

동종강재 및 이종강재 용접접합부의 잔류응력 특징

Characteristics of Residual Stress in welds Composed of Similar or Dissimilar Steels

장 경 호¹⁾ · 이 진 형²⁾ · 이 상 형³⁾ · 이 은 택⁴⁾

Chang, Kyong Ho Lee, Chin Hyung Lee, Sang Hyong Lee, Eun Taik

요 약 : 본 연구는 동종강재 및 이종강재 용접시 발생하는 잔류응력 특징을 파악하기 위해서 유한 요소법을 이용한 3차원 탄소성해석을 수행하였다. 결과에 의하면, 동종강재 맞대기용접시 용접부의 잔류응력은 고강도강재의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN80) 증가하였고, 이종강재 맞대기용접시 용접부의 잔류응력은 SM400과 접합되는 고강도강재의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN80) 잔류응력의 크기의 차이가 증가하였다. 그리고 동종강재 필렛용접시 용접부의 잔류응력은 플랜지와 웨브의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN80) 증가하였고, 이종강재 필렛용접시 용접부의 잔류응력은 플랜지(SM400)와 접합되는 웨브의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN80) 용접 토우 에서 잔류응력의 크기의 차이가 증가하였다.

ABSTRACT : This study, investigated the characteristics of residual stress in welds composed of similar or dissimilar steels, are investigated by using 3-dimensional thermal elasto-plastic FEM analysis. The results showed that for the groove welding of the similar steels, increased the tensile strength of the steels (POSTEN60 < POSTEN80) increased the residual stress in the welds and for the groove welding of the dissimilar steels, increased the difference between the tensile strengths of the steels (POSTEN60 < POSTEN80) that were welded together with SM400 increased the difference in the magnitude of the residual stress. Similarly, the residual stress in the welds increased during the fillet welding of the similar steels and the difference in the magnitudes of the residual stresses between the flange toe and the web toe increased during the fillet welding of the dissimilar steels.

핵심 용어 : 이종강재, 용접 접합부, 잔류응력, FEM 해석

KEYWORDS : Dissimilar Steels, Welds, Welding Residual Stress, FEM analysis

1. 서 론

최근 강구조물의 초고층·장스팬화와 더불어 고성능·고강도 강재의 개발이 요구되어 추진되고 있다. 또한 구조물의 경량화 및 경제성을 목적으로 고강도 강재와 용접구조용강재를 접합해서 사용할 필요가 있다. 그러나 이러한 이종강재를 구조물에 적용하기 위해서는 이종강재 접합부의 역학적 특성을 명확히 해야한다. 본 연구에서는 먼저 실험 및 자체 개발한 3차원 열탄소성 프로그램(KIM 등, 1998; 장경호 등, 1999)을 이용하여 용접구조용강재인 SM400과 고강도강재인

POSTEN60, POSTEN80의 세가지 강종을 접합하는 것으로 상정하여, 3차원 열탄소성해석을 수행하여 이종강재 접합부의 잔류응력 특징을 명확히 하였다.

2. 프로그램의 해석이론 및 타당성 검증

2.1 해석이론

기하학적 비선형 및 재료의 물리적 제성질의 온도의존성을 고려한 재료학적 비선형을 고려하였다. 8절점 Isoparametric

1) 정희원, 중앙대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사
(Tel. 02-820-5337, Fax. :02-823-5337, E-mail: changkor@cau.ac.kr)

2) 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정(ifinder@hanmail.net)

3) 정희원, 중앙대학교 토목공학과 박사과정(semton@ms.cau.ac.kr)

4) 정희원, 중앙대학교 건축학부 교수, 공학박사(ctlee@cau.ac.kr)

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

입체 유한요소를 도입하였으며, 기본식은 아래와 같다.

2.1.1 변위-변형률 관계식

요소의 전변형률

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} \ \gamma_{xy}\}^T$$

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_o\} + \{\epsilon_L\}$$

여기서 $\{\epsilon_o\}$ 와 $\{\epsilon_L\}$ 는

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

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

$\{\epsilon\}$ 을 증분형으로 나타내면,

$$\{d\epsilon\} = [B] \{dw\} \tag{1}$$

$[B]$: 변위-변형률 매트릭스

2.1.2 응력-변형률 관계식

응력-변형률 관계식은 증분형으로 다음 식처럼 쓸 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D_a][d\epsilon] - \{c\}dT \tag{2}$$

여기서,

$[D_a]$: 탄성의 경우 $[D_e^a]$ 와,

소성의 경우 $[D_p^a]$ 로 분리된다.

$\{c\}$: 재료의 물리적 제성질의 온도의존성을 고려한 응력 증분에서의 영향

2.1.3 평형방정식

유한요소의 절점력 과 절점변위 $\{dw\}$ 와의 평형방정식을 가상일의 원리를 적용하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\{dF\} + \{L\} - \{dR\} = [K]\{dw\} \tag{3}$$

여기서,

$[K]$: 요소의 구성 매트릭스

$\{dF\}$: 외력에 의한 요소의 등가절점력 증분

$\{L\}$: 하중 수정항

$\{dR\}$: 온도변화에 의한 요소의 등가절점력 증분

식 (3)는 요소에 대하여 구하는 것이다. 따라서, 이것을 계 전체에 대하여 구성해서, 경계조건을 고려해 연립 일차 방정식을 풀면, 절점 변위 증분 $\{dw\}$ 이 구해진다.

절점 변위 증분이 구해지면, 변위-변형률 관계식으로부터 요소의 변형이 계산되고, 그리고, 구성 방정식으로부터 응력을 계산할 수 있게 된다.

2.2 해석프로그램의 타당성 검증

본 연구에 사용된 프로그램의 검증은 수차례 기 발표 논문 (KIM 등, 1998; 장경호 등, 1999; 장경호 등, 2002)을 통해 이루어졌으며, 추가로 실험과 해석을 수행하여 그 결과를 바탕으로 프로그램의 타당성을 다시한번 검증하였다.

