

◎ 論 文

터빈 로터강의 피로크랙 전파속도의 확률특성 연구(I)<sup>+</sup>

오세욱\* · 이치우\*\* · 장윤석\*\*\* · 정순호\*\*\*

A Study on the Statistical Characteristics of Fatigue Crack Propagation Rate in Turbine Rotor Steel(I)

Sae-Wook Oh, Chi-Woo Lee, Yun-Souk Chang and Soon-Ho Chung

**Key Words :** Turbine Rotor Steel(터빈로터용 강), Fatigue Crack Growth Rate(피로크랙 전파속도), Statistical Characteristics(확률특성)

Abstract

In order to estimate the running life of turbine rotors, fatigue crack propagation law,  $da/dN = C(\Delta K)^m$ , proposed by Paris et al. has been widely applied.

In this study, fatigue crack propagation rates for 16 samples of 1% Cr-Mo-V rotor steel were measured and statistical characteristics of  $m$  and  $C$  values in above equation were reviewed.

The results are summarized as follows.

1.  $C$  and  $m$  follow a log-normal distribution and normal distribution, respectively. And the relation of  $C$  and  $m$  shows a strong negative correlation.
2. Fatigue crack propagation equation can be expressed as  $da/dN = 4.11 \times 10^{-4} (\Delta K / 153.8)^m$ , introducing the relationship  $C = C_0 K_0^{-m}$ .

In this case, contribution of  $C_0$  distribution to the distribution of  $\log C$  shows very small compared to degrees of contribution by  $m$ .

1. 서 론

산업기술의 발달과 함께 자동차, 항공기, 발전용 터빈 등과 같이 반복하중과 진동을 받는 기계들이 생산됨으로 피로현상에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히, 발전설비의 터빈로터와 같이 가동과 중지

적상 몇 가지의 요건 즉, 요구되는 기계적 성질, 피로크랙성장에 대한 우수한 저항성, 크리프 특성등, 종합적인 성질을 만족 시켜야 한다. 또, 크랙을 포함하는 구조물이 반복하중을 받게 될 때 이에 대한 수명을 예측하기 위해서는 피로크랙전파거동(fatigue crack propagation behavior)을 정량적으로 나타낼 필요가 있다. 지금까지 피로크랙 성장을 기술하기

<sup>+</sup> 1987년도 한국해양공학회 춘계 학술대회 발표(1987년 6월)

\* 정회원, 동아대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 경남대학교 기계설계학과

\*\*\* 정회원, 한국중공업기술연구소

위해 많은 법칙들이 제안되었다. Head<sup>1)</sup>가 처음으로 크랙전파법칙을 제안하였고, Irwin<sup>2)</sup>의 응력확대계수의 개념이 도입되고 부터 피로크랙이론에 커다란 변화를 가져왔었고, Paris등<sup>3)</sup>이 이러한 법칙들을 종합하여 피로크랙 전파속도 관계식을 확립하였다. 이 식은 현재 재료의 크랙전파거동을 기술하는데 기본으로 사용되고 있다. 특히 피로에 대한 크랙을 갖는 구조물의 신뢰성을 확립하려면 피로크랙전파속도의 확률특성을 정량적으로 나타내므로써 손상허용설계 및 수명예측 등을 정립할 수 있으므로 최근에는 관심이 고조되고 있다<sup>4-8)</sup>.

피로크랙전파속도는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 크랙의 길이,  $N$ 은 반복 회전수,  $C$ 는 크랙전파계수,  $m$ 은 크랙전파지수,  $\Delta K$ 는 응력확대계수범위이며  $C$ 와  $m$ 은 실험에 의해 구하여지는 재료상수이다. 이 경우 일반적으로  $C$ 와  $m$ 을 확정치로 취급하는 경우가 많으나 신뢰성까지 포함시켜 수명추정을 행하려면  $C$ 와  $m$ 의 확률특성을 검토할 필요가 있다.

$C$ 와  $m$ 의 확률특성에 대하여 일반적으로 다음과 같은 가능성을 검토할 필요가 있다.

- 1)  $C$ 와  $m$ 은 확정치이다.
- 2)  $C$ 는 확률변수이지만  $m$ 은 확정치이다.
- 3)  $m$ 은 확률변수이지만  $C$ 는 확정치이다.
- 4)  $C$ 와  $m$ 은 확률변수이지만 서로 상관관계는 아니다.
- 5)  $C$ 와  $m$ 은 확률변수이고 동시에 서로 상관관계이다.

이 중에서 어느 것이 타당한가를 검토하기 위해서는 알맞는 실험 데이터가 필요하다. 그러나 현재까지는 이러한 문제에 대한 실험 데이터는 거의 없는 실정

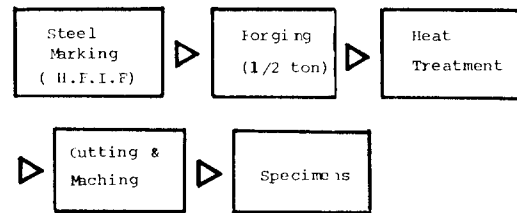
이다. Tanaka등<sup>9)</sup>은 저탄소강의 실험에서  $C$ 와  $m$ 의 확률특성을 조사하여  $m$ 과  $\log C$ 는 대부분 정규분포에 따르며 동시에 양자 사이에는 강한 음의 상관관계에 있다는 것을 확인 하였으며 Sakai등은 2024-T3Al 합금의 실험에서도 같은 경향을 확인하였다. 또, Ichikawa등<sup>11)</sup>은 2024-T3Al 합금에 대하여  $m$ 은 대부분 정규분포에,  $C$ 는 거의 대수정규분포에 따르고  $m$ 과  $\log C$ 의 사이에는 강한 음의 상관관계가 있으며  $C = C_0 K_0^{-m}$ 의 관계가 성립한다는 것을 확인하였다. Kitagawa등<sup>12)</sup>은  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강에 대하여 Monte Carlo 시뮬레이션(simulation)을 행하여 얻어진  $S-N$  곡선에서의 수명예측과  $C$ 와  $m$ 의 관계도 같은 경향이 나타남을 확인하였다.

