

마찰 에너지 소산과 자동 복원력을 활용한 가새 댐퍼 시스템의 최적 설계와 구조적 활용

허종완* · 박지웅**

Hu, Jong Wan*, Park, Ji-Woong**

Optimum Design and Structural Application of the Bracing Damper System by Utilizing Friction Energy Dissipation and Self-Centering Capability

ABSTRACT

This study mainly treats a new type of the bracing friction damper system, which is able to minimize structural damage under earthquake loads. The slotted bolt holes are placed on the shear faying surfaces with an intention to dissipate considerable amount of friction energy. The superelastic shape memory alloy (SMA) wire strands are installed crossly between two plates for the purpose of enhancing recentering force that are able to reduce permanent deformation occurring at the friction damper system. The smart recentering friction damper system proposed in this study can be expected to reduce repair cost as compared to the conventional damper system because the proposed system mitigates the inter-story drift of the entire frame structure. The response mechanism of the proposed damper system is firstly investigated in this study, and then numerical analyses are performed on the component spring models calibrated to the experimental results. Based on the numerical analysis results, the seismic performance of the recentering friction damper system with respect to recentering capability and energy dissipation are investigated before suggesting optimal design methodology. Finally, nonlinear dynamic analyses are conducted by using the frame models designed with the proposed damper systems so as to verify superior performance to the existing damper systems.

Key words : Superelastic shape memory alloy (SMA), Friction damper, Energy dissipation, Bracing system

초록

본 연구는 지진에 대한 구조물의 손상을 최소화 하기 위하여 슬립 저항력을 활용한 새로운 형태의 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 설계와 개발을 주로 다루고자 한다. 가새 부재 내에서 전단력에 의한 마찰 거동으로 상당량의 에너지를 수동적으로 소산하기 위하여 플레이트 전단 이음부 위에 슬롯 형태의 볼트 구멍을 설치한다. 여기에 전단 마찰 거동으로 인해 발생되는 잔류변형을 줄이고자 상온에서 원형복원이 가능한 초탄성 형상합금 와이어를 꼬아서 만든 연선을 설치하여 댐퍼 시스템 내에 복원성을 증진 시켰다. 기존에 주로 사용된 수동적인 변위 제어 장치와 비교하여 본 연구에서 다루고자 하는 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템은 중심 가새 프레임 구조물에 손쉽게 설치하여 지진발생 후에 구조물에 발생하는 층간 잔류변위를 최소화하여 유지 보수에 소모되는 비용의 대폭적인 절감을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 역학적인 거동 메커니즘을 살펴보고 실험값으로 보정되어 신뢰성을 확보한 스프링 모델을 사용하여 해석을 실시하였다. 시스템에 다양한 설계 변수를 적용하여 복원성과 에너지 소산 능력 측면에서 제안된 댐퍼의 성능 동향을 분석을 하고 최적의 설계 방식을 제안하고자 한다. 마지막으로 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼를 중심 가새 프레임 구조물에 설치하여 비선형 동적 해석을 실시하고 기존의 시스템과 비교하여 성능적인 우수성을 입증하고자 한다.

검색어 : 초탄성 형상기억합금, 마찰 댐퍼, 자동복원, 에너지 소산, 가새 시스템

* 정회원 · 교신저자 · 인천대학교 도시환경공학부 (Corresponding Author · Incheon National University · jongp24@incheon.ac.kr)

** 인천대학교 도시환경공학부 건설환경전공 석사과정 (pooh2391@naver.com)

Received October 22, 2013/ revised November 4, 2013/ accepted November 11, 2013

1. 서론

지난 수세기 동안에 지진에 대한 구조물의 피해를 최소화 하기 위하여 대표적인 에너지 소산 시스템인 감쇠 장치가 개발되어 실생활에 널리 활용되고 있다. 이러한 시스템 장치는 구조물 내에서 피해저감 설비로 장착되어 지진 하중으로 인하여 작동할 경우 상당량의 에너지를 소산하며 이로 인하여 구조물 전체에 발생하는 층간 변위를 효율적으로 제어하는 기능을 담당하고 있다(Moreschi et al., 2003; Mualla et al., 2002). 본 연구에서는 상용화가 완성되어 현재 건설현장에서 널리 활용하고 있고 전단력에 의한 슬립(Slip, 미끄러짐) 마찰 거동으로 소산된 에너지로 충격흡수와 진동제어가 가능한 마찰 댐퍼(Friction Damper) 시스템 장치를 다루고자 한다. 댐퍼 장치 내에서 에너지 소산량을 결정하는 전단 마찰력은 표면 상태나 전단 볼트의 긴장력에 따라 쉽게 조정이 가능하다. 따라서 마찰 댐퍼는 반복하중을 받는 동안에 안정적인 이력 거동을 (Hysteresis Behavior) 유지하며 사용 기간에 걸쳐서 거동을 정확하게 예측 가능한 장점을 가지고 있다(Pall et al., 1982).

지진 혹은 태풍과 같이 건물 측면에 작용하는 하중에 효율적으로 저항하기 위하여 주로 프레임 구조물에서 가새 부재의 일부분에 마찰 댐퍼 시스템 장치를 설치한다. 이러한 시스템 장치가 구조물 내에서 지진 응답에 직접 대응하여 에너지 소산에 의한 구조물의 내진 성능을 향상 시키더라도 장진이 발생 후에 시스템 장치에서 발생하는 손상이나 상당량의 잔류변형이 발생하며 이로 인하여 시스템 교체와 원형 복원을 위한 추가적인 보수 비용이 요구된다. 무엇보다도 댐퍼 시스템 장치의 손상 때문에 구조물 전체에 발생하는 층간 잔류변위는 건물 거주자에게 안전상의 불안감을 조성하며 특히 0.5%를 초과하는 경우에는 붕괴 가능성이 높다고 판단되어 부분적인 보수보다는 전면적인 재건축이 경제적인 관점에서 유리한 상황으로 간주하고 있다(McCormick et al., 2008). 따라서 층간 잔류변위는 지진에 대한 손상의 정도를 파악하는 데 중요한 지표로 활용되고 있으며 구조물의 사용성과 안정성을 확보하기 위해서 성능을 기반으로 한 내진설계의 주요한 요소로 인식되어 왔다. 최근에는 지진으로 인한 구조물의 피해를 저감하고 잔류변위의 발생을 최대한 줄이고자 구조물 내에 자동복원이 가능한 부가적인 장치를 설계하는 방식이 각광을 받고 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 기존의 충격흡수용 마찰 댐퍼 시스템의 에너지 소산 능력을 최대한 활용하고 잔류변위 발생의 단점을 보완하기 위하여 추가의 복원 시스템을 도입한 새로운 댐퍼 시스템 장치에 대하여 성능과 활용 측면에서 살펴보고자 한다.