2.2.1 실험

1) 실험판의 제작

이종강재 용접시의 잔류응력을 측정하기 위해 실험판을 제작하였으며 그 재질 및 수량은 표 1과 같다. 실험판 제작에 쓰인 강재는 용접구조용강재인 SM400강재와 SM570강재이며 좌, 우측면의 구분은 용접진행방향을 기준으로 볼 때의 방향이다. 이종강재 실험판의 전체 폭(B)은 400mm이고 길이(L)는 600mm, 두께(t)는 25mm의 크기로서 그림 1과 같은 형태로 제작하였다. 실험판 제작시 용접방법 및 용접금속은 표 2와 같으며 용접금속의 기계적 성질 및 화학성분은 표 3과 표 4에 나타내었다. 용접금속의 기계적 성질은 제조사의 성적서(JIS 및 AWS 규격)를 인용하였다. 용접은 표 5와 같이 총 7PASS용접을 실시하였다. 처음 1PASS는 CO2 가스용접을 실시하였고 2, 3, 4PASS는 SAW(Submerged Arc Welding)을 실시하여 전면용접하였다. 또한 뒷면 용접시 가우징을 먼저 실시하여 뒷면의 불연속면 및 결함과 공극이 있는 부분을 제거한 후에 다시 SAW로 5, 6, 7PASS를 실시하여 실험판을 제작하였다. 잔류응력을 측정하기 위해 사용된 게이지의 제원은 표 6과 같으며 부착한 게이지의 위치는 그림 2에 나타내었다.

표 1. 실험판의 재질 및 수량

좌측면	우측면	수량
SM570	SM400	1SET

표 2. 용접방법 및 용접금속

용접방법	용접금속
CO2 Gas Welding	DW-100(1.2Φ)
SAW(Submerged Arc Welding)	S-777MX×H14(4.8Φ)

표 3. 용접금속의 기계적 성질

용접금속	항복점 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)
DW-100 (1.2Φ)	510	570	29
S-777MX×H14 (4.8Φ)	460	530	32

표 4. 용접금속의 화학성분(%)

용접금속	C	Si	Mn	P	S
DW-100 (1.2Φ)	0.05	0.45	1.35	0.013	0.009
S-777MX×H14 (4.8Φ)	0.06	0.32	1.17	0.018	0.01

그림에서 x축 방향이 용접선 방향이다. 뒷면 용접이 끝나 뒤 전체 용접이 끝나므로 뒷면의 잔류응력에 주목하여 게이지를 부착하였다.

표 5. 용접조건

PASS	전류(A)	전압(V)	속도(시간)	비고
1	250	30	1'37"	
2	610	35	1'25"	
3	630	38	1'26"	
4	630	40	1'28"	
가우징				폭:14, 깊이:11 단위: mm
5	620	35	1'27"	
6	630	38	1'26"	
7	620	40	1'26"	

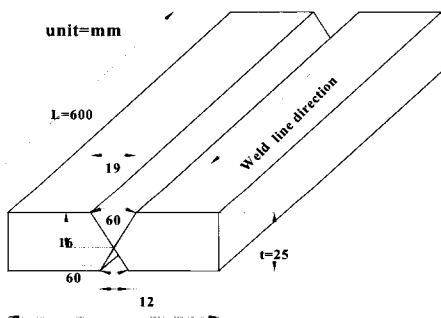


그림 1. 실험판의 크기 및 형상

표 6. 게이지 제원

게이지 종류	사용 개수	Gage Factor	게이지 크기
2축 Strain Gage	27개	2.09±1.0%	2mm

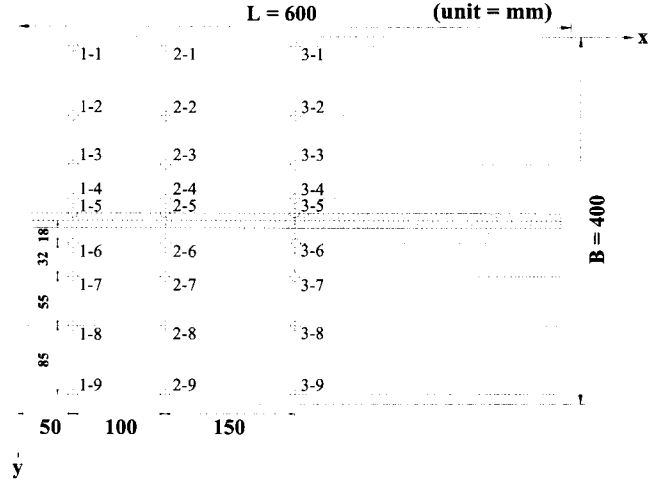


그림 2. 게이지 부착 위치

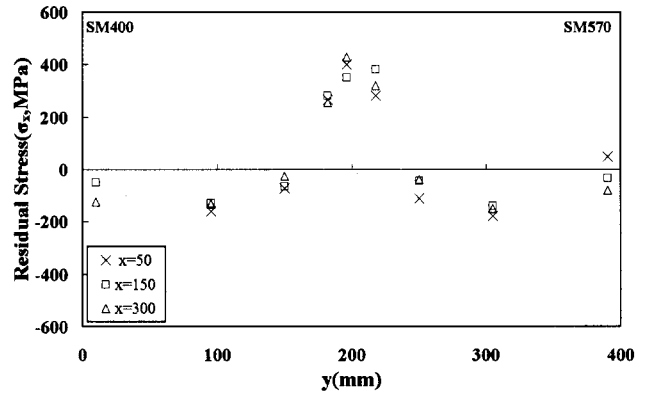


그림 3. 용접선 방향의 잔류응력 (σ_x)

2) 실험결과

게이지를 부착하고 초기변형률을 측정후 실험판을 게이 지부분별로 절단법을 실시하여 x축(용접선 방향)의 응력을 측정하였다. 그림 3에 각각의 게이지 위치에서 용접선 방향의 잔류응력 측정값을 나타내었다. 그림 3의 y방향은 그림 2의 y방향과 일치하며 y=200mm 위치가 용접부이다.

