

〈論 文〉

피로크랙 진전속도에 대한 평가방법의 영향

최병기* · 최남식** · 정택용*** · 윤한용***

(1992년 10월 10일 접수)

Influence of Evaluation Methods to Fatigue Crack Propagation Rate

Byung-Ky Choi, Nam-Sik Choi, Taek-Ryong Chung and Han-Yong Yoon

Key Words: Distribution of Fatigue Crack Growth Rate(피로크랙 진전속도분포), Measuring Interval(측정간격), Method of Calculation of Fatigue Crack Growth Rate(피로크랙 진전속도 계산법)

Abstract

The distribution of fatigue crack growth rate is influenced by the measuring interval and methods of calculation of crack growth rate. The purpose of this paper is to suggest a method for the evaluation of crack growth rate distribution without the influence. The constant ΔP test and the constant ΔK test are executed by using the CT specimen. The measuring interval of ($\Delta a/W = 0.0067 \sim 0.014$) crack length is not affected by methods of the calculation of the fatigue crack growth rate is suggested.

1. 서론

재료내부의 조직적 불균일성과 실험적 오차등의 원인으로 피로시험 데이터가 어떠한 확률적 특성을 나타낸은 주지의 사실이다. 피로크랙진전 데이터 또한 확률분포를 나타내며 이에 관한 이론적, 실험적 연구가 확률파괴역학의 한 부분으로서 연구되고 있다^(1~10). 피로크랙 진전속도의 분포는 피로크랙 진전속의 계산법과 크랙길이 측정간격에 지대한 영향을 받게 되는데, 시험편간의 분포와 시험편 내부의 분포로 대별되는 피로크랙 진전속의 분포중 시험편간 분포는 그다지 영향을 받지 않으나⁽¹¹⁾, 시험편 내부의 분포는 Fig. 1, 2(일정 ΔK 시험으로부터 구한 것임)에 나타내는 바와 같이 커다란 영향을 받는다. 따라서, 측정간격이나 피로크랙 진전속

도의 계산법의 영향을 배제하거나 가능한 한 적게 할 수 있는 방법이 모색되어야 한다고 생각된다.

D.F. Oestergaard⁽¹²⁾은, D.A. Virkler⁽²⁾의 실험데이터를 이용하여 계산방식과 측정간격에 따른 피로크랙 진전수명의 차이를 논했다. 즉, 크랙길이 a 와 사이를 수 N 으로부터 근사법을 이용하여 데이터간의 중분 da/dN 을 구한다음 다시 이 da/dN 으로부터 특정길이사이의 사이를 수를 수치적분을 통하여 구하고 이 값과 실제 측정된 사이를 수와의 오차를 계산해 이 오차가 가장 작은 것을 바람직한 것으로 구했다. 특히, 그들은 68개의 CCT(center crack tension) 시험편의 특정 길이 사이의 오차를 구해 이 오차의 평균치가 계산방식과 측정간격에 따라 어떻게 달라지는가를 나타냈다. 그러나, 크랙 진전 제Ⅱ 영역에서는 일반적으로 Paris법칙을 적용하여 크랙진전속도를 나타내며, 실질적으로 이를 이용하여 수명을 예측하거나 안전을 평가하고 있는 것이 현실인 점을 고려하면 이들의 방식은 계산 그 자체로서는 의미를 가질지 모르나 실질적이고 물리

*정회원, 조선대학교 기계공학과

**조선대학교 기계공학과 대학원

***정회원, 목포대학교 기계공학과

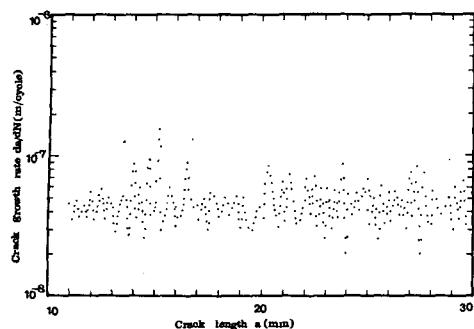


Fig. 1 Distribution of Fatigue crack growth rate (measuring interval: 0.1mm, da/dN calculation: Secant method)

