

〈論 文〉

# 신뢰성 공학적 피로 균열의 발생, 진전 수명 평가 및 예측에 관한 연구(I)

— 피로 균열 진전 수명의 통계학적 분포 특성 —

권재도\* · 최선호\* · 황재석\*\* · 곽상국\*\*\* · 전경옥\*\*\*\* · 장재영\*\*\*\*

## Evaluation and Prediction for the Fatigue Crack Initiation and Growth Life by Reliability Approach(I)

— Statistical Consideration for Fatigue Crack Growth Life —

J.D.Kwon, S.H.Choi, J.S.Hwang, S.G.Kwak, K.O.Chon and J.Y.Jang

**Key Words :** Fracture Mechanics(파괴역학), Boundary Element Method(경계요소법), S.I.F Calibration(응력확대계수 검정), Fatigue Crack Growth Rate(피로크랙 성장률), Statistics(통계학), Life Prediction(수명예측)

### Abstract

Life prediction and residual life prediction of structures or machines are one of the most strongly world wide needed problems as requirement in the stage of slowly developing economy which comes after rapidly and highly developing stage. For the purpose of statistical life prediction, fatigue test was conducted under the 4 stress levels, and for each stress level, about 20 specimens are used. The statistical properties of crack growth parameter  $m$  and  $C$  in the fatigue crack growth law of  $da/dN = C(\Delta K)^m$ , and the relationship between  $m$  and  $C$ , and the statistical distribution pattern of fatigue crack growth rate can be obtained by experimental results.

### 1. 서 론

1970년대 고도 급속 성장기에 건설하기 시작한 대형 플랜트, 고온, 고압 용기, 원자력 발전 설비 등과 같은 기계 구조물들은 그 사용 기간이 길어짐과 더불어 수명상의 문제가 제기 되기 시작할 것이며, 이에 따라 검사, 보수, 교환, 사용정지, 운전조건의 제한, 재건설, 안정성 및 신뢰성 검토 등

기존 기계 구조물들을 하루라도 더 길게, 더 안전하게 그리고 효율 좋게 사용하고자 하는 요구는 점점 더 커져가고 있으며 이는 산업계 각 분야에서 가장 중요하고도 실질적인 문제로 대두되고 있다. 이와 같은 관점에서 기계 구조물의 수명 예측은 중요한 문제로 등장하고 있으며, 이에 따라 통계학적인 방법과 파괴 역학을 결합한 통계 파괴 역학 및 신뢰성 공학이 그 중요성을 더해가고 있다. 이와 병행하여 최근의 컴퓨터의 발전과 더불어 구조물을 보수 관리를 위한 의사 결정 지원 시스템의 개발<sup>(1)</sup>에 관한 연구와 파괴 역학 분야에 대한 전문가 시스템<sup>(2)</sup> 및 강도 평가를 위한 대화형 시스템<sup>(3)</sup>의 개발 등에 관한 연구가 진행되고 있다.

\*정회원, 영남대학교 공과대학 기계설계학과

\*\*정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\*정회원, 영남공업전문대학 자동차학과

\*\*\*\*영남대학교 대학원

그러나, 종래의 피로 및 파괴강도에 대한 연구는 균열의 발생, 진전 및 파단에 대한 연구<sup>(4-6)</sup>가 주종을 이루고 있다. 이와같은 연구들 중에도 균열의 발생, 진전 및 파단에 대한 통계적인 연구결과<sup>(7-10)</sup>는 극소수에 불과하여, 이들 데이터를 이용한 통계학적인 결합체의 파괴수명 예측을 하기에는 부족한 점이 많다고 생각된다. 또한, 피로에 대한 구조물의 신뢰성 해석을 확립하기 위해서는 피로균열의 발생 및 파단수명과 피로균열 진전속도의 확률특성을 밝히는 것이 필요하지만, 이 특성을 밝힐 만한 충분한 실험 데이터의 수도 부족한 점이 많다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 결합체의 정도 높은 수명 예측을 하기 위한 기초연구의 일환으로서 다수의 피로 실험을 통한 다수의 실험 데이터로부터 확률통계학적 방법을 적용해서 피로 균열의 발생, 진전 및 파단 특성의 정략적인 파악을 수행하여, 수명에 측 및 신뢰성 평가를 위한 시스템에 도입함으로써 실제 구조물의 수명예측에 적용하고자 한다. 피로 균열의 발생 및 파단수명의 통계적 분포특성과 수명예측에 관해서는 제 2 보 등에서 보고할 예정이다.

## 2. 피로 균열 진전 실험

### 2.1 실험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 시험편의 재료는 포항제철(주)에서 생산한 두께 3.2mm의 SS41 구조용 강이며, 화학적성분 및 기계적성질은 Table 1 및 Table 2와 같다.

그리고, Fig. 1(a)의 본 연구에 사용된 시험편의 형상을 나타낸다. 피로시험에 사용된 시험편의 노치선단의 형상은 피로균열의 발생특성에 미치는 영향이 크다는 보고<sup>(11)</sup>가 있다.

