



[적용 풍속(평균 풍속 = 25m/s)]

(나) 검토 요소



[피로손상 검토 요소]

- 풍력타워의 하단부에는 유지관리를 위해 내부로의 출입이 가능하도록 개구부가 존재하며 개구부로 인한 구조적 손실을 예방하기 위해 타워 하단 Segment를 두껍게 제작함.
- 본 연구에 사용된 타워모델 또한 하단 두 개의 Segment 두께를 40mm로 하였으며, 3번째 Segment부터 최상단까지 26mm ~ 16mm의 두께를 가짐.
- 타워모델의 피로손상 검토에는 2번째 Segment와 3번째 Segment사이 용접부가 사용됨.
- 시간이력 구조해석을 통해 도출된 해당 요소의 모멘트 단면력을 통해 Bending Normal Stress $= \frac{M}{I} y$를 계산함.

  (여기서, M : 모멘트 단면력, I : 단면2차모멘트, y : 중립축으로부터의 거리)
- DNV · GL에서는 피로검토를 위해 Stress Concentration Factor(SCF)를 고려하도록 제시하고 있으며, Tubular butt weld connections에 대한 SCF at thickness transitions는 아래와 같음.

$$SCF = 1 + \frac{6(\delta + \delta_m - \delta_0)}{t} \frac{1}{1 + \left(\frac{T}{t}\right)^{\beta}} e^{-\alpha}$$

$$\text{여기서, } \alpha = \frac{1.82L}{Dt} \frac{1}{1 + \left(\frac{T}{t}\right)^{\beta}},$$

$$\beta = 1.5 - \frac{1.0}{Log\left(\frac{D}{t}\right)} + \frac{3.0}{\left[Log\left(\frac{D}{t}\right)\right]^2},$$

δ_t : $1/2(T-t)$ eccentricity due to change in thickness,

δ_m : maximum misalignment,

δ_0 : misalignment inherent in the S-N data(0.1t),

T : thickness of thicker plate,

t : thickness of thinner plate,

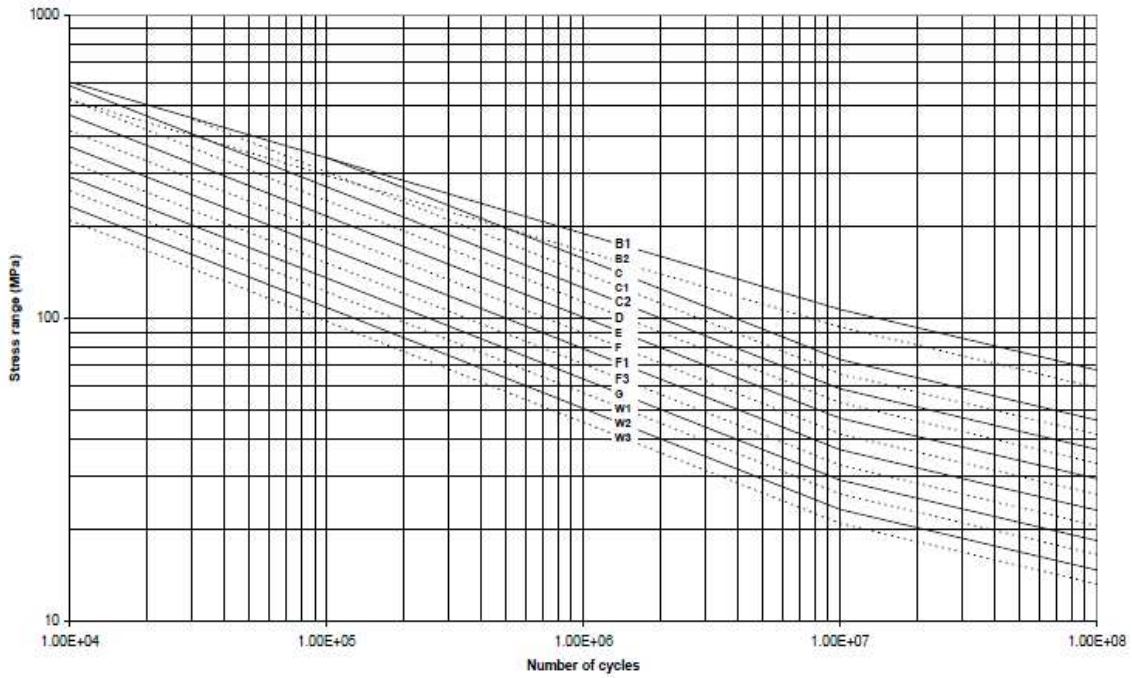
L : width of weld at surface,

D : chord diameter

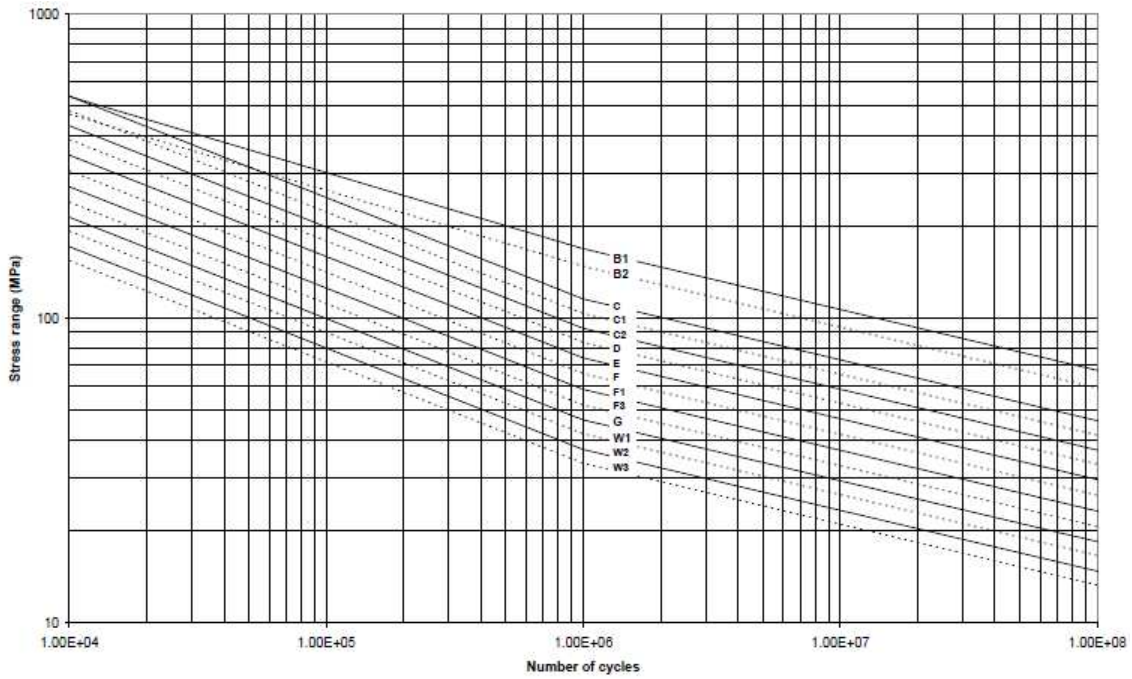
- SCF계산을 위해 $=\delta_0$, $=t$ 가정 시 약 1.5의 값을 나타내며, 피로손상 검토를 위한 SCF는 1.5의 값을 사용함.

(다) S-N Curve

- DNV · GL에서는 피로검토를 위한 Design S-N Curve를 아래와 같이 제시함.



[S-N Curves in air]



[S-N Curves in seawater with cathodic protection]

- 육상풍력타워의 피로손상 검토를 위해 DNV · GL에서 제시하는 'S-N Curves in air' 를 사용하며, 해상풍력타워의 피로손상 검토에는 'S-N Curves in seawater with cathodic protection'를 적용함.
- Butt weld connection at hollow sections에 대한 Detail category는 아래와 같음.

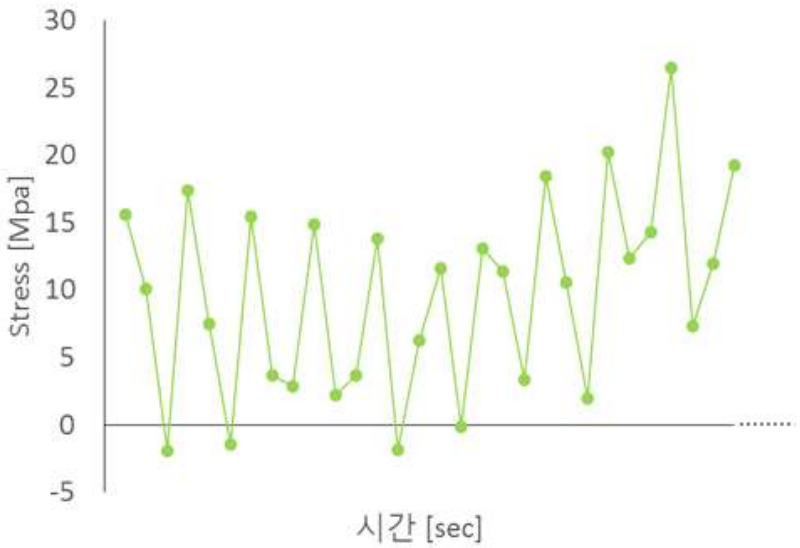
C1		3. Circumferential butt weld made from both sides dressed flush.	3., 4., 5. and 6. — The applied stress must include the stress concentration factor to allow for any thickness change and for fabrication tolerances, ref. section [3.3.7]. — The requirements to the corresponding detail category in Table A-5 apply.
D		4. Circumferential butt weld made from both sides.	
E		5. Circumferential butt weld made from both sides made at site.	
F		6. Circumferential butt weld made from one side on a backing bar.	

[Classification of structural details]

- 피로손상 검토를 위한 S-N Curve는 category D(Circumferential butt weld made from both sides)를 이용함.

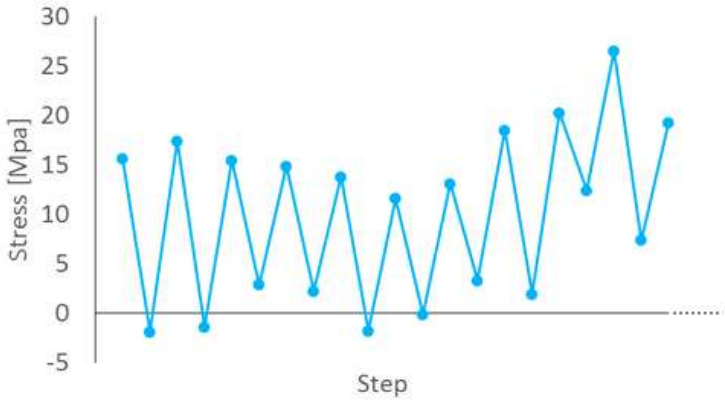
(라) Rainflow Counting

- 시간이력해석을 통한 구조응답으로부터 S-N Curve에 대입하여 피로손상을 산출하기 위한 발생 응력 범위의 반복횟수 Counting을 위한 방법에는 Peak Counting, Level Cross Counting 등이 있으나 Rainflow Counting Method가 가장 일반적으로 사용됨.
- 해당 검토요소에서의 시간이력 모멘트 데이터는 Bending normal stress로 치환되며 SCF(=1.5)가 적용됨.



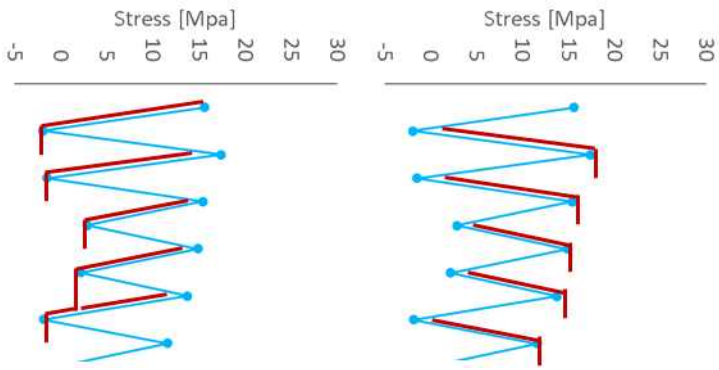
[시간이력 응력데이터]

- SCF가 적용된 Bending normal stress데이터를 통해 Rainflow Counting Method를 적용하기 위해 Peak value를 추출함.



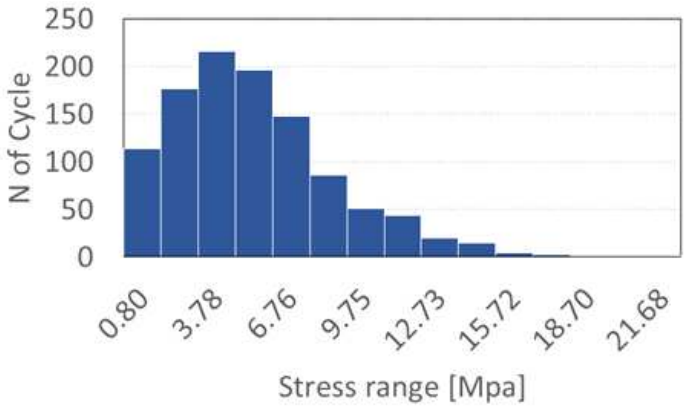
[응력데이터 Peak value plotting]

- 추출된 Peak value 데이터는 시계방향으로 90° 회전하여 Rigid sheet로 간주하며 빗방울이 흘러내릴 때의 half-cycles 수를 아래와 같은 조건에 따라 Counting하게 됨.
  · It reaches the end of the time history;
  · It merges with a flow that started at an earlier tensile peak; or
  · It flows when an opposite tensile peak has greater magnitude



[Rainflow Counting Method]

- 응력의 범위는 15개 구간으로 나누어 해당 구간에 포함되는 cycles 수를 Counting함.



[Counting Result(풍속:15m/s, 감쇠비:1%. Offshore)]

(마) 피로손상 검토

- Rainflow Counting을 통해 추출된 결과를 Miner 선형누적손상을 가정하여 누적피로손상을 계산함.

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{k} n_i \, \Delta\sigma_i)^m \leq \eta$$

여기서, D : 누적피로손상,

$\bar{a}$: S-N Curve의 log N축에 대한 절편

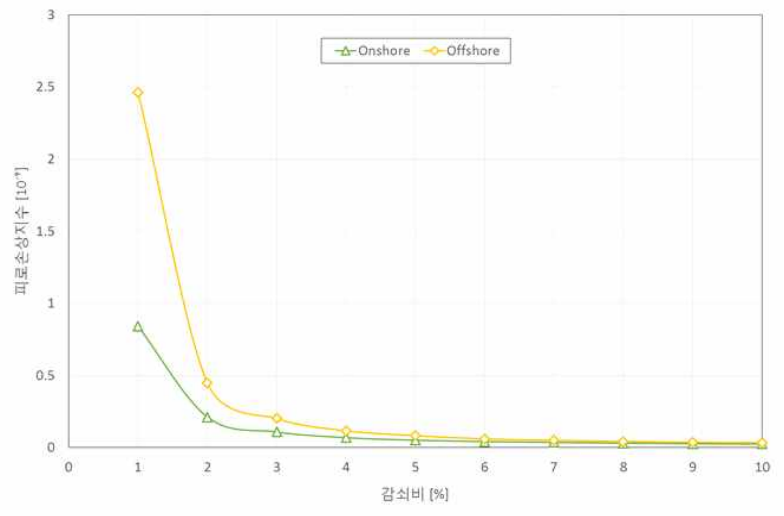
m : S-N Curve에서의 음의 기울기

k : 응력블록의 수

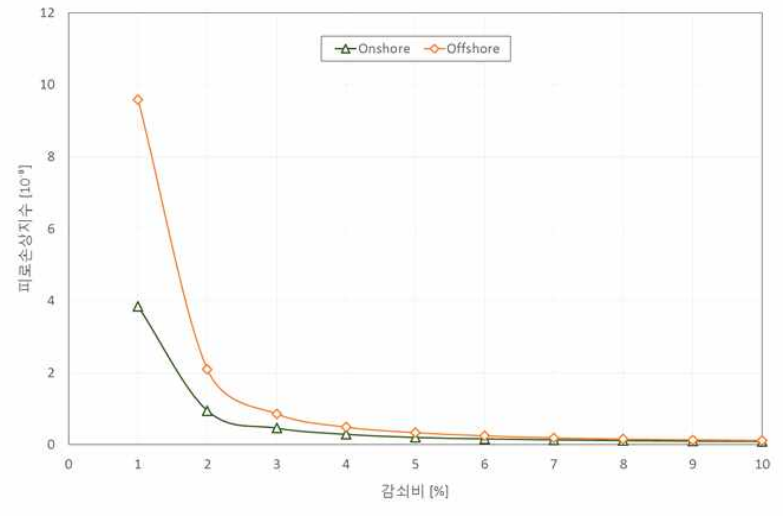
n_i : i번째 응력블록의 반복횟수

N_i : 일정 응력범위 $\Delta\sigma_i$에서의 파괴도달까지 반복횟수

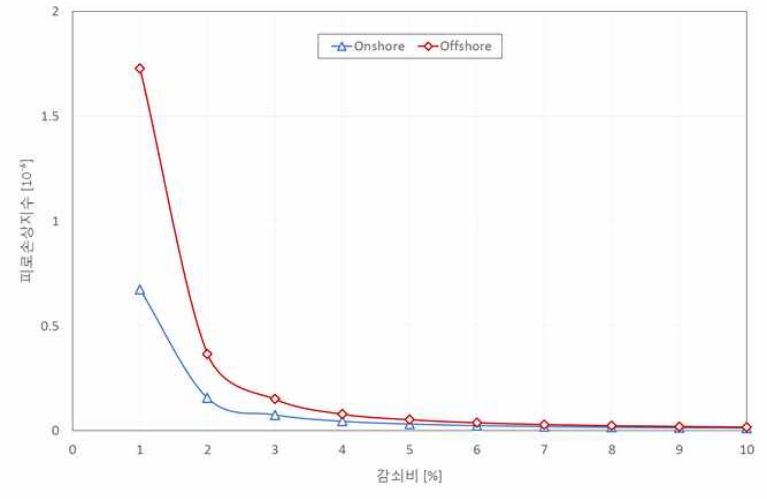
η : Usage Factor



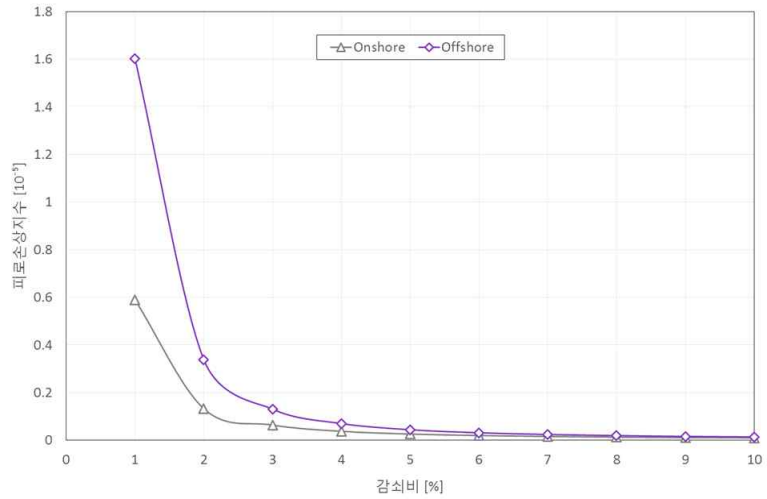
[10m/s의 평균풍속(1hr)에 대한 피로손상지수]



[15m/s의 평균풍속(1hr)에 대한 피로손상지수]

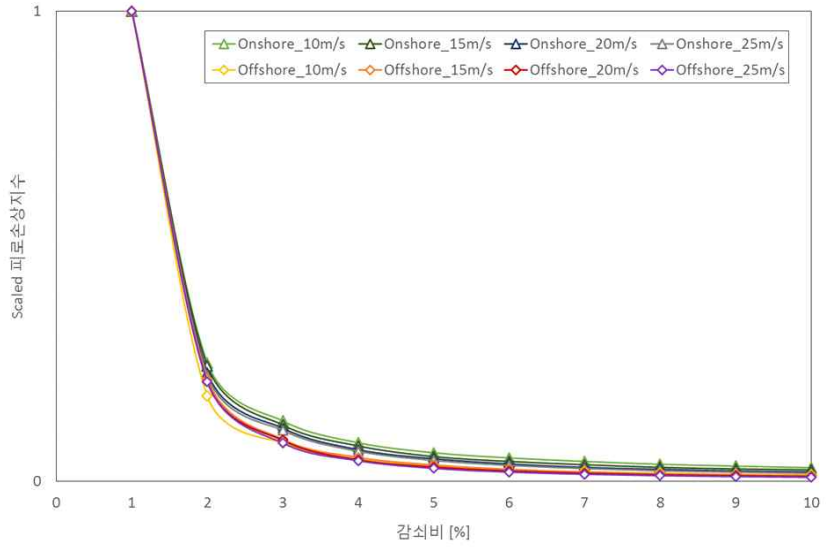


[20m/s의 평균풍속(1hr)에 대한 피로손상지수]



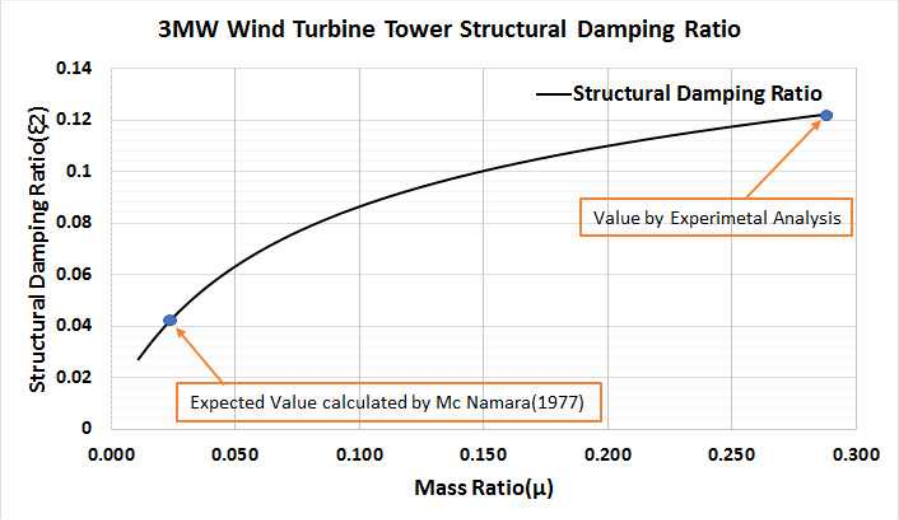
[25m/s의 평균풍속(1hr)에 대한 피로손상지수]

– 감쇠비에 따른 전체 모델의 피로손상저감 효과에 대한 정성적 분석을 위해 감쇠비 1%에서의 응답에 대해 Scale을 적용.



[1% 감쇠비에 대한 Scaled 피로손상지수]

- 피로손상의 경우 최대응답과 달리 육·해상 풍력타워모델에 대한 차이를 크게 나타내지 않으며, 3~4%의 감쇠비를 확보할 경우 1%의 감쇠비 대비 약 90%의 피로손상저감 효과를 기대할 수 있음.
- 본 연구의 경우, 6장에서의 3MW급 풍력터빈타워 TMD 성능시험을 토대로 구조 감쇠비를 추정한 결과, TMD의 성능효과로 인하여 풍속 25m/s에서 4.1%값을 지니게 되므로, 약 95%의 피로손상 저감 효과를 기대할 수 있음.

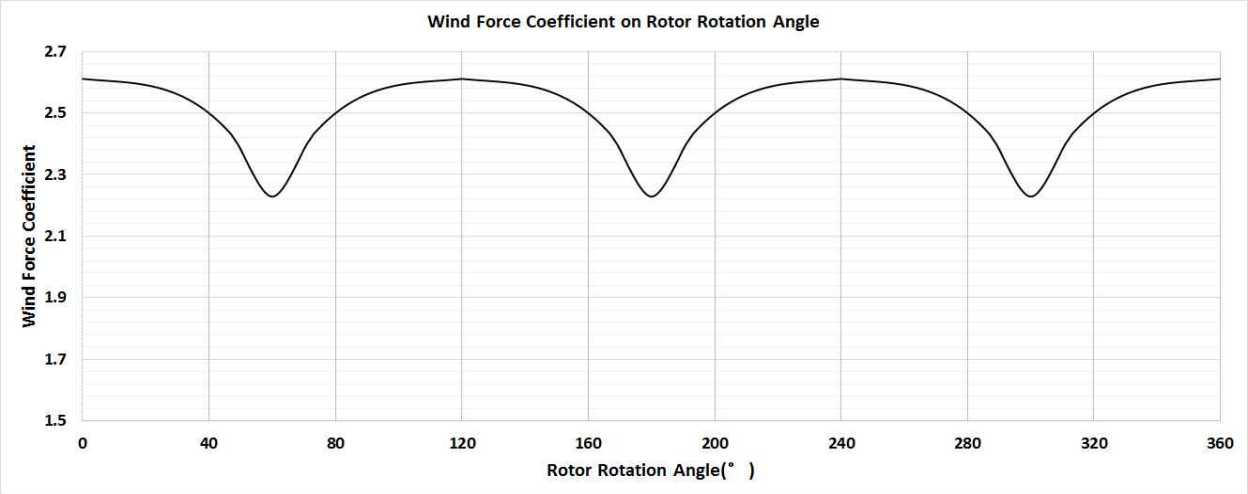


[실험을 통한 3MW 풍력터빈타워의 구조감쇠비 변화(w/ TMD)]

(7) 블레이드 및 동력장치의 연동에 따른 진동 검토

(가) 블레이드 회전각에 따른 풍력계수 및 풍하중 산정

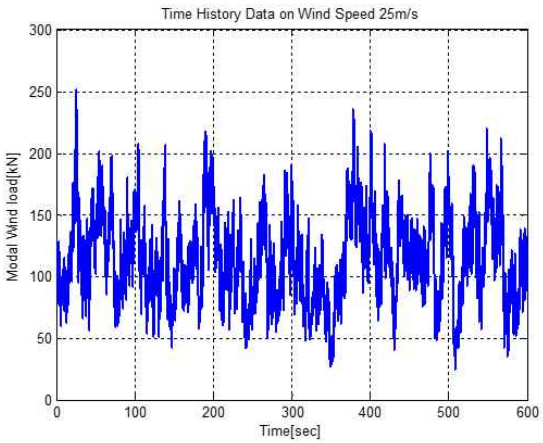
① 블레이드의 회전에 따른 풍력계수 값은 다르므로 풍력계수 변동에 따른 풍력터빈타워의 거동에 영향을 끼치는지 검토가 필요함.
② 위의 풍동실험 결과를 활용하여 블레이드 회전각 0°~360°에 대한 풍력계수를 산정함.



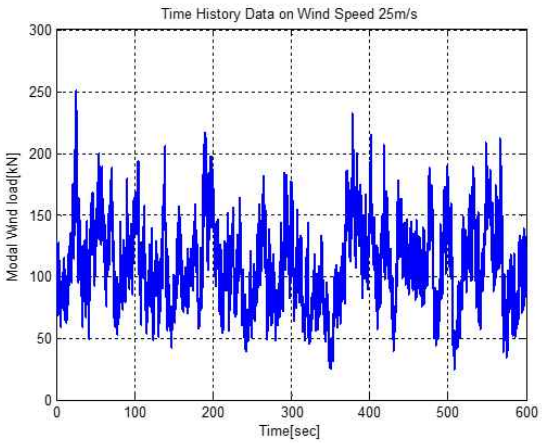
[블레이드 회전각에 따른 풍력계수]

③ 3MW급 풍력타워의 경우, Rated Rotor Speed범위는 8.6~18.4 RPM이며, 최대 RPM으로 블레이드가 회전하였을 때의 각속도는 1.926 rad/s임.

④ 본 연구의 풍하중(25m/s) 산정 시, 풍력계수의 값은 최대 값 2.611을 사용하였으며, 블레이드의 동력장치의 연동에 따른 풍력계수 변동 값(2.611~2.499)을 사용한 풍하중(25m/s)과 비교함.

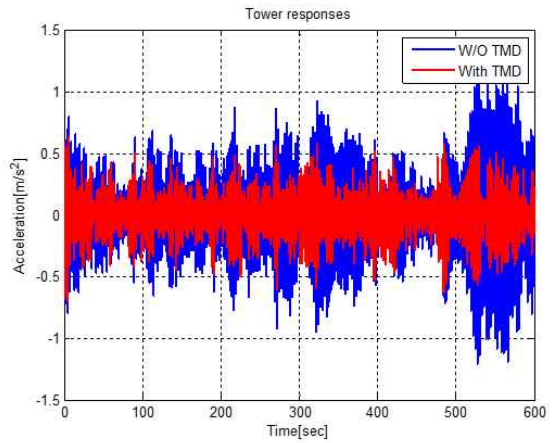


[동일한 풍력계수를 사용하여 산정된 Modal Wind Load(25m/s)]

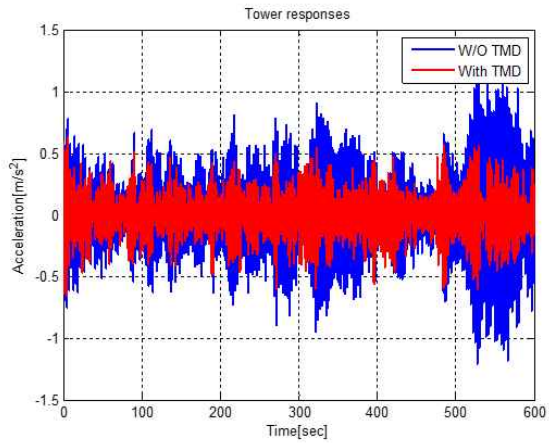


[변동되는 풍력계수를 사용하여 산정된 Modal Wind Load(25m/s)]

⑤ 동일한 풍력계수를 갖는 풍하중과 변동 풍력계수를 갖는 풍하중을 활용하여 3MW급 풍력터빈타워의 구조해석을 실시함. 제진장치는 2장에서 설계된 최적 TMD 사양을 활용함.



[3MW 풍력타워의 가속도 응답(동일 풍력계수)]



[3MW 풍력타워의 가속도 응답(변동 풍력계수)]

⑥ 동일한 풍력계수 및 변동되는 풍력계수를 지닌 풍하중을 활용한 구조 시뮬레이션을 해본 결과, 미소한 응답 차이 값을 보였음.

[풍력계수 변화에 따른 가속도 응답 및 Control Ratio]

3MW Wind Turbine Tower of Response	Wind Force Coefficient			
	2.611		2.611~2.499	
	w/o TMD	w/ TMD	w/o TMD	w/ TMD
Max. Acceleration[/s]	1.2396	0.6271	1.2207	0.6232
Accel. Control Ratio	0.5030		0.5060	

(8) 풍력타워 Cut-out 풍속(25m/s) 초과 시의 진동 해석

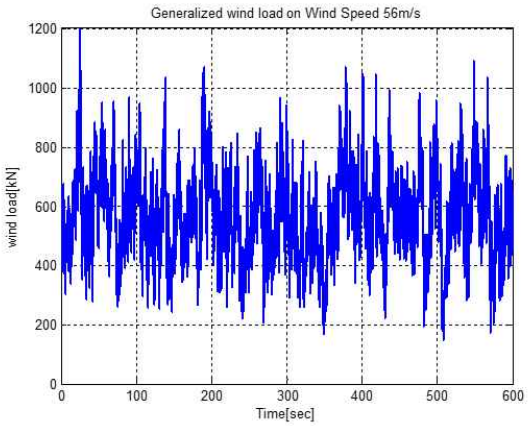
(가) Cut-out 풍속(25m/s) 초과 시, 풍력터빈타워의 제진장치는 제진성능에 대한 억제 기능을 갖춘 기기를 별도 제작하여 제진장치가 없는 풍력터빈타워로 가정하여 진동해석을 실시해야함.

(나) Vestas 사의 V-90 3.0MW Specification 에서는 극한 풍속을 각각 52.5m/s, 63.5m/s로 산정하여 그에 따른 타워의 최상층 및 최하층 기초에 발생하는 하중을 산정함.

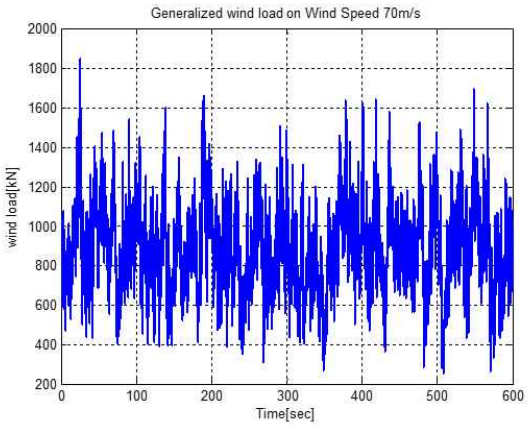
[3MW 풍력터빈타워의 최상층 및 최하층 하중]

Load Case	Tower Top Load		Tower Bottom Load	
	V90L71F	V906160	V90L71F	V906160
Wind Speed(m/s)	52.5	63.5	52.5	63.5
Critical Direction(Deg.)	180	67.7	180	67.7
Fx(kN)	18	596	18	861
Fy(kN)	-46	-25	-238	84
Fz(kN)	-1,046	-946	-	-
Mx(kN.m)	941	1,042	12,369	-1,230
Mx(kN.m)	2,825	1,009	4,233	60,773
Mx(kN.m)	-241	1,180	-241	1,180

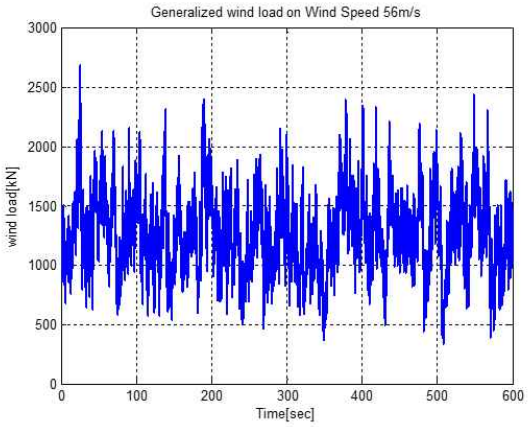
(다) IEC 61400-1에 의거하여 산정된 1년 재현주기 풍속 56m/s, 50년 재현주기 풍속 70m/s에 대한 풍하중을 산정함.



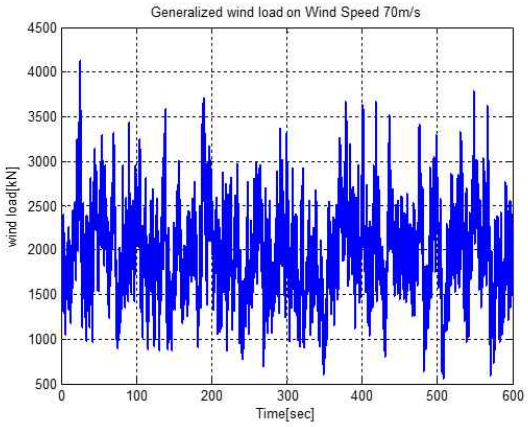
[56m/s의 Modal Load(3MW 풍력타워)]



[70m/s의 Modal Load(3MW 풍력타워)]

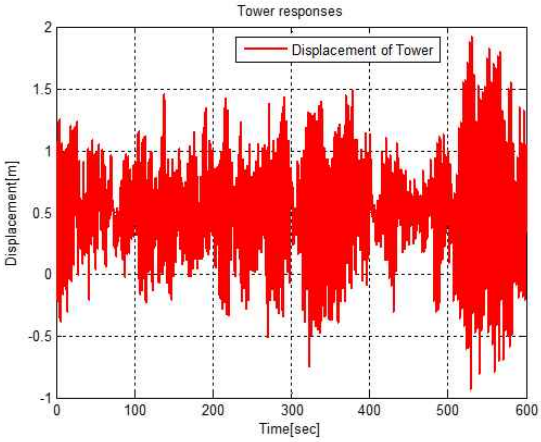


[56m/s의 Modal Load(7MW 풍력타워)]

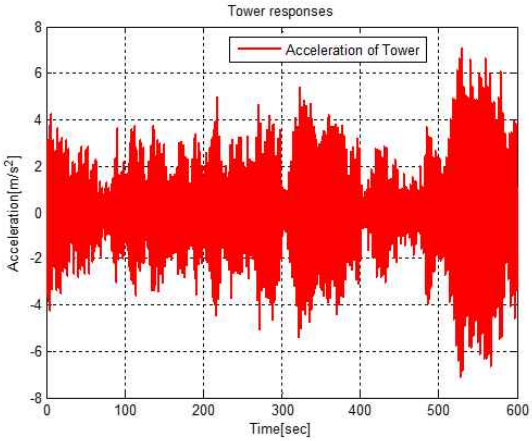


[70m/s의 Modal Load(7MW 풍력타워)]

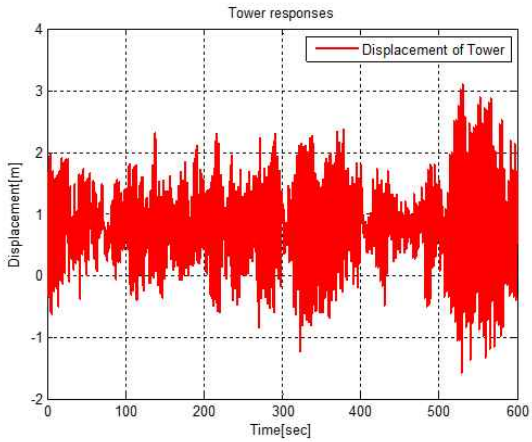
(라) 산정된 1년 재현주기 풍속 56m/s, 50년 재현주기 풍속 70m/s에 대한 풍하중에 대한 구조응답을 구함. 3MW급 풍력터빈타워의 경우, 풍속 56m/s, 70m/s 최대 변위는 각각 1.91m, 3.09m이며 최대 가속도는 각각 7.07 $/s$, $12.30 m/s^2$의 값을 보임. 7MW급 풍력터빈타워의 경우 풍속 56m/s, 70m/s 최대 변위는 각각 1.75m, 2.82m이며 최대 가속도는 각각 $3.97 m/s^2$, $6.24 m/s^2$의 값을 보임.



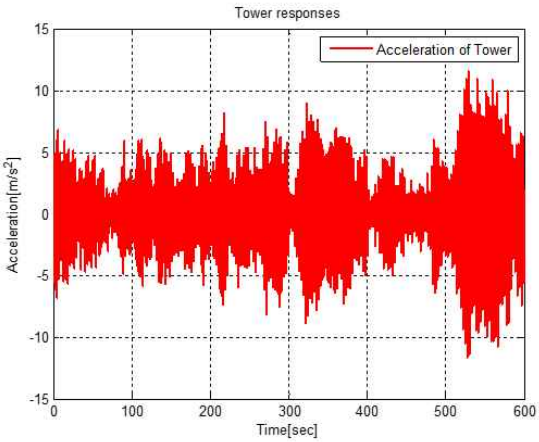
[56m/s 작용 시 3MW 타워 최상층 변위]



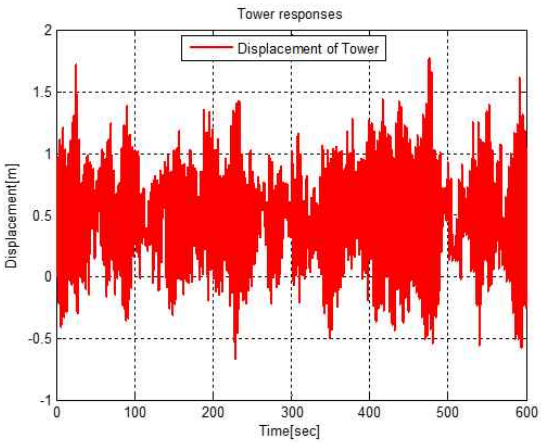
[56m/s 작용 시 3MW 타워 최상층 가속도]



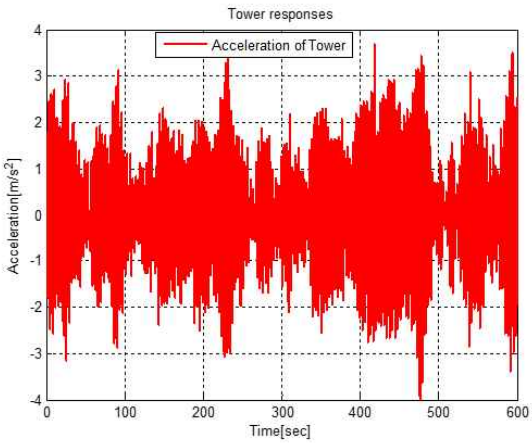
[70m/s 작용 시 3MW 타워 최상층 변위]



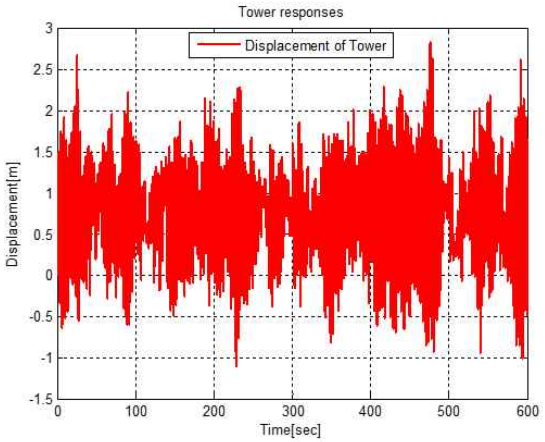
[70m/s 작용 시 3MW 타워 최상층 가속도]



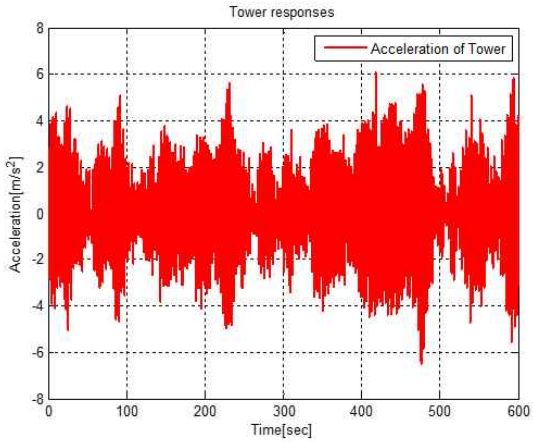
[56m/s 작용 시 7MW 타워 최상층 변위]



[56m/s 작용 시 7MW 타워 최상층 가속도]



[70m/s 작용 시 7MW 타워 최상층 변위]



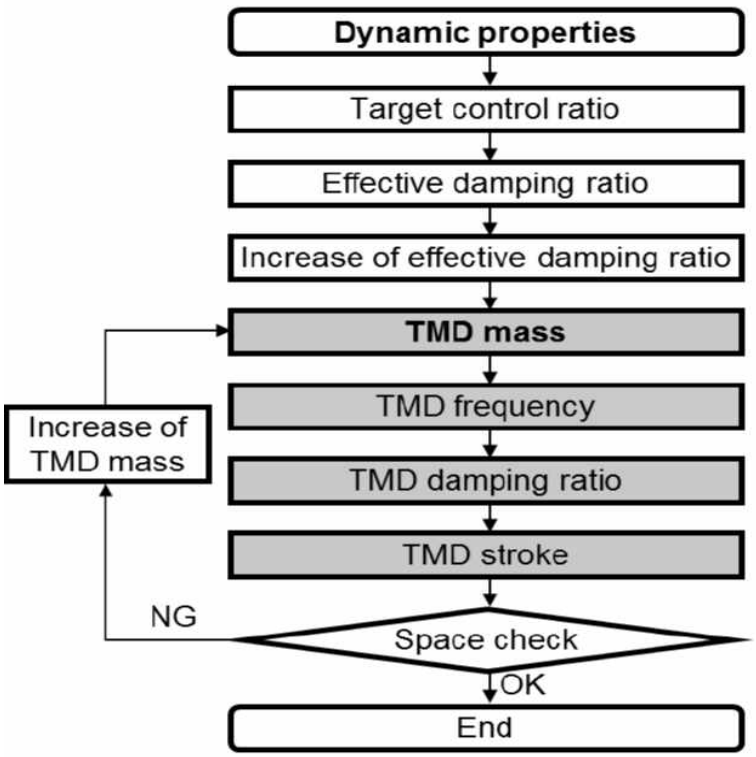
[70m/s 작용 시 7MW 타워 최상층 가속도]

2. 풍력타워의 제진장치 설계 및 해석

가. 풍력타워 및 제진장치 사양

(1) 제진장치의 이론 식

- 외부 조건에 따라 최적의 제진장치 사양 결정으로 설계하기 위해 Yamaguchi et.al(1991)의 TMD Design Parameter을 인용함.



[제진장치 설계 절차]

- 단진자형 제진장치의 경우, 아래의 식과 같이 질량에 관련이 없고 진자 길이에 따라 진동주기가 변화함.

$$2\pi \quad L/g$$

(여기서, T: 제진장치의 진동주기(sec), L: 진자 길이, g: 중력 가속도($9.81 m/s$)

- TMD 최적 설계의 중요한 설계변수(Random Excitation)로 TMD Mass Ratio, TMD Frequency Ratio, TMD Damping Ratio가 있으며, 이 3가지 변수의 최적 값을 정하는 방법에는 여러 가지가 있고, 최적의 기준을 무엇으로 정하느냐에 따라 달라짐.

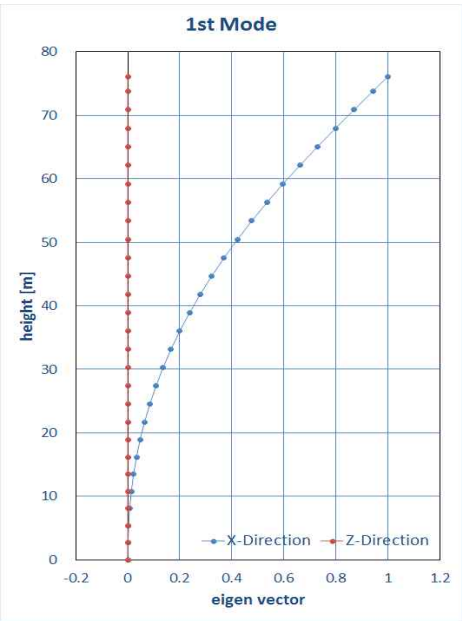
$$\mu = \frac{M_{tmd}}{M_1}, \quad \gamma = \frac{1+\frac{\mu}{2}}{1+\mu}, \quad \xi_{tmd} = \frac{1}{2}\frac{\mu(1+\frac{3\mu}{4})}{1+\frac{3\mu}{2}}$$

여기서, μ: TMD Mass Ratio, M_{tmd}: 풍력타워의 모드질량, M_1: TMD의 질량, γ: TMD Frequency Ratio, ξ_{tmd}: TMD Damping Ratio

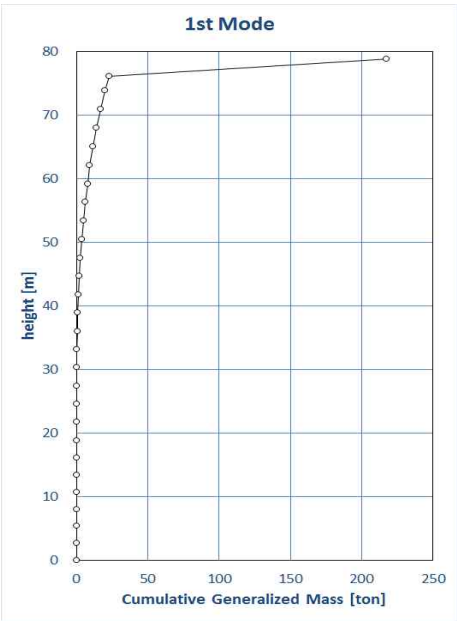
(2) 3MW급 풍력타워

(가) 풍력터빈의 동적특성

① 고유 진동수 : 0.3616Hz.
② 제진장치의 예상 설치위치인 타워 최상단 Segment[height : 73.81m]을 기준으로 1차모드 형상으로 정규화하여 모드질량 산출.
③ 모드질량 : 217ton.



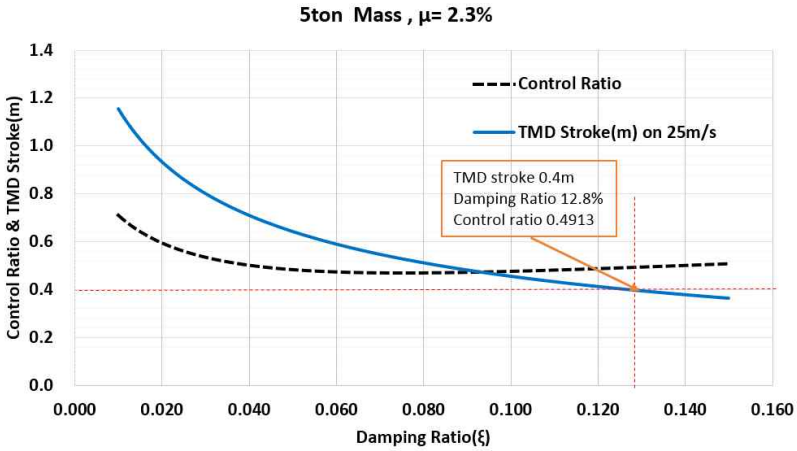
[1차모드 변형 형상]



[1차모드 누적된 일반화질량]

(나) TMD 최적 Mass 산정

① 제진장치가 설치될 3MW급 풍력타워의 Segment 실내공간은 최상부 지름 2.268m, 최하단 지름 2.418m, 높이 2.3m로 공간이 내부적으로 협소함.
② 이러한 공간적 문제를 해결하기 위해 제진장치의 이송거리를 조정하여 Cut-out Wind Speed(25m/s)까지 진동 제어할 수 있는 시스템 설계.
③ TMD 약산식을 이용하여, 최적의 질량비 2.3%(TMD Mass : 5ton)로 결정하고 제진장치 이송거리를 0.4m로 제한하여(제진장치 감쇠비 12.8%) 설계할 경우, 변위 저감율 50.87%의 효과를 얻을 수 있음. 여기서, Pendulum Length는 고유진동수에 상응하는 1.964m임.



[질량의 따른 제진장치 성능 특성 분석]

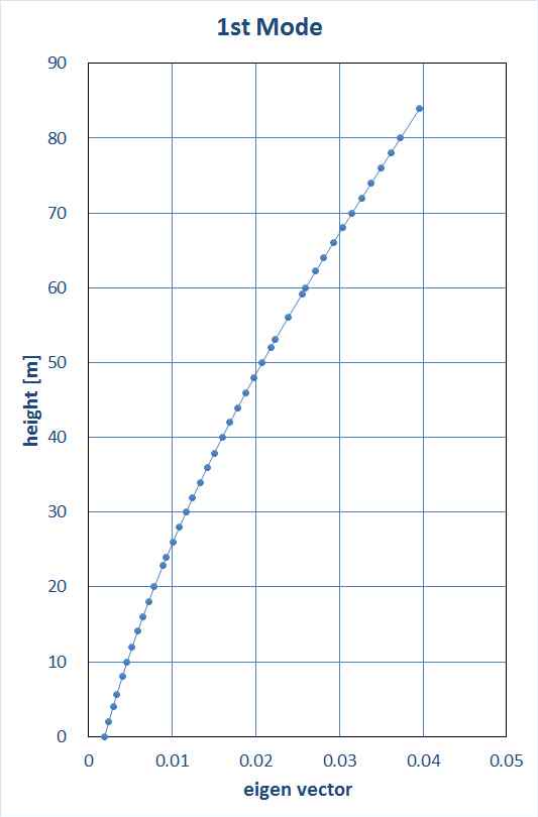
[3MW급 제진장치 사양]

항 목	제 원
이동질량 [ton]	5
질량비 [%]	2.3
감쇠비 [%]	12.8
튜닝비 [%]	98.3
튜닝진동수 [Hz]	0.3555

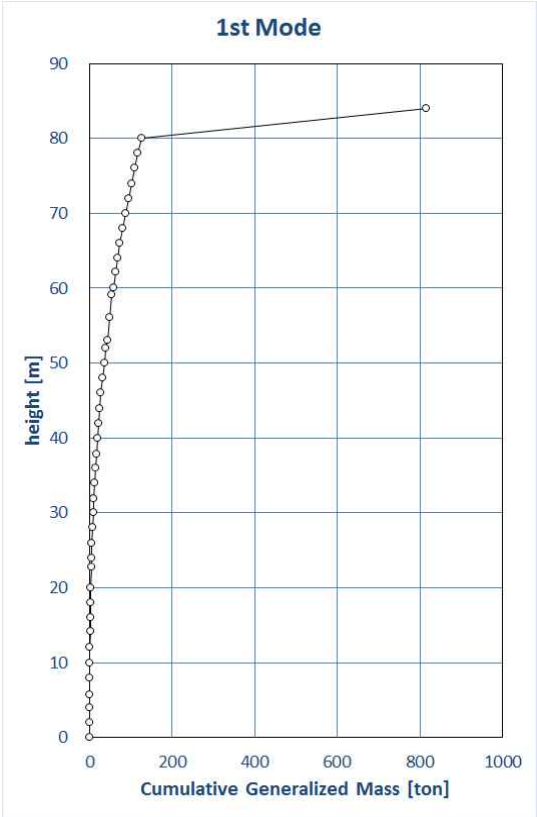
(3) 7MW급 풍력타워

(가) 풍력터빈의 동적특성

① 고유 진동수 : 0.2874Hz.
② 제진장치의 예상 설치위치인 타워 최상단 Segment[height : 76m]을 기준으로 1차모드형상으로 정규화하여 모드질량 산출.
③ 모드질량 : 816ton.



[1차모드 변형 형상]



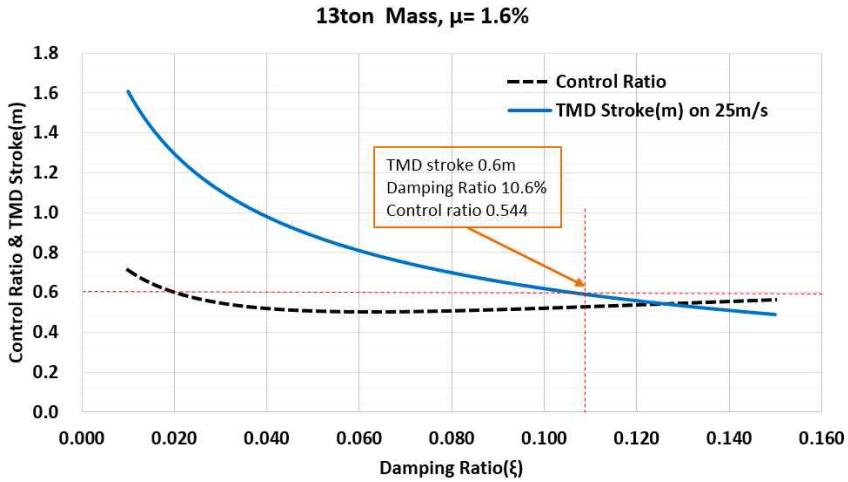
[1차모드 누적된 일반화질량]

(나) TMD 최적 Mass 산정

① 제진장치가 설치될 3MW급 풍력타워의 Segment 실내공간은 최상부 지름 5.880m, 최하단 지름 5.936m, 높이 4m로 공간이 상대적으로 3MW급 타워공간보다 넓음.

② 충분한 공간을 활용하고 타워의 구조적인 영향을 주지 않을 최적의 제진장치 질량을 산정하여 Cut-out Wind Speed(25m/s)까지 진동 제어할 수 있는 시스템을 설계함.

③ TMD 약산식을 이용하여, 최적의 질량비 1.6%(TMD Mass : 13ton)로 결정하고 제진장치 이송거리를 0.6m로 제한하여(제진장치 감쇠비 10.6%) 설계할 경우, 변위 저감율 45.6%의 효과를 얻을 수 있음. 여기서, Pendulum Length는 고유진동수에 상응하는 3.077m임.



[질량의 따른 제진장치 성능 특성 분석]

[7MW급 제진장치 사양]

항 목	제 원
이동질량 [ton]	13
질량비 [%]	1.6
감쇠비 [%]	10.6
튜닝비 [%]	98.8
튜닝진동수 [Hz]	0.2840

나. 최적 TMD 형상 결정

(1) 일반 사항

(가) TMD의 경우, 특정 주파수에 대해 연속적 · 단속적 진동제어가 가능하며, 제어 주파수 범위을 벗어나면 진동제어 효과가 적은 특성이 있음.
(나) 특정 주파수에 목표하는 진동저감을 위해서는 공간적인 부분과 감쇠 등의 제진장치 구조적 시스템을 최적화된 제진장치의 연구가 필요함.
(다) 풍력터빈타워의 경우, 높이에 비해 폭이 좁기 때문에 제진장치 진동수를 와이어 길이로 조절하고 2차원적 진동제어가 상대적으로 편리한 PTMD(Pendulum Tuned Mass Damper)로 설계하기로 결정함.
(라) 본 연구에 제안하는 PTMD 타입의 종류는 총 3가지(단진자 타입, 역진자 타입, 이중 역진자 타입)임.
(마) 풍하중 데이터는 위에 기술된 3MW급 터빈타워의 풍속 25m/s로 환산되어진 5가지의 Modal Load를 사용함.

(2) 진동제어장치 모델

(가) 단진자 TMD(Simple Pendulum TMD)

① 가장 기본적인 PTMD 타입인 단진자 TMD를 설계하여 적용.
② 제진장치의 사양으로 질량 2.6ton, 감쇠비 13%, 제진장치 제한 이송거리 0.5m.
③ 1.933m의 동일한 길이를 갖는 4개의 케이블로 진자운동함.

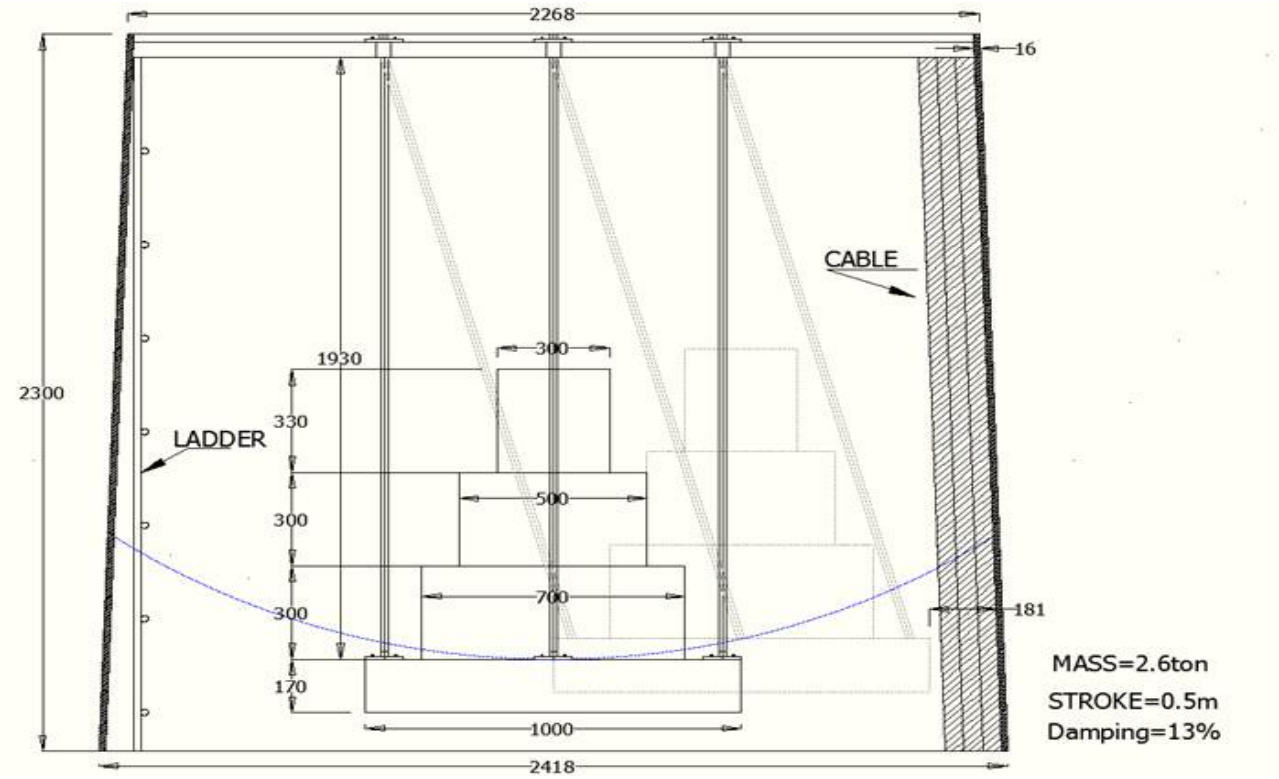
(나) 역진자 TMD(Inverted Pendulum TMD)

① 순진자 질량과 역진자 질량을 이용하여 타워의 진동을 저감하는 방법임.
② 제진장치의 사양으로 순진자 질량 2.48ton, 역진자 질량 0.097ton, 역진자 팔에 댐퍼 설치함.

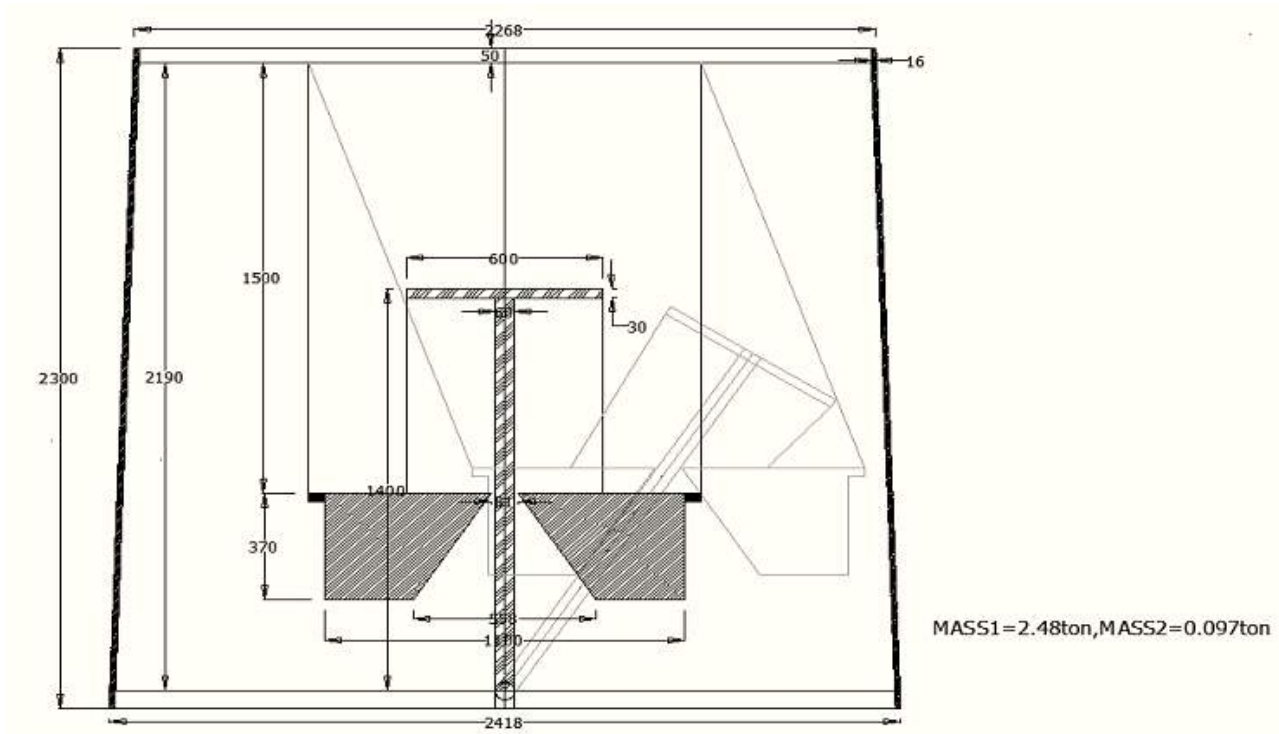
(다) 이중 역진자 TMD(Double Inverted Pendulum TMD)

① 순진자 질량 상부에 추가 역진자 질량을 설치하고 스프링 및 오일댐퍼나 실리콘 오일을 역진자 질량 팔에 설치하는 개념으로 설계함.

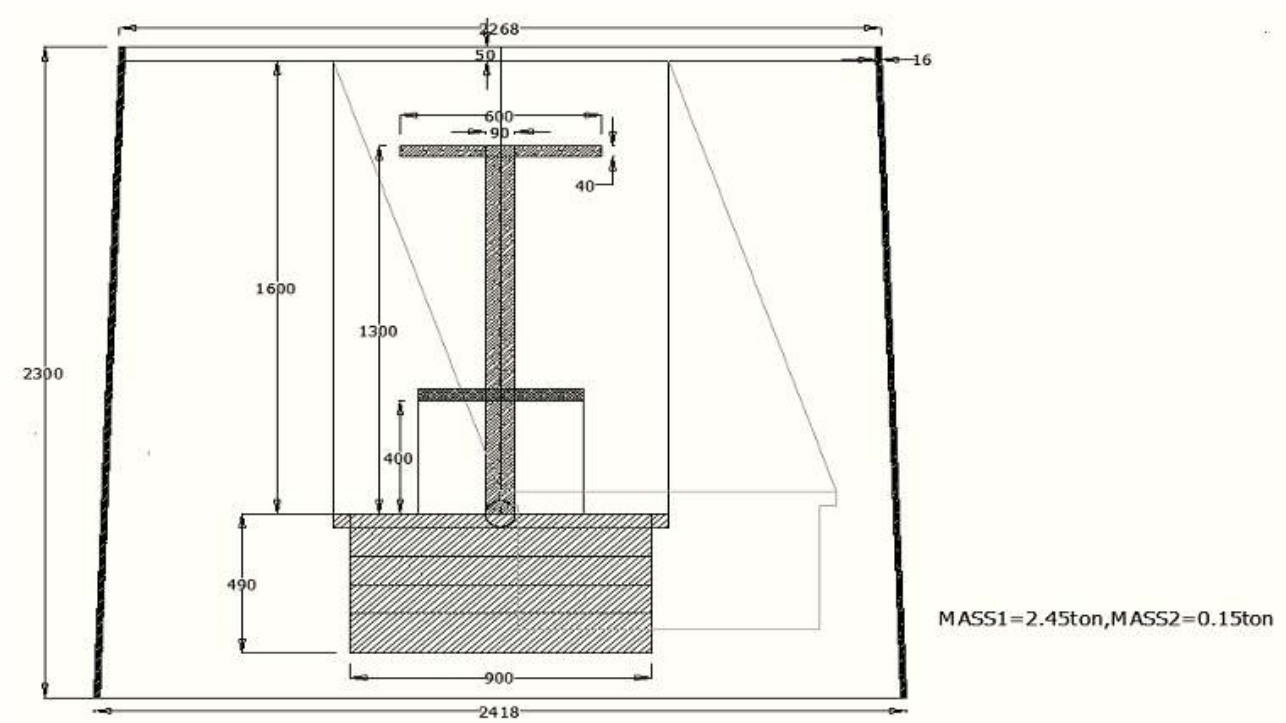
② 제진장치 사양으로 순진자 질량 2.45ton, 추가 역진자 질량 0.15ton
③ 역진자 팔에 설치되는 스프링을 통하여 최적의 순진자, 추가 역진자 질량 값 및 변위를 찾음.



