

표면결함재에 관한 탄소성 파괴역학에 의한 피로수명 예측

강 용 구* · 서 창 민** · 이 중 식***
(95년 8월 23일 접수)

Fatigue Life Prediction by Elastic-Plastic Fracture Mechanics for Surface Flaw Steel

Y. G. Kang* · C. M. Suh** · J. S. Lee***

Key Words : Crack Growth Equation (균열성장식) J-Integral Range(J-적분범위) Cyclic stress-strain Curve (반복응력-변형률곡선) Life Prediction (수명예측) Crack Growth Curve (균열성장곡선)

Abstract

In this work, prediction of fatigue life and fatigue crack growth are studied. 4th order polynomial function is presented to describe the crack growth behaviors from artificial pit of SM45C steel. Crack growth curves obtained from 4th order polynomial growth equations are in good agreement with experimental data

The crack growth behaviors at arbitrary stress levels are investigated by the concept of elastic-plastic fracture mechanics using ΔJ .

Fatigue life prediction are carried out by numerical integral method. Prediction lives obtained by proposed method in this study, is in good agreement with the experimental ones. Life prediction results calculated by using of ΔJ better than those of ΔK .

1. 서 론

반복하중을 받고있는 각종구조물이나 기계부품의 일반적인 파손형태는 피로이다. 이와 같은 피로 현상은 대부분 각종 기계부재에 존재하는 형상불연속부 및 제조과정 중 발견하지 못한 균열유사

결함(Crack-like flaws)에서 발생, 성장하는 피로 균열에 기인한다. 따라서 설계시 고려되지 않지만 제작과정중이나 사용중에 발생한 피로균열이 발견되는 경우에는 파괴역학적 방법을 사용하여 안전성평가 및 잔존수명예측을 수행하는 것이 일반적이다.

* 금오공과대학교 기계설계공학과

** 경북대학교 공과대학 기계설계공학과

*** 대우기술연구소 차체 설계실

선형파괴역학적 수명예측방법은 균열을 내재하고 있는 기계부재의 균열성장속도(da/dN)를 균열선단의 응력확대계수범위(ΔK)의 함수로 나타내어 이를 초기균열(a_i)에서 파단시 균열 반길이(a_f)까지를 적분하는 방법이다. 따라서 파괴역학적 방법에 의하여 안전성평가 및 잔존수명을 예측하기 위해서는 구조물이나 각종 기계부품에 존재가능한 작은 표면결합에서 발생, 성장하는 표면균열의 이차원적인 균열성장거동에 대한 정량적인 자료 축적이 선행되어야 한다.

표면균열의 성장거동은 여러가지 요인에 의해 영향을 받지만 그중 가장 큰 영향을 주는 인자는 부하응력의 크기이다. 그러나 작은 인공결합에서 발생, 성장하는 표면균열의 성장거동을 균열반길이비(a/a_f)와 반복수비(N/N_f)로 정리하면 균열성장데이터들이 부하응력의 차이에도 불구하고 좁은 밴드내에 모인다는 연구결과[1~5]와 이 특성을 이용하여 임의응력 작용시에 균열성장거동을 수식화할 수 있는 지수함수형 균열성장식을 제안하였다[5]. 또한 이 성장식을 사용하여 임의응력 작용시에 대하여 응력확대계수범위, ΔK 를 사용한 파괴역학적 수명예측을 시도한 바 있다[5]. 그러나 지수함수형 균열성장식을 사용하면 균열성장 후반부까지 정확하게 근사되지 않아 실험수명과 약 15% 정도의 오차가 발생되었다.

또한 작용응력이 커지게 되면 균열선단부의 조성역의 크기가 선형파괴역학을 적용할 수 없을 정도로 커지게 되며 이와 같은 경우는 Rice[6]가 제안한 탄소성 파괴역학적 파라메타인 J적분범위(ΔJ)를 사용하여 균열성장거동을 파괴역학적으로 정리하는 것이 보다 합리적이다.

따라서 본 연구에서는 기계구조용 탄소강인 SM45C재의 표면피로균열의 성장거동을 실험적으로 조사하여 그 성장특성을 4차다항함수로 근사시켜 임의 응력작용시에 대하여 균열성장식을 유도하였다. 또한 균열의 성장에 따른 ΔJ 의 변화를 계산하여 임의 응력작용시에 대한 탄소성 파괴역학적 수명예측을 시도하였으며 그 결과를 ΔK 를 사용한 결과와 비교검토했다.

2. 실험장치와 실험방법

2.1 시험편과 실험장치

표면피로균열의 성장거동을 조사하기 위한 시험편 재료는 실험결과를 서로 비교하기 위하여 전보[5]와 같이 기계구조용 탄소강 SM45C재를 사용하였다. 실험 재료의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1, 2에 나타내었다. 피로 시험편은 Fig. 1과 같은 형상과 크기로 압연 방향과 평행하게 절단하여 기계가공한 후 기계가공이 끝난 시험편은 압연 및 기계가공에 따른 잔류응력을 제거하기 위하여 풀림(Annealing)열처리를 실시하였다. 열처리가 끝난 시험편은 연마지(#800)로 표면을 가볍게 연마시켜 표면 중앙 평활부에 작은 피트형 결함을 다이얼 게이지를 부착한 소형 드릴링 머신으로 시험편 중앙 평활부 표면에 작은 인공결합(직경 0.5 mm, 깊이 0.5mm)을 가공한 다음, 다시 연마지 (#1000~1200)로 표면을 재연마 시킨 후 산화크롬 분말로 버핑 작업을 실시하였다.

