

71
118
=2

工學碩士學位論文

一定振幅荷重下の 確率論的
疲勞龜裂傳播舉動에 關한 研究



釜慶大學校大學院

機械工學科

鄭鉉澈

工學碩士 學位論文

一定振幅荷重下の 確率論的
疲勞龜裂傳播舉動에 관한 研究

指導教授 金善振

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2003年 2月

釜慶大學校 大學院

機械工學科

鄭鉉澈

鄭鉉澈의 工學碩士 學位論文을 認准함

2002年 12月 26日

主 審 工學博士 李 圭 用 

委 員 工學博士 金 亨 資 

委 員 工學博士 金 善 振 

목 차

Abstract	iii
Nomenclature	v
1. 서 론	1
2. 이론적 배경	4
2.1 선형과괴역학	4
2.2 피로균열전파의 특성	10
2.3 피로균열전파의 불확정성과 확률론적 취급	15
2.4 Scaling factor	23
2.5 신뢰성에 관한 확률분포	24
2.5.1 확률분포함수의 정의	24
2.5.2 정규분포	26
2.5.3 대수정규분포	28
2.5.4 Weibull 분포	29
3. 재료 및 실험방법	32
3.1 시험편 재료	32
3.2 실험방법	34
3.2.1 실험시스템	34
3.2.2 균열전파율과 응력확대계수범위의 결정	34
3.3 실험조건	36

4. 실험결과 및 고찰	37
4.1 피로균열전파곡선의 불확정성	37
4.2 피로균열전파수명의 확률분포	41
4.3 피로균열전파율의 확률분포 및 변동계수	45
4.4 Paris법칙의 C와 m의 확률분포 및 그 상관관계	51
5. 결 론	57
참고문헌	58

A Study on Probabilistic Fatigue Crack Growth Behavior under Constant-Amplitude Loads

Hyeon-Cheol Jeong

*Department of Mechanical Engineering
Graduate School
Pukyong National University*

ABSTRACT

Fatigue crack growth processes are usually dealt with as deterministic phenomenon, however, fatigue crack growth data, regardless of how carefully they are generated, show considerable scatter which depends on various uncontrolled factors, such as material properties and metallurgical structure, type of loading, environment and so on. Currently, this scatter of fatigue crack growth data is commonly regarded as an inherent feature of fatigue crack growth process.

Therefore, the assessment of the probabilistic fatigue crack growth behavior is very important for fatigue sensitive structures.

In this study, an analysis of fatigue crack growth behavior from a statistical point of view under constant amplitude loads has been carried out. Fatigue crack growth tests were conducted on sixteen pre-cracked compact tension (CT) specimens of the pressure vessel

(SPV50) steel in controlled identical load and environmental conditions. The assessment of the statistical distribution of fatigue crack growth experimental data obtained from SPV50 steel was studied and also the correlation of the parameter C and m in the Paris-Erdogan law was studied.

The results obtained are summarized as follows;

1. The probability distribution function of fatigue crack growth life seems to follow the 3-parameter Weibull and the coefficient of variation (COV) of fatigue crack growth life was observed to decrease as the crack grows.
2. The fatigue crack growth rate seems to follow the 3-parameter Weibull and the log-normal distribution.
3. Fatigue crack growth rate data shows a normal distribution for both m and $\log C$ and a strong negative linear correlation exists between the coefficient C and the exponent m in Paris model.

Nomenclature

a	:	Crack length
a_i	:	Final crack length
a_0	:	Initial crack length
a	:	Shape parameter of Weibull distribution
B	:	Specimen thickness
β	:	Scale parameter of Weibull distribution
C	:	Constant of Paris' law
COV	:	Coefficient of variation
da/dN	:	Fatigue crack growth rate
Δa	:	Crack length increment
ΔK	:	Stress intensity factor range
ΔK_N	:	Scaling factor
ΔK_P	:	Stress intensity factor range at pivot point
ΔK_{th}	:	Threshold stress intensity factor range
ΔP	:	Load range
$F(x)$:	Probability distribution function
$f(x)$:	Probability density function
v	:	Location parameter of Weibull distribution
Hz	:	Frequency
K	:	Stress intensity factor
K_C	:	Fracture toughness
K_{max}	:	Maximum Stress intensity factor
K_{min}	:	Minimum Stress intensity factor
m	:	Exponent of Paris' law
N	:	Number of cycle
P	:	Load
R	:	Stress ratio
W	:	Specimen width

1. 서론

선박 및 해양구조물 등과 같은 비교적 대형구조물의 경우 전체 피로수명에서 피로균열전파수명이 약 70% 이상의 비중을 차지하고 있기 때문에 피로균열전파거동에 관한 연구는 매우 중요하다. 그러나, 피로균열의 발생 및 전파 과정은 통상 결정론적인 현상으로 취급하여 왔으나, 현재에는 피로균열의 발생 및 전파과정이 본질적으로 확률적인 현상이라는 것으로 널리 인식하고 있다. 따라서, 피로파괴가 안전성, 신뢰성에 깊이 관여하고 있는 경우에는 부재 혹은 재료의 피로 특성의 확률분포 등과 같은 변동성을 고려할 수 있는 방법과 해석에 필요한 충분한 정보의 요구가 필요로 하게 된다.^(1, 19)

균열의 거동이나 균열체(crack body)의 강도를 역학적 측면에서 해석, 평가하기 위한 방법이 이른바 1950년대 이후 Irwin 등에 의해 발전하여 왔으나 이러한 학문과 기술의 발전에도 불구하고 기계구조물의 파괴사고는 일어났으며 앞으로도 발생할 것으로 예상된다.

과괴역학에 기초한 재료의 피로균열전파거동은 보통 양대수(bilogarithmic) 그래프에서 피로균열전파율 da/dN 과 응력확대계수범위 ΔK 와의 관계로 해석되어왔다. 1963년 Paris와 Erdogan은 다음과 같은 실험식을 최초로 제안하였다.⁽²⁾

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^4 \quad (1-1)$$

그 이후에 많은 연구자들은 ΔK 의 지수가 고정된 값을 가지지 않고, 2~9 정도의 값을 가진다는 것을 보였다. 따라서 피로균열전파율은 일반적으로 다음과 같이 표현되어 사용되고 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1-2)$$

여기서, 계수 C 와 지수 m 은 재료와 실험조건에 의존하는 파라미터이다. 일반적으로 이 식을 Paris 법칙, 혹은 Paris-Erdogan법칙이라 부른다. 이 식은 제2단계 피로균열전파 영역(stage II fatigue crack growth regime, power law regime)에서 가장 많이 사용되며, 응력 확대계수범위값이 증가하면 피로균열전파율이 선형적으로 증가하는 상관관계가 있다. 피로균열전파율의 변동성을 고찰하기 위해서는 이 식의 계수 C 와 지수 m 에 대한 변동성을 명확히 하는 문제로 귀결된다.

그러나 Paris-Erdogan법칙에 의해 정식화된 피로균열전파율에도 여러 가지 불확정성의 요인, 예를 들면, 외력, 온도, 재료의 불균질성, 혹은 부재의 크기 등의 영향이 있으므로, 확률적 변동을 한다고 하는 것은 일반적 사실이다.⁽³⁾ 많은 연구자들이 이들의 인자가 피로균열전파율에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서 실험 및 해석적 연구를 행하였다.^(4-10, 23, 24) 지금까지의 연구결과에 의하면, 그 취급 방법으로는 다음의 5가지를 들 수 있다.

- (1) C 와 m 모두 확정치로 취급한다.
- (2) m 은 확정치, C 만을 확률변수로 취급한다.
- (3) C 는 확정치, m 만을 확률변수로 취급한다.
- (4) m , C 모두 확률변수로 하고, 양자의 사이에는 상관이 없는 것으로 취급한다.
- (5) m , C 모두 확률변수로 하고, 양자의 사이에는 상관이 있는 것으로 취급한다.

이 중에서 어느 것이 타당한가에 대해서는 아직 불명확한 점이 많고, 또한 정확한 많은 실험 데이터의 축적이 필요하다. 그러나, 현재까지 이러한 문제에 대한 실험 데이터는 부족한 실정이며, 피로균열전파거동에 미치는 재료강도의 불확실성을 정량적으로 취급하기 위한 여러 가지 연구가 행하여지고 있다. 상기의 5가지 모델 중 주로 (1), (2), (4) 및 (5)의 경우가 주로 많이 논의되고 있지만, 현재 어느 것이 타당하다고 결론 내리기에는 아직 불명확한 점이 많다. 또한 많은 연구자들이 m 과 C 사이에는 다음과 같은 관계가 성립함을 보고하였다.^(11, 12)

$$m = a + b \log C$$

(1-3)

더욱, m 과 C 의 확률특성에 대해서는 동일 실험자가 동일한 실험조건에서 동일 재료의 다수의 시험편을 이용하여 통계적 데이터를 얻는 것이 바람직하다. 그리고 Paris 모델에 의한 신뢰성 있는 전파수명을 예측하기 위해서는 무엇보다도 C 와 m 의 확률특성은 물론 그 상관을 고찰할 필요가 있다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 피로균열전파거동의 변동성에 대한 예측과 분포특성을 명확하게 하기 위하여, 압력용기용 압연강재 SPV50 강의 CT시험편을 사용하여 동일 형상과 동일 균열길이에서 동일한 일정 응력진폭하중하에서의 피로균열전파시험 결과를 통하여 다음을 고찰하고자 하였다.

- (1) 피로균열전파곡선의 불확정성
- (2) 피로균열전파수명의 확률분포
- (3) 피로균열전파율의 확률분포 및 변동계수
- (4) Paris법칙의 계수 C 와 지수 m 의 확률분포 및 그 상관관계

2. 이론적 배경

2.1 선형파괴역학

구조물이나 기계의 설계 또는 사용에 있어서 강도상 안전한지를 추정하는 수단으로 종래는 재료역학이 중요한 역할을 하여 왔다. 그러나 재료역학적 방법에서는 응력집중계수나 노치 근방의 응력집중을 고려하고 있으나 예리한 균열상의 결함이 구조부재 또는 기계부품 속에서 발견되는 경우는 그 결함을 제거하는 방법, 또는 제거 할 수 없으면 결함발생 구조부재 또는 부품을 즉시 교환한다는 전제 하에 그 이상의 대책은 강구되지 않았다. 그러나 결함검사 기술의 진보에 따라 대형구조물 또는 기계류에서 많은 미소결함이 검출됨에 따라 이러한 미소결함에 대해서 그것을 포함하는 부재 또는 부품을 즉시 교환하는 일은 매우 비경제적이며, 또한 미소결함에서 즉시 부재전체의 파괴가 발생하는 것은 아니므로 불합리하기도 하다. 이것은 종래의 재료역학이 균열상의 결함에 대하여 아무런 고려를 해오지 않았기 때문에 생기는 문제들이다. 이러한 중요한 문제를 해결함에 있어 최근에 현저한 발전을 본 분야가 파괴역학이다. 즉, 파괴역학^{5,6)}은 균열상의 결함을 포함하는 구조물 또는 기계를 안전하게 사용하기 위한 방법이라 할 수 있다. 파괴역학은 균열을 포함하는 부재의 응력해석과 파괴인성 시험이라는 두 개의 기둥으로 성립되며, 따라서 기본적으로는 구조물의 응력해석과 재료시험 두 가지로 이루어지는 재료역학적 방법의 일부라고 할 수가 있다. 즉 재료역학에서는 구조물의 응력집중부 등에서 최대응력 σ_{max} 를 응력해석에 의해 구하며, 이것과 재료시험에서 얻어진 재료강도 파라미터로부터

$$\sigma_{max} \leq \sigma_y / S \quad (2-1)$$

가 되도록 설계를 한다. 여기에서 S 는 안전율(safety factor)이며, 외력을 추정할 때의 부정확성, 구조물의 모델화와 응력해석에 의해 생긴 오차 및 재료 자체의 강도의 분산 등을 고려하여 각각의 입장에서 경험적으로 정하고 있다. 균

열둘레의 탄성응력장은 일반적으로 σ_{max} 가 무한대로 되기 때문에 식 (2-1)을 그대로 적용할 수는 없다. 따라서 균열근방의 탄성응력장을 특정 짓는 파라메터 K 를 사용하여 식 (2-1) 대신에

$$K \leq K_c / S \quad (2-2)$$

에 의해 취성파괴(brittle fracture)를 방지하는 조건을 기술하려는 입장을 소위 선형파괴역학(linear elastic fracture mechanics)이라고 부르는 것이다. 여기서 파라메터 K 및 K_c 는 각각 응력확대계수(stress intensity factor) 및 파괴인성(fracture toughness)이라 부르고 있다.

균열선단 근방의 응력장은 기본적인 세 가지형으로 분류할 수 있다. 그 각각은 Fig. 2-1과 같은 세 가지 독립적인 방법으로 변형된다. 모드 I은 열림형(opening mode)으로 (x, y) 와 (y, z) 평면에 대하여 대칭성을 가지며 균열면이 서로 떨어지는 변형을 한다.

모드 II는 미끄럼형(sliding mode)으로 (x, z) 평면에 대하여 비대칭이나 (x, y) 평면에 대해서는 대칭성을 가지며 미끄러지는 변형이 일어난다. 모드 III은 찢음형(tearing mode)으로 (x, y) 평면과 (x, z) 평면에 대해서 비대칭성으로 균열면이 서로 z 에 평행하게 미끄러지는 변형을 한다.

