

## 세라믹스의 피로수명에 대한 통계적 분석

박성은 · 김성욱 · 이홍림  
연세대학교 세라믹공학과  
(1997년 6월 5일 접수)

### Statistical Analysis for Fatigue Lifetime of Ceramics

Sung Eun Park, Sung Wook Kim and Hong Lim Lee

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749 Korea

(Received June 5, 1997)

#### 요 약

알루미나 시편의 정적 및 반복 피로 실험을 행하고 정규 분포, 대수 정규 분포, Weibull 분포의 통계적 분석 방법에 따라서 피로 수명 데이터 및 공칭 초기 균열 크기 데이터에 관하여 비교 분석하였다. 피로 수명 데이터는 Weibull 분포에 있어서 노치를 준 시편의 형상매개변수가 노치를 주지 않은 시편의 형상매개변수보다 정적 및 반복 피로에 대하여 모두 크게 나타났으므로, 정규 분포나 대수 정규 분포보다는 Weibull 분포를 잘 따른다고 할 수 있다. 또한 피로 수명 데이터로부터 얻은 공칭 초기 균열 크기 데이터는 대수 정규 분포에 있어서 노치를 주지 않은 시편의 변이계수가 노치를 준 시편의 변이계수보다 정적 및 반복 피로에 대하여 모두 크게 나타났고, 또한 Weibull 분포에 있어서 노치를 주지 않은 시편의 형상매개변수가 노치를 준 시편의 형상매개변수보다 정적 및 반복 피로에 대하여 모두 작게 나타났으므로, 정규 분포보다는 대수 정규 분포와 Weibull 분포를 잘 따른다고 할 수 있다.

#### ABSTRACT

Static and cyclic fatigue tests were carried out for alumina specimen to study the statistical analyses (normal, lognormal and Weibull distribution) of fatigue lifetime data and nominal initial crack length data. Fatigue lifetime data followed Weibull distribution better than normal or lognormal distribution, for the shape parameter of the notched specimen was larger than that of the unnotched specimen. The nominal initial crack length data obtained from fatigue lifetime followed the lognormal and Weibull distribution better than normal distribution, for the coefficient of variation of the unnotched specimen was larger than that of the notched specimen, and shape parameter of unnotched specimen was smaller than that of the notched specimen.

**Key words :** *Static fatigue, Cyclic fatigue, Alumina, Normal distribution, Lognormal distribution, Weibull distribution, Fatigue lifetime, Nominal initial crack length, Shape parameter, Coefficient of variation*

#### 1. 서 론

탄성률, 질량, 파괴인성 등 대부분의 세라믹스 물성들은 전형적인 정규 분포를 따르고 그 특성을 평균값과 분산을 이용하여 나타낸다. 그러나 세라믹스의 강도는 그 시편에서 파괴를 야기시키는 결함의 크기와 위치에 의해서 결정되며, 아무리 동일한 시편을 제조하려고 하더라도 그 결함 크기와 위치가 일정하지 않고 어떤 분포를 나타낸다. 이와 같은 이유로 세라믹스의 강도는 일정하지 않고 큰 편차와 분포를 나타낸다. 이와 같은 거동으로 인해서 세라믹스의 신뢰도 분석은 일반적으로 Weibull 이론을 많이 이용하고 있다.<sup>1)</sup> 세라믹스의 강도뿐만 아니라

피로 수명 또한 그 시편에서 피로 파괴를 야기시키는 결함의 크기와 위치에 의해서 결정되며, 일정하지 않고 넓은 편차와 분포를 나타낸다.

강도와 피로 수명과 같이 분산이 큰 데이터는 정규 분포(normal distribution)를 이용할 경우에는 주의가 요구된다. 정규분포는  $(-\infty, \infty)$  영역에서 정의되고, 때때로 낮은 확률을 갖는 부분이 음(-)이 될 수가 있다. 그러나 이것은 강도나 피로 수명과 같은 경우에는 실제로 불가능하다. 그러므로 정규 분포 대신에 항상 양(+)의 빈수를 취하는 Weibull 분포나 대수 정규(lognormal) 분포<sup>2,3)</sup>를 사용하여 통계적 처리를 해야 한다.<sup>4)</sup> 강도의 경우는 Weibull 분포를 일반적으로 사용하고 있지만, 세라

믹스의 피로 수명의 경우는 아직 확실한 기준이 없다.

본 연구에서는 대표적인 구조재료용 세라믹스인 알루미나를 이용하여 정적 및 반복 피로 실험을 행하고 피로 수명 데이터를 통계적 분석 방법에 대해서 고찰하여 보았으며, 또 강도와 피로 수명 데이터의 큰 분산을 야기시키는 균열 크기 데이터의 통계적 분석 방법에 대해서 고찰하여 보았다.