본 실험에 사용된 피로시험기는 전기 유압 서어브식 피로시험기(INSTRON Model 1350, 10ton)이다.

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

Material	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.42	0.33	0.71	0.014	0.009

Table. 2 Mechanical properties of the specimen.

Material	Yield strength σ_y (MPa)	Tensile strength σ_u (MPa)	Elastic modulus E(GPa)	Poisson ratio ν
SM45C	340.5	689	203.5	0.28

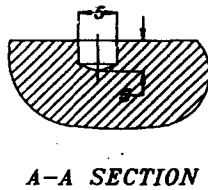
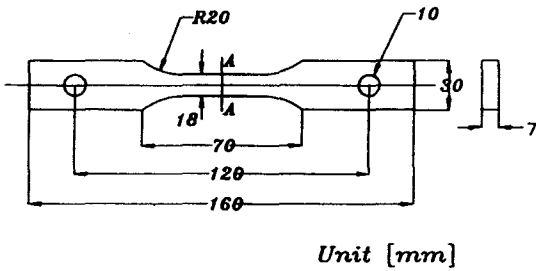


Fig. 1 Configuration of the specimen

2.2 실험방법

시험편은 상온하에서 응력비 $R(\sigma_{min}/\sigma_{max}) = 0.05$ 에서 $\sigma_{max} = 261, 237, 213$ MPa의 세가지 응력에 대하여 인장축 피로실험을 실시하였다. 피로시험 중 표면 균열길이 2a는 일정 반복수(파단반복수의 5~7% 단계)마다 시험기를 일시 정지시켜 인공 결함부를 포함하는 시험편 평활 중심부 상의 일정 면적에 대한 표면 레프리카를 채취하고 이 레프리카는 광학 현미경을 사용하여 정밀하게 측정하였다. 또한 균열길이 c는 템퍼칼라법(Temper color method)을 사용하여 각각 균열길이에 해당하는 깊이 c를 측정하였다. 또한 균열의 성장에 따른 ΔJ 의 값을 측정하기 위하여 시험편 균열길이 측정부와 반대측의 평활평행부 중앙에 스트레인 게이지(Gauge length 2 mm, 120 Ω)를 부착한 후 스트레인 인디케이터와 연결하여 전 스트레인의 양과 반복 응력-변형률 히스테리시스 곡선을 얻었다.

3. 실험결과

3.1 $\sigma - N_f$ 특성

Fig. 2는 상온하에서 직경 0.5 mm, 깊이 0.5 mm의 작은 인공결합을 가공한 SM45C재 시험편을 사

용하여 주파수 10Hz, R=0.05의 인장축하중 피로시험을 실시하여 얻은 $\sigma - N_f$ 선도이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 응력이 증가할수록 피로수명은 작아지며 양 log-log 그래프상에서 부하응력(σ)과 파단반복수(N_f)의 관계는 선형적인 관계가 성립됨을 알 수 있다. 이 $\sigma - N_f$ 관계선도상에서 ● 표로 표시한 응력레벨 중에서 세가지 응력레벨(213, 237, 261MPa)에 한하여 균열성장특성을 실험적으로 조사하여 임의응력 작용시의 균열성장특성을 나타낼 수 있는 4차 다항함수형 균열성장식을 적용하여 파괴역학적 정리 및 수명에측을 수행하였다.

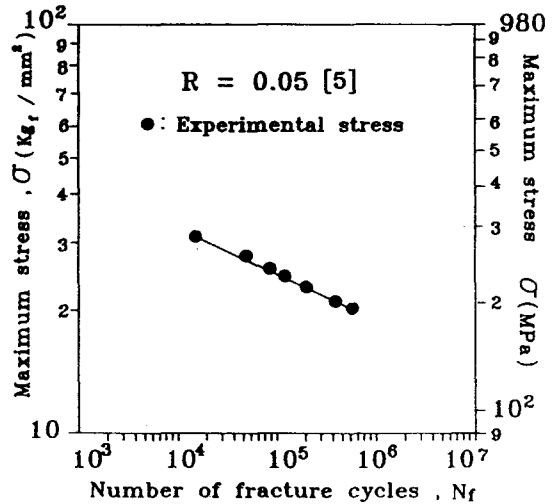


Fig. 2 The relation between maximum stress and the number of cycle to fracture

3.2 균열의 성장에 따른 형상비의 변화

균열의 성장에 따른 균열면 형상비의 변화는 템퍼칼라법을 사용하여 세가지 응력레벨하에서 측정하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 213 MPa의 데이터는 □로, 237 MPa, 261 MPa의 데이터는 각각 △와 ○로 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 응력레벨의 차이에도 불구하고, 균열의 성장에 따른 균열면 형상비 (c/a)는 거의 동일한 값을 가짐을 알 수 있다.

