

# 구조용강의 용접가공에 따른 피로균열진전에 미치는 응력비의 영향

박경동\*, 신영진\*\*, 이주영#

## Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Propagation Processing of Structural Steel

Kyeong-Dong Park\*, Yeong-Jin Shin\*\*, Ju-Yeong Lee#

### ABSTRACT

The lightness of components required on marine and shipbuilding industry is requiring high strength of components. In particular, fatigue failure phenomena, which happen in metal, bring on danger in human life and property. Therefore, antifatigue failure technology takes an important part on current industries. In this study, it is investigated about endurance and fatigue crack propagation rate of according to welding methods such as SMAW, FCAW and SAW commonly used for welding structures in present. Endurance limits carried out highly in the order of SMAW, FCAW, SAW and fatigue crack propagation rate out lowly in the order of SMAW, FCAW, SAW. By these results, it is needed to use SMAW welding method for welding structures with small welding capacity and FCAW, SAW methods for large welding structures after consideration about economic gains and operation efficiency of welding. Fatigue crack propagation rate is more affected by strength of welding materials than endurance limit of welding materials according to welding methods.

**Key Words** : Fatigue crack propagation ratio(피로균열진전속도), Welding method(용접방법), Endurance limit(내구한도), Fatigue Characteristics(피로특성)

### 1. 서 론

현재 용접은 기계분야 외에 조선 해양산업에 있어서 차지하는 비중이 크며, 주로 구조물이나 기계장치

의 접합과정에 사용되어 지고 있다<sup>[1-2]</sup>. 그러나 용접 구조물이 주어진 기간동안 정적인 하중뿐만 아니라 충격피로, 부식작용 등 다양한 하중과 환경적 손상 등을 받을 수 있다. 일반적으로 용접구조물에서 피로 균열의 70% 이상이 용접 이음부에서 발생한다고 보고 된 바 있다<sup>[3]</sup>. 따라서 용접구조물의 안전설계를 위해서 강도상 가장 취약한 접합부의 강도 평가가 요구된다. 또한 용접부 파손사고의 대부분은 반복하중에 의한 피로균열이 발생 성장하여 일어난 것으로서 용

\* 부경대학교 기계공학부

# 교신저자 : 부경대학교 대학원 기계설계학전공

E-mail : parkkd@pknu.ac.kr

\*\* 부경대학교 대학원 기계공학부

접부의 최적 용접방법과 피로강도 평가를 체계적으로 연구하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 모재(Base metal)와 용접방법(SMAW, FCAW, SAW)에 따른 최적의 용접방법을 찾고자 모재와 응력비별로 용접부의 응력확대계수( $\Delta K$ )와 피로균열진전속도( $da/dN$ )와의 관계 및 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ ) 관계를 정량적으로 평가하고자 한다. 이러한 연구결과로 용접구조물의 최적용접조건을 개발하여 구조물의 강도향상 및 효율적인 설계에 기여하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편

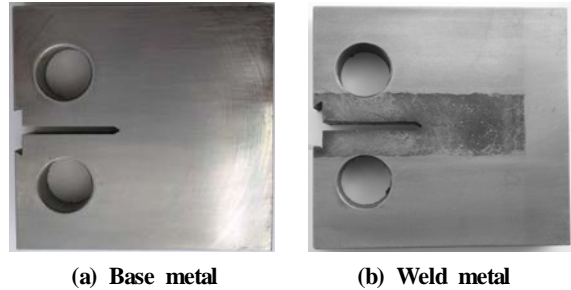
본 연구에 사용된 재료는 선박의 구조물에 사용되고 있는 선체 구조용 강(LR GRADE D)으로, 모재(Base metal)와 용접방법별(SMAW, FCAW, SAW) 화학적 성분을 Table 1, 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. 용접은 V-groove의 양쪽 경사각이 40°가 되도록 시험편을 가공하여 SMAW(Shielded Metal Arc Welding : 수동용접)와 FCAW(Flux Cored Arc Welding : 반자동용접)는 3G자세로 하였으며, SAW(Submerged Arc Welding: 자동용접)는 1G자세로 용접을 실시하였다. Fig. 1에 용접이 완료된 시험편의 모습을 나타내었다.