따라서, 본 연구에서는 노치선단 형상이 피로균열 발생 특성에 미치는 영향을 최소화 하기 위하여 노치(notch)의 가공은 센터드릴 작업후, 방전가공기를 사용하여 노치길이  $2a=6.3\text{mm}$  및  $8\text{mm}$ , 노치선단 곡률반경  $\rho$ 는  $0.2\text{mm}$ 로 일정하게 가공하였다. Fig. 1(b)는 시험편을 물림턱에 고정시킨 방법을 나타낸 것으로 시험편과 양면척은 고정용 핀과 핀 양측에 두개의 보조볼트를 사용하여 너트로 체결하였다. 이때 각 시험편은 초기 체결력의 불균일로 인해 균열 진전 속도가 분산이 될 가능성을 최

**Table 1** Chemical composition of SS41 steel,  
 $t$ =thickness

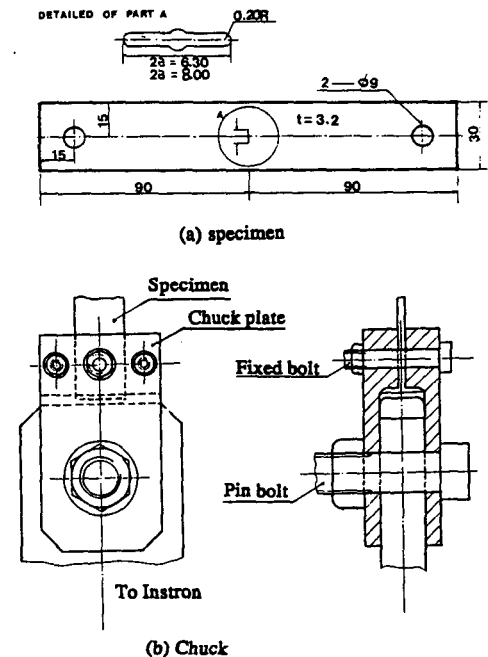
	Si	Mn	Cr	Ni	P	C	S
3.2t	0.061	0.740	0.013	0.015	0.014	0.150	0.013

**Table 2** Mechanical properties of SS41 steel

Yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Reduction of area (%)
35	46	22	27

소화하기 위하여 토크렌치를 사용하여 550kg-cm의 일정한 토크로 체결후 실험을 수행하였다. 또한 척 부에서 가능한한 등분포 하중을 가하기 위하여 척의 내면은 너링 작업을 행하였다.

통계적 피로시험을 행하기 위해 다량의 시험편이 필요하기 때문에, 본 연구에서는 노치 길이 6.3mm의 시험편을 30개, 8.0mm의 시험편을 60개 제작하여, 가공후 노치 길이 및 곡률반경을 현미경에서 검사후 1/50mm 정도내에 들어가는 시험편만 선별하여 실험을 행하였다. 또한 노치길이가 8.0mm인



**Fig. 1** Specimen geometry and holding chuck( $\phi$  dimensions : mm)

경우에는 3개의 응력 레벨에 대해서 각각 20개 정도의 시험편을 사용하여 실험을 행하였다.

2.2 피로시험방법

피로시험은 Instron사 제품의 유압서어보 피로시험기를 사용하여 상온에서 주파수 15Hz, 응력비  $R=0.05$ , 사인파형(sine wave)의 인장-인장 하중 제어 방식으로 실험을 행하였다.

피로균열길이 측정은 시험기에 부착시킨 이동식 현미경을 사용하였으며, 시험편 전면 좌, 우측의 균열증가분을 측정한 후 초기 노치길이를 더하여 균열길이  $2a$ 로 정의하였다.

본 연구의 목적상 균열의 발생 및 진전수명을 정확히 파악하는것이 필요하나, 이동식 현미경으로는 그 정도가 떨어지고 일정한 반복횟수 후에 균열이 길게 진전되어 버리면 발생수명의 파악에 어려운 점이 있다. 따라서 정확한 균열의 발생 수명과 진전 특성을 측정하기 위하여 피로균열이 발생하기전부터 0.3mm이상 진전할때까지 각시험편마다 약 5~6회 정도 표면 레프리카(replica)를 채취해서 만능투영기 및 현미경을 사용하여 균열발생여부를 확인하였다. 이와같은 실험을 노치길이 6.3mm에서는  $\Delta\sigma=15.5\text{kg/mm}^2$ , 노치길이 8.0mm에서는  $\Delta\sigma=13.5, 11.3$  및  $9.2\text{kg/mm}^2$ (초기노치의 응력 확대계수범위  $\Delta K$  값이 노치 길이 6.3mm에 대해  $50\text{kg/mm}^{3/2}$ , 노치 길이 8.0mm에 대해서는 50, 42 및  $34\text{kg/mm}^{3/2}$ )의 4개 응력레벨에서 실험을 행했다.

균열발생수명 측정후 균열진전과정에서부터 파단 수명까지는 일정한 하중반복횟수  $N$ 마다 하중진폭만을 정지시켜서 피로균열 진전량을 측정하였다. 이와같이 측정하여 얻어진 81개 시험편에 대한 균열길이  $a$ 와 하중반복횟수  $N$ 의 데이터로부터  $a-N$  선도 및  $\Delta K-da/dN$  선도를 작성하였다.

