論文 한국공작기계학회지 제 8 권 제 1 호 1999. 2.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

피로균열 성장과정에 대한 평가방법의 영향

안 철 봉*, 최 병 기**

Influence of Evaluation Methods for Fatigue Crack Growth Process

Chul-Bong An*, Byung-Ki Choi**

Abstract

The distribution of fatigue crack growth rate is subjected to the measuring interval and calculated method of growth rate.

In this paper, in order to establish the method of determining the distribution of fatigue crack growth rate, which ignores those influences, a series of fatigue crack growth experiments and measuring intervals of crack length calculated reasonable are presented. The main conclusions obtained are summarized as follows:

1) As a result of the ΔP constant test and ΔK constant test, it is thought that an approximate measuring interval of 0.3~0.7 mm is reasonable, which allows for few errors and is little subjected to the calculated method of crack growth rate.

2) After generally comparing the error estimation by using the experimental data of CCT specimen with the error rating of the CT specimens, it is possible that the fatigue test has few errors within the measuring interval, $\xi(\Delta a/W)=0.0067\sim0.014$, regardless of the dimension of specimen geometry.

KeyWords : Fatigue crack growth rate(피로균열 성장속도), Measuring interval(측정간격), CCT(Center crack tension), CT(Compact tension), ΔP(하중범위), ΔK(응력확대계수 범위)

1. 서 론

재료 내부의 조직적 불균일성과 실험적 오차 등의 요인으로 피로실험 데이터가 어떠한 확률적 특성을 나타냄은 잘 알려진 사실이다. 피로균열 진전 데이터 또한 확률 분포를 나타내며 이에 관한 이론적, 실험적 연구가 확률파괴

* 조선이공대 건축설비과
** 조선대학교 기계공학부

역학의 한 부분으로서 연구되고 있다.[1-8] 피로균열 진전속도의 분포는 피로균열 진전속도의 계산방법과 균열길이 측정간격에 지대한 영향을 받게 되는데, 시험편간의 분포와 시험편 내부의 분포로 대별되는 피로균열 진전속도의 분포 중 시험편간 분포는 그다지 영향을 받지 않으나[9], 시험편 내부는 커다란 영향을 받는다. 따라서, 측정간격이나 피로균열 진전속도의 계산방법에 지배되지 않는 균열 진전속도 분포를 구할 수 있는 방법이 모색되어야 한다고 생각된다.

D. F. Ostergaard들[10]은 D. A. Virkler들[2]의 실험데이터를 이용하여 계산방법과 측정간격에 따른 피로균열 진전수명의 차이를 논하였다. 즉, 균열길이 a와 사이클 수 N으로부터 근사방법을 이용하여 데이터간의 증분 da/dN을 구한 다음 다시 이 da/dN으로부터 특정길이 사이의 사이클 수를 수치적분을 통하여 구하고 이 값과 실측된 사이클 수와의 오차를 계산해 이 오차가 가장 작은 것을 바람직한 것으로 했다. 특히, 그들은 68개의 CCT 시험편의 측정길이 사이의 오차를 구해 이 오차의 평균치가 계산방법과 측정간격에 따라 어떻게 달라지는가를 나타냈다. 그러나, 균열진전 제 Ⅱ영역에서는 일반적으로 Paris법칙을 적용하여 균열 진전속도를 나타내며, 실질적으로 이를 이용하여 수명을 예측하거나 안전을 평가하고 있는 것이 현실인 점을 고려하면 이들의 방법은 계산 그 자체로서는 의미를 가질지 모르나 실질적이고 물리적인 면에서는 그 의미가 대단히 희박하다고 생각된다. 또한, 이들은 계산 결과로부터 가장 바람직한 균열길이 측정간격은 0.8~1.6 mm라는 결론을 내렸다. 그러나, 이 측정간격은 시험편의 규격에 따라 충분히 달라질 소지가 있다.

