

〈論 文〉

평활 및 노치재의 미소피로균열측정과 성장특성

이 종 형*

(1992년 8월 31일 접수)

Small Fatigue Crack Measurement and Crack Growth Characteristics for Smooth and Notch Specimens

Jong-Hyung Lee

Key Words : Crack Initiation(균열 발생), Fatigue(피로), Short Crack(미소균열), Crack Growth(균열성장), Crack Closure(균열 닫힘), Crack Measurement(균열측정), Back Face Strain(배면변형), Subtractive Circuit(인산화로), Ultrasonic(초음파), Ideal Crack(이상균열)

Abstract

The objective of this paper is to examine the detection limit, growth characteristics and notch curvature radius in short crack problem. Measurement techniques such as ultrasonic method and back-face strain compliance method were adopted. The fatigue crack growth rate of the short crack is slower than that of a long crack for a notched specimen. The characteristic of crack growth and crack closure is same as the case of a delay of crack growth caused by constant amplitude load for an ideal crack or single peak overload for a fatigue crack. The short crack is detected effectively by ultrasonic method. A short surface crack occurs in the middle of specimen thickness and is transient to a through crack when maximum crack depth is larger than the notch curvature radius.

1. 서 론

피로균열의 발생, 성장의 과정은 Mode II의 성분을 포함하는 제 1단계, Mode I의 제 2단계의 균열성장 과정으로서 구별되고 있다. 대부분의 실험적 연구에서는 Paris 법칙⁽¹⁾이 성립하는 제 2단계의 큰 균열이 연구 중심이었다. 피로수명 전체로 보면 미소균열의 성장이 큰 균열에 비해서 지배적이라고 생각된다.^(2,3) 더욱이, 현재로서는 기기에 대해서, 품질관리, 비파괴검사로부터 미소균열의

공학적 중요성이 새롭게 인식되고 있다.

미소균열 문제에 대한 최초의 연구는 1953년에 Isibasi 등⁽⁴⁾에 의해서 회전굽힘 피로시험을 행하여 피로한도를 구한 것이다. 그 후 Forst⁽⁵⁾는 선형탄성파괴역학이 나오기 이전에 균열재의 피로한도를 피로균열진전 시키는데 필요한 반복응력과 균열길이와의 관계에 대해서, Forsyth⁽⁶⁾는 반복하중을 받는 평활시험편의 표면에는 미끄럼대가 발생해서, 균열이 전단방향의 제 1단계과정 및 인장응력과 수직하중을 전파하는 제 2단계과정을 밝혔다. Kobayashi등⁽⁷⁾은 환상시험편에 대해서, 균열길이와 그것을 진전시키는데 필요한 반복응력과의 관계를 검토함과 동시에, 균열재의 피로한도, 한계균열

*정회원, 금오공과대학 생산기계공학과

Classification	Short Crack	Large Crack
Short Crack of absolutely Small Size	$a, b \approx R_p$	$a, b \gg R_p$
Short Crack from Notch	$a \approx \text{notch-size}$	$a \gg \text{notch size}$
Influence of Structure	$a(R_p) = \text{structural size}$	$a(R_p) \gg \text{structural size}$

Fig. 1 Definition of short crack and large crack

길이에 대해서 밝혔다. 1970년대에는, 광범위의 응력하에서 균열전파를 선형과괴역학적으로 해석하고, 그 성립한계를 검토한 Kitagawa⁽⁸⁾에 의한 연구, Haddad,⁽⁹⁾ Smith⁽¹⁰⁾에 의한 선형과괴역학이 적용되는 균열길이의 한계에 대한 검토 등이 있다.