3. 응력 확대 계수의 검정

피로 균열 진전 속도 법칙에 따른 균열 진전 속도의 분산 문제를 통계학적으로 취급하기 위하여서는 응력확대 계수의 정도가 중요한 인자로 대두된다. 그러나 본시험편은 Fig. 1(a) 및 (b)에서 나타낸 것과 같이 고정용 핀 및 보조나사를 사용하여 충분히 체결함으로써 면압력을 가했다고 생각되나 완벽히 등분포 하중으로 보기는 어렵다. 따라서 응력확

대 계수의 정도가 피로 균열 진전 속도 법칙의 상수  $C$  및 지수  $m$ 의 분산에 미치는 영향을 확실하게 하기 위하여 본 연구자들이 개발한 2차원 경계요소법 프로그램<sup>(12)</sup>을 사용하여 응력확대 계수를 해석해 보았다. 본 해석에 사용한 경계 요소법 프로그램은 절점수 82개까지 해석이 가능하고 Isoparametric 요소를 사용하였으며, 형상 함수로는 Quadratic 요소를 사용하였다. 해석용 모델은 시험편의 대칭성을 이용하여 1/4을 요소 분할하였으며, 모델의 길이와 폭의 비  $L/W=4$ , 균열 길이와 폭의 비  $2a/W=0.5$ 인 경우에 대하여 집중하중 및 집중하중과 등분포하중이 동시에 작용하는 경우는 절점수 60개, 이중 절점수 7개,  $X$  및  $Y$  방향 변위 구속수 13개로 분할하였으며, 등분포하중만이 작용하는 모델의 경우는 절점수 48개, 이중 절점수 5개,  $X$  및  $Y$  방향 변위 구속수 11개로 분할한 예를 Fig. 2에 나타내었다. 특히 균열 선단 부근과 집중하중이 작용하는 핀 구멍부는 해석의 정도 향상을 도모하기 위하여 등비 간격으로 자동 분할하였다.

하중조건은

- (1) 전체 하중이 등분포 하중만으로 작용하는 경우

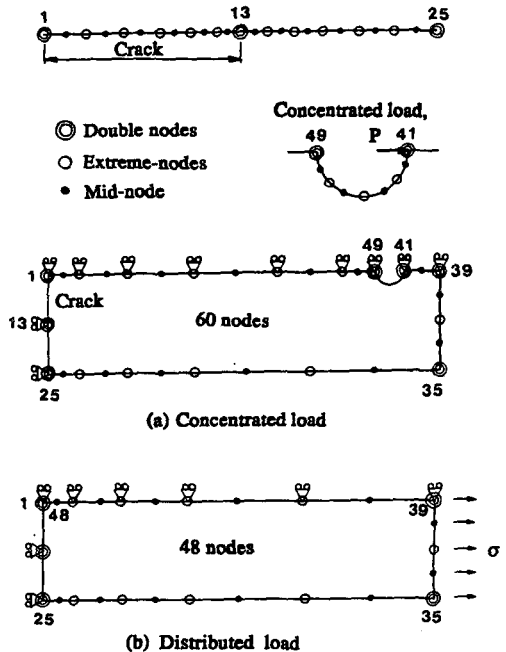


Fig. 2 Boundary element method meshes for finite plate with center crack

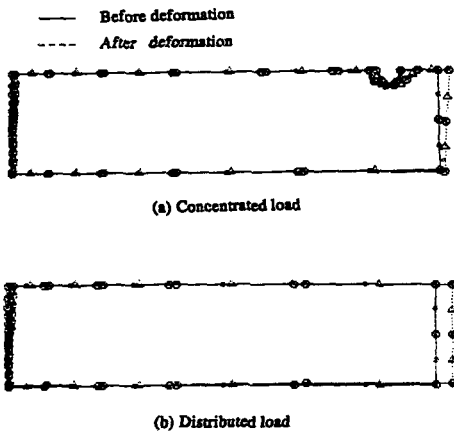


Fig. 3 B.E.M. displacement diagram for finite plate with center crack

- (2) 등분포 하중이 75%, pin부에 집중하중이 25% 작용하는 경우
- (3) 등분포 하중이 50%, pin부에 집중하중이 50%로 작용하는 경우
- (4) 등분포 하중이 25%, pin부에 집중하중이 75%로 작용하는 경우
- (5) 전체 하중이 pin부에 집중하중만으로 작용하는 경우의 5종류로 가정하였다.

이상과 같이 해석하여 순수 집중 등분포 하중만 작용하는 경우의 변형도를 Fig. 3(a)에 나타내었으며 순수 등분포 하중만 작용하는 경우 변형도를 Fig. 3(b)에 나타내었다. Fig. 3(a) 및 (b)에서 실선은 요소 분할도를 나타내며 점선은 변형후의 형상을 나타낸다.

일반적으로 중앙 균열을 가진 유한폭의 판이 균일한 인장력을 받는 경우의 응력 확대 계수는 Tada에 의해 다음 식<sup>(13)</sup>으로 주어진다.

$$\Delta K = \sigma \sqrt{\pi a} F(a) \quad (1)$$

$$F(a) = (1 - 0.025a^2 + 0.06a^4) * \sqrt{\sec(\alpha\pi/2)}$$

여기서  $\alpha = 2a/W$ 이고,  $W$ 는 시험편의 폭이다.

