

리센터링 대각 가새 강구조 골조의 이력거동

김장호¹ · 김주우^{2*} · 이성주³

¹사원, (주)ES건축구조엔지니어링, ²교수, 세명대학교, 건축공학과, ³강사, 세명대학교, 건축공학과

Hysteresis Behavior of Recentering Diagonal Bracing Steel Frames

Kim, Jang Ho¹, Kim, Joo-Woo^{2*}, Lee, Sung Ju³

¹Engineer, ES & Partners Structural Engineering Co. Ltd, Seoul, 06302, Korea

²Professor, Dept. of Architecture, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

³Lecturer, Dept. of Architecture, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

Abstract - Concentrically diagonal braced steel frames are generally designed for having complete truss behavior properties that the brace elements are governed by axial force in elastic region. But, when a large earthquake occurs, inelastic deformation occurring of the brace elements and connections cause a decrease in the internal resistance forces. Development of possible to return seismic resistance system without residual strain is necessary for solving the problem. Therefore, 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 bracing systems are fabricated with angle and square tube SMA (Shape Memory Alloy) sections. 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. 서 론

형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)은 오스테나이트 상태(austenite phase)와 마르텐사이트 상태(martensite phase)의 상태변화에 의하여 물체의 고유형상을 기억하는 뛰어난 형상기억능력과 초탄성(superelastic) 복원능력을 나타내는 신재료이다. 이러한 형상기억합금은 변형이 발생한 후 원래의 형상으로 복원하는 와이어나 강봉, 또는 댐퍼의 형태로 강구조 건축물에 적용하여 에너지소산능력을 증가시켜 내진성능을 향상시킬 수 있으며, 진동제어 및 충격흡수와 잔류변형이 없는 변형능

력, 모멘트-회전각 능력, 내부식성 등에서 일반 강재보다 우수하다. 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.

가새 골조는 경제적인 내진 구조 시스템으로서 가새와 기둥의 축강성을 통하여 횡하중에 대해 저항하는 횡력저항 시스템이다. 이 시스템은 물량 절감효과를 얻으면서 횡변위를 제어하는데 효과적이기 때문에 강진지역에서 널리 사용된다. Astaneh-Asl et al.^[1]은 거셋플레이트와 가새 부재 끝단 구속선 사이의 여유길이(stitch spacing)를 거셋플레이트 두께의 2배로 설계하는 것이 가새 부재에 유연한 단부조건을 야기한다는 연구결과를 제시하였고, Saeki et al.^[2], Tremblay et al.^[3] 및 Black and Bartoletti^[4]은 좌굴로 인한 압축강성의 급격한 저하 방지를 위하여 가새 주위를 철골 튜브 및 콘크리트로 보강한 비좌굴가새인 BRB(Buckling Restrained Brace)를 제안하였다. Davaran and Hasanzadeh^[5]은 특수중심가새골조(Special Concentrically Braced Frames, SCBFs)

Note.-Discussion open until February 28, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 12, 2018; revised July 11, 2018; approved on July 13, 2018.
Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-43-649-1329 Fax. +82-43-649-1755

E-mail. jw_kim@semyung.ac.kr

인 역V형 가새골조에서 인장강도보다 압축가새의 좌굴 후 강도가 현저히 작으므로 발생하는 한계에 대하여 지적하고 이를 보완할 수 있는 좌굴방지가새골조(Buckling Restrained Brace Frames, BRBFs)와의 혼용에 대해 적합성을 평가하였고, Johnson^[6]과 Yoo et al.^[7]는 실험·해석 연구를 실시하여 특수중심가새골조의 내진 성능을 평가하고 타원형 간극거리를 이용한 거셋플레이트 설계를 제안하였으며, Moon and Yoon^[8]은 보봉괴형으로 설계된 단 위골조 Braced에서 Double Angle을 X형으로 배치한 가새 골조의 단조재하 및 반복재하에 따른 탄소성 영역에서 변형능력 및 이력특성을 평가하였다. Kim et al.^[9]은 K형 가새 골조를 선택하여 보와 가새의 상관관계, 골조의 내력, 가새 골조의 내력 및 제안 식 등의 특성을 고찰하고 이에 대한 구조설계의 기초자료를 제공하였고, Yoo^[10]는 역V형 가새골조의 내진성능에 대한 거셋플레이트와 골조 부재의 영향을 조사하고 개선된 설계모델을 개발하기 위해 유한요소모델을 이용한 매개변수 연구를 수행하였다. 수행한 결과, 골조의 크기, 간극거리(clearance distance), 거셋플레이트 두께와 테이퍼 플레이트(tapered plate)의 영향에 대해 조사하였고, 그 결과 접합부의 적절한 상세는 골조 성능의 개선에 크게 기여할 수 있다는 결론을 얻었다.