그러나, 미소균열은 큰 균열의 성장법칙에 따르지 않는다는 보고^(8,11)가 있기 때문에 최근 미소균열의 성장특성에 대해서 많은 연구가 행하여지고 있다. 미소균열의 검출 및 성장 특성의 측정은 피로파괴의 방지대책상 중요한 문제로서, 많은 방법이 사용되고 있다. 미소균열의 정의는 Fig. 1과 같이 균열의 크기가 재료의 조직의 크기와 같은 균열, 균열의 크기가 소성역 크기와 같은 균열, 그리고 노치로부터 발생한 균열의 크기가 노치곡률반경과 같은 균열의 3가지 형태로 내릴 수 있다. 전자의 2가지 특성은 탄소강 평활재에 대해서 별보⁽¹²⁾에서 보고한 바가 있다. 본 연구에서는 별보⁽¹²⁾의 결과와 함께 후자의 미소균열 특성에 착안해서 노치재에 발생한 미소균열을 초음파법(이하, UT법)과 배면변형제하탄성공플라이언스법(이하, BFS법)을 사용해서 측정하였으며, 미소균열의 검출한계와 성장특성 및 노치곡률반경의 영향에 대해서 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

사용한 재료는 원자로 압력용기용저합금강 SFVQ-IA(항복응력 : 460 MPa, 인장강도 : 595 MPa)으로서 시험편은 compact type(폭 $W=50$ mm, 두께 $B=12.5$ mm)이다. 노치곡률반경 ρ 는 0.1, 0.5, 1.0 mm의 3가지로 제작하였으며, 600°C에서 1시간