**Table 1 Chemical composition of base metal and filler metals(wt, %)**

	C	Si	Mn	P	S	Cr
Base metal	0.130	0.130	1.010	0.019	0.002	0.024
Filler metal	0.055	0.470	1.200	0.013	0.010	-

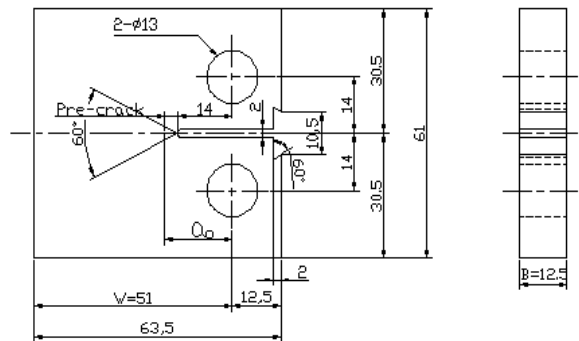
**Table 2 Mechanical properties of base metal and filler metals**

	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
Base metal	456	329	31
Filler metal	580	510	28



**Fig. 1 CT specimen of base metal and weld metal**

Fig. 2는 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용하여 압연방향이 하중방향이 되게 L-T방향으로 채취하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 외형가공은 밀링(Milling)으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(Wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈 반지름 0.1mm가 되게 가공하였다<sup>[4-5]</sup>.



**Fig. 2 Dimension of CT specimen(unit: mm)**

### 2.2 실험장치 및 실험방법

용접방법에 따른 용접부의 경도분포를 조사하기 위해 시험편의 단면부를 채취하여 열경화성 수지에 고정하고 폴리싱한 후 마이크로 비커스 경도기(MVK-H1)로 경도측정을 하였다. 측정하중은 500g을 적용하여 압흔간격은 1mm로 하였다.

피로균열진전실험은 Fig. 3의 전기유압서보 피로시험기(Instron 8821S, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다.



Fig. 3 Apparatus of fatigue test machine

적용하중 파형은 정현파(Sine)로 하고 적용 응력비는 R=0.1, R=0.3, R=0.6, 주파수는 10Hz로 하였다. 피로균열 길이 측정은 COD 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 측정하였으며, ASTM E647-05에 의거  $\Delta K$  감소법으로 피로균열진전이 정지될 때 까지 실험하였다. 실험해석을 하기 위한 응력확대계수  $\Delta K$ 는 식 (1)과 같으며,

$$\Delta K = \begin{cases} K_{\max} - K_{\min} & (K_{\min} > 0) \\ K_{\max} & (K_{\min} \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

응력비 R은 식 (2)와 같다.

$$R = K_{\min} / K_{\max} \quad (2)$$

여기서 R의 영향을 제외하면 특정의  $\Delta K$ 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인<sup>[6]</sup>

$$da / dN = C ( \Delta K )^m \quad (3)$$

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 여기서 C와 m은 재료상수로서 그 값은 동일재료, 동일 환경 구조물 등의 균열진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다<sup>[6]</sup>.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 용접방법에 따른 경도분포

Fig. 4에 용접방법에 따른 용접부의 경도분포를 나타낸 것이다. 용접방법에 따른 용접부의 경도분포의 평균값은 모재(Base metal)의 경우 135(Hv), SMAW 용접재의 경우 203(Hv), FCAW 용접재의 경우 214(Hv), SAW 용접재의 경우 190(Hv)로 나타났다. 이는 용접법에 기인한 것으로 잔류응력 및 열영향부의 열 및 압력의 영향으로 판단된다. 각 용접방법에 있어서 FCAW 용접법이 가장 높은 수치를 나타냈으며, SAW 용접법이 가장 낮은 수치를 나타내었으며, 그 차이는 크게 나지 않은 것으로 나타났다.

