

# 일정 응력확대계수 제어하의 피로균열전파수명 분포의 파라미터 특성에 관하여

김선진\* · 김영식\* · 정현철\*\*

\*부경대학교 기계공학부, \*\*부경대학교 기계공학과 대학원

## Characteristics of Parameters for the Distribution of Fatigue Crack Growth Lives under Constant Stress Intensity Factor Control

SEON-JIN KIM\*, YOUNG-SIK KIM\* AND HYEON-CHEOL JEONG\*

\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*Graduate Student, Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Fatigue Crack Growth Life 피로균열전파수명, Weibull Distribution 와이블 분포, Stress Intensity Factor 응력확대계수, Non-Gaussian Random Process Simulation 비가우스 확률과정 시뮬레이션

**ABSTRACT:** The characteristics of parameters for the probability distribution of fatigue crack growth lives by the non-Gaussian random process simulation method is investigated. In this paper, the material resistance to fatigue crack growth is treated as a spatial random process, which varies randomly on the crack surface. Using the previous experimental data, the crack length - the number of cycles curves are simulated. The results are obtained for constant stress intensity factor range conditions with stress ratio of  $R=0.2$ , three specimen thickness of 6, 12 and 18mm, and the four stress intensity level. The probability distribution function of fatigue crack growth lives seems to follow the 3-parameter Weibull and shows a slight dependence on specimen thickness and stress intensity level. The shape parameter,  $\alpha$ , does not show the dependency of thickness and stress intensity level, but the scale parameter,  $\beta$ , and location parameter,  $\nu$ , are decreased by increasing the specimen thickness and stress intensity level. The slope for the stress intensity level is larger than the specimen thickness.

### 1. 서 론

선박 및 해양구조물과 같은 대형구조물의 경우 전체 피로수명 (fatigue life)에서 피로균열전파수명은 약 70% 이상의 비중을 차지하고 있기 때문에 피로균열전파에 관한 연구는 매우 중요하다 (김경수와 심선식, 2002). 그러나 피로 균열의 발생 (initiation) 및 전파 (growth) 과정은 결정론적인 방법 (deterministic approach)으로 취급하여 왔으나, 현재에는 피로균열의 발생 및 전파 과정이 본질적으로 확률론적인 현상 (probabilistic approach)이라는 것으로 널리 인식하고 있다. 따라서, 피로균열전파수명이 전체 수명의 대부분을 차지하는 중요한 선박 및 해양구조물과 같은 비교적 대형 구조물의 안전성 (safety), 신뢰성 (reliability)을 확보하기 위해서는 부재의 피로균열전파 특성의 통계적 성질 (statistical properties) 혹은 확률분포 (probability distribution) 등과 같은 변동성을 고려할 수 있는 신뢰성공학적 접근법, 혹은 해석에 필요한 충분한 실험 데이터의 확보가 요구된다 (김선진, 1999; 김선진 등, 2000; Seon-Jin Kim, 2001).

Itagaki et al.(1991)은 재질의 공간적 변동과 피로시험에 대한 균열의 측정 간격과의 관계를 신뢰성공학적으로 검토하여 비교적 긴 균열의 전파시험에서 얻은 데이터를 이용하여 비교적 짧은 균열의 전파추정이 가능하다는 것을 보고하였다. 그러나 시험편 두께가 다르면 피로균열전파수명의 확률분포에도

