

工學碩士學位論文

壓力容器用鋼의 低溫疲勞
進展 特性에 관한 研究

指導教授 朴卿東

이 論文을 指導教授 朴卿東 先生에게 提出함



2004年 8月

釜慶大學校 大學院

機械工學科

李善守

이 論文을 李善守의 工學碩士
學位論文으로 認准함

2004年 8月

主 審 教授 金 敏 男



委 員 教授 李 守 鍾



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	10
2.4. 응력확대계수 범위의 결정	12
2.5. 균열진전의 하한계 추정	14
제 3 장 실험장치 및 방법	17
3.1. 시험편	17
3.2. 실험 장치	19
3.3. 실험 방법	21
제 4 장 실험결과 및 고찰	22
4.1. 응력비별 피로균열 전파특성	22
4.2. 각 저온균열진전에 미치는 응력비의 영향	27
4.3. 피로균열진전 하한계 특성 ΔK_{th}	30
4.4. 응력비에 따른 재료상수(C) 및 균열진전지수(m)의 관계	33
4.5. 시험편 파단면 특성	35

제 5 장 결 론	38
참고문헌	39
Abstract	41
Nomenclature	43

제1장 서론

최근 산업의 발달로 각종의 기계, 기구 및 금속 구조물 등은 그 사용 환경이 다양하게 변하고 있으며, 거기에 적응할 수 있는 기계적 성질도 요구되고 있다.

그러나 설계에 있어서 재료가 갖는 기계적 강도 기준치나 충분한 안전율을 채택하였음에도 불구하고 예기치 않은 파괴가 발생되어지는 예가 많다.

이것은 기존의 강도 계산식을 벗어나서 파괴에 대한 어떤 불확실한 요인이 있음을 알 수 있게 한다. 특히 상온에서 연성을 갖는 재료라도 저온에서는 취성을 갖는 것이 보통인데 취성거동에서 나타나는 재료의 강도는 균열이나 개재물 등의 결함에 커다란 영향을 받는다. 그러한 결함 부분에 반복하중이 작용하면, 응력은 피로로 축적되어 미세한 균열을 발생 또는 진전시켜 모재의 파괴로 이어지는 경우가 일반적 파괴의 대부분이라 하겠다.⁽¹⁾

따라서 이러한 결함들로부터 피로균열이 성장하지 않도록 하기 위해서, 공학적인 설계를 위한 피로균열하한계특성과, 피로균열이 생성·성장했을 때의 잔존수명을 평가하기 위한 피로균열진전특성을 규명하는 일은 대단히 중요한 일이다.

피로파괴에 대한 연구는 W. Rankin에 의한 피로파괴에 대한 보고 이후, 1850년경 wöhler가 부하응력 진폭과 시편이 파단에 도달할 때까지의 응력 반복수 N_f 와의 상호 연관성을 나타냄으로서 비롯되어, 1940년경까지 피로한도가 곧 피로설계의 기초가 되었다. 그 후 1963년 Paris는 피로균열진전에 대한 파괴역학적인 파라미터 K 를 사용하여 균열진

전속도 da/dN 과 응력확대계수 범위 ΔK 의 함수관계를 도입함으로써 선형파괴역학적인 피로균열 진전거동의 이론을 확립하였으며^{(2)~(5)}, 그 외에도 많은 학자들에 의해 피로파괴에 대한 연구가 계속되고 있고, 기계 및 구조물의 안전설계를 위하여 보다 많은 자료의 축적이 요구되고 있다.

근래 열교환기, 탭조류, 저장탱크 등의 압력용기 및 관련 구조물이나 기기 등은 저온에서도 고압을 유지한 채 장기간 사용되는 경우가 많아졌고, 그 설계 제작과 유지의 필요성에 따라 저온피로 분야에도 파괴역학을 적용할 필요성이 높아졌다.

실제의 용기나 구조물에는 처음부터 잠재적으로 존재한 결함이나 사용중 외적환경의 부하조건에 의해 균열이 발생되는데, 이들 결함으로부터 피로균열진전 및 잔존수명을 평가하기 위해서는 균열진전의 특성을 파악하는 것이 대단히 중요하다.

본 연구는 압력용기용 강 SA516-70에 대하여 상온 25℃와 -30℃, -60℃, -80℃, -100℃, -120℃의 환경속에서 정(+)방향 사인파형, 반복하중을 진폭 20 cycle/sec 로서 응력비 0.1과 0.3에 대해 안정성장영역에서 각각의 피로균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 및 피로균열 하한계특성 ΔK_{th} 을 구하고, 온도 및 응력비에 따르는 피로균열진전지수 m 과 재료상수 C 를 규명하여 저온에서의 압력용기 재료에 대한 파괴수준을 제시함으로써 강도상의 안전설계에 기여하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 피로균열의 파괴역학적 개념

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

재료의 부재나 구조물을 연속체로 보고 파괴의 현상을 거시적인 입장에서 다루는 선형탄성파괴역학(LEFM : Linear Elastic Fracture Mechanics)은 균열 또는 예리한 노치를 갖는 부재 혹은 구조물의 강도나 변형을 선형탄성론으로부터 얻어진 결과를 기초로 하여 취급하는 분야의 하나이다⁽⁶⁾.

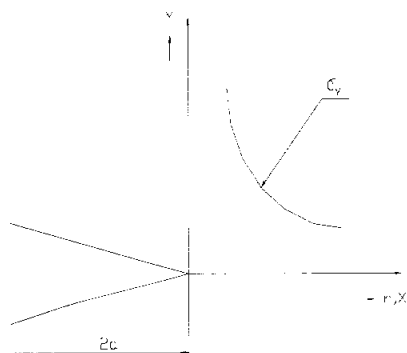
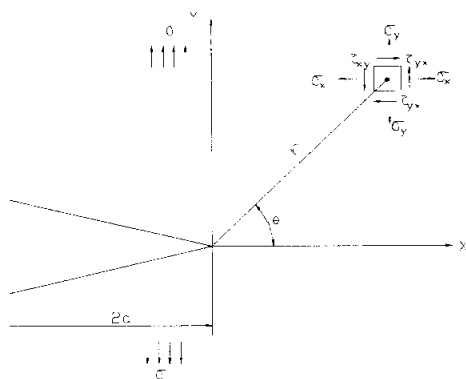
길이 $2a$ 인 관통 균열이 있는 무한판이 균일인장응력 σ 를 받고 있는 경우를 생각해 보면 균열 선단으로부터 거리 r 인 곳에 있는 요소 dx, dy 는 응력 σ_x, σ_y 및 τ_{xy} 등을 받는데 이들은 Fig. 1의 좌표계로서는 다음과 같이 표시할 수 있다⁽⁷⁾.

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

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 응력확

대계수 $K_1^{(8)}$ 은

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi a} \quad \text{-----}(2)$$



그러므로 식 (1)은 일반적으로 K_1 을 사용하여

$$\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) \quad \text{-----}(3)$$

로 표시할 수 있다.

식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 균열 선단에서 응력의 크기 σ_y 는 K_1 에 의존함을 알 수 있고 균열 진전거동도 K_1 의 영향을 크게 받을 것임을 용이하게 단정할 수가 있다.

