

고강도강(POSTEN60, POSTEN80) 용접접합부의 잔류응력

Residual Stress in Welds of High Strength Steel(POSTEN60, POSTEN80)

장 경 호¹⁾ · 이 진 형²⁾

Chang, Kyong Ho · Lee, Chin Hyung

요 약 : 대부분의 용접재는 용접 후 빠른 속도로 냉각하는 과정에서 재료조직의 변화, 즉 상변태(마르텐사이트변태)가 일어난다. 그리고 이러한 상변태에 의한 체적의 팽창은 특히 고강도강재의 용접시 용접부의 잔류응력완화에 기여한다. 따라서 고강도강을 적용한 강구조물 접합부의 잔류응력 특징을 파악하기 위해서는 고강도강 용접시 상변태가 잔류응력완화에 미치는 효과를 정량적으로 평가할 수 있는 수치적 모델을 확립해야 한다. 본 연구에서는 고강도강 용접시 상변태에 의한 체적의 팽창이 잔류응력 완화에 미치는 영향을 잔류응력 측정 실험을 통하여 조사하였고, 이를 바탕으로 상변태에 의한 잔류응력완화를 고려한 고강도강 및 이종강재 용접접합부의 잔류응력 특징을 3차원 열탄소성 해석기법 개발을 통하여 재현하였다.

ABSTRACT : Most of ferrous b.c.c weld materials may experience martensitic transformation during rapid cooling after welding. And it is well known that volume expansion due to phase transformation could influence in the case of welding of high tensile strength steels on the relaxation of welding residual stress. To apply this effect practically, it is a prerequisite to establish a numerical model which is able to estimate the effect of phase transformation on residual stress relaxation quantitatively. In this study, we investigated the effect of phase transformation on the relaxation of welding residual stress through experiment. And three-dimensional thermal elastic-plastic FEM analysis is conducted to reproduce the effect of phase transformation on the relaxation of welding residual stress. Also we carried out the analysis of welding residual stress in welds of similar or dissimilar steels considering the effect of residual stress relaxation due to phase transformation.

핵심용어 : 고강도강재, 마르텐사이트변태, 잔류응력 완화, FEM 해석

KEYWORDS : High Tensile Strength Steels, Martensite Transformation, Welding Residual Stress Relaxation, FEM analysis

1. 서론

아크 용접 등의 용융용접은 열을 접합부에 집중하여 국부적으로 용융·응고 되어짐으로 국부적인 열팽창·수축과 이로 인한 소성변형 등으로 용접잔류응력과 용접변형이 필연적으로 발생한다. 이러한 잔류응력과 변형은 구조물의 강도적 신뢰성 및 사용성을 떨어뜨리는 원인이 되므로 건전한 구조물을 설계하고 제작·보수 관리하는데 반드시 고려해야 할 중요한 문제이다. 이러한 용접잔류응력을 저감하기 위해서 용접전의 예열처리와 용접후의 응력제거 열처리가 가장 널리 적용되고 있다. 그러나 이러한 예열처리와 후열처리는 용접공정 외의 추

가 공정이므로 비용 및 작업시간의 증가를 가져온다. 이에 반해 대부분의 용접재가 용접 후 빠른 속도로 냉각되는 과정에서 겪게되는 상변태(마르텐사이트 변태, 이승평 등, 1998)는 용접공정 중에 발생한다. 그 결과 고강도강의 용접시 상변태가 용접잔류응력을 완화시킨다는 것이 알려졌다. 그러나 기존의 연구는 실험적인 연구(Satoh 등, 1976)가 대부분이며 수치적 모델에 관한 연구는 미진한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 실험(잔류응력의 측정)을 통하여 고강도강(POSTEN60, POSTEN80)용접시 상변태가 잔류응력의 완화에 미치는 영향을 정량적으로 조사하였고, 이를 바탕으로 상변태시의 재료의 열적·기계적 물성치 변화를 해석적인 방법으로 역추적합

1) 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 조교수
(Tel. 02-820-5337, Fax. 02-823-5337, E-mail : changkor@cau.ac.kr)
2) 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사수료

본 논문에 대한 토의를 2005년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

으로써 용접잔류응력을 완화시키는 상변태 현상을 3차원 열탄소성 해석기법 개발을 통하여 재현하였다.

2. 실험

2.1 실험 재료 및 형상

2.1.1 실험판의 제작

고강도강재 용접시의 잔류응력을 측정하기 위해 실험판을 제작하였다. 실험판 제작에 쓰인 강재는 POSCO에서 새롭게 개발된 고강도강재인 POSTEN60 강재와 POSTEN80 강재이며 기계적 성질은 표 1과 같다. 실험판의 전체 폭(B)과 길이(L)는 500mm이고 두께(t)는 30mm의 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 제조자의 성적서(KWS 및 JIS 규격)를 인용하였다. 본용접을 하기전에 예열을 실시하였다. 예열범위는 용접선 양측 100mm까지이며 예열속도는 30cm/min로 하였다. 그리고 예열온도(한국강구조학회, 2001)는 표 5에 나타내었다. 예열 실시 후 본용접은 POSTEN60강재의 경우 FCAW(Flux Cored Arc Welding)로 표 6-(a)와 같이 총 6 PASS, POSTEN80강재의 경우 GMAW(Gas Metal Arc Welding)로 표 6-(b)와 같이 총

표 1. 고강도강재의 기계적 성질

강종	항복응력 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	탄성계수 (GPa)
POSTEN60	530	640	26.5	208.4
POSTEN80	790	840	20.3	248.8

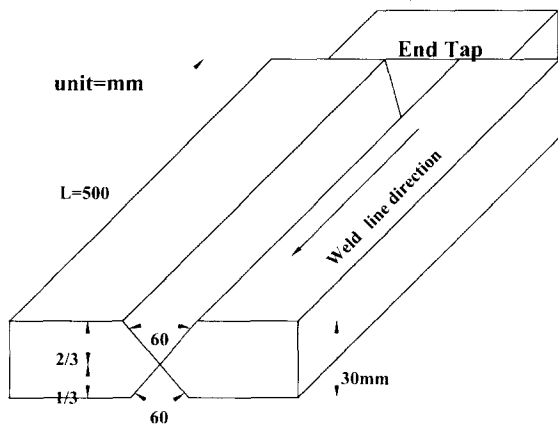


그림 1. 실험판의 크기 및 형상

표 2. 용접방법 및 용접금속

모재	용접방법	용접금속
POSTEN60	FCAW	Supercored81(1.2Φ)
POSTEN80	GMAW	MGS-80(1.2Φ)

