

저온 압력용기용 SA516강의 응력비에 따른 피로크랙 전파특성에 관한연구

A Study of Stress ratio on the Fatigue Crack Growth Characteristics of Pressure Vessel SA516 Steel at Low Temperature

박경동* · 하경준**

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 대학원 기계공학과

ABSTRACT In this study, CT specimens were prepared from ASTM SA516 which was used for pressure vessel plates for room and low temperature service. And we got the following characteristics from fatigue crack growth test carried out in the environment of room and low temperature at 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C and -120°C and in the range of stress ratio of 0.1, 0.3 by means of opening mode displacement. At the constant stress ratio, the threshold stress intensity factor range ΔK_{th} in the early stage of fatigue crack growth (Region I) and stress intensity factor range ΔK in the stable of fatigue crack growth (Region II) was increased in proportion to descend temperature. It assumed that the fatigue resistance characteristics and fracture strength at low temperature is considerable higher than that of room temperature in the early stage and stable of fatigue crack growth region. The straight line slope relation of logarithm $da/dN - \Delta K$ in Region II, that is, the fatigue crack growth exponent m increased with descending temperature at the constant stress ratio.

It assumed that the fatigue crack growth rate da/dN is rapid in proportion to descend temperature in Region II and the cryogenic-brittleness greatly affect a material with decreasing temperature.

1. 서 론

최근 피로파괴의 구조이론과 실험적인 해석은 상당히 발전되었지만, 여러 가지 인자들의 복합적인 영향을 받는 부재로 이루어진 항공기와 선박 등 대형구조물의 피로파괴에 대한 규명은 명확히 확립되지 않았으며, 피로현상에 대하여 충분히 축적된 자료를 이용하여 내피로 설계에 적용한다는 것은 일부 구조물 및 부품에만 가능한 실정이다. 따라서 기계부품이나 발전설비, 원자로, 저온 압력용기, 저수조 탱크 등이 다양한 환경에서 장시간 사용되는 경우에 이들 구조물의 설계, 제작 및 유지의 측면에서 파괴역학적인 적용이 크게 필요하게 되었다.

최근에는 압력용기나 관련 구조물 등이 고온뿐만 아니라 저온에서도 장시간 사용하는 경우가 많아졌고, 그 설계 제작과 유지의 필요성에 따라 저온피로 분야에서도 파괴역학을 적용할 필요성이 높아졌으나, 국내에서는 이에 대한 연구가 미미한 실정이다.

본 연구는 압력용기용 강판 SA516에 대하여 상온 25°C 와 -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C의 환경 속에서 정(+)-방향 사인파형 반복 하중을 주

파수 20 cycle/sec.로서 응력비 0.1, 0.3에 대해 안정성장영역에서 각각의 피로균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 선도 및 피로균열 하한계특성 ΔK_{th} 을 구하고, 온도 및 응력비에 따르는 피로균열진전지수 m 와 재료상수 C 를 규명하여 저온에서의 압력용 용기 재료에 대한 파괴 기준을 제시함으로써 강도상의 안전 설계에 기여하고자 한다.

2. 실험 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 압력용기용 강판(SA516)이며, 시험편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

시험편은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재를 이용하여 L-T방위로 채취해, 압연방향이 하중방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 외형가공은 밀링으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기에서 노치 끝부분이 60°C의 각도에 노즈반경 0.1mm가 되게 가공하였다. Fig. 1는 시험편의 형상과 치수 를 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical composition of specimen(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 specimen

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
390	558	26	77.37

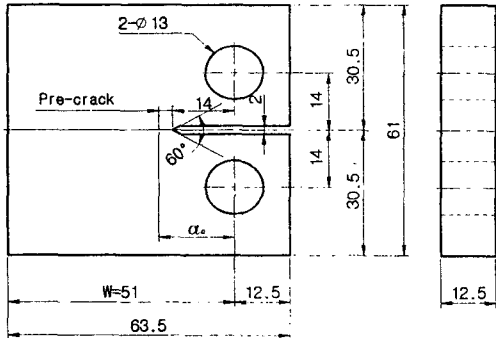


Fig. 1 Configuration of CT-specimen(Unit:mm)

그리고 피로크랙진전의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며, 25°C 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력 범위에서 ASTM E647-93 규정에 의거 3mm의 피로 예균열을 주었다.

