

研 究 論 文

大韓熔接學會誌  
第6卷, 第4號, 1988年 12月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.6, No.4, Dec., 1988

## Butt 용접부에서 잔류응력이 피로균열성장거동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구(I)<sup>+</sup>

최용식\*, 김영진\*\*, 우홍식\*\*\*

### Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Behaviour in Butt Weldment(I)(Experimental Study)

Y. S. Choy\*, Y. J. Kim\*\*, H. S. Woo\*\*\*

**Key Words** : Fatigue Crack Growth Behavior(피로균열전파거동), Threshold Stress Intensity Factor Range(임계응력확대계수폭), PWHT(용접후열처리), Residual Stress(잔류응력)

#### Abstract

The objective of this paper is to investigate the effect of residual stress on fatigue crack growth behavior. For this purpose, submerged arc welding was performed on SM50A steel plate and post weld heat treatment (PWHT) was followed. Residual stress distribution on the weld plate was determined by a hole drilling method and a series of  $\Delta P$ -const. and  $\Delta K$ -decreasing fatigue test were performed on the three different regions, i.e. weld metal, HAZ and base metal. Following conclusions were achieved.

1. In "as welded" specimens, tensile residual stresses were produced in the center portion of the specimen while compressive residual stresses were produced near the edges. In PWHT specimens, however, most of the residual stresses were disappeared.
2. The fatigue crack growth behavior in low  $\Delta K$  region was considerably affected by the presence of residual stress in both "as welded" and PWHT specimens.
3. Because of the relaxation of residual stresses in PWHT condition, the values of  $m$  increased from 2.62-2.78(in the "as welded" condition) to 3.57-3.91(in the "PWHT" condition)

<sup>+</sup> 1987년도 추계학술대회 발표

\* 성균관대 기계공학과

\*\* 성균관대 기계설계학과

\*\*\* 성균관대 대학원 기계공학과

## 1. 서 론

용접으로 제작되는 대형압력용기, 교량, 선체구조물등의 파괴문제는 구조물의 안전성 및 경제성 측면에서 지대한 관심의 대상이 되어왔다. 용접구조물의 파괴원인은 주로 용접시에 발생하는 잔류응력이나 수소의 흡수, 또는 용접열로 인한 금속조직의 변화등에 의한 기계적 성질의 저하에 기인된다고 알려지고 있다. 따라서 이같은 문제점을 최소화하기 위한 용접봉의 개발, 용접방법의 개선, 그리고 열처리 방법에 관한 연구가 꾸준히 계속되어 왔다.<sup>1)2)</sup>

용접잔류응력을 제거하기 위해 보통 용접후열처리(post weld heat treatment : PWHT)를 실시하고 있는데, 강의 경우는 600°C 이상의 고온에서 오랜시간 유지되기 때문에 용접부, 특히 용접열영향부(heat affected zone : HAZ)의 조대결정조직에 균열이 발생하거나 재질의 취화를 가져오는 예가 많다.<sup>3)</sup>

현재까지 잔류응력의 분포를 실험적으로 측정하거나 유한요소법등의 수치적인 방법에 의해 해석하려는 연구가 여러 연구자들에 의해 추진되어 왔으나<sup>4)~6)</sup> 아직까지는 정성적인 해석단계를 벗어나지 못하고 있다. 또한, 용접부의 피로균열성장거동에 관한 많은 연구가 있으나<sup>7)~9)</sup> 용접조건이나 용접부위의 금속조직의 변화에 따른 해석이 많고, 이들의 실험결과에서도 공통된 추세를 밝히지 못

하고 있다.

본 연구에서는 선형탄성파괴역학의 관점에서 이들 문제를 다루고자 한다. 연구방법은 용접구조물인 SM50A를 맞대기 잠호용접(butt-submerged arc welding)을 한 다음에 as weld재 및 PWHT 재에 대하여 각각 잔류응력의 분포를 측정한 후,  $\Delta K$ -감소 피로시험과  $\Delta P$ -일정 피로시험을 수행하고 잔류응력이  $\Delta K_{th}$  및  $da/dN - \Delta K$  관계에 미치는 영향을 해석하고자 한다.