[풍력터빈타워 최상층에서의 단진자 TMD 타입 형상]



[풍력터빈타워 최상층에서의 역진자 TMD 타입 형상]

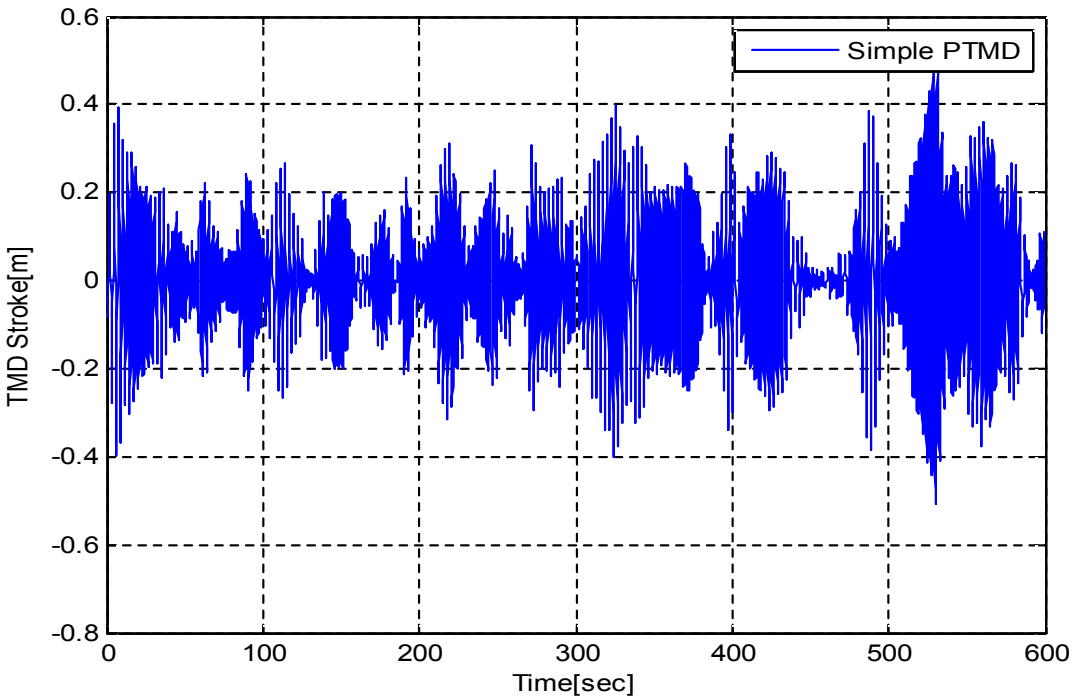


[풍력터빈타워 최상층에서의 이중 역진자 TMD 타입 형상]

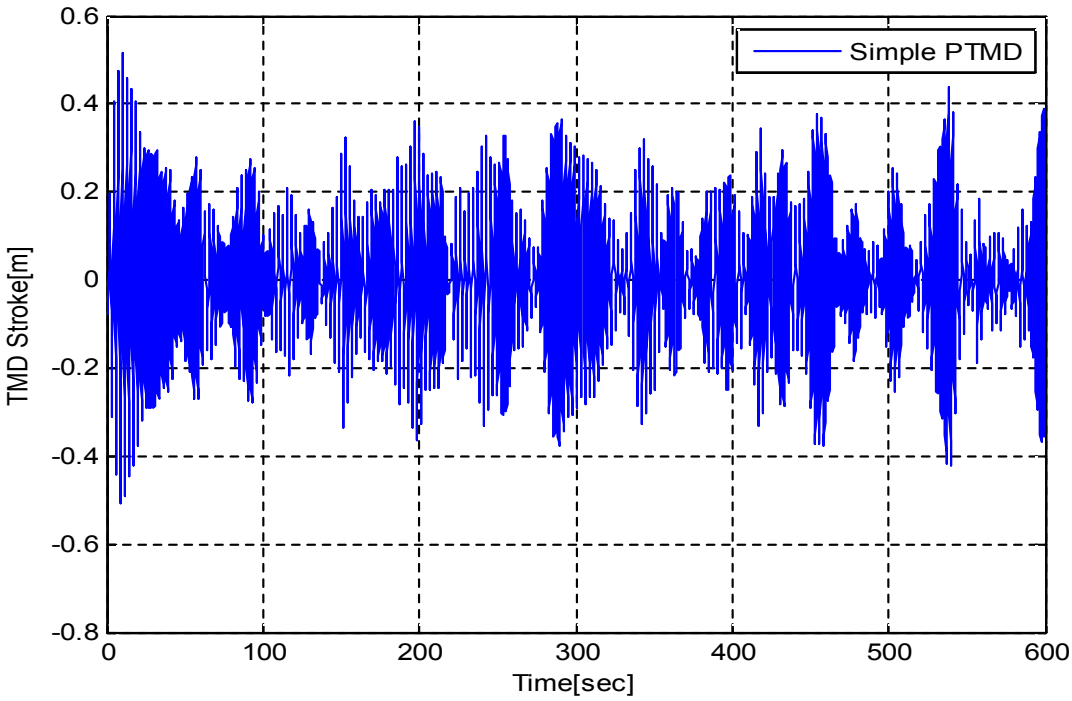
(3) 해석결과 비교

(가) 단진자 TMD 해석

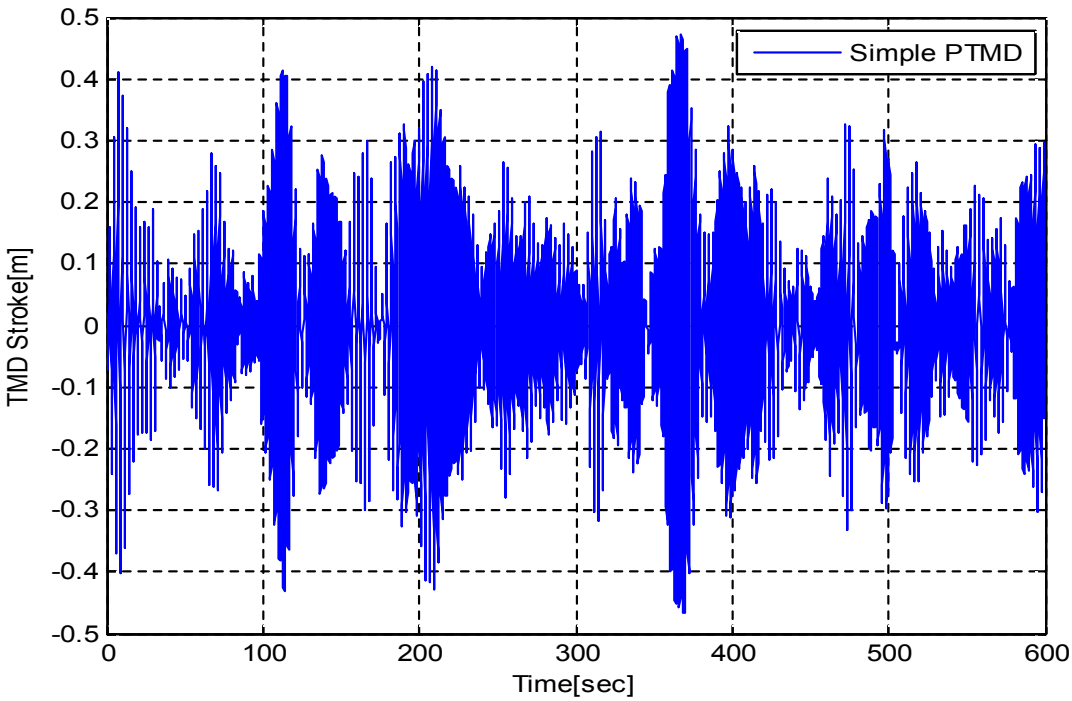
① TMD 이송거리 분석



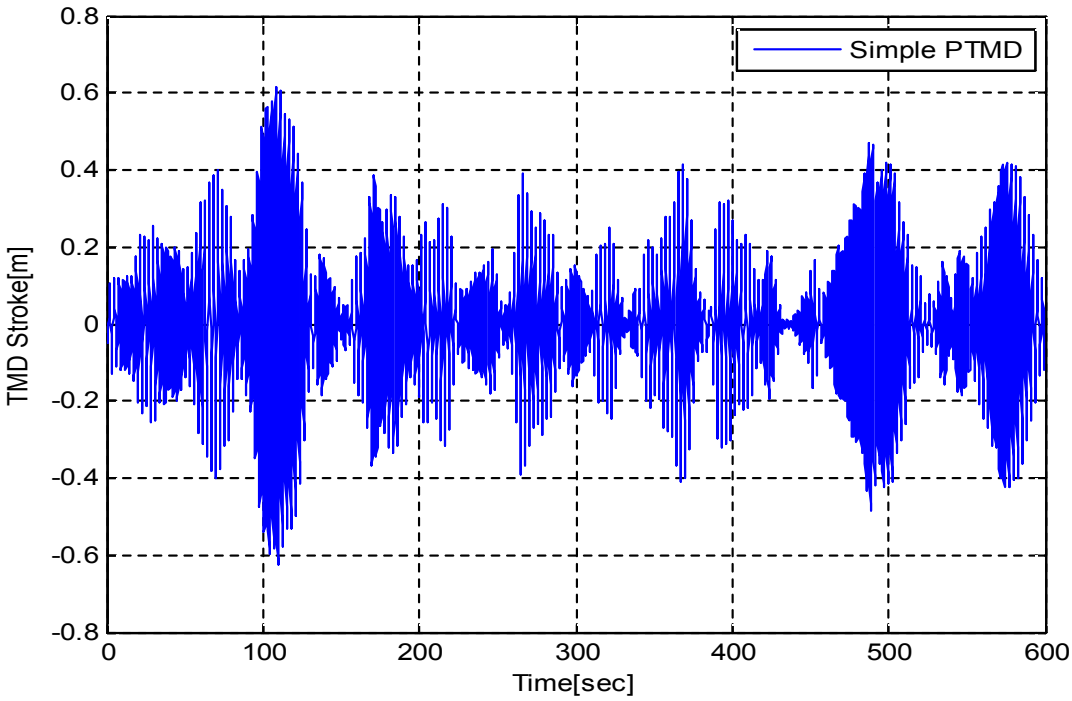
[풍속 25m/s(CASE01)에서의 단진자 TMD 이송거리]



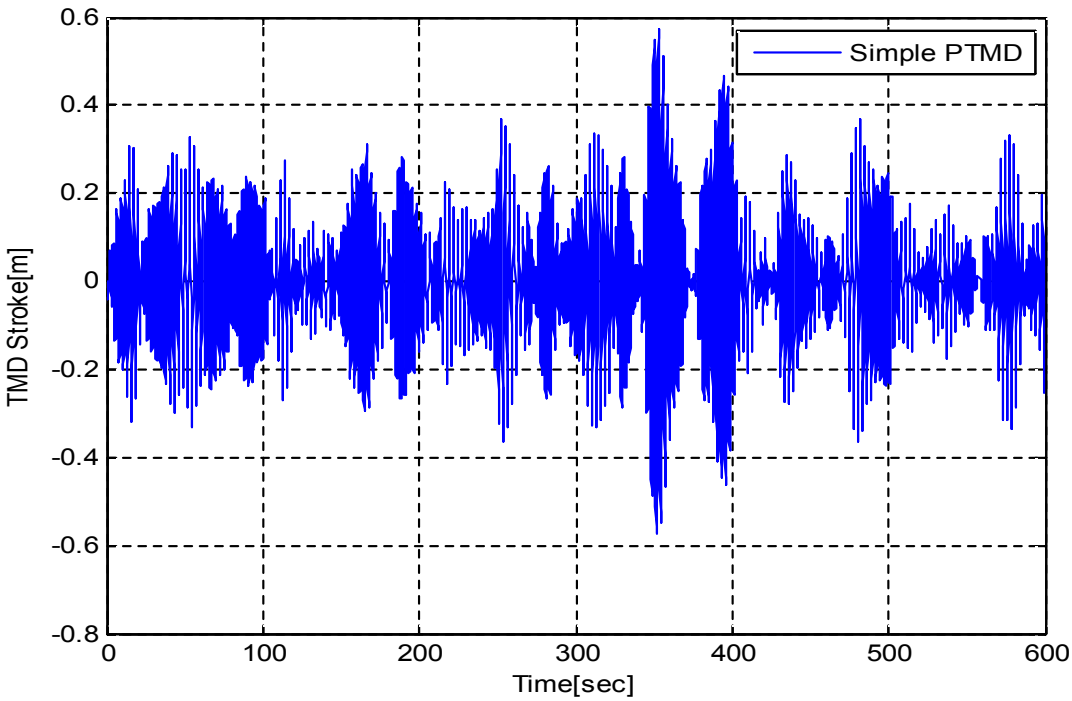
[풍속 25m/s(CASE02)에서의 단진자 TMD 이송거리]



[풍속 25m/s(CASE03)에서의 단진자 TMD 이송거리]

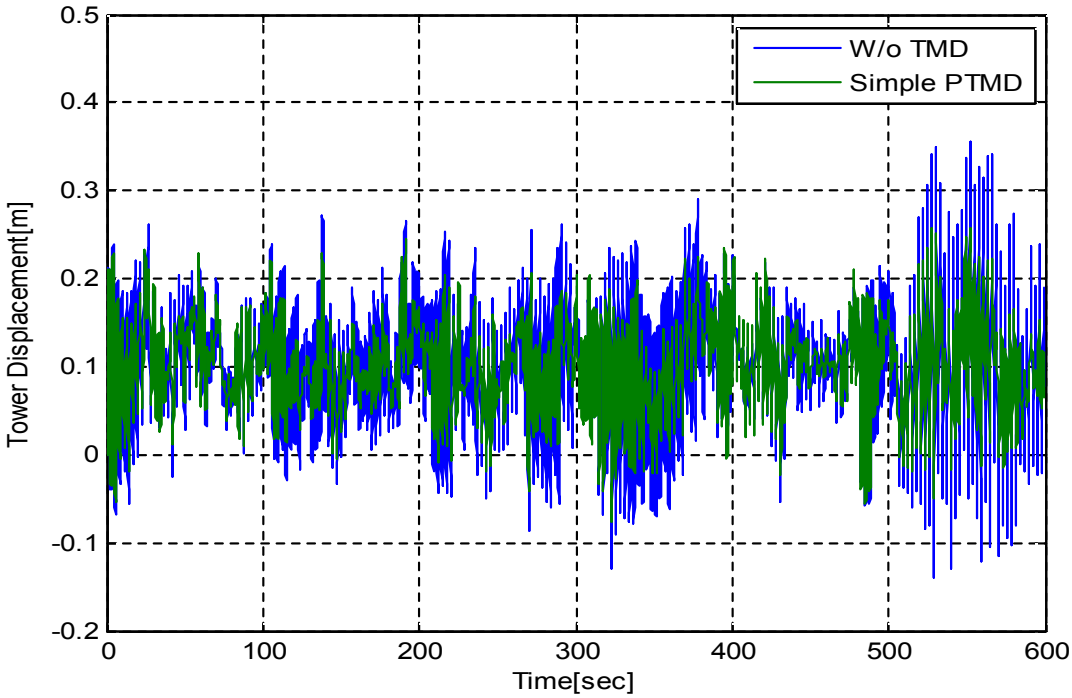


[풍속 25m/s(CASE04)에서의 단진자 TMD 이송거리]

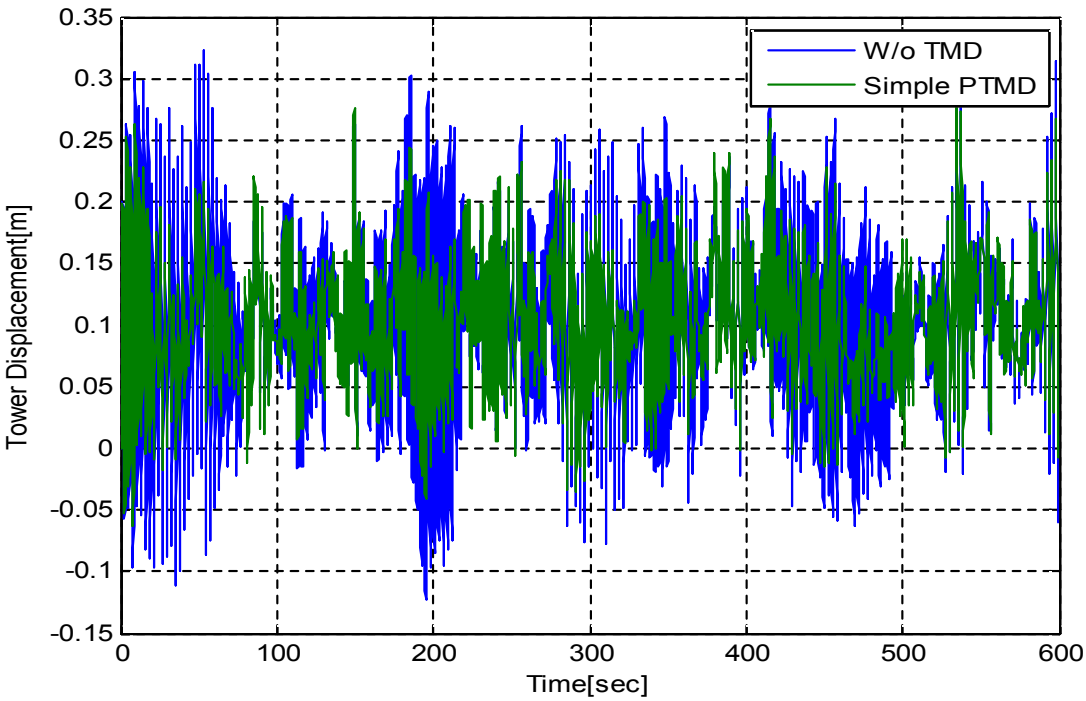


[풍속 25m/s(CASE05)에서의 단진자 TMD 이송거리]

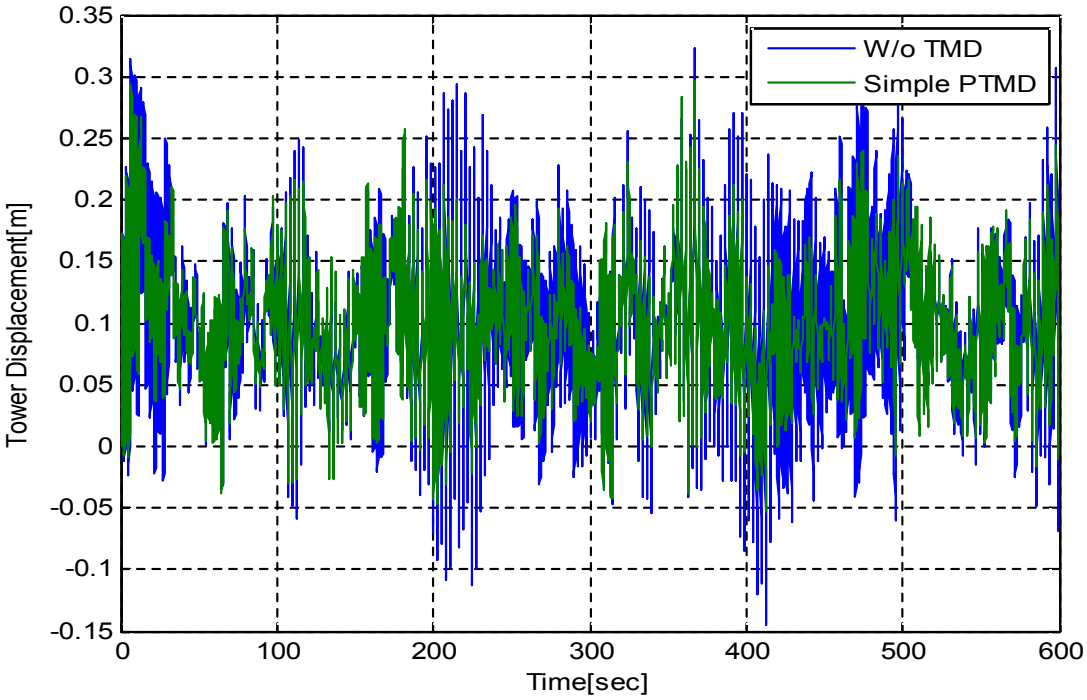
② 단진자 TMD 설치 유무에 따른 풍력타워 변위 비교



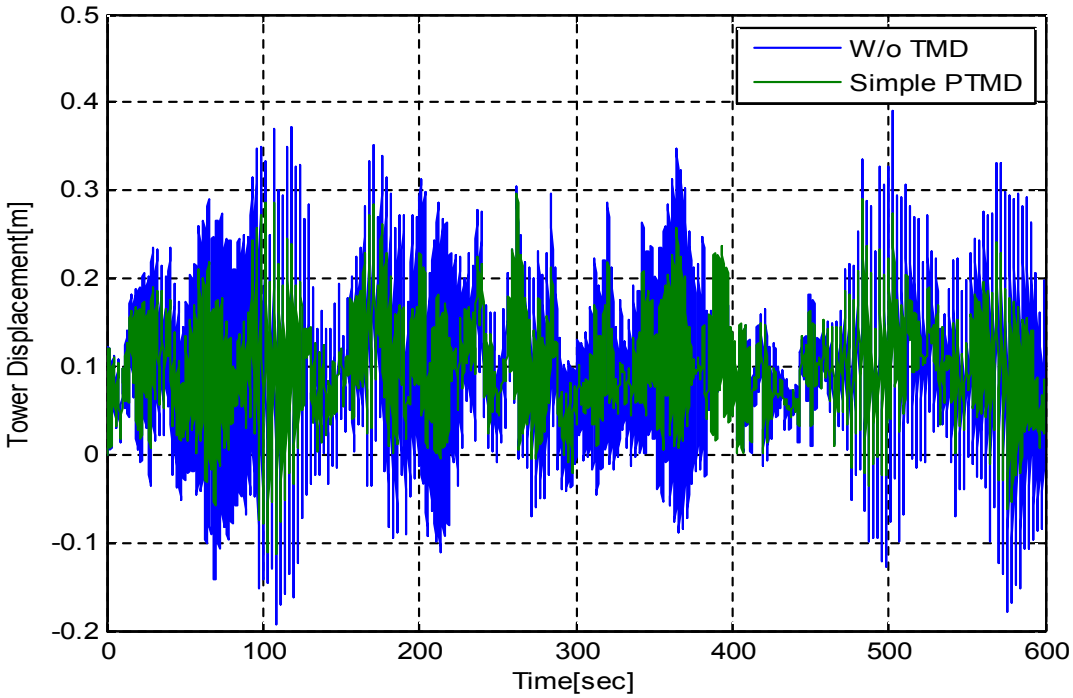
[풍속 25m/s(CASE01)에서의 풍력타워 변위 비교]



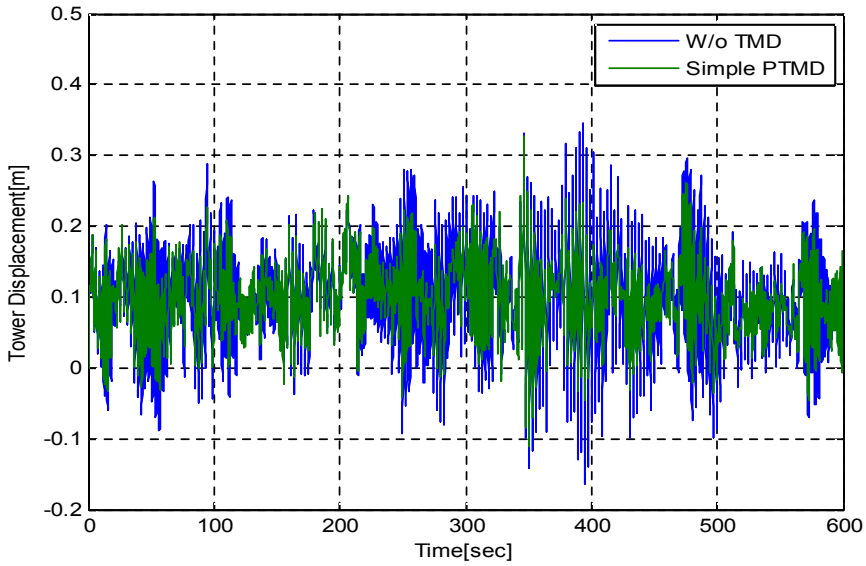
[풍속 25m/s(CASE02)에서의 풍력타워 변위 비교]



[풍속 25m/s(CASE03)에서의 풍력타워 변위 비교]



[풍속 25m/s(CASE04)에서의 풍력타워 변위 비교]



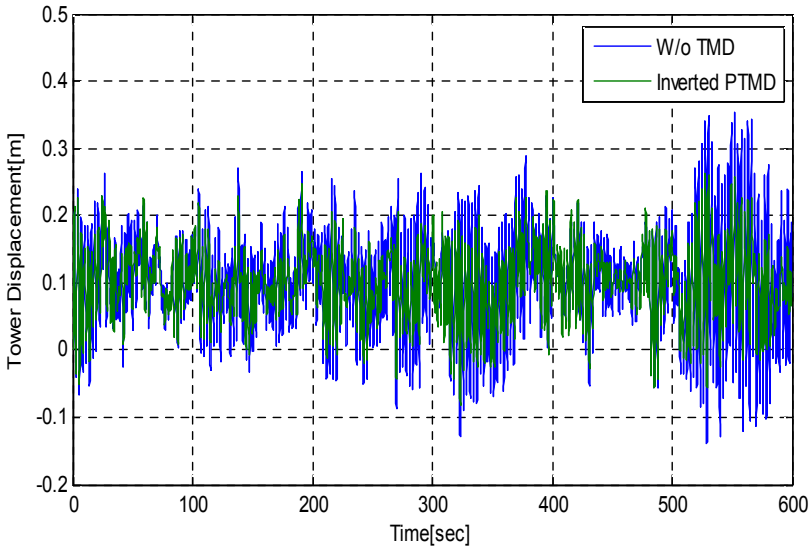
[풍속 25m/s(CASE05)에서의 풍력타워 변위 비교]

[단진자 TMD의 해석 값]

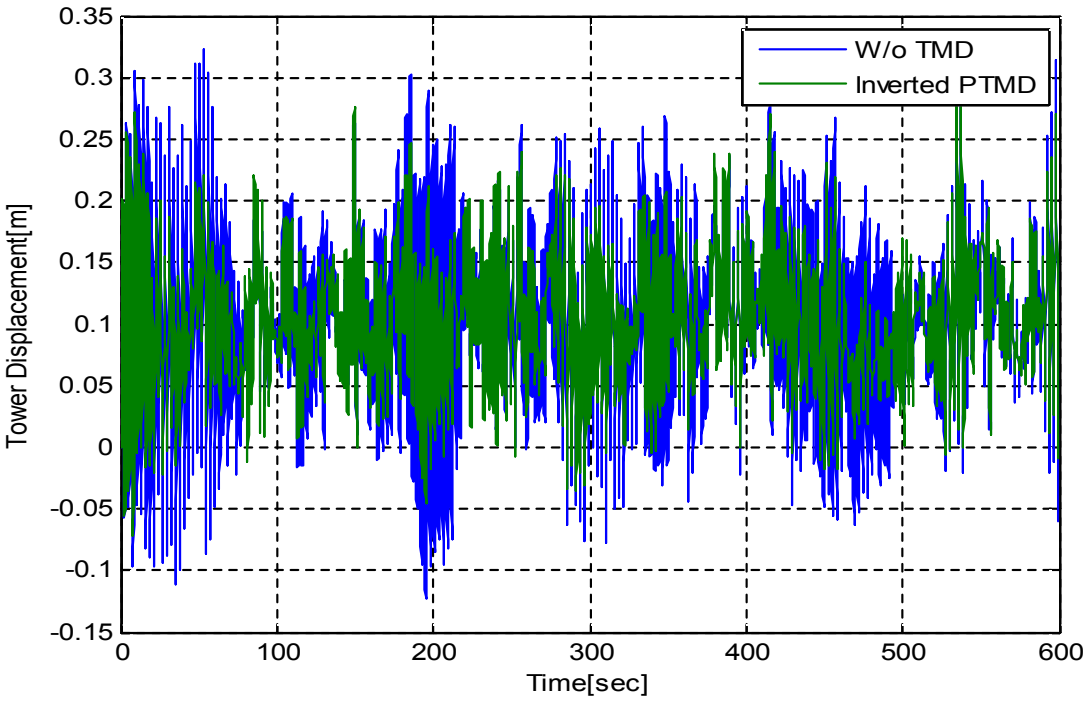
CASE	Max. Stroke(m)	Tower Displacement Control atio
CASE01	0.4841	0.6853
CASE02	0.5142	0.7017
CASE03	0.4723	0.7422
CASE04	0.6169	0.5892
CASE05	0.5743	0.6911
MAX. VALUE	0.6169	0.7422
AVERAGE. VALUE	0.5323	0.6819

(나) 단진자 TMD와 역진자 TMD의 성능 비교

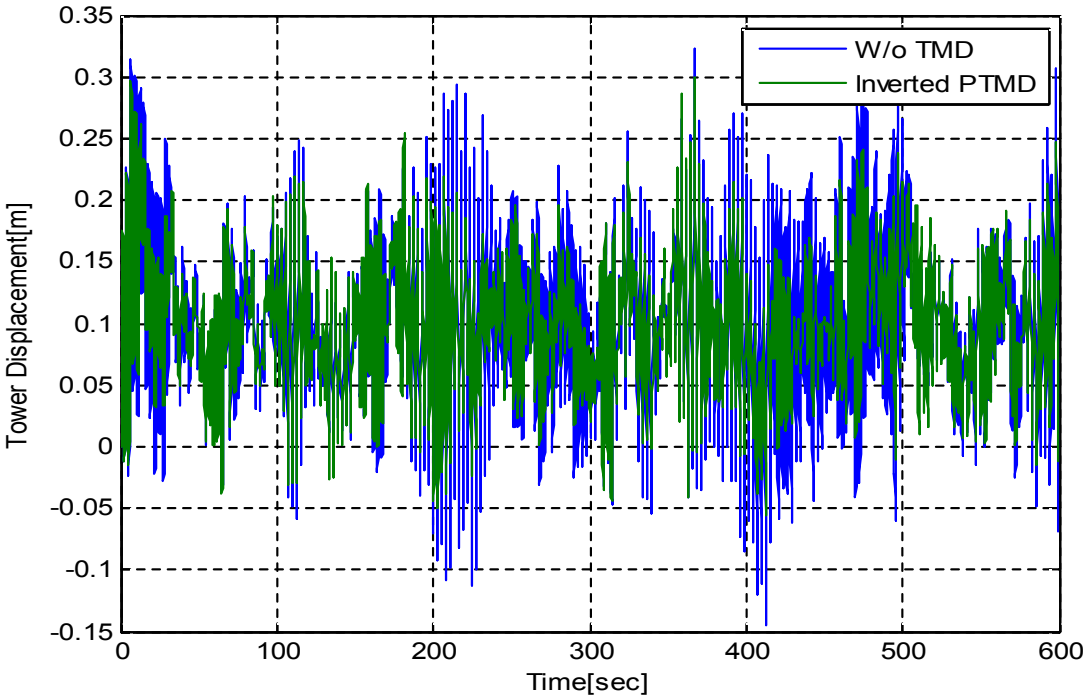
① 역진자 TMD 설치 유무에 따른 풍력타워 변위 비교



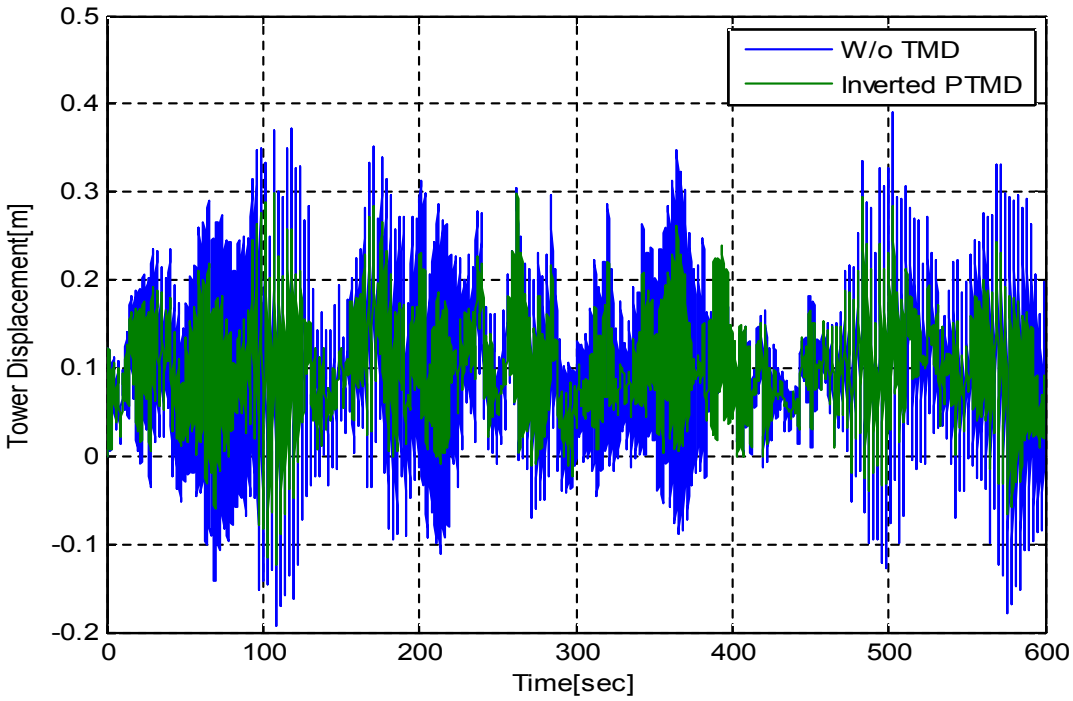
[풍속 25m/s(CASE01)에서의 풍력타워 변위 비교]



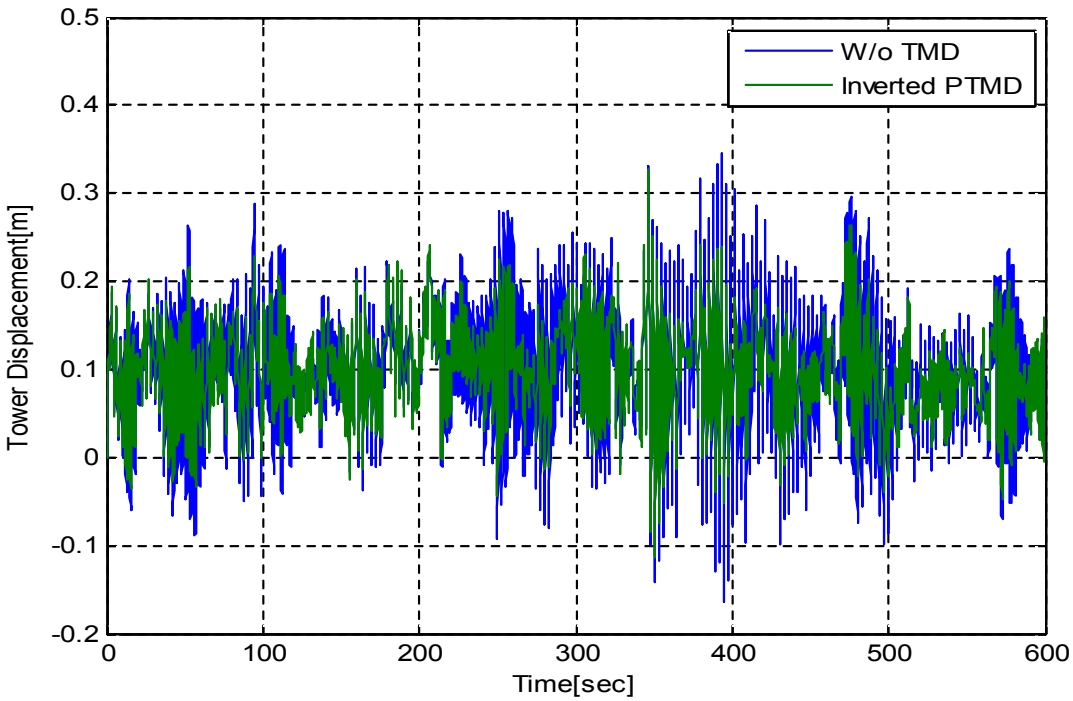
[풍속 25m/s(CASE02)에서의 풍력타워 변위 비교]



[풍속 25m/s(CASE03)에서의 풍력타워 변위 비교]

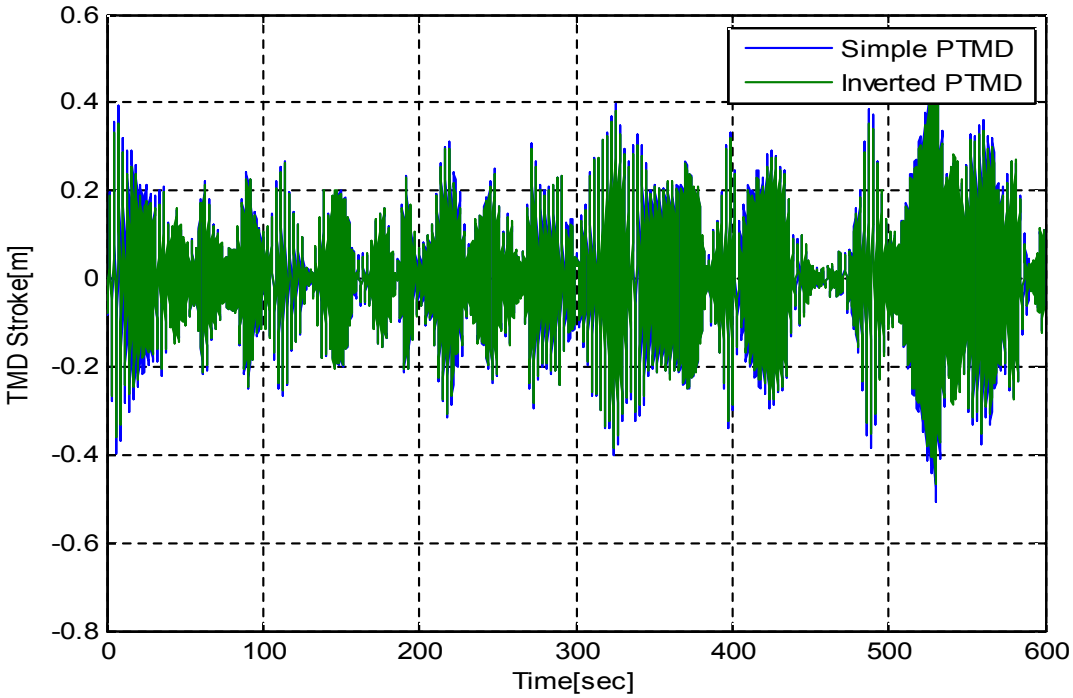


[풍속 25m/s(CASE04)에서의 풍력타워 변위 비교]

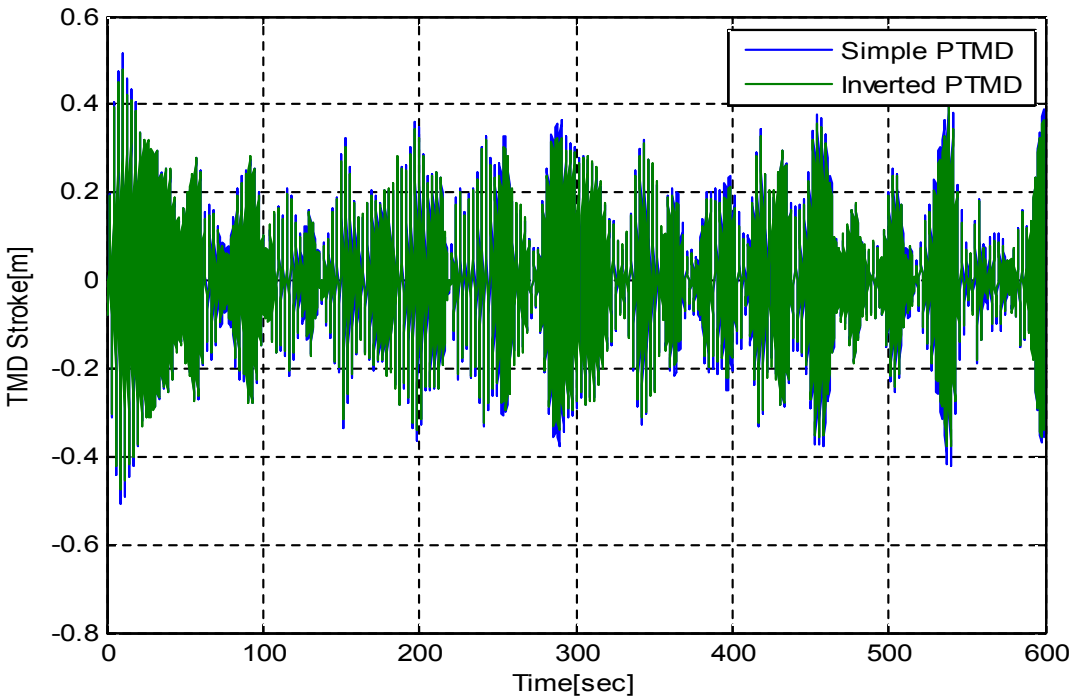


[풍속 25m/s(CASE05)에서의 풍력타워 변위 비교]

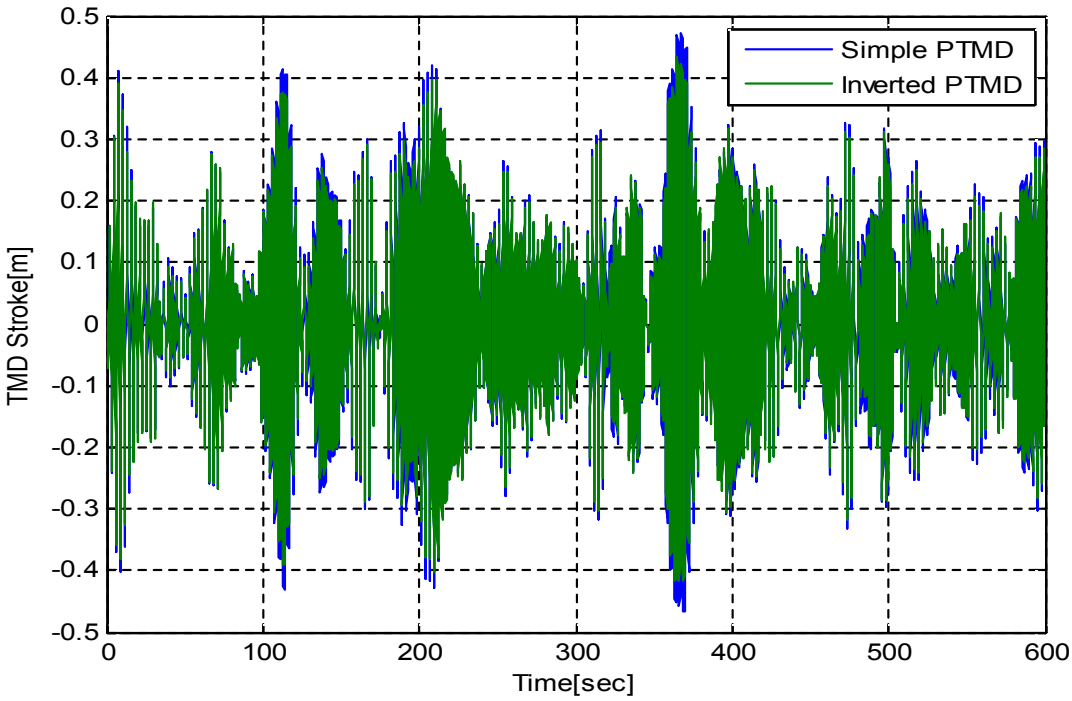
② 단진자 TMD와 역진자 TMD 이송거리 비교



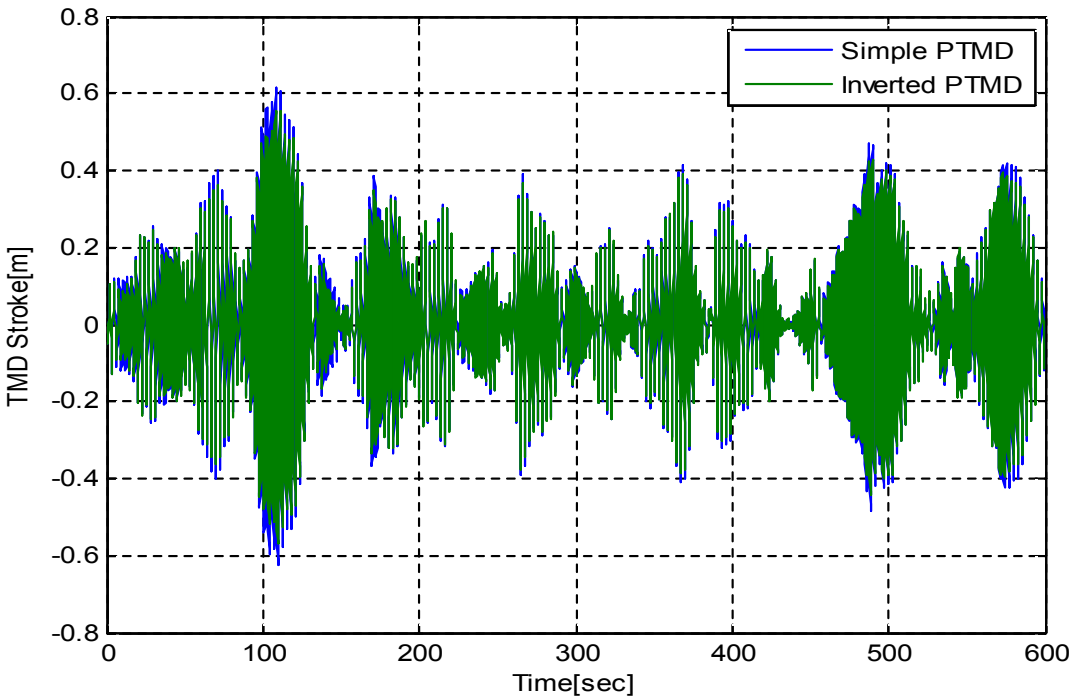
[풍속 25m/s(CASE01)에서의 TMD 이송거리 비교]



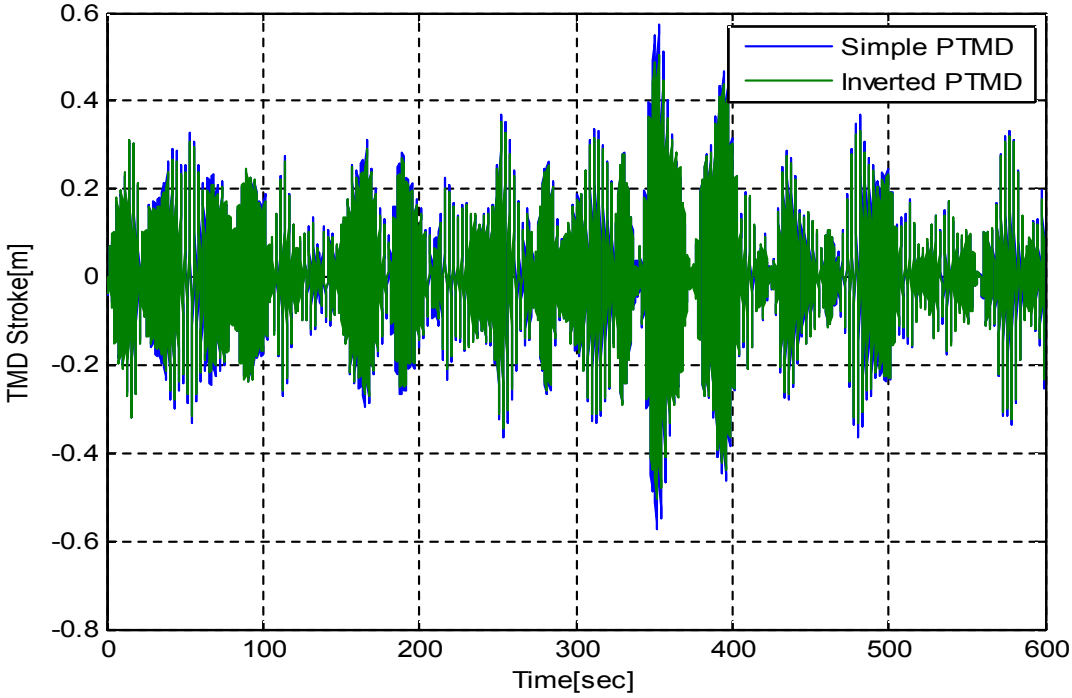
[풍속 25m/s(CASE02)에서의 TMD 이송거리 비교]



[풍속 25m/s(CASE03)에서의 TMD 이송거리 비교]



[풍속 25m/s(CASE04)에서의 TMD 이송거리 비교]



[풍속 25m/s(CASE05)에서의 TMD 이송거리 비교]

[단진자 TMD와 역진자 TMD의 Control Ratio 비교]

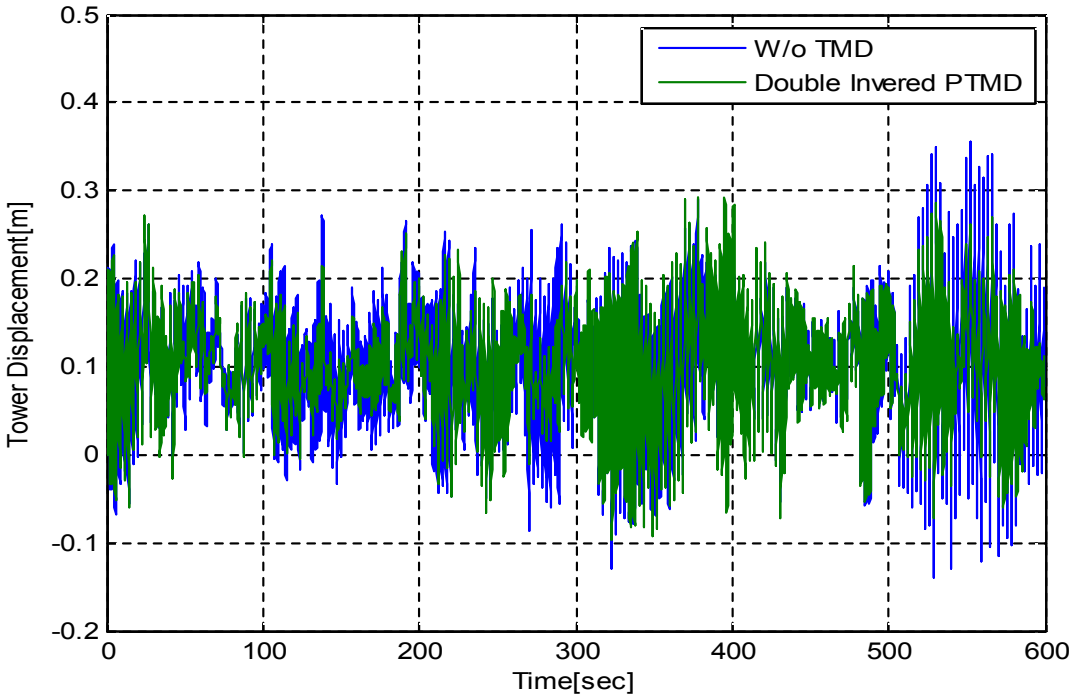
No. CASE	단진자 Tower Displacement Control ratio	역진자 Tower Displacement Control Ratio
CASE01	0.6853	0.6959
CASE02	0.7017	0.7163
CASE03	0.7422	0.7515
CASE04	0.5892	0.6073
CASE05	0.6911	0.7003
MAX. VALUE	0.7422	0.7515
AVERAGE. VALUE	0.6819	0.6942

[단진자 TMD와 역진자 TMD의 이송거리 비교]

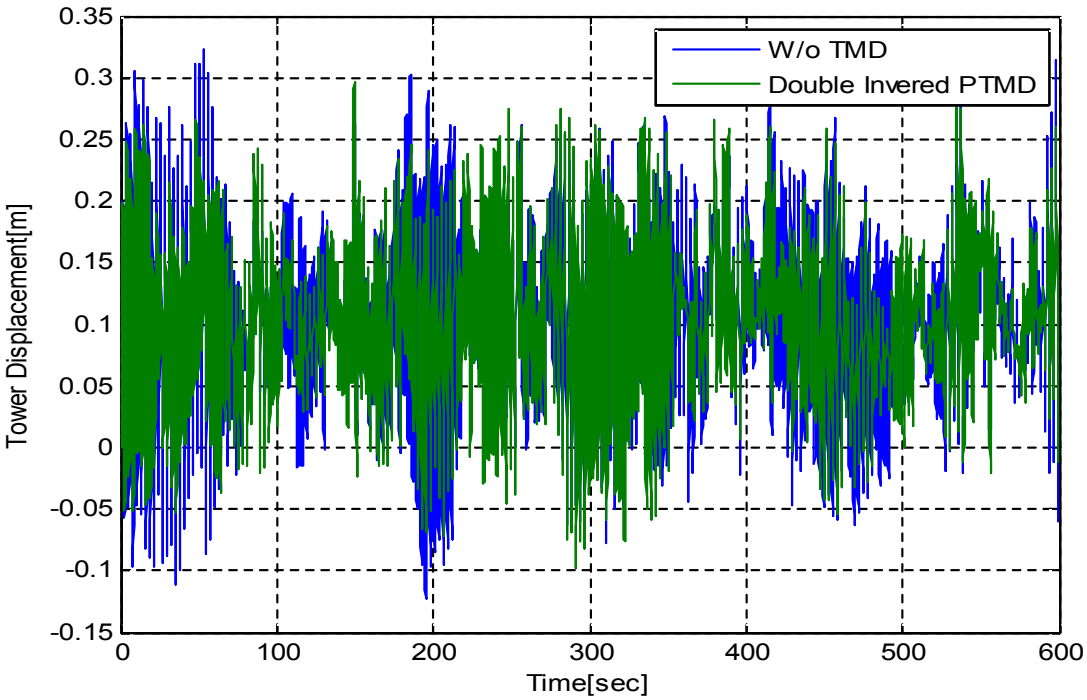
No. CASE	단진자 Max. Stroke(m)	역진자 Max. Stroke(m)
CASE01	0.4841	0.4435
CASE02	0.5142	0.4812
CASE03	0.4723	0.4350
CASE04	0.6169	0.5536
CASE05	0.5743	0.5019
MAX. VALUE	0.6169	0.5536
AVERAGE. VALUE	0.5323	0.4830

(다) 단진자 TMD와 이중 역진자 TMD의 성능 비교

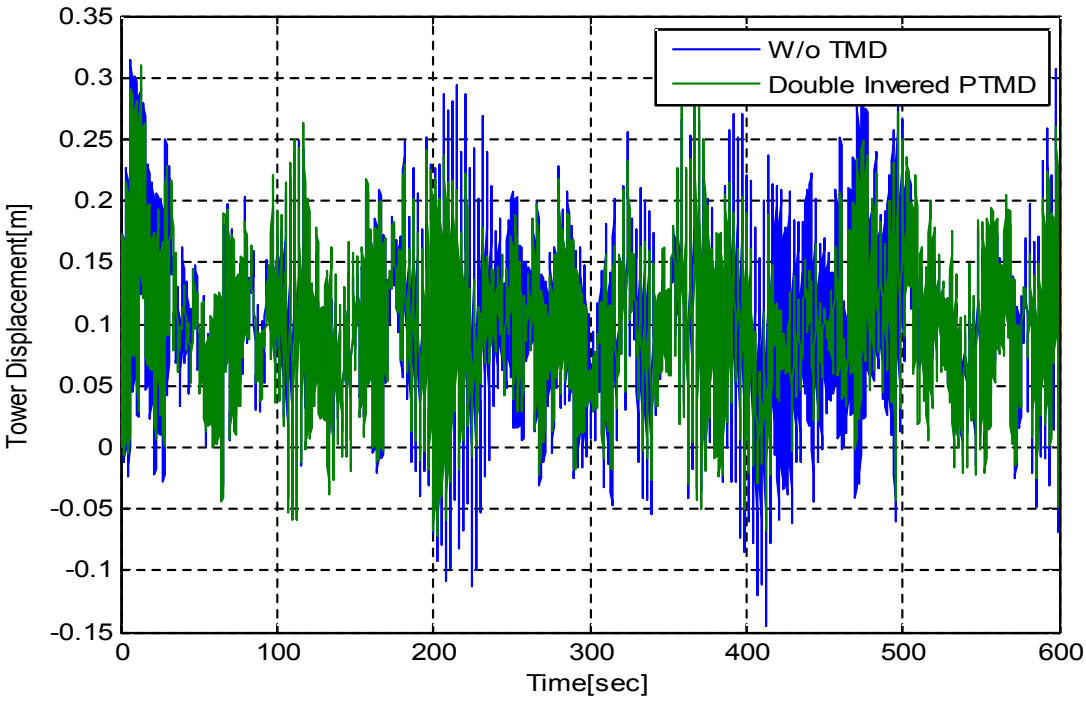
① 이중 역진자 TMD 설치 유무에 따른 풍력타워 변위 비교



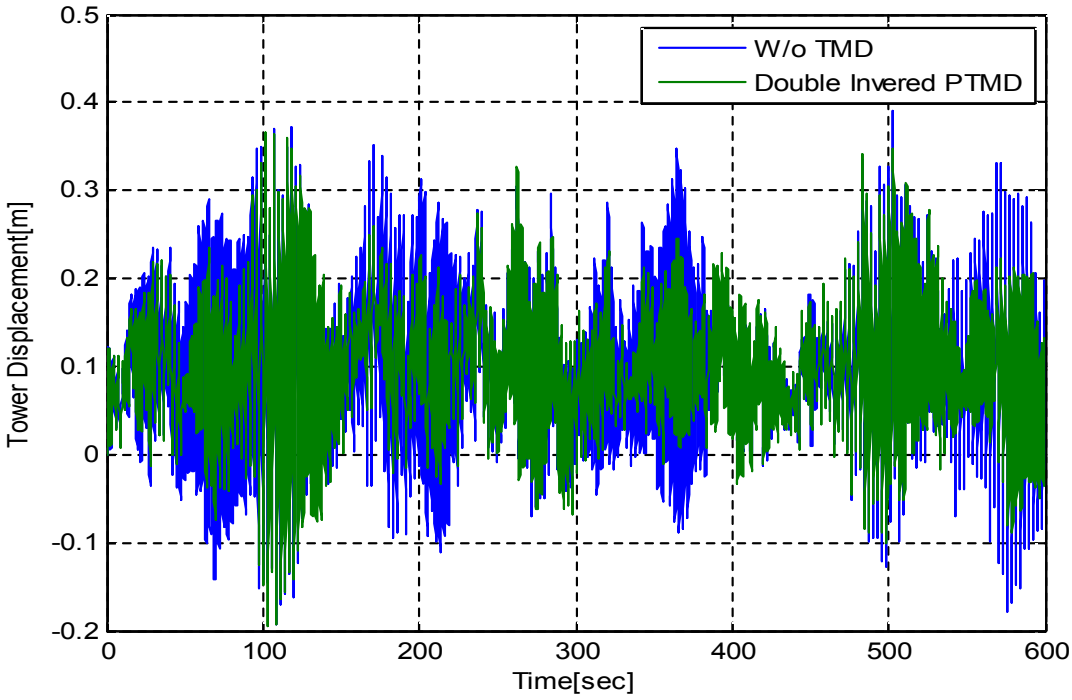
[풍속 25m/s(CASE01)에서의 풍력타워 변위 비교]



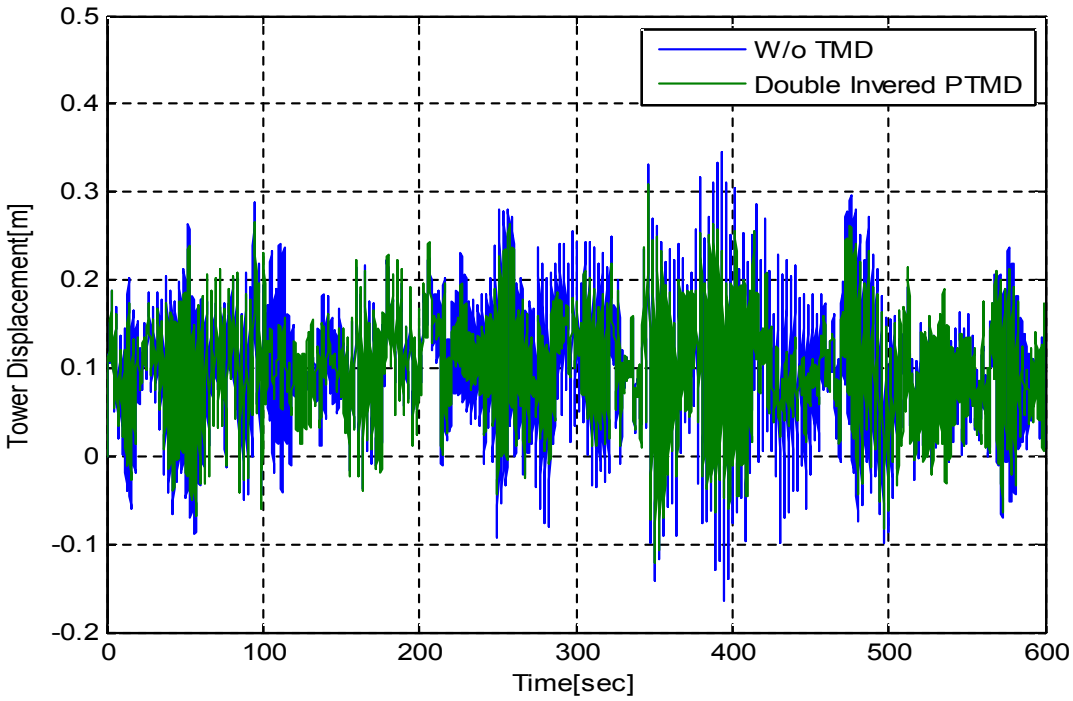
[풍속 25m/s(CASE02)에서의 풍력타워 변위 비교]



[풍속 25m/s(CASE03)에서의 풍력타워 변위 비교]

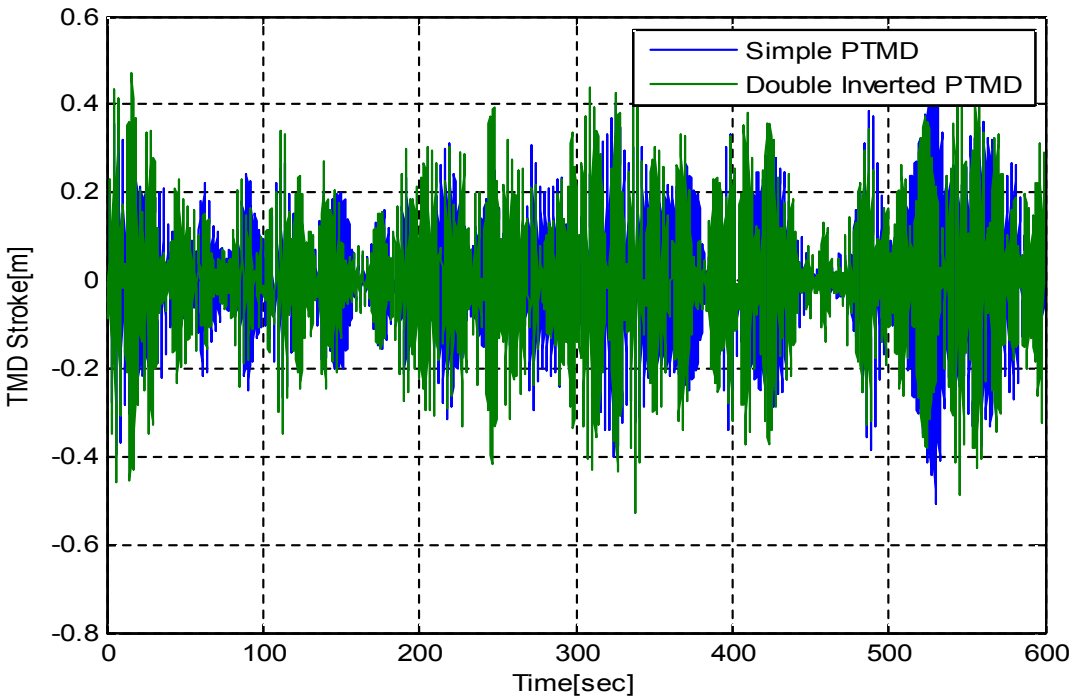


[풍속 25m/s(CASE04)에서의 풍력타워 변위 비교]

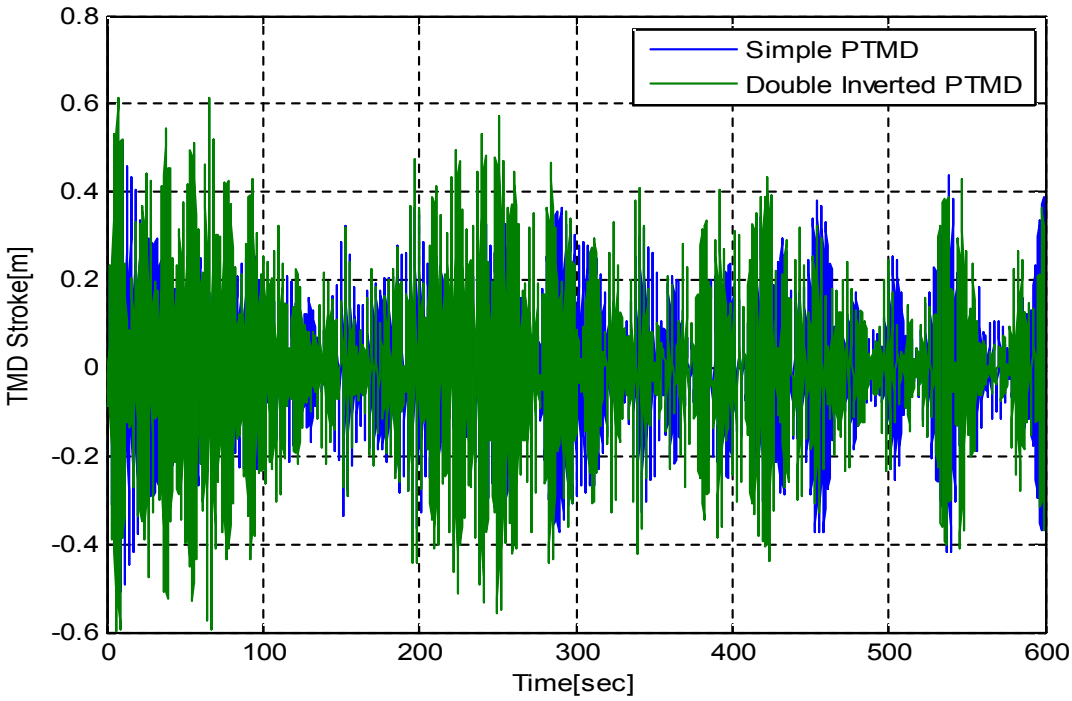


[풍속 25m/s(CASE05)에서의 풍력타워 변위 비교]

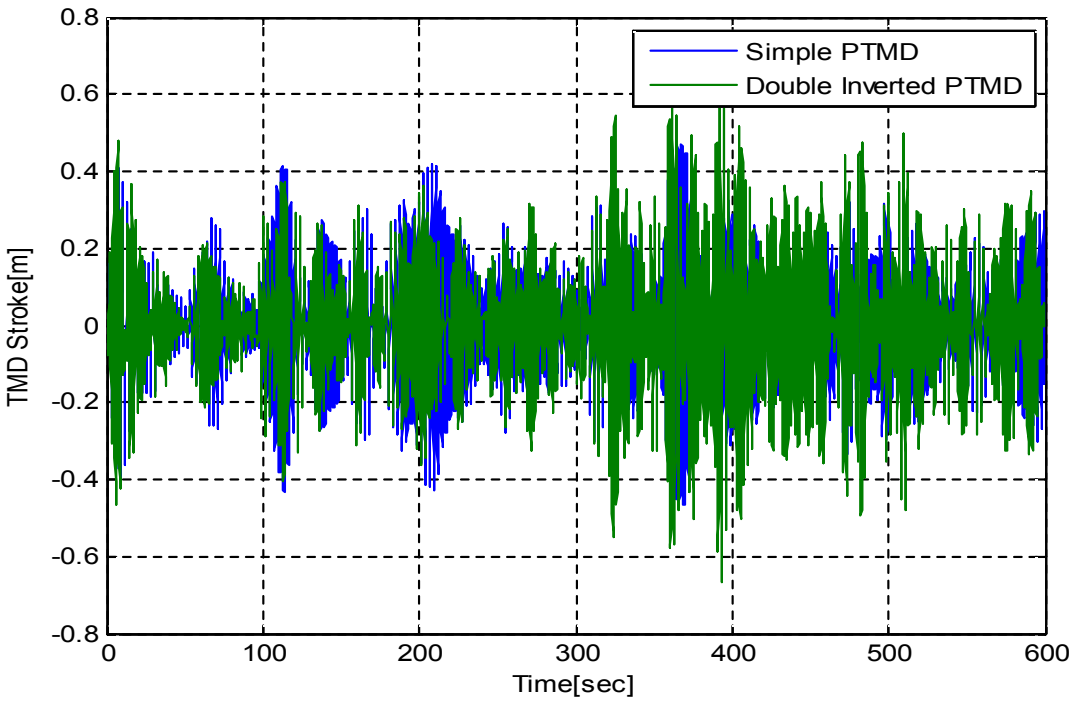
② 단진자 TMD와 역진자 TMD 이송거리 비교



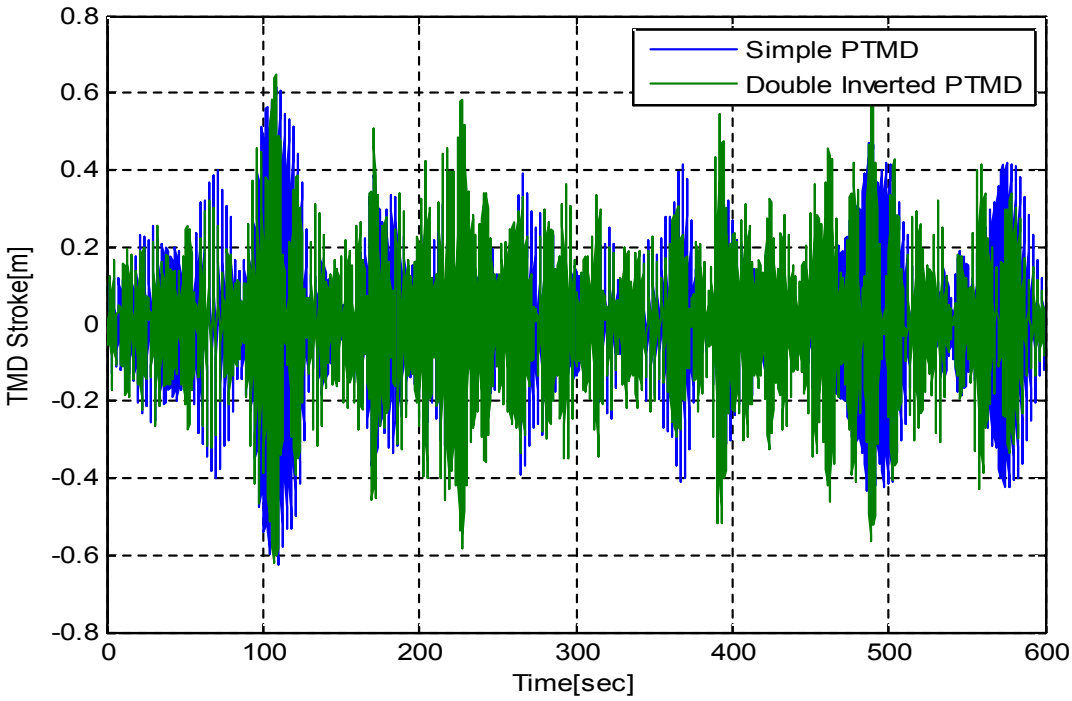
[풍속 25m/s(CASE01)에서의 TMD 이송거리 비교]



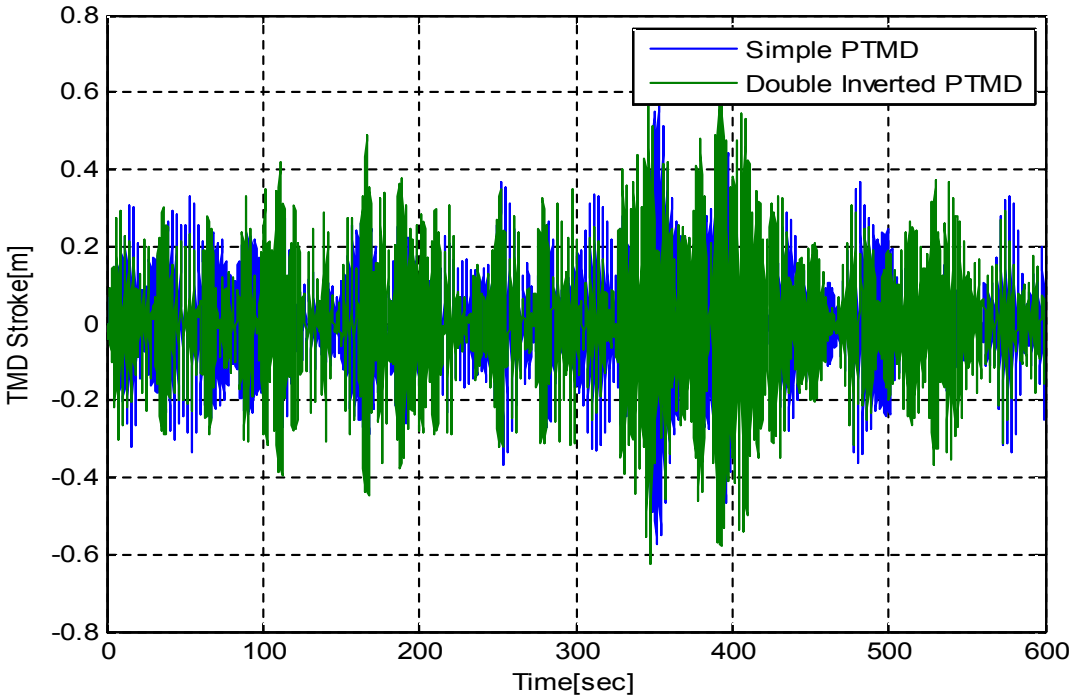
[풍속 25m/s(CASE02)에서의 TMD 이송거리 비교]



[풍속 25m/s(CASE03)에서의 TMD 이송거리 비교]



[풍속 25m/s(CASE04)에서의 TMD 이송거리 비교]



[풍속 25m/s(CASE05)에서의 TMD 이송거리 비교]

[단진자 TMD와 이중 역진자 TMD의 Control Ratio 비교]

No. CASE	단진자 Tower Displacement Control ratio	이중 역진자 Tower Displacement Control Ratio
CASE01	0.6853	0.8630
CASE02	0.7017	0.9093
CASE03	0.7422	0.8449
CASE04	0.5892	0.8013
CASE05	0.6911	0.8025
MAX. VALUE	0.7422	0.9093
AVERAGE. VALUE	0.6819	0.8442

[단진자 TMD와 이중 역진자 TMD의 이송거리 비교]

No. CASE	단진자 Max. Stroke(m)	이중 역진자 Max. Stroke(m)
CASE01	0.4841	0.5118
CASE02	0.5142	0.6156
CASE03	0.4723	0.6575
CASE04	0.6169	0.6490
CASE05	0.5743	0.6388
MAX. VALUE	0.6169	0.6490
AVERAGE. VALUE	0.5323	0.5937

(라) 성능 비교 결과

① 25m/s 풍속을 기준으로 단진자 TMD는 평균적으로 이송거리 0.53m, Displacement Control Ratio 0.68값을 성능을 가지게 되며, 역진자 TMD의 경우에는 이송거리 0.48m, Displacement Control Ratio 0.69값의 성능을 지님. 또한, 이중 역진자 TMD의 경우, 이송거리 0.59m, Displacement Control Ratio 0.84값을 갖음.

② 단진자 TMD의 경우, 상대적으로 역진자 TMD보다 큰 이송거리를 가지지만 진동 저감부분에서는 근소하게 역진자 TMD 보다 효율적인 것으로 나타남.

③ 역진자 TMD의 경우, 상대적으로 다른 TMD보다 작은 이송거리를 가지는 특징이 있음.

④ 이중 역진자 TMD의 경우에는, 상대적으로 다른 TMD보다 큰 이송거리를 가지며 진동 저감부분에서도 가장 효율이 적음.

⑤ 결론적으로, 단진자 TMD가 이송거리 성능에서 역진자 TMD에 비해 근소하게 열등하지만 진동 저감 성능을 가장 뛰어나며, 경제성 및 설치 기술에 따른 난이도가 다른 TMD에 비해 비교적 쉽기 때문에 단진자 TMD가 풍력타워에 제진장치로 가장 최적화된 TMD라고 판단됨.

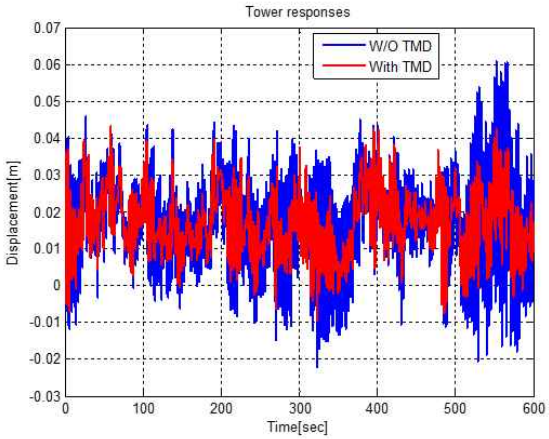
⑥ 3MW급 및 7MW급 제진장치는 단진자 TMD로 최종 결정하여 연구를 수행함.

다. TMD 수치해석

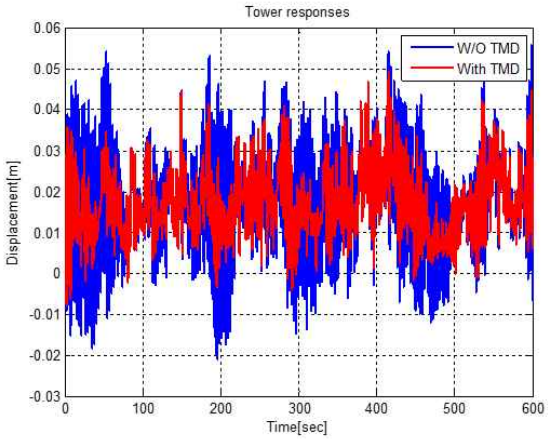
(1) 3MW급 풍력터빈타워 제진용 TMD

(가) 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s의 풍하중이 작용할 때, TMD 설치 유무에 따른 풍력타워 변위 저감율을 분석함.

