

SM570-TMC 강의 고온 시 기계적 성질 및 용접접합부의 잔류응력 특징

Characteristics of Mechanical Properties at Elevated Temperatures and Residual Stresses in Welded joint of SM570-TMC Steel

이진형¹⁾ · 장경호²⁾ · 박현찬³⁾ · 이진희⁴⁾

Lee, Chin Hyung · Chang, Kyong Ho · Park, Hyun Chan · Lee, Jin Hee

요약: 최근 건설되는 강교량은 지간의 장대화 및 교량으로서의 기능은 물론이고 외적 조형미, 유지관리, 공사기간과 수명주기비용 등을 고려한 구조적 단순함을 요한다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 극후판이나 TMCP 강과 같은 고성능 강의 사용이 요구된다. TMCP (Thermo-Mechanical Control Process)법에 의해 제조되는 TMCP 강은 탄소당량이 적고, 조직이 미세하며, 강도 및 인성이 좋다. 최근에는 인장강도 600MPa급의 고강도 TMCP 강인 SM570-TMC 강이 개발되어 토목구조물에 일부 적용되고 있으며, 점차 그 영역을 확장하려는 추세에 있다. 하지만 이러한 고강도 TMCP 강을 강구조물에 적용하기 위해서는 그 재료적 특성뿐만 아니라 용접시 발생하는 접합부의 역학적 특징을 명확히 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 고온인장실험을 통해서 SM570-TMC 강의 고온시의 기계적 특성을 조사하였고, 이를 3차원 열탄소성해석에 도입하여 SM570-TMC 강의 용접시 발생하는 잔류응력 특징을 명확히 하였다.

ABSTRACT: Recently constructed bridges often have long spans and simple structure details considering not only the function but other important factors such as aesthetics, maintenance, construction duration and life cycle cost. Therefore, bridges require high-performance steels like extra-thick plate steels and thermo-mechanical control process (TMCP) steels. TMCP steels are now gaining wide attention due to their weldability for less carbon equivalent. Such steels also have improved strength and toughness. Recently, SM570-TMC steel, which is a high-strength TMCP steel with a tensile strength of 600 MPa, has been developed and applied to steel structures. However, using this steel in building steel structures requires the elucidation of not only material characteristics but also the mechanical characteristic of welded joints.

In this study, high-temperature tensile properties of SM570-TMC steel were investigated through the elevated temperature tensile test and the characteristics of residual stresses in welded joints of SM570-TMC steel were studied through the three-dimensional thermal elastic-plastic analyses on the basis of mechanical properties at high temperatures obtained from the experiment.

핵심용어: 고온인장특성, TMCP 강, 고온인장실험, 잔류응력, 3차원 열탄소성해석

KEYWORDS: High Temperature Tensile Properties, TMCP Steel, Elevated Temperature Tensile Test, Residual stresses, Three-dimensional thermal elastic-plastic analyses

1. 서론

최근 장대화된 교량과 같은 대형 강구조물에서는 일반 구조용 강판의 경우보다 강도가 높고 구조적 성능이 우수한 고강도·고성능 강재의 사용이 요구되고 있다. 고강도·고성능 강

의 사용에 따른 문제점으로는 용접부 균열, 용접결함, 열영향부의 인성저하 등을 예상할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 강도, 용접성, 용접부 인성 등 재료의 성질이 우수하고, 경제적으로 타당성이 있는 구조용 강재가 요구된다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 TMCP 강(김희진 등, 1986; 김

1) 교신저자, 한국철도기술연구원 기촌철도기술개발사업단, 공학박사
(Tel. 031-460-5688, Fax. 031-460-5699, E-mail: ifinder@hanmail.net)

2) 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 교수(E-mail: changkor@cau.ac.kr)

3) 중앙대학교 토목공학과 박사과정(jamilachan@hanmail.net)

4) 중앙대학교 토목공학과 박사과정(senior@naver.com)

본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

영식 등, 1990)을 생산하여 실제 구조물에 사용하고 있다. 제강, 제어가열, 제어압연, 제어냉각을 유기적으로 결합하여 이들의 공정조건을 통일적으로 규제함으로써 성형 완료시 재료에 최고의 재료특성을 부여하도록 하는 기술체계라 정의되고 있는 제어 압연법, 즉 TMCP(Thermo-Mechanical Control Process) 법에 의해 제조되는 강은 탄소당량이 작고, 조직이 미세하며, 강도 및 인성이 좋다. 또한 종래의 강에 비해 용접성이 뛰어나고, 취성과파괴에 대한 저항능력이 우수하며, 극후판 강재에서도 고강도, 고인성을 확보할 수 있다. 최근에는 인장강도 600MPa 급의 고강도 TMCP 강인 SM570-TMC 강이 개발(임성우 등, 2005)되어 토목구조물에 일부 적용되고 있으며, 점차 그 영역을 확장하려는 추세에 있다. 하지만 이러한 고강도 TMCP 강을 강구조물에 적용하기 위해서는 그 재료적 특성뿐만 아니라 용접시 발생하는 접합부의 역학적 특성을 명확히 할 필요가 있다. 대부분의 강과 마찬가지로 TMCP 강도 용접에 의해 제작되어 지는데, 용접시에는 필연적으로 용접잔류응력과 용접잔류변형이 발생하여 구조물에 악영향을 미친다. 그리고 고강도 TMCP 강의 경우에는 더 큰 용접잔류응력과 용접잔류변형이 발생하리라고 판단된다. 따라서 용접시에 발생하는 이들의 정량적인 크기와 그 생성 메카니즘을 규명하는 것은 대단히 중요하다. 잔류응력과 잔류변형의 크기 및 그 생성 메카니즘의 규명에 있어 구조물이 복잡해질수록 실험에 의해서는 한계가 있으므로 수치해석을 통하여 규명하는 것이 일반적이다. 그리고 수치해석에 의한 용접 시뮬레이션에는 반드시 강재의 기계적 제성질의 온도의존성을 알아야 한다. 따라서 본 연구에서는 고온인장실험을 실시하여 SM570-TMC 강의 고온시의 기계적 제성질을 조사하였고, 이를 수치해석에 도입하여 SM570-TMC 강의 용접시 발생하는 잔류응력의 특성을 조사하였다. 또한 SM570-TMC 강의 잔류응력 측정실험을 실시하여 이를 수치해석의 결과와 비교하였다.

