18CTAP-C
129811-02

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호( )
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 18CTAP-C129811-02

신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 장치의 원천 시스템 개발 및 성능검증을 위한 연구 최종보고서

2019. 03. 11.

주관연구기관 / 인천대학교 산학협력단
공동연구기관 / (주)에스코알티에스

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

신소재를 활용한내진보강용 브레이싱 장치의 원천 시스템 개발 및 성능검증을 위한 연구 최종보고서
2019
국토교통과학기술진흥원
국토교통부

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 원천 시스템 개발 및 성능검증을 위한 실험적 연구'(연구개발 기간 : 2017.04.01~ 2018.12.31) 과제의 최종보고서(보완본) 2부를 제출합니다.

2019. 03. 11

주관연구기관명 : 인천대학교 산학협력단 (대표자) 옥우석 (인)
협동연구기관명 : ㈜에스코알티에스 (대표자) 조영철 (인)
참여기관명 : (대표자) (인)

주관연구기관책임자: 허종완
협동연구기관책임자: 이찬영
참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>18CTAP-C129811-02</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2018. 1. 1 - 2018. 12. 31</td><td>단계구분</td><td>2차년도 / 2차년도</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 원천 시스템 개발 및 성능검증을 위한 실험적 연구</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2"></td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총: 12 명
내부: 7 명
외부: 5 명</td><td>해당단계 연구비</td><td>정부:170,000천원
기업: 56,667천원
정부 외: 0천원
계: 226,667천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총: 24 명
내부: 17 명
외부: 7 명</td><td>총 연구비</td><td>정부:360,000천원
기업:120,001천원
정부 외: 0천원
계: 480,001천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">인천대학교 산학협력단</td><td colspan="2">참여기업명
㈜에스코알티에스</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:</td><td colspan="2">연구책임자:</td></tr>
<tr><td colspan="6">※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의 보안등급 및 사유</td><td colspan="5"></td></tr>
</table>

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정보	생물자원	정보	실물
등록·기탁 번호	9	3									

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

본 연구는 지진으로부터 발생하는 구조물의 피해를 최대한 줄이고 손상으로부터 치유하는데 요구되는 유지·보수비용을 최소화하는 새로운 댐퍼 시스템 장치에 대한 원천 기술을 개발하고 해석과 실험을 통한 구조적 성능 검증으로 세계적 수준의 관련 기술 보유성과를 창출하고자함. 건설 분야에서 새로운 기초·원천 기술을 국내에 도입하고 발전시키고자함. 연구에서 개발된 스마트 댐퍼 시스템은 별도 열처리를 가하지 않아도 원형 복원되어 소성변형이 심한 구조물 일부에 영구적인 설치 및 활용이 가능함. 본 연구에서 사용되는 초탄성 형상기억합금은 댐퍼 시스템에 뛰어난 복원력과 에너지 소산 효과를 동시에 제공함. 개발된 댐퍼 시스템은 국내 도입에 선도적인 역할을 할 것으로 기대되며 선진국과의 기술 격차를 감소하는데 크게 이바지할 것으로 판단됨. 중소기업과 공동으로 수행하여 얻어진 연구 성과물은 제품생산과 기술이전이라는 실용적인 단계를 거쳐 최종적으로 사업화 진행이 기대됨.	보고서 면수 64

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	1차년도에 첨단 신소재를 활용하여 자기치유와 원상복원이 가능한 새로운 브레이싱(가새) 댐퍼 시스템 장치를 개발하고 실험체 제작을 위한 상세 설계 완성하며 실험체를 제작하고 재료 및 구조 실험을 위한 준비 작업을 수행하였다. 이에 따라 2차년도 연구개발 목표는 구조실험을 실시하여 실험결과의 분석을 통하여 물리적 성능을 검증하고 평가하며 실험 결과를 바탕으로 정밀한 유한요소 해석을 수행하여 설계 파라미터별 댐퍼 시스템의 복원성 및 에너지 소산 능력과 같은 역학적 메커니즘을 파악하고 시스템을 장착한 프레임 구조물에 대한 프레임 모델의 제작과 수치해석을 통하여 시스템의 요소적 성능 파악과 부가적 평가 업무를 수행한다. 본 연구에서는 첨단 신소재를 활용하여 자기 치유와 원상 복원이 가능한 새로운 브레이싱(가새) 댐퍼 시스템의 개발에서부터 성능검증까지를 수행한다. 먼저 시스템에 사용될 신소재의 물성치 특성을 파악하고 수치해석에 활용되는 모델을 개발한다. 시스템에 사용되는 지능형 형상기억합금은 상온에서 하중제거 만으로 원형이 복원되는 자기치유 성능을 보유한 첨단 신소재이며 이를 브레이싱 댐퍼 장치에 활용한다. 초탄성 형상기억합금의 재료적 거동을 파악하기 위해 해석 프로그램을 사용하여 수치해석 방법으로 모사한다. 이후 시스템에 대한 역학적 거동 원리와 개념을 정립하고 이를 토대로 첨단 소재와 융합된 새로운 댐퍼 시스템을 개발한다. 초탄성 형상기억합금의 깃발모양 이력 거동은 자기 치유와 원형 복원이 가능하도록 구조물에 복원력을 제공하며 아울러 댐퍼 시스템에 추가의 복원력을 제공하기 위하여 별도의 스프링 장치의 설치가 가능하다. 복원력은 댐퍼 시스템에서 발생하는 잔류 변형을 줄여주는 역할을 담당하여 마찰력과 적절히 조율한다면 잔류 변형 발생을 최소화 하면서 강도증진, 에너지 소산 능력을 최대로 향상시키는 최적인 시스템 설계가 가능하다. 개발된 댐퍼 시스템에 대한 물리적 성능을 검증하기 위하여 상세 설계를 실시하고 실험체에 대한 반복 하중 실험으로 댐퍼의 종류별 복원력과 에너지 소산 능력을 평가한다. 이때 얻어진 실험 결과를 바탕으로 다양한 설계 파라미터 별 유한요소해석 모델을 제작하고 해석결과를 바탕으로 최적의 설계 방식을 도출한다. 마지막으로 구조물 내에서 댐퍼 시스템이 미치는 영향력을 파악하기 위하여 시스템을 장착한 프레임 구조물에 대한 모델을 제작하고 수치해석을 통한 시스템의 요소적 성능 파악과 부가적 평가를 실시한다. 이를 위해 2차원 구조해석이 가능한 프레임 구조물을 설계하여 개발된 시스템에 대한 적용 및 해석을 수행하고 해석결과의 비교 분석을 통하여 시스템의 우수성을 입증하고자 한다.
연구개발성과	지진으로부터 발생하는 구조물의 피해를 최대한 줄이고 손상으로부터 치유하는데 요구되는 유지 · 보수비용을 최소화하는 새로운 댐퍼 시스템 장치에 대한 원천 기술을 개발하고 해석과 실험을 통한 구조적 성능 검증으로 세계적 수준의 관련 기술을 보유하는 성과를 창출하고자 한다. 건설 분야에서 새로운 기초 · 원천 기술을 국내에 도입하고 발전시키며 연구 결과를 바탕으로 해외 유명한 학술지에 여러 편의 논문을 게재하는 도전적인 연구 성과를 달성하고자 한다.
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	연구에서 개발된 스마트 댐퍼 시스템은 별도의 열처리를 가하지 않아도 원형으로 복원되어 소성변형이 심한 구조물 일부에 영구적인 설치 및 활용이 가능하다. 이는 지진과 태풍과 같은 외력으로부터 발생하는 변형을 제어하고 구조물의 붕괴 및 파손을 막을 수 있다. 아울러 본 연구에서 사용되는 초탄성 형상기억합금은 댐퍼 시스템에 뛰어난 복원력과 에너지 소산 효과를 동시에 제공한다. 따라서 구조물의 지속적인 사용성 확보와 유지보수 비용의 절감효과를 기대할 수 있다. 개발된 댐퍼 시스템은 국내 도입에 선도적인 역할을 할 것으로 기대하고 있으며 선진국과의 기술 격차를 감소하는데 크게 이바지할 것으로 판단된다. 중소기업과 공동으로 수행하여 얻어진 연구 성과물은 제품생산과 기술이전이라는 실용적인 단계를 거치면서 최종적으로 사업화에 성공을 기대할 수 있다.

핵심어 (5개 이내)	신소재	스마트 댐퍼	초탄성 거동	복원력	스프링

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	The first year's Research and Development (R & D) goals are as follows. Development of a new bracing (bracing) damper system device capable of self-healing and restoration by utilizing advanced new materials, completion of detailed design for the preparation of test specimens, preparation of test specimens, and preparations for material and structural tests. The second year's research and development goal is to verify and evaluate the physical performance through analysis of the experimental results by carrying out structural tests, and to perform finite element analysis on the basis of the experimental results to evaluate the stability and energy dissipation capacity of the damper system Understanding the mechanical mechanism and constructing the frame model for the frame structure equipped with the system and numerical analysis of the frame structure to perform elemental performance evaluation and additional evaluation work. In this study, a new concentrically bracing damper system capable of self-healing and restoring by utilizing advanced materials is carried out from the development to performance verification. First, the properties of the new material to be used in the system are grasped and a model used for numerical analysis is developed. The new material shape memory alloy used in the system is a state-of-the-art new material with self-healing ability that restores the original shape by removing the load only at room temperature. It is applied to the bracing damper device. In order to understand the material behavior of superelastic shape memory alloy, it is simulated by numerical analysis method using analysis program. Then, based on the principle and concept of the mechanical behavior of the system, we develop a new damper system that is fused with advanced materials. The flagship superelastic behavior of the superelastic shape memory alloy provides restoring force for self-healing and circular restoration, and a separate spring device can be installed to provide additional restoring force to the damper system. The restoring force reduces the residual strain generated in the damper system. If it is properly adjusted with the frictional force, it is possible to design the optimum system to maximize the strength enhancement and energy dissipation capacity while minimizing the residual strain. In order to verify the performance of the developed damper system, detailed design is carried out and the restoring force and energy dissipation capacity of each type of damper are evaluated by cyclic load test on the specimen. Based on the experimental results obtained, the finite element analysis model for various design parameters is fabricated and the optimum design method is derived based on the analysis results. Finally, to understand the influence of the damper system in the structure, a model is built for the frame structure equipped with the system, and the elemental performance of the system is evaluated through numerical analysis and additional evaluation is performed. To do this, we design a frame structure capable of two - dimensional structure analysis and apply it to the developed system and analyze it.
Results	Developed original technology for new damper system device that minimizes maintenance and repair cost required to minimize damages of structure caused by earthquake and to heal damage, and has world-class related technology by structural performance verification through analysis and experiment We want to create achievements that can be achieved. We will introduce and develop new basic and original technologies in the field of construction and achieve the results of challenging research that publishes several papers in overseas famous journals based on the results of research.
Expected Contribution	The smart damper system developed in this study can be restored to its original shape without any additional heat treatment and can be permanently installed and utilized in some structures with severe plastic deformation. This can control deformation resulting from external forces such as earthquakes and typhoons, and can prevent the collapse and destruction of structures. In addition, the super-elastic shape memory alloy used in this study provides excellent restoring power and energy dissipation effect to the damper system. Therefore, it is expected that the structure can be used continuously and the maintenance cost can be reduced. The developed damper system is expected to play a leading role in the introduction of the domestic system and it will contribute to reduce the technology gap with the developed countries. The research achievements obtained through the joint operation with small company can be expected to be commercialized finally through the practical steps of product production and technology transfer.

Keywords	New materials	Smart damper	Superelastic Behavior	Recentering Force	Spring

〈 Contents 〉

1. Outline of Research and Development Project ····· 1
2. Domestic and overseas technology development status ····· 9
3. Research performance and performance ····· 19
4. Achievement of goals and contribution to related fields ····· 46
5. Plan to utilize R & D achievements ····· 52
6. Overseas Science and Technology Information ····· 55
7. Security rating of R & D achievement ····· 58
8. Research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System ····· 59
9. Implementation of safety measures in laboratories based on R&D tasks 60
10. Representative Research Results of R & D Project ····· 61
11. Others ····· 64
12. References ····· 65

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 9
3. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 19
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 46
5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 52
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 55
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 58
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 59
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 60
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 61
11. 기타 사항 ····· 64
12. 참고 문헌 ····· 65

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 목적

□ 최종 연구개발의 목적

최종 연구 개발 목적	본 연구개발의 최종목표는 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치를 개발하고 실험과 해석적 방법으로 시스템의 복원성과 에너지 소산 능력 등 성능을 검증하며 수치해석적 방법으로 현장 적용가능성을 검증하여 전주기적 연구를 통한 최적의 설계 시스템을 완성함

□ 연차별 연구개발의 목적

○ (1차년도) 첨단 신소재를 활용하여 자기 치유와 원상 복원이 가능한 새로운 브레이싱(가새) 댐퍼 시스템 장치를 개발하고 실험체 제작을 위한 상세 설계 완성하며 실험체를 제작하고 재료 및 구조 실험을 위한 준비 작업을 수행함

○ (2차년도) 구조실험을 실시하여 실험결과의 분석을 통하여 물리적 성능을 검증하고 평가하며 실험 결과를 바탕으로 정밀한 유한요소 해석을 수행하여 설계 파라미터별 댐퍼 시스템의 복원성 및 에너지 소산 능력과 같은 역학적 메커니즘을 파악하고 시스템을 장착한 프레임 구조물에 대한 프레임 모델의 제작과 수치해석을 통하여 시스템의 요소적 성능 파악과 부가적 평가 업무를 수행함

2. 연구개발의 필요성

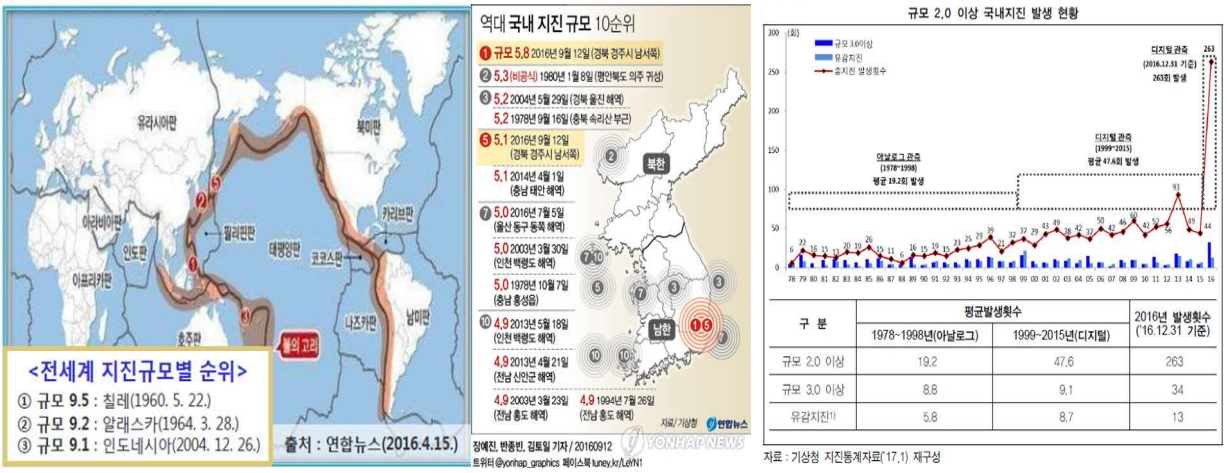
가. 연구개발 기술의 제안배경

□ 국내외 지진재해의 현황 및 심각성

○ 20세기 이후 전 세계적으로 다양한 자연재해로 인한 막대한 인명 및 재산 피해가 발생되고 있는 가운데 그중에서 지진으로 인한 피해가 가장 큰 규모를 나타내고 있음(그림 1 참고)

- 지난 38년간(1978년~2015년) 전 세계적으로 규모 5.0이상의 지진은 총 62,258회로 연평균 1,638회 발생하였고 최근 10년간(2006년~2015년) 연평균 1,953회로 꾸준히 증가하는 추세임
- 20세기 이후 자연재해로 인한 피해규모 약 3만 5천 건 이상 발생하여 88만여 명의 사망자와 약 8000조원의 재산피해가 발생하였으며 자연재해 가운데 지진으로 인한 피해가 가장 큰 규모(사망 232만여 명, 재산피해 약 2080조원)를 차지함
- 세계적으로 2008년 중국 쓰촨성 대지진(사망 7만여 명, 재산피해 약 160조원), 2010년 아이티 대지진(사망 31만여 명, 재산피해 약 15조원), 2011년 동일본 대지진(사망 2만여 명, 재산피해 약 382조원), 2015년 네팔 대지진(사망 9천여 명, 재산피해 약 4조원) 등과 같은 대규모 지진으로 인한 피해가 발생함
- 대부분의 강진은 태평양을 둘러싸고 있는 불의 고리모양인 환태평양 조산대에서 90%이상 발생하고 있으며 이는 세계적인 지진 전조현상으로 국내에도 영향이 있을 것이라는 분석이 지배적임

- 국외의 경우 지진 발생으로 인한 피해를 교훈 삼아 내진 성능 확보를 위한 국가적 차원의 다양한 지원을 통하여 지진 피해방지에 대한 노력을 기울여 추후 피해 예방을 위한 노력을 기울이고 있음



구 분	평균발생횟수		2016년 발생횟수 ('16.12.31 기준)
	1978~1998년(아날로그)	1999~2015년(디지털)	
규모 2.0 이상	19.2	47.6	263
규모 3.0 이상	8.8	9.1	34
유감지진[1]	5.8	8.7	13

자료 : 기상청 지진통계자료('17.1) 재구성

그림 1. 국내외 지진 피해 사례 및 발생 현황

○ 국내의 경우 최근 지진 발생 빈도와 규모의 증가에 따라 내진현황의 문제점 해결과 국민의 안전에 대한 불감증 해소를 위한 **<u>내진 안전성 확보 대책 필요성이 국가적 문제로 확산되고 있음</u>**

- 국내의 경우에는 과거에는 인명 및 재산 피해가 크게 발생되지 않았지만 최근에는 한반도에서 지진 관측 이래로 최대인 **<u>규모 5.8에 경주지진을 포함한 크고 작은 규모의 지진이 발생하였고 앞으로도 진도 6.0 이상 규모의 지진이 추가적으로 발생할 것으로 예상됨</u>**
- 지난 38년간(1978년~2015년) 규모 2.0 이상의 지진은 총 1,212회로 연평균 32회 발생(규모 5.0이상은 총 9회)하였고 경주지진이 발생한 2016년의 경우 규모 2.0 이상 지진은 2016년 12월 기준으로 총 263회 발생하여 연평균 8배 가까운 발생 빈도를 나타내어 우리나라도 더 이상 지진으로부터 안전하지 못한 현실에 있음
- 우리나라는 90년대부터 내진설계가 적용되어 이전의 지진에 무방비 상태인 노후화된 구조물들은 진도 5.5 규모의 지진이 발생하면 막대한 재산 피해와 사상자가 발생하여 비극적인 참사가 발생될 것으로 예상됨(※서울에서 6.5 규모의 지진 발생 시 예상 피해는 1만 2천여 명의 사망자가 발생할 것으로 추정)
- 지진 발생 시 1차적으로 구조물 붕괴와 2차 피해로 발생되는 인적·물적 피해를 직접적으로 예방하고 내진 안정성을 확보하기 위하여 근본적인 해결책이 되는 지진피해 저감 시스템에 대한 기초원천 기술개발에 집중적인 투자가 필요함

□ 기존의 지진 피해저감 기술의 현황과 한계점

○ 지진에 저항하여 구조물의 붕괴를 막아 인적·물적 피해와 손상을 방지할 수 있는 **<u>지진피해 저감을 위한 내진설계의 세부기술로는 내진/면진/제진 방식이 있음</u>**

○ 내진은 국내에 가장 많이 사용하는 방식이며 부재를 특정 규모의 지진 하중에 견디도록 설계하는 기술로 현행 건축, 토목 등의 설계기준에서는 내진설계가 의무화 되어 있음

- 내진은 구조물에 강도와 인성을 증가시켜서 외력에 저항하는 방식으로 강진 발생 시 구조물에 발생되는 손상을 줄이기 위해서 부재의 단면적을 확보하여 설계하는 방식임

- 건축 분야에서는 1980년대 후반에 포괄적으로 면진/제진을 포함하는 내진설계가 제한적으로 도입되었으며 교량 및 도로와 같은 토목 시설물에는 1990년대 초반에 도입되었음
- 내진설계 기준은 현재까지 수차례 지속적인 개정을 통하여 구조 대상을 확대하고 강화하여 의무화고 있지만 내진설계 도입 이전의 구조물, 실질적으로 지진피해가 가장 많은 저층 구조물, 내진설계 도입이 비용 측면에서 어려운 민간 구조물 등 국내에 현존하는 구조물 환경에 부합하지 않는 경우가 다수임

○ 면진은 지반과 구조물 사이에 받침과 같은 격리 장치를 설치하여 가속도의 방향으로 움직임을 허용하여 진동의 전달을 감소시키는 방식이며, 제진은 구조물 내부에서 진동을 흡수하고자 브레이싱 댐퍼와 같은 에너지 소산 장치를 구조물 내에 설치하여 지진 하중에 대하여 일부 직접적으로 대응하는 방식임(그림 2 참고)

- 면진 설계는 구조물과 지반사이에 전단변형 장치를 설치하여 지반과 건물을 각각 격리(Base Isolation)시키는 방식으로 지진이 발생하는 경우 구조물의 고유주기를 길게 하여 지진과 구조물과의 공진을 막아 지진 하중의 영향을 감소시킴
- 제진 설계는 구조물의 내부나 외부에 댐퍼와 같은 시스템 장치를 국부적으로 설치하여 지진이 발생하는 방향으로 직접적으로 대응하며 구조물의 진동을 저감시키고 변위를 감소시키거나, 구조물의 강성이나 감쇠 등을 변화시켜 구조물을 제어하는 방식임
- 국내에서는 2000년대 초반에 면진 및 제진 방식이 구조물에 처음 도입되었으나 현재 국내에서 면진 및 제진 방식은 설계·시공 등의 명확하게 정립된 지침이나 기준도 마련되어 있지 않은 실정임
- 면진 설계의 경우 유니슨 연구동에 처음 면진 방식이 적용되었으며 현재 국가 주요시설인 원전을 포함하여 대부분이 신축 교량에 사용되고 있으며 다양한 국내 기술들이 개발 및 현장 적용 중에 있음
- 제진 설계의 경우 초기에 대형 건설사를 중심으로 일부 고층 구조물에 상용화 되고 있지만 기초원천 기술의 부족과 초기 투자비용에 대한 부담으로 현장 적용에 있어서 현실적으로 많은 어려움이 있음

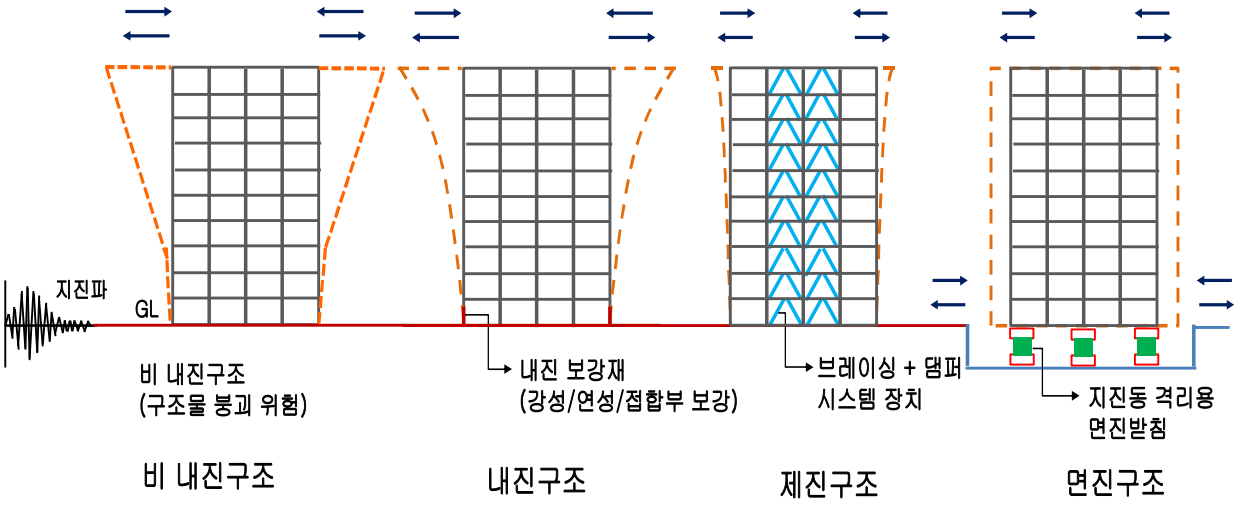


그림 2. 지진 피해저감 기술의 종류 및 정의

○ 구조물이 점차적으로 대형화 고층화 되는 국내외 건설 환경을 고려할 때 지진피해 저감 시스템과 관련된 기술 중에서 가장 효율이 높은 제진 시스템에 대한 기술 개발이 필요한 상황임

□ 기존 기술의 문제점 및 해결방안

○ 내진 방식은 철근 콘크리트 및 철골 부재의 발달로 지진 하중에 버틸 수 있는 저항력이 향상되었지만 여전히 강한 지진 하중에 견디기 위해서는 단면적을 증대해야 하기 때문에 효율이 상대적으로 저하되고 비경제적인 설계가 될 우려가 있음

- 내진 방식은 구조물의 하중증가, 사용성 등의 부수적인 문제가 발생하고 지진동에 구조체가 직접적으로 저항하기 때문에 강진 발생 시 구조물 내부의 진동이 심하고 배관과 내부 시설물 등의 비구조체의 파괴 가능성이 매우 높음
- 부재의 단면적의 확보로 구조물의 강도가 증가하지만 근거리 지진 발생 시 구조물의 변위가 증가하여 지진으로 인한 피해가 큰 사례가 다수 발생하여 부가적인 후속 조치가 필요한 상황임

○ 면진 방식은 구조물의 주기를 늘려서 지반으로부터 전달되는 가속도를 줄여주는 장점이 있지만 진동 격리를 위하여 지반과 구조물 사이에 탄성체의 물체를 설치하여 구조물 전체의 하중을 지탱하기 때문에 중·저층 빌딩에 한정되어 사용됨

- 면진 받침의 파괴가 발생하는 경우 구조물 전체를 들어내어 교체를 해야 하므로 보수·보강을 위한 시공 규모와 소요 비용이 증가하며 극단적인 경우 재건축을 해야 하는 상황이 발생할 수 있음
- 아울러 면진 방식은 사용된 재료에 의해 비선형 거동 후 교체 필요, 수평 하중에 의한 큰 변위에 의해 파괴를 방지하기 위하여 추가적인 댐퍼 사용 등과 같은 문제점이 발생함

○ 제진 방식은 구조물 내부에서 충격과 진동을 흡수할 목적으로 변위와 진동이 집중하는 부분에 충격 흡수용 댐퍼 장치가 구조물과 일체화되어 설치되기 때문에 건물의 높이에 상관없이 사용이 가능함

- 제진 방식은 시스템에 변위를 집중시켜 구조물에 하중을 지탱하는 주요한 구조체(보 혹은 기둥)들을 보호하는 형식으로 설계가 되기 때문에 강한 지진이 발생할 경우 이러한 제진 장치의 손상이 발생되어 교체에 의한 추가의 유지 및 보수비용이 발생함
- 능동제어 방법을 활용한 제진 방식은 비교적 소규모 장치를 이용하여 높은 진동제어 효율을 얻을 수 있지만 정밀 기계 및 전자 장비를 추가로 설치하고 이를 운영하기 위하여 외부 동력을 필요로 하는 번거로움이 있음

○ 이러한 환경적 요인을 고려하여 본 연구에서는 **지진피해 저감 기술 중에서 가장 많은 장점을 가지고 있는 제진 시스템에 대한 문제점들을 해결하고 성능 향상을 위하여 제진 장치에서 브레이싱 댐퍼의 복원성과 에너지 소산 능력을 증가시켜 잔류변형 감소와 사용성 증대 효과를 발생시키는 획기적인 시스템 개발 기술을 제안함**

나. 연구개발 기술의 활용방안

□ 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 활용

○ 본 연구에서 제안하는 첨단 신소재인 초탄성 형상기억합금을 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼는 구조물의 보(Beam)와 브레이싱의 연결부에 설치하여 지진하중에 의한 구조물의 횡방향 변위제어 및 진동저감을 위한 시스템으로 활용됨(그림 3 참고)

- 스마트 댐퍼 시스템은 프레임 구조물에서 하중에 의한 영향이 집중되는 보와 브레이싱의 접합부에 설치하며, 보-댐퍼 연결부는 거셋 플레이트를 활용하여 마찰볼트와 체결하고 시스템에서 공급되는 마찰에너지와 더불어 거셋 플레이트의 마찰 거동으로 추가적인 에너지의 제공이 가능함

- 댐퍼-브레이싱 연결부는 댐퍼의 슬라이더 부분과 브레이싱(가새) 부재를 직접 체결하고 박스형 강재에 일정한 크기의 슬롯 볼트 구멍을 제작하여 슬라이더의 탈락방지와 제한적인 이동 거리를 확보함
- 스마트 댐퍼 시스템의 우수한 에너지 소산능력으로 인하여 충격을 흡수하고 진동을 완화하여 외력으로부터 구조물에 발생하는 손상을 최대한으로 줄일 수 있으며 구조물의 규모, 형태, 에너지 흡수의 규모 등을 고려하여 여러 개의 댐퍼를 브레이싱과 보의 연결부에 아래 그림과 같이 간단하고 편리하게 설치함

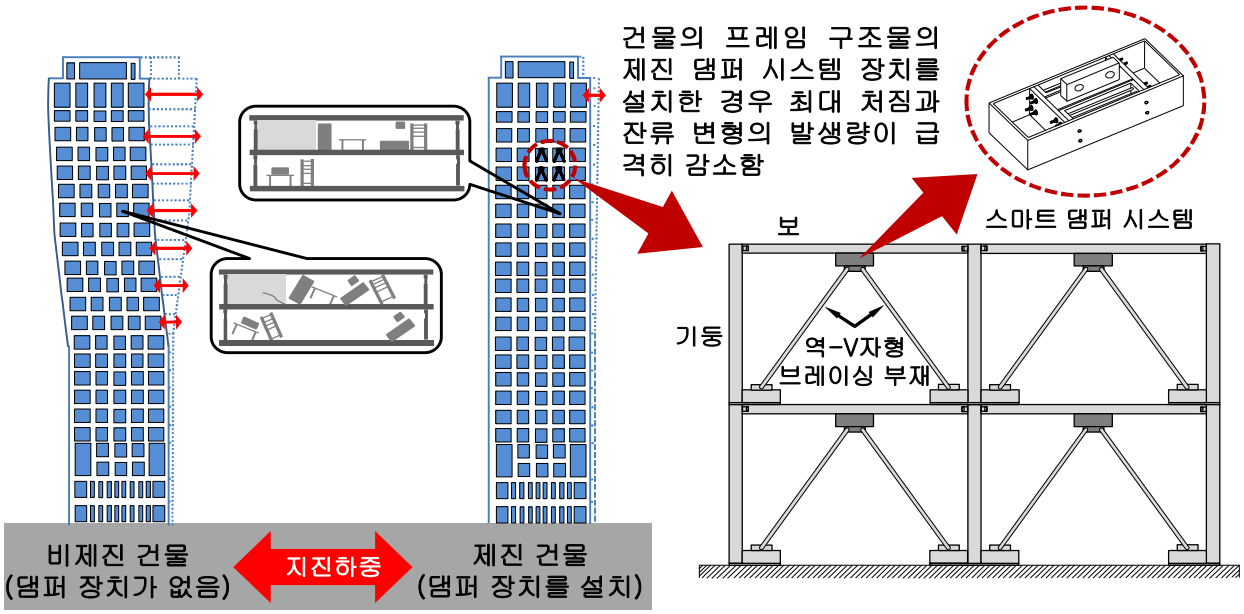


그림 3. 연구개발 시스템의 활용방안

○ 스마트 댐퍼시스템을 프레임 구조물에 설치할 경우 **우수한 에너지 소산능력에 의하여 지진으로부터 발생되는 손상을 상당량 저감하는 것이 가능하며 층간 잔류 변위를 감소시켜 유지와 보수로 소모되는 비용을 상당량 절감하는 효과가 나타날 것으로 판단됨**

3. 연구개발 범위

가. 연구개발 대상 기술의 개요

□ 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱(Bracing, 가새) 댐퍼(Damper, 감쇠) 장치의 개발

○ 본 연구에서 제안하는 대상 기술은 지진에 의해 발생하는 진동과 변위를 효율적으로 제어하고 변형으로부터 자기치유가 가능하여 유지·보수 능력이 뛰어난 **형상기억합금 소재를 활용한 스마트 댐퍼 시스템으로 브레이싱 프레임 구조물에서 내진보강용 제진 장치로 활용 가능함**

- 스마트 댐퍼 시스템은 외부 하중으로 발생된 진동이나 충격을 흡수하여 완충 또는 에너지 소산 효과를 갖는 마찰(Friction) 댐퍼 시스템에 재료 자체에 감지 및 작동 능력을 보유하여 지능적인 반응이 가능한 스마트 재료인 초탄성 형상기억합금을 활용하여 우수한 성능을 보유한 새로운 개념의 댐퍼 장치를 개발함(그림 4 참고)

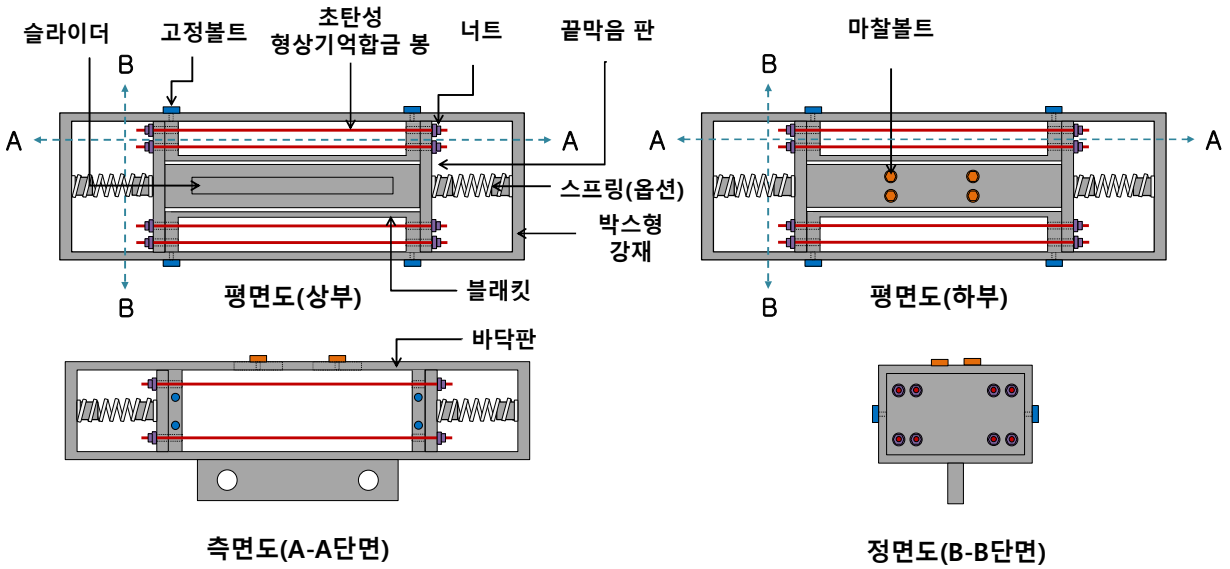


그림 4. 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 구조형상

□ 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 핵심 기술

○ 본 연구에서 제안하는 기술의 핵심인 초탄성 형상기억합금 와이어(봉)은 복원력(Recentering Force)에 의한 시스템의 자기치유(Self-healing) 능력을 향상시키고자 재료 자체에 원형으로 복원되는 성능을 갖는 니켈-티타늄(Ni-Ti)계 혹은 구리(Cu)계 합금을 제작하여 사용함

