

셀프센터링 더블 웨브앵글 반강접 CFT 기둥-보 접합부의 이력특성

김주우^{1*} · 김창준²

¹교수, 세명대학교, 건축공학과, ²석사과정, 세명대학교, 건축공학과

Hysteresis Characteristics of Self-Centering Semirigid CFT Column-to-Beam Double Web-Angle Connections

Kim, Joo-Woo^{1*}, Kim, Chang Jun²

¹Professor, Dept. of Architecture, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

²Graduate Research Assistant, Dept. of Architecture, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea

Abstract - In this study a systematic numerical analysis is performed to obtain the hysteresis behavior of partially restrained double web-angle connections subjected to cyclic loading. This double web-angle connections include superelastic shape memory alloy (SMA) components in order to obtain proper energy dissipation effects as well as the re-centering capacities of a CFT composite frame. The three-dimensional (3D) nonlinear finite element models of the connections are built to probe into the rotational stiffness, bending moment capacity, and failure modes. A wide scope of additional structural behaviors describe the different effects of the connection's parameters, such as the various thickness of connection angles and the gage distances.

Keywords - Shape memory alloy, Double web-angle connection, CFT composite frame, Bending moment capacity, 3D nonlinear FE analysis, Cyclic load

1. 서론

형상기억합금(shape memory alloy, SMA)은 충분한 연성을 확보하고 있으며 열에너지를 이용하여 원래의 형상으로 되돌아갈 수 있는 성질로 인하여 다양한 공학 분야에 적용되고 있는 신소재이다. Fig. 1은 전형적인 SMA의 응력-변형률 관계^[1]를 나타내고 있으며, 여기서 오스테나이트 상태(austenite phase)와 마르텐자이트 상태(martensite phase)의 상태변화에 의하여 물체의 고유형상을 기억하는 뛰어난 형상 기억 능력과 초탄성 효과(superelastic effect)를 보여주고 있다. 다양한 분야에 대한 잠재력을 지닌 SMA는 와이어나 강봉, 또는 고성능 및 스마트 댐퍼의 형태로 강구조 건축물에 적용함으로써 혁신적인 원상복원 장치를 갖춘 내진 구조 개

발을 위하여 구조공학 분야의 많은 연구자들의 지속적인 관심을 모으고 있다^[2].

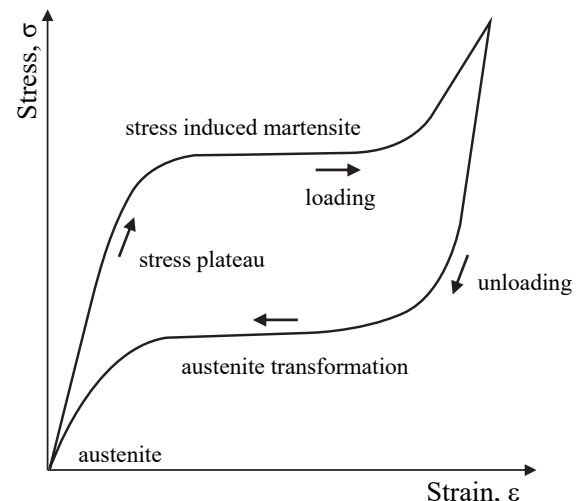


Fig. 1. Stress-strain relationship and super-elasticity behavior of SMA

Note.-Discussion open until April 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 09, 2019; revised June 03, 2019; approved on June 03, 2019. Copyright © 2019 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

반강접 접합부의 한 형태인 더블 웨브앵글 접합은 사용하중 하에서 큰 마찰력이 발생되지 않는 지압볼트를 통하여 보

에서 기둥으로 모멘트보다는 전단력이 주로 전달되며, 일반적으로 H형강 기둥과 보로 설계되는 중·저층 강구조 건물에 적용된다. 최근까지 H형강 기둥-보의 더블 웹앵글 접합부의 초기강성 및 극한모멘트 그리고 이력거동을 파악하기 위하여, 앵글의 기하학적인 형상, 볼트의 크기 및 개수에 따른 모멘트-회전각의 관계 및 전단력-회전각의 관계 등에 대한 정적 및 동적 해석과 실험 연구가 수행되었다^{[3][6]}.

CFT(Concrete Filled Steel Tube)기둥은 사각형 또는 원형 단면 등의 속이 비어있는 강관내부에 콘크리트를 채움으로써, 충전 콘크리트는 강관 자체의 국부좌굴을 감소시키며 강관과 콘크리트의 합성 작용에 의해서 동일한 크기의 단면을 갖는 기둥의 압축내력을 증가시킨다. 따라서 CFT 기둥 시스템은 강성, 내력, 변형성능, 내화 등의 측면에서 우수한 특성을 지니고 있다. 일반적으로 CFT 기둥-보 접합부에는 다이아프램을 사용하여 접합부의 응력집중 또는 국부변형에 대하여 보강을 하는데, 이 경우 다이아프램의 용접에 대한 철저한 검증이 필요하게 되며, 또한 CFT 기둥에 내측 또는 관통 다이아프램이 적용될 경우에는 콘크리트의 충전성을 면밀히 검토하여야 한다.

최근에 Yang *et al.*^[7]과 Kim^[8]은 반복하중을 받는 CFT 기둥-보의 접합부에 SMA 봉으로 체결된 스플릿 T-stub 접합부의 에너지소산 능력과 원상복원 효과를 조사하였다. 그러나 초탄성 SMA를 적용한 CFT 기둥-보의 접합부의 거동 예측과 휨모멘트 내력 구축을 위한 국내의 연구는 아직 미미하며, 구조설계에 필요한 다양한 접합부 상세 개발 및 설계 지침 제안 등이 구체적으로 이루어지지 않은 실정이다.