영향이 있을 것으로 생각되며, 또한 재질의 공간적 변동의 양상에 의해서도 피로균열전파수명의 분포에 영향이 있으리라 사료된다. 따라서, 저자 등은 시험편 두께가 다른 해양구조물용 고강력강 (BS 4360)을 이용한 일정 응력확대계수제어 시험을 통하여 시험편 두께가 피로균열전파저항에 미치는 영향을 조사하였고 (김선진 등, 2000). 또한, 확률론적 피로균열전파수명의 시뮬레이션을 통하여 시험편 두께의 영향을 평가한 바 있다 (Seon-Jin Kim, 2001). 심과 김 (1998)의 연구결과에 의하면 시험편 두께에 따라 그 수명분포에도 차이가 있음을 보고하였다. 그러나, 대부분의 실험 결과는 균열선단에서의 응력 상태가 증가하는 일정하중 제어하의 실험결과가 많고 체계적으로 피로균열전파수명의 분포에 대한 확률특성이나 확률분포의 파라미터의 특성에 대해서는 고찰하지 않았다. 또한, 재질의 공간적 변동의 양상에 따라서는 시험편 두께와 응력레벨이 다른 경우에는 그 수명의 확률분포에도 차이가 존재할 것으로 생각된다. 그러나, 이에 대한 연구는 아직까지 아주 미흡한 실정이며, 실험 데이터의 수집도 용이하지 않는 것이 현실이다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 피로균열전파에 대한 재료 저항을 하나의 공간적 확률과정이라 취급하여, 시험편 두께가 다른 기계구조용탄소강 (S45C)에 대한 이전의 실험결과 (김선진 등, 2000)를 이용하여 비가우스 확률과정 시뮬레이션법에 의한 피로균열전파과정을 재현하여 피로균열전파수명의 확률분포를

추정하였다. 특히, 추정된 이 피로균열전파수명의 3-parameter Weibull 분포함수의 파라미터와 시험편 두께 및 응력레벨과의 의존성을 고찰하여 본 재료의 피로균열전파수명의 확률분포의 파라미터 특성 해석을 정량적으로 검토하고자 하였다.

## 2. 이전의 실험결과

본 연구에 사용된 시험편 재료는 일반 기계구조용 탄소강인 S45C이며, 시험편은 ASTM E647-93의 규정에 의하여 폭이 100mm 그리고 시험편 두께가 6, 12, 18mm인 3종류의 CT 시험편에 대하여 실험을 수행하였다(김선진 등, 2000). 시험조건은 대기중에서 응력반복속도 10Hz, 응력비 0.2의 정현파로 일정 응력확대계수( $\Delta K$ ) 제어하의 실험을 행하였다. 본 실험에서 제어한  $\Delta K$ 치는 25, 30, 37.5 및 45  $MPa\sqrt{m}$ 의 4종류에 대하여 시험편 두께 6, 12, 18mm에 대하여 각  $\Delta K$ 당 5개의 시험편을 사용하여 총 60개의 시험편을 사용하여 실험을 행하였다. 일례로 두께 12mm의 CT 시험편에 대하여  $\Delta K$  치가 25, 30, 37.5, 45  $MPa\sqrt{m}$ 의 조건하에서 얻은 응력반복수  $N$ 과 균열길이  $a$ 와 관계를 Fig. 1에 나타낸다. 동일한 시험편 두께와 동일  $\Delta K$ 에 대하여 구한 재료의 피로균열 전파저항계수  $Z(x)$ 의 평균자기상관함수(autocorrelation function)와 확률분포함수는 다음과 같은 지수함수와 3-parameter Weibull분포로 근사함이 가능하였다. 즉,

$$R(\tau) = \exp(-a_0|\tau|) \quad (1)$$

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

$R(\tau)$ 와  $F_Z(Z)$ 는 각각 피로균열 전파저항계수  $Z$ 의 자기상관함수 및 확률분포함수를 나타낸다.

