論 文

大 韓 造 船 學 會 誌
第23卷 第3號 1986年 9月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol.23, No. 3, September 1986

피로균열 성장율과 싸이클당 AE수 증가율간의 상호관계

이 강 용*·김 형 규**

Relationship between Fatigue Crack Growth Rate and Total Acoustic Emission Counts per Cycle

by

Kang Yong Lee*, Hyung Kyu Kim**

Abstract

A new relationship between total acoustic emission counts per cycle and crack growth rate is derived in terms of stress intensity factor to explain the acoustic emission behavior due to fatigue crack growth.

The experimental results of the total acoustic emission counts per cycle obtained from aluminium 5,000 series alloy specimens are compared with the theoretical values.

Both experimental and theoretical total acouctic emission counts per cycle result in the linear relationship to the crack length.

1. 서 론

AE (Acoustic Emission)〔1〕법에 의한 최근의 피로 파괴에 대한 이론적인 연구 동향은 파괴 역학의 매개 변수인 응력세기 계수(stress intensity factor) K와 AE 수(total AE count number) N을 연관시켜 상호간의 관계식을 이끌어 내는 방향으로 진행되어 왔다. Dunegan등〔2〕은 N50A 베릴륨과 알루미늄 7075-T6 합금에 대해 균열이 없는 인장 시편을 갖고 인장 시험을 하여 AE를 측정한 결과 시편의 파단시까지 나타난 AE의 대부분이 시편의 항복점부터 인장 강도까지의 영역에서 발생 된다는 사실을 발견하고 균열이 있는 시편에서도 AE는 균열 첨단의 소성역 형성에 기인한다고 생각하여 다음 식을 가정하였다.

$$N=CV_p \tag{1}$$

여기서 V_p는 균열 첨단에 형성된 소성역의 체적이며 C는 비례상수이다. 이러한 관계에 대한 실험적인 검토는 Ohira등〔3〕이 고장력강(HT 60)으로 균열이 있는 시편에 대해 조사하여 가정의 타당성을 입증하였다. Lindley 등〔4〕은 식(1)을 이용하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$\frac{dN}{dn}=AK^2_{max}\frac{da}{dn} \tag{2}$$

여기서 A는 비례 상수이고 K_{max}는 최대 응력세기 계수이며 $\frac{da}{dn}$은 피로 균열 성장율이다. Sinclair등〔5〕은 A533B강과 저 탄소강 등을 실험한 결과로 부터 dN/dn이 피로 균열 성장율 da/dn과 직접적인 비례 관계가 있음을 발견하고 Paris Law〔6〕와 같은 형태의 다음 식을 제시하였다.

接受日字 : 1986年 4月 9日, 再接受日字 : 1986年 5月 20日

* 정회원, 연세대학교 기계공학과
** 한국에너지연구소(대덕)

$$\frac{dN}{dn}=F(\Delta K)^n \tag{3}$$

여기서 F와 n은 실험 상수이다. 식 (3)의 형태는 Morton등[7]이 알루미늄 합금 2024와 마그네시움 합금 EZ 33A에서 얻은 실험식과도 같다. 위에 언급한 식(2)와 식(3)은 피로 균열 성장율이 Parris law를 따른다면 모두 동일한 형태의 식이 됨을 알 수 있다. 그런데 Lindley등[4]이 사용한 Dunegan의 가정, 즉 소성 영역에서만 AE가 발생하고 탄성 영역에서는 발생하지 않는다는 것이 과연 모든 재료에 대해서도 적용 가능한 것인지 의문이다. 또한 그들은 이론식의 유도 과정에서 응력 세기 계수가 피로 하중 싸이클(n)의 함수임에도 불구하고 상수로 처리하여 이론을 전개하는 오류를 범하고 있다. 이러한 오류는 Harris등[8]에서도 찾아 볼 수 있다. 따라서 본 연구는 위의 문제점 등을 고려하여 피로 파괴에 따른 AE 거동을 해석 할 수 있는 싸이클에 따른 AE수 증가율과 피로 균열 성장율에 대한 새로운 이론식을 제시하며 알루미늄 합금을 가지고 실험한 결과와 이론 값을 비교 검토하고자 한다.

