

<論 文>

저주기 피로 파괴 하중하에서 AE수 변화율과 균열성장율에 관한 연구

이 강 용*

(1988년 11월 9일 접수)

AE Count Rate and Crack Growth Rate under Low Cycle Fatigue Fracture Loading

Kang Yong Lee

Key Words : AE Count Rate(AE수 변화율), Crack Growth Rate(균열성장율), Stress Intensity Factor(응력세기계수), *J*-Integral(*J*-적분), Low Cycle Fatigue Fracture(저주기 피로파괴)

Abstract

In the low cycle fatigue fracture testing with KS(or JIS) SS41 Steel, crack growth rate, AE count rate and *J*-integral range are measured to get empirical relations between crack growth rate and *J*-integral range, AE count rate and *J*-integral range as well as AE count rate and crack growth rate. All the relations are shown to be linear on the log-log graphs. It is also shown that the linear relations can be formulated by using Dunegan's assumption and elastic-plastic fracture mechanics along with the well-known relation of crack growth rate and *J*-integral range. It is concluded that the differences between experimental and theoretical values are due to Dunegan's assumption.

1. 서 론

음향방출(Acoustic Emission : 이하 AE)과 파괴 역학 매개변수와의 관계에 관한 기존의 연구들은 다음과 같다. Dunegan등⁽¹⁾은 AE가 탄성영역에서 보다 소성영역에서 주로 발생함에 근거를 두어 발생원을 소성역으로 보고 AE수(AE count)와 소성역 체적은 비례한다고 가정하였다. 이러한 가정하에서 Morton등⁽²⁾은 2024-T851 알루미늄 합금과 EZ33A-T5 마그네슘 합금을 가지고 CT시편(compact tension specimen)에 대해 실험하여 다음과 같은 실험식을 제시하였다.

$$\frac{dN}{dn} = A(\Delta K_I)^M \tag{1}$$

여기서 *A*와 *M*은 실험상수이며 AE수 *N*은 사이클 *n*까지의 누계총수(total cumulative AE count)이고 ΔK_I 은 모우드 I 응력세기계수 범위(stress intensity factor range)이다. Dunegan등⁽³⁾과 Sinclair등⁽⁴⁾도 식 (1)과 같은 형태식을 얻은 바 있다. 한편, Lindley등⁽⁵⁾은 Ducol W30B, EN30B, FV520B와 1% 탄소강을 실험한 결과를 바탕으로 AE발생원을 균열첨단의 소성역에 의한 것과 균열 전면에 의한 복합적인 것으로 보고 다음의 식 (2)를 유도하였다.

$$\frac{dN}{dn} = D(K_I^{\max})^2 \frac{da}{dn} \tag{2}$$

* 정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

여기서 D 는 실험상수이고 da/dn 은 피로 균열성장율이며 K_I^{max} 는 모우드 I 응력세기계수의 최대치이다. 식 (2)와는 형태는 다르지만 AE수 N 과 균열선단의 소성역 체적이 비례 관계에 있다는 가정과 선형 탄성 파괴역학을 적용함으로써 dN/dn 이 da/dn 과 직선적인 관계에 있다는 것을 저자^(6,7)에 의해서도 유도된 바 있다.

이상의 연구들은 AE수 변화율 dN/dn 을 선형 탄성 파괴역학의 매개변수인 응력세기계수 K 와 관련짓고 있다. 그러나 균열선단에 소성역이 크게 발생하는 경우에는 선형 탄성 파괴역학은 적용될 수 없으므로 탄성-소성 파괴역학의 매개변수 J 를 사용하여야 한다. J 매개변수를 피로파괴에 처음으로 적용한 사람은 Dowling등^(8,9)으로서 J 적분 범위 ΔJ 와 피로 균열성장율은 양대수그래프에서 직선 관계에 있음을 보였다. 이 후 Kaisand등⁽¹⁰⁾, Leis등⁽¹¹⁾, Kaiser⁽¹²⁾ 등이 Dowling등^(8,9)의 연구 결과를 뒷받침하는 연구 보고가 있었다. 그러나 ΔJ 와 AE수 변화율과 dN/dn 의 관련성은 아직 연구된 바 없는 것 같으며 탄성-소성 파괴인 경우에 dN/dn 와 균열성장율 da/dn 의 관련 데이터도 없는 것 같다. 따라서 본 연구에서는 탄성-소성 피로파괴 시험을 하여 dN/dn 과 ΔJ 의 관계와 dN/dn 과 da/dn 의 관계에 대한 실험식을 얻고 이론적인 해석결과와 비교 검토하고자 한다.

