

# SMA 적용 상·하부 $\Gamma$ 형강 CFT 기둥-보 접합부의 내진성능

김주우<sup>1\*</sup> · 이성주<sup>2</sup>

<sup>1</sup>교수, 세명대학교, 건축공학과, <sup>2</sup>강사, 세명대학교, 건축공학과

## Seismic Performance of Top and Seat Angle CFT Column-to-Beam Connections with SMA

Kim, Joo-Woo<sup>1\*</sup>, Lee, Sung Ju<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Professor, Dept. of Architecture, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

<sup>2</sup>Lecturer, Dept. of Architecture, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

**Abstract** - In this paper a systematic numerical analysis is performed to obtain the hysteresis behavior of partially restrained top and seat angle connections subjected to cyclic loading. This connection includes superelastic shape memory alloy (SMA) angles and rods in order to secure the recentring capacities as well as proper energy dissipation effects of a CFT composite frame. The three-dimensional nonlinear finite element models are constructed to investigate the rotational stiffness, bending moment capacity and failure modes. A wide scope of additional structural behaviors explain the different influences of the connection's parameters, such as the various thickness of connection angles and the gage distance of steel and SMA rods.

**Keywords** - Shape memory alloy, Top and seat angle connection, CFT composite frame, Nonlinear FE analysis, Failure mode, Cyclic load, Bending moment capacity

### 1. 서론

형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)은 Fig. 1의 응력-변형률 관계<sup>[1]</sup>에서 보여지는 것과 같이 오스테나이트 상태(austenite phase)와 마르텐사이트 상태(martensite phase)의 상태변화에 의하여 물체의 고유형상을 기억하는 뛰어난 형상기억능력과 초탄성(superelastic) 복원능력을 나타내는 신재료이며, 변형이 발생한 후 원래의 형상으로 복원하는 와이어나 강봉, 또는 댐퍼의 형태로 강구조 건축물에 적용하여 에너지소산능력을 증가시켜 내진성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 진동제어 및 충격흡수와 잔류변형이 없는 변

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

부분강접 접합부는 힌지접합형식에 일부 보강만으로 수평 강성 확보가 가능하며 사용하중 하에서 강접합과 유사한 거동을 보인다. 상·하부  $\Gamma$ 형강 접합부는 부분강접 접합부의 한 형태로 중·저층 건물에 적합하다. 이러한 상·하부  $\Gamma$ 형강 접합부는 실험적 연구<sup>[2],[3],[4]</sup>를 통하여 접합부의 전단, 휨 모멘트 지지능력, 강도 및 강성이  $\Gamma$ 형강의 두께와 길이, 볼

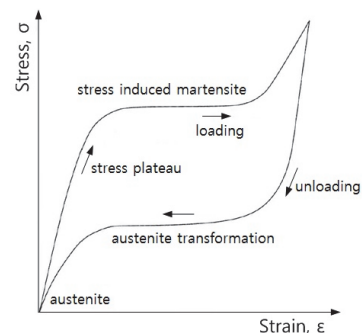


Fig. 1. Stress-strain relationship and super-elasticity behavior of SMA

Note.-Discussion open until June 30, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 27, 2017; revised October 30, 2017; approved on October 30, 2017.

Copyright © 2017 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

트의 개수와 직경, 용접 길이와 강도 등에 의하여 주로 영향을 받으며, 이러한 변수들에 따라서 다양한 접합부의 파괴양상을 나타내는 것을 밝혔다. Roeder *et al.*<sup>[5]</sup>은 접합부에 작용하는 대부분의 전단력을 하부 ㄱ형강이 부담하고, 상부 ㄱ형강은 접합부의 횡방향 안정성만을 도모하기 위하여 설치되는 것으로 이상화 하였다. 또한, 해석적 연구로 3차원 비선형 유한요소해석을 수행하여 부분강접 접합부의 강성 및 강도뿐만 아니라 응력분포, 소성화 과정 등 추가적으로 파악하였고 해석결과를 바탕으로 강성 및 강도 예측을 위한 해석모델을 제안하였으며<sup>[6],[7],[8],[9],[10],[11]</sup>, Chen<sup>[12]</sup>, Chen and Kishi<sup>[13]</sup>, Chen and Lui<sup>[14]</sup>, Faella *et al.*<sup>[15],[16],[17]</sup>은 횡방향 안정성만을 도모하기 위하여 설치된 상부 ㄱ형강도 ㄱ형강의 두께 및 길이, 볼트 게이지 거리 등의 변화에 따라서 충분한 모멘트 저항능력을 가질 수 있다고 예측하였고, 상부 ㄱ형강 접합형태 변화에 따른 접합부의 초기회전강성 및 소성모멘트 저항능력 예측을 위한 해석모델을 제안하였다. 또한, CFT(Concrete Filled Steel Tube)구조는 원형 혹은 각형단면의 강관내부에 콘크리트를 충전한 구조로 강관과 충전콘크리트의 상호 합성 작용에 의해서 압축내력을 증가 시켜주며, 콘크리트는 강관의 국부좌굴을 감소시켜주기 때문에 단면을 증가시키지 않아도 내력을 크게 증가시킬 수 있다. 따라서 이 구조는 강성, 내력, 변형성능, 내화, 시공 등의 측면에서 우수한 특성을 발휘하는 구조시스템이다. 특히, 반복하중의 작용에 대해서는 우수한 내진성능을 발휘하고 경제성이 우수하며 범용성이 높기에 사용이 증가하고 있는 추세이긴 하나 우리나라에서는 콘크리트 충전성 확보 및 품질 검사 등의 어려움으로 인하여 실무에 많이 적용되는 구조시스템이 아니다.

최근에 Yang *et al.*<sup>[18]</sup>과 Kim<sup>[19]</sup>은 SMA 봉으로 체결된 스플릿 T-stub 접합부의 에너지소산 능력을 파악하였다. 그러나 SMA를 이용한 CFT 기둥-보의 접합부의 거동 예측과 휨모멘트 내력을 파악하기 위한 국내의 연구는 아직 미흡하며, 설계에 필요한 접합부 상세 개발 및 설계지침 제안 등이 본격적으로 이루어지고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 3차원 비선형 유한요소 해석을 통하여 SMA를 이용한 CFT 합성골조의 상·하부 ㄱ형강 접합부의 응력분포와 파괴모드를 분석함과 더불어 모멘트-회전각 관계에 근거하여 휨모멘트 내력, 에너지소산 및 복원 능력 등의 구조적 거동을 알아보고자 한다.

## 2. 3차원 유한요소 해석모델

### 2.1 SMA 이론적 고찰

SMA의 재료 모델은 오스테나이트(A)와 마르텐자이트(S)의 상호 변태(transformation)로 표현되며, 오스테나이트와 마르텐자이트 분율(fraction)을 나타내는 변수를 각각  $\xi_A$ 와  $\xi_S$ 로 가정할 때 다음 관계를 만족한다<sup>[20],[21]</sup>.

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

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

여기서 위첨자  $\cdot$ 는 시간에 대한 미분을 나타낸다.

