

불규칙 하중하의 확률론적 피로균열 성장 해석

송삼홍\*, 장두수\*\*

Probabilistic Fatigue Crack Growth Analysis under Random Loading

Sam-Hong Song\*, Doo-Soo Chang\*\*

ABSTRACT

The methodology of a simple probabilistic fatigue crack under random loading is proposed. Using the crack closure concept, the crack opening stress is assumed to be constant during random loading. The loading history was analyzed to determine the probability density functions, probability distribution functions and other related parameters for the probabilistic fatigue crack growth analysis. Fatigue crack growth using the existing available data was predicted by the proposed probabilistic analysis and compared with experimental data.

**Key Words :** Fatigue Crack Growth(피로 균열 성장), Random Loading(불규칙 하중), Probabilistic Analysis(확률론적 해석), Gaussian Distribution(정규분포), Probability Distribution Function(확률분포함수), Probability Density Function(확률 밀도함수)

기호설명	
a	: 균열길이 (in)
da/dN	: 피로 균열 성장속도 (in/cycle)
F(X)	: 확률밀도함수
K	: 응력세기계수 (ksi-in <sup>1/2</sup> )
Δk	: 응력세기계수 범위 (ksi-in <sup>1/2</sup> )
μ	: 평균값
p(X)	: 확률분포함수
R	: 응력비
S	: 응력 극한값 (ksi)
σ	: 응력 (ksi)
σ <sup>2</sup>	: Variance
Δσ	: 응력의 범위 (σ <sub>max</sub> -σ <sub>min</sub> )

W	: 시편의 폭 (in)
하첨자	
eff	: 유효
i	: 임의의 i번째
max	: 최대
min	: 최소
op	: 균열 열림
l	: Δσ <sub>eff</sub> 의 상당값

1. 서 론

현재의 기계나 구조물의 부품에 사용되는 재료는 인류 생활의 다변화에 따라 점점 더 가혹한 환경에 처하게 된다. 이런 환경에 대한 설계기준은 안전계수를 큰

\* 고려대학교 기계공학과 (정회원)

\*\* 고려대학교 대학원 기계공학과, 한국원자력연구소 (정회원)

값으로 사용한다든지, 매우 보수적인 해석 방법으로 설계하므로 상당한 여유분이 포함되어 있는 것이 현실이다. 특히, 외력을 받는 대부분의 기계나 구조물에 대한 과거의 연구는 실제의 불규칙 하중을 일정 진폭 하중으로 해석하므로 더욱 보수적이며 큰 설계 여유분을 함유하고 있다. 따라서 현재 실제의 하중인 불규칙하중하에 대한 피로거동을 해석적으로 예측하는 많은 연구가 수행되고 있다. 그 중에서 ASTM의 소위원회인 E24.06이 불규칙하중하에서 시험한 결과와 여러 해석적 방법으로 피로거동을 예측한 Round-robin해석과 SAE의 피로 손상 분과에서 수행한 연구가 그 대표적인 연구라 하겠다. 그 중에서 ASTM의 Round-robin해석에 수행한 연구는 불규칙하중을 받는 2219-T851 알루미늄의 중앙 균열 인장시편에 대한 피로균열 성장을 해석적으로 예측하였는데, 이 해석에 참여한 사람들에게 시험결과에 대한 자료가 제공되었고 그 자료들은 일정진폭 균열성장 데이터, 시편의 치수, 초기 균열크기와 시험에 사용된 불규칙 데이터등으로 구성<sup>(1-6)</sup>되었다. Hudson<sup>(2)</sup>은 각 시편의 하중이력이 제공평균방근의 최대 및 최소응력을 결정하기 위해 사용하였고, 이때의 예측은 시험이 일정진폭하중하의 제공평균방근(Root-Mean-Square : RMS)의 최대 및 최소 응력레벨에서 수행되었다고 가정하고 해석하였다. Newman<sup>(3)</sup>은 균열달림이 변동 진폭하중하의 균열 성장속도에서 하중 상호작용효과(지연 및 가속)의 원인이 되는 중요한 인자로 보고 수명예측을 하였는데, 균열달림효과를 포함하는 주기적인 균열성장의 해석 모델을 Dugdale 모델과 같은 개념에 두고 진행하는 균열선단전방에서 소성으로 변형된 재료를 수정하여 해석하였다. 또 Johnson<sup>(4)</sup>은 다중인자 항복영역(Multi-Parameter Yield Zone)이라는 모델로써 균열 성장지연, 가속과 과소하중효과 및 균열선단에서의 소성변형에 의한 잔류응력 세기에 의한 하중 상호작용을 이용하여 해석하였고, Rudd등<sup>(5)</sup>은 과하중의 상호작용을 고려하여 민감도 분석을 수행하였다. Chang등<sup>(6)</sup>은 두 가지의 서로 다른 접근방법, 즉, 하중 상호작용효과를 고려한 것과 그렇지 않은 것의 인장과 대하중다음에 즉시 오는 압축하중에 의한 과대하중 지연효과와 감소뿐만 아니라 인장과대하중에 의한 지연과 압축과대하중에 의한 가속효과도 고려하여 해석하였다. 상기의 대부분의 해석에서는 그 접근방법이 매우 복잡할 뿐만 아니라, 복잡한 해석방법에 비해 그다지 만족스럽지 못한 해석결

과를 나타내고 있다. 그 중에서 해석방법이 상대적으로 비교적 평이하면서 매우 만족스러운 결과를 보이고 있는 것이 Hudson<sup>(2)</sup>이 수행한 제공평균방근을 이용한 것이다. Hudson은 Barsom<sup>(7)</sup>의 개념을 Round robin 해석 중의 한 접근방법으로 사용하였다.