2. SM570-TMC 강의 고온시의 기계적 제성질

열탄소성 해석 시 필요한 SM570-TMC 강의 기계적 제성질의 온도의존성을 조사하기 위하여 고온인장시험을 실시하였다.

2.1 시험시편

본 실험에 사용한 재료는 최근 국내에서 개발된 인장강도 600MPa급의 SM570-TMC 강재이며, 두께 20mm인 판에서 고온인장시험편을 채취하였다. 인장 시험편은 KS D 0026의 철강재료 및 내열 합금의 고온인장시험 방법에 따라 제작하였으며, 그 치수 및 형상은 그림 1에 나타내었다. 시험편의 양

끝은 나선으로 되어 있어 전기로의 위아래에 있는 지그에 고정 되도록 하였다. 이 나선들은 시험편의 중앙에서 일어나는 시험편의 파단에는 영향을 주지 않도록 하였다.

2.2 고온인장시험방법

그림 2와 같이 U.T.M에 열선에 의해 가열되는 전기로를 설치한 후 전기로의 온도를 변화시키면서 실험을 실시하였다. 고온인장시험은 상온 (20℃) ~ 800℃의 시험온도범위에서 10 0℃ 간격으로 전기로를 사용해서 가열하고, 시험편 평행부의 온도를 균일화시키기 위하여 시험온도에서 20분간 유지한 후, 1mm/min의 인장속도로 시험을 행하였다. 전기로의 온도 오차는 ±2℃의 범위가 되게 하였으며, 가열시에 시험편에 발생하는 힘을 '0'으로 유지함으로써 열에 의한 시험편의 열팽창이 일어나도록 하였다. 실험이 끝난 후 시험편 형상의 한 예를 그림 3에 나타내었다.

2.3 실험결과 및 고찰

SM570-TMC 강의 고온에서의 강도저하를 그림 4에 나타내었다. 그리고 SM570-TMC 강과의 비교를 위해 용접구조용 압연강재인 SM570 강의 고온 시 기계적 특성(일본강구조학회 내화소위원회, 1968)을 그림 5에 나타내었다. SM570-TMC 강의 경우 인장강도는 100℃까지 완만하게 저하되다가 온도가 올라가면 동적변형시효(dynamic strain aging, Suleyman 등, 2005)로 인해 인장강도가 증가하기 시작하여 400℃부근에서 최대치가 된 후 감소함을 알 수 있다. 반면에 SM570 강의 경우는 300℃까지는 인장강도가 완만하게 저하되다가 400℃부근에서 최대치가 된 후 감소함을 알 수 있다.