본 연구에서는 CFT 기둥-보의 반강접 접합부의 높은 연성과 시공성 외에 에너지 소산과 원상복원 능력을 얻기 위하여, 더블 웹앵글과 강봉을 이용한 접합부 상세를 제시하였다. 앵글 두께 및 강봉의 게이지 거리를 변수로 하여, 3차원 비선형 유한요소 해석결과를 통하여 반복하중을 받는 SMA 적용 CFT 합성골조의 더블 웹앵글 접합부의 응력 분포와 파괴모드를 분석하였다. 또한 모멘트와 회전각의 이력거동을 이용하여 최대 휨모멘트 내력, 에너지소산 및 원상복원 능력 등을 알아보고자 한다.

2. 3차원 유한요소 해석모델

Fig. 2는 더블 웹앵글을 이용한 전형적인 CFT 기둥과 H형강 보의 접합부에 대한 기하학적인 형상 및 크기를 나타

내고 있다. 이 때 높이가 3,200 mm인 CFT 기둥과 길이가 2,150mm인 H형강 보는 2개의 웹앵글, 8개의 강봉과 8개의 볼트로 연결되어 있다(Fig. 2 참조). Fig. 3은 범용유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS^[11]를 이용하여 CFT 기둥-보 접합부의 각 요소(즉, 각형강관, 콘크리트, H형강, 앵글, 강봉, 볼트)에 대한 3차원 유한요소모델을 보여주고 있다.

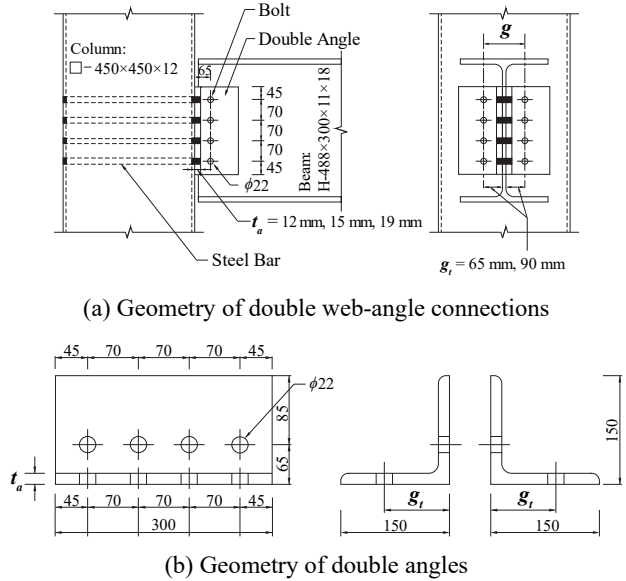


Fig. 2. Configurations of CFT column-to-beam connections

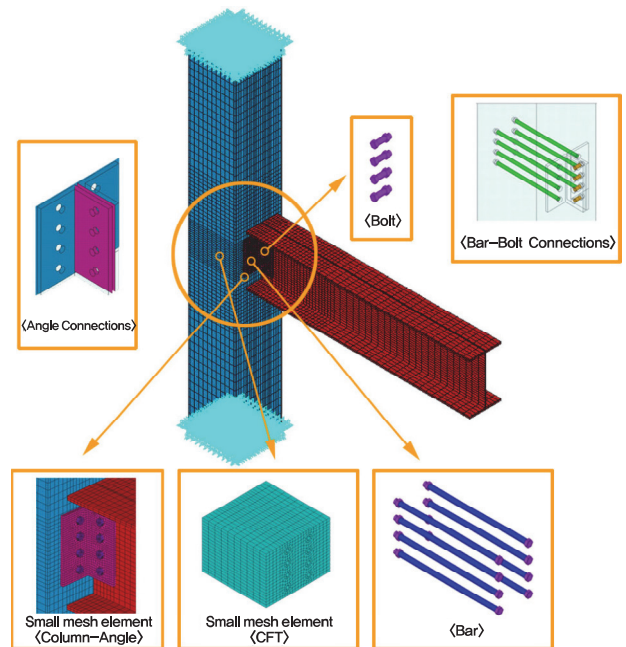


Fig. 3. Typical finite element model of CFT column-to-beam connection with double-web angles

유한요소모델링 과정에서 강재의 재료 및 기하학적 비선형형을 지원하는 ANSYS의 3차원 요소인 Solid 185와 CFT 기둥 내부의 콘크리트의 비선형 물성치를 나타낼 수 있는 3차원 요소인 Solid 65를 적용하였다. 또한 Fig. 3에서 웹 앵글, 볼트, 강봉 및 CFT 기둥의 콘크리트의 확대된 부분으로부터 응력집중이 발생할 수 있는 부분에 더욱 조밀한 유한요소망이 형성되어있음을 볼 수 있다. CFT 기둥의 양쪽 끝단의 경계조건은 고정으로 하였으며, 하중은 H형강 보의 자유 끝단에 가해지는 변위제어법을 이용하였다. 변위하중은 Fig. 4와 같이 AISC 내진설계 매뉴얼^[12]에서 제시한 단조중가 반복하중 이력이 적용되었다.