마찰 거동을 통한 에너지 소산과 외부 충격에 대응하여 자동복원이 가능한 댐퍼 시스템은 프레임 구조물에서 가새 부재의 일부분에 통합 설치가 가능하며 Zhu의 1인의 연구에서 제안되었다(Zhu

et al., 2008). 시스템 내에서 복원력을 발생 시키기 위하여 상온에서 별도의 열처리를 가하지 않아도 하중제하(Unloading) 만으로도 원형복원이 가능한 초탄성 형상기억합금(Superelastic Shape Memory Alloys, 이하 SMA) 활용하여 와이어를 엮어서 만든 연선을(Strand) 설치하였다. Fig. 1에서는 오스테나이트(Austenite) 결정형 구조를 가진 초탄성 형상기억합금의 응력-변형을 선도를 보여주고 있다. 이러한 재료에 상당량의 소성 변위를 가하더라도 하중을 제거한 뒤 역방향 상변위(Reverse Phase Transformation) 발생하는 동안에 재료 내에서 복원력이 발생하여 잔류 변형이 거의 발생하지 않는 원형복원 현상을 보여주고 있다. 초탄성 효과에 의한 원형복원 능력 이외에도 형상기억합금은 충격흡수 및 진동저감의 성능이 우수하며 또한 부식과 피로파괴에 대한 저항 능력이 뛰어난 장점을 가지고 있다(DesRoches et al., 2004). 우수한 재료적인 성질 때문에 형상기억합금은 진동감쇠 및 변위제어 장치로 중심 가새 프레임 구조물 내에서 주로 가새 시스템과 결합하여 사용되고 있고 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Hu, 2008; Hu et al., 2011; Hu, 2013; Dolce et al., 2000; Dolce et al., 2005).

마찰 댐퍼형 가새 시스템에서 마찰 거동을 통하여 소산되는 운동 에너지의 양은 미끄러짐 거리와 볼트의 초기 긴장에 의하여 쉽게 조절이 가능하다. 외부의 충격에 의하여 발생하는 구조물에 진동을 저감하는 감쇠 능력을 향상시키기 위하여 에너지 소산 능력이 뛰어난 댐퍼 장치의 설치가 요구된다. 하지만 상대적으로 에너지 소산능력이 뛰어난 마찰 댐퍼 장치는 상대적으로 슬립에 의한 많은 양의 변위를 허용해야 하므로 강한 지진이 발생 후에는 상당한 양의 잔류변위가 발생하는 문제점을 가지고 있다. 자동복원이 가능한 개량된 마찰 댐퍼형 가새 시스템은 마찰 거동에 의한 에너지 소산 능력과 초탄성 형상기억합금 연선에서 제공하는 복원 능력을 동시에 활용하여 기존 시스템의 장점을 보유했면서 단점의 보완이 가능하다. 잔류변형이 거의 발생하지 않고 동시에 많은 양의 에너지를 소산하는 이상적인 거동은 댐퍼 시스템의 설계시 형상기억합금의 항복강도와 슬립에 저항하는 마찰력의 비율을 적

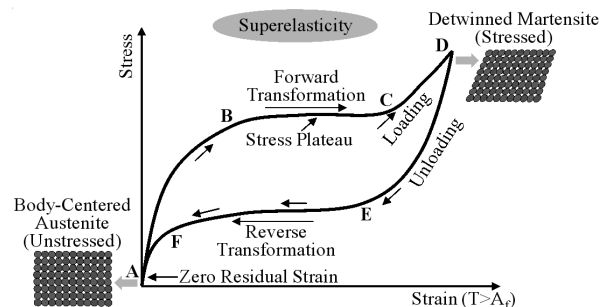


Fig. 1. Stress and Strain Curve for Superelastic Shape Memory Alloy (SMA) Materials

절하게 조절하면서 얻어질 수 있다. 이러한 스마트한 댐퍼 시스템에서 복원성과 에너지 소산능력을 극대화하여 활용하기 위해서는 부속품들의 적절한 설계 파라미터(Parameter) 결정하는 설계 지침의 개발이 반드시 필요하다. 하지만 수동적인 변위제어 기반의 충격흡수용 댐퍼 시스템 장치와 관련된 대부분의 연구들이 최적의 설계 방식의 도출보다는 단지 시스템 개발에만 초점을 두어 연구를 수행하였다.

이러한 이유로 본 연구에서는 대표적인 지능형 변위장치로써 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼 시스템의 성능을 기반으로 한 최적의 설계 방식을 다양 조건의 해석 결과의 분석을 통하여 제안하고자 한다. 댐퍼 시스템 내에서 발생하는 복원성과 슬립현상에 의한 마찰은 개별적인 비선형 스프링 요소로 모형화하여 거동을 재현하였다. 이러한 비선형 스프링 요소를 사용하여 재현된 거동은 실험값과 직접 비교하여 해석의 신뢰성을 확보하였다. 여러 가지의 설계 파라미터를 적용하여 댐퍼 시스템을 설계하고 이를 비선형 스프링 요소로 모형화한 후 해석을 실시하여 다양한 이력거동 곡선을 확보하였다. 이러한 해석결과를 분석하여 복원성과 에너지 소산 능력 사이에 최적의 설계 방법을 도출하였다. 마지막으로 시스템을 활용하고 피해저감 능력을 확인하기 위하여 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템을 3층 프레임에 설치 모형화하여 비선형 동적 해석을 실시하

고 댐퍼 시스템을 설치하지 않은 경우와 비교하여 댐퍼 시스템의 잔류변위 저감 효과를 직접적으로 입증하고자 한다.

2. 거동 메커니즘

Fig. 2는 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 구조 상세를 보여주고 있다. 이러한 댐퍼 시스템 장치는 슬롯 형태의 볼트 구멍이 설치된 2개의 플레이트, 4개의 전단볼트, 플레이트 옆면에 설치된 앵커 사이를 연결하는 초탄성 형상기억합금 재질의 와이어 연선들로 구성되어 있다. 주로 전단력에 의하여 양쪽 플레이트에 슬립 현상이 발생되고 이러한 거동으로 많은 양의 에너지를 소산하는 데 슬립에 저항하는 마찰력은 볼트의 초기 긴장력으로 쉽게 조절이 가능하다. 두 플레이트를 연결하는 와이어는 일종의 케이블과 같은 원리로 인장을 받을 때만 유효하므로 반복 하중에 저항하기 위하여 댐퍼의 중앙을 기점으로 “S”자 형태로 서로 마주보는 모양으로 설치 하였다.

Fig. 3은 자동복원과 에너지 소산으로 구성되는 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 역학적인 거동 메커니즘을 보여주고 있다. 시스템 내에서 복원력은 주로 깃발 모양의 이력곡선을 보여주는 초탄성 형상기억합금 와이어 연선에 의하여 발생하며 Fig. 3(a)에서는

