실리콘 점성 감쇠장치를 이용한 다층형 토글감쇠시스템 내진 보강 기술

Multi-Story Toggle-Brace-Damper System With Silicone Viscous Damping Device for Seismic Retrofitting

류 동 일*
Ryu, Dongil

류 재 호*
Ryu, Jaeho

1. 서언

우리나라 내진 설계의 실상은 2016년 경주 지진과 인공 지진으로 간주된 2017년 포항 지진 사례를 통해 환기(喚起)되었다. 규모 5.8과 5.3의 강진이 발생하여 각각 110억, 3323억에 달하는 재산 피해 및 구조물의 손상을 발생시켰다. 손상을 입은 대부분의 구조물은 1988년 이전에 시공되어 내진 설계가 반영되지 않은 건축물이었다. 지진에 대한 국내외 피해 사례를 통해 구조물에서 내진 성능을 반영한 설계를 비롯하여 성능을 보유하지 못한 건축물에 대한 보수·보강의 필요성이 부각되고 있다.

지진 피해가 증가하는 상황에서 국토교통부는 2017년 내진 설계 적용 대상 및 기준을 강화하였다. 또한 정부는 "지진 방재 개선 대책"을 2017년 논의하여 확정하였으며, 해당 기준은 지속적으로 강화되고 있다. 2021년 현재 기준 내진 설계 의무 대상은 2층 이상 또는 연면적 200m^2 이상의 건축 구조물로 확대되었다.

기존 건축 구조물의 내진 성능을 향상시키기 위한 내진 보강 기술을 보강 효과에 따라 크게 3가지로 구분할 수 있다. ①건축 구조물의 내력을 향상시키는 방법, ②연성을 증가시키는 방법, ③지진 시 진동을 제어하는 방법이다.

우리나라에서 지진에 대한 가장 일반적인 보강 방법은 기둥, 보 등 구조물 부재의 면적을 넓혀 내력 향상과 연성을 보강하는 것이다. 하지만 단면 증설 보강법과 같은 경우 부재량(部材量)의 증가에 따라 건축물의 중량이 증가되고, 공간의 사용성이 저하되며, 지진 작용 시 보강에 따라 예측 불가한 구조물의 거동이 발생할 수도 있다는 단점이 존재한다.

단면 증설 보강법에서 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위한 보강 방법으로 제진 보강을 제시할 수 있다. 제진 보강이란 구조물의 감쇠 능력 증가를 통하여 지진 에너지를 소산시켜 구조물의 내진 성능을 확

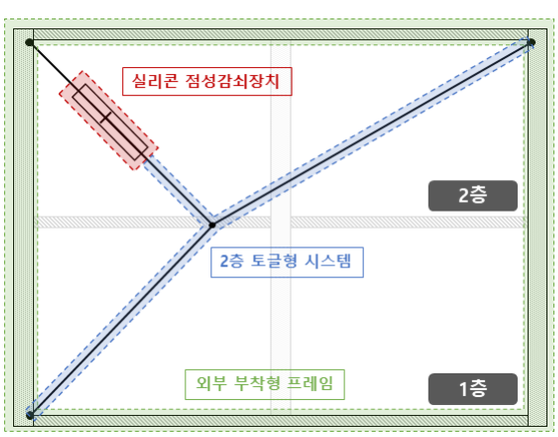
* (주)테크스퀘어
TechSquare Co., Ltd.

보하는 것으로, 주로 구조물의 감쇠비 증대를 위한 제진 장치를 추가 설치하는 내진 보강법이다. 제진 보강 공법의 특징은 강도 및 연성을 증가시키는 내진 보강 공법과 비교하여 보강 개수가 적고, 외부 시공에도 적용이 용이하다는 것이다. 외부 시공이 가능하기 때문에 거주하면서도 시공이 가능하고, 통풍 및 채광 확보는 물론 개구부에 대한 대응이 용이하므로 설치 상 제약이 적을 뿐 아니라 여러 구조 형식에 적용이 가능한 장점이 있다.

