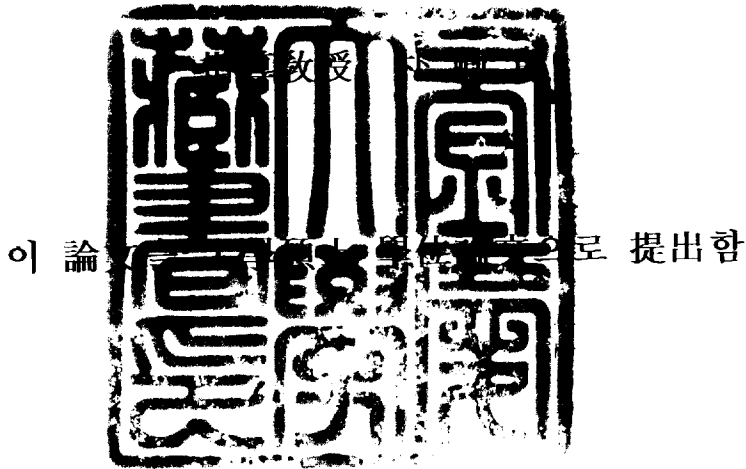


工學碩士學位論文

船體構造用鋼의 最適 銲接
疲勞強度 研究



2005년 2月

釜慶大學校大學院

機械工學科

陳 永 範

이 論文을 陳永範의 工學碩士
學位論文으로 認准함

2004年 12月 26日

主 審 教授 金 榮 大



委 員 教授 金 亨 資



委 員 教授 朴 卿 東



목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 이론적 배경	3
2.1. 피로균열의 파괴역학적 개념	3
2.2. 피로균열 진전거동에 있어서 파괴역학의 적용	7
2.3. 피로균열 진전거동	9
2.4. 응력확대계수범위의 결정	12
2.5. 균열진전의 하한계 측정	13
제 3 장 실험장치 및 방법	16
3.1. 시험편	16
3.2. 시험편의 용접	19
3.3. 실험 장치	20
3.4. 실험 방법	23
제 4 장 실험결과 및 고찰	25
4.1. 경도측정	25
4.2. 피로크랙 전파특성	26
4.2.1 SMAW의 피로크랙 전파특성	26
4.2.2 FCAW의 피로크랙 전파특성	26

4.3. 응력비에 따른 피로크랙 전파특성	31
4.4. 하한계 특성과 용접방법과의 관계	40
4.5. 재료상수와 피로균열진전지수	40
4.6. 하한계 특성과 m 의 관계	40
4.7. 크랙길이와 사이클수	43
4.7.1 용접방법에 따른 a , N 관계	43
4.7.2 응력비에 따른 a , N 관계	43
4.8. 파단면의 특성	47
제 5 장 결 론	48
 참고문헌	 49
Abstract	51
Nomenclature	53

제 1 장 서 론

용접은 교량, 선박 등의 다양한 구조물과 기계장치의 접합과정 중 가장 일반적인 작업으로 기계장치 및 구조물에 있어서 큰 비중을 차지하고 있다⁽¹⁾. 용접은 높은 온도에서 수행되므로 국부적으로 금속조직의 변화 및 열응력 영향을 받게 되고, 용착금속부 안에 기포나 불순물 혼입의 가능성이 높으며, 용접부 표면에 기공이나 언더컷(undercut)등이 생기기 쉬워 구조물의 강도를 크게 저하시키는 요인이 된다. 이상과 같이 용접부에 강도를 저하시키는 요인이 많으므로 이들을 개선하고자 하는 많은 연구 등이 계속되어 최근에는 용접부의 기포나 침전물 혼입 그리고 표면에 언더컷 등의 발생을 방지하여 용접부의 강도 향상에 많은 진전을 가져오고 있다. 그러나 오랜 용접기술의 연구와 발전에도 불구하고 강 구조물의 경우 미숙한 용접사에 의한 용입불량이나, 복잡한 구조물로 인한 불완전 용입, 그리고 공정의 감소에 따른 미용입이 존재하고 있는 용접구조물의 연결부와 같은 불연속부에서 반복하중에 의한 피로균열이 발생 성장하여 파손되는 사고가 발생하고 있다. 일반적으로 용접구조물에서 피로균열의 70% 이상이 용접부에서 발생한다고 보고된 바 있다.⁽²⁾ 따라서, 용접부에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나 기하학적인 조건과 하중형태 등의 복합적인 영향으로 인하여 아직 해결해야 할 문제가 많이 남아있다. 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. 본 연구에서는 용접방법에 따른 최적의 용접방법을 찾고자 응력확대계수(ΔK), 피로균열진전속도(da/dN), 하한계 응력확대계수(ΔK_{th}) 관계를 고찰하고자 한다. 실제 용접에 있어서 경제성과 편리함은 배제하고 단순히 용접방법에 따른 해석이므로 어떤 용

접방법이 더 좋다고는 말할 수 없지만, 용접방법이 그 경제성과 편리성이 어느 정도 같다고 생각한다면 이 연구로 효율적인 용접 방법을 선택하는데 도움이 되리라 생각된다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 피로균열의 파괴역학적 개념

파괴라는 이론적 현상은 미시적 조직이나 파괴기구의 영향을 강하게 받기 때문에 여러 가지 학문적 수법이 요구된다.

재료의 부재나 구조물을 연속체로 보고 파괴의 현상을 거시적인 입장에서 다루는 선형탄성파괴역학(L.E.F.M : Linear Elastic Fracture Mechanics)은 균열 또는 예리한 노치를 갖는 부재 혹은 구조물의 강도나 변형을 선형탄성론으로부터 얻어진 결과를 기초로 하여 취급하는 분야의 하나이다⁽³⁾.

길이 $2a$ 인 관통 균열이 있는 무한판이 균일인장응력 σ 를 받고 있는 경우를 생각해 보면 균열 선단으로부터 거리 r 인 곳에 있는 요소 dx, dy 는 응력 σ_x, σ_y 및 τ_{xy} 등을 받는데 이들은 Fig. 1의 좌표계로서는 다음과 같이 표시할 수 있다⁽⁴⁾.

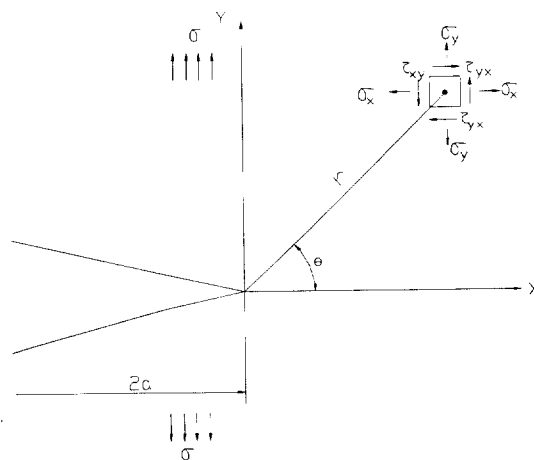


Fig. 1 The coordinate system of a crack in an infinite plate

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \right] \\
\sigma_y &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \right] \quad \text{-----}(1) \\
\tau_{xy} &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3}{2} \theta \\
\sigma_z &= 0 (\text{plane stress})
\end{aligned}$$

파괴가 Mode I 에서 발생할 때 식 (1)에서 $\theta = 0$ 일 때 균열선단에
 서의 σ_y 의 분포는 $\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}}$ 가 되고 이를 Fig. 2에 표시하면 응력
 확대계수 $K_I^{(5)}$ 은

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad \text{-----}(2)$$

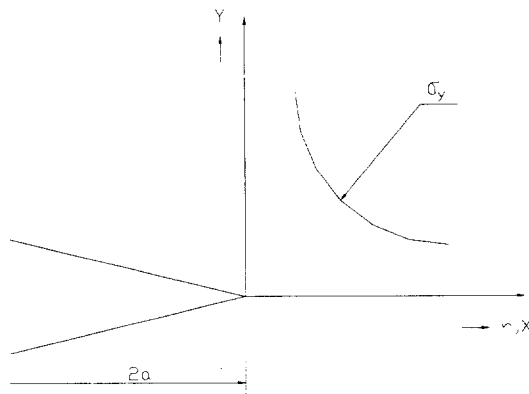


Fig. 2 Elastic stress at the crack tip

그러므로 식 (1)은 일반적으로 K_I 을 사용하여

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) \quad \text{-----}(3)$$

로 표시할 수 있다.

식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 균열 선단에서 응력의 크기 σ_y 는 K_I 에 의존함을 알 수 있고 균열 진전거동도 K_I 의 영향을 크게 받을 것임을 용이하게 단정할 수가 있다.

본 연구에서는 응력확대계수 K 의 이러한 성질을 이용하여 균열 길이에 대한 K 값을 제어하여 실험을 행하였다.

선형과괴역학은 균열 선단부근의 소성역의 크기가 작은 소규모항복상태에 운용이 되며 균열 선단부근의 소성역의 크기를 고려하는 경우 응력확대계수 K 는 보정이 필요하다.

탄성과 소성의 경계조건 즉, σ_y 를 항복강도 σ_{ys} 로 대치하면 $\theta = 0$ 에서 식 (3)은

$$\sigma_{ys} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_p^*}} \quad \text{-----}(4)$$

로 표시되며 여기서 r_p^* 는 이론상의 소성역의 크기이다.

일반적으로 역학적 평형조건으로부터 실제의 소성역의 크기 r_p 는 $r_p = 2r_p^*$ 가 됨이 밝혀져 있다(Fig. 3). 즉,

$$r_p^* = \frac{1}{2\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{ys}^2} \text{ (plane stress)} \quad \text{-----}(5)$$

로 표시할 수 있으며

$$r_p = \frac{1}{\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{ys}^2} \text{ (plane stress)} \quad \text{-----}(6)$$

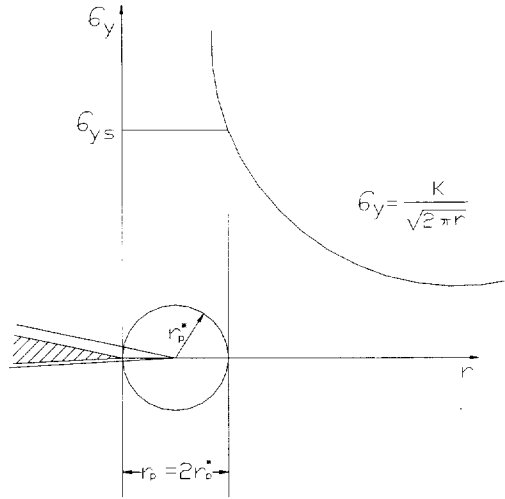


Fig. 3 Plastic zone at the crack tip

소성역의 반경 r_p^* 를 고려한 균열 길이 즉 $a + r_p^*$ 를 유효 균열 길이라 하며 이것을 고려한 응력확대계수 K 를 유효응력확대계수 K_{eff} 라고 한다. 식 (5)를 식 (2)에 대입시키면

$$K_{\text{eff}} = \sigma \sqrt{\pi \left[a + \frac{1}{2\pi} (K_1^2 / \sigma_{ys}^2) \right]} \quad \text{----- (7)}$$

이 되며, 이것을 다시 정리하면

$$K_{\text{eff}} = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\left[1 - \frac{1}{2} (\sigma / \sigma_{ys}^2)^2 \right]^{1/2}} \quad \text{----- (8)}$$

로 표시된다.

2.2 피로균열 진전거동에 있어서 파괴역학의 적용

피로에 대하여 파괴역학의 본격적인 적용은 1960년대부터이며, 파괴역학적 입장에서 정리한 피로균열진전속도에 관한 실험법칙과 이론은 극히 다양하다.

그 예로서 Liu에 의하여 $da/dN = Ba$ 와 Frost와 Dugdale에 의한 $d(2a)/dN = \text{Const.}$ 및 McEvily에 의한 $d(2a)/dN = f(\sigma_0)$ 등을 들 수 있으나, Irwin의 응력확대계수 K 가 균열선단에서의 응력의 크기를 특성 지워주는 Parameter이므로 K 의 함수로서 균열 진전속도를 나타냄이 가장 적절하리라는 추측이 간다. 즉 $K_{\max}$, $K_{\min}$, ΔK 및 K_m 등의 함수로서 주어지는 양은, 예컨대 균열진전속도와 밀접한 관계가 있어야 한다.

