

SM490TMC 극후판(120mm) 강재의 가스실드아크용접(FCAW)을 이용한 용접성 및 이음성능에 관한 연구

김성배¹ · 홍형주² · 최영한³ · 김상섭^{4*}

¹소장, (주)더나은구조엔지니어링, ²학사과정, 한국기술교육대학교, 건축공학과
³박사과정, 한국기술대학교, 건축공학과, ⁴교수, 한국기술교육대학교, 디자인·건축공학부

A Study of Weldability and Welded Joint Performance on the Gas Shield Arc Welding (FCAW) of SM490TMC Steel Plate (120mm)

Kim, Sung Bae¹, Hong, Hyung Ju², Choi, Young Han³, Kim, Sang Seup^{4*}

¹Manager, The Naeun Structural Engineering, Seoul, 07205, Korea

²The Bachelor's Course, Department of Architectural Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

³The Doctor's Course, Department of Architectural Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

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

Abstract - To figure out the weldability and welded joint performance on the FCAW of SM490TMC 120mm, several specimens were manufactured and 10 kinds of experiments were implemented. The result of the weld zone chemical composition test, weld metal tensile test, weld zone tensile test, and weld zone impact test has satisfied the KS. Especially, the weld zone tensile test result shows the base metal fracture, which means the weld zone performs enough required performance. In addition, the results of the weld zone bending test, hardness test, macroscopic test, microscopic test, and the maximum hardness in HAZ were showing that the FCAW weld zone has fine quality.

Keywords - TMCP, SM490TMC, Weldability, Welded joint performance, FCAW

1. 서론

건축 구조물이 초고층화, 장스팬화 됨에 따라 고강도, 후판 강재의 수요가 증가하고 있다. 강재는 필연적으로 이음과 접합이 발생하는데, 후판강재의 접합은 일반적으로 용접이 많이 적용된다. 강재의 용접성능은 강재를 선택하는데 필수적인 요소이며, 후판강재의 경우 용접성이 향상된 제어열처리강(TMCP)의 수요가 상대적으로 증가하고 있다.

TMCP강재는 일반 강재에 비해 탄소량으로 등가평가한 탄소당량이 낮아 용접성이 우수하다. 또한 강구조 설계기준에서는 판두께 40mm를 초과하는 경우, 항복강도를 10% 저감하도록 정하고 있으나, TMCP강재는 판두께 40mm를 초과하여도 항복강도를 저감하지 않는다. 따라서 40mm 초과 후판강재의 경우, TMCP 강재를 적용하면 용접성능이 향상되고, 항복강도를 저감하지 않아도 되므로 효율성이 증대된다. 반면, 강재의 품질보장은 판두께 80mm 이하로 규정하고 있다^[1].

이미 50mm, 80mm SM490TMC 후판 강재에 대한 연구가 진행되어 소재특성 및 용접 방법에 따른 용접성이 입증된 바 있다^[2]. 그러나 판두께 80mm를 초과하는 TMCP 강재에 대해서는 이를 평가할 수 있는 기준이 미비하고, 특히 용접성에 대한 실험 결과 및 연구 성과가 부족해 아직 건설 현장에서 적극적으로 활용되지 못하고 있다.

이에 SM490TMC 극후판(판두께 120mm) 강재를 대상으

Note.-Discussion open until June 30, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 14, 2017; revised November 2, 2017; approved on November 6, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. kimss@koreatech.ac.kr

로 강재의 소재특성 및 용접성에 대한 연구를 진행하였다. 소재특성 평가는 이미 화학적 성질과 기계적 성질 및 기타 성능에 대해 KS를 중심으로 성능을 평가하여 만족 여부를 확인하였다^[3]. 본 연구에서는 SM490TMC 120mm 강재의 용접성능에 대해 가스실드아크용접의 하나인 플릭스코어 아크용접(FCAW)을 대상으로 용접성 및 이음성능에 대한 10종의 시험을 실시하여 그 적용성을 평가하고, 극후판강재 적용에 대한 참고자료로 제시하고자 한다.

2. 용접성 및 이음성능 공시체 계획

SM490TMC 120mm강재의 용접성 및 이음성능을 평가하기 위해, 현업에서 가장 많이 사용되고 있는 플릭스가 감싸진 용접선재를 적용한 플릭스코어 아크용접(FCAW)을 활용하여 Table 1과 같이 공시체를 제작하였다.

Table 1. The specimens of FCAW

| Specimen | Welding method | Welding type | Specimen size L×C×T (mm) |
|----------|----------------|-----------------------|--------------------------|
| W1 | FCAW | CJP groove welding | 806×700×120 |
| WMH | | 1 pass test welding | 220×200×120 |
| Wy50 | | 1 pass groove welding | 202×200×120 |
| Wy100 | | | |

Note1: Specimen size indication - L: rolling direction, C: rolling orthogonal direction, T: thickness

Note2: Root gap of W1 - 6mm / Wy50, Wy100 - 2mm

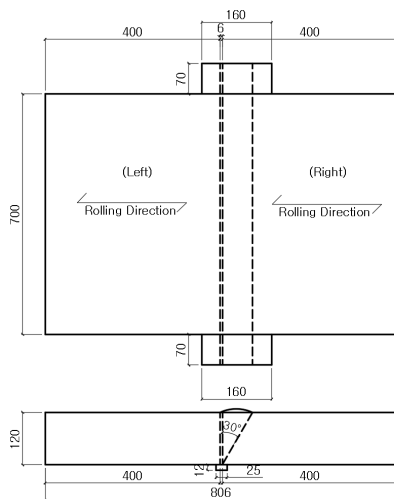


Fig. 1. FCAW W1 specimen

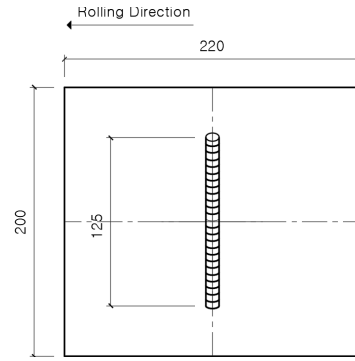


Fig. 2. FCAW WMH specimen

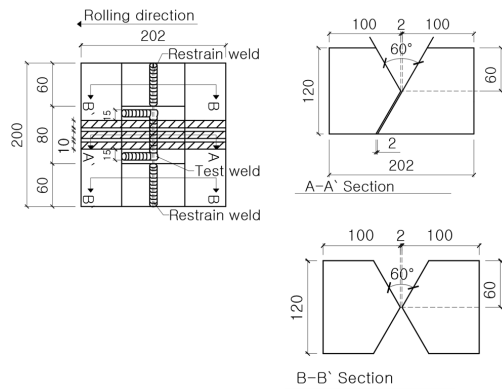


Fig. 3 FCAW Wy50, Wy100 specimens

W1 용접공시체는 Fig. 1과 같이 120mm 후판을 30° 베벨형(V)으로 개선하여 그루브용접 하였다.