표 3. 용접금속의 기계적 성질

용접금속	항복점 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)
Supercored81 (1.2Φ)	582	610	27
MGS-80 (1.2Φ)	770	850	20

표 4. 용접금속의 화학성분(%)

용접금속	C	Si	Mn	P	S
Supercored81 (1.2Φ)	0.03	0.35	1.12	0.013	0.017
MGS-80 (1.2Φ)	0.05	0.44	1.35	0.006	0.001

표 5. 예열온도

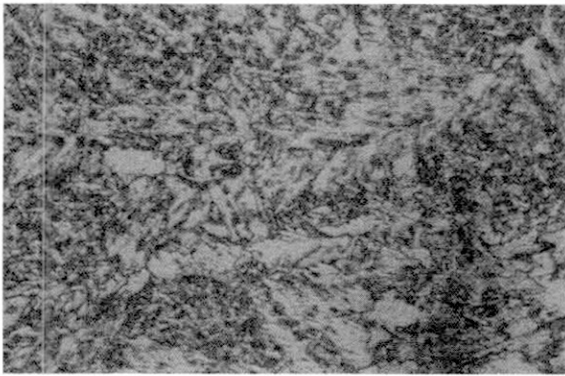
모재 및 용접방법	예열온도
POSTEN60(FCAW)	90 ~ 95℃
POSTEN80(GMAW)	105 ~ 110℃

표 6-(a). 용접조건(POSTEN60)

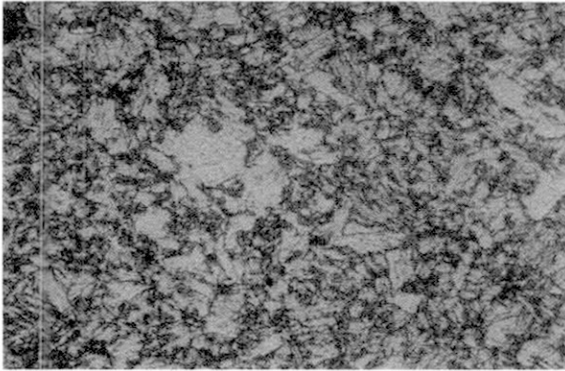
PASS	전류(A)	전압(V)	속도(시간)	비고
1	250	30	2'40"	
2	270	32	2'51"	
3	280	35	4'07"	
4	280	35	3'25"	
가우징				
5	250	30	1'42"	
6	250	30	2'23"	

표 6-(b). 용접조건(POSTEN80)

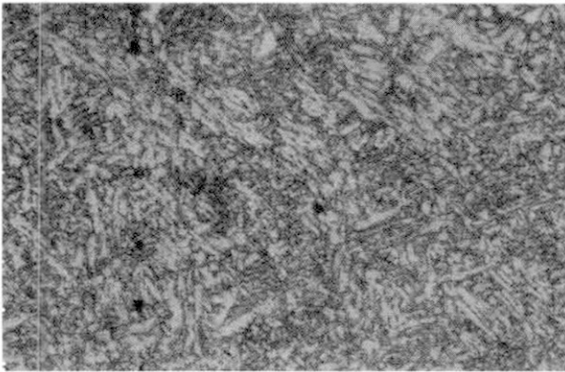
PASS	전류(A)	전압(V)	속도(시간)	비고
1	250	30	3'05"	
2	260	32	4'14"	
3	260	35	4'20"	
가우징				
4	250	30	2'03"	
5	250	30	2'30"	



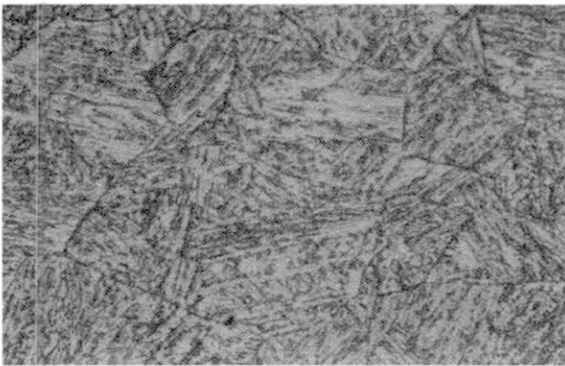
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2. 용접부 및 열영향부에서의 미세조직

5 PASS용접을 실시하였다. 전면용접 후 후면 용접시 가우징을 먼저 실시하여 후면의 불연속면 및 결함과 공극이 있는 부분을 제거한 후에 다시 용접을 실시하여 실험편을 제작하였다. 패스 층간 온도는 200℃ 온도쇼크를 사용하여 200℃이하가 되게 하였다.

2.2 실험결과

2.2.1 미세조직

용접이 끝난 후 용접부 및 용접부 근방의 열영향부(HAZ)를 절단하여 샘플(sample)을 채취 한 후 폴리싱(polishing)을 하고 Nital의 에칭제(etch-ant)를 이용하여 에칭한 후 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 사용한 광학현미경은 OLYMPUS PME3 모델로써 500배율의 크기로 미세조직을 촬영하였다. 그림 2에 그 결과를 나타내었다. 그림 2의 (a), (b)는 각각 POSTEN60의 용접부와 열영향부의 미세조직을 나타낸 것이고 (c), (d)는 각각 POSTEN80의 용접부와 열영향부의 미세조직을 나타낸 것이다.

표 7. 게이지 제원

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

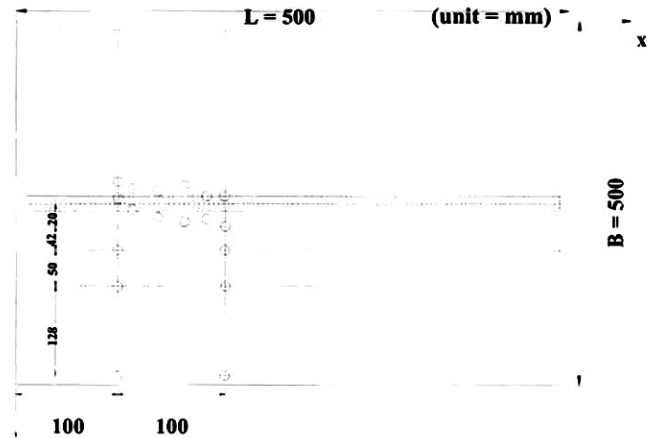


그림 3. 게이지 부착 위치

POSTEN60의 경우 용접부 및 열영향부에서의 미세조직은 마르텐사이트와 페라이트(Martensite and Ferrite)조직을 나타내고, POSTEN80의 경우에는 마르텐사이트(Martensite)조직을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 용접중에 오스테나이트화 온도 이상으로 가열 된 용접부와 열영향부는 용접후 공기중에

서 급냉하는 과정에서 상변태(마르텐사이트변태)를 일으키며, POSTEN80의 마르텐사이트 변태정도가 POSTEN60의 경우보다 크다는 것을 알 수 있다.

