

環狀龜裂을 갖는 軸의 비틀림疲勞 龜裂成長舉動에 關한 基礎研究

A Study on the Torsional Fatigue Crack Propagation Behavior on the Shaft with Circumferential Crack

金 福 起*, 崔 鎔 湜**
B. K. Kim Y. S. Choi

ABSTRACT

During torsional fatigue of externally cracked cylindrical specimen, crack face rubbing may occur. At this time, normal contact forces arise when shear displacements cause the crack faces to be wedged open due to mismatch of the fracture surface asperities. These normal forces, in turn, generate friction forces which act in opposition to the applied shear stresses and reduce the effective stress intensity factor.

The premise of the proposed work is that friction and wedging can be studied by measuring the shear and normal displacement across the crack mouth. We have measured the crack mouth compliance using the new biaxial extensometer.

1. 서 론

각종 동력전달용 축이나 크랭크축(Crank Shaft), 발전기 로우터(Rotor) 등의 기계구조물에는 언제나 비틀림 피로하중이 작용한다. 이 경우, 미소 결함부로부터 균열이 발생, 성장하여 기계 구조물의 피로수명을 단축시켜, 예기치 못하는 대형사고를 일으키게 된다.¹⁾

환상균열을 갖는 축의 비틀림피로하중에 대한 피로균열 진전에 대하여 1956년 최초로 McClintock²⁾에 의하여 연구 보고되었으며, Hult³⁾에 의하여 보다 발전하게 되었다. McClintock²⁾는 탄, 소성조건에서의 피로균열성

장속도를 소성영역크기(Plastic Zone Size)의 함수로서 예측하여 일반화 시켰다.

그후 Ritchie⁴⁾ 등은 균열선단변위 (Crack Tip Displacement)의 크기 (CTD_{III})를 적용시키고자 하였다. 이들 연구에 의하면, 선형탄성영역조건하에서는, Mode III 균열의 응력확대계수 (S. I. F) K_{III}를 사용하여 피로 균열성장속도식 (da/dN-ΔK)_{III}가 Paris의 지수법칙 da/dN = C(ΔK_{III})^m를 만족한다고 하였다. 대규모 항복 조건하에서는 ΔK_{III}에 의한 해석이 Paris의 법칙을 만족시키지 못하기 때문에 (CTD_{III})나 J_{III} 적분을 사용할 수 있는데 계산상이나 실험상의 어려움이

* 정회원, 명지전문대학 기계설계과

** 정회원, 성균관대학교 기계공학과

있다고 하였다. 따라서, Nayeb-Hashemi, Ritchie⁶⁾ 등은 새롭게 소성변형을 확대계수 (Γ_{III})를 제안하여 탄소성(Elastic-Plastic) 또는 완전소성(Fully Plastic) 조건에서도 만족하도록 일반화 시켰다. 근래에는 M. W. Brown⁶⁾, Tschegg⁷⁾, Gross⁸⁾ 등에 의하여 비틀림피로하중을 받는 Mode III 균열에서 상, 하 균열표면끼리의 마찰영향에 대한 연구가 보고되고 있다. 국내에서는 환상균열을 갖는 나사의 비틀림에 대한 파괴역학적 연구⁹⁾와 축¹⁰⁾에 대한 기초연구 등이 보고되고 있다.

환상피로균열은 표면으로부터 축의 내부쪽으로 성장하기 때문에 대부분 연구자들은 균열깊이를 추정하는 방법으로 전위차법(Electric Potential Drop Method)를 사용하고 있으나, 계측장비 정밀도가 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 균열선단에서의 컴플라이언스(Compliance)와 균열깊이를 경제적이고 간편한 방법으로 해석하므로써 비틀림피로하중을 받는 축에서의 피로균열성장 거동에 대하여 파괴역학적으로 고찰하고자 한다.

