건축구조용 TMC 강관의 가공성능 평가

Evaluation of Forming Performance of TMC Steel Pipes & Tubes for Building Structure

임 성 우[1] · 김 종 성[2] · 장 인 화[3]
Im, Sung Woo Kim, Jong Seong Chang, In Hwa

요 약 : 건축물이 초고층화 및 장스팬화 됨에 따라 일반 구조용 강재에 비해서 강도도 높고, 판의 두께도 두꺼워지고, 성능도 우수한 신강종이 요구된다. TMC 강재는 내진성능이 우수하며, 용접성이 뛰어나고, 판두께가 두꺼워도 설계기준강도를 저감할 필요가 없기 때문에 건축구조물에 널리 사용된다. 그러나 대구경 후육강관에 TMC 강재를 사용하기 위해서는 2차 가공으로 인한 물성 변화가 건축구조물 안정성에 영향을 미치는가를 검토해야 한다. 본 연구에서는 SAW로 용접한 SM520TMC 강관의 물성 열화도를 평가하였다. 이때 실험변수로는 강관 제조 프로세스와 강종으로 하였다. 실험결과 강관을 롤 벤딩이나 프레스 성형으로 제관하든지 또는 강종이 국산 SM620TMC이냐 일본산 SM520TMC이든지에 상관없이 항복강도와 인장강도는 증가하였고, 연신율은 저하하였다.

BSTRACT : With building structures becoming higher and having longer spans, new structural steel with better strength, thicker plate, andperformance may be required rather than conventional structural steel. TMC steel is widely used in building structures largely due to its excellent seismic performance, superior weldability, and design strength that is not affected by plate thickness. To make use of TMC steel in pipe structures with large diameter and heavy wall, however, the effect of the change of material properties due to secondary fabrication on the building's stability should be reviewed. In this study, the degradation of material properties in submerged arc welded SM520TMC steel pipes and tubes was evaluated using variable fabrication process and material change. Degradation test results showed that the yield and ultimate strength increased and elongation decreased regardless of the mode of fabrication, i.e., through roll bending or press forming, or steel used, i.e., domestic SM520TMC steel or SM520TMC steel from Japan.

핵 심 용 어 : 후육강관, 열화, 롤 벤딩, 프레스 성형, 용접성
KEYWORDS : Heavy Wall Pipe, Degradation, Roll Bending, Press Forming, Weldability

1. 서 론

철골조 건축물은 1970년대 고도 경제성장과 함께 활성화되기 시작하였다. 최근 국내 건축물의 현황을 살펴보면 20층 규모에서 1997년에 이르면 30층 규모로 발전하고, 2000년에는 40~50층 규모로 건축물의 층수가 점점 높아지고 있다. 또한 스팬의 길이도 과거 5×8m 수준에서 1997년에 이르면 9×12m 수준으로 길어지고 있는 추세이다. 이와 같이 건축물이 고층화 및 장스팬화 됨에 따라서 철골조 건축물에 사용되는 건축구조용 강재도 과거와는 달리 고강도화, 극후화 및 고성능화 등의 특성이 요구되고 있다. 따라서 지금까지는 건축구조용 강재로 주로 490MPa급 강재가 사용되었으나 최근에는 종로타워나 금호 리첸시아 등에 570MPa급 강재가 적용되기 시작했다. 또한 60mm 정도면 충분했던 강재의 두께도 80mm 이상이 요구되고 있다. 이외에도 강재가 극후화됨에 따라서 내라메라테어 등 용접성이 우수한 강재가 필요해지고 있다. 특히 내진성능 확보를 위해서 저 항복비의 강재가 요구되고 있는 실정이다.

건축물에 고성능 강재를 사용한 시기를 일본과 비교해 보면 10년 정도 격차를 보이고 있다. 특히 TMC 강재의 경우 국내는 1996년부터 일반사용이 가능했으나, 일본의 경우는 1988년에 건설대신 일반인정을 취득하였다. 따라서 일본 내

1) 정회원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원 공학박사
(Tel. 031-370-9545, Fax. 031-370-9559, E-mail : swim@rist.re.kr)
2) 정회원, (주)오션스페이스(jskim@oceanspace.com)
3) 정회원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 수석연구원 공학박사(ihchang@rist.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

에서는 이미 NTT DoMoCo 埼玉빌딩, JT 本社빌딩, 東京都廳舍 등 많은 건축물에 TMC 강재가 적용되고 있다. 국내의 경우는 PILAC BT33 강재에 대해서 1996년에 강구조학회의 일반인정을 받은 후, 그 다음 해에 건교부 고시 1997-378호로 설계기준강도가 공표되었다. 그러나 실제로는 PILAC BT33 강재는 1995년 준공된 POSCO Center에 개별인정 방식으로 최초 적용되었다. 그 후 1997년 철골조 주상복합아파트인 나산스위트타워에 적용된 다음부터 그 수요가 급증하여 이제는 PILAC BT33 강재의 사용이 일반화되었다. 한편 PILAC BT36 강재는 1999년 강구조학회의 일반인정을 받은 이후 Tower Palace II에 최초로 적용되었으며, 하이페리온, SBS 목동 2사옥 등 적용범위를 점차 넓혀가고 있다. 이러한 고층 건축물 이외에도 최근에는 강관을 이용한 스타디움이나 컨벤션 센터 또는 공항과 같은 대경간 구조물의 수요가 증가 추세에 있다. 이때 후판에서 강관으로 2차 가공을 했을 경우 재질변화로 인한 건축구조물의 성능유지에 문제점이 발생될 수도 있다. 그러나 건축구조용 TMC 강재의 경우는 구조재로써 많은 연구(김덕재 등, 1994; 김규석 등, 2000; 김규석 등 2001; 김규석 등, 2001; 김규석 등, 2001)가 진행되었으나, 건축구조용 TMC 강관의 경우는 연구가 매우 미약한 상태이다.

