

<論 文>

高溫下 304스테인리스鋼의 작은 表面龜裂의 成長舉動에 관한 研究

서 창 민\* · 김 영 호\*\*

(1989년 6월 7일 접수)

A Study on Growth Behavior of Small Fatigue Crack in 304 Stainless Steel at Elevated Temperatures

Chang-Min Suh and Young-Ho Kim

Key Words : Elevated Temperature(고 온), Fatigue Life(피로수명), Small Crack Growth Behavior(작은 균열 성장거동), S-N<sub>f</sub> Curve(S-N<sub>f</sub> 곡선)

Abstract

Rotating bending fatigue tests of an austenitic steel 304 were performed at various temperatures such as room temperature, 538° and 593°C. The plastic replica method was also applied in order to estimate the fatigue life on the basis of serial observation of small fatigue crack initiation and growth on the pit specimen surface. The fatigue crack growth behavior of 304 stainless steel was investigated within the frame work of elastic-plastic fracture mechanics within a narrow scatterband in spite of different stress levels at elevated temperature as at room temperature. The growth law of small surface crack is determined uniquely by the term  $\Delta\sigma^n a$  where  $\Delta\sigma$  is the stress amplitude,  $a$  is the crack length, and  $n$  is a constant. It is found that the small crack growth behavior is basically equivalent to the S-N<sub>f</sub> relationship, where S and N<sub>f</sub> are stress and number of cycles to failure, and the fatigue life prediction is in good agreement with the experimental results.

1. 서 론

원자로를 위시한 압력용기, 증기 터빈 또는 발전기용 로우터 등의 안전성의 요구가 나날이 증대되고 있는 현 시점에서, 각 부재가 고온, 고압 또는 고응력하에서 사용될 경우에 이들 재료들의 파괴거동에 관한 연구는 이것들의 강도설계, 안전성 확립 및 정확한 수명예측 등을 위하여 중요한 과제로 대두되었다. 따라서 고인성재료에 존재하는 작은 표면 피로 균열에 관한 연구가 중요한 연구대상이 되고 있다<sup>(1~8)</sup>.

상온하에서의 관통피로균열의 성장거동은 응력확대계수범위  $\Delta K$ 로 정리되는 것이 잘 알려져 있다. 그러나 고온하에서의 작은 표면 균열의 거동에 관한 문제는 응력확대계수범위  $\Delta K$ 로 체계적인 정리가 불가능한 경우가 많으며, 이것에 관한 연구의 공학적인 중요성에도 불구하고 연구가 비교적 적고 불명확한 점이 아직 많이 남아 있다<sup>(9)</sup>.

Rice<sup>(10)</sup>에 의하여 제안된 J적분은 역학적 모델로써의 정의는 명확하지만, 직접 측정하기 어려운 양이며 최근李동<sup>(11)</sup>의 Caustics방법에 의해 직접 측정 가능한 방법도 제안되고 있다. 그러나 이 방법은 재료의 응력-변형률 관계에 의존하는 등의 관점에서 볼 때 응력확대계수에 비하여 복잡한 양이다. 따라서 Kitagawa 등<sup>(12,13)</sup>은 히스테리시스 곡선에

\*정회원, 경북대학교 공과대학 기계공학과  
\*\*정회원, 부산대학교 공과대학 생산기계공학과

서 안정된 반복 변형률 값  $\Delta\epsilon$ 을 사용한 반복변형률을 확대계수범위  $\Delta K\epsilon$ 을 제안하였다. 즉  $\Delta K\epsilon$ 을 사용하면  $\Delta K$ 로 실험결과를 정리할 때 생긴 응력의존성이 없어지므로  $\Delta K\epsilon$ 은 작은 피로균열의 전파에 대한 통일적 정리가 가능한 역학적 매개변수로 인식되고 있다.

그러나 상기의  $\Delta J$ ,  $\Delta K\epsilon$  등의 역학적 매개변수는 상당히 유용하나 피로시험과정 중 정확하게 응력-변형률 특성을 측정하는 것은 쉽지 않다. 특히 고온과 부식성 조건하에서는 이러한 특성의 측정이 매우 어려운 경우가 많으므로 탄소성 파괴거동을 파악하기 힘들다. 따라서 이러한 여러 가지 문제점들을 해결하기 위하여 많은 연구가 계속되고 있다<sup>(14)</sup>.

본 연구에서는 측정기술의 간편성과 실용적인 측면에서 유익하다고 생각되어지는 역학적 매개변수  $\Delta\sigma^n a$  [ $\sigma$ : 공칭응력  $n$ : 지수  $a$ : 균열길이]를 도입하여 탄소성하의 작은 피로 균열성장법칙에의 통일적 취급의 가능성을 검토해 보고자 하였다.

이 방법은 Frost<sup>(15)</sup>에 의하여 처음 실험적으로 적용되었고, 그 후 Waering<sup>(16)</sup>, Nisitani<sup>(17)</sup> 등에 의하여 상온하의 피로 균열에 대하여 그 유용성이 일부 입증되었다.

