

# SA 516-70 압력용기용 강판의 저온피로 균열 진전 특성에 관한 연구

(A study on the Fatigal Crack Grow for SA 516-70 steel at low temperature )

박 경 동 ( 부경대 ) , 차 상 수 ( 부경대 대학원 )  
 Park, Kyung-dong ( Pukyung National Univ. )  
 cha, Sugn-su ( Pukyung National Univ. )

**Key words:** crack propagaion, fatigue, low temperature, crack colsure, stress ratio

**Abstract:** Fatigue crack propagaion rates and characteristics of the SA516-70 steel which is used for the low temperature pressure vessels, were studied in the room temperature of 1 0°C and low temperature ranges of -10°C, -30°C, -50°C, -70°C with stress ratio of R=0.05.

## 1. 서론

최근 기계나 구조물이 시대의 요구에 따라 점차 대형화되고 그 사용 환경도 해를 거듭할수록 다양화되는 경향을 보인다. 구조물의 대형화는 제조과정중에 부재내에서 균열의 잠재 가능성을 크게 하며 까다로운 사용조건은 사용중에 균열의 발생 빈도를 높이는 결과를 가져온다.

재료역학적으로 재료가 갖는 기계적 강도 기준치나 충분한 안전율을 고려하였음에도 불구하고 예기치 않은 지하중에서의 파괴 및 파손이 발생된 예가 보고되고 있으며 철구조물의 경우 이러한 파손 사고 예의 80~90% 이상이 직,간접적으로 피로현상에 기인되고 있다. 이러한 사정으로 인하여 피로현상이 중요시되고 있다.

실제의 압력용기 및 관련 구조물 등은 상온이나 저온에서도 고압을 유지한 채 장기간 사용되는 경우가 많으며 사용중 외적환경의 부하조건에 의해 발생된 결함으로부터 피로균열진전 및 잔존수명을 평가하기 위해서는 균열진전의 특성을 파악하는 것이 대단히 중요하다.

본 연구는 상온 및 저온의 압력용기용 탄소강판(SA516-70)에 대하여 상온 10°C와 -10°C, -30°C, -50°C 및 -70°C의 환경에서 정(+ )방향 사인

파형 반복하중을 진동 20 cycle/sec, 응력비 R=0.05로 하여 피로 크랙 진전 특성과 하한계 특성을 규명하여 피로수명, 잔존수명등을 예측하여 안전설계에 기여하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 SA516-70재로 용접성 및 절삭성이 좋은 저온용 압력용기 강으로

사용되며 Table 1은 화학적 성분을 나타낸 것이고 Table 2은 기계적 성분을 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical composition of test piece (wet,%)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	Ni	Mo	Fe
0.16	0.22	0.011	0.008	0.001	0.36	0.07	0.20	0.027	0.097

Table 2. Mechanical Properties of test piece

Yield strength kg/mm <sup>2</sup> (Mpa)	Tensile strength kg/mm <sup>2</sup> (Mpa)	Elongation (%)	Hardness (Hs)
57 (390)	81 (558)	26	71.37

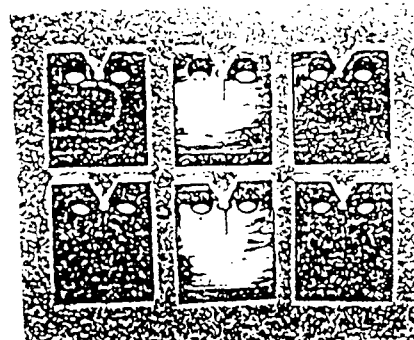
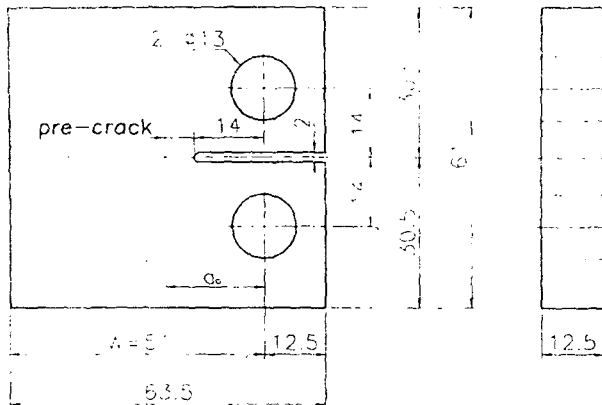


Fig.1 Compact-Specimen



시험편은 compact 시험편으로 위치는 원 두께의 1/4 및 1/3 부분이고 방향은 1-T방향 하중방향은 단조방향으로 밀링, 와이어커팅, 방전 가공등으로 ASTM E 647-81에 따라 제작하였다. Fig.1 및 2는 그 형상과 치수를 나타낸 것이다.