WMH 공시체는 열영향부 최고경도 시험을 위해 제작하였다. Fig. 2와 같이 SM490TMC 120mm 판재(220mm(L)×200mm(C)×120mm(T)) 중간에 FCAW를 활용해 125mm 길이로 1층(one pass) 용접하여 제작하였다.

Wy50, Wy100 공시체는 y형 용접균열 시험을 위해 제작하였으며, Wy50과 Wy100은 각각 예열 온도를 50°C, 100°C로 제작하였다. Fig. 3과 같이 공시체 길이는 200mm이고, 양단 60mm는 X형으로, 중심부 80mm는 y형으로 개선하여 그루브용접을 실시하였다.

3. 용접재 및 용접사양

FCAW에 사용된 용접재는 현대중합금속의 SF-71(1.4 ϕ)이며, KS D 7104 「연강, 고장력강 및 저온용 강용 아크용접 플릭스코어선」, YFW-C50DR 규격의 490N/mm²급 용접재

Table 2. The mechanical properties of welding material

| Name | Yield strength (N/mm ²) | Tensile strength (N/mm ²) | Elongation (%) | Charpy absorbed energy (0°C, J) |
|-------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------------|
| SF-71 | 390 | 490 | 22 | 47 |

Table 3. The average weld specification of W1 specimen

| Welding method | Pass | Average voltage (V) | Average current (A) | Average heat input capacity (kJ/cm) |
|----------------|------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|
| FCAW | 110 | 35.4 | 308.3 | 25.5 |

이다. Table 2는 용접재의 KS 기계적 성질이다.

Table 3은 W1 용접공시체의 평균용접사양이다. W1 용접공시체는 110번의 패스로 평균전압 35.4V, 평균전류 308.3A, 평균입열량 25.5kJ/cm, 층간온도 250°C 이하로 용접하였다. 입열량과 층간온도 관리는 기존 자료와 현장여건, 작업속련도 등을 고려하여 선정하였다^{[4],[5],[6]}.

4. 용접성 및 이음성능 시험 계획 및 방법

SM490TMC 120mm 강재의 FCAW 용접성 및 이음성능을 확인하기 위하여 Table 4와 같이 10종의 시험을 계획하였으며, W1 용접공시체와 WMH 공시체, Wy50, Wy100 공시체

Table 4. Test list of FCAW

| Piece name | Test list | Quantity |
|---------------|-------------------------------------|----------|
| WCh-W1-1 | Weld zone chemical composition test | 1 |
| WMT-W1-1~3 | Weld metal tensile test | 3 |
| WT-W1-1~3 | Weld zone tensile test | 3 |
| WB-W1-1~3 | Weld zone bending test | 3 |
| WC-W1-WM-1~15 | Weld zone impact test | 15 |
| WC-W1-BD-1~15 | | 15 |
| WC-W1-HA-1~15 | | 15 |
| MH-W1-1~3 | Maximum hardness test in HAZ | 3 |
| WH-W1-1 | Weld zone hardness test | 1 |
| WMA-W1-1 | Weld zone macroscopic test | 1 |
| WMI-W1-1 | Weld zone microscopic test | 1 |
| Wy50-W1-1~2 | y-groove weld cracking test | 2 |
| Wy100-W1-1~2 | | 2 |
| Total | | 65 |

에서 총 65개의 시험편을 채취하였다. 용접성 및 이음성능 시험으로는 용접부 화학성분 및 인장·굽힘·충격·경도·마크로·마이크로조직시험, 용착금속부 인장시험, 열영향부 최고경도시험, y형 용접균열시험을 실시하였다.

4.1 용접부 화학성분시험

용접부 화학성분시험은 용착금속 내에 함유된 화학성분의 KS 만족 여부를 확인한다. 또한 강도, 인성, 내충격성 등 용착금속의 기계적인 특성 및 성능에 영향을 미치는 화학성분의 과다 함유여부를 확인하는 것을 목적으로 한다.

용접부 화학성분시험편은 KS D 1652 「철 및 강의 스파크 방전 원자방출 분광분석 방법」에 따라 W1 용접공시체의 용착금속부 내에서 23mm(L)×13mm(C)×23mm(T) 크기의 육면체 형태로 채취하였다. 시험편은 Fig. 4와 같이 두께방향의 1/4지점에서 채취하였다.

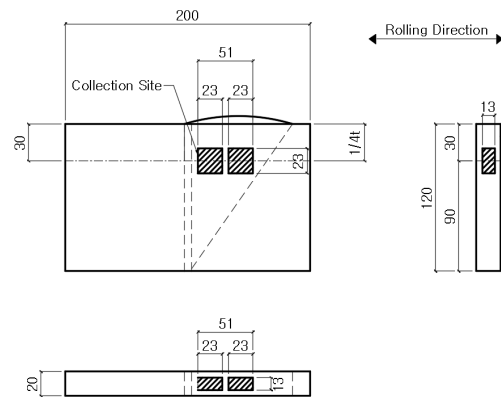


Fig. 4. Weld zone chemical composition and microscopic piece

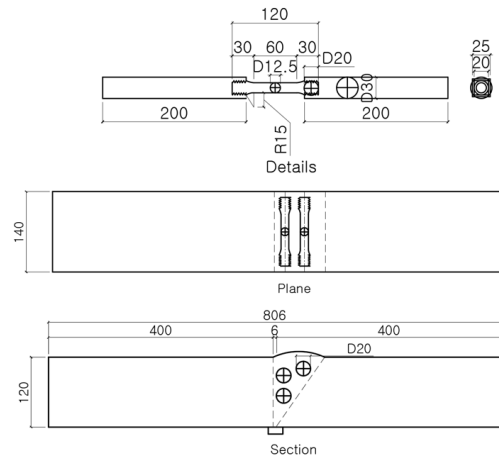


Fig. 5. Weld metal tensile piece

4.2 용착금속부 인장시험

용착금속부 인장시험은 용착금속의 인장강도 및 변형 능력을 확인하여 소요성능의 발휘 여부 및 KS 만족 여부를 확인하는 것을 목적으로 한다.

