

<논 문>

직류전위차법을 이용한 랜덤하중하의 피로균열 진전율에 대한 신뢰성 공학적 연구

배 성 인*

(1995년 3월 3일 접수)

Reliability Engineering Approach to Fatigue Crack Growth Rate under Random Loading Using DC Electrical Potential Method

Sung-In Bae

Key Words : Crack Growth(균열성장), Reliability(신뢰성), Fatigue(피로), Fatigue Crack Growth Rate(피로균열 진전율), DC Electrical Potential Method(직류전위차법), Random Load(랜덤하중)

Abstract

Automatic fatigue crack length measuring system using DC electrical potential method and the system control program for automatic fatigue testing under random load condition were made in this study. And using these system and control program, fatigue tests were executed under constant and random load condition. As the result, the propagation of crack in random loading can be represented Paris equation and log normal probability function. But, constant and random load test show different crack propagation properties.

기 호 설 명

a : 균열길이

N : 사이클수

da/dN : 균열진전속도

ΔK : 응력확대계수 폭

ΔK_{rms} : $\Delta\sigma_{rms}$ 에 의한 응력확대계수 폭

f : 주파수

R : 전압비

R_s : 응력비

P_m : 평균하중

P_{max} : 최대하중

$p(\sigma)$: 확률밀도함수

σ : 응력의 피크값

σ_{rms} : 응력의 평균 제곱근

$\Delta\sigma_{rms}$: 응력범위의 평균 제곱근값

$\Delta\sigma$: 응력폭

σ_{max} : 최대응력

$V_s(a)$: 시험편의 측정전압

$V_s(a_0)$: 시험편의 초기전압

$V_d(a)$: 더미시험편의 측정전압

$V_d(a_0)$: 더미시험편의 초기전압

1. 서 론

기계구조물의 사용수명을 단축시키는 원인중에 피로는 극히 중요한 문제이다. 일반적으로 구조물의 피로파괴는 반복응력의 작용에 의해 발생한 피로균열이 점차 성장하여 머지않아 위험길이에 도달해 파괴에 이르는 과정을 겪는 경우가 많고, 여기서의 피로균열 진전율 da/dN 는 확률분포를 나타

*회원, 창원대학교 기계공학과

내는 것을 알 수 있다. 따라서 이 피로균열 전진율 da/dN 의 확률특성을 명확하게 해석하는 것은 손상허용 응력설계와 수명평가 등의 고정도화에 필요하고 최근 국내의 연구가 활발하게 진행되고 있다. (1~10)

da/dN 의 확률특성을 명확하게 하기 위해서는 적절한 실험데이터의 수집이 필요하다. 피로균열 전진속도의 통계적 데이터를 구하는 실험은 피로수명의 통계적 데이터를 구하는 실험보다도 어려운 점이 많고, 데이터를 얻기가 간단하지 않다. 이것은 다수의 시험편에 대하여 시험중에 여러번 균열 길이를 측정할 필요가 있기 때문이다. 수천 사이클의 간격으로 시험기를 정지하고, 광학식 이동현미경을 이용하여 균열길이를 측정하는 데에 필요한 노력은 상당히 크다. 더군다나 측정간격을 짧게 하기 위해서는 그 노력이 더욱 커지게 된다. 또한, 광학식 이동 현미경은 측정하는 개인차가 문제가 되기도 한다.

본 연구에서는 마이크로 컴퓨터를 사용해 피로시험을 자동화하기 위하여, 직류전위차법을 사용해 피로균열길이를 자동측정하는 시스템을 제작하였고, 랜덤하중을 발생시키며 피로시험을 자동화하는 시스템 제어 프로그램을 만들었다. 또한 이를 이용하여 일정진폭하중하와 랜덤하중하에서의 피로시험을 행하여 피로균열 전진율에 대한 신뢰성 공학적인 해석을 하였다.

