

용접한 건축구조용 강재의 고온 시 기계적 특성에 관한 연구

A Study on the Mechanical Properties of Structural Steels by Welding at High Temperature

조 범 연* 지 남 용**
Cho, Bum-Yean Jee, NamYong

Abstract

This research is to show the mechanical properties of structural steels by welding at high temperature. Welding parts are divided with weld metal and HAZ(Heat Affected Zone). HAZ is formed by interval from welding heat source and heating and cooling rates. Then, the change of both microstructure and mechanical properties occurs. Discontinuity of mechanical and chemical property at HAZ is the cause of safety decrease of structure. At this point, in this research, tensile tests at high temperature with test pieces of base metal and weld metal of SS400 and SM490 are accomplished. From the results, the mechanical properties of both SS400 and SM490 are standardized without welding or non-welding.

키 워 드 : 구조용 강재, 용접, 고온강도
Keywords : structural steel, welding, high temperature strength

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

강재는 화재와 같이 고온에 노출될 경우, 강도 및 탄성의 저하가 발생하는 단점이 있다.⁴⁻⁶⁾ 이에 강재의 내화성능에 대한 연구는 국내외에서 많이 이루어지고 있는 실정이지만, 강재를 건축구조물에 적용하는데 있어 필수공정인 용접에 의해 형성되는 용접부에 대한 내화성능에 관한 연구는 부족한 실정이다.

용접부는 용접 금속(weld metal)과 열영향부(HAZ ; heat affected zone)로 구분할 수 있다. 건축구조물에 주로 사용되는 용융 용접에서 발생하는 고온은 열원으로부터의 거리에 따른 온도 분포 및 가열·냉각속도에 따라 강재의 기계적 성질의 변화를 야기한다. 특히 급열·급냉의 용접공정에 따른 연성 및 인성 저하에 의하여 용접부재는 구조물의 취약부로 작용할 수 있다.⁷⁾

따라서 본 연구에서는 용접한 건축구조용 강재의 고온 시 기계적 특성을 파악하여 강구조 내화설계 시 활용할 수 있는 기초자료로 제시하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 국내 건축구조물에서 사용되고 있는 대표적인 강

재인 SS400과 SM490을 플럭스 코어드 아크 용접(FCAW)하여, 비용접부위와 용접부위에서 시험편을 채취하여 상온 및 고온에서 한국산업규격(KS)에 따라 탄성계수, 항복강도, 인장강도, 연신율을 파악하여 용접한 건축구조용 강재의 고온 시 기계적 특성을 파악하였다.

2. 실험개요

2.1 실험인자 및 수준

본 연구에서는 용접한 건축구조용 강재의 고온 시 기계적 특성을 알아보기 위하여 표 1과 같은 실험인자 및 수준으로 그림 2와 같이 비용접부위와 용접부위에서 시험편을 채취하여 상온 및 고온에서 인장시험을 실시하였다. 고온의 경우 5℃/min의 속도로 600℃까지 가열하여 600℃에서 10분간 유지한 후 하중을 가하였다.

표 1 실험인자 및 수준

| 실험인자 | 수준 | 수준 수 |
|------|--------------|------|
| 강종 | SS400, SM490 | 2 |
| 부위 | 비용접부, 용접부 | 2 |
| 온도 | 상온, 600℃ | 2 |

* 한양대학교 대학원 건축환경공학과 석사과정

** 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사

2.2 사용재료

2.2.1 강재

SS400과 SM490의 기계적 성질에 대해서는 각각 KS D 3503 「일반구조용 압연강재」와 KS D 3515 「용접구조용 압연강재」에서 표 2와 같이 규정하고 있다. 표 2의 기계적 성질은 시험편 치수인 지름 10mm 봉강에 대한 기준치이다.

표 2 건축구조용 강재의 기계적 성질 규격

| 강종 | 항복강도(MPa) | 인장강도(MPa) | 최소연신율(%) |
|-------|-----------|-----------|----------|
| SS400 | 245이상 | 400~510 | 20이상 |
| SM490 | 325이상 | 490~610 | 17이상 |

2.2.2 용접재

용접재는 AWS D1.1(American Welding Society)의 규정에 따라 직경 1.4mm의 플러스 코어드 와이어(flux cored wire)를 사용하였으며 기계적 성질은 표 3과 같다.

