

〈論 文〉

## 피로파괴 인성치의 통계적 성질에 관한 연구

오환교\* · 김희송\*\*

(1994년 4월 15일 접수)

### A Study on Statistical Nature of Fatigue Fracture Toughness

H. G. Oh and H. S. Kim

**Key Words** : Crack Propagation Rate(균열진전속도), Effect of Parameter(파라미터의 영향), Fatigue Fracture Toughness(피로파괴 인성치), Probabilistic Fracture Mechanics(확률론적 파괴역학), Size Effect(치수효과), Weibull Distribution(Weibull 분포)

#### Abstract

Many researchers presented a probabilistic and statistical property of the material strength. However, the study on probabilistic and statistical property of fatigue fracture toughness has not been nearly presented. Major objectives in this paper are to compare the statistical test results of fatigue fracture toughness with those obtained in the tensile experiments, and to recognize the size effect for the probabilistic and statistical property by using specimens with various thickness.

#### 1. 서 론

확률파괴역학(probabilistic fracture mechanics)은 결함이 있는 구조부재의 안전성을 평가하는 파괴역학과 안전율 등의 경험적 계수대신에 확률통계적 성질에 바탕을 두어 구조부재의 안전성 및 신뢰성을 평가하는 구조 신뢰성공학(structural reliability engineering)을 접목시킨 분야로서 최근에 와서 그 중요성이 인식됨과 동시에, 이를 연구하는 연구자의 수가 증가하고 있다.

피로파괴거동에 관한 확률론적 연구는 피로균열 진전수명의 분포 또는 파괴확률을 지배하는 파라미터(parameter)의 영향을 논하는 연구 및 그러한 파라미터의 통계적 성질을 논하는 연구 등으로 대별된다.

피로수명의 분포 또는 파괴확률에 관한 연구는

Monte Carlo simulation을 이용하여 파괴확률을 구하고 이의 파라미터의 영향을 논한 것,<sup>(1-5)</sup> 적은 수의 중요한 파라미터만을 가지고 직접적인 수치계산을 통하여 간략히 수명의 분포를 구하고 파라미터의 영향을 논한 것,<sup>(6)</sup> 파괴역학적 모델을 사용하지 않고 Markov chain등의 통계적 모델을 손상모델로 하여 파괴확률을 구한 것,<sup>(7)</sup> 그리고 이들의 혼합형 모델을 제시한 것<sup>(8)</sup> 등이 있다. 또한 파괴확률에 대한 파라미터들의 영향은 영향도평가(sensitivity study)수법을 이용하여 검토된 바 있다.<sup>(9)</sup>

한편 이와같은 파라미터의 통계적 성질에 관한 연구는 균열진전속도의 통계적 성질을 기초로 한 것이 대부분이다. 이들의 대표적인 것으로는 연강의 피로균열 진전분포를 구한 것,<sup>(10)</sup> 알루미늄합금의 피로균열 진전속도와 미시조직과의 관계에 관한 것,<sup>(11)</sup> 크롬몰리브덴강의 장기사용 열화재의 피로수명 분포를 구한 것,<sup>(12)</sup> 알루미늄합금의 피로균열 진전속도 분포에 대한 시험편 두께의존성에 관한 연구<sup>(13)</sup> 등이 있다. 또한 橫堀<sup>(14)</sup>은 피로파괴 인성치(fatigue fracture toughness)라고 하는 개념을

\*정회원, 조선대학교 기계공학과

\*\*정회원, 단국대학교 기계공학과

새롭게 정의했으며, 이의 확정론적 특성을 밝힌 바 있다. 그러나 이에 대한 연구는 아직까지 상당히 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 일반 구조용강인 SM45C 재에 대한 항복강도, 인장강도 및 피로파괴 인성치의 통계적 실험결과를 비교평가하고, 이들의 확률 통계적 성질에 대한 치수효과(size effect)를 밝히고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 인장시험

사용된 재료는 일반 구조용강인 SM45C재로서 화학적성분 및 기계적 성질은 Tables 1,2와 같다. 시험편 형상은 KS 금속재료 인장시험편 치수 5호의 규정<sup>(15)</sup>에 따라 제작하였다. 확률통계적 성질에 대한 치수효과를 밝히기 위하여 시험편 두께를 변화시켰으며, 사용한 시험편의 두께 ( $t$ )는 3.0, 5.5, 12.5 mm의 3종으로 하였다.

