

ASTM 516-60 강의 저온피로 크랙전파 특성에 관한 연구

박경동 · 김정호
부경대학교 기계공학부

Fatigue Crack Propagation Characteristics in ASTM 516/60 Steel at Low Temperature

KEYOUNG-DONG PARK AND JUNG-HO KIM

School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

Key Words : Crack Propagation 균열전파, Fatigue 피로, Low Temperature 저온, Crack Closure 균열 닫힘, Stress Ratio 응력비

ABSTRACT: Fatigue crack propagation rates and characteristics of the SA516-60 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, -10°C, -30°C, -50°C, and -70°C with stress ratio of R=0.05. The obtained experimental results are as follows:

- 1) In the logarithmic relationship between the fatigue crack propagation rate(da/dN) and stress intensity factor K, the linear relationship was obtained up to $da/dN > 8 \times 10^{-3}$ 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.
- 2) The lower limit stress intensity factor of SA516-60 ΔK_{th} was $15.8 \text{MPa}\sqrt{m}$ and in the case of low temperature -50°C and -70°C, the crack propagation rate da/dN which showed a linear relation, reached rapidly to the ΔK_{th} . As the results, the crack propagation rates of -50°C and -70°C were lower than that of room temperature and according to the testing temperature the rates were decreased rapidly to the ΔK_{th} .
- 3) On the relationship between the stress intensity factor ΔK and the crack propagation cycle, the stress intensity factors of low cycle region was rapidly increased at low temperature, but ΔK was increased rapidly at room temperature of high cycle.
- 4) On the relationship between the fatigue crack propagation rate and cycle, the fatigue crack propagation rate showed higher gradient in the room temperature than the low temperature due to the increment in ductility at low temperature.

1. 서 론

기계나 구조물을 설계함에 있어 재료가 갖는 강판의 기준치나 충분한 안전율을 채택하였음에도 불구하고 전혀 예기치 않는 파괴의 발생은 기존의 강도 계산식을 벗어나 파괴에 대한 불확정한 요인이 있음을 알 수 있다^{1,2)}. 특히 상온에서 연성을 갖는 재료도 저온에서는 취성적 성질을 갖는 것이 보통인데 취성거동에서 나타나는 재료의 강도는 균열이나 개재물 등의 결함에 큰 영향을 받는다^{3,4)}.

실재의 구조물에는 많은 노치결함 등이 존재하고 있다. 이들 결함으로부터 피로크랙전파 특성을 파악하는 것이 대단히 중요하다. 특히 피로균열은 저온에서 급속하게 전파된다⁵⁾. 저온 영역에서 사용되는 저온용기, 저장탱크, 탑조류 등 구조물들의 저온균열성장구조 및 수명을 평가하기 위해서는 저온피로균열 전진특성의 연구가 대단히 중요하다⁶⁾.

본 연구는 저온용기, 탱크, 탑조류 등에 사용되는 SA516-60 강에 대하여 상온(25°C), 10°C, -10°C, -30°C, -50°C, -70°C 등의 20°C간격의 저온에서 응력비 R=0.05로 하여 피로크랙전파

특성과 하한계특성을 규명하여 피로수명, 잔존수명 등을 예측하여 안전설계에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 저온압력용기용 SA516 -60강 재료 용접성 및 절삭성이 좋은 저온용 압력용기 강으로 사용되며, Table 1은 화학적 성분을 나타낸 것이고 Table 2는 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical composition of test piece(wt, %)

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

Table 2 Mechanical properties of test piece

| yield strength (MPa) | Tensile strength(MPa) | Elongation (%) | Hardness (H _{HR}) |
|-------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------------|
| 310 | 459 | 29 | 66.12 |