본 연구는 피로균열 진전속도의 분포에 대한 금속학적 인자 내지는 역학적 인자의 영향을 평가하기 위한 연구의 전단계로 연구된 것으로 피로균열 진전속도의 분포는 측정간격 및 피로균열 진전속도 계산 방법에 따라 많은 차이를 나타낸다. 이러한 영향이 배제된 피로균열 진전속도 분포를 평가하기 위한 방법을 제시하기 위하여 수행된 것으로서, 표준형 CT 시험편을 이용하여 ΔP 일정시험(하중 일정시험), ΔK 일정시험(응력확대계수 일정시험)을 하였으며 그로부터 얻어진 데이터를 이용하여 가장 적절한 균열길이 측정간격을 제시하고자 한다.

2. 시험편 및 시험기

2.1 시험편

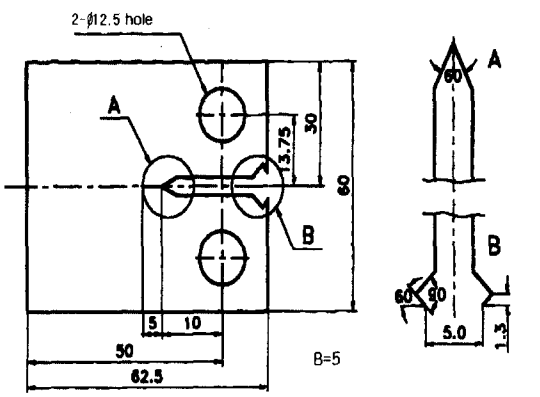
본 연구에 사용한 재료는 국산 SS41재로 그 화학적 성분을 Table 1, 기계적 성분을 Table 2에 나타냈다. 또한, 시험편은 압연 방향과 균열진전 방향이 직각이 되도록 채취하였으며 채취된 시험편을 약 5 mm×60 mm×62.5 mm의 크기로 밀링 가공 후 연삭기로 압연 방향과 동일한 방향으로 연삭가공하였다. 또한, ASTM E647-81에 준하여 기계 노치를 10 mm를 가공하고, 개선각 30°가 되도록 와이어 커팅(wire cutting)하였다. 시험편 형상은 표준형 CT 시험편으로 Fig. 1에 나타냈다.

Table 1 Chemical compositions of material

Material	Composition(wt %)				
	C	Si	Mn	P	S
SS41	0.18	0.08	0.61	0.013	0.012

Table 2 Mechanical properties of material

Material	Tensile strength (kgf/mm^2)	Yield strength (kgf/mm^2)	Elongation (%)
SS41	42.3	28.7	39.7



Detail A, B

Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

2.2. 시험기

본 실험에 이용한 시험기는 A/D, D/A 변환기를 내재한 마이크로 컴퓨터에 의해 하중의 설정 및 제어를 하도록 되어 있으며, 이 A/D, D/A 분해능과 로드셀로부터 출력을 스트레인 증폭기에서 증폭시켜 D/A에 의해 마이크로 컴퓨터에 입력해 스트레인 증폭기의 증폭전원에 의

해 하중의 감도가 변화되도록 되어 있는 용량 10 ton의 전기유압식 서보시험기(SHIMADZU SERVO-PULSER EHF-ED10-40L)를 이용했다.

3. 실험방법

본 실험에서 사용된 제어방식은 크로스 루프(close-loop)식 제어기구를 응용한 것으로 설정하중과 수시로 검출(검출간격 : 10 msec)되는 로드셀의 신호를 제어기안에 내재된 A/D변환기를 통해서 소형 컴퓨터에 입력해 오차를 보정하는 방법을 택함으로 해서 고정도의 실험이 가능하다. 특히, ΔK 일정시험의 경우는 균열길이가 증가함에 따라 수시로 ΔK치를 계산하여 그 값이 일정하도록 하중값을 점진적으로 내려주어야 하는데, 본 실험에서는 고정도의 원활한 K치 제어가 가능하다. 반복하중은 하중제어에 의한 정현파형, 주기는 10 Hz을 사용하였으며 실험에 사용된 ΔP 일정하중시험 및 ΔK 일정시험의 하중조건을 Table 3 및 4와 같이 설정하였다.

