

잔류응력에 의한 피로균열면 형상변화 및 수명예측⁺

강 용 구* · 서 창 민** · 박 원 종***
(1993년 10월 9일 접수)

Fatigue Crack shape Variations by a Residual Stress and Fatigue Life Prediction

Yong-Goo Kang · Chang-Min Suh · Won-Jong Park

Key Words : Residual Stress(잔류응력), Residual Stress Intensity Factor(잔류응력확대계수), True Effective Stress Intensity Factor(진유효응력확대계수), Crack Closure(균열닫힘), Crack Growth Equation(균열성장식), Aspect Ratio(균열면 형상비), Life Predicton(수명예측)

Abstract

Fatigue crack shape variation by a residual stress during crack growth and life prediction are studied. An analytical method is presented to predict the influence of a residual stress due to heat treatment on crack shape variations. Computer simulation results using this method are graphically shown that crack growth rate to surface direction are decreased due to compressive residual stress existing in surface area. These results are compared with experimental results. The fatigue life is also predicted by computer simulation of crack aspect ratio variation which is based on the surface crack length increment per unit cycle calculated from a-N diagram. Predicted life is about 12 percent lower than experimental life.

1. 서 론

각종 구조물이나 기계부품의 설계 및 파손에

대한 해석수단으로 파괴역학적 개념을 사용하기 시작한 1960년대 이후 파괴역학적 방법에 의한 구조물의 안전성과 사용수명을 보다 정확히 예측하기 위한 연구가 많이 수행 되어오고 있다.

+ 1993년도 춘계 학술대회 발표 논문임(1993년 6월)

* 금오공과대학교 기계설계공학과

** 경북대학교 기계설계공학과

*** 동환산업(주) 기술연구소

기계구조물의 대부분 파손은 피로에 의해 발생하며, 발생한 균열은 표면과 깊이방향으로 동시에 성장하여 반타원형의 균열을 형성한다. 따라서 피로전과정에 대한 수명예측은 2차원적인 균열성장특성을 고려하여 예측하는 것이 대단히 중요하다.

반타원형 표면균열(Semi-Elliptical Surface Crack)을 가진 3차원 유한체에 대한 보다 정확한 응력 확대 계수(Stress Intensity Factor) 관계식이 1983년 Newman과 Raju¹⁾에 의해 발표되면서 표면과 깊이방향으로의 성장에 대한 2차원적 해석이 몇몇 연구가들에 의해 수행되었다.²⁾⁻⁶⁾

Jolles 등⁶⁾은 부재에 작용하는 응력레벨이 균열 표면과 균열최심점에서의 유효응력범위비(U_c/U_a)가 0.911로 일정하다는 가정하에서 2차원적인 균열면 형상비(Aspect Ratio)의 변화를 예측하였다.

피로 균열성장 과정은 하중조건, 환경적인 요인 및 재료의 구성성분과 같은 상호 복합적인 요인에 의해 영향을 받게되며 특히, 구조물 내부에 존재하는 잔류응력은 균열성장과정에 큰 영향을 미친다.⁷⁾⁻⁹⁾ 이러한 잔류응력은 실제 부재에 작용하는 작용응력과 상호관련되어 균열성장 특성에 영향을 미치게 되어 균열면 형상비의 변화를 일으킨다는 것은 명백하다.

따라서 본 연구에서는 열처리후 부재에 잔존하는 잔류응력을 실제 작용응력과 조합하여 잔류응력이 존재하는 경우에 대하여 균열의 성장에 따른 유효응력범위비(U_c/U_a)의 변화에 대한 해석을 수행하여 균열면 형상비의 변화를 보다 정확하게 예측하고 U_c/U_a 가 0.911로 일정하면서 잔류응력이 없는 경우에 대한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 서로 비교검토 하였다. 또한 피로수명의 예측은 상한 및 하한응력하에서 얻어진 표면 균열길이 a 와 반복수 N 과의 관계에서 임의 응력하에서의 균열성장식을 구하여 한 사이클당 균열길이 증분량 da 를 추정한 다음, 단지 컴퓨터 시뮬레이션(Computer Simulation)을 통하여 균열면 형상의 변화를 예측함과 동시에 균열 성장 전 단계의 수명을 예측하여 실험결과와 비교검토 하였다.

2. 관계이론

2. 1 응력확대계수 관계식

균열성장속도(da/dN)와 응력확대계수 범위비(ΔK)의 관계에서 선형을 나타내는 균열진전 II 영역에서 LEFM(Linear Elastic Fracture Mechanics) 개념을 도입한 응력확대계수 관계식은 무한평판에 인장응력 σ 가 작용하는 경우는 다음과 같이 주어진다.¹⁰⁾

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

그러나 본 연구에서와 같이 유한평판의 중앙표면에 작은 피트형 인공결합이 존재하는 경우에 대한 응력확대계수 관계식은 Newman-Raju가 1983년에 제안한 반타원형 균열에 대한 수정식을 사용하였다. 표면 균열길이와 균열깊이와 상호관련되는 Newman-Raju식은 다음과 같이 두 형태로 나뉘어 진다.

