

SM490A TMC 후판강재의 소재 및 용접부 특성에 관한 연구

A Study on Structural Characteristics of SM490A TMC Thick Steel Plates

김 종 락¹⁾ · 박 양 희²⁾
Kim, Jong Rak · Park, Yang Hee

요 약 : Thermo Mechanical Control Process(TMCP) 강재는 열간압연시에 압연 온도를 제어하면서 경우에 따라 압연직후 냉각, 열처리 하여 안정된 조직으로 압연, 제조된 강재이다. 본 연구에서는 극후판 TMCP강재의 소재특성과 건축구조용 강재로서의 적합성과 특성을 밝히기 위하여 화학성분 및 조직특성, 내력 및 기계적 특성, 사용성 및 인성, 등으로 분류하여 소재특성과 용접특성을 분석하였다. 실험결과, 대상강재는 극후판에서도 설계기준강도를 만족하고 낮은 탄소당량 (C_{eq}) 및 용접갈라짐 감수성 조성(P_{cm})과 저항복비 등이 확보되었다. 또한, 기준온도($\pm 0^\circ\text{C}$)는 물론 -60°C 의 극저온에서도 충분한 충격흡수에너지값으로 양호한 인성의 소재특성을 나타냈고, 용접부에서도 경화현상이 저감되고, 용접부의 인성 및 내력이 충분한 것으로 나타났다.

ABSTRACT : The study discussed in this paper investigated the material characteristics for the Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) plates, which are controlled by several factors such as rolling, cold-stripping, cooling rate, and fixed carbon quantity. The suitability of thick TMCP steel plates as structural steel was also estimated through several experiments and with the use of a statistical method to analyze mill certificate sheets provided by the manufacturer. The results of this study are as follows: the TMCP steel plates showed stable values of the composition parameter (P_{cm}) and the carbon equivalents (C_{eq}) with satisfied yield strength, ultimate strength, and low-yield ratio.

핵심용어 : 열가공제어법, 탄소당량, 용접갈라짐 감수성 조성, 천이온도, 충격흡수에너지

KEYWORDS : Thermo Mechanical Control Process, Carbon equivalents, Composition parameter, Transition temperature, Impact absorbed energy

1. 서 론

최근 건축구조물의 초고층, 장스팬화로 기둥 및 브레이스 등에 고강도, 극후판 강재의 사용이 증가하고 있으며, 이러한 강재는 내진설계 등으로 인해 충분한 소성능력이 요구된다. 그러므로 건축구조용 후판강재는 충분한 설계기준강도, 낮은 탄소당량(C_{eq})과 탁월한 용접성, 양호한 인성, 저항복비 등을 확보해야 하며, 이러한 요구조건을 만족하는 건축구조용 후판강재가 TMCP강재이다. (한국강구조학회, 1995).

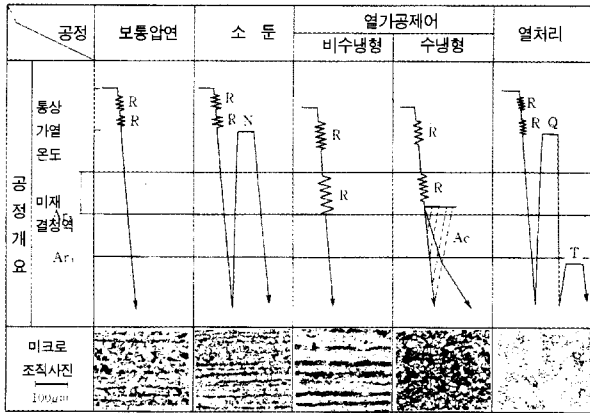
TMCP (Thermo Mechanical Control Process)는 열가공제어법으로, 열간압연시에 압연 온도의 제어와 압연직후의 냉각 방법을 조합하여 최적의 재질로 압연하는 과정으로 그림 1에

공정의 흐름과 열가공 제어공정을 나타내었다. TMCP강재는 제조공정에서 오스테나이트(austenite)계 결정온도 영역에만 압연하는 것이 아니라 오스테나이트 미재결정 온도영역에서도 압하하고 동시에 각 온도 영역에서의 압하율도 조정하는 제어 압연을 사용하여 제조된다. 재결정 온도영역에서의 통상 압연법으로 고온의 거친 오스테나이트 입상이 압하 및 재결정이 반복되어 조밀한 구조를 형성하고, 재결정 온도영역을 지나 그 상역에서의 압하에 따라 오스테나이트 결정은 결정성장이 제어되고 미세한 페라이트 결정이 생성되므로 미세하고 견고한 조직이 된다. 이와 함께 가속냉각을 가하면 인성의 저하 없이 고강도를 얻을 수 있고 냉각조건의 변화에 따라 강도 수준을 조정할 수 있는 방법이다. (김종락, 1996 1997)

1) 정회원, 숭실대학교 건축학부 교수, 공학박사
(Tel. 02-820-0702, Fax. 02-816-3354, E-mail:jrkim@ssu.ac.kr)
2) 정회원, 숭실대학교 대학원 박사과정 (didgml@hotmail.com)

본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

이에 본 연구에서는 TMCP강재의 소재특성을 조사, 연구하기 위하여 화학성분 및 조직특성, 내력 및 기계적 특성, 사용성 및 인성 등에 대해 시험하였다. 또한 용접부의 특성분석을 위하여 패스간 온도와 입열량에 의한 용접부의 변화를 분석하여 건축구조용 강재로서의 적합성과 특성을 밝힌다.



C.R: 제어압연, ACC:가속냉각, DQ:직접담금질, WC:수냉, Air C:공랭

그림 1. 제조법의 개념도((社)鋼構造俱樂部, 1993)

2. 시험계획

2.1 사용 강재 및 시험항목

사용 강재는 SM490A TMC이고 판 두께는 50mm와 80mm의 2종으로 하였다.