Table 3 Load conditions of ΔP constant test

P_{max}(kgf)	P_{min}(kgf)	ΔP(kgf)	Stress ratio
600	240	360	0.4

Table 4 Load conditions of ΔK constant test

ΔK (kg/mm$^{3/2}$)	Stress ratio
65	0.4

균열길이의 측정은 시험편의 전면에 클립게이지를 장착하여 균열열림변위를 측정하였고, 이 변위와 하중신호로부터 컴플라이언스를 구해 식 (1)과 같이 환산하는 방법을 이용했다.

$$C=\frac{\delta}{P} \tag{1}$$

여기서, C : 컴플라이언스(mm/N)

δ : 하중점 변위

P : 작용하중

균열길이의 측정은 예비균열(pre-crack)의 효과를 고려하여 1 mm 진전한 후 기록을 시작하였으며 측정간격은 0.1 mm로 하였다.

균열길이 측정의 정밀도는 제어기안에 내재된 12 bit A/D 변환기의 분해능(resolution)을 고려하면 균열 열림변위의 측정 정밀도가 대략 0.0001 mm 정도이며 이를 균열길이로 환산하면 0.01 mm 정도가 된다. 본 실험은 시험편의 착탈을 제외하고는 하중의 제어, 균열길이의 측정 등이 모두 프로그램되어 자동으로 시행된다.

4. 실험결과 및 오차평가

실험으로부터 얻어진 균열길이와 사이클 수의 관계를 Fig. 2, 3에 나타냈다.

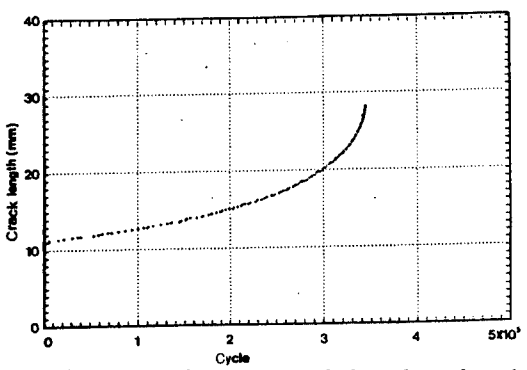


Fig. 2 Relation between crack length and cycle (ΔP constant test)

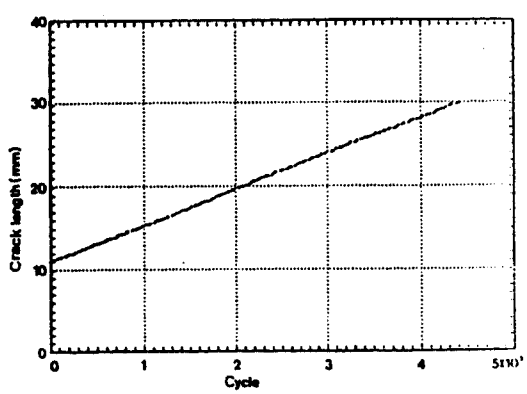


Fig. 3 Relation between crack length and cycle (ΔK constant test)

Fig. 2는 ΔP 일정시험, Fig. 3은 ΔK 일정시험의 결과로 특히, ΔK 일정시험의 경우, 균열길이와 사이클 수의 관계가 거의 일직선상에 놓여있는 것으로 보아 양호한

실험이 가능했다고 생각되어 진다.

