

## 강재의 피로균열전파율에 미치는 영향인자에 관한 연구

- 시험편 두께의 영향을 중심으로 -

김 선 진\* · 남 기 우\*\* · 홍 진 표\*\*\*

(99년 4월 15일 접수)

### A Study On the Factors that Affect Fatigue Crack Growth Rate in Steels - Specimen Thickness Effect -

Seon-Jin Kim\* · Ki-Woo Nam\*\* · Jin-Pyo Hong\*\*\*

**Key Words** : Specimen Thickness(시험편 두께), Fatigue Crack Growth Rate(피로 균열전파율), Variation(변동성), Fatigue Crack Growth Resistance(피로 균열전파저항), Size Effect(치수효과), Weibull Distribution(와이블분포)

#### Abstract

The effect of specimen thickness on fatigue crack growth rate was studied. The objective of the present study is to investigate the effect of specimen thickness on the fatigue crack growth behavior at various stress intensity factor ranges and also the variation of material resistance to fatigue crack growth. The fatigue crack growth resistance was treated as a spatial stochastic process, which varies randomly on the crack path. Compact tension specimens with a LT orientation for structural steel were used. All testing was done at a constant stress intensity level. The experimental data were analyzed for the size effect to determine the Weibull distributions of the material resistance.

#### 1. 서 론

피로파괴(fatigue fracture)를 고려할 때 균열의 발생 수명도 중요하지만 균열의 전파거동을 고찰하는 것도 중요한 사항 중의 하나이다. 피로균열

전파거동은 대수 그래프에서 응력확대계수에 대한 균열전파율의 관계로부터 얻어진다. Paris등은<sup>(1)</sup> 균열의 전파구간인 제2영역에서 균열전파율은 응력확대계수에 대하여 선형적인 증가 관계가 있음을 보고 하였는데, 이것이 유명한 Paris-Erdogan

\* 종신회원, 부경대학교 기계·자동차공학부

\*\* 종신회원, 부경대학교 재료공학부

\*\*\* 한전기공(주)

식이다. 그리고 Forman등은<sup>(2)</sup> 제2영역뿐만 아니라 정적 파손 양상을 나타내는 제3영역까지 확대 해석할 수 있는 식을 제안하였다. 그러나 이때 수식화된 피로균열전파율에도 여러 가지 불확정성 요인, 예를 들면, 외력, 환경, 재료의 불균질성, 부재의 크기 등의 영향은 물론 이들의 상호작용으로 확률적 변동을 한다는 것은 일반적으로 잘 알려져 있다. 많은 연구자들이 이들의 인자가 피로균열전파율에 어떻게 영향을 미치는가에 대해서 연구를 수행해 왔다. 그 중에서도 실험실에서의 시험편 데이터를 실제 구조물 등에 어떻게 적용할 것인가 하는 관점에서, 피로균열전파율에 미치는 시험편 크기에 대해 많은 연구가 행하여 졌다. 특히, 그 중에서도 시험편두께에 대한 연구결과<sup>(3~10)</sup>에 의하면,

- (1) 두께가 증가하면 균열전파율은 감소한다.
- (2) 두께가 증가하면 균열전파율도 증가한다.
- (3) 시험편 두께에 의한 영향은 없다.

등의 3가지로 대별할 수 있다. 이와 같이 피로균열전파율에 대한 시험편 두께의 영향에 관한 연구는 많지만, 재료에 따라 다를 뿐만 아니라 명확히 규명하기도 어렵다. 또한, 이들 결과의 대부분은 일정 진폭하중하에서 얻어진 것이 많으며, 결정론적인 방법에 의한 것들이 많다. 그러나 피로균열전파의 미시적 과정이 본질적으로 확률적 특성을 가지므로, 균열 선단에서의 파괴역학적 상태가 변화하는 하중을 일정하게 제어하는 실험보다는 균열 선단의 역학적 상태를 일정하게 유지하는 응력확대계수 제어 실험이 피로균열전파율의 영향을 보다 정확히 파악할 수 있을 뿐 아니라 재질의 변동성을 고찰하는데 유효하다고 할 수 있다. 그리고 재질의 불균질성을 파악하기 위해서는 무엇보다도 재질의 공간적 분포 특성에 대한 고찰이 중요하다<sup>(4)</sup>. 재질의 공간적 변동의 양상에 의해서는 두께가 다른 시험편의 경우에는 그 피로균열전파거동이 변화하리라 생각된다. 시험편의 두께가 감소하면 일정 구간에서의 피로균열전파저항의 변동은 크게 된다는 보고들<sup>(3~6)</sup>이 있지만, 이에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 피로균열전파율의 변동요