본 연구에서는 PILAC BT36 강재를 대상으로 롤 벤딩 또는 프레스 성형으로 원형강관을 제관할 경우 제관 프로세스에 따른 강관 열화도를 평가하였다. 또한 비교재로써 일본 NKK의 SM520TMC인 HIBUIL355OL 강재를 롤 벤딩으로 원형강관을 제관할 경우 강관 열화도를 PILAC BT36 강재의 경우와 비교하였다. 한편 PILAC BT36 강재를 프레스 성형으로 각형강관을 제관할 경우 가공에 따른 강관 열화도도 함께 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 강관의 제작

그림 1. 롤 벤딩

그림 2. 프레스 성형

2차가공에 의한 강관의 열화도를 평가하기 위해서 SM520TMC인 PILAC BT36 강재를 원형강관과 각형강관으로 제관하였다. 원형강관은 두께 50mm인 후판을 외경이 1,016mm가 되도록 롤 벤딩과 프레스 성형으로 각각 제관하여 제관 프로세스에 의한 영향을 검토하였다. 또한 강종이 강관 열화도에 미치는 영향을 보기 위해서 두께 60mm인 PILAC BT36 강재와 HIBUIL355OL 강재를 롤 벤딩을 해서 각각 외경 2,133mm의 원형강관으로 제관하였다. 여기서 롤 벤딩이란 그림 1에서 보는바와 같이 3개의 Roller를 이용해서 제관하는 프로세스이며, 프레스 성형이란 그림 2에서와 같이 프레스 칼날로 제관하는 프로세스를 의미한다. 따라서 롤 벤딩을 하면 진원에 가까운 제관이 가능하고, 프레스 성형을 하게 되면 보다 두꺼운 후판을 쉽게 제관할 수 있는 장점이 있다. 각형강관은 두께 40mm인 후판을 'ㄷ'자 형태로 2개를 프레스 성형한 후 용접하여 폭 600mm로 제작하였다.

강관을 제관한 후 용접 프로세스는 제관사에 따라서 약간의 차이가 있다. 본 연구에서는 롤 벤딩의 경우 강관 외측 이음부를 가접을 한 다음 SAW로 강관의 내측을 용접하고, 내측 용접이 완료되면 밀링으로 용접부의 외측을 가우징을 한 다음 강관 외측을 SAW로 용접하였다. 프레스 성형의 경우는 강관 외측 이음부를 가접을 한 다음 GMAW로 강관 외측을 초층 용접하고 나서 SAW로 강관 내측을 용접하고, 내측 용접이 완료되면 강관 외측을 SAW로 용접하였다. 어느 경우나 최대층간온도를 250℃로 유지하였다. 이때 사용한 용접재료의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 용접재료의 제원

	화학성분 (%)						기계적 성질			
	C	Si	Mn	P	S	Mo	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	충격에너지(J)
S-777MXHx A-3(SAW)	0.05	0.42	1.24	0.025	0.010	0.51	580	650	27	vE-20: 80
SM-70 (GMAW)	0.09	0.41	1.10	0.012	0.011	-	430	540	30	vE-28: 70

2.2 시험체 채취부위

원형강관과 각형강관을 제작한 다음 가공에 의한 열화도를 평가하기 위해서 각 부위별로 시험체를 제작하였다. 그림 3과 그림 2는 각각 원형강관과 각형강관에서의 시험체 채취부위를 나타낸다. 원형강관의 경우 용접부에서는 강관 길이방향의 직각방향에서 인장시험체와 충격시험체 및 굽힘시험체를 채취하였다. 인장시험체와 굽힘시험체는 강관을 상온에서 기계적으로 편 후 전두께 시험체로 제작하였다. 충격시험체는 강관 두께방향으로 t/4와 t/2 및 3t/4 위치에서 KS B 0809에 의거해서 4호 시험체로 제작하였다. 이때 노치는 용착금속 및 열영향부에 위치하도록 하였다. 원형강관 강관부에서의 인장