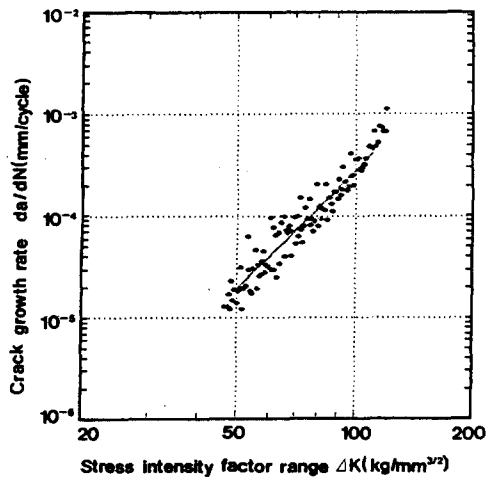


Fig. 4 Relation between stress intensity factor and crack growth rate (measuring interval : 0.1 mm, da/dN calculation : secant method)

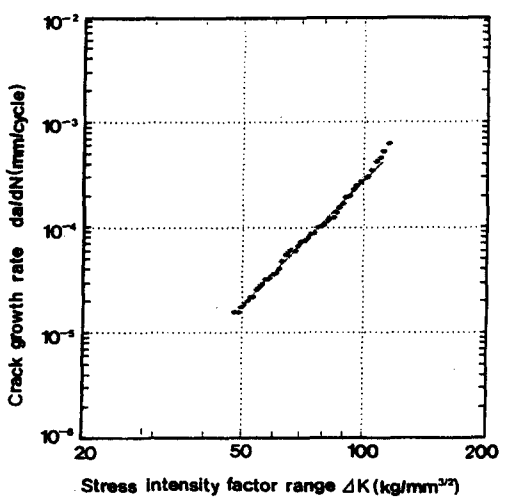


Fig. 5 Relation between stress intensity factor and crack growth rate (measuring interval : 0.3 mm, da/dN calculation : 5-point polynomial method)

Fig. 4, 5에 ΔP 일정시험에서 얻어진 균열길이와 사이클 수와의 관계로부터 균열진전속도와 응력확대계수와의 관계를 구해 나타냈다.

Fig. 4는 측정간격을 0.1 mm로 하고 균열진전속도 da/dN의 평가 방법[11]은 Secant법을 사용한 것이며, Fig. 5는 측정간격을 0.3 mm로 하고 da/dN의 계산은 5점 다항식 근사방법(5-point polynomial method)을 이용했다. 두 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 측정간격과 da/dN의 계산방법에 따라 많은 차이를 나타냄을 알 수 있다.

4.1. ΔP 일정시험결과의 오차평가

D. F. Ostergaard[10]들은 측정간격 및 계산방법의 차이로부터 가장 적절한 측정간격을 결정하기 위하여 균열길이 a와 사이클 수 N으로부터 근사방법을 이용하여 데이터간의 증분 da/dN을 구한 다음 다시 이 da/dN으로부터 특정길이 사이의 사이클 수 Ni을 수치적분을 통하여 계산했다. 즉,

$$W_i = \left(\frac{da}{dN}\right)_i \tag{2}$$

$$N_i = \int_{a_{i-1}}^{a_i} W_i \tag{3}$$

과 같이 구해 이 값과 실측된 사이클 수와의 오차를 계산해 이 오차가 가장 작은 것을 바람직한 것으로 했다. 여기서, W_i는 i번째의 da/dN값이다.

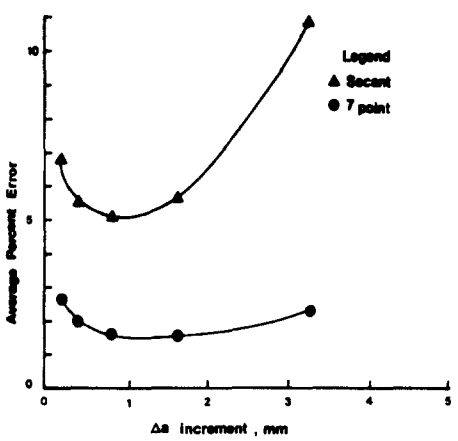


Fig. 6 Average percent error in calculating N from da/dN versus the Δa increment size

Fig. 6은 D. F Ostergaard의 실험결과를 나타낸 것이다. 그러나, 서론에서도 기술했듯이 균열진전 제 II영역에

서는 일반적으로 Paris법칙을 적용하여 균열진전속도를 나타내며, 실질적으로 이를 이용하여 수명을 예측하거나 안전을 평가하고 있는 것이 현실인 점을 고려하면 이들의 방식은 계산 그 자체로서는 의미를 가질지 모르나 실질적이고 물리적인 면에서는 그 의미가 대단히 희박하다고 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 택했다.