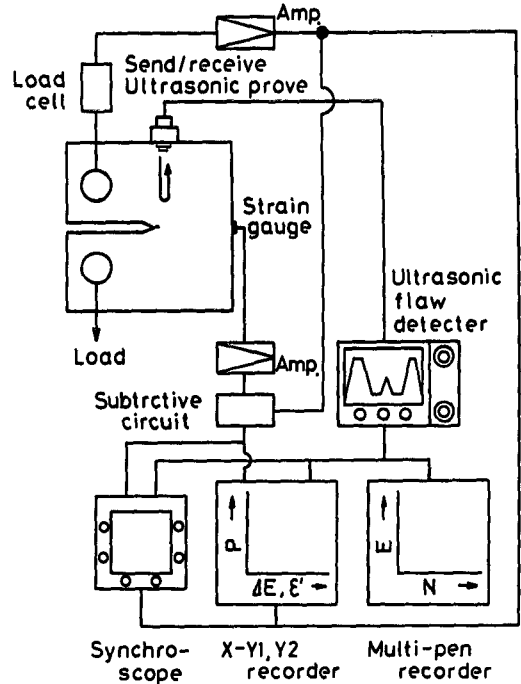


Fig. 2 Block diagram of measuring apparatus

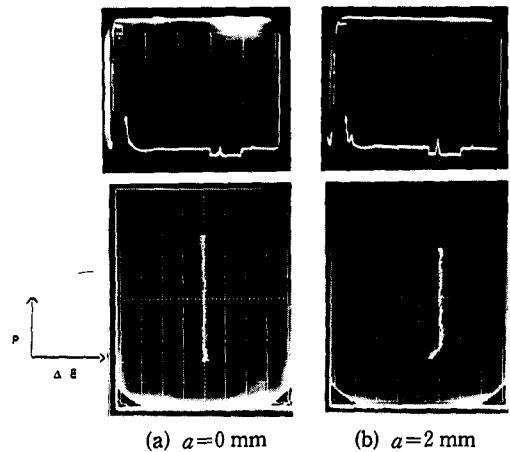


Fig. 3 Sample screen of CRT and synchroscope

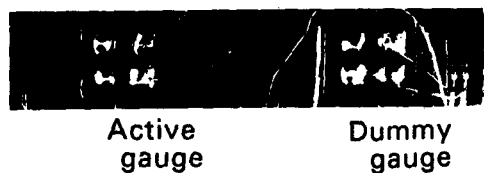


Fig. 4 Strain gauge

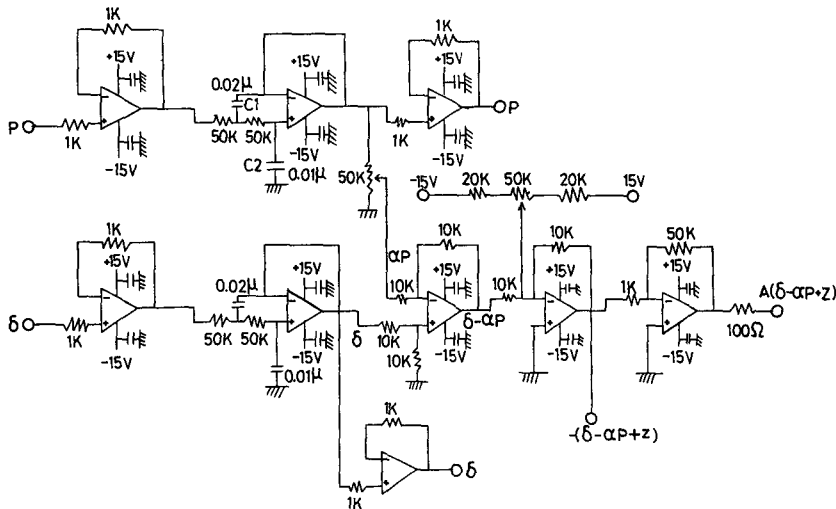


Fig. 5 Subtractive circuit

어닐링한 후에 시험에 사용하였다.

시험은 $\pm 10\text{tonf}$ (98 KN) 전기유압식 피로시험기를 사용하였으며, 실험조건은 하중범위 ($\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$) 일정, 응력비 ($R = P_{\min}/P_{\max}$) $R = 0.06$ 의 정현파형, 반복속도 10 Hz이었다.

미소균열 및 균열열림, 단합의 측정에는 Fig. 2에 나타내는 바와 같이 시험편 상단면에 수직탐촉자를 설치한 UT법⁽¹³⁾과 시험편 배면에 strain gauge를 접착한 BFS법⁽¹⁴⁾을 사용하였다.

2.1 UT법

초음파탐상법으로서 종파의 Plus 반사에 근거해서 수직 단일 탐촉자를 채용하였다. Fig. 2에 나타내는 바와 같이 시험편 상단면에 수직탐촉자(재질: 세라믹, 주파수: 10 MHz, 진동크기: $\phi 5$)를 설치하였다. 일반적으로 탐촉자에는 지향성이 있고 다음식으로 표시된다.⁽¹⁵⁾

$$\sin \theta_0 = 0.61 C / fr \quad (1)$$

여기에서, θ_0 는 지향각, C 는 시험편 내의 음속, f 는 탐촉자 주파수, r 는 탐촉자 반경이다. 상기식 (1)에 근거해서 초음파탐상영역 ($C: 5920 \text{ m/s}$)은 시험편 두께 약 9 mm의 부분으로 된다.

미소균열의 발생, 성장에 따라 균열선단 근방의 결합 echo출력이 생긴다. 이것을 시험중에 X-Y recorder에 연속 기록하였다. 균열 성장에 따른 UT의 CRT부분과 synchroscope 부분의 일례의

사진을 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 BFS법

Fig. 4에 나타내는 바와 같이 2매의 strain gauge (gauge길이: 2 mm)를 사용해서 완전한 bridge를 구성하고, 온도 보상을 완전히 행하도록 하였다.

(14) 하중 P 와 열림변위 δ 의 관계에서 격여지는 점을 균열의 열림점으로 하였다. 이 균열의 열림점, 즉 변화가 생긴 직후의 미소균열을 측정하였다. 여기에서 격여지는 점을 정도 좋게 측정하기 위하여 균열배면의 strain gauge에 의해 측정되는 변형과 하중을 증폭하기 위해 Fig. 5와 같은 인산회로 (subtractive circuit)를 사용하였다.

2.3 실험방법

UT법의 echo출력에 변화가 생긴 직후에 시험을 중단하고 시험편을 320°C의 노중에서 부하상태로서 30분간 균열면을 산화착색시켜 냉각후에 피로파단 시켜서 미소표면균열의 발생, 성장을 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미소균열의 측정

UT법의 하중 P -echo출력 E 의 관계는 Fig. 3의 아래 synchroscope 부분과 같이 균열발생 이전은 양호한 직선성을 나타내지만, 균열발생 이후는 비선형으로 된다.

