



CFT 합성골조의 내진성능을 위한 스마트 반강접합의 이력거동

김주우^{1*}

¹교수, 세명대학교, 건축공학과

Hysteresis Behavior of Partially Restrained Smart Connections for the Seismic Performance of Composite Frame

Kim, Joo Woo^{1*}

¹Professor, Dept. of Architecture, Semyung University, Jecheon, 390-711, Korea

Abstract - The partially restrained smart CFT (concrete filled tube) column-to-beam connections with top-seat split T connections show various behavior characteristics according to the changes in the diameter and tightening force of the fastener, the geometric shape of T-stub, and material properties. This paper presents results from a systematic three-dimensional nonlinear finite element study on the structural behavior of the top-seat split T connections subjected to cyclic loadings. This connection includes super-elastic shape memory alloy (SMA) T-stub and rods to obtain the re-centering capabilities as well as great energy dissipation properties of the CFT composite frame. A wide scope of additional structural behaviors explain the influences of the top-seat split T connections parameters, such as the different thickness and gage distances of split T-stub.

Keywords - Top-seat split T connection, CFT composite frame, Shape memory alloy, Nonlinear FE analysis, Cyclic load

1. 서론

강구조 건물의 일반적인 해석 및 설계에서 기둥-보 접합부의 이상적인 구조적 거동을 강(rigid)접합 또는 단순(simple)접합으로 취급하지만, 실제로는 많은 접합부들이 강판, 앵글, T-stub, 볼트 등과 같은 접합부의 구성요소들의 순차적인 항복으로 인한 비선형 거동을 나타내는 반강접합(semirigid connection)으로 고려되어야 한다. 강구조 건물의 안정성 확보를 위해서는 반강접으로 분류되는 여러 가지 접합부의 강도 및 회전강성 뿐 아니라, 에너지 소산 능력 및 잔류변형을 명확히 파악하여 실질적인 거동특성을 설계에 반영하여야 한다. 특히, 잔류변형은 건축물의 사용성

에 심각한 문제를 발생시키며, 이를 최소화시키는 연구가 필요하다.

SMA(shape memory alloy)는 일반적으로 오스테나이트 상태(austenite phase)와 마르텐사이트 상태(martensite phase)의 상호변화에 의하여 뛰어난 형상기억능력과 초탄성(super-elastic) 능력을 나타내는 신재료로, 형상합금의 배합, 오스테나이트와 마르텐사이트의 온도에 따라서 Fig. 1 과 같은 응력-변형률 관계 곡선을 나타낸다^[1]. 이러한 형상 기억합금은 일반 강재보다 에너지소산 능력, 잔류변형 없는 복원능력, 모멘트-회전각 능력, 내부식성 등에서 우수하다. 이러한 우수성 때문에 지진지역에서 내진 건축물을 설계 및 시공하는데 최근 많이 채택되고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 잔류변형을 최소화시키기 위하여 상·하부 스플릿 T 접합부에 SMA를 적용하고자 한다.

반강접 접합부의 한 형태인 스플릿 T-stub 접합은 사용 하중 하에서 큰 마찰력이 요구되지 않는 지압볼트를 통하여 보에서 기둥으로 전달력이 전달되도록 설계되며, 주로 H형강 기둥과 보로 설계되는 중·저층 건물에 적용된다. 지금까지 H형강 기둥-보의 스플릿 T-stub 접합부가 갖는 강도와

Note.-Discussion open until August 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 4, 2014; revised December 22, 2014; approved on January 19, 2015.

Copyright © 2015 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

강성을 파악하기 위하여, 보 웹 강성에 의한 지압이 앵글의 거동에 미치는 영향과 앵글의 기하학적 형상, 볼트의 개수 및 크기에 따른 모멘트-회전각 관계 및 전단력-회전각 관계 등에 대한 다양한 실험과 해석연구가 수행되었다 [2],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9].

CFT(Concrete Filled Steel Tube)구조는 원형 혹은 각형단면의 강관내부에 콘크리트를 충전한 구조로 강관과 충전콘크리트의 상호 합성작용에 의하여 강성, 내력, 변형성능, 내화, 시공 등의 측면에서 우수한 특성을 발휘하는 구조시스템이다. 특히, 반복하중의 작용에 대해서는 우수한 내진성능을 발휘하고 경제성이 우수하며 범용성이 높아 사용이 증가하고 있는 추세이다. 하지만 우리나라에서는 콘크리트 충전성 확보 및 품질 검사 어려움, 내진성능을 갖춘 접합부 개발의 부족 및 규격화와 표준접합부상세 제공 부족 등으로 실무에 많이 적용되지 않는다. 일반적으로 CFT 기둥과 보의 접합부에는 접합부의 응력집중이나 변형에 대한 보강을 위하여 다이아프램을 사용하는데, 이러한 경우 용접에 대한 주의가 반드시 필요하게 되며, 또한 내측 또는 관통 다이아프램을 사용할 경우에는 콘크리트의 충전성에 주의해야 한다.