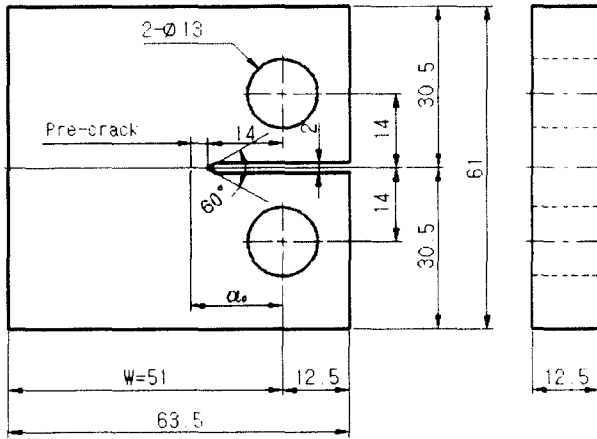


Fig. 1 Configuration of CT-specimen

시험편은 CT 시험편으로, 채취위치는 판두께의 1/4 및 1/3 부분이고 채취방향은 L-T방향 하중방향은 단조방향으로 밀링, 와이어커터, 방전가공 등으로 ASTM E647-81에 따라 제작하였다²⁸⁾. Fig. 1은 그 형상과 치수를 나타낸 것이다.

2.2 실험장치

Fig. 2는 본 실험에 사용한 Servo 유압식INSTRON 8501(10ton)이며, 균열길이의 측정은 상온에서 광학현미경을 사용하였다.

시험장치의 최대 변위량은 50mm이며, 컴퓨터를 이용하여 조작하였다. 저온장치는 챔버, 열전대온도계, 액체질소병, 질소탱크 등으로 구성하였다.



Fig. 2 Apparatus of fatigue test

2.3 시험방법

시험은 INSTRON사제의 10ton의 전기유압식 피로시험기를 사용하여 하중제어, 정현파형으로 반복속도는 20Hz로 하였다.

응력확대계수 K 는 $0.2 \leq a/w < 1.0$ 의 범위에서 다음식에 의하여 나타내었다.

$$K=f(a/w)=\frac{P}{BW^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

$$f(a)=\frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}}(0.886+4.64\alpha-13.32\alpha^2+14.72\alpha^3-5.6\alpha^4) \quad (2)$$

여기서 a 는 크랙길이, W 는 시험편폭, B 는 시험편두께, P 는 하중, $\alpha=a/W$ 를 의미한다.

응력비 R 은 최대응력확대계수 K_{max} 와 최소응력확대계수 K_{min} 의 비 K_{min}/K_{max} 으로 응력비 $R=0.05$ 로 하중범위일정 점증 시험을 실시했으며, 응력확대계수 범위 ΔK 는 $K_{max}-K_{min}$ 으로 했다.

ΔK 의 점증조건은 ASTM규격 E647-81에 따랐으며 점증조건은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\Delta K} \times \frac{d\Delta K}{da} \geq 0.08 \text{ mm}^{-1} \quad (3)$$

da/dN 의 측정범위는

$$\Delta a \geq 0.5 \text{ mm} \quad (4)$$

여기서 Δa 는 균열진과량이다.

da/dN 는 반복시 ΔK 는^{9,10)}

$$\Delta K = \frac{K_{max} - K_{min}}{K_{max}} \quad (K_{min} > 0) \quad (5)$$

$$\Delta K = \frac{K_{max} - K_{min}}{K_{min}} \quad (K_{min} \leq 0)$$

본 실험에서 ΔK 구배는 상기의 조건을 만족하는 $\Delta a = 0.2 \sim 0.45 \text{ mm}$ 로 했다.

시험전에 25℃에서 약 3mm의 예비균열크랙을 넣었다.

저온장치로는 피로시험기에 챔버를 부착하여 액체질소병, 질소탱크에 연결하여 액체질소병내의 압력으로 액체질소를 챔버내로 유입시켜 저온환경을 만든다. 액체질소를 액체질소의 유입이 적은 경우는 질소탱크의 압력으로 밀어주며, 온도유지는 전자식 밸브가 자동으로 작동되어 액체질소의 유입구를 개폐하도록 되어있다.^{11,12)}

온도편차는 ±1℃로 유지하였으며, 실험 응력비 $R=0.05$, 사용주파수 20Hz, 시험온도는 상온(25℃), 10℃, -10℃, -30℃, -50℃, -70℃로 하였다.