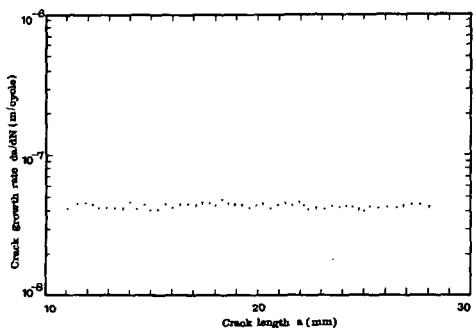


Fig. 2 Distribution of fatigue crack growth rate (measuring interval: 0.3mm, da/dN calculation: 5-point polynomial method)

적인 면에서는 그 의미가 대단히 희박하다고 생각된다. 그 결과, 크랙진전속도 계산법 중 ASTM에서 권장하고 있는 7점 다항식 근사법(7 point polynomial approximation method)이 세칸트법(secant method)보다 오차가 크게 나타났으며, 이를 그대로 적용한다면 계산방법이 지극히 간단한 세칸트법을 이용하는 것이 낫다고 하는 결론에 이르게 된다. 또한, 이들은 계산 결과로 부터 가장 바람직한 크랙길이 측정간격은 0.8~1.6 mm라는 결론을 내렸다. 그러나, 이 측정 간격은 시험편의 규격에 따라 충분히 달리 질 소지가 있다.

본 논문은, 피로크랙 진전속도의 분포에 대한 금속학적 인자 내지는 역학적 인자의 영향을 평가하기 위한 연구의 전 단계로 연구된 것으로, 최근 가장 많이 사용되고 있는 CT(compact tension) 시험편을 이용하여 일정 ΔP 시험(하중일정시험), 일정 ΔK 시험(응력확대계수 일정시험)을 하여 이를 토대로 계산방식과 측정간격의 영향을 논하고, 이를

통하여 바람직한 측정간격을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

실험에 사용한 시험기는 전기유압 서보식 피로시험기(Electro-hydraulic Servopulser Fatigue Testing Machine)를 이용했다. 본 시험기는 Fig. 3에 나타내는 바와 같이 폐회로식 제어기구를 응용한 것으로 설정하중과, 수시로 검출되는 로드셀의 신호를 제어기안에 내장된 A/D변환기를 통해서 소형 컴퓨터에 입력해 오차를 보정하는 방식을 택함으로 해서 고정밀도의 실험이 가능하다. 특히, 일정 ΔK 시험의 경우는 크랙길이가 증가함에 따라 수시로 ΔK 치를 계산하여 그 값이 일정하도록 하중값을 점진적으로 내려 주어야 하는데, 본 시험기에서는 고정밀도의 원활한 K 치 제어가 가능하다.

실험에 사용한 재료는 SS41재로 화학적성분 및 기계적성질을 Table 1,2에 나타냈다. 또한, 시험편은 Fig. 4에 나타내는 두께 5 mm CT(compact tension) 시험편을 이용했다. 반복하중은 하중제어에 의한 정현파형을 부과하였고, 주기는 10 Hz로

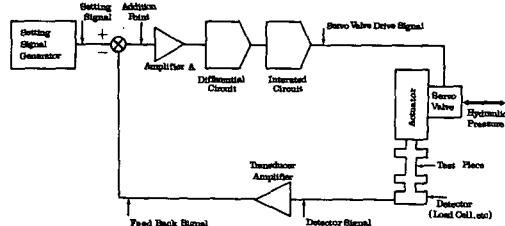


Fig. 3 Control circuit diagram of fatigue testing machine

Table 1 Chemical compositions of material

MATERIAL	Composition (Wt%)				
	C	Si	Mn	P	S
SS 41	0.18	0.08	0.61	0.013	0.012

Table 2 Mechanical properties of material

MATERIAL	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
SS 41	414.96	281.55	39.7

하였으며 실험에 사용된 ΔP 일정하중시험 및 ΔK 일정하중시험의 하중조건을 Table 3 및 4와 같이 설정하였다.