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

선형파괴역학은 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

$$\sigma_{ys} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r_p^*}} \quad \text{-----}(4)$$

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,

$$r_p^* = \frac{1}{2\pi} \frac{K_1^2}{\sigma_{ys}^2} \text{ (plane stress)} \quad \text{-----}(5)$$

로 표시할 수 있으며

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

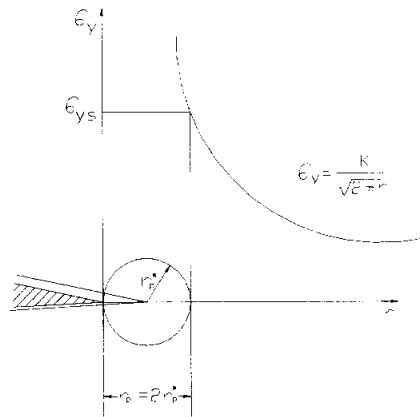


Fig. 3 Plastic zone at the crack tip

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

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

이 되며 이것을 다시 정리하면

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

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 $d(2a)/dN = Const$ 및 McEvily에 의한 $d(2a)/dN = f(\sigma_0)$ 등을 들 수 있으나, Irwin의 응력확대계수 K 가 균열선단에서의 응력의 크기를 특성지워주는 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 $\Delta K (= K_{max} - K_{min})$ 및 평균응력확대계수 $K_m \left\{ = \frac{1}{2}(K_{max} + K_{min}) \right\}$ 은 균열 진전에 따라 변화한다. 즉,

$$\begin{aligned}
 da/dN &= f_1(\Delta K, R) \\
 da/dN &= f_2(K_{\max}, R) \\
 da/dN &= f_3(\Delta K, K_{\max})
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

여기서 R 은 응력비(stress ratio)이며

$2a$: 균열의 길이

f_i : 작용응력의 함수 ($i = 1, 2, 3$)

σ_0 : 균열 선단에서의 응력

N : 하중반복회수

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

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

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

셋째, 균열 진전속도 da/dN 와 응력확대계수폭 ΔK 를 양 대수좌표로 표시하면 3단계구간이 나타나는데 균열의 안정성장구간 즉 2단계구간 선형영역에 있어서는 $\log \Delta K$ 와 $\log(da/dN)$ 의 직선관계를 나타내는

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

의 식이 일반적으로 성립하며, 여기서 C 와 m 은 재료상수이다^{(9)~(12)}.

이 식은 각종 금속재료외에 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 영

역에 걸쳐 특성이 잘 맞는 이유에서 다음과 같은 사승식을 제시하였다.

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

그러나 많은 시험결과는 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.

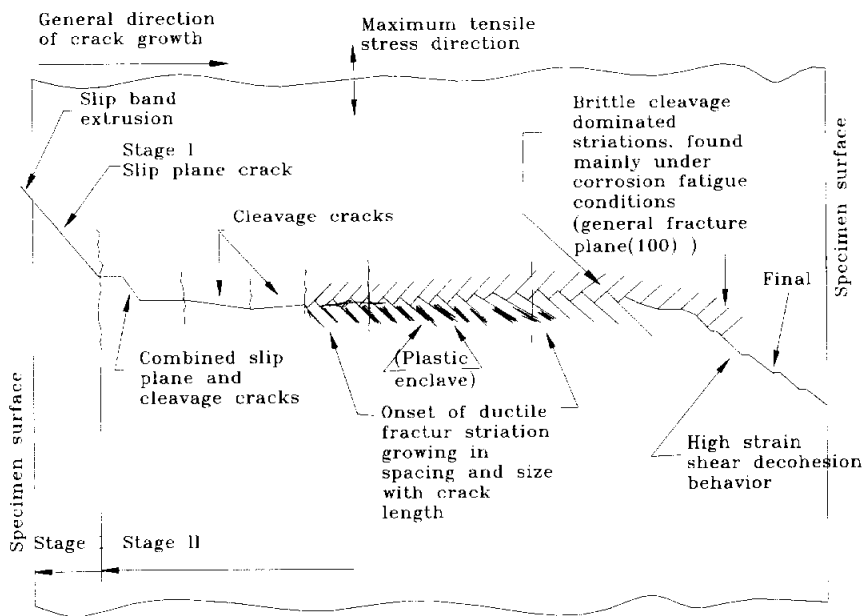


Fig. 4 Schematic illustration of the various modes of fatigue fracture

여기서 균열선단에서의 응력-변형률의 성질은 응력확대계수 (stress intensity factor) K 로 표시되고, 반복 응력확대계수와 피로균열진전속도 와도 관계가 있다.

한편 균열의 성장률을 표시하면 Fig. 4와 같이 3개의 분리된 영역으로 나타난다.

이처럼 균열의 성장률을 나타냄으로서 주어진 하중에서 어느 정도 크

기의 균열까지는 안전한가 또는 주어진 균열크기에 어느 하중까지는 얼마동안 안전한가 등 여러 가지 공학적 중요한 문제를 해결하는데 이용할 수 있다.

여기서 C 와 m 은 재료상수이고 보통 m 은 0.5~0.8의 넓은 범위에서 변화한다. 그러나 식 (12)는 실험재료를 총괄적으로는 나타내지 못한다. 실제로 Fig. 2에서 da/dN 와 ΔK 의 관계는 S형 모양을 갖거나 부분적으로 다른 기울기를 가진다.

ΔK 범위의 최상부 끝을 벗어남은 da/dN 가 유한으로 되어야 하는 균열이 임계값에 도달하는 것일 때 예상될 수 있다. 최종파괴는 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 응력 확대계수범위의 결정

CT시험편에 대하여 응력 확대계수 범위 ΔK 는 다음 식으로 계산한다.

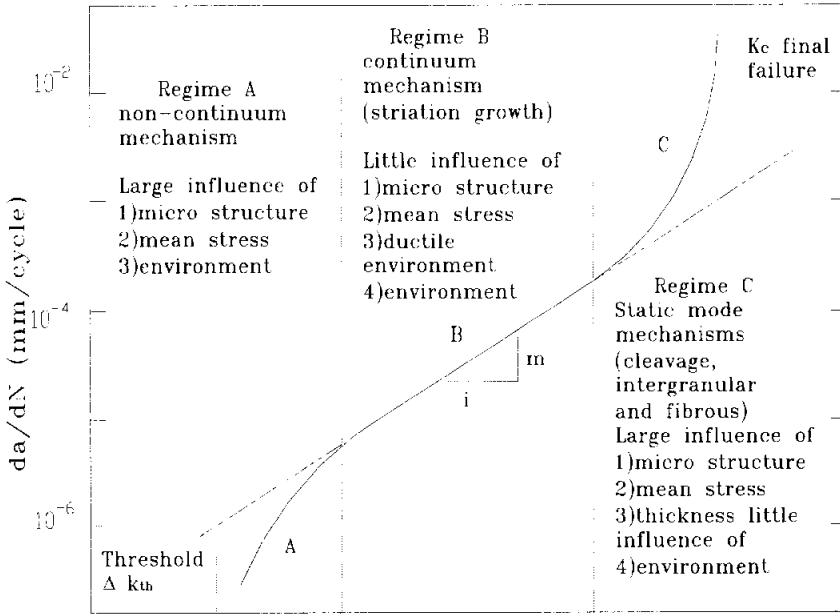


Fig. 5 Primary fracture mechanisms with variation of fatigue crack propagation rate da/dN with stress intensity factor range ΔK

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

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 $a = 2a/W$ 위식은 $2a/W < 0.95$ 에 대하여 유효하다. 또 전술한 대로 CT시험편은 인장-압축부하에 대하여 권장하지 않으나 CCT시험편에 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 범위내에서 $\Delta P = P_{\max}$ 이라 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 정하중진폭시험으로 측정하는 경우, 피로 예균열 도입때의 K_{max} 및 시험개시때의 K_{min} 또는 ΔK 가 현저한 영향을 미친다. 진(眞)의 $da/dN - \Delta K$ 관계는 하중이력이 무시되는 이상 균열에 대하여 시험개시때의 ΔK_{th} 와 거의 같은 ΔK 를 준 경우에만 얻어진다. 이것을 달성하는 것은 용이하지 않다. 따라서 하중 점감시험이 일반적으로 행하여지고 있다. ASTM에서는 E647-81의 개정에 이어 10^{-8} m/cycle의 da/dN 측정을 포함하여 ‘정상상태의 피로균열 진전속도의 시험방법’을 검토중이다. 아래에 그것을 소개한다^{(12),(13)}.