인장시험은 각 두께에 대하여 20개씩의 시험편을 준비하고, cross-head speed는 1 mm/min.로 행하였다. 이로부터 항복강도 및 인장강도를 얻고, 이들에 대한 평균(mean), 표준편차(S.D.), 변동계수(coefficient of variation)를 산출하였다.

### 2.2 피로시험

#### 2.2.1 재료 및 시험편

재료는 인장시험에 사용된 재료와 동일하다. 시험편은 압연방향과 균열의 진전방향이 직각(L-T)이 되도록 채취하였으며, ASTM E399-81<sup>(16)</sup>에 따른 CT시험편(compact tension specimen)이다. 이

Table 1 Chemical composition

Material (SM45C)	Compositions (Wt%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
	0.47	0.23	0.76	0.016	0.009	0.054	0.074	0.039

Table 2 Mechanical properties

Materials (SM45C)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HB)
	617	342	23	172

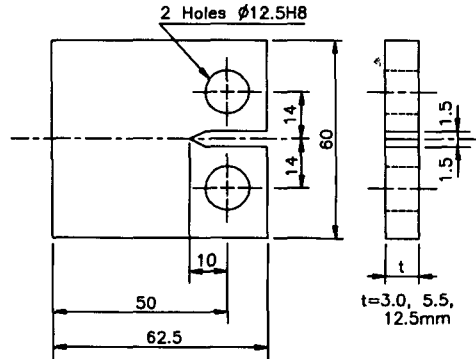


Fig. 1 Geometry of CT specimen

의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같으며, 통계적 실험을 위하여 시험편 개수는 각 두께 ( $t=3.0, 5.5, 12.5$  mm)에 대하여 20개씩 준비하였다. 이때 시험편은 기계가공에 의한 소성변형층의 영향을 최소화하기 위해 C. N. C. wire cutting machine(wire 직경 : 0.25 mm)으로 방전가공하였다.

#### 2.2.2 피로시험방법

##### (1) 피로균열진전 시험

피로균열진전 시험은 피로파괴 인성치의 확률분포에 대한 치수효과를 밝히기 위한 예비실험이며, 이는 3가지 두께의 시험편에 대하여 일반적인 피로균열진전 데이터를 얻기 위한 것이다.

실험은 전기유압식 인장압축 피로시험기(servo-pulsar type pullpush fatigue tesing machine : 용량  $\pm 10$  ton)로 행하였고, 피로하중조건은 Table 3과 같다.

균열길이는 시험편에 height gage를 사용하여 0.5 mm 간격으로 slip marking 한 후, 이동식 현미경으로 측정하였다. 이로부터 얻어진 실험결과를 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 와 균열진전속도  $da/dN$ 으로 정량화시키기 위하여 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 는 식(1)<sup>(17)</sup>에 의하여 산출하였으며, 균열진전속도  $da/dN$ 은 7점 다항근사법(seven point incremental polynomial method)으로 구하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} f(a)$$

$$\alpha = \frac{a}{W} (0.25 \leq \alpha \leq 0.60)$$

$$f(a) = \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} 0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.64\alpha^4 \quad (1)$$

**Table 3** Loading conditions in fatigue crack growth test

Thickness (mm)	$P_{max}$ (kN)	$P_{min}$ (kN)	Stress ratio	Wave form	Temperature (°C)	Frequency (Hz)
3.0	2.94	0.294	0.1	sine	22	5
5.5	4.90	0.490	0.1	sine	22	5
12.5	11.77	1.177	0.1	sine	22	5