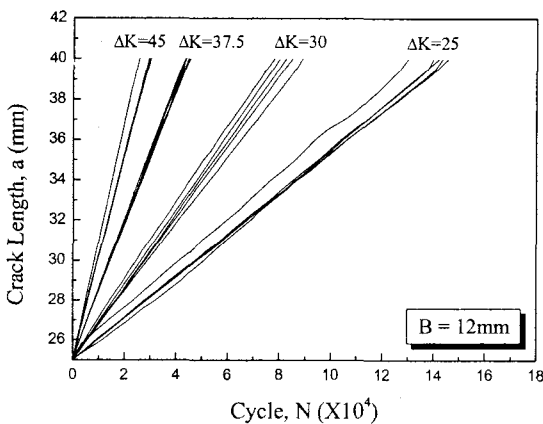


Fig. 1 a~N curves for 12mm specimens

## 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 3.1 피로균열전파의 시뮬레이션

피로균열전파의 시뮬레이션에 선행해서 실험에서 구한  $Z(x)$ 의 확률 특성, (1) 및 (2)식에 기초해서  $Z(x)$ 의 시뮬레이션을 행하였다. 실험에서 구한  $Z(x)$ 는  $x$ 가 0.5mm 진행하는 동안의 평균적인 피로균열전파저항이기 때문에 본 시뮬레이션에서도 0.5mm 간격으로  $Z(x)$ 를 시뮬레이트하고, 임의의 균열길이  $a_i(i=1,2,\dots,n)$ 에 달하는 반복수  $N_i$ 는 시뮬레이트한 확률과정  $Z(x)$ 의 데이터로부터 일정  $\Delta K$ 하의  $a\sim N$ 관계를 시뮬레이션 하였다. 본 시뮬레이션의 알고리즘은 이전의 보고와 같다(김선진 등, 2000).

Fig. 2는 두께 18mm,  $\Delta K=30MPa\sqrt{m}$ 에 대한 시뮬레이션한 결과와 실험 결과를 함께 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 본 시뮬레이션의 결과가 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 나타낸다. 따라서, 실험 결과의 통계적 특성을 기초로 하여 모든 시험편에 대하여, 100개의 시험편에 대한 시뮬레이션을 행하여 분포 특성을 고찰하였다.

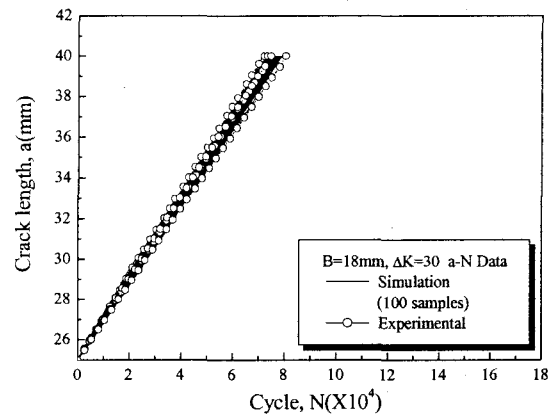


Fig. 2 Results of comparison of simulation and experimental results

### 3.2 피로균열전파수명 분포의 추정

일례로, Fig. 2에서 구한 100회분의  $a\sim N$ 곡선에서 균열길이가 각각 30, 35, 40mm에 전파했을 때의 전파수명  $N(a)$ 을 구해 Weibull 확률지상에 그린 것을 Fig. 3에 나타낸다. 균열길이가 증가할수록 분포가 우측으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그림 중의 실선은 직접 탐색법을 이용하여 나타낸 분포함수의 곡선이다. 이와 같은 방법으로 각 조건에 대한 확률분포함수를 추정하여 파라미터의 특성 해석을 행하였다. 한편, 피로균열전파에 대해서 구조물의 요구 신뢰도(reliability)  $R(n)$ 이 주어지면, 추정된 피로균열 전파수명의 분포함수를 이용해서 수명을 구하는 것이 가능하다. 또, 균열전파경로에 의한 장소에 있어서

전파저항계수  $Z(x)$ 가 최소치를 취했을 때의 전파수명을  $N_0$ 라 한다.