- 초탄성 형상기억합금은 가공성 내구성 등이 매우 우수한 특수 재료로서 상당량의 변위 하중을 가하더라도 상온에서 응력 제거만으로 잔류변형이 발생하지 않고 자동으로 원형 복원이 가능한 일종의 지능형(Smart) 합금 소재임
- 초탄성 형상기억합금은 하중을 주어 변형이 진행되는 오스텐나이트(Austenite)에서 마르텐자이트(Martensite)로 순방향(Forward) 상변위 과정 동안에 응력 슬립(Stress Slip) 현상이 발생하여 많은 양의 에너지 소산이 가능함(그림 5 참고)
- 하중 제거 후 마르텐자이트에서 오스텐나이트로 역방향(Reverse) 상변위(Phase Transformation)가 진행되는 동안에 자동적으로 원형으로 복귀하며 깃발 모양의 이력을 가지고 거동하며 시스템에 잔류변형을 줄여주는 복원력 제공이 가능함
- 초탄성적인 거동이 가능한 재료는 90대부터 성능향상을 위한 개발연구가 수행되었으며 현재는 8%까지 소성변형을 허용하더라도 완벽하게 원형으로 복원되는 형상기억합금 개발이 완성된 상태임
- 니켈-티타늄(Ni-Ti)계에 니티놀 합금의 경우 일반 강재와 비교하면 항복이후의 강도가 10% 이상 높고 변위 억제의 효과가 탁월하며 초기 탄성률이 대략 1/8 수준이며 고유주기는 강재에 비해 크게 감소되지 않음
- 초탄성 형상기억합금은 강재에 비해 항복강도는 높지만 보다 유연한 초기 탄성률에 의하여 시스템 내에 변위 발생을 억제하면서 구조물의 고유주기를 늘려서 전달되는 지진동을 효율적으로 감소할 수 있는 장점도 가지고 있음
- 재료적 성능이 우수한 형상기억합금은 과거에는 군사용으로 개발되었으며 단가 및 적용성 연구에 대한 문제로 항공, 우주, 의학 등 일부 국한된 범주의 산업분야에서만 활용되고 있으나 현재에는 제작에 대한 가격이 낮아져 건설 분야를 포함하여 다양한 분야에 활용되고 있음

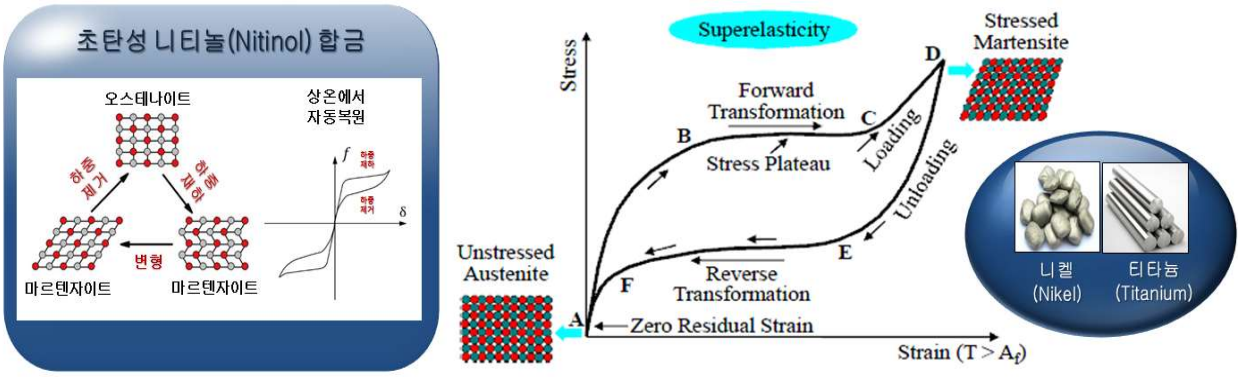


그림 5. 첨단 신소재인 초탄성 형상기억합금의 거동 특성 및 제작

○ 본 연구에서는 건설 내진분야에 내구성, 피로파괴에 대한 저항성, 가공성 등이 우수한 초탄성 형상기억합금을 내진보강용 댐퍼 시스템에 활용하여 지진으로 인하여 발생되는 진동저감 및 변위제어 성능을 검증하고 구조물의 강도 증진, 자동치유로 인한 잔류변형 저감 및 에너지 소산 능력 등의 우수성을 입증하고자 함

나. 연구개발의 범위

□ 연구 목표 달성을 위한 연구개발의 범위



그림 6. 연구개발의 범위

○ 자기치유 및 원형복원이 가능한 첨단 합금 소재를 활용하여 제진 장치의 일종인 새로운 댐퍼 시스템을 개발함

- 진동저감 및 변위제어 기술에 기존 사용된 재료적 한계를 극복 가능하고 재료적으로 우수한 성능의 새로운 소재인 형상기억합금을 도입하는 도전적인 연구를 수행함
- 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치는 기존에 활용된 댐퍼 시스템과 비교하여 강도, 에너지 소산, 자기치유 등 다방면으로 우수한 지진 피해저감 장치를 본 연구 과제에서 새롭게 제안함
- 기존에 지진피해 저감을 위하여 주로 사용되었던 내진기술에 대한 부분적인 보수·보강의 어려움, 효율적인 진동 및 변위 제어의 한계 등의 문제점을 해결 가능한 댐퍼 시스템을 개발함
- 댐퍼 시스템의 핵심기술인 초탄성 형상기억합금의 거동특성을 확인하고 수치해석적 방법으로 거동특성을 모사한 알고리즘을 개발함

○ 규모 7.5 지진에서도 손상이 거의 발생하지 않는 획기적인 구조 시스템 장치를 개발·설계하고 시험체를 제작 후 구조 실험을 통한 성능의 우수성을 검증함

- 본 연구에서는 초·탄성 형상기억합금에 대하여 해석적 결과를 바탕으로 재료실험을 통하여 재료와 시스템의 거동을 비교·분석하여 특성과 개념을 정립함
- 유한요소 해석과 개념 설계만을 수행하여 시스템의 성능과 거동을 예측하는 수준에서 연구를 수행했던 기존 R&D과제들의 한계를 극복하고 본 연구에서는 실험체를 제작하여 직접 하중을 재하(Loading)하는 물리적 실험을 수행하여 실험 결과의 분석을 통한 성능 검증과 평가로 스마트 시스템의 신뢰성을 향상을 도모함

○ 새로운 댐퍼 시스템의 원천 기술 개발과 더불어 추후에 현장 적용과 실용화를 고려하여 개발된 시스템을 설치한 구조물을 설계하여 해석을 통하여 구조물 전체에 미치는 영향력과 내진 성능을 해석을 통하여 새롭게 검증하는 관련 기술 개발에 전주기적인 연구를 수행함

- 본 연구에서는 댐퍼 장치가 설치된 프레임 빌딩 혹은 교량 구조물들을 설계하고 수치해석 방법으로 현장 적용 가능성과 시스템 요소기술의 성능을 검증함
- 구조실험과 유한요소해석의 방법으로 시스템의 국부적인 성능을 입증하였더라도 실제 구조물 전체에 미치는 영향을 파악하는 과정은 시스템 성능 검증을 위하여 반드시 필요하므로 비선형 해석을 수행함
- 스마트 댐퍼 시스템을 구조물에 직접 설치하고 실제 환경과 유사한 해석적 방법을 사용하여 층간 하중-변위 특성이나 각 부재의 파괴 메커니즘 형태 등을 정밀하게 분석하는 작업을 수행함

○ 새로운 댐퍼 시스템 장치에 대하여 기존 시스템의 문제점을 해결하면서 설계·해석과 관련된 고부가가치의 핵심 원천기술을 개발함

- 기존 제진 시스템이 갖는 하중과 변위 집중 부분에 간편한 설치, 구조물의 사용성 확보 등 장점을 유지하고 복원성으로 인한 보수·보강의 비용 절감 등의 추가적인 장점을 부가하여 지진 응답에 대한 효율적인 대응 방안을 제시함
- 다양한 성능검증 연구를 수행한 결과를 바탕으로 새로운 개념의 댐퍼 시스템에 대한 단면형상을 완성하여 최적화된 파라미터에 따른 설계를 제안함

○ 건설 분야에서 새로운 기초·원천 기술을 국내에 도입하고 발전시키며 연구 결과를 바탕으로 해외 유명한 학술지에 여러 편의 논문을 게재하는 도전적인 목표를 설정함

- 본 연구는 연구 제안자의 해외에서 축적한 경험과 노하우를 바탕으로 첨단 신소재를 활용한 댐퍼 장치 개발과 실질적 성능검증에 초점을 둔 연구를 수행하여 최종 연구 목표 및 성과를 달성함
- 본 연구는 요소기술 개발, 개념 및 상세 설계, 구조실험과 유한요소해석을 통한 성능검증, 시스템의 적용을 위한 구조물 설계와 수치해석 실시, 다양한 해석 및 실험 결과 비교·분석 등을 수행하여 양질의 성과를 창출함

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 연구동향 및 학술적 성과

가. 국내외 기술의 연구동향

□ 국내외 연구논문 동향 및 성과

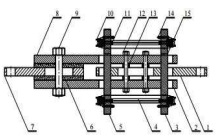
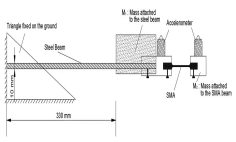
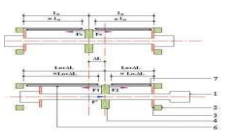
○ 2000년 - 2017년 동안 국내외에서 발행된 “댐퍼 시스템”과 “스마트 댐퍼 시스템”에 대한 연구는 주로 미국, 일본 등 기술 선진국에서 활발히 수행 중이며 국내의 댐퍼 시스템과 관련된 학술성과(논문, 보고서, 단행본 등 포함)는 상대적으로 부족한 수준임

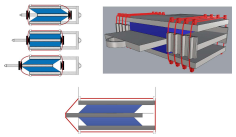
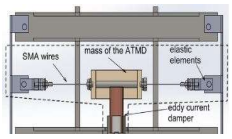
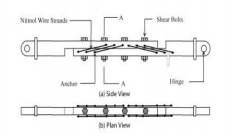
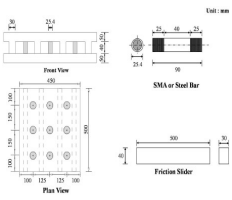
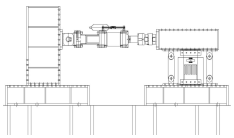
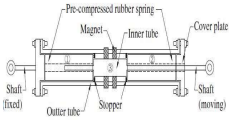
- “댐퍼 시스템”에 대한 학술성과 중에서 총 16,780건을 대상으로 조사한 결과 국외 학술성과 15,200건, 국내 학술성과 1,580건으로 국내의 학술성과는 약 10%의 점유율을 갖는 것으로 조사됨
- 하지만 “스마트 댐퍼 시스템”에 대한 학술적 성과는 총 4,440건으로 국외 학술성과 4,400건, 국내 학술성과 40건으로 나타났으며 국외와 국내의 학술성과는 현저한 차이를 보이는 것으로 조사됨

○ 국외의 경우 지진재해의 지속적인 증가와 안전에 대한 관심 고조로 건설 분야에서 지진재해 저감에 대한 연구가 전 세계적으로 증가되고 있는 가운데 본 연구에서 제안하고자 하는 첨단 신소재를 활용한 지진재해 저감 기술과 관련한 연구가 꾸준히 증가하는 추세임

- 첨단 신소재를 활용한 유사 시스템에 대한 연구는 (미)조지아 공과 대학을 중심으로 학·연에서 활발하게 이루어지고 있으며, 현재 실용화를 위한 실험 단계까지 수행되어 향후에도 지속적으로 발전할 것으로 전망되며 3-4년 이내에 현장에 활용 가능할 것으로 예상됨
- 국외에서는 현재까지 첨단 신소재인 초탄성 형상기억합금을 활용하여 다양한 형태의 지진격리장치 시스템을 개발하고 해석적 및 실험적 방법으로 성능을 검증하여 실질적인 거동을 예측 연구가 수행되었으며 일부에서는 실제로 재료 자체를 케이블과 같은 간단한 구조물에 적용한 사례도 발견됨

표 1. 국내외 연구논문 동향 및 학술적 성과

연구 성과명	출처	대표 연구 성과물	연구 내용
Theoretical Study on Vibration Control of Symmetric Structure with Shape Memory Alloy (SMA)-Friction Damper	Yunli Gao 등, 2014		형상기억합금 와이어의 자동복원 및 마찰요소를 활용한 댐퍼시스템 관련 연구 진행
Feasibility of shape memory alloy in a tuneable mass damper to reduce excessive in-service vibration	Haoyu Huang, 등, 2016		형상기억합금을 적용한 바닥 진동 감소 시스템 관련 연구 진행
Feasibility study on a superelastic SMA damper with re-centring capability	Hongwei Ma 등, 2016		형상기억합금 와이어와 2개의 사전 압축된 스프링으로 구성된 새로운 댐퍼시스템 개발 연구 진행

A superelastic viscous damper for enhanced seismic performance of steel moment frames	Baikuntha Silwal 등, 2015		강재 모멘트 프레임의 내진 성능 향상을 위한 초탄성 형상기억합금 점성댐퍼 연구진행
Modelling and control of an adaptive tuned mass damper based on shape memory alloys and eddy currents	M. Berardengo 등, 2015		형상 기억 합금을 기반으로 하는 적응형 동조 질량 댐퍼의 새로운 배치를 제안 및 연구 진행
마찰에너지 소산과 복원력을 활용한 가새 댐퍼 시스템의 최적 설계와 구조적 활용	**허종완** 등, 2014		형상기억합금을 활용하여 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템에 대한 연구 진행
Pilot Study for Investigating the Cyclic Response of the Recentering Bridge Bearing System Combined with the Friction Damper)	**허종완** 등, 2016		초탄성 형상기억합금을 활용하여 새로운 방식의 면진장치를 개발하고 해석적 방법으로 성능검증을 위한 연구 진행
Seismic loss assessment of a structure retrofitted with slit-friction hybrid dampers	Jinkoo Kim 등, 2016		강재 슬릿과 마찰을 결합하여 하이브리드 댐퍼 관련 연구 진행
Vibration tests of precompressed rubber springs and a flag-shaped smart damper	Eunsoo Choi 등, 2017		자석의 마찰과 형상기억합금의 self-centering을 활용한 시스템 관련 연구 진행

○ 국내의 경우 최근 경주 지진과 같은 내륙에서 발생한 유감지진(여진)이 증가하고 있는 가운데 지진재해에 대해 안전하다는 인식과 내진관련 국가 R&D투자가 미비하여 지진피해저감 시스템 연구는 초기단계에 머물러 있으며 선진국에 비해 매우 낮은 수준임

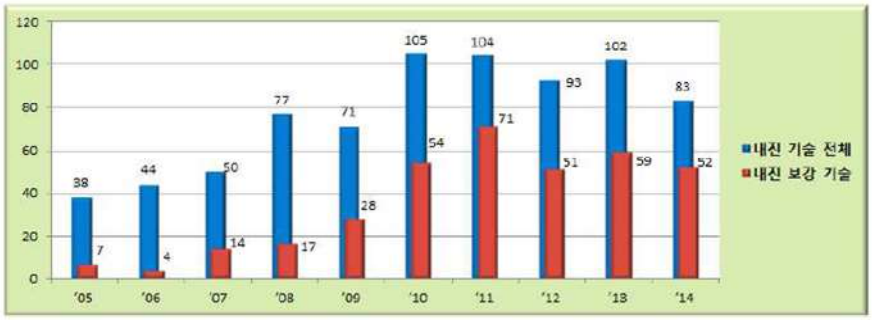
- 첨단 신소재를 활용한 유사 시스템에 대한 연구는 본 연구책임자가 기 수행한 면진시스템 개발연구를 제외하면 거의 전무한 실정이므로 연구책임자가 해외에서 연구한 선진기술을 국내에 도입하고자 함
- 또한 본 연구를 통하여 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치를 개발하고 해석 및 실험적 방법으로 기초·원천 기술에 대한 성능과 실제 구조물에 적용 가능성을 검증하여 최적의 설계 방법을 도출함으로써 국내 지진 피해저감 기술 확보를 통한 선진국과의 기술적 격차를 감소시키고자 함

□ 국내외 특허 및 기술이전 현황

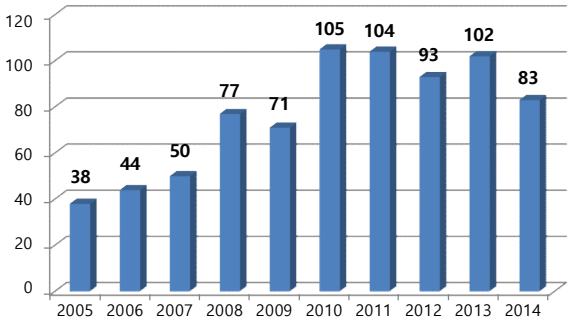
○ 최근 지진재해로 인하여 발생되는 구조물의 피해 유형을 분석한 결과 대부분이 내진 설계가 되지 않은 노후화된 구조물에 집중되어 있는 것으로 조사되면서 구조물의 내진성능을 보강해주는 기술에 대한 관심이 점차적으로 증가하고 있음

- 국내의 경우 건축 구조물의 내진 관련 특허 출원건수는 지난 2005년~2009년 280건에서 2010년 - 2014년 487건으로 증가였으며, 교량 구조물의 내진 관련 특허 출원건수는 2006 - 2010년 335건에서 2011년 - 2015년 448건으로 증가함(그림 7 참고)

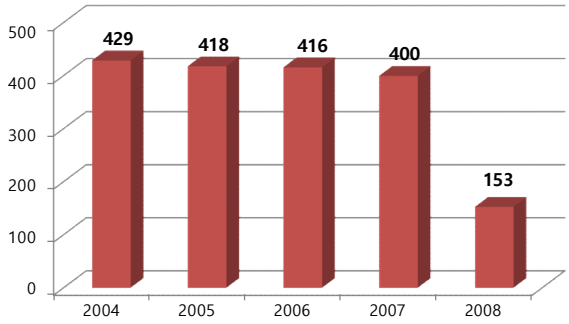
- 지진 피해저감 기술 점유율은 건축 구조물의 경우 내진 52%, 면진 37%, 제진 11%로 가장 효율이 우수한 제진시스템에 대한 연구 및 기술 개발이 가장 미흡한 것으로 나타남
- 기존 건축 구조물의 내진성능 보강 기술은 2005년~2009년 70건에서 2010년~2014년 287건으로 4배 이상 급증하였으며, 교량 구조물의 내진성능 보강 기술은 전체 특허출원건수의 81%를 차지하는 것으로 조사됨(그림 7 참고)
- 국외의 경우 지진 피해저감 기술 선진국인 일본의 내진 관련 특허 출원 건수는 2004년~2008년 연평균 360건 이상으로 지진재해에 대한 꾸준한 기술개발 연구와 투자가 이루어지고 있음



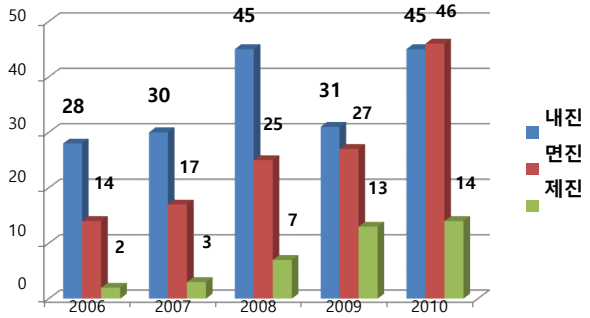
(a) 연도별 내진관련 특허 출원 건수



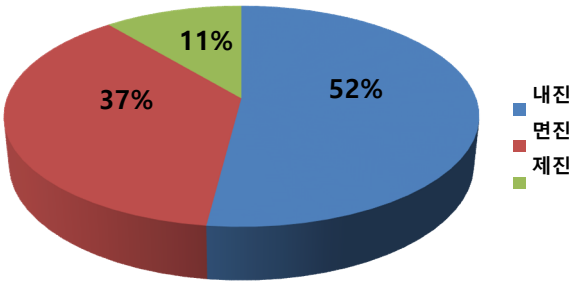
(b) 국내 특허 출원 건수



(c) 국외(일본) 특허 출원 건수



(d) 국내 기술 분야별 특허 출원 건수



(e) 국내 기술 분야별 특허 출원 분포

그림 7. 국내외 내진관련 특허 현황

○ 전기, 전자, 의료, 항공, 기계와 같은 산업 분야에서는 첨단 신소재를 활용하여 시스템을 개발하는 사례는 흔하게 찾아볼 수 있지만 **<u>건설 분야에서는 아직 초기의 연구개발 단계로 지식재산권의 분포가 상대적으로 낮은 수준에 머물러 있음</u>**

- 첨단 신소재를 활용한 스마트 댐퍼 시스템과 관련된 특허는 약 2,000건으로 자동차, 의학 등의 기계분야에 대다수의 특허가 분포되어 있는 것으로 나타났으며 건설 분야에서 지진 피해저감 장치의 경우 55건으로 1990년대는 저조하였으나 2005년 이후 점차적인 증가 추세를 보이고 있음

표 2. 국내 관련 기술 특허

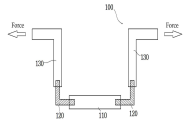
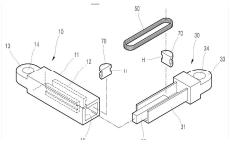
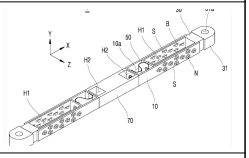
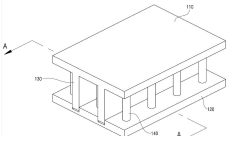
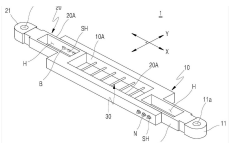
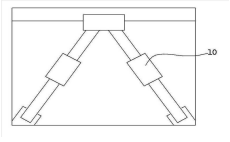
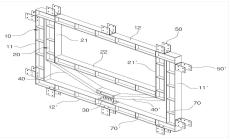
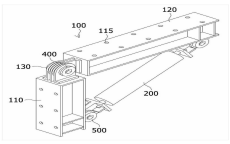
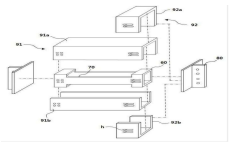
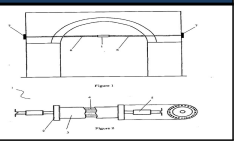
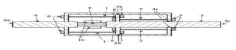
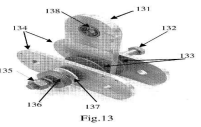
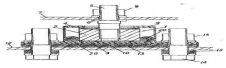
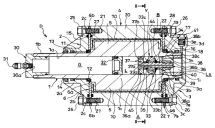
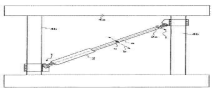
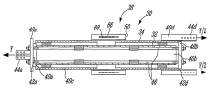
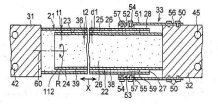
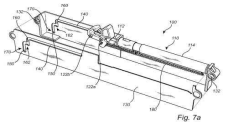
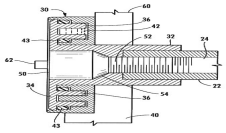
등록번호	특허제목	권리권자	등록일	대표도면
1009230720000	강재와 형상기억합금으로 구성된 댐퍼	주식회사 삼림엔지니어링 남태현, 최은수	2009	
1013686530000	자동복원형 마찰댐퍼	인천대학교 산학협력단 허종완, 장희명	2014	
1020140051080	에너지 소산형 마찰댐퍼	인천대학교 산학협력단 허종완, 김재완	2014	
1015418450000	에너지 소산형 가새댐퍼	인천대학교 산학협력단 허종완, 김영찬	2015	
1020150092139	자동복원형 면진받침	인천대학교 산학협력단 허종완, 조용일	2015	
1016617580000	원형복원형 에너지 소산 댐퍼	인천대학교 산학협력단 허종완, 김영찬	2016	
1016209030000	건축/토목 구조물의 내진 성능 향상을 위한 다중 휨 변형 강재 댐퍼	주식회사 태명엔지니어링 서울메트로 이철희	2016	
1016518490000	슬릿 댐퍼를 이용한 개구부의 내진 보강체 및 그 내진 보강 방법	주식회사 행림종합 건축사사무소 장극관	2016	
1016385560000	건축물의 내진보강을위한 하이브리드 댐퍼	주식회사 메트로 티엔씨 이선근	2016	
1016977530000	강성 조절형 이력댐퍼	주식회사 힐 엔지니어링 우종열, 유충근	2017	

표 3. 국외 관련 기술 특허

등록번호	특허제목	권리권자	등록일	대표도면
(EP 2450506)	System Including a shape-memory alloy device	CONSORZIO CETMA	2011	

(JP 23062337)	Hysteresis Damper	NAGOYA INSTITUTE OF TECHNOLOGY	2011	
(EP 2302144)	Frictional Damper for Damping Movement of Structures	株式會社ジェイアール總研エンジニアリング，三井住友建設株式會社，三協オイルレス工業株式會社	2014	
(JP 05805694)	Vibration Reducing/Attenuating Device	Tremblay Robert Christopoulos Constantin	2015	
(US 09404550)	Rotary Damper	Damptech A/S	2016	
(JP 04712682)	Vibration Isolating Damper Attachment Structure	ブリヂストンケービージー株式會社	2011	
(US 8250818)	Self-centering Energy Dissipative Brace Apparatus with Tensioning Elements	SUGATSUNE KOGYO CO LTD.	2012	
(EP 02261442)	Damper and Vibration Damping Structure Using The Same	OILES CORPORATION	2015	
(EP 3091161)	A Damper	IKEA Supply AG	2016	
(US 09297195)	Hinge Damper Assembly	Toby Berry, Jr. David A. Doornbos Daniel P. Calby	2016	

2. 국내외 기술 시장 및 개발 현황

가. 국내외 기술 시장 현황

□ 국내외 시장분석 및 산업동향

○ 국내 건설시장은 2015년 건설 수주액은 사상 최고치를 경신하며 증가세를 보였으나, 2016년 감소를 시작해 2~3년간 감소를 지속할 것으로 전망됨(그림 8 참고)

- 건설수주는 2016년 8월 누계 수주액 기준으로 2015년 수주액을 상회(※수도권 및 광역시의 재건축, 재개발 등이 요인으로 작용함)하는 것으로 나타났지만 2017년 건설 수주액은 2016년 대비 7.0% 감소한 132.2조원으로 예정이므로 추후 감소할 것으로 전망됨

- 국내의 건설 활동은 국가 경제발전단계와 밀접한 관련을 갖고 변화하여 OECD 각국의 데이터를 기초로 정립한 전망 모델식과 우리나라 특성을 추가적으로 고려하여 분석한 결과 우리나라의 GDP 대비 건설투자 비중이 2020년에는 11%에 근접하여, 2030년에는 10% 내외에 이를 것으로 예상됨
- 국내 건설시장은 2020년 이후 신축 시장은 축소 쇠퇴하기 시작하고, 주택 리모델링, 도심재생, SOC 시설물의 유지보수/재개축 등과 관련된 유지보수 시장 위주로 재편될 것으로 예상됨

○ 국외 건설시장은 오랜 침체기를 벗어나 중국 및 인도 등 아시아 지역의 개도국을 중심으로 점차적으로 꾸준한 성장세를 유지할 것으로 전망됨(그림 8 참고)

- 국외 건설시장은 2014년 8조 5000억 달러에서 2018년까지 연평균 4%씩 성장하여 10조 달러 벽을 넘어설 것으로 전망되며 2023년까지 19조 1000억 달러로 확대될 것으로 예상되며 오랜 침체를 벗어날 조짐을 보이고 있음
- 부분별 성장률은 공공 인프라구조(Infrastructure)부문에서 가장 큰 성장세를 보일 것으로 예상되며 공종별로는 토목부분에서 6.7%의 성장을 보일 것으로 예상됨
- 해외건설 수주액은 사상 최고치인 715억 달러를 수주한 2010년을 제외할 경우 성장세를 보이며 2017년에는 전년대비 39.6% 증가한 455억 달러로 2016년 부진에서 벗어날 전망임

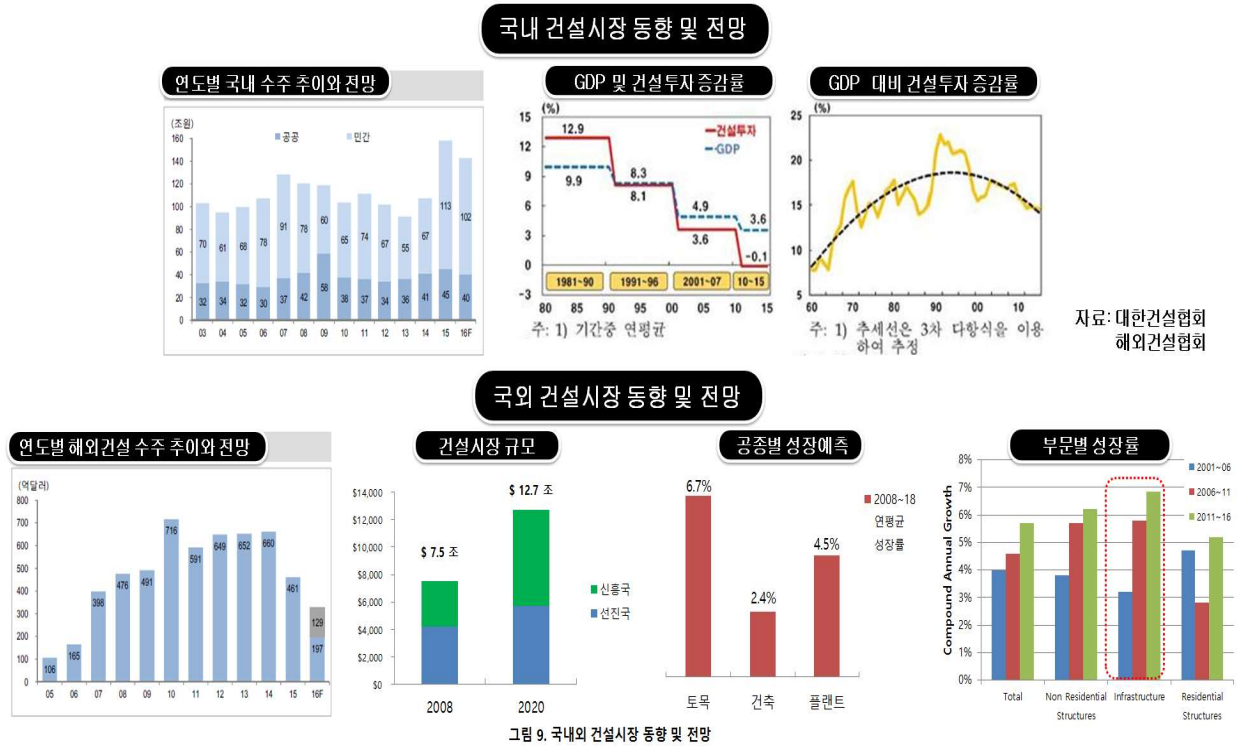


그림 9. 국내외 건설시장 동향 및 전망

그림 8. 국내외 건설시장 동향 및 전망

○ 지진 빈도 증가로 인하여 우리나라도 지진 안전지대가 아니라는 견해가 지배적인 가운데 구조물 내진 성능 확보를 위한 내진 시장규모는 점차적으로 확대될 것으로 판단됨(그림 9 참고)

- 국내에 내진과 관련된 산업시장은 7년간(2007년~2011년) 연평균 5% 성장되어 왔고 수출시장도 연평균 36% 성장되어 왔으며 이후에도 고성장이 이루어질 것으로 예상됨
- 국내 내진보강 시장은 중소기업을 중심으로 기술개발이 이루어지고 있으며 시장규모는 2011년 약 332억 원에서 2015년에는 약 1,000억 원의 시장규모를 형성하였으며 지속적인 성장세가 예상됨

- 일본 내진보강 시장은 일본은 1995년 고베 대지진 이후 구조물에 5,000건 이상 적용되었고 건물의 개조 공사에 사용되는 내진보강 시장 규모는 약 6조원 이상의 시장이 형성됨
- 미국 내진보강 시장은 1985년에 최초로 내진보강 시스템이 적용되어 LA 등 서부 강진지역에 공공기관, 병원 및 역사적 건축물 등 약 300여건이 적용되었으며 현재까지 다양한 구조물에 적용되고 있음
- 세계적으로는 지진에 대해 상당량의 안전성을 요구하는 원전과 플랜트 시설물과 같은 국가 주요시설에 내진 보강기술이 필수적으로 적용되고 있으며 미국, 일본, 일부 유럽연합 국가에서 내진보강 시스템은 다양한 기술로 개발되어 구조물에 적용되고 있는 추세임

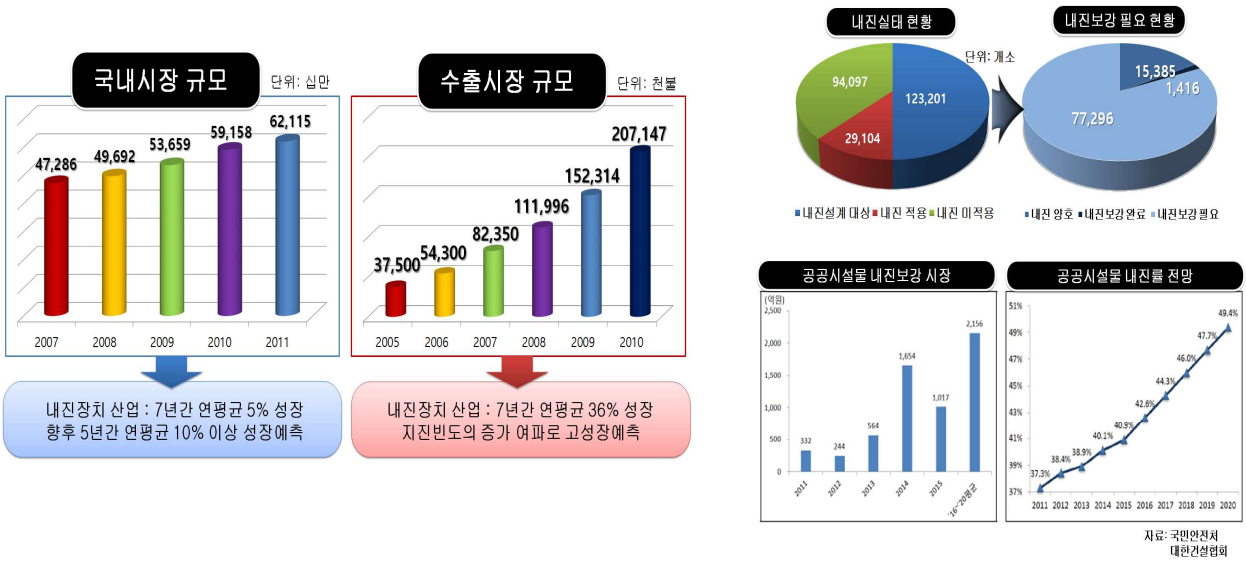


그림 9. 국내 내진시장 동향 및 전망

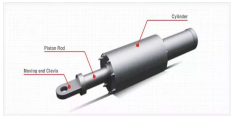
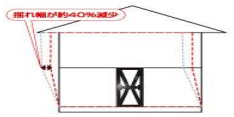
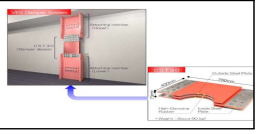
나. 국내외 기술 개발 현황

□ 국내외 기술현황 및 수준분석

○ 국내의 내진 기술은 기술 선진국에 비해 미약한 수준이고 개발된 기술의 종류도 일부 중소기업을 중심으로 개발이 이루어지고 있어 현실은 매우 미미한 실정임
- 국내 내진 기술은 현재 일부 아파트, 원전 등 다양한 구조물에 적용 중이지만 국내 순수 기술력으로 개발되어 적용된 사례는 일부분이며 대부분의 경우 국외의 기술을 수입하여 적용하고 있는 실정임
- 현재 국내의 구조물은 내진율이 40% 수준에 불과하여 외화유출 감소와 지진 피해를 최소화하기 위해서는 효과적인 국내 내진보강 기술개발이 시급함

○ 지진이 자주 발생하는 미국, 일본 등에서는 지진재해 후에 구조물의 붕괴방지, 사용성 확보 및 보수비용 절감을 위하여 내진/면진/제진 시스템을 포함하는 내진 보강에 대한 기술개발이 활발하게 이루어지고 있음
- 지진에 대해서 어느 나라보다도 대비가 되어있었던 일본의 경우 1995년 고베 지진으로 내진 기준이 설립되기 전에 설계 되어진 건물에 대한 피해가 막대하여 내진 성능을 증가시킬 수 있는 내진 보강 시스템의 개발과 보급이 활발히 이루어지고 있음
- 방재와 관련하여 기술 선진국들의 경우 막대한 피해가 발생된 대규모 지진재해를 교훈삼아 국가적 차원의 다양한 기술개발을 통한 내진 대책을 확보하여 지진피해 방지를 위한 노력을 기울이고 있음