2. 관련 기초이론

환상균열이 있는 중실축의 시험편은 Fig.3과 같으며, Mode I, III 균열에서의 에너지 해방률(Energy Release Rate)(g)와 컴플라이언스(λ)의 관계는 다음과 같다.

$$g_I = \frac{P^2}{2} \cdot \frac{d\lambda_I}{dA} \tag{1}$$

$$g_{III} = \frac{T^2}{2} \cdot \frac{d\lambda_{III}}{dA} \tag{2}$$

여기서,

P : 축하중

T : 비틀림모우멘트

A : 균열의 표면적

g_I, g_{III} : Mode I, III 균열의 에너지해방률

λ_I, λ_{III} : Mode I, III 균열의 컴플라이언스

K_I, K_{III} : Mode I, III 균열의 응력확대계수

이때, 응력확대계수 K 와 컴플라이언스(λ)의 관계는 다음과 같다.

$$K_I^2 = E \cdot P^2 \cdot \frac{d\lambda_I}{dA}, \left(\because g_I = \frac{K_I^2}{2E} \right) \tag{3}$$

$$K_{III}^2 = G \cdot T^2 \cdot \frac{d\lambda_{III}}{dA}, \left(\because g_{III} = \frac{K_{III}^2}{2G} \right) \tag{4}$$

E : 평면응력하의 영계수(Young's Modulus for Plane Stress)

G : 전단탄성계수(Shear Modulus)

환상 노치(Notch)의 반경(r_0)로부터 피로 균열반경(r)까지의 컴플라이언스 변화량($\Delta\lambda$)는 식(3), (4)로부터

$$\Delta\lambda_I = \lambda_{I0} - \lambda_I = \frac{2\pi}{E} \int_r^{r_0} \frac{K_I^2}{P^2} r \cdot dr \tag{5}$$

$$\Delta\lambda_{III} = \lambda_{III0} - \lambda_{III} = \frac{2\pi}{G} \int_r^{r_0} \frac{K_{III}^2}{T^2} r \cdot dr \tag{6}$$

Tada et al.¹¹⁾ Benthem¹²⁾은 K_I, K_{III} 값을 다음과 같이 보고하였으며, 이 값의 오차는 1.0% 미만으로 알려져 있다.

$$K_I = \frac{P}{\sqrt{\pi r^3}} \cdot \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right) + \frac{3}{8} \left(\frac{r}{R} \right)^2 - .363 \left(\frac{r}{R} \right)^3 + .731 \left(\frac{r}{R} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{1 - r/R} \tag{7}$$

$$K_{III} = \frac{2T}{\pi r^3} \sqrt{\pi r} \cdot \frac{3}{8} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right) + \frac{3}{8} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \frac{5}{16} \left(\frac{r}{R} \right)^3 + \frac{35}{128} \left(\frac{r}{R} \right)^4 + .208 \left(\frac{r}{R} \right)^5 \right] \cdot \sqrt{1 - r/R} \tag{8}$$

Table 1 Chemical compositions (Wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Sn	Mo	Fe
0.18	0.1	0.6	0.06	0.03	0.04	0.025	0.04	0.04	0.01	balance

Table 2 Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Shear yield strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)
260	412	150	205	80.4

Mode I, III의 균열길이 (a)는 시험편의 반경(R)과 피로균열로 감소된 반경(r)의 차로 계산할 수 있다. 식(5), (6)에 식(7), (8)을 각각 대입시켜서 구한 이론식을 컴퓨터 프로그램(Eureka)에 의하여 수치해석을 하였다. 균열길이(a)와 컴플라이언스(λ)를 수치해석하여 그래프로 그리면 Fig.4, Fig.5와 같다.

3. 실험 및 고찰

3.1 시험편 및 실험장치

본 실험에 사용한 재료는 직경 25.4 mm인 일반용 연강(AISI C 1018)으로 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1 과 Table 2와 같다. 비틀림피로 시험편의 형상은 Fig. 3과 같고, 환상 V-노치는 꼭지각 60°이고 깊이는 1.0mm이었다.