본 기사에서는 이러한 제진 보강 공법 중 하나로 겔(Gel) 형태의 실리콘이 주입된 속도의존형 점성 감쇠장치를 사용한 변위 증폭형 제진 보강 기술을 소개하고자 한다. 이는 저비용으로 고효율의 제진을 하는 것이 특장점이다. 본 시스템에는 95% 이상의 높은 에너지 소산 효율을 갖는 속도의존형 실리콘 점성 감쇠장치가 사용되며, 입력되는 변위와 속도를 토글시스템을 통해 증폭시킴으로써 기존의 제진 시스템에 비하여 더 많은 에너지를 소산시킬 수 있는 장점을 갖는다.

2. 기술 구성 및 특징

실리콘 점성 감쇠장치를 이용한 다층형 토글감쇠시스템 내진 보강 기술은 크게 세 부분으로 구성된다. 지진 에너지를 효과적으로 흡수할 수 있는 “실리콘 점성 감쇠장치”, 작은 변위도 크게 증폭하여 제진 성능을 크게 향상시켜주는 “다층형 토글시스템”, 기존 건물의 기능을 유지하며 공사가 가능한 “외부 부착형 프레임”으로 〈Fig. 1〉에 상세를 나타냈다.



〈Fig. 1〉 Components of the multi-story toggle-brace-damper system for seismic retrofitting

2.1 실리콘 점성 감쇠장치

점성 감쇠장치는 속도에 의해 저항력이 발생하는 점성체(粘性體)를 이용하여 감쇠력을 발생시키며, 일반적인 형태는 〈Fig. 2〉와 같다. 실린더(Cylinder) 안에 점성체가 충전(充塡)되어 있고, 클레비스(Clevis)를 통해 피스톤 로드(Piston rod)를 움직이면 피스톤 헤드(Piston head)로 양분(兩分)된 실린더 내부 공간(Chamber)을 연결하는 틈(Orifice)으로 점성체가 이동하며 저항력을 발생시킨다.

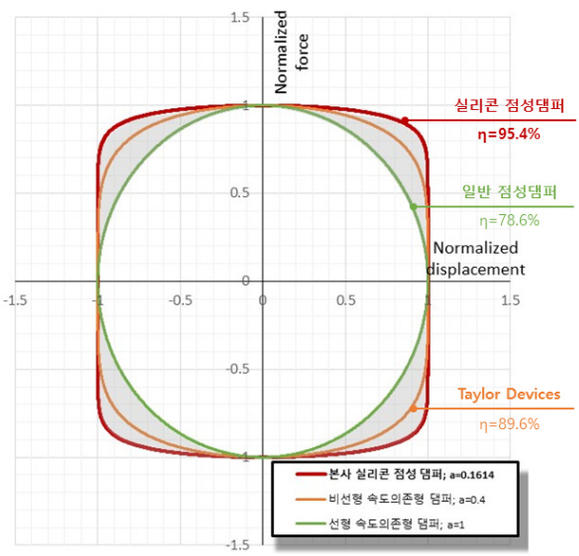
충전재(充塡材)로 점성체를 사용하는 점성 감쇠장치는 에너지 소산 능력이 크고 설계의 요구에 따라 작동 구간(Stroke)을 크게 제작할 수 있기 때문에 감쇠 효율이 높다. 또한 작동 후에도 제품에 손상이 발생하지 않기 때문에 반영구적으로 사용이 가능하며 여진(餘震)에도 대비할 수 있는 장점이 있다.

점성 감쇠장치에 사용되는 점성체는 일반적으로 기체나 유체이다. 기체는 압축성 때문에 작용 하중이 높은 감쇠장치에 사용되지 않고, 유체는 ‘누유(漏油)’라는 고질적인 문제를 갖는다. 누유에 따른 실린더 내부의 유체 손실은 감쇠장치의 성능에 심각한 저하가 발생하기 때문에 유지 보수 및 관리가 중요하다.