### 2.2 실험장치

Fig.3은 본 실험에 사용한 Servo 유압식 INSTRON8501(10ton)이며, 균열길이의 측정용 상온에서 광학현미경을 사용하였다. 시험장치의 최대 변위량은 50mm이며 컴퓨터를 이용하여 조작하였다. 저온장치는 챔버, 열전대온도계, 액체질소병, 질소탱크 등으로 구성하였다.

### 2.3 시험방법

시험은 INSTRON사제의 10ton급 전기유압식 피로시험기를 사용하여 하중제어, 정현파형으로 반복 속도는 20Hz로 했다.

응력확대계수  $K$ 는  $0.2 \leq a/w < 0.1$ 의 범위에서 다음 식에 의하여 나타내었다.

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

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



Fig.3 Apparatus of fatigue test

여기서,  $a$ 는 균열길이,  $W$ 는 시험편폭,  $B$ 는 시험편두께,  $P$ 는 하중,  $a=a/w$ 를 의미한다.

응력비  $R$ 는 최대응력/최소응력  $K_{max}$ 과 최소응력/최대응력  $K_{min}$ 의 비  $K_{min}/K_{max}$ 으로 응력비  $R=0.05$ 로 하중범위인정 검증시험을 실시했으며 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 는  $K_{max}-K_{min}$ 으로 했다.  $\Delta K$ 의 검증조건은 ASTM규격 E647-81에 따랐다.

본 실험에서  $\Delta K$ 구배는 상기의 조건을 만족하는  $\Delta a = 0.25 \sim 0.45mm$ 로 했다.

시험전에 10°C에서 약3mm 크랙을 넣었다. 저온 장치로는 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 폐쇄하도록 되어있다.

온도편차는  $\pm 1^\circ C$ 로 유지하였으며 실험응력비  $R=0.005$ , 사용주파수 20Hz, 시험온도는 상온(10°C), -10°C, -30°C, -50°C, -70°C로 하였다.

시험하중은  $\Delta P=10.2KN$ 으로 하중일정 시험을 하였으며 크랙길이는 크리프게이지를 이용한 컴프리아인스법으로 측정하여 비치마크법으로 검증하였다. 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 상온 및 저온의 피로 균열전파 특성 비교

Fig.4에 저온 압력 용기용 SA516-70강에 대하여 응력비  $R=0.05$ 로 하여 온도 상온(10°C), -10°C, -30°C, -50°C, -70°C에서의 하중일정의 검증시험을 실시한 피로 균열전파 속도  $da/dN$ 와 응력확대 계수  $\Delta K$ 관계를 양대수 선상에 나타낸 것이다.

그림에서 상온의 경우  $da/dN > 8 \times 10^{-3} mm/cycle$ 까지 양대수 직선관계가 성립하면서 가장 높은 값을 나타내었으며 그 후  $\Delta K$ 의 감소에 따라 하한계에 도달하였다.

-10°C의 경우  $9 \times 10^{-3} mm/cycle$ , -30°C의 경우  $2 \times 10^{-4} mm/cycle$ , -50°C의 경우  $5 \times 10^{-4} mm/cycle$ , -70°C의 경우  $7 \times 10^{-4} mm/cycle$  까지 양대수 직선관계가 성립하여 온도의 지하에 따라 상온(10°C)에 비하여 양대수 직선관계가 저하되었다.

또 온도에 따라 양대수 직선 성립구간의 양대수 직선관계 양상은 동일하게 나타났으며 온도의 저하에 따라 낮아지는 경향을 나타내었다.

하한계 특성은 상온이 가장 낮은  $\Delta K_{th}$  값을 나타내었고 온도의 저하에 따라 급격하게 하한계에 도달하였으며  $-70^{\circ}\text{C}$ 의 경우는 하한계가 나타나지 않았다. 온도의 저하에 따라 저  $da/dN$ - $\Delta K$ 영역까지 양대수 직선관계가 성립하다가 급격하게 감소하여 하한계에 도달하였으며,  $-70^{\circ}\text{C}$ 의 경우는 저온취성 관계 및 산화물의 영향으로 생각된다.