Fig. 2는 본 실험기 본체와 콘트롤러(Controller), 컴플라이언스 측정장치의 사진이며, 서보유압식 2축(Biaxial) 피로시험기(M. T. S. 250KN)를 사용하였다.

Mode I과 Mode III의 균열선단의 컴플라이언스 측정은 Dr. Liu¹³⁾의 O.R.N.L. 2축 엑스텐소미터(Extensometer)를 본 연구에 적합하도록 개선하여 제작하였다. 2축 엑스텐소미터는 Fig. 1과 같으며, 회전축 부분에 베어링(Bearing) 대신에 얇은 탄성굽힘보(Beam)를 사용함으로써 회전시의 백러쉬(Backlash)나 미끄러짐을 방지하였으며, 변위측정용 센서는 비접촉 용량형 변위탐촉자(Capacitance

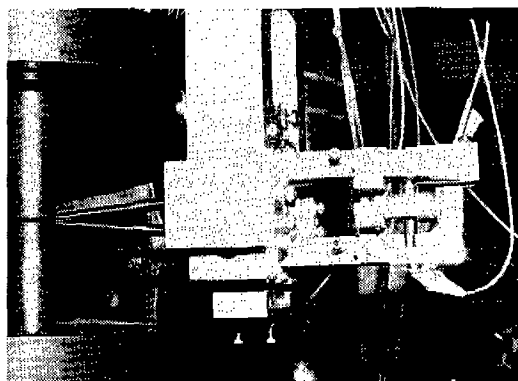


Fig. 1 Biaxial extensometer

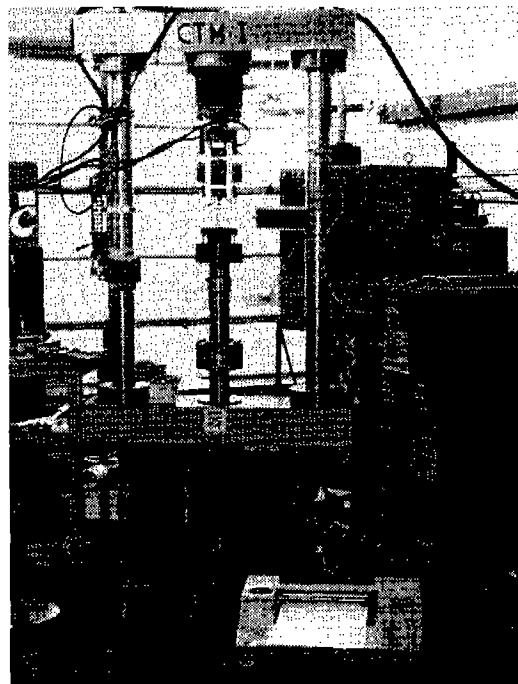


Fig. 2 Main parts of testing system

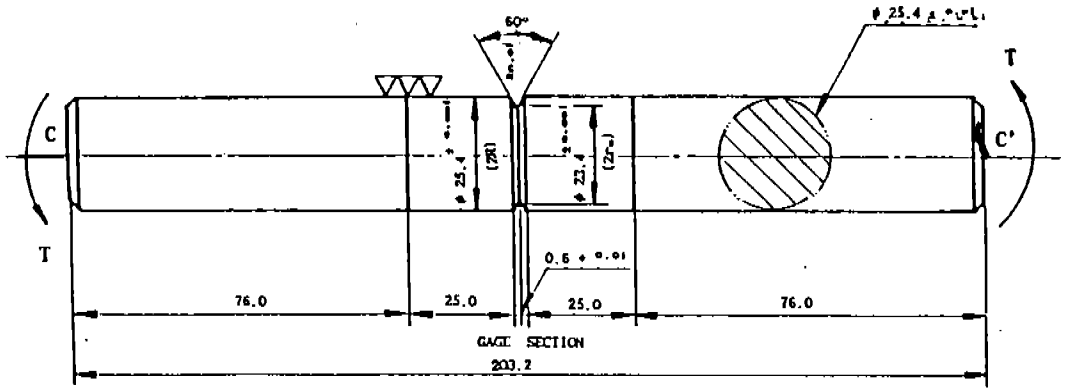


Fig. 3 Configuration of specimen (Dimensions In mm)

Displacement Probe)를 사용함으로써 정도 높은 컴플라이언스 측정이 가능하도록 기구를 개조하였다.

