

# 초탄성 형상기억합금 능동제어 가새시스템을 이용한 해석모델링

## Superelastic Shape Memory Alloy Active Control System Using the Brace Modeling



허종완(Jong-Wan Hu)이사 | 인천대학교 도시환경공학부 교수  
| 인천대학교 인천방재연구소 센터장 | |jongp24@incheon.ac.kr  
손홍민(Hong-Min Son) | 인천대학교 도시환경공학과 박사과정 | bluekaris@nate.com

### 1. 서론

기존에 사용된 비가새 모멘트 저항프레임과 비교하여 중심가새프레임 (Concentrically Braced Frame, 이하 CBF)은 추가로 설치되는 대각선 부재 때문에 횡적인 변위에 저항하는 강성증가로 인한 처짐을 일정수준 이하로 감소할 수 있는 매우 효율적인 구조 시스템이다.(1-6) 하지만 비탄성 거동을 수반하는 지진하중이 작용할 경우 좌굴 (Buckling)로 인한 저항 내력의 감소 및 에너지 소산능력의 저하를 초래 할 수 있다.

이러한 문제점을 보완하기 위하여 최근에는 주부재를 콘크리트 충전 강관으로 제작한 비좌굴 가새프레임 (Buckling Restraint Braced Frame, 이하 BRBF) 구조물이 건설현장에 도입이 되고 있으나 고비용, 전매권, 현장타설의 어려움 등으로 인해 상용화에 어려움이 있다. (7-9) 주로 가새 부재는 전체 프레임구조물에서 허용할 만한 손상이 집중이 되는 일종에 추가적인 퓨즈 역할을 하도록 설계되어 있다. 따라서 심각한 지진이 발생하더라도 주된 뼈대부재를 최대한 피해로부터 보호를하고 손상된 가새부재

만을 교체하여 구조물에 부분적인 원형 복원을 가능하게 한다(Watanabe 등, 1988; Park 등, 2011). 하지만 가새부재에 전형적으로 발생하는 영구변형은 전체 프레임구조물에 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 하는문제점을 가지고 있다(Inoue 등, 2001). 결국 손상 부위 교체의 편리함 및 저비용 장점 때문에 여전히 CBF가 건물의 외벽에 설치되어 횡력에 저항하기 위한 모멘트 저항 프레임 구조물로 주로 활용되고 있다. 그리고 압축 가새에 좌굴을 방지하고 소성변형이 집중되는 연결부에 자동 복원이 가능한 제어시스템을 설치할 경우 구조물 전체에 발생하는 잔류변형 감소 및 교체비용의 절감효과의 장점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 상온에서 하중제하만으로 원상복원이 가능한 초탄성 형상기억합금 (Shape Memory Alloy, 이하 SMA)을 가새의 일부에 사용하여 횡력에 대한 구조물의 처짐을 능동적

으로 제어 가능한 시스템을 비교 평가 가능한 해석 모델을 제안한다.