시험종류 및 시험편수를 표 1에 나타내었다. 조직 및 성분 분석, 내력 및 인성평가와 용접성평가를 위해 구분하였다.

2.2 용접방법 및 조건

용접은 일면 개선으로 하였고, 개선각은 45°, 루트갭은 5 mm이다. 용접방법은 Flux Cored Arc Welding (이하 FCAW), Gas Metal Arc Welding (이하 GMAW), Submerged Arc Welding (이하 SAW)의 3종으로 하였고(대한용접학회, 1998) 특히 시험용 강재의 입열량 및 층간온도 영향평가(中込忠男, 1990. 日本建築學會, 2002)를 위해 FCAW 용접시 입열량을 대소로 구분하여 2가지로 용접하였다. 공통적으로 입열은 초층 균열을 방지하기 위해 용접속도를 낮춰 입열량을 25 KJ/cm 정도로 제어하였고, 2층 이후엔 전류 및 속도를 제어하여 입열의 많고 적음을 구분하였다. FCAW 와 GMAW용 용접재는 고장력 강재용인 AWS E71T급 $\phi 1.2$ (mm)를 사용하였다. 표 2는 용접방법 및 용접조건, 입열량을 나타내었다.

2.3 시험계획

2.3.1 화학성분 분석 시험계획

시험대상 강재의 화학성분을 파악하기 위하여 KS D 0001 강재의 검사 통칙((사)한국공업표준협회, 1998)에 따르며, 스펙트럼분석에 따라 분석한다. 판 두께별로 판 두께 1, 1/2, 3/4 지점을 시험면으로 한다.

2.3.2 인장시험 계획

시험편의 채취 방법은 그림 2와 같다. 판 두께 1/2지점을 시험위치로 KS D 0801에 따라 압연방향(L)과 압연직각방향(C)은 인장시험편 4호, 단면방향(Z)은 8호로 제작한다.

2.3.3 충격시험 계획

그림 3에 시험편 채취위치를 나타낸다. 충격시험편은 샤르피 충격시험 KS B 0809에 따라 4호 시험편으로 제작하며, 시험방향은 압연방향, 압연직각방향, 단면방향으로 한다. 시험온도는 -60°C, -40°C, -20°C, 0°C, +20°C의 5종으로 한다. 시험편 채취위치는 단면 1/2 지점으로 한다.

표 1. 시험항목 및 시험편 수량

구분	시험항목	시험조건	판 두께		비고
			50(mm)	80(mm)	
소재 시험	화학성분	래들분석	2	2	1, 1/2, 3/4
	인장시험	압연방향 (L)	9	9	L, C, Z는 강판재의 압연방향을 구분한 것임.
		압연직각방향(C)	9	9	
		단면방향(Z)	3	3	
	충격시험	압연방향(L)	30	30	
		압연직각방향(C)	30	30	
		단면방향(Z)	15	15	
최고경도시험	Hv 10 kgf	1	1	최고경도	
경도시험	Hv 10 kgf	1	1	판 두께 방향	
미크로조직시험	100배, 500배	2	2	단면 : 1, 1/2	
용접부 시험	평판 인장시험	압연방향	12	12	용접법: FCAW, GMAW, SAW
	충격시험	열영향부	9	9	
		분드부	9	9	
		용착금속부	9	9	
	경도시험	Hv 10 kgf	1	1	

표 2. 입열량 및 층간온도에 따른 특성시험 용접조건

두께 (mm)	용접법	용접조건				층간 온도(°C)
		전류(A)	전압(V)	속도(cm/min)	입열량(KJ/cm)	
50	FCAW	340	45	20	45.9	100, 200, 300
		300	40	32	22.5	
	GMAW	250±20	28±2	20~25	14.3~24.3	250이하
	SAW	660±20	32±2	35~40	28.8~39.6	
80	FCAW	340	45	20	45.9	100, 200, 300
		300	40	32	22.5	
	GMAW	250±20	28±2	20~25	14.3~24.3	250이하
	SAW	660±20	32±2	35~40	28.8~39.6	

3. 시험결과

3.1 화학성분 분석 결과

화학성분 분석 결과를 표 3에 나타내었다.

강재의 판 두께 1, 1/2, 3/4 지점에 대해서 화학성분을 분석하여 판의 단면 전체에 대한 강재의 각 성분값과 탄소당량(Ceq) 및 용접갈라짐 감수성조성(Pcm)을 나타내었다.

분석결과, 탄소(C), 규소(Si), 망간(Mn), 인(P), 황(S)의 5원소에 대해 규준에서 정하는 위치인 단면 1/4 지점은 물론 강재의 판 중앙부까지 규준값을 만족하고 있다.

본 시험대상 강재는 KS D 3515 동 부속서 1, 2에 탄소당량과 용접 갈라짐 감수성 조성에 대한 규격 값을 적용시키며, 이에 따라 기본 5원소 외에 Cu, Ni, Cr, Mo, V, B를 포함한 11종의 성분이 관리되어진다. 시험대상 강재는 단면 1/4 위치에서 규격 값을 만족하는 것은 물론 1/2 위치에서도 규격에 비취 양호한 값으로, 저탄소당량 및 낮은 용접갈라짐 감수성조성에 따른 고인성, 저취성의 특성과 양호한 용접특성을 기대할 수 있다.