본 연구에서는 고온기기의 구조용 부재로 널리 사용되고 있는 304스테인리스강을 선택하여 상온, 538°C(1000°F) 및 593°C(1100°F) 고온하의 작은 표면노치 시험편에서 발생한 표면 피로 균열의 성장거동을 레플리카법에 의하여 상세히 관찰측정하여 파괴역학적으로 해석 연구하고자 한다. 즉 피로균열의 성장특성을  $\Delta\sigma^n a$ 의 매개변수를 도입하여 정량적으로 평가하고, 수명예측을 실시하여 그 유용성을 비교검토하였다. 또한 피로균열의 성장에 관한 실험결과 자료들을 PC를 이용하여 전산화하고 도식화함으로써 파괴역학적 설계에 유용한 기초적 자료를 제시하고자 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편 재료는 고속증식형 원자로(FBR) 및 고온기기에 널리 사용되는 직경 13 mm의 열간압연환봉을 1100°C에서 고용화처리하여 급냉한 스테인리스 304강으로써 그 화학적 성분과 기계적 성질을 각각 Table 1 및 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition(weight percent)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.05	0.47	1.82	0.034	0.014	—	8.15	18.7

Table 2 Mechanical properties

Temperature	Yield point 0.2% offset MPa	Tensile Strength MPa	Elongation %	Reduction of area %	Hardness Hv
R.T.	343.3	627.8	54	74	197
538°C	208.0	505.2	40.8	66.5	—
593°C	191.3	479.7	39.2	63.8	—



Fig. 1 Microstructure of type 304 stainless steel

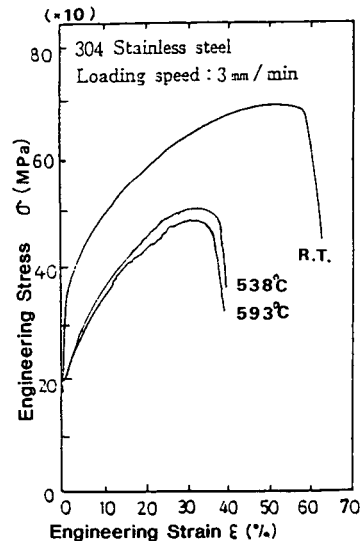


Fig. 2 Relation between engineering stress and engineering strain at room temperature, 538°C and 593°C

Fig. 1은 본 실험에 사용된 시험편의 조직사진으로써 시험편 평활부 표면을 왕수(25% HNO<sub>3</sub> + 75% HCl의 용액)로 부식시킨 후 광학현미경으로 확대 촬영한 것이며 결정립 크기는 약 30μm 정도이다.

Fig. 2은 본 실험에 사용된 304스테인리스강재를 538°C 및 593°C의 인장시험결과에서 얻은 공칭응력 σ과 공칭변형률 ε과의 관계를 나타낸 것으로 고온하에서 항복점 및 인장강도가 상온에 비해서 상당히 감소됨을 알 수 있다. 피로시험편은 Fig. 3과 같은 형상으로 기계가공한 후 중앙 평활부상에 다이알 게이지가 부착된 고속드릴(2200rpm)을 이용하여 0.5mm 드릴로 깊이 0.5mm가 되도록 정밀하게 인공노치를 가공하였다. 이러한 작업이 끝난 후에는 평활부를 연마지 1200번까지 연마한 후 산화 크롬분말로 버핑한 후 피로시험에 사용하였다.

2.2 실험방법

Fig. 3와 같이 제작된 피로시험편은 전기로가 부착된 오노식 회전굽힘피로시험기를 사용하여 일정한 반복 하중하에서 고온피로시험을 행하였으며 시험기의 회전속도는 3400rpm이었다. 시험편은 하중을 걸지 않은 상태에서 회전축에 대한 편심이 ±10μm 이하가 되도록 조정하여 시험기에 부착시켰다. 실험온도는 스테인리스 304강의 용도를 고려하여 상온, 538°C 및 593°C로 정하고 이 온도하에서 각각 피로시험을 행하였다. 또한 시험편의 온도는 전기 저항식 전기로 중앙부에 뚫린 구멍을 통해 시험편에 근접설치된 열전대에 의하여 시험편 평활부 주위의 온도를 측정하였고, 자동온도 조절장치로써

설정온도를 조절하였다.

이 때의 온도를 자동온도 기록장치로써 기록하여 본 결과 설정온도에 대하여 ±5°C 이내로 유지됨을 확인하였으며 또 시험편의 온도를 균일하게 하기 위하여 각 설정온도에서 약 1시간 동안 유지시킨 후 피로시험을 실시하였다.

본 연구에 있어서는 반복응력-파단반복수 (S-N<sub>r</sub>) 특성을 얻음과 동시에 평활시험편 표면상의 작은 표면피로 균열의 발생, 성장거동을 관찰하기 위하여 파단수명의 일정 단계마다 피로시험기를 일시 정지시켜 상온까지 냉각시킨 후 시험편의 표면을 표면레프리카법으로 채취, 마이크로 슬라이드 (micro slide)에 보존하였다. 채취한 레프리카에서 표면 균열의 발생, 성장거동을 광학현미경으로 정밀하게 측정하였다. 이러한 시험기의 일시 정지에 의한 영향과 상온까지의 냉각은 피로수명에 거의 영향이 없다고 보고되어 있으므로 본 연구에서도 무시하였다<sup>(16)</sup>.

3. 피로균열의 성장거동에 대한 해석적 검토

일반적으로 구조물 및 기기의 설계시에 고려하는 기초적인 자료로써는 하중 또는 응력을 기준으로 선택하는 경우가 많으므로 피로균열 성장 법칙을 응력기준으로 나타내는 것이 실용상 특히 유효하고 간편할 것이다.