표 4. 국내외 관련 기술 현황

기술명(업체명)	기술내용	
EaSy Damper-강재형 댐퍼 (DRB동일)	탄성강성 및 소성변형능력이 크며 안정된 이력특성을 가진 슬릿(Slit)형 강재 플레이트(Steel Plate)를 이용한 댐퍼	
인방형 제진댐퍼 (DRB동일)	Shim Plate를 교대로 적층한 전단항복형 강재댐퍼와 미끄럼방지 홈·마찰패드·스테인리스 스틸 Plate를 활용한 휨항복형 마찰댐퍼를 철근콘크리트 인방보에 적용한 장치	
All-in-1 Smart Damper (BRITEC)	댐퍼, 센서 및 무선통신을 병합한 스마트 댐퍼로서 상시와 지진시 모니터링이 가능한 장치	
오일댐퍼 (BRITEC)	감쇠력이 크고 안정적이며 온도·주파수의 영향이 적고 Stroke의 조절이 가능한 장치	
실리콘 점성댐퍼 (DCR E&C)	실리콘을 활용한 점성물질의 전단변형으로 인한 에너지를 소산하는 원리로 변위, 가속도 및 전단력을 감소시키는 장치	
점성댐퍼 SA (MAGEBA)	피스톤, 피스톤로드, 실린더 등으로 본체를 구성하여 구조물의 자유로운 거동과 지진 등 외부 충격으로 인한 변위제어가 가능한 장치	
J-NVA (ENDURE)	주택의 내진 성능 저하와 내력벽 등의 손상을 방지하기 위하여 X축 2개, Y축 2개가 설치되는 제진 장치	
CST30 /Constec	Plate와 Plate사이에 점성고무가 부착되어 진동을 제어하는 장치	

○ 현재 내진 기술 분야에 대한 시장은 지속적인 확대가 예상되며 2020년 이후 국내 지진 시장은 최대 성숙기가 예상됨(※내진설계 분야만 해당)

- 현재 국내에서는 댐퍼와 같은 제진 시스템 기술은 성장기 단계로 접어들기 시작하였으나 본 연구에서 제안하는 첨단 신소재를 활용한 스마트 댐퍼 시스템은 초기 단계로 현재 도입기 단계에 있음
- 내진 장치를 생산하는 국내 중소기업은 면진의 경우 상당 수준의 기술력을 보유하고 일본과 같은 선진국에서 기술에 대한 인증을 확보한 상태이나 제진의 경우 기술개발 수준이 낮은 상태이므로 국내외 건설시장에 스마트 댐퍼 시스템 기술이 도입된다면 폭발적인 성장과 부가가치 창출이 기대됨

○ 기존에 국내에서는 지진에 대한 관심 부족으로 선진국에 비해 기술력이 뒤처져 있지만 **최근 지진 발생빈도의 증가로 인하여 지진 재해피해 저감 기술에 대한 국민들의 관심과 정부적 차원의 지원 및 내진 기술 수요가 증가하고 있어 내진 기술의 인프라 시장 규모는 확대**될 것으로 전망됨

□ 본 연구개발 과제의 기술개발 성숙도

○ 본 연구개발 과제의 기술개발 성숙도는 **연구 착수 전에는 핵심 특허가 출원 및 등록이 되는 기술적 개념정립 단계(TRL-2)이며 연구 종료 후에는 연구실 규모에서**

실험체 제작과 구조 실험을 통하여 성능의 우수성이 입증하는 실험실 성능평가 단계(TRL-4)로 마무리될 것으로 판단됨

○ 본 연구에서는 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 개발하고 개념을 정립하여 상세 설계와 해석기술 및 시험체 개발에 초점을 두어 **기초·원천 기술단계(TRL 2-4)에서의 연구를 수행함**

- 첨단 신소재를 활용한 내진 보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 초탄성 형상기억합금과 시스템의 기본 원리와 개념을 정립하고 개념 및 상세 설계를 완성함
- 시스템 장치의 거동 예측과 기본적인 성능을 검증하고자 해석(Analysis) 모델을 개발하고 해석을 수행하며 실험실 규모의 시제품을 제작하고 재료와 시스템의 실험을 수행하여 시스템의 성능을 검증함
- 해석과 실험의 결과를 바탕으로 최적의 설계 파라미터로 시스템을 선정하고 실제 발생된 지진 하중에 대하여 구조물에 적용 가능한지 여부를 검증하며 시스템 설치 유무에 따른 손상의 정도를 평가하는 방법을 개발함

○ 본 연구에서 제안하는 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치는 연구개발 종료 후에 후속사업과 연계된다면 기업에 기술협약 및 이전을 통하여 기술 상용화 및 사업화가 예상됨

- 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치는 본 연구를 통하여 TRL 4단계까지 완료되면 후속적으로 사업화 지원을 통하여 실질적인 성능을 검증하고 기술 협약 및 이전을 실시하여 기술의 실질적인 생산 및 도입이 기대됨(**※이러한 이유에서 중소기업과 공동으로 본 연구 과제를 제안함**)

○ 스마트 댐퍼 시스템의 보급은 국내 건설 산업 성장에 우수한 파급효과를 가져올 것으로 예상되어 국내 기술력의 해외 시장 선점을 위한 발판을 마련할 것으로 기대됨

표 5. 기술개발 성숙도

최종성과물	기술성숙도		설정근거
	유형	단계	
신소재(초탄성 니티놀 합금)의 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성	재료·자재 유형	4단계 (성능검증)	니티놀 합금 소재는 이미 90년대에 재료가 개발이 완료되어 가격을 낮추고 재료의 물성치를 향상 시키는 연구를 수행중임. 소재 개발은 이미 응용 연구로 진행 중이며 실험실 환경에서 재료 실험과 전산 모사가 이루어지고 있으며 재료 모델의 활용에 있어서 최적의 결과를 실험과 해석을 통하여 도출하는 기술성숙도가 4단계 수준에 있음
신소재와 융합된 스마트 댐퍼 시스템 개발 및 상세 설계 완성	시스템 유형	2단계 (개념정립)	기존에 제진 설계방식으로 브레이싱 프레임과 결합된 댐퍼 시스템은 이미 실용화 단계에 있으나 니티놀 장치와 마찰 댐퍼와 결합하여 복원력 및 에너지 소산 능력이 향상된 **스마트 댐퍼 시스템은 아직 기술 개발의 원리와 개념을 정립하는 초기 단계에 머물러 있음(특허 출원이 가능함)**
실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 내진효과와 물리적 성능 검증	시스템 유형	3단계 (기본 성능검증)	개발된 스마트 댐퍼 시스템과 부품들의 기본 설계 도면을 제작하고 상세 설계를 토대로 구조 실험을 위한 실험체를 제작함. 아울러 실험실 단계에서 실험을 통하여 시스템의 기본 성능을 검증하는 기술성숙도가 3단계 수준에 있음
정밀한 유한요소 해석을 통한 최적의 설계 파라미터 도출	시스템 유형	3단계 (기본 성능검증)	실험실 단계에서 시스템에 대한 성능을 검증하고 설계 파라미터별 거동을 예측하기 위해 고등적인 수치해석 모델을 개발하고 해석을 실시하는 기술성숙도가 3단계 수준에 있음
수치해석을 통한 시스템의 요소 특성 파악 및 부가적 성능 평가	시스템 유형	4단계 (성능검증)	구조물 내에서 시스템과 부품의 성능을 검증하고 평가함. 정밀한 유한요소 해석에서 도출된 최적의 설계 파라미터로 시스템 요소를 제작하고 이를 장착한 프레임 모델에 대한 수치해석을 수행하여 최종적인 성능 평가를 완성하여 기술성숙도가 4단계임

□ 타산업과의 연계 및 국제협력 가능성

○ 본 연구에서 제안하는 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치는 **첨단 신소재인 형상기억합금 재료를 건설 기술에 융·복합한 기술로써 소재 기술개발이 선행되어야 하므로 재료 산업과의 연계가 필수적임**

- 본 기술은 댐퍼장치 외에 내진보강 기술인 기타 제진 및 면진 시스템 개발을 위한 응용 기술로써 활용이 가능함
- 타 산업의 경우 자동차 충격흡수 장치, 형상복원 안경테, 여성속옷, 교정기 등 자동차, 기계, 의류, 전기, 전자, 의학 등의 다양한 분야에 충격흡수, 복원성 등 첨단 신소재의 성능 활용이 가능함

○ 지진 재해저감 기술은 지진의 발생 빈도가 높은 미국, 일본, 이태리 등과 같은 국가에서는 높은 수준의 기술을 보유하고 있으며 추후에 기술교류와 같은 국제협력을 통하여 국내 내진 산업분야의 발전을 전망할 수 있음

○ 본 연구 책임자는 국내외에서 수년간 관련 분야 연구를 수행함으로써 지진 재해저감 시스템과 관련된 다양한 실적과 경험을 축적하고 인프라를 구축하였기에 국제협력을 통한 기술개발이 가능하다고 판단됨

- 연구 책임자는 석·박사 학위 시절부터 국외에서 유사분야의 연구에 종사하는 교수 및 연구자들과 긴밀한 인적 네트워크를 형성하였기에 본 연구에 제안하는 기술 개발을 위한 연구협력과 자문 등이 가능하다고 판단됨

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 핵심 성과별 연구 수행 내용 및 성과

가. 1차 년도 연구 수행 내용 및 성과

□ (핵심 1) 주관연구기관(인천대학교): 활용될 신소재의 물성치 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차년도	■ 참고문헌 조사(전문가 자문 포함)	초탄성 형상기억합금의 구성과 재료적 특성에 대한 자료를 수집하고 조사함
	■ 재료 시편을 제작하여 재료실험 수행	초탄성적 거동을 보여주는 니티놀 합금의 물성치를 확인하기 위하여 재료 실험을 수행
	■ UMAT 모델 제작 및 해석 수행	수치해석적 방법으로 초탄성 형상기억합금의 거동을 재현하기 위하여 User-defined Material (UMAT) 모델을 사용함
	■ 모델의 정확성 검증	해석으로 얻어진 결과를 재료 실험 결과와 비교하여 정확성을 검증함

○ 별도의 열처리 없이 **상온에서 하중제거 만으로 원형으로 복원되는 자기치유(Self-healing) 성능을 보유한 첨단 신소재인 초탄성 형상기억합금을 지진피해 저감이 가능한 브레이싱 댐퍼 장치에 활용함**

- 초탄성 형상기억합금 중에서 가장 널리 사용되는 것은 니켈과 티타늄이 거의 같은 비중으로 섞여서 만들어진 니티놀(Nitinol)이며 하중 제거 후에 상온에서 Martensite에서 Austenite로 상변위가 발생하여 원형으로 복원되는 현상을 보여줌
- 따라서 초탄성 형상기억합금의 응력-변형률 선도에서 응력고원(Stress Plateau)에서 상당량의 변위를 허용을 하면서 상당량의 에너지를 소산 가능하여 Unloading 경로에서 원상회복을 보여주는 깃발모양(Flag-shaped)의 이력곡선을 보여줌(그림 10 참고)

○ 본 연구에서는 초탄성 형상기억합금의 재료적 거동을 OpenSEES 및 ABAQUS 프로그램을 사용하여 수치해석 방법으로 모사하고 재료 실험에서 얻어진 물성치를 사용하고자 기존에 개발된 알고리듬을 활용하여 사용자 정의 재료(User-defined Material, 이하 UMAT) 모델을 제작함

- 지진하중과 같은 반복 하중이력이 작용하는 상태에서 초탄성 형상기억합금의 자기복원 성질이 나타나는 3차원 응력-변형률 거동을 프로그램에 재현하고 해석에 활용함(그림 11 참고)

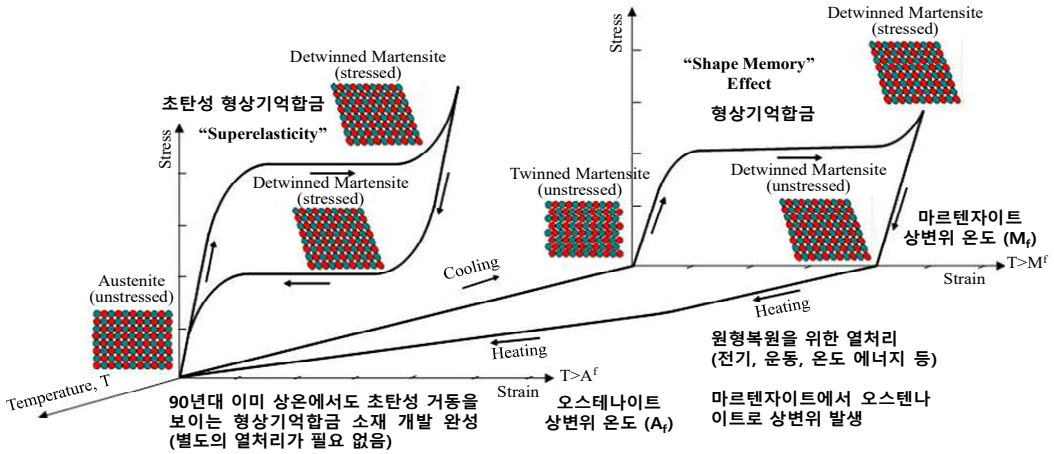
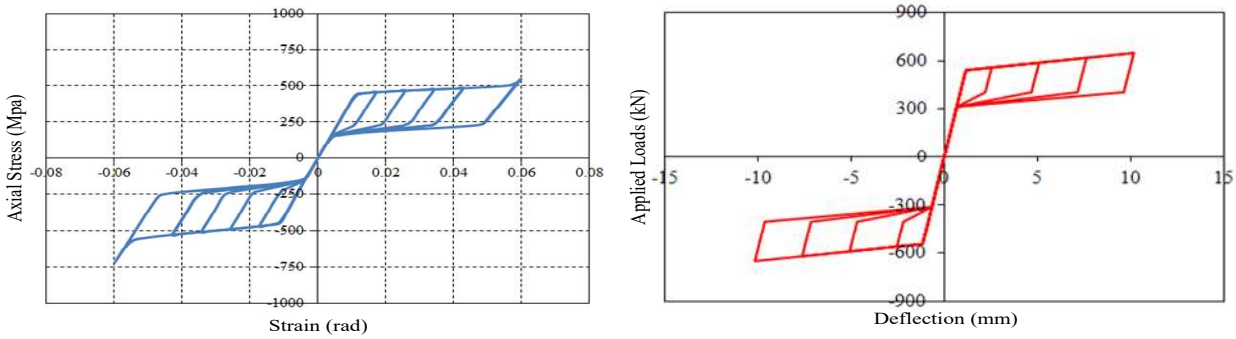


그림 10. 온도 변화에 따른 형상기억합금의 거동 특성



(a) Simulated SMA Behavior (ABAQUS Program)　(b) Simulated SMA Behavior (OpenSEES Program)

그림 11. UMAT 알고리듬 모델을 활용하여 수치해석 방법으로 모사한 초탄성 형상기억합금의 거동

□ (핵심2) 주관연구기관(인천대학교): 신소재와 융합된 스마트 댐퍼 시스템 개발 및 상세 설계 완성

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차년도	■ 해외의 문헌조사 및 정보 수집	자기치유 및 자동복원이 가능한 스마트 댐퍼 시스템과 관련된 해외의 문헌 및 정보 수집
	■ 유사 시스템에 대한 실험 논문 분석	스마트 시스템에 대한 원리와 개념을 정립하기 위하여 관련된 실험 논문들을 분석함
	■ 댐퍼 시스템 개발	선행연구에서 정립된 스마트 시스템에 대한 원리와 개념을 토대로 신소재와 융합된 댐퍼 시스템을 개발함
	■ 개발된 댐퍼의 하중-변위 메커니즘 및 거동 특성 조사	개발된 댐퍼의 작동 원리를 이해하고 댐퍼의 거동에서 복원성과 에너지 소산 능력을 평가함
	■ 댐퍼 설계와 관련 설계 지침 참고	부품을 포함하여 개발된 댐퍼 시스템의 상세 설계를 완성함
	■ 전문가 자문 실시	상세 설계에 대한 문제점 보완과 타당성 검증을 위하여 전문가 자문을 실시함

○ 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 구성 및 작동 원리 등 개념정립을 정리함(그림 12 참고)

- 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치는 기능적으로 크게 **마찰 댐퍼 부분과 형상기억합금 와이어(봉) 부분으로 나눌 수 있고 추가적 옵션으로 복원성 강화를 위한 스프링 설치가 가능함**
- 마찰 댐퍼(Friction Damper) 부분은 사각형 중공 각관으로 설계하여 슬라이더, 슬롯 볼트 구멍, 브래킷, 끝막음 판, 마찰 볼트(Bolt)로 구성되고 슬라이더와 형상기억합금 와이어(봉)의 위치 확보와 외부 하중이 작용하는 경우 탈락방지를 위하여 브래킷과 끝막음 판을 슬라이더 양단에 고정시킴
  - ■ 마찰 댐퍼 부분에서 슬라이더는 구조물에 직접적으로 연결되어 외부 하중으로 인한 마찰 에너지를 댐퍼 장치에 전달하고 초기의 긴장력(Tension)을 받는 마찰 볼트는 바닥판이 밀착되어 슬롯 볼트 구멍에서 반복운동을 하면서 발생되는 마찰력에 의해 에너지를 소산하는 역할을 담당함
  - ■ 브래킷은 박스형 강재와 일체 거동을 위한 고정체(Fastener) 역할을 하며 볼트로 고정시켜 체결함
  - ■ 끝막음 판은 슬라이더, 블래킷 및 형상기억합금 봉 혹은 와이어 장치를 지지해 주는 역할을 수행하기 위해 모멘트에 의한 휨과 지렛대 현상(Prying Action Mechanism)이 발생하지 않도록 적정한 두께로 제작되어야 함

■ 마찰 볼트는 마찰력에 의한 에너지 소산 능력을 증대시켜 댐퍼 시스템의 강도 성능과 충격 흡수 능력을 향상시키는 역할을 하며 슬라이더 하부에 고정시켜 설치함

■ 마찰 볼트가 설치되기 위하여 관통하는 슬롯 볼트 구멍을 제작하며 슬라이더의 제한적인 이동거리를 확보하고 마찰 볼트와 바닥판이 접촉하여 마찰력을 생성시킴. 마찰력은 마찰 볼트의 초기 긴장력과 접촉 표면의 거칠기로 조절이 가능함

- 형상기억합금 와이어(봉)은 블래킷을 통과시켜 끝막음 판에 너트와 같은 조임 철물로 고정시켜 형상기억합금 와이어(봉)을 그림 12에서 보는바와 같이 설치하고 시스템에 요구되는 강도 및 복원력(Recentering Force)에 따라 대칭으로 개수 조정이 가능함

■ 외부 하중으로 인한 슬라이더의 횡방향 이동에 의해 형상기억합금 와이어(봉)는 끝막음 판과 동시에 거동하고 슬라이더 중심을 축으로 양방향 인장(Tension)을 받으며 탄성을 넘는 상태에도 재료의 복원력에 의해 잔류변형의 발생 없이 다시 원래의 상태로 돌아옴

■ 본 댐퍼 장치는 마찰 댐퍼 자체의 에너지 소산 능력으로 외부 하중으로 인한 충격을 흡수하고 완화하여 구조물에 발생하는 손상을 최대한 줄일 수 있는 동시에 자기치유(Self-healing)를 위한 형상기억합금의 복원력이 작용하여 구조물에 발생할 수 있는 영구변형을 효과적으로 제어하고 감소시킴

- 마찰 댐퍼를 사용하면 시스템에서의 에너지 소산 능력은 향상되지만 잔류 변형이 증대되므로 추가적으로 스프링(탄성부재)을 끝막음 판과 박스형 강재 사이에 초탄성 형상기억합금 장치와 같이 댐퍼의 종방향으로 설치하면 복원력을 향상시킬 수 있음

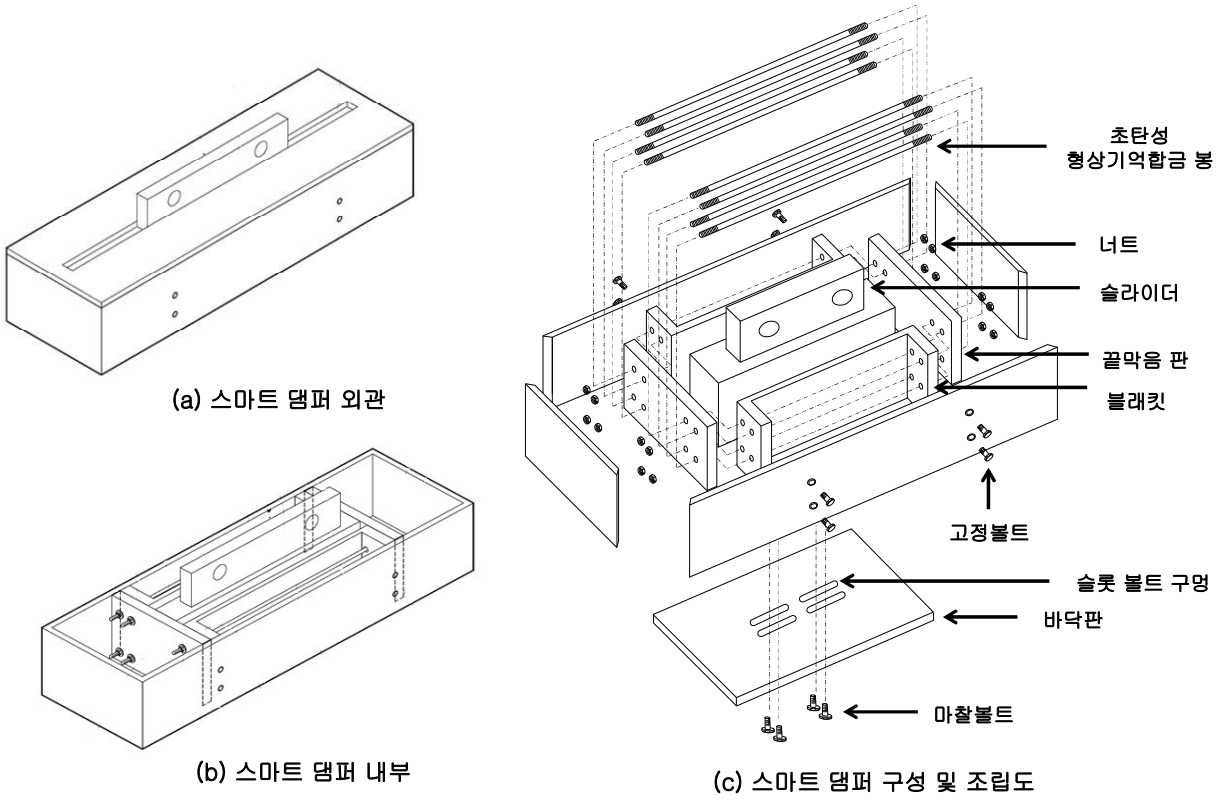


그림 12. 첨단 신소재를 활용한 내진 보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 구성

○ 첨단 신소재를 활용한 내진 보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 역학적 거동특성을 정립함

- 첨단 신소재인 **초탄성 형상기억합금을 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼의 예상되는 작동원리는 마찰댐퍼의 에너지 소산과 강도 성능의 향상과 더불어 초탄성 형상기억합금의 자기치유 및 스프링 장치의 추가적인 탄성 복원으로 발생되는 잔류 변형의 감소 효과를 기대할 수 있음**(그림 13 참고)

■ 스마트 댐퍼 시스템은 주로 인장력을 받고 상온에서 운동에너지에 대한 초탄성 효과를 보여주고 있는 형상기억합금과 마찰 댐퍼가 병렬적으로 결합된 시스템으로서 이 부품들에 의한 구조물의 거동을 중첩시키는 효과를 보여줌

■ 그림 13(a)는 초탄성 형상기억합금의 거동을 보여주고 있으며 주로 복원력을 제공하여 잔류변위를 감소시키는 역할을 하고 그림 13(b)는 마찰면에 의해 발생되는 마찰력에 의한 댐퍼 시스템의 거동을 보여주고 있으며 주로 에너지를 소산하는 역할을 담당함

■ 기존에 사용되는 마찰 댐퍼는 마찰력에 의하여 상당량에 에너지를 발생 시켜서 가장 효율적으로 충격과 진동을 흡수하였지만 운동 종료 후 시스템에서 상당량에 잔류변형을 발생시키는 문제점을 발생시킴

■ 복원력과 마찰력은 형상기억합금 와이어(봉)과 마찰볼트의 개수, 마찰 볼트의 초기 긴장력 및 마찰면의 거칠기 등을 적절히 조절하여 소산되는 에너지양을 극대화할 수 있고 잔류 변위를 최소화할 수 있는 설계가 가능함

■ 댐퍼 장치에서 형상기억합금에 의하여 발생하는 복원력을 마찰력과 거의 비등하거나 약간 크게 설계를 한다면($F_{Fric} \leq F_{SMA}$) 댐퍼의 이력 거동에서 잔류변형을 최대한 줄이고 에너지 소산 능력을 극대화 시킬 수 있는 가장 이상적인 형태로 최적화된 설계가 가능함

■ 스마트 댐퍼 시스템은 그림 13(c)와 같이 주로 인장력을 받고 상온에서 운동에너지에 대한 초탄성 효과를 보여주고 있는 형상기억합금과 마찰 볼트 연결이음에 의한 마찰 댐퍼가 연결된 시스템으로서 이 부재들에 의한 구조물의 거동을 중첩시키는 효과를 보여줌

- 본 연구에서 제안하는 첨단 신소재를 활용한 내진 보강용 브레이싱 댐퍼 장치는 초탄성 형상기억합금 장치와 스프링(탄성부재)에서 제공하는 복원력과 마찰 댐퍼에서 제공하는 에너지 소산 능력을 동시에 활용 가능하므로 잔류변형(Δ_P) 감소 효과와 강도 증진 효과를 동시에 기대할 수 있음

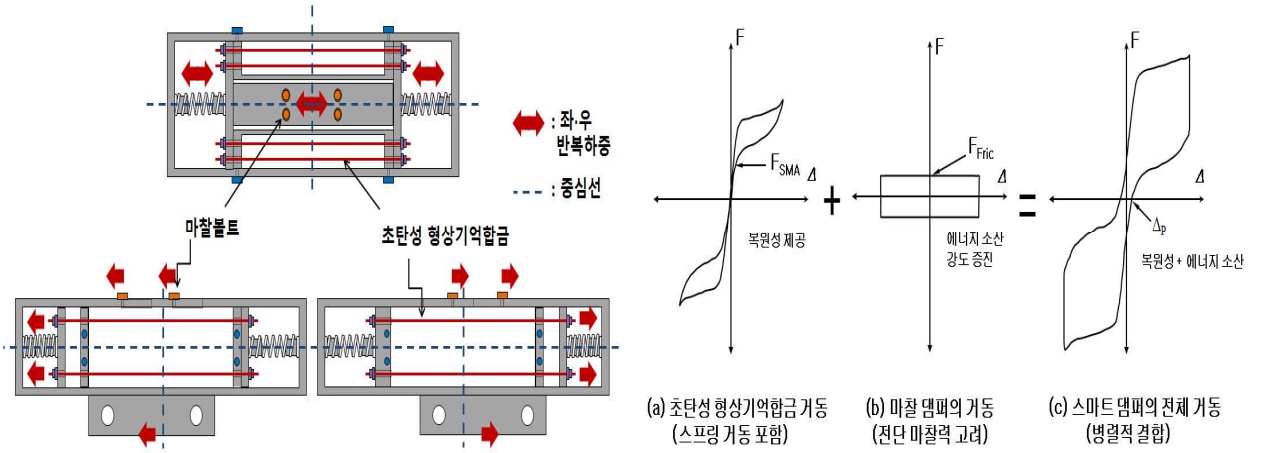


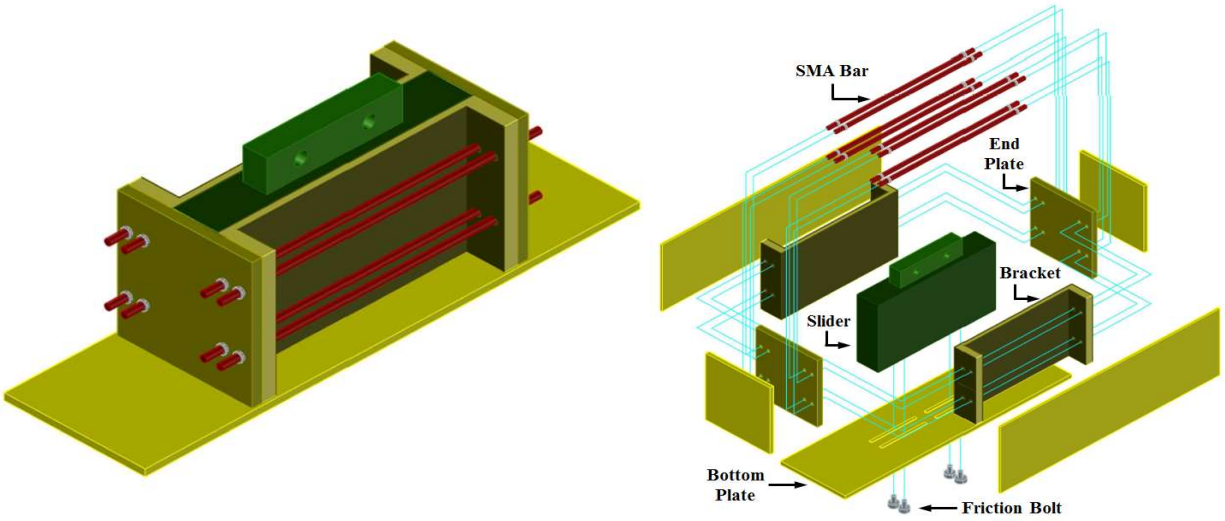
그림 13. 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 역학적 거동 및 특성

○ **<u>첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 실험 및 해석적 성능검증을 위한 상세설계를 완성함</u>**(그림 14, 15 참고)

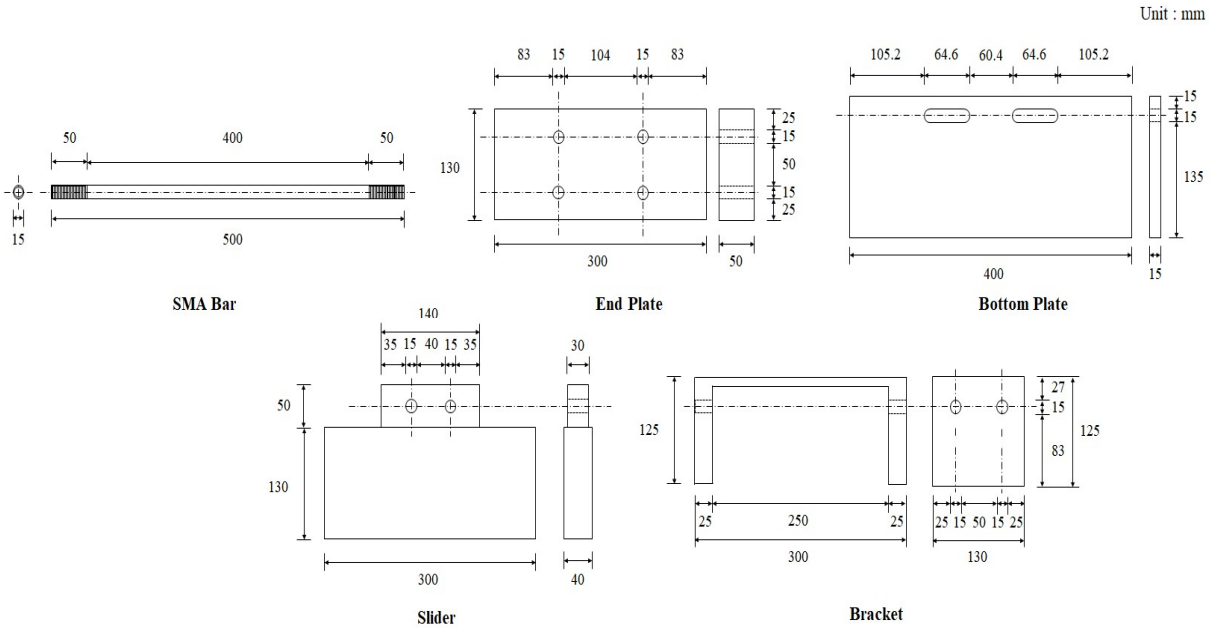
- 초탄성 형상기억합금의 깃발모양의 이력 거동은 댐퍼 시스템에서 자기 치유와 원형 복원이 가능하도록 복원력을 제공함. 아울러 댐퍼 시스템에 추가의 복원력을 제공하기 위하여 별도의 스프링 장치의 설치가 가능함

- 댐퍼 하부에 마찰력에 의한 에너지 소산 능력을 증대시키기 위하여 전단 볼트를 사용한 마찰 댐퍼를 추가로 설치하고 마찰력에 의한 에너지 소산 능력은 전단 볼트의 축력을 변화시켜서 조절이 가능하며 전단력의 방향으로 슬롯 볼트 구멍을 설치함

- 댐퍼의 거동은 초탄성 형상기억합금 봉 혹은 와이어와 복원 스프링에서 제공하는 하중-변위 이력 거동과 마찰 댐퍼의 이력 거동을 병렬로 결합하여 재현 가능함
- 마찰 댐퍼는 주로 에너지를 소산하면서 충격과 에너지를 흡수하지만 마찰력이 증가할 경우 지진 발생 후 상당량의 잔류변위(Δ_P)가 발생하는 문제점을 가지고 있음
- 복원력은 댐퍼 시스템에서 발생하는 잔류 변형을 줄여주는 역할을 담당하여 마찰력과 적절히 조율한다면 잔류 변형 발생을 최소화 하면서 강도증진, 에너지 소산 능력을 최대로 향상시키는 최적의 댐퍼 시스템 장치 설계가 가능함
- 댐퍼의 설계 시 댐퍼를 구성하는 부품들의 휨 파괴에 직접적으로 연관되는 Prying Action을 고려하여 끝막음 판의 두께, 원형봉의 위치 등을 기준에 부합하는 설계치수를 선정하여 상세설계를 완성함



