

## 압력용기용 A516강의 저온피로크랙전파특성에 관한 연구

박경동\* · 노태영\*\* · 김영대\* · 김형자\* · 손재윤\*\*\*  
(99년 7월 16일 접수)

### A Study on the Characteristics of Fatigue Crack Growth of A516 Steel for Pressure Vessel at Low Temperatures

Kyung-Dong Park\* · Tae-Young Ro\*\* · Young-Dae Kim\* · Hyung-Ja Kim\* · J-Y Son\*\*\*

**Key Words :** Crack Propagation(크랙전파), Fatigue(피로), Low Temperature(저온), Crack Closure(크랙개폐), Stress Ratio(응력비)

#### Abstract

In this study, CT specimens were prepared from ASTM A516 Gr. 65 which was used for pressure vessel plates for moderate and lower temperature service. Fatigue crack growth test was carried out in the environment of low temperature of 10°C, -10°C, -30°C and -50°C and in the range of stress ratio of  $R=0.05$  and 0.3 by means of opening mode displacement.

Based on these test results, the characteristics from temperature and stress ratio were shown as follows.

- 1) As the stress ratio,  $R$  increased  $da/dN$  and  $\Delta K$  of 2nd stage gradually decreased. And as  $R$  decreased, the effect of temperature became greater and greater.
- 2) As the temperature descended,  $da/dN$  decreased on a certain  $\Delta K$ , and  $\Delta K$  did in a same  $da/dN$ . And the stress ratio,  $R$  exerted greater influence at the lower temperature.
- 3) The fatigue crack growth constant,  $m$  increased at 10°C and -10°C, and decreased at -30°C and -50°C following the increment of stress ratio  $R$ . And  $m$  increased along with the reduction of temperature greatly decreased at -30°C to come close to two(2).

#### 1. 서 론

최근 산업의 발달로 각종의 기계·기구 및 금속 구조물에 있어 그 사용 환경은 다양하게 변하고

있으며 거기에 적용할 수 있는 재료적 성질도 더 붙어 요구되고 있다.

그러나 설계에 있어서는 재료가 갖는 기계학적 강도 기준치나 충분한 안전율을 채택하였음에도

\* 종신회원, 부경대학교 공과대학 기계·자동차공학부

\*\* 부경대학교 공과대학 기계·자동차공학부

\*\*\* 부경대학교 대학원

불구하고 전혀 예기치 않은 파괴가 발생되어지는 예가 많다<sup>1)</sup>.

이것은 기존의 강도 계산식을 벗어나서 파괴에 대한 어떤 불확정한 요인이 있음을 알 수 있게 한다. 특히 상온에서 연성을 갖는 재료라도 저온에서는 취성적 성질을 갖는 것이 보통인데 취성거동에서 나타나는 재료의 강도는 균열이나 개재물 등의 결함이 존재하는 것에 커다란 영향을 받는다<sup>2),3)</sup>. 그러한 결함 부분에 반복하중이 작용되면 그에 대한 응력은 피로로서 축적되어 미세한 균열을 발생 또는 진전시켜 모재의 파괴로 이어지는 경우가 일반적 파괴의 대부분이라 하겠다<sup>4),5)</sup>.

근래 열교환기, 탑조류, 저장탱크 등의 압력용기 및 관련 구조물이나 기기 등은 저온에서도 고압을 유지한 채 장기간 사용되는 경우가 많아졌다. 이러한 압력용기의 설계제작과 유지의 필요성에 따라 저온피로 분야에도 파괴역학을 적용할 필요성이 크게되었으나 국내에선 그에 대한 연구가 적은 실정이다.

실제의 용기나 구조물에는 처음부터 잠재적으로 존재한 결함이나 사용 중 외적환경의 부하조건에 의해 발생된 것들인데 이들 결함으로부터 피로균열진전 및 잔존수명을 평가하기 위해서는 균열진전의 특성을 파악하는 것이 대단히 중요하다<sup>6)</sup>.