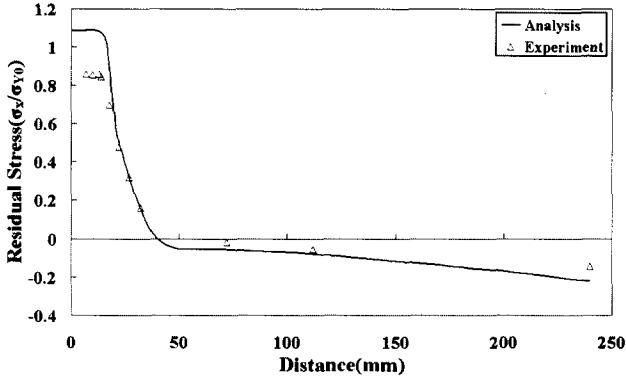


그림 4-(a). 실험결과(POSTEN60)

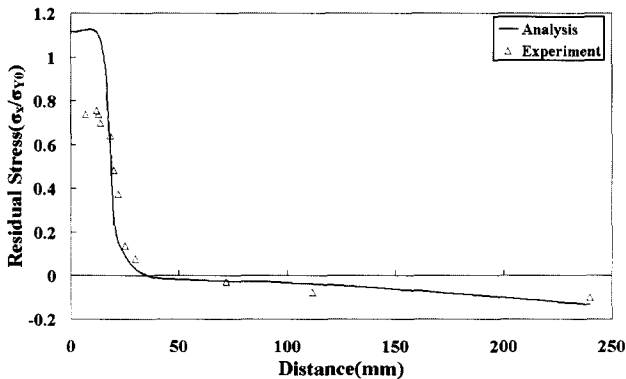


그림 4-(b). 실험결과(POSTEN80)

2.2.2 잔류응력 측정 결과

잔류응력을 측정하기 위해 사용된 게이지의 제원은 표 7과 같으며 부착한 게이지의 위치는 그림 3에 나타내었다. 용접부 및 열영향부에서의 상변태에 의한 잔류응력 완화효과를 관찰하기 위해서 용접선(weld line) 및 접합부로부터 각각 0mm, 1mm, ... , 5mm 위치에 게이지를 집중해서 부착하였다. 게이지를 부착하고 초기변형률을 측정 후 실험판을 게이지 부분별로 절단법을 실시하여 응력을 측정하였다. 그림 4와 그림 4-1에 각각 POSTEN60 강재와 POSTEN80 강재의 용접선 방향의 잔류응력 측정 결과를 나타내었다. 여기서 실선은 냉각 과정에서의 상변태현상을 고려하지 않고 단순히 용접선에 수직한 단면으로의 3차원 열탄소성 유한요소 해석을 수행하여 얻어진 결과인데, 실제 고강도 재료에서는 상변태에 의한 응력의 완화가 발생하기 때문에 그림에서와 같이 용접부에서 상당한 인장응력의 감소가 발생(용접부에서 용접

선방향의 잔류응력이 POSTEN60, POSTEN80의 경우 각각 약 $0.85 \sigma/\sigma_{y0}$, $0.75 \sigma/\sigma_{y0}$ 로 줄어듬)하여, 이를 고려하지 못한 해석의 결과와는 용접부에서의 응력 분포가 상당한 차이를 보이고 있다.

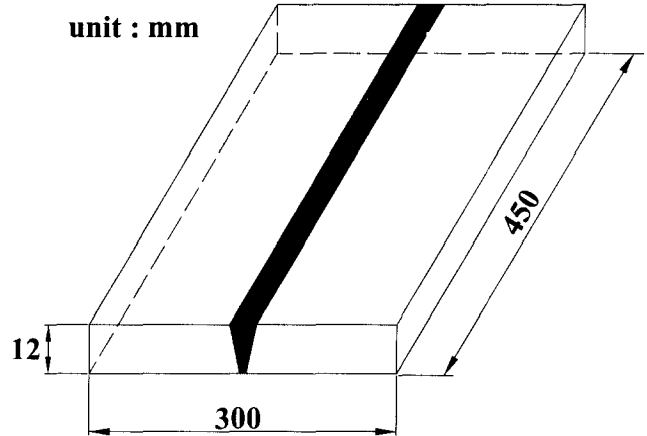


그림 5. 해석모델

표 8. 용접조건

Welding Metal	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm/min)
MGS-80	450	25	25

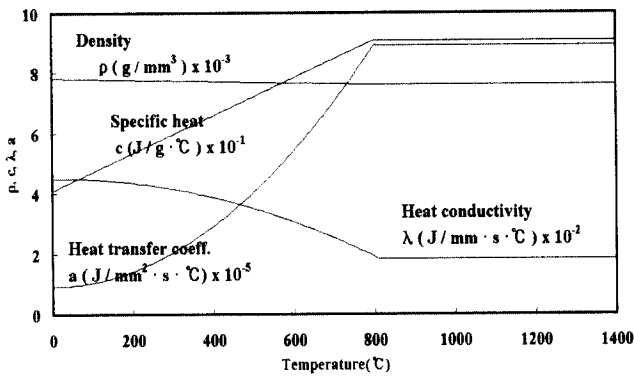
3. 수치적 모델

3.1 해석모델

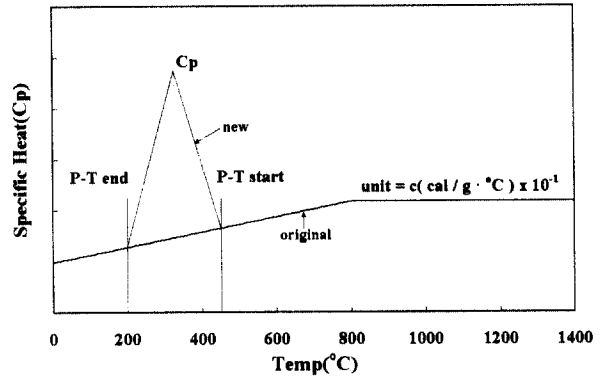
해석모델의 수치 및 형상은 그림 5에 나타내었다. 용접시편은 폭 150mm, 길이 450mm, 두께 12mm의 두 판을 맞대기 용접한 것으로 개선각이 60°C인 V개선 단층 용접의 경우이다. 용접조건은 표 8과 같고 해석에 사용한 재료는 POSTEN80 강재이다. 또한 3차원 열탄소성 해석은 재료의 물리정수(밀도, 비열, 열전달계수, 열전도율 등) 및 기계적 제성질(선팽창계수, 포아송비, 인장강도, 영율등)의 온도 의존성을 고려(Kim 등, 1998)하였다. 온도 변화에 따른 재료의 물리정수 및 기계적 제성질은 그림 6에 나타내었다.