2.2.2 수치해석

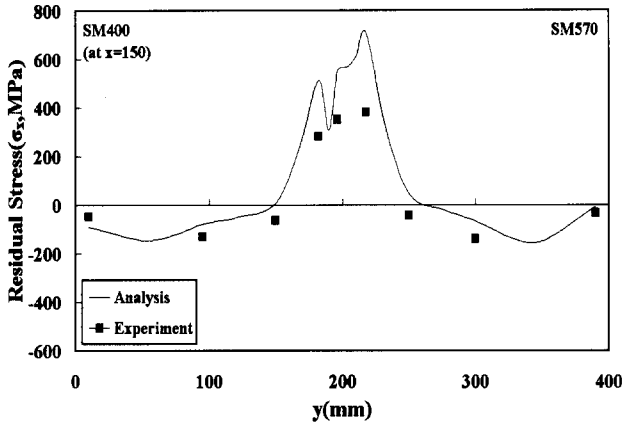
1) 해석방법

본 해석에 사용된 프로그램의 타당성을 검토하기 위해 실험과 같은 조건하에서 해석을 수행하였다. 단, 해석시 가우징을 재현하기 위해서 가우징이 이루어지고난 후의 모델을 상정하였다. 잔류응력 측정지점은 실험시 게이지부착위치와 동일

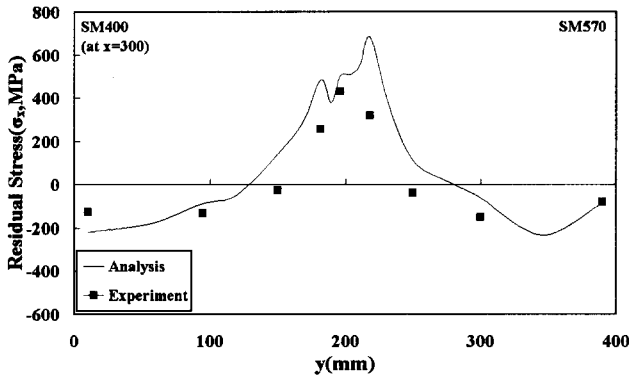
시하였다.

2) 잔류응력

용접시 잔류응력은 용접선방향의 잔류응력이 커서 구조물에 많은 영향을 미치므로 용접선방향의 잔류응력에 주목하였다. 게이지 부착위치와 같은 위치에서의 용접선 방향의 잔류응



(a)



(b)

그림 4. 용접선 방향의 잔류응력 (σ_x)

력과 실험치를 그림 4에 나타내었다. $x=50\text{mm}$ 인 지점에서는 가용점에 의한 영향을 받기 때문에 가용점의 영향을 거의 받지 않는 $x=150\text{mm}$ 일때와 $x=300\text{mm}$ 일때의 잔류응력을 고찰하였다. 그림 4(a)는 $x=150\text{mm}$ 에서의 용접선 방향의 잔류응력의 해석치와 실험치를 나타낸 것이고 그림 4(b)는 $x=300\text{mm}$ 에서의 용접선 방향의 잔류응력의 해석치와 실험치를 나타낸 것이다. 이상의 결과에서 실험시 용접부에서는 전면 용접 후 후면 용접전에 가우징에 의한 영향으로 응력의 해방이 발생하므로 그 절대값이 약간의 차이를 보이나 실험치와 해석치가 거의 일치함을 알 수 있다.

3. 고온인장실험

본 연구에서 수행한 이종강재의 FEM해석에서 재료학적 비선형을 재현하기 위해서는 반드시 재료의 기계적 제성질을 실험에 의하여 구하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 POSTEN60 및 POSTEN80 강재의 온도변화에 따른 기계적 제성질을 구하기 위해서 고온인장실험을 실시하였다.

3.1 실험방법

그림 5과 같이 U.T.M에 가열로를 설치한 후 가열로의 온도를 변화시키면서 실험을 실시하였다. 시험편은 KS D 0026의 철강재료 및 내열 합금의 고온 인장 시험 방법에 따라 제작 하였다. 그 치수 및 형상은 표 7과 그림 6에 나타내었다. 그림 7에 상온(20°C)과 900°C 에서 고온인장실험이 끝난 후의 시험편형상의 예를 나타내었다.

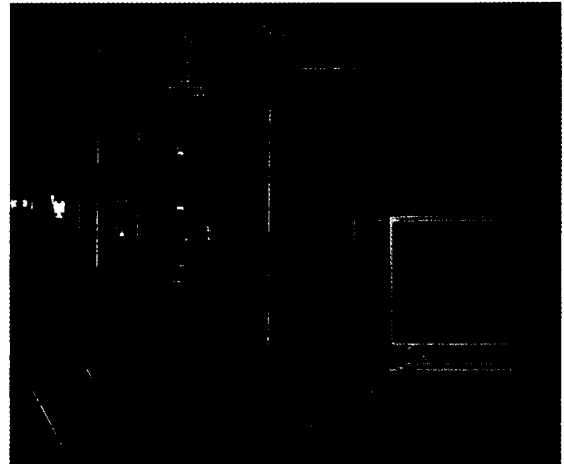


그림 5. 실험장경

표 7. 시험체 치수

평행부의 지름(D)	표점거리 (L)	평행부의 길이(P)	어깨부분의 반지름(R)
6mm	30mm	5.5D~7.5D	3mm이상

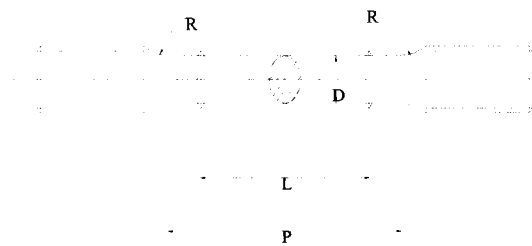


그림 6. 시험체 형상

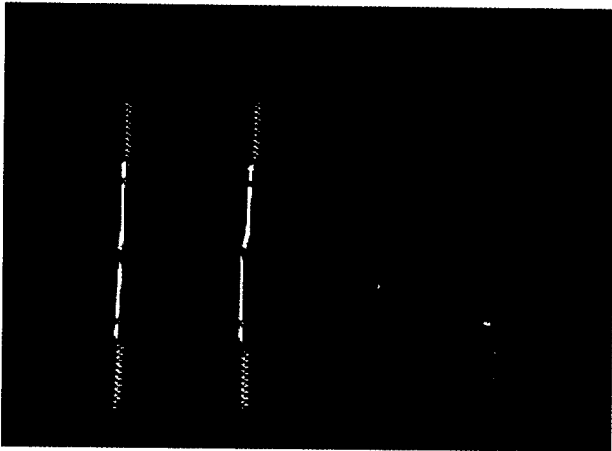


그림 7. 실험 후 시험체 형상

표 8. 실험결과(POSTEN60)

