

건축구조용 냉간성형 강관의 가공성능 평가

Evaluation of Forming Performance of Cold Rolled Steel Pipes & Tubes for Building Structure

임 성 우¹⁾ · 최 광²⁾ · 장 인 화³⁾
Im, Sung Woo Choi, Kwang Chang, In Hwa

요 약 : SN 강재를 건축구조용으로 사용하기 위해서는 설계기준강도가 제정되어야 한다. 선행 연구로써, SN400B/490B 후판재로 제관한 STKN400B/490B 원형강관과 SPAP235/325 및 SPAR295 각형강관의 물성을 평가하였다. SN400B/490B 후판재와 비교했을 때 STKN400B/490B 원형강관의 항복인장 및 인장강도는 상승하였지만, 제조 프로세스에 무관하게 STKN400B/490B 원형강관의 규격을 만족하였다. 그러나 SPAP235/325 각형강관 모서리부에서의 항복인장 및 인장강도는 규격을 벗어났다. 이것은 SPAP235/325 각형강관 규격에서 정하고 있는 값이 모서리부에서의 값이 아니라 변에서의 값이기 때문이다. STKN490B 원형강관에 발생한 최대 인장잔류응력은 모재 항복강도 수준이며, 최대 압축잔류응력은 모재 항복강도의 40% 수준이었다. 또한 SPAP325 각형강관에 발생한 최대 인장잔류응력과 최대 압축잔류응력은 모두 모재 항복강도의 80% 수준이었다. 중심압축실험을 한 결과 STKN490B 원형강관의 좌굴강도는 제조 프로세스에 관계없이 별 차이를 보이지 않았다. 그러나 각형강관의 경우는 SPAP325 각형강관이 SN490B로 built-up한 각형강관보다 좌굴강도가 높게 나타났다.

ABSTRACT : Making use of SN steel in the building structure should be a prerequisite to adopt the design strength of said steel. As a preceding study, the material properties of STKN400B/490B tubes and SPAP235/325 and SPAR295 square pipes manufactured using SN400B/490B plates were evaluated. Compared with the yield and ultimate strengths of SN400B/490B plates, those of STKN400B/490B tubes increased. Nonetheless, the yield and ultimate strengths of STKN400B/490B tubes satisfied the design codes of STKN400B/490B tubes even though the tubes were fabricated via roll bending or press forming. On the other hand, the yield and ultimate strengths at the edges of SPAP235/325 square pipes did not satisfy the design codes based on the values at the sides. The maximum tensile and compressive residual stresses at the STKN490B tube were equal to and 40% of the yield strength of the SN490B plate, respectively. In the case of the SPAP325 square pipe, both the maximum tensile and compressive residual stresses were 80% of the yield strength of the SN490B plate. The axial compressive loaded column test results showed that the buckling strengths were not very different regardless of the mode of fabrication of STKN490B tubes, i.e., through roll bending or press forming. On the other hand, the buckling strength of the SPAP325 square pipe was higher than that of the built-up square pipe.

핵심용어 : 롤 벤딩, 프레스 성형, 잔류응력, 좌굴강도

KEYWORDS : Roll Bending, Press Forming, Residual Stress, Buckling Strength

1. 서론

1970년대 고도 경제성장과 함께 활성화되기 시작한 철골조 건축물은 2000년대에 들어서게 되면서 많은 주상복합아파트를 비롯하여 ASEM 타워 등 사무소 빌딩과 인천국제공항 등 공공 건축물에 적용이 확대되고 있다. 그러나 건축구조용 강재 측면에서 살펴보면 1990년 이전까지는 SS400 강재를

기본으로 한 롤빔이 사용되었고,²⁾ 그 후 건축물이 고층화 및 장식팬화 됨에 따라서 SM490 강재의 사용이 일반화되었다. 이와 함께 건축구조용 고성능 강재인 TMC 강재(PILAC-BT33 & 36)가 1990년대 후반부터 건축물에 적용되기 시작하였다. 한편 KS D 3861로 고시된 건축구조용 고성능 강재인 SN 강재와 SN 강재를 원소재로 한 KS D 3632의 STKN 원형강관 및 KS D 3864의 SPAR/SPAP 각형강관

1) 정희원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원 공학박사
(Tel. 031-370-9545, Fax. 031-370-9559, E-mail : swim@rist.re.kr)
2) 정희원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원(kchoi@rist.re.kr)
3) 정희원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 수석연구원 공학박사(ihchang@rist.re.kr)

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

은 주요 구조용 강재로 강구조 설계기준작업을 수행 중이므로 곧 사용이 가능할 것으로 예상된다.

일본에서 1994년 6월 1일 JIS G 3136으로 고시되면서부터 건축구조용 강재로 사용되기 시작한 SN 강재는 Mill사 입장이 아닌 수요가 입장에서 최초로 수요가의 요구사항을 반영하여 개발된 강재(橋本篤秀, 1996)이다. SN 강재의 특성을 살펴보면 건축구조용 TMC 강재와 마찬가지로 용접성과 내진성능을 보증한다. 그러나 SN 강재의 경우는 강재 두께가 40mm를 초과하면 설계기준강도를 저감한다는 것이 건축구조용 TMC 강재와 차이점이다. 따라서 SN 강재는 항복강도의 편차가 작아야 하거나, 내진설계가 필요하든지 또는 대입 열 용접이 요구되는 40mm 이하의 부재에 사용하는 것이 바람직하다.

STKN 원형강관에는 STKN400W 강관과 STKN400B 강관 및 STKN490B 강관이 있다. STKN400W 원형강관은 용접성이 필요하지 않는 부위에 사용되고, STKN400B 원형강관 및 STKN490B 원형강관은 SN 강재와 마찬가지로 소성변형능력과 용접성이 요구되는 주요 구조부재에 사용된다. SN 강재를 기본으로 하는 각형강관에는 SPAR295 강관과 SPAP235 강관 및 SPAP325 강관이 있다. SPAR295 각형강관은 일본건설대신의 일반인정을 받은 BCR295 강관과 동일 규격이며, SPAP235 각형강관 및 SPAP325 각형강관은 각각 일본건축센터의 인증을 취득한 BCP235 강관 및 BCP325 강관과 동일 규격이다(岡本晴仁, 1996). 따라서 SPAP/SPAR 각형강관의 사용용도도 SN 강재와 유사하다. 다만 SN 강재와 차이점은 STKN 원형강관과 SPAP/SPAR 각형강관은 냉간성형을 하기 때문에 냉간가공성을 향상시키기 위해서 유리질소의 양을 0.006% 이하로 관리(鋼材俱樂部, 1998)하고 있고, 제관으로 인한 가공경화현상 때문에 SN 강재에 비해서 항복강도와 인장강도 및 항복비의 상한치가 높다는 점이다. 그러나 이상과 같이 우수한 성능을 갖고 있는 건축구조용 냉간성형 강관에 관한 연구(岡本晴仁, 1995)는 매우 미약한 실정이다.