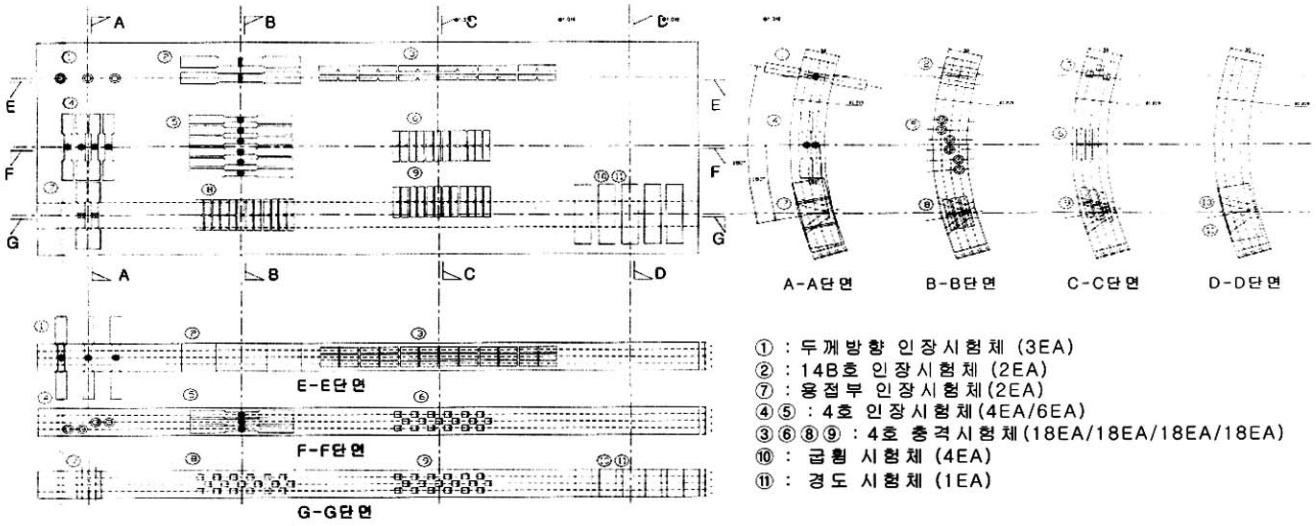

그림 3. 원형강관에서 시험체 채취부위

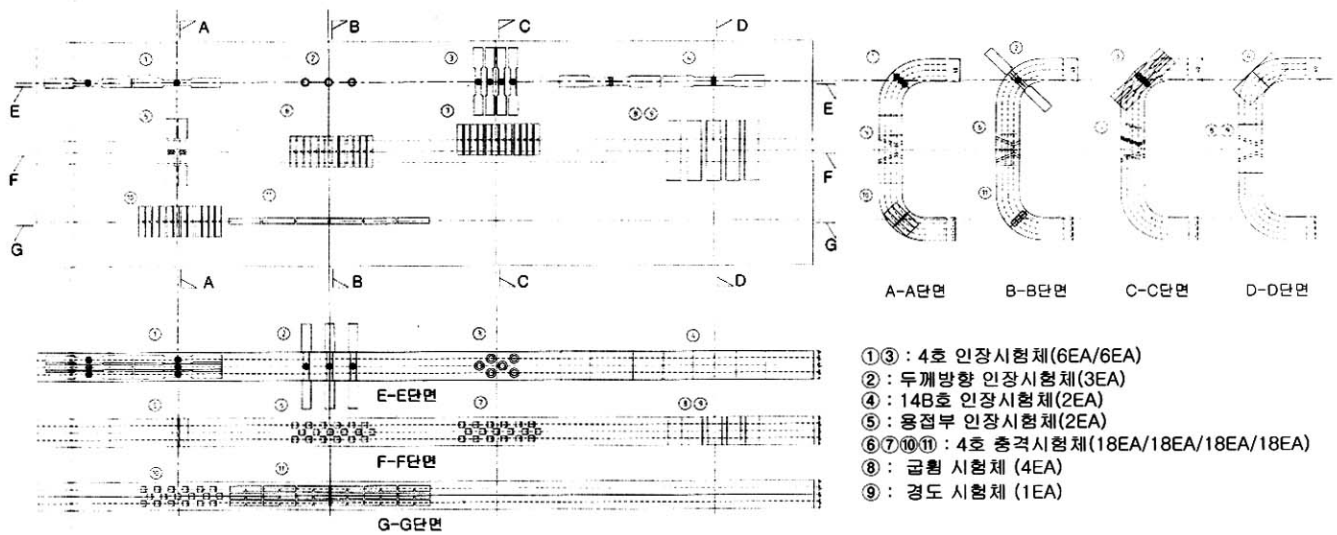

그림 4. 각형강관에서 시험체 채취부위

시험체와 충격시험체는 강관 길이방향과 길이방향의 직각방향에서 강관 두께방향으로 t/4와 t/2 및 3t/4 위치에서 각각 KS B 0801과 KS B 0809에 의거해서 4호 시험체로 제작하였다. 원형강관 두께방향 인장시험체는 KS D 0276에 의거해서 제작하였다. 이때 강관 두께방향 인장시험체의 그립부와 측정부는 EB로 용접하였다. 한편 각형강관의 경우 용접부에서는 그림 4와 같이 원형강관과 동일한 방향과 위치에서 동일 규격의 인장시험체와 충격시험체 및 굽힘시험체를 채취하였다. 각형강관 강관부에서의 인장시험체는 강관 길이방향으로, 충격시험체는 강관 길이방향과 강관 길이방향의 직각방향에서 강관 두께방향으로 t/4와 t/2 및 3t/4 위치의 모서리부에서 각각 KS B 0801과 KS B 0809에 의거해서 4호 시험체를 제작하였다. 각형강관 두께방향 인장시험체는 강관 모서리부에서 원형강관의 경우와 동일하게 KS D 0276에 의거해서 제작하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 소재평가

3.1.1 화학성분 및 조직관찰

PILAC BT36 강재와 HIBUIL355OL 강재의 화학성분을 분석한 결과를 표 2에 요약하였다. PILAC BT36 강재나 HIBUIL355OL 강재 모두 SM520TMC 규격을 만족하고 있다. 다만 HIBUIL355OL 강재의 화학성분이 PILAC BT36 강재에 비해서 전반적으로 낮았다.