## 2. 이론적 배경

피로 수명 데이터를 통계적 분석 방법으로 처리하기 위해서 정규 분포, 대수 정규 분포, Weibull 분포를 사용하였다.

### 2.1. 정규 분포(normal distribution)

정규 분포는 통계학의 모든 분야에서 가장 중요한 분포이고, 가우스(Gauss) 분포라고도 한다. 정규 분포의 확률 밀도 함수는 Eq. (1)와 같다.<sup>3)</sup>

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

Eq. (1)에서  $\sigma$ 는 표준편차,  $\mu$ 는 평균이고, 이 식은  $(-\infty < x < \infty)$  영역에서 정의된다.

### 2.2. 대수 정규 분포(lognormal distribution)

대수 정규 분포는  $Y=\ln X$ 의 분포가 정규 분포를 나타내는 분포이고, 대수 정규 분포의 확률 밀도 함수는 Eq. (2)와 같다. 이 식은  $(0 < x < \infty)$  영역에서 정의된다.<sup>3)</sup>

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

### 2.3. Weibull 분포

Weibull 분포는 강도와 같이 분산이 큰 데이터의 경우에 많이 사용되고, Weibull 분포의 확률 밀도 함수는 Eq. (3)와 같다.<sup>4)</sup>

$$f(x) = mvx^{m-1} \exp[-vx^m] \quad (3)$$

Eq. (3)에서  $m$ 은 형상매개변수(shape parameter),  $v$ 는 비례매개변수(scale parameter)이고, 이 식은  $(x \geq 0, v > 0, m > 1)$  영역에서 정의된다.

## 3. 실험방법

상용 알루미나 분말(AL-160SG-3, Showa Denko,

**Table 1.** Properties of Alumina Specimen

Sintered density	3.94 g/cm <sup>3</sup> (99.0%)
Flexural strength	505±40 MPa
Fracture toughness	4.09±0.29 MPa·m <sup>1/2</sup>
Mean grain size	5 μm

Japan)을 사용하여 시편을 제작하였다. 분말을 20.7 g씩 칭량하여 50 mm×50 mm의 몰드에 넣고 5 MPa의 압력으로 일축 성형한 후 138 MPa의 압력으로 냉간 정수압 성형(cold isostatic pressing)하고, 1650°C에서 1시간동안 상압 소결하였다. 이렇게 제작한 시편을 정밀 절단 연삭기(SFG-200M, Samsung clover, Korea)를 사용하여 diamond grit 150 및 600으로 연마한 후 3 mm×4 mm×34 mm이 되도록 절단하고 모서리에 존재하는 균열을 제거하기 위하여 각 모서리를 45°로 가공하여 정적, 반복 피로 실험에 사용한 시편을 제작하였다. 시편의 특성을 Table 1에 나타내었다. 또, 0.1 mm 두께의 다이아몬드 날을 이용하여 0.5 mm 깊이의 노치를 만들어 SENB(single edge notched beam) 시편을 제작하였다.

노치를 주지 않은 시편과 노치를 준 시편에 대해서 만능재료시험기(H10K-C, Hounsfield Test Equipment Ltd., England)를 이용하여 inner span 10 mm, outer span 30 mm, 4점 꺾임방법으로 정적 피로 실험을 행하였다. 노치를 주지 않은 시편에 인가되는 응력의 크기는 350 MPa이었고, 노치를 준 시편에 대해서는 80 MPa이 되도록 조절하였다. 또한, 반복 피로 시험의 경우에는 하중 인가 주기를 0.5 Hz로 조절하여 노치를 주지 않은 시편은 등가 정적 응력(equivalent static stress)<sup>5)</sup>이 360 MPa이 되도록 하였으며, 노치를 준 시편은 등가 정적 응력이 80 MPa이 되도록 하중을 인가하였다. 이와 같은 조건으로 시편의 파괴 시점까지 피로 시험을 행하여 피로 수명을 측정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

노치를 주지 않은 시편과 노치를 준 시편의 피로 수명 측정치를 정규 분포, 대수 정규 분포, Weibull 분포를 이용하여 나타내었다. 노치를 주지 않은 시편과 노치를 준 시편은 피로 수명은 초기 균열 크기가 다르기 때문에 큰 차이를 나타내게 된다. 이와 같이 대표값의 차이가 큰 두 자료나 단위가 틀리는 두 자료의 산포도(dispersion)를 비교하기 위해서는 상대적 산포도를 사용하여야 한다.<sup>6)</sup> 상대적 산포도 중에서 가장 일반적으로 사용하는 변이 계수(coefficient of variation,  $V_s$ )는 표준 편차( $\sigma$ )를 평균( $\bar{x}$ )으로 나눈 몫의 백분율로 식 (4)과 같다. 변이 계수가 클수록 상대적 산포도가 크다는 것을 의미한다.