본 연구에서는 건축구조용 강재로 KS 규격에 고시된 SN 강재와 SN 강재를 원소재로 한 STKN 원형강관 및 SPAR/SPAP 각형강관의 건축구조물 적용확대를 위해서 기본물성을 평가하였다. 이때 STKN 원형강관의 경우 roll bending과 press forming에 따른 가공 열화도를 평가하였다. SPAR/SPAP 각형강관의 경우는 각형강관 제조 프로세스에 따른 가공 열화도를 평가하였다. 또한 제조 프로세스에 따른 STKN 원형강관과 SPAR/SPAP 각형강관의 잔류응력 분포와 부재성능도 함께 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 강관의 제작

2차가공에 의한 강관의 열화도를 평가하기 위해서 SN 강재를 원형강관과 각형강관으로 제관하였다. 원형강관의 경우 두께 30mm인 후판을 외경이 914mm가 되도록 SN400B 강재와 SN490B 강재를 각각 roll bending으로 제관하여 강종에 따른 STKN 원형강관 열화도를 검토하였다. 또한 SN490B 강재를 $\varnothing 457 \times 16$ mm의 STKN 원형강관이 되도록 roll bending과 press forming으로 각각 제관하여 제조 프로세스에 의한 영향을 검토하였다. 한편 두께 30mm인 SN400B 강재와 SN490B 강재를 각각 'ㄷ'자 형태로 2개씩 press forming한 후 용접하여 $500 \times 500 \times 30 \times 30$ mm 크기의 각형강관으로 제작하여 강종에 따른 SPAP 각형강관 열화도를 검토하였다. 또한 각형강관의 제조 프로세스에 따른 가공 열화도를 평가하기 위해서 $340 \times 340 \times 16 \times 16$ mm 크기의 SPAP325 각형강관과 SPAR295 각형강관을 제조하였다. 이때 SPAP325 각형강관은 SN490B 강재를 'ㄷ'자 형태로 2개로 press forming한 후 용접하여 제작하였다. 그러나 SPAR295 각형강관은 SN400B 열연코일을 원형강관으로 제관한 다음 다시 각형강관으로 sizing해서 제조하기 때문에 본 실험에서는 SN400B 후판강재를 roll bending으로 원형강관을 만든 후 1000톤 UTM으로 강관측면을 가압하여 SPAR295 각형강관을 모사하였다.

강관을 제관한 후 용접 프로세스는 제관사에 따라서 약간의 차이가 있다. Roll forming의 경우는 강관 외측 이음부를 tack welding한 다음 SAW로 강관의 내측을 용접하고, 내측 용접이 완료되면 milling machine으로 용접부의 외측을 gouging을 한 다음 강관 외측을 SAW로 용접하였다. Press forming의 경우는 강관 외측 이음부를 tack welding한 다음 GMAW로 강관 외측을 초층용접하고나서 SAW로 강관 내측을 용접하고, 내측 용접이 완료되면 강관 외측을 SAW로 용접하였다. 어느 경우나 최대층간온도를 250℃로 유지하였다. 이때 사용한 용접재료는 표 1에서 보는바와 같이 SAW의 경우 SN400B 후판강재에서는 S-777MXHxH-14, SN490B 후판강재에서는 S-777MXHxA-3를 사용하였고, GMAW의 경우는 SM-70을 사용하였다.

표 1. 용접재료의 제원

	화합성분 (%)						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	$\sqrt{E_{20}}$:80
S-777MXHx H-14(SAW)	0.07	0.40	1.37	0.023	0.011	-	510	560	29	$\sqrt{E_{20}}$:70
SM-70 (GMAW)	0.09	0.41	1.10	0.012	0.011	-	430	540	30	$\sqrt{E_{28}}$:70

2.2 강관 부위별 성능평가

원형강관과 각형강관을 제작한 다음 가공에 의한 열화도를 평가하기 위해서 각 부위별로 시험체를 제작하였다. 그림 1과 그림 2 및 그림 3은 각각 STKN 원형강관과 SPAP 각형강관 및 SPAR 각형강관에서의 시험체 채취부위의 예를 나타낸다. STKN 원형강관의 경우 용접부에서는 강관 길이방향의 직각방향에서 인장시험체와 충격시험체 및 굽힘시험체를 채취하였다. 인장시험체와 굽힘시험체는 강관을 상온에서 기계적으로 편 후 전두께 시험체로 제작하였다. 충격시험체는 t/4와 t/2 및 3t/4 위치에서 KS B 0809에 의거해서 4호 시험체로 제작하였다. 이때 노치는 용착금속 및 열영향부에 위치하도록 하였다. STKN 원형강관 강관부에서의 인장시험체와 충격시험체는 강관 길이방향과 길이방향의 직각방향으로 t/4와 t/2 및 3t/4 위치에서 각각 KS B 0801과 KS B 0809에 의거해서 4호 시험체로 제작하였다. STKN 원형강관 두께방향 인장시험체는 KS D 0276에 의거해서 제작하였다. 이때 강관 두께방향 인장시험체의 그림부와 측정부는 EB로 용접하였다. SPAP 각형강관의 경우 용접부에서는 STKN 원형강관과 동일한 방향과 위치에서 동일 규격의 인장시험체와 충격시험체 및 굽힘시험체를 채취하였다. SPAP 각형강관 강관부에서의 인장시험체는 강관 길이방향으로, 충격시험체는 강관 길이방향과 강관 길이방향의 직각방향으로 t/4와 t/2 및 3t/4 위치의 모서리부에서 각각 KS B 0801과 KS B 0809에 의거해서 4호 시험체를 제작하였다. SPAP 각형강관 두께방향 인장시험체는 강관 모서리부에서 STKN 원형강관의 경우와 동일하게 KS D 0276에 의거해서 제작하였다. 한편 SPAR 각형강관의 용접부에서는 t/2 위치에서 SPAP 각형강관의 경우와 동일한 방향에서 동일 규격으로 인장시험체와 충격시험체를 채취하였다. 또한 SPAR 각형강관 강관부에서의 인장시험체와 충격시험체는 강관 길이방향과 강관 길이방향의 직각방향으로 t/2 위치의 평탄부에서 각각 KS B 0801과 KS B 0809에 의거해서 시험체를 제작하였다. 그러나 SPAR 각형강관은 후판재를 원형강관으로 제관한 다음 1000톤 UTM으

로 강관측면을 가압하여 모사하였기 때문에 강관 모서리부에 대한 평가는 하지 않았다.