용착금속부 인장시험편은 Fig. 5와 같이, KS B 0821 「용착금속의 인장 및 충격시험」에 따라 KS B 0801 「금속 재료 인장시험편」의 10호 시험편을 참고하여 W1 용접공시체에서 용접길이 방향으로 3개를 채취하였다.

용착금속부 인장시험은 KS B 0802 「금속 재료 인장시험 방법」에 따라 실시하였다. 시험기는 500kN급 만능시험기(UTM, Universal Testing Machine; 이하 UTM)를 사용하였고, 40kN/min의 속도로 가력 하였다.

4.3 용접부 인장시험

용접부 인장시험은 용접 이음부의 인장강도 및 변형 능력을 확인하여 그 안전성을 검토하는 것을 목적으로 한다.

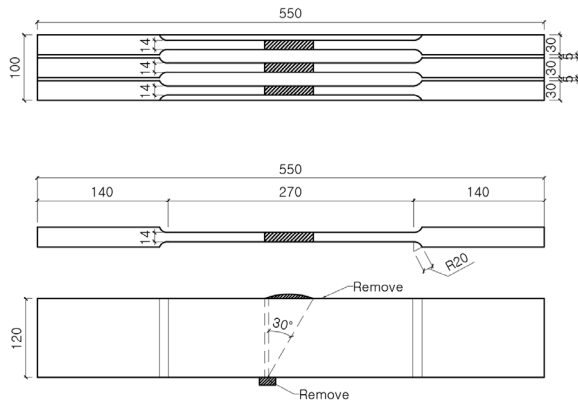


Fig. 6. Weld zone tensile piece

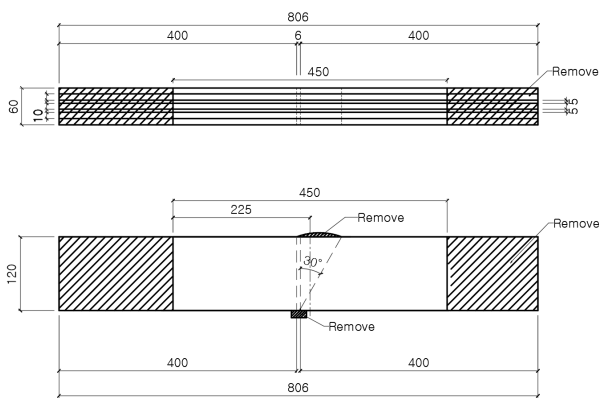


Fig. 7. Weld zone bending piece

용접부 인장시험편은 KS B 0801 「금속 재료 인장시험편」의 14B호 시험편을 참고하였다. 시험편은 Fig. 6과 같이 전 두께를 기준으로 W1 용접공시체에서 3개를 채취하였다.

용접부 인장시험은 KS B 0802 「금속 재료 인장시험 방법」에 따라 실시하였다. 시험기는 2000kN급 UTM을 사용하였다. 시험 전 질산과 에틸알콜을 혼합한 5% 나이탈(Nital) 용액을 시험편의 용접부 표면에 도포하여 에칭(etching)을 실시하였고, 용접부 조직을 사전에 파악한 후 2mm/min의 속도로 가력 하였다. 또한, 스트레인지지를 모재부, 열영향부, 용착금속부에 부착하여 각 부의 변형률을 확인하였다.

4.4 용접부 굽힘시험

용접부 굽힘시험은 굽힘에 의해 소성변형 되는 용접부의 표면 및 근처에서 발생하는 결함의 존재를 확인하여 용접부의 건전성을 파악하는 것을 목적으로 한다.

용접부 굽힘시험편은 KS B 0832 「금속 재료 용접부의 파괴 시험-굽힘시험」을 참고하여 Fig. 7과 같이 W1 용접공시체에서 3개의 시험편을 용접 이음부가 시험대상면이 되도록 채취하였다.

시험은 2000kN급 UTM과 포머를 이용하여 KS B 0832 「금속 재료 용접부의 파괴 시험-굽힘시험」에 따라 180° 3점 굽힘시험을 하였다. 시험 전 5% 나이탈용액을 시험편의 용접부 표면에 도포하여 에칭을 실시한 후 2mm/min의 속도로 가력 하였다.

4.5 용접부 충격시험

용접부 충격시험은 용접부의 샤르피 흡수에너지 및 저온에서의 취성저항성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

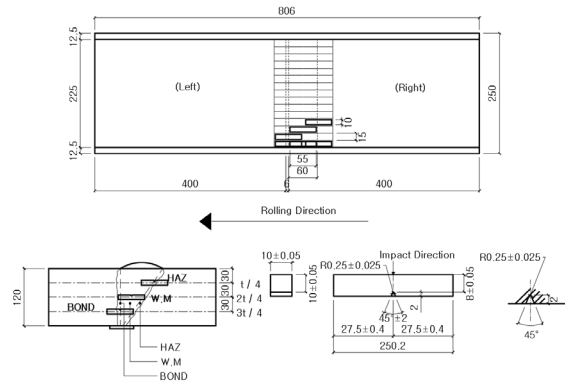


Fig. 8. Weld zone impact piece

용접부 충격시험편은 KS B 0809 「금속 재료 충격시험편」에 따라 V노치 시험편으로 제작하였다. Fig. 8과 같이 노치가 용착금속부(Weld metal), 열영향부(HAZ부), 본드부(Bond, Fusion line)에 위치하도록 하였으며, 노치의 방향은 용접길이 방향으로 하였다. 또한, W1 용접공시체의 두께 1/4 위치에서 열영향부 시험편을, 두께 2/4 위치에서 용착금속부 시험편을, 두께 3/4 위치에서 본드부 시험편을 채취하였다.

용착금속부, 열영향부, 본드부의 충격시험편은 온도별 샤르피 흡수에너지 및 파면율의 분포를 확인하기 위해 5개의 온도영역(20°C, 0°C, -20°C, -40°C, -60°C)에서 3개씩, 총 45개를 제작하였다.

시험은 KS B 0810 「금속 재료 충격시험방법」에 따라 500 N·m급 샤르피 충격시험기를 이용하였으며, 시험편의 냉각은 메탄올(99%)과 드라이아이스를 이용하였다.

