

개폐식 대공간 건축물에 적용한 스마트 TMD의 지진응답 제어성능 검토

Performance Evaluation for Seismic Response Control of Smart TMD Applied to Retractable-Roof Spatial Structure



이영락*
Lee, Young-Rak



김현수**
Kim, Hyun-Su



강주원***
Kang, Joo-Won

1. 서론

최근 우리나라에는 이례적으로 큰 지진들이 발생하고 있다. 2016년 9월 경주에서 발생한 5.8 규모의 지진을 시작으로 2017년 11월 포항에서 5.4 규모의 지진이 발생하는 등 규모 5 이상의 지진이 다수 발생하였다. 최근에는 2018년 2월 4.6 규모의 포항 지진이 발생하면서 97차례의 크고 작은 여진이 이어지고 있다. 국제적으로도 2018년 2월 멕시코에서는 7.2 규모의 지진이 발생하여 많은 인명피해를 낳았다.

지진하중과 같은 동적하중은 구조물에 막대한 손상을 입히며, 크고 작은 인명피해까지 초래할 수

있다. 특히 대공간 구조물은 구조적 특성상 많은 인원을 수용하며, 지진으로 인한 피해 발생 시 큰 인명피해로 이어질 것으로 예상된다. 또한 직접적으로 대공간 구조물의 붕괴가 없다 하더라도 과도한 진동이 발생하게 되면 지붕에 설치된 각종 조명, 음향 및 디스플레이 장치 등이 낙하하여 인명피해를 일으킬 수 있다¹⁾. 그러므로 이러한 피해를 미연에 방지하고 대공간 구조물의 지진응답 제어를 효과적으로 수행하기 위해서는 대공간 구조물의 동적 특성을 파악하는 것이 필요하다.

본 기사에서는 개폐식 대공간 건축물의 개폐 지붕 특성에 대해 분석하고, 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)를 이용하여 개폐식 대공간 건축물의 지진응답 제어성능을 검토하고자 한다.

2. 개폐식 대공간 건축물의 지붕구조 특성

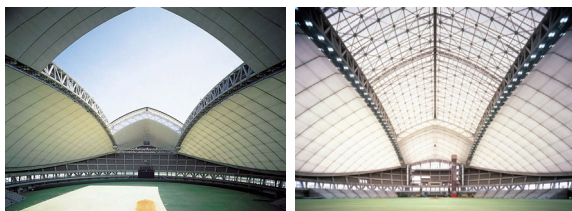
개폐식 대공간 건축물의 지붕구조는 개폐되는 행

* 영남대학교 일반대학원 건축학과, 박사과정
Dept. of Architecture, Yeungnam University

** 선문대학교 건축사회환경학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture, Architectural & Civil Engineering,
Sunmoon University

*** 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University

사의 내용 등에 따라 지붕을 개폐함으로써 사용 용도에 최적화된 환경을 제공한다. 닫힌 상태의 지붕은 눈이나 비바람과 같은 날씨 변화에 대해 실내 공간을 보호할 수 있으며 기온, 조명, 음향 등 다양한 실내 행사에 최적화된 조건을 만족시킬 수 있다. 열린 상태의 지붕은 자연 채광 및 관람석의 환기에 유리하고 운동장의 잔디 생육에 필요한 최적의 조건을 제공하며 건축물의 유지관리비를 절약할 수 있는 장점을 가지고 있다^{2),3)}.