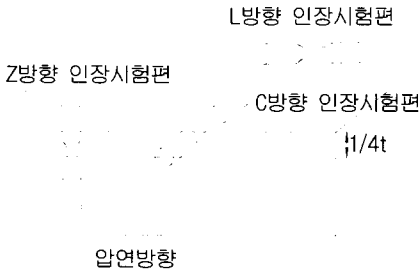


그림 2. 인장시험편 채취위치

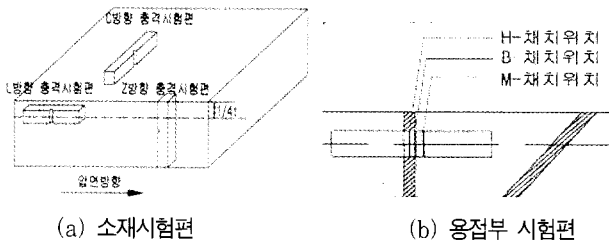


그림 3. 충격시험편 채취위치

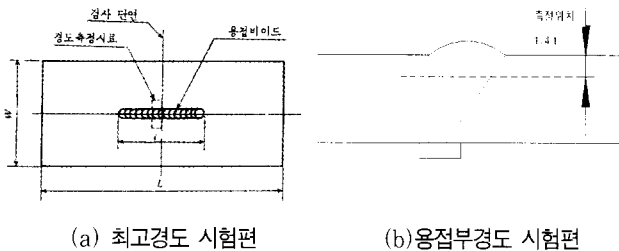


그림 4. 경도시험편 채취위치

표 3. 소재 화학성분 분석결과 (%)

판두께	위치	C	Si	Mn	P	S	Ceq	Pcm
50mm	1/4	0.16	0.45	1.09	0.016	0.002	0.36	0.23
	1/2	0.16	0.45	1.08	0.016	0.002	0.36	0.23
	3/4	0.16	0.46	1.09	0.016	0.003	0.36	0.23
80mm	1/4	0.15	0.44	1.24	0.014	0.003	0.38	0.23
	1/2	0.16	0.44	1.24	0.014	0.003	0.39	0.24
	3/4	0.16	0.44	1.23	0.014	0.003	0.39	0.24
규격	50 이하	0.18	0.55	1.60	0.035	0.035	0.38	0.24
	50초과 100이하	단면 1/4 기준					0.40	0.26

$$\bullet \text{탄소당량}(C_{eq}) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

$$\bullet \text{용접갈라짐 감수성조성}(P_{cm})$$

$$= C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

3.2 인장시험 결과

3.2.1 소재 인장시험

소재에 대한 인장시험결과를 표 4에 나타낸다.

강재의 각 방향으로 인장시험을 실시하여 강재의 방향별 이방성 및 단면별 특성을 분석, 결과 값을 정리하였다. 항복강도는 허용응력에 설계기준값(3.3t/cm²)을 기준하였다. 또한 인장강도, 항복비, 연신율을 방향으로 구분, 분석하였다. 기준값에 대하여 항복강도는 50mm에서 3.59 t/cm², 80mm에서 3.87 t/cm²의 값으로 각각 109%, 117%의 값이고, 인장강도는 규격(5.0t/cm²~6.2t/cm²)에 대하여 50mm에서 5.14t/cm², 80mm에

2.3.4 경도시험 계획

시험은 KS B 0811의 비커스 경도시험으로 실시하며, 소재와 용접부에 대해 경도시험을 실시한다. 용접부에 대해서는 FCAW용접에 대해 층간온도 100℃, 200℃, 300℃로 구분하여 용접하고 그 영향을 분석한다. 그림 4에 용접부 경도 시험편을 나타낸다.

2.3.5 마이크로시험 계획

시험은 소재를 대상으로 판두께의 1/4, 1/2 지점의 조직을 배율 ×100배, ×500배로 관찰한다. 마이크로시험을 통해 강재의 화학성분조성, 금속조직의 구분, 결정입도의 크기 등으로 강재의 재성질을 유추할 수 있다.

서 5.41t/cm²으로 규격을 만족한다.

연신율과 단면 수축률은 강재의 포텐셜 에너지(Potential Energy)를 예측할 수 있는 중요요소로 연신율은 50mm에서 36.0%, 80mm에서 36.4%의 값을 나타낸다. 항복비는 강재의 인장특성을 나타내는 중요한 요소 중의 하나이고, 구조물의 안전성을 나타내는 지표로 가능한 낮은 항복비를 지향하며, 80% 미만의 값을 권장하고 있다(대한건축학회, 1998. 日本建築學會, 1998). 시험결과, 50mm에서 62.0%, 80mm에서 71.5%의 값을 나타낸다. 강재의 압연직각방향에 시험 결과값을 정리하여 강재의 방향에 따른 이방성의 정도를 도출한다. 연신율이 강재의 이방성에 가장 큰 영향을 받는다.

압연직각방향의 항복강도는 50mm에서 3.70t/cm², 80mm에서 3.93t/cm²이고, 인장강도는 50mm에서 5.14t/cm², 80mm에서 5.39t/cm²으로 L방향에 대한 규격의 값을 만족한다. 연신율은 50mm에서 34.5%, 80mm에서 35.0%의 값을 보이며, 항복비는 50mm에서 66.7%, 80mm 70.7%의 값을 보인다. 이상에서 강재의 강도는 각 단면별로 압연방향에 대해 대등한 값을 나타내고, 신율 차이가 적어 이방성이 적다.