Barsom의 개념에 의하면 변동진폭하중시험의 피로균열성장데이터는 일정진폭하중시험의 결과치와 상호관련이 있다고 보고하였다. Barsom은 이런 데이터들을 제공평균방근의 응력세기계수범위에 대한 피로균열 성장속도로 나타냄으로 상호관련을 유도하였다. 그 접근방법은 다음과 같다. 먼저 각 시편에 대해 제공평균방근의 관계식<sup>(8)</sup>을 이용하여 최대, 최소 응력 및 응력비를 구한다. 그리고 제공평균방근의 응력 세기계수범위는 Fedderson의 실험식<sup>(9)</sup>을 사용하였고, 피로균열 성장은 Forman 식<sup>(10)</sup>을 이용하였다. 재료상수 C와 n는 응력세기계수 범위의 크기 및 응력비에 따라 각각 다른 값들을 사용<sup>(10)</sup>하였다. Hudson의 해석방법은 그 접근방법이 다른 해석에 비해 상대적으로 비교적 평이하지만 Forman식을 적용하기 위해서는 각 작용하중의 응력비에 따른 재료상수 C와 n이 응력 세기계수 범위에 해당하는 값들이 필요하며, 이와 더불어 탄성파괴인성의 실험치가 더 필요하므로, 이 해석을 위해서는 추가적인 실험이 필요하게 된다.

따라서 본 연구는 Hudson이 수행했던 제공평균방근의 접근방법에서 필요한 추가적인 자료인 응력 세기계수 범위 및 응력비에 따라 변하는 재료상수 C와 n를 단순히 그 전형적인 대표값만으로도 해석이 가능한 방법을 제시하였다. 또 통계적인 관점에서의 대표값인 제공평균방근을 사용한 Hudson의 접근방법을 단순하면서도 제공평균방근의 접근방법 해석 결과에 근접하며 경우에 따라서는 보다 더 실험치에 가까운 해석을 수행하기 위하여, 본 논문에서 평균값과 분산을 이용, 보다 통계적이며 확률론에 입각한 접근방법을 사용하였다. 즉, 본 논문은 이들이 사용한 데이터를 데이터 베이스화하여 구한 불규칙 하중으로 부터 균열 달림 이론을 도입하여 송<sup>(11)</sup>등이 수행한 불규칙 하중하에서 피로 균열성장의 확률론적 해석 방법을 적용, 평가하였다.

## 2. 확률론의 적용

### 2.1 해석에 사용한 데이터

현재 국내에는 불규칙 하중에 대한 하중이력의 생산과 그 시험결과등에 대한 상세한 자료가 거의 전무한 상태이고, 더구나 이것을 해석적인 방법에 적용하여 해석방법의 연구에 활용하기에는 아직 미흡한 상황이므로 그 필요성에 따라 한편에서는 데이터베이스화하는 연구가 활발히 수행되고 있다. 이러한 적용 가능한 국내 자료의 선택이 어려운 상황에서 본 연구에서는 불규칙 하중에 대한 이력과 그 시험결과가 충분하여 확률론적 해석에 적용 가능한 자료를 선택, 데이터 베이스화하여 사용하였다. 즉, 본 해석에 사용한 데이터는 Round Robin 해석을 수행한 ASTM의 소위원회인 E24.06에서 수행한 참고문헌(1)의 Table 5, 6 및 8의 하중이력을 데이터 베이스화하여 사용하였다. 본 논문에서는 Table 5, 6 및 8의 경우를 각각 Case 5, 6 및 8이라 하였다. 해석에 사용한 데이터는 총 9가지로, Table 5의