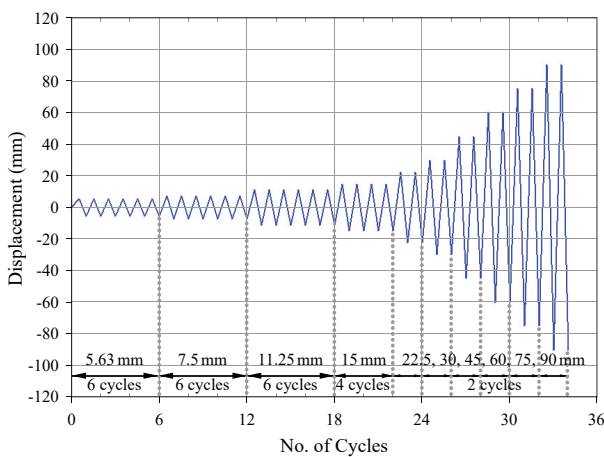


Fig. 4. Displacement loading history

Table 1은 CFT 기둥-보 접합부의 각 요소에 적용되는 강재의 재료특성 및 CFT 기둥 내부의 콘크리트의 물성치를 나타내고 있다. 여기서 H형강에 적용되는 SM490 강재, 강관과 앵글에 적용되는 HSB600, 그리고 F10T 볼트와 강봉의 응력-변형률 관계는 Fig. 5와 같이 bilinear와 완전탄소성으로 가정하였다.

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 & angle	HSB 600	450	600	205,000	0.3	-
Beam	SM 490	325	490			-
Bolt & steel bar	F10T	900	1,000			-
Concrete	-	-	-	22,628	0.167	27

F_y = yield strength; F_u = tensile strength; E = modulus of elasticity; ν = Poisson's ratio; f_{ck} = compressive strength of concrete

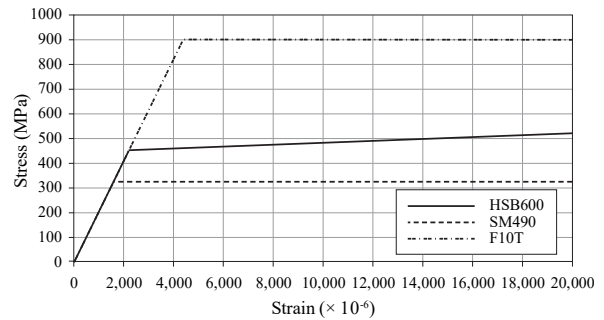


Fig. 5. Stress-strain relationships of steel components

CFT 기둥-보 접합부의 복원능력을 확인하기 위해 봉과 앵글에 적용된 SMA의 재료특성은 초탄성 이론^{[9],[10]}에 근거를 둔 DesRoches *et al.*^[13]의 응력-변형률 관계를 이용하였다(Fig. 6 참조). 비탄성 범위에 대한 재료 비선형 해석을 위하여 von Mises 항복조건을 사용하였으며, ANSYS에서 von Mises 등가소성응력은 다음 식과 같이 정의된다.

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

여기서 σ_i ($i = 1, 2, 3$)는 주응력이며, 주응력의 위첨자 p 는 소성응력을 나타낸다.

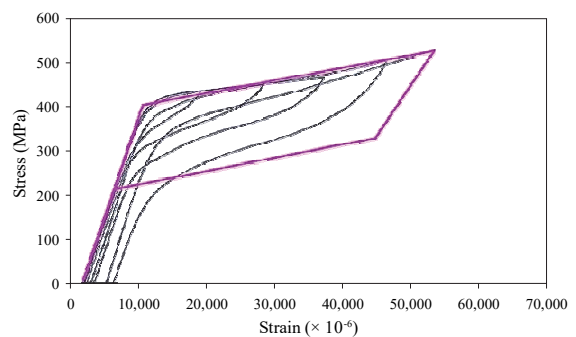


Fig. 6. Stress-strain curve for SMA bar and angle

더블 웹앵글을 이용한 CFT 기둥과 H형강 보 접합부를 직경 22 mm(M22)인 F10T 볼트와 강봉으로 체결할 경우, 축방향 프리텐션을 고려해야 한다. 본 연구에서는 현행 기준(KBC 2016)에 제시된 200 kN의 프리텐션 값을 유한요소 해석모델에 적용하였다. 이러한 CFT 기둥-보 접합부는 각 형강관, 앵글, 볼트, 콘크리트 등과 같이 다양한 요소와 재료로 구성되어 있으며, 이러한 요소와 요소 사이의 상호작용은 다양하게 고려되어야 한다. 이러한 상호작용은 요소들 사이의 접촉면 상태에 따라 달라지는 것이 일반적이며, 정확한 유한요소해석을 수행할 경우 실제와 근접한 접촉조건을 이용해야 한다.

CFT 기둥-보 접합부의 요소 사이의 접촉면은 ANSYS의 ‘standard tangential sticking/sliding’ 옵션을 사용하였다 (Table 2 참조). 이 옵션의 장점은 접촉면의 마찰 거동과 접촉면의 수직방향의 단함과 열림 거동을 동시에 고려할 수 있다는 점이다. 접합부 요소들 사이에서 앵글과 강봉, 앵글과 보, 그리고 콘크리트와 강봉 사이의 접촉면은 마찰 거동이 고려되어야 하며, 이러한 접촉면은 Table 3에서와 같이 작용력에 의한 마찰 거동의 방향에 따라 마찰계수가 다르게 적용된다. 접합부가 휨모멘트를 받을 경우 CFT 기둥과 더블 웹앵글 사이의 접촉면은 앵글다리의 들림 현상으로 인한 접촉면 사이의 분리가 허용되며, 다른 한편으로 앵글과 볼트, 보와 볼트 사이의 접촉면은 접촉 후에 요소 상호간의 관입이 허용되지 않는다고 가정하였다.