지금 일정진폭의 반복하중을 작용시켰을 경우 응력확대계수 K 에 대하여 살펴보면 반복하중회수(N)의 증가에 따라 K 가 변화하며 즉, 최대응력확대계수 $K_{\max}$, 최소응력확대계수 $K_{\min}$, 응력확대계수폭 ΔK ($=K_{\max} - K_{\min}$) 및 평균응력확대계수 $K_m \left\{ = \frac{1}{2}(K_{\max} + K_{\min}) \right\}$ 은 균열 진전에 따라 변화한다. 즉,

$$da/dN = f_1(\Delta K, R)$$

$$da/dN = f_2(K_{\max}, R) \quad \text{-----}(9)$$

$$da/dN = f_3(\Delta K, K_{\max})$$

여기서 R 은 응력비(Stress ratio)이며

$2a$: 균열의 길이

f_i : 작용응력의 함수 ($i = 1, 2, 3$)

σ_0 : 균열 선단에서의 응력

N : 하중반복횟수

균열 진전속도 da/dN 을 응력확대계수 K 로서 표시하면 다음과 같은 특징이 있다.

첫째로, 서로 다른 균열 진전특성을 나타내는 각종 시험편의 da/dN 을 K 로 정리하면, 동일 선상에 오게 된다.

둘째로, 높은 응력상태하에서 작은 균열이나 낮은 응력하에서의 긴 균열에 상관없이 K 가 같으면 균열 진전속도 da/dN 가 일정하게 된다.

셋째로, 균열 진전속도 da/dN 와 응력확대계수폭 ΔK 를 양대수 좌표로 표시하면 3단계 구간이 나타나는데 균열의 안정성장구간 즉 2단계 구간 선형영역에 있어서는 $\log \Delta K$ 와 $\log (da/dN)$ 의 직선관계를 나타내는

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad \text{-----}(10)$$

의 식이 일반적으로 성립하며, 여기서 C 와 m 은 재료상수이다^{(6)~(9)}.

이 식은 각종 금속재료 외에 고분자재료나 K 의 적용이 문제가 되는 고연성재료의 고 ΔK 영역에서도, 각종 균열에 대하여 일반적으로 성립한다. Paris와 Erdogan은 직선의 경사 즉 식 (10)에서 $m=4$ 가 넓은 영역에 걸쳐 특성이 잘 맞는 이유에서 다음과 같은 사승식을 제시하였다.

$$da/dN = C(\Delta K)^4 \quad \text{-----}(11)$$

그러나 많은 실험결과는 재료에 따라서 단 하나의 값으로 정의하는

것은 어렵다는 것이 밝혀졌다.

즉, m 은 0.4~8.0 정도의 넓은 값을 취하며 C 도 $10^{-5} \sim 10^{-18}$ 정도의 값을 가짐을 지적하였다.

2.3 피로균열 진전거동

균열선단에서 응력-변형률이 금속의 거동을 지배한다는 피로역학의 개념은 이미 존재해 있는 균열로부터 해석한다는 의미에서는 피로파괴 성장과 같다.

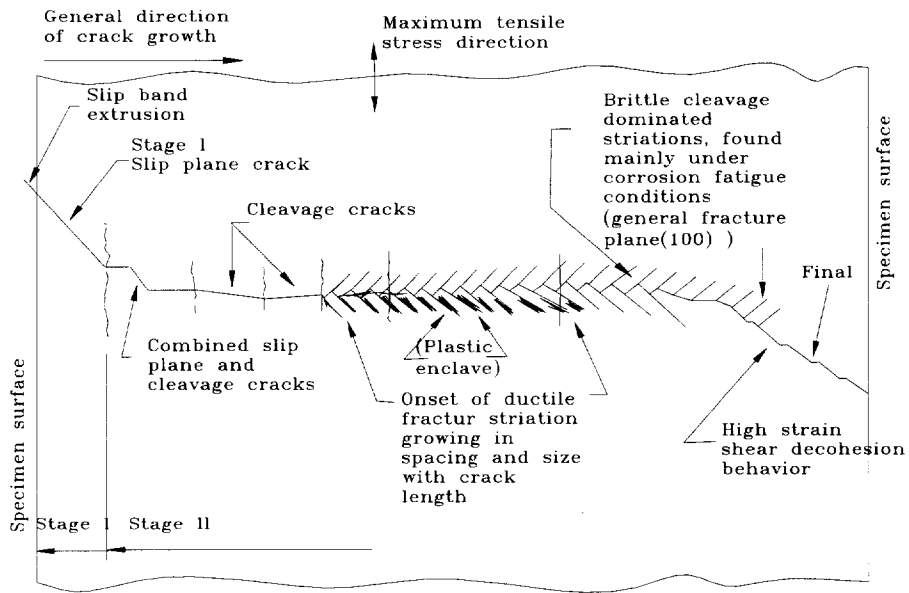


Fig. 4 Schematic illustration of the various modes of fatigue fracture

여기서 균열선단에서의 응력-변형률의 성질은 응력확대계수(Stress intensity factor) K 로 표시되고, 반복 응력확대계수와 피로균열진전속도와도 관계가 있다. 한편 균열의 성장률을 표시하면 Fig. 4와 같이 3개의 분리된 영역으로 나타난다.

이처럼 균열의 성장률을 나타냄으로서 주어진 하중에서 어느 정도 크기의 균열까지는 안전한가 또는 주어진 균열크기에 어느 하중까지는 얼마동안 안전한가 등 여러 가지 공학적 중요한 문제를 해결하는데 이용할 수 있다. 여기서 C 와 m 은 각각 재료상수, 피로균열진전지수이고 보통 m 은 0.5~0.8의 넓은 범위에서 변화한다. 그러나 식 (12)는 실험 재료를 총괄적으로는 나타내지 못한다. 실제로 Fig. 5에서 da/dN 와 ΔK 의 관계는 S형 모양을 갖거나 부분적으로 다른 기울기를 가진다.

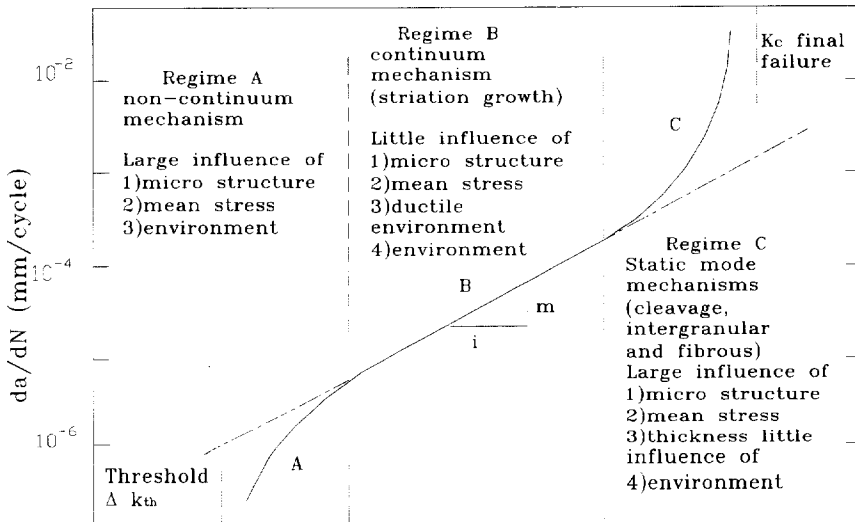


Fig. 5 Primary fracture mechanisms with variation of fatigue crack propagation rate da/dN with stress intensity factor range ΔK

ΔK 범위의 최상부 끝을 벗어남은 da/dN 가 유한으로 되어야 하는 균열이 임계값에 도달하는 것일 때 예상될 수 있다. 최종 파괴는 사이클 동안에 응력확대계수 K_{Ic} 에 도달한 상태에서 일어난다.

최대응력확대계수 K_{max} 및 응력비 R 의 영향도 고려해 넣으면 다음과 같이 일반화된다. 즉,

$$\frac{da}{dN} = f_1(K_{max}, \Delta K) = f_2(R, \Delta K) \quad \text{-----}(12)$$

여기서 응력비 $R = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$ 이다.

2.4 응력확대계수범위의 결정

CT시험편에 대하여 응력확대계수 범위 ΔK 는 다음 식으로 계산한다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad \text{-----}(13)$$

여기서 $\alpha = a/W$, 위 식은 $a/W \geq 0.2$ 에 대하여 유효하다.

CCT시험편에 대하여 ΔK 는 다음 식으로 계산한다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi a}{2W} \sec \frac{\pi a}{2}} \quad \text{-----}(14)$$

여기서 $\alpha = 2a/W$, 위 식은 $2a/W < 0.95$ 에 대하여 유효하다. 또 전술한대로 CT시험편은 인장-압축부하에 대하여 권장하지 않으나 CCT 시험편에 대하여 그 제한은 없다. 따라서 CCT시험편에 대하여 하중범위 ΔP 는 다음 식으로 정의된다.

$$\Delta P = \begin{cases} P_{\max} - P_{\min} & (R > 0) \\ P_{\max} & (R \leq 0) \end{cases} \quad \text{-----}(15)$$

특히 응력비 R 에 관계없이 $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$ 이라 정의해 da/dN - ΔK 관계를 표시한 보고가 많다. $R < 0$ 의 결과를 조사하는 경우 주의를 요한다. 선형탄성 파괴역학의 범위 내에서 $\Delta P = P_{\max}$ 라 하면 $R \leq 0$ 의 R 이 da/dN - ΔK 관계에 영향을 미치는 일은 없다.

2.5 균열진전의 하한계 측정

10^{-8} m/cycle 이하에서 균열진전의 하한계 ΔK_{th} 에 이르는 da/dN 을 상술한 정하중 진폭시험으로 측정하는 경우, 피로 예균열 도입 때의 K_{max} 및 실험 개시 때의 K_{max} 또는 ΔK 가 현저한 영향을 미친다. 실제의 $da/dN-\Delta K$ 관계는 하중이력이 무시되는 이상 균열에 대하여 실험 개시 때의 ΔK_{th} 와 거의 같은 ΔK 를 준 경우에만 얻어진다. 이것을 달성하는 것은 용이하지 않다. 따라서 하중점감 실험이 일반적으로 행하여지고 있다. ASTM에서는 E647-81의 개정에서 10^{-8} m/cycle의 da/dN 측정을 포함하여 ‘정상상태의 피로균열 진전속도의 실험방법’을 검토중이다. 아래에 그것을 소개한다^{(10)~(13)}.

R 일정의 경우 K 구배는 다음에 의해 정의된다.

$$\begin{aligned} C &\equiv \frac{1}{K} \frac{dK}{da} \equiv \frac{1}{K_{max}} \frac{dK_{max}}{da} \\ &\equiv \frac{1}{K_{min}} \frac{dK_{min}}{da} \equiv \frac{1}{\Delta K} \frac{d\Delta K}{da} \end{aligned} \quad \text{-----}(16)$$

K 증가실험은 C 가 정(正), K 감소 실험은 C 가 부(負)가 된다. 하중은 계단상으로 감소시켜도 연속적으로 감소시켜도 좋다. C 의 값으로 다음이 권장된다.

$$C \geq -0.08 \text{ mm}^{-1} \quad \text{-----}(17)$$

하중을 계단상으로 감소시키는 경우에도 Fig. 10을 참조하여 이것에 준한다. 단 P_{max} 의 감소는 10%이하로 하여 감소 후에

$$\Delta a \geq 0.50 \text{ mm} \quad \text{-----}(18)$$

의 균열길이 증분이 확인이 권장된다.

