

< 논문 >

# 맞대기 용접 강판재에서 압연 및 잔류응력에 의한 피로거동

이용복\* · 오병덕\* · 김성엽\*

(2006년 1월 23일 접수, 2006년 4월 12일 심사완료)

## Fatigue Behavior with Respect to Rolling and Residual Stress in Butt-welded Steel Plate

Yong-Bok Lee, Byung-Duck Oh and Sung-Yeup Kim

**Key Words:** Welding Residual Stress Distribution(용접잔류 응력분포), Rolling Directional Characteristic(압연방향특성), Butt-Jointed Steel Plate(맞대기용접강판), Welded Material(용접재료), Stress Ratio(응력비), Welding Direction(용접방향), Tensile Loading Direction(인장하중방향), Fatigue Crack Propagation Rate(피로균열 진전속도)

### Abstract

For the improvement of safety and endurance in welded steel structure, it is needed to consider welding residual stress distribution and rolling directional characteristics of materials. In this study, it was investigated experimentally about characteristics of fatigue crack propagation according to welding residual stress and rolling in FCAW(flux cored arc welding) butt-jointed steel plates. SS400 steel plates of 3mm thickness were selected and tested for this study. When the angles between tensile loading direction and rolling direction in welded materials are increased from 0° to 90°, their fatigue crack propagation rates are increased. These results are same as predicted increments of fatigue crack propagation rate when stress ratio is increased from 0 to 0.5. When the angles of rolling direction and welding direction to tensile loading direction are 0° and 90° respectively, fatigue crack propagation rate in welded material is lowest.

### 1. 서 론

산업의 발전과 함께 산업구조물의 규모가 증대되고, 사용조건이 더욱 가혹해지면서 산업재해 문제가 크게 대두되고 있고, 산업구조물의 설계상 안전성, 정밀성, 효율성 및 내구성 향상을 위한 필요성이 가중되고 있다. 산업구조물에 사용하는 대부분 강재료의 제조과정은 압연, 인발 및 압출 등의 공정을 거치게 된다. 이러한 공정에 의하여 제조된 판재와 형강재를 사용하여 나사결합, 리벳접합 및 용접을 통하여 제작되고 있다.<sup>(1)</sup> 따라서 이와 같은 강구조물의 설계를 위해서는 이들 과정에

의한 재료의 기계적 성질과 피로특성을 정확하게 파악하고, 그 결과를 고려하여 설계하는 것이 바람직하다.<sup>(2,3)</sup> 재료의 제조과정에서 발생하는 압연의 방향성과 용접에 의한 잔류응력은 강구조물에 필연적으로 존재하게 되어 구조물 안전에 영향을 주게 되므로 안전하고, 효율적인 설계를 위해서는 이들 영향에 대한 체계적인 연구가 필요하다.<sup>(4,5)</sup> 그리고 이러한 구조물은 계속적인 반복하중을 받게 되므로 압연 및 잔류응력을 고려하여 피로특성을 파악하는 것이 중요하다. 지금까지 용접 잔류응력에 의한 피로거동에 대한 연구는 많으나 압연 방향에 따른 피로거동에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.<sup>(6-8)</sup> 특히 압연의 영향과 잔류응력을 고려한 종합적인 피로거동 연구는 찾아보기 어렵다. 이에 본 연구에서는 일반적인 구조물 재료로 많이 사용하고 있는 SS400 압연강판 재료를 사용하여

\* 책임저자, 회원, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과  
E-mail : yblee@wow.hongik.ac.kr

TEL : (02)320-1665 FAX : (02)322-7003

\* 홍익대학교 대학원 기계공학과

맞대기 용접을 하고, 재료의 압연방향과 용접으로 인한 잔류응력에 따른 피로거동에 대하여 고찰해 보고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편의 준비