(a) 3차원 구성도



(b) 댐퍼의 상세 설계도

그림 14. 내진보강용 브레이싱 댐퍼의 구성 및 부품별 상세 설계도

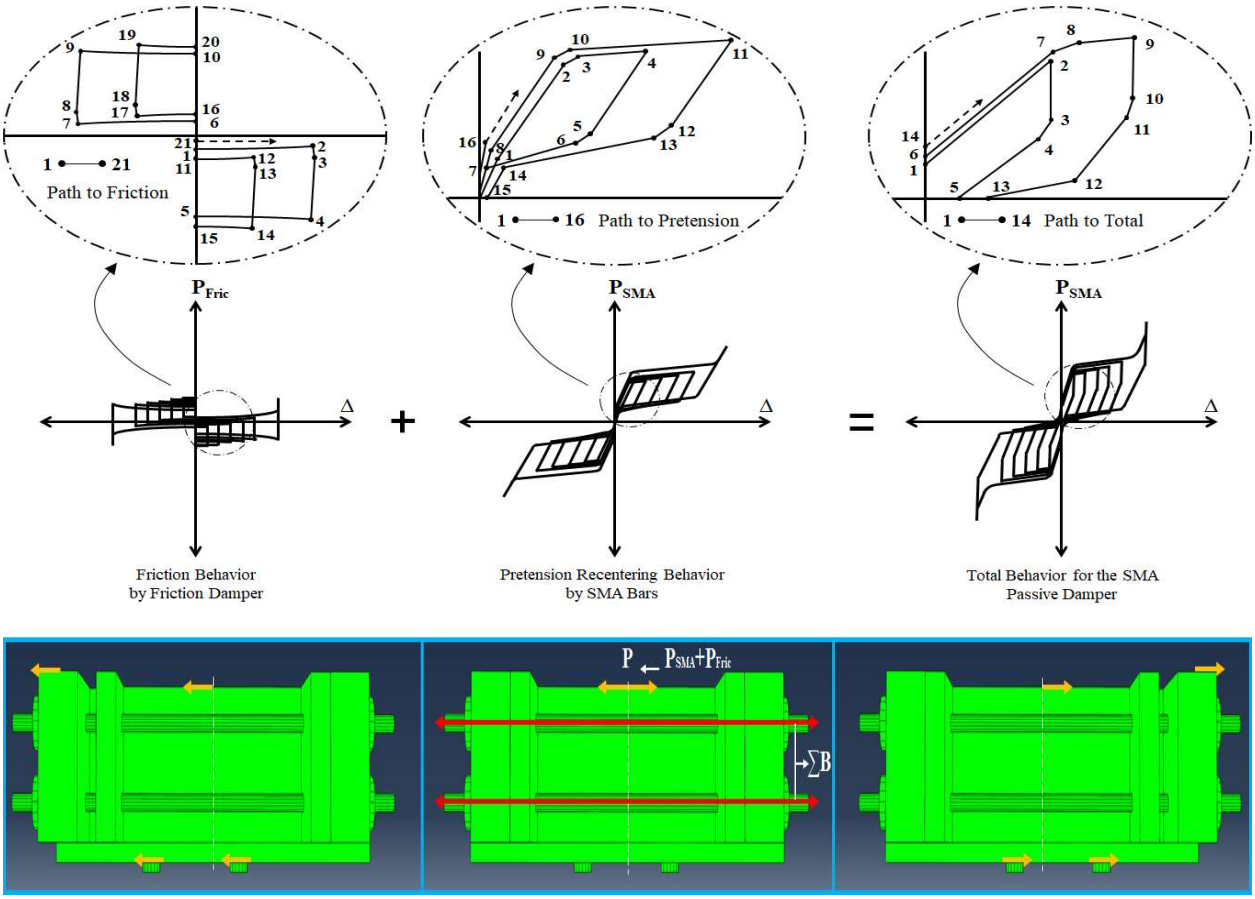
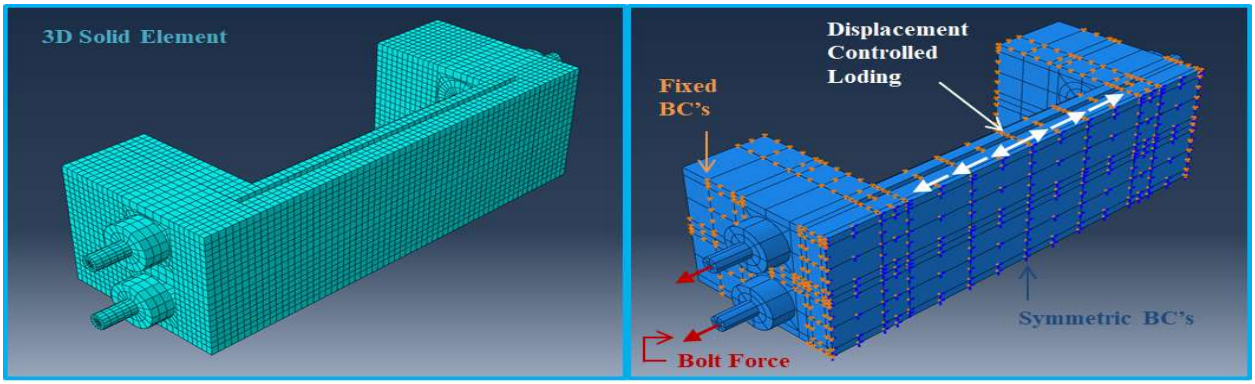


그림 15. 스마트 댐퍼 시스템의 역학적 거동 원리 및 특성

○ 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의에 대한 3차원 정밀 유한요소 해석 모델을 개발하고 예비 해석 연구를 수행함(그림 16, 17 참고)

- 초탄성 형상기억합금 봉에서 제공하는 복원력과 전단 볼트의 축력으로 조절 가능한 마찰력과의 비율을 조절하여 유한요소 해석 모델을 설계함(ABAQUS 프로그램 사용)
- 경계조건을 고려하여 Geometry를 간소화하고 Symmetric 경계조건을 사용하여 Half 모델을 제작하며 3차원 솔리드 요소를 사용하여 유한요소 해석 모델을 제작함
- 각각의 모델별로 초탄성 형상기억합금 장치와 마찰 댐퍼와 같은 부속품들의 하중-변위 거동을 측정하여 역학적 메커니즘을 확인한 후 댐퍼 시스템 전체의 거동과 비교하여 최적의 설계 파라미터를 도출함
- 그림과 같이 해석을 수행하여 결과를 도출하고 비교분석을 통하여 초탄성 형상기억합금에 의한 댐퍼 시스템의 소성변형의 감소에 따른 복원력을 검증하였고 초기 긴장력과 마찰력에 의한 에너지소산능력 향상을 확인함



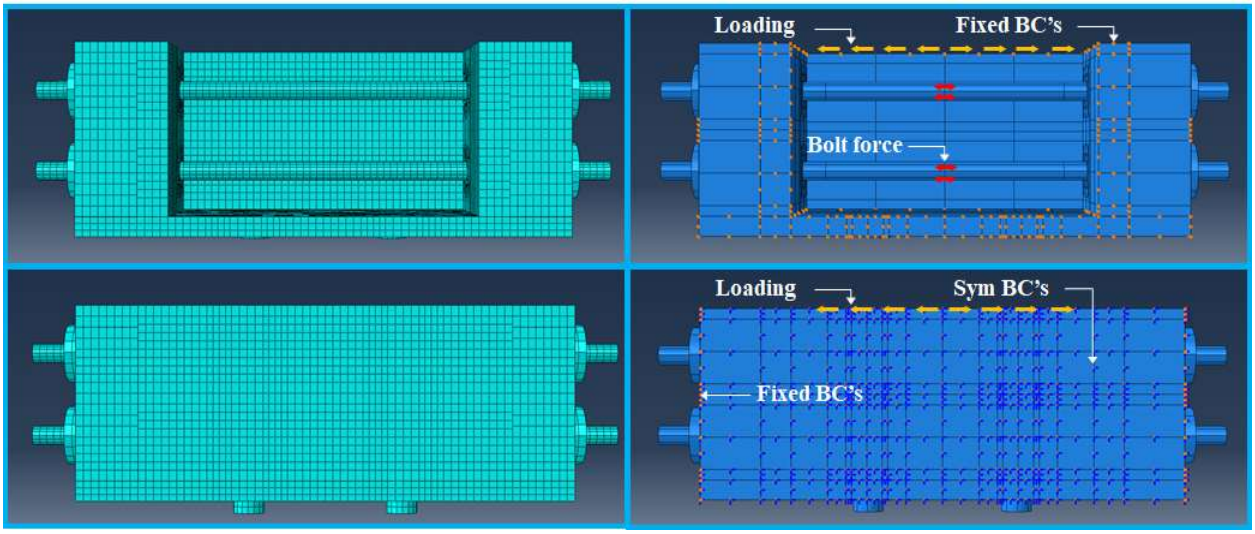


그림 16. 스마트 댐퍼 시스템의 예비 유한요소 모델

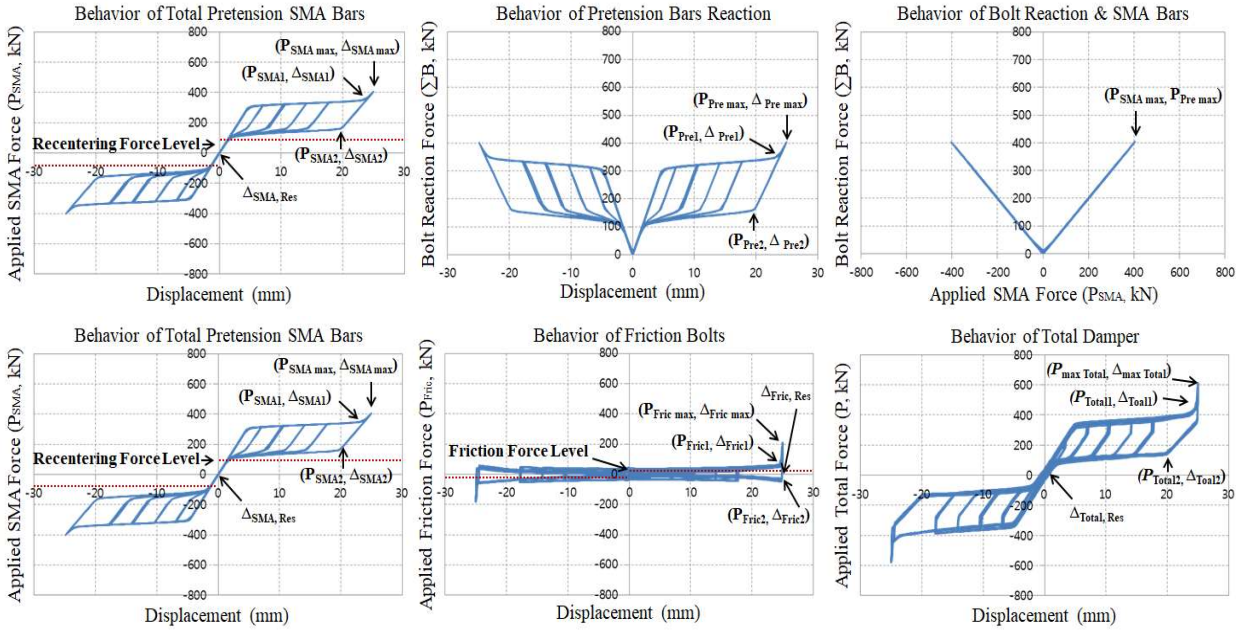


그림 17. 스마트 댐퍼 시스템의 예비 유한요소해석 결과

□ (핵심3-1) 주관연구기관(인천대학교)과 참여연구기관((주)에스코 알티에스): 실험체를 제작하고 재료 및 구조 실험을 위한 준비 작업 수행

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차년도	■ 실험체 제작 ■ 구조 실험을 위한 준비 작업 수행(※봉과 마찰 볼트의 초기 축력 측정 준비 등)	상세 설계를 바탕으로 실험을 위한 실험체를 제작함(강재와 형상기억합금에 따른 실험체 4세트를 제작)

○ **재료 및 구조실험을 위하여 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 상세설계를 검토하고 실험을 위한 설계를 완성함**(그림 18 참고)

- 재료 및 구조실험을 수행하기 전에 실험을 수행하는 기술전문가와 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치의 상세설계를 검토하고 실험 가능 여부를 판단한 후 실질적인 설계를 재 수행함
- 본 연구에서 제안하는 스마트 댐퍼 시스템의 성능을 향상시키기 위해 재료의 혼합 비율에 따라 탄성과 경도 변화가 용이한 폴리우레탄을 추가적으로 활용하여 설계를 수행함

- 검토결과 원형 봉 형상의 초탄성 형상기억합금의 제작, 댐퍼 내에서 원형 봉의 정착을 위해 사용하는 고정철물(너트)의 풀림 등의 문제점을 해결하기 위해 그림 18과 같이 앞서 설계된 원형봉을 대신하여 동일한 성능의 플레이트 형상으로 제작하여 설계를 완성함

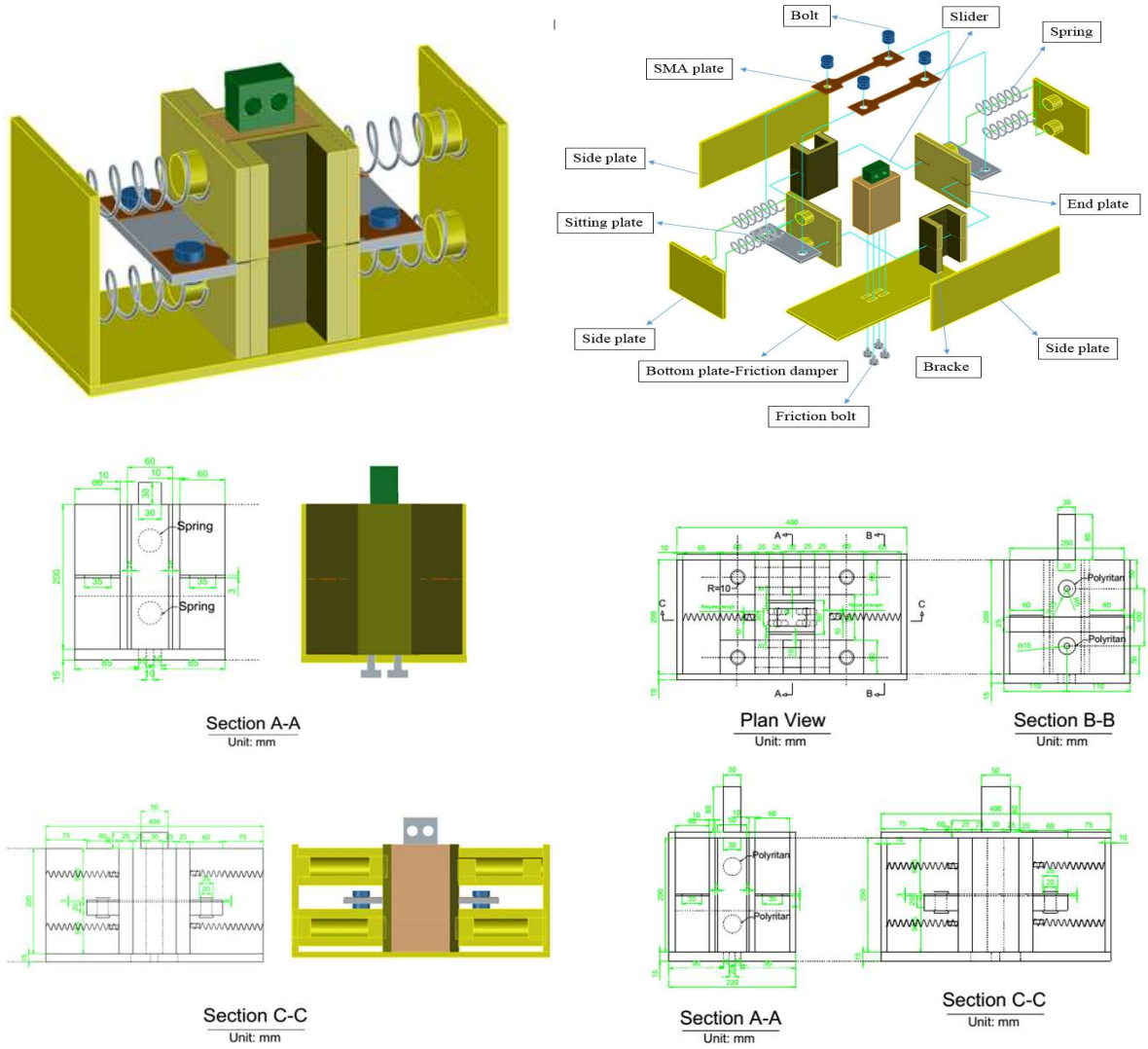


그림 18. 실험을 위한 스마트 댐퍼 시스템 시험체 설계도

표 6. 스마트 댐퍼 시스템의 파라미터에 따른 실험 모델 분류

Model	Parameter
S-SMA	Shear damper without polyurethane and friction
SP-SMA	Shear damper including polyurethane
SF-SMA	Shear damper including friction
SPF-SMA	Shear damper including polyurethane and friction
S-Steel	Steel shear damper without polyurethane and friction
SP-Steel	Steel shear damper including polyurethane
SF-Steel	Steel shear damper including friction
SPF-Steel	Steel shear damper including polyurethane and friction

- 고안된 **내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치는 초탄성 형상기억합금의 자동치유 능력과 댐퍼의 마찰에너지 및 스프링의 탄성 복원력이 결합되어 시너지 효과를 발생시키는 효율적이고 우수한 성능의 구현이 가능한 새로운 개념의 지진 재해저감 시스템임**

- 마찰댐퍼는 마찰력에 의해 에너지 소산 능력이 향상되지만 지진 하중이 발생할 경우 충격을 흡수하면서 반복적 거동에 의해 잔류변형이 발생하는 문제점을 발생시킴
- 초탄성 형상기억합금은 충격흡수를 위한 에너지 소산 능력을 향상시키고 추가의 보강효과와 복원력에 의한 잔류 변위를 상당량 감소시킬 수 있으므로 초탄성 형상기억합금의 복원력과 댐퍼의 마찰력을 파라미터로 두 힘의 비율을 설계 파라미터로 산정을 하여 에너지 소산과 복원성 측면에서 최적의 성능을 보여주는 모델을 선정함

나. 2차 년도 연구 수행 내용 및 성과

□ (핵심 3-2) 주관연구기관(인천대학교)과 공동연구기관((주)에스코 알티에스): 구조 실험을 통한 지진 피해저감 효과와 물리적 성능 검증

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
2차년도	■ 구조 실험 수행((주)에스코 알티에스에서 제공하는 실험 장비를 활용함)	(1) 초탄성 형상기억합금 봉에 초기 축력을 계측함 (2) 마찰 댐퍼에 가해진 전단 볼트의 토크를 측정하여 마찰력을 계측함 (3) 실험체의 슬라이더에 반복 하중 이력을 가하여 하중-변위 성능 실험을 수행함 (4) 초탄성 형상기억합금 봉에 변위 게이지를 설치하여 하중 재하에 따른 변위량 변화를 측정함
	■ 실험 결과의 분석	(1) 하중-변위 곡선에서 극한강도, 에너지 소산 능력과 잔류 변위 발생량을 모델별로 관측함. (2) 실험 결과를 분석을 하여 댐퍼의 지진 피해저감 효과와 물리적인 성능을 검증함

○ 본 연구에서 제안하고 시스템에 복원력을 제공하는 변위제어 장치의 **<u>핵심 소재인 초탄성 형상기억합금에 대하여 재료의 물리적 특성을 얻고자 보강판 형태로 제작하여 하중조건을 변화시키면서 반복 인장 시험을 수행하여 재료성능을 검증함</u>**

○ 재료실험에 사용된 초탄성 형상기억합금의 형태와 실험을 통하여 도출된 초탄성 형상기억합금의 응력-변형률(3싸이클 후 파단까지) 거동특성을 나타냄(그림 19 참고)

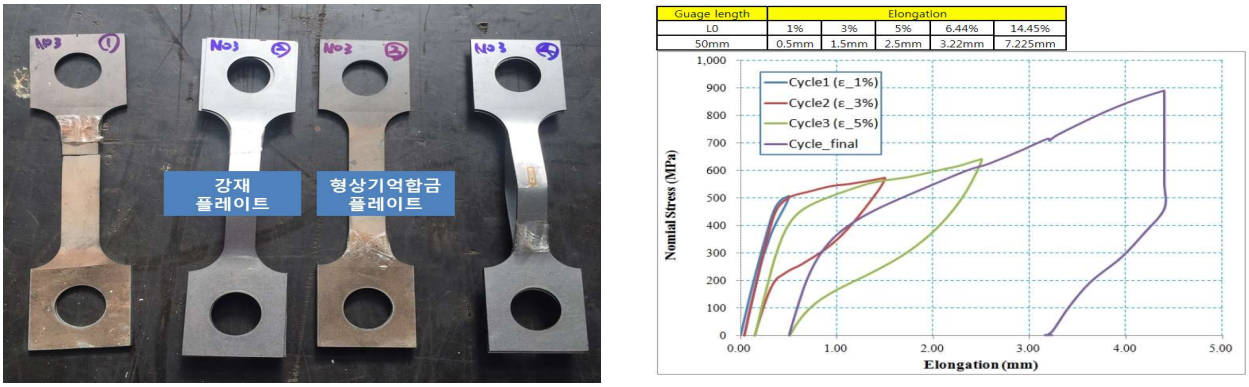


그림 19. 재료실험 시편 및 인장실험을 통한 물리적 특성 검증 결과

○ 연구의 핵심 소재인 **<u>초탄성 형상기억합금의 거동을 토대로 일정한 속도의 하중이 적용되는 시험체를 구성하고 폴리우레탄 및 마찰력을 추가로 적용하여 성능을 향상시킴</u>**
- 기본 시험체는 전단하중을 받는 브레이싱 댐퍼 장치로 형상기억합금을 4방향으로 설치하여 동일한 하중을 받을 수 있도록 구성함
- 기본 시험체를 토대로 폴리우레탄 적용, 마찰력 적용, 폴리우레탄 및 마찰력 적용에 대한 시험체 구성을 실시함(그림 20 참고)

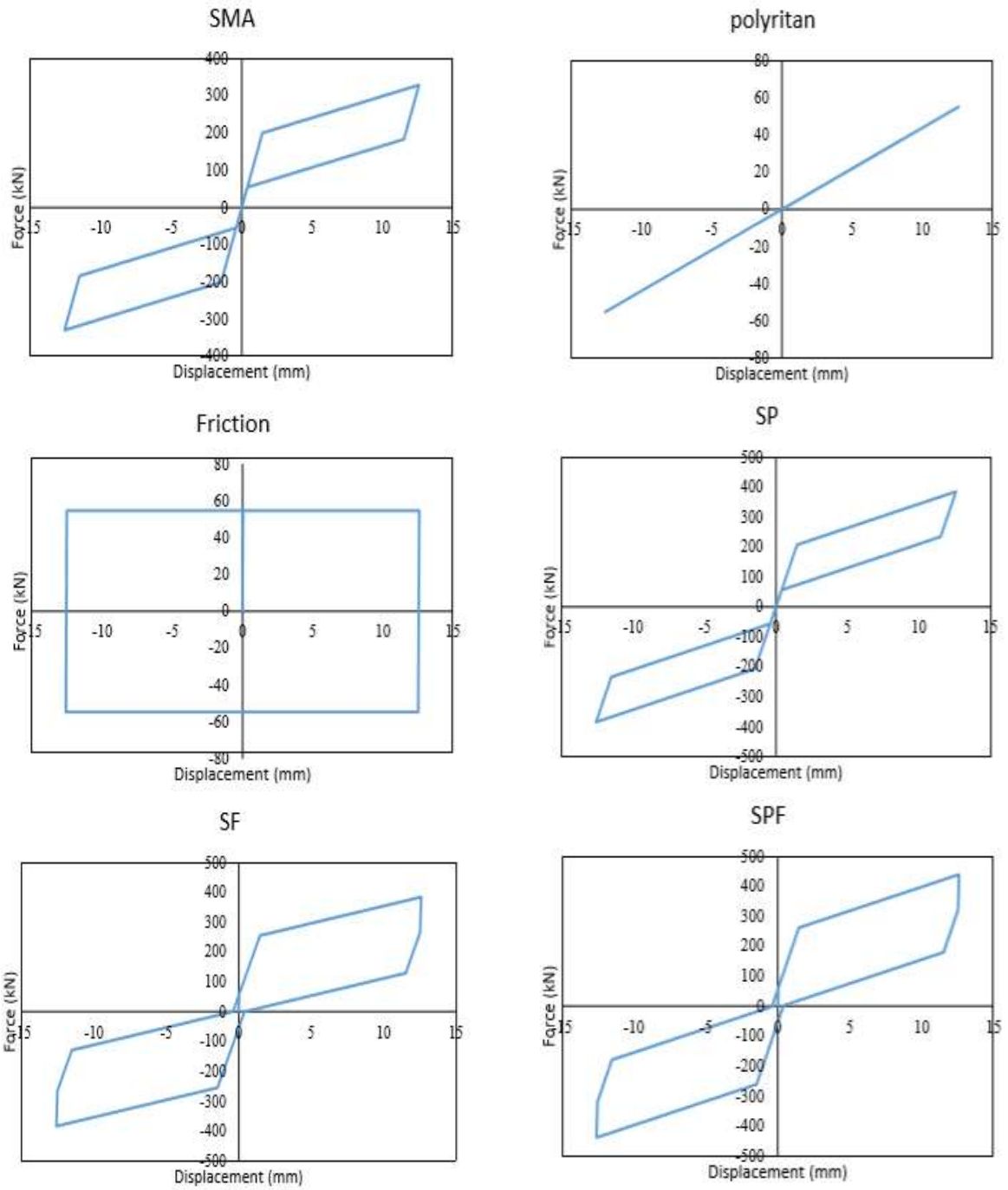


그림 20. 구조실험 시험체 메커니즘

표 7. Modulus of elasticity of polyurethane

Items	Polyurethane
Outer diameter(mm)	125
Inner diameter(mm)	40
Length(mm)	297
k(kN/mm)	1.775
Polyurethane, K	$K=\frac{EA}{L}\rightarrow 1775=\frac{E[\pi(\frac{125^2}{4})-\pi(\frac{40^2}{4})]}{297}\rightarrow E=47.86\,N/mm$

표 8. Required polyurethane size

Items	Polyurethane	
	Type 1	Type 2
Outer diameter(mm)	60	40
Inner diameter(mm)	10	10
Length(mm)	73	73
Type 1, K	$K_1 = \frac{EA}{L} \rightarrow \frac{E[\pi(\frac{60^2}{4}) - \pi(\frac{10^2}{4})]}{73} \rightarrow K_1 = 1802.176\,N/mm$	
Type 2, K	$K_2 = \frac{EA}{L} \rightarrow \frac{E[\pi(\frac{40^2}{4}) - \pi(\frac{10^2}{4})]}{73} \rightarrow K_2 = 772.361\,N/mm$	

표 9. Total force of polyurethane in SPF

구분	Force
Polyurethane 1	$\rightarrow F_1 = K_1 TRIANGLE \rightarrow 1802.176 \times 12.6 = 22707.41\,N$
Polyurethane 2	$\rightarrow F_2 = K_2 TRIANGLE \rightarrow 772.361 \times 12.6 = 9731.749\,N$
Total	$\rightarrow F = F_1 + F_2 \rightarrow 2 \times 22.707 + 9.7 = 55.114\,kN$

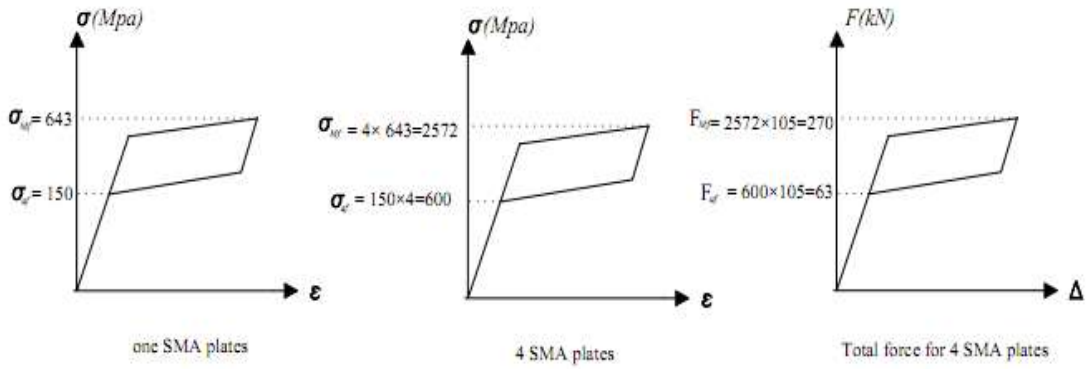


그림 21. Capacity of the shear damper with polyurethane and friction force(SPF)

표 10. Total force of polyurethane in SPF

구분	Force
Friction	$F_{friction} = \sigma_{af} \times A_{SMA} = 63\,kN$
SMA	$F_{SMA} = \sigma_{MS} \times A_{SMA} = 270.6\,kN$
Polyurethane	$F_{Polyurethane} = K\Delta = 55.11\,kN$
Total	$F = 270.06 + 63 + 55.11 = 388.17\,kN$

○ 브레이싱 댐퍼 장치의 **기본 개념 정립 및 파라미터 도출을 통해 얻어진 데이터를 바탕으로 정밀한 설계를 수행함**(그림 22, 23 참고)

- 연구의 핵심 소재인 형상기억합금의 수치를 기반으로 부속품 들의 최종 사이즈를 결정함
- 형상기억합금의 기본 사이즈는 250x60x3mm이며 하중을 받는 유효길이는 105mm로 선정하였으며 소성변위 발생을 위해 형상기억합금의 신장율인 7% 이상 변위를 적용 시킴
- 폴리우레탄은 최종 결과 분석 시 형상기억합금의 소성 구간만을 고려하기 위해서 탄성 범위 내에서 작용하도록 설계함

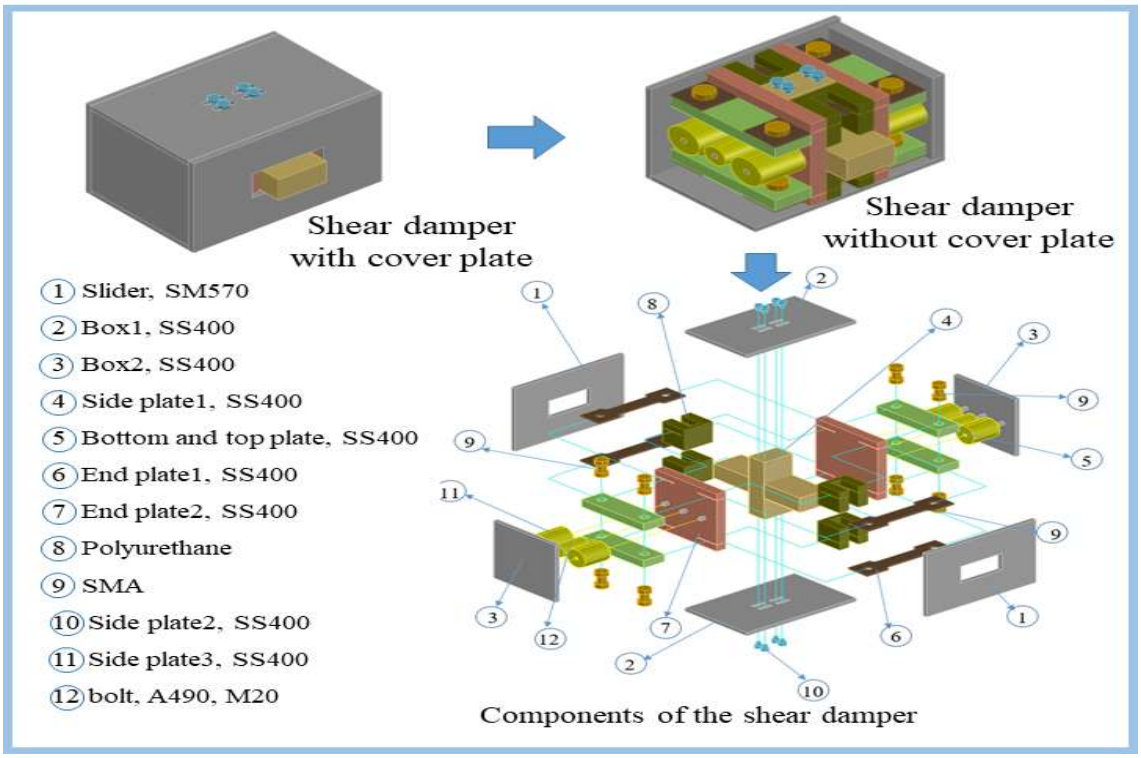


그림 22. 구조실험 시험체 제작을 위한 구성도

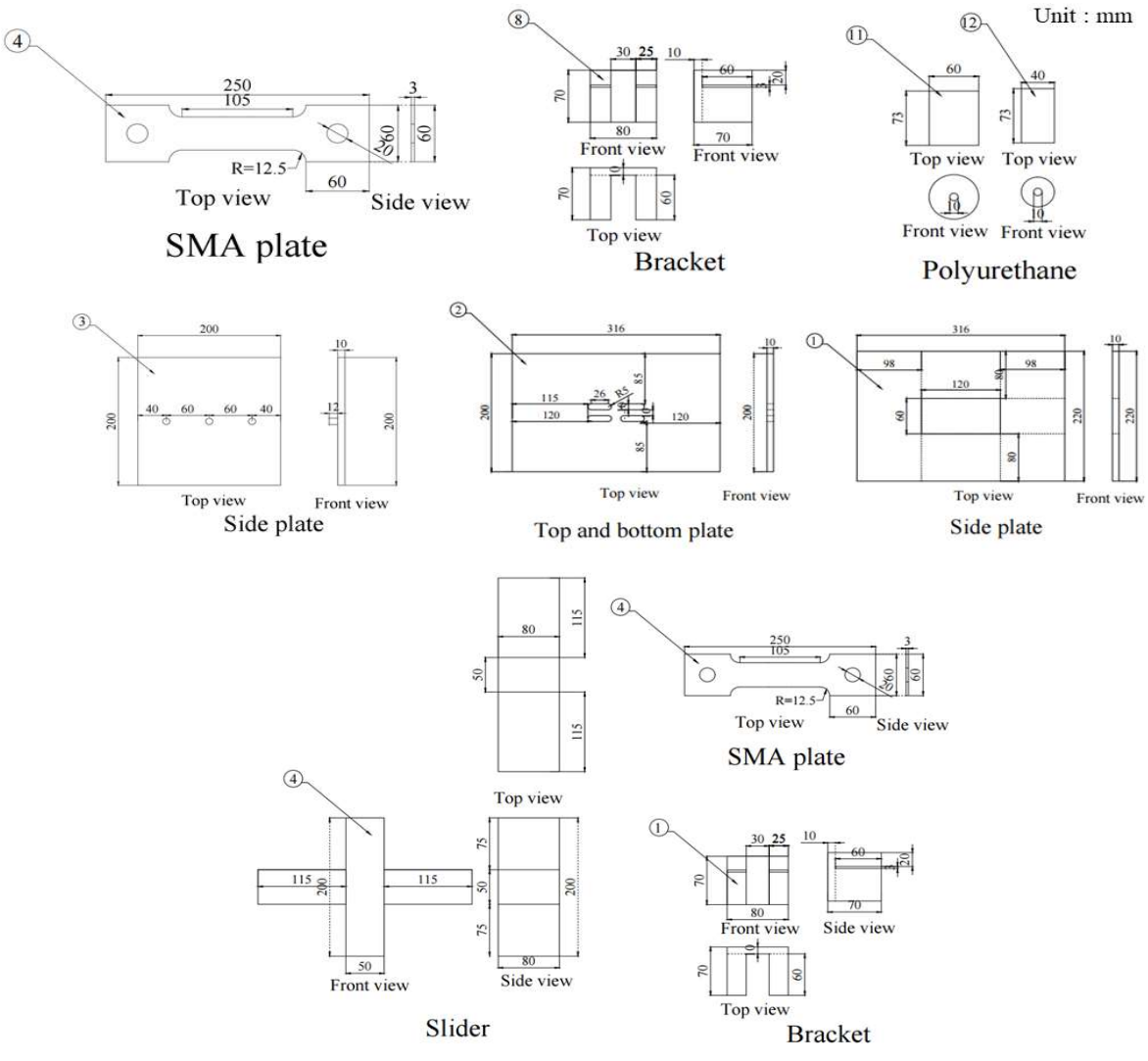


그림 23. 브레이싱 댐퍼 장치의 상세 설계도

○ **<u>형상기억합금 및 강재 시편에 대한 제작을 수행하고 브레이싱 댐퍼 장치의 각 파트별 부품에 대한 제작을 수행함</u>**(그림 24 참고)

- 형상기억합금 시편은 상온에서 하중에 의한 변형이 발생하더라도 원형으로 복원되는 초탄성 형상기억합금으로 제작함
- 강재 시편은 형상기억합금 시편과 유사한 강도를 갖는 구조용 강재 SM45C로 제작함

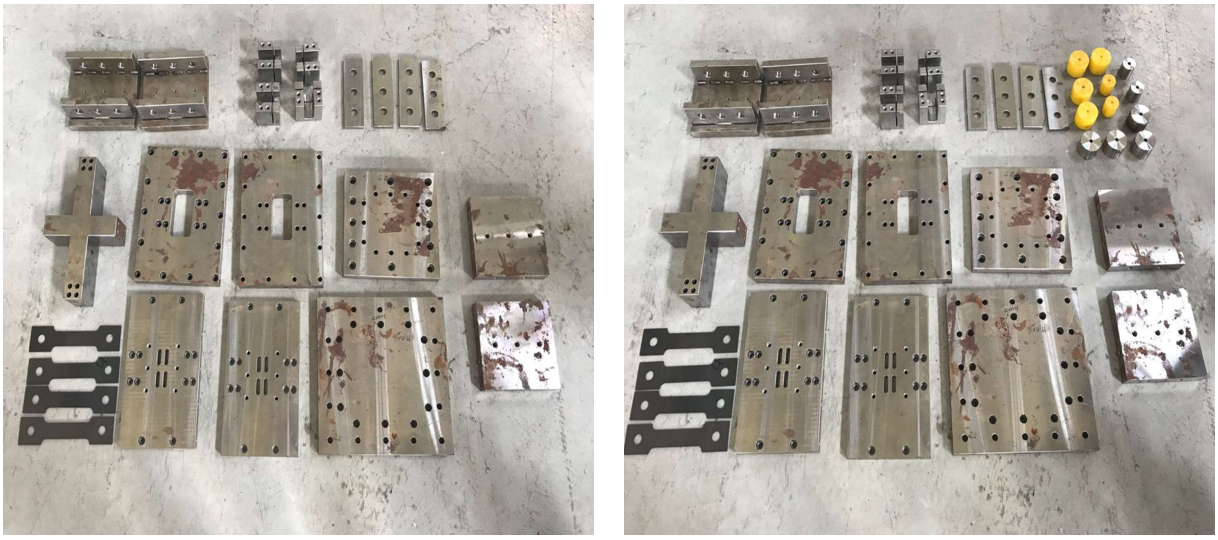


그림 24. 브레이싱 댐퍼 장치의 구조실험 시험체 부품

○ 각 부품별 제작되어진 브레이싱 댐퍼 장치의 설계 도면에 따라 시험체 조립을 수행함(그림 25 참고)



