

# 구조물-제진장치 통합 해석 및 설계 기술

## Integrated Analysis and Design Technologies for a Structure with Control Devices

이 상 현\* · 정 란\*\* · 강 경 수\*\*\* · 황 재 승\*\*\*\* · 박 지 훈\*\*\*\*\*

Lee, Sang-Hyun · Chung, Lan · Kang,, Kyung-Soo · Hwang, Jae-Seung · Park, Ji-Hun

### 요 약

본 논문에서는 풍하중을 받는 구조물의 응답을 보다 적극적으로 저감시킴으로써 구조물의 안정성과 사용성을 개선하기 위한 능동제어 알고리즘을 송도 자유무역 지구에 건설중인 포스코건설 사옥에 수치해석을 통해 적용하여 그 효과를 검증하였다. 수치해석에 의한 시뮬레이션 결과를 보면 최대 제어력이 제한이 된 비선형 제어기가 LQR 제어기와 등등한 제어효과를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 제어력의 측면에서 본다면 비선형 제어기법이 더욱 유리한 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서는 구조물과 질량형 제진장치의 상호작용을 고려하여 통합적으로 제진효과를 해석하고, 이를 바탕으로 제진장치를 설계할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 구조물의 모드정보에 기초한 축소모델을 구축하고 제진장치의 설계 및 제진성능 평가를 수행하고 사용성을 평가하게 된다. 전체 소프트웨어는 질량형 제진장치의 설계프로그램과 질량형 제진장치의 종류별 대안설계결과를 등가감쇠비로 표현하여 비교평가하는 두 개의 모듈로 이루어져 있으며 전자는 비제어구조물 해석 모듈 및 TMD, TLD, TLCD, AMD를 대상으로 해석 및 설계를 수행하는 총 5개의 하부 모듈로 구성된다. 본 소프트웨어를 현재 TLCD가 설치되어 있는 인천 송도 국제업무지구의 주상복합건물에 적용하여 TMD, TLD, TLCD, AMD의 대안설계를 실시하였다.

**keywords** : 제진장치, 비선형 제어기, 등가감쇠비, 축소모델

## 1. 서 론

지진, 바람에 대한 구조물의 내진/내풍성능 향상을 위한 연구는 전 세계적으로 광범위하게 이루어져 왔다. (Housner 등, 1997) 구조물 자체의 강성이나 연성을 증대시키는 소극적인 방법에서 탈피하여 구조물에 다양한 제진기술을 적용함으로써 외력의 영향을 제진장치의 에너지 소산으로 변화시키기 위한 연구가 현재도 활발히 진행되고 있다. 그 결과로 지난 30여년 간 미국, 일본, 뉴질랜드, 이태리, 캐나다, 중국 등 많은 나라에서 700 여개가 넘는 구조물에 다양한 종류의 에너지소산장치가 새로운 내진/내풍설계 및 보강개념으로 적용되었으며, 구조물의 사용성 및 안전성 증진을 위한 유용한 장치로 검증되어 그 실용성을 높이기 위한 연구들이

\* 정회원 · 단국대학교 건축공학과 조교수 lshyun00@dankook.ac.kr

\*\* 정회원 · 단국대학교 건축공학과 교수 lanchung@dku.edu

\*\*\* 정회원 · 동명대학교 건축공학과 부교수 koosin@tu.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 · 전남대학교 건축공학과 부교수 jshwang@jnu.ac.kr

\*\*\*\*\* 정회원 · 인천대학교 건축공학과 조교수 jhpark606@incheon.ac.kr

현재 이루어지고 있다.

제진장치 설계 및 제작은 주로 일본에서 이루어지고 있으며 Shimizu, Takenaka 건설과 같은 대형 건설회사들은 고유의 제진기술을 시공기술과 접목하여 자국내/해외시장에서의 경쟁력 확보에 활용하고 있으며, 미쓰비시 중공업, IHI는 제진기술에 대한 설계 및 제작기술을 특화하여 자국시장 뿐만 아니라 타국가의 건설업체와 연계하여 해외에 진출함으로써 시장을 다변화하고 있다. 일본의 1990-2000년 사이의 제진기술 시장 규모는 초기 수동형 제진기술이 차지하고 있었으며 1990년대 중반 고부가가치의 능동형 제진기술시장이 급속히 증가하는 경향을 나타냈고, 2000년대 이후 자국의 시장이 정체되면서 해외시장으로 진출하고 있다. 2000년 이후 중국을 중심으로 초고층 구조물이 증가하면서 제진기술 시장이 아시아 지역으로 이전되는 경향을 보이고 있으나, 제진기술은 미국과 일본의 고유기술에 의존하여 이루어지고 있다.