3.2 Mode I, Mode III 컴플라이언스 실험

컴플라이언스 실험용 직경 25.4mm인 환상 균열 표준시험편으로는 노치저반경 (Notch Root Radius) R 을 0.01mm 이하로 하고, 깊이 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0mm가 되도록 방전 가공기(Electric Discharge Machine)로 정밀 가공하였다. 2축 익스텐소미터의 표점거리는 1.0mm이었으며, 이론식의 수치해석결과 그래프와 본 실험의 측정치(Fig. 4와 Fig. 5의 점들)를 정량, 정성적으로 비교하여 보았다.

3.3 비틀림피로균열 성장 거동

비틀림피로시험은 상온(20°C)에서 비틀림 모멘트범위 (ΔT) 일정제어 피로시험으로 정현파형 (Sine Wave)이었고, 응력비는 $R=-1$ 와 $R=0$ 이었으며, 시편에 가하여진 초기 최대전단응력 ($\tau_{max} \leq 0.19 \tau_y$)은 아주 낮은 선형탄성범위였고, 주파수는 3.0 Hz 이었다. 본 연구는 기초단계로서 균열깊이가 2~4 mm 되는 지점이 주요 연구대상이었다. 추정 유효균열깊이 (a_{eff})가 4.0mm에서 피로시험을 중단하고 가열변색(Heat Tinting) 시킨후, 추정 균열깊이가 6mm이상 진행된 시점에서 인장파단 시켰다. 파단된 시험편의 사진은 Fig. 6과 같다.

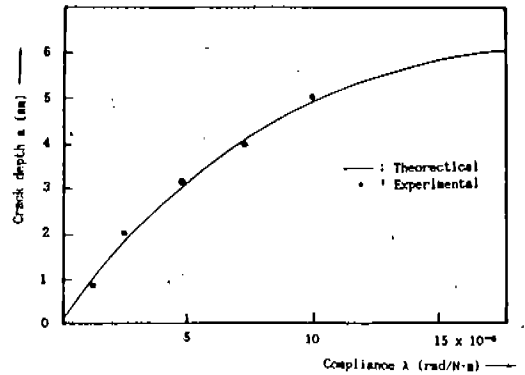


Fig. 4 $a-\lambda$ relation for mode III crack

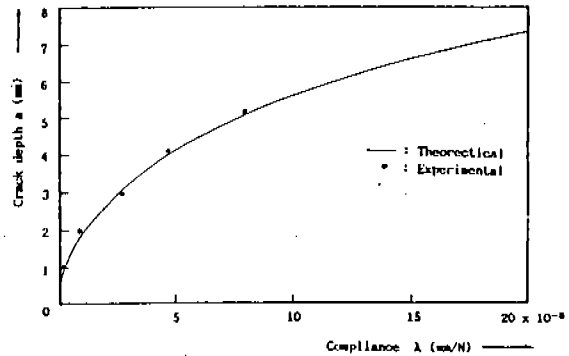


Fig. 5 $a-\lambda$ relation for mode I crack

Fig. 7은 $R=-1$ 인 경우의 반복 사이클 수 (N)에 대한 균열성장깊이 (a)의 $a-N$ 관계를 Fig. 8은 $R=0$ 인 경우의 $a-N$ 관계를 표시한 것이다. 여기서 표점(●)은 Mode III 균열면에 마찰력 (Friction) 영향으로 컴플라이언스