(1) $c/a \leq 1$ 인 경우

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{(\pi \cdot c/Q)} \cdot F_s(c/a, c/t, a/w, \varphi) \quad \dots \dots \dots \quad (2.2)$$

$$Q = 1 + 1.464(c/a)^{1.65}$$

$$F_s = [M_1 + M_2(c/t)^2 + M_3(c/t)^4] f_\varphi \cdot g \cdot f_w$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09(c/a)$$

$$M_2 = -0.54 + [0.89/(0.2 + (c/a))]$$

$$M_3 = 0.5 - [1.0/(0.65 + (c/a))] + 14(1.0 - c/a)^{24}$$

$$g = 1 + [0.1 + 0.35(c/t)^2] (1 - \sin\varphi)^2$$

$$f_\varphi = [(c/a)^2 \cos^2\varphi + \sin^2\varphi]^{1/4}$$

$$f_w = [\sec(\pi a/2 w \pi c/t)]^{1/2}$$

(2) $c/a > 1$ 인 경우

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{(\pi \cdot c/Q)} \cdot F_s(a/c, c/t, a/w, \varphi) \quad \dots \dots \dots \quad (2.3)$$

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}$$

$$F_s = [M_1 + M_2(c/t)^2 + M_3(c/t)^4] f_\varphi \cdot g \cdot f_w$$

$$M_1 = \sqrt{a/c} (1 + 0.04 \cdot a/c)$$

$$M_2 = 0.2(a/c)^4$$

$$M_3 = -0.11(a/c)^4$$

$$g = 1 + [0.1 + 0.35(a/c) (c/t)^2] (1 - \sin\varphi)^2$$

$$\begin{aligned} f_\phi &= [(a/c)^2 \sin^2 \phi + \cos^2 \phi]^{1/4} \\ fw &= [\sec(\pi \cdot a/2 \cdot w \cdot \sqrt{c/t})]^{1/2} \end{aligned}$$

여기서

- $\Delta\sigma$: Remote uniform tensile stress range
- a : Half-length of surface crack
- c : Depth of crack
- w : Width or half width of cracked plate
- F : Boundary-correction factor
- fw : Finite-width correction factor
- f_ϕ : Angular function derived from elliptical crack solution
- Q : Shape factor for an elliptical crack
- ϕ : Parametric angle of the ellipse
- M_i : Curve fitting functions

2.2 잔류응력확대계수 관계식

부재에 잔류응력이 존재하게 되면, 피로균열성장에 민감한 영향을 끼친다는 것은 명백한 사실이다. 그러므로 피로균열 해석에 있어서 잔류응력의 고려는 보다 정확한 결과를 도출한다. 이러한 잔류응력확대계수(Residual stress intensity factor)는 Kanazawa¹¹⁾에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$K_r = \int_0^c \sigma_r(x) \left[\frac{2 \cdot \sin(\pi(c+x))/t}{t \cdot \sin((2\pi c)/t) \cdot \sin(\pi(c-x))/t} \right] dx \quad (2.4)$$

위에서 $\sigma_r(x)$ 는 실험에 의해 구한 잔류응력의 분포이다. 그러므로 두께방향으로 잔류응력이 존재하면서 응력을 받고 있는 반타원형 균열재에 대한 진 유효응력확대계수는 중첩법을 사용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_{la,eff} &= K_{la} + K_r(x=0 \text{ 일 때}) \quad (2.5) \\ K_{lc,eff} &= K_{lc} + K_r(x=C \text{ 일 때}) \end{aligned}$$

여기서 K_{la} , K_{lc} 는 각각 표면균열선단 및 균열최심점에서의 응력확대계수 값이다.

2.3 균열증분비 관계식

반복하중을 받는 반타원형 균열의 표면균열선단을 나타내는 점 a와 균열 최심점 c에서의 응력 확대계수 범위비, ΔK_{la} 및 ΔK_{lc} 는 Newman-Raju 수정식에서 각각 $\phi=0$ 과 $\phi=\pi/2$ 일 때의 값이다.

균열이 안정 성장하는 영역에서의 표면방향 및 깊이방향으로의 균열성장속도는 Paris 법칙¹²⁾에 의해 다음과 같은 성장속도식이 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} da/dN &= C(\Delta K_{la})^m \quad (2.6) \\ dc/dN &= C(\Delta K_{lc})^m \end{aligned}$$

여기서, C, m은 재료 상수이다.

재료가 등방성 재료이며 균열성장속도가 응력 확대계수 범위비에만 관련된다면 C, m은 두 방향에서 동일하다고 볼 수 있고 따라서 두 방향으로의 균열증분비는 다음과 같다.

$$dc/da = C(\Delta K_{lc}/\Delta K_{la})^m \quad (2.7)$$

또한 균열증분비를 전진하는 균열 선단의 소성 변형에 의해 발생하는 균열단힘을 고려하여 유효응력 범위비로 나타내면 다음과 같다.¹³⁾

$$da/dN = C(U_a \cdot \Delta K_{la})^m \quad (2.8)$$

$$dc/dN = C(U_c \cdot \Delta K_{lc})^m \quad (2.9)$$

$$U_a = \Delta K_{la,eff}/\Delta K_{la} \quad (2.10)$$

$$U_c = \Delta K_{lc,eff}/\Delta K_{lc} \quad (2.11)$$

식(2.7)~식(2.11)을 조합하여 정리하면 식 (2.12)과 같이 표현할 수 있다.