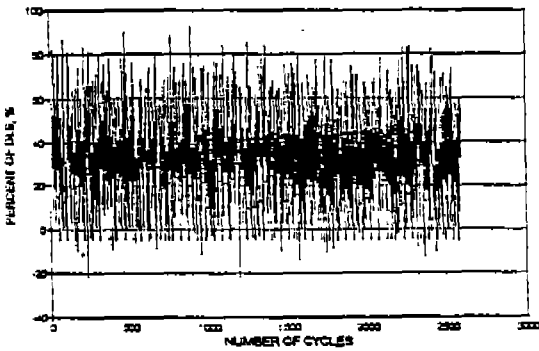


Fig.1 Load history of case 5 random load

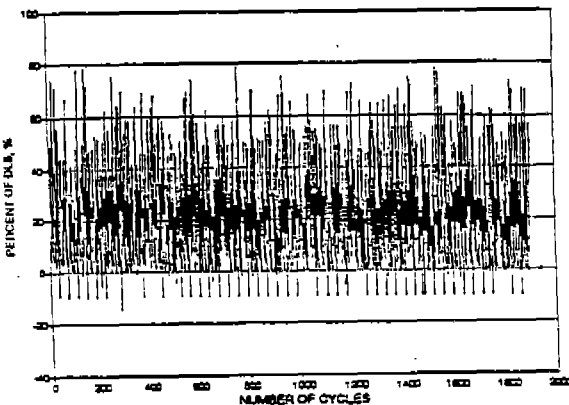


Fig.2 Load history of case 6 random load

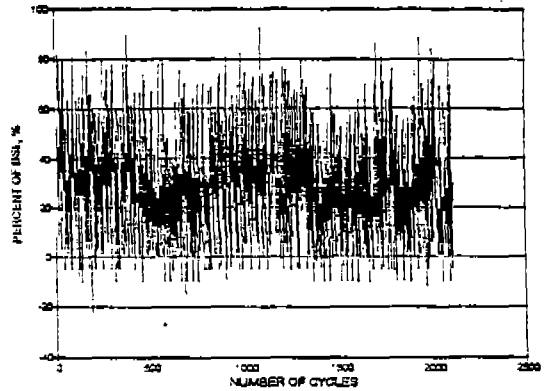


Fig.3 Load history of case 8 random load

시험번호 M-81, 82, 83과 Table 6의 시험번호 M-84, 85, 86 및 Table 8의 시험번호 M-90, 91, 93이다. 또 각 경우에 작용시켰던 불규칙 시험하중의 백분율에 대한 변동을 각각 시간에 따라 데이터 베이스화하여 사용하였는데 그 하중이력은 각각 그림 1, 2 및 3과 같다. 작용하중은 3가지로, 각 Case의 첫번째 경우인 시험번호 M-81, 84, 및 90은 설계 한계 응력(Design Limit Stress : DLS)이 20 ksi(138 Mpa), 각 Case의 두번째 경우인 시험번호 M-82, 85 및 91은 설계 한계 응력이 30 ksi(207 Mpa), 그리고 각 Case의 세번째 경우인 시험번호 M-83, 86, 및 92은 설계 한계 응력은 40 ksi(276 Mpa)이다. 각 Case의 작용하중 및 시험번호는 표 1과 같다.

시편은 2219-T851 알루미늄 판으로 폭 6 in, 길이 9 in, 두께 0.25 in 이고, 초기균열길이 0.15 in가 중앙에 존재하는 중앙 균열 인장(Center Cracked Tension : CCT) 시편이다.

## 2.2 확률론을 적용을 위한 가정

불규칙 하중하에서의 피로거동을 지배하는 각 인자들의 실제 수치 그대로를 변수로 사용하여 수치적으로 해석하는 것은, 단순화를 위하여 가정하고 해석한 결과와 비교 분석해보면 그 방법이 그다지 실용적이지 못한 것을 알 수 있다. 즉, 불규칙 하중하의 피로거동은 각 인자들에 타당한 가정을 도입하여 단순화시키면 간단한 수치해석으로도 만족할만한 결과를 구할 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같이 가정하였고, 해석 절차에서 각각의 가정의 타당성을 나타내었다.

Table 1. Comparison of RMS Approach and Probabilistic Approach Lives.

Case	Test Number	Design Limit Stress	Test Life, Cycles Reference 1	Probab. App. Life, Cycles ( $N_{pre}/N_{test}$ )	RMS Approach Life, Cycles ( $N_{pre}/N_{test}$ ) <sup>(2)</sup>
5	M-81	20 ksi	11570	148292 (1.28)	246000 (2.13)
	M-82	30 ksi	58585	61062 (1.04)	79000 (1.35)
	M-83	40 ksi	18612	24584 (1.32)	25359 (1.36)
6	M-84	20 ksi	268908	419901 (1.56)	395292 (1.47)
	M-85	30 ksi	95642	114751 (1.20)	99368 (1.04)
	M-86	40 ksi	36367	45901 (1.26)	29789 (0.82)
8	M-90	20 ksi	218151	357645 (1.64)	430225 (1.97)
	M-91	30 ksi	65627	97847 (1.49)	93473 (1.42)
	M-92	40 ksi	22182	39043 (1.76)	31446 (1.42)

- 불규칙 하중은 각 주기에 대해 독립적인 불규칙 변수로 간주할 수 있는 Stationary 불규칙 과정 (Procedure) 이다.
- 모든 하중은 확률론적으로 정규분포를 한다.
- 균열 열림응력은 최대 및 최소응력의 함수이다.
- 불규칙 하중하에서 각각의 하중이력에 대해 각각의 균열 열림응력은 일정<sup>(12-14)</sup> 이다.
- 균열 열림응력은 각 주기의 최소 응력보다 크다.

