

SA516/70강의 저온피로크랙 전파 하한계 특성에 관한 연구

A Study on Fatigue Crack Propagation Threshold Characteristics in SA516/70 Steel at Low Temperature

박경동 · 김정호 · 박형동 · 최병국

K. D. Park, J. H. Kim, H. D. Park and B. K. Choi

Key Words : Crack Propagation(균열전파), Low Temperature(저온), Fatigue(피로), Stress Ratio(응력비), Crack Closure(균열닫힘), Threshold Characteristics(하한계 특성)

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 -10°C, -30°C, -60°C and -80°C with stress ratio of $R=0.1$. In the logarithmic relationship between the fatigue crack propagation rate(da/dN) and stress intensity factor range $4K$, 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.

1. 서론

급속한 산업의 발달로 기계나 강구조물의 파괴사고가 많이 일어나고 있다. 그러나 이러한 구조물을 안전하게 설계를 함에 있어 구조 재가 가지고 있는 이론적 기준치나 안전율을 충분히 고려하였음에도 불구하고, 전혀 예기치 못했던 많은 파괴의 발생이 나타나는 것은 파괴에 따른 불확정한 발생요인 때문이다^{1,2)}. 상온에서 연성을 가지는 재료도 저온에 이르면 취성적 성질을 갖는 것이 보통이며 취성적 거동에서 발생하는 재료의 강도는 재료 고유의 결함인 크랙 및 개재물들의 결함에 큰 영향을 받게 된다^{3,4)}.

실제로 많은 구조물에 재료 고유의 결함, 제조 결함, 응력집중부 또는 용접시 열영향부에 발생하는 결함등이 존재하고 있다.

이러한 결함으로부터 파괴 현상을 실험적 방법으로 해명하기 위해 피로 크랙 전파 특성을 정량적으로 평가하는 것은 대단히 중요하다. 특히 저온에

서 저온 취성으로 인하여 피로 크랙이 급속하게 전파되어 피로 수명이 저하한다⁵⁾.

저온의 범위에서 사용되고 있는 저온 압력 용기, LNG용 탱크, 저장용탱크등 실제 구조물들의 저온 피로 크랙 전파 특성 등을 연구하여 수명의 안전성을 확보하는 것은 대단히 중요하다^{6,7)}.

본 연구에서는 저온 압력 용기, 저장용 탱크, 탑조류등에 사용되는 SA516/70강에 대하여 25°C, -10°C, -30°C, -60°C, -80°C 등의 저온에서 응력비 $R=0.1$ 로 하여 피로 크랙 전파특성과 하한계 특성을 규명하여 피로 수명, 잔여수명 및 구조 건전성 예측 평가에 기여 하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 용접성, 절삭성 및 가공성이 좋은 저온 압력용 기강으로 사용되는 SA516/70압력용기용 재료로 Table 1은 화학적 성분을 나타낸 것이고 Table 2는 기계적 성질을 나타낸 것이다.

접수일 : 2000년 2월 21일

박경동 : 부경대학교 기계공학부

김정호, 박형동 : 부경대학교 대학원

최병국 : 동명대학교

Table 1 Chemical composition of specimen(wt,%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V	Mo	Cb	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

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
390	558	26	71.37

시험편은 CT시험편으로 판두께 15mm이고 채취 방향은 하중방향과 압연방향이 평행인 L-T방향으로 단조한 것이며 밀링, 와이어 커터, 방전 가공 등으로 ASTM E647-95a의 규정에 따라 가공하였다⁸⁾. Fig. 1은 그 형상과 치수를 나타낸 것이다.