$$dc/da = (U_c \Delta K_{lc} / U_a \Delta K_{la})^m \quad (2.12)$$

또한 식 (2.8)와 (2.9)을 증분형으로 변환하여 U_a 및 U_c 의 관계를 구해보면 식 (2.13)과 같이 된다.

$$U_c/U_a = (\Delta_c/\Delta_a)^{1/m} \cdot (\Delta K_{la}/\Delta K_{lc}) \quad (2.13)$$

여기서 $(\Delta_c/\Delta_a)^{1/m} \doteq$ 로 두면 식 (2.14)으로 유도된다.

$$U_c/U_a = (\Delta K_{la}/\Delta K_{lc}) \quad (2.14)$$

잔류응력이 존재하면서 반복하중을 받는 경우, 두 방향으로 균열증분비를 유효응력 범위비를 사용하여 정리하면 다음과 같이 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} dc/da &= (U_c \Delta K_{laeff}/U_a \Delta K_{laeff})^m \\ &= (\Delta K_{la}/\Delta K_{lc})^m \cdot (\Delta K_{laeff}/\Delta K_{laeff})^m \end{aligned} \quad \dots \quad (2.15)$$

여기서 $\Delta K_{laeff} = \Delta K_{la}/\Delta K_r (x=0 \text{ 일 때})$

$\Delta K_{laeff} = \Delta K_{lc}/\Delta K_r (x=C \text{ 일 때})$

2.4 표면균열길이 증분량, da 관계식

최대작용응력레벨(σ_{up}) 및 최소작용응력레벨(σ_{lo}) 하에서의 표면균열의 반길이와 반복수관계선 도를 무차원화한 $a/a_r - N/N_f$ 특성을 이용한 균열성장식은 다음과 같다.¹⁴⁾

$$UC : a/a_r = C_1 e^{m_1(N/N_f)}$$

$$LC : a/a_r = C_2 e^{m_2(N/N_f)}$$

여기서 a_r 는 파단시 균열반길이이고 N_f 는 파단반복수이다.

위의 식에 Log를 취한 후 직선 회귀 분석을 사용하여 임의응력 σ_x 에서 균열성장식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a/a_r &= C \left[\left(1 - \frac{\sigma_x - \sigma_{Lo}}{\sigma_{Up} - \sigma_{Lo}} \right) e^{m_1(N/N_f)} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_{Lo}}{\sigma_{Up} - \sigma_{Lo}} \right) e^{m_2(N/N_f)} \right] \end{aligned} \quad \dots \quad (2.16)$$

또 임의응력 σ_x 가 σ_{Lo} 와 σ_{Up} 의 중간응력레벨인 경우 위의 식은 다음과 같이 유도된다.

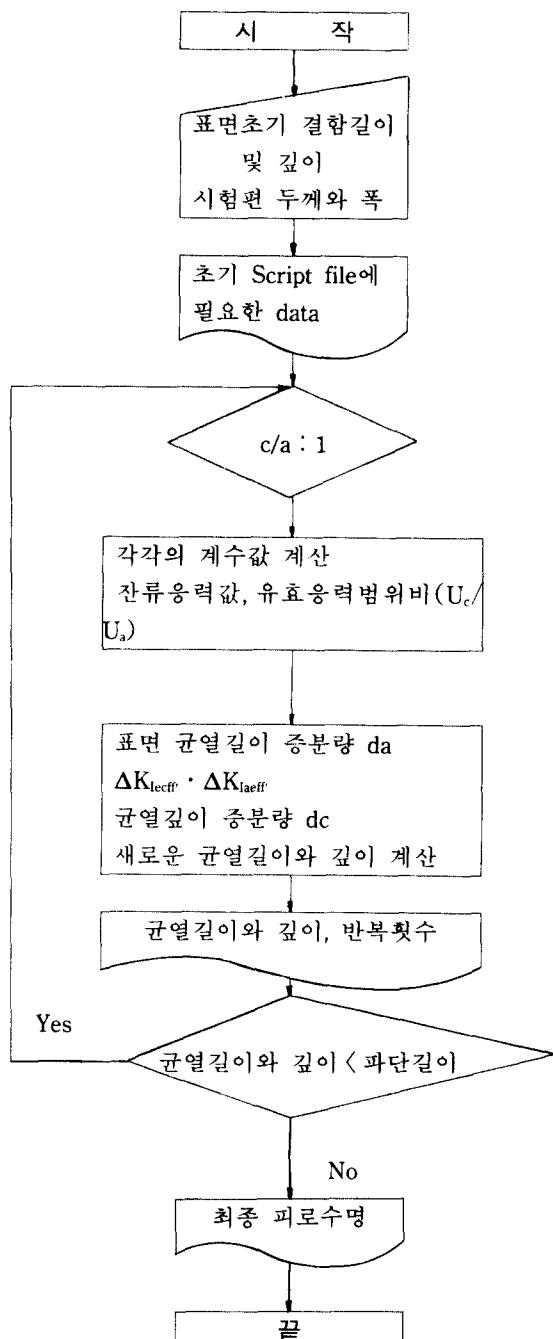
$$a/a_r = C \left[\frac{1}{2} e^{m_1(N/N_f)} + \frac{1}{2} e^{m_2(N/N_f)} \right] \dots \quad (2.17)$$

식 (2.17)에서 a에 대해 정리하면

$$a = C \cdot a_r \left[\frac{1}{2} e^{m_1(N/N_f)} + \frac{1}{2} e^{m_2(N/N_f)} \right]$$

으로 나타낼 수 있고, 여기서 한 사이클당 da 값을 구하면 매 사이클 당 변화하는 표면 균열 길이

증분량을 반복적으로 구할 수 있다. 이 결과를 사용하여 균열 기하학적 변동과 시뮬레이션에 필요한 자료를 얻을 수 있다.



