Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 33, No. 3: 875~888, May 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.3.875

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Structural Engineering **구조공학**

초탄성 형상기억합금을 활용한 좌굴방지 가새프레임 구조물의 지진거동 및 성능평가

허종완*
Jong Wan Hu*

Seismic Behavior and Performance Evaluation of Uckling-restrained Braced Frames (BRBFs) using Superelastic Shape Memory Alloy (SMA) Bracing Systems

ABSTRACT

The researches have recently progressed toward the use of the superelastic shape memory alloys (SMAs) to develop new smart control systems that reduce permanent deformation occurring due to severe earthquake events and that automatically recover original configuration. The superelastic SMA materials are unique metallic alloys that can return to undeformed shape without additional heat treatments only after the removal of applied loads. Once the superelastic SMA materials are thus installed at the place where large deformations are likely to intensively occur, the structural system can make the best use of recentering capabilities. Therefore, this study is intended to propose new buckling-restrained braced frames (BRBFs) with superelastic SMA bracing systems. In order to verify the performance of such bracing systems, 6-story braced frame buildings were designed in accordance with the current design specifications and then nonlinear dynamic analyses were performed at 2D frame model by using seismic hazard ground motions. Based on the analysis results, BRBFs with innovative SMA bracing systems are compared to those with conventional steel bracing systems in terms of peak and residual inter-story drifts. Finally, the analysis results show that new SMA bracing systems are very effective to reduce the residual inter-story drifts.

Key words : Superelastic behavior, Shape memory alloys (SMAs), Buckling-restrained bracing, Moment frames, Residual inter-story drifts

초 록

최근에는 초탄성 형상기억합금을 구조물 일부에 설치하여 지진과 같은 외부 충격하중으로 인해 발생되는 영구적인 소성 변형을 줄이고 자동치유가 가능한 변위제어 시스템을 개발하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 초탄성 형상 기억합금은 상당량의 변위를 가하더라도 별도의 열처리 없이도 상온에서 단지 하중만을 제거하여도 원형으로 복원이 가능한 독특한 합성 금속재료이다. 뼈대 구조물에서 변형이 집중이 되는 부위에 기존에 사용된 강재를 대신하여 초탄성 형상기억합금을 사용한다면 시스템의 복원 효과를 극대화 시킬 수 있다. 따라서 본 연구는 내진성능이 우수한 좌굴방지 가새프레임에 초탄성 형상기억합금 소재를 접목시킨 새로운 구조 시스템을 제안하고 자 한다. 본 연구에서 제안된 구조시스템의 성능을 검증하기 위하여 현재 사용되는 설계코드를 참고하여 6층의 가새프레임 빌딩을 설계를 하고 2차원적인 유한요소 프레임 모델에 각각의 지진 위험도 레벨의 가속도 데이터를 사용하여 비선형 동적 해석을 실시하였다. 해석결과를 바탕으로 초탄성 형상기억합금 가새시스템을 사용한 프레임 구조물과 기존의 가새시스템을 성능적인 측면에서 서로 비교하였다. 해석결과는 지진하중 이후에 초탄성 형상기억합금 가새시스템은 구조물에 잔류 처짐을 감소하는데 매우 효율적임을 보여주고 있다.

검색어 : 초탄성 거동, 형상기억합금, 좌굴방지 가새, 모멘트 프레임, 층간 잔류 처짐

* 정회원 · 인천대학교 도시환경공학부 조교수, 공학박사, 기술사 (**Corresponding Author** · Department of Civil and Environmental Engineering, University of Incheon · jongp24@incheon.ac.kr)

Received March 27 2013, **Revised** April 5 2013, **Accepted** April 23 2013

Copyright ⓒ 2013 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

좌굴방지 가새프레임은 (Buckling-restrained braced frame, 이하 BRBF) 인장과 압축에서 동시에 항복하는 가새시스템의 특성을 보유한 새로운 뼈대구조 시스템이다 (Black 등, 2002; Wada 등, 1992). 기존에 주로 철골 구조로 사용된 중심가세 프레임을 (Concentrically braced frame, 이하 CBF) 대신하여 최근에 압축하중에서 좌굴파괴를 (Buckling failure) 미연에 방지할 수 있는 좌굴방지 가새프레임 구조물이 건설 현장에 널리 활용되고 있는 추세이다. 주로 강재중공 (Steel hollow section) 내부에 콘크리트를 충전하여 제작된 좌굴방지 가새부재는 보와 기둥과 같은 뼈대부재에 (Frame member) 대각선 보강재로 활용되며 반복하중 상태에서 인장으로 인한 항복강도와 거의 비슷한 수준의 압축항복 강도를 지닌 이력거동을 보여준다 (Sabelli, 2004). 그러므로 이러한 가새시스템은 강한 지진 하중이 발생 하더라도 구조물 전체 거동에 안정된 에너지 소산 효과를 발휘하는데 큰 역할을 한다. 게다가 좌굴방지 가새프레임은 비 가세 모멘트 프레임과 비교하여 강한 측면 보강효과를 기대할 수 있기 때문에 현재 사용되고 있는 설계코드에서 제시된 측면 처짐의 제한 조건을 쉽게 만족하는 장점을 가지고 있다 (Kim 등, 2009). 따라서 다른 강재 프레임 구조물과 비교하여 설계상에 상당한 이점을 지닌 좌굴방지 가새프레임 구조물이 최근에 현장에서 널리 활용 되고 있다.

주로 가새부재는 전체 프레임구조 물에서 허용할 만한 손상이 집중이 되는 일종에 추가적인 퓨즈 역할을 하도록 설계되어 있다. 따라서 심각한 지진이 발생하더라도 주된 뼈대 부재를 최대한 피해로부터 보호를 하고 손상된 가새부재만을 교체하여 구조물에 부분적인 원형 복원을 가능 하게 한다 (Watanabe 등, 1988; Park 등, 2011). 하지만 가새부재에 전형 적으로 발생하는 영구변형은 전체 프레임 구조물에 층간 잔류변위를 발생시키고 이러한 경우에 구조물을 원상태로 복구하는데 추가적인 비용이 요구된다. 또한 수리를 위하여 손상된 가새시스템을 교체할 때 추가의 비용을 요청하더라도 현재까지는 교체의 척도를 나타내는 객관적인 기준이 부재하고 오로지 기술자의 주관적인 판단에 의존해야 하는 문제점을 가지고 있다 (Inoue 등, 2001). 따라서 본 연구에서는 중간에서부터 강한 수준까지의 지진에 의하여 발생되는 가새부재의 영구변 형을 감소시키고 복구 비용을 절감 하고자 복원 메커니즘 (Recenter ing mechanism)을 이러한 좌굴방지 가새 시스템에 적용 하고자 한다.

최근 지진이 빈번하게 발생되는 미국 과 일본 등지의 과학자들은 지진의 개장 시스템 (Retrofit system)으로 인식이 되는 복원장치 개발에 많은 심혈을 기울이고 있다. 복원 성능을 확보하는 가장 괄목할 만한 방법은 스마트한 소재들을 프레임 구조물에 일부분에 결합하여 활용하는 방법이다. 이중 초탄성 (Superelastic) 형상기억 합금은 (Shape memory alloy, 이하 SMA) 스마트한 소재의 좋은 본보기 로써 별도의 열처리가 없이도 상온에 서 하중을 제하 (Unloading) 후에 원형 으로 자동복원이 가능하다. 니켈과 티타늄 재질의 합금인 니티놀 (Nitinol) 이 현재 가장 널리 활용되고 있는 형상기억 합금소재이다. 온도에 의존하 는 상변위에 따른 형상기억 합금의 이상적인 응력-변형율 거동 곡선을 Fig. 1에서 보여주고 있다.

그림에서 제시한 대로 마르텐자이트 (Martensite) 상변위 이상이고 오스텐 나이트 (Austenite) 상변위 이하의 온도에서는 ($M_f < T < A_f$) 하중에 의한 변형 후 형상기억합금을 원형으로 복원하는데 별도의 열처리가 필요하다. 하지만 오스텐나이트 상변위가 끝나는 온도 이상에서는 ($A_f < T$) 하중 제하 후에 영구변형이 없이 원형으로 자동 복원되고 깃발 모양의 이력곡선으로 대변되는 초탄성적인 거동을 보여주고 있다. 8%의 신장변위까지 발생 하더라도 오스텐나이트 상변위에서의 형상 기억합금은 제로의 잔류변형을 기대할 수 있다 (Song 등, 2006; Des Roches 등, 2004). 초탄성적인 효과에 의해 제공되는 반복적인 복원성능 이외에도

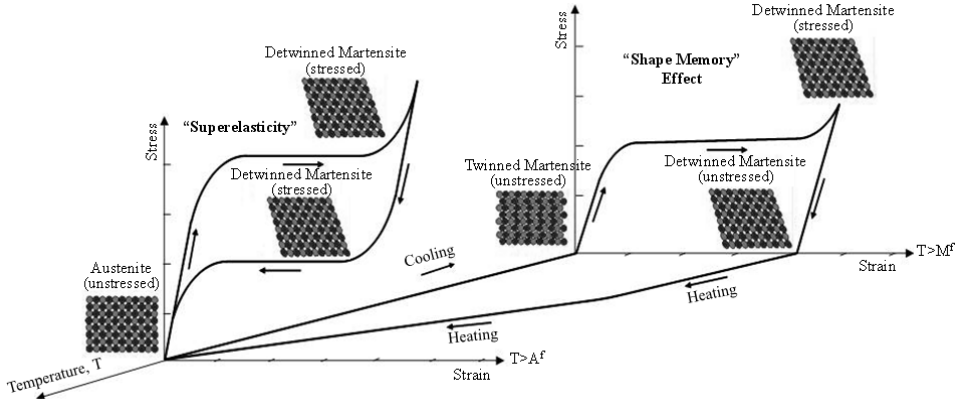


Fig. 1. Behavior of temperature-dependent shape memory alloy materials

이러한 특수한 소재는 깃발 모양의 이력곡선 면적에 의하여 제공되는 추가적인 완충 (Damping) 효과를 보유하고 있으며 또한 우수한 내구성, 피로파괴에 대한 저항력 및 대변위 에서 응력강화 효과 등을 추가 적으로 포함하고 있다 (DesRoches 등, 2002; Dolce 등, 2001). 다만 비용적인 측면에서 경제성을 고려한다면 구조물 전체에 적용하는 대는 현재까지는 한계를 가지고 있다.