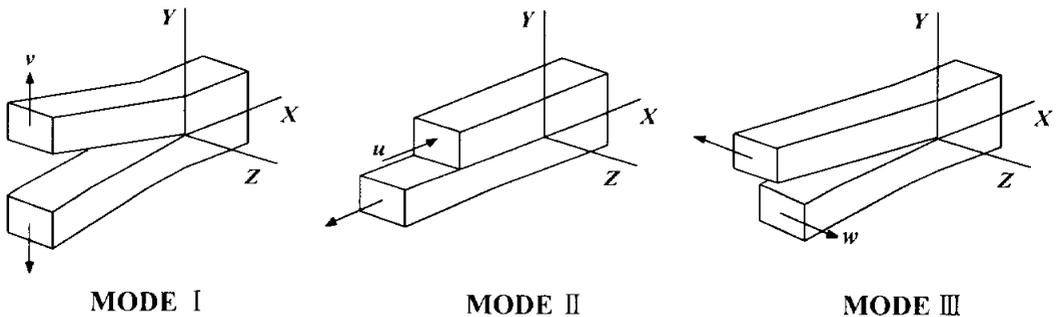


Fig. 2-1 The three modes of cracking

이러한 세 개의 기본적인 변형양식을 적당히 조합함으로써 균열선단 근방의 임의의 변위장을 기술할 수 있다.⁽²¹⁾ Fig. 2-2에 나타나듯이 균열선단에 직각좌표 (X, Y, Z) 또는 원주좌표 (r, θ, z) 를 생각할 때 좌표 (r, θ) 에 있어서 x, y, z 에 관한 응력성분 $\sigma_{ij}(i, j=x, y, z)$ 는 어느 균열의 변형양식에 대해서도 $r^{(n-1)/2}$ ($n=0, 1, 2, \dots$)의 무한급수로 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{ij} = (C_1/\sqrt{r})f_{ij}^{(1)} + (C_2/\sqrt{r})f_{ij}^{(2)} + (C_3/\sqrt{r})f_{ij}^{(3)} + \dots \quad (2-3)$$

C_1, C_2 는 균열의 변형양식, 균열재의 형상치수, 경계조건에 의해서 결정되는 것으로 r, θ 에는 관계가 없다. $f_{ij}^{(1)}(\theta), f_{ij}^{(2)}(\theta) \dots$ 는 θ 만의 함수이고, 균열의 변형양식 및 각 응력성분에 의해 결정되는 응력의 θ 방향 분포를 주는 고유함수이다. 지금 균열선단의 아주 가까운 곳의 응력을 생각하면 위의 식에서 r 를 θ 에 접근시켜감에 따라서 제1항이 제2항 이하에 비하여 아주 크게 되고, 제2항 이하의 상대적으로 무시될 수 있으므로 응력은 제1항만으로 근사시킬 수 있다. 즉

$$\sigma_{ij} = (C_1/\sqrt{r})f_{ij}^{(1)}(\theta) \quad (2-4)$$

이 제1항의 계수 C_1 에 $\sqrt{2\pi}$ 를 곱한 값 $(C_1\sqrt{2\pi})$ 을 K 로 나타내고 응력확대계수라고 부른다. K 를 사용하면 σ_{ij} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij} = (K/\sqrt{\pi r})f_{ij}^{(1)}(\theta) \quad (2-5)$$

위의 식에 의해 균열선단의 응력은 균열선단에서 무한대로 되는 특이 응력장이고, K 는 이 특이응력장의 강도를 나타내는 계수이다. $f_{ij}^{(1)}(\theta)$ 는 균열의 변형양식 또는 응력성분마다 정해진 계수로서, 균열선단 근방의 응력 절대값은 균

열재의 형상치수와 경계조건에 의해서 결정되는 응력확대계수 K 에 의해 완전히 결정된다. 즉 K 값이 같다고 하면 균열재의 형상치수, 경계조건이 달라도 균열선단 근방의 응력상태들은 일치한다.

응력확대계수 K 를 Fig. 2-1에 나타난 세 개의 기본적인 변형양식 각각에 대해 표현하면 다음과 같다. 모드 I 과 모드 II는 탄성론의 2차원 평면문제로서 해석 할 수가 있고 균열면에 관해서 각 대칭부분으로 해석할 수 있으며 균열면에 관해서 각 대칭부분으로 나누어진다. 모드 III은 순수전단 또는 비틀림 문제로 생각할 수가 있다. 좌표 및 응력성분에 관해 Fig. 2-2의 기호를 사용하면 응력과 변위는 아래와 같이 되고 있다. 다만 균열선단을 원점으로 하는 극좌표는 X - Y 면에 취하는 것으로 한다.

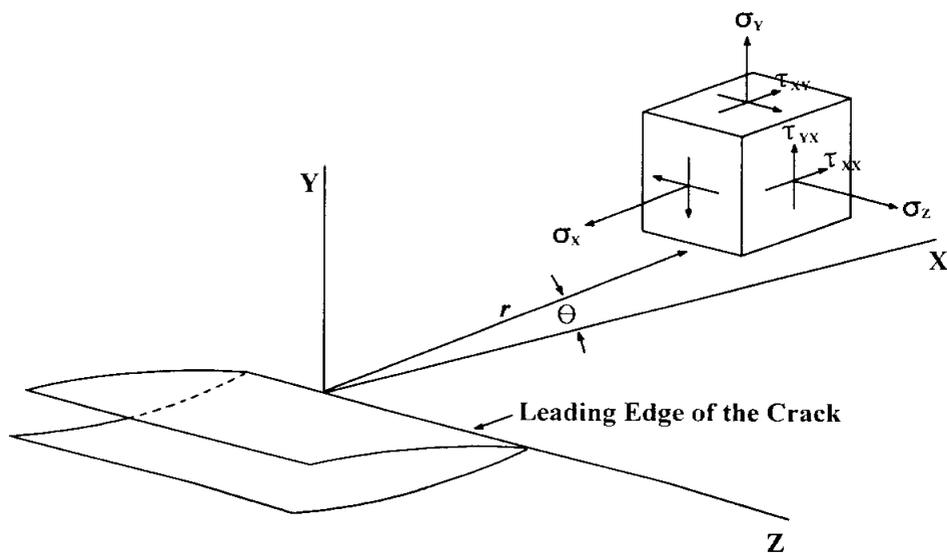


Fig. 2-2 Coordinate system and components ahead of a crack tip

모드 I

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{2\theta}{2}) \quad (2-6)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{2\theta}{2}) \quad (2-7)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\gamma}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2-8)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2-9)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2-10)$$

$$u = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}) \quad (2-11)$$

$$v = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} (2 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2}) \quad (2-12)$$

$$w = 0 \quad (2-13)$$

모드 II

$$\sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos \frac{\theta}{2} (2 - \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}) \quad (2-14)$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi\gamma}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2-15)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \quad (2-16)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2-17)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2-18)$$

$$u = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} (2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2}) \quad (2-19)$$

$$v = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} (-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}) \quad (2-20)$$

$$w = 0 \quad (2-21)$$

모드 III

$$\tau_{xx} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi\gamma}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2-22)$$

$$\tau_{yx} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (2-23)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0 \quad (2-24)$$

$$u = v = 0 \quad (2-25)$$

$$w = \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2-26)$$

여기서, ν 는 Poisson비이고, μ 는 전단계수이다.

식 (모드 I) ~ (모드 II)는 평면 변형률(plane strain)(즉 $w = 0$)인 경우지만 평면 응력(plane stress)의 경우에는 이러한 식에서 $\sigma_z = 0$ 으로 두고, 또 변위를 나타내는 식 중의 Poisson 비를 $\nu/(1+\nu)$ 로 바꾸어 놓음으로써 간단히 구할 수가 있다. 식 (모드 I) ~ (모드 III)은 r 에 관한 고차의 항을 무시함으로서 구해진다. 따라서 이러한 식은 r 가 균열 길이라든가, 리가먼트 길이 등 X - Y 면 내에서 이 물체에 관계한 치수에 비하여 충분히 작은 경우에 좋은 근사를 주는 것이 가능하다. 또 r 가 제로인 극한에서는 이것들은 엄밀해로 되고 있다.

이들 식 중의 파라미터 K_I , K_{II} , K_{III} 들은 각각의 형에 대한 변위장과 응력장에 대응하는 응력확대계수(stress intensity factor)라 부르고 있다. 이 응력확대계수는 좌표 r , θ 에는 의존하지 않는다. 따라서 각각의 변형양식에 대해서 응력장의 강도에는 영향을 주는데 분포의 형에는 영향을 주지 않는다는 점에 주의할 해두는 것이 중요하다. 식 (모드 I) ~ (모드 III)을 차원해석의 입장에서 바라보면 탄성체의 경우, 응력확대계수는 외력의 크기에 비례하고, 또 균열을 포함하는 물체의 형상에 의존하고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 물리적으로는 응력확대 계수는 물체 중에 균열을 도입함으로써 응력을 재분배, 특히 균열의 변형양식과 균열선단부를 통과하는 힘의 크기를 나타내는 파라미터라고 생각할 수가 있다.

이상과 같은 선형 탄성론에 의한 특이 응력장의 강도 K 를 기본으로 하는 역

학체계를 선형파괴역학이라 한다.

2.2 피로균열전파의 특성

금속재료는 반복하중을 받으면 피로손상이 생기고 저응력에서도 파단에 이르는 것이 잘 알려져 있는데 이 피로과정의 오랜 연구에서 피로과정 대부분은 피로균열의 발생, 성장에 소비되는 것으로 인식되어 이 피로균열의 전파에 착안한 파괴역학적 방법이 유력한 정량적 평가 방법으로서 주목되어 활발한 연구가 진행되고 있다.⁽²²⁾ 평활재의 피로과정을 대략적으로 Fig. 2-3과 같이 되고 평활 표면에서 전단형의 균열 내지 미끄럼이 수명초기에 발생하여 마침내 기구형의 안전성장으로 이행하여 스트라이에이션(striation)을 형성하면서 성장 후 취성 내지 연성과괴를 교차시키면서 급속 파단에 이른다. 파괴역학에서는 이 제2단계의 스트라이에이션을 수반하는 피로균열의 전파과정을 대상으로 하여 그 전파율 da/dN 을 파괴역학 파라미터로 특성 짓는다. 이 균열에 대하여 소규모 항복조건이 만족되면 그 성장속도는 ΔK 로 특성 짓게 되는 것을 알 수 있다.

이 전파특성은 3영역으로 나뉜다. ΔK 가 작은 영역에서는 그 이하에서 균열이 성장하지 않는 하한계 ΔK_{th} 가 존재하고 그 근방에서의 균열성장 속도는 급속히 감소한다. 이 영역에서는 재료, 환경, 응력비의 영향이 현저하게 된다. 이 영역에서는 로그 좌표 그림 상에서 직선적으로 변하고 통상 다음의 Paris-Erdogan법칙으로 나타낸다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2-27)$$

이 법칙의 제2단계 영역에서는 비교적 각종인자의 영향이 적고, C 와 m 은 재료 상수로 간주할 수 있다. 단, C 와 m 은 독립이 아니라 어떤 종류의 상관관계가 있으며 또 취성재료일수록 m 은 크고, 연성이 크게 되면 $m=2$ 에 가깝

게 되는 경향이 있다. 또한, K 가 큰 영역에서는 이 직선 관계에서 이탈하며 급속한 성장이 나타난다. 이 영역에서는 취성과파괴 내지 연성과파괴가 혼재하며 그 성장특성이나 급속파단 조건은 파괴인성과 마찬가지로 시험편 형상 및 치수의 영향을 받으므로 주의가 필요하다.

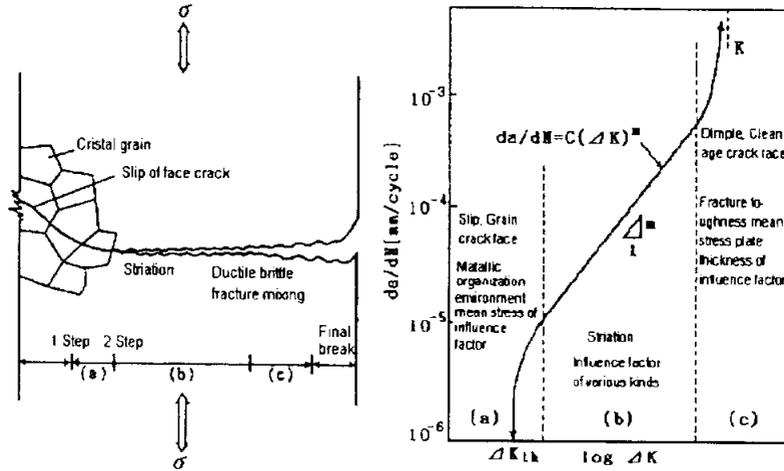


Fig. 2-3 Fatigue fracture process in plate specimen or growth rate characteristic and effective factor

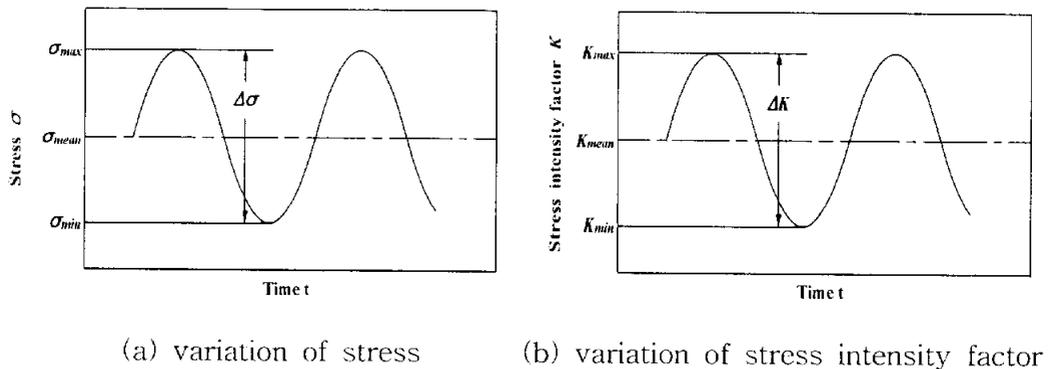


Fig. 2-4 Time variation of stress intensity factor and stress

Fig. 2.4와 같이 하중 또는 응력이 시간에 대하여 변화하면, K 도 시간에 대하여 변화하는데 K 의 변동범위인 ΔK 뿐만 아니라 그 평균치도 피로에 당연히 영향을 미친다. 그 대표량으로 다음과 같은 응력비 R 을 사용한다.

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (2-28)$$

따라서 식 (2-28)을 일반화하면 ΔK 와 R 의 함수로서

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (2-29)$$

으로 나타낼 수 있다. 또한, 실온의 피로에서는 과형이나 주파수에 그다지 의존하지 않는다는 것이 알려져 있다. R 의 함수로서의 전파법칙으로 다음 Walker의 식이 간편성 때문에 잘 사용된다.

$$\frac{da}{dN} = C\{K_{\max}(1-R)^n\}^m = C\{\Delta K(1-R)^{n-1}\}^m \quad (2-30)$$

여기서 n 은 0.3~0.7정도의 값이 되고, 주로 강재의 피로균열 성장특성에 적용되고 있다. 피로균열의 진전은 제 I 단계와 제 II 단계로 구별된다. 앞에서 설명했듯이, 소규모 항복조건하에 균열전단의 소성변형은 선형파괴역학 파라미터의 하나인 응력확대계수(stress intensity factor) K 로 규정된다. 따라서, 비교적 소규모 항복조건을 만족하기 쉬운 제 II 단계 균열의 진전속도 da/dN 은 K 의 함수로 표시될 수 있다. 지금 반복응력의 최대값, 최소값을 σ_{\max} , σ_{\min} 으로 할 때, L 의 최대값 K_{\max} 와 최소값 K_{\min} 은 아래의 식으로 나타낸다.

$$K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (2-31)$$

$$K_{\min} = \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (2-32)$$

여기서, a 는 균열길이, F 는 시험편과 균열의 형상, 치수, 부하방법 등에 의한 K 의 보정계수이다. 따라서, K 의 변동범위 ΔK (stress intensity factor range)는

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (2-33)$$

로 된다. 여기서, $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 이다.