2.3 제조 프로세스에 따른 잔류응력평가

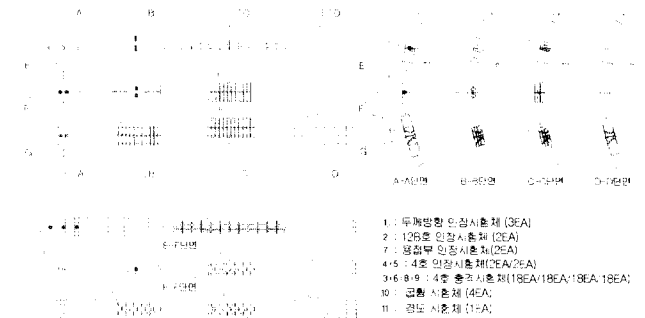


그림 1. STKN400B/490B 원형강관에서 시험체 채취부위(∅457x16xL)

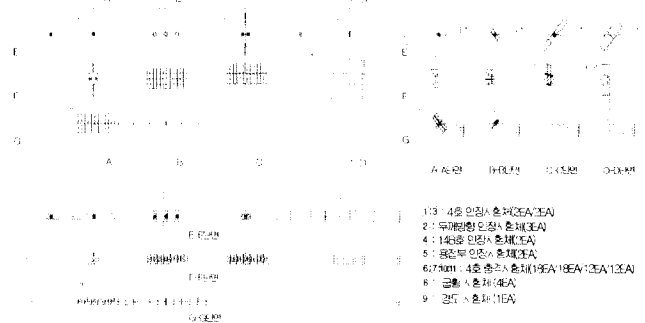


그림 2. SPAP235/325 각형강관에서 시험체채취부위(□500x500x30x30xL)

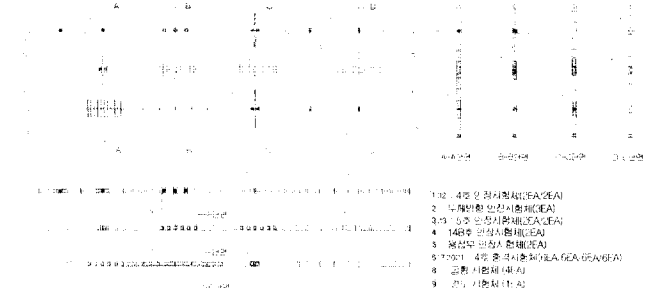


그림 3. SPAR295 각형강관에서 시험체 채취부위(□340x340x16x16xL)

Roll bending과 press forming으로 제관된 ∅457×16mm의 STKN490B 원형강관 2개와 press forming으로 제관된 □340×340×16×16mm의 SPAP325 각형강관 1개를 대상으로 ASTM E 837의 hole drilling 방법을 이용해서 강관에 발생된 잔류응력을 평가하였다. 이때 강관 길이방향과 길이방향의 직각방향에서의 잔류응력을 측정하기 위해서 3축 gage를 사용하였다. 3축 gage는 STKN490B 원형강관과 SPAP325 각형강관 모두 강관 단부로부터 250mm 떨어진

진 위치에서 그림 4에서 보는바와 같이 강관축을 중심으로 부착하였다. 특히 STKN490B 원형강관의 경우는 강관 내부의 잔류응력도 함께 측정하였다.

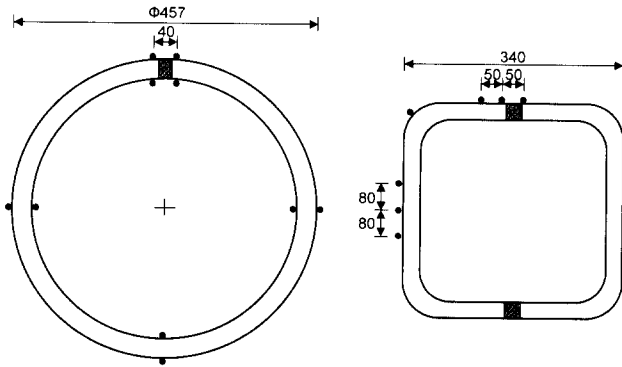


그림 4. 잔류응력 측정부위

2.4 제조 프로세스에 따른 부재성능평가

강관 제조 프로세스에 따른 부재성능을 평가하기 위해서 1000톤 UTM을 이용해서 중심압축실험을 수행하였다. 원형강관에서는 roll bending과 press forming으로 제관한 경우를 비교하였고, 각형강관에서는 press forming한 것과 built-up한 것을 비교하였다. 이때 원형강관은 $\phi 457 \times 16$ mm에 길이가 4150mm로 제작하였고, 각형강관은 $340 \times 340 \times 16 \times 16$ mm에 길이 4150mm로 제작하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 소재 평가

3.1.1 소재 물성

SN400B/490B 후판강재의 화학성분을 분석한 결과를 표 2에 요약하였다. 탄소당량과 용접 갈라짐 감수성 조성이 기준 값보다 훨씬 낮게 나타나고 있다. 특히 냉간가공성과 관련된 유리질소의 양이 0.006%보다 낮아서 냉간성형을 하는데

큰 문제가 없을 것으로 보인다.

SN400B/490B 후판강재의 t/4와 t/2 위치에서의 조직사진을 그림 5에 나타내었다. Band structure가 있는 전형적인 pearlite와 ferrite 조직을 보이고 있다. 두께 30mm SN490B 후판강재의 결정립은 25 μ m 수준인데 반하여, 두께 30mm SN400B 후판강재와 두께 70mm SN490B 후판강재의 결정립은 50 μ m 수준이었다.

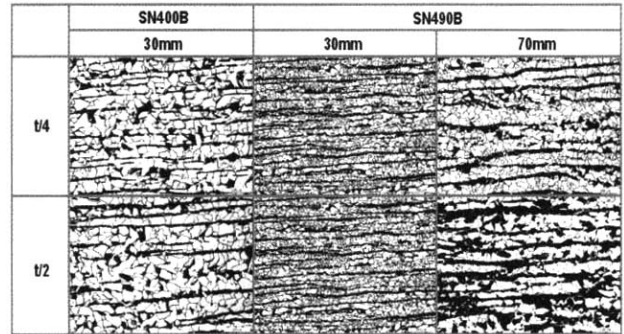


그림 5. 사용강재의 조직사진($\times 100$)

SN400B/490B 후판강재의 기계적 성질은 표 3에 요약하였다. 강재는 B 등급으로 생산되었지만, 평균 판두께 방향 단면수축율이 C 등급으로 나타났다.

3.1.2 예열온도

SN400B 강재와 SN490B 강재의 한계예열온도를 평가하기 위해서 KS B 0870에 의거해서 y-groove 용접균열시험을 실시하였다. 건축구조용 냉간성형 강관은 주로 SAW로 용접되기 때문에 표 1의 직경 4mm SAW용 용접재료를 사용하였다. 그림 8에 17kJ/cm (550A-29V-56cm/min)의 입열량으로 용접한 결과를 나타내었다. 두께가 30mm인 경우에는 예열이 전혀 필요없지만, 70mm를 넘어서게 되면 125 $^{\circ}$ C가 되어야 균열이 발생되지 않음을 알 수 있다. 그러나 y-groove 용접균열시험의 조건이 현장조건보다 매우 가혹한 상태이기 때문에 일반적으로 실험결과보다 50~70 $^{\circ}$ C 정도 낮

표 2. 사용강재의 화학성분

		화학성분 (%)												Ceq (%)	Pcm (%)
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	B	N		
SN400B (30t)	KS	≤ 0.20	≤ 0.35	0.6~1.4	≤ 0.03	≤ 0.015	-	-	-	-	-	-	-	≤ 0.36	≤ 0.26
	실험	0.142	0.120	1.01	0.018	0.006	0.018	0.011	0.016	<0.002	<0.002	<0.0002	0.0028	0.32	0.20
SN490B (30t)	KS	≤ 0.18	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.03	≤ 0.015	-	-	-	-	-	-	-	≤ 0.44	≤ 0.29
	30t	0.149	0.385	1.24	0.013	<0.002	0.013	0.014	0.019	0.002	0.028	<0.0002	0.0004	0.38	0.23
SN490B (70t)	KS	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.03	≤ 0.015	-	-	-	-	-	-	-	≤ 0.46	≤ 0.29
	실험	0.157	0.447	1.27	0.011	<0.002	0.009	0.007	0.011	<0.002	<0.002	<0.0002	0.0036	0.39	0.24

취서 예열하는 것이 상례이다. 따라서 70mm 이상의 SN 강재를 용접하는 경우는 60℃정도 예열하는 것이 바람직하다.