본 연구를 위하여 일반구조물 재료로 많이 사용하고 있는 3mm 두께의 열간압연 강판재료인 SS400을 선택하였고, 용접은 FCAW(Flux Cored Arc Welding) 법으로 수행하였으며 이때 두 강판을 압연방향과 일치시켜 맞대놓고, 용접열로 인한 과대변형을 방지하기 위하여 지그를 고정시킨 후 앞면과 뒷면 양쪽을 1패스로 맞대기 용접하였다. 그리고 용접재료의 용접비드 방향과 하중방향 사이의 각도( $\theta^\circ$ )를  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  및  $90^\circ$ 로 구분하여 Fig. 1과 같은 규격으로 와이어 절단가공하고, 중앙에  $\phi 2\text{mm}$ 의 구멍을 뚫고, 양쪽으로 0.1mm 폭과 2mm 길이의 슬릿(slit)을 방전가공 하였으며 그로부터 2mm 길이의 예비균열을 진전시켜 시험하도록 하였다. 시험편 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고, 용접조건은 Table 2와 같이 26V의 전압과 230A의 전류 및 12l/min의 송출량, 40cm/min로서 용접을 수행하였다. 그리고 기계적 성질을 Table 3에 나타내었고, 피로시험편의 크기를 Fig. 1에 나타내었다.<sup>(5)</sup>

Table 1 Chemical compositions of specimen

Material	Chemical compositions (wt.%)				
	C	Si	Mn	P	S
SS400	0.13	0.14	0.70	0.003	0.045

Table 2 FCAW conditions

Voltage (V)	Electric Current (A)	Electrode (Dia.mm)	Gas Flux ( $\ell$ /min)	Velocity (cm/min)
26	230	1	12	40

Table 3 Mechanical properties of base material

Specimen	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	Elongation(%)
$0^\circ$ Mean	220.7	310.7	49.0
$30^\circ$ Mean	227.9	309.3	48.6
$45^\circ$ Mean	260.9	331.7	46.6
$60^\circ$ Mean	236.6	308.5	46.0
$90^\circ$ Mean	275.1	329.6	44.0

### 2.2 시험 방법

본 실험을 위하여 Fig. 2에 나타낸 5톤 용량의 피로시험기(Instron 8511)를 사용하였으며 우선 모재시험편의 압연방향에 따른 피로특성을 알아보기 위하여 Fig. 1(a)의 시험편을  $\theta=0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  및  $90^\circ$ 로 구분하여 피로시험을 수행하였다. 이때 시험데이터의 신뢰성을 갖도록 하기 위하여 하중방향과 시험편 재료의 압연방향 각도별 3편 이상씩을 사용하였고, 예비균열은 시험하중 5% 이내의 높은 하중으로 양쪽 슬릿(slit)으로부터 2mm 피로균열을 진전시킨 후 시험하중에 의하여 피로균열

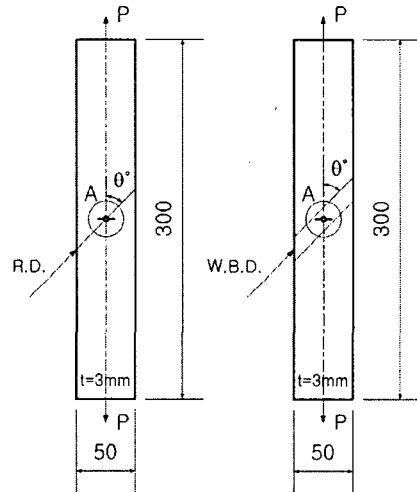


Fig. 1 Configurations of fatigue test specimen  
(a) Base material specimen  
(b) Welded specimen

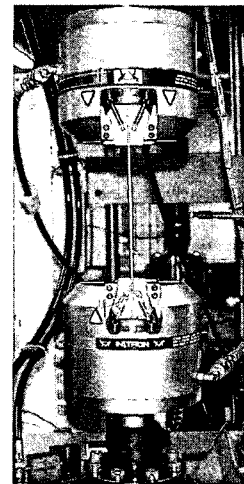


Fig. 2 Apparatus for fatigue test(Instron 8511)