〈Fig. 1〉 Komatsu Dome

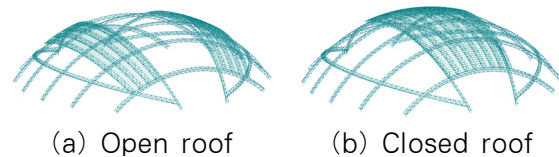
실제 일본에 건설되어 있는 〈Fig. 1〉의 고메즈 돔을 통해서 개폐식 대공간 건축물의 지붕구조 특성을 분석해보았다. 장변 방향이 Keel 아치 트러스로 구성되어 있고 단변 방향의 Cross 거더 및 이를 연결하는 스페이스 트러스로 구성되어 있다. 건축물의 고유진동주기는 뼈대를 이루는 Keel 아치에 의해서 주로 결정되지만 지붕의 개폐 상태 및 적설하중 등의 고려에 따라 달라질 수 있다. 기존 연구를 보면 지붕구조물이 닫힌 상태일 때에 비해서 열린 상태일 때 장변 방향 및 단변 방향의 고유진동주기가 증가하였다⁴⁾. 또한 지붕이 닫힌 상태에서 적설하중을 고려하지 않을 때에 비해서 고려했을 때 고유진동주기가 증가하는 것을 알 수 있었다. 개폐식 대공간 건축물의 동적 특성은 지붕의 개폐 여부 및 적설하중의 고려 여부에 따라서 크게 달라질 수 있다. 그러므로 내진설계 또는 진동제어시스템 설계 시 지붕 개폐에 따른 특성 변화와 지진하중 및 적설하중 등에 대해 반드시 고려해야 한다.

개폐식 대공간 건축물은 지붕의 개폐 여부에 따라 구조물의 강성 및 질량 분포가 변화한다. 개폐식 대공간 구조물에 TMD가 설치될 경우에는 감소된

강성으로 인해 더 큰 지진응답이 발생할 것으로 예측되는 지붕이 열린 상태의 구조물을 대상으로 TMD를 조율한다. 그러나 사용상 필요에 의해서 대공간 구조물의 지붕이 닫힌다면 비동조(Off-tuning) 현상이 발생하게 된다. 따라서 일반적인 TMD를 사용한다면 지붕의 개폐 상태에 따라 TMD의 제어 성능이 저하될 수 있다. 다음 절에서는 대공간 구조물 지붕의 개폐 상태에 따른 TMD 및 스마트 TMD의 지진응답 제어성능 변화에 대해 알아보았다.

3. 스마트 TMD의 지진응답 제어성능

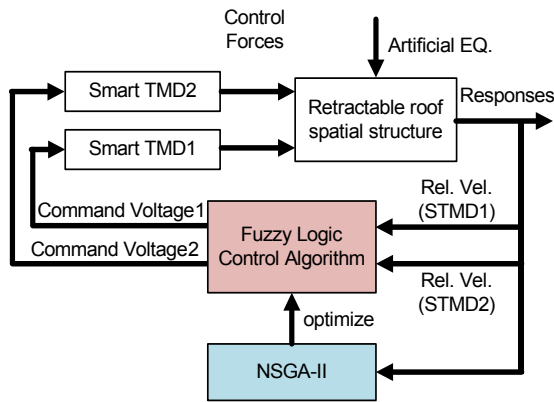
스마트 TMD의 지진응답 제어성능을 검토하기 위해 Singapore sports hub와 Oita bank dome을 기반으로 디자인한 해석 모델은 〈Fig. 2〉와 같다.



〈Fig. 2〉 Analysis model

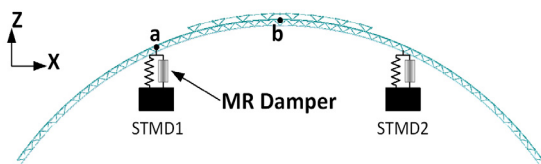
수치 해석 결과, 해석 모델의 지붕 개폐 여부에 따라서 고유진동주기의 변화가 13% 차이가 나는 것을 확인하였다. 일반적으로 대공간 건축물에 작용하는 외부 동적하중에 대한 응답을 저감시키기 위해 동조질량감쇠기를 사용하는 경우 고유진동주기에 맞추어 적절하게 조율되었을 때 뛰어난 동적응답 제어성능을 갖는다.