Temp(°C)	σ_{Y1} (kgf/mm ²)	σ_{Y2} (kgf/mm ²)	σ_{Y3} (kgf/mm ²)
20	53.9376	54.1949	54.6064
100	49.2743	48.1029	49.2234
200	47.0334	46.6769	47.5427
300		46.7788	46.244
400	43.7485	40.8709	43.0354
500	38.3119	37.7888	38.095
600	26.8271	26.1778	26.9162
700	11.9175	10.7665	10.6239
800	5.76014	6.34073	6.50371
900	2.89789	2.99975	2.84187

표 9. 실험결과(POSTEN60)

Temp(°C)	σ_{U1} (kgf/mm ²)	σ_{U2} (kgf/mm ²)	σ_{L2} (kgf/mm ²)
20	64.5606	64.3548	65.255
100	58.4926	58.3398	58.2634
200	58.6963	58.6454	58.6454
300		62.6433	62.3378
400	55.3604	49.6054	54.571
500	43.683	43.4151	43.2237
600	30.6978	30.545	30.6214
700	13.318	12.931	12.6865
800	7.26765	7.62925	7.64962
900	5.41891	5.67355	5.26612

3.2 실험결과

가열로의 온도를 상온(20°C)에서 900°C까지 변화시키면

서 각 온도마다 시험체 3개의 항복응력 및 극한 응력을 구하였다. 표 8와 표 9에 POSTEN 60의 항복응력 및 극한응력의 결과를 나타내었다. 그리고 표 10와 표 11에 POSTEN 80의 항복응력 및 극한응력의 결과를 나타내었다.

표 10. 실험결과(POSTEN80)

Temp(°C)	σ_{Y1} (kgf/mm ²)	σ_{Y2} (kgf/mm ²)	σ_{Y3} (kgf/mm ²)
20	79.6076	79.4018	79.5304
100	74.8155	74.9683	74.5863
200	70.6902	70.13	70.2828
300	70.5374	70.7411	70.7666
400	65.801	65.3935	64.2985
500	59.5538	60.6	60.8296
600	47.008	47.1098	46.957
700	16.934	18.1945	16.5521
800	6.66668	6.49352	6.78382
900	3.19838	3.16273	3.23912

표 11. 실험결과(POSTEN80)

Temp(°C)	σ_{U1} (kgf/mm ²)	σ_{U2} (kgf/mm ²)	σ_{L2} (kgf/mm ²)
20	84.7518	84.36489	84.36489
100	79.9594	80.0103	79.9105
200	77.9477	77.3365	77.2347
300	79.1191	79.8066	79.8321
400	72.8802	73.1094	72.8038
500	64.6315	65.7542	65.448
600	52.3301	52.4574	51.8972
700	20.2445	22.3453	20.741
800	7.41535	7.47137	7.83806
900	6.63103	6.61066	6.68196

4. 맞대기 용접시 잔류응력 특징

4.1 해석조건

4.1.1 해석모델과 용접조건

본 연구에 사용된 해석 모델은 그림 8에 나타난것과 같다. 각각 용접 구조용강재(SM400)와 고강도강재(POSTEN 60, POSTEN80)로 이루어진 500mm×1000mm×7mm 크기의 두 평면 플레이트를 입열량 $Q = 1200(J/mm)$, 용접속도 $v = 6(mm/s)$ 로 1pass로 맞대기용접하는 것으로 하였다. 또

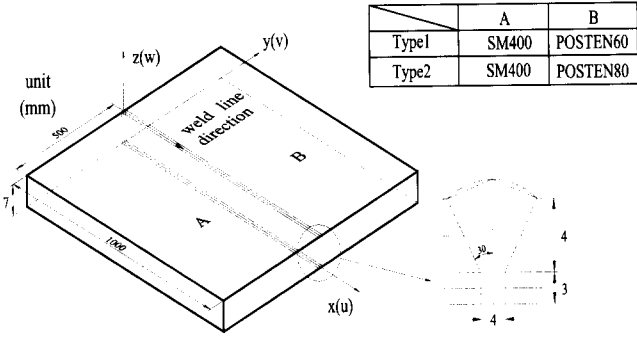


그림 8. 해석모델

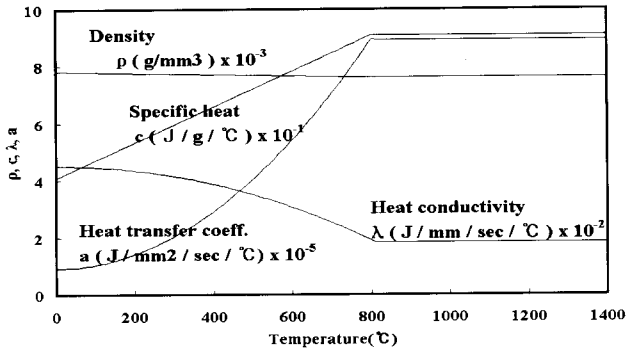


그림 9.(a) 재료의 물리정수

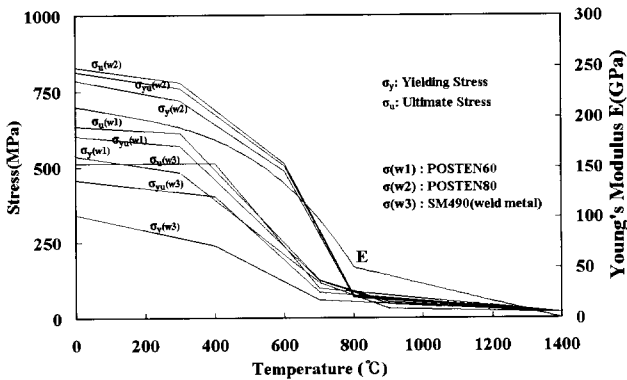


그림 9.(b) 기계적 제성질

한 3차원 열탄소성 해석은 재료의 물리정수(밀도, 비열, 열전달계수, 열전도율 등) 및 기계적 제성질(선팽창계수, 포아송비, 인장강도, 영율등)의 온도 의존성(Kim 등, 1998)을 고려하였다. 온도 변화에 따른 재료의 물리정수 및 기계적 제성질은 그림 9(a)와 그림 9(b)에 나타내었다.

4.2 온도분포

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

예를 그림 10에 나타내었다.