크랙길이의 측정은 시험편의 전면(Fig. 4 A부의 knife edge)에 클립게이지를 장착하여 크랙 개구변 위를 측정하였고 이 변위와 하중신호로부터 캠플라이언스(compliance)를 구해 환산하는 방법을 이용했다. 크랙길이의 측정은 예크랙(pre-crack)의 효

과를 고려하여 1 mm 진전한 후 기록을 시작하였으며 측정간격은 0.1 mm로 하였다. 본 실험은 시험편의 착탈을 제외하고는 하중의 제어, 크랙길이의 측정 등이 모두 프로그램화되어 자동으로 시행된다.

3. 실험결과 및 오차평가

실험으로부터 얻어진 크랙길이와 사이를 수의 관계를 Fig. 5,6에 나타냈다. Fig. 5는 일정 ΔP 시험, Fig. 6은 일정 ΔK 시험의 결과로, 특히, 일정 ΔK 시험의 경우 크랙길이와 사이를 수의 관계가 거의 일직선상에 놓여 있는 것으로 보아 양호한 실험이 가능했다고 생각되어 진다.

Fig. 7,8에 일정 ΔP 시험에서 얻어진 크랙길이와 사이를 수와의 관계로부터 크랙진전속도와 응력회대계수변위의 관계를 구해 나타냈다. Fig. 7은 측정간격을 0.1 mm로 하고 크랙진전속도 da/dN 의 계산법⁽¹³⁾은 Secant법을 사용한 것이며, Fig. 8은

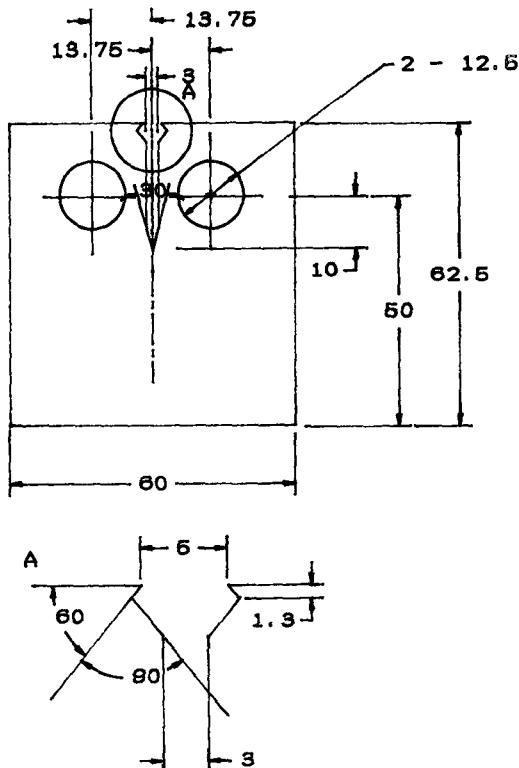


Fig. 4 Configuration of the specimen

Table 3 Load conditions of ΔP constant test

P_{max} (N)	P_{min} (N)	ΔP (N)	Stress ratio
5886	2354	3532	0.4

Table 4 Load conditions of ΔK constant test

ΔK ($MPa\sqrt{m}$)	P_{max} (N) at test starting	P_{min} (N) at test starting	Stress ratio (R)
20.15	8456	3365	0.4

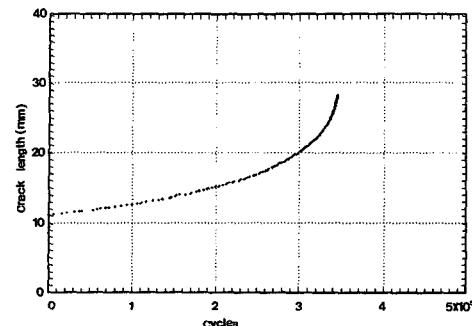


Fig. 5 Relation between crack length and cycle (ΔP constant test)