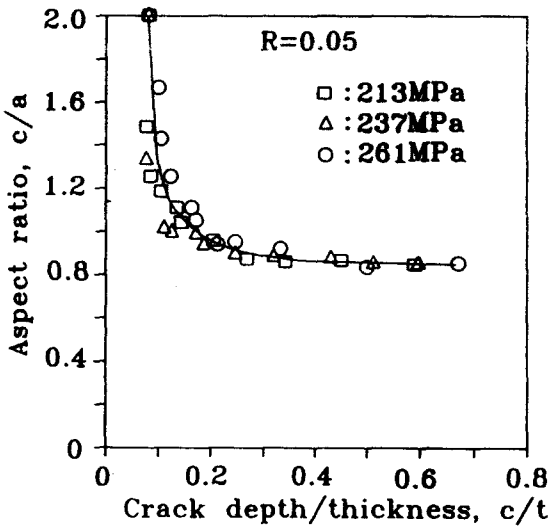


Fig. 3 The relation of aspect ratio (c/a) with the ratio of crack depth to the thickness(c/t) of specimen

3.3 반복응력-변형률 히스테리시스곡선

Fig. 4는 본 실험에 사용한 SM45C재 인공결합재(직경 $\phi 0.5$ mm 깊이 0.5 mm)의 반복응력-변형률곡선 (Cyclic stress-strain curve)을 나타낸 것이다. 이 곡선은 각 실험응력레벨에서 피로시험중 일정 반복수마다 피로시험기를 일시 정지시키고 주파수를 0.5Hz로 낮추어 한 사이클 동안의 응력과 변형률의 관계를 X-Y 레코더를 사용하여 얻은 안정된 히스테리시스 곡선을 중첩시킨 것이다.

이 반복응력-변형률 곡선은 탄성변형률과 소성 변형률 성분을 합한 것으로 Ramberg-Osgood 관계식[7]을 사용하여 응력과 전변형률의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\epsilon_t = \sigma/E + (\sigma/A)^{1/n} \quad (1)$$

여기서 영율 E, 계수 A 및 가공경화지수 n의 값은 실험재료에 대해서 구해보면 다음과 같다.

$$E=203,500, A=1145 \quad n=0.184$$

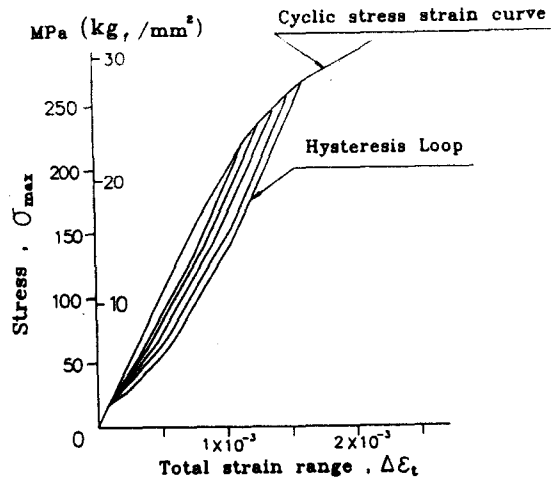


Fig. 4 Cyclic stress-strain curves obtained from stable hysteresis loops for SM45C steel

3.4 표면피로균열의 성장특성

상온하에서 응력비 R=0.05의 인장-축하중 피로 시험시 세가지 작용응력 레벨에 따라 작은 인공 결합에서 발생, 성장하는 피로균열의 균열반길이 (a)와 반복수(N)와 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

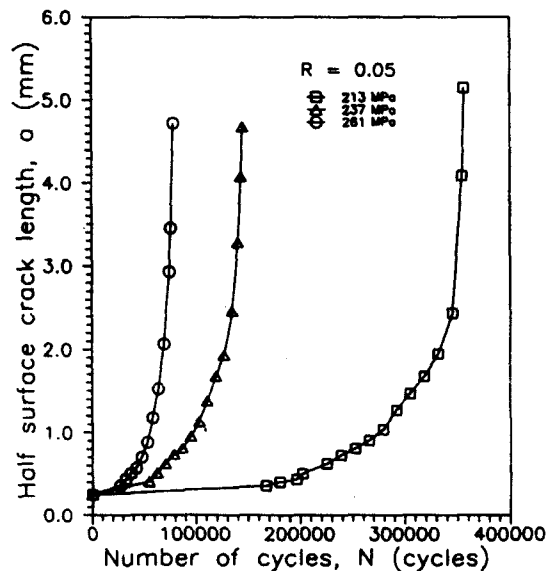


Fig. 5 The relation between half surface crack length and number of cycles

그림에서 알 수 있는 바와 같이 각각의 응력레벨에서의 피로균열은 작은 인공결합에서 발생하여 표면방향과 깊이방향으로 동시에 반복수의 증가에 따라 원활하게 성장함을 알 수 있다.

따라서 작은 표면결합에서 발생, 성장하는 표면균열의 균열성장식을 도출하기 위하여 표면방향에 대해서만 무차원화된 균열길이비(a/a_f)와 반복수비(N/N_f)의 관계로 재도시하여 나타내면 Fig. 6과 같다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 피로균열성장 데이터들은 a - N 곡선과 달리 응력레벨의 차이에도 불구하고 좁은 밴드내에 모여지는 경향을 나타낸다. 또한 좁은 밴드의 상한부에는 고응력하의 균열성장 데이터들이 하한부에는 저응력하의 균열성장 데이터들이 위치하여 반복수비의 증가에 따라 원활하게 상승한다.