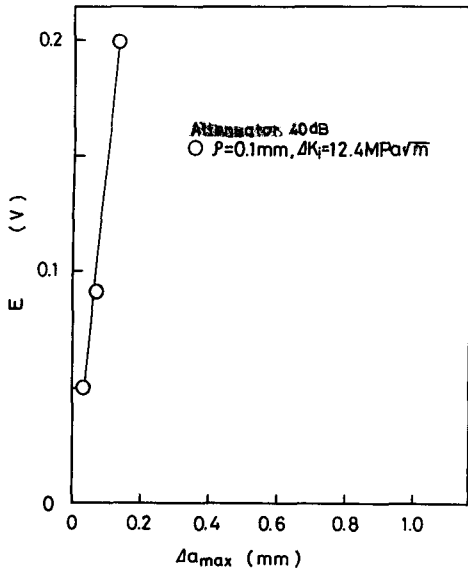


Fig. 6 Relation between E and Δa_{max}

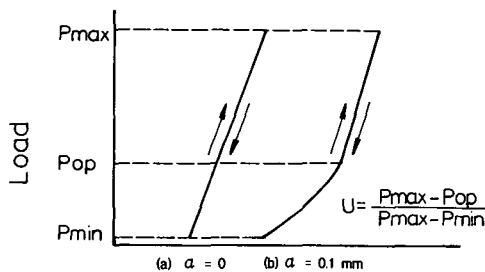


Fig. 7 Monitoring of crack opening

Fig. 6은 시험중단 직전에 UT법에서 검출된 E 와 파면상에서 측정된 미소표면균열의 최대길이 증분 Δa_{max} 의 관계를 나타낸 것이다. Echo출력변화 E 는 Δa_{max} 의 증대에 따라 증가하고 있다. 따라서, 적당한 E 의 level을 선정하면 미소표면균열을 검출하는 것이 된다. 이와같은 기준에 의한 미소표면균열의 검출정도는 0.04 mm(Fig. 8(a))로서 균열 단함의 유무에 의해 측정된 미소표면균열의 검출정도 0.1 mm(Fig. 8(b))보다 측정 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

한편, BFS법의 경우의 하중과 strain의 관계는 균열발생 이전은 양호한 직선성을 나타내지만, 균열발생 이후는 비선형으로 된다(Fig. 7). 그러나, 그 정도는 $\Delta a_{max}=0.1$ mm(Fig. 8(c)) 정도였다. 따라서 UT법의 echo출력 변화에 근거한 방법이 검출정도가 높다.