3.2 상변태의 수치적 재현

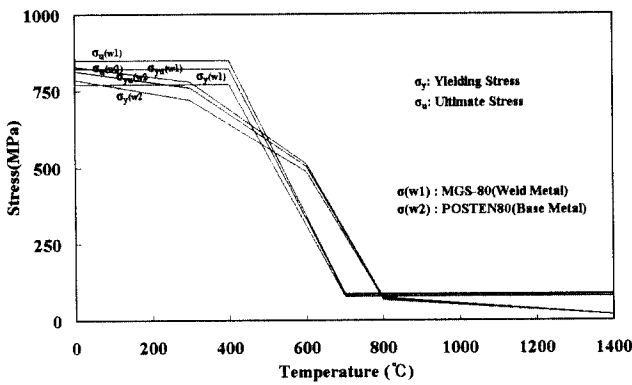
용접부 중 입열된 후 급냉되는 부분은 상변태를 겪게되는데, 이러한 상변태에 의한 체적의 팽창으로 응력의 완화가 발생한다. 이를 온도와 응력·변형률, 그리고 조직의 상관관계



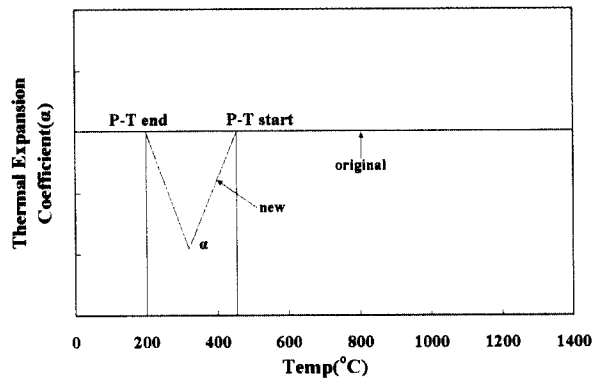
(a) 물리정수



(a) 비열



(b) 기계적 제성질



(b) 열팽창계수

그림 6. 재료의 물리정수 및 기계적 제성질

그림 7. 변태구간에서의 재료물성치의 변화

에서 살펴보면, 용접 입열과 냉각으로 인해 온도가 변화하면 상변화가 발생하고 이 때 체적의 팽창으로 인해 비열이 증가함으로써 다시 온도장이 변화한다. 또한 변태에 의한 체 적 변화는 변태 변형률과 응력의 원인이 된다. 그리고 온도와 조직 간의 상관관계는 재료의 물성치 중 비열의 변화에 크게 의존 하며, 응력· 변형률과 조직간의 상관관계는 재료의 열팽창계 수의 변화에 크게 의존한다. (Taljat 등, 1998) 이러한 물성 치 변화에 주목하여 상변태현상을 모델링하였다. 그림 7은 상 변태 온도 영역에서의 비열과 열팽창 계수의 온도에 따른 변 화를 나타내는 것으로, 반복적인 해석의 수행으로 변태구간에 서의 실험치의 잔류응력과 가장 잘 일치할 때의 Cp와 α를 구함으로써 본 연구에서 사용된 재료의 용접 후 냉각과정에서 의 상변태에 의한 응력완화의 정도를 정량적으로 평가하였다. 그림 8에 수치적 모델의 전반적인 알고리즘을 나타내었다. 해 석을 크게 두가지 영역으로 나누어 수행하였다. 즉 입열과정 은 입열이 완료될 때까지를 3차원 비정상열전도 해석을 수행 하여 오스테나이트화 온도이상으로 된 영역(변태영역)을 구하 고 이 때의 온도분포를 구하였다.

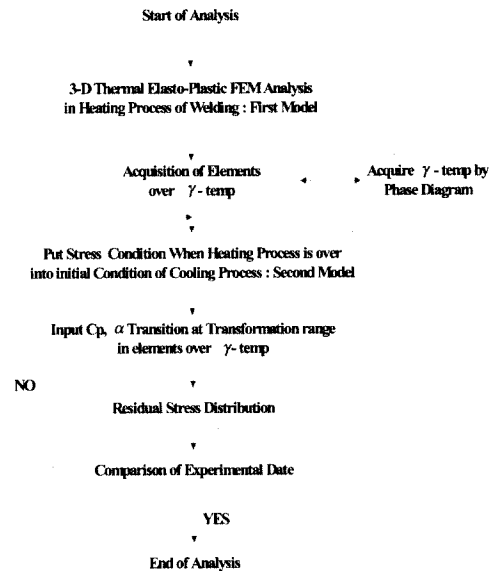


그림 8. 수치적 모델의 알고리즘

POSTEN 80의 오스테나이트 조직으로 변하는 Ac3 변태점 은 POSTEN80의 탄소(C) 함량이 0.07%이므로 상태도에서 살 펴보면 870°C 정도이나 잠복기가 존재하기 때문에 이를 고려

하기 위해서 50°C 정도 높은 온도인 920°C로 오스테나이트화 온도를 설정하였다. 냉각과정에서는 입열과정에서 구한 오스테나이트화 온도이상의 영역은 재료의 물성치 중 비열과 열팽창 계수가 그림 6과 같은 형태를 가지도록 하고 나머지 부분은 원래의 물성치를 가지도록 하여 해석을 수행하였다(장경복 등, 1999). 여기서 그림 6의 변태 시작 온도는 Andrews의 식(Andrews KW, 1965)을 이용하여 구했으며 Andrews의 식은 아래와 같다.

$$M_s = 539 - 423C - 30.4Mn - 12.1Cr - 17.7Ni - 7.5Mo \quad (1)$$

(1)식에서 POSTEN80의 화학성분을 이용하여 구한 마르텐사이트 변태 시작 온도는 455°C 이며, 변태 종료온도는 200°C이다. 이러한 과정을 해석으로 얻어진 잔류응력의 결과가 변태영역에서의 σ/σ_{y0} 값이 0.75가 될 때까지 반복하여 상변태시의 물성치 변화, 즉 그림 7의 Cp와 α 를 구하였다.