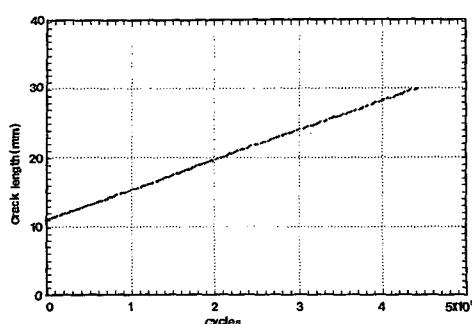


Fig. 6 Relation between crack length and cycle (ΔK constant test)

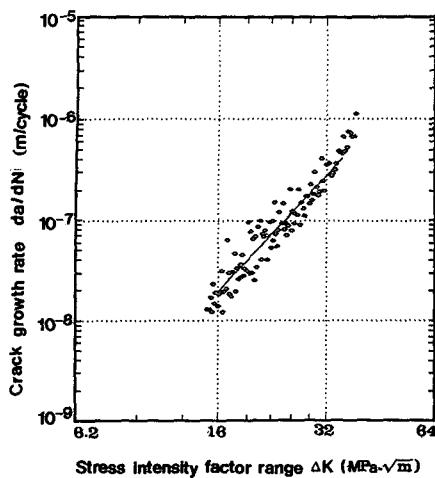


Fig. 7 Relation between stress intensity factor range and crack growth rate(measuring interval: 0.1mm, da/dN calculation: Secant method)

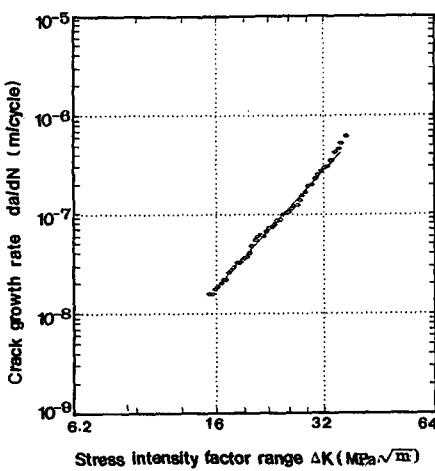


Fig. 8 Relation between stress intensity factor range and crack growth rate(measuring interval: 0.3mm, da/dN calculation: 5-point polynomial method)

측정간격을 0.3 mm로 하고 da/dN 의 계산은 5점 다항식 근사법(5-point polynomial method)을 이용했다. 두 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 측정간격과 da/dN 의 계산법에 따라 많은 차이를 나타낸다.

3.1 일정 ΔP 시험 결과의 오차평가

D.F. Oestergaard⁽¹²⁾은 측정간격 및 계산법의 차이로부터 가장 적절한 측정간격을 결정하기 위하

여 크랙길이 a 와 사이클 수 N 으로부터 근사법을 이용하여 데이터간의 증분 da/dN 을 구한다음 다시 이 da/dN 으로부터 특정 길이사이의 사이클 수 N 을 식 (1), (2)와같이 수치적분을 통하여 계산했다.

$$W_i = \left[\frac{da}{dN} \right] \quad (1)$$

$$N = \int_{a_{i-1}}^{a_i} W_i \, da \quad (2)$$

즉, 계산된 이 값과 실제 측정된 사이클 수와의 오차를 계산해 이 오차가 가장 작은 것 바람직한 것이라 했다. 여기서, W_i 는 i 번째의 da/dN 값이다. 그 결과, 크랙진전속도 계산법 중 ASTM에서 권장하고 있는 7점 다항식 근사법(7 point polynomial approximation method)이 세칸트법(secant method)보다 오차가 크게 나타났으며, 이를 그대로 적용한다면 계산방법이 지극히 간단한 세칸트법을 이용하는 것이 낫다고 하는 결론에 이르게 된다. 그러나, 서론에서도 기술했듯이 크랙진전 제Ⅱ영역에서는 일반적으로 Paris법칙을 적용하여 크랙진전속도를 나타내며, 실질적으로 이를 이용하여 수명을 예측하거나 안전을 평가하고 있는 것이 통례인 점을 고려하면 이들의 방식은 계산 그 자체로서는 의미를 가질지 모르나 실질적이고 물리적인 면에서는 그 의미가 대단히 회박하다고 생각된다. 따라서, 본 논문에서는 다음과 같은 방법을 택했다.