4.6 열영향부 최고경도시험

열영향부 최고경도시험은 용접열로 인해 경화되는 용접부 주위의 최고경도를 확인하여 용접성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

열영향부 최고경도시험편은 KS B 0893 「용접 열영향부의 최고경도시험방법」을 참고하여 제작하였다. WMH 공시체에서 Fig. 9와 같이 총 3개의 시험편을 용접길이의 중앙

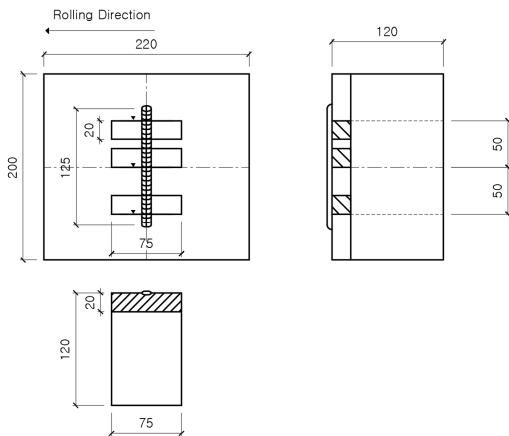


Fig. 9. Maximum hardness piece in HAZ

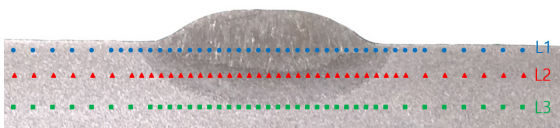


Fig. 10. Measuring line of WMH

과, 중앙에서 양쪽으로 50mm 이격된 지점을 측정면으로 하여 채취하였다.

시험은 KS B 0893 「용접열영향부의 최고경도시험 방법」에 따라 실시하였다. 에칭은 고운 샌드페이퍼(Sand paper)로 측정면을 연마한 뒤 5% 나이탈용액을 측정면에 도포하는 방법을 사용하였다.

Fig. 10과 같이, 에칭으로 확인된 조직의 영역을 바탕으로 용접 최상단부 선, 용접재와 모재가 만나는 최하단 본드부를 지나는 선, 열영향부 최하단부 선을 3개의 경도 측정선으로 하여 모재부는 1mm 간격으로, 열영향부와 용착금속부는 0.5mm 간격으로 경도를 측정하였다. 경도측정은 비커스 경도시험기 및 TS-2000 측정시스템을 활용하였으며, 5kgf 하중으로 5초간 가력하여 측정하였다.

4.7 용접부 경도시험

용접부 경도시험은 용접부 주위의 경도를 측정함으로써 용접부의 건전성을 확인하는 것을 목적으로 한다. 용접부 경도시험편은 Fig. 11과 같이 W1 용접공시체에서 용접 길이방향으로 15mm가 되도록 200mm(L)×15mm(C)×120mm(T)의 크기로 채취하였다.

시험은 KS B 0811 「금속 재료의 비커스 경도시험 방법」에 따라 실시하였다. 경도측정은 비커스 경도시험기 및 TS-2000 측정 시스템을 활용하였다. 에칭은 고운 샌드페이퍼로 측정면을 연마한 뒤 5% 나이탈용액을 측정면에 도포하는 방법을 사용하였다. 모재부 및 용착금속부는 1mm 간격으로 측정하였으며 열영향부는 0.5mm 간격으로 측정하였다. 경도측정은 5kgf의 하중으로 5초간 가력하여 측정하였다.

4.8 용접부 매크로조직시험

용접부 매크로조직시험은 용접부 조직을 육안으로 확인하여 조직의 건전성 평가를 목적으로 한다.

용접부 매크로시험편은 Fig. 11과 같이 W1 용접공시체에서 용접 길이방향으로 15mm가 되도록 200mm(L)×15mm

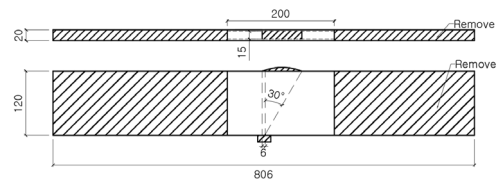


Fig. 11. Weld zone hardness and macroscopic piece

(C)×120mm(T)의 크기로 채취하였다.

시험은 KS D 0210 「강의 매크로조직시험 방법」에 따라 실시하였다. 에칭은 고온 샌드페이퍼로 측정면을 연마한 뒤 5% 나이탈용액을 측정면에 40분~1시간 도포하는 방법을 사용하였다.

4.9 용접부 마이크로조직시험

용접부 마이크로조직시험은 용접부 마이크로조직의 변태 상태를 통하여 건전성을 확인하는 것을 목적으로 한다. 용접부 마이크로조직시험편은 Fig. 4와 같이 23mm(L)×13mm(C)×23mm(T) 크기의 육면체로 용착금속부 내에서 채취하였다. 채취한 시험편을 100배(×100)와 500배(×500)로 확대하여 두 가지 배율로 촬영하였다.

4.10 y형 용접균열시험

y형 용접균열 시험은 용접부에 발생하는 저온균열 여부를 육안으로 확인하여 용접부 수소량 관리, 용접부 잔류응력, 열영향부 경화에 대한 용접성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

KS B 0870 「y형 용접균열 시험 방법」에 따라 별도로 제작된 Wy50, Wy100 공시체에서 y형 용접균열 시험편을 각각 2개씩 채취하였다.

시험은 KS B 0870 「y형 용접균열 시험 방법」에 준하여 실시하였으며, 표면을 고온 샌드페이퍼로 연마한 뒤 5% 나이탈용액을 표면에 40분~1시간 도포 후 용접부 표면 및 단면의 균열발생여부를 확인하였다.

5. 용접성 및 이음성능 시험결과

5.1 용접부 화학성분시험

Table 5는 용접부 화학성분 시험결과 및 용접재(SF-71),

Table 5. Chemical composition analysis result

(unit: %)

| Piece | C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V | Nb | B |
|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|------|------|----|------|------|---|
| WCh-W1-1 | 0.06 | 0.59 | 1.24 | 0.011 | 0.004 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0 | 0.01 | 0.02 | 0 |
| KS*1 | less than 0.20 | less than 0.90 | less than 2.00 | less than 0.030 | less than 0.040 | less than 0.50 | - | - | - | - | - | - |
| KS*2 | less than 0.22 | less than 0.55 | less than 1.60 | less than 0.035 | less than 0.035 | - | - | - | - | - | - | - |

*1 KS of the welding material (SF-71): KS D 7104

*2 KS of the base material (SM490): KS D 3515 (2014)

모재(SM490A)에 대한 KS이다. 용착금속부의 화학성분은 두 KS를 충분히 만족하며, 탄소치는 KS를 상당히 하회하여 용착금속의 용접성을 관리하고 있는 것으로 판단된다. 또한 KS에서 용착금속은 모재와 비슷한 수준으로 화학성분이 관리되고 있으나, 탈산제로 사용되는 규소(Si)와 망간(Mn)의 관리기준치가 높다.