경계요소법에 의해 해석한 균열 부근의 변위의 값들로부터 응력 확대 계수를 해석한 결과와 Tada의 등분포 하중을 받는 경우의 이론해를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

이 결과로부터 등분포 하중만이 작용하는 경우 BEM해석 결과는 Tada의 결과보다 약 0.44% 정도 적은 값을 가지나, 등분포하중과 집중하중의 비의 변화에 따라 BEM 해석 결과가 Tada의 해보다 조

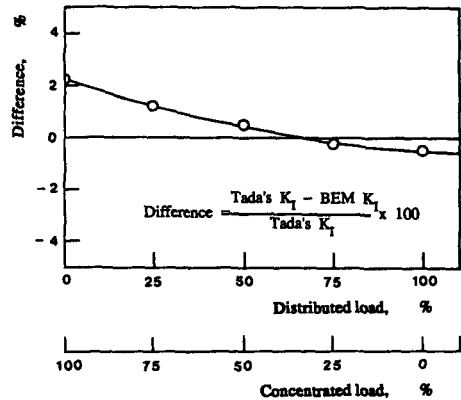


Fig. 4 Relationships between distributed and concentrated load ratio and difference of stress intensity factor by Tada's results

금씩 커져가는 경향이 나타났으며, 순수 집중하중만이 작용하는 경우는 Tada의 해보다 약 2.2% 정도 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 응력 확대 계수의 값은 Tada의 값을 그대로 사용하기로 하였다.

#### 4. 피로균열 진전량의 통계학적 분포특성

피로시험 도중 일정응력 진폭하에서 일정하중 반복횟수를 가한후, 이동식 현미경 및 표면 레프리카로 균열 길이의 증가분  $\Delta a$ 를 측정하는 과정을 반복하였으므로, 이들 결과로부터 일정 사이클 반복

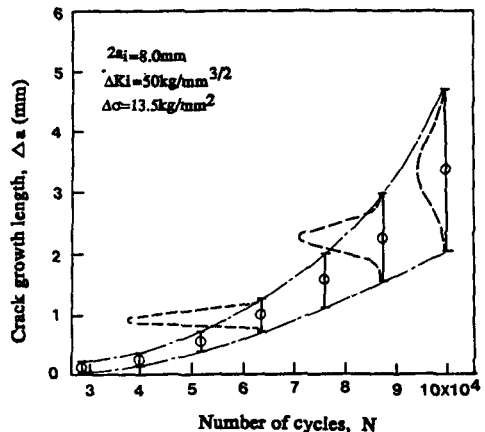


Fig. 5 Crack increment distribution for load repetition cycles

하중을 가한후 각 시험편에 있어서 피로균열 진전량  $\Delta a$ 의 통계적 분포특성을 검토해 보았다.

Fig. 5는 응력레벨  $\Delta\sigma=13.5\text{kg/mm}^2$  초기노치길이  $2a=8.0\text{mm}$ , 초기응력확대계수범위  $\Delta K=50$   $:\text{g/mm}^{3/2}$ 일 때 일정하중 반복횟수  $N$ 마다의 크랙진전량  $\Delta a$ 의 분포 특성을 나타낸 것이며, Fig. 6는 응력 레벨  $\Delta\sigma=11.3\text{kg/mm}^2$  ( $2a=8.0\text{mm}$ ,  $\Delta K=42\text{kg/mm}^{3/2}$ )일 때, Fig. 7는 응력 레벨  $\Delta\sigma=9.2$   $:\text{g/mm}^2$  ( $2a=8.0\text{mm}$ ,  $\Delta K=34\text{kg/mm}^{3/2}$ )일 때의 일정 하중 반복 횟수  $N$ 마다의 균열 길이 진전량  $\Delta a$ 의 분포 특성을 나타낸 것이다. 동선도에서  $\bigcirc$ 는 평균치를 나타내며, 상·하부의 일점쇄선으로 표시된 곡선은 실험 데이터의 상·하한을 나타내며,

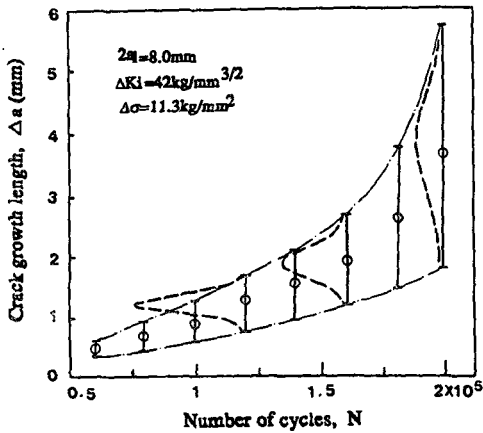


Fig. 6 Crack increment distribution for load repetition cycles

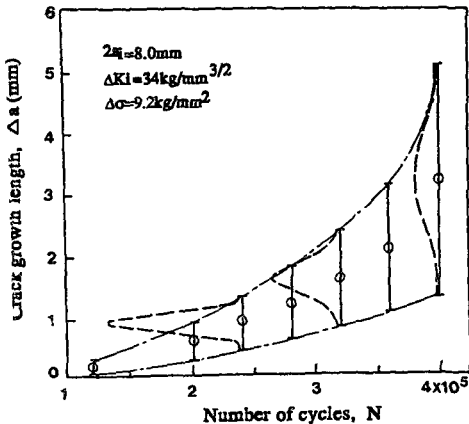


Fig. 7 Crack increment distribution for load repetition cycles

점선으로 표시된 분포도는 일정 사이클에서의 균열길이 진전량  $\Delta a$ 의 가상 분포 상태를 나타낸다.