식(3)에 나타내는 Paris식,⁽¹⁴⁾

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (3)$$

을 실험 데이터에 적용하여 Paris식이 적용 가능한 크랙진전 제Ⅱ영역에 대해 재료계수 C, m 을 구한 뒤, 식(4)로 부터, 그렉진전 제Ⅱ영역 안의 첫번째 크랙길이로부터 그 다음에 오는 크랙길이들 사이의 사이클 수 N 을 수치적분(Simpson's method)을 이용하여 구한 다음 실제로 측정된 사이클 수와의 오차들을 계산해 그 평균값을 기록했다.

$$N_i = \int_{a_0}^{a_i} \frac{1}{C\Delta K} da \quad (4)$$

여기서, a_0 는 첫번째 크랙길이이며, a_i 는 그 다음의 각각의 크랙길이이고 N_i 는 그때의 사이클 수이다.

Fig. 9에 오차계산 결과를 나타냈다. 측정간격이 짧거나 길 경우는 오차도 크고, da/dN 계산법에

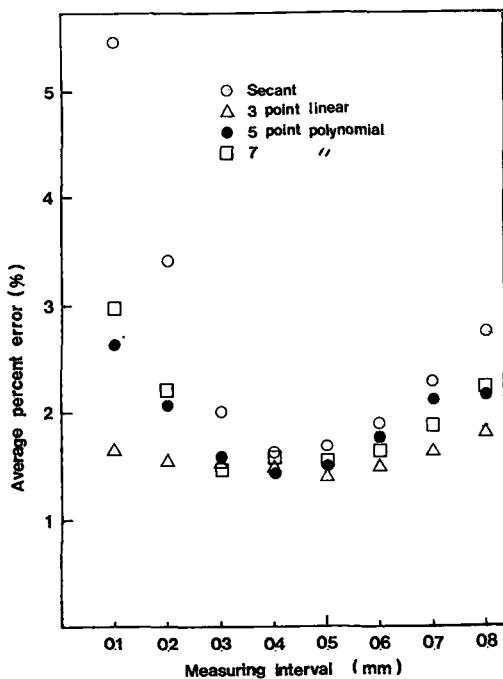


Fig. 9 Average percent error in calculating N from da/dN versus measuring intervals (ΔK constant test)

따른 많은 차이를 나타내는 반면, 측정간격 0.3~0.6, 0.7 mm에서는 오차도 작고 D.F. Ostergaard들의 결과와는 달리 계산법에 따른 차이도 적음을 알 수 있다.

3.2 일정 ΔK 시험 결과의 오차평가

다항식 근사법 (polynomial approximation method)의 효력은 데이터가 곡선적인 변화를 나타낼 때 발휘된다. 일정 ΔP 시험에서는 Fig. 5와 같이 크랙 길이와 사이를 수가 곡선적인 관계를 나타내므로 근사법의 차이가 나타나게 된다. 일정 ΔK 시험의 경우는 Fig. 6과 같이 크랙길이와 사이를 수가 선형적인 관계를 나타내므로 다항식 근사법은 별 의미를 가지지 못하며, 따라서, 가능한 한 계산법에 따른 오차의 차이를 배제한 측정간격의 영향을 평가할 수가 있다고 생각된다.

일정 ΔK 시험에서는 크랙진전속도가 일정하다. 따라서, 다음 식(5)와 같이 크랙길이 사이의 사이를 수를 구해 실제 측정된 사이를 수와의 오차를 구했다.