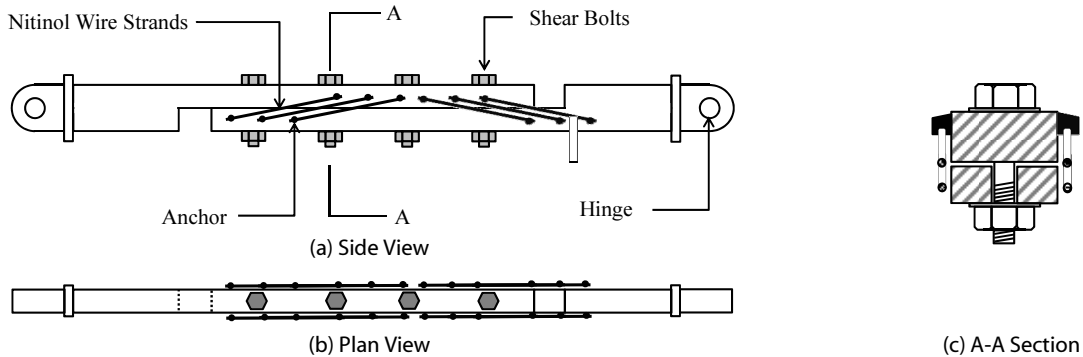


Fig. 2. Schematic Drawings of the Self-Centering Friction Damper Brace System

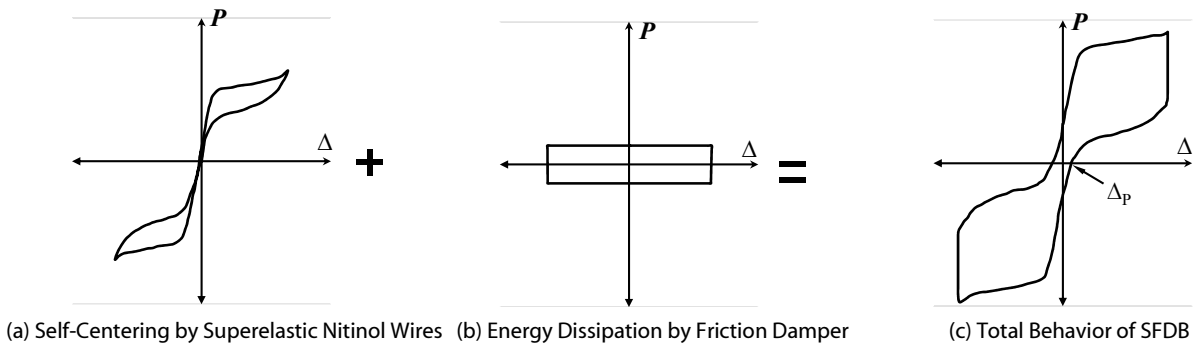


Fig. 3. Response Mechanisms of the Self-Centering Friction Damper Brace System

이러한 거동을 이상화한 이력곡선을 보여주고 있다. 초탄성 형상기억합금은 8%까지의 변위를 가하더라도 상온에서 별도의 열처리를 가하지 않아도 원형으로 복원되는 성질을 가지고 있다. 따라서 댐퍼 시스템 장치 내에서 초탄성 형상기억합금 와이어를 적절한 위치에 설치한다면 변형이 발생한 이후에 구조물 전체의 자동 복원이 가능하며 성능의 저하 없이도 외부의 하중이나 충격에 저항할 수 있다. Fig. 3(b)와 같이 마찰력에 의하여 발생하는 에너지 소산에 대한 거동은 직사각형 모양의 이력곡선으로 이상화하여 재현 가능하다. 진동주기나 주변 온도에 상관없이 마찰 댐퍼 장치에서는 비교적 효율적이고 저렴한 방식으로 안정적인 에너지 소산을 기대할 수 있다(Pall et al., 1982). 볼트의 초기 긴장력에 의한 마찰력과 슬롯 형태의 볼트 구멍의 길이에 의한 슬립 이동거리 등을 조절하여 소산되는 에너지의 양을 쉽게 제어할 수 있다. 위에서 제시한 2개의 거동 메커니즘을 Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이 중첩을 시켜 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 전체적인 거동을 재현할 수 있다. 비록 마찰력에 기인한 에너지 소산 작용이 많은 양의 잔류변위를 발생시키더라도 초탄성 형상기억합금 와이어의 강도와 마찰 저항강도를 적절하게 조율하여 본 가새 댐퍼 시스템을 설계한다면 충분한 에너지 소산 능력을 지닌 완벽한 자동 복원을 보여주는 이력 거동을 생성할 수 있다.

3. 구조실험

초탄성 형상기억합금을 활용한 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템에 대한 이력 거동을 조사하기 위하여 Zhu의 1인은

구조 실험을 수행하였다(Zhu et al., 2008). 본 연구에서는 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 거동 재현을 위하여 수행하는 해석에 신뢰성을 높이고자 수치해석용 스프링 요소 모델을 구조 실험에 의하여 얻어진 결과 데이터로 보정하는 작업을 수행하였다. 구조 실험용 모델은 총 길이가 0.7m로 제작되었으며 0.58mm의 직경을 가진 니티놀(Nitinol) 형상기억합금 와이어를 사용하여 10회 감아서 만든 연선을 사용하였다. 연선의 총 길이는 0.25m이며 응력변형을 효율성을 보존하기 위하여 하중 시점전에 초기의 긴장을 가하였다. 구조 실험은 상온에서 2Hz의 주기로 반복 하중을 가하면서 수행하였다.

Fig. 4는 구조 실험에서 얻어진 결과 데이터를 보여주고 있다. 구조 실험에서 얻어진 이력 곡선은 거의 제로에서 1.8kN로 각각 3단계의 마찰력을 주어서 측정하였다. 아래쪽 그림들은 댐퍼 시스템에서 초탄성 형상기억합금 와이어를 제거하고 같은 마찰 조건하에서 측정하여 얻어진 마찰 거동 이력곡선이다. 마찰력을 거의 무시할 수 있는 실험 모델의 경우에는 명확한 복원현상을 보여주는 있지만 전체의 시스템 거동에 있어서 매우 제한적인 에너지 소산 능력을 가지고 있다. 하지만 충분한 복원력을 확보하지 못한 경우에는 높은 수준의 마찰력은 하중의 반복 횟수가 증가할수록 축적되는 영구 변형량이 증가함을 보여주고 있다. 마지막으로 실험 데이터에서는 전단 볼트가 슬롯 모양의 볼트 구멍 중앙에 정확하게 정렬되어 설치되어 있으므로 인장과 압축에 의한 반복 하중에 있어서 정확하게 대칭을 이루는 이력 거동을 보여주고 있다.