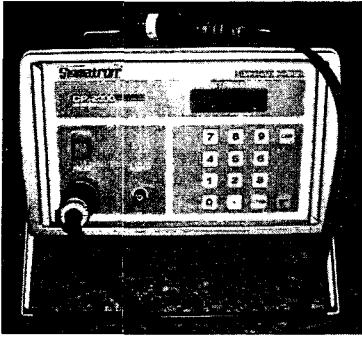


Fig. 3 Magnetizing residual stress indicator

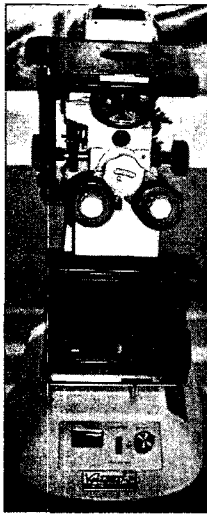


Fig. 4 Optical microscope

진전시험을 수행하였다. 용접 시험편은 Fig. 1(b)에 보이는 바와 같고, 피로시험 전에 천공법<sup>(9,10)</sup> (Mather's method)과 자기식 응력측정기 사용을 병행하여 잔류응력을 측정하였고, Terada식을 이용하여 균열진전 부위로부터의 잔류응력 분포도를 구하였다. 그리고 압연 및 용접비드 방향을 같도록 하여 하중방향 각도  $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  및  $90^\circ$ 로 구분하고, 모재시험편과 동일 방법 및 동일 조건으로 피로균열 진전시험을 수행하였다. 피로균열 진전길이 측정은 광학현미경과 전자현미경을 사용하여 1/100mm 이내의 정확도로 일정 사이클마다 반복 측정하였다. 피로시험기를 Fig. 2에 나타내었고, 자기식 응력측정기와 광학현미경은 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 그리고 피로시험 조건은 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Conditions of fatigue test

Frequency of loading (Hz)	Maximum load (KN)	Minimum load (KN)	Stress ratio $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$	Temperature ( $^\circ C$ )
10	24.5	0	0	15

Table 5 Material constants by Paris law

	$C$	$m$
$0^\circ$	$2 \times 10^{-14}$	4.36
$30^\circ$	$3 \times 10^{-14}$	4.30
$45^\circ$	$5 \times 10^{-14}$	4.21
$60^\circ$	$3 \times 10^{-14}$	4.38
$90^\circ$	$2 \times 10^{-14}$	4.55

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 모재의 피로균열 진전특성

모재의 피로균열 진전시험 결과를 하중방향과 압연방향 사이의 각도별로 나타내면 Fig. 5 (a-N)와 같고, Paris 식<sup>(11)</sup>을 이용하여 균열진전 속도를 나타내면 Fig. 6 (da/dN- $\Delta K$ )과 같으며 재료상수는 Table 5와 같다. 피로균열 진전속도는 하중방향과 재료의 압연방향 각도가  $0^\circ$ 로부터  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  및  $90^\circ$ 로 증가함에 따라 높게 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 Lee 등<sup>(5)</sup>의 연구결과를 참고하면 하중방향과 압연방향 사이의 각도가 클수록 항복강도는 높게 나타나며 연신률은 낮게 나타나는 경향이 있는데 재료의 항복강도가 높을수록 피로균열 진전속도는 높게 나타나고, 연신률이 낮을수록 피로균열 진전속도가 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 그리고 재료의 압연방향에 재료의 압연방향에 따른 인장강도는 거의 변화가 없는데 이것은 피로균열 진전속도를 인장강도와 관련시킬 수

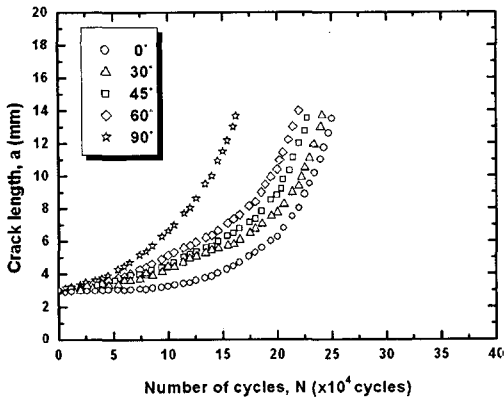


Fig. 5 Crack length vs. number of cycles

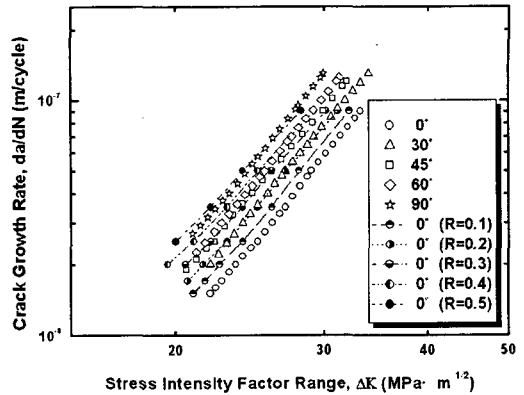


Fig. 7 Crack growth rate vs. stress intensity factor range(stress ratio)