2. 전위차법에 의한 균열길이 자동측정 시스템 제작

전위차법은 시험편의 전기저항이 균열길이 증대와 동시에 변화하는 것을 이용한 측정원리이다. 즉, Fig. 1에 나타난 원리처럼 전기의 양전도체인 시험편에 전류를 흘리면 균열이 발생 혹은 전진하는 경우에 생기는 전기저항의 변화를 균열의 양쪽에 설치한 전압단자에서 전위차의 변화로써 검출하고 균열길이로 변환하는 것이다. (7,8)

피로균열길이는 측정한 시험편과 더미시험편의 양쪽의 전압 데이터를 마이크로 컴퓨터에 식 (1)에 의해 전류변동과 환경보정을 전압비 R 에 환산하고, 사전에 구해둔 교정곡선에 대입하는 것에서 구한다.

$$R = \frac{V_s(a)/V_s(a_0)}{V_d(a)/V_d(a_0)} \quad (1)$$

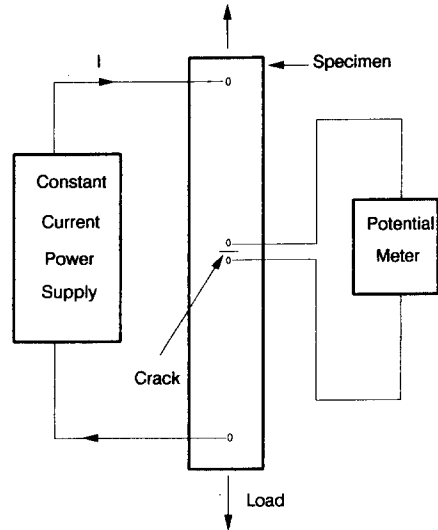


Fig. 1 Schematic of the electrical potential method

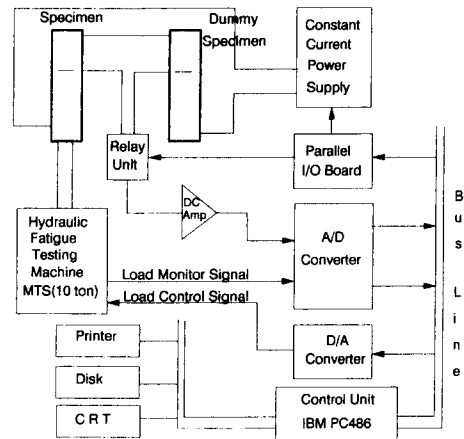


Fig. 2 System of the electrical potential method

$V_s(a)$ 은 시험편의 측정전압, $V_d(a)$ 은 더미시험편의 측정전압, $V_s(a_0)$ 은 시험편의 초기전압, $V_d(a_0)$ 은 더미시험편의 초기전압이다.

본 연구에서 제작한 균열길이 자동측정 시스템의 구성도를 Fig. 2에 나타내었다. 균열길이 자동측정 시스템은 피로시험기, 전위차법에 의한 균열길이의 측정을 행하는 측정부 및 이들의 제어와 측정데이터의 처리를 행하는 제어부로 구성된다.

균열길이 측정부는, 정전류원, 직류앰프, 릴레이 유니트로 구성된다. 시험편은 더미시험편(dummy specimen)과 직렬로 접속하여 정전류원으로부터 8 A의 전류를 공급한다. 측정은 시험편과 더미시험

편의 전압단자간의 전압차를 앰프로부터 증폭하여, A/D 변환기를 통하여 제어부의 마이크로 컴퓨터에 의해 제어한다. 균열길이 측정시에는 마이크로 컴퓨터의 명령에 의해 릴레이를 전환하고, 시험편과 더미시험편의 양쪽의 전압을 측정한다. 더미시험편은 시험편과 동일형상이고 보정감도를 높이기 위해 더미시험편의 초기전압을 시험편의 초기전압의 2배정도에 설정하고 시험편에 되도록 가깝게 설치한다. 이렇게 하는 것에 의해 정전류원의 전류변동이나 시험편 부근 등의 온도변화를 데이터로 얻을 수 있고 오차를 감소시킬 수 있다. 전압단자의 부착은 접촉저항과 사용한 육각너트의 각도의 영향을 줄이기 위해 시험편과 단자사이에 에폭시판을 사용하여 절연시켰다.

3. 실험장치 및 조건

3.1 시험편

시험편재료는 항공기 등에 사용되고 있는 두께 2 mm의 7075-T6 알루미늄합금을 사용하였다. 시험편의 형상과 치수는 Fig. 3에 나타내었다. 시험편은 길이방향(하중방향)과 압연방향을 일치시키고 전단기에서 전단한 후에 단면을 밀링으로 절삭했다. 또 초기 노치가공으로서 직경 0.7 mm 구멍을 뚫은후 싹뚫으로 끊었다. 전압단자용으로서 1.6 mm의 구멍을 뚫어서 M2 암나사를 내고, 전압단자가 붙여지도록 했다. 게다가 균열진전경로 부근을 2000번 사포로 연마하고, 산화알루미늄 가루를 경면사상해서 광학현미경에 의한 측정을 준비하였다.