**Table 4** Loading conditions in fatigue fracture toughness test

Thickness (mm)	$P_{max}$ (kN)	$P_{min}$ (kN)	Stress ratio	Wave form	Temperature (°C)	Frequency (Hz)
3.0	7.85	0.785	0.1	sine	22	10
5.5	10.79	1.079	0.1	sine	22	10
12.5	38.25	3.825	0.1	sine	22	10

**Fig. 2** Macroscopic appearances of fracture surface

여기서,

$a$  : 균열길이

$W$  : 시험편의 폭

$\Delta P$  : 하중폭

$B$  : 시험편의 두께

### (2) 피로파괴인성 시험

피로파괴인성 시험은 다수의 피로시험을 실시해야 하는 관계로 소요시간을 고려하여 균열진전속도가 비교적 빠른 영역 ( $10^{-4} < da/dN < 10^{-3}$ )에서 실시하였다.<sup>(18)</sup> 이의 피로하중조건은 Table 4와 같다.

피로파괴 인성치 범위  $\Delta K_{cr}$ 는 Fig. 2에 나타내는 바와같이 각각의 파단면에 나타나는 파단마크로부터 균열길이를 측정하여 이를 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 로 환산하였다. 균열길이는 이동현미경(정밀도 1/100 mm)으로 표면의 2곳과 두께중앙의 1곳에서 측정하여 그의 평균치로 구하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 기계적 특성

Table 5는 시험편 두께에 따른 항복강도와 인장강도의 결과를 나타낸 것으로, 이 표의 형상계수(shape parameter)  $\alpha$ 와 척도계수(scale parameter)  $\beta$ 는 2-parameter Weibull 분포함수의 양변에 이중

자연대수(double natural logarithm)를 취하여 식 (2)의 선형함수식을 얻고 Table 5의 실험데이터로부터 산출하였다.

$$\ln x = \frac{1}{\alpha} \ln \ln \left( \frac{1}{1-F(x)} \right) + \ln \beta \quad (2)$$

$$MR = \frac{j=0.3}{n+0.4} \quad (3)$$

여기서,  $x$ 는 항복강도 또는 인장강도이며,  $F(x)$ 는 식(3)의 중앙순위(median rank,  $MR$ )<sup>(19)</sup>로 환산된 파손확률 값으로서  $j$ 는 강도데이터를 증가하

Table 5 Tensile test results

No.	Yield strength(MPa)			Tensile strength(MPa)		
	t=3.0 mm	t=5.5 mm	t=12.5 mm	t=3.0 mm	t=5.5 mm	t=12.5 mm
1	345.78	344.31	355.24	588.40	585.65	669.99
2	331.37	340.78	356.18	571.04	578.98	673.76
3	372.65	345.88	366.22	618.60	578.10	680.03
4	370.69	343.92	357.75	603.21	569.47	678.46
5	319.30	350.39	358.37	562.61	577.51	673.13
6	338.53	370.89	353.67	580.55	602.23	676.89
7	309.99	340.88	359.94	568.10	571.83	675.33
8	337.25	337.74	361.51	578.89	572.32	680.97
9	242.32	374.03	356.18	577.51	602.81	677.84
10	287.73	361.47	361.51	603.40	597.13	679.40
11	230.16	344.61	364.02	587.61	567.22	679.40
12	345.19	304.30	353.04	596.24	591.05	676.27
13	390.40	241.64	358.37	621.35	575.55	673.76
14	217.81	306.85	356.81	577.21	587.91	673.76
15	336.66	353.53	354.61	586.83	581.24	673.13
16	348.53	318.52	364.02	597.32	569.77	677.84
17	349.12	375.69	356.81	603.40	614.29	676.27
18	349.90	340.49	360.88	604.19	571.24	676.89
19	332.15	363.43	367.16	579.08	598.50	675.33
20	356.57	352.72	358.81	618.31	576.54	678.84
Mean	325.61	340.60	359.06	591.21	583.47	673.36
Shape parameter ( $\alpha$ )	7.71	12.92	110.94	42.11	57.26	284.17
Scale parameter ( $\beta$ )	345.48	353.75	360.80	598.65	588.90	677.66