Table 2. Applied contact options^[11]

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-Steel bar	0.65
Angle-Steel bar	0.3
Angle-Beam	0.3

본 연구에서는 앵글 두께 및 강봉 게이지 거리의 변화에 따른 더블 웹앵글 접합부의 변형 및 응력 등과 같은 구조 거동에 대한 경향을 분석하기 위하여, Table 4에서와 같이 앵글 두께 t_a 는 12 mm와 15 mm로 변화시켰으며, 강봉의 게이지거리 g_t 는 65 mm와 90 mm를 고려하였다. 다른 한편으로 CFT 기둥-보 접합부에 사용되는 볼트와 강봉의 수, 앵글의 길이 l_a , 볼트의 직경 b_d 및 피치거리는 일정하다고 가정하였다. 여기서 접합부의 원상복원능력을 파악하기 위하여 CFT 기둥과 더블 웹앵글을 연결하는 강봉과 앵글에 SMA를 적용하여 FE 해석을 수행하였다(Table 4 참조).

Table 4. Analytical cases selected for double web-angle connections (Unit: mm)

Analytical model designation	t_a	g_t	l_a	b_d
G65-T12-SASB* G65-T12-SAMB** G65-T12-MASB+ G65-T12-MAMB++	12	65	300	22
G65-T15-SASB G65-T15-SAMB G65-T15-MASB G65-T15-MAMB	15			
G90-T12-SASB G90-T12-SAMB G90-T12-MASB G90-T12-MAMB	12	90		
G90-T15-SASB G90-T15-SAMB G90-T15-MASB G90-T15-MAMB	15			

G: Gage distance; T: Angle thickness;
 SASB*: Steel Angle & Steel Bar; SAMB**: Steel Angle & SMA Bar; ASB+: SMA Angle & Steel Bar; MAMB++: SMA Angle & SMA Bar

3. 유한요소 해석결과

이 절에서는 앞에서 언급한 Fig. 4의 단조증가 반복하중을 적용하여 더블 웹앵글 반강접 CFT 기둥-보 접합부 해석모델(Table 4 참조)의 모멘트-회전각 이력곡선을 얻었다. 이러한 해석모델의 이력곡선에서 내부면적을 나타내는 에너지소산능력 E_D 를 Table 5에 보여주고 있다. Fig. 7은 앵글의 두께와 게이지 거리가 각각 12 mm, 90 mm로 동일한 경우, 강재 앵글, 강봉, SMA 앵글 및 SMA 봉을 조합하여 적

Table 5. Comparison of the energy dissipation capacities of the double web angle connection models

(Unit: N·m)

Analytical model designation	E_D by Step										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	E_D
G65-T12-SASB	26.98	31.99	81.52	136.44	405.52	698.47	1,631.90	2,324.89	3,038.36	3,834.77	12,210.85
G65-T12-SAMB	9.12	11.35	28.20	45.91	122.25	236.42	763.37	1,411.33	1,002.44	-	3,630.40
G65-T12-MASB	20.16	26.84	87.06	159.35	327.65	548.43	1,292.93	2,093.69	2,796.38	3,430.91	10,783.42
G65-T12-MAMB	5.54	6.24	15.67	28.82	84.23	147.71	515.17	832.40	1,117.66	1,378.99	4,132.43
G65-T15-SASB	42.06	53.12	160.16	326.95	623.60	1,002.86	2,273.40	2,974.97	3,824.79	4,732.30	16,014.20
G65-T15-SAMB	11.09	13.46	33.24	55.46	170.26	293.82	960.46	1,561.39	2,272.83	3,023.85	8,395.86
G65-T15-MASB	13.82	15.84	38.24	62.67	194.68	316.67	748.27	980.12	1,424.46	1,937.47	5,732.25
G65-T15-MAMB	7.49	8.31	20.97	36.90	112.10	208.52	603.16	850.76	1,153.43	1,542.93	4,544.56
G90-T12-SASB	13.48	16.13	45.61	72.62	200.45	360.47	938.16	1,496.41	2,052.46	2,693.58	7,889.36
G90-T12-SAMB	6.53	8.19	20.17	32.25	81.05	138.42	471.97	845.67	1,352.40	1,974.06	4,930.70
G90-T12-MASB	7.37	9.02	21.86	34.35	90.20	155.21	435.00	735.02	1,070.52	1,415.73	3,974.29
G90-T12-MAMB	3.61	4.13	10.64	17.48	51.57	97.07	288.91	569.37	851.33	1,230.73	3,124.82
G90-T15-SASB	26.88	36.63	82.65	155.54	379.18	680.79	1,680.90	2,453.74	3,222.00	4,019.39	12,737.69
G90-T15-SAMB	8.45	10.66	26.56	42.42	105.59	189.88	639.51	1,240.82	1,944.25	-	4,208.14
G90-T15-MASB	10.62	12.33	29.42	47.15	136.61	230.76	621.51	897.88	1,148.73	1,488.36	4,623.38
G90-T15-MAMB	5.44	6.08	15.32	25.95	76.68	136.16	439.08	725.70	980.79	1,246.67	3,657.87

용한 접합부의 모멘트-회전각 이력곡선을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 7에서 기하학적 특성이 동일한 경우 강재 앵글과 강봉(SASB)을 적용한 접합부가 SMA 봉(SAMB) 또는 SMA 앵글(MASB)를 적용한 접합부보다 초기강성이 더 큰 것으로 나타났다. 또한, SASB 접합부에 가장 큰 에너지 소산이 발생되며, MAMB 접합부에서 가장 작은 에너지가 소산되는 것으로 나타났다. 에너지소산 능력의 감소가 비교적 적은 SAMB 접합부의 최대 잔류 회전각은 0.0109 radian으로 나타났으며, 이는 최대 잔류 회전각이 0.0124 radian인 SASB 접합부보다 약 12% 복원능력을 향상시킨 것을 의미한다. SMA 앵글을 사용한 MASB와 MAMB 접합부에서는 하중 제거 시 잔류 회전각이 거의 발생되지 않아 복원능력이 가장 효과적인 것으로 나타났다.