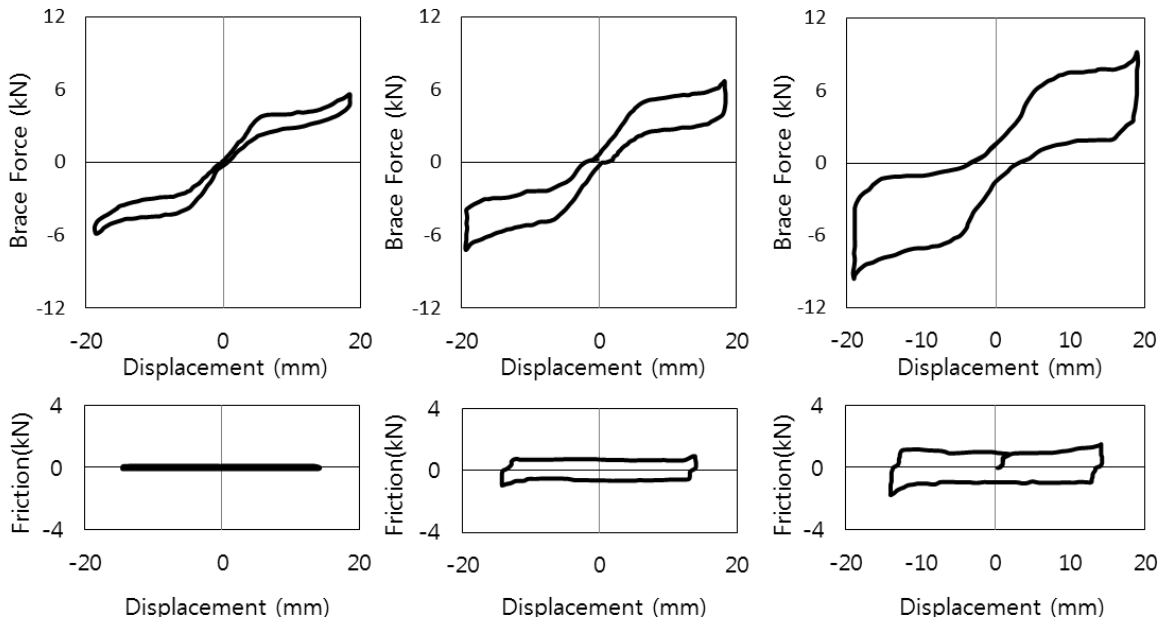


Fig. 4. Experimental Test Results

4. 해석모델과 결과검증

해석모델은 본 가새 댐퍼 시스템의 비선형적인 거동을 포함하고 있는 스프링 요소들로 구성되어 있으며 버클리 대학에서 개발한 OpenSEES 프로그램을(Mazzoni et al., 2006) 사용하여 준정적 해석을 실시하였다. 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템에 대한 모델링 방법이 Fig. 5에서 정확하게 제시되었다. 앞 절에서 언급한대로 본 가새 댐퍼 시스템의 전체적인 거동은 초탄성 형상기억합금 와이어와 마찰 댐퍼 시스템들의 요소적인 거동을 중첩시켜 재현할 수 있다. Fig. 5(a)에서 제시한 바와 같이 이러한 요소적인 거동은 선형적인 강성(Stiffness) 모델로 이상화하여 모형화되어 각각에 대응하는 스프링 요소에 물성치로 사용된다. 반복적인 하중은 스프링 요소에 직접적으로 전달된다. 여기서 하중 전달에 대한 스프링 요소들의 상호 작용을 고려하여 병렬로 결합된 하나의

등가의 스프링 모델로 모형화가 가능하며 이를 이용하여 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템 전체의 비선형적 거동을 재현할 수 있다.

반복하중 하에서 하중-변위 곡선으로 대변되는 스프링 요소의 이력 거동은 Fig. 5(b)에서 제시한 바와 같이 다중선형 강성 모델로 이상화할 수 있다. 초탄성 형상기억합금 와이어에 대한 강성 모델은 재료 시편의 하중 실험의 결과로 얻어진 데이터를 토대로 얻어진다. 반면에 마찰 댐퍼의 경우에는 기존에 사용된 강성 모델을 토대로 거동을 재현한다. 마찰 댐퍼 시스템의 강성 모델은 OpenSEES 프로그램 내에서 등방성 경화 재료 모델을(Isotropic Hardening Material Models) 사용하여 재현한다. 하지만 깃발 모양의 이력을 가진 초탄성 형상기억합금의 경우에는 프로그램 내에서 기본적으로 제공하는 모델이 부재하므로 사용자 정의의 재료(User-defined Material, 이하 UMAT) 모델을 사용하여 구현하였다. 본 연구에서 사용된 사용자 정의의 재료 모델에서(Auricchio et al., 1997) 초탄성

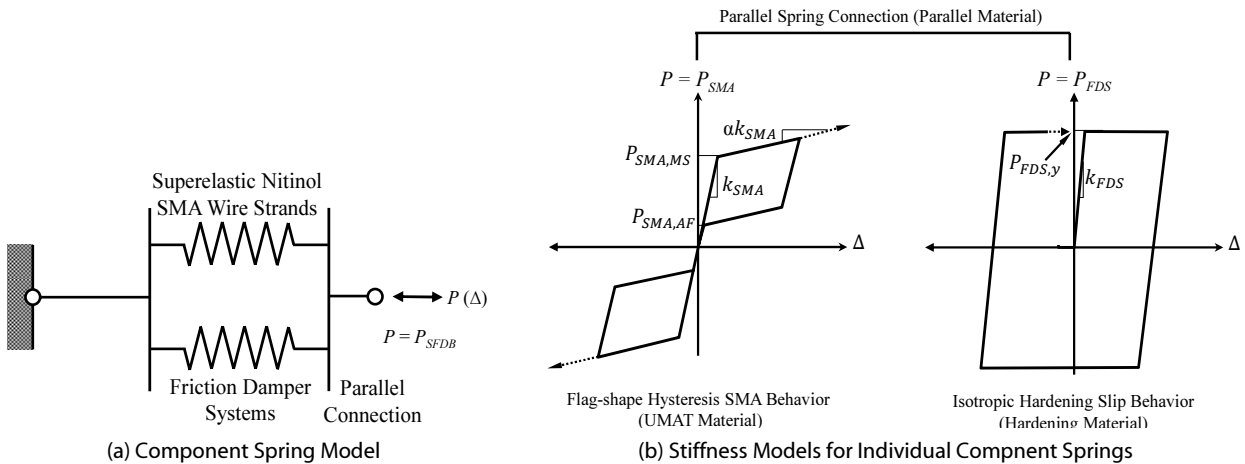


Fig. 5. Component Spring Models for Numerical Analyses

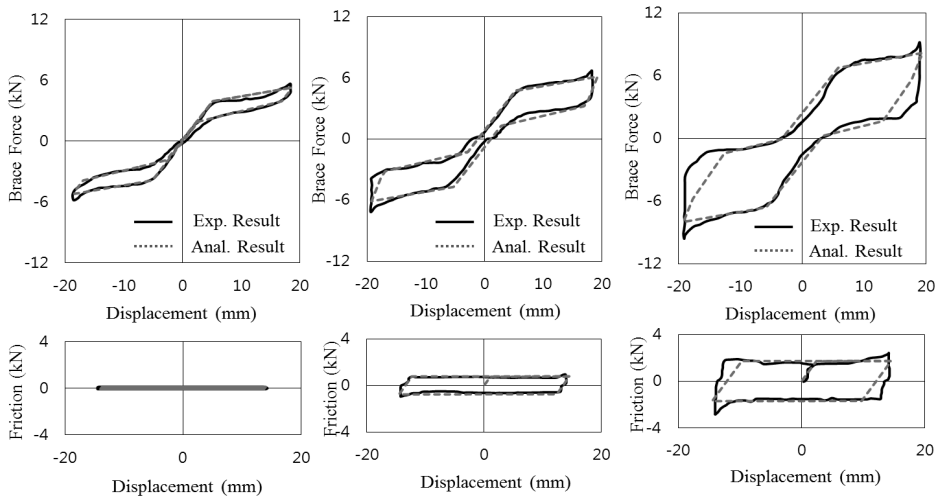


Fig. 6. Comparisons Between Experimental Results and Numerical Analysis Results

형상기억합금의 이력 거동은 상변위 단계와 일치하는 직선으로 이상화 하였다. 특히 마르텐자이트와(Martensite) 오스테나이트 상태의 탄성 계수는(Elastic Modulus) 같은 기울기로 정의하여 모형화 하였다. 해석을 통하여 본 가새 댐퍼 시스템의 전체 거동을 정확하게 재현하기 위해서 스프링 요소들에 일축 하중 하에서 이러한 재료적인 성질을 추가하였다.

