

〈論 文〉

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

권재도\* · 곽상국\*\* · 최선호\* · 황재석\* · 진영준\*\*\*

(1990년 11월 21일 접수)

## A Study on the Evaluation and Prediction for the Fatigue Crack Initiation and Growth Life by Reliability Approach (Ⅱ)

J.D.Kwon, S.G.Kwak, S.H.Choi, J.S.Hawong and Y.J.Jin

**Key Words :** Fracture Mechanics(파괴역학), Fatigue Crack Initiation(피로 크랙발생), Fracture Life(파단 수명), Statistics(통계학), Life Prediction(수명예측)

### Abstract

In the various fields of the industrial world, to take advantage of materials and structures without accident for a long time as far as possible has been required. Therefore, their life prediction and residual life prediction are one of the most important problems and the practical problems in the industrial field. To predict their lives by reliability approach, we should know their probability characteristics through stochastic variables obtained from crack initiation, crack growth and statistical fracture life. In this paper, specimen material is SS41 structural steel, 81 specimens which have curvature with constat length and artificial central crack were respectively tested under four levels of stress by uniaxial tension fatigue test. The statistical distribution patterns on the crack initiation and fracture lives have been investigated. Such results as statistical probability characteristics of crack initiation and fracture lives, the relationships between the radius of curvature and crack initiation lives, the S.E.M.(Scanning Electronic Microscope) inspection on the fracture surface of crack initiation and the life prediction method by computer simulation etc. are obtained in this research.

### 1. 서 론

재료나 기계구조물을 사고 없이 가능한한 장기간 사용하려는 요구가 최근 산업계 각 분야에서 가장 중요하고도 실질적인 문제의 하나로 대두되고 있다. 즉, 재료나 기계구조물들의 교환시기, 보수,

검사기간등의 최적기 선택, 잔여수명의 신뢰성 있는 예측이 필요하다. 이에따라 대형 기계구조물, 원자력 발전설비, 항공, 우주등의 제공학 분야에서 사고의 예방을 위하여 크랙의 발생이나 파단수명 예측을 통한 안정성 및 신뢰성 향상을 도모하기 위하여 확률통계학적 견지에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 컴퓨터의 발전과 더불어 다수의 데이터를 이용한 크랙의 발생, 진전 및 파단수명예측을 함으로서 실제의 경우에 가깝도록 통계학적으로 신뢰성을 평가하는 방안들이 제안되고 있고, 수

\* 정회원, 영남대학교 공과대학 기계설계학과

\*\* 정회원, 영남공업전문대학 자동차과

\*\*\* 정회원, 영남대학교 대학원

명예측을 위한 노력들이 계속되고 있다. 그 예로는 건전재와 열화재에 있어서 피로 크랙 발생, 진전, 파단 특성에 관한 연구<sup>(1-3)</sup>, 부식열화에 대한 피로 파괴 특성에 관한 연구<sup>(4,5)</sup>, SUS-304 스테인레스강의 표면미소 결함으로부터 발생한 피로 크랙의 진전에 관한 통계학적 연구<sup>(6)</sup> 등 다수가 보고된 바 있다. 그러나 종래의 피로 및 파괴강도에 관한 연구로서 크랙 발생, 파단에 대한 통계적인 연구는 극소수에 불과하여 이들 데이터를 이용한 통계학적인 결함체의 수명예측은 부족함이 많다. 그러므로 크랙의 발생, 진전, 파단수명의 통계학적 분포특성을 파악하기 위하여 동일 재료에 대해서 다수의 시험편을 제작하여 다수 실험을 수행하였으며, 데이터들을 통계적으로 처리하는 것이 신뢰성 있는 평가의 기본이라 볼 수 있다. 이와같은 관점에서 제 1보에서는 4개의 초기응력 레벨에서 각 응력 레벨에 대해 약 20여개씩 합계 81개의 시험편을 사용하여 피로 실험을 행한후 피로 크랙의 성장 법칙의 피로 크랙 진전상수  $m$  및  $C$ 의 통계적 특성  $m$ 과  $C$ 의 상관관계로부터 피로크랙 진전의 통계적 분포 특성에 대해 보고한바 있다. 따라서 본 연구에서는 피로 크랙 발생 및 파단수명의 통계학적 분포특성을 명확히 하기 위해서 단축인장을 받고, 크랙 선단 곡률반경이 일정한 중앙 크랙을 가진 81개의 시험편을 사용하여 4개의 응력 레벨하에서 피로 실험을 행한후 많은 데이터들로부터 피로크랙의 발생, 파단특성에 대한 신뢰성있는 통계학적 확률특성을 제시하고, 이들 데이터를 활용하여 수명예측을 행해 보고자 한다.

## 2. 실험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 시험편의 재료는 포항제철(주)에서 생산된 두께 3.2mm의 SS41구조용 강이며 화학 성분 및 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 시험편의 형상을 나타내었다. 여기서 노치 선단의 형상이 피로 크랙 발생 특성에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 노치의 가공은 센터드릴 작업후 방전가공기를 사용하여 초기 노치길이  $2a=6.3\text{mm}$  및  $8\text{mm}$ , 노치선단 곡률반경  $\rho$ 는  $0.2\text{mm}$ 로 일정하게 가공 하였다. 통계적 피로시험을 행하기위해 다량의 시험편이 필요하기 때문에 본 연구에서는 노치길이  $6.3\text{mm}$ 의 시

Table 1 Chemical composition of SS41 steel

	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

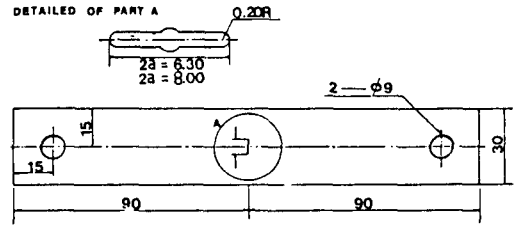


Fig. 1 Specimen geometry (all dimensions : mm)

험편을 30개, 8.0mm의 시험편은 3개의 응력 level에 대해서 60개의 시험편을 제작하여 노치 길이 및 곡률반경을 현미경에서 검사후  $1/50\text{mm}$  정도 내에 들어가는 시험편만 선별하여 실험을 행하였다. 또한 노치길이  $8.0\text{mm}$ 인 경우에는 3개의 응력 레벨에 대해서 각각 20개 정도의 시험편을 사용하여 실험하였다.