선형 탄성 파괴 역학(LEFM)하의 균열성장률 da/dN은 응력 확대계수 범위 ΔK에 의하여 식 (1)과 같다<sup>(19)</sup>.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

단, C, m은 재료상수

그러나 높은 응력하에서 성장하는 작은 피로 균열의 성장 법칙은 탄소성 변형을 고려하여 식 (2)와 같이 표시할 수 있다<sup>(17)</sup>.

$$da/dN = C(\Delta\sigma)^n a \tag{2}$$

단, Δσ : 응력 진폭 C, n : 재료상수,

a : 표면 균열 길이

식 (2)는 실험적으로 일부 보고되어 있지만 해석적, 물리적 근거가 부족하여 많이 사용을 하고 있는 않다. 일반적으로 고응력하의 피로 균열 길이의 log a는 파단반복수비 N/N<sub>r</sub>에 비례한다는 것이 Frost<sup>(15)</sup>, Nisitani<sup>(17)</sup>, Maiya<sup>(20)</sup>, Suh<sup>(21)</sup> 등에 의하여 각종 재료의 피로시험에서 확인되고 있다. 여기서 N는 반복수, N<sub>r</sub>는 파단 반복수이다. 그러

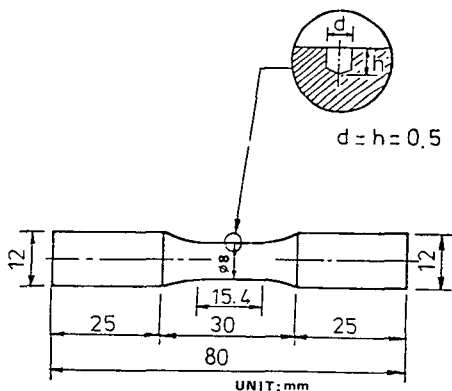


Fig. 3 Profile of the specimen and pit

므로 피로균열과 파단 반복수비 사이에는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\log a = Z(N/N_f) + \log a_0$$

여기서  $Z$ : 기울기,  $a_0$ : 초기균열길이(일정)

$$\log(a/a_0) = Z(N/N_f) \quad (3)$$

또한  $S-N_f$  곡선은 식 (4)로 표현 가능하다.

$$\Delta\sigma = C N_f^{-b} \quad (4)$$

여기서  $b$ : 기울기,  $C$ : 절편

$$N_f = C^{1/b} \Delta\sigma^{-1/b} \quad (4')$$

식 (4)'를 식 (3)에 대입하면 식 (5)로 된다.

$$\log(a/a_0) = ZN(C^{1/b}\Delta\sigma^{-1/b}) \quad (5)$$

식 (5)에서  $N$ 을  $a$ 에 대해 미분하여 정리하면, 식 (6)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} da/dN &= (Z/C^{1/b})\Delta\sigma^{1/b}a \\ &= C_2\Delta\sigma^n a \end{aligned} \quad (6)$$

단  $C_2 = Z/C^{1/b}$ ,  $n = 1/b$ 이다.

이상에서 피로균열성장속도를 해석적으로 검토하면  $\Delta\sigma^n a$ 의 매개변수로 정리가능함을 알 수 있다. 상기 방법 외에도 여러 가지 재료를 이용하여 균열 성장속도를 측정, 연구한 Frost의 연구<sup>(15)</sup>, 소성변형률 범위와 응력과의 관계를 이용한 Wareing의 연구<sup>(16)</sup>, 균열선단의 소성역과의 관계를 이용한 Nisitani의 연구<sup>(22)</sup> 등이 있다.

위에서 설명한 작은 피로균열성장 법칙은

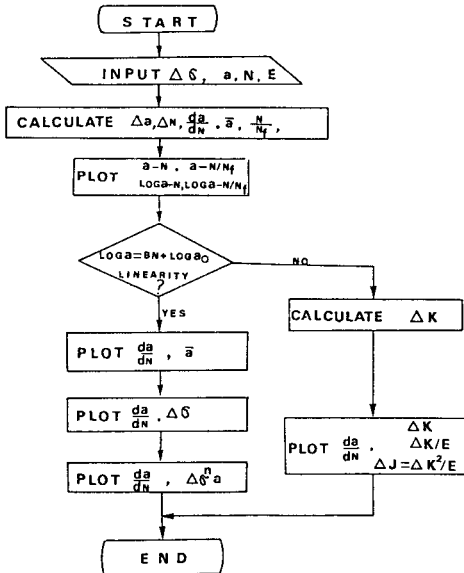


Fig. 4 Flow chart for determination of crack growth rate

Huang 및 Pelloux<sup>(23)</sup>에 의하면 균열길이의 좁은 범위내의  $\Delta\sigma^n a$ 관계는  $\Delta J$  즉  $J$ 적분의 근사치라고 주장하고 있으며, Brown등<sup>(24)</sup>은 차원해석을 이용한 탄소성 이론적해석을 통하여 상기 법칙과 유사한 형태로 도출됨을 설명하고 있다.