해석을 위한 모델링 방법의 타당성을 검증하고자 Fig. 6에서는 수치해석을 통하여 스프링 요소에 한 주기의 반복하중을 가하여 얻어진 해석결과와 실험결과를 각각에 다른 수준의 마찰력에서 결과 곡선을 비교하였다. 실험과 해석에서 얻어진 곡선은 각각 실선과 점선으로 표시하였다. 마찰 댐퍼 시스템에서 보여주는 슬립 메커니즘은 전단면에 미끄러짐이(Slippage) 발생한 후 볼트와 볼트 구멍이 맞닿아 생기는 지압이 발생하기 전까지는 전단면에 전달되는 하중을 일시적으로 제한한다. 실험에서 변위 하중의 진폭을 슬롯 형태의 볼트 구멍의 길이 이내로 하여 슬립 메커니즘에 의한 거동만 발생하도록 제한하였기 때문에 마찰 거동을 재현하는 강성 모델에서는 볼트에 의한 지압은 고려하지 않았다. 마찰 댐퍼 시스템에서 강성 모델은 OpenSEES 프로그램 내에서 지원되는 하중 기울기가 동일한 등방성 경화(Isotropic Hardening) 재료 모델을 사용하였기 때문에 실험결과와 비교하여 하중 제하시(Unloading) 기울기가 완만하고 에너지 소산 능력을 다소 낮게 평가하였다. 이러한 이유로 실험값이 좀 더 풍부한 이력 곡선을 보여주지만 초기 기울기, 하중 포락선(Loading Envelope), 극한강도, 변곡점 및 잔류변형 등 전반적인 측면에서는 해석값과 정확하게 일치하는 결과를 보여주고 있다. 따라서 해석을 위하여 사용된 스프링 요소가 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 전체 거동을 정확하게 예측한다고 판단할 수 있다.

5. 최적설계를 위한 매개변수 조사

자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 복원성능과 에너지 소산 능력을 평가하기 위해서는 Fig. 5(b)에서 제시한 강성 모델과 연관된 수식의 조사가 필요하다. 개별적인 스프링 요소들은 병렬로 연결되어 있기 때문에 잔류변형은(Δ_p) 반복적인 하중-변위 이력곡선에서 합력이 제로가 되는 시점에서 발생하며 다음과 같은 함수의 형태로 정의할 수 있다.

$$\Delta_p = \Delta (P_{SMA} + P_{FDS} = 0) \neq 0 \quad (1)$$

여기서 P_{SMA} 와 P_{FDS} 는 각각 본 가새 댐퍼 시스템을 구성하는 초탄성 형상기억합금 와이어와 마찰 댐퍼의 부재력을 의미한다. 본 시스템에서 발생하는 잔류변위의 양을 근거로 복원력이 미치는

영향력을 판단할 수 있다. 잔류변위의 발생을 줄이고 시스템 내에 자동복원의 효과를 증진시키기 위해서는 원형 복원시 역으로 작용하는 마찰력과 비교하여 초탄성 형상기억합금 와이어가 제공하는 복원력이 반드시 이상의 값을 유지하여야 한다. 마찰력이 복원력보다 크게 작용할 경우 본 가새 댐퍼 시스템 내에서 에너지 소산 능력은 확보되지만 오히려 복원능력이 감소되고 상당량의 잔류 변형이 발생한다.

본 가새 댐퍼 시스템의 소산되는 전체 에너지는 개별적인 요소들에 거동에 의해 발생하는 에너지의 총합과 같으며 다음과 같이 정의한다.

$$E_{SFDB} = E_{SMA} + E_{FDS} \quad (2)$$

Δ 의 진폭을 가지고 한 주기 진동의 변위 하중을 가하였을 때 소산된 에너지는 이력 곡선의 면적과 일치한다. 그러므로 초탄성 형상기억합금 연선에서 소산된 에너지 양은(E_{SMA}) 다음과 같이 계산한다.

$$E_{SMA} = 2(1-\beta) \cdot (u-1) \cdot (1-\alpha) \cdot P_{SMA,MS} \cdot \Delta_{SMA,MS} \quad (3)$$

여기서 α 변형률 경화 계수를 의미하여 β 와 u 는 하중과 변위의 비율로써 다음과 같이 정의한다.

$$\beta = \frac{P_{SMA,AF}}{P_{SMA,MS}} \quad (4)$$

$$u = \frac{\Delta}{\Delta_{SMA,MS}} \quad (5)$$

여기서 $P_{SMA,MS}$ 와 $P_{SMA,AF}$ 는 형상기억합금에서 각각 마르텐자이트 상변위가 시작할 때 오스테나이트 상변위가 완성되었을 때의 변위 하중을 의미한다. $u > 1$ 경우에 $\Delta_{SMA,MS}$ 는 소성 변형이 시작되는 항복 변위로써 $P_{SMA,MS}$ 에 상응하는 변위점을 의미한다. 따라서 연성의 비율을 나타내는 u 의 값이 증가할수록 소산되는 에너지의 양도 증가한다. 반대로 α 와 β 가 증가할수록 소산되는 에너지 양은 감소한다. 마찰 댐퍼 시스템의 경우 사각 모양의 변형을 경화를 가진 이력 거동을 하기 때문에 소산되는 에너지의 양은 (E_{FDS}) 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E_{FDS} = 4 \cdot P_{FDS,Y} \cdot (\Delta - \Delta_{FDS,Y}) \quad (6)$$

여기서 $P_{FDS,Y}$ 는 슬립에 대한 저항력에 상응하고 초기 볼트

Table 1. Design of Analytical Model Cases

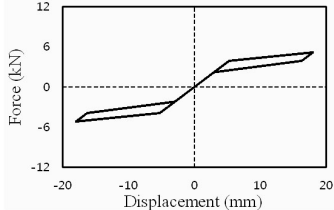
Model	Nitinol SMA Wire	Friction Damper System
Case 1	$\bar{K}_{SMA} = 0.74\text{kN/mm}$, $\alpha = 0.135$, $P_{SMA,MS} = 3.80\text{kN}$, $P_{SMA,AF} = 2.10\text{kN}$ 	$K_{FDS} = 0.75\text{kN/mm}$, $P_{FDS,Y} = 0.70\text{kN}$
Case 2		$K_{FDS} = 0.75\text{kN/mm}$, $P_{FDS,Y} = 2.10\text{kN}$
Case 3		$K_{FDS} = 0.75\text{kN/mm}$, $P_{FDS,Y} = 3.50\text{kN}$

Table 2. Numerical Analysis Results

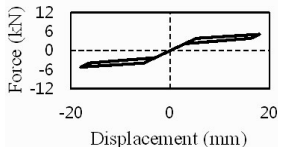
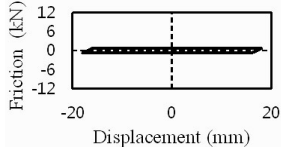
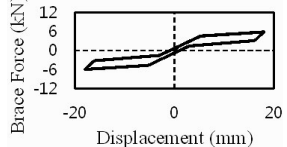
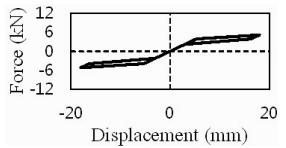
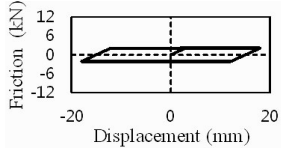
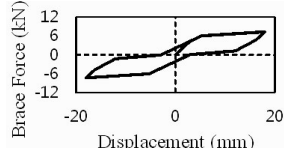
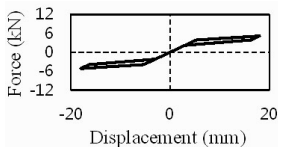
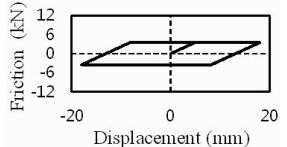
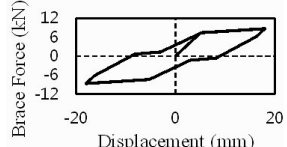
Model	SMA Wire	Friction Damper	Total Behavior
Case 1 ($\gamma = 0.33$)			
Case 2 ($\gamma = 1.00$)			
Case 3 ($\gamma = 1.67$)			

Table 3. Details of Numerical Analysis Results

Model	Ultimate Point			Recentering Capability		Energy Dissipation (kN·mm)		
	Δ	P_{SFDB}	$P_{SMA} + P_{FDS}$	Δ_p	$P_{SMA} + P_{FDS}$	E_{SMA}	E_{FDS}	E_{SFDB}
Case 1	18mm	5.90kN	5.91kN	0.97mm	0.001kN	37.47	47.64	85.11
Case 2	18mm	7.30kN	7.30kN	2.85mm	-0.003kN	37.47	126.42	163.89
Case 3	18mm	8.70kN	8.70kN	8.94mm	-0.0005kN	37.47	183.26	220.73

긴장력과 마찰면의 상태에 의해 결정되는 마찰력을 의미한다. 마지막으로 $\Delta_{FDS,Y}$ 는 슬립이 발생할 때의 발생하는 항복변위를 의미한다.