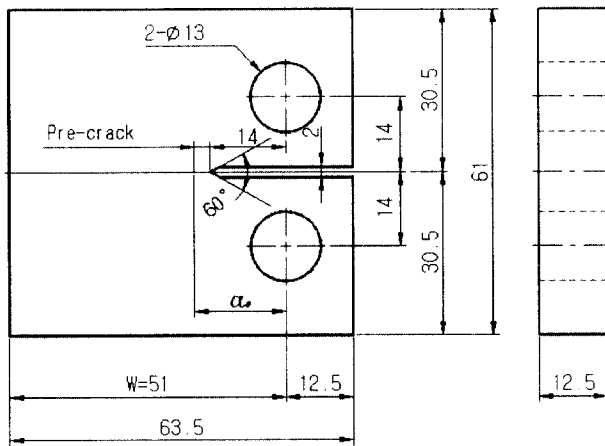


Fig. 1 Configuration of CT-specimen (Unit : mm)

2.2 실험장치

Fig. 2는 본 실험에 사용한 서보 전기 유압식 (INSTRON 8501 : 100 kN)이며, 파괴 역학 파라미터는 시험기에 장착된 컴퓨터에 의하여 산출하였다. 저온장치는 열전대 온도계, 챔버(chamber), 액체 질소 용기, 질소 펌프 등으로 구성하였다.

2.3 실험 방법

실험은 서보전기 유압식 피로 시험기를 사용하여 하중증가 제어 방식으로 주파수 20Hz, 정현파형으로 하였다.

저온 장치로는 전기 유압식 피로 시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 펌프를 연결하여

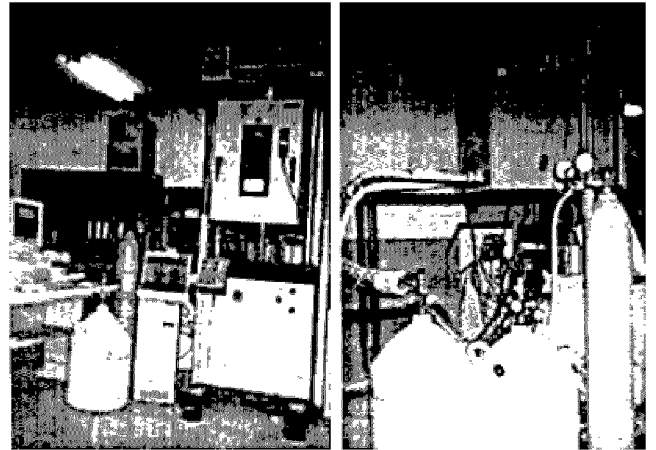


Fig. 2 Apparatus of fatigue test

액체 질소 용기 내의 압력을 0.5kg/mm²내외로 되도록 하여 액체 질소를 챔버내로 유입시켜 저온 환경으로 조성시켰다.

실험중 액체 질소의 감소에 따라 질소펌프의 압력으로 액체 질소의 유입을 정상적으로 밀어 주며 온도 유지는 전자석 밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는 ±1℃로 유지하였고 응력비 R=0.1, 주파수 20Hz, 실험온도는 25℃ -10℃, -30℃, -60℃, -80℃로 하였다. 실험하중은 P=10.2kN으로 일정하게 하였으며 크랙길이는 클립 게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 측정하고 피로크랙 전파시험은 ASTM E647-95a규정⁸⁾에 따라 일정진폭 하중하에서 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 상온과 저온의 피로 크랙 전파 하한계 특성

Figs. 3, 4, 5, 6, 7에 응력비 R=0.1의 경우 실험 온도 25℃, -10℃, -30℃, -60℃, -80℃에서 일정하중의 증가 피로크랙 전파특성인 피로 크랙 전파속도 da/dN와 응력확대계수 범위 ΔK의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다. 그리고 하한계 응력확대계수 ΔK_{th}의 범위는 최소자승법으로 구하였다.

Fig. 3은 상온25℃에서 피로 크랙 전파 속도 da/dN와 응력확대계수 범위 ΔK의 관계를 나타내고 있다. 소성변형이 지배적인 직선구간에서 저 ΔK영역에서는 응력부하시 균열선단에 발생하는 소성역내의 잔류응력이 작용하여 압축하중이 피로크랙전파의 구속력으로 작용해 전파속도에 영향을 준 것으로 하한계 응력확대계수 값은 15.89MPa√m가 된다.

