

초탄성 형상기억합금을 이용한 원상 복원 X형 철골 가새 골조

Recentering X-Braced Steel Frames Using Superelastic Shape Memory Alloy

이 성 주*
Lee, Sung Ju

김 주 우**
Kim, Joo-Woo

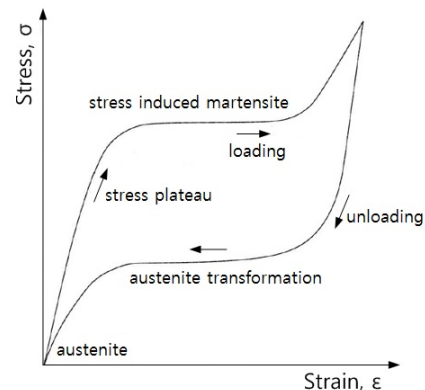
Abstract

In this paper a systematic numerical analysis is performed to obtain the energy dissipation and re-centering capacities of diagonal steel braced frames subjected to cyclic loading. This diagonal steel bracing systems are fabricated with super-elastic SMA (Shape Memory Alloy) braces in order to develop a recentering seismic resistance system without residual deformation. The three-dimensional nonlinear finite element models are constructed to investigate the horizontal stiffness, drifts and failure modes of the re-centering bracing systems.

Keywords : Shape Memory Alloys (SMAs), Hysteretic behavior, Nonlinear finite element analysis, Diagonal steel braced frames, Recentering braced systems

1. 서론

형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)은 Abolmaali et al.(2006)¹⁾ 응력-변형률 관계에서 보여지는 것과 같이 오스테나이트 상태(Austenite phase)와 마르텐자이트 상태(Martensite phase)의 상태 변화에 의하여 물체의 고유 형상을 기억하는 뛰어난 형상기억능력과 초탄성(Superelastic) 복원능력을 나타내는 신재료이며, 변형이 발생한 후 원래의 형상으로 복원하는 와이어나 강봉, 또는 댐퍼의 형태로 강구조 건축물에 적용하여 에너지 소산능력을 증가시켜 내진 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 진동 제어 및 충격 흡수와 잔류 변형이 없는 변형 능력, 모멘트-회전각 능력, 내부식성 등에서 일반 강재보다 우수하다. 이러한 재료적인 특이성 때문에 지진이 빈번하게 발생하는 미국에서는 소성 변형이 발생하기 쉬운 구조물에 초탄성 형상기억합금을 설치하여 내진적인 보강뿐만 아니라 능동 제어 및 자



〈Fig. 1〉 Stress-strain relationship and super-elasticity behavior of SMA

동 복원 효과의 장점을 잘 활용하고 있다.

가새 골조는 경제적인 내진 구조 시스템으로서 가새와 기둥의 축 강성을 통하여 횡 하중에 대해 저항하는 횡력 저항 시스템이다. 이 시스템은 물량 절감 효과를 얻으면서 횡 변위를 제어하는데 효과적이기 때문에 강진 지역에서 널리 사용된다.

Astaneh-Asl, Goel & Hanson(1986)²⁾은 거싯플레이트와 가새 부재 끝단 구속선 사이의 여유 길이(Stitch spacing)를 거싯플레이트 두께의 2배로 설계

* 정희원, 세명대학교 건축공학과, 공학박사
Department of Architecture, Semyung University
** 교신저자, 정희원, 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Department of Architecture, Semyung University
Tel: 043-649-1329 Fax: 043-649-1755
E-mail: jw_kim@semyung.ac.kr

하는 것이 가새 부재에 유연한 단부 조건을 야기한다는 연구 결과를 제시하였고, Goel(1992a; 1992b)^{3,4)}은 판폭두께비의 제한, 단속긴결재의 근접 배치 및 단부 접합부에 대한 특별한 설계 및 상세 등 설계 변수를 개선하면 가새 골조의 좌굴 이후 거동을 크게 향상시킬 수 있다고 파악하였다. Saeki et al.(1995)⁵⁾, Tremblay, Degrange & Bluin(1999)⁶⁾ 및 Black, Makris & Aiken(2004)⁷⁾은 좌굴로 인한 압축 강성의 급격한 저하 방지를 위하여 가새 주위를 철골 튜브 및 콘크리트로 보강한 비좌굴 가새인 BRB(Buckling Restrained Brace)를 제안하였다. Dolce et al.(2005)⁸⁾은 기존 강재의 가새와 SMA 가새를 적용한 소규모 RC 프레임에 대해 실험을 수행한 결과, 현재 사용되는 장치들에 의해 제공되는 것과 SMA 기반의 새로운 가새 시스템이 유사한 성능을 제공하는 결과를 얻었다. Johnson(2005)⁹⁾과 Yoo, Roeder & Lehman(2008)¹⁰⁾은 실험·해석 연구를 실시하여 특수 중심 가새 골조의 내진 성능을 평가하고 타원형 간극 거리를 이용한 거셋플레이트 설계를 제안하였다. Lee & Kim(2017)¹¹⁾은 초탄성 SMA 와이어를 대각 가새 골조에 적용하여 가새 골조의 리센터링 효과를 확인하였고, Moon & Yoon(1988)¹²⁾은 보붕괴형으로 설계된 단위 골조 Braced에서 Double angle을 X형으로 배치한 가새 골조의 단조 재하 및 반복 재하에 따른 탄소성 영역에서 변형 능력 및 이력 특성을 평가하였다. Kim, Kim & Kim(1990)¹³⁾은 K형 가새 골조를 선택하여 보와 가새의 상관 관계, 골조의 내력, 가새 골조의 내력 및 제안식 등의 특성을 고찰하고 이에 대한 구조 설계의 기초 자료를 제공하였다. Yoo(2009)¹⁴⁾는 역V형 가새 골조의 내진 성능에 대한 거셋플레이트와 골조 부재의 영향을 조사하고 개선된 설계 모델을 개발하기 위해 유한 요소 모델을 이용한 매개 변수 연구를 수행하였다. 골조 크기, 간극 거리(Clearance distance), 거셋플레이트 두께와 테이퍼플레이트(Tapered plate)의 영향에 대해 조사하였고 그 결과 접합부의 적절한 상세는 골조 성능의 개선에 크게 기여할 수 있다는 결론을 얻었다. Hu, Rhee & Joe(2012)¹⁵⁾는 하중 재하만으로 상온에서 원상복원이 가능한 초탄성 SMA를 가새 일부분에 적용하여 능동적으로 횡력에