$$(N_i - N_o) = (a_i - a_o) \cdot (dN/da) \quad (5)$$

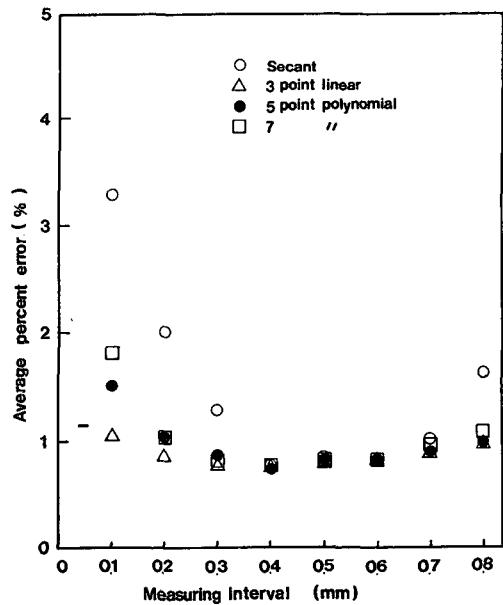


Fig. 10 Average percent error in calculatin N from da/dN versus measuring intervals (ΔK constant test)

여기서, N_i 는 크랙길이 a_i 에서의 사이를 수이며 N_o 는 크랙길이 a_o 에서의 사이를 수이다. (dN/da) 은 각 크랙길이에서의 크랙진전속도의 평균치의 역수이다.

Fig. 10에 계산된 오차를 나타냈다.

이상으로 2개의 시험결과의 계산으로부터 가장 적당한 측정간격은 0.3~0.7 mm정도이며 이 측정간격에서는 계산법에 따른 오차평균의 차이도 그다지 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

3.3 CCT(center crack tension) 시험편의 경우

위에서는 CT시험편의 경우에 대해서 논했으나 시험편의 크기에 따라 충분히 다를것으로 생각된다. 본 계산에서는 기존의 실험데이터⁽¹⁵⁾를 이용했다. 이 실험데이터는 A12024-T3재의 시험편 폭 150 mm, 두께 5 mm의 CCT시험편으로 응력비 0.12 하중폭 18.6 KN의 시험에서 얻어진 것으로, 크랙길이의 측정은 육안으로 측정했으며 원래는 측정간격이 1~2 mm정도인 것을 본 계산에 이용하기 위하여 spline 보간을 이용하여 측정 간격이 0.5 mm가 되도록 수정을 가했다. Fig. 11에 3.1절과 동일한 방법으로 계산한 결과를 나타냈다. 비교적 Fig. 9와 비슷한 경향을 나타냄을 알 수가 있고,

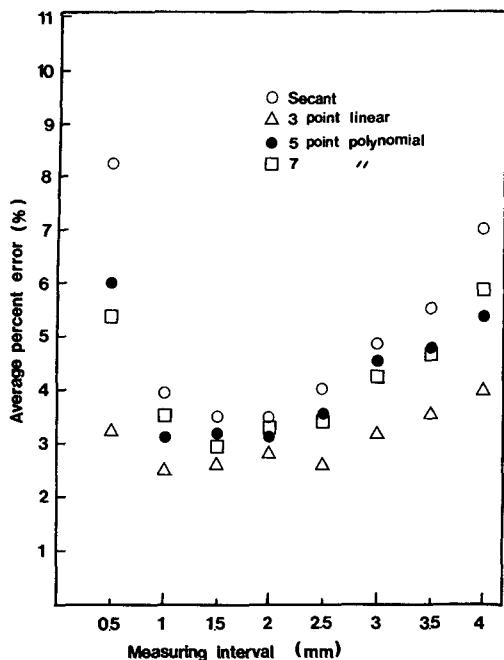


Fig. 11 Average percent error in calculating N from da/dN versus measuring intervals (ΔP constant test; in case of CCT specimen)

적당한 측정간격은 1~2.5 mm정도임을 알 수가 있다.

여기서, 시험편의 크기에 따른 차이를 배제하기 위하여 크랙길이 측정간격 Δa 를 시험편 폭 W 로 무차원화한 값 $\xi(\Delta a/W)$ 를 이용하면 1~2.5mm이면 $\xi=0.0067\sim0.017$ 이 되며, 앞의 CT시험편의 경우 0.3~0.7 mm이면 $\xi=0.006\sim0.014$ 가 된다. 따라서 CT나 CCT 시험편에 관계없이 $\xi=0.0067\sim0.014$ 를 측정간격으로 잡으면 오차가 작은 피로크랙 진전시험이 가능할 것으로 생각된다.