표 3. 사용강재의 기계적 성질

두께 (mm)	시험체명	방향	위치	인장시험					충격시험 E ₂ (J)	
				YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAz (%)		
SN40 OB	16	1A호인장	L	-	274.4	419.4	65.4	34.0	-	-
			C	-	270.5	419.4	64.5	34.3	-	-
		4호충격	L	t/4	-	-	-	-	-	357.7
			C	t/4	-	-	-	-	-	299.9
	30	1A호인장	L	-	271.5	431.2	63.0	35.6	-	-
			C	-	267.5	427.3	62.6	33.9	-	-
		두께인장	Z	-	273.8	462.6	59.2	28.7	46.9	-
		4호충격	L	t/4	-	-	-	-	-	142.7
C	t/4		-	-	-	-	-	169.8		
SN49 OB	16	1A호인장	L	-	395.9	530.2	74.7	27.8	-	-
			C	-	403.8	527.2	76.6	27.6	-	-
		4호충격	L	t/4	-	-	-	-	-	250.2
			C	t/4	-	-	-	-	-	160.4
	30	1A호인장	L	-	375.3	508.6	73.7	31.7	-	-
			C	-	383.2	508.6	75.3	30.8	-	-
		두께인장	Z	-	406.8	547.7	74.3	40.4	72.3	-
		4호충격	L	t/4	-	-	-	-	-	334.5
	C		t/4	-	-	-	-	-	292.7	
	70	4호인장	L	t/4	360.6	522.3	69.0	39.3	-	-
				t/2	319.5	502.7	63.6	38.0	-	-
			C	t/4	349.9	510.6	68.5	37.2	-	-
				t/2	327.3	508.6	64.4	37.4	-	-
		두께인장	Z	-	341.1	512.3	66.6	28.7	71.2	-
			4호충격	L	t/4	-	-	-	-	-
		t/2		-	-	-	-	-	-	175.7
		t/4		-	-	-	-	-	-	281.3
		t/2		-	-	-	-	-	-	161.7

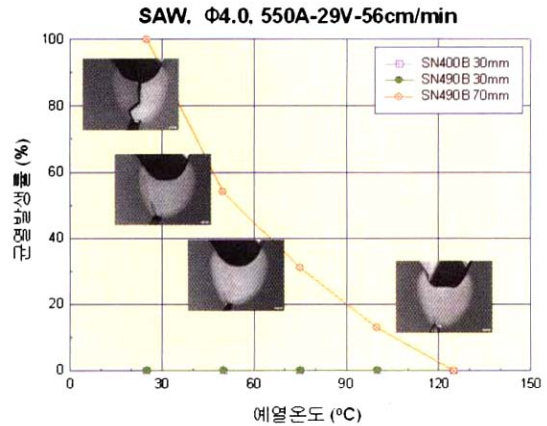


그림 8. SN400B/490B 강재의 예열온도

3.2 강관 부위별 성능평가

3.2.1 강관 용접부의 마크로 조직검사와 굽힘시험

SN400B 강재와 SN490B 강재를 다양한 크기의 원형강관 또는 각형강관으로 제관한 다음 용접부의 마크로 조직시험 결과를 그림 6에 나타내었다. 마크로 조직에서는 균열이나 슬래그 혼입 등 어떠한 결함도 관찰되지 않았다. 그림 7은 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.

3.2.2 원형강관의 가공 열화도 평가

3.2.2.1 STKN400B 원형강관과 STKN490B 원형강관

강종에 따른 STKN 원형강관 열화도를 평가하기 위해서 두께 30mm인 SN400B 강재와 SN490B 강재를 외경이 914mm가 되도록 roll bending으로 각각 제관하여 그림 1에서 보는 것처럼 각 부위별로 시험체를 채취하여 인장시험 및 충격시험을 실시하였다. 강관의 각 부위별 실험결과를 모재의 실험결과와 비교하여 표 4와 표5에 정리하였다. 여기서 강관부는 후판을 강관으로 제관했을 때 용접하지 않은 부위에서 실험한 것을 의미하고, 용접부란 강관의 용접부에서 실험한 결과라는 것을 의미한다. 시험체명에서 4호인장은 4호 인장시험체, 12B호인장은 12B호 인장시험체, 두께인장은 두께 방향 인장시험체, 4호충격은 4호 충격시험체, 용접부인장은 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 두께 중심을 의미하고, 구분에서 R은 roll bending을 의미한다.

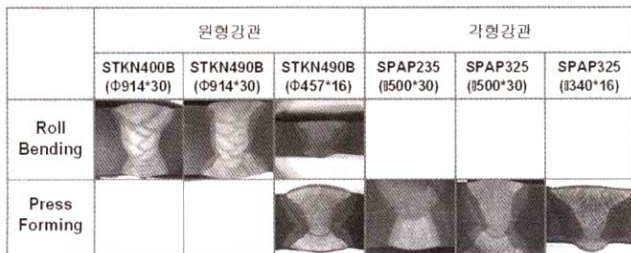


그림 6. 강관 용접부의 마크로 사진



그림 7. 강관 용접부의 굽힘 실험결과

강관부 인장시험한 결과를 표 3의 모재 시험결과와 비교해 보면 시험체 방향이나 위치에 무관하게 가공경화로 인해서 항복강도와 인장강도가 상승하였음을 알 수 있다. 그러나 STKN400B/490B 원형강관의 규격은 만족하고 있다. 용접부 인장시험에서는 용접부 항복강도와 용접부 인장강도가 각각 모재 항복강도와 모재 인장강도보다 높게 나타났다. 용접부 강도에 관해서는 STKN400B/490B 원형강관의 규격에서 정의되어 있지 않다. 일반적으로 용접부 인장강도가 모재 인장강도 이상만 확보하면 건전한 용접부로 간주하므로 용접부에는 문제가 없음을 알 수 있다. 한편 용접부의 충격흡수에너지는 기준값을 만족하고 있다.

3.2.2.2 제관 프로세스의 영향

제관 프로세스에 따른 강관의 열화도를 평가하기 위해서 두께 16mm인 SN490B 강재를 외경이 457mm가 되도록 roll bending과 press forming으로 각각 제관하여 그림 1에서 보는 것처럼 각 부위별로 시험체를 채취하여 인장시험 및 충격시험을 실시하였다. 강관의 각 부위별 시험결과를 모재의 시험결과와 비교하여 표 6에 정리하였다. 이때 구분에서 R은 roll bending, P는 press forming을 의미한다. 그 외의 표기는 표 4와 동일하다.