식 (4)에 나타내는 보편적인 Paris식(12)

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{4}$$

을 실험 데이터에 적용하여 Paris식이 적용 가능한 균열진전 제 Ⅱ영역에 대해 재료계수 C, m을 구한 뒤, 식 (5)로부터 균열진전 제 Ⅱ영역 안의 첫 번째 균열길이로부터 그 다음에 오는 균열길이들 사이의 사이클 수 N을 수치적분(Simpson's method)을 이용하여 구한 다음 실측정된 사이클 수와의 오차들을 계산해 그 평균값을 기록했다.

$$N_i = \int_{a_0}^{a_i} \frac{1}{C(\Delta K)^m}\, da \tag{5}$$

여기서, a0는 첫 번째 균열길이이며 ai는 그 다음의 각각의 균열길이이고 Ni는 그때의 사이클 수이다.

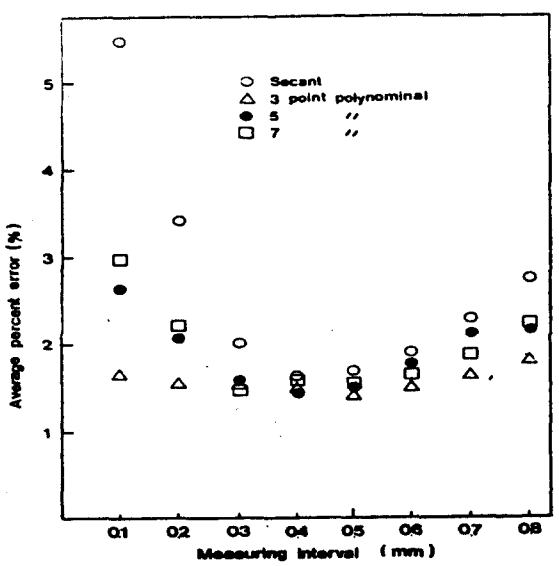


Fig. 7 Average percent error in calculating N from da/dN versus measuring intervals (ΔP constant test)

Fig. 7에 오차계산 결과를 나타냈다. 측정간격이 짧거나 길 경우는 오차도 크고, da/dN 계산방법에 따른 많은 차이를 나타내는 반면, 측정간격 0.3 mm~0.6, 0.7 mm에서는 오차도 작고 측정방법에 따른 차이도 비교적 작다.

4.2 ΔK 일정실험결과의 오차평가

다항식 근사방법(polynomial approximation method)의 효력은 데이터가 곡선적인 변화를 나타낼 때 발휘된다. ΔP 일정시험에서는 Fig. 2와 같이 균열길이와 사이클 수가 곡선적인 관계를 나타내므로 근사방법의 차이가 나타나게 된다. ΔK 일정시험의 경우는 Fig. 3과 같이 균열길이와 사이클 수가 선형적인 관계를 나타내므로 다항식 근사방법은 별 의미를 가지지 못하며, 따라서 가능한 한 계산방법에 따른 오차의 차이를 배제한 측정간격의 영향을 평가할 수가 있다고 생각된다.