Fig. 4은 -10°C 에서 피로크랙전파속도 da/dN 와 응력확대계수범위 ΔK 의 관계를 나타내었다. 상온 25°C 에서 보다 저온 -10°C 에서는 피로 크랙 전파 거동은 차츰 ΔK 의 증가에 따라 전파구속력이 생겨 저항성이 감소되어 크랙 전파 속도가 지연되는 것으로 생각되며 하한계 응력확대계수 값은 $15.95\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 가되어 상온 25°C 에 비하여 증가된 것으로 나타났다.

Fig. 5은 저온 -30°C 에서 저온피로 크랙전파속도 da/dN 와 응력확대계수 ΔK 의 관계를 그림으로 나타내었다. 온도 25°C , -10°C 에 비하여 피로크랙전파속도의 구동력이 더욱 감소되어 저온피로 크랙 전파 저항력이 작용된 것으로 재료가 가지고 있는 슬립에 따른 전위의 운동이 불규칙적인 상태로 되어 입자를 취약하게 하므로 서서히 피로 강도를 증가시키게 되며 응력확대계수 범위도 증가됨을 알 수 있다. 그리고 하한계 응력확대계수 값도 증가되어 $16.43\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 되었다

Fig. 6에서 저온 -60°C 의 경우 da/dN 와 ΔK 관계를 그림으로 나타내었다. 실험온도가 저온으로 내려 갈수록 크랙전파의 거동은 고 ΔK 영역으로 이동되고 있으며 저온 피로 크랙전파의 구동력은 더욱 감소되어 크랙전파를 지연시키는 것으로 재료물성치 변화에 크게 영향을 주는 것으로 생각되며 하한계 응력확대계수 값은 더욱 증가되어 $16.91\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 가 된다.

Fig. 7은 저온 -80°C 에서 da/dN - ΔK 관계를 나타내고 있으며 2단계 직선관계가 크게 증가된 것으로 나타났다. 따라서 실험분위기 온도가 극저온으로 이동함에 따라 고 ΔK 영역으로 이동되는 경향이 상온에 비하여 현저하게 나타났으며 또한 하한계 부근과 제 2단계 영역에서도 저온 피로크랙전파 속도를 보아도 비슷한 양상으로 나타남을 알 수 있다. 그러므로 온도저하에 따른 저온피로 크랙전파속도에 대한 저항력이 증가된 것으로 판단되며 이 원인은 하한계 응력확대계수 범위에서 온도감소에 의한 저온피로 크랙전파 구속력의 약화가 생기게 되고 하한계 응력확대계수값은 크게 증가되어 $18.25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 가 된다.

따라서 상온보다 저온에서 제 2단계 직선구간에서 취성이 증가되고 인성이 저하됨을 알수있으며 이는 온도의 영향이라고 생각된다.

Fig. 8은 전반적으로 상온 25°C 의 경우 $da/dN=4.425 \times 10^{-4}$ mm/cycle까지 직선관계가 유지되면서 가장 낮은 값을 나타내었고 그 후 ΔK_{th} 의 증가에

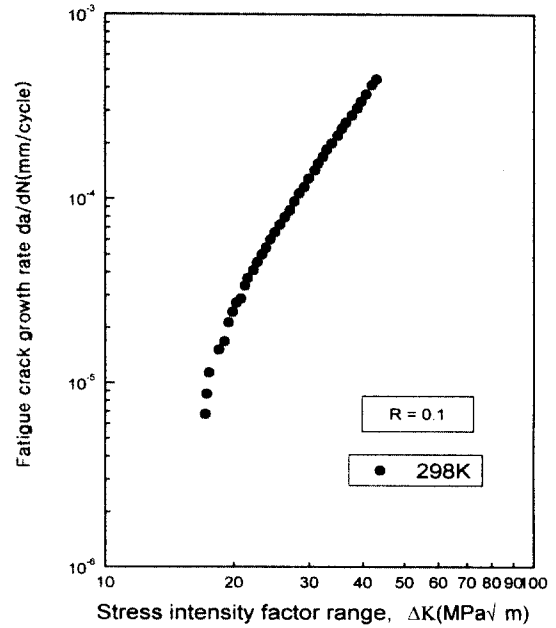


Fig. 3 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(25°C)