2. 이 론

균열이 있는 시편에 하중을 가할때, AE는 소성 변형 뿐만 아니라 탄성 변형에서도 얻어진다고 가정하면 식 (1)은 다음과 같이 수정된다.

$$N=C_1V_e+C_2V_p \tag{4}$$

여기서 N은 AE수이며 V_e와 V_p는 각각 균열이 있는 시편이 하중을 받아 변형을 일으킬때 탄성 변형을 하는 체적과 균열 첨단의 소성 변형을 하는 체적을 나타내며 C_1, C_2는 비례상수이다. 식 (4)를 하중 싸이클수 n에 관하여 미분하면 다음식을 얻는다.

$$\frac{dN}{dn}=C_1\frac{dV_e}{dn}+C_2\frac{dV_p}{dn} \tag{5}$$

그리고 탄성 변형을 하는 체적과 균열 첨단의 소성 변형을 하는 체적의 합은 일정하다고 가정하면 식 (5)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{dN}{dn}=C_3\frac{dV_p}{dn} \tag{6}$$

여기서 C_3는 비례 상수이다. 그런데 균열 첨단에 형성되는 소성역의 형상을 원형이라고 가정하면 소성역 반경 r_p는 다음 식으로 주어진다[9].

$$r_p=\alpha\left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2 \tag{7}$$

여기서 σ_y는 재료의 항복 강도이고 α는 상수이다.

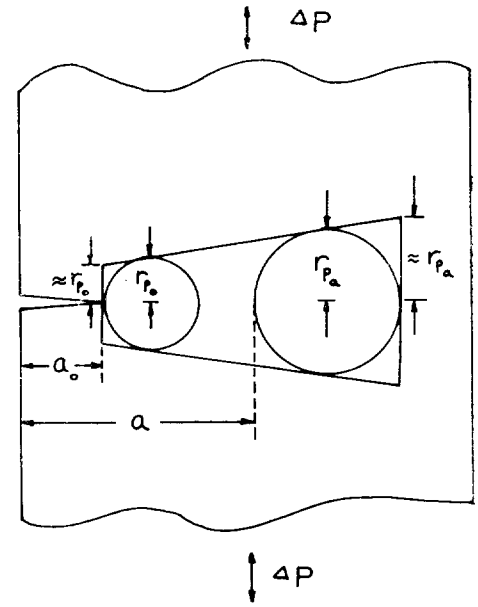


Fig. 1 Trace of plastic zones

일정피로 하중 ΔP상태에서 균열이 진전함에 따라 식 (7)의 K값이 달라지게 되고 따라서 소성역 반경이 변하게 되는데 그 변화는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 균열이 진전된 길이에 비례적으로 증가한다고 가정한다. 따라서 선 피로 균열 길이 a_0로 부터 임의의 피로 균열 길이 a에 이르기까지 피로 하중을 받을때 소성역이 점유하게 되는 체적(V_p)은 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 두께 (B)가 일정한 사다리꼴 기둥으로 생각하여 다음과 같이 구하여 진다.

$$V_p\cong B(a-a_0+2r_{pa})\ (r_{pa}+r_{p0}) \tag{8}$$

여기서 r_{pa}와 r_{p0}는 각각 균열 길이 a와 a_0일 때 균열 첨단에 형성된 소성역의 반경이다. 소성역 반경이 균열 길이 a와 a_0에 비해 작다고 생각하면 식 (8)은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$V_p\cong B(a-a_0)\ (r_{pa}+r_{p0}) \tag{9}$$

식 (7)을 식 (9)에 대입하고 이를 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{dN}{dn}=\gamma\frac{d}{dn}[(a-a_0)\ (K_a^2+K_a^2)] \tag{10}$$