그러나 가새 골조의 가장 큰 단점은 비탄성 거동을 수반하는 지진하중이 작용할 경우 가새의 좌굴로 인한 저항내력의 감소 및 에너지 소산능력의 저하를 초래할 수 있다. 또한, 압축강성이 급격히 저하하며 잔류 층간변위로 인해 원래의 상태로 회복할 수 없고, 이에 따라 P- Δ 2차 효과에 의해 붕괴될 위험을 초래할 수 있다. 이러한 문제점에 따라 강진에서도 구조물의 손상을 최소화하고 구조물에 복원력을 부여하는 리센터링 기술이 가미된 다양한 구조시스템이 제안되고 있으나 아직 미흡하며, 설계에 필요한 가새 골조 상세 개발 및 설계지침 제안 등이 본격적으로 이루어지고 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 가새 골조의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 원상복원이 가능한 초탄성 형상기억합금을 가새에 적용하였다. 이에 따라 리센터링(recentering) 대각 철골 가새 골조에 대해 3차원 비선형 유한요소해석을 수행하여 수평강성, 파괴모드 및 이력곡선 등을 도출하여 이력거동을 알아보고 기존의 가새 골조와 비교·분석하였다.

2. 3차원 유한요소 해석모델

본 연구에서는 범용 유한요소 해석 프로그램 ANSYS^[11]를 이용하여 해석 대상 모델들에 대하여 3차원 유한요소 모델링을 수

행하고 비탄성 정적해석을 진행하였다. 일련의 과정들은 역V형 가새 골조에 대한 선행연구를 참고하여 수행되었으며 특히 Yoo et al.^[7]의 유한요소모델 생성에서 사용된 경계조건, 재료물성, 해석환경 등 모델링 기법을 참조하였다.

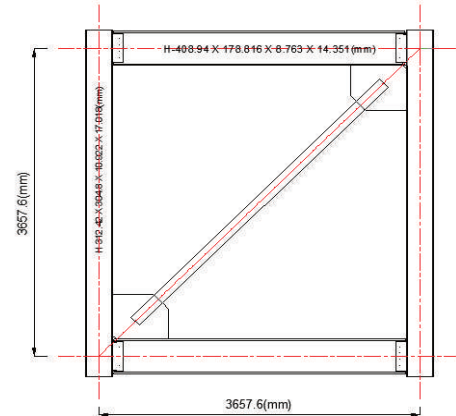


Fig. 1. Typical geometry of diagonal braced frames

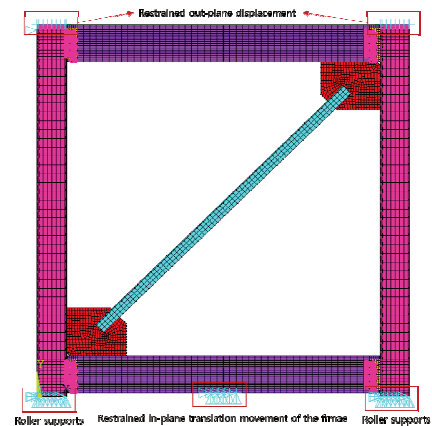


Fig. 2. FE model of diagonal braced frames

해석대상인 대각 철골 가새 골조에 대한 기하학적 형상은 Fig. 1.에 나타나 있다. 이 때 골조의 기둥의 중심선 간 간격과 보의 중심선 간 간격은 3.66×3.66(m)이며, 기둥은 H-312.4×304.8×10.922×17.018(mm), 보는 H-408.94×178.816×8.763×14.354 (mm)이 사용되었다. 거셋 플레이트는 보와 기둥으로 구성된 골조에 용접접합 되어있고 45° 대각 가새가 거셋플레이트에 용접접합으로 설치되어 있다.

ANSYS를 이용하여 가새 골조의 각 부재(H형강, L형강, 거셋 플레이트, 시어탭, 볼트)에 대해 생성한 유한 요소모델은 Fig. 2.와 같다. 3차원 모델링 시 많이 사용되고 대변형에 대한 재료적인 비선형과 두께방향의 전단변형 효과를 지원하며 형상기억합금 재료특성 적용이 가능한 Solid 185 요소를 사용하여 골조 및 가

새 부재를 모델링하였고, 보와 기둥 접합시 사용되는 볼트는 비교적 간단한 모델링을 위하여 Beam188 요소를 사용하였다.

접합부와 가새부재 등 응력집중 및 소성거동이 예상되는 부분에는 비교적 조밀한 요소망(mesh)을 생성하였고 그 외 항복이 일어나지 않거나 탄성변위가 발생할 것으로 예상되는 부분은 해석적 효율성을 고려하여 비교적 넓은 요소망을 생성하였다.