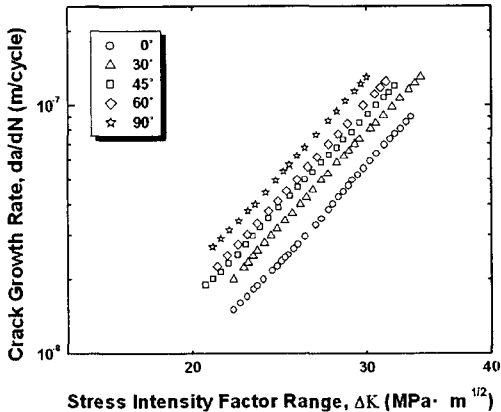


Fig. 6 Crack growth rate vs. stress intensity factor range

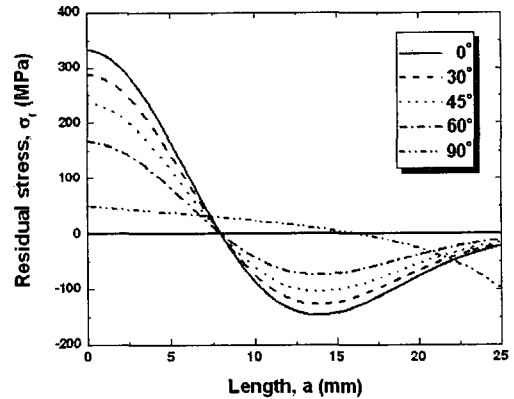


Fig. 8 Distribution of residual stress in weldments

없음을 나타낸다. 이와 같은 결과로 피로균열은 비교적 낮은 하중 하에서 진전하므로 소성영향을 거의 받지 않고, 취성거동을 하기 때문인 것으로 생각된다. 하중방향과 압연방향 사이의 각도에 따른 피로거동을 응력비의 영향과 비교해보기 위하여 피로균열 진전속도가 가장 낮은 즉, 하중방향과 압연방향 사이의 각도가 0°인 경우를 기준으로 하여 응력비 R=0.1, 0.2, 0.3, 0.4 및 0.5일 때 Forman식을 이용한 피로균열 예측선을 함께 나타내면 Fig. 7과 같다. 하중방향과 압연방향 사이의 각도가 0°로부터 90°까지 변하는 동안의 피로균열 진전속도의 증가는 전체적으로 응력비 R=0.0으로부터 R=0.5까지 증가시켰을 때의 피로균열 진전속도의 증가범위 안에서 나타나고 있다.

### 3.2 용접재의 피로균열 진전특성

용접구조물은 용접으로 인한 잔류응력, 재료의 압연방향과 하중방향 그리고 용접비드 방향 등의 복합적인 영향을 받게 되므로 이에 대한 피로거동을 정확하게 파악하는 것은 매우 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 체계적으로 용접구조물의 피로거동을 파악하기 위하여 재료의 압연방향과 용접 방향을 일치시키고, 하중방향 각도를 0°, 30°, 45°, 60° 및 90°로 구분한 Fig. 1(b)의 시험편을 사용하였다. 용접 시험편의 잔류응력 분포는 용접비드 방향이 하중방향(시험편의 길이방향)과 일치( $\theta=0^\circ$ ) 하는 경우를 기준으로 용접 잔류응력 측정값을 Terada의 분포식에 적용하여 각도에 따라 코사인(cosine)값으로 나타내었고, 용접부를 중심으로 양