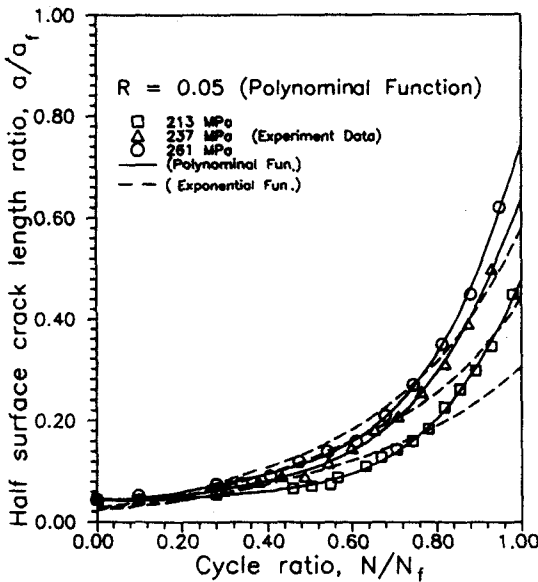


Fig. 6 The relation between crack depth and number of cycles

따라서 이와 같은 표면피로균열의 균열성장특성을 수식화하기 위하여 4차다항함수로 이들 균열성장데이터를 근사시킨 균열성장곡선은 실선으로 Fig. 6상에 중첩시켜 나타내었다. 또한 전보(5)에서 도입한 지수함수로 근사시킨 균열성장곡선은 파선

으로 나타내었다. 이들 두가지 균열성장곡선을 비교하면 4차다항함수를 사용한 균열성장곡선이 지수함수형 균열성장곡선보다 실험데이터의 균열성장특성을 잘 근사시킴을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 4차다항함수 균열성장식을 사용하여 임의 응력레벨의 균열성장특성 예측 및 수명예측을 시도하고자 한다.

4. 표면피로균열의 균열성장식과 수명예측

4.1 표면피로균열의 균열성장식

작은 표면결합에서 발생, 성장하는 표면균열의 반균열길이비(a/a_f)와 반복수비(N/N_f)의 관계는 식(2), (3)과 같이 4차다항함수로 나타낼 수 있다.

부하응력 중 가장 큰응력 σ_{HIGH} 가 작용하는 경우 식(2)로 표기된다.

$$a/a_f = A_1(N/N_f)^4 + A_2(N/N_f)^3 + A_3(N/N_f)^2 + A_4(N/N_f) + A_5 = F(A) \quad (2)$$

부하응력 중 가장 낮은 응력 σ_{LOW} 가 작용하는 경우 식(3)으로 표기된다.

$$a/a_f = B_1(N/N_f)^4 + B_2(N/N_f)^3 + B_3(N/N_f)^2 + B_4(N/N_f) + B_5 = F(B) \quad (3)$$

임의응력 σ_x 가 작용하는 경우($\sigma_{LOW} < \sigma_x < \sigma_{HIGH}$) 균열성장거동이 부하응력의 크기에 비례한다고 가정하면 식(4)로 표기된다.

$$a/a_f = \left(1 - \frac{\sigma_x - \sigma_{LOW}}{\sigma_{HIGH} - \sigma_{LOW}}\right)F(B) + \frac{\sigma_x - \sigma_{LOW}}{\sigma_{HIGH} - \sigma_{LOW}}F(A) \quad (4)$$

따라서 부하응력이 σ_{HIGH} 와 σ_{LOW} 사이의 중간응력이 작용하는 경우의 균열성장식은 식(5)와 같다.

$$a/a_f = \frac{1}{2}\{F(B) + F(A)\} \quad (5)$$

여기에서 σ_{HIGH} 는 고사이클피로(High cycle fatigue)에 상당하는 응력 중 가장 높은 응력 또는 실험응력 중 가장 높은 응력 등이 될 수 있다. 또한 σ_{LOW} 는 피로한도의 응력보다 약간 높은 응력 또는 실험응력 중 가장 낮은 응력 등으로 될 수 있다.

파단반균열길이, a_f 는 재료의 파괴인성치 또는 실험응력하에서 실제 측정가능한 파단반복수의 95% 반복수에서의 균열길기로 설정할 수 있다. 또한 임의응력을 부하할때 파단반복수 N_x 는 σ_{HIGH} 및 σ_{LOW} 응력 작용시의 파단반복수만 실험적으로 결정되면 σ -N선도에 대한 Basquin 식[8]을 사용하면 결정할 수 있다.

4.2 임의응력 작용시의 피로수명 (N_x)

고사이클 피로영역(High cycle fatigue)에서 반복하중을 받고 있는 기계부재에 대해서, 피로수명 (N_f)과 작용응력(σ)과의 관계는 σ -N 선도에 대한 Basquin 방정식을 사용하면 식(6)과 같다.

$$N_f \cdot \sigma^p = C \tag{6}$$

여기서 P 및 C는 재료에 따른 상수이다.