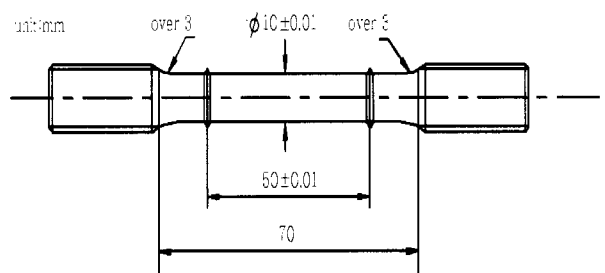


그림 1. 고온인장 시험편 형상

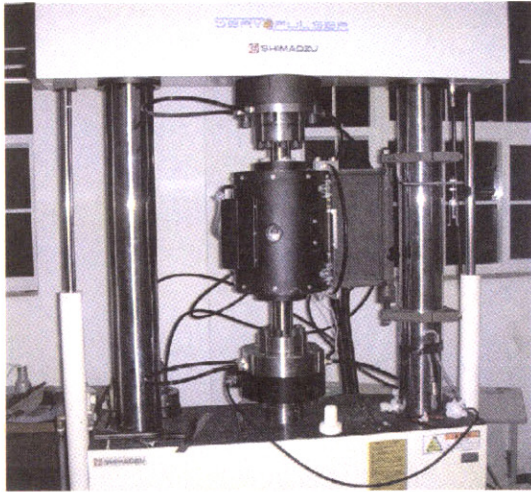


그림 2. 실험 전경

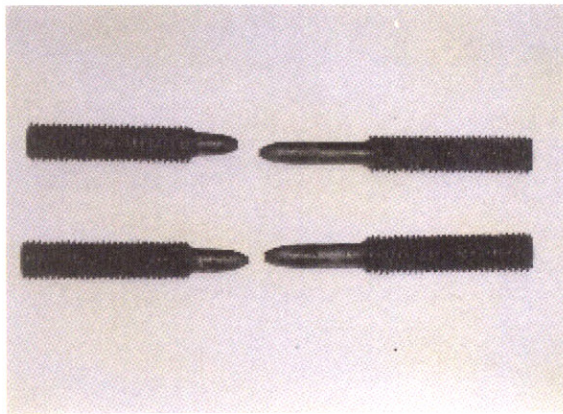


그림 3. 700°C에서 실험을 행한 후의 시험편 형상

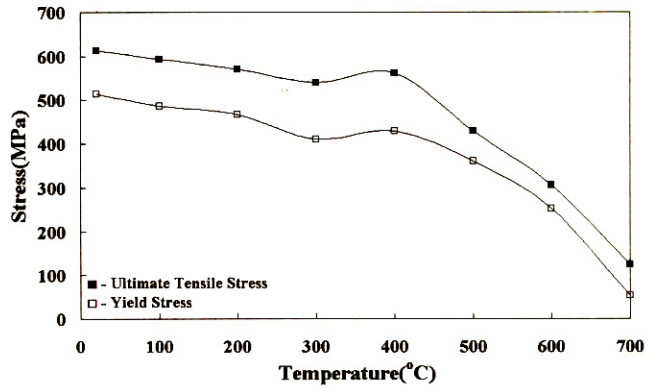


그림 5. SM570 강 의 고온에서의 항복응력 및 인장강도

근에서는 그 크기의 차이가 약 2배 정도(SM570-TMC: 260MPa, SM570 강: 125MPa) 차이가 남을 알 수 있다. SM570-TMC 강과 SM570 강 의 고온시의 항복응력의 경우도 인장강도의 경우와 마찬가지로 100°C부근을 제외하고는 SM570-TMC 강 의 고온에서의 항복응력이 SM570 강보다 큼을 알 수 있다. SM570-TMC 강 의 고온에서의 인장강도 및 항복응력이 SM570 강보다 큰 것은 SM570-TMC 강 의 제조시 제어냉각에 의한 조직의 미세화(김희진 등, 1986)로 인해 고온에서도 기계적 성질이 우수하기 때문으로 사료된다.

3. SM570-TMC 강 용접부의 잔류응력 특징

3.1 실험편의 제작

SM570-TMC강의 용접시 발생하는 잔류응력의 특징을 조사하기 위해 미세조직 관찰 및 잔류응력 측정 실험을 수행하였다. 이를 위해 용접시편을 제작하였으며 시험편의 전체 폭(B)과 길이(L)는 600mm이고 두께(t)는 20mm의 크기로서 그림 6과 같은 형태로 제작하였다. 시편 제작 시 용접방법 및 용접재료는 표 1과 같으며 용접재료의 기계적 성질 및 화학성분은 표 2와 표 3에 나타내었다. 용접재료의 기계적 성질은 제조자의 성적서(KWS 및 JIS 규격)를 인용하였다. 예열은 하지 않고 본용접을 실시하였으며 본 용접은 표 4과 같이 FCAW (Flux Cored Arc Welding)로 총 4PASS 용접을 실시하였다. 전면 용접 후 후면 용접시 가우징을 먼저 실시하여 후면의 불연속면 및 결함과 공극이 있는 부분을 제거한 후에 다시 용접을 실시하여 시편을 제작하였다. 패스 층간 온도는 200°C 온도 쇼크를 사용하여 200°C이하가 되게 하였다.

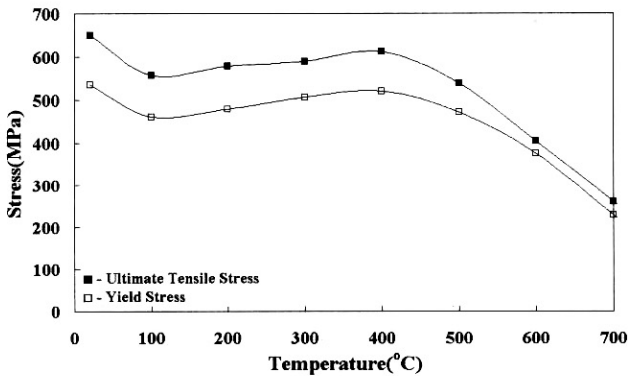


그림 4. SM570-TMC 강 의 고온에서의 항복응력 및 인장강도

또한 SM570-TMC 강과 SM570 강 의 고온에서의 항복응력은 감소의 저하경향이 인장강도와 비슷함을 알 수 있다. 이상의 결과에서 SM570-TMC 강과 SM570 강 의 고온시의 인장강도를 비교해 보면 100°C부근을 제외하고는 SM570-TMC 강 의 고온에서의 인장강도가 SM570 강보다 크며, 700°C 부

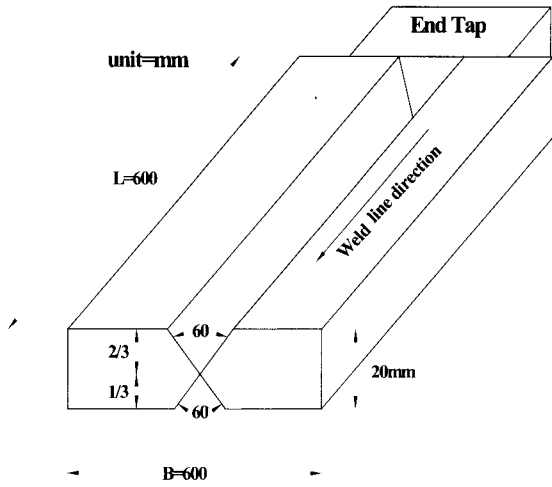


그림 6. 시험편의 크기 및 형상

표 1 용접방법 및 용접재료

모재	용접방법	용접재료
SM570-TMC	FCAW	Supercored81 (1.2φ)