Paris 와 Erdogan은 ΔK 에 의해 da/dN 가 아래의 함수로 표시될 수 있음을 식 (2-27)에 밝혔다.⁽²⁾

이 식을 일반적으로 Paris-Erdogan 법칙 또는 Paris법칙이라 부른다. 여기서, C 와 m 은 재료상수이다. 알루미늄 합금에서의 실험결과를 정리해 보면 $m = 4$ 이며, 그러나 그 후 m 은 대개 2~9의 범위를 가지는 결과를 보이고 있다. 그 후에 실시된 많은 실험에서 식 (2-27)은 특정의 범위에서만 성립되고 $da/dN \sim \Delta K$ 관계도 Fig. 2-5와 같이 3개의 영역으로 나타나는 것으로 밝혀져 있다. Fig. 2-5의 좌측의 제Ⅱa 단계에서는 ΔK 의 감소와 함께 da/dN 은 급격히 감소하고 균열의 진전이 사실상 없는 것으로 인정되는 ΔK 의 감소와 함께 da/dN 은 급격히 감소하고 균열의 진전이 사실상 없는 것으로 인정되는 ΔK 에 이른다. 이 ΔK 를 하한계 응력확대계수범위(threshold stress intensity range) ΔK_{th} 라 부른다. 우측의 제Ⅱc 단계에서는 ΔK 의 증가에 따라서 da/dN 은 급속히 증가하고, K_{\max} 가 파괴인성 K_C 에 이르면 불안정 파괴한다. 이 K_C 는 일반적으로 정적인 파괴인성보다 낮고 피로파괴 인성(fatigue fracture toughness) K_{fc} 라 부르는 경우도 있다. 양측을 제외한 중간의 제Ⅱb 단계에서는 균열은 안전하게 진전하고, Paris법칙인 식 (2-27)이 잘 성립한다. 다음에 제Ⅱa~제Ⅱc 단계의 균열진전속도에 영향을 주는 인자와 특징을 간단히 정리해서 나타낸다.

제Ⅱa 단계 : 미시조직, 평균응력(응력비), 환경의 영향이 크다. 시험편 치수의 영향은 없다. 표면에는 미시조직에 대응하는 흔적이 보이고 불연속인 진전을 하고 있다고 생각된다. 균열단합이 현저하게 생기는 수가 많다.

제 II b 단계 : 미시조직, 평균응력(응력비), 시험편의 치수의 영향은 적고 거의 영률에 의존하고 있다. 파면은 스트라이에이션이 주이고, 이 간격에 대응하는 연속진전을 하고 있으며, 균열닫힘이 일어나는 수가 많다.

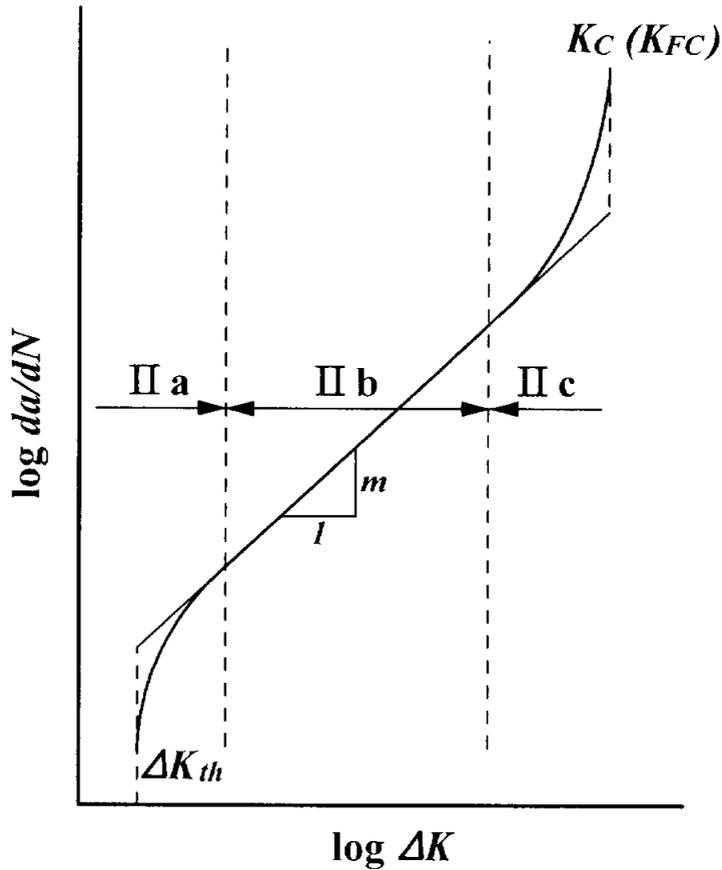


Fig. 2 5 Between factor crack growth rate and stress intensity factor range

제 II c 단계 : 미시조직, 평균응력(응력비), 시험편의 치수의 영향이 크나 환경의 영향은 적다. 파면에는 덩플, 벽개, 입계 등 정적파괴가 접하는 비율이 50% 이상이 되고 진전속도는 점차로 ΔK 에서 K_{max} 에 지배된다. 균열닫힘은 보이지 않는다.

이와 같이 각 단계에 미치는 영향인자가 다른 것을 알 수 있다. 일례로서, 미시조직 및 응력의 영향, 응력비(stress ratio or load ratio) R 로 나타낸다.

$\sigma_{min} < 0$, 즉 < 0 의 경우에는 $\Delta K = K_{max}$ 가 일반적으로 사용되지만, 압축 측도 포함한 전 응력범위에 대해 식 (2-6)과 같은 형식으로 구한 ΔK 가 사용될 수도 있으므로 주의를 요한다. 미시조직과 응력비는 저 및 고 ΔK 영역, 즉 제 IIa 단계와 제 IIc단계의 균열 진전에 크게 영향을 주고, 중간 단계인 제 IIb단계에서는 영향이 적다는 것이 알려져 있다.

2.3 피로균열전파의 불확정성과 확률론적 취급

피로균열전파의 안정성장에 있어서 선형과피역학에 기초를 둔 균열전파의 예측식으로는 Paris-Erdogan 식이 많이 이용되고 있다. 그렇지만 이것은 어디까지나 평균적 거동만을 기술한 것이다. 일반적으로 균열전파에는 여러 가지 불확정요인이 존재한다. 즉 균열전파의 내적 요인으로는 초기 결함의 종류, 크기의 불확정성, 그리고 재료의 불균질성(inhomogeneous)에 기인한 재료의 균열전파 저항의 불규칙성을 들 수 있고, 외적 요인으로는 부재에 가해진 하중의 불규칙 변동에 따른 응력 진폭의 불규칙성이 중요한 요인이다¹⁾.

일정진폭하중에 있어서 피로균열전파에 대한 연구결과는 많다. 예를 들면 Fig. 2 6은 Virkler 등⁽²³⁾이 알루미늄 합금 2024-T3 68의 중앙균열전파 시험편에 대해서 실시한 피로시험의 결과이다. 각 시험편의 초기 균열길이는 9mm이며 그림에서 보는 것과 같이 균열전파에는 뚜렷하게 변동성이 있다.

이러한 변동성은 시험편의 형상이나 하중과 같은 양의 변동성에 의한 것이 아니라 생각된다. 피로균열전파의 미시적 과정이 본질적으로 확률적 특성을 가지는 것이라 할 수 있다. 따라서 Paris-Edogan 식을 확정치로 간주하는 것은 무리가 있고, 또 외력이 불규칙적으로 되면 더욱 더 확정적인 수명예측은 불가능할 것이다.

또 Ortiz 등⁽²⁴⁾은 재료의 불균질성에 따라 피로균열전파의 영향을 확률론적

과정에 따라 해석하고 있다. 여기에서도 알 수 있는 것처럼 피로균열전파는 확률론적 특성을 가지고 있는 것이다. 그러므로 균열이 있는 위험한 길이까지의 균열전파에 필요로 하는 하중의 반복수 즉, 피로전파수명도 확률분포를 하는 것이다.

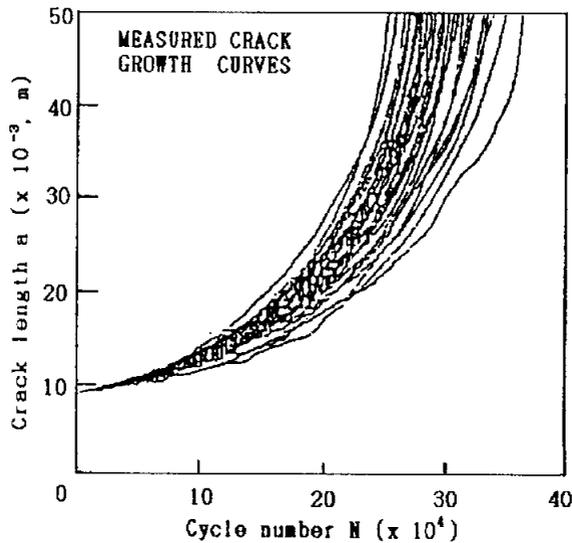


Fig. 2-6 $a \sim N$ Curve

피로균열전파 현상의 본질은 하중 반복수에 두고 비가역적 사상이 누적되었고, 균열전파의 확률과정을 생각할 경우는 절대 시간 대신에 이것을 반복한 수로 옮겨 놓는 방법이 균열전파율을 표현하는데 직접적이고, 실험사실에도 적합하다. 즉, 시간을 대신하는 반복수에 대응하는 확률과정이라고 생각하는 것이 타당할 것이다. 한편, 피로균열전파의 영역에 있어서, 균열전파과정은 시간뿐만 아니라 기하학적 형상 등의 여러 가지 파라미터의 영향을 받는다. 예를 들면, 모든 균열변위의 측정법과 방향, 결정립 방향, 측정법 등은 그 영역에 있어서 국부적 응력집중 등에 큰 영향을 가지고 있기 때문이다. 그리고 이들 파라미터는 결국 확률변수이기 때문에 균열전파 과정은 이러한 의미에서도 확률과정으로 취급하기 때문이다. 즉 재료가 불균질이고, 피로균열전파율은 그 공간위치에 의해서도 다르다. 따라서 재질의 공간 위치에 대해서는 확률변수이고, 피로균열

전과과정은 공간적 확률과정으로 생각할 수도 있다. 따라서 피로균열전파수명의 확률분포를 추정하기 위해서라면 재질의 공간적 분포를 고찰하는 것이 중요한 것이라고 생각할 수 있다.

이들의 요청에 부응하기 위해서 파괴역학을 기초로 균열재의 건전성을 확률론적으로 평가하는 학문 및 균열전파 과정을 확률과정론적으로 해석하는 것은 구조신뢰성 공학의 중요한 분야로 되어 있다.

피로균열전파거동은 피로균열 전파수명의 확률분포, 혹은 균열전파에 대하여 재료특성의 확률론적 취급에 관한 연구는 활발히 행하여지고 있다. 이들의 연구는, (a) 선형파괴역학에 기초를 두고 Paris-Edogan의 균열전파 법칙에서의 파라미터 C , m 의 정수를 확률변수화하여 취급하는 것과, (b) 균열전파과정의 진행과정을 마르코프 과정, 그 밖의 이론을 이용한 피로균열전파의 확률론적 모델로 취급하는 것 2개로 크게 분류할 수 있다. 다음에, 이들 연구를 간단히 살펴보면, 다음과 같다.⁽²⁵⁾

(a)는 균열전파 중에 나타난 파라미터를 모두 확률변수화하는 것으로 하고 현재에도 넓게 받아 들여 지고 있다. 피로균열전파율의 분포를 수식화하는 방법으로는 선형파괴역학에 기초를 두었던 Paris-Edogan법칙에 포함되어 있는 파라미터 C 또는 m 을 확률변수로 취급하는 방법을 말한다. 그 경우 확률변수화의 방법에 대해서 다음의 3가지로 크게 분류할 수 있다. 즉 1) 파라미터로 시험편강의 분포를 확률변수화하는 방법, 2) 파라미터로 시험편내의 공간적 분포를 확률변수화하는 방법, 3) 파라미터로 동일 시험편내에서 공간적 분포와 동시에 시험편 사이의 분포를 확률변수화하는 방법 등의 3가지가 있다.

酒井 등⁽⁴⁾은 공업용 순수 알루미늄에 대해서 12개의 시험편을 이용하여 인장하중 하에서 ΔK 의 확률과정을 비교하면 C 는 대수정규분포에 대부분 따르고, m 과 C 사이에는 $\log C = a - \beta m$ ($\beta > 0$)의 관계가 성립되는 것을 보고하였다. 市川 등⁽⁶⁾은 2024-T3 알루미늄에 대해서 동일 조건하에서 30개의 시험편을 사용하여 인장피로시험을 실시하고 피로균열 전파속도를 측정하였다. Fig. 2-8은 Fig. 2-7의 $a \sim N$ 곡선으로부터 ΔK 과 응력확대계수 ΔK 의 관계를 양대수 도표로 나타낸 것이다. 동일한 ΔK 에 대해서는 ΔK 가 상당한 분산을

가지고 있는 것을 알 수 있다. 그림에서 시험편내의 것에 $\Delta K = \Delta K^m$ 에 있어서는 m , C 의 확률특성을 비교한 결과 m 은 정규분포에 따르고, C 는 대수정규분포에 따른다는 것을 알 수 있으며, m 과 $\log C$ 사이에는 그림과 같이 많은 상관관계가 존재하는 것을 나타낸다. 지금 $C = C_0 / (K_0)^m$ 을 식 (2-27)에 대입하면

$$\frac{da}{dN} = C_0 \left(\frac{\Delta K}{K_0} \right)^m \quad (2-34)$$

이 된다. 여기서 K_0 은 ΔK 와 동일차원의 량이다. 이렇게 하면 $\log C = \log C_0 - m \log K_0$ 로 되고 나서, 식 (2-34)에서 m 을 정규 확률변수로써 다루면 위의 경향은 설명된다.

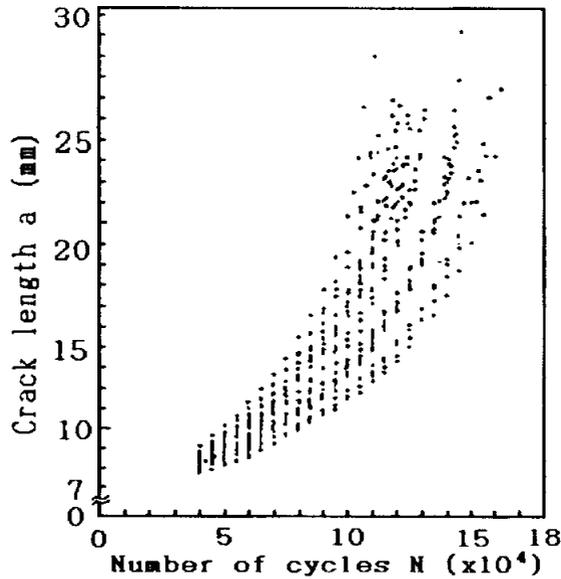


Fig. 2-7 $a \sim N$ Curve

石井 등은 저탄소강(S15C), 스테인레스강(SUS304), 무탄소강(99.99% OFHC 강, CU)의 3종류의 재료를 이용한 연구결과에 따라 m 과 $\log C$ 는 정규분포에 따르고 이들 사이에 음의 상관관계의 경향을 나타내었다고 보고하였다. 板垣

등은 피로균열전파특성에 대한 데이터를 수집하고 전파율의 분포를 C 의 분포로 취급하는 방법을 나타내었다.