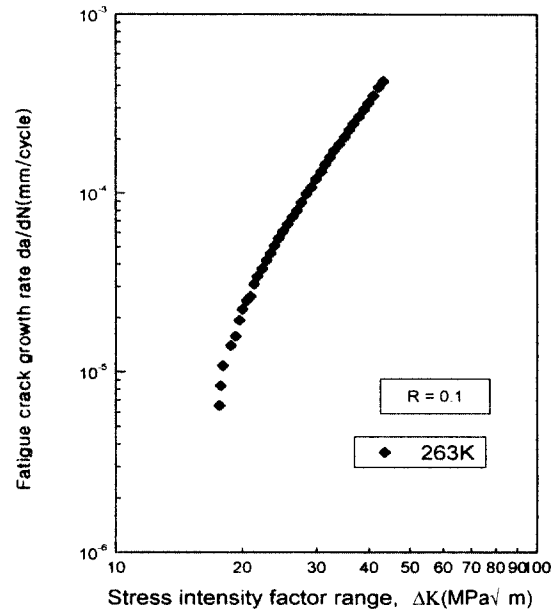


Fig. 4 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-10°C)

따라서 -30°C 에서는 -10°C 보다 약간 낮으나 저온으로 갈수록 비교적 증가하는 경향을 나타내었다.

-10°C 의 경우 $da/dN=4.764 \times 10^{-4}$ mm/cycle

-30°C 의 경우 $da/dN=4.713 \times 10^{-4}$ mm/cycle

-60°C 의 경우 $da/dN=4.813 \times 10^{-4}$ mm/cycle

-80℃의 경우 $da/dN=5.013 \times 10^{-4}$ mm/cycle

까지 양 대수 직선 관계가 성립하며 온도 저하에 따라 직선관계는 상온에 비하여 아래로 나타났다.

따라서, 이 자료에서 상온보다는 저온으로 갈수록 저온취성이 가속되는 현상이 나타나면서 저온 피로강도는 증가하고 인성은 저하되며, 상온과 저온에서 전파 형식은 유사하다. 하한계 응력확대계수 값은 상온 25℃에서 가장 낮은 값을 나타내고 있다.

3.2 크랙전파속도와 크랙길이의 관계

Fig. 9에서 컴플라이언스법을 이용하여 계산한 크랙길이와 da/dN 관계를 그림으로 나타내었다. 상온에서 저온으로 갈수록 선도 상에서 아래쪽으로 나타났으며 온도차이에 따라 거의 비슷한 모양의 선도가 나타났고 크랙전파속도 da/dN 는 상온보다 저온일수록 da/dN 값이 점점 감소됨을 알수 있다^{9,10,11}. 따라서 최종크랙 길이의 비교는 주어진

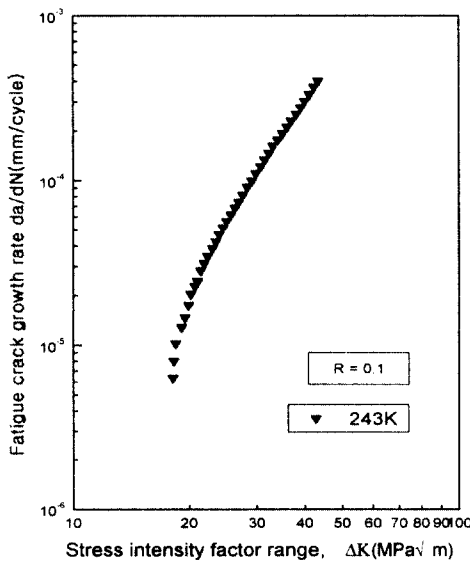


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-30℃)