위에서 언급된 아이디어를 정리해 볼 때 프레임 구조물에서 좌굴방지 가새 부재를 설치하고 변형이 집중되는 부분에 기존에 주로 사용되는 강재를 대신하여 스마트한 재료를 적용하는 것이 내진성능향상을 위한 가장 최적의 방법이라고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 복원성과 에너지 소산 능력을 향상시키기 위하여 초탄성 형상기억합금을 활용한 새로운 능동 제어시스템을 개발하고 이를 좌굴 방지 가새프레임에 설치 적용하고 비선형 유한요소 해석을 통하여 새로운 구조시스템에 대한 성능 검증에 초점을 두었다. 소성 변형이 주로 발생하는 가새프레임 부재의 연결부위를 강봉 대신에 초탄성 형상기억합금 재질의 접합봉으로 대체 한다면 가세 프레임 구조물에서 복원 성능을 최대한 발휘 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 비선형 시간 이력 동적해석을 통하여 초탄성 형상 기억합금 가새시스템을 지닌 프레임 구조물과 기존에 사용된 가새시스템 으로 설계된 프레임 구조물 사이에 층간 잔류처짐과 복원력 측면에서 평가하는데 주안점을 두었다.

형상기억합금은 지진발생 후 생기는 손상을 완화하는데 매우 효율적임을 입증하기 위하여 두 종류 의 좌굴방지 가새프레임에 대한 해석적인 결과 들을 서로 비교하였다.

2. 구조물 설계

본 연구에서 제시된 모든 프레임 빌딩 모델은 ASCE 7-05 코드 규정에 의거하여 LA지역에서 50년주기 10%의 발생확률의 지진위험도 상태하에 견고한 토질 지역에 위치한 일반적인 오피스 건물로 간주하여 설계를 하였다 (ASCE, 2005). 더욱이 내진설계 범주를 (Seismic design category, 이하 SDC) ASCE 코드에서 규정한 강진 지역으로 설정하였다. 다른 기본적인 설계 조건은 Table 1에서 제시한다. 빌딩 모델은 측면 하중에 저항하기 위한 건물 외곽 중앙에 가새가 체결된 경간(Bay)을 가진 6층 프레임 구조물로 설계하였다. 또한 질량과 강성이 등분포로 존재하고 평면도 상에서 양방향 대칭의 형태로 설계를 하였다. Fig. 2는 5개의 각각 9.15m 경간을 가진 6층의 프레임 구조물의 평면도를 보여준다. 가새가 체결된 경간은 평면도 상에서 점선으로 표시하였으며 각각의 방향에 대칭으로 총 12개의 가새경간을 설치하였다. 측면의 지진하중을 효율적으로 저항하기 위해 건물 외벽은 모멘트 저항 프레임 구조물로 설계를 하였으며 평면도에서 굵은 선으로 표시하였다. 건물 안쪽의 프레임은 주로 건물의 하중을 지지하며 단순한 핀 전단 접합부로 연결되며 동서 방향으로 설치하였다. 2차원적인 비선형 푸쉬오버 (Pushover) 해석을 통하여 비틀림 (Torsion) 효과를 무시한 대칭적인 프레임 구조물의 설계를 검증하였다.

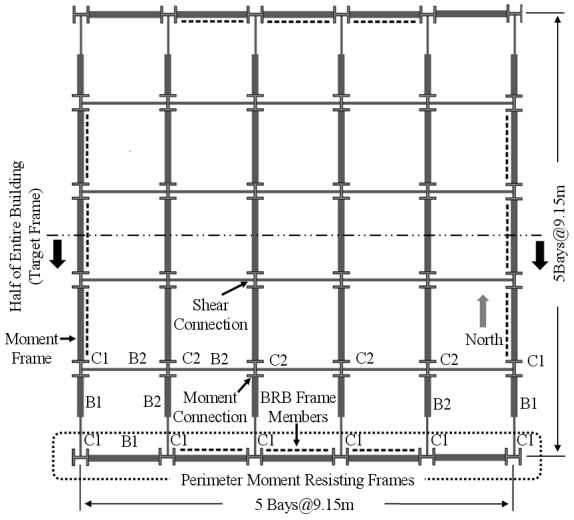


Fig. 2. Plan view of frame models

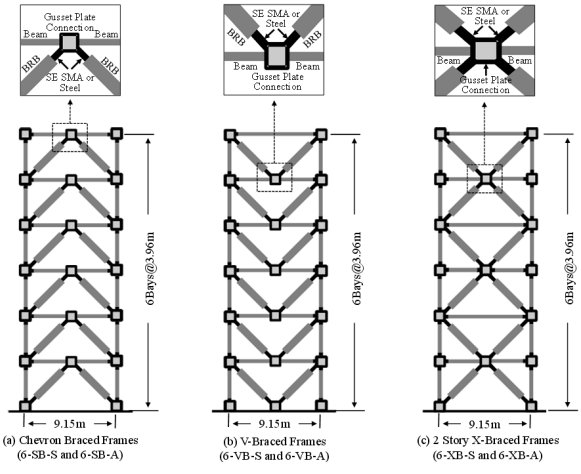


Fig. 3. Elevation view of braced frames and their connection details

Table 1. Basic information for frame design

Located Area	Loads(Other)	Loads(Roof)	SDC	Site Condition	Occupancy Category
LA Area	DL:4.12kPa LL: 2.39kPa	DL:4.50kPa LL: 20.96kPa	D Class	Stiff Soil (Class D)	Ordinary Stuctures

Table 2. Dimensions for frame members

Story	Column* (C1)	Beam* (B1)	BRB		Int. Column* (C2)	Int. Beam* (B2)
			Core Area* (mm^2)	Casing Tube**		
1	W14x109	W24x84	2580	HSS6x1/4	W12x87	W24x68
2	W14x109	W24x84	2580	HSS6x1/4	W12x87	W24x68
3	W14x109	W24x68	2580	HSS6x1/4	W12x87	W24x68
4	W14x109	W24x68	2580	HSS6x1/4	W12x87	W24x68
5	W14x109	W18x50	2027	HSS6x1/4	W12x87	W24x68
6	W14x109	W18x50	2027	HSS6x1/4	W12x87	W24x68

* Gr.50 Carbon Steel ** Gr.B Carbon Steel

다양한 가새 형태들 중에서 본 연구에서는 역방향 V형, V형 및 2층 X형 가새프레임 시스템을 선택하였고 이들의 각각의 정면도는 가새와 다른 프레임 부재들 사이를 연결하는 거셋 플레이트 (Gusset Plate) 접합부 상세를 포함하여 Fig. 3에서 보여준다. 그림 하부에 제시된 모델명에서 첫 번째 숫자는 6층의 프레임 구조물을 의미하며 두 번째 약어는 사용된 가새프레임 종류를 의미한다 (SB: 역방향 V형 가새, VB: V형 가새, XB: 2층 X형 가새). 마지막에 약어는 기존에 사용된 좌굴방지 가새시스템을 S로 표기하며 초탄성 형상기억합금을 사용한 새로운 가새시스템은 A로 각각 표기하여 구분하였다. 예를 들면 초탄성 형상기억합금 가새시스템을 가진 6층 좌굴방지 가새프레임 모델은 6-SB-A로 지칭한다. 모든 프레임 모델은 3.96m의 동일한 층간 높이로 설계하였다. 프레임 구조물의 부재들은 AISC-LRFD 매뉴얼의 지침에 의거하여 설계하였다 (AISC, 2001). 시공상 편의를 고려하여 기둥은 전 층에 걸쳐서 동일한 규격으로 설계를 하였으며 경제성을 고려하여 고층에서는 적은 규격의 보 부재를 사용하였다. Table 2에서 제시된 바와 같이 서로 비교되는 각각의 프레임 모델은 같은 규격의 부재들로 설계하였다. 중심에는 원형의 강봉 코어를 설치하고 외벽은 강재 중공 튜브로 덮고 그 사이를 콘크리트로 충전한 형태의 좌굴방지 가새를 사용하였다 (Fig. 5 참고). 강봉 코어는 A572-Gr.50 탄소 강으로 제작하여 가새시스템에서 높은 강도와 우수한 연성효과를 동시에 제공하는 대 커다란 기여를 한다. 삽입된 강봉 코어는 가새부재에서 주된 하중전달 매개체로 작용하기 때문에 좀 더 많은 측면 하중을 저항하기 위하여 저층에서는 상대적으로 더 큰 규격으로 설계를 하였다 (Table 2 참고). 가새부재에서 외벽의 강재 중공 튜브는 원형으로 제작하였으며 AISC 코드에서 제공하는 표준 규격의 중공 단면을 가지고 설계를 하였다. Fig. 3에서 제시된 바와 같이 프레임 부재와 연결되는 가새 끝단의 연결부는 초탄성 형상기억합금 혹은 강 재질의 원형봉을 사용하여 제작하였으며 가새부재 내에 삽입된 중심의 코어와 같은 규격으로 일직선의 형태로 연장하여 연결한다. 가새부재의