본 연구는 보통온도 및 저온의 압력용기용 강판 ASTM A516 Gr.65에 대하여 겨울철 실내온도 10℃와 -10℃, -30℃, 및 -50℃ 등의 분위기 속에서 정(+)방향 사인파형 반복하중을 진동 20cycles/sec로서 응력비 R=0.05 및 0.3에 대한 피로균열진전속도와 응력확대계수범위 등을 연구하였다. 이 연구에서 온도 및 응력비의 효과와 저온에서의 압력용 용기 등의 파괴 기준을 제시하므로서 결함의 존재 또는 발생이 예측되는 재료를 강도상 안전하게 설계하는데 기여하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 보통온도 및 저온의 압력용기용 강판(ASTM A516 Gr.65)으로 Table 1은 화학적 성분을, Table 2는 기계적 성질을 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of test piece (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V	Mo
0.12	0.23	0.97	0.017	0.04	0.026	0.02	0.03	0.002	0.01

Table 2 Mechanical properties of test piece

Yield strength kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	Tensile strength kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	Elongation (%)	Hardness (H <sub>RB</sub> )
31.6(310)	46.8(459)	29	66.12

시험편은 CT시험편으로 두께 20mm판재에서 산소 절단기를 이용 L-T방위로 채취, 압연방향이 하중방향이 되게 하였고 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라, 외형가공은 밀링(milling)에서 노치홈은 와이어커팅방전가공기(Wire cutting E.D.M)로 하고 노치 끝부분은 60도의 각도에 노치 반경이 0.1mm가 되게 하였다<sup>7)</sup>.

그리고 피로균열진전의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면은 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며 3mm정도의 피로균열을 주었다. Fig. 1은 그 형상과 치수를 나타낸 것이다.

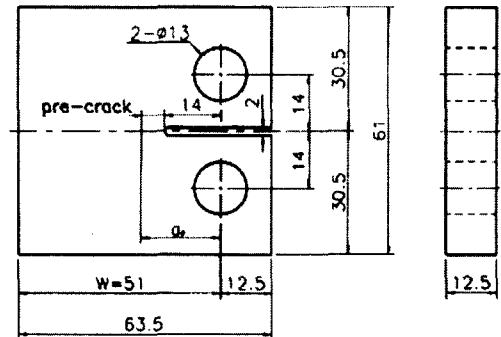


Fig. 1 Specimen configuration(mm)

### 2.2 실험장치

Photo. 1은 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로 시험기(INSTRON 8501, 100KN)이며, 연결된 컴퓨터를 이용한 실험을 하였다. 저온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기

에 질소병을 연결하여 액체 질소의 압력을  $0.5\text{kg/mm}^2$  내외로 유지하여 챔버내로 유입시켜 저온환경으로 만들었으며, COD(균열개구변위) 측정은 COD클립 게이지를 사용하였다.

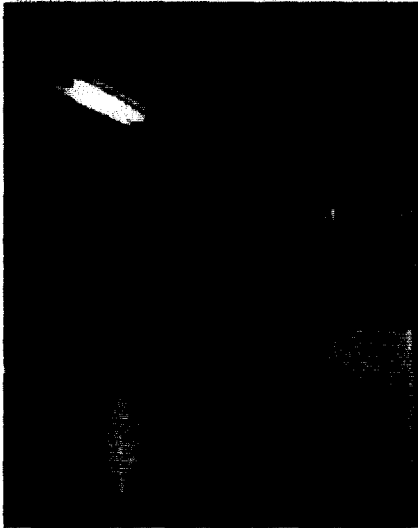


Photo. 1 Fatigue testing machine

### 2.3 시험방법

본 실험은 전기 유압식 피로시험기에 연결된 컴퓨터의 프로그램>Loading A.F.C.P)을 이용하여  $K$  제어에 의한  $\Delta K$  점증방식으로 정(+ )방향 편집 반복하중을 20Hz의 속도로 주었으며 응력비  $R=0.05$  및 0.3으로 각각 유지하였다<sup>8),9)</sup>.

