

## SM20C 강의 피로파괴인성치의 확률분포 특성에 관한 연구

### A Study on Characteristic of Probabilistic Distribution of Fatigue Fracture Toughness in SM20C steel

오 환 교\*

Hwan-Gyo Oh

(1997년 3월 14일 접수, 1997년 9월 20일 채택)

#### ABSTRACT

The strength of material is scattered owing to the inhomogeneity of microstructure, in spite of the same material. Therefore, in order to design the mechanical structure with the reliability engineering, it is important to grasp the statistic nature of material strength. In this paper, effects of grain sizes for the statistical nature of the fatigue crack growth was discussed. And the statistical of mechanical properties was compared with statistical nature of the fatigue crack growth rate.

#### 1. 서론

현재 항공기, 선박, 원자력 구조물 등 대규모의 사고를 유발할 수 있는 기계구조물의 안전 평가는 확률통계적 접근 보다는 확정론적인 평가로 낮은 사고도 예방한다는 측면에서 안전율을 높게 책정하여 이루어 지고 있는 바, 비합리적이고 비경제적인 측면이 강하게 내재되고 있다. 따라서 파괴역학(fracture mechanics)은 결합이 있는 구조부재의 안전성을 평가하는 확률파

괴역학(probabilistic fracture mechanics)과 안전율 등의 경험적 계수대신에 확률통계적 성질에 바탕을 두어 구조부재의 안전성 및 신뢰성을 평가하는 구조 신뢰성공학(structural reliability engineering)을 접목시킨 분야로서 그 중요성이 인식됨과 동시에, 이를 연구하는 연구자의 수가 증가하고 있다<sup>1,2)</sup>.

피로파괴거동에 관한 확률통계적 연구는 피로 균열진전수명의 분포 또는 파괴확률을 지배하는 파라미터(parameter)의 영향을 논하는 연구 및 그러한 파라미터의 통계적 성질을 논하는 연구

\* 조선대학교 기계공학부

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 chain 등의 통계적 모델을 손상모델로 하여 파괴확률을 구한 것<sup>7)</sup>, 그리고 이들의 혼합형 모델을 제시한 것<sup>8)</sup> 등이 있다.

따라서 금속의 피로현상이 확률통계적 성질을 띠고 있음은 널리 알려져 있는데, 피로수명중 다수를 차지하는 피로균열 발생과정 뿐만 아니라 피로균열의 진전과정도 확률통계적 성질을 띠고 있음은 널리 알려져 있는데, 피로수명중 다수를 차지하는 피로균열 발생과정 뿐성질을 나타냄이 밝혀졌다.

한편, 재료의 결정입자의 크기(grain size)는 강도에 지대한 영향을 나타내며, 각종 강도와 결정입자 크기와의 관계를 논한 논문<sup>9-12)</sup>도 눈에 띄는데, 거의가 강도의 평균값과의 관계에 국한되어 있으며 강도의 분포와의 관계를 논한 논문은 보이지 않는다. 피로균열 진전수명의 분포에 관한 논문들이 발표된 이래 다수의 시험편으로부터 얻어진 통계데이터가 기계구조물의 안전평가에 이용되고 있으나, 실제로 문제시 되고 있는 용접부재나 열처리에 의해 결정입자의 크기가 달라진 부재 등의 피로균열 진전속도의 분포(distribution of fatigue crack growth rate)는 어떠한 경향을 나타내지는 알려지지 않고 있으며 同 부재에도 原材(母材)의 데이터가 그대로 적용되고 있는 것으로 알고 있다. 그러나 만일 결정입자의 크기가 달라진 부재의 피로균열 진전속도의 분포가 원재의 경우보다 클 경우는 수명의 분포 또한 커지고 파괴확률은 높아지게 되며 원재의 데이터를 그대로 적용한다면 위험한 평가가 될 수 있다. 반면에 반대의 양상이 나타난다면 과도한 안전을 확보하고 있다는 결과가 되므로 경제적인 손실이 나타나게 된다.