경계조건은 하위 보의 아래 플랜지의 자유도는 골조의 면내 변위를 제어하기 위해 구속하였으며 각 기둥의 하부는 이동지점이 적용되었다. 또한 각 기둥의 상부는 면외방향의 변위를 제어하기 위해 면외방향을 구속하였다. 하중은 AISC^[12]의 내진설계 매뉴얼에서 제시한 변위제어법을 이용하여 단조증가 반복하중이력을 적용하였다.

해석모델에 사용된 재료물성은 반복비탄성거동을 시뮬레이션하기 위해 이동성경화(bilinear kinematic hardening) 모델이 사용되었으며 비탄성 범위에 대한 재료적 비선형 해석을 위한 항복 기준은 von Mises 항복조건을 사용하였다. 강재의 재료물성에 대한 자세한 사항은 Table 1에 제시하였다. 가새 부재에 적용된 형상기억합금에 대한 재료물성치는 DesRoches et al.^[13]이 제시한 직경 2.54mm의 형상기억합금 봉에 대한 실험결과 값에 대한 응력-변형률 관계를 Fig. 4.에 나타내었으며, 이를 이용하여 Table 2와 같이 적용하였다.

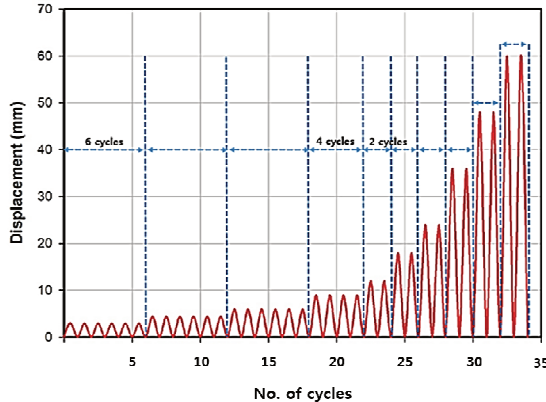


Fig. 3. Displacement cyclic loading history

Table 1. Material properties of steel components

Members	Yield strength (F_y , MPa)	Modulus of elasticity (E , 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

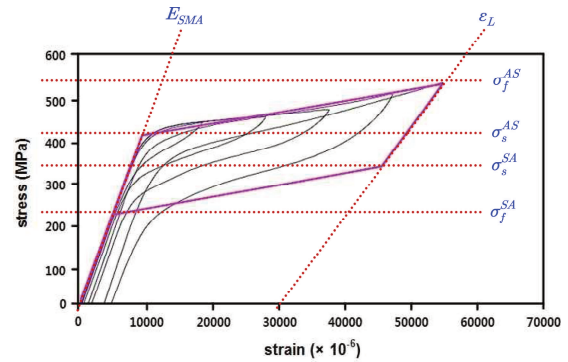


Fig. 4. Stress-strain relationship of shape memory alloy

Table 2. Material properties of shape memory alloys

Parameters	Values
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 이력거동에 영향을 미치는 요소로는 가새 부재의 세장비, 단부조건, 단면형상, 단면 폭-두께비 등이 있으며 선행연구를 참고하여 본 연구에서 설정한 가새 부재의 변수는 다음과 같이 3가지로 구분할 수 있다. (1) 단면 형태 (앵글형강, 각형강관), (2) 각 단면 형태에 따른 폭-두께비, (3) 재료물성치(기준강재와 형상기억합금)이다.

실무에서 가새 부재로 가장 널리 사용되는 앵글형강과 각형강관을 단면형태로 선정하였다. 또 다양한 변수 연구를 위해 건축구조기준에서 제한하고 있는 특수중심가새골조에서 사용 가능한 내진컴팩트 단면에 국한하지 않고 KS 규격 상 제작 가능한 다양한 형강 단면 사이즈에 대해 해석을 진행하여 폭-두께비가 리센터링 거동에 미치는 영향을 폭 넓게 분석하고자 한다. 또한 기존 강재와 초탄성 형상기억합금의 비교분석을 위해 2가지 재료물성치에 대해 해석을 수행하였다.

가새 부재 변수에 따른 해석 모델명은 Fig. 5.와 같이 부여하였다.

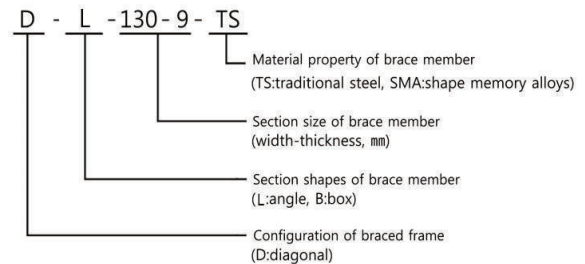


Fig. 5. Definition of analytical models designation

3. 3차원 유한요소 해석 결과

3.1 앵글형강 대각 가새골조

3.1.1 파괴모드 및 응력분포

Figs. 6. ~ 9.는 반복하중이 작용한 후 골조의 횡변위가 0일 때 앵글형강 가새 골조 중 D-L-130-9 모델에 대한 변형형상과 응력분포를 나타내며 기존강재를 사용한 골조와 형상기억합금을 적용한 골조를 비교하였다.