2. 실험

사용한 재료는 KS SS41 일반 구조용 강으로서 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 2에서 보는 바와 같다.

Fig. 1과 같은 콤팩트 인장 시편을 Instron사의 유압식 만능 재료시험기에 걸고 ASTM 표준서

E647-81⁽¹³⁾에 의해서 선 피로 균열을 내었다. AE수는 B & K사의 AE장비를 사용하며 측정하였으며 AE수를 검출하기 위한 트랜스듀서(transducer)는 200kHz의 공진 주파수를 갖는 압전형이며 시편 두께측면 중앙선 아래 부분에 부착되었다. 트랜스듀서는 40dB로 고정된 게인을 갖는 선 증폭기에 연결되고 이는 주 증폭기로 연결된다. 주 증폭기에는 기계적 잡음을 제거하기 위하여 100kHz~2mHz의 주파수만을 받아들이는 필터가 장치되어 있다. 주 증폭기는 다시 펄스 애널라이저(pulse analyzer)에 연결되며 이때 주 증폭기는 펄스 애널라이저의 표시창에 '0'이 나타나는 최대 게인인 25dB로 눈(knob)을 조정하였다. 이 펄스 애널라이저에는 pulse area count method⁽¹⁴⁾에 의한 수치값이 나타나게 된다.

피로 하중 작용방법은 하중조절조건(load control condition)이 사용되었다. 하중 범위는 균열선단 소성변형을 크게 일어나게 하기 위하여 330~3300kgf 하중 범위로 하여 1×10^4 사이클 이전에 파괴가 일어나도록 하였다. J 적분 범위인 ΔJ 는 다음 식을 사용하였다⁽¹⁵⁾.

$$\Delta J = \frac{A}{Bb} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (3a)$$

여기에서

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = 2 \cdot \frac{1 + \phi}{1 + \phi^2}$$

$$\phi = \left[\left(\frac{2a}{b}\right)^2 + 2\left(\frac{2a}{b}\right) + 2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[\left(\frac{2a}{b}\right) + 1 \right] \quad (3b)$$

$$\frac{2a}{b} = \frac{2a}{W - a}$$

A 는 Dowling등⁽⁹⁾이 정의하는 하중과 하중점 변위 선도상의 면적이다. a 는 사이클에 해당하는 균열 길이이고 w 는 시편폭이다. 그리고 ΔK 는 응력세기계수 범위로서 다음 식⁽¹³⁾에 의해 구하여졌다.

Table 1 Mechanical properties of material

Material	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Yield Strength (kgf/mm ²)	Young's Modulus (kgf/mm ²)
SS41	45.63	27.091	2.31×10^4

Table 2 Chemical composition of material(weight %)