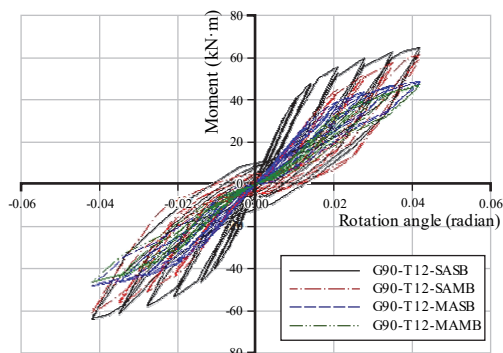
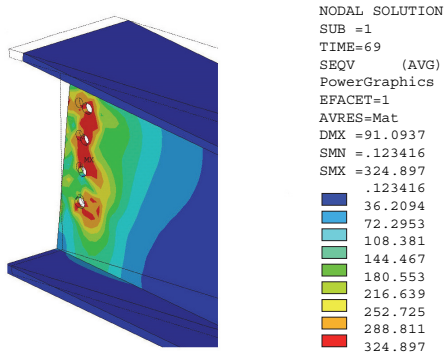


Fig. 7. Moment-rotation hysteresis loops of double web angle connections with 90mm of gage distance

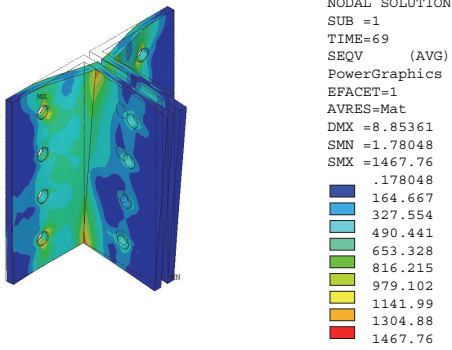
Figs. 8-10은 앵글의 두께가 12 mm이며 게이지 거리가 90 mm인 SASB, SAMB, MAMB 접합부에 최대변위하중이 작용할 때, 이에 상응하는 접합부의 각 요소(즉, H형강 보, 앵글, 봉, 볼트)의 변형 분포도와 von Mises 응력분포를 나타내고 있다. Figs. 8-10으로부터 앵글과 봉의 재료성질(즉, 강재 또는 SMA)에 따라 변형의 크기 및 von Mises 응력분포가 달라지는 것을 알 수 있으며, 특히 더블 웹앵글에서의 응력집중의 크기와 위치의 변화는 매우 흥미로운 경향을 나타내고 있다.

Figs. 8-10으로부터 SASB 접합부의 최대 von Mises 응력은 강재 앵글의 필릿 상하부(약 1,467.6 MPa)에서 발생하며, SAMB 접합부인 경우에는 SMA 봉 양단(약 1,907.1 MPa)에서, 그리고 MAMB 접합부인 경우에는 볼트에서 최대 von Mises 응력(903.7 MPa)이 발생함을 볼 수 있다. 더블 웹앵글 접합부를 구성하고 있는 재료의 성질과는 관계없이 일반적으로 하중이 증가하기 시작하면 앵글의 필릿과 봉의 양단부부터 항복하기 시작하며 응력집중 현상이 발생한다. 상당히 큰 응력집중 현상의 심화로 앵글의 필릿의 상하부와 봉의 양단부의 소성화로 인한 파단이 예측된다.

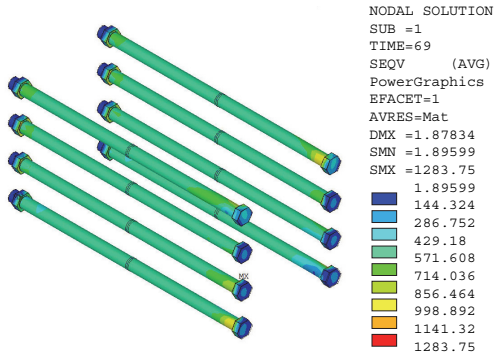
Fig. 11은 강재 웹앵글 접합부에 SMA 봉을 사용할 때의 모멘트-회전각 이력곡선이며, 여기서 Fig. 11(a)는 앵글의 두께는 동일하나 게이지 거리를 다르게 하였으며, Fig. 11(b)는 동일한 게이지 거리 하에서 더블 웹앵글의 두께를 변화시켰다. 예상한대로, 게이지 거리가 작을수록, 앵글의 두께가