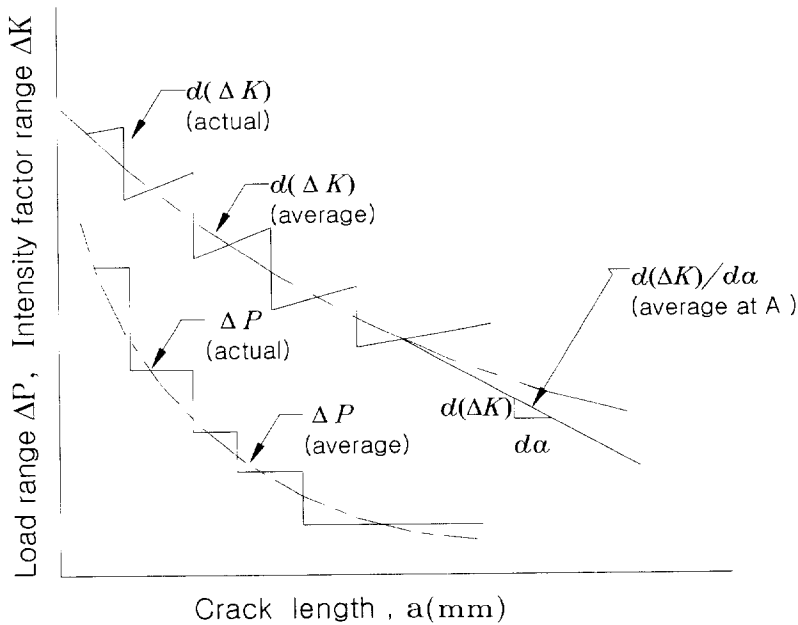


Fig. 6 Typical K decreasing test by stepped load

$da/dN = 10^{-9} \sim 10^{-10}$ m/cycle의 범위를 등분할 한 5점 이상의 데이터를 사용하여 $da/dN - \Delta K$ 관계를 양대수 좌표상에 최적직선으로 근사한다. 이 최적직선에서 $da/dN = 10^{-8}$ m/cycle에 대응하는 ΔK 를 결정하여 ΔK_{th} 로 한다.

상기의 시험방법에 대한 비판이 적지 않다. 우선 상기의 C 의 조건을 만족하지 않는 경우에도 ($C \geq -1 \text{ mm}^{-1}$), C 는 ΔK_{th} 에 영향을 미치지 않는다. 또 통상의 재료 및 시험편 치수에 대하여 상기의 Δa 의 조건을 만족하기에는 매우 어렵다. $da/dN = 10^{-9} \sim 10^{-10}$ m/cycle의 범

위를 등분할 한 5점 이상의 데이터를 얻기 위해 최저 5×10^7 회의 하중 반복이 필요하게 되는 것은 명심해야 한다.

또한 K 점감실험에 실제의 ΔK_{th} 가 얻어지는가 아닌가에 대해서도 의문이 있다. 아래에서 설명한 것과 같이 대기 중에서 ΔK_{th} 는 프레팅(Fretting)산화물 유기균열개구에 지배되어 있다. 프레팅(Fretting) 산화물의 생성은 하중, 환경조건에 강하게 영향을 받으며 ΔK_{th} 의 평가와 실험방법의 검토는 차후의 과제로서 아직 남아 있다.

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 선박등의 구조물에 사용되고 있는 선체 구조용 강(LR GRADE D)으로 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고, Table 2는 시험편의 기계적 성질이다.

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

	C	Si	Mn	P	S	Al
Base metal	0.13	0.13	1.01	0.019	0.002	0.024
SMAW	0.06	0.4	1.0	0.012	0.01	-
FCAW	0.05	0.55	1.3	0.015	0.01	-

Table 2 Mechanical properties of base metal and filler metals

	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
Base metal	456	329	31
SMAW	570	490	28
FCAW	590	530	27

Fig. 7은 시편의 형상과 치수를 나타내었다. 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^{(14),(15)}.

그리고 기계 가공된 노치는 실제로는 매우 둔한 침단을 갖는다. 이에 비하여 피로균열성장실험의 기본역학인 선형탄성파괴역학(L.E.F.M)은 이상적으로 날카로운 균열을 전제로 하고 있다.

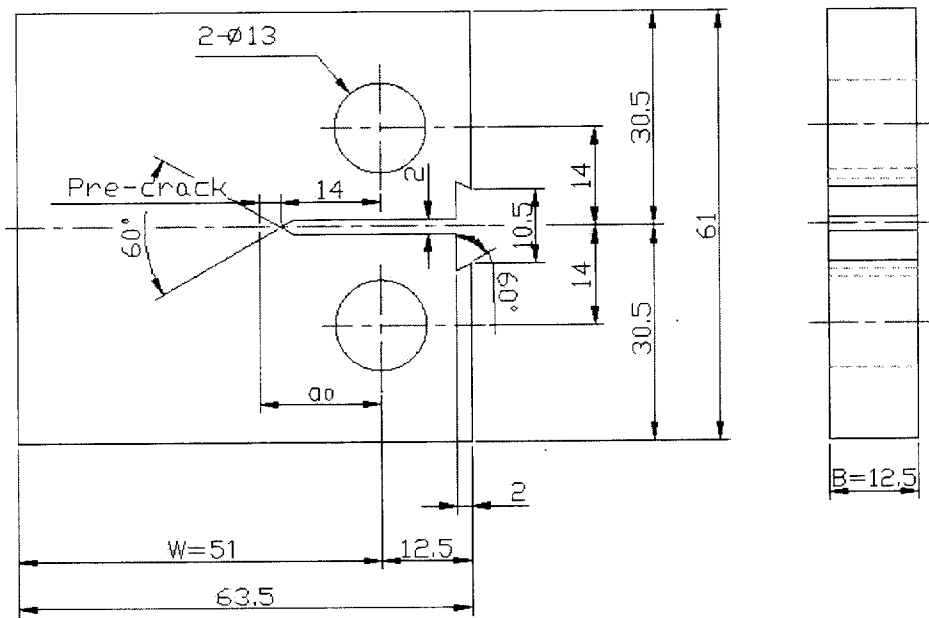
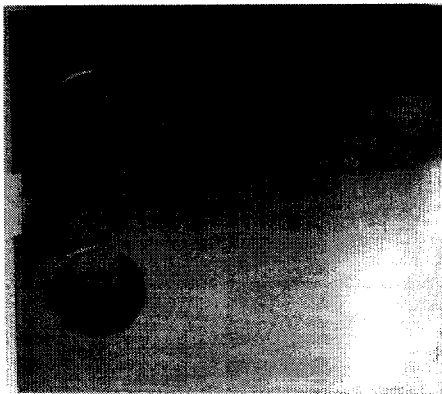
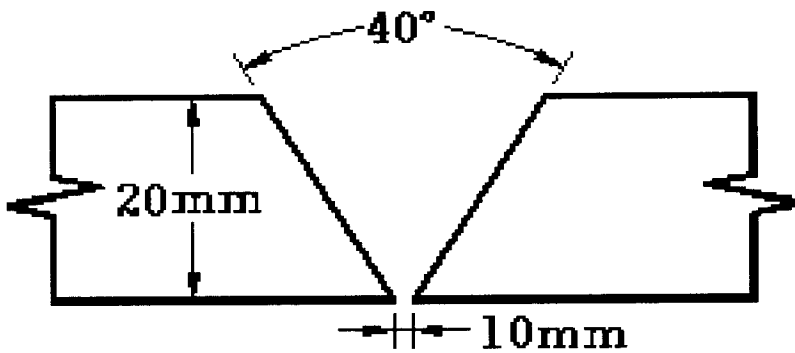


Fig. 7 Dimension of CT specimen(unit:mm)

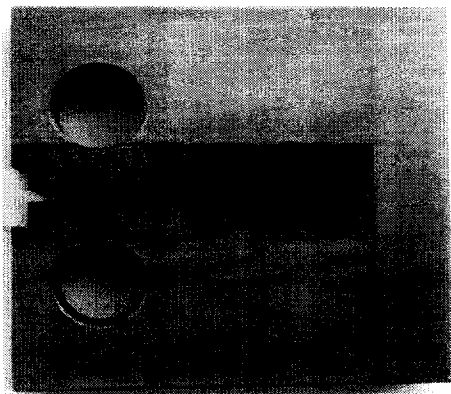
따라서, 기계 가공된 노치로부터 날카로운 예비균열을 성장시켜 가공된 노치의 영향과 균열 침단모양 및 하중 이력으로 인한 영향을 감소하고 예상 경로를 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며 25℃ 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력범위에서 ASTM E647-93 규정에 의거해 3mm의 피로예비균열을 주었다^{(16),(17)}.

3.2 시험편의 용접

Fig. 8은 본 실험에 사용된 용접시험편의 형상이다. 용접하기 전에 시험편을 압연방향과 직각으로 40° V-groove로 용접하였다. 시험편 규격은 ASTM E647-93의 규정에 의해서 제작 하였으며, 모재(a)와 용접재(b)를 비교해보면 용접부위가 뚜렷이 구별됨을 확인할 수 있다.



(a) base metal



(b) weld metal

Fig. 8 CT specimens of base metal and weld metal

3.3 실험장치

Fig. 9는 본 실험에 사용된 피로시험기의 구조이다. 피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기(Instron 8821S, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용 하중 파형은 정현파(SINE)로 하고 적용 응력비는 $R=0.1$, $R=0.6$, 주파수는 10Hz로 하였으며, 피로균열 길이측정은 COD 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 ASTM E647-93의 규정에 따라 상온에서 실험하였다. Fig. 10은 전기유압서보 피로시험기이다. 그리고 Fig. 11은 경도 분포를 조사하기 위하여 사용한 마이크로 비커스 경도계(Micro Vickers, MVK-H1)이다.

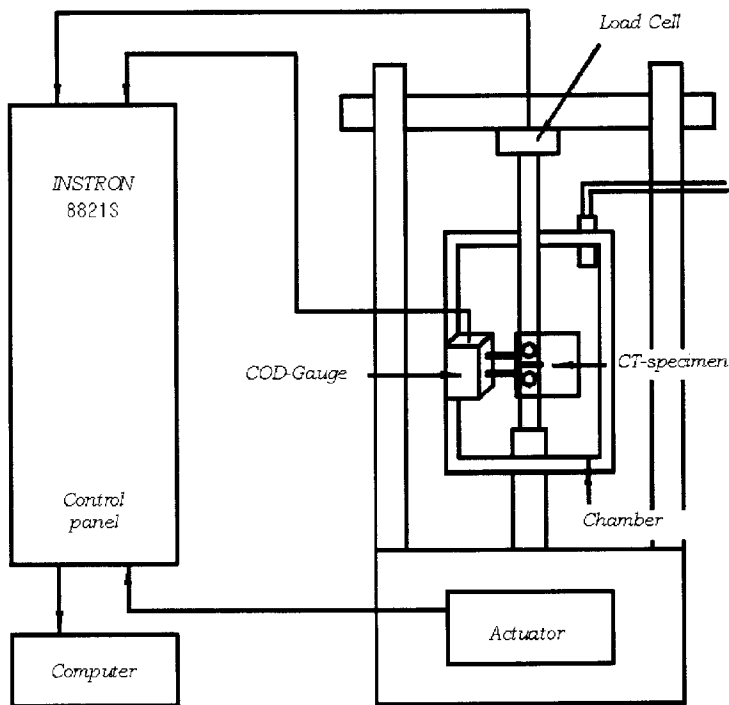


Fig. 9 Schematic diagram of fatigue test machine

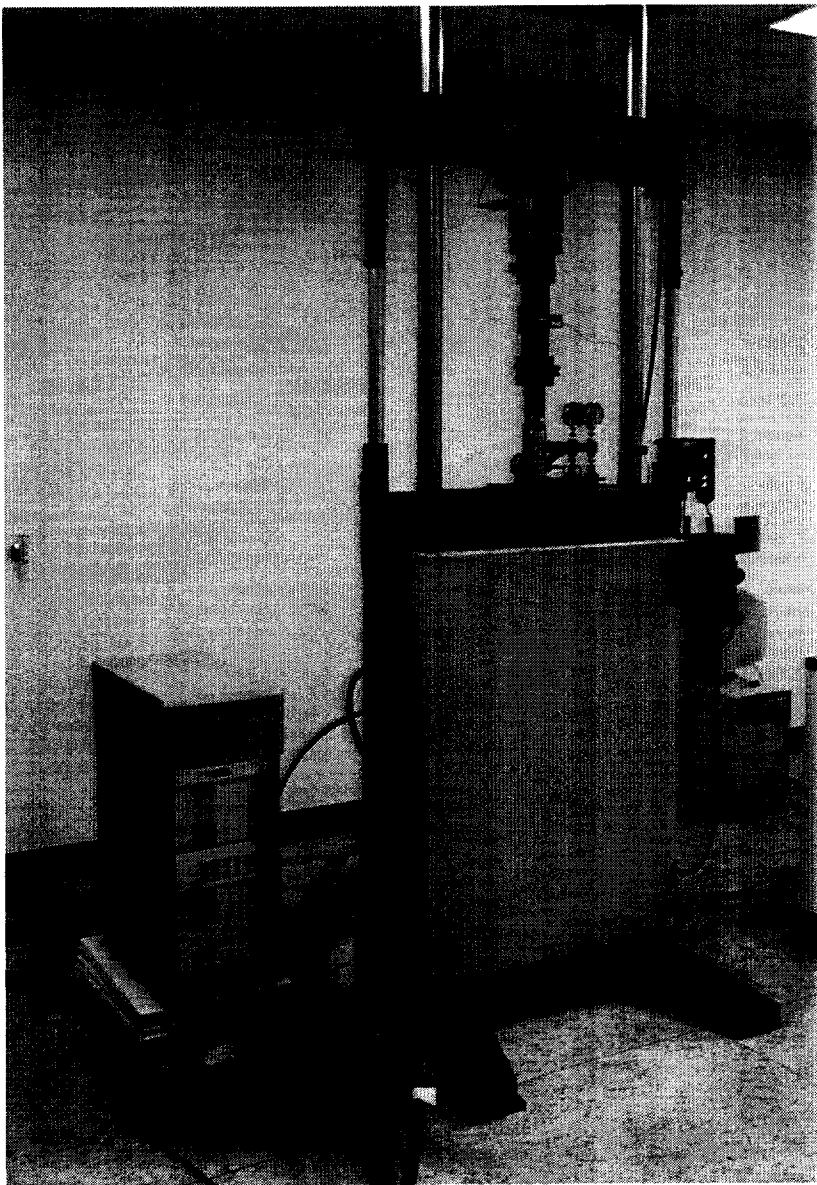


Fig. 10 Apparatus of fatigue test machine(Instron, 8821S)



Fig. 11 Micro vickers hardness tester(MVK-H1)

3.4 실험 방법

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기에 의해 응력비 $R=0.1$ $R=0.6$, 주파수는 10Hz, 피로균열 길이측정은 COD 클립게이지에 의해 상온에서 각각의 시험편을 실험하였다.