실험온도는 겨울철 실내온도  $10^\circ\text{C}$ ,  $-30^\circ\text{C}$  및  $-50^\circ\text{C}$ 로 하였으며 저온환경은 챔버 내에 액체질소를 유입시키므로써 가능케 하였고, 온도계측은 챔버에 설치된 열전기 온도계에 의해서 모니터로 나타나며, 온도유지는 전자석 밸브가 자동적으로 작동되어 액체질소의 유입구를 개폐하므로써 이루어지며 그 편차는  $\pm 1^\circ\text{C}$  이내이다<sup>10)</sup>.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 응력비에 따른 균열진전특성

ASTM A 516 Gr.65에 대하여 겨울철 실내온도

$10^\circ\text{C}$ 와  $-10^\circ\text{C}$ ,  $-30^\circ\text{C}$  및  $-50^\circ\text{C}$ 에서의 균열진전특성에 관한 실험결과를, 각 응력비  $R=0.05$  및 0.3에 대하여 표시하였다.

$R=0.05$ 에서의 각 온도환경에 대한 균열진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수  $\Delta K$ 의 관계를 Fig. 2에,  $R=0.3$ 에서의  $da/dN - \Delta K$ 의 관계를 Fig. 3에 각각 나타내었다.

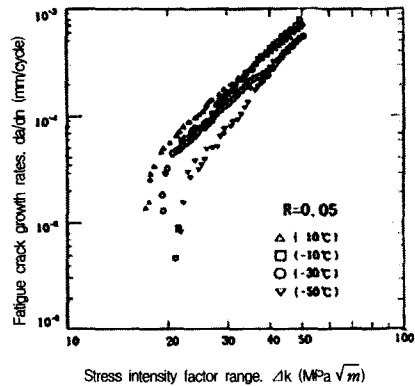


Fig. 2  $da/dN - \Delta K$  relation ( $R=0.05$ )

응력비  $R=0.05$  경우에 양대수 직선관계는  $da/dN - \Delta K$  선도에서

$$3 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle} \leq da/dN \leq 8 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle},$$

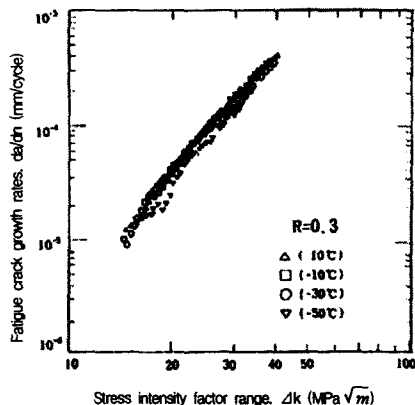


Fig. 3  $da/dN - \Delta K$  relation ( $R=0.3$ )

응력비  $R=0.3$  경우는

$$1.5 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle} \leq da/dN \leq 4 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle},$$

의 결과를 얻었다. 이 자료에서 응력비  $R$ 이 커질수

록 2단계 영역의  $da/dN$ 가 낮아지는 경향이 있다.  
 그리고, 응력비  $R$ 이 낮아질수록 온도의 영향이 커짐을 알 수 있다.

피로크랙진전과정의 제 2단계 영역에 있어서  $da/dN$ - $\Delta K$ 는 양대수 선도상에서 직선 관계로 나타나고, 이것은 앞에서 언급한 Paris식<sup>11)</sup>  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 를 이용하여, 각 온도 및 응력비에 대한 실험결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Regression constants for the fatigue crack growth law  $da/dN=C(\Delta K)^m$

R	10		-10		-30		-50	
	C	m	C	m	C	m	C	m
0.05	$3.409 \times 10^{-9}$	3.117	$1.238 \times 10^{-9}$	3.377	$6.046 \times 10^{-9}$	2.871	$7.913 \times 10^{-9}$	3.968
0.3	$6.000 \times 10^{-9}$	3.682	$4.009 \times 10^{-9}$	3.751	$1.344 \times 10^{-9}$	2.646	$2.490 \times 10^{-9}$	3.816

C와 m은 재료상수로서 서로 상관 관계가 있으며 m의 값은 온도의 저하에 따라 -30℃의 결과를 제외하고 각 온도에서 증가하는 경향을 나타내었다.