본 연구에서는 다이아프램의 이용을 배제하고 높은 연성 및 시공성의 확보 외에 에너지소산과 복원 능력을 확보하기 위하여, 전형적인 상·하부 스플릿 T 접합 형태에 SMA를 적용한 CFT 기둥-보 접합부에 대한 상세를 제공하였다. 최근에는 Yang *et al.* [10]이 SMA 강봉으로 체결된 T-stub가 축방향 인장력을 받는 경우에 에너지소산 능력을 파악하였다. 그러나 SMA를 이용한 CFT 기둥-보의 접합부의 거동 예측과

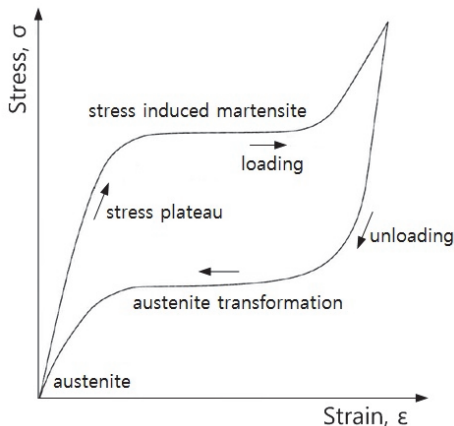


Fig. 1. Stress-strain relationship and super-elasticity behavior of SMA

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 스플릿 T 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 ξ_A 와 ξ_S 로 가정할 때 다음 관계를 만족한다 [11],[12].

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

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

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 것

을 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), α 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.

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

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

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

여기서, H^{AS} 는 다음과 같이 정의된다.

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

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

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

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

여기서, H^{SA} 는 다음과 같이 정의된다.

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

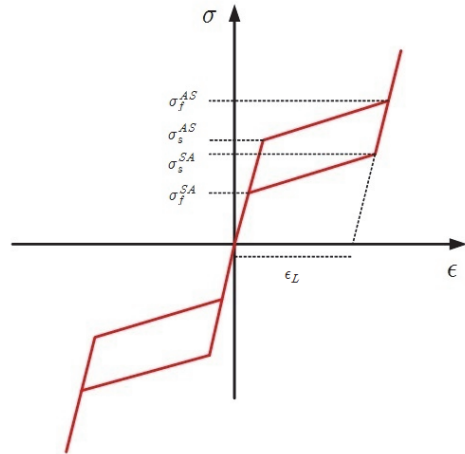


Fig. 2. Decomposed stress-strain relationship of super-elastic SMA

지금까지 언급된 식을 적용하면 SMA 응력-변형률 관계를 탄성과 소성 변형율로 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 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. 이 때 Fig. 2의 최대 변형률(ϵ_L)은 등온과정(isothermal process)에서 복구된다.

2.2 스플릿 T 접합부의 기하학적 및 재료 특성

상·하부 스플릿 T-stub를 이용한 전형적인 CFT 기둥과 H형강 보의 접합부에 대한 기하학적인 형상 및 크기가 Fig. 3에 나타나 있다. 이 때 CFT 기둥의 높이와 H형강 보의 길이는 각각 3,200 mm와 2,150 mm이며, 1개의 상부 스플릿 T형강과 1개의 하부 스플릿 T형강 및 16개의 강봉과 12개의 볼트로 연결되어 있다. Fig. 4에서와 같이 범용유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS^[13]를 이용하여 접합부의 각 요소(즉, 각형강관, 콘크리트, H형강, 스플릿 T-stub, 강봉, 볼트)에 대한 3차원 유한요소모델링이 이루어졌다.

이러한 모델링 과정에서 강재의 재료 및 기하학적인 비선형성을 지원하는 ANSYS의 3차원 요소인 Solid 185와 CFT 기둥의 콘크리트의 재료적 특성을 포함하는 3차원 요소인 Solid 65가 적용되었다. Fig. 4의 확대된 스플릿 T형강, 볼