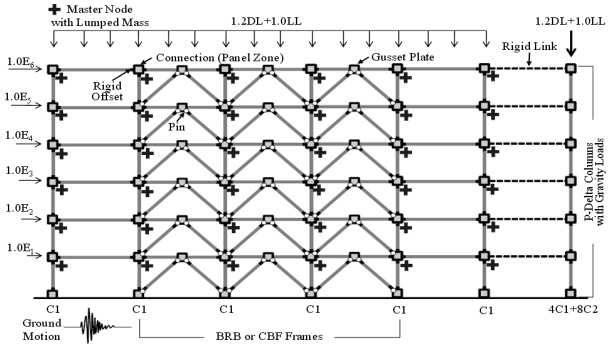


Fig. 4. Numerical modeling attributes for 2D frame models

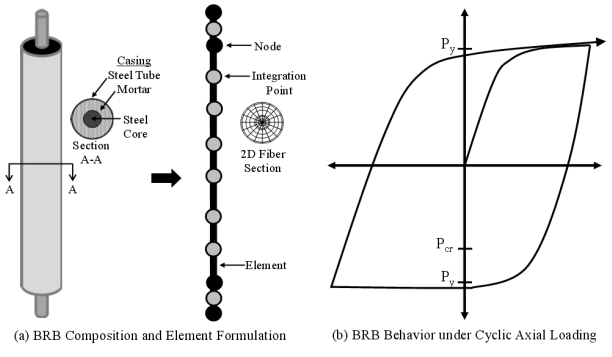


Fig. 5. Modeling of brace members

주된 몸통은 콘크리트가 충전된 원형 강재 튜브는 합성 단면의 형태로 구성되며 끝단의 연결부와 비교하여 상대적으로 강체로 (Rigid) 거동을 한다. 두 개의 부분이 상대적으로 다른 강성을 가지고 있기 때문에 상대적으로 강성이 약한 연결부 강봉에 소성적인 변형이 집중된다.

3. 해석 모델

총 6개의 프레임 모델을 제작하여 오픈 비선형 지진 유한요소

해석 프로그램인 OpenSEES (Mazzoni 등, 2006)를 사용하여 비선형 해석을 수행 하였다. 원형 빌딩 구조물이 정방향의 대칭구조로 설계되었기 때문에 반쪽을 대칭으로 2차원 프레임 구조물로 모형화가 가능하다. 이러한 구조물은 면내의 비틀림 효과를 고려하지 않는다. 지진하중 하에 내부의 중력 저항 프레임과 평행하게 연결된 외부 의 2차원적인 모멘트 저항 프레임에 대한 모형화 방법은 Fig. 4에서 보여 주고 있다. 중력 프레임에 위치한 내측 기둥 부재들은 전체 빌딩에 절반의 무게를 받치고 있으며 하중계수를 곱한 활하중과 사하중을 이러한 부재 요소들에 수직방향으로 가한다. 대변형에 의한 기하학적인 비선형 거동 때문에 발생하는 P-Delta 효과를 실제 해석에 포함시켰다.

모멘트 저항 프레임과 중력 저항 프레임 사이를 연결하는 콘크리트 바닥 슬래브는 강체의 다이어프램처럼 거동한다. 따라서 내측의 중력 저항 프레임은 외부의 측면 하중에 직접적으로 저항하는 모멘트 저항 프레임의 거동에 의존하여 일체로 움직인다. 이러한 이유 때문에 재료적인 비선형 거동을 고려한 2차원 파이버 단면을 가진 비선형 보-기둥 요소(Nonlinear beam-column element)를 사용하여 외측 모멘트 저항 프레임의 부재들을 모형화 하였다. 반면에 중력 기둥들은 단지 단면의 규격만을 고려한 탄성적 보-기둥 요소들로 모형화 하였다. 또한 슬래브의 직접적인 강체 거동을 재현하기 위하여 외측과 내측 프레임 시스템들을 강체 링크(Rigid link)를 사용하여 일직선으로 연결하였다.

기하학적인 비선형 거동을 재현하기 위하여 요소들과 결합된 P-Delta 좌표 변환을 사용하였다. 또한 강재구조물에 일반적으로 적용되는 1.5%의 변형률 경화와 5%의 유효 댐핑 상수를 사용하였다 (Sabelli 등, 2003). 프로그램에서 제공하는 기록 커멘드를 사용하여 절점변위, 기둥 기초부의 전단력, 시간주기 및 단면 응력 등과 같은 주요 거동 데이터를 수집하였다.

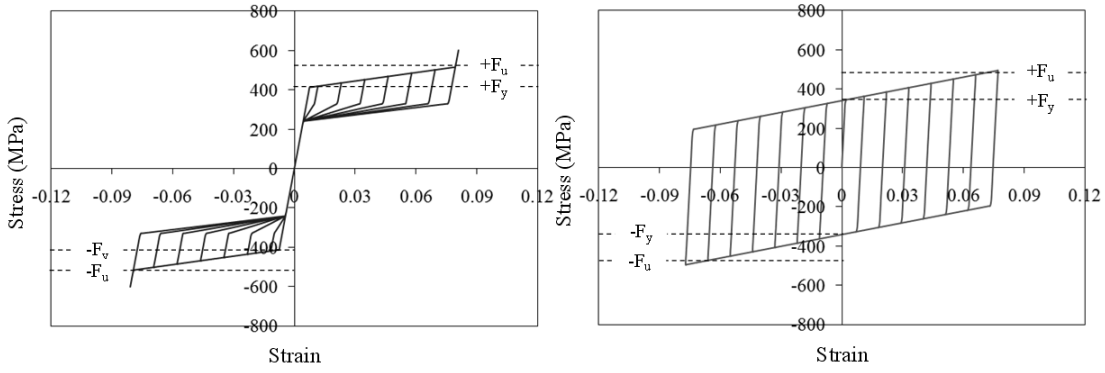
Fig. 5는 좌굴방지 가새의 수치해석적 모델링과 이력 거동을 보여준다. 외측 프레임 부재를 포함하여 좌굴방지 가세 부재들도 콘크리트와 강재튜브로 구성되어 있는 복합단면을 수치해석적 모델링을 위하여 2차원 파이버단면을 가진 비선형 보-기둥 요소들을 사용하여 모형화 하였다. 수치해석적으로 재현된 가새부재는 좌굴로 인한 강도 손상이 없이 인장과 압축에 동시에 항복하며 강도와 거동은 주로 사용된 재료적인 특성에 의하여 결정된다. 콘크리트의 구속효과로 인하여 극한 상태의 압축강도가 인장강도와 비교할 때 약간 높은 값을 보여주고 있다. 복합단면을 재현하기 위하여 사용되는 파이버 단면은 상응되는 위치에서의 재료적인 물성치를 포함하고 있으며 비선형 보-기둥 요소내의 수치해석적인 통합 포인트(Numerical integration point)에 배열한다.

가새부재에서 끝단의 연결봉은 프레임 모델에 따라 Gr. 50 강재 혹은 초탄성 형상기억합금으로 제작하였으며 비선형 보-기둥 요소들로 모형화 하였다 (Fig. 5 참고). Fig. 6은 이러한 재료들의 수치해석적으로 재현된 거동 곡선을 보여준다. Gr.50 강재의 재료적 거동은 200GPa의 탄성률, 345MPa의 항복응력과 1.5%의 변형률 경화들로 결정지어 진다. 초탄성 형상기억합금의 재료적인 거동은 OpenSEES 프로그램내에서 명령어 지원이 되지 않기 때문에 사용자 정의의 재료 코드를 (User-defined material code) 사용하여 수치해석적으로 재현하였다 (Auricchio 등, 1997). 본 연구에서는 25mm의 초탄성 형상기억합금의 일축 하중 실험의 결과를 토대로 (DesRoches 등, 2004) 41GPa의 탄성률, 413MPa의 항복응력, 516MPa의 극한응력과 8%의 회복 가능한 신장률 등의 재료상수 값을 가지고 재현하였다. 기존에 주로 사용된 강재와 비교할 때 초탄성 형상기억합금은 초기의 거동이 좀 더 유연하지만 항복 이후의 강도 성능은 더 높음을 알 수 있다.

4. 비선형 정적해석

4.1 해석과정

ASCE 7-05 코드(ASCE, 2005)에 명시되어 있는 대로 총 12번



(a) Stress and Strain Curve for SE SMA (b) Stress and Strain Curve for Gr.50 Carbon Steel

Fig. 6. Numerically simulated stress-strain curves for SE SMA and Gr. 50 steel materials

의 비선형 푸쉬오버 해석을 실시하기 위하여 사하중 DL), 활하중 (LL), 지진하중(E)으로 구성되어 있는 조합하중을 사용하였다 (e.g., LC5=1.2DL+1,0LL+1.0E). 등분포의 사하중과 활하중은 등가의 집중하중들로 치환이 되어 보 요소에 시간 상수함수를 사용하여 중력방향으로 가해진다. 이후에 지진하중을 대신하는 등가의 측면하중은 선형적인 시간 증분 함수를 사용하여 하중을 가한다. 따라서 미리 정의된 시간 함수와 연관된 정적 혹은 반복적으로 선형적으로 증가하는 방식으로 등가의 측면지진하중을 가한다. 각각의 하중 단계에서 정적 혹은 반복적인 푸쉬오버 해석은 변위제어 알고리즘을 가지고 실시하였다.