시험하중은 점중 방법으로 시험을 하였으며, 크랙길이는 크리프게이지를 이용한 컴프라이언스법으로 측정하여 비치마크법으로 검증하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 저온피로 균열 전파 특성

Fig. 3, 4, 5, 6 및 7에 저온 압력용기용 SA516 -60강에 대하여 응력비 $R=0.05$ 의 경우 시험온도 상온(25°C), 10°C, -30°C, -50°C, -70°C에서의 하중일정의 점중 피로균열 전파특성인 피로 균열 전파속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다.

Fig. 3에는 10°C의 피로균열전파속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 상온 25°C의 경우와 비교하여 나타내었다. 25°C의 경우 $\Delta K_{th}=15.8\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 나타났으나 10°C의 경우 $\Delta K_{th}=17\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 나타났다. 상온 25°C의 경우가 10°C보다 낮은 하한계값을 보였다.

Fig. 4에서 -10°C의 균열전파과정 소성변형 폐구가 지배적인 제 2b단계에 있어서 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선 관계는 $da/dN > 9 \times 10^{-3} \text{mm/cycle}$ 까지 성립하다가 하한계 응력확대계수 $\Delta K_{th}=19\text{MPa}\sqrt{m}$ 에 도달하였다.

Fig. 5의 -30°C의 경우 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는 $da/dN > 2 \times 10^{-4} \text{mm/cycle}$ 까지 성립하다가 하한계 응력확대계수 $\Delta K_{th}=20\text{MPa}\sqrt{m}$ 에 도달하였다.

Fig. 6의 -50°C의 경우 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는 $da/dN > 5 \times 10^{-4} \text{MPa}\sqrt{m}$ 까지 성립하다가 하한계 응력확대계수 ΔK 의 저하에 따라 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 에 도달하였다. $\Delta K_{th}=22\text{MPa}\sqrt{m}$ 이다.

Fig. 7의 -70°C의 경우 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선 관계는 $da/dN > 7 \times 10^{-4} \text{mm/cycle}$ 까지 성립하였고, 하한계 응력확대계수 $\Delta K_{th}=23\text{MPa}\sqrt{m}$ 으로 나타났다.

전체적으로 온도가 저온일수록 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 증가함을 보였다.

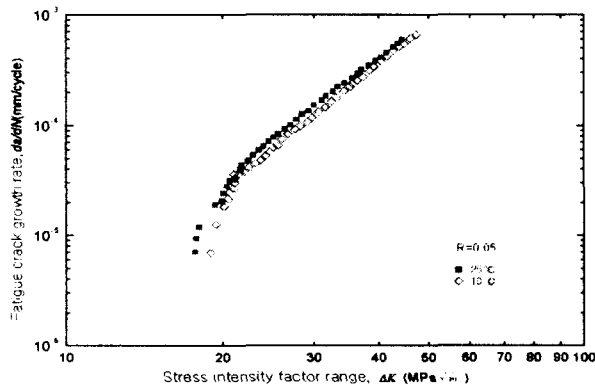


Fig. 3 Relation between da/dN and ΔK (10°C)

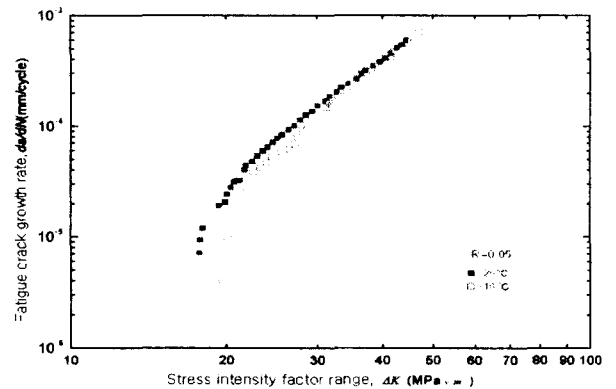


Fig. 4 Relation between da/dN and ΔK (-10°C)