표 4. 소재인장시험 결과

판 두께	방 향	항복점 σ_y (tf/cm ²)	인장강도 σ_u (tf/cm ²)	항복비 σ_y/σ_u	연신율* Elo(%)
50mm	L	3.59	5.14	62.0	35.97
	C	3.70	5.14	66.7	34.53
	Z	4.15	5.78	70.5	41.18
80mm	L	3.87	5.41	71.5	36.37
	C	3.93	5.39	70.7	35.00
	Z	3.72	5.61	66.0	30.55

비고) L : 압연방향, C : 압연직각방향, Z : 판 두께 방향
* 5호시험편 : 22%이상 (KS D 3515)

TMCP 강재는 40mm이상의 후판재로 주로 쓰인다. 강구조 기둥 보 접합부의 기둥 부재는 단면방향으로 큰 응력이 전달되어 라미네이션(lamination) 및 라멜라 티어링(lamellar tearing)을 일으킬 수 있으므로 단면방향의 강재특성을 파악하는 것이 중요하다.(佐藤邦彦, 1988) 단면방향 시험결과, 압

연방향이상의 강도와 규준 값에 적합한 신율을 보이고 있어 양호한 단면방향 특성을 나타낸다.

3.2.2 용접부 인장시험

입열량의 변화와 층간온도의 변화에 따른 평판인장시험결과를 표 5에 나타내었다.

항복강도 및 인장강도가 소재강도와 비교하여 다소 높은 값을 보인다. 특히 판 두께가 두꺼운 80mm 강재에서 두드러지게 나타나는데 이는 용접부의 구속효과(佐藤邦彦, 1988)인 것으로 사료되며 전체적으로 만족한 값을 보인다. 강재별로 입열량 혹은 층간온도에 따른 강도와 항복비, 연신율의 변화(日本建築學會, 2002)는 나타나지 않고 있다. 시편의 최종 파단은 모두 모재부에서 발생하여 용접부는 충분한 내력 및 연성을 확보하고 있다고 판단된다. 연신율은 전체적으로 20% 전후의 범위안에 있어 편차가 크지 않고, 용접부의 구속영향으로 연신율은 모재와 비교하여 약 70% 정도를 나타내고 있다. 항복비는 80%미만의 안정적인 값을 보인다. 용접법에 따른 용접부 평판인장시험 결과를 표 6에 나타내었다. 항복강도는 판 두께 50 mm에서 소재의 압연방향 항복점인 3.59 tf/cm²보다 5 % 정도 높게 나타났다. 판 두께 80 mm의 경우는 소재의 항복점인 3.87 tf/cm²보다 10 % 이상 상회한다. 인장강도는 판 두께 50 mm에서 소재의 압연방향 인장강도인 5.14 tf/cm²와 대등한 값을 나타낸다. 80mm는 소재의 인장강도 5.41 tf/cm²보다 5 ~ 10 % 정도 높다. 강도 특성은 어떤 용접법을 채택해도 모재 이상의 우수한 용접부 성능을 보이고 있다. 항복비는 판 두께 및 용접법에 상관없이 전체적으로 80% 미만의 양호한 값을 갖는다. 연신율은 판 두께 50mm와 80 mm 모두 모재 보다 절반 정도로 감소하고 있다. 특히 GMAW 용접법을 적용한 판 두께 80 mm 시험체인 G8은 모재파단으로 연신율이 타시험체 보다 낮게 나타나 연성저하를 나타내고 있다. 에너지는 인장시험의 P-δ 곡선에서 파단까지의 곡선 하부 면적을 시험체 단면적으로 나눈 값으로 판 두께 80 mm가 50 mm의 경우보다 30 % 정도 높다.

그림 5~7은 용접법에 따른 항복점, 인장강도, 에너지 분포를 나타낸 것이다. 항복점과 인장강도는 판 두께 50 mm와 80mm

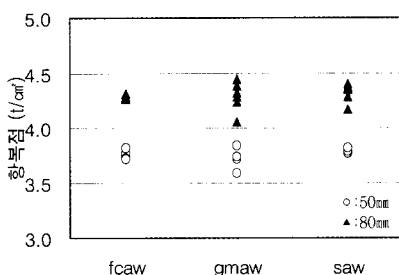


그림 5. 용접법에 따른 항복점의 변화

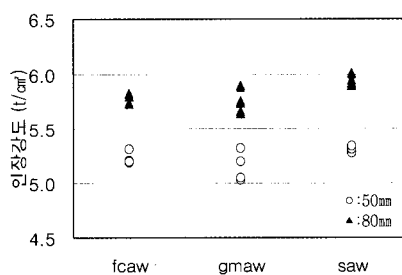


그림 6. 용접법에 따른 인장강도의 변화

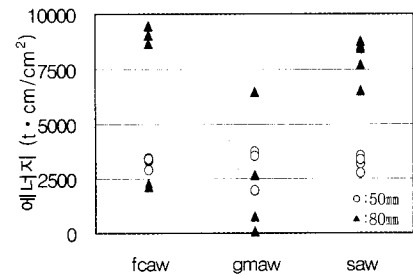


그림 7. 용접법에 따른 에너지의 변화

모두 용접방법에 의한 강도의 변화는 없으나 GMAW 용접법을 사용시 다소 편차가 크다. 에너지 분포는 80mm의 경우 용접법에 따라 편차가 크게 나타나고 있다.