∅457×16mm의 단면을 갖는 STKN490B 강관부 인장시험한 결과를 표 3의 모재 시험결과와 비교해보면 ∅914×30mm의 단면을 갖는 STKN490B 강관부의 경우와 마찬가지로 시험체 방향이나 위치 그리고 제관 프로세스에 무관하게 가공경화로 인해서 항복강도와 인장강도가 상승하였음을 알 수 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 인장시험에서는 용접부 항복강도와 용접부 인장강도가 각각 모재 항복강도와 모재 인장강도보다 높게 나타났다. 용접부 인장강도가 모재 인장강도 이상이므로 용접부에는 문제가 없음을 알 수 있다. 제관 프로세스에 무관하게 강관부나 용접부의 충격흡수에너지는 기준값을 만족하고 있다. 다만 roll bending의 경우 용착금속에서 기준값을 만족시키지 못하고 있다. Press forming으로 제관한 용착금속 시험체가 충분한 충격인성을 갖고 있는 것으로 보아 roll bending의 경우는 충분하지 못한 용접재료를 사용한 결과가 아니라 용접시공에 문제가 있었음을 유추할 수 있다.

3.2.3 각형강관의 가공 열화도 평가

3.2.3.1 SPAP235 각형강관과 SPAP325 각형강관

표 4. STKN400B 원형강관의 기계적 성질(∅914×30)

구분	부위	시험체명	방향	위치	구분	인장시험					충격시험 (J)	
						YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAz (%)		
규격	강관부	12호인장	L	-	-	235/385	400/540	85.0	23	-	-	
	강관부	4호종격	L	3/4	-	-	-	-	-	-	27	
	강관부	4호인장	L	1/2	R	319.0	458.6	69.5	33.2	-	-	
	강관부	4호인장	C	1/2	R	300.9	452.3	66.5	29.8	-	-	
	강관부	12B호인장	L	-	R	330.3	458.7	72.0	43.9	-	-	
	강관부	두께인장	Z	-	R	340.1	461.9	73.6	24.4	49.5	-	
	용접부	용접부인장	C	-	R	448.8	528.8	84.9	27.8	-	-	
	원형 강관 (∅914 ×30)	강관부	4호종격	L	3/4	R	-	-	-	-	-	91.3
		강관부	4호종격	L	1/2	R	-	-	-	-	-	71.0
		강관부	4호종격	L	1/4	R	-	-	-	-	-	114.0
		강관부	4호종격	C	3/4	R	-	-	-	-	-	41.3
		강관부	4호종격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	41.4
강관부		4호종격	C	1/4	R	-	-	-	-	-	48.1	
용착금속		4호종격	C	3/4	R	-	-	-	-	-	86.7	
용착금속		4호종격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	115.3	
용착금속		4호종격	C	1/4	R	-	-	-	-	-	190.1	
HAZ		4호종격	C	3/4	R	-	-	-	-	-	126.8	
HAZ		4호종격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	82.0	
HAZ		4호종격	C	1/4	R	-	-	-	-	-	124.9	

표 5. STKN490B 원형강관의 기계적 성질(∅914×30)

구분	부위	시험체명	방향	위치	구분	인장시험					충격시험 (J)	
						YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAz (%)		
규격	강관부	12호인장	L	-	-	325/475	490/640	85.0	23	-	-	
	강관부	4호종격	L	3/4	-	-	-	-	-	-	27	
	강관부	4호인장	L	1/2	R	376.8	536.6	70.2	34.9	-	-	
	강관부	4호인장	C	1/2	R	384.7	545.4	70.5	32.8	-	-	
	강관부	12B호인장	L	-	R	384.5	533.6	72.1	45.1	-	-	
	강관부	두께인장	Z	-	R	402.8	549.1	73.4	37.5	67.4	-	
	용접부	용접부인장	C	-	R	539.7	608.4	88.7	26.0	-	-	
	원형 강관 (∅914 ×30)	강관부	4호종격	L	3/4	R	-	-	-	-	-	213.9
		강관부	4호종격	L	1/2	R	-	-	-	-	-	209.9
		강관부	4호종격	L	1/4	R	-	-	-	-	-	224.6
		강관부	4호종격	C	3/4	R	-	-	-	-	-	175.9
		강관부	4호종격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	178.3
강관부		4호종격	C	1/4	R	-	-	-	-	-	199.5	
용착금속		4호종격	C	3/4	R	-	-	-	-	-	94.2	
용착금속		4호종격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	99.2	
용착금속		4호종격	C	1/4	R	-	-	-	-	-	91.2	
HAZ		4호종격	C	3/4	R	-	-	-	-	-	214.7	
HAZ		4호종격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	183.8	
HAZ		4호종격	C	1/4	R	-	-	-	-	-	196.6	

표 6. 제관 프로세스에 따른 STKN490B 원형강관의 기계적 성질(∅457×16)

구분	부위	시험체명	방향	위치	구분	인장시험					충격시험 (J)	
						YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAz (%)		
규격	강관부	12호인장	L	-	-	325/475	490/640	85.0	23	-	-	
	강관부	4호종격	L	3/4	-	-	-	-	-	-	27	
	강관부	4호인장	L	1/2	R	419.9	563.5	74.5	34.8	-	-	
					P	397.9	552.7	72.0	33.3	-	-	
	강관부	4호인장	C	1/2	R	394.9	561.5	70.3	30.0	-	-	
					P	421.4	560.1	75.2	28.4	-	-	
	강관부	12B호인장	L	-	R	413.2	548.9	80.7	33.2	-	-	
					P	469.4	566.3	82.9	32.9	-	-	
	강관부	두께인장	Z	-	R	439.0	579.3	75.8	24.8	64.9	-	
					P	436.9	577.5	75.6	29.5	65.5	-	
	원형 강관 (∅457× 16)	용접부	용접부인장	C	-	R	492.9	619.3	79.6	21.1	-	-
						P	538.0	605.2	88.9	23.5	-	-
강관부		4호종격	L	1/2	R	-	-	-	-	-	168.4	
					P	-	-	-	-	-	152.9	
용접부		4호종격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	82.5	
					P	-	-	-	-	-	103.5	
용착금속		4호종격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	23.4	
					P	-	-	-	-	-	58.7	
HAZ		4호종격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	90.9	
					P	-	-	-	-	-	37.7	

500×500×30×30mm의 단면을 갖는 SPAP235 각형강관과 SPAP325 각형강관을 press forming으로 제관했을 때 강관 열화도를 평가하기 위해서 그림 2에서 보는 것처럼 각 부위별로 시험체를 채취하여 인장시험 및 충격시험을 실시하였다.

강관의 각 부위별 시험결과를 모재의 시험결과와 비교하여 표 7과 표 8에 정리하였다. 이때 표 7과 표 8의 표기는 표 6과 동일하다.

SPAP235/325 각형강관의 규격에서 정하고 있는 값은 각형강관의 변에서 값이다. 따라서 SPAP235/325 각형강관의 기준은 모재인 SN400B/490B 후관강재와 동일하다. 그러나 각형강관을 기동재로 사용할 경우 모서리부의 경화에 의한 열화도가 부재성능에 영향을 미친다. 따라서 본 실험에서는 SPAP235/325 각형강관의 규격에서 정하고 있지 않는 모서리부에서의 가공 열화도를 평가하였다.

