

# 상변태에 의한 잔류응력 완화효과에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on The Effect of Residual Stress Relaxation due to Phase Transformation

장 경호\*, 이 진형\*\*, 김재환\*\*

\* 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과

\*\* 중앙대학교 공과대학 토목공학과

**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 compare the effect of phase transformation on the relaxation of welding residual stress in high strength steels(POSTEN60, POSTEN80) with analytical results which is not considering the effect of phase transformation on residual stress relaxation.

According to the results, the extents of welding residual stress relaxation due to phase transformation in the case of welding of POSTEN60, POSTEN80 are  $0.85 \sigma/\sigma_{Y0}$ ,  $0.75 \sigma/\sigma_{Y0}$  respectively.

## 1. 서 론

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 추가 공정이므로 비용 및 작업시간의 증가를 가져온다. 이에 반해 대부분의 용접재가 용접 후 빠른 속도로 냉각되는 과정에서 겪게되는 상변태(마르텐사이트 변태)는 용접공정 중에 발생한다. 그 결과 고강도강의 용접시 상변태가 용접잔류응력을 완화시킨다는 것이 알려졌다. 그러나 기존의 연구는 미국이나 일본 등에서 외국에서 생산되는 고강도강재에 대한 연구만 수행되고 있을 뿐 국내에서 생산되는 고

강도강재에 대한 연구는 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 실험(잔류응력의 측정)을 통하여 국내에서 생산되는 고강도강(POSTEN60, POSTEN80)용접시 상변태가 잔류응력의 완화에 미치는 영향을 정량적으로 조사하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료 및 형상

#### 2.1.1 실험판의 제작

고강도강재 용접시의 잔류응력을 측정하기 위해 실험판을 제작하였으며 그 재질 및 수량은 표 1과 같다. 실험판 제작에 쓰인 강재는 고강도강재인 POSTEN60강재와 POSTEN80강재이며 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 기계

표 1. 실험판의 재질 및 수량

좌측면	우측면	수량
POSTEN60	POSTEN60	1SET
POSTEN80	POSTEN80	1SET

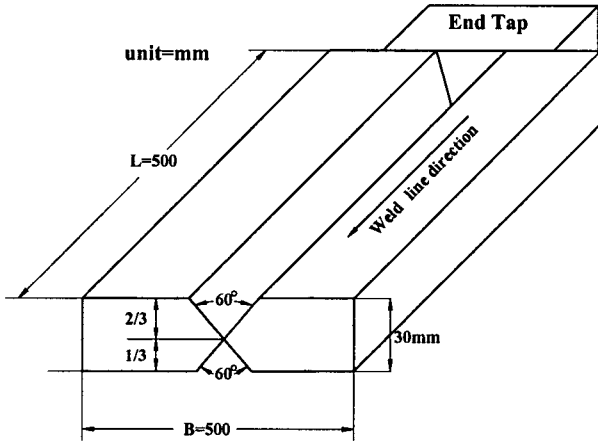


그림 1. 실험판의 크기 및 형상

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

적 성질은 제조자의 성적서(KWS 및 JIS 규격)를 인용하였다. 본용접을 하기전에 예열을 실시하였다. 예열범위는 용접선 양측 100mm까지 이며 예열속도는 30cm/min로 하였다. 그리고 예열온도는 표 5에 나타내었다. 예열 실시 후 본용접은 표 6과 같이 POSTEN60강재의 경우 FCAW(Flux

표 5. 예열온도

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

표 6-1. 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 6-1. 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"	

Cored Arc Welding)로 총 6PASS, POSTEN80강재의 경우 GMAW(Gas Metal Arc Welding)로 총 5PASS용접을 실시하였다. 전면용접 후 후면용접시 가우징을 먼저 실시하여 후면의 불연속면 및 결함과 공극이 있는 부분을 제거한 후에 다시 용접을 실시하여 실험판을 제작하였다. 패스충간온도는 200℃ 온도쇼크를 사용하여 200℃이하가 되게 하였다. 잔류응력을 측정하기 위해 사용된 게이지의 제원은 표 7과 같으며 부착한 게이지의 위치는 그림 2에 나타내었다.