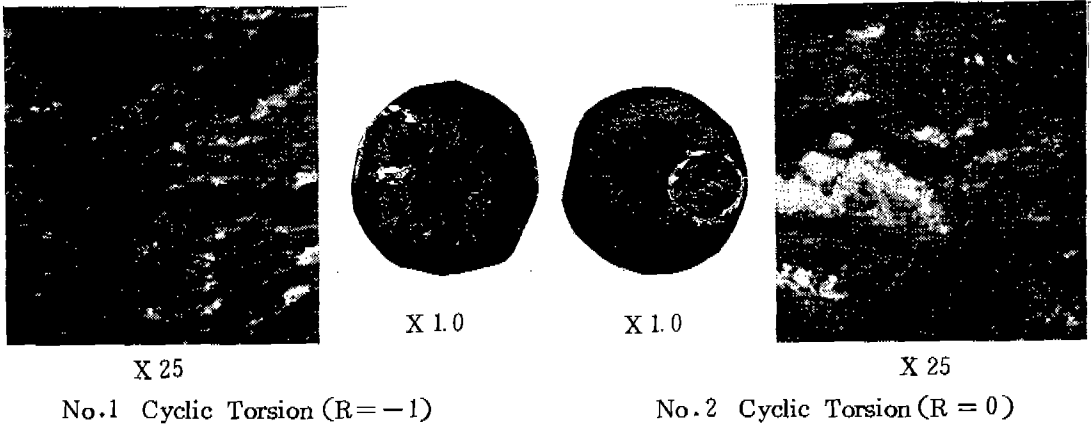


Fig. 6 Fracture surfaces for specimen No. 1, No. 2

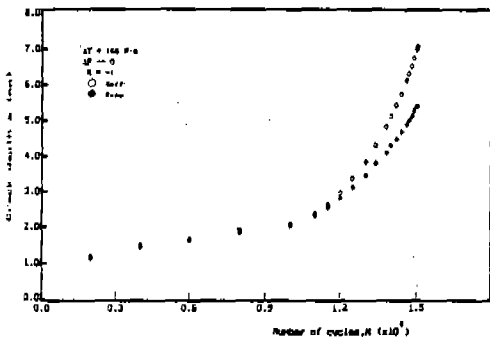


Fig. 7 a-N relations for specimen No. 1

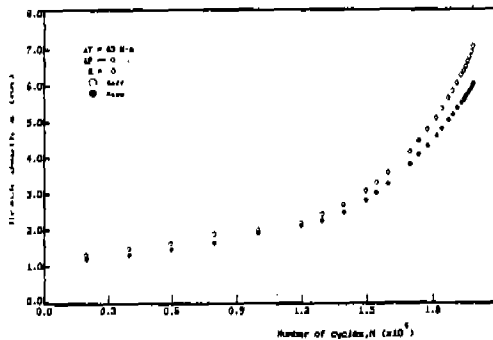


Fig. 8 a-N relations for specimen No. 2

언스가 감소된 경우의 겉보기 균열깊이(a_{app})이고, 표점(○)는 비틀림과 균열면의 마찰력을 제거시킨 상태($\Delta T \rightarrow 0$)에서, 미소량의 축응력($\sigma \leq 0.1 \sigma_y$)에 의한 Mode I 유효균열깊이(a_{eff})를 컴플라이언스 측정으로 산출하여 표시한 것이다.

Fig. 9과 Fig. 10에서는 피틀림피로균열 성장률(da/dN)_{III}과 균열깊이(a)의 관계를 산출하여 표시한 것이다.

3. 4 고 찰

본 연구를 위하여 특별 제작한 2축 엑스텐소미터를 이용한 실험 컴플라이언스 측정치와 이론 그래프의 관계는 아래와 같다.

1) 균열깊이 1.0, 2.0mm인 E.D.M. 가공 표준시험편의 컴플라이언스 측정치와 이론치의 오차범위는 약 $\pm 5\%$ 이었다.

2) 균열깊이 3.0, 4.0, 5.0mm인 E.D.M. 가공 표준시험편의 컴플라이언스 측정치와 이론치의 오차범위는 약 $\pm 2\%$ 이었다.