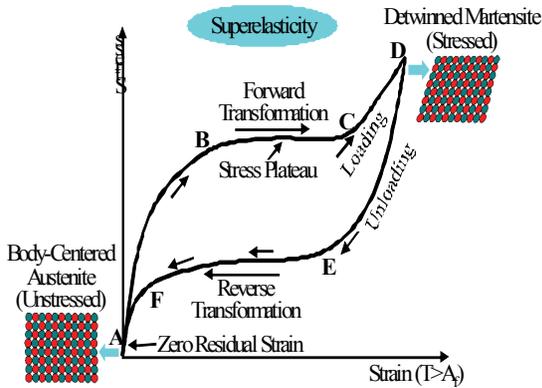


그림 1. 초탄성 형상기억합금의 응력-변형을 거동 및 상변화

그림1과 같이 SMA는 오스텐나이트 (Austenite) 상변위 이상의 온도에서 상당량의 소성변형을 가하더라도 원형으로 돌아가는 초탄성적인 거동을 보여 준다. 또한 깃발형태의 이력곡선은 재료거동에 있어서 에너지 흡수능력을 향상시킨다.(10) 이외에 내구성, 완충성, 가공성, 피로성 측면에서 기존에 주로 사용된 강재 (Steel)와 비교할 때 우월한 재료적 성질을 가지고 있다. 현재까지 개발된 초탄성 형상기억합금은 8% 이내의 변형을 가한 후에 별도의 열처리가 없이도 단지 응력제거만으로 잔류변형을 제거할 수 있다.(10),(11) 이러한 재료적인 특이성 때문에 지진이 빈번하게 발생하는 미국에서는 소성변형이 발생하기 쉬운 구조물에 초탄성 형상기억합금을 설치하여 내진적인 보강뿐만 아니라 능동제어 및 자동복원 효과의 장점을 잘 활용하고 있다. 근래에는 미국 조지아 공대를 중심으로 보와 기둥의 접합부위 중 변형이 집중되는 볼트나 인장봉과 같은 구속재 일부를 초탄성 형상기억합금으로 제작하여 구조실험 및 성능검증을 하는 연구가 진행되나 있다.(4),(12)

이러한 연구배경과 동기를 반영하여 본 연구에서

는 최근 스마트한 재료로써 부각되고 있는 형상기억합금을 외력에 의해 발생하는 변위의 능동적인 제어를 목적으로 구조물 일부분에 설치 적용 하고자 한다.

## 2. 구조물 설계

본 연구에서 다루고 있는 예제 구조물은 미국 ASCE 7-05 시방서(13) 기준에 의하여 설계를 수행하였으며 세부적인 부재의 설계는 AISC-LRFD 매뉴얼을(14) 참고하여 결정하였다. 일반적인 사무실 용도로써 1.0의 중요도 (Important Factor)를 가지고 강한 지진에 견딜 있는 D등급의 지진설계범주 (Seismic Design Category, 이하 SDC)를 적용하여 L.A. 지역의 단단한 토질층 (ASCE 7-05에 의거 D 등급)에 건설하였다. 또한 설계강도와 상응하는 50년 주기 발생빈도 10%의 지진강도 (10% in 50 years)를 가새프레임 구조물 설계에 적용하여 0.2초와 1.0초의 건물 고유주기에서의 설계응답 스펙트럼을 각각 2.35g와 1.41g를 사용하였다. 수정응답계수 (Response Modification Coefficient, 이하 R)는 설계시방서에 명시한 대로 특수한 가새프레임 구조물인 경우 6의 값을 적용하여 설계 지진하중에 상응하는 측면등가하중으로 산정하였다.(13),(15) 구조물의 설계 검증을 위하여 측면등가하중을 이용한 2차원 Pushover 테스트를 실시하여 층간 처짐과 기둥의 P-Delta 값을 산출하고 이러한 수치해석 결과값들이 허용범위 내에 있는지를 확인하였다.

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. 그림 2는 5개의 각각 9.15m 경간을 가진 6층의 프레임 구조물의 평면도를 보여준다. 가새 체결된 경간은 평면도 상에서 점선으로 표시하였으며 각각의 방향에 대칭으로 총 12개의 가새 경

간을 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(그림 2).

지진하중이 작용하는 동안 발생하는 측면하중에 대응하여 저항력을 향상시키고자 건물 외벽 중심을 기준으로 특수 중심가새를 동서남북 방향으로 대칭적으로 설치하였다. 특수 중심가새가 체결된 경간은 그림 2에서 점선으로 표시하였으며 각 방향으로 6개씩 체결하였다. 주로 건물 외벽은 횡력에 대한 저항력을 높이고자 용접된 강접 모멘트 접합부로 보와 기둥의 연결부를 가진 모멘트 저항 프레임 구조물로 설계를 하였으며 (평면도에서 굵은 선으로 표시된 부분을 참고), 이와는 대조적으로 건물내부에서 주로 자중에 저항하는 중력 저항 프레임은 동서방향으로 단순 전단 핀 (Pin) 접합부로 설계를 하였다 (평면도에서 가는 선으로 표시된 부분 참고).