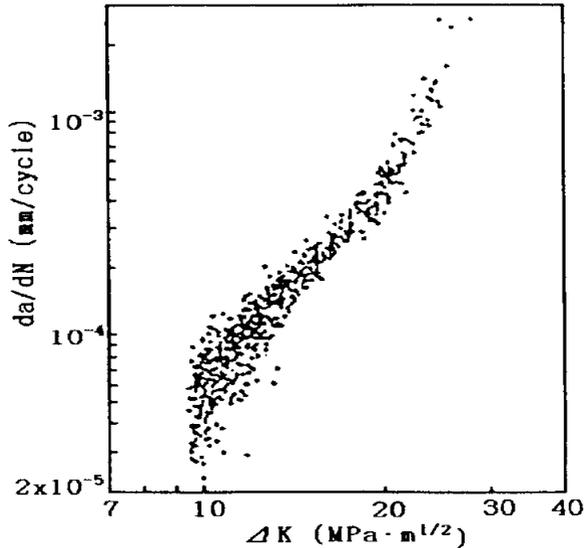


Fig. 2-8 Relation between ΔK and ΔK

특히, 市川 등⁽⁶⁾은 피로균열전파율의 확률특성을 신뢰성 해석에 기초한 방법으로 $da/dN = C(\Delta K)^m = C_0(\Delta K/K_0)^m$ 에 있어서 파라미터의 확률변수화를 실험과 시뮬레이션에 의해 검토하고 균열전파 수명의 분포특성을 해석하여 m 과 $\log C$ 를 서로 독립된 정규 확률변수라고 말하는 결과가 실험의 경향에 최근에 잘 맞는 것으로 밝혀졌다.

그런데 2)에서는 파라미터의 값은 동일 시험편에서도 장소에 따라 미시적인 공간적 변동을 가진다고 하는 모델이다. 이러한 관점에서의 취급으로는 식 (2-34)에 있어서, C_0 만을 공간적 확률변수로 하고, m 은 일정치로 하는 방법을 생각할 수 있다. 市川 등은 이 방법에 의해 균열전파수명의 분포특성이 실험적 경향을 설명할 수 있다는 것을 확인하고, 균열전파 수명의 분포특성의 간단한 해석법을 제안했다. 이 경우 파라미터의 공간적 변동의 상관에 착안하는

연구가 많다. 왜냐하면 이것은 각 반복수의 전과율과 ΔK 의 변동 사이에 상관이 있다고 예상되기 때문이다. 板垣 등은 먼저 전자현미경을 이용해 파면의 스트라이에이션을 관찰하고, 균열전파에 대한 재료 저항의 공간적 상관을 고찰하고, Shinozuka 등이 제안한 가우스 확률과정의 시뮬레이션 방법을 이용 피로수명을 추정하는 방법을 제안하고 있다. 이와 같은 공간적 상관을 고려한 모델로 균열전파수명의 분포특성을 해석하고 있는 연구도 있다.

3)에서는 파라미터 값은 시험편내에서 공간적으로 변동하는 동시에, 그 평균치는 시험편에 따라 다르다고 하는 모델이다. 市川 등⁽⁷⁾은 식 (2-27)에서 C 의 변동은 시험편내에 변동과 시험편간 변동의 2개의 성분으로 구성되어 있다고 하는 모델을 제안한 동시에 이 모델로 기초로 해석한 결과는 1)과 2)의 모델보다 실험과의 일치가 잘 된다는 것을 주장하였다. 또, 그들은 고장력강 HT60의 시험편을 이용하여 응력비 0.2, ΔK 일정 시험을 행하여 피로균열전과율의 시험편내 변동과 시험편간 변동을 분리하는 것을 시도하여 얻어진 ΔK 의 분포를 대수정규분포지에 나타내고 있다. $\log da/dN$ 의 시험편간 분산과 시험편내 분산을 분리한 것으로 양자의 크기는 같았다. 또, 수천 주파수의 간격으로 균열 길이로 측정하고 ΔK 을 구하는 피로균열전과율에는 시험편내 변동과 시험편간 변동의 양방을 같은 정도에 존재하는 것으로 지적하고 있다.

(b)는 Bogdanoff 및 Kozin & Bogdanoff 에 의해서 제안된, 상태와 시간을 서로 이산화 한 취급모델이었고 많은 연구가 되고 있다. Bogdanoff, Kozin 등은 피로균열전파를 일종의 마르코프 과정이라고 생각, 균열의 기초 분포를 주고 마르코프 연쇄(추리확률행렬을 갖는 불연속 마르코프 과정)의 이론을 이용하고, 임의의 시간에서 균열길이의 평균치, 분산 및 분포를 정한 균열길이에 이론 반복수(균열전과수명)의 평균치 및 분포를 구한다. 市川 등은 이것을 참고로 해서 같은 형태의 연구를 하고 있다. 피로균열전파의 과정을 마르코프 연쇄에 대한 추리확률행렬의 요소 p 및 q 의 비고 $r = p / q$ 를 일정 과정이라 하고 마르코프 연쇄의 피로균열전과 응용의 가능성을 제시했다. Lin, Yang 등도 균열측정의 시간 의존성에 대해서는 마르코프의 이론을 이용, 균열 전과율에 대해서는 랜덤 프로세스 개수를 도입하는 것보다, 피로균열전과에서 불확정성을

해석하기 위한 확률론적 모델을 제안했다. 이 모델에 의한 예제를 다른 실험결과와 비교하고, 마르코프 과정에 의한 방법에 의하면 음의 균열전파율을 얻는다고 하는 오차가 생기지만, 이것에 대한 전파율의 편차는 확산경향을 지배하는 경우에는 이 오차는 무시할 수 있다는 것을 나타내었다. 또 그들은 파괴역학과 확률과정의 개념에 기초해서 피로균열전파를 해석하는 새로운 수학적 이론을 제안했다. 그 중에서도 시간에 의존하는 균열 치수의 확률분포와 초기 균열 치수를 안다고 하는 조건을 기초로 소정의 균열길이에 달하는 시간 확률분포에 대한 해석적 표현을 하였다.

Sobczyk⁽³⁾는 실험 데이터를 랜덤화하는 Bogdanoff 의 취약점을 수용하여, 확률미분방정식 모델을 제안했다. 그들은 확률미분방정식의 해가 Fokker-Plank 방정식을 만족하는 것을 보였다. 또, Tang 등은 균열진전 중에 나타나는 파라미터에 시간적 변동을 넣고 그것을 확률미분방정식으로 해석하고 있다. 그러나 균열진전은 유한시간 후에 균열길이가 무한대에 달하는 특이성을 가지고 있고, 이것으로 인해 수학적으로 해석되지 않음을 지적하고 있다. Bogdanoff-Kozin 모델과 같은 대표적 모델로 Tsurui & Ishikawa 모델이 있다. 균열전파 과정은 마르코프 과정만이 아니고 외부하중 진전 저항 등은 상관이 있는 확률과정이라고 간주할 수는 없지만, 상관시간에 비하여 충분히 긴 시간 간격에 대한 분포가 변화한다는 것에 주목하면 마르코프에 가까운 수법을 이용하고 균열 분포형의 변화 및 수명 분포 등을 논하려고 하는 것이다. 이 모델은 마르코프 근사에 있어서는 사점을 도입하고 광의의 Fokker-Plank 방정식의 해를 쉽게 구할 수 있다는 것이 큰 특징이다.

실제로 피로균열전파 과정의 확률특성을 조사한 연구는 많이 있지만, 이들을 개관하면 Ortiz 등은 피로균열 전파에 대한 재료저항을 공간확률사상으로서 취급하는 확률모델을 제안했다. 피로에 대한 파괴역학적인 접근은 피로균열전파율을 ΔK 와의 확률함수로 취급, 이 모델의 파라미터는 시계열 해석에서 얻을 수 있다. 이 해석은 피로균열전파율의 인접한 측정치에 대한 통계적 상관을 설명하려고 하는 것이다. 즉, 수명의 평균과 분산을 잘 예측하는 것이 가능한 이 모델에 의해 중간 ΔK 영역에서 관찰된 증정도의 변동, 특히 짧은 균열성장을

거론하는 것이 가능하다고 생각할 수 있다. 또 板垣 등은 피로균열전파저항의 불규칙성을 응력확대계수 제어실험에 의해 조사하여 소수의 실험과 시뮬레이션에 의해 전파수명의 확률분포함수를 추정하는 방법을 제안하고 있다. 그 외의 연구자들도 동일한 방법으로 재료를 피로균열전파에 있어서 재료 저항의 불균질성에 의해 피로균열전파 속도의 변동이 존재할 것이라고 생각하여, 이 경우 무차원의 공간적인 확률과정을 도입함에 따라 피로균열전파법칙을 랜덤화하는 확률모델을 제안하고 있다. 이 모델의 모식도를 Fig. 2-9에 나타냈다.

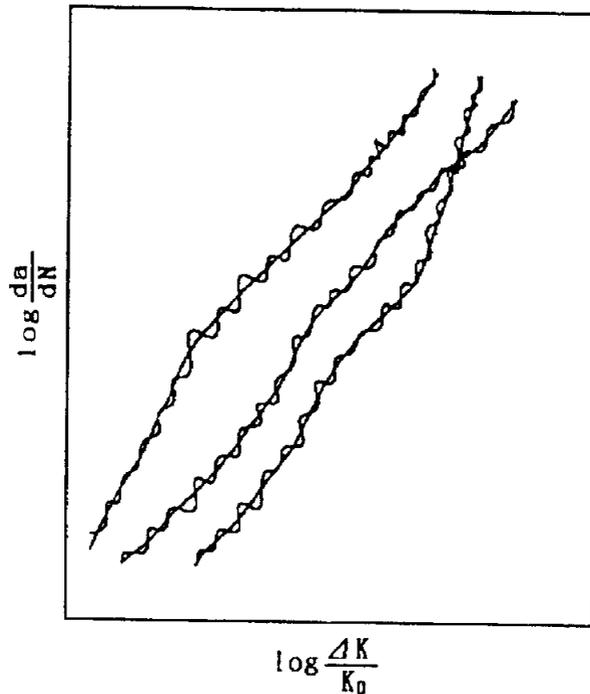


Fig. 2-9 Relation between $\log \Delta K/K_0$ and $\log \Delta K$

2.4 Scaling factor⁽¹⁶⁾

Paris 법칙의 C 의 차원은 m 의 값에 의존하므로 Paris식은 차원적으로 맞지 않다는 것은 널리 알려져 있다. Paris 식은 ΔK 를 어떠한 normalization factor (또는 scaling factor) ΔK_n 으로 나누어주면 차원적으로 올바른 형태로 바꿀 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C_n \left(\frac{\Delta K}{\Delta K_n} \right)^m \quad (2-35)$$

$$C_n = C \Delta K_n^m \quad (2-36)$$

C_n 의 차원은 m 값에 독립적인 균열전파율이다. 아직까지는 이러한 방법으로 해결되지 않고, 단지 식(2)의 ΔK 의 차원과 동일한 ΔK_n 의 값을 변화시킴으로써 C_n 과 m 사이의 상관관계계수 r 은 $-1 \sim 1$ 사이의 값으로 가정할 수 있고, 이것은 실험결과에 의해 증명할 수 있다. 특히, $r=0$ 일 때의 ΔK_n 값은 항상 존재한다. 이러한 방법은 직접적으로 영향을 주는 인자 C 와 단지 m 에 영향을 주는 인자 C 를 구분하기 위해 C_n 과 m 의 상관관계수가 0이 되는 ΔK_n 을 선택한다.

ΔK 가 주어지고 이를 다음식

$$\Delta K_0 = 10 \frac{\sum_i (m_i - \bar{m})(\log C_i / \log C_0)}{\sum_i (m_i - \bar{m})^2} \quad (2-37)$$

에 따른 ΔK_0 로 나누고 나면 C_0 와 m 파라미터의 결과치는 통계적으로 독립적 ($r=0$)이다.

$$\frac{da}{dN} = C_0 \left(\frac{\Delta K}{\Delta K_0} \right)^m \quad (2-38)$$

$$C_0 = C \Delta K_0^m \quad (2-39)$$

식(2-38)에서 ΔK 를 ΔK_0 로 나누는 것은 ΔK_0 를 ΔK 의 단위에 따라 선택하거나, 기하학적 관점에서, da/dN 의 log-log 대 $\Delta K=1MPa\sqrt{m}$ 부터 $\Delta K=\Delta K_0$ 까지의 범위를 가지는 ΔK 와의 그림의 수직축을 대신하는 것이다.

식(2-35)의 ΔK 를 식(2-36)의 ΔK_n 으로 나누고 나면 새로운 지수법칙계수 C_n , $\log(C_n)$ 과 m 의 상관계수를 결정하는 것은 선택되어진 ΔK 의 함수에 의해 계산될 수 있다. 상관계수의 일반적인 수학적 해답은 어떠한 값도 -1보다 크고 1보다 작다고 예상된다.

특별히 $\Delta K_n=1MPa\sqrt{m}$ 에서 r 의 값은 원래의 $\log C$ 와 m 의 상관관계값과 동일하다. 0의 함수 $r(\Delta K_n)=0$ 는 $\Delta K_n=\Delta K_0$ 일 때 일어난다. 상관관계는 ΔK_n 이 ΔK_0 로부터 멀어질 때 커진다. 그러나 어떠한 물리적으로 의미있는 무차원적인량은 반드시 선택된 scaling factor(또는 ΔK 의 측정단위와 동일하게)에 의존해서 안된다.

따라서, 상관계수의 크기는 합금 set의 물리적 성질이라 할 수 없고, 이것은 “형식적” 또는 “대수적”인 것이다. $\log C$ 와 m 간의 상관관계의 높은 값은 Paris 식의 두 대수구조의 결과이고, $\Delta K(1MPa\sqrt{m})$ 의 측정단위에 대한 것은 ΔK_0 로부터 떨어져있다.

2.5 신뢰성에 관한 확률분포

2.5.1 확률분포함수의 정의

주사위 게임과 동전을 던지는 것과 같은 실험에 의하여 우연의 결과로 얻어지는 값을 확률변수(random variable)라 한다. 확률변수 X 가 어떤 분포에 따르고 있는가는 분포함수에 의하여 결정된다. 확률분포함수 $F(x)$ 는 확률변수 X 가 어떤 값 x 이하의 값을 취하는 확률로 정의된다. 즉, 다음과 같이 나타낸다.

$$F(x) = \Pr[X \leq x] \quad (2-40)$$

여기서, $\Pr[\cdot]$ 는 괄호내의 사상이 일어날 확률을 의미한다. $F(x)$ 는 x 의 증가와 더불어 0에서 1까지 단조 증가하는 함수이다. X 가 a 에서 b 사이의 값을 취할 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$\Pr[a < X \leq b] = F(b) - F(a) \quad (2-41)$$

확률변수 X 가 연속변수의 경우의 분포에서는 그 확률밀도함수가 다음과 같이 정의된다.

$$f(x) = \frac{dF}{dx} \quad (2-42)$$

$f(x)$ 를 간단히 밀도함수라고도 한다. 정의에서도 알 수 있듯이 다음 식으로 나타낼수 있다

$$\int_0^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (2-43)$$

확률분포의 대표치로서는 평균치(mean value), 중앙치(median), 최빈치(mode)가 자주 이용된다.