ΔK 일정시험에서는 균열진전속도가 일정하다. 따라서, 다음 식 (6)과 같이 균열길이 사이의 사이클 수를 구해 실측된 사이클 수와의 오차를 구했다.

$$(N_i - N_0) = (a_i - a_0)(da/dN) \tag{6}$$

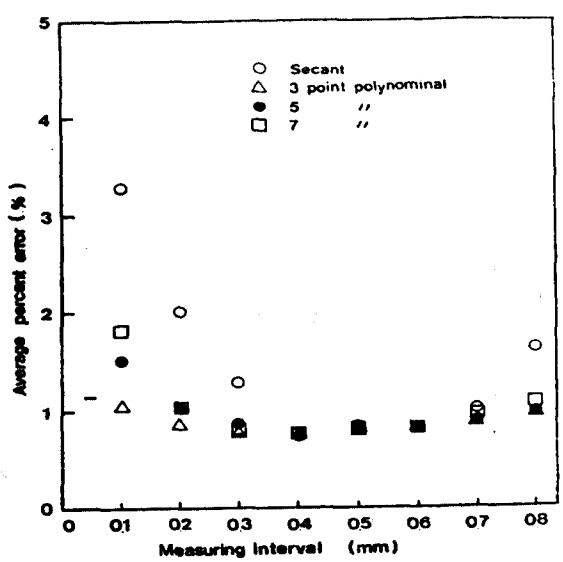


Fig. 8 Average percent error in calculating N from da/dN versus measuring intervals (ΔK constant test)

여기서, Ni는 균열길이 ai에서의 사이클 수이며 N0는 균열길이 a0에서의 사이클 수이다. (da/dN)은 각 균열길이에서의 균열진전속도의 평균치이다.

Fig. 8에 계산된 오차를 나타냈다. 측정간격이 작은 부분에서는 측정방법의 차이가 나타나지만, 0.3~0.7 mm에서는 계산방법의 차이가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 측정간격이 작은 부분에서 나타난 계산방법의 차이는 선형근사라던가 다항식 근사의 차이보다는 하나의 da/dN의 계산에 사용된 샘플의 수가 많고 적음의 차이로부터 기인된다고 본다.

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

4.3 CCT 시험편의 경우의 오차평가

본 절에서는 CCT 시험편의 경우에 대해서 논했으나 시험편의 크기에 따라 충분히 다를 것으로 생각된다. 본 계산에서는 기존의 실험 데이터[13]를 이용했다.

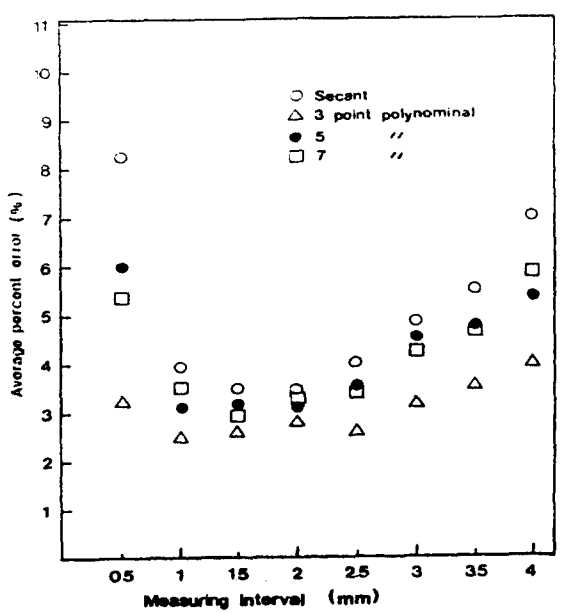


Fig. 9 Average percent error in calculating N from da/dN versus measuring intervals (ΔP constant test : in case of CCT specimen)

이 실험 데이터는 Al2024-T3재의 시험편 폭 150 mm, 두께 5 mm의 CCT 시험편으로 응력비 0.12, 하중폭 1.9ton의 시험에서 얻어진 것으로, 균열길이의 측정은 목측(eye-measurement)이며 원래는 측정간격이 1~2 mm 정도인 것을 본 계산에 이용하기 위하여 스플라인(spline) 보간을 이용하여 측정간격이 0.5 mm가 되도록 수정을 가했다.