표 3 용접재의 기계적 성질

| 항복강도 (MPa) | 인장강도 (MPa) | 최소연신율 (%) |
|------------|------------|-----------|
| 548 | 582 | 28 |

2.3 시험편 제작

2.3.1 용접조건

시험편 제작을 위해 25mm 두께의 SS400과 SM490 강판을 FCAW법으로 맞대기 용접을 실시하였다. 용접조건은 AWS D1.1의 규정에 따라 실시하였다. 용접단면은 양면개선(X-groove)으로 개선각은 60°로 설계하였다. 개선형상 및 상세는 그림 1과 같으며, 용접조건은 표 4와 같다.

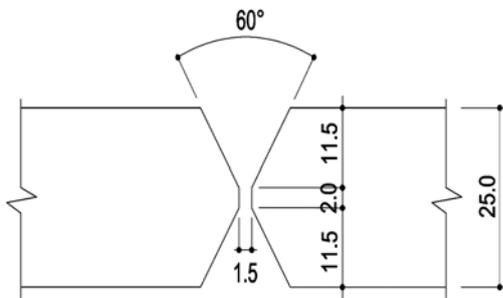


그림 1 개선형상 및 상세(mm)

표 4 용접조건

| 조건 | 범위 |
|------|--------------|
| 전류 | 260~300 A |
| 전압 | 28~32 V |
| 용접속도 | 25~35 cm/min |

2.3.2 시험편 채취위치 및 상세

그림 2와 같이 용접부위와 비용접부위에서 인장시험편을 채취하였으며, 시험편은 고온인장시험기(Shimadzu사의 고온챔버를 장착한 UTM) 규격에 맞게 JIS G 0567의 II-10호 시험편을 기준으로 상온 및 600°C용으로 각각 3개씩 제작하였다. 시험편의 형상 및 치수는 그림 3과 같다.

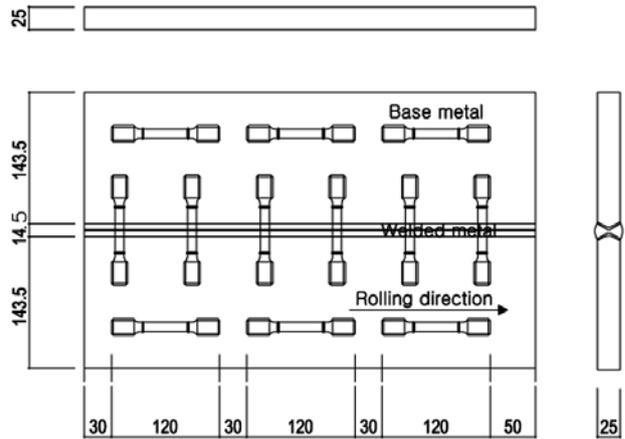


그림 2 시험편의 채취위치(mm)

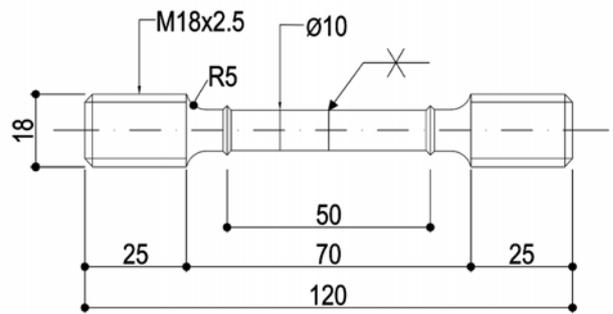


그림 3 시험편 형상 및 치수(mm)

2.4 실험방법

상온 및 고온 인장시험은 KS B 0802 「금속재료의 인장시험방법」과 KS D 0026 「철강재료 및 내열합금의 고온인장시험방법」을 기준으로 실시하였다.