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

$$\dot{\xi}_S = \dot{\xi}_S^{AS} + \dot{\xi}_S^{SA} \tag{3}$$

$$\dot{\xi}_A = \dot{\xi}_A^{AS} + \dot{\xi}_A^{SA} \tag{4}$$

$$\dot{\xi}_A^{AS} = -\dot{\xi}_S^{AS} \tag{5}$$

$$\dot{\xi}_A^{SA} = -\dot{\xi}_S^{SA} \tag{6}$$

식 (3)과 (4)에서 마르텐자이트와 오스테나이트 분율은 각각 AS 또는 SA 변태동안의 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 변태함수는 다음 식 (7)과 같이 정의된다.

$$F = q + 3\alpha p \tag{7}$$

여기서  $q$ 는 편향응력(deviatoric stress),  $p$ 는 정수압(hydrostatic pressure),  $\alpha$ 는 재료 파라미터(인장과 압축 거동이 같을 경우,  $\alpha = 0$ )이다. 이 변태함수는 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.

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

여기서,  $\sigma_s^{AS}$ 와  $\sigma_f^{AS}$ 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.

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

지금까지 언급된 식을 적용하면 SMA 응력-변형률 관계를 탄성과 소성 변형률로 분리하여 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 2에서 초기 기울기는 100% 오스테나이트 위상에서의 탄성계수를 나타내며, 마지막 기울기(는 100% 마르텐사이트 위상의 탄성계수를 나타낸다. 변태는 응력  $\sigma_s^{AS}$ 에서 시작하여 100% 마르텐사이트 위상인 응력  $\sigma_f^{AS}$ 로 끝난다. 하중이 제거될 경우에는 100% 마르텐사이트에서 응력이  $\sigma_s^{SA}$  이하로 떨어질 때 변태가 시작되며 100% 오스테나이트에서 응력이  $\sigma_f^{SA}$ 일 때 끝난다. 이 때 Fig. 2의 최대 변형률( $\epsilon_L$ )은 등온과정(isothermal process)에서 복구된다.

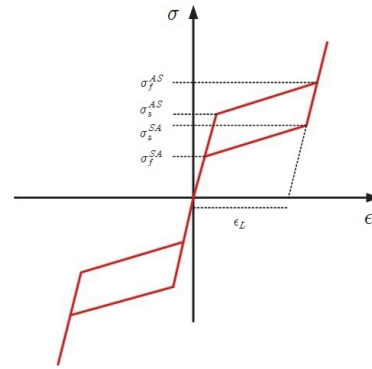


Fig. 2. Decomposed stress-strain relationship of super-elastic SMA

## 2.2 상·하부 ㄱ형강 접합부의 기하학적 및 재료 특성

상·하부 ㄱ형강을 이용한 전형적인 CFT 기둥과 H형강 보의 접합부에 대한 기하학적인 형상 및 크기가 Fig. 3에 나타나 있다. 이때 CFT 기둥의 높이와 H형강 보의 길이는 각각 3,200mm와 2,150mm이며, 1개의 상부 ㄱ형강과 1개의 하부 ㄱ형강 및 4개의 강봉과 4개의 볼트로 연결되어 있다. Fig. 4에서와 같이 범용유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS<sup>[22]</sup>를 이용하여 접합부의 각 부재(즉, 각형강관, 콘크리트, H형강, ㄱ형강, 강봉, 볼트)에 대한 3차원 유한요소모델링이 이루어졌다.

이러한 모델링 과정에서 강재의 재료 및 기하학적인 비선형을 지원하는 ANSYS의 3차원 요소인 Solid 185와 CFT 기둥의 콘크리트의 재료적 특성을 갖고 있는 3차원 요소인 Solid 65가 적용되었다. Fig. 4의 확대된 ㄱ형강, 볼트, 강봉 및 CFT 기둥의 콘크리트의 유한요소모델로부터 응력집중이 발생할 가능성이 있는 부분에 더욱 세밀한 요소망이 형성되어있음을 볼 수 있다. CFT 기둥 양쪽 끝단을 고정으로 경계조건을 적용하였으며, 하중은 H형강 보의 자유 단부에 가해지는 변위제어법을 이용하였다. 변위하중은 Fig. 5과 같이 AISC 내진설계 매뉴얼<sup>[23]</sup>에서 제시한 단조중가 반복하중이력을 이용하였다.

기둥-보 접합부의 각 부재에 적용되는 강재의 재료특성 및 CFT 기둥 내부의 콘크리트의 재료특성은 Table 1에 나타나 있다. 여기서 강관과 ㄱ형강에 적용되는 HSB600과 H형강에 적용되는 SM490 강재 및 F10T 볼트와 강봉의 응력-변형률 관계는 Fig. 6과 같이 bilinear와 완전탄소성으로 가정하였다. 접합부의 복원능력을 확인하기 위한 SMA 봉과 SMA ㄱ형강의 재료특성은 Fig. 7과 같이 DesRoches *et al.*<sup>[24]</sup>의 응

력-변형률 관계를 이용하였다. 비탄성 범위에 대한 재료적 비선형 해석을 위한 항복기준은 von Mises 항복조건을 사용하였으며, ANSYS에서 von Mises 등가소성응력은 다음 식 (13)과 같이 정의된다.

$$\sigma_{eq}^p = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1^p - \sigma_2^p)^2 + (\sigma_2^p - \sigma_3^p)^2 + (\sigma_1^p - \sigma_3^p)^2} \quad (13)$$

여기서  $\sigma_i (i=1,2,3)$ 는 주응력이며, 주응력의 위첨자 p는 소성응력을 나타낸다.

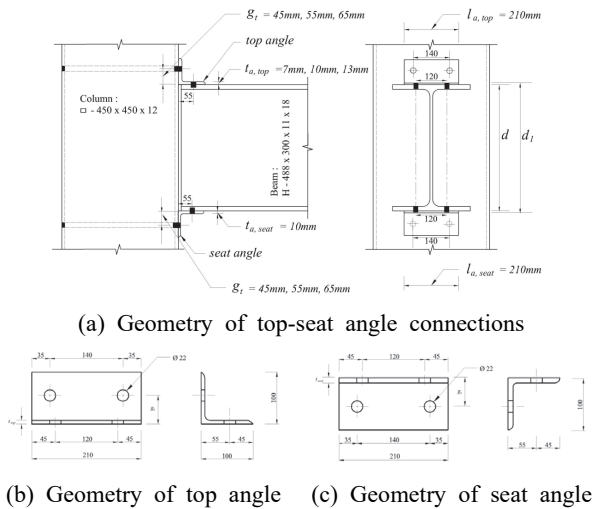


Fig. 3. Configurations of CFT column-to-beam connections

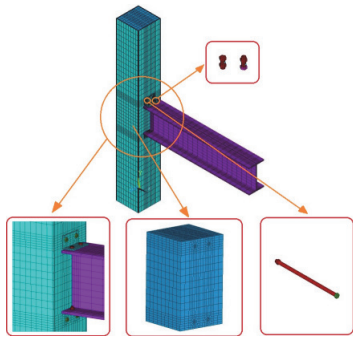


Fig. 4. Typical finite element model of CFT column-to-beam connection with a top-seat angle