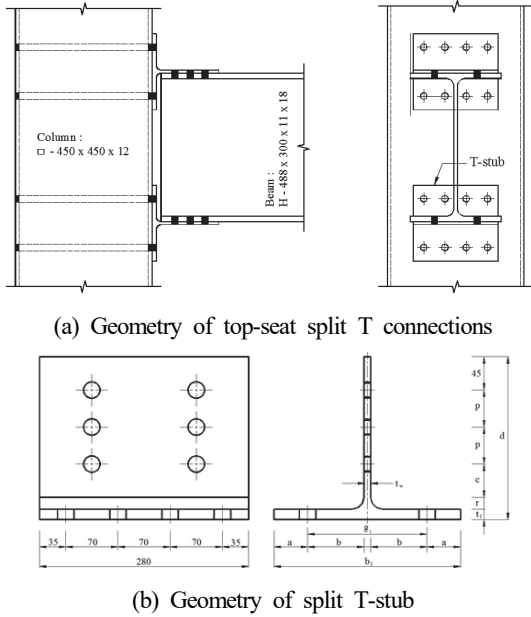


Fig. 3. Configurations of CFT column-to-beam connections

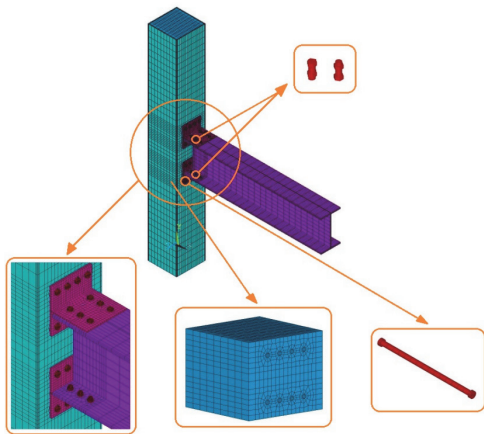


Fig. 4. Typical finite element model of CFT column-to-beam connection with a top-seat split T-stub

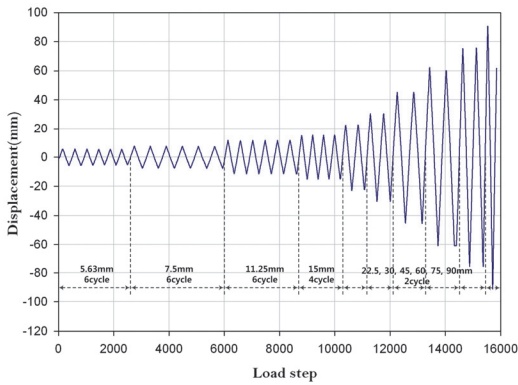


Fig. 5. Displacement loading history

트, 강봉 및 CFT 기둥의 콘크리트의 유한요소모델로부터 응력집중이 발생할 가능성이 있는 부분에 더욱 세밀한 요소망이 형성되어있음을 볼 수 있다. CFT 기둥 양쪽 끝단의 경계 조건은 고정으로 하였으며 하중은 H형강 보의 자유 단부에 가해지는 변위제어법을 이용하였다. 변위하중은 Fig. 5와 같이 AISC 내진설계 매뉴얼^[14]에서 제시한 단조증가 반복하중이력을 이용하였다.

기둥-보 접합부의 각 부재에 적용되는 강재의 재료특성 및 CFT 기둥 내부의 콘크리트의 재료특성은 Table 1에 나타나 있다. 여기서 강관과 스플릿 T 형강에 적용되는 HSB600 과 H형강에 적용되는 SM490 강재 및 F10T 볼트와 강봉의 응력-변형률 관계는 Fig. 6과 같이 bilinear와 완전탄소성으로 가정하였다. 접합부의 복원능력을 확인하기 위한 SMA 봉과 SMA T-stub의 재료특성은 Fig. 7과 같이 DesRoches *et al.*^[15]의 응력-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 p 는 소성응력을 나타낸다.

또한, 직경이 22 mm(M22)인 F10T 볼트 및 강봉을 체결할 때 축방향으로 발생하는 프리텐션을 고려해야 하는데, 본

Table 1. Material properties of connection members

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

F_y = yield strength, F_u = tensile strength, F_{ck} : compressive strength, E = modulus of elasticity, ν = Poisson's ratio

연구의 유한요소 해석모델에서는 현행 기준(KBS2009)에 제시된 200kN의 프리텐션 값을 주었다. 상·하부 스플릿 T형강을 이용한 CFT 기둥-보 접합부는 각형강관, 콘크리트, 스플릿 T형강, 강봉, 볼트 등과 같이 다양한 부재와 재료들로 구성되어 있기 때문에, 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 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, 스플릿 T형강과 강봉, 그리고 스플릿 T형강과 보 사이의 접촉면은 마찰 거동이 고려되어야 하며, 이러한 접촉면 각각에 대한 마찰계수가 Table 2에 제시되어 있다. Table 2에서 CFT 기둥과 상부 스플릿 T형강 사이의 접촉면은 휨모멘트를 받는 다리의 들림 현상으로 인한 접촉면의 분리를 허용하도록 모델링이 되