5.2 용착금속부 인장시험

Table 6은 W1 용접공시체 용착금속부의 인장시험 결과이며, Fig. 12는 시험편의 응력-변형률 곡선이다.

Table 6. Tensile test result of weld metal zone

| Piece | Yield strength (N/mm ²) | Tensile strength (N/mm ²) | Elongation (%) |
|----------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| WMT-W1-1 | 508.4 | 585.7 | 32.96 |
| WMT-W1-2 | 505.5 | 591.6 | 33.92 |
| WMT-W1-3 | 506.5 | 589.5 | 31.14 |
| Average | 506.8 | 588.9 | 32.67 |
| KS* | more than 390 | more than 490 | more than 22 |

* KS of the welding material (SF-71): KS D 7104

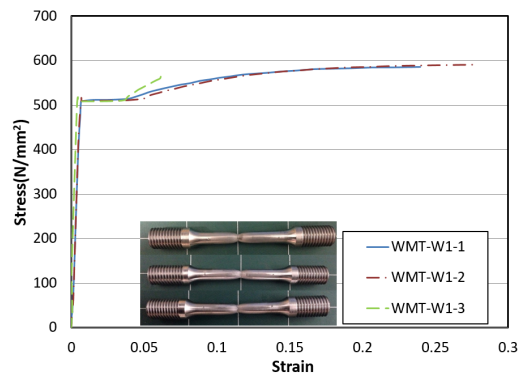


Fig. 12. Stress-Strain curve of WMT-W1-1~3

모든 시험편은 중심부에서 파단이 일어났으며, SF-71에 대한 항복강도, 인장강도, 연신율은 KS를 만족하였다. 또한, 각 시험편의 항복강도, 인장강도, 연신율의 편차는 상당히 작다. 특히 항복강도와 인장강도에 대한 각 시험결과편차는 1% 이하로 나타났으며, 항복강도는 기준 대비 약 30%가 높아 강도에 대한 관리기준이 엄격한 것으로 판단된다.

5.3 용접부 인장시험

모재인 SM490TMC 120mm 강재의 소재인장시험 결과^[3]는 Table 7과 같으며, 용접부 인장시험 결과는 Table 8과 같다. 용접부의 최대인장강도는 평균 514.9N/mm²이며, 파단형

Table 7. Tensile test result of SM490 TMC 120mm^[3]

| Devision | Yield strength (N/mm ²) | Tensile strength (N/mm ²) | Elongation (%) | Yield ratio (%) |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------|-----------------|
| Rolling direction (120mm) | 350.3 | 545.0 | 62.5 | 64.3 |
| KS (120mm) | 285 and above | 490~610 | 23 and above | - |

Table 8. Tensile test result of weld zone

| Piece | Welding method | Failure mode | Tensile strength (N/mm ²) |
|---------|----------------|---------------------|---------------------------------------|
| WT-W1-1 | FCAW | Base metal breaking | 508.0 |
| WT-W1-2 | | | 519.2 |
| WT-W1-3 | | | 517.4 |
| Average | | | 514.9 |

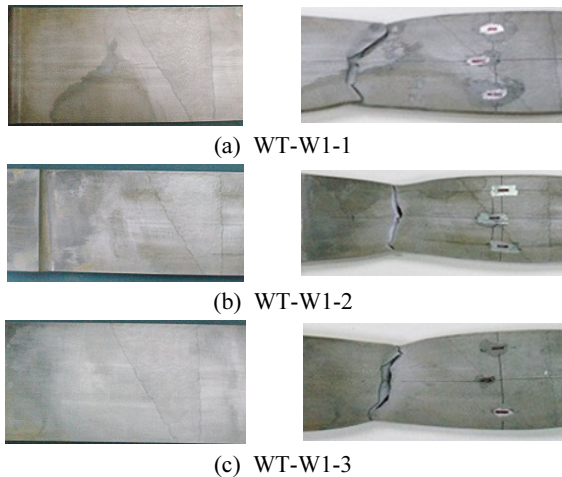


Fig. 13. Breaking mode of WT-W1-1~3

태는 Fig. 13과 같이 모두 모재파단으로 나타났다. 모재의 인장강도는 545.0N/mm²으로 용착금속의 인장강도인 588.9N/mm²(Table 6) 보다 낮아 모재에서 파단이 일어난 것으로 판단된다. 또한, 용접부의 인장강도는 모재의 인장강도 보다 낮으나 KS 하한치인 490N/mm² 보다 높게 나타나, 소요성능을 충분히 발휘하는 것으로 판단된다. Figs. 14~16은 시험편의 응력-변형률 곡선이다. 모재와 용착금속, 열영향부에 부착한 스트레인게이지를 통해 측정된 값이다. 측정 결과는 모재(Base Metal)가 용착금속(Weld Metal) 및 열영향부(HAZ)에 비해 강도가 낮은 것이 확인되고 있으며, 열영향부는 용착금속의 강도와 동일한 경향을 갖는다.