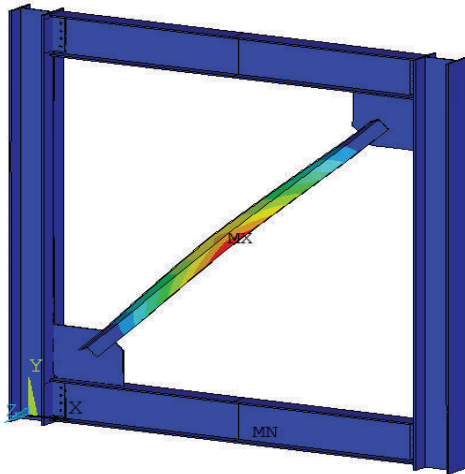


Fig. 6. Deformation of D-L-130-9-TS

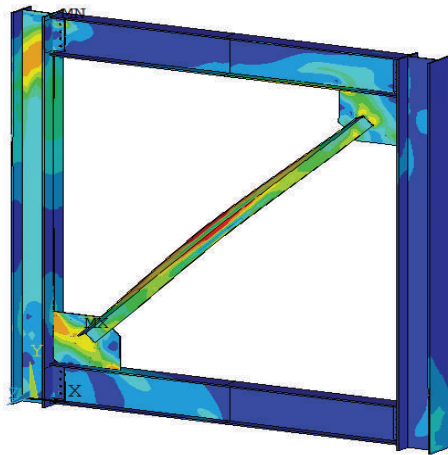


Fig. 7. von Mises stress distribution of D-L-130-9-TS

초기에 골조는 탄성거동을 보이며 하중제거만으로 원형으로 돌아올 수 있지만 소성영역으로 진입한 이후에는 원래의 상태로 돌아오기 위해 압축력이 가해지게 됨으로써 가새 부재 중앙부에 좌굴이 발생하게 되며 그 위치에 가장 큰 잔류변형과 응력이 집중되어 발생했다.

형상기억합금을 적용한 가새의 경우 골조가 원형으로 돌아오는 과정에서 발생된 좌굴의 정도가 기존 강재와 비교하여 상당히 감소한 것을 알 수 있었고 이에 따라 중앙부에서 발생했던 큰 응력을 상당히 감소시켰다. 이러한 결과는 골조에 작용하던 하중이 제거되는 동안 형상기억합금의 원형복원 및 잔류응력 감소가 발휘된 것으로 볼 수 있다.

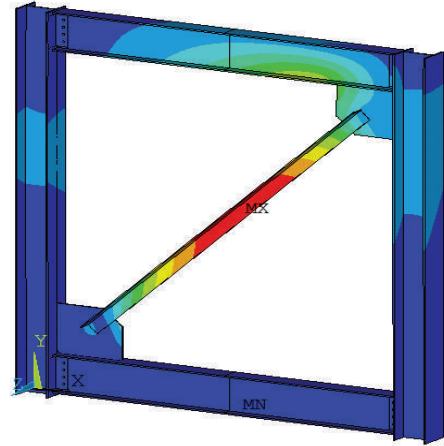


Fig. 8. Deformation of D-L-130-9-SMA

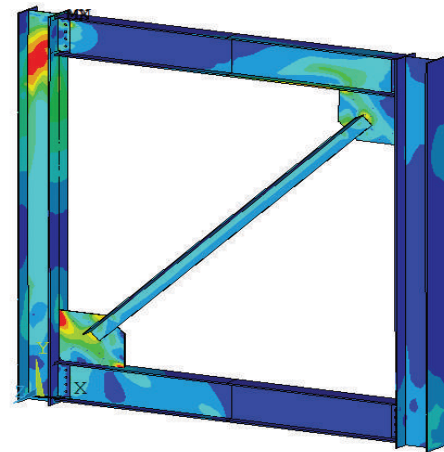


Fig. 9. von Mises stress distribution of D-L-130-9-SMA

가새 부재의 최대변위와 최대응력을 재료물성에 따라 비교하여 Table 3에 나타냈다. 최대변위의 경우 가새 중앙부에서 면의 좌굴로 인해 최대 변위가 발생하였으며 가새 단면적이 증가할수록 좌굴에 의한 변위가 감소하였다. SMA를 적용한 경우 기존강

재를 사용한 가새의 잔류변형을 40~96%가량 감소시켰다. 이때 감소량은 가새 단면의 폭·두께비가 클수록 증가하는 것으로 나타났다.

최대응력의 경우 기존 강재의 가새는 중앙 부분에서 항복 응력에 가까운 큰 응력이 발생한 반면 SMA를 적용한 결과 중앙부의 응력을 평균적으로 36% 감소시킴을 알 수 있었다.

