



HSA800 강재의 소재특성 및 강도의 균질성에 관한 연구

김종락¹ · 이은택² · 최영한³ · 김상섭^{4*}

¹교수, 숭실대학교, 건축학부, ²교수, 중앙대학교, 건축학부, ³석사과정, 한국기술교육대학교, 건축공학과,
⁴교수, 한국기술교육대학교, 디자인·건축공학부

A Study on the Material Characteristics of the HSA800 Steel and Homogeneity of Strength

Kim, Jong Rak¹, Lee, Eun Taik², Choi, Young Han³, Kim, Sang Seup^{4*}

¹Professor, School of Architecture, Soongsil University, Seoul, 06978, Korea

²Professor, School of Architecture, Chungang University, Seoul, 06974, Korea

³Master course, Department of Architectural Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

⁴Professor, School of Design & Architectural Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

Abstract - Various material characteristics of HSA800 steel were examined and a quantitative criteria about the homogeneity of the strength was proposed. Whether HSA800 steel is satisfied the criteria for homogeneity of the strength or not was also examined. From the test results, the material characteristics of 1/4 point from the extreme fiber in the Z-direction satisfied the KS requirements. The excellent directional properties and impact resistance at low temperatures were also showed from the test results. HSA800 steel satisfied the criteria of homogeneity for the strength of the steel. However, it showed that some structures were banded together at 2/4 point from extreme fiber in the Z-direction from the microscopic tests and attention is needed to be paid in that point.

Keywords - HSA800, TMCP, Homogeneity, Chemical Composition test, Tensile test, Impact test, Bending test, Hardness test, Macroscopic test, Microscopic test

1. 서론

최근 건축물의 대형화 및 장경간화, 초고층화에 따른 안정성과 시공성을 확보하기 위해 사용 강재에 대한 요구조건이 고강도화, 극후화 되고 있으며, 기존의 일반구조용이 아닌 고강도, 고성능의 건축구조용 강재의 적용이 필요한 추세이다^[1].

이에 따라 최근 800N/mm²급인 HSA800 강재가 개발되어 사용되고 있으며, 한국산업표준(KS)에서는 KS D 5994

「건축구조용 고성능 압연강재」에 따라 HSA800강재의 규격을 규정하고 있다^[2].

HSA800 강재는 건축물의 안정성을 확보하면서, 40mm 이상의 후판에서도 항복강도가 저감되지 않고, 소요용접성능을 확보할 수 있도록 TMCP로 압연된 강재이다^[3].

TMCP는 제어압연과 가속냉각을 병용한 압연방법으로, 조직의 미세화와 저온변태조직의 생성을 통해 강재가 고인성화, 고강도화 된다. 따라서 TMCP강은 종래의 구조용 강재에 비해 적은 합금원소의 양으로 고인성, 고강도화가 달성되기 때문에 낮은 탄소당량을 유지하고 있으며, 저온균열 예방을 위한 예열공정의 생략, 대입열 용접부의 인성 등의 관점에서 볼 때 용접성이 우수하다^[4].

그 동안의 연구를 통해 각종 TMCP 강재의 소재특성 및 용접성이 확인되었으며, 항복강도 및 인장강도의 양호한 등방성, 인성 및 내충격성 등이 우수한 것으로 검증되었다^{[5],[6],[7]}.

Note.-Discussion open until December 31, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 6, 2016; revised May 11, 2016; approved on May 30, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-41-560-1330 Fax. +82-41-560-1224

E-mail. kimss@koreatech.ac.kr

HSA800 강재의 경우, 두께별 인장시험, 충격시험, 경도 시험, 매크로조직시험을 통해 기본적인 소재특성이 확인되었지만, 인장시험은 압연방향, 충격시험은 -5°C 의 온도영역에 대해서만 진행되었으며, 압연직각방향에 대한 항복강도 및 인장강도의 이방성, 샤르피 흡수에너지의 온도영역에 대한 특성 등은 확인되지 않았다^[3].

따라서 본 연구에서는 HSA800 60mm 강재를 대상으로 7종의 각종 시험을 통하여 HSA800 강재의 소재특성을 확인하고자 한다.

또한, 극후판 강재의 경우 두께 층에 따라 불균일한 집합조직으로 조성된다는 연구가 있다^[8].

TMCP강재는 40mm이상의 후판에서도 항복강도를 저감하지 않으므로 건축구조설계 시 강재의 강도에 대한 균질성이 보장되어야 한다. 그러나 강재의 강도에 대한 균질성의 정량적 기준이 존재하지 않으므로 기준을 제안하고, HSA800 강재의 강도가 제안된 기준을 만족하는지 검토하고자 한다.

2. 강재의 강도에 대한 균질성

2.1 강재의 불균일조직의 생성

압연공정은 금속재료를 압연롤 사이로 통과시키며 가압하여 두께를 감소시키고, 단면의 형상을 변화시키는 공정으로 열간에서 슬래브를 분괴압연함으로써 조대입자를 가진 취성의 주조조직을 파괴하고 기공과 같은 내부결함을 압착하여 치밀하고 미세한 단련조직으로 바꾼다^[9].

압연재는 압연롤 사이에서 압축되면서 단순히 평면변형하는 것으로 가정될 수 있는데, 이러한 가정은 압연재의 중간층에서만 만족하는 것으로 다른 두께 층에서 일어나는 전단변위를 무시한 것이다^[10].

평면변형을 벗어난 전단변위의 원인으로는 압연롤과 압연재간의 마찰, 압연롤 사이에서 변형구역의 기하학적 형상 및 변형상태의 변화, 압연전·후의 평균두께 h 와 압연롤과 압연재의 접촉길이 L 과의 비(h/L) 등이 있다^{[8],[10],[11]}.