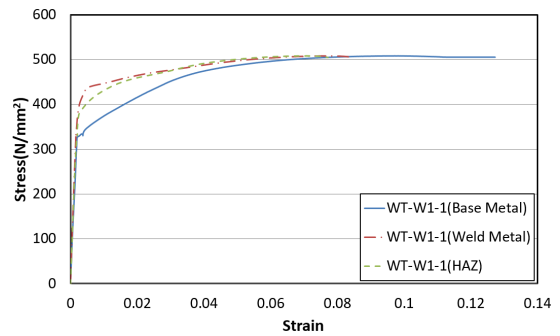


Fig. 14. Stress-Strain curve of WT-W1-1

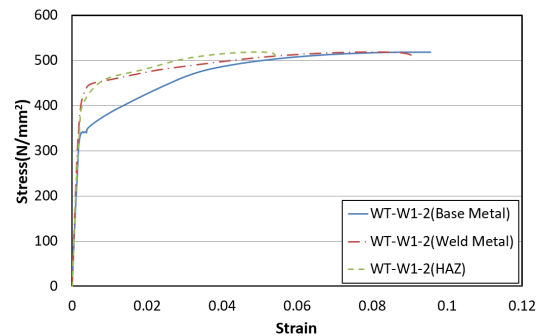


Fig. 15. Stress-Strain curve of WT-W1-2

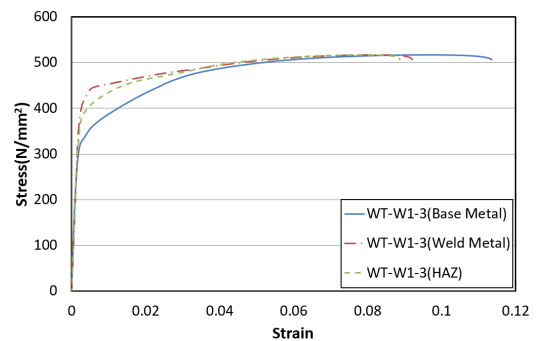


Fig. 16. Stress-Strain curve of WT-W1-3

5.4 용접부 굽힘시험

Table 9와 Fig. 17은 용접부의 굽힘시험 결과이다. 시험 전에칭을 실시한 결과 Fig. 17(a)와 같이 3개의 시험편 모두 용접부에서 불건전한 조직이나 균열은 발견되지 않았다. 굽힘 시험 결과 Fig. 17(b)~(d)와 같이 용접부의 터짐이나 균열은 발견되지 않았다.

따라서 극후판(120mm) 강재의 경우, 정해진 용접절차로 관리하면 터짐이나 균열이 발생하지 않아 건전한 용접부의 성능을 확보할 것으로 판단된다.

Table 9. Bending test result of weld zone

| Piece | Bending type | Test result | Remarks |
|---------|---------------------------|-------------|----------|
| WB-W1-1 | Transverse side bend test | O.K | No crack |
| WB-W1-2 | | | |
| WB-W1-3 | | | |

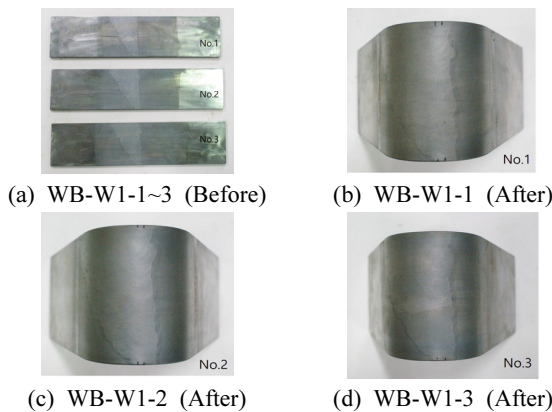


Fig. 17. Bending test result

5.5 용접부 충격시험

Table 10은 용접재 SF-71 및 SM490에 대한 샤르피 흡수에너지의 KS를 나타낸 것이다^{[7],[8]}. 용접부 충격시험 결과는 Table 11과 같으며, Figs. 18~20은 샤르피 흡수에너지와 취성 파면율의 천이온도 곡선이다.

용접부 충격시험 결과, 용착금속(WM)부의 샤르피 흡수에너지는 20°C, 0°C에서는 47J 이상이나, -20°C, -40°C, -60°C에서는 47J 이하이다. 열영향부(HAZ)부의 샤르피 흡수에너지

Table 10. Charpy absorbed energy of KS^{[7],[8]}

| Division | Experimental temperature (°C) | Charpy absorbed energy (J) | piece |
|----------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| SF-71 ^{*1} | 0 | more than 47 | - |
| SM490B ^{*2} | 0 | more than 27 | V notch rolling direction |
| SM490C ^{*2} | 0 | more than 47 | |

*1 KS of SF-71: KS D 7104 (2012)

*2 KS of SM490: KS D 3515 (2014)

Table 11. Impact test result of weld zone

| Piece | Weld zone result of the temperatures (J) | | | | |
|----------|--|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | -60°C | -40°C | -20°C | 0°C | 20°C |
| WC-W1-WM | 10.2 (84.9) | 13.9 (79.3) | 32.2 (69.5) | 77.0 (47.6) | 118.8 (30.9) |
| WC-W1-HA | 14.8 (89.8) | 70.2 (75.8) | 82.4 (62.0) | 166.7 (28.1) | 198.9 (20.3) |
| WC-W1-BD | 14.4 (88.1) | 44.9 (69.4) | 89.9 (52.8) | 117.5 (22.3) | 145.5 (12.6) |

Note () is brittle failure rate (%).

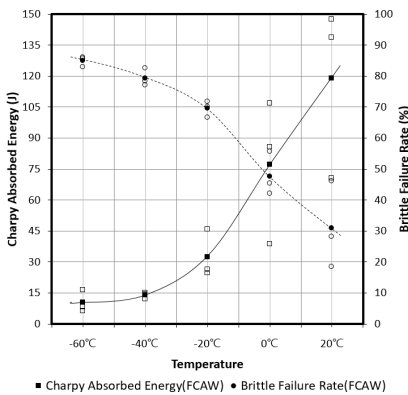


Fig. 18. Transition temperature curve of weld metal

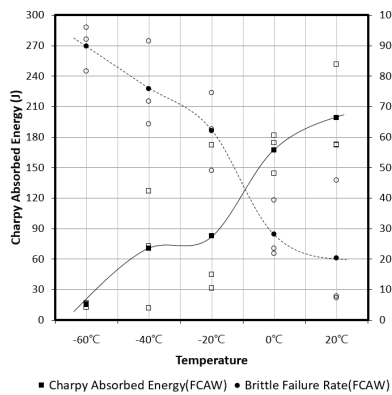


Fig. 19. Transition temperature curve of HAZ

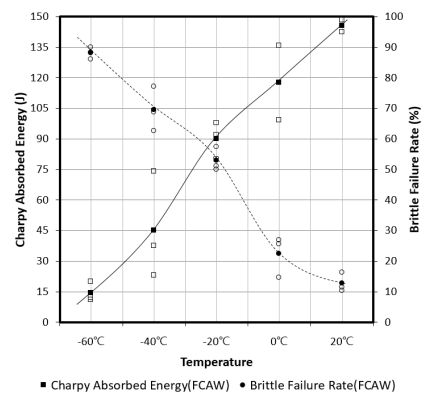


Fig. 20. Transition temperature curve of BOND zone

지는 20°C, 0°C, -20°C, -40°C에서는 47J 이상이나, -60°C의 온도영역에서는 47J 이하이다. 또한, 본드(BOND)부의 샤프피 흡수에너지는 20°C, 0°C, -20°C에서는 47J 이상, -40°C, -60°C에서는 47J 이하로 나타났다. 그러므로 용접부의 샤프피 흡수에너지는 0°C 이상의 경우 47J 이상으로 나타나 SF-71 및 SM490C에 대한 KS를 모두 만족하는 것으로 나타났다.