Fig. 5와 6 및 7의 결과로부터 3개의 응력 레벨에 대해 초기 응력 레벨이 증가하면 일정 사이클에 대한 피로 균열 진전량의 분포에 대한 분산도 전반적으로 증가해 감을 알 수 있다. 또한 그 분포도는 하중 반복 회수가 적으면 분산이 작아지고, 커질수록 분산이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 응력진폭  $\Delta\sigma=15.5\text{kg/mm}^2$ , 초기노치길이  $2a=6.3\text{mm}$ 로 일정하게 유지하고 초기인공노

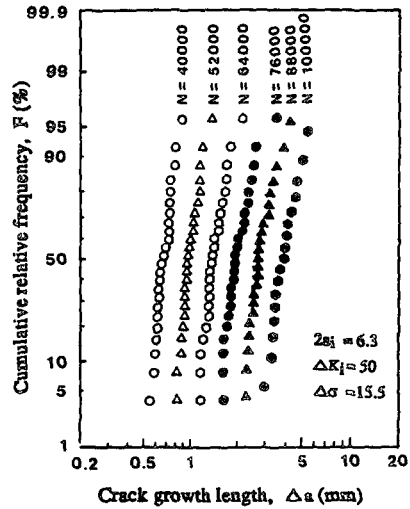


Fig. 8 Log-normal distribution plots of the crack growth length in the SS41 steel

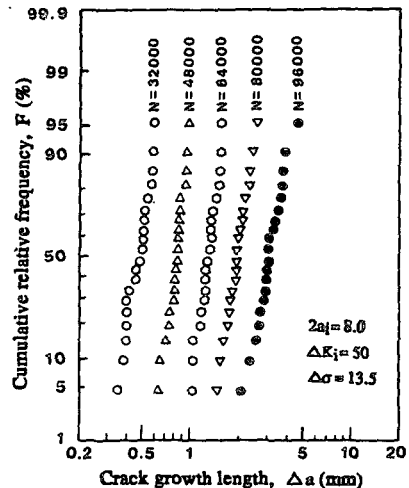


Fig. 9 Log-normal distribution plots of the crack growth length in the SS41 steel

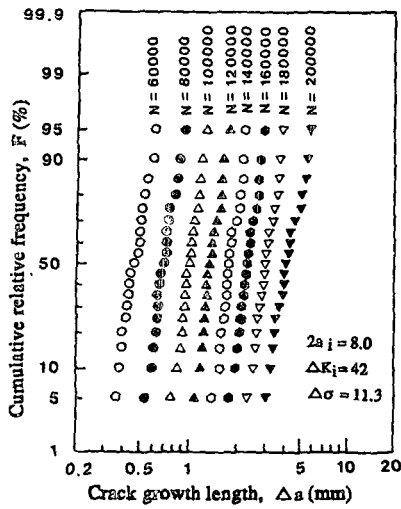


Fig. 10 Log-normal distribution plots of the crack growth length in the SS41 steel

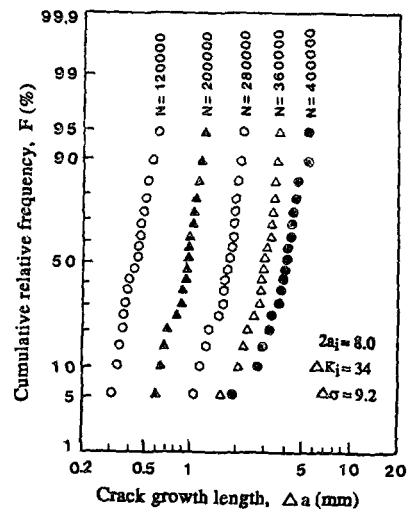


Fig. 11 Log-normal distribution plots of the crack growth length in the SS41 steel

치에 대한 초기응력확대계수범위  $\Delta K = 50 \text{ kg/mm}^{3/2}$  인 경우에 대하여 일정 반복회수  $N$  마다의 균열길이 증가분  $\Delta a$  를 이동식 현미경으로 측정하여 대수

정규 확률지에 플로트한 결과를 나타낸 것이며, Fig. 9는 응력진폭  $\Delta\sigma = 13.5 \text{ kg/mm}^2$ ,  $2a = 8.0 \text{ mm}$ , 초기응력확대계수 범위  $\Delta K = 50 \text{ kg/mm}^{3/2}$  인

Table 3 Statistical relationships of crack growth length( $\Delta a$ ) in the regular cycles number( $N$ )