### 3.2 온도에 따른 균열진전특성

Fig. 4~7에는 응력비  $R=0.05$  및 0.3에서의 균열진전특성에 관한 실험결과를 각 온도 10℃, -10℃, -30℃ 및 -50℃의 환경에 대하여 각각 표시하였다.

이 자료에서 온도가 내려갈수록 주어진  $\Delta K$ 에 대한  $da/dN$ 는 감소하는 경향으로 나타나며 동일한  $da/dN$ 에서는  $\Delta K$ 가 증가하는 경향이 있다.

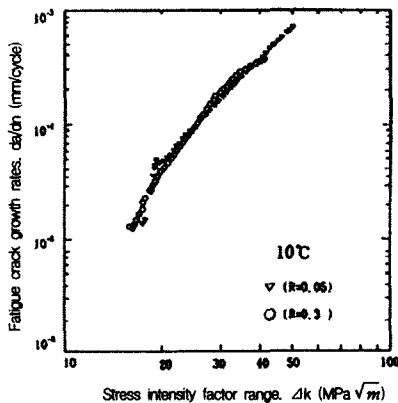


Fig. 4  $da/dN$  -  $\Delta K$  relation (10℃)

그리고 낮은 온도일수록 응력비의 영향이 증가함을 알 수 있다.

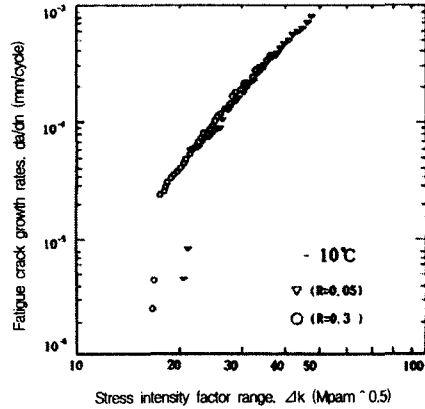


Fig. 5  $da/dN$  -  $\Delta K$  relation (-10℃)

온도가 감소할수록 피로균열진전상수 m의 수치는 증가하는데, 이것은 시편의 균열강도가 감소하기 때문으로 추정되며<sup>12),13)</sup> 취성재료 일수록 m은 커지는 연구결과와 일치한다. 따라서 온도가 내려갈수록 취성파괴가 일어날 경향이 증가함을 알 수 있다.

### 3.3 파단면의 특성

ASTM A516 Gr.65 강판에 대하여 10℃, -10℃, -30℃ 및 -50℃ 등의 저온환경에서 각 응력비  $R=0.05$  및 0.3에 대한  $\Delta K$  증가시험을 실시하고 파단 후, 그 파단면을 거시적으로 촬영하여 Photo. 2

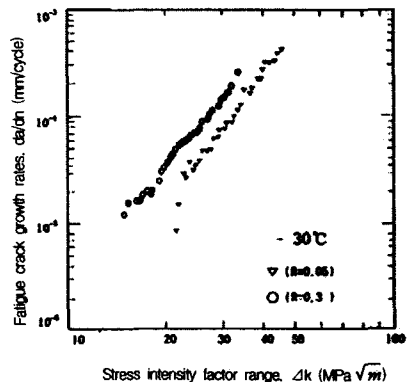


Fig. 6  $da/dN$  -  $\Delta K$  relation (-30℃)

에 나타내었고, 주사식 전자현미경으로 미시적 파면 양상을 Photo. 3, Photo. 4에 각각 나타내었다.

각 파단면에는 피로파단면의 전형적인 스트라이에이션(striation)이<sup>14)</sup> 관찰되었다. 이것의 생성과정은 인장과정에서 균열선단에 소성변형이 생김에 따라 둔화(blunting)가 일어나고, 압축과정에서 재예화(resharpening)가 일어나는 둔화-재예화 과정에 의해 형성되는 것으로 알려져 있으며 반복응력 1사이클당 스트라이에이션 1개가 형성되는 것으로 보고되고 있다.<sup>9)</sup>