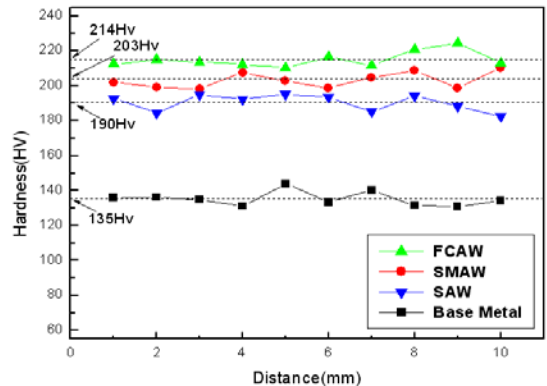


Fig. 4 Result of hardness test according to welding method

#### 3.2 피로균열속도

Fig. 5~7은 응력비(R)가 0.1, 0.3, 0.6에서 모재, SMAW, FCAW, SAW 시편의 피로균열진전속도 (da/dN)와 응력확대계수( $\Delta K$ )와의 관계를 나타내었다. 응력확대계수가  $\Delta K=15\text{MPa}\sqrt{m}$ 일 때 각 용접방법에 따른 피로균열진전속도비(da/dN)를 비교해보면 Table 3과 같이 각 용접방법에 있어서 SMAW 용접재와 FCAW 용접재가 SAW 용접재와 모재에 비해 낮은 피로균열속도를 나타내고 있음을 알 수가 있다. 또한 응력비가 높을수록 각 용접재의 피로균열속도는 가속화되고 있는 경향이 나타났다. Table 4에 하한계응력확대계수값( $\Delta K_{th}$ )을 응력비 및 용접방법 별로 나타내었다.

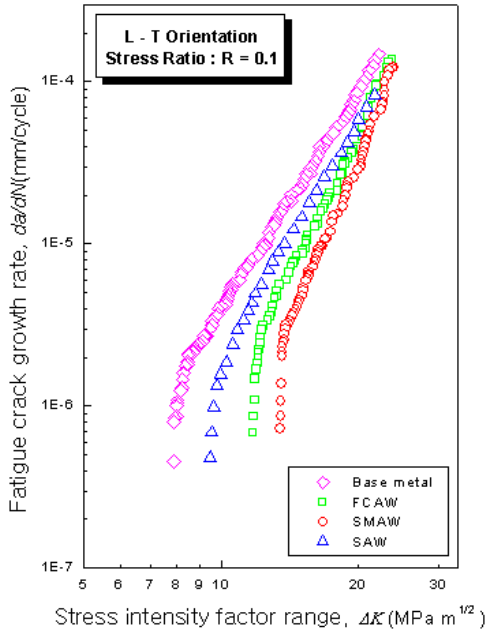


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (R=0.1)

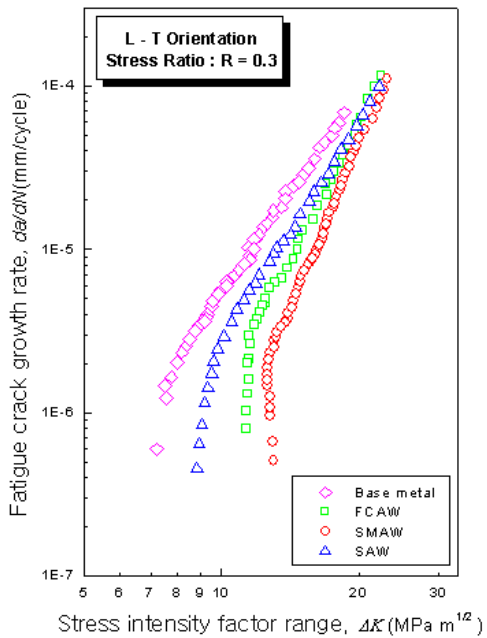


Fig. 6 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (R=0.3)

응력비 0.1일때 크랙전파속도  $da/dN$ 의 경우  $\Delta K=15 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서 SMAW 용접법일 때  $4.79 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ , FCAW 용접법일 경우  $9.08 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ , SAW 용접법의 경우가  $1.46 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 로 SMAW 용접법의 경우가 가장 감속이고 다음이 FCAW 용접법이고 SAW 용접법의 경우가 가장 가속의 경향으로 나타났다. R=0.6에서 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )가 큰 감소량을 나타내었고, SMAW 용접법에서 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )가 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 FCAW 용접재가 인장강도가 높아 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ ) 값이 높게 나타나리라 예상했으나 오히려 낮은 값을 나타내고 있어 용접법에 기인한 것으로 판단된다.