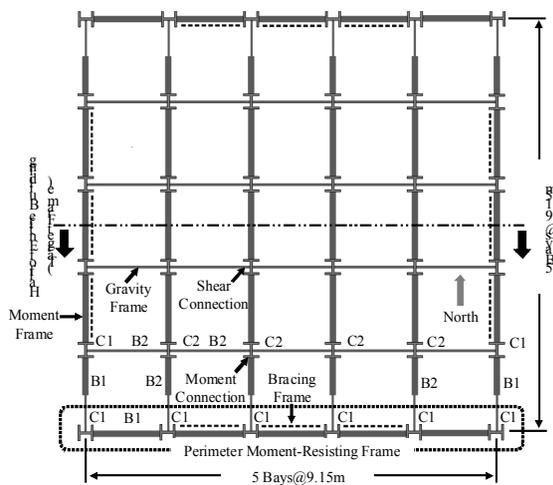


그림 2. 예제 빌딩 구조물의 평면도

기준에 주로 사용되었던 특수한 CBF 형식 중에서, 가새 부재 설계에 대하여 강재를 사용한 고전적인 방식과 SMA를 혼합적으로 활용한 새로운 방식을 서로 비교하였고, V형, 역 V형, 2층 X형 가새시스템을 채택하였다. 더 자세한 가새프레임 구조물의 종류와 구체적인 부재 설계는 참고문헌에서 확인할 수 있다.(7-9),(16) 가새 부재와 보/기둥과 같은 메인 프레임 부재들 사이를 연결하는 거셋 (Gusset) 플레이트 연결부의 상세를 포함하여 3층 가새 경간에 대한 정면도는 그림 3에 나타나 있다. 그림 4에서는 6층 가새 경간에 대한 정면도를 나타낸다. 새로운 가새프레임 구조물인 경우 외력에 대한 능동제어 및 자동복원을 극대화하기 위하여 상대적으로 변위가 집중되는 양쪽 가새 끝단의 일부분은 초탄성 형상기억합금을 설치한다.