국내에서는 90년대 이후 진동제어에 대한 이론적 연구를 시작으로 건축구조물의 내풍성능 및 거주성능을 개선하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(이상현 등, 2007). 여러 가지 제진장치 타입에 대한 제어이론과 수치해석을 통한 성능개선을 평가하고, 축소모형에 대한 실험실 수준의 성능검증연구가 이루어지다가 90년대 말 실제 구조물에 적용하는 단계에 이르렀다. 최근에는 초고층 아파트에 대한 제진장치 적용 타성성검토가 적극적으로 이루어지고 있고, 그에 따라 적용사례 또한 증가하고 있는 추세이다.

본 연구에서는 제진장치 설계 및 제작기술의 국내자립을 위한 1단계 연구로 제진장치 적용을 위한 제어알고리즘 개발 및 구조물-제진장치 통합해석 및 설계기술의 진산화를 수행하였다. 제안된 능동제어 알고리즘을 송도 자유무역 지구에 건설중인 포스코건설 사옥에 수치해석을 통해 적용하여 그 효과를 검증하였다. 또한, 구조물과 질량형 제진장치의 상호작용을 고려하여 통합적으로 제진효과를 해석하고, 이를 바탕으로 제진장치를 설계할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다.

## 2. 풍진동제어를 위한 제어알고리즘 개발

구조물에 작용하는 풍하중은 풍동실험을 통해서 구한 풍향별 밀면 전단력(비틀림하중 포함)과 전도 모멘트를 사용하였으며 대상구조물의 형상 및 제원은 그림 1에 나타나 있다. 구조물은 일반 사무소 37층과 3개 층의 펜트하우스 2개의 헬리포터로 구성되어 있으며 각 층은 두개의 병진방향과 한개의 비틀림 방향으로 모델링하였다. 두개 동은 좌우 대칭의 유사한 형상을 가지고 있으며 폭 39.5 m, 깊이 40.5m 이며 층고는 185.6 m로 42층 규모의 구조물이다.

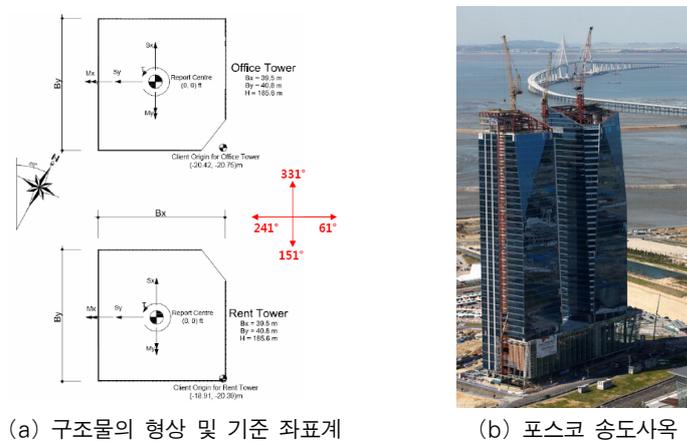


그림 1. 풍진동 제어알고리즘 적용 대상구조물

그림 2는 비제어, LQR 제어(Soong, 1990), 비선형 제어를 수행했을 때 코너부분 x 방향의 가속도가 최대인 부분을 확대하여 나타낸 것이다. 총 해석시간은 한시간이며 해석을 위한 시간간격은 0.2초이다. 비제어시에 비하여 LQR 제어나 비선형 제어의 경우 50% 이상 가속도가 저감되는 것을 알 수 있다. y 방향의 가속도 또한 유사하게 진동제어가 이루어지고 있으나 여기에서는 생략하였다. 그림 3은 제어 알고리즘에 따른 제어력의 크기를 비교한 것이다. LQR 제어의 경우 최대 제어력이 300kN 이다. 비선형 제어기의 경우 LQR 제어기에 의한 제어력을 1/3 값을 선정하여 최대 제어력이 100kN으로 지정하였다. 이상 수치해석에 의한 시뮬레이션 결과를 보면 최대 제어력이 제한이 된 비선형 제어기가 LQ와 제어기와 등등한 제어효과를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 제어력의 측면에서 본다면 비선형 제어기법이 더욱 유리한 것을 알 수 있다.