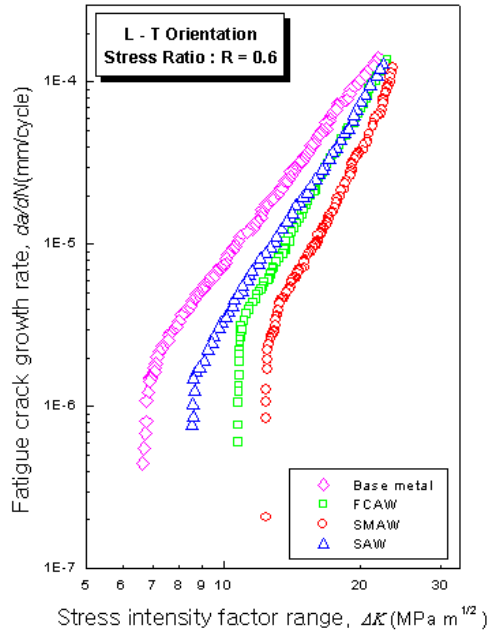


Fig. 7 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (R=0.6)

Table 3  $da/dN$  at  $\Delta K=15 \text{ MPa}\sqrt{m}$

Stress ratio	Base metal	SMAW	FCAW	SAW
0.1	$2.33 \times 10^{-5}$	$4.79 \times 10^{-6}$	$9.08 \times 10^{-6}$	$1.46 \times 10^{-5}$
0.3	$2.83 \times 10^{-5}$	$7.50 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^{-5}$	$1.60 \times 10^{-5}$
0.6	$3.47 \times 10^{-5}$	$7.77 \times 10^{-6}$	$1.43 \times 10^{-5}$	$1.93 \times 10^{-5}$

피로균열속도와 응력확대계수 값을 양대수 그래프로 표시하는 Paris 공식  $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에 따른 각 용접방법에 대한 실험결과 균열진전지수(m) 및 재료상수값(C)을 Table 5에 나타내었다. 피로균열진전지수(m)는 SMAW 용접법과, FCAW 용접법이 높았으며 재료상수(C)도 이와 비슷한 양상을 나타내었다.

Table 4 The value of fatigue crack growth  $\Delta K_{th}(MPa\sqrt{m})$

Stress ratio	Base metal	SMAW	FCAW	SAW
0.1	8.0	13.2	11.8	9.4
0.3	7.6	12.8	11.3	8.9
0.6	7.0	12.3	10.8	8.6

Table 5 Paris linear regime of material according to welding method

Welding method	Stress ratio	0.1		0.3		0.6	
		m	C	m	C	m	C
Base metal	4.443	$1.447 \times 10^{-10}$	4.065	$4.775 \times 10^{-10}$	3.615	$1.912 \times 10^{-10}$	
SMAW	6.550	$9.689 \times 10^{-14}$	6.461	$1.649 \times 10^{-13}$	5.596	$1.661 \times 10^{-12}$	
FCAW	7.004	$1.936 \times 10^{-12}$	5.185	$9.648 \times 10^{-12}$	4.838	$3.435 \times 10^{-11}$	
SAW	5.779	$3.965 \times 10^{-11}$	4.309	$1.448 \times 10^{-10}$	4.161	$2.511 \times 10^{-10}$	

### 3.3 피로균열진전지수와 하한계응력확대계수와의 관계

응력비별 용접방법에 따른 피로균열진전지수(m)와 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )와의 관계를 Fig. 8~10에 도시하였다. 각 응력비별 모두 하한계응력확대계수가 증가할수록 피로균열진전지수도 증가하는 양상을 나타내었다. 용접방법에 따른 피로균열진전지수는 SMAW 용접법에서 가장 높고, FCAW, SAW, Base metal 순으로 나타났다.