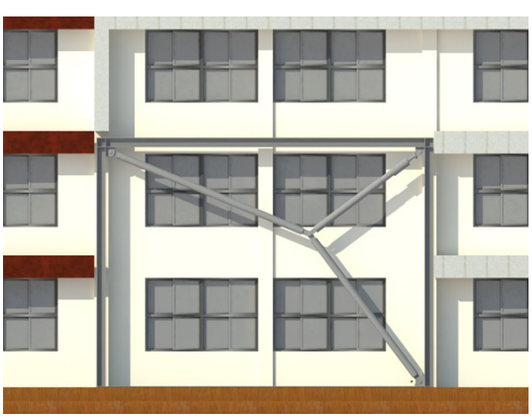
(주)테크스퀘어에서 개발한 점성 감쇠장치는 〈Fig. 3〉과 같은 겔(Gel) 형태의 실리콘을 충전재로 사용하므로 누유 현상이 없으며, 그에 따른 유지 보수가 필요 없는 것이 특징이다. 또한 충전재로 사용되는 실리콘 겔은 유체인 실리콘 오일보다 점성이 높아 최대 21% 더 높은 효율을 발휘한다.

〈Fig. 2〉 Silicone viscous damper

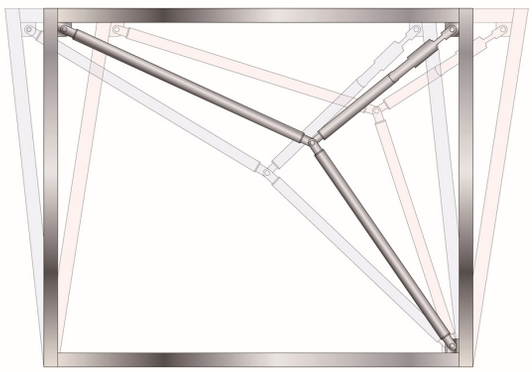
〈Fig. 3〉 Silicone gel



〈Fig. 4〉 Comparison of energy dissipation capacity of the proposed viscous damper and those of other fluid dampers



〈Fig. 5〉 Two-story toggle-brace-damper system



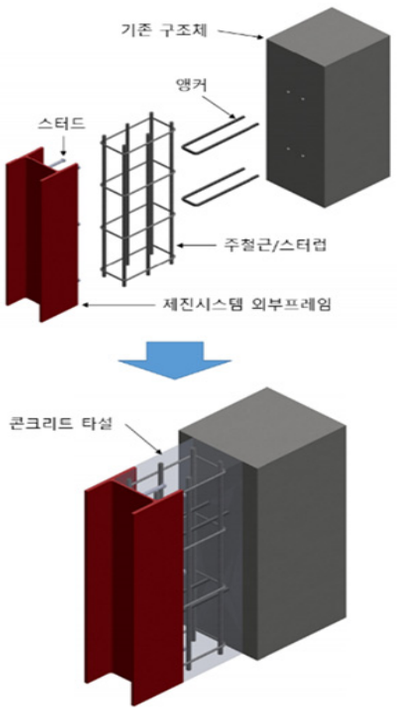
〈Fig. 6〉 Operating mechanism of toggle-brace-damper system

2.2 다층형 토글시스템

토글시스템은 대표적인 변위 증폭 시스템으로 건축 구조물의 횡 변위를 토글 가새의 증폭 작용을 통해 감쇠장치로 전달한다. 〈Fig. 5〉와 같이 가새가 특정한 각도를 이루며 핀으로 연결되어 있는데, 이 가새에 인장 또는 압축 변위가 가해지면 핀으로 연결된 부분의 각도가 변하면서 변위가 전달되는 원리이다. 핀 부분에 감쇠장치를 연결하여 시스템의 전단 변형을 감쇠장치로 전달하며, 가새의 각도에 따라 변형이 증폭되는 것이 가장 큰 특징이다.

시스템에 입력된 변위는 2~3배 증폭되어 감쇠장치로 전달되고. 감쇠장치의 하중은 그에 따라 증폭되어 시스템의 반력으로 작용한다. 따라서 작은 용량의 감쇠장치로 높은 효율을 얻을 수 있으며, 변위가 작아서 감쇠장치의 사용이 어려운 건축 구조물에도 적용 가능하다.

다층형 제진 시스템은 여러 층의 변위를 1개의 감쇠장치에 집중시켜 제진 효율을 더욱 높이기 위해 고안되었다. 예를 들어 2층형의 경우 시스템의 탄성 변형, 댐퍼의 변형 특성 등 제진 시스템의 특성 상 변위 δ의 감쇠장치 2개보다 변위 2δ의 감쇠장치 1개의 에너지 소산 면적이 더 크다. 다층형 토글시스템은 이와 같은 장점을 조합해 효율을 크게 향상시킨 제진 시스템이다.