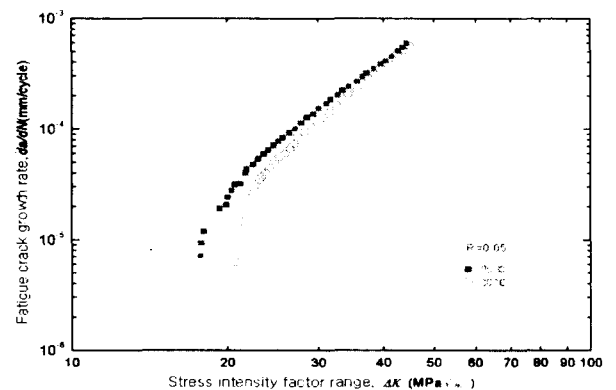


Fig. 5 Relation between da/dN and ΔK (-30°C)

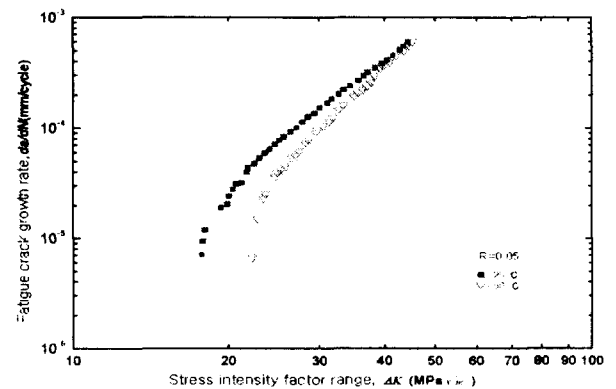


Fig. 6 Relation between da/dN and ΔK (-50°C)

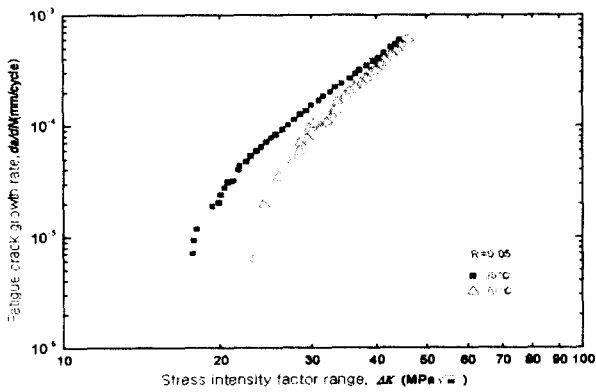


Fig. 7 Relation between da/dN and ΔK (-70°C)

3.2 상온과 저온의 피로균열전파 특성의 비교

Fig. 8에 저온 압력용기용 SA516-60강에 대하여 응력비 $R=0.05$ 로 하여 상온(25°C), 10°C, -10°C, -30°C, -50°C, -70°C에서의 하중일정의 점증시험을 실시한 피로균열전파속도 da/dN 와 응력확대계수 ΔK 관계를 양대수 선상에 나타낸 것이다.

그림에서 상온의 경우 $da/dN > 8 \times 10^{-5}$ mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립하면서 가장 높은 값을 나타내었으며, 그 후 ΔK 의 감소에 따라 하한계에 도달한다. -10°C의 경우 9×10^{-3} mm/cycle, -30°C의 경우 2×10^{-4} mm/cycle, -50°C의 경우 5×10^{-4} mm/cycle, -70°C의 경우 7×10^{-4} mm/cycle 까지 양대수 직선관계가 성립하여 온도의 저하에 따라 상온(25°C)에 비하여 양대수 직선관계가 저하된다. 또 온도에 따른 양대수 직선 관계의 성립구간에서 양대수 직선관계 양상은 동일하게 나타났으며, 온도의 저하에 따라 낮아지는 경향을 나타내었다.

하한계 특성은 상온이 가장 낮은 ΔK_{th} 값을 나타내었고, 온도의 저하에 따라 급격하게 하한계에 도달하였으며 -70°C의 경우는 다른 온도에 비하여 높은 하한계를 나타내었다. 온도의 저하에 따라 저 da/dN - ΔK 영역까지 양대수 직선관계가 성립하다가 급격하게 감소하여 하한계에 도달하였으며, -70°C의 경우는 저온취성 관계 및 산화물의 영향으로 생각된다.