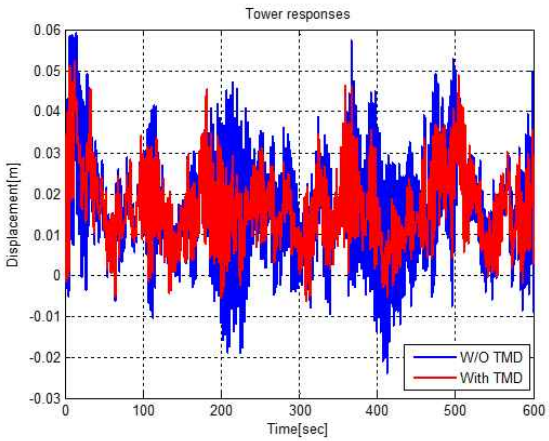
① Wind Speed 10m/s



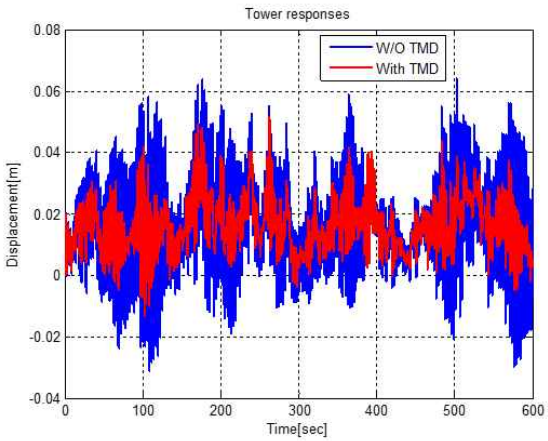
[CASE01]



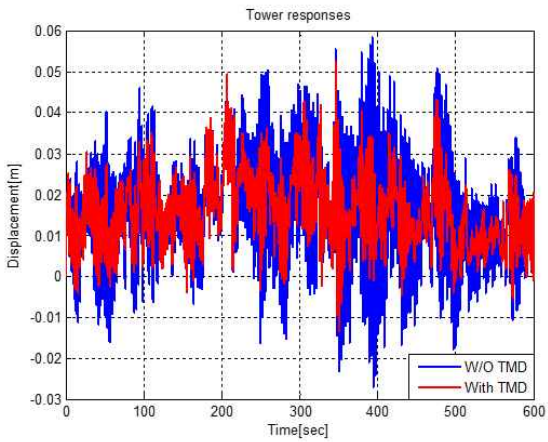
[CASE02]



[CASE03]

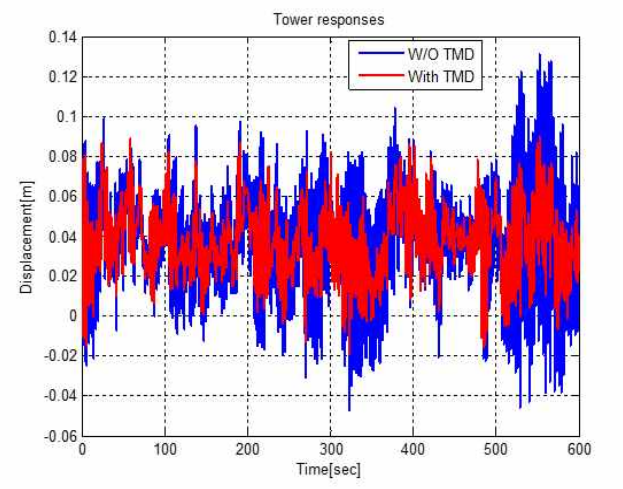


[CASE04]

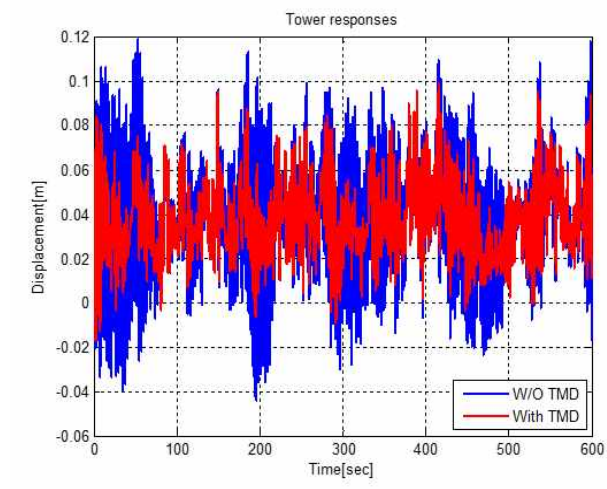


[CASE05]

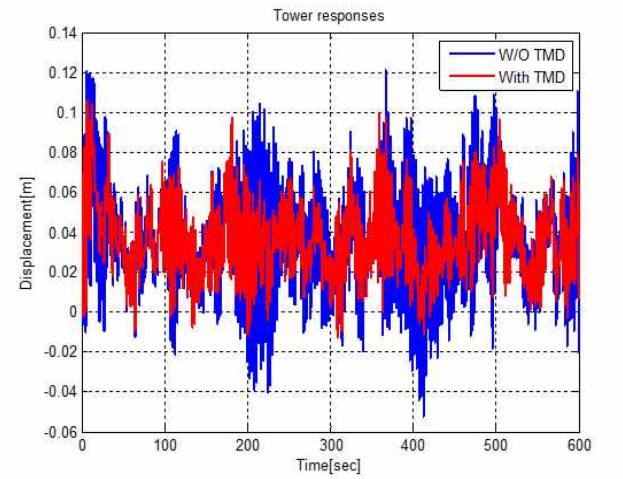
② Wind Speed 15m/s



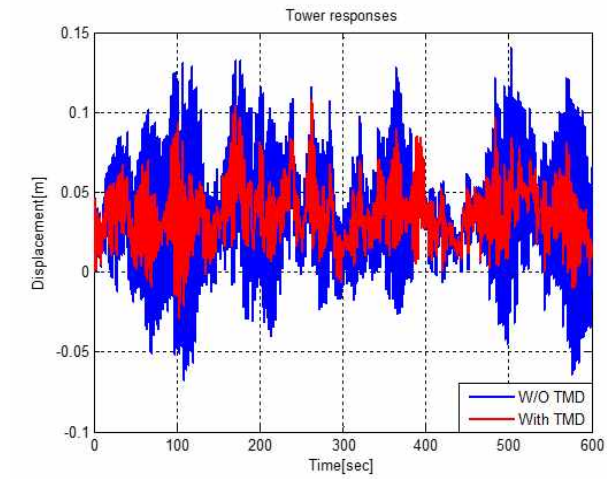
[CASE01]



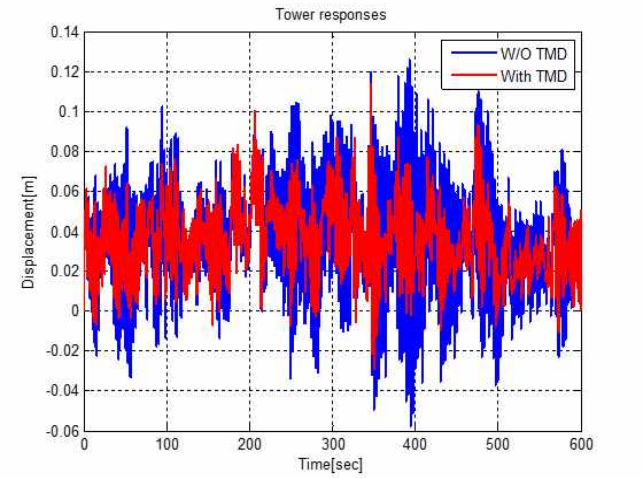
[CASE02]



[CASE03]

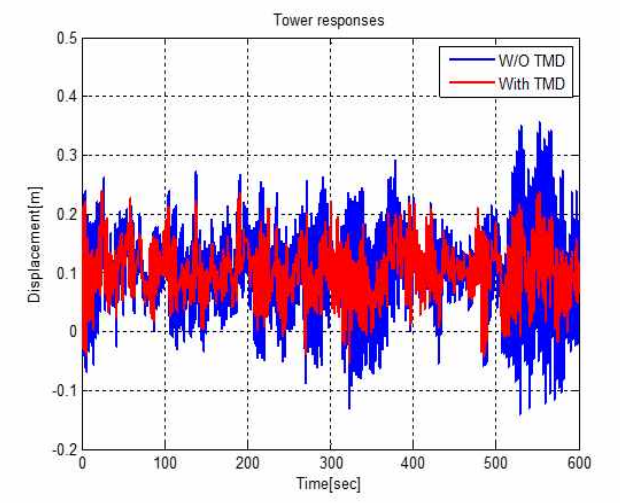


[CASE04]

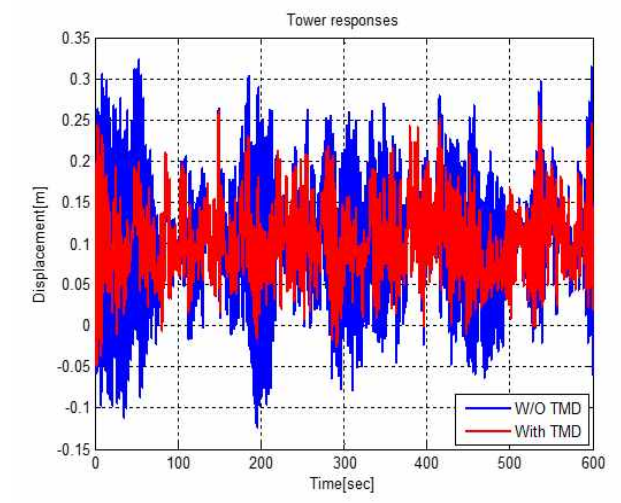


[CASE05]

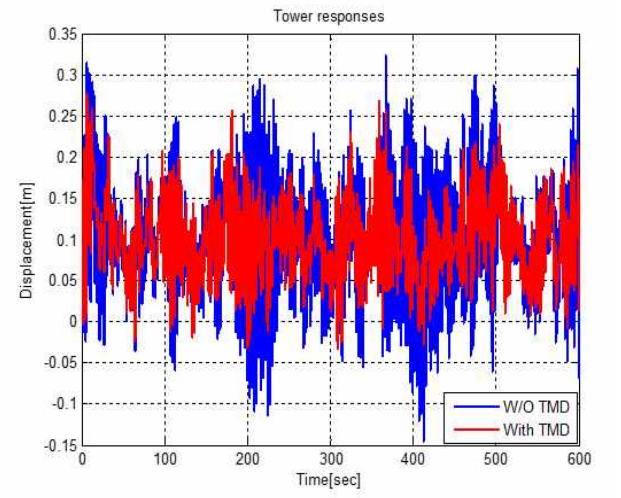
③ Wind Speed 25m/s



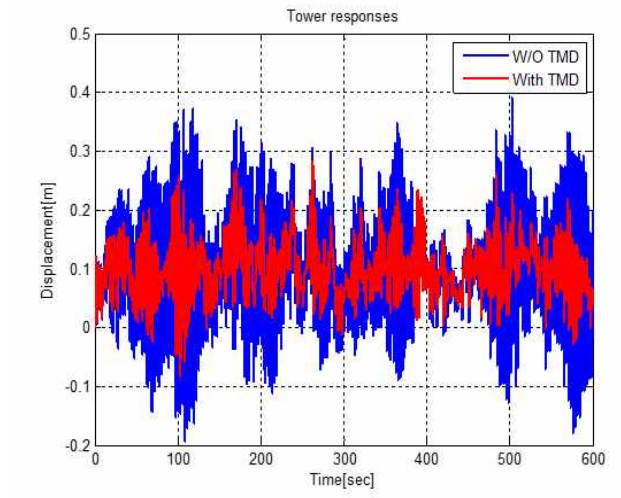
[CASE01]



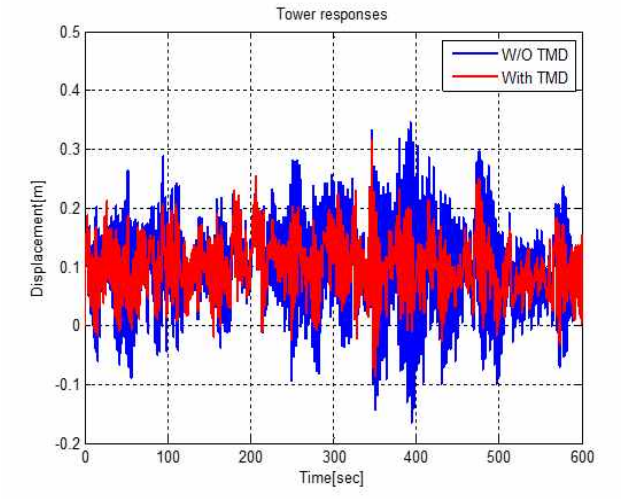
[CASE02]



[CASE03]



[CASE04]



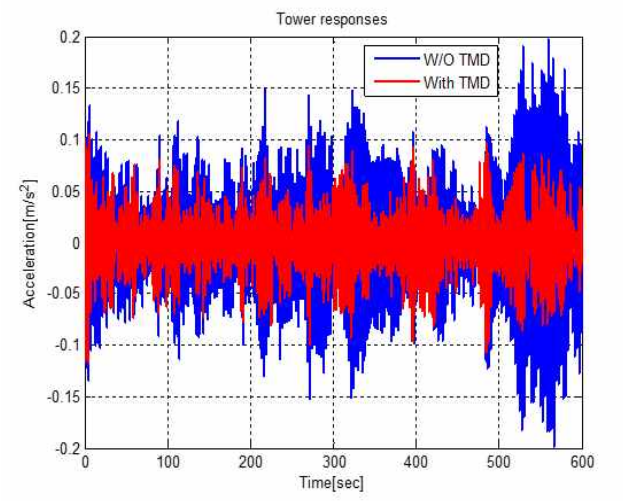
[CASE05]

④ 풍속 별 변위 Control Ratio (RMSw/ TMD / RMSw/o TMD)

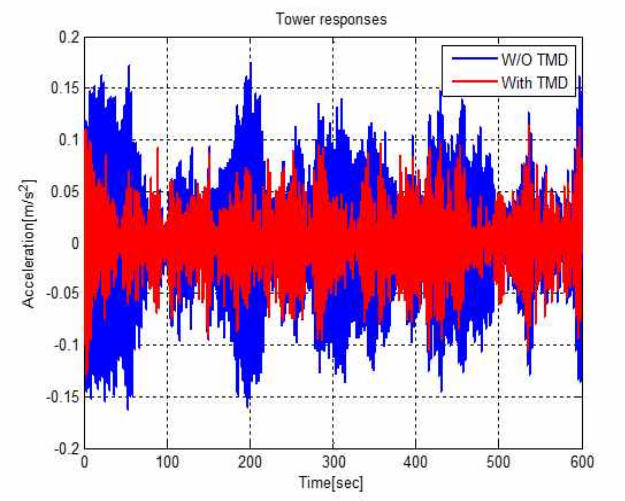
Wind Speed(m/s)	Displacement Control Ratio				
	CASE01	CASE02	CASE03	CASE04	CASE05
10	0.6622	0.6658	0.7238	0.5470	0.6574
15	0.6365	0.6432	0.6953	0.5185	0.6404
25	0.6037	0.6197	0.6624	0.4883	0.6236

(나) 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s의 풍하중이 작용할 때, TMD 설치 유무에 따른 풍력타워 가속도 저감율을 분석함.

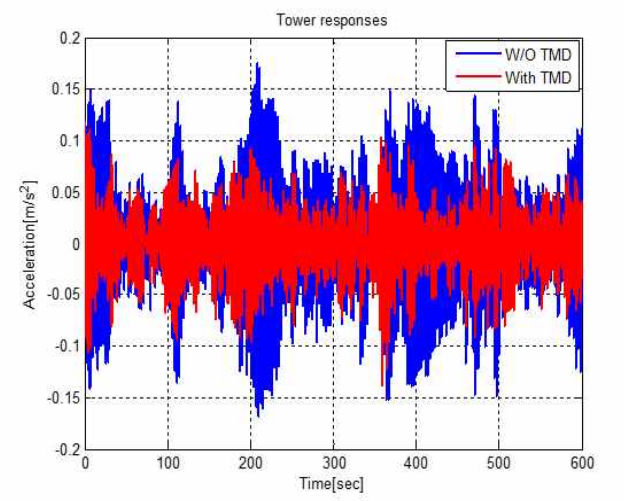
① Wind Speed 10m/s



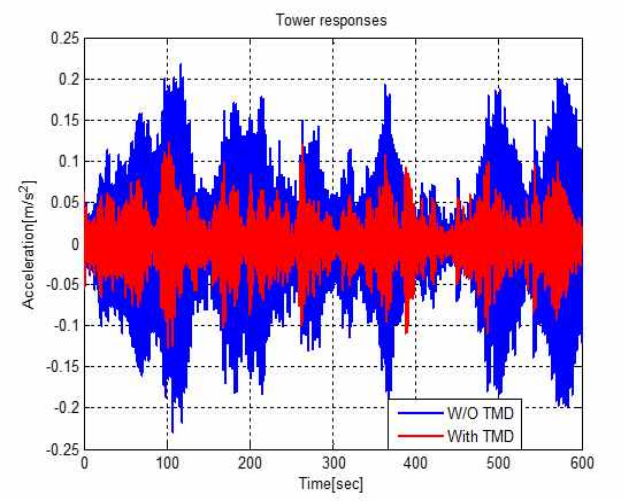
[CASE01]



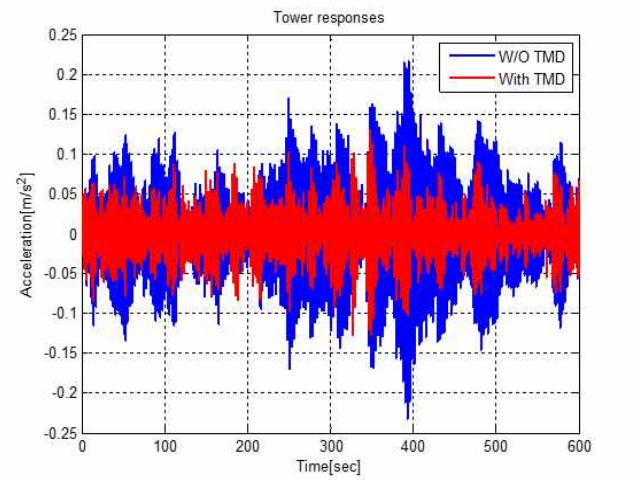
[CASE02]



[CASE03]

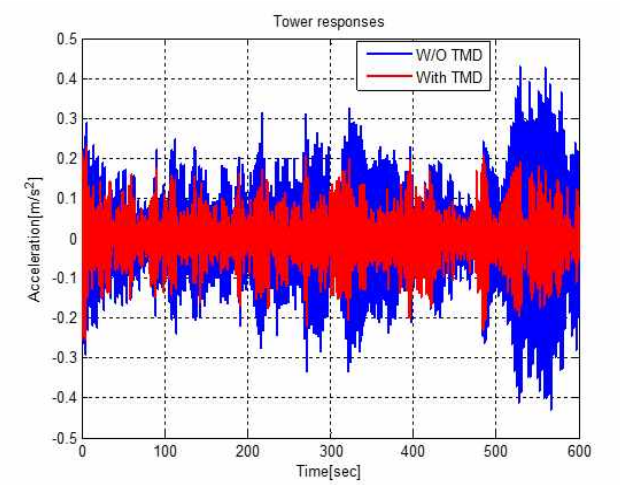


[CASE04]

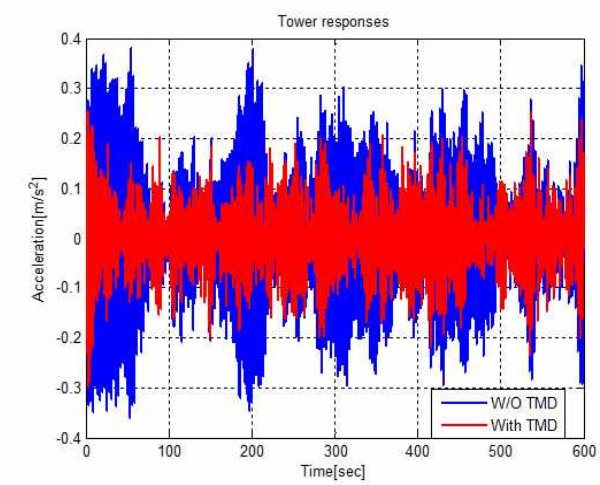


[CASE05]

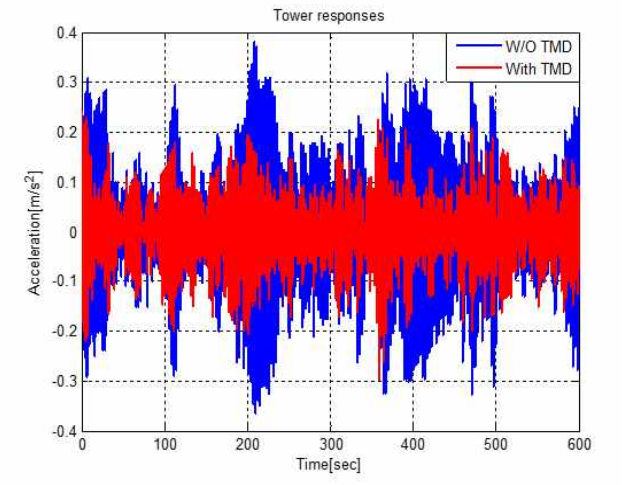
② Wind Speed 15m/s



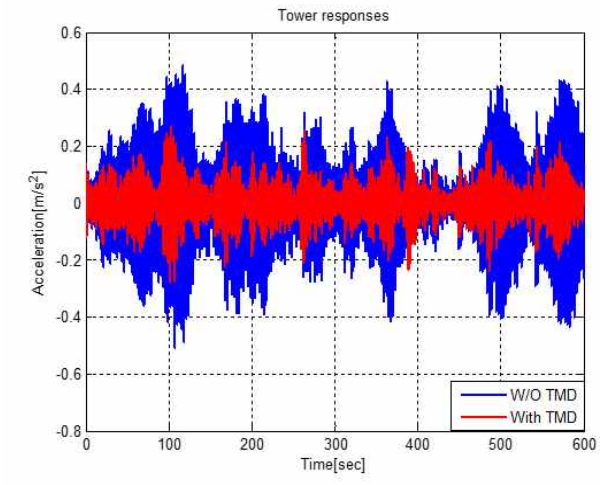
[CASE01]



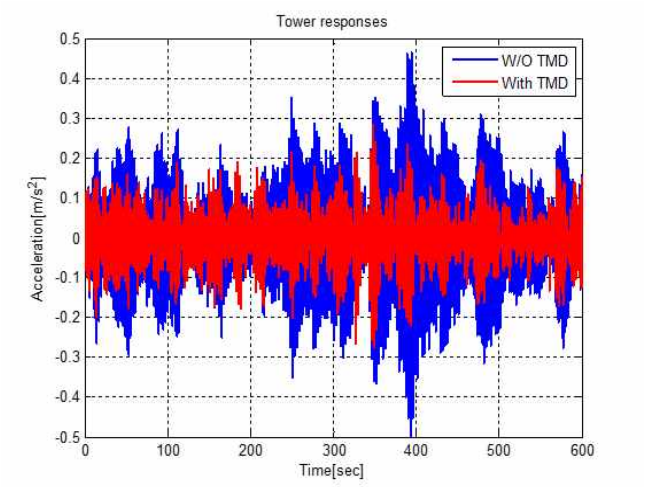
[CASE02]



[CASE03]

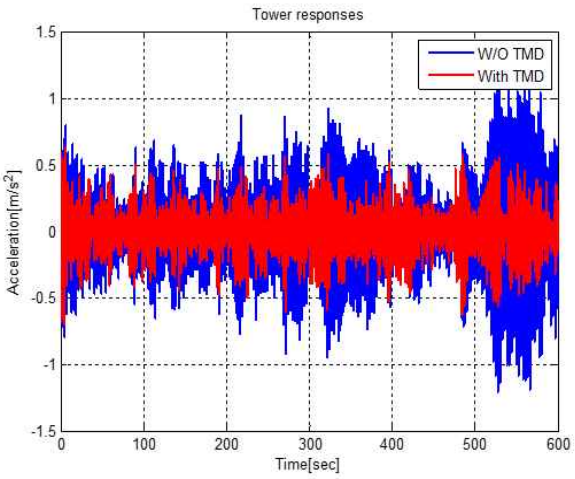


[CASE04]

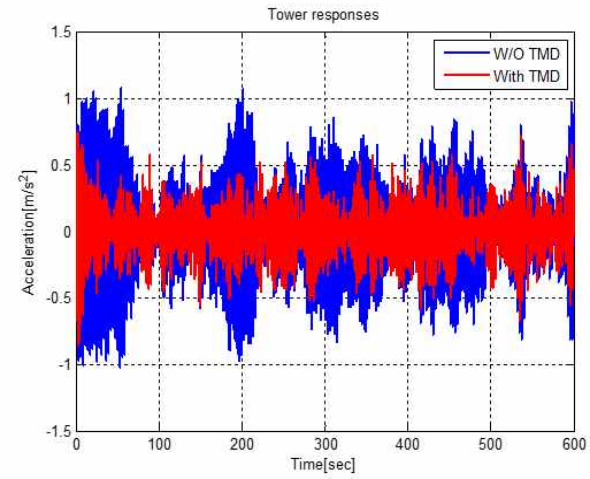


[CASE05]

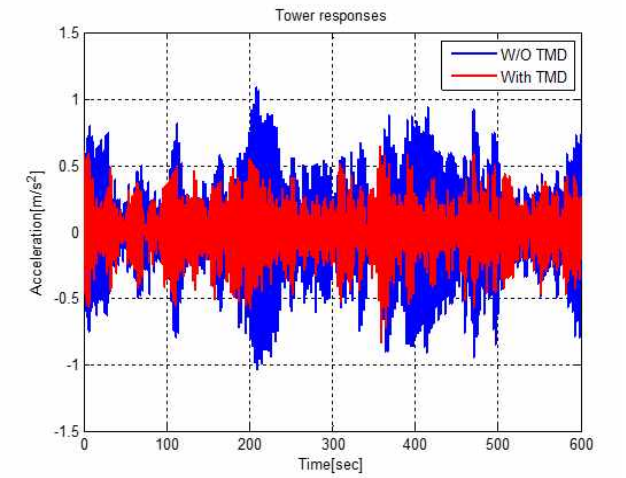
③ Wind Speed 25m/s



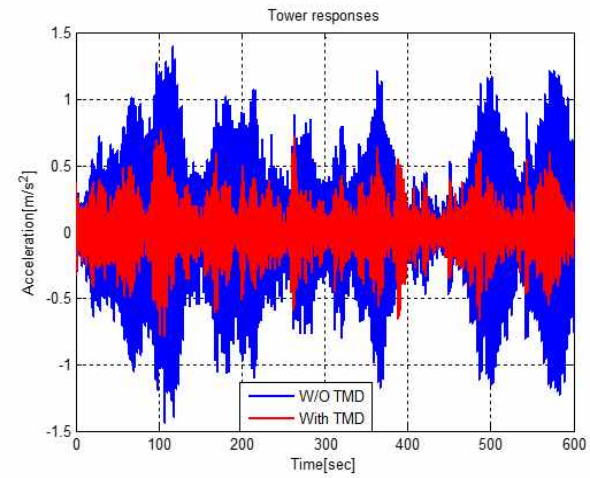
[CASE01]



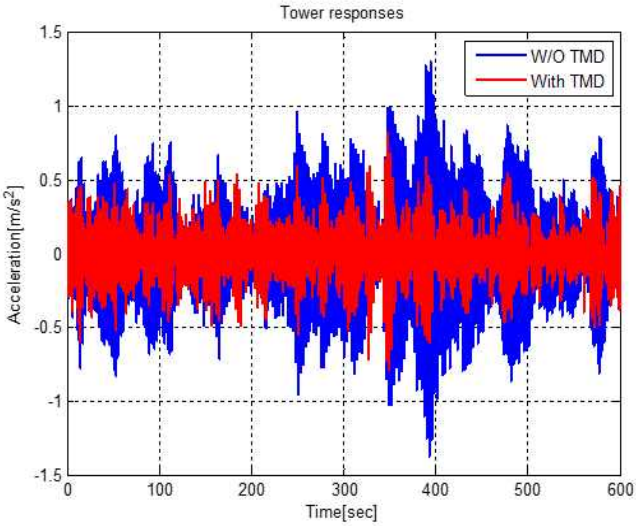
[CASE02]



[CASE03]



[CASE04]



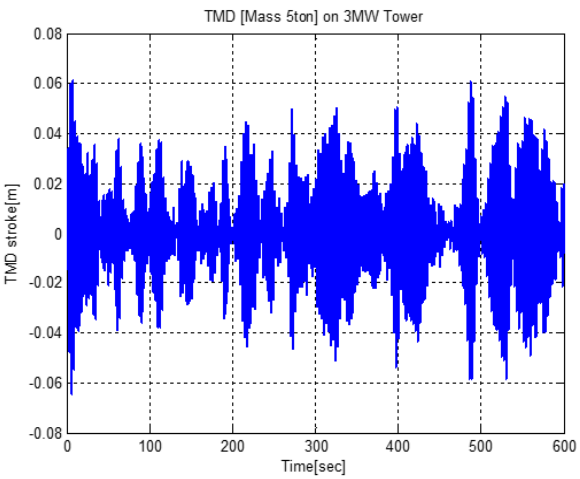
[CASE05]

④ 풍속 별 가속도 Control Ratio (RMSw/ TMD / RMSw/o TMD)

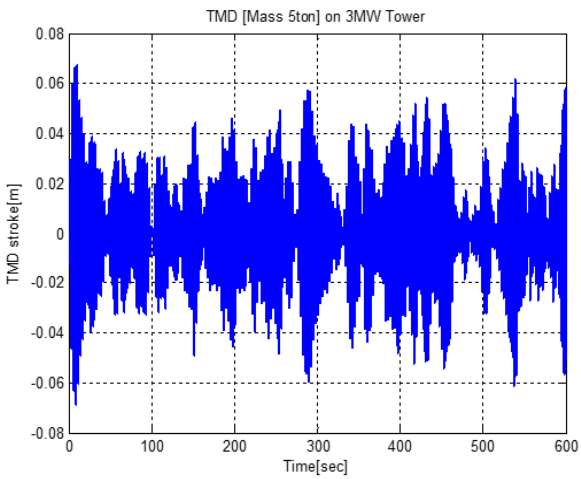
Wind Speed(m/s)	Acceleration Control Ratio				
	CASE01	CASE02	CASE03	CASE04	CASE05
10	0.5111	0.5498	0.5682	0.416	0.5083
15	0.5076	0.5469	0.5671	0.4132	0.5164
25	0.5030	0.5442	0.5644	0.4116	0.5251

(다) 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s의 풍하중이 작용할 때, TMD의 이송거리(Stroke)를 분석함.

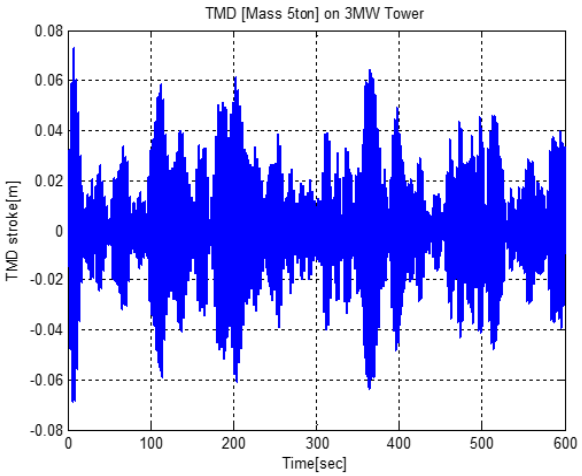
① Wind Speed 10m/s



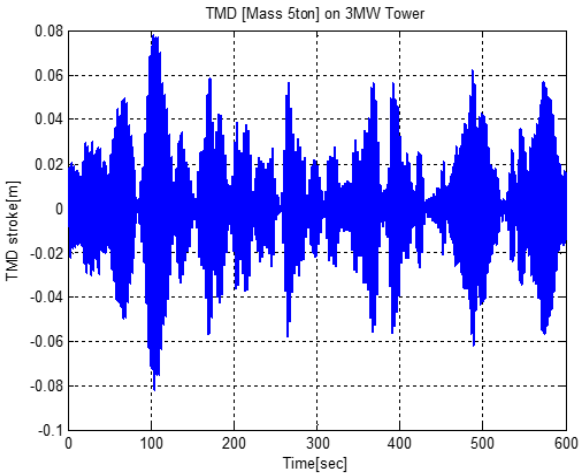
[CASE01]



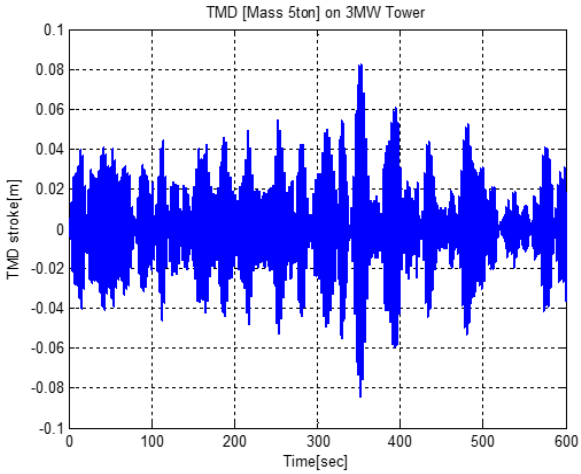
[CASE02]



[CASE03]

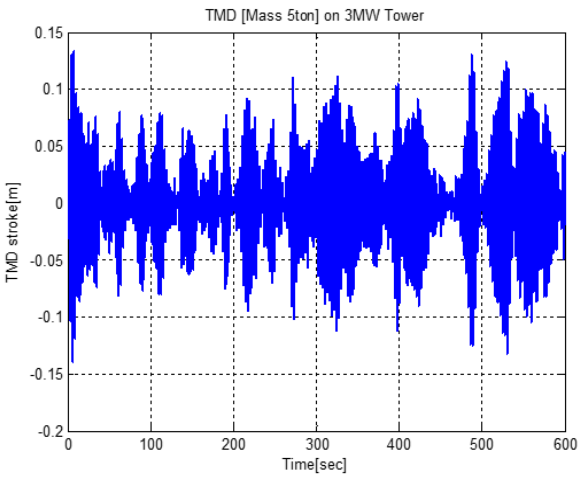


[CASE04]

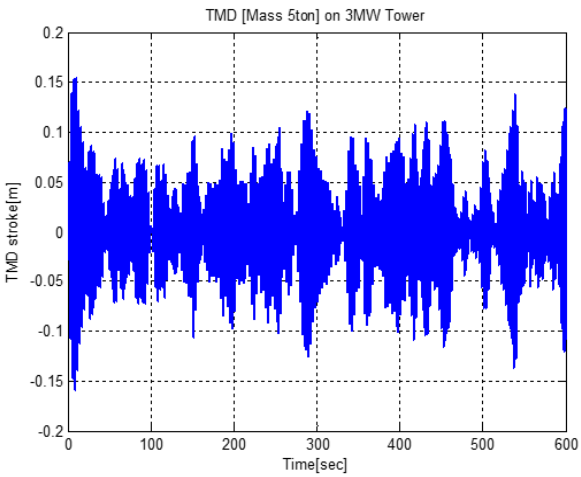


[CASE05]

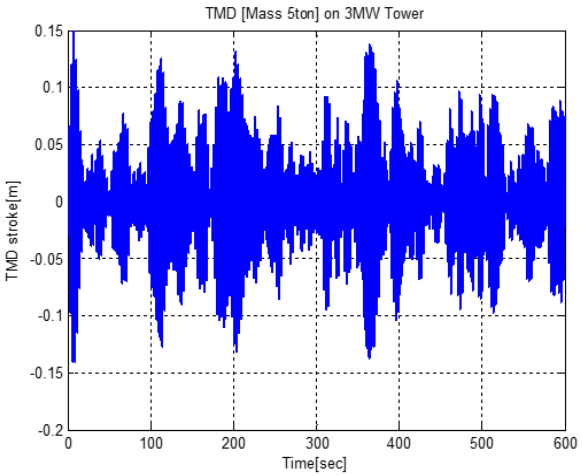
② Wind Speed 15m/s



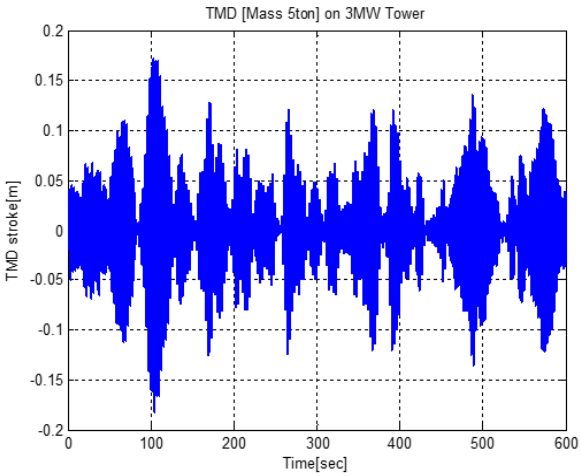
[CASE01]



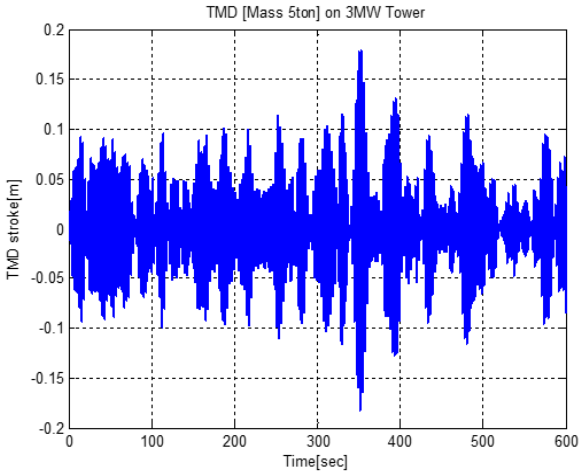
[CASE02]



[CASE03]

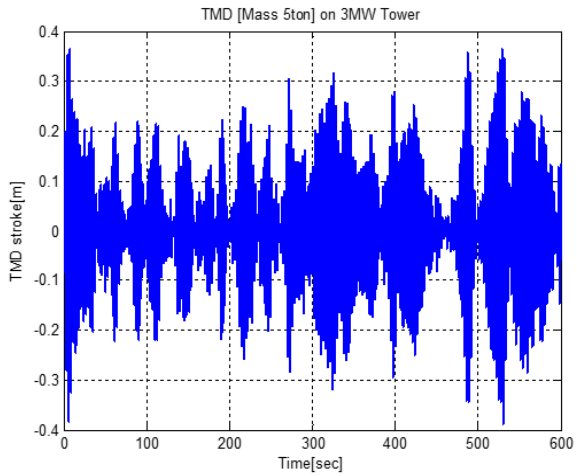


[CASE04]

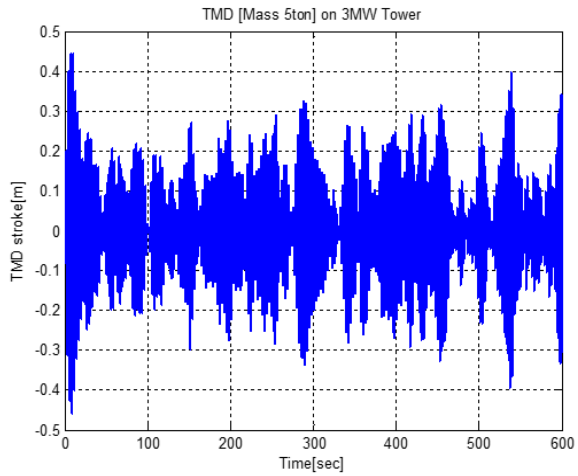


[CASE05]

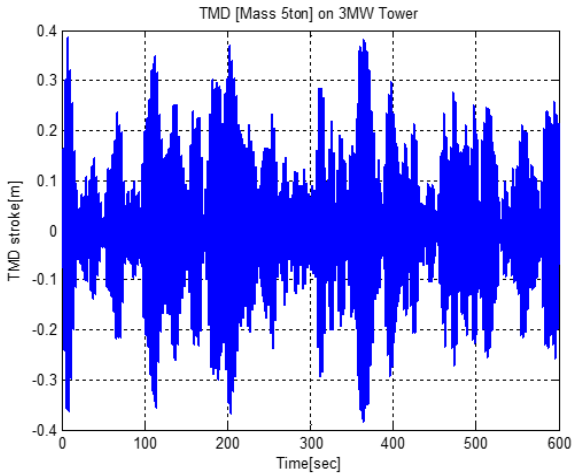
③ Wind Speed 25m/s



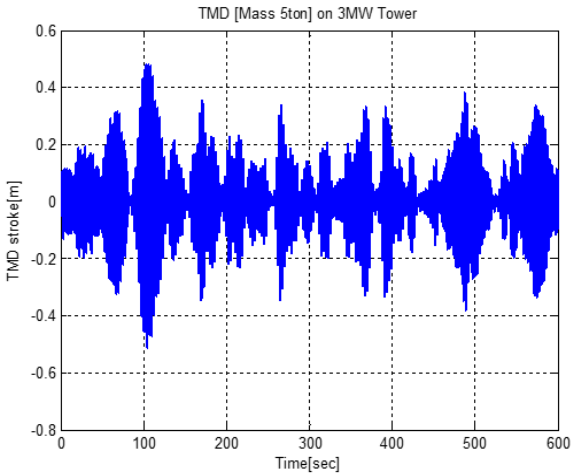
[CASE01]



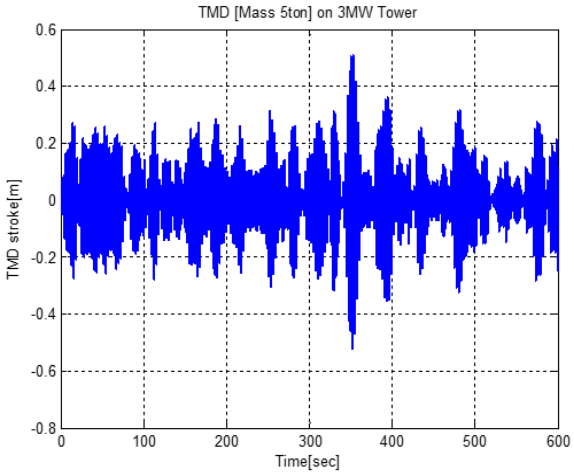
[CASE02]



[CASE03]



[CASE04]



[CASE05]

④ 풍속 별 TMD 이송거리(Stroke)

Wind Speed(m/s)	3MW Wind Tower TMD Max. Stroke(m)				
	CASE01	CASE02	CASE03	CASE04	CASE05
10	0.0611	0.0671	0.0728	0.0774	0.0823
15	0.1326	0.1542	0.1499	0.1715	0.1783
25	0.3641	0.4444	0.3848	0.4812	0.5066

(라) 3MW 풍력터빈타워 제진장치에 대한 성능 결과

① 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s에 대하여 최소 28%(10m/s, CASE03), 최대 51%(25m/s, CASE04)의 타워 변위 저감 효과를 얻을 수 있으며, 목표 진동 제어 풍속인 25m/s에서 5CASE 최대 변위의 평균값은 40.05%의 제어 효과를 볼 수 있음.

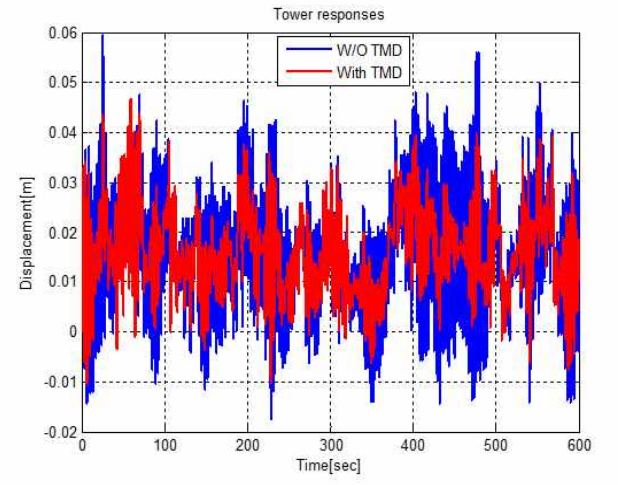
② 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s에 대하여 최소 43%(10m/s, CASE03), 최대 59%(25m/s, CASE04)의 타워 가속도 저감 효과를 얻을 수 있으며, 목표 진동 제어 풍속인 25m/s에서 5CASE 최대 가속도의 평균값은 49.03%의 제어 효과를 볼 수 있음.

③ 풍속 10m/s에서는 최대 0.0823m(CASE05), 15m/s에서는 최대 0.1783m(CASE05), 25m/s에서는 최대 0.5066m의 TMD stroke가 발생하였고, 목표 진동 제어 풍속인 25m/s에서의 5CASE 최대 이송거리의 평균값은 0.436m임.

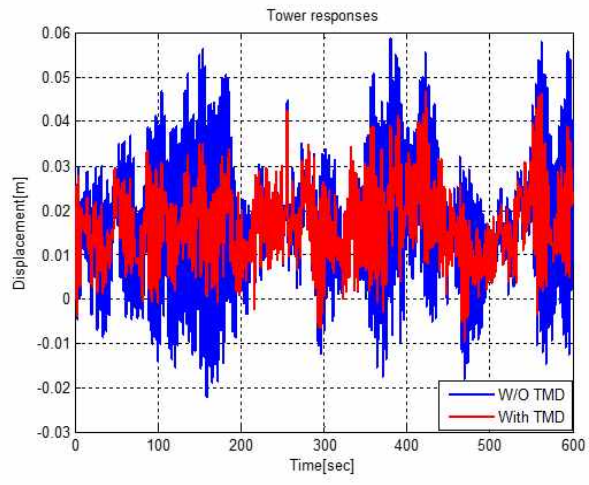
(2) 7MW급 풍력터빈타워 제진용 TMD

(가) 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s의 풍하중이 작용할 때, TMD 설치 유무에 따른 풍력타워 변위 저감율을 분석함.

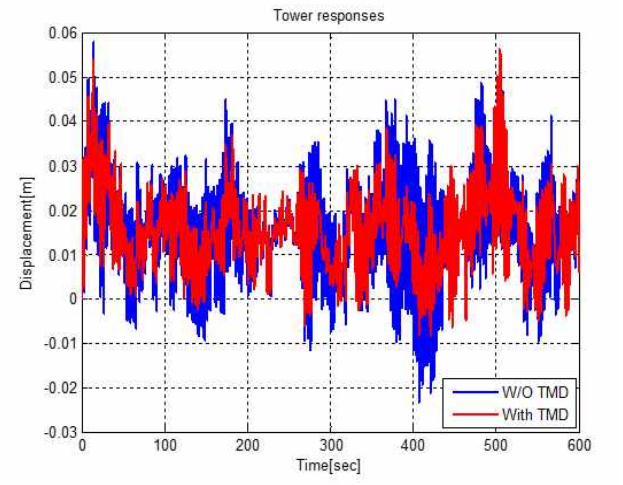
① Wind Speed 10m/s



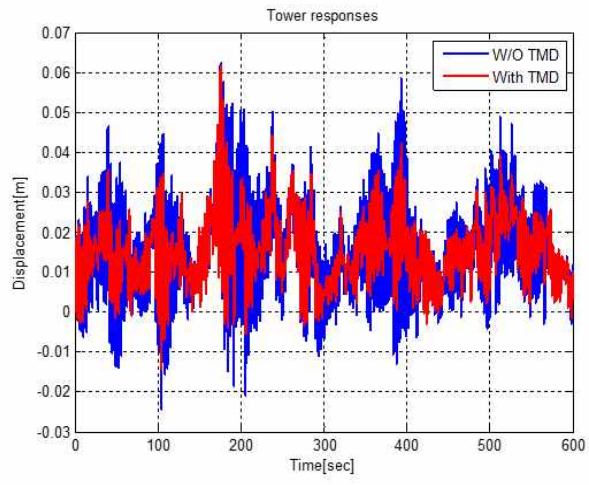
[CASE01]



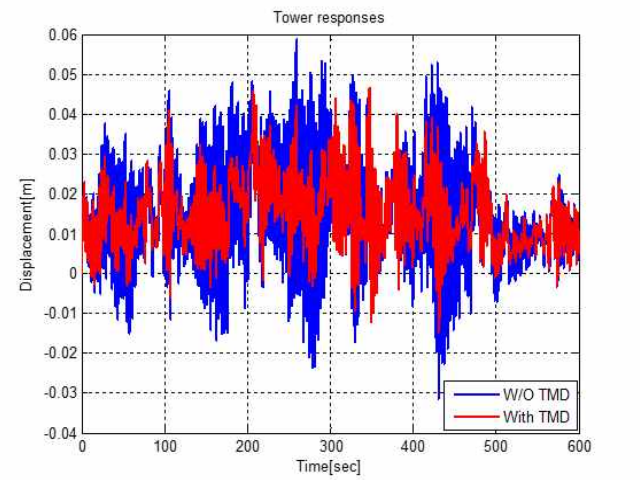
[CASE02]



[CASE03]

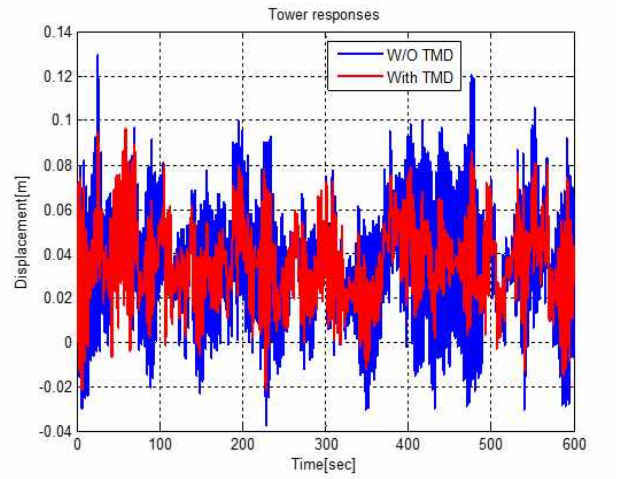


[CASE04]

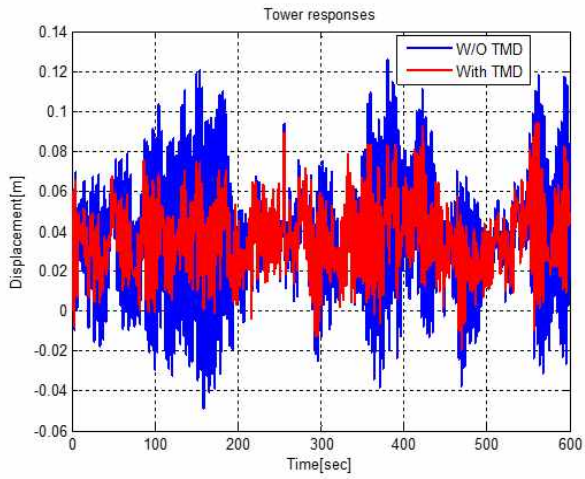


[CASE05]

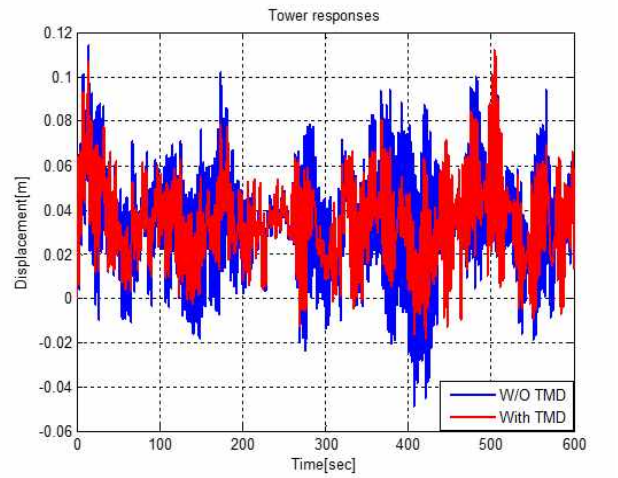
② Wind Speed 15m/s



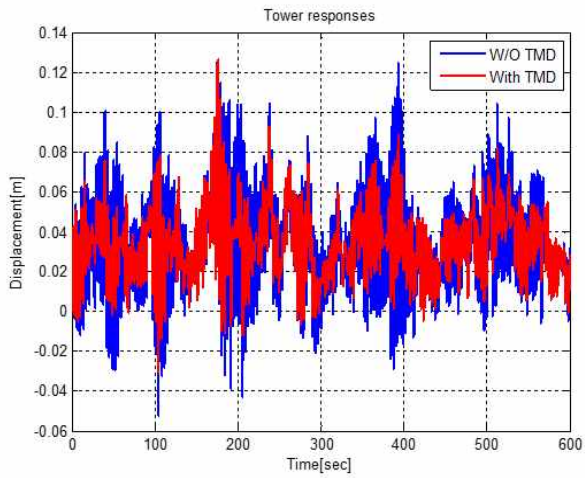
[CASE01]



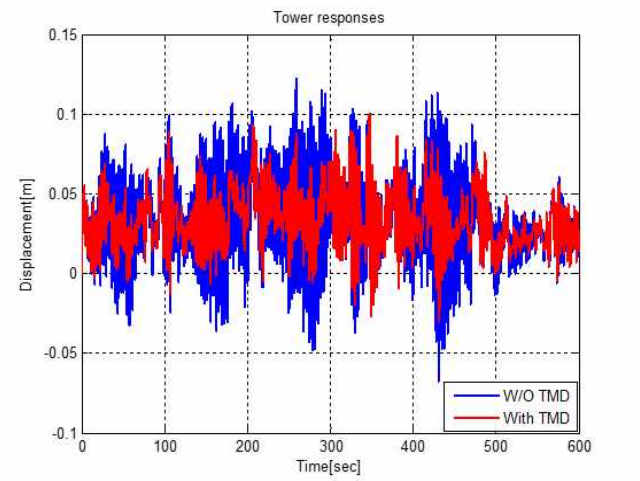
[CASE02]



[CASE03]

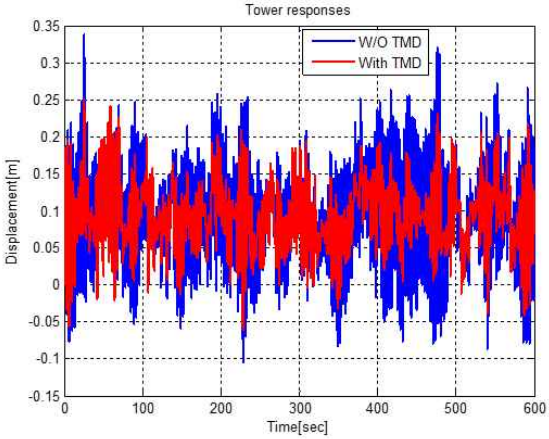


[CASE04]

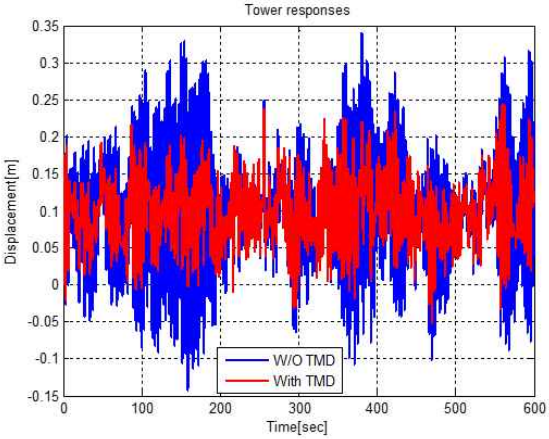


[CASE05]

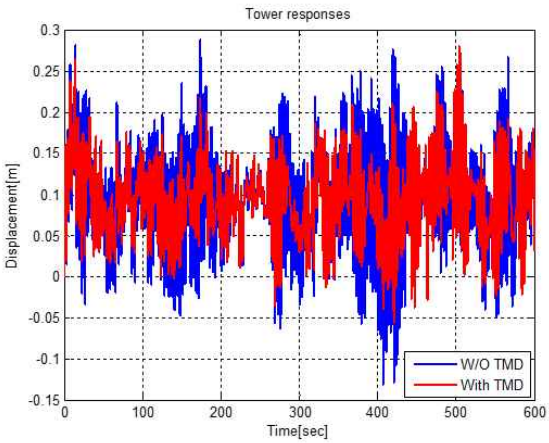
③ Wind Speed 25m/s



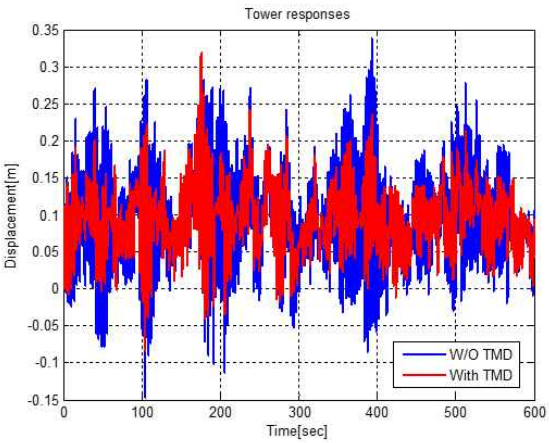
[CASE01]



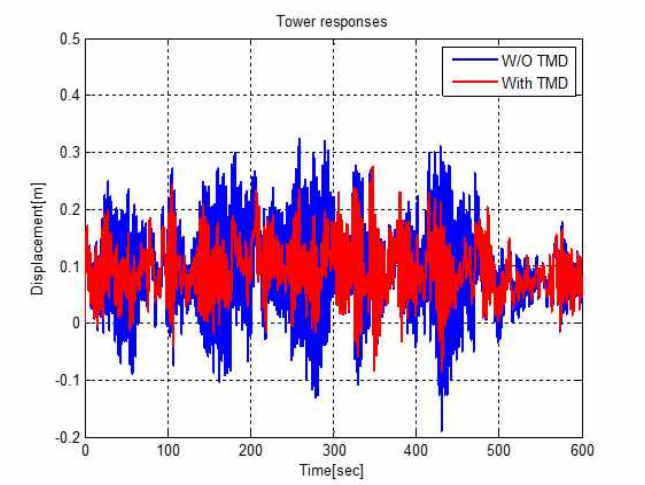
[CASE02]



[CASE03]



[CASE04]



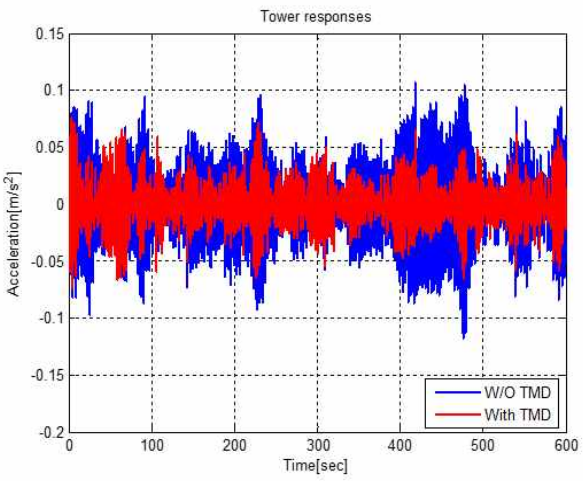
[CASE05]

④ 풍속 별 변위 Control Ratio (RMSw/ TMD / RMSw/o TMD)

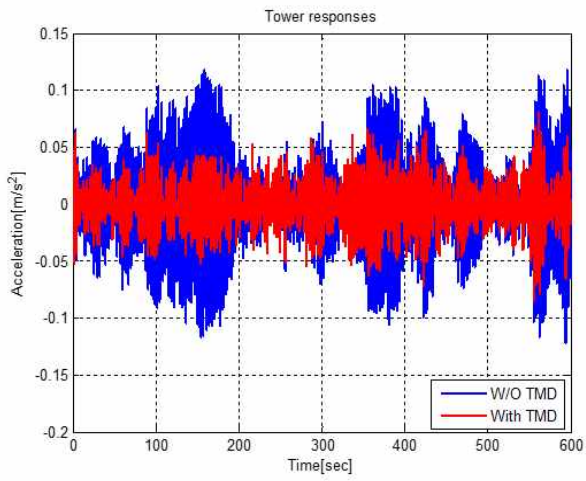
Wind Speed(m/s)	Displacement Control Ratio				
	CASE01	CASE02	CASE03	CASE04	CASE05
10	0.6961	0.6161	0.7807	0.7268	0.6639
15	0.6768	0.5988	0.7617	0.6991	0.6452
25	0.6570	0.5828	0.7412	0.679	0.6272

(나) 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s의 풍하중이 작용할 때, TMD 설치 유무에 따른 풍력타워 가속도 저감율을 분석함.

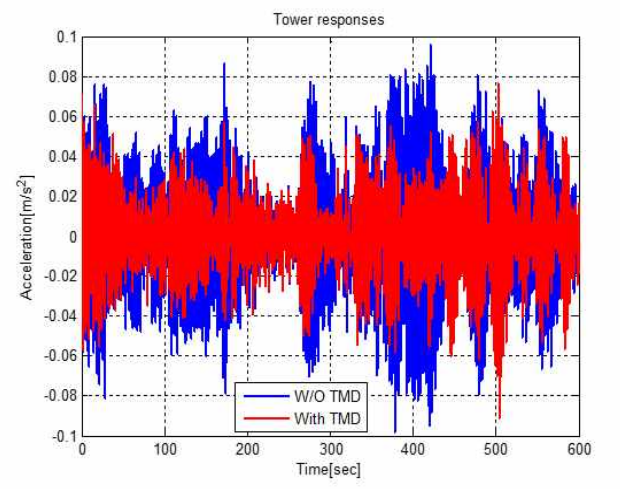
① Wind Speed 10m/s



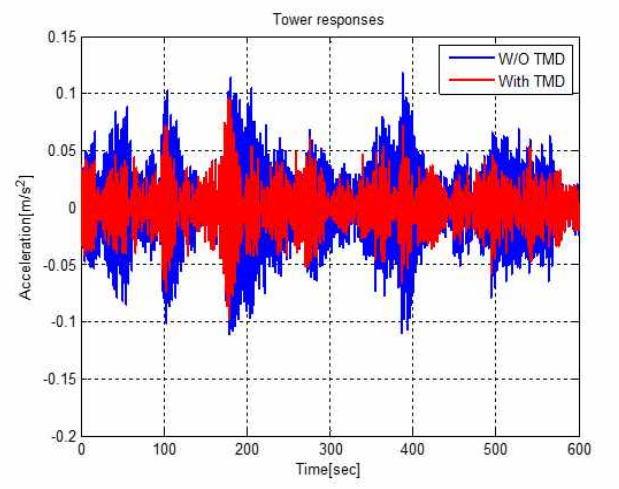
[CASE01]



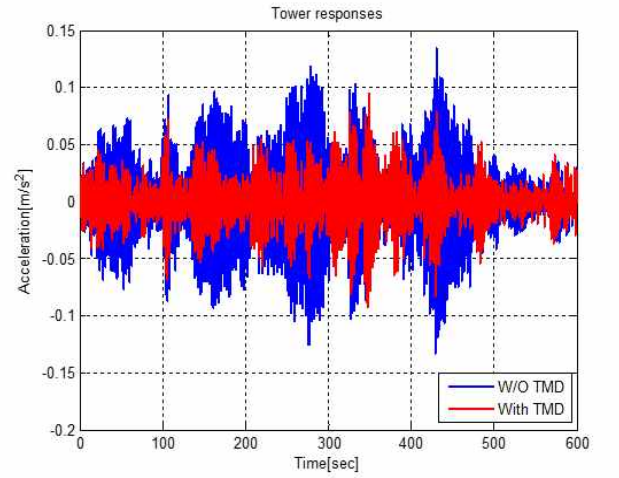
[CASE02]



[CASE03]

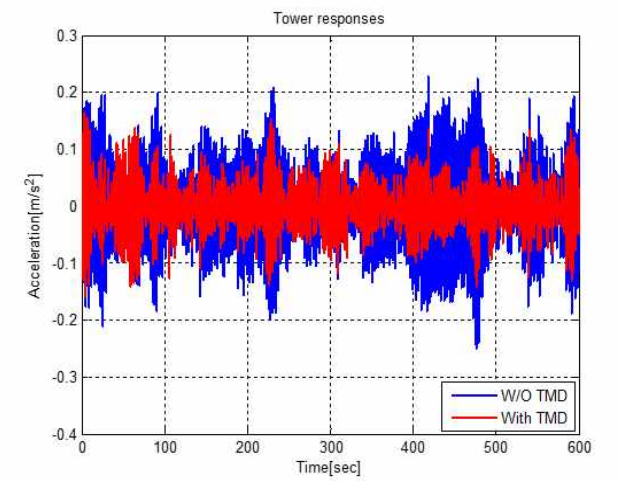


[CASE04]

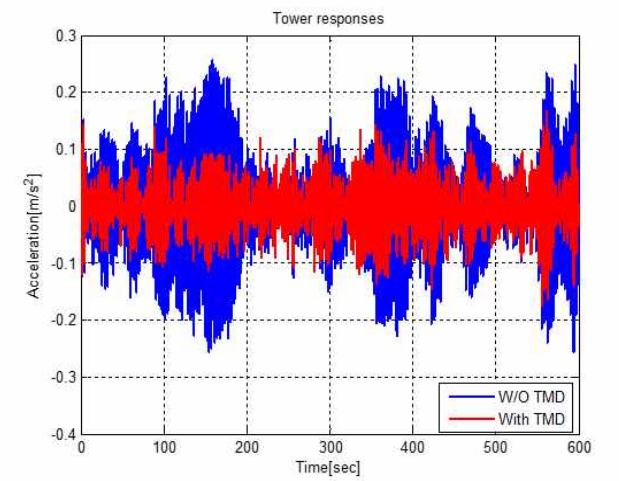


[CASE05]

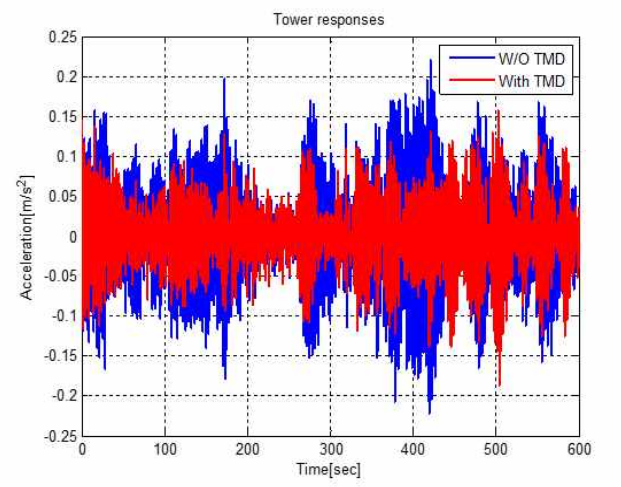
② Wind Speed 15m/s



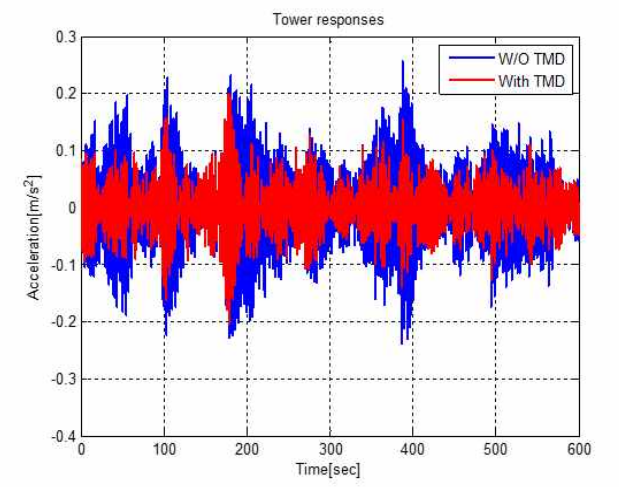
[CASE01]



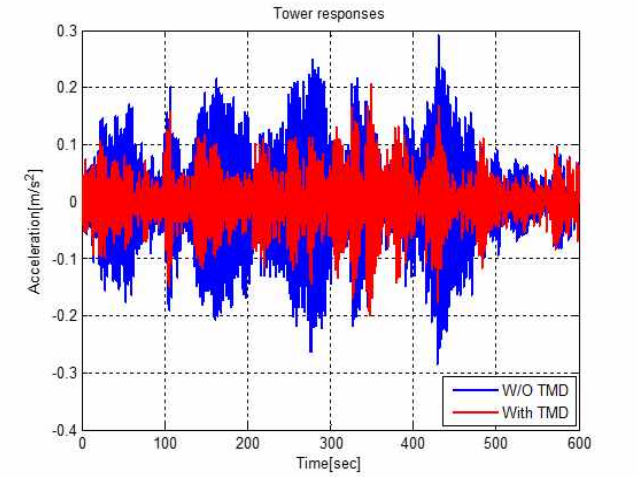
[CASE02]



[CASE03]

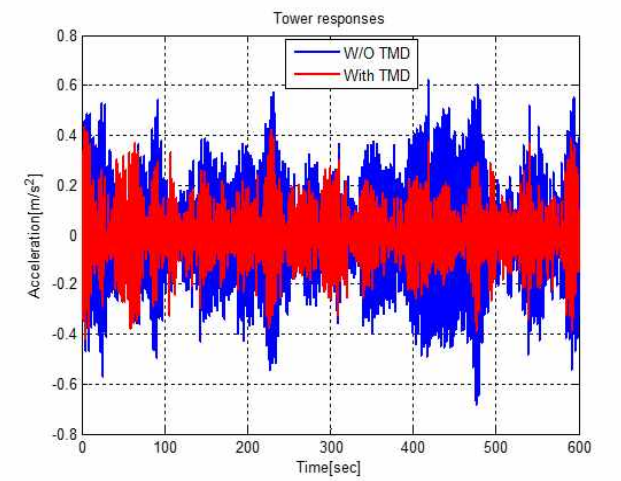


[CASE04]

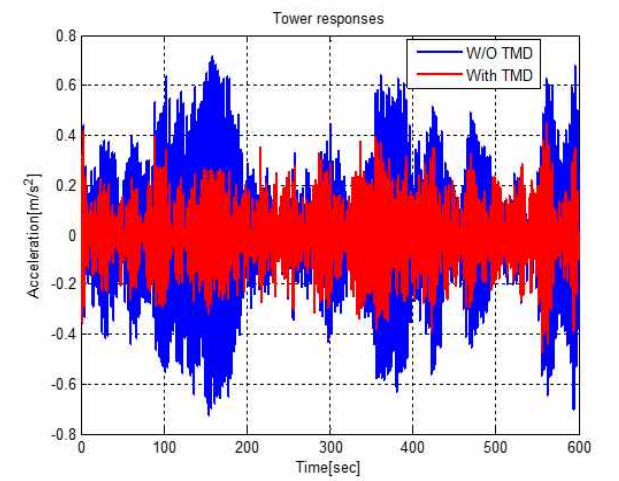


[CASE05]

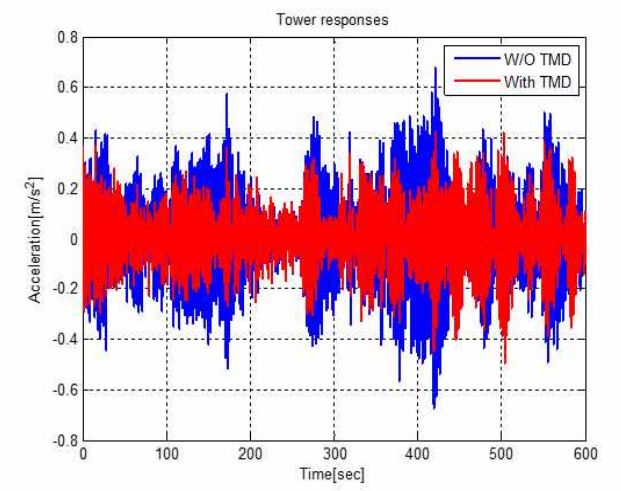
③ Wind Speed 25m/s



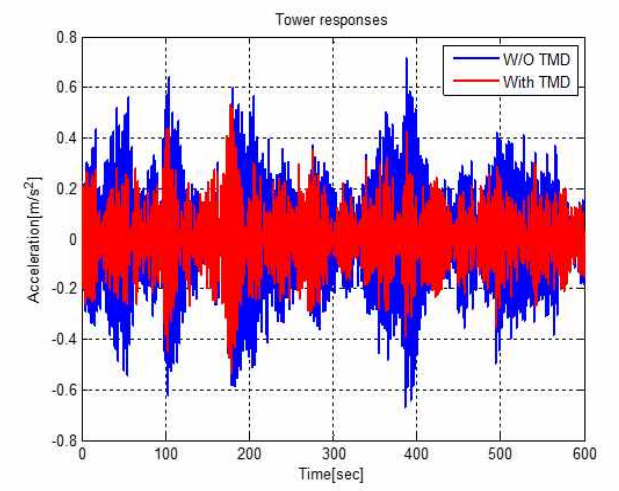
[CASE01]



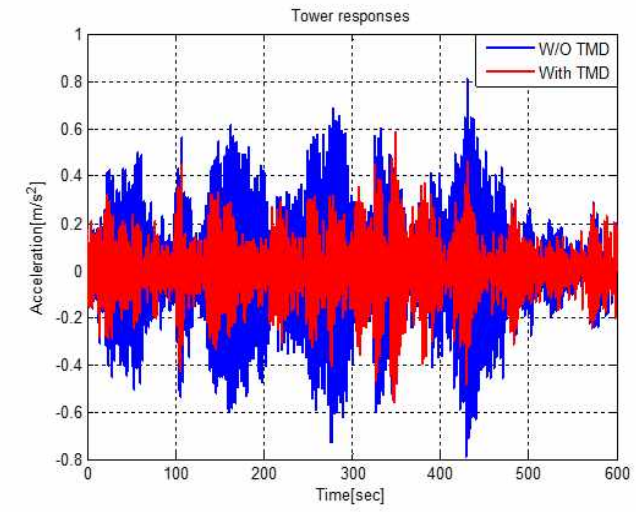
[CASE02]



[CASE03]



[CASE04]



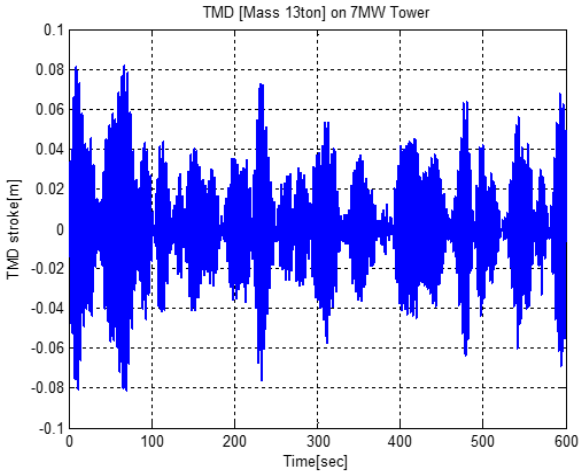
[CASE05]

④ 풍속 별 가속도 Control Ratio (RMSw/ TMD / RMSw/o TMD)

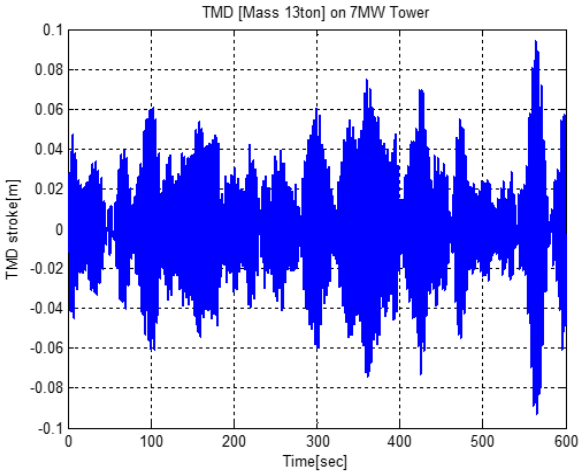
Wind Speed(m/s)	Acceleration Control Ratio				
	CASE01	CASE02	CASE03	CASE04	CASE05
10	0.5723	0.5232	0.656	0.609	0.5526
15	0.5704	0.5232	0.6608	0.5949	0.5537
25	0.5756	0.5253	0.6656	0.5987	0.5562

(다) 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s의 풍하중이 작용할 때, TMD의 이송거리(Stroke)를 분석함.