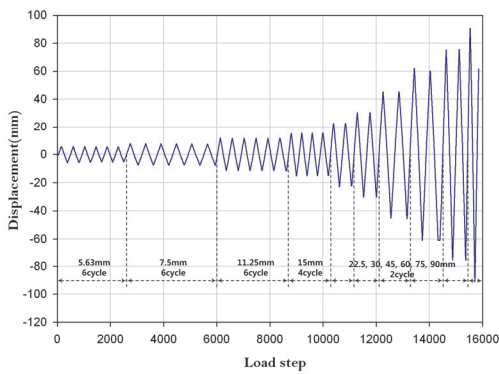


Fig. 5. Displacement loading history

Table 1. Material properties of connection members

Member	Material	$F_y$ (MPa)	Tensile strength $F_u$ (MPa)	$E$ (MPa)	$\nu$	$f_{ck}$ (MPa)
Steel tube	HSB600	450	600	205000	0.3	27
Angle	HSB600	450	600			
	SMA	422	531	44359		
Beam	SM490	325	490	205000		
Bolt	F10T	900	1000			
Bar	F10T	900	1000	44359		
	SMA	422	531			
Concrete	-	-	-	22628	0.167	27

$F_y$ =yield strength;  $F_u$ =tensile strength;  $F_{ck}$ =compressive strength  $E$ =modulus of elasticity;  $\nu$ =Poisson's ratio

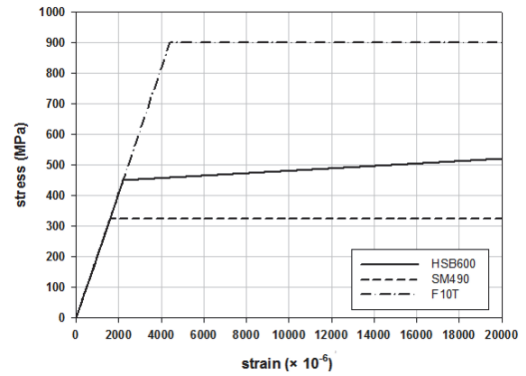


Fig. 6. Stress-strain relationships of steel components

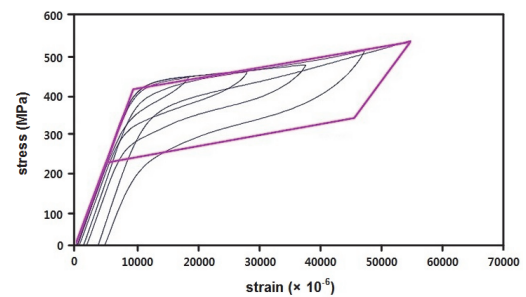


Fig. 7. Stress-strain curve for SMA bar and angle

또한, 직경이 22mm(M22)인 F10T 볼트 및 강봉을 체결할 시, 축방향으로 발생하는 프리텐션을 고려해야 한다. 따라서 본 연구의 유한요소 해석모델에서는 현행 기준(KBC2016)에 제시된 200kN의 프리텐션 값을 주었다. 상·하부  $\Gamma$ 형강을 이용한 CFT 기둥-보 접합부는 각형강관, 콘크리트,  $\Gamma$ 형강, 볼트 등과 같이 다양한 부재와 재료들로 구성되어 있으므로 이러한 부재들 사이의 상호작용은 매우 다양하게 고려되어야 한다. 일반적으로 이러한 상호작용은 부재들 사이의 접촉면 상태에 따라 달라지며, 엄밀한 3차원 비선형 유한요소해석을 수행할 경우, 실제 접촉면과 가까운 접촉조건을 적용해야 한다.

CFT 기둥-보 접합부 부재들 사이의 접촉면은 Table 2와 같이 ANSYS의 ‘Standard tangential sticking/sliding’ 옵션을 사용하여 모델링 되었으며, 이 옵션은 접촉면의 마찰 거동과 접촉면의 수직방향의 닫힘과 열림 거동이 동시에 고려될 수 있다.

접합부 부재들 사이 중에서 콘크리트와 강봉,  $\Gamma$ 형강과 강봉, 그리고  $\Gamma$ 형강과 보 사이의 접촉면은 마찰 거동이 고려되어야 하며, Table 3에 나타난 바와 같이 이러한 접촉면은 작용력에 의한 마찰의 방향에 따라서 마찰계수가 다르게 적용되어야 한다. CFT 기둥과 상부  $\Gamma$ 형강 사이의 접촉면은 휨모멘트를 받을 경우 다리의 들림 현상으로 인해서 접촉면의 분리를 허용하도록 모델링이 되었으며,  $\Gamma$ 형강과 볼트, 보와 볼트 사이의 접촉면은 접촉 후에 부재 상호간의 관입이 발생하지 않는다고 가정하였다.

**Table 2.** ANSYS contact options applied in the finite element analysis

Contact surface	Contact options	
	Contact algorithm	Behavior of contact surface
Column-Angle	Augmented Lagrange method	Standard
Beam-Angle		
Angle-Bar		
Angle-Bolt		
Concrete-Bar		
Beam-Bolt		

**Table 3.** Friction coefficients between connection members

Contact surface	Friction coefficient
Concrete-Bar	0.3
Angle-Bar	0.33
Seat angle-Seat bolt	0.23

Table 4에서와 같이 CFT 기둥-보 접합부에 사용되는  $\Gamma$ 형강의 길이, 볼트와 강봉의 수, 직경 및 피치거리는 일정하다고 가정하였다. 이에 반해  $\Gamma$ 형강 두께 및 강봉 게이지 거리의 변화에 따른 상·하부  $\Gamma$ 형강 접합부의 응력 및 변형 등과 같은 구조적 거동에 대한 경향을 파악하기 위하여,  $\Gamma$ 형강 두께  $t_{top}$ 를 7mm, 10mm, 13mm로 변화시켰으며, 강봉의 게이지거리  $g_t$ 는 45mm, 55mm, 65mm로 세 가지 경우를 고려하였다(Table 4 참조).