표 2. 사용강재의 화학성분

	두께 (mm)	화학성분 (%)											Ceq (%)	Pcm (%)
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	B		
SM520TMC	≤50	≤0.20	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.035	-	-	-	-	-	-	≤0.40	≤0.26
	>50												≤0.42	≤0.27
PILAC BT36	40	0.147	0.460	1.34	0.010	<0.002	0.013	0.182	0.215	<0.002	<0.002	<0.0003	0.40	0.24
	50	0.145	0.470	1.24	0.010	<0.002	0.012	0.171	0.198	<0.002	<0.002	<0.0003	0.38	0.24
	60	0.147	0.446	1.39	0.010	<0.002	0.013	0.184	0.217	<0.002	<0.002	<0.0003	0.40	0.25
HIBUIL355OL	60	0.131	0.338	1.36	0.012	<0.002	0.033	0.013	0.007	<0.002	0.003	<0.0003	0.38	0.21

PILAC BT36 강재와 HIBUIL355OL 강재의 t/4와 t/2 위치에서의 조직사진을 그림 5에 나타내었다. PILAC BT36 강재는 밴드 조직이 있는 전형적인 퍼얼라이트와 페라이트 조직인데 반하여, HIBUIL355OL 강재는 베이나이트 조직을 보이고 있다. 이러한 차이는 각사의 제어압연과 가속냉각 프로세스의 차이에 기인하는 것으로 사료된다. 사용강재의 물성 중에서 기계적 성질은 '3.3 가공 열화도 평가'에서 언급하기로 한다.

3.1.2 예열온도

PILAC BT36 강재를 현장에 적용하기 위해서는 용접성이 평가되어야 한다. 일반적으로 PILAC BT36 강재는 SM520 강재에 비해서 탄소당량과 용접 갈라짐 감수성 조성 등을 관리하기 때문에 용접성이 우수한 것으로 알려져 있다. 이중에서도 예열저감 효과가 큰 것이 가장 큰 장점으로 부각되고 있다.

HIBUIL355OL 강재의 경우 100mm 두께의 후판을 용접할 경우 한계예열온도를 50℃로 하고 있다. 국산 PILAC BT36 강재의 한계예열온도를 평가하기 위해서 KS B0870에 의거해서 y-groove 용접균열시험을 실시하였다. PILAC BT36 강재는 주로 SAW로 용접되기 때문에 직경 4mm의 SAW용 용접재료인 S-777MXHxA-3을 사용하여 두께 60mm의 후판을 17kJ/cm (550A-29V-56cm/min)의 입열량으로 용접한 결과를 그림 6에 나타내었다. PILAC BT36 강재의 한계예열온도는 두께 60mm의 경우 50℃임을 알 수 있다.

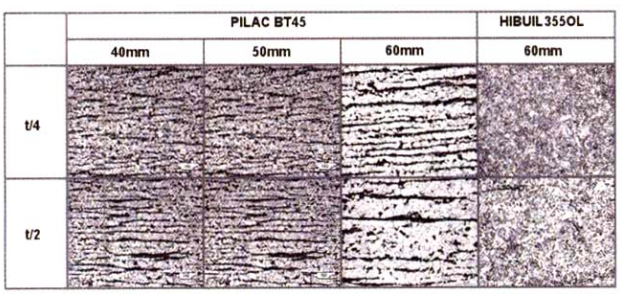

그림 5. 사용강재의 조직사진(x100)

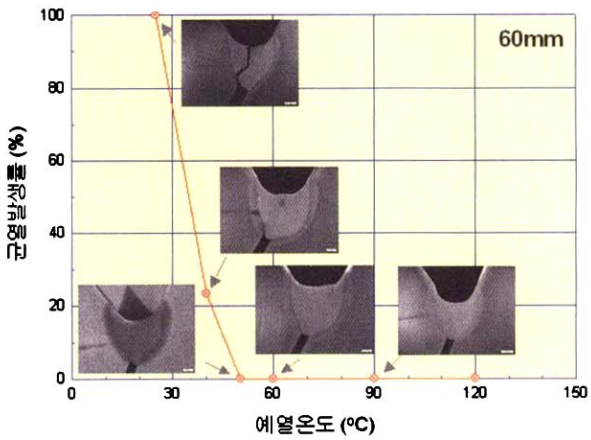

그림 6. PILAC BT36 강재의 예열온도

3.2 강관 용접부의 마크로 조직검사와 굽힘실험

PILAC BT36 강재 또는 HIBUIL355OL 강재를 롤 벤딩 또는 프레스 성형을 해서 원형강관 또는 각형강관으로 제관한 다음 용접부의 마크로 조직시험결과를 그림 7에 나타내었다. 마크로 조직에서는 균열이나 슬래그 혼입 등 어떠한 결함도 관찰되지 않았다. 그림 8는 강관 용접부 굽힘시험을 한 결과를 나타낸다. 제관 프로세스나 강종에 무관하게 용접부 터짐현상이 발생되지 않았다. 이상의 결과로 볼 때 강관 용접부는 결함이 없는 건전한 상태임을 알 수 있다.