따라서 본 연구에서는 일반구조용의 열간압연강인 SM20C재에 대하여 열처리를 하지 않은 原

材와 열처리에 의해 결정입자의 크기를 달리한 3종류의 시험편에 대하여 통계시험을 실시하여 열처리 유무에 따르는 피로균열 진전속도 및 정적강도의 분포와 관계를 밝히고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 인장시험

#### 2.1.1 시험편재료 및 시험편

본 실험에 사용한 재료는 일반구조용 열간압연강인 SM20C재로서 화학적 성분과 열처리 조건 및 결정입자의 크기(grain size)는 Table 1, 2와 같다. 인장 시험편은 판재형으로 KS 금속재료 인장시험편 5호의 규정<sup>13)</sup>에 의거 제작하였으며, 두께는 5.5mm로하여 확률통계적 실험을 위해 열처리 하지 않은 것과 열처리에 의해 결정입자의 크기를 달리한 시험편을 각각 24개씩 제작하였다.

Table 1. Chemical compositions

Material (SM20C)	Composition(Wt%)					
	C	Si	Mn	P	S	Ni
	0.168	0.021	0.828	0.015	0.012	0.012

Table 2. Heat treatment conditions and grain size of ferrite

Material (SM20C)	Heat treatment conditions	Grain size d(mm)
		870°C Normalizing
	920°C Annealing	0.18
	1,030°C Annealing	0.25

#### 2.1.2 실험 방법

인장시험은 만능재료시험기(Instron universal testing machine, 용량 ±10ton)를 사용하였으며 시험편은 각 조건에 따라 24개씩의 시험편을 준비하고 cross-head speed는 1mm/min로 행하였다. 이로부터 항복강도 및 인장강도를 얻고 이들에 대한 평균(mean), 표준편차(standard deviation), 변동계수(coefficient of variation)를 산출하였다.

### 2.2 피로시험

2.2.1 시험편 재료 및 시험편

재료는 인장시험에 사용된 재료와 동일하다. 시험편은 압연 방향과 균열의 진전 방향이 직각(L-T)이 되도록 채취하였으며, ASTM E647-89<sup>14)</sup>에 따른 표준 CT(compact tension) 시험편이다. 통계적 실험을 위하여 두께를 5.5mm로 제작하여 열처리를 하지 않은 것과 열처리를 하여 결정입자의 크기를 달리한 3종류에 대하여 각각 24개 씩을 C.N.C wire cutting machine (wire 직경: 0.25mm)으로 방전가공하여 제작하였다. 시험편의 형상에 관해서는 이미 일반화되어 있으므로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

2.2.2 실험방법

피로균열 진전시험은 전기유압 서보식 피로시험기(Electro-hydraulic survopulser fatigue testing machine, 용량 ±10ton)를 이용하였다. 본 시험기는 폐회로식 제어기구를 적용한 것으로 설정하중과 수시로 검출되는 로드 셀(load cell)의 신호를 제어기안에 내장된 A/D 변환기를 통하여 PC(personal computer)에 입력하여 오차를 보정하는 방식으로 고정밀도의 시험이 가능하다.

균열길이의 측정은 시험편에 부착한 클립게이지(clip gauge)에 의해 균열개구변위(crack opening displacement)를 측정하였고 이 변위와 하중신호로부터 컴플라이언스(compliance)를 구해 환산하는 방식을 이용하였다. 균열길이는 예비피로균열(pre-fatigue crack)의 효과를 고려하여 1mm 진전 시킨 후 기록을 시작하였으며 측정간격은 0.1mm로 하였다.

피로균열 진전속도의 변동성은 시험편내의(intra-specimen)변동성과 시험편간(inter-specimen)의 변동성으로 분류하여 생각할 수가 있는데 시험편간의 변동성은 실험조건 및 실험방법의 오차로 시험편 채취 위치에 따른 차이로부터 주로 기인되는 것으로 결정입자의 크기의 차이에 의한 영향은 주로 시험편내의 변동성인 것으로 생각되어 피로균열 진전실험은 결정입자 크기에 따라 각 1개씩 시행하여 시험편내의 변동성을 고찰하였으며 하중조건은 Table 3과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험결과

각각 24개씩 인장시험에서 얻어진 인장강도 및 항복강도의 통계데이터는 지면관계상 Table 4, 5에 평균값만 나타냈으며 Fig. 1~3과 같다. Table에서 C.O.V는 변동계수(coefficient of variation)를 의미한다.