각형강관 모서리부 인장시험한 결과를 표 3의 모재 시험결과와 비교해보면 원형강관과 마찬가지로 가공경화로 인해서 항복강도와 인장강도가 상승하고 연신율이 저하되고 있다. 그러나 원형강관과 비교했을 때 각형강관의 모서리부에서의 가공경화 현상이 더 심하기 때문에 원형강관과 달리 상승폭이 훨씬 커서 대부분 각형강관의 규격에서 정하고 있는 값을 초과하고 있다. 따라서 각형강관의 경우는 변에서 값이 아니라 모서리부에서의 값으로 규정할 필요가 있다고 사료된다. 한편 용접부 인장강도는 모재 인장강도 이상이므로 용접부에는 문제가 없음을 알 수 있다. 충격시험의 경우 강중에 상관없이 용접부의 충격값은 기준값을 만족하고 있다. 그러나 SPAP235 각형강관 모서리부에서의 충격값은 기준값을 만족시키지 못하고 있다. 동일 단면으로 제관된 SPAP325 각형강관 모서리부에서의 충격값이 충분한 충격인성을 갖고 있는 것으로 보아 SPAP235 각형강관의 경우는 제관과정에서 문제가 있었음을 유추할 수 있다.

3.2.3.2 제관 프로세스의 영향

340×340×16×16mm의 단면을 갖는 SPAP325 각형강관은 press forming으로 제관하고, SPAP295 각형강관을 roll bending으로 원형강관을 만든 후 1000톤 UTM으로 강관측면을 가압하여 제관했을 때 강관 열화도를 평가하기 위해서 각각 그림 2와 그림3에서 보는 것처럼 각 부위별로 시험체를 채취하여 인장시험 및 충격시험을 실시하였다. SPAP325 각형강관과 SPAP295 각형강관의 각 부위별 시험결과를 모재의 시험결과와 비교하여 각각 표 9와 표 10에 정리하였다. 이때 구분에서 P는 press forming을 의미한다. 이때 시험체명에서 14B인장은 14B호 인장시험체, 5호인장은 5호 인장시험

표 7. SPAP235 각형강관의 기계적 성질(□500×500×30×30)

부위	시험체명	방향	위치	구분	인장시험					충격시험 E ₂ (J)	
					YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAZ (%)		
모재	강관부	1A호인장	L	-	-	255/375	400/510	80	22	-	-
	강관부	4호충격	L	3/4	-	-	-	-	-	-	27
가공 강관 SPAP235	강관부	4호인장	L	1/2	P	453.2	529.2	81.8	23.0	-	-
	강관부	두께인장	Z	-	P	496.0	520.4	78.0	9.4	22.8	-
	용접부	용접부인장	C	-	P	544.9	478.1	72.1	33.2	-	-
	강관부	4호충격	L	1/2	P	-	-	-	-	-	3.7
	강관부	4호충격	L	1/4	P	-	-	-	-	-	4.9
	강관부	4호충격	C	1/2	P	-	-	-	-	-	18.4
	강관부	4호충격	C	1/4	P	-	-	-	-	-	10.0
	용접부측	4호충격	C	3/4	P	-	-	-	-	-	83.6
	용접부측	4호충격	C	1/2	P	-	-	-	-	-	71.1
	용접부측	4호충격	C	1/4	P	-	-	-	-	-	62.3
HAZ	HAZ	4호충격	C	3/4	P	-	-	-	-	-	72.1
	HAZ	4호충격	C	1/2	P	-	-	-	-	-	75.7
	HAZ	4호충격	C	1/4	P	-	-	-	-	-	89.3

표 8. SPAP325 각형강관의 기계적 성질(□500×500×30×30)

부위	시험체명	방향	위치	구분	인장시험					충격시험 E ₂ (J)	
					YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAZ (%)		
모재	강관부	1A호인장	L	-	-	325/445	490/510	80	21	-	-
	강관부	4호충격	L	3/4	-	-	-	-	-	-	27
가공 강관 SPAP325	강관부	4호인장	L	1/2	P	541.5	620.8	87.2	20.5	-	-
	강관부	두께인장	Z	-	P	486.7	596.2	81.6	26.0	68.7	-
	용접부	용접부인장	C	-	P	487.2	568.5	85.7	29.7	-	-
	강관부	4호충격	L	1/2	P	-	-	-	-	-	112.5
	강관부	4호충격	L	1/4	P	-	-	-	-	-	101.4
	강관부	4호충격	C	1/2	P	-	-	-	-	-	135.4
	강관부	4호충격	C	1/4	P	-	-	-	-	-	77.1
	용접부측	4호충격	C	3/4	P	-	-	-	-	-	67.4
	용접부측	4호충격	C	1/2	P	-	-	-	-	-	67.6
	용접부측	4호충격	C	1/4	P	-	-	-	-	-	141.8
HAZ	HAZ	4호충격	C	3/4	P	-	-	-	-	-	80.8
	HAZ	4호충격	C	1/2	P	-	-	-	-	-	69.2
	HAZ	4호충격	C	1/4	P	-	-	-	-	-	141.9

표 9. SPAP325 각형강관의 기계적 성질(□340×340×16×16)

부위	시험체명	방향	위치	구분	인장시험					충격시험 E ₂ (J)	
					YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAZ (%)		
모재	강관부	1A호인장	L	-	-	325/445	490/510	80	17	-	-
	강관부	4호충격	L	3/4	-	-	-	-	-	-	27
가공 강관 SPAP325	강관부	4호인장	L	1/2	P	555.2	639.5	86.8	18.0	-	-
	강관부	두께인장	Z	-	P	579.4	611.1	93.3	25.5	68.0	-
	용접부	용접부인장	C	-	P	514.5	701.3	73.6	21.3	-	-
	강관부	4호충격	L	1/2	P	-	-	-	-	-	116.3
	강관부	4호충격	C	1/2	P	-	-	-	-	-	44.6
	용접부측	4호충격	C	1/2	P	-	-	-	-	-	37.8
	HAZ	4호충격	C	1/2	P	-	-	-	-	-	41.8

표 10. SPAP295 각형강관의 기계적 성질(□340×340×16×16)

부위	시험체명	방향	위치	구분	인장시험					충격시험 E ₂ (J)	
					YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	EL (%)	RAZ (%)		
모재	강관부	1A호인장	L	-	-	295/445	400/550	90	23	-	-
	강관부	4호충격	L	3/4	-	-	-	-	-	-	27
가공 강관 SPAP295	강관부	4호인장	L	1/2	R	373.8	469.4	75.4	28.0	-	-
	강관부	4호인장	Z	1/2	R	320.0	455.7	70.1	30.7	-	-
	강관부	5호인장	L	-	R	347.7	464.7	74.8	30.7	-	-
	강관부	5호인장	C	-	R	314.8	455.7	69.1	30.9	-	-
	용접부	용접부인장	C	-	R	411.5	519.2	79.3	24.3	-	-
	강관부	4호충격	L	1/2	R	-	-	-	-	-	150.3
	강관부	4호충격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	91.8
	용접부측	4호충격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	157.8
	HAZ	4호충격	C	1/2	R	-	-	-	-	-	141.5

체를 의미한다. 그 외의 표기는 표 6과 동일하다.

340×340×16×16mm의 단면을 갖는 SPAP325 각형강관의 실험 결과는 500×500×30×30mm의 단면을 갖는 SPAP325 각형 강관의 실험결과와 마찬가지로 모서리부 인장시험값은 대부분 각형강관의 규격에서 정하고 있는 값을 초과하고 있으며, 충격값은 기준값을 만족하고 있다. 한편 SPAR295 각형강관의 경우 규격에서 정하고 있는 값은 각형강관의 변에서 값이다.