평균치는 다음 식으로 정의된다.

$$\mu = \int_0^{\infty} xf(x)dx \quad (2-44)$$

중앙치 \tilde{x} 는 $F(x) = 0.5$ 의 점을 만족하는 값이다.

최빈치는 곡선 $f(x)$ 가 극대로 되는 x 이고, 다음 식으로 구하여진다.

$$\frac{df}{dx} = 0 \quad (2-45)$$

신뢰성공학에서는 MTBF(mean time between failure)이라는 말이 자주 사용된다. 이것은 고장이 발생하면 수리를 행하여 다시 사용하는 제품의 경우에 이용된다. 이것과 유사한 것으로 MTTF(mean time to failure)라는 것이 있다. 이것은 고장이 일어나면 수리하지 않고 폐기하는 제품에 대해서 이용된다.

한편, 확률변수 X 의 변동의 크기를 나타내는 양으로는 다음의 분산과 변동계수가 있다.

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (2-46)$$

$$\eta = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2-47)$$

변동계수는 조건이 다른 강도나 성질이 다른 것들의 변동량을 비교하는데 유용하다.

신뢰성공학에서는 무엇보다도 강도나 하중의 확률분포를 아는 것이 기본적으로 중요하다. 재료강도의 확률분포는 일반적으로 다수개의 실험에 의하여 구한다. 그러나 소수개의 실험결과를 기존의 다수개의 실험결과와 비교해서 유추하는 방법도 있다. 하중의 확률분포에 대해서는 어느 정도 장시간에 걸친 하중의 실험결과를 참고로 하지만 유사한 기계·구조물의 정보를 참조하는 것이 많다.

2.5.1 정규분포

정규분포(normal distribution)는 인장강도, 항복점, 피로한도 등의 분포로 구조신뢰성공학에서도 자주 이용되는 종모양의 형상을 갖는 분포이다. 이를 가우스 분포(Gaussian distribution)라고도 한다.

정규분포의 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx \quad (2-48)$$

여기서, μ 는 평균치, σ 는 표준편차이다.

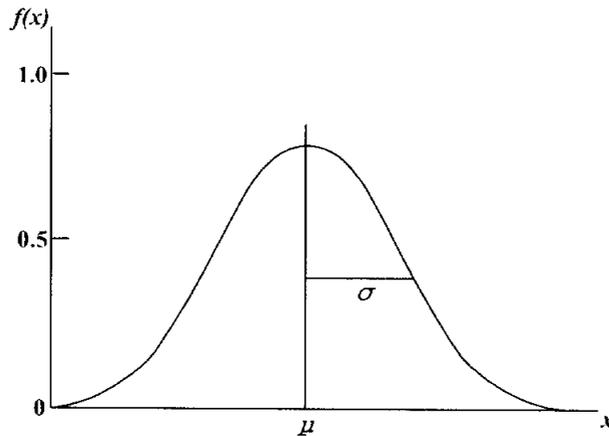


Fig. 2-10 Density function of normal distribution

$f(x)$ 는 $x=\mu$ 에 관해서 대칭이고, 분산이 작을수록 분포는 예리하게 된다. 그림 2-10은 정규분포의 확률밀도함수를 나타낸다.

$N(\mu, \sigma^2)$ 의 확률분포함수는 다음과 같이 나타낸다.

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx \quad (2-49)$$

지금, 새로운 변수 u 를

$$u = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2-50)$$

으로 정의하면, $F(x)$ 는 다음과 같이 적을 수 있다.

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\frac{x-\mu}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (2-51)$$

이 식의 피적분함수는 평균이 0, 분산이 1의 정규 분포 (0, 1)의 확률밀도함수이다. $N(0, 1)$ 을 표준 정규분포(standard normal diotribution)라 한다. 그 분포함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) dx \quad (2-51)$$

Φ 를 이용하면, 식(2.51)의 $F(x)$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (2-52)$$

2.5.3 대수정규분포

변수 x 의 대수(자연대수 $\ln x$ 또는 상용대수 $\log x$)가 정규분포에 따를 때, x 는 대수정규분포(log-normal distribution)에 따른다고 한다. 대수정규분포는 피로수명의 분포 등으로서 이용되어 구조신뢰성공학에서 중요한 위치를 점하고 있다.

대수정규분포의 확률밀도함수와 누적분포함수는 다음 식으로 표현된다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2-53)$$

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx \quad (2-54)$$

여기서, μ 는 평균, σ 는 표준편차이다.

2.5.4 Weibull 분포

Weibull분포⁽²⁸⁾는 1939년 강구 재료의 파괴 연구에 대해서 스웨덴의 W. Weibull이 고안한 분포로 오늘날 신뢰성공학에 있어서 가장 많이 사용되고 있는 확률분포 중의 하나이다.

Weibull분포는 다음과 같은 확률분포함수를 갖는 분포이다.

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right\} \quad (x \geq \gamma \geq 0) \quad (2-55)$$

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta-\gamma} \left(\frac{x-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^{\alpha-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right\} \quad (2-56)$$

여기서, α 는 분포의 형상을 특징짓는 형상 계수(shape parameter)이다. β 는 특수한 수명을 나타내는 척도 계수(scale parameter)이다. γ 는 위치(또는 최소 수명)를 나타내는 위치 계수(location parameter)이다.

그리고 α 는 무차원의 량이고 β , γ 는 각각 x 와 동일한 차원의 량이다.

이들을 3-parameter Weibull 분포라 부르고, 특히 $\gamma=0$ 의 경우를 2 parameter Weibull 분포라 한다.

한편 Weibull분포의 신뢰도 함수와 고장율 함수는 각각 다음 식과 같다.

$$R(x) = 1 - F(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right] \quad (2-57)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^{\alpha-1} \quad (2-58)$$

$a < 1, a = 1, a > 1$ 로 가정하면 그때의 확률밀도 함수는 Fig. 2-11 에서와 같이 시간적으로 감소, 일정(지수분포), 상승의 세 가지로 대응시킬 수 있다.

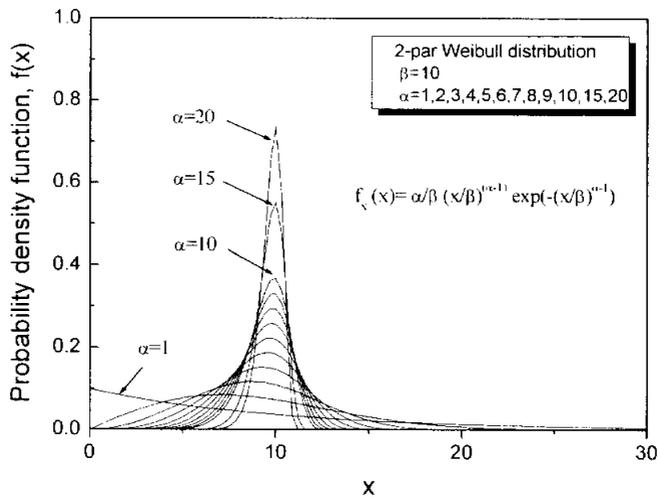


Fig. 2-11 Failure density function of Weibull distribution

$a < 1$ 에서는 신뢰도는 지수보다 더욱 더 급격히 떨어진다. 또, $a > 1$ 에서 a 가 크게되면 고장은 차차 집중적으로 일어나고 $a = 2 \sim 4$ 정도에서는 정규분포에 가깝다.

이 분포의 평균수명과 분산은

$$\mu = E(t) = \beta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (2-59)$$

$$\sigma^2 = V(t) = \beta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right] \quad (2-60)$$

또, 평균수명 M 및 고장율은

$$M = \beta (\ln 2)^{1/\alpha} \quad (2-61)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1} \quad (2-62)$$

$\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]$ 혹은 $(\ln 2)^{1/\alpha}$ 는 α 가 1보다 큰 영역에서는 거의 0.8~1에 가까운 값이 된다. β 를 사용하면 $R(t) = e^{-(t/\beta)^\alpha}$ 이기 때문에 $t = \beta$ 일 때 $R(\beta) = e^{-1} = 36.8\%$ 가 된다. Weibull 분포는 직관적으로 지수분포의 확장임은 확실하다. 이 분포가 흔히 사용되는 이유는 적용범위가 넓고 더욱이 모수의 추정을 확률치에 의해서 비교적 간단히 행할 수 있기 때문이다.

3. 재료 및 실험방법

3.1 시험편 재료

본 연구에 사용된 시험편 재료는 압력용기용 압연강재(pressure vessel steel)인 SPV50으로, 그 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 3-1 및 Table 3-2에 나타낸다. 시험편은 ASTM E647-93의 규정에 의하여 폭(W)이 50mm 그리고 두께(B) 9mm인 CT(compact specimen) 시험편을 이용하였으며, 그 형상과 치수를 Fig. 3-1에 나타내었다. 또한 시험편 사진의 예를 Photo 3-1에 보여준다. 시험편의 채취방향은 압연방향(rolling direction)과 균열의 전파방향(growth direction)이 직각(L-T direction)이 되도록 하였다. 이것은 대부분의 많은 기계·구조물이 재료의 압연방향을 힘이 걸리는 방향으로 하고 있기 때문이다. 기계가공시 평면부는 열영향이 극소화 되도록 앤드밀과 정면커터를 사용하여 가공하였다.

Table 3-1 Chemical composition (wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SPV50	0.13	0.3	1.27	0.016	0.004	0.12	0.01	0.05

Table 3-2 Mechanical properties

Material	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
SPV50	656	572	35.0

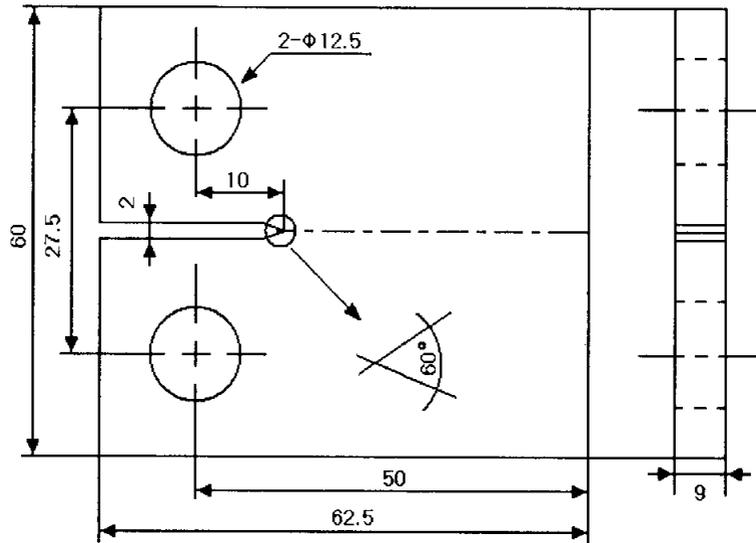


Fig. 3-1 Shape and dimensions of CT specimen

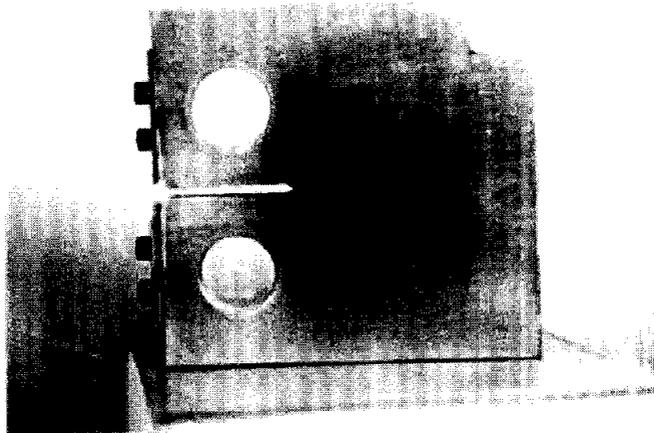


Photo 3-1 Test specimen

3.2 실험방법

3.2.1 실험시스템

피로시험에 이용한 시스템은 시험편에 하중을 부하 하는 용량 100kN의 전기 유압 서보식 피로시험기로 행하였다. 서보 시험기를 움직이는 유압펌프, 실험의 제어 등을 행하는 마이크로 컴퓨터, 그리고 주변기기 등으로 구성하였으며, 균열길이의 측정은 컴플라이언스법과 피로시험중에 쌍안 실체현미경을 사용하여 비교하면서 측정하였다. Photo 3-2에 피로균열 전파시험에 사용한 시험기를 나타내었다.

3.2.2 균열전파율과 응력확대계수범위의 결정

균열길이가 0.5mm증가할 때마다 균열길이 a , 응력반복수 N , 응력확대계수범위 ΔK , 최대하중, 최소하중, 최대개구변위, 최소개구변위 등을 하드디스크에 자동적으로 기록하였다.

균열길이 a 의 반복수 N 관계에서 피로균열전파율 da/dN 를 결정하기 위해 시컨트법(secant method)을 사용하였다. 이는 통상 널리 사용되는 방법이며 인접하는 두 개의 데이터점을 직선으로 맺어 그 구배에서 da/dN 를 결정한다. 즉 da/dN 는 다음식으로 주어진다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (3-1)$$

이 경우의 da/dN 는 균열길이 증분 $a_{i+1} - a_i$ 에 대한 평균치이므로 평균균열길이 $(a_{i+1} + a_i)/2$ 를 사용하여 ΔK 를 계산한다.

한편, 균열선단의 응력확대계수범위 ΔK 는 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left\{ C_0 + C_1 \frac{a}{W} + C_2 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + C_3 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + C_4 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right\} \quad (3-2)$$

$$C_0 = 0.886 \quad C_1 = 4.64 \quad C_2 = -13.32 \quad C_3 = 14.72 \quad C_4 = -5.6$$

위 식은 $a/W \geq 0.2$ 에 대하여 유효한 식이다.

3.3 실험조건

실험에 앞서 시험편의 가공에 의한 열적영향과 가공경화 등의 영향을 최소화하고 이상적인 실험조건을 만들기 위하여 실험실의 대기중에서 응력반복속도 $5Hz$, 응력비 R 0.1의 정현파의 조건에서 본 실험의 응력레벨보다 낮은 응력하에서($\Delta P=225kgf=2.2kN$) 1~2mm의 예비균열(pre-crack)을 삽입한 후 실험을 행하였다.

피로균열전파 실험은 실험실의 대기중에서 응력반복속도 $5Hz$, 응력비 0.1의 정현파 인장-인장 일정하중제어 방식으로, 16개의 시험편에 대하여 동일 실험자가 동일한 하중 조건하에서 실험을 수행하였다. 본 실험에서 제어한 ΔP 치는 $3.9kN$ 으로 행하였다.