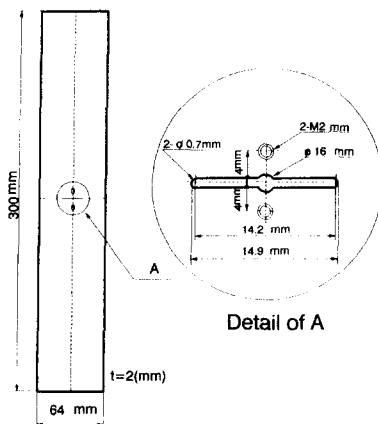


Fig. 3 Shape and dimensions of the specimen

3.2 일정진폭하중 시험방법

일정진폭하중 피로시험은 주파수 $f=10$ Hz, 응력폭 $\Delta\sigma=56.3$ MPa, 최대응력은 $\sigma_{max}=62.5$ MPa, 응력비 $R=0.1$ 편진인장을 행했다. 이때 평균하중 $P_m=4400$ N, 최대하중 $P_{max}=8000$ N, 최소하중 $P_{min}=800$ N이다.

시험편에 정전류를 공급하기 위한 단자로서 척과 시험편의 사이에 망선을 끼워두었다. 시험편의 장착에 관해서는 특히 절연에 조심할 필요가 있지만, 본 실험에서는 척의 양쪽부분에 절연판을 끼워넣어서 실험기와 시험편 사이를 절연하였다.

3.3 랜덤 피로균열진전 시험방법

일반 구조물은 공진특성을 갖고 있는 것이 많아, 예로 구조물에 작용하는 주파수가 광대역에 있어도, 실제에는 협대역으로 되는 것이 많다고 생각된다. 주파수가 거의 일정한 협대역 랜덤과정에서의 진동의 피크의 확률분포는 Rayleigh 분포를 표시하는 경우가 잘 알려져 있으므로 본 연구에는 Rayleigh 분포를 이용한다.⁽⁸⁾

응력의 피크값을 σ 로 하면, Rayleigh 분포에 따르는 σ 의 확률밀도함수 $p(\sigma)$ 는 식 (2)으로 표시된다.

$$p(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_{rms}^2} \exp\left(-\frac{\sigma^2}{\sigma_{rms}^2}\right) \quad (2)$$

σ_{rms} : 응력의 평균 제곱근

발생시킨 랜덤하중의 한 예를 Fig. 4에 나타내었다. 본 실험에 사용한 시스템은 하중이 최대치까지 Rayleigh 분포에 따르는 것으로 Fig. 4와 같이 등간격의 10개 하중으로 등분하여 발생시켰다. 이때의 최대응력은 117 MPa이다. 랜덤하중 피로시험은

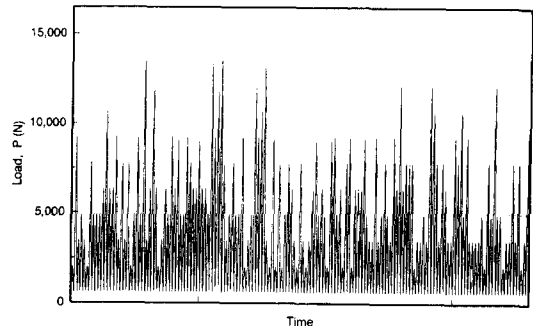


Fig. 4 Example of random wave

주파수 $f=5$ Hz, 응력폭 $\Delta\sigma_{rms}=60.0$ MPa의 편진 인장을 행했다. 이때 최대하중 $P_{max}=15000$ N, 최소하중 $P_{min}=1500$ N이다.

3.4 랜덤 피로제어 프로그램 작성

C 언어를 사용하여 랜덤 파형발생 프로그램과 피로하중 사이클 카운트 프로그램을 만들어 시험하였으며, C 언어에 의한 A/D 및 D/A 변환 프로그램을 사용하였다. 랜덤 피로균열진전시험의 제어부는 D/A 변환기를 사용하여 피로시험기에 하중신호를 보냄과 동시에, A/D 변환기를 사용하여 시

험기의 하중을 모니터하고, 일정하중이 되도록 하중제어를 행한다. 또, 패러렐 I/O보드를 사용하여 릴레이 유니트 및 정전류원의 ON/OFF도 행한다. 그후에 얻어진 측정데이터를 실시간 처리하여, 프린터, 모니터, 디스크 등에 출력한다. 이를 총괄 제어하는 프로그램을 작성하였다.