## 3. 실험 방법

본 실험에 사용한 피로 시험기는 Instron사 제품의 유압 서-보 피로시험기로서 최대용량을  $25\text{ kN}$  ( $55000\text{lb}$ )이다. 실험은 상온에서 주파수  $15\text{Hz}$ , 응력비  $R=0.05$ , 사인파형 (sine wave)의 인장-인장 (tension-tension) 하중제어방식으로 실험을 행했다.

본 연구의 목적상 크랙의 발생 및 파단 수명을 정확히 파악하는 것이 필요하나 크랙 발생수명을 파악하기 위해서는 이동식 현미경으로는 그 정도가 떨어지고 일정한 반복 횟수 후에 크랙이 길게 진전되어 버리면 발생수명의 파악에 어려운 점이 많다. 따라서 정확한 피로크랙의 발생수명을 측정하기 위하여 각 시험편마다 피로 크랙이 발생하기전 부터

발생후 0.3mm 이상 진전할때까지 약 5~6회 정도 레프리카(replica)를 채취해서 나중에 광학 현미경으로 크랙 발생여부 및 길이를 확인하였다.

이와같은 실험을  $2a=6.3\text{mm}$ 의 경우 응력진폭 범위  $\Delta\sigma=15.5\text{kgf/mm}^2$ ,  $2a=8.0\text{mm}$ 의 경우  $\Delta\sigma=13.5, 11.3$  및  $9.2\text{kgf/mm}^2$  즉, 초기노치의 응력 확대 계수 범위( $\Delta K$ )의 값이  $2a=6.3\text{mm}$ 에서  $\Delta K=50\text{kgf/mm}^{3/2}$ ,  $2a=8.0\text{mm}$ 인 경우 50, 42 및  $34\text{kgf/mm}^{3/2}$ 의 3개의 응력 레벨 하에서 실험을 행하였다. 크랙 발생수명 측정후 크랙 진전 과정에서 부터 파단수명측정까지는 일정한 하중 반복횟수( $N$ )마다 하중진폭만을 정지시켜서 피로 크랙 진전량을 이동식 현미경으로 측정하였다. 그리고 파단수명( $N_f$ )의 정의는 피로 크랙이 진전하여 시험편이 파단될때의 하중 반복회수( $N_f$ )로 하였다.

#### 4. 통계적 피로 수명의 분포 특성

##### 4.1 통계적 $a-N$ 선도

이상과 같이 실험하여 얻은 각 시험편에 대한 크랙 길이  $a$ 와 하중반복회수  $N$ 과의 관계로부터 얻은  $a-N$  선도를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2는 3개의 응력 레벨 즉,  $\Delta\sigma=13.5\text{kgf/mm}^2$  ( $2a=8.0\text{mm}$ ,  $\Delta K=50\text{kgf/mm}^{3/2}$ ) 하에서 20개의 시험편,  $\Delta\sigma=11.3\text{kgf/mm}^2$  ( $2a=8.0\text{mm}$ ,  $\Delta K=42\text{kgf/mm}^{3/2}$ ) 하

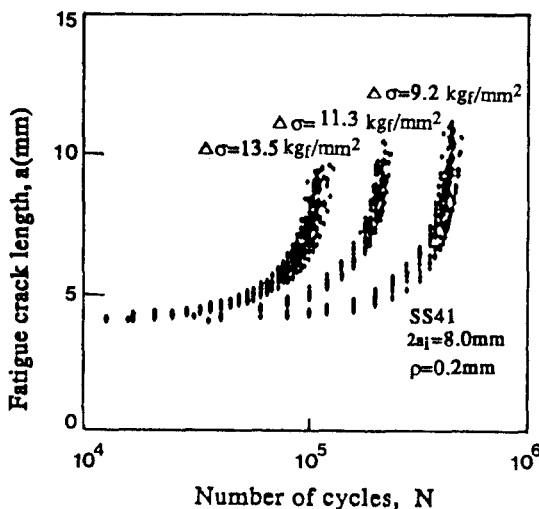


Fig. 2  $a-N$  curves in the SS41 steel ( $\Delta\sigma=13.5, 11.3, 9.2\text{kgf/mm}^2$ ,  $\Delta K=50, 42, 34\text{kgf/mm}^{3/2}$ )

에서 19개의 시험편,  $\Delta\sigma=9.2\text{kgf/mm}^2$  ( $2a=8.0\text{mm}$ ,  $\Delta K=34\text{kgf/mm}^{3/2}$ ) 하에서 18개의 시험편에 대해 피로 크랙의 발생 및 진전실험을 행하여 얻은 피로 크랙 길이  $a$ 와 하중반복회수  $N$  사이의 관계를 나타내는것으로 응력 레벨이 낮아 질수록 파단시의 피로 크랙 길이와 피로수명이 길어진다는 것을 알 수 있으며, 동일 하중 레벨 및 크랙 길이에 대해서 피로 실험을 하더라도  $a-N$  선도 상에는 상당한 분산이 있음을 알 수 있다.