4.3 잔류응력

4.3.1 용접선 방향 축에서 직각방향으로의 잔류응력

그림 11에 동종강재를 접합한 평판의 경우 평판상단 ($x = 500, z = 6$)의 용접선방향축에서 직각방향으로의 잔류응력을 나타내었다. 잔류응력은 용접선 방향축에서 용접선방향(weld line direction)과 용접선직각방향(transverse direction), 그리고 두께방향(thickness direction)의 잔류응력에 주목하였다. 그림 11(a)는 POSTEN60을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이고 그림 11(b)는 POSTEN80을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이다. 이상에서 고강도강재의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN80) 용접부의 잔류응력은 증가(655MPa < 845MPa)함을 알 수 있다. 이것은 강재의 인장강도가 클수록 용접에 의한 소성영역의 크기가 더 커지기(장경호 등, 2000) 때문이다.

이종강재를 접합한 평판의 경우 결과를 그림 12에 나타내었다. 그림 12(a)는 Type1(SM400과 POSTEN 60)을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이다. 결과를 보면 용접부에서 SM400의 인장잔류응력값이 420MPa로써 원래의 인장잔류응력값(472MPa)보다 작다. 이것은 용접시 POSTEN60에서

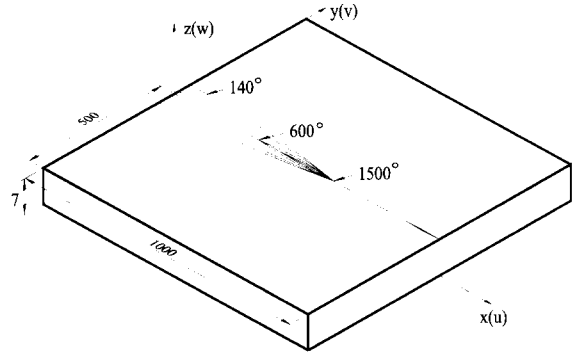
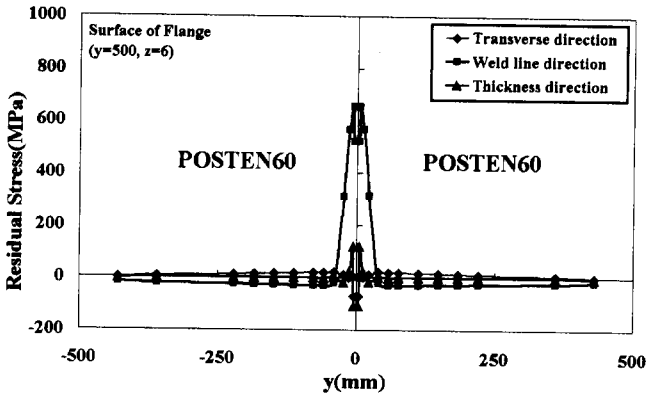


그림 10. 온도분포(t=82sec)

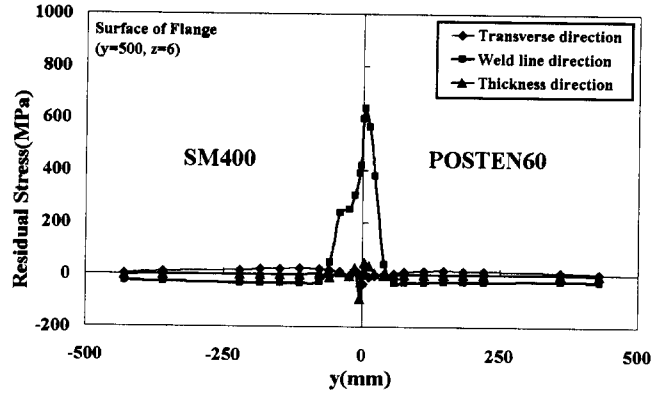
SM400보다 큰 인장이 발생하므로 즉, 수축이 더 크므로, SM400에서 수축을 구속시키는 힘이 발생했기 때문이다. 그림 12(b)는 Type2(SM400과 POSTEN80)를 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이다. 그 결과는 Type1과 같은 양상을 보이나 용접부에서의 잔류응력의 크기의 차이가 그림 12(a)의 경우보다 커짐(294MPa < 564MPa)을 알 수 있다.

4.3.2 용접선 방향 축에서 용접선 방향으로의 잔류응력

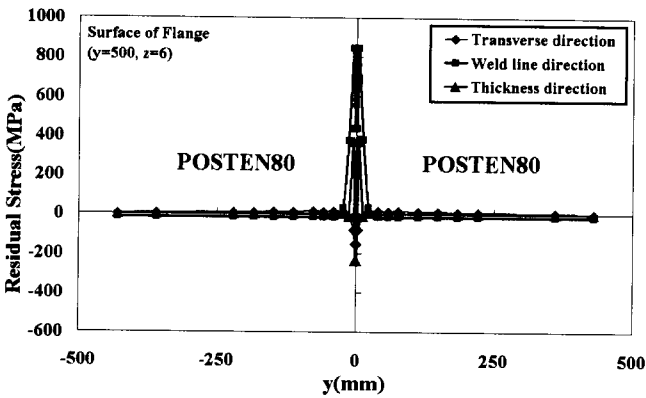
평판 상단 ($x = 500, z = 6$)의 용접선 방향축에서 용접선



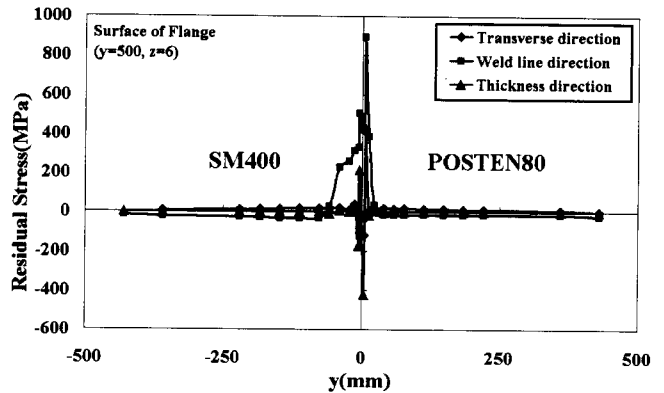
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 11. 용접선 직각방향으로의 잔류응력(동종강재)

그림 12. 용접선 직각방향으로의 잔류응력(이종강재)

방향의 잔류응력(σ_x)을 그림 13에 나타내었다. 그림 13(a)는 POSTEN60을 동종강재로 접합했을 때와 SM400과 이종강재로 접합했을 때의 잔류응력을 나타낸 것이다. 결과를 보면 이종강재(SM400/POSTEN60)로 접합했을 때가 동종강재(POSTEN60/POSTEN60)로 접합했을 때보다 잔류응력이 크다. 그림 12(b)의 결과도 마찬가지로 이종강재로 접합했을 때가 동종강재로 접합했을 때보다 잔류응력이 크다.