Table 3. Maximum displacements and stress of diagonal angle brace members

Models	Brace member			
	Max displacement(mm)		Max stress(MPa)	
	TS	SMA	TS	SMA
D-L-100-7	236.26	19.74	504.35	260.21
D-L-100-8	232.72	19.92	552.52	250.60
D-L-100-9	228.95	23.05	514.50	246.49
D-L-120-8	232.63	18.92	504.35	232.40
D-L-130-9	229.09	16.28	504.34	255.45
D-L-130-10	225.15	14.56	505.23	265.87
D-L-130-15	206.08	30.54	504.35	340.38
D-L-150-10	224.98	17.55	513.74	295.99
D-L-150-12	216.07	17.65	521.58	314.05
D-L-150-15	202.48	47.47	517.67	408.58
D-L-150-19	181.32	108.74	537.11	501.85
D-L-175-12	214.12	27.56	531.13	341.09
D-L-175-15	196.99	74.85	546.89	452.93
D-L-200-15	191.84	48.27	527.41	497.51

3.1.2 하중-변위 이력곡선

재료물성치에 따른 D-L-130-9에 대한 하중-변위 이력곡선은 Fig. 10.과 같다. 이때 가력하중으로 인장하중만을 작용하였음에도 불구하고 골조에 압축하중이 작용한 것으로 나타났는데 이는 골조에 소성변형이 발생한 이후에 원형으로 되돌리기 위해서는 압축력이 필요하기 때문인 것으로 판단된다.

가새의 단면크기가 증가할수록 가새 골조의 최대하중, 초기강성 및 에너지 소산량은 증가하였지만 SMA 적용에 따른 리센터링 효과는 감소함을 알 수 있다.

에너지 소산량은 기존강재 가새를 사용한 골조가 SMA를 사용한 골조보다 넓은 이력곡선을 나타내며 우수성을 보였다. 이 때 SMA를 사용한 가새가 두꺼운 두께를 갖고 있다면 기존 강재에 근접하는 에너지 소산량을 보였다.

SMA의 리센터링 효과는 단면의 두께가 증가함에 따라 감소하

며 종국에는 기존강재처럼 리센터링 효과가 사라지는 모델도 존재하였다.

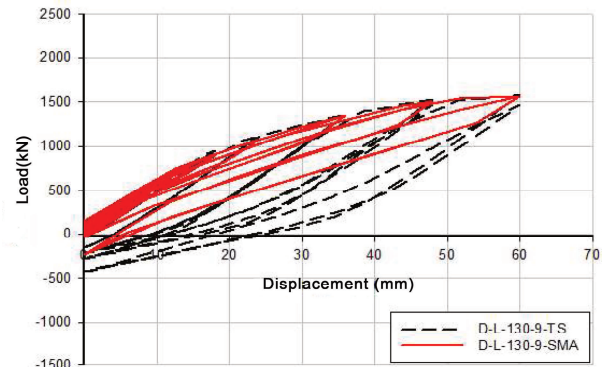


Fig. 10. Load-displacement hysteresis curves of D-L-130-9

3.2 각형강관 가새골조

3.2.1 파괴모드 및 응력분포

Figs. 11. ~ 14.는 각형강관 대각 가새 골조에 반복하중이 작용한 후 골조가 횡 변위가 원위치로 되돌아 왔을 때 단면크기 및 재료물성에 따른 변형형상 및 응력분포이다.

Table 4에 각형강관 가새 골조의 최대 변위와 최대 응력을 나타내었다. 앞서 언급된 앵글형강 가새 골조와 유사하게 반복하중 작용 후 골조의 횡변위가 원위치로 되돌아 왔을 때 가새 부재 중앙부분에 횡자굴에 의한 잔류변형을 확인할 수 있었다. 이러한 잔류변형은 SMA 적용에 따라 평균 약 64% 감소하는 양상을 나타냈으며 그에 따라 가새 중앙부의 응력 또한 평균 약 49% 감소하며 SMA 적용에 따른 원형복원 및 응력감소의 효과를 나타냈다.