2.5 시뮬레이션 알고리즘(Simulation Algorithm)

컴퓨터력을 고려한 2차원적 균열 기하학적 변동과 피로수명을 예측하는 시뮬레이션 알고리즘은 다음과 같은 과정을 거치며, 이 프로그램은 AUTOCAD SCRIPT FILE로 출력되도록 하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 시험편과 실험장치

본 실험에 사용된 시험편 재료는 각종 구조물에 널리 사용되는 구조용 탄소강 SM 45C재로 재료의 기계적 성질과 화학적 성분들은 Table 1, 2에 나타내었으며, 시험편 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 시편은 두께가 11mm인 평활재로 시편 표면 중앙에 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm의 초기 표면 결함을 가진 시편이다. 시편은 기계가공후 연마지(#800)로 연마하고 표면 중앙부에 작은 피트형 결함을 가공한 다음, 시편 일부를 풀링(Annealing) 처리하여 잔류응력을 제거시켰다.(P1재 라칭 함) 또는 잔류응력의 영향을 조사하기 위해 시편 일부를 담금질(Quenching)과 뜨임(Tempering)으로 열처리 하였다.(각각 P2재, P3재 칭 함) 각 재료의 열처리후의 기계적 성질은 Table 3에 나타내었다. 이상과 같이 표면결함을 가공하여 후 처리를 끝낸 시험편은 피로시험전에 연마지(#1000~1200)를 사용하여 표면을 연마 시킨 후 베핑 작업을 실시하였다.

피로실험 장치는 전기 유압 서어보식 피로시험기(INSTRON Model 1350-20, 10 ton)를 사용하였으며, 피로파면 형상을 조사하기 위하여 광학현미경을 사용하였다. 또한 균열깊이를 측정하기 위해 템퍼칼라법에 사용되는 1000°C용 전기 도가니로가 사용되었다.

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 modlus E(GPa)	Poisson's ratio ν
P1	340.5	689	203.5	0.28

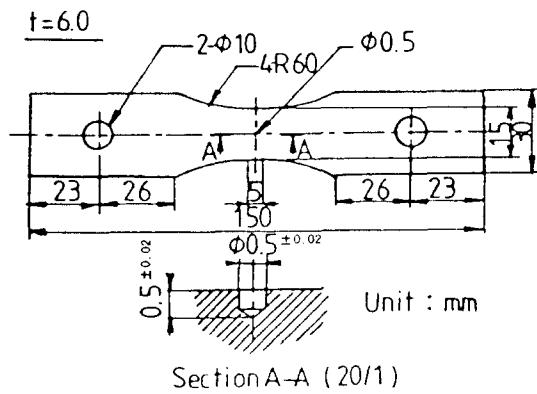


Fig. 1 Configuration of the specimen

Table. 3 Mechanical Properties of Heat treatment specimen.

Material	Yield strength σ_y (MPa)	Tensile strength σ_u (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
P2	703	909.2	18	50
P3	951	1215	5	27

3.2 실험방법

피로시험은 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$), $R=0.05$ 에서 $\sigma_{max}=261,237,213\text{ MPa}$ 으로 수행하였다. 이론적인 해석과 비교, 검토하기 위해 표면 균열길이 $2a$ 는 전체 파단 수명의 5~7%마다 시험기를 정지시켜 채취 보관한 레프리카를 광학현미경으로 확대하여 고정밀도로 측정하였다. 또한 균열깊이 b 는 템퍼칼라법(Temper Color method)을 사용하여 각각 균열길이에 해당하는 깊이 b 를 측정하였다.

시편의 열처리에 따른 잔류응력 측정은 ASTM E837-85에 규정된 훌드릴링 스트레인-계이지

방법(Hole-Drilling Strain-Gage Method)을 사용하였다.¹⁵⁾ 또한 한 사이클당 표면 균열길이 증분량 da 를 구하기 위해 상한 및 하한응력하에서의 균열길이-반복수 관계선도를 실험에서 구한 다음 지수 회귀 분석을 사용하여 임의의 응력하에서의 균열 성장식을 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4. 1 피로균열의 발생 및 성장거동

Fig. 2, 3는 P1재에 대해 3가지 각기다른 응력 베벨에서 실험한 균열길이 및 깊이와 반복수 관계선도이다. 부하사이클이 증가할수록 균열길이는 매우 빠르게 증가하며, 피로수명의 초기단계 보다 후기단계일수록 균열길이 및 깊이는 급성장을 할 수 있다.

이와 같은 경향은 열처리한 P2, P3재에 대해서도 동일한 경향을 보인다.