그림 25. 브레이싱 댐퍼 장치의 조립 과정

- 브레이싱 댐퍼 장치의 기본적인 조립을 수행하고 시편에 대한 응력-변형률을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 시편에 부착함
- 폴리우레탄 적용 모델은 기본적인 브레이싱 댐퍼 장치와 동일하며 하중을 받는 부분에 대해 수직 방향으로 설치하여 추가의 하중 및 복원력을 제공하도록 함

○ 조립된 **<u>브레이싱 댐퍼 장치를 하중 제어 장치인 액추에이터에 설치하여 구조실험을 수행함</u>**(그림 26, 27, 28, 29 참고)
- 액추에이터에 설치된 브레이싱 댐퍼 장치에 0.33mm/sec의 변위 제어 하중을 적용시켜 구조 실험을 수행함
- 각 시험체 별로 12.6mm의 최대 변위를 가하여 변위에 따라 작용하는 하중을 분석함

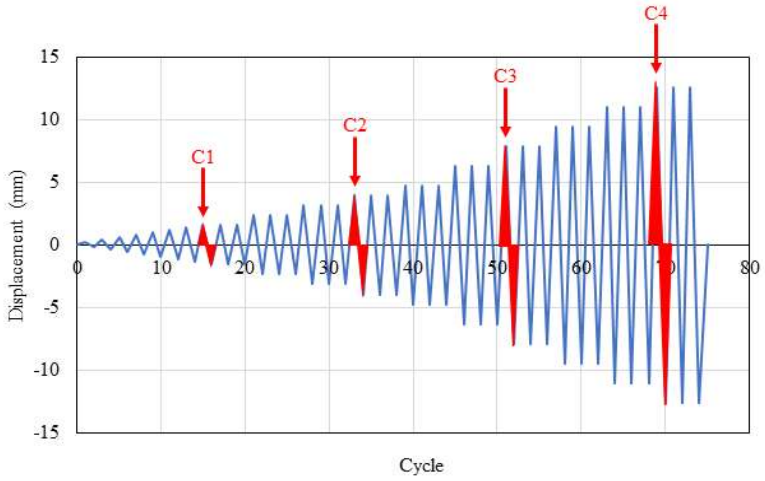
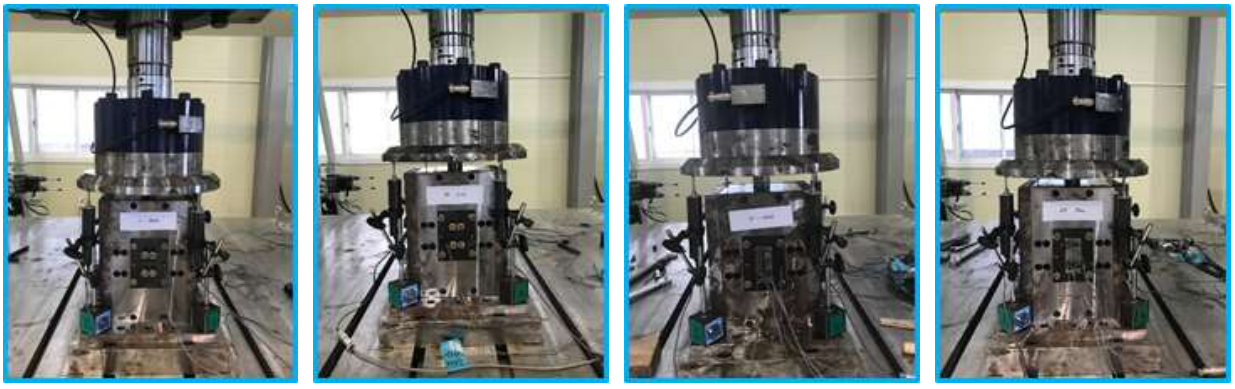
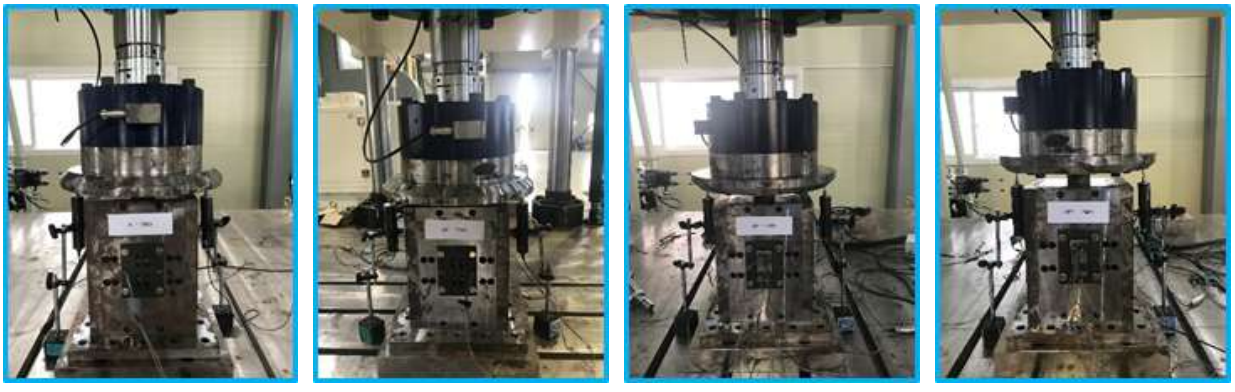


그림 26. 구조 실험을 위한 변위제어 반복하중



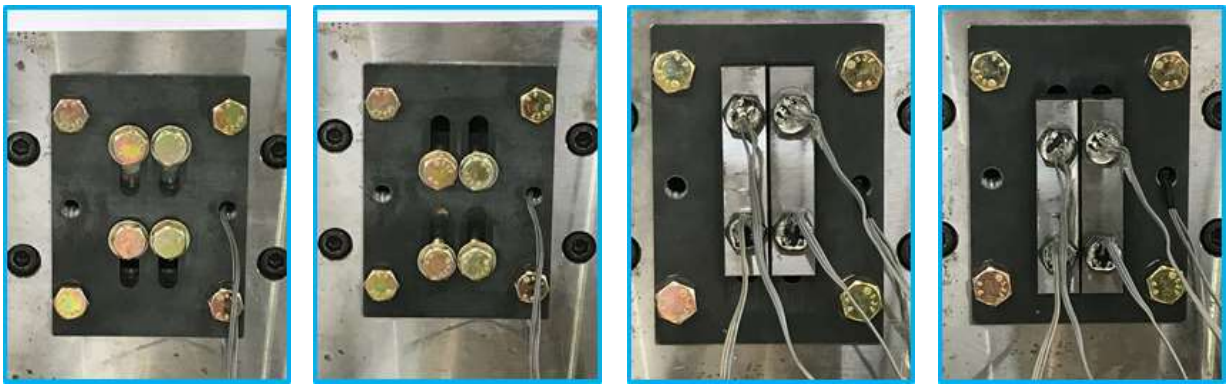
(a) S-Steel (b) SP-Steel (c) SF-Steel (d) SPF-Steel

그림 27. 강재 브레이싱 댐퍼 장치의 구조실험



(a) S-SMA (b) SP-SMA (c) SF-SMA (d) SPF-SMA

그림 28. 형상기억합금브레이싱 댐퍼 장치의 구조실험

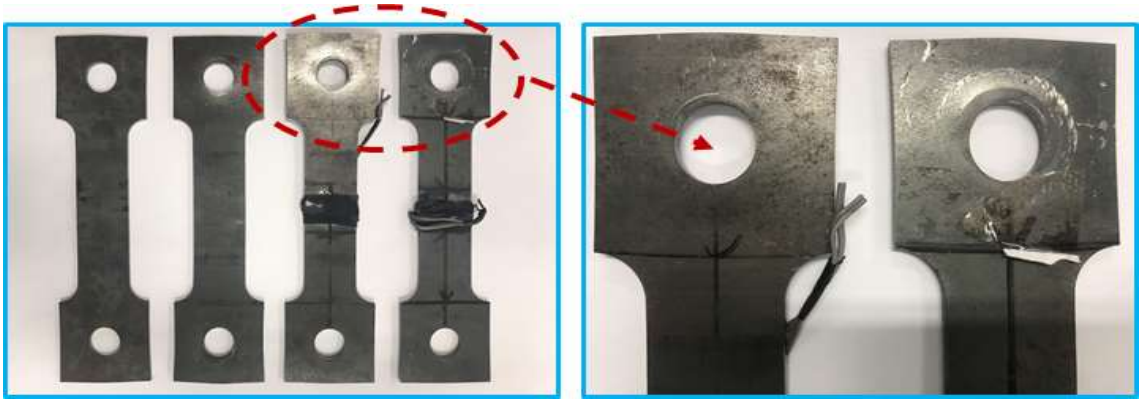


(a) 마찰볼트 미적용 최대 변위(±12.6mm) (b) 마찰볼트 적용 최대 변위(±12.6mm)

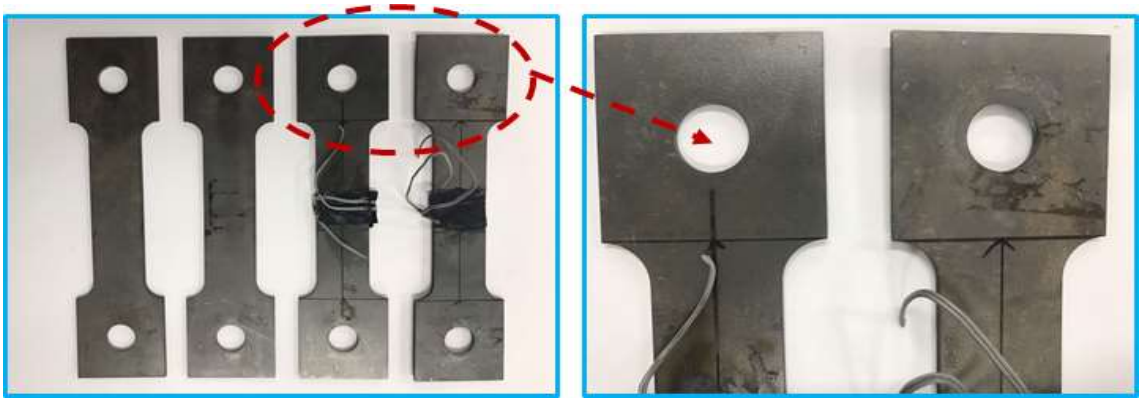
그림 29. 브레이싱 댐퍼 장치 시험체의 변위 제어

○ 기본 **<u>브레이싱 댐퍼 모델에 대해 실험 종료 후 시편에 대한 분석을 수행함</u>**(그림 30 참고)

- 초탄성 형상기억합금 및 강재에 대한 기본 댐퍼 모델은 두 케이스 모두 실험 종료 후 시편에 대한 파단이 발생하지 않음
- 초탄성 형상기억합금의 경우 시험 수행 전의 시편 사이즈와 완벽히 동일하게 나타남
- 강재의 경우 시편이 댐퍼 시험체와 결합하는 볼트 홀이 영구적으로 늘어나 복원력이 떨어지는 것을 확인할 수 있음



(a) 강재 시편의 시험 결과(S)



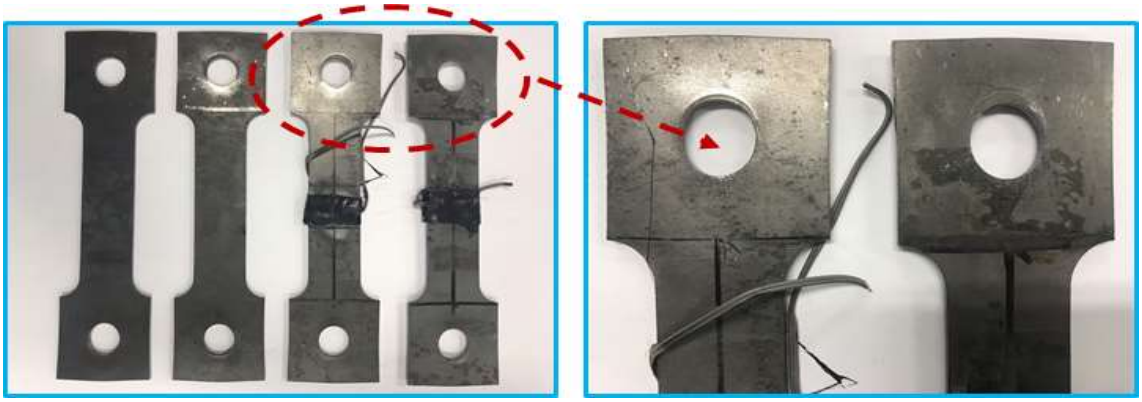
(b) 형상기억합금 시편의 시험 결과(S)

그림 30. 강재 및 형상기억합금 시편의 시험 결과(S)

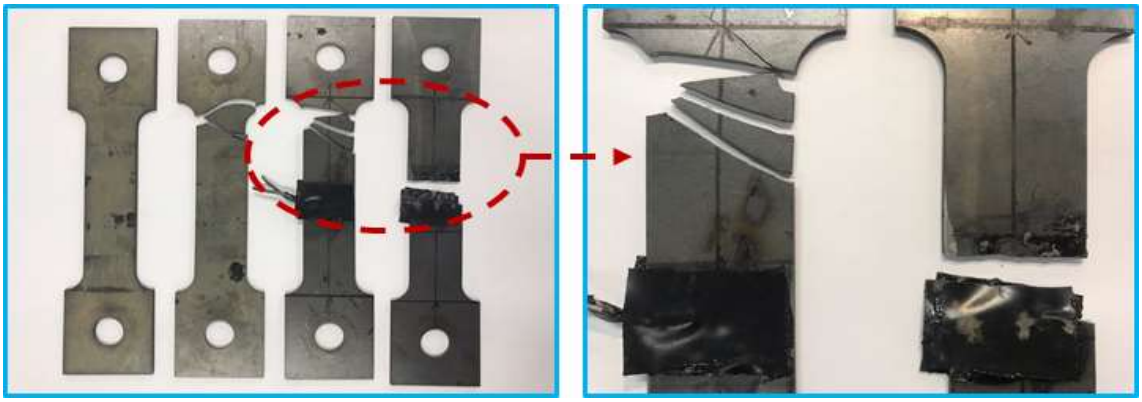
○ **<u>폴리우레탄 적용 댐퍼 모델에 대해 실험 종료 후 시편에 대한 분석을 수행함</u>**(그림 31 참고)

- 초탄성 형상기억합금의 경우 시험 수행 후 4개 시편 중 3개의 시편에 대한 파단이 발생함

- 강재의 경우 파단이 발생하지 않았지만 기본 모델과 동일하게 볼트 홀이 영구적으로 늘어나 복원력이 떨어지는 것을 확인할 수 있음

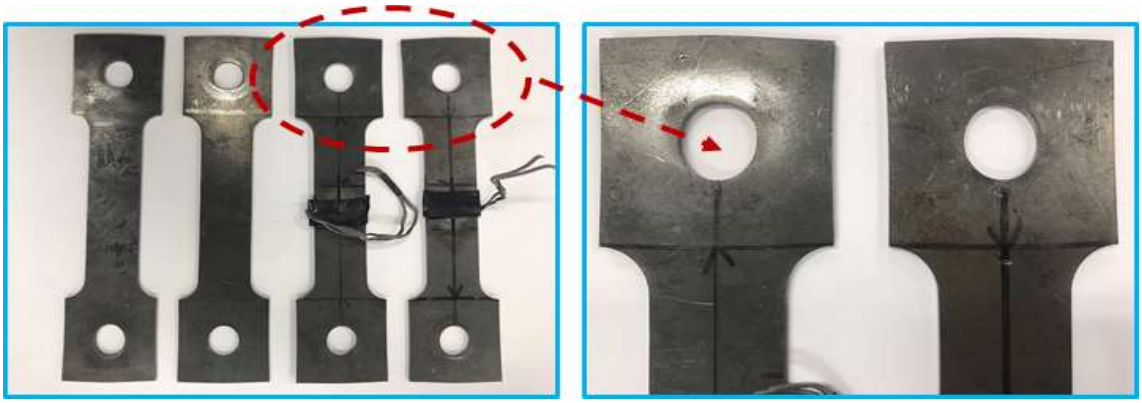


(a) 강재 시편의 시험 결과(SP)

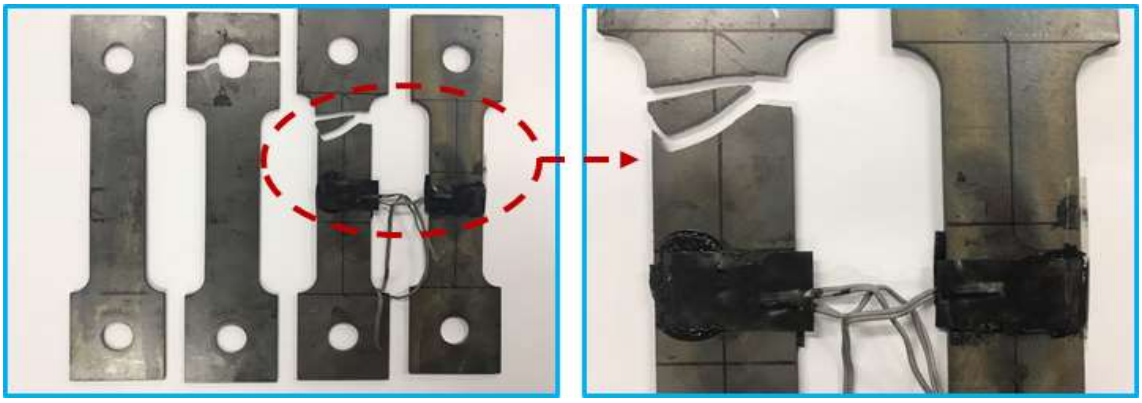


(b) 형상기억합금 시편의 시험 결과(SP)

그림 31. 강재 및 형상기억합금 시편의 시험 결과(SP)



(a) 강재 시편의 시험 결과(SF)

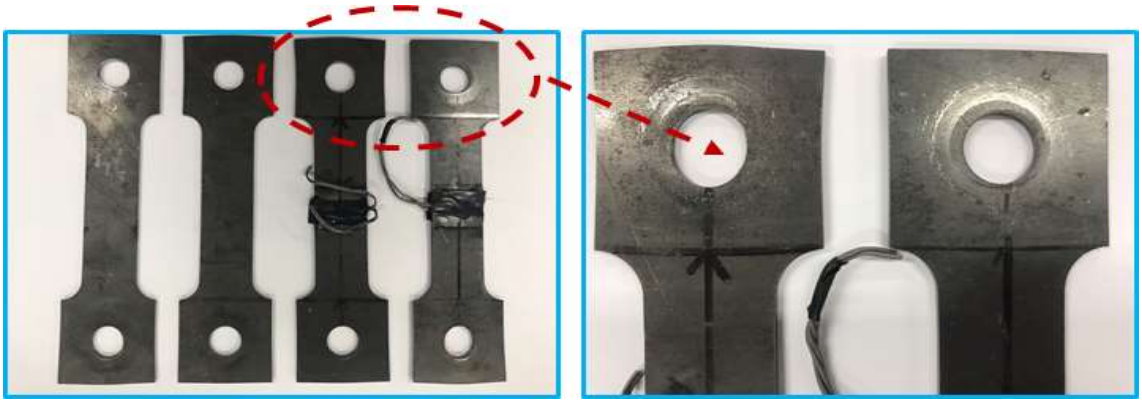


(b) 형상기억합금 시편의 시험 결과(SF)

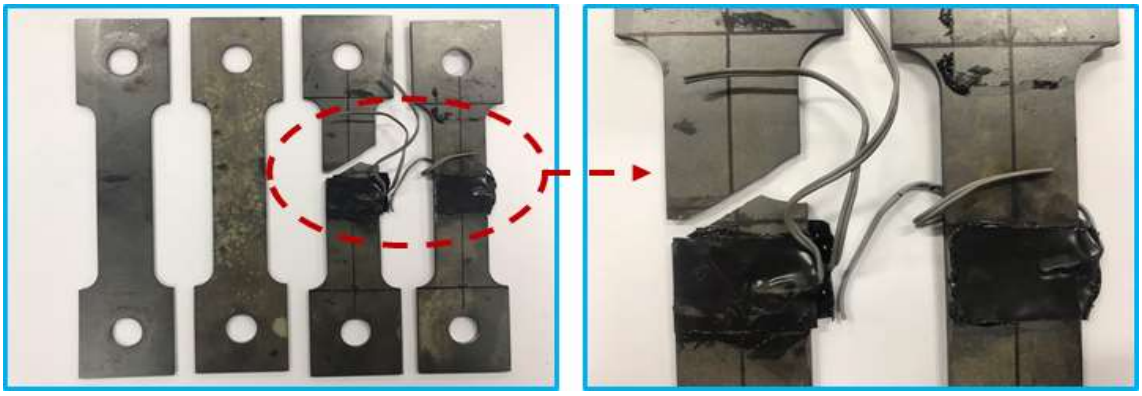
그림 32. 강재 및 형상기억합금 시편의 시험 결과(SF)

○ **마찰력 적용 댐퍼 모델에 대해 실험 종료 후 시편에 대한 분석을 수행함**(그림 32 참고)

- 초탄성 형상기억합금의 경우 시험 수행 후 4개 시편 중 2개의 시편에 대한 파단이 발생함
- 강재의 경우 파단이 발생하지 않았지만 기본 모델과 동일하게 볼트 홀이 영구적으로 늘어나 복원력이 떨어지는 것을 확인할 수 있음

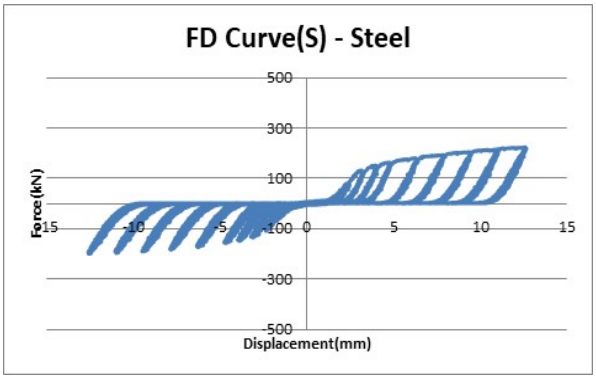


(a) 강재 시편의 시험 결과(SPF)

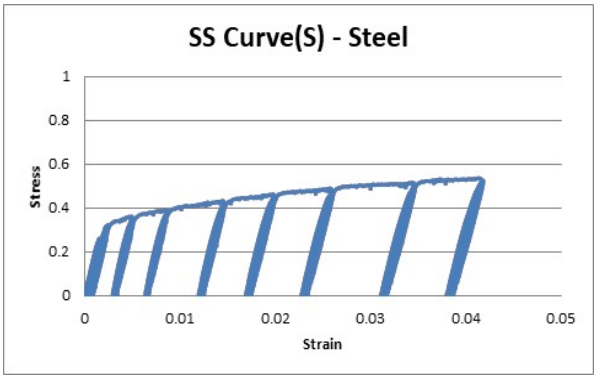


(b) 형상기억합금 시편의 시험 결과(SPF)

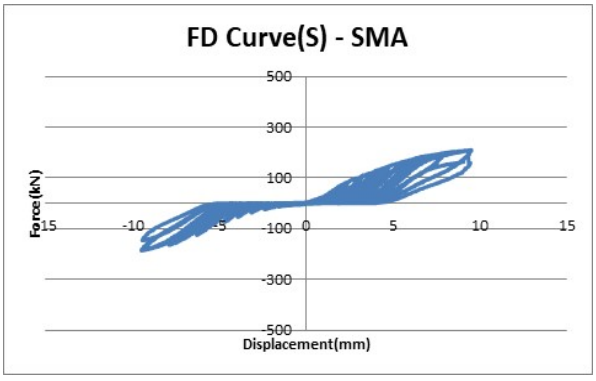
그림 33. 강재 및 형상기억합금 시편의 시험 결과(SPF)



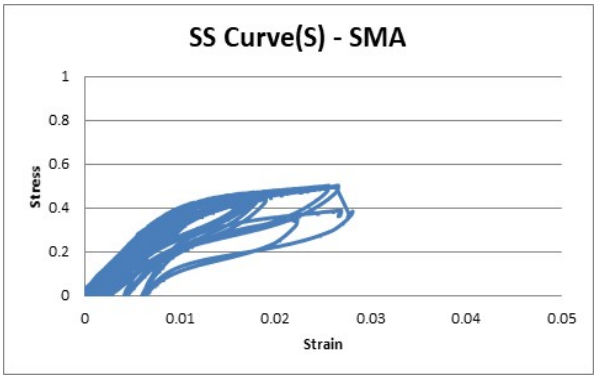
(a) 강재 댐퍼의 전체 거동 특성(S)



(b) 강재 시편의 응력-변형률 선도(S)



(c) 형상기억합금 댐퍼의 전체 거동 특성(S)

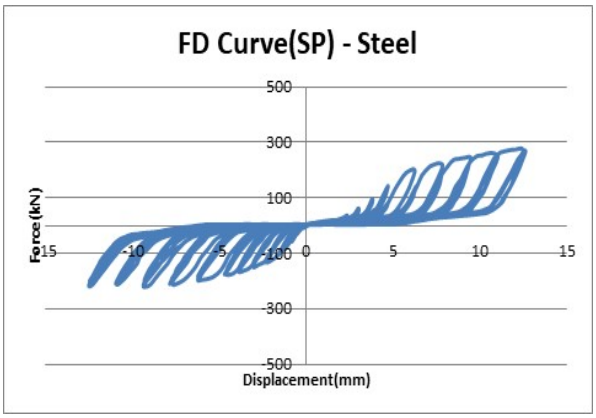


(d) 형상기억합금 시편의 응력-변형률 선도(S)

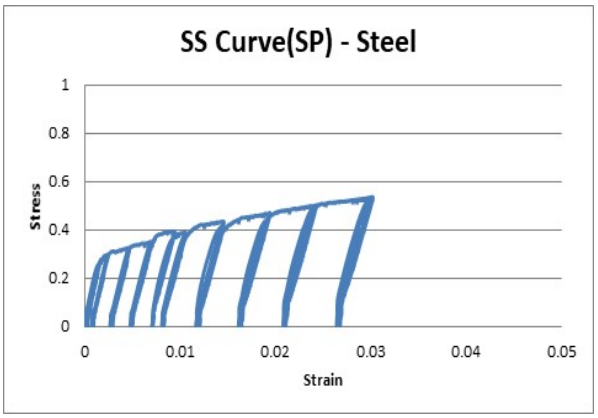
그림 34. 기본 댐퍼 모델의 강재 및 형상기억합금 거동 특성 비교

○ **구조실험 결과의 분석을 통하여 시스템의 성능 평가를 실시함**

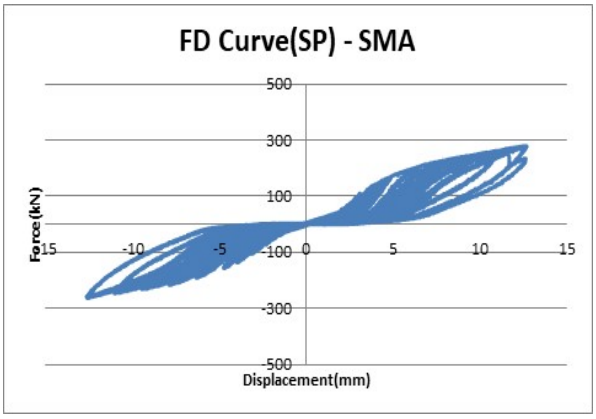
- 각 실험체 모델별로 얻어진 **하중-변위 곡선에서 최대강도, 이력곡선의 면적을 나타내는 에너지 소산 능력, 잔류 변위 등을 측정하여 댐퍼 모델의 물리적 성능을 관측하고 평가함**
- 기본 모델의 경우 형상기억합금 및 강재 두 케이스 모두 약 200kN이 넘는 하중이 작용함(그림 34 참고)
- 형상기억합금의 경우 중심축을 기준으로 상하 하중을 받을 때 비슷한 수준의 하중이 작용되며 복원력이 우수하게 나타남
- 강재의 경우 형상기억합금과 비슷한 수준의 하중이 작용하지만 시편 자체가 복원되지 않아 중심축을 기준으로 반대 방향으로 하중이 작용할 때 보다 적은 하중을 받도록 나타남



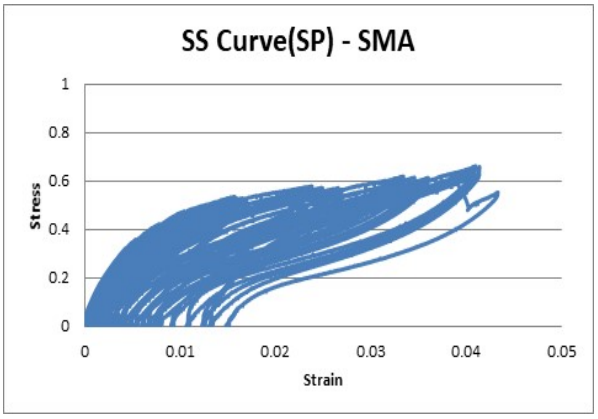
(a) 강재 댐퍼의 전체 거동 특성(SP)



(b) 강재 시편의 응력-변형률 선도(SP)



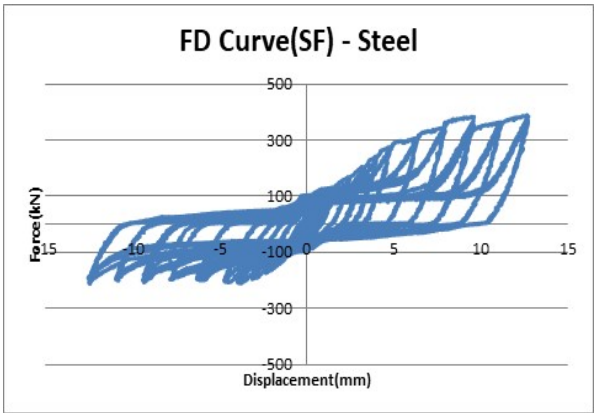
(c) 형상기억합금 댐퍼의 전체 거동 특성(SP)



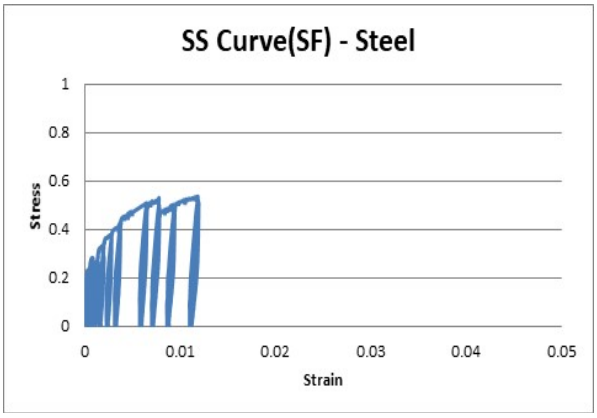
(d) 형상기억합금 시편의 응력-변형률 선도(SP)

그림 35. 폴리우레탄 적용 댐퍼 모델의 강재 및 형상기억합금 거동 특성 비교

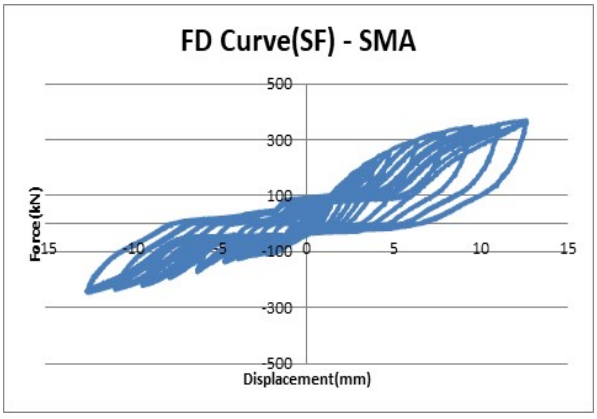
- 폴리우레탄 적용 모델의 경우 형상기억합금 및 강재 두 케이스 모두 약 280kN의 하중이 작용함(그림 35 참고)
- 형상기억합금의 경우 중심축을 기준으로 상하 하중을 받을 때 비슷한 수준의 하중이 작용되며 기본 모델과 같은 복원력이 나타남
- 형상기억합금은 적용 하중 사이클 중 최대 변위인 12.6mm에서 파단이 발생함
- 강재의 경우 기본 모델과 유사하게 형상기억합금과 비슷한 수준의 하중이 작용함
- 하지만 이전과 동일하게 시편 자체가 복원되지 않아 중심축을 기준으로 반대 방향 하중이 작용할 때 보다 적은 하중을 받도록 나타남



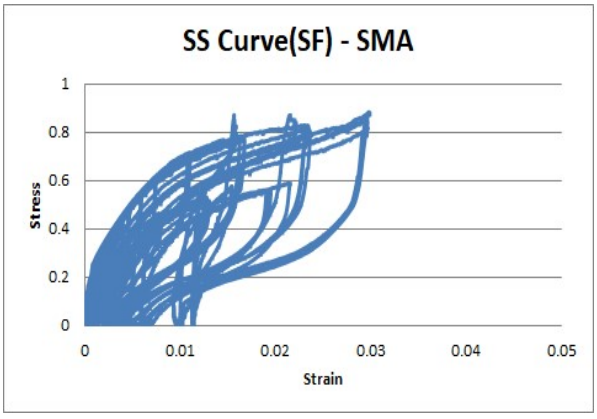
(a) 강재 댐퍼의 전체 거동 특성(SF)



(b) 강재 시편의 응력-변형률 선도(SF)

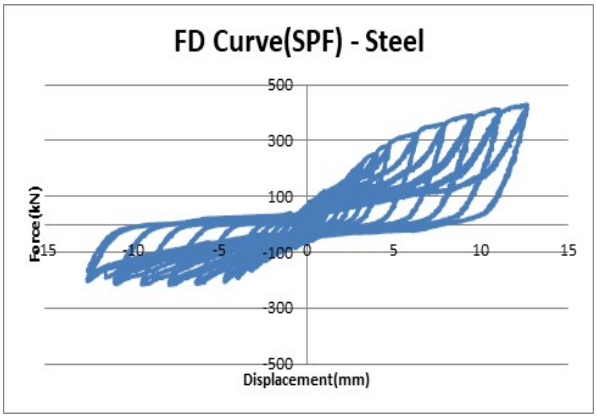


(c) 형상기억합금 댐퍼의 전체 거동 특성(SF)

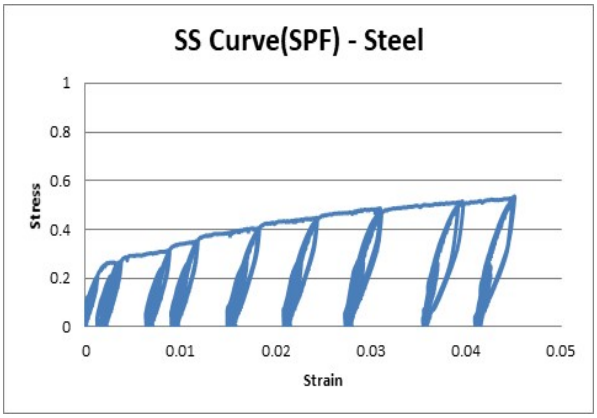


(d) 형상기억합금 시편의 응력-변형률 선도(SF)

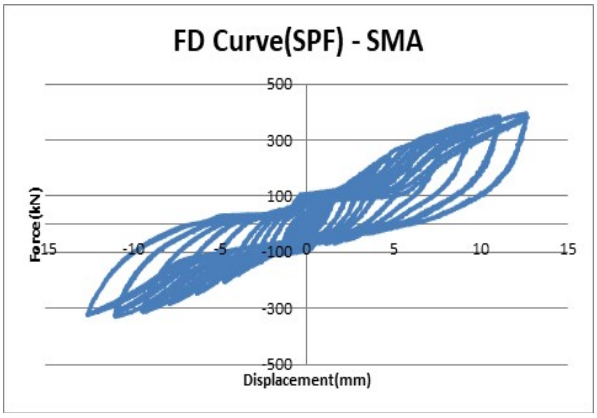
그림 36. 마찰력 적용 댐퍼 모델의 강재 및 형상기억합금 거동 특성 비교