Material	C	P	S	Mn	Fe
SS41	0.1688	0.0114	0.00395	—	Rem

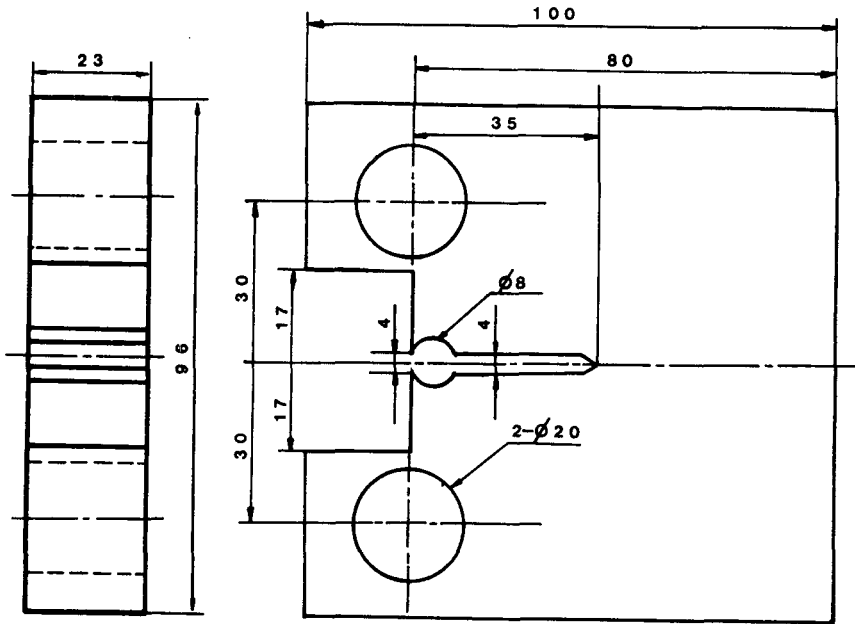


Fig. 1 Compact tension specimen

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{(2+\phi)}{(1-\phi)^{3/2}} (0.886+4.64\phi - 13.32\phi^2 + 14.72\phi^3 - 5.6\phi^4) \quad (4)$$

여기에서 $\phi = a/W$, ΔP 는 하중범위, B 는 시편두께이다.

3. 실험 결과

피로 파괴 시험을 행하여 얻은 ΔJ , $(1-\nu^2) \cdot (\Delta K)^2/E$ (여기서 ν 는 프와송비)와 균열길이의 관계 결과를 Fig. 2에서 보이고 있다.

이 그림에서 ΔJ 와 $(1-\nu^2) \cdot (\Delta K)^2/E$ 의 균열길이에 따른 변화를 비교할 때 균열선단이 상당한 소성 변형을 받은 것으로 나타났음을 알 수 있다. Fig. 3에서는 균열성장율과 ΔJ 의 관계를 보이고 있다. 점선은 곡선맞춤선(curve fitted line)이다. 이들 그림에서 보듯이 균열성장율은 ΔJ 에 대하여 Dowling 등이 제안한 잘 알려진 다음식^(8,9)으로 표현됨을 알 수 있다.

$$da/dn = c(\Delta J)^m \quad (5)$$

여기서 a 와 ΔJ 의 단위를 각각 mm, kgf/mm로 나타낼 때 실험상수 c 와 m 은 각각 $10^{-3.195}$, 1.287으로 얻어졌다.

AE수 변화율(AE count rate)을 ΔJ 에 대하여 표

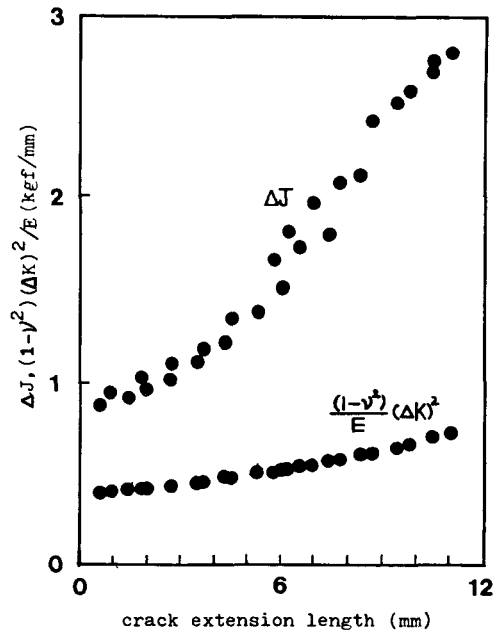


Fig. 2 ΔJ and $(1-\nu^2) \cdot (\Delta K)^2/E$ vs. crack extension length

시하면 Fig. 4와 같고 이 그림으로부터 dN/dn 과 ΔJ 의 실험식을 다음과 같이 표현한다.