3.5 균열길이 교정곡선

전위차법에 의한 균열길이의 자동측정을 행하기 위해서는 전위차법에 의해서 측정되는 전압비 R 과 실제의 균열길이를 관계시키는 교정곡선을 구해둘

Table 1 Comparison of crack length measured by traveling microscope and by electrical potential method

$$\begin{aligned} a(R) = & 3.95346E+00 - 6.50261E+00 \times R + 1.66263E+01 \times R^2 \\ & - 8.41098E+00 \times R^3 + 2.03808E+00 \times R^4 \\ & - 2.43322E-01 \times R^5 + 1.41569E-02 \times R^6 \end{aligned}$$

N cycle	FR (mm)	FL (mm)	BR (mm)	BL (mm)	a_t (mm)	R	a_e (mm)	$a_t - a_e$ (mm)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	7.500	1.0000	7.472	0.208
15500	1.920	2.190	1.090	2.280	9.370	1.2270	9.450	-0.080
18000	3.630	3.700	3.770	3.880	11.245	1.4273	11.201	0.044
19800	5.280	5.090	5.220	5.240	12.708	1.6022	12.677	0.031
22600	6.810	6.710	7.020	6.910	14.363	1.8221	14.420	-0.057
24000	8.420	7.960	8.420	8.310	15.778	2.0022	15.737	0.041
25000	9.640	9.220	10.370	9.390	17.155	2.2027	17.078	0.077
25900	11.030	10.550	11.220	10.620	18.355	2.4257	18.422	-0.067
26500	12.080	11.580	12.230	11.680	19.393	2.6124	19.438	-0.045
27000	13.100	12.530	13.310	12.720	20.415	2.8167	20.454	-0.039
27450	14.020	13.580	14.340	13.610	21.388	3.0187	21.377	0.011
27750	14.830	14.200	15.000	14.720	22.208	3.2044	22.170	0.038
28050	15.780	15.320	16.040	15.490	23.158	3.4230	23.049	0.109
28200	16.480	15.930	16.680	16.240	23.833	3.6495	23.913	-0.080
28400	17.220	16.740	17.480	17.030	24.618	3.8424	24.618	0.000

* a_t : Crack length measured by traveling microscope.

a_e : Crack length measured by electrical potential method.

FR : Crack length of right side of front face.

FL : Crack length of left side of front face.

BR : Crack length of right side of back face.

BL : Crack length of left side of back face.

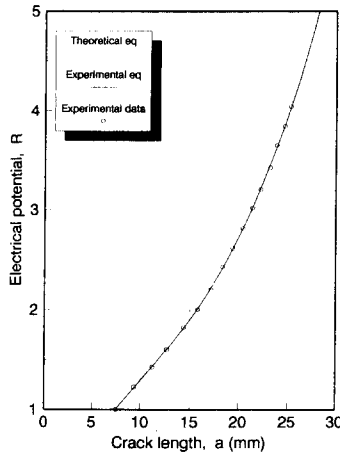


Fig. 5 Comparison between experimental results and theoretical equation

필요가 있다. 그 결과를 최소자승법을 이용하여 6차 다항식으로 구하여 Table 1에 나타내었다. 이 표에 나타낸 바와 같이 본 균열길이 측정 시스템의 오차는 0.1 mm 정도이다.

전위차법에 의해 균열을 측정하는 경우에는 사전에 전위차와 균열길이를 관계하고 있는 교정곡선 혹은 교정식을 구해줄 필요가 있다. 본 실험의 경우 교정곡선은 실제의 피로시험을 해서 구하고 있지만 해석적인 방법에 의해서도 구할 수 있다. 본 실험에 의한 중앙부 평판에서는 등각사상법에 의해 다음과 같이 이론식이 구해지고 있다.⁽⁷⁾

$$\frac{V(a)}{V(a_0)} = \frac{\cosh^{-1}\left(\frac{\cosh(\pi y/W)}{\cos(\pi a/W)}\right)}{\cosh^{-1}\left(\frac{\cosh(\pi y/W)}{\cos(\pi a_0/W)}\right)} \quad (3)$$