본 연구에서는 터빈로터용 강에 대한 피로크랙전파속도실험을 통하여  $C$ 와  $m$ 의 확률특성을 검토하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편제작 및 방법

본 연구에 사용된 시험편은 발전 터빈로터용강으로 널리 사용되고 있는 Cr-Mo-V강으로 Table 1은 시험편의 화학성분과 기계적 특성을 표시한다. 용해는 고주파유도로를 사용하여 150N의 강괴를 주조하였다. 시험편의 제조공정은 Fig.1에 나타내었으며 강괴의 형



H.F.I.F ; High Frequency Induction Furnace

Fig. 1 Schematic diagram of manufacturing process

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of rotor steel

Chemical composition (wt %)										
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	As
0.31	0.05	0.61	0.006	0.002	0.58	1.28	1.06	0.29	0.06	0.011
Mechanical properties										
Tensile stress (MPa)		Yield stress (MPa)		Elongation (%)		F. A. T. T (°C)		Impact energy (N·m at 23°C)		
722.3		571.3		19.3		8		129.36		

상과 시험편 채취부 및 방향은 Fig.2와 같다. 단조작업은 에어해머(0.5ton)를 사용하여 단조비 4.3으로 단조하였다. 단조후 생산라인의 로터와 같은 열처리 효과를 주기 위하여 Fig.3과 같은 방법으로 열처리한 후 Fig.4와 같이 인장, 충격, 피로시험편으로 가공하였다.

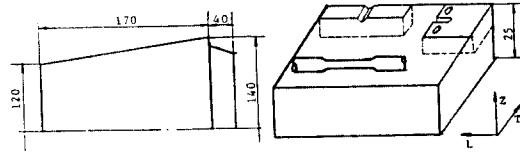


Fig. 2 Ingot profile and sampling method

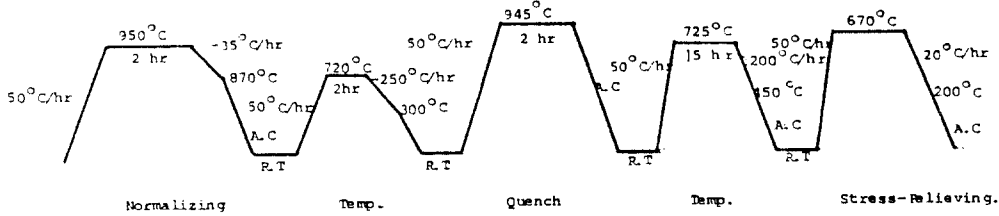


Fig. 3 Heat treatment cycle

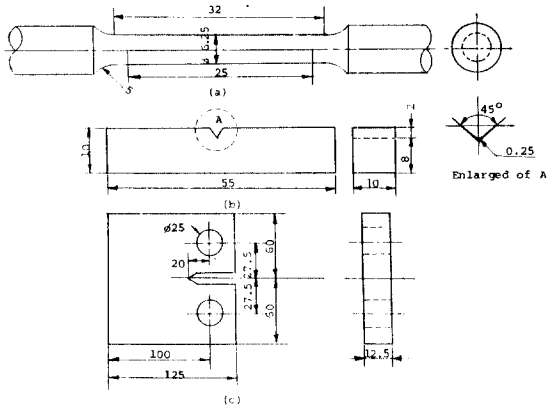


Fig. 4 Dimension of specimens for: (a) tension, (b) impact, and (c)  $da/dN$  tests

### 2.2 피로크랙전파시험

본 실험에서는 측정배율 50에서 0.02mm까지 측정 가능한 이동식광학현미경을 사용하여 크랙길이를 측정하였다. 크랙전파속도의 본 실험에 앞서 시험편에 예비크랙을 발생시켜야 하는데 예비크랙의 발생을 용이하게 하기 위하여 실제 시험할 하중보다 높게 반복하중을 가하여 크랙을 발생시킨 다음 점차 감소하여 예비크랙을 발생시켰다. 실험은 용량이 100ton 인 서보유압시험기(Instron 1336)를 사용하여 상온에서 주파수가 5Hz로 일정한 하중제어로 행하여 졌다. 하중파형은 최대값과 최소값이 모두 인장축에 있는 일정 진폭 sine 하중을 사용하여 응력비  $R$ 을