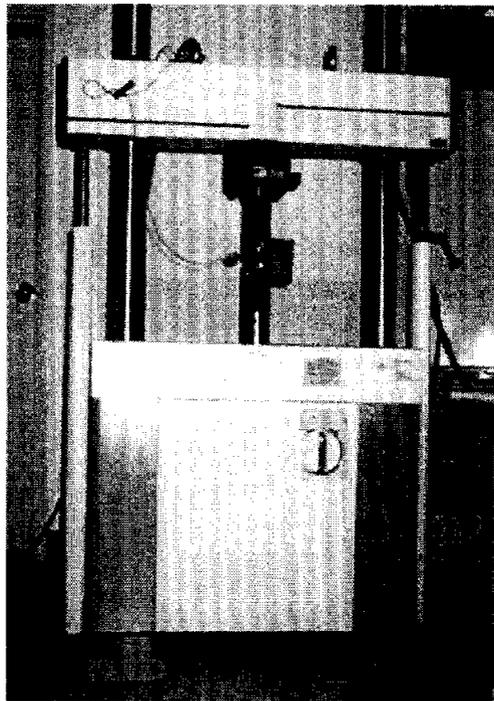


Photo 3-2 Fatigue test machine

4. 실험결과 및 고찰

4.1 피로균열전파곡선의 불확정성

Fig. 4-1은 16개의 시험편에 대한 균열길이 a 와 응력반복수 N 의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 하나의 시험편에 대한 $a \sim N$ 의 관계는 일정진폭 하중하의 전형적인 형태인 곡선형태를 보여주지만, 동일 응력의 실험 조건하에서도 전파곡선의 기울기가 시험편마다 다르게 나타나고 있다. 이것은 피로균열 전파에 대한 재료의 전파저항의 국부적 평균치가 시험편간에서 변동한다고 할 수 있다. 또한, 그림에서 알 수 있듯이 이들 전파곡선이 서로 겹치고 있으므로 시험편내에서도 재료의 전파저항에 변동이 있음을 알 수 있다. 이는 김⁽¹⁾의 응력확대계수 제어 피로시험 결과에서도 잘 나타나고 있다. 이것은 m 이 시험편마다 변동하는 것과 또, C 가 비교적 완만한 변동과 백색잡음적 변동의 양 성격을 동시에 가지고 있다고 생각된다.

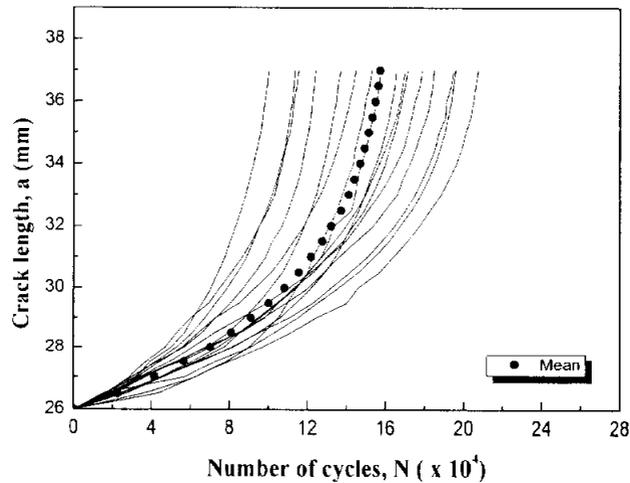


Fig. 4-1 $a \sim N$ curves for the 16 specimens studied

그림에서 알 수 있듯이 피로균열전과거동에는 불확정성(uncertainty)이 존재하므로 이를 해석하기 위해서는 평균이나 분산만이 아닌 확률분포를 고려한 신뢰성공학해석이 필요함을 알 수 있다. 개념적으로 Fig. 4-2에 임의의 균열길이 및 수명에 대한 확률밀도함수를 표현해 보았다.

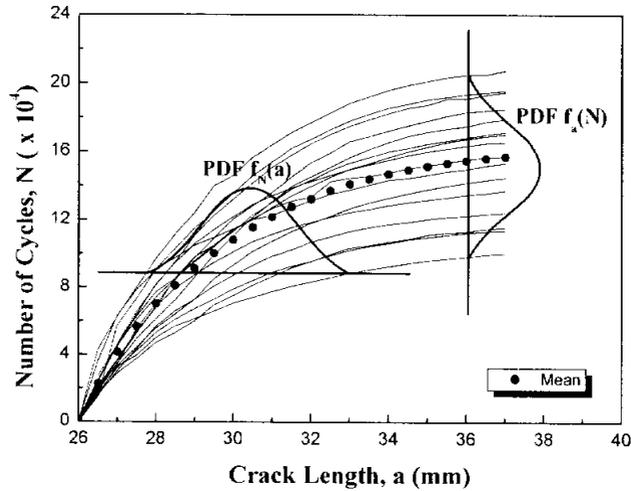


Fig. 4-2 Crack growth curves for the 16 specimens studied

Lapetra 등⁽¹³⁾에 의하여 보고된 12mm 두께의 알루미늄 2024-T351재에 대한 것과 Virkler 등⁽²³⁾의 2.54mm 두께의 알루미늄 2024-T3재에 대한 것의 피로균열전과곡선을 비교하여 보면 본 실험의 경우가 비교적 큰 변동을 나타내었다. 그 차이를 정량화하기 위하여 본 실험에 대한 피로균열전과수명 $N(a)$ 의 변동계수(COV)를 Lapetra, Virkler 등의 실험 데이터와 비교하여 Fig. 4-3에 나타내었다.

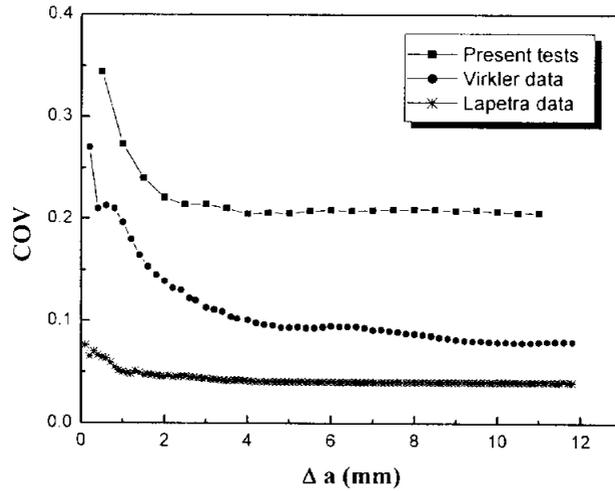


Fig. 4-3 Coefficients of variation (COV) of fatigue crack growth life of $\Delta a = a_0 - a_i$

그림에서 알 수 있듯이 본 실험에 의한 변동계수가 알루미늄재의 경우보다 높게 나타났으며, 균열길이의 증분 Δa 가 약 4mm까지는 감소하다가 그 이후부터는 비교적 동일한 변동계수를 나타내는 경향을 보이고 있다. 이러한 변동계수에 영향을 미치는 인자로는 재질, 응력조건, 응력비, 초기균열길이 및 실험에 의한 오차 등을 생각할 수 있다. 동일 알루미늄 재질의 Virkler의 실험 결과가 다소 큰 값을 보인 것은 시험편 두께의 영향이라 생각된다. 본 실험 재료에 대한 전파수명의 변동계수는 약 0.2(20%) 정도로 나타났다.

한편, 균열길이에 대한 피로균열전파수명의 표준편차와의 관계를 Fig. 4-4에 나타내었다. 균열길이가 증가할수록 전파수명의 표준편차는 증가하는 현상을 보이고 있다. Figs. 4-1, 4-2, 4-3 및 4-4를 비교해 보면 피로균열전파곡선은 시험편마다 불확정적이고, 피로균열전파거동에는 변동성이 있음을 알 수 있다.

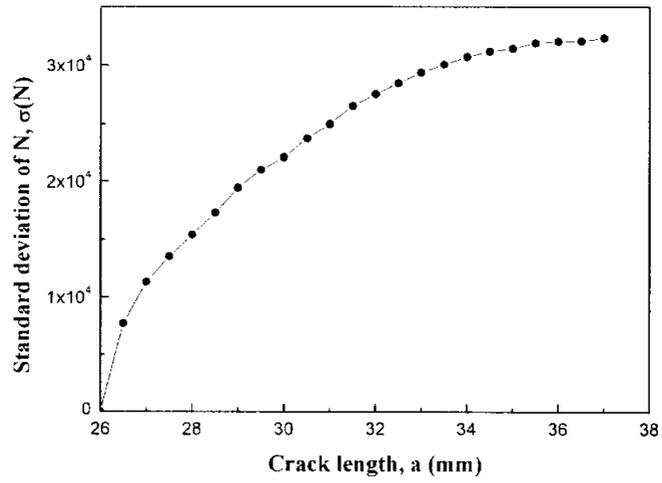


Fig. 4-4 Standard deviation of $N(a)$

4.2 피로균열전파수명의 확률분포

피로균열전파수명의 변동특성을 정량적으로 평가하기 위하여 수명의 분포 성질을 해석하였다. 많은 연구자들이 피로균열전파 수명과 임계 균열길이에 대한 통계적 취급을 수행하였는데, 이들의 결과에 의하면 피로균열전파수명의 확률분포는 대수정규분포(Log-normal distribution) 혹은 와이불분포(Weibull distribution)에 잘 따른다고 하고 있다.

따라서, 본 연구에서의 실험결과가 어느 분포에 적합한지를 고찰하기 위하여 대수정규분포와 2-parameter Weibull 분포 그리고 3-parameter Weibull 분포에 대하여 고찰하였다.

먼저, Fig. 4-5에 초기 균열길이 $a_0=26mm$ 에서 임의의 균열길이 a_i 가 27, 27.5, 29, 31 그리고 37mm까지 전파할 때까지의 수명의 확률분포를 대수정규확률지에 나타내었다.

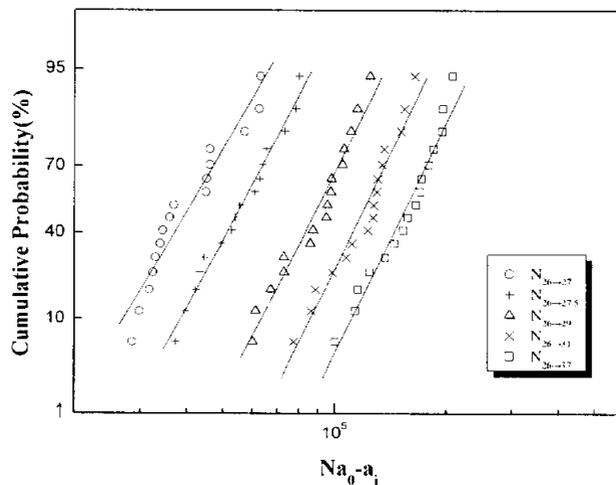


Fig. 4-5 Log normal plots for the various growth life, $Na_0 \rightarrow a_i$

또한 Fig. 4-6은 동일 조건에서의 수명의 확률분포를 2-parameter Weibull 분포로 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 짧은 균열길이의 수명의 경우 대수정규분포와 2-parameter Weibull 분포는 실험 데이터와 다소 차이가 있음이 확인되었다. 즉, 비교적 균열길이가 짧은 경우에는 대수정규분포로 취급하는 것은 진(true)의 확률을 구하는데 무리가 있다고 판단된다.

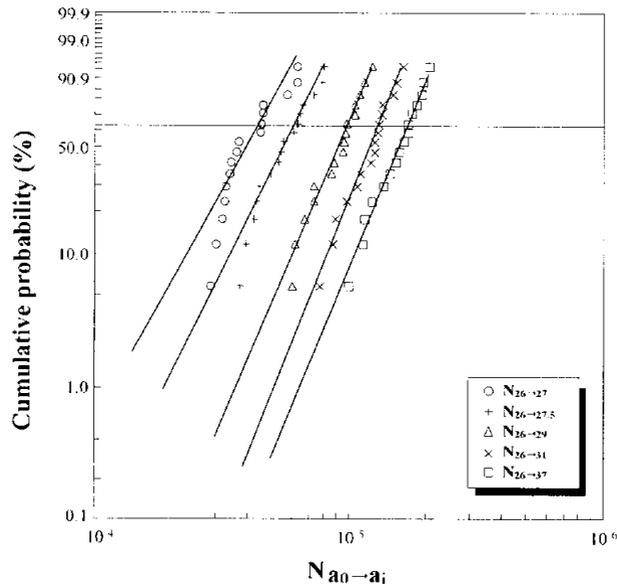


Fig. 4-6 2-parameter Weibull plots for the various growth life, $N_{a_0 \rightarrow a_i}$

3-parameter Weibull 분포에도 적합시켜 본 결과, 본 실험의 경우 피로균열 전파수명은 3-parameter Weibull 분포가 가장 적합한 분포임을 알았다.

Fig. 4-7은 초기 균열길이 26mm에서 임의의 균열길이 a_i 까지 16개의 시험편에 대한 피로균열전파수명을 3-parameter Weibull 확률지에 나타낸 것이다.

그림 중의 실선은 Weibull 분포함수의 양변에 이중자연대수를 취하여 직접탐색법(DSO)에 의하여 구한 α , β , γ 값을 가지고 그린 곡선이다.

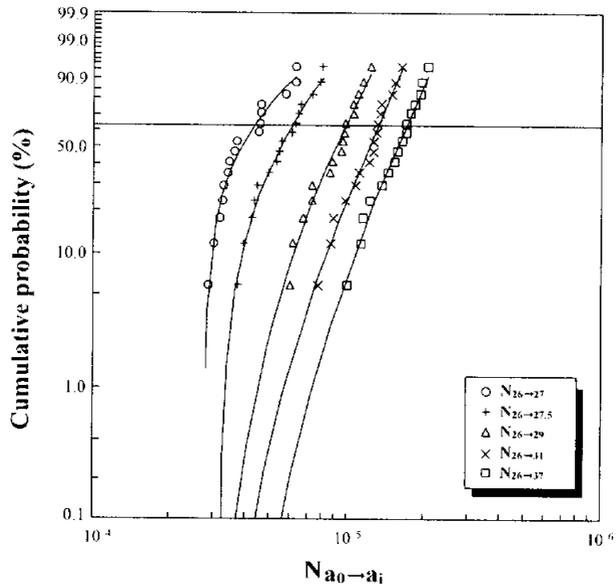


Fig. 4-7 3-parameter Weibull plots for the various growth life, $N_{a_0 \rightarrow a_i}$

또한 각각에 대한 Weibull 분포의 계수값을 Table 4-1에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전파수명의 분포는 3-parameter Weibull 분포에 잘 따른다고 할 수 있다. 균열길이가 증가할수록 분포함수의 계수 α , β , ν 값은 모두 증가하는 경향을 보였다. 짧은 균열길이의 경우 대수정규분포와 2-parameter Weibull 분포는 실험 데이터와 다소 차이가 있음이 확인되었다. 즉, 비교적 균열길이가 짧은 경우에는 대수정규분포로 취급하는 것은 진(true)의 확률을 구하는데 무리가 있다고 판단된다.

