

진자슬래브에 의한 진동제어시스템의 적용성 평가

Study on the Application of Tuned Pendulum Slab Damper system (TPSD) to Building structure

김 양 중* 서 근 배**
 Kim, Yang-Jung Seo, Gun-Bae

Abstract

The Tuned Pendulum Slab Damper(TPSD)system is mainly composed of suspended pendulum slab which was hanging with cable wire from the top floor of building without any extra loads structurally, and can be helpful to reduce vibration with effect of tuned mass damper function by the principle of pendulum movement. The experiment was performed with miniatures of the 30stories of steel structure building by the forced vibration test using shaking table, and the result was reduced about 42% of vibration. The purpose of this study was to make analysis of application of the TPSD system to new building and exist building against strong wind or seismic wave. The result of this study was that the TPSD system shall be satisfactory in field of execution, process control, safety and economical efficiency with saving up to 70% of construction cost.

키 워 드 : 동조질량감쇠, 진자형댐퍼, 현장적용성,
 Keywords : tuned mass damper, pendulum damper, application on site,

1. 서 론

1.1 연구의 목적

근래의 빈번한 주변국 지진발생으로 국내에서도 건축물의 진동에 대한 불안감이 고조되고 있으며, 이에 대한 대응방안에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근, 공간 및 평면제약과 구조물의 추가하중 등에 대한 문제점으로 기존의 내진보강방법보다는 면진이나 제진방법에 대한 연구가 선호되고 있으나 면진방법은 기존 구조물에 적용하기 곤란한 제약때문에 제진방법이 관심을 모으고 있다.

그러나, 제진용 동조질량댐퍼(TMD)시스템 또한 댐퍼의 무게를 질량체로 이용하므로 추가적인 질량부가에 따른 구조적 부담과 함께 설치공간에 대한 제약이라는 단점이 있어 이러한 문제점을 해결하고자 최근 새로이 연구개발된 것이 진자슬래브 댐퍼시스템(TPSD) 방식이다.

진자슬래브 댐퍼시스템은 현수방식의 일종으로서 아래의 그림 1과 같이 최상층 바닥슬래브의 네변을 절단 분리하고 옥상층구조체에 와이어로 메달아 현수화 함으로서 지진 또는 강풍 등의 입력진동에 대한 진자슬래브의 역진동 원리를 이용하는 진동제어방식

이므로 슬래브의 자중을 질량체로 전환하여 구조체에 전연 추가하중이 없으며 댐퍼 설치를 위한 별도의 공간이 필요없는 이점이 있다.

본 연구에서는 이러한 진자슬래브에 의한 진동제어시스템을 신축 또는 기존 건축물에 적용할 경우에 대한 타당성 및 적용성을 평가해 보고자 한다.

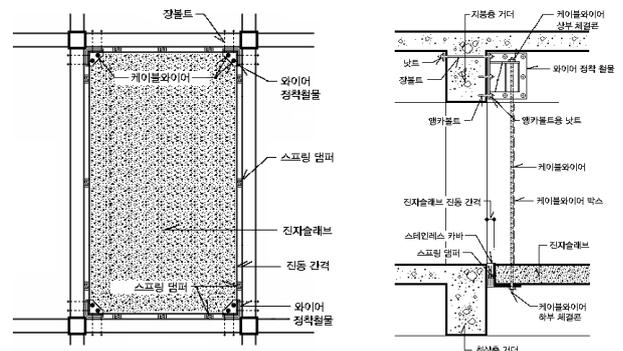


그림 1. 진자슬래브댐퍼의 평면 및 단면도

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 현수방식에 의한 진동제어 시스템의 기존 연구동향 및 적용사례에 대해 고찰하고, 진자슬래브의 모형실험을 통한 구조적 거동 특성을 검증하였으며, 이를 바탕으로 진자슬래브 댐퍼시스템을 신축과 기존건축물에 적용하는 경우로 구분하여 소

* 피에스Eng(주) 특수건설기술연구소 연구소장, 공학박사,
 교신저자(yjkim7573@hanmail.net)
 ** 피에스Eng(주) 특수건설기술연구소 선임연구원,

요재료의 반입조건, 작업인력의 투입조건 및 공정관리조건에 따른 시공성을 고찰하고, 이에 대한 안정성을 검증하였으며, 소방방재청의 내진보강 소요공사비의 통계를 바탕으로 경제적 타당성을 검증하여 현장 적용성을 평가하였다.

그러나 진자슬래브댐퍼시스템은 새로이 연구개발된 시스템으로서 그 적용사례가 아직 없으므로 연구개발 자료에 근거한 평가로 연구범위를 한정한다.