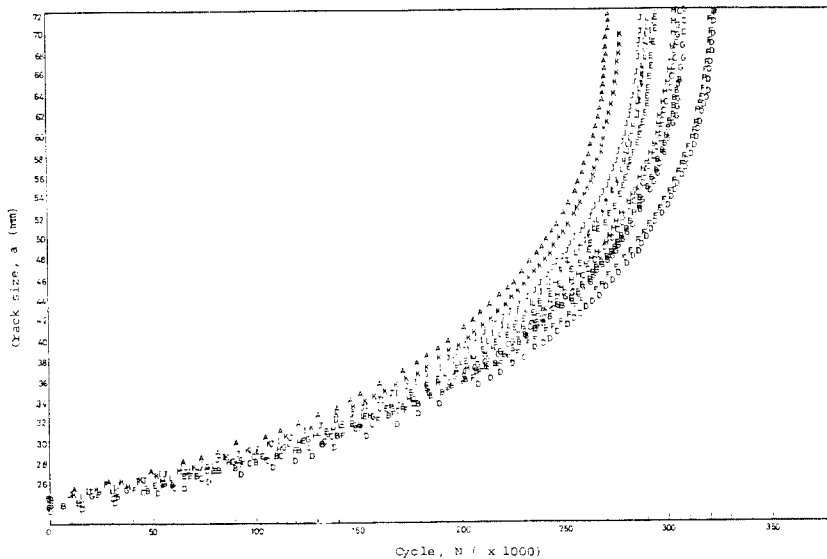


Fig. 5 Relation  $a$  and  $N$ (A-L: Identification of specimens)

0.1, 작용하중범위  $\Delta P=16660N$ 으로 일정한 실험을 하였다. 피로크랙전파속도  $\frac{da}{dN}$ 는 실험에서 구한 Fig. 5의  $a-N$ 곡선에서  $\Delta N$  사이에 증가한  $\Delta a$ 를 구하여  $\frac{\Delta a}{\Delta N}$ 로 하였다.  $\Delta K$ 는  $\Delta N$ 사이의 크랙길이  $a$ 와 작용하중범위  $\Delta P$ 를 ASTM E647에 의한 식에 대입하여 구하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2+\alpha}{(1-\alpha)^3} (0.886 + 4.64\alpha - 13.2\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (2)$$

여기서,  $\alpha = \frac{a}{W}$ ,  $\frac{a}{W} \geq 0.2$ 이며  $a$ 는 크랙의 길이,  $B$ 는 시험편의 두께,  $W$ 는 시험편의 폭이다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 $\frac{da}{dN}$ - $\Delta K$ 와의 관계

피로크랙전파실험에 의한 피로크랙전파속도와 응력확대계수 범위의 관계를 Fig. 6~Fig. 20에 나타낸 것이다. Table 2는  $\frac{da}{dN}$ 와  $\Delta K$ 를 최소자승법을 사용하여 크랙전파계수  $C$ 와 크랙전파지수  $m$ 을 나타내었으며 여기서  $C$  또는  $m$ 만으로는 재료의 특성을 해

Table 2 Coefficient,  $C$  and exponent,  $m$

Specimens	$C$ ( $\times 10^{-9}$ )	$m$
A	1.78	2.46
B	2.32	2.41
C	1.92	2.45
D	2.10	2.45
E	1.10	2.56
F	1.59	2.46
G	0.63	2.67
H	1.76	2.45
I	1.14	2.54
J	1.69	2.46
K	1.94	2.45
L	2.18	2.42
M	1.26	2.55
N	1.02	2.56
O	1.34	2.51
P	1.64	2.47

석할 수 없으므로  $C$  및  $m$ 의 데이터를 확률지에 타점하였다.  $m$ 을 정규확률지에 타점한 결과를 Fig. 21에  $C$ 를 대수정규확률지에 타점한 결과를 Fig. 22에 나타내었다. 거의 일직선상으로 나타낼 수 있으므로 즉,  $m$ 은 정규분포에,  $C$ 는 대수정규분포에 거의 따른다는