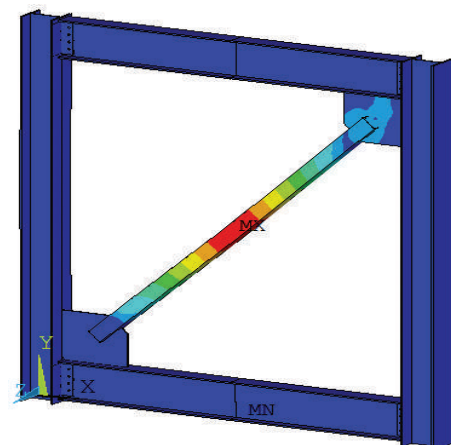


Fig. 11. Deformation of D-B-150-5-TS

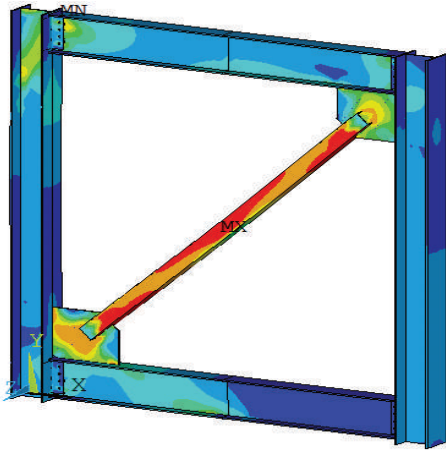


Fig. 12. von Mises stress distribution of D-L-150-5-TS

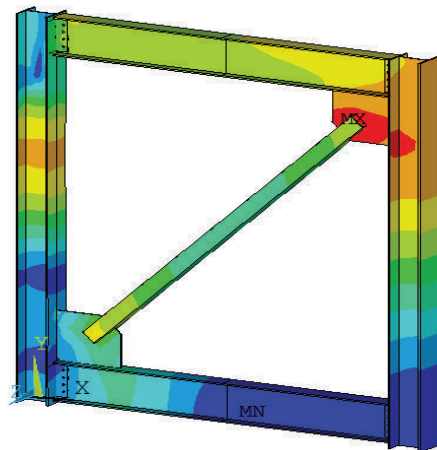


Fig. 13. Deformation of D-L-150-5-SMA

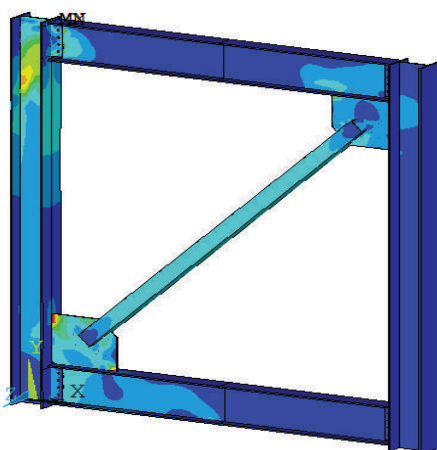


Fig. 14. von Mises stress distribution of D-L-150-5-SMA

Table 4. Maximum displacements and stress of diagonal box brace members

Models	Brace member			
	Max displacement(mm)		Max stress(MPa)	
	TS	SMA	TS	SMA
D-B-100-6	223.25	6.93	504.35	149.98
D-B-110-9	4.15	1.21	504.34	141.79
D-B-120-7	209.78	9.61	525.30	193.97
D-B-120-8	17.89	1.30	515.15	146.50
D-B-125-6	190.43	7.46	511.37	146.56
D-B-125-9	5.38	4.32	504.35	313.61
D-B-130-8	71.46	10.36	536.17	213.06
D-B-150-5	19.59	1.30	508.65	108.50
D-B-150-6	8.28	1.14	509.41	149.11
D-B-150-7	78.32	7.83	467.41	329.34
D-B-150-9	6.70	6.05	451.96	388.35
D-B-175-6	162.03	3.99	549.36	275.76
D-B-175-8	8.43	8.41	451.33	378.45

3.2.2 하중-변위 이력곡선

Fig. 15.는 D-B-150-15 모델에 대한 하중-변위 이력곡선을 나타낸다. 가새부재의 단면크기가 증가함에 따라 가새 골조의 최대하중 및 초기강성이 증가함을 알 수 있었다.

에너지 소산량은 부재의 단면 두께가 증가함에 따라 증가했다. 동일한 단면의 경우 기존강재 가새가 SMA의 가새보다 큰 소산량을 갖는 것으로 나타났다. 하지만 SMA 가새의 단면 두께가 두꺼워 질수록 기존강재만큼의 에너지 소산량을 갖는 것으로 확인됐다.

리센터링 효과의 경우 SMA를 적용했을 때 기존강재에 비해 상당히 증가했지만 단면의 두께가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

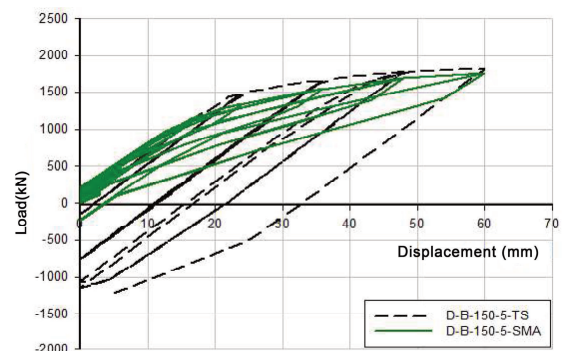


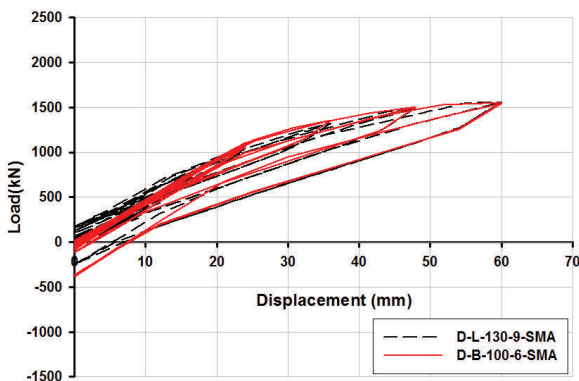
Fig. 15. Load-displacement hysteresis curves of D-B-150-5