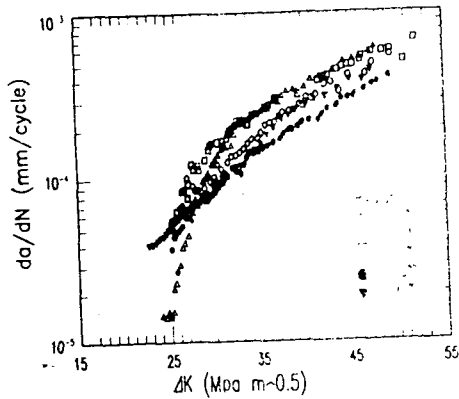


Fig.4  $da/dN$ - $\Delta K$  Relation

### 3.2 균열진전속도와 cycle 관계

Fig.5은 cycle의 변화에 대한 균열진전속도  $da/dN$  값의 관계를 양대수 선도상에 나타낸 것이다. 상위 온도에서는 급한 경사를 보이는 얇은 소성이던 것이 온도가 낮아질수록 낮은 경사로 시작하는 깊은 호선을 나타냄을 볼 수 있다. 이는 저온에서의 인성이나 취성의 증가로 피로하중에 대한 저항이 크게 나타남을 알 수 있다.

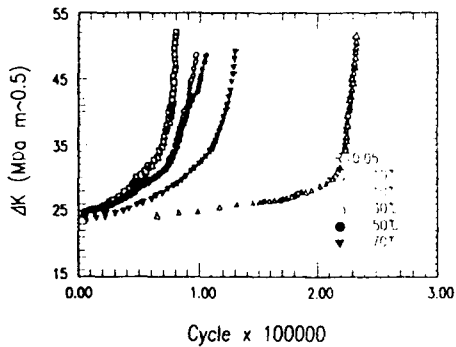


Fig.5  $da/dN$ -Cycle Relation

### 3.3 균열진전속도와 크랙길이의 관계

Fig.6은 검플라이언스 법으로 계산된 크랙길이의 변화에 대한  $da/dN$  관계를 양대수 선도상에 나타낸 것이다. 온도차에 따라 모두 같은 경사도를 나타내지만 낮은 온도일수록 균열진전속도  $da/dN$ 가 적은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 저온에서의 인성이 증가하기 때문으로 추정된다.

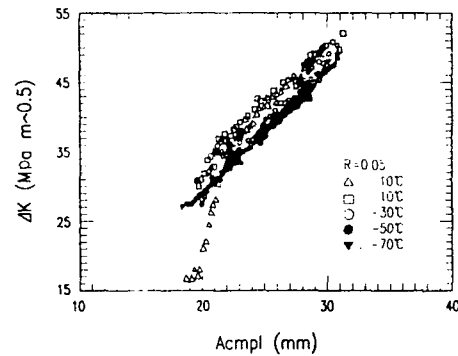


Fig.6  $da/dN$  - Acmpl Relation

### 3.4 파단면 특성

Fig.7은 응력비  $R=0.05$ 에 대하여 상온( $10^{\circ}\text{C}$ ),  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$ ,  $-70^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 하중일정  $\Delta K$  점증시험을 한 시험편의 거시적 파단면을 나타내었다.

상온의 파단면상에는 흑색의 Fretting 산화물이 부착하고 있음을 알 수 있으며 상온에서는 이 Fretting 산화물의 영향에 의하여 양대수 직선관계를 이탈하여 하한계 응력 확대 계수에 도달한 것으로 생각된다.

따라서 구조물의 피로수명, 잔존수명의 평가에 있어서 산화물의 부착상황 및 내용에 따른 특성들은 중요한 것으로 생각되어진다.

산화물이 주로 부착하고 있는 영역은 균열진전속도  $da/dN$ 의 양대수 직선관계에서 이탈하는 범위에 해당된다.

소성변형폐구가 지배적인 것으로 생각되는 제 2b 단계에서 크랙진파기구는 크랙선단 소성변형에 의한 것으로 생각된다. 저온의 경우는 온도의 저하에 따라 취성파괴의 영향이 큰 것으로 생각된다. Fig.8은 응력비  $R=0.05$ 에 대하여 상온( $10^{\circ}\text{C}$ ),  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$ ,  $-70^{\circ}\text{C}$ 에 있어서 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 에 달한 시험편을 절단하여 두께 중앙단면에 있어서 크랙선단부분을 주사식 전자현미경으로 관찰한 결과를 나타내었다.