4. 결론

피로크랙진전속도의 분포는 피로크랙진전속도의 계산법 및 측정간격에 영향을 받는다. 본 연구는 이를 영향이 배제된 피로크랙진전속도의 분포를 구하는 방법을 확립하기 위하여 수행된 것으로서, 일련의 피로크랙진전시험 및 계산에 의해 적절한 크랙길이 측정간격을 제시했다. 얻어진 결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) ΔP 일정시험 및 ΔK 일정시험 결과, 측정간격

0.3~0.7 mm정도가 오차가 작고 D.F. Oestergaard들의 결과와는 달리 크랙진전속도의 계산법에도 그다지 영향을 받지 않는 적절한 간격으로 사료된다.

(2) CCT시험편의 실험데이터를 이용하여 오차 평가와 CT시험편의 오차평가를 종합적으로 검토한 결과, CT나 CCT 시험편에 관계없이 $\xi(\Delta a/W)=0.0067\sim0.014$ 를 측정간격으로 잡으면 오차가 작은 피로시험이 가능하다.

후기

이 논문은 1991학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 관계제위께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 田中榮, 秋田敏, 小林信之, 1973, “軟鋼缺陷き材の疲れき裂傳播に関する統計的考察,” 日本材料強度學會誌, 第8卷, 第2號, pp. 56~73.
- Virkler, D.A., Hillberry, B.M. and Goal, P.K., 1979, “The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation,” Trans, ASME, Vol. 101, pp. 148~152.
- 酒井達雄, 田中道七, 1979, “金屬材料の疲労き裂進展壽命分布特性に關する統計的研究,” 日本機械學會論文集, 第28卷, 第312號, pp. 880~886.
- 島田住弘, 中川隆夫, 德納久睦, 1984, “マルコフ連鎖を用いに疲労き裂進展壽命の信頼性解析, 材料, 第33卷, 第367號, pp. 475~481.
- 北川英夫, 権在度, 中會根祐司, 島崎剛, 1986, “長期使用鋼劣化材疲労裂進展壽命豫測,” 日本機械學會論文集, 第52卷, 第480號, pp. 1749~1759.
- Kozin, F. and Bogdanoff J.L. 1981, “A Critical Analysis of Some Probabilistic Models of Fatigue Crack Growth,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 14, No. 1, pp. 59~89.
- Keith Ortiz, Anne S.Kiremidjian, 1988, “Stochastic Modeling of Fatigue Crack Growth,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 29, No. 3, pp. 317~334.
- 윤한용, 1990, “피로크랙 진전수명의 확률특성에 관한 연구(1)-초기크랙길이 분포의 영향,” 대한기계학회논문집 제14권, 제1호, pp. 138~144.

- (9) 윤한용, 1990, “피로크랙 진전수명의 확률특성에 관한 연구(2)-크랙진전속도의 분포-,” 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp. 1561~1567.
- (10) 윤한용, 1991, “피로크랙 진전수명의 확률특성에 관한 연구(3)-크랙진전속도의 불확정성 평가수법-,” 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, pp. 1635~1639.
- (11) 尹漢鏞, 1988, “缺陷を有する部材の疲労壽命豫測に關する信賴性工學的研究,” 東京大學博士學位論文, p. 164.
- (12) Oestergaard, D.F., Thomas, J.R. and Hillberry, B.M. 1981, “Effect of Δa -Increment on Calculating da/dN from a versus N data,” ASTM STP 738, pp. 194~204.
- (13) 國尾武, 中澤一, 林郁彦, 岡村弘之, 1984, “破壞力學實驗法,” 朝倉書店, pp. 164~165.
- (14) Paris, P.C. and Erdogan, F., 1963, “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws,” Tran. ASME Ser. D. 85, pp. 528~534.
- (15) 尹漢鏞, 1985, “不規則荷重下の疲労き裂進展學動に關する研究,” 東京大學碩士學位論文, p. 89.