t : Thickness of specimen

는 순서로 정리한 파손순위 (failure order number) 이며  $n$ 은 실험된 전체 시험편 수이다.

Table 5의 항복강도 및 인장강도에 대한 확률분포를 그림으로 표시한 것이 Fig. 3 및 Fig. 4이며, 그림에서 이들 강도의 분포는 2-parameter Weibull 분포(실선 및 점선)를 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 또한 항복강도와 인장강도는 모두 시험편 두께가 작을수록 넓게 분포함도 쉽게 알 수 있다.

Fig. 5는 각각의 두께에 대하여 식(4)로부터 구한 변동계수(coefficient of variation : 이하 C.O.V.라 함)를 나타낸 것이다.

$$C.O.V. = \sigma / \mu \quad (4)$$

여기서,  $\sigma$ 는 표준편차(standard deviation)를 나타내며,  $\mu$ 는 평균(mean)을 나타낸다. 이 그림으로부터 동일한 두께에 대하여 항복강도의 변동계수는 인장강도의 것 보다 크음을 알 수 있으며, 이는 Fig. 3 및 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 항복강도가 인

장강도보다 넓게 분포한다는 사실과 관계된다. 또한 항복강도와 인장강도는 시험편 두께가 두꺼워질수록 변동계수가 작아짐을 알 수가 있으며, 이는

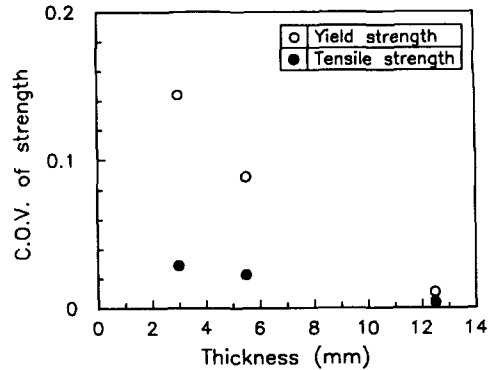


Fig. 5 The effect of thickness on C.O.V. of strength

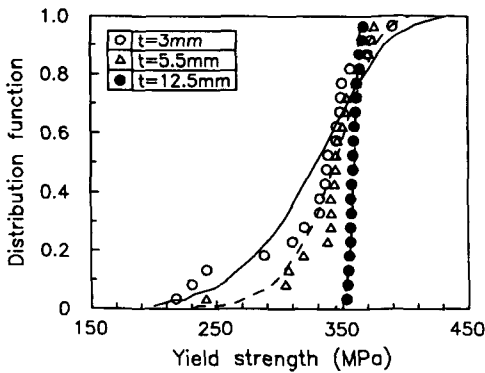


Fig. 3 Distribution function of yield strength

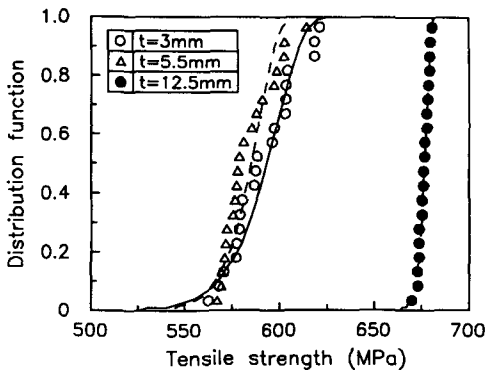


Fig. 4 Distribution function of tensile strength

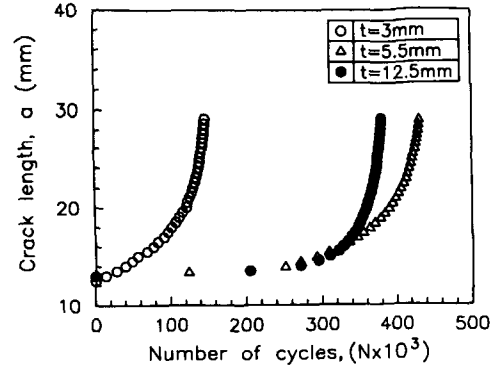


Fig. 6 Relationship between crack length and number of cycles

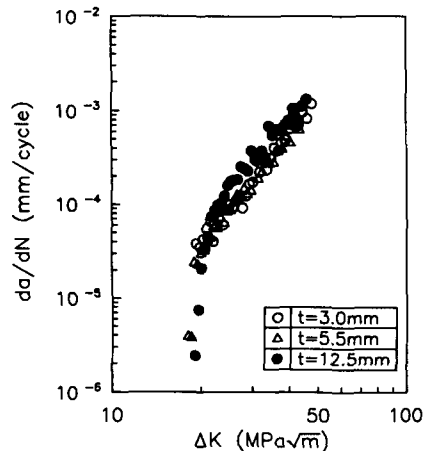


Fig. 7 Relationship between stress intensity factor range and crack growth rate