Table 2. Comparison of Three Distributions for Fatigue Lifetime

(unit : s)

Fatigue test		Static fatigue for notched specimens	Static fatigue for notched specimens	Cyclic fatigue for notched specimens	Cyclic fatigue for notched specimens
Distribution					
Normal distribution	$\mu$	16626	41897	16212	1246
	$\sigma$	21266	55843	32676	1593
	C.V.	128%	133%	202%	128%
Lognormal distribution	$\mu$	8.35	9.75	8.48	6.13
	$\sigma$	2.23	1.57	1.81	1.61
	C.V.	26.6%	16.1%	21.4%	26.2%
Weibull distribution	m	0.50	0.68	0.59	0.65

\* $\mu$  : mean,  $\sigma$  : standard deviation, C.V. : coefficient of variation, m : shape parameter

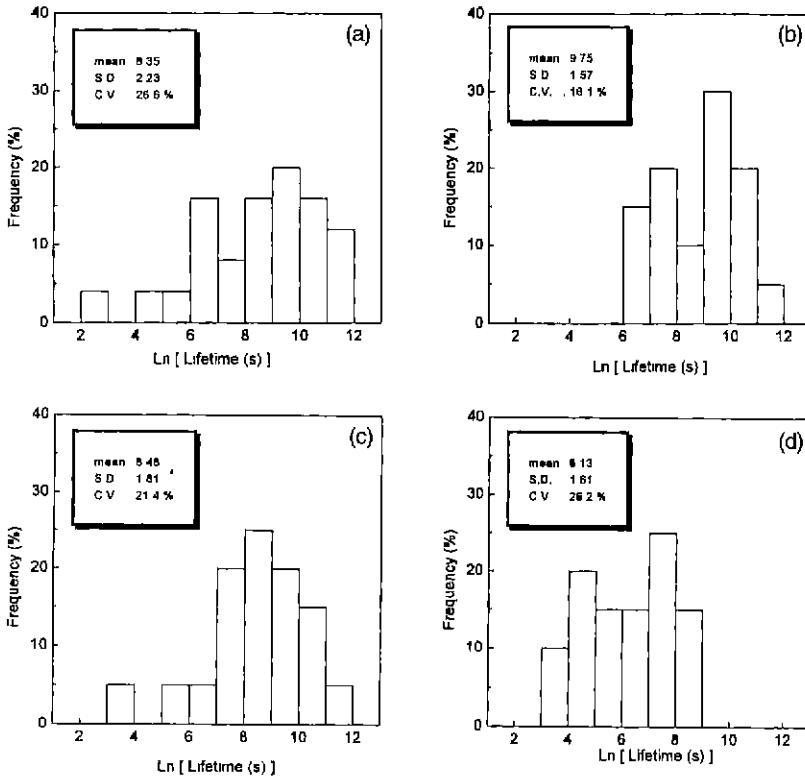
$$V_x = \frac{\sigma}{x} \times 100(\%) \quad (4)$$

Table 2에 나타난 바와 같이 노치를 주지 않은 시편에 인가되는 응력의 크기를 350 MPa로 하여 정적 피로 시험을 하여 얻은 피로 수명 데이터를 정규 분포로 분석하면, 평균이 16626 초, 표준 편차가 21266 초, 변이 계수는 128%이었다. 노치를 준 시편에 인가되는 응력의 크기를 80 MPa로 하여 정적 피로 시험을 하여 얻은 피로 수명 데이터를 정규분포로 분석하면, 평균이 41897 초, 표준 편차가 55843 초, 변이 계수는 133%이었다. 모두 같은 조건으로 실험을 하였지만, 피로 수명이 다르게 나타나는 것은 시편에서 피로 파괴를 야기시키는 결함의 크기와 위치가 일정하지 않기 때문이다. 노치를 주지 않은 시편의 경우는 시편 내부에 무작위로 존재하는 결함으로 인해서 초기 균열 크기의 분산이 크지만, 노치를 준 시편의 경우에는 노치가 초기 균열로 작용하여 거의 일정하다고 할 수 있다. 다른 실험 조건은 전부 같기 때문에 피로 수명의 차이를 야기시키는 것은 단지 초기 균열 크기라고 할 수 있고, 초기 균열 크기의 분산이 큰 노치를 주지 않은 시편보다는 초기 균열 크기가 일정한 노치를 준 시편의 피로 수명의 분산이 더 작을 것이라고 생각된다. 그러나 실험 결과는 반대로 나타났다. 노치를 준 시편의 피로 수명의 변이 계수가 더 높게 나타났다. 이것은 분산이 큰 데이터를 정규 분포를 이용해서 분석했기 때문에 나타나는 오류라고 생각된다. 노치를 주지 않은 시편에 등가 정적 응력이 360 MPa이 되도록 하중을 인가하여 반복 피로 시험을 하여 얻은 피로 수명 데이터를 정규 분포로 분석하면 Table 2에 나타난 바와 같이 평균이 16212초, 표준 편차가 32676초, 변이 계수가 202%이었고, 노치를 준 시편에 등가 정적 응력으로 80 MPa이 되도록 하중을 인가하여 반복 피로 시험을 하여 얻은 피로 수명 데이