시험편의 초기 크랙은 초기응력확대계수 범위 ΔK 를 $10 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 으로 하여 초기 ΔK 의 95% 범위 내에서 ΔK 증가법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였고 초기크랙진전길이 3~5mm 지점에서 다시 95% 범위 내의 ΔK 감소법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다.

본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 다음과 같다.

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

$$a = a/W \quad (a/W \geq 0.2) \quad (1)$$

여기서, a 는 하중중심에서의 균열길이, W 는 하중중심에서의 시험편 길이, B 는 시험편의 두께이며 ΔP 는 하중변위이다⁽¹⁸⁾.

실험해석을 위해 응력확대계수 ΔK 는

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

및 응력비

$$R = K_{\min} / K_{\max} \quad (3)$$

의 함수가 된다. 여기서 R 의 영향을 제외하면 특정의 ΔK 의 범위에서

다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인

$$da / dN = C (\Delta K)^m \quad (4)$$

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 응력확대계수 범위 ΔK 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 실험에서는 ASTM E647-93 규정에 의거 ΔK 콘트롤에 의한 K -감소방식을 이용하였는데 그 감소 조건은 다음과 같다.

ΔK 의 기울기는^(19~21)

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

da/dN 의 측정범위 $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$ (Δa 는 균열길이 증분량)이다. 여기서 C 와 m 은 재료상수와 균열진전지수로서 그 값은 동일재료, 동일환경 구조물 등의 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 경도 측정

Base metal과 SMAW, FCAW 의 경도분포를 조사하기 위하여, 시험편의 단면부를 채취하여 열경화성 수지에 고정하고 포리싱을 한 후, 측정하중은 500g을 적용하여 압흔간격을 1mm로 하였다. 측정한 값을 Fig. 12에 나타내었다. Base metal의 경우 135(HV), SMAW 203(HV), FCAW 214(HV)로 나타나 FCAW가 가장 높은 경도 값을 나타내었다.

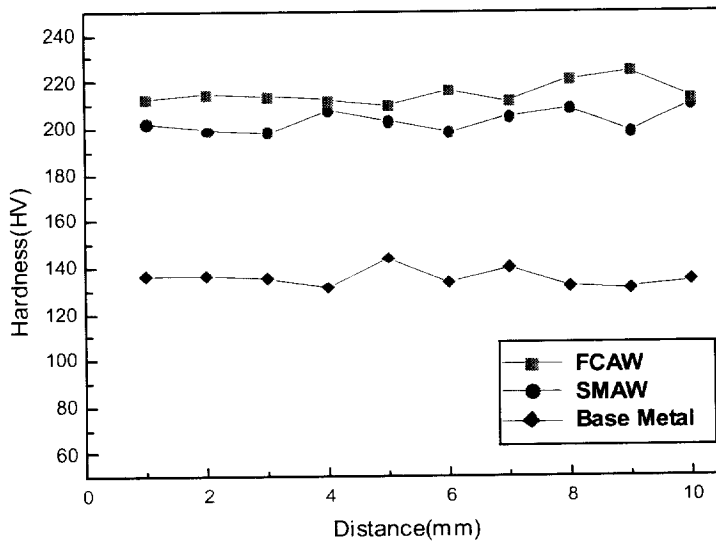


Fig. 12 Results of vickers hardness test

4.2 피로크랙 전파특성

4.2.1 SMAW의 피로크랙전파특성

Fig. 13, 14는 SMAW에 대하여 응력비 $R=0.1$, $R=0.6$ 에서 점감 하중법에 의해 피로균열 진전속도 da/dN 과 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 동일한 ΔK 에서 Base metal과 용접재 SMAW의 피로균열 진전속도 da/dN 관계가 차이가 있음을 알 수 있다.

또한 SMAW가 Base metal, FCAW 보다 피로균열 전파초기영역(Stage I)에서의 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났다.

4.2.2 FCAW의 피로크랙전파특성

Fig. 15, 16는 4.1.1의 SMAW와 동일한 방법으로 FCAW에 대하여 피로균열 진전속도 da/dN 과 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다. 동일한 ΔK 에서 Base metal과 FCAW의 da/dN 관계에서 Base metal의 피로균열진전속도 da/dN 이 증가함을 알 수 있다.

