

## 선체구조용강의 용접방법에 따른 용접부의 피로균열전파특성 연구

박경동† · 기우태\* · 이주영\*

(원고접수일 : 2006년 9월 5일, 심사완료일 : 2007년 3월 26일)

### A Study on the Fatigue Crack Growth Characteristics of the Welded Part According to the Welding Method of Ship Structural Steel

Kyeong-Dong Park† · Woo-Tae Ki\* · Ju-Yeong Lee\*

**Abstract** : The strength evaluation of the most weakest junction part is required for the safety design of all structures. Most of all, in order to enhance the reliability and safety of the welding part, whose use is the highest, it is very important to establish the efficient structure manufacturing technology by studying and investigating the evaluation of fatigue strength in various environments. This study analyzed the relations of  $da/dN$ , and  $th$  according to the welding methods of SMAW, FCAW, and SAW. In the stage II, the value of stress intensity factor range was the highest in SMAW welding method of stress ration  $R=0.1$ , and appeared under the sequence of FCAW and SAW, and as the completion section of stress intensity factor was low, threshold stress intensity factor was lowly formed in  $da/dN$  - The fatigue life of each welding method is sensitively worked in high stress ratio, judging from the fact that the width of life reduction increases in the high stress ratio zone compared to the width of life reduction in the low stress ratio zone. In the fatigue limit of welding methods before corrosion, the welding of SMAW and FCAW shows the same fatigue limit compared to Base metal, and SAW holds the lowest fatigue limit value.

**Key words** : Fatigue crack propagation(피로균열진전), Welding method(용접방법), Endurance limit(내구한도)

#### 1. 서 론

용접은 선체, 차량 등의 다양한 구조물과 기계장치의 접합과정 중 가장 중요한 작업으로 기계장치 및 구조물제작에 큰 비중을 차지하고 있다<sup>(1)</sup>. 용접

은 높은 온도에서 수행되므로 국부적으로 금속조직의 변화 및 열응력의 영향을 받게 되며, 용착금속 부 안에 기포나 불순물 혼입의 가능성이 높다. 용접부 표면에 기공이나 언더컷 등이 생기기 쉬워 구조물의 강도를 크게 저하시키는 요인이 된다. 이상

† 교신저자(부경대학교 기계공학부), E-mail: parkkd@pknu.ac.kr, Tel: 051)620-1592

\* 부경대학교 대학원 기계설계학전공

과 같이 용접부에 강도를 저하시키는 요인이 많으므로 이들을 개선하고자 하는 많은 연구가 진행되고 있지만 오랜 용접기술의 연구와 발전에도 불구하고 강 구조물의 경우 미숙한 용접사에 의한 용입 불량이나, 복잡한 구조물로 인한 불완전 용입, 그리고 공정의 감소에 따른 미용입이 존재하고 있는 용접구조물의 연결부와 간은 불연속부에서 반복하중에 의한 피로균열이 발생 성장하여 파손되는 사고가 발생하고 있다<sup>[2]</sup>. 따라서 모든 구조물의 안전설계를 위해서는 강도상 가장 취약한 접합부의 강도 평가가 요구되며 그 중 이용도가 높은 용접부의 최적 용접방법과 피로강도 평가를 체계적으로 연구 고찰함으로써 구조물의 강도 향상 및 경제적이고 능률적인 구조물 제작 기술을 구축하는 것이 매우 중요하다.