표 2 용접재료의 기계적 성질

항복점 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)
582	610	27

표 3 용접재료의 화학성분(mass, %)

C	Si	Mn	P	S
0.03	0.35	1.12	0.013	0.017

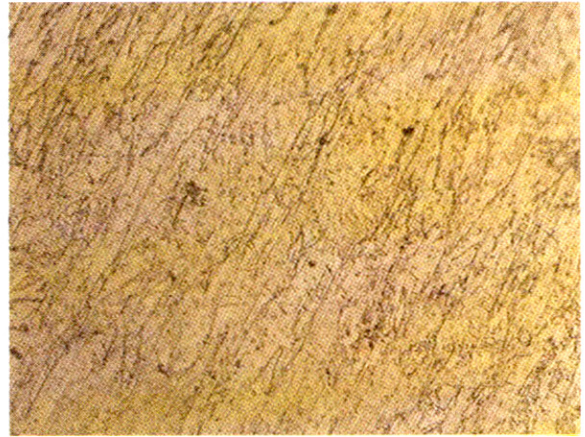
표 4 용접조건

PASS	전류(A)	전압(V)	속도(시간)	비고
1	250	30	3' 12"	가우징
2	260	35	4' 42"	
3	250	30	2' 51"	
4	280	35	4' 06"	

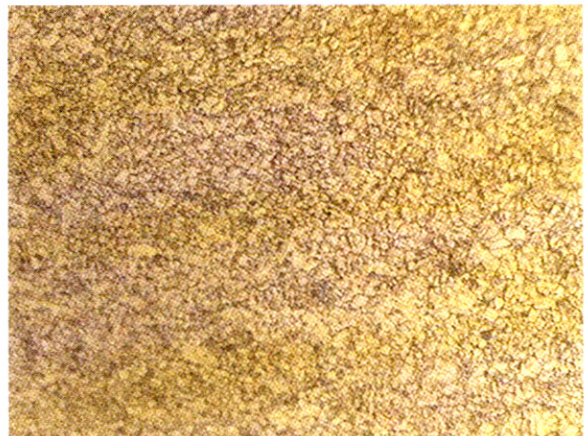
3.2 미세조직

용접이 끝난 후 용접부와 용접부 근방의 열영향부(HAZ) 및 모재를 절단하여 샘플(sample)을 채취 한 후 폴리싱(polishing)을 하고 2% Nital의 에칭제(etchant)를 이용하여 20~30초 동안 에칭한 후 광학현미경을 이용하여 미세조직

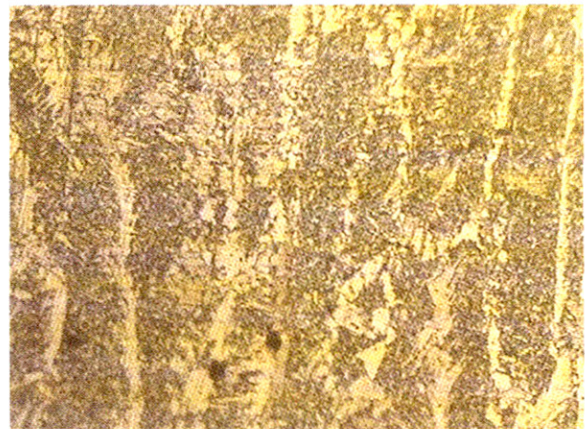
을 관찰하였다. 사용한 광학현미경은 OLYMPUS PME3 모델로써 600배율의 크기로 미세조직을 촬영하였다. 그림 7에 그 결과를 나타내었다. 그림 7의 (a), (b), (c)는 각각 모재, 용접부 및 열영향부의 미세조직을 나타낸 것이다. 결과를 보면 모



(a) 모재 (×600)



(b) 열영향부 (×600)



(c) 용접부 (×600)

그림 7. 미세조직

재에서는 베이나이트(Bainite) 조직을 나타냄을 알 수 있으며, 용접시 오스테나이트화 온도 이상으로 가열된 열영향부에서는 베이나이트와 페라이트(Bainite+Ferrite)의 혼합 조직을 나타냄을 알 수 있다. 그리고 용접부에서는 초석 페라이트와 Acicular Ferrite가 부분적으로 보이는 미세 Pearlite의 혼합조직을 나타냄을 알 수 있다. 즉, SM570-TMC 강은 용접중에 오스테나이트화 온도 이상으로 가열된 용접부와 열영향부에서 용접 후 공기중에서 냉각하는 과정에서 상변태(마르텐사이트변태)가 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서 용접부 및 열영향부에서 상변태에 의한 잔류응력의 완화(Satoh 등, 1976; Taljat 등, 1998)는 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

3.3 잔류응력 측정

시편을 제작한 후 절단법으로 잔류응력을 측정하기 위해 게이지를 부착하였다. 사용된 게이지의 제원은 표 5와 같으며 부착한 게이지의 위치는 그림 8에 나타내었다. 용접부 및 열영향부에서의 잔류응력의 특징을 관찰하기 위해 용접부와 열영향부에 게이지를 집중해서 부착하였다. 게이지를 부착하고 초기변형률을 측정한 후 시편을 게이지 부분별로 그림 9와 같이 절단법을 실시하여 잔류응력을 측정하였다. 그림 10에 용접선 방향의 잔류응력 측정 결과를 나타내었다. 여기서 실선은 용접선에 수직인 단면으로의 3차원 열탄소성 유한요소 해석을 수행하여 얻어진 결과이다.