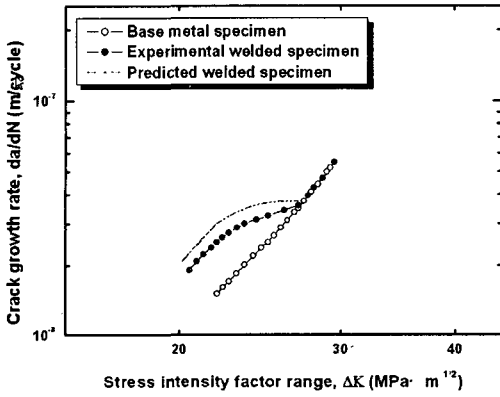


Fig. 9 da/dN vs.  $\Delta K(\theta=0^\circ)$

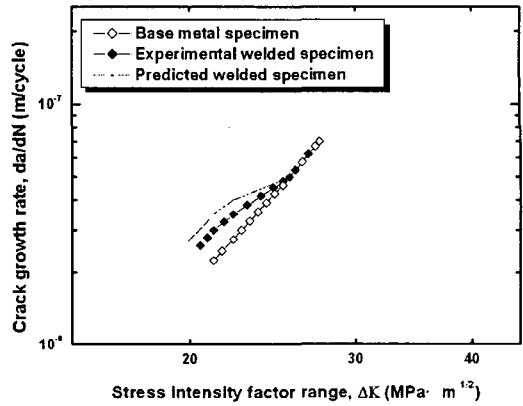


Fig. 12 da/dN vs.  $\Delta K(\theta=60^\circ)$

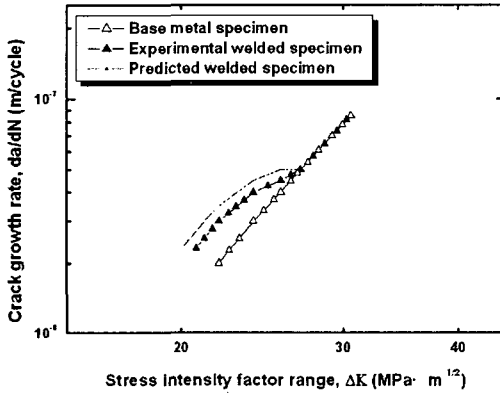


Fig. 10 da/dN vs.  $\Delta K(\theta=30^\circ)$

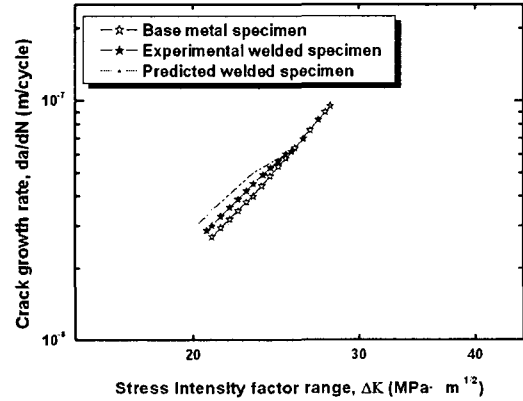


Fig. 13 da/dN vs.  $\Delta K(\theta=90^\circ)$

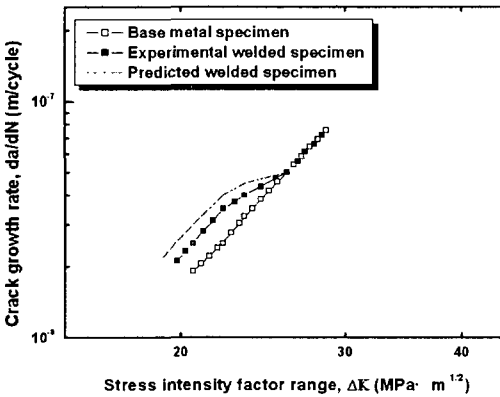


Fig. 11 da/dN vs.  $\Delta K(\theta=45^\circ)$

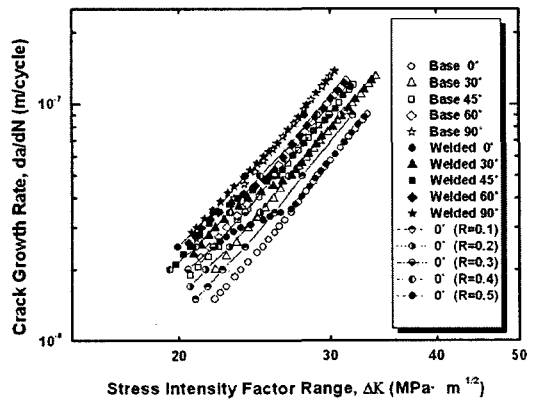


Fig. 14 da/dN vs.  $\Delta K$

쪽으로 대칭하여 분포하므로 한쪽만의 분포도를 Fig. 8과 같이 나타내었다. Terada의 잔류응력 분포식<sup>(12)</sup>은

$$\sigma_r(x) = \sigma_o [1 - (\frac{x}{b})^2] e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{b})^2}$$

이며, 여기에서  $\sigma_o$ 는 용접부 중앙에서 용접비드 방향으로 작용하는 최대 잔류응력 값이고,  $b$ 는 인장 잔류응력 영역의 반폭이다. 본 연구에서는 CCT(Center Cracked Tension Specimen) 시험편을 사용하여 편진 반복 인장하중으로 피로균열 진전 시험을 수행하였으므로 잔류응력과 작용응력의 중첩에 의한 응력

$$\sigma_r(x) = \sigma_o [1 - (\frac{x}{b})^2] e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{b})^2} + \sigma_a$$