이에 본 연구에서는 선체구조용강의 용접방법에 따른 최적의 용접방법을 찾고자 피로균열진전속도, 하한계 응력확대계수 등 피로균열진전 특성을 연구하여 용접부의 건전성 확보와 유지보수 비용의 절감을 통해 효율적인 사용적합성 평가를 하는 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 선체 및 차량용 구조 합금강(JIS G 3458)으로서의 모재(Base metal)와 용접방법별(SMAW, FCAW, SAW) 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1, 2에 나타내었다. 용접은 V-groove의 양쪽 경사각이 40°가 되도록 시험편을 가공하여 아래보기자세로 다층용접을 실시하였으며, SMAW(Shielded Metal Arc Welding : 수동용접), FCAW(Flux Cored Arc Welding : 반자동용접), SAW(Submerged Arc Welding : 자동용접)로 각 용접방법별로 하였다. FCAW의 경우 실딩 가스는 CO<sub>2</sub>가스를 사용했으며, 가스의 유량은 20 l/min으로 공급하였다. 시험편에 대한 용접조건은 Table 3과 같고, 용접시험편에 대한 용접순서 및 용접부 단면형상을 Fig. 1에 나타냈으며, CT시험편의 형상과 치수를 Fig. 2에 나타내었다.

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

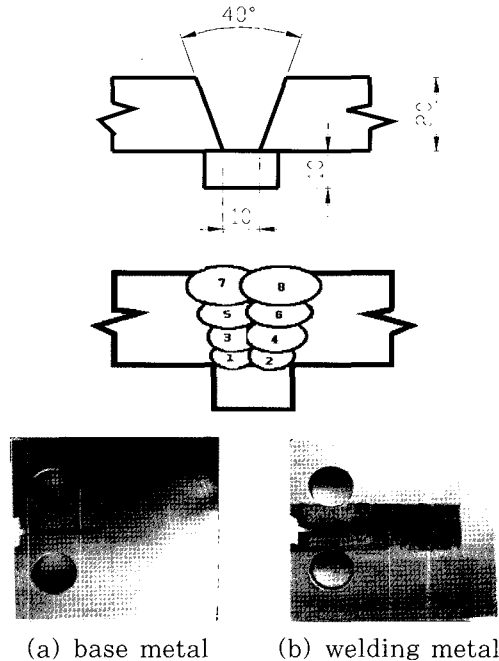
	C	Si	Mn	P	S	Cr
Base metal	0.130	0.130	1.010	0.019	0.002	0.024
Filler metal	0.055	0.470	1.200	0.013	0.010	-

**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

**Table 3 Welding condition**

	Welding wire dia	Current (A)	Polarity	Welding position	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)
SMAW	Φ4	121	AC	1G	25	5-8
FCAW	Φ4	210	DCEP	1G	25	21
SAW	Φ4	650	AC	1G	34	34



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

Fig. 2는 콤팩트(CT) 시험편으로, 두께 20 mm 판재에서 산소 절단기를 이용하여 압연방향이 하중 방향이 되게 L-T방향으로 채취하였고, 각부 치수는 ASTM-05의 기준에 따라 외형가공은 밀링(Milling)으로, 노치 홈은 와이어커팅 방전가공기(Wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노치 반지름 0.1 mm가 되게 가공하였다(3)-(5).

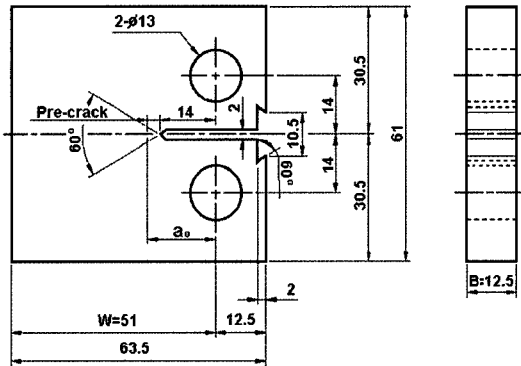


Fig. 2 Dimension of CT specimen(unit:mm)

그리고 기계 가공된 노치는 실제로는 매우 둔한 첨단을 갖는다. 이에 비하여 피로균열성장실험의 기본역학인 선형탄성파괴역학은 이상적으로 날카로운 균열을 전제로 하고 있다. 따라서 기계 가공된 노치로부터 날카로운 예비균열을 성장시켜 가공된 노치의 영향과 균열 첨단모양 및 하중 이력으로 인한 영향을 감소하고 예상경로를 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며 25 °C 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력범위에서 ASTM E647-05 규정에 의거해 3 mm의 피로예비균열을 주었다<sup>(4)-(6)</sup>.