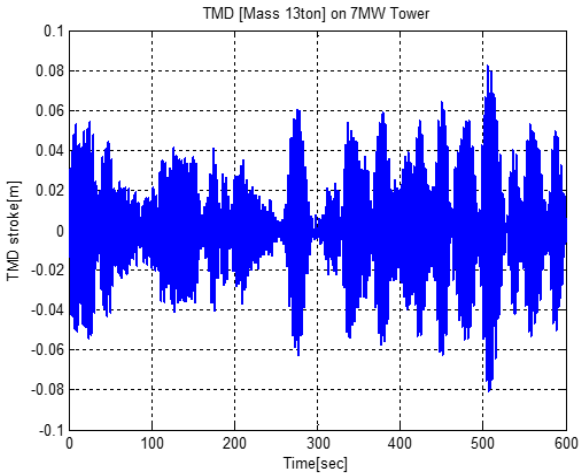
① Wind Speed 10m/s



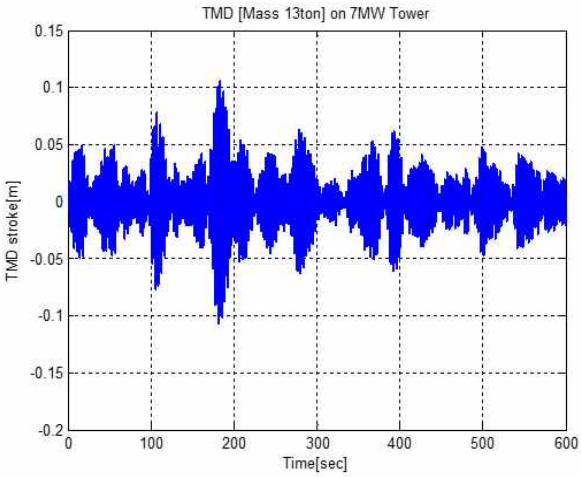
[CASE01]



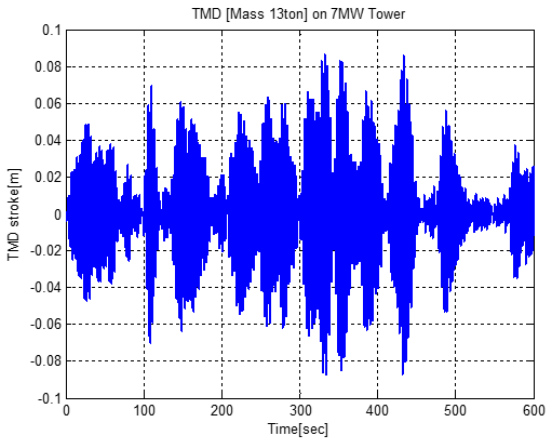
[CASE02]



[CASE03]

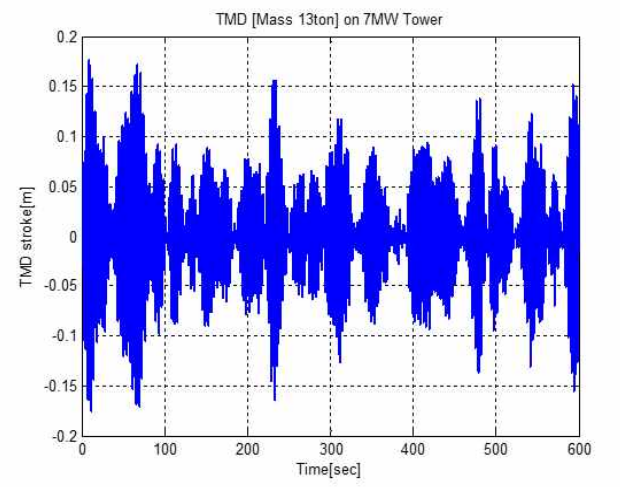


[CASE04]

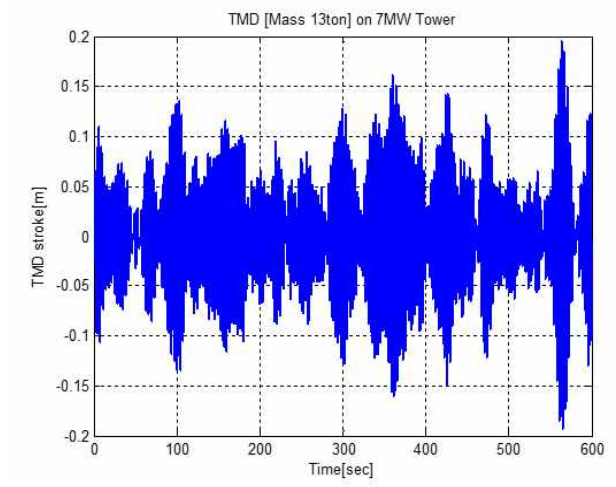


[CASE05]

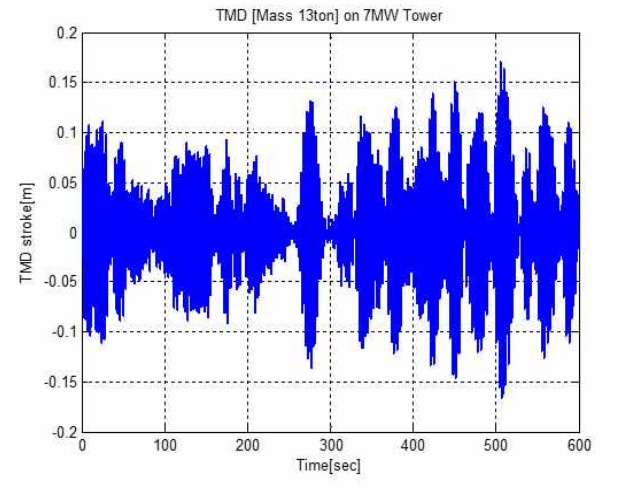
② Wind Speed 15m/s



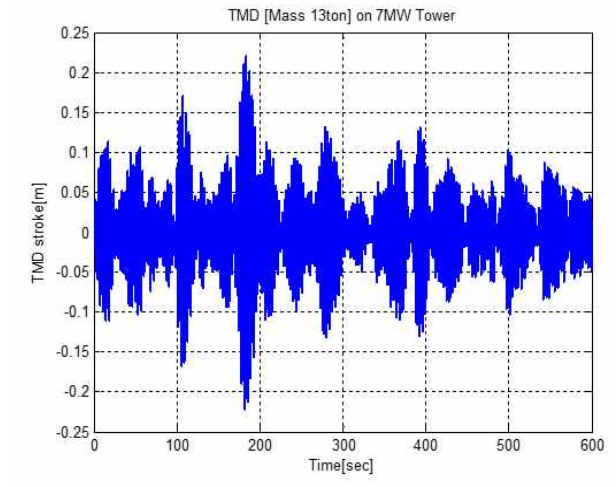
[CASE01]



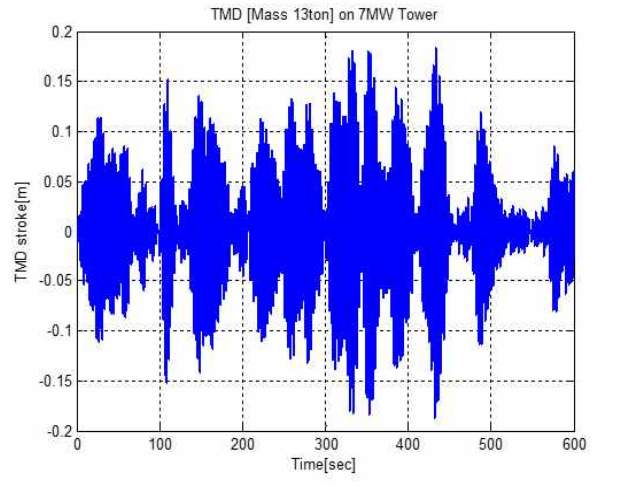
[CASE02]



[CASE03]

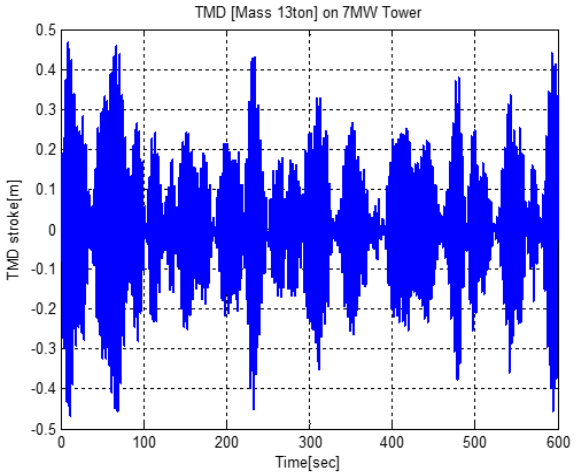


[CASE04]

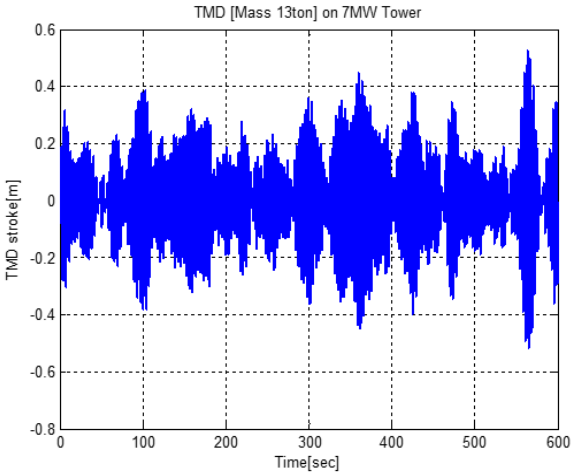


[CASE05]

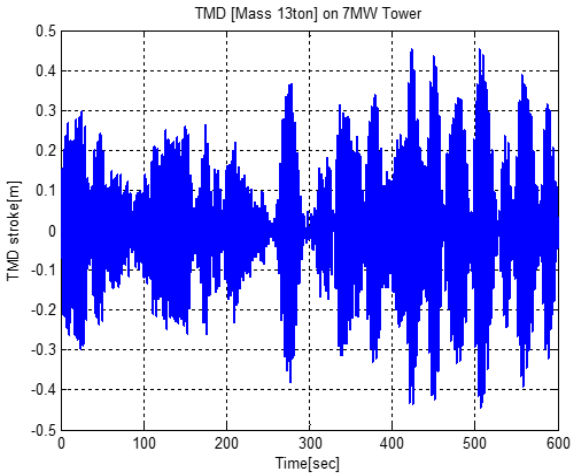
③ Wind Speed 25m/s



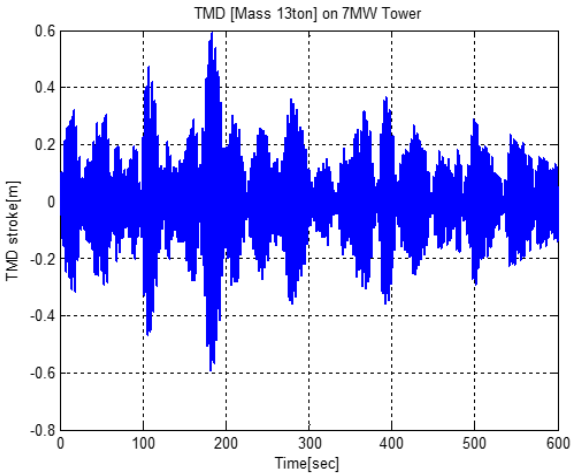
[CASE01]



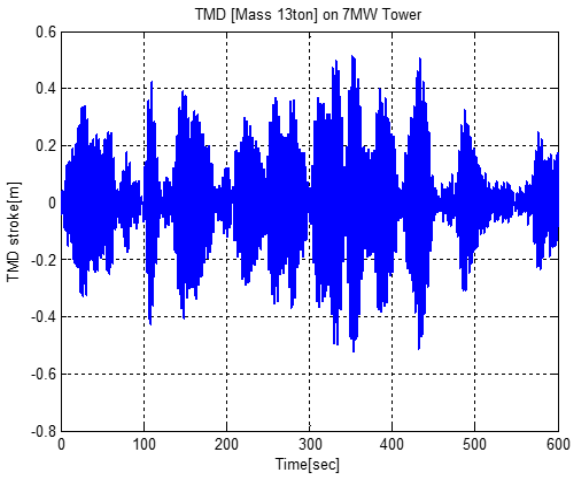
[CASE02]



[CASE03]



[CASE04]



[CASE05]

④ 풍속 별 TMD 이송거리(Stroke)

Wind Speed(m/s)	7MW Wind Tower TMD Max. Stroke(m)				
	CASE01	CASE02	CASE03	CASE04	CASE05
10	0.0814	0.0937	0.0824	0.1054	0.0865
15	0.1759	0.1953	0.1696	0.2206	0.1833
25	0.4675	0.5231	0.4528	0.5889	0.5139

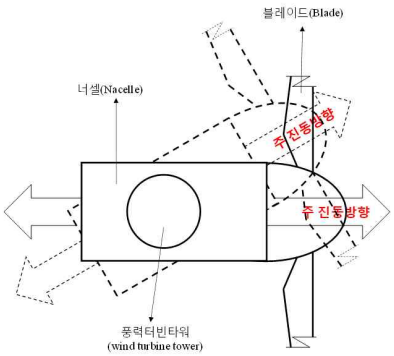
(라) 7MW 풍력터빈타워 제진장치에 대한 성능 결과

① 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s에 대하여 최소 22%(10m/s, CASE03), 최대 42%(25m/s, CASE02)의 타워의 변위 저감 효과를 얻을 수 있으며, 목표 진동 제어 풍속인 25m/s에서 5CASE 최대 변위의 평균값은 34.26%의 제어 효과를 볼 수 있음.
② 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s에 대하여 최소 33%(25m/s, CASE03), 최대 48%(10m/s, 15m/s, CASE02)의 타워의 가속도 저감 효과를 얻을 수 있으며, 목표 진동 제어 풍속인 25m/s에서 5CASE 최대 가속도의 평균값은 41.57%의 제어 효과를 볼 수 있음.
③ 풍속 10m/s에서는 최대 0.1054m(CASE04), 15m/s에서는 최대 0.2206m(CASE04), 25m/s에서는 최대 0.5889m의 TMD stroke를 나타냈으며, 목표 진동 제어 풍속인 25m/s에서의 5CASE 최대 이송거리의 평균값은 0.509m임.

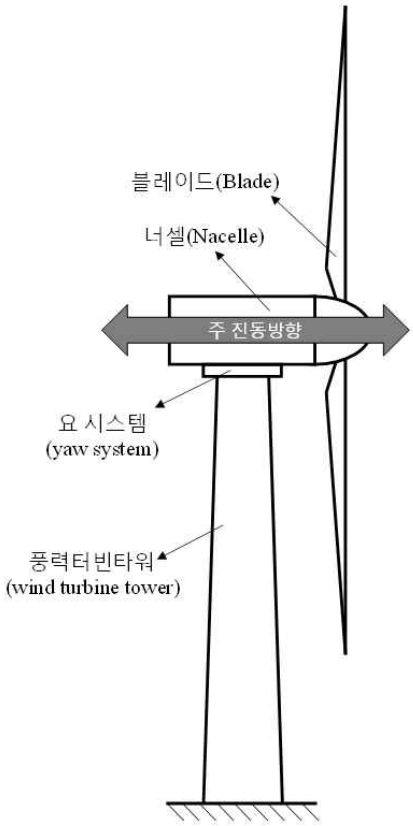
3. 풍력타워 제진장치 특허 개발

가. 발명 개요

(1) 본 발명은 풍력터빈타워의 진동을 감소시키기 위한 제진축 자동조정시스템으로, 바람의 방향에 따라서 변화하는 풍력터빈타워의 주요한 진동을 줄이기 위해서 진동제어장치의 진동제어 축(제진 축)을 자동으로 회전시켜주는 시스템에 관한 것임.
(2) 풍력터빈타워의 주요진동은 블레이드 회전면의 대해서 직각 방향으로 발생하는데 이러한 진동은 내부 주요 발전기자재 고장 및 터빈 타워의 피로파괴에 영향을 줌.
(3) 제진장치를 통하여 주 진동방향 또는 너셋 축과 평행하게 제진하는 장치가 요구됨.



[풍력터빈타워의 주 진동방향(평면)]

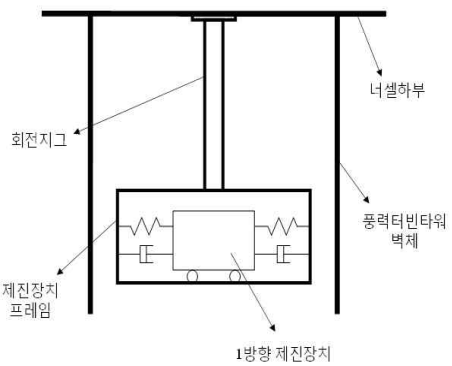


[풍력터빈타워의 주 진동방향(입면)]

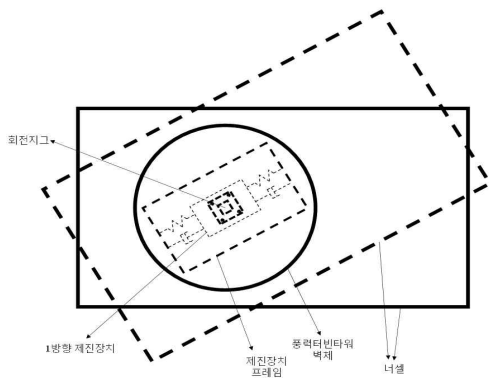
(4) 제진장치 자체는 기존의 1방향 제진장치(예를 들면, 슬라이딩 방식의 1방향 제진장치)를 이용하고 이를 너셀이 회전함에 따라 1방향의 제진축도 너셀축과 평행하게 유지되는 구조가 간단한 회전시스템을 고안함.

나. 과제 해결 수단

(1) [대안 1] 너셀하부에 지그를 일단을 고정하고 다른 일단을 1방향으로 작동하는 제진장치 프레임에 고정함으로써 너셀이 회전함에 따라 제진축도 너셀 축과 평행하게 회전하면, 제진장치의 자중이 너셀에 전달되어 너셀을 회전시키기 위한 모터의 용량이 증가됨.



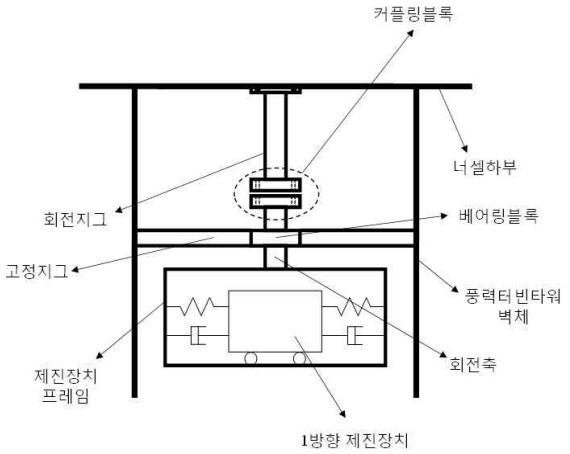
[대안. 1 자동조정시스템(입면)]



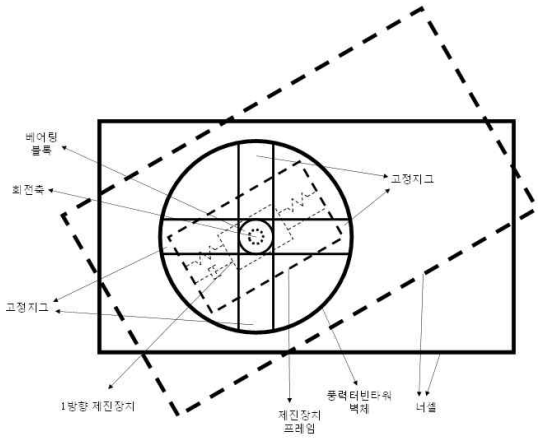
[대안. 1 자동조정시스템(평면)]

(2) [대안 2] 너셀하부에 회전지그를 고정하고, 이를 하부구조와는 구조적으로 분리시켜서 하부

구조의자중은 상부구조로 전달되지 않고 단지 상부구조의 회전력만 전달하게 하는 기구(예를 들면, 커플링 블록)로 연결함으로써 회전지그를 하부구조와 이격시켜서 제진장치를 포함하는 프레임의 자중이 직접 상부의 너셀하부에 전달되지 않게 하고, 커플링의 하부에 회전은 허용하되 하부구조의 자중은 부담하는 기구(예를 들면, 베어링블록)을 두고 이를 고정지그를 통하여 타워벽체에 연결하면, 제진장치 프레임의 자중과 제진장치의 제어력이 베어링블록을 통하여 타워본체에 전달되게 됨.

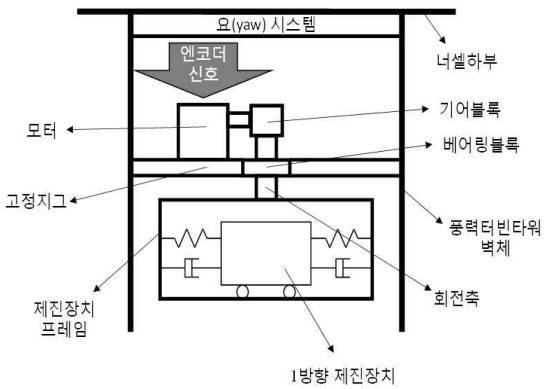


[대안. 2 자동조정시스템(입면)]

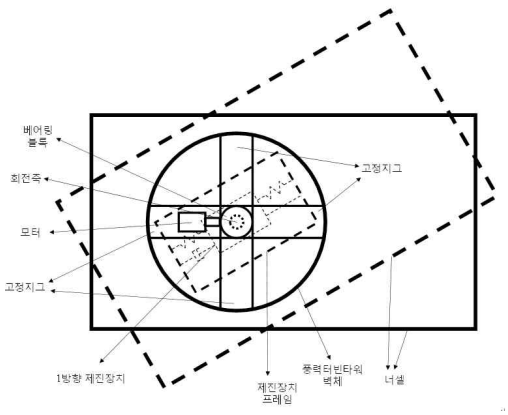


[대안. 2 자동조정시스템(입면)]

(3) 상기 [대안 1]과 [대안 2]의 회전지그를 너셀하부에 접합하기가 용이하지 않은 경우, 너셀하부의 회전지그 대신에 너셀을 회전시키기 위한 요(yaw)시스템 모터의 엔코더 신호와 동조시킨 모터와 그 회전력을 회전축의 회전으로 변환시키기 위한 기어블록을 별도로 도입하여 제진장치 프레임을 회전시킴.



[대안. 3 자동조정시스템(입면)]



[대안. 3 자동조정시스템(입면)]

다. 기대 효과

(1) 회전시스템의 구조가 간단하여 제작 및 유지관리가 용이함.

(2) 제진축이 항상 너셀축이 평행하게 유지되어 제진효과가 극대화됨.

(3) 제진장치 프레임 내부에 2방향의 제진장치의 도입이 가능함.

4. 제진장치 및 시험체 상세 설계 및 제작

가. 축소 스케일 제진장치 설계

(1) 역진자형 제진장치

(가) 제진장치 특징

① 풍력타워와 같이 협소한 내부 공간에 설치가 용이하고 장주기의 진자운동이 가능함.

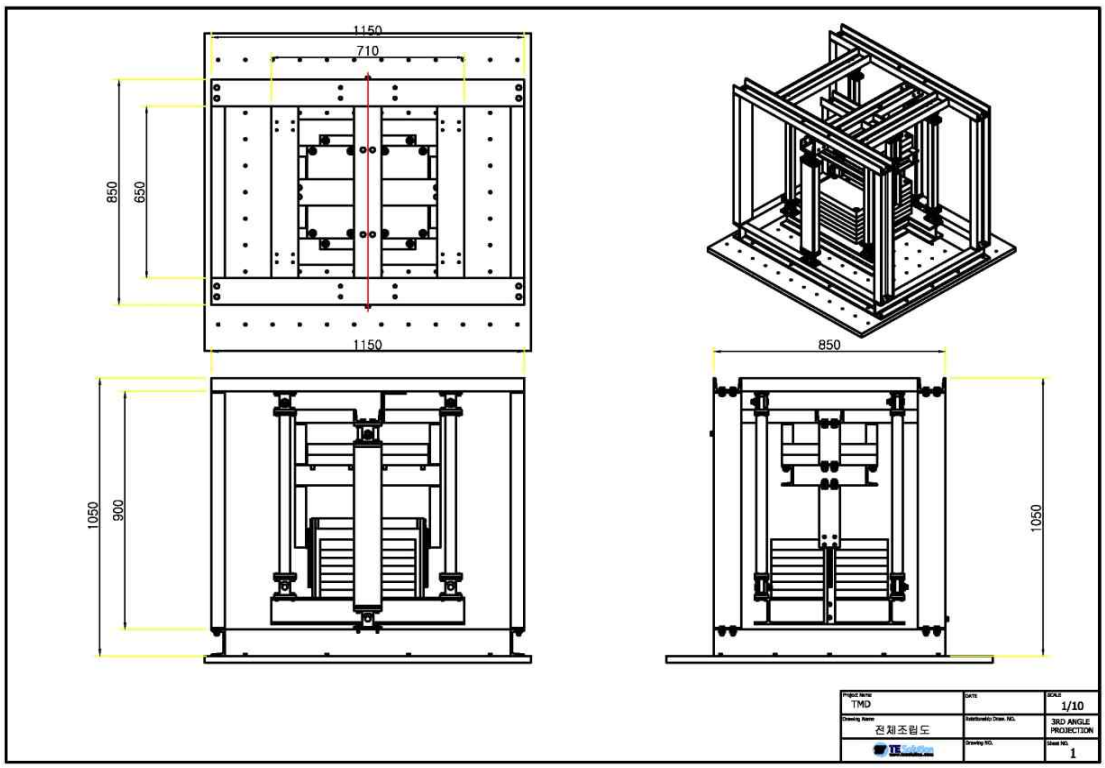
② 기존의 진자형 제진장치에서는 주기를 2배로 하기 위해서는 진자의 길이를 4배로 해야함. 본 시제품은 진자의 길이를 2배만 길게하여 주기를 2배로 할 수 있음.

③ 상단과 하단의 이동질량의 비율을 조절하여 미세튜닝이 가능함.

(나) 제진장치 사양 (질량조절 가능함)

항 목	제 원	
진자길이 [m]	0.7	
회전각 [Deg]	17	
수평변위 [m]	0.20	
하단질량 [kg]	293	417
상단질량 [kg]	214	90
진동수 범위[Hz]	0.268	0.546

(다) 축소 스케일 제진장치 도면



(2) 스프링 횡강성을 이용한 제진장치

(가) 제진장치 특징

① 코일스프링의 횡방향 강성을 이용하여 장치의 왕복운동 주기를 구현하며, 길이와 수량을 조절하여 장주기의 튜닝이 가능함.

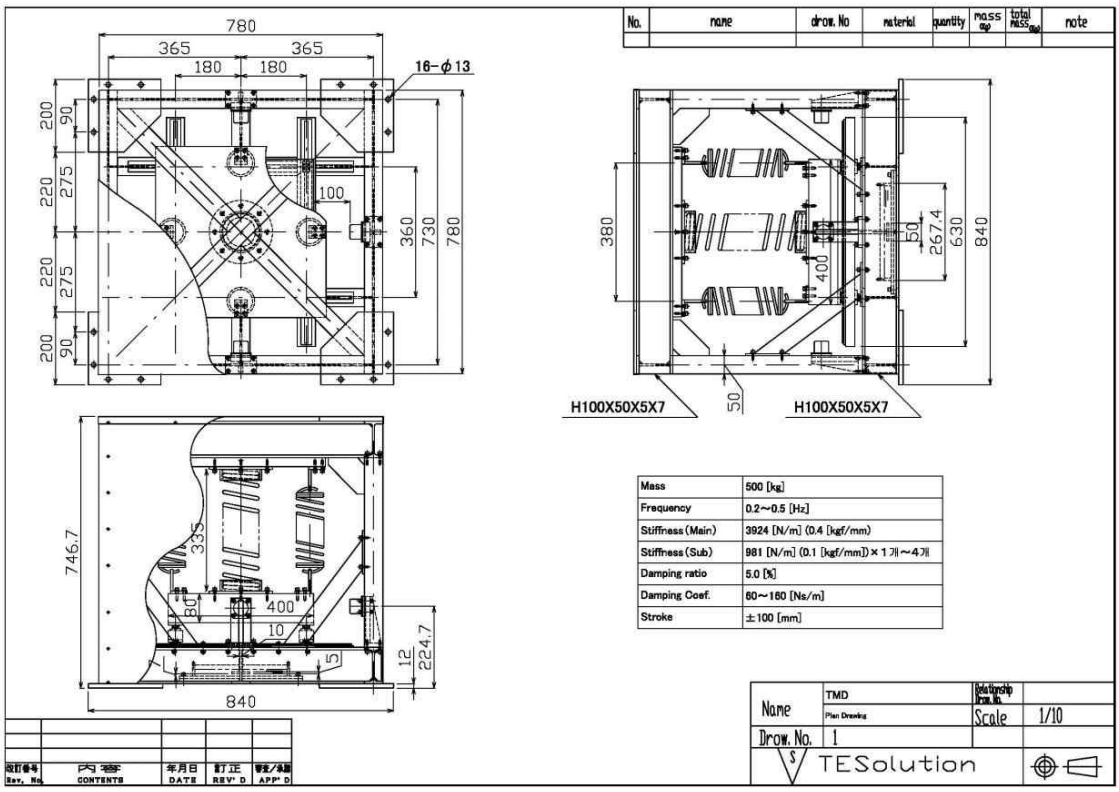
② 코일스프링은 수직방향으로 배치되어 메인과 서브코일스프링으로 구성됨.

③ 이러한 메인/서브코일스프링의 강성과 수량에 의해서 장치의 튜닝이 이루어짐.

(나) 제진장치 사양 (코일스프링 수량조절 가능함)

항 목	제 원
이동질량 [kg]	500
진동수 [Hz]	0.2~0.5
메인스프링강성 [N/m]	3924
서브스프링강성 [N/m]	981 × 1~4개
감쇠비 [%]	5
감쇠계수 [Ns/m]	60~160
스트로크 [mm]	±100

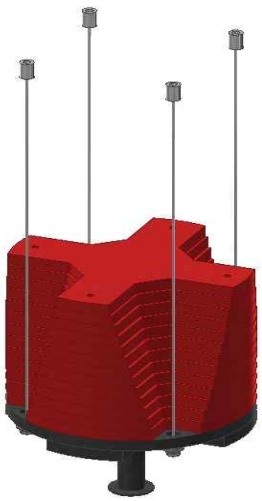
(다) 축소 스케일 제진장치 도면



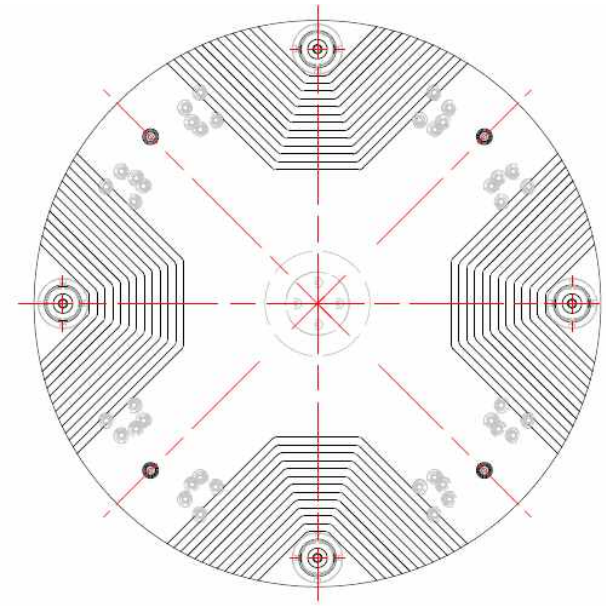
나. 실 스케일 제진장치 설계

(1) 3MW급 제진장치

(가) 3MW급 제진장치의 경우, 타워의 좁은 공간을 효율적으로 이용하기 위해 많은 부피를 차지하는 TMD 질량의 형상 변화가 요구됨. 따라서, 제진 시 거동하는 4개의 케이블의 최소한의 범위만 커팅하고 질량체(5ton) 설계.

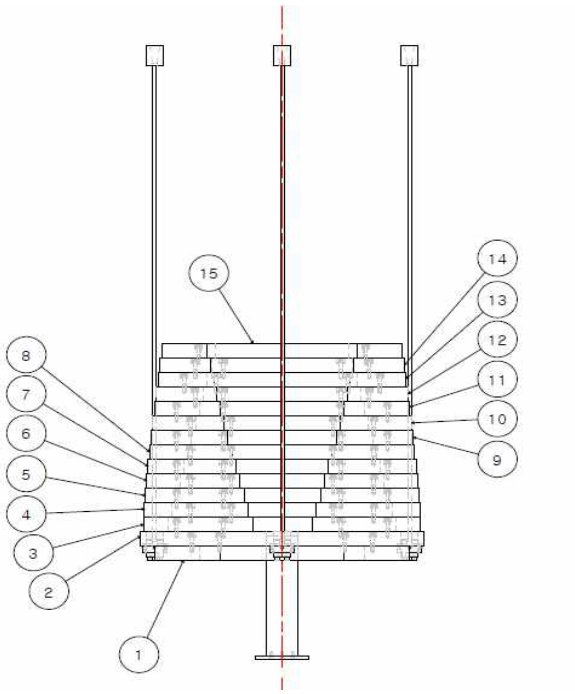


[3MW급 TMD MASS(1)]

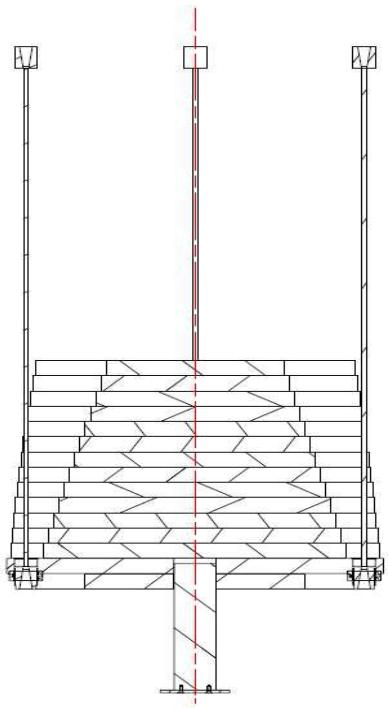


[3MW급 TMD MASS(2)]

(나) 질량체는 규격 별 15개로 독립 제작하여 볼팅 및 용접을 실시하여 하나의 질량체로 만듦.

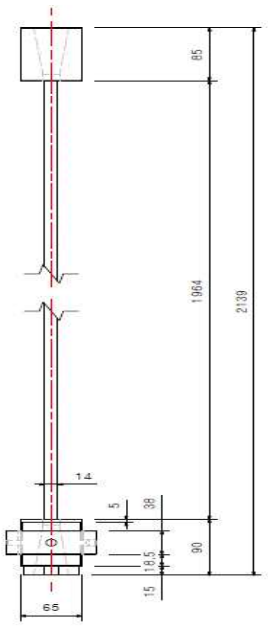


[3MW급 TMD MASS(3)]

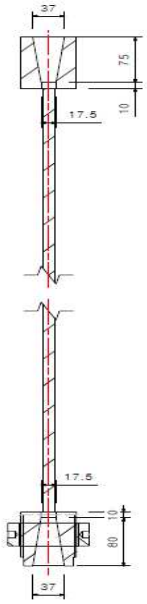


[3MW급 TMD MASS(4)]

(다) 케이블의 규격은 6XWS(36)IWRC로 선정하고 최상단 케이블 끝에는 소켓(C type), 최하단 케이블 끝에는 소켓(TR type)으로 설계함.

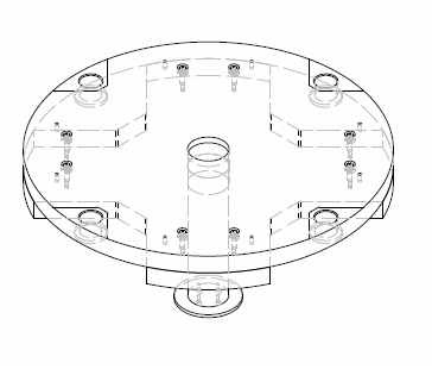


[3MW급 TMD Cable(1)]

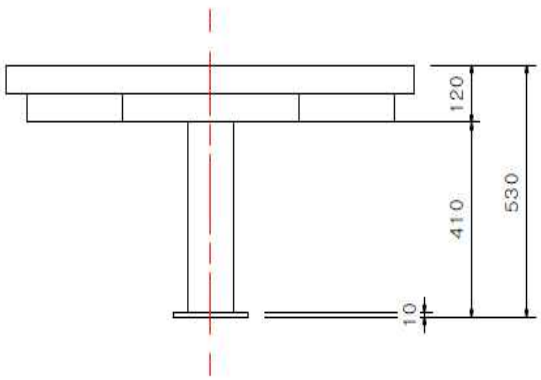


[3MW급 TMD Cable(2)]

(라) TMD Mass 하단부에는 높이 0.41m의 수직으로 된 추가 MASS가 있으며 이를 이용하여 TMD 거동 시, 실리콘 오일통에서 봉의 면적을 통한 감쇠효과로 TMD의 요구 감쇠비를 구현함.



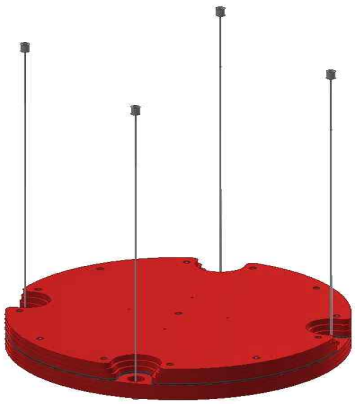
[3MW급 TMD Mass 하단부(1)]



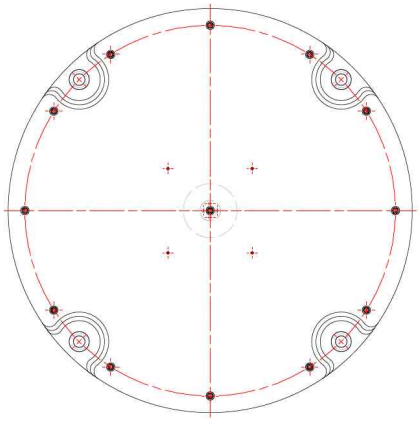
[3MW급 TMD Mass 하단부(2)]

(2) 7MW급 제진장치

(가) 7MW급 제진장치의 경우, 3MW급 제진장치와는 다르게 타워내부에 비교적 공간을 넓으므로 경제성 및 제작성이 용이하게 설계함. 또한, 제진 시 거동하는 4개의 케이블의 최소한의 범위보다 여유있게 커팅하고 질량체(13ton) 설계.



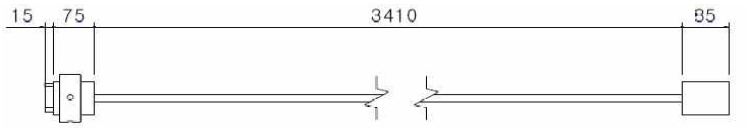
[7MW급 TMD MASS(1)]



[7MW급 TMD MASS(2)]

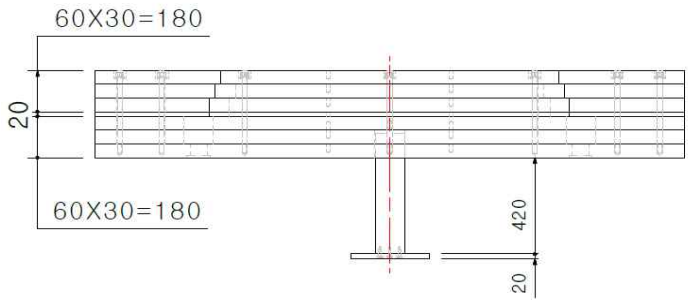
(나) 질량체는 규격 별 7개로 독립 제작하여 볼팅 및 용접을 실시하여 하나의 질량체로 만듦.

(다) 케이블의 규격은 6XFi(25)IWRC로 선정하고 최상단 케이블 끝과 최하단 케이블 끝에는 소켓으로 설계함.

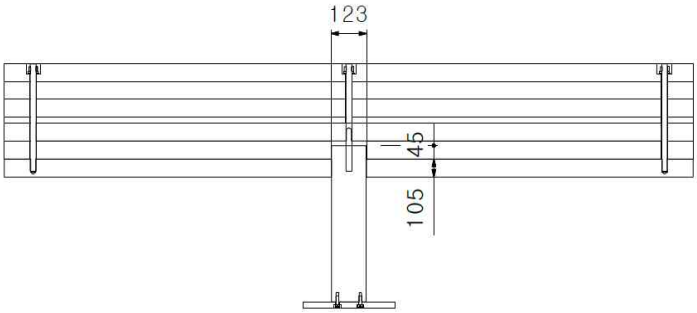


[7MW급 TMD Cable]

(라) 3MW 제진장치 Mass와 마찬가지로 TMD Mass 하단부에는 높이 0.43m의 수직으로 된 추가 MASS가 있으며 이를 이용하여 TMD 거동 시, 실리콘 오일통에서 봉의 면적을 통한 감쇠효과로 TMD의 요구 감쇠비를 구현함.



[7MW급 TMD Mass 하단부(1)]

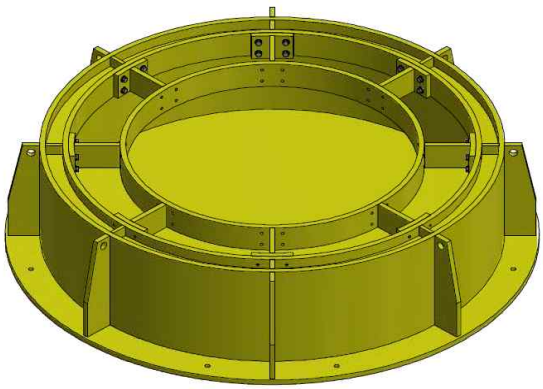


[7MW급 TMD Mass 하단부(2)]

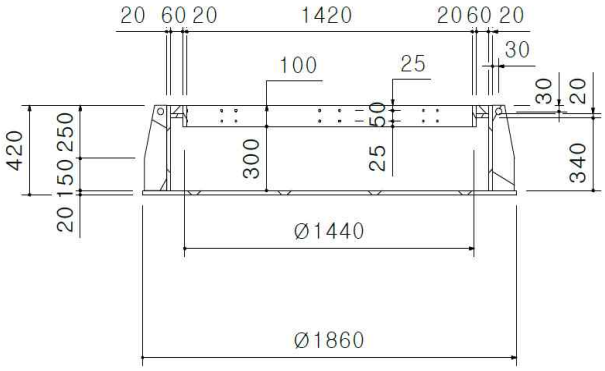
(3) 기타 제진장치 설계

(가) 3MW 및 7MW 제진장치를 위한 감쇠장치로써, 실리콘 오일을 이용하여 TMD 감쇠비를 구현함. 따라서, 질량체 하단에 봉이 충분히 잠길 수 있도록 공간 TMD 하단에 실리콘 Basket을 제작함. 질량 1.2ton, 지름 1.58m, 높이 0.4m의 공간을 가짐으로써, 3MW 및 7MW TMD Mass가 제진 시 풍속 25m/s까지 충분히 거동할 수 있도록 설계되어짐.

(나)

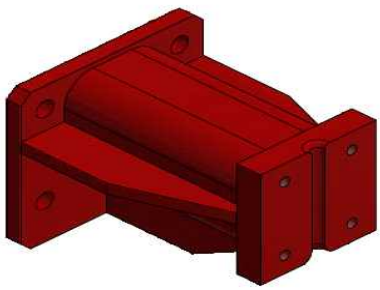


[실리콘 Basket(1)]



[실리콘 Basket(2)]

(다) 7MW TMD의 경우 케이블 길이를 조정하여 임의로 TMD 진동수를 조정할 수 있도록 Tuning Jig를 설치하여 진동수를 +5.8%~-3%까지 조절 가능함.

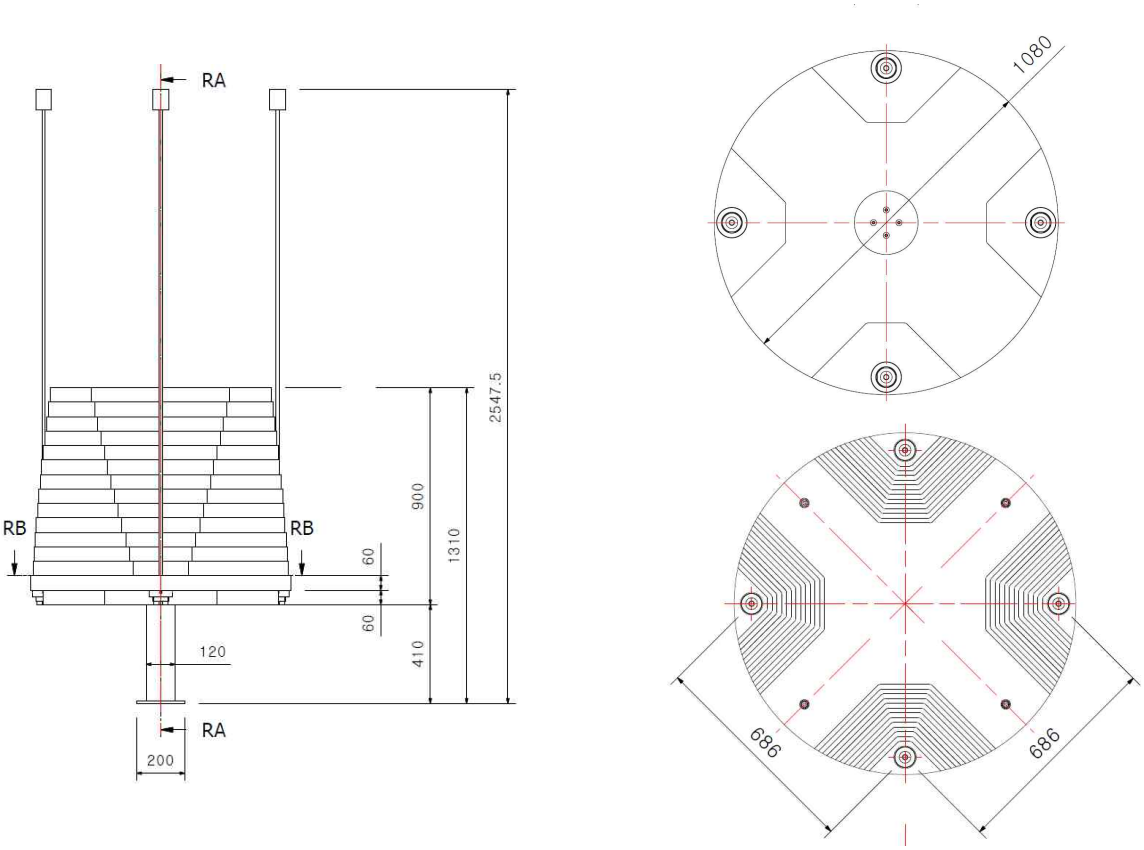


[Tuning Jig]

(라) 풍속 25m/s 이상의 풍하중이 작용할 때에는 허용되는 TMD의 이송거리가 초과할 수 있으므로, 초과 시 TMD 질량체 하단의 봉과 실리콘 Basket 상단부 띠의 충돌을 저감하기 위해 고무(15T)된 버퍼를 설치함.

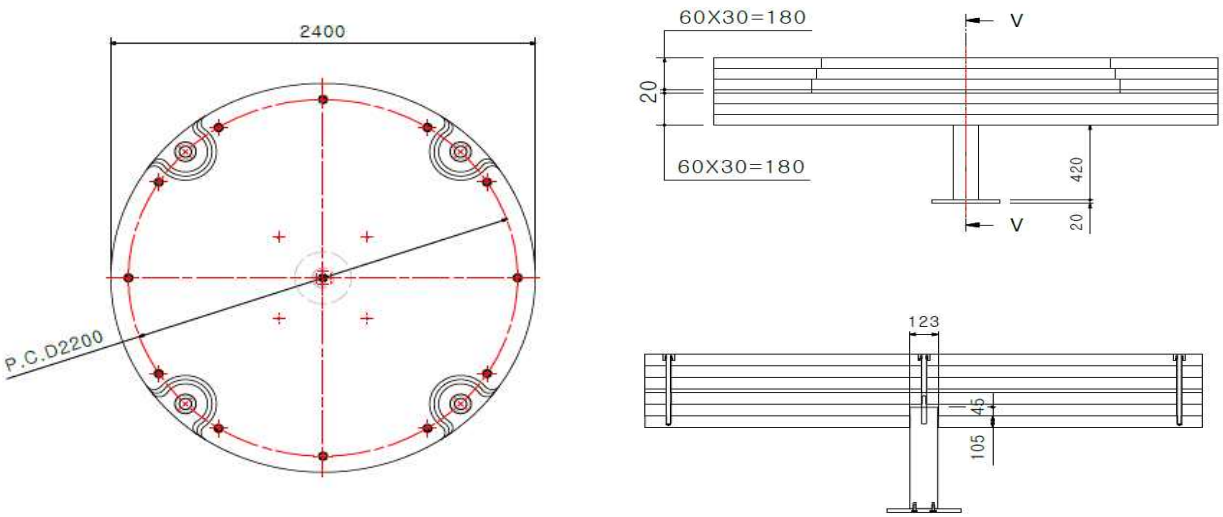
(4) 제진장치의 규격

(가) 3MW 제진장치 규격



[3MW 제진장치 규격]

(나) 7MW 제진장치 규격



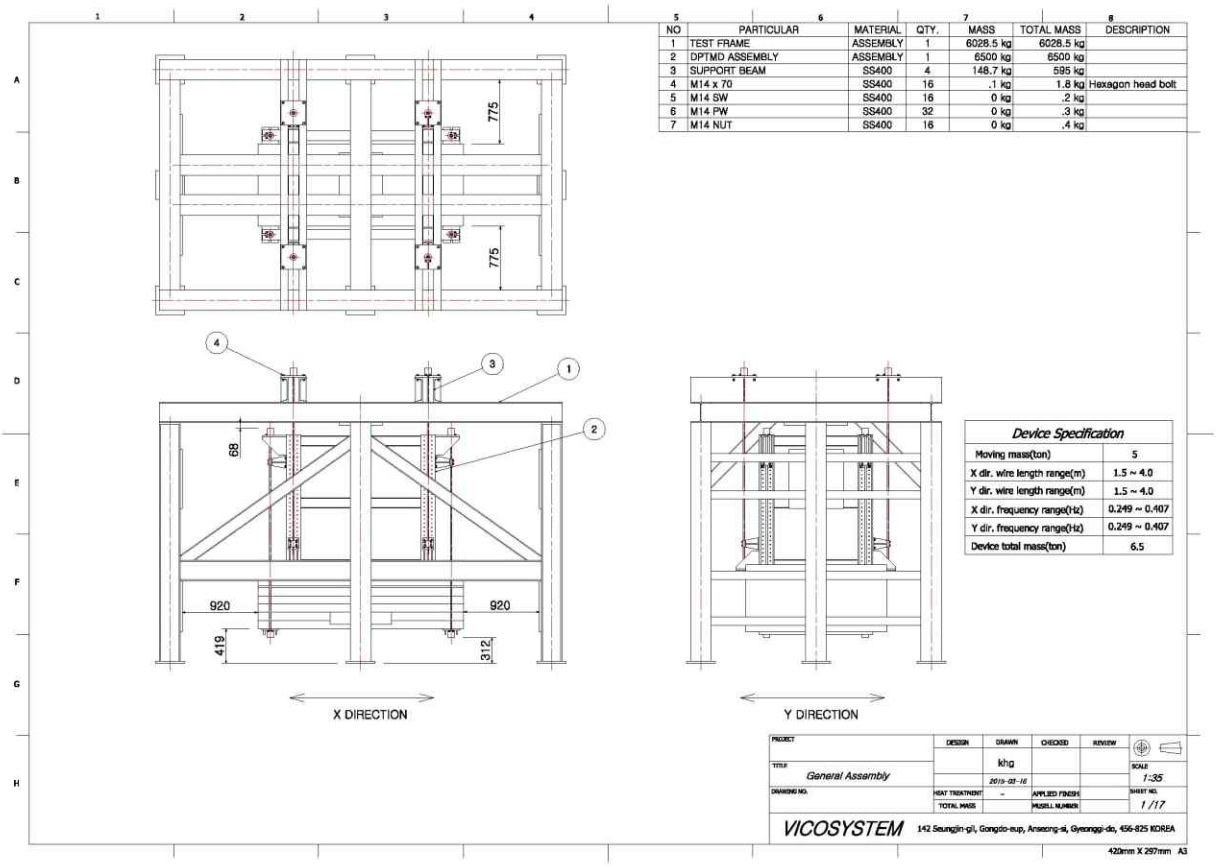
[7MW 제진장치 규격]

다. 축소 스케일 시험체 설계

(1) 대상 풍력타워의 고유진동수를 묘사하기 위한 축소스케일을 설계함.
(2) 축소스케일 풍력타워 시험체의 사양은 다음과 같음.

항 목	제 원
장치크기 [mm]	2500(L) × 1500(W) × 2100(H)
진동체 중량 [kgf]	5000
전체중량 [kgf]	6500
진동수 범위 [Hz]	0.25~0.41

(3) 축소스케일 풍력타워 시험체의 형상은 다음과 같음.



라. 실 스케일 시험체 설계

(1) 일반사항

(가) 3MW급 및 7MW급 풍력터빈타워의 경우, 실크기로 제작하기에는 어려움이 따르므로, 제진장치가 설치될 최상단 Segment만 실제 크기로 독립 설계함.
(나) 각각의 풍력터빈타워의 1차 고유진동수를 구현할 수 있지만 그에 따른 모드질량은 3MW급

풍력터빈타워의 경우 217ton, 7MW 풍력터빈타워는 816ton으로 현실적인 문제가 있음.

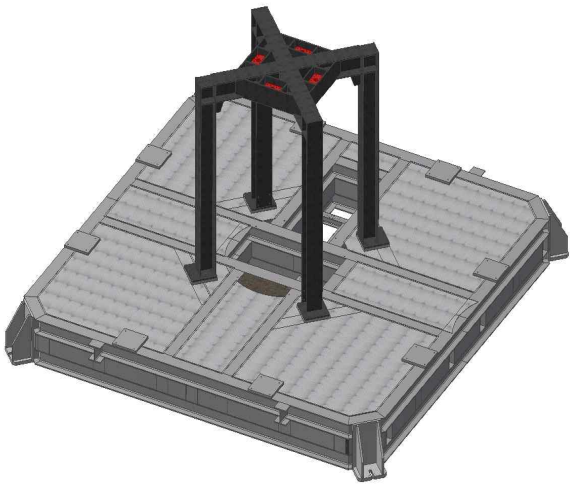
(다) 실제 모드질량보다 작은 Mass를 제작하고 추가적인 Mass를 부가하는 방법을 이용하여 실제 풍력타워에서의 제진장치 성능을 유추함.

(2) 3MW 시험체

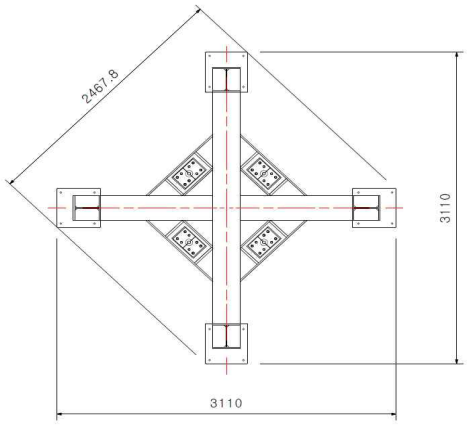
(가) 실제 풍력타워 최상단의 지름과 높이로 제작하고 타워 안에서의 제진장치의 거동을 보기 위해 H-Beam으로 기둥을 설계하고 아래에 시험체 베이스 설계함.

(나) 실제 풍력타워에서는 3MW TMD의 케이블을 연결할 수 있는 추가 지지대를 제작함. 이 TMD 케이블 지지대는 실제 타워에 추가적으로 제작 · 설치되어져야 할 구조물임.

(다) 높이 2.58m, 가로· 세로 폭 2.47m, 질량 1.8ton.



[3MW급 시험체(1)]



[3MW급 시험체(2)]

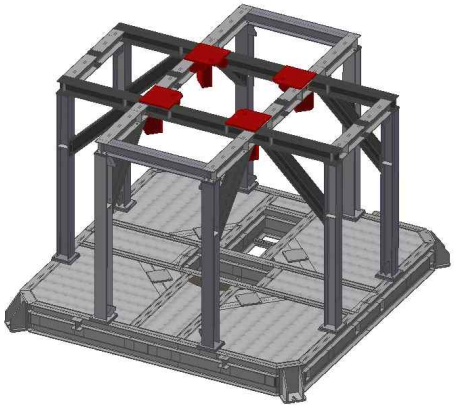
(3) 7MW 시험체

(가) 3MW 시험체와 마찬가지로, 실제 풍력타워 최상단의 지름과 높이로 제작하고 타워 안에서의 제진장치의 거동을 보기 위해 H-Beam으로 기둥을 설계하고 아래에 시험체 베이스 설계함.

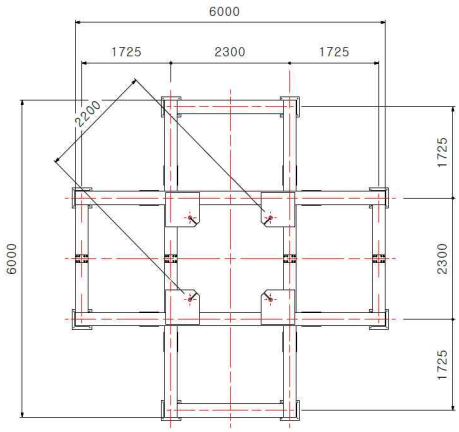
(나) 마찬가지로, 실제 풍력타워에서는 7MW TMD의 케이블을 연결할 수 있는 추가 지지대를 제작함. 이 TMD 케이블 지지대는 실제 타워에 추가적으로 제작 · 설치되어져야 할 구조물임.

(다) TMD 질량체를 지탱하는 케이블을 잡아주기 위해 Plate를 설치함.

(라) 높이 3.87m, 가로· 세로 폭 6m, 질량 7ton.



[7MW급 시험체(1)]



[7MW급 시험체(2)]

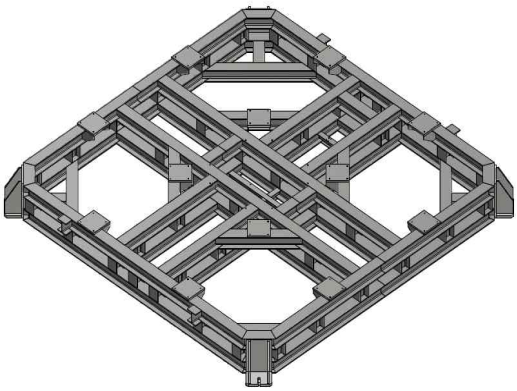
(4) 시험체 베이스

(가) 시험체 베이스는 3MW 및 7MW 시험체와 제진장치가 설치될 바닥으로 각각의 타워 고유진동수를 구현하기 위한 케이블을 설치하는 구조물이기도 함.

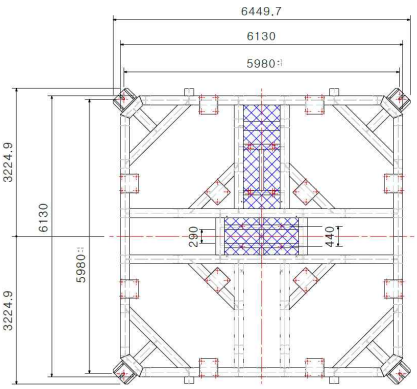
(나) 실제 풍력타워에 비해 상대적으로 가벼운 시험체에 질량을 높이기 위해 시험체 베이스에 콘크리트를 타설함.

(다) X축 및 Y축에 대한 진동을 모사하기 위해 시험체 베이스에 가진기 2대를 설치함.

(라) 높이 0.6m, 가로 · 세로 폭 6.45m.



[시험체 베이스(1)]



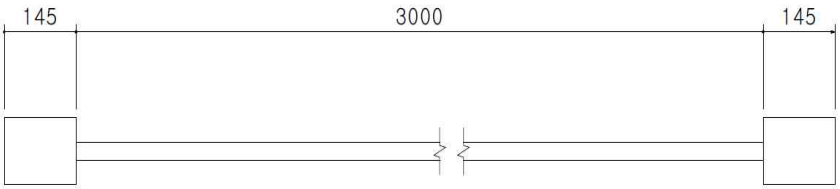
[시험체 베이스(2)]

(5) 시험체 케이블

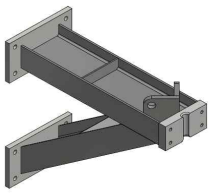
(가) 풍력터빈타워의 동적 특성을 위한 고유진동수를 맞추기 위해 시험체에 케이블을 연결하여 구현함.

(나) 시험체 케이블의 최하단은 시험체 베이스, 최상단은 별도의 시험대 지지대 장착함.

(다) 기본적으로 7MW 시험체 케이블에 사용되는 본 케이블은 케이블 고정 지그를 이용해 상대적으로 진자길이가 짧은 3MW 시험체 케이블도 고정시켜 사용 할 수 있음.



[시험체 케이블]



[시험체 케이블]

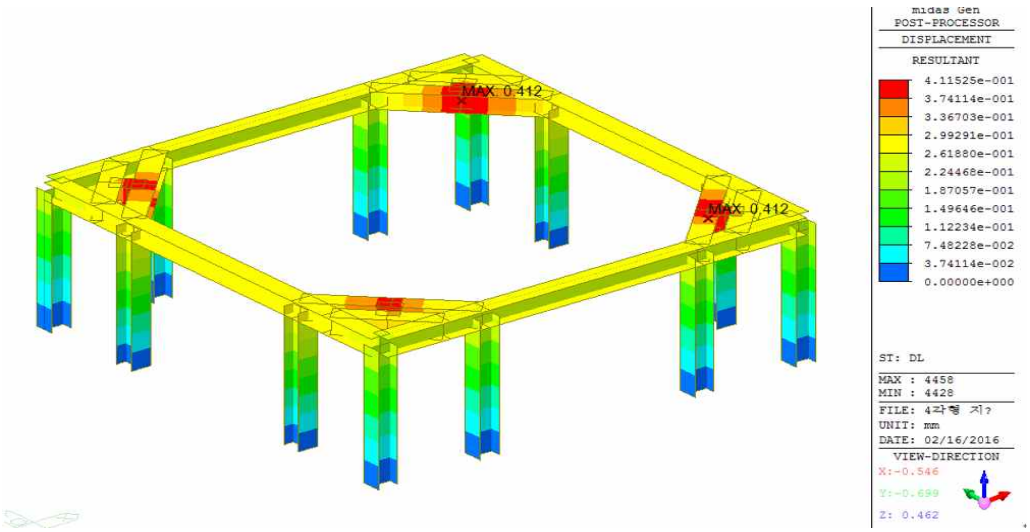
(6) 시험체 지지대

(가) 일반사항

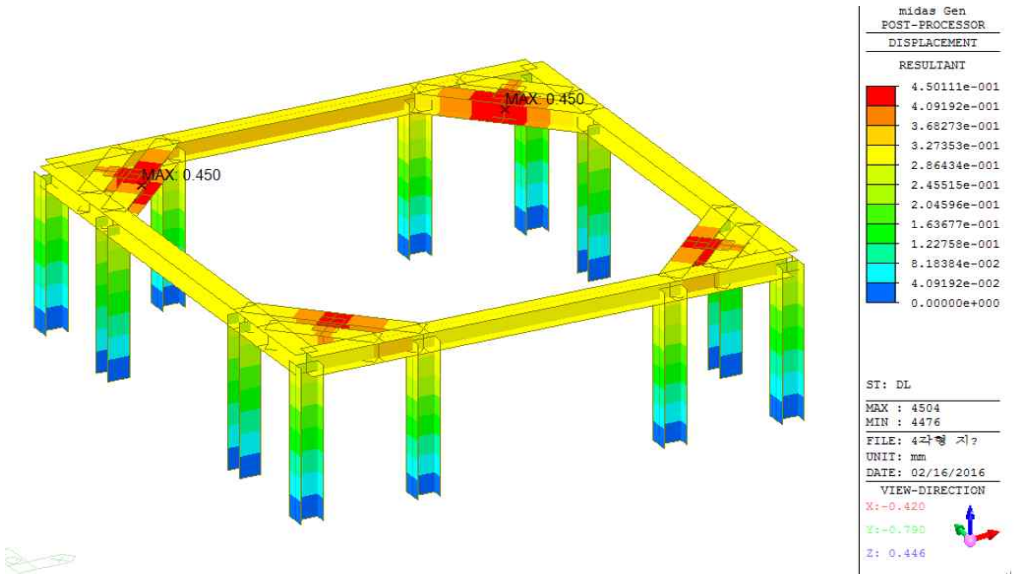
① 3MW 및 7MW 시험체를 지탱하는 시험체 지지대는 TMD 성능실험을 진행할 때, 시험체 및 TMD 동적특성이나 응답에 영향을 주지 않기 위해 큰 강성이 지닌 구조물로 설계해야 함.
② 시험체 지지대는 경제성과 구조물의 안정성을 지닌 최적의 설계를 목표로 함.

(나) 구조 해석

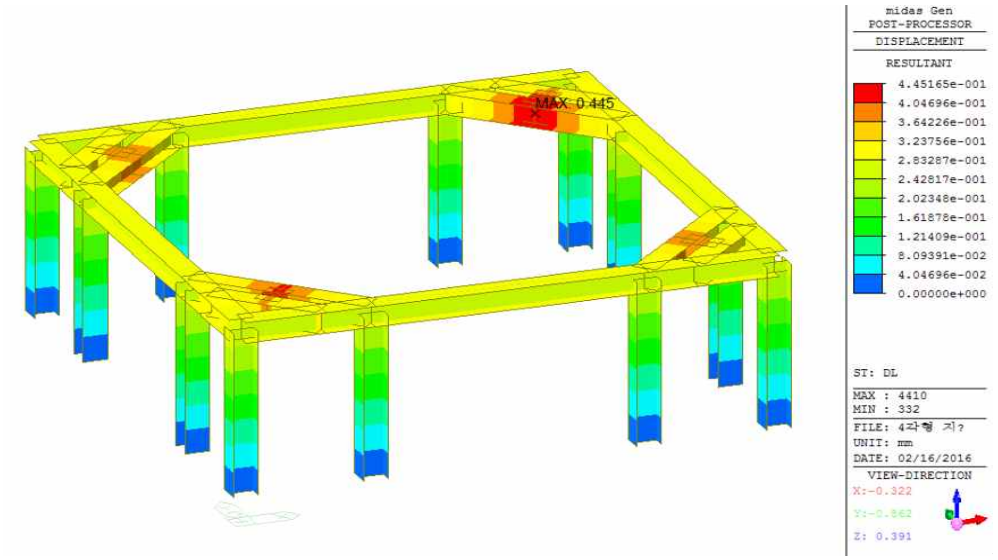
① 최대 질량값을 갖는 7MW 시험체와 시험체 베이스가 풍속 25m/s 의 풍하중에 의해 X축, Y축, 45도로 최대 거동시의 정적 하중을 시험체 지지대에 재하 하여 해석 실시.



[X축방향으로 시험체 거동 시, 시험체 지지대 최대변위 0.412mm]



[Y축방향으로 시험체 거동 시, 시험체 지지대 최대변위 0.450mm]

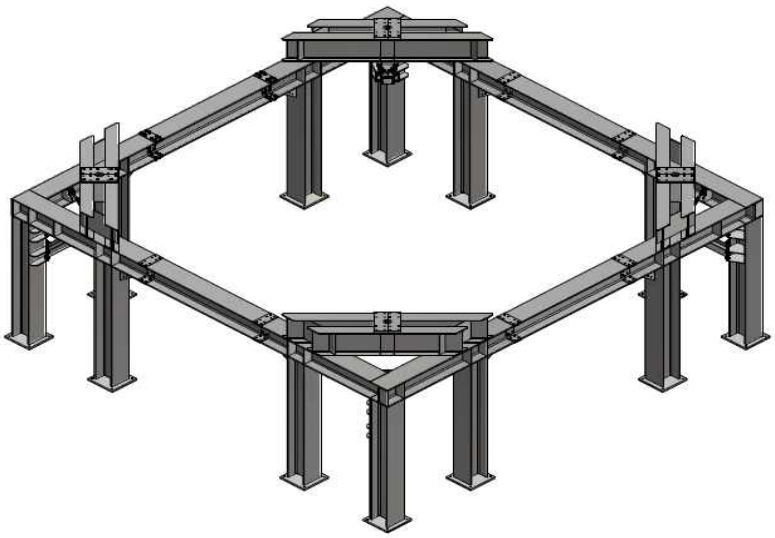


[45도방향으로 시험체 거동 시, 시험체 지지대 최대변위 0.445mm]

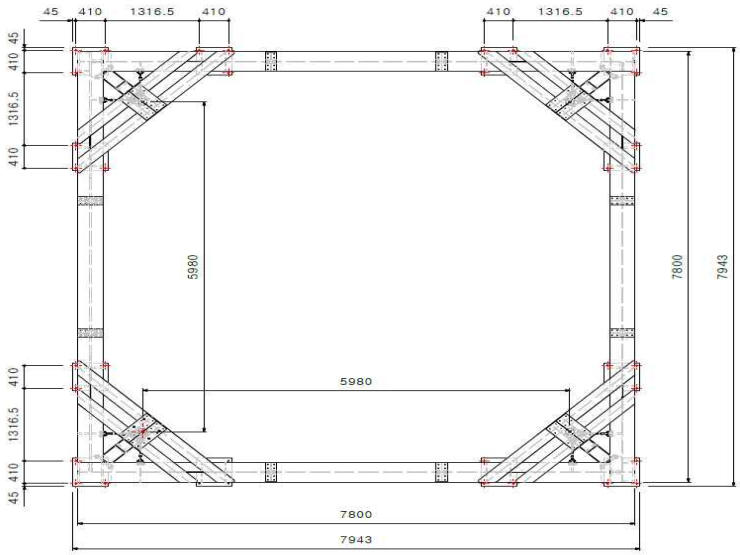
② 변위 응답 결과, 최대변위 0.450mm(Y방향으로 시험체 거동 시)로 큰 강성을 갖는 지지대를 설계하였으며, 이는 시험체나 제진장치의 실험에 대한 동적 및 구조물 응답에 영향을 주지 않을 것으로 판단됨.

(다) 시험체 지지대 설계

① 시험체 지지대는 기본 H-Beam을 H-350X357X19을 기본형강으로 선정하고 시험체에 연결되어 있는 케이블을 지탱할 형강은 H-450X200X9를 사용함.
② 높이 3.32m, 폭 7.94m(정방형 구조물)



[시험체 지지대(1)]



[시험체 지지대(2)]

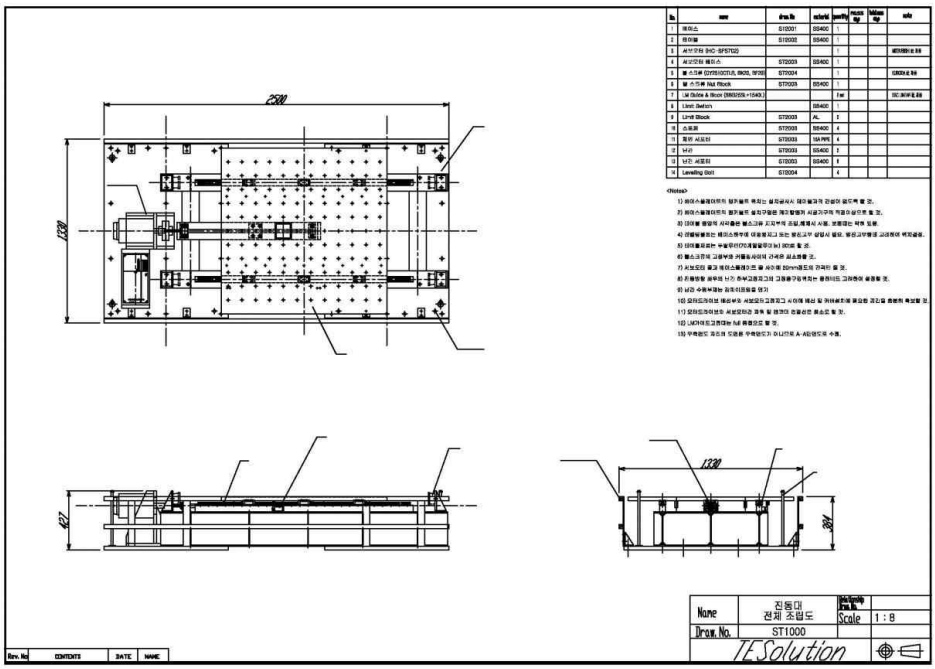
마. 축소 스케일 가진기 설계

(1) X축 가진기 개발

(가) 축소스케일의 TMD의 1방향에 대한 진동을 모사하기 위해 가진기 1대를 설계.

항 목	제 원
장치크기 [mm]	2500(L) × 1330(W) × 430(H)
중량 [kgf]	약 1200
테이블크기 [mm]	1200 × 1200
상부 적재하중 [kgf]	5000 이하
스트로크 [mm]	±200

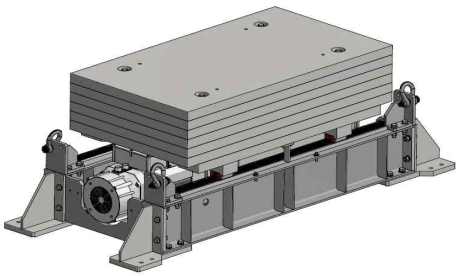
(나) 가진장치의 형상은 다음과 같음.



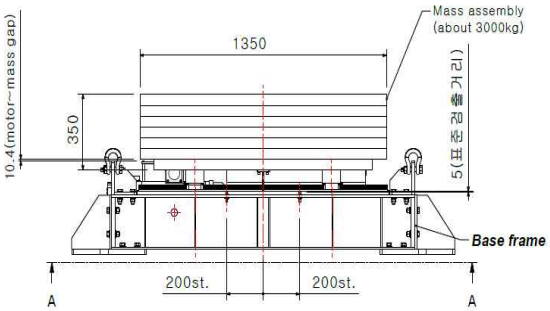
바. 실 스케일 가진기 설계

(1) X축 · Y축 가진기 개발

(가) 실스케일의 시험체에 대한 2방향에 대한 진동을 모사하기 위해 가진기 2대를 설계.



[시험용 가진기(1)]



[시험용 가진기(2)]

(나) 가진기의 제원은 실스케일 시험체의 성능시험을 충분히 진행할 수 있는 사양으로 설계.

[시험용 가진기 사양]

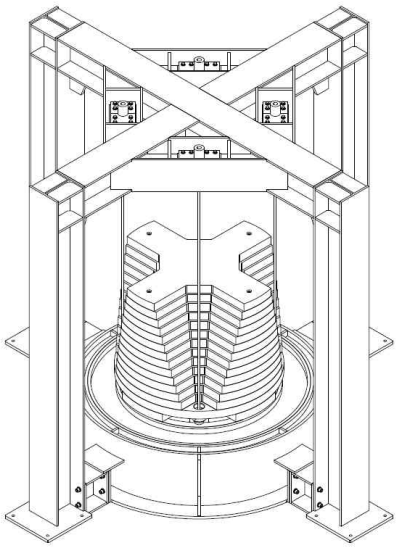
항 목	제 원
장치크기 [mm]	2100(L) × 875(W) × 745(H)
총 질량 [kg]	3500kg
상부 질량 [kg]	3000kg
스트로크 [mm]	±200
모터 Rated Torque[N·m]	191
모터 Rated Speed[RPM]	1500
모터 Max. Speed[RPM]	2000

사. 실 스케일 전체 조립도

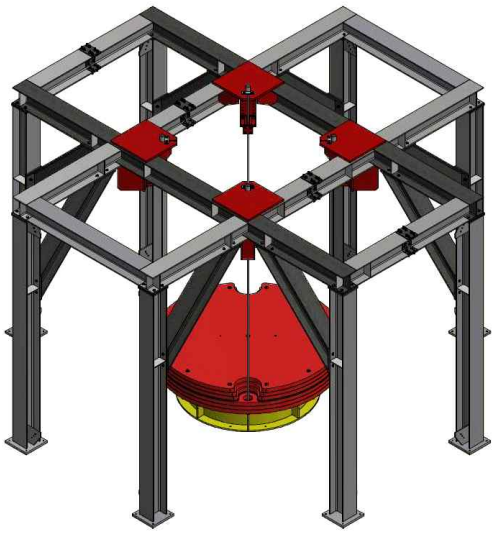
(1) 일반사항

(가) 전체 구성은 TMD 2개(5ton TMD, 13ton TMD), 시험체 2개(3MW 시험체, 7MW 시험체), 시험체 베이스 1개, 시험체 지지대 1개 이루어짐.
(나) 시험체 베이스에 3MW 및 7MW 풍력타워 실험을 각각 진행할 수 있게 제작함.
(다) 3MW 및 7MW 시험체 및 TMD, 가진기, 시험체 질량은 각각 62.768ton, 75.968ton임.