시험은 포항산업과학연구원(RIST) 소재의 장비로 Shimadzu사의 10mm까지 변위를 측정할 수 있는 변위계와 고온챔버를 장착한 UTM을 이용하여 실시하였다. 이에 최대 변형도 0.2까지의 응력-변형도 곡선을 이용하여 탄성계수와 항복강도를 구하였다. 이때 항

복강도는 상온과 600℃에서 동일하게 0.2% offset법을 이용하여 산정하였다. 또한 최대하중 값으로 인장강도를 구하였으며, 인장시험 후 연신된 시험편의 표점거리를 측정하여 연신율을 산출하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기계적 특성

3.1.1 SS400

SS400의 비용접부재와 용접부재에 대하여 상온 및 600℃에서 인장시험을 실시한 결과, 응력-변형도 곡선은 그림 4와 같다. 기계적 특성은 표 5와 같다.

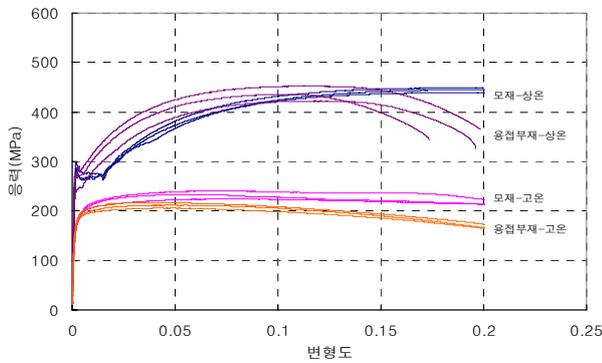


그림 4 SS400의 부위 및 온도에 따른 응력-변형도 곡선

표 5 SS400의 온도변화에 따른 기계적 특성

| 부위 | 온도 (°C) | 측정항목 | 평균값 | 표준편차 | 변동계수 (%) |
|-------|---------|-----------|--------|----------|----------|
| 비용접부재 | 상온 | 탄성계수(MPa) | 193620 | 4658,55 | 2,41 |
| | | 항복강도(MPa) | 272 | 6,74 | 2,48 |
| | | 인장강도(MPa) | 445 | 4,11 | 0,92 |
| | | 연신율(%) | 32 | 0,17 | 0,51 |
| 비용접부재 | 600 | 탄성계수(MPa) | 151285 | 1131,10 | 0,75 |
| | | 항복강도(MPa) | 185 | 1,47 | 0,80 |
| | | 인장강도(MPa) | 233 | 6,52 | 2,80 |
| | | 연신율(%) | 37 | 1,45 | 3,98 |
| 용접부재 | 상온 | 탄성계수(MPa) | 210139 | 15970,51 | 7,60 |
| | | 항복강도(MPa) | 267 | 14,84 | 5,56 |
| | | 인장강도(MPa) | 437 | 12,45 | 2,85 |
| | | 연신율(%) | 20 | 1,20 | 6,08 |
| 용접부재 | 600 | 탄성계수(MPa) | 156336 | 10882,39 | 6,96 |
| | | 항복강도(MPa) | 187 | 3,77 | 2,02 |
| | | 인장강도(MPa) | 211 | 4,51 | 2,13 |
| | | 연신율(%) | 30 | 1,32 | 4,40 |

실험결과 표 5에서 알 수 있듯이 용접에 의한 성능의 변동폭이

발생하였음을 알 수 있다. 그림 5는 KS D 3503 「일반구조용 압연강재」 및 허용응력 설계법에 의한 강구조설계기준(2003)에서 정하고 있는 항복강도 및 인장강도의 허용치와의 관계를 나타낸 것이다. 항복강도의 경우 600℃에서 비용접부재와 용접부재 모두 항복강도 기준치의 75%로 허용치 60%(147MPa)를 상회하였고, 인장강도의 경우 600℃에서 비용접부재와 용접부재 모두 인장강도 기준치의 53%로 허용치 50%(200MPa)를 상회하여 용접유무에 관계없이 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다. 연신율은 용접부재가 비용접부재에 비해 상온에서 61%, 600℃에서 82%의 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 전술한 바와 같이 용접유무에 따른 성능의 변화가 크므로 용접 시 이에 대한 관리가 필요하다.