Table 3. Loading conditions in fatigue crack growth test

	Pmax (kN)	Pmin (kN)	stress ratio	wave form	Frequency (Hz)
Non-heat treatment	4.90	0.490	0.1	sine	5
Heat treatment	6.87	0.687	0.1	sine	5

Table 4. Tensile test results (Non-heat treatment)

	Mean(MPa)	C.O.V(%)
Yield strength	340.60	0.095
Tensile strength	583.47	0.022

Table 5. Tensile test results (Heat treatment)

	Grain size d(mm)	Mean(MPa)	C.O.V(%)
Yield strength	0.091(870℃)	269.67	4.58
	0.18 (920℃)	227.71	5.82
	0.25(1030℃)	213.48	6.52
Tensile strength	0.091(870℃)	393.18	0.54
	0.18 (920℃)	384.81	0.65
	0.25(1030℃)	380.14	0.76

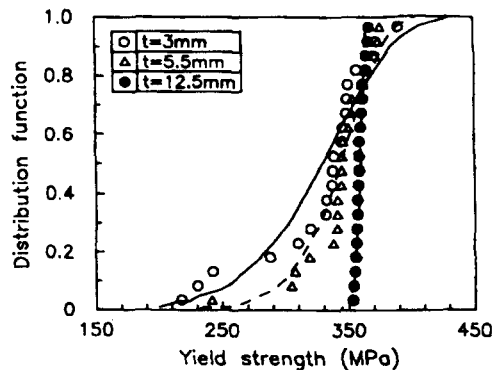


Fig. 1 Distribution function of yield strength (Non-heat treatment condition)<sup>15)</sup>

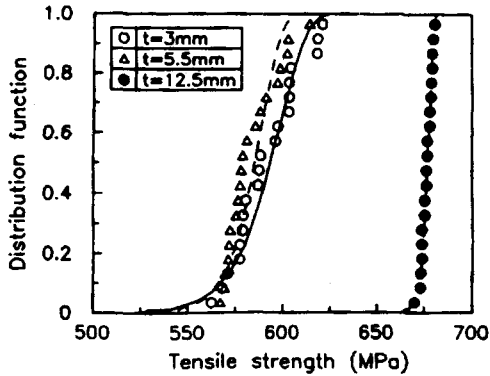


Fig. 2 Distribution function of tensile strength (Non-heat treatment condition)<sup>15)</sup>

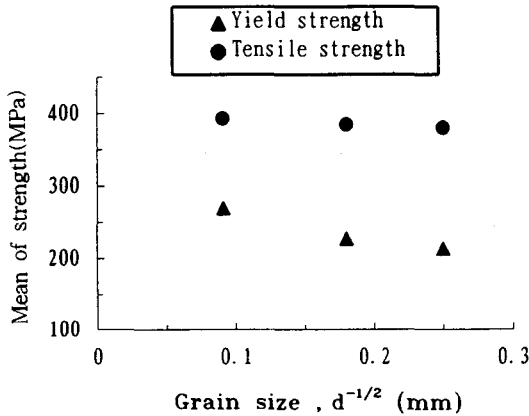


Fig. 3 Mean of yield or tensile strength (Heat treatment condition)

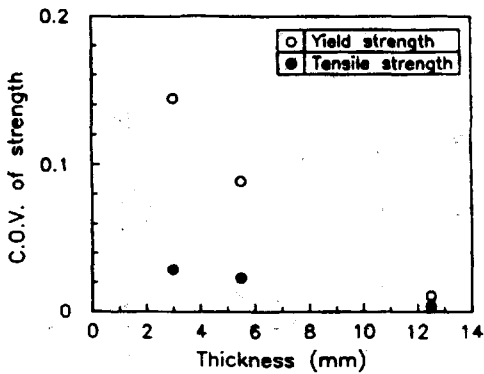


Fig. 4 The effect of thickness on C.O.V of strength (Non-Heat treatment condition)<sup>15)</sup>