2.2 실험장치 및 실험방법

피로균열 진전실험은 Fig. 3의 전기유압서보 피로시험기(Instron 8821S, 100KN)에 의한 하중 제어 방식으로 실험하였다. 파괴역학 파라미터인 ΔK의 가감과 균열길이측정용 COD게이지의 출력 데이터를 처리하기 위한 컴퓨터로 구성되어있다.

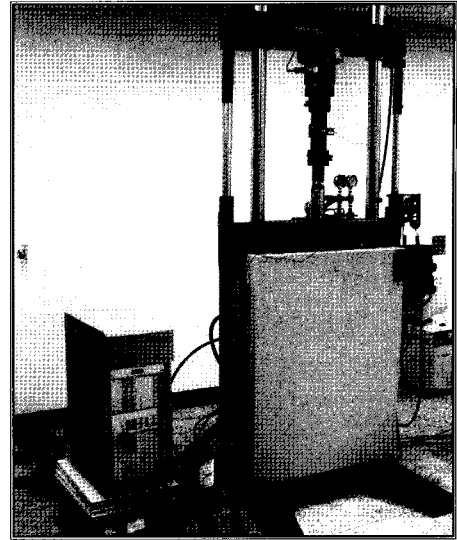


Fig. 3 Apparatus of fatigue test machine (Instron 8821S)

적용하중 파형은 정현파로 하고 적용 응력비는 R=0.1, R=0.3, R=0.6, 주파수는 10 Hz로 하였다. 피로균열 길이 측정은 COD 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 측정하였으며, ASTM E647-05에 의거 ΔK감소법으로 피로균열 진전이 정지될 때 까지 실험하였다. 본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK의 계산식은 다음과 같다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.46\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

$$\alpha = a/W \quad (a/W \geq 0.2) \tag{1}$$

여기서, a는 하중중심에서의 균열길이, W는 하중중심에서의 시험편길이, B는 시험편의 두께이며, ΔP는 하중변위이다<sup>(7)</sup>.

실험해석을 위해 응력확대계수 ΔK는

$$\Delta K = \begin{cases} K_{max} - K_{min} & (K_{min} > 0) \\ K_{max} & (K_{min} \leq 0) \end{cases} \tag{2}$$

및 응력비

$$R = K_{min} / K_{max} \tag{3}$$

의 함수가 된다. 여기서 R의 영향을 제외하면 특정의  $\Delta K$ 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (4)$$

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 실험에서는 ASTM E647-05 규정에 의거  $\Delta K$  콘트롤에 의한 K-감소방식을 이용하였는데 그 감소조건은 다음과 같다.  
 $\Delta K$ 의 기울기는<sup>(8)-(10)</sup>

$$C_g = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \geq 0.08 \text{mm}^{-1} \quad (5)$$

da/dN의 측정범위  $\Delta a \leq 0.5 \text{mm}$  ( $\Delta a$ 는 균열길이 증분량)이다. 여기서  $C_g$ 는 Normalized K-gradient이고, C와 m은 재료상수와 균열진전지수로서 그 값은 동일재료, 동일환경 구조물 등의 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다<sup>(11)</sup>.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 용접방법에 따른 경도분포

Fig. 4는 경도 분포를 조사하기 위해 마이크로 비커스 경도기(MVK-H1)로 경도측정을 하였다. 모재(Base metal)와 용접방법별(SMAW, FCAW, SAW)의 경도분포를 조사하기 위해 시험편의 단면부를 채취하여 열경화성 수지에 고정하고 폴리싱한 후, 측정하중은 500 g을 적용하여 압흔간격은 1 mm로 하였다. 측정한 값은 Fig. 5에 나타내었다. 용접방법에 따른 용접부의 경도분포의 평균값은 모재(Base metal)의 경우 135(Hv), SMAW용접재의 경우 203(Hv), FCAW용접재의 경우 214(Hv), SAW용접재의 경우 190(Hv)로 나타나 각 용접방법에 있어서는 FCAW용접재가 가장 높은 수치를 나타내었다. 따라서 용접재의 강도가 높을수록 경도값이 높게 나타났다.