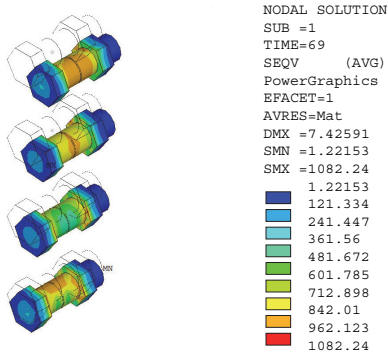
(a) H beam



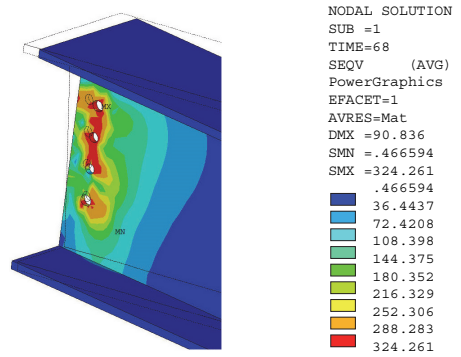
(b) Double web angles



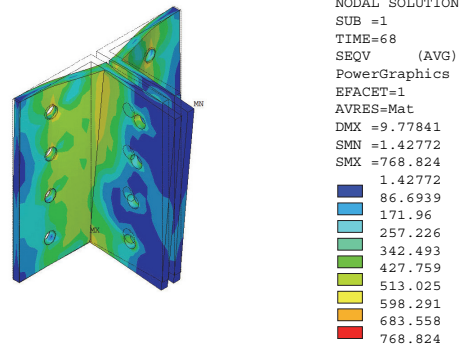
(c) Steel bars



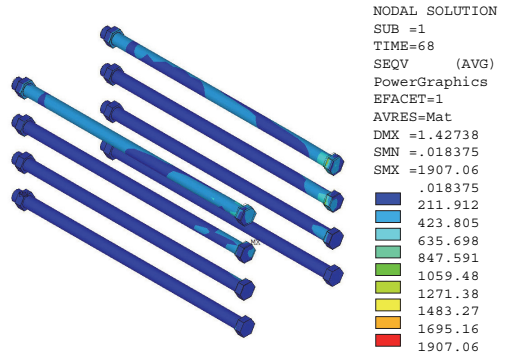
(d) Bolts



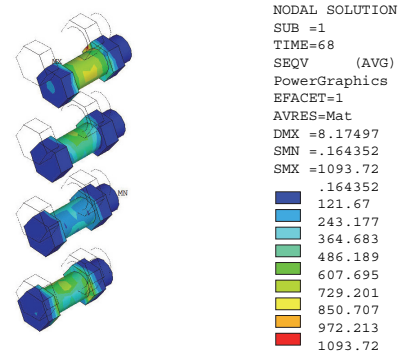
(a) H beam



(b) Double web angles



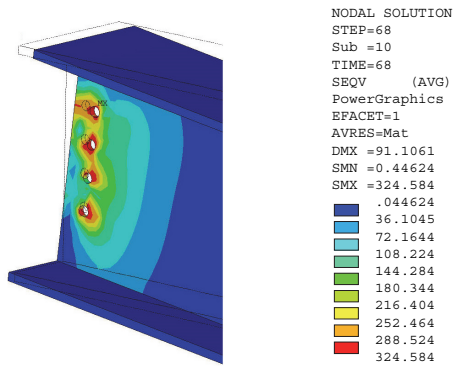
(c) SMA bars



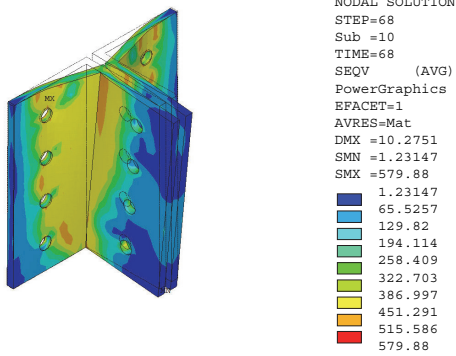
(d) Bolts

Fig. 8. von Mises stress distribution and deformation shape of G90-T12-SASB connection

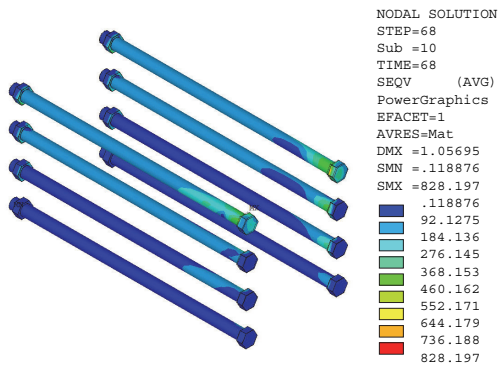
Fig. 9. von Mises stress distribution and deformation shape of G90-T12-SAMB connection



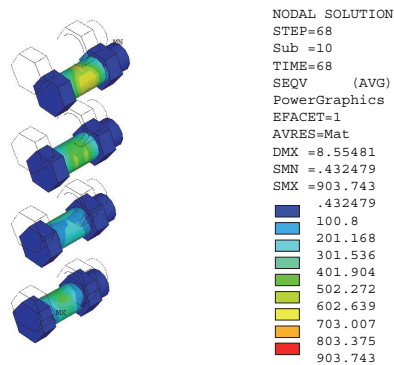
(a) H beam



(b) SMA double web angles

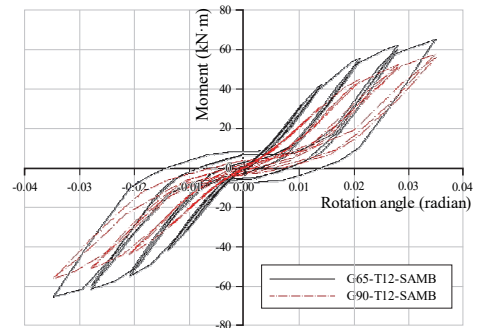


(c) SMA bars

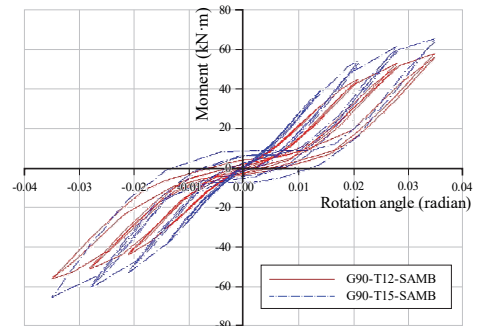


(d) Bolts

Fig. 10. von Mises stress distribution and deformation shape of G90-T12-MAMB connection