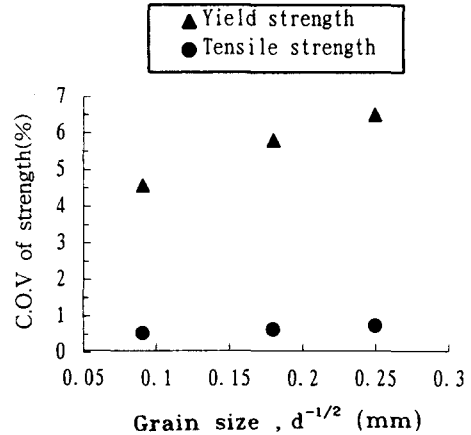


Fig. 5 C.O.V of strength (Heat treatment condition)<sup>15)</sup>

Table 4, 5와 Fig. 1~5는 열처리를 하지 않은 경우와 열처리를 하여 결정입자의 크기를 달리 한 경우의 항복강도와 인장강도를 나타낸 것으로서 항복강도의 경우 열처리에 의하여 강도가 2/3로 감소되었고 인장강도의 경우는 열처리를 하지 않은 경우가 열처리를 한 경우보다 약 2배 정도 되었음을 알 수 있었다. 강도 분포는 Fig. 1, 2 에서와 같이 2-parameter weibull 분포(실선 및 점선)를 잘 따르고 있음을 알 수 있다. Fig. 3, 5는 결정입자 크기를 제곱근의 역수와 강도와의 관계로서 표시했다. 결정입자가 커질수록 강도의 평균치가 저하하고 그 관계가 입자 크기의 제곱근의 역수에 비례하는 기존의 결과<sup>9-10)</sup>에 대략 밝혀져 있다. 그러나 결정입자의 크기에 따른 강도의 차이가 인장강도에 비해 항복강도의 경우가 훨씬 크다. 변동계수의 경우 인장강도, 항복강도 모두 결정입자의 제곱근의 역수에 반 비례하는 결정입자의 의존성을 나타낸다. 항복강도의 경우가 인장강도의 변동계수 보다 대략 10 배정도 커서 결정입자의 크기의 영향이 평균치적인 성격이나 분포에 비해 크게 나타났다. 그리고 열처리를 하지 않은 경우에서도 변동계수에서 항복강도가 인장강도보다 대략 10배정도 큰 것으로 보아 동일한 재료에서는 열처리 유무에 상관없이 변동계수의 분포가 일치함을 알 수 있다.

### 3.2 피로균열 진전속도

얻어진 실험결과를 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 와 균열진전속도  $da/dN$ 으로 정량화 시키기 위하여 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 는 식 (1)<sup>16)</sup>에 의하여 산출하였으며, 균열진전속도  $da/dN$ 는 7점 다항식 근사법(seven point incremental polynomial method)으로 구하였다.

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

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

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

..... (1)

$a$ : Crack length,  $W$ : Width of specimen,  
 $\Delta P$ : Range of load,  
 $B$ : Thickness of specimen

피로시험결과 얻어진 균열진전속도(crack growth rate)와 응력확대계수(stress intensity factor)폭과의 관계를 Fig. 6, 7에 나타냈다.

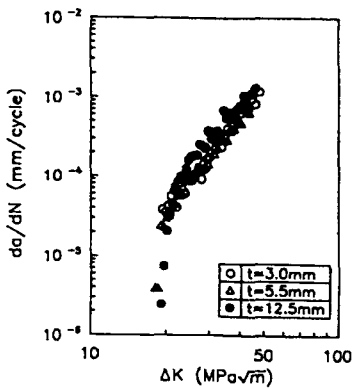


Fig.6 Relationship between stress intensity factor range and crack growth rate (Non-heat treatment)<sup>15)</sup>

운동<sup>8)</sup>은 시험편간의 변동은 다음 Paris-Erdogan식을 적용하였다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad \dots \dots \dots (2)$$

$a$ : Crack length,  $N$ : Number of cycle,  
 $C, m$ : Material factor

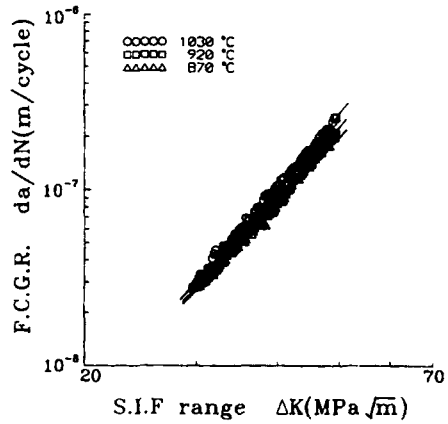


Fig.7 Relationship between stress intensity factor range and crack growth rate (Heat treatment)

식(2)에서 계수  $C$ 를 확률변수로하여 변동성을 부여하고, 시험편내 변동은 위치에 따라 변하는 확률과정(stochastic process)으로하여 변동성을 부여하였다. 본 연구에서도 마찬가지로 다음과 같이 확률과정  $X$ 를 구해 변동의 크기를 평가하여 보았다.

$$X_i = \frac{(da/dN)_i}{\frac{1}{\Delta a} \int_{a_i}^{a_{i+1}} C \cdot \Delta K^m da} \quad \dots \dots \dots (3)$$

여기서  $\Delta a = a_{i+1} - a_i, i = 1, 2, \dots$  이다.