**Table 4.** Analytical cases selected for top-seat angle connections (unit: mm)

Analytical model designation	$t_{top}$	$t_{seat}$	$g_t$	$l_{top}, l_{seat}$		
+T7-++S10-+++G45-SASB*	7	10	45	210		
T7-S10-G45-SAMB**						
T7-S10-G45-MASB***						
T10-S10-G45-SASB	10				45	
T10-S10-G45-SAMB						
T10-S10-G45-MASB						
T13-S10-G45-SASB	13		45			
T13-S10-G45-SAMB						
T13-S10-G45-MASB						
T7-S10-G55-SASB	7		10		55	210
T7-S10-G55-SAMB						
T7-S10-G55-MASB						
T10-S10-G55-SASB	10	55				
T10-S10-G55-SAMB						
T10-S10-G55-MASB						
T13-S10-G55-SASB	13	55				
T13-S10-G55-SAMB						
T13-S10-G55-MASB						
T7-S10-G65-SASB	7	10		65	210	
T7-S10-G65-SAMB						
T7-S10-G65-MASB						
T10-S10-G65-SASB	10		65			
T10-S10-G65-SAMB						
T10-S10-G65-MASB						
T13-S10-G65-SASB	13		65			
T13-S10-G65-SAMB						
T13-S10-G65-MASB						

\*T: Top angle thickness; \*\*S: Seat angle thickness;

+++G: Gage distance

SASB\*: Steel Angle & Steel Bar; SAMB\*\*: Steel Angle & SMA

Bar, MASB\*\*\*: SMA Angle & Steel Bar

### 3. 유한요소 해석결과

CFT 기둥-보 접합부 해석모델(Table 3 참조)의 모멘트-회전각 이력곡선을 얻기 위하여 Fig. 5와 같은 단조증가 반복하중이력을 적용하였다.

각 해석모델의 이력곡선에서 내부면적으로 표시되는 에너지소산능력을 Table 5에 나타내었고, Fig. 8은 ㄱ형강의 두께가 10mm이며 게이지 거리가 55mm인 경우, 강재 ㄱ형강, 강봉, SMA ㄱ형강 및 SMA 봉을 조합하여 적용한 접합부의 모멘트-회전각 이력곡선을 보여주고 있다. Fig. 8로부터 동일한 기하학적 특성을 갖는 경우 강재 ㄱ형강과 강봉(즉, SASB)을 적용한 접합부가 SMA 봉(즉, SAMB) 또는 SMA ㄱ형강(즉, MASB)를 적용한 접합부보다 초기강성이 더 큰 것으로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, SASB 접합부에서 가장 크게 에너지가 소산되며, MASB 접합부에서 가장 작

게 에너지가 소산되는 것으로 나타났다. 에너지소산 능력의 감소가 비교적 적은 SAMB 접합부의 최대 잔류 회전각은 0.0063radian으로 나타났으며, 이는 최대 잔류 회전각이

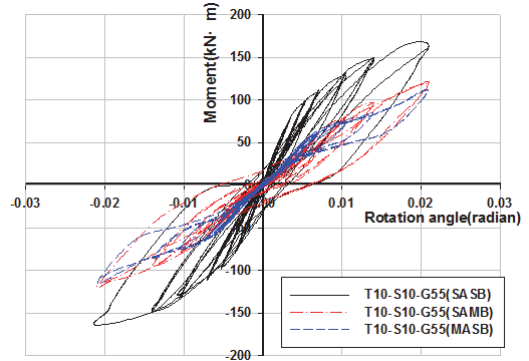


Fig. 8. Moment-rotation hysteresis loops of top angle connections of T10-S10-G55

Table 5. Comparison of the energy dissipation capacities of the top-seat angle connection models

(unit: kN·m)

Analytical model designation	$E_D$ by Step										$E_{D,}$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T7-S10-G45-SASB	90.80	89.87	442.35	670.54	1513.81	2783.26	-	-	-	-	-	5590.63
T7-S10-G45-SAMB	6.08	12.42	89.81	271.01	721.09	1529.57	3766.44	5734.65	-	-	-	12131.07
T7-S10-G45-MASB	38.10	24.69	152.91	404.48	608.20	1090.18	2393.31	3982.46	-	-	-	8694.33
T10-S10-G45-SASB	125.23	109.40	432.69	724.53	1673.55	-	-	-	-	-	-	3065.40
T10-S10-G45-SAMB	8.50	2.18	77.87	320.74	854.67	1792.76	4548.81	7528.63	9431.64	-	-	24565.80
T10-S10-G45-MASB	44.13	92.28	228.06	546.44	885.16	1567.30	3162.60	5181.32	-	-	-	11707.29
T13-S10-G45-SASB	154.01	145.84	501.56	725.58	-	-	-	-	-	-	-	1526.99
T13-S10-G45-SAMB	19.77	10.59	80.70	325.32	934.55	1612.45	3428.98	-	-	-	-	6412.36
T13-S10-G45-MASB	61.61	54.38	164.97	537.77	1074.25	1818.78	-	-	-	-	-	3711.76
T7-S10-G55-SASB	60.01	48.60	284.49	489.27	1162.09	2019.19	4486.98	-	-	-	-	8550.63
T7-S10-G55-SAMB	13.11	25.06	23.76	165.15	556.07	1216.62	3173.08	5628.35	8028.34	10640.44	-	29469.98
T7-S10-G55-MASB	34.76	14.90	107.85	296.63	472.99	705.80	1619.09	2701.19	4123.16	5659.07	-	15735.44
T10-S10-G55-SASB	92.98	82.90	349.03	514.66	1414.84	2176.90	2375.38	-	-	-	-	7006.69
T10-S10-G55-SAMB	21.84	24.98	48.71	264.92	683.91	1470.37	3798.48	6525.82	9928.82	12517.10	-	35284.95
T10-S10-G55-MASB	44.28	2.15	138.04	345.85	617.68	1006.98	2086.12	3563.11	4745.34	6149.41	-	18698.96
T13-S10-G55-SASB	127.77	124.63	406.43	570.71	1339.36	-	-	-	-	-	-	2568.90
T13-S10-G55-SAMB	25.94	27.74	27.49	237.26	728.89	1404.51	3853.05	6117.64	-	-	-	12422.52
T13-S10-G55-MASB	52.28	17.33	195.51	375.60	806.80	1207.22	2687.73	4149.20	5031.60	-	-	14523.27
T7-S10-G65-SASB	45.74	47.61	168.97	337.50	859.93	1479.93	3635.24	5172.84	5148.78	-	-	16896.54
T7-S10-G65-SAMB	14.77	15.67	9.74	117.43	378.85	800.82	2377.57	4095.36	6403.29	8668.42	-	22881.92
T7-S10-G65-MASB	18.18	26.67	62.51	175.61	291.45	440.43	1039.48	1795.67	-	-	-	3850.00
T10-S10-G65-SASB	81.33	70.41	261.91	424.84	1118.82	1817.21	3966.08	2569.31	-	-	-	10309.91
T10-S10-G65-SAMB	22.57	15.37	32.85	166.92	482.38	1006.04	2844.46	5030.09	7810.32	10628.97	-	28039.97
T10-S10-G65-MASB	30.17	49.56	84.38	234.04	445.53	735.50	1590.55	2644.51	3774.65	4801.25	-	14390.14
T13-S10-G65-SASB	104.49	87.71	316.88	361.58	1212.95	1782.08	2701.71	-	-	-	-	6267.40
T13-S10-G65-SAMB	25.16	5.40	35.84	189.14	564.19	1176.33	3349.71	5801.36	8377.20	10335.36	-	29859.69
T13-S10-G65-MASB	38.37	61.68	201.69	232.98	643.26	1048.18	2113.36	3320.30	4339.63	5784.07	-	17783.52