3.3 온도분포

3차원 비정상 열전도 해석을 상기와 같은 조건하에서 수행하여 온도이력을 구하였으며, 시간(t)에 따른 온도분포의 한 예를 그림 9에 나타내었다.

3.4 해석결과

그림 10은 입열과정의 해석에서 재료의 오스테나이트화 온도인 920°C를 넘어서는 영역을 나타낸 것으로 이 영역에서 냉각시에 상변태가 발생하여 변태응력에 의해 용접부의 응력을 완화시켜주는 역할을 한다.

그림 8에서와 같은 알고리즘이 냉각 중에 상변태현상을 제대로 재현하는지를 알아보기 위해, 그림 10에 나타난 영역내의 임의의 절점에서의 용접의 입열과 냉각과정 동안의 온도이력과 열응력을 상변태를 재현하지않는 일반적인 3차원 열탄소성해석으로 구하여진 결과와 비교하였다. 그림 11에 온도이력의 변화를 나타내었다. 결과를 살펴보면 상변태를 재현한(b)의 경우 변태 온도 영역에서 잠열로 인해(a)와 달리 온도 변화율이 줄어든 부분을 관찰할 수 있다. 그림 12에는 열응력의 변화를 나타내었다. (a)는 상변태를 재현하지 않은 모델의 경우이고 (b)는 상변태시 비열과 열팽창계수 모두를 고려한 경우이다. 결과를 살펴보면 상변태를 재현한 모델의 경우에는 상변태를 재현하지 않은 모델의 경우와는 달리 냉각

중에 변태 온도 영역에서 체적의 팽창으로 인해 응력의 완화가 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시된 수치적 모델이 용접 후 냉각중의 상변태 과정을 재현하고 있다고 할 수 있다.

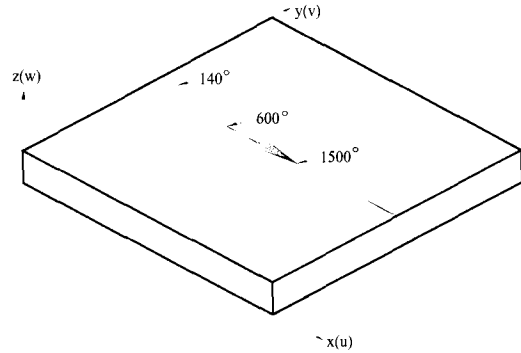


그림 9. 온도분포

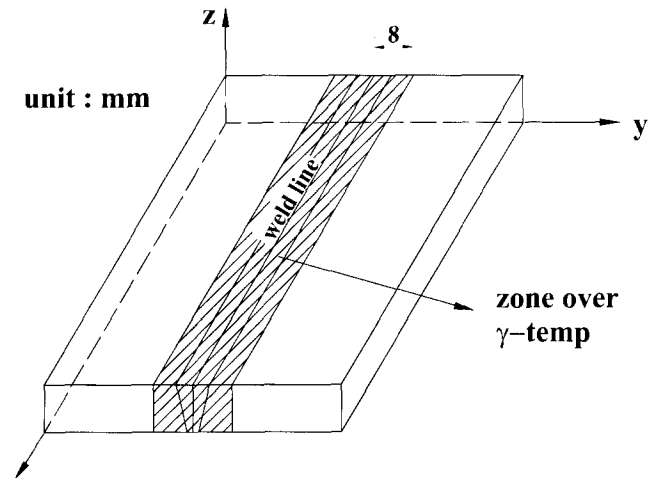
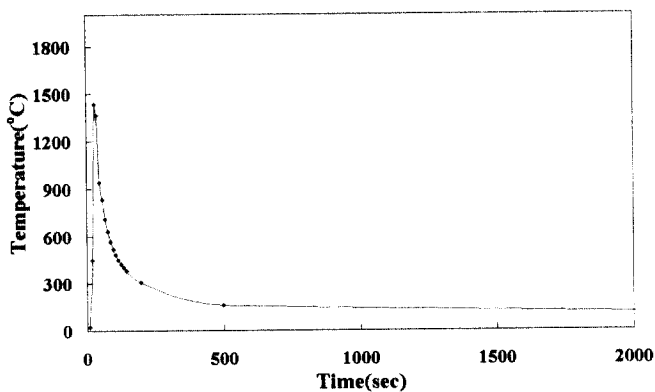


그림 10. 오스테나이트화 온도이상 영역

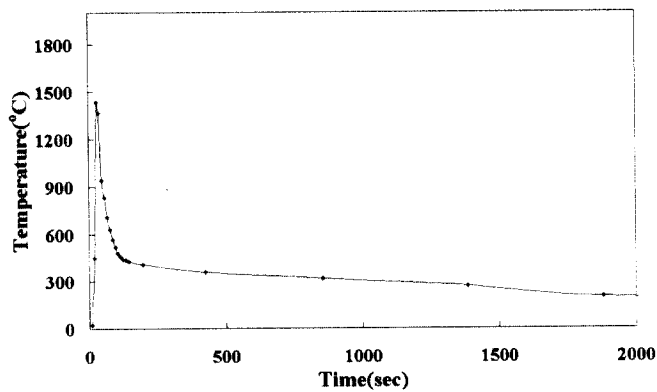
4. 상변태에 의한 잔류응력완화를 고려한 이중강재 용접접합부의 잔류응력 특징

4.1 해석모델

본 연구에 사용된 해석 모델은 그림 13에 나타낸 것과 같다. 각각 용접 구조용강재(SM400)와 고강도 강재(POSTEN60, POSTEN80)로 이루어진 500mm×1000mm×7mm 크기의 두 평면 플레이트를 입열량 $Q = 1200(J/mm)$, 용접속도 $v = 6(mm/s)$ 로 1pass 및 대기용접하는 것으로 하였다. 그림 14에 온도변화에 따른 재료의 기계적 제성질을 나타내었다.