Fig. 8~10에 식(2)에서 구한  $X$ 에 log를 취하여 나타내 보았다. 각 peak점이 log  $X$ 의 값이고 선으로 그 점들을 연결한 것이다.

Fig. 8은 열처리 온도 870°C( $d=0.091mm$ )의 것이고, Fig. 9는 920°C( $d=0.18mm$ ), Fig. 10은 1030°C( $d=0.25mm$ )의 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 파형은 0점을 중심으로 대칭을 이루는 파형에 가깝고 극치는 Rayleigh 분포<sup>17)</sup>를 이루게 된다. 이 경우 평균치가 0에 가깝기 때문에 일반적으로 변동의 크기를 나타내는 변동계수(표준편차/평균)는 특별한 의미가 없으므로 R.M.S.(root mean square)값으로서 변동의 정도를 나타낼 수가 있다.

Fig. 9에 열처리를 한 경우의 균열진전속도의 평가방법인 secant법과 7점 다항식 근사법을 동시에 나타내 보았다. 그림에서 알 수 있는 것처럼

럼 차이는 거의 없고 균열 진전속도의 평가방법이 진전속도의 분포에 미치는 영향은 무시할 수 있다.

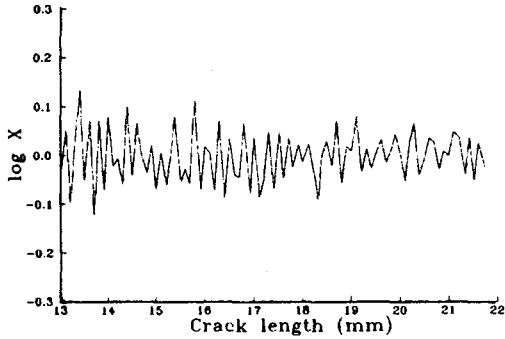


Fig. 8 Relation between log X and crack length (d=0.091mm)

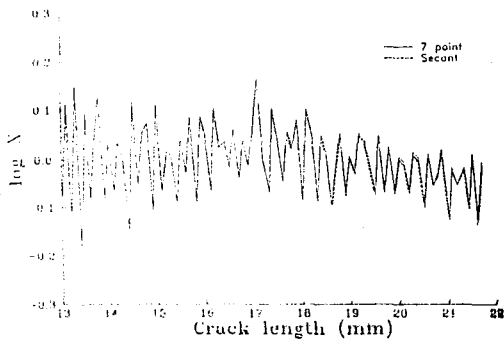


Fig. 9 Relation between log X and crack length (d=0.18mm)

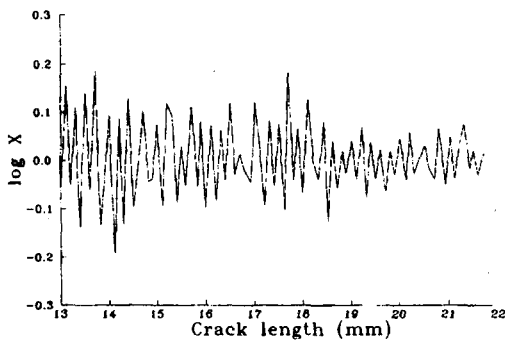


Fig. 10 Relation between log X and crack length (d=0.25mm)

파형의 형태가 균열길이가 커질수록 즉,  $\Delta K$  가 커질수록 작아지는 현상을 나타내고 있어 분포가 작아짐을 알 수 있다. 또한 결정입자  $d$ 의 크기가 클수록 파형의 크기가 커져 결정입자의 크기가 커질수록 분포의 크기가 커짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 피로균열 진전속도의 분포에 대한 결정입자 의존성을 밝히기 위하여 동일한 두께에 대하여 열처리 유무에 따르는 확률통계 실험을 실시하였으며 그 결과는 아래와 같다.