재료의 강도분포가 재료내부의 미시적 결함 또는 조직적 불균일성으로부터 기인된다는 가정을 기초로 치수가 큰 시험편의 경우 미시적결함이 통계적 분포를 하여 각 시험편마다 평준화되는 것으로 예

측할 수 있다. 이상에서 검토한 바와같이 강도의 분포에 치수효과가 존재함은 명백하다고 할 수 있다.

**Table 6** Fatigue fracture toughness test results

No.	F.F.T. range $\Delta K_{cf}$ (MPa $\sqrt{m}$ )		
	t=3.0 mm	t=5.5 mm	t=12.5 mm
1	83.81	82.09	74.54
2	81.86	72.81	72.09
3	82.76	85.22	73.78
4	86.74	87.83	74.54
5	84.13	76.91	73.59
6	84.60	93.16	71.72
7	82.31	87.83	70.44
8	82.76	72.59	69.89
9	88.72	80.78	70.00
10	85.07	87.30	71.17
11	81.77	79.86	70.55
12	86.02	88.43	68.82
13	83.90	83.00	70.55
14	88.50	84.93	71.83
15	86.26	85.67	69.89
16	84.74	80.37	68.82
17	89.22	89.65	72.46
18	83.53	83.27	69.17
19	82.31	82.54	71.69
20	86.26	81.75	71.15
Mean	84.66	83.23	71.33
Shape parameter ( $\alpha$ )	46.91	18.44	50.48
Scale parameter ( $\beta$ )	85.72	85.63	72.09

$\Delta K_{cf}$ : Fatigue fracture toughness range  
t: Ghickness of specimen

3.2 피로균열 진전속도

Fig. 6은 균열길이  $a$ 와 사이클 수  $N$ 의 관계이며, 이로부터 구한 응력확대계수 범위 (stress intensity factor range : S. I. F. range)  $\Delta K$ 와 균열진전속도 (crack growth rate)  $da/dN$ 의 관계는 Fig. 7이다. 이 그림에서 시험편 두께가 12.5 mm인 것이 다른 치수의 것에 비해 진전속도가 약간 빠르게 나타난 것은 균열선단의 평면응력 및 평면변형조건으로부터 기인된 것이며, 이는 McGowan<sup>(20)</sup>의 결과와 동일한 양상을 나타내는 것이다.