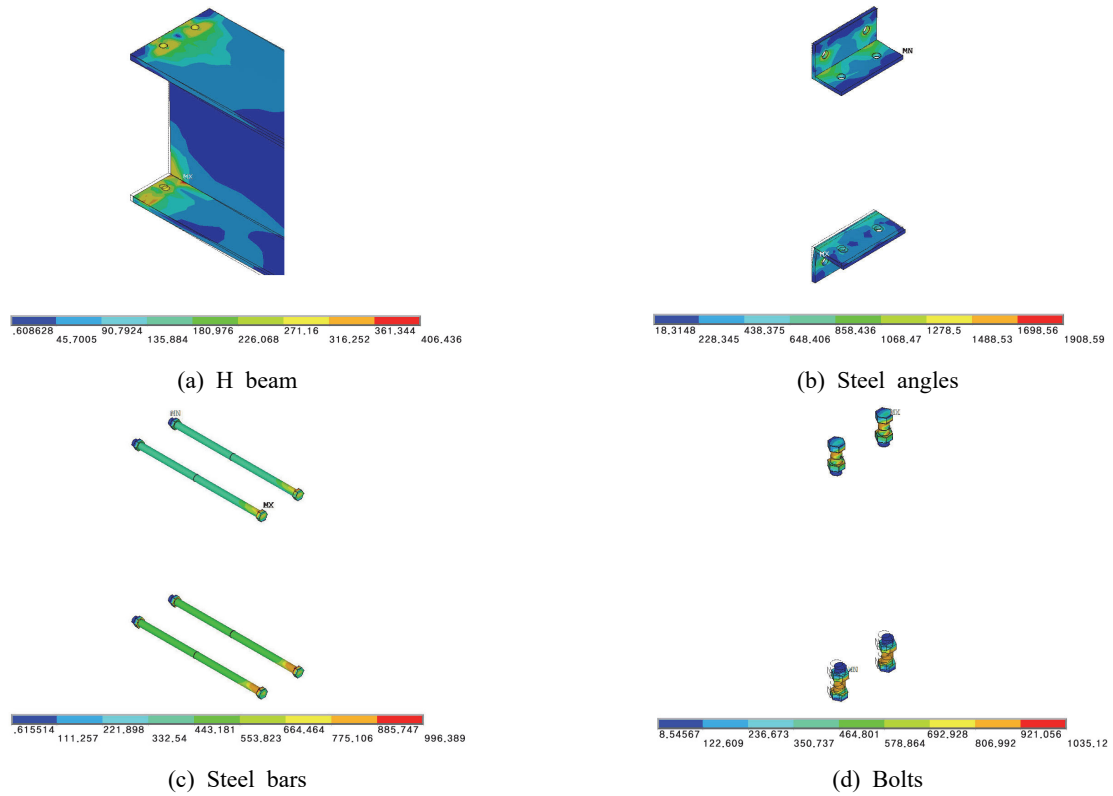


Fig. 9. Von Mises stress distribution and deformation shape of T10-S10-G55-SASB connection

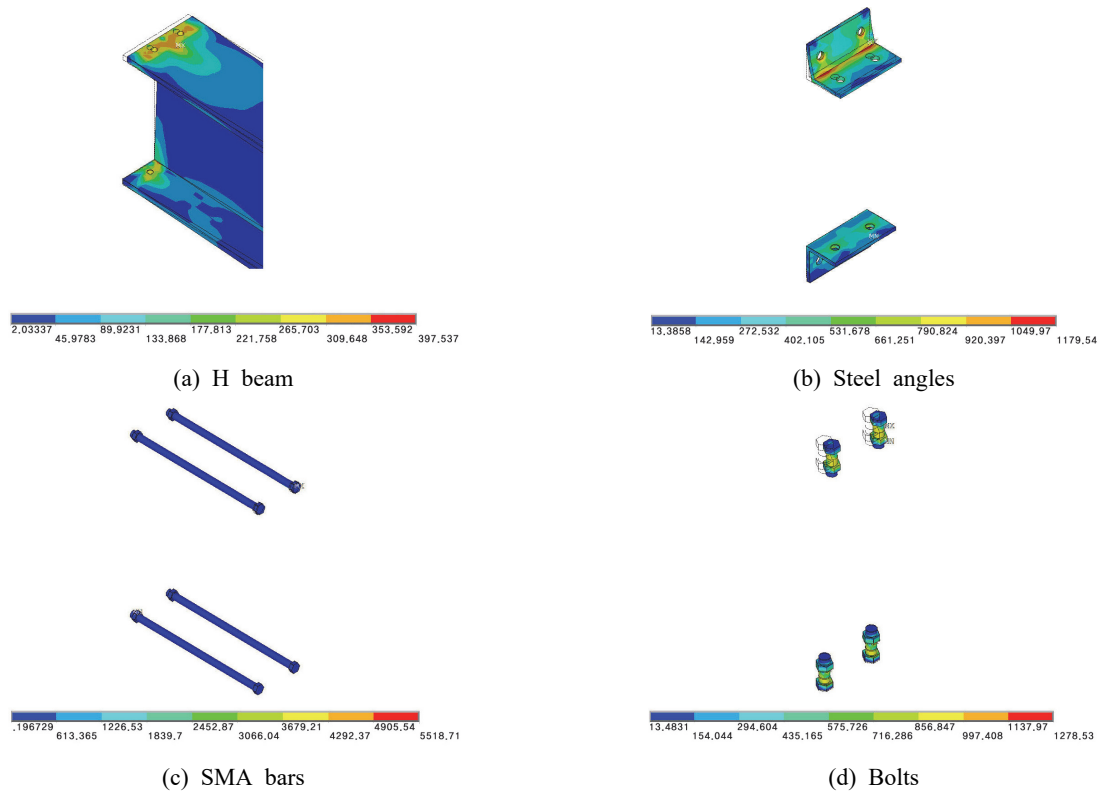


Fig. 10. von Mises stress distribution and deformation shape of T10-S10-G55-SAMB connection