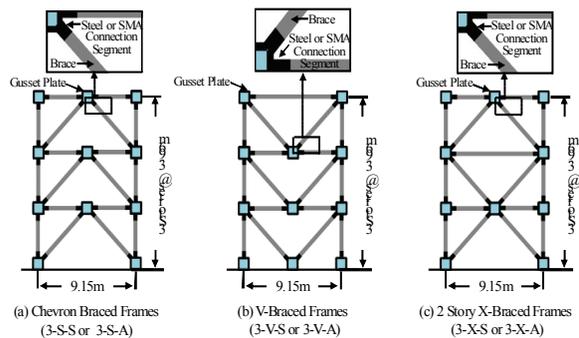


그림 3. 3층 빌딩 구조물 중 가새 경간에 대한 정면도 및 접합부 구조상세

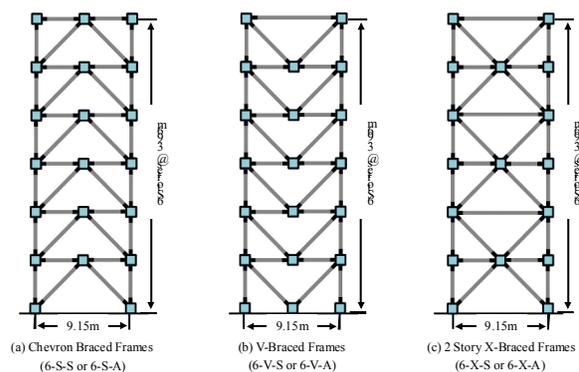


그림 4. 6층 빌딩 구조물 중 가새 경간에 대한 정면도

그림 3-4에서는 각 모델 조건에 따른 모델명이 제시되어 있는데, 모델명에 처음 제시된 숫자 (3 또는 6)는 3층 혹은 6층 프레임 빌딩을 의미하며 그 뒤에 수반되는 글자는 사용된 가새 형식을 나타낸다 (S: 역 V형 가새, V: V형 가새, X: 2층 X형 가새). 마지막으로, 고전전인 가새시스템을 가진 CBF 모델들은 모델명 끝에 S라는 글자로 명명되며 초탄성 형상 기억합금 가새시스템을 가진 CBF 모델들은 A라고 명명된다. 예를 들면, 3층 높이에 역 V형 형식의 초탄성 형상기억합금 가새시스템을 가진 모델은 3-S-A라고 명명한다. 이러한 모든 프레임 모델들은 3.96m의 균일한 높이를 가지고 설계를 하였고 3층과 6층의 프레임 모델 설계에 대한 자세한 정보는 표 2와 3에서 각각 제시되었다. 가새 부재는 ASTM A500-Gr.B 강재의 표준각형 증공튜브 단면으로 설계하였으며 경제성을 고려하여 프레임 구조물의 저층부터 중간층에 빈번하게 발생하는 횡하중에 대응하고자 큰 증공튜브 단면을 설치하였다.

### 3. 해석모델

본 연구에서 제시된 모든 예제 빌딩구조물은 중심축으로부터 대칭적인 구조를 이루고 있으며 또한 동일한 분포의 중량과 강성을 가지고 설계되었다. 중량과 강성의 불균형적인 분포로 인해 발생하는 내부의 비틀림은 무시될 수 있으며 각 구조물들은 정형적인 형태의 2차원 프레임 모델로 간주하여 해석이 가능하다. 그림 5와 같이, 해석에 사용되는 2차원 프레임 모델은 외벽의 모멘트 저항 프레임과 내부의 중력 저항 프레임 구조물로 이루어져 있다. 건물 내부의 수직기둥은 주로 사하중과 일부의 활하중을 포함하여 구조물의 전체 자중을 지지해주는 역할을 하기 때문에 중력하중과 조합하여 부재의 대변형 발생을 고려한 추가하중과의 P-Delta 효과를 고려하였다.

보, 기둥과 같은 메인 프레임 부재들의 비선형 거

동을 완벽하게 재현을 하기 위해서 2차원 Fiber 단면을 가진 비선형적인 보-기둥 요소들 (Nonlinear Beam-Column Elements)로 모형화하여 해석을 수행하였다. 대변형 혹은 P-Delta 효과와 같은 기하학적인 비선형을 해석에 반영하기 위하여 각 요소들에서 비선형 좌표변환을 사용하였다. 보와 기둥이 만나는 접합부는 변위가 거의 발생하지 않는 강접 형태로 간주하고 연결부인 패널존 (Panel Zone)의 크기를 해석에 반영하기 위하여 보요소의 단부 강역을 Rigid Offset 방식을 적용하여 모형화 하였다 (그림 5 참고). 또한 거сет 플레이트 연결부의 강성 효과를 재현하고자 같은 방식으로 모형화를 진행하였다. 건물의 외부 프레임과 내부프레임 구조물을 연결하는 슬래브의 다이아프램 (Diaphragm) 거동을 재현하고자 강체링크 (Rigid Link)를 사용하여 모형화하였고 각층의 내부 프레임은 외벽 움직임에 종속되어 강체 거동을 하도록 모형화하였다.

기둥의 기초부는 지반에 완벽하게 고정되어 모형화 하였다. 강재의 변형률 경화 (Strain Hardening) 비율은 1.5%로 적용하였다. 시간에 의존하는 동적인 문제를 해결하기 위하여 Newmark 방법에 기초를 둔 동적평형 (Transient Equilibrium) 해석을 수행하였다. OpenSEES 프로그램에서 제공하는 Rayleigh 커맨드 (Command)를 사용하여 강재 구조물 설계에서 주로 적용되는 5% 유효 감쇠비 (Effective Damping Ratio)를 해석 프레임 모델에 적용하였다.(8-9) 지진가속도로부터 구조물에 층간 전단력을 생성시키기 위하여 구조물의 사하중과 활하중, 일부로부터 치환된 럼프드 (Lumped)질량은 외부에 모멘트 저항 프레임의 각 절점 (Node)에 등가적으로 배분하였다 (그림 5 참고). 시간에 따른 절점의 변위 및 각 층간의 전단력과 같은 응답 데이터는 프로그램 상에서 기록 커맨드를 사용하여 측정하였다.