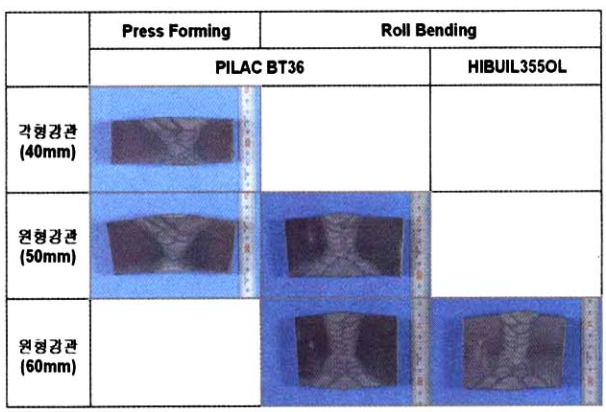

그림 7. 강관 용접부의 마크로 사진

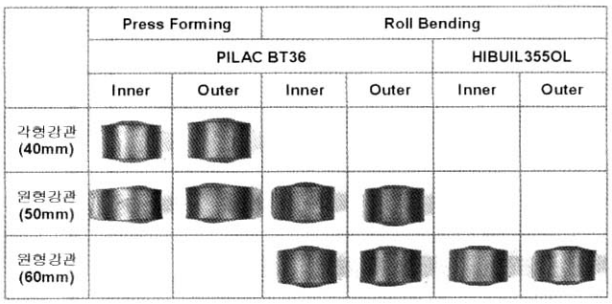

그림 8. 강관 용접부의 굽힘 실험결과

3.3 가공 열화도 평가

3.3.1 원형강관

3.3.1.1 제관 프로세스에 따른 강관의 가공성능

제관 프로세스에 따른 강관의 열화도를 평가하기 위해서 두께 50mm인 PILAC BT36 강재를 외경이 1,016mm가 되도록 롤 벤딩과 프레스 성형으로 각각 제관하여 그림 1에서 보는 것처럼 각 부위별로 시험체를 채취하여 인장시험 및 충격실험을 실시하였다. 강관의 각 부위별 실험결과를 모재의 실험결과와 비교하여 표 3에 정리하였다. 여기서 부위에서 모재는 후판재로 실험한 것을 의미하며, 강관부는 후판을 강관으로 제관했을 때 용접하지 않은 부위에서 실험한 것을 의미하고, 용접부란 강관의 용접부에서 실험한 결과라는 것을 의미한다. 시험체명에서 4호인장은 4호 인장시험체, 두께인장은 두께방향 인장시험체, 4호충격은 4호 충격시험체, 용접부 인장은 용접부 인장시험체를 의미한다. L은 강관길이 방향, C는 강관 길이방향의 직각방향을 나타낸다. 위치에서 3t/4는 강관 바깥쪽에서 t/4 위치, t/4는 안쪽에서 t/4 위치, t/2는 강관 두께중심을 의미하고, 구분에서 R은 롤 벤딩, P는 프레스 성형을 의미한다.

표 3. 제관 프로세스에 따른 원형강관의 기계적 성질

	부위	시험체명	방향	위치	구분	인장실험					충격실험
						YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAx (%)	vE (J)
후판 (50mm)	모재	4호인장	L	t/2		354.8	517.8	68.5	36.4	-	-
	모재	4호인장	L	t/4	-	374.7	523.0	71.6	36.6	-	-
	모재	두께인장	Z	-	-	372.9	525.4	71.2	31.8	73.7	-
	모재	4호충격	L	t/2	-	-	-	-	-	-	280.4
	모재	4호충격	L	t/4	-	-	-	-	-	-	325.8
원형강관 (BT36-50)	강관부	4호인장	L	3t/4	R	416.0	534.6	77.8	32.1	-	-
					P	378.8	526.8	71.9	35.7	-	-
	강관부	4호인장	L	t/2	R	423.9	527.7	80.3	29.7	-	-
					P	342.5	522.3	65.6	36.2	-	-
	강관부	4호인장	L	t/4	R	466.5	529.7	88.1	32.0	-	-
					P	371.4	526.5	70.6	36.1	-	-
	강관부	4호충격	C	t/2	R	386.6	523.3	73.9	31.1	-	-
					P	382.2	526.8	72.5	31.9	-	-
	강관부	4호인장	C	t/4	R	374.9	527.2	71.1	32.0	-	-
					P	374.9	530.7	70.6	31.9	-	-
	강관부	두께인장	Z		R	340.1	516.5	75.6	22.0	71.3	-
					P	368.1	518.7	74.8	25.0	71.6	-
	용접부	용접부 인장	T	-	R	337.9	606.2	55.7	30.9	-	-
					P	353.9	587.8	60.2	40.0	-	-
	강관부	4호충격	L	3t/4	R	-	-	-	-	-	161.9
					P	-	-	-	-	-	271.6
	강관부	4호충격	L	t/2	R	-	-	-	-	-	203.5
					P	-	-	-	-	-	317.4
	강관부	4호충격	L	t/4	R	-	-	-	-	-	324.3
					P	-	-	-	-	-	201.3
	강관부	4호충격	C	3t/4	R	-	-	-	-	-	189.8
					P	-	-	-	-	-	249.4
	강관부	4호충격	C	t/2	R	-	-	-	-	-	154.6
					P	-	-	-	-	-	232.4
	강관부	4호충격	C	t/4	R	-	-	-	-	-	174.0
					P	-	-	-	-	-	288.5
	용착금속	4호충격	C	3t/4	R	-	-	-	-	-	103.0
					P	-	-	-	-	-	23.5
	용착금속	4호충격	C	t/2	R	-	-	-	-	-	119.5
					P	-	-	-	-	-	12.8
	용착금속	4호충격	C	t/4	R	-	-	-	-	-	130.8
					P	-	-	-	-	-	57.6
	HAZ	4호충격	C	3t/4	R	-	-	-	-	-	305.8
					P	-	-	-	-	-	202.7
	HAZ	4호충격	C	t/2	R	-	-	-	-	-	161.6
					P	-	-	-	-	-	139.4
	HAZ	4호충격	C	t/4	R	-	-	-	-	-	155.7
					P	-	-	-	-	-	141.2