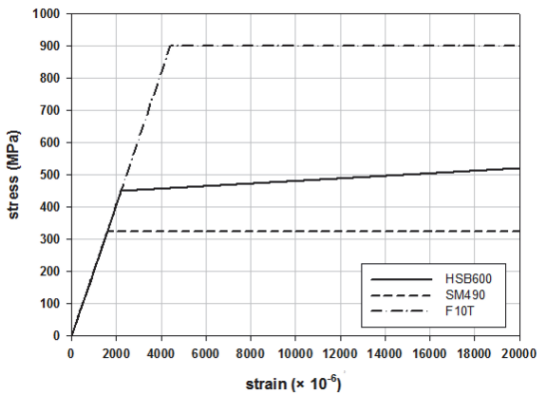


Fig. 6. Stress-strain relationships of steel components

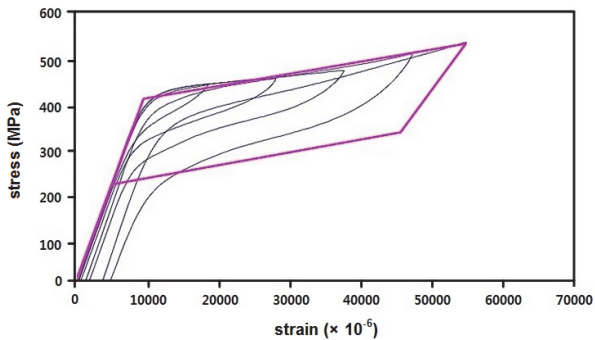


Fig. 7. Stress-strain curve for SMA bar and T-stub

Table 2. Friction coefficients between connection members

Contact surface	Friction coefficient
Concrete-Bar	0.3
T stub-Bar	0.33
T stub-Bolt	0.23

Table 3. Analytical cases selected for top-seat split T connections (unit: mm)

Analytical model designation	b_f	t_w	t_f	g_t	a	b
⁺ G160- ⁺⁺ T14- ⁺⁺⁺ B250-STSB [*]	250	9	14	160	55	75.5
G160-T14-B250-STMB ^{**}						
G160-T14-B250-MTSB ^{***}						
G210-T15-B300-STSB	300	10	15	210	45	100
G210-T15-B300-STMB						
G210-T15-B300-MTSB						

⁺G : Gage distance, ⁺⁺T : T-stub thickness, ⁺⁺⁺B : T-stub width, STSB^{*} : Steel T-stub & Steel Bar; STMB^{**} : Steel T-stub & SMA Bar, MTSB^{***} : SMA T-stub & Steel Bar

었으며, 스플릿 T형강과 볼트, 보와 볼트 사이의 접촉면은 접촉 후에 부재 상호간의 관입이 발생하지 않는다고 가정하였다.

Table 3에서와 같이 CFT 기둥-보 접합부에 사용되는 볼트와 강봉의 수는 일정하다고 가정하였다. 다른 한편으로, 스플릿 T-stub의 플랜지 두께 및 강봉 게이지 거리의 변화에 따른 스플릿 T 접합부의 에너지소산능력과 응력 및 변형 등의 구조적 거동을 파악하기 위하여, 스플릿 T-stub의 플랜지 두께 t_f 를 14 mm와 15 mm로 변화시켰으며, 강봉 게이지 거리 g_t 는 160 mm와 210 mm를 고려하였다. 또한 접합부의 복원능력을 파악하기 위하여 CFT 기둥과 T-stub를 연결하는 강봉과 강재 T-stub에 SMA를 적용하여 FE 모델링을 수행하였다(Table 3 참조).

3. 유한요소 해석결과

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

Fig. 8은 T-stub의 두께와 폭이 각각 15mm와 300mm이며 게이지 거리가 210mm인 경우, 강재 T-stub, 강봉, SMA T-stub 및 SMA 봉을 조합하여 적용한 접합부의 모멘트-회

전각 이력곡선을 보여주고 있다. Fig. 8로부터 동일한 기하학적 특성을 갖는 경우 강재 T-stub와 강봉(즉, STSB)을 적용한 접합부가 SMA 봉(즉, STMB) 또는 SMA T-stub(즉, MTSB)를 적용한 접합부보다 초기강성이 더 큰 것으로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, STSB 접합부에서 가장 크게 에너지가 소산되며, MTSB 접합부에서 가장 작게 에너지가 소산되는 것으로 나타났다. 에너지소산 능력의 감소가 비교적 적은 STMB 접합부의 최대 잔류 회전각은 0.0164radian으로 나타났으며, 이는 최대 잔류 회전각이 0.0233 radian인 STSB 접합부보다 약 30% 복원능력을 향상시킨 것을 의미한다. SMA T-stub를 사용한 MTSB 접합부에서는 하중 제거 시 잔류 회전각이 거의 발생하지 않아 복원능력이 가장 뛰어난 것으로 나타났다.