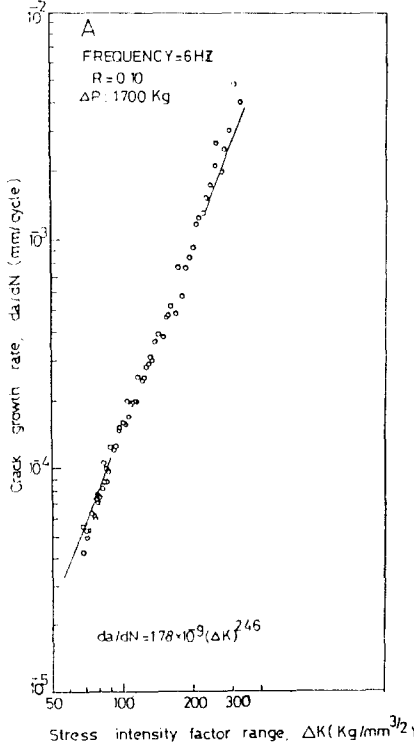


Fig. 6 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

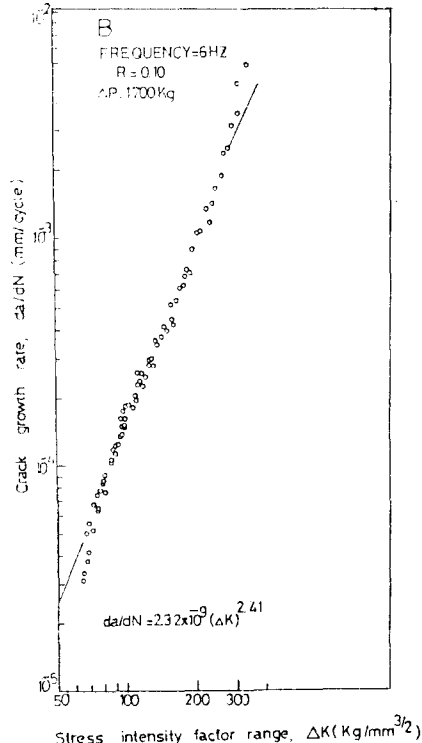


Fig. 7 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

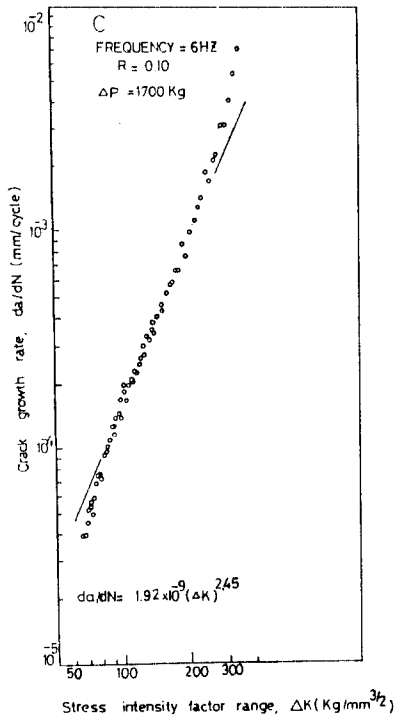


Fig. 8 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

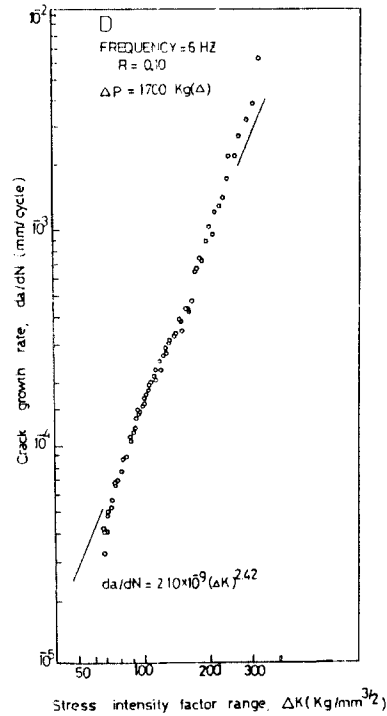


Fig. 9 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

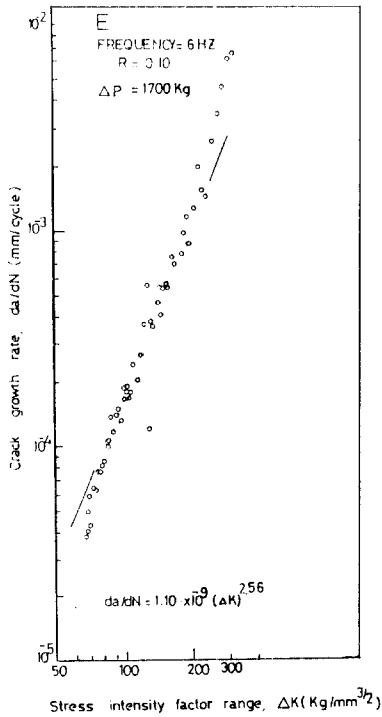


Fig. 10 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

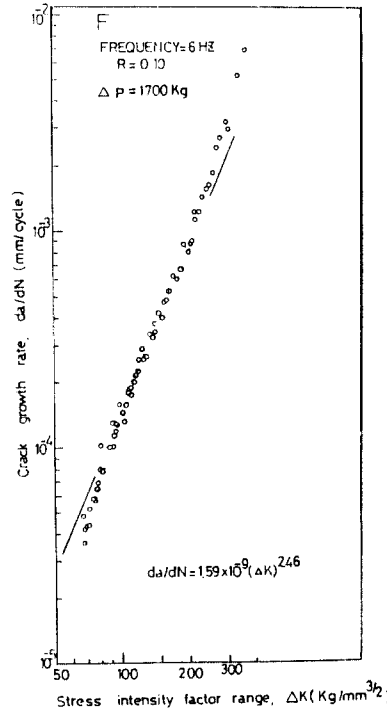


Fig. 11 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