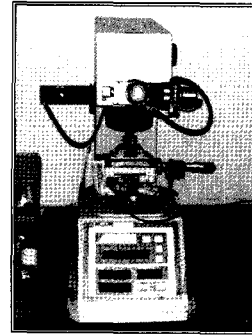


Fig. 4 Micro vickers hardness tester(MVK-H1)

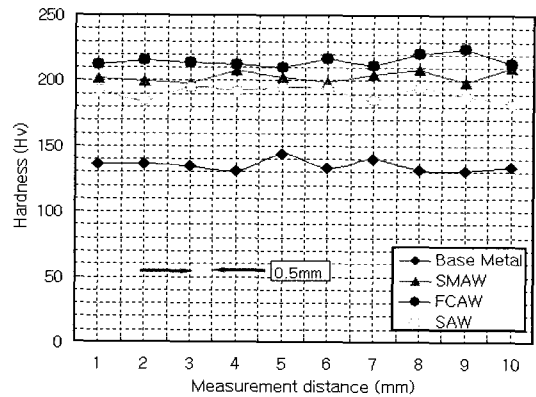


Fig. 5 Result of hardness test according to welding method

#### 3.2 피로균열속도

Figs. 6~9는 용접방법에 따른 시험편의 응력비 R=0.1, R=0.3, R=0.6에서의 피로균열진전속도 (da/dN)와 응력확대계수( $\Delta K$ )와의 관계를 나타냈으며, Table 3에 하한계응력확대계수값( $\Delta K_{th}$ )을 응력비별 용접방법별로 나타내었다. R=0.6에서 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 가 큰 감소량을 나타내었고, SMAW가 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 가 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 FCAW용접재가 인장강도가 높아 하한계 응력확대계수 값이 높게 나타나리라 예상했으나 오히려 낮은 값을 나타내고 있어 용접법에 기인한 것으로 판단된다.

응력확대계수가  $\Delta K = 15 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 일 때 각 용접방법에 따른 피로균열진전속도를 비교해보면 Table 4와 같다. 각 용접방법에 있어서 SMAW용접재와 FCAW용접재가 SAW용접재와 모재에 비해 낮은

피로균열속도를 나타내고 있음을 알 수가 있다. 또한 응력비가 높을수록 각 용접재의 피로균열속도는 가속화되고 있는 경향이 나타났다.

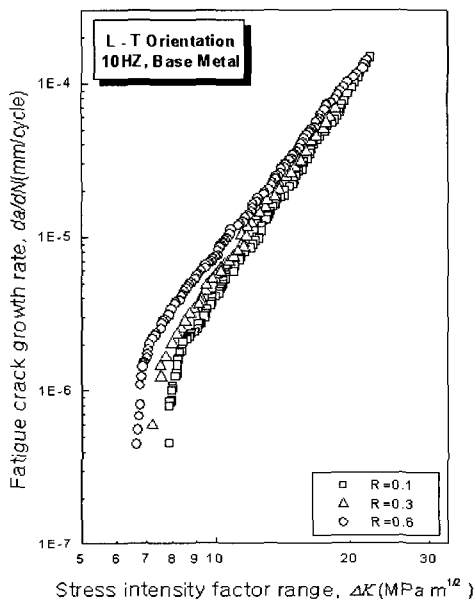


Fig. 6 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (Base Metal)