전체의 유효한 지진중량(W)은 단지 사하중으로부터 치환이 되었다. 좌굴방지 가새프레임에 대한 수정응답계수(R)는 코드에 명시된 대로 8을 적용하였다 (ASCE, 2005). 같은 유효 질량을 가진 모든 프레임 모델들의 시간주기(Time period)는 단지 사용된 가새시스템의 측면 강성에 영향을 받는다. 예비적인 모달해석 (Modal analy sis)에서 얻어진 모델들의 시간주기는 등가의 측면하중 생성과정을 통한 설계 지진하중(V_s)을 계산하기 위하여 사용된다. 등가의 측면 지진하중은 구조물을 지배적인 모드 형상과 (Mode shape) 일치하는 형태로의 변형을 가능하게 하며 각층마다 차지하고 있는 중량의 비율을 근거로 이러한 설계 지진하중을 균등하게 배분하여 계산한다 (ASCE, 2005). 대부분의 중·저층 프레임 구조물에서 1차 모드 형상을 제외하고 다른 고차 모드 형상들은 단지 전체의 10% 미만의 유효 질량만을 차지하므로 1차 모드 형상에 의해 구조물의 거동이 결정된다 (Hu, 2008; Hu and Leon, 2011; Hu 등, 2011; Hu 등, 2010). 마지막으로 지배적인 조합하중을 받는 프레임 모델이 층간 처짐과 P-Delta 효과에 대한 허용 설계 제한을 만족하는지 여부를 확인하여 설계의 타당성을 검증하였다.

4.2 해석결과

Fig. 7은 비선형 푸쉬오버 해석 이후에 프레임 모델에 가해진 단순 혹은 반복적인 측면 전단하중에 대한 전체 높이로 나눈 옥상층의 처짐 비율 곡선을 보여준다. 가새가 동일한 형태로 체결이 되었지만 강재 혹은 초탄성 형상기억합금을 활용한 각각의 다른 가새시스템을 가진 프레임 모델들의 비선형적인 거동을 비교하였다 (e.g., 6-SB-V 대 6-SB-A). 여기서 설계 지진하중(V_s)은 각층에 가해진 등가의 측면 전단하중의 합을 의미한다.

Fig. 7 (a)에서 보여지는 바와 같이 단순한 하중의 푸쉬오버 해석은 곡선에서의 탄성 한계구간, 초기항복, 변형률 경화구간, 극한하중과 같은 중요한 변이점들을 확인하기 위하여 수행하였다. 예를 들면, 6-SB-A 프레임 모델은 탄성 한계구간, 항복점, 초기 변형률 경화 등이 각각 0.45%, 0.53%, 0.85%의 처짐 비율을 보여줌을 그림에서 확인할 수 있다. 6-SB-A 프레임 모델과 6-SB-S 프레임 모델은 각각 0.32%와 0.53%의 항복처짐을 그림에서 확인할 수 있으며 이는 초탄성 형상기억합금 가새시스템을 가진 프레임 모델이 기존에 강재를 활용한 가새시스템을 가진 프레임 모델과 비교하여 초기의 거동이 완만함을 의미한다. 반면에 6-SB-A 모델은 상대 모델과 비교하여 더 큰 전단 항복강도를 보여주고 있다. 가새부재의 연결봉에 사용된 재료적인 성질이 이러한 프레임 구조물의 항복 이후의 거동특성에 영향을 준다. 따라서 비록 형상기억합금이 구조물에 극히 일부분에 사용되었지만 전체 구조물의 성능향상에 많은 기여를 한다고 판단된다.

정적 푸쉬오버 테스트를 통하여 얻어진 추가적인 결과값들은 Table 3에서 정리하였다. Table 3은 제 1 모드형상에서의 구조물의 시간주기, 설계 지진하중을 유효한 지진 중량으로 나눈 값인 설계 지진하중 계수(C_s=V_s/W)와, 항복 전단강도 (V_y), 층간 변위가 설계를 위한 한계에 도달할 때의 전단강도(V_{dl})를 포함하여 이러한 전단강도에서 보여주는 옥상층의 처짐(Δ_y and Δ_{dl})등도 제시한다. 기존의 가새시스템과 비교하여 초탄성 형상기억합금을 활용한 가새 프레임 모델이 초기에 좀 더 유연한 거동을 하기 때문에 상대적으로 긴 시간주기를 보여준다. 따라서 기존에 가새프레임 모델들과

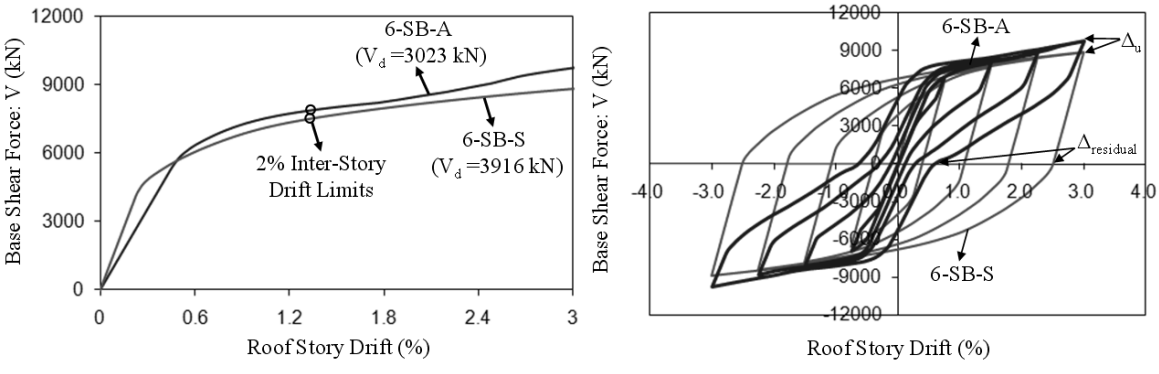
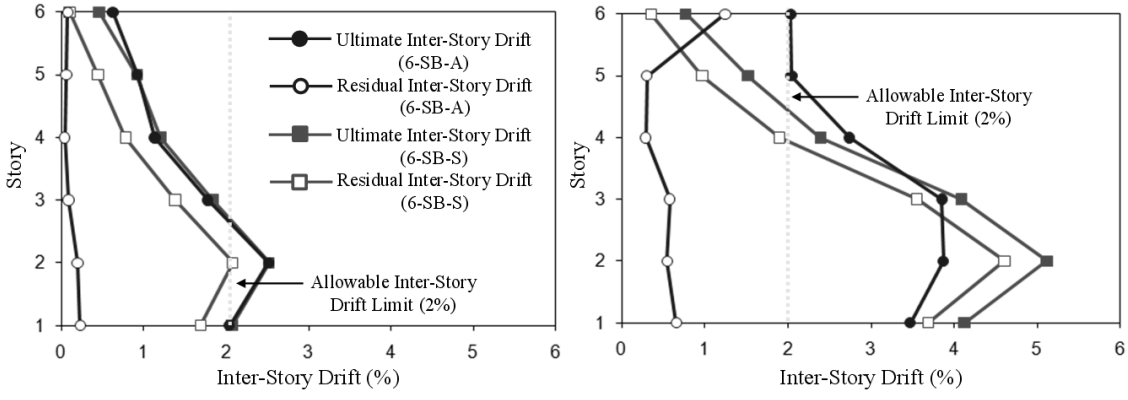


Fig. 7. Results of nonlinear pushover analyses

Table 3. Characteristics of braced frame models

Model ID	T (sec.)	W (kN)[a]	V_s(kN)[b]	V_s / W[c]	V_y(kN)	$\triangle_y$ (%)	V_y / V_s[d]	V_{dl}(kN)[e]	$\triangle_{dl}$ (%)	V_{dl} / V_s[d]
6-SB-S	0.82	26200	3916	0.149	4939	0.32	1.26	7498	1.33	1.91
6-SB-A	1.06	26200	3023	0.115	5978	0.53	1.98	7879	1.35	2.61
6-VB-S	0.84	26200	3823	0.146	4880	0.32	1.28	7384	1.33	1.93
6-VB-A	1.08	26200	2983	0.114	5893	0.53	1.98	7763	1.35	2.60
6-XB-S	0.79	26200	4072	0.155	4912	0.32	1.21	7263	1.31	1.78
6-XB-A	1.04	26200	3120	0.119	6068	0.53	1.94	7687	1.27	2.46

[a] Effective seismic weight of the frame model equal to half of the total seismic weight of the entire building
[b] Seismic design base shear force of the frame model equal to half of the design base force of the entire building
[c] Seismic design base shear coefficient ($C_s = V_s / W$)
[d] Overstrength factor ($\Omega = V/V_s$)
[e] Base shear force at the design inter-story drift limit of the ASCE 7-05 (e.g. 2% for 6 story building)



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

Fig. 8. Ultimate and residual inter-story drifts obtained from cyclic pushover analyses

비교하여 형상기억합금 가새프레임 모델들이 평균적으로 23% 적은 설계 전단하중을 가졌다. 하지만 항복 이후에는 형상기억합금이 강재와 비교하여 우수한 강도 성능을 보유하고 있으므로 초탄성 형상기억합금 가새시스템을 가진 프레임 모델이 소성변형이 발생한 이후에 더 우수한 강도 성능을 보여주고 있다. 각 관측점에서 측정한 전단하중을 설계 지진하중으로 나눈 비율로 정의되는 강도계수(Ω)도 Table 3에서 제시되고 있다. 이러한 계수들은 프레임 구조물의 강도적인 측면에서 내진 성능을 평가하는 데 유용한 지표로 활용이 된다. 본 연구에서 제시된 모든 프레임 모델들이 설계요구 강도에 2배 이상으로 설계되고 있음을 보여주고 있다.

반면에 반복적 하중의 푸쉬오버 해석은 각각의 프레임 모델들의 강도성능, 에너지 소산능력, 복원성 등을 평가하기 위하여 수행하였다. 서로 비교되는 프레임 모델에 같은 변위 이력을 적용하였다 (Fig. 7 (b) 참고). 반복 하중을 받는 프레임 구조물에서도 초탄성 형상기억합금 가새시스템을 가진 프레임 모델이 항복 이후의 우수한 전단강도 성능 특성을 보여주고 있다. 더욱이 이러한 프레임 모델은 형상기억합금의 복원능력 때문에 많은 양의 변위를 회복하였다. 특히 하중의 반복 주기가 커질수록 가해진 변위량에 잔류변위를 제외한 회복 가능한 변위량이 더욱더 증가하였다. 그림에서 보는 바와 같이 6-SB-A 프레임 모델에 3%의 변위 하중을 가할 경우 2.4%의 변위가 회복하는데 이는 가해진 변위 하중의 80%이상을 회복하였음을 의미한다.