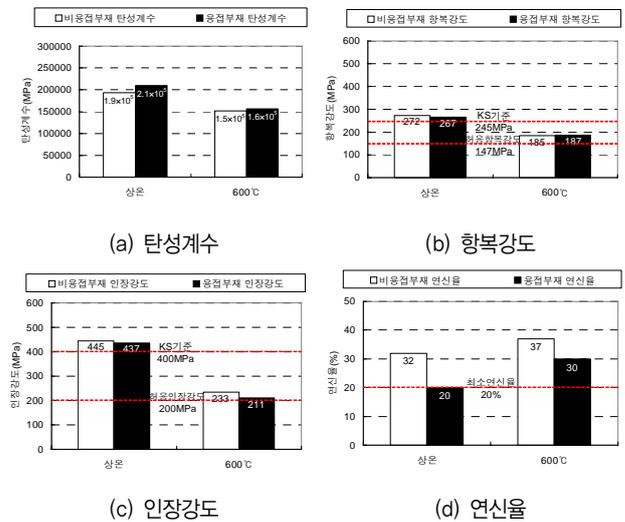


그림 5 SS400의 온도변화에 따른 기계적 특성

3.1.2 SM490

SM490의 비용접부재와 용접부재에 대하여 상온 및 600℃에서 인장시험을 실시한 결과, 응력-변형도 곡선은 그림 6과 같고, 기계적 특성은 표 6과 같다.

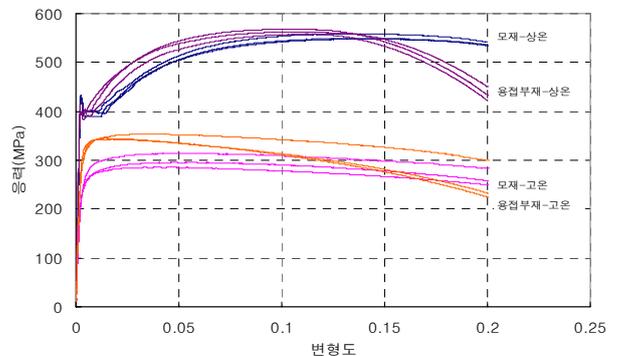


그림 6 SM490의 부위 및 온도에 따른 응력-변형도 곡선

표 6 SM490의 온도변화에 따른 기계적 특성

| 부위 | 온도 (°C) | 측정항목 | 평균값 | 표준편차 | 변동계수 (%) |
|--------|---------|-----------|--------|---------|----------|
| 비용접 부재 | 상온 | 탄성계수(MPa) | 201885 | 2679.85 | 1.33 |
| | | 항복강도(MPa) | 398 | 6.50 | 1.63 |
| | | 인장강도(MPa) | 552 | 4.86 | 0.88 |
| | | 연신율(%) | 30 | 0.69 | 2.28 |
| | 600 | 탄성계수(MPa) | 134577 | 9646.70 | 7.17 |
| | | 항복강도(MPa) | 248 | 6.37 | 2.57 |
| | | 인장강도(MPa) | 298 | 11.34 | 3.80 |
| | | 연신율(%) | 31 | 0.70 | 2.28 |
| 용접 부재 | 상온 | 탄성계수(MPa) | 209381 | 5464.09 | 1.51 |
| | | 항복강도(MPa) | 393 | 5.60 | 2.61 |
| | | 인장강도(MPa) | 563 | 4.29 | 0.76 |
| | | 연신율(%) | 22 | 0.80 | 3.67 |
| | 600 | 탄성계수(MPa) | 157041 | 6603.84 | 4.21 |
| | | 항복강도(MPa) | 312 | 8.70 | 2.79 |
| | | 인장강도(MPa) | 347 | 4.78 | 1.38 |
| | | 연신율(%) | 25 | 1.37 | 5.46 |