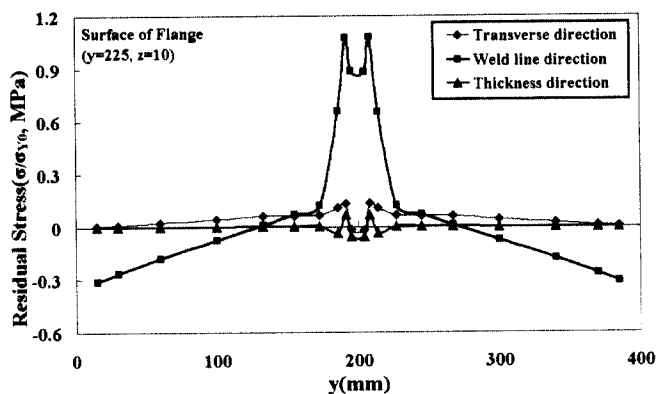


(a) 상변태를 재현하지 않은 경우

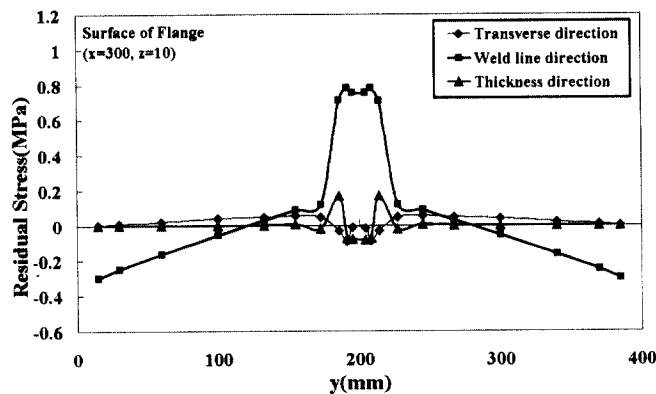


(b) 상변태를 재현한 경우

그림 11. 온도이력의 변화



(a) 상변태를 재현하지 않은 경우



(b) 상변태를 재현한 경우

그림 12. 열응력의 변화

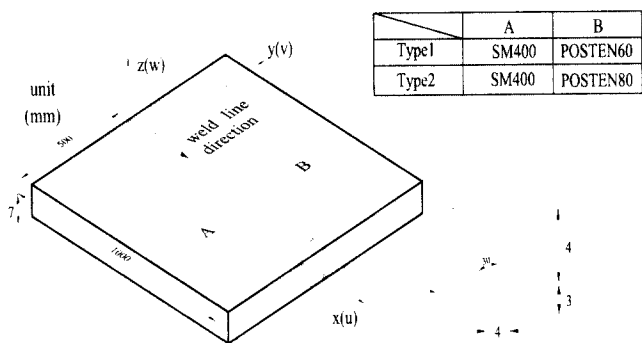


그림 13. 해석모델

4.2 용접선직각방향으로의 잔류응력

그림 15에 상변태를 고려하지 않은 경우 평판상단 ($x=500, z=6$)의 용접선방향축에서 직각방향으로의 잔류응력을 나타내었다. 잔류응력은 용접선 방향축에서 용접선 방향(weld line direction) 과 용접선직각방향(transverse direction), 그리고 두께방향(thickness direction)의 잔류응력

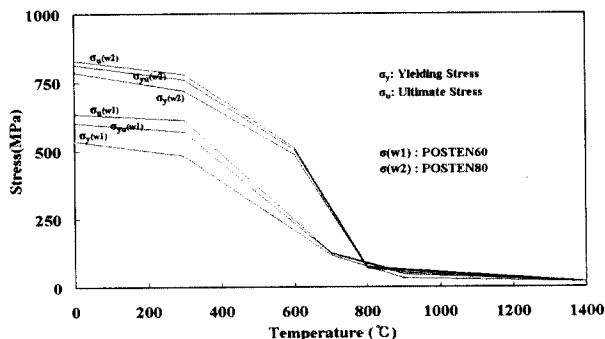
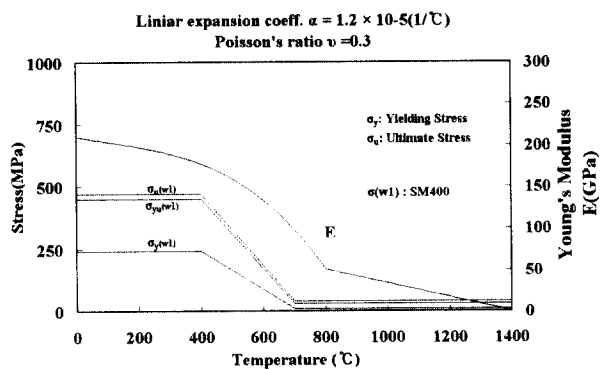