여기서 γ는 상수이다. 식 (10)의 응력 세기 계수 K의 관계식으로 본 연구의 실험시편 모양인 Tada [10]의 단일모서리 균열 시편(single edge cracked specimen)에 대한 다음 식을 이용한다.

$$K=\sigma\sqrt{\pi a}\ Y\left(\frac{a}{W}\right) \tag{11}$$

여기서 σ는 작용 응력이고 W는 시편의 폭이다.

$$Y\left(\frac{a}{W}\right)=\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}\ \frac{\left\{0.752+2.02\left(\frac{a}{W}\right)+0.37\left(1-\sin\frac{\pi a}{2W}\right)^3\right\}}{\cos\frac{\pi a}{2W}} \tag{12}$$

식 (11)을 식 (10)에 대입하여 전개하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dN}{dn}=\gamma\left[K_a^2\left\{2+\frac{2a}{W}\ \frac{Y^1(a/W)}{Y(a/W)}\left(1-\frac{a_0}{a}\right)-\frac{a_0}{a}\right\}+K_o^2\right]\frac{da}{dn} \tag{13}$$

여기서

$$Y^1\left(\frac{a}{W}\right)=\left\{\frac{0.752+2.02\left(\frac{a}{W}\right)+0.37\left(1-\sin\frac{\pi a}{2W}\right)^3}{\cos\frac{\pi a}{2W}}\right\}\frac{\left[\frac{W}{a}\sec^2\left(\frac{\pi a}{2W}\right)-\left(\frac{2W^2}{\pi a^2}\right)\tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)\right]}{2\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}}$$

$$+\sqrt{\frac{2W}{\pi a}\tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}\left\{\frac{\left[2.02+1.11\left(1-\sin\frac{\pi a}{2W}\right)^2\left(-\frac{\pi}{2}\cos\frac{\pi a}{2W}\right)\right]\cdot\cos\frac{\pi a}{2W}}{\cos^2\frac{\pi a}{2W}}+\right.$$

$$\left.\frac{\left(\frac{\pi}{2}\sin\frac{\pi a}{2W}\right)\left[0.752+2.02\left(\frac{a}{W}\right)+0.37\left(1-\sin\frac{\pi a}{2W}\right)^3\right]}{\cos^2\frac{\pi a}{2W}}\right\} \tag{14}$$

식 (13)에서 최대 피로 하중이 걸릴 때를 생각하면 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\frac{dN}{dn}=\gamma\left[K_{\max_a}^2\left\{2+\frac{2a}{W}\ \frac{Y^1(a/W)}{Y(a/W)}\left(1-\frac{a_0}{a}\right)-\frac{a_0}{a}\right\}+K_{\max_o}^2\right]\frac{da}{dn} \tag{15}$$

여기서 $K_{\max a}$ 및 $K_{\max 0}$는 각각 최대 피로 하중에서 균열 길이 a와 선 피로 균열 길이 a_0에서의 최대 응력 세기 계수이다.

3. 실 험

3-1. 시편 제작

본 실험에서 사용한 시편의 재료는 국산 알루미늄 5000계열의 합금으로서 화학성분과 기계적 성질을 Table 1 (a), (b)에서 보여주고 있다. 정 하중 시험에 사용한 인장 시편의 형상은 Fig. 2(a)와 같으며 하중의 방향이 압연된 방향과 일치하도록 전단하였다. 인장 시편 중 일부는 SHINKOH TOM 5000형 만능 재료 시험기를 사용하여 항복 응력보다 높은 331 MPa의 응력을 받게 하고 하중을 제거하므로써 항복 강도를 증가시켰다. 이와 같이 항복강도가 증가된 시편을 '*A* 시편' 항복 강도가 상승되지 않은 시편을 '*B*시편'이라 칭한다.