R 일정의 경우 K 구배는 다음에 의해 정의된다.

$$C \equiv \frac{1}{K} \frac{dK}{da} \equiv \frac{1}{K_{max}} \frac{dK_{max}}{da} \quad \text{-----}(16)$$

$$\equiv \frac{1}{K_{min}} \frac{dK_{min}}{da} \equiv \frac{1}{\Delta K} \frac{d\Delta K}{da}$$

K 증가시험은 C 가 정(正), K 감소 시험은 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. 6을 참조하여 이것에 준한다. 단 P_{max} 의 감소는 10%이하로 하여 감소후에

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

의 균열길이 증분이 확인이 권장된다.

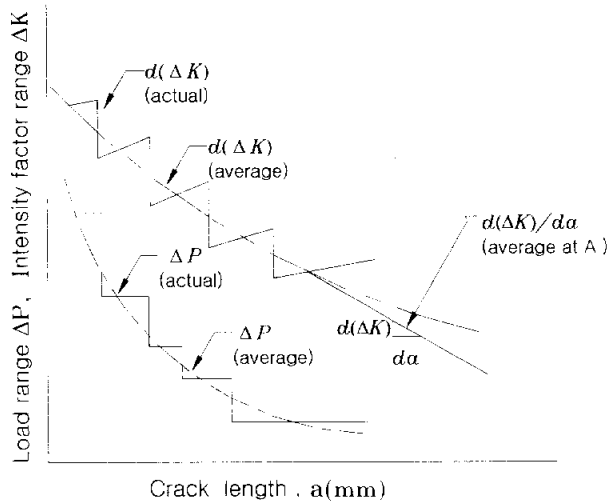


Fig. 6 Typical K decreasing test by stepped load

$da/dN = 10^{-9} \sim 10^{-10}$ m/cycle의 범위를 등분할한 5점이상의 테이터를 사용하여 $da/dN - \Delta K$ 관계를 양대수좌표상에 최적 직선으로 근사한다. 이 최적직선에서 $da/dN = 10^{-8}$ m/cycle 에 대응하는 ΔK 를 결정하여 ΔK_{th} 로 한다.

상기의 시험방법에 대한 비판이 적지 않다. 우선 상기의 C의 조건을 만족하지 않는 경우에도 ($C \geq -1 \text{ mm}^{-1}$), C는 ΔK_{th} 에 영향을 미치지 않는다. 또 통상의 재료 및 시험편 치수에 대하여 상기의 Δa 의 조

건을 만족하기에는 매우 어렵다. $da/dN = 10^{-9} \sim 10^{-10}$ m/cycle의 범위를 등분할한 5점 이상의 데이터를 얻기 위해 최저 5×10^7 회의 하중 반복이 필요하게 되는 것은 명심해야 한다.

또한 K 점감시험에 진(眞)의 ΔK_{th} 가 얻어지는가 아닌가에 대해서도 의문이 있다. 아래에서 설명한 것과 같이 대기중에서 ΔK_{th} 는 프레팅(fretting)산화물 유기균열개구에 지배되어 있다. 프레팅(fretting) 산화물의 생성은 하중, 환경조건에 강하게 영향되며 ΔK_{th} 의 평가와 시험방법의 검토는 금후의 과제로서 아직 남아 있다.

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연 강재 압력용기용강 SA516-70이며, 시편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

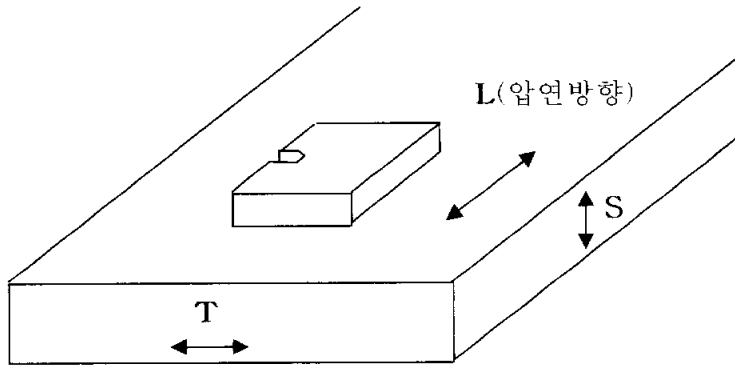
Table 1 Chemical composition of specimen(wt, %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V	Mo	Cd	Al
0.16	0.30	1.14	0.008	0.001	0.36	0.07	0.20	0.027	0.097	0.018	0.028

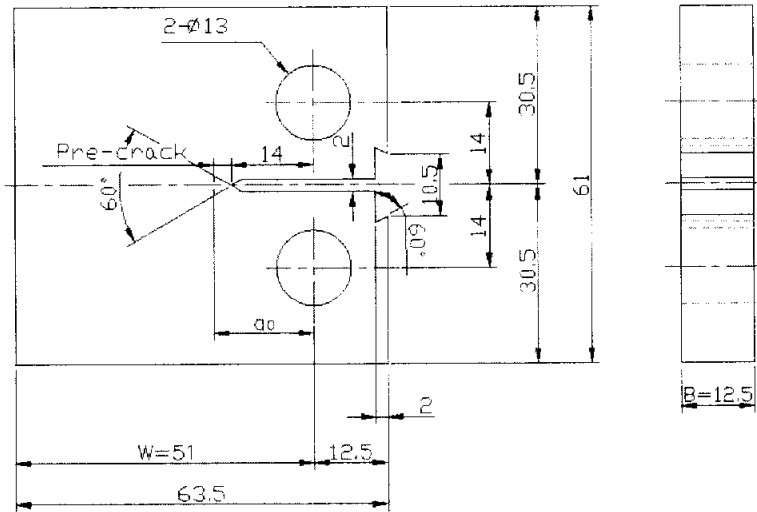
Table 2 Mechanical properties of specimen

Tensile Strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Hardness (H _{RB})	Elongation (%)
558	390	71.37	26

시험편은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용 L-T방위로 채취하여, 압연방향이 하중방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-81의 기준에 따라 외형가공은 밀링(milling)으로, 노치 홈은 와이어커팅 방전가공기(Wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈 반경 0.1mm가 되게 가공하였다. Fig. 7의 (a)는 시험편의 채취 방향을, (b)는 그 형상과 치수를 나타낸 것이다^{(14),(15)}.