## 2. 실 험

### 2.1. 시험편 및 실험장치

본 실험에 사용된 재료는 국내 시판중인 판 두께 11mm의 용접구조물강판(SM50A)으로 화학적 성분은 Table 1에, 상온에서의 기계적 성질은 Table 2에 제시되어 있다. 용접시험편을 얻기 위하여 강판을 50mm×100mm의 크기로 절단을 한 후에 압연방향과 직각으로 60° V-groove 를 기계가공 한 다음, 잠호용접기를 사용하여 용접재의 전, 후면을 각기 1pass로 용접하였으며 second pass를 실시하기에 앞서 arc air gouging을 실시하여 용접시에 발생할 지도 모르는 용입불량을 방지하였다. 용접조건은 Table 3과 같으며 사용된 용접봉은 시판중인 연강 및 50Kg급 고장력강 용인 H-14( $\phi = 4mm$ )이었고, flux는 동 회사제품의 bonded-type flux이었다. 그리고 용접봉의 화학적 성분은 Table 4와 같다.

용접판으로부터 시험편의 채취는 Fig.1과 같이 하였고 base metal, weld metal, HAZ부가 시험편

**Table 1 Chemical composition(weight %)**

C	Si	Mn	P	S
0.14	0.41	1.32	0.16	0.05

**Table 2 Mechanical properties**

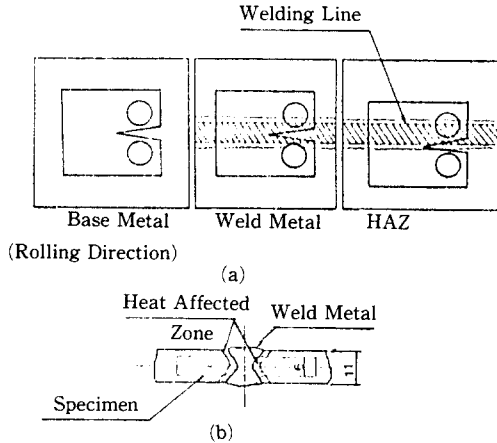
Metal	Yield strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
Base	38	53	29
As welded	52	55	16
PWHT	35	50	32

**Table 3 Welding procedure**

Material	Welding method	Welding position	Welding current(A)	Welding voltage(V)	Welding speed (Cm/Min)	Heat input (KJ/Cm)	Number of Pass	
							1st weld side	2nd weld side
SM50A	Submerged arc	Flat	500	30	50	18	1	1

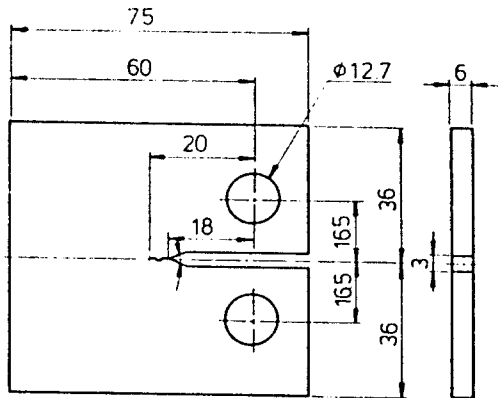
**Table 4 Chemical composition of welding wire**  
(weight %)

C	Si	Mn
0.12	0.03	1.93



**Fig.1. Specimen Orientation**

- (1) CT specimens prepared for fatigue tests in the three different locations
- (2) Location of fatigue specimens



**Fig.2. Geometry of CT specimens**  
(Unit : mm)

의 중앙에 오도록 하여 Fig.2와 같이 ASTM E647-83<sup>15)</sup> 규격에 따라 CT 시험편으로 가공하였다. 용접잔류응력을 제거하기 위한 PWHT 는 as weld 상태의 시험편을 가열속도 200℃/hr로 650℃ 까지 가열한 후, 100분동안 유지한 다음 노냉하였다.