Table 4-1 The value of the Weibull parameters

Crack length, a (mm)	α	β	γ
27	1.06	43052	27541
27.5	1.59	60461	32126
29	2.85	98654	31552
31	3.58	131617	28985
37	3.60	170718	36336

4.3 피로균열전파율의 확률분포 및 변동계수

Fig. 4-8은 16개의 시험편에 대한 피로균열전파율 da/dN 와 응력확대계수범위 ΔK 와의 관계를 나타낸다. 이 그림에서 실선은 최소자승법을 사용하여 구한 회귀직선이다.

이들의 관계로부터 얻은 Paris식의 C 와 m , 그리고 그 통계값을 Table 4-2에 정리하였다. 그림에서 알 수 있듯이 각 직선의 기울기는 서로 다르고 특별할 만한 점은 없다. 그러나 동일 ΔK 에서도 그 피로균열전파율에는 변동이 있음을 알 수 있고, 피로균열전파 데이터를 해석하려고 하면 확률통계적 고찰이 필요함을 알 수 있다. 그리고 본 실험의 범위는 피로균열전파의 제2단계 안정 정상 상태의 전파영역에 속함을 알 수 있다.

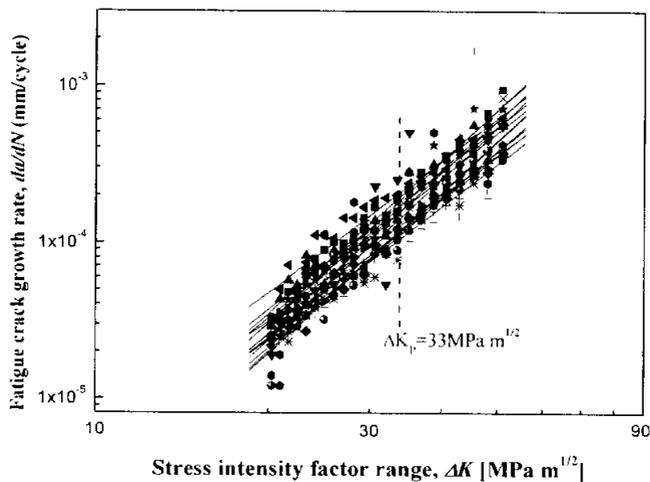


Fig. 4-8 Relation between da/dN and ΔK

Table 4-2 The constants in Paris' law

Specimen No.	m	log C
SPV50-1	3.26	-8.6995
SPV50-2	3.25	-8.7520
SPV50-3	2.92	-8.2380
SPV50-4	3.39	-9.0025
SPV50-5	2.97	8.4808
SPV50-6	2.79	-7.9558
SPV50-7	2.66	-7.9634
SPV50-8	2.96	-8.3448
SPV50-9	3.41	-8.9584
SPV50-10	3.38	-9.0961
SPV50-11	3.32	-9.0289
SPV50-12	2.86	-8.3170
SPV50-13	3.41	-9.0577
SPV50-14	3.15	-8.7812
SPV50-15	2.80	-8.2752
SPV50-16	3.39	-9.1307
Distribution	normal	normal
Mean	3.12	-8.6302
Std(σ)	0.26258	0.40654
COV	0.08416	0.04710

피로균열전파율의 변동 및 분포특성을 조사하기 위하여 앞절의 피로균열전파 수명의 분포와 같이 정규분포, 대수정규분포, 2-parameter Weibull 분포, 3-parameter Weibull 분포에 대하여 해석을 행하였다. 일례로 Fig. 4-9, 4-10, 4-11 그리고 4-12는 각각 임의의 ΔK 레벨에서 피로균열전파율(da/dN)의 정규

분포, 대수정규분포, 2-parameter Weibull 분포 및 3-parameter Weibull 분포를 나타낸다. 그림 중의 실선은 각 분포함수의 계수값을 구하여 그린 것이다.

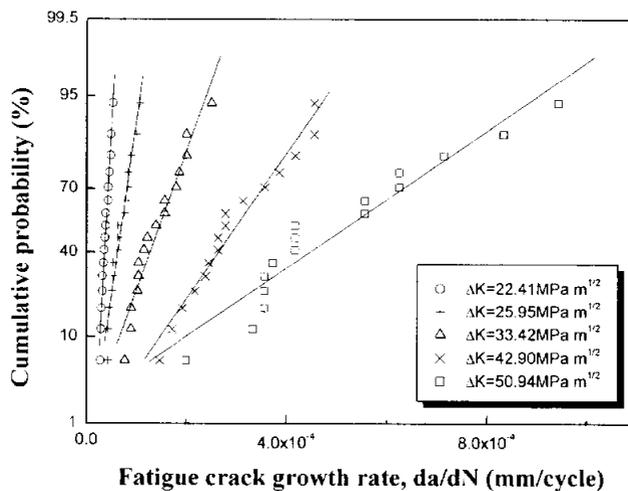


Fig. 4-9 Normal plots of da/dN

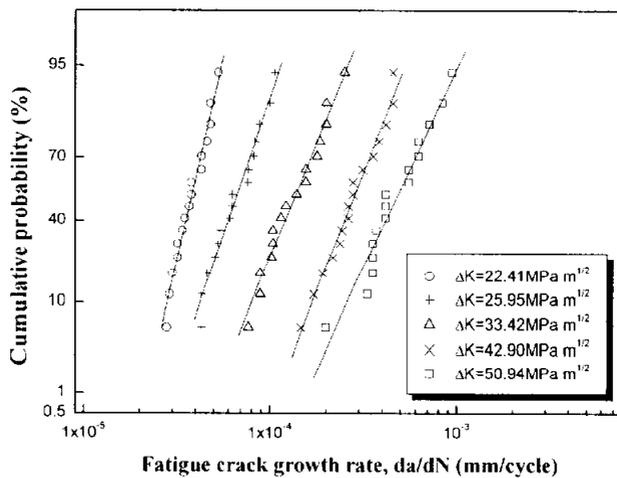


Fig. 4-10 Log-normal plots of da/dN

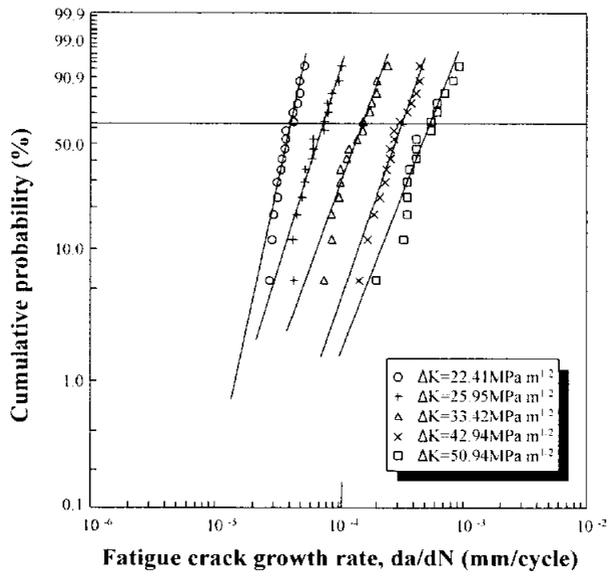


Fig. 4-11 2-parameter Weibull plots of da/dN

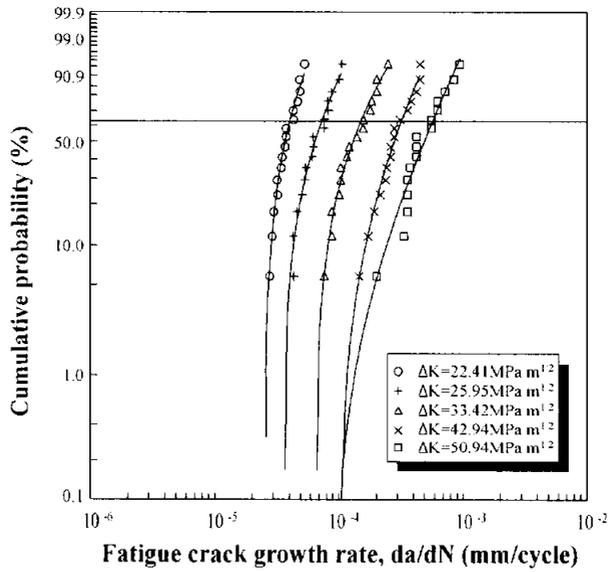


Fig. 4-12 3-parameter Weibull plots of da/dN

Table 4-3 The value of the Weibull parameters

ΔK ($MPa\ m^{1/2}$)	α	$\beta(\times 10^{-5})$	$v(\times 10^{-5})$
22.41	1.43	4.04	2.576
25.95	1.39	7.28	3.632
33.42	1.32	15.20	6.692
42.90	1.82	32.10	10.122
50.94	2.00	57.00	8.920

또한 Table 4-3은 각각의 응력레벨에 대한 전파율의 Weibull 분포의 계수값을 나타낸 것이다. 피로균열전파율의 분포는 비교적 대수정규분포 또는 3-parameter Weibull 분포에 잘 맞는다고 할 수 있으나, 그림에서 알 수 있듯이 대수정규분포도 전반적으로는 일치하는 것처럼 보이나, 이에 비해서 3 parameter Weibull 분포의 경우가 대수정규분포보다 걸보기상 더 잘 따름을 알 수 있다.

Fig. 4-13은 ΔK 에 따른 da/dN 의 변동계수를 조사한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 ΔK 가 증가함에 따라 da/dN 의 변동계수는 감소하다가 어느 영역의 ΔK 에서 최소가 된 후 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 Paris식의 회귀직선이 변동계수 최소인 ΔK 에서 집중하는 현상을 의미한다. 이 때의 ΔK_P 값은 $33MPa\sqrt{m}$ 이고 Fig. 4-8에 나타내었다.

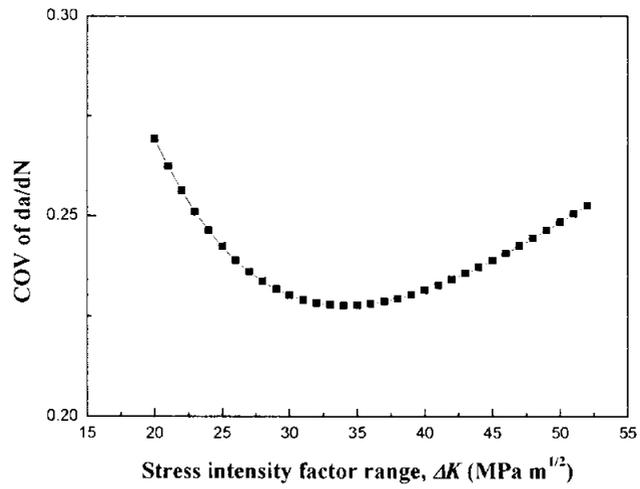


Fig. 4-13 Coefficients of variation (COV) of da/dN for ΔK

4.4 Paris법칙의 C 와 m 의 확률분포 및 그 상관관계

16개의 시험편에 대하여 구한 Paris법칙의 식을 이용하여 전파지수 m 과 전파계수 C 의 변동성을 고찰하기 위하여 그 분포특성을 조사하였다. m 과 $\log C$ 의 평균, 표준편차 및 변동계수는 Table 4-2에 나타낸 바와 같다. m 과 C 의 분포에 대하여 여러 가지 분포에 적합하여 보았으나, m 과 C 의 분포는 각각 정규분포, 대수정규분포에 잘 따름이 확인되었다. 이는 저탄소강, 알루미늄, 해양구조물용 고장력강 등의 연구결과와도 같았다(Itagaki et al., 1991). 그림 4-14와 4-15에 각각 m 과 $\log C$ 의 분포를 나타내었다.

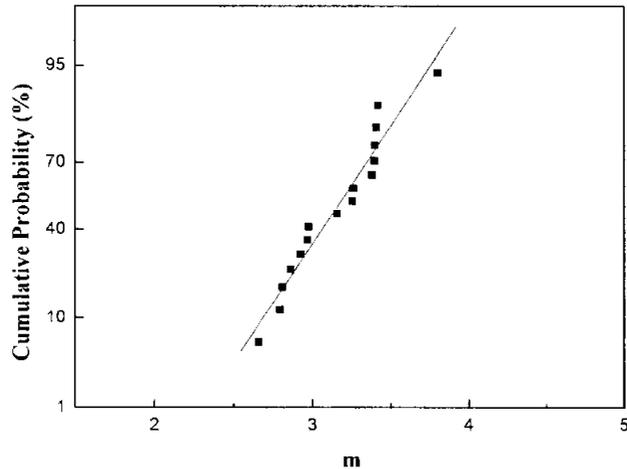


Fig. 4-14 Normal plot of m

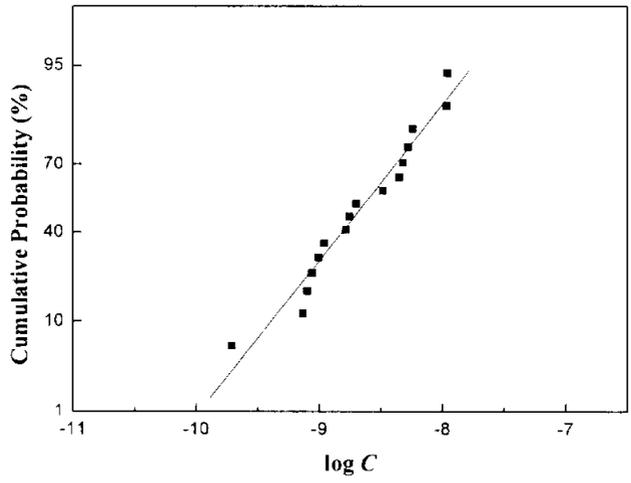


Fig. 4-15 Normal plot of log C

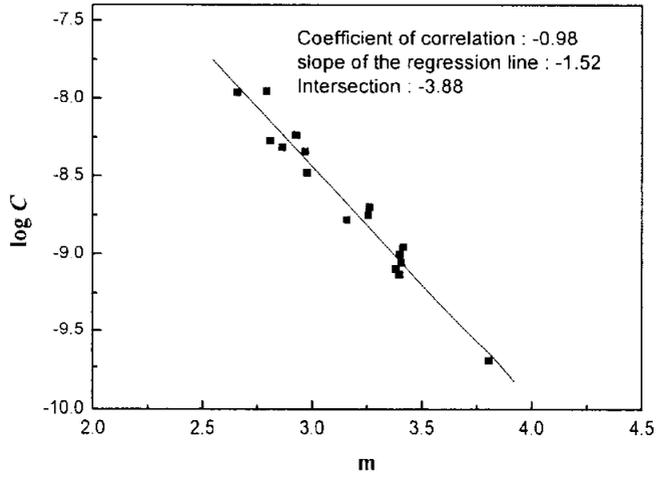


Fig. 4-16 Scatterplot of the values of log C and m

Fig. 4-16은 m 과 $\log C$ 의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 지수 m 이 증가하면 $\log C$ 가 감소하는 관계가 있으며, 그 상관관계 실험식은 다음과 같이 표현된다.

$$\log C = -3.884 - 1.518m \quad (r=-0.98) \quad (4-5)$$

$\log da/dN - \log \Delta K$ 의 관계에서 각 시험편에 대한 실험 데이터를 이용하여 최소자승법으로 회귀직선을 구하면 이 기울기가 크면 클수록 절편이 작은 경향이 있다. 이 관계에서 m 과 C 의 변동은 회귀직선이 갖는 성질에 기인하는 단순한 변동일 수 있다. 또한 m 과 $\log C$ 의 변동이 시험에 대한 하중 설정의 오차, 실험시 균열 측정의 오차 등에 기인할 수 있다는 의문이 있지만 잘 제어된 실험에서도 동일한 결과가 얻어지는 것으로 보아 재질의 공간적 변동에 기인하는 하나의 확률 변수가 아닌가 생각된다.