이때 고사이클피로영역 중 가장 큰 반복응력 또는 실험 작용응력 중 가장 큰 반복응력 (σ_{HIGH})이 작용하는 경우의 피로수명을 N_{HIGH} , 피로한도보다 약간 높은 반복응력 또는 실험부하응력 중 가장 작은 반복응력 (σ_{LOW})이 작용하는 경우의 피로수명을 N_{LOW} 라 하면 σ_{HIGH} 와 σ_{LOW} 사이의 임의응력 (σ_x)부하시의 피로수명, N_x 는 식(7)과 같이 주어진다.

$$N_x \cdot \sigma_x^p = C \tag{7}$$

$$\text{여기서, } P = \frac{\log N_{LOW} - \log N_{HIGH}}{\log \sigma_{HIGH} - \log \sigma_{LOW}}$$

$$C = N_{HIGH} \sigma_{HIGH}^p \text{ or } N_{LOW} \sigma_{LOW}^p$$

4.3 J적분범위 (ΔJ)

탄소성 반복응력을 받는 평판내에 균열길이 $2a$, 균열깊이 c 의 반타원형 균열이 존재하는 경우, 반타원형 균열재에 대한 J적분범위의 값은 실험적으로 Dowling과 Beglay의 결과[9]를 적용하여 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta J = \Delta J_e + \Delta J_p \tag{8}$$

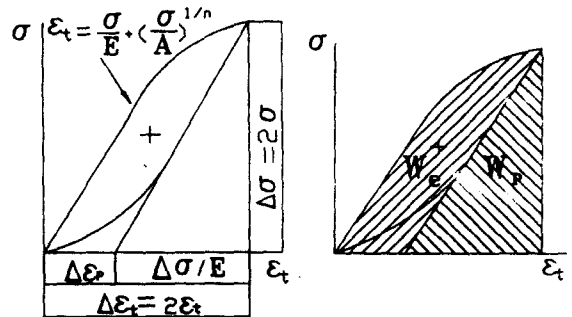
여기서 ΔJ_e 및 ΔJ_p 는 각각 ΔJ 의 탄성성분 및 소성성분을 나타낸다. ΔJ 의 탄성성분 ΔJ_e 와 응력 확대계수범위 ΔK 와의 관계는 식(9)와 같다.

$$\Delta J_e = \Delta K^2/E \tag{9}$$

ΔJ 의 소성성분 ΔJ_p 는 반복응력-변형률 히스테리시스 곡선으로부터 구해지며 그 값은 다음과 같다.

$$\Delta J_p = F^2 \cdot f_{(n)} \cdot \Delta W_p \cdot a \tag{10}$$

여기서 F는 균열의 유효크기 및 균열면 형상에 대한 수정계수이며 Newman-Raju의 결과[10][11]를 적용하여 구한다.



$$W_e = \frac{\Delta \sigma}{2E} \quad W_p = \frac{\Delta \sigma \Delta \epsilon}{n+1}$$

Fig. 7 Estimation of ΔJ from stress-strain hysteresis loop

또한 ΔW_p 및 n 은 소성스트레인 에너지밀도 및 가공경화지수이며 ΔW_p 는 Fig. 7의 반복응력-변형률선도 상의 표시된 면적에 해당되며 이를 수식으로 나타내면 식(11)과 같다.

$$\Delta W_p = \Delta \sigma \cdot \Delta \varepsilon_p / (n+1) \quad (11)$$

또 $f(n)$ 은 가공경화지수의 함수로써 식(12)와 같이 주어진다[12].

$$f(n) = (1+n) \cdot \{3.85(1-n) \cdot n^{(-1/2)} + \pi \cdot n\} \quad (12)$$

본 연구에서는 ΔJ_e 를 구하기 위하여 사용한 응력확대계수범위 ΔK 는 반타원형 균열 및 유탄크기에 대해 수정한 Newman-Raju의 수정식[10]을 사용하였다.

4.4 탄소성파괴역학 파라메타 ΔJ 를 사용한 수명 예측

부하응력에 따라 작은 표면결합에서 발생, 성장하는 표면피로균열의 균열성장속도 (da/dN)를 ΔJ 의 파라메타를 사용하여 정리하면 양 대수지 상에서 식(13)과 같이 선형적인 관계가 성립된다.

$$da/dN = C (\Delta J)^m \quad (13)$$

단,

$$\begin{aligned} \Delta J &= \Delta J_e + \Delta J_p = (\Delta \sigma \sqrt{\pi \cdot c / Q} \cdot F)^2 / E + F^2 \cdot \\ &\quad \frac{f(n) \cdot \Delta W_p \cdot a}{\Delta \sigma (\Delta \sigma \cdot \pi \cdot c / Q \cdot E) +} \\ &\quad \Delta \varepsilon_p \cdot \{3.85(1-n) \cdot n^{(-1/2)} + \pi \cdot n\} \cdot F^2 \end{aligned} \quad (14)$$

위 식을 N 에 대하여 적분하면

$$N_f = \int da = \int_{a_i}^{a_f} f(a) da \quad (15)$$

$$\text{단, } f(a) = \frac{1}{c(\Delta J)^m}$$

a_i = 초기균열길이

a_f = 파단직전의 균열길이

위 식을 균열길이 a 에 대하여 적분하기 위해서는 형상비의 함수로 주어지는 $f(a)$ 를 a 의 함수로 변환하여야 한다. 따라서 Fig. 3의 형상비에 대한 데이터를 a 와 c 의 관계로 재도시 하면 a 와 c 의 관계는 식(16)과 같은 선형적 관계로 된다.

$$c = 0.86a + 0.14 \quad (16)$$

이 관계를 식 (15)에 대입하면 a 의 함수로 변환된다.