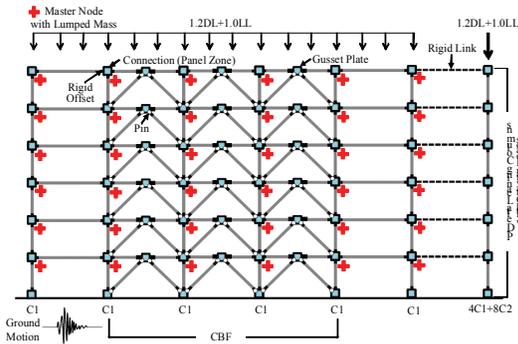


그림 5. 2차원적인 프레임 수치해석 모델

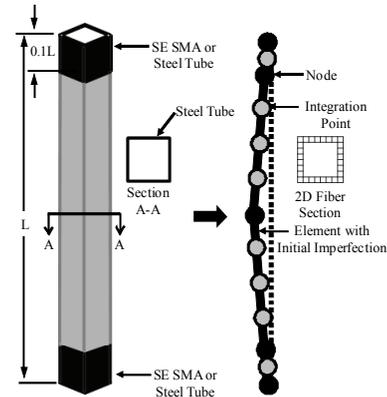


그림 6. 가새 부재의 구성 및 수치해석 모델링

특수 중심가새 부재들은 반응하는 자유도 (Degree of Freedom, 이하 DOF)로써 축력만을 고려한다고 가정하기 때문에 양단의 끝이 힌지 (Hinge)처리된 비선형 보-기둥 요소 (Nonlinear Beam-column Element)들로 모형화 되었다 (그림 5-6 참고). 가새 부재에 사용된 표준 중공튜브 단면은 비선형 재료 거동특성을 지닌 2차원 Fiber 단면으로 모형화되어 각 요소에 배치되어 있는 있는 절점과 수치해석 Integration 지점에 포함시켰다. 변형을 경화를 지닌 전형적인 강재의 비선형 거동은 프로그램에서 제공하는 일축 재료모델 커맨드에 의하여 재현된다. 따라서 각 프레임 부재들을 재현하기 위해서 사용된 요소들은 절점과 Integration 지점에서 단면 특성과 재료적 비선형성을 고려하였다. 일반적으로 압축 상태에서 발생하는 좌굴 현상을 구현하고자 요소의 중앙 절점을 중심에서 벗어나게 위치시키는 Offset 방법을 적용하여 부재 길이에 1/1000의 비율로 초기 솟음 (Camber)을 주어 모형화하였다. 따라서, 가새 부재는 초기의 변위를 포함하여 양단에 설치된 SMA 연결부를 모형화하기 위해서는 4개의 요소를 사용하여 구분하는 것이 필요하다 (그림 6 참고).