터를 정규 분포로 분석하면 평균이 1246초, 표준 편차가 1593초, 변이 계수가 128%이었다. Table 2에서 알 수 있듯이 이것을 그림으로 표현하기는 매우 곤란하므로 그림은 생략하기로 한다.

이와 같이 정적 및 반복 피로 시험에 대하여 모두 노치를 준 시편과 노치를 주지 않은 시편 모두 평균에 대해서 표준 편차가 더 큰 것은 데이터의 분산이 매우 큰 것을 의미한다. 데이터의 분산이 큰 경우에 때때로 낮은 확률을 갖는 값이 음(-)이 될 수가 있으므로 정규 분포를 사용하는 데에는 주의가 요구된다. 정규 분포를 이용하여 피로 수명 데이터를 분석한 경우, 노치를 주지 않은 시편의 정적 피로 수명 데이터의 변이 계수보다 노치를 준 시편의 정적 피로 수명 데이터의 변이 계수가 더 크게 나타났고 평균에 대해서 표준 편차가 더 크게 나타났으므로, 피로 수명은 정규 분포를 잘 따르지 않는다고 할 수 있다.

피로 수명 데이터를 대수 정규 분포를 이용하여 분석하면, 노치를 주지 않은 시편의 정적 피로 수명 데이터의 대수 정규 분포는 Fig. 1(a)와 같았고, 평균은 8.35, 표준 편차는 2.23, 변이 계수는 26.6%이었으며, 노치를 준 시편의 정적 피로 수명 데이터의 대수 정규 분포는 Fig. 1(b)와 같았고, 평균은 9.75, 표준 편차는 1.57, 변이 계수는 16.1%이었다. 또, 노치를 주지 않은 시편의 반복 피로 수명 데이터의 대수 정규 분포는 Fig. 1(c)와 같았고, 평균은 8.48, 표준 편차는 1.81, 변이 계수는 21.4%이었으며, 노치를 준 시편의 반복 피로 수명 데이터의 대수 정규 분포는 Fig. 1(d)와 같았고, 평균은 6.13, 표준 편차는 1.61, 변이 계수는 26.2%이었다. 대수 정규 분포를 이용하여 피로 수명 데이터를 분석한 경우, 노치를 주지 않은 시편의 반복 피로 수명 데이터의 변이 계수보다 노치를 준 시편의 반복 피로 수명 데이터의 변이 계수가 더 크게 나타났으므로, 피로 수명은 대수 정규 분포를 잘 따



**Fig. 1.** Lognormal distribution of fatigue lifetime : (a) unnotched alumina specimens under the fixed static stress of 350 MPa for static fatigue, (b) notched alumina specimens under the fixed static stress of 80 MPa for static fatigue, (c) unnotched alumina specimens under the fixed equivalent static stress of 360 MPa for cyclic fatigue and (d) notched alumina specimens under the fixed equivalent static of 80 MPa for cyclic fatigue.