2a는 균열길이, V(a)는 단자간 전압, 2a₀은 초기 균열길이, V(a₀)는 단자간 초기전압 y는 균열을 사이에 둔 전압단자간 거리

본 실험의 경우 y=4 mm, W=64 mm, a₀=7.45 mm이다. 이를 Fig. 5에 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 a-N 선도

일정진폭하중하에서 실험한 11개 시험편과 랜덤하중하에서 실험한 12개의 시험편에 대한 a-N선도를 Fig. 6에 나타내었다. 두 가지 하중상태 모두에서 데이터가 어느 정도의 산포를 가지고 나오는 것

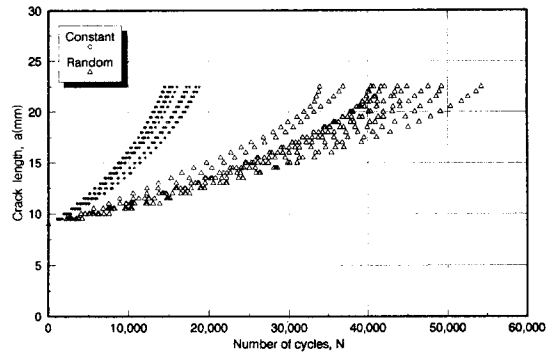


Fig. 6 Crack length a as plotted against the number of repeated cycles N

을 알 수 있어, 이의 산포도와 확률분포에 대한 해석이 요구된다.

4.2 da/dN-ΔK 선도

일정진폭하중과 랜덤하중 모두 어느 정도 산포를 보이고 있으나, 피로균열진전속도 da/dN과 응력 확대계수 폭 ΔK는 Paris식에 의해 표현될 수 있는 것을 알 수 있다.

균열진전속도 da/dN의 계산방법은 7점중분 다항식근사법에 따랐다. 랜덤하중 시험에서는 Δσ가 일정하지 않기 때문에, 응력확대계수 폭 ΔK를 이용할 수는 없다. 거기에서 Δσ대신에 등가응력범위 Δσ_{eq}를 이용하여 정리하는 법이 Okamura에 의해서, 또한, 응력범위의 평균 제곱근값인 Δσ_{rms}를 이용한 방법이 Barsom에 의해 제안되어지고 있다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 Δσ_{rms}를 이용하여 정리했다.

$$\Delta\sigma_{rms} = \left[\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^k (\Delta\sigma_i)^2 \cdot n_i \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기서, k는 응력의 step수, n_i는 각각의 응력 step Δσ_i의 반복수, N₀=n₁+n₂+...+n_k 총반복수이다.

피로균열진전속도 da/dN과 응력확대계수 ΔK의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 랜덤하중하에서도 일정진폭하중의 경우와 마찬가지로 da/dN 및 ΔK의 관계는 직선으로 나타나게 되며 이를 수식화한 Paris-Erdogan의 피로균열진전법칙 da/dN=C(ΔK)^m의 식에 적용이 가능하다. 일정진폭하중의 경우는 균열진전곡선의 식은 da/dN=5.846×10⁻⁸×ΔK^{1.832}로 나타났으며 랜덤진폭하중의 경우는 da/dN=1.506×10⁻⁶ΔK^{1.971}로 나타났다. 이와 같

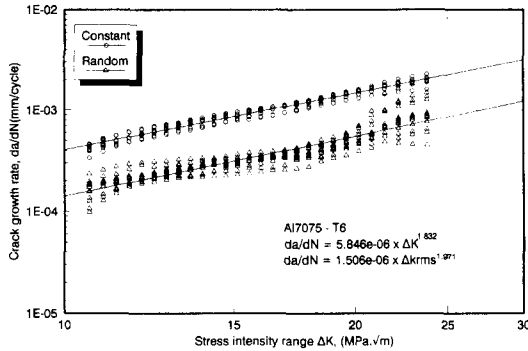


Fig. 7 Crack growth rate da/dN as plotted against the stress intensity range ΔK

이 동일 재료임에도 불구하고 일정진폭하중의 경우와 랜덤하중의 경우는 서로 다른 균열진전곡선을 보이고 있다. 랜덤하중의 경우가 더 낮은 진전특성을 보이는데, 이는 과대하중이 포함된 경우에서 나타나는 균열진전 지연현상의 영향이라 생각되어진다. 일정진폭하중하에서의 균열진전특성을 랜덤하중의 경우에 이용하기 위하여는 ΔK_{rms} 외에 새로운 파라미터의 개발이나 관계식에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