	Cycle	$\mu(\Delta a)$	$\sigma(\Delta a)$	$S$	$\mu(S)$
$\Delta\sigma = 15.5$ $2a_i = 6.3$ $\Delta K_i = 50$	40000	0.68	0.10	0.147	0.163
	52000	0.98	0.14	0.143	
	64000	1.40	0.25	0.179	
	76000	2.00	0.40	0.167	
	88000	2.80	0.50	0.179	
$\Delta\sigma = 13.5$ $2a_i = 8.0$ $\Delta K_i = 50$	32000	0.48	0.08	0.167	0.164
	48000	0.84	0.12	0.143	
	64000	1.30	0.20	0.154	
	80000	2.00	0.40	0.200	
	96000	3.20	0.50	0.1506	
$\Delta\sigma = 11.3$ $2a_i = 8.0$ $\Delta K_i = 42$	60000	0.46	0.09	0.196	0.172
	100000	1.00	0.17	0.170	
	140000	1.80	0.25	0.139	
	180000	3.00	0.50	0.167	
	200000	4.20	0.80	0.190	
$\Delta\sigma = 9.2$ $2a_i = 8.0$ $\Delta K_i = 34$	120000	0.43	0.09	0.209	0.217
	200000	0.90	0.20	0.222	
	280000	1.70	0.30	0.176	
	360000	2.80	0.60	0.214	
	400000	3.80	1.00	0.263	

(dimension :  $\Delta\sigma$  :  $\text{kg/mm}^2$ ,  $a_i$  : mm,  $\Delta K_i$  :  $\text{kg/mm}^{3/2}$ )

경우에 대해서, Fig. 10은  $\Delta\sigma=11.3\text{kg/mm}^2$ ,  $2a=8.0\text{mm}$ ,  $\Delta K$ 는  $42\text{kg/mm}^{3/2}$ 일 경우에 대해서, 그리고 Fig. 11은  $\Delta\sigma=9.2\text{kg/mm}^2$ ,  $2a=8.0\text{mm}$ ,  $\Delta K=34\text{kg/mm}^{3/2}$ 일 경우에 대한 일정하중 반복횟수  $N$ 마다의 균열길이 증가분  $\Delta a$ 를 대수정규 확률지에 플로트한 결과를 나타낸 것이다.

또한 통계학적으로 이와같은 분포상태가 대수정규분포에 따르는지의 여부를 K.S(Kolmogorov-Smirnov)검정<sup>(14)</sup>을 통하여 확인하였다. Fig. 8에 대해 K.S검정한 결과의 예를 보면, 측정된 데이터를  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ 이라 하면 이들 데이터가 가정한 분포를 따르는가를 판단하기 위하여  $i/N$  또는  $(i-1)/N$ 과 이론계산한 누적분포 함수  $F(x_i)$ 와의 차의 최대치가  $N=52,000$ 사이클에서  $D_{max}=0.1512$ 의 값을 가지며 이는 유의 수준(위험률)  $\alpha=0.1$ 인 경우  $D_n=0.21204$ 보다 적은 값을 가지므로 대수정규 분포에 따른다고 판단하였다. 이와 같은 검정은 Fig. 9, 10 및 11의 경우에도 동일한 현상이 나타났다.

그리고 Fig. 8, 9, 10 및 11의 관계로부터 동일 사이클에 대한 균열길이 증가분  $\Delta a$ 의 평균  $\mu(\Delta a)$ , 표준편차  $\sigma(\Delta a)$  및 변동계수  $S(\Delta a)$  등을 Table 3에 나타내었다.

Table 3에 나타난 바와 같이 동일 사이클에 대한 균열길이 증가분의 변동계수는  $\Delta\sigma=15.5\text{kg/mm}^2$ 일 때 평균 0.163이고,  $\Delta\sigma=13.5\text{kg/mm}^2$ 일 때 평균 0.164이고,  $\Delta\sigma=11.3\text{kg/mm}^2$ 일 때 평균 0.172이며,  $\Delta\sigma=9.4\text{kg/mm}^2$ 일 때 평균 0.217이다. 따라서 응력 레벨이 낮아질수록 변동계수가 크게 나타나는 경향이 있으며 이는 통계학적으로 저응력 레벨, 또는 저 초기응력확대계수 레벨에서 피로균열 진전실험을 행할 경우, 진전속도에 분산이 크다는 것을 의미한다.

5. 피로균열 진전법칙에 있어서  $C$ 와  $m$ 의 통계학적 분포특성

이상과 같이 실험하여 얻은  $a-N$ 의 관계를 사용하여 균열진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 를 계산하여,  $\Delta K$ 와  $da/dN$  사이의 관계를 양대수(log-log) 그래프상에 플로트한 예를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12는 81개의 시험편에 대한  $\Delta K-da/dN$ 의 관계를 종합하여 플로트한 것으로, 저  $da/dN$  부분에 분산이 크게 나타나고 3개의 가지 모양으로 형성된 것은 초기 노치의 응력확대계수

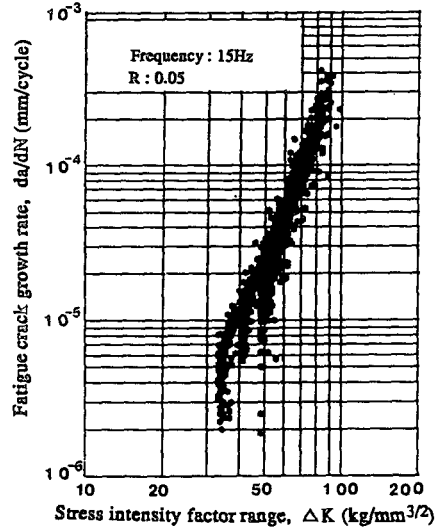


Fig. 12  $\Delta K-da/dN$  relationships in the SS41 steel

범위  $\Delta K=50, 42$  및  $34\text{kg/mm}^{3/2}$ 하에서 피로실험을 시작하였으므로 노치선단에서부터 피로균열이 발생하는 과정에서 나타난 것으로 생각된다.