3.3 단일 대각 가새 골조 거동의 비교분석

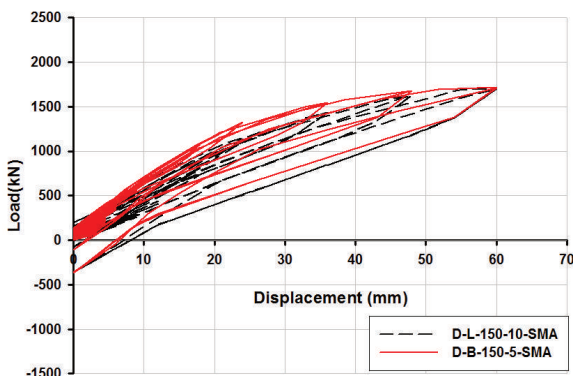
지금까지 앵글형강, 각형강관을 가새부재로 하는 인장 반복하중을 받는 대각 가새 골조에 대해 파괴모드 및 응력분포와 하중-변위 이력곡선을 살펴보았다. 본 절에서는 두 가지 단면형태의 하중-변위이력곡선을 비교·분석하였다.

Fig. 16.은 가새 부재의 단면 형태에 상관없이 단면적이 증가할수록 가새 골조의 최대하중 및 초기강성이 증가하였으며, 단면적이 유사하다면 그 값들 또한 유사하게 나타났음을 보여준다. 에너지 소산량 측면에서도 두 가지 단면 형태가 단면적이 유사하다면 큰 차이점을 보이지 않았고 단면적이 증가함에 따라 에너지 소산량이 증가하는 점도 같았다. Fig. 16.으로부터 리센터링 효과 또한 단면적이 유사할 경우 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

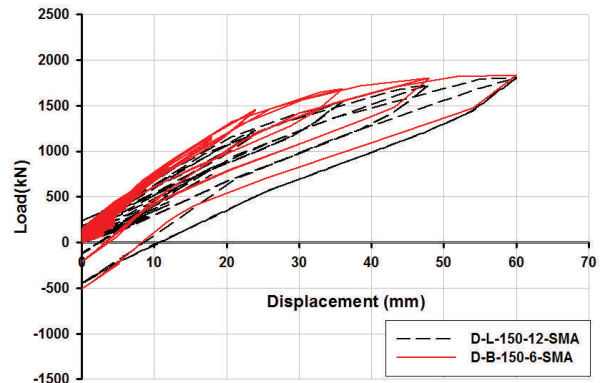
단면적이 유사한 여러 단면형태의 가새 골조들의 이력거동을 비교했을 때 최대하중, 초기강성, 에너지 소산량 및 리센터링 효과가 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다.



(a) Area $\approx 2,259\text{mm}^2$



(b) Area $\approx 2,900\text{mm}^2$



(c) Area $\approx 3,456\text{mm}^2$

Fig. 16. Comparison of Load-displacement hysteresis curves of three section shapes with similar section area

4. 결론

본 연구에서는 인장 반복하중을 받는 대각 가새골조에 대해 가새 부재의 단면 형태, 폭-두께비 그리고 재료물성치를 변수로 하여 3차원 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 결과로 파괴모드 및 응력분포를 살펴보고 하중-변위 이력곡선을 도출하여 최대하중, 에너지소산능력, 리센터링 효과를 확인하여 변수에 따른 이력거동을 비교·분석하였다. 이와 같이, 본 연구의 해석결과를 분석하고 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 인장반복하중을 받는 대각 가새골조에서 형상기억합금 적용에 따른 두 가지 단면형태(앵글, 각형강관)를 비교했을 때 최대하중, 에너지소산량, 리센터링 효과가 매우 유사하였다.

(2) 가새부재에 형상기억합금을 적용했을 때 원형복원효과로 잔류변형제거 및 응력감소가 나타났으며 이러한 효과는 폭-두께비가 크고 단면적이 작을수록 효과적으로 발생되었다.

(3) 형상기억합금을 사용한 가새를 갖는 골조의 리센터링 효과는 증가했지만 가새골조의 거동에 중요한 영향을 미치는 에너지소산량이 감소하였다. 따라서 추가적인 댐핑 장치 등을 이용하여 에너지소산량을 충분히 확보한다면 최적의 내진 시스템이 될 것이라고 판단된다.