여기서,

$$h = (h_0 + h_1)/2 \tag{1}$$

$$L = \sqrt{R(h_0 - h_1)} \tag{2}$$

h_0 : 압연전 두께

h_1 : 압연후 두께

R : 롤의 반경

전단변위와 함께 압연재의 두께 층에 따른 온도구배, 불균일한 변형률 상태가 두께 층에 따른 압연집합조직의 불균일성의 원인이 된다^{[8],[10],[11]}.

압연롤 사이에서의 불균일한 변형으로 인해 압연판에는 잔류응력이 생길 수 있다.

큰 지름의 롤을 사용하거나 압하율이 큰 경우($h/L \leq 1$ 의 경우)에는 변형은 비교적 균질하게 일어나며 잔류응력은 작게 된다. 이 경우에는 압연롤과 압연재간의 마찰로 인해 표면에는 인장잔류응력, 중심부에는 압축잔류응력이 남기도 한다. 일반적으로 h/L 가 1 이상으로 커지면 표면에는 인장잔류응력, 중심부에는 압축잔류응력이 남게 된다.

지름이 작은 롤을 사용하거나 압하율이 작은 경우(h/L 가 아주 클 경우) 표면부근에서만 소성변형 되어 변형구역이 재료의 중심부에 미치지 못하게 되며, 표면에는 압축잔류응력, 중심부에는 인장잔류응력이 남게 된다^{[9],[11]}.

여기서,

$$\text{압하율} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100 \tag{3}$$

$$\text{압하량} = h_0 - h_1 \tag{4}$$

2.2 강재의 강도에 대한 균질성의 기준 제안

KS D 3503 「일반 구조용 압연 강재」, KS D 3515 「용접 구조용 압연 강재」, KS D 3861 「건축 구조용 압연 강재」에서는 강재의 두께에 따라 그 기준을 정하고 있으며, 강재가 두꺼워질수록 항복강도의 기준이 낮아진다.

또한, 국토교통부제정 하중저항계수설계법에 의한 강구조설계기준에서는 두께 40mm를 초과하는 경우 10% 정도 항복강도를 저감하여 사용하도록 정하고 있다^[12].

그러나 SM490C-TMC, SM520C-TMC, SM570-TMC, HSA800 강재와 같이 TMCP로 압연된 강재에 대해서는 적용두께가 80mm이하인 경우 항복강도를 저감하지 않고 사용할 수 있다. 이것은 TMCP는 제어압연과 가속냉각을 병용한 압연방법으로 소요항복강도를 만족하는데 압하율에 대한 영향이 적기 때문으로 판단된다.

따라서 TMCP 강재를 비교적 균질한 강재로 볼 수 있다. TMCP 강재의 1/4지점과 2/4지점에 대한 기존 연구자료는 Table 1과 같다^{[6],[13]}. 1/4지점과 2/4지점의 항복강도와 인장강도는 두께에 따른 KS를 만족하고 강구조설계기준에서 정한 TMCP 강재의 항복강도 및 인장강도를 상회하고 있다.

1/4지점의 연신율은 KS를 만족하고 있으며, 2/4지점의 연신율은 KS를 대부분 만족하고 있다. Case2/Case1에서 항복강도는 89.2%~106.7%, 인장강도는 95.7%~104.8%, 연신율은 85.3%~103.6%의 범위로 나타났다. 따라서 두께가 40mm를 초과하는 TMCP 강재의 강도에 대한 균질성의 기준을 공학적 판단에 따라 다음과 같이 제안하며, 이에 대한 지속적인 연구와 토론을 통하여 보다 정량적 기준을 확립하도록 노력하여야 한다.

- 1) 1/4지점에서의 인장시험결과는 KS를 만족한다.
- 2) 2/4지점에서의 인장시험결과는 1/4지점의 85%이상을 만족한다.
- 3) 전두께에서의 인장시험결과는 KS를 만족한다.

Fig. 1과 같이 항복강도 및 인장강도가 선형적으로 변화한다고 가정한다면 2)항을 만족하면 3)항도 만족할 것으로 판단되므로 3)항의 경우는 선택적으로 시험할 수 있다고 판단된다.

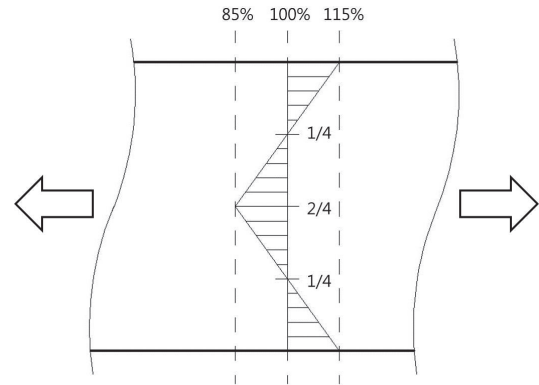


Fig. 1. Linear change in strength according to the position

3. 소재특성시험 계획 및 방법

HSA800 강재의 소재특성을 파악하기 위해 Table 2와 같이 시험편을 제작하였다. 소재특성 시험은 강재의 화학적, 기계적 성질 및 기타 성능이 한국산업표준(KS)에 만족하는지 여부와 관리기준 이외에 조직의 건전성 및 경화도 등을 판단하기 위하여 총 61개의 시험편을 가공하여 7종의 시험을 실시하였다.