4.3 Paris식의 계수 m 과 C 의 확률적 특성

최소자승법(least square method)을 이용하여 피로균열진전법칙 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에서의 계수 m 과 $\log C$ 의 값을 각 시험편으로부터 구할 수 있다. m 과 $\log C$ 의 양자간에 존재하는 관계를 그래프에 나타내 보임으로써 이들의 상관관계를 조사할 수 있게 된다. 실제로 이들을 반대수 좌표상에 도식해보면 Fig. 8과 같이 나타난다. 랜덤하중의 경우도 일정진폭하중의 경우와 같이 음의 기울기를 가진채 일정한 직선상에 분포되어 나타나는 것을 알 수가 있다. 이것으로부터 이들 사이에는 서로 강한 음의 상관관계가 존재한다는 것을 알 수 있다. 또한 이들은 $C = A \times B^m$ 의 관계식으로서 표현될 수 있고, 이들 각 데이터점들에 대해 최소자승법에 적용시킴으로써 계수 A 및 B 를 구할 수가 있다. 이렇게 해서 구한 A 와 B 의 값은 일정진폭하중의 경우 $A = 1.112E-3, B = -2.920$ 이며 랜덤하중의 경우는 $A = 2.238E-3, B = -2.538$ 이다.

Fig. 9에 m 의 값들을 정규확률지에 나타내었다. 랜덤하중의 경우도 일정진폭하중의 경우와 마찬가지로 거의 직선으로 나타나므로, 랜덤하중의 경우

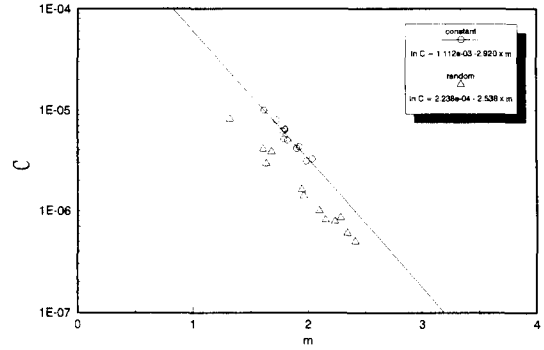


Fig. 8 Relation of coefficient m and C in Paris eq.

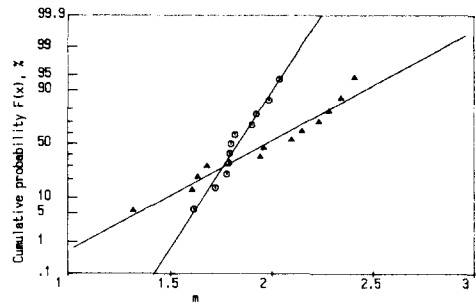


Fig. 9 Normal probability distribution of parameter m

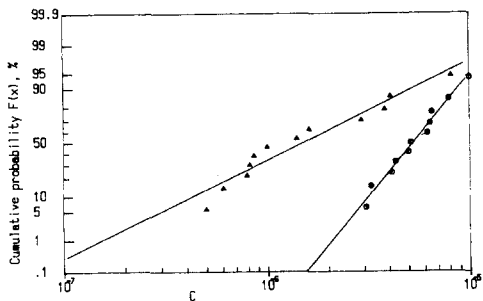


Fig. 10 Log-normal probability distribution of parameter C

도 m 의 값은 정규분포에 따른다는 것을 알 수 있다. 그러나 직선의 기울기가 낮아지는 것을 볼 때 일정진폭하중보다 더 큰 산포를 갖는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 10에 C 의 분포를 대수정규확률 용지에 도시하였다. 랜덤하중의 C 의 값은, m 의 경우와 마찬가지로, 일정진폭하중에서의 C 의 값과 같이 대수정규확률 용지에서 직선으로 분포되어 나타

나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 m 의 경우와 마찬가지로 랜덤하중의 경우에 직선의 기울기가 낮아지는 것을 볼 때 일정진폭하중의 경우보다 조금 큰 산포를 갖는 것을 알 수 있다.