##### 4.2 피로크랙의 발생 및 파단수명의 통계적 분포 특성

피로 시험에 사용되는 시험편의 노치선단 곡률반경  $\rho$ 가 피로 크랙의 발생특성에 영향<sup>(7)</sup>을 미친다는 것을 잘 알려진 사실이다. 본 논문에서는 시험편 노치선단의 곡률반경  $\rho$ 를 일정하게 할 때 초기응력 레벨의 변화에 따른 크랙의 발생수명 및 파단수명의 분산 특성을 알아보았다.

$2a=6.3\text{mm}$ 인 경우는  $\Delta\sigma=15.5\text{kgf/mm}^2$ (초기 응력 확대 계수 범위  $\Delta K=50\text{kgf/mm}^{3/2}$ ),  $2a=8.0\text{mm}$ 인 경우는 3개의 응력 레벨 즉,  $\Delta\sigma=13.5, 11.3$  및  $9.2\text{kgf/mm}^2$ (초기 응력확대계수범위  $\Delta K=50, 42$  및  $34\text{kgf/mm}^{3/2}$ ) 하에서 노치선단 곡률반경  $\rho=0.2\text{mm}$ 로 일정한 시험편을 각각 24개, 20개, 19개, 18개씩 피로 실험을 행하여 0.1 및 0.3 mm 크랙 발생 및 파단 수명을 측정하였다.

레프리카 및 이동식 현미경으로 부터 측정된 크랙 길이와 하중반복회수의 관계로부터 노치 선단에서 발생한 크랙의 길이가 0.1mm 및 0.3mm 일때의 하중 반복회수를 각각  $0.1 N_i$ (0.1mm 발생수명),  $0.3 N_i$ (0.3mm 발생수명)로 정의 하였다. 그러나 본 실험의 경우 각 응력 레벨에 대하여 일정한 하중 반복회수( $N$ )의 증가마다 크랙 길이를 측정하였기 때문에 정확한  $0.1 N_i$  및  $0.3 N_i$ 에 상당하는 수명을 측정할수는 없었다. 따라서 각 시험편에 대해 크랙 발생수명 전후에 측정된 피로 크랙길이( $a$ )와 그때의 하중 반복회수( $N$ )로부터 다음 식(1)의 Paris 법칙에 따라 제1보에서 보고한 바 있는  $C$ 와  $m$ 의 평균값을 이용하여 컴퓨터 계산을 통하여  $0.1 N_i$  및  $0.3 N_i$ 에 상당하는 발생 수명을 구하였다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

파단수명( $N_f$ )의 측정은 피로 크랙이 진전하여 시험편이 파단될때 그 때의 하중반복회수( $N$ )를

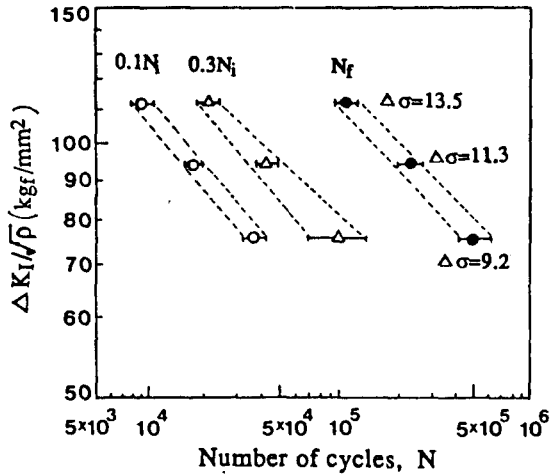


Fig. 3 Relationships between  $\Delta K_I/\sqrt{\rho}$  and initiation lives and fracture lives in the SS41 ( $\rho=0.2$  mm)

측정하였다. 노치 선단에서 피로 균열의 발생 수명은  $\Delta K_I/\sqrt{\rho}$ 에 의존한다는 연구 결과<sup>13)</sup>에 따라 노치 선단의 곡률 반경을 일정하게 하여  $\Delta K$  값만을 변화시킨 다수의 시험편에 대한 통계적 시험 결과에도 이 관계가 성립되는지를 알아 보기 위하여  $\Delta K_I/\sqrt{\rho}$ 의 값에 대한 0.1 및 0.3mm 발생수명 ( $N_i$ ) 및 파단수명 ( $N_f$ )을 양대수(log-log) 그래프 상에 플롯(plot)한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 크랙 발생 및 파단 수명은 동일한 시험편에 대해서도 상당한 분산이 있으며 Fig. 3의 ○표, △표 및 ●표는 각 응력 레벨에 대한 0.1 및 0.3mm 발생수명 ( $N_i$ ) 및 파단수명 ( $N_f$ )의 평균값을 나타낸 것인데  $\Delta K_I/\sqrt{\rho}$ 의 변화에 따른 이들 평균값을 연결하였을 때 근사적으로 직선이라는 것을 알 수 있었고 이들 실험결과에 의한 근사직선의 실험식을 구하면 식 (2), (3), (4)와 같다.

$$\Delta K_I/\sqrt{\rho} = 10^{3.443}/0.1N_i^{0.345} \quad (2)$$

$$\Delta K_I/\sqrt{\rho} = 10^{3.329}/0.3N_i^{0.293} \quad (3)$$

$$\Delta K_I/\sqrt{\rho} = 10^{3.525}/N_f^{0.292} \quad (4)$$

여기서 식 (2)는 0.1mm 발생 수명과  $\Delta K_I/\sqrt{\rho}$ 와의 관계를 나타내는 실험식이며, 식 (3)은 0.3mm 발생 수명과  $\Delta K_I/\sqrt{\rho}$ 와의 관계를 나타내는 식이며, 식 (4)는 파단 수명  $N_f$ 와  $\Delta K_I/\sqrt{\rho}$ 와의 관계를 나타내는 실험식이다. 위의 식 (2), (3) 및 (4)와 같은 결과로부터  $\Delta K_I/\sqrt{\rho}$ 의 값은 발생 수명 뿐만