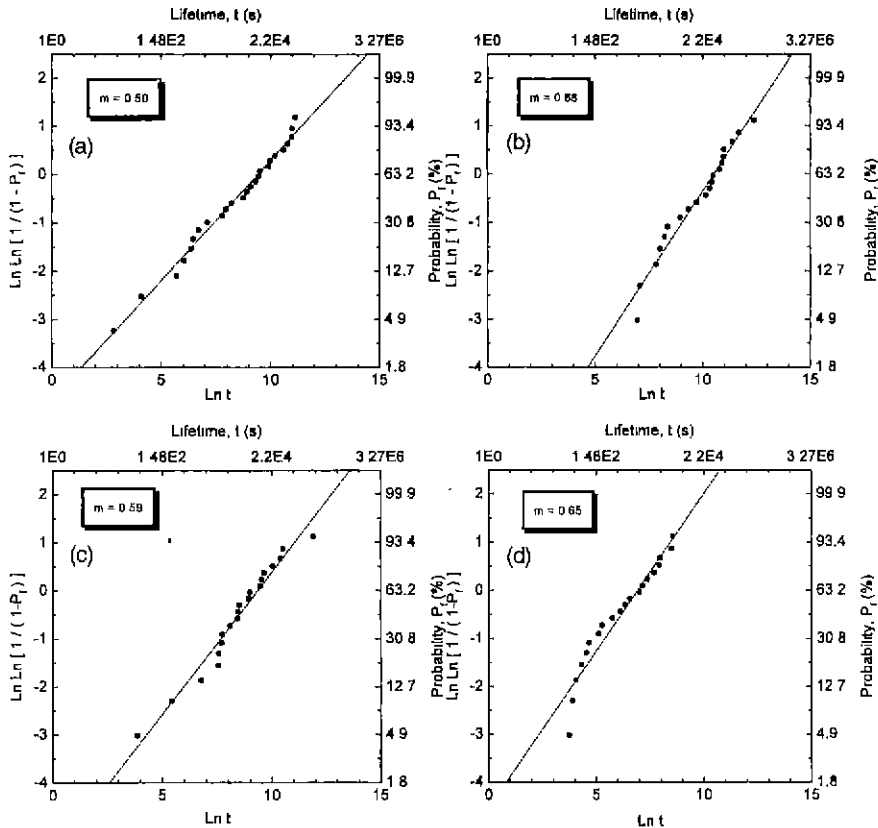
르지 않는다고 할 수 있다.

피로 수명 데이터를 Weibull 분포를 이용하여 분석하면, 노치를 주지 않은 시편의 정적 피로 수명 데이터의 Weibull 분포는 Fig. 2(a)와 같았고, 형상매개변수는 0.50이었으며, 노치를 준 시편의 정적 피로 수명 데이터의 Weibull 분포는 Fig. 2(b)와 같았고, 형상매개변수는 0.68이었다. 또, 노치를 주지 않은 시편의 반복 피로 수명 데이터의 Weibull 분포는 Fig. 2(c)와 같았고, 형상매개변수는 0.59이었으며, 노치를 준 시편의 반복 피로 수명 데이터의 Weibull 분포는 Fig. 2(d)와 같았고, 형상매개변수는 0.65이었다. 정적 및 반복 피로의 경우 모두 노치를 준 시편의 형상매개변수가 노치를 주지 않은 시편의 형상매개변수보다 더 크게 나타났으며, 형상매개변수가 클수록 데이터의 분산이 작음을 의미하므로, 피로 수명 데이터는 Weibull 분포를 잘 따른다고 할 수 있다. 정적 및 반복 피로 수명에 대한 세 가지 분포 특성의 비교를 위하여 Table 2에 정리하여 나타내었다.

정적 및 반복 피로 수명( $t$ )은 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>7)</sup>

$$t = \frac{2}{(n-2)A\sigma_{cs}^n Y^n} \cdot a^{(2-n)/2} \quad (5)$$

Eq. (5)에서  $n$ 은 균열 성장 지수(crack growth exponent),  $A$ 는 상수,  $\sigma_{cs}$ 는 등가 정적 응력,  $Y$ 는 형상계수(geometric factor),  $a$ 는 초기 균열 크기이다. 실험 조건이 동일하므로  $n$ ,  $A$ ,  $\sigma_{cs}$ ,  $Y$  등은 일정한 상수라고 할 수 있으며 피로 수명에 크게 영향을 주는 것은 초기 균열 크기라고 생각할 수 있다. 이 연구에서 최소의 초기 균열 크기( $a_{min}$ )에 대한 피로 수명은 최대의 피로 수명( $t_{max}$ )이 되므로, Fig. 3에서 알 수 있듯이  $n$ 값에 따라 정도의 차이가 있지만 피로 수명은 초기 균열 크기가 클수록 감소한다.  $n$ 값이 커질수록 그 정도가 더 심해진다. 이것은  $n$ 값이 큰 경우에 초기 균열 크기가 조금만 변해도 피로 수명은 큰 차이를 보인다는 것을 의미한다. Eq. (5)를 이용하여 피로 수명 데이터로부터 초기 균열 크기를 구할 수 있다. 그러나 이 초기 균열 크기는 시편에서 최대 응력이 인가되는 부분에 응력과 수직 방향으로 하나의 균열이 존재할 때의 크기에 해당하므로, 이를 공칭



**Fig. 2.** Weibull plot of fatigue lifetime : (a) unnotched alumina specimens under the fixed static stress of 350 MPa for static fatigue, (b) notched alumina specimens under the fixed static stress of 80 MPa for static fatigue, (c) unnotched alumina specimens under the fixed equivalent static stress of 360 MPa for cyclic fatigue and (d) notched alumina specimens under the fixed equivalent static of 80 MPa for cyclic fatigue.

초기 균열 크기(nominal initial crack length)라고 할 수 있다.