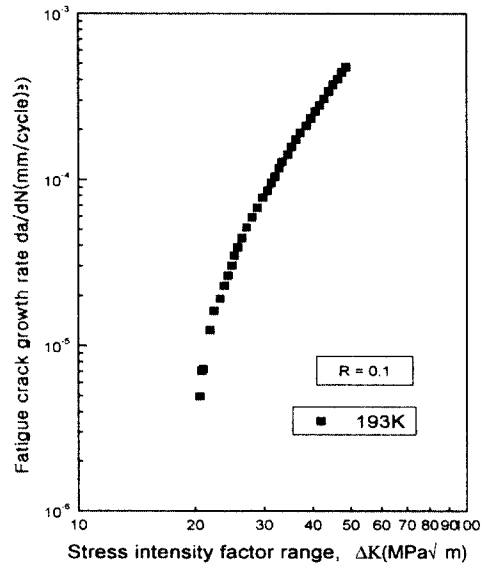


Fig. 7 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-80℃)

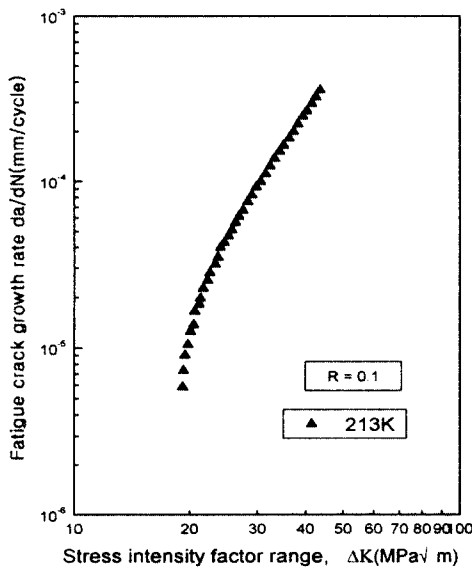


Fig. 6 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-60℃)

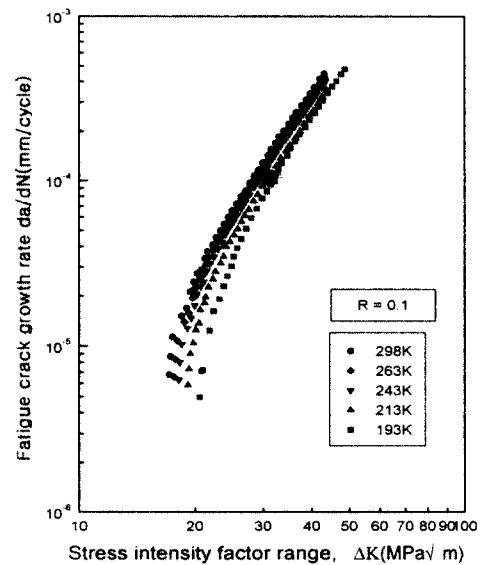


Fig. 8 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

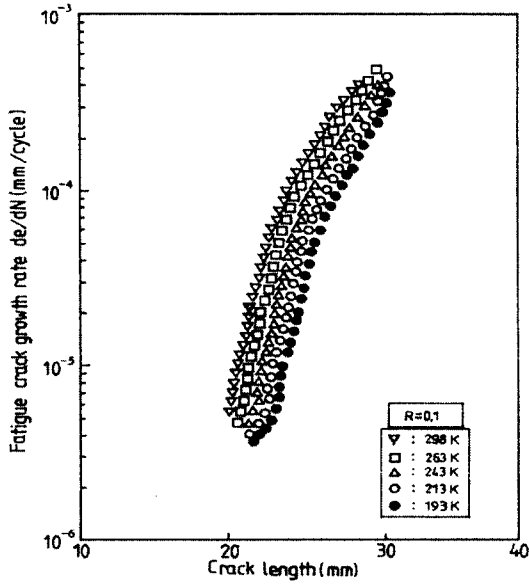


Fig. 9 Relations between da/dN and $acmpl$

재료와 하중에서 실온과 저온에서 큰 차이는 보이지 않았으나, 저온 환경에서 저온강도 증가와 피로크랙 전파 저항성이 상온보다 현저히 떨어짐을 알 수 있다.