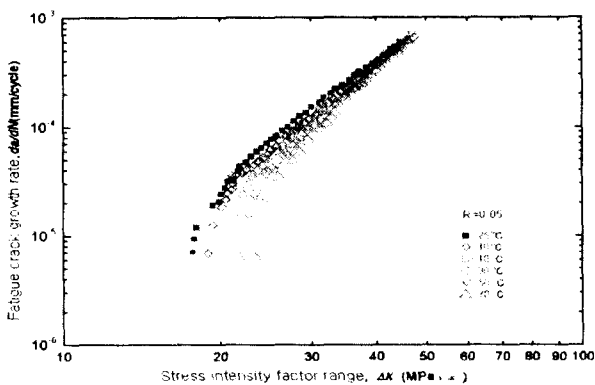


Fig. 8 Relation between da/dN and ΔK

3.3 응력확대계수와 크랙길이의 관계

Fig. 9은 컴플라이언스 법으로 계산된 Cycle의 변화에 대한 응력확대계수 ΔK 관계를 양대수 선도에 나타낸 것이다. 온도차에 따른 변화가 거의 없는 완만한 경사의 얇은 호선을 나타내지만, 온도가 낮을수록 후반부의 ΔK 값이 조금씩 작아짐을 볼 수 있다. 이는 인장과 압축의 반복으로 소성적 작용에 의한 취성이 증가하기 때문으로 판단된다.

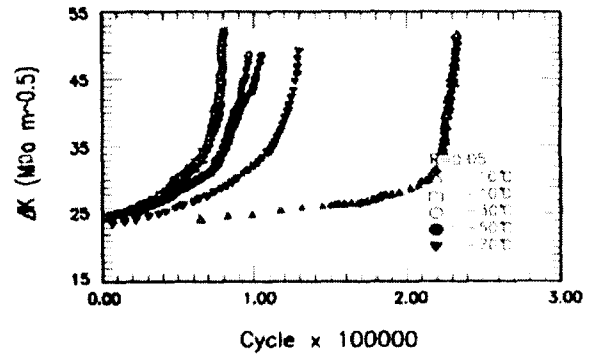


Fig. 9 Relation between ΔK and cycle

3.4 균열진전속도와 크랙길이의 관계

Fig. 10는 컴플라이언스법으로 계산된 크랙길이의 변화에 대한 da/dN 관계를 양대수 선도로 나타낸 것이다. 온도차에 따라 모두 같은 경사도를 나타내지만, 낮은 온도일수록 균열진전속도 da/dN 가 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 저온에서의 취성이 증가하기 때문으로 추정된다.

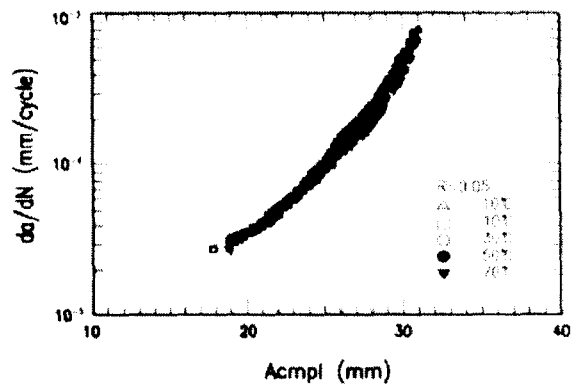


Fig. 10 Relation between da/dN and $Acmpl$

3.5 ΔK 와 사이클의 관계

Fig. 11은 응력확대계수와 사이클관계를 나타내었다. 10°C의 경우, 사이클의 감소에 따른 ΔK 의 감소가 완만하게 서서히 감소하였으나, 온도의 저하에 따라 급격하게 감소함을 나타냈다.