Table 1. Tensile test result of TMCP steel^{[6],[13]}

Division	Case. 1 (1/4)			Case. 2 (2/4)			Case. 2/Case. 1 (%)		
	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Yield strength	Tensile strength	Elongation
SM520TMC 30mm L	391.0	528.2	22.0	394.9	532.1	22.0	101.0	100.7	100.0
SM520TMC 50mm L	406.7	561.5	19.0	362.6	541.9	18.0	89.2	96.5	94.7
SM520TMC 80mm L	394.9	532.1	22.0	421.4	557.6	19.0	106.7	104.8	86.4
SM570TMC 45mm L	480.4	614.6	30.1	489.9	617.3	29.7	102.0	100.4	98.7
SM570TMC 60mm L	509.8	627.9	28.5	470.8	601.1	29.1	92.3	95.7	102.1
SM570TMC 80mm L	470.8	598.4	30.7	495.0	613.5	26.2	105.1	102.5	85.3
SM570TMC 45mm C	499.9	625.1	28.5	509.7	633.2	27.1	102.0	101.3	95.1
SM570TMC 60mm C	499.9	625.1	28.5	500.1	616.2	27.7	100.0	98.6	97.2
SM570TMC 80mm C	498.3	611.3	28.0	512.8	622.6	29.0	102.9	101.8	103.6

Table 2. Test list

Specimens	Test Division	Quantity	Sampling parts and specimen
C-1~2	Chemical Composition Test	2 (Using the same sample)	1/4, 2/4
MI-1~2	Microscopic Test		
T-4L-1~3	Tensile Test	3	L direction 1/4
T-2L-1~3		3	L direction 2/4
T-4C-1~3		3	C direction 1/4
T-Z-1~3		3	Z direction
C-4L-1~15		Impact Test	15
C-2L-1~6	6		L direction 2/4 (-20℃, -5℃)
C-4C-1~15	15		C direction 1/4 (-60℃, -40℃, -20℃, -5℃, 20℃)
C-Z-1~6	6		Z direction (-20℃, -5℃)
B-1~3	Bending Test	3	L direction
H-1~2	Hardness Test	2 (Using the same sample)	L, Z direction
MA-1~2	Macroscopic Test		
Total		61	-

3.1 화학성분시험 계획 및 방법

화학성분시험은 강재에 포함되어 있는 화학성분을 바탕으로 강재의 건전성 및 용접성을 파악하기 위하여 실시하며, 화학시험편의 채취는 KS D 0001 「강재의 검사통칙」에 따라 Fig. 2와 같이 판두께 1/4t, 2/4t 지점이 시험면이 되도록 각각 1개씩 제작하였다.

HSA800 강재의 화학성분, 탄소당량(C_{eq}), 용접균열 감수성 조성(P_{en})을 파악하고 KS D 5994 「건축구조용 고성

능 압연강재」의 관리기준에 만족하는지 확인한다.

3.2 인장시험 계획 및 방법

인장시험은 강재의 항복강도, 인장강도, 연신율, 항복비, 단면수축률을 확인하여 강재가 소요능력을 발휘하는지 여부와 기계적 성질이 한국산업표준(KS)에서 제시하는 관리기준을 만족하는지 여부를 확인하기 위하여 실시한다.

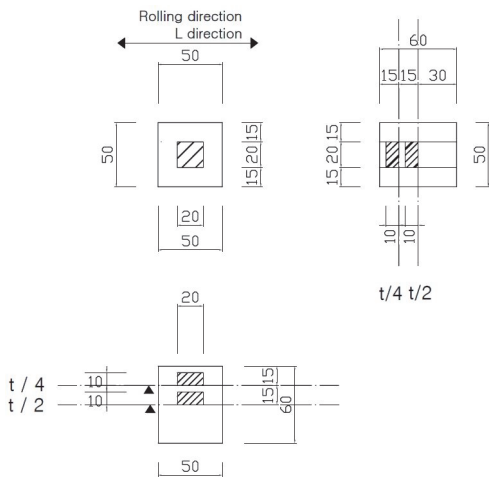
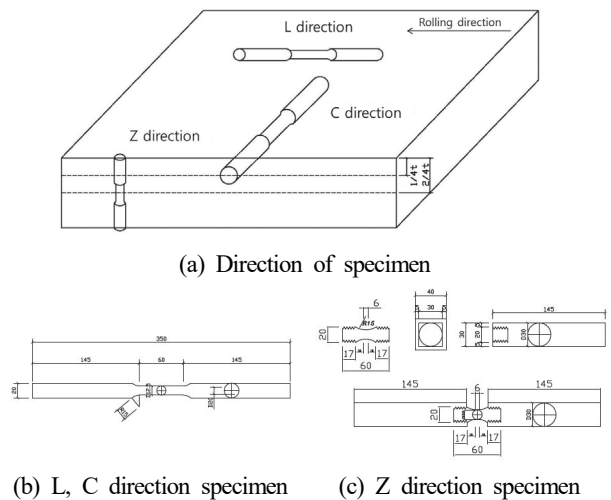


Fig. 2. Chemical composition and Microscopic specimen



(a) Direction of specimen

(b) L, C direction specimen (c) Z direction specimen

Fig. 3. Tensile specimen

인장시험편의 채취는 KS D 0801 「금속재료 인장시험편」에 따라 Fig. 3(a)와 같이 압연방향(L), 압연직각방향(C), 두께방향(Z)으로 구분하여 채취하였다.

압연방향(L)에서는 두께방향의 1/4t, 2/4t 지점에서, 압연직각방향(C)에서는 두께방향의 1/4t 지점에서 채취하였으며, Fig. 3(b)와 같이 시험편 채취 및 가공을 고려하여 4호 시험편보다 얇은 10호 시험편으로 제작하였다.

두께방향(Z)에서는 KS D 0276 「강판 및 평강의 두께 방향 특성」에 준하여 시험편을 채취하였으며, Fig. 3(c)와 같이 강재의 두께에 따른 물림부의 길이를 확보하기 위해 양 단부를 나사형태로 가공하고 별도의 물림부 지그를 제작하였다. 인장시험편의 개수는 시험의 신뢰도를 높이기 위해 각각의 경우에 대하여 3개씩 총 12개의 시험편을 제작하였다.

KS B 0802 「금속재료 인장시험방법」에 준하여 인장시험을 실시하였으며, 인장시험을 통하여 HSA800 강재의 항복강도, 인장강도, 연신율, 항복비, 단면수축률이 KS D 5994 「건축구조용 고성능 압연강재」의 관리기준에 만족하는지 확인한다.