4.4 피로균열진전수명의 산포

실험결과에서 구한 $a \cdot N$ 데이터를 ASTM E 647에 제시되어 있는 7점증분 다항식근사법에 적용시켜서 다항식을 구한후, 이 함수로부터 일정균열길이의 증분에 대한 피로균열진전수명을 구할 수 있다. 즉, 초기 균열길이를 9 mm로 두고 0.5 mm씩 균열길이를 증가시키면서 각각에 대한 피로균열진전수명 N 을 계산한다. 계산결과를 보면 각 시험편으로부터 구한 N 의 값에는 산포가 존재함을 알 수가 있다. 따라서 일정 균열길이에서의 피로균열진전수명 N 의 값의 산포에 대한 이들의 평균과 표준편차, 그리고 변동계수를 구해보았다. 위에서 구한 N 의 변동계수를 일정 균열길이에 대해 도시한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. N 의 변동계수의 경향은 균열길이가 짧은 영역에서는 다소 불안정한 모습을 보이거나 균열길이가 증가함에 따라 안정된 모습을 보이는 것을 알 수 있다. 안정된 변동계수의 값은 일정진폭하중의 경우는 약 9.5% 정도를 나타내며, 랜덤하중의 경우는 약 12% 정도로 다소 높은 값을 보이고 있다.

4.5 피로균열진전수명의 확률분포 특성

Fig. 12은 일정진폭하중조건에서 초기 균열길이 9 mm에서 균열이 진전하여 각각 10, 12, 14, 16, 18(mm)가 될때의 피로균열진전수명 N 의 분포를 대수정규확률 용지에 나타낸 결과이다. 각 경우 모

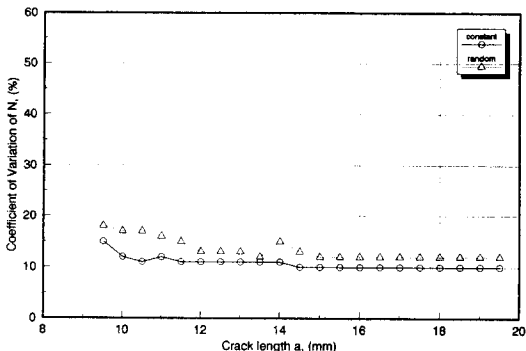


Fig. 11 Coefficient of variation of repeated cycle N according to crack length a

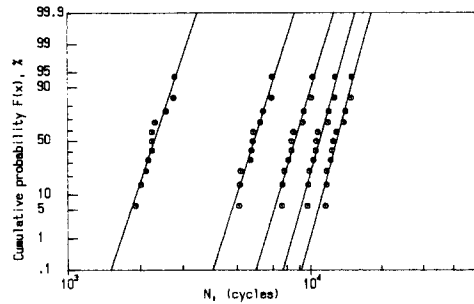


Fig. 12 Log-normal probability distribution of repeated cycle N (Constant load)

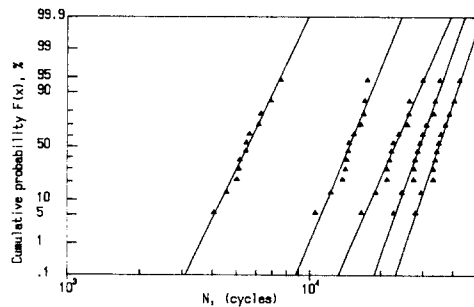


Fig. 13 Log-normal probability distribution of repeated cycle N (Random load)

두 좋은 직선성을 보이고 있으므로 피로균열진전수명 N 은 대수정규분포에 잘 따른다는 것을 알 수 있다. 또한 직선들의 기울기도 거의 같으므로 산포 정도가 비슷하다는 사실도 알 수 있다.

랜덤진폭하중하에서 피로균열진전수명 N 의 분포를 Fig. 13에 나타내었다. 일정진폭하중의 경우와 마찬가지로 각 데이터점들의 분포가 거의 직선상에 있음을 알 수 있다. 그러므로 랜덤하중의 경우도 피로균열진전수명 N 이 대수정규분포로 나타나는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 피로균열진전시험을 자동화하기 위하여, 직류전위차법을 이용하여 피로균열길이를 자동측정하는 시스템을 제작하였고, 랜덤하중을 발생시키며 피로시험을 자동화하는 시스템 제어 프로그램을 만들었다. 또한 이를 이용하여 일정진폭하중하와 랜덤하중하에서의 피로시험을 행하여 피로균열진전속도에 대한 신뢰성 공학적인 해석을 하였

다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 통계적인 연구를 목적으로한 신뢰성이 높은 피로균열진전 데이터를 얻기 위해 직류전위차법에 따른 균열길이 자동측정 시스템을 제작했다. 이 시스템의 균열길이의 측정정도는 적어도 0.1 mm 이하이다.