실험결과 표 6에서 알 수 있듯이 SM490의 경우 용접에 따른 성능의 변동폭이 SS400 보다 적은 것으로 나타났다. 그림 7은 KS D 3515 「용접구조용 압연강재」 및 허용응력 설계법에 의한 강구조설계기준(2003)에서 정하고 있는 항복강도 및 인장강도의 허용치와의 관계를 나타낸 것이다. 항복강도의 경우 600°C에서 비용접부재와 용접부재 모두 항복강도 기준치의 76%로 허용치 60%(195MPa)을 상회하였고, 인장강도의 경우 600°C에서 비용접부재와 용접부재 모두 인장강도 기준치의 61%로 허용치 50%(245MPa)을 상회하여 용접유무에 관계없이 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다. 연신율은 용접부재가 비용접부재에 비해 상온에서 72%, 600°C에서 82%의 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 전술한 바와 같이 용접유무에 따른 성능의 변화가 크므로 용접 시 이에 대한 관리가 필요하다.

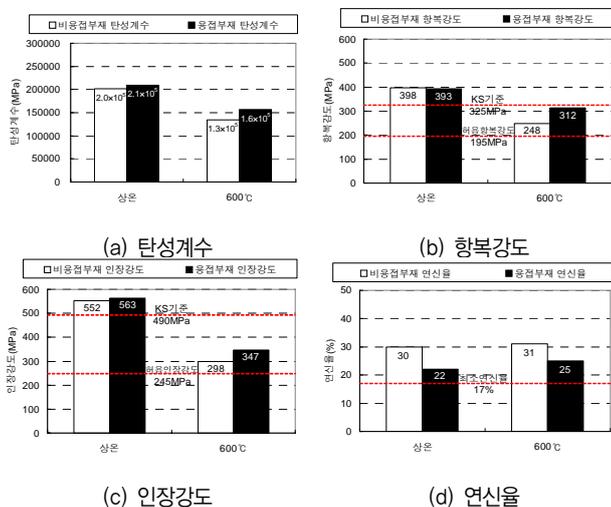


그림 7 SM490의 온도변화에 따른 기계적 특성

4. 결 론

본 연구에서는 용접한 건축구조용 강재의 고온 시 기계적 특성 파악을 통해 강구조 내화설계 시 활용할 수 있는 기초자료로 제시하기 위해 상온 및 고온에서 인장실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) SS400의 인장실험결과, 600°C에서 용접부재의 항복강도는 항복강도 기준치의 75%로 허용치를 상회하는 것으로 나타났고, 인장강도는 인장강도 기준치의 53%로 허용치를 상회하는 것으로 나타났다. 연신율은 용접부재가 비용접부재에 비해 상온에서 61%, 600°C에서 82%의 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.
- 2) SM490의 인장실험결과, 600°C에서 용접부재의 항복강도는 항복강도 기준치의 76%로 허용치를 상회하는 것으로 나타났고, 인장강도는 인장강도 기준치의 61%로 허용치를 상회하는 것으로 나타났다. 연신율은 용접부재가 비용접부재에 비해 상온에서 72%, 600°C에서 82%의 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.

본 연구의 실험 결과 600°C에서 용접부재의 내화성능은 기준치를 만족하는 것으로 나타났으나, 향후 파단부의 미세조직을 관찰하고 용접중심선을 기준으로 파단위치를 추정하여 용접부위에서 취약부를 파악하여 용접부재의 내화성능에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회, 용접접합 편람, 1998
2. 한국강구조학회, 「허용응력설계법에 의한 강구조설계기준」 2003.12
3. 권인규, 지남용, SS400 강재의 고온 시 기계적 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집 구조계 제17권 제5호, 2001
4. 日本建築学会, 建築構造用鋼材および金属系素材に関する技術資料, 2002
5. American Welding Society, AWS D1.1/D1.1M: STRUCTURAL WELDING CODE STEEL 2006
6. Andrew H. Buchanan, Structural Design for Fire Safety, John Wiley & Sons Ltd, 2002
7. Eurocode 3, Design of Steel Structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, 2005
8. Kenneth Easterling, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths, 1983
9. William D. Callister, Jr, Materials Science and Engineering : An Introduction, John Wiley & Sons, Inc, 2006
10. Y.C. Wang, Steel and Composite Structures: Analysis and Design for Fire Safety, Spon Press, 2003