3.3 충격시험 계획 및 방법

충격시험은 샤르피 흡수에너지를 확인하고 강재가 가지는 저온에서의 내충격성을 확인하며, 충격시험편은 KS B 0809 「금속 재료 충격시험편」에 따라 Fig. 4와 같이 압연방향(L), 압연직각방향(C), 두께방향(Z)으로 제작하였다.

샤르피 흡수에너지의 방향에 따른 이방성, 온도별 변화 및 분포를 확인하기 위하여 압연방향 1/4t 지점, 압연직각

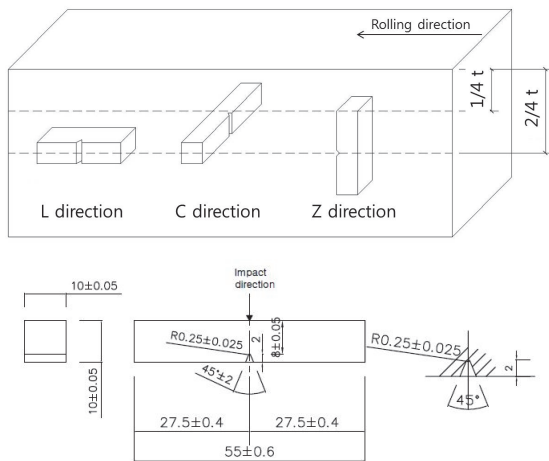


Fig. 4. Impact specimen

방향 1/4t 지점에서는 5개의 온도영역(-60°C, -40°C, -20°C, -5°C, 20°C)에서, 압연방향 2/4t 지점, 두께방향에서는 2개의 온도영역(-5°C, 20°C)에서 충격시험을 진행하였으며, 각 온도영역 당 3개씩 충격시험편을 제작하였다.

충격시험은 KS B 0810 「금속재료 충격시험방법」의 V-노치 충격시험방법에 따라 실시하며, HSA800 강재의 샤르피 흡수에너지가 KS D 5994 「건축구조용 고성능 압연강재」의 관리기준에 만족하는지 확인한다.

3.4 굽힘시험 계획 및 방법

굽힘시험은 굽힘으로 인한 소성변형 시 강재의 굽힘부 표면 혹은 근처에서 발생하는 터짐 또는 균열 등의 결함을 확인하여 강재의 연성 및 건전성을 확인하기 위하여 실시한다.

굽힘시험편은 KS B 0804 「금속재료 굽힘시험」에 따라 Fig. 5와 같이 제작하였으며, 채취방향 및 위치는 압연방향으로서 굽힘면이 표면이 되도록 채취하여 3개의 굽힘시험체를 제작하였다.

HSA800 강재의 연성을 육안으로 확인하기 위하여 KS B 0804 「금속재료 굽힘시험」에 따라 시험편을 구부러, 굽힘시 표면의 터짐이나 기타 결점의 유무를 확인하였다.

3.5 경도시험 계획 및 방법

경도시험은 강재의 경도분포를 측정함으로써 강재의 경화도를 확인하여 강재의 건전성을 파악한다. 경도시험편은 KS B 0811 「금속재료의 비커스 경도시험방법」에 따라 Fig. 6과 같이 판두께 60mm가 시험면이 되도록 80(L)×20(C)×60(Z) 크기로 2개의 시험편을 채취하여 제작하였다.

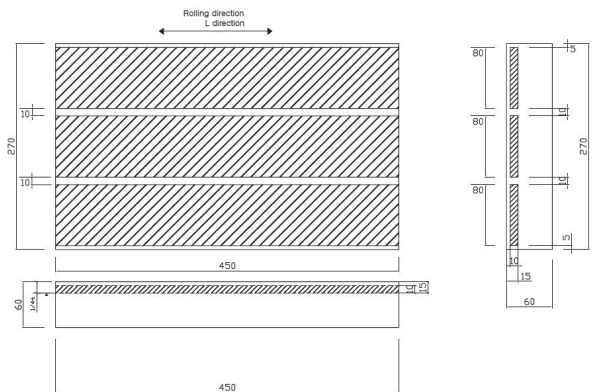


Fig. 5. Bend specimen

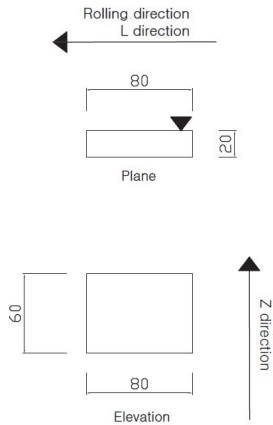


Fig. 6. Hardness and Macroscopic specimen

HSA800 강재의 경도를 파악하기 위하여 KS B 0811 「금속재료의 비커스 경도시험 방법」에 따라 실시하였다.

3.6 매크로시험 계획 및 방법

매크로시험은 강재 조직의 건전성을 육안으로 확인한다. 매크로시험편은 KS D 0210 「강의 매크로 조직 시험 방법」에 따라 판두께 방향으로 조직을 검사할 수 있는 형상으로 제작하였다. 시험편은 판두께 60mm가 시험면이 되도록 80(L)×20(C)×60(Z) 크기로 2개의 시험편을 채취하여 제작하였으며, 경도시험편과 동일한 시험편을 사용하였다.

매크로시험을 통하여 HSA800 강재 단면의 조직상태, 편석의 유무, 결정립계의 방향 등을 알 수 있으며, 이로 미루어 강재의 제성질을 유추할 수 있다. 매크로시험의 실시 및 분석은 KS D 0210 「강의 매크로 조직 시험 방법」에 따라 실시하였다.