(a)



(b)

Fig. 7 Configuration of CT-specimen

그리고 피로균열진전의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며, 25℃ 정도의 온도환경과 항복강도이내의 응력범위에서 ASTM(1993) E647-93 규정에 의거 3mm의 피로 예균열을 주었다⁽¹⁸⁾.

3.2 실험 장치

Fig. 8은 본 실험에 사용된 피로시험기의 구조이고 Fig. 9는 전기 유압식 피로시험기(INSTRON 8501, 100KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤하였다. 균열길이 측정은 시편에 COD 클립게이지를 부착한 compliance법을 사용하였으며, 파단면의 미시적 촬영은 Fig. 10의 주사식 전자현미경(S.E.M)을 사용하였다.

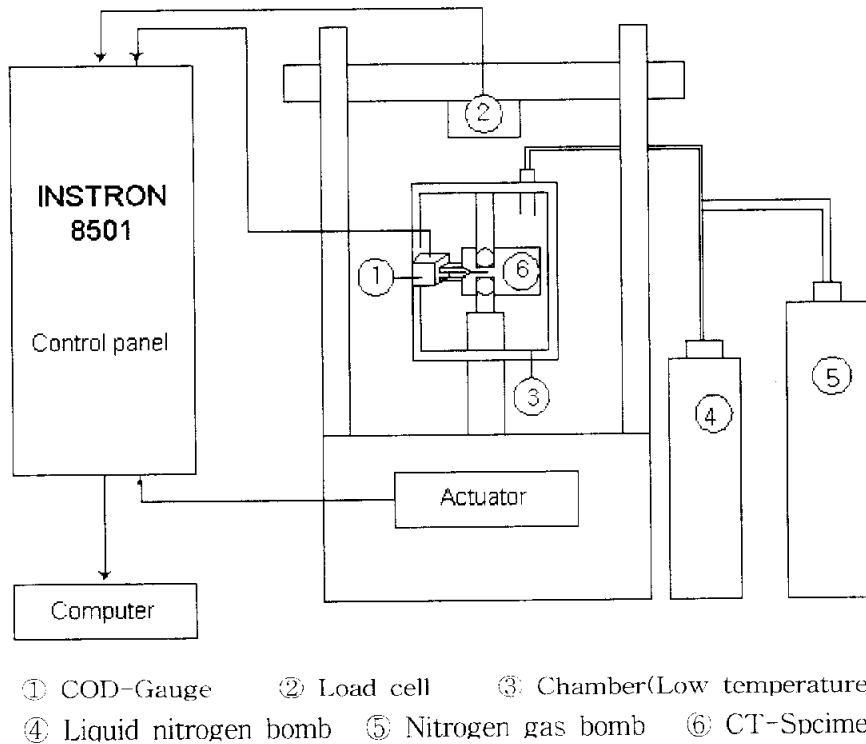


Fig. 8 Schematic diagram of low temperature fatigue testing machine

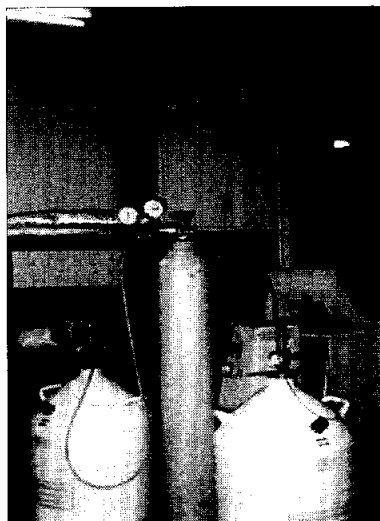
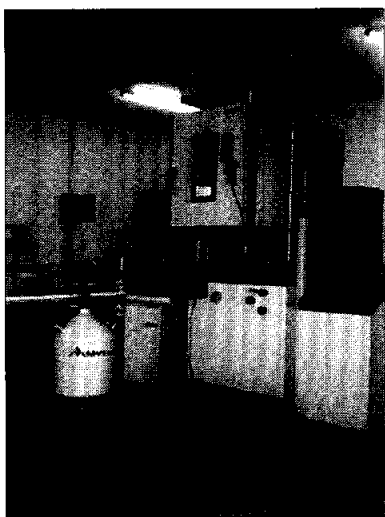


Fig. 9 Apparatus of fatigue test machine(INSTRON 8501)

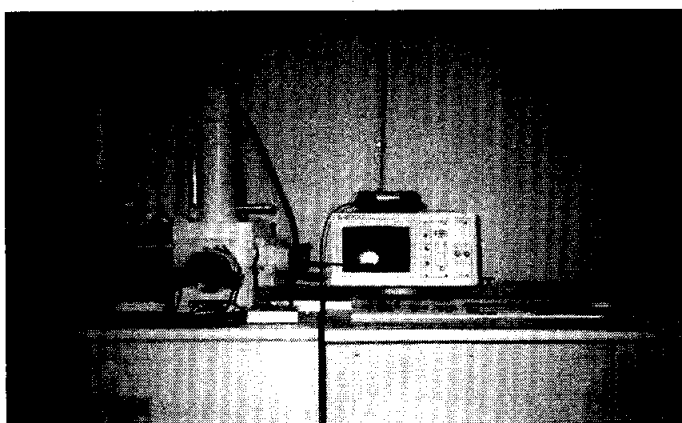


Fig. 10 General view scanning electron microscope (model S-2570)

3.3 실험 방법

본 실험은 INSTRON사의 전기 유압식 피로시험기(8501, 100KN)를 사용하여 K 콘트롤에 의한 하중제어방식으로 실험하였다.

정현파형으로 반복하중을 20Hz의 속도로 주었고, 실험온도는 상온 (25℃), -30℃, -60℃, -80℃, -100℃ 그리고 -120℃에서 실험하였다.

저온장치로는 피로시험기에 챔버를 부착하여 액체 질소용기에 질소 펌페를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 5MPa내외로 되도록 하여 액체 질소를 챔버 내로 유입시켜 저온환경으로 만든다. 실험 중 액체 질소의 감소에 따라 질소펌페의 압력으로 액체 질소의 유입을 정상적으로 밀어주며, 온도유지는 전자석 밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였다.

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 응력비별 피로균열 전파특성

Table 3과 4는 저온환경에서 각 온도별 응력확대계수 범위와 피로 균열진전속도범위를 도표화 하였고, Fig. 11, 12는 응력비에 따른 각 저온의 피로균열 전파특성을 비교하여 도시하였다.

