

압력용기용강의 저온피로 크랙전파 하한계 특성에 관한 연구

A Study on the Fatigue Crack Growth threshold Characteristic for Steel of Pressure Vessel at Low Temperature

박경동* · 하경준**

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 대학원 기계공학부

ABSTRACT In this study, CT specimens were prepared from ASME SA516 Gr. 70 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 in the range of stress ratio of 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.

Key Words : Crack Propagation(균열전파), Low Temperature(저온), Stress Ratio(응력비), Fatigue(피로), Cryogenic-Brittleness(저온취성)

1. 서론

실제 구조물에는 소재내에 노치나 개재물등 많은 결함이 존재하게 된다.

이와 같이 재료 내부에 존재하는 결함 부분에 반복하중이 작용하게 되면 피로로 축적되어 미세한 균열을 발생 또는 진전시켜 파괴로 이어지는 경우가 일반적이라 하겠다.

따라서 이러한 결함들로부터 피로균열이 성장하지 않도록 하는 공학적인 설계를 위해 피로균열 하한계 특성과 피로균열이 생성·성장했을 때의 잔존수명을 평가하기 위한 피로균열진전 특성을 규명하는 것은 대단히 중요한 일이다.

Paris는 피로균열진전에 대한 파괴역학적인 파라미터 K 를 사용하여 균열진전속도 da/dN 과 응력확대계수 범위 ΔK 의 함수관계를 도입하여 발표함으로써 선형파괴역학적인 피로균열진전 거동의 이론을 확립하였으며, 그 외에도 많은 학자들에 의해 피로파괴에 대한 연구가 계속되

고 있으며, 기계 및 구조물의 안전설계를 위하여 보다 많은 자료의 축적이 요구되고 있다.

최근에는 압력용기 관련 구조물 등이 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 SA516-70에 대하여 상온 25°C 와 -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C의 환경 속에서 정(+)방향 사인파형 반복하중을 주파수 20 cycle/sec.로서 응력비 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 압력용기 재료에 대한 파괴 기준을 제시함으로써 강도상의 안전설계에 기여하고자 한다.

2. 실험 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 압력용기용 강판(SA516-70)이며, 시편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1. Chemical composition of specimen (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	V	Mo
0.16	0.30	1.14	0.008	0.01	0.036	0.07	0.20	0.027	0.097

Table 2. Mechanical properties of specimen

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

시험편은 콤팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재를 이용하여 L-T방위로 채취해, 압연방향이 하중방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 외형가공은 밀링(milling)으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(Wire cutting E.D.M)에서 노치 끝 부분이 60°의 각도에 노즈반경 0.1mm가 되게 가공하였다. Fig. 1는 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다.

그리고 피로크랙진전의 예상경로는 샌드페이퍼 #1200으로 표면을 충분히 연마하여, 그 관찰을 명확히 하였으며, 상온 25°C에서 ASTM E647-93 규정에 의거 3mm의 피로 예균열을 주었다.

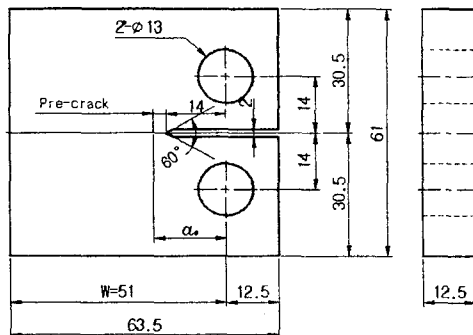


Fig. 1 Configuration of CT-specimen(Unit:mm).

2.2 실험 장치

Fig. 2은 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로

시험기(INSTRON 8501, 100KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 조작하였다. 크랙길이 측정은 콤프라이언스법을 사용하였으며, 파단면의 미시적 촬영은 주사식 전자현미경(S.E.M)을 사용하였다.



Fig. 2 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

2.3 실험방법

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

저온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 펌프를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 0.5kg/mm²내외로 되도록하여 액체질소를 챔버내로 유입시켜 저온환경으로 만든다.

실험 중 액체질소의 감소에 따라 질소펌프의 압력으로 액체질소의 유입을 정상적으로 밀어주며 온도유지는 전자석밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는 ±1°C로 유지하였고 응력비 R=0.3, 주파수 20Hz, 실험온도는 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로크랙진전 하한계 특성

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

실험 결과 응력비 0.3에서 온도가 내려갈수록 피로크랙 진전초기영역(제1단계 영역)에서의 피

로크랙진전 하한계특성 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났으며, 피로수명의 대부분이 피로크랙진전 초기에 소비된다는 점을 감안한다면, 이는 저온일수록 탄성계수의 상승으로 인한 재료강도의 증가 때문으로 크랙초기 피로저항성이 증가한 것으로 판단된다. 온도가 상승할수록 저 ΔK 영역까지 da/dN - ΔK 양대수 직선관계가 성립하므로 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 값이 저하됨을 나타내었다.