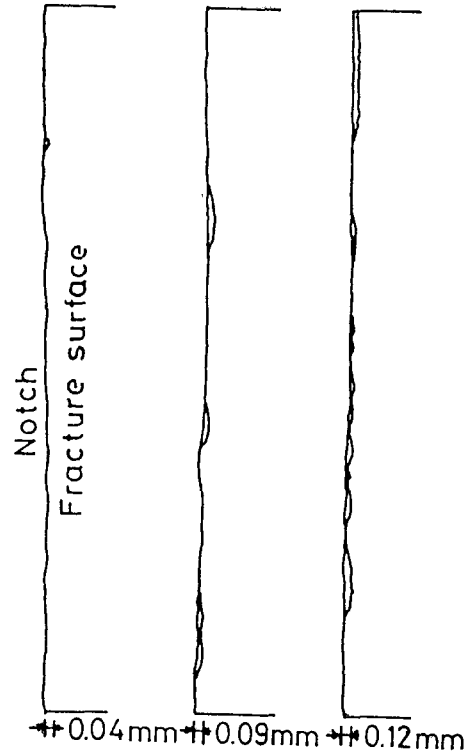


Fig. 8 Shapes and dimension of small cracks

산화착색한 파면상에서 측정된 미소표면균열의 형상의 한 예를 Fig. 8에 나타내었다. 회전수 N 의 증대에 따라 노치에 복수의 미소표면균열이 발생하고 성장에 따라 합체하고, 단일의 표면균열로 되어 관통균열로 해서 성장하는 것을 알 수 있다. 표면균열의 최대길이 Δa_{max} 는 표면균열에서 관통균열로 성장하기 직전이고, Δa_{max} 는 ρ 보다 약간 컸다. 즉, Δa_{max} 가 ρ 보다 커지면 관통균열로 천이 된다고 판단된다. 후술하는 바와같이 미소표면균열의 길이 방향의 성장속도는, 균열성장에 따라 감소하고, 최소치를 나타낸 후에 증대한다. 따라서 최초에 발생한 미소표면균열이 길이 방향으로 완만히 성장하고 있는 사이에, 다른 복수의 미소표면균열이 발생, 성장해서 이것들이 합체에 이른다고 생각된다. 따라서, 관통균열로 천이하는 표면균열의 최대길이 Δa_{max} (크기는 $\approx \rho$ 의 값)는 후술하는 Fig. 11과 같이 균열성장속도가 최소치로 되는 값과 대응한다.

3.2 균열성장특성

Fig. 9는 초기응력확대계수범위 $\Delta K_i=9.3$ MPa

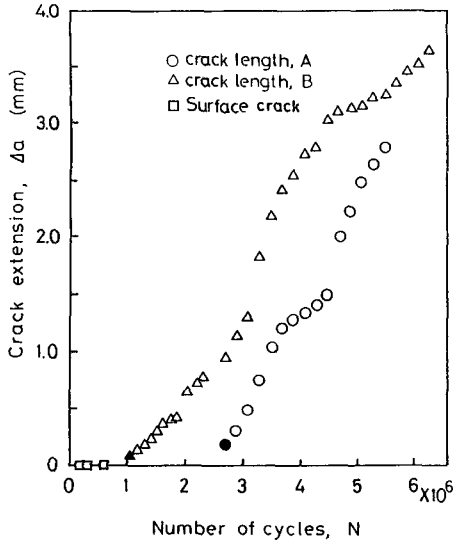


Fig. 9 Relation between Δa and N

\sqrt{m} , $\rho=0.1$ mm의 경우에 대해서 미소표면균열로부터 관통균열의 천이 직후에 있어서 시험편 양면에서 측정된 균열길이 증분 $\Delta a = a - a_0$ 와 반복수 N 의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, a 는 하중점으로 부터 균열선단까지의 길이, a_0 는 하중점으로 부터 노치선단까지의 길이이며, 양면의 균열길이 값에 차이가 있었다. 그림에서 검은 표시는 시험편 양면에 있어서 최초의 관통균열 발생점을 나타내며, □ 표시는 Δa_{max} 와 N 의 관계를 나타낸 것이다. 관통균열 발생 이전에 이미 노치에 미소표면균열이 발생, 성장하는 과정이 존재하고 있다. 다른 ΔK_i 의 결과는 생략하지만, 양면에 있어서 Δa 의 차이는, ΔK_i 가 낮은 $\Delta K_i=9.3 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 의 경우가 가장 현저하다. 관통균열 발생직후의 양면에 있어서 Δa 의 현저한 차이는 Δa 의 증대에 따라 소멸해 간다.

Fig. 10은 ρ 의 크기에 따른 파단면의 형상을 나타낸 것이다. $\rho=0.5, 1.0$ mm의 경우, $\Delta K_i=12.4 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서 $N=5 \times 10^6$ 까지 균열발생이 되지 않았기 때문에 $\Delta K_i=15.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 의 경우에 대해서 표시하였다. $\rho=0.1$ mm의 경우가 fretting 산화물의 생성이 현저하다.