3.3 피로파괴 인성치

Table 6은 피로파괴 인성치 시험의 결과를 정리한 것이며, 2-parameter Weibull 분포의 형상계수  $\alpha$ 와 척도계수  $\beta$ 는 식 (2) 및 (3)으로부터 결정하였다. 이 표에서 피로파괴 인성치 범위 (fatigue fracture toughness range : F. F. T. range)  $\Delta K_{cf}$ 의 실험데이터와 2-parameter Weibull 분포(실선 및 점선)는 Fig. 8에 나타낸 바와 같다. 이 그림로부터 알 수 있듯이  $t=3.0$  mm와  $t=12.5$  mm의 경우 확률분포는 비슷한 양상을 나타내는 반면,  $t=5.5$  mm의 경우는 분포가 대단히 넓게 나타남을 알 수 있다. Fig. 9는 이들의 변동계수 (C. O. V.)를 나타낸 것이며,  $t=3.0$  mm와  $t=12.5$  mm의 경우는 2.5~2.6%인 반면  $t=5.5$  mm의 경우는 6.2% 정도로 인장시험의 결과와 전혀다른 양상을 나타내고 있다. 이로부터 피로파괴 인성치는 재료내부의 미

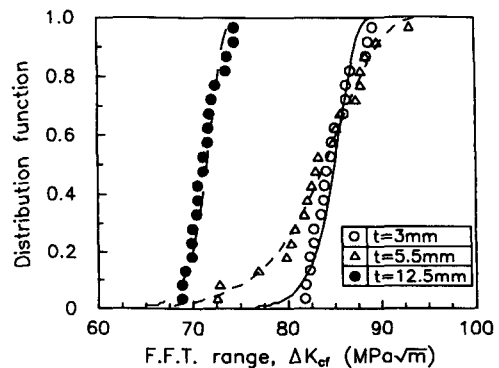


Fig. 8 Distribution function of fatigue fracture toughness range

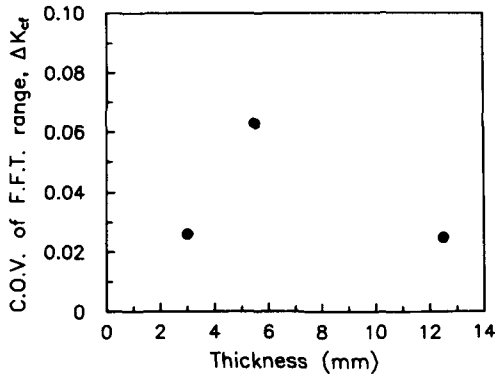


Fig. 9 The effect of thickness on C.O.V. of fatigue fracture toughness range

시적인 결함의 영향외에 균열진전의 제 III 영역에서 균열진전의 역학적 형태의 영향을 받는 것으로 생각된다. 즉 두께  $t$ 가 3.0 mm 및 12.5 mm인 시험편의 경우에는 이들 시험편의 파단면의 형태가 평탄하고 유사한 양상을 나타내었다. 그러나  $t=5.5$  mm의 경우는 각 시험편마다 균열진전의 제 III 영역에서 균열진전 양상 및 파단형태가 다르며, 이것이 분포를 넓게하는 원인이 되는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 두께가 다른 다수의 시험편을 이용하여 인장시험 및 피로파괴 인성치 실험을 하였으며, 재료강도 및 피로파괴 인성치 범위의 통계적 성질에 대한 치수효과를 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 시험편 두께에 관계없이 항복강도의 분포는 인장강도의 분포보다 넓게 나타났다.
- (2) 시험편 두께가 두꺼울수록 항복강도와 인장강도의 분포는 좁아지는 양상을 나타내었다.
- (3) 피로파괴 인성치 범위의 분포는 시험편 두께가 3.0 mm, 12.5 mm인 경우보다 5.5 mm의 경우가 크게 나타났으며, 이는 재료내부의 미시적인 결함의 영향외에 균열진전의 제 III 영역에서 균열진전의 역학적 형태가 영향을 미치는 것으로 생각된다.