대한 구조물의 처짐을 제어할 수 있는 시스템을 개발하고 기존에 사용된 시스템과 내진 성능을 비교, 평가하였다.

일반적인 가새 골조의 가장 큰 단점은 비탄성 거동을 수반하는 지진 하중이 작용할 경우 가새의 좌굴로 인한 저항 내력의 감소 및 에너지 소산 능력의 저하를 초래할 수 있다. 또한, 압축 강성이 급격히 저하하며 잔류 층간 변위로 인해 원래의 상태로 회복할 수 없고 이에 따라 P- Δ 이차효과에 의해 붕괴될 위험을 초래할 수 있다. 이러한 문제점에 따라 강진에서도 구조물의 손상을 최소화 하고 구조물에 복원력을 부여하는 리센터링 기술이 가미된 다양한 구조 시스템이 제안되고 있으나 아직 미흡하며, 설계에 필요한 가새 골조 상세 개발 및 설계 지침 제안 등이 본격적으로 이루어지고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 3차원 비선형 유한 요소 해석을 통하여 초탄성 SMA 와이어를 이용한 X형 철골 가새 골조의 응력 분포와 파괴 모드를 분석함과 더불어 하중-변위 관계에 근거하여 에너지 소산 및 리센터링 등의 구조적 거동을 알아보고자 한다.

2. 3차원 유한 요소 해석 모델

2.1 SMA 이론적 고찰

SMA의 재료 모델은 오스테나이트(A)와 마르텐사이트(S)의 상호 변태(Transformation)로 표현되며, 오스테나이트와 마르텐사이트 분율(Fraction)을 나타내는 변수를 각각 ξ_A 와 ξ_S 로 가정할 때 다음 관계를 만족한다^{16),17)}.

$$\xi_S + \xi_A = 1 \tag{1}$$

$$\dot{\xi}_S + \dot{\xi}_A = 0 \tag{2}$$

여기서 위첨자 \cdot 는 시간에 대한 미분을 나타낸다.

‘AS’를 오스테나이트→마르텐사이트 변태로, ‘SA’를 마르텐사이트→오스테나이트 변태라 할 때 분율은 다음 식 (3)~(6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\xi}_S = \dot{\xi}_S^{AS} + \dot{\xi}_S^{SA} \quad (3)$$

$$\dot{\xi}_A = \dot{\xi}_A^{AS} + \dot{\xi}_A^{SA} \quad (4)$$

$$\dot{\xi}_A^{AS} = -\dot{\xi}_S^{AS} \quad (5)$$

$$\dot{\xi}_A^{SA} = -\dot{\xi}_S^{SA} \quad (6)$$

식 (3)과 (4)에서 마르텐사이트와 오스테나이트 분율은 각각 AS 또는 SA 변태 동안의 분율에 기초하는 것을 알 수 있으며, 식 (5)와 (6)은 각 변태의 분율은 서로 같아야 한다는 것을 나타내고 있다.

완전 복원이 가능한 SMA의 변태에 관한 식은 소성 모델을 이용해서 유도될 수 있으며, 이때 변태 함수는 다음 식 (7)과 같이 정의된다.

$$F = q + 3\alpha p \quad (7)$$

여기서 q 는 편향응력(Deviatoric stress), p 는 정수압(Hydrostatic pressure), α 는 재료 파라미터(인장과 압축 거동이 같을 경우, $\alpha = 0$)이다. 이 변태 함수는 AS와 SA 두 변태 모두 적용되며, Druker-Prager의 다음 식 (8)과 유사하다.

$$F_{DP} = q + 3\beta p - \sigma_{eqv} \quad (8)$$

이때, AS 변태에서 마르텐사이트 위상(Phase)은 다음 식 (9)와 같이 유도된다.

$$\dot{\xi}_S^{AS} = -H^{AS}(1 - \xi_S) \frac{\dot{F}}{F - \sigma_f^{AS}(1 + \alpha)} \quad (9)$$

여기서 H^{AS} 는 다음과 같이 정의된다.

$$H^{AS} = \begin{cases} 1 & \text{if } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_s^{AS}(1 + \alpha) < F < \sigma_f^{AS}(1 + \alpha) \\ \dot{F} > 0 \end{array} \right. \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

여기서, σ_s^{AS} 와 σ_f^{AS} 는 재료 파라미터를 나타낸다.