인이라고 생각되는 재질의 공간적 변동을 확률과정으로 취급하여, 두께가 다른 일반 구조용강의 시험편을 이용하여 4종류의 응력확대계수에 대하여 일정  $\Delta K$ 치 피로시험을 수행하여 피로균열전파저항이 시험편 두께에 미치는 영향을 확률론적 관점에서 고찰하고자 한다.

## 2. 피로균열전파저항의 확률모델과 분포함수

전보<sup>(11)</sup>와 같이, 재료가 피로균열전파에 대해서 갖는 저항의 시험편 내부에서의 불균일성을 나타내기 위하여 공간적인 확률과정  $Z$ 를 도입해서, 피로균열전파식을 다음과 같이 랜덤화 한다.

$$Z(x) = (\Delta K, R)^m \frac{dN}{da} \quad (1)$$

여기서,  $Z(x)$ (즉,  $1/C(x)$ )를 전파 경로  $x$ 에 연한 피로균열전파에 대한 재료의 피로균열전파저항계수(간단히, 전파저항계수)라 부른다.

식(1)에서 알 수 있듯이  $\Delta K$  및  $R$ 을 일정으로 하여 실험을 행하면, 피로균열전파에 대한 재료의 전파저항계수와 실험적으로 구하는  $dN/da$ 의 통계적 특성은 등가로 된다. 따라서, 확률과정  $Z(x)$ 의 특성은 피로균열전파율의 역수를 조사하면 된다. 이  $Z(x)$ 는 재료 강도, 피로균열전파에 관계하는 하나의 파라미터이고, 확률변수이다.

한편, 이 전파저항  $Z$ 의 확률분포(probability distribution)에 관해서는 여러 가지 설이 있지만, 재료 강도가 극치분포 중에서도 경험적으로 Weibull분포에 따르는 예가 많으므로, 본 연구에서는  $Z$ 의 확률분포는 2-모수 Weibull분포에 따른다고 가정한다. Weibull분포의 확률분포함수와 밀도함수는 다음과 같이 주어진다.

$$F_z(Z) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{Z}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (2)$$

$$f_z(Z) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{Z}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left\{-\left(\frac{Z}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 형상계수(shape parameter)이고,  $\beta$ 는 척도계수(scale parameter)이다.

### 3. 실험방법

#### 3.1 재료 및 시험편

시험편 재료는 일반 기계 구조용강인 SM45C를 사용하였으며, 그 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타낸다. 본 실험에 사용한 시험편은 ASTM E647-93의 규정에 의하여 시험편 폭이 100mm 그리고 두께가 6, 12, 18mm인 3종류의 CT시험편을 사용하였다. 시험편의 채취방향은 압연방향과 균열의 전파방향이 직각(L-T direction)이 되도록 하였다.