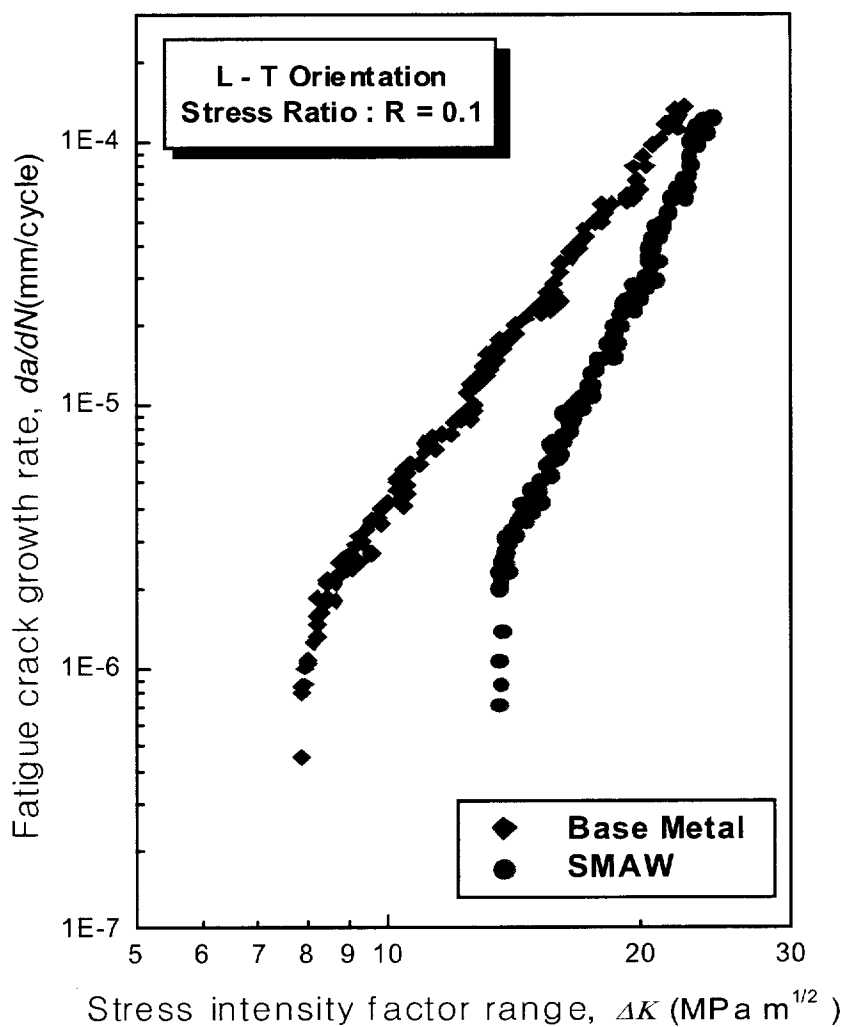


Fig. 13 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

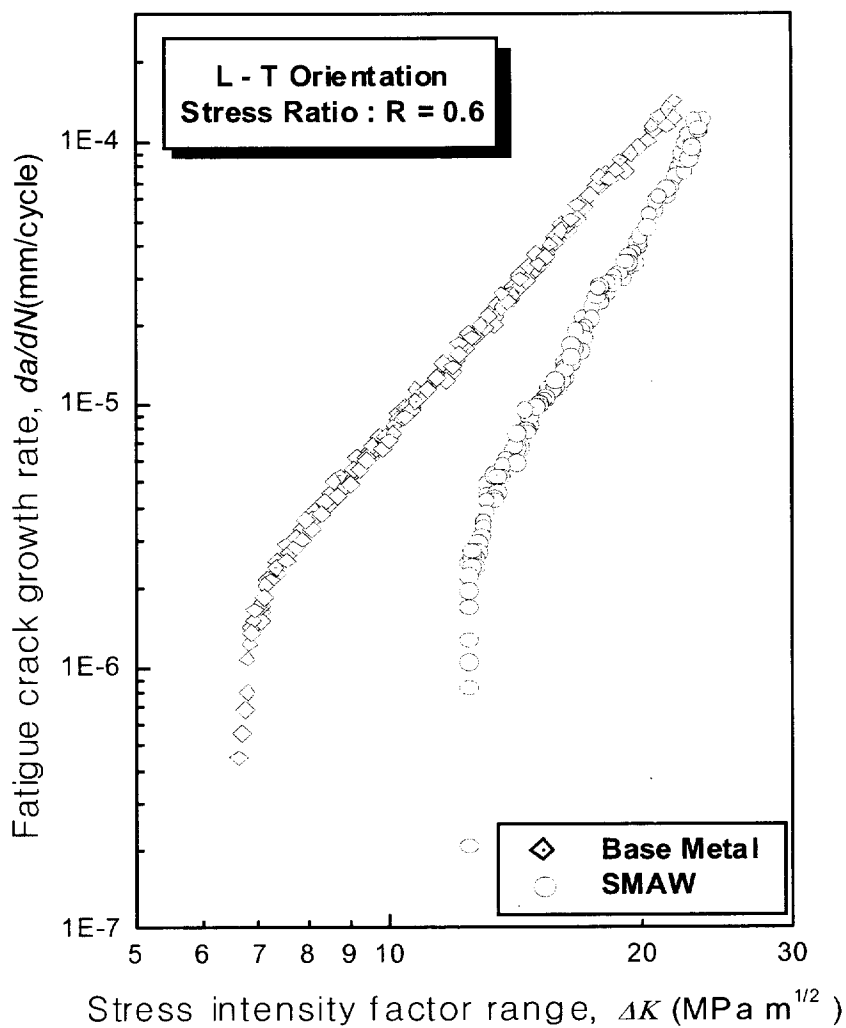


Fig. 14 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

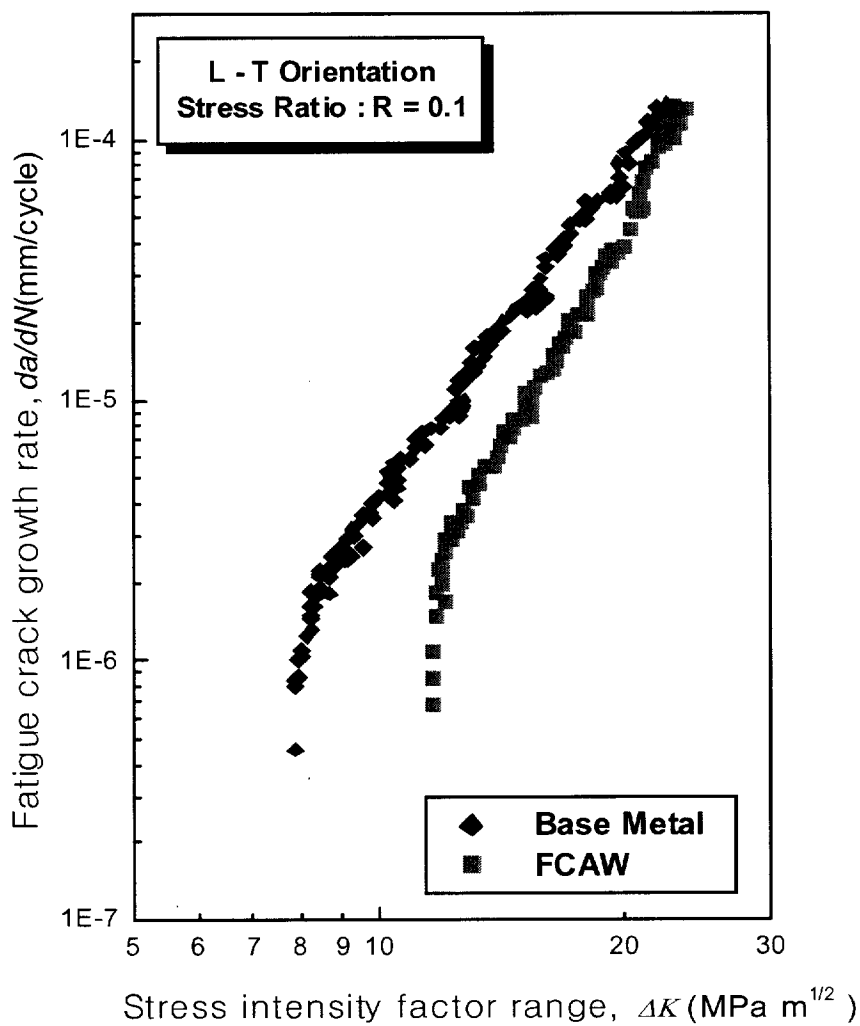


Fig. 15 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

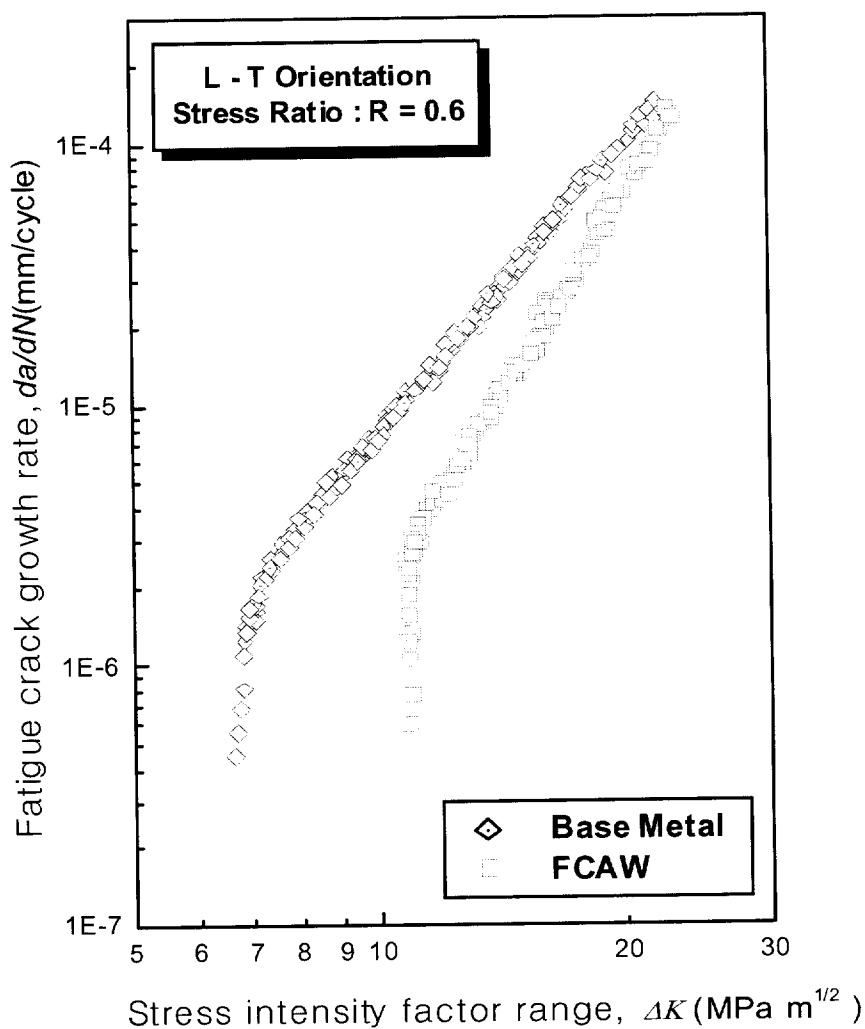


Fig. 16 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

4.3 응력비에 따른 피로크랙 전파특성

Fig. 17, 18, 19, 20, 21, 22는 선체 구조물로 주로 사용되는 선체 구조 용강에 대하여 Base metal, SMAW, FCAW에 대하여 응력비 $R=0.1$, $R=0.6$ 에서 사이클은 10Hz로 하여 상온에서 하중점감법 실험을 실시하여 피로균열 진전속도 da/dN 와 응력확대계수 ΔK 관계를 양대수 직선상에 나타낸 것이다. 실험결과 용접방법 따른 피로균열진전지수 da/dN 은

SMAW 응력비 0.1에서 $2.232 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle} \leq da/dN \leq 1.249 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$

0.6에서 $1.949 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle} \leq da/dN \leq 1.241 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$,

의 범위를 가졌고,

FCAW 응력비 0.1에서 $2.202 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle} \leq da/dN \leq 1.311 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$

0.6에서 $1.849 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle} \leq da/dN \leq 1.331 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$

그림에서 보다시피 $R=0.1$ 과 $R=0.6$ 의 피로균열 진전속도 da/dN 을 비교해 보면 응력비가 커 질수록 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이는 피로균열 진전 Stage II 영역의 피로균열진전속도 da/dN 이 응력비의 영향을 받는 것으로 판단된다.