Fig. 9-11은 STSB, STMB, MTSB 접합부의 최대변위하중 하에서 이에 상응하는 접합부의 각 부재(즉, H형강 보, T-stub, 봉, 볼트)의 변형도와 von Mises 응력분포를 나타내며, 여기서 일반적으로, T-stub와 봉의 재료성질(즉, 강재 또는 SMA)에 따라 변형형상 및 응력분포가 달라지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9-11로부터 STSB 접합부의 최대 von Mises 응력은 강재 T-stub에서 발생하며, STMB 접합부인 경우에는 SMA 봉에서, 그리고 MTSB 접합부에서는 SMA T-stub에 최대 von Mises 응력이 발생함을 볼 수 있다. 하중이 증가하기 시작하면 T-stub 필릿과 봉의 머리 부분부터 항복하기 시작하며 응력집중 현상이 발생한다. 응력집중 현상의 심화로 T-stub 필릿과 봉 머리 부분의 소성화로 인한 파단이 예측된다.

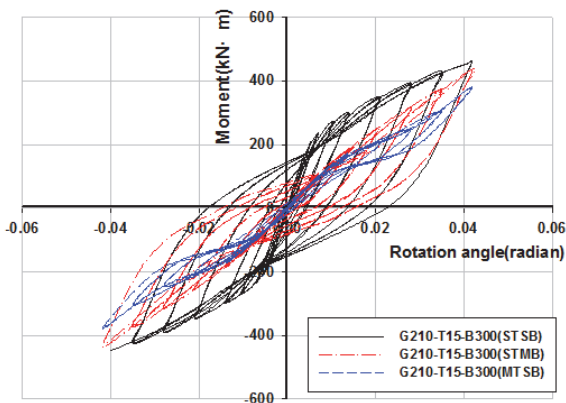


Fig. 8. Moment-rotation hysteresis loops of T-stub connections of G210-T15-B300

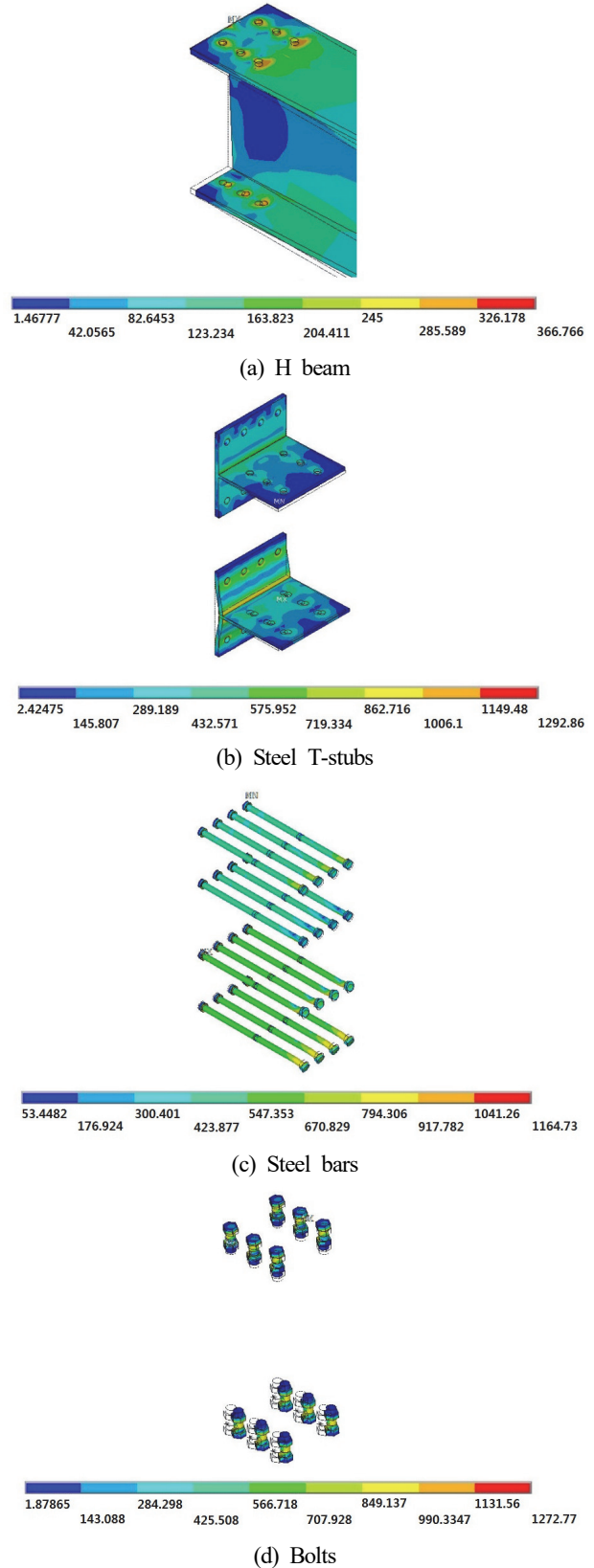
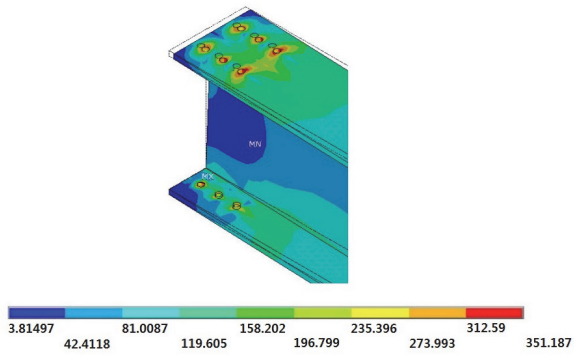
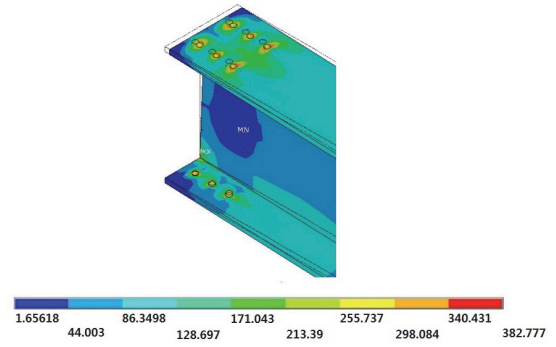