Table 1 Chemical composition(wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Al
SM45C	0.47	0.20	0.74	0.01	0.18	0.01

Table 2 Mechanical properties

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongat. (%)	Hardness ( $H_B$ )
SM45C	610MPa	342MPa	23.0	170

#### 3.2 피로시험

피로시험에 이용한 시스템은 용량 100kN의 전기 유압 서보식 피로시험기, 서보 시험기를 움직이는 유압펌프, 실험의 제어 등을 행하는 마이크로컴퓨터, 균열길이를 산출하기 위한 개구변위 측정장치, 그리고 주변기기 등으로 구성하였다. 시험조건은 실험실의 대기중에서 응력반복속도 10Hz, 응력비(R) 0.2의 정현파로 하였다. 본 실험에서 제어한  $\Delta K$ 치는 25, 30, 37.5 및 45MPa $\sqrt{m}$ 의 4종류로 행하였다. 균열길이는 피로시험중에 하중과 클립 게이지로부터 측정된 균열개구변위를 자동계측하여 Ashok Saxena등이 제안한 식<sup>(12)</sup>을 사용하여 구하고, 균열길이가 0.5mm 증가할 때마다 데이터를 컴퓨터에 자동적으로 기록하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 피로균열전파율에 미치는 두께의 영향

Fig. 1은 응력확대계수범위 일정제어 피로시험하에서 얻은 피로균열전파율  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 와의 관계를 나타낸다. Fig. 2는 모든 시험편에 대하여 균열길이가 25mm에서 40mm까지 전파하는 경우의  $da/dN$ 를 시험편 두께 B에 대하여 나타낸 것이다. 본 실험의 범위는 피로균열전파의 제2단계 영역인 안정 전파영역에 속한다고 생각되며, 시험편의 두께가 두꺼울수록  $da/dN$ 이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이상에서 알 수 있듯이,  $\Delta K$ 가 증가하면 평균 피로균열전파율도 증가하는 일반적 경향을 나타내고 있지만 동일  $\Delta K$ , 동일 두께의 시험편에서도 피로균열전파율에는 변동이 있음을 알 수 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이,  $\Delta K$ 치가 비교적 낮은 25MPa $\sqrt{m}$ 의 경우, 본 실험에서 조사한 재료의 시험편 두께(B=6~12mm)의 범위에 있어서는 피로균열전파율에 미치는 시험편 두께의 영향은 그렇게 크지 않은 것 처럼 보인다. 비교적 낮은 응력레벨의 경우에는 연강이나 저합금강에서의 낮은 응력확대계수범위에서는 시험편 두께의 영향은 없다고 하는 결과<sup>(9)</sup>와 비슷한 결과를 본 재료의 시험편 두께에서도 얻었다. 그러나  $\Delta K$ 치가 30, 37.5 및 45MPa $\sqrt{m}$ 의 경우는 시험편 두께가 증가하면 피로균열전파율도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 그 경향은  $\Delta K$ 치가 증가할수록 커짐을 알 수 있다. 높은  $\Delta K$ 치 하에서는, 피로균열전파율은 시험편 두께가 증가하면 두께의 구속과 인장응력의 증가에 의해 전파율도 증가하는 것으로 생각되며, 또한 균열선단에서의 전파저항이 두께의 증가와 더불어 더욱 평균화되어 감소하기 때문이라 생각된다. 시험편간의 피로균열전파율의 변동은 두께가 증가할수록 편차가 커짐을 알 수 있다. 본 실험 결과에서 관찰된 피로균열전파율의 차이는 이들 재료가 본래 가지고 있는 이방성의 기계적 성질에 의한 것이라 생각할 수 있으며<sup>(10)</sup>, 피로균열전파율에 대한 재료의 전파저항계수를 고찰함으로써 그 변동성을 파악할 수 있다고 생각된다.