본 연구에서는 IBM PC를 사용하여 포트란 언어로 Fig. 4와 같은 프로그램의 흐름도를 작성하였다. 실험에서 얻어진 기본 자료파일을 기초로 피로균열 성장거동과 피로수명 예측에 필요한 자료를 도출시켰다. 즉 응력진폭  $\Delta\sigma$ , 균열길이  $a$ 와 반복수  $N$ 값들을 실험에서 측정하여 Fig. 4의 흐름도와 같이 성장된 균열길이  $\Delta a$ , 반복수 변화  $\Delta N$ , 성장속도  $da/dN$ , 평균 균열길이  $\bar{a}$ , 반복수 비  $N/N_f$  등을 계산시켜 본연구에 관련된 분석자료를 얻도록 연구하였다. 또한 실험측정값의 자료를 PC에 입력, 계산하여 얻은 결과를 도식화하기 위하여 ENER 소프트웨어를 사용하였다<sup>(25)</sup>.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 4.1 S-N<sub>f</sub>특성

본 실험에서 사용한 304스테인리스강의 작은 표면피트재의 상온, 538°C 및 593°C의 세 가지 온도 하에서 얻은 S-N<sub>f</sub> 곡선은 Fig. 5와 같다. 이때 종축은 최대공칭응력  $\sigma_{max}$ 이고 횡축은 피로파단반복수  $N_f$ 이다. Fig. 5와 같이 304스테인리스강의 상온피로시험에서는 10<sup>6</sup>사이클 이전에 절점(knee point)이 존재하여 피로한도의 존재가 명확시되고 있다. 그러나 538°C와 593°C의 고온에서는 10<sup>6</sup>사이클 이후에도 계속하여 파단응력이 감소하면서 피로

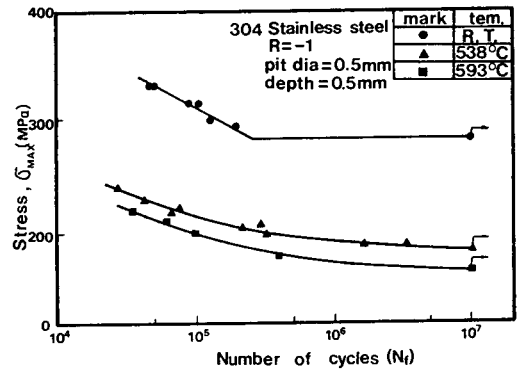


Fig. 5 Relation between maximum bending stress,  $\sigma_{max}$  and the number of cycles to failure,  $N_f$

파단이 일어날 수 있는 경향을 보이고 있다.

본 연구에서는 편의상 고온의 경우에는  $10^6$  사이클을 피로한도로 설정하여 상온의 결과와 비교하였다. 이렇게 하여 얻어진 상온에서의 피로한도는 279 MPa이며, 538°C는 181 MPa, 593°C는 167 MPa이었다. 따라서 상온에 대한 고온에서의 피로한도의 저하율은 538°C 및 593°C의 경우 각각 35.1%와 40.4%이었다. 이와 같이 고온에 있어서 피로한도가 크게 감소하는 것은 고온에 의한 재료의 기계적 성질의 저하가 큰 요인으로 생각된다.

4.2 표면 피로균열의 성장특성

Fig. 6은 538°C하에서 세 가지 응력 레벨에 따라 작은 피트재상에서 발생 성장하는 피로 균열길이  $a$ 와 반복수  $N$ 의 관계를 예로서 나타낸 것이다. 이 그림과 같이 각각의 응력레벨에서 피로균열은 작은 피트에서 발생하여 반복수  $N$ 에 따라 원활하게 성장함을 알 수 있다.

이와같은 균열발생 성장거동을 각 응력 레벨에 따른 피로균열 길이의 대수  $\log a$ 와 반복수  $N$ 의 관계를 예로서 나타낸 것이 Fig. 7이다. 여기서  $\log a$ 와  $N$ 의 관계는 거의 직선으로 나타나며 피로균열의 성장 거동은 이 그림과 같이 반복수  $N$ 에 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 이와 같은 피로균열의 성장 특성은 여러 가지 재료<sup>(15~17,20)</sup>에서도 연구 보고되고 있다.