Table 3 Experimental constants by $da/dN=C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth (R=0.05)

Temperature (℃)	ΔK Range (MPa√m)	da/dN Range (mm/cycle)
25	$11.2 \leq \Delta K \leq 40.57$	$7.211 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.053 \times 10^{-4}$
-30	$12.7 \leq \Delta K \leq 42.07$	$7.205 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.032 \times 10^{-4}$
-60	$13.58 \leq \Delta K \leq 45.6$	$6.714 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.281 \times 10^{-4}$
-80	$14.98 \leq \Delta K \leq 47.93$	$5.117 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.442 \times 10^{-4}$
-100	$17.17 \leq \Delta K \leq 46.37$	$4.539 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.683 \times 10^{-4}$
-120	$18.67 \leq \Delta K \leq 46.59$	$4.492 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.188 \times 10^{-4}$

Table 4 Experimental constants by $da/dN=C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth ($R=0.3$)

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	ΔK Range ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	da/dN Range (mm/cycle)
25	$7.79 \leq \Delta K \leq 31.19$	$6.34 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.38 \times 10^{-4}$
-30	$9.29 \leq \Delta K \leq 32.69$	$6.32 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.35 \times 10^{-4}$
-60	$9.44 \leq \Delta K \leq 32.08$	$4.99 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 2.71 \times 10^{-4}$
-80	$10.86 \leq \Delta K \leq 34.37$	$4.79 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.07 \times 10^{-4}$
-100	$12.01 \leq \Delta K \leq 35.03$	$3.4 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.59 \times 10^{-4}$
-120	$13.51 \leq \Delta K \leq 36.53$	$3.3 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.57 \times 10^{-4}$

Fig. 11, 12를 보면 응력비 0.05에서 $\Delta K=20MPa\sqrt{m}$ 일때의 피로균열진전속도 da/dN 은 25℃ 상온에서 $da/dN=8.536\times 10^{-5}$, -30℃ 저온에서 $da/dN=7.348\times 10^{-5}$, -60℃ 저온에서 $da/dN=5.892\times 10^{-5}$, -80℃ 저온에서 $da/dN=4.032\times 10^{-5}$, -100℃ 저온에서는 $da/dN=2.466\times 10^{-5}$, -120℃ 저온에서 $da/dN=1.652\times 10^{-5}$ 이다.

응력비 0.3에서 $\Delta K=20MPa\sqrt{m}$ 일때의 피로균열진전속도 da/dN 은 25℃ 상온에서 $da/dN=1.036\times 10^{-4}$, 30℃ 저온에서 $da/dN=8.571\times 10^{-5}$, -60℃ 저온에서 $da/dN=7.603\times 10^{-5}$, -80℃ 저온에서 $da/dN=6.826\times 10^{-5}$, -100℃ 저온에서는 $da/dN=6.142\times 10^{-5}$, -120℃ 저온에서 $da/dN=4.880\times 10^{-5}$ 이다.

응력비 0.05, 0.3 모두 상온에 비하여 온도가 하강할수록 피로균열진전 속도비는 작아짐을 알 수 있다.

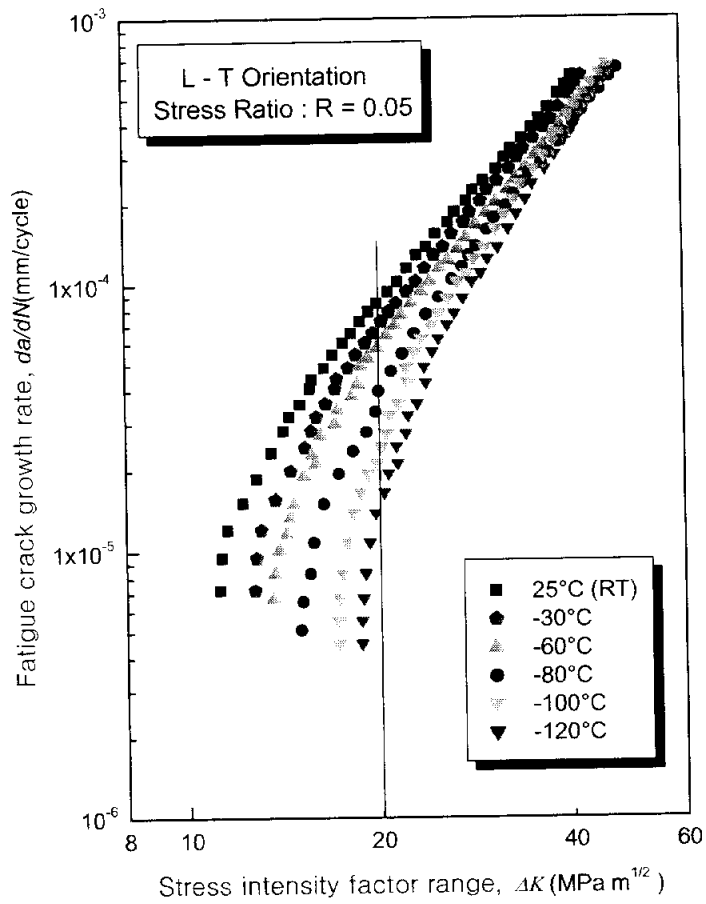


Fig. 11 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range ($R=0.05$)

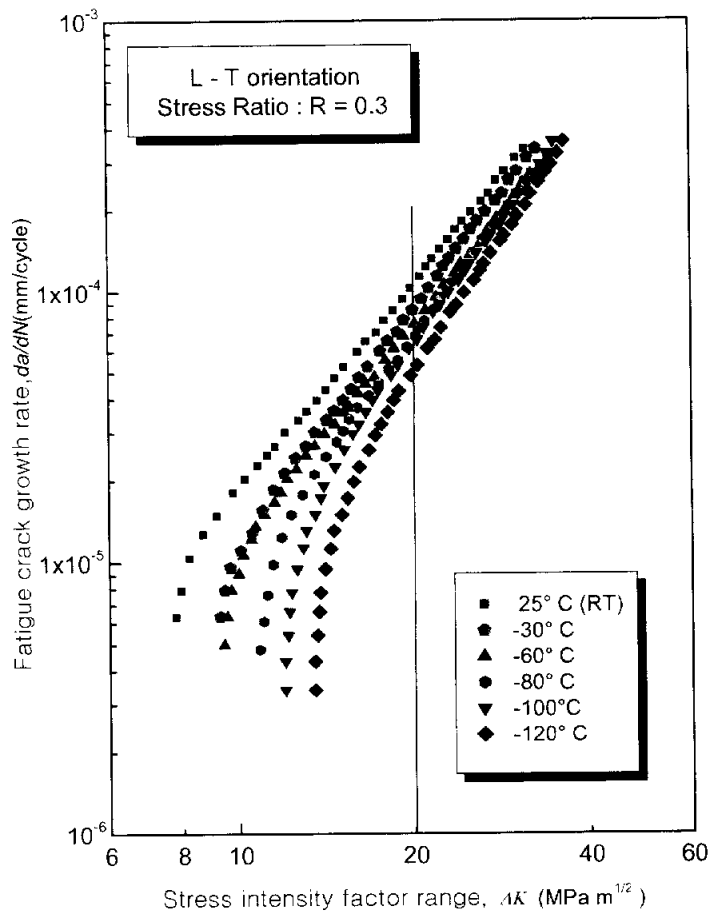


Fig. 12 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (R=0.3)

4.2 각 저온균열진전에 미치는 응력비의 영향

응력비에 따라서 각 저온의 피로균열진전 특성이 어떻게 달라지는가를 알아보기 위해 응력비에 따른 각 저온의 피로균열진전특성을 Fig 13, 14에 도시하였다.