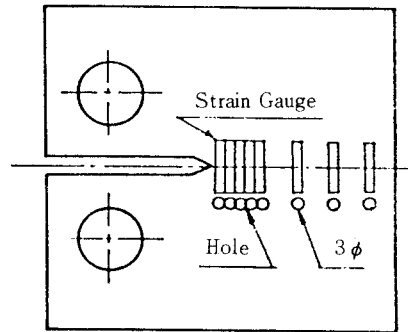
피로시험에는 25ton용량의 dynamic universal testing machine(Instron Model 1332)을 사용하였

고, 피로균열길이는 배율이  $\times 25$ 인 digital식 이동 현미경을 사용하여 측정하였다.

## 2.2. 실험방법

### 2.2.1. 잔류응력의 측정

As weld상태의 base metal, HAZ, weld metal 및 PWHT 상태의 weld metal, HAZ에 대한 균열선단의 잔류응력분포는 Mathar<sup>16)</sup>의 hole drilling method를 이용하여 하중축 방향에 평행인 잔류응력을 측정하였다. 이때의 strain gage 및 구멍의 위치는 Fig.3과 같다.



**Fig.3. Positions of strain gage and holes drilled for detecting residual stresses**

### 2.2.2 $\Delta P$ - 일정피로시험

$\Delta P$  - 일정피로시험은 ASTM E647-83에 준하였으며 이때의 하중제어는 정현파, 하중비( $R = P_{min}/P_{max}$ )는 0.05, 하중반복수는 30Hz, 그리고 실험온도는 23℃(실온)이었다. Precrack은 기계 notch로부터 약 2mm 정도 진행시켰으며 precracking초기에는 본 피로시험시의 하중보다 큰 피로하중을 주었고 precrack 이 성장함에 따라 10%씩의 하중감소를 실시하여 최종 precrack 길이에 도달시에는 본 실험에서의 하중조건과 같게 하였다. 이때의  $P_{max}$ 은 ASTM E647-83에 제시된 소규모항복조건을 만족하는 크기로 정했으며 피로균열의 0.2-0.3mm 증가할 때 마다 시험편의 전, 후면을 동시에 측정하여 그의 평균값을 균열 길이로 취하였다.

### 2.2.3. $\Delta K$ - 감소 피로시험

$\Delta K_{th}$  값을 결정하기위한 시험법에는 여러가지 방

법<sup>17)18)</sup>들이 있으나, 본 실험에서는 Amzallag<sup>18)</sup>가 제시한 방법을 채택하였다.  $\Delta P$  - 일정피로시험시의 시험편과는 별개의 시험편으로  $a/W$ 가 0.45에 도달할 때까지는  $\Delta P$ -일정피로시험을 수행하고,  $0.45 < a/W < 0.55$  구간에서 균열길이가 0.2-0.3 mm 성장함에 따라 5%씩 하중을 감소시켜  $da/dN$  이  $10^{-7}mm/cycle$ 이 하가 될 때에 실험을 끝냈다.

2.3. 해석방법

$\Delta P$ -일정피로시험에서 얻은 data 로 a-N관계곡선을 구하고  $\Delta K$ 의 계산에는 ASTM E647-83에 제시된 다음식을 사용하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2 + \alpha)}{B\sqrt{W}(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

여기에서  $\alpha$ 는  $a/W$ , B는 시험편의 두께, W는 시험편의 폭을 나타낸다. 그리고 a-N관계로부터 seven point incremental method로 계산하여  $da/dN - \Delta K$  관계를 구하였다.