3.3 균열성장속도

Fig. 11에 관통균열의 성장속도 da/dN 과 균열길이 증분 Δa 의 관계를 나타내었다. 여기서, Δa 는

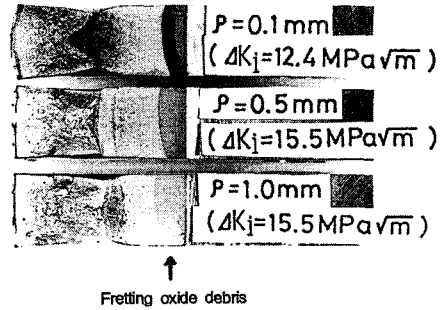


Fig. 10 Macroscopic fracture appearance of surface cracked Specimen

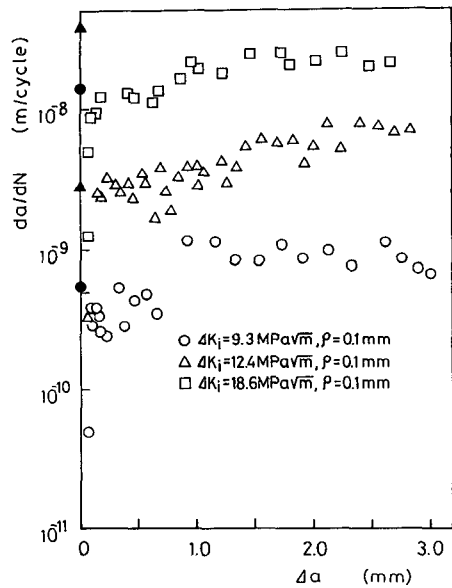


Fig. 11 Relation between da/dN and Δa

시험편 양면에서 측정된 균열길이 증분의 평균치이다. 그림에서 검은 표시는 미소표면균열의 data에서 얻어진 da/dN 이다. 그림에서 보는 바와 같이 미소표면균열의 data를 고려하면, da/dN 은 Δa 의 증대에 따라 일단 감소하고, 최솟치 ($\Delta a < 1.0$ mm)를 나타낸 후에 증대해서 큰 균열의 특성을 나타낸다. 이것은 이상균열⁽¹⁶⁾에 일정진폭하중⁽¹⁷⁾을 혹은 피로균열에 단일과대하중⁽¹⁸⁾을 부하한 후에 균열성장의 지연이 생기는 경우의 da/dN 의 특성과 같다. $\rho=0.1$ mm의 경우, 노치의 소성역 크기⁽¹⁹⁾는 $0.05 (\Delta K_i=9.3 \text{ MPa}\sqrt{m})$, $0.1 (\Delta K_i=12.4 \text{ MPa}\sqrt{m})$, $0.2 (\Delta K_i=18.6 \text{ MPa}\sqrt{m})$ mm 정도이다. Δa 의 증대에 따라 da/dN 의 감소는 소성역 내부를

균열이 성장할 때에 생기는 소성유기균열단합과 그것을 원인으로 fretting산화물 유기균열단합에 기인하고 있다고 생각된다.

큰 균열에 대한 $da/dN - \Delta K$ 특성과 상술한 대표적인 data를 Fig. 12에 나타낸다. $\Delta a > 1.0$ mm의 경우, da/dN 과 ΔK 의 관계는 ΔK_I 에 관계없이 큰 균열에 대한 그것과 일치하고 있다. 그러나, $\Delta a < 1.0$ mm의 경우, da/dN 과 ΔK 의 관계는 큰 균열에 대한 그것의 하측에 위치한다. (● 표) 아울러, 평활재의 별보⁽¹²⁾의 결과(○ 표)도 함께 표시하면, 평활재의 $da/dN - \Delta K$ 관계는 ΔK 의 감소에 따라, 관통균열의 결과보다도 빠른측으로, 이탈되는 것이 된다. 그러나, 노치재의 미소균열의 특성은 빠른측이 아니고 늦어지는 경향을 나타내고 있다.

3.4 균열열림 및 닫힘

UT법 및 BFS법에 근거하여 균열열림 및 닫힘을 측정하였으며, 다음식에 의하여 개구비 U 를 구하였다.

$$U = \frac{(P_{max} - P_{op})}{(P_{max} - P_{min})} \quad (2)$$

여기에서, P_{max} 및 P_{min} 은 1 cycle에 있어서 최대 하중과 최소하중, P_{op} 는 열림점에 해당하는 점의

하중으로 Fig. 3의 꺾임점이다.