4. 2 균열성장식

Fig. 4는 Fig. 2의 P1재 실험데이터를 횡축을 반균열길이비(a/a_i), 종축을 반복수비(N/N_i)로 나

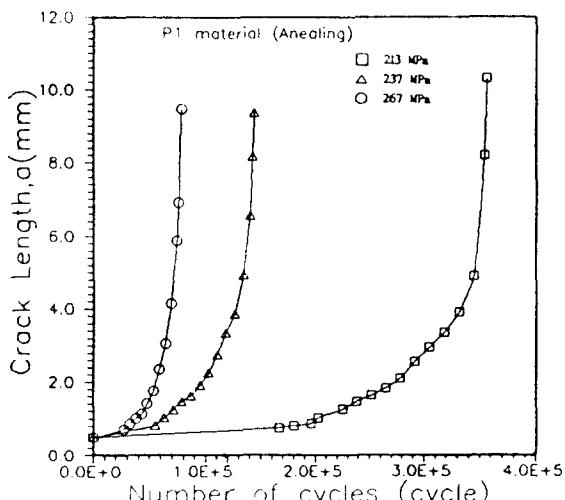


Fig. 2 Relation between crack length and number of cycles

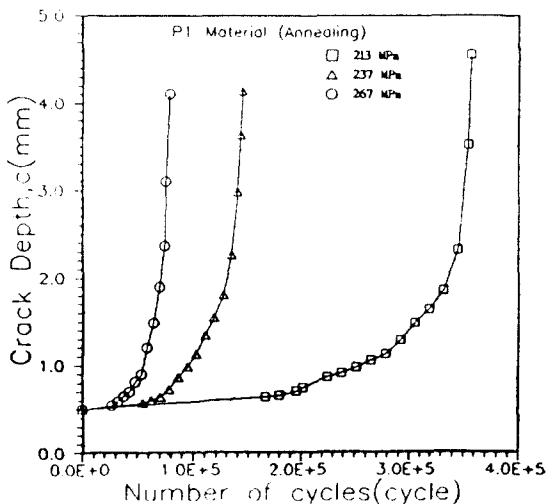


Fig. 3 Relation between crack depth and number of cycles

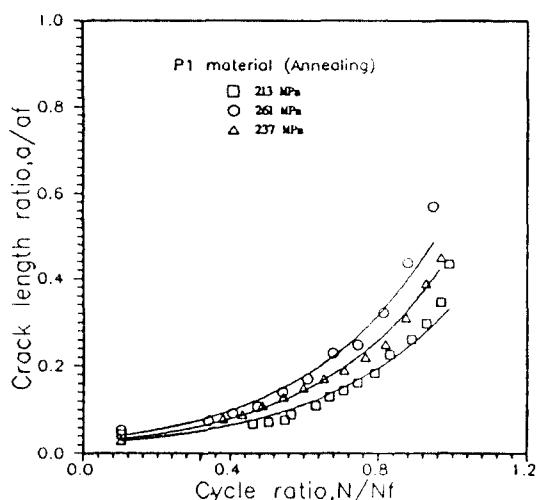


Fig. 4 Relation between crack length ratio and cycle ratio($a/a_i - N/N_f$)

타낸 그림이다. 최대부하응력이 작용하는 상한선, UC(Upper limit Curve)와 최소부하응력이 작용하는 하한선, LC(Lower limit Curve) 사이의 임의 응력이 작용할 때 균열성장식을 구할 수 있다. 지수회귀곡선으로부터 UC와 LC에서 각각의 균열 성장식을 구한 다음 UC와 LC의 중간부인 AC의

균열성장속도를 구한 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5에서 UC와 LC에서 유도된 AC의 균열성장식은

$$a/a_f = 0.0221198 \times \exp(3.04189 N/N_f)$$

이고 실험에 의한 균열성장식은

$$a/a_f = 0.0246242 \times \exp(2.9429 N/N_f)$$

이다.

이와 같이, 이론적으로 유도한 균열성장식은 균열면 기하학적변화와 피로수명의 컴퓨터 시뮬레이션에 중요한 관계식이다.

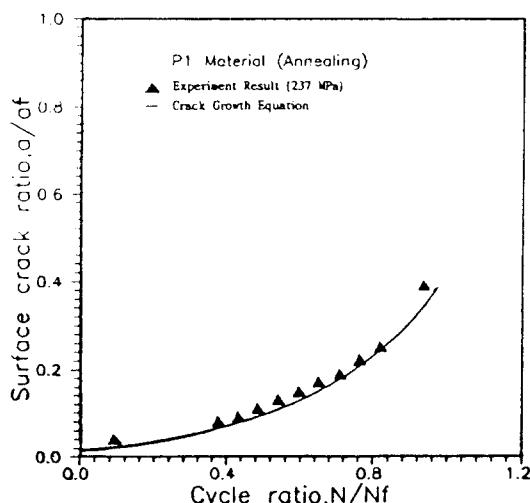


Fig. 5 Relation between crack length ratio and cycle ratio(Crack growth equation)

4. 3 균열면의 기하학적 변화

1) 균열길이와 균열깊이의 기하학적 변화

Fig. 6은 P1재에서 3가지 응력레벨하에서 실험한 균열길이와 깊이의 관계 선도이다. 균열깊이는 템퍼칼라법에 의해 실험적으로 구하여 졌다. 이 그림에서 알 수 있듯이 3가지 응력레벨(213, 237, 261 MPa)하에서 균열깊이와 길이 관계는 응력레벨이 바뀌어도 거의 동일하게 나타난다. 이와같은