피로균열성장의 하 한계치인 임계응력확대계수 폭(threshold stressintensity factor range)  $\Delta K_{th}$ 는  $\Delta K$ -감소 피로시험에서  $da/dN$ 이  $10^{-7}mm/cycle$  이 하가 될때의  $\Delta K$ 값을  $\Delta K_{th}$ 로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 잔류응력 및 경도분포

As weld 상태의 base metal, HAZ, weld metal

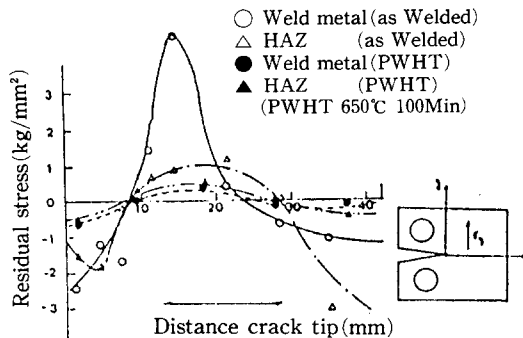


Fig.4. Residual Stress Distribution( $\sigma_y$ )

및 PWHT상태의 weld metal, HAZ에 대한 균열 전전면의 하중축 방향의 잔류응력분포는 Fig.4와 같다. 용접판에서 CT형상으로 시험편을 채취할 경우는 weld metal, HAZ는 균열선단부근 및 시험편의 끝부근에는 압축잔류응력이, 시험편의 중간부위에는 인장잔류응력이 분포하고 있음을 알 수 있는데, 이는 다른 연구자들의 연구결과와도 잘 일치한다.<sup>11)~14)</sup>

PWHT시험편에서의 잔류응력은 상당량 제거되거나 완전한 제거는 이룰 수 없었다. 그리고 이때의 잔류응력분포는 as weld 상태의 잔류응력분포와 경향은 비슷하게 나타났다.

Fig.5는 Rockwell Hardness,  $H_R$ (B scale)의 분포를 나타낸 것으로 시험편 전, 후면의 경도분포는 차이를 보여 주고있다. 시험편 전면의 경도치가 후면과 비교하여 상당히 감소하는 이유는 2nd pass용접시의 용입열에 의하여 부분적으로 열처리가 된 것에 기인된다고 생각된다. 그러나 잔류응력을 제거하기 위한 PWHT재의 경우에도 경도치는 as weld재와 비슷한 양상을 보여주고 있다.

본 연구에서는 weld metal, HAZ는 저  $\Delta K$ 영역인 near threshold부근에서는 시험편 전, 후면 균열길이의 차이가 1-1.2mm 정도 나타났으나,  $\Delta P$ -일정 피로시험에 의한 고  $\Delta K$ 영역에서의 균열 길이는 양면이 거의 일치하였다. 특이한 사항은 near threshold 부근에서 잔류응력이 상당량 이완된 PWHT 재의 weld metal, HAZ 도 역시 균열길이의 차이가 1-1.2mm 정도 발생하였는 데 이는 두께방향의 잔류응력 및 시험편 전, 후면 경도의 차이로 추측할 수 있는 금속조직의 차이가 복합되어서 피로균열성장거동에 영향을 준다고 생각할 수 있다. 여기에 대해서는 추후에도 지속적