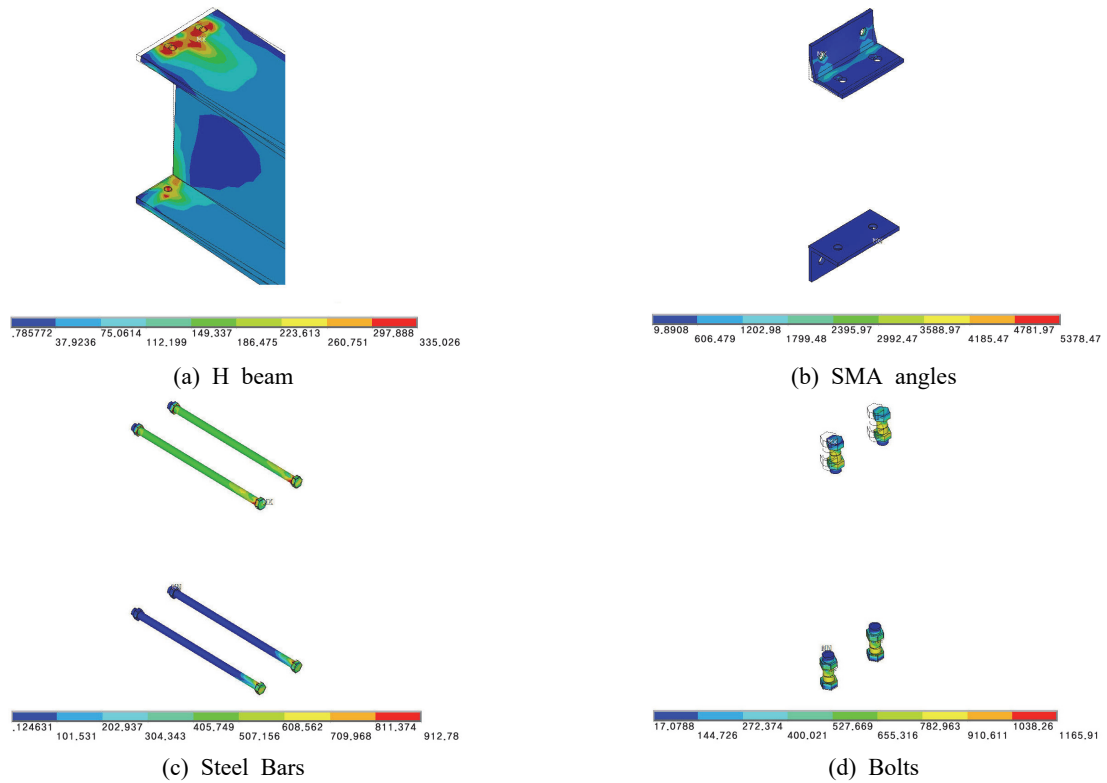


Fig. 11. Von Mises stress distribution and deformation shape of T10-S10-G55-MASB connection

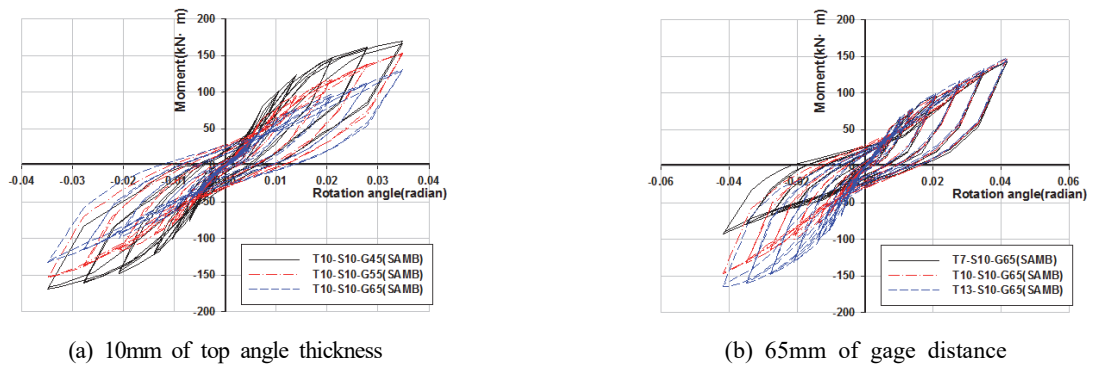


Fig. 12. Moment-rotation hysteresis loops of top angle connections with SAMB

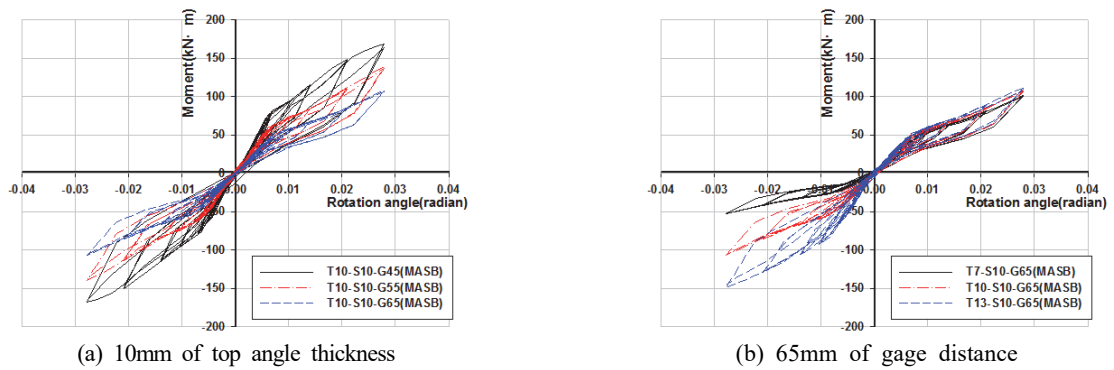


Fig. 13. Moment-rotation hysteresis loops of top angle connections with MASB



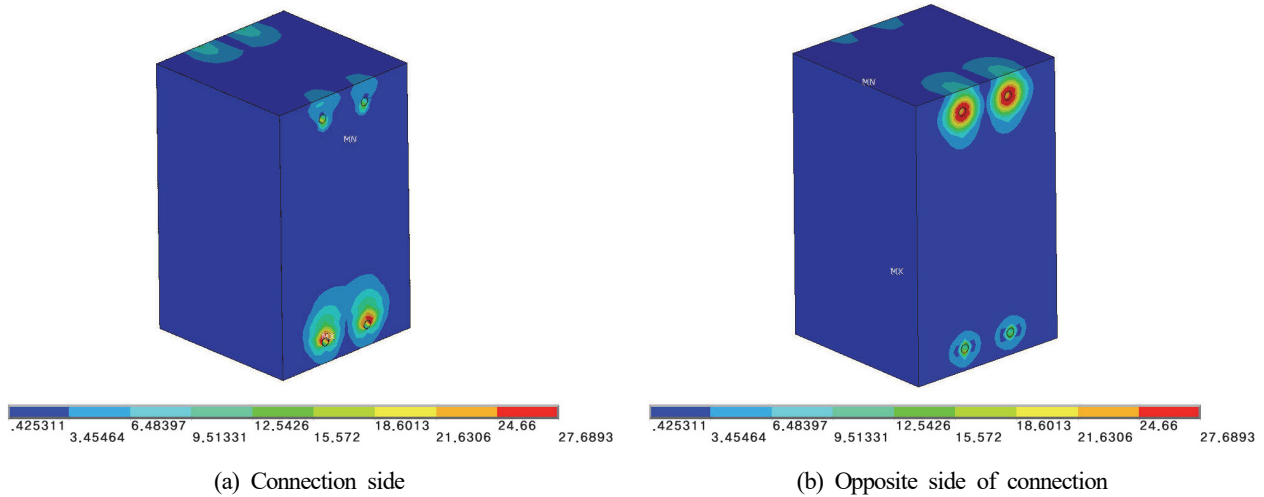


Fig. 14. Typical von Mises stress distribution of concrete in CFT column (T7-S10-G55-SAMB)