표 5 게이지 제원

게이지 종류	사용 개수	Gage Factor	게이지 크기
2축 Strain Gage	18개	2.09±1.0%	1mm

L = 600 (unit = mm)



그림 8. 게이지 부착 위치

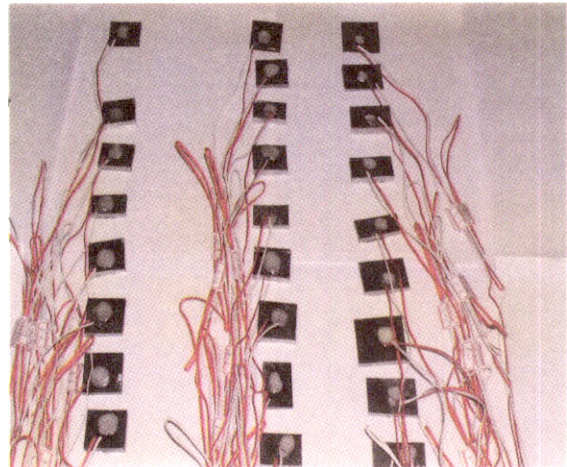


그림 9. 최종 시편

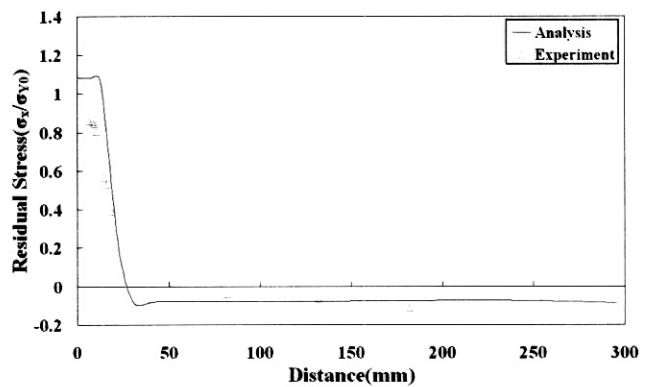


그림 10. 용접잔류응력 측정결과

실험 결과를 보면 SM570-TMC 강의 용접부 및 열영향부에서 수치해석의 결과와는 달리 인장잔류응력의 완화가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 시험편 제작시 전면용접 후 후면 용접을 실시하기 전에 가우징을 실시하여 불연속면 및 공극을 제거하게 되는데 이때 가우징에 의한 응력의 완화가 발생했기 때문으로 사료된다.

4. SM570-TMC 강의 잔류응력 해석

4.1 해석 이론

기하학적 비선형 및 재료의 물리적 제성질의 온도의존성을 고려한 재료학적 비선형을 고려하였다. 8절점 Isoparametric 입체 유한요소를 도입하였으며, 기본식은 아래와 같다.

1) 변위-변형률 관계식

요소의 전변형률은

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} \ \gamma_{xy}\}^T \quad \{\epsilon\} = \{\epsilon_0\} + \{\epsilon_L\} \quad (1)$$

여기서, $\{\epsilon_0\}$ 와 $\{\epsilon_L\}$ 은

$$\{\epsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ (\frac{\partial w}{\partial y}) + (\frac{\partial v}{\partial z}) \\ (\frac{\partial u}{\partial z}) + (\frac{\partial w}{\partial x}) \\ (\frac{\partial v}{\partial x}) + (\frac{\partial u}{\partial y}) \end{Bmatrix}$$

$$\{\epsilon_L\} = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z}\right) \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ 2\left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}\right) \end{Bmatrix}$$

$\{\epsilon\}$ 을 증분형으로 나타내면,

$$\{d\epsilon\} = [B]\{dw\} \tag{2}$$

$[B]$: 변위-변형을 매트릭스

2) 응력-변형을 관계식

응력-변형을 관계식은 증분형으로 다음 식처럼 쓸 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D_d]\{d\epsilon\} - \{C\}dT \tag{3}$$

여기서, $[D_d]$: 탄성의 경우는 $[D_d^e]$,

소성의 경우는 $[D_d^p]$ 로 분리된다.

$\{C\}$: 재료의 물리적 제성질의 온도의존성을 고려한 응력증분에서의 영향

3) 평형방정식

유한요소의 절점력 $\{dF\}$ 와 절점변위 $\{dw\}$ 의 관계를 가상변위의 원리를 적용하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\{dF\} + \{L\} - \{dR\} = [K]\{dw\} \tag{4}$$