(2) 시험체 및 TMD 조립

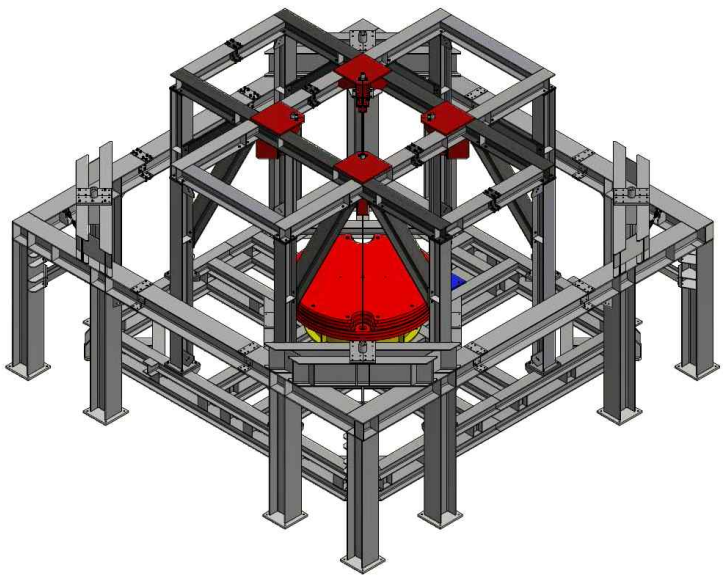


[3MW 시험체 및 TMD 조립]



[7MW 시험체 및 TMD 조립]

(3) 7MW 풍력타워 전체 조립



[7MW 풍력타워 전체 조립]

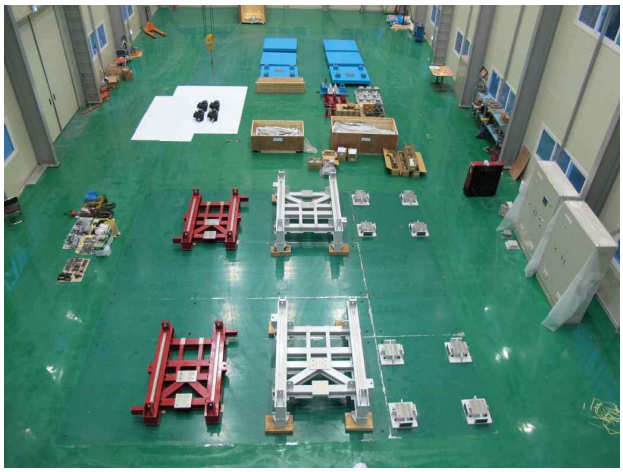
5. 제진장치 및 시험체 제작 및 설치

가. 일반사항

(1) 3MW 및 7MW급 풍력터빈타워 시험체 및 TMD가 설치될 장소는 (주)비코시스템 신사옥 구조실험동임.



[테스트 공간 외부전경]



[테스트 공간 내부전경]

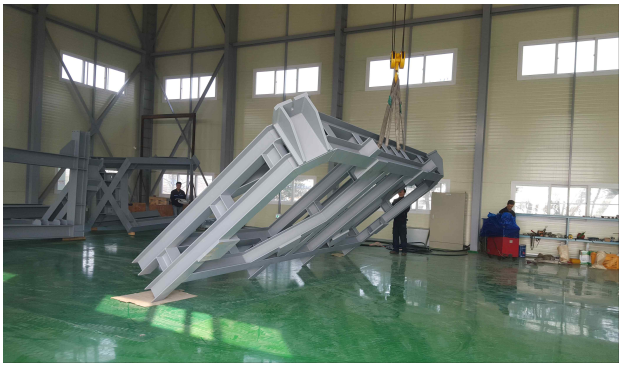
(2) 제작하는 실스케일 구조물은 그 규격이 크므로 운반차에 최대한의 싣을 수 있는 한도로 컷팅하여 테스트 공간으로 옮김.



[운송차량을 이용한 실스케일 구조물 운반모습]



[지게차량을 이용한 실스케일 구조물 운반모습]



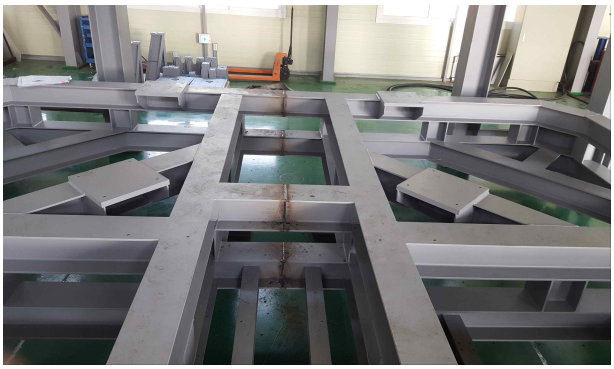
[크레인을 이용한 하차모습]



[하차된 실스케일 구조물]

나. 실 스케일시험체 지지대 및 시험체 베이스 제작 및 설치

(1) 분리되어 운반된 시험체 지지대와 베이스는 운반 후 용접과 볼팅작업을 통하여 일체화 시켜야 함.




[시험체 베이스의 용접 작업]

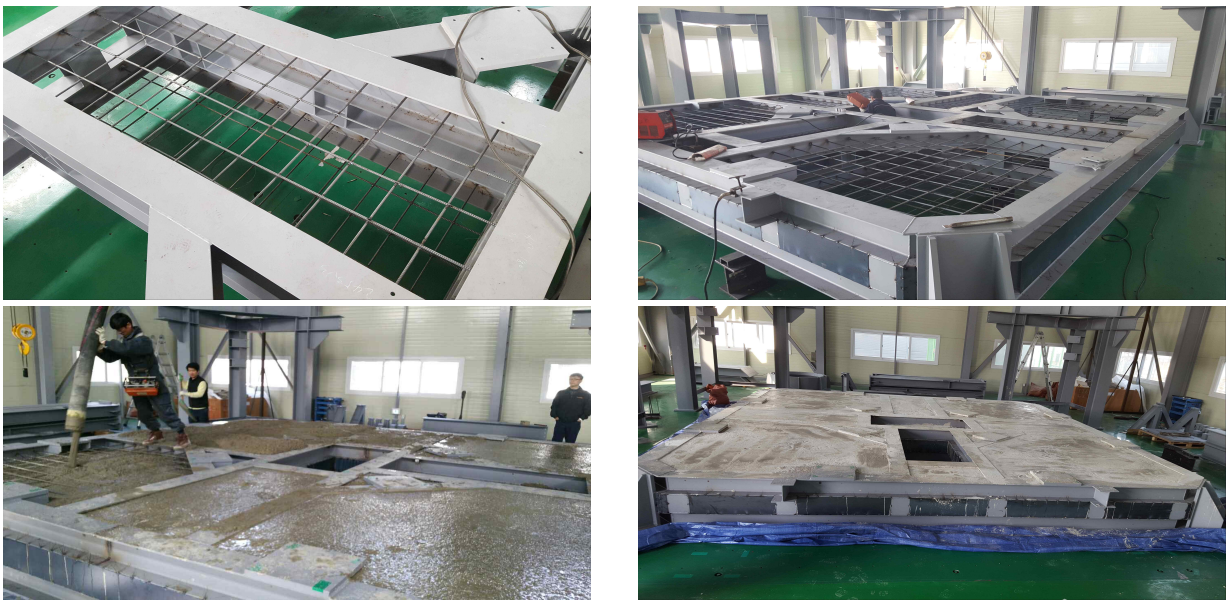
(2) 시험체 베이스는 전체규격이 시험체 지지대의 너비와 비슷하므로 동시에 설치가 진행되어야 하며, 시험체 베이스 프레임을 우선적으로 설치 후에 시험체 지지대 프레임이 배치 및 조립되어 져야 함.






[시험체 지지대 및 베이스의 설치 작업]

(3) 실스케일 시험체 베이스는 질량 및 강성을 증가 시키기 위해 철근 배근 후 콘크리트 타설을 진행함.



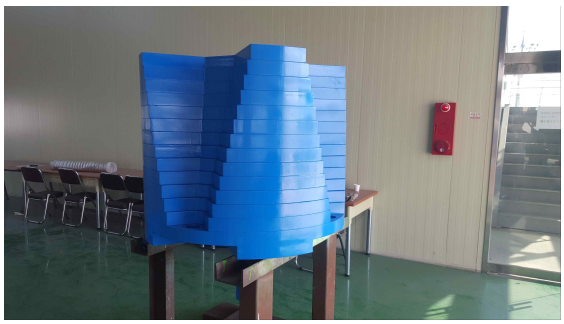
[철근 배근 및 콘크리트 타설 작업]

다. 실스케일 시험체 및 TMD 제작 및 설치

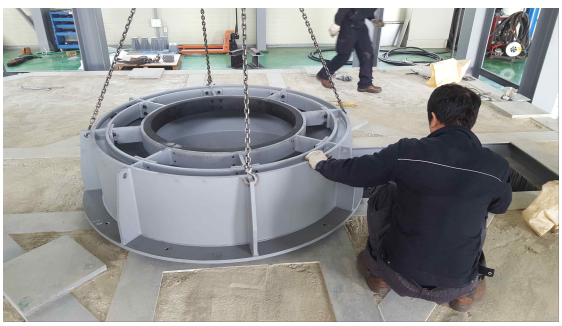
(1) 규격이 작은 3MW 시험체와 TMD 질량체는 공장에서 완전 조립 후에 운반되었으며, 시험체 베이스에 시험체 볼팅 후, 안에 TMD(질량체, 케이블, 실리콘 basket)를 제작, 설치함.



[조립된 3MW 시험체]



[조립된 3MW TMD 질량체]



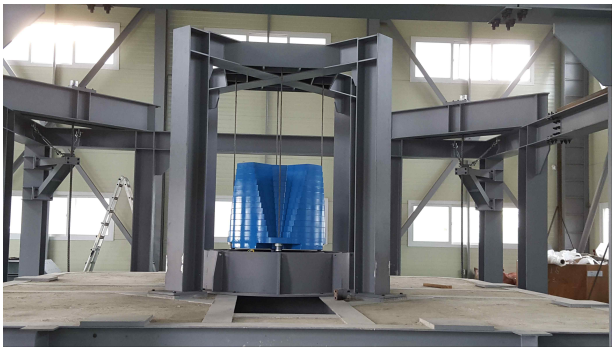
[실리콘 basket 설치 작업]



[시험체 볼팅 작업]



[케이블과 질량체 연결작업]

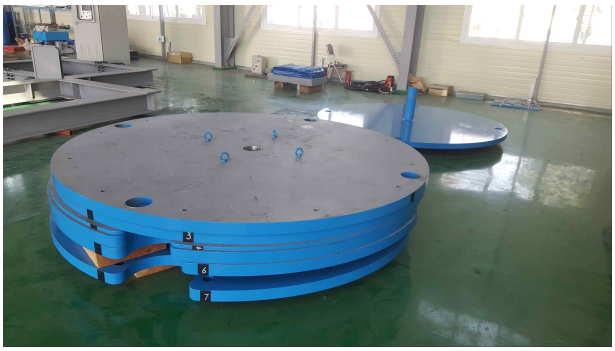


[설치된 3MW 시험체 및 TMD]

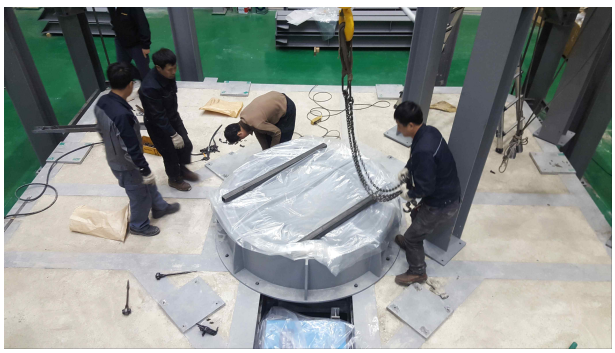
(2) 규격이 큰 7MW 시험체와 TMD 질량체는 구조실험동에서 완전 조립을 진행하였으며, 시험체 베이스에 시험체 볼팅 후, 안에 TMD(질량체, 케이블, 실리콘 basket)를 제작, 설치하였음.



[7MW 시험체 상부 프레임]



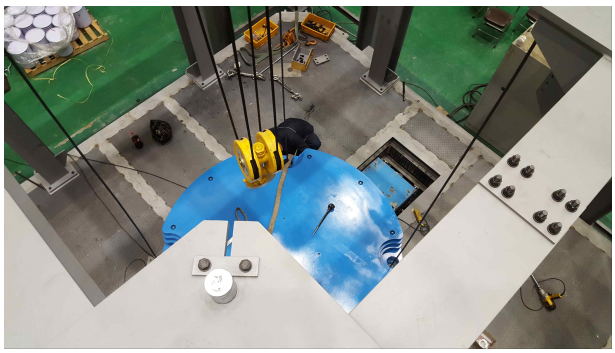
[7MW TMD 질량체]



[실리콘 basket 설치 작업]



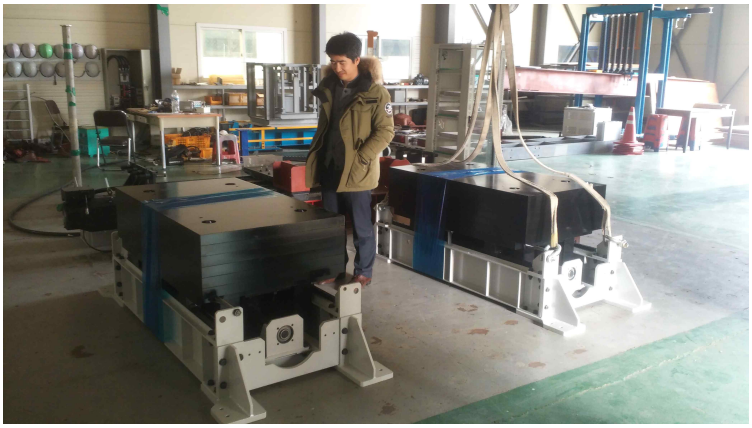
[시험체 설치 작업]



[케이블과 질량체 연결작업]

[설치된 7MW 시험체 및 TMD]

라. 실스케일 풍력타워 시험체를 가질 할 가진기 제작



[실스케일 제진장치 성능평가를 위한 동하중
발생기(가진기) 제작]

마. 실스케일 풍력타워 시험체 및 TMD 전경 사진



[3MW 실스케일 풍력타워 전경 사진]



[7MW 실스케일 풍력타워 전경 사진]

바. 축소 스케일 시험체 및 TMD, 가진기 제작 및 설치

(1) 축소 스케일의 시험체는 부분적으로 공장에서 조립하여 제1 구조동 실험에 설치함.



[축소 스케일 시험체 설치(1)]

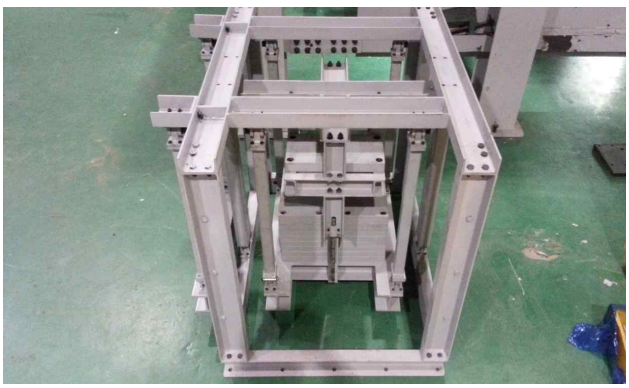


[축소 스케일 시험체 설치(1)]

(2) 축소 스케일의 역진자형 TMD는 완제품으로 공장에서 조립되었고, 제1 구조동 실험에 설치함.

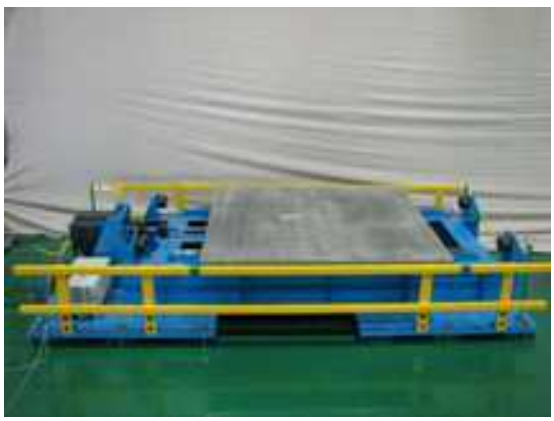


[축소 스케일 TMD 설치(1)]



[축소 스케일 TMD 설치(2)]

(3) 축소 스케일의 역진자형 TMD를 가진 할 가진기는 완제품으로 공장에서 제작, 제1 구조동 실험에 설치함.



[축소 스케일 TMD 가진기(1)]



[축소 스케일 TMD 가진기(1)]

6. 시험체 및 TMD 성능 시험

가. 시험 개요 및 종류

(1) 3MW급 및 7MW급 시험체의 동특성을 파악하기 위해 자유진동실험을 실시한 후, 3MW급 및 7MW급 제진장치를 설치 후 TMD 동특성을 파악함.

(2) 3MW급 및 7MW급 시험체에 대해 각각 제작된 제진장치를 이용하여 제진 시, 비 제진 시의 정현파 실험 및 풍진동 실험을 실시함.

(3) 정현파 실험은 고정시험(Sine Dwell Test)과 소인시험(Sine Sweep Test)로 분류하여 진행하고, 풍진동 실험은 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s에 대하여 1CASE만 진행함.

(4) 시험체 베이스에 추가적인 질량체(5.86ton)를 부가하여 위의 같은 실험을 재 실험 함. 이는 실제 질량을 갖는 시험체의 제진성능을 유추하기 위함이며, 실제 풍력터빈타워의 질량보다 작은 두 시험체 질량으로부터 성능을 평가하고 같은 질량에서의 시뮬레이션 수치해석과의 비교 분석하여 그 값이 근사값을 가지면, 실제 질량의 시뮬레이션 수치해석 결과가 실스케일의 성능평가의 결과임을 신뢰할 수 있기 때문임.

[풍력터빈타워 실스케일 시험체 시험 종류]

<table>
<tr><th>구분</th><th colspan="2">시험종류</th><th>실험 분류</th><th>상세내용</th></tr>
<tr><td rowspan="7">3MW&7MW
시험체</td><td rowspan="3">TMD
거동 억제</td><td>자유진동실험</td><td>–</td><td>• FFT분석 및 감쇠분석
• 구조물의 동특성 파악</td></tr>
<tr><td rowspan="2">정현파실험</td><td>고정 시험
(Sine Dwell Test)</td><td>• 일정한 진동수로 가진</td></tr>
<tr><td>소인 시험
(Sine Sweep Test)</td><td>• 진동수의 상한 및 하한값 사이를 왕복 소인</td></tr>
<tr><td>풍진동실험</td><td>가진기 진동 시험</td><td>• 풍진동 모사에 따른 응답</td></tr>
<tr><td rowspan="4">TMD
거동</td><td>자유진동 및 감쇠실험</td><td>실리콘오일 설치 전,후</td><td>• FFT분석 및 감쇠분석
• TMD의 동특성 파악</td></tr>
<tr><td rowspan="2">정현파실험</td><td>고정 시험
(Sine Dwell Test)</td><td>• 일정한 진동수로 가진</td></tr>
<tr><td>소인 시험
(Sine Sweep Test)</td><td>• 진동수의 상한 및 하한값 사이를 왕복 소인</td></tr>
<tr><td>풍진동실험</td><td>가진기 진동 시험</td><td>• 풍진동 모사에 따른 응답</td></tr>
</table>

나. 성능 시험 종류에 따른 시험체 및 TMD 사진



[3MW TMD 거동 억제 시]



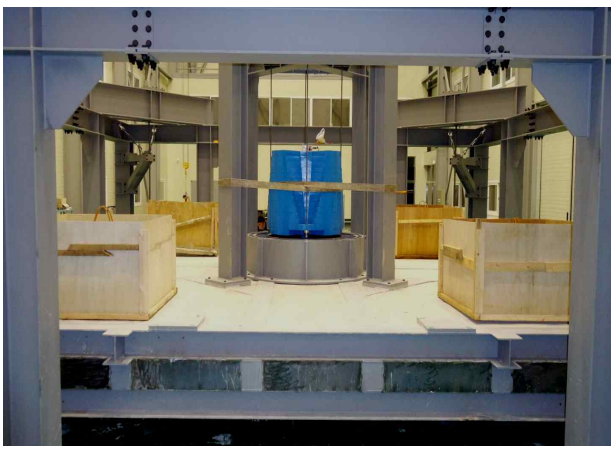
[3MW TMD 거동 해제 시]



[7MW TMD 거동 억제 시]



[7MW TMD 거동 해제 시]



[추가 매스 부가 후 TMD 거동 억제 시]



[추가 매스 부가 후 TMD 거동 억제 시]

다. 제진장치 및 시험체의 스케일 조건

- 정확하고 신뢰성 높은 성능평가를 위해서는 실 스케일화된 제진장치와 풍력터빈타워의 제작이 요구되지만 풍력터빈타워의 실크기를 갖는 시험체를 제작하기에는 현실적으로 어려움이 따르므로, 본 연구에서는 실 스케일화된 제진장치와 부분 스케일화된 타워 시험체를 제작하여 성능시험을 진행하고 동일한 조건에서의 시뮬레이션 수치분석을 실시하여 성능 값들의 오차를 비교함으로써, 시험 응답에 대한 신뢰성을 평가함.

[3MW TMD 및 시험체 스케일 조건]

Parameter	Prototype	Design Value
Moving Mass [ton]	5	5
Mass Ratio [%]	2.3	8.0
Damping Ratio [%]	12.8	12.8
Frequency Ratio [%]	98.3	94.4
Frequency [Hz]	0.3555	0.3555
Max. Stroke [m]	0.4	0.4

[7MW TMD 및 시험체 스케일 조건]

Parameter	Prototype	Design Value
Moving Mass [ton]	13	13
Mass Ratio [%]	2.3	17.1
Damping Ratio [%]	10.6	10.6
Frequency Ratio [%]	98.8	88.97
Frequency [Hz]	0.2840	0.2840
Max. Stroke [m]	0.6	0.6

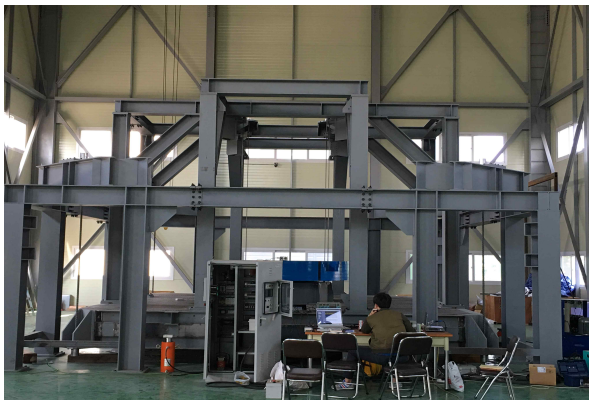
라. 자유 진동 실험

(1) 시험체 동적 특성 파악

(가) 시험체의 자유 진동 실험을 통하여 목표로 하는 시험체의 동특성에 도달하는지 파악.
(나) TMD 질량체를 거동억제 시킨 후, 가진기를 이용하여 강제 가진 후, 자유진동영역에서 고유 진동수 및 감쇠비를 구함.

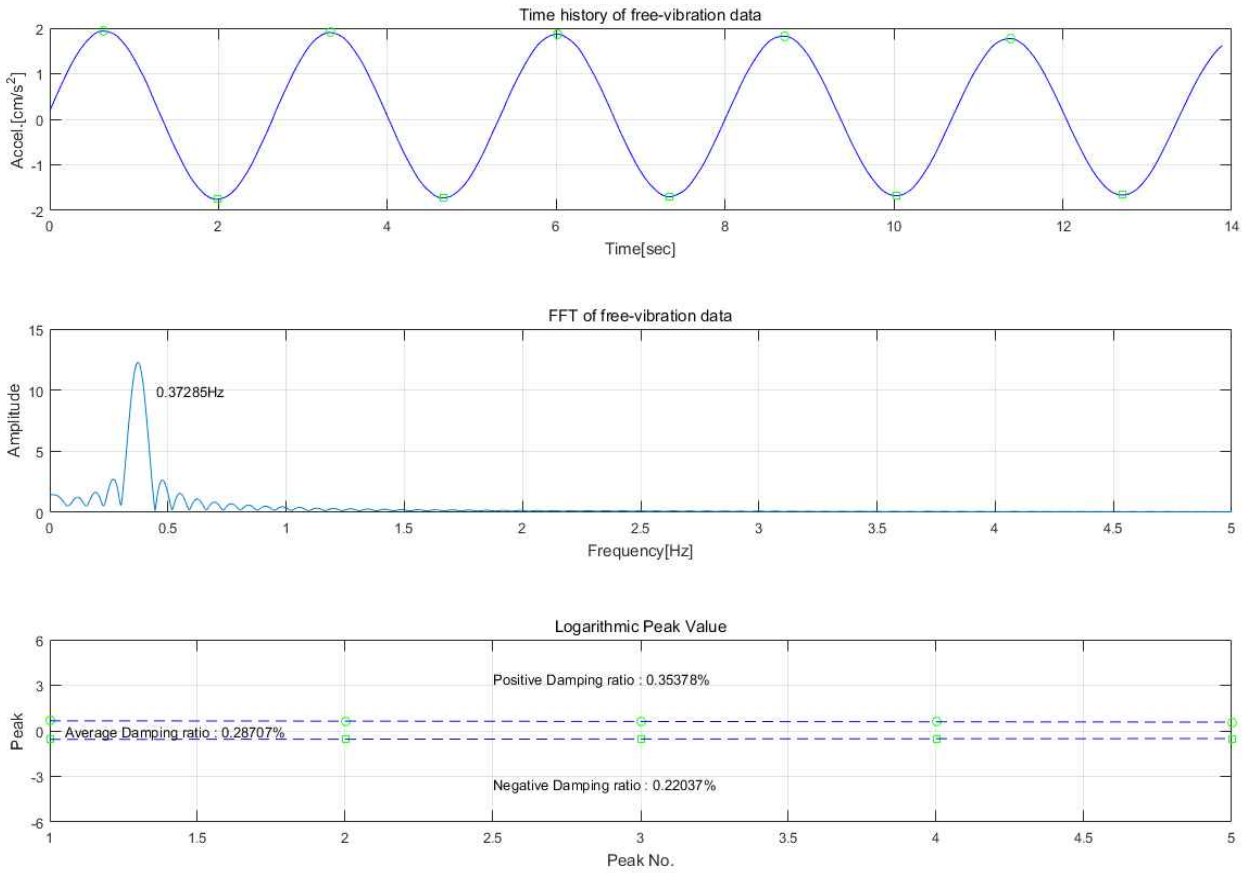


[3MW 시험체 동특성 시험]



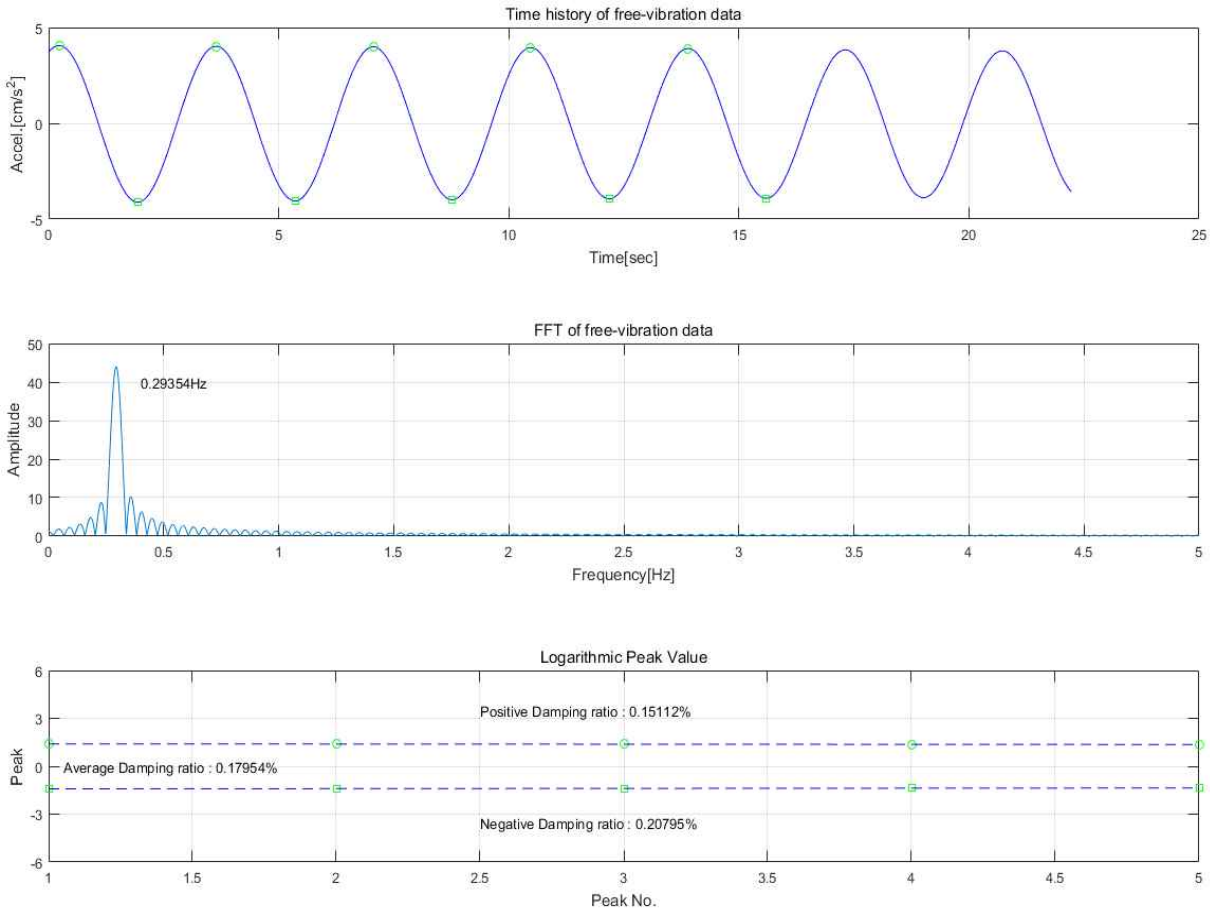
[7MW 시험체 동특성 시험]

(다) 3MW 시험체의 경우, 고유진동수 0.373Hz, 구조 감쇠비 0.287%의 동적특성을 가짐.



[3MW 시험체 동특성 결과]

(라) 7MW 시험체의 경우, 고유진동수 0.294Hz, 구조 감쇠비 0.180%의 동적특성을 가짐.



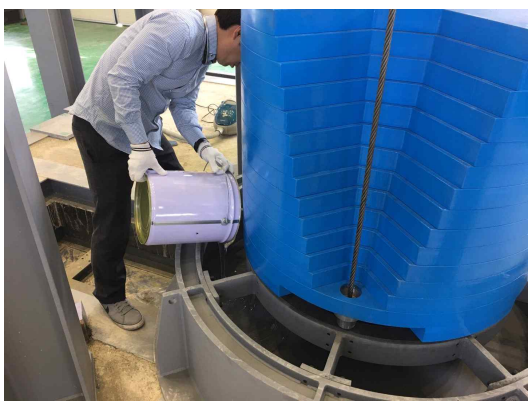
[7MW 시험체 동특성 결과]

(2) TMD 동적 특성 파악

(가) TMD의 자유 진동 실험을 통하여 목표로 하는 시험체의 동특성에 도달하는지 파악.
(나) 목표로 하는 TMD의 감쇠비를 구현될 때까지 반복적으로 실리콘 오일을 실리콘 Basket에 천천히 붓고 감쇠비 측정을 실시함.



[실리콘 Basket에 사용된 실리콘 오일]



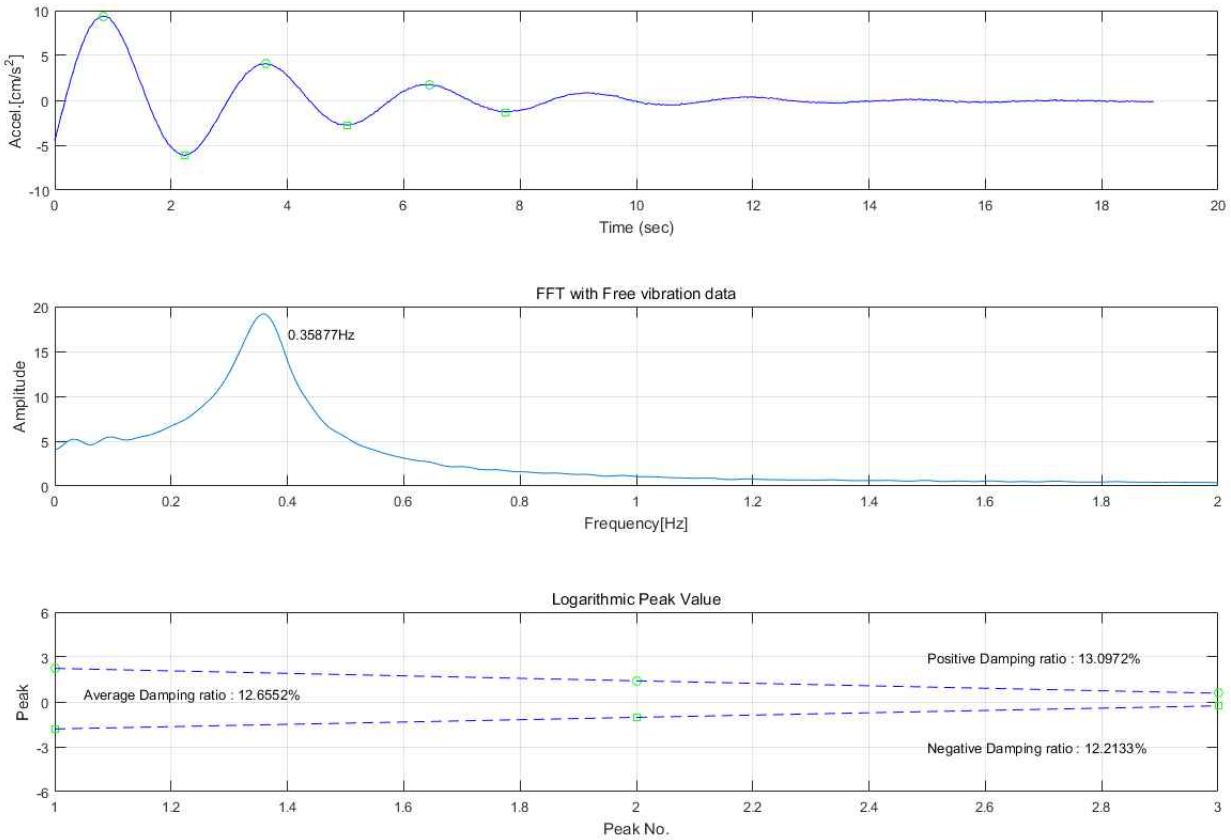
[감쇠 구현 실험]

(다) 실리콘 오일은 KF-96H-100,000cs를 사용하였음.

[실리콘 오일 특성]

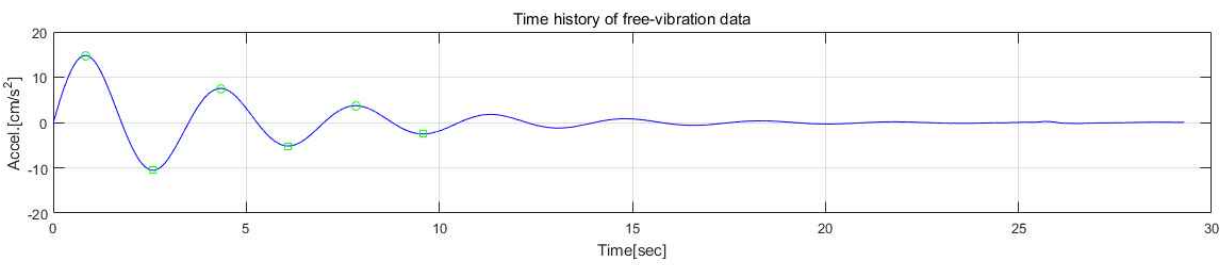
Characteristics	Value
Kinetic Viscosity(m/s, 25℃)	100,000
Surface Tension(m /m, 25℃)	21.3
Thermal Conductivity(W/m • ℃, 25℃)	0.16
Pour Point(℃)	≤-50
Flash Point(℃)	≥315

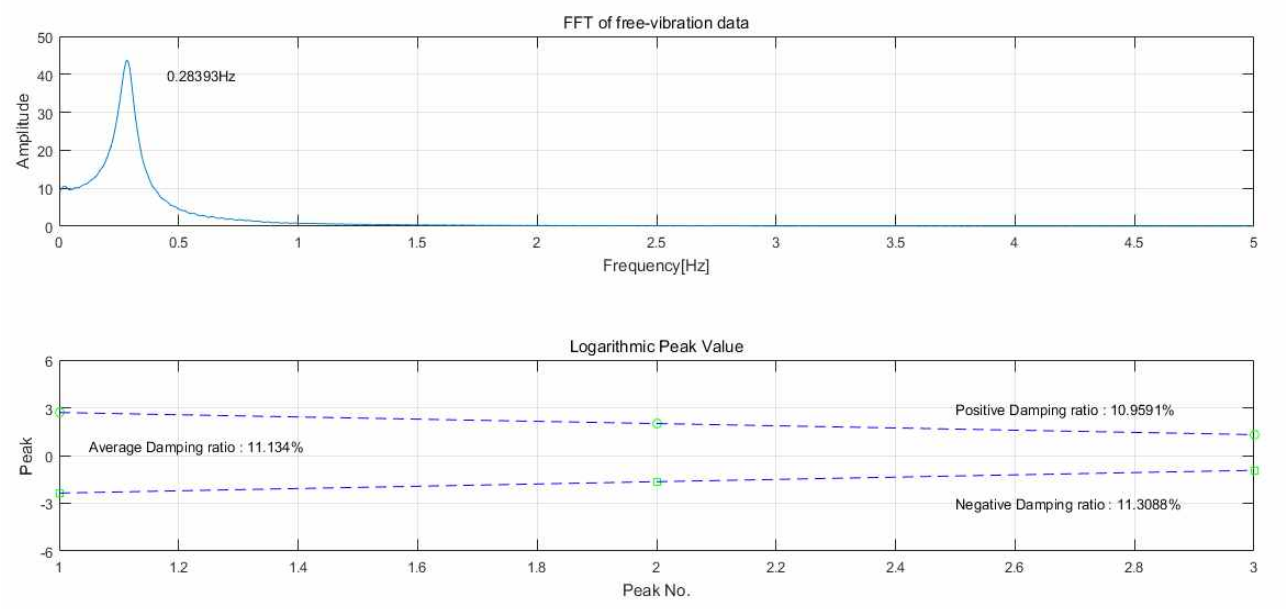
(라) 3MW TMD의 경우, 고유진동수 0.359Hz, TMD 감쇠비 12.65%의 동적특성을 가짐. 따라서, 목표로 하는 TMD 사양과도 거의 유사함을 지님.



[3MW TMD 동특성 결과]

(마) 7MW TMD의 경우, 고유진동수 0.284Hz, TMD 감쇠비 11.13%의 동적특성을 가짐.따라서, 목표로 하는 TMD 사양과도 거의 유사함을 지님.





[7MW TMD 동특성 결과]

(3) TMD 설계사양 및 제작 계측 사양 비교

[3MW & 7MW TMD 설계·계측사양 비교]

항 목	설계 사양	계측 사양
3MW용 제진장치 이동질량 [ton]	13	13
3MW용 제진장치 감쇠비 [%]	12.8	12.65
3MW용 제진장치 튜닝진동수 [Hz]	0.3555	0.3587
7MW용 제진장치 이동질량 [ton]	5	5
7MW용 제진장치 감쇠비 [%]	10.6	11.13
7MW용 제진장치 튜닝진동수 [Hz]	0.2840	0.2839

(4) 시험체와 TMD의 진동수 관계

(가) TMD의 제진성능에 의해서 시험체와 TMD의 진동수가 변화함에 따라 진동수 분석 실시.

(나) 시험체를 가진 후 자유진동실험을 실시하여 TMD 질량체의 진동수와 시험체의 진동수를 동시 계측함.

[시험체와 TMD 진동수 관계]

진동 수[Hz]	3MW급 풍력타워		7MW급 풍력타워	
	시험체	TMD	시험체	TMD
기본 고유 진동수[Hz]	0.373	0.359	0.294	0.284
제진 시 고유 진동수[Hz]	0.329	0.331	0.244	0.240

라. 정현파 고정 시험

(1) 실험 개요

(가) 3MW급 시험체의 경우, 가진 진동수를 시험체의 고유진동수인 0.362Hz 사인파로 가진하여 목표 주파수에서의 저감성능 확인. 가진시간은 120sec, 자유진동 시간을 60sec로 진행함.
(나) 7MW급 시험체의 경우, 가진 진동수를 시험체의 고유진동수인 0.288Hz 사인파로 가진하여 목표 주파수에서의 저감 성능 확인, 가진시간은 60sec, 자유진동 시간 120sec로 진행함.
(다) 가진방향은 한 방향(X축)가진, 두방향(X,Y가진) 가진하여 구조물의 성능을 평가함.
(라) 3MW급 시험체의 경우, X축 가진은 진폭 2 Volt, Y축 가진은 진폭 ±8cm로 가진함.
(마) 7MW급 시험체의 경우, X축 가진은 진폭 ±1.5 Volt, Y축 가진은 진폭 ±8cm로 가진함.

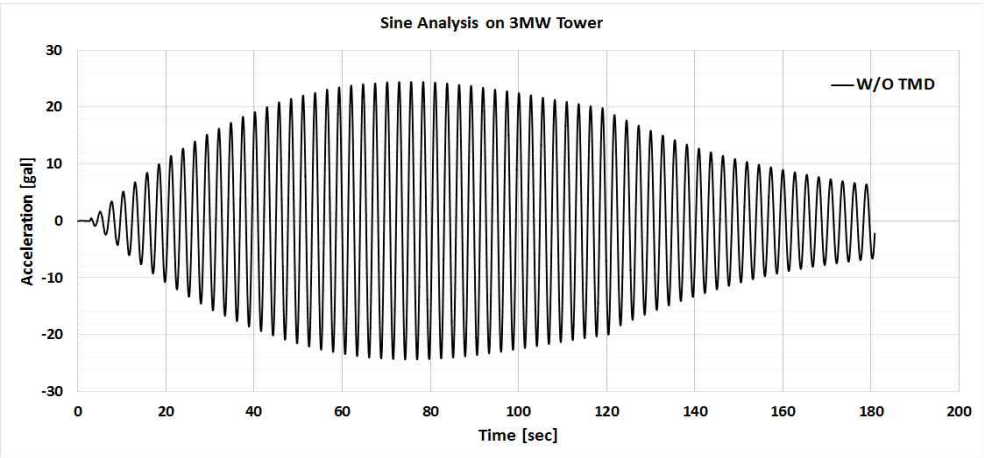
(2) 정현파 고정 시험 결과

(가) 결과 개요

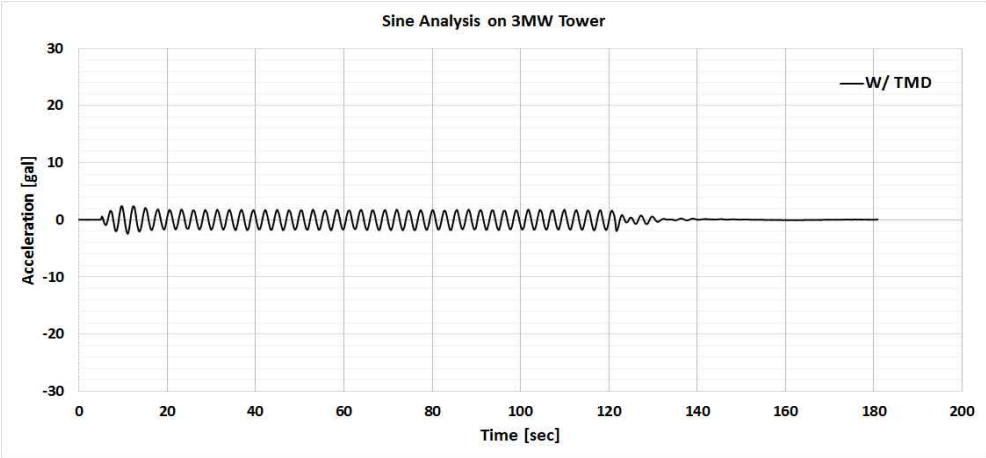
① TMD 설치 유 · 무에 따른 풍력타워의 가속도 응답을 비교함.
② TMD 이송거리를 시간이력으로 분석함.
③ 한 방향만 가진하는 경우, 실측한 값과 시뮬레이션 수치해석 값과 FFT 비교 분석을 실시함.
④ 시험체 베이스에 추가 질량 부가 후의 TMD 설치 유 · 무에 따른 풍력타워의 가속도 응답을 비교함.
⑤ 시험체 베이스에 추가 질량 부가 후에 TMD 이송거리를 시간이력으로 분석함.
⑥ 한 방향만 가진하는 경우, 시험체 베이스에 추가 질량 부가 후에 실측한 값과 시뮬레이션 수치해석 값과 FFT 비교 분석을 실시함.

(나) X축 방향 정현파 가진 결과

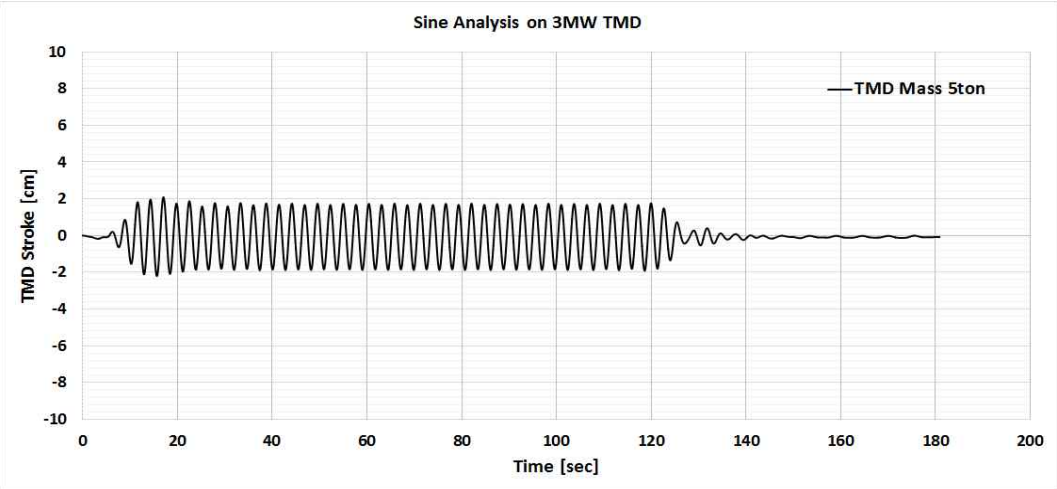
① 3MW급 시험체



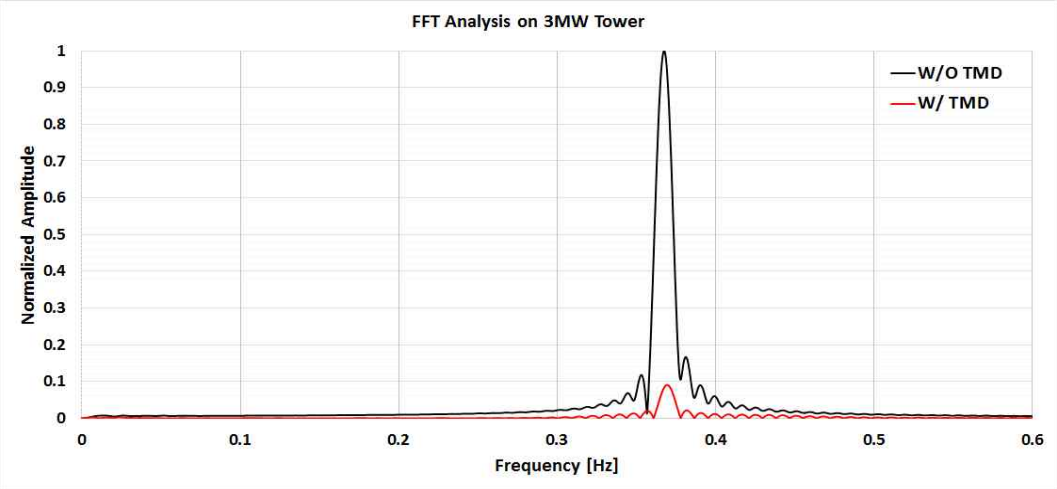
[비 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답]



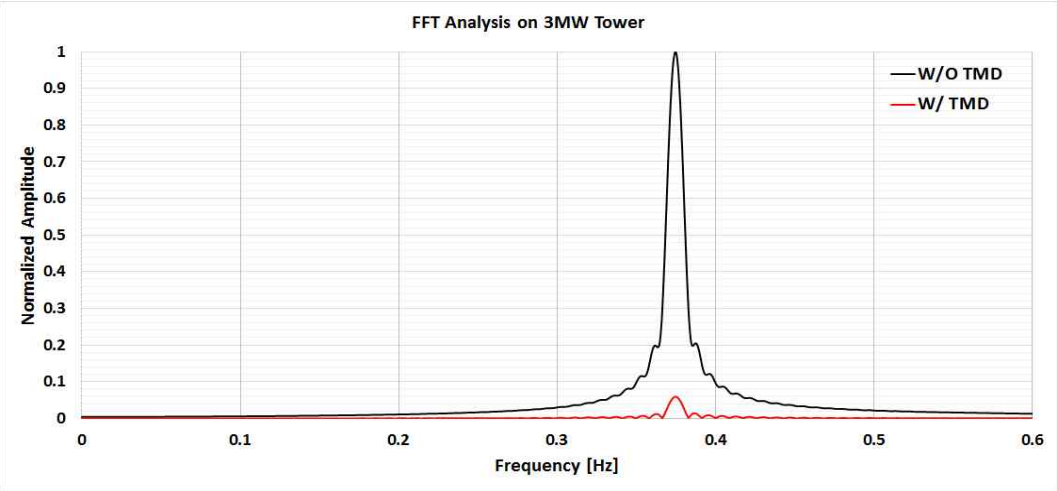
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답]



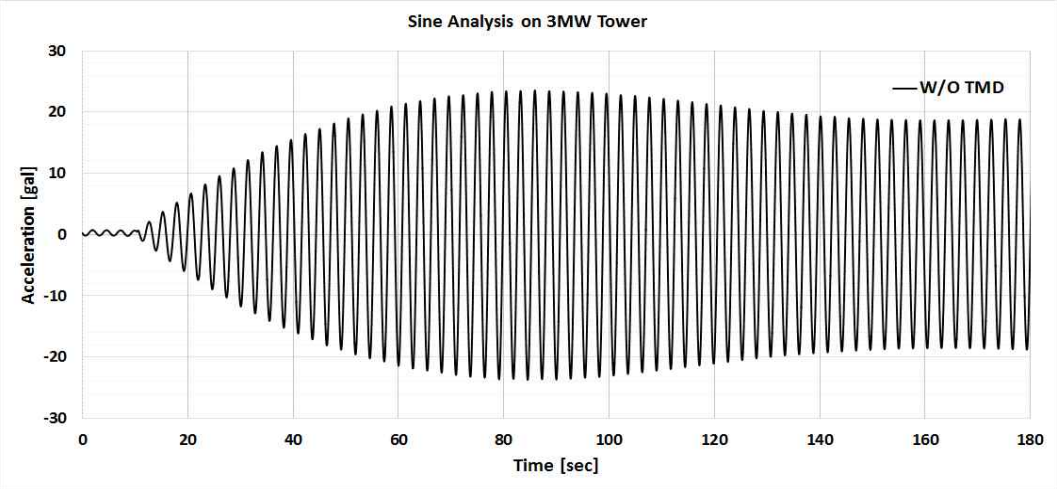
[3MW 시험체 TMD의 이송거리]



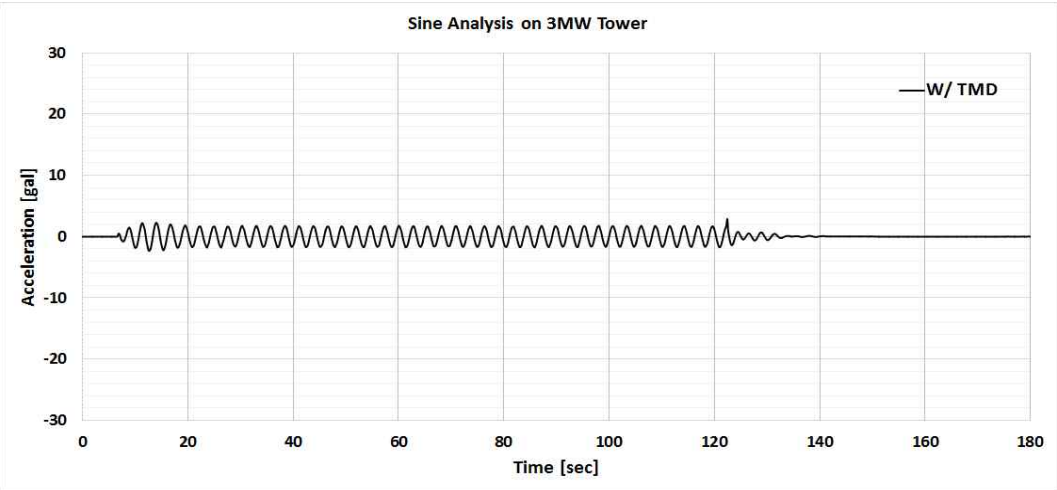
[TMD 유 · 무에 따른 FFT 분석]



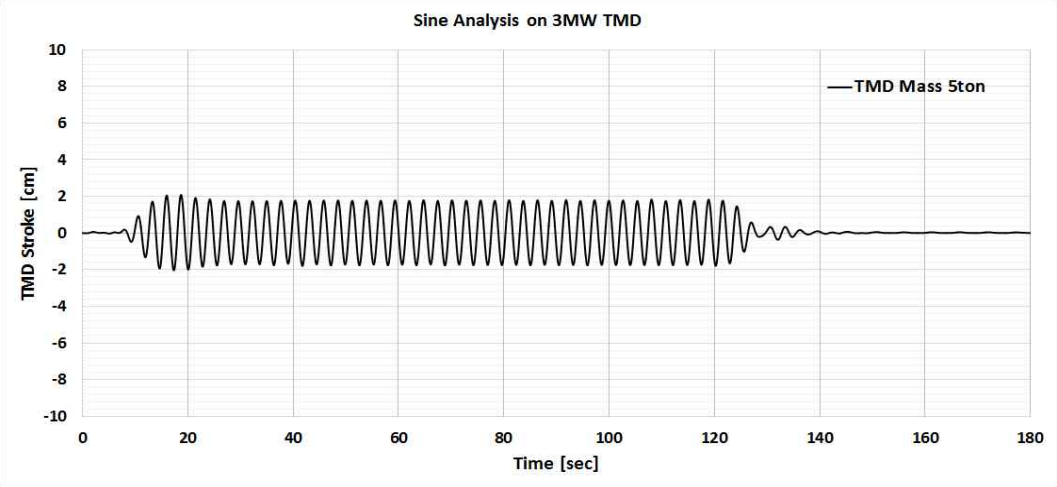
[시뮬레이션 수치해석에서의 TMD 유 · 무에 따른 FFT 분석]



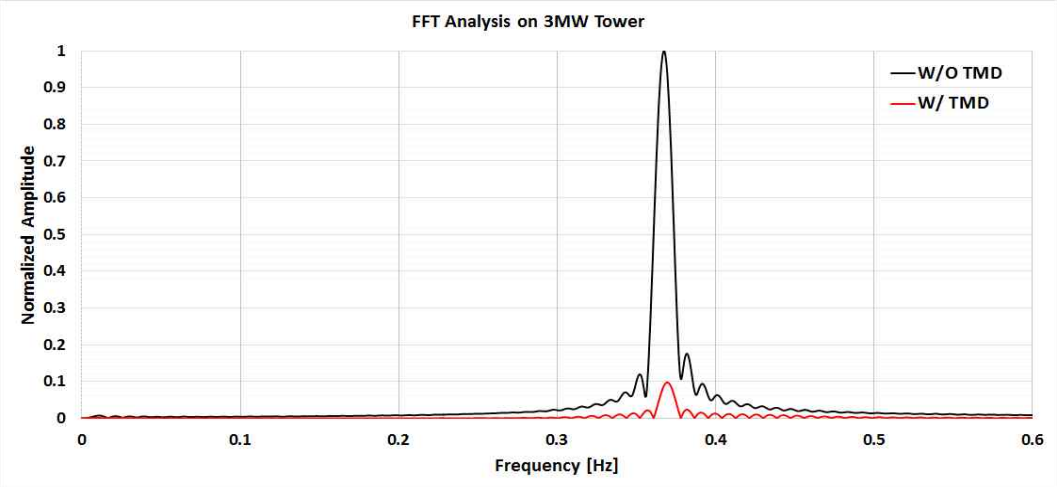
[비 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]



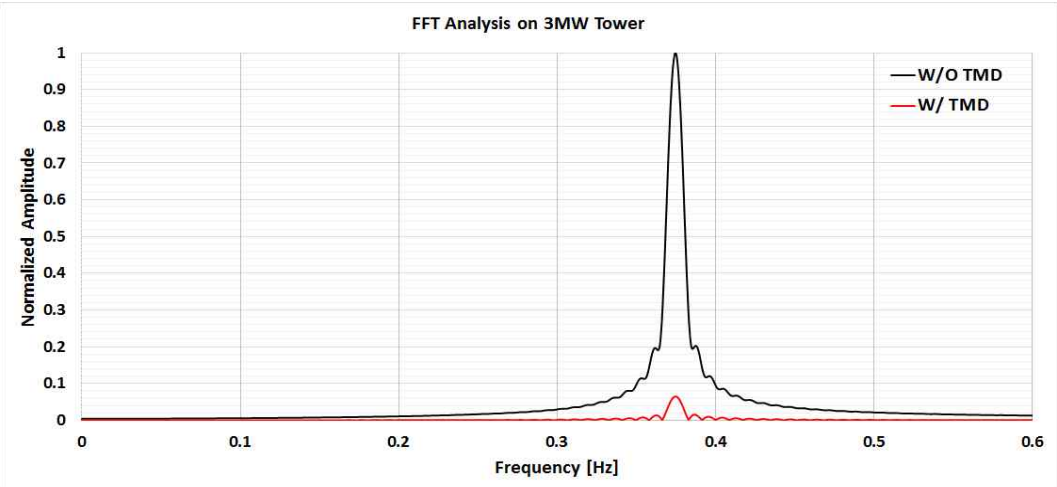
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]



[3MW 시험체 TMD의 이송거리(추가질량)]

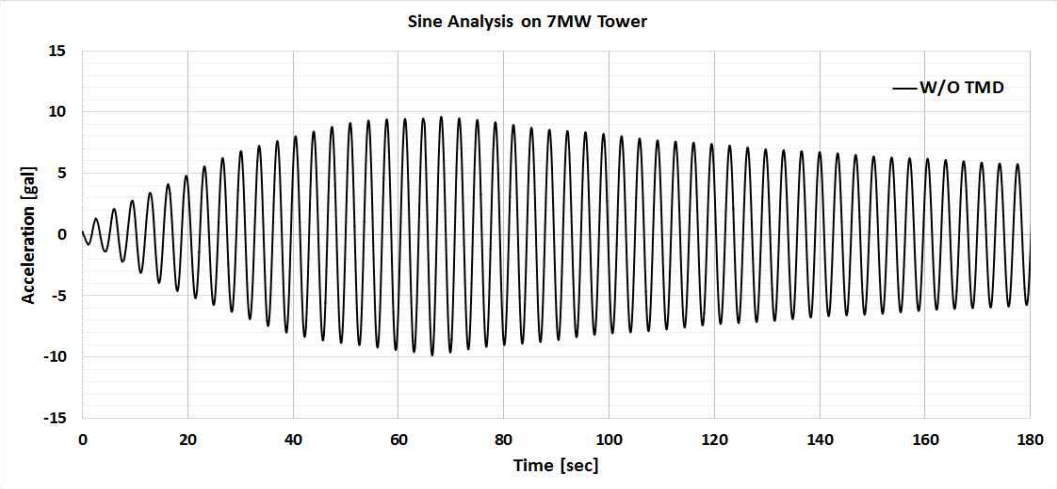


[TMD 유 · 무에 따른 FFT 분석(추가질량)]

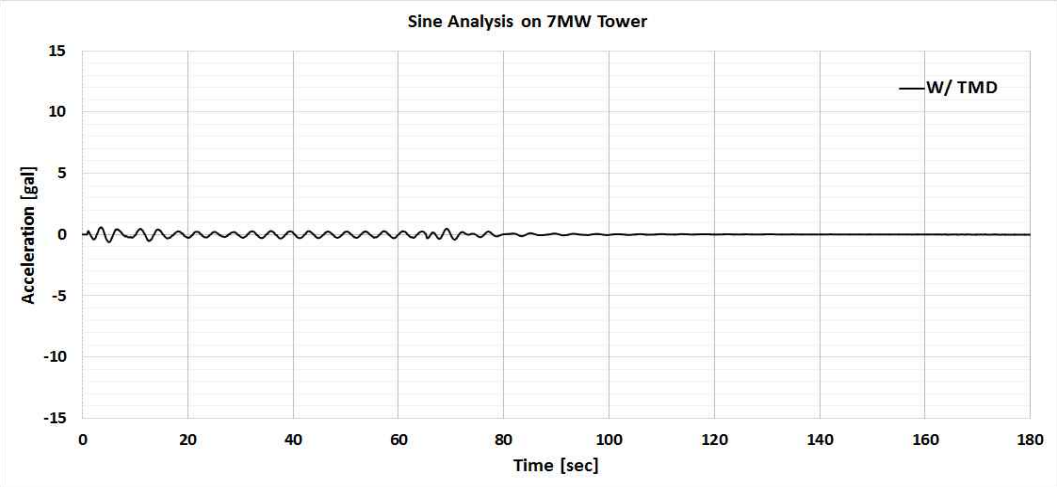


[시뮬레이션 수치해석에서의 TMD 유 · 무에 따른 FFT 분석(추가질량)]

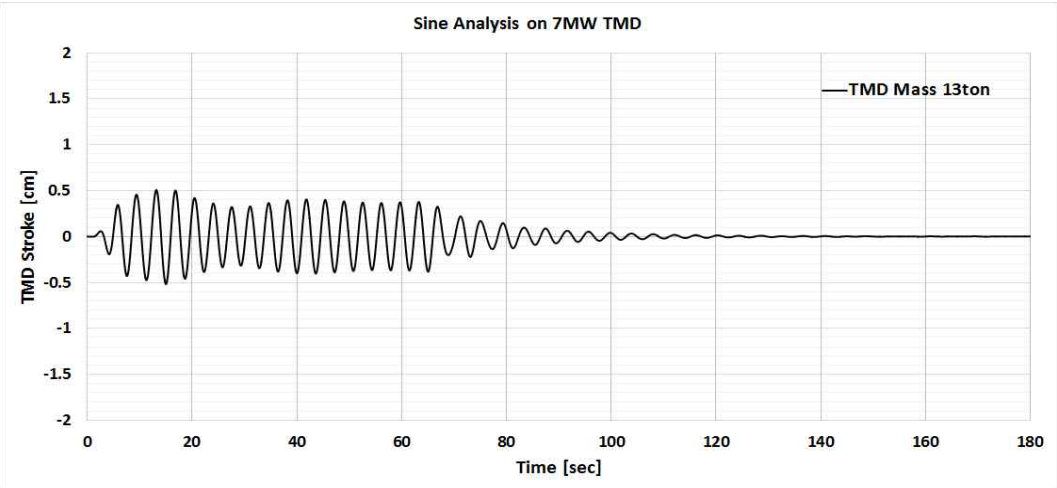
② 7MW급 시험체



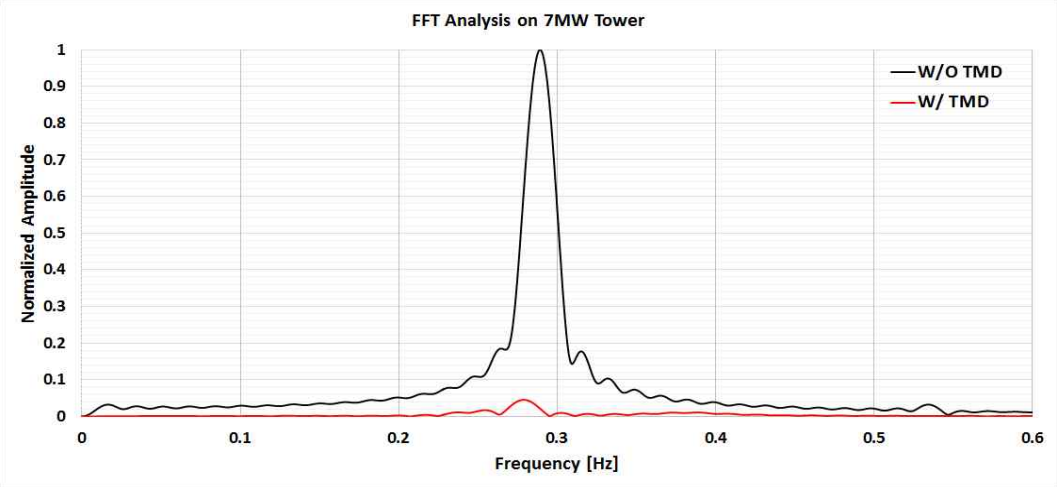
[비 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답]



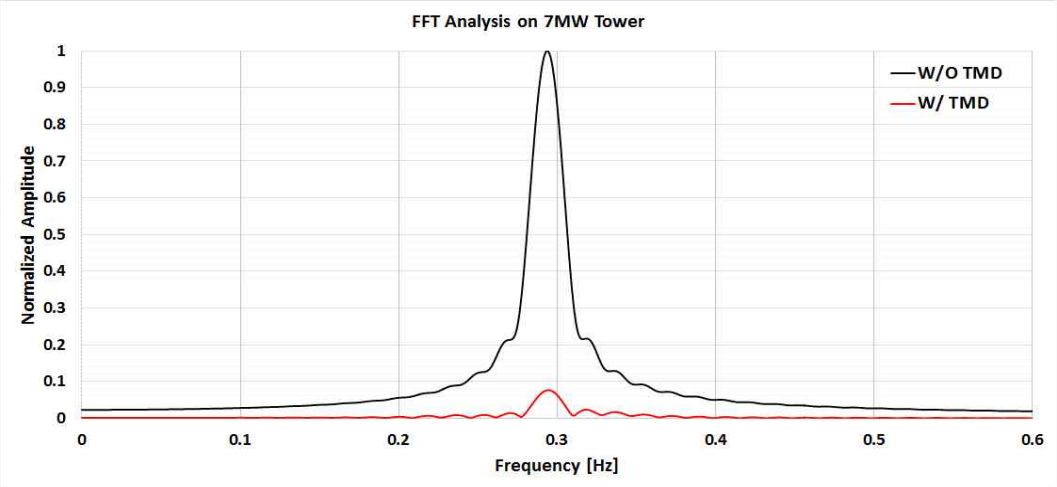
[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답]



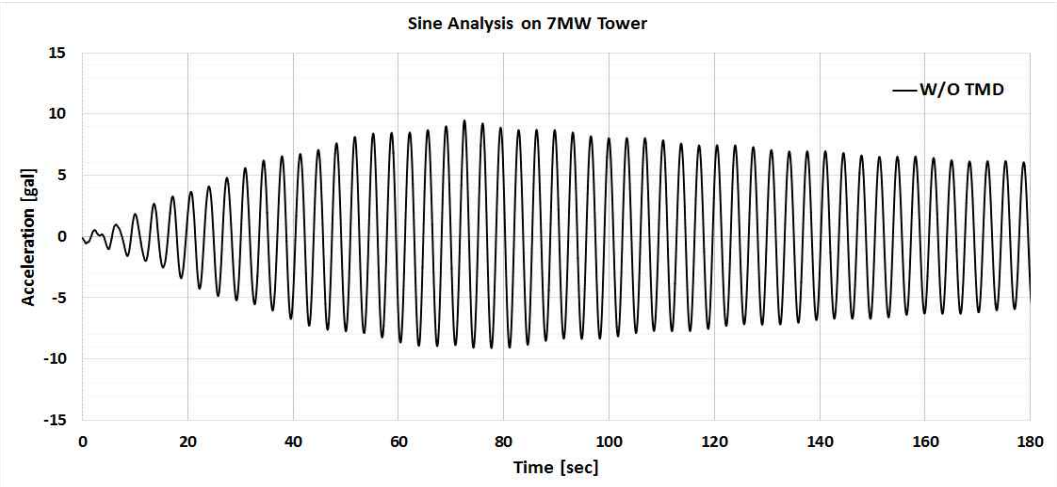
[7MW 시험체 TMD의 이송거리]



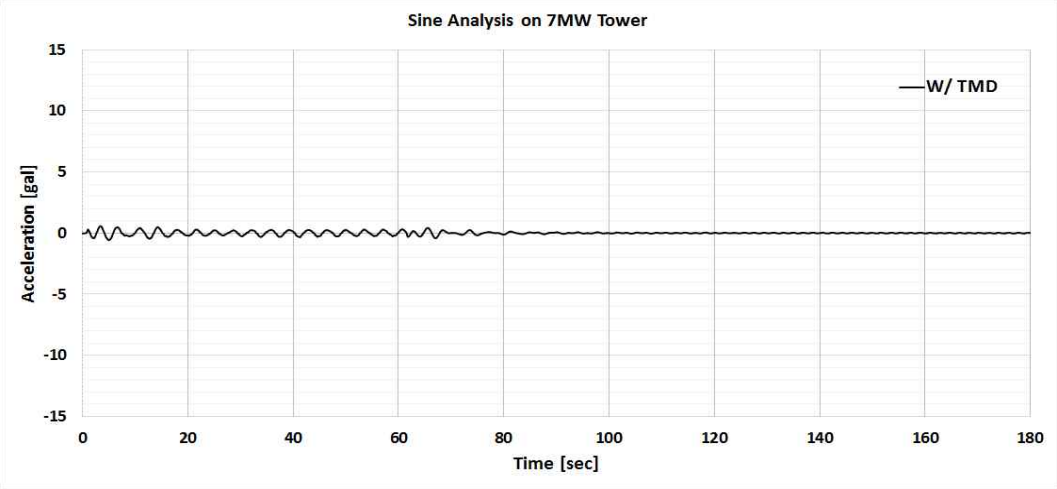
[TMD 유·무에 따른 FFT 분석]



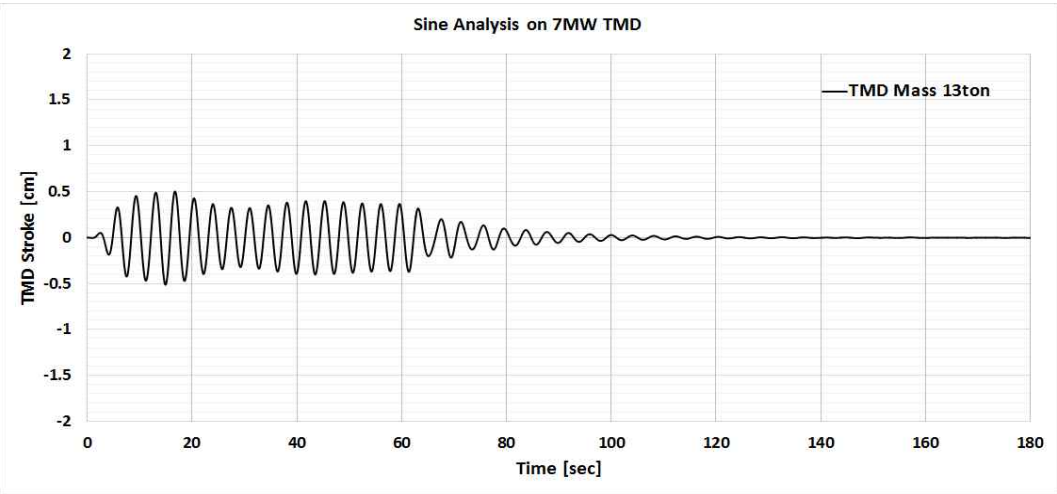
[시뮬레이션 수치해석에서의 TMD 유·무에 따른 FFT 분석]



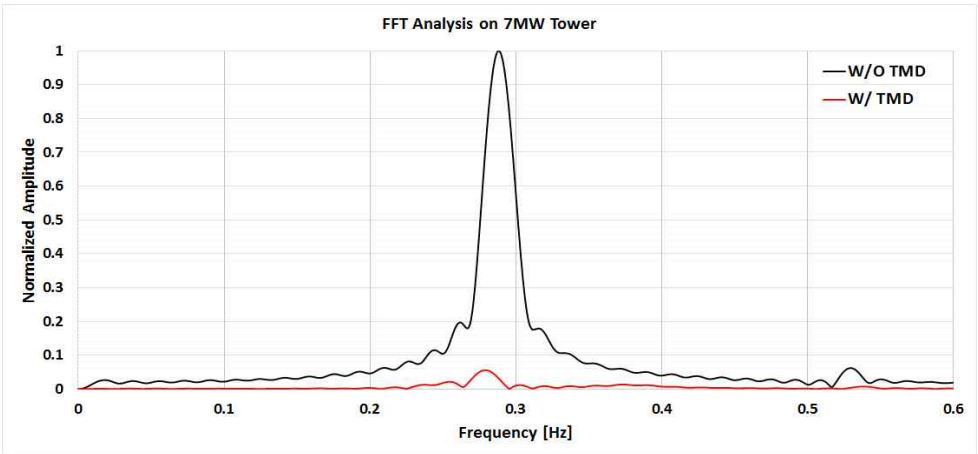
[비 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]



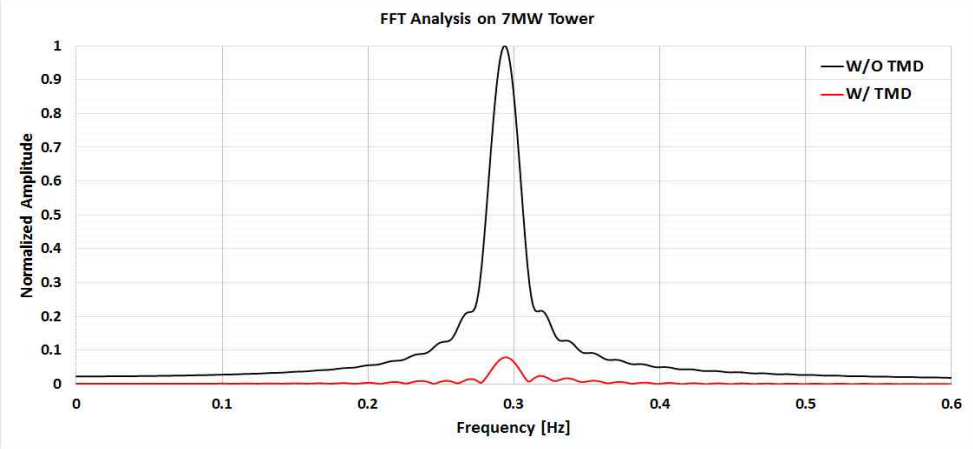
[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]



[7MW 시험체 TMD의 이송거리(추가질량)]