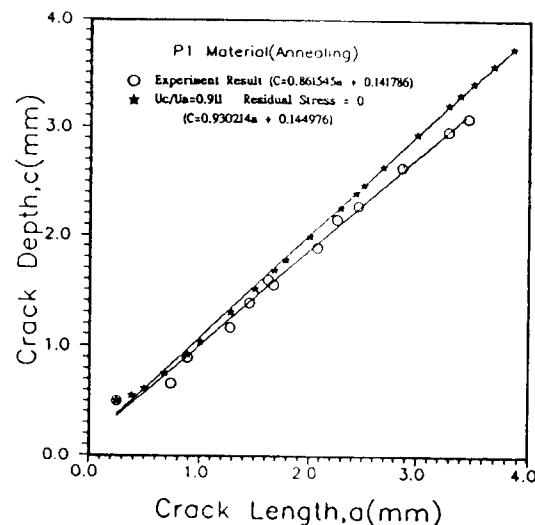


Fig. 6 Relation between crack length and crack depth(Jolles result – experiment result)

사실은 균열면 형상의 기하학적 변화를 예측하는데 매우 중요한 결과이다. 또한 Fig. 6 상에서 유효응력범위비를 $U_c/U_a=0.911$ 로 고정하여 예측한 Jolles의 결과를 중첩시켜 비교검토 하였다. 그럼에서 알 수 있듯이 균열진전의 초기에서는 양호하게 일치하나 균열이 성장할수록 기울기의 편차가 발생한다. 이와같은 결과는 유효응력범위비가 선형적으로 변한다는 사실¹⁶⁾을 보여준다.

2) 균열면의 기하학적 변화

Fig. 7은 시편의 열처리 후(Quenching)에 존재하는 잔류응력을 ASTM E837-85의 방법으로 표면 잔류응력을 측정하고 깊이방향의 잔류응력 분포는 문헌¹⁷⁾에서 발표된 결과를 인용하여 나타낸 잔류응력 분포선도이다. 이 그림의 잔류응력분포는 다항식으로 회귀분석한 다음 식 (2.4)을 사용하여 잔류응력확대계수 K_r 을 구하고 유효응력범위비의 변화를 고려한 균열기하학적 변화를 나타내는 시뮬레이션의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 잔류응력과 유효응력범위비를 일정하게 두었을 때 균열면 선단의 기하학적 변화는 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서는 실험결과와 상당한 오차가 발생된 반면 Fig. 8에서는 실험결과와 양호하

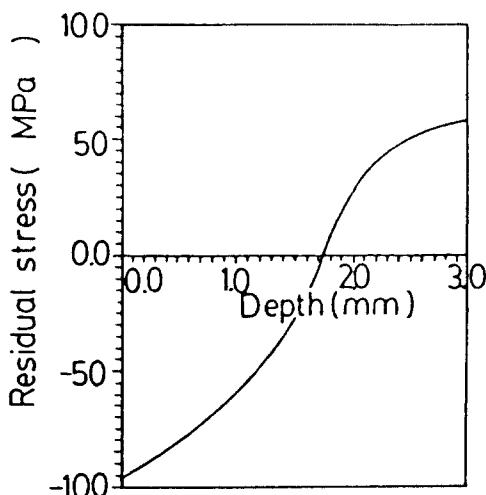


Fig. 7 Relation between residual stress and depth direction

P3 Material(450 MPa)

----- Residual Stress, $U_c/U_a=0.911$
Simulation Result
—— Experiment Result

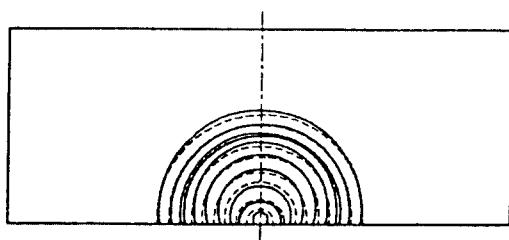


Fig. 8 The variation of crack growth

P3 Material(450 MPa)

----- Residual Stress=0
 $U_c/U_a=0.911$
—— Experiment Result

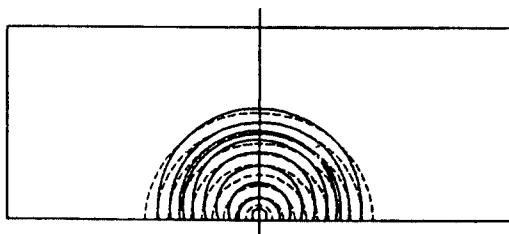


Fig. 9 The variation of crack growth

게 일치한다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과를 보다 더 구체적으로 나타내기 위해 Fig. 10에서는 균열길이와 균열깊이의 관계 선도를 각 실험 시편에 대해 얻은 실험 결과를 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 열처리한 P3재의 경우 균열진전의 특성은 표면 방향으로는 느리고 깊이방향으로는 빠르게 성장한다는 것을 알 수 있다. 이와같은 사실은 열처리 후 존재하는 잔류응력이 표면에는 압축잔류응력으로 존재하고 깊이방향으로 갈수록 인장잔류응력으로 존재한다는 사실을 뒷받침해주는 결과이다.