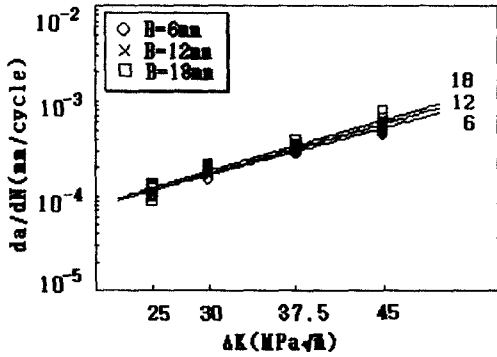


Fig. 1 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta K$

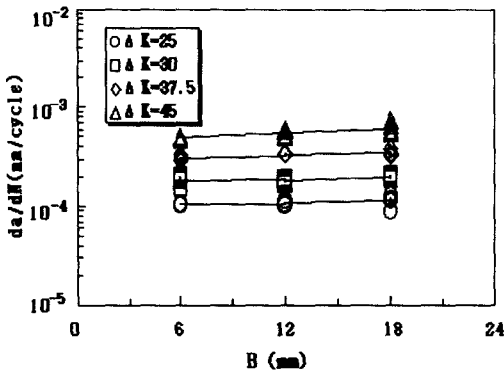


Fig. 2 Effect of specimen thickness on fatigue crack growth rate

#### 4.2 피로균열전파율과 전파저항과의 관계

Fig. 3은 시험편 두께에 대한 평균 피로균열전파 저항의 관계를 각 응력확대계수범위에서 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시험편 두께가 증가하면 전파저항이 감소하는 경향을 알 수 있다. 또한 그 기울기의 양상은 응력레벨이 낮을수록 급해짐을 알 수 있다.

모든 시험편에 대한 평균전파저항  $Z$ 와 평균 피로균열전파율  $da/dN$ 와의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 본 실험 하에서의 평균 피로균열전파율은 전파저항의 증가와 더불어 지수적으로 감소하고 있으며, 시험편 두께에 관계

없이 일의적으로 전파율을 전파저항  $Z$ 의 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = D (Z)^p \quad (4)$$

여기서,  $D = 1.03$ ,  $p = -1.001$ 이다.

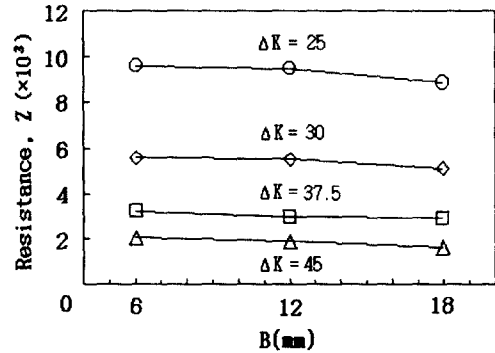


Fig. 3 Effect of specimen thickness on  $Z$

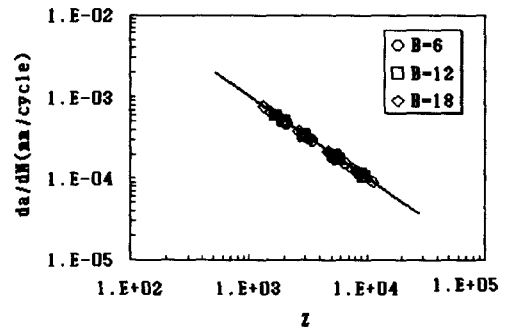
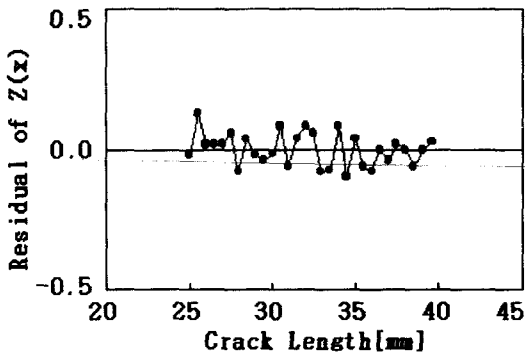


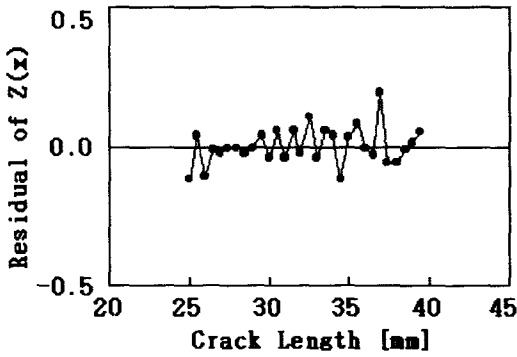
Fig. 4 Relation between  $da/dN$  and  $Z$