Table 1(a). Chemical compositions of material used

Elements	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Al
weight %	0.02	0.06	0.15	0.05	1.16	0.01	0.18	remained

Table 1(b). Mechanical properties of material used

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)
361	263

피로 파괴 시험때 사용한 시편은 Fig. 2(a) 형상의 *A* 시편 및 *B* 시편을 SHIMADZU UF-500형 만능 피로 시험기의 그립(grip)에 물릴 수 있게 하기 위하여 지름 9.5mm의 드릴 구멍 4개를 내었다. 시편에 선 피로 균열을 내기 위하여 시편 폭의 한쪽에 실톱으로 4mm 깊이의 예리한 홈을 내고 그 선단부에 면도날로 날카로운 홈을 내었다. 그리고서 만능 피로 시험기에 걸고 ASTM 규격서 E647-81[11]에 의해서 1mm 길이의 선 피로 균열을 내었다. 이렇게 하여 얻어진 완성된 피로 시편은 Fig. 2 (b)와 같다.

3-2. 실험 방법

정하중 시험과 피로 하중 시험에 사용한 AE 장비는 B & K社(BRÜEL & KJÆR)의 제품을 이용하였으며, 이 장비의 구성은 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 트랜스듀서(transducer: Model #8314)는 800KHz의 공진 주파수를 갖는 압전형이며 시편에 붙일 때에는 시편 표면과 트랜스 듀서와의 접합면에 기밀을 유지시키기 위해 그리이스유를 바르고 시편과 트랜스 듀서가 시험중 항상 같은 강도로 체결 되어 있게 하기 위하여 천