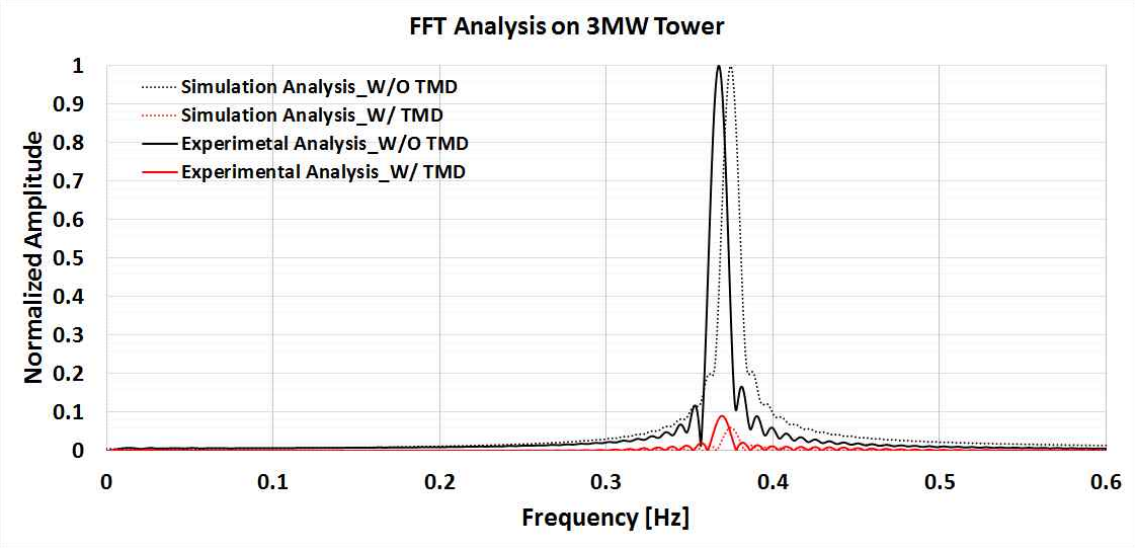


[TMD 유 · 무에 따른 FFT 분석(추가질량)]

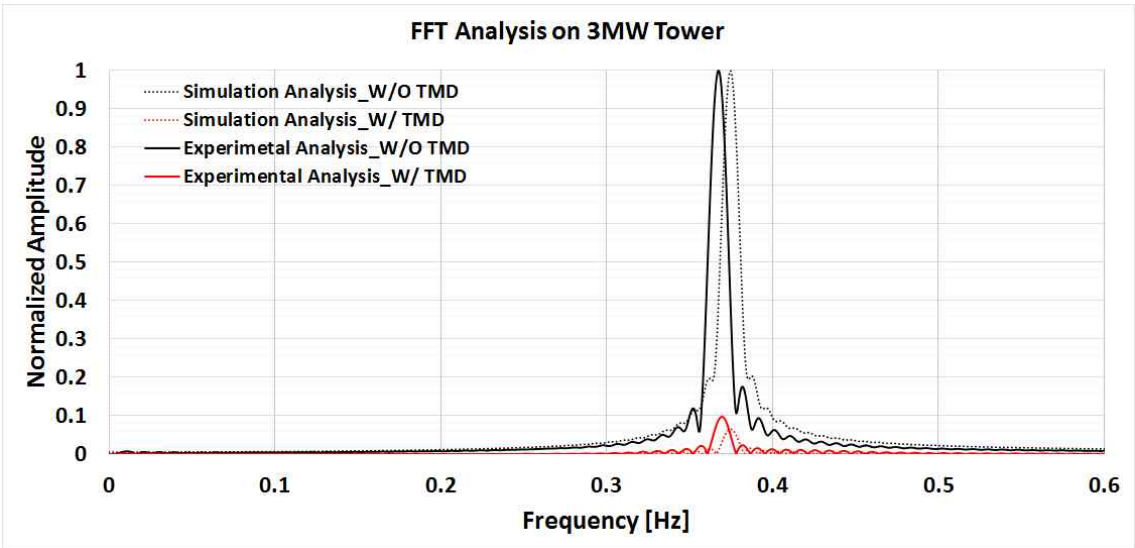


[시뮬레이션 수치해석에서의 TMD 유 · 무에 따른 FFT 분석(추가질량)]

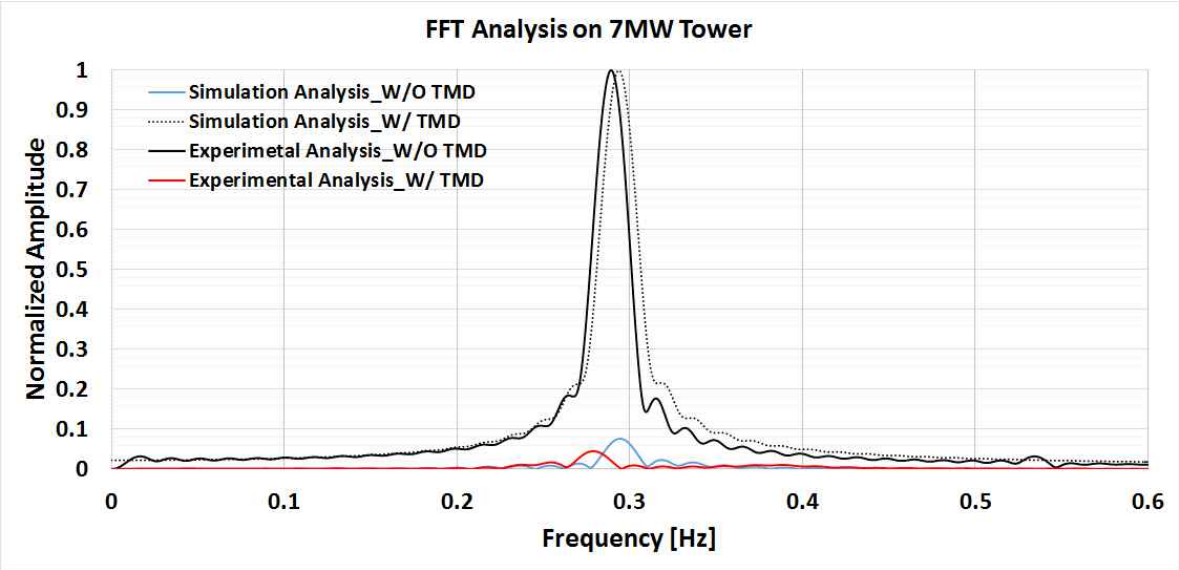
③ 시뮬레이션 수치해석과 성능시험과의 비교



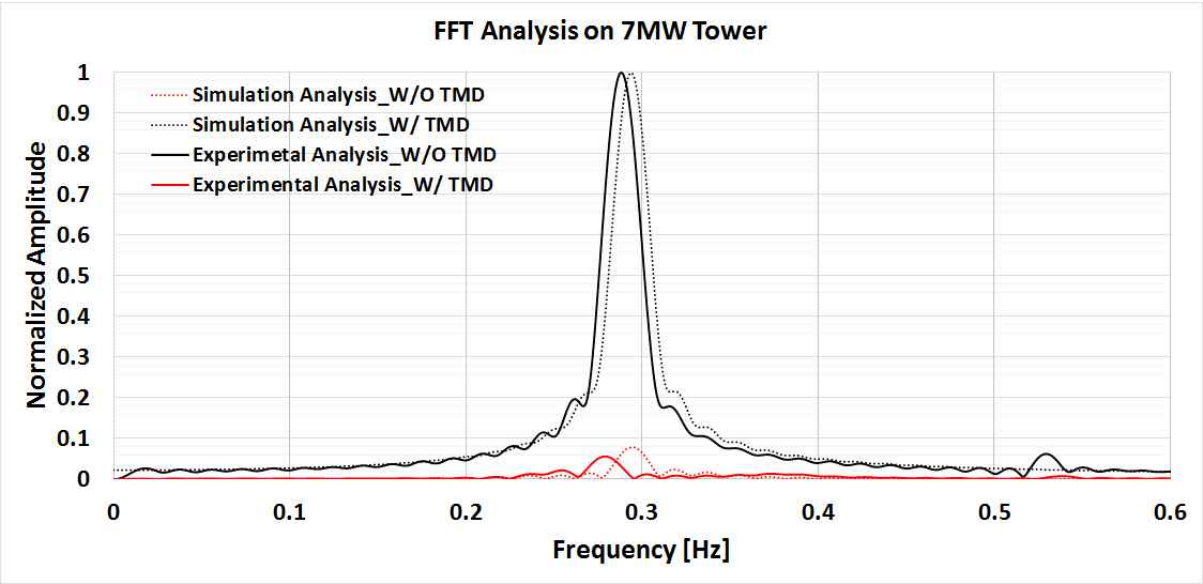
[시뮬레이션 수치해석과 성능시험 결과값 FFT 비교, 3MW]



[시뮬레이션 수치해석과 성능시험 결과값 FFT 비교, 3MW (추가질량)]



[시뮬레이션 수치해석과 성능시험 결과값 FFT 비교, 7MW]



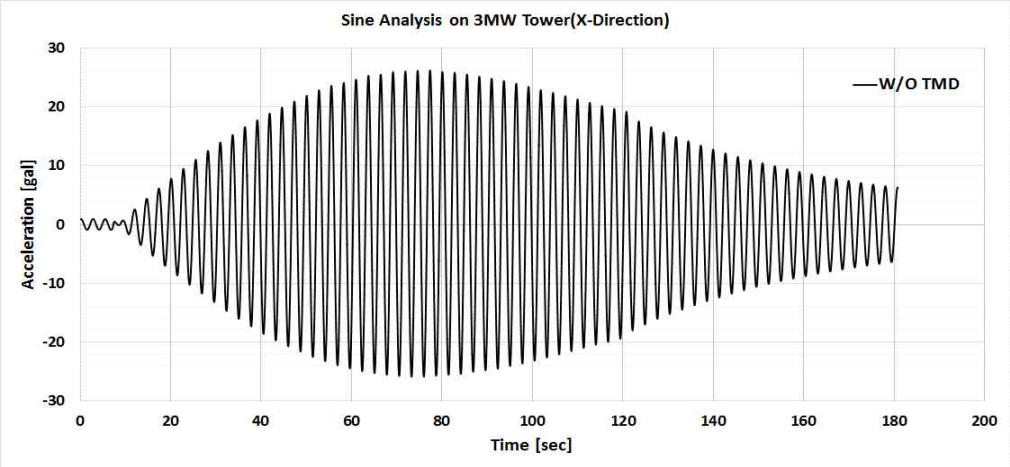
[시뮬레이션 수치해석과 성능시험 결과값 FFT 비교, 7MW (추가질량)]

[시뮬레이션 수치해석과 성능시험 결과값 FFT 비교]

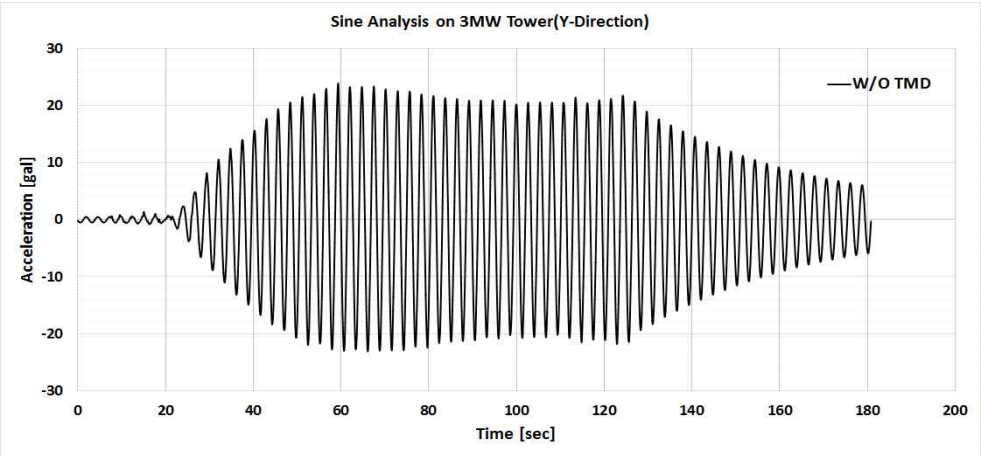
시험체	추가 Mass 여·부	정현파 고정 시험에 따른 저감율(%)	
		시뮬레이션 해석	성능 시험 해석
3MW 시험체	w/o Added Mass	94.1	90.9
	w/ Added Mass	93.5	90.2
7MW 시험체	w/o Added Mass	95.5	92.4
	w/ Added Mass	94.4	92.1

(다) X ·Y축 방향 정현파 동시 가진 결과

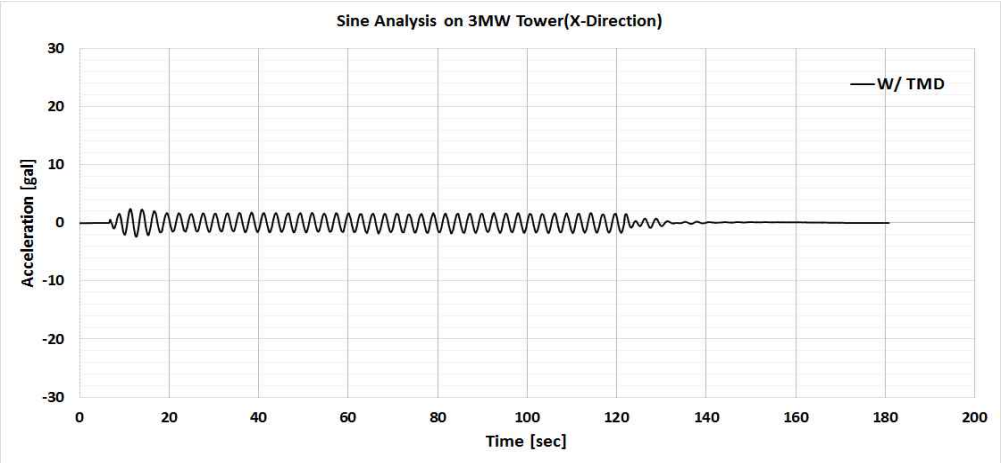
① 3MW급 시험체



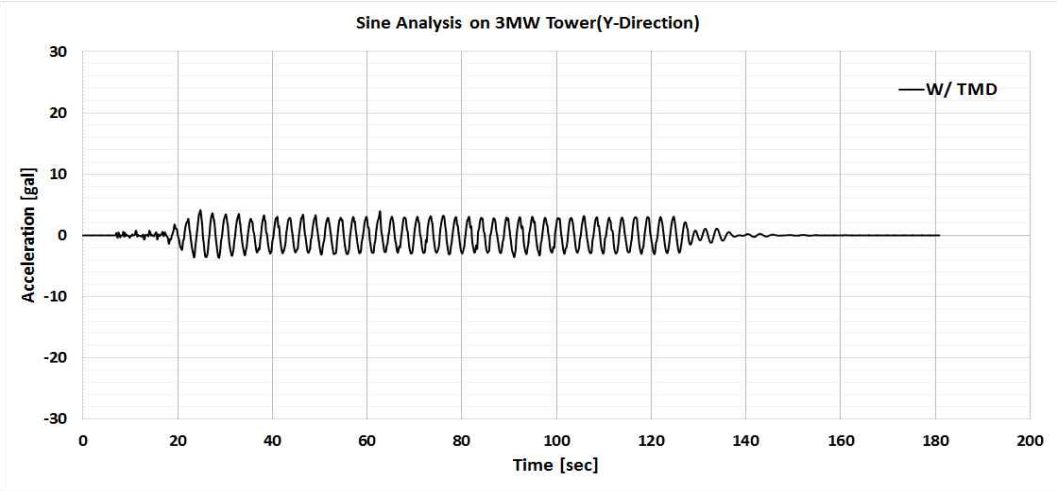
[비 제진된 3MW 시험체의 X 방향 가속도 응답]



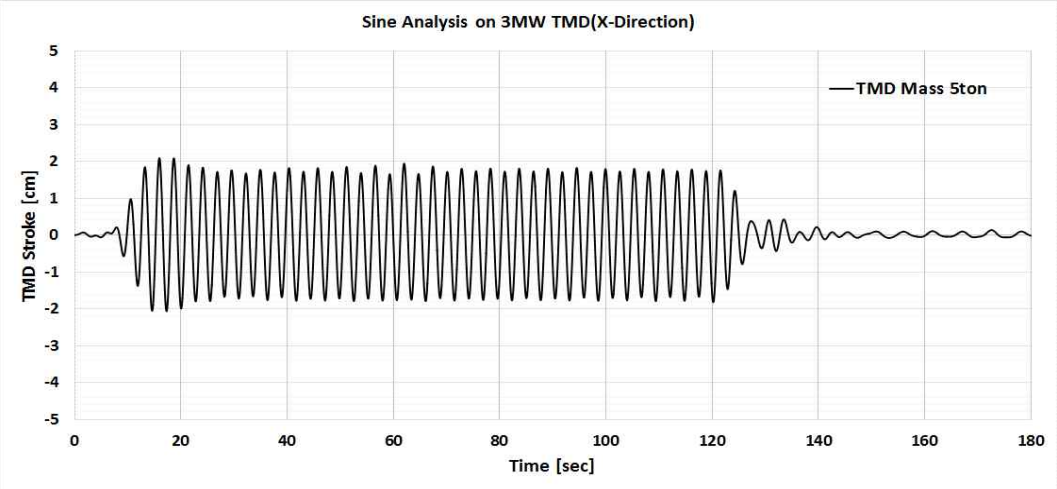
[비 제진된 3MW 시험체의 Y 방향 가속도 응답]



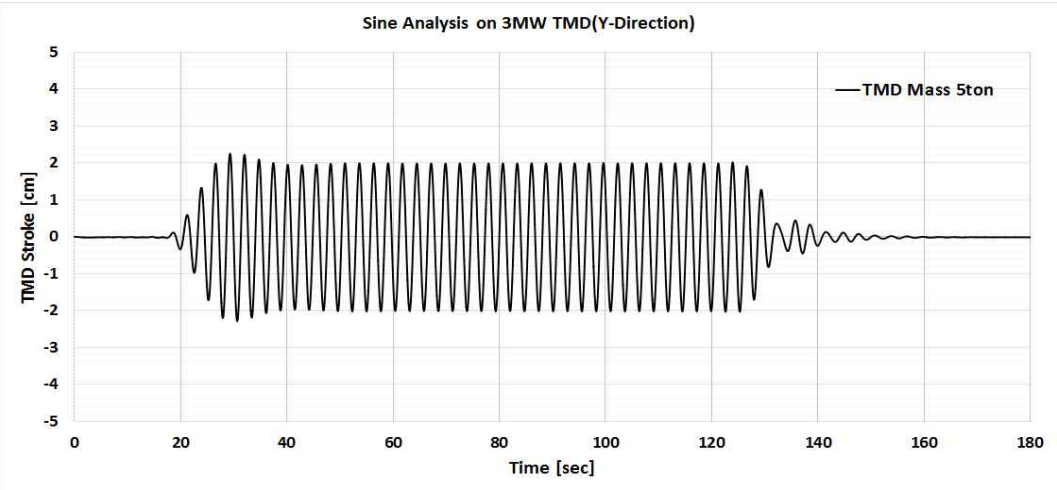
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 X 방향 가속도 응답]



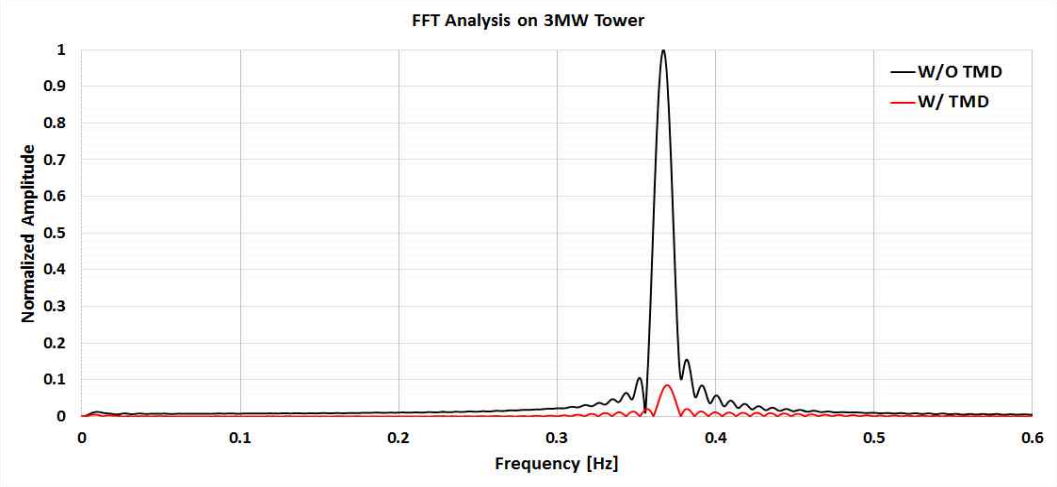
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 Y 방향 가속도 응답]



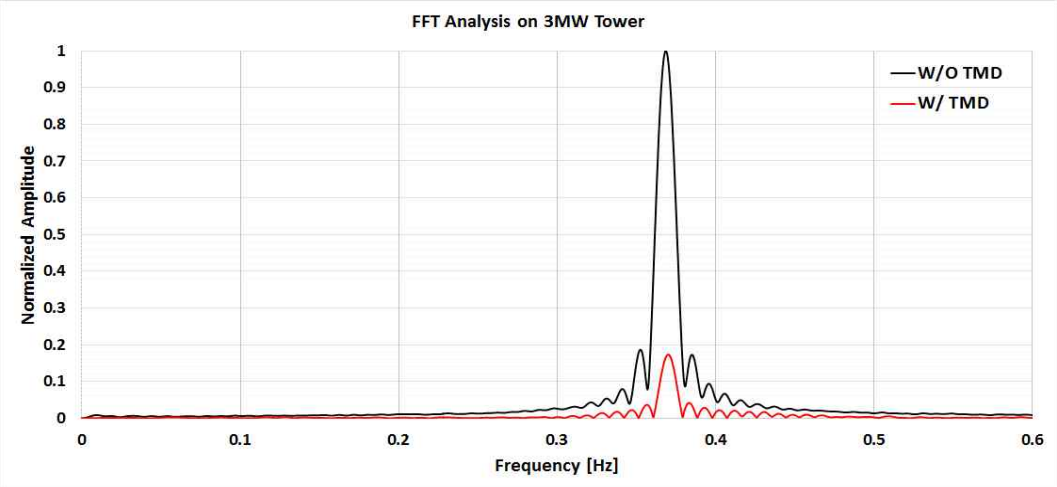
[3MW 시험체 TMD의 X 방향 이송거리]



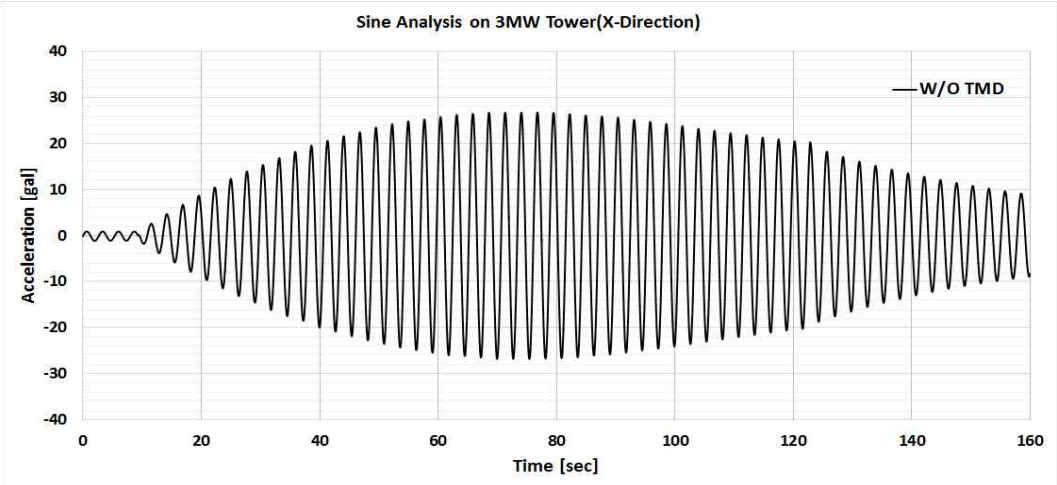
[3MW 시험체 TMD의 Y 방향 이송거리]



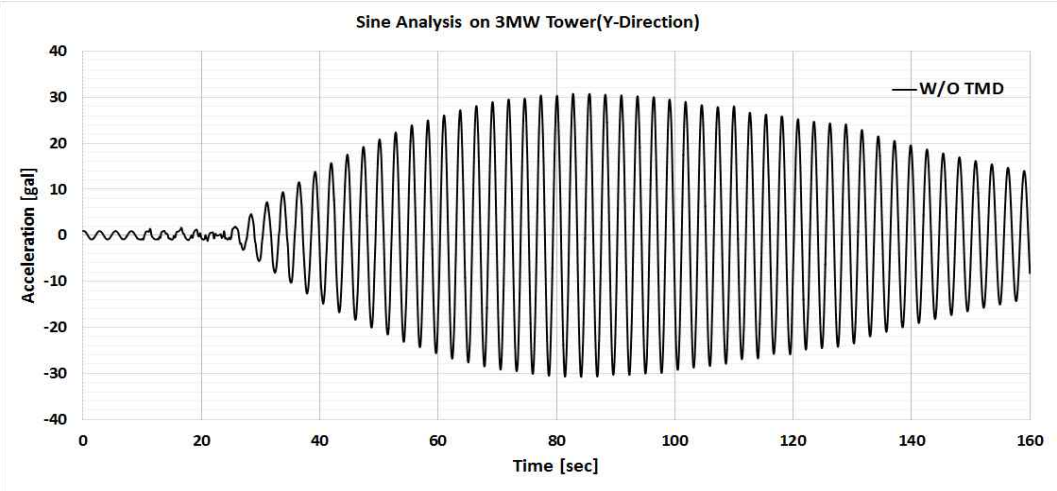
[TMD 유·무에 따른 X 방향 FFT 분석]



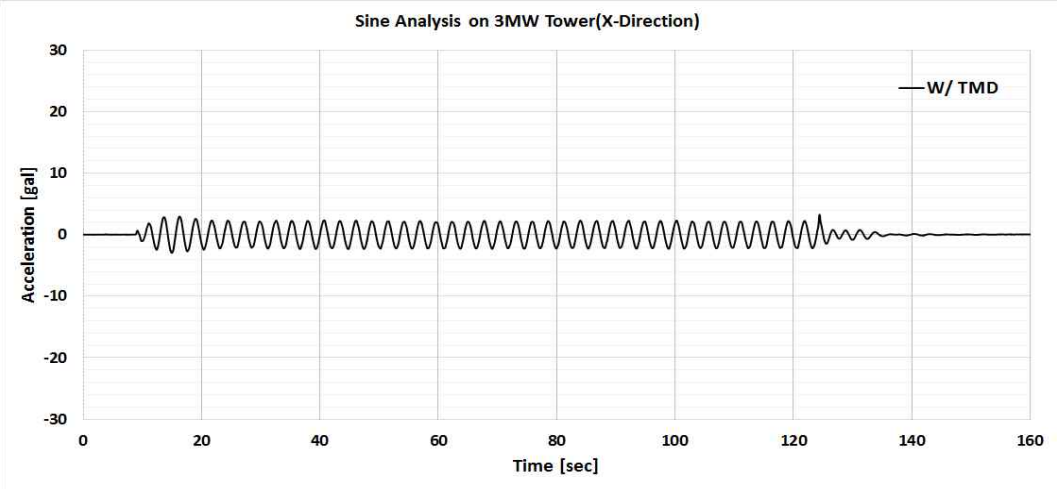
[TMD 유·무에 따른 Y 방향 FFT 분석]



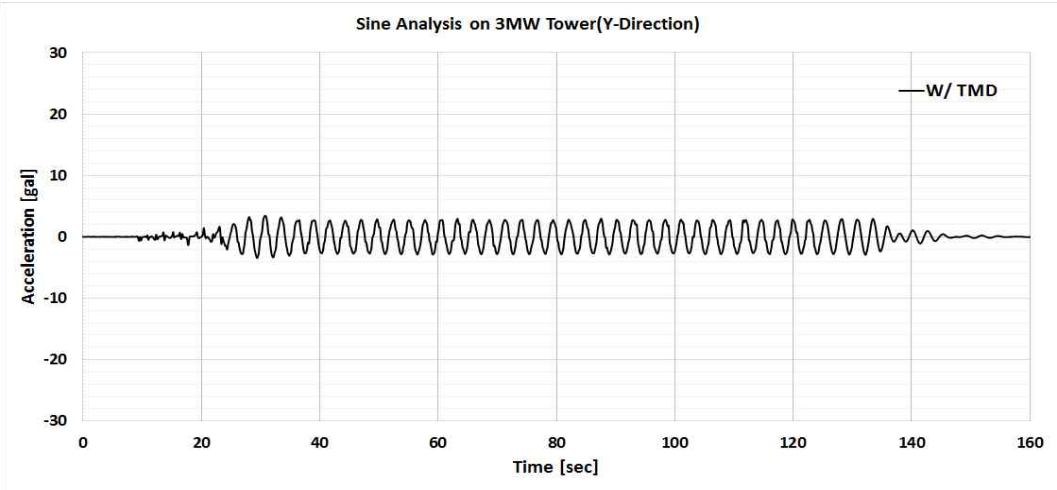
[비 제진된 3MW 시험체의 X 방향 가속도 응답(추가질량)]



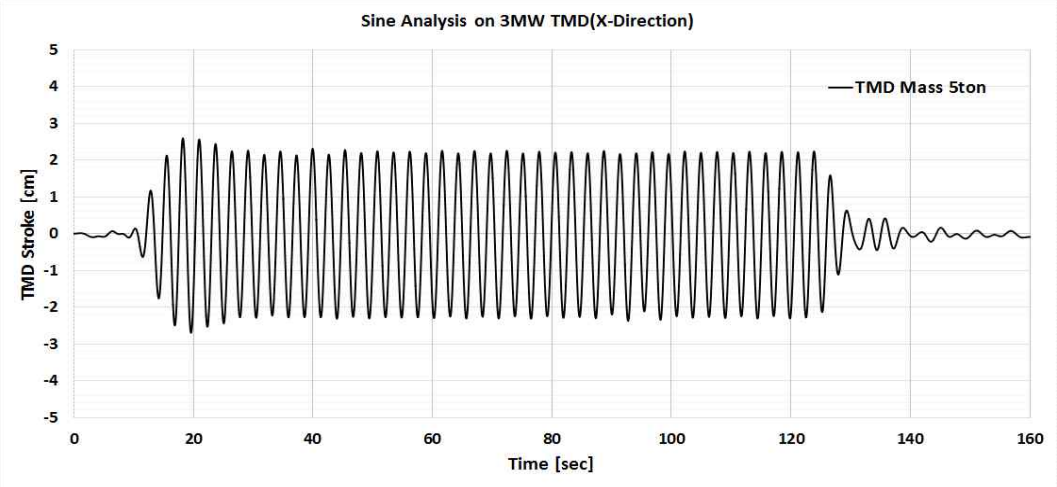
[비 제진된 3MW 시험체의 Y 방향 가속도 응답(추가질량)]



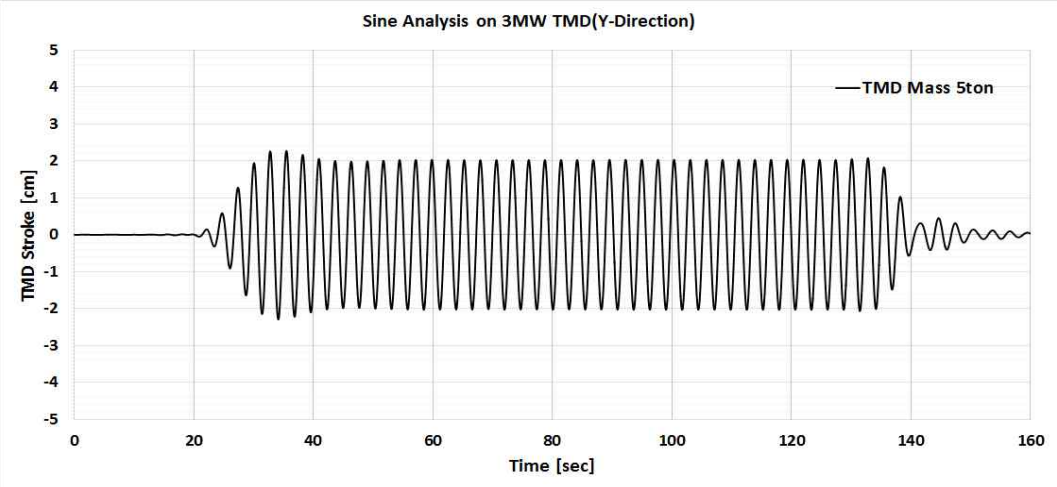
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 X 방향 가속도 응답(추가질량)]



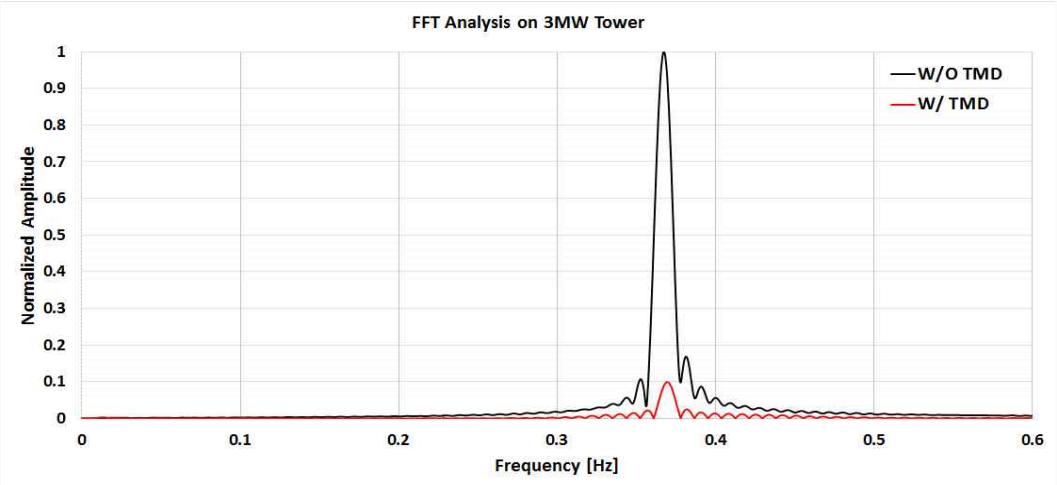
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 Y 방향 가속도 응답(추가질량)]



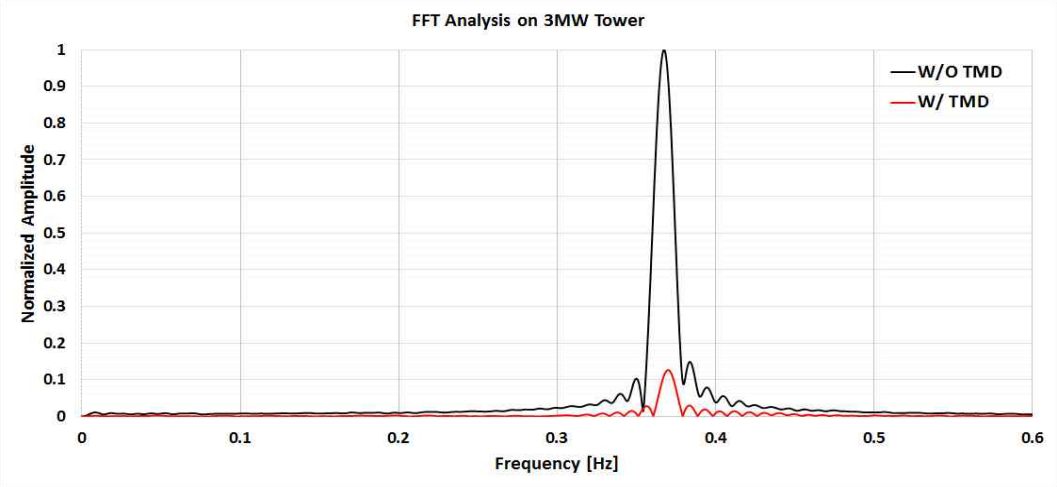
[3MW 시험체 TMD의 X 방향 이송거리(추가질량)]



[3MW 시험체 TMD의 Y 방향 이송거리(추가질량)]

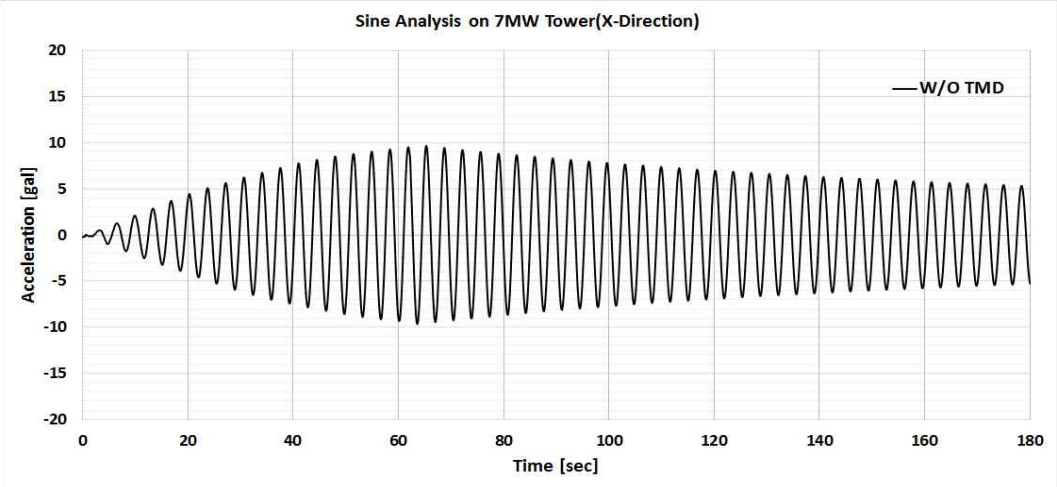


[TMD 유 · 무에 따른 X 방향 FFT 분석(추가질량)]

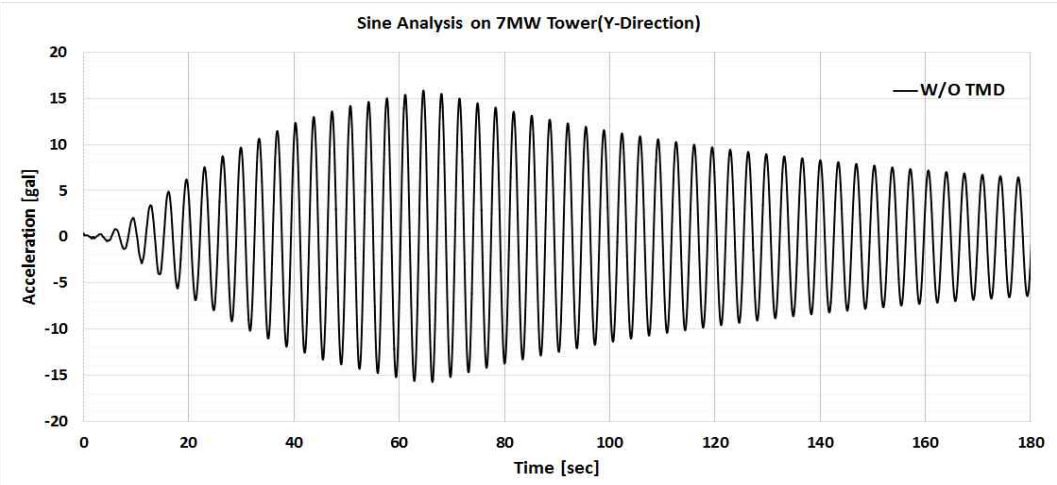


[TMD 유 · 무에 따른 Y 방향 FFT 분석(추가질량)]

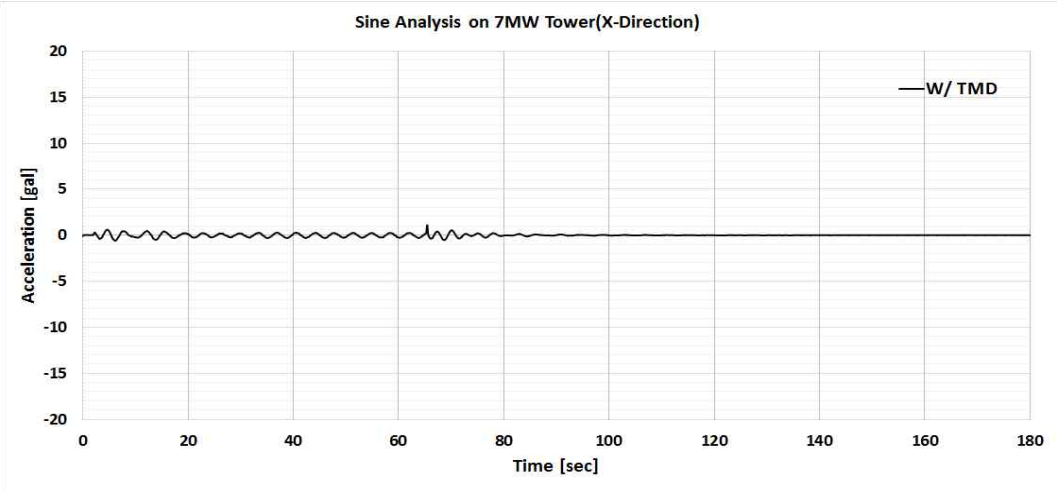
② 7MW급 시험체



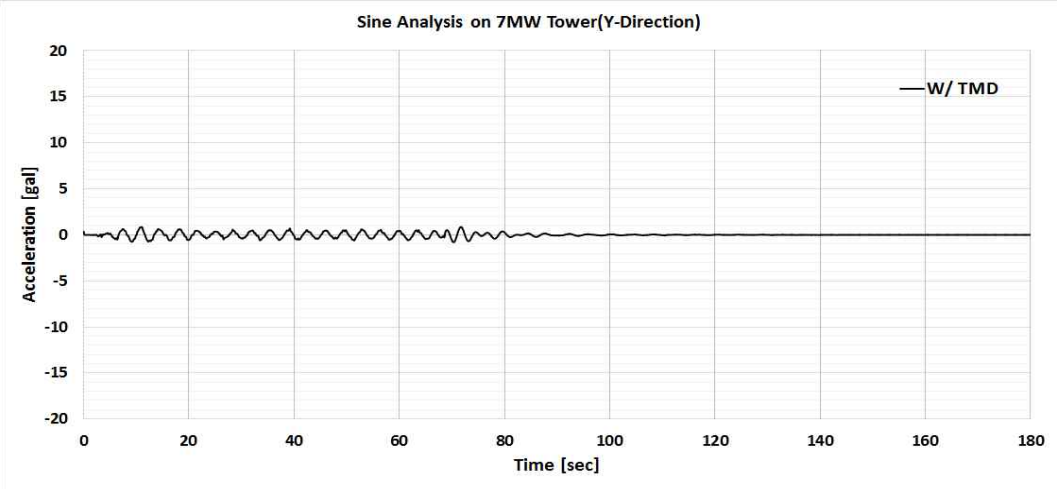
[비 제진된 7MW 시험체의 X 방향 가속도 응답]



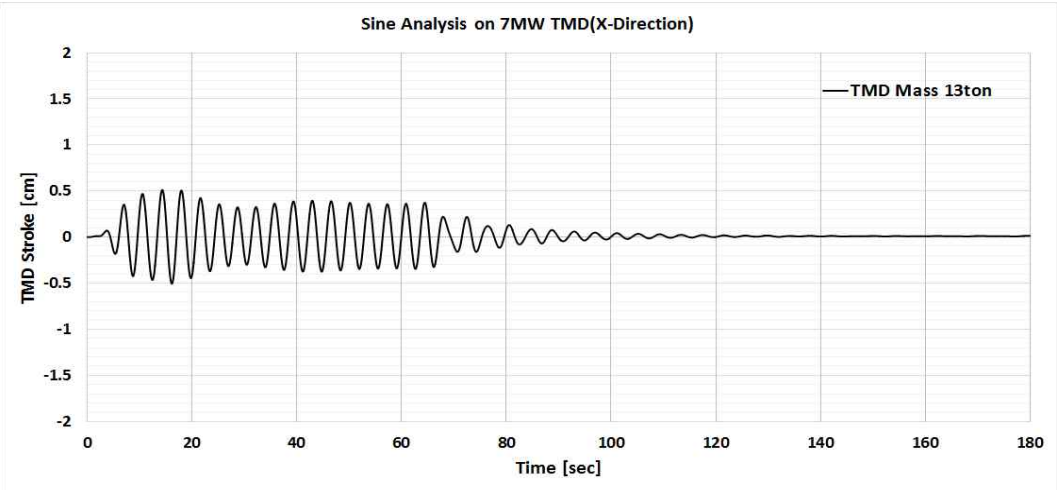
[비 제진된 7MW 시험체의 Y 방향 가속도 응답]



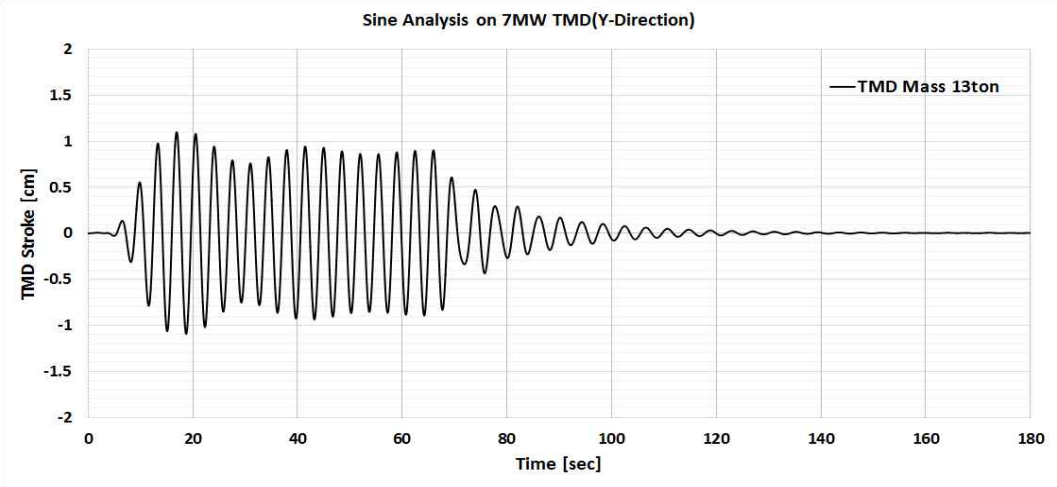
[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 X 방향 가속도 응답]



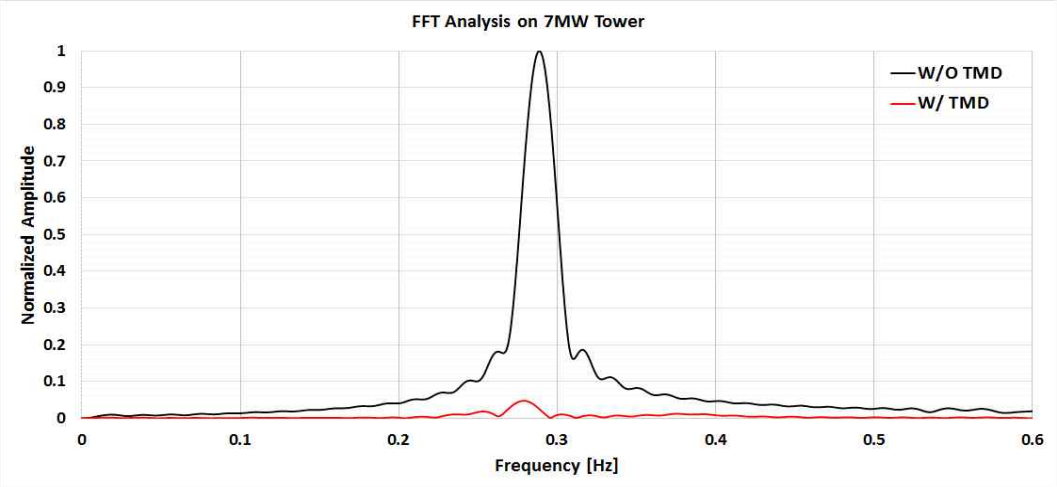
[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 Y 방향 가속도 응답]



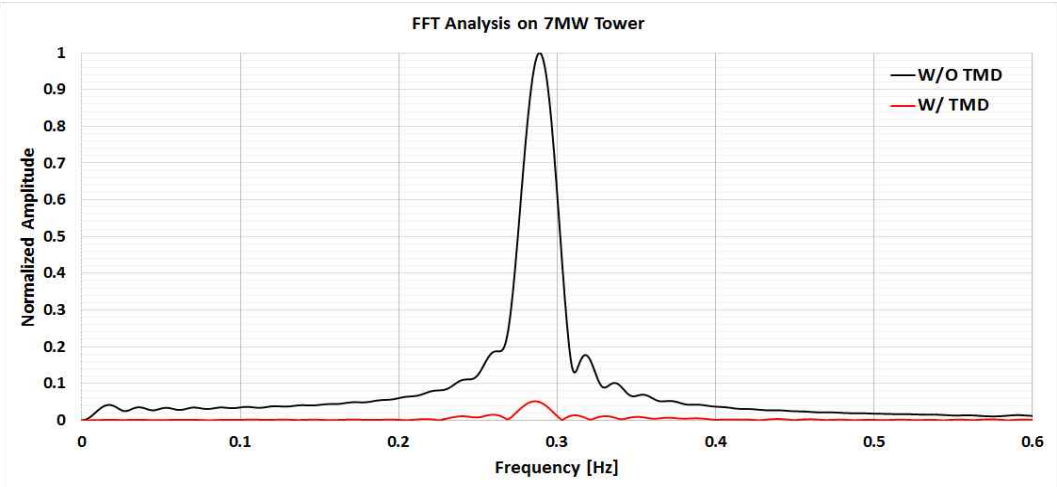
[7MW 시험체 TMD의 X 방향 이송거리]



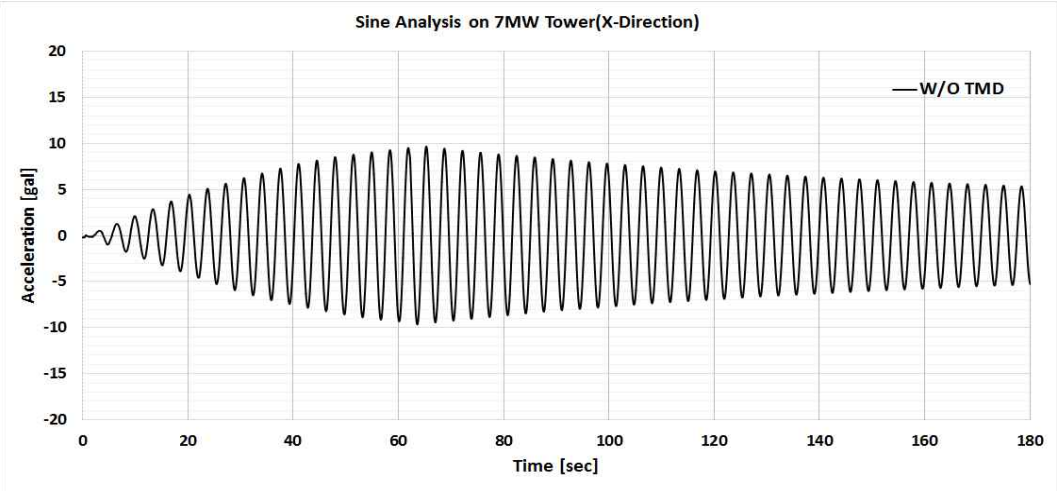
[7MW 시험체 TMD의 Y 방향 이송거리]



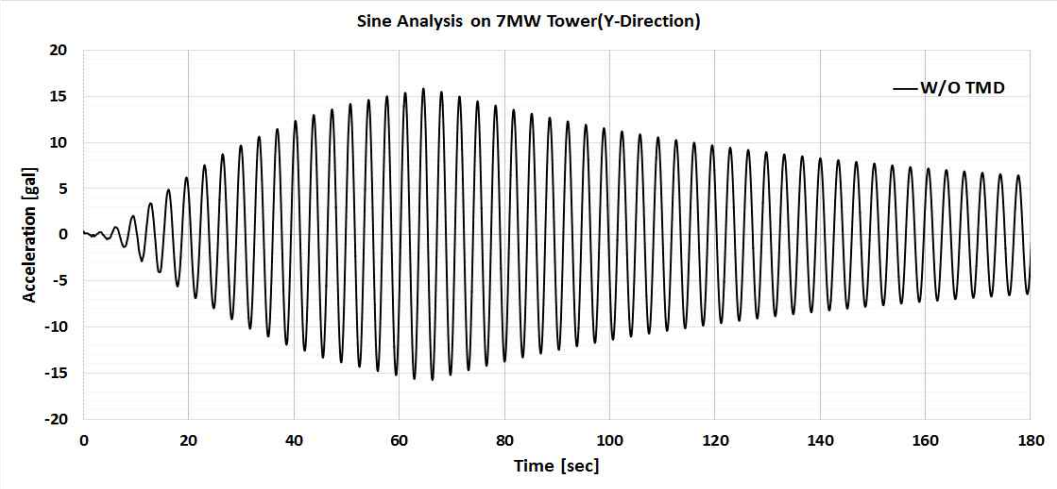
[TMD 유·무에 따른 Y 방향 FFT 분석]



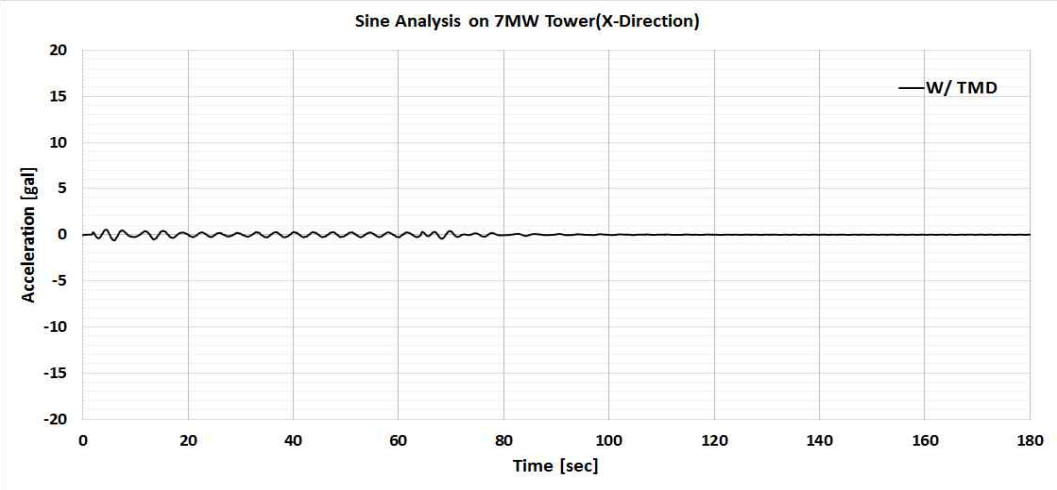
[TMD 유·무에 따른 Y 방향 FFT 분석]



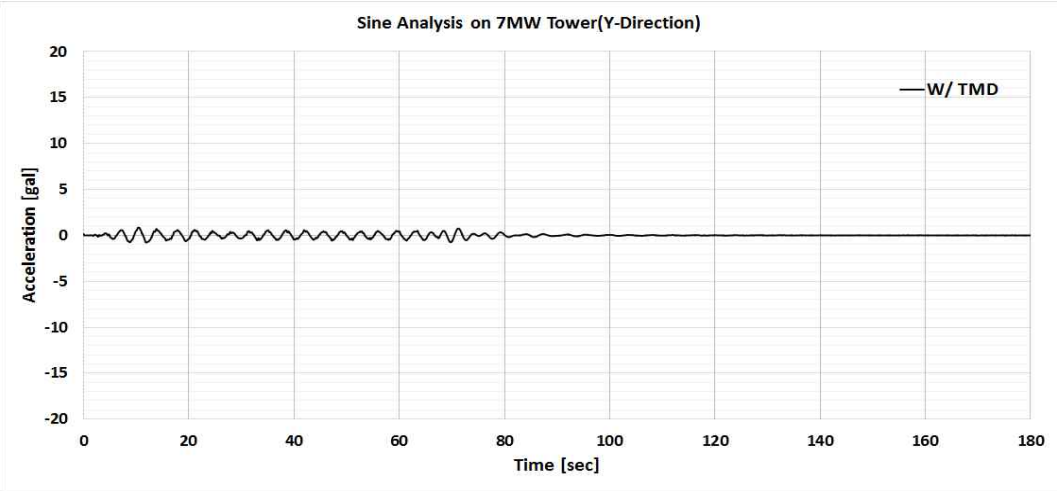
[비 제진된 7MW 시험체의 X 방향 가속도 응답(추가질량)]



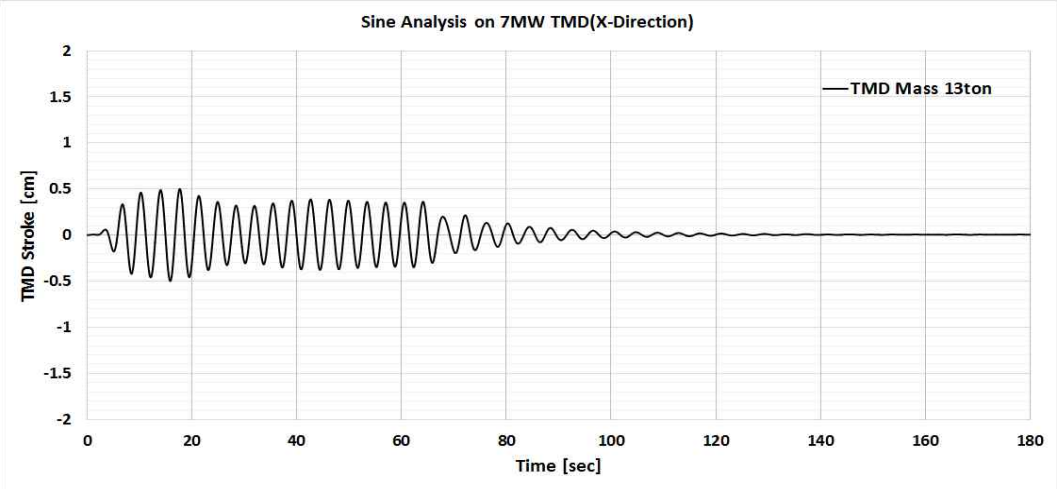
[비 제진된 7MW 시험체의 Y 방향 가속도 응답(추가질량)]



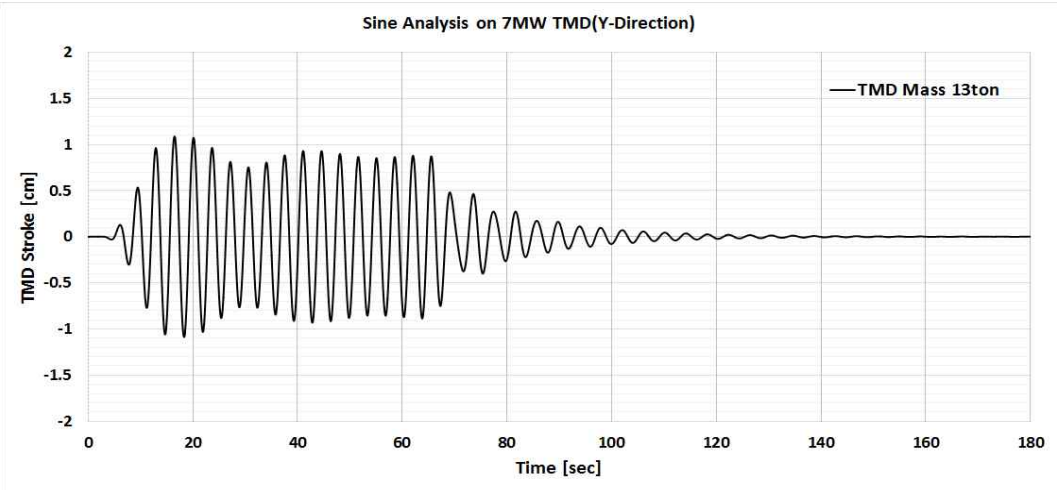
[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 X 방향 가속도 응답(추가질량)]



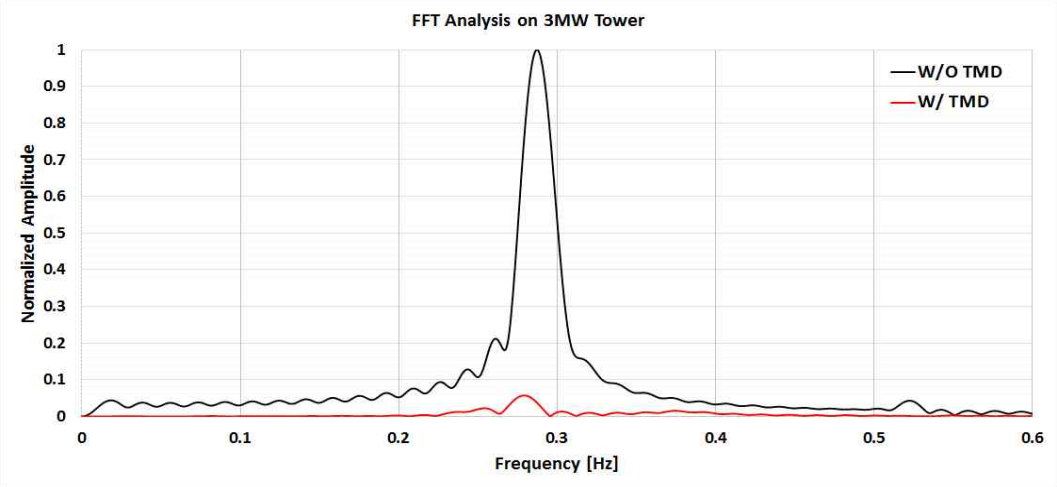
[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 Y 방향 가속도 응답(추가질량)]



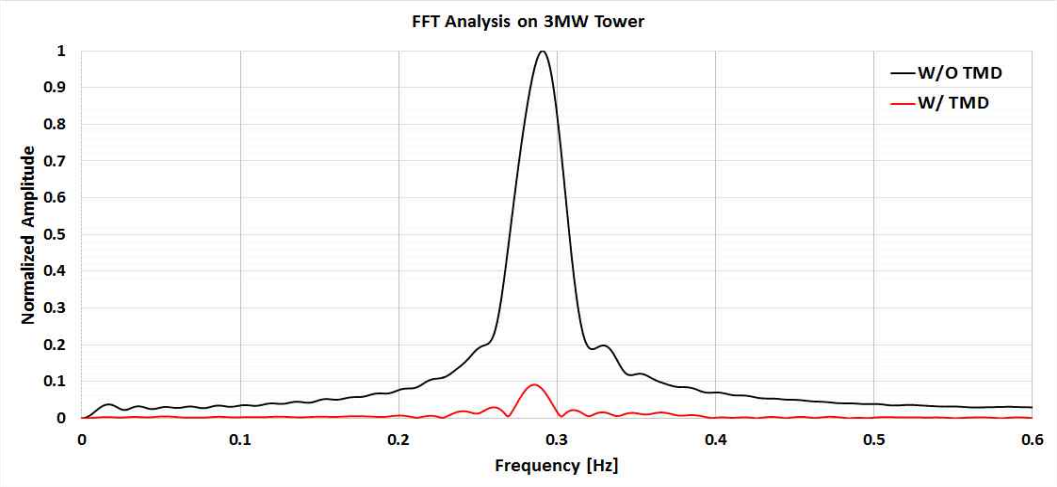
[7MW 시험체 TMD의 X 방향 이송거리(추가질량)]



[7MW 시험체 TMD의 Y 방향 이송거리(추가질량)]



[TMD 유 · 무에 따른 X 방향 FFT 분석(추가질량)]

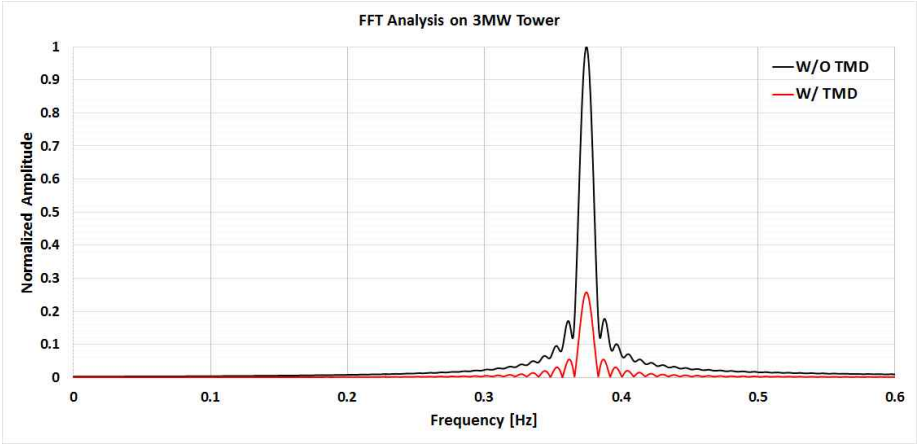


[TMD 유 · 무에 따른 Y 방향 FFT 분석(추가질량)]

(라) 정현파 고정 가진 성능 평가 결과

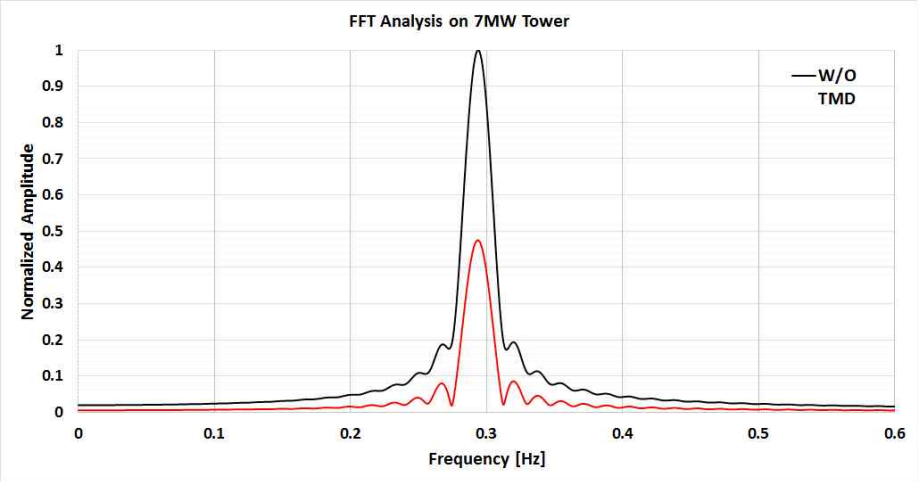
① 1 축(X축) 가진 시험

㉮ 한 방향으로 가진시험을 진행한 결과, 7MW 시험체의 경우, 고유 진동 주파수에서 최대 95% 이상의 진동 저감율을 보였으며, 3MW 시험체의 경우에도, 90%이상의 저감율을 나타냄.
㉯ 같은 조건에서의 시뮬레이션 수치해석 결과, 3MW 시험체 경우는 약 96%, 7MW 시험체의 경우 92%이상의 진동 저감율을 보이고 있음.
㉰ 추가질량 유 · 무에 따른 타워의 응답차이는 미소한 차이임.
㉱ 시험체간의 진동 저감율의 차이는 가진력과 가진 시간 TMD 질량비가 다르기 때문임.
㉲ 실제 모드질량을 지닌 풍력터빈타워에서의 진동 저감율은 이보다 작으며, 시뮬레이션 수치해석응답 값과 비교해 볼 때, 유사한 저감율을 보이기 때문에, 실제 풍력터빈타워의 시뮬레이션 성능 해석 값은 높은 신뢰성을 지님.
㉳ 3MW급 풍력터빈타워의 경우, 목표 주파수(0.3616Hz) 가진 시 실제 모드질량에서의 예상되는 진동 저감율을 시뮬레이션 FFT 해석을 통하여 약 75%로 유추함.



[시뮬레이션 수치해석에서의 TMD 유 · 무에 따른 실제타워 FFT 분석(3MW)]

㉮ 7MW급 풍력터빈타워의 경우, 목표 주파수(0.2879Hz) 가진 시 실제 모드질량에서의 예상되는 진동 저감율을 시뮬레이션 FFT 해석을 통하여 약 53%로 유추함.



[시뮬레이션 수치해석에서의 TMD 유 · 무에 따른 실제타워 FFT 분석(7MW)]

② 2 축(X · Y) 가진 시험

㉮ 두 방향(X · Y)으로 가진시험을 진행한 결과, 3MW 시험체의 X 방향 가속도응답은 고유 진동 주파수 범위에서 최대 90% 저감효과를 볼 수 있으며, Y방향의 경우 최대 82%의 저감율을 나타냈음.

㉯ 7MW 시험체의 X 방향 가속도응답은 고유 진동 주파수 범위에서 최대 94% 저감효과를 볼 수 있으며, Y방향의 경우도 최대 94%의 저감율을 나타냈음.

마. 정현파 소인 시험

(1) 실험 개요

(가) 3MW급 시험체의 경우, 0.1Hz 간격으로 고유진동수 0.362Hz을 포함한 0.33Hz~0.41Hz

범위에서 sweep가진하여 진동수 변화에 따른 타워의 응답을 평가함.

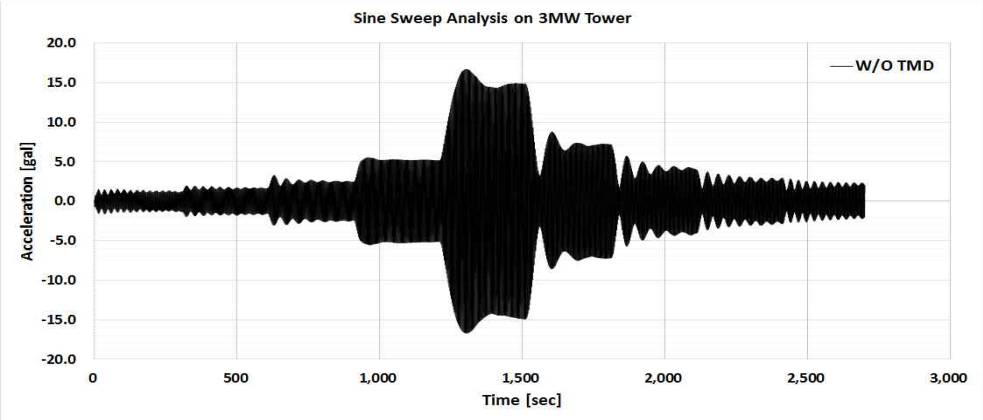
(나) 7MW급 시험체의 경우, 0.1Hz 간격으로 고유진동수 0.288Hz을 포함한 0.26Hz~0.32Hz 범위에서 sweep가진하여 진동수 변화에 따른 타워의 응답을 평가함.

(다) 진동수 별로 가진시간 300sec이며 가진력 크기는 200N으로 동일하게 진행함.

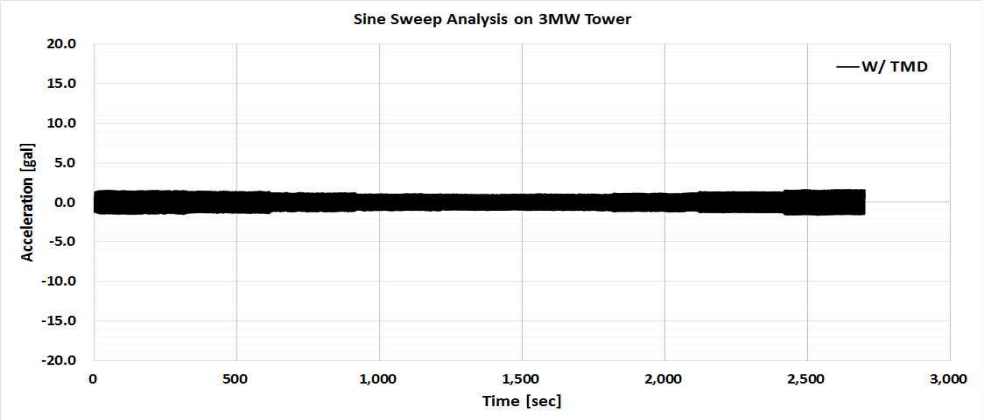
(라) 모든 시험의 가진 방향은 X 방향 1축으로 함.