3.7 마이크로조직시험 계획 및 방법

마이크로조직시험은 강재의 마이크로조직을 금속 현미경을 활용하여 변태상태를 확인함으로써 금속조직의 건전성을

확인한다. 마이크로조직시험편은 KS D 0204 「강의 비금속 개재물 측정 방법-표준 도표를 이용한 현미경 시험방법」에 따라 판두께 1/4t, 2/4t 지점의 조직을 관찰할 수 있도록 각 지점에서 1개씩 2개의 시험편을 제작하였으며, 화학시험편과 동일한 시험편을 사용하였다.

마이크로조직시험방법은 KS D 0204 「강의 비금속 개재물 측정 방법-표준도표를 이용한 현미경 시험방법」의 검사통칙에 따라 강판의 시험면을 광학현미경을 통해 조직을 관찰하였다. 본 시험에서는 배율을 200배로 하였다.

4. 소재특성시험 결과

4.1 화학성분시험 결과

화학성분 분석결과는 Table 3에 나타내었으며, 이에 따른 탄소당량 및 용접균열 감수성 조성은 Table 4에 나타내었다. 화학성분시험 결과, HSA800(60mm) 강재의 화학성분, 탄소당량(C_{eq}), 용접균열 감수성 조성(P_{cm})은 1/4지점, 2/4지점에서 모두 한국산업표준(KS)을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

4.2 인장시험 결과

인장시험 결과는 Table 5, Table 6에 나타내었으며, Table 5는 압연방향과 압연직각방향에 대한 인장시험 결과, Table 6은 두께방향에 대한 인장시험에 대한 결과를 나타낸다. 고강도 강재 특성상 항복점이 명확하게 나타나지 않으므로 항복강도는 0.2% off-set법에 의하여 구하였다.

압연방향 1/4지점에 대한 항복강도, 인장강도, 연신율, 항복비는 모두 한국산업표준(KS)을 만족하고 있는 것으로 나타났으며, 응력-변형도 곡선은 Fig. 7과 같다.

압연방향 2/4지점에 대한 항복강도와 연신율은 모두 한국

Table 3. Chemical composition test of HSA800 (%)

Specimens	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	B
C-1/4	0.05	0.16	2.32	0.006	0.004	0.38	0.29	0.01	0.00	0.004	0.0012
C-2/4	0.05	0.16	2.33	0.006	0.004	0.38	0.29	0.01	0.00	0.004	0.0013
KS*	0.20 and below	0.55 and below	3.00 and below	0.015 and below	0.006 and below	-	-	-	-	-	-

* KS D 5994 High-performance rolled Steel for building structures

산업표준(KS)를 만족하고 있지만, 인장강도는 800N/mm²보다 낮게 나타났다. 또한 항복비는 상한치인 85%보다 높은 것으로 나타났으며, 응력-변형도 곡선은 Fig. 8과 같다.

압연직각방향 1/4지점에 대한 항복강도, 인장강도, 연신율, 항복비는 한국산업표준(KS)을 만족하고 있는 것으로 나타났으며, 응력-변형도 곡선은 Fig. 9와 같다. 또한 압연

Table 4. Carbon equivalent and Welding crack sensitivity of HSA800

Thickness	Sampling parts	Carbon equivalent (C_{eq})	Welding crack sensitivity (P_{cm})
60mm	1/4t	0.5111%	0.1991%
	2/4t	0.5128%	0.2001%
KS (100mm and below)	-	0.60 and below	0.30 and below

Table 5. Tensile test of HSA800

Specimens	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Yield ratio (%)
T-4L-1	759.4	898.0	20.8	84.6
T-4L-2	710.0	840.1	20.1	84.5
T-4L-3	721.6	887.5	18.7	81.3
Average	730.3	875.2	19.9	83.5
T-2L-1	709.0	764.3	22.9	92.7
T-2L-2	730.0	791.3	22.8	92.2
T-2L-3	740.1	785.4	23.4	94.2
Average	726.4	780.3	23.0	93.0
T-4C-1	732.2	866.7	18.9	84.4
T-4C-2	711.4	829.6	21.1	85.8
T-4C-3	738.0	876.4	19.2	84.2
Average	727.2	857.6	19.7	84.8
KS (1/4)	650~770	800~950	16 and above	85.0 and below

Table 6. Thickness direction characteristic of HSA800

Specimens	Reduction of area (%)	Average
T-Z-1	80	77
T-Z-2	74	
T-Z-3	77	
KS	15 and above	25 and above

직각방향 1/4지점에 대한 인장시험 결과는 압연방향 1/4지점에 대한 결과와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

두께방향에 대한 인장시험은 단면수축률만을 확인하였다. 시험결과는 한국산업표준(KS)을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

인장시험 결과, HSA800(60mm) 강재의 1/4지점에 대한 방향별 이방성은 압연방향이 압연직각방향에 비하여 인장강도는 다소 높게 나타났으나, 항복강도, 연신율, 항복비는 대등하게 나타나 방향성에 대해 우수한 것으로 판단된다.