Table 6. Analytical results for top-seat angle connections under cyclic loadings

Analytical model designation	Ultimate von Mises stress		+Ultimate moment (kN·m)	Ultimate rotation (radian)
	Value (MPa)	Location		
T7-S10-G45-SASB	2154.82	Angle	135.10	0.0140
T7-S10-G45-SAMB	3898.98	SMA Bar	139.92	0.0349
T7-S10-G45-MASB	3122.81	SMA Angle	146.97	0.0349
T10-S10-G45-SASB	1434.95	Angle	163.11	0.0105
T10-S10-G45-SAMB	4612.63	SMA Bar	169.04	0.0349
T10-S10-G45-MASB	4614.11	SMA Angle	168.12	0.0279
T13-S10-G45-SASB	1272.77	Angle	173.08	0.0105
T13-S10-G45-SAMB	3695.75	SMA Bar	144.40	0.0209
T13-S10-G45-MASB	2925.02	SMA Angle	148.78	0.0195
T7-S10-G55-SASB	2913.61	Angle	130.89	0.0209
T7-S10-G55-SAMB	4866.95	SMA Bar	124.31	0.0419
T7-S10-G55-MASB	6727.42	SMA Angle	134.23	0.0419
T10-S10-G55-SASB	1908.59	Angle	164.43	0.0209
T10-S10-G55-SAMB	5518.71	SMA Bar	165.17	0.0419
T10-S10-G55-MASB	5378.47	SMA Angle	166.69	0.0419
T13-S10-G55-SASB	1611.69	Angle	167.09	0.0140
T13-S10-G55-SAMB	3720.19	SMA Bar	156.14	0.0279
T13-S10-G55-MASB	4574.79	SMA Angle	167.51	0.0279
T7-S10-G65-SASB	3652.64	Angle	132.93	0.0349
T7-S10-G65-SAMB	4194.39	SMA Bar	92.82	0.0419
T7-S10-G65-MASB	3751.89	SMA Angle	53.24	0.0279
T10-S10-G65-SASB	2061.86	Angle	155.46	0.0279
T10-S10-G65-SAMB	4951.80	SMA Bar	147.40	0.0419
T10-S10-G65-MASB	4580.97	SMA Angle	147.40	0.0419
T13-S10-G65-SASB	1896.76	Angle	161.09	0.0209
T13-S10-G65-SAMB	4750.10	SMA Bar	164.97	0.0419
T13-S10-G65-MASB	2457.35	SMA Angle	173.09	0.0419

<sup>†</sup>Ultimate moment: Maximum moment at top angle under tension

0.0068radian인 SASB 접합부보다 약 7% 복원능력을 향상시킨 것을 의미한다. SMA T형강을 사용한 MASB 접합부에서는 하중 제거 시 잔류 회전각이 거의 발생하지 않아 복원능력이 가장 뛰어난 것으로 나타났다.

Figs. 9~11은 SASB, SAMB, MASB 접합부의 최대변위 하중 하에서 이에 상응하는 접합부의 각 부재(즉, H형강 보, T형강, 봉, 볼트)의 변형도와 von Mises 응력분포를 나타내며, 여기서 일반적으로, T형강과 봉의 재료성질(즉, 강재 또는 SMA)에 따라 변형형상 및 응력분포가 달라지는 것을 알 수 있다.

Figs. 9~11로부터 SASB 접합부의 최대 von Mises 응력은 강재 T형강에서 발생하며, SAMB 접합부인 경우에는 SMA 봉에서, 그리고 MASB 접합부에서는 SMA T형강에서 최대 von Mises 응력이 발생함을 볼 수 있다. 하중이 증가하기 시작하면 T형강의 필릿과 봉의 머리 부분부터 항복하기 시작하며 응력집중 현상이 발생한다. 응력집중 현상의 심화로 T형강 필릿과 봉 머리 부분의 소성화로 인한 파단이 예측된다.

Fig. 12는 상·하부 T형강 접합부의 SMA 봉을 사용한 경우 모멘트-회전각 이력곡선으로, Fig. 12(a)는 게이지 거리를 증가시켜 접합부의 거동을, Fig. 12(b)는 상부 T형강이 인장력을 받았을 때 접합부의 거동을 살펴보고자 상부 T형강의 두께를 증가시켰다. 예상한대로 게이지 거리가 작을수록, T형강의 두께가 클수록 강성이 증가하는 거동을 보인다. 또한, 에너지 소산능력과 변형 복원능력에서 다소 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 Fig. 12와 기하학적으로 동일한 접합부에서 SMA T형강을 사용한 경우로, T형강의 기하학적 변화가 변형 복원능력에 변화를 주지 않는 것으로 나타난다.

Fig. 14는 최대 변위하중 하에서 이에 상응하는 T7-S10-G55-SAMB 접합부의 CFT 기둥내부의 콘크리트에 발생하는 전형적인 von Mises 응력분포를 보여주고 있으며, 최대 응력은 약 28MPa로 나타났다.

Table 6에 동적하중에 대한 27가지의 CFT 기둥-보 접합부 해석모델에 대한 최대응력, 최대휨모멘트 및 최대회전각을 요약하였으며, 이러한 것들은 기존의 강재와 초탄성 SMA 재료를 적용하여 더욱 효과적인 에너지소산 능력과 복원능력을 확보한 스마트 반강접을 갖는 CFT 합성골조의 비선형 동적해석에 필요한 기초적 데이터베이스가 될 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 반복하중을 받는 CFT 합성골조의 상·하부 T형강접합부에 초탄성 SMA 재료를 적용하여 3차원 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과로부터 상·하부 T형강 접합부의 모멘트 내력, 응력분포 및 파괴모드를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) T형강의 두께, 폭 및 게이지거리와 같은 기하학적 특성이 동일할 경우, 접합부 전체를 강재로 적용한 경우가 SMA 봉 또는 SMA T형강을 적용한 접합부보다 초기강성이 더 큰 것으로 나타났다.
- (2) 강재로 된 상·하부 T형강 접합부에 SMA 봉 또는 SMA T형강을 적용할 경우 에너지 소산능력은 감소하나, 변형 복원능력은 향상되는 것으로 나타났다. 더욱이, T형강에 SMA 재료를 사용할 경우 하중 제거 시 잔류 변형이 거의 발생하지 않아 복원능력이 가장 뛰어난 것으로 나타났다.
- (3) SMA T형강의 폭, 두께 및 게이지 거리의 변화에 따라 접합부의 에너지 소산능력과 각 부재의 응력분포가 달라지며, 이에 따른 파괴모드 및 변형형상이 달라지나, 이러한 T형강의 기하학적 변화가 변형 복원능력에 변화를 주지 않는 것으로 나타났다.