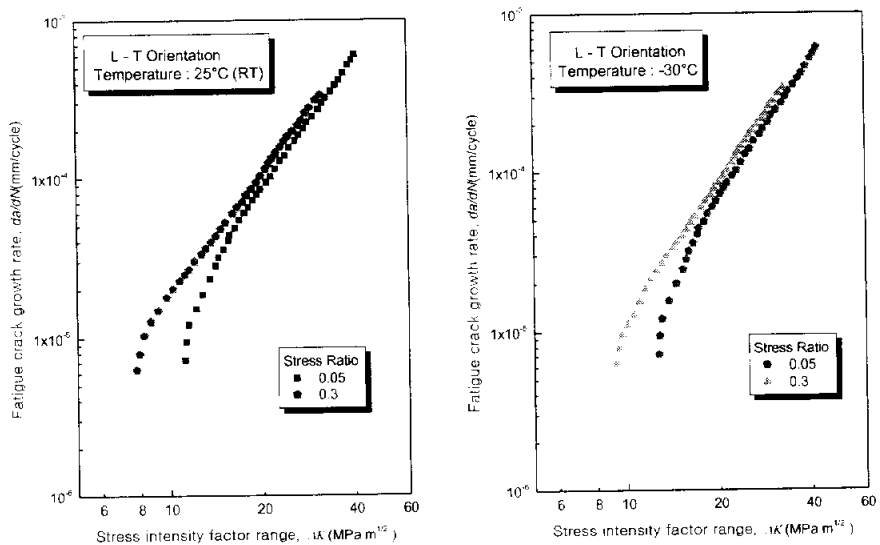


Fig. 13 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (25°C, -30°C)

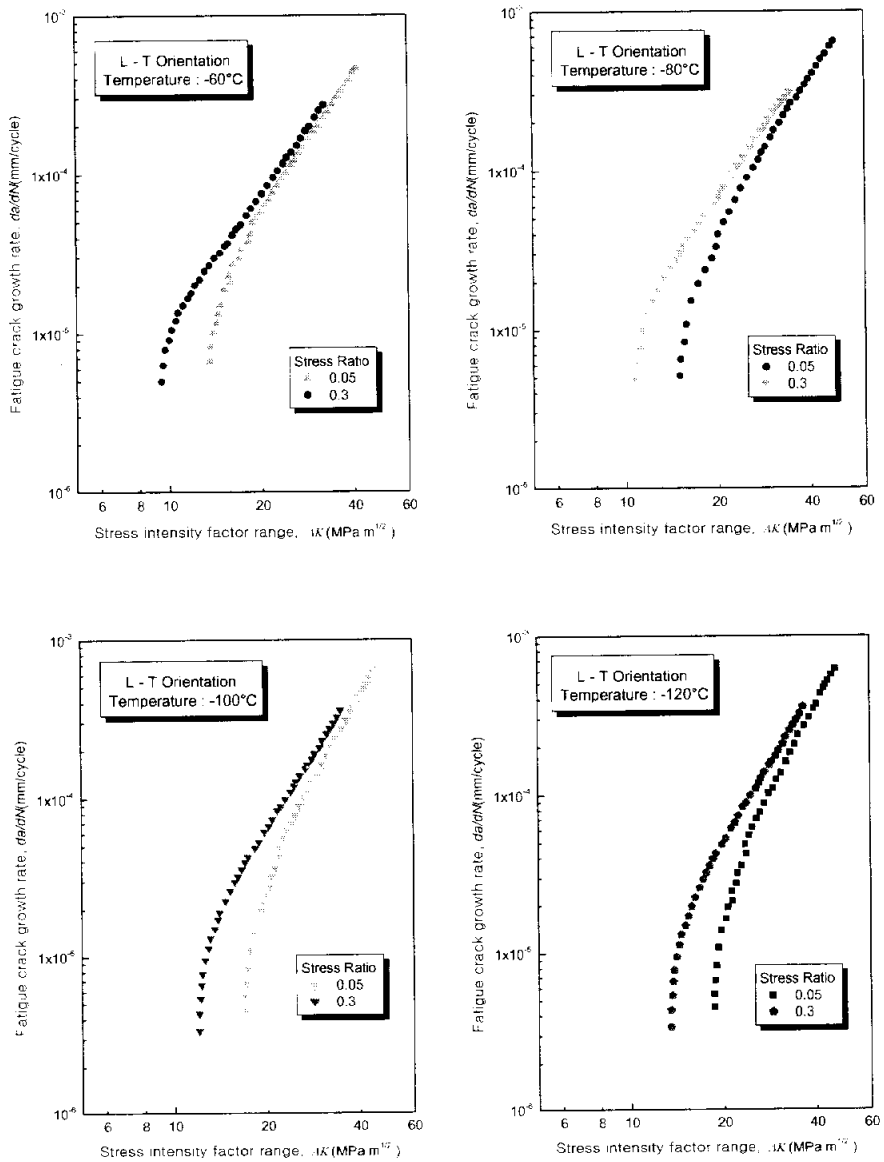


Fig. 14 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (-60°C , -80°C , -100°C , -120°C)

Fig. 13, 14를 통해 알 수 있듯이, 피로크랙 전파속도비 영역이 응력비 감소에 따라 그 범위가 증가되는 경향을 나타냈고, 응력확대계수 범위도 증가됨을 알 수 있다. 따라서 높은 응력비인 0.3이 0.05보다 크랙진전이 빠름을 알 수 있으며, 이것은 응력비 증가에 따른 최대하중의 증가가 원인으로 생각되며, 응력비 0.05에서는 0.3일때에 비해 fretting 산화물에 의한 균열단힘 현상으로 인해 균열진전속도가 저하되는 것으로 판단된다.

각 저온에서 공통적으로 이런 현상이 나타났으며, 높은 ΔK 영역일 때 응력비의 영향이 크게 나타나지 않음을 알 수 있었다.

4.3 피로균열 진전 하한계 특성 ΔK_{th}

압력용기용 강 SA516-70을 상온 25℃와 -30℃, -60℃, -80℃, -100℃ 및 -120℃에서 응력비에 따른 균열진전 특성에 관한 실험을 하고, 그 결과 균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 양대수 선도상에 표시하였다. 실험결과 최소자승법을 이용하여 구한 피로균열 하한계특성 ΔK_{th} 은 Table 4에, 각 응력비에 대한 균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계는 Fig. 15, 16에 나타내었다.

Table 4 The value of fatigue crack growth threshold - ΔK

Temperature(℃)	25	-30	-60	-80	-100	-120
$R=0.05$ $\Delta K(MPa\sqrt{m})$	11.2	12.7	13.58	14.98	17.17	18.67
$R=0.3$ $\Delta K(MPa\sqrt{m})$	7.79	9.29	9.44	10.86	12.01	13.51

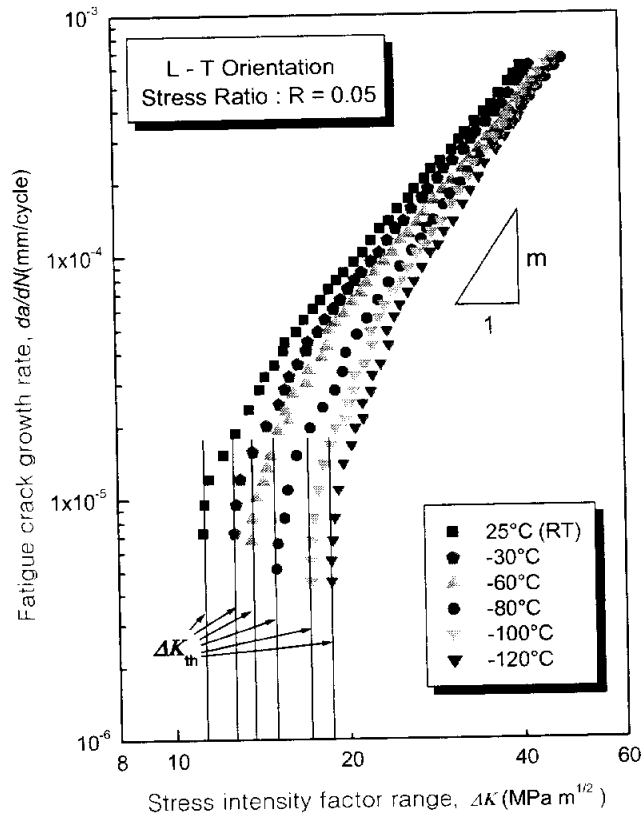


Fig. 15 Relation between fatigue crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK_{th}) - $R=0.05$