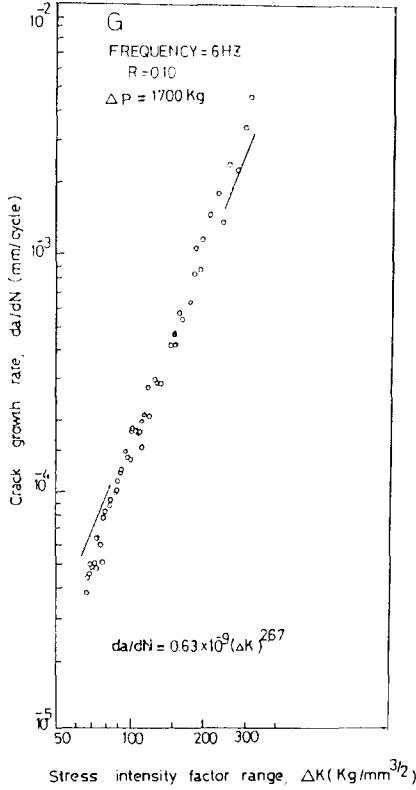


Fig. 12 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

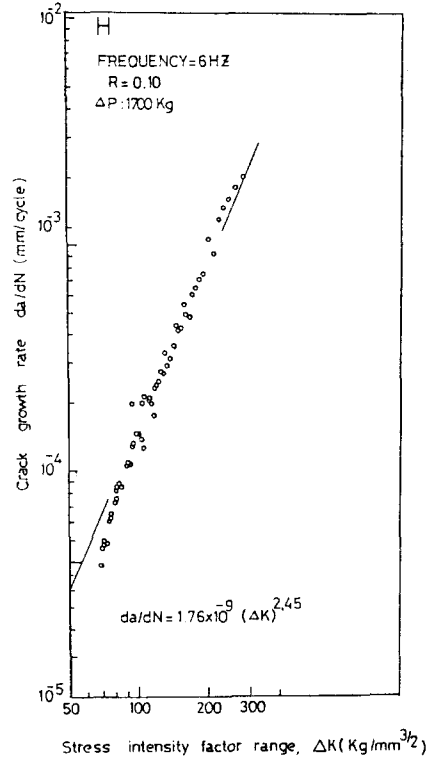


Fig. 13 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

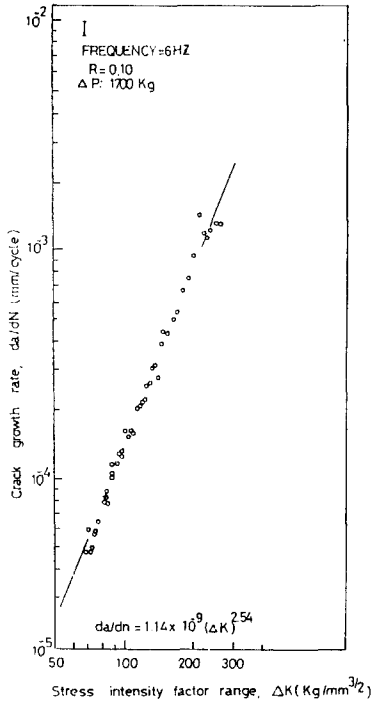


Fig. 14 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

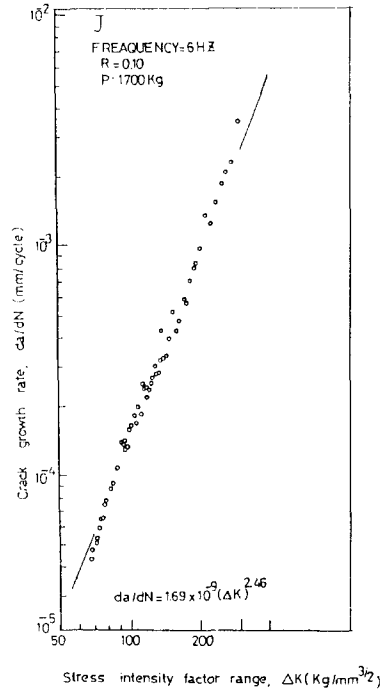


Fig. 15 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

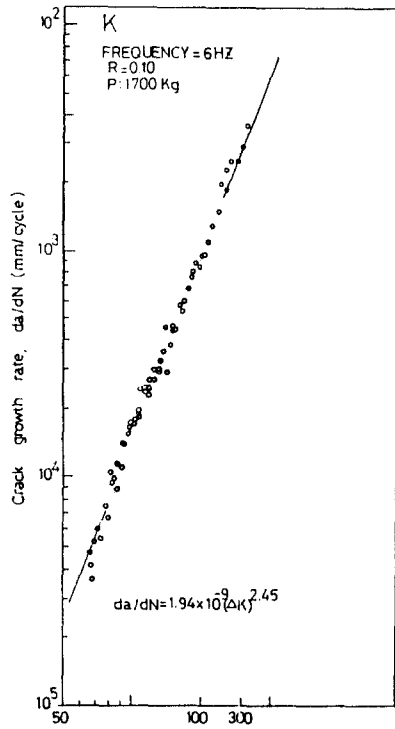


Fig. 16 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

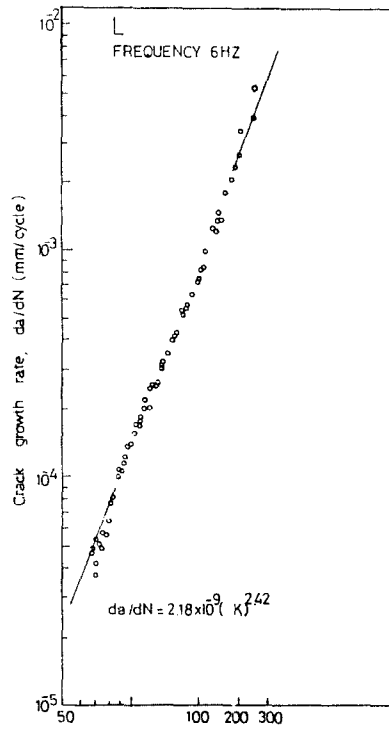