3) 유효균열깊이(a_{eff})가 4.0mm에서 가열변색시킨 피로시험편을 인장파단시킨 후, 파단면을 12등분하여 측정한 평균치는 추정유효균열깊이(a_{eff})보다 약 2% 높게 나타났다.

Fig. 6의 사진은 피로시험편의 파단면으로서, 연강재료가 낮은 응력조건($\tau_{max} \leq 0.19 \tau_y$)에서 볼 수 있는 공장지붕(Factory Roof) 형태를 관찰할 수 있었다. 응력비 $R = -1$ 인 경우, 균열의 꼭지각이 대칭적 삼각형으로 보였으나, $R = 0$ 인 경우에는 최대전단력이 작용하는 한쪽방향 뿔니형의 비대칭적인 파면들이 형성되었다.

Fig. 7과 Fig. 8에서와 같이 균열깊이(a)가 2.0mm에서 4.0mm까지 도달하는 피로반복수(N)는 $R = -1$ 인 경우가 $R = 0$ 인 경

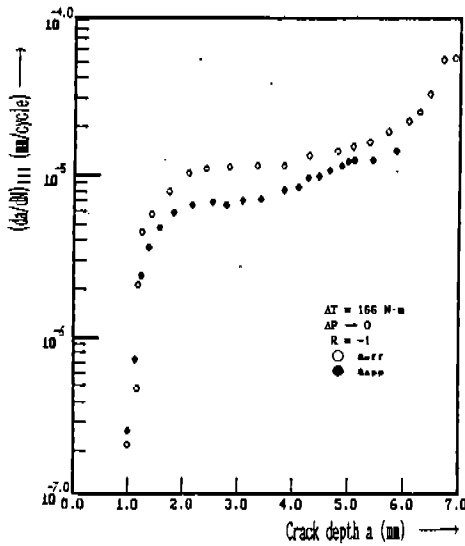


Fig. 9 $(da/dN)_{III}$ - a relations for specimen No.1

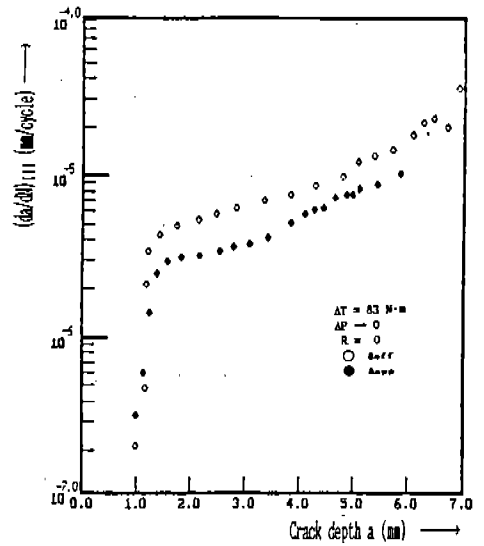


Fig. 10 $(da/dN)_{III}$ - a relations for specimen No.2

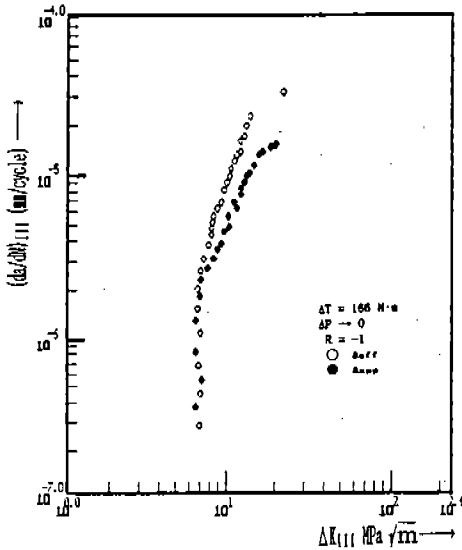


Fig. 11 $(da/dN-\Delta K)_{III}$ relations for specimen No.1

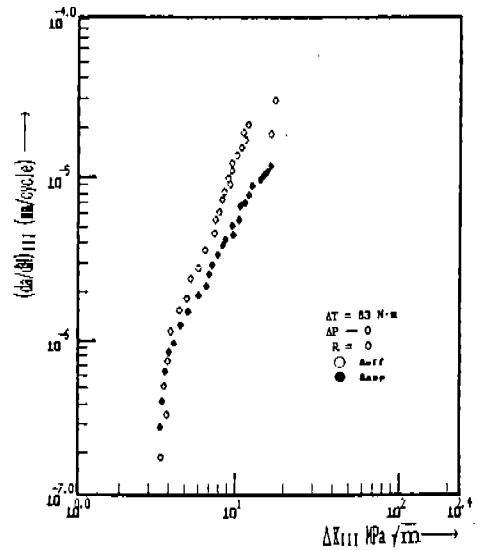


Fig. 12 $(da/dN-\Delta K)_{III}$ relation for specimen No. 2

우보다 약 2배 정도 더 빠르게 나타났다.

비틀림피로균열성장률 $(da/dN)_{III}$ 와 균열깊이 (a) 의 관계에서는 $R = -1$ 와 $R = 0$ 인 경우 균열깊이가 약 2.9mm 지점에서 피로균열 전진속도가 급격히 변하는 현상을 Fig. 9, 10에서 알아볼 수 있었다. 이는 Mode III 피로 파괴단면의 파괴형상과 역학적 관계 규명을

위한 중요한 연구과제가 될 것으로 생각된다.