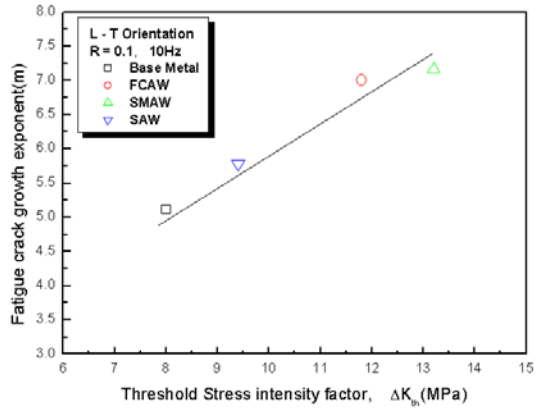


Fig. 8 Relation between threshold stress intensity factor range and m(R=0.1)

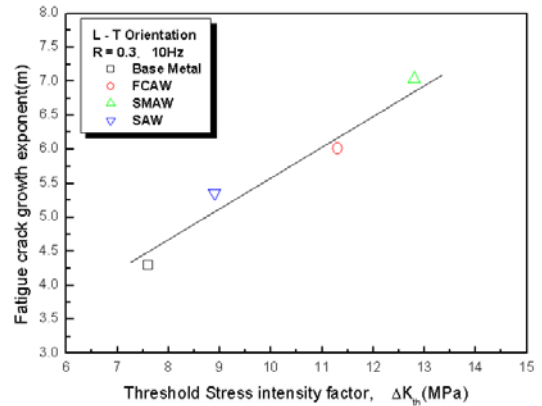


Fig. 9 Relation between threshold stress intensity factor range and m(R=0.3)

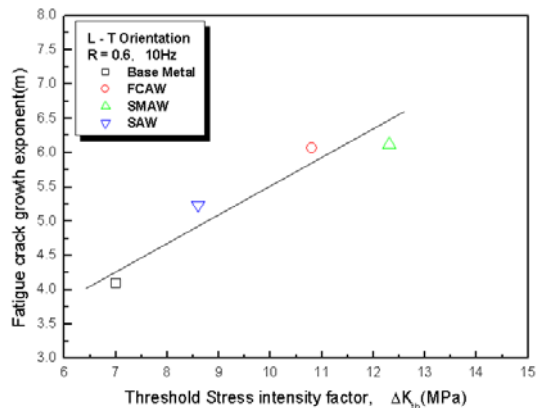


Fig. 10 Relation between threshold stress intensity factor range and m(R=0.6)

### 3.4 크랙길이와 사이클 수

Fig. 11~13은 상온 25°C에서 응력비 R=0.1, R=0.3, R=0.6의 환경을 적용하여 Base metal, SMAW, FCAW, SAW의 크랙길이(a)와 반복 사이클 수(N)의 관계를 나타내었다.

크랙길이 28mm지점에서의 하중 반복 사이클 수를 비교해보면 응력비 R=0.1일 때 모재는  $6.9 \times 10^5$  cycle, SMAW 용접재는  $3.6 \times 10^6$  cycle, FCAW 용접재는  $1.9 \times 10^6$  cycle, SAW 용접재는  $1.0 \times 10^6$  cycle로 나타났다. 또한 응력비가 R=0.3일 때 SMAW 용접재는  $9.5 \times 10^5$  cycle, FCAW 용접재는  $1.4 \times 10^6$  cycle, SAW 용접재는  $3.1 \times 10^6$  cycle로 나타났다. 응력비가 R=0.6일 때 모재는  $5.3 \times 10^5$  cycle, SMAW 용접재는  $2.6 \times 10^6$  cycle, FCAW 용접재는  $1.0 \times 10^6$  cycle, SAW 용접재는  $8.5 \times 10^5$  cycle로 나타났다.