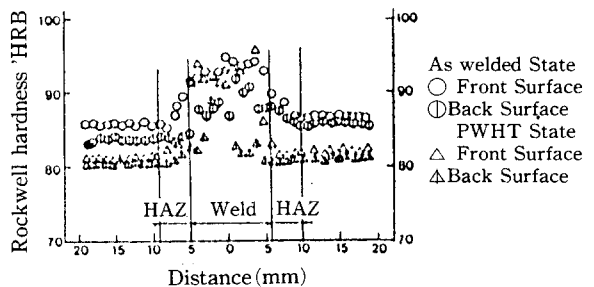


Fig.5. Hardness distribution in weldment

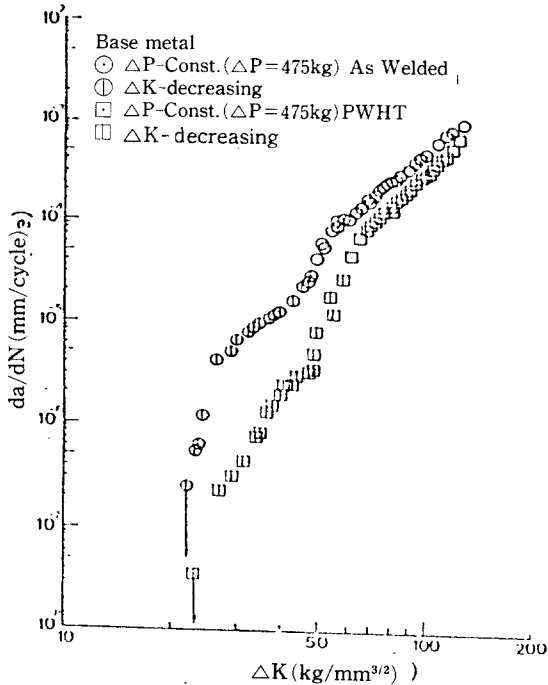


Fig. 6. Comparison of fatigue crack growth data obtained by  $\Delta P$ -const and  $\Delta K$ -decreasing for SM50A

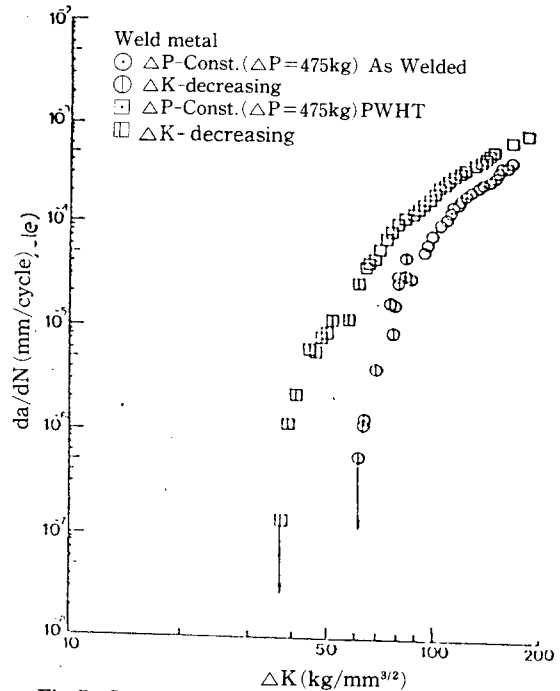


Fig. 7. Comparison of fatigue crack growth data obtained by  $\Delta P$ -const. and  $\Delta K$ -decreasing for SM50A

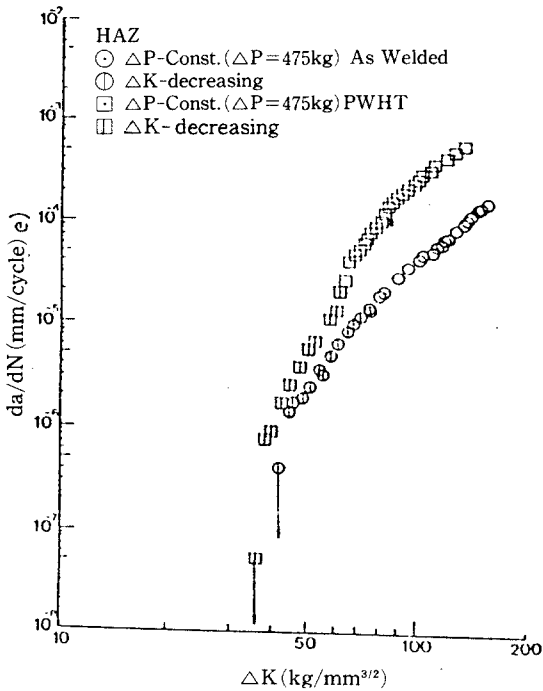


Fig. 8. Comparison of fatigue crack growth data obtained by  $\Delta P$ -const. and  $\Delta K$ -decreasing for SM50A