Fig. 17 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

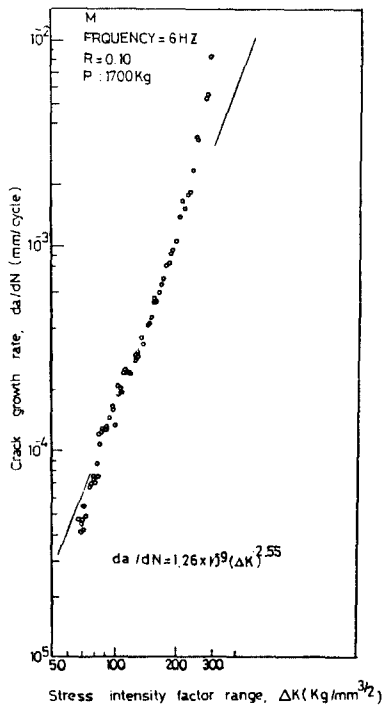


Fig. 18 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

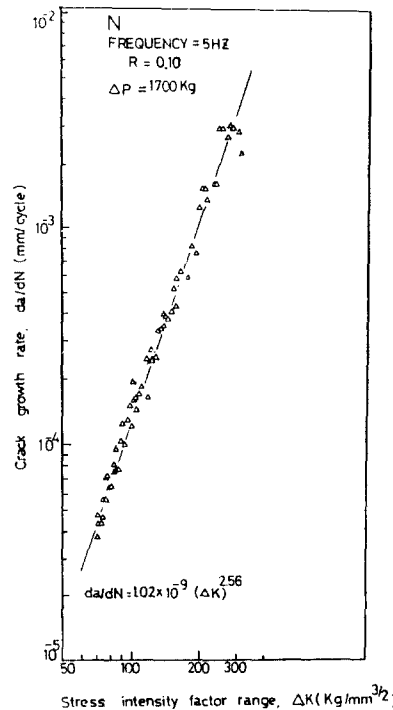


Fig. 19 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

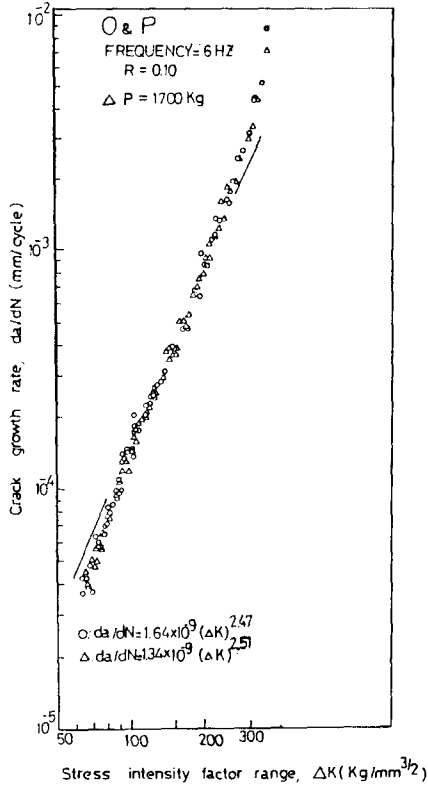


Fig. 20 Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$

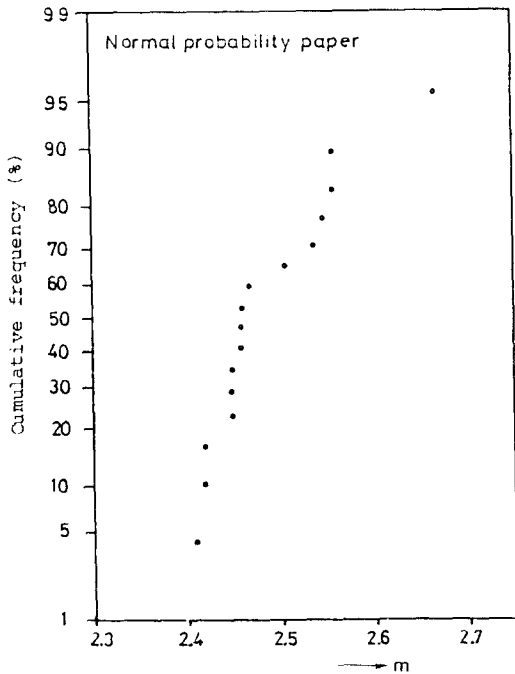


Fig. 21 Distribution of exponent  $m$

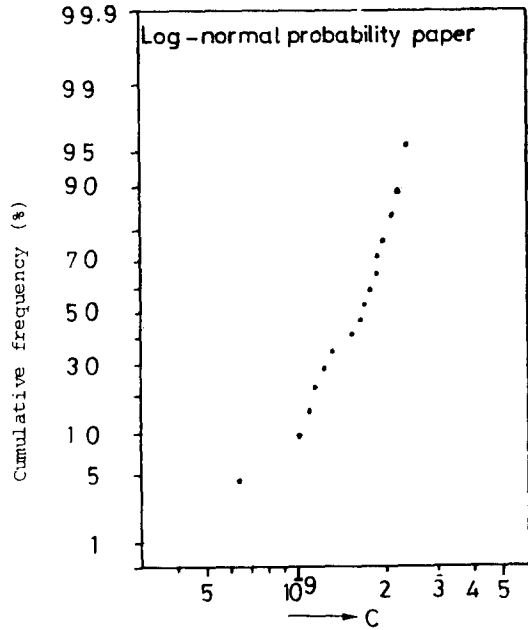


Fig. 22 Distribution of coefficient  $C$

것을 알 수 있다.  $C$ 와  $m$ 에 대한 평균치, 표준편차 및 분산계수는 Table 3과 같다.