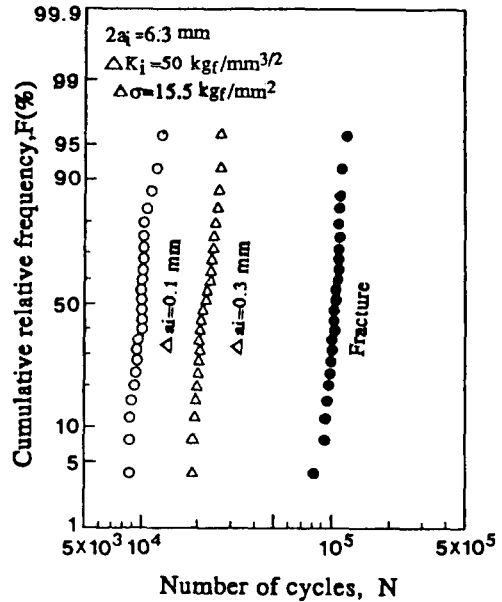


Fig. 4 Log-normal distribution plots of the crack initiation lives and fracture lives in the SS41 steel

아니라 파단 수명에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 그리고 3개의 응력 레벨하에서 실험한 각각의 시험편에 대하여 노치 선단에서 측정된 피로 크랙의 0.1 및 0.3mm 발생수명 ( $N_i$ )과 파단 수명 ( $N_f$ )을 각각 대수 정규 확률지에 플롯한 결과를 Fig. 4, 5, 6 및 7에 나타내었다. Fig. 4는  $\Delta\sigma=15.5\text{kgf/mm}^2$  ( $\Delta K=50\text{kgf/mm}^{3/2}$ ,  $2a=6.3\text{mm}$ ,  $\rho=0.2\text{mm}$ ) 하에서 피로실험을 행한 24개의 시험편에 대해 플롯한 결과를 나타낸 예이다. Fig. 5는  $\Delta\sigma=13.5\text{kgf/mm}^2$  ( $\Delta K=50\text{kgf/mm}^{3/2}$ ,  $2a=8.0\text{mm}$ ,  $\rho=0.2\text{mm}$ ) 하에서 피로실험을 행한 20개의 시험편에 대해 플롯한 결과를 나타낸 예이다. Fig. 6은  $\Delta\sigma=11.3\text{kgf/mm}^2$  ( $\Delta K=42\text{kgf/mm}^{3/2}$ ,  $2a=8.0\text{mm}$ ,  $\rho=0.2\text{mm}$ ) 하에서 피로실험을 행한 19개의 시험편에 대해서 나타낸 예이며, Fig. 7은  $\Delta\sigma=9.2\text{kgf/mm}^2$  ( $\Delta K=34\text{kgf/mm}^{3/2}$ ,  $2a=8.0\text{mm}$ ,  $\rho=0.2\text{mm}$ ) 하에서 0.1mm 피로 실험을 행한 18개의 시험편에 대해서 나타낸 예이며, Fig. 8은 3가지 응력 레벨하에서 0.1mm 발생수명 및 파단수명을 대수 정규확률지에 나타낸 것으로서 공히 직선에 근사한 형태로 나타남을 알 수 있다. 그리고 이와같은 것을 통계학적으로 확인하기 위하여 K.S 검정<sup>19)</sup>을 행

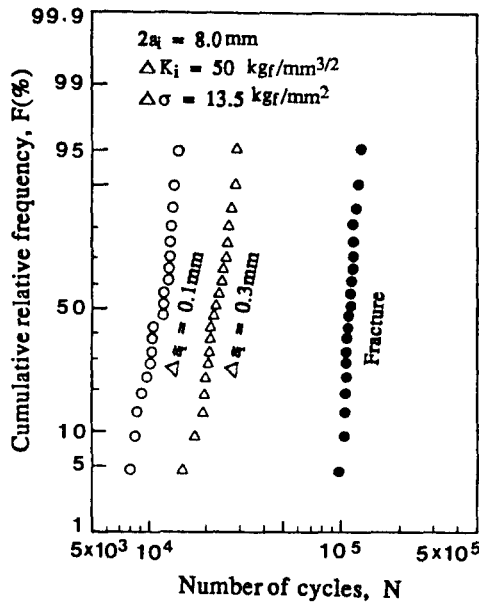


Fig. 5 Log-normal distribution plots of the crack initiation lives and fracture lives in the SS41 steel

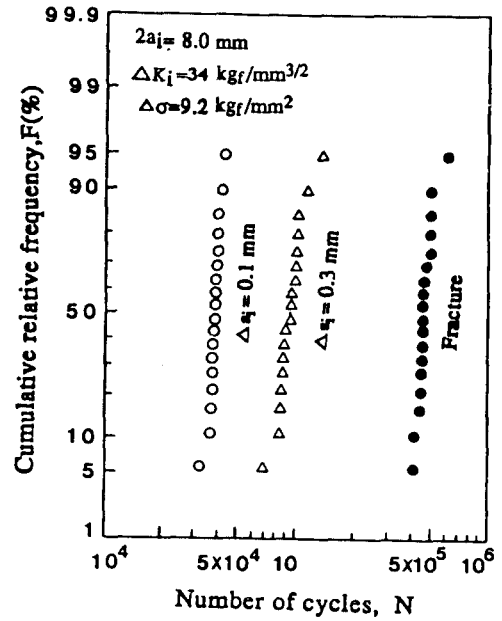


Fig. 7 Log-normal distribution plots of the crack initiation lives and fracture lives in the SS41 steel