#### 4.3 두께에 따른 전파저항의 변동성

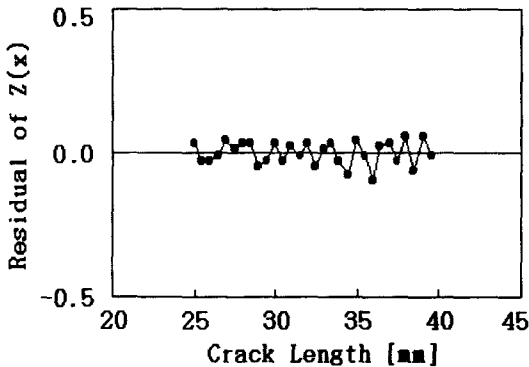
4. 1절에서 언급한 바와 같이 피로균열전파율에는 변동이 있다. 이의 변동성은 피로균열전파저항의 변동성을 고찰하면 잘 알 수 있다. 피로균열전파저항  $Z$ 의 잔차를 균열길이에 대해서 나타낸 일례를 Fig. 5에 나타낸다. 그림은 모두  $\Delta K$ 치가  $25MPa\sqrt{m}$ 의 경우로 (a)는  $B=6mm$ , (b) $B=12mm$ , (c) $B=18mm$ 의 경우이다. 어느 것이나 시험편 내에서



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Examples of the residual

급격히 변동을 하고 있음을 알 수 있다. 시험편의 두께가 12mm로 증가하면 그 변동은 감소하고, 다시 18mm로 증가하면 그 변동은 더욱 감소하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로  $Z$ 의 변동성은 시험편 두께의 증가와 더불어 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 6은 시험편 두께에 대한 전파저항  $Z$ 의 변동계수(coefficient of variation)를  $\Delta K$ 에 의해서 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 동일 응력 레벨에서 시험편 두께가 얇은 6mm의 경우가 그 변동계수가 가장 크고, 그 다음 12mm, 18mm의 순으로 작아짐을 알 수 있다. 그림 중의 더하기 표는 BS4360강에 대한  $\Delta K=28MPa\sqrt{m}$ 에서의 실험 결과<sup>(5)</sup>이다. 전파저항의 변동계수는 시험편 두께가 증가할수록, 또 응력 레벨이 증가할수록 감소함을 알 수 있다.

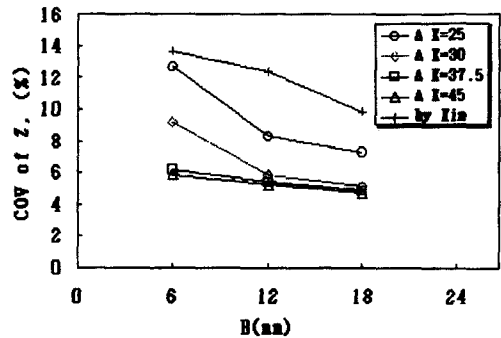


Fig. 6 Effect of specimen thickness on the COV

#### 4.4 재료의 전파저항의 통계적 성질

전파저항의 확률분포는 두께와 응력 레벨에 관계 없이 거의 2모수 Weibull 분포에 따랐다. 하나의 예로,  $\Delta K=25MPa\sqrt{m}$ 의 경우에 대한  $Z$ 의 Weibull 분포의 예를 Fig. 7에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 시험편 두께가 증가하면 그 분포함수는 좌측으로 평행 이동하는 형태를 가짐을 알 수 있다. Table 3에 전 시험편에 대한 2모수 Weibull 분포의 형상모수(shape parameter)  $\alpha$ 와 척도모수(scale parameter)  $\beta$ 를 나타내었다. 동일 응력 레벨에서, 형상모수  $\alpha$ 는 두께가 증가할수록 증가하는 경향이

고, 척도모수  $\beta$ 는 시험편 두께가 증가하면 감소하고 있다.