2.2 실험 장치

본 실험에 사용된 전기 유압식 피로 시험기 (INSTRON 8501, 10KN) 이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 조작하였다. 크랙길이 측정은 시편에 COD 클립게이지를 부착한 콤프라이언스법을 사용하였으며, 파단면의 미시적 촬영은 주사식 전자현미경(S.E.M)을 사용하였다.

2.3 실험방법

실험은 서보전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 20Hz, 정현파형으로 하였다.

저온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 보무를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 0.5kg/mm²내외로 되도록하여 액체질소를 챔버내로 유입시켜 저온환경으로 만든다. 실험 중 액체질소의 감소에 따라 질소보무의 압력으로 액체질소의 유입을 정상적으로 밀어주며 온도유지는 전자석밸브

가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는 ±1°C로 유지하였고 응력비 R=0.1, R=0.3, 주파수 20Hz, 실험온도는 25°C와 -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로크랙진전 하한계특성

온도 25°C와 -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C에서, 응력비 0.1 및 0.3에 대하여 크랙진전특성에 관한 실험을 하고, 그 결과 크랙진전속도 da/dN와 응력확대계수 폭 ΔK의 관계를 양대수 선도상에 표시하였다. 실험 결과 최소자승법을 이용하여 구한 피로크랙 하한계특성 ΔK_{th}은 Table 3에, 응력비에 대한 크랙진전속도속도 da/dN와 응력확대계수 폭 ΔK의 관계는 Fig. 3, 4에 나타내었다.

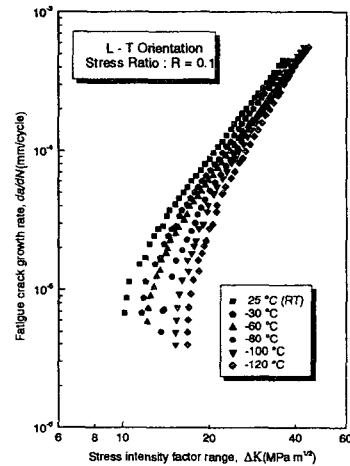


Fig. 3 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (R=0.1)

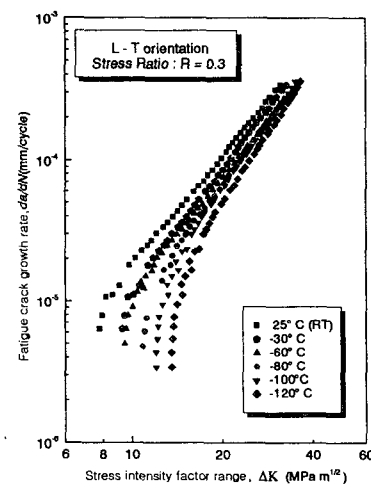


Fig. 4 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (R=0.3)

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

Stress ratio \ Temp.	25°C	-30°C	-60°C	-80°C	-100°C	-120°C
0.1	8.89	9.39	9.91	11.25	13.19	15.12
0.3	6.49	7.24	7.79	8.49	11.62	12.92

실험 결과 응력비 0.1 및 0.3에서 온도가 내려갈수록 피로크랙 진전영역(제1단계)에서의 피로크랙진전 하한계특성 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났으며, 피로수명의 대부분이 피로크랙진전 제1단계 영역에서 소요된다는 점을 감안한다면, 이는 저온일수록 피로크랙 진전속도 da/dN 가 감소되어 ΔK_{th} 가 상승하는 것으로 판단된다.

3.2 온도에 따른 피로크랙진전특성에 미치는 응력비영향

Fig. 5 및 Fig. 6에 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 의 온도 및 응력비 영향과 피로크랙진전속도 da/dN 의 응력비 영향을 각각 나타내었다.