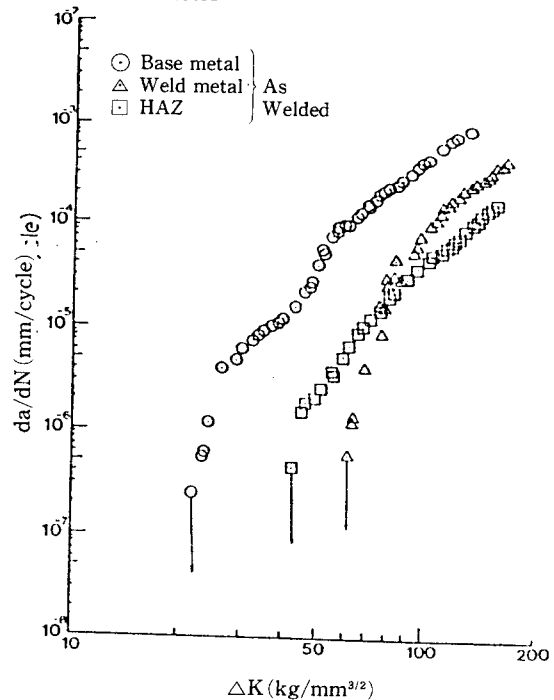


Fig. 9. Comparison of fatigue crack growth data obtained by  $\Delta P$ -const. and  $\Delta K$ -decreasing for SM 50A.

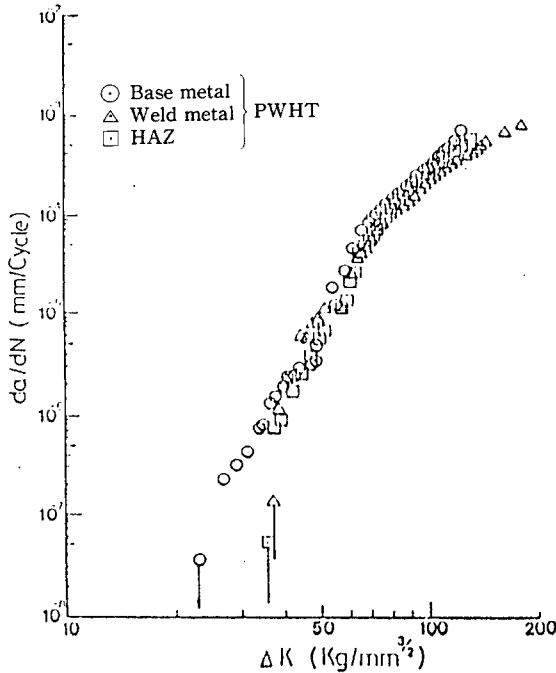


Fig.10. Comparison of fatigue crack growth data obtained by  $\Delta P$ -const. and  $\Delta K$ -decreasing for SM50A.

인 연구가 필요하다.

3.2. 잔류응력이  $\Delta K_{th}$ 에 미치는 영향

Fig. 6-Fig. 10은 실험결과로부터 구한  $da/dN$ - $\Delta K$ 관계곡선을 보여주고 있다. As weld재에 대한 실험결과인 Fig. 6-Fig. 9에서 보여주듯이 base metal, HAZ, weld metal 순으로  $\Delta K_{th}$  값이 커지고 있다. 이는 Fig. 4에 제시된 균열선단에서의 초기 잔류응력분포에서 나타난 압축잔류응력의 영향이라 볼 수 있다. 즉, HAZ, weld metal에서는 base metal에 비하여  $\Delta K_{th}$  값이 커지고, weld metal에서는 HAZ에 비하여 균열선단의 압축잔류응력이 클수록  $\Delta K_{th}$  값은 커진다고 볼 수 있다.

다. Weld metal에서의  $K_{th}$  값은 base metal에 비하여 거의 3배 정도 크게 나타났다.

PWHT재에서는 잔류응력이 Fig. 4에서와 같이 상당량 이완된 것으로 나타나 있으나 미소하게나마 잔류응력이 존재하고 있어, 이것이 Fig. 6-Fig. 8, Fig. 10에서 보여주듯이 near threshold부근의  $da/dN$ - $\Delta K$ 관계에 큰 영향을 주는 것으로 나타나 있다. Fig. 4에서와 같이 weld metal, HAZ의 균열선단에는 비슷한 크기의 압축잔류응력이 존재하여 이들 부위에서의  $\Delta K_{th}$ 는 비슷하게 나타나나, base metal에 비교하여서는 거의 1.6배 정도가 크게 나타나고 있다. 이로써 균열선단의 잔류응력은 near threshold부근에서의 피로균열성장거동에 크게 영향을 준다고 볼 수 있다.