표 5. 입열량 및 층간온도별 평판 인장시험결과 (용접법:FCAW)

두께	입열량 (KJ/cm)	층간온도	항복강도 σ_y (tf/cm ²)	인장강도 σ_u (tf/cm ²)	항복비 σ_y/σ_u	연신율 Elo(%)
50mm	45.9	100	3.97	5.41	73.38	19.50
		200	3.82	5.36	71.27	19.33
		300	3.98	5.41	73.57	20.67
	22.5	100	3.97	5.46	72.71	19.56
		200	4.07	5.51	73.87	19.16
		300	3.84	5.45	70.46	20.50
80mm	45.9	100	4.36	6.01	72.55	25.83
		200	4.40	5.97	73.70	24.89
		300	4.25	5.95	71.43	24.55
	22.5	100	4.23	5.99	70.62	22.78
		200	4.55	6.12	74.35	22.00
		300	4.40	6.11	72.01	24.44

표 6. 용접법에 따른 용접부 평판 인장시험결과

기호	항복점 σ_y (tf/cm ²)	인장강도 σ_u (tf/cm ²)	항복비 σ_y/σ_u	연신율 Elo(%)	에너지 (t · cm)
F5	3.78	5.27	71.74	19.00	3309
G5	3.73	5.15	72.36	17.06	2928
S5	3.82	5.32	71.77	18.22	3296
F8	4.30	5.79	74.25	19.63	6328
G8	4.29	5.76	74.48	15.56	5759
S8	4.33	5.96	72.71	21.89	8132

비고) F: FCAW, G:GMAW, S:SAW, 5:판두께 50mm, 8:판두께 80mm

3.3 샤르피 충격시험 결과

3.3.1 소재 샤르피 충격시험

샤르피 충격시험의 결과값은 강재의 인성을 알기 위한 기준이 되는 중요한 요소이며, 온도별 충격흡수에너지로 강재의 사용성을 추정할 수 있다. 소재에 대한 샤르피 충격시험의 결과를 표 7과 그림 8, 그림 11에 나타내었다. 시험결과, 모두 규격을 만족하고 있으며 압연방향과 압연직각방향의 충격 흡수에너지의 차는 크지 않다. 그러나 50mm와 80mm 강재 모두 판 두께 방향의 충격 시험값이 많이 저하되었고, 특히 80mm의 경우 에너지 흡수량이 크게 저하되었으나 규격($\pm 0 : 2.8\text{kgf} \cdot \text{m}$)은 만족한다. 천이온도는 흡수에너지가 급격하게 저하되거나 파면이 연성에서 취성으로(또는 역으로) 변화하는 현상에 대응하는 온도이다(岡松眞之, 1993). 그림 8, 그림 11과 같이 각 시험온도 역에서 압연방향 및 압연직각방향의 에너지 흡수량이 안정된 값을 보이나, 50mm에서 약 -30°C , 80mm에서 약 -40°C 이하에서 강재의 흡수에너지가 급격히 저하되어 이 온도영역에서 천이온도가 형성되는 것을 알 수 있다.

3.3.2 용접부 샤르피 충격시험

FCAW 용접법의 경우 입열량 및 층간온도의 변화에 따른 용접부 충격시험결과를 표 8과 그림 9, 그림 12에 나타내었다. 충격 흡수에너지값은 KS D 3515에서 규정하고 있는 $\pm 0^\circ\text{C}$ 에서 $2.8\text{kgf} \cdot \text{m}$ 이상의 값을 모두 만족하며 열영향부, 본드부, 용착 금속부 순으로 저하되었다. 그러므로 FCAW 용접법을 적용하는 경우, 층간온도가 300°C 이하에서는 판 두께와 용접부에 따른 흡수에너지의 변화는 작은 것으로 판단된다.