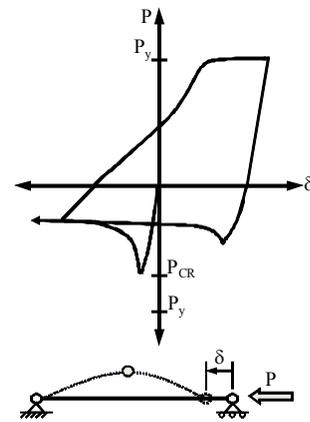


그림 7. 가새 부재의 거동에 대한 하중-변위 이력곡선

그림 7에서는 양단이 힌지인 특수 중심가새의 하중-변위 이력거동을 보여주고 있다. 그림에서와 같이, 전체 좌굴이 일어나기 전까지 ( $P_{cr}$ ) 압축하중을 받는 가새는 탄성적으로 거동을 한다. 압축영역 내에서 최대 하중에 도달할 경우 가새 중간에서 전체 좌굴이 발생한다. 이외에도 좌굴 이후에 급격한 강도감소, 하중제하 (Unloading), 인장하중에서의 탄성 거동 및 인장에 의한 일축 항복과 같은 특이구간 영역이 이력거동 곡선에서 발견된다. 하중제하 및 재장전 (Reloading) 구간에서의 기울기 (Slope)는 초기의 탄성 영역내의 기울기보다 완만한데, 이러한 현상은 가새의 휘어짐 (Deflection)이 초기의 휨 변위

보다 크기 때문에 발생한다. 가새의 인장항복 이후에는 양의 방향으로 완만한 기울기를 보이며 거동하는데 이는 사용된 강재의 변형률 경화로 인한 추가의 하중이 이력거동 곡선에서 보여지기 때문이다.

그림 8은 수치해석 방법으로 재현된 가새 연결부에 설치되는 초탄성 형상기억합금과 각형 중공강관에 사용되는 ASTM A500-Gr.B 강재의 재료적인 응력-변형률 거동에 대한 곡선을 나타낸다. 각 단면을 재현하기 위하여 요소 내에서 사용된 Fiber 섹션이 이러한 비선형적인 재료특성을 포함하고 있다. OpenSEES 프로그램상에서 제공하는 일축 강재(Steel) 재료모델 커맨드 상에서 320MPa의 항복강도와 200GPa의 탄성률 (Elastic Modulus) 및 1.5%의 경화률을 사용하여 Gr.B 강재의 거동을 재현하였다. 하지만 초탄성 형상기억합금의 거동을 재현할 초기의 재료모델이 프로그램상에 부재하므로 유저에 의한 재료코드 (User Defined Material Code, 이하 UMAT Code)를 사용하여 수치해석적으로 재현하였다. 초탄성 형상기억합금 재료의 이력거동은 하중의 변화에 따라 발생하는 각각의 상변위 (Phase Transformation) 과정과 상응된 일련의 직선구간으로 표시된 강성모델 (Stiffness Model)에 의하여 이상화할 수 있다. 유저 재료코드는 이러한 강성모델을 프로그램상에서 시행을 하며 마르텐사이트 (Martensite)와 오스텐나이트 상태의 재료적인 특성을 고려하고 있다. 강성모델과 코딩에 대한 자세한 사항들은 참고문헌에 수록 되어있다.(18),(19) 본 연구에서는 강성모델에서 요구하는 재료적인 특성과 관련된 계수들, 즉 예를 들면, 41GPa 탄성률, 410MPa 항복응력, 8% 회복가능 신장력과 이에 상응하는 520MPa 최대 응력 값들은 참고문헌에서(10) 실시한 25mm 직경의 초탄성 형상기억합금 봉의 재료실험 결과값들을 참고하여 산출하였다.