해석 모델의 지진응답을 효과적으로 제어하기 위해서는 적절한 제어 알고리즘이 필요하다. 비교 대상 제어 알고리즘으로 그라운드훅 제어 알고리즘을 사용하고, 퍼지 제어 알고리즘을 사용하여 스마트 TMD를 제어하였다. 그리고 다목적 유전자 알고리즘(NSGA-II)⁵⁾을 이용해서 퍼지 제어 알고리즘을 최적화하고, 그 과정의 개념도를 〈Fig. 3〉에 나타내었다.



〈Fig. 3〉 Optimization process of fuzzy logic control algorithm

TMD를 사용하여 대공간 건축물을 효과적으로 제어하기 위해서 〈Fig. 4〉에 나타낸 것처럼 좌측과 우측 경간의 1/4지점에 TMD 및 스마트 TMD를 설치하였고, 지진하중에 대한 비교 지점은 아치경간의 1/4 지점인 ‘a’점과 중간 지점인 ‘b’점을 비교하였다.



〈Fig. 4〉 Location of the TMD

일반적인 수동 TMD의 지진응답과 함께 제어하지 않은 경우의 응답을 비교하였고, 퍼지 제어 알고리즘으로 제어되는 스마트 TMD의 제어성능을 검토하기 위해서 그라운드 후크 제어 알고리즘과 비교하여 〈Table 1~6〉에 나타내었다.

스마트 TMD가 지진하중에 대해서 변위응답 저감에 효과적인 것을 알 수 있다. 가장 큰 변위응답이 발생하는 ‘a’점의 Z방향 응답은 제어하지 않은 경우에 비해서 TMD에 의하여 약 13%의 응답을 저감시킬 수 있었다. TMD는 ‘a’점과 ‘b’점의 X방향 응답에서도 모두 응답저감 효과를 나타내었다. 스마트 TMD의 경우 그라운드 후크 제어 알고리즘과 퍼지 제어 알고리즘으로 제어한 경우에 대해서 모두 TMD의 제어성능보다 더 우수한 것을 확인하였다. 특히

‘a’점의 Z방향 응답을 보면 퍼지 제어 알고리즘을 사용한 스마트 TMD는 TMD의 응답을 28% 저감시킬 수 있고, 그라운드 후크 제어 알고리즘에 비해서도 14%의 응답을 더 줄일 수 있었다.

〈Table 1〉 Peak displacement at ‘a’ (DZ)

	Uncontrolled	TMD	STMD (Ghook)	STMD (Fuzzy)
Opened (cm)	15.37 (100%)	13.38 (87.1%)	11.88 (77.3%)	10.41 (67.7%)
Closed (cm)	15.06 (100%)	12.48 (82.9%)	11.08 (73.6%)	9.06 (60.2%)

〈Table 2〉 Peak displacement at ‘a’ (DX)

	Uncontrolled	TMD	STMD (Ghook)	STMD (Fuzzy)
Opened (cm)	12.47 (100%)	10.93 (87.7%)	9.65 (77.4%)	8.50 (68.2%)
Closed (cm)	12.32 (100%)	10.76 (87.3%)	8.07 (65.5%)	7.19 (58.4%)

〈Table 3〉 Peak displacement at ‘b’ (DX)

	Uncontrolled	TMD	STMD (Ghook)	STMD (Fuzzy)
Opened (cm)	10.71 (100%)	9.42 (88.0%)	8.23 (76.8%)	7.29 (68.1%)
Closed (cm)	10.78 (100%)	9.04 (83.9%)	7.13 (66.1%)	6.21 (57.6%)

〈Table 4〉 Peak acceleration at ‘a’ (DZ)

	Uncontrolled	TMD	STMD (Ghook)	STMD (Fuzzy)
Opened (cm/s ²)	275.51 (100%)	259.45 (94.2%)	296.27 (107.5%)	260.94 (94.7%)
Closed (cm/s ²)	313.64 (100%)	304.88 (97.2%)	284.68 (90.8%)	277.65 (88.5%)