4.3 정적 성능평가

형상기억합금의 활용에 따른 복원 성능을 평가하기 위하여 비선형 정적 해석결과를 바탕으로 좌굴방지 가새프레임 모델들의 거동적 특성을 포괄적으로 분석하였다. 역 V형 가새프레임의 경우 옥상층에서의 1.5%와 3.0%의 처짐 비율을 특수한 성능 관측레벨로 지정하였으며 그 단계에서의 하중 제하 후에 잔류 처짐 비율도 측정하였다. Fig. 8은 각각의 성능 관측레벨에서 역 V형 가새프레임의 최대 및 잔류 층간 처짐을 보여준다. 설계 코드에서 규정된 2%의 허용 층간 처짐(ASCE, 2005)도 그림에 표시되어 있다.

양쪽 관측레벨에서도 최대의 층간 처짐 변위는 2층에서 발생하고 이는 소성변위가 저층에서 집중이 됨을 나타낸다. 푸쉬오버 곡선에서 항복 이후에 변형률 경화구간에 속하는 3.0%의 옥 상 처짐에서는 6-SB-A 프레임 모델이 상대 모델과 비교하여 적은 최대 층간 처짐을 보여준다 (Fig. 8 (b) 참고). 이러한 현상은 변형률 경화 상태에서 강재 가새프레임 구조물들이 상대적으로 많은 양의 소성 변형을 경험하고 있음을 의미한다. 예상한대로 6-SB-A 프레임 모델이 6-SB-S 프레임 모델과 비교하여 훨씬 더 적은 층간 잔류 처짐을 발생한다. 특히 1.5%의 옥상 처짐과 비교하여 3.0%의 옥상 처짐에서 양쪽 모델에서 더 많은 소성 변형을 경험하고 있으나 초탄성 형상기억합금 가새시스템의 설치로 인하여 새로운 프레임 모델에서는 하중 제하 후에 더 좋은 복원 성능을 보여주고 있다.

전 층에 걸쳐서 발생되는 모든 프레임 모델에 대한 층간 처짐에 대한 자세한 정보는 Table 4에서 요약 정리하였다. 표에서 정리된 해석결과들은 Fig. 8에서 분석하여 얻어진 사항들과 일치하는 결론을 도출한다. 무엇보다도 최대 및 잔류 층간 처짐에 대한 구조물의 성능은 가새시스템의 형태보다는 가새연결봉에 사용된 재료적 특성에 의해 결정된다는 주장을 뒷받침 해주고 있다. 정적 해석결과를 토대로 형상기억합금 가새시스템이 하중 제거 후에 잔류 변형을 감소 시키는데 매우 효율적이라고 결론 지을 수 있다.

5. 비선형 동적해석

5.1 해석과정

비선형 동적해석을 수행하기 위하여 SAC 프로젝트의 일환으로 개발되었던 지진가속도 데이터를 활용하였다 (Somerville 등, 1997). 240번의 비선형 해석에 사용된 총 40여개의 가속도 데이터는 설계 수준의 50년 주기 10% 확률 발생 빈도와 (LA1 to LA20) 극한 수준의 50년 주기 2% 확률 발생빈도의 (LA21 to LA40) 지진위험도 수준으로 분류하였다. 각각의 지진위험도 수준마다 로스앤젤레스 (LA) 지역에서 발생한 20개의 지진가속도 데이터를 포함하였다. 개별적인 지진가속도 데이터의 응답 스펙트럼을 포함하여 각 지진위험도 수준별로 평균적인 지진응답 스펙트럼과 이에 상응하는 설계응답 스펙트럼 곡선을 Fig. 9에서 서로 비교하여 제시하였다. 프레임 구조물이 위치한 LA 지역의 여건을 고려하여 각각의 지진가속도 데이터는 설계 응답 스펙트럼과 비슷한 수준을 유지하기 위하여 스케일을 조정하였다. 보편적으로 초탄성 형상기억합금 가새시스템을 가진 프레임 구조물이 기존의 강재 가새프레임 구조물과 비교하여 상대적으로 긴 시간 주기를 가지고 있어서 전자의 구조물에 더 적은 지진 설계 하중을 적용하여 설계를 실시하였다. 이러한 사실은 설계 응답 스펙트럼에서 확인할 수 있다. 시간에 의존적인 동적 문제를 해결하기 위하여 Newmark 방법을

Table 4. Detailed results for nonlinear pushover analyses

Model ID	V (kN)	Ultimate Inter-Story Drift (%)						Residual Inter-Story Drift (%)					
		Story						Story					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
6-SB-S	7690	2.07	2.52	1.84	1.20	0.92	0.46	1.69	2.08	1.38	0.78	0.44	0.10
6-SB-A	8017	2.04	2.52	1.77	1.13	0.92	0.62	0.23	0.19	0.09	0.04	0.06	0.07
6-VB-S	7569	2.06	2.52	1.83	1.18	0.92	0.49	1.69	2.07	1.36	0.74	0.43	0.11
6-VB-A	7898	2.04	2.52	1.76	1.10	0.92	0.66	0.27	0.25	0.12	0.06	0.08	0.11
6-XB-S	7504	2.31	2.61	1.69	1.10	0.86	0.44	1.96	2.19	1.27	0.72	0.40	0.12
6-XB-A	7921	2.28	2.62	1.60	1.02	0.89	0.59	0.33	0.26	0.08	0.06	0.08	0.09

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

Model ID	V (kN)	Ultimate Inter-Story Drift (%)						Residual Inter-Story Drift (%)					
		Story						Story					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
6-SB-S	8866	4.12	5.12	4.08	2.40	1.53	0.75	3.68	4.60	3.57	1.87	0.98	0.36
6-SB-A	9740	3.47	3.87	3.85	2.73	2.03	2.05	0.65	0.55	0.57	0.27	0.31	1.25
6-VB-S	8658	4.09	5.13	4.07	2.31	1.55	0.85	3.65	4.61	3.53	1.81	0.95	0.45
6-VB-A	9713	3.40	4.00	3.97	2.83	2.00	1.80	0.65	0.55	0.57	0.27	0.31	1.25
6-XB-S	8591	4.69	5.47	3.67	2.01	1.41	0.75	4.30	5.00	3.21	1.57	0.87	0.41
6-XB-A	10017	3.41	3.99	3.88	2.76	2.01	1.95	0.83	0.81	0.67	0.29	0.30	1.18

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

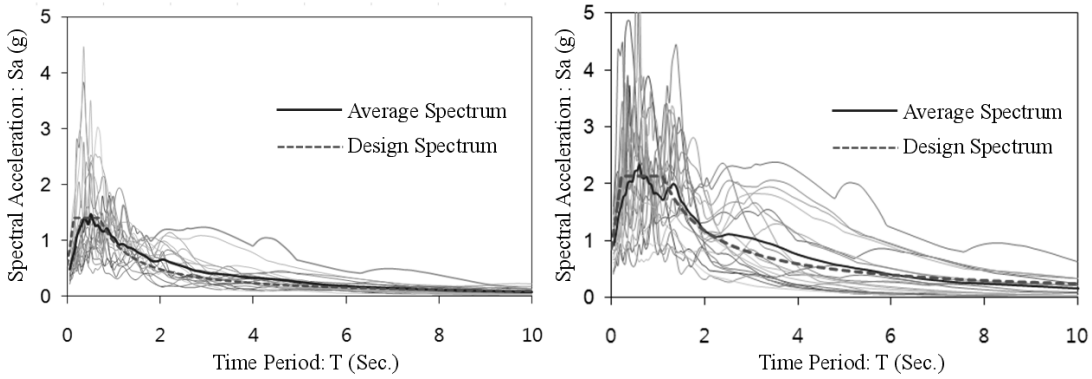


Fig. 9. Ground motion data used for nonlinear dynamic analyses

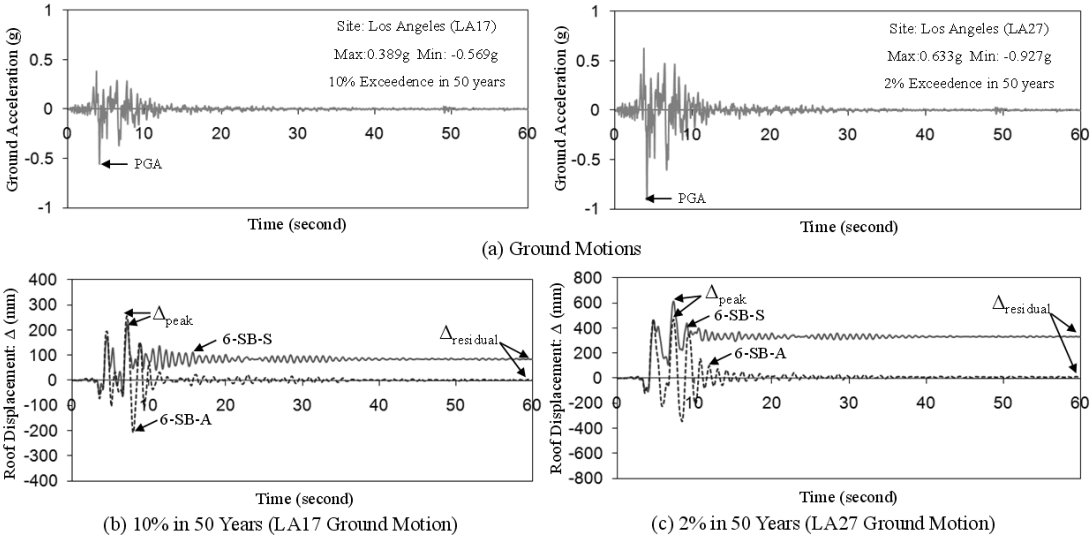


Fig. 10. Results of nonlinear dynamic analyses

사용하여 순간적 평형 해석을 실시하였다. 프로그램에서 지원이 되는 Rayleigh 명령어를 사용하여 유효 댐핑 효과를 비선형 동적해석에 반영하였다. 중력방향으로 작용하는 사하중과 활하중으로 인하여 발생되는 P-Delta 효과를 해석에 반영 하기 위하여 중력하중으로부터 변환된 집중하중을 보 요소들에 재하 하였다. 중력하중 이외에도 지진가속도 때문에 각 층마다 발생하는 전단력을 생성시키기 위하여 모멘트 저항 프레임상에 위치해 있는 절점들마다 덩어리 질량(Lumped mass)을 배당하였다. 덩어리 질량은 설계코드에 의거하여 사하중과 활하중 일부를 포함하여 치환하였다 (ASCE, 2005).