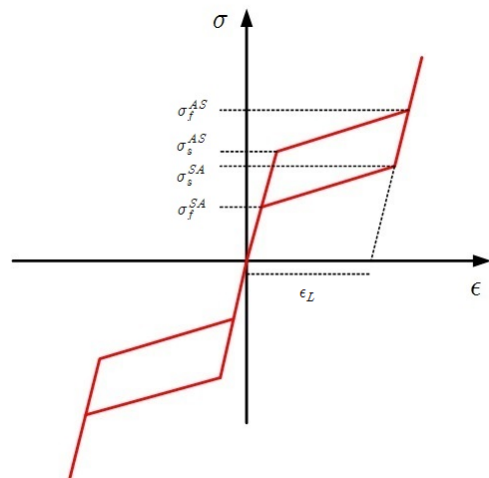
AS 변태와 유사하게, SA 변태에서 오스테나이트 위상은 다음 식 (11)과 같다.

$$\dot{\xi}_S^{SA} = H^{SA}(\xi_s) \frac{\dot{F}}{F - \sigma_f^{SA}(1 + \alpha)} \quad (11)$$

여기서 H^{SA} 는 다음과 같이 정의된다.

$$H^{SA} = \begin{cases} 1 & \text{if } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_f^{SA}(1 + \alpha) < F < \sigma_s^{SA}(1 + \alpha) \\ \dot{F} > 0 \end{array} \right. \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

지금까지 언급된 식을 적용하면 SMA 응력-변형률 관계를 탄성과 소성 변형률로 분리하여 <Fig. 2>와 같이 나타낼 수 있다. <Fig. 2>에서 초기 기울기는 100% 오스테나이트 위상에서의 탄성 계수를 나타내며, 마지막 기울기는 100% 마르텐사이트 위상의 탄성 계수를 나타낸다. 변태는 응력 σ_s^{AS} 에서 시작하여 100% 마르텐사이트 위상인 응력 σ_f^{AS} 로 끝난다. 하중이 제거될 경우에는 100% 마르텐사이트에서 응력이 σ_s^{SA} 이하로 떨어질 때 변태가 시작되며 100% 오스테나이트에서 응력이 σ_f^{SA} 일 때 끝난다. 이때 <Fig. 2>의 최대 변형률(ϵ_L)은 등온 과정(Isothermal process)에서 복구된다.

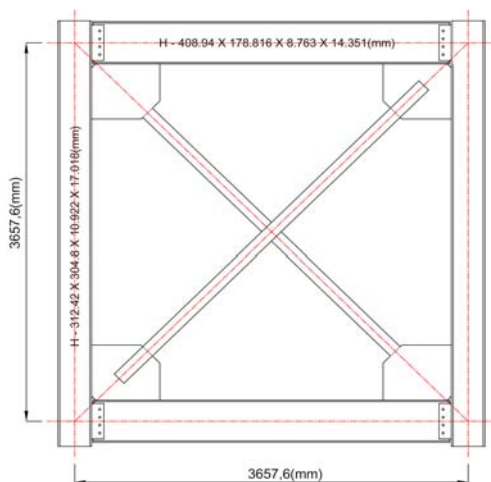


<Fig. 2> Decomposed stress-strain relationship of super-elastic SMA

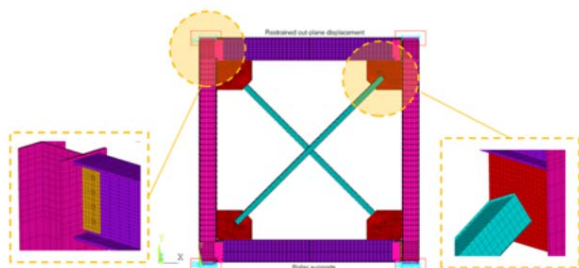
2.2 X형 철골 가새 골조의 기하학적 및 재료 특성

본 연구에서는 범용 유한 요소 해석 프로그램 ANSYS(2017)¹⁸⁾를 이용하여 해석 대상 모델들에 대하여 3차원 유한 요소 모델링을 수행하고 비탄성 정적 해석을 진행하였다. 일련의 과정들은 Yoo, Roeder & Lehman(2008)¹⁰⁾의 유한 요소 모델 생성에서 사용된 경계 조건, 재료 물성, 해석 환경 등 모델링 기법을 참조하였다.

해석 대상인 X형 철골 가새 골조에 대한 기하학적 형상은 <Fig. 3>에 나타나 있다. 이때 골조의 기둥의 중심선 간 간격과 보의 중심선 간 간격은 3.66×3.66(m)이며, 기둥은 H-312.42×304.8×10.922×17.018(mm), 보는 H-408.94×178.816×8.763×14.351(mm)이 사용되었다. 거셋플레이트는 보와 기둥으로 구성된 골조에 용접 접합 되어있고 가새 부재와 거셋플레이트 간의 접합도 용접 접합을 사용하였다.



<Fig. 3> Typical geometry of X-braced frames

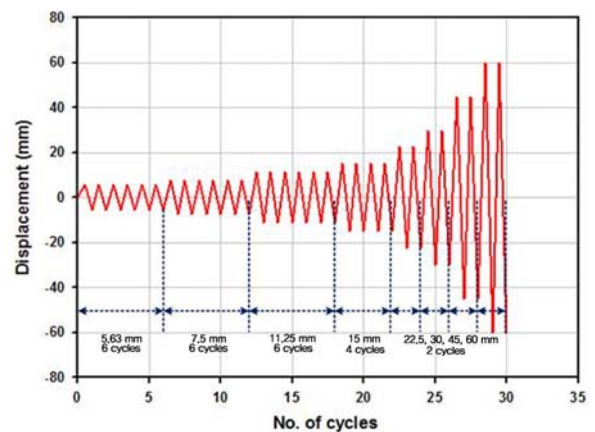


<Fig. 4> FE model of X-braced frames

ANSYS를 이용하여 가새 골조의 각 부재(H형강, L형강, 거셋플레이트, 시어탭, 볼트)에 대해 생성한 유한 요소 모델은 <Fig. 4>와 같다. 3차원 모델링 시 많이 사용되고 대변형에 대한 재료적인 비선형과 두께 방향의 전단 변형 효과를 지원하며 형상기억합금 재료 특성 적용이 가능한 Solid 185 요소를 사용하여 골조 및 가새 부재를 모델링 하였다. 보와 기둥 접합시 사용되는 볼트는 비교적 간단한 모델링을 위하여 Beam188 요소를 사용하였다.

