

# 하이브리드 제진장치 컨트롤러 설계기술

## Controller Design of Hybrid Tuned Mass Damper

주 석 준\* · 이 성 경\*\* · 신 군 재\*\*\* · 권 준 엽\*\*\*\*

Joo, Seok-Jun · Lee, Sung-Kyung · Shin, Koon-Jae · Kwon, June-Yeop

### 요 약

최소질량형 제진장치는 초고층건물의 풍진동 제어시 질량체의 관성력을 최대한 효율적으로 이용하여 이동질량의 크기를 최소화한 제진장치라 할 수 있다. 본 연구의 최종목표는 순수 국내기술에 의한 능동제어(active control)와 수동제어(passive control)의 특성이 결합된 하이브리드 제진장치(hybrid control device)의 컨트롤러 설계기술 개발이다. 이를 위한 1차적인 목표로 여기에서는 국내에 설치된 기존의 능동진동제어장치의 전체적인 설계과정을 살펴본다.

**keywords** : 능동제어, 수동제어, 하이브리드 제진장치, 컨트롤러 설계

## 1. 서 론

최소질량형 제진장치는 초고층건물의 풍진동 제어시 질량체의 관성력을 최대한 효율적으로 이용하여 이동질량의 크기를 최소화한 제진장치로 정의할 수 있다. 본 연구는 능동제어(active control)와 수동제어(passive control)의 특성이 결합된 하이브리드 제진장치(hybrid control device)의 설계/제작기술의 확보 및 제진성능을 극대화할 수 있는 독자적인 기술의 확보를 최종목표로 한다. 하이브리드 제진장치는 수동형 제진장치에 대한 설계/제작 기술에 능동형 제진장치에 대한 설계/제작기술을 개발하여 접목함으로써 구현될 수 있다. 기존의 제진 프로젝트 경험에 비추어볼 때, 수동제어와 능동제어의 기술접목은 큰 어려움이 없다고 판단되어 우선적으로 순수한 능동형 제진장치에 대한 설계/제작기술의 확보를 1차목표로 설정한다. 이를 위하여 여기에서는 능동제어개념이 적용된 프로젝트에 대한 조사를 통하여 능동형 제진장치에 대한 구성요소를 파악하고, 전체적인 설계과정을 살펴본다.

## 2. 사용성 평가

국내의 L빌딩은 철골구조의 판상형건물로 풍동실험에 의하면 강풍에 대한 구조적인 안정성은 확보하고 있지만, 진동가속도가 사용성평가기준을 상회하여 사용성측면의 개선이 필요할 것으로 판단되었다. 사용성 개선을 위하여 건물의 구조체를 보강하는 대신 건물 옥상에 제진장치를 설치하기로 결정하였는데, 제진장치 중량에 따른 슬라브골조의 구조보강 양을 최소화하기 위하여 수동형 대신 능동형의 제진장치를 설치하기로 하

\* 정회원 · (주)티이솔루션 이사 sjjoo@tesolution.com

\*\* 정회원 · (주)비코시스템 차장 sklee@tesolution.com

\*\*\* 정회원 · (주)티이솔루션 대리 kjshin@tesolution.com

\*\*\*\* (주)티이솔루션 대리 kkwonjy@tesolution.com

였다. L빌딩의 제진장치는 AMD(active mass damper)로써 수동형 TMD(tuned mass damper)의 구성요소인 코일스프링과 오일댐퍼를 포함하지 않고, 서보모터에 의해서만 구동되는 순수한 능동형 제진장치에 해당된다. L빌딩 AMD는 건물 사용 중에 설치된 최초의 사례로, 계획단계에서부터 고려되지 않았기 때문에 AMD 설치공사 이전에 설치층 슬라브골조의 보강공사 및 전원공급을 위한 전기공사가 별도로 실시되었다. L빌딩 AMD는 최소작동기준 이상의 진동에서 작동을 시작하여, 서보모터의 용량 및 이동질량의 최대스트로크 범위 내에서 작동을 계속하게 된다. 과도한 진동에 의하여 장비 또는 구조물의 손상이 우려될 때에는 작동을 중단하여 진동이 작동 범위 내로 감소할 때까지 대기한다. 인천공항 관제탑 HMD와 비교하면, 수동형 TMD로서의 제어모드를 포기하는 대신 시스템이 매우 간단해졌다고 할 수 있다.