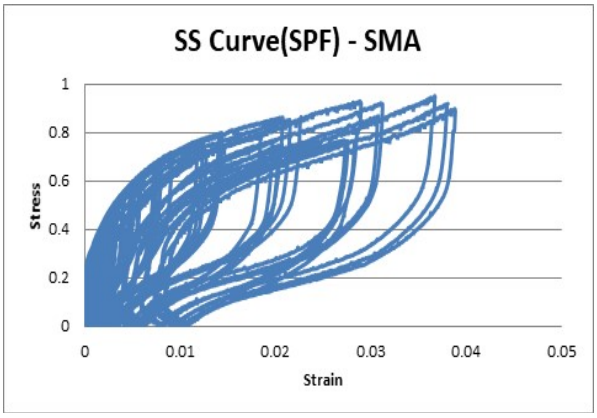
(a) 강재 댐퍼의 전체 거동 특성(SPF)



(b) 강재 시편의 응력-변형률 선도(SPF)



(c) 형상기억합금 댐퍼의 전체 거동 특성(SPF)

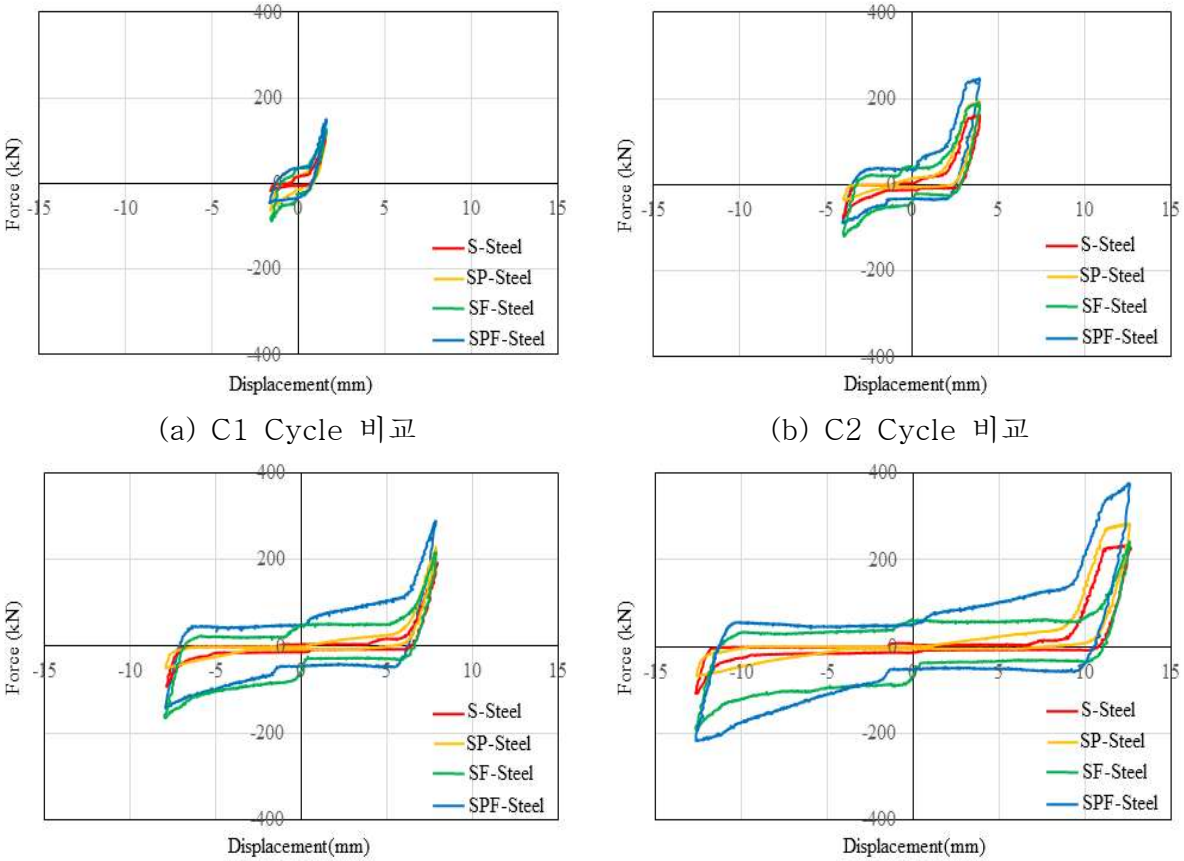


(d) 형상기억합금 시편의 응력-변형률 선도(SPF)

그림 37. 폴리우레탄 및 마찰력 적용 댐퍼 모델의 강재 및 형상기억합금 거동 특성 비교

- 마찰력 적용 댐퍼 모델은 마찰 볼트에 의한 마찰력 적용 시 M10 볼트의 마찰 면적이 적어 추가의 강판을 이용하여 마찰력을 제공함
- 변위 제어를 통한 하중 작용 시 강판이 상하로 움직이며 댐퍼 시스템에 추가의 마찰 하중 적용함
- 마찰력 적용 댐퍼 모델의 형상기억합금 하중이 강재보다 작은 값이 나왔지만 물성치 강도의 차이라고 판단됨
- 강재 시편은 하중 작용 시 소성 구간을 넘어가면 변형된 상태가 유지되므로 초기 하중의 반대 방향으로 하중이 작용하면 하중을 받을 수 없는 것으로 분석됨(그림 35, 36 참고)
- 형상기억합금 시편의 경우 파단이 발생하였지만 복원력으로 인해 잔류변위가 거의 발생하지 않았음(그림 36, 37 참고)
- 폴리우레탄 및 마찰력 적용 댐퍼 모델은 이전 실험들과 거의 유사한 형태의 결과값을 나타내며 최대하중 및 복원력에 대해 가장 우수한 결과를 나타냄
- 반복하중을 재하하여 수행된 실험 결과 메커니즘과 유사한 거동특성이 확인되었고 강재의 소성변형을 초탄성 형상기억합금과 폴리우레탄에 의해 일정 수준 복원되었고 마찰볼트에 의해 에너지 소산능력이 향상됨을 알 수 있음

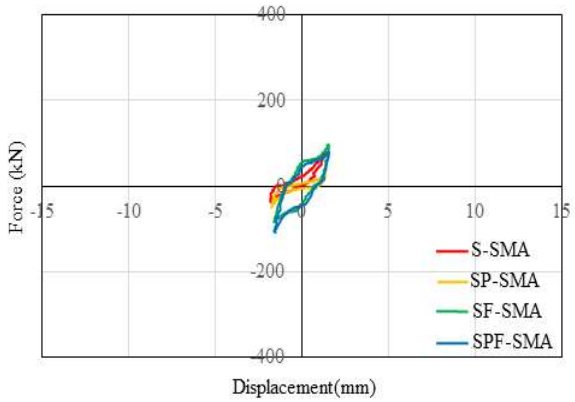
○ **구조실험 결과를 토대로 변위하중 구간(C1, C2, C3, C4)에 대한 최대 하중 및 잔류변위에 대한 분석을 실시함(그림 38, 39, 40, 41 참고)**



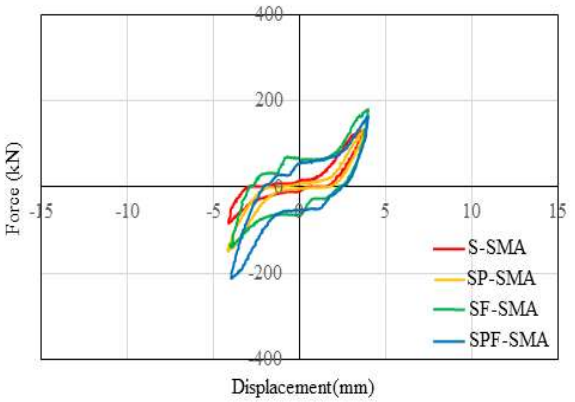
(a) C1 Cycle 비교 (b) C2 Cycle 비교

(c) C3 Cycle 비교 (d) C4 Cycle 비교

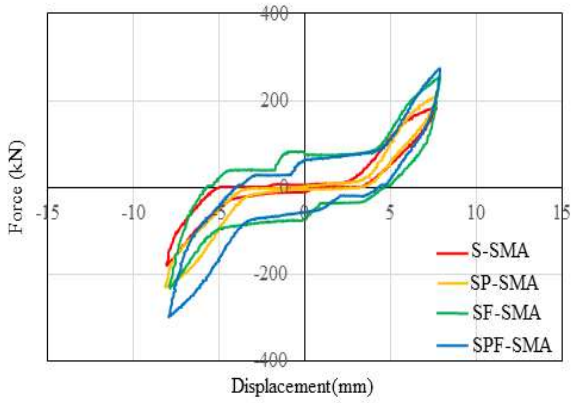
그림 38. 강재 댐퍼 모델의 변위하중 구간 비교



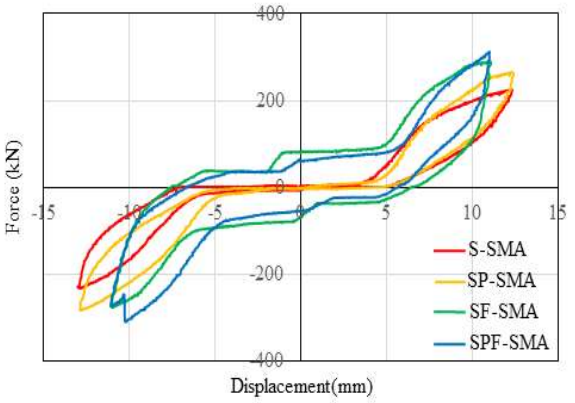
(a) C1 Cycle 비교



(b) C2 Cycle 비교

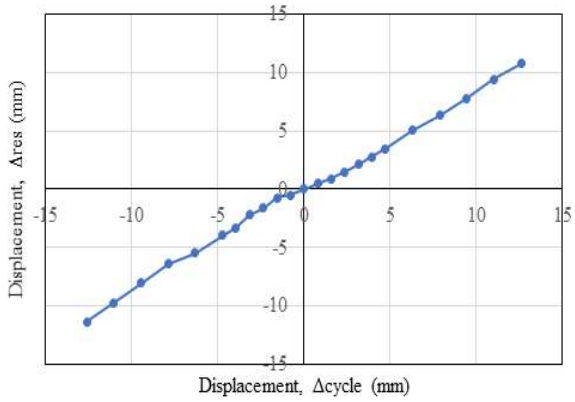


(c) C3 Cycle 비교

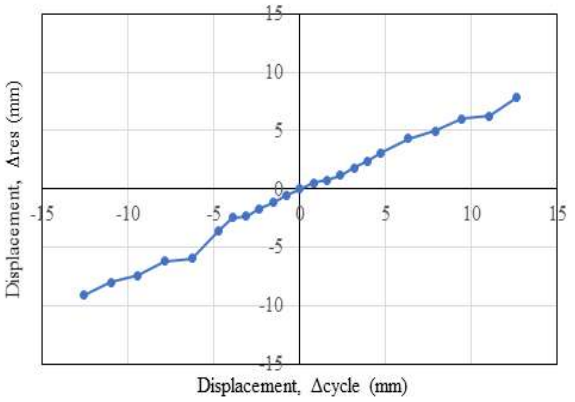


(d) C4 Cycle 비교

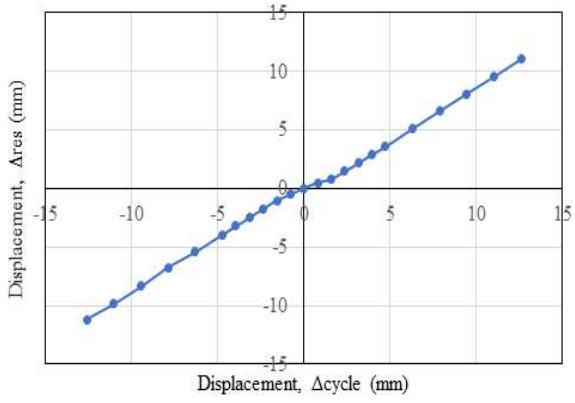
그림 39. 형상기억합금 댐퍼 모델의 변위하중 구간 비교



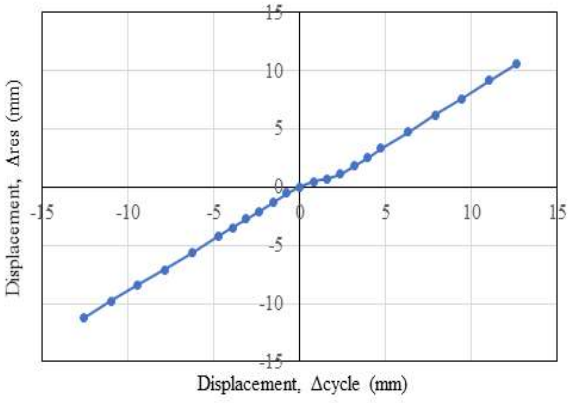
(a) 강재 댐퍼의 잔류변위(S)



(b) 강재 댐퍼의 잔류변위(SP)

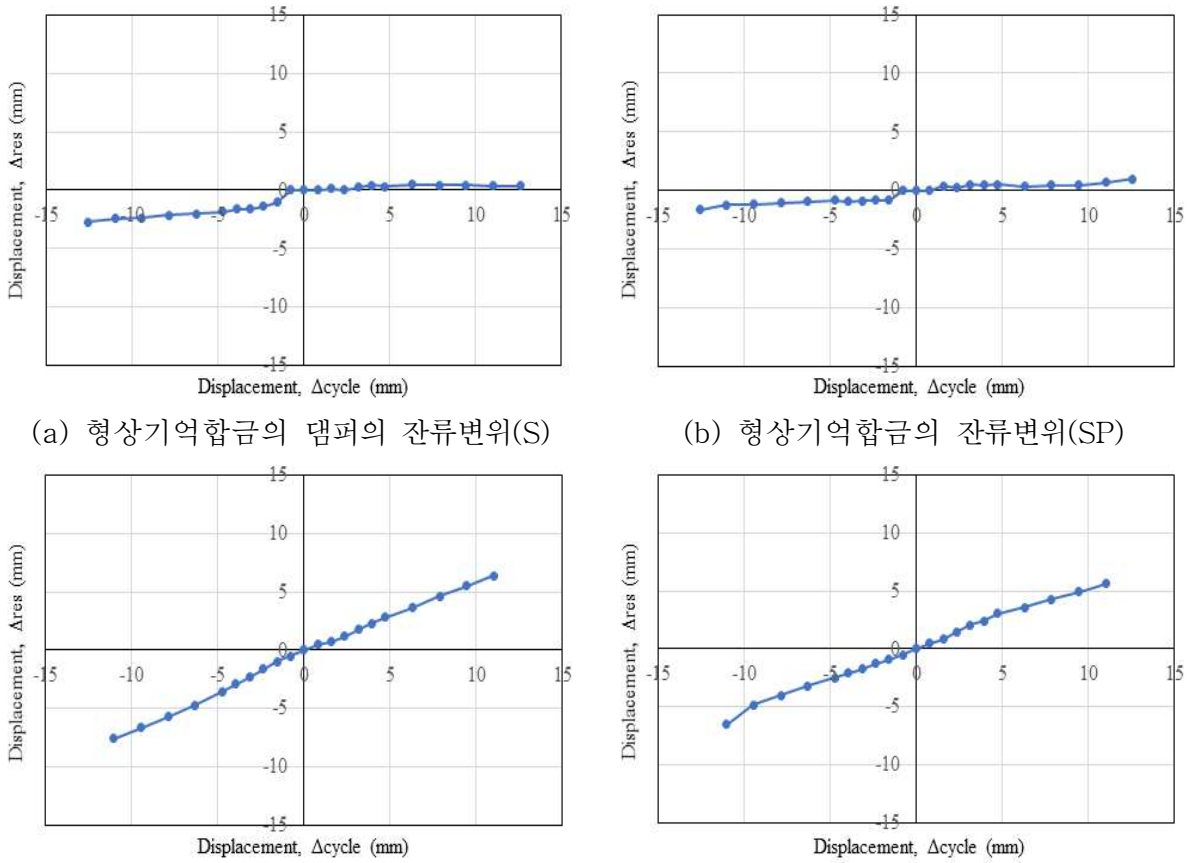


(c) 강재 댐퍼의 잔류변위(SF)



(d) 강재 댐퍼의 잔류변위(SPF)

그림 40. 강재 댐퍼 모델의 잔류변위



(a) 형상기억합금의 댐퍼의 잔류변위(S)　(b) 형상기억합금의 잔류변위(SP)

(c) 형상기억합금의 잔류변위(SF)　(d) 형상기억합금의 잔류변위(SPF)

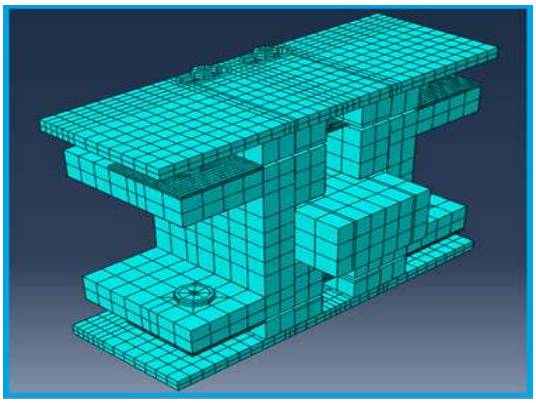
그림 41. 형상기억합금 댐퍼 모델의 잔류변위

- 구간 하중은 일반적으로 모델별 SPF가 가장 크게 나타나며 SP 및 SF는 비슷한 수준임(그림 38, 39 참고)
- 잔류변위의 경우 강재 시편에서 상당히 크게 발생하는 것을 볼 수 있는 반면, 형상기억합금은 잔류변위가 상당히 작게 나타나 복원력이 상당히 우수한 것을 볼 수 있음(그림 40, 41 참고)

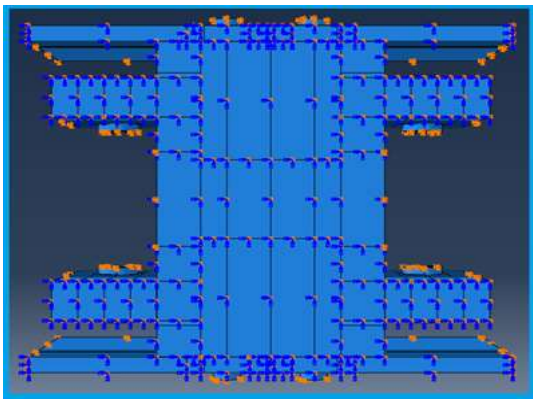
□ (핵심 4) 주관연구기관(인천대학교): 유한요소해석을 통한 시스템 부품의 역학적 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출

○ 첨단 신소재를 활용한 내진보강용 브레이싱 댐퍼 장치에 대한 3차원 정밀 유한요소 해석 모델을 개발하고 수행함(그림 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48 참고)

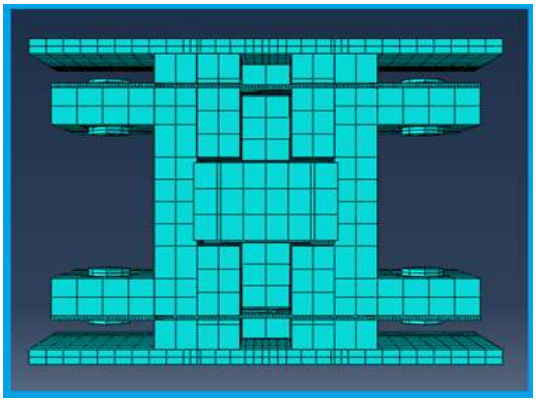
- 초탄성 형상기억합금 플레이트에서 제공하는 복원력과 전단 볼트의 축력으로 조절 가능한 마찰력과의 비율($R=F_{SMA}/F_{Fric}$)을 조절하여 예비 해석과 유사하게 해석 모델을 완성함
- 경계조건을 고려하여 Geometry를 간소화하고 Symmetric 경계조건을 사용하여 Half 모델을 제작하며 3차원 솔리드 요소를 사용하여 유한요소 해석 모델을 제작함
- 복원력을 증진 시키는 스프링은 그램에서 제공하는 Ground Spring 요소를 사용하여 정밀한 모델링을 대신하여 1차원적으로 간단하게 모형화(Modelling)를 실시함
- 각각의 모델별로 **초탄성 형상기억합금 장치와 마찰 댐퍼와 같은 부속품들의 하중-변위 거동을 측정하여 역학적 메커니즘을 확인한 후 댐퍼 시스템 전체의 거동과 비교하여 최적의 설계 파라미터를 도출함**



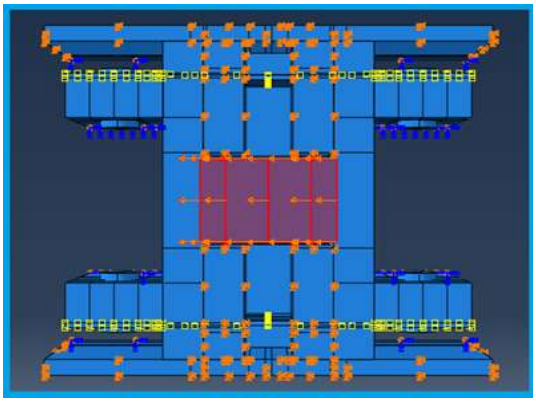
(a) 브레이싱 댐퍼 장치 3D 모델



(b) 브레이싱 댐퍼 장치 경계 조건



(c) 브레이싱 댐퍼 장치 2D 모델



(d) 변위 제어 하중 조건

그림 42. 프로그램을 통한 브레이싱 댐퍼 장치 모델링



(a) 형상기억합금 시편 해석 모델



(b) 강재 시편 해석 모델

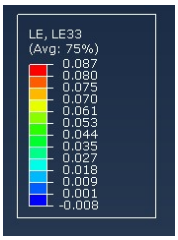
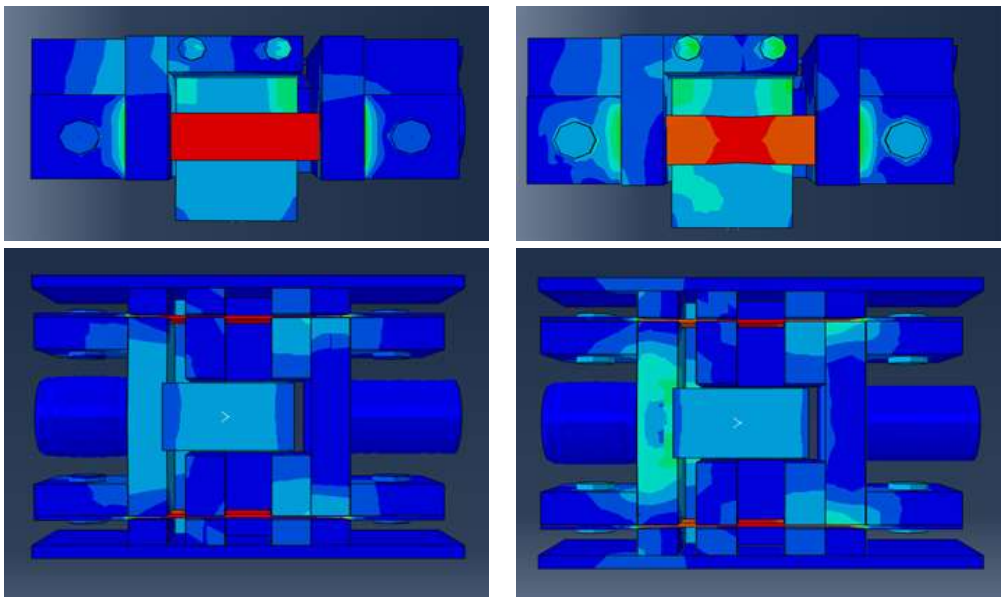


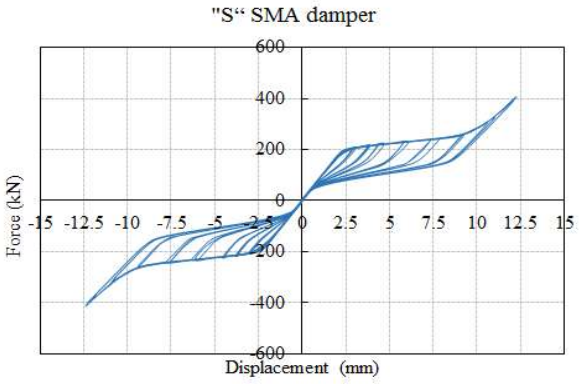
그림 43. 형상기억합금 및 강재 시편 해석 모델



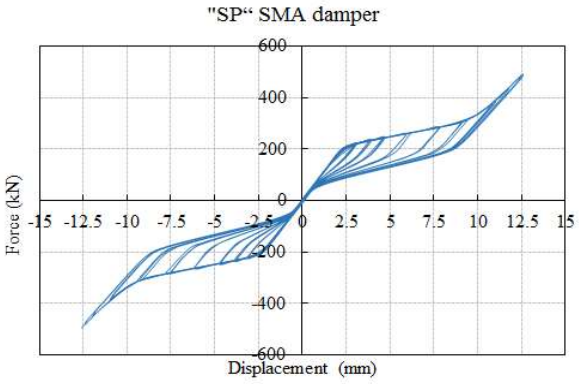
(a) 형상기억합금 댐퍼 해석 모델

(b) 강재 댐퍼 해석 모델

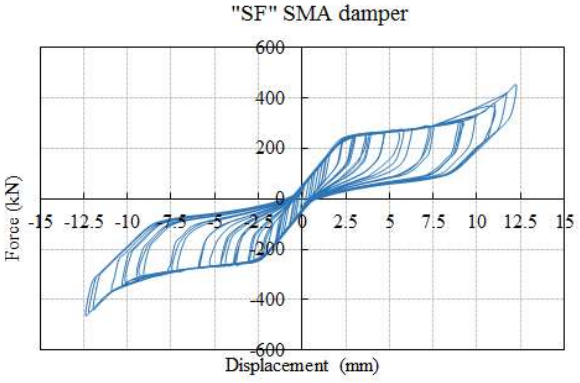
그림 44. 형상기억합금 및 강재 댐퍼의 해석 모델(SPF)



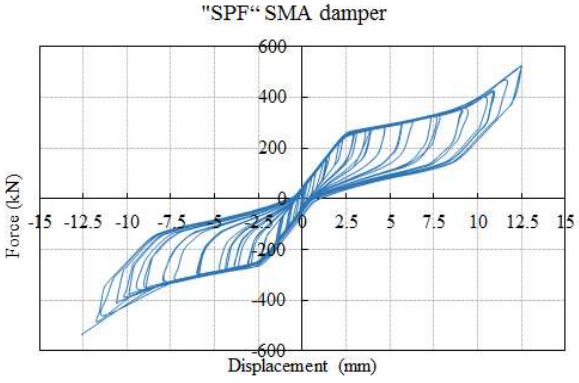
(a) 형상기억합금 댐퍼 해석결과(S)



(b) 형상기억합금 댐퍼 해석결과(SP)

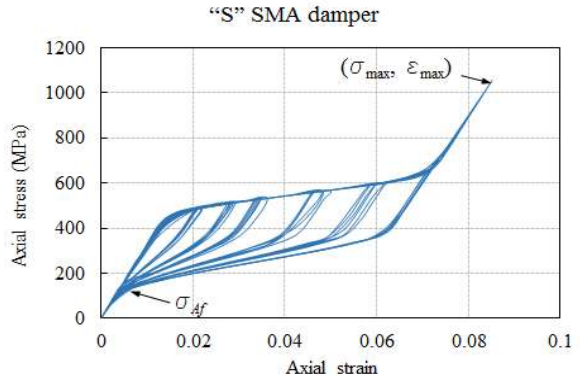


(c) 형상기억합금 댐퍼 해석결과(SF)

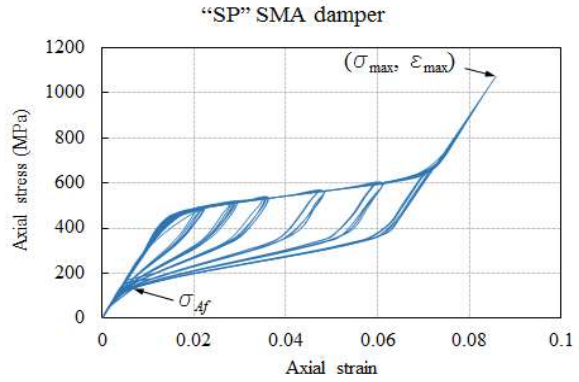


(d) 형상기억합금 댐퍼 해석결과(SPF)

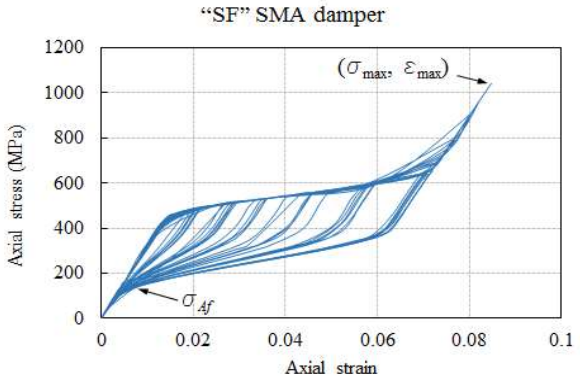
그림 45. 형상기억합금 댐퍼 장치의 해석결과



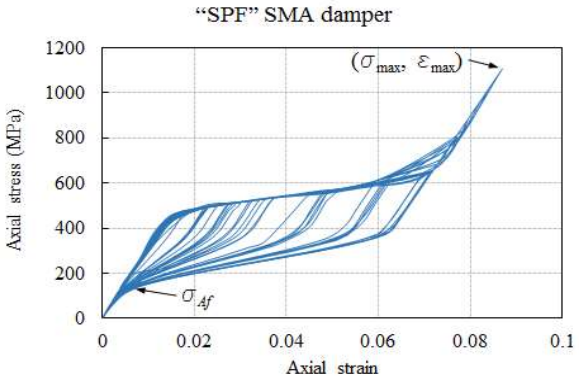
(a) 형상기억합금 시편 해석결과(S)



(b) 형상기억합금 시편 해석결과(SP)

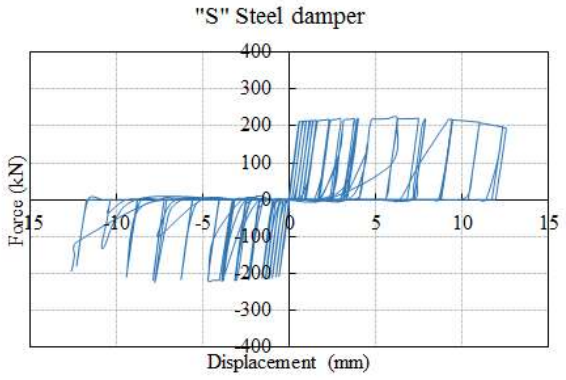


(c) 형상기억합금 시편 해석결과(SF)

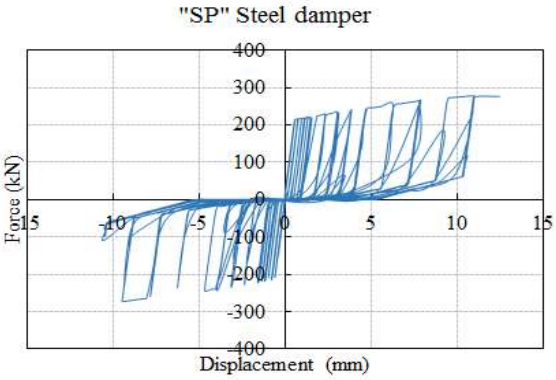


(d) 형상기억합금 시편 해석결과(SPF)

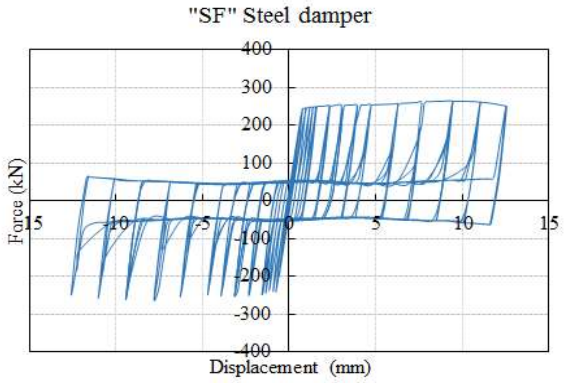
그림 46. 형상기억합금 시편의 해석결과



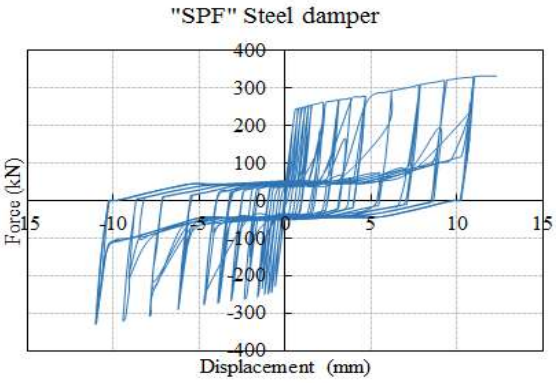
(a) 강재 댐퍼 해석결과(S)



(b) 강재 댐퍼 해석결과(SP)

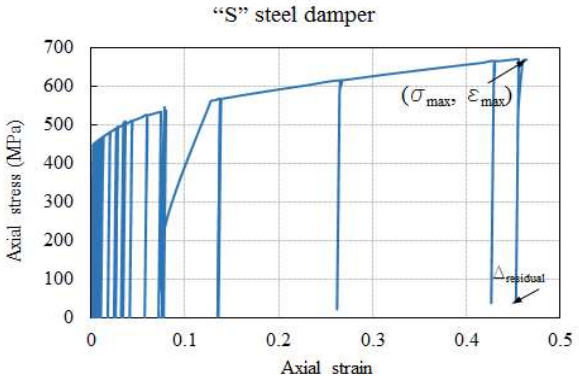


(c) 강재 댐퍼 해석결과(SF)

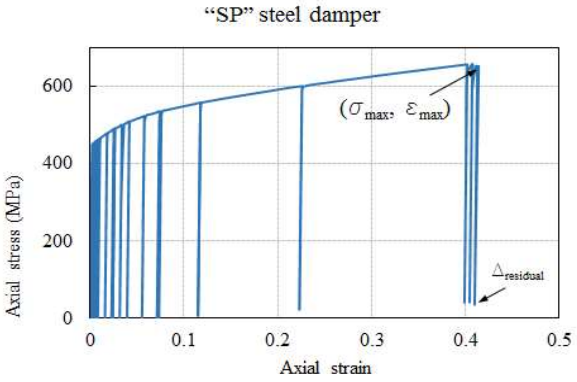


(d) 강재 댐퍼 해석결과(SPF)

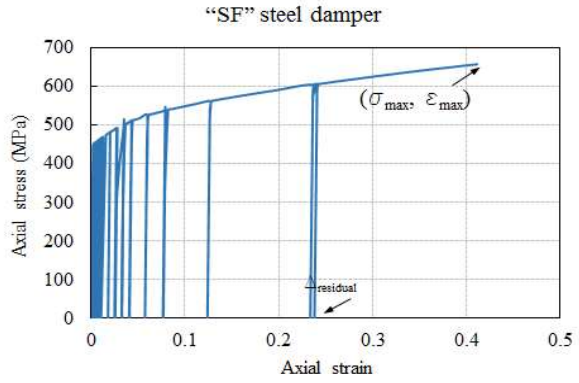
그림 47. 강재 댐퍼 장치의 해석결과



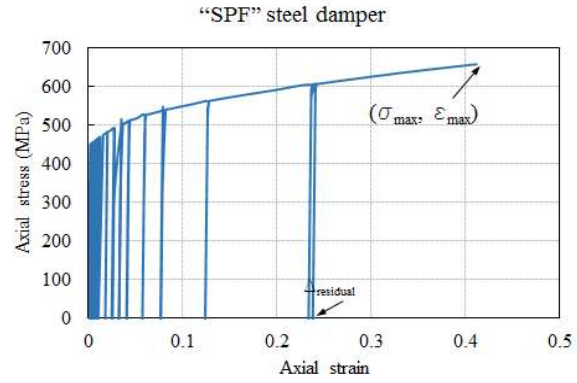
(a) 강재 시편 해석결과(S)