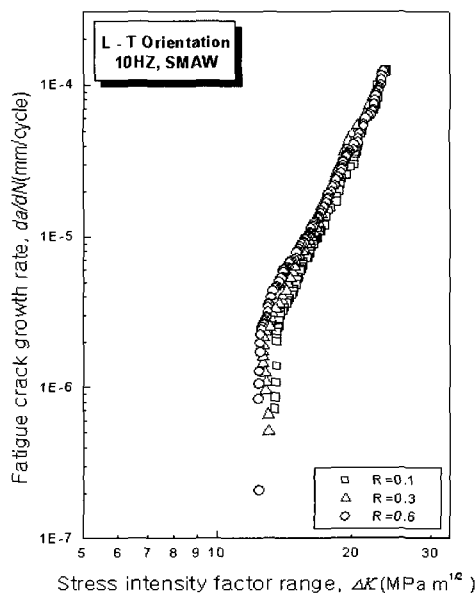


Fig. 7 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (SMAW)

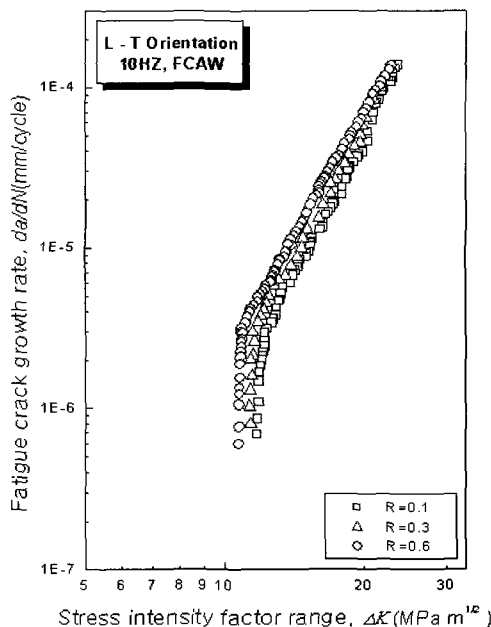


Fig. 8 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (FCAW)

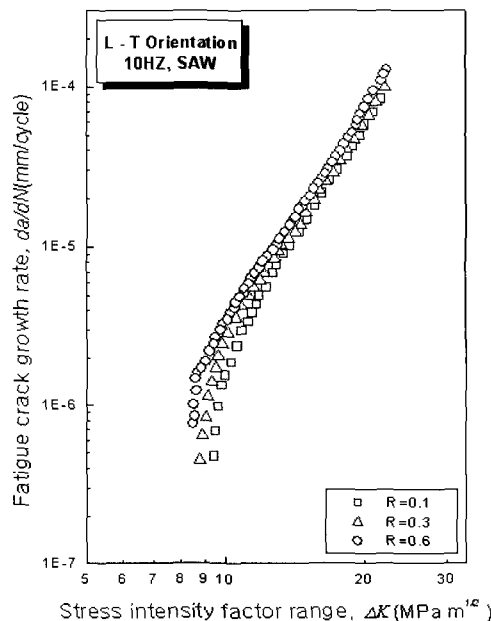


Fig. 9 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (SAW)

피로균열속도와 응력확대계수 값을 양대수 그래프로 표시하는 Paris 공식<sup>[12]</sup>  $da/dN=C(\Delta K)^m$

에 따른 각 용접방법에 대한 실험결과 균열진전지수(m) 및 재료상수값(C)을 Table 5에 나타내었다. 피로균열진전지수(m)는 SMAW용접법과, FCAW용접법이 높았으며 재료상수(C)도 이와 비슷한 양상을 나타내었다.