Fig. 8은 Fig. 6과 같은 538°C의 균열성장특성을 균열길이  $a$ 와 파단 반복수비  $N/N_f$ 의 관계를 예시

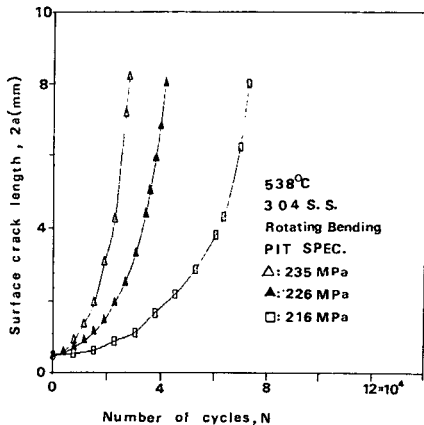


Fig. 6 Growth behaviors of fatigue cracks initiated from a pit at 538°C

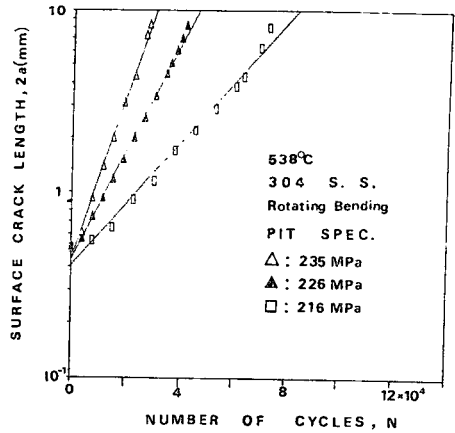


Fig. 7 Growth behavior of fatigue cracks initiated from a pit at 538°C

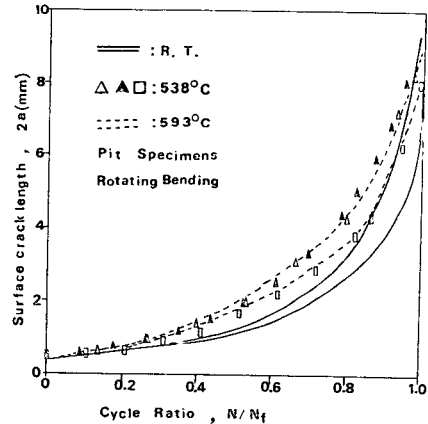


Fig. 8 Relation between surface crack length and cycle ratio

한 것이다. 또 그림상에는 실선의 밴드로 나타낸 상온의 데이터와 점선 밴드로 나타낸 593°C의 데이터를 동시에 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 온도조건과 응력레벨에 관계없이 피로균열의 성장특성을  $a-N/N_f$ 로 도식화시키면 비교적 좁은 밴드내에 여러 가지 데이터가 모여지는 것을 알 수 있다. 이러한 피로균열의 성장특성은 표면피로균열의 발생, 성장거동을 파악하는데 중요하며 이것의 정량적 분석 검토에 의하여 피로균열의 발생, 성장특성, 피로수명 예측 등의 자료 획득이 가능하다.

4.3 표면피로 균열성장률

Fig. 9는 538°C하의 세 가지 응력레벨에 대하여

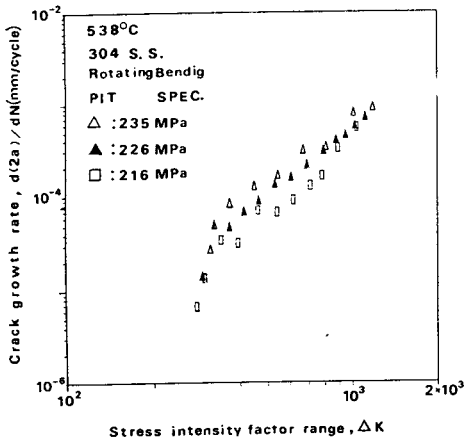


Fig. 9 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon the stress intensity factor range

응력확대계수범위  $\Delta K$ 와 균열성장률  $da/dN$ 과의 관계를 나타내고 있다. 표면피로 균열의 성장특성은  $\Delta K$ 로서는 통일적인 정리가 불가능함을 여기에서 알 수 있다. 이러한 응력의존성은 회전굽힘 피로시험에서 생기는 결과로서 평활재 표면상의 미소피로 균열의 경우와 작은 표면균열 결함을 갖는 여러 가지 재료<sup>(26,27)</sup>에서도 나타나고 있다.

따라서 응력 의존성을 없애고 각 자료를 통일적으로 해석하기 위하여, 탄소성변형을 고려한 역학적 매개변수  $\Delta J$  또는  $\Delta K\epsilon$ <sup>(12,13)</sup>으로도 정리 가능하다. 그러나 고온하에서는  $\Delta J$ 와  $\Delta K\epsilon$ 의 정리를 위하여 측정되어야 하는 양의 측정이 대단히 어렵다. 그러므로 근사적인 방법으로 탄성변형을 확대계수 범위  $\Delta K/E$ 와 Dugdale-Barenblatt 모델에 의한  $J$ 적분값과 균열 선단개구변위(CTOD)의 관계에 의한  $\Delta J = \Delta K^2/E$ 를 사용하여 균열 성장률의 특성을 비교검토해 보았다<sup>(28)</sup>.

고온하의 탄성계수  $E$ 는 온도에 따라 크게 감소하므로 본 연구에서는 여러 참고문헌<sup>(29-31)</sup>에서 얻은 자료를 정리한 Fig. 10을 이용하여 결정하였다. Fig. 11은 Fig. 9의 자료를 538°C의 탄성계수  $E = 154118 \text{ MPa}$ 로 계산하여 프로트한 것으로  $\Delta K/E - da/dN$ 의 결과 역시 응력의존성이 존재함을 알 수 있다. 또한 Fig. 12는 앞에서 예시된 538°C의 자료를  $\Delta J$ 로 계산하여 나타낸 것으로 이 그림상에도 응력의존성이 존재하여  $\Delta K$ 보다도 다소 개선되었지만 통일적인 정리가 어려움을 알 수 있다.

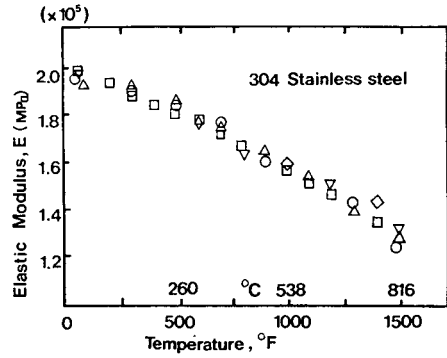


Fig. 10 Variation of elastic modulus corresponding to ambient temperature

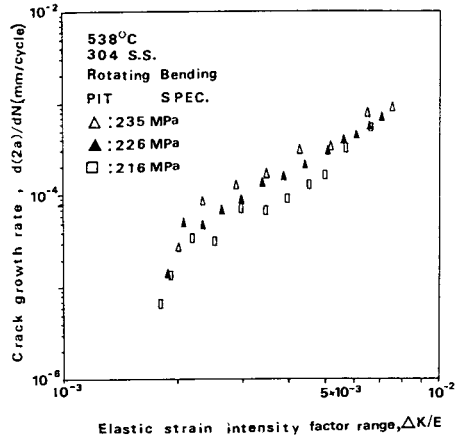


Fig. 11 Dependence of fatigue surface crack growth rate upon elastic strain intensity factor range