L빌딩의 사용성평가를 위하여 풍동실험에서 구한 풍하중스펙트럼과 구조해석 및 상시진동계측에서 주어진 건물동적특성을 적용하여 스펙트럼해석을 수행하고, 여기서 산정된 거주 최상층에서의 진동가속도를 사용성평가기준인 일본건축학회(AIJ) 권장기준과 비교하였다. AIJ 권장기준은 1년 재현주기풍속에 대한 최대 피크가속도에 대하여 5개의 인지레벨(H-10, H-30, H-50, H-70, H-90 여기서 숫자는 진동을 인지하는 사람들의 비율을 의미)을 제공하는데, 건물주, 건설사, 구조엔지니어, 풍전문가 등이 협의하여 사용성기준으로 인지레벨 중 하나를 선택할 수 있도록 하고 있다. L빌딩의 경우 H-30을 사용성기준으로 선택하였는데, 건물의 상업적용도를 고려하면 매우 엄격한 기준이라 할 수 있다. 풍동실험에서의 스펙트럼 해석시 건물의 동적특성은 표 1과 같다. 1년 재현주기풍속에 대한 Peak 가속도응답의 최대값을 정리하면 그림 1과 같다.

표 1 최대 피크가속도 응답(1년재현주기풍속)

축방향	풍향(°)	최대 피크가속도(gal)	AIJ H-30(gal)
X-Dir.	320	7.82	2.57
Y-Dir.	0	4.17	2.78
Z-Rot.	40	3.03	2.24

위의 결과로부터 L빌딩의 최대가속도는 건물 상층부의 다수의 거주자에게 인지될 수 있으며, 특히 X방향의 진동가속도는 평가기준을 크게 상회하는 수준이기 때문에 제진대책이 필요한 것으로 평가되었다.

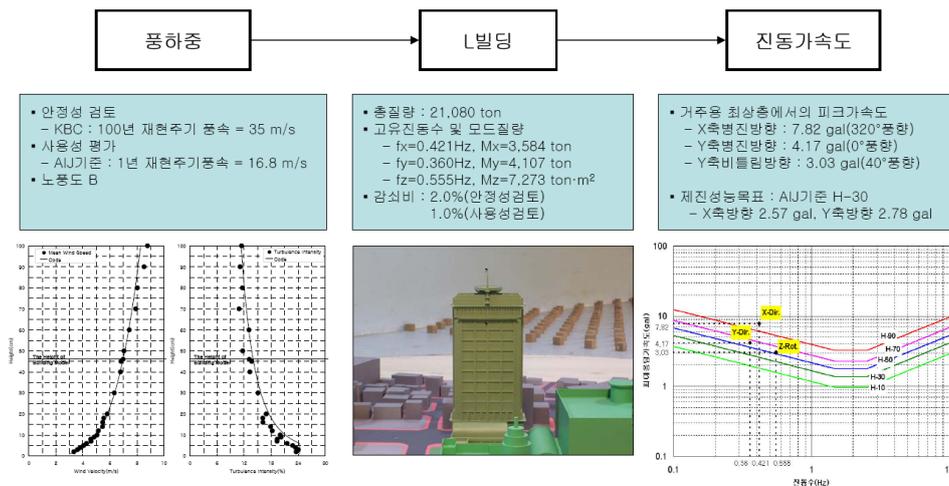


그림 1 L빌딩 풍동실험

### 3. 제진장치

L빌딩 상층부의 가속도가 AIJ기준을 크게 상회하는 것으로 평가되었기 때문에, 건물의 거주성의 개선을 위하여 제진장치를 설치하기로 하였다. 제진장치는 약 70% 정도의 높은 제진효율을 나타내어야 하고, 기존의 구조체에 대한 부담이 최소화되어야 하기 때문에 수동형이 아닌 능동형으로 결정되었다. 표 2는 L빌딩 옥상에 설치된 제진장치의 사양을 나타낸다.