여기서

$[K]$: 요소의 구성 매트릭스

$\{dF\}$: 외력에 의한 요소의 등가 절점력 증분

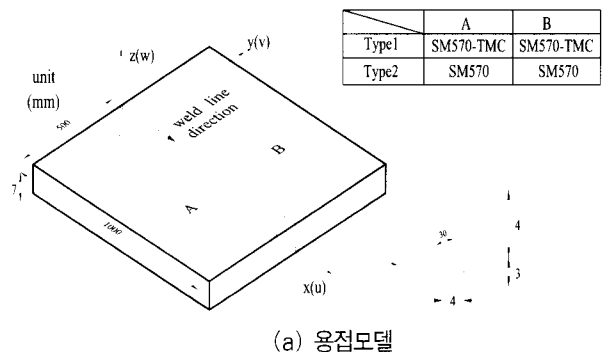
$\{L\}$: 하중 수정 항

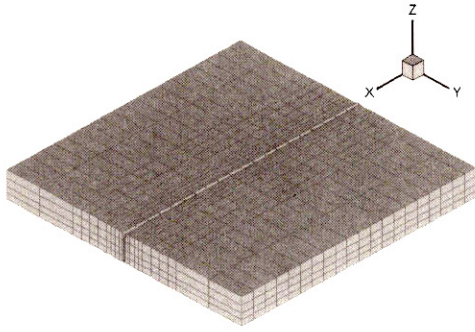
$\{dR\}$: 온도변화에 의한 요소의 등가 절점력 증분

식 (4)는 요소에 대하여 구하는 것이다. 따라서 이것을 계 전체에 대하여 구성해서 경계조건을 고려해 연립일차방정식을 풀면 절점변위증분 $\{dw\}$ 이 구해진다. 절점변위증분이 구해지면, 변위-변형을 관계식으로부터 요소의 변형이 계산되고, 구성 방정식으로부터 응력을 계산할 수 있게 된다.

4.2 해석모델

본 연구에 사용된 해석 모델은 그림 11에 나타난 것과 같다. 각각 SM570-TMC 강과 SM570 강으로 이루어진 $500\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 7\text{mm}$ 크기의 두 평면 플레이트를 FCAW(Flux Cored Arc Welding)로 1pass 맞대기 용접하는 것으로 하였다. 용접조건은 입열량 $Q = 1300(\text{J}/\text{mm})$, 용접속도 $v = 6(\text{mm}/\text{s})$ 이다. 해석에 사용된 프로그램은 수차례 기 발표 논문에서 검증된 3차원 해석 프로그램(Kim 등, 1998; 장경호 등, 2002; 장경호 등, 2003)으로써, 8절점 Isoparametric 입체유한요소를 도입하여 용접패스의 진행속도를 고려한 시간에 따른 이동열원을 이용하여 3차원 비정상 열전도 해석을 전체모델(full model)로 수행하였다. 잔류응력의 해석은 열전도해석으로부터 구한 시간에 따른 각 절점에서의 온도를 하중으로 도입하여 3차원 열탄소성해석을 수행하였다. 3차원 비정상 열전도 해석시 공기와 접하는 면에서 열은 대류가 되고 내부에서 열은 전도되는 것으로 하였다. 그리고 용착부를 모델링하기 위하여 용접이 진행되지 않은 요소는 강성이 없게 처리하고 용접이 끝난 후 온도에 따라 강성을 회복하는 것으로 하였으며 강제운동이 발생하지 않도록 경계조건을 설정하였다. 온도 변화에 따른 재료의 물리정수는 그림 12와 같으며 기계적 제성질은 고온인장실험의 결과를 이용하여 그림 13과 그림 14와 같이 이상화 하였다.





(b) 메쉬분할도
그림 11. 해석모델

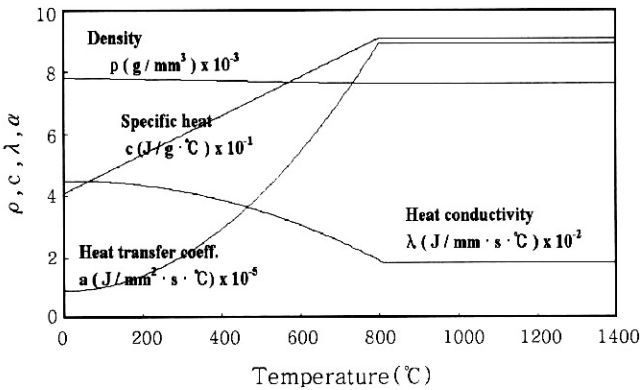


그림 12. 물리점수

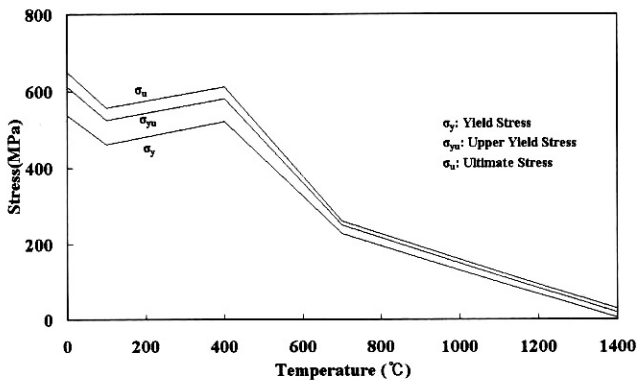


그림 13. 기계적 제성질 (SM570-TMC)

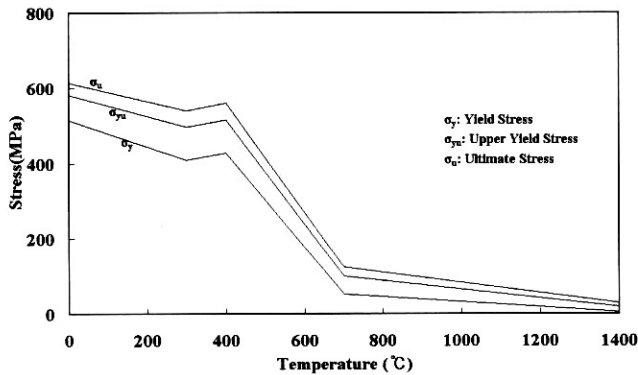


그림 14. 기계적 제성질 (SM570)

4.3 온도분포

3차원 비정상 열전도 해석을 상기와 같은 조건하에서 수행하여 온도이력을 구하였으며, 시간(t)에 따른 온도분포의 한 예를 그림 15에 나타내었다.