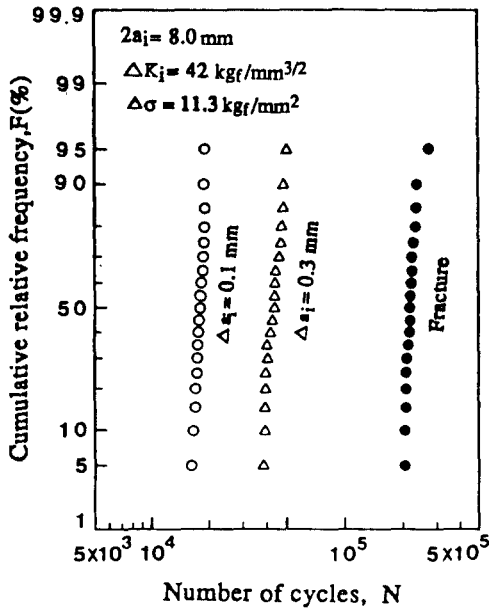


Fig. 6 Log-normal distribution plots of the crack initiation lives and fracture lives in the SS41 steel

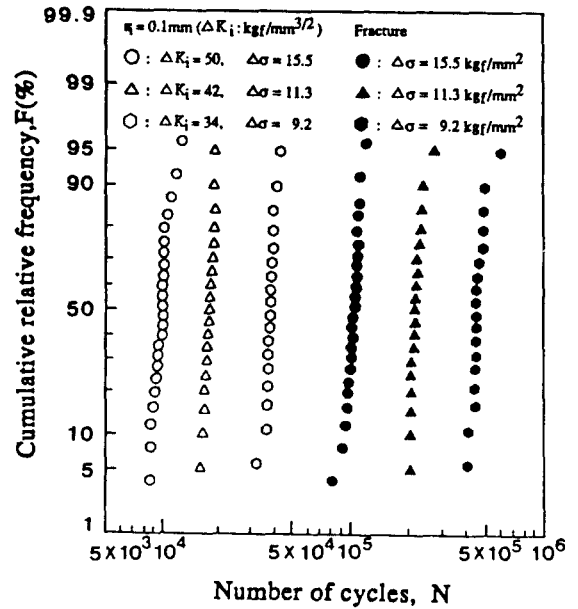


Fig. 8 Log-normal distribution plots of the crack initiation lives and fracture lives in the SS41 steel

한 결과로부터도 대수 정규 분포에 따른다는 것을 확인하였다. Fig. 7에 대해 K.S 검정한 결과의 예를 보면 측정된 데이터를  $X1 < X2 < X3 \dots < Xn$  이라 하면 이들 데이터가 가정한 분포를 따르는가를 판단하기 위하여  $i/N, (i-1)/N$ 과 이를 계산한 누적 분포 함수  $F(X_i)$ 와의 최대치가  $a_i=0.1\text{mm}$ ,  $a_i=0.3\text{mm}$ 인 경우 각각  $D_{max}=0.2195$  및  $0.1653$ 의 값을 가지며 이는 유의 수준(위험률)  $\alpha=0.1$ 인 경우  $Dn=0.24360$  보다 적은 값을 가지므로 대수 정규분포를 따른다고 판단하였다. 이와같은 검정은 Fig. 4, 5, 6 및 8의 경우에도 동일한 현상이 나타났다. 그리고 Fig. 4, 5, 6 및 7의 관계로부터 하중 반복 횟수( $N$ )에 대한  $0.1\text{mm}$  및  $0.3\text{mm}$ 발생 수명( $N_i$ )과 파단수명( $N_f$ )의 평균( $\mu$ ), 표준편차( $\sigma$ ) 및 변동 계수( $S$ ) 등을 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타낸바와 같이 각 응력 레벨에 대한  $0.1$ 과  $0.3\text{mm}$  발생 수명( $0.1N_i, 0.3N_i$ ) 및 파단 수명( $N_f$ )의 변동 계수는 응력 레벨이 낮을수록 크게 나타나는 경향이 있는데 이것은 통계학적으로 저 응력 레벨 또는 저 응력 확대 계수 레벨에서 피로 실험을 행할 경우 피로 크랙 발생수명 및 파단 수명의 분산이 커진다는 것을 의미한다.

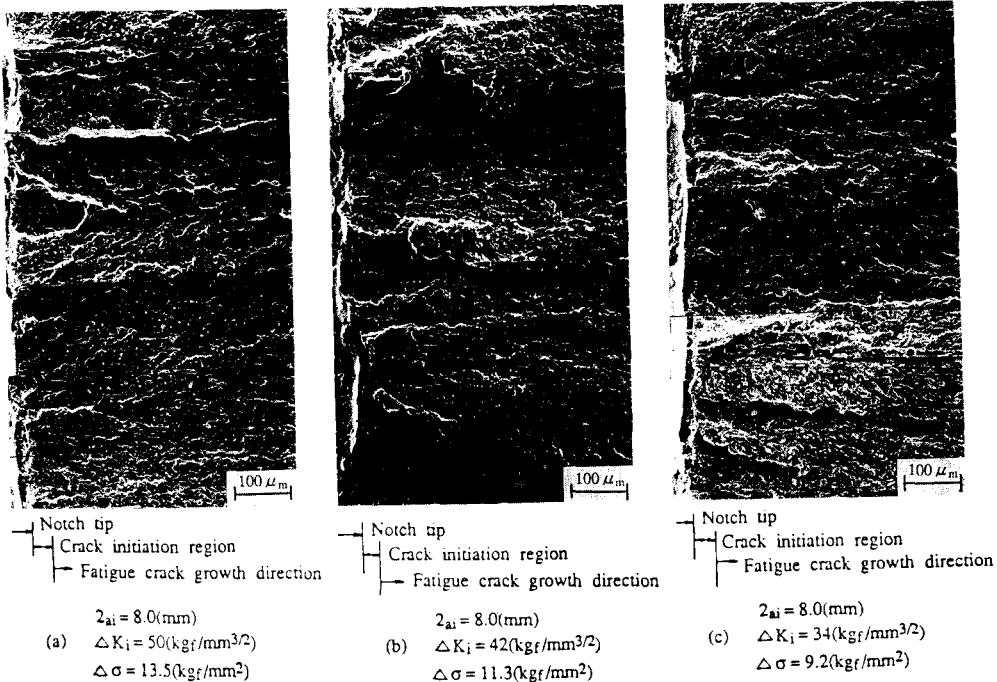
**Table 3** Statistical relationships of  $0.1\text{mm}, 0.3\text{mm}$  fatigue crack initiation and fracture lives in the SS 41 steel