한편, 전파수명의 확률분포에 관해서는 금속재료의 경우 대수정규분포 혹은 3-parameter Weibull 분포함수가 주로 많이 사용되고 있다(材料, 1993). 그러나 본 연구에서는 분포의 적합성을 논하려는 것이 아니고 분포 파라미터의 특성을 논한다는 것과 본래 재료강도가 극치분포 중에서도 경험적으로 Weibull 분포에 따르는 예가 많으므로, 수명의 확률분포도 Weibull 분포에 따른다고 가정하여, 본 연구에서는 전파저항과 동일한 다음과 같은 3-parameter Weibull 분포함수에 적합하였다.

$$F_N(N) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{N-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right\} \quad (3)$$

여기서,  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 각각 피로균열전파수명의 3-parameter Weibull 분포의 형상계수(shape parameter), 척도계수(scale parameter), 위치계수(location parameter)이다.

Fig. 3에서도 알 수 있듯이 꼭선형태의 3-parameter Weibull 분포함수가 수명의 분포를 잘 나타낸다고 할 수 있다.

한편, 신뢰도  $R(N)$ 은 다음 식으로 표시된다.

$$R(N) = P_r[a < a_f] = 1 - F_N(N) \quad (4)$$

(3)식을 (4)식에 대입하면 신뢰도는 다음과 같다.

$$R(N) = \exp\left\{-\left(\frac{N-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right\} \quad (5)$$

이다. (5)식으로부터 구조물의 소정의 신뢰도  $R(N)$ 이 주어지면 그것에 대한 사용기간  $N$ 을 구할 수 있다. 또, (5)식에서 알 수 있듯이 만약  $\gamma$ 가 존재하면  $\gamma$ 는 임의의 균열길이  $a$ 에 도달하는 전파수명의 최소치이므로

$$N_s = \gamma \quad (6)$$

이다.

만일 사용기간  $N$ 이 이 값 이하이면 균열은 길이  $a$ 에 도달하지 않는다. 즉,  $R(N)=100\%$ 이다. 이때의  $N_s$ 를 최소수명이라 정의한다.

일례로 Fig. 4와 Fig. 5는 각각 신뢰도  $R(N)$ 이 99.0%, 99.99%에 대한 균열전파수명(사용기간)  $N$ 을 시험편 두께에 대하여 응력별로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일 신뢰도에 있어서 사용기간은 시험편 두께가 증가할수록 감소하고, 동일 시험편에 있어서는 응력레벨이 감소할수록 증가하였다. 한편  $N_0$ 는 최소수명  $N_s$ 와 거의 일치함을 보였다.

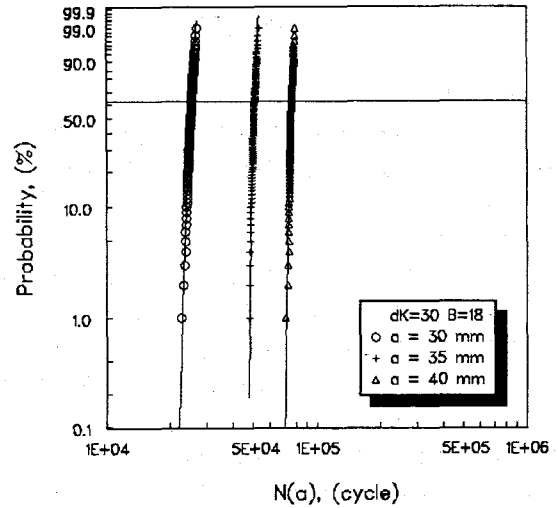


Fig. 3 Weibull plots of growth life by simulation

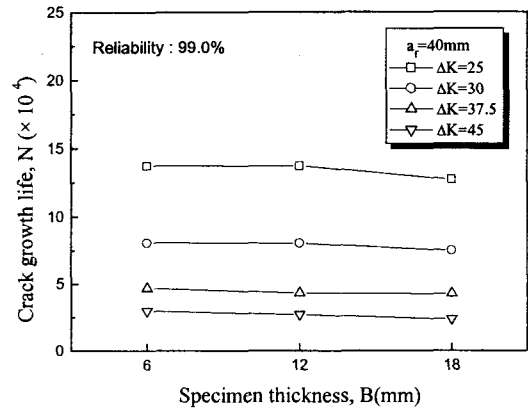


Fig. 4 Effects of growth life on thickness ( $R(n)=99.0\%$ )