5.2 해석결과

LA 지역에서의 40개의 지진가속도 데이터를 활용하여 비선형 동적 시간이력 해석을 실시하고 기존의 강재 가새 프레임과 새롭게 제안된 형상기억합금 가새프레임의 지진 거동에 대하여 서로 비교하였다. Fig. 10은 2개의 대표적인 지진가속도 데이터를 활용하여 시간에 대한 양쪽 프레임 모델들의 옥상 변위를 보여준다. 50년 주기 10%의 발생빈도에 속하는 LA17 지진가속도 데이터는 0.569g의 최대 지진가속도와 60초의 지속시간을 가지고 있다. 또 다른 LA27 지진가속도 데이터는 50년 주기 2%의 발생빈도에 속하며 상대적으로 큰 0.927g의 최대 지진가속도와 60초의 지속시간을 가지고 있다. 50년 주기 10%의 발생빈도의 지진 위험도에서는 초기 탄성 거동이 유연한 초탄성 형상기억합금 가새시스템을 가진 프레임 모델은 강재 가새시스템을 가진 프레임 모델과 비교하여 일반적으로 더 큰 최대 처짐을 보여준다. 예를 들면 LA17 지진가속도를 받는 6-SB-A와 6-SB-S 프레임 모델의 옥상 층에서 발생하는 최대 변위는 각각 256mm와 225mm이며 처짐 비율로는 1.08%와 0.94%에 상응한다. 하지만 극한 수준의 지진진동으로

평가를 받는 LA27 지진가속도를 적용할 경우 형상기억합금 가새프레임 모델들이 강재 가새프레임 모델들보다 옥상 층에서 더 적은 최대 변위를 보여주고 있다 (Fig. 10 (b) 참고). 대변형이 발생한 이후에 초탄성 형상기억합금 요소에서는 응력 경화 현상이 발생한다. 이러한 재료적 현상은 가새부재의 소성 상태가 상당부분 진행이 된 이후에 측면 전단하중에 저항할 수 있는 추가적인 보강재 역할을 한다. 옥상층에서 최대 변위가 발생하는 시간은 같은 지진 가속도를 경험하고 있는 상태에서 최대가속도가 발생한 2-3초 이후에 양쪽 프레임 모델에서 거의 같은 시각에 발생한다.

형상기억합금의 복원 능력은 잔류변형을 감소시키는 대 커다란 공헌을 한다. 6-SB-S 프레임 모델에 LA27 지진가속도 하중을 가한 이후에 옥상층에서 발생하는 잔류 변위는 330mm로써 6-SB-A 프레임 모델과 비교하여 무려 37배나 큰 수치이다. 그러므로 초탄성 형상기억합금 가새시스템은 지진하중 이후에 프레임 전체 구조물에 발생하는 잔류 변위를 상당량 저감시키고 원형으로의 자동복원이 가능하다고 판단한다. 또한 초탄성 형상기억합금의 우수한 충격 완충 효과는 지진 하중이 발생하는 동안의 변위의 진폭을 빠르게 감소하는데 큰 기여를 한다. Fig. 10과는 별도로 옥상층에서 발생하는 처짐 비율과 기초 부위에 발생하는 지진 전단하중은 Fig. 11에서 보여주고 있다. 소성 변위가 발생한 이후에는 새로운 가새프레임 모델에서 더 큰 지진 전단하중이 발생함을 알 수 있으며 이는 Fig. 10에서 형상기억합금의 응력 경화 때문에 발생하는 거동 특성과 보강 효과를 입증한다.

지진하중 상태에서 가새부재의 손상 정도는 소성힌지의 발생을 연속적으 로 추적함으로써 적절하게 평가할 수 있다. Fig. 12와 13은 옥상층에서 최대 처짐이 발생시 서로 비교되는 프레임 모델에서의 소성힌지의 발생 여부와 정도를 보여주고 있다. 앞에서 제시된 동일한 지진데이터와 비선형 동적해석 결과를 활용하였다. 각 프레임 모델에서 최대지진전단하중과 변위는 동시에 발생한다. 가새부재에서 사용된 Gr.50 강재와 초탄성 형상기억합금의 재료적인 강도 특성을 고려하여 5등급의 응력 구간으로 구분하였다. 각 힌지의 소성화된 정도는 파이버 단면에서 측정된 응력 값으로 결정하여 각 응력 구간에 맞게 고형의 원형으로 표시하였다.

가새부재에서 강재중공 내에 콘크리트를 충전한 합성구간은

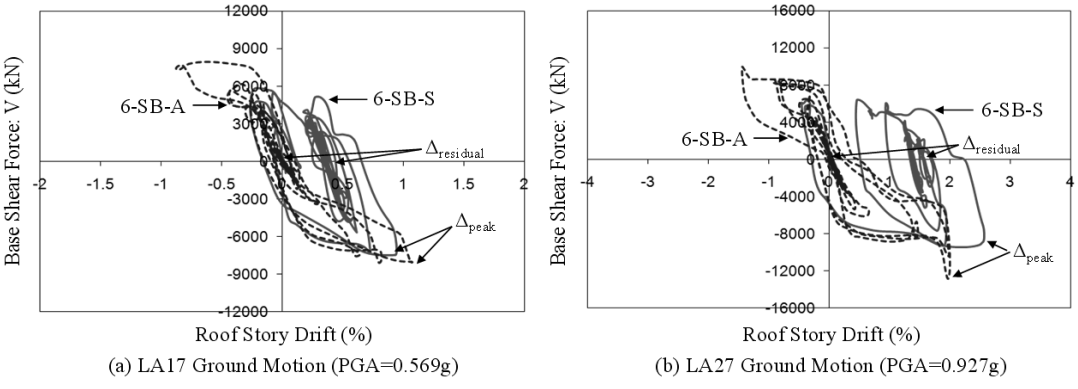


Fig. 11. Base shear force vs. roof story drift curves for selected frame models

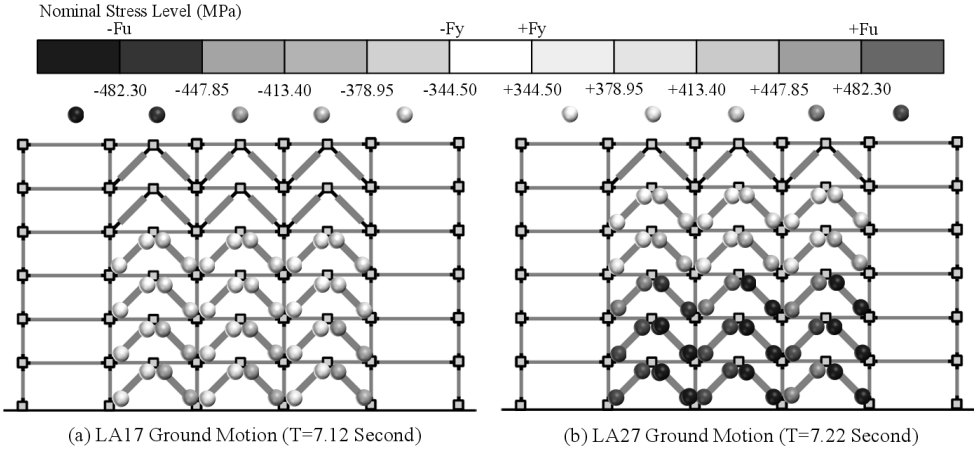


Fig. 12. Observation for plastic hinge sequences (6-SB-S frame model)

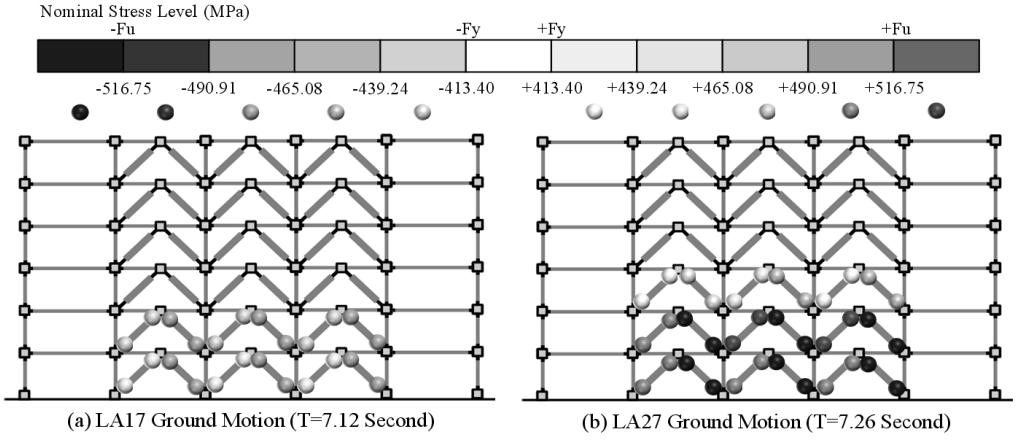


Fig. 13. Observation for plastic hinge sequences (6-SB-A frame model)