접합부와 가새 부재 등 응력 집중 및 소성 거동이 예상되는 부분에는 비교적 조밀한 요소망(Mesh)을 생성하였고 그 외 항복이 일어나지 않거나 탄성 변위가 발생할 것으로 예상되는 부분은 해석적 효율성을 고려하여 비교적 넓은 요소망을 생성하였다.

경계 조건은 각 기둥의 하부는 이동 지점이 적용되었고 각 기둥의 상부는 면의 방향의 변위를 제어하기 위해 구속하였다. 하중은 AISC(2006)¹⁹⁾의 내진 설계 매뉴얼에서 제시한 단조증가 반복하중이력을 적용하였으며 이를 변위제어법을 이용하여 단조증가 반복하중이력을 적용하였다.



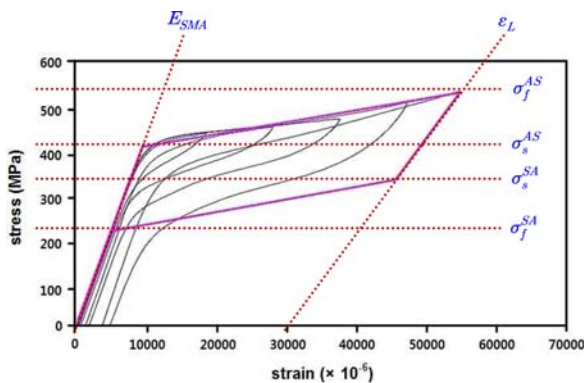
<Fig. 5> Displacement loading history

해석 모델에 사용된 재료 물성은 반복비탄성거동을 시뮬레이션하기 위해 이동성경화(Bilinear kinematic hardening) 모델이 사용되었으며 비탄성 범위에 대한 재료적 비선형 해석을 위한 항복 기준은 von Mises 항복 조건을 사용하였다. 강재의 재료 물성에 대한 자세한 사항은 <Table 1>에 제시하였다. 가새 부재에 적용된 형상기억합금에 대한 재

료 물성치는 DesRoches, McCormick & Delemont (2004)²⁰가 제시한 직경 1인치의 형상기억합금 봉에 대한 실험 결과 값에 대한 응력-변형률 관계를 <Fig. 6>에 나타내었으며 이를 인용하여 <Table 2>와 같이 적용하였다.

<Table 1> Material properties of steel components

Members	Yield strength ($F_{y'}^s$, MPa)	Modulus of elasticity (E_s , MPa)	Poisson ratio (ν)
Column	408.58	205,000	0.3
Beam	394.80	205,000	0.3
Brace	504.35	205,000	0.3
Gusset plate & Shear tab	446.47	205,000	0.3
Bolt	900.00	205,000	0.3



<Fig. 6> Stress-strain relationships of shape memory alloys

<Table 2> Material properties of shape memory alloys

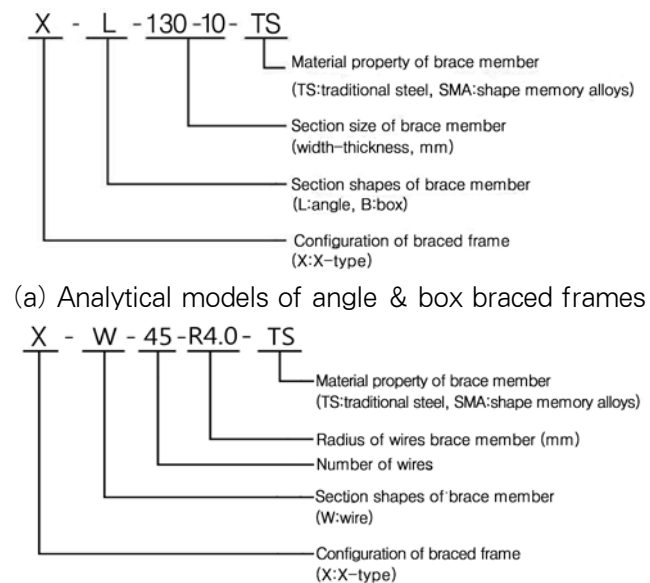
Parameters	Value
E_{SMA} (MPa)	27,579
σ_s^{AS} (MPa)	422
σ_f^{AS} (MPa)	531
σ_s^{SA} (MPa)	337
σ_f^{SA} (MPa)	227
ϵ_L (%)	3.18

가새 골조의 이력 거동에 영향을 미치는 요소로는 가새 부재의 세장비, 단부 조건, 단면 형상, 단면 폭-

두께비 등이 있으며 선행 연구를 참고하여 본 연구에서 설정한 가새 부재의 변수는 다음과 같이 3가지로 구분할 수 있다. (1) 단면 형태(앵글형강, 각형강관, 와이어), (2) 각 단면 형태에 따른 폭-두께비, (3) 재료 물성치(기존 강재, 형상기억합금)이다.

실무에서 가새 부재로 가장 널리 사용되는 앵글형강과 각형강관 그리고 와이어를 단면 형태로 선정하였다. 또 다양한 변수 연구를 위해 건축구조기준에서 제한하고 있는 특수 중심 가새 골조에서 사용 가능한 내진콤팩트 단면에 국한하지 않고 KS 규격상 제작 가능한 다양한 형강 단면 사이즈에 대해 해석을 진행하여 폭-두께비가 리센터링 거동에 미치는 영향을 폭 넓게 분석하고자 한다. 또 기존 강재와 초탄성 형상기억합금의 비교 분석을 위해 2가지 재료 물성치에 대해 해석을 수행하였다.