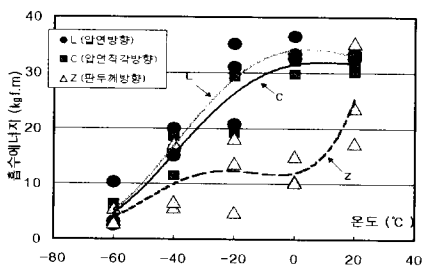


그림 8. 50mm 소재 천이곡선

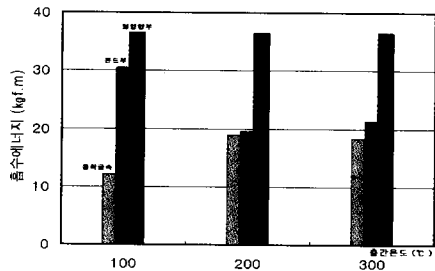


그림 9. 50mm 층간온도별 충격흡수에너지

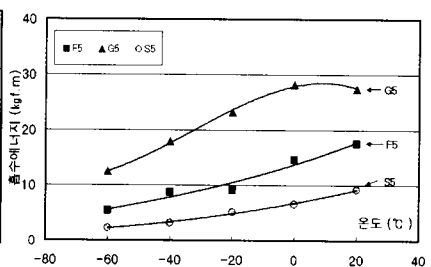


그림 10. 50mm 용접부 천이곡선

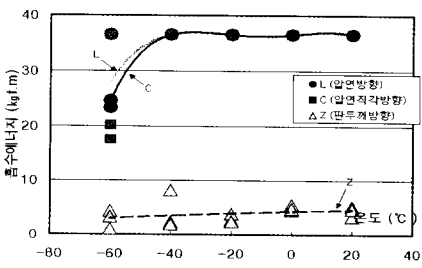


그림 11. 80mm 소재 천이곡선

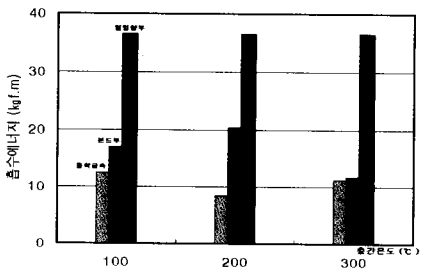


그림 12. 80mm 층간온도별 충격흡수에너지

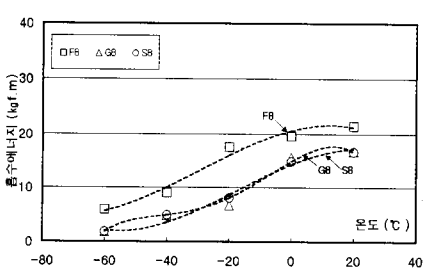


그림 13. 80mm 용접부 천이곡선

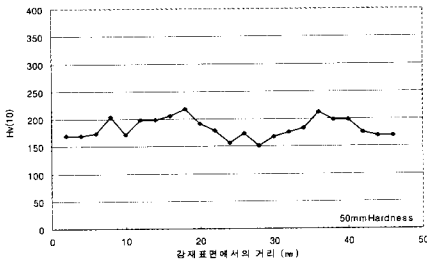


그림 14. 50mm 소재 경도 시험결과

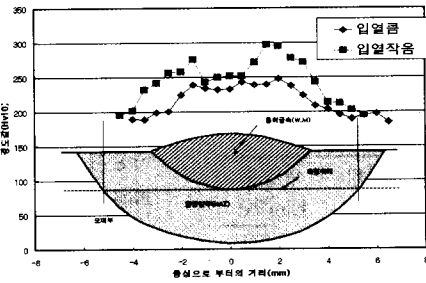


그림 15. 50mm 최고 경도 시험결과

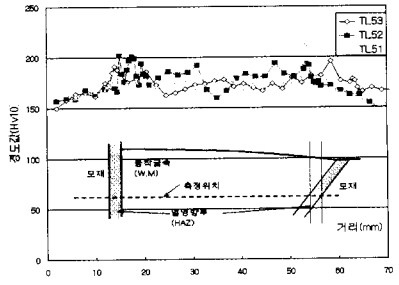


그림 16. 50mm 용접부 경도 시험결과

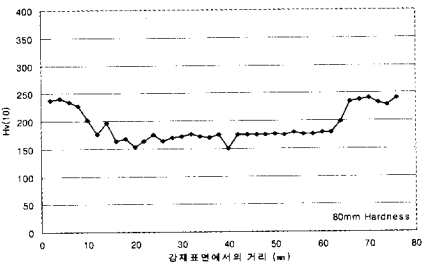


그림 17. 80mm 소재 경도 시험결과

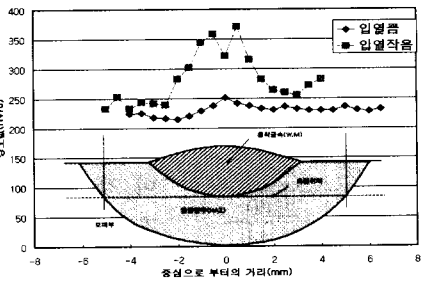


그림 18. 80mm 최고 경도 시험결과

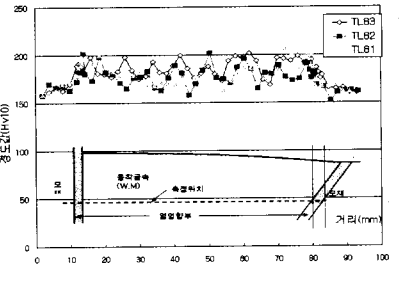


그림 19. 80mm 용접부 경도 시험결과

표 7. 소재 충격시험결과단위 (kgf · m)

시험편	시험온도(°C)					
	-60	-40	-20	±0	+20	
50mm	L	5.30	16.97	28.97	34.13	33.10
	C	4.77	15.40	26.30	31.47	31.67
	Z	4.00	9.97	12.33	11.97	25.53
80mm	L	28.13	36.50	36.50	36.50	36.50
	C	24.73	36.50	36.50	36.50	36.50
	Z	2.83	4.13	2.97	4.93	4.40

비고) L: 압연방향, C: 압연직각방향, Z: 판두께 방향

표 8. 입열량 및 층간온도별 샤르피시험 결과

두께	입열량 (KJ/cm)	층간온도 (°C)	충격흡수에너지(±0°C) (kgf · m)		
			용착금속부	본드부	열영향부
50mm	45.9	100	12.1	30.5	36.5
		200	18.9	19.6	36.5
		300	18.4	21.4	36.5
	22.5	100	10.0	13.9	32.3
		200	10.9	8.9	30.7
		300	8.3	12.5	35.3
80mm	45.9	100	12.4	16.9	36.5
		200	8.4	20.4	36.5
		300	11.1	11.7	36.5
	22.5	100	10.8	22.9	36.5
		200	13.5	18.6	36.5
		300	6.8	18.3	36.5

표 9. 용접법에 따른 용접부 샤르피 충격 시험결과 단위(kgf · m)

시험편	시험온도(°C)				
	-60	-40	-20	±0	+20
F-5	5.37	8.70	9.17	14.63	17.53
G-5	12.47	17.90	23.20	28.17	27.43
S-5	2.23	3.13	5.10	6.60	9.23
F-8	5.87	9.00	17.47	19.53	21.43
G-8	1.77	4.80	6.67	15.55	16.73
S-8	1.83	4.90	8.07	14.83	16.53

비고) L: 압연방향, C: 압연직각방향, Z: 판두께 방향

표 9와 그림 10, 그림 13은 용접법에 따른 용접부 샤르피 충격시험의 결과이다. 판 두께 50mm의 경우 각 용접법은 0°C 샤르피 흡수에너지가 모재 보다 20% 정도 저하하고 있다. 판 두께 80mm의 경우도 유사하다. 각 용접방법에 따른 입열량은 표 2와 같이 약 15.0~45.0KJ/cm이다. 시험결과 판 두께 50mm의 경우 입열량이 가장 낮은 GMAW 용접법이 샤르피 흡수에너지가 가장 우수하여 입열량에 의한 차이를 보인다. 그러나 80mm의 경우 입열량이 높은 FCAW 가 가장 우수한 인성을 나타내어 입열량에 의한 샤르피 흡수에너지의 차이는 명확하지 않다. 이것은 입열량 보다 패스간 온도에 의한 샤르피 흡수에너지의 변화가 크기 때문으로 판단된다. 그러므로 패스간 온도가 300°C이하의 경우는 입열량에 의한 샤르피 흡수에너지의 변화는 패스간 온도에 의한 영향 보다 상대적으로 작은 것으로 판단된다.