또한, 피로균열 진전속도  $da/dN$ 과 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 의 계산은 다음과 같은 방법으로 행하였다. 즉, 균열진전속도  $da/dN$ 의 계산은  $N$ 과  $a$ 에 대한 데이터로부터 secant법에 따라서 계산했으며, 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 는 Tada 식을 사용해서 구했다.

Paris에 따르면 균열 진전속도 법칙은

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{2}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $C$ 와  $m$ 은 균열진전법칙에 따른 실험상수이다.

Fig. 12의 81개의  $\Delta K-da/dN$ 의 관계로부터 최소자승법(least square method)에 따라 각 시험편의 피로균열진전속도법칙에 대한 실험상수  $m$ 과  $C$ 를 산출했다.

위와같은 방법으로 81개의 시험편에 대한  $m$ 과  $C$ 의 값을 구했으며, 이와 같이 구한  $m$ 의 값을 정규확률지(normal probability paper)에 플로트한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 또한, 81개의 시험편에 대한  $C$ 를 대수정규 확률지(log-normal probability paper)에 플로트한 결과를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 13과 14에서 나타낸 바와같이 실험결과 구한  $m$ 과  $C$ 의 확률분포 상태는 거의 직선에 일치하는 것을 알 수 있으며, 유의 수준(위험

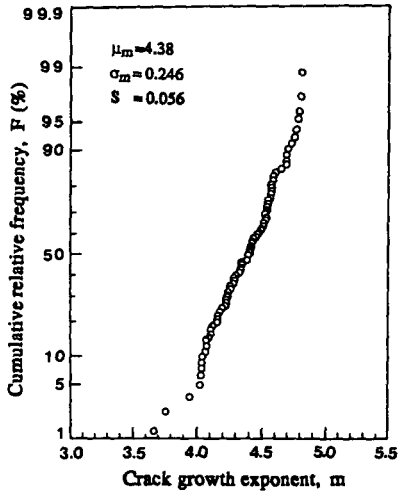


Fig. 13 Normal distribution of crack growth exponent in the SS41 steel

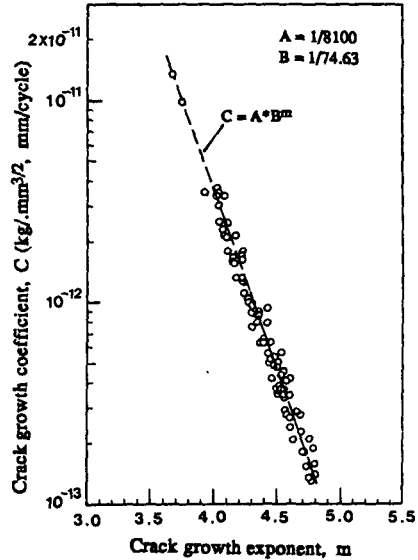


Fig. 15 Relationships between log C and m in the SS41 steel

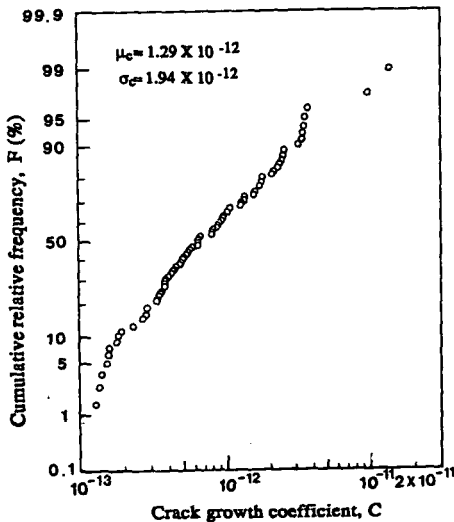


Fig. 14 Log-normal distribution of crack growth coefficient C in the SS41 steel

그림내부에 나타내었다. Fig. 15에는 81개의 시험편에 대해 얻어진 81쌍의  $m$ 과  $C$ 의 관계를 반대수 (Semi-log) 그래프상에 플로트한 결과를 나타낸 것으로,  $m$ 과  $\log C$  사이에는 반대수 선도에서 직선관계가 있음을 알 수 있으며, 근사적으로  $C=A \times B^m$ 의 관계식으로 나타낼 수 있으며, 본 실험의 경우  $A=1/8100$ ,  $B=1/74.63$ 의 값을 갖는다는 것을 알 수 있었다.