노치를 주지 않은 시편의 정적 피로 수명 데이터로부터 얻은 공칭 초기 균열 크기 데이터를 정규 분포를 이용하여 분석하면 Table 3에 나타난 바와 같이, 평균은 5.41  $\mu\text{m}$ , 표준 편차는 0.67  $\mu\text{m}$ , 변이 계수는 12.3%이었으며, 노치를 준 시편의 정적 피로 수명 데이터로부터 얻은 공칭 초기 균열 크기 데이터를 정규 분포를 이용하여 분석하면, 평균은 526  $\mu\text{m}$ , 표준 편차는 44  $\mu\text{m}$ , 변이 계수는 8.4%이었다. 또, 노치를 주지 않은 시편의 반복 피로 수명 데이터로부터 얻은 공칭 초기 균열 크기 데이터를 정규 분포를 이용하여 분석하면, 평균은 6.06  $\mu\text{m}$ , 표준 편차는 1.18  $\mu\text{m}$ , 변이 계수는 19.5%이었으며, 노치를 준 시편의 반복 피로 수명 데이터로부터 얻은 공칭 초기 균열 크기 데이터를 정규 분포를 이용하여 분석하면, 평균은 483  $\mu\text{m}$ , 표준 편차는 94  $\mu\text{m}$ , 변이 계수는 19.5%이었다. 노치를 주지 않은 시편의 초기 균열은 크기가 일정하

지 않고 임의의 위치에 무작위로 분포하고, 노치를 준 시편의 초기 균열은 일정한 길이의 노치를 일정한 위치에 생성시켰으므로 균일하다고 할 수 있다. 그러므로 노치를 주지 않은 시편의 공칭 초기 균열 크기의 변이 계수가 노치를 준 시편의 공칭 초기 균열 크기의 변이 계수보다 더 클 것이라고 생각된다. 정규 분포를 이용하여 공칭 초기 균열 크기를 분석한 경우, 반복 피로 시험에서 노치를 주지 않은 시편의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 변이 계수와 노치를 준 시편의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 변이 계수가 같게 나타났으므로, 공칭 초기 균열 크기는 정규 분포를 잘 따르지 않는다고 할 수 있다. Table 3에서 알 수 있듯이 이것을 그림으로 표현하기는 매우 곤란하므로 그림은 생략하기로 한다.

공칭 초기 균열 크기 데이터를 대수 정규 분포를 이용하여 분석하면, 노치를 주지 않은 시편의 정적 피로에서의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 대수 정규 분포는 Fig. 4(a)와 같았고, 평균은 1.68, 표준 편차는 0.12, 변

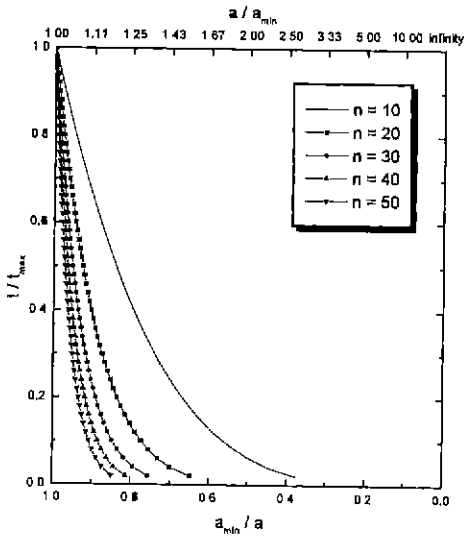


Fig. 3. Fatigue lifetime,  $t$  as a function of nominal initial crack length,  $a$  under various crack growth exponent,  $n$ .

이 계수는 7.02%이었으며, 노치를 준 시편의 정적 피로에서의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 대수 정규 분포는 Fig. 4(b)와 같았고, 평균은 6.26, 표준 편차는 0.08, 변이 계수는 1.33%이었다. 또, 노치를 주지 않은 시편의 반복 피로에서의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 대수 정규 분포는 Fig. 4(c)와 같았고, 평균은 1.79, 표준 편차는 0.18, 변이 계수는 10.14%이었으며, 노치를 준 시편의 반복 피로에서의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 대수 정규 분포는 Fig. 4(d)와 같았고, 평균은 6.16, 표준 편차는 0.18, 변이 계수는 2.94%이었다. 대수 정규 분포를 이용하여 공칭 초기 균열 크기를 분석한 경우, 정적 피로와 반복 피로 모두에서 노치를 주지 않은 시편의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 변이 계수가 노치를 준 시편의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 변이 계수보다 크게 나타났다으므로, 공칭 초기 균열 크기 데이터는 대수 정규 분포를 잘 따른다고 할 수 있다.