주기의 응력은  $\sigma_{max, i}$ ,  $\sigma_{min, i}$  와  $\Delta\sigma$ 로 나타낼 수

### 3. 확률론적 피로균열 성장해석

#### 3.1 불규칙 하중의 하중 이력 및 확률 분포

불규칙 하중하에서의 하중이력으로부터 임의의  $i$ 번째

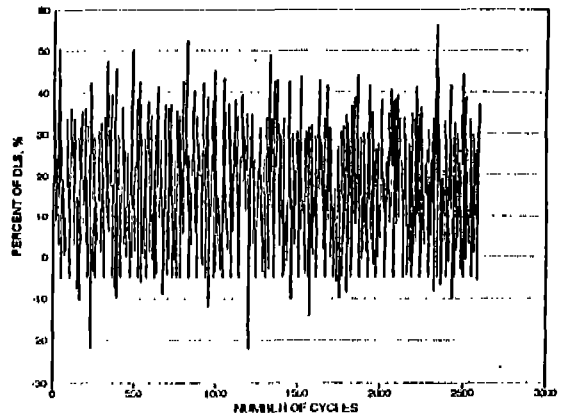


Fig.5 Load history of case 5 minimum stress

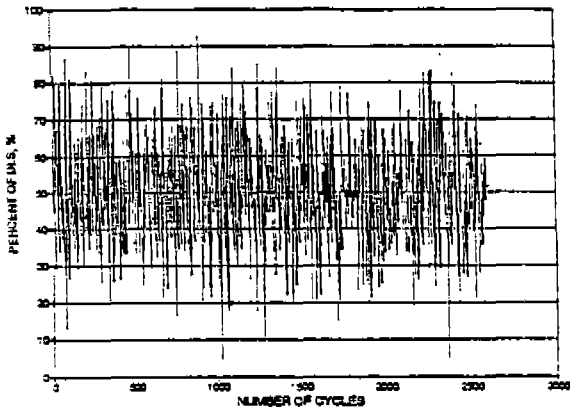


Fig.4 Load history of case 5 maximum stress

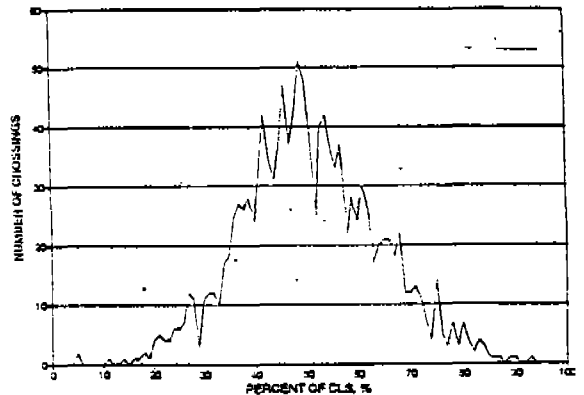


Fig.6 PDF of case 5 maximum stress

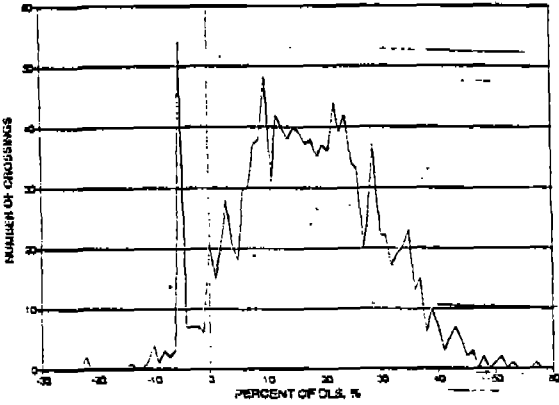


Fig.7 PDF of case 5 minimum stress

있다. Case 5의 경우가 그대표적인 예인데,  $\sigma_{max}$ 는 그림 4,  $\sigma_{min}$ 은 그림 5와 같은 하중이력을 나타내고 있다. 또 각각의 확률분포는, 그림 6과 그림 7과 같이 정규분포(Gaussian Distribution)에 가깝게 접근함을 보이고 있으므로 하중의 분포는 정규분포를 한다고 가정한 상기의 가정(b)가 타당하다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 균열 열림응력의 결정

불규칙 하중하에서 각각의 하중이력에 대해 각각의 균열 열림응력  $\sigma_{op}$ 가 일정하다면 해석이 매우 용이하게 되는데, 본 논문에서는 Elber(12, 13)와 Schijve(14)의 이론을 일정한 응력 레벨을 유지한다고 가정하였고  $\sigma_{op}$ 를 구하기 위해 Schijve(14)가 제시한 식을 사용하였다. 즉, Elber(12)가 주장한 균열 닫힘이론에 의하면 피로균열 성장속도를 결정하는 유효 응력세 기계수범위  $\Delta K_{eff}$ 는 선행주기의 최대 및 최소응력에 대한 균열열림응력  $\sigma_{op}$ 에 의존한다. 또 Elber(13)는 해석에 적용한 순수 불규칙하중시험의  $\sigma_{op}$ 가 근사적으로 일정한 응력레벨에 머물러 있음을 보고하였고, 비행기 모사시험에서 Schijve(14)는 변동 진폭하중하의  $\sigma_{op}$ 는 최대응력과 최소응력의 함수로 가정하여 다음 식에서와 같이 근사적으로 일정하다고 제시하였다.

$$\sigma_{op} = S_{max}(0.5 + 0.1R + 0.4R^2) \quad (1)$$

여기서 R은 응력비이며,  $R = S_{min}/S_{max}$ 로 표현된다.