가새 부재 변수에 따른 해석 모델명은 <Fig. 7>과 같이 부여하였다.



(a) Analytical models of angle & box braced frames

(b) Analytical models of wire braced frames

<Fig. 7> Definition of analytical model designation

여기서 초탄성 SMA 와이어를 가새 부재의 단면 형태 중 하나로 선택한 이유는 형상기억합금의 가격이 감소하고 있는 추세이긴 하지만 아직 기존 강재에 비해 높은 가격을 형성하고 있어 가새 부재 전체에 적용하기에는 경제적인 문제가 있고, 형상기억

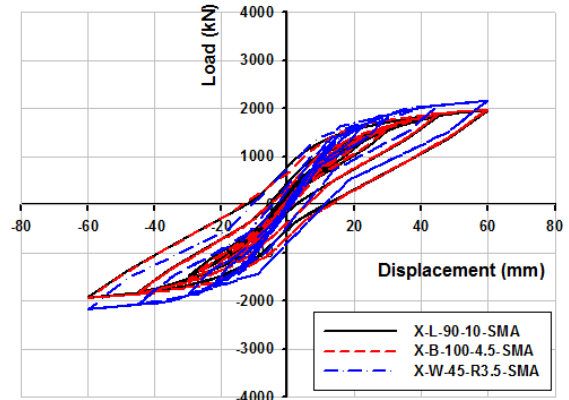
합금이 적용된 가새와 거сет플레이트의 접합 시 시공적인 문제와 역학적인 문제에 대해 확실히 밝혀진 바가 없기 때문이다. 또한 와이어는 오직 인장에만 저항하는 부재로서 가새 골조 거동에 내력 저하를 일으키는 좌굴이 발생하지 않는다는 장점이 있다. 따라서 비교적 경제적이고 시공성이 좋은 형상 기억합금의 적용 방법 중 하나로 와이어를 채택하고 그에 따라 기존에 가새 부재로 널리 채택되었던 형태인 앵글 단면과 각형강관 단면과의 비교·분석을 통해 와이어 가새의 이력 거동을 평가하고자 한다.

3. 3차원 유한 요소 해석 결과

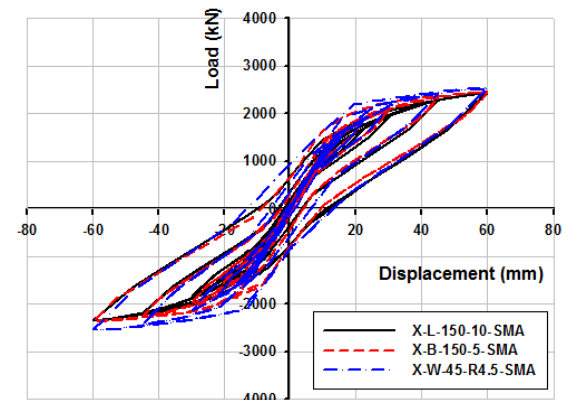
X형 철골 가새 골조 해석 모델의 하중-변위 이력 곡선을 얻기 위하여 <Fig. 5>와 같은 단조 증가 반복하중 이력을 적용하였다.

<Fig. 8>은 유사한 단면적을 갖는 각 단면 형태의 하중-변위 이력 곡선을 나타내고 있다. 이들은 거의 비슷한 리센터링 효과를 보여주고 있고 가새 부재에 앵글 및 각형강관을 적용한 가새 골조의 에너지 소산 능력은 비슷하였다. 하지만 가새 부재에 와이어를 적용한 가새 골조의 경우 에너지 소산 능력이 위의 두 형상을 적용한 가새 골조보다 12% ($A \approx 1730 \text{ mm}^2$), 22% ($A \approx 2900 \text{ mm}^2$) 증가하였다. 따라서 X형 철골 가새 골조의 구조적 거동에 대한 경향을 파악하고자 가새 부재에 와이어를 적용하여 비교하였다.

각 해석 모델의 이력 곡선에서 내부 면적으로 표시되는 에너지 소산 능력을 <Table 3>에 나타내었고, <Fig. 9>는 와이어의 직경이 8.5mm인 경우, 고력 볼트, 강제 와이어 및 SMA 와이어를 조합하여 적용한 가새 골조의 하중-변위 이력 곡선을 보여주고 있다. <Fig. 9>로부터 동일한 기하학적 특성을 갖는 경우 고력 볼트와 강제 와이어(즉, TS)를 적용한 가새 골조가 고력 볼트와 SMA 와이어(즉, SMA)를 적용한 가새 골조보다 에너지가 크게 소산되는 것으로 나타났다. 또한, SMA 가새 골조의 최대 잔류 변위는 12.1mm로 나타났으며, 이는 최대 잔류 변위가 38.8mm TS 가새 골조보다 약 69% 리센터링을 향상시킨 것을 의미한다.

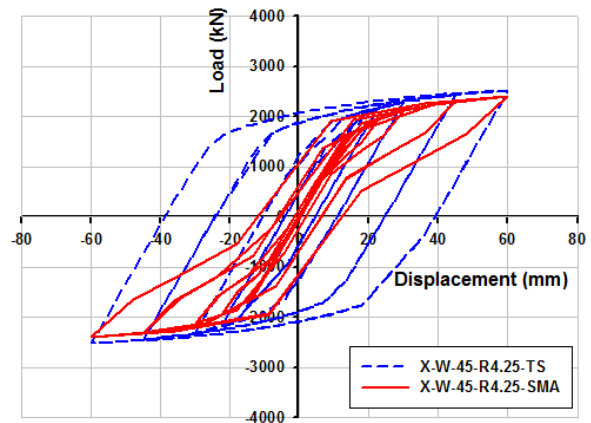


(a) $A \approx 1730 \text{ mm}^2$



(b) $A \approx 2900 \text{ mm}^2$

<Fig. 8> Comparison of load-displacement hysteresis curves of three section shapes with similar section area