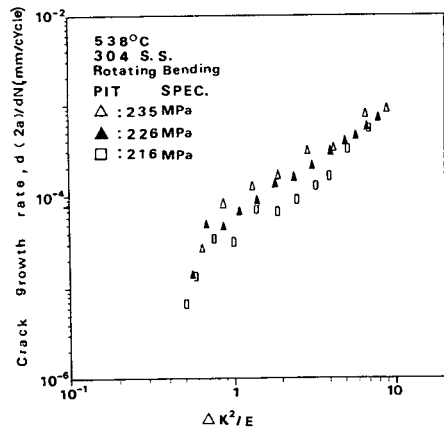


Fig. 12 Dependence of fatigue surface crack growth rate upon  $\Delta K^2/E$

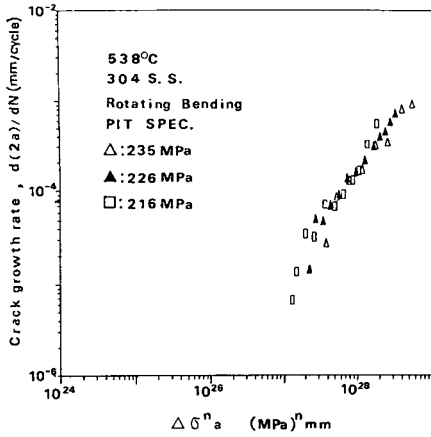


Fig. 13 Dependence of fatigue surface crack growth rate upon  $\Delta\sigma^n a$  at 538°C

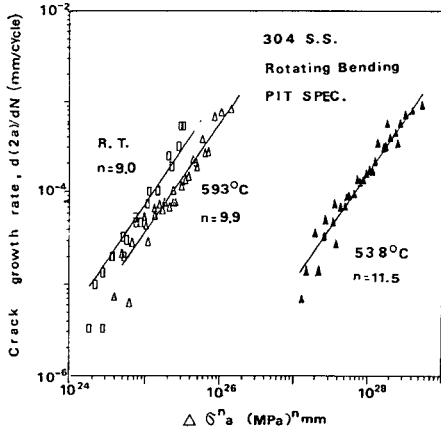


Fig. 14 Dependence of fatigue surface crack growth rate upon  $\Delta\sigma^n a$  at three kinds of temperatures

538°C의 예로서 탄소성변형을 고려한 역학적 매개 변수  $\Delta\sigma^n a$ 로 정리한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 이 그림상에서는 Fig. 9, 11 및 12에서 균열의 성장률을  $\Delta K$ ,  $\Delta K/E$  및  $\Delta J = \Delta K^2/E$ 로 정리할 때 응력레벨에 따라 생겼던 응력 의존성이 상당히 소멸되어 거의 직선적으로 표시되어 통일적인 정리가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 14는 본 연구에서 실시한 상온, 538°C 및 593°C의 세 가지 자료에 대한 Fig. 4의 과정을 거친 결과를 동시에 나타낸 것이다. 그림과 같이 각각의 온도에서 응력 의존성이 없어지고 Fig. 13과 같이 직선적으로 표시 가능함을 알 수 있다. 이러

한 온도에 따른 자료의 분리는 S15C, S45C로 실험한 Nisitani들<sup>(32,33)</sup>의 자료에서도 비슷한 경향을 나타내고 있다.

#### 4.4 작은 피로균열 성장특성과 $S-N_f$ 선도의 관계

이상과 같이 해석한 피로균열의 발생성장특성을 기초로 하여 구조물 및 기기의 검사, 보수, 평가에 중요한 피로수명을 예측하기 위하여, Fig. 4와 같은 과정의 계산을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 즉 균열성장거동을 기초로 한 관계식  $da/dN = C \cdot \Delta\sigma^n a$ 에서 수치해석하여 얻은 지수  $n$  값과 실험결과에서 얻은  $S-N_f$  관계식인  $\Delta\sigma = CN_f^{-b}$  또는  $\Delta\sigma^{1/b} N_f = C^{1/b}$ 의 식에서 응력 의존도  $1/b$ 와의 관계를 비교하여 Table 3에 나타내었다. Table 3에서의 계산치  $n$ 과 실험치를 비교하여 보면 세 가지 온도레벨상에서 비슷한 결과를 나타

Table 3 Comparison between  $n$  and  $1/b$

Temp.	Prediction ( $n$ )	Experiment ( $1/b$ )
R.T.	9.0	10.5
538°C	11.5	11.0
593°C	9.9	10.5

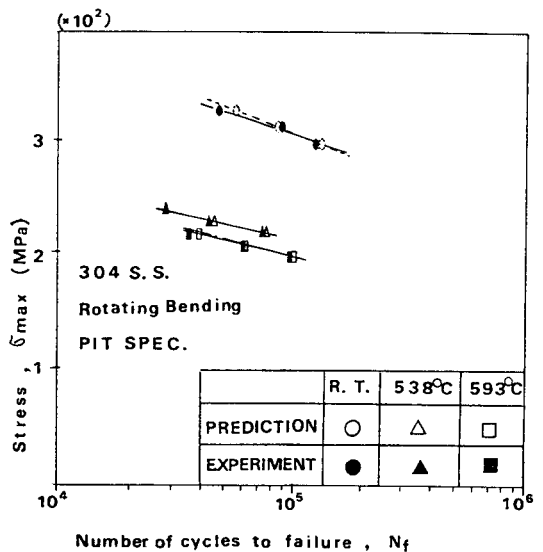


Fig. 15 Relation between maximum bending stress,  $\sigma_{max}$ , and the number of cycles to failure,  $N_f$