- 1) 열처리를 하지 않은 경우의 항복강도와 인장강도가 열처리를 한 경우보다 훨씬 크게 나타나는 특성이 있었다.
- 2) 열처리에 의한 결정입자의 크기에 따른 강도의 차이가 항복강도에 비해 인장강도의 경우가 훨씬 크며, 변동계수의 경우 열처리 유무에 관계없이 인장강도, 항복강도 모두 결정입자의 체평균의 역수에 반비례하는 결정입자에 의존성이 있음을 나타냈다.
- 3) 열처리에 무관하게 항복강도의 경우가 인장강도의 변동계수 보다 대략 10배 정도 크게 나타났다.
- 4) 열처리한 경우에 있어서의 피로균열 진전속도의 확률분포특성에 대해, 균열진전속도의 평가방법인 secant법과 7점 다항식 근사법을 비교해 볼 때 차이가 거의 없었다.

따라서 용접이나 기타의 열처리에 의해 결정입자의 크기가 달라진 경우 재료의 정적강도 및 동적강도의 평균치적인 성격외에도 분포의 크기가 변화하므로 설계나 안전평가지 충분한 검토가 있어야 된다고 사료된다.

이 논문은 1995년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계제위께 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- 1) Okamura, H., Watanabe, K., Natio, K.,

- "Some Crack Problems in Structural Reliability Analysis," Reliability Approach in Structural Engineering(Maruzen), pp. 244~257, 1975.
- 2) 北川英夫, 久田俊明, "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, 1976.
  - 3) 北川英夫, 久田俊明, "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, 760-2, pp. 302~330, 1977.
  - 4) Harris, D. O., "A Mean of Assessing the Effect of NDE on the Reliability of Cyclically Loaded Structures," Material Evaluation, pp. 57~65, 1977.
  - 5) Besuner, P. M., Tetelman, A. S., "Probabilistic Fracture Mechanics," Nuclear Engineering and Design, Vol. 43, pp. 99~112, 1977.
  - 6) Brckner, A., Munz, D. Theodoropoulos, J., "Probabilistic Fatigue Crack Growth in a Pipe Elbow of a Fast Breeder Reactor," Transation of the 8th International Conference of SMIRT, Vol. M1, pp. 75~80, 1985.
  - 7) Keith Ortiz and Anne S. Kiremidjian, "Time Series Analysis of Fatigue Crack Growth Rate Data," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 25, No. 5, pp. 657~675, 1986.
  - 8) 윤한용, 양영순, 윤장호, "균열진폭 하중하에서의 확률론적 균열진전 수명해석," 대한기계학회논문집, Vol. 16, No. 9, pp. 1691~1699, 1992.
  - 9) 小倉信和, 西岡俊久, "疲労き裂近傍の塑性挙動とき裂伝ば速度の結晶粒経依存性," 日本機械學會論文集, Vol. 44, No. 388, pp. 4014~4023, 1978.
  - 10) 横堀武夫, "疲労き裂成長舉動におよぼすフェライト結晶粒大きさの影響," 日本機械學會論文集, Vol. 16, No. 1, pp. 1~17, 1983.
  - 11) 西田明生, 寺井健二, "MgO質燒結體の曲げ強度に及ぼす粒子経と人工缺陷寸法の影響," 材料, Vol. 42, No. 475, pp. 426~430, 1993.
  - 12) 三浦馬義, 西谷弘信, "疲労壽命のばらつき特性とフェライト粒徑の關係," 日本機械學會論文集, Vol. 59, No. 562, pp. 1413~1420, 1993.
  - 13) 오세욱, 오환섭, 김상태, 오환교, "재료시험입문", 원창출판사, p. 29, 1993.
  - 14) ASTM E 399-81, "Standard Method of Test for plane-strain Fracture of Metallic", 1981.
  - 15) 오환교, 김희송, "피로 파괴 인성치의 통계적 성질에 관한 연구", 대한기계학회지, Vol. 18, No. 11, pp. 2894~2901, 1994.
  - 16) 岡村弘之, 破壊力學實驗法, '84 朝倉書店, pp. 81~82.
  - 17) Okamura, H. and Itagaki, H., "Statistical Treatment of Strength", Baihukan (Japanese), p. 105, 1983.