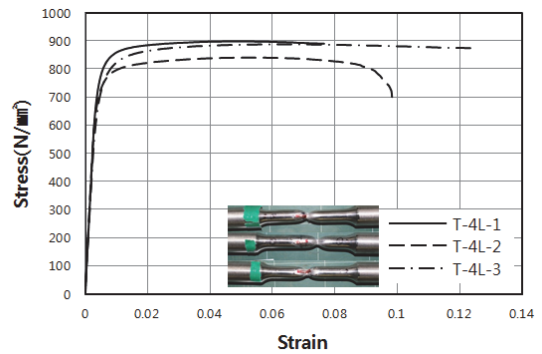


Fig. 7. Stress Strain Curve of T-4L-1~3

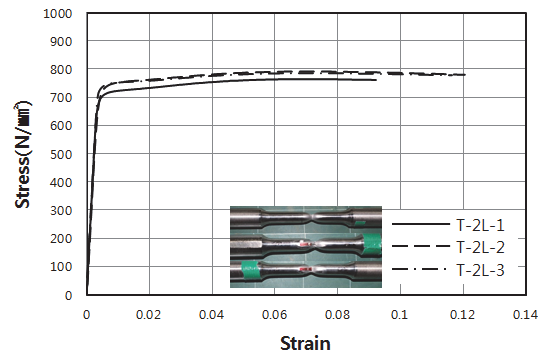


Fig. 8. Stress Strain Curve of T-2L-1~3

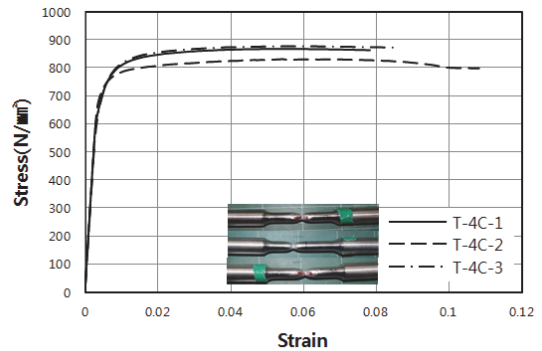


Fig. 9. Stress Strain Curve of T-4C-1~3

Table 7. Homogeneity of the strength of HSA800

Division	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Yield ratio (%)
T-2L	726.4	780.3	23.0	93.0
T-4L	730.3	875.2	19.9	83.5
T-2L/T-4L	99.5%	89.2%	115.6%	111.4%

또한, Table 7과 같이 압연방향 2/4 지점의 인장시험 결과가 1/4지점의 인장시험 결과의 85% 이상으로 나타나 강재의 강도에 대한 균질성도 만족하는 것으로 나타났다.

4.3 충격시험 결과

충격시험 결과에 따른 샤르피 흡수에너지는 Table 8에 나타내었다. 압연방향 1/4지점 및 압연직각방향 1/4지점에 대한 샤르피 흡수에너지는 모든 온도영역에서 47J 이상으로, 한국산업표준(KS)을 만족한다.

또한 압연방향에 따른 이방성은 -60℃, -40℃의 온도영역에서 압연방향이 압연직각방향보다 다소 높게 나타났지만, -20℃, -5℃, 20℃의 온도영역에서는 대등하게 나타나 방향성이 우수한 것으로 판단된다.

압연방향 2/4지점에 대한 샤르피 흡수에너지는 -20℃,

Table 8. Charpy absorbed energy of HSA800 (J)

Sampling parts	No.	Test temperature				
		-60℃	-40℃	-20℃	-5℃	+20℃
L direction (1/4)	1	219	240	271	265	252
	2	250	261	264	272	260
	3	232	251	270	276	242
	Average	233.7	250.7	268.3	271.0	251.3
L direction (2/4)	1	-	-	13	290	-
	2	-	-	164	48	-
	3	-	-	69	250	-
	Average	-	-	82.0	196.0	-
C direction (1/4)	1	56	55	279	263	242
	2	19	253	270	261	247
	3	227	224	249	243	247
	Average	100.7	177.3	266.0	255.7	245.3
Z direction	1	-	-	12	12	-
	2	-	-	9	16	-
	3	-	-	13	28	-
	Average	-	-	11.3	18.7	-
KS (1/4, L direction)	-	-	-	47 and above	-	

-5℃의 온도영역에서 편차가 다소 크게 나타났으며, 온도영역에 따른 차이도 크다. 하지만 -20℃, -5℃의 온도영역의 평균은 47J 이상으로, 한국산업표준(KS)을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

두께방향에 대한 KS 관리기준은 없지만, 충격시험결과 샤르피 흡수에너지가 Table 8과 같이 -20℃의 온도영역에서는 11.3J, -5℃의 온도영역에서는 18.7J로서 모두 47J 이하로 나타났다.

4.4 굽힘시험 결과

굽힘시험 결과 압연방향의 경우, Table 9와 같이 모든 시험체에서 균열 및 터짐과 같은 이상 현상이 발생하지 않아 소성변형에 따른 연성의 능력이 우수한 것으로 판단된다.

Table 9. Bending test of HSA800

Specimens	Bending Test	Test result	Note
B-1	Transverse Side Bend Test	O.K	No tear
B-2	Transverse Side Bend Test	O.K	No tear
B-3	Transverse Side Bend Test	O.K	No tear

4.5 경도시험 결과

경도시험 결과는 Table 10에 나타내었으며, Fig. 10, Fig. 11은 H-L-1, H-L-2의 경도분포를 나타낸 것이다. H-L-1의 경우 경도값이 218~273(Hv) 정도로 균일하게 나타났다. H-L-2의 경우 237~329(Hv)로 H-L-1에 비해 경도값이 다소 높게 나타났으며, 중앙부 경도값에 비해 표면층의 경도값이 약간 높게 나타났다. 두 시험체 모두 최고 경도치가 350(Hv)을 넘지 않아 취성파괴에 대한 우려는 없는 것으로 판단된다.