그림 14. 기계적 제성질

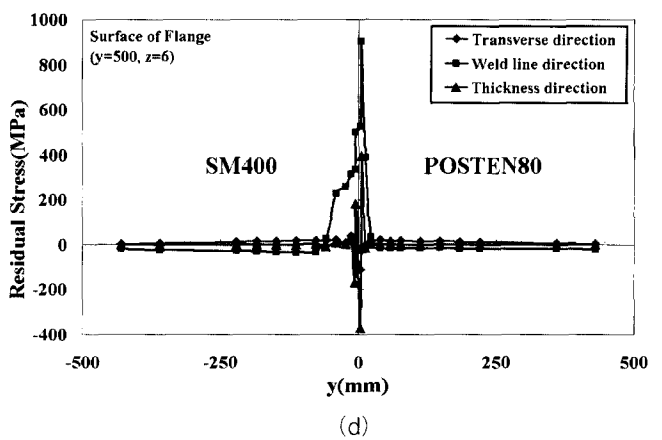
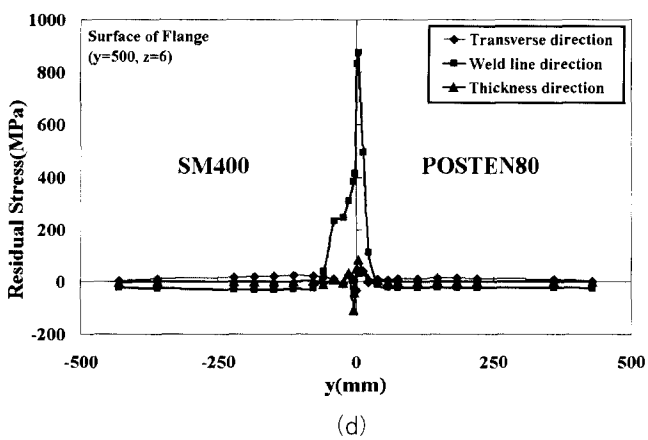
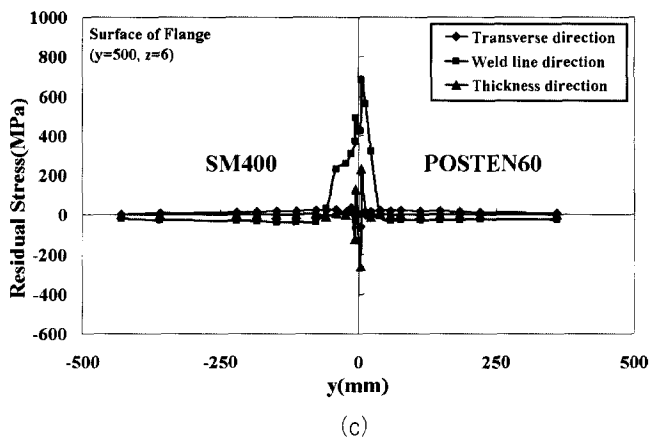
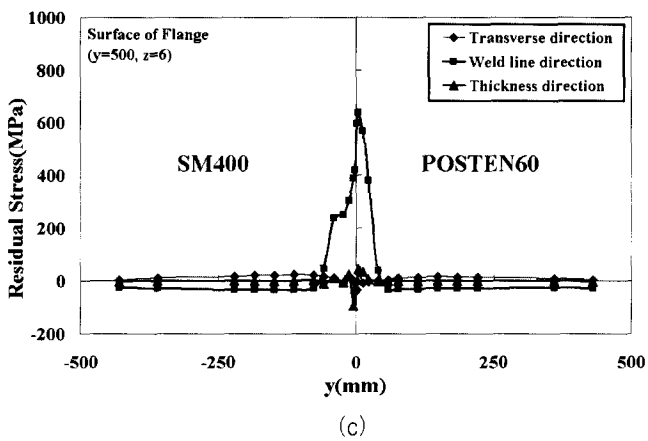
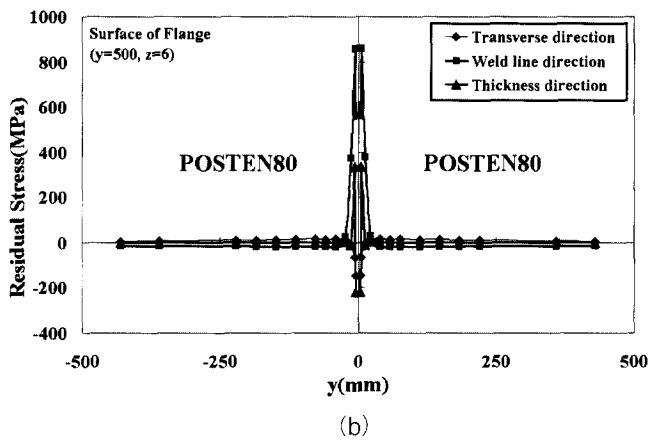
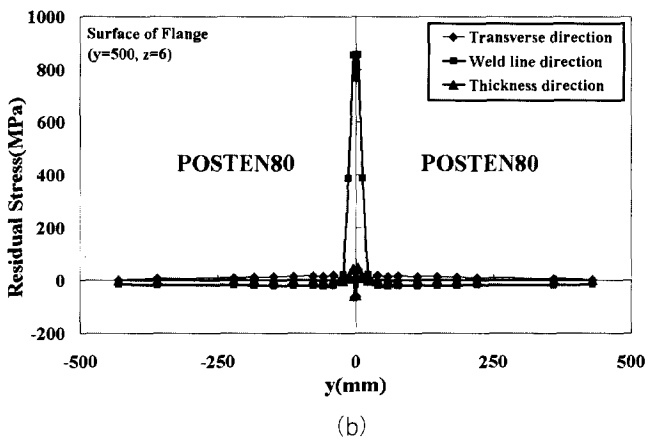
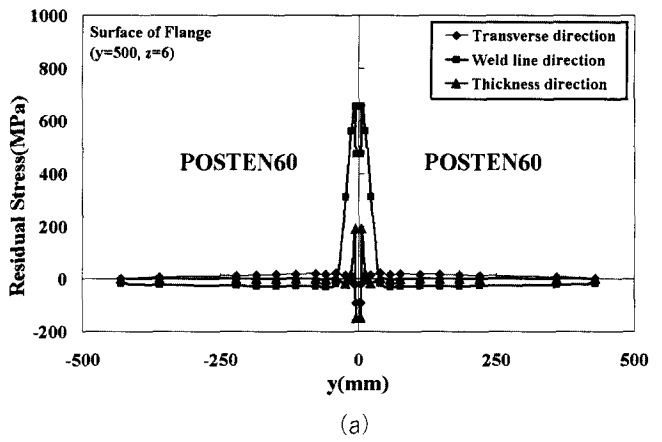
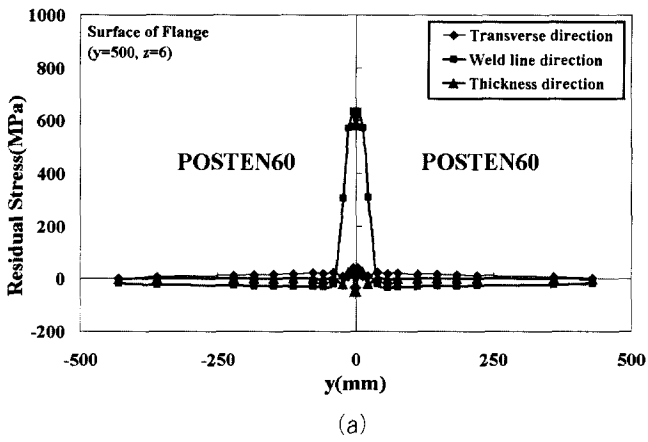


그림 15. 상변태를 고려하지 않은 경우의 잔류응력

그림 16. 상변태를 고려한 경우의 잔류응력

에 주목하였다. 상변태를 고려한 경우 잔류응력의 결과는 그림 16에 나타내었다. 그림 16(a)는 POSTEN60을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이고 그림 15(b)는 POSTEN80을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이다. 이상에서 상변태를 고려하지 않은 경우에 비해 상변태를 고려한 경우의 용접부 및 열영향부에서 잔류응력의 완화가 발생하고 있으며(POSTEN60 강재, POSTEN80 강재의 경우 각각 100MPa, 266MPa 완화됨) 또한 POSTEN80 강재의 용접부 및 열영향부에서의 잔류응력의 크기가 POSTEN60 강재보다 큼을 알 수 있다. 이것은 고강도강재의 용접시 냉각과정에서 발생하는 상변태에 의해 체적이 팽창되는데 이때 용접부의 잔류응력 발생의 원인이 되는 용접부 수축이 저하되어 결국 잔류응력의 크기가 감소되기 때문이다. 또한 용접부의 잔류응력의 감소정도는 POSTEN60, POSTEN80의 경우 각각 $0.85 \sigma / \sigma_{Y0}$, $0.75 \sigma / \sigma_{Y0}$ 이다. 그리고 열영향부 근방의 모재에서도 고강도강재의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN 80) 용접부의 잔류응력도 증가(653MPa < 860MPa)함을 알 수 있다. 이것은 강재의 인장강도가 클수록 용접에 의한 소성영역의 절대크기가 작아지기 때문이다.