3.4 경도시험 결과

3.4.1 소재 경도시험

일반적으로 소재의 경도값은 강재제작시 냉각속도가 빠른 표면 쪽이 높고, 탄소당량이 높을수록 경질의 조직이 된다.

시험결과 소재의 최고 경도는 판 두께 80mm의 표면 쪽에서 Hv(10) 250미만의 값을 보이며, 표면과 중앙부의 경도 편차가 전 단면에 걸쳐 적은 균질한 양상을 나타내고 있다. 또한 판 두께 80mm가 50mm 보다 다소 높은 경도치를 보이고 있어 표 4의 소재 인장시험 결과와 동일한 양상을 확인할 수 있다.

그림 14와 그림 17은 소재 경도시험 결과이다.

3.4.2 최고 경도시험

그림 15와 그림 18은 FCAW 용접법에 의한 최고 경도시험 결과이다. 시험용 강재의 표면에 1패스 용접을 실시하여 이에 따른 경도의 분포를 측정하였다. 시험결과 50mm 강재에서 최고경도는 Hv(10) 300미만의 값을 보이고, 80mm의 경우 Hv(10) 380의 높은 값을 보여 용접에 의한 경화현상을 나타내고 있다. 입열량이 적은 경우 최고 경도값이 높게 나타났는데, 이는 낮은 입열량으로 냉각속도가 빨라 용접부가 경화된 것으로 판단되며, 50mm보다 80mm에서 그 차이가 크다.

3.4.3 용접부 경도시험

용접부의 경도시험결과를 그림 16과 그림 19에 나타내었다. 용접법은 FCAW이고, 입열량은 45.9 (KJ/cm)일 때의 용접부에 대한 각 층간온도의 영향을 나타낸 것이다. 대부분의 용접부 경도가 열영향부에서 최고치를 나타내고 있으나 명확하지 않고, 경도치도 Hv (10) 200 정도를 보이고 있어 용접으로 인한 용접부의 경화는 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한, 패스간 온도에 의한 경도의 변화도 크지 않아 표 5의 층간온도별 평균 인장시험결과 동일하다.

3.5 마이크로 조직시험 결과

그림 20~23는 소재의 마이크로 시험 결과로, 50mm와 80mm에 대해 판 두께 1과 1/2에 대해 나타낸 것이다. 마이크로 조직 시험은 조직의 분포와 형상 등을 확인할 수 있다 (한국강구조학회, 1995).

각 강재의 조직사진에서 웨라이트(Ferrite)는 백색으로 보이며 펄라이트(Pearlite)는 흑색 및 층상으로 보인다. 강에 탄소의 양이 적을 때는 웨라이트의 분포가 지배적이거나 탄소량이 0.1% 이상 함유되어 있으면 웨라이트 이외에 펄라이트가 뚜렷이 나타나게 된다. 펄라이트는 탄소함유량의 증가에 따라 차지

하는 면적이 증대하고 펄라이트가 증가하면 경도, 인장강도는 증가하지만 신율 충격값 등은 감소한다.

100배 배율의 조직사진에서 백색과 흑색으로 대조되어 보이는 웨라이트와 펄라이트의 분포를 관찰할 수 있으며, 500배 배율의 조직사진에서 각 입자의 크기와 형상들을 관찰할 수 있다. 시험강재는 후판에서도 입자의 분포가 고르고, 조직이 조밀하며, 펄라이트의 층상분포는 나타나고 있지 않다. 각 강판에 공통적으로 1/2위치의 입자가 1/4위치의 입자보다 크고, 펄라이트의 양이 많다. 또한 판 두께 80mm가 50mm 보다 입자가 다소 큰 것으로 나타났다.



배율 (×100) 배율 (×500)
그림 20. 50mm의 마이크로 조직(시험면 : 1/2)



배율 (×100) 배율 (×500)
그림 21. 50mm의 마이크로 조직(시험면 : 1/2)



배율 (×100) 배율 (×500)
그림 22. 80mm의 마이크로 조직(시험면 : 1/2)



배율 (×100) 배율 (×500)
그림 23. 80mm의 마이크로 조직(시험면 : 1/2)

4. 분산분석

4.1 가설 및 유의수준

입열량 및 층간온도가 TMCP 강재의 용접특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 분산분석을 실시했다.(김우철, 2000) 적용한 가설은 유의수준 5%에서 입열량 및 층간온도에 따라 용접부의 기계적 성질의 차이가 없다는 것으로 하였다.