본 논문에서는 Elber(12, 13)와 Schijve(14)의 이론을 배경으로  $\sigma_{op}$ 가 최대응력과 최소응력의 함수로 일정한 응력레벨에 머문다고 가정하였고, 이것은 각각 상기의 가정(c)와(d)가 타당함을 보이고 있다.

설계 한계 응력(Design Limit Stress)의 백분율에 대한  $S_{max}$ 와  $S_{min}$ 로 식(1)을 이용하여 구한  $\sigma_{op}$ 는 표2와 같다.

### 3.3 유효 응력세기계수 범위

균열 닫힘이론(2)에 의하면, 임의의 반복수 동안의 균열증분은

$$\Delta a = c(\Delta K_{eff})^n \quad (2)$$

여기서  $\Delta a$ 는 하중주기당 균열증분,  $\Delta K_{eff}$ 는 유효 응력세기계수범위, c와 n은 재료상수이다.

유효 응력세기계수 범위는

$$\begin{aligned} \Delta K_{eff} &= \Delta \sigma_{eff} f(a/w) \sqrt{\pi a} \\ &= q(a) \Delta \sigma_{eff} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서  $\Delta \sigma_{eff}$ 는 유효응력범위이고  $f(a/w)$ 는 보정계수이며,  $q(a) = f(a/w) \sqrt{\pi a}$ 이다.

$\Delta \sigma_{eff}$ 의 크기에 따라서 다음과 같이 구분(2)된다.

$$\Delta \sigma_{eff} = \begin{cases} 0 & \text{단, } \sigma_{max} < \sigma_{op} \\ \sigma_{max} - \sigma_{op} & \text{단, } \sigma_{min} < \sigma_{op} < \sigma_{max} \\ \Delta \sigma & \text{단, } \sigma_{op} < \sigma_{min} \end{cases} \quad (4)$$

해석에 사용된 그림 4 및 그림 5의 하중이력과 표2에서 알 수 있는 바와 같이  $\sigma_{op}$ 는 거의 대부분  $\sigma_{min}$ 보다 크므로  $\sigma_{op}$ 의 범위는 식(4)의 둘째식과 같게 된다.

따라서  $\Delta \sigma_{eff} = \Delta \sigma_{op} = \sigma_{max} - \sigma_{op}$ 이며, 그림 5와 같은 하중이력을 갖는다. 임의의 주기에서의  $\sigma_{max}$ 는  $\sigma_{op}$ 에 독립적이므로  $\Delta \sigma_{eff}$ 의 하중이력은 그림 8과 같고, 유효 응력범위에 따라 정규분포를 하므로 확률분포함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_1(X) &= \int_{-\infty}^x (1/\sqrt{2\pi\sigma_1^2}) \\ &\exp\{-(X-\mu_1)^2 / 2\sigma_1^2\} dX \quad (5) \end{aligned}$$

여기서 확률분포를 하는  $\Delta \sigma_{eff}$ 의  $\mu_1$ 는 평균이고  $\sigma_1^2$ 는 Variance이다.

식(2)와 (3)부터 임의의 i번째 하중 주기에 대한  $\Delta \sigma_{eff}$ 는

Table 2. Crack Opening Stress

(Unit : % of Design Limit Stress)

Case	S <sub>min</sub>	S <sub>max</sub>	σ <sub>op</sub>
5	-22.0	92.5	46.14
6	-14.7	78.9	39.06
8	-22.0	92.5	46.14

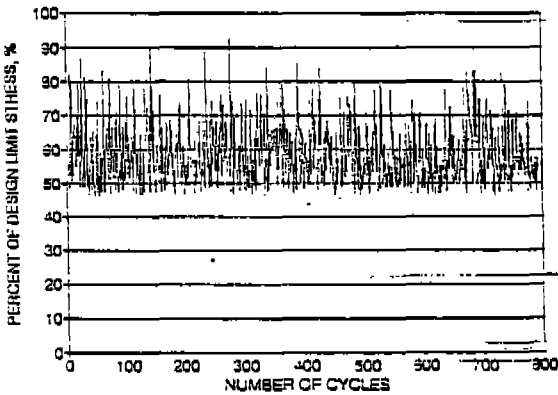


Fig.8 Load history of case 5 effective stress range

$$(\Delta \sigma_{eff, i})^n = \Delta a_i / [C(q(a_i))]^n \quad (6)$$

3.4 확률 밀도 및 분포 함수와 균열성장속도와의 관계  
 식(6)을 하중의 전 구간에 대해 고려하려면 각각의 주기를 모두 합하면 된다. 즉,

$$\Sigma (\Delta \sigma_{eff, i})^n = \Sigma \Delta a_i / [C(q(a_i))]^n \quad (7)$$