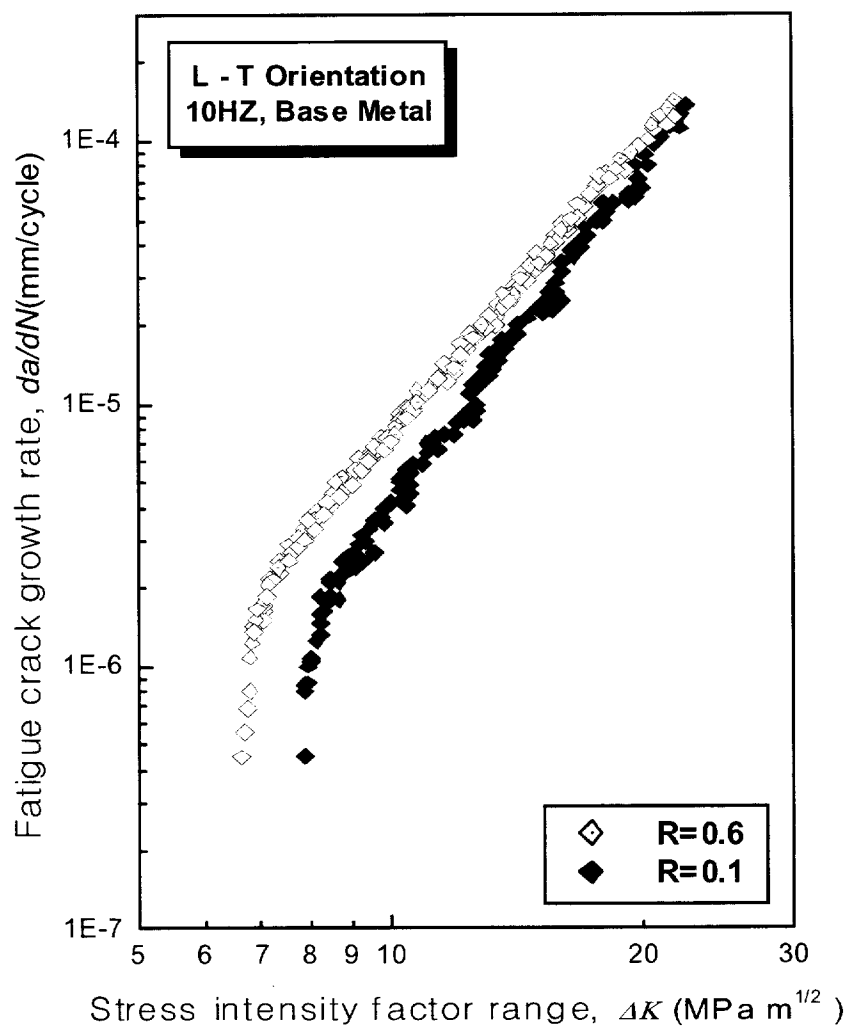


Fig. 17 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

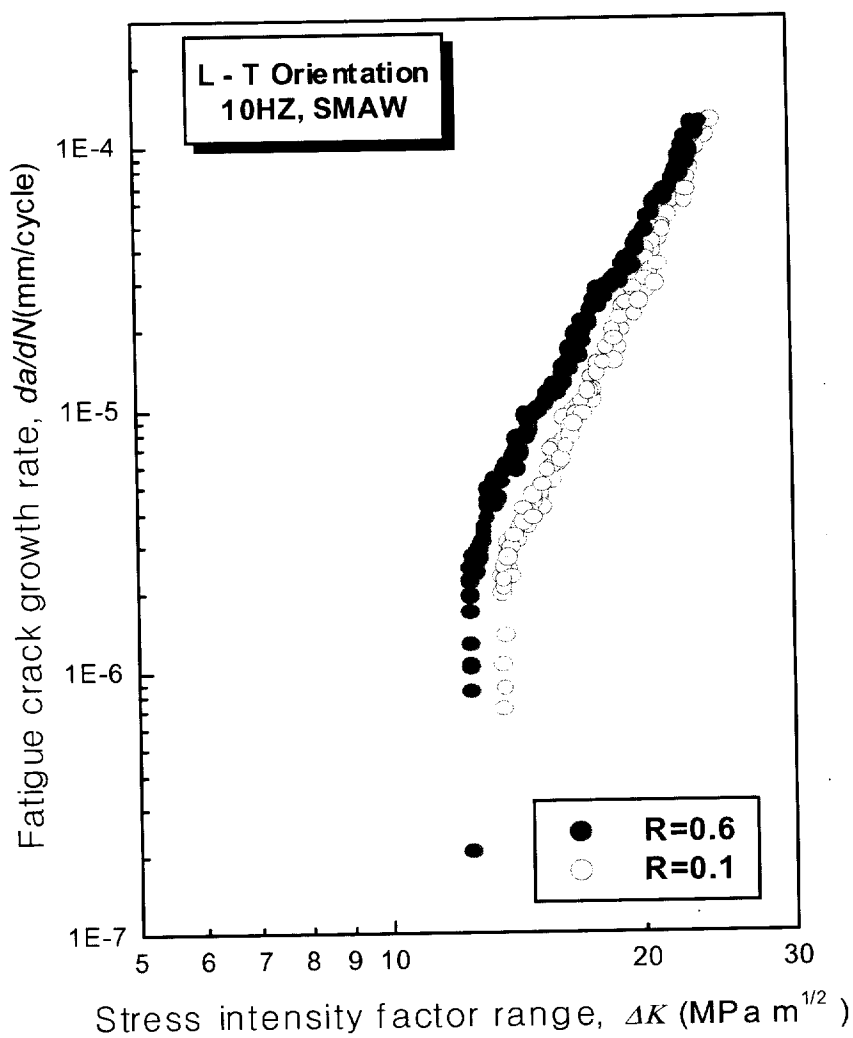


Fig. 18 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

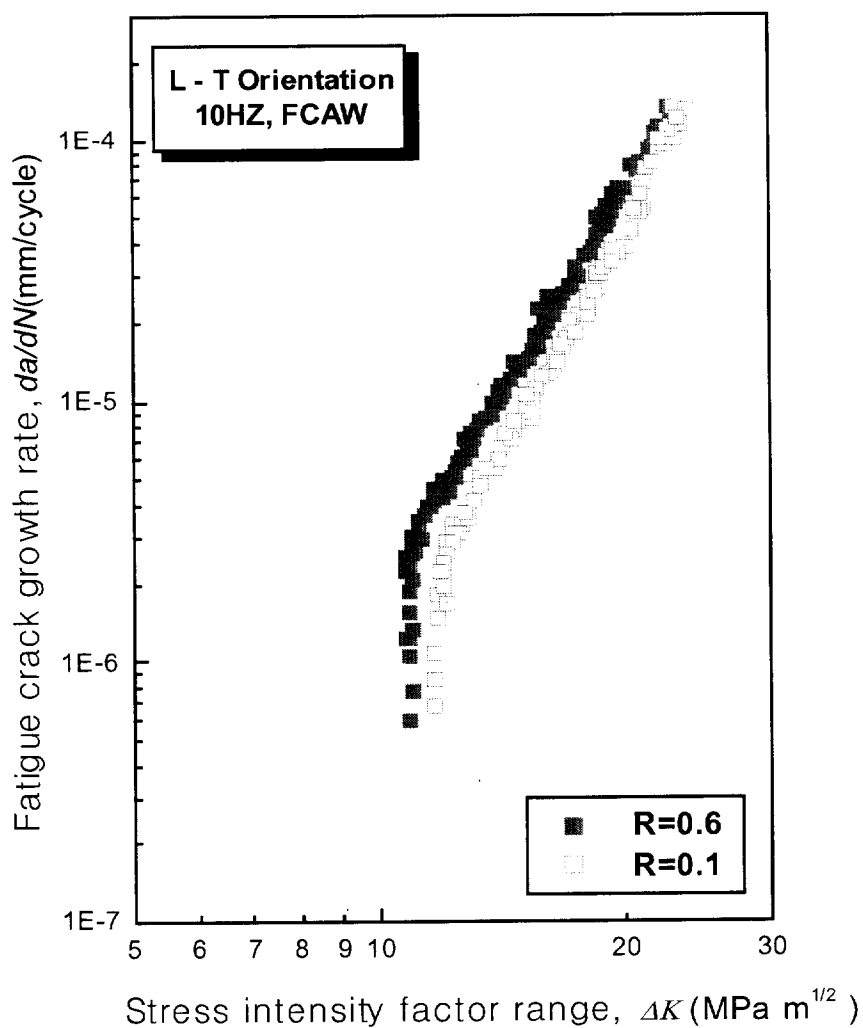


Fig. 19 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

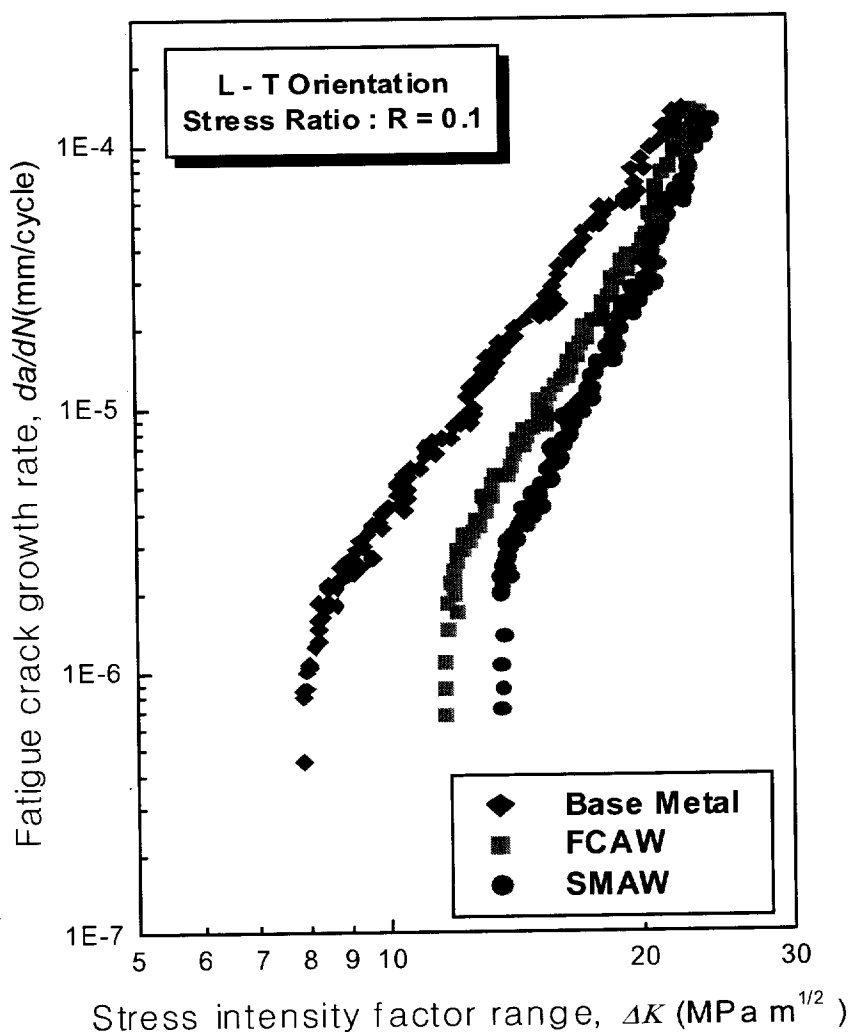


Fig. 20 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

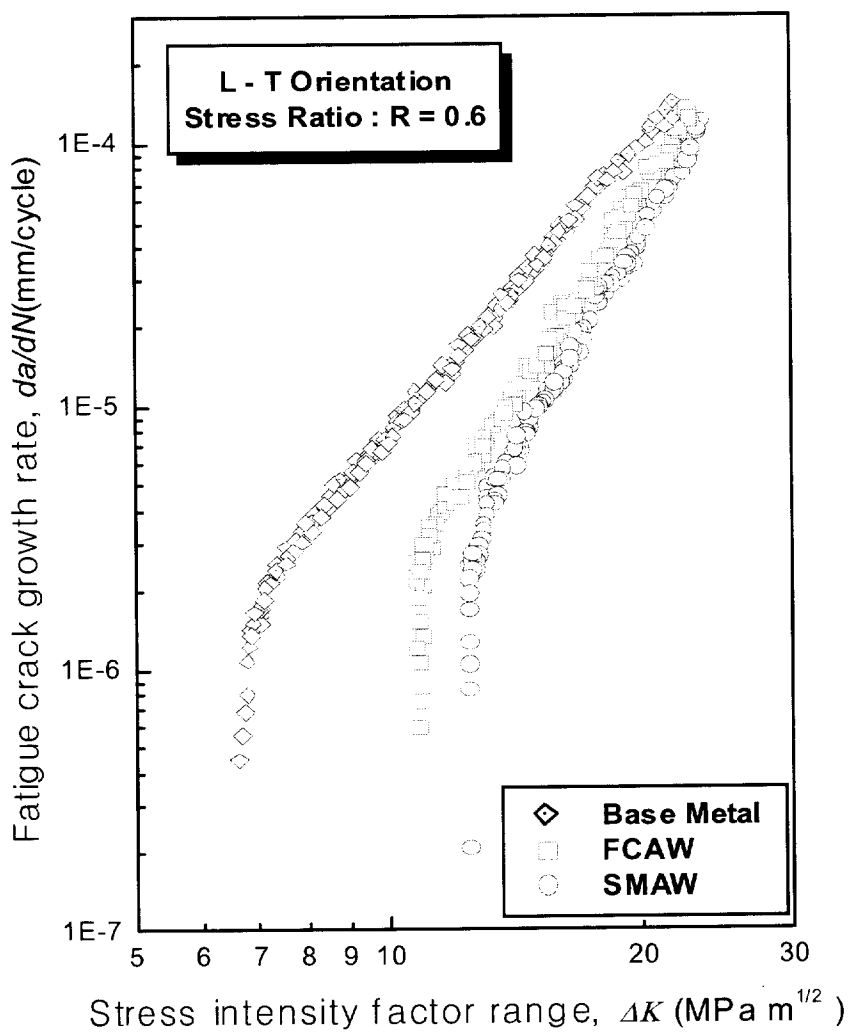


Fig. 21 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

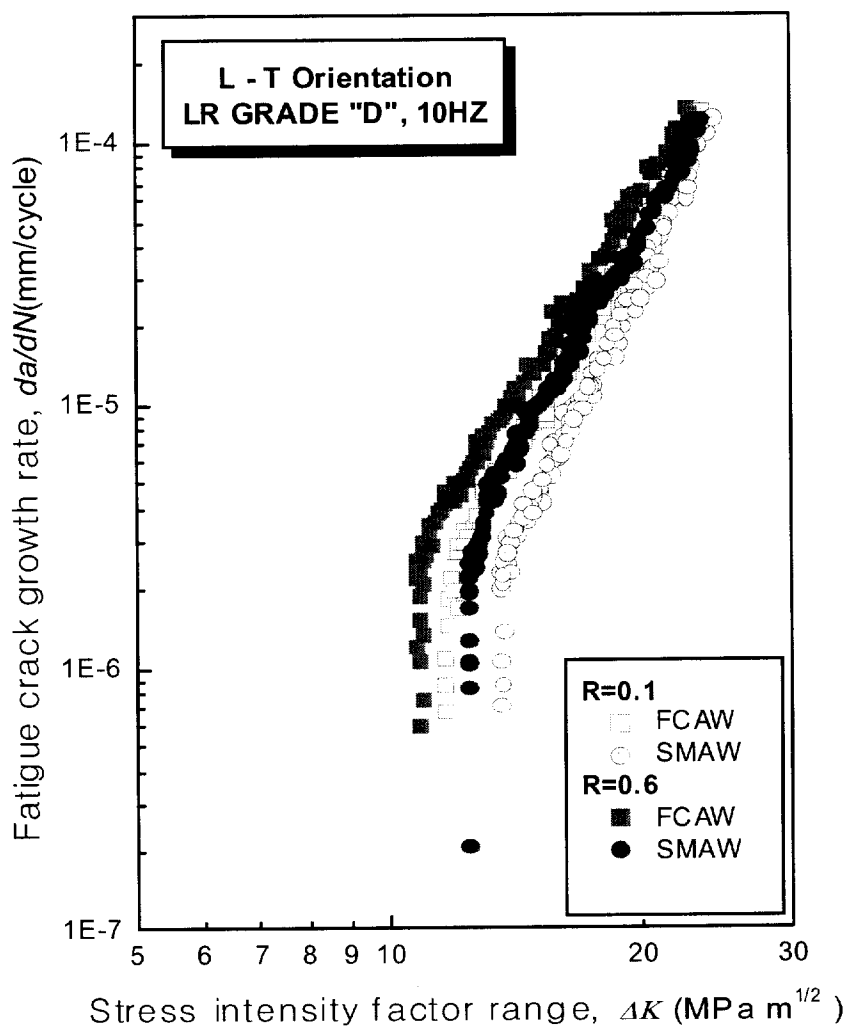


Fig. 22 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

4.4 하한계 특성과 용접방법과의 관계

선체 구조용강(LR GRADE D)에 대하여 용접방법에 따른 하한계 응력 확대계수 ΔK_{th} 의 관계를 Fig. 23에 나타내었으며, Table 3에 그 값을 나타내었다. Table 3에서 $R=0.1$ 보다 $R=0.6$ 에서 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 감소함을 나타내었다. 그리고 FCAW보다 SMAW가 하한계 응력 확대계수 ΔK_{th} 가 높게 나타남을 알 수 있다.