4.2 분산분석 결과

표 10. 층간온도 및 입열량에 따른 분산분석결과

두께	변수	유의확률 P		
		항복점	인장강도	에너지
50mm	층간온도	0.718	0.899	0.437
	입열량	0.373	0.019	0.275
80mm	층간온도	0.093	0.811	0.288
	입열량	0.596	0.058	0.001

표 11. 용접법에 따른 평판 인장시험결과의 분산분석

판두께	유의확률 P		
	항복점	인장강도	에너지
50 mm	0.147	0.016	0.245
80 mm	0.801	0.001	0.016

표 12. 용접법에 따른 샤르피 충격시험에 대한 분산분석

판두께	유의확률				
	-60 °C	-40 °C	-20 °C	0 °C	20 °C
50 mm	0.154	0.000	0.041	0.000	0.012
80 mm	0.007	0.059	0.002	0.555	0.268

표 10은 입열량 및 층간온도에 따른 용접 특성의 분석결과이다. 입열량 및 층간온도별 시험결과는 항복강도에는 영향을 미치고 있지 못하지만 인장강도는 50mm에서 입열량에 의해 영향을 받는다. 80mm에서는 입열량에 따라 항복강도와 인장강도는 영향이 없으나 에너지에는 유의성을 나타내고 있다. 층간온도는 50mm, 80mm모두에서 영향이 전혀 없는 것으로 분석되었다. 입열량이 인장강도나 에너지에 영향을 미치는데 반해서 층간온도는 항복강도, 인장강도, 에너지에 모두 영향을 미치지 못하고 있는 것으로 나타난 결과는 층간온도의 변수폭이 적기 때문에 TMCP 강재의 용접시 층간온도를 300°C이하로 관리하면 양호한 용접부 성능을 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

표 11은 용접법에 따른 용접부 인성에 대한 분석 결과이다.

판두께 50mm에서는 인장강도, 80mm에서는 인장강도와 에너지를 제외하고는 모두 용접법에 따른 유의성이 적음을 알 수 있다.

표 12는 용접법에 따른 시험온도별 샤르피 충격 시험에 대한 분석 결과이다. 판 두께 50mm는 -60°C를 제외하고 모든 온도에서 용접법에 따른 충격에너지의 차가 유의하다고 보여지며, 80mm는 -20°C와 -60°C만이 유의하다.

5. 결 론

TMCP강재의 건축구조용 강재로서의 적합성과 특성을 조사, 연구하기 위하여 화학성분 및 조직특성, 내력 및 기계적 특성, 사용성 및 인성 등으로 분류하여 시험하고, 용접부특성 분석을 위해 평판인장, 용접부 충격, 용접부 경도시험과 입열량 및 패스간 온도가 미치는 영향에 대한 시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) SM 490 TMC 강재는 층간온도가 300°C이하의 경우 강도 및 샤르피 충격 흡수에너지 등의 용접성능에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
- (2) 용접법(FCAW, GMAW, SAW)에 따른 항복점과 인장강도 등의 강도의 변화는 없으며, 패스간 온도가 300°C이하의 경우는 입열량에 의한 샤르피 흡수에너지의 변화는 패스간 온도에 의한 영향보다 작다.
- (3) 층간온도와 입열량에 따른 분산분석결과 에너지는 대체로 입열량에 의해서 영향을 받으나 층간온도와는 상관관계가 없는 것으로 분석되었다.
- (4) 화학성분 분석결과 5원소와 탄소당량, 용접 갈라짐 감수성 조성 등이 모두 만족하는 분석값을 보여 시험용 각 강재의 화학조성은 충분히 균질하며 양호한 것으로 사료된다.
- (5) 인장시험결과 여러 KS규격치에 대해 SM 490 TMC는 만족하는 결과를 보이고 있고, 압연방향과 압연직각방향의 이방성도 적어 강재의 인장특성은 양호하다.
- (6) 소재의 샤르피 충격시험 결과 KS규격에서 정하는 시험온도인 ±0°C에서는 모든 시험강재가 9.88kgf이상의 높은 흡수에너지를 나타내고 있어 충분한 인성을 확보하는 것으로 판단된다.
- (7) 소재의 판 두께별로 경도값이 최고 Hv(10) 250 전후를 나타내고 있고, 경도값의 편차도 Hv(10) 80 미만으로 표면과 중앙부의 경도값 편차가 크지 않아 전 단면에 걸쳐 균질한 값을 보인다.
- (8) 마이크로 조직시험결과, 시험강재는 후판에서도 화이트와 퍼얼라이트의 분포가 고르고, 입자의 크기와 형상,

조직이 조밀하며, 퍼얼라이트의 층상분포는 나타나고 있지 않다. 그러나 β 위치의 입자가 α 위치의 입자보다 크고, 퍼얼라이트의 양이 많은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

(사)한국공업표준협회(1998), 한국산업규격
 한국강구조학회(1995), 강구조편람 제 1권, 한국강구조학회.
 대한건축학회(1998), 강구조 한계상태 설계기준 및 해설.
 대한용접학회(1998), 용접·접합 편람.
 김종락 외 4인(1996), "TMCP 강재의 규격관리 및 기계적 특성에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표대회논문집, pp. 503 ~ 506
 김종락(1997), 용접구조용 TMCP 강재의 인성에 관한 연구 (1), 대한건축학회논문집.
 김종락 외 4인(1997) TMCP 후판강재의 화학성분 및 기계적 특성에 관한 연구, 한국강구조학회.

김우철 외 8인(2000), 일반통계학, 영지문화사, p. 397.
 日本建築學會(2002. 1), '建築構造用鋼材および金屬系素材に關する技術資料'.
 日本建築學會(2002. 8.), 'パス間溫度・入熱量が溶接部の力學的性能に与える影響', 2002年度日本建築學會大會パネルディスカッション資料.
 佐藤邦彦(1988), 溶接強度ハンドブック, 鋼構造出版.
 岡松眞之 外 11人(1993), 建築構造用鋼材の知識, 鋼構造出版.
 (社)鋼構造俱樂部(1993), 新しい建築構造用鋼材, 鋼構造出版.
 日本建築學會(1998), 鋼構造限界狀態設計指針・同解説.
 中込忠男 外 4人(1990) '鋼構造溶接接合部における溶着金屬の強度に及ぼすパス間溫度の影響に關する検討', 構造工學論文集, pp. 333~340.

(접수일자 : 2003. 2. 26 / 심사일 2003. 3. 17 /
 심사완료일 2003. 6. 10)