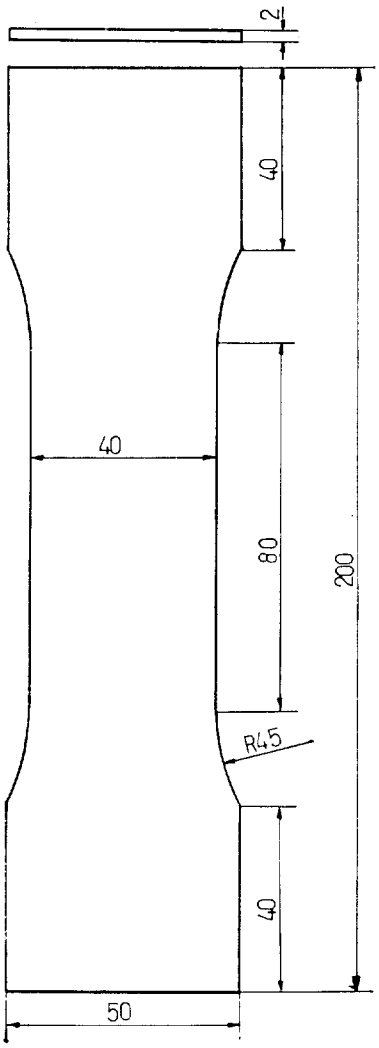


Fig. 2(a) Tensile test specimen

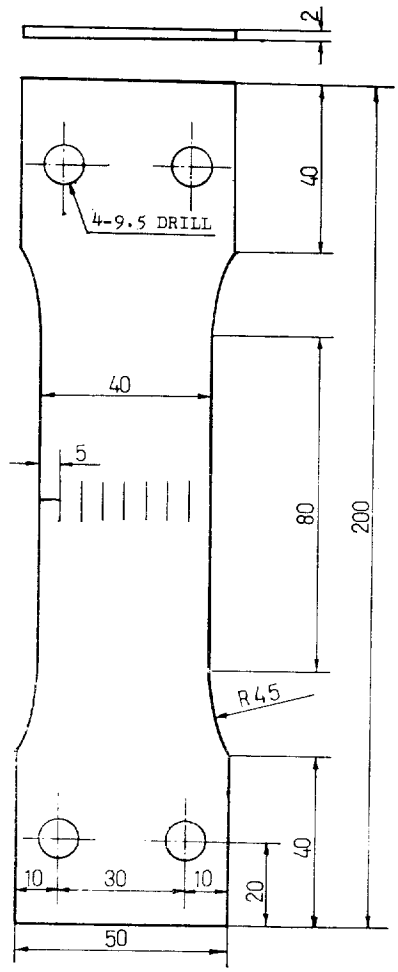


Fig. 2(b) Fatigue test specimen

테이프로 시편에 고정시켰으며 그 위치는 정 하중 시험과 피로 하중 시험에서 시편 폭의 중앙선상에 그리고 시편의 중심으로 부터 10mm 떨어진 곳으로 하였다. 트랜스 듀서는 40dB로 고정된 게인(gain)을 갖는 선증폭기(pre-amplifier: Model #2637)에 연결하고 이는 주증폭기(main amplifier: Model #2638)에 연결하였다. 주증폭기에 있는 필터(filter)는 400KHz~2MHz의 주파수를 갖는 AE만 받아 들이도록 조정하여 사용하였으며 펄스애널라이저(pulse Analyser: Model #4429)의 표시창에 '0'이 나타날 수 있는 최대 게인인 35dB로 놉(knob)을 조정하였다. 따라서 총 75dB 게인으로 실험하였다. 펄스애널라이저에서 펄스면적

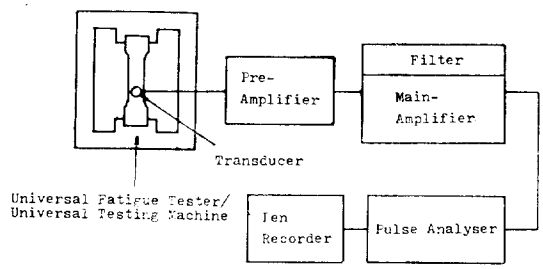


Fig. 3 Block diagram of acoustic emission instrumentation

Table 2 Fatigue load ranges for specimens

Specimen Classification / Load range(kM)	A Specimen	B Specimen
0.5~5.4	No. 3, No. 7	No. 18, No. 21
0.5~5.0	No. 11, No. 15	No. 27, No. 30

수 방법(pulse area count method)[12]을 사용하여 나타난 수치는 기록계(level recorder: Model #2306)에 기록되도록 연결하였다. 정 하중 시험은 Fig. 2(a)의 시편을 만능 재료 시험기에 걸고 Fig. 3과 같이 AE 장비를 연결한 후 크로스헤드 속도를 각각 3 mm/min, 2 mm/min 및 0.5 mm/min로 하중을 가하고 최종 파단 시까지 나타난 AE수를 크로스헤드 변위량에 대하여 기록하였다. 그리고 피로 파괴 시험은 시편을 만능 피로 시험기에 걸고 Fig. 3과 같이 AE 장비를 연결한 후 두가지 하중 범위인 0.5~5.4kN과 0.5~5.0kN중 택일하였다.

각 시편에 대한 분류 및 하중 조건을 Table 2에 나타낸다. 피로 파괴 시험 중에 5000싸이클 마다 20배율 이동식 현미경으로 최대 피로 하중 상태의 균열 길이

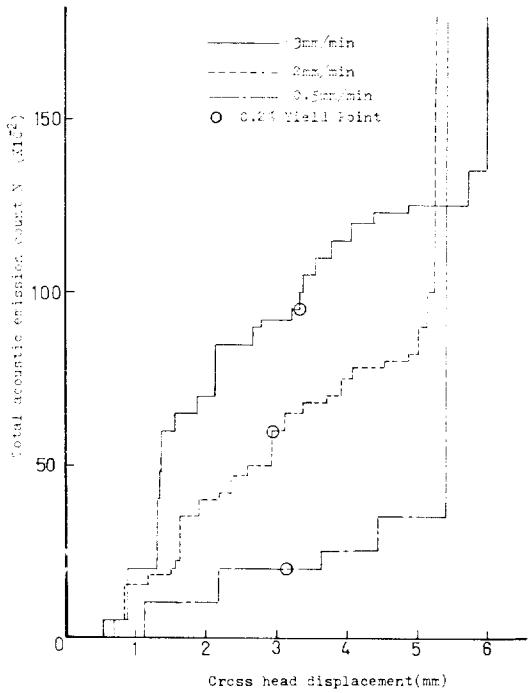


Fig. 4 Total acoustic emission count during tensile tests for different cross head velocities