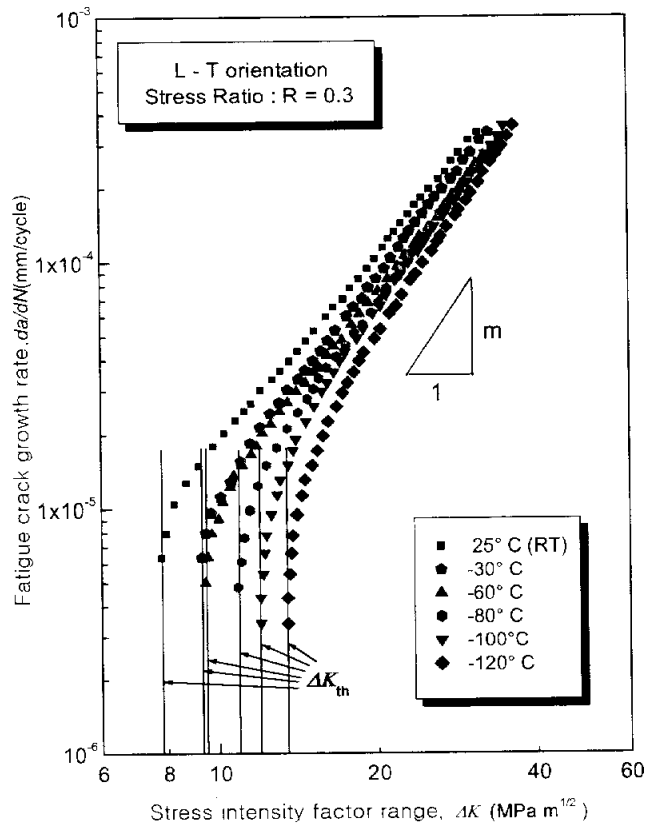


Fig. 16 Relation between fatigue crack growth rate(da/dN) and stress intensity factor range(ΔK_{th}) - $R=0.3$

4.4 응력비에 따른 재료상수(C) 및 균열진전지수(m)의 관계

Fig. 17과 Fig. 18은 응력비 0.05와 0.3일때의 재료상수 C와 피로균열진전지수 m을 상온(25℃)과 저온환경(-30℃, -60℃, -80℃, -100℃, -120℃) 조건에서 실험하여 정량적으로 비교 도시한 것이다.

Fig. 17, 18을 보면 시험온도가 하강함에 따라 C의 값은 감소하고, m의 값은 증가하는 것을 알 수 있다.

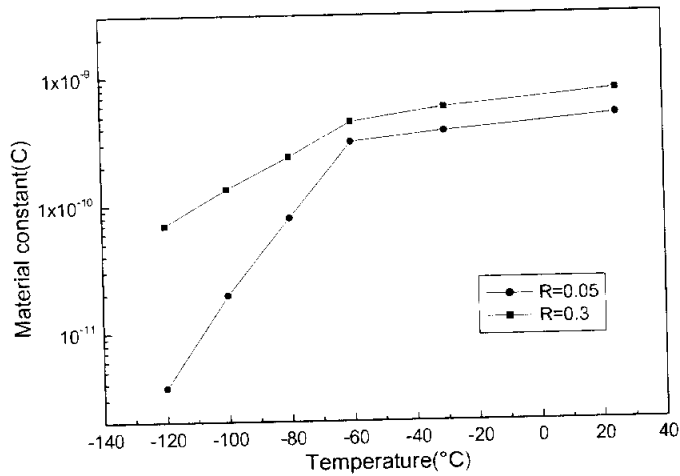


Fig. 17 Relation between material constant C and temperature (°C)

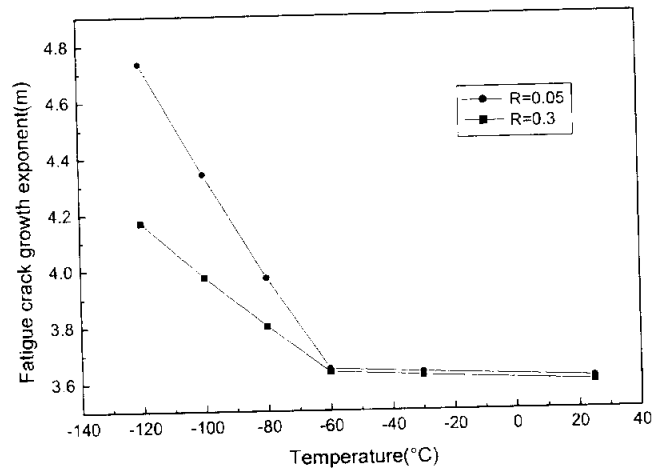


Fig. 18 Relation between material constant m and temperature (°C)

4.5 시험편 파단면 특성

Fig. 19와 Fig. 20은 압력용기용강 SA516-70에 대하여 상온 25℃와 -30℃, -60℃, -80℃, -100℃ 및 -120℃의 저온환경에서, 응력비 0.05와 0.3에 대한 피로균열진전특성을 각각 시험한 후, 제2단계 영역의 중심부의 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경으로 촬영하여 비교한 것이다.

각 시험편의 파단면에는 피로파단면의 특징이 되는 스트라이에이션(striation)이 관찰되었는데, 그 생성은 인장과정에서 균열선단에 소성변형이 생김에 따라 둔화되고, 압축과정에서 재예화가 일어나는 둔화-재예화 과정에 의해 형성되는 것으로 반복응력 1사이클당 스트라이에이션 1개가 형성되는 것으로 보이며 각 온도별 스트라이에이션의 크기와 모양은 큰 변화가 없었으나 -80℃, -100℃, -120℃에서는 파면 조직상의 뚜렷한 차이를 타나내어 취성파괴가 발생한 것으로 판단된다.

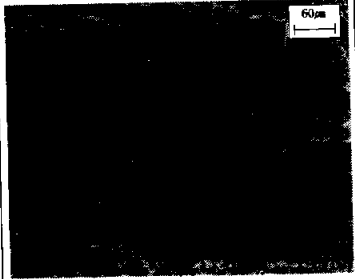
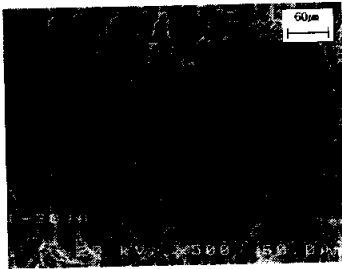
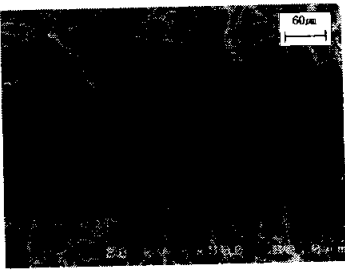
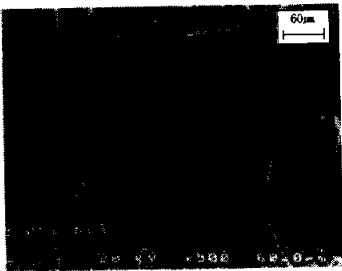
온도 응력비	0.05	0.3
25℃		
-30℃		
-60℃		