표 2 AMD의 사양

항 목	제 원
제진방식	2축 액티브 방식
진동체질량	X방향: 20[t], Y방향: 10[t]
제어 스트로크	±60[cm]
장치질량	약30[t] (장치커버포함)
장치의형치수	4.5m(W) × 4.5m(L) × 2.5m(H) (장치커버포함)
설치대수	2[대]
장치분할질량	1.5[t]이하

L빌딩 AMD의 제진성능은 정량적 평가의 가능성과 재현성을 고려하여 건물자유진동시험 또는 장치1대가진·1대제진의 sweep시험에 의해 얻어지는 건물등가감쇠비에 의해 평가하기로 하였다. 풍동실험결과를 기준으로 건물등가감쇠비는 X방향에서 12.5%이상, Y방향에서 7.2%이상,  $\theta$ 방향에서 7.2%이상이 되도록 제진장치를 설계하였다.

L빌딩 AMD는 건물 옥상에 설치되어 비교적 공간적 제약을 크게 받지 않았으나, 스트로크가 커질 경우 본체의 중량이 커지고 제작비도 증가하기 때문에 수치해석결과를 기준으로 ±60cm로 제한하였다. 그러나 사용성평가시의 기준풍속보다 강한 바람이 불어오거나, 지진 등에 의한 예상치 못한 큰 진동이 발생할 때에는 이동질량이 최대스트로크 이상의 변위를 나타낼 수 있으므로 제어알고리즘상에 Gain 스케줄링 기법을 적용하였다. 제어알고리즘으로는 현재 일반적으로 많이 사용되고 있는  $H_{\infty}$  제어알고리즘을 적용하였으며, 풍하중 및 건물의 불확실성이 반영된 안정된 제어기로 설계되었다.

그림2는 L빌딩의 구성요소들의 기본기능과 정보흐름을 보여준다. L빌딩과 함께 피드백제어루프를 형성하고 있는 AMD의 각 구성요소들의 정보흐름을 파악할 수 있다.

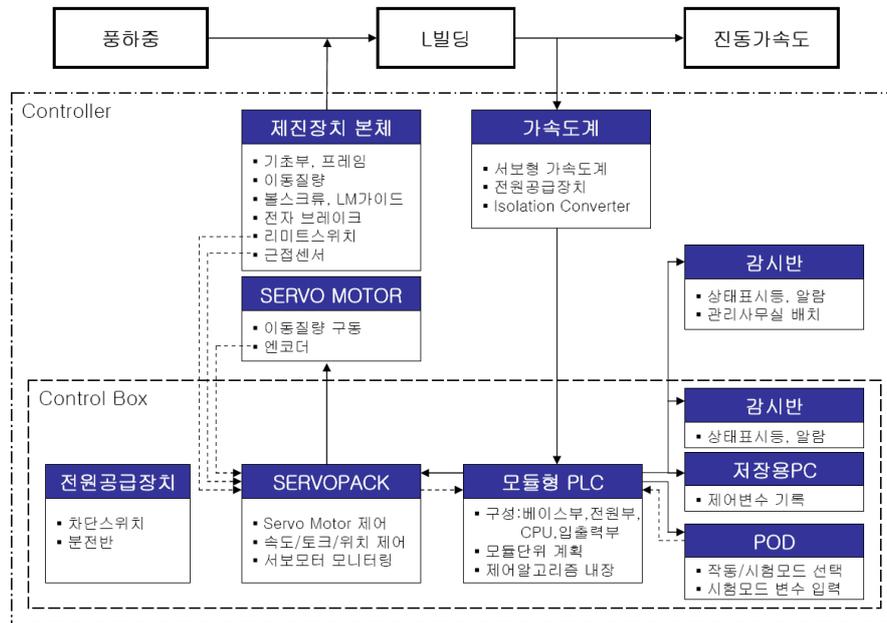


그림 2 L빌딩의 진동제어 흐름도

#### 4. 결론

최소질량형 제진장치는 초고층건물의 풍진동 제어시 질량체의 관성력을 최대한 효율적으로 이용하여 이동 질량의 크기를 최소화한 제진장치라 할 수 있다. 본 연구의 최종목표는 순수 국내기술에 의한 능동제어 (active control)와 수동제어(passive control)의 특성이 결합된 하이브리드 제진장치(hybrid control device)의 콘트롤러 설계기술 개발이다. 이를 위한 1차적인 목표로 여기에서는 국내에 설치된 기존의 능동진동제어장치의 설계과정에 대해서 살펴보았다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009년도 첨단도시개발사업의 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

한국풍공학회. (1994) 실무자를 위한 건축물 풍동실험 가이드북  
 T.T. Soong. (1990) *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Scientific & Technical