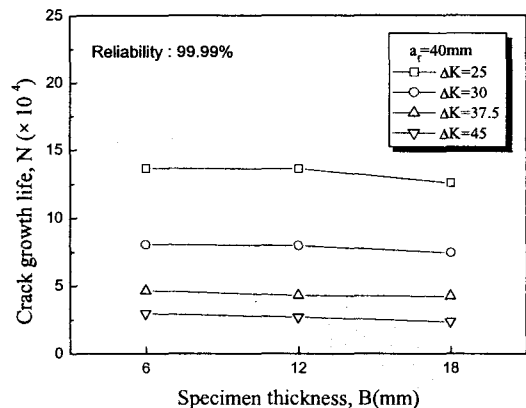


Fig. 5 Effects of growth life on thickness ( $R(N)=99.99\%$ )

### 3.3 피로균열전파수명 분포의 시험편 두께 의존성

Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8은 시뮬레이션 결과를 이용해서 3-parameter Weibull 분포의 parameter의 시험편 두께 의존성을 응력 레벨별로 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 동일 균열길이에서 전파수명의 Weibull 분포함수의 형상 파라미터(shape parameter)  $\alpha$ 의 값은 시험편 두께의 의존성은 판단하기 어려우나 저응력 레벨인  $\Delta K$ 가 25 및 30MPa $\sqrt{m}$ 에서는 시험편 두께가 증가하면 증가하는 경향을 보이고 있으나, 비교적 고응력 레벨인  $\Delta K$ 치가 45MPa $\sqrt{m}$ 에서는 시험편 두께가 증가하면 형상 파라미터  $\alpha$ 는 감소하는 경향을 보이고 있다. Table 1은  $\Delta K$ 가 28MPa $\sqrt{m}$ 로 제어한 경우의 BS4360강에 대한 3-parameter Weibull 분포함수의 형상 파라미터의 시험편 두께 의존성을 나타낸 것이다(Seon-Jin Kim, 2001). 시험편 두께가 증가하면 형상 파라미터도 증가하는 결과를 나타내었다. 두 재료에 대한 결과를 비교해 보면 비교적 저응력 레벨에서는 시험편 두께가 증가하면 그 형상계수도 증가하는 의존성을 나타낸다고 할 수 있다. 그러나 응력레벨에 관계없는 전체의 시험편 두께 의존성에 대한 규명은 좀 더 많은 실험과 고찰이 필요하다고 생각된다. 또한 18mm 시험편 두께인 경우에는 응력레벨이 증가할수록 분포의 형상 parameter는 저응력 레벨인 25MPa $\sqrt{m}$ 의 경우를 제외하면 감소하는 경향이었으나, 6, 12mm의 두께에서는 규칙성이 없음을 보였다. 그러나, 본 연구 범위에 대한 분포의 형상 파라미터는 1.57~3.36 정도의 값을 나타내었다. 이는 수명의 분포양상이 시험편 두께나 응력레벨에 관계없이 비교적 비슷한 분포 양상을 보인다고 할 수 있다. 그러나, Fig. 7, 8에서 알 수 있듯이 수명분포의 특성 파라미터인  $\beta$ 와 위치 파라미터인  $\nu$ 는 모두 시험편 두께가 증가할수록 감소하였으며, 또한 동일 시험편 두께에서 응력레벨이 증가하면 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 응력레벨이 증가할수록 균열전파속도가 빠르게 되는 결과라 생각된다. 수명분포의 특성 파라미터인  $\beta$ 와 위치 파라미터인  $\nu$ 는 모두 Table 1의 BS4360의 결과와 같은 결과를 얻었다.