<Fig. 9> Load-displacement hysteresis curve of X-W-45-R4.25

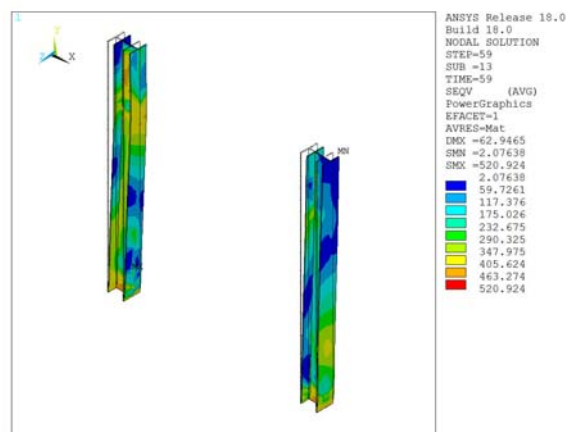
<Table 3> Comparison of the energy dissipation capacities of the X-braced frame models (unit: kN·m)

Analytical model designation	E_D by step								$E_{D, total}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	
X-W-45-R2.5-TS	1.06	1.27	3.19	13.85	40.38	79.43	181.64	337.37	658.19
X-W-45-R2.5-SMA	0.88	0.93	2.50	6.73	14.41	23.41	76.30	167.70	292.86
X-W-45-R2.75-TS	1.17	1.40	3.53	12.41	44.76	91.96	209.10	378.63	742.96
X-W-45-R2.75-SMA	0.95	1.00	2.76	7.30	16.23	26.15	85.14	180.22	319.75
X-W-45-R3.0-TS	1.28	1.53	3.87	11.43	50.19	105.06	238.30	419.70	831.36
X-W-45-R3.0-SMA	1.03	1.06	2.92	7.76	18.24	29.20	93.28	198.42	351.91
X-W-45-R3.25-TS	1.40	1.67	4.22	10.16	55.52	117.61	269.69	-	460.27
X-W-45-R3.25-SMA	1.11	1.13	3.22	7.82	20.36	32.73	102.56	204.75	373.68
X-W-45-R3.5-TS	1.51	1.82	4.58	9.27	61.29	131.42	303.08	514.60	1027.57
X-W-45-R3.5-SMA	1.20	1.25	3.48	8.17	22.53	37.16	113.27	220.81	407.87
X-W-45-R3.75-TS	1.63	1.96	4.93	8.90	66.04	145.76	336.15	568.41	1133.78
X-W-45-R3.75-SMA	1.29	1.33	3.72	8.27	24.68	42.48	124.81	245.53	452.11
X-W-45-R4.0-TS	1.75	2.10	5.30	9.12	66.47	159.22	370.25	616.73	1230.94
X-W-45-R4.0-SMA	1.38	1.42	3.97	8.46	27.58	49.31	140.86	277.24	510.22
X-W-45-R4.25-TS	1.87	2.24	5.67	10.70	65.42	171.61	402.27	668.41	1328.19
X-W-45-R4.25-SMA	1.47	1.50	4.22	9.02	30.53	58.79	164.66	314.64	584.83
X-W-45-R4.5-TS	1.98	2.38	6.05	13.38	67.69	184.21	437.59	724.38	1437.66
X-W-45-R4.5-SMA	1.58	1.60	4.49	11.03	36.63	72.94	196.73	362.26	687.26

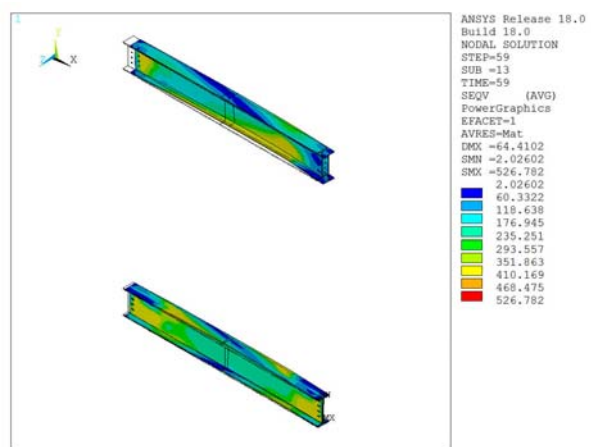
<Fig. 10>과 <Fig. 11>은 TS, SMA 가새 골조의 최대 변위 하중 하에서 이에 상응하는 가새 골조의 각 부재(즉, H형강 기둥, H형강 보, 와이어 가새, 거셋플레이트, 전단 탭)의 변형도와 von Mises 응력 분포를 나타내며, 여기서 일반적으로 와이어의 재료 성질(즉, 강재 또는 SMA)에 따라 변형 형상 및 응력 분포가 달라지는 것을 알 수 있다.

<Fig. 10>과 <Fig. 11>로부터 TS, SMA 가새 골조 모두 최대 von Mises 응력은 전단 탭에서 발생함을 볼 수 있다. 하중이 증가하기 시작하면 볼트 구멍 부분부터 항복하기 시작하며 응력 집중 현상이 발생한다. 또한, Wire 가새의 최대 von Mises 응력을 비교한 결과, TS 가새 골조에서는 640.35MPa, SMA 가새 골조에서는 450.45MPa로 약 12% 감소함을 알 수 있었다. 이는 원형 복원 및 잔류 변형의 감소의 효과로 인하여 나타남을 알 수 있다.