Fig. 11과 Fig. 12에서는 비틀림피로균열성장률 $(da/dN)_{III}$ 과 S.I.F. ΔK_{III} 의 관계를 산출하여 표시한 것이다. 여기에서 Paris의 법칙 $(da/dN)_{III} = C(\Delta K_{III})^m$ 을 만족하였다. $R = -1$ 인 경우 유효균열깊이 (a_{eff}) 에 대한 제 2영역에서의 기울기 $m = 5.86$ 이었고, 마찰

력이 포함된 결보기 균열깊이 (a_{app}) 에서는, $m=4.23$ 으로 산출되었다. 이때의 응력확대 계수범위의 하한계치(Threshold Stress Intensity Factor Range)인 $(\Delta K_{th})_{III}=6.4 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 각기 일치하였다. 한편 $R=0$ 인 경우 유효균열깊이 (a_{eff}) 에 대한 제 2 영역에서의 기울기 $m=5.52$ 이었고, 마찰력이 포함된 결보기 균열깊이 (a_{app}) 에서는 $m=4.0$ 으로 산출되었다. 이때의 $(\Delta K_{th})_{III}=3.6 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 각기 일치하였다.

피로균열성장을 $(da/dN)_{III}$ 와 균열깊이(a)의 관계 그래프로부터 결보기 Mode III 균열깊이 (●)는 유효균열깊이(○)의 성장속도 다소 낮게 나타났다. 그 주요원인은 Mode III 균열면에서의 상, 하 균열 표면끼리의 마찰영향으로 생각되며, 다른 연구자^{5, 6, 7, 8)}들의 보고와 일치하고 있다.

피로균열성장률 $(da/dN)_{III}$ 와 응력확대계수범위 (ΔK_{III}) 관계는 비틀림 일정하중제어 피로시험시 응력비 R 의 영향을 받아, 제 1 영역에서의 응력확대계수 범위의 하한계치 $(\Delta K_{th})_{III}$ 값은 $R=-1$ 가 $R=0$ 인 경우보다 약 1.6 배 높게 나타났다.

4. 결 론

원형축 파괴사례의 대부분이 비틀림 피로하중에 의하여 발생하기 때문에, 기계구조물의 건전성 평가 및 피로수명 예측 연구는 매우 중요하게 다루어지고 있다.

본 연구는 기초적인 단계로서 Mode I, Mode III 균열의 컴플라이언스 측정용 2축 엑스텐소미터를 사용하여서 보다 정확한 균열깊이를 알아냄으로서, 이들 문제들을 파괴역학적으로 실험한 결과는 다음과 같다.