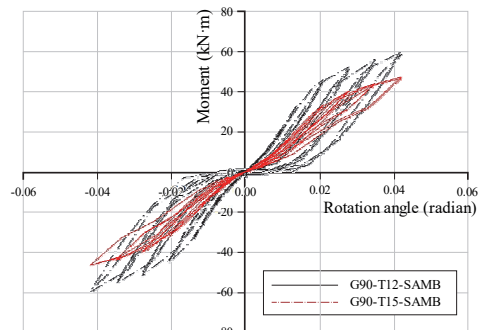


(a) 12 mm of double web angle thickness

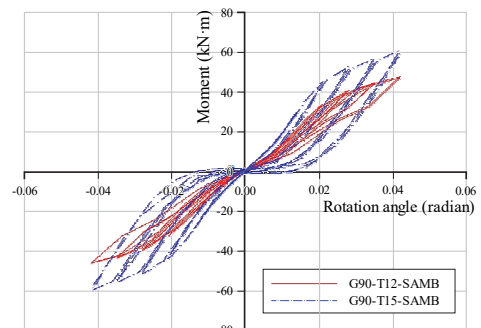


(b) 90 mm of gage distance

Fig. 11. Moment-rotation hysteresis loops of double web angle connections with SAMB



(a) 12 mm of double web angle thickness



(b) 90 mm of gage distance

Fig. 12. Moment-rotation hysteresis loops of double web angle connections with MAMB

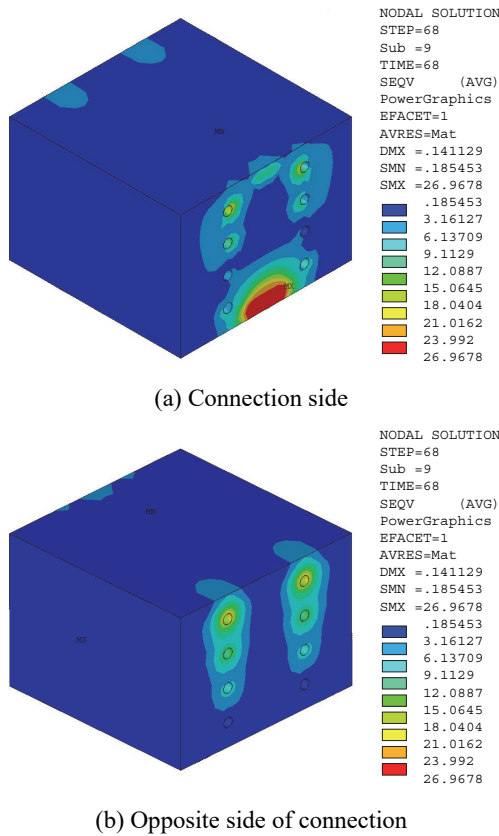


Fig. 13. Typical von Mises stress distribution of concrete in CFT column (G90-T12-MASB)

Table 6. Analytical results for double web angle connections under cyclic loadings

Analytical model designation	Ultimate von Mises stress		Ultimate moment (kN·m)	Ultimate rotation (radian)
	Value (MPa)	Location		
G65-T12-SASB	1,312.96	Steel Bar	73.00	0.0419
G65-T12-SAMB	1,411.54	SMA Bar	67.53	0.0349
G65-T12-MASB	1,341.93	Steel Bar	69.98	0.0419
G65-T12-MAMB	766.74	Bolt	59.81	0.0419
G65-T15-SASB	1,326.89	Steel Bar	69.62	0.0419
G65-T15-SAMB	1,153.58	Bolt	70.58	0.0419
G65-T15-MASB	935.80	Steel Bar	55.08	0.0419
G65-T15-MAMB	1,312.04	SMA Bar	54.39	0.0419
G90-T12-SASB	1,467.76	Steel Angle	63.64	0.0419
G90-T12-SAMB	1,907.06	Steel Bar	61.55	0.0419
G90-T12-MASB	1,080.46	Bolt	48.73	0.0419
G90-T12-MAMB	903.74	Bolt	47.02	0.0419
G90-T15-SASB	1,256.14	Steel Bar	72.91	0.0419
G90-T15-SAMB	1,214.02	SMA Bar	64.99	0.0349
G90-T15-MASB	1,058.01	Steel Bar	62.03	0.0419
G90-T15-MAMB	1,091.56	SMA Bar	60.26	0.0419

[†]Ultimate moment: Maximum moment at double web-angle under tension

클수록 강성이 증가하고 에너지 소산량이 증가하는 거동을 보였다. 반면 원상복원능력 면에서는 게이지 거리가 커질수록, 앵글의 두께가 작아질수록 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 더블 웹앵글 접합부의 봉과 더블웹앵글에 SMA를 적용한 경우 모멘트-회전각 이력곡선으로, Fig. 12와 같이 게이지 거리가 줄어들수록, 앵글의 두께가 커질수록 에너지소산능력이 증가하고, 변형 원상복원능력 면에서는 게이지 거리가 커질수록, 앵글의 두께가 작아질수록 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 최대 변위하중 하에서 이에 상응하는 G90-T12-MASB 접합부의 CFT 기둥 내부의 콘크리트에 발생하는 von Mises 응력분포를 나타내고 있으며, 최대응력은 최상단에 위치한 강봉 구멍 주위에 본 해석에서 가정한 콘크리트의 최대 압축응력인 약 27MPa로 나타났다.