$$\text{즉 } N_f = \int da = \int_{a_i}^{a_f} f(a) da \quad (17)$$

4.5 시뮬레이션 결과 및 검토

1) 표면피로균열의 성장곡선

SM45C재의 인공결합에서 발생, 성장하는 표면 균열의 균열길이비와 반복수비의 관계를 4.1항에서 소개한 4차다항함수형으로 나타내어보자. 우선 작용응력 중 가장 큰 응력 σ_{HIGH} 를 실험응력 중 가장 큰 응력 261MPa로 두고 이때의 균열성장 데이터를 4차다항함수로 근사시키면 균열성장식은 식(18)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} a/a_f &= 1.945 (N/N_f)^4 - 2.253 (N/N_f)^3 + \\ & 1.103 (N/N_f)^2 - 0.032 (N/N_f) + 0.047 \end{aligned} \quad (18)$$

또한 작용응력 중 가장 작은 응력 σ_{LOW} 를 실험 응력 중 가장 작은응력 213MPa로 두면 이때의 균열성장식은 식(19)와 같다.

$$\begin{aligned} a/a_f &= 1.154 (N/N_f)^4 - 1.226 (N/N_f)^3 + \\ & 0.569 (N/N_f)^2 - 0.063 (N/N_f) + 0.045 \end{aligned} \quad (19)$$

이들 두 극한응력 σ_{HIGH} 및 σ_{LOW} 사이의 임의응력을 249MPa, 237MPa 및 225MPa로 두고 이들 세가지 임의응력 작용시에 대하여 식(4)를 적용시켜 균열성장식을 구하여 균열길이비와 반복수비의 관계로 나타내면 Fig. 8과 같다.

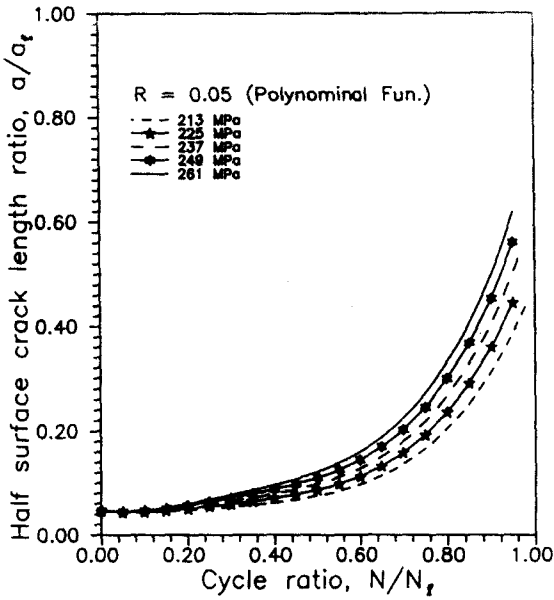


Fig. 8 Polynominal crack growth curves for arbitrary stress

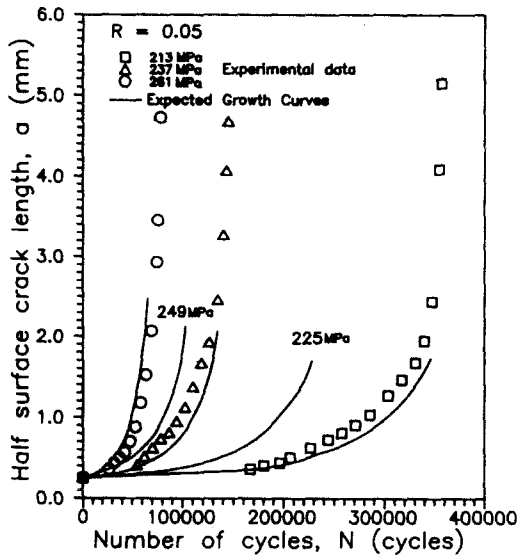


Fig. 9 Crack growth curves obtained from polynominal crack growth equations

그림에서 알 수 있는 바와 같이 세가지 임의응

력 작용시의 균열성장곡선은 σ_{HIGH} 및 σ_{LOW} 응력 작용시의 균열성장곡선들 사이에 존재하며 균열길이 비는 반복수비의 증가에 따라 원활히 상승한다. 또한 세가지 임의응력 작용시에 대하여 식(7)의 Basquin식에 의하여 파단수명 (N_f)을 예측하고 파 단직전 ($0.95 N_f$)의 균열반길이 (a_f)를 4.7mm, 초기균열 (a_i)을 0.25mm로 두면 $a/a_f \sim N/N_f$ 관계 선도는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 일반적인 a-N 선도로 변환이 가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 4차다항함수형 균열성장식을 적용하여 탄소성 파괴역학적 수명예측을 시도하고 그 결과를 실험 치와 비교·검토하였다.