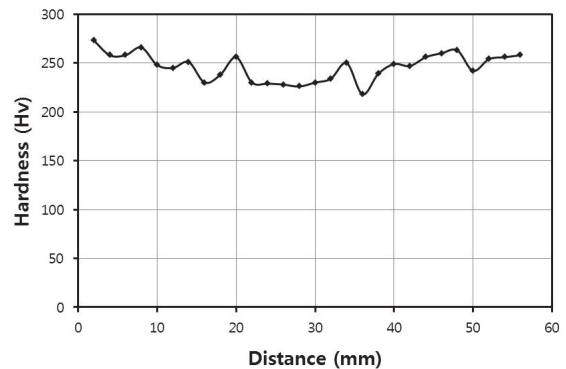


Fig. 10. Hardness test of H-L-1

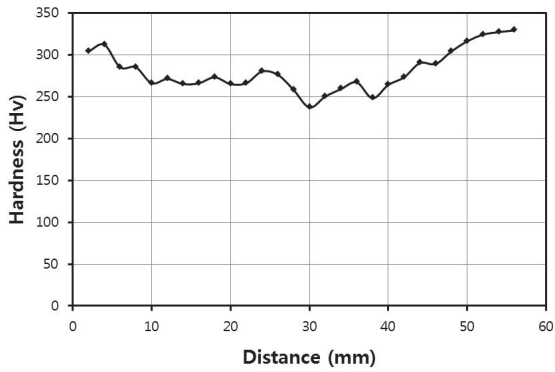


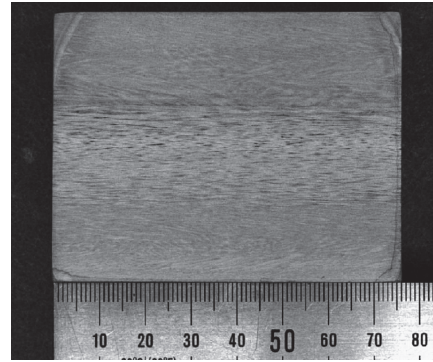
Fig. 11. Hardness test of H-L-2

Table 10. Hardness test of HSA800

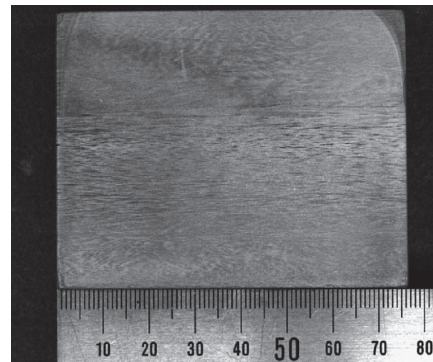
Specimen No.	Base Metal		
	H-L-1	H-L-2	
Results	2 mm part	273	304
	4 mm part	258	312
	6 mm part	258	285
	8 mm part	266	285
	10 mm part	248	266
	12 mm part	245	271
	14 mm part	251	265
	16 mm part	230	266
	18 mm part	238	273
	20 mm part	256	265
	22 mm part	230	266
	24 mm part	229	280
	26 mm part	228	276
	28 mm part	226	258
	30 mm part	230	237
	32 mm part	234	250
	34 mm part	250	259
	36 mm part	218	267
	38 mm part	239	248
	40 mm part	249	264
42 mm part	247	273	
44 mm part	256	290	
46 mm part	260	289	
48 mm part	263	304	
50 mm part	242	316	
52 mm part	254	324	
54 mm part	256	327	
56 mm part	258	329	
Average	246.14	280.32	

4.6 매크로시험 결과

매크로시험결과 Fig. 12와 같이 나타났으며, 기포, 모세 균열, 중심부 균열은 발생하지 않았다.



(a) < MA-1 >



(b) < MA-2 >

Fig. 12. Macroscopic test of HSA800



(a) < MI-1, 1/4t, ×200>



(b) < MI-2, 2/4t, ×200>

Fig. 13. Microscopic test of HSA800

4.7 마이크로조직시험 결과

마이크로조직시험 결과는 Fig. 13과 같이 나타났으며, HSA800 강재의 조직은 베이나이트를 기지로 하고 있으며 미세 펄라이트 조직과 함께 구성되어 있다.

1/4지점의 경우 층상의 베이나이트 조직과 미세 펄라이트 조직이 나타났으나, 2/4지점의 경우 입자의 크기가 다소 조대하며, 일부의 경우 조직이 뭉쳐있는 형태를 나타내고 있다.

5. 결론

강재의 강도에 대한 균질성 기준을 제안하였으며, HSA 800 60mm 강재를 대상으로 7종의 시험을 하여 HSA800 강재의 소재특성을 확인하였다.

- (1) 기존의 연구결과를 바탕으로 공학적 판단을 통하여 강재의 강도에 대한 균질성 기준을 다음과 같이 제안한다.
 - ① 1/4지점에서 인장시험결과는 KS를 만족한다.
 - ② 2/4지점에서 인장시험결과는 1/4지점의 85%이상을 만족한다.
 - ③ 전두께에서의 인장시험결과는 KS를 만족한다.
- (2) 화학성분시험 결과 HSA800(60mm) 강재의 화학성분, 탄소당량(C_{eq}), 용접균열 감수성 조성(P_{cn})은 1/4지점, 2/4지점에서 모두 한국산업표준(KS)을 만족하고 있는 것으로 나타났다.
- (3) 인장시험 결과 압연방향 1/4지점과 압연직각방향 1/4지점에 대한 항복강도, 인장강도, 연신율, 항복비는 모두 한국산업표준(KS)을 만족하고 있는 것으로 나타났다. 압연방향 2/4 지점의 인장시험 결과가 1/4지점의 인장 시험 결과의 85% 이상으로 나타나 강재의 강도에 대한 균질성도 만족하는 것으로 나타났다.
- (4) 충격시험 결과 압연방향 1/4지점, 2/4지점 및 압연직각방향 1/4지점에 대한 샤르피 흡수에너지는 모든 온도영역에서 47J 이상으로, 한국산업표준(KS)을 만족한다. 또한 압연방향에 따른 이방성은 -60°C , -40°C 의 온도영역에서 압연방향이 압연직각방향보다 다소 높게 나타났지만, -20°C , -5°C , 20°C 의 온도영역에서는 대등하게 나타나 방향성이 우수한 것으로 판단된다.
- (5) 굽힘시험 결과 압연방향 시험편에서는 균열 및 터짐과

같은 이상 현상이 발생하지 않아 소성변형에 따른 연성의 능력이 우수한 것으로 판단된다.