Table 3 Statistical characteristics of exponent,  $m$ , coefficient,  $C$  and  $\log C$

Coefficient and exponent	$m$	$C$	$\log C$
Type of distribution	normal	log-normal	normal
Mean value	2.4900	1.5881	-8.8206
Standard deviation	0.0675	0.4898	0.1443
Coefficient of variation	2.71%	28.64%	1.64%

3.2  $m$ 과  $C$ 의 상관

$m$ 과  $\log C$ 의 관계를 Fig. 23에 나타내었으며 확실히 음의 상관관계가 있다는 것을 알 수 있으며 이때 상관계수  $r$ 은 -0.81이다. Tanaka 등<sup>13)</sup>은  $m$ 과  $\log C$ 의 관계가 음의 기울기로서 직선상에 있는 경우에는 다음의 관계식이 성립한다고 하였다.

$$C = C_0 K_0^{-m} \tag{3}$$

여기서,  $C_0$ ,  $K_0$ 는 재료상수로서 일정한 값이다. 따라서 식(1)은 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{da}{dN} = C_0 \left( \frac{\Delta K}{K_0} \right)^m \tag{4}$$

또, 식(3)은



$$\log C = \log C_0 - m \log K_0 \quad (5)$$

로 피로로  $m - \log C$ 의 직선의 기울기와 절편은 각각  $K_0$ ,  $C_0$ 와 같다. Fig. 23과 같이 완전한 직선이 되므로 각 시험편의  $\log \frac{da}{dN} - \log \Delta K$  직선은 엄밀히 한 점에 만나는 것은 아니지만 이것에 가깝게 근접한다고 생각할 수 있다. Fig. 23에서 회귀직선의 기울기  $K_0$ 와 절편  $C_0$ 는 각각  $C_0 = 4.11 \times 10^{-4}$ ,  $K_0 = 153.8$ 로 된다. 따라서, 피로크랙전파계수  $C = 4.11 \times 10^{-4} \times 153.8^{-m}$ 로 나타낼 수 있다.

그러므로 피로크랙전파속도는

$$\frac{da}{dN} = 4.11 \times 10^{-4} \left( \frac{\Delta K}{153.8} \right)^m \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 이 식은 각 시험편에 대한 피로크랙전파속도의 일반식이다. 여기서,  $m$ 과  $C$ 는 강한 음의 상관관계를 가지므로  $m$ 과  $C$ 의 산포는 본질적인 것이 되고 단지 회귀직선의 성질에 기인한다고는 볼 수 없다.

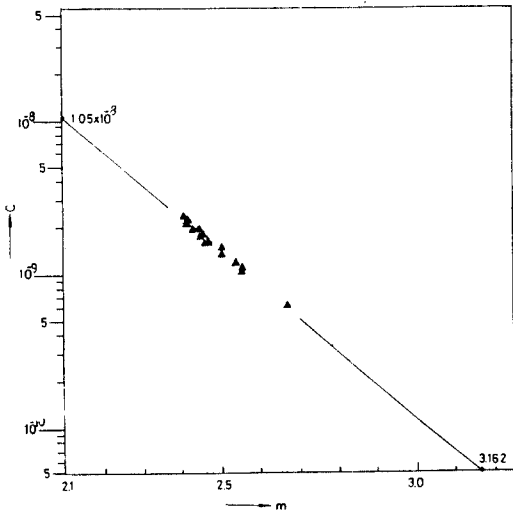


Fig. 23 Relation coefficient, C and exponent, m

#### 4. 피로크랙전파수명의 예측

$m$ 과  $C$ 의 확률특성을 고려하여 피로수명을 예측하는 방법으로 다음과 같은 경우를 생각할 수 있다.

- 1)  $m$ 은 확정치로 하고  $\log C$ 는 정규분포에 의존한 확률변수로서  $N$ 의 분포를 계산한다.
- 2)  $m$ 과  $\log C$ 는 모두 정규분포에 따른다. 서로 양자의 사이에  $C = C_0 K_0^{-m}$ 의 관계가 완전히 성립할 때  $N$ 의 분포를 계산한다. 이때  $C_0$ 는 일정치로

한다.

- 3)  $C = C_0 K_0^{-m}$ 의 관계에서  $C_0$ 의 분산을 생각할 때  $m$ 은 정규분포에 따른다.  $C_0$ 는 이것과는 독립적인 대수정규분포에 따를 때  $N$ 의 분포를 계산한다.

Fig. 23의 데이터점에 대한 회귀직선에 의하여 얻어진  $K_0$ 를 사용하면 각 시험편의  $C_0$ 는  $C_0 = CK_0^m$ 의 관계로부터 구할 수 있다. 여기서, 얻어진  $C_0$ 를 대수정규확률지에 타점하면 Fig. 24와 같이 나타낼 수 있고  $\log C_0$ 는 정규분포에 따른다. 또, 식(5)에 분산을 적용시키면 다음과 같이 된다.

$$V_{ar}(\log C) = V_{ar}(\log C) + V_{ar}(m)(\log K_0)^2 \quad (6)$$

여기서  $V_{ar}()$ 는 분산을 의미한다. 상기의 식(6)에서 우변의 제1항과 제2항의 크기를 비교하면 제1항 =  $4.70 \times 10^{-4}$ , 제2항 =  $2.20 \times 10^{-2}$  이므로 제1항은 제2항의 약 2.14%이다. 따라서  $\log C$ 의 분산에 대한  $\log C_0$ 의 분산의 기여도는  $m$ 에 비하여 매우 작다.