본 마찰 댐퍼형 가새 시스템에 대한 복원력과 에너지 소산 능력과의 상호 관계를 살펴보기 위하여 최적 설계 방법의 도출과 연관된 파라미터 선정이 필요하다. 각 모델 케이스에 대한 세부적인 설계 파라미터는 Table 1에서 정리하였다. 해석을 위한 주요한 파라미터인 마찰력은 0.7kN에서 3.5kN까지의 범위에서 3등급으로 동일한 간격으로 마찰 댐퍼 시스템 내에서 동일한 강성을 가지고 설계하였다($K_{FDS} = 0.72\text{kN/mm}$). 복원력과 에너지 소산 능력의 상호 관계를 명확하게 규명하기 위하여 마찰력을 변수로 가정하고 모든

모델 케이스에 동일한 규격의 초탄성 형상기억합금 와이어 시스템으로 설계하였다. 초탄성 형상기억합금 와이어 시스템과 관련된 파라미터인 K_{SMA} , α , $P_{SMA,MS}$, $P_{SMA,AF}$ 들은 각각 0.74kN/mm, 0.135, 3.80kN, 2.10kN 값으로 설정하였다. 각각의 모델 케이스는 아래에서 정의된 하중 비율에 따라서 구분할 수 있다.

$$\gamma = \frac{P_{FDS,Y}}{P_{SMA,AF}} \quad (7)$$

3개의 개별적인 모델 케이스에 따라서 해석 결과는 Table 2와

Table 3에서 정리하였다. Table 2에서 제시된 바와 같이 마찰 댐퍼 시스템에서 작용하는 마찰력이 증가할 때 이력 곡선의 포락선의 면적이 증가하기 시작하여 소산되는 에너지의 양은 증가하기 시작한다. 에너지 소산 능력의 향상과 상반되게 복원성은 감소한다. 따라서 마찰력은 본 가새 댐퍼 시스템에서 소산되는 에너지의 양을 증가시키지만 상대적으로 잔류변형의 발생의 증가를 초래한다. 예를 들면 Case 1과($P_{FDS, Y} = 0.7kN$) Case 3의 5($P_{FDS, Y} = 3.5kN$) 모델에서 소산되는 에너지의 양은 각각 85.11kN-mm와 220.73kN-mm 이지만 0.97mm와 8.94mm의 잔류변형을 발생한다(Table 3을 참고). 복원이 될 때 발생하는 마찰력이 초탄성형상기억합금 와이어가 역방향 상변위가 발생할 때 생기는 복원력을 초과하는 경우에는 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템이 완전하게 원형 복원을 하지 못함을 의미한다. 반대로 Case 1과 같이 복원력이 마찰력과 비교하여 상대적으로 큰 경우에는 잔류변형이 발생이 제로에 가까워 완벽한 복원이 가능하지만 마찰력에 의한 에너지 소산이 적어 충격흡수와 진동제어의 효과가 다소 떨어지는 문제점을 야기할 수 있다. 따라서 본 가새 댐퍼 시스템의 최적의 설계는 복원력과 마찰력의 크기가 거의 동일한 Case 2($\gamma = 1.00$) 가장 이상적인 에너지 소산 능력과 복원성을 보여주고 있다. 따라서 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템에 대한 설계는 형상기억합금 와이어에 의하여 제공되는 복원력이 볼트에 긴장력에 의해 발생하는 마찰력보다 거의 비슷하거나 약간 큰 경우에 에너지와

복원성 측면에서 최적의 성과를 달성한다고 결론 지을 수 있다.

6. 시스템 활용과 성능 검증

자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 활용과 성능적인 우수성을 검증하기 위하여 프레임 구조물을 설계하고 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템을 직접 설치하여 실제 지진데이터를 활용하여 비선형 동적 해석을 수행하였다. 복원성과 에너지 소산 능력 향상을 확인하기 위하여 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 설치 유무에 따라 지진 발생 후 가새 프레임 구조물에서 발생하는 최대변위와 잔류변위를 동시에 조사하고 평가 비교하고자 한다. 따라서 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템을 설치한 경우와(3-SC-SMA 모델) 설치하지 않은 경우로(3-SC-S 모델) 나누어 2개의 프레임 모델을 제작하였다. 프레임 모델의 제작과 비선형 동적 해석도 OpenSEES 프로그램을 사용하여 수행하였다. 시간 의존적인 해석의 경우 본 프로그램에서는 Newmark 이론을(Newmark, 1965) 기본으로 한 과도평형 해석(Transient Equilibrium Analysis) 방법을 사용하여 수행한다.

본 연구에서 제시하고 있는 전체 프레임 모델은 ASCE 7-05 (ASCE, 2005) 설계 지침을 토대로 설계를 하였으며 국부적인 강재 부재들은 AISC-LRFD 지침을(AISC, 2001) 토대로 설계하였다. 하중 조건을 포함한 상세한 설계 조건은 Table 4에서 정리하였다. LA 지역에 단단한 토양 위에 위치한 일반적인 사무실 건물로

Table 4. Design Condition of 2D Frame Models

Located Area	Loads (Other)	Loads (Roof)	SDC	Site Condition	Occupancy Category
LA Area	DL: 4.12kPa LL: 2.39kPa	DL: 4.50kPa LL: 0.96kPa	D Class	Stiff Soil (Class D)	Ordinary Structures