(b) 강재 시편 해석결과(SP)



(c) 강재 시편 해석결과(SF)



(d) 강재 시편 해석결과(SPF)

그림 48. 강재 시편의 해석결과

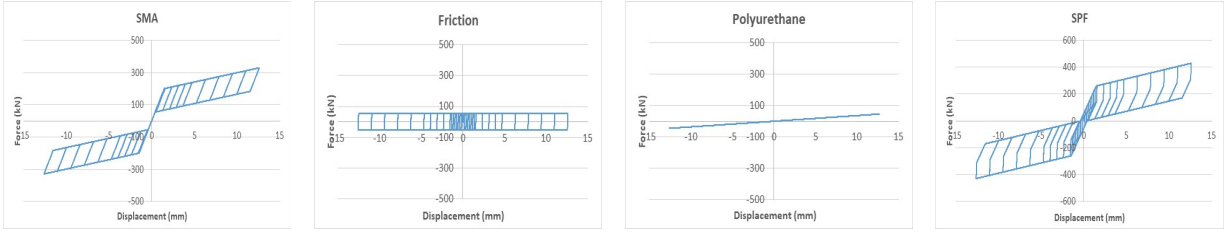
○ 실험 및 해석을 통해 얻어진 결과를 토대로 최종적인 평가를 수행함

- 실험 및 해석의 결과값을 분석해보면 강재 및 형상기억합금 댐퍼의 축 방향에 대한 최대 하중은 비슷한 수준을 나타남. 하지만 지진과 같은 반복하중이 작용할 경우 형상기억합금 댐퍼는 축 방향을 기준으로 대칭적인 거동이 발생하며 강재 댐퍼는 축방향을 기준으로 반대로 하중이 작용했을 때 충분한 하중을 받지 못하는 것으로 나타남
- 결과적으로 강재 댐퍼는 형상기억합금 댐퍼에 비해 지진과 같은 반복하중에 취약하며 단발적인 사용만 가능한 시스템으로 본 연구에서 개발된 형상기억합금 댐퍼가 제진 시스템으로써 우수한 성능을 지님
- 시스템 개발 단계에서 실질적인 재료인 강재와 형상기억합금은 생산 단가에서 상당한 차이가 나타남. 강재 및 형상기억합금 댐퍼는 실질적으로 구조물에 적용했을 때 총 단가가 상당한 차이가 날 것으로 예상됨. 하지만 지진 발생 이후 손상된 댐퍼 및 구조물에 대한 보수·보강을 수행할 경우 지속 사용 가능한 형상기억합금 댐퍼에 비해 상당한 비용이 소요될 것으로 판단됨
- 구조물의 규모 및 성능에 대해서 각각의 비용을 산정할 수 없지만 생애주기 등을 고려했을 때 지속적인 사용 연수를 고려하면 형상기억합금 댐퍼의 경제성이 강재 댐퍼보다 우수할 것으로 예상됨
- 본 연구에서 수행된 개발 시스템은 형상기억합금을 활용한 제진 시스템으로 구조물에 대한 다양한 적용성을 갖지만 기타 시설물에 대한 적용성은 추후 연구를 통해 검토가 필요하다고 판단됨

□ (핵심 5) 주관연구기관(인천대학교): 수치해석을 통하여 구조물에 장착된 시스템의 요소 특성을 파악하고 부가적 성능 평가 실시

○ 본 연구에서 제안하는 댐퍼 장치의 현장 적용 가능성을 검증하기 위한 구조물 설계와 수치해석 모델을 개발함

- 댐퍼 시스템을 구성하는 부품들은 선형적인 강성(Stiffness) 모델로 이상화된 재료적 물성치를 포함하는 스프링 요소들로 모형화하고 병렬로 결합하여 댐퍼의 거동을 수치해석으로 재현 가능한 비선형 스프링 요소를 제작함
- 현행 IBC 또는 ASCE 설계기준을 활용하여 질량과 강성이 대칭인 강재-콘크리트 합성 빌딩 구조물을 설계하고 이를 비선형 보-기둥 요소로 이루어진 2차원 수치해석 프레임 모델들로 제작함
- 내진 성능이 우수한 강재-콘크리트 합성 프레임에 브레이싱을 설치하고 보-브레이싱 연결부에 본 연구에서 제안하는 댐퍼 장치를 설치하도록 설계함
- 댐퍼의 거동을 재현할 수 있는 등가의 비선형 스프링 요소를 장착한 6층짜리 강재-콘크리트 합성 브레이싱 프레임 모델들로 제작하고 지반 가속도 데이터를 활용하여 비선형 동적 해석을 수행함



(a) SMA (b) Friction (c) Polyurethane (a) Total

그림 49. 각 부품의 재료 모델과 스마트 댐퍼의 거동 재현

○ OpenSEES 프로그램을 활용하여 제안된 댐퍼 시스템을 구조물에 적용하여 비선형 동적 해석을 수행하고 비선형 동적 해석의 결과를 분석하여 성능의 우수성을 입증하는 부가적 평가를 실시함

- 비선형 동적 해석결과를 근거로 댐퍼 장치의 설치 유무에 따른 성능검증을 위하여 구조물의 최대 층간 처짐, 층간 잔류 변위으로부터 구조물의 복원력, 에너지 소산능력을 조사하여 파라미터별 결과 값에 대한 비교·분석을 통하여 시스템의 우수한 성능을 입증함

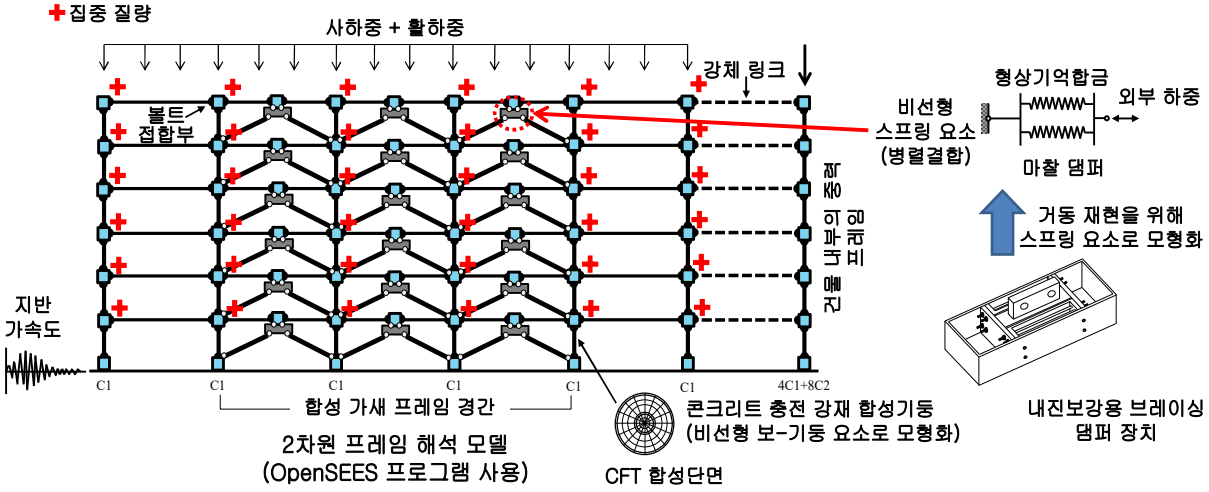
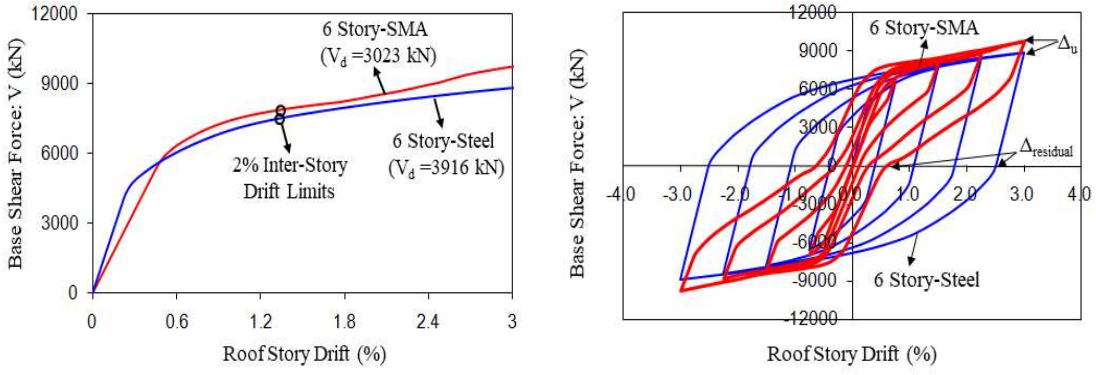


그림 50. 댐퍼 장치가 장착된 프레임 구조물의 수치해석 모델(OpenSEES 프로그램 사용)

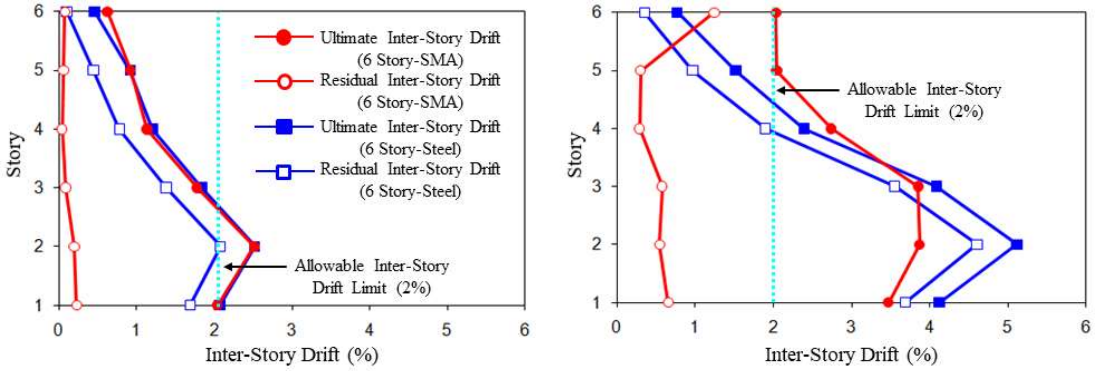
- 비선형 스프링 요소를 적용한 6층 프레임 구조물에 대한 모델을 제작하여 지반 가속도를 적용하고 비선형 동적해석을 수행함
- Static Pushover 해석을 수행하였을 때 지붕층에서 하중에 따른 변위를 비교·분석 해보면 형상기억합금 댐퍼가 강재 댐퍼보다 일정 변위를 넘어갔을 때 전단 하중이 크게 나타나는 것을 볼 수 있음(그림 51(a) 참고)
- Cyclic Pushover 해석을 수행하였을 때 지붕층에서 하중에 따른 변위를 비교·분석 해보면 동일한 변위에서 형상기억합금 댐퍼의 전단 하중이 크게 발생하였으며 형상기억합금의 잔류변위는 상당히 작게 나타나지만 상대적으로 강재 댐퍼의 경우 잔류변위가 상당히 크게 나타나는 것을 볼 수 있음(그림 51(b) 참고)
- Static & Cyclic Pushover 해석결과를 비교해보면 형상기억합금 댐퍼와 강재 댐퍼에서 발생하는 작용 전단하중은 유사한 값을 보이지만 반복적으로 하중이 작용하였을 때 잔류변위는 형상기억합금 댐퍼에서 상대적으로 작게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이를 통해 강재 댐퍼보다 성능이 우수하다고 판단할 수 있음



(a) Static Pushover Analysis Result (b) Cyclic Pushover Analysis Result

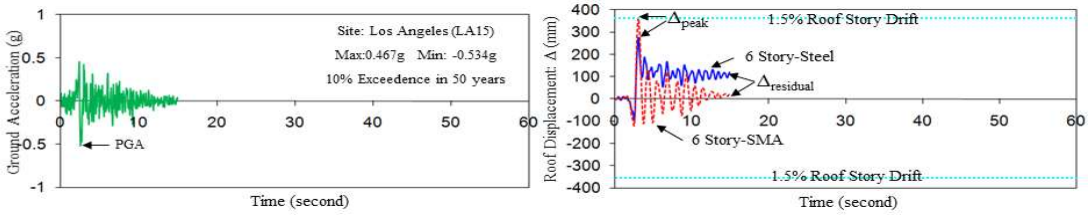
그림 51. Pushover 해석을 통한 프레임 구조물 Roof에서의 해석결과

- 프레임 구조물에 대한 층간 변위를 확인하기 위해 형상기억합금 댐퍼와 강재 댐퍼 적용을 통해 추가적으로 비교·분석하였음
- 지붕층 최대 변위가 1.5%일 때 층간의 최대 변위를 비교·분석해보면 형상기억합금 댐퍼와 강재 댐퍼는 상당히 유사한 값을 나타냈으며 잔류변위는 형상기억합금 댐퍼가 강재 댐퍼보다 우수하게 나타남(그림 52(a) 참고)
- 지붕층 최대 변위가 3.0%일 때 층간의 최대 변위를 비교·분석해보면 3층 이하에서는 형상기억합금 댐퍼가 작게 나타나며 3층을 넘어서면 강재 댐퍼가 작게 나타나며 잔류변위는 형상기억합금 댐퍼가 강재 댐퍼보다 우수하게 나타남(그림 52(b) 참고)

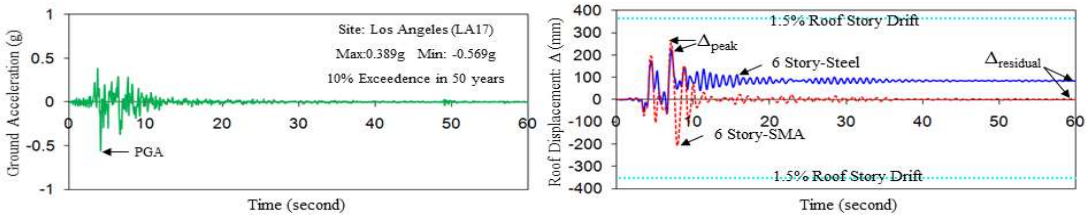


(a) Inter-Story Drift under 1.5% Roof Drift (b) Inter-Story Drift under 3.0% Roof Drift

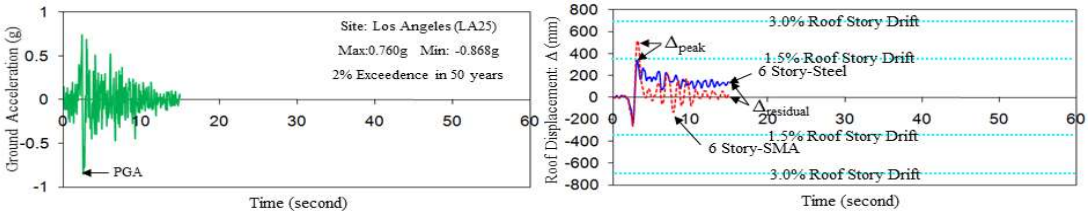
그림 52. Pushover 해석을 통한 구조물 층간 최대 변위 및 잔류변위



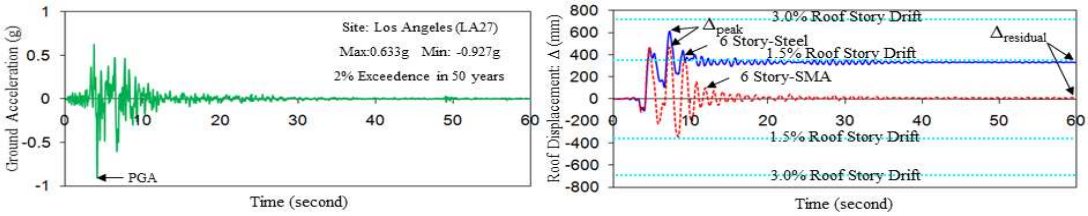
(a) LA15 Ground Motion(Short Period)



(b) LA17 Ground Motion(Long Period)

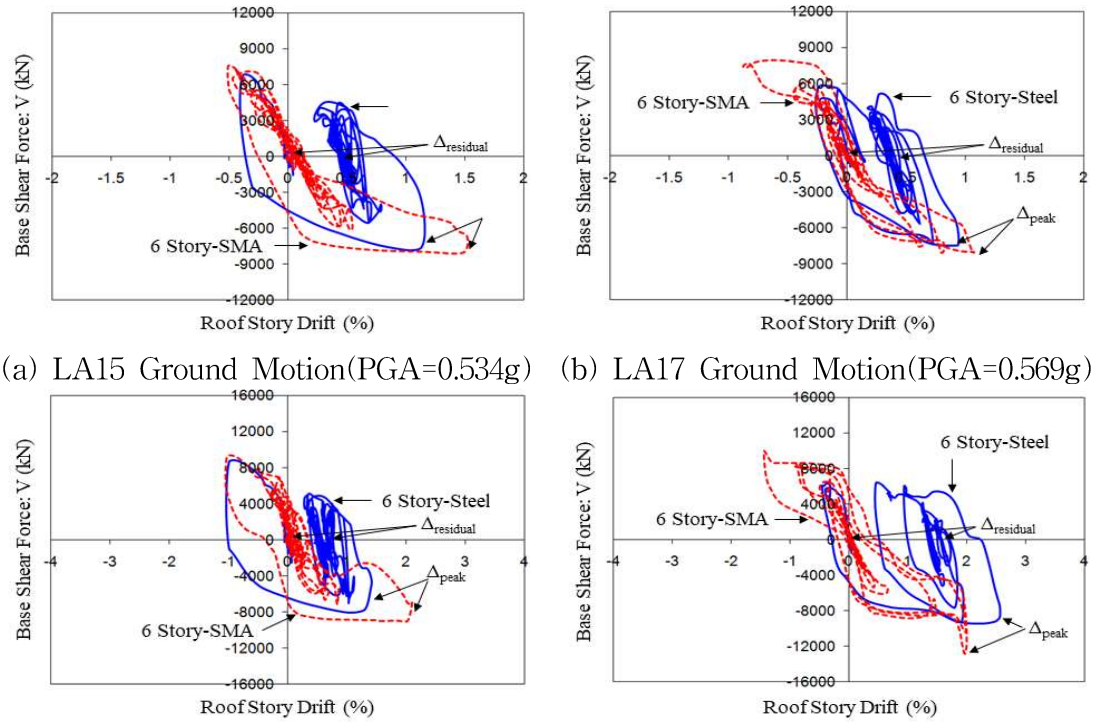


(c) LA25 Ground Motion(Short Period)



(d) LA27 Ground Motion(Long Period)

그림 53. 다양한 지진하중 조건에 따른 프레임 구조물 Roof에서의 해석결과



(a) LA15 Ground Motion(PGA=0.534g) (b) LA17 Ground Motion(PGA=0.569g)

(c) LA25 Ground Motion(PGA=0.868g) (d) LA27 Ground Motion(PGA=0.927g)

그림 54. 다양한 지진하중 조건에 따른 댐퍼 시스템의 응답 결과

- 프레임 구조물에 대한 다양한 지반 가속도를 적용하여 프레임 구조물에 대한 추가적인 해석을 진행함
- 지진하중 증가에 따른 프레임 구조물 지붕층의 잔류변위를 비교·분석해보면 강재 댐퍼는 지속적으로 잔류변위가 발생하며 형상기억합금 댐퍼는 원형으로 복원되는 성능을 볼 수 있어 지속적인 활용이 가능하다고 판단됨(그림 53, 54 참고)

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 연구 개발 성과 목표

□ 최종 연구개발의 성과 목표

연구 개발 성과 목표	지진으로부터 발생하는 구조물의 피해를 최대한 줄이고 손상으로부터 치유하는데 요구되는 유지·보수비용을 최소화하는 새로운 댐퍼 시스템 장치에 대한 원천 기술을 개발하고 해석과 실험을 통한 구조적 성능 검증으로 세계적 수준의 관련 기술을 보유하는 성과를 창출함

□ 정량적 성과목표

- 1차년도 연구를 성실히 수행하여 SCI급(영향지수 1.8 이하) 논문 1편 게재, 국내 등재지 1편 게재, 국내 특허 2건 출원의 성과를 달성하고자 함
- 2차년도 연구를 성실히 수행하여 SCI급(영향지수 1.8 이상) 논문 2편 게재, SCI급(영향지수 1.8 이하) 논문 1편 게재, 국내 등재지 1편 게재의 성과를 달성하고자 함

□ 정성적 성과목표

- 1차년도에는 첨단 신소재에 대한 개념 및 해석모델을 정립하고 스마트 댐퍼 시스템을 개발하며 상세설계를 완성하여 실험을 위한 시험체를 제작함
- 2차년도에는 1차년도에 제작된 시험체에 대한 구조실험을 실시하고 현장 적용 가능성을 검증하기 위하여 댐퍼 시스템이 적용된 프레임 구조물을 설계하며 비선형 동적해석을 실시함

□ 성과점검 기준표

[총괄]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	
주관/공동	1	활용될 신소재의 물성치 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성	1-1	신소재(초탄성 니티놀 합금)의 특성 확인	①	재료특성 확인	문헌 수집	문헌 수집	문헌수집	전문가 검증	8	특허: 출원 건 등록 건 논문: 1건 시제품: 건 S/W: 건
			1-2	신소재의 거동 재현을 위한 해석 모델 완성	②	신소재 해석 모델	해석 모델 완성	해석 모델 완성	모델 완성	전문가 검증	8	
	2	신소재와 융합된 스마트 댐퍼 시스템 개발(시스템 개념 정립 포함) 및 상세 설계 완성	2-1	스마트 댐퍼 시스템의 개념 정립	①	개념정립	개념정립 완성	개념정립 완성	개념도 제시	전문가 검증	7	특허: 출원 2건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 S/W: 건
			2-2	스마트 댐퍼 시스템의 상세 설계 완성	②	상세 설계도	상세 설계도 완성	상세 설계도 완성	설계도 제시	전문가 검증	14	

	3	실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 지진 피해 저감 효과와 물리적 성능 검증	3-1	스마트 댐퍼 시스템의 실험체 제작	①	3-5개의 실험체	실험체 제작	실험체 제작	세금 계산서	과제 담당자 검토	20	특허: 출원 건 등록 건 논문: 1건 시제품: 건 S/W: 건
			3-2	재료 및 구조 실험 수행 및 결과 분석을 통한 성능 검증	②	구조실험 결과	구조 실험 완성 (재하 실험)	구조 실험 완성 (재하 실험)	구조 실험	자체 검증	15	
	4	유한요소해석을 통한 시스템 부품의 역학적 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출	4-1	유한요소 해석 모델 제작 및 해석 수행	①	해석모델	해석 모델 완성	해석 모델 완성	해석 모델 제시	자체 검증	10	특허: 출원 건 등록 건 논문: 2건 시제품: 건 S/W: 건
			4-2	유한요소 해석결로 최적의 설계 방식 도출	②	설계지침 (최적설계 변수도출)	설계 지침 완성	설계 지침 완성	최적 설계 지침 제시	자체 검증	13	
	5	수치해석을 통하여 구조물에 장착된 시스템의 요소 특성 파악 및 부가적 성능 평가 실시	5-1	강재-콘크리트 합성 브레이싱 프레임 모델 설계 및 제작	①	프레임 모델설계 및 해석모델	설계 및 해석 모델 완성	설계 및 해석 모델 완성	설계도 및 해석 모델 제시	자체 검증	1	특허: 출원 건 등록 건 논문: 2건 시제품: 건 S/W: 건
			5-2	비선형 동적해석 실시	②	해석결과	해석 완료	해석 완료	해석결과제시	자체 검증	2	
			5-3	해석결과 분석 및 부가적 성능 평가 실시	③	성능 평가	성능 평가 완료	성능 평가 완료	성능 평가 결과 제시	자체 검증	2	
계											100	특허: 출원 2건 등록 건 논문: 6건 시제품: 건 S/W: 건

[1차년도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	
주관/공동	1	활용될 신소재의 물성치 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성	1-1	신소재(초탄성 니티놀 합금)의 특성 확인	①	재료특성 확인	문헌 수집	문헌 수집	문헌 수집	전문가 검증	14	특허: 출원 건 등록 건 논문: 1건 시제품: 건 S/W: 건
			1-2	신소재의 거동 재현을 위한 해석 모델 완성	②	신소재 해석 모델	해석 모델 완성	해석 모델 완성	모델 완성	전문가 검증	14	
	2	신소재와 융합된 스마트 댐퍼 시스템 개발(시스템 개념 정립 포함) 및 상세 설계 완성	2-1	스마트 댐퍼 시스템의 개념 정립	①	개념정립	개념 정립 완성	개념 정립 완성	개념도 제시	전문가 검증	12	특허: 출원 2건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 S/W: 건
			2-2	스마트 댐퍼 시스템의 상세 설계 완성	②	상세 설계도	상세 설계도 완성	상세 설계도 완성	설계도 제시	전문가 검증	24	
	3	실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 지진 피해 저감 효과와 물리적 성능 검증	3-1	스마트 댐퍼 시스템의 실험체 제작	①	3-5개의 실험체	실험체 제작	실험체 제작	세금 계산서	과제 담당자 검토	36	특허: 출원 건 등록 건 논문: 1건 시제품: 건 S/W: 건
계											100	특허: 출원 2건 등록 건 논문: 2건 시제품: 건 S/W: 건

[2차년도]

구분	핵심성과 (CIE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	
주관	3	실험을 위한 실험체 제작 및 구조실험을 통한 지진 피해 저감 효과와 물리적 성능 검증	3-2	재료 및 구조 실험 수행 및 결과 분석을 통한 성능 검증	②	구조실험 결과	구조 실험 완성 (반복/정적 재하 실험)	구조 실험 완성 (반복/정적 재하 실험)	구조실험	자체 검증	35	특허: 출원 건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 S/W: 건
	4	유한요소해석을 통한 시스템 부품의 역학적 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출	4-1	유한요소 해석 모델 제작 및 해석 수행	①	해석모델	해석 모델 완성	해석 모델 완성	해석모델 제시	자체 검증	25	특허: 출원 건 등록 건 논문: 2건 시제품: 건 S/W: 건
			4-2	유한요소 해석결과로 최적의 설계 방식 도출	②	설계지침 (최적 설계 변수 도출)	설계 지침 완성	설계 지침 완성	최적 설계지침 제시	자체 검증	28	
	5	수치해석을 통하여 구조물에 장착된 시스템의 요소특성 파악 및 부가적 성능 평가 실시	5-1	강재-콘크리트 합성 브레이싱 프레임 모델 설계 및 제작	①	프레임 모델 설계 및 해석모델	설계 및 해석 모델 완성	설계 및 해석 모델 완성	설계도 및 해석모델 제시	자체 검증	3	특허: 출원 건 등록 건 논문: 2건 시제품: 건 S/W: 건
			5-2	비선형 동적해석 실시	②	해석결과	해석 완료	해석 완료	해석결과제시	자체 검증	5	
			5-3	해석결과 분석 및 부가적 성능 평가 실시	③	성능 평가	성능 평가 완료	성능 평가 완료	성능평가 결과 제시	자체 검증	4	
계											100	특허: 출원 건 등록 건 논문: 4건 시제품: 건 S/W: 건

나. 정량적 성과 목표

□ 정량적 성과 목표 달성도

성과지표	성과 목표	달성 성과
SCI(E)급 학술지 게재 (2점)	2건 (4점)	8건 (11점)
일반 학술지 게재 (1점)	4건 (4점)	1건 (1점)
특허 출원 (1점)	2건 (2점)	2건 (2점)
특허 등록 (2점)	-	1건 (2점)
디자인 등록 (1점)	-	-
소프트웨어 (1점)	-	-
하드웨어 (1점)	-	-
기타 (1점)	-	인력양성 2건 (2점)
소계(점수)	10점	18점

※ 본 연구개발을 통하여 도출된 정량적 성과는 목표 대비 180%의 성과를 달성함

※ 연구개발을 통한 연구 성과(논문, 특허) 뿐만 아니라 인력양성(박사 2명) 성과를 달성함

○ **SCI(E)급 학술지 게재 성과의 경우 성과 목표는 총 2건(4점)으로 설정하였으나 연구를 수행한 결과 총 8건(11점)의 성과를 달성함**

- SCI(E)급 학술지 게재 성과는 세부적으로 1차년도(핵심-1)에 1.8 이하의 SCI(E)급 논문 1건을 달성하고 영향지수 2차년도(핵심-3, 핵심-4, 핵심-5)에 1.8 이상의 SCI(E)급 논문 3건과 1.8 이하의 SCI(E)급 논문 4건의 성과를 달성하여 성과 목표를 100%이상 달성하였다고 판단됨

○ **일반 학술지 게재 성과의 경우 성과 목표는 총 4건(4점)으로 설정하였으나 연구를 수행한 결과 총 1건의 성과(1점)를 달성함(일반 학술지 게재 성과 1건은 SCI(E)급 학술지 게재 성과 2건으로 대체 가능하다고 판단됨)**

- 일반 학술지 게재 성과는 세부적으로 2차년도(핵심-4)에 일반 학술지 게재성과 1건과 1.8 이상의 SCI(E)급 논문 1건 및 1.8 이하의 SCI(E)급 논문 1건을 달성하여 성과 목표를 대체하여 100%이상 달성하였다고 판단됨

○ **특허 출원 성과의 경우 성과 목표는 총 2건(4점)으로 설정하였으나 출원 2건, 등록 1건으로 총 3건(6점)의 성과를 달성함**

- 특허 출원 성과는 세부적으로 1차년도(핵심-2)에 특허 2건의 성과를 달성하였으며 추가적으로 등록 1건을 달성하여 성과 목표를 100% 이상 달성하였다고 판단됨

다. 정성적 성과 목표

□ 정성적 성과 목표 달성도

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	활용될 신소재의 물성치 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성	재료 실험을 통하여 활용될 소재의 물성치 특성을 파악하고 수치해석에 활용되는 재료 모델을 개발함. 핵심성과를 토대로 댐퍼 시스템의 설계와 해석에 활용함	재료·자재 유형	인천 대학교	1차 년도	4단계 (성능 검증)
2	신소재와 융합된 스마트 댐퍼 시스템 개발(시스템 개념 정립 포함) 및 상세 설계 완성	시스템에 대한 원리와 개념을 정립하고 이를 토대로 신소재와 융합된 새로운 댐퍼 장치를 개발함. 성능 검증을 위한 실험체 제작을 위하여 댐퍼의 상세 설계를 완성함	시스템 유형	인천 대학교	1차 년도	2단계 (개념 정립)
3	실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 지진 피해 저감 효과와 물리적 성능 검증	실험체에 반복 하중을 재하하여 물리적 성능을 검증하고 댐퍼의 종류별로 복원성과 에너지 소산 능력을 평가함. 유한요소해석 모델을 보정하는 대 실험 결과를 활용함	시스템 유형	인천 대학교 (주)에스코알티에스	1-2차 년도	3단계 (기본 성능 검증)
4	유한요소해석을 통한 시스템 부품의 역학적 메커니즘과 최적의 설계 파라미터 도출	다양한 설계 파라미터를 사용하여 유한요소해석 모델을 제작하고 해석 결과로 최적의 설계 방식을 도출함. 아울러 시스템의 거동 재현을 위한 스프링 요소 제작에도 활용됨	시스템 유형	인천 대학교	2차 년도	3단계 (기본 성능 검증)
5	수치해석을 통하여 구조물에 장착된 시스템의 요소 특성 파악 및 부가적 성능 평가 실시	구조물 내에서 댐퍼 시스템이 미치는 영향력을 파악하기 위하여 시스템을 장착한 프레임 모델을 제작하고 수치해석을 수행함. 수치해석을 통하여 부가적 성능 평가를 실시함	시스템 유형	인천 대학교	2차 년도	4단계 (성능 검증)

기간	연구목표	성과 목표	성과 결과
1차년도	(1) 첨단 신소재를 활용하여 자기 치유와 원상 복원이 가능한 새로운 브레이싱 댐퍼 시스템 장치를 개발함(개념정립 포함) (2) 시스템과 부품에 대한실험체 제작을 위하여 상세 설계를 완성함 (3)실험체를 제작하고 재료 및 구조실험을 위한 준비 작업을 수행함	• 첨단 신소재의 발굴과 적용성 검토 • 국제 표준을 준수하여 재료 실험을 실시하고 발굴된 신소재의 물성치 특성을 파악함 • 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델을 완성함	• 첨단 신소재인 초탄성 형상기억합금에 대하여 재료실험을 통한 물성을 확인하고 수치해석적 모델을 완성함
		• 스마트 브레이싱 댐퍼 시스템의 개념을 정립함 • 각각의 댐퍼 부품들에 역학적 거동을 예측함 • 첨단 신소재와 융합된 댐퍼 시스템과 부품들에 대한 상세설계를 완성함	• 스마트 브레이스이 댐퍼의 개념 및 상세 설계를 완성함
		• 상세 설계를 토대로 구조 실험을 위한 실험체 제작 • 구조 실험을 위한 준비 작업 수행(※초탄성 형상기억합금 봉과 마찰 볼트의 초기 축력 등을 측정 준비함)	• 구조실험을 위한 스마트 브레이싱 댐퍼의 시험체를 완성함
2차년도	(1) 구조 실험을 실시하고 결과 분석을 통한 물리적 성능을 검증하고 평가함 (2)실험 결과를 바탕으로 정밀한 유한요소 해석을 수행하여 설계 파라미터별 댐퍼 시스템의 복원성 및 에너지 소산능력과 같은 역학적 메커니즘을 파악함 (3) 시스템을 장착한 프레임 구조물에 대한 프레임 모델의 제작과 수치해석을 통하여 시스템의 요소적 성능 파악과 부가적 평가 업무를 수행함	• 실험체에 반복적 하중을 재하하여 구조 실험을 수행함 • 실험 결과를 분석하여 실험체의 물리적 성능을 검증하고 평가함	• 스마트 브레이싱 댐퍼의 구조실험을 수행하여 도출된 결과에 대한 분석을 수행하여 성능을 검증하고 평가함
		• 실험 결과에 보정된 정밀한 유한요소해석 모델을 제작하고 비선형 반복재하 실험을 실시함 • 해석으로 재현된 댐퍼의 거동에서 복원성 및 에너지 소산성 측면에서의 역학적 메커니즘을 파악하고 최적의 설계 파라미터를 도출함	• 유한요소 해석을 수행하여 도출된 결과와 실험 결과의 비교분석을 통하여 성능의 타당성을 검증함
		• 설계 파라미터를 사용하여 제작된 댐퍼의 거동을 수치해석으로 재현하기 위하여 비선형 스프링 요소를 개발함 • 구조물 내에서 댐퍼의 요소적 거동과 성능을 평가하기 위하여 댐퍼 시스템을 장착한 프레임 모델을 개발함 • 지반 가속도를 사용하여 프레임 모델에 비선형 동적해석을 수행함 • 해석 결과를 분석하고 부가적 평가 업무를 수행함	• 구조물을 설계하여 수치해석적 방법으로 스마트 브레이싱 댐퍼의 유무에 따른 성능을 평가함

※ 본 연구개발을 통하여 도출된 정량적 성과에 대한 상세 내용은 위의 목차 “다. 연구 수행 내용 및 성과”에 명시함

○ 1차년도에는 첨단 신소재에 대한 개념 및 해석모델을 정립하고 스마트 댐퍼 시스템을 개발하며 상세설계를 완성하여 실험을 위한 시험체를 제작하여 연구 핵심성과 목표(핵심-1~핵심3-1까지)를 100% 달성하였다고 판단됨

○ 2차년도에는 1차년도에 제작된 시험체에 대한 구조실험을 실시하고 현장 적용 가능성을 검증하기 위하여 댐퍼 시스템이 적용된 프레임 구조물을 설계하며 비선형 동적해석을 실시하여 연구 핵심성과 목표(핵심3-2~핵심5까지)를 100% 이상 달성하였다고 판단됨

2. 관련 분야 기여도

□ 첨단 신소재의 개발과 더불어 건설 분야에 융합하는 새로운 기초원천 기술을 개발함

○ 자기치유가 가능한 신소재를 활용하여 새로운 댐퍼 시스템을 개발하는데 초점을 두어 이전에 선행 연구가 없는 새로운 도전 연구를 수행함
- 본 연구를 통하여 건설 산업의 내진 분야에서 새로운 소재인 초탄성 형상기억합금을 도입하는 도전적인 연구를 수행함
- 국제적인 추세를 반영하여 기존 사용된 재료적 한계를 극복 가능한 새로운 개념의 신소재 기술을 도입하여 현재 선진국 대비 낙후된 국내 제진기술 수준 향상에 이바지함
- 국내·외 건설시장 이슈 중 하나인 첨단 스마트 소재와 건설기술의 융·복합적 사업으로 새로운 트렌드(Trend)를 제시함으로써 건설기술 사업에 활력을 불어 넣을 것으로 판단됨