#### 후 기

이 논문은 1993년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계제위께 감사

를 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Okamura, H., Watanabe, K., Natio, K., 1975, "Some Crack Problems in Structural Reliability Analysis," *Reliability Approach in Structural Engineering*(Maruzen), pp. 244~257.
- (2) 北川英夫, 久田俊明, 1976, "疲れき裂の成長と非破壊検査を考慮した信頼性解析(第1報)," 日本機械學會講演論文集, 760-12, pp. 320~322.
- (3) 北川英夫, 久田俊明, 1977, "疲れき裂の成長と非破壊検査を考慮した信頼性解析(第2報)," 日本機械學會講演論文集, 770-2, pp. 330~302.
- (4) Harris, D. O., 1977, "A Mean of Assessing the Effect of NDE on the Reliability of Cyclically Loaded Structures," *Material Evaluation*, pp. 57~65.
- (5) Besuner, P. M., Tetelman, A. S., 1977, "Probabilistic Fracture Mechanics," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 43, pp. 99~112.
- (6) Brckner, A., Munz, D. Theodoropoulos, J., 1985, "Probabilistic Fatigue Crack Growth in a Pipe Elbow of a Fast Breeder Reactor," *Transaction of the 8th International Conference of SMIRT*, Vol. M1, pp. 75~80.
- (7) Keith Ortiz and Anne S. Kiremidjian, 1986, "Time Series Analysis of Fatigue Crack Growth Rate Data," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 25, No. 5, pp. 657~675.
- (8) 윤한용, 양영순, 윤장호, 1992, "균열진폭 하중에서의 확률론적 균열진전 수명해석," 대한기계학회논문집, 제16권, 제9호, pp. 1691~1699.
- (9) Shinozuka, M, 1976, "Development of Reliability Based Aircraft Safety Criteria," *AFFDL-TR-76-31*.
- (10) 田中榮, 秋田敏, 小林信之, 1973, "軟鋼切欠き林の疲れき裂傳播に關する統計的考察," 日本材料強度學會誌, 第8卷, 第2號, pp. 56~63.
- (11) 木村雄二, 山田邦博, 清水眞佐男, 國尾武, 1976, "疲労き裂傳播速度に現れる統計的變動とその微視組織的要因について," 日本機械學會論文集, 第42卷, 第353號, pp. 1~7.
- (12) 北川英夫, 權在度, 中曾根祐司, 島崎剛,

- 1986, “長期使用クロムモリブデン 鋼劣化材の疲労き裂進展壽命豫測,” 日本機械學會論文集, 第52卷, 第480號, pp. 1749~1756.
- (13) 윤한용, 1993, “Random 하중하의 피로균열진전수명에 대한 파라미터의 영향도 평가,” 대한기계학회논문집, 제17권, 제1호, pp. 46~50.
- (14) 横堀武夫, 相澤民玉, 1970, “疲労破壊靱性について,” 日本材料強度學會誌, Vol. 5, No. 2, pp. 54~58.
- (15) 오세욱, 재료시험입문, '94 원창출판사, pp. 29.
- (16) *ASTM Designation*: E399-81, 1985, “Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness.”
- (17) 岡村弘之, 破壊力學實驗法, '84 朝倉書店, pp. 81~82.
- (18) Westergard, H. M., 1939, “Bearing Pressures and Cracks,” *Transactions of the ASME, J. Mech.*, Vol. 6, pp. 49~53.
- (19) 日本機械學會編, 機械構造物の安全性, 丸善株式會社, pp. 13.
- (20) McGowan, J. J. and Liu, H. W., “The Role of Three-Dimensional Effects in Constant Amplitude Fatigue Crack Growth testing,” *Journal of Engineering Materials and Technology(Trans. ASME)*, Vol. 102, pp. 341~346.