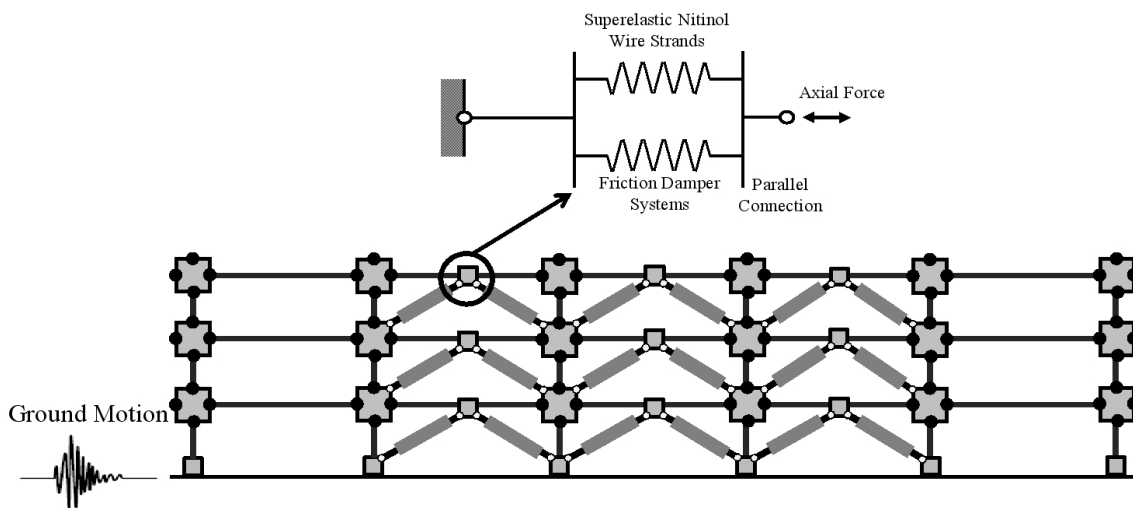


Fig. 7. Modeling Attributes for the 2D Frame Models

가정하였고 내진 설계의 범주(Seismic Design Category, 이하 SDC) 강진 지역으로 가정하여 프레임 모델을 제작하였다. 50년 주기 10%의 발생 빈도 수준의 지진 강도로 가속도 지도를 활용 0.2초와 1초의 가속도를 각각 2.35g와 1.41g로 가정하고 설계 지침에 의거하여 변환된 등가의 하중을 설계 하중으로 규정하였다. 프레임 모델에 정적 푸쉬오버(Push-over) 해석을 수행하여 처짐을 허용범위 이내로 제한하여 안전성을 확보하였다. 지진에 대한 횡하중을 효율적으로 저항하기 위하여 강접 접합부 형식의 건물 외벽을 둘러싼 모멘트 프레임 형식으로 유효 단위폭은 9.15m로 하였으며 총 5경간으로 각 경간은 9.15m로 하였다. 건물 외벽 3개의 경간을 역 방향 V형태로 가새가 체결된 3층짜리 프레임 구조물에 기둥과 (Column) 보(Beam) 각각 W12x79와 W24x68 표준 규격의 I-형강을 사용하였으며 가새 부재는 모두 HSS6x6x3/8 규격의 사각형 중공 각관을 사용하여 설계하였다.

설계 처짐을 바탕으로 설계된 중심 가새 프레임 구조물에 비선형 동적 해석을 위하여 제작한 수치해석용 프레임 모델에 대한 자세한 사항을 Fig. 7에서 제시하였다. 프레임 구조물을 이루고 있는 보와 기둥은 2차원 파이버 단면을(2D Fiber Section) 갖는 비선형 보-기둥 요소를 사용하여 모형화 하였으며 가새 부재 역시 동일한 비선형 보-기둥 요소를 사용하여 모형화 하였으나 좌굴의 영향을 고려하기

위하여 중심에 전체 길이의 1/1000에 비율로 솟음(Camber) 주어 초기에 기하학적 비선형을 고려하여 모형화 하였다. 본 가새 댐퍼 시스템을 설치한 프레임 모델의 경우에는 Fig. 5(a)에서 제시한 등가의 스프링 요소를 프레임 모델에서 가새 양쪽 끝단에 Fig. 7에서 보이는 보와 같이 설치하였다. 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템에서 최적 설계방식이 구조물의 전체 성능에 미치는 영향력을 조사하기 위하여 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템 내에서 마찰력과 복원력이 동등한 조건하에 해석을 수행하였다($\gamma = 1.00$). 프레임 구조물이 강재로 설계된 점을 고려하여 5%의 감쇠 상수를 적용하였고(Sabelli, 2001; Sabelli et al., 2003) 사하중과 일부의 활하중이 등가로 치환된 덩어리 질량을 보와 기둥이 만나는 모든 절점에 입력하였다. 보와 기둥이 만나는 절점은 용접 형태의 완전 강접 접합부(Fully Rigid Connection) 가정하였으며 접합부 패널존의(Panel Zone) 폭의 길이만큼 보 요소에 강접 오프셋(Rigid Offset) 입력하였다. 해석을 수행하는 동안에 P-Delta 효과에 의한 기둥의 2차원적인 비선형 거동을 고려하였다.

Fig. 8은 비선형 동적 해석을 수행하기 위하여 사용된 지진 가속도 데이터와 해석 결과를 보여주고 있다. 실제로 LA 지역에 발생한 지진 기록 데이터를 활용하였으며 50년 주기로 2% 발생 빈도에 리히터 규모로 진도 7.0 이상의 강진이다. LA21 지진