식(7)의 왼쪽항을 확률분포함수 F(x<sup>1/n</sup>)를 갖는 통계적으로 독립적인 불규칙 변위 Δσ<sub>eff, i</sub>의 합이며, 정규분포를 하므로, (Δσ<sub>eff, i</sub>)<sup>n</sup>의 확률 밀도함수 F(X)와 확률분포함수 P(X)는 다음과 같이 표현된다.

$$F(X) = 1 / \sqrt{2N\sigma^2} \cdot \exp\{-(X-N\mu)^2 / 2N\sigma^2\} \quad (8)$$

$$P\{y(a) < x\} = 1 / \sqrt{2N\sigma^2} \int_{-\infty}^x \exp\{-(X-N\mu)^2 / 2N\sigma^2\} dx \quad (9)$$

여기서 N은 하중의 반복수이며 μ과 σ<sup>2</sup>는 각각(Δσ

eff, i)<sup>n</sup>의 평균과 Variance이며 다음과 같다.

$$\mu = \int X dF(X^{1/n}),$$

$$\sigma^2 = \int (X - \mu)^2 dF(X^{1/n}) \quad (10)$$

식(9)는 누적된 n 하중의 크기에 대한 균열길이의 확률을 나타낸다. 즉 식(9)로부터 균열길이는 하중의 반복수, 평균, Variance 및 균열길이 그 자체의 함수로 표현될 수 있다. 식(7)의 오른쪽 항을 적분으로 나타낼 수 있으므로, 균열에 대한 함수로 표현된다. 식(9)로부터 구한 균열 길이에 대한 함수와 식(7)의 오른쪽 항의 그것으로, Paris식과 흡사한 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C' (\Delta K')^n \quad (11)$$

여기서 ΔK' = Δσ' · f(g) = μ<sup>1/n</sup> · f(g)이고, W는 시편의 폭이며, C' = C(1 + C'/2√N)이며 C"는 변이계수(Coefficient of Variance)이다.

식(11)로부터 해석에 사용한 불규칙 데이터인 참고 문헌(1)로부터 재료상수의 대표적인 값은 C = 5.39 × 10<sup>-9</sup>이고 n = 3.18이며 (Δσ<sub>eff, i</sub>)<sup>n</sup>의 확률분포에 대한 평균 및 Variance를 대입하면 주어진 불규칙 하중하의 중앙 균열이 있는 인장시편에서 피로균열 성장속도식을 구할 수 있다.

#### 4. 해석 결과 및 고찰

불규칙 하중 반복수에 따른 확률론적 해석에 의한 피로균열 길이의 성장은 식(11)를 이용하여 초기균열 0.15 in에서 파단시까지 예측할 수 있는데, 그 결과는 각 Case의 DLS에 따라 그림 9, 10 및 11과 같다. 그림에서 알수 있는 바와 같이 DLS가 높아 질수록 급격한 피로균열이 성장함을 알수있다. 즉, DLS가 20에서 30 ksi로 1.5배 증가하면 균열성장은 약 2.42에서 3.66배로 빨라지고, DLS가 30에서 40 ksi로 약 1.33배 증가하면 균열성장 역시 약 2.48에서 2.51배로 빨라진다. 특히 그림 11은 Case 8의 DLS에 대한 반복수 증가에 따른 균열길이의 변화를 나타낸다. 이 경우에 대해서만 시험 결과 (3)와 비교하였는데 본 논문에서 사용한 데이터 베이스에는 그외의 경우에는 피로수명만