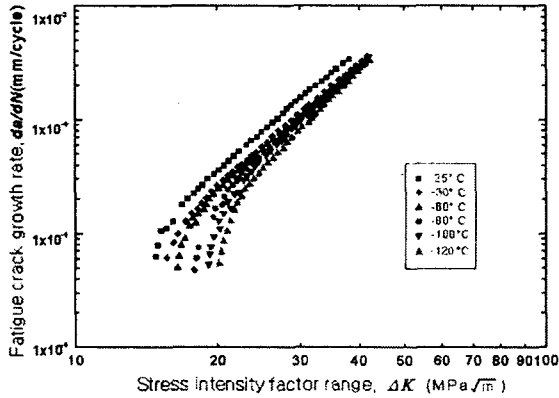


Fig. 3 Relations between da/dN and ΔK ($R = 0.3$)

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

온도 하한값	25°C	-30°C	-60°C	-80°C	-100°C	-120°C
ΔK_{th}	13.49	14.24	14.79	15.49	18.62	19.92

피로크랙진전특성에 관한 실험에서 제2단계 영역에 있어서의 da/dN - ΔK 는 선도상에서 직선관계로 나타났고, 이것을 Paris식 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 대입하여 온도 및 응력비에 대한 크랙진전지수 m 와 재료상수 C 를 구하였다.

상온에서 저온으로 진행될수록 피로균열 진전속도 da/dN 가 감소되어 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 증가하는 것으로 보아 취성의 가속이 생기는 것으로 판단된다.

3.2 피로크랙진전속도 da/dN 와 피로 크랙진전 지수 m

피로크랙진전과정의 제2단계 영역에 있어서 da/dN - ΔK 의 좌표선상에서 직선 관계로 나타났고, 이것을 Paris식 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 대입하여, 각 온도에 대한 크랙진전지수 m 및 재료상수

C 를 Fig. 4 및 Fig. 5에 그 결과를 나타내었다.

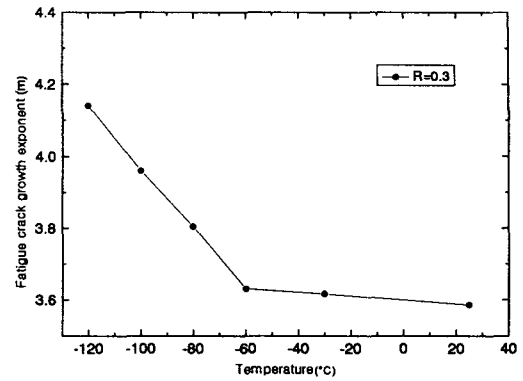


Fig. 4 Relation between fatigue crack growth exponent m and Temperature(°C)

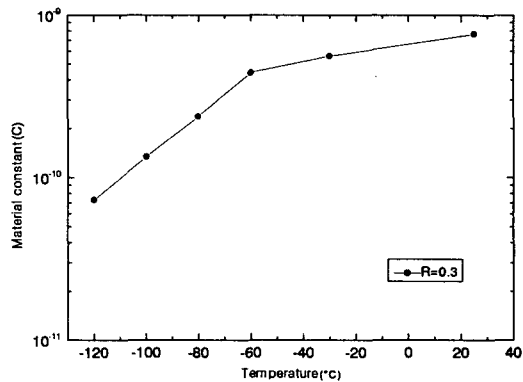


Fig. 5 Relation between material constant C and Temperature(°C)

Table 4에서 직선관계가 성립하는 제2단계 영역에서 일정한 응력비에서는 온도가 저하될수록, 크랙진전속도 da/dN 가 감소한 반면 응력확대계수 범위 ΔK 이 증가한 것으로 나타났다.

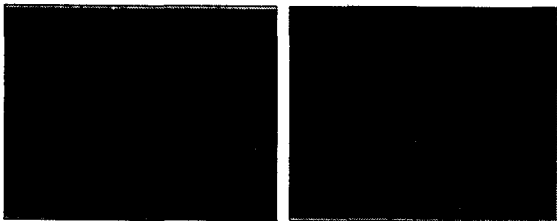
실험 결과 일정한 응력비에서는 온도가 낮아질수록 직선관계가 성립하는 제2단계 영역에서의 da/dN - ΔK 직선의 기울기 즉, 크랙진전지수 m 의 값이 증가한 것으로 나타났으며, 이것은 재료의 파괴가 시작되면 크랙진전속도 da/dN 가 증가하게 되고, 따라서 취성파괴가 일어날 가능성이 높아 질것으로 판단된다.

3.3 파단면의 특성

온도 25°C와, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C 및 -120°C 등에서, 응력비 0.3에 대한 피로크랙진전특성을 ΔK -증가방식으로 시험한 후, 하한계 영역에 도달한 시험편의 크랙선단 영역의 중심부의 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경으로 촬영하여 Fig. 11에 나타내었다.