**Table 3** The value of threshold stress intensity factor range  $\Delta K_{th}$  (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 4** da/dN at  $\Delta K=15\text{MPa}\sqrt{m}$

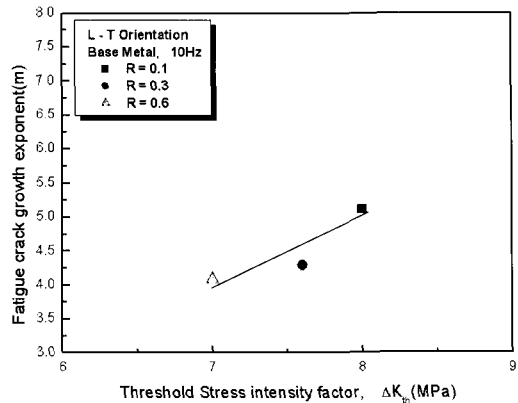
Stress ratio	Base metal	SMAW	FCAW	SAW
0.1	$2.33 \times 10^{-5}$	$4.79 \times 10^{-6}$	$9.08 \times 10^{-6}$	$1.46 \times 10^{-5}$
0.3	$2.83 \times 10^{-5}$	$7.50 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^{-5}$	$1.60 \times 10^{-5}$
0.6	$3.47 \times 10^{-5}$	$7.77 \times 10^{-6}$	$1.43 \times 10^{-5}$	$1.93 \times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

**Table 5** Paris linear regime of material according to welding method

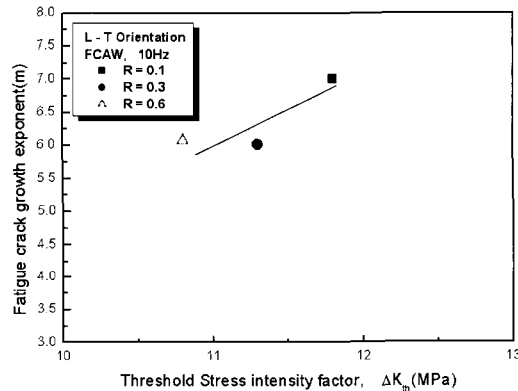
Welding method	0.1	0.3	0.6
Base metal	$2.66 \times 10^{-11}$ ( $\Delta K$ ) <sup>5.114</sup>	$2.55 \times 10^{-10}$ ( $\Delta K$ ) <sup>4.294</sup>	$6.27 \times 10^{-10}$ ( $\Delta K$ ) <sup>4.088</sup>
SMAW	$1.50 \times 10^{-14}$ ( $\Delta K$ ) <sup>7.166</sup>	$3.10 \times 10^{-14}$ ( $\Delta K$ ) <sup>7.037</sup>	$4.32 \times 10^{-13}$ ( $\Delta K$ ) <sup>6.118</sup>
FCAW	$4.40 \times 10^{-14}$ ( $\Delta K$ ) <sup>7.004</sup>	$9.51 \times 10^{-13}$ ( $\Delta K$ ) <sup>6.014</sup>	$2.73 \times 10^{-13}$ ( $\Delta K$ ) <sup>6.073</sup>
SAW	$2.28 \times 10^{-12}$ ( $\Delta K$ ) <sup>5.779</sup>	$1.01 \times 10^{-11}$ ( $\Delta K$ ) <sup>5.355</sup>	$6.63 \times 10^{-11}$ ( $\Delta K$ ) <sup>4.662</sup>

3.3 하한계 응력확대계수와 크랙진전지수와의 관계

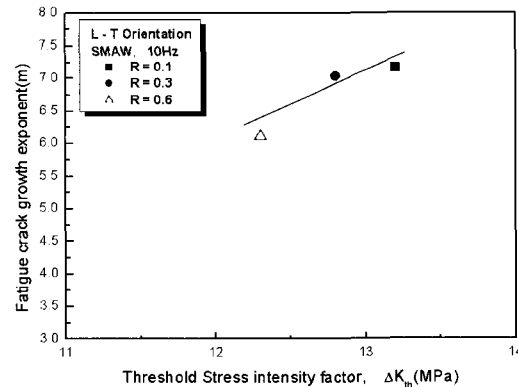
Figs. 10~13은 용접방법에 따른 하한계 응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 피로균열진전지수(m)와의 관계를 나타낸 것이다. 각 응력비별 하한계 응력확대계수가 증가할수록 피로균열진전지수도 증가하는 양상을 나타내었다.