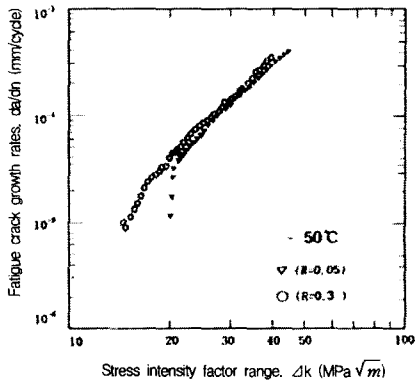


Fig. 7  $da/dN - \Delta K$  relation ( $-50^{\circ}\text{C}$ )

fracture	fatigue crack	Pre-crack	Temperatures	Stress ratio
←----- ----- -----→				
			10°C	0.05
			-10°C	
			-30°C	
			-50°C	
			10°C	0.3
			-10°C	
			-30°C	
			-50°C	

Photo. 2 Macro Fracture Surface appearances fatigue testing specimen

Surfaces	Temperatures	Stress ratio
	10°C	0.05
	-10°C	
	-30°C	
	-50°C	

Photo. 3 Fractographs showing typical striations formed at 10°C, -10°C, -30°C and -50°C for  $R=0.05$

Surfaces	Temperatures	Stress ratio
	10°C	0.3
	-10°C	
	-30°C	
	-50°C	

Photo. 4 Fractographs showing typical striations formed at -10°C, -10°C, -30°C and -50°C for  $R=0.3$

#### 4. 결론

ASTM A516 Gr.65 강판에 대하여 10°C, -10°C,

-30℃ 및 -50℃의 저온환경에서 응력비  $R=0.05$  및 0.3으로 피로균열진전 실험을 한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 응력비  $R$ 가 커질수록 양대수 직선관계와 성립하는 제 2단계 영역의  $da/dN$  및  $\Delta K$ 는 감소하고,  $R$ 가 작아질수록 온도의 영향을 크게 받는다.
- 2) 온도가 낮아질수록 주어진  $\Delta K$ 에 대한  $da/dN$ 은 감소하고, 동일한  $da/dN$ 에서의  $\Delta K$ 는 증가한다.
- 3) 온도와 응력비가 낮을수록 하한계치는 높아졌다.
- 4) 파단면은 균열선단 소성둔화에 의한 연속진전의 연성 스트라이에이션 파면을 나타내었다.

### 참고문헌

- 1) 배성인, 한민구, "파괴역학 실험법", 원창출판사, pp.136, 209, 1995
- 2) 朴卿東, "原字盧用 低合金鉾 高溫波榮 크랙진이와 크랙開口 特性에 關한 研究," 동아대학교 박사학위 논문, 1983
- 3) 장동일 외 2명, 파괴역학, 원창출판사, pp.85-96, 119, 1992
- 4) 禹興植 외 2명, "재료파괴공학," 서울, 보성문화사, pp.147-170, 265-273, 1993
- 5) 日本機械學會基準, "彈塑性 破壞引性 J 試驗方法," JSME S 001, 1981
- 6) ASTM, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM, E 647-93
- 7) Kitsunai, Y., "Fatigue Crack Growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperature," pp.280-290, 1991
- 8) 김재훈, "기계구조용재료의 피로균열진전 거동에 관한 연구," 충남대학교 박사학위논문, pp.10-16, 1989
- 9) 小林英男, "破壞力學," 公立出版株式會社, pp.63, 89, 133, 1993
- 10) 吳世旭 華甲記念論文集, pp. 208, 300, 1990
- 11) 서창민, 오명석, "2024-T3 및 황동의 작은 표면 결함재의 피로 균열 성장 특성에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제10권 제1호, pp.53-63, 1996
- 12) 오맹중, 오창배, 김귀식, "세라믹용사된 S45C 강재의 기계적특성 및 피로 강도," 한국해양공학회지, 제12회 제1호 pp.35-38, 1998
- 13) 강용구, 김대석, "응력비의 영향을 고려한 표면 피로 균열의 균열성장식," 한국해양공학회지, 제12권 제1호, pp.39-48, 1998
- 14) 서창민, 허정훈, 이해무, 서덕영 "시효 열화 시킨 터빈 로터강의 피로강도에 관한 연구" 한국해양공학회지, 제10권 제2호, pp.83-87, 1996