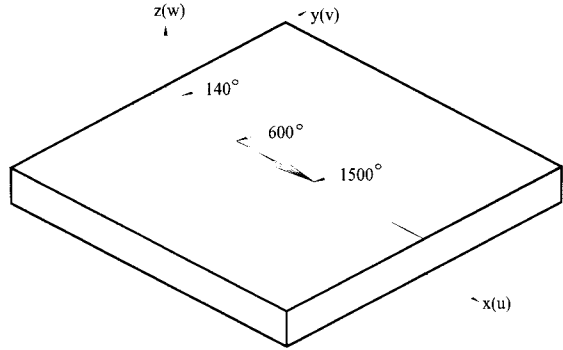


그림 15. 온도분포

4.4 잔류응력

그림 16에 SM570-TMC 강을 접합한 경우 평판상단 ($x=500, z=6$)의 용접선방향축에서 직각방향으로의 잔류응력의 결과를 나타내었다. 잔류응력은 용접선 방향축에서 용접선방향 (weld line direction)과 용접선직각방향 (transverse direction), 그리고 두께방향 (thickness direction)의 잔류응력에 주목하였다. SM570 강을 접합한 경우 잔류응력의 결과는 그림 17에 나타내었다. SM570 강 경우에도 상변태에 의한 잔류응력의 완화는 발생하지 않는 것으로 하였다. 이상의 결과에서 SM570-TMC 강을 접합한 경우의 용접부에서의 용접선방향의 잔류응력의 크기가 SM570 강을 접합한 경우보다 큼을 ($591\text{MPa} > 560\text{MPa}$) 알 수 있다. 이것은 SM570-TMC 강의 고온에서의 기계적 성질이 SM570 강보다 우수하기 때문이다. 즉, 본 연구에 의하면 잔류응력이 결정되는 온도는 용접 후 냉각 시의 $400\text{°C} \sim 500\text{°C}$ 사이인데 이때의 SM570-TMC 강의 항복응력의 크기가 SM570 강보다 크기 때문이다.

그림 18과 그림 19는 SM570-TMC 강 및 SM570 강의 용접시 용접부 상단 ($y=1, z=6$)의 용접선방향축에서 용접선 방향으로의 잔류응력의 결과를 각각 나타낸 것이다. 잔류응력은 용접선 방향축에서 용접선방향 (weld line direction)의 잔류응력에 주목하였다. 결과를 보면 직각방향으로의 결과와 마찬가지로 용접부에서 SM570-TMC 강의 용접선방향의 잔류응력의 크기가 SM570 강보다 큼을 알 수 있다.

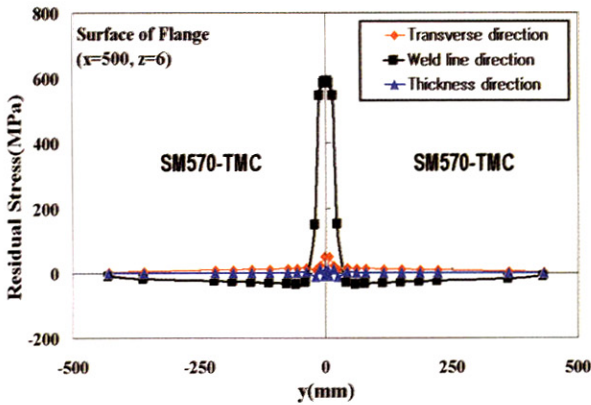


그림 16. 용접선 직각방향으로의 잔류응력 (SM570-TMC)

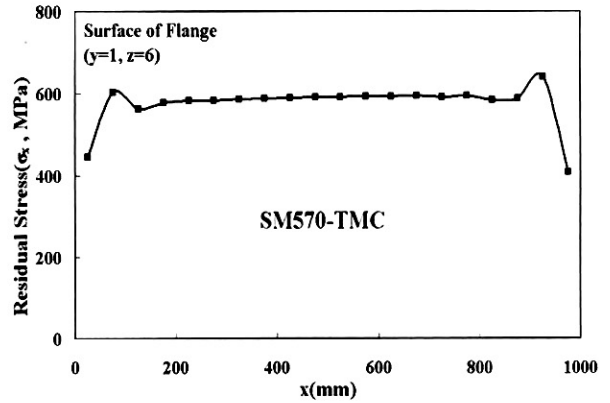


그림 18. 용접선방향으로의 잔류응력 (SM570-TMC)

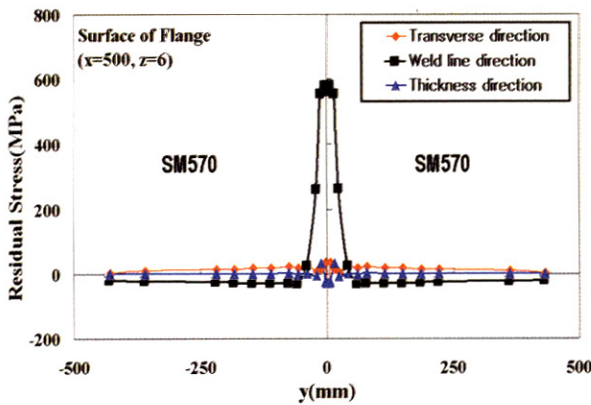


그림 17. 용접선 직각방향으로의 잔류응력(SM570)