R:Roll Bearing / P:Press Forming

실험결과 후판재의 경우는 강구조 설계기준을 만족하고 있다. 그러나 후판을 강관으로 제관할 경우 강관부 인장실험한 결과를 보면 시험체 방향이나 위치 그리고 제관 프로세스에 무관하게 가공경화로 인해서 항복강도와 인장강도가 상승하고 연신율이 저하되었음을 알 수 있다. 경우에 따라서는 항복강도가 지나치게 높아져서 항복비가 90% 수준에 도달하고 있다. 따라서 PILAC BT36 강관재의 경우도 후판재와 마찬가지로 항복비의 제한을 규정해두는 것이 건축구조물의 안정성을 유지하는데 필요하다고 사료된다. 참고로 일본에서는 SM520TMC 강재를 강관으로 제관할 경우에는 항복비를 85%로 제한(石塚馨, 2002)하고 있다. 한편 프레스 성형의 경우 시험위치에 따라서는 가공연화 현상이 발생하고 있다. 이러한 현상은 제관 프로세스상 일부 위치에서 압축과 인장이 반복해서 작용한 결과로 사료된다. 이와 같은 결과는 일본 Sumitomo의 SM490TMC인 T-DAC325 강관재에서도 프레스 성형을 할 경우 동일한 결과가 보고(高性能鋼管構造小委員會, 1993)되고 있다. 강관부 두께방향 인장시험에서 두께방향 단면수축율은 제관 프로세스에 관계없이 모재와 비교해서 크게 저하되지 않았다. 따라서 가공경화가 강관의 두께방향 단면수축율에는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 한편 용접부 인장실험에서는 용접부 항복강도가 모재 항복강도보다 낮게 나타났다. 용접부 항복강도가 낮게 나타난 것은 용접부 인장시험체를 판형으로 제작할 때 바우싱거 효과에 기인한다. 그러나 용접부 인장강도는 모재 인장강도보다 높게 나타났다. 용접부에서는 강도 측면에서는 모재 인장강도 이상만 확보하면 건전한 용접부로 간주하므로 용접부에는 문제가 없음을 알 수 있다. 제관 프로세스에 무관하게 강관부나 용접부의 충격흡수에너지는 기준값을 만족하고 있다. 다만 프레스 성형의 경우 일부 용착금속 시험체에서 기준값을 만족시키지 못하고 있다. 롤 벤딩으로 제관한 용착금속 시험체가 충분한

충격인성을 갖고 있는 것으로 보아 프레스 성형의 경우는 충분하지 못한 용접재료를 사용한 결과가 아니라 용접시공에 문제가 있었음을 유추할 수 있다.

3.3.1.2 강종에 따른 강관의 가공성능

강종이 강관 열화도에 미치는 영향을 보기 위해서 두께 60mm인 PILAC BT36 강재와 HIBUIL355OL 강재를 롤 벤딩을 해서 각각 외경 2,133mm의 원형강관으로 제관하여 그림 1의 예처럼 각 부위별로 시험체를 채취하여 인장시험 및 충격실험을 실시하였다. 강관의 각 부위별 실험결과를 모재의 실험결과와 비교하여 표 4에 정리하였다. 이때 구분에서 K는 PILAC BT36 강재, J는 HIBUIL355OL 강재를 의미한다. 그리고 그 외의 표기는 표 3과 동일하다.

PILAC BT36 후판재의 경우 인장실험과 충격실험 결과가 모두 강구조 설계기준을 만족하고 있다. HIBUIL355OL 강재의 경우는 t/2에서의 항복강도가 기준값을 만족하지 못하고 있다. 그러나 HIBUIL355OL 강재에서 t/2와 t/4에서의 항복강도의 평균값이 기준값을 상회하고 있고, 전두께 14B호 시험체로 인장실험을 한 결과도 항복강도가 437.5MPa이며, Mill Sheet 상으로도 423MPa인 것으로 보아 t/2에서의 항복강도가 기준값을 만족하지 못한 이유가 시험체 채취위치에 따른 재질편차에 기인하는 것으로 사료된다. 한편 후판재의 충격흡수에너지는 HIBUIL355OL 강재가 PILAC BT36 강재보다 우수한 것으로 나타났다. 강관부 인장실험한 결과를 보면 '3.3.1.1 제관 프로세스에 따른 강관의 가공성능'에서의 결과와 마찬가지로 강종이나 시험체 위치에 무관하게 가공경화로 인해서 항복강도와 인장강도가 상승하고 연신율이 저하되었음을 알 수 있다. 특히 t/4 위치에서 항복강도가 지나치게 높아져서 PILAC BT36 강재와 HIBUIL355OL 강재의 항복비가 90% 수준에 도달하고 있다. 한편 두께방향 단면수축율는 강종에 관계없이 모재와 비교해서 크게 저하되지 않았으며, 용접부 인장강도도 표 4의 모재 인장실험결과와 비교해보면 강종에 무관하게 모재 인장강도보다 높게 나타났다. 또한 강관부나 용접부의 충격흡수에너지도 강종에 상관없이 기준값을 만족하고 있다. 다만 모재와 마찬가지로 HIBUIL 355OL 강관의 용접부 인성이 PILAC BT36 강관에 비해서 높게 나타났다.