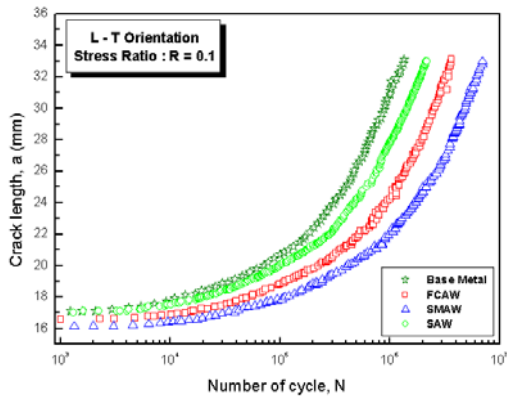


Fig. 11 Relation between fatigue crack length and number of cycle (R=0.1)

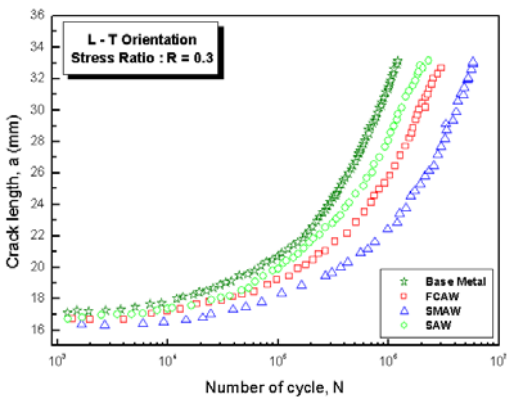


Fig. 12 Relation between fatigue crack length and number of cycle (R=0.3)

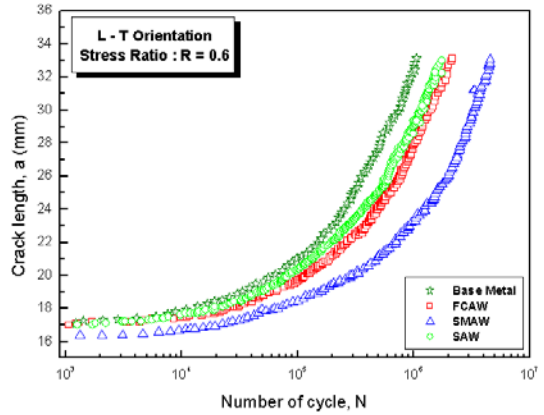
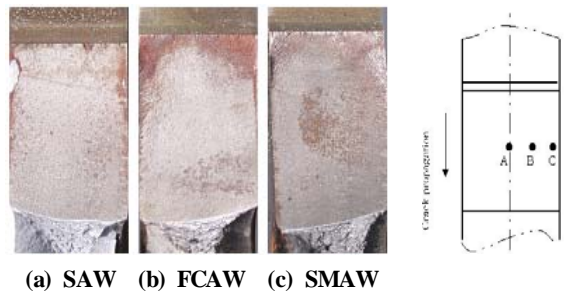


Fig. 13 Relation between fatigue crack length and number of cycle (R=0.6)

응력비에 따른 결과에서는 모두 SMAW 용접재가 다른 용접재에 비해 피로수명이 향상되고 있음을 알 수가 있다. 이는 용접방법에 의한 것으로 가능한 용접량이 작은 소형 구조물은 SMAW로 용접하도록 하고, 용접량이 많고 대형 구조물의 경우는 경제적인 측면과 작업능률성을 고려하여 FCAW를 선택하는 것이 유리하다고 판단된다.