〈Fig. 7〉 Construction methods of the externally attached connections

2.3 외부 부착형 프레임

소개된 제진 시스템은 〈Fig. 5〉와 같이 기존 구조물 외부에 부착되는 형태로 시공된다. 이를 구현하기 위해 기존 구조물에 U형 앵커를 설치하고, H-형강(H-beam)으로 된 제진 시스템의 외부 프레임에는 스터드(Stud)를 용접하며, 그 사이에는 콘크리트를 타설(打設)하여 일체화한다. 접합부의 상세를 〈Fig. 7〉에 나타냈다. 외부에 부착하는 공법이므로 건물의 기능을 유지하면서 공사가 가능하다는 장점이 있다.

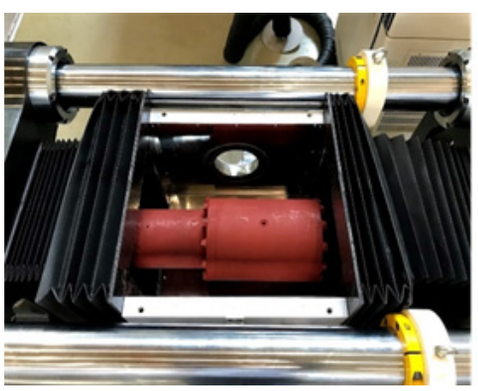
3. 성능 검증 시험

3.1 감쇠장치원형 시험

제진 시스템에 사용된 실리콘 점성 감쇠장치의 속도의존성, 온도의존성, 그리고 내구성 등 관련 성능을 시험을 통해 확인 및 검증하였다〈Fig. 8~10〉.

수치 해석(Numerical analysis)을 통해 감쇠장치가 적용된 구조물의 내진 성능을 평가하기 위해서는 감쇠장치의 성능을 수치화하여 정의한 수치 모델(Numerical model)이 필요하다. 시험 결과를 통해 얻은 감쇠장치의 속도에 따른 하중 성능의 관계를 맥스웰 모델(Maxwell model)의 방정식을 활용하여 〈Fig. 11〉과 같이 수치 모델로 정의하였다. 국토교통부(2019)[1]의 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00: 2019)에 근거하여 제진 시스템 연결 부재 및 접합부

〈Fig. 8〉 Velocity dependence test



〈Fig. 9〉 Temperature dependence test

〈Fig. 10〉 Durability test

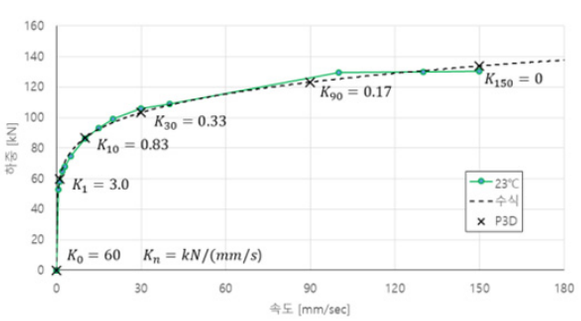
설계 시에는 해당 수치 모델의 120% 감쇠하중을 사용하며, 실질적인 내진 성능 평가에는 85% 감쇠 성능을 하한값으로 반영하게 된다.

3.2 2층형 토글감쇠시스템 시험

2층형 토글감쇠시스템의 층간변위비(Story Drift Ratio, SDR)에 따른 하중 성능을 확인 및 검증하기 위한 시험을 수행하였다. 〈Fig. 12〉와 같이 철골 프레임에 토글감쇠시스템이 핀으로 결합된 형태의 시험체 상부에 수평 변위를 입력하는 시험을 수행하였다. 수평 변위는 층간변위비를 0.1%에서 1.0%까지 10단계(Step)를 단계마다 5번씩 왕복한 후 2.0%까지 5단계를 단계마다 3번씩 왕복하도록 하였다. 총 15단계에서 각 단계의 주기는 6초로 동일하여 시험이 진행되면서 변위와 속도가 증가하도록 하였다.