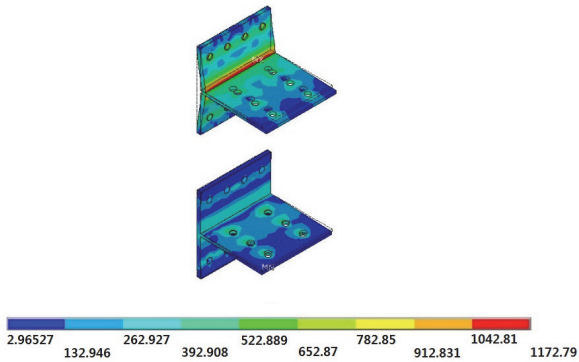
Fig. 9. von Mises stress distribution and deformation shape of G210-T15-B300-STSB connection



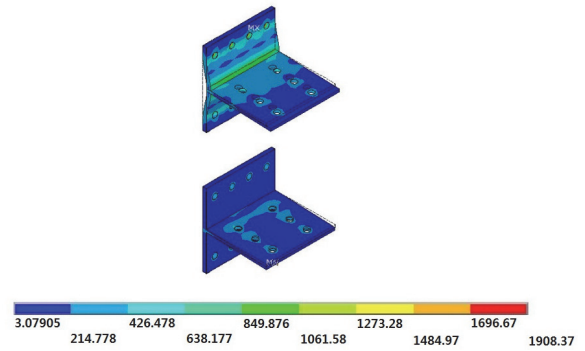
(a) H beam



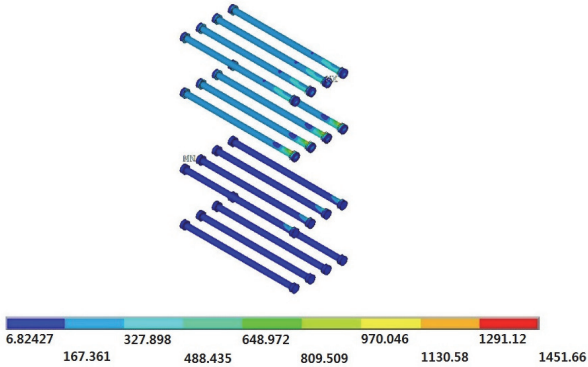
(a) H beam



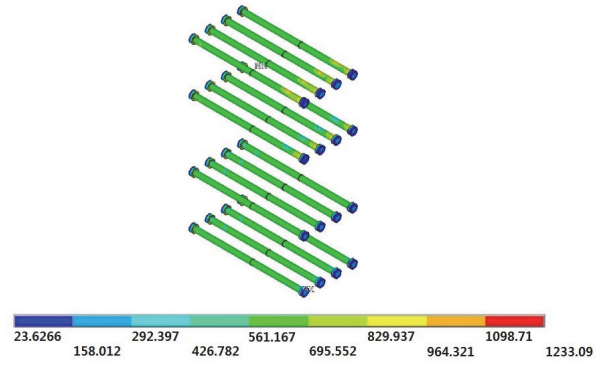
(b) Steel T-stubs



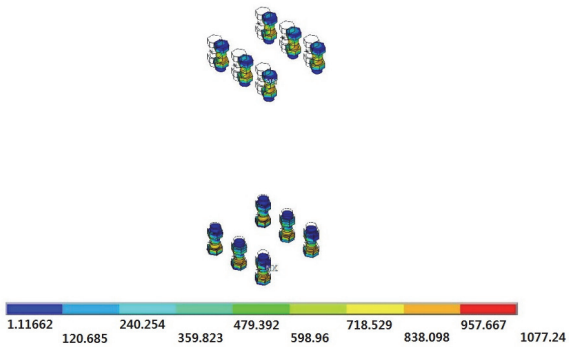
(b) SMA T-stubs



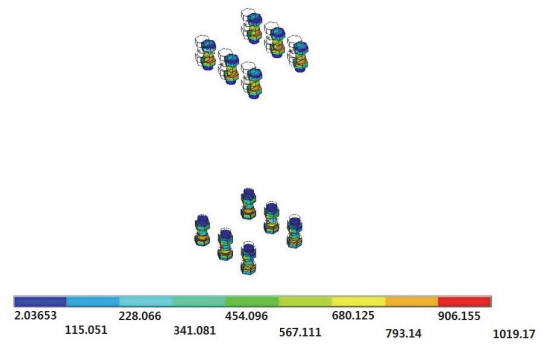
(c) SMA bars



(c) Steel bars



(d) Bolts



(d) Bolts

Fig. 10. von Mises stress distribution and deformation shape of G210-T15-B300-STMB connection

Fig. 11. von Mises stress distribution and deformation shape of G210-T15-B300-MTSB connection