Table 3 The value of fatigue crack growth $\Delta K_{th}(\text{MPa}\sqrt{m})$

Stress ratio	Base metal	FCAW	SMAW
0.1	7.867	11.657	13.377
0.6	6.677	10.842	12.365

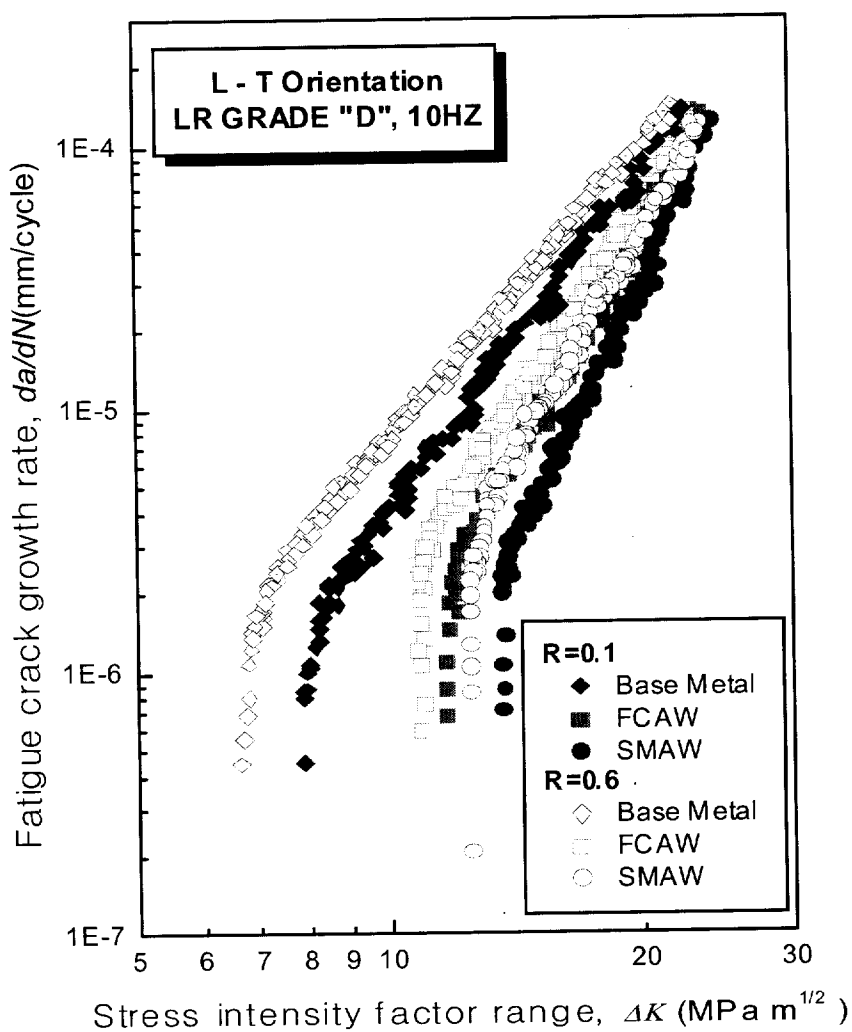


Fig. 23 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

4.5 재료상수와 피로균열진전지수

피로균열진전과정의 제 2단계 영역에 있어서 $da/dN - \Delta K$ 는 양대수 선도상에 직선 관계로 나타났고, 이것을 Paris식 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 대입하여, 응력비 $R=0.1$, $R=0.6$ 에서 Base metal, SMAW, FCAW 대한 피로균열진전지수 m 과 재료상수 C 를 Table 4과 5에 정리하였다.

4.6 하한계 특성과 피로균열진전지수의 관계

선박 구조용강(LR GRADE D)에 대하여 응력확대계수 ΔK_{th} 와 균열진전지수 m 과의 관계를 Fig. 24, 25에 응력비별로 도시하였다. 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 증가할수록 균열진전지수 m 의 값이 증가함을 알 수 있다.

Table 4 Experimental constants by $da/dN = C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth($R=0.1$)

	ΔK Range (MPa $\sqrt{m}$)	da/dN Range (mm/cycle)	m	C
Base metal	$8.649 \leq \Delta K \leq 22.744$	$1.813 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 1.346 \times 10^{-4}$	4.785	6.466×10^{-11}
FCAW	$12.063 \leq \Delta K \leq 23.669$	$2.202 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 1.311 \times 10^{-4}$	6.678	1.229×10^{-13}
SMAW	$14.189 \leq \Delta K \leq 24.316$	$2.232 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 1.249 \times 10^{-4}$	7.247	1.312×10^{-14}

Table 5 Experimental constants by $da/dN=C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth(R=0.6)

	ΔK Range (MPa $\sqrt{m}$)	da/dN Range (mm/cycle)	m	C
Base metal	$7.394 \leq \Delta K \leq 22.015$	$1.332 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 1.458 \times 10^{-4}$	3.995	8.461×10^{-10}
FCAW	$11.778 \leq \Delta K \leq 22.629$	$1.849 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 1.331 \times 10^{-4}$	5.779	3.121×10^{-12}
SMAW	$13.327 \leq \Delta K \leq 23.563$	$2.232 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 1.241 \times 10^{-4}$	6.018	7.844×10^{-13}

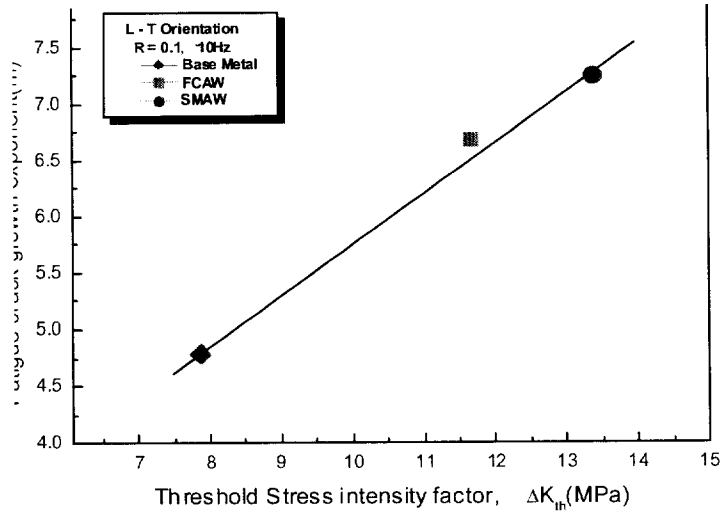


Fig. 24 Relations between threshold stress intensity factor range and $m(R=0.1)$

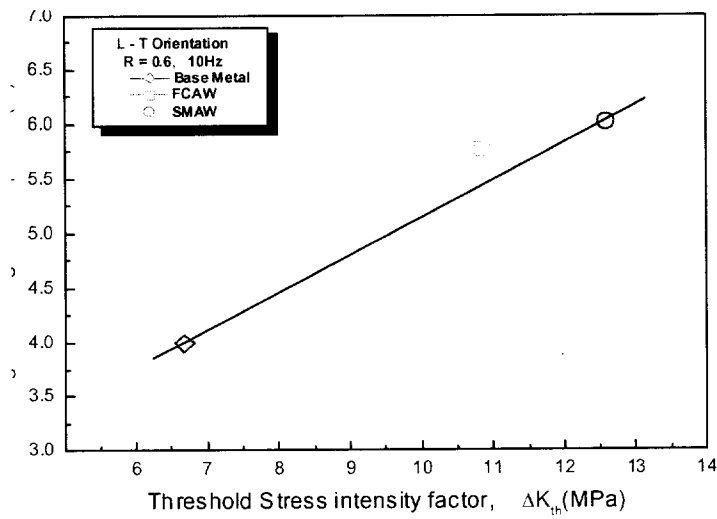


Fig. 25 Relations between threshold stress intensity factor range and $m(R=0.6)$

4.7 크랙길이와 사이클수

4.7.1 용접방법에 따른 a , N 관계

Fig. 26은 응력비 $R=0.1$ Fig. 27 응력비 $R=0.6$ Base metal, SMAW, FCAW의 크랙길이 a 와 반복 사이클수(N)의 관계를 나타내었다.

크랙길이 28mm지점에서 $R=0.1$ 의 Base metal의 $N=699,218$ 회 SMAW의 $N=3,630,052$ 이며, FCAW의 $N=1,965,973$ 으로 나타났으며, $R=0.6$ 의 Base metal의 $N=537,612$ 회 SMAW의 $N=2,648,137$ 이며, FCAW의 $N=1,046,244$ 으로 나타났다. SMAW 용접방법이 피로수명이 현저하게 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 용접 방법에 의한 것으로 가능한 용접량이 작은 소형 구조물은 SMAW로 용접하도록 하고, 용접량이 많고 대형 구조물인 경우는 경제적인 측면과 작업능률성을 고려하여 FCAW를 선택하는 것이 유리하다고 판단된다.

4.7.2 응력비에 따른 a , N 관계

Fig. 28은 COD 클립게이지에 의해 컴플라이언스 법으로 계산된 크랙길이 a 의 변화와 사이클수의 관계를 용접방법에 따른 응력비 $R=0.1$, $R=0.6$ 에 대해 비교 도시 하였다. 그림에서 보듯이 저 응력비 $R=0.1$ 에서 피로 수명이 현저하게 증가함을 볼 수 있다. 이는 피로수명이 응력비의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

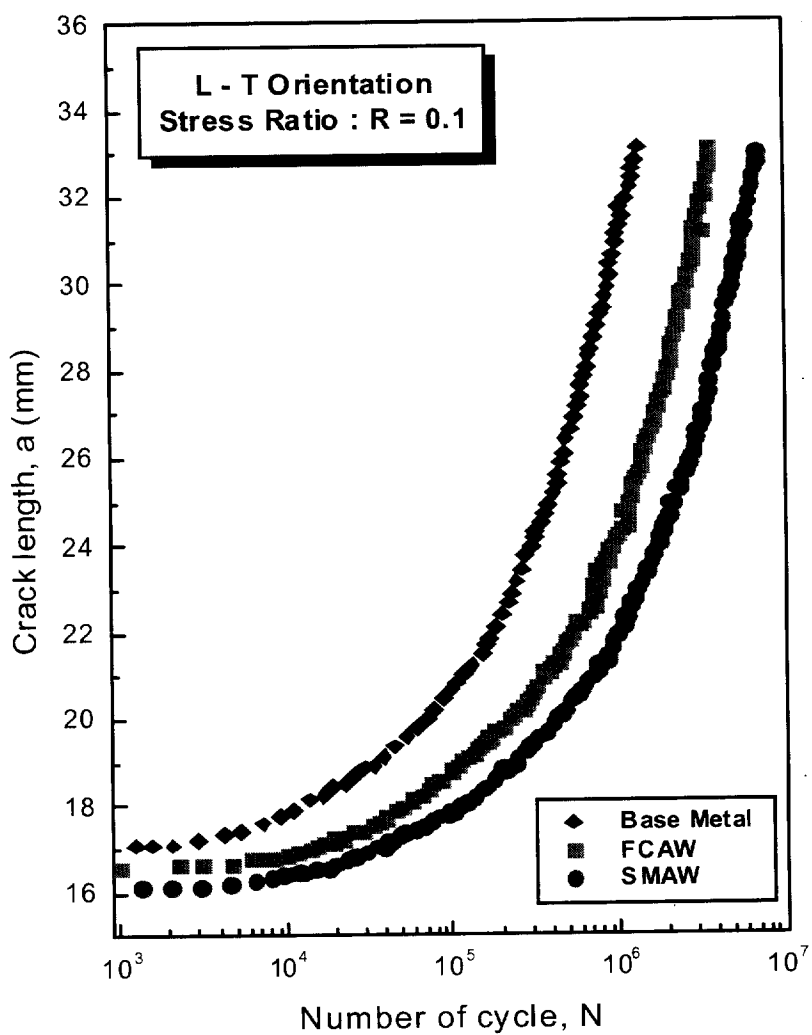


Fig. 26 Relation between stress fatigue crack length and number of cycle (R=0.1)