한편, 시험편의 두께에 상관없이 전 시험편에 대한 재료의 전파저항의 잔차를 구하여 그 자기상관함수<sup>13)</sup>를 Fig. 8에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 자기상관함수는 시험편 두께나 응력레벨에 관계없이 전체적 경향은 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 전파저항의 편차는 Fig. 7에서와 같이 두께가 증가하면 감소하는 경향이다.

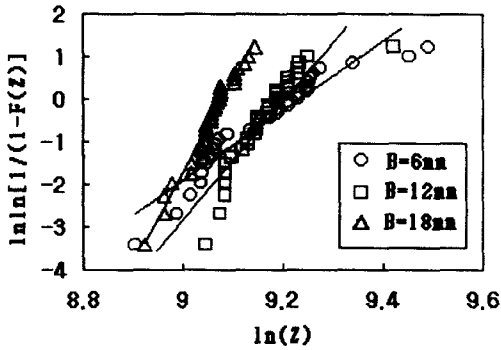


Fig. 7 Weibull plots of Z

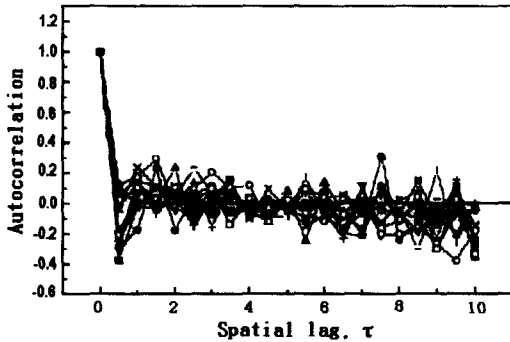


Fig. 8 Autocorrelation functions

Fig. 9은 전파저항 Z의 변동계수와 분포함수의 형상모수  $\alpha$ 와의 관계를 나타낸다. 변동계수 COV는 형상모수  $\alpha$ 의 증가와 더불어 감소하는 음의 상관이 있으며, 다음의 상관 관계식을 얻었다.

$$COV = A + B\alpha \quad (R = -0.98) \quad (5)$$

여기서,  $A=17.092$ ,  $B=-0.582$ 이다.

Table 3 Weibull parameter values of Z

$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )	B (mm)	$\alpha$	$\beta$
25	6	8.7	10143
	12	13.5	9902
	18	17.2	9214
30	6	14.6	5804
	12	18.9	5691
	18	21.5	5225
37.5	6	17.6	3110
	12	20.1	3030
	18	22.0	2965
45	6	18.2	2109
	12	20.1	1912
	18	21.1	1687

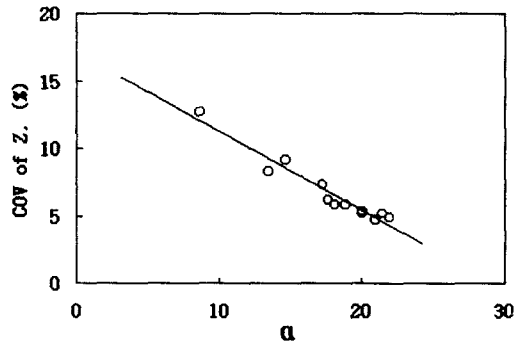


Fig. 9 Relation between COV and  $\alpha$

이상과 같이, 재료의 전파저항의 통계적 성질 중 자기상관함수에는 시험편 두께나 응력레벨이 그렇게 영향을 미치지 않으나, 그 분포함수와 변동계수는 시험편 두께에 의존하는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 피로균열전파율에 미치는 시험편 두께의 영향을 고찰하기 위하여, 두께가 다른 6, 12 및 18mm의 3종류의 일반 기계 구조용강의 CT 시험편을 이용하여 4종류의 응력 레벨에서 일정  $\Delta K$

치 제어 피로시험을 수행하여 피로균열전파율이 시험편 두께에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