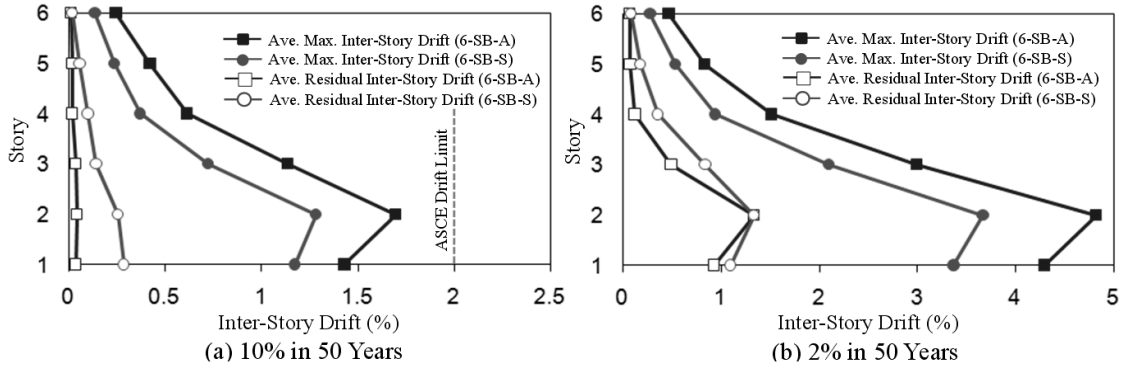


Fig. 14. Average maximum and residual inter-story drifts from nonlinear dynamic analyses

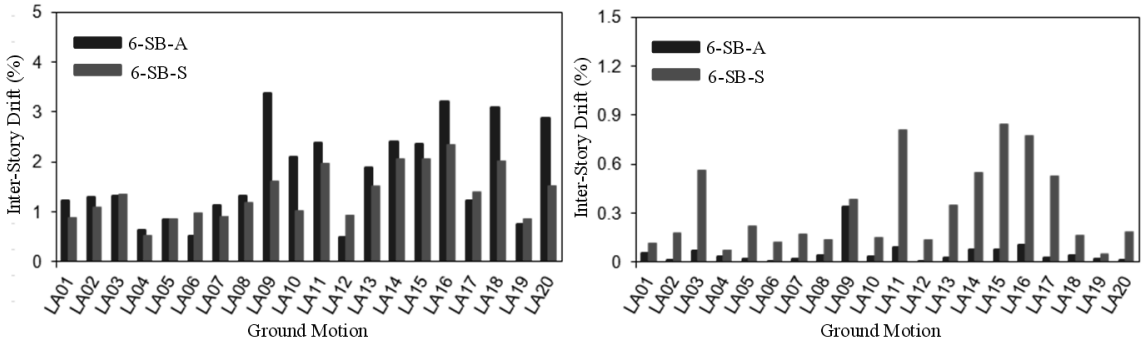
좌굴 발생 없이 거의 탄성 상태를 유지한다. 대신에 상대적으로 적은 단면을 가진 합성구간에서 연장되어 설치된 연결봉에서 소성변형이 집중된다. 한 경간 안에서 가새부재가 서로 마주보며 대칭적으로 설치되어 있기 때문에 인장과 압축으로 구성된 소성힌지가 한쌍을 이루어 발생을 한다. 그림에서 보는 바와 같이 LA27 지진데이터는 상대적으로 더 큰 가속도를 가지고 있어서 LA17 지진데이터와 비교할 때 더 많은 소성힌지와 심각한 파괴를 초래한다. 심각한 소성파괴힌지는 주로 층간 변위가 집중이 되는 저층에서 분포하였다.

LA27 지진 하중을 받는 6-SB-S 프레임 모델의 경우 소성힌지가 5층에 설치된 가세까지 널리 분포되었다. 항복에 의한 가새성능의 저하와 강재 연결봉의 영구적인 변형이 구조물 전 층에 걸쳐서 상당한 양의 층간 잔류 변위가 발생함을 알 수 있다. 반면에 6-SB-A 프레임 모델은 초탄성 형상기억 합금이 강재 재료와 비교하여 항복 이후의 강도가 우수하기 때문에 소성힌지가 단지 3층 높이까지만 분포하였다. 형상기억합금 연결봉에 소성힌지가 발생하더라도 지진하중 이후에 원형으로 복원되는 성질을 가지고 있다. 따라서 초탄성 형상기억합금 가새시스템의 복원 성능은 좌굴방지 가새프레임 구조물에서 상당량의 층간 잔류 변위를 감소시키는데 중요한 역할을 한다고 결론 지을 수 있다.

5.3 동적 성능평가

형상기억합금의 활용가능 여부에 의 하여 개별적인 프레임 모델들의 잠재적인 자동치유 능력을 확인하고자 최대 및 잔류 층간 변위 등의 해석 결과를 분석하였다. 각각의 지진위험도 레벨의 지진 하중 별로 최대 및 잔류 층간 변위들의 평균값이 Fig. 14에서 정리 되었다. 지진하중 발생시 전 층에 걸쳐서 2% 미만의 층간변위를 허용하는데 이러한 제한적인 조건을 그림에서 실선으로 표시하였다. 따라서 설계 수준의 위험도를 가진 지진가속도를 받는 4개의 프레임 모델들은 이러한 제한 조건을 만족함을 알 수 있다.

최고의 층간 변위는 일반적으로 저층에서 발생하고 이는 주로 저층에 위치한 기둥 부재들에서 소성 변형이 집중한다는 사실을 뒷받침 해주고 있다. 층간 잔류 변위를 분석해 본다면 50년주기 10% 발생빈도 수준의 지진가속도와 비교하여 2% 발생빈도 수준의



(a) Peak Inter-Story Drift (10% in 50 Years)

(b) Max. Residual Inter-Story Drift (10% in 50 Years)

Fig. 15. Peak inter-story drifts and maximum residual inter-story drifts according to individual ground motions

Table 5. Average and standard deviation (between brackets) of maximum inter-story drifts and residual inter-story drifts under two sets of scaled ground motions

Model ID	Maximum Inter-Story Drift (%)						Residual Inter-Story Drift (%)					
	Story						Story					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
6-SB-S	1.17(0.48)	**1.28**(0.49)	0.73(0.31)	0.37(0.18)	0.24(0.10)	0.14(0.05)	**0.29**(0.26)	0.26(0.22)	0.14(0.11)	0.10(0.11)	0.06(0.07)	0.02(0.03)
6-SB-A	1.43(0.84)	**1.70**(0.91)	1.14(0.63)	0.61(0.23)	0.42(0.12)	0.25(0.05)	**0.04**(0.05)	0.04(0.07)	0.04(0.05)	0.02(0.01)	0.02(0.01)	0.01(0.01)
6-VB-S	1.17(0.47)	**1.26**(0.51)	0.73(0.29)	0.35(0.12)	0.25(0.08)	0.16(0.05)	**0.30**(0.27)	0.28(0.24)	0.14(10)	0.10(0.10)	0.06(0.06)	0.02(0.03)
6-VB-A	1.48(0.85)	**1.70**(0.94)	1.06(0.48)	0.60(0.20)	0.44(0.13)	0.27(0.07)	0.03(0.03)	**0.04**(0.04)	0.04(0.10)	0.02(0.02)	0.02(0.01)	0.0(0.01)
6-XB-S	1.39(0.76)	**1.41**(0.73)	0.74(0.33)	0.35(0.18)	0.25(0.13)	0.15(0.08)	**0.28**(0.32)	0.21(0.26)	0.10(0.09)	0.08(0.10)	0.05(0.06)	0.02(0.03)
6-XB-A	1.61(0.97)	**1.73**(0.96)	0.97(0.43)	0.54(0.18)	0.39(0.11)	0.22(0.06)	0.03(0.04)	**0.04**(0.06)	0.03(0.03)	0.02(0.01)	0.02(0.01)	0.01(0.01)

(a) 10% in 50 Years

Model ID	Maximum Inter-Story Drift (%)						Residual Inter-Story Drift (%)					
	Story						Story					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
6-SB-S	3.38(1.73)	**3.67**(2.21)	2.10(1.68)	0.95(0.62)	0.54(0.28)	0.28(0.14)	1.10(1.17)	**1.34**(1.50)	0.85(1.08)	0.36(0.43)	0.18(0.18)	0.09(0.08)
6-SB-A	4.30(1.85)	**4.82**(2.51)	3.00(1.50)	1.51(1.04)	0.84(0.44)	0.47(0.20)	0.93(1.40)	**1.34**(1.91)	0.50(0.77)	0.13(0.18)	0.08(0.08)	0.07(0.07)
6-VB-S	3.26(1.73)	**3.80**(2.12)	2.19(1.59)	1.00(0.56)	0.55(0.27)	0.34(0.15)	1.16(1.14)	**1.42**(1.49)	0.89(1.07)	0.37(0.43)	0.19(0.20)	0.11(0.11)
6-VB-A	4.09(2.03)	**4.68**(2.54)	2.86(1.53)	1.45(0.96)	0.87(0.48)	0.53(0.24)	0.78(1.37)	**1.17**(1.88)	0.44(0.67)	0.16(0.22)	0.12(0.12)	0.10(0.11)
6-XB-S	3.64(1.97)	**3.92**(2.26)	1.87(1.21)	0.80(0.43)	0.45(0.22)	0.27(0.14)	1.41(1.40)	**1.63**(1.70)	0.69(0.86)	0.24(0.26)	0.14(0.14)	0.10(0.09)
6-XB-A	4.85(2.64)	**5.44**(3.29)	2.72(1.27)	1.30(0.71)	0.81(0.40)	0.49(0.23)	1.20(1.72)	**1.58**(2.33)	0.34(0.35)	0.11(0.13)	0.12(0.12)	0.10(0.10)

(b) 2% in 50 Years

지진가속도가 발생 시 프레임 모델에서 더 심각한 피해가 발생함을 알 수 있었다. 최대 층간 변위가 증가하면 할 수록 지진 이후에 발생하는 층간 잔류변위도 같이 증가한다는 사실을 보여주고 있다. 50년주기 10%의 발생빈도 수준의 지진가속도를 받는 6-SB-A 프레임 모델의 경우 층간 잔류변위가 거의 제로에 가까운 사실에 비추어 볼 때 거의 원형으로 복원 가능하였다.