	$\Delta\sigma=15.5$ ( $2a=6.3,$ $\Delta K=50$ )	$\Delta\sigma=11.3$ ( $2a=8.0,$ $\Delta K=42$ )	$\Delta\sigma=9.2$ ( $2a=8.0,$ $\Delta K=34$ )
$\mu(0.1N_i)$	4.000	4.2553	4.5798
$\sigma(0.1N_i)$	0.0128	0.0142	0.0222
S	0.0032	0.0033	0.0048
$\mu(0.3N_i)$	4.3385	4.6335	4.9638
$\sigma(0.3N_i)$	0.0344	0.0432	0.0532
S	0.0079	0.0093	0.0107
$\mu(N_f)$	5.0128	5.3424	5.6532
$\sigma(N_f)$	0.0286	0.0378	0.0544
S	0.0057	0.0071	0.0096

$S = \sigma / \mu, \Delta\sigma : \text{kgf/mm}^2, a : \text{mm}, \Delta K = \text{kgf/mm}^{3/2}$

**5. 크랙발생 파단면의 전자 현미경 관찰**

위의 실험을 행하여 시험편이 파단 되었을 시 초기 크랙 발생파면을 S.E.M(주사 전자 현미경)으로



**Fig. 9** Fracture surface of fatigue crack initiation by S.E.M observation

관찰한 결과 Fig. 9의 (a), (b), (c)에 나타내었다. Fig. 9의 (a)는  $\Delta\sigma=13.5(2a=8.0, \Delta K=50)$  일 때 이고 Fig. 9의 (b)는  $\Delta\sigma=11.3(2a=8.0, \Delta K=42)$  일 때 Fig. 9의 (c)는  $\Delta\sigma=9.2(2a=8.0, \Delta K=34)$  일 때의 파단면을 나타낸다. 여기서 발생 파면은 200배 확대한 사진이다. Fig. 9의 (a), (b), (c)로 부터 피로 실험의 초기 응력 레벨이 적을수록 발생 파면이 더 거칠어짐을 알 수 있다. 크랙의 발생부에서 진전 방향으로 흰선이 나타나면서 거칠게 보이는 것은 시험편 두께 방향의 노치 선단에서 미소 균열이 다소 발생하여 크랙이 진전하면서 합쳐 되는 현상으로 해석할 수 있다.

6. 피로 크랙의 수명 예측

피로에 대한 구조물의 신뢰성 해석을 바탕으로한 피로수명예측을 하기 위해서는 피로 크랙 진전속도의 확률특성을 밝히는 것이 필요하다. 따라서 파괴역학적 견지에서 이 문제는 크랙 진전속도  $da/dN$ 에 대해 이미 알고 있는 Paris 법칙으로부터 피로 크랙 진전법칙에서의 지수(exponent)  $m$ 과 계수(coeffcient)  $C$ 의 확률 특성을 사용한 수명예측을 하기 위하여 Monte-Carlo 시뮬레이션(simulation) 방법을 이용하고자 한다. 이때 확률 변수의 난수를 취하는 방법으로서는 다음 몇가지의 경우를 고려해 볼 수 있다.

- (1)  $m$ 이 정규분포에 따르고,  $C$ 는  $C=A \times B^m$ 의 관계를 이용한 수명 예측
- (2)  $C$ 는 대수정규분포에 따르고,  $m$ 은  $C=A \times$

$B^m$ 의 관계를 이용한 수명예측

- (3)  $m$ 이 정규분포에 따르고,  $C$ 는  $C=const$ 의 관계를 이용한 수명예측
- (4)  $C$ 는 대수정규분포에 따르고,  $m$ 은  $m=const$ 의 관계를 이용한 수명예측
- (5)  $m$ 은 정규분포에 따르고,  $C$ 는 대수정규분포에 따른다는 관계를 이용한 수명예측
- (6) 기타의 방법

여기서는 (1)~(4)의 4가지 방법에 의한 시뮬레이션을 행하여 확률론적  $a-N$ 선도를 예측해 보았다. 이 때 시뮬레이션에 적용된 피로크랙 진전 법칙은 Paris의 식을 사용하였다.

Paris의 식에서  $N$  사이클 하중 반복을 가했을 경우 피로 균열의 진전 길이는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$a_n = a_0 + \int_{N_0}^N C(\Delta K)^m dN \tag{5}$$

여기서  $N_0$ 는 초기 하중 반복수이고  $N$ 는  $\Delta N$  사이클 후의 피로 균열 진전량을 플롯트할려는 경우의 하중 반복수를 나타낸다. 또한  $a_n$ 는  $\Delta N$  사이클 반복후의 균열의 길이이며,  $a_0$ 는 초기 균열의 길이를 나타낸다. 여기서  $a_n$ 의 계산 방법은 수치적분법에 따랐다. 이 경우의 시뮬레이션 모델(model)로서는 본 실험에서 사용한 SS41구조용 강재의 시험편 형상을 가정해서 중앙 노치길이  $2a=8.0mm$ , 두께  $t=3.2mm$ , 폭  $W=30mm$ 인 모델에 1축 인장 반복하중이 가해지는 경우를 선정했다. 이 경우 피로 균열 진전 과정만의 수명을 계산하면 실제 실험 결과보다 수명이 길게 나오게 되