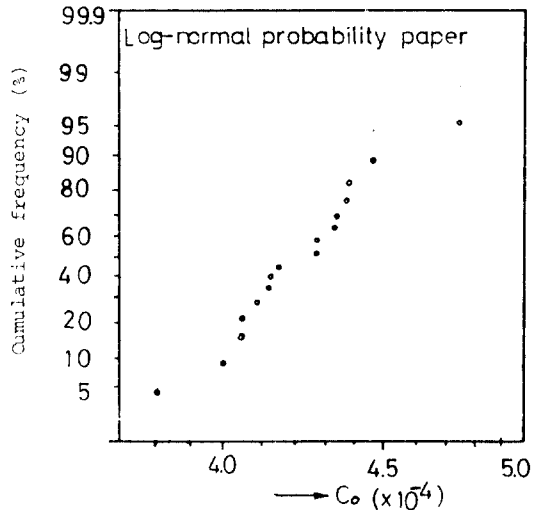


Fig. 24 Distribution of  $C_0$ .

#### 5. 결 론

터빈로터용 강에 대한 피로크랙전파속도실험을 행하여 얻어진 확률특성은 다음과 같다.

- 1)  $m$ 은 거의 정규분포에,  $C$ 는 대수정규분포에 따른다.
- 2)  $m$ 과  $\log C$ 의 사이에는 강한 음의 상관관계가 있고 근사적으로  $C = C_0 K_0^{-m}$ 의 관계가 성립한다.
- 3)  $C = C_0 K_0^{-m}$ 에 대한  $C_0$ 는 엄밀히 일정한 값이 아니며  $\log C_0$ 는 정규분포에 따른다. 또  $\log C$ 의 분산

에 대한  $\log C_0$ 의 분산의 기여도는  $m$ 의 분산에 비하여 작다.

4) 피로크랙전파속도식은

$$\frac{da}{dN} = 4.11 \times 10^{-4} \left( \frac{\Delta K}{153.8} \right)^m$$

인 일반식으로 나타낼 수 있다.

### 참 고 문 헌

- 1) Head, A. K., "The Growth of Fatigue Cracks", *The Philosophical Magazine*, Vol. 44, pp.975, 1953
- 2) Irwin, G. R., "Analysis of Stress and Strains near the End of a Crack Traversing Plate", *J. of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp.361, 1957
- 3) Paris, P. C. and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack of Crack Propagation Laws", *J. of Basic. Eng.*, Vol. No. 4, pp.528-534, 1963
- 4) Kaechele, L.E. and A.S. Tetelman, "A Statistical Investigation of Micro-Crack Formation", *Acta Metallurgica*, Vol. 17, pp.463-475, 1969
- 5) Dvork, H.R. and E.C. Schwegler, "Statistical Distribution of Flaw Size", *Int. J. of Fract. Mech.*, Vol. 8., pp.110-111, 1971
- 6) Maenning, W., "Statistical Planning and Evaluation of Fatigue Tests", *Int. J. of fract.*, Vol. 11, pp.123-129, 1975
- 7) Saunders, S. C., "The Problems of Estimating a Fatigue Service Life with a Low Probability of Failure", *Eng. Fract. Mech.* Vol. 8, pp. 205-215, 1976
- 8) Clark, W.G. Jr., "Fatigue Crack Growth Characteristics of Rotor Steel", *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 2, pp.287-299, 1971
- 9) Tanaka, S., M. Ichikawa, and S. Akita, "Variability of  $m$  and  $C$  in the Fatigue Crack Propagation Law,  $da/dN=C(\Delta K)^m$ ", *Int. J. of Fract.* Vol. 17, pp.121-124, 1981
- 10) Sakai, T. and T. Tanaka, "A Statistical Study on the Fatigue Life Distribution of Metallic Materials", *J. of JSMS*, Vol.28, No.312, pp. 880, 1979
- 11) Ichikawa, M., M. Hamaguchi, and T. Nakamura, "Statistical Characteristics of  $m$  and  $C$  in Fatigue Crack Propagation Law,  $da/dN=C(\Delta K)^m$ (2024-T3Al Alloy)", *J. of JSMS*, Vol. 33, No. 364, pp.8-13, 1983
- 12) Kitagawa, H., J.D. Kwon, Y. Nasone, M. Ohashi, and T. Shimazaki, "Effect of Degradation on Fatigue Crack Growth and Statistical Life Prediction", *Proceeding of 2nd Conf. of APCS-86*, pp.371-376, 1986
- 13) Tanaka, S., S. Akita and N. Kobayashi, "Statistical Behavior of Fatigue Crack Propagation in Notched Mild Steel Specimens", *J. of JSFM*, Vol.8, No. 2, pp.56-63, 1973



## 국제 학술대회 개최 안내

### 제23차 학회간 에너지 전환공학 학술대회

—23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference—

주관 : 미국기계학회(ASME)

후원 : 미국기계학회를 포함한 7개 참여학회 및 3개 협동학회

분야 : 대체연료, 바이오매스, 브레이튼 사이클, 열병합발전, 화석연료, 연료전지, 전기추진, 전기화학적에너지, 에너지절약, 에너지저장시스템, 지열동력, 수소에너지시스템, 원자핵분열, 원자핵융합, 광전지, 펌프사이클, 태양에너지전환, 태양열가열 및 냉각, 스팀링사이클, 열전기동력, 풍력등.

일시 : 1988년 7월 31일~8월 5일

장소 : 미국 Colorado주 Denver시 Denver Marriott Hotel