Fig. 9에 4.1절과 동일한 방법으로 계산한 결과를 나타냈다. 비교적 Fig. 7과 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있고, 적당한 측정간격은 1~2.5 mm 정도임을 알 수 있다.

여기서, 시험편의 크기에 따른 차이를 배제하기 위하여 균열길이 측정간격 Δa를 시험편 폭 W로 무차원화한 값 $\xi(\Delta a/W)$를 이용하면 1~2.5 mm이면 $\xi=0.0067\sim0.017$이 되며, 앞의 CT 시험편의 경우 0.3~0.7 mm이면 $\xi=0.006\sim0.014$가 된다. 따라서, 시험편의 형상과 크기에 관계없이 $\xi=0.0067\sim0.014$를 측정간격으로 잡으면 오차가 적은 피로균열진전 실험이 가능할 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구의 얻어진 결과를 종합하면 다음과 같다.

1) ΔP 일정시험 및 ΔK 일정시험결과, 측정간격 0.3~0.7 mm정도가 오차가 작고 균열진전 속도의 계산방법에도 그다지 영향을 받지 않는 적절한 간격으로 사료된다.

2) CCT 시험편의 실험 데이터를 이용하여 오차 평가와 CT 시험편의 오차평가를 종합적으로 검사한 결과, 시험편의 형상과 크기에 관계 없이 $\xi(\Delta a/W)=0.0067\sim0.014$를 측정간격으로 잡으면 오차가 작은 피로실험이 가능하리라 본다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 지정 조선대학교 수송기계부품공장자동화 연구센터의 1998년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

6. 참 고 문 헌

(1) 田中榮, 秋田敏, 小林信之, "軟鋼缺陷き材の 疲れき裂傳播に關する統計的考察", 日本材料强度學會誌, 第8卷, 第2號, pp. 56~73, 1973.

(2) Virkler, D. A., Hillberry, B. M., Goel, P. K., "The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation", Trans. ASME, Vol. 101, pp. 148~152, 1979.

(3) 酒井達雄, 田中道七, "金屬材料の疲勞き裂進 展壽命分布特性に關する統計的研究", 第28卷, 第312號, pp. 880~886, 1979.

(4) 島田住弘, 德納久睦ほか 1名 "マルコプ連鎖を用いた疲勞き裂進展壽命の信賴性解析", 材料, 第33卷, 第367號, pp. 475~481, 1984.

(5) 北川英夫, 權在度, 中會根祐司, 島崎剛, "長期使用鋼劣化材疲勞き裂進展壽命豫測", 日本機械學會論文集, 第52卷, 第480號, pp.1749~1759, 1986.

(6) F. Kozin, J. L. Bogdanoff, "A Critical Analysis of Some Probabilistic Models of Fatigue Crack Growth", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 14, No. 1, pp. 59~89, 1981.

(7) Keith Ortiz, Anne S. Kiremidijian, "Stochastic Modeling of Fatigue Crack Growth", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 29, No. 3, pp. 317~334, 1988.

(8) 윤한용, "피로크랙진전수명의 확률특성에 관한 연구 (1)-초기크랙길이 분포의 영향-", 대한기계학회논문집, 제14권, 제1호, pp. 138~144, 1990.

(9) 尹漢鏞, "缺陷を有する部材の疲勞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, pp. 164, 1988.

(10) D. F. Ostergaard, J. R. Thomas, B. M. Hillberry, "Effect of Δa-Increment on Calculating da/dN from a versus N data", ASTM STP 738, pp. 194~204, 1981.

(11) 國尾武, 中澤一, 林郁彦, 岡村弘之, "破壞力學實驗法", 朝倉書店, pp. 164~165, 1984.

(12) Paris, P. C., Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. ASME Ser. D. 85, pp. 528~534, 1963.

(13) 尹漢鏞, "不規則荷重下の疲勞き裂進展擧動に關する研究", 東京大學 碩士學位論文, p. 89, 1985.