3.3 잔류응력이 피로균열성장거동에 미치는 영향

As weld 재나 PWHT재에서의  $da/dN$  - $\Delta K$ 관계곡선은 Fig. 6-Fig. 10에서와 같이  $da/dN$ 이  $4 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$  mm/cycle에서는 power law인  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 잘 만족하고 있다. As weld 재의 경우, Fig. 9에서와 같이 weld metal, HAZ에서는 base metal과 비교하여 동일한  $\Delta K$  값에 대하여  $da/dN$ 이 느리게 나타난 것으로 미루어 볼 때 균열선단의 압축잔류응력의 영향을 받는 것으로 추정할 수 있다. Ohta<sup>9)</sup>, Murakami<sup>11)</sup>, Kapadia<sup>12)</sup>, Kobayashi<sup>13)</sup> 등에 의하면 피로균열의 잔류응력 재분포형상은 초기 잔류응력의 분포형상과 같은 경향을 보여주며 균열이 진전됨에 따라 점차로 감소되어 나간다고 하였는데, 본 연구결과와 이들의 연구결과와 잘 일치하고 있다.

그러나, as weld상태의 base metal, HAZ, weld metal에 대한 기울기 m 값은 Table 5에 제시된 바와 같이 2.62-2.87로 비슷하고, 다만 C 값이 다르게 얻어졌다. 그러나 피로균열의 안정성장구간인 II영역에서는 m 값이 가장 큰 의미를

Table 5  $\Delta K_{th}$ , C, m data

Metal	R	$\Delta K_{th}$ (Kg/mm <sup>3/2</sup> )	C	m
Base(as weled)	0.05	22	$1.34 \times 10^{-9}$	2.62
Weld(as weled)	0.05	65	$5.23 \times 10^{-10}$	2.66
HAZ(as weled)	0.05	43	$8.06 \times 10^{-11}$	2.87
Base(PWHT)	0.05	23	$2.02 \times 10^{-11}$	3.57
Weld(PWHT)	0.05	39	$1.22 \times 10^{-11}$	3.58
HAZ(PWHT)	0.05	38	$3.72 \times 10^{-12}$	3.91

갖고 있으므로, 일단 피로균열이 안정성장구간에 들어서면 base metal의 data로써 weld metal, HAZ의 피로균열성장의 예측이 가능할 것으로 생각된다.

PWHT재에서는 Fig.10과 같이 base metal, weld metal, HAZ의 II영역에서의 피로균열성장거동은 잘 일치하였으며, 이때의  $m$  값은 3.57-3.91이었다. As weld재와 PWHT재의  $m$  값을 비교하면, PWHT재는 as weld 재에 비하여  $m$  값은 36%정도 증가하였다. 이는 PWHT에 의한 초기 균열선단의 압축잔류응력의 이완에 기인된 것으로 생각할 수 있다. 그리고 as weld상태의 base metal과 비교하면 열처리를 실시한 base metal의  $m$ 값의 증가는 열처리에 의한 금속재질의 변화에 기인된다고 할 수 있다. 그러나 전술 3.2절에서 언급된 I 영역에서의 잔류응력의 영향과 비교하면 II영역에서의 잔류응력의 영향은 그다지 크지 않다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 용접구조용강인 SM50A를 맞대기 잠호용접을 한 후, as weld재 및 PWHT재에 대하여 각각 잔류응력을 측정 한 후,  $\Delta K$ -감소피로시험과  $\Delta P$ -일정피로시험을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. As weld재나 PWHT재는 모두가 초기균열선단에 크기의 차이는 있어도 압축잔류응력이 존재하며,  $\Delta K_h$  값을 포함한 저 $\Delta K$  영역의 피로균열성장거동은 잔류응력의 영향을 크게 받아서 weld metal, HAZ의  $\Delta K_h$  값은 base metal의  $\Delta K_h$  값에 비교하여 크게 나타났다.