$$dN/dn = c'(\Delta J)^{m'} \quad (6)$$

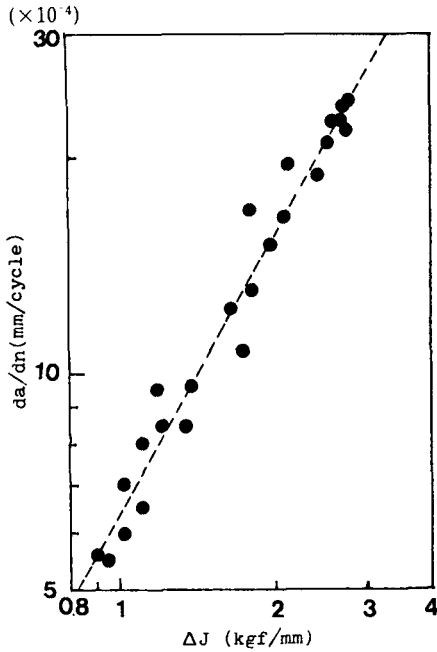


Fig. 3 Crack growth rate vs. ΔJ

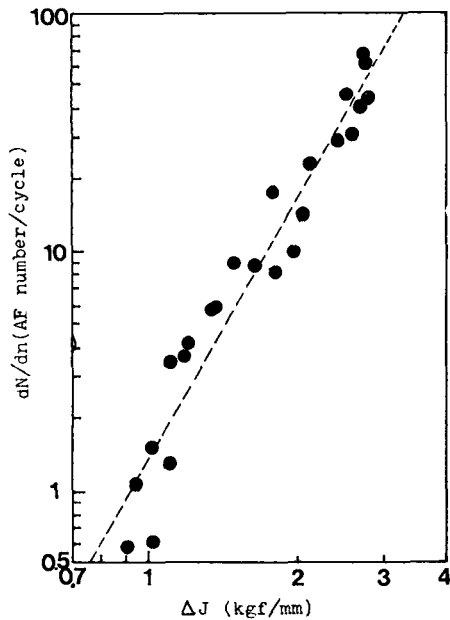


Fig. 4 AE count rate vs. ΔJ

여기서 ΔJ 의 단위는 kgf/mm로 나타낼 때 실험상수 c' 과 m' 은 각각 $10^{0.1332}$, 3.611으로 얻어졌다. 이러한 관계는 Al 5052와 Al 2024합금에서도 보고된 바 있다⁽¹⁶⁾.

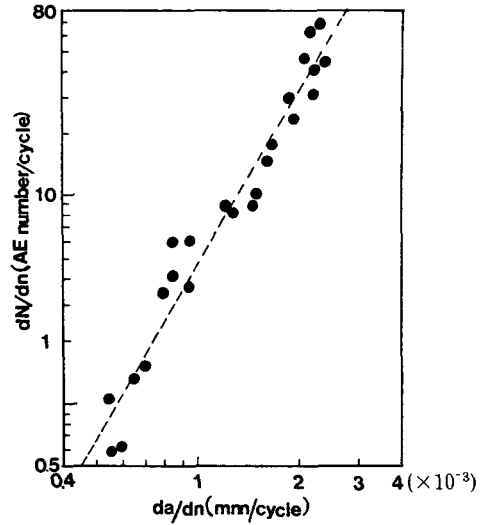


Fig. 5 Acoustic emission rate vs. crack growth rate

식 (5)와 식 (6)으로부터 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{dN}{dn} = \alpha \left(\frac{da}{dn} \right)^\beta \quad (7)$$

여기서 a 의 단위를 mm로 나타낼 때 실험상수 α 와 β 는 실험결과로부터 각각 $10^{9.006}$, 2.783으로 얻어졌다. 식 (7)에 대한 관계 그림이 Fig. 5에서 보여주고 있다.

4. 이론 해석 및 검토

dN/dn 과 ΔJ 의 관계와 da/dn 과 dN/dn 의 관계를 이론적으로 유도하기 위해 AE수와 균열선단 소성역 체적 V_p 의 관계에 대한 Dunegan 등⁽¹⁾의 가정을 사용한다. 즉

$$N \propto V_p \quad (8)$$

피로인 경우에 식 (8)을 다음과 같이 표현한다.

$$\frac{dN}{dn} \propto \frac{dV_p}{dn} = \frac{dV_p}{da} \cdot \frac{da}{dn} \quad (9)$$

여기서

$$V_p = 2B \int_{a_0}^a r_p(a) da \quad (10)$$

r_p 는 피로 하중하에 있는 균열선단의 원형 소성역 반경이고, a_0 는 초기 균열길이이다.