3.3.2 각형강관

프레스 성형으로 600x600x40x40mm 크기의 각형강관을 제관했을 때 강관 열화도를 평가하기 위해서 그림 4에서 보는 것처럼 각 부위별로 시험체를 채취하여 인장시험 및 충격실험을 실시하였다. 강관의 각 부위별 실험결과를 모재의 실험결과와 비교하여 표 5에 정리하였다. 이때 구분에서 P는 프레스

표 4. 강종에 따른 원형강관의 기계적 성질

	부위	시험체명	방향	위치	구분	인장실험					충격실험
						YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAz (%)	$_cE_v$ (J)
후판 (60mm)	모재	4호인장	L	t/2	K	377.0	533.4	70.7	37.6	-	-
					J	352.1	510.3	68.9	36.7	-	-
	모재	4호인장	L	t/4	K	385.5	535.1	72.0	36.9	-	-
					J	394.9	546.8	76.1	33.7	-	-
	모재	두께인장	Z	-	K	364.2	526.5	69.1	24.8	70.4	-
					J	374.7	517.8	72.3	22.7	73.1	-
	모재	4호충격	L	t/2	K	-	-	-	-	-	289.9
					J	-	-	-	-	-	398.2
	모재	4호충격	L	t/4	K	-	-	-	-	-	358.3
					J	-	-	-	-	-	414.6
원형강관 Φ2133*60	강관부	4호인장	L	3t/4	K	409.2	546.8	74.8	32.9	-	-
					J	457.7	547.8	83.5	31.8	-	-
	강관부	4호인장	L	t/2	K	394.0	541.5	72.8	31.1	-	-
					J	357.2	503.2	71.0	33.5	-	-
	강관부	4호인장	L	t/4	K	493.4	555.2	88.9	30.1	-	-
					J	542.4	588.5	92.1	29.0	-	-
	강관부	두께인장	Z	-	K	407.4	538.7	75.6	21.4	72.9	-
					J	332.9	508.3	65.5	18.5	70.7	-
	용접부	용접부 인장	C	-	K	340.6	592.8	57.5	41.5	-	-
					J	340.4	581.9	58.5	54.9	-	-
	강관부	4호충격	L	3t/4	K	-	-	-	-	-	209.0
					J	-	-	-	-	-	273.3
	강관부	4호충격	L	t/2	K	-	-	-	-	-	106.7
					J	-	-	-	-	-	331.2
	강관부	4호충격	L	t/4	K	-	-	-	-	-	191.1
					J	-	-	-	-	-	268.4
	강관부	4호충격	C	3t/4	K	-	-	-	-	-	233.3
					J	-	-	-	-	-	313.8
	강관부	4호충격	C	t/2	K	-	-	-	-	-	256.2
					J	-	-	-	-	-	401.0
	강관부	4호충격	C	t/4	K	-	-	-	-	-	256.1
					J	-	-	-	-	-	298.1
	용착금속	4호충격	C	3t/4	K	-	-	-	-	-	134.6
					J	-	-	-	-	-	154.0
	용착금속	4호충격	C	t/2	K	-	-	-	-	-	127.1
					J	-	-	-	-	-	172.2
	용착금속	4호충격	C	t/4	K	-	-	-	-	-	99.9
					J	-	-	-	-	-	116.6
	HAZ	4호충격	C	3t/4	K	-	-	-	-	-	184.0
					J	-	-	-	-	-	223.0
	HAZ	4호충격	C	t/2	K	-	-	-	-	-	184.0
					J	-	-	-	-	-	398.0
	HAZ	4호충격	C	t/4	K	-	-	-	-	-	279.4
					J	-	-	-	-	-	215.3

K:PILAC BT36 / J:HIBUIL3550L

표 5. 제관 프로세스에 따른 각형강관의 기계적 성질

	부위	시험체명	방향	위치	구분	인장실험					충격실험
						YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAz (%)	$_cE_v$ (J)
후판 (40mm)	모재	4호인장	L	t/2	P	380.7	541.0	70.4	36.5	-	-
	모재	4호인장	L	t/4	P	381.2	538.0	70.9	35.8	-	-
	모재	두께인장	Z	-	P	428.8	544.3	78.7	40.4	73.1	-
	모재	4호충격	L	t/2	P	-	-	-	-	-	184.2
	모재	4호충격	L	t/4	P	-	-	-	-	-	337.8
원형강관 600*40	모서리부	4호인장	L	3t/4	P	636.0	693.4	91.7	17.6	-	-
	모서리부	4호인장	L	t/2	P	529.2	593.4	89.1	23.8	-	-
	모서리부	4호인장	L	t/4	P	490.5	583.1	84.1	27.7	-	-
	모서리부	두께인장	Z	-	P	497.8	563.5	88.3	23.4	68.6	-
	용접부	용접부인장	C	-	P	339.0	582.0	58.3	37.8	-	-
	모서리부	4호충격	L	3t/4	P	-	-	-	-	-	52.4
	모서리부	4호충격	L	t/2	P	-	-	-	-	-	124.3
	모서리부	4호충격	L	t/4	P	-	-	-	-	-	210.7
	모서리부	4호충격	C	3t/4	P	-	-	-	-	-	75.9
	모서리부	4호충격	C	t/2	P	-	-	-	-	-	186.5
	모서리부	4호충격	C	t/4	P	-	-	-	-	-	119.3
	용착금속	4호충격	C	3t/4	P	-	-	-	-	-	34.3
	용착금속	4호충격	C	t/2	P	-	-	-	-	-	67.9
	용착금속	4호충격	C	t/4	P	-	-	-	-	-	56.3
	HAZ	4호충격	C	3t/4	P	-	-	-	-	-	164.9
	HAZ	4호충격	C	t/2	P	-	-	-	-	-	88.3
	HAZ	4호충격	C	t/4	P	-	-	-	-	-	192.8

P:Press Forming

성형을 의미한다. 그리고 그 외의 표기는 표 3과 동일하다.