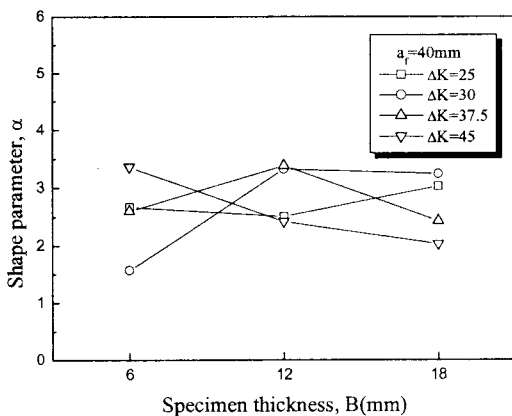


Fig. 6 Specimen thickness dependency of shape parameter

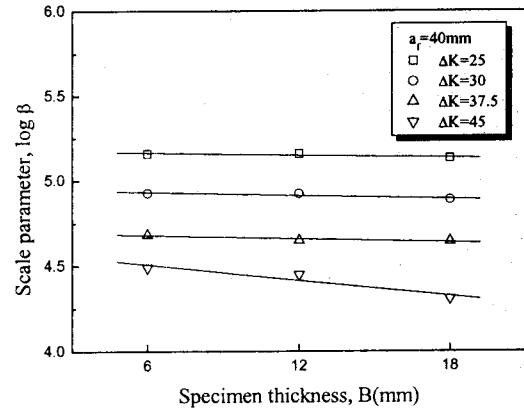


Fig. 7 Specimen thickness dependency of scale parameter

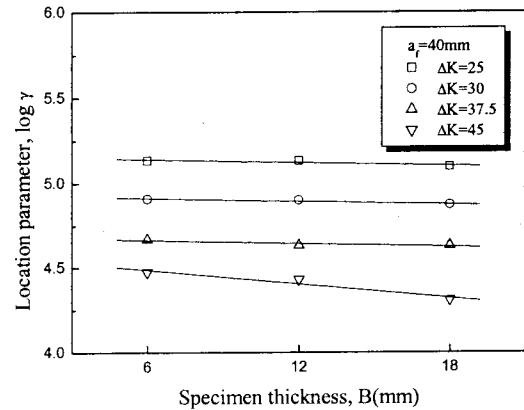


Fig. 8 Thickness dependency of location parameter

Table 1 The Weibull parameters for BS4360 steel

Thickness	Crack(mm)	$\alpha$	$\beta$	$\nu$
6	25.0~40.2	2.32	124026	90060
12	25.0~40.2	2.68	116721	87057
18	25.0~40.2	3.99	91793	73391

### 3.4 피로균열전파수명 분포의 응력레벨 의존성

Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11은 3-parameter Weibull 분포의 parameter의 응력레벨 의존성을 시험편 두께별로 나타낸 것이다. Fig. 6에서와 같이, 동일 균열길이까지 전파수명의 Weibull 분포의  $\alpha$ 값은 응력레벨의 의존성은 판단하기 어려우나 고응력 레벨인  $\Delta K=45$ MPa $\sqrt{m}$ 에서는 시험편 두께가 증가하면 감소하는 일반적인 경향을 보였으나, 다른 응력레벨 범위에서는 시험편 두께에 대한 파라미터의 의존성을 규명하기는 곤란하였다. 본 연구 범위에 대한 분포의 형상 파라미터는 1.57~3.36