(1) 균열초기에서는 컴플라이언스에 의한 균열깊이(a)가 이론치에 비하여 오차가 다소 컸으나, 균열깊이가 증가할수록 정확도가 높아졌다.

(2) Mode I 균열의 컴플라이언스를 측정함으로써 마찰력이 없는 유효균열깊이(a_{eff})를 산출할 수 있었다.

(3) Mode III 균열의 컴플라이언스를 측정함으로써, 균열면에 작용하는 마찰력의 영향에 의한 결보기 균열깊이 (a_{app})를 정량화시킬 수 있었다.

(4) ΔT 하중제어피로시험에 의한 피로균열 성장속도식 $(da/dN - \Delta K)_{III}$ 선도에서 균열깊이가 2.0~6.0mm 범위에서는 Paris의 지수법칙 $(da/dN)_{III} = C(\Delta K_{III})^m$ 를 잘 만족하며, $(\Delta K_{th})_{III}$ 값은 응력비(R)의 영향을 받아서 $R=-1$ 인 경우가 $R=0$ 인 경우보다 약 1.6 배 크게 나타났다.

후 기

본 연구 논문은 1989년도 교육부 해외파견 교수 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다. 또한 본 연구에 도움을 준 성균관대학교 기계설계과 양원호 교수와 Univ. of Connecticut 의 E. H. Jordan 교수께도 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. M.C. Jackson, S.D. Umans, R.D. Dunlop, S.R. Horowitz, and A.D. Parikh, "IEEE Transactions for power Apparatus and System", vol. 98, p. 2229, 1979.
2. F.A. McClintock, "Proc. Intl. Conf. on Fatigue of Metals" London, UK, Instit. Mech. Engineers, p. 538, 1956.
3. J.K. H. Hult, "Trans. Royal Instit. of tech", Stockholm, Sweden, No. 119, 1958. See also: J.K.H. Hult and F.A. McClintock, "Proc. Ninth Intl. Congress on Applied Mechanics", Univ. Brussels, vol. 8, p. 51, 1957.
4. R.O. Ritchie, F.A. McClintock, H. Nayeb-Hashemi and M.A. Ritter, "Mode III crack propagation in low alloy steel", Metall. Trans. 18A, pp. 101-110, 1982.
5. H. Nayeb-Hashemi, F.A. McClintock and R.O. Ritchie, "Effects of friction and high torque on fatigue crack propagation

- in mode III", Metall. Trans. 18A, pp. 2197-2204, 1982.
6. M.W. Brown, E. Hay and K.J. Miller, "Fatigue at notches subjected to reversed torsion and static axial loads", Fat. Engng Mater. Str. 8, pp. 243-258, 1985.
 7. E.K. Tschegg, "Mode III and mode I fatigue crack propagation behaviour under torsional loading", J. Mater. Sci. 18, 1604-1614, 1983.
 8. T.S. Gross and D. Mendelsohn, "An Analysis of Frictional Effects on cylindrical Mode III Fatigue crack Propagation Specimens", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. vol. 11, No. 3, pp. 167-178, 1988.
 9. 김복기, "비틀림피로하중을 받는 나사에
서의 피로균열성장거동에 관한 연구(I)"
명지실업전문대학 논문집, vol. 13, pp. 393-405, 1989.
 10. 이혜철, "환상균열을 갖는 축의 비틀림에
대한 파괴역학적 연구", 성균관대학교 석
사학위논문, 1990.
 11. H. Tada, P.C. Paris, and G.R. Irwin, "Stress
Analysis of Cracks Handbook", Del Re-
search Corp., Hellertown, PA, 1973.
 12. J.P. Benthem and W.T. Koiter, "In 'Me-
chanics of Fracture', vol. 1" ed. by G.C.
Sih, Noordhoff, p. 176, 1973.
 13. Liu, K.C. "Low cycle Biaxial Fatigue of
Annealed 2 1/4 Cr-1Mo Steel at 538°C
Under in - phase Loads" ORNLTM-
8641, July 1983.