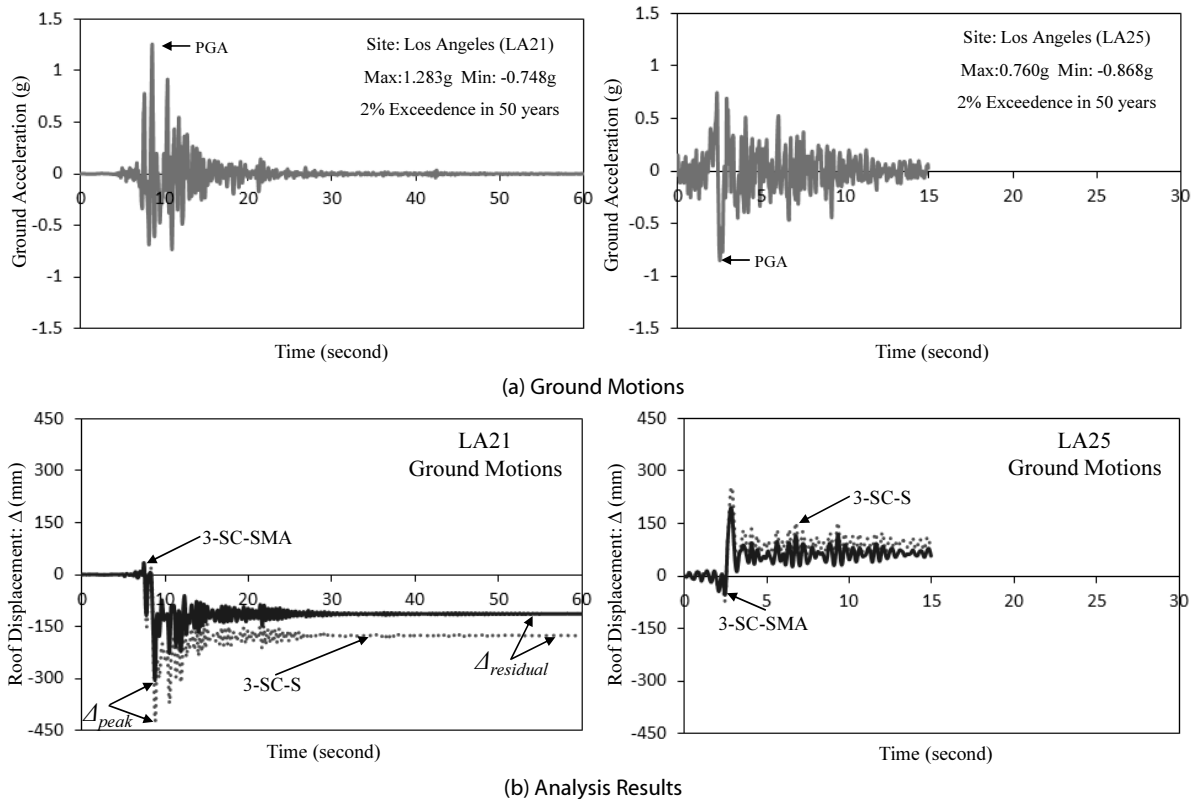


Fig. 8. Ground Motions and Analysis Results

가속도는 60초의 지속 시간을 지니고 있으며 반면에 LA25 지진 가속도는 15초로 비교적 짧은 지속 시간을 가지고 있다. 두 지진 가속도 데이터의 최고 지반 가속도를(Peak Ground Acceleration, 이하 PGA) 포함하여 기타 자세한 사항은 Fig. 8(a)에 정리되어 있다. Fig. 8(b)에서는 위에서 언급한 지진 가속도 데이터를 가지고 각각의 프레임 모델에 비선형 동적 해석을 수행하여 얻어진 시간변위 이력 그래프를 보여주고 있다. 본 연구에서 다루고 있는 댐퍼 시스템의 설치 유무에 따라서 옥상 층에서(Roof Story) 측정된 변위를 지진발생 시간대 별로 비교하였다. 최대 지반 가속도가 발생한 이후 약 0.5초 이내에 두 모델에서 최대변위(Δ_{peak}) 측정되었고 LA21 지진 데이터가 LA25 지진 데이터와 비교하여 높은 PGA 값을 가지고 있어 최대변위와 잔류변위($\Delta_{residual}$) 포함하여 전반적으로 발생하는 변위의 양이 커진 경향을 보여주고 있다. 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템을 가새 부재에 설치한 프레임 모델의 경우(3-SC-SMA 모델) LA21 지진이 발생한 이후에 최대변위와 잔류변위는 각각 290mm와 110mm가 발생하였고 LA25 지진이 발생한 이후에는 180mm와 62mm가 발생하였다. 반면에 본 가새 댐퍼 시스템을 설치하지 않은 경우에는(3-SC-S 모델) LA21 지진이 발생한 이후에 최대변위와 잔류변위는 각각 420mm와 180mm가 발생하였고 LA25 지진이 발생한 이후에는 260mm와 100mm가 발생하였다. 해석 결과를 토대로 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템은 우수한 충격흡수와 진동감쇠 능력으로 인하여 지진으로 인한 변위 발생량을 전반적으로 감소시키고 또한 형상기억합금이 제공하는 복원력에 의하여 잔류변위 발생량도 감소시켜 구조물에 발생하는 손상과 피해를 최소화 한다고 결론을 내릴 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 중심 가새 프레임에 일체로 설치하는 수동적인 변위 제어장치로서 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 역학적 거동과 성능적인 효율성에 대하여 주로 살펴 보았다. 초탄성 형상기억합금 와이어 연선을 시스템 내에서 재료의 복원력을 활용하여 잔류변위를 줄여주는 장치로 활용되는 반면에 볼트 마찰 댐퍼는 에너지를 소산하여 충격흡수와 진동저감 장치로 활용된다. 자동복원이 가능한 마찰 댐퍼형 가새 시스템에서 주요한 부속품인 형상기억합금 연선과 마찰 댐퍼 시스템의 역학적 하중변위 거동을 조사하고 스프링 요소를 모형화하는데 사용하였다. 이러한 스프링 요소는 수치해석을 수행하는데 활용되며 해석의 신뢰를 높이고 정확한 거동을 예측하고자 실험 결과에 보정하였다. 본 마찰 댐퍼형 가새 시스템의 최적 설계 파라미터를 예측하기 위하여 마찰력을 변수로 하여 비교 연구를 수행하였으며 그 결과 복원력과 마찰력이 거의 동등한 조건하에 설계시 복원성과 에너지 소산 능력 측면에서

최적의 결과를 도출함을 입증하였다. 복원력을 제공하는 초탄성 형상기억합금 와이어 연선을 설치하고 이에 상응하는 마찰력을 볼트의 긴장력을 적절하게 조절하여 본 가새 댐퍼 시스템의 이상적인 거동을 재현할 수 있다. 마지막으로 본 가새 댐퍼 시스템이 구조물 내에서 진동감소와 변위제어의 성능적인 효과를 입증하기 위하여 3층 높이의 중심 가새 프레임을 설계하였으며 실제의 지진 가속도 데이터를 사용하여 비선형 동적 해석을 수행하였다. 해석 결과를 토대로 본 가새 댐퍼 시스템이 지진 발생시 구조물 전체에 발생하는 변위와 진동을 저감하고 최종적으로 잔류변위의 발생을 저감하여 피해를 최소화 한다는 결론을 내릴 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업이며(과제번호: 2012R1A1A1041521) 이러한 지원에 깊은 감사를 드립니다.

References

- American Institute of Steel Construction (AISC) (2001). *Manual of steel construction, Load and Resistance Factor Design (LRFD)*, Chicago (IL) 3rd edn.
- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2005). *Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI No. 7-05)*, Reston (VA).
- Auricchio, F. and Sacco, E. (1997). "A one-dimensional model for superelastic shape-memory alloys with different properties between martensite and austenite." *Int. J. Non-Linear Mech.*, Vol. 32, No. 6, pp. 1101-1114.
- DesRoches, R., McCormick, J. and Delemont, M. (2004). "Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars." *J. Struct. Eng.*, Vol. 130, No. 1, pp. 38-46.
- Dolce, M., Cardone, D., Ponzio, F. C. and Valente, C. (2005). "Shaking table tests on reinforced concrete frames without and with passive control systems." *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 34, No. 14, pp. 1687-1717.
- Dolce, M., Cardone, D. and Marnetto, R. (2000). "Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys." *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 29, No. 7, pp. 945-968.
- Hu, J. W. (2008). *Seismic performance evaluations and analyses for composite moment frames with smart SMA PR-CFT connections*, Ph.D. Dissertation, Atlanta (GA), Georgia Institute of Technology.
- Hu, J. W. (2013). "Seismic analysis and evaluation of several recentering braced frame structures." *Proc. IMechE. Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, DOI: 10.1177/0954406213490600.
- Hu, J. W., Choi, E. and Leon, R. T. (2011). "Design, analysis, and application of innovative composite PR connections between

- steel beams and CFT columns.” *Smart Mater. Struct.*, Vol. 20, No. 2, DOI: 10.1088/0964-1726/20/2/025019.
- Mazzoni, S. McKenna, F. and Fenves, G. L. (2006). *OpenSEES command language manual v. 1.7.3.*, Department of Civil Environmental Engineering, University of California, Berkeley, CA, USA.
- McCormick J., Aburano H. and Ikenaga M., et al. (2008). “Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements.” *Proceedings of 14 World Conference Earthquake Engineering*, Beijing, China, Paper No. 05-06-0071.
- Moreschi, L. M. and Singh, M. P. (2003). “Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance.” *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 32, pp. 1291-1311.
- Mualla, I. H. and Belev, B. (2002). “Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation.” *Eng. Struct.*, Vol. 24, pp. 365-371.
- Newmark, N. M. (1959). “A method of computation for structural dynamics.” *J. Eng. Mech.* ASCE, Vol. 85, No. 3, pp. 67-94.
- Pall, A. S. and Marsh, C. (1982). “Response of friction damped braced frames.” *J. Struct. Eng.*, Vol. 108, No. 9, pp. 1313-1323.
- Sabelli R., Mahin S. A. and Chang, C. (2003). *Seismic demands on steel braced-frame buildings with buckling-restrained braces*, *Eng. Struct.*, Vol. 25, No. 5, pp. 655-666.
- Sabelli R. (2001). *Research on improving the design and analysis of earthquake-resistant steel-braced frames*, The 2000 NEHRP Professional Fellowship Report. Oakland (CA): EERI.