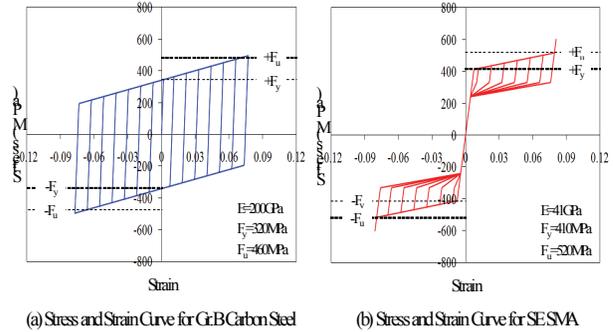


그림 8. 가새에 사용된 강재와 초탄성 형상기억합금의 응력-변형률 거동

### 참고문헌

1. Rassati, G.A., Leon, R.T., and Noe, S., "Component modeling of partially restrained composite joints under cyclic and dynamic loading," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 2, 343-51, 2004.
2. Hu, J.W., Kang, Y.S., Choi, D.H., and Park, T., "Seismic design, performance, and behavior of composite-moment frames with steel beam-to-concrete filled tube column connections," *International Journal of Steel Structures, KSSC*, Vol. 10 No. 2, 177-91, 2010.
3. Park, T., Hwang, W.S., Leon, R.T., and Hu, J.W., "Damage evaluation of composite-special moment frames with concrete-filled tube columns under strong seismic loads," *Journal of Civil Engineering, KSCE*, Vol. 15 No. 8, 1381-1394 (DOI 10.1007/s12205-011-1225-6), 2011.
4. Hu, J.W., "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, 2008.
5. Hu, J.W., and Leon, R.T., "Analyses and evaluations

- for composite-moment frames with SMA PR-CFT connections,” *Nonlinear Dynamics*, Vol. 65, No. 4, DOI 10.1007/s11071-010-9903-3, 2011.
6. Hu, J.W., Choi, E., and Leon, R.T., “Design, analysis, and application of innovative composite PR connections between steel beams and CFT columns,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 20 No. 2, DOI 10.1088/0964-1726/20/2/025019, 2011.
  7. Sabol, T.A., “An assessment of seismic design practice of steel structures in the United State since the Northridge Earthquake,” *Structure Design and Tall Buildings*, Vol. 13, No. 5, 409-423, 2004.
  8. Sabelli, R., “Research on improving the design and analysis of earthquake-resistant steel-braced frames,” *The 2000 NEHRP Professional Fellowship Report EERI*, Oakland, CA, USA, 2001.
  9. Sabelli, R., Mahin, S.A., and Chang, C., “Seismic demands on steel braced-frame buildings with buckling-restrained braces” *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 5, 655-666, 2003.
  10. DesRoches, R., McCormick, J., and Delemont, M., “Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 1, 38-46, 2004.
  11. Song, G., Ma, N., and Li. H., “Applications of shape memory alloys in civil structures,” *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 9, 1266-1274, 2006.
  12. Ocel, J.M., DesRoches, R., Leon, R.T., Hess, W.G., Krumme, R., Hayes, J.R., and Sweeney, S., “Steel beam-column connections using shape memory alloys,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 5, 732-740, 2004.
  13. American Society of Civil Engineers (ASCE), *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI No. 7-05). Reston, VA, USA, 2005.
  14. American Institute of Steel Construction (AISC), *Manual of steel construction, Load and Resistance Factor Design (LRFD)*, 3rd edn. Chicago, IL, USA, 2001.
  15. International Code Council (ICC), *International building code 2006 (IBC2006)*. Falls Church, VA, USA, 2006.
  16. Sabelli, R., “Recommended provisions for buckling-restrained braced frames,” *Engineering Journal*, AISC, Vol. 41, No. 4, 155-175, 2004.
  17. Mazzoni, S., McKenna, F., and Fenves, G. L., “OpenSEES command language manual v. 1.7.3. Department of Civil Environmental Engineering,” University of California, Berkeley, CA, USA, 2006.
  18. Fugazza, D., *Shape alloy devices in earthquake engineering: mechanical properties, constitutive modeling and numerical simulations*. Master’s thesis Rose School, Italy, 2003.
  19. Auricchio, F., and Sacco, E., “A one-dimensional model for superelastic shape-memory alloys with different properties between martensite and austenite,” *International Journal of Nonlinear Mechanics*, Vol. 32, No. 6, 1101-1114, 1997.
  20. Somerville, P.G., Smith, N., Punyamurthula, S., and Sun, J., “Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project” SAC background document, Report No. SAC/BD 97/04, 1997.
  21. McCormick, J., Aburano, H., Ikenaga, M., and Nakashima, M., “Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements,” *Proc. 14 World Conference Earthquake Engineering Paper No. 05-06-0071*, Beijing, China, 2008.