의 영향을 받고, 응력확대계수<sup>(13)</sup>는

$$K_{res} = 2 \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^a \frac{\sigma_r(x)}{\sqrt{a^2 - x^2}} dx$$

로부터 구할 수 있다. 여기에서 응력 분포값은 균열진전과 함께 일부 이완되고 재분포될 수 있으나 초기 잔류응력 분포값만을 이용하였다. 유효 응력 확대계수는

$$\Delta K = (K_{max} + K_{res}) - (K_{min} + K_{res}) = K_{max} - K_{min}$$

유효 응력비는

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}}$$

따라서 이들 값을 Forman's equation<sup>(14-15)</sup>

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_{cf} - \Delta K}$$

에 적용함으로써 용접재의 피로균열 진전특성을 나타낼 수 있다. 위 식에서 C와 m은 모재 시험편의 피로시험 결과로부터 얻은 재료상수를 사용하였고,  $K_{cf}$  값은 피로시험 시 최종 급속파손 때의 KI의 임계값을 사용하였다. 용접재의 피로시험 결과를 하중방향과 용접 비드방향 및 압연방향 사이의 각도별로 나타내면 Fig. 9~Fig. 13과 같고, 이들을 종합하여 나타내면 Fig. 14와 같다.  $\theta=0^\circ$ 인 Fig. 9의 경우 피로균열 진전속도는 시험편 중앙의 용접부에 분포하는 높은 인장 잔류응력의 영향을 받아 초기에 매우 높은 균열진전 속도를 보이며 균열이 진전됨에 따라 인장 잔류응력의 영향이 줄어들어 나중에는 모재의 균열진전 속도와 일치되고 있다. 그리고 하중방향과 용접 비드방향 사이의 각도가 클수록 잔류응력 영향은 감소하며 피로균

열 진전특성은 같은 경향을 나타내고 있다. Fig. 14에서 하중방향과 압연방향 사이의 각도  $\theta=0^\circ$ 인 경우 모재의 피로균열 진전속도가 가장 낮게 나타나지만 초기에 높은 인장 잔류응력으로 인하여  $\theta \approx 45^\circ$ 의 경우와 유사하게 나타난다. 그리고 압연방향이  $90^\circ$ 인 경우 모재의 피로균열 진전속도는 가장 높게 나타나지만 낮게 분포하는 인장 잔류응력으로 균열초기에 피로균열 진전속도가 크게 나타나지 않고 있다. 이와 같은 경향으로 보아 만일 피로균열 진전속도가 가장 높게 나타나는 모재의 압연방향( $\theta=90^\circ$ )과 용접인장 잔류응력이 가장 높게 나타나는 용접비드 방향( $\theta=0^\circ$ )을 갖도록 용접 구조물을 설계하여 하중이 용접비드 방향으로 작용하도록 한다면 매우 위험하게 될 것이다. 반대로 외부 하중방향에 대하여 압연방향을  $0^\circ$ 로 하고, 용접방향을  $90^\circ$ 로 한다면 가장 안전한 용접 구조물을 설계할 수 있을 것이다. 따라서 용접재에서의 피로균열은 용접잔류 응력분포에 민감하게 영향을 받고 있으므로 용접구조물의 안전사용 및 안전설계를 위해서는 잔류응력의 분포를 정확하게 파악하고, 하중방향과 용접방향 및 압연방향을 잘 조화시켜 설계 제작하는 것이 필요하다.

#### 4. 결 론

용접구조물의 안전사용 및 안전설계를 위해서는 구조물의 피로파괴에 크게 영향을 줄 수 있는 잔류응력과 하중 그리고 사용재료의 압연의 영향을 고려하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 이를 감안하여 일반적으로 구조물 강재로서 많이 사용되고 있는 SS400 압연강재를 선택하여 압연방향과 용접비드 방향을 일치시켜 FCAW 법에 의한 맞대기 용접을 하였고, 하중방향과 용접비드 방향 사이의 각도를 변화시켜 시험편을 제작하였다. 그리고 잔류응력 분포, 압연방향 및 하중방향에 따른 피로균열 특성을 파악하고자 하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 피로균열 진전속도는 하중방향과 압연방향 사이의 각도가 클수록 높게 나타나는데 이는 재료의 항복강도가 높을수록 연신률이 낮을수록 피로균열 진전속도가 높게 나타나는 현상과 관련되고 있음을 알 수 있다.