Fig. 11은식 (2.17)에서 U_c/U_a 를 선형적으로 변화시키고 잔류응력을 고려한 진 유효응력변화 계수를 사용하여 균열면 형상의 기하학적 변화를 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과는 그림에서와 같이 실험결과와 거의 일치 한다는 것을 알 수 있다. 이와같은 사실은 균열의 기하학적 변화를 예측하는데 있어서 유효응력범위비의 변화와 잔류응력의 고려는 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

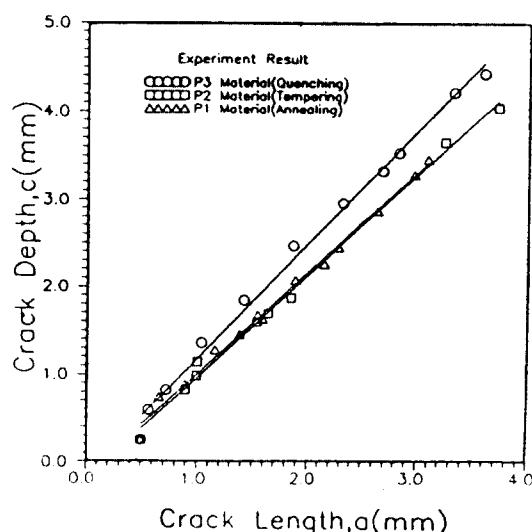


Fig. 10 Relation between crack length and crack depth

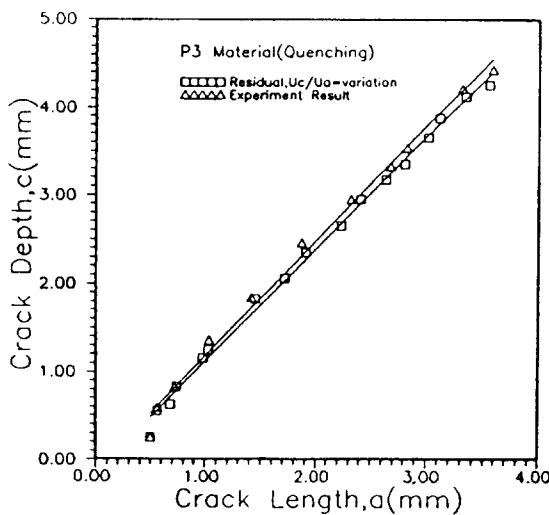


Fig. 11 Comparision of analytic results and experimental results

3) 피로수명 예측

P1재에 대하여 σ_{up} (261MPa)와 σ_{lo} (213MPa) 및 σ_{up} 과 σ_{lo} 사이의 임의응력레벨하($\sigma=237$ MPa)에 대해 유도한 균열성장식을 사용하여 표면방향 및 깊이방향으로의 균열성장속도를 파괴역학적으로 정리한 결과를 Fig. 12, 13에 나타내었다. 표면방

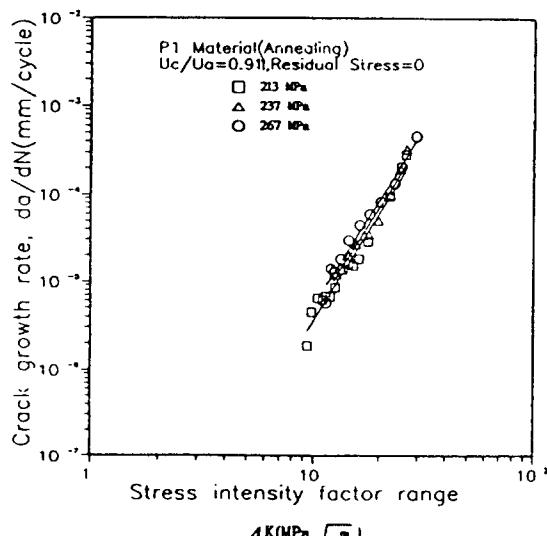


Fig. 12 Relation between crack growth rate and stress intensity factor range

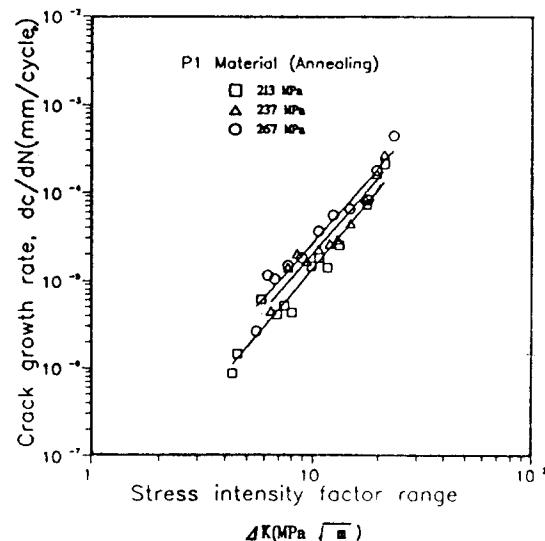


Fig. 13 Relation between crack growth rate and stress intensity factor range

향 및 깊이방향으로의 성장속도는 각각의 응력확대계수 범위비와 선형적인 관계가 잘 성립한다. 이들 관계를 이용하여 임의응력(237MPa)하에 대한 피로수명을 수치적분을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션한 결과 예상되는 균열길이를 $a_t=4.68$ 로 가정하였을 때 다음과 같은 결과를 산출하였다.

$$\begin{array}{ll} \text{실험 결과} & N_f = 144573 \text{ cycles} \\ \text{시뮬레이션 결과} & N_f = 127852 \text{ cycles} \\ \text{오 차} & = 11.56\% \end{array}$$

이러한 오차의 발생원인으로는 균열성장식을 지수함수로 나타내어서는 균열성장의 최종단계까지 표현이 불가능하여 약 11%의 오차가 발생하였다.