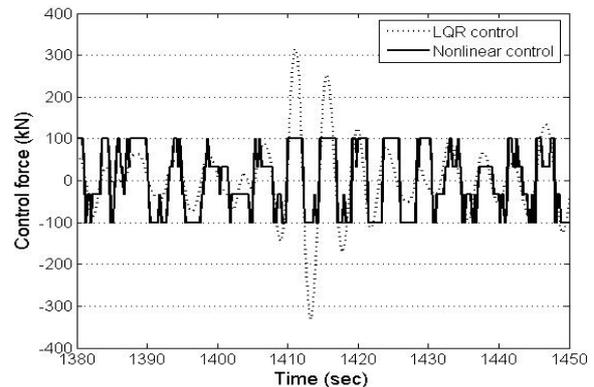
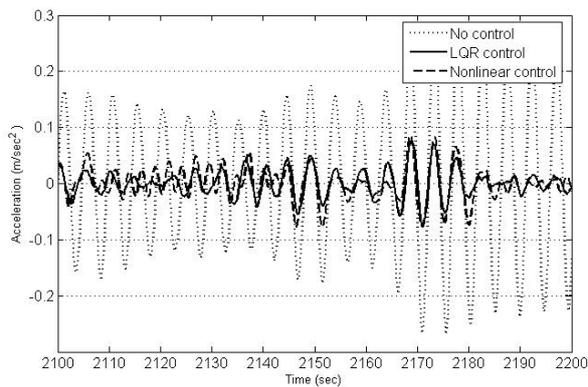


그림 2. 제어 방식에 따른 최상층 x 방향 가속도 비교 그림 3. 제어 방식에 따른 x 방향 제진장치의 제어력 비교

### 3. 구조물-제진장치 통합 설계 및 해석 프로그램

대형구조물의 풍응답 진동을 제어하기 위해 TMD, TLD, TLD, TLCD, TLMD, HMD, AMD 등의 다양한 진동제어장치가 사용되고 있으며, 현재 국내에서도 대형 건설회사를 중심으로 초고층건물에 이러한 장치들이 적용되고 있다. 이러한 다양한 진동제어장치 중에서 제어성능, 시공성, 그리고 경제성 등을 고려하여 대상구조물에 적합한 최적의 장치를 결정하기 위해서는, 초기설계단계에서 목표성능을 실현하기 위해 각 제어장치에 요구되는 질량의 크기, 설치소요공간, 그리고 기타 부가장치의 사양 등에 대한 정보가 즉각적으로 건축주에게 주어져야 한다. 그러나 기존의 설계과정에서는 이러한 설계(안)을 도출하는 과정에 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 설계(안)도 각각의 제어장치에 대하여 개별적으로 진행되어 동일한 설계조건(동일질량, 공간, 비용)에서 비교·평가하기가 매우 어려웠던 것이 현실이다. 따라서, 동일한 설계조건에서 각 감쇠장치에 의해 실현될 수 있는 감쇠비, 요구질량, 설치소요공간, 그리고 기타 부가장치의 요구사양 등을 자동적으로 계산할 수 있는 전산 프로그램의 개발이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 구조물과 질량형 제진장치의 상호작용을 고려하여 통합적으로 제진효과를 해석하고, 이를 바탕으로 제진장치를 설계할 수 있는 MATLAB 기반 소프트웨어를 개발하였다. 구조물의 모드정보에 기초한 축소모델을 구축하고 제진장치의 설계 및 제진성능 평가를 수행하고 사용성을 평가하게 된다. 전체 소프트웨어는 질량형 제진장치의 설계프로그램과 질량형 제진장치의 종류별 대안설계결과를 등가감쇠비로 표현하여 비교평가하는 두 개의 모듈로 이루어져 있으며 전자는 비제어구조물 해석 모듈 및 TMD, TLD, TLCD, AMD를 대상으로 해석 및 설계를 수행하는 총 5개의 하부 모듈로 구성된다. 본 소프트웨어를 현재 TLCD가 설치되어 있는 인천 송도 국제업무지구의 주상복합건물에 적용하여 TMD, TLD, TLCD, AMD의 대안설계를