2) 균열성장속도의 탄소성 파괴역학적파라메타 ΔJ 에 의한 정리

4차다항함수형 균열성장식을 사용하여 두 극한 응력(261MPa, 213MPa) 및 임의응력(249MPa, 237MPa 및 225MPa) 작용시에 대하여 균열성장속도와 J적분범위와의 관계를 양대수지상에 도식한

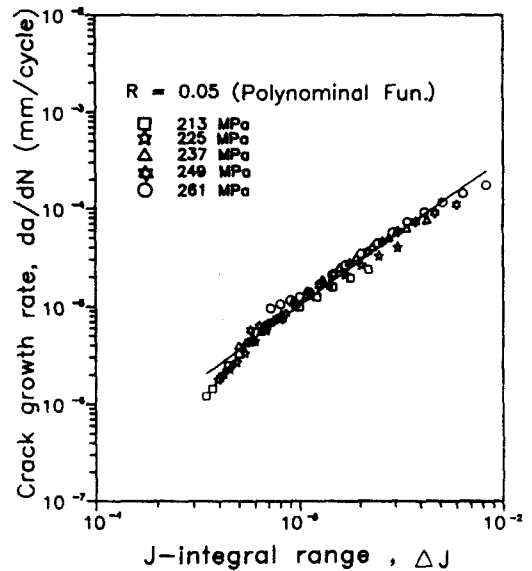


Fig. 10 Fatigue crack growth rate (da/dN) versus J-integral range (ΔJ) obtained from polynominal crack growth curves

결과를 Fig. 10에 나타내었다. 균열성장속도와 J적

분범위와의 관계는 양대수지상에서 선형적인 관계가 성립하며 이때 균열성장 데이터의 중앙부를 최소자승법으로 직선화시켜 균열성장속도식으로 나타내면 식(20)과 같다.

$$da/dN = C (\Delta J)^m \quad (20)$$

(C = 2.932 x 10⁻¹ m = 1.488)

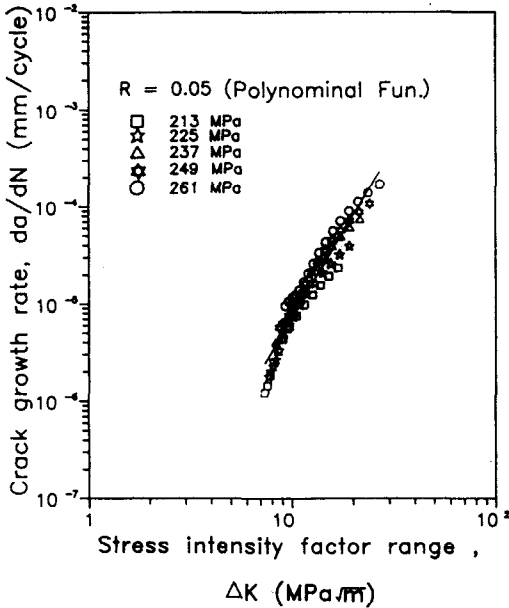


Fig. 11 Fatigue crack growth rate (da/dN) versus stress intensity factor range (ΔK) obtained from Polynominal crack growth curves

Fig. 11은 4차다항함수형 균열성장식을 사용하여 균열성장속도를 응력확대계수범위로 정리한 그림이다. 이때 사용한 응력확대계수는 앞절에서 언급한 Newman-Raju(10)의 수정응력확대계수이다. 4차다항함수형 균열성장식을 사용한 경우 균열성장속도와 응력확대계수범위와의 관계는 양대수지상에서 선형적인 관계가 잘 성립한다. 이때 균열성장데이터의 중앙부를 최소자승법으로 직선화시켜 균열성장속도식으로 나타내면 식(21)과 같다.

$$da/dN = C (\Delta J)^m \quad (21)$$

(C = 2.075932 x 10⁻⁹ m = 3.511)

3) 수명예측결과

SM45C 인공결합재의 실측가능한 파단직전 (0.95 N_r)의 균열반경이(0.95 a_p)를 4.7mm, 초기균열반경이 (a_i)를 0.25mm로 하여 4차다항함수형 균열성장식을 사용하여 얻은 da/dN ~ ΔJ 관계선도를 이용하여 식(17)로 수치적분하여 예측한 피로수명을 Table 3에 나타내었다. Table 3에서와 같이 4차다항함수형 균열성장식 및 ΔJ를 사용하여 피로수명을 예측하면 응력레벨에 따라 실험피로수명과 약 3~6%의 오차범위로 정확하게 수명을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

위 결과를 선형파괴역학적 파라메타 ΔK를 사용한 결과와 비교검토하기 위하여 4차다항함수형 균열성장식과 da/dN ~ ΔK관계선도를 이용하여 수치적분하여 예측한 피로수명을 Table 4에 나타내었다. 또한 지수함수형 균열성장식과 da/dN ~ ΔK 관계선도를 이용하여 수치적분한 예측피로수명은 Table 5에 나타내었다. 4차다항함수 균열성장식과 ΔK를 사용한 경우에는 예측피로수명이 실험피로수명과 약 14~17%의 오차범위를 나타냄을 알 수 있다.