5. 결론

Quenching 열처리에 의하여 잔류응력이 내재하는 경우, 반타원형 균열의 균열형상비의 변화를 해석하고 컴퓨터 Simulation 결과와 SM45C재를 사용하여 얻은 실험결과를 비교검토 하였다. 또한 Annealing 열처리재에 대하여 표면결함에서 반타원형의 균열로 성장하는 피로균열에 대한 균열성

장식을 유도하고 이식을 사용하여 피로수명을 예측하고 실험결과와 비교검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열처리(Quenching)한 시험편의 잔류응력을 측정한 결과 시편 표면에는 약 -96MPa의 압축잔류응력이 존재하였고 이러한 잔류응력은 표면의 균열진전을 느리게 하고 반면에 깊이 방향으로의 균열진전을 빠르게 하는 주된 원인이 된다는 사실을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.
- 2) 깊이방향으로의 잔류응력분포를 문헌의 결과를 인용하여 결정한 다음 이를 토대로 진 유효응력확대계수를 구하고 유효응력범위비, U_c/U_a 의 값을 선형적으로 변화시켜 균열면의 기하학적 변동을 컴퓨터 시뮬레이션한 결과 Jolles의 유효응력범위비, U_c/U_a 값을 0.911로 고정한 균열기하학적 변동예측보다 매우 정확하게 실험결과와 일치하였다.
- 3) $a/a_i - N/N_f$ 관계선도상에서 상한 및 하한응력 하에서 실험결과인 균열성장식으로 임의의 응력하에서의 균열성장식을 유추한 결과 실험결과와 거의 일치하였으며, 이 관계식으로 피로수명을 예측한 결과 실험결과와 약 11%의 오차를 나타내었다.
- 4) 열처리하지 않은 시편에 대해 각기 다른 응력으로 균열길이와 깊이관계를 연구한 결과 응력레벨의 차이에도 불구하고 거의 동일한 선형적인 $a - c$ 관계식을 나타내었다.

$$213 \text{ MPa} : c = 0.775706a + 0.343686$$

$$237 \text{ MPa} : c = 0.846416a + 0.171372$$

$$261 \text{ MPa} : c = 0.818708a + 0.229351$$

- 5) 피로균열성장속도, da/dN 와 응력확대계수 범위, ΔK 관계선도는 응력레벨의 차이에도 불구하고 좁은 벤드를 형성하였다.

6. 참고문헌

- (1) Newman, J. C. Jr. and Raju, I. S., "Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies", Vol. 1 ASTM STP 791, pp. 1238-1265, 1983.
- (2) Hodulak, L. and Kordisch, H., Kunzelmann, S and Sommer, E., "Growth of Part-through Cracks", ASTM STP 677, pp. 399-410, 1979
- (3) Engle, R. M., Jr., "Aspect Ratio Variability in part-through Crack Life Analysis", ASTM STP 687, pp. 74-88, 1979.
- (4) Forman, R. G and Shivakumar, V., "Growth behavior of Surface Cracks in the Circumferential Plane of Solid and Hollow Cylinders", ASTM STP 905, pp. 59-74, 1986.
- (5) Muller, H. M., Muller, S., Munz, D. and Neumann, J., "Extension of Surface Cracks During Cyclic Loading", ASTM STP 905, pp. 625-643, 1986.
- (6) Jolles, M. and Tortoriello, V., "Geometry Variations During Fatigue Growth of Surface Flaws", Vol. 1 ASTM STP 791, pp. 1297-1307, 1983.
- (7) Grzegorz Glinka, "Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Amplitude Loads", ASTM STP 677, pp. 198-214, 1979.
- (8) Woodtli, J. and Muster, W. and Radon, J. C., "Residual Stress Effects in Fatigue Crack Growth", Engineering Fracture Mechanics Vol. 24, No. 3, pp. 399-412, 1980.
- (9) Kang, K. J., Song, J. H. and Earmme, Y. Y., "Fatigue Crack Growth and Closure Behaviour Through a Compressive Residual Stress field", Fatigue engng mater. struct. Vol. 13, No. 1, pp. 1-13, 1990.
- (10) Paris, P. C. and Sih, G. C. M., "Stress Analysis of Crack", ASTM STP 381, pp. 30-81, 1965.
- (11) Kanazawa, T., Oba, H., and Machida, S., Society of Naval Architects of Japan Journal, No. 109, pp. 359-369, 1961.
- (12) Paris, P. C. and Erdogan, F., "A Critical

- Analysis of Crack Propagation Laws”, Trans. ASME, J. Basic Eng. Vol. 85, p. 528, 1963
- (13) Elber, W., “The Significance of Fatigue Crack Closure”, ASTM STP 486, pp. 230–242, 1971.
- (14) 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.
- (15) “Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole-Drilling Strain-Gage Method”, ASTM E837–85, 1985.
- (16) C. M. Suh, Robert O. Ritchie Y. G. Kang “Growth Behavior of short Surface Fatigue Cracks in 2 1/4Cr–1Mo Steel” KSME Journal, Vol. 3, No. 2 pp. 78–85, 1989.
- (17) 日本鐵鋼協會, “鋼의 热處理”, Vol. 5, 기전연구사, pp. 136–145, 1989.