3.3 크랙길이와 응력확대계수와와의 관계

Fig. 10은 컴플라이언스법을 이용하여 크랙길이와 응력확대계수 ΔK 관계를 선도로 도시하였다.

온도차에 따라 유사하게 완만한 선도를 나타내지만, 온도가 낮아질수록 후반부 ΔK 의 값이 조금씩 증가하고 있음을 보여주고 있다. 특히 ΔK 가 낮은 영역에서는 저온에서 피로크랙 전파저항성이 상온보다 증가됨을 알 수 있다.

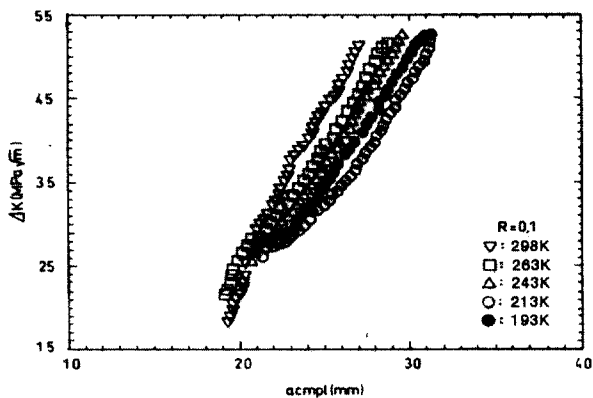


Fig. 10 Relations between ΔK and $acmpl$

이런 현상은 저온환경에서 인장과 압축의 반복으로 인한 피로강도의 증가 및 인성이 저하되는 것으로 생각된다.

3.4 크랙길이와 Cycle관계

Fig. 11은 크랙길이와 cycle관계를 도시하였다. 상온 25°C의 경우 크랙이 성장하다 6×10^5 정도의 사이클에서 급속하게 균열이 성장하는 것을 알 수 있으나 저온 -10°C, -30°C, -60°C, -80°C로 온도가 저하되면서 크랙길이에 비하여 사이클 수가 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

이는 상온과 저온에서 나타나는 온도의 특성으로서 cycle수가 저온 피로크랙 성장에 영향을 미치며 반복과 압축에 따른 저온 피로강도와 인성의 증가로 추정된다^{12,13}. 따라서 저온으로 갈수록 피로파괴강도가 증가하므로 SA517/70강은 저온 압력용기재료써 피로파괴강도의 특성이 우수함을 알 수 있다.

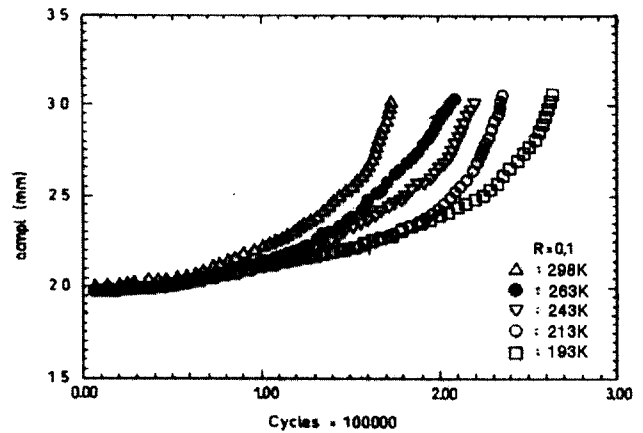


Fig. 11 Relations between $acmpl$ and Cycle

3.5 온도와 재료상수와의 관계

Table 3에서 크랙전파속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 관계로부터 온도에 따라 Paris공식 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 적용하여 구한 재료상수 C 및 m 을 나타내고 있다.

상온에서 저온으로 갈수록 크랙전파속도 da/dN 이 감소하며 재료상수 m 이 증가되고 C 는 감소되는 현상을 보이고 있다^{14,15}. 즉, 온도 저하가 취성 파괴의 원인이 될 수 있으며, 이것은 저온 압력용기 강으로서 저온강도 증가와 인성의 저하로 저온 파괴인성에 영향을 주는 것으로 생각된다¹³.