### 3.5 용접방법에 따른 파단면 관찰

Fig. 13은 용접방법에 따른 피로크랙진전 파면의 실물사진과 파단면을 미시적으로 관찰하기 위한 SEM 촬영지점이다. Fig. 14는 용접방법에 따른 피로크랙진전 파면을 미시적으로 관찰하기 위한 주사식 전자현미경(SEM) 촬영지점이다. 용접방법에 따른 시험편의 각 지점에서 2000배 확대한 사진이다. 파면의



(a) SAW (b) FCAW (c) SMAW  
Fig. 9 Photograph and picture point of fracture surface

양상을 미시적으로 관찰한 결과 피로파면의 전형적인 피로줄무늬를 볼 수가 있으나, 연성이 큰 재료로서 피로줄무늬 사이의 높이차가 다르게 형성되어 있는 것을 알 수가 있었다. 또 용접부의 잔류응력 및 열영향부(HAZ)에서 변형과 수축으로 균열이 용접종단부에서 약간 내부로 균열이 전파되며 파단 되었음을 알 수 있었다.

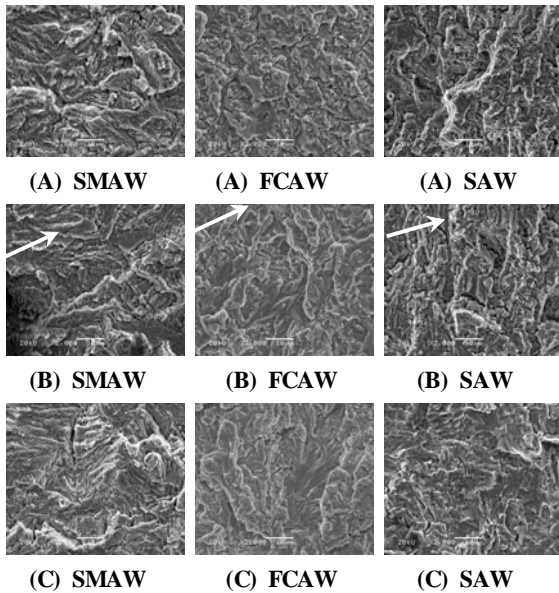


Fig. 10 Fractography of fatigue crack growth surface at FCAW, SMAW, SAW

#### 4. 결 론

구조용강의 용접가공에 따른 피로균열진전에 미치는 응력비의 영향을 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 용접방법에 따른 용접재의 피로크랙 전파 하한계 응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )가 SMAW, FCAW, SAW 순으로 나타났다. 이는 용접방법에 기인하는 것으로 잔류응력, 열영향부의 열 및 압력의 영향으로 판단된다.
2. SMAW 용접법이 FCAW, SAW 용접법에 비하여

피로수명이 각 응력비 별 모두 향상되어 응력비의 영향을 나타내었다.

3. 용접방법에 따른 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )에서는 SMAW가 가장 높고, FCAW, SAW 순으로 낮게 나타났다으며,  $da/dN-\Delta K$ 는 양대수 직선관계의 영향으로 비례적인 관계를 나타내었다.
4. 피로균열파단면을 주사식 현미경(SEM)으로 관찰한 파단면의 균열의 성장은 정상적인 스트라이에이션(Striation)을 형성하였고, 균열의 성장은 응력의 작용방향에 대하여 수직으로 진행되었다.

#### 참고문헌

1. S. W. Kang et al, "An improvement of the Fatigue Strength in Fillet Welded Cruciform Joints of Mild Steel under Pulsating Tension Load," JSNA of Japan, Vol. 150, No. 11 p. 499, 1981.
2. C. Miki and M. Sakano, "A Survey of Fatigue Cracking Experience in Steel Bridges," IIW Doc, XII -1383-90, 1990.
3. K. Natto, T. Ochi, T. Takahashi, and T. Suzuki, Effect of shot peening on the fatigue strength of carburized steels, Proc. The 4th International conference on shot peening, Tokyo, pp. 519-526, 1990.
4. 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, 청문각, pp. 1-31, 1999.
5. ASTM E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM, 2005.
6. 박경동, 정찬기, "압축잔류응력이 스프링강의 고온 환경 피로균열 진전거동에 미치는 영향," 한국해양 공학회지, 제 1권, 제 5호, pp. 73-79, 2002.
7. 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, 청문각, pp. 99-125, 1999.