각 시험편의 파단면에는 피로파단면의 특징이

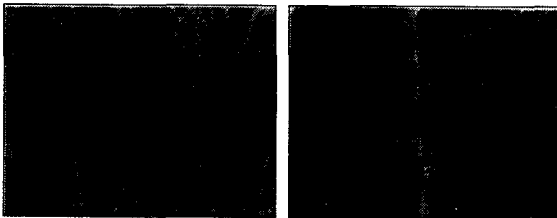
되는 스트라이에이션(striation)이 관찰되었는데, 그 생성은 인장과정에서 크랙선단에 소성변형이 생김에 따라 둔화가 일어나고, 압축과정에서 재예화가 일어나는 둔화-재예화 과정에 의해 형성되는 것으로 반복응력 1사이클당 스트라이에이션 1개가 형성되는 것으로 보이며 각 온도별 스트라이에이션의 크기와 모양은 -80°C , -100°C , -120°C 의 파면상에서 뚜렷한 변화를 보이고 있으며 파면조직상의 크기도 뚜렷한 차이를 나타내어 균열의 붕괴현상에 의해 저온일수록 취성 파괴가 발생하여 의백개(quasi cleavage) 현상을 보이고 있다.



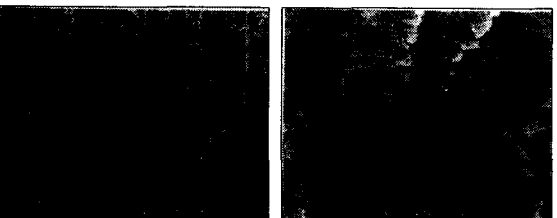
(a) Stress ratio $R=0.3$, Temperature : 25°C



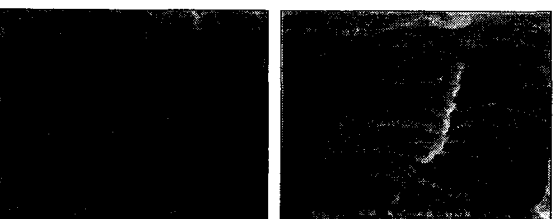
(b) Stress ratio $R=0.3$, Temperature : -30°C



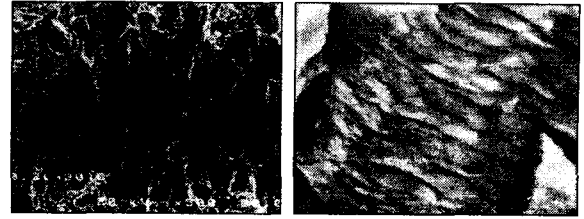
(c) Stress ratio $R=0.3$, Temperature : -60°C



(d) Stress ratio $R=0.3$, Temperature : -80°C



(e) Stress ratio $R=0.3$, Temperature : -100°C



(f) Stress ratio $R=0.3$, Temperature : -120°C
 Fig. 6 Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C , -30°C , -60°C , -80°C , -100°C and -120°C for $R=0.3$

4. 결론

본 연구에서는 SA516-70강판에 대하여 온도 25°C 와 -30°C , -60°C , -80°C , -100°C 및 -120°C 와 응력비 $R=0.3$ 로 유지하여 피로크랙 진전특성에 관한 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일정한 응력비에서 온도가 저하할수록 피로크랙진전 제1단계인 하한계 특성 ΔK_{th} 가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 온도저하에 따른 저온 취성의 영향으로 생각된다.
- 2) 일정한 응력비에서 양대수 직선관계가 성립하는 제2단계 영역에서의 크랙진전속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK , $da/dN - \Delta K$ 관계에서 온도가 저하할수록 크랙진전지수 m 가 증가하였다.
- 3) 일정한 응력비에서 각 온도에 따라 피로크랙진전지수 $m=3.596$ (25°C), 3.659 (-30°C), 3.717 (-60°C), 3.906 (-80°C), 3.950 (-100°C), 4.167 (-120°C)로 증가하였다.
- 4) 상온에서는 파단면상에 검은색의 작은 fretting 산화물이 발생하였으나 온도가 저하할수록 크랙선단의 소성변형생김이 둔화되어 파면조직의 크기가 증가하여 크랙의 개폐에 영향을 미친 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 배성인, 한민구, "파괴역학 실험법", 원창출판사, pp. 8~11, 209, 1995
2. P. C. Paris and F. Erdogan, Tran. of the ASME Ser. D, pp. 528~534, 1963
3. 朴卿東, "原子爐用 低合金鋼의 高溫疲勞 크랙진전 이 와 크랙閉閉口 特性에 關한 研究", 동아대학교 박사학위논문, 1983
4. 김재훈, 기계구조용재료의 피로크랙진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp. 10~16, 1989