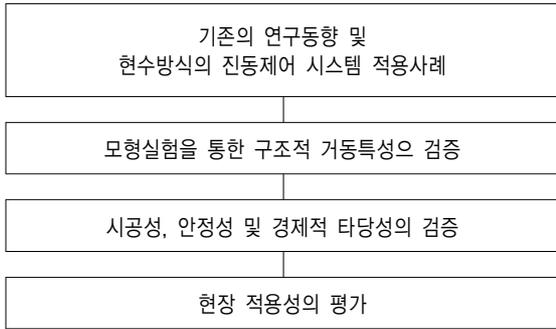


그림 2. 연구의 방법

2. 기존연구의 고찰 및 적용사례

2.1 기존의 연구 동향

진자형 제진방식은 거의 대부분 자동차 등의 기계분야에서 차량 주행 중의 진동제어를 위한 연구가 주를 이루고 있으며, 건축물에는 기초분리형 베어링 시스템이 주로 연구되어왔다. 진자형 현수방식의 제진방법은 1992년 Tadashi Nagase⁽¹⁾ 등이 일본에서 최초로 적용된 크리스탈 타워(Crystal Tower)의 진자형 댐퍼에 대한 제어성능을 연구 발표하였으며, H. Matsuhisa 교수⁽²⁾ 등은 2007년 수동식 역진자스프링 댐퍼가 일반진자스프링 댐퍼보다 더 우수한 제어성능이 있음을 실험을 통하여 입증하였다. 2004년 T.Haskett와 B. Breukelman 등은 현재 세계에서 두 번째로 높은 타이페이 101빌딩에 660ton의 진자댐퍼가 92층으로부터 82층까지 매달려 내려져 있는 진자댐퍼의 진동제어 성능을 연구하여 강풍시 최대 1/3의 진동을 감소시킨다는 결과를 제출하였다.

2.2 진자방식의 적용사례

대표적인 진자방식의 적용사례는 일본 오사카의 크리스탈 타워 빌딩과 대만의 타이페이 101빌딩을 들 수 있다. 아래의 그림 3과 같은 크리스탈 타워빌딩은 157m 높이 및 무게 44,000ton의 건축물로서, 90ton 무게의 냉난방기기 및 냉동탱크 6개를 옥상층 거더에 4m길이의 와이어로 매달아 진자화함으로서 전체공사비의 0.2%에 불과한 비용으로 50%의 수평진동을 감소시킬 수 있었다.

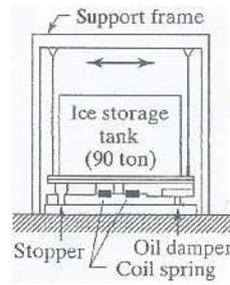


그림 3. 크리스탈빌딩의 진자방식

아래 그림4와 같은 대만의 타이페이101 빌딩은 660ton, 직경 5m의 진자댐퍼가 4개층 아래에 매달려 내려져 있어 풍하중에 대해 30~40%의 진동감쇠 성능을 보이고 있다.

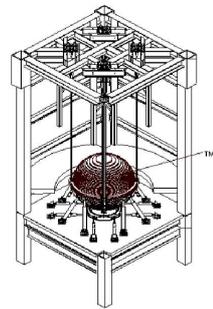


그림 4. 타이페이 101 빌딩의 진자형 TMD(59)

3. 구조적 거동 특성

3.1 모형 실험

실험체는 축소기준 및 실험변수를 참조하여 기둥간격 10.8m x 9m 및 층고 3.6m의 철골조 건축물을 상사법칙의 질량기준에 의한 축소계수를 감안하여 1/24 비율로 10층, 20층 및 30층 규모로 제작하여 각 층별 실험체의 1차 고유진동수를 검측하고 이를 기준으로 $\pm 2.5\text{Hz}$ 범위 내에서 0.05Hz 단위로 매 10회씩 가진력을 증폭하여 실험하였다.

아래의 그림5는 실험체 최상층의 진자슬래브 모습이며, 그림6은 각 층별 실험체의 진동대 실험 모습이다.



그림 5. 진자슬래브 실험체



그림 6. 모형실험체 진동대실험

3.2 실험 결과

모형실험 결과 고층일수록 고유진동수는 작게 나타난 반면 변위응답은 크게 거동하고 저층일수록 고유진동수가 크게 나타나는 반면 변위응답은 작게 거동하는 것을 확인하였다. 또한 진자의 길이가 저층일수록 짧은 반면 고층일수록 길어지는 현상을 확인 하였으며, 진자의 길이와 요구질량이 수학적 해석 결과와 거의 동조하는 것을 확인하였다.