(2) 압연방향에 따른 인장강도의 변화는 미약하여 압연방향에 따른 피로균열 진전속도는 인장강

도와 관련시킬 수 없음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 피로균열은 비교적 낮은 하중 하에서 진전하므로 취성거동을 하기 때문인 것으로 생각된다.

(3) 하중방향과 압연방향 사이의 각도가 0°로부터 90°까지 변하는 사이의 피로균열 진전속도 증가는 응력비를  $R=0$ 으로부터 0.5까지 증가시켰을 때의 피로균열 진전속도 범위 안에 있다.

(4) 용접재에서 하중방향에 대하여 모재의 압연 방향을 0°로 하고, 용접비드 방향을 90°로 했을 때 피로균열 진전속도는 가장 낮게 나타나고 있다.

(5) 용접재에서의 피로균열은 용접잔류 응력분포에 민감하게 영향을 받고 있으므로 용접구조물의 안전설계를 위해서는 잔류응력 분포를 정확하게 파악하고, 하중방향과 용접방향 및 재료의 압연방향을 잘 조화시켜 설계하는 것이 필요하다.

## 후 기

이 논문은 2005년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- (1) Green O. V., 1930, "Trans. of American Society for Steel Treating," 18, 369.
- (2) Juvinall R. C., 1967, "Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength," McGRAW HILL BOOK Co.
- (3) Yong Bok Lee, Nam Ik Cho and Kang Eun Park, 1996, "A Study on Surface Fatigue Crack Behavior of SS400 Weldment," *J. of KWS*, 14-2, pp. 124~129.
- (4) Irwin G. R., 1957, "Analysis of Stress and Strain near the End of a Crack Traversing a Plates," *Trans. ASME*, 24, p. 361.
- (5) Yong Bok Lee and Byung Duck Oh, 2005, "Characteristics of Fatigue Crack Propagations with Respect to the Angles Between Rolling and Tensile Loading Directions of Steel Plates," *J. of KSMTE*, 14-3, pp. 74~80.
- (6) Yong Bok Lee, Chin Sung Chung and Nam Ik Cho, 1996, "A Study on Fatigue Behavior Considering Effects of Redistributing Tensile Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment," *J. of KSME(A)*, Vol. 20, No. 7, pp. 2234~2245.
- (7) Yong Bok Lee, Chin Sung Chung, Ho Kyung Kim, Nam Il Cho and Sang Heup Park, 1997, "A Study on Fatigue Behavior considering Effects of Redistributing Compressive Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment," *J. of KSMTE*, 6-2, pp. 26~33.
- (8) Yong Bok Lee, Chin Sung Chung, Young Keun Park and Ho Kyung Kim, 1998, "Effect of Redistributing Residual Stress on the Fatigue Behavior of SS330 Weldment," *Int. J. Fatigue*, 20-8, pp. 565~573.
- (9) Wilson W. M. and Hao C. C., 1974, "Residual Stresses in Welded Structures," *The Welding Journal*, Research Supplement, 26-5, pp. 295~320.
- (10) Nawwar A. M., Malachlan K. and Shewchuk J., 1976, "A Modified Hole-Drilling Technique for Determine Residual Stresses in Thin Plates," *Experimental Mechanics*, June, pp. 226~232.
- (11) Paris P. and Erdogan F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Law," *J. of Basic Eng., Trans. of ASME*, 8, pp. 528~534.
- (12) Terada H., 1976, "An Analysis of the Stress Intensity Factor of a Crack Perpendicular to the Welding Bead," *Engineering Fracture Mechanics*, 8, pp. 441~444
- (13) Isida M., 1930, "On the Determination of Stress Intensity Factors for Some Common Structural Problems," *Eng. Fracture Mechanics*, 2-1, p. 61.
- (14) Forman R. G. and Kearney V. E., 1967, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures," *J. of Basic Eng., Trans. of ASME*, 9, pp. 459~460.
- (15) Sang Chul Kim, Yong Bok Lee, 1987, "The Application of Forman Equation for Fatigue Crack Propagation in Welding Residual Stress Region," *J. of the Korean Welding Society*, 5-1, pp. 42~56