PILAC BT36 50mm와 60mm 후판재의 경우와 마찬가지로 40mm 후판재의 경우도 인장실험과 충격실험 결과가 모두 강구조 설계기준을 만족하고 있다. 또한 강관 모서리부에서의 인장실험결과도 원형강관처럼 시험체 위치에 무관하게 가공경화로 인해서 항복강도와 인장강도가 상승하고 연신율이 저하되고 있다. 특히 원형강관과 비교했을 때 각형강관의 모서리부에서의 가공경화 현상이 더 심하기 때문에 항복비 상승현상이 원형강관에 비해서 상대적으로 심하게 발생하고 있다. 또한 3t/4에서는 강관부 인장강도가 모재 인장강도 상한치를 초과하고 있다. 따라서 후판재처럼 강관재의 경우도 항복비와 인장강도 상한치의 제한을 규정할 필요가 있다고 사료된다. 한편 두께방향 단면수축율의 경우는 원형강관에 비해서 다소 떨어졌다. 표 5의 모재 4호 인장시험결과와 비교해보면 용접부 인장강도가 모재 인장강도보다 높게 나타났다.

강관부나 용접부의 충격흡수에너지도 강종에 상관없이 기준값을 만족하고 있다.

4. 결 론

(1) PILAC BT36 강재와 HIBUIL355OL 강재의 화학성분을 분석한 결과 모두 SM520TMC 규격을 만족하였다. 다만 HIBUIL355OL 강재의 화학성분이 PILAC BT36 강재에 비해서 전반적으로 낮았다.

(2) PILAC BT36 후판재의 경우 인장실험과 충격실험 결과가 모두 강구조 설계기준을 만족하였다. 그러나 HIBUIL355OL 강재의 경우는 t/2에서의 항복강도가 기준값을 만족하지 못하였다. 한편 충격흡수에너지는 HIBUIL355OL 강재가 PILAC BT36 강재보다 우수한 것으로 나타났다.

(3) PILAC BT36 강재를 SAW로 용접할 경우 한계예열온도는 두께 60mm에서 50℃였다.

(4) 롤 벤딩이나 프레스 성형으로 원형강관을 제관하거나 프레스 성형으로 각형강관을 제관할 경우 가공경화로 인해서 강관부의 항복강도와 인장강도는 상승하고 연신율은 감소하였다. 그러나 항복강도가 지나치게 높아져서 항복비가 90%를 초과하는 경우도 발생하였다. 이러한 현상은 PILAC BT36 원형강관이나 HIBUIL 355OL 원형강관에서 모두 일어났다. 또한 원형강관에 비해서 각형강관의 경우는 항복비 상승현상이 상대적으로 심하게 발생하였다. 특히 각형강관 일부 시험체의 경우 강관 모서리부 인장강도가 모재 인장강도 상한치를 초과하고 있다. 따라서 강관재의 경우도 후판재처럼 항복비와 인장강도 상한치의 제한을 규정할 필요가 있다고 사료된다.

(5) 원형강관을 프레스 성형으로 제관할 경우 t/2에서 가공연화 현상이 발생하였다.

(6) 원형강관 두께방향 인장시험에서 두께방향 단면수축율은 제관 프로세스나 강종에 관계없이 모재와 비교해서 크게 저하되지 않았다. 한편 프레스 성형으로 제관한 각형강관 모서부의 두께방향 단면수축율은 원형강관에 비해서 다소 떨어졌다.

(7) 원형강관과 각형강관 용접부 인장실험에서는 제관 프로세스나 강종에 상관없이 바우싱거 효과로 인해서 용접부 항복강도가 모재 항복강도보다 낮게 나타났다. 그러나 용접부 인장강도는 모재 인장강도보다 높게 나타났다.

(8) 원형강관과 각형강관의 강관부나 용접부의 충격흡수에너지는 제관 프로세스나 강종에 무관하게 기준값을 만족하였다.

참고문헌

TMCP鋼(T-DAC33)大型鋼管の試作結果 (製管法:プレスベンダー製管), 住友金屬工業(株), 高性能鋼管構造小委員會, 極厚圓形鋼管WG資料, 資料 No. CWG17-2, 1993

石塚馨, 厚肉圓形鋼管の材料性能確認試驗, 鐵構技術, 2002년, pp. 18-25

김규석, 김상섭, 건축구조용 TMCP 강재 (2000), **한국강구조학회지**, 제12권, 제2호, pp. 39-47

김규석, 김종락, 이승준, 김종성, 양영기, 이충민 (2001), SM490TMC 후판강재의 용접재에 따른 용접부 인성에 관한 연구, **한국강구조학회학술발표논문집**, pp. 520-525

김규석, 김종락, 이은택, 김태영, 문상원, SM490TMC 후판강재의 용접법에 따른 용접부 인성에 관한 연구 (2001), **한국강구조학회학술발표논문집**, pp. 532-537

김규석, 김종락, 김원기, 김상섭, 홍갑표, 최형준, SM490 TMC 후판강재의 입열량 및 층간온도에 따른 용접부 인성에 관한 연구 (2001), **한국강구조학회학술발표논문집**, pp. 526-531

김덕재, 김동규, 김규석, 문태섭, 윤명호, 신일범, TMCP 강재를 사용한 용접 H 형강 보의 거동에 관한 연구 (1994), **한국강구조학회지**, 제6권, 제3호, pp. 165-172

(접수일자 : 2003. 11. 12 / 심사일 2003. 12. 5 / 심사완료일 2004. 1. 5)