실시하였으며, 설계 결과를 도시하면 그림 4와 같다. 또한 각각의 제진효과를 제진장치별 증가감쇠비를 통해 비교하였으며, 능동제어장치인 AMD의 증가감쇠비 증가량이 가장 큰 것으로 나타났다(그림 5).

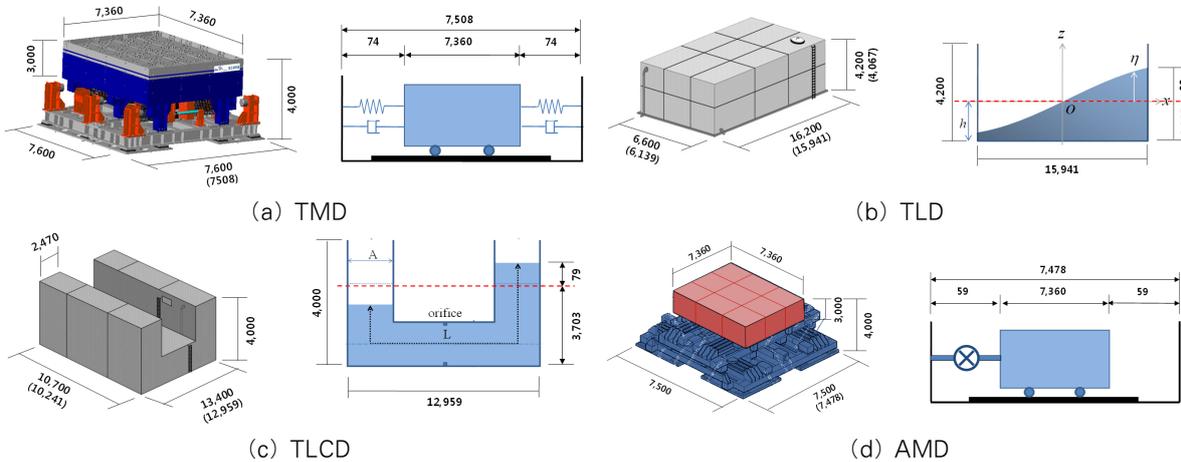


그림 4. 통합해석설계 소프트웨어를 통해 설계된 제진장치 치수 (단위: mm)

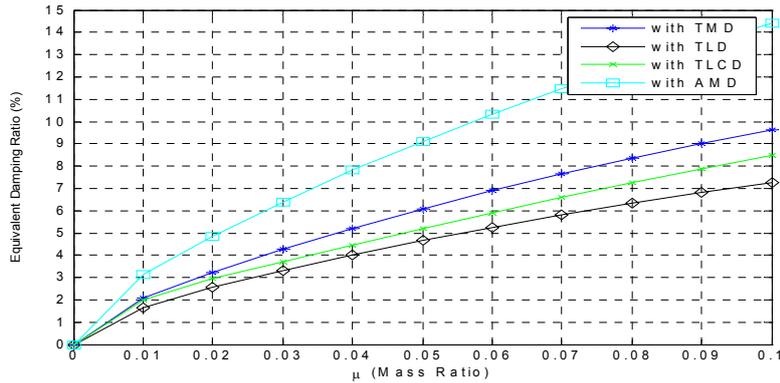


그림 5. 동일질량비를 갖는 제진장치의 증가감쇠비 증가량 비교

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009년도 첨단도시개발사업에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F.Jr., and Yao, J.T P.(1997), Special Issue Structural Control: Past, Present, and Future, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 123, pp.897-971.
- Soong, T.T. (1990), *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Wiley, London.
- 이상현, 박은천, 이성경, 민경원, 정란, 강경수 (2007), 건축구조물의 풍하중 구형 및 풍특성 평가를 위한 가진시스템 설계, **한국전산구조공학회 논문집**, 20(6), pp.771-780.