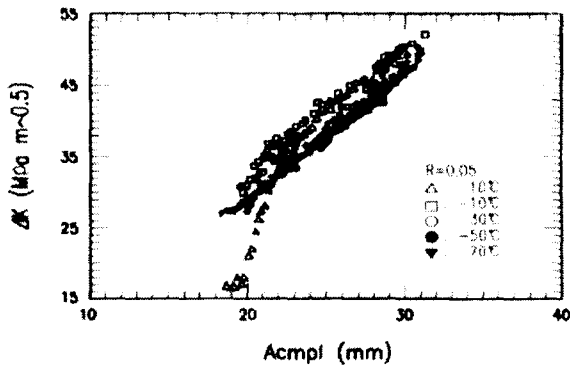


Fig. 11 ΔK and Acmpl relation

최종 ΔK 의 범위는 거의 일정하게 나타났으나 온도의 저하에 따라 조금 증가하는 경향을 나타내었으며, ΔK 와 사이클의 경향은 동일하게 나타났다.

3.6 균열진전속도와 사이클의 관계

사이클의 변화에 대한 균열진전속도 da/dN 의 양대수 선도상의 관계는 높은 온도에서는 급한 경사를 보이는 얇은 소성이던 것이 온도가 낮아질수록 낮은 경사로 시작하는 깊은 호선을 나타냄을 볼 수 있다. 이는 저온에서의 취성의 증가로 피로하중에 대한 저항이 크게 나타남을 알 수 있다.

3.7 파단면 특성

Fig. 12는 응력비 $R=0.05$ 에 대하여 10°C , -10°C , -30°C , -50°C 및 -70°C 의 온도에서 하중일정 ΔK 점중시험을 한 시험편의 거시적 파단면을 나타내었다. 10°C 의 파단면상에는 흑색의 프레팅(fretting)산화물이 부착하고 있음을 알 수 있으며 상온에서는 이 프레팅산화물의 영향에 의하여 양대수 직선관계를 이탈하여 하한계 응력확대 계수에 도달한 것으로 생각된다. 따라서 구조물의 피로수명, 잔존수명의 평가에 있어서 산화물의 부착상황 및 내용에 따른 특성들은 중요한 것으로 생각되어진다.

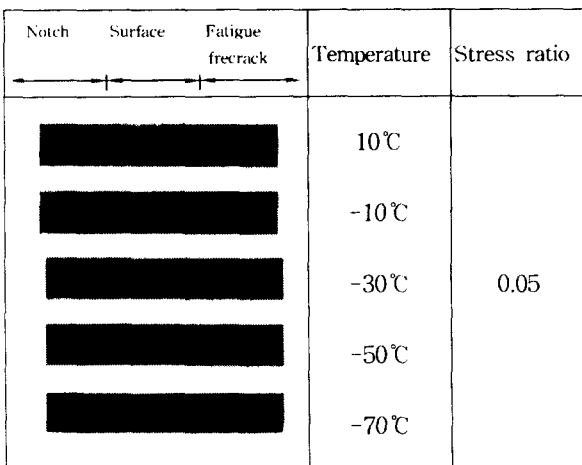


Fig. 12 Fatigue fracture surface of specimen

Fig. 13은 응력비 $R=0.05$ 에 대하여 10°C , -10°C , -30°C , -50°C , -70°C 에 있어서 하한계 응력확대 계수 ΔK_{th} 에 달한 시험편을 절단하여 중앙단면에 있어서 크랙선단부분을 주사식 전자현미경으로 관찰한 결과를 나타내었다. 산화물이 주로 부착하고 있는 영역은 da/dN 의 양대수 직선관계에서 이탈하는 범위에 해당된다. 소성변형폐구가 지배적인 것으로 생각되는 제 2b 단계에서 크랙전파기구는 크랙선단 소성변형에 의한 것으로 생각된다. 저온의 경우는 온도의 저하에 따라 취성파괴의 영향이 큰 것으로 생각된다.