Table 4 Input data for statistical  $a-N$  curves prediction

Stress range(kgf/mm <sup>2</sup> ) (S.I.F, (kgf/mm <sup>3/2</sup> ))	$\Delta\sigma=13.5$ ( $\Delta K_i=50$ )	$\Delta\sigma=11.3$ ( $\Delta K_i=42$ )	$\Delta\sigma=9.2$ ( $\Delta K_i=34$ )
$2a_{max} \times (mm)$	19	21	23
$\Delta K_{rc} (kgf/mm^{3/2})$	100	95	90
Mean of $m, \mu_m$	4.433	4.45	4.220
S.D of $M, \sigma_m$	0.192	0.231	0.271
Mean of $C, \mu_c$	5.4239E-13	5.8152E-13	1.5915E-12
S.D of $C, \sigma_c$	2.2040	2.3696	2.7043
$A$	1.235 E-4	1.235 E-4	1.235 E-4
$B$	1/74.63	1/74.63	1.74.63

로 시뮬레이션시 진전 균열 길이에 대한  $\Delta K$ 의 값을 계산하여  $\Delta K$ 의 값이  $\Delta K_{fc}$  이상이 되면 모델의 수명이 다 된것으로 가정하였다. 여기서  $\Delta K_{fc}$ 는 피로 크랙이 진전하여 파단될때의 응력확대계수 값인데 이 값도 시험편들의 파단직전의 응력확대계수 값들의 평균값을 사용하였다.

시뮬레이션에 사용한  $m$ 과  $C$ 의 값은 제1보에서 통계학적으로 구한  $m$ 과  $C$ 의 평균( $\mu_m, \mu_c$ )과 표준편차( $\sigma_m, \sigma_c$ )<sup>(9)</sup>를 사용하였으며 A와 B는 실험결과로부터 구한  $m$ 과  $C$ 의 값들에 대해서 직선관계식  $C=A \times B^m$ 에 의해 구한 값들을 사용하였다. 또한 하한계 응력확대계수 범위  $\Delta K_{th}$ 를  $15\text{kgf/mm}^{3/2}$ , 하중 반복 횟수 간격은 500으로 하여  $a-N$  선도표에 1점씩 플롯 하였다. Table 4는 3가지 응력 레벨에 대해 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통하여

$a-N$  선도를 예측하기위한 입력 데이터를 나타낸다. 이상과 같은 시뮬레이션 결과를 Fig. 10, 11, 12 및 13에 나타내었다.

Fig. 10은 위의 (1)의 예측 방법에 의해 Table 4의 입력 데이터를 이용하여  $a-N$  선도를 예측한 결과이다. 또한 Fig. 11은 (2)의 예측방법, Fig. 12는 (3)의 예측방법, Fig. 13은 (4)의 예측 방법에 의하여 시뮬레이션을 통하여 예측한 통계적  $a-N$  선도들이다. 여기서 Fig. 10 및 Fig. 11의 결과를  $m$  또는  $C$ 의 값을 확률변수로부터 얻어내고 나머지  $C$  또는  $m$ 을  $C=A \times B^m$ 의 관계에서 구한 경우로서 Fig. 2의 통계적 실험결과의  $a-N$  선도와 비교할 때 거의 근접함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 12, Fig. 13은 Fig. 2의 통계적 실험 결과의  $a-N$  선도와 비교하여 그 분산이 매우 크게 나타나서 상이

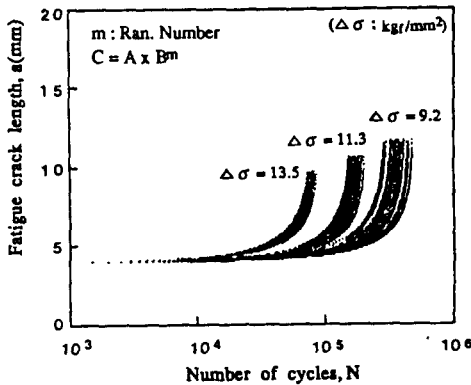


Fig. 10 Predicted  $a-N$  curves when  $m$  is randomly chosen and  $C$  is calculated by  $C=A \times B^m$

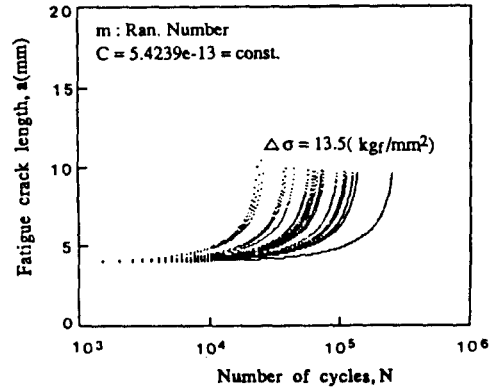


Fig. 12 Predicted  $a-N$  curves for  $m$  random number and  $C$  constant

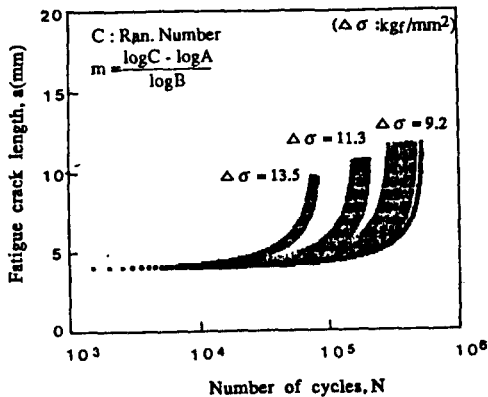


Fig. 11 Predicted  $a-N$  curves when  $C$  is vandomly chosen and  $m$  is const