설계 위험도 수준에서 각각의 지진 가속도 데이터에 따른 지진성능과 구조물 손상 정도를 Fig. 15에서 제시된 막대 그래프의 분포를 통하여 파악할 수 있다. 역V형 가새프레임 모델들의 개별적인 해석을 통하여 얻어진 최고의 층간 변위와 최대 잔류 층간 변위를 조사하였다. 지진하중을 받는 동안에 주로 2층에서 최고의 층간변위가 발생하며 전반적으로 6-SB-A 프레임 모델에서 더 큰 수치의 분포를 보여주고 있다. 하지만 초탄성 형상기억 합금의 고유의 재료적인 특성으로 인하여 각 지진 하중 별로 최대 잔류 층간 변위가 상당량 감소하였다. 이는 새로운 가새시스템이 프레임 전체 구조물의 복원력 향상에 큰 기여를 한다고 판단된다. 그림에서

제시된 막대 그래프의 분석을 통하여 지진 하중의 유형과 크기별로 초탄성 형상기억합금 가새시스템의 전반적인 기여도를 파악할 수 있고 이를 뒷받침 할 구체적인 수치정보는 다음 표에서 잘 정리 되었다.

Table 5는 모든 프레임 모델에 대하여 지진위험도 수준별로 최대 층간 변위와 잔류 층간 변위의 평균값과 표준편차를 보여준다. 50년주기 10% 발생빈도의 지진하중과 비교하여 2% 발생빈도의 지진하중의 경우 더 큰 하중강도를 가지고 있기 때문에 층간 변위의 평균값과 표준편차를 더하여 정의된 불확실성의 퍼짐 분포가 상대적으로 증가하게 된다. 표에서 정리된 모든 결과값을 분석해 볼 때 가새부재의 설계 형태보다는 초탄성 형상기억합금의 사용 유무에 따라서 평균적인 층간 잔류 처짐량을 결정함을 알 수 있다. 최대 층간 처짐 변위의 경우 앞에서 제시된 사항들과 일치하는 결과를 보여주고 있다. 또한 표에서 제시된 결과값을 살펴보고 초탄성 형상기억합금 가새시스템이 프레임 전체 구조물에서 발생하는 잔류 변위량을 상당량 감소 시킨다는 사실을 확인할 수 있다. 마지막으로 극한 수준의 지진 하중 발생시보다는 (50년주기 2% 발생빈도) 설계 단계에서 적용하는 중간 수준의 지진 하중 발생시에 (50년주기 10% 발생빈도) 잔류 변위를 더 효율적으로 감소한다는 사실을 Table 5에서 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 비선형 해석을 통하여 강재 혹은 초탄성 형상기억합금 좌굴방지 가새시스템을 가진 중간 높이의 (6층) 프레임 구조물에 대한 지진 성능을 분석하는 데 초점을 두었다. 초탄성 형상기억합금 가새시스템 설치 유무에 따른 강도, 강성, 처짐, 복원성 측면에서 지진 거동을 분석하고 기존의 설계 방식과 비교하여 새로운 시스템에 구조적인 장점을 확인할 수 있었다. 해석 결과를 바탕으로 다음과 같은 추가의 결론을 도출하였다.

(1) 비선형 푸쉬오버 해석 결과는 본 연구에서 제시된 프레임 모델들이 현재 사용되는 설계 코드에 명시된 처짐의 제한기준을 만족하여 설계 되었음을 입증하여 주었다. 좌굴방지 가새 프레임 모델들은 초탄성 형상기억합금 가새시스템을 도입함으로써 유연한 초기 강성, 항복 이후의 강도 성능 향상, 잔류 변형의 감소 등과 같은 물리적인 거동 측면에서 괄목할 만한 향상을 보여주었다.

(2) 반면에 가새부재의 끝단의 연장되어 설치된 연결봉은 부재의 대부분을 차지하는 합성 단면부와 비교하여 상대적으로 적은 단면과 강성을 가지고 있기 때문에 강한 외부 하중이 발생시 부재 내에서 소성 변형이 집중된다. 기존에 주로 사용된 강재를 대신하여 초탄성 형상기억합금을 항복이 주로 발생하는 연결봉에 사용한다면 재료의 고유의 특성으로 인하여 진동감소, 원형복원과 강도증진 효과를 기대할 수 있다. 본 연구에서 수행한 비선형 해석을 토대로 얻어진 층간 처짐과 단면 응력 등의 결과값을 분석하여 이러한 사실을 입증하였다.

(3) 초탄성 형상기억합금은 상온에서 깃발 모양의 이력 형태를 가지고 물리적 거동을 한다. 그러므로 가새부재 내에서 사용된 초탄성 형상기억합금은 구조물 전체의 우수한 복원 성능과 에너지 소산 능력을 제공한다. 따라서 초탄성 형상기억합금 가새시스템은 심각한 지진 발생 후에도 상당량의 층간 잔류 변위를 감소하는 대 큰 역할을 하였다. 반면에 기존의 가새부재에서는 강재 요소들의 항복은 비선형 해석에서 입증된 바와 같이 구조물 전체에 상당량에 잔류 변형을 발생 시켰다.

감사의 글

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

References

American Institute of Steel Construction (AISC) (2001). *Manual of steel construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD), 3rd edition,* Chicago (IL) USA.

American Society of Civil Engineers (ASCE) (2005). *Minimum design loads for buildings and other structures,* ASCE/SEI No. 7-05, Reston VA USA.

Auricchio, F., 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.

Black. C., Makris. N., Aiken. I. (2002). *Component testing, stability analysis and characterization of buckling-restrained braces*, Report No. PEER-2002/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California Berkeley CA USA.

DesRoches. R., Delemont. M. (2002). "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys." *Eng. Struct.*, Vol. 24, No. 3, pp. 325-332.

DesRoches. R., Delemont. M. (2002). "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys." *Eng. Struct.*, Vol. 24, No. 3, pp. 325-332.

Dolce. M., Cardone. D. (2001). "Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications: 1. Martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion." *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 43, No. 11, pp. 2631-2656.

Hu, J. W. (2008). *Seismic performance evaluations and analyses for*

composite moment frames with smart SMA PR-CFT connections, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.

Hu, J. W., Choi, E., 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.

Hu, J. W., Kang, Y. S., Choi, D. H., Park, T. (2010). "Seismic design, performance, and behavior of composite-moment frames with steel beam-to-concrete filled tube column connections." *KSSC Int. J. Steel Struct.*, Vol. 10, No. 2, pp. 177-91.

Hu, J. W., Leon, R. T. (2011). "Analyses and evaluations for composite-moment frames with SMA PR-CFT connections." *Nonlin. Dyna.*, Vol. 65, No. 4, DOI 10.1007/s11071-010-9903-3.

Inoue, K., Sawaisumi, S., Higashibata, Y. (2001). "Stiffening requirements for unbonded braces encased in concrete panels." *ASCE J. Struct. Eng.*, Vol. 127, No. 6, pp. 712-719.

Kim, J., Park, J., Kim, S. (2009). "Seismic behavior factors of buckling-restrained braced frames." *Struct. Eng. Mech.*, Vol. 33, No. 3, pp. 261-284.

Mazzoni, S., Mckenna, F., Fenves, G. L. (2006). OpenSEES command language manual v. 1.7.3. Department of Civil Environmental Engineering University of California, Berkeley, CA, USA.

Park, T., Hwang, W. S., Leon, R. T., Hu, J. W. (2011). "Damage evaluation of composite-special moment frames with concrete-filled tube columns under strong seismic loads." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE* (DOI 10.1007/s12205-011-1225-6).

Sabelli, R. (2004). "Recommended provisions for buckling- restrained braced frames." *AISC Eng. J.*, Vol. 41, No. 4, pp. 155-175.

Sabelli, R., Mahin, S. A., Chang, C. (2003). "Seismic demands on steel braced-frame buildings with buckling-restrained braces." *Eng. Struct.,* Vol. 25, No. 5, pp. 655-666.

Somerville, P. G., Smith, N., Punyamurthula, S., Sun, J. (1997). *Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project*, SAC background document, No. SAC /BD 97/04.

Song, G., Ma, N., Li, H. (2006). "Applications of shape memory alloys in civil structures." *Eng. Struct.*, Vol. 28, No. 9, pp. 1266-1274.

Wada, A., Connor, J., Kawai, H., Iwata, M. Watanabe, A. (1992) "Damage tolerant structures." *Proc.5th U.S. −Japan Workshop on the Improvement of Structural Design and Construction Practices Applied Technology Council*. (ATC-15-4) 27-39, SanDiego, CA, USA.

Watanabe, A., Hitomi, Y., Yaeki, E., Wada, A., Fujimoto, M. (1988). "Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube." *Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 5, pp. 719-724, Tokyo-Kyoto, Japan.