공칭 초기 균열 크기 데이터를 Weibull 분포를 이용하여 분석하면, 노치를 주지 않은 시편의 정적 피로에서의

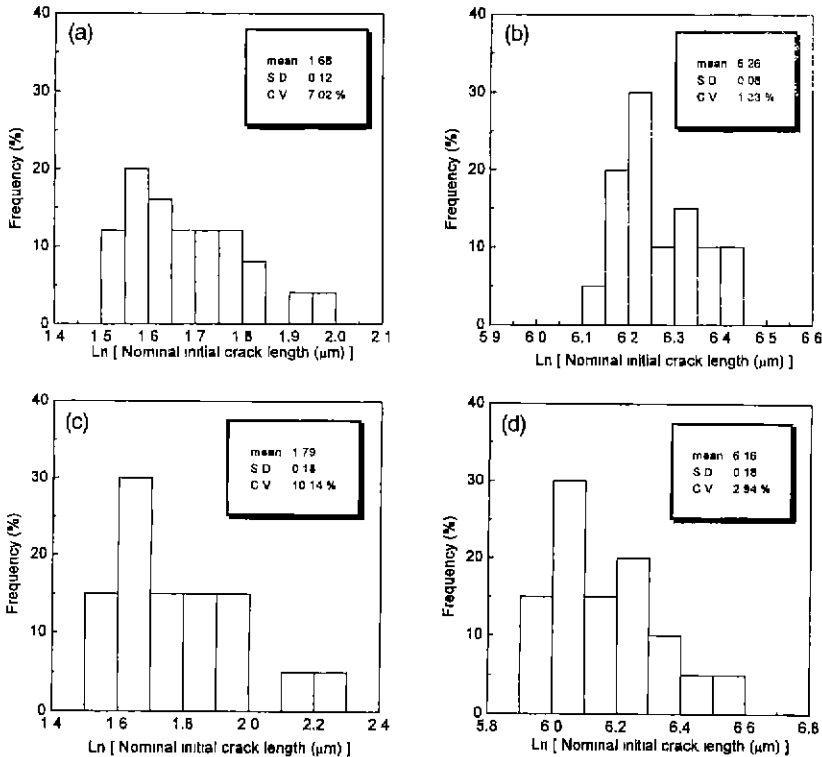


Fig. 4. Lognormal distribution of nominal initial crack length : (a) unnotched alumina specimens under the fixed static stress of 350 MPa for static fatigue, (b) notched alumina specimens under the fixed static stress of 80 MPa for static fatigue, (c) unnotched alumina specimens under the fixed equivalent static stress of 360 MPa for cyclic fatigue and (d) notched alumina specimens under the fixed equivalent static of 80 MPa for cyclic fatigue.

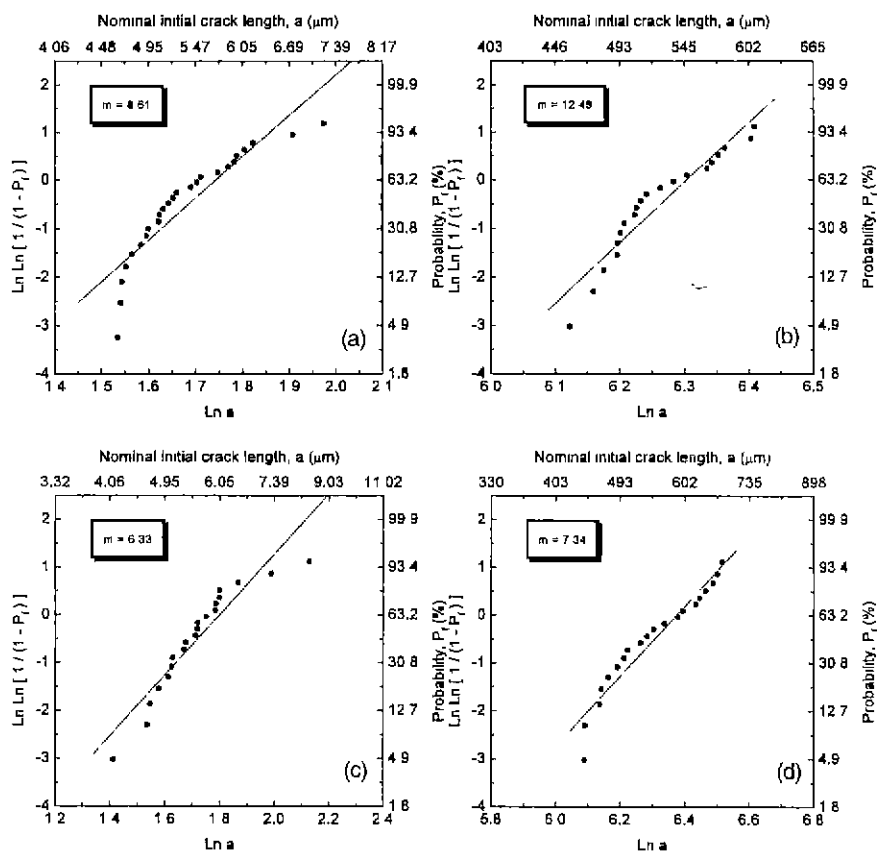
**Table 3.** Comparison of Three Distributions for Nominal Initial Crack Length (unit :  $\mu\text{m}$ )