**Fig. 10** Relation between threshold stress intensity factor range and m(Base metal)



**Fig. 11** Relation between threshold stress intensity factor range and m(FCAW)



**Fig. 12** Relation between threshold stress intensity factor range and m(SMAW)

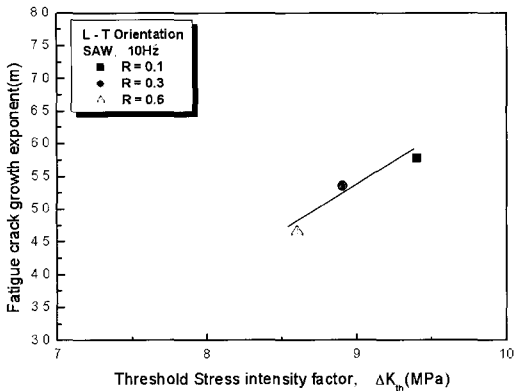


Fig. 13 Relation between threshold stress intensity factor range and m(SAW)

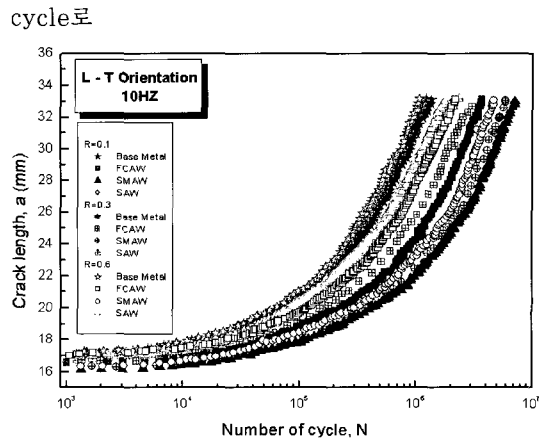


Fig. 14 Relation between fatigue crack length and number of cycle

3.4 크랙길이의 사이클 수

Fig. 14는 상온 25°C에서 응력비 R=0.1, R=0.3, R=0.6의 환경을 적용하여 Base metal, SMAW, FCAW, SAW의 크랙길이(a)와 반복 사이클수(N)의 관계를 나타내었다. 크랙길이 28 mm 지점에서의 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 나타났

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. 응력비별 모두 SMAW 용접재가 다른 용접재에 비해 피로수명이 향상되고 있음