이러한 결론들은 강구조물에서 초탄성 형상기억합금이 혁신적인 가새 시스템의 요소로서 성공적으로 사용될 수 있음을 보여

주며 앞으로도 형상기억합금을 이용한 가새골조 시스템의 거동을 파악하고 이해하기 위해서는 가새 설치 형태, 추가적인 댐핑장치 등 다양한 파라미터에 대한 해석적 연구와 이를 검증하기 위한 실험적 연구가 요구된다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 기초연구사업(과제번호 : 2017R1D1A3B03030232)으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] Astaneh, A., Goel, S.C., and Hanson, R.D. (1986) Earthquake-Resistant Design of Double-Angle Bracings, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.23, No.4, pp.133-147.
- [2] 佐伯英一郎, 前田泰史, 中村秀司, 緑川光正, 和田章(1995) 実大アンボンドブレースに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会, 第60巻, pp.149-158.
Saeki, E., Meada, Y., Nakamura, H., Midorikawa, M., and Wada, A. (1995) Experimental Study on Practical-Scale Unbonded Braces, *Journal of the Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Architectural Institute of Japan, Vol.60, pp.149-158 (in Japanese).
- [3] Tremblay, R., Degrange, D., and Boluin, J. (1999) Seismic Rehabilitation of a Four-Story Building with a Stiffened Bracing System, *Proceedings of the 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Canadian Association for Earthquake Engineering, Canada, pp.549-554.
- [4] Bonneville, D., and Bartoletti, S. (1996) 1994 Northridge Earthquake: Buildings Case Studies Project (Proposition 122, Product 3.2, SSC 94-06), Case Study 2.3: Concentric Braced frame, Lankershim Boulevard, North Hollywood, California Seismic Safety Commission, USA., pp.305-324.
- [5] Davaran, A., and Hasanzadeh, J. (2008) Analytical Investigation of Mixed BRBF and SCBF Braced Steel Frames, *Proceedings of Structures Congress 2008*, American Society of Civil Engineers, Canada, pp.2613-2621.
- [6] Johnson, S.M. (2005) *Improved Seismic Performance of Special Concentrically Braced Frames*, Master's Thesis, University of Washington, USA.
- [7] Yoo, J.-H., Roeder, C.W., and Lehman, D.E. (2008) Analytical Performance Simulation of Special Concentrically Braced Frames, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.134, No.6, pp.881-889.
- [8] 문태섭, 윤명호(1988) Brace 및 Brace 골조의 탄소성 거동에 관한 연구 (II), 대한건축학회 논문집, 대한건축학회, 제4권, 제4호, pp.197-204.
Moon, T.S., and Yoon, M.H. (1988) *A Study on the Elasto-Plastic Behaviours of Braces and Braced Frames (II)*, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.4, No.4, pp.197-204 (in Korean).
- [9] 김상모, 김필중, 김규석(1990) K형 철골 브레이스 골조의 내력평가에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제10권, 제1호, pp.401-404.
Kim, S.M., Kim, P.J., and Kim, K.S. (2009) A Study on the Strength Evaluation of the K Type Braced Steel Frame, *Proceedings of Conferences of Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.10, No.1, pp.401-404 (in Korean).
- [10] 유정환(2009) 역V형 가새 골조의 개선된 디자인 모델을 위한 해석적 연구, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제13권, 제5호, pp.73-78.
Yoo, J.-H. (2009) Analytical Investigation for Improved Design Models of Chevron Braced Frames, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.13, No.5, pp.73-78 (in Korean).
- [11] ANSYS (2012) *Aqwa Reference Manual*, Ver. 14.5, ANSYS, Inc., USA.
- [12] American Institute of Steel Construction (2006) *Steel Construction Manual* (13th Ed.), AISC, USA.
- [13] DesRoches, R., McCormick, J., and Delemont, M. (2004) Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.130, No.1, pp.38-46.

요약 : 초탄성형상기억합금은 재료적 특성 때문에 소성변형이 발생하기 쉬운 구조물에 설치되어 변위능동제어 및 자동복원 효과의 장점을 활용하는 사례가 늘고 있다. 가새골조의 큰 단점은 지진하중이 작용할 경우 좌굴로 인한 저항내력의 감소 및 에너지소산능력의 저하를 초래할 수 있다. 또한 잔류 층간변위로 인해 원상태로 회복될 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이러한 가새골조의 문제점을 해결하기 위해 초탄성 형상기억합금을 가새 부재에 적용한 대각 철골 가새 골조에 대해 3차원 비선형 유한요소해석을 수행하여 내진성능을 비교분석하고자 한다.

핵심용어 : 형상기억합금(SMAs), 이력거동, 비선형유한요소해석, 대각철골가새골조, 리센터링가새골조