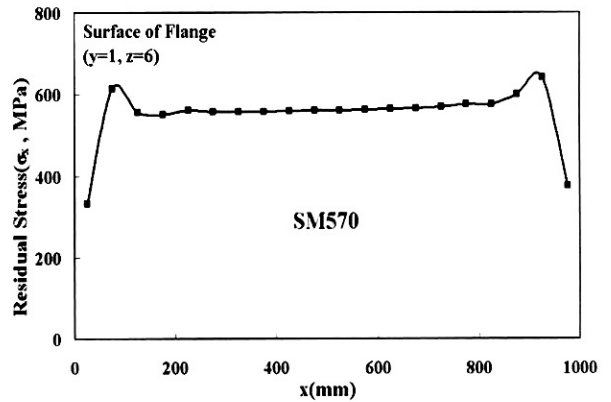


그림 19. 용접선방향으로의 잔류응력(SM570)

5. 결론

본 연구에서는 고온인장실험을 실시하여 SM570-TMC 강의 고온시의 기계적 성질을 조사하였고, 이를 수치해석에 도입하여 SM570-TMC 강의 용접시 발생하는 잔류응력의 특징을 조사하였다. 또한 동일한 인장강도급의 용접구조용 압연강재인 SM570 강의 고온시의 기계적 특성과 용접시 발생하는 잔류응력의 특징을 조사하여 이를 SM570-TMC 강의 결과와 비교하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) SM570-TMC 강의 고온에서의 항복응력 및 인장강도는 100℃부근을 제외하고는 SM570 강보다 큼을 알 수 있었다. 이것은 SM570-TMC 강의 제조시 제어냉각에 의한 조직의 미세화로 인해 고온에서도 기계적 성질이 우수하기 때문으로 사료된다.
- (2) SM570-TMC 강을 접합한 경우 용접부에서의 용접선방향의 잔류응력의 크기는 SM570 강을 접합한 경우보다

큼을 알 수 있었다. 이것은 SM570-TMC 강의 고온에서의 기계적 성질이 SM570 강보다 우수하기 때문이다. 즉, 본 연구에 의하면 잔류응력이 결정되는 온도는 용접 후 냉각 시의 400℃~500℃사이인데 이때의 SM570-TMC 강의 항복응력의 크기가 SM570 강보다 크기 때문이다.

참고 문헌

- 日本鋼構造協會 技術委員會 安全性 分科會 耐火 小委員會 (1968) : 特集/構造用鋼材の高温時ならびに加熱後の機械的性質目次
- Kunihiko Satoh, Toshio Terasaki(1976) Effect of Transformation Expansion on Welding Residual Stresses Distributions and Welding Deformation, *Journal of JWS*, Vol.45 No.7, pp.560-566
- Kunihiko Satoh, Toshio Terasaki(1976) Effect of

- Welding condition on Residual Stresses Distribution in Welded Structures Materials, *Journal of JWS*, Vol.45, pp.150-156
- B.A.B. Anderson(1978) Thermal Stresses in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformation, *Transaction of ASME*, Vol. 100, pp. 110-123
- KS D 0026(1997) Method of elevated temperature tensile test for steels and heat-resisting alloys, *Korean Standards*, pp.291-294
- 김희진(1986) TMCP강의 개발 및 적용, *대한용접학회지*, 대한용접학회, 제 4권 제2호, pp.1-11
- 김영식(1990) TMCP 강재와 그 용접부의 강도 특성, *대한기계학회지*, 대한기계학회, 제30권 제2호, pp.146- 154
- B. Taljat, B. Radhakrishnan, T. Zacharia(1998) Numerical analysis of GTA welding process with emphasis on post-solidification phase transformation effects on the residual stresses, *Materials Science and Engineering*, A246, pp.45-54
- Y.C.Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa(1999) すみ肉溶接で生じる面外變形の防止, *일본강구조학회 논문집*, 일본 강구조학회 pp.11-16
- Y.C.Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa(1999) すみ肉溶接で生じる面外變形の生成機構と普遍性の檢證, *일본 용접학회 논문집*, 일본용접학회 pp.294-300
- Y.C. Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa Production Mechanism of Out-of-Plane Deformation in Fillet Welding, *Transaction of JWRI*, Vol.27 No.2, pp.107-113
- Y.C. Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa Effects of Welding Conditions on Out-of-Plane Deformation and Residual Stress in Fillet Welding, *WTIA 46th International Conference*, pp.1-7
- K.H.Chang, C.H. Lee, W.C. Cho(2001) Characteristics of Residual Stress in Welding Joint composed of Different Kind Steels, *6th Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges(JSSB-JK6)*
- 장경호, 이진형(2002.3) 인장력을 받는 이중강재 용접접합부의 잔류응력 해석, *대한토목학회 논문집*, 대한토목학회, 제22권 2-A호, pp.201-210
- 장경호, 이진형(2003.6) 동종강재 및 이중강재 용접부의 잔류응력 특징, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제 15권 3호, pp.241-250
- Suleyman Gunduz, Mustafa Acarer(2005) The effect of heat treatment on high temperature mechanical properties of microalloyed medium carbon steel, *Materials & Design*, pp.1-10
- 임성우, 김요숙, 장인화(2005) SM570TMC 강재의 재료특성에 관한 연구, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제 17권 3호, PP.3.5-373
- (접수일자 : 2005. 11. 28 / 심사일 2005. 12. 22 / 심사완료일 2006. 3. 28)