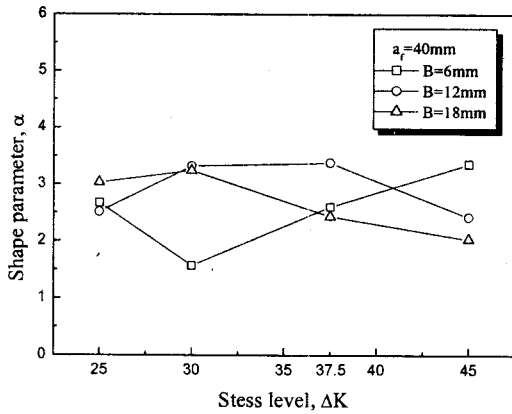


Fig. 9 Stress dependency of shape parameter

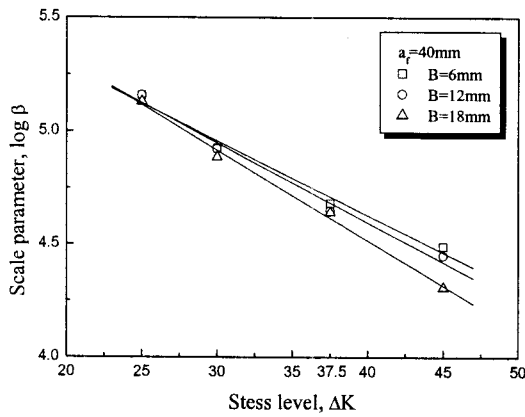


Fig. 10 Stress dependency of scale parameter

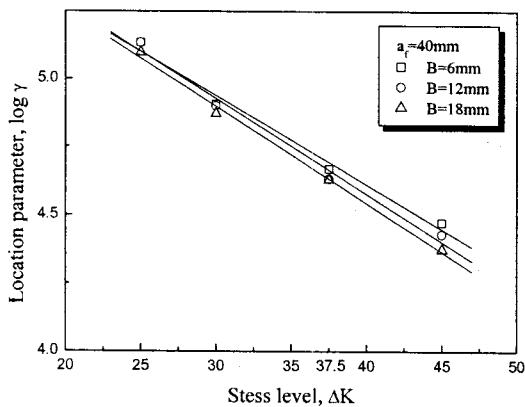


Fig. 11 Stress dependency of location parameter

정도의 값을 나타내었다. 이는 수명의 분포양상이 시험편 두께나 응력레벨에 관계없이 비교적 비슷한 분포 양상을 보인다고

할 수 있다. 한편, Fig. 10, 11에서 알 수 있듯이, 분포의 특성 파라미터인  $\beta$ 와 위치 파라미터인  $\gamma$ 는 모두 응력레벨이 증가할수록 감소하였으며, 또한 동일 응력레벨에서도 크게 차이가 없으나, 고응력 레벨인  $45\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서는 약간의 차이를 보였다. 척도 파라미터인  $\beta$ 는 두께가 증가할수록 감소하였고, 위치 파라미터는 두께가 증가할수록 반대로 감소하였다.

### 3.5 피로균열전파수명 분포의 시험편 두께 및 응력레벨 의존성 고찰

많은 금속재료의 경우 형상계수는 시험편 두께가 증가하면 증가할 것으로 예상되나, 본 연구 결과에 의하면 시험편 두께의 형상 파라미터 의존성을 명확히 결론짓기에는 다소 어려움이 있을 것으로 예상된다. 이는 동일 시험편 두께에 대한 시험편의 수의 문제, 본 재료의 응력레벨에 대한 재질의 통계적 특성 등에 기인한 결과라고 사료되나, 이에 대한 정확한 해석을 위해서는 더 많은 실험 결과에 의한 통계적 해석과 고찰이 요구된다. 한편, 척도 파라미터와 위치 파라미터는 모두 시험편 두께와 응력레벨의 의존성을 보이고 있다. 각 응력레벨에서 시험편 두께와 혹은 동일 시험편 두께에서 응력레벨에 대한 Weibull 분포의 척도 및 위치 파라미터와의 사이에는 다음의 관계식이 성립함을 알 수 있었다. 또한, 최소자승법에 의하여 구한 각각의 계수값을 Table 2 및 Table 3에 나타낸다.

$$\log \beta = a + bB \quad (7)$$

$$\log \beta = a' + b'(\Delta K) \quad (8)$$

$$\log \gamma = c + dB \quad (9)$$

$$\log \gamma = c' + d' \cdot B \quad (10)$$

피로균열전파수명의 분포 특성은 시험편 두께보다도 응력레벨 의존성이 크다는 것을 알 수 있었다. 응력레벨이 증가할수록 척도 및 위치 파라미터의 두께 의존성이 증가하는 경향임을 알 수 있다.