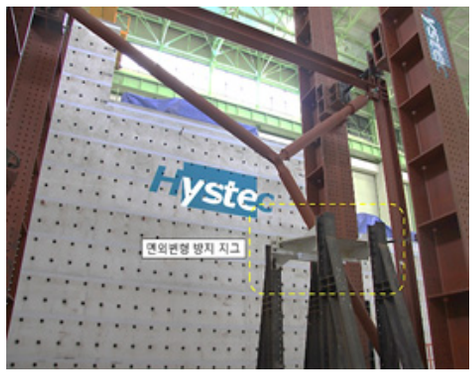
시험 결과를 하중-층간변위비 선도로 정리하면 〈Fig. 13〉과 같이 2층형 토글감쇠시스템의 하중 성능을 파악할 수 있다. 여기에서 철골 프레임의 강성을 제외하면 〈Fig. 14〉와 같다. 2층형 토글시스템을 통한 변위증폭을 통해 느린속도에서부터 감쇠장치의 최대 감쇠하중에 준하는 감쇠 성능을 발휘함을 확인할 수 있다.

철골 프레임의 강성을 제외한 토글감쇠시스템의 감쇠하중이 감쇠장치의 최대 감쇠하중보다 더 큰 것은 토글시스템의 연결부에서 작용하는 마찰에 의해 감쇠하중이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

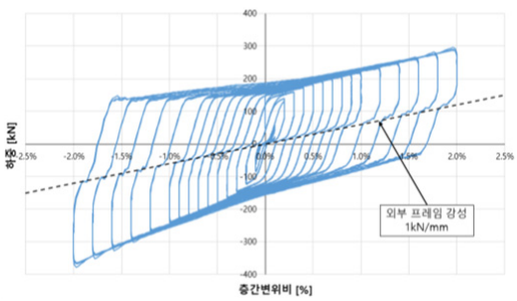


$$F = 60\,V^{0.16}$$

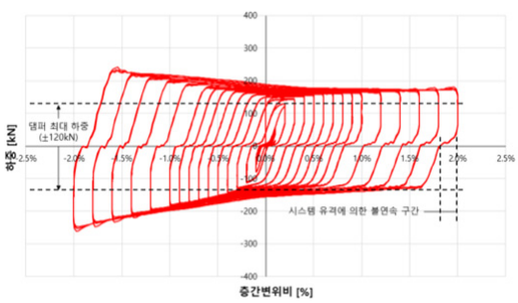
〈Fig. 11〉 Numerical model of the proposed silicone viscous damper



〈Fig. 12〉 Seismic performance test of two-story toggle-brace-damper system



〈Fig. 13〉 Load-SDR relationships of two-story toggle-brace-damper system



〈Fig. 14〉 Load-SDR relationships of two-story toggle-brace-damper system excluding steel frame stiffness

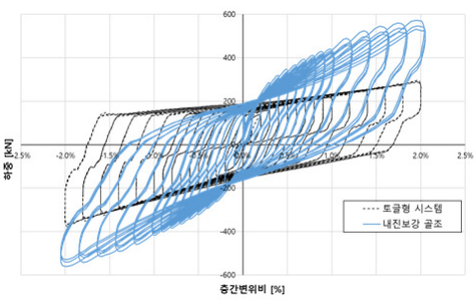
〈Fig. 15〉 Seismic performance test of RC frame retrofitted by two-story toggle-brace-damper system