표 7. 게이지 제원

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

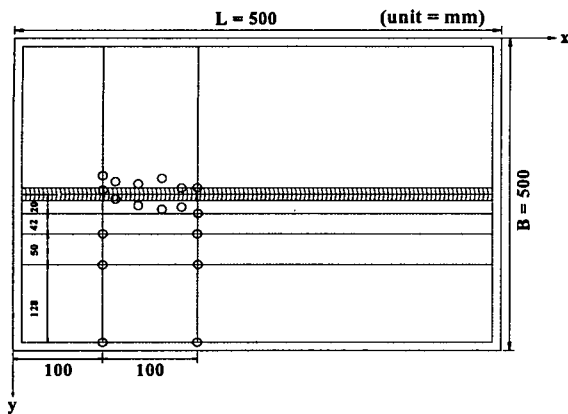


그림 2. 게이지 부착 위치

2.2 실험결과

게이지를 부착하고 초기변형률을 측정 후 실험편을 게이지 부분별로 절단법을 실시하여 응력을 측정하였다. 그림 3에 용접선 방향의 잔류응력 측정 결과를 나타내었다. 그림 3-1은 POSTEN60강재의 결과이고, 그림 3-2는 POSTEN80강재의 결과이다. 여기서 실선은 냉각 과정에서의 상변태현상을 고려하지 않고 단순히 용접선에 수직인 단면으로의 3차원 열탄소성

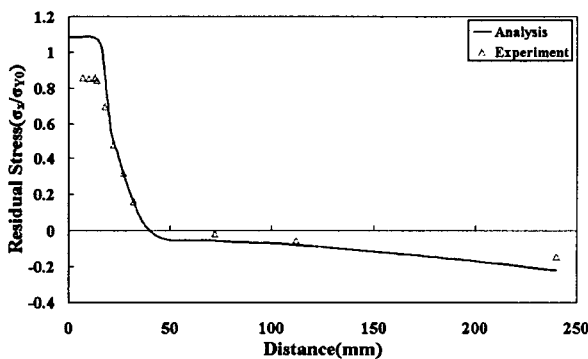


그림 3-1. 실험결과(POSTEN60)

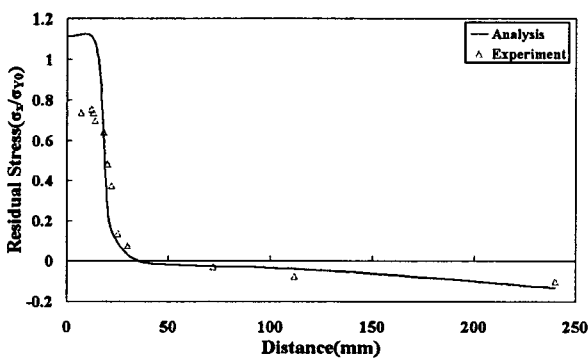


그림 3-2. 실험결과(POSTEN80)

유한요소 해석을 수행하여 얻어진 결과인데, 실제 고강도 재료에서는 상변태에 의한 응력의 완화가 발생하기 때문에 그림에서와 같이 용접부에서 상당한 인장응력의 감소가 발생(용접부에서 용접선방향의 잔류응력이 POSTEN60, POSTEN80의 경우 각각 약  $0.85 \sigma/\sigma_{Y0}$ ,  $0.75 \sigma/\sigma_{Y0}$ 로 줄어듦)하여, 이를 고려하지 못한 해석의 결과와는 용접부에서의 응력의 분포가 상당한 차이를 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 실험을 통하여 고강도강재 용접시의 상변태에 의한 잔류응력완화 효과를 조사하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고강도강재(POSTEN60, POSTEN80)에서는 용접 후 냉각하는 과정에서 발생하는 상변태로 인하여 용접부 및 HAZ부에서 상당한 인장잔류응력의 감소(POSTEN60, POSTEN80의 경우 각각 약  $0.85 \sigma/\sigma_{Y0}$ ,  $0.75 \sigma/\sigma_{Y0}$ 로 줄어듦)가 발생한다.
- 2) 고강도강재(POSTEN60, POSTEN80)의 인장강도가 클수록 상변태에 의한 잔류응력의 완화정도가 커진다.

참고문헌

1. 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.150-156
2. 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
3. 이승평, (1998), "금속재료", 도서출판 청호
4. B.A.B. Anderson, (1978), "Thermal Stresses in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformation", Transaction of ASME, Vol.100, pp. 110-123
5. B. Taljat, B. Radhakrishnan, T. Zacharia, (1998), "Numerical Analysis of GTA Welding Process with Emphasis on Post-Solidification Phase Transformation Effects on Residual Stresses", Materials Science and Engineering A246, pp.45-54