Fig. 13은 K_{op}/K_{max} 와 Δa 의 관계를 측정하였다. 여기에서 K_{op} 는 균열열림응력확대계수, K_{max} 는 최대응력확대계수이며, 검은표시는 Δa_{max} 에 관한 data이다. K_{op}/K_{max} 는 Δa 의 증대에 따라 상승하고, 최대치를 나타낸 후에 저하해서 일정치가 된다. 이 특성은 전술한 da/dN 과 일치한다. 즉, 발생직후의 미소표면균열의 K_{op} 는 낮지만, 노치에 형성되어 있는 소성역의 내부는 균열이 성장할 때에 생기는 소성유기 균열단합과, 그것을 원인으로 하는 fretting 산화물 유기균열 단합에 기인해서 K_{op} 가 상승해서, 균열성장에 지연을 가져온다고 생각되어진다. 균열이 소성역을 넘어서 성장하면, 이 효과는 소멸하고, 큰 균열의 성장특성으로 된

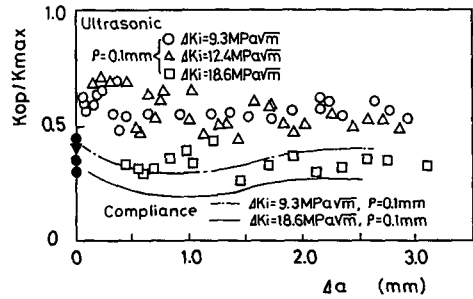


Fig. 13 Relation between K_{op}/K_{max} and Δa

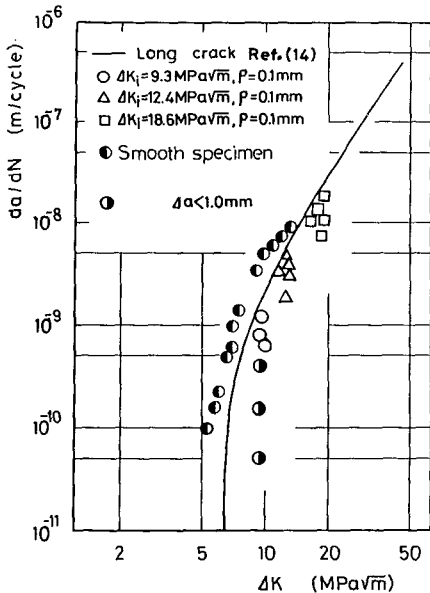


Fig. 12 Relation between da/dN and ΔK

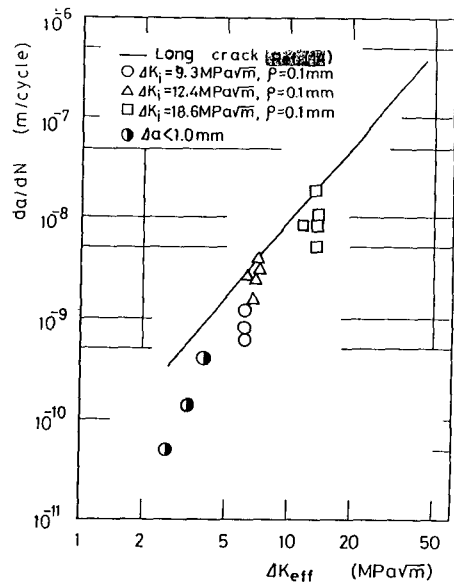


Fig. 14 Relation between da/dN and ΔK_{eff}

다. UT법과 BFS법의 경향은 일치하지만, 정량적으로는 UT법의 K_{op}/K_{max} 가 높다. 따라서, 진술한 미소균열의 측정에 대응해서 UT법의 정확도가 높다고 생각된다.

da/dN 과 UT법에 근거한 유효응력확대계수범위 $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ 의 관계를 Fig. 14에 나타내었다. da/dN 과 ΔK_{eff} 의 관계는 큰 균열에 대한 그것과 일치하지 않는다. 큰 균열에 대한 그것의 아래측에 위치하고 있다.

4. 결 론

미소균열의 검출 및 균열열림단함을 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 노치재에 있어서 미소균열의 특성은 큰 균열의 성장속도보다 늦어진다. 균열성장 및 균열열림 단함의 특성은 이상균열에 일정진폭하중을, 혹은 피로균열에 단일과대하중을 부하한 후에, 균열성장의 지연이 생기는 경우의 특성과 같다.