그러나 SPAP235/325 각형강관과 달리 SPAR295 각형강관은 일차적으로 원형강관으로 제관한 다음 다시 각형강관으로 sizing해서 제조하기 때문에 각형강관 변에서의 값이 중요하다. 시험결과 기준값을 모두 만족하고 있다.

3.3 제조 프로세스에 따른 잔류응력평가

3.3.1 원형강관

경우 인장잔류응력이 발생하였으며, roll bending한 강관에 발생된 잔류응력이 press forming한 강관에 발생된 잔류응력보다 전반적으로 작게 나타났다. 동일 제조 프로세스에서 원주방향이나 강관 길이방향의 차이는 크지 않았다. 내부의 경우는 SA440 강관(石塚鑿, 2002)의 경우처럼 인장잔류응력보다는 압축잔류응력이 주로 발생하였으며, roll bending과 press forming의 차이는 크지 않았다. Roll bending의 경우 길이방향의 잔류응력이 크게 나타났고, press forming의

경우는 원주방향의 잔류응력이 크게 나타났다. 용접부를 제외한 강관부에 발생된 최대 인장잔류응력은 모재 항복강도에 거의 근접하였으며, 최대 압축잔류응력은 모재 항복강도의 40% 수준이었다.

3.3.2 각형강관

Press forming으로 제관된 □340×340×16×16mm의 SPAP325 각형강관에 발생된 잔류응력을 그림 10에 나타내었다. 원주방향보다는 강관 길이방향의 잔류응력이 크게 나타났다. 강관 길이방향의 잔류응력은 모서리부에서 인장방향으로 가장 크게 나타났고, 변의 중심에서는 압축방향으로 변화하였다. 원주방향의 잔류응력은 위치에 무관하게 거의 일정한 값

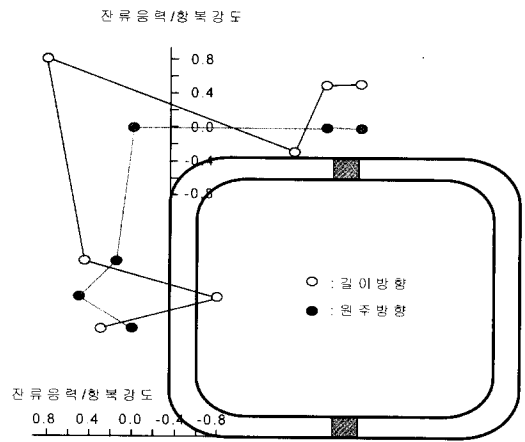


그림 10. SPAP325 각형강관에 발생된 잔류응력의 분포

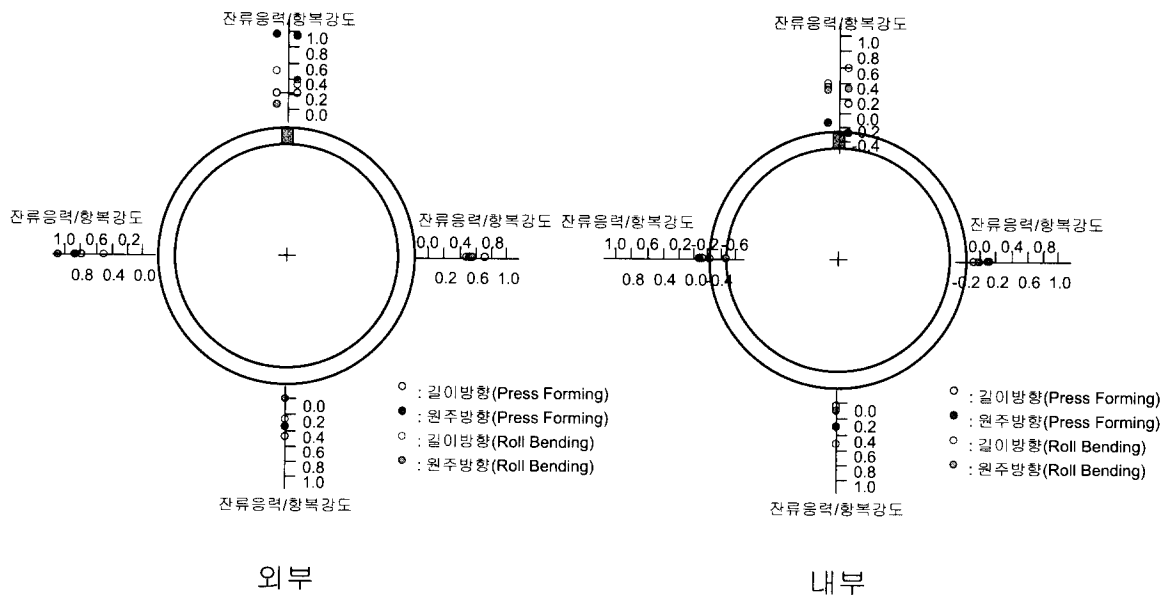


그림 9. STKN490B 원형강관에 발생된 잔류응력의 분포

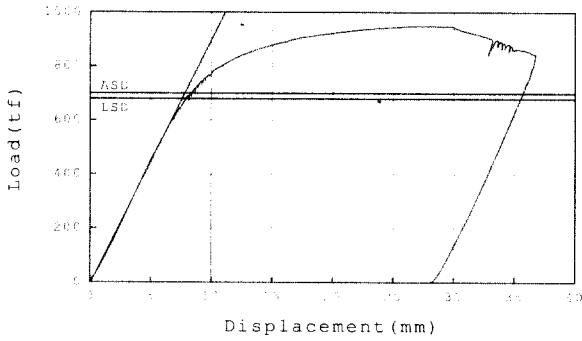


그림 10. 원형강관(Press Forming)

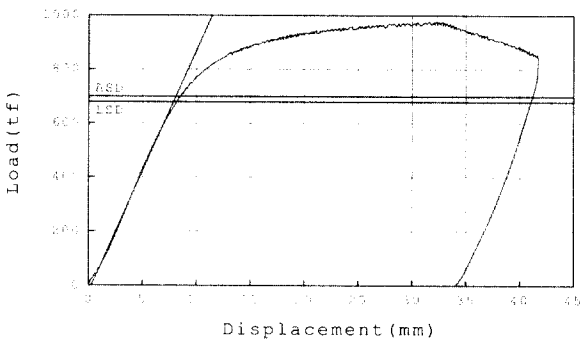


그림 11. 원형강관(Roll Bending)

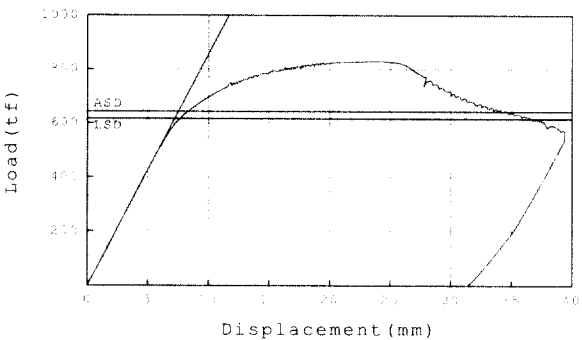


그림 12. 각형강관(Press Forming)