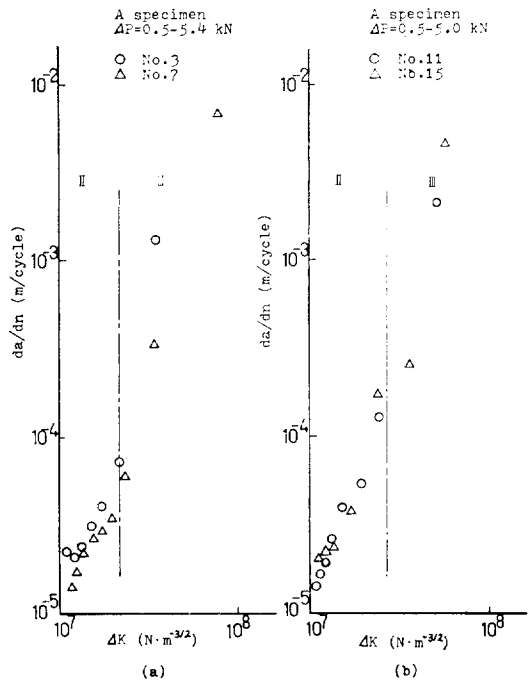


Fig. 5 Crack growth rate (da/dn) as a function of stress intensity factor range (ΔK) for A specimen
(a) ΔP=0.5~5.4kN (b) ΔP=0.5~5.0kN

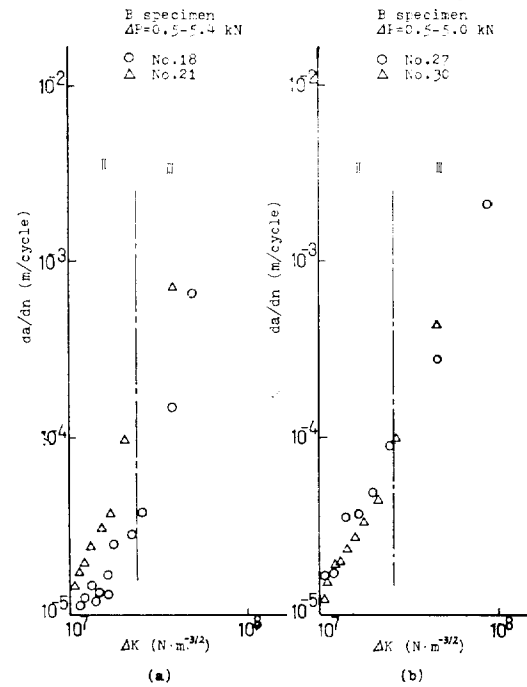


Fig. 6 Crack growth rate (da/dn) as a function of stress intensity factor range (ΔK) for B specimen
(a) ΔP=0.5~5.4kN (b) ΔP=0.5~5.0kN