식 (10)을 식 (9)에 대입하면

$$\frac{dN}{dn} \propto r_p(a) \frac{da}{dn} \quad (11)$$

$r_p(a)$ 는 HRR 응력분포식과 von-Mises 항복조건식에 의하면 다음 식으로 주어진다.

$$r_p(a) \propto \Delta J(a) \quad (12)$$

잘 알려진 식 (5)를 식 (11)과 식 (12)에 대입하고 정리하면 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{dN}{dn} \propto (\Delta J)^{m+1} \quad (13)$$

$$\frac{dN}{dn} \propto \left(\frac{da}{dn}\right)^{\frac{m+1}{m}} \quad (14)$$

식 (6)과 식 (13)을 비교하면

$$m' = m + 1 \quad (15)$$

실험과 이론의 m' 오차는 약 36.7%이다. 식 (7)과 식 (14)를 비교하면

$$\beta = \frac{m+1}{m} \quad (16)$$

실험과 이론의 β 오차는 약 36.1%이다.

이러한 오차의 크기로 보아서, 균열시편이 아닌 시편에서 얻어진 결과를 균열시편에 적용한 Dunegan 등의 가정에 연구의 여지가 있다고 하겠다.

5. 결 론

KS SS41 일반 구조용 강을 저주파 피로 파괴 하중하에서 시험하여 J 적분범위 (ΔJ)와 AE수 변화율(dN/dn)의 실험관계 및 균열성장율(da/dn)과 AE수 변화율(dN/dn)의 실험관계에 대한 연구를 수행하여 모두 양대수 그래프에서 직선 관계에 놓임을 보이고 이론적 해석 결과와 비교 검토하여 Dunegan 등의 가정에 문제가 있음을 지적하였다.

후 기

본 연구를 위해 여러 면에서 수고한 연세대학교 기계공학과 석사 과정 백충현, 장용훈, 김준섭, 이길호, 홍정균, 강대진 군에게 사의를 표한다.

참 고 문 헌

(1) Dunegan, H.L., Harris, D.O. and Tatro, C.A., 1968, "Fracture Analysis by Use of Acoustic Emission", Eng. Fract. Mech., Vol. 1, pp. 105~122.
 (2) Morton, T.M., Smith, S. and Harrington, R.M.,

1974, "Effect of Loading Variables on the Acoustic Emission of Fatigue Crack Growth", Exp. Mech., pp. 208~213.
 (3) Dunegan, H.L., Harris, D.O. and Tetelmen, A.S., 1970, "Detection of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission Technique", Mat. Eval., pp. 221~227.
 (4) Sinclair, A.C., Formby, C.L. and Cornors, D.C., 1976, "Fatigue Crack Assessment from Proof Testing and Continuous Monitoring", in Acoustic Emission, Applied Science Publishers, pp. 51~64.
 (5) Lindley, T.C., Palmer, I.G. and Richards, C.E., 1978, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Growth", Mat. Sci. Eng., Vol. 32, pp. 1~15.
 (6) 이강용, 진태은, 1987, "파괴 단면 천이에 의한 Acoustic Emission 거동", 연세 논총, 제23집, pp. 231~243.
 (7) 이강용, 김형규, "피로 균열 성장율과 사이클당 AE수 증가율간의 상호관계", 대한조선학회지, 제23권, 제3호, pp. 17~26.
 (8) Dowling, N.E. and Begley, J.A., 1976, "Fatigue Crack Growth during Gross Plasticity and J-integral", ASTM STP 590, pp. 82~103.
 (9) Dowling, N.E., 1976, "Geometry Effect and the J-integral Approach to Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth", ASTM STP 601, pp. 19~32.
 (10) Kaisand, L.R. and Mowbray, D.F., 1979, "Relationship between Low Cycle Fatigue Crack Growth Rate Properties", J. Test. Eval., Vol. 7, No. 5, pp. 270~280
 (11) Leis, B.N. and Akram Zahoor, 1980, "Cycle Inelastic Deformation Aspects of Fatigue Crack Growth Analysis", ASTM STP 700, pp. 65~96.
 (12) Kaiser, S., 1983, "On the Relationship between Stable Crack Growth and Fatigue", Fat. Eng. Mat. Struct., Vol. 6, No. 1, pp. 33~49.
 (13) ASTM Designation E647-81, Standard Test Method for Constant Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rates above 10^{-8} m/cycle.
 (14) Torben, L., Acoustic Emission, 1979, "Brüel & Kjær, Technical Review, No. 2.
 (15) ASTM Designation E813-81, Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness.
 (16) 이강용, 김준섭, 1987, "저주파 피로파괴에서 피로 균열성장율과 AE수 변화율에 관한 연구", 대한기계학회 '87년도 춘계학술대회 초록집, pp. 35~38.