Table 2 Constants for thickness dependency

$\Delta K$	$a$	$b$	$R$	$\Delta K$	$c$	$d$	$R$
25	5.177	-0.0023	-0.87	25	5.158	-0.0031	-0.87
30	4.951	-0.0033	-0.90	30	4.928	-0.0030	-0.94
37.5	4.698	-0.0034	-0.94	37.5	4.682	-0.0033	-0.90
45	4.598	-0.0152	-0.95	45	4.568	-0.0138	-0.96

Table 3 Constants for stress dependency

$B$	$a'$	$b'$	$R$	$B$	$c'$	$d'$	$R$
6	5.947	-0.0330	-0.99	6	5.915	-0.0326	-0.99
12	6.007	-0.0353	-0.99	12	5.974	-0.0349	-0.99
18	6.119	-0.0400	-0.99	18	5.962	-0.0355	-0.99

## 5. 결 론

시험편 두께와 응력레벨 의존성을 기초로 강의 피로균열전파 수명의 확률분포 특성 해석을 검토할 목적으로 기계구조용탄소강인 S45C의 피로실험 결과에서 얻은 재료의 통계적 특성을 이용하여 피로균열전파의 확률과정 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

소수의 피로시험 결과를 이용해서 설계자료로 중요한 피로균열전파 수명의 확률분포를 확률과정 시뮬레이션 방법에 의해서 추정할 수 있었으며, 신뢰도 평가도 가능함을 알 수 있었다. 또한 피로균열전파수명 분포를 지배하는 3-parameter Weibull 분포의 parameter에 대한 시험편 두께 및 응력 레벨의 의존성을 정량적으로 명확히 하였다. 그러나, 형상계수에 대해서는 좀 더 많은 실험 데이터에 의한 고찰과 해석이 필요로 함을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- 김경수, 심천석 (2002). "전자스펙클턴 간섭시스템을 이용한 피로하중을 받는 균열선단에서 탄소성 영역 측정에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제16권 제4호, pp 13-18.
- 김선진 (1999). "피로균열전파저항의 변동성에 의한 균열전파율의 해석", 대한기계학회논문집 제23권 제7호, pp 1139-1146.
- 김선진, 윤성환, 전창환, 김일석 (2000). "강의 피로균열전파수명의 확률분포추정에 관한 연구", 한국해양공학회지 제14권 제4호, pp 73-78.
- 심동석, 김정규 (1998). "두께변화에 따른 피로균열전진의 변동성에 대한 확률론적 해석", 대한기계학회논문집, 제22권 제8호, pp 1523-1532.
- Iatagaki, H., Ishizuka, T. and Kim, S. J. (1991). "Effect of Spatial Distribution of Material Properties on its Experimental Estimation (Part 1 Fatigue Crack Growth)", J. Soc. Nav. Archit. of Japan, Vol 170, pp 665-671.
- Seon-jin Kim (2001). "Evaluation of Specimen Thickness Effect by Simulation of Probabilistic Fatigue Crack Growth", International Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 4, No 2, pp 25-30.
- Seon-jin Kim, Hiroshi Itagaki and Tetsuo ishizuka (2000). "Effect of Specimen Thickness on the Statistical Properties of Fatigue crack Growth Resistance in BS4360 Steel", KSME International Journal, Vol 14, No 10, pp 1041-1050.
- 材料 (1993). "材料強度統計의性質", Vol 42, No 478, pp 888-894.