(2) 정현파 소인 실험 결과

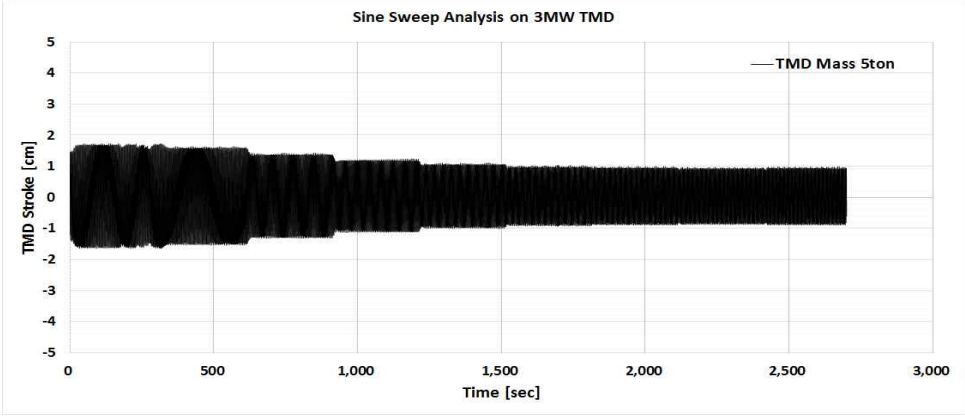
(가) 3MW급 시험체



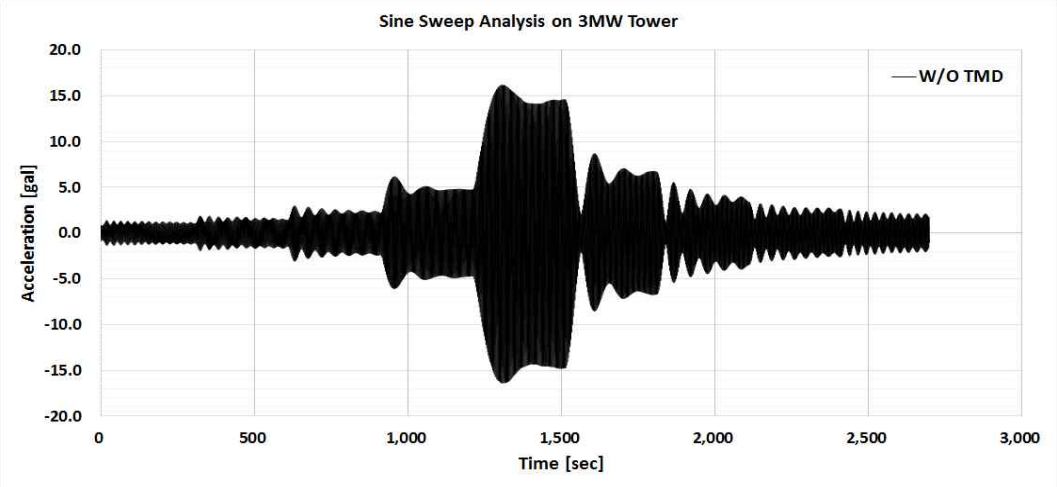
[비 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답]



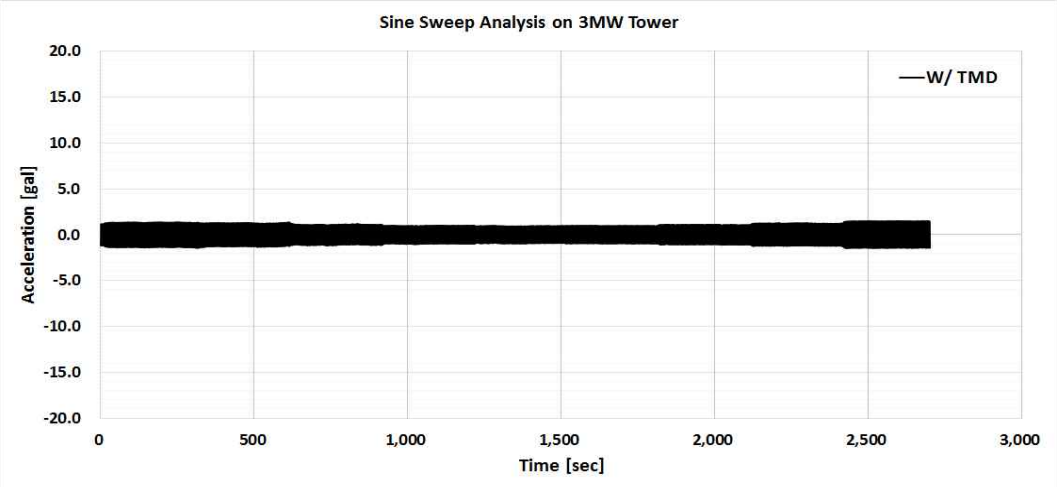
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답]



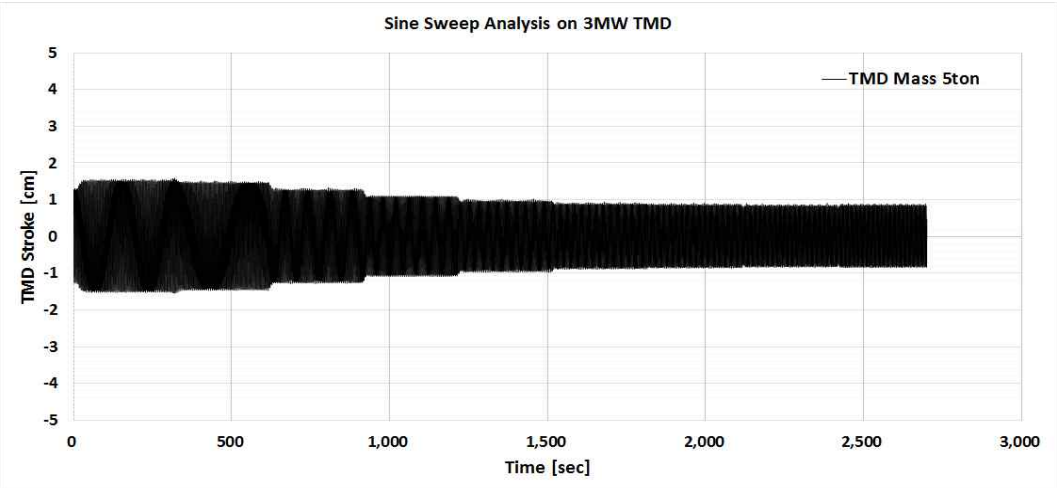
[3MW 시험체 TMD의 이송거리]



[비 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]

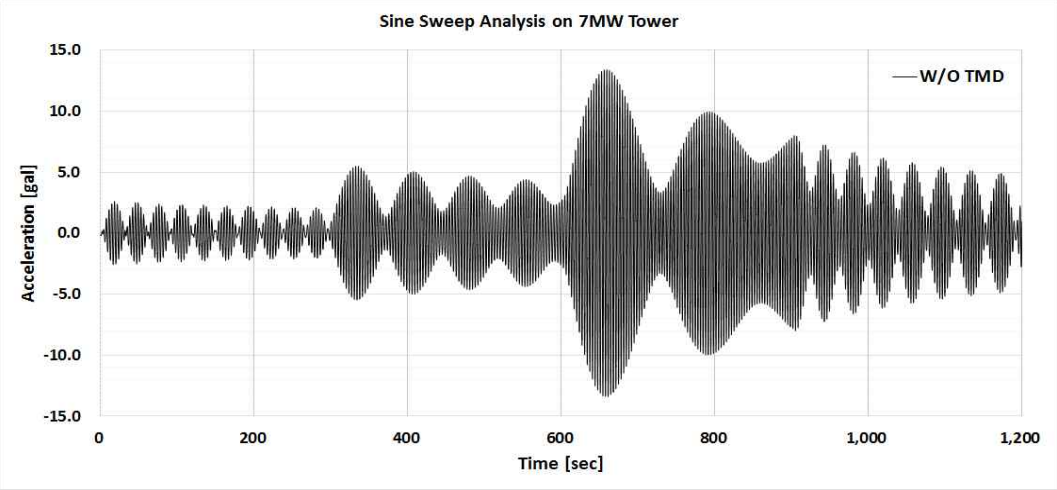


[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]

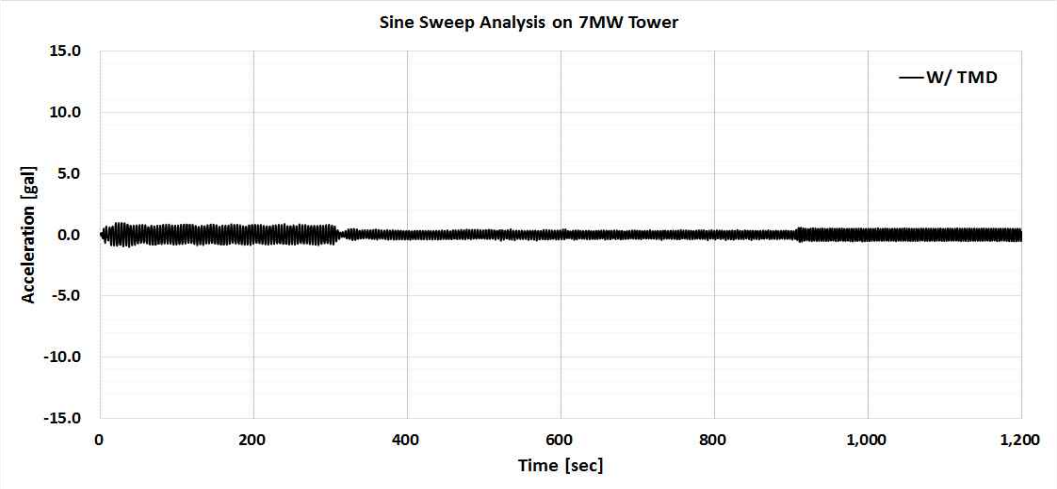


[3MW 시험체 TMD의 이송거리(추가질량)]

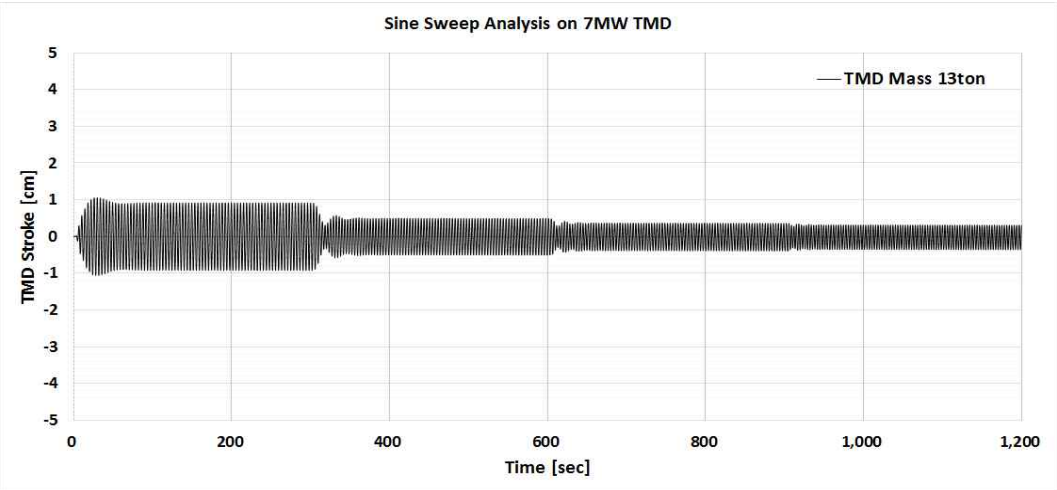
(나) 7MW급 시험체



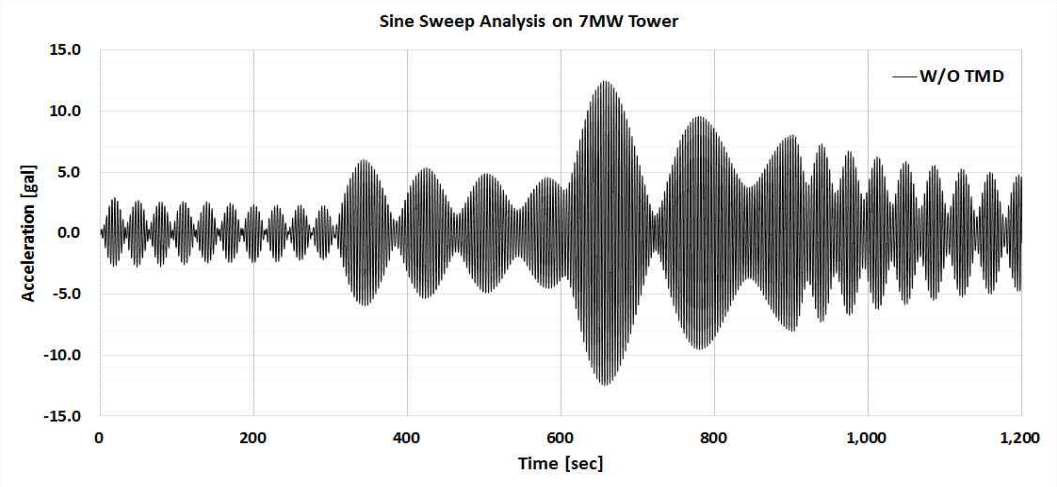
[비 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답]



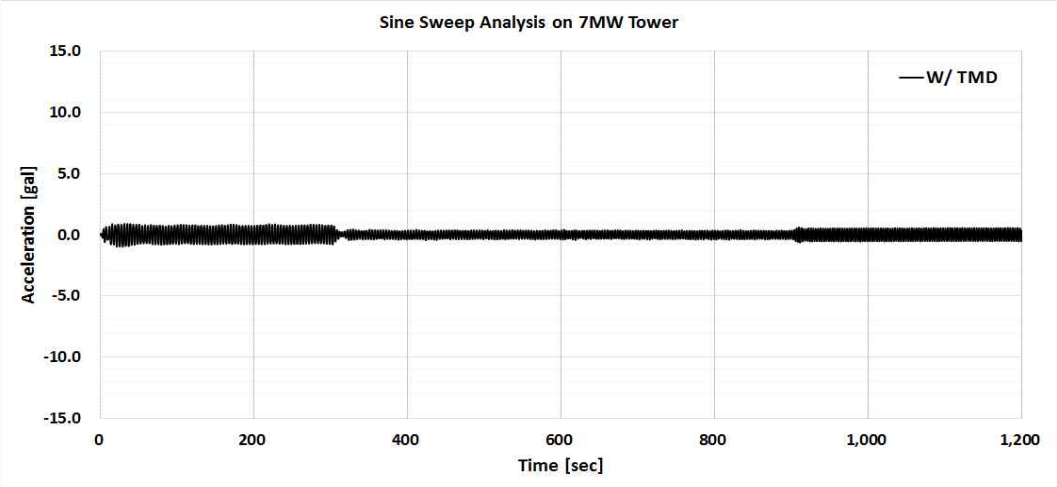
[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답]



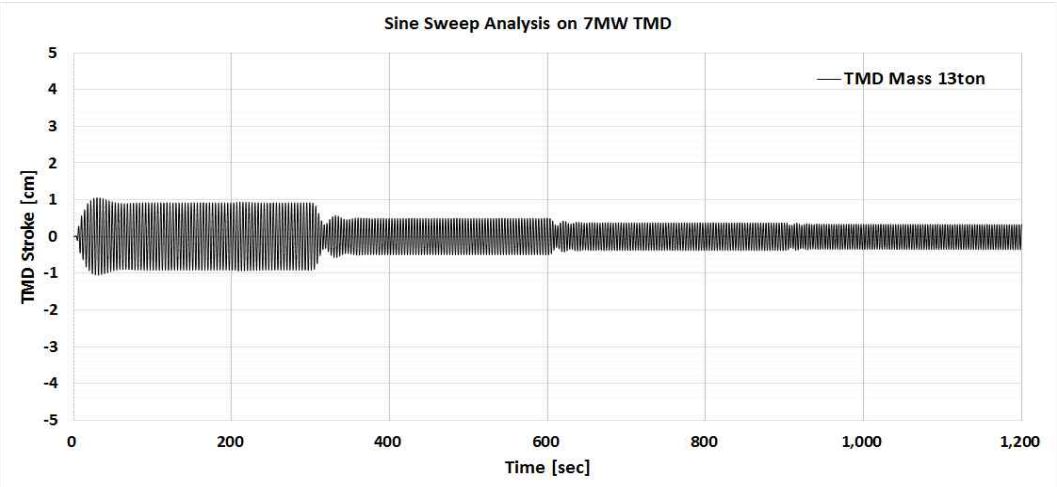
[7MW 시험체 TMD의 이송거리]



[비 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]



[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]



[7MW 시험체 TMD의 이송거리(추가질량)]

(3) 정현파 소인 가진 성능 평가 결과

(가) 비 제진된 시험체에서는 구조물의 고유진동수 범위에서 공진현상으로 인한 큰 가속도 응답을 나타냄.
(나) 모든 실험 결과를 보면, 고유진동수 범위 구간에서 가장 높은 진동저감 효과를 볼 수 있으며, 진동효과는 그 범위를 벗어나면서 작아짐.
(다) 이 저감효과는 풍력터빈타워의 진동 모드인 1차에서 진동을 낮추려는 본 연구의 목적에 부합함.

바. 풍진동 시험

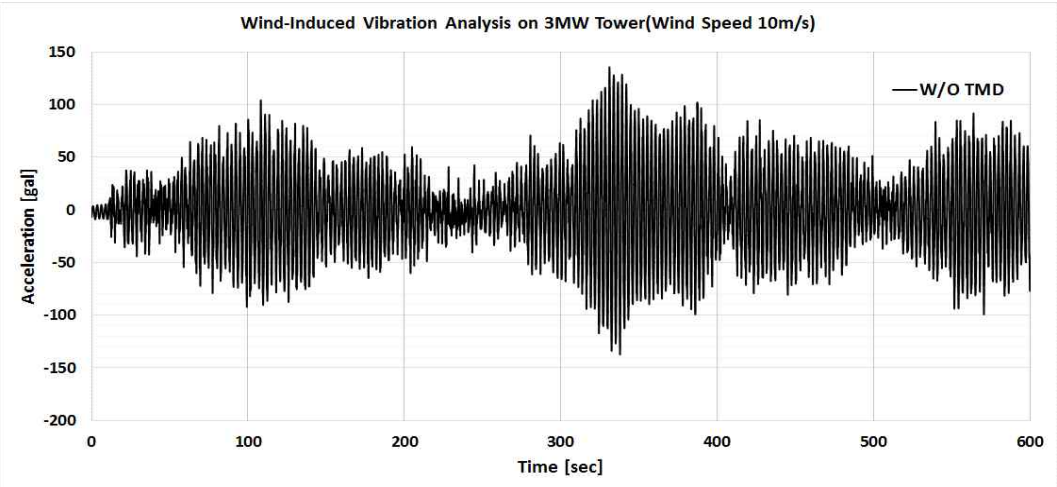
(1) 실험 개요

(가) 풍속 10m/s, 15m/s, 25m/s에 대한 시험체의 제진 성능평가를 진행함.
(나) 가진시간은 600sec이며, 각각의 풍속에 대해 1case씩 실험함.
(다) 1축 방향에 대해 실험을 진행함.
(라) TMD 유 · 무에 따른 동적응답을 통하여 저감율을 산출하고 추가 질량 부가 후의 저감율을 구하여 시뮬레이션 해석 값과 비교분석함으로써, 실제 풍력터빈타워의 진동저감 성능을 평가함.

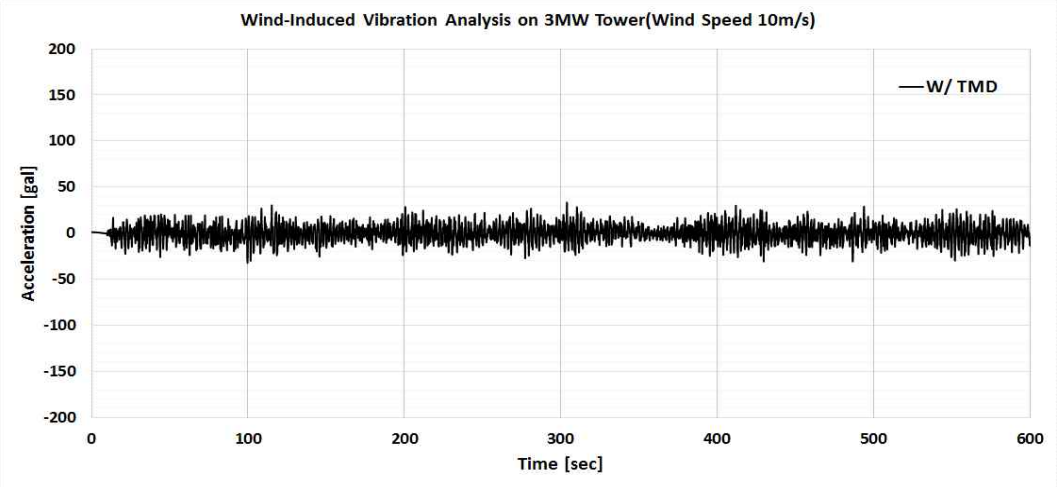
(2) 풍진동 시험 결과

(가) 3MW급 시험체

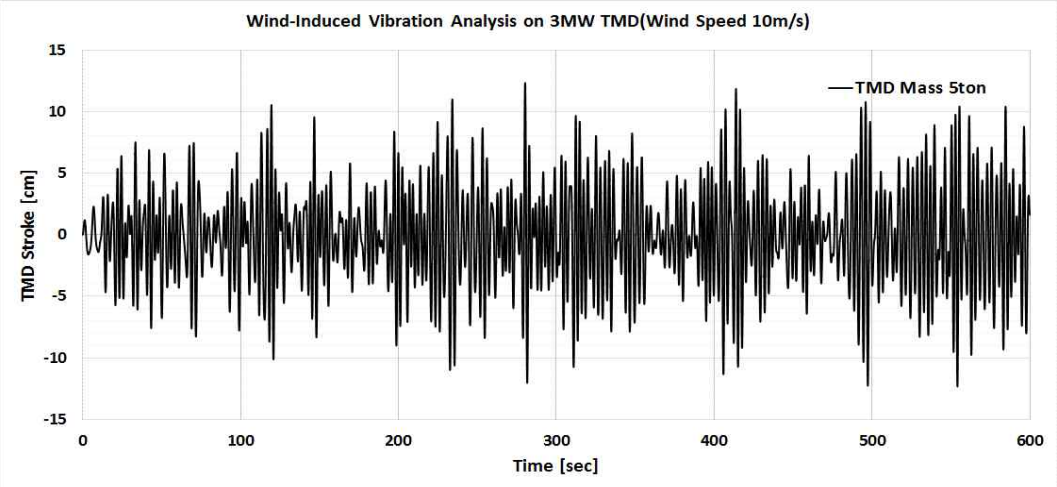
① Wind Speed 10m/s



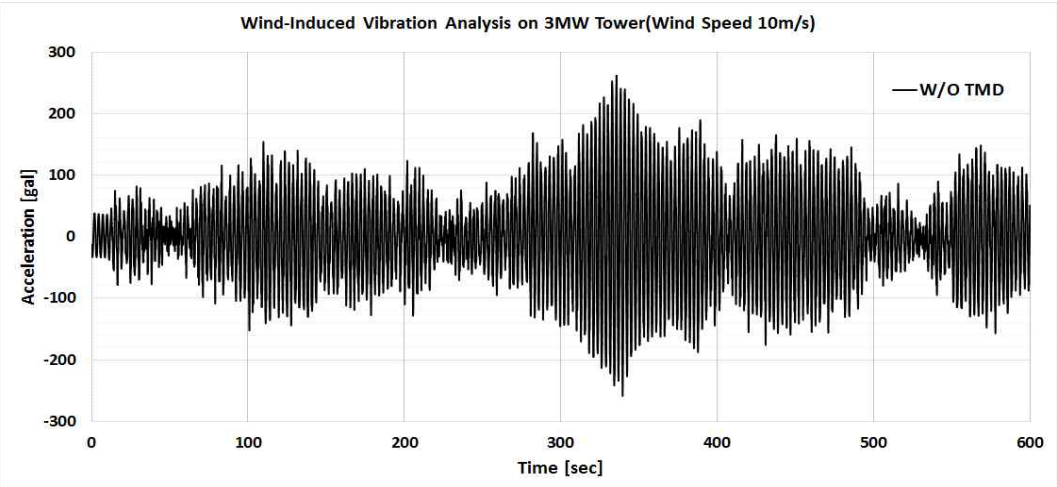
[비 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답]



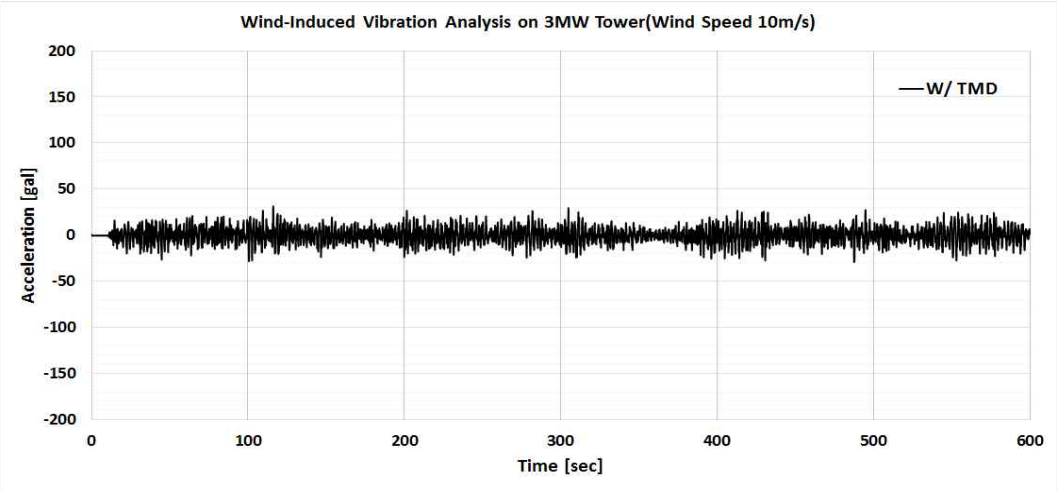
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답]



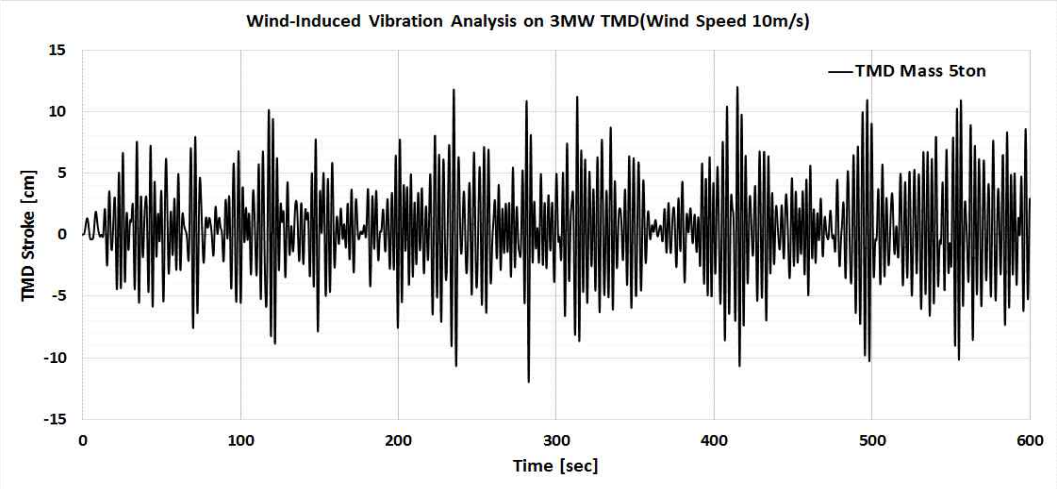
[3MW 시험체 TMD의 이송거리]



[비 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]

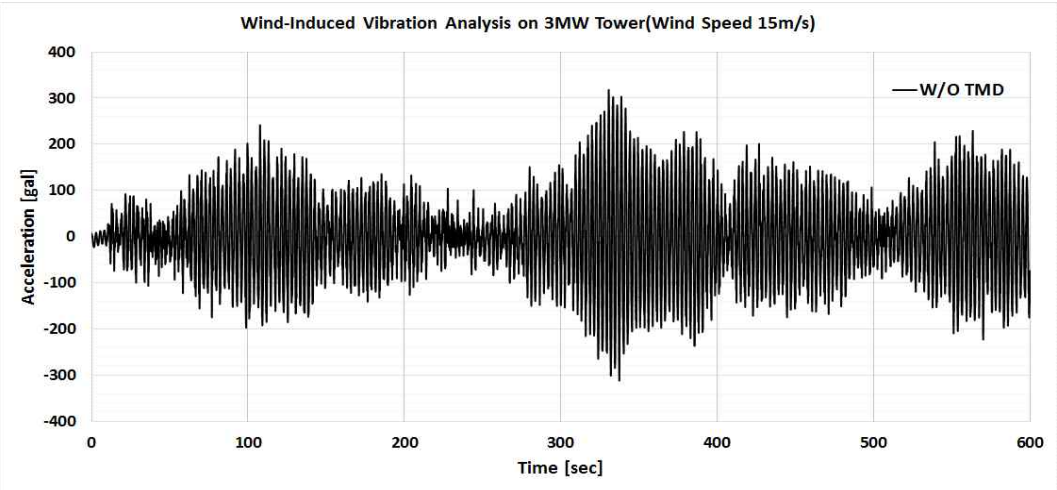


[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]

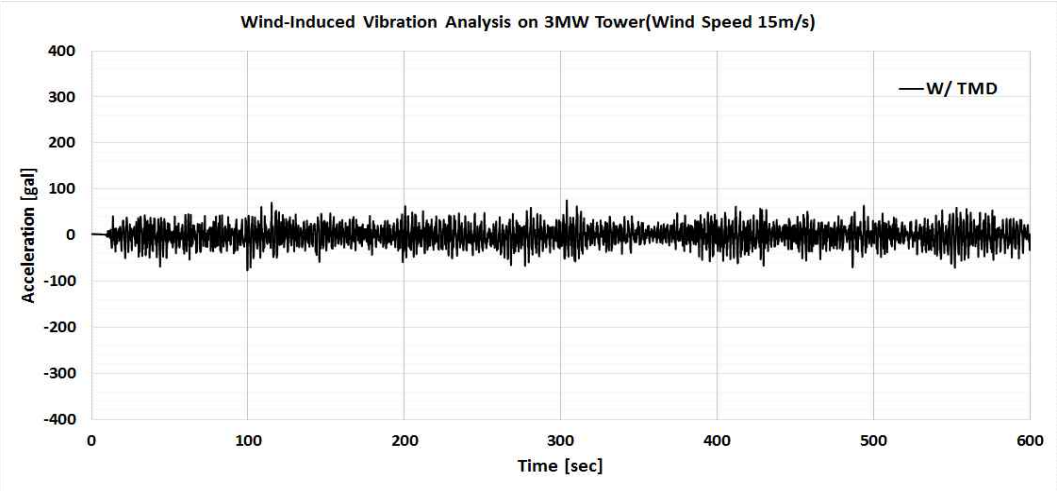


[3MW 시험체 TMD의 이송거리(추가질량)]

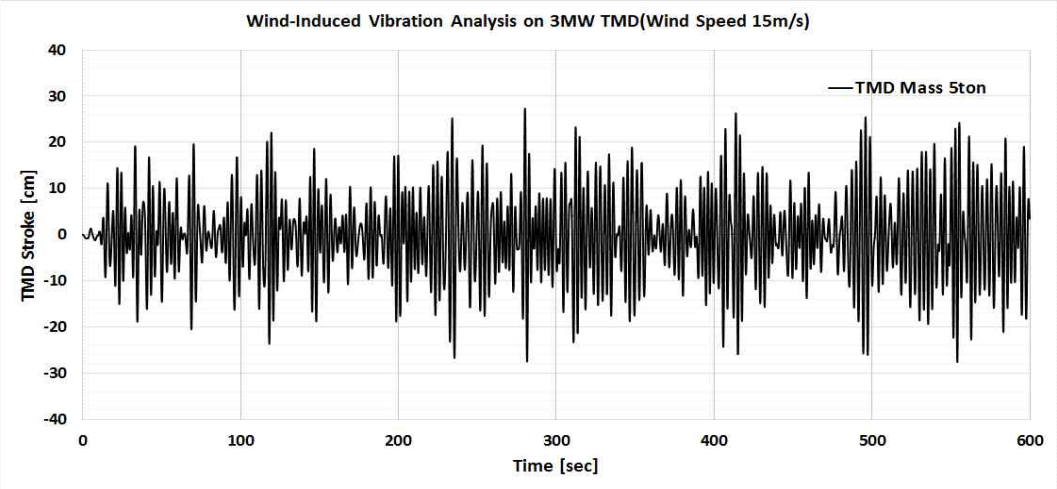
② Wind Speed 15m/s



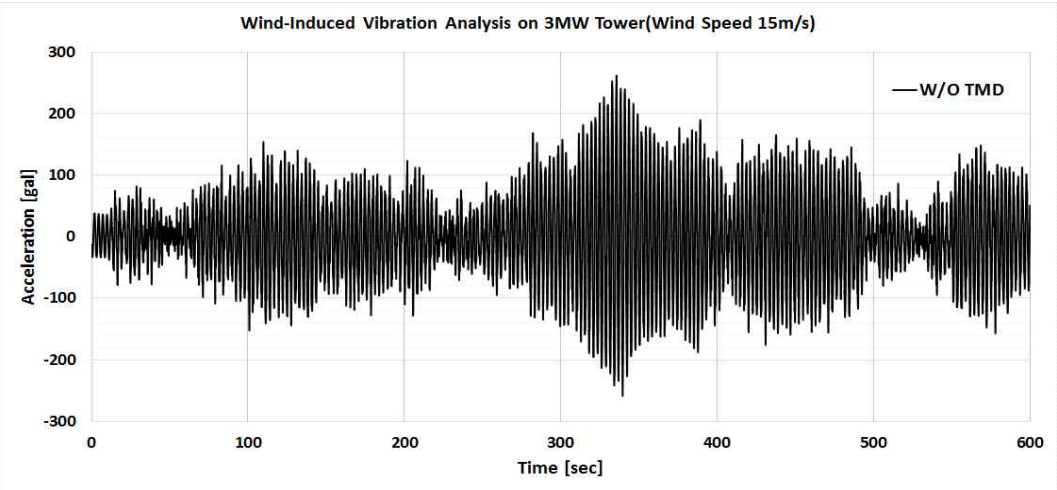
[비 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답]



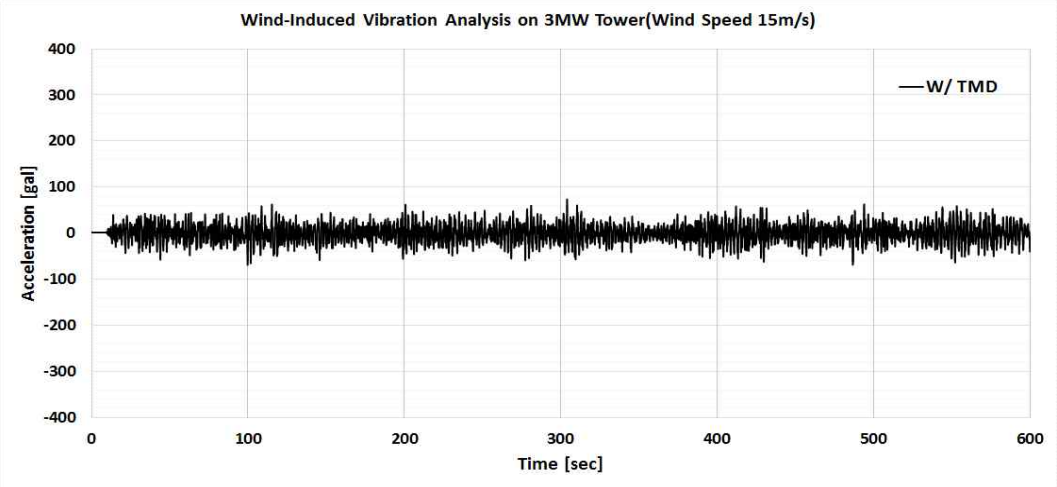
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답]



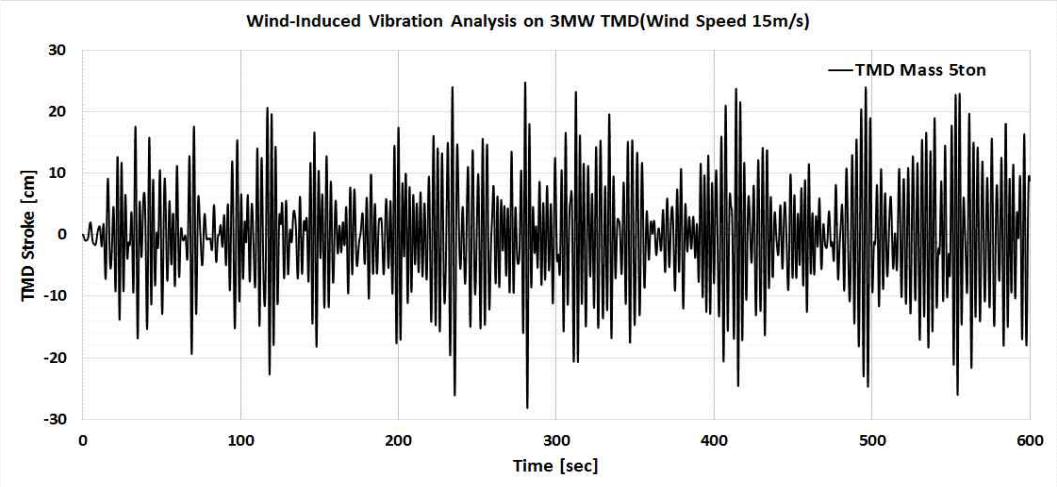
[3MW 시험체 TMD의 이송거리]



[비 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]

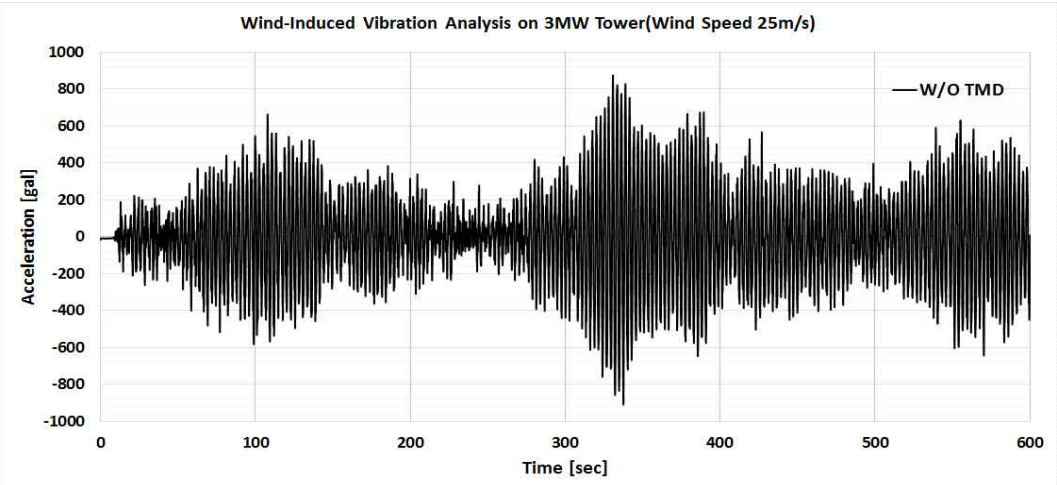


[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]

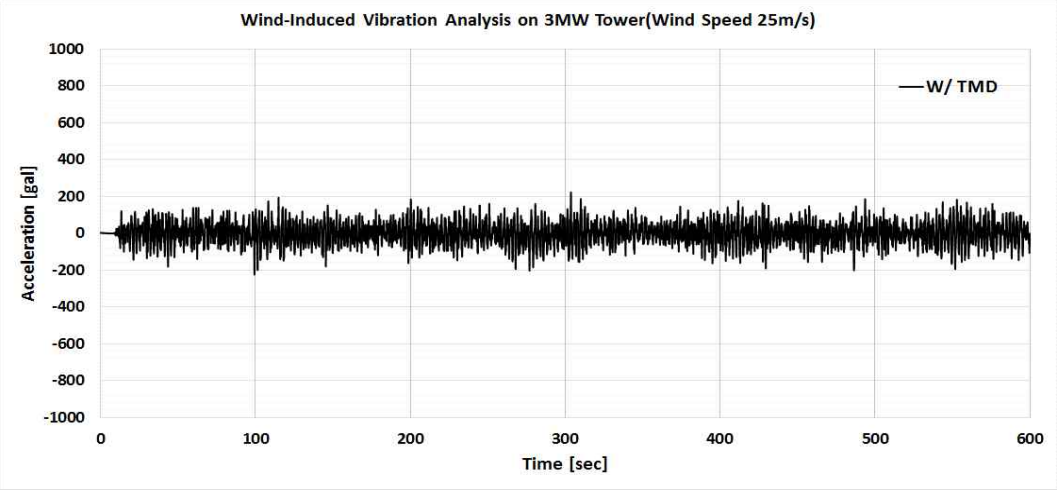


[3MW 시험체 TMD의 이송거리(추가질량)]

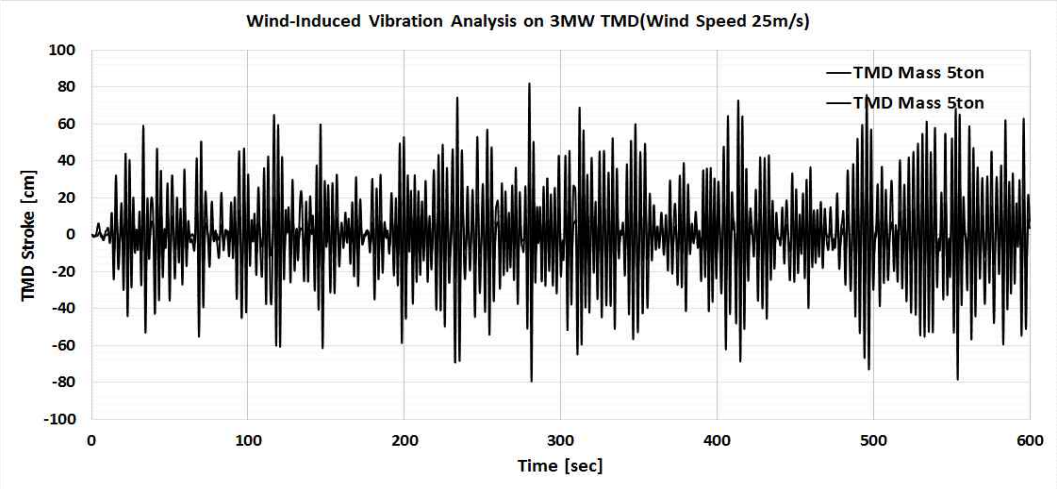
③ Wind Speed 25m/s



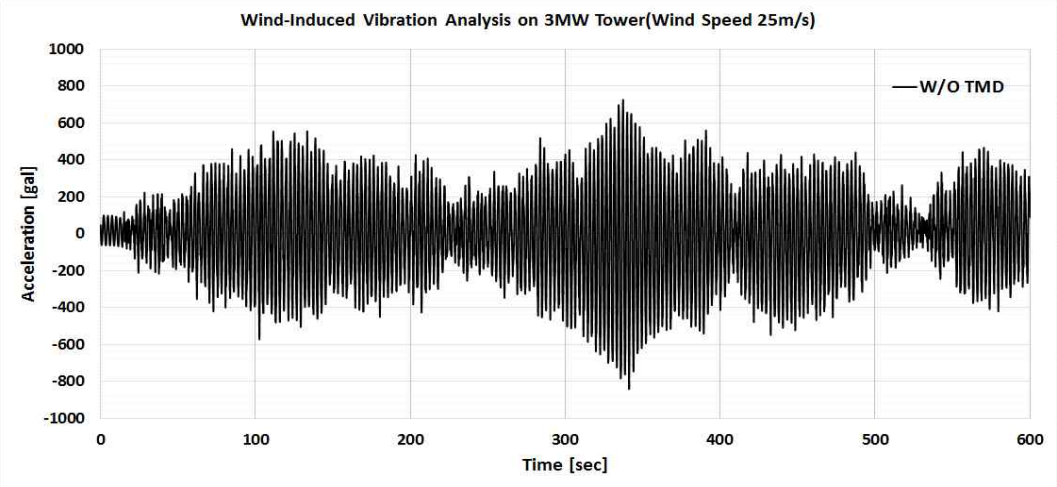
[비 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답]



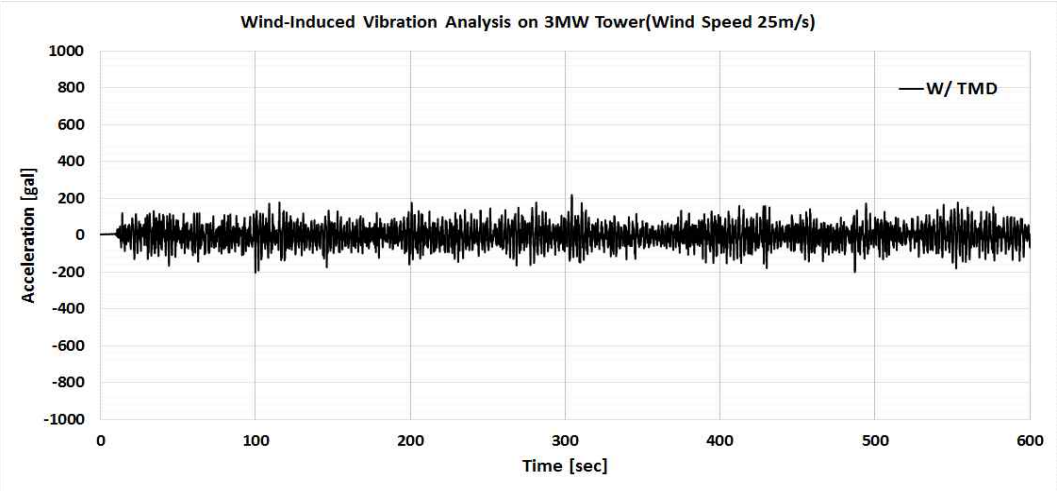
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답]



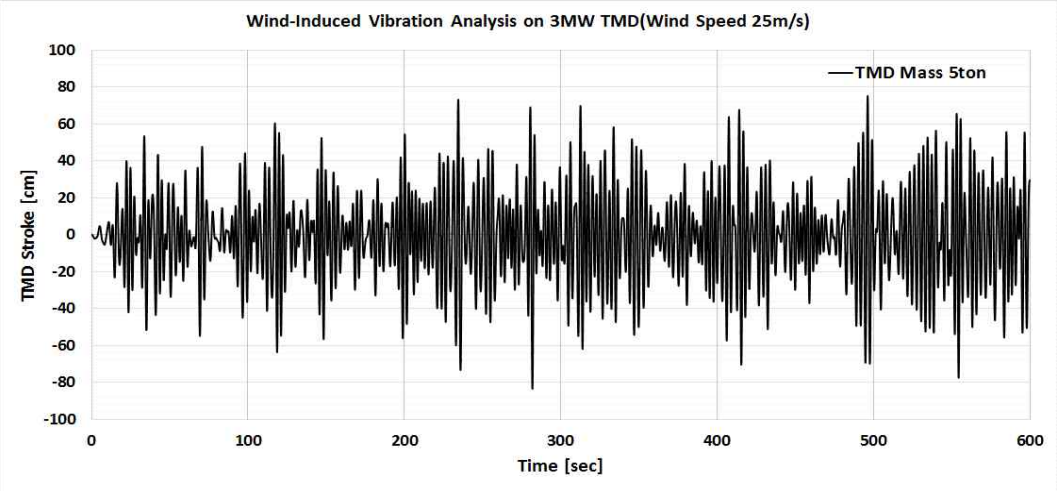
[3MW 시험체 TMD의 이송거리]



[비 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]



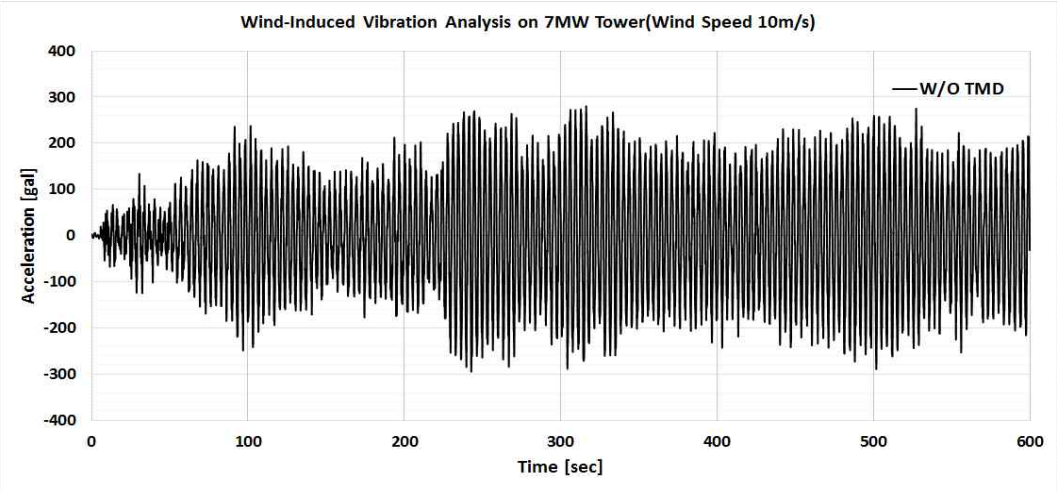
[TMD에 의해 제진된 3MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]



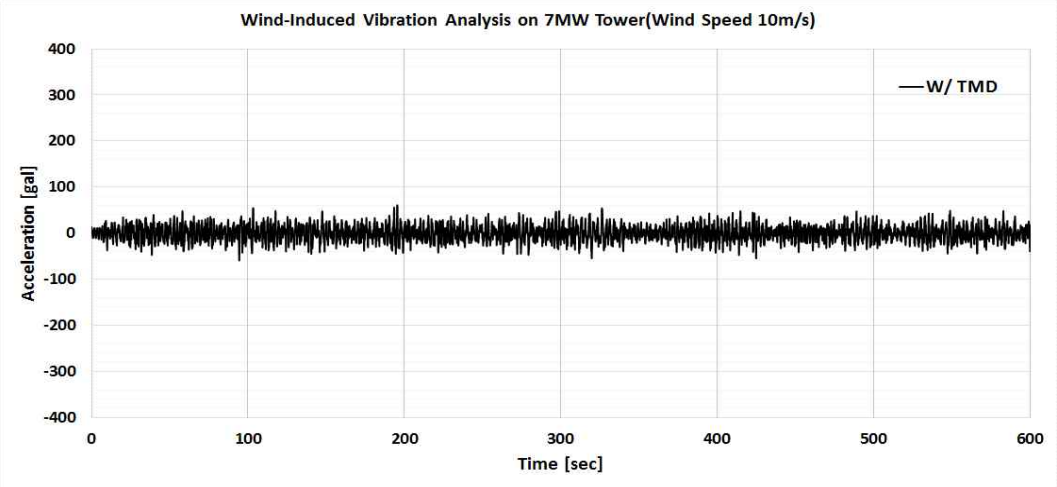
[3MW 시험체 TMD의 이송거리(추가질량)]

(나) 7MW급 시험체

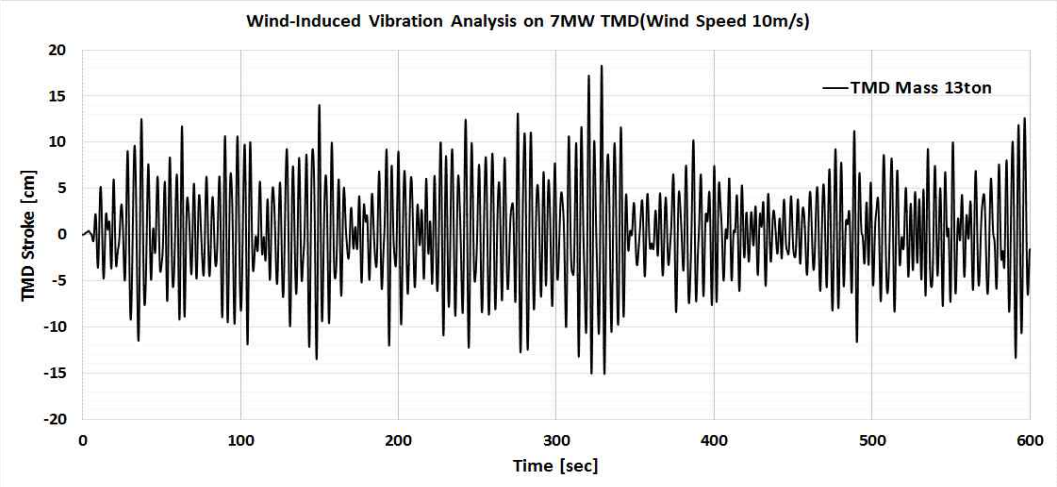
① Wind Speed 10m/s



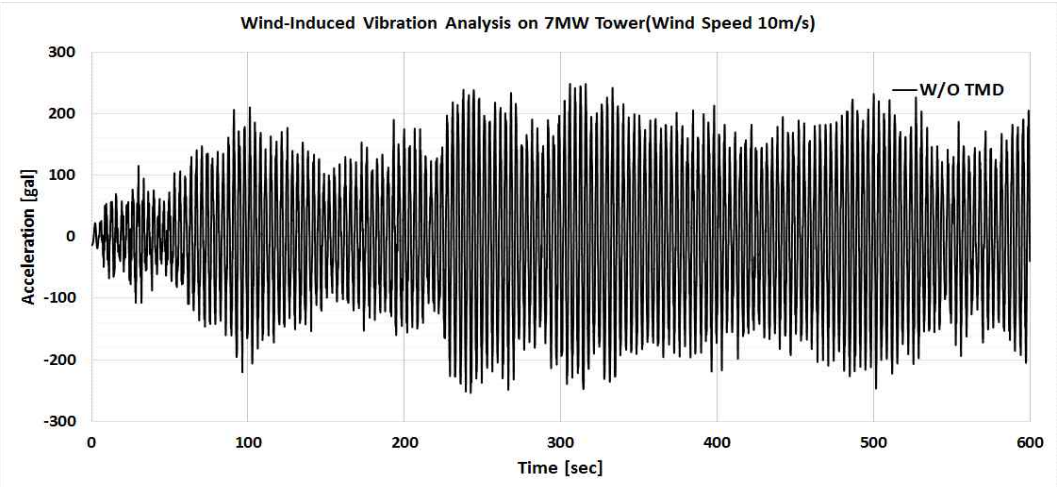
[비 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답]



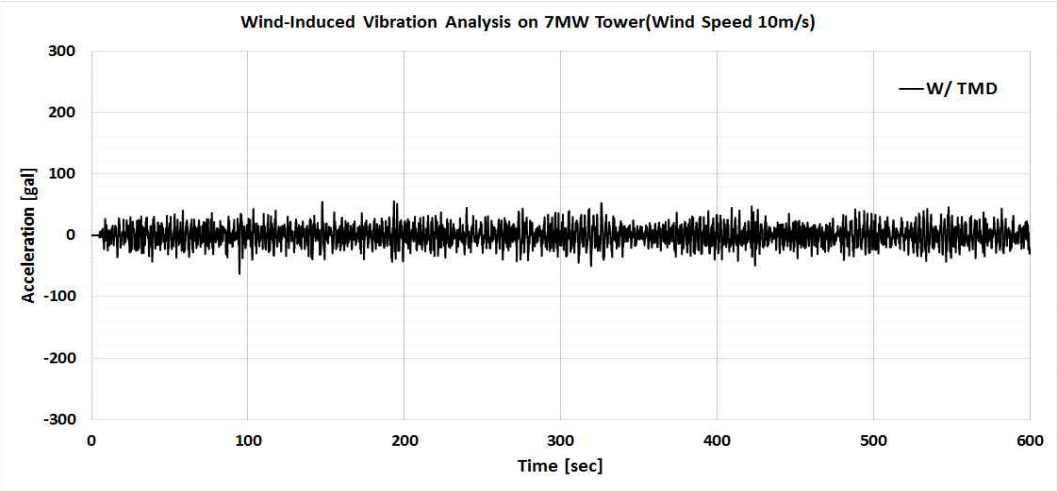
[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답]



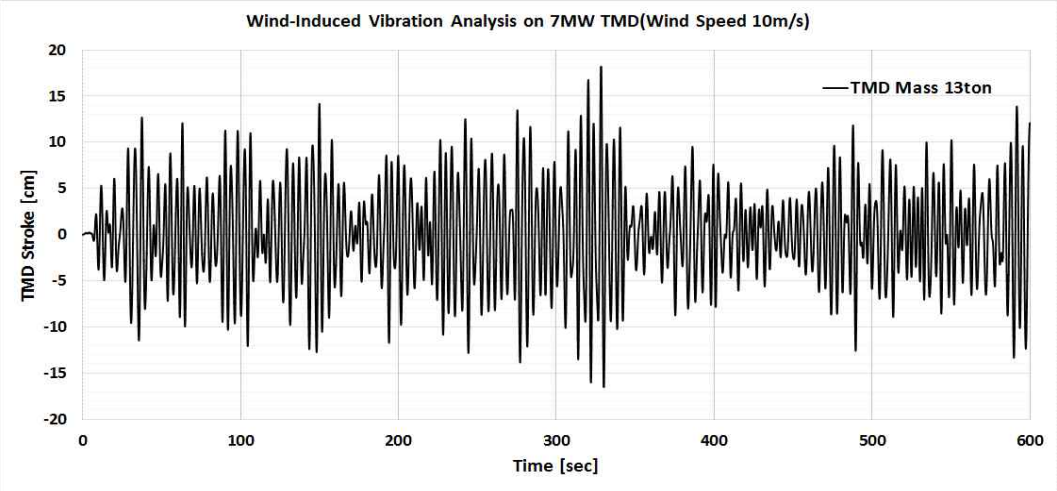
[7MW 시험체 TMD의 이송거리]



[비 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]

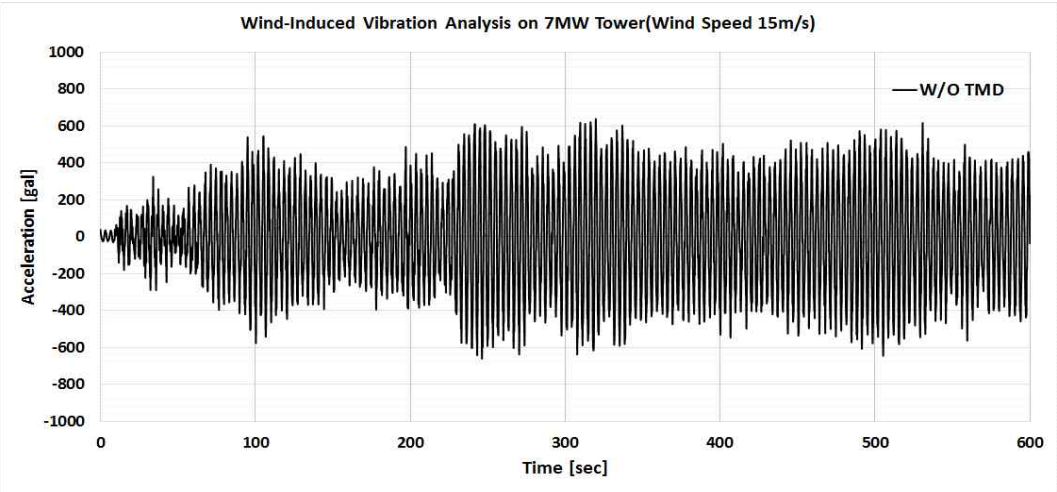


[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]

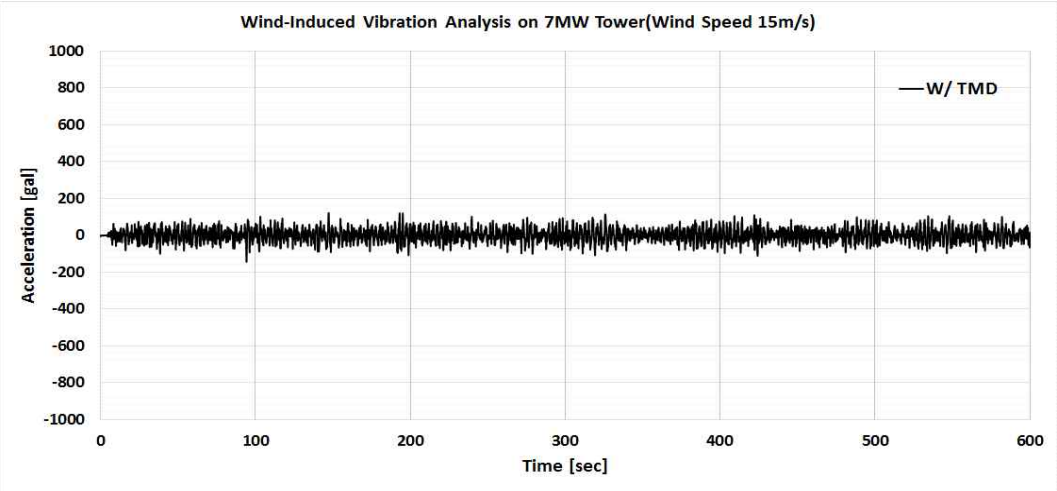


[7MW 시험체 TMD의 이송거리(추가질량)]

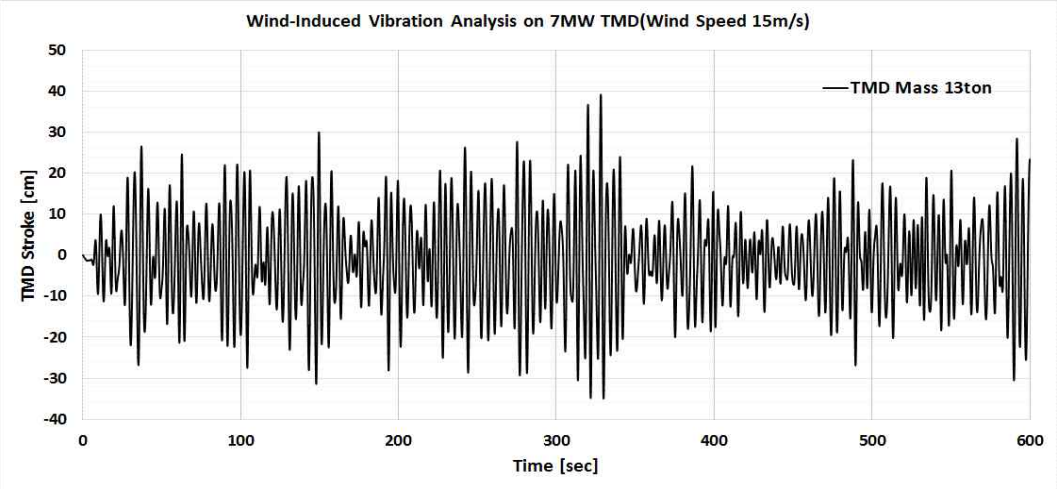
② Wind Speed 15m/s



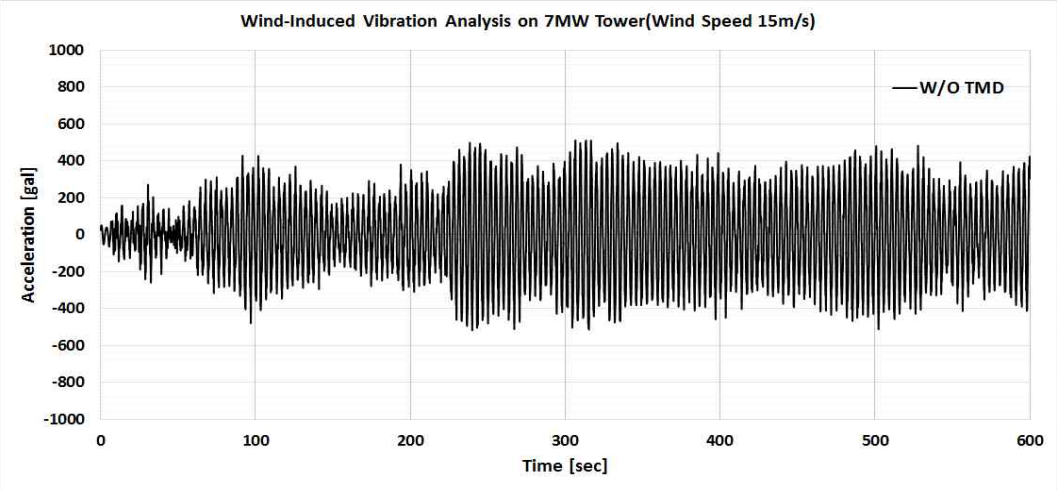
[비 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답]



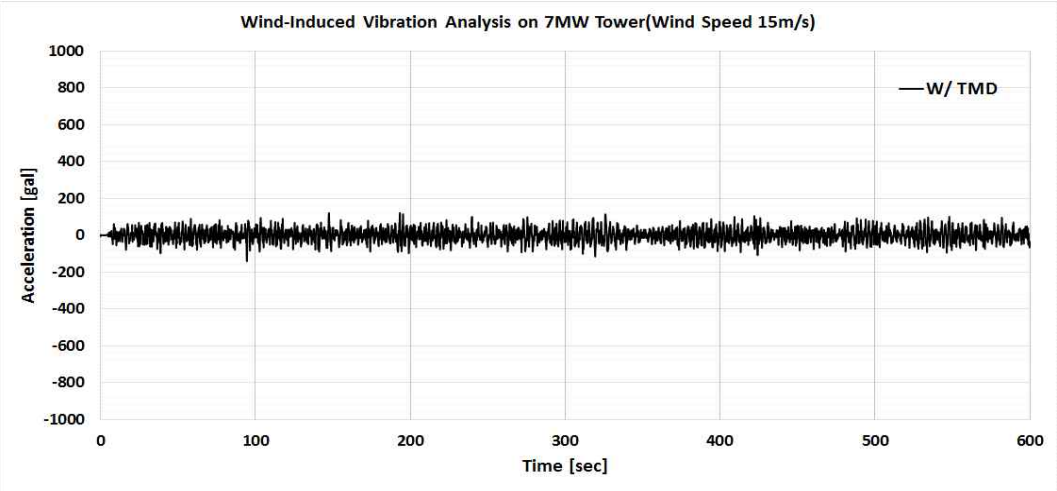
[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답]



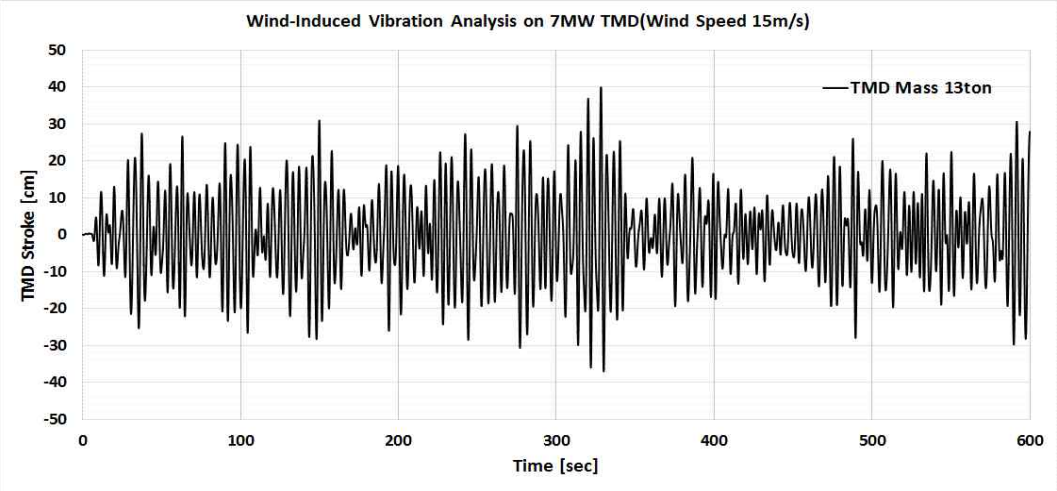
[7MW 시험체 TMD의 이송거리]



[비 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]

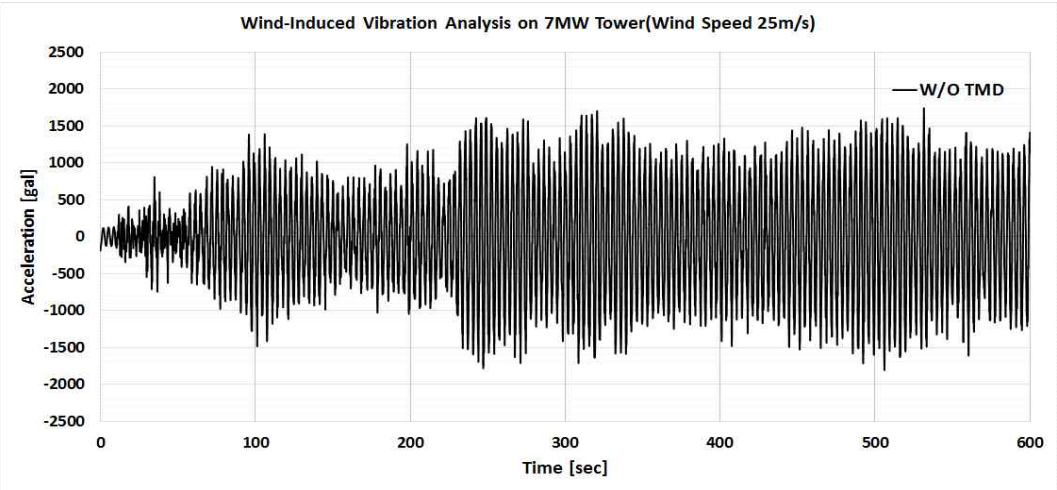


[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]

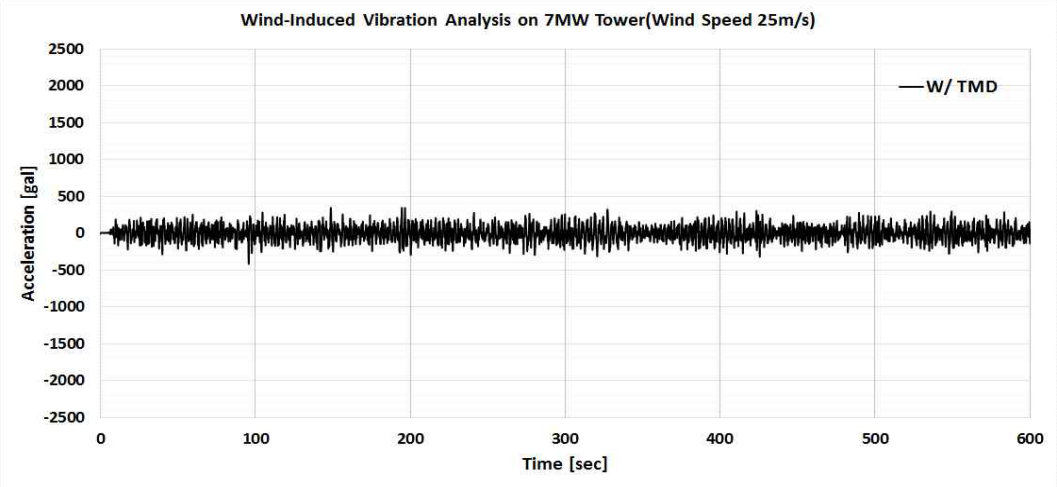


[7MW 시험체 TMD의 이송거리(추가질량)]

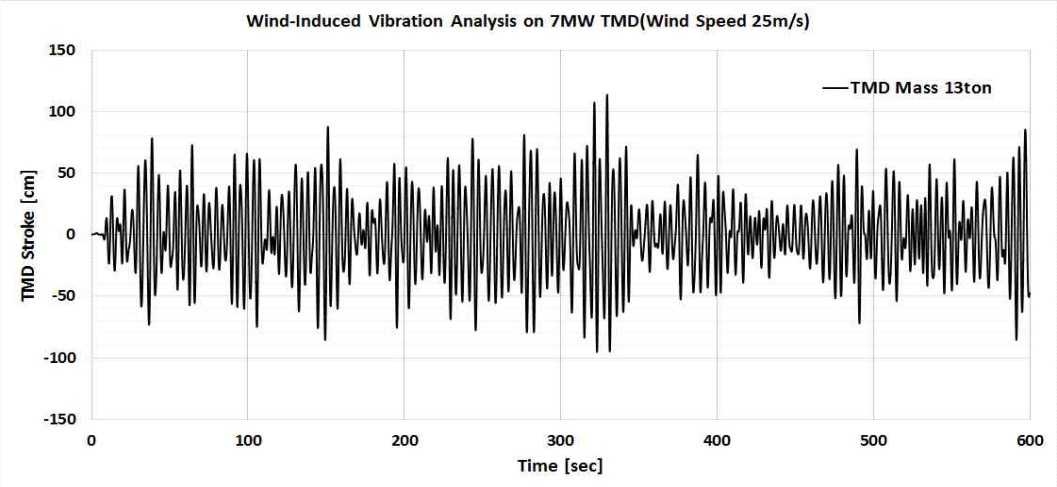
③ Wind Speed 25m/s



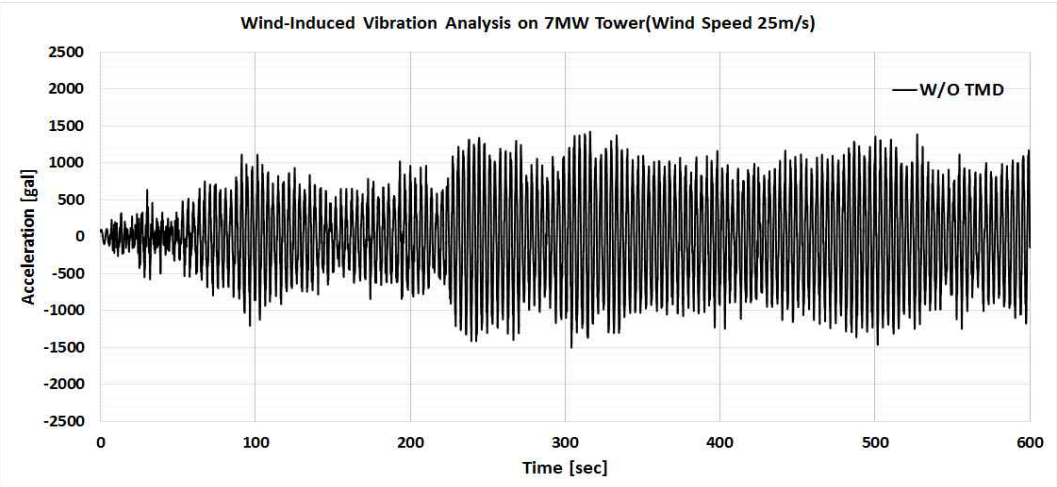
[비 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답]



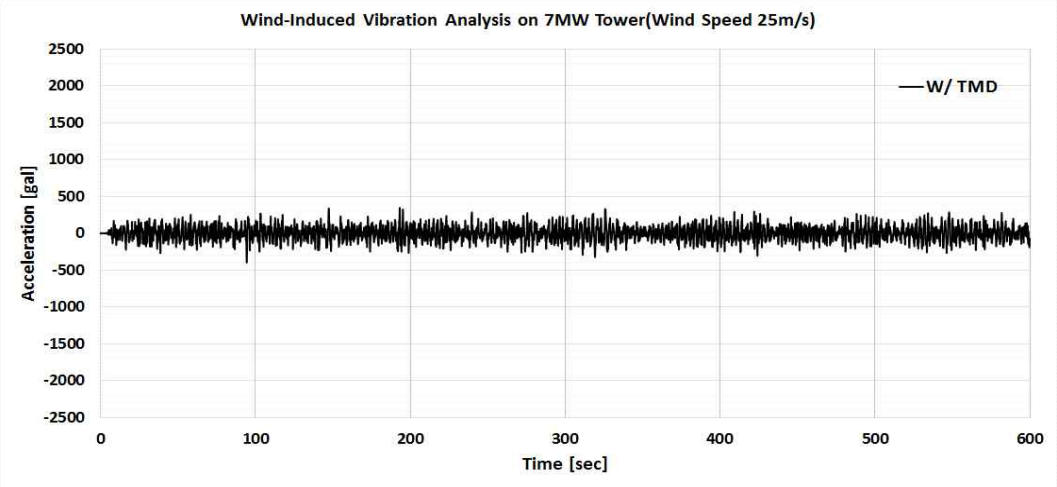
[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답]



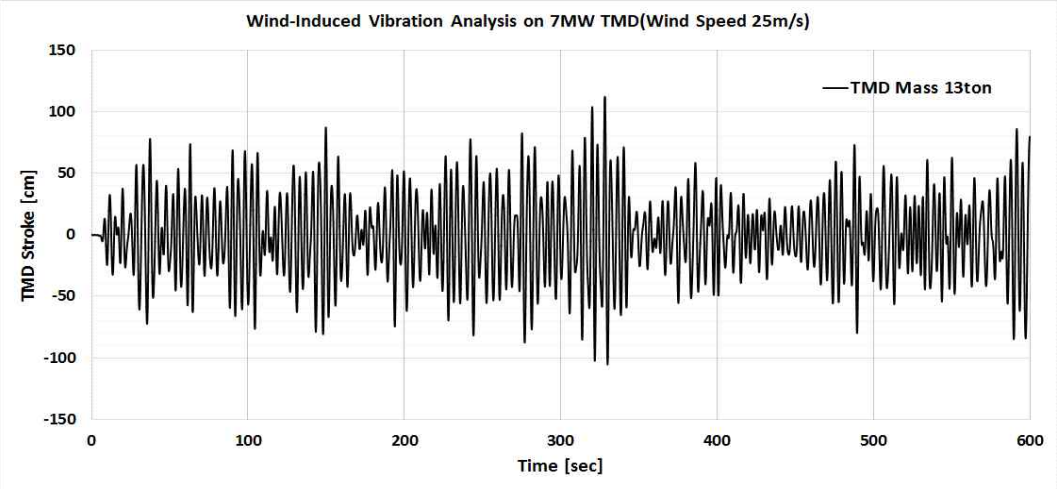
[7MW 시험체 TMD의 이송거리]



[비 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]



[TMD에 의해 제진된 7MW 시험체의 가속도 응답(추가질량)]



[7MW 시험체 TMD의 이송거리(추가질량)]

(3) 풍진동 시험 성능 평가 결과

(가) 3MW 시험체에서의 가속도 Control Ratio는 다음 표와 같으며, TMD 유 · 무에 따른 풍진동 응답이 시뮬레이션 수치해석 응답과 유사하게 평가되는 것을 볼 수 있음.