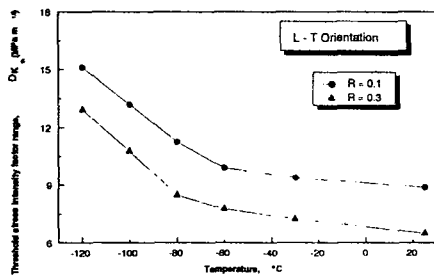


Fig. 5 Effect to threshold stress intensity factor range ΔK_{th} and temperature

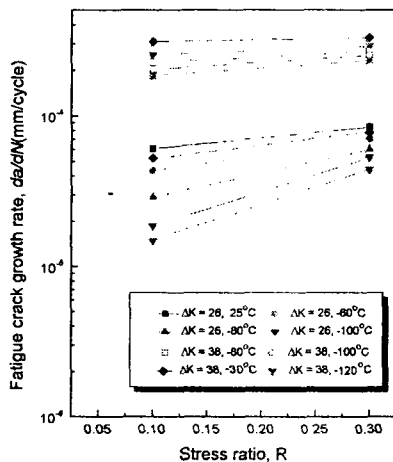


Fig. 6 Relations between Fatigue crack growth rate and stress ratio

3.3 피로크랙진전속도 da/dN 와 피로크랙진전지수 m , 재료상수 C 의 온도 관계
 피로크랙진전과정의 제2단계 영역에 있어서 da/dN - ΔK 의 좌표선상에서 직선 관계로 나타났고, 이것을 paris식 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 를 적용하여 나타내었다.

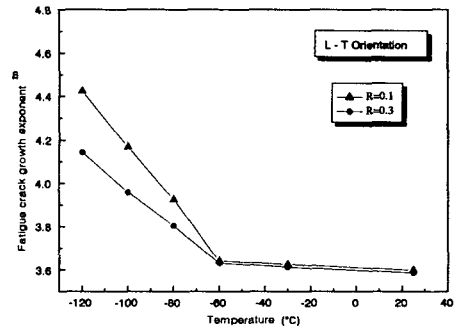


Fig. 7 Relation between fatigue crack growth exponent m and Temperature(°C)

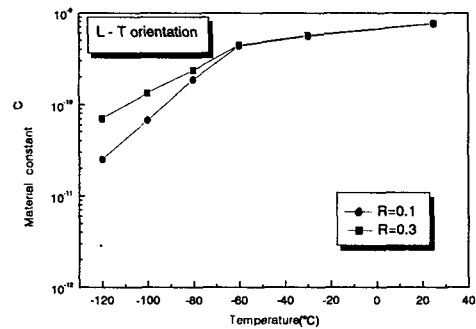


Fig. 8 Relation between material constant C and Temperature(°C)

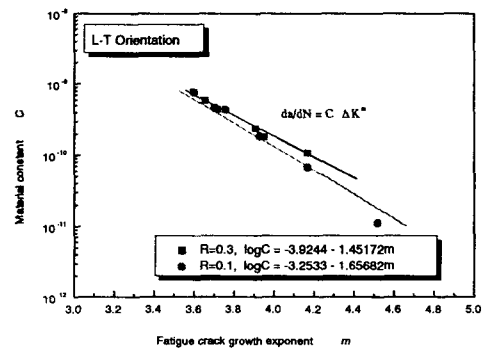


Fig. 9 Correlation between C and W in Paris equation $da/dN = C(\Delta K)^m$

Fig. 7, 8에 크랙진전지수 m 및 재료상수 C 와 온도관계를 그림에서 나타내었다. 일정한 응력비에서는 온도가 낮아질수록 직선관계가 성립하는

제2단계 영역에서의 da/dN - ΔK 직선의 기울기 즉, 크랙진전지수 m 의 값이 증가한 것으로 나타났으며, 이것은 재료의 파괴가 시작되면 크랙진전속도 da/dN 가 증가하게 되고, 따라서 취성파괴가 일어날 가능성이 높아진 것으로 판단된다. 온도가 25°C에서 -60°C까지는 크랙진전지수 m 와 재료상수 C 의 값이 응력비에 크게 영향을 받지 않았으나 -60°C에서 -120°C사이에는 응력비의 영향이 나타났으며 온도가 저하할수록 응력비 영향이 크게 나타났다. Fig. 9의 m 와 C 의 관계를 보면 크랙진전지수 m 가 증가함에 따라 재료상수 C 가 감소하는 경향으로 나타났으며 응력비의 영향은 크게 나타나지 않았다.

3.4 파단면의 특성

온도 25°C와 -30°C, -60°C, -80°C, -100°C 및 -120°C에서, 응력비 0.1 및 0.3에 대한 피로크랙진전특성을 ΔK -감소방식으로 시험한 후, 하한계 영역 중심부의 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경으로 촬영하여 Fig. 10에 나타내었다.