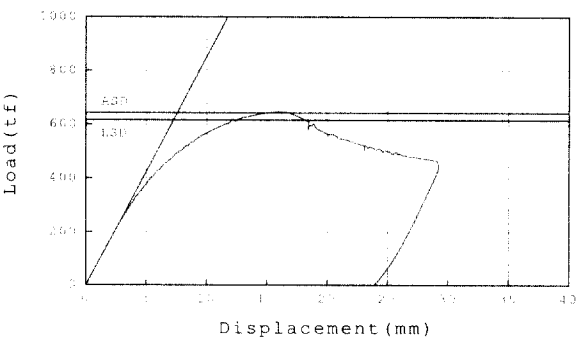


그림 13. 각형강관(Built-up)

을 보였다. 용접부를 제외한 강관부에 발생된 최대 인장잔류응력과 최대 압축잔류응력은 모두 모재 항복강도의 80% 수준이었다. 이 값은 Built-up으로 제작된 각형강관에서 발생되는 잔류응력(Yuhshi Fukumoto, 1987)의 2배 수준이다.

3.4 제조 프로세스에 따른 부재성능평가

3.4.1 원형강관

Roll bending과 press forming으로 제관된 STKN490B 원형강관의 제조 프로세스에 따른 부재성능을 평가하기 위해서 1000 UTM을 이용해서 중심압축실험을 수행하였다. 이때 원형강관의 크기는 $\varnothing 457 \times 16 \times 4150$ mm이며, 세장비는 33.0이다. 그림 10과 그림 11는 각각 roll bending과 press forming으로 제관된 STKN490B 원형강관의 하중-변위곡선을 나타낸다. 강관 제조 프로세스에 관계없이 거의 유사한 거동을 보이고 있다. 여기서 ASD와 LSD는 각각 허용응력설계법에서 안전율을 빼고 계산한 이론값과 한계상태설계법에서 강도감소계수를 빼고 계산한 이론값을 의미한다.

3.4.2 각형강관

$\square 340 \times 340 \times 16 \times 16 \times 4150$ mm의 각형강관을 각각 press forming과 built-up으로 제관하여 1000톤 UTM을 이용해서 중심압축성능을 비교하였다. 이때 각형강관의 세장비는 38.9였다. 그림 12과 그림 13에서 보는바와 같이 좌굴하중이 큰 차이를 보이고 있다. Press forming한 것은 설계기준값을 훨씬 상회하고 있으나, built-up한 것은 설계기준값을 약간 넘어서고 있다. 냉간성형 각형강관의 길이방향으로 발생된 잔류응력은 변의 중심에서는 압축으로 작용하지만 대부분 인장으로 작용하고 있기 때문에 press forming한 것이 built-up재보다 우수한 좌굴내력을 보유하는 것으로 사료된다. 여기서 ASD와 LSD의 정의는 3.4.1절에서 언급한 것과 동일하다.

4. 결 론

- (1) Roll bending이나 press forming으로 SN400B 후판강재와 SN490B 후판강재를 각각 STKN400B 원형강관과 STKN490B 원형강관으로 제관한 다음 물성을 평가한 결과 가공경화로 인해서 강관부의 항복강도와 인장강도는 모재에 비해서 상승하였으나, 제조 프로세스에 무관하게 모두 STKN400B 원형강관과 STKN490B 원형강관의 규격을 만족하였다.

- (2) Press forming으로 SN400B 후판강재와 SN490B

후관강재를 각각 SPAP235 각형강관과 SPAP325 각형강관으로 제관한 다음 강관부 모서리부의 물성을 평가한 결과 STKN400B/490B 원형강관의 경우와 마찬가지로 가공경화로 인해서 강관부의 항복강도와 인장강도는 모재에 비해서 상승하였다. 그러나 강관 모서리부의 항복강도와 인장강도 및 항복비 등이 SPAP235/325 각형강관의 규격을 벗어나고 있다. 이것은 SPAP235/325 각형강관 규격에서 정하고 있는 값이 강관 모서리부에서의 값이 아니라 변에서의 값이기 때문이다. 따라서 SPAP235/325 각형강관의 규격은 변에서의 값보다는 모서리부의 값으로 변경할 필요가 있다고 사료된다.

- (3) SN400B 후관강재를 원형강관으로 제관한 다음 다시 각형강관으로 sizing해서 제조되는 SPAP295 각형강관의 경우 변에서의 물성치가 기준값을 모두 만족하였다.
- (4) Roll bending과 press forming으로 제관된 STKN490B 원형강관에 발생된 잔류응력을 hole drilling 방법으로 측정된 결과 강관 외부에는 인장잔류응력이 발생하였으며, 내부의 경우는 인장잔류응력보다는 압축잔류응력이 주로 발생하였다. Roll bending의 경우는 길이방향의 잔류응력이 크게 나타났고, press forming의 경우는 원주방향의 잔류응력이 크게 나타났다. 용접부를 제외한 강관부에 발생된 최대 인장잔류응력은 모재 항복강도에 거의 근접하였으며, 최대 압축잔류응력은 모재 항복강도의 40% 수준이었다.
- (5) Press forming으로 제관된 SPAP325 각형강관에 발생된 잔류응력을 원주방향보다는 강관 길이방향의 잔류응력이 크게 나타났다. 강관 길이방향의 잔류응력은 모서리부에서 인장방향으로 가장 크게 나타났고, 변의 중심에서는 압축방향으로 변화하였다. 용접부를 제외

한 강관부에 발생된 최대 인장잔류응력과 최대 압축잔류응력은 모두 모재 항복강도의 80% 수준이었다.

- (6) 강관 제조 프로세스에 따른 부재성능을 평가하기 위해서 중심압축실험을 수행하였다. Roll bending과 press forming으로 제관된 STKN490B 원형강관의 경우 강관 제조 프로세스에 관계없이 거의 유사한 거동을 보인다. 그러나 press forming과 built-up으로 제관한 각형강관의 경우는 좌굴하중이 큰 차이를 보이고 있다. Press forming한 각형강관의 좌굴하중은 설계기준값을 훨씬 상회하고 있으나, built-up한 것은 설계기준값을 약간 넘어서고 있다.

참 고 문 헌

Yuhshi Fukumoto, Guidelines for Stability Design of Steel Structures, Subcommittee on Stability Design Committee on Steel Structures Japan Society of Civil Enginners, 1987, pp.60-76

橋本篤秀, “耐震設計と新しい金屬構造材 SN材”, 建築技術, 1996, Vol.2, No.551, pp.66-75

岡本晴仁, “耐震設計と新しい金屬構造材 新冷間成形角形鋼管 (BCR,BCP)”, 建築技術, 1996, Vol.2, No.551, pp.96-99

鋼材俱樂部, 建築專門委員會, 建築用鋼材研究會, 新しい建築構造用鋼材, 剛構造出版, 1998, pp.13-52

岡本晴仁, “冷間成形角形鋼管の保有性能”, JSSC, No.16, 1995

石塚馨, “厚肉圓形鋼管の材料性能確認試験”, 鐵構技術, No.9, pp.18-25

(접수일자 : 2003. 11. 12 / 심사일 2003. 11. 21 / 심사완료일 2004. 1. 20)