Table 3 The gradient and constant of Paris equation

Temp. (K)	C	m
298	1.131×10^{-9}	3.524
263	2.565×10^{-10}	3.784
243	1.855×10^{-10}	3.823
213	1.049×10^{-10}	3.917
193	9.448×10^{-11}	3.952

3.6 파단면 관찰

Fig. 12는 응력비 $R=0.1$ 에 대하여 온도 25°C -10°C , -30°C , -60°C 및 -80°C 에 있어서 하한계 응력 확대계수 ΔK_{th} 에 도달한 시험편을 파단하여 두께 중앙 단면에 나타난 크랙 선단부분을 SEM사진으로 관찰한 결과를 나타내고 있다.

파면의 전체 양상은 입내파괴의 형태를 나타내고 있으며 저온으로 갈수록 균열의 분기 형상이 많아지는 것을 알 수 있으며, 또한 의벽개(quasi-cleavage)현상이 관찰되는 것으로 보아 취성 파괴의 영향이 나타남을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 SA516/70강에 대하여 온도 25°C , -10°C , -30°C , -60°C 및 -80°C 등의 저온에서 응력비 $R=0.1$ 의 피로크랙 전파 특성 및 피로 크랙 전파속도를 실측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) da/dN - ΔK 의 직선관계는 상온 25°C 에 있어서 $da/dN = 4.425 \times 10^{-4} \text{mm/cycle}$ 의 영역까지 성립하는데 대하여 저온에서는 고크랙전파 속도 $da/dN = 5.013 \times 10^{-4} \text{mm/cycle}$ 의 영역까지 직선관계가 성립하였다. 그리고 저 ΔK 영역에서 고 ΔK 영역으로 이동되고 있으며 저온취성이 가속되고 있는 것으로 생각된다.
- 2) 상온 25°C 에서 하한계 응력확대계수 값이 $\Delta K_{th} = 15.89 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 나타났고, 저온 -10°C , -30°C , -60°C , -80°C 의 경우 $\Delta K_{th} = 15.95 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $\Delta K_{th} = 16.43 \sqrt{\text{m}}$, $\Delta K_{th} = 16.91 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $\Delta K_{th} = 18.25 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 저온으로 갈수록 ΔK_{th} 값이 증가하였다.
즉, 피로수명의 대부분이 피로균열진전 초기에 소요된다는 것을 감안하면 이는 저온에서 탄성