3.3 내진 보강 골조 실험

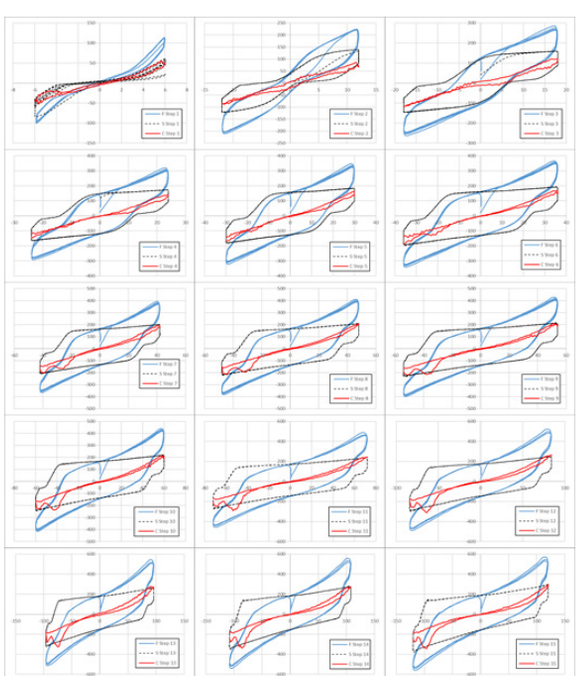
2층형 토글감쇠시스템을 〈Fig. 15〉와 같이 2경간 2층 철근콘크리트 모멘트 골조에 부착하여 철근콘크리트 골조 상부에 수평 변위를 입력하는 실험을 수행하였다. 층간변위비 및 속도에 따른 하중을 확인함으로써 철근콘크리트 골조에 적용된 감쇠시스템의 작동 여부, 그리고 골조에 감쇠시스템을 부착하여 고정하는 접합부의 건전성을 확인 및 검증하였다.

실험의 가력 계획은 앞서 진행한 토글감쇠시스템 시험과 동일하게 하였고, 그 결과를 3.2절의 결과와 함께 하중-층간변위비 선도로 〈Fig. 16〉과 같이 정리하였다.

각 단계별 하중-변위의 관계를 내진 보강된 철근콘크리트 골조(파랑), 토글감쇠시스템(검정), 그리고 순수 철근콘크리트 골조(빨강)의 데이터를 함께 정리하여 〈Fig. 17〉에 나타냈다. 이 결과를 통해 철근콘크리트 구조물에 입력되는 변위가 접합부를 통해 토글감쇠시스템의 철골 프레임으로 전달되고 토글시스템에서 변위가 증폭되어 구상한대로 감쇠장치에서 에너지 소산이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.



〈Fig. 16〉 Load-SDR relationships of RC frame retrofitted by two-story toggle-brace-damper system



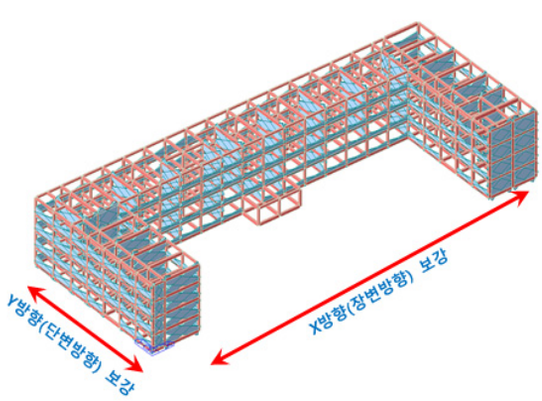
〈Fig. 17〉 Load-SDR relationships of the retrofitted RC frame for each loading step

4. 적용 효과

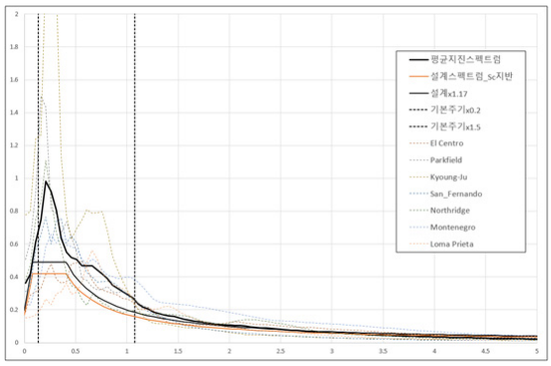
실제 건축 구조물을 대상으로 비선형 동적 해석(시간이력해석)을 수행하여 내진 보강 전과 후의 내진 성능이 국토교통부(2019)[1]와 학교시설 재난공제회(2018)[2]의 기준을 충족하는지 본 기술의 적용 효과를 확인해 보고자 한다. 또한 내진 성능 확보를 위한 내진 보강 설계를 타 공법과의 비교해 봄으로써 본 기술의 효율성도 확인해 보고자 한다.

4.1 대상 건축 구조물

본 연구의 대상 건축 구조물은 1989년 준공된 서울 소재 초등학교의 교사동이다. 지상 4층, 연면적 5,307m^{2}의 철근콘크리트 조의 교육 연구 시설이며, 해석 모델 형상은 〈Fig. 18〉과 같다.