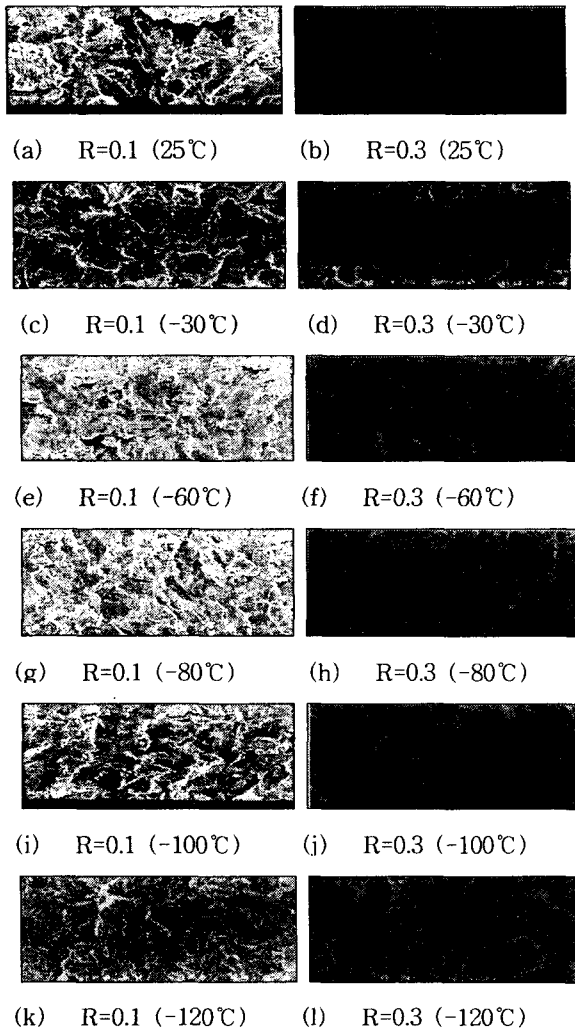


Fig. 10 Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C and -120°C for R=0.1, 0.3

4. 결론

본 연구는 저온 압력용기용 SA516 강판에 대하여 온도 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C 및 -120°C의 저온에서 응력비 0.1 및 0.3으로 피로크랙진전과 특성에 관한 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험 온도가 저하할수록 피로크랙진전 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 및 제 2단계 영역에서 응력확대계수 ΔK 가 증가하는 것으로 나타났다. 응력비 0.1과 0.3에서 같은 경향으로 나타났다. 이는 저온취성의 영향으로 생각된다. 그리고 응력비 0.1보다 0.3일 때가 가속의 경향을 나타내어 ΔK_{th} 가 낮게 나타났다.

2) 온도가 저하할수록 직선관계가 성립하는 제 2단계 영역에서 da/dN - ΔK 의 직선 기울기 즉 크랙진전지수가 증가하는 것으로 나타났다. 응력비 0.1 및 0.3에서도 같은 경향으로 나타났다. 온도가 저하할수록 크랙진전 속도 da/dN 가 감소되어 하한계 응력확대계수가 증가하였다.

크랙진전지수의 크기가 응력비 영향을 받아 응력비가 0.1의 경우 3.599~4.517로 나타났으나 0.3의 경우 3.596~4.167로 나타나 응력비가 증가할수록 낮게 나타났다.

3) 상온 25°C에서 -120°C까지의 하한계 응력확대계수 ΔK 는 응력비 0.1의 경우 8.89MPa $m^{1/2}$ ~14.69MPa $m^{1/2}$ 로 온도의 저하에 따라 증가하였다.

응력비 0.3의 경우 상온 25°C~-120°C까지의 ΔK_{th} 값은 6.49MPa $m^{1/2}$ ~12.92MPa $m^{1/2}$ 로 응력비가 증가할수록 감소하였다.

이는 상온 및 저온에서 산화물이 크랙 개폐에 영향이 된 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 김영대, 김형자, 노태영, 박경동, 손재윤(1999). "압력용기용 A516강의 저온 피로 크랙 전파특성의 관한연구" 한국해양공학회지, 제13권, 제3(1)호, pp 108~115.