[3MW 시험체의 가속도 Control Ratio]

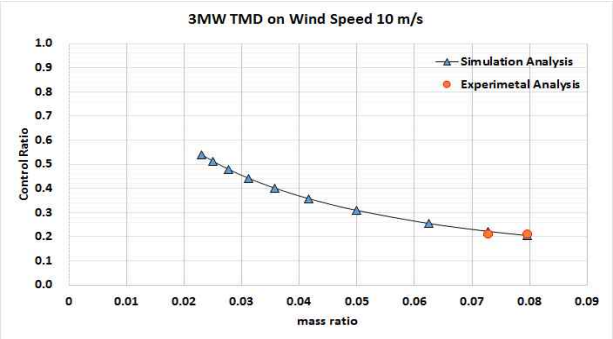
질량유·무	시험 방법	Max. ACC. Control Ratio		
		풍속 10m/s	풍속 15m/s	풍속 25m/s
w/o 추가질량	풍진동 시험	0.2108	0.2126	0.2228
	시뮬레이션 수치해석	0.2046	0.2006	0.1992
w/ 추가질량	풍진동 시험	0.2128	0.2381	0.2128
	시뮬레이션 수치해석	0.2220	0.2179	0.2163

(나) 7MW 시험체에서의 가속도 Control Ratio는 다음 표와 같으며, TMD 유·무에 따른 풍진동 응답이 시뮬레이션 수치해석 응답과 유사하게 평가되는 것을 볼 수 있음.

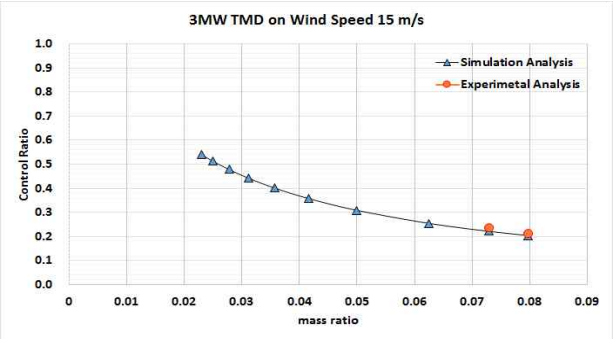
[7MW 시험체의 가속도 Control Ratio]

질량유·무	시험 방법	Max. ACC. Control Ratio		
		풍속 10m/s	풍속 15m/s	풍속 25m/s
w/o 추가질량	풍진동 시험	0.1260	0.1177	0.1250
	시뮬레이션 수치해석	0.1233	0.1261	0.1281
w/ 추가질량	풍진동 시험	0.1302	0.1442	0.1474
	시뮬레이션 수치해석	0.1278	0.1307	0.1328

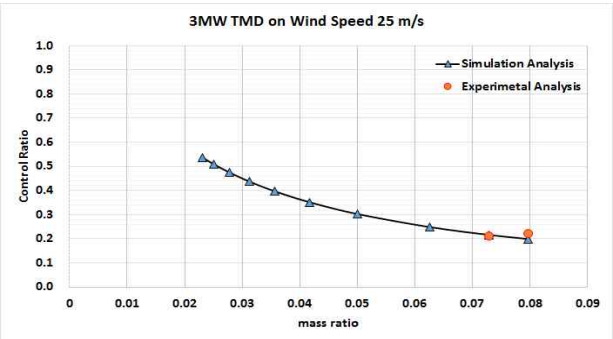
(다) 3MW 및 7MW 시뮬레이션 수치해석을 통해서 실제 풍력터빈타워의 풍진동 응답을 유추해 보면 다음과 같음.



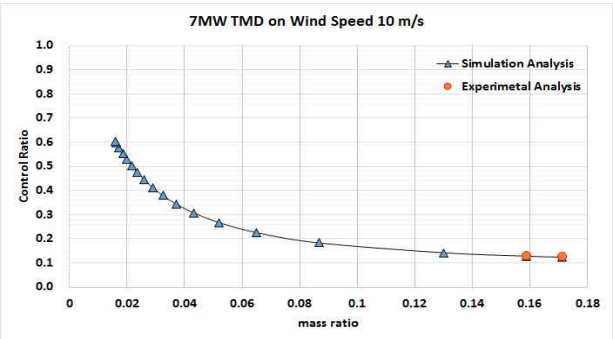
[3MW시험체의 질량비 별 Control Ratio(10m/s)]



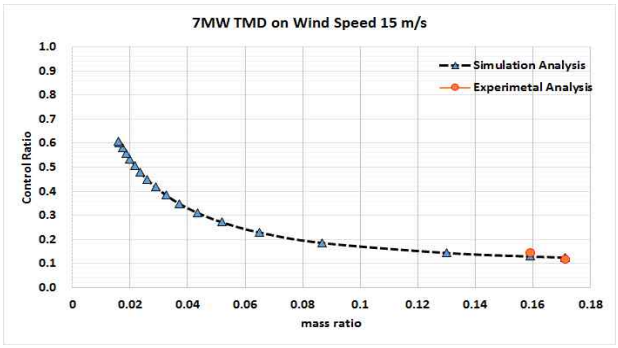
[3MW시험체의 질량비 별 Control Ratio(15m/s)]



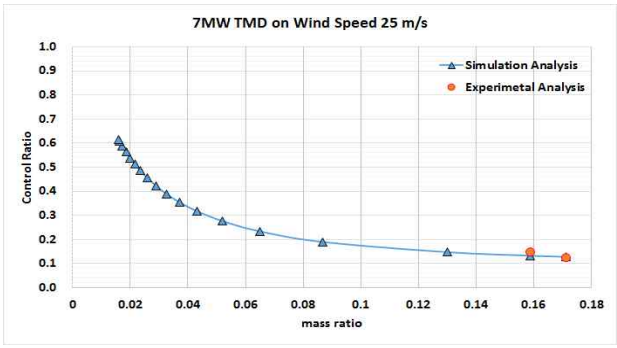
[3MW시험체의 질량비 별 Control Ratio(25m/s)]



[7MW시험체의 질량비 별 Control Ratio(10m/s)]



[7MW시험체의 질량비 별 Control Ratio(15m/s)]



[7MW시험체의 질량비 별 Control Ratio(25m/s)]

(라) TMD 이송거리의 경우, 대체적으로 시뮬레이션 해석과 근사한 값을 보였기에 실제 스케일의 풍력터빈타워에서의 시뮬레이션 해석값을 인용, 본 과제의 목표를 두고 있는 3MW TMD 제한 이송거리 0.4m, 7MW TMD 제한 이송거리 0.6m을 만족할 것으로 판단됨.

7. 제진장치 유지관리 계획

가. 개요

(1) 타워 내에 설치된 제진장치의 유지관리는 타워의 기능성과 안전성을 유지하기 위해 정기점검 및 정밀점검, 긴급점검을 통하여 제진장치 및 타워 최상층 내부 구조물의 손상여부를 확인이 이루어져야 함.
(2) 결함 발생 시, 그 결함 정도에 따라 적정한 보수공법 및 보수시기를 판단하여 신속하게 제진장치가 원활히 작동할 수 있도록 해야 함.

나. 유지관리의 목적

(1) 풍력터빈타워에 설치된 제진장치의 제진 성능 지속성 점검
(2) 제진장치의 구조적 안전성을 위한 결함 및 파손, 부식 등의 점검
(3) 제진장치가 설치된 타워 내부의 균열 및 박리 등의 점검

다. 유지관리의 범위

(1) 풍력타워 내부의 제진장치
(2) 타워내부 구조

라. 점검시기

(1) 정기점검 : 정기점검은 분기별 1회 이상을 실시함.

(2) 정밀점검 : 정밀점검은 1년에 1회 이상 실시함.
(3) 긴급점검 : 긴급적인 문제나 관리 주체가 필요하다고 판단 할 때 또는 행정기관 장이 필요하다고 판단하여 긴급점검을 요청할 때 실시함.

마. 점검항목

(1) 육안 확인

(가) 제진장치의 외관 확인
- 제진장치의 외간, 접합부 볼트 및 핀, 및 고무버퍼, 실리콘오일 등을 육안으로 확인하여 이물질이나 구조적 결함 여부를 파악함.

(나) 최상층 타워 내부 외관 확인
- 최상층 타워 내부의 균열, 박리, 부식, 누수, 사고에 의한 손상 등을 육안으로 확인하여 문제여부를 파악함.

(다) 제진장치의 설치 프레임 외관 확인
- 제진장치를 지탱하는 프레임에 대해 용접의 타락, 볼트의 상태, 프레임 부식 등을 육안으로 확인, 결함 여부를 파악함.

(2) 정밀 확인

(가) 제진장치 케이블 성능 확인
- 제진장치의 질량체를 지탱하는 케이블에 대하여 파손 여부 확인 및 늘어짐, 4개의 케이블의 장력 균등성 등을 확인하여야 하며, 양끝단의 소켓에 대한 결함 여부를 파악하여야 함.

(나) 제진장치 질량체 확인
- 각각의 독립된 질량체의 볼트 결합 안전성 및 질량체 파손, 부식 등에 대해 파악함.

(다) 제진장치 실리콘 오일 확인
- 실리콘 오일통의 누수 여부를 확인해야 하며, 실리콘 오일의 변색 및 이물질, 점성 변화 여부를 파악해야 함. 또한, 실리콘 오일통에 부착되어 있는 고무버퍼의 파손 여부 및 탄성력 손실 등을 확인해야 함.

(라) 프레임 결합 안전성 확인
- 제진장치와 프레임, 타워내부와 프레임의 결합에 대해 문제가 없는지 파악함.

(마) 제진장치 성능 확인
- 제진장치가 성능을 설계 목표치로 유지되고 있는지를 파악하기 위해 제진장치의 동특성을 파악함.

바. 유의 사항

(1) 유지관리를 목적으로 제진장치의 성능을 확인하는 경우, 예상하지 못한 제진장치의 거동으로 인한 안전사고를 예방하기 위해 질량체를 고정 후 점검이 이루어져야 함.
(2) 제진장치 성능 확인을 위해 인력가진을 실시하는 경우, 질량체의 거동방향을 파악하여 안전한 자리를 선정한 후 행해져야 함.
(3) 타워내부는 공간이 협소하고 높은 곳에 위치하고 있으므로 큰 움직임을 금지함.

8. 제진장치의 사업화 추진

가. 풍력터빈타워의 시장 및 산업동향

(1) 국내 풍력터빈타워 시장성

(가) 국내 시장 동향

- 국내 풍력산업은 아직도 시장 형성기로 볼 수 있다. 2013년에는 76MW의 풍력터빈을 신규 설치하여 누적 설비용량 561MW가 되었으나 이는 전세계 30위의 저조한 실적임. 현재까지 설치된 풍력터빈의 60%이상이 외국제품이었으나 최근에는 현대중공업, 한진산업, 두산중공업, 유니슨 등 국산 풍력터빈의 보급이 본격화 되는 것을 청신호라고 볼 수 있음. 정부는 총 발전량 중 풍력발전 비중을 2010년 0.2%에서 2020년 9.4%로 증대시킬 계획이며, 풍력산업을 제 2의 조선산업으로 육성하여 2030년까지 연간 세계풍력터빈 시장 점유율을 현재 0.5%에서 20%까지 확대하는 목표를 설정한바 있음.
  그러나 육상풍력의 경우, 높은 토지이용률로 인하여 개발가능 지역이 매우 제한적일뿐 아니라 각종 환경 규제로 인하여 풍력사업 인허가 문제해결이 쉽지 않은 상황임. 현재 인허가 단계에서 계류 중인 신재생에너지의무공급제도(RSP) 사업규모는 54개 사업, 1.8GW에 이르며, 국산 풍력터빈이 개발되어도 단지개발 인허가 문제로 묶여 운용실적을 조기에 확보하지 못함에 따라 세계시장 진출이 계속 지연될 수 있음.
  해상풍력의 경우, 산업통상자원부에서는 2019년까지 10.2조의 민관 합동투자로 2.5GW 규모의 해상풍력 단지를 개발하여 세계 3대 해상풍력 강국으로의 진입을 추진하고 있음. 그 1단계 100MW 실증사업의 추진을 위해 2012년 말 한국전력, 한국수력원자력 등 발전 6사가 공동으로 한국해상풍력 특수목적법인(SPC)을 수립하여 삼성중공업, 두산중공업, 현대중공업, 효성이 풍력터빈을 지원하고 있음.

(나) 국내 산업 동향

- 국내 대형 조선사는 조선업 업황부진에 따른 사업 다각화의 일환으로 2008년 이후 본격적으로 풍력터빈 제작 기술 도입 및 해외 제작사 인수합병을 통하여 본격적으로 풍력터빈 시장에 진입함. 현재 중공업은 기어박스 제조업체인 독일 야케(Jahnel-Kestermann Getriebewerke GmbH)사를 인수하여 합병하고 국산에 국내 최대규모의 풍력터빈 공장을 건설하여 1.65MW 풍력터빈을 생산하고 있으며, 풍력터빈 설계회사 미국 AMSC사와 전략적 제휴를 체계하고 해상용 5.5MW급 풍력터빈을 공동개발하고 있으며, 현대중공업은 국내

최초로 핀란드 전력회사 피니시 파워에 2MW급 풍력터빈 8기, 미국 뉴욕주에 1.65MW급 풍력터빈을 납품하는 실적을 올렸음.



[현대 중공업의 군산 풍력발전기 공장]

대우조선해양은 2009년 미국 풍력터빈 업체인 드윈드(DeWind)를 5천만 달러에 인수하여 본격적으로 풍력산업에 뛰어들었으나 아직 국내 설치 실적이 없음.

삼성중공업은 7MW급 대형 해상풍력터빈을 개발하여 스코틀랜드에 설치를 하였으며, 인도에 새상 풍력터빈 설치선을 납품하는 등 해상 풍력터빈 설치선 및 하부 구조물 제작 및 시공에 이르는 토탈 해상 풍력 서비스회사를 지향하고 있음.

두산중공업은 3MW급 해상 풍력터빈의 실증시험이 완료하여 DEWI-OCC로부터 국제인증을 취득하였음. 현재 3MW급 이상 해상 풍력터빈은 덴마크 Vestas등 소수 회사만 국제인증 제품을 보유하고 있음. 또한, 한국에너지기술연구원과 협력하여 제주시 북제주군 구좌읍 월정리 공유수면에 5MW 해상풍력실증연구단지를 조성하여 국내 최초의 해상풍력발전을 수행하였음. 효성 중공업은 주력 기종인 2MW급 풍력터빈 이외에도 5MW급 해상 풍력터빈을 개발하고 있으며, STX조선해양은 네덜란드에 하라코산 유럽을 인수한 바 있음.

현재 5MW급 이상 풍력터빈을 제조했던 국내 기업들은 풍력터빈 제조사인 조선업체들이 경영 정상화를 이유로 사실상 대형 풍력터빈의 사업이 중단되고 있으며, 5MW급 이상 풍력터빈에 대해 한국에너지공단 신재생에너지센터로부터 인증을 받은 기업이 한 곳도 없는 실정임. 하지만 현재 세계적으로 신재생에너지 발전사업 투자를 늘리고 있고, 경기가 회복된다면 대형 해상풍력프로젝트 추진 역시 힘을 얻을 것이라는 분석임.

(2) 국외 풍력터빈타워 시장성

(가) 국외 시장 동향

- 세계풍력에너지협회에서 발간한 Global Wind Report Annual Market Update(2015)에서는 국외 풍력발전 시장 동향을 예측하였음.

① 2015~2019년 세계 풍력발전 시장 동향

- 세계 풍력발전 시장의 중기적 전망은 전반적으로 긍정적이지만, 여러 변수에 의해 풍력발전 시장의 변동성이 확대될 가능성도 있는 것으로 분석되고 있음. 그 중에서도 글로벌 경제 회복세, 전력 수요 동향, 세계 각국의 재생에너지 지원 및 환경 보호 정책의 방향 등이 세계 풍력발전 시장의 성장 모멘텀을 좌우할 주요 요인으로 지목되고 있음.

- 주요 리스크 요인들에 의한 변동성 확대 가능성에도 불구하고, 향후 5년간 세계 풍력발전 시장은 비교적 안정적인 성장세를 지속할 전망임. 구체적으로, 올해 세계 풍력발전 시장은 누적 설비용량 기준 15% 내외의 성장세를 기록하면서, 신규 설비용량 증가분이 53 GW를 기록하는 강세를 이어나갈 것으로 예상함.
- 2016~2019년 세계 풍력발전 시장의 연간 성장률은 11~13%에 달할 것으로 전망함. 이는 전세계 누적 풍력발전 설비용량이 2014년 369.6 GW에서 2019년 666.1 GW로 급증하게 됨을 의미하는 것임.

② 2015~2019년 아시아 풍력발전 시장 전망

- 향후 5년간 아시아 풍력발전 시장은 연평균 28 GW의 신규 설비용량 증가세를 기록할 전망이며, 2019년 말 아시아 지역의 누적 풍력발전 설비용량은 2014년 말 대비 약 두 배 증가한 282 GW 내외를 기록하면서, 세계 최대 풍력발전 시장으로서의 위상을 더욱 강화해 나갈 것으로 예상함.
- 2015년 말 발전차액지원제도 종료 후 다소의 성장세 둔화가 예상되지만, 누적 풍력발전 설비용량을 200 GW로 확대하려는 중국 정부의 계획은 당초 예정인 2020년보다 1년 앞당겨진 2019년에 달성될 수 있을 것으로 전망됨. 이는 향후 5년간 중국의 풍력발전 설비용량 증가가 100 GW에 이르게 될 것임을 의미함.
- 정부의 비효율적인 에너지 정책과 정책 안정성 부재가 풍력발전 시장의 강한 성장 잠재력을 약화시키는 주요 장애 요인으로 지적되고 있음에도 불구하고, 인도의 풍력발전 시장 역시 향후 5년간 연평균 5 GW 내외의 신규 설비용량 증가세를 나타내는 등 대체로 양호한 성장세를 기록할 것으로 예상함.
- 일본의 풍력발전 시장은 부진한 에너지 시장 개혁 성과로 인해 성장 잠재력이 약화될 우려가 있으며, 해상 풍력발전 설비 건설에 집중하고 있는 한국의 풍력발전 시장에서도 별다른 성장 모멘텀이 나타나지 않을 것으로 예상함. 반면, 대규모 신규 프로젝트가 진행 중인 대만, 필리핀, 파키스탄, 태국의 풍력발전 시장은 향후 5년간 상대적으로 강한 성장세를 나타낼 것으로 전망함.

③ 2015~2019년 유럽 풍력발전 시장 전망

- 유로존 각국의 재생에너지 지원 정책 축소에도 불구하고, 유럽 풍력발전 시장은 점차 성장 동력을 회복하는 모습을 나타낼 것으로 전망함. 영국의 성장세 둔화가 예상되지만, 유럽 최대 시장인 독일을 비롯하여, 스웨덴, 프랑스, 터키, 폴란드 등이 강한 성장세를 나타내면서 유럽 풍력발전 시장의 반등을 견인하게 될 것으로 예상함.
- 상대적으로 강한 성장세를 나타낼 것으로 예측되는 해상 풍력발전 시장을 바탕으로, 유럽의 누적 풍력발전 설비용량은 2014년 말 134.0 GW에서 2019년 말 204.0 GW로 52% (70 GW)로 증가할 전망이며, 향후 5년간 유럽 풍력발전 시장의 연평균 신규 설비용량 증가 규모는 14 GW에 달할 것으로 예상함.

④ 2015~2019년 북미 풍력발전 시장 전망

-2015-2016년 미국의 풍력발전 시장은 대체로 양호한 성장세를 나타낼 전망이지만, PTC와 같은 에너지 정책의 향방에 따라, 2017년 이후 미국 풍력발전 시장이 예기치 못한 모습을 나타낼 가능성도 있음. 정책적 지원 여부에 따라 재생에너지 산업의 성장세가 좌우되는 모습은 캐나다에서도 동일하게 나타날 전망임.

-정부의 적극적인 재생에너지 지원 정책에 힘입은 멕시코의 풍력발전 시장은 당분간 연평균 2,000 MW 내외의 가파른 설비용량 증가세를 나타낼 것으로 전망함. 2019년 말 북미 지역의 누적 풍력발전 설비용량은 2014년 말 대비 44 GW 증가한 122.1 GW에 달할 것으로 예상함.

⑤ 2015~2019년 중남미 풍력발전 시장 전망

- 브라질이 중남미 풍력발전 시장을 선도하고 있는 현재의 상황은 향후에도 지속될 것으로 판단함. 향후 5년간 브라질의 누적 풍력발전 설비용량은 12-13 GW 급증할 전망이며, 2017년 말까지 풍력발전은 천연가스를 제치고 브라질의 2대 전력생산 자원으로 부상하게 될 것으로 예상함.

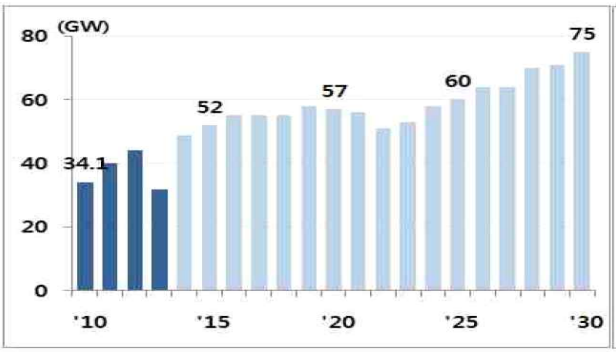
- 브라질 이외에도 칠레, 우루과이, 파나마, 콜롬비아 등지에서 비교적 안정적인 풍력발전 설비용량 증가세가 향후 5년간 목격될 것으로 전망함. 중남미 지역의 누적 풍력발전 설비용량은 2014년 말 8.5 GW에서 2019년 말 33.5 GW로 약 25 GW 확대될 것으로 예상함.

⑥ 2015~2019년 아프리카 및 중동 풍력발전 시장 전망

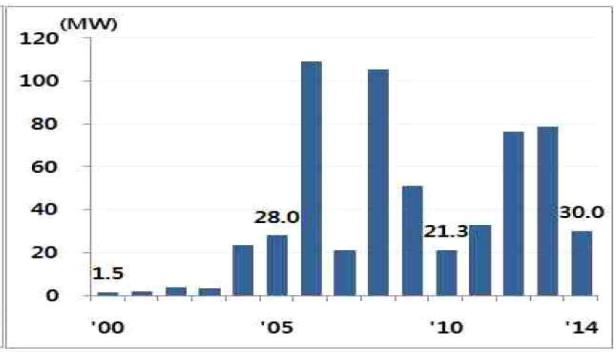
- 높은 잠재력을 보유하고 있는 아프리카 및 중동의 풍력발전 시장은 향후 5년간 성장 모멘텀이 뚜렷이 강화되는 모습을 나타낼 전망임. 남아프리카공화국이 상대적으로 큰 폭의 증가세를 기록할 것으로 예상되는 가운데, 에티오피아, 케냐, 모로코, 요르단, 탄자니아, 세네갈, 사우디아라비아, 이집트에서 진행 중인 풍력발전 설비 프로젝트 역시 이 지역 풍력발전 시장의 강한 성장세를 뒷받침할 요인으로 평가함. 2019년 말 아프리카 및 중동 지역의 누적 풍력발전 설비용량은 총 16.0 GW에 이를 전망임.

⑦ 2015~2019년 오세아니아 풍력발전 시장 전망

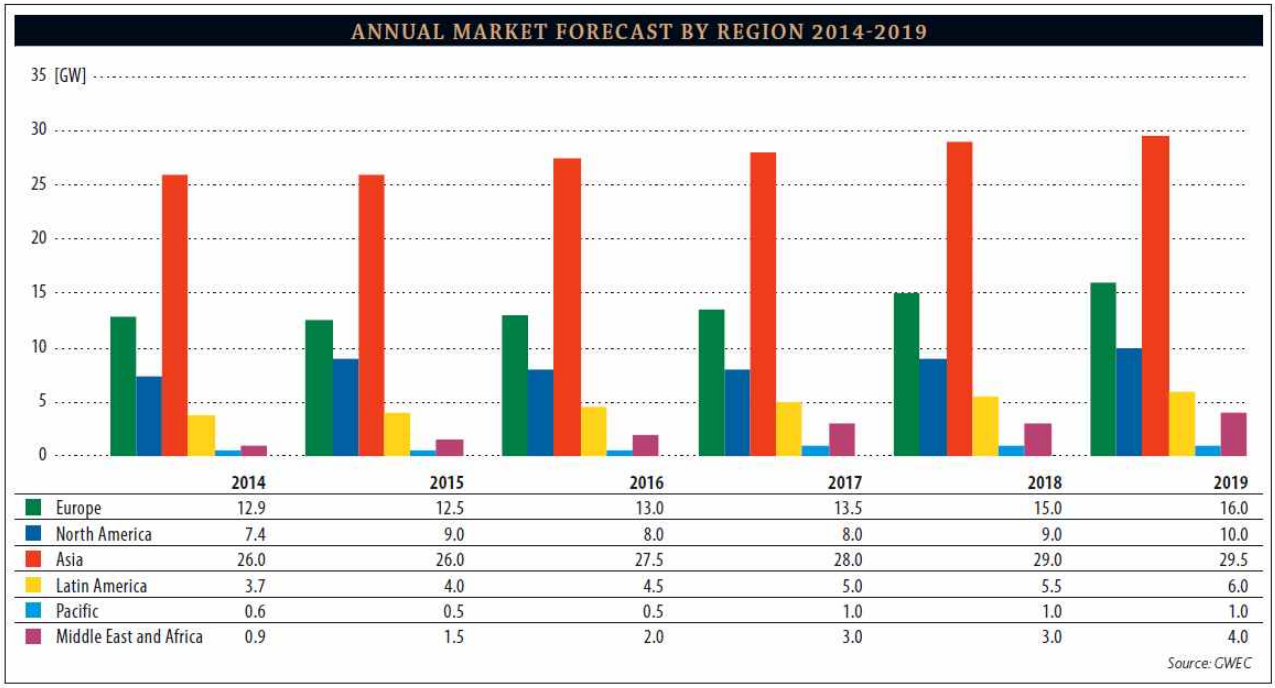
- 호주가 오세아니아 및 태평양 제도 풍력발전 시장의 성장세를 주도하고 있는 현재의 상황이 향후에도 이어질 전망이며, 이 지역의 누적 풍력발전 설비용량은 2014년 말 4.4 GW에서 2019년 말 8.4 GW로 약 4 GW 증가할 것으로 예상함.



[세계풍력 시장규모]



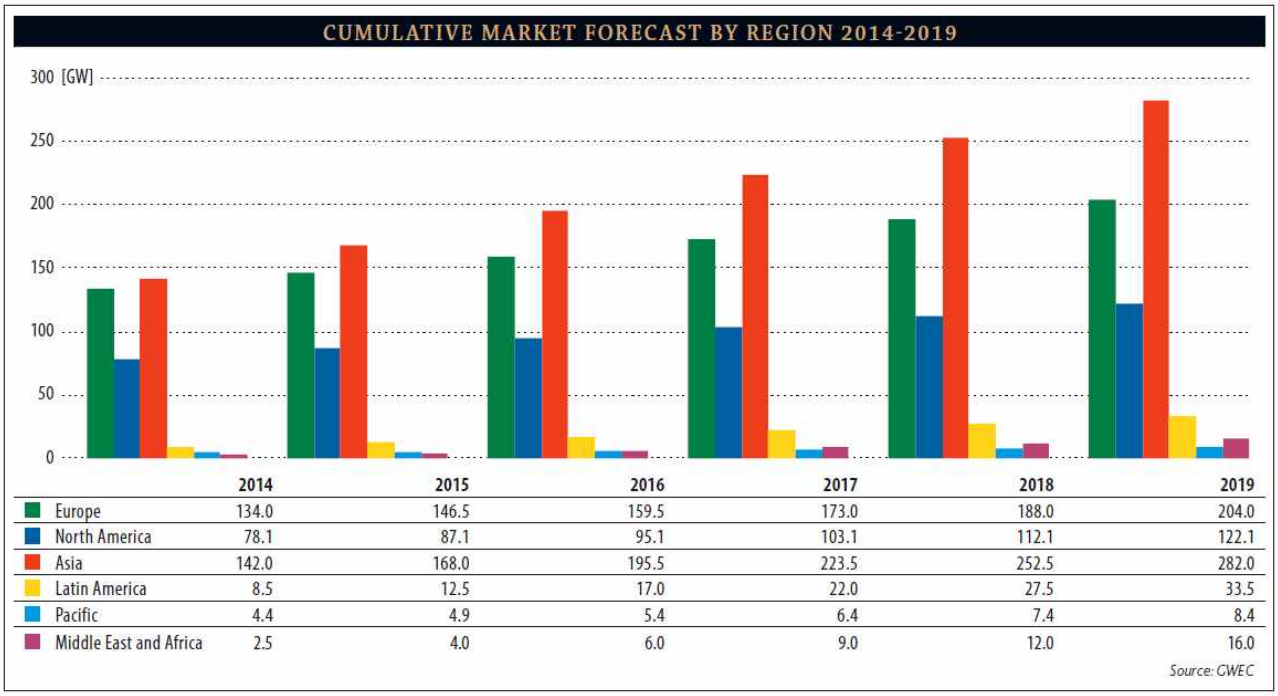
[국내풍력 시장규모]



	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Europe	12.9	12.5	13.0	13.5	15.0	16.0
North America	7.4	9.0	8.0	8.0	9.0	10.0
Asia	26.0	26.0	27.5	28.0	29.0	29.5
Latin America	3.7	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Pacific	0.6	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0
Middle East and Africa	0.9	1.5	2.0	3.0	3.0	4.0

Source: GWEC

[년도 별 세계 지역 풍력발전기 용량]



	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Europe	134.0	146.5	159.5	173.0	188.0	204.0
North America	78.1	87.1	95.1	103.1	112.1	122.1
Asia	142.0	168.0	195.5	223.5	252.5	282.0
Latin America	8.5	12.5	17.0	22.0	27.5	33.5
Pacific	4.4	4.9	5.4	6.4	7.4	8.4
Middle East and Africa	2.5	4.0	6.0	9.0	12.0	16.0

Source: GWEC

[년도 별 세계 지역 풍력발전기 누적 용량]

(나) 풍력터빈타워의 제조사별 분석

(1) 국내 풍력터빈타워 제조사 종류

(가) 대형 풍력발전기 제조업체

-효성, 삼성중공업, 대우중공업, 두산중공업, 현대로템, STX, 유니슨 및 한진중공업

(나) 타워 제작업체

-한라산업개발, 동국S&C, 스패코, (주)한길S&V Wind Tower, (주)금성기공, 유니슨 및 WIN&P

(다) 단조품 제작업체

-(주)태웅, 삼정ENW, 현진, 유니슨, 영월메탈, 서한, 오성 영월드 및 용한BM

(라) 기자재 납품업체

-두산인프라, 현대위아, LS전선, 코어, 연합화스너, KNR, 동양시스템

(마) 요우 및 피치 구동계 제어장치 납품업체

-(주)동성, 서호전지 및 삼양감속기

(2) 국내 풍력터빈타워 보급현황

- 2015년 신규 설치량 224MW으로 누적설치용량은 834MW이며, 2016년에 약 400MW가 추가 설치되어 1GW 시대 진입이 전망됨.
- 누적 설치량 기준으로 국내산 풍력터빈은 약 347MW(41.6%), 국외산 풍력터빈은 약 487MW(58%)를 차지함.

[국내·외 풍력터빈 제조업체별 국내 설치 실적 요약]

구분	제조사	2010년(누적)		2015년 말(누적)	
		설치용량(MW)	점유율(%)	설치용량(MW)	점유율(%)
국내기업	유니슨	11.25	3.0	79.8	9.6
	현대중공업	3.65	1.0	79.65	9.5
	한진산업	4.5	1.2	68	8.2
	두산중공업	-	-	51	6.1
	효성중공업	2.75	0.7	20	2.4
	삼성중공업	-	-	20	2.4
	대우조선해양	-	-	20	2.4
	STX중공업	-	-	7	0.8
	DMS	-	-	2	0.2
	국산 소계	22.15	5.9	347.45	41.6
국외기업	Vestas	281.2	75.3	341.6	40.9
	Acciona	64.5	17.3	64.5	7.7
	Mitsubishi	3	0.8	19.8	2.4
	Gamesa	2.6	0.7	-	-
	Siva	-	-	0.5	0.1
	NPS	-	-	0.4	0.0
	Siemens	-	-	30	3.6
	Alstom(GE)	-	-	30	3.6
	외산 소계	351.3	94.1	486.8	58.4
총 계		373.45	100	834.25	100

- 2011년 이후 국내 풍력터빈 설치는 증가 추세로 5년간(2011~2015) 국내 터빈 158기 325.3MW(국외터빈 51기 135.5MW) 설치함.

(3) 국외 풍력터빈타워 제조사 종류

- 현재(2015년 기준) 세계 시장의 점유율 별로 나열되는 제조사는 Vestas(덴마크), GE Wind(미국), Sinovel(중국), Enercon(독일), GoldWind(중국), Gamesa(스페인), Dongfang(중국), Suzlon(인도), Siemens(덴마크), Repower(독일)

(4) 국외 풍력터빈타워 보급현황

- 2011년 기준 세계 10대 풍력발전기 공급업체의 시장점유율은 다음과 같음.

[표 3] 세계 10대 풍력발전기 공급업체의 시장점유율(2011년) (단위 : %)

순위	제조사(국가)	시장점유율
1	Vestas(덴마크)	12.9
2	Enercon(독일)	7.6
3	Goldwind(중국)	8.8
4	Siemens Wind Power(독일)	7.6
5	Suzlon Group(인도)	7.6
6	GE Wind(미국)	7.4
7	Sinovel(중국)	7.2
8	United Power(중국)	7.0
9	Gamesa(스페인)	6.4
10	Ming Yang Wind Power(중국)	2.9
-	기타	24.6
-	합 계	100.0

※ 주 : 2011년 풍력발전기 설치규모 기준
※ 자료 : BTM Consult ApS

[세계 10대 풍력발전기 제조업체의 시장 점유율(2011)]

- 최근 세계 10대 풍력발전기 공급업체의 시장점유율은 다음과 같음.

[세계 10대 풍력발전기 제조업체의 시장 점유율(2015)]

순위	제조사(국가)
1	Vestas(덴마크)
2	GE Wind(미국)
3	Sinovel(중국)
4	Envercon(독일)
5	GoldWind(중국)
6	Gamesa(스페인)
7	Dongfang(중국)
8	Suzlon(인도)
9	Siemens(덴마크)
10	Repower(미국)

- 현재 글로벌 풍력시장은 상위 Top 10 기업이 선도하고 있음.

- 중국의 Sinovel, GoldWind의 경우, 유럽의 기술을 2002년대부터 도입시켜 풍부한 내수시장을 바탕으로 글로벌 제조사로 성장함.

(5) 풍력터빈타워의 제진장치 설치 현황

- 현재 개발된 해상풍력터빈타워의 제진장치는 실제 해상풍력에 설치된 이력이 세계적으로 전무함.
- 국내의 경우, 대우조선해양, (주)디엔디이, 한국전력공사, 씨에이코리아(주) 등에서 풍력터빈타워의 진동 저감을 위한 특허를 확인하였지만, 실용화된 사례 없음.

(6) 진동제어장치의 사업화를 위한 추진 정책

- 시제품의 시장진출을 위해서는 4P(Price, Products, Place, Promotion)을 실행해야 하며 가격정책, 시제품 혁신, 공급망 구축, 시장 촉진활동을 고려해야함.

(가) 가격정책(Price)

- 가격 책정 방법은 3가지 관점에서 살펴볼 수 있는 바, 시장점유율 극대화, 수익극대화, 기존제품의 시장유지 관점에서 가격이 책정됨.

① 시장 점유율 극대화 : 신제품 출시나 새로운 시장 개척 시 세우는 목표로 시장 가격 반응에 민감하고 생산원가가 판매량의 증가에 따라 감소되며, 잠재적 경쟁을 방지가 가능할 때 적용.
② 이익 극대화: 계획제품의 기술성능이 뛰어나고 수요 및 원가예측이 가능하며 시장 수요가 충분하고 초기 고가격전략이 경쟁 업체들에 반발과 추가적인 경쟁자들을 시장에 유인하지 않는 경우 책정하는 가격전략.
③ 기존 제품의 시장 유지 : 경쟁이 심화되는 시장에 대응하기 위한 단기적인 제품가격 인하 전략.

- 수혜기업 계획제품의 시장진입 가격은 시장 점유율 극대화 가격을 우선적으로 고려해야 함.

① 경쟁기업이 제공하는 제품 또는 장치가 유사한 기능을 제공한다면 경쟁제품 가격보다 낮은 가격으로 출시하는 시장 점유율 극대화 가격 책정함.
② 제품 경쟁력에 자신이 있다면 경쟁사에 비해 높은 가격으로 출시하는 이익극대화를 전략가격 책정이 바람직함.
③ 계획제품의 시장진출 가격 책정 방향은 시장점유율 극대화–> 이익극대화–> 점유제품의 시장 유지 순으로 책정하는 것이 보통의 경우임.

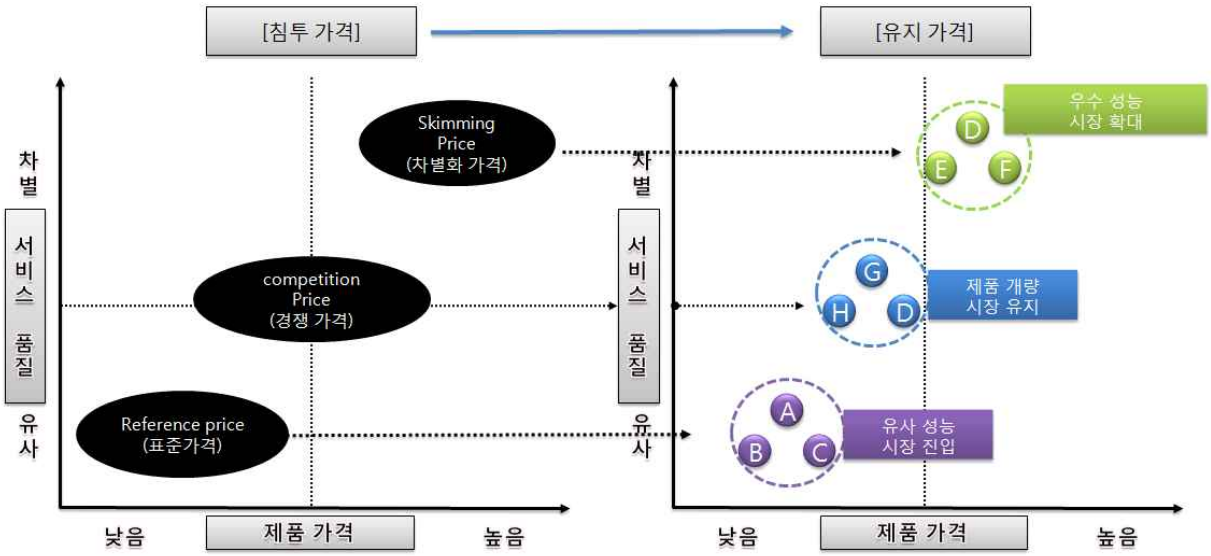


[제품 가격 책정 방향]

④ 계획제품이 조립완제품의 형태로 해외 시장에 진출하는 경우 수출가격이 수입가격보다 낮고, 수출이 수입보다 많은 경우이나, 시장규모가 작고 감소추세 있어 계획제품 가격을 높게 책정할 경우, 시장 진입을 저해하는 요인이 될 수 있음.

⑤ 감쇠장치의 경우에는 시장 규모가 크고 수출이 증가하는 시장으로, 제품 성능이 보장된다면 다소 높은 가격 책정을 고려해 볼 수 있음.

⑥ 제진장치가 조립완제품 또는 부품 수출 등의 공급형태를 떠나, 시장에 보편적으로 적용된 제품, 장치 등이 제공하는 성능 수준이 유사한 경우, 풍력타워 제조 원가를 크게 증가 시키지 않는 범위 내에서 공급 가격을 책정해야 함.



[시제품의 시장 진출 가격 책정 모형]

(나) 계획 제품(Products)

- 계획제품은 기존 제품의 단점을 보완하고, 개량 및 혁신이 수반되어야 함.

① 기존 제품 단점

㉮ 기존 풍력타워의 풍진동 저감은 타워 구조의 변경이 불가피한 경우 존재.

㉯ 해양풍력타워조성 환경적 여건인 수심, 풍향, 파고 등 해양환경의 영향을 많이 받음.

㉰ 풍진동 제어력의 원리가 명확하지 않아, 제품 성능의 정확한 평가 불가.

② 개량 및 혁신 방향

㉮ 해양환경에 따른 고정식, 부유식 등 타워구조물의 형태와 종류에 관계없이 적용.

㉯ 타워의 구조의 변경 없이도 장치 조립 및 설치가 간편하고, 유지보수 용이.

㉰ 해상 대형 풍력터빈타워의 진동 원인 파악, 진동 저감 성능 평가, 저감에 따른 효과 분석에 대한 원격 감시 통제.

㉱ 해상에 존재하는 염분으로 인해 부식성이 빠르게 진행되므로, 부식성을 차단할 수 있는 도료 및 소재적용 → 최근의 경우 카본 소재가 다수 활용.

③ 적용 시장

㉮ 계획제품의 적용 시장은 대형 해상대형풍력단지의 풍력타워에 설치하지만, 제품 개량 및 응용에 따라 적용 시장 확대.

(다) 유통망 구축(Place)

① 풍진동제어장치는 부품기업 → 모듈기업 → 타워제작조립기업 → 대형풍력발전기제작 기업으로 연결되는 공급망(Supply chain)을 구성하고 있음.
② 계획제품은 부품기업과 타워조립기업의 중간에 속하는 모듈제품으로 다음 그림에서 나타난 기업들과의 제품 생산 · 공급 협력이 필요함.



[시제품의 유통망]

③ 유통망 구축을 위한 연관기업과의 교섭은 통상적으로 제품 양산이 확인 가능한 시점에서 활발히 진행되나, 제품 양산 이전에 연관기업과의 사전 물밑 접촉을 통해 업계의 관심도를 사전에 제고시킬 필요성이 있음.

- 유통망 구축을 위한 제휴 활동의 형태는 다음과 같음.

㉮ 기술제휴 : 공동기술개발, 기술교환, 특허공유, 연구 참여.
㉯ 조달제휴 : 생산위탁, 부품조달제휴, 단순외주가공.
㉰ 생산제휴 : 공동생산, 생산위탁. 수탁OEM생산.
㉱ 판매제휴 : 공동브랜드 위탁판매, 판매조건설정.
㉲ 합작투자 : 핵심사업합작투자, 판매합작투자, 생산합작투자, 연구개발합작투자.
㉳ 기능별제휴 : 판매제휴, 생산라이센스, 기술제휴, 연구개발컨소시엄.

- 제휴업체 선정은 다음과 같은 관점을 고려해야 선정해야 함 .

㉮ 협력 업체의 경영 전략, 기업문화, 경영관리시스템 측면에서 양립성 고려.
㉯ 경영자원, 핵심역량, 기술, 생산능력, 유통망 등 파트너 역량 고려.

(라) 시장 촉진(Promotion)

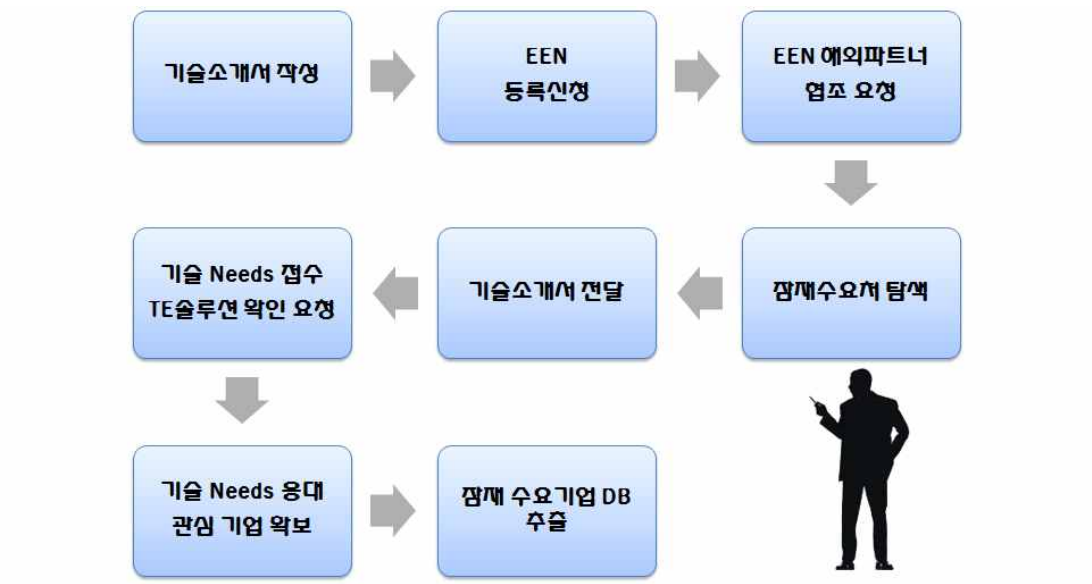
① 유럽의 경우 EEN(www.een.ec.europa.eu) 기술상담회(Brokerage Event) 활용 통해 제휴업체를 탐색하는 것이 바람직함.

② 미국의 경우 미국풍력협회(www.awea.org)등록 기업에서 제휴희망기업 선택 후 미국EEN파트너를 통해 추진.
③ 중국의 경우 엔비전(www.envisioncn.com)이 수혜기업의 계획제품에 관심이 있는 바, 필드테스트 통한 실측실험자료 확보 및 관련 인증 확보 후 추진.
㉮ 전략적 파트너십 구축에 필요한 공동 협력 목표 설정.
㉯ 기술세미나, 기술·사업설명회 개최.
㉰ 한국풍력산업협회(www.kweia.or.kr)를 통한 신제품 홍보.
㉱ 전문적 홍보 브로슈어 제작 후 국·내외 연관기업에 DM발송.
㉲ 기술교류, 공동연구 및 공동개발 등 공급망에 속한 기업과의 기술교류 강화.
㉳ 한국무역협회(KOTRA)의 중소기업해외진출 지원사업 활용.

(7) 해외 수요처 사업화

(가) 해외 수요처 발굴은 EEN(Enterprise Europe Network)을 활용하여, 해외국의 기술사업화컨설턴트와의 협업을 통해 수행할 예정임.
① EEN(Enterprise Europe Network) 은 EU 및 미국 등 세계 46개국이 가입된 기업협력, 기술이전사업화, 공동연구를 위한 세계 최대 기술이전 네트워크.
② EC주관으로 One Stop Service를 위해 2008년 IRC (기술이전사업) 와 EIC (비즈니스협력) 네트워크를 통합 출범한 조직.
③ EU회원국 및 미국 등 50개국, 600여 기술거래기관과 실질적 비즈니스 협업 체계 구축 약 5천명의 기술이전·사업화 전문가 및 1백만 명의 기술고객과 네트워크 구축.

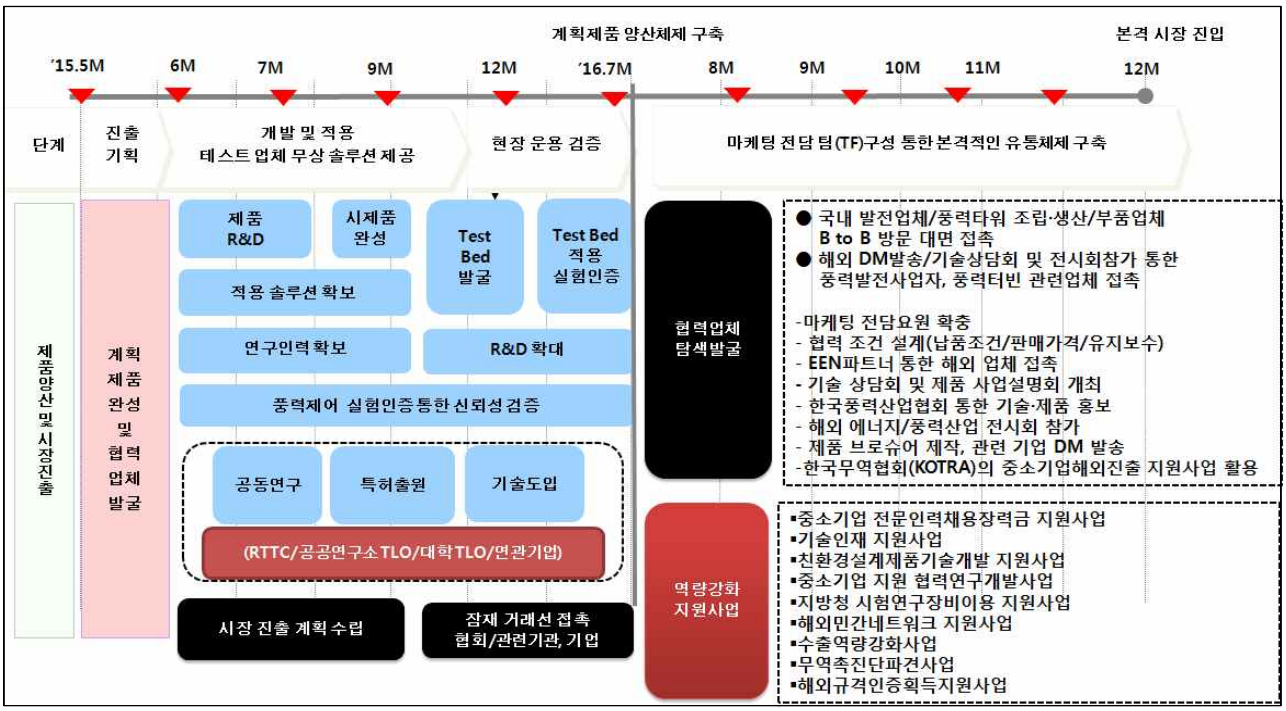
(나) 해외 수요처 발굴은 기술소개서 작성하여 EEN에 등록신청하고, 이를 토대로 EEN해외파트너 통한 잠재수요처 정보를 획득하거나, EEN에 등록된 기업DB를 직접 탐색하여 기술소개서 전달 및 홍보 E-mail 발송 통해 계획 제품의 잠재 수요기업 DB를 추출함.



[해외 수요처 발굴 프로세스]

(다) EEN 기술소개서 등록과 함께, 해외기술무역파트에 기술판촉 전담직원을 배치하여 해외 DB 탐색을 통해 풍력발전 제품에 관심있는 기업 탐색하여 연계・협력 실시.

(8) 진동제어장치의 사업화를 위한 향후 종합 계획



[시장진출 종합 계획표]

9. 연구 수행에 따른 성과

나. 풍력터빈타워의 구조적인 모델 설계

(3) 너셀 및 블레이드 등과 같은 풍력터빈타워 최상부의 복잡한 구조물을 FEM 해석 모델로 재구성하여 설계함.
(4) 3MW급 및 7MW급 풍력터빈타워의 실제 도면과 구조 자료를 토대로 해석적으로 분석이 가능한 풍력타워구조 모델을 구축함으로써, 구조적 동적특성을 포함한 풍하중에 대한 정적・동적응답을 평가할 수 있게 됨.
(5) 풍하중을 각각의 풍력터빈타워에 적합하게 산정함에 따라 이 자료를 이용하여 타워의 구조적인 성능 평가가 가능하게 되었음

다. 제진장치의 구조적인 모델 설계

(1) 각각의 풍력터빈타워의 모드질량, 내부공간 등의 자료를 토대로 최적의 제진장치를 설계함.
(2) 풍력터빈타워에 가장 적합한 제진장치를 설계하기 위해 PTMD를 선정하였으며, PTMD 형식인 단진자 TMD, 역진자TMD, 이중 역진자TMD와 같은 제진장치의 설계에 관한 수치해

석 모델자료를 구축함.

(3) 특히, 내부적으로 공간이 협소한 3MW급 풍력타워의 경우, 최소한의 공간활용으로 최대한의 제진성능을 발휘하는 제진장치를 개발함.

(4) 내부적으로 협소한 공간의 경우, 제진장치의 감쇠를 높임으로써 Stroke를 감소시켜야 하는데 본 풍력터빈타워의 경우에는 높은 감쇠비를 요구함. 따라서, 경제성이 지니고 좁은공간에서 목표하는 감쇠비를 구현하기 위한 실리콘오일 감쇠장치를 개발함.

(5) 제진축에 대해 자동조정시스템을 가진 제진장치를 개발하였으며 성과지표 인 특허등록 계획중에 있음.

라. 풍력터빈타워 시험체 개발

(2) 각각의 시험체와 실험에 활용되는 시험체베이스, 시험체 지지대, 진동가진을 위한 가진기를 개발함으로써, 풍력터빈타워 성능평가 시스템을 구축

(3) 실제 풍력터빈타워의 질량은 현실적으로 실스케일화 시키기에는 어려움이 있으며, 이 문제를 극복하기 위해 내부공간과 동적특성 등만을 실스케일화하여 비교 분석하는 방법을 개발함.

(4) 실제 풍력터빈타워과 제작된 3MW급 및7MW급의 풍력터빈타워의 질량차이가 각각 29%, 9.3% 정도 발생함. 이를 극복하기 위해서 질량 차이만을 제외한 다른 Parameter를 실스케일화 하여 평가된 성능과 질량의 증가에 따른 제진성능의 변화를 보여주는 시뮬레이션 수치해석값을 비교분석하여 일치성을 확인함. 같은 질량에서 실험한 값과 시뮬레이션 값이 일치성을 가지고 있으면 실제 모드질량에서의 시뮬레이션 수치해석 결과값을 본 과제에서 목표로 하는 실스케일의 제진성능이라고 간주함.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 1차년도

연구목표	세부목표	내 용	목표치	달성치	달성도(%)
제진장치 설계	요소기술 분석 및 설계사양 결정	구조검토	1건	1건	100
		풍동실험	1건	1건	100
		기존기술조사	1건	1건	100
	제진장치 설계	축소스케일 설계	2건	2건	100
	풍력타워 시험체 설계	축소스케일 설계	1건	1건	100
제진장치 제작 및 성능평가	제진장치 제작	축소스케일 제작	2건	1건	50
	풍력타워 시험체 제작	축소스케일 제작	1건	1건	100
	성능평가	축소스케일 성능평가	1건	1건	100
성능인증 및 사업화	국제인증(성능 및 품질인증)	국제인증	1건	0건	0
	논문게재	국내외 학술지 논문	논문 1건	0건	0
	특허출원 및 등록	특허출원	특허 1건	0건	0

나. 2차년도

연구목표	세부목표	내 용	목표치	달성치	달성도(%)
제진장치 설계	제진장치 설계	실스케일 설계	2건	2건	100
	풍력타워 시험체 설계	실스케일 설계	2건	2건	100
제진장치 제작 및 성능평가	제진장치 제작	실스케일 제작	2건	2건	100
	풍력타워 시험체 제작	실스케일 제작	2건	2건	100
	성능평가	실스케일 성능평가	1건	1건	100
성능인증 및 사업화	국제인증(성능 및 품질인증)	국제인증	2건	진행중	100
	논문게재	국내외 학술지 논문	논문 1건	1건 게재, 1건 게재 예정 중	100
	특허출원 및 등록	특허출원	출원 1건	1건 출원	100
	제진장치 적용 풍력타워 설계도면	제진장치를 적용한 풍력타워 설계	도면 2건	2건	100
	기술실시 계약	기술계약 체결	계약서 1건	0건	0

2. 참여기관 별 수행 실적

기술 분야	과제 연구내용[목표건수]	참여연구기관[달성건수]
제진 장치 설계	구조/진동 해석[1]	고려대학교[1]
	풍동 실험[1]	티이솔루션[1]
	축소스케일 제진장치 설계[2]	티이솔루션[1], 한국전력기술[1]
	축소스케일 풍력타워 시험체 설계[1건]	비코시스템[1]
	실스케일 제진장치 설계[2]	티이솔루션[2]
	실스케일 풍력타워 시험체 설계[2]	비코시스템[2]
	기존기술사례 및 문헌조사	비코시스템, 델타텍코리아
제진장치 제작 및 성능 평가	축소 스케일 제진장치 제작[2]	티이솔루션[1], 한국전력기술
	실 스케일 제진장치 제작[2]	티이솔루션[1], 한국전력기술[1]
	축소 스케일 풍력타워 시험체 제작[1]	비코시스템[1]
	실스케일 풍력타워 시험체 제작[2]	비코시스템[2]
	축소스케일, 실스케일 성능 평가[각각 1]	비코시스템[각각 1]
성능인증 및 사업화	국제인증[2]	티이솔루션[진행중], 한국전력기술[진행중]
	특허출원 및 등록[2]	티이솔루션[1], 한국전력기술
	논문 게재[2]	티이솔루션[게재예정1], 고려대학교[1]
	제진장치 적용 풍력타워 설계 도면 작성[2]	티이솔루션[2]
	기술실시계약[1]	티이솔루션

3. 관련 분야 기여도

가. 제진장치 설계

(1) 본 연구의 주관기관인 ㈜티이솔루션은 국가연구개발사업 수행 및 자체 연구 개발을 통하여 수동형 및 능동형 진동제어기술을 확보하고 있음.

(2) 고층빌딩, 사장교 주탑, 굴뚝과 같은 타워형 구조물에 적용된 진동제어기술을 본 과제에 응용하여 풍력터빈타워와 같은 타워형 구조물에 적합한 질량형 제진장치의 설계능력을 확보함.

나. 제진장치 제작 및 성능평가

(1) 해외에서는 풍력터빈타워에 제진장치를 적용한 사례가 있으나, 국내에서는 전례가 없음.

(2) 본 과제에 의한 실물크기 풍력터빈타워 및 제진장치를 제작/설치하고, 성능을 검증하여 제작 기술을 확보함.

(3) 이러한 설계 및 제품개발을 통하여 국내는 물론 해외시장에 진출 할 수 있는 초석을 마련함.

다. 성능인증 및 사업화

(1) 현재 진행중인 특허출원이 등록이 되면, 풍력터빈타워용 제진장치에 관한 독자적인 설계/제작기술확보를 공식적으로 인정받을 것으로 사료됨.
(2) 해외의존도가 높은 질량형 제진장치 기술의 국내기술개발로 인한 제진장치 요소기술의 국산화 실현으로 기술료 수입 대체효과 창출할 것으로 기대됨.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

개발된 기술은 국내에서 진행되고 있는 대단위 해상 풍력 단지에 즉시 적용될 수 있는 기술로 주관기관인 ㈜티이솔루션에서 사업화할 예정. 공동연구기관인 한국전력기술은 동해안 해상 풍력 단지 등을 추진하고 있는 기관으로 향후 해상 풍력 타워 설계에 본 과제에서 개발된 질량형 제진장치를 적극 반영할 예정임. 또한, 국내에서 진행되는 해상풍력단지는 물론 해외 해상 풍력타워의 수출에 있어서도 타워의 구조적 안전성 및 수명 증가 측면에서 기술적 우위를 적극 홍보할 수 있어 수출 경쟁력 확보에 이바지 할 수 있음.

1. 기술적 파급효과

가. 풍력터빈타워용 질량형 제진장치 설계/제작/설치/성능시험 기술 확보
나. 제진장치의 설치에 따른 단지배치 최적화 기술 확보
다. 상부 풍력발전기와 수중기초와 안정적인 연계기술 확보
라. 제진장치의 설치를 고려한 해상 대형 풍력터빈타워 설계 최적화 기술 확보
마. 풍력터빈타워 시험체를 이용한 제진장치 성능평가기술 확보
바. 대형 풍력터빈타워의 진동 원인별 진동 추정 기술 확보
사. 해상 풍력터빈타워의 진동저감에 따른 효과 분석 기술 확보

2. 사회/경제적 파급효과

가. 진동저감에 의한 대형 해상 풍력터빈타워의 장수명화
나. 진동저감에 의한 대형 해상 풍력터빈타워의 유지관리비용 절감
다. 진동저감에 의한 대형 해상 풍력터빈타워의 가동률 확대
라. 해상 풍력터빈타워의 대형화를 통한 발전 효율 증대
마. 해상 풍력터빈타워의 설치 가능 수심 확대
바. 신재생에너지의 확대를 통한 화석 연료 사용 절감
사. 신재생에너지의 확대를 통한 대기 오염 감소

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

첨부 ‘해상풍력발전’ : 일본의 해상풍력발전에 관한 전반적인 내용이 수록됨.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

연구목표	세부목표	내 용	보안등급
제진장치 설계	요소기술 분석 및 설계사양 결정	구조검토	공개
		풍동실험	공개
		기존기술조사	공개
	제진장치 설계	축소 및 실스케일 설계	비공개
	풍력타워 시험체 설계	축소 및 실스케일 설계	공개
제진장치 제작 및 성능평가	제진장치 제작	축소 및 실스케일 제작	비공개
	풍력타워 시험체 제작	축소 및 실스케일 제작	공개
	성능평가	축소 및 실스케일 성능평가	공개
성능인증 및 사업화	국제인증(성능 및 품질인증)	국제인증	공개
	논문게재	국내외 학술지 논문	공개
	특허출원 및 등록	특허출원	공개

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

- 해당사항 없음 -

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 일반 업무 구역과 연구실 구역 분리

가. 연구참여인력의 연구수행을 위한 공간과 일반 업무를 위한 공간을 분리

2. 연구실 안전점검 실시

가. 연간 1회 이상 의무적으로 안전검검 실시

나. 안전점검 결과에 의거하여 전기, 소방시설 등 보완실시

3. 참여연구원 교육

가. 매년 1회 이상 실험분야 안전교육 실시

나. 교육내용 : 연구실 안전환경 조성법령 및 유해, 위험요인 관련 외

4. 연구활동종사자 보험가입

가. 연구실 안전환경조성에 관한 법률 제14조와 15조에 의거 의무적으로 가입

나. 기존 가입자 지속적인 갱신 처리

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분(논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부(단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항(SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	지반조건 상호작용을 고려한 풍력발전타워의 공진회피 진동수 산정을 위한 고유진동수 해석 연구	고려대학교	공동	한국산학기술학회논문지		2016.04.30		
2	제작	3MW급 제진장치 시제품	한전기술	공동					
3	제작	7MW급 제진장치 시제품	티이솔루션	주관					
4	제작	동하중 발생기	티이솔루션	주관					
5	특허출원	일방향 제진장치용 제진축 자동조정장치를 구비한 풍력발전 시스템	티이솔루션/비코시스템	주관/공동	대한민국(특허출원)		2016.06.15.(출원일)		

제11장. 기타 사항

- 해당사항 없음 -

제12장. 참고 문헌

강경수, 주석준, 홍성목. (1997). 다중동조질량감쇄장치의 최적설계에 관한 연구. 대한건축학회 논문집 v.13 n.4. pp.341~350.

김동우, 주석준, 권준엽. (2010). 남산 케이블카의 풍진동제어를 위한 진자형 TMD의 적용. 대한건축학회 논문집(구조계) v.26 n.02. pp.11~18.

김두기, 장성규, 김동현, 장상길. Active control of offshore structure for wave response reduction using PNN. 한국해양공학회지 제20권 5호. pp.1~8.

김석현, 남윤수, 은성용. (2005). 750kW 풍력발전기 타워 구조의 진동 특성. 한국소음진동공학회논문집. 제 15권, 제2호, pp. 219~224.

김영민, 주석준, 신승환, 김대영. (2010). 가설단계 사장교의 안전성 확보를 위한 TMD의 적용. 2010년도 풍공학회 학술대회발표집(통권제13호). pp.192~197.

김희수, 장민서, 이윤우, 강영종. (2013). 대용량 풍력발전타워 설계기술 개발을 위한 극한풍속의 예측. 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표논문집. pp.377~379.

강성덕, 홍성목, 황재승, 주석준, 박지훈, 이상현. 준능동제어장치를 이용한 구조물의 진동제어, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집(구조계).

강정화, 이해청. (2011). 풍력산업 동향 및 시사점. 한국수출입은행 해외경제연구소 산업투자조사실.

김윤석, 황재승, 천태삼. (1998) 양양국제공항관제탑의 진동제어 및 사용성에 관한 연구. 한국풍공학회 학술발표회 .

김윤석, 주석준, 박지훈. (2000). 능동질량감쇠장치를 이용한 동적 횡하중에 대한 건축 구조물의 H2 제어. 한국풍공학회 2000년도 학술발표회논문(통권제3호), pp141~146.

김홍진, 주석준, 조지성, 황재승, 김재형. (2010). 초고층 구조물 풍진동 제진장치의 현장성능실험. 2010년도 학술대회발표집(통권제13호). pp.198~202.

이성경, 민경원, 박은천. (2008). TMD와 TLCD를 이용한 2방향 감쇠기의 동적특성. 한국전산구조공학회논문집 제21권 제6호. pp.589~596.

이성경, 민경원, 박지훈. (2009). TLCD와 LCVA의 설계파라미터에 대한 실험적 평가. 한국전산구조공학회논문집 제22권 제5호. pp.403~410.

이성경, 이혜리, 민경원. (2009). 가진입력의 크기에 따른 동조액체기둥감쇠기의 비선형 특성. 한국소음진동공학회논문집 제19권 제11호. pp.1167~1176.

이윤우, 한택희, 장민서, 이정화, 강영종. (2013). 풍력발전타워의 설계 최적화를 위한 단면별 거동평가. 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표논문집. pp.808~809.

이진호, 배경태, 진병무, 김재관. (2013). 기하 비선형과 항력 효과를 고려한 해상풍력발전기의 지진응답해석. 한국지진공학회 논문집. 17권, 6호 pp.257~269.

장성규, 김두기. (2010) Structural vibration control technique using modified probabilistic neural network. 한국전산구조공학회 제23권 6호. pp.667~674.

장민서, 김대혁, 김희수, 이윤우, 강영종. (2013). F.E.M과 풍력발전타워 설계지침을 비교한 풍력발전타워의 거동 분석. 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표논문집. pp.931~933.

조상원, 이인원, 주석준, 김윤석. (2004). 자기유변유체댐퍼 기반의 스마트 수동제어 시스템, 한국풍공학회 학술발표회논문집.

조상원, 주석준, 장동두, 김윤석. (2004). 제2진도대교 가설단계 주형에 대한 제진장치(TMD), 한국지진공학회 추계워크샵발표논문집, pp.134~139.

주석준, 권준엽, 이성경, 신군재, 김현배, 조지성 (2010). 적층고무를 이용한 최소마찰형 TMD의 현장적용. 한국풍공학회 2010년도 학술대회발표집(통권제13호) pp.180~185.

주석준, 김윤석, 건축구조물의 진동제어를 위한 복합형질량감쇠장치의 스트로크 포화 보상. (2003). 한국풍공학회 2003년 학술발표회논문집(통권제 6호), pp.49-54.

주석준, 황재승, 김윤석. (2002). 양양국제공항 관제탑의 동조질량감쇠장치의 제진성능, 한국풍공학회 2002년 학술발표대회논문집(통권제5호). pp.183~189.

주석준, 박지훈, 김윤석, 홍성목.(2000). 능동질량감쇠장치를 이용한 건축 구조물의 H2 진동제어, 한국풍공학회지, 제4권, 제1호, pp.82~89.

주석준, 박지훈, 민경원, 홍성목. (1999). 건축구조물의 지진응답제어를 위한 시스템 식별의 실험적 연구, 한국지진공학회 논문집, v.3 n.4(통권 12 호), pp.47~59.

최준호, 김승준, 장민서, 강영종. (2013). 풍력타워 거동 계측을 위한 GNSS 적용 연구. 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표논문집. pp.256~257.

허재성, 박은천, 이상현, 이성경, 김홍진, 조봉호, 조지성, 김동영, 민경원. (2008). 건축구조물의 2방향 진동제어를 위한 동조액체질량감쇠기. 한국 소음진동공학회 논문집 제18권 제3호. pp.345~355.

허재성, 박은천, 이상현, 이성경, 김홍진, 조봉호, 조지성, 김동영, 민경원. (2008). 실물크기 구조물에 설치된 동조액체질량감쇠기의 성능실험. 한국전산구조공학회논문집 제21권 제2호. pp.161~168.

홍성목, 황재승, 정형일, 주석준, 박지훈, 이상현. (1997). 능동형 질량 가진기를 이용한 건축구조물의 진동제어 실험 연구. 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집(구조계) v.17 n.02. pp.923~929.

황재승 김윤석 홍성목. (2000). 복합형 질량감쇠기가 설치된 타워형 구조물의 동적특성 및 진동제어 성능개선에 관한 연구. 한국풍공학회지. 제4권제1호. pp.90~98, 2000년 6월.

황재승, 주석준, 김윤석. (2004). 슬라이딩 블록 제진장치를 이용한 구조물의 진동제어. 한국풍공학회 학술발표회논문집.

황재승, 김윤석, 홍성목. (2000). 제진장치에 의한 타워형 구조물의 진동제어 성능개선에 관한 연구. 한국풍공학회 학술발표회.

황재승, 김윤석. (2001). 바람에 의한 원형 구조물의 동적 거동 및 진동제어에 관한 연

구. 한국풍공학회 학술발표회.

A. Rodriguez T., C.E. Carcangiu, I. Pineda, T. Fischer, B. Kuhnle, M. Scheu and M. Martin. (2011) Wind Turbine Structural Damping Control for Tower Load Reduction. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 7, Volumn 4. pp. 141~153.

Avila, S. M., de Morais, M. V. G., et al. (2009) VIBRATION CONTROL OF THE SET TOWER AND WIND TURBINE UNDER THE WIND INFLUENCE. 20th International Congress of Mechanical Engineering.

Chandrasekaran, S., Bhaskar, K. et al. DYNAMIC RESPONSE BEHAVIOUR OF MULTI –LEGGED ARTICULATED TOWER WITH & WITHOUT TMD. Proceedings of MARTEC 2010 The International Conference on Marine Technology.

Chung-Bang Yun, Doo-Hoon Kim, Yun-Seok Kim. (1998). Research and Application Activities on Base Isolation and Structural Control in Korea. Multi-lateral Workshop on Development of Earthquake and sunami Disaster Mitigation Technologies and its Integration for the Asia-Pacific Region. Kobe Japan.

Colin. R. (2012). VIBRATION REDUCTION OF OFFSHORE WIND TURBINES USING TUNED LIQUID COLUMN DAMPERS. (Master' s thesis university of Messachusetts Amherts).

Fischer, T. & Kuehn, M. (2010). Importance and Mitigation of Loading on Offshore Wind Turbines on Monopiles Support Structures in Cases of Non-Availability. Proceedings of the Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference.

Hyun Moo Koh, Kwan Soon Park, Won Suk Park, Kyu Seon Park, Yun Seok Kim. (1998). Active Vibration Control of Air Traffic Control Tower at Inchon International Airport under Wind Excitation. 2nd World Conference on Structural Control, June 1998, Kyoto Japan

Hyung-Jo Jung, Dong-Doo Jang, Seung-Woo Lee, Heon-Jae Lee, In-Ho Kim. (2008). Semiactive Control System based on MR Damper for Suppressing Vibration of Stay Cable under Wind Load. Proceedings of The 17th IFAC World Congress, pp.15756~15761.

In-Ho Kim, Seung-Woo Lee, Heon-Jae Lee, Hyung-Jo Jung. (2008). Experimental Validation of Smart Passive System for Cable Vibration Mitigation", Proceedings of The 21th KKCNN Symposium on Civil Engineering, pp.310~313.

International Energy Agency. (2013). Technology Roadmap Wind energy.

J.S. Hwang, Y.S. Kim, H. Kurabayashi. (1999). Serviceability Enhancement of Yangyang. International Airport Control Tower using the Active Mass Damper. 10th International Conference of Wind Engineering, Copenhagen Denmark.

Koss, L. L., Melbourne. W. H. (1995). Chain Dampers for Control of Wind-induced Vibration of Tower and Master Structures, 1995, Vol. 17(9), pp. 622-625.

Li, J., Zhang, Z., Chen, J. (2012). Experimental Study on Vibration Control of Offshore Wind Turbines Using a Ball Vibration Absorber. Energy and Power Engineering, 2012, 4, 153-157.

Negm. H. M., Maalawi. K. Y. (2000). Structural Design Optimization of Wind Turbine Towers. Computers and Structures, 2000, Vol. 74, pp. 649-666.

Sarkar, A. (2013). Offshore wind turbines supported by monopiles – installation technology, a passive damper, and a study on the breaking wave induced vibrations (Doctoral dissertation, University of Stavanger).

Seok-Jun Joo, Jae-Seung Hwang, Yun-Seok Kim. (2001). Robust Control of Wind-induced Vibration for Suwon Observation Tower. The Fifth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Kyoto, Japan. pp.445-448.

Seongkyu Chang, Dookie Kim, Chunho Chang, Sung Gook Cho. (2009). Active response control of an offshore structure under wave loads using a modified probabilistic neural network. J. Marine Sci. Tech. Vol.14.No.2. pp.240-247.

Si, Y., Karimi, H. R., et al. (2013). Modeling and Parameter Analysis of the OC3-Hywind Floating Wind Turbine with a Tuned Mass Damper in Nacelle. Koutnal of Applied Mathematics. 2013. ID 679071, 10 pages

Soon-Duck Kwon, Yun-Seok KIm, Sung-Moom Jung, Sung-Pil Chang. (2000). Passive Aerodynamic Control of Bridge Flutter by Modifying Airflow. The 4th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Its Applications, Bochum Germany

Stewart, G. M. (2012). Load Reduction of Floating Wind Turbines using Tuned Mass Dampers (Master' s thesis, University of Messachusetts Amherts). Tsouroukidissian, A. R. (2011). Wind Turbine Tower Load Reduction using Passive and Semi-Active Dampers. ALSTOM. EWEA 2011.

Wilmink, A. J. Hengeveld. J. F. Application of Tuned Liquid Column Dampers in Wind Turbines. MECAL.

Won-seok Park, Hyun-Moo Koh, Nam-Hee Kim, Dong-Ho Ha, Yun-Seok Kim. (2001). Application and R&D of Active, Semi-Active and Hybrid Vibration Control Techniques for Civil Structures in Korea. 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, Assisi, Italy.

Yun Seok Kim, Jae Seung Hwang, Hyun Moo Koh. (2000). Vibration Control of Air Traffic Control Tower with Hybrid Mass Damper. Symposium on Wind and Structures, Seokwipo Korea.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화 지원사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.