〈Fig. 18〉 Analytical model for example



〈Fig. 19〉 Response spectrums of the used ground motions

4.2 내진 성능 평가

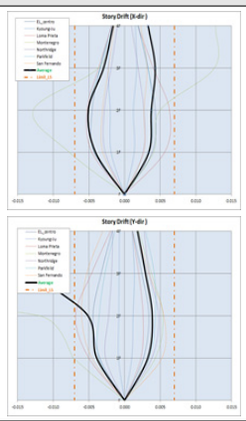
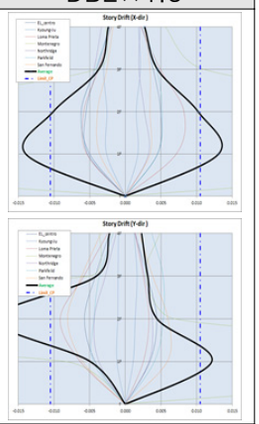
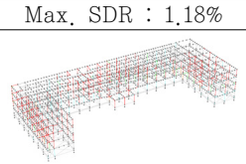
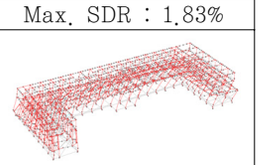
7개의 지진파를 사용하여 시간이력해석을 수행하였으며, 국토교통부(2019)[1]의 기준에 의거하여 사용된 지진파를 〈Fig. 19〉와 같이 스케일 조정하였다.

국토교통부(2019)[1]의 기준과 학교시설 재난공제회(2018)[2]의 매뉴얼에 따르면 해당 구조물은 기본 설계지진(Design Based Earthquake, DBE)의 1.2배에서 층간변위비(Story Drift Ratio, SDR)는 0.7%, 부재 성능(Member Capacity, MC)은 인명안전(Life Safety) 수준을 만족하고, 설계 지진의 1.5배인 최대고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)에서 층간변위비는 1.05%, 부재 성능은 붕괴방지(Collapse Prevention) 수준을 만족해야 한다.

내진 보강 전 구조물의 비선형 동적해석 결과는 〈Fig. 20〉, 내진 보강 후 구조물은 〈Fig. 21〉에 정리하였다. 층간변위비 0.7%는 빨강색 점선, 1.05%는 파랑색 점선으로 표시되어 있고, 7개 지진파에 대한 구조물의 층간변위비 평균값은 검정색 실선으로 표시하였다. 성능이 기준을 만족하지 못하는 부재는 빨강색으로 표시하였다.

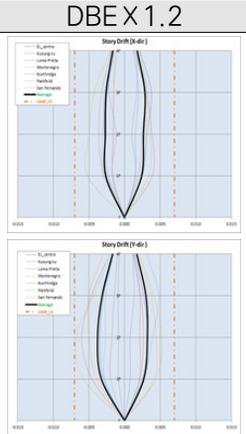
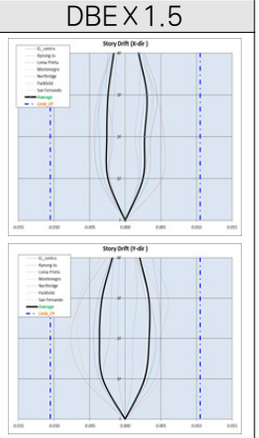
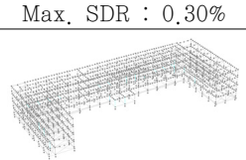
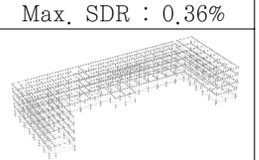
해석의 결과를 종합해보면 보강 전에는 설계 지진의 1.2배와 1.5배에 대해 모두 층간변위비와 부재 성능을 만족하지 못하였으나, 보강 후에는 설계지진의 1.2배와 1.5배에 대해 모두 층간변위비와 부재 성능을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

before the Seismic Reinforcement

	DBE X 1.2	DBE X 1.5
SDR		
	Max. SDR : 1.18%	Max. SDR : 1.83%
MC		
	Red colored member : Not OK for LS	Red colored member : Not OK for CP

〈Fig. 20〉 Non-linear dynamic analysis results of the building structure before seismic retrofitting