또한, 아래 그림7과 같이 30층의 고층에서는 진자의 질량비가 3%에서 42.7%, 20층의 중층에서는 5%에서 39.3%의 높은 감소율을 나타냈으며, 10층의 저층에서는 70%전후의 감소율이 질량비 8%~11%의 넓은 대역에서 나타났다. 그러나, 아래 그림8과 같이 20층 및 30층에서는 뚜렷한 동조질량감쇠(TMD)현상이 나타났으나 10층에서는 이러한 현상이 없어 이의 원인규명에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

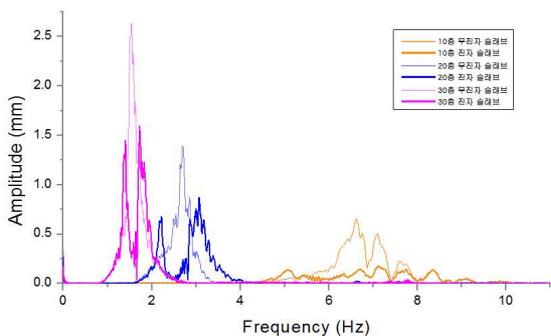


그림 7. 각 층별 최상층 변위응답 이력

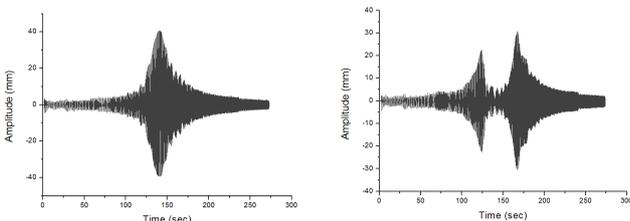


그림 8. 30층인 경우의 시간-변위이력 대비

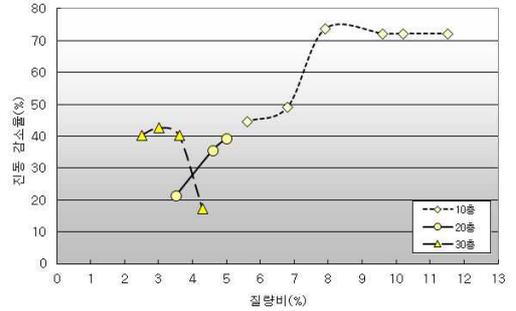


그림 9. 각 층별 질량비에 따른 진동감소율 분포도

4. 적용성 평가

4.1 시공성 및 안전성

4.1.1 재료의 반입조건

진자슬래브 댐퍼시스템의 소요재료는 통용되고 있는 일반콘크리트와 철관용접제작인 브라켓과 케이블와이어를 사용하므로 기존의 반입가능한 재료로 구성된다. 또한, 진자슬래브의 진자운동시 구조물과의 충격방지용 스프링댐퍼는 스프링상수의 계산에 의해 결정되므로 내진공법에 비하여 소요재료에 대한 시공성이 양호한 것으로 판단된다.

표 1. 소요재료의 대비

구 분	내진공법			진자슬래브 제진공법		
	반입	가공	설치	반입	가공	설치
물량 다소	○	○	○	X	X	X
난이도	○	△	○	X	X	△

범례: ○ : 많음 및 높음, △ : 중간 X : 적음 및 낮음

4.1.2 인력의 투입조건

진자슬래브 시스템화의 현장시공을 위한 소요 기능인력은 할석공과 철공 및 용접공으로 간단한 교육실시 후 작업가능한 투입조건이다. 사전계획 및 상세도면과 시방에 따른 시공관리는 시공기술자들의 기본적 기술지식으로 충분하므로 본 시스템의 소요인력 투입조건에 대한 시공성은 아래의 표2와 같이 내진공법에 비하여 양호한 것으로 판단된다.

표 2. 투입인력의 기능도 대비

구 분	내진공법			진자슬래브 제진공법		
	인력 투입	재료 가공	재료 설치	인력 투입	재료 가공	재료 설치
인력의 다소	○	○	○	X	△	△
기능 난이도	X	△	△	X	X	△

범례: ○ : 많음 및 높음, △ : 중간 X : 적음 및 낮음

4.1.3 공정관리 조건

기존의 내진공법은 매층에서 작업이 이루어지며, 선행층과 후속층의 간섭이 있는 반면 진자슬래브 시스템은 아래의 그림10과 같이 최상층 및 옥상층에서만 이루어지므로 선행 및 후속작업이 순행으로 이루어지므로 공공간 간섭없이 Critical Path를 형성하지 않으므로 기존의 내진공법에 비하여 공정관리가 양호한 것으로 판단된다.