이종강재를 접합한 평판의 경우 결과를 그림 16에 나타내었다. 그림 16(c)는 Type1(SM400과 POSTEN60)을 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이고 그림 16(d)는 Type2(SM400과 POSTEN 80)를 용접했을 때 잔류응력을 나타낸 것이다. 이상에서 SM400강재와 접합하는 강재의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN80) SM400강재의 용접부에서의 잔류응력이 커짐을 알 수 있다. 이것은 용접시 POSTEN80강재의 용접부에서의 잔류응력의 완화정도가 POSTEN60강재보다 크므로 Type2의 SM400강재측에서 상대적으로 더 큰 잔류응력이 발생했기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 실험을 통하여 고강도강재(POSTEN 60, POSTEN80)의 용접시 발생하는 상변태에 의한 잔류응력의 완화정도를 정량적으로 조사하였고, 상변태시 재료의 물성치 변화는 크게 비열과 열팽창 계수에 의존한다는 사실에 근거하여 해석적인 방법으로 변태 온도 영역에서의 열적·기계적 물성치 변화를 역추적함으로써 용접잔류응력의 완화에 영향을 미치는 상변태 현상을 정량적으로 평가할 수 있는 3차원 수치적 모델을 정립하였다. 여기서, 용접 공정의 해석을 크게 가열과 냉각과정으로 구분하여 수행함으로써 상변태로 인한 가열과정과 냉각과정에서의 물성치변화를 구현할 수 있었다. 또한 정립된 3차원 수치적 모델을 통해서 상변태에 의한 잔류

응력완화효과를 고려한 고강도강재 및 이종강재 용접접합부의 잔류응력 특징을 조사하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 고강도강재의 용접시에는 일반강재와는 달리 용접후 빠른 속도로 냉각하는 과정에서 겪게되는 상변태(마르텐사이트변태)에 의해 상변태 구간에서 체적이 팽창되는데 이때 잔류응력 발생의 원인이 되는 수축이 저하되어 결국 용접부 및 열영향부에서 잔류응력의 완화가 발생하며 그 정도는 POSTEN60, POSTEN80의 경우 각각 $0.85 \sigma / \sigma_{Y0}$, $0.75 \sigma / \sigma_{Y0}$ 이었다. 그리고 열영향부 근방의 모재에서는 고강도강재의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN80) 잔류응력은 증가(653MPa < 860MPa)함을 알 수 있었다. 이것은 강재의 인장강도가 클수록 용접에 의한 소성영역의 절대크기가 작아지기 때문이다.
- (2) 고강도강재와 일반구조용강재(SM400)의 이종강재 용접시에는 SM400 강재와 접합하는 고강도강재의 인장강도가 클수록(POSTEN60 < POSTEN80) SM400 강재의 용접부에서의 잔류응력이 커짐을 알 수 있었다. 이것은 용접시 POSTEN80 강재의 상변태에 의한 용접부에서의 잔류응력의 완화정도가 POSTEN60 강재보다 크므로 POSTEN80 강재와 접합하는 SM400 강재측에서 상대적으로 더 큰 잔류응력이 발생했기 때문이다.

참 고 문 헌

- 이진형, 장경호, 김재환(2003) 상변태에 의한 잔류응력완화효과에 관한 실험적 연구, 대한용접학회 학술발표대회 개요집, 대한용접학회, 제41권, pp.216-218
- 심용래(1997) 유한요소법을 이용한 용접부의 잔류응력, 변형 및 파괴해석, 대한용접학회지, 대한용접학회, 제 15권 제1호, pp.15-25
- 한국강구조학회(2001) 고강도강 교량 적용 설계 및 제작 기술 개발 연구
- 이승평(1998) 금속재료, 도서출판 청호
- 장경복, 손금렬, 강성수(1999) 잔류응력 완화에 미치는 상변태의 수치적 모델링, 대한용접학회 논문집, 대한용접학회, 제 17권 제6호, pp.84-89
- 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. 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変形の防止, 일본강구조학회 논문집, 일본강구조학회 pp.11-16
- Y.C.Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa(1999) すみ肉溶接で生じる面外変形の生成機構と普遍性の検証, 일본 용접학회 논문집, 일본용접학회 pp.294-300
- 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変形の豫則と精度, 일본기계학회 강연논문집, 일본기계학회, pp.295-296
- 장경호(1999) 필렛 용접에서 생기는 변형 및 잔류응력에 끼치는 용접 제조건의 영향, 대한토목학회 구조위원회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp.1-4
- 장경호, 이진형(2002.3) 인장력을 받는 이중강재 용접접합부의 잔류응력 해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제22권 2-A호, pp.201-210
- 장경호, 이진형(2000) 이중강재 접합부의 응력 거동, 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, pp.268-272
- 장경호, 이진형(2000) 이중강재 맞대기 용접에 따른 용접부의 잔류응력 특징, 대한용접학회 학술발표대회 개요집, 대한용접학회 pp.235-238
- 장경호, 양성철, 강재훈(2001) 강관적층용접부 잔류응력의 생성 기구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제 13권 4호, pp.327-335
- 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)*
- B.A.B. Anderson(1978) Thermal Stresses in a Submerged Arc Welded Joint Considering Phase Transformation, *Transaction of ASME*, Vol.100, pp. 110-123
- Y.C. Kim, K.H. Chang, and K. Horikawa(1998) 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
- M. Shibahara, H. Serizawa and H. Murakawa(2001) 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(2001) 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. Kaierle and, R. Poprawe (2001) 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(2001) High Strength Steel Weld Metals - Developments with Ni and Mn, *7th International Welding Symposium*, Vol.1, pp.797-802
- Andrews KW(1965) Empirical formulae for the calculation of some transformation temperature, *J Iron Steel Inst*, vol.203, pp.721-727

(접수일자 : 2004. 7. 9 / 심사일 2004. 7. 23 /
심사완료일 2004. 9. 23)