**Table 4** Comparison between the predicted and experimental results

Class Temp.	Stress ( $\sigma_{max}$ , MPa)	Experi- ment (N)	Prediction (N)	Error (%)
Room Temp.	324	47000	55870	18.8
	309	88200	84842	-3.8
	294	124300	131491	5.8
538°C	235	28200	27878	-1.1
	226	43000	45423	5.6
	216	73000	75636	3.6
593°C	216	35300	39156	10.9
	206	60400	62023	2.7
	196	96000	100474	4.7

내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 15는 Fig. 5의 실험자료(●, ▲, ■)에다 작은 표면균열 성장법칙인 식 (7)에 의하여 피로수명예측한 결과 (○, △, □)를 동시에 비교하여 나타낸 것이다. Table 4에는 실험한 연구결과와 계산에서 얻은 수명예측치를 서로 비교한 것이며 약 5%의 범위내에 자료가 모이고 있기 때문에 본 연구 결과의 균열성장 법칙이 타당성이 있음을 보여주고 있다.

이상의 결과에서 작은 표면피로 균열성장법칙은 실질적으로 Manson-Coffin 법칙과 등가임을 설명하고 있다<sup>(34,35)</sup>. 또한 본 연구에서 적용한 작은 균열의 성장법칙은 본 연구에서 실시된 것과 같이 실험결과를 해석예측한 그 결과가 잘 적용되므로 대체로 응력이 높은 경우에 유효하며 공학적, 공업적 측면에서 상당히 유효할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

304스테인리스강의 작은 피트재의 피로시험편을 사용하여 상온 및 고온(538°C, 593°C)하에서 회전 굽힘 피로시험을 실시하고 피트재의 수명을 지배하는 작은 균열의 발생 성장거동을 조사하여 탄소성 변형을 고려한 역학적 매개변수  $\Delta\sigma^m a$ 의 유용성을 검토하였다. 또한 이 방법을 이용한 피로수명예측을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상온 및 고온하에서의 각 온도 레벨에서 작은 피로균열의 성장속도는 탄소성변형을 고려한 역학

적 매개변수  $\Delta\sigma^m a$ 로 정리하면 응력 의존성이 없어지고 각각의 온도 레벨에서 통일적인 정리가 가능하다.

(2)  $da/dN = C \cdot \Delta\sigma^m a$ 의 관계식으로부터  $S-N_f$  곡선을 유도하였으며, 작은 피로균열 성장거동은  $S-N_f$  곡선과 밀접한 관계가 있다. 따라서 이 성장 법칙은 실용적 견지에서 피로수명 예측에도 상당히 유효하다.

## 參 考 文 獻

- (1) 徐昌敏, 申享燮, 權寧泰, 1987, "304스테인리스鋼의 高溫에서의 表面龜裂 成長 特性에 관한 研究", 大韓機械學會論文集, 第11卷, 第3號, pp. 355~361.
- (2) Suh, C.M., Kitagawa, H., Kim, G.N. and Yuuki, R., 1985, "Quantitative Analysis of Surface Microcracks in Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", ASME PVP-Vol. 98-1, pp. 137~142.
- (3) 徐昌敏, 金奎南, 1984, "SUS 304鋼의 常溫下 表面疲勞龜裂의 發生 成長舉動에 관한 研究", 大韓機械學會論文集, 第8卷, 第3號, pp. 195~200.
- (4) Suh, C.M., Kang, Y.G., Suh, D.Y. and Hwang, B. W., 1987, "Basic Characteristics of Surface Microcracks in Type 304 Stainless Steel at 538°C", KSME Journal, Vol. 1, No. 2, pp. 115~120.
- (5) 結城良治, 北川英夫, 徐昌敏, 持田郁夫, 1982, "高溫におけるステンレス鋼の表面き裂の疲勞き裂成長特性", 日本材料學會, 材料, 第31卷, 第344號, pp. 500~504.
- (6) 徐昌敏, 李正州, 金英吳, 1988, "304스테인리스鋼의 高溫表面微小龜裂의 舉動에 관한 基礎的 研究", 大韓機械學會論文集, 第12卷, 第6號, pp. 1320~1326.
- (7) 徐昌敏, 金英吳, 李正州, 1987, "高溫下の 表面き裂の 壽命豫測に關する破壊力學的研究", 日本材料學會, 第4回, 破壊力學シンポジウム 講演論文集, pp. 51~55.
- (8) 徐昌敏, 金英吳, 姜用求, 1986, "SUS 304鋼의 表面龜裂의 疲勞破面解析에 관한 研究", 慶北大 論文集, 第41卷, pp. 371~380.
- (9) 田中啓介, 1984, "微小疲勞き裂の傳ば", 日本材料學會, 材料, 第33卷, 第371號, 961~972.
- (10) Rice, J.R., 1968, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", J. of the Applied Mechanics, Vol. 35, No. 2, pp. 379~386.
- (11) 이억섭, 이병훈, 1989, "Caustics 방법에 의한 J