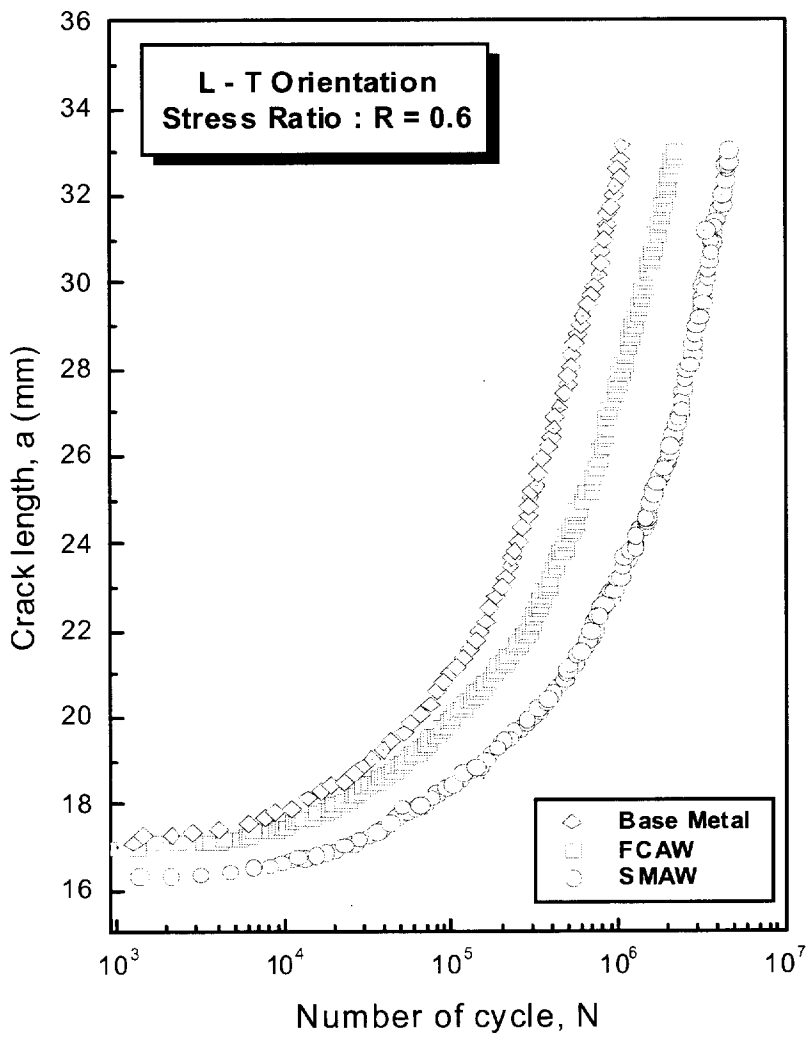


Fig. 27 Relation between stress fatigue crack length and number of cycle (R=0.6)

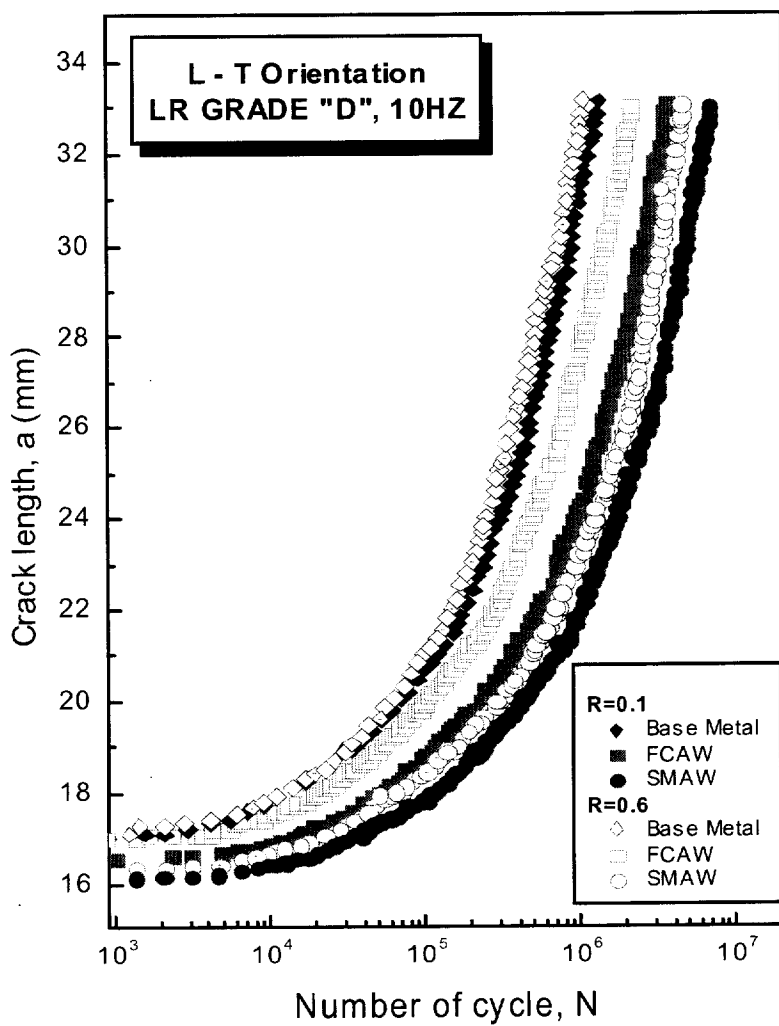


Fig. 28 Relation between stress fatigue crack length and number of cycle (R=0.1 and 0.6)

4.8 파단면의 특성

Fig. 29, 30은 선박용 구조용강(LR GRADE D)에 대하여 고사이클 반복하중을 받은 CT시험편의 피로균열파단면을 주사식 전자현미경(SEM)으로 관찰한 파단면이다. 피로균열진전의 거시적인 양상은 하중 제어 응력비를 $R=0.1$, $R=0.6$ 으로 하였으며 균열의 성장면은 정상적인 스트라이에이션을 형성하였고, 균열의 성장은 응력의 작용방향에 대하여 수직으로 진행되었다.

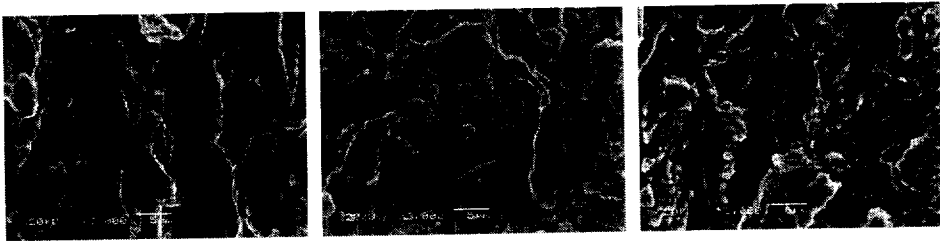


Fig. 29 Striation of fatigue crack propagation by SEM($R=0.1$)

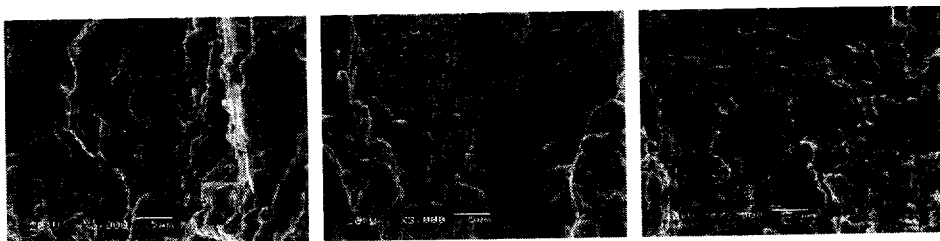


Fig. 30 Striation of fatigue crack propagation by SEM($R=0.6$)

5. 결 론

본 연구에서는 용접방법에 따른 Butt 용접부의 내구성 및 피로특성을 비교하여 피로균열 진전특성에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 용접부의 내구성 및 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 값에서 FCAW보다 SMAW용접방법의 값이 높게 나타남을 알 수 있었다.
2. 응력비 $R=0.1$ 과 $R=0.6$ 에서 피로균열 전파초기영역(Stage I)에서 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 의 값은 응력비가 증가함에 따라 감소되었다. 이와 같이 응력비가 증가할수록 하한계응력확대계수가 감소하고 있는 현상을 고찰한 결과 하한계응력확대계수는 응력비의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.
3. 크랙길이 a 와 사이클수 N 과의 관계에서 Base metal과 SMAW, FCAW의 피로수명을 비교한 결과 SMAW 용접방법의 피로수명이 가장 높게 나타나고 있다.
4. 피로균열진전 파단면을 주사식전자현미경(SEM)으로 촬영한 결과 덤플형태의 전형적인 연성파단면을 보여주고 있다.
5. Base metal과 SMAW, FCAW의 경도분포를 조사한 결과 Base metal의 경우 135(HV), SMAW 203(HV), FCAW 214(HV)로 나타나 FCAW가 가장 높은 경도 값을 나타내었다.

※ 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) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, pp. 99~125, (1999)
- (4) P. C. Paris and F. Erdogan, Tran. of the ASME Ser. D, pp. 528~534, (1963)
- (5) H. Liebowitz, Fracture. Vol, III, (1971)
- (6) 日本機械學會基準, 彈塑性 破壊引性 J 試驗方法, JSME S 001-1981
- (7) Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM : E647-93, (1993)
- (8) Advanced Fatigue Crack Propagation, Instron 2490 Series Application Programs , pp. 1~4, (1991)
- (9) 小林英男, 破壊力學, 東京, 共立出版株式會社, pp. 57~63, 131~135, (1993)
- (10) 朴卿東, 原子爐用 低合金鋼의 高溫疲勞 크랙전이와 크랙開閉口 特性에 關한 研究, 동아대학교 박사학위논문, (1983)
- (11) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp. 10~16, (1989)
- (12) Advanced Fatigue Crack Propagation, Instron 2490 Series Application Programs , pp. 1~4, (1991)
- (13) 禹興植 외 2명, 재료파괴공학, 서울, 보성문화사, pp. 147~170, 265~

- 273, (1993)
- (14) 日本機械學會基準, 彈塑性 破壞引性 J 試驗方法, JSME S 001-1981
- (15) Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM : E647-93, (1993)
- (16) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, pp. 99~125, (1999)
- (17) 小林英男, 破壞力學, 東京, 共立出版株式會社, pp. 57~63, 131~135, (1993)
- (18) 朴卿東, 原子爐用 低合金鋼의 高溫疲勞 크랙전이와 크랙開閉口 特性에 關한 研究, 동아대학교 박사학위논문, (1983)
- (19) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp. 10~16, (1989)
- (20) Advanced Fatigue Crack Propagation, Instron 2490 Series Application Programs , pp. 1~4, (1991)
- (21) 禹興植 외 2명, 재료파괴공학, 서울, 보성문화사, pp. 147~170, 265~273, (1993)

A Study on Optimal Weld Fatigue Strength of Ship Structure Steel

Young-beom Jin

**Dept. of Precision Mechanical Engineering,
Graduate School of Pukyong National University**

Abstract

The lightness of components required in 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 of current industries. In this study, it was investigated about endurance and fatigue crack propagation rate of according to welding methods of SMAW and FCAW commonly using for welding structures in present. Endurance limit carried out highly in the order of SMAW, FCAW and fatigue crack propagation rate carried out lowly in the order of SMAW, FCAW. By these results, it is needed to used SMAW welding method for welding structures with small welding capacity and FCAW method for large welding structures after due consideration about economic gains and operation efficiency of welding. Fatigue crack propagation rate is more effected by strength of welding materials than endurance limit of welding materials according to welding methods.

Key words : Fatigue Crack(피로균열), High Strength(고강도), Fatigue Failure Phenomena(피로파괴 현상), Endurance Limit(내구한도), Ship Structure Steel(선체 구조용강), Small Welding Capacity Structure(소형 용접구조물)

Nomenclature

da/dN	: Fatigue crack growth rate
K	: Stress intensity factor
ΔK	: Stress intensity factor range
ΔP	: Load range
R	: Stress ratio
K_{max}	: Maximum Stress intensity factor
K_{min}	: Minimum Stress intensity factor
C	: Material constant
m	: Fatigue crack growth exponent
a/W	: Crack length of width ratio
$B_{eff} E' \frac{\nu}{P}$	: Compliance
B_{eff}	: Effective specimen thickness
B_{net}	: Net thickness
E'	: Elastic modulus of material
v	: Crack opening displacement(C.O.D)
P	: Load on specimen
C_g	: Normalized K -gradient

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 학문적으로나 정신적으로 도움을 주신 모든 분들께 감사의 말씀을 드립니다. 학부 때부터 대학원 졸업할 때까지 계속적인 열과 성의로 지도 편달하여 주시고 사제의 정이 무엇인지 가슴 깊이 느낄 수 있게 해 주신 지도교수 박경동 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 심사를 하시면서 많은 조언을 아끼지 않으신 김영대 교수님과 김형자 교수님께 감사드립니다.

그리고 학부와 석사를 끝마칠 때까지 가르침을 주신 학과 교수님들과 재료공학과 남기우 교수님, 특히 학문적으로나 인간적으로 많은 조언을 해주신 안석환 박사님께 감사를 드립니다. 아울러 실험실에서 많은 도움을 주신 졸업하신 선배님들과, 노영석 선생님, 류찬욱 선생님을 비롯한 동기 정재욱 그리고 사랑하는 후배 안재필 에게도 감사의 말을 전합니다.

끝으로 저에게 대학원까지 공부할 수 있게 깊은 사랑과 헌신으로 항상 저를 믿고 뒷바라지 해주신 어머니, 아버지 그리고 형님, 형수님 그리고 누나, 매형께 고마움을 표하며 감사의 글을 마칩니다.

2005년 2월

진 영 범 드림