Fig. 12는 T-stub 접합부에 SMA 봉을 사용한 경우로, G160-T14-B250-STMB 접합부와 게이지거리, 두께 및 폭을 증가시킨 G210-T15-B300-STMB 접합부의 모멘트-회전각 이력곡선을 보여주고 있다. 예상한대로, G210-T15-B300-STMB인 경우 G160-T14-B250-STMB보다 전체적으로 강성이 증가하는 거동을 보인다. 또한, 에너지 소산능력은 다소 증가하는 것으로 나타났으나, 변형 복원능력에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 Fig. 12와 기하학적으로 동일한 접합부에서 SMA T-stub를 사용한 경우로, Fig. 12와 마찬가지로 T-stub의 기하학적 변화가 변형 복원능력에 변화를 주지 않는 것으로 나타난다.

Fig. 14는 최대 변위하중 하에서 이에 상응하는 G160-T14-B250-STMB 접합부의 CFT 기둥내부의 콘크리트에 발생하

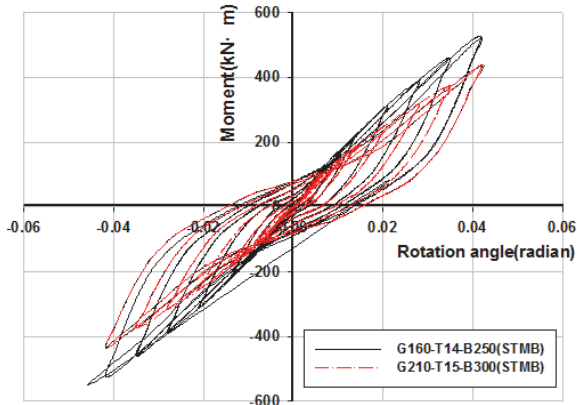


Fig. 12. Moment-rotation hysteresis loops of T-stub connections with STMB

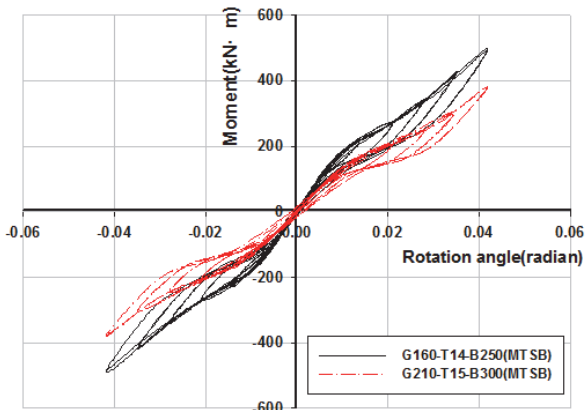


Fig. 13. Moment-rotation hysteresis loops of T-stub connections with MT SB

는 전형적인 von Mises 응력분포를 보여주고 있으며, 최대 응력은 약 28 MPa로 나타났다.

Table 4에 동적하중에 대한 6가지의 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.