(2) 랜덤하중을 발생시키며 피로시험을 자동화하는 시스템 제어 프로그램을 제작하였다.

(3) 일정진폭하중의 경우와 마찬가지로 랜덤하중 하에서도 da/dN 및 ΔK 의 관계는 직선으로 나타나게 되며 이를 수식화한 Paris-Erdogan의 피로 균열진전법칙 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 의 식에 적용이 가능하다.

(4) 일정진폭하중의 경우와 마찬가지로 랜덤하중의 경우도 m 과 $\log C$ 는 음의 기울기를 가진채 일직선상에 분포된다는 것과, m 과 $\log C$ 의 값은 정규분포에 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

(5) 랜덤하중의 경우도 피로균열진전수명 N 이 대수정규분포로 나타나는 것을 알 수 있었고, 변동계수의 값은 일정진폭하중의 경우는 약 9.5% 정도를 나타내며, 랜덤하중의 경우는 약 12% 정도로 다소 높은 값을 보이고 있다.

종합적으로 볼 때, 동일 재료임에도 불구하고 일정진폭하중의 경우와 랜덤하중의 경우는 서로 다른 균열진전곡선을 보이고 있다. 랜덤하중의 경우가 더 낮은 진전특성을 보이는데, 이는 과대하중이 포함된 경우에서 나타나는 균열진전지연현상의 영향이라 생각되어진다.

후 기

수행된 연구는 1993년도 교육부 학술연구조성비 (ME93-C-03)에 의하여 수행되었으며, 관계자분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 배성인, 1993, "고장력강 HT60의 피로균열진

전시험에서 하중비의 효과," 대한기계학회 경남지부·논문발표회 논문집, pp. 7~15.

(2) 김정훈, 배성인, 1993, "7075 알루미늄 합금재의 피로균열진전에 관한 연구," 산업기술연구소 논문집, 창원대학교, 제7권, pp. 173~179.

(3) Bae, S. I. and Ichikawa, M., 1993, "The Effect of Load Ratio on the m-logC Relationship in HT60." *Proceedings of the V Conference of Asian-Pacific Congress on the Strength Evaluation*, Tschuira Japan, pp. 591~595.

(4) 윤한용, 양영순, 윤장호, 1992, "균일진폭 하중하에서의 확률론적 균열진전 수명해석," 대한기계학회논문집, 제16권, 제9호, pp. 1691~1699.

(5) 윤한용, 1990, "피로크랙 진전수명의 확률특성에 관한 연구(II)-크랙진전속도의 분포-, " 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp. 1561~1567.

(6) 권재도, 최선호, 황재석, 광상국, 전경욱, 장재영, 1991, "신뢰성공학적 피로균열의 발생, 진전수명 평가 및 예측에 관한 연구(II)," 대한기계학회논문집, 제15권, 제3호, pp. 907~915.

(7) Ichikawa, M. and Akita, S., 1988, "Reliability Engineering Approach to Fatigue Crack Growth Rate Using DC Electrical Potential Method," *J. of JSM*, Vol. 37, pp. 1010~1016.

(8) Ichikawa, M. and Matsumura, T. 1991, "Statistical Experiment on Fatigue Crack Growth Rate Using DC Electrical Potential Method and Examination of Stochastic Models," *J. of JSM*, Vol. 40, pp. 283~288.

(9) 박준협, 송지호, 엄운용, 김정엽, 강기주, 1988, "퍼스널 컴퓨터에 의한 疲勞試驗自動化 및 疲勞擧動 測定의 精密化," 대한기계학회논문집, 제12권, 제1호, pp. 120~130.

(10) 송지호, 김중환, 김정엽, 1989, "유사랜덤하중파형 작성과 이를 이용한 랜덤하중하의 표면 피로균열진전에 관한 기초적 검토," 대한기계학회논문집, 제13권, 제1호, pp. 125~134.