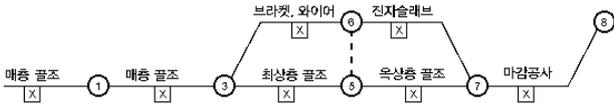


그림 10. 진자슬래브 제진공법의 공정 네트워크

4.1.4 안전성 평가

진자슬래브의 안전성 요소로는 진자슬래브의 휨모멘트에 대한 내력 및 케이블와이어의 장력과 브라켓의 내력으로 구분할 수 있다. 진자슬래브의 휨모멘트에 대한 내력은 구조해석을 통한 내력 계산에 적합한 설계로 이루어지며, 브라켓 및 케이블와이어의 장력에 대한 내력은 진자슬래브의 중량대비 안전율을 고려한 적정의 물성재료를 선정하여 설계되므로 진자슬래브는 안정한 것으로 판단된다.

4.2 경제타당성

4.2.1 대비 분석방법

소방방재청의 내진설계 현황자료에 의하면 2010년 국내 공공 건축물 16건의 내진보강공사비 평균 단가는 m2당 6만 1천 800 원이라는 분석결과⁽³⁾와 진자슬래브의 단위 슬래브당 소요공사비 산정을 대비분석 기본자료로 하였다. 분석대상은 아래의 그림11과 같은 목동소재 H-빌딩의 지상층 평면과 동일한 30층 규모의 건축물을 설정하고 신축과 기존건축물인 경우로 구분하여 공사비를 상호 대비 분석하였다.

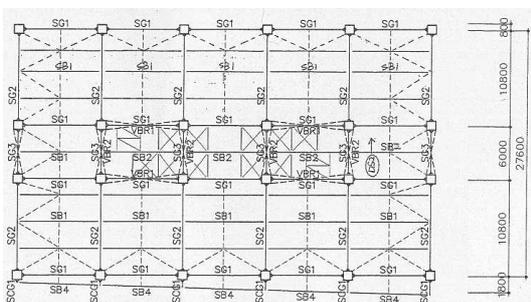


그림 11. 공사비 대비용 30층 규모의 가상평면도

4.2.2 신축현장 적용시

단위기둥스팬 10.8m X 9m로서 건축면적 1,242m2, 30층 규모의 가상건축물을 대상으로 내진공사비와 질량비3%의 진자슬래브화 공사비를 상호 대비분석한 결과 내진공사 소요비는 23억 2백 7십만원인 반면 진자슬래브화 소요공사비는 6억 3천만원이 소

요되어 72.6%의 비용절감이 되었다.

표 3. 신축건물인 경우의 소요공사비 대비

구 분	내진공사비	진자슬래브 제진공법
소요공사비 총계	2,302,700,000원	630,000,000원
절 감 액	-	1,672,700,000원
절 감 율	-	72.6%

4.2.3 기존건물 적용시

당초 비내진 설계의 건물이거나 내진설계규준의 강화에 따른 추가적인 보완이 필요한 기존건물의 경우 H-빌딩과 동일한 규모의 건축물을 설정하고 추가되는 내진보강공사비와 진자슬래브에 의한 보완공사비를 상호 대비 분석한 결과 아래의 표4와 같이 내진공사비는 23억 2백 7십만원이 소요되는 반면 진자슬래브화 공사비는 7억5천6백만원이 소요되어 67.1%의 비용절감이 있는 것으로 나타났다.

표 4. 기존건물인 경우의 소요공사비 대비

구 분	내진공사비	진자슬래브 제진공법
소요공사비 총계	2,302,700,000원	756,000,000원
절 감 액	-	1,546,700,000원
절 감 율	-	67.1%

5. 결 론

진자슬래브 댐퍼시스템에 의한 제진공법에 대하여 시공성과 안전성 및 경제타당성에 의한 적용성 평가결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 진자슬래브화 공사는 통상의 일반재료 및 기능인력 투입으로 시공가능하고 장력설계에 의한 시공이므로 시공성과 안정성이 양호하며, 신축공사 적용시 내진공사비에 비하여 72.6%의 절감효과가 있으며, 기존건물 적용시 67.1%가 절감되는 것으로 나타났다.
- 2) 기존의 내진공법은 전층에 걸쳐 이루어지는 반면 진자 슬래브는 최상층 및 옥상층에서 이루어지므로 50%의 공기단축으로 부가적인 경제적 효과가 있다.

그러나, 새로이 개발된 방식으로서 이를 실제 적용하기에는 설계용 프로그램 개발 등의 많은 연구가 향후 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 조홍복, 시설물 내진설계 현황 분석결과 소방방재청, 2011
2. Tadashi Nagase, Toshiharu Hisatoku, Tuned Pendulum Mass Damper installed in Cristal Tower the Structure Design of Tall Building, Vol.1, Issue 1, pp.35~56, 1992
3. T. Haskett, B. Breukelman, TunedMass Dampers under Excessive Structural Excitation Report of the Water fordmgnt. com, 2004