5. 필렛 용접시 잔류응력 특징

5.1 해석조건

5.1.1 해석모델과 용접조건

본 연구에 사용된 해석 모델은 그림 14에 나타낸 것과 같다. 600mm×500mm×15mm 크기의 플랜지(SM400)와 600mm×19mm×100mm 크기의 웨브(POSTEN60, POSTEN 80)를 필렛 용접하는 것으로 상정하여 이를 입열량

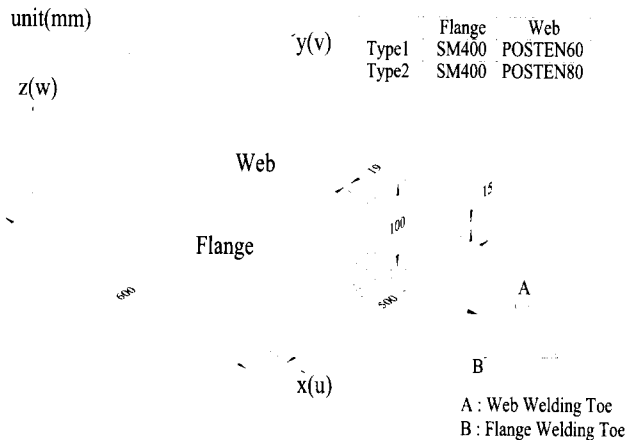


그림 14. 해석모델

$Q = 1200(J/mm)$, 용접속도 $v = 6(mm/s)$ 로 1pass 용접하는 것으로 하였고 용접금속은 SM490을 사용하였다. 용접금속의 모델링은 더미요소를 사용하였으며 그 강도는 그림 9(b)에 나타내었다. 용접금속의 강성에 대한 온도 의존도는 그림 9(b)에 보이며 또한 용접금속의 강성회복온도를 알 수 있다.

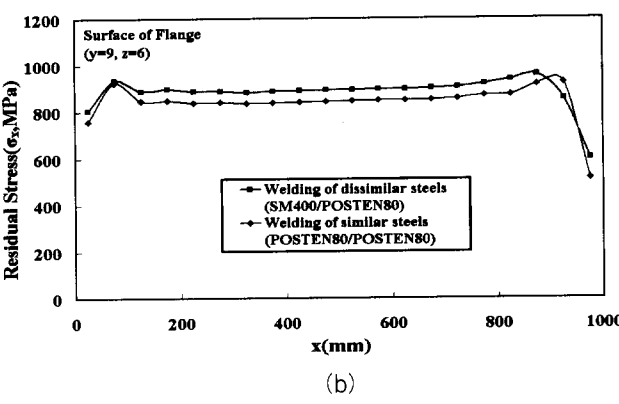
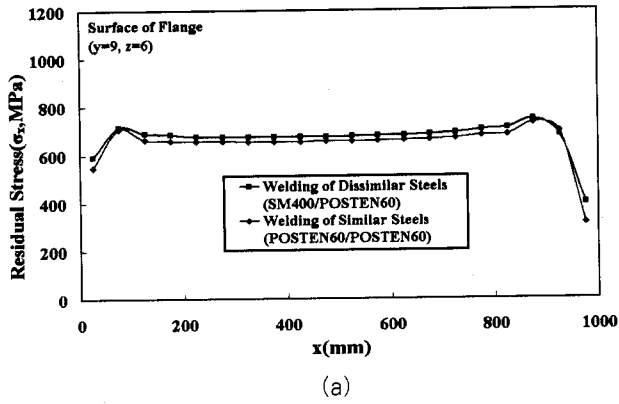


그림 13. 용접선 방향으로의 잔류응력 (σ_x)

차원 탄소성 해석은 맞대기 용접시와 마찬가지로 재료의 물리 정수 및 기계적 제성질의 온도 의존성을 고려하였다.

5.2 온도분포

3차원 비정상 열전도 해석을 상기와 같은 조건하에서 수행하여 온도이력을 구하였으며, 시간($t=100\text{sec}$)에 따른 온도분포의 한 예를 그림 15에 나타내었다.

5.3 잔류응력

5.3.1 용접선 방향 축에서 직각방향으로의 잔류응력

동종강재로 접합한 플랜지와 웨브의 경우 평판 상단 ($x = 320, z = 13.5$)의 용접선 방향 축에서 용접선 직각방향으로의 잔류응력을 그림 16에 나타내었다. 그림 16(a), 그림 16(b)는 각각 POSTEN60, POSTEN80 을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이다. 이상에서 플랜지와 웨브의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN80) 용접부의 잔류응력이 증가함(695MPa < 870MPa)을 알 수 있다. 이것은

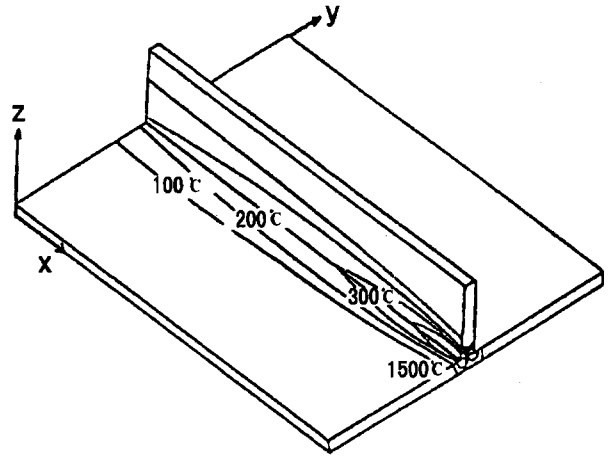


그림 15. 온도분포

동종강재 맞대기 용접부의 응력거동과 비슷하다. 이종강재로 접합한 플랜지와 웨브의 경우 그 결과를 그림 17에 나타내었다. 그림 17(a), 그림 17(b)는 각각 Type1(SM400/POSTEN60), Type2(SM400/POSTEN 80)로 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이다. 평판 상단 ($x = 320, z = 13.5$)의 용접선 방향 축에서 용접선 직각방향으로의 잔류응력을 주목했으므로 그 최대치의 차이는 보이지 않으나, 수치해석결과 웨브의 인장강도가 클수록(POSTEN 60 < POSTEN80) 플랜지와 웨브의 용접 토우 부분인 A ($x = 320, y = 240.5, z = 19.5$), B ($x = 320, y = 231.5, z = 13.5$)의 잔류응력크기의 차이가 커짐(218MPa < 409 MPa)을 알 수 있다.