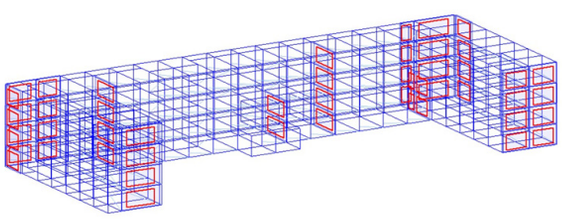
after the Seismic Reinforcement

	DBE X 1.2	DBE X 1.5
SDR		
	Max. SDR : 0.30%	Max. SDR : 0.36%
MC		
	OK for LS	OK for CP

〈Fig. 21〉 Non-linear dynamic analysis results of the building structure after seismic retrofitting

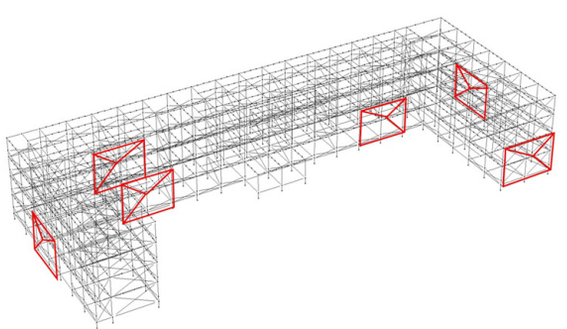
4.3 타 공법 비교

본 기술의 효율성을 확인해 보기 위해 여러 종류의 내진 보강법 중 가장 일반적인 단면 증설 보강법과 보강 개소를 비교해 보았다. 비교 대상은 철근콘크리트 전단벽을 세우는 보강 공법이 적용되었다. 그 결과, 동일한 내진 성능 기준을 만족하기 위해 요구되는 RC 전단벽은 총 48개소, 기초 보강은 22개소가 필요한 것으로 나타났다〈Fig. 22〉. 반면, 본 제안 기술이 적용될 경우 〈Fig. 23〉과 같이 2층형 토글감쇠시스템이 6개소, 기초 보강이 7개소가 요구되어 공사비 및 시공성 측면에서 더 우수한 효과를 거둘 수 있었다.



구 분	RC전단벽		기초 보강
	X방향	Y방향	
1층	7개소	6개소	22개소 (마이크로 파일83본)
2층	7개소	6개소	
3층	7개소	4개소	
4층	7개소	4개소	
합계	28개소	20개소	

〈Fig. 22〉 Locations of RC shear wall required for seismic retrofitting



구 분	2층형 토글감쇠시스템		기초 보강
	X방향	Y방향	
1-2층	4개소	2개소	7개소 (마이크로 파일 7본)

〈Fig. 23〉 Locations of two-story toggle-brace-damper system required for seismic retrofitting

5. 결언

본고에서 소개한 “실리콘 점성 감쇠장치를 이용한 다층형 토글감쇠시스템 내진 보강 기술”은 토글 가새의 작동 메카니즘과 다층형 연결 골조를 통해 감쇠장치로 입력되는 변위와 속도를 증폭시켜 제진 성능을 극대화한 내진 보강 공법이다. 해당 기술은 행정안전부로부터 방재신기술로 지정받은 바 있으며, 한국지진공학회로부터 교육 시설물 내진 보강을 위한 특수 공법으로서 검증을 받는 등 여러 공공 기관을 통해 그 우수성을 인정받고 있다. 또한 관련 기술은 학교, 공공 기관 시설물 및 민간 건축물을 포함하는 약 100건의 내진 보강 프로젝트에 실제 적용되어 국내 건축구조물의 내진 성능 확보에 크게 기여하고 있다.

최근 코로나 바이러스 감염증 확산으로 재난 방재에 국가 재정이 많이 소요되고 있는 현실에서 지진 재난 방재를 위한 내진 보강법으로 제안된 기술과 같은 저비용 고효율의 기술들이 적극 활용되어 지진으로부터 안전한 사회를 구축하는데 이바지하길 기대하며 본 기고를 마치고자 한다.

References

1. 국토교통부, “건축물 내진설계기준”, KDS(Korean Design Standard) 41 17 00, 2019
2. 학교시설 재난공제회, “학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼”, 2018