Table 6에 동적하중에 대한 16가지의 CFT 기둥-보 접합부에 대한 최대 응력, 휨모멘트 및 회전각을 정리하였다. Table 6의 값들은 초탄성 SMA재료를 이용하여 에너지소산 능력과 더불어 복원능력을 확보함으로써 더욱 효율적인 스마트 반강접을 갖는 CFT 합성골조의 비선형 동적해석에서 요구되는 기초적 데이터베이스가 될 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 단조증가 반복하중을 받는 CFT 기둥-보의 더블 웹앵글 반강접 접합부에 초탄성 SMA를 적용하여 3차원 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 더블 웹앵글 접합부의 변형 및 응력분포, 모멘트 내력, 파괴모드 등으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 앵글의 폭, 두께 및 게이지거리 등과 같은 기하학적 특성이 동일할 경우, 초기강성은 접합부 전체를 강재로 적용한 경우가 SMA 봉 또는 SMA 앵글을 적용한 경우보다 더 큰 것으로 나타났다.
- (2) 강재로 된 더블 웹앵글 접합부에 SMA 봉 또는 SMA 앵글을 적용할 경우 에너지 소산능력은 감소하였으나, 변형의 원상 복원능력은 향상되는 것으로 나타났다. 더욱이, 앵글에 SMA를 사용할 경우, 하중 제거 시 영구변형이 거의 발생하지 않아 복원능력이 가장 우수한 것으로 나타났다.

- (3) SMA 앵글의 폭, 두께 및 게이지 거리의 값에 따라 접합부의 에너지 소산능력과 각 부재의 응력분포가 변화되었으며, 이에 따른 변형형상 및 파괴모드가 달라진다. 따라서 이러한 앵글의 기하학적 변화가 접합부의 원상복원에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 형상기억합금을 이용한 스마트 CFT 합성골조의 더블 웹브앵글 반강접 접합부가 소성변형 이후 잔류 변형에 대한 원래의 상태로 되돌아 갈 수 있는 능력을 갖고 있음을 확인 하였다. 향후, 이러한 특성을 갖는 다양한 구조적 거동을 알아보고 이해하기 위해서는 더욱 다양한 파라미터에 대한 해석적 연구와 이를 검증하기 위한 실험 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 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, *Journal of the Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.62, No.8, pp.831-838.
- [2] DesRoches, R., and Smith, B. (2004) Shape Memory Alloys in Seismic Resistant Design and Retrofit: A Critical Review of Their Potential and Limitations, *Journal of Earthquake Engineering*, Taylor & Francis, Vol.8, No.3, pp.415-429.
- [3] McMullin, K.M., and Astaneh-Asl, A. (1988) *Analytical and Experimental Studies of Double-Angle Framing Connections*, Report No. UCB/SEMM-88/14, University of California, USA.
- [4] Owen, G.W., and Moore, D.B. (1992) Steelwork Connections: The Robustness of Simple Connections, *The Structural Engineer*, The Institution of Structural Engineers, Vol.70, No.3, pp.37-46.
- [5] Yang, J.G., and Lee, G.Y. (2006) Analytical Models for the Initial Stiffness and Ultimate Moment of a Double Angle Connection, *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.3, pp. 311-320 (in Korean).
- [6] Lee, S.J., and Kim, J.W. (2013) Hysteresis Behavior of Semirigid CFT Column-to-Beam Connections with a Double Web-Angle, *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.1, pp.15-24 (in Korean).
- [7] Yang, J.G., Baek, M.C., Lee, J.Y., and Lee, H.D. (2014) Energy Dissipation Capacity of the Angle Fastened by SMA Bars, *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.231-240 (in Korean).
- [8] Kim, J.W. (2015) Hysteresis Behavior of Partially Restrained Smart Connections for the Seismic Performance of Composite Frame, *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.1, pp.99-108 (in Korean).
- [9] Auricchio, F., and Sacco, E. (1997) An One-Dimensional Model for Superelastic Shape-Memory Alloys with Different Elastic Properties Between Austenite and Martensite, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Pergamon Press, Vol.32, No.6, pp.1101-1114.
- [10] Auricchio, F., Taylor R.L., and Lubliner, J. (1997) Shape-Memory Alloy: Macromodelling and Numerical Simulations of the Superelastic Behavior, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier, Vol. 146, pp.281-312.
- [11] ANSYS (2016) *Aqwa Reference Manual, Ver. 17.2*, 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.

요 약: 본 연구에서는 반복하중을 받는 반강접합부인 더블 웨브앵글 접합부의 이력거동을 구하기 위하여 체계적인 수치해석이 수행되었다. 이러한 더블 웨브앵글 접합부는 CFT 합성골조의 원상복원 및 충분한 에너지 소산 능력을 확보하기 위하여 초탄성 성질을 갖는 형상기억합금(SMA)이 적용되었다. 접합부의 회전강성, 휨모멘트 내력 및 파괴모드를 면밀히 연구하기 위하여 3차원 비선형 유한요소 해석이 수행되었다. 부가적인 다양한 구조적 거동은 앵글의 두께 및 강봉 게이지 거리로 더블 웨브앵글 접합의 파라미터에 대한 영향을 보여주고 있다.

핵심용어: 형상기억합금, 더블 웨브앵글 접합부, CFT 합성골조, 휨모멘트 내력, 3차원 비선형 유한요소해석, 반복하중