- 적분값 측정에 대한 고찰”, 대한기계학회 89년도 추계학술대회 초록집, pp. 71~75.
- (12) Kitagawa, H., Takahashi, S., Suh, C.M. and Miyashita, S., 1979, “Quantitative Analysis of Fatigue Process-Microcracks and Slip Lines under Cycle Strains”, ASTM STP 675, pp. 420~449.
- (13) Suh, C.M. and Kitagawa, H., 1987, “Crack Growth Behavior of Fatigue Microcracks in Low Carbon Steels”, Fatigue Fract Eng. Mater. Struct. Vol. 9, No. 6, pp. 409~424.
- (14) 金奎南, 徐昌敏, 結城良治, 北川英夫, 姜成守, 1983, “軟鋼의 高溫 表面疲勞龜裂 成長特性에 관한 研究”, 大韓機械學會論文集, 第7卷, 第4號, pp. 425~433.
- (15) Frost, N.E., 1962, “Effect of Mean Stress on the Rate of Growth of Fatigue Cracks in Sheet Materials”, J. of Mechanical Engineering Science, Vol. 4, No. 1, pp. 22~35.
- (16) Wareing, J., 1975, “Fatigue Crack Growth in a Type 316 Stainless Steel at Elevated Temperature”, Metallurgical Transactions A, Vol. 6A, pp. 1367~1377.
- (17) Nisitani, H., 1981, “Unifying Treatment of Fatigue Crack Growth Laws in Small, Large and Non-Propagating Cracks”, Mechanics of Fatigue-AMD, ASME, Vol. 43, pp. 151~166.
- (18) 堀口正一, 川崎正, 1982, “オーステナイト系ステンレス鋼의 650°Cにおける疲勞クリープ 相互作用下の破壊舉動に關する 研究”, 日本材料學會, 材料, 第31卷, 第342號, pp. 277~282.
- (19) Paris, P.C. and Erdogan, F., 1963, “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, Trans. ASME, J. Basic Eng. Vol. 84, No. 4, p. 528~534.
- (20) Maiya, P.S., 1975, “Considerations of Crack Initiation and Crack Propagation in Low-Cycle Fatigue”, Scripta Metallurgical, Vol. 9, pp. 1141~1146.
- (21) 徐昌敏, 李正州, 권오현, 1987, “작은 表面缺陷에서 發生·成長하는 表面疲勞龜裂의 成長特性에 관한 研究”, 大韓機械學會論文集, 第11卷, 第2號, pp. 191~197.
- (22) 西谷弘信, 皮籠石 紀雄, 1984, “Fe-3% Si合金における疲勞き裂傳ば則と塑性域の關係”, 日本機械學會論文集(A編), 第50卷, 第450號, pp. 277~282.
- (23) Huang, J.S. and Pelloux, R.M., 1982, “Low Cycle Fatigue Crack Propagation in Hastelloy-X at 25° and 760°C”, Metallurgical Transaction A, Vol. 11A, pp. 899~904.
- (24) Brown, M.W., Liu, H.W., Kfoury, A.P. and Miller, K.J., 1981, “An Analysis of Fatigue Crack Growth Under Yielding Conditions”, Advances in Fracture Research (Fracture 81), Vol. 2, pp. 891~898.
- (25) ENER Graphics, 1983. Enertronics Research, Inc.
- (26) 北川英夫, 徐昌敏, 1980, “小さな人工缺陷からの疲勞き裂成長舉動”, 日本材料學會, 第14回 疲勞シンポジウム前刷集, pp. 26~30.
- (27) 徐昌敏, 姜用求, 1984, “炭素鋼材의 작은 表面缺陷에서 成長하는 表面疲勞龜裂의 成長特性에 관한 研究”, 大韓造船學會誌, 第21卷, 第1號, pp. 35~42.
- (28) 金澤武, 町田進, 金田重裕, 小野塚正, 1985, “J-積分による破壊基準について”, 日本造船學會論文集, 138號, pp. 480~489.
- (29) Structural Alloys Handbook Mechanical Properties Data Center, Massachusetts, 1975, p. 70, 69.
- (30) Aerospace Structural Metals Handbook, Mechanical Properties Data Center, Massachusetts, 1975, Code 1303, p. 15.
- (31) Berling, J.T., Slot, T., 1969, ASTM STP 459, P. 3.
- (32) 西谷弘信, 皮籠石 紀雄, 1987, “炭素鋼の高温回轉曲げにおける微小疲勞き裂傳ば則”, 日本機械學會論文集(A編), 第53卷, 第491號, pp. 1163~1166.
- (33) 西谷弘信, 皮籠石 紀雄, 1988, “炭素鋼の高温回轉曲げにおける微小疲勞き裂傳ば則(續報)”, 日本機械學會論文集(A編), 第54卷, 第500號, pp. 663~669.
- (34) Murakami, Y., Harada, S., Endo, T., Tani-ish H. and Fukushima, Y., 1983, “Correlations Among Growth Law of Small Cracks Low Cycle Fatigue Law and Applicability of Miner's Rule”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 18, No. 5, pp. 909~924.
- (35) 原田昭治, 材上海宣, 福島良博, 石松豊, 遠藤達雄, 1985, “微小き裂の發生, 傳ばに基づくS45C平滑材の低サイクル疲勞壽命評價”, 日本機械學會論文集(A編), 第51卷, 第464號, pp. 1215~1223.