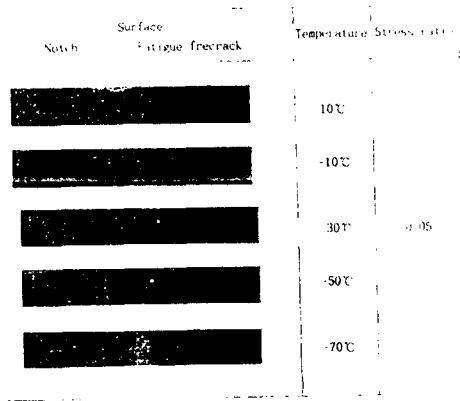


Fig.7 Fatigue fractured surface of specimen

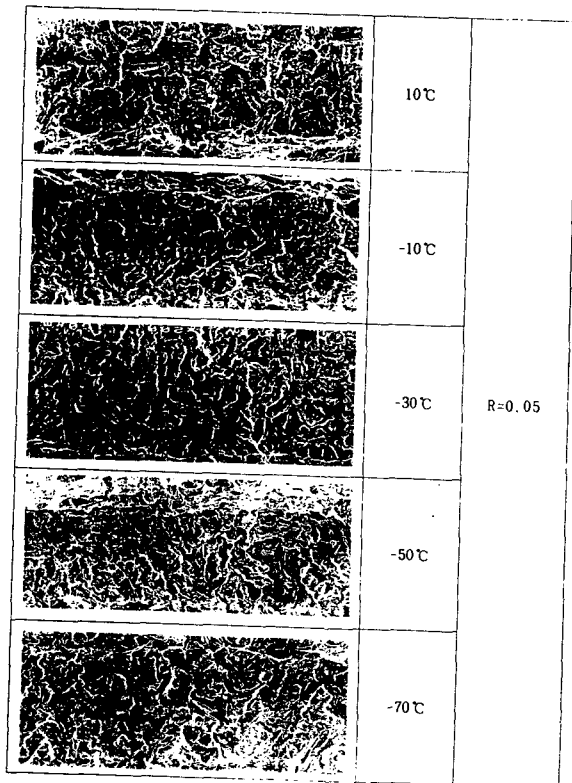


Fig.8 Fractographs showing typical striations formed at 10°C

#### 4. 결론

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

1)  $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는 상온(10°C)에 있어서  $da/dN > 8 \times 10^{-3} \text{mm/cycle}$ 의 영역에 성립하는데 대하여 저온환경은 저 크랙전파속도 영역까지 양대수 직선관계가 성립하였다.

2) 하한계응력확대계수  $\Delta K_{th} = 23 \text{Mpa}\sqrt{\text{m}}$  였으나 저온의 경우 양대수 직선관계에서 갑자기 하한계에 도달함으로써 상온보다 크게 나타났으며 온도의 감소에 따라 급하게 하한계에 도달함을 알았다.

3) 각온도의 양대수 직선관계가 성립하는 구간은 소성유기크랙의 영향을 받고  $\Delta K_{th}$ 에 도달할때는 상온의 경우 산화물 영향을 받았으나 저온의 경우 저온인성관계의 영향에 기인됨을 알았다.

4) 응력확대계수  $\Delta K$ 와 cycle관계에서 저온의 경우 저cycle에서 급격하게 응력확대계수가 증가하였으나 상온의 경우 점지적인 cycle의 증가에 따라 증가하다가  $\Delta K$ 가 증가함을 나타내었다.

#### 參 考 文 獻

- 1) P.C.Paris and F Erdogan:TRANS ASME Ser. D,85 (1963) P528
- 2) 小林英男, 日本金屬學會,5(1982) P329
- 3) 小林英男, 材料科學,17.(1981) P282
- 4) Bucci, R. J, Clark, W.G. ASTM STP, 513 (1972) P177-178
- 5) Elber,W., ASTM STP, 486, (1971), P 230-142
- 6) Stewart, A.T., 뚜홍,Frature Mech., 13, 1980, P 463
- 7) ASTM Standard, E7\647-81,(1981)
- 8) ASTM Committee E-24, ASTM STP 738, (1981), P340