5.3.2 용접선 방향축에서 용접선방향으로의 잔류응력

동종강재로 접합한 플랜지와 웨브의 경우 웨브의 용접 토우 ($y = 240.5, z = 19.5$)에서 용접선 방향 축에서 용접선방향의 잔류응력 (σ_x)을 그림 17에 나타내었다. 그림 18(a)는 POSTEN60을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이고 그림 18(b)는 POSTEN80을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이다. 이상에서 플랜지와 웨브의 인장강도가 클수록 (POSTEN60 < POSTEN80) 웨브의 용접 토우에서 잔류응력이 증가함을 알 수 있다.

이종강재로 접합한 플랜지와 웨브의 경우 그 결과를 그림 19에 나타내었다. 그림 19(a)는 Type1(SM400과 POSTEN 60)으로 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이고, 그림 19(b)는 Type2(SM400과 POSTEN80)로 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이다. 이상에서 플랜지(SM400)와접합하는 웨브의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN 80) 웨브의 용접 토우에서 잔류응력이 증가함을 알 수 있다.

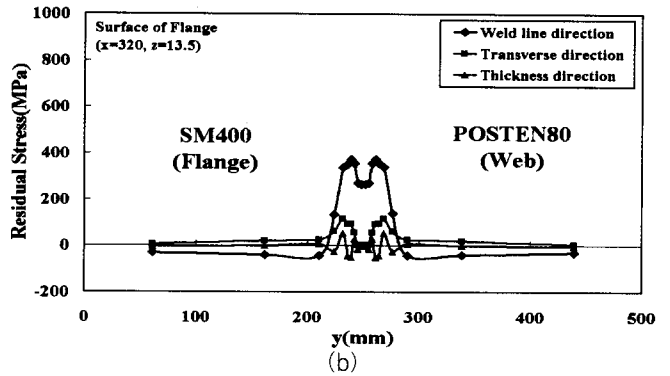
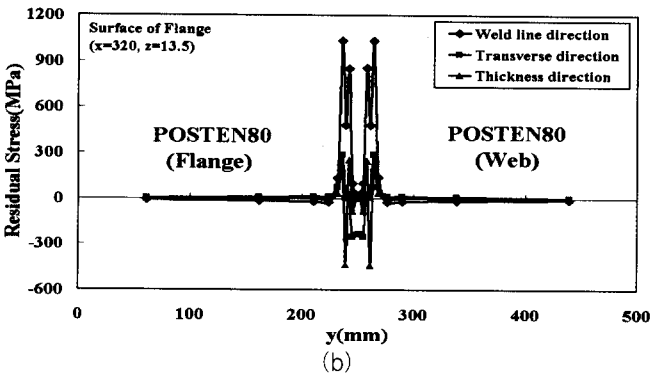
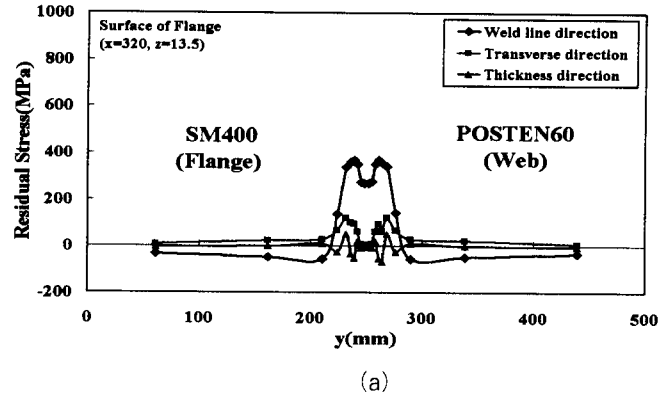
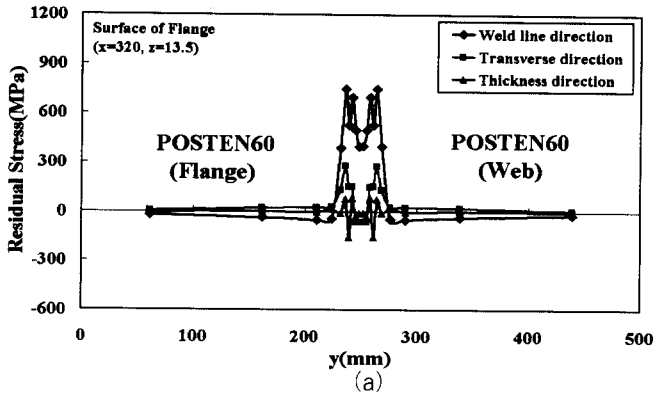


그림 16. 용접선 직각방향으로의 잔류응력(동종강재)

그림 17. 용접선 직각방향으로의 잔류응력(이종강재)