<Fig. 12>는 X형 철골 가새 골조의 SMA 와이어를 사용한 경우 하중-변위 이력 곡선으로, 와이어의 직경을 증가시켰다. 예상한대로 직경이 클수록 강성이 증가하는 거동을 보였고, 또한 에너지 소산 능력도 증가하였지만 리센터링 효과는 크게 변화를 주지 않는 것으로 나타난다.



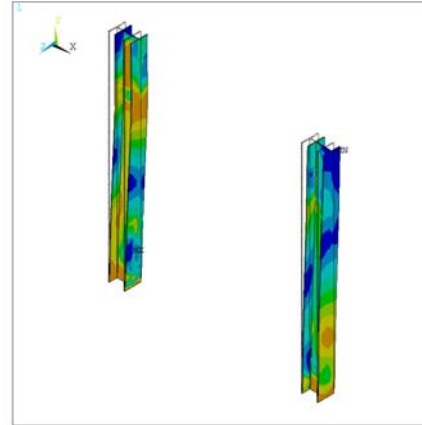
(a) H columns



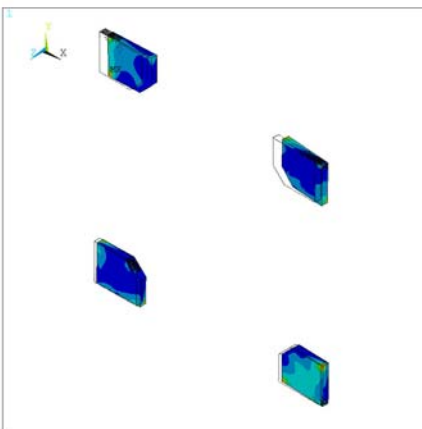
(b) H beams



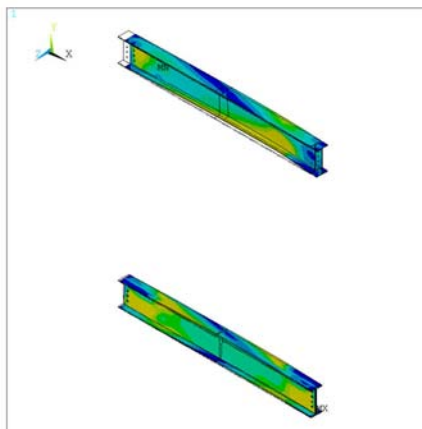
(c) Wire braces



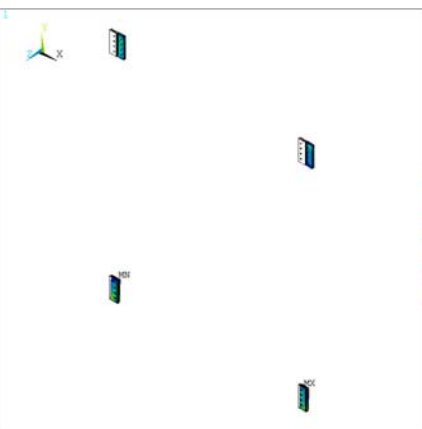
(a) H columns



(d) Gussets



(b) H beams

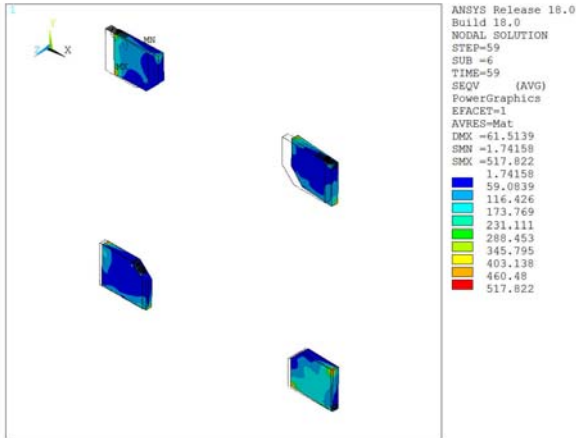


(e) Shear tabs

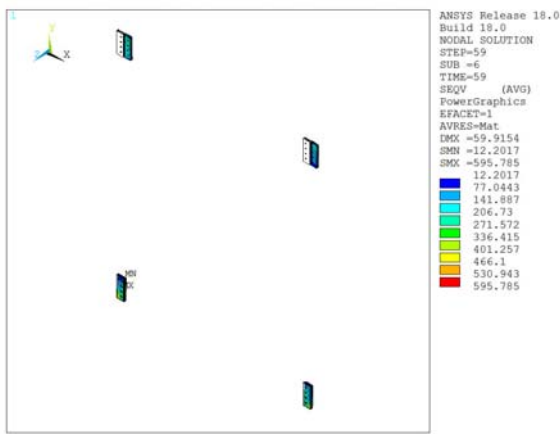


(c) Wire braces

(Fig. 10) von Mises stress distribution and deformation shape of X-W-45-R4.25-TS connection

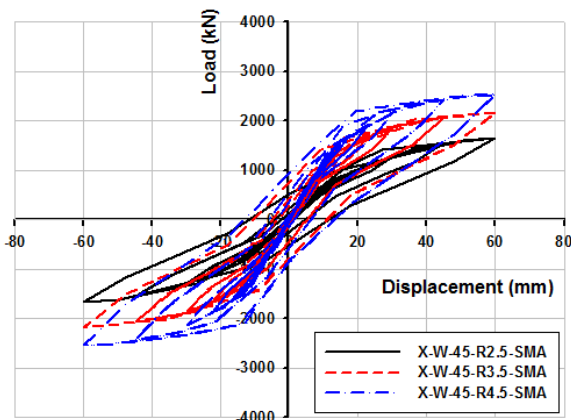


(d) Gussets



(e) Shear tabs

〈Fig. 11〉 von Mises stress distribution and deformation shape of X-W-45-R4.25-SMA connection



〈Fig. 12〉 Load-displacement hysteresis curve of diameter size

4. 결론

본 연구에서는 반복 하중을 받는 X형 철골 가새 골조에 초탄성 SMA 재료를 적용하여 3차원 비선형 유한 요소 해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 X형 철골 가새 골조의 내력, 리센터링 효과, 에너지 소산 능력, 응력 분포 및 파괴 모드를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가새 부재에 초탄성 SMA를 적용한 3가지 단면 형태(앵글, 각형강관, 와이어)의 가새 골조는 리센터링 효과가 유사하고 에너지 소산 능력은 가새 부재에 와이어를 적용한 가새 골조가 가새 부재에 다른 두 단면 형태를 적용한 가새 골조보다 증가하였다. 경제성 및 시공성을 고려할 때 와이어 형태의 SMA 가새 부재를 적용하는 것이 바람직하다.