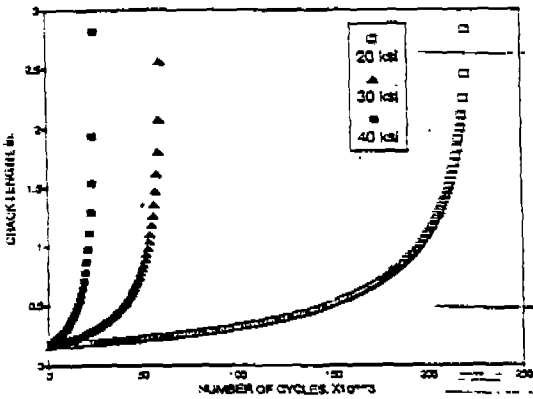


Fig. 9 Crack length against cycles curves of case 5 random load

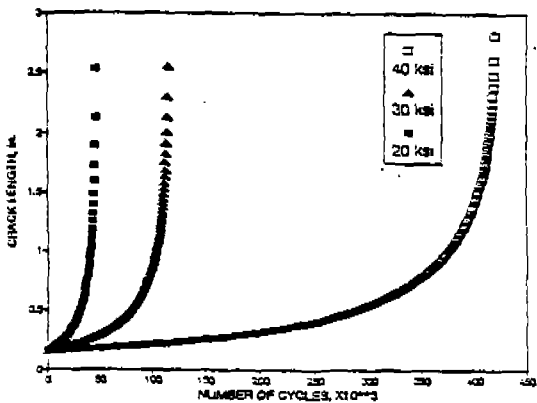


Fig. 10 Crack length against cycles curves of case 6 random load

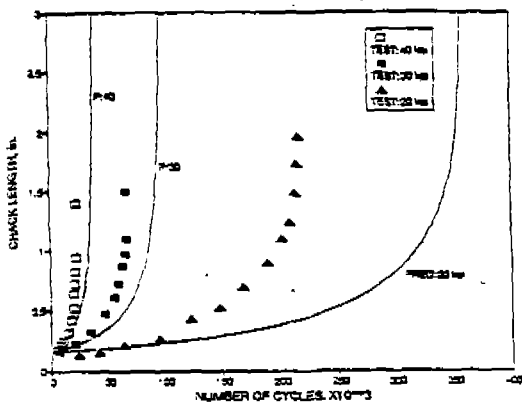


Fig. 11 Comparison of experimental and predicted crack length against cycle curves for case 8

적용할 수 있기 때문(1)이다. 실험 결과와 비교해 보면 예측한 균열길이 성장은 그림 11의 모든 DLS에서 큰 값을 보이고 있다. 특히, DLS가 20 ksi일때 더 큰 차이를 나타내고 있는데 시험수명에 대한 예측수명의 비는 약 1.64이다. 이것은 RMS방법으로 수행한 Hudson의 결과(2)인 시험수명에 대한 예측수명의 비 1.97보다 안전한 측에 위치하므로 보수적인 결과를 나타낸다. 일반적으로 동일하중하에서 피로 균열성장속도의 정상적 분산(Normal Scatter)이 2 또는 4의 배수의 범위에 있다는 것(2)과 이 해석결과가 2의 배수내에 있다는 것을 비교해보면, 이 해석방법이 매우 양호한

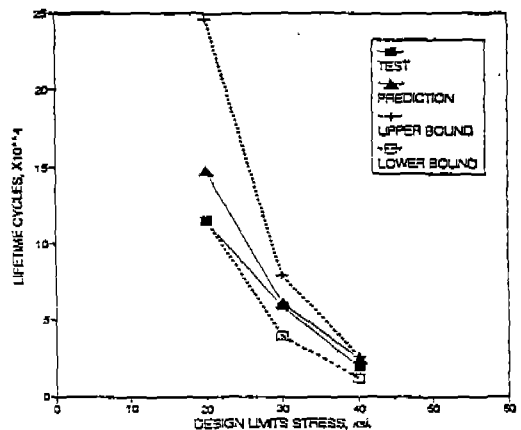


Fig. 12 Comparison of experimental and predicted lifetime cycles against DLS curves for case 5

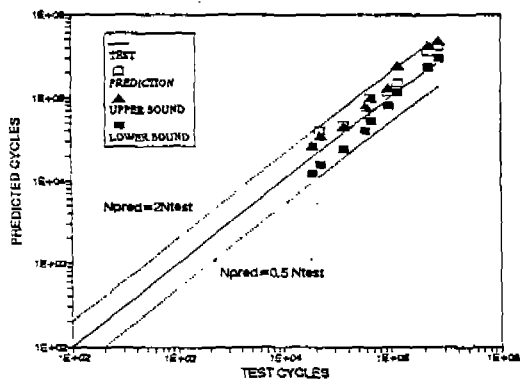


Fig. 13 Correlation of predicted life to test life cycles

Table 3. Comparison of Fatigue Life Prediction for Failure

Case	Test Number	Test Life, Cycles Ref 1	Probabilistic Ap. Life, Cycles ( $N_{pre}/N_{test}$ )	Predicted Life by Analysis, Cycles : References 2~6 ( $N_{pre}/N_{test}$ )
5	M-81	115700	148292 (1. 28)	115800~246000 (1. 00~2. 12)
	M-82	58585	61062 (1. 04)	39125~79000 (0. 67~1. 35)
	M-83	18612	24584 (1. 32)	11940~25944 (0. 64~1. 39)
6	M-84	268908	419901 (1. 56)	302816~496284 (1. 13~1. 85)
	M-85	95642	114751 (1. 20)	79644~131868 (0. 83~1. 38)
	M-86	36367	45901 (1. 26)	23275~45034 (0. 64~1. 24)
8	M-90	218151	357645 (1. 64)	231240~430225 (1. 06~1. 97)
	M-91	65627	97847 (1. 49)	51165~97679 (0. 78~1. 49)
	M-92	22182	39043 (1. 76)	15370~34000 (0. 69~1. 53)

것임을 알 수 있다. 그림 12는 Case 5의 DLS 증가에 따른 수명의 감소 경향을 나타내고 있다. 이 해석결과 역시 Round-robin 해석 결과의 상한 및 하한치내에 위치하므로 예측이 시험결과에 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 13은 9가지 경우에 대한 해석결과를 보이고 있다. 여기서 시험반복수에 대한 예측 반복수를 Log-Log형 그래프로 표현한 것 인데 대각선의 바깥 점선은 피로균열성장속도의 정상적 분산(Normal Scatter)이 2의 배수인 범위를 나타내며, 예측한 수명은 역시 Round-robin 해석 결과의 상한 및 하한치내에 위치하므로 해석에 의한 예측이 시험결과에 잘 일치되는 것을 볼 수 있다.