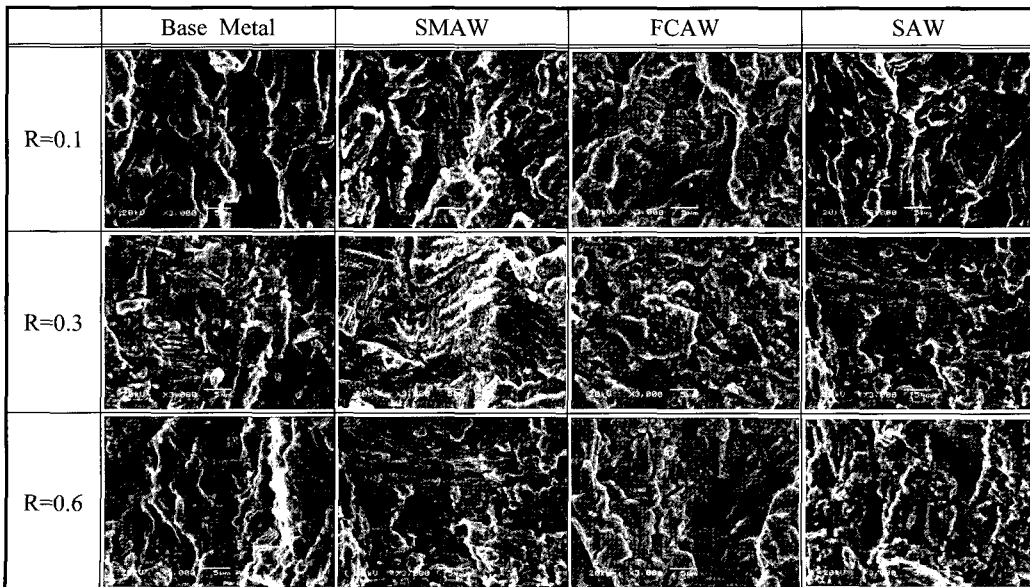


Fig. 15 Scanning electron microscopes of fatigue fracture morphology for welding methods and stress ratios

을 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. 15는 용접방법에 따른 피로크랙진전 파면을 미시적으로 관찰하기 위한 주사식 전자현미경(SEM) 촬영지점이다. 용접방법에 따른 시험편의 각 지점의 300배 확대한 사진이다. 파면의 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 용접중단부에서 약간 내부로 균열이 전파되며 파단 되었음을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

선체구조용강의 수동용접(SMAW), 반자동용접(FCAW), 자동용접(SAW)의 용접방법과 응력비  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ ,  $R=0.6$ 으로 피로균열진전특성과 하한계특성을 실험하여 다음과 같은 결과를 알 수 있었다.

(1) 용접방법별 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 에서는 SMAW가 가장 높고, FCAW, SAW 순으로 하한계 응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )값은  $da/dN-\Delta K$ 는 양대수 직선관계의 영향으로 비례적인 관계를 나타내었다. 이는 용접법에 기인하는 것으로 잔류응력 및 열영향부의 열 및 압력의 영향으로 판단된다.

(2) SMAW 용접법이 FCAW, SAW에 비하여 피로수명이 각 응력비 별 모두 향상되어 응력비의 영향을 나타내었다.

(3) 피로균열파단면을 주사식 현미경(SEM)으로 관찰한 파단면의 균열의 성장은 정상적인 스트라이에이션을 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] 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.
- [3] 日本機械學會基準, 彈塑性 破壊引性 J 試驗方法, JSME S 001-1981.
- [4] Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM : E647-05, 2005.
- [5] 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, pp. 99~125, 1999.
- [6] 小林英男, 破壊力學, 東京, 共立出版株式會社, pp. 57~63, 131~135, 1993.
- [7] 朴卿東, 原子爐用 低合金鋼의 高溫疲勞 크랙 전이와 크랙閉口 特性에 關한 研究, 동아대학교 박사학위논문, 1983.
- [8] 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp. 10~16, 1989.
- [9] Advanced Fatigue Crack Propagation, Instron 2490 Serie Application Programs, pp. 1~4, 1991.
- [10] 禹興植 외 2명, 재료파괴공학, 서울, 보성문화사, pp. 147~170, 265~273, 1993.
- [11] 박경동, 정찬기, "압축잔류응력이 스프링강의 고온환경 피로균열 진전거동에 미치는 영향", 한국해양공학회지, 제1권, 제5호, pp. 73-79, 2002.
- [12] 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, 청문각, pp. 99-125, 1999.



## 저 자 소 개



**박경동(朴卿東)**

1943년 2월생. 1983년 동아대학교 대학원 공학박사, 1992년 일본동경공업대학교 공학박사 학위취득, 현재 부경대학교 기계공학부 교수



**이주영 (李周映)**

1981년 6월생. 2005년 경성대학교 멀티미디어공학과 졸업(공학사), 현재 부경대학교 기계설계학전공 대학원(석사과정)



**기우태 (奇宇泰)**

1959년 6월생. 1992년 부경대학교 금형공학과 졸업(공학사), 1996년 울산대학교 교육대학원 공업교육학과(공학석사), 현재 부경대학교 기계설계학전공 대학원(박사과정), 한국폴리텍Ⅶ 울산대학 컴퓨터응용기계과 전임교수