Fatigue test		Static fatigue for unnotched specimens	Static fatigue for notched specimens	Cyclic fatigue for unnotched specimens	Cyclic fatigue for notched specimens
Normal distribution	$\mu$	5.41	526	6.06	482
	$\sigma$	0.67	44	1.18	94
	C.V.	12.3%	8.41%	19.5%	19.5%
Lognormal distribution	$\mu$	1.68	6.26	1.79	6.16
	$\sigma$	0.12	0.08	0.18	0.18
	C.V.	7.02%	1.33%	10.14%	2.94%
Weibull distribution	m	8.61	12.49	6.33	7.34

\* $\mu$  : mean,  $\sigma$  : standard deviation, C.V. : coefficient of variation, m : shape parameter

공칭 초기 균열 크기 데이터의 Weibull 분포는 Fig. 5(a)와 같았고, 형상매개변수는 8.61이었으며, 노치를

준 시험편의 정적 피로에서의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 Weibull 분포는 Fig. 5(b)와 같았고, 형상매개변수는



**Fig. 5.** Weibull plot of nominal initial crack length : (a) unnotched alumina specimens under the fixed static stress of 350 MPa for static fatigue, (b) notched alumina specimens under the fixed static stress of 80 MPa for static fatigue, (c) unnotched alumina specimens under the fixed equivalent static stress of 360 MPa for cyclic fatigue and (d) notched alumina specimens under the fixed equivalent static of 80 MPa for cyclic fatigue.

12.49이었다. 또, 노치를 주지 않은 시편의 반복 피로에서의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 Weibull 분포는 Fig. 5(c)와 같았고, 형상매개변수는 6.33이었으며, 노치를 준 시편의 반복 피로에서의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 Weibull 분포는 Fig. 5(d)와 같았고, 형상매개변수는 7.34이었다. Weibull 분포를 이용하여 공칭 초기 균열 크기 데이터를 분석한 경우, 정적 피로와 반복 피로 모두에서 노치를 주지 않은 시편의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 형상매개변수가 노치를 준 시편의 공칭 초기 균열 크기 데이터의 형상매개변수보다 크게 나타났으므로, 공칭 초기 균열 크기 데이터는 Weibull 분포를 잘 따른다고 할 수 있다. 정적 및 반복 피로에서의 공칭 초기 균열 크기에 대한 세 가지 분포 특성을 정리하여 Table 3에 나타내었다.

## 5. 결 론

알루미늄 시편에 대하여 정적 및 반복 피로 실험을 행하고 피로 수명 데이터 및 강도와 피로 수명 데이터의 큰 분산을 야기시키는 균열 크기 데이터의 통계적 분석 방법인 정규 분포, 대수 정규 분포 및 Weibull 분포에 대하여 고찰하였다. 그 결과, 피로 수명 데이터는 Weibull 분포를 잘 따랐고, 피로 수명 데이터로부터 얻은 공칭 초기 균열 크기 데이터는 대수 정규 분포와

Weibull 분포를 잘 따랐다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)대우엔지니어링이 연세대학교 공과대학에 기탁한 대학원 연구지원기금 연구비로 진행되었으며 이에 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

## REFERENCES

1. W. Weibull, Ing. Handl., Vol. 151, pp.15, Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, Stockholm, 1939.
2. John B. Kennedy and Adam M. Neville, Basic Statistical Methods for Engineers and Scientists, pp.204-209, Harper & Row, Publishers, New York, 1986.
3. Robert M. Bethea, Benjamin S. Duran and Thomas L. Boullion, Statistical Methods for Engineers and Scientists, pp.49-62, Marcel Dekker, Inc., New York, 1995.
4. Jaroslav Menk, Strength and Fracture of Glass and Ceramics, pp.198, Elsevier, Amsterdam, 1992.
5. Hong Lim Lee, Sung Eun Park and Bong Seok Hahn, "Modelling of cyclic fatigue stress for life prediction of structural ceramics," *J. Mater. Sci.*, **30**, 2521-2525 (1995).
6. 이창석, 통계학 연습, pp.61-62, 대은출판사, 1989.
7. Jaroslav Menčík, Strength and Fracture of Glass and Ceramics, pp.137, Elsevier, Amsterdam, 1992.