식 (4-5)와 같이 C 와 m 사이에 강한 음의 상관관계가 있다는 것은 1970년대 초반부터 많은 연구자들에 의해 연구되었다(Yokobori et al., 1973 ; Iost and Lesage, 1990 ; Cortie and Garrett, 1988). 그 중에 pivot point값의 존재에 의한 상관 해석(Cavallini and Iacoviello, 1995)을 행하여 본 실험에 대하여 다음의 좌표값을 얻었다.

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_p = 1.3 \times 10^{-4} m / cycle \quad (4-6)$$

$$\Delta K_p = 33 MPa \sqrt{m} \quad (4-7)$$

Table 4-4는 Paris 모델의 직선으로부터 구한 피로균열전파율의 표준편차(Standard deviation)와 변동계수(Coefficient of variation)를 나타낸다. Table 4-4에서 보듯이 ΔK 가 증가함에 따라 평균피로균열전파율과 그 표준편차는 증가하나, 그 변동계수는 감소하다가 ΔK 가 $33 MPa \sqrt{m}$ 부근에서 최소가 된 후

다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 식 (4-6), (4-7)의 해석 결과와 비교해 보면 pivot point에서 최소의 변동을 나타내었다. 이 ΔK_P 값을 Fig. 4-8에 전파율 축과 평행하게 점선으로 나타내었다. 2091Al-Cu-Li합금에 대한 결과와 비슷한 경향임을 알 수 있다.

Table 4-4 Fatigue crack growth rate scatter on present tests

ΔK (MPa m ^{1/2})	Mean da/dN (10 ⁻⁵ m/cycle)	Standard dev. (10 ⁻⁶ m/cycle)	COV
21	3.28	8.62	0.262
23	4.35	10.93	0.251
25	5.64	13.67	0.242
27	7.17	16.91	0.236
29	8.95	20.74	0.231
31	11.02	25.25	0.229
33	13.40	30.53	0.228
35	16.11	36.68	0.228
37	19.17	43.83	0.229
39	22.61	52.09	0.230
41	26.46	61.56	0.232
43	30.73	72.38	0.236
45	35.45	84.68	0.239
47	40.65	98.58	0.242
49	46.35	114.21	0.246
51	52.58	131.72	0.251

다음에 Bergner and Zouhar (2000)가 제안한 C 와 m 의 상관관계 해석법 (scaling factor법)에 의해서도 고찰해 보았다.

Fig. 4-17은 scaling factor값에 따른 $\log C_N$ 과 m 의 사이의 상관계수 r 값을 나타낸 것이다. 그 결과, $\log C$ 와 m 사이의 상관계수가 0이 되는 scaling factor인 ΔK_0 의 값이 $33MPa\sqrt{m}$ 로 pivot point법에 의해 구한 것과 같은 값을 보였다. 즉, scailig factor법과 pivot point값의 상관해석법은 실제 같은 개념임을 확인

하였다.

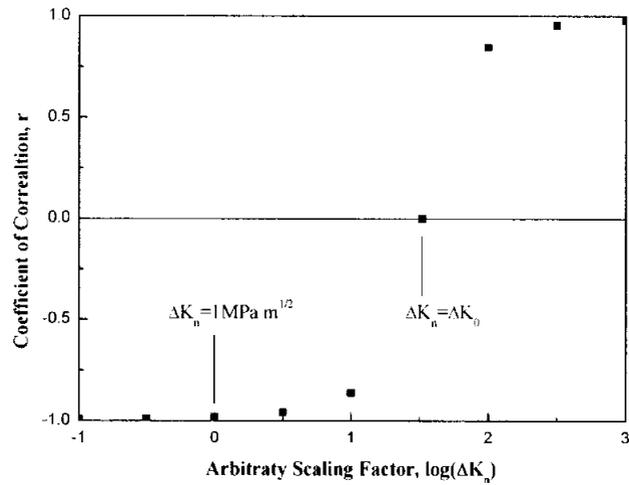


Fig. 4-17 Dependence of the coefficient of correlation between $\log C_n$ and m on the scaling factor, ΔK_n

그림 4-18에 상관계수가 0일 때 즉, scaling factor, ΔK_N 이 ΔK_0 일 때의 $\log C_0$ 와 m 의 scatter plot를 보여준다. 다음 그림에서 실제로 $\log C_0$ 와 m 의 사이의 상관계수 r 값은 0임을 알 수 있다. 하지만 $\log C$ 와 m 의 상관관계에 대해서는 앞으로 물리적으로 더욱 더 많은 데이터에 의해 고찰되어야 할 것이다.

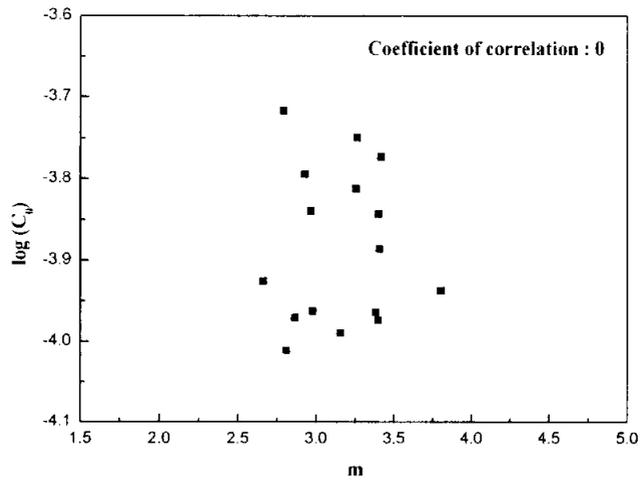


Fig. 4-18 Scatterplot of the values of $\log C_0$ and m

4. 결 론

본 연구에서는 피로균열전파거동의 변동성에 대한 예측과 분포특성을 명확하게 하기 위하여, 피로균열전파시험을 수행하여, 피로균열전파수명과 피로균열전파율의 확률분포 및 변동성과 Paris법칙의 계수 C 와 지수 m 의 확률특성 및 그 상관성에 대하여 검토를 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 피로균열전파곡선은 시험편마다 불확정적이고, 피로균열전파거동에는 변동성이 있음을 확인하였다.
- (2) 피로균열전파수명의 변동계수(COV)는 알루미늄재의 경우보다 높게 나타났으며 균열초기 단계에서 균열길이의 증분 Δa 가 약 $4mm$ 까지는 감소하다가 그 이후부터는 약 0.2(20%)로 비교적 동일한 값을 나타내었다.
- (3) 피로균열전파수명은 3-parameter Weibull 분포에 잘 따랐고, 균열길이가 증가할수록 분포함수의 형상계수 α , 척도계수 β , 위치계수 ν 값은 모두 증가하는 경향을 보였다.
- (4) 피로균열전파율은 3-Parameter Weibull 또는 대수정규 분포에 잘 따름을 확인하였다.
- (5) 안전전파영역에서의 Paris모델 식에 대한 전파계수 $\log C$ 와 전파지수 m 의 분포는 각각 정규분포에 잘 따름이 확인되었다.
- (6) m 과 $\log C$ 의 사이에는 음의 상관관계가 있음을 보였으며, 이의 관계는 Pivot point법과 scaling factor법으로 설명될 수 있고 이는 같은 개념임을 확인하였다.

$$\log C = -3.884 - 1.518m$$

$$\Delta K_p = \Delta K_0 = 33MPa\sqrt{m}$$

그러나, Paris-Erdogan 모델의 계수 C 와 지수 m 의 통계적 특성 및 상관관계에 대한 이론적 실험적 연구가 앞으로 더욱 요망된다.

참고 문헌

1. 김선진, 1999, “피로균열전파저항의 변동성에 의한 균열전파율의 해석”, 대한기계학회논문집, 제23권, 제17호, pp. 1139-1146.
2. Paris, P. C. and Erdogan. F., 1963, “A Critical Analysis of Crack Propagation”, ASME J. Basic Eng., Vol. 55, pp. 528-534.
3. Sobczyk, K., 1993, “A Stochastic Approach to Fatigue”, Springer Verlag Wein-New York, pp. 1-33.
4. 酒井 達雄, 田中 道七, 1979, “金屬材料의 疲勞き裂進展壽命의 分布特性에 關する 統計的研究”, 材料, 28-321, pp. 880-891.
5. Bilir, O. G., 1990, “The Relationship Between the Parameter C and m of Paris' law for Fatigue Crack Growth in a SAW 1010 Steel”, Eng. Frac. Mech., Vol. 36, pp. 361-364.
6. 市川 昌弘, 中村武夫, 1985, “疲勞き裂伝播則(da/dN)^mにおけるパラメータ의 確率變數化の方法”, 材料, 第34卷 第378호, pp. 321-326.
7. 市川 昌弘, 中村武夫, 1987, “疲勞き裂伝播速度의 試驗片內變動と 試驗片間變動分離”, 材料, 第36卷 第408호, pp. 922-926.
8. 板垣 浩, 石塚鐵夫, 黃培彦, 1991, “疲勞き裂進展壽命의 確率分布推定에 關する 實驗的研究”, 日本機械學會論文集, Vol.57-534, pp. 250- 258.
9. 板垣 浩, 石塚鐵夫, 金善振, 1991, “材質의 空間的變動確의 材料試驗結果에 及ぼす影響について”, 日本造船學會論文集, Vol. 170, pp. 665-671.
10. M. B. Cortie and G. G. Garrett, 1988, “On the Correlation between the C and m in the Paris Equation for Fatigue Crack Propagation”, Eng. Fract. Mech., Vol. 30. No. 1, pp. 49-58.
11. M. Cavallini and F. Iacoviello, 1995, “A Statistical Analysis of Fatigue Crack Growth in a 2091 Al-Cu-Li Alloy”, Int. J. Fatigue, Vol. 17, No. 2, pp. 135-139.
12. T. Yokobori, I. Kawada and H. Hata, 1973, “The Effects of Ferrite Grain

- Size on the Stage II Fatigue Crack Propagation in Plain Low Carbon Steel”, Rep. Res. Inst. Strength Fract. Mater. Tohoku Univ., Vol 9, 35-64.
13. Lapetra, C., Mayo, J. and Dominguez, J., 1996, “Randomness of Fatigue Crack Growth under Constant Amplitude Loads”, Fat. Fract. Eng. Mater. Struct., Vol. 19, pp. 589-600.
 14. Tanaka, S., Ichikawa, M. and Akita, S., 1981, “Variability of m and C in the Fatigue Crack Propagation Law”, Int. J. Fract., Vol. 17, R121.
 15. A. Iost and J. Lesage, 1990, “On the Existence of a Pivot Point for Stage II Fatigue Crack Growth”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 36, No. 3. pp. 585-596.
 16. F. Bergner and G. Zouhar, 2000, “A New Approach to the Correlation between the Coefficient and the Exponent in the Power Law Equation of Fatigue Crack Growth”, Int. J. Fatigue, Vol. 22, pp. 229-239.
 17. 黃培彥, 鋼の疲勞龜裂傳播の信賴性推定に關する研究, 橫濱國大工學博士學位論文, 1990
 18. 金善振, 板垣 浩, 石塚 鐵夫, “ 材質の空間的變動の材料強度試驗結果に及ぼす影響について(その2.疲勞龜裂傳播に及ぼす板厚の影響)” 日本造船學會論文集, 第173号,pp.327-336, 1993
 19. 심동식, 김정규, “두께변화에 따른 피로균열진전의 변동성에 대한 확률론적 해석”, 대한기계학회 논문집, 제22권 제8호, pp. 1528-1532, 1998
 20. 장동일, 정경섭, 한민구, 파괴역학, 원창출판사, 1995
 21. 오세욱, 이치우, 윤한기, 남기우, 재료강도학, 원창출판사, 1993
 22. Anderson, T. L., Fracture Mechanics, CRC press, 1995
 23. Virkler, D. A., Hillberry, B. M. and Goel, P. K., 1979, “The Statisticla Nature of Fatigue Crack Propagation”, ASME H. Eng. Mat. and Tech., Vol. 101, pp. 148-153.
 24. Oritz, K. and Kiremidjian, A. S., 1986, “Time Series Analysis of Fatigue

- Crack Growth Rate Data”, Eng. Frac. Mech., Vol. 24, No. 5, pp. 657-675.
25. 김선진, “강도의 확률분포에 미치는 재질의 공간적 변동의 영향에 관한 연구”, 요코하마국립대 박사학위논문, 1992년 12월
 26. Ritchie, R. O., Smith, R. F. and Knott, J. F., “Effects of Thickness on Fibrous Fracture from a Notch and on Fatigue Crack Propagation in low Strength Steel”, Metal Science, Vol. 9, pp. 485-492, 1975
 27. Ashok Saxena and Hudak, S. J., “Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens”, International J. of Fracture, Vol. 14 No. 5, pp.453~462, 1978
 - 28) 이치우, 김선진, 이성우, 정상영, 신뢰성공학, 원창출판사, 1993

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 학문적으로나 정신적으로 도움을 주신 모든 분들께 감사의 말씀을 드립니다. 학부 때부터 대학원 졸업할 때까지 지속적인 열과 성의로 지도 편달하여 주시고 사제의 정이 무엇인지 가슴 깊이 느낄 수 있게 해주신 지도교수 김선진 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한, 심사를 하시면서 많은 조언을 아끼지 않으신 이규용 교수님과 김형자 교수님께 감사 드립니다.

그리고 학부와 석사를 끝마칠 때까지 가르침을 주신 학과 교수님들과 재료공학과 남기우 교수님, 특히 학문적으로나 인간적으로 많은 조언을 해주신 안석환 박사님께 감사를 드립니다. 아울러 실험실에서 많은 도움을 주신 졸업하신 선배님들과 명규형, 상수를 비롯한 동기들 그리고 후배들에게도 감사의 말을 전합니다.

끝으로 저에게 대학원까지 공부할 수 있게 깊은 사랑과 헌신으로 항상 저를 믿고 뒷바라지 해주신 부모님과 항상 따뜻한 격려와 관심을 보내준 누나와 동생에게도 고마움을 전하고, 오랫동안 곁에서 사랑과 이해로 대해준 최윤주에게 고마움을 표하며 감사의 글을 마칩니다.

2003년 2월

정 현 철 드림