2) 강재로 된 X형 가새 골조에 SMA 와이어를 적용할 경우 에너지 소산 능력은 감소하나, 리센터링 효과는 향상되는 것으로 나타났다.

3) SMA를 와이어의 반지름 변화에 따라 가새 골조의 에너지 소산 능력과 각 부재의 응력 분포가 달라지며, 이에 따른 파괴 모드 및 변형 형상이 달라지지만 이러한 와이어의 기하학적 변화가 리센터링 효과에 변화를 주지 않는 것으로 나타났다.

이러한 결론들은 X형 철골 가새 골조에서 초탄성 SMA가 잔류 변형을 최소화 시킬 수 있는 가능성을 보여주고 있으며, 향후 SMA를 이용한 가새 골조 시스템의 리센터링 효과를 더욱 명확히 파악하고 이해하기 위해서는 가새 설치 형태, 추가적인 댐핑 장치 등 다양한 파라미터에 대한 해석적 연구와 이를 검증하기 위한 실험적 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 세명대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. Abolmaali, A., Treadway, J., Aswath, P., Lu, F. K., & McCarthy, E., "Hysteresis behavior of T-stub connections with superelastic shape memory fasteners", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.62, Vol.8, pp.831~838, 2006
2. Astaneh-Asl, A., Goel, S. C., & Hanson, R. D., "Earthquake-resistant design of double-angle bracings", *Engineering Journal*, Vol.23, No.4, pp.133~147, 1986
3. Goel, S. C., "Cyclic post buckling behavior of steel bracing members", *Stability and ductility of steel structures under cyclic loading*, pp.75~104, 1992
4. Goel, S. C., "Earthquake resistant design of ductile braced steel structures", *Stability and ductility of steel structures under cyclic loading*, pp.297~308, 1992
5. Saeki, E., Meada, Y., Nakamura, H., Midorikawa, M., & Wada, A., "Experimental study on Practical-scale unbonded braces", *Journal of Structural and Construction Engineering(Transactions of AIJ)*, Vol.60, No.476, pp.149~158, 1995
6. Tremblay, R., Degrange, D., & Bluin, J. (1999). Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system. *The 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering, The Canadian Association for Earthquake Engineering, Canada.*
7. Black, C. J., Makris, N., & Aiken, I. D., "Component Testing, Seismic Evaluation and Characterization of Buckling-Restrained Braces", *Journal of Structural Engineering*, Vol.130, No.6, pp.880~894, 2004
8. Dolce, M., Cardone, D., Ponzo, F. C., & Valente, C., "Shaking table tests on reinforced concrete frames without and with passive control systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.34, Vol.14, pp.1687~1717, 2005
9. Johnson, S. M. (2005). Improved Seismic Performance of Special Concentrically Braced Frames (Master's thesis). University of Washington, Seattle, Washington.
10. Yoo, J. H., Roeder, C. W., & Lehman, D. E., "Analytical Performance Simulation of Special Concentrically Braced Frames", *Journal of Structural Engineering*, Vol.134, No.6, pp.881~889, 2008
11. Lee, S. J., & Kim, J. W. (2017, November). The Re-centering Behavior of the Steel Braced Frames Using SMA Wires. *The 9th International Symposium on Steel Structures. Korean Society of Steel Construction, Republic of Korea.*
12. Moon, T. S., & Yoon, M. H., "A Study on the Elasto-Plastic Behaviours of Braces and Braced Frames(II)", *Architectural Institute of Korea*, Vol.4, No.4, pp.197~204, 1988
13. Kim, S. M., Kim, P. J., & Kim, K. S., "A Study on the Strength Evaluation of the K type Braced Steel Frame", *Architectural institute of Korea*, Vol.10, No.1, pp.401~404, 1990
14. Yoo, J. H., "Analytical Investigation for Improved Design Models of Chevron Braced Frames", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.13, No.5, pp.73~78, 2009
15. Hu, J. W., Rhee, D. J., & Joe, Y. H., "Seismic Behavior and Recentering Capability Evaluation of Concentrically Braced Frames Structures using Superelastic Shape Alloy Active Control Bracing System", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.16, No.6, pp.1~12, 2012

16. Auricchio, F., & Sacco, E., "A one-dimensional model for superelastic shape-memory alloys with different elastic properties between austenite and martensite", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol.32, No.6, pp.1101~1114, 1997
17. Auricchio, F., Taylor, R. L., & Lubliner, J., "Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.146, No.3-4, pp.281~312, 1997
18. ANSYS, "Reference Manual", Ver. 18.0, 2017
19. AISC "Manual of steel construction, American Institute of steel Construction", 13th Edition American Institute of steel Construction, Chicago, 2006.
20. DesRoches, R., McCormick, J., & Delemont, M., "Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars", *Journal of Structural Engineering*, Vol.130, No.1, pp.38~46, 2004

- Received : May 03, 2018
- Revised : May 16, 2018
- Accepted : May 16, 2018