$\Delta K$ 치가  $25MPa\sqrt{m}$ 의 경우, 피로균열전파율에 미치는 시험편 두께(B=6~12mm)의 영향은 그렇게 있는 것처럼 보이지 않으나  $\Delta K$ 치가 30, 37.5 및  $45MPa\sqrt{m}$ 의 경우는 시험편 두께가 증가하면 피로균열전파율도 비교적 증가하는 경향을 보였으며, 그 기울기는  $\Delta K$ 치가 증가할수록 커짐을 알 수 있었다. 한편, 평균 피로균열전파율은 평균 피로균열전파저항의 증가와 더불어 지속적으로 감소하였으며, 시험편 두께와 관계없는 상관 관계식을 얻을 수 있었다. 그리고 전파저항의 변동계수는 시험편 두께가 증가할수록, 또 응력 레벨이 증가할수록 감소하였다. 또한, 전파저항의 확률분포는 2모수 Weibull분포에 따르고, 그 형상모수  $\alpha$ 는 시험편 두께가 증가할수록 증가하는 경향이었고, 척도모수  $\beta$ 는 두께와 더불어 감소하였다. 그리고, 전파저항의 자기상관함수에는 시험편 두께나 응력레벨에 그렇게 차이가 없고 전체적 경향은 일치하였다. 한편, 전파저항의 변동계수 COV는 형상모수  $\alpha$ 와 음의 상관관계가 있었으며, 그 상관 관계식은 다음과 같았다.

$$COV = A + B\alpha$$

여기서, A와 B는 각각 17.092 및 -0.582의 값을 얻었다.

### 후 기

본 연구는 97년도 교육부 학술연구조성비(기계공학분야 : ME97-C-11)에 의하여 수행된 연구 결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) Paris, P. C. and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", J. of Basic Engineering, Vol.85, pp.528~534, 1960
- 2) Forman, R. G., V. E. Keary and R.M. Engle,

- "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures", J. of Basic Engineering, Vol.89, pp.459~464, 1967
- 3) 윤한용, 양영순, 윤장호, "균일인폭하중하에서의 확률론적 균열진전 수명해석", 대한기계학회논문집, 제16권 제9호, pp.1691~1699, 1992
- 4) 김선진, "피로균열전파저항에 미치는 시험편 두께의 영향에 관한 신뢰성공학적 고찰", 대한기계학회 94년도 재료 및 파괴부문 학술대회는 문집, pp.31~34, 1994
- 5) Seon-Jin Kim, Sae-Kyoo Oh, Hiroshi Itagaki and Tetsuo Ishizuka, "Effect of Specimen Thickness on Probabilistic Fatigue Crack Growth", Proceedings of the 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles, Vol.IV, pp.219~226, 1996
- 6) 심동석, 김정규, "두께변화에 따른 피로균열진전의 변동성에 대한 확률론적 해석", 대한기계학회논문집, 제22권 제8호, pp.1523~1532, 1998
- 7) Ritchie, R. O., R. F. Smith and J. F. Knott, "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
- 8) Fujitani, K., T. Sakai, A. Nakagawa and T. Tanaka, "Effect of Specimen Thickness on Fatigue Crack Propagation in High Strength Steels", Bull. Japan Soc. Mech. Engineers, Vol.25, pp.1195~1201, 1982
- 9) Richard, C. E. and T. C. Lindley, "The Influence of Stress Intensity and Microstructure on Fatigue Crack Propagation in Ferritic Materials", Eng. Fract. Mech., Vol.4, pp. 951~978, 1972
- 10) Putatunda, S. K. and J. M. Rigsbee, "Effect of Specimen Size on Fatigue Crack Growth Rate in AISI 4340 Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol.22, No.2, pp.335~345, 1985
- 11) 김선진, "피로균열전파저항의 변동성에 의한 균열전파율의 해석", 대한기계학회논문집, 제23권 제7호 게재 예정, 1999

- 12) Ashok Saxena and S. J. Hudak, "Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens," International J. of Fracture, Vol.14 No.5, pp.453~462, 1978
- 13) 日野幹雄, "スペクトル解析", 朝倉書店, 1986