2. As weld 재의  $m$  값은 2.62-2.87이었으나, PWHT재의 경우에는 잔류응력의 이완으로 인하여  $m$  값은 3.57-3.91로 증가하였다. 이로 미루어, 균열선단에 압축잔류응력이 상당량 존재하는 as weld재에서는 PWHT재에서보다 피로균열성장속도가 둔화된다고 보겠다.

#### 후 기

본 연구는 1987년도 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 87-0307-019-2)에 의해서 수행되었으며 동 재단 관계자 여러분께 감사함을 드립니다.

#### 5. Reference

1. In "Welding Inspection," American Welding Society, Second Edition, pp. 15-23, 1980.
2. In "安全工學講座 3, 破壊," 安全工學協會, 海文堂出版社, pp.218-241, 1984.
3. H. D. Brody, "Segregation and Structure in the Weld Zone," Advanced in Welding Science and Technology, Edited by S. A. David, Conference Proceedings, pp. 83-118, 1986.
4. In "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gauge Method," ASTM Standard E 837-85, pp. 310-316, 1985.
5. Leonard Mordfin, "Standard for Residual Stress Measurement," ASTM STP 776, pp. 6-12, 1981.
6. 轟章, 小林英男, 中村春夫, "残留应力場の疲労き裂進展速度の豫測(き裂面部分接触の考慮)," 日本機械學會論文集(A編), 54卷 498號, pp. 205-211, 1988.
7. Y. Mutoh and I. Sakamoto, "Fatigue Crack Propagation in the Weld Bond Region of a Type 304 Stainless Steel Weldment," Advanced in Fracture Research (Fracture84), Vol.3, pp. 1605-1702, 1984.
8. J. P. Sandifer and G. E. Bowie, "Fatigue Crack Propagation in A537M Steel," ASTM STP 648, pp. 185-196, 1978.
9. Akihito Ohta and Satoshi Nishijima, "Fatigue Crack Growth and Threshold Stress Intensity Factor for Weld Joints," Material Research Vol. 1, Current Research on Fatigue Cracks, The Society of Materials Science, Japan, pp. 157-174, 1985.
10. L. A. James and W. J. Mills, "Fatigue Crack Propagation Behaviour of Defected Weldment," Int. J. Pre. Ves.& Piping, Vol. 9, pp. 367-383, 1981.
11. 村上理一, 秋園幸一, "溶接残留应力場での疲労き裂成長速度に及ぼす残留应力緩和の影響," 日本材料學會論文集, 34卷 377號, pp. 202-207, 1985.

12. B. M. Kapadia, "Influence of Residual Stresses on Fatigue Crack Propagation in Electroslag Welds," *Fatigue Testing of Weldments*, ASTM STP 648, pp. 244-260, 1978.
13. 小林英男, 轟章, "ユンパクト試験片の疲労き裂進展特性に及ぼす溶接残留応力の影響評価," *日本材料學會論文集*, 35卷 391號, pp. 401-406, 1986.
14. 橋内良雄, "軟鋼突合せ溶接継手の疲労き裂傳播挙動に及ぼす試験片寸法および形状の影響," *日本材料學會論文集*, 32卷 354號, pp. 304-309, 1983.
15. In "Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rates above  $10^{-4}$  m/cycle," ASTM Standard E 647-83, pp. 756-783, 1983.
16. In "Analysis of Welded Structures," Edited by Koichi Masubuchi, Pergamon Press, pp. 111-119, 1980.
17. R. J. Bucci, "Development of a Proposed ASTM Standard Test Method for Near Threshold Fatigue Crack Growth Rate Measurement," ASTM STP 738, pp. 5-28, 1981.
18. C. Amzallag, P. Rabbe, C. Bathias, D. Benoit and M. Truchon, "Influence of Various Parameters on the Determination of the Fatigue Crack Arrest Threshold," ASTM STP 738, pp. 29-44, 1981.