확률론적 해석에 의한 파단시 피로수명 예측은 식 (11)을 초기균열 0.15 in에서 파단시까지 적분하여 구할 수 있다. 예측한 피로수명은 파단시의 반복수로 표현되는데 그 결과를 표 1 및 3과 같이 Round-robin으로 해석한 결과들<sup>(2-6)</sup>과 비교하였다. 표 1 및 3은 각 Case의 시험수명에 대한 예측수명의 비를 나타낸다. 시험수명에 대한 예측수명의 비는 1.04에서 1.76의 범위를 보인다. 표1에서는 본 해석방법이 RMS방법으로 수행한 Hudson의 결과<sup>(2)</sup>인 시험수명에 대한 예측수명의 비 0.82에서 2.13의 범위 보다 대체로 안전한 측에 위치하므로 보수적인 경향을 나타내고 있음을 보이고 있다. 또 표3은 Round-robin으로 해석한 결과들<sup>(2-6)</sup>과 비교하였는데 반복수에 따른 피로 균열 성장에서와 같이, 파단시 피로수명도 Case 8의 DLS이 30 및 40 ksi인 경우를 제외한 모든 경우에 대해서 Round-robin

해석 범위내에서 그 결과를 얻을 수 있다. 이것 역시 동일하중하에서 피로균열성장속도의 정상적 분산(Normal Scatter)이 2 또는 4의 배수의 범위에 있다는 것<sup>(2)</sup>을 고려해보면, 이 해석결과는 2의 배수내에 들어 있으므로 매우 양호한 것임을 알 수 있다. 즉, 해석결과는 시험결과치와 상당히 일치한다는 것을 알 수 있다.

본 논문의 확률론적 피로해석의 결과는 여러 가정들에 비해 비교적 실제 시험의 값에 가깝게 접근한다. 그러므로, 하중이력과 재료상수만 알 수 있고 하중이 통계적으로 분포를 한다면 확률론적 해석 방법을 도입, Hudson이 수행했던 제곱평균평방근의 접근방법에서 추가적인 자료인 응력 세기계수 범위 및 용력비에 따라 변하는 재료상수 C와 n을 그 전형적인 대표값만을 사용하여도 해석이 가능하다. 그리고, 단순하면서도 제곱평균평방근의 접근방법 해석 결과에 근접하며 경우에 따라서는 보다 더 실험치에 가까운 해석 결과를 얻을 수 있다. 이를 위하여 통계적인 관점에서의 대표값인 제곱평균평방근 보다는 본 논문에서는 평균값과 분산을 이용하여 보다 통계적이며 확률론에 입각한 접근방법을 제시하였다.

## 5. 결 론

불규칙 하중하의 피로균열 성장거동에 대해 확률론적 해석을 이용하여 평가한 결론은 다음과 같다.



- 1) 불규칙 하중에 대한 확률분포함수 및 확률밀도함수를 고려하여 피로균열 성장거동을 평가하는 방법을 제시하였다.
- 2) 확률론적 피로해석은 제곱 평균 평방근을 이용한 기존의 해석 방법보다 그 결과가 실제 시험 결과에 잘 일치한다.

### 참고문헌

1. Chang, J., 1981, Round-Robin Crack Growth", Predictions on Centered Tension Specimens under Random Spectrum Loading, ASTM STP 748, pp. 3~40
2. Hudson, C., 1981, A Root-Mean-Square Approach for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading, ASTM STP 748, pp. 41~52
3. Newman, J., 1981, A Crack-Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth under Aircraft Spectrum Loading, ASTM STP 748, pp. 53~84
4. Johnson, W., 1981, Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth, ASTM STP 748, pp. 85~102
5. Rudd, J., et al., 1981, Crack Growth Behavior of Center-Cracked Panels under Random Spectrum Loading, ASTM STP 748, pp. 103~114
6. Chang, J., 1981, Random Spectrum Fatigue Crack Life Predictions with or without Considering Load Interactions, ASTM STP 748, pp. 115~132
7. Barsom, J. M., 1976, Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads, ASTM STP 595, pp. 217~235
8. Selby, S.M., 1972, Standard Mathematical Tables, 20th ed., The Chemical Rubber Company.
9. Brown, W. F., Jr., and Strawley, J.E., 1967, Plane Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Material
10. Forman, R.G., et al., 1967, Transactions of the ASME, Series D: Journal of Basic Engineering, Vol. 89, No. 3, pp. 459~465
11. 송삼홍, 장두수, 1992, "불규칙 하중하의 확률론적 피로해석의 신뢰성 평가", 한국정밀공학회 '93년도 춘계학술대회 초록집, pp. 365~367
12. Elber, W., 1971, The Significance of Fatigue Crack, ASTM STP 486, pp. 230~242
13. Elber, W., 1976, Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads, ASTM STP 595, pp. 236~247
14. Schijve, J., 1980, Prediction Method for Fatigue Crack Growth in Aircraft Material, ASTM STP 700, pp. 3~34