향후, 형상기억합금을 이용한 스마트 CFT 합성골조의 상·하부 T형강 반강접 접합부를 갖는 여러 가지 구조물의 거동을 알아보고 이해하기 위해서는 더욱 다양한 파라미터에 대한 해석적 연구와 이를 검증하기 위한 실험적 연구가 수행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2015년도 세명대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### 참고문헌(References)

[1] Abolmaali, A., Treadway, J., Aswath, P., Lu, F.K., and McCarthy, E. (2006) Hysteresis Behavior of T-Stub Connections with Superelastic Shape Memory Fasteners, *Jour-*

- nal of the Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.62, No.8, pp.831-838.
- [2] Hechtman, R.A., and Johnston, B.G. (1947) *Riveted Semi-Rigid Beam-to-Column Building Connections*, Progress Report No. 1, American Institute of Steel Construction Research at Lehigh University, USA.
- [3] Altman, W.G., Jr, Azizinamini, A., Bradburn, J.H., and Radziminski, J.B. (1982) *Moment-Rotation Characteristics of Semi-Rigid Steel Beam-to-Column Connections*, Report No. NSF/CEE-82044, University of South Carolina, USA.
- [4] Azizinamini, A., Bradburn, J.H., and Radziminski, J.B. (1985) *Static and Cyclic Behavior of Semi-Rigid Steel Beam-Column Connections*, Report No. NSF/ENG-85003, University of South Carolina, USA.
- [5] Roeder, C.W., and Dailey, R.H. (1989) The Results of Experiments on Seat Beam Connections, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.26, No. 3, pp.90-95
- [6] Ahmed, A., Kishi, N., Matsoka, K., and Komuro, M. (2001) Nonlinear Analysis on Prying of Top- and Seat-Angle Connections, *Journal of Applied Mechanics*, Japan Society of Civil Engineers, Vol.4, pp.227-236.
- [7] Pirmoz, A., Khoei, A.S., Mohammadrezapour, E., and Daryan, A.S. (2009) Moment-Rotation Behavior of Bolted Top-Seat Angle Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.65, No.4, pp.973-984.
- [8] Yang, J.-G., and Jeon, S.-S. (2009) Analytical Models for the Initial Stiffness and Plastic Moment Capacity of an Unstiffened Top and Seat Angle Connection Under a Shear Load, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.9, No.3, pp.195-205.
- [9] 양재근, 최정환, 김현광, 박재호(2011) 무보강 상·하부  $\Gamma$ 형강 접합부의 소성휨모멘트 저항능력 예측을 위한 실험 및 해석적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제5호, pp.547-555.  
Yang, J.G., Choi, J.H., Kim, H.K., and Park, J.H. (2011) Experimental Tests and Analytical Study for the Prediction of the Plastic Moment Capacity of an Unstiffened Top and Seat Angle Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.5, pp.547-555 (in Korean).
- [10] 이성주, 김주우(2013) 더블 웹브앵글 반강접 CFT 기둥-보 접합부의 이력거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제1호, pp.15-24.  
Lee, S.J., and Kim, J.W. (2013) Hysteresis Behavior of Semirigid CFT Column-to-Beam Connections with a Double Web-Angle, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.1, pp.15-24 (in Korean).
- [11] 이성주, 김주우(2014) 상·하부  $\Gamma$ 형강 반강접 CFT 기둥-보 접합부의 단조 및 이력거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제3호, pp.191-204.  
Lee, S.J., and Kim, J.W. (2014) Monotonic and Hysteresis Behavior of Semirigid CFT Column-to-Beam Connections with a Top-Seat Angle, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.191-204 (in Korean).
- [12] Chen, W.-F. (1987) *Joint Flexibility in Steel Frames*, Elsevier Applied Science, UK.
- [13] Chen, W.-F., and Kishi, N. (1989) Moment-Rotation Relation of Top- and Seat-Angle Connections, *Proceedings of the International Colloquium on Bolted and Special Connections*, USSR National Committee of IABSE, USSR, pp.15-20.
- [14] Chen, W.-F., and Lui, E.M. (1991) *Stability Design of Steel Frames*, CRC Press, UK.
- [15] Faella, C., Piluso, V., and Rizzano, G. (1996) Prediction of the Flexural Resistance of Bolted Connections with Angles, *Proceedings of IABSE Colloquium on Semi-Rigid Structural Connections*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Turkey, pp.25-27.
- [16] Faella, C., Piluso, V., and Rizzano, G. (1998) Experimental Analysis of Bolted Connections: Snug Versus Preloaded Bolts, *Journal of Environmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.124, No.7, pp.765-774.
- [17] Faella, C., Piluso, V., and Rizzano, G. (2000) *Structural Steel Semirigid Connections: Theory, Design and Software*, CRC Press, UK.
- [18] 양재근, 백민창, 이재윤, 이형동(2014) SMA 강봉으로 체결된 T-Stub의 에너지소산능력, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제3호, pp.231-240.  
Yang, J.G., Baek, M.C., Lee, J.Y., and Lee, H.D (2014) Energy Dissipation Capacity of the T-Stub Fastened by SMA Bars, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.231-240 (in Korean).
- [19] 김주우(2015) CFT 합성골조의 내진성능을 위한 스마트 반강접합의 이력거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제1호, pp.99-108.  
Kim, J.W. (2015) Hysteresis Behavior of Partially Restrained Smart Connections for the Seismic Performance of Composite Frame, *Journal of Korean Society of Steel*

- Construction*, KSSC, Vol.27, No.1, pp.99-108 (in Korean).
- [20] Auricchio, F., and Sacco, E. (1997) A One-Dimensional Model for Superelastic Shape-Memory Alloys with Different Elastic Properties Between Austenite and Martensite, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Elsevier, Vol.32, No.6, pp.1101-1114.
- [21] Auricchio, F., Taylor R.L., and Lubliner, J. (1997) Shape-Memory Alloys: Macromodelling and Numerical Simulations of the Superelastic Behavior, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier, Vol.146, pp.281-312.
- [22] ANSYS (2016) *Aqwa Reference Manual, Ver. 17.2*, ANSYS, Inc., USA.
- [23] American Institute of Steel Construction (2006) *Steel Construction Manual* (13th Ed.), AISC, USA.
- [24] 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.

---

**요 약 :** 본 논문에서는 반복하중을 받는 부분강접 접합부인 상·하부 ㄱ형강 접합부의 이력거동을 구하기 위하여 체계적인 수치해석이 수행되었다. 이러한 상·하부 ㄱ형강 접합부는 CFT 합성골조의 원상복원 및 충분한 에너지 소산 능력을 확보하기 위하여 초탄성 성질을 갖는 형상기억합금(SMA)으로 제작된 봉과 ㄱ형강이 적용된다. 접합부의 회전강성, 휨모멘트 내력 및 파괴모드를 연구하기 위하여 3차원 비선형 유한요소 해석이 수행되었다. 부가적인 다양한 구조적 거동은 ㄱ형강의 두께 및 강봉 게이지 거리로 상·하부 ㄱ형강 접합의 파라미터에 대한 영향을 설명하고 있다.

**핵심용어 :** 형상기억합금, 상·하부 ㄱ형강 접합부, CFT 합성골조, 비선형 유한요소해석, 파괴모드, 반복하중, 휨모멘트 내력

---