천이온도는 취성파면을 또는 샤프피 흡수에너지가 급변하는 온도를 나타내는 것으로, 파면 천이온도는 취성파면율이 50%가 되는 온도, 에너지의 천이온도는 취성파면율이 0%가 되는 온도에서의 샤프피 흡수에너지의 1/2의 값에 상당하는

Table 12. Maximum hardness test result

| Piece | Welding method | Max hardness (Hv5) | L2 (Center) max hardness (Hv5) |
|----------|----------------|--------------------|--------------------------------|
| WMH-W1-1 | FCAW | 259.1 | 240.7 |
| WMH-W1-2 | | 288.6 | 236.2 |
| WMH-W1-3 | | 291.3 | 282.9 |

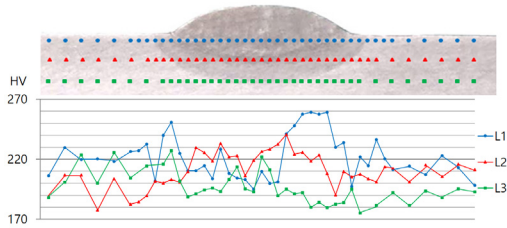


Fig. 21. Hardness distribution of WMH-W1-1

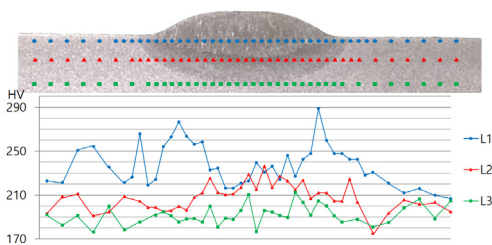


Fig. 22. Hardness distribution of WMH-W1-2

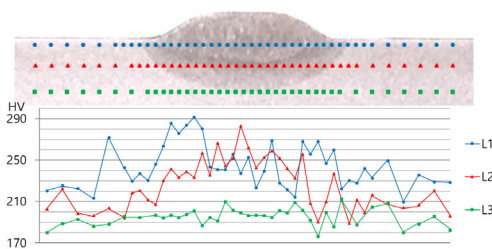


Fig. 23. Hardness distribution of WMH-W1-3

온도이다^[9]. 일반적으로 두 천이온도는 차이가 크지 않으므로 취성파면을 천이온도 곡선과 샤프피 흡수에너지 천이온도 곡선의 교차점을 천이온도라고 한다. Figs. 18~20에서 용착금속부, 열영향부, 본드부의 천이온도는 각각 -2°C, -8°C, -23°C로 나타나 상온에서는 취성파괴가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

5.6 열영향부 최고경도시험

열영향부 최고경도시험 결과는 Table 12, Figs. 21~23과 같다. WMH-W1-2의 측정면은 용접길이의 중앙면이며, WMH-W1-1, WMH-W1-3은 중앙에서 양쪽으로 50mm이격된 측정면이다.

용접부 최고경도는 291Hv로 확인되었으나, 전반적으로 270Hv 이하로 나타났으며, 모재는 220Hv 이하로 나타났다. 또한 최고경도분포는 위치별로 용착금속의 경계면(본드부)의 경도가 높게 나타났으며, 판두께의 중심부보다 표면에 가까운 열영향부가 더 높은 것으로 나타났다. 또한 최고경도는 350Hv를 넘지 않아 용접절차에 의한 용접관리를 잘하면 양호한 용접성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다^[10].

5.7 용접부 경도시험

용접부의 경도시험 결과는 Table 13, Fig. 24와 같다. Table 13에서 용접부의 최대, 최소경도는 용착금속부와 열영향부를 대상으로 하였다. Fig. 24는 W1 용접공시체의 경도분포이다. 용접부의 경도가 최고경도시험보다 낮은 경도 분포를 보여 예 · 후열 관리가 적절하게 된 것으로 판단된다. 또한 경도와 강도의 관계에서^[10] 용접부경도의 최대치 평균(210.8Hv)과 용착금속의 인장강도 평균치(588.9N/mm²)의 비는 2.79배인 것으로 나타났다.

5.8 용접부 매크로조직시험

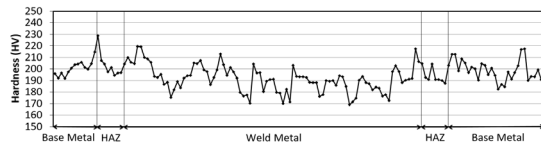
Fig. 25는 W1 용접공시체 용접부의 매크로조직을 나타낸 것이다. 용접부의 육안검사 결과 FCAW 용접부 조직은 건전한 것으로 판단된다.

5.9 용접부 마이크로조직시험

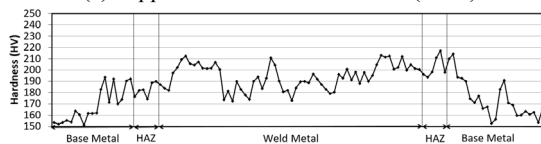
Fig. 26은 용착금속부의 마이크로조직을 나타낸 것이다. (a)는 100배율 현미경으로, (b)는 500배율 현미경으로 관찰한

Table 13. Hardness test result of weld zone

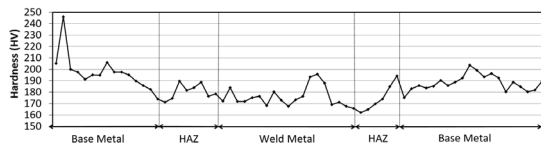
| Piece | Welding method | Measuring line | Weld joint hardness (HV5) | |
|---------|----------------|---------------------|---------------------------|-------|
| | | | Max | Min |
| WH-W1-1 | FCAW | 3mm from the top | 219.6 | 169.2 |
| | | Middle (60mm) | 216.8 | 172.3 |
| | | 3mm from the bottom | 195.9 | 162.2 |



(a) Upper hardness distribution (3mm)



(b) Middle hardness distribution (60mm)



(c) Bottom hardness distribution (3mm)