Table 3. Comparison of experiment life and calculation life obtained from crack growth rate equation using ΔJ which calculated from polynominal function crack growth curves

Stress level(MPa)	Experiment life. N _r (cycle)	Calculation life. N _r (cycle)	Error (%)
213	362,282	834,380	6.1
225	244,812	257,787	5.3
237	144,587	151,153	4.5
249	110,975	115,637	4.2
261	76,912	74,361	3.3

Table 4. Comparison of experiment life and calculation life obtained from crack growth rate equation using ΔK which calculated from polynomial function crack growth curves

Stress level(MPa)	Experiment life. N_f (cycle)	Calculation life. N_f (cycle)	Error (%)
213	362,282	396,526	9.5
225	244,812	266,120	8.7
237	144,587	158,500	9.6
249	110,975	119,952	8.1
261	76,912	72,049	6.3

Table 5. Comparison of experiment life and calculation life obtained from crack growth rate equation using ΔK which calculated from exponential function crack growth curves

Stress level(MPa)	Experiment life. N_f (cycle)	Calculation life. N_f (cycle)	Error (%)
213	362,282	396,526	14.7
225	244,812	205,886	15.9
237	144,587	120,200	16.8
249	110,975	93,551	15.7
261	76,912	65,365	15.0

이상의 결과를 종합하면 4차다항함수형균열성장식과 탄소성파괴역학적 파라메타(ΔJ)를 사용한 경우가 가장 정확하게 피로수명이 예측됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기계구조용 탄소강인 SM45C재에 작은 인공표면 결함을 가공하여 상온하에서 $R=0.05$ 의 인장-축하중 피로시험을 실시하였다. 피로과정중 표면균열의 성장거동을 조사하여 그 성장

특성을 4차 다항함수로 근사시켜 임의 응력작용시에 대한 균열성장식을 유도하였다. 또한 균열의 성장에 따른 ΔJ 의 변화를 계산하여 임의 응력작용시에 대하여 ΔJ 를 사용한 탄소성 파괴역학적 피로수명 예측을 시도하였으며 그 결과를 ΔK 를 사용한 결과와 비교검토한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) $a/a_f - N/N_f$ 관계선도상에서의 균열성장식은 다음과 같이 4차다항함수로 들 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{HIGH}: a/a_f &= A_1(N/N_f)^4 + A_2(N/N_f)^3 + \\ &A_3(N/N_f)^2 + A_4(N/N_f) + A_5 = F(A) \\ \sigma_{LOW}: a/a_f &= B_1(N/N_f)^4 + B_2(N/N_f)^3 + \\ &B_3(N/N_f)^2 + B_4(N/N_f) + B_5 = F(B) \end{aligned}$$

임의응력 σ_x ($\sigma_{LOW} < \sigma_x < \sigma_{HIGH}$) 작용시 균열성장식

$$\begin{aligned} a/a_f = \left[\left(1 - \frac{\sigma_x - \sigma_{LOW}}{\sigma_{HIGH} - \sigma_{LOW}} \right) F(B) \right. \\ \left. + \frac{\sigma_x - \sigma_{LOW}}{\sigma_{HIGH} - \sigma_{LOW}} F(A) \right] \end{aligned}$$

2) 4차다항함수 균열성장식을 사용하면 지수함수 균열성장식보다 실험데이터의 성장특성에 보다 잘 일치한다.

3) 4차다항함수 균열성장식을 사용하여 파괴역학적으로 피로수명을 예측한 결과 ΔK 의 탄소성 파괴역학적 파라메타를 사용한 경우보다 ΔJ 의 탄소성 파괴역학적 파라메타를 사용하면 실험수명과 오차가 3%~6% 정도로 오차가 가장 작게 예측 가능하였다.

4) 4차다항함수 균열성장식을 사용하면 임의응력 작용시에 대한 $da/dN \sim \Delta J$ 관계선도와 $S - N_f$ 선도의 추정이 가능하다.

6. 참고문헌

[1] 서창민, 강용구 "2 1/4Cr - 1Mo 鋼의 작은 표면균열의 成長에 관한 基礎的 研究" 한국해양공학회지 제 1권 제 1호 pp. 104-110, 1987.
[2] 서창민, 임창순, 강용구 "작은표면균열의 성장

- 특성에 의한 수명예측” 한국해양공학회지 제 3권 제 2호 pp. 608-617, 1989.
- [3] 서창민, 강용구 “회전굽힘응력하의 탄소강재의 표면피로균열의 성장특성” 대한기계학회 논문집 제 15권 제 4호 pp. 1195-1203, 1991.
- [4] 강용구 “表面龜裂의 成長特性에 관한 破壞力學的 研究” 慶北大學校 博士 學位論文, 1990.
- [5] 강용구, 서창민, 박원중 “잔류응력에 의한 피로균열면 형상변화 및 수명예측” 한국해양공학회지 제 7권 제 2호 pp. 246-259, 1993.
- [6] Rice, J.R., “A Path Independent Integral and Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks” J. of the Applied Mechanics, Vol. 35 No. 2, pp. 379~386, 1968.
- [7] Ramberg, W. and Osgood, W.R., NACA Tech. Note, P.902, 1943.
- [8] Dieter, G.E. “금속강도학” 회중당 p. 246, 1991.
- [9] Dowling N.E. and Begley J.A., “Fatigue Crack Growth During Gross Plasticity and the J-Integral” ASTM STP 590, pp 82- 103, 1976.
- [10] Newman, J.C. and Raju, I.S., “Stress-Intensity Factor Equations for Crack in Three-Dimensional Finite Bodies, “Vol I: ASME STP 791, pp. I-238 - I-265, 1976.
- [11] Newman, J.C. and Raju, I.S., “An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack,” Engineering Fracture Mechanics, Vol.15 No.1-2, pp. 185-192, 1981.
- [12] Shih, C.F. and Hutchinson, J.W., “Fully Plastic Solutions and Large Scale yielding Estimated for Plane Stress Crack Problems” J. Engng Mater. Tech., Trans. ASME 98, pp. 280-295, 1976.