(2) 미소균열의 검출은 echo 출력변화에 의한 초음파법이 측정 정밀도가 정확하다. 검출된 미소 표면균열의 깊이는 $\rho=0.1$ mm의 경우에 0.04 mm 정도이다.

(3) 미소표면균열은 시험편 두께 중앙부에서 발생하고, 최대깊이가 거의 노치곡률반경의 크기를 넘어서면 관통균열로 천이된다.

후 기

본 연구는 1991년도 한국과학재단의 기초연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 동재단 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Paris, P.C. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, Series D. Vol. 85, pp. 528~534.
- (2) Suh, C.M., Yuuki, R. and Kitagawa, H., 1985, "Fatigue Microcracks in a Low Carbon Steel," Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 8, No. 2, pp. 193~203.
- (3) 結城良治, 北川英夫, 徐昌敏, 1985, "SUS304 鋼の高温疲労における微小分布き裂の發生・成長學動," 日本材料學會 3回 破壊力學 シンポジウム, pp. 11~15.
- (4) Isibasi, T., Uryu, T. and Sato, T., 1953, "Fatigue Strength of Carbon Steel Bars with Round-Crack," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 87, pp. 34~37.
- (5) Forst, N.E., 1955, "Crack Formation and Stress Concentration Effects in Direct Stress Fatigue," The Engineer, pp. 464~467.
- (6) Forsyth, P.J.E., 1963, "Fatigue Damage and Crack Growth in Aluminium Alloys," ACTA Metallurgica, Vol. 11, pp. 703~715.
- (7) Kobayashi, H. and Nakazawa, H., 1967, "On the Alternating Stress Required to Propagate a Fatigue Crack in Carbon Steels," Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 33, No. 254, pp. 1529~1534.
- (8) Kitagawa, H. and Takahasi, S., 1979, "Fracture Mechanical Approach to very Small Fatigue Crack Growth and to the Threshold," Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 45, No. 399, pp. 1289~1303.
- (9) El Handdad, M.H., 1979, "Prediction of Non Propagation Cracks," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 573~584.
- (10) Smith R.A., 1977, "On the Short Crack Limitations of Fracture Mechanics," Int Journ of Fracture, Vol. 33, pp. 717~720.
- (11) Taylor, D. and Knott, J.F., 1981, "Fatigue Crack Propagation Behavior of Short Cracks," Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 4, No. 2, pp. 147~155.
- (12) 李宗炯, 1990, "미소피로균열의 검출과 정류 균열," 대한기계학회논문집, Vol. 14, No. 3, pp. 603~609.
- (13) Nakazawa, H., Kobayashi, H. and Hirano, K., 1983, "Application of Ultrasonic Method to Experimental Fracture Mechanics Studies," Journal of the Materials Science Society of Japan, Vol. 20, No. 1, pp. 11~21.
- (14) 小林英男, 小川武史, 中村春夫, 中澤一, 1984, "SFVV3 鋼の疲労龜裂開閉口の實測と下限

- 界特性の評価,” 日本機械學會論文集, Vol. 50, No. 451, pp. 309~319.
- (15) 日本非破壊検査協會編, 1967, “非破壊検査便覽,” 日刊工業新聞社, p. 535.
- (16) 小林英男, 1982, “疲勞き裂閉口の現象とその力學的取扱い,” 日本材料學會 第27回 材料強度と破壊シソポジウム論文集, pp. 97~124.
- (17) 小川武史, 小林英男, 中澤一, 1983, “ ΔK 漸増試験における下限界特性とき裂閉口の評價,” 日本機械學會講演論文集, No. 830~10, pp. 191~193.
- (18) Hirano, A., Kobayashi, H., Nakamura, H. and Nakazawa, H., 1980, “A Fractographic Approach of Study on the Influence of a Single Peak Overload on Fatigue Crack Growth,” Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 46, pp. 1040~1048.
- (19) Forman, R.G., 1972, “Study of Fatigue Crack Initiation from Flaws Using Fracture Mechanics Theory,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 4, pp. 333~345.