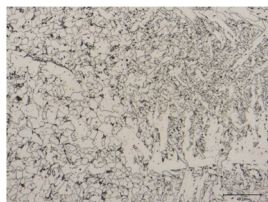
Fig. 24. Hardness distribution of FCAW



Fig. 25. Macroscopic test



(a) FCAW, ×100



(b) FCAW, ×500

Fig. 26. Microscopic test

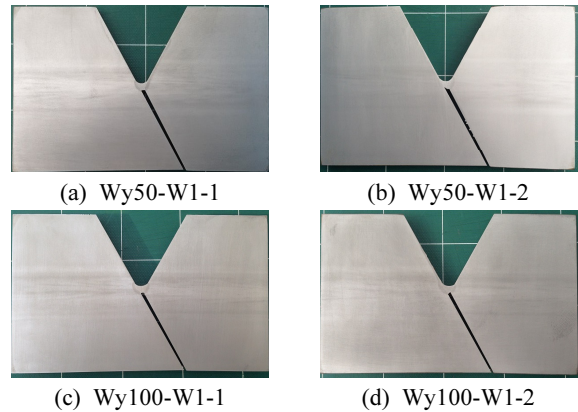


Fig. 27. Y-groove weld cracking test

것이다. 분석 결과, W1 용접공시체의 용착금속부는 인성이 우수한 침상의 페라이트 조직이 잘 발달되어있어 건전한 조직으로 판단된다.

5.10 y형 용접균열시험

Fig. 27은 y형 용접균열 시험편을 부식시킨 후 조직을 관찰한 사진이다. y형 용접균열시험 결과 저온균열은 발생되지 않았고, 용접조직도 건전한 것으로 관찰되어 충분한 용접성과 저온균열 저항성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 그러므로 판두께 120mm의 극후판 강재의 경우 충분한 용접관리를 한다면, 예열온도를 50°C로 관리할 수 있는 것으로 판단된다.

6. 결론

SM490TMC 120mm 강재의 FCAW 용접성 및 이음성능을 확인하기 위하여 10종의 시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 용접재 SF-71에 대한 용착금속부의 화학성분 및 기계적 특성은 KS를 만족하는 것으로 나타났다.
- (2) 용접부 인장시험 결과, 용접부의 인장강도는 490N/mm² 이상으로, 모재파단으로 나타났다. 따라서 FCAW 용접부는 소요성능을 충분히 발휘하는 것으로 판단된다.
- (3) 용접부 충격시험 결과, FCAW 용접부의 용착금속부, 열영향부, 본드부의 샤르피 흡수에너지는 0°C에서 47J 이상으로 나타나 SF-71 및 SM490C에 대한 KS를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 그리고, 용착금속부, 열영향부, 본드부의 천이온도는 각각 -2°C, -8°C, -23°C로 나타

나 상온에서는 취성파괴가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

- (4) 용접부 굽힘시험, 경도시험, 매크로시험, 마이크로조직 시험 및 열영향부 최고경도시험 결과, FCAW는 양호한 용접부로 판단된다.
- (5) y형 용접균열시험 결과 저온균열은 발생하지 않았고, 용접조직도 건전한 것으로 관찰되어 충분한 용접성과 저온균열 저항성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년 한국기술교육대학교 교육연구진흥비 프로그램의 일부 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌(References)

- [1] 한국강구조학회(2014) 강구조설계기준, 국토교통부. KSSC (2014) *Steel Structure Design Code*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- [2] 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).
- [3] 김상섭, 이철호, 이은택, 한태호, 최영한, 김종락(2016) SM490TMC 극후판재 120mm의 소재특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제5호, pp.313-323. Kim, S.S., Lee, C.H., Lee, E.T., Han, T.H., Choi, Y.H., and Kim, J.R. (2016) A Study of Material Characteristics of 120mm-Thick SM490TMC Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.5, pp.313- 323 (in Korean).
- [4] 한국강구조학회(2012) 강구조공사 표준시방서, 구미서관. KSSC (2012) *Steel Structure Construction Standard Specification*, goomiseoguan (in Korean).
- [5] 日本建築學會 (2015) 建築工事標準仕様書 JASS 6 鐵骨工事, 丸善(株). Architectural Institute of Japan (2015) *Japanese Architectural Standard Specification JASS 6 Steel Work*, Maruzen Publishing, Japan (in Japanese).
- [6] 日本溶接協會 (1984), 高張力鋼溶接の實際, 産報出版. The Japanese Welding Engineering Society (1984) *The Practical Knowledge of High Tension Steel Welding*, Sanpo Publishing, Japan (in Japanese).
- [7] KS D 7104 (2012) 연강, 고장력강 및 저온용 강용 아크용접플럭스코어선, 기술표준원, 지식경제부. KS D 7104 (2012) Flux Cored Wires for Gas Shielded and Self-shielded Metal Arc Welding of Mild Steel, High Strength Steel and Low Temperature Service Steel, *Korean Agency for Technology and Standards*, Ministry of Knowledge Economy (in Korean).
- [8] KS D 3515 (2014) 용접 구조용 압연강재, 기술표준원, 지식경제부. KS D 3515 (2014) Rolled Steels for Welded Structures, *Korean Agency for Technology and Standards*, Ministry of Knowledge Economy (in Korean).
- [9] KS B 0810 (2003) 금속재료 충격시험 방법, 기술표준원, 지식경제부. KS B 0810 (2003) Method of Impact Test for Metallic Materials, *Korean Agency for Technology and Standards*, Ministry of Knowledge Economy (in Korean).
- [10] 岡松眞之ほか(1993) 建築構造用鋼材の知識, 鋼構造出版. Masayuki, O., et al. (1993) *Structural steel for building construction*, Steel Structure Publishing, Japan (in Japanese).

요 약 : 본 연구에서는 SM490 TMC 120mm 강재의 FCAW 용접성 및 이음성능을 확인하기 위해 공시체를 제작하고 10종의 시험을 실시하였다. 용접부 화학성분시험, 용착금속부 인장시험, 용접부 인장시험, 충격시험 결과는 KS를 만족하였다. 특히, 용접부 인장시험 결과, 모재에서 파단이 발생하였으며, 소요성능을 충분히 발휘하는 것으로 나타났다. 또한, 용접부 굽힘시험, 경도시험, 매크로시험, 마이크로시험 및 열영향부 최고경도시험 결과, FCAW는 양호한 용접부로 나타났다.

핵심용어 : TMCP, SM490TMC, 용접성능, 이음성능, FCAW