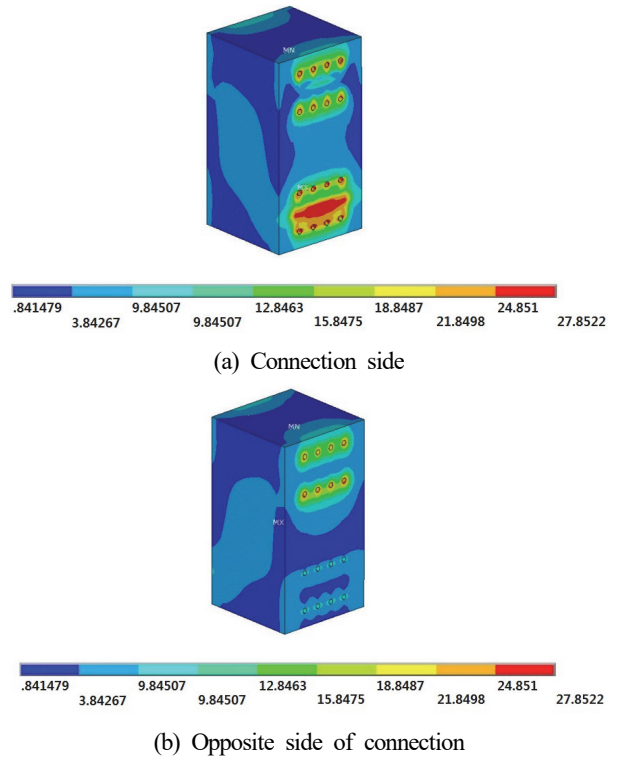


Fig. 14. Typical von Mises stress distribution of concrete in CFT column (G160-T14-B250-STMB)

Table 4. Analytical results for top-seat split T connections under cyclic loadings

Analytical model designation	Ultimate von Mises stress		Ultimate moment (kN·m)	Ultimate rotation (radian)
	Value (MPa)	Location		
G160-T14-B250-STSB	1776.66	T-stub	535.83	0.0209
G160-T14-B250-STMB	1664.59	SMA bar	526.93	0.0419
G160-T14-B250-MT SB	2173.81	SMA T-stub	491.49	0.0419
G210-T15-B300-STSB	1292.86	T-stub	460.49	0.0419
G210-T15-B300-STMB	1451.66	SMA bar	437.07	0.0419
G210-T15-B300-MT SB	1908.37	SMA T-stub	380.18	0.0419

4. 결론

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

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

향후, 형상기억합금을 이용한 스마트 CFT 합성골조의 반강접 접합부를 갖는 여러 가지 구조물의 거동을 알아보고 이해하기 위해서는 파라미터를 더욱 다양하게 적용시킨 해석적 연구와 이를 검증하기 위한 실험적 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 세명대학교 교수연구년제의 지원을 받아 수행되었음.

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, *Journal of the Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.62, No.8, pp.831-838.

[2] Piluso, V., Faella, C., and Rizzano, G. (2001) Ultimate Behavior of Bolted T-Stubs. I: Theoretical Model, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.6, pp.686-693.

[3] Swanson, J.A. (2002) Ultimate Strength Prying Models for Bolted T-Stub Connections, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.39, No.3, pp. 136-147.

[4] 양재근, 이길영(2006) 더블앵글 접합부의 초기강성 및 극한모멘트 산정을 위한 해석모델, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제3호, pp.311-320.

Yang, J.G., and Lee, G.Y. (2006) Analytical Models for the Initial Stiffness and Ultimate Moment of a Double Angle Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.3, pp.311-320 (in Korean).

[5] 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.

[6] 양재근, 김윤, 박재호(2012) 상·하부 스플릿 T 접합부의 초기회전강성 예측모델, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제3호, pp.279-287.

Yang, J.G., Kim, Y., and Park, J.H. (2012) Prediction Model for the Initial Rotational Stiffness of a Double Split T Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.3, pp.279-287 (in Korean).

[7] 양재근, 김주우, 김윤(2012) 상·하부 스플릿 T 접합부의 휨강도 설계식, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제5호, pp.511-520.

Yang, J.G., Kim, J.W., and Kim, Y. (2012) Design Formula for the Flexural Strength of a Double Split Tee Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.5, pp.511-520 (in Korean).

[8] 이성주, 김주우(2013) 더블 웹앵글 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).

- [9] 이성주, 김주우(2014) 상·하부 Γ 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).
- [10] 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).
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] ANSYS (2012) *ANSYS Multiphysics, Ver. 14.5*, ANSYS Inc., USA.
- [14] American Institute of Steel Construction (2006) *Steel Construction Manual* (13th Ed.), USA.
- [15] 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 : 상하부 스플릿 T 접합부를 이용한 스마트 CFT 기둥-보 접합부는 긴결재의 직경과 체결력, 스플릿 T 형강의 기하학적 형상, 재료적 물성 특성 등의 변화에 의하여 상이한 거동특성을 나타낸다. 본 논문은 반복하중을 받는 상·하부 스플릿 T 접합부의 구조적 거동에 대해 체계적으로 수행된 3차원 비선형 유한요소 해석으로부터 얻은 결과를 제시하고 있다. 이러한 상·하부 스플릿 T 접합부는 CFT 합성골조의 변위복원 및 충분한 에너지 소산 능력을 확보하기 위하여 초탄성 성질을 갖는 형상기억합금(SMA)과 강으로 제작된 봉과 T-stub가 적용된다. 부가적인 다양한 구조적 거동은 T-stub의 두께 및 게이지 거리로 상·하부 스플릿 T 접합부의 파라미터에 대한 영향을 설명하고 있다.

핵심용어 : 상·하부 스플릿 T접합부, CFT 합성골조, 형상기억합금, 비선형 유한요소해석, 반복하중