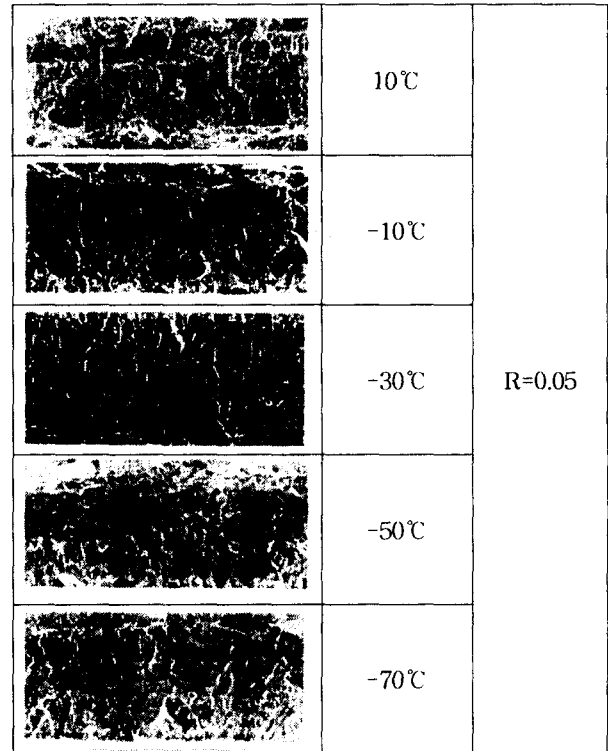


Fig. 13 Fractographs of fatigue fracture surface($\times 200$)

4. 결 론

저온 용기용 SA516-60강에 대하여 상온(25°C), -10°C , -30°C , -50°C , -70°C 의 저온분위기에 있어서 응력비 $R=0.05$ 의 피로크랙전파속도 및 피로크랙전파특성을 실측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) da/dN - ΔK 의 양대수 직선관계는 상온(25°C)에 있어서 $da/dN > 8 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 의 영역에 성립하는데 대하여 저온환경은 저 크랙전파속도 영역까지 양대수 직선관계가 성립하였다.
- 2) 하한계응력확대 계수 $\Delta K_{th} = 15.8 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 였으나, 저온의 경우 양대수 직선관계에서 갑자기 하한계에 도달함으로써 상온보다 크게 나타났으며 온도의 감소에 따라 급하게 하한계에 도달함을 알았다.
- 3) 각 온도의 양대수 직선관계가 성립하는 구간은 소성유기크랙의 영향을 받고 ΔK_{th} 에 도달할 때는 상온의 경우 산화

물 영향을 받았으나, 저온의 경우 저온인성관계의 영향에 기인됨을 알았다.

- 4) 응력확대계수 ΔK 와 사이클관계에서 저온의 경우, 저사이클에서 급격하게 응력확대계수가 증가하였으나 상온의 경우 점진적인 사이클의 증가에 따라 증가하다가 ΔK 가 증가함을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 朴卿東, 原宇庶川 低合金鋼 高周波勞 크랙傳波와 크랙開閉 II 特性에 關한 研究, 동아대학교 박사학위 논문, 1983
2. 장동일의 2명, 파괴역학, 원창출판사, pp.85~96, 119, 1992
3. 禹興植 의 2명, 재료파괴공학, 서울, 보성문화사, pp.147-170, 265-273, 1993
4. 日本機械學會基準 彈塑性 破壞引性 J 試驗 方法, JSME S 001, 1981
5. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM : E647-93
6. Y. Kitsunai, Fatigue Crack growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperature, pp.280-290, 1991
7. 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp.10-16, 1989
8. 小林英男, 破壞力學, 公立出版株式會社, pp.63, 8~9, 133, 1993
9. 최종술, 권숙인, 김송희 편저, "금속강도학". p. 290, 1994
10. Tanaka, K., "Mechanics and Micromechanics of Fatigue Crack Propagation." ASTM STP 1020, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 51~183, 1989.
11. Y. Kitsunai, "Fatigue Crack growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperature", pp. 280~290, 1991
12. 小林英男, "破壞力學", 共立出版株式會社, pp. 57~63, 131~135, 1993