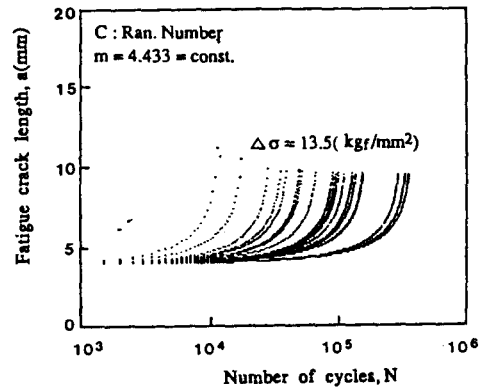


Fig. 13 Predicted  $a-N$  curves for  $C$  random number and  $m$  constant



한 현상을 나타내므로 수명 예측 방법으로는 적합하지 못함을 알 수 있다. 즉,  $m$  및  $C$ 의 어느 하나를 난수로 발생하고  $m$ 과  $C$ 의 어느 하나 값을 일정하게 했을 경우의 수명 예측은 수명의 분산이 크게 나타나는 경향이 있다.

여기서 Fig. 10과 Fig. 11을 비교할 때 Fig. 11은 Fig. 10에 비해 분산이 다소 커지는 경향이 있음을 알 수 있다. 즉,  $m$ 을 난수로 발생했을 때 보다  $C$ 를 난수로 발생했을 경우가 분산이 다소 커지는 현상은 수차례의 시뮬레이션에서 확인되었다. Fig. 10~13의 관계로부터 제 (1) 및 (2)의 방법에 의한 시뮬레이션 결과는 실험 데이터와 근사적으로 일치하는 경향이 있으나 여타의 방법에 대해서는 보다 좋은 개선책이 마련되어야 할 것으로 사료 된다. 이상의 결과로부터 다수의 실험을 통하여 정확한 데이터만 얻을 수 있다면 시뮬레이션을 통한 수명 예측을 할 수 있으리라 생각된다.

## 7. 결 론

이상과 같은 SS41 기체구조용 강에 대한 피로 크랙의 발생, 파단수명 측정에 대한 실험과 시뮬레이션에 의한 수명 예측으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 인공 노치의 곡률 반경 및 응력 레벨을 일정하게 하고 피로 실험을 행한 결과 피로 크랙의 발생 수명 ( $N_i$ ) 및 파단수명 ( $N_f$ )는 대수 정규 분포를 따르고 곡률반경  $\rho$ 를 0.2mm로 일정하게 하였을 때  $\Delta K_i/\sqrt{\rho}$ 와 피로크랙 발생 및 파단수명과 관계에서  $\Delta K_i/\sqrt{\rho}$ 는 피로 크랙의 발생 및 파단수명에 영향을 미치며 양대수 선도에서 근사적으로 직선관계가 성립함을 알 수 있었다.

(2) 피로 크랙 발생파단면은 전자 현미경에서 관찰한 결과 응력 레벨이 적을수록 발생 파면이 거칠어지고 파단면도 역시 같은 현상이 일어남을 알 수 있었다.

(3) 다수의 실험을 통한 많은 데이터로부터 피로 크랙의 발생, 진전 및 파단 특성에 대한 통계학적인 확률 변수들을 얻어서 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 피로 크랙의 발생, 진전 및 파단 수명 예측을 해 보았다. 그 결과  $m$  또는  $C$ 중의 어느 값을 확률 변수로 구하고, 나머지  $C$  또는  $m$ 의 값을  $C =$

$A \times B^m$ 의 관계에서 구한 경우의 수명 예측이 다른 방법 보다 실험 결과와 근접함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) 北川英夫, 權在度, 中曾根祐司, 島崎剛, 1986, "長期使用クロムモリブテン鋼 劣化材の疲労き裂進展壽命豫測", 日本機械學會論文集(A), 第52卷, 第480號, pp.1749~1756.
- (2) Kitagawa, H. Kwon, J.D., etc., 1986, "Effect of Degradation of Fatigue Crack Growth and Statistical Life Prediction", Proceeding of the 2nd A.P.C. S-86 Seoul, Korea : pp.371~376.
- (3) 權在度, 中曾根祐司, 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", 材料, 第36卷, 第408號, pp.927~933.
- (4) 권재도, 최선호, 광상국, 전경욱, 장재영, 1990, "신뢰성 공학적 피로 균열의 발생, 진전수명평가 및 예측에 관한 연구(I)", 대한기계학회논문집, 제14권, 제 6 호, pp.1059~1068.
- (5) Staehle, R.W. Hochmann, J. etc. : 1972 "National Association of Corrosion engineers, Nace-5
- (6) Devereoux, O. F. Mcevely, A. J. etc., 1972, National Association of Corrosion Engineers, Nace-2
- (7) Tsuneshichi Tanaka, Tatsuo Sakai and Kenji Okada, 1988, "Statistical Aspects of Fatigue Crack Propagation from Micro surface defects", 재료, 제30권, 제332호 pp.483~488.
- (8) Paris, P.C. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Low Trans.", Trans, ASMED, 8594, p.528.
- (9) 腐食防食協會編, 1984, "裝置材料の壽命 豫測入門", 丸善 株式會社, pp.99, 174~178, 1982~100
- (10) Tada, H. 1986, "A Note on the Finite width Corrections to the Stress Intensity Factor", Engng. Frac. Mech, Vol.3, No.3.
- (11) 金楨圭, 徐昌敏, 1984, "破面 解析 그 應用 (I) (II) (III)", 대한기계학회지, Vol. 24, No.1.
- (12) 권재도, 1989, "재질 열화가 표면 크랙 진전에 미치는 영향과 수명 예측에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제13권, 제 5 호, pp.921~927.
- (13) 최용식, 한지원, 김규성, 1990, "노치에서 발생하는 미소 균열의 성장거동에 대한 연구", 대한기계학회추계학술대회 초록집, pp.46~51.