○ 규모 7.5 지진에서도 손상이 거의 발생하지 않는 획기적인 구조 시스템 장치를 개발·설계하고 시제품을 제작 후 구조 실험을 통한 성능의 우수성을 검증함
- 기존에 활용된 댐퍼 시스템의 대체가 가능한 강도, 에너지 소산, 자기치유 등 다방면으로 우수한 지진 피해저감 장치를 새롭게 제안함
- 유한요소 해석과 개념 설계만을 수행하여 시스템의 성능과 거동을 예측하는 수준에서 연구를 수행했던 기존 R&D과제들의 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 실험체를 제작하여 직접 하중을 재하하는 물리적 실험을 수행하여 신뢰성을 향상을 도모함

○ 추후에 현장 적용과 실용화를 고려하여 개발된 시스템을 설치한 구조물을 설계하고 해석을 수행하여 구조물 전체에 미치는 영향력과 성능을 새롭게 검증하는 연구를 수행함
- 댐퍼 장치가 설치된 프레임 빌딩 혹은 교량 구조물들을 설계하고 수치해석 방법으로 현장 적용 가능성과 시스템 요소기술의 성능을 검증하여 실제로 현장적용이 어려운 기술에 대한 성능검증 방안을 제시함
- 실제 환경과 유사한 해석적 방법을 사용하여 층간 하중-변위 특성이나 각 부재의 파괴 메커니즘 형태 등을 정밀하게 분석하는 작업을 수행하는 새로운 장치의 수치 해석적 방법을 제시함

□ 국내 고유의 기초원천 기술을 개발하여 건설 방재분야의 국내 기술력 향상에 이바지함

○ 새로운 댐퍼 시스템 장치에 대하여 기존 시스템의 문제점을 해결하면서 기술개발 도입기인 설계·해석과 관련된 고부가가치의 원천기술을 개발하고 기술력 향상을 도모함
- 기존에 지진피해 저감을 위하여 주로 사용되었던 내진기술에 대한 부분적인 보수·보강의 어려움, 효율적인 진동 및 변위 제어의 한계 등의 문제점을 해결 가능한 기술로 판단됨
- 응력 집중 부분에 간편한 설치, 구조물 사용성 확보 등 기존 제진장치의 장점을 유지하고 복원성으로 인한 보수·보강의 비용 절감 등 장점을 부가하여 지진에 대한 효율적인 대응 방안을 제시함
- 국내의 내진 기술에 대한 선진국 대비 매우 낮은 원천기술 수준과 적은 비중의 산업체 활용 및 연구과제수에 대하여 본 연구를 수행하여 기술력 격차를 해소하는데 기여함

○ 건설 분야에서 새로운 기초·원천 기술을 국내에 도입하고 발전시키며 연구 결과를 바탕으로 해외 유명한 학술지에 여러 편의 논문을 게재하는 도전적인 목표를 설정함
- 첨단 신소재를 활용한 댐퍼 장치 개발과 실질적 성능검증에 초점을 둔 연구로 새로운 기술개발을 시도하여 국내 건설 분야에 선구적 기술을 도입하는데 큰 기여를 함
- 기술 개발, 개념 및 상세 설계, 실험과 해석을 통한 성능검증, 구조물 설계와 수치해석 실시, 다양한 해석 및 실험 결과 비교·분석 등을 수행하여 양질의 성과를 창출함

제5장. 연구개발성과의 활용계획

□ 성과의 활용방안

최종성과물	활용방안
스마트 소재의 발굴 및 활용 (핵심 1: 초탄성 니티놀 합금의 특성 확인 및 거동 재현을 위한 해석적 재료 모델 완성)	• 국내 건설·토목 산업분야에서 기존 소재 대체가 가능한 스마트 소재인 초탄성 니티놀 합금 소재를 활용 • 건설·토목 R&D 분야에 신소재 활용 등 다양한 융·복합 연구 지원 • 첨단 스마트 소재 제작 및 활용 시스템 기술의 민간기업 이전 가능 • 시스템 스스로 원형 복원이 가능한 내진 보강용 복합체 제작 • 구조물 내부에서 변위제어 댐퍼 시스템에 충격감쇠 및 에너지소산을 위한 핵심소재로 활용 • 지진에 대한 피해 저감을 위한 진동저감 및 변위제어 장치에 활용 • 구조물의 내진 성능을 향상시키고 외력으로부터 발생되는 진동과 변위의 능동 제어가 가능한 보강 시스템에 활용
스마트 댐퍼 시스템의 개발 (핵심 2: 신소재와 융합된 스마트 댐퍼 시스템 개발 및 상세설계 완성)	• 소성 변형이 발생하고 허용해야 하는 프레임 구조물의 인장 볼트에 초탄성 형상기억 합금을 활용(스마트 접합 시스템) • 지진하중에 의한 영향을 감소시키고 브레이싱 프레임 구조물의 변위를 능동적으로 제어하기 위한 댐퍼 시스템에 활용(에너지 소산 셀프 센터링 댐퍼) • 교량에서 교축방향으로 발생되는 변위를 제어하는 면진시스템에 활용(잔류변형의 자동치유가 가능한 면진시스템) • 교량의 상부구조물에 설치된 케이블에 발생하는 변위를 제어하는 보강 와이어 구조물에 활용(자동복원형 초탄성 형상기억합금 와이어) • 지진 등의 횡방향 하중으로 발생하는 모멘트에 의해 극한 변위가 발생하기 쉬운 기둥과 기초부를 연결하는 앵커 볼트 시스템에 활용(내진성능 향상 스마트 앵커볼트 시스템)
시스템의 성능 검증을 위한 실험 (핵심 3: 실험을 위한 실험체 제작 및 구조 실험을 통한 내진효과와 물리적 성능 검증)	• 제작된 시스템에 반복하중을 가하여 사용성과 내구성 검증 • 구조물 내부에서 진동과 변위를 제어하기 위한 에너지 흡수 장치의 효율성 검증 • 마찰 댐퍼에서 마찰력의 증가로 인한 에너지 소산 및 강도 향상 효과 검증 • 복원력과 마찰력의 비율에 따른 잔류 변위 생성량 예측
정밀한 유한요소 해석 (핵심 4: 정밀한 유한요소 해석을 통한 최적의 설계 파라미터 도출)	• 사용자 정의 알고리듬을 사용하여 스마트 재료의 거동을 수치해석의 방법으로 재현하는데 활용 • 제진·면진 시스템 장치에 거동을 재현할 수 있는 비선형 스프링 요소에 활용(설계 파라미터에 따라 손쉽게 거동을 예측함) • 시스템을 장착한 프레임 구조물의 설계와 지진 발생 시 거동을 예측하는데 활용(시스템이 구조물에 미치는 영향력을 손쉽게 파악함) • 합성 단면에 재료적 비선형 거동의 구현을 요구하는 정밀한 동적 프레임 해석에 활용 • 역학적 메커니즘이 복잡한 부위에 수치해석을 통한 정확한 거동 재현하고 해석결과를 분석하여 최적의 설계 파라미터를 도출하는데 활용
부가적 내진 성능 평가 및 활용 (핵심 5: 수치해석을 통한 시스템의 요소 특성 파악 및 부가적 성능 평가)	• 구조물의 작용하는 지진하중에 의한 발생 변위의 정도에 따른 붕괴위험도 산정 및 확률을 기반한 구조물의 지진취약도 분석에 활용 • 지진하중 규모에 따른 구조물에 발생하는 손상 및 위험도를 조사하는데 활용 • 복원력, 극한강성, 연성도, 에너지 소산 정도를 포함한 성능기반 설계 지침에 활용 • 구조물 손상 거동 예측 및 주요 부위에 보강 필요성 확인

□ 연구 성과의 파급효과

파급적 측면	파급효과
▪ 기술적 측면	• 지진, 태풍 등 자연재해에 대한 피해 저감 기술을 개발함 • 건설 분야의 니즈를 만족하는 지속가능한 방재기술을 개발함 • **<u>첨단 소재를 활용한 건설기술의 융복합화를 달성함</u>** • 지진에 대한 비선형적인 거동 예측을 위한 시뮬레이션을 개발함 • 선진국 대비 기술수준이 상대적으로 낙후된 제진 설계용 브레이싱 댐퍼 시스템에 대한 국내 기술력을 향상시킴 • 실제 적용 가능한 형상기억합금의 활용으로 경제적 성과 창출 • 기존에 사용되던 건설재료에 대한 단점을 개선하여 우수한 성능의 시스템 개발
▪ 산업·경제적 측면	• 국가 주요시설 및 사회기반시설의 보호를 통하여 생명·재산 피해를 최소화하는데 기여함 • 국내 개발 초기 단계인 능동제어 스마트 구조물의 현장 적용 가능성 여부를 판단하는 시도적인 연구를 수행함 • 첨단 신소재인 형상기억합금의 제작 및 보급에 기여함 • 지진으로 발생되는 구조물의 피해 최소화와 개보수 비용을 절감함 • **<u>구조물을 유지 및 관리에 소요되는 비용을 절감하고 재생에 들어가는 건자재 소비를 절감하여 탄소발생 저감 및 녹색화를 달성하는데 커다란 기여를 함</u>** • 건설 내진 보수·보강 등의 방재산업에 주로 종사하는 중소기업으로의 기술 이전 및 신제품 아이디어 제공 • 제안된 시스템의 특허 등록 및 신기술 신청이 가능 • 스마트 신소재 활용을 통한 기술산업의 시장 확대 및 경제 성장에 기여 • 신소재 활용을 통한 건설 분야의 고부가가치 성과 창출과 국내 기술의 수출
▪ 연구적 측면	• 첨단소재 활용하여 복원력과 에너지 소산 능력을 향상시킨 브레이싱 댐퍼 시스템의 기초·원천 기술을 개발함 • 댐퍼 시스템의 원천기술 개발부터 현장적용 및 성능평가까지 전주기적인 연구를 수행함 • 재료 및 구조물의 비선형적 거동을 해석적인 방법으로 구현할 수 있는 정확한 고등 시뮬레이션 모델을 개발함 • 관련 분야가 연구개발 초기 단계이므로 국제저명학술지에 독창적인 저널 논문 발표가 가능함
▪ 교육적 측면	• 새로운 개념의 재해저감 기술에 대한 시스템 개발 및 구조물 설계에 대한 개념을 정립함 • 본 연구가 포함하는 이론, 설계, 해석, 성능평가 등 다양한 분야에 석박사급 연구원이 직접 참여하여 연구 역량 강화 등 교육적 효과를 기대할 수 있음 • 민간 참여와 글로벌 교류로 인한 참여 연구원의 관련기술 실무형 인력양성
▪ 인력양성 측면	• 선진 기술에 대한 전문 인력을 양성하여 국가 기술 경쟁력을 갖춘 우수한 인재 배출 • 기존의 한정된 건설 영역뿐만 아니라 타 산업과의 기술 융복합화로 새로운 건설기술에 특화된 기술 인력 배출 • 세계 시장에서 비전이 있고 선도할 수 있는 주제로 연구개발함으로서 이 공학계열에 대한 관심을 유발할 것으로 판단됨

□ 기대효과

○ 첨단소재를 활용한 새로운 개념의 시스템 개발

- 초탄성 형상기억합금을 브레이싱 댐퍼 내부에 원형 봉이나 와이어 형태로 설치하여 구조물에 발생하는 변위를 제어하고 복원력을 통하여 잔류변형을 줄여주는 장치로 활용함
- 지진과 같은 외부하중으로 인한 소성변형이 집중되는 부분에 **<u>초·탄성 형상기억 합금</u>**을 설치하여 변위를 제어하고 자동으로 복원됨으로써 **<u>구조물 보수·보강으로 소모되는 비용을 감소시킴</u>**

- 첨단소재인 형상기억 합금의 우수한 성능을 기반으로 다양한 형태의 진동저감 및 변위 제어 장치(접합부의 연결 구속재, 교량의 변위제어 장치, 기둥 기초부의 고정앵커 장치 및 기타 변위제어 및 복원 장치 등)에 활용이 가능함
- 첨단소재를 활용한 댐퍼시스템이 장착된 브레이싱 프레임은 **비선형 거동에도 불구하고 잔류 변형이 제거되는 깃발모양의 이력거동을 보이므로 우수한 에너지 소산효과를 발휘함**

○ 지진 피해 저감을 위한 최적화된 구조물 개발
- 기존의 철골 혹은 콘크리트 구조물 대신 내진성능이 우수한 콘크리트-강재 합성 복합 모멘트 프레임 구조물을 이용하여 구조물을 설계함
- **본 연구에 제안하는 내진보강용 댐퍼 시스템을 내진성능이 우수한 프레임 구조물에 설치하여 지진에 대한 손상으로부터 내진성능과 자동치유 능력을 확보함**

○ 유저코드와 연계한 프로그램을 활용한 고등해석용 수치해석 모델 개발
- 상온에서 초탄성적인 거동 재현이 가능한 형상기억합금의 유저코드 사용과 정밀한 유한요소 해석모델을 개발함
- 내진성능 향상을 위한 내진보강용 댐퍼를 구조물 내 거동이 특수한 부분에 역학적 모델을 사용하여 비선형 거동부분까지 정확하게 재현함
- 본 연구에서는 댐퍼 시스템을 프레임 구조물에 설치하고 메인 부재인 경우에는 빔 요소를 사용하여 모델링하여 **프레임 전체의 거동을 예측하는 해석적 모델을 개발함**
- 콘크리트-강재 합성 구조물에 비선형 동적 해석이 가능한 수치해석 모델의 개발을 위해 **본 연구에서는 기존에 적용된 탄성적인 재료 물성치 외에 항복이후에 영역을 포함하는 비선형적인 재료 특성까지 고려함**

○ 내진성능 검증을 위한 새로운 평가기법 개발
- 제안된 구조물이 지진에 대한 우수한 성능의 입증을 위한 거동적인 특수성을 고려한 새로운 평가기법 개발을 위하여 신뢰성을 바탕으로 구조물의 성능을 입증하고자 통계·확률적인 기법을 도입함
- 스마트 면진 시스템 장치의 설치 유무에 따라 각각 다른 해석 모델을 제작하고 다양한 강도의 지진 데이터를 사용하여 붕괴위험도 및 지진 취약도를 조사함
- **확률적인 평가의 정확성을 높이고자 취약성 분석시 기존에 일괄적으로 사용하였던 표준정규분포 대신에 해석으로 얻어진 결과 데이터와 가장 유사한 확률 분포도를 적용함**

○ 선진국과의 기술 격차를 줄이고 국가경쟁력 확보에 기여
- 새로운 개념의 댐퍼 시스템 개발은 국내 건설·토목 산업분야에 핵심기술 확보를 통한 고부가 가치 창출과 세계적 시장의 트렌드 선도가 가능할 것으로 판단됨
- 세계적인 현안이슈인 지진재해에 대한 피해저감이 가능한 기초원천 기술의 확보로 선진국과의 기술 격차를 줄이고 국가 경쟁력 확보가 가능함

○ 새로운 시장 개척으로 인한 경제적 성과 창출
- 새로운 개념의 첨단 신소재를 도입한 혁신적인 연구를 통하여 건설 산업에서 재료 및 기술 분야의 새로운 시장개척을 위한 기틀을 마련함
- 댐퍼시스템 개발로 추후 상용화 및 사업화 등의 단계가 실현되어 보급된다면 국내 내진보강 산업의 매출증가가 가능할 것으로 예상되며 지진으로 인한 피해비용 감소가 나타날 것으로 기대됨

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

□ 니티놀 합금에서 형상기억작용이 발생하는 원리

- 수많은 합금은 마르텐사이트 단계 변환의 결과로 인해 낮은온도에서 변형된 경우 높은 온도로 가열하게 되면 원래의 비정형 형태를 되찾는 형상기억 효과를 가짐.[참고문헌1]
- 원자 순서, 가역적인 열탄성 마르텐사이트 변환, 그리고 자체 수용방식으로 형성되는 마르텐 사이트단계와 같은 공통적인 특성을 가짐[참고문헌2]
- 이와 비교되는 형상기억합금의 특징은 “일방향”형상기억 이외에도, 하중유도 마르텐사이트의 형성 및 반전에 의한 “이방향”형상기억과 “기계적”형상기억효과를 가지는 것임.[참고문헌3]
- 위와같은 형상기억효과는 합금이 마르텐사이트 상태에서 변형되며, 표본이 모체 (오스테나이트) 단계로 역변환 될 때 가열 중에 형상회수가 발생하는 과정에서 발생함(그림 46 참고)

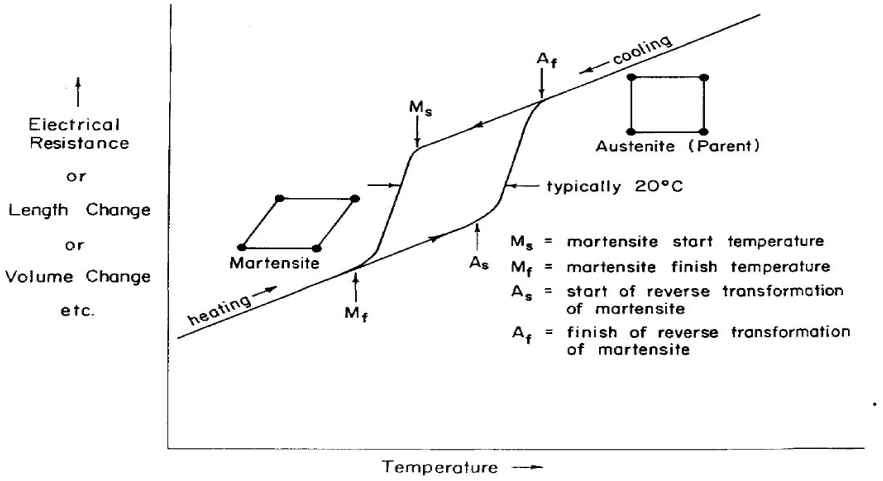


그림46. 형상기억합금에서 발생하는 마르텐사이트 변환의 온도와 특성변화 관계

- 냉각 중에 마르텐사이트 단계를 모체로부터 생성하는 여러 가지 방법은 여러 가지가 있지만, 일단 하부 대칭 마르텐사이트가 형성되면 결정학적 제한으로 인해 역변환 시 단 하나의 고유한 역변환 경로만을 가짐
- 모 단계를 마르텐사이트로 변환하는 것은 기본적으로 변형과정이지만, 마르텐사이트의 개별 단위가 자체수용방식으로 조합되기 때문에 변환시 전체적인 거시적 변형은 관측되지 않음

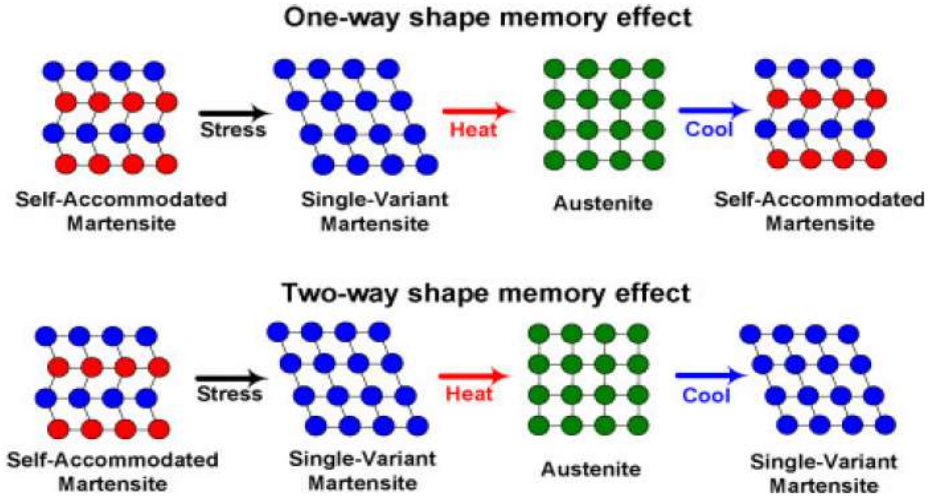


그림47. 일방향 형상기억과 이방향 형상기억에서 오스테나이트와 마르텐사이트를 묘사

- 하중이 없을 때, 오스테나이트는 결정구조의 변화로 인한 변형을 완화하기 위해 냉각시 트윈 마르텐사이트로 변환됨
- 트윈 마르텐사이트는 위 그림과 같이 여러개의(일반적으로 2개의) 격자모양으로 구성됨.
- 하중을 받으면 트윈 마르텐사이트의 트윈구조가 해체되며 그 결과로 단일격자구조로 변화하는 과정에서 형상변화가 발생함[참고문헌3]
- 일방향 형상기억에서 마르텐사이트는 보통 오스테나이트에서 단방향 형태의 메모리효과로 냉각된 후 자가 조합된 구조로 돌아오는 반면, 이방향 형상기억에서는 마르텐사이트가 단일한 역변환 경로를 가짐

□ 니티놀 합금의 형상기억작용에서 변환온도

- 기계적 속성뿐 아니라 변환 온도는 니티놀 형상기억 합금의 적용에 가장 중요한 요소 중 하나임
- 변환온도가 높은 형상기억합금은 높은 온도에서 작용하도록 설계된 많은 기계구성요소에 사용 될 수 있으며, 잠재적인 활용가치가 매우 높음[참고문헌4-5]
- 변환온도에 따른 SMA의 범위는 매우 광범위 하며, 변환온도가 높은 형상기억합금은 허용가능한 변환변형 변형률, 장기적 안정성, 플라스틱 변형 및 크리프에 대한 저항성, 적절환 환경저항력을 필요로 함
- 열역학적 응답에 따른 열 활성화 매커니즘이 더 복잡해지기 때문에 작동 온도가 증가할수록 조건을 충족하기 어려움

□ 니티놀 합금의 결정체 모양이 형상기억작용에 미치는 영향

- 일부 합금은 형상기억작용에 의한 변형복구가 단일 결정체로서는 잘 작용되지만, 다결정체로서는 거의 작용되지 않기도 함[참고문헌 6]
- 위와 같은 차이는 다결정에서의 회복 가능 변형률, 마르텐사이트 변환의 변형률, 변환중 대칭의 변화에 의해 발생하며, 기본 변환 중 대칭의 변화가 클수록 회복가능한 변형률 또한 커짐

□ Ni, Ti외에 추가적인 금속을 합성한 형상기억합금의 장점

- Ni-Ti합금의 기계적 속성과 변환온도를 조절하기 위해서는 Ni-Ti SMA에 Ni과 Ti외의 세 번째 성분을 추가할 수 있음[참고문헌 7]
- 형상기억합금의 열응답을 변경하기 위해 세 번째 성분으로서 주로 사용되는 것은 Cu, Nb, Fe등이 있으며, 이를 활용하여 형상기억합금의 마르텐사이트 변환온도 이력의 범위를 좁히거나(NiTiCu SMA), 넓힐 수 있고(NiTiNb SMA), 마르텐사이트 변환 시작 온도를 낮추거나(NiTiFe SMA) 높일 수 있음(NiTiPt SMA)

□ Ni, Ti외에 추가적인 금속을 합성한 형상기억합금의 보완점

- Ni, Ti이외의 성분이 추가된 형상기억합금은 극한환경에서도 활용 할 수 있다는 장점으로 인해 광범위한 분야에서 각광 받고 있으나, 복원을 반복할 경우 열역학 주기 간 변형이 축적되는 문제가 발생할 수 있음[참고문헌 8]
- 열역학 주기 간 변형누적은 구조적 결점에 의한 마르텐사이트의 핀닝과 오스테나이트와 마르텐사이트 간의 격자 불일치등을 포함한 여러 가지 요인에 기인함
- 이러한 요인들을 줄이기 위해 석출경화, 고용경화, 열적가공 및 강소성가공과 같은 기술을 활용해 회복 불가능한 변형의 누적을 줄이고, 변환온도를 안정화 할 수 있음[참고문헌 9-12]

- 그러나 안정화 메커니즘을 수행하는 과정에서 고온에서의 회복과 크리프로 인해 형상기억합금이 손상되는 경우가 발생 할 수 있으며, 이를 이해하고 보완하기 위한 연구가 활발히 진행중임

□ 형상기억합금의 장점

- 온도에 따라 변형하는 장점으로 인해 기존 접근방식이 달성하기 어렵거나 불가능한 목표를 달성 할 수 있도록 함
- 추가부품이 필요 없고 가용 에너지를 활용하여 변형을 복원하는 특징으로 인해 기기의 활용성이 매우 증가함
- 형상기억 작용은 일회성 동작이 아니며 거의 무한히 작용 할 수 있으며, 소재를 마르텐사이트 상태로 돌아오면 반복적인 재가열등을 통해 다시 활용할 수 있음[참고문헌 13-14]
- 이러한 장점들로 인해 SMA는 솔레노이드, 모터, 바이메탈, 엑추에이터등 광범위한 산업분야에 활용 가능함[참고문헌 15]

□ 건설분야에서 형상기억의 활용방안

- 부식저항성이 높아서 콘크리트구조물의 보강재로 사용할 가능성이 있음
- 하중 제거 시 큰 변형이 발생한 후에도 원래 모양을 되찾을 수 있음[참고문헌 16-20]

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	공고 안내서에 명시한 기준을 적용하여 일반 과제로 분류함	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 (해당사항 없음)

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

□ 실험실 안전 점검 체계

구분	세부내용
일일안전점검	◦ 점검횟수 : 매일 1회 ◦ 점검내용 : 시약 및 실험폐기물 관리상태 및 정리정돈 상태 등 ◦ 점검대상 : 이공분야 전체 실험실습실 ◦ 점 검 자 : 연구활동종사자 및 연구실 책임자 / 주관 : 연구실 책임자
정기점검	◦ 점검기간 : 연 1회 이상 ◦ 점검대상 : A,B,C형 실험실 ◦ 점검내용 : 시약보관 상태, 가스용기 관리상태, 보호구 착용 및 관리 상태 외 ◦ 점 검 자 : 정기점검 기관 및 연구실 안전환경관리자 / 주관 : 시설관리팀
정밀안전진단	◦ 점검기간 : 2년 1회 ◦ 점검대상 : A, B, C형 실험실 중 정기점검 결과에 따른 정밀한 진단이 필요한 실험실 ◦ 점검내용 : 가스누출여부, 전기과부하, 접지상태 점검, 화학약품 반응위험도 점검 등 ◦ 점 검 자 : 정밀안전진단 전문기관 위탁 / 주관 : 시설관리팀
안전순찰	◦ 점검기간 : 2년 1회 ◦ 점검대상 : 송도, 제물포 이공분야 실험, 실습실 ◦ 점검내용 : 연구실 관리 상태 및 일일점검일지 작성 여부 확인을 통한 관리. 감독강화 ◦ 점 검 자 : 연구실안전환경관리자(시설관리팀)

※ C형 실험실 유형 관리

※ 연구실험실 유형분류

- A형 : 미생물 및 동물, 방사성동위원소, 위험성이 높은 실험실
- B형 : 가스 및 화학약품 (염색 폐수포함) 취급 실험실
- C형 : 기계, 전기 설비 등의 실험실
- D형 : 실험, 실습을 수행하지 않는 설계, 컴퓨터관련 등의 실험실

□ 실험실 정밀안전진단 실시

- 대상 : 연구개발활동에 유해화확물질 관리법 제2조 7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실, 산업안전보건법 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실, 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실
- 실시 : 2년마다 1회 실시하여 교과부에 보고

□ 교육훈련

- 개요 : 「연구실 안전 환경 조성에 관한 법률」에 의거하여 연구실안전교육을 통하여 연구 활동 종사자의 안전의식을 높이고, 실험실내 위험인지능력을 강화함으로써 안전사고 및 화재로부터 안전한 연구실 환경을 구축하고자 함
- 교육대상 : 교수, 대학원생, 실험조교, 전문직원, 소속연구원, 실험참여 학부생 및 업체직원 등
- 단계별 교육 이수과정 : 1단계 : 공통이수과목(연구실 안전 일반, 전기, 소방설비 사용요령)
  2단계 : 선택과목(화학, 기계, 생물, 소방안전 분야)
- 교육방법 : 온라인교육 : 년 2회 상·하반기 온라인 안전교육 시행

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Analytical Investigation of the Cyclic Behavior of Smart Recentering T-Stub Components with Superelastic SMA Bolts	인천대학교산학협력단	교신	Metals (MDPI AG, 스위스)	1.984	2017.09.21	단독	SCI(E)
2	논문	Recent Advances of Structures Monitoring and Evaluation Using GPS-Time Series Monitoring Systems: A Review	인천대학교산학협력단	교신	ISPRS International Journal of Geo-Information (MDPI AG, 스위스)	1.502	2017.11.24	중복	SCI(E)
3	논문	Experimental and numerical investigation of lead-rubber dampers in chevron concentrically braced frames	인천대학교산학협력단	교신	Archives of Civil and Mechanical Engineering (Elsevier SP Z O O, 폴란드)	2.216	2018.01.02	단독	SCI(E)
4	논문	Experimental Investigation on the Behavior of Bracing Damper Systems by Utilizing Metallic Yielding and Recentering Material Devices	인천대학교산학협력단	제1	Advances in Materials Science and Engineering (HINDAWI LTD, 미국)	1.299	2018.01.30	단독	SCI(E)

5	논문	Comparison of Seismic Reliability and Risk Assessment for Special and Intermediate Steel Moment Frames	인천대학교산학협력단	교신	KSCE Journal of Civil Engineering (Korean Society of Civil Engineers, 대한민국)	0.940	2018.05.15	단독	SCI(E)
6	논문	Performance based design optimum of CBFs using bee colony algorithm	인천대학교산학협력단	교신	Steel Composite Structures (Techno-Press, 대한민국)	3.594	2018.05.10	단독	SCI(E)
7	논문	Unsupervised identification of arbitrarily-damped structures using time-scale independent component analysis: Part I	인천대학교산학협력단	교신	Journal of Mechanical Science and Technology (Korean SOC Mechanical Engineers, 대한민국)	1.128	2018.02.01	단독	SCI(E)
8	논문	Unsupervised identification of arbitrarily-damped structures using time-scale independent component analysis: Part II	인천대학교산학협력단	교신	Journal of Mechanical Science and Technology (Korean SOC Mechanical Engineers, 대한민국)	1.128	2018.09.03	단독	SCI(E)
9	논문 (학술대회발표)	자동복원이 가능한 댐퍼의 이력거동 특성 연구	인천대학교산학협력단	교신	한국복합신소재구조학회 학술발표대회 (한국복합신소재구조학회, 대한민국)	-	2018.04.19	단독	-
10	특허 (출원)	지진 관측에 대한 예측 시스템 및 방법	인천대학교산학협력단	공동	대한민국	-	2017.06.30	단독	-

11	특허 (출원)	자동복원이 가능한 가새 댐퍼장치	인천대 학교산 학협력 단	단독	대한민국	-	2017.08.07	단독	-
12	특허 (등록)	지진 관측에 대한 예측 시스템 및 방법	인천대 학교산 학협력 단	공동	대한민국	-	2018.09.17	단독	-
13	기타 (인력양성-박사)	지진피해저감시스템을 갖춘 합성모멘트프레임 구조물의 확률론적 내진성능 평가	인천대 학교산 학협력 단	-	-	-	2017.08.17	단독	-
14	기타 (인력양성-박사)	자동복원이 가능한 댐퍼의 이력거동 특성 및 설계 최적화 연구	인천대 학교산 학협력 단	-	-	-	2018.02.23	단독	-

제11장. 기타 사항

□ 추후 연구를 통한 국내 기술의 경쟁력 향상과 시장 활성화 방안 마련

○ 본 연구를 통하여 기초·응용 단계에서의 연구 성과를 달성하고 추후 지속적인 연구를 통하여 스마트 댐퍼 시스템 장치 시제품을 직접 제작하고 성능평가를 위한 구조 실험과 테스트 베드를 수행하여 제품화를 위한 실용화 연구를 수행함

- **첨단 소재를 활용한 스마트 댐퍼 시스템 상용화 및 사업화가 달성되면 경제적인 관점에서 국내외 건설시장에서 커다란 파급효과를 불러일으킬 것으로 판단**되므로 본 연구개발 과제의 국가적인 지원이 필요함
- 또한 전 세계 도시성장에 따라 건축 및 토목업계는 사회 인프라 분야에 더욱 새롭고 효과적인 기술의 향상과 도입이 예상되며, 다 방면에 장점을 가지고 있는 본 기술의 도입은 원천기술과 국가기업 경쟁력 수준의 향상에 이바지 할 것으로 기대됨

제12장. 참고 문헌

[1] C. M. JacksoH, H. J. WagneR, R. J. Wasilewski, 55-Nitinol－The alloy with a memory: Its physical metallurgy, properties and applications, Tech. Rep. NASA SP-5110, NASA Technology Utilization Office, Washington, D.C. 1972.

[2] K. OtsukC, C. M. Wayman (Eds.), Shape Memory Materials, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

[3] J Ma, I Karaman & R D Noebe, High temperature shape memory alloys, International Materials Reviews, 55(5), 257-315, 2010.

[4] T.W. Duerig and AR. Pelton, Ti-Ni Shape Memory Alloys, Nitinol Davelopnwnt Corporslion, 1994.

[5] N. Morgan, The stability of NiTi shape memory alloys and actuator applications, PhD thesis, Cranfield University, England, UK, 1999.

[6] Glen S. Bigelow, Santo A. PadulaII 외 3인, Characterization of Ternary NiTiPd High-Temperature Shape-Memory Alloys under Load-Biased Thermal Cycling, Metallurgical and Materials Transactions A, 41(12), 3065-3079, 2010.

[7] K.Bhattacharya, R.V.Kohn, SYMMETRY, TEXTURE AND THE RECOVERABLE STRAIN OF SHAPE-MEMORY POLYCRYSTALS, Acta Materialia, 44(2), 529-542, 1996.

[8] H.E.Karaca, I.Karaman, 외 2인, Compressive Response of A Single Crystalline CoNiAl Shape Memory Alloy, Scripta Materialia, 51(3), 261-266, 2004.

[9] M.S.AlamM.A., YoussefM.Nehdi, Analytical prediction of the seismic behaviour of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements, Engineering Structures, 30(12), 3399-3411, 2008.

[10] J.A. Monroe, I. Karaman 외 2인, Determining recoverable and irrecoverable contributions to accumulated strain in a NiTiPd high-temperature shape memory alloy during thermomechanical cycling, Scripta Materialia, 65(2), 123-126, 2011.

[11] L. Kovarik, F. Yang 외 5인, Structural analysis of a new precipitate phase in high-temperature TiNiPt shape memory alloys, Acta Materialia, 58(14), 4660-4673, 2010.

[12] Firstov GS, Van Humbeeck J 외 1인, High-temperature shape memory alloys: Some recent developments, Materials Science and Engineering: A, 378(1-2), 2-10, 2004

[13] YaXu, S.Shimizu 외 4인, Recovery and recrystallization processes in Ti-Pd-Ni high-temperature shape memory alloys, Acta Materialia, 45(4), 1503-1511, 1997.

[14] B.Kockar, I.Karamana 외 4인, Thermomechanical cyclic response of an ultrafine-grained NiTi shape memory alloy, Acta Materialia, 56(14), 3630-3646, 2008

[15] D.Golberg, YaXu1 외 5인, Improvement of a Ti50Pd30Ni20 high temperature shape memory alloy by thermomechanical treatments, Scripta Metallurgica et Materialia, 30(10), 1349-1354, 1994.

[16] Mauro Dolce, Donatello Cardone 외 1인, SMA recentering devices for seismic isolation of civil structures, Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, 4330, 2001.

[17] A.H.M. Muntasir Billah, M. Shahria Alam, Seismic performance of concrete columns reinforced with hybrid shape memory alloy (SMA) and fiber reinforced polymer (FRP) bars, 2012.

[18] H. Roh, A.M. Reinhorn, Hysteretic behaviour of precast segmental bridge pier with superelastic shape memory alloy bars, Engineering Structures, 32(10), 3394-3403, 2010.

[19] N. Wierschem, B. Andrawes, Superelastic SMA - FRP composite reinforcement for concrete structures, Smart Materials and Structures, 19(2), 2010.

[20] M.S. Alam, M.A. Youssef, M. Nehdi, Seismic performance of concrete frame structures reinforced with superelastic shape memory alloys, Smart Structures and Systems, 5(5), 565-585, 2009.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.