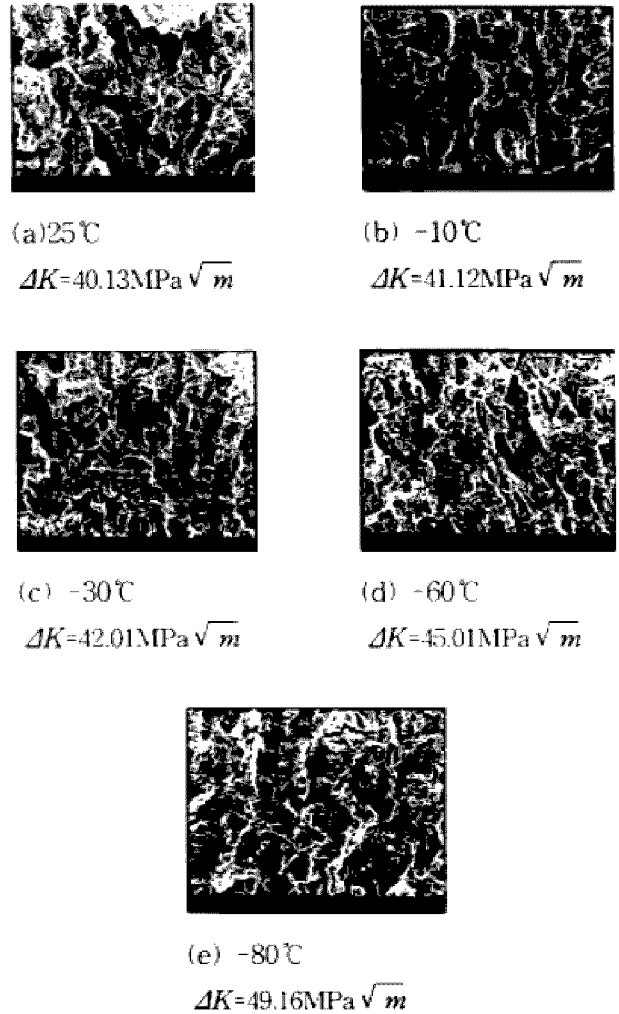


Fig. 12 Fractographs at 25°C , -10°C , -30°C , -60°C and -80°C for $R=0.1$

계수의 상승으로 인한 재료강도의 증가 때문으로 균열 초기피로 저항성이 우수한 것으로 판단된다.

- 3) 크랙길이와 cycle관계에서 상온에서는 낮은 cycle 수에서 급속성장이 일어나고, 저온에서는 사이클수가 상온보다 높은 곳에서 균열의 급속성장이 일어난다. 이 재료의 저온 특성이 반복과 압축에 따른 피로강도의 증가와 인성의 저하에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.
- 4) 온도와 재료상수 관계에서 Paris공식 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 적용하여 구한 재료상수 C , m 은 상온에서 저온으로 갈수록 m 가 증가하고 C 는 감소되는 현상을 보이고 있다. 따라서 온도가 저하될수록 재료상수 m 의 값이 증가하고 균열강도가 감소하기 때문으로 취성재일수록 m 는 커지는 연구결과와 일치하며 온도가 저하될수록 취성파괴의 가속이 나타남을 알 수 있다.

참고문헌

1. 박경동, 차성수, "SA 516-70 압력용기용 강의 저온피로 크랙전파 특성에 관한 연구" 한국동력기계학회지, 제3권 제2호 pp. 51~56, 1999
2. 박경동, 김정호, 정찬기, 하경준, "압력용기용강의 저온 피로크랙 하한계 특성에 관한 연구 (II)" 한국해양공학회지, 제14권 제3호 pp. 78~83, 2000
3. 박경동, 김정호, "SA516/70 강의 저온피로 크랙전파 하한계 특성에 관한 연구" 한국해양공학회, pp. 36~41, 1999
4. 배성인, 한민구, "파괴역학 실험법", 원창출판사, pp. 136~140, 1995
5. 김재훈, "기계구조용재료의 피로크랙 진전거동에 관한 연구", 충남대학교 박사학위논문, pp. 10~16, 1989
6. 박경동, 김정호, "ASTM516/60 강의 저온피로 크랙전파 특성에 관한 연구", 한국해양공학회, pp. 240~245, 2000
7. 장동일, 정경섭, 한민구 공역, "파괴역학", p. 98, 1998
8. ASTM Standard, E647-95a, 1997
9. 박경동, 노태영, 김영대, 김형자, 오명석, 이경렬, 김정호 "압력용기용 강의 저온피로크랙 하한계 특성에 관한 연구" 한국동력기계학회 추계학술대회 논문집 pp. 131~136, 1999
10. 박경동, 노태영, 김영대, 김형자, 손재윤, "압력용기용 A516강의 저온피로크랙전파 특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제13권 제3(1)호, pp. 108~115, 1999
11. 김정호, 이경렬, 박경동, "저온에서 SA516/70 강의 피로균열성장거동에 관한연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(A), pp. 36~41, 1999
12. 박경동, 김정호, 이경렬 "저온에서 SA516/70 강의 피로균열성장 거동에 관한 연구", 대한기계 공학회, pp. 35~41, 1999
13. 최종술, 권숙인, 김송희 편저, "금속강도학", p. 290, 1994
14. Tanaka, K., "Mechanics and Micro-mechanics of Fatigue Crack Propagation." ASTM STP 1020, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 51~183, 1989
15. Kitsunai, Y., "Fatigue Crack Growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low

Temperatures", Fatigue at Low Temperatures, ASTM STP 857, R. I. Stephens, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 274~292, 1985