Fig. 19 Striation of fatigue crack propagation by SEM
(25℃, -30℃, -60℃)

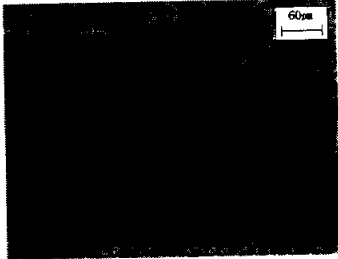
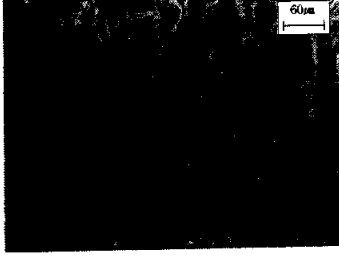
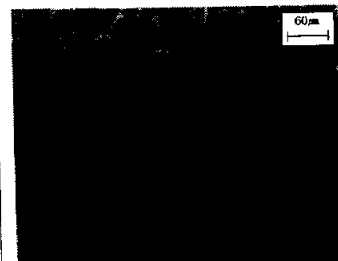
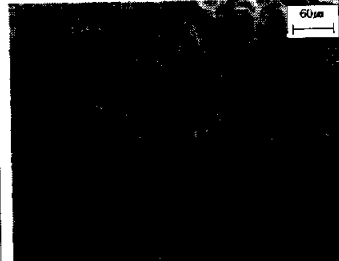
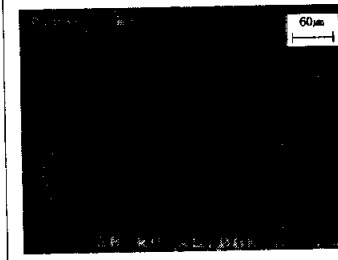
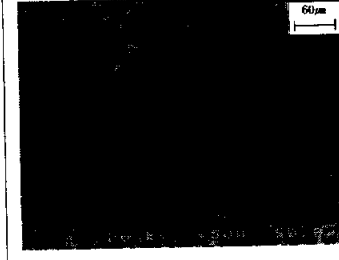
응력비 온도	0.05	0.3
-80℃		
-100℃		
-120℃		

Fig. 20 Striation of fatigue crack propagation by SEM
 (-80℃, 100℃, -120℃)

제 5 장 결 론

압력용기용 강 SA516-70에 대하여 상온 25℃와 -30℃, -60℃, -80℃, -100℃ 및 -120℃의 저온환경에서 응력비 0.05와 0.3으로 각각 피로균열 진전특성에 관한 실험을 하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 온도가 낮을수록 피로균열전파 초기영역(제1단계 영역)에서 피로균열 하한계 특성 ΔK_{th} 및 제2단계 영역에서의 응력확대계수 범위 ΔK 값이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 저온일수록 균열초기 피로저항성과 제2단계 초기영역에서의 피로파괴강도가 우수한 것으로 판단된다.

2) 응력비 0.05와 응력비 0.3일때의 피로균열진전특성을 비교한 결과 응력확대계수(ΔK)가 큰 구간에서는 응력비의 영향을 적게 받는 것을 알 수 있었다. 반면에 응력확대계수가 작아질수록 각 저온에서의 피로균열진전 양상은 큰 차이를 나타내어 응력비와 온도의 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

3) 피로균열지전지수(m)는 온도가 낮을수록 증가하였고, 재료상수(C)는 온도가 낮을수록 감소하는 경향을 보였으며, 25℃에서 -60℃까지는 큰 변화를 보이고 있지 않으나 -60℃에서 -120℃ 사이는 급격한 변화를 보였다. 이는 저온취성의 영향을 받는 것으로 사료된다.

4) 파단면은 균열선단 소성둔화에 의한 연속진전의 연성 스트라이에이션 파면을 나타내었고, 25℃와 -60℃까지 스트라이에이션의 모양과 크기는 큰 차이가 없으나, -80℃부터 -120℃까지는 조식상의 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 조식의 뒤틀현상으로 보아 취성으로 인한 벽개파괴가 일어난 것으로 판단된다.

※ 참고문헌

- (1) 배성인, 한인구, '파괴역학 실험법', 인천, 원창출판사, pp.8-11, pp.8-209, (1995).
- (2) 장동일 외 2명, 파괴역학, 인천, 원창출판사, pp.85-96, 119, (1992).
- (3) Y. Kitsunai, Fatigue Crack growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperature, pp.280-290, (1991).
- (4) ASTM Standard, E647-81, (1981).
- (5) P. C. Paris and F. Erdogan, 'Tran. of the ASME Ser. D', pp.528-534, (1963).
- (6) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, pp.99-125, (1999).
- (7) P. C. Paris and F. Erdogan, Tran. of the ASME Ser. D, pp.528-534, (1963).
- (8) H. Liebowitz, Fracture. Vol. III, (1971).
- (9) 日本機械學會基準, '彈塑性 破壊引性 J 試験方法', JSME S 001, (1981).
- (10) 小林英男, '破壊力学', 東京, 共立出版株式會社, pp.57-63, pp.131-135, (1993).
- (11) 'Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM : E647-93', (1993).
- (12) 'Advanced Fatigue Crack Propagation', Instron 2490 Series Application Program, pp.1-4, (1991).
- (13) 박경동, '원자로용 저합금강의 고온피로 크랙전이와 크랙 개폐구 특성에 관한 연구', 동아대학교 박사학위논문, (1983).
- (14) 김재훈, "기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구", 충남대학교 박사학위논문, pp.10-16, (1989).
- (15) R. N. Moody, W. W. Gerberich, "Materials Science and

Engineering", pp.35-46, (1977).

- (16) K. Tanaka, Y. Akinwa, and M. Yamashita, "Fatigue Growth Threshold of Small Cracks", International Journal of Fracture, Vol.17, pp.519-533, (1981).

A Study on the Fatigue Growth Characteristics of Pressure Vessel Steel at Low Temperature

Sun-soo Lee

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

Abstract

Fatigue crack propagation rate and threshold characteristics of the SA516 70 steel which is used for the low temperature pressure vessels, were studied in the room temperature of 25°C and low temperature ranges of -30°C, -60°C, -80°C, -100°C and -120°C with stress ratio of $R=0.05$ and $R=0.3$. In the logarithmic relationship between the fatigue crack propagation rate(da/dN) and stress intensity factor range ΔK , the linear relationship was obtained up to $da/dN = 4.425 \times 10^{-4}$ mm/cycle in the same of room temperature, but in low temperature case, the relationship was extended to the range of low crack propagation rate. The fractured specimens were examined by SEM. Tested results showed that specimen failed at

low temperature exhibit the quasi-cleavage fracture formation however considerable ductility proceed final fracture.

Key words : Crack Propagation(균열전파), Low Temperature(저온), Fatigue Crack Propagation(피로균열전파), Stress Ratio(응력비), Threshold Characteristics(하한계 특성).

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}	: Effective specimen thickness
B_{net}	: Net thickness
E'	: Elastic modulus of material
v	: Crack opening displacement(COD)
P	: Load on specimen
C_g	: Normalized K -gradient