- (6) 경도시험 결과 모든 시험체의 경도값이 218~329(Hv) 정도로 균일하게 나타났다. 경도시험 분석결과 2개의 시험체 모두 공통적으로 두께의 상하부 표면측에서 경도값이 높게 나왔으며, 중앙부로 갈수록 경도값이 낮아지는 것으로 나타났다.
- (7) 매크로시험 결과 기포, 모세균열, 중심부 균열은 발생하지 않았다.
- (8) 마이크로조직시험 결과 조직은 베이나이트를 기지로 하고 있으며 미세 펄라이트 조직과 함께 구성되어 있다. 2/4 지점에서 일부의 경우 조직이 뭉쳐있는 형태로 확인되어 주의가 요망된다.

감사의 글

이 논문은 한국기술교육대학교 교육연구진흥비 프로그램의 일부 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌(References)

- [1] 최인락, 정경수, 김도환, 김진호(2014) HSA800 강재 현장 적용사례, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제26권, 제3호, pp.33-39.
Choi, I.-R., Chung, K.-S., Kim, D.-H., and Kim, J.-H. (2014) Field Application of High-Strength Steel HSA800, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.33-39 (in Korean).
- [2] 국가기술표준원(2011) 건축구조용 고성능 압연강재(KS D 5994: 2011).
Korean Agency for Technology and Standards (2011) *High-Performance Rolled Steel for Building Structures* (KS D 5994: 2011), Korea (in Korean).
- [3] 정우성, 김도환, 이승은, 유승호, 조재영, 김진호(2014) HSA800 강재의 특징 및 소재성능평가, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제26권, 제3호, pp.11-16.
Jung, W.-S., Kim, D.-H., Lee, S.-E., Yu, S.-H., Cho, J.-Y., and Kim, J.-H. (2014) Material Performance Evaluation of HSA800 Properties, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.11-16 (in Korean).

- [4] 주응용, 장래웅(1988) TMCP강의 개발현황 및 발전방향, 상변태 심포지엄 자료집, 대한금속재료학회, pp.14-20.
Choo, W.Y., and Chang, R.W. (1988) Recent Development and Future Prospect in TMCP Steel, *Proceedings of Phase Transformation Symposium*, The Korean Institute of Metals and Materials, pp.14-20 (in Korean).
- [5] 김종락, 박양희(2003) SM490A TMC 후판강재의 소재 및 용접부 특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제3호, pp.331-339.
Kim, J.R., and Park, Y.H. (2003) A Study on Structural Characteristics of SM490 TMC Thick Steel Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 15, No.3, pp.331-339 (in Korean).
- [6] 이명재(2000) 건축구조용 SM520 TMC 강재의 성능, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제12권, 제2호, pp.33-38.
Lee, M.-J. (2000) Performance of SM520 TMC Steel for Building Structures, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.12, No.2, pp.33-38 (in Korean).
- [7] 김종락, 김상섭, 이철호, 이은택, 백기열(2008) 600MPa 급(SM570TMC) 강재의 소재 및 용접특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제6호, pp.773-781.
Kim, J.R., Kim, S.S., Lee, C.H., Lee, E.T., and Beak, K.Y. (2008) A Study on the Material Characteristics and the Welding Properties of 600MPa Grade Steel (SM 570 TMC), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.6, pp.773-781 (in Korean).
- [8] 허무영(2002) 압연재에서 불균일 집합조직의 형성, 한국소성가공학회지, 한국소성가공학회, 제11권, 제1호, pp.14-23.
Huh, M.Y. (2002) Evolution of Inhomogeneous Textures in Rolled Sheets, *Transaction of Materials Processing*, The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol.11, No.1, pp.14-23 (in Korean).
- [9] 김낙수, 김형중(2002) 소성가공과 해석, 문운당.
Kim, N.S., and Kim, H.J. (2002) *Plastic Working and Analysis*, Munundang, Korea (in Korean).
- [10] 박노진, 이문규, 허무영(2000) 극저탄소강판에서 불균질 냉간 압연집합조직의 형성에 미치는 압연변수의 영향, 대한금속·재료학회지, 대한금속재료학회, 제38권, 제4호, pp.599-606.
Park, N.-J., Lee, M.-K., and Huh, M.-Y. (2002) Effects of Deformation Parameters on the Formation of Inhomogeneous Cold Rolling Textures in Extra Low Carbon Steel Sheets, *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, The Korean Institute of Metals and Materials, Vol. 38, No.4, pp.599-606 (in Korean).
- [11] Hosford, W.F, and Caddell, R.M.; 허무영(역)(1996) 금속소성가공, 희중당.
Hosford, W.F, and Caddell, R.M.; Huh, M.-Y. (Trans.) (1996) *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, Heejeongdang, Korea (in Korean).
- [12] 한국강구조학회(2014) 강구조설계기준(하중저항계수설계법), 국토교통부.
KSSC (2014) *Steel Structure Design Code (Load and Resistant Factored Design)*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- [13] 임성우, 김요숙, 장인화(2005) SM570TMC 강재의 재료 특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제3호, pp.365-373.
Im, S.W., Kim, Y.S., and Chang, I.H. (2005) A Study on the Materials Characteristics of SM570TMC Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 17, No.3, pp.365-373 (in Korean).

요 약 : 본 연구에서는 HSA800 강재의 7종의 각종 시험을 실시하여 다양한 소재특성을 확인하였으며, 강도에 대한 균질성의 정량적 기준을 제안하였다. 또한 HSA800 강재가 강도에 대한 균질성의 기준을 만족하는지 검토하였다. 시험결과 HSA800 강재의 1/4지점의 소재 특성은 KS를 만족하며, 우수한 방향성, 저온에서의 내충격성이 나타났다. 또한, 제안한 강재의 강도에 대한 균질성의 기준을 만족하였다. 그러나, 마이크로조직시험 결과 2/4 지점에서 일부의 경우 조직이 뭉쳐있는 형태로 확인되어 주의가 요망된다.

핵심용어 : HSA800, TMCP, 균질성, 화학성분시험, 인장시험, 충격시험, 굽힘시험, 경도시험, 매크로시험, 마이크로조직시험