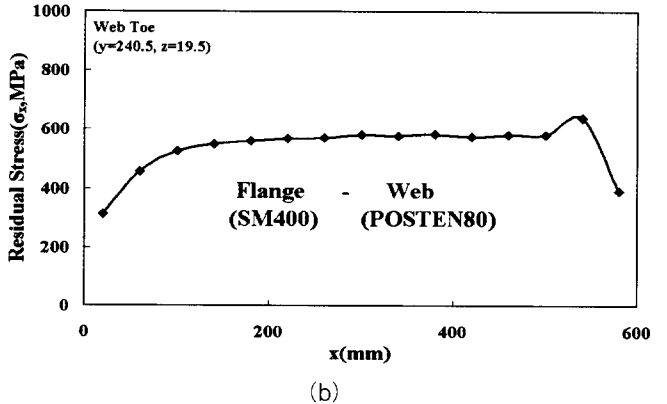
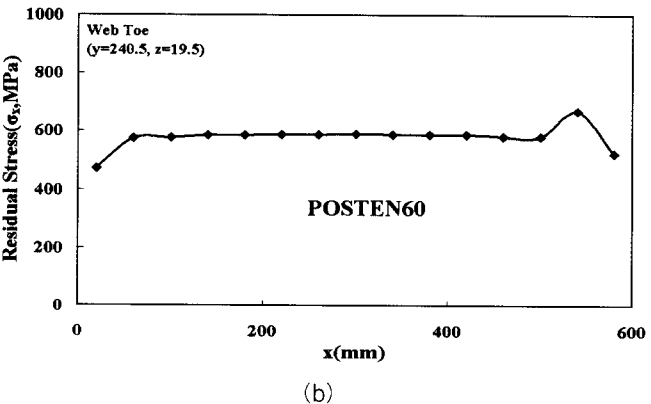
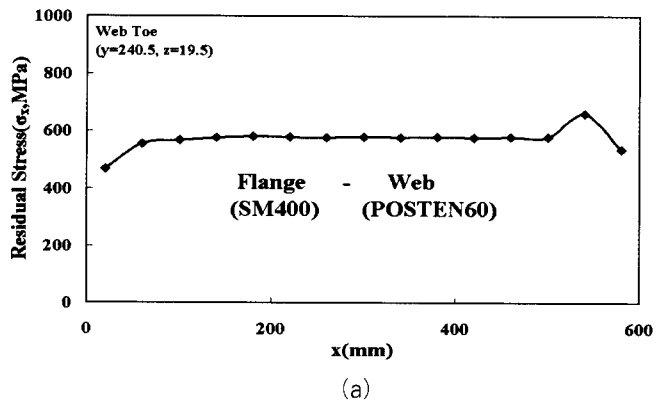
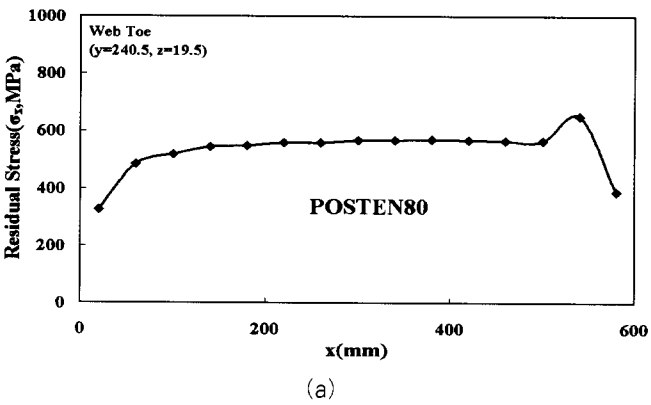


그림 18. 용접선 방향으로의 잔류응력 (σ_x)-동종강재

그림 19. 용접선 방향으로의 잔류응력 (σ_x)-이종강재

6. 결론

- (1) 동종강재 맞대기 용접시 용접부의 잔류응력은 접합되는 고강도강재의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN80) 증가(695MPa < 870 MPa)하였다.
- (2) 이종강재 맞대기 용접시 용접부의 잔류응력은 SM400 과 접합되는 고강도강재의 인장강도가 클수록 (POSTEN60 < POSTEN80) 잔류응력의 크기의 차이가 증가(178MPa < 417MPa)하였다.
- (3) 동종강재 필렛 용접시 용접부의 잔류응력은 플랜지와 웨브의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN 80) 증가(698MPa < 855MPa)하였다.
- (4) 이종강재 필렛 용접시 용접부의 잔류응력은 플랜지(SM 400)와 접합되는 고강도강재의 인장강도가 클수록 (POSTEN60 < POSTEN80) 용접 토우에서 잔류응력 의 크기의 차이가 증가(218MPa < 409MPa)하였다.

감사의 글

본 연구는 2002학년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것입니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

장경호(1999) 필렛 용접에서 생기는 변형 및 잔류응력에 끼치는 용접 제조건의 영향, 대한토목학회 구조위원회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp.1-4

장경호, 이진형(2000) 이종강재 맞대기 용접에 따른 용접부의 잔류응력 특징, 대한용접학회 학술발표대회 개요집, 대한용접학회, pp.235-238

장경호, 이진형(2000) 이종강재 접합부의 응력 거동, 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, pp.268-272

장경호, 이진형(2002) 인장력을 받는 이종강재 용접접합부의 잔류응력 해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 22권, 2-A호, pp.201-210

Y.C.Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa(1998) 3次元有限要素法解析による溶接面外變形の豫測と精度, 일본기계학회 강연논문집, 일본 기계학회, pp.295-296

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, 일본용접학회 논문집, 일본 용접학회, pp.294-300

Y.C. Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa Characteristics of Out-of-plane Deformation and Residual Stress Generated by Fillet Welding, *Transaction of JWRI*, Vol.27, No.1, pp.69-74

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)

K.H. Chang, S.H. Lee, and J.T. Jeon(2001) Behavior of Stress and Deformation Generated by Cutting under Loading, *6th Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges(JSSB-JK6)*

M. Shibahara, H. Serizawa and H. Murakawa(2002) Numerical Simulation of Hot Cracking in Weld Using Temperature Dependent Interface Element, *7th International Welding Symposium*, Vol.2, pp.1075-1080

H. Murakawa, H. Minami, and T. Kato(2002) Development of Finite Element Method for Seam Welding and Its Application to Optimization of Welding Conditions, *7th International Welding Symposium*, Vol.2, pp.1081-1086

R. Laitinen, D. Porter, M. Dahmen, S. Kaielerle and, R. Poprawe(2002) Comparative Study on the Weldability of Different Shipbuilding Steels, *7th International Welding Symposium* Vol.1, pp.779-784

E. Keehan, L. Karlson, M. Muruganath, H. Ardren, and H. Bhadeshia(2002) High Strenth Steel Weld Metals - Developments with Ni and Mn, *7th International Welding Symposium*, Vol.1, pp.797-802

(접수일자 : 2003. 2. 28 / 심사일 2003. 3. 17 / 심사완료일 2003. 5. 13)