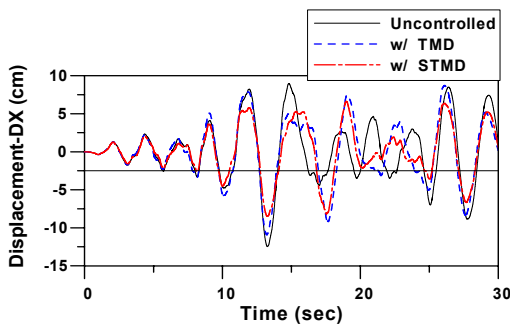
〈Table 5〉 Peak acceleration at ‘a’ (DX)

	Uncontrolled	TMD	STMD (Ghook)	STMD (Fuzzy)
Opened (cm/s ²)	317.14 (100%)	343.15 (108.2%)	343.40 (108.3%)	337.29 (106.4%)
Closed (cm/s ²)	293.63 (100%)	284.69 (97.0%)	294.29 (100.2%)	275.26 (93.7%)

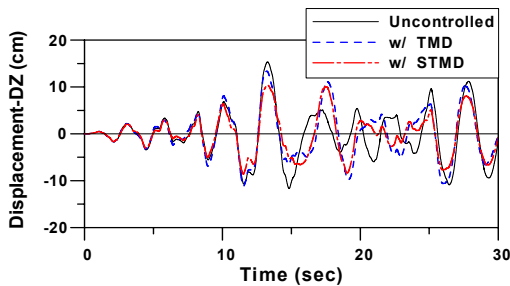
〈Table 6〉 Peak acceleration at 'b' (DX)

	Uncontrolled	TMD	STMD (Ghook)	STMD (Fuzzy)
Opened (cm/s^2)	372.16 (100%)	366.86 (98.6%)	367.15 (98.7%)	357.75 (96.1%)
Closed (cm/s^2)	354.21 (100%)	374.91 (105.8%)	360.16 (101.7%)	358.15 (101.1%)

〈Fig. 5〉와 〈Fig. 6〉은 지진하중을 받는 해석 모델에서 동적변위가 가장 크게 발생하는 'a'점의 X방향 및 Z방향의 변위 시간 이력을 나타내었다. 이때 제어하지 않은 경우, TMD를 사용한 경우, 퍼지 제어 알고리즘으로 제어된 스마트 TMD를 사용한 경우를 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 TMD를 사용해서도 개폐식 대공간 구조물의 응답을 효과적으로 줄일 수 있지만 본 연구에서 제안된 스마트 TMD를 사용하면 제어하지 않은 경우에 비하여 약 47% 이상의 동적변위를 줄일 수 있는 것을 알 수 있다.



〈Fig. 5〉 Displacement time history at 'a'(DX)



〈Fig. 6〉 Displacement time history at 'a'(DZ)

4. 결론

본 기사에서는 스마트 TMD를 이용한 개폐식 대

공간 건축물의 지진응답 제어성능에 대하여 알아보았다. 스마트 TMD가 TMD에 비해 우수한 제어성능을 나타내는 것을 해석적으로 확인할 수 있었고, 추후 실험적 연구 및 시제품 제작을 통해서 스마트 TMD의 활용 가능성을 검증할 필요가 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(18AUDP-B100343-04)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kawaguchi, K., & Suzuki, Y., "Damage investigations of public hall in Nagaoka city after Niigata-Chuetu earthquake 2004 in Japan", Proceedings of the International Symposium of Shell and Spatial Structures, pp.421~428, 2005
2. Ishii, K., Structural Design of Retractable Roof Structures, IASS, WIT Press, 2000.
3. Mahovič, A., "Typology of retractable roof structures in stadiums and sports halls", Theory and Practice of Spatial Planning, No.3, pp.90~99, 2015
4. Kang, J. W., & Kim, H. S., "Seismic Response Control of Retractable-roof Spatial Structure Using Smart TMD", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.16, No.4, pp.91~100, 2016
5. Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T., "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", Technical Report No.200001, Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur, India, 2000.