이와 같은 결과로부터 동일 재료의 다수 시험편에 대해 서로 다른 초기 응력확대계수 레벨에서 피로실험을 행할경우 피로균열진전법칙의 상수  $C$ 와 지수  $m$ 은 각각 정규분포 및 대수정규분포에 따르고  $C$ 와  $m$  사이에는 반대 수선도에서 직선관계가 있음을 확인하였다.

6. 결 론

이상과 같은 동일재료의 다수시험편에 대해 피로균열 진전 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 피로균열 진전량은 하중반복수가 많을수록 분산이 커지는 경향이 있으며 초기실험응력 레벨이 낮은 경우가 높은 경우에 비해 전수명을 통하여 분산이 커지는 경향이 확인되었다.
- (2) 피로균열 진전법칙에 있어서의 실험지수  $m$

를)  $\alpha=0.1$ 인 경우 K.S 검정 결과로부터  $m$ 은 정규분포에,  $C$ 는 대수정규분포에 따른다는 것을 확인하였다.

Fig. 13과 14의 결과로부터 피로균열 진전속도법칙에서의 지수  $m$ 의 평균  $\mu_m=4.38$ , 표준편차,  $\sigma_m=0.246$ 이었으며, 변동계수  $S=0.056$ 이었다. 또한 피로균열진전법칙에서의 상수  $C$ 의 평균치  $\mu_c=1.29 \times 10^{-12}$ , 표준편차  $\sigma_c=1.94 \times 10^{-12}$ 의 값을 가지는 것을 알 수 있었고 이 결과의 확률변수들을



과 상수  $C$ 는 동일재료의 다수 시험편에서도 분산이 있었으며,  $m$ 은 정규분포,  $C$ 는 대수정규분포를 따른다는 것을 알 수 있었다. 또한  $m$ 과  $C$ 의 관계는 서로 독립인 것이 아니라 반대수(semi-log) 그래프상에 플롯트 할 경우, 직선관계에 있었으며,  $C=A * B^m$ 이라는 관계에 따른다는 것을 알 수 있었다. 본실험의 재료인 SS41에서 상수  $A, B$ 는 각각 1/8100, 1/74.63라는 값으로 나타났다.

(3) 일정응력 진폭범위 하에서 실험을 행할 경우, 일정 반복횟수 마다의 균열길이 증가분은 대수정규분포를 따른다는 것을 알 수 있었고 일정 사이클에 대한 균열길이 증가분에 대한 변동계수는 초기응력 레벨이 낮아질수록 크게 나타나는데, 이것은 응력 레벨이 낮을수록 균열 진전속도의 분산이 커진다는 것을 의미한다.

후 기

이 논문은 1989년도 문교부 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

(1) Fukuta, S., Motooka, T., 1985, "Development of a decision Support System for Maintenance of a Structure", Trans. of JSME, A, Vol. 51-465, pp. 1499~1503.  
 (2) Jdvanovic, A.S., Kobes, E., Sauter, A. and Sturm, D., 1989, "An Expert System in the Domain of Fracture," Univ. Stuttgart, FRG. pp. 49~54.  
 (3) Miyata, H., Kojima, H., Kimoto, H. and Kotana, S., 1984, "Interactive System for Strength Analysis",

Jour. of HPI, Vol. 22-2, pp. 57~67.  
 (4) 김정규, 1988, "파괴인성 및 균열진전의 평가", 대한기계학회지, 제28권, 제 4호, pp. 328~336.  
 (5) 송삼홍, 1988, "신공 비관통 노치재의 피로크랙 전파거동에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제12권, 제6호, pp. 1327~1334.  
 (6) 권재도, 1989, "재질 열화가 표면 크랙 진전에 미치는 영향과 수명 예측에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제13권, 제 5호, pp. 921~927.  
 (7) 北川英夫, 權在度, 中僧根祐司, 島崎剛, 1986, "長期使用クロムモリブデン鋼劣化材の疲労き裂進展壽命豫測", 日本機械學會論文集(A), 제52권 제480호, pp. 1749~1756.  
 (8) 權在度, 中僧根祐司, 北川英夫, 1987, "長期使用劣化材の信頼性工學的 疲労壽命豫測", 日本材料學會論文集, 제36권, 제408호, pp. 927~933.  
 (9) Ichikawa, M., 1983, "Statistical Characteristics of  $m$  and  $C$  in Fatigue Crack Propagation Law  $da/dN = C(\Delta K)^m$ , Material," Vol. 33 No. 364, pp. 8~13.  
 (10) Ichikawa, M., 1984. 5, "Methods for Randomization of Parameters in the Fatigue Crack Propagation Law  $da/dN = C(\Delta K)^m$ ", Material, Vol. 34, No. 378, pp. 321~326.  
 (11) Barson, John M. Rolfe, Stanley T. 1986, "Fracture and Fatigue Control in Structures," pp. 208~231.  
 (12) 김기정, 권재도, 김석배, 김중천, 1989, "PC용 경제요소법 프로그램 개발과 파괴 역학 및 불규칙 표면의 응력해석의 적용", 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp. 59~62.  
 (13) Tada, H., "A Note on the Finite Width Corrections to the Stress Intensity Factor", Engng. Frac. Mech, Vol 3, No. 3.  
 (14) 腐食 防食協會, 1984, "裝置材料の壽命豫測 入門", 丸善 株式會社, pp. 174~178.