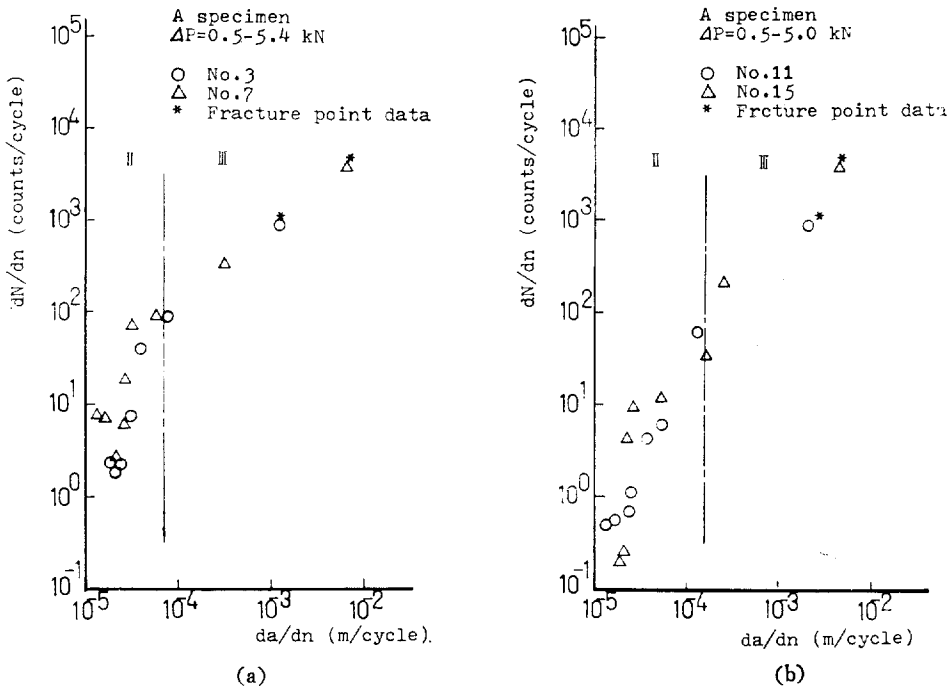


Fig. 7 Experimental total acoustic emission counts per cycle (dN/dn) vs. crack growth rate (da/dn) for A specimen (a) $\Delta P=0.5\sim5.4$kN (b) $\Delta P=0.5\sim5.0$kN

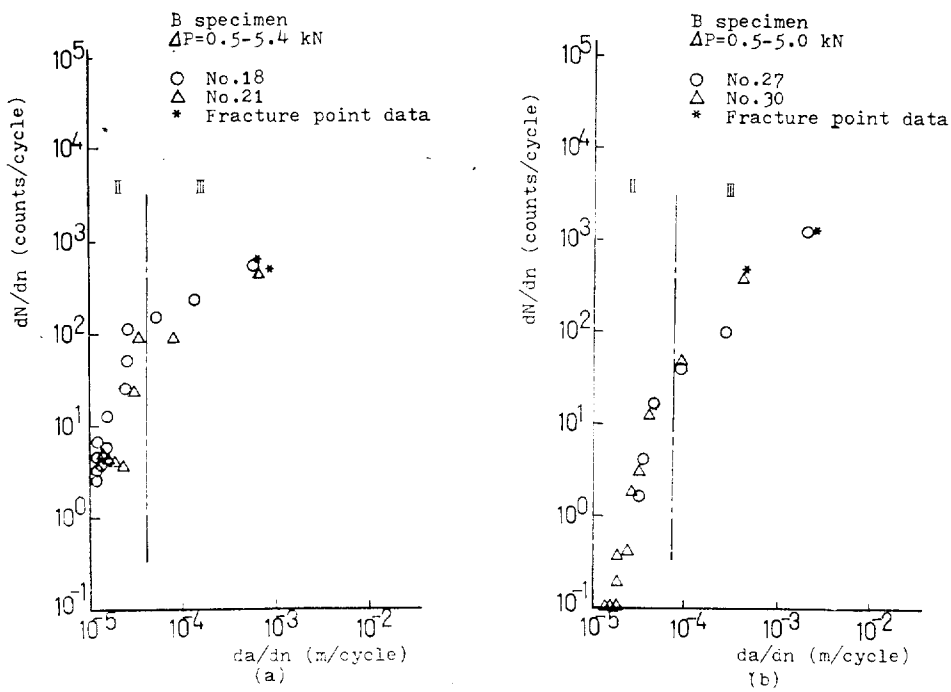


Fig. 8 Experimental total acoustic emission counts per cycle (dN/dn) vs. crack growth rate (da/dn) for B specimen
(a) $\Delta P=0.5\sim5.4$kN (b) $\Delta P=0.5\sim5.0$kN

를 측정하는 동시에 AE수 및 피로 하중 싸이클 수를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

정 하중 시험에서 얻은 데이타를 Fig. 4에 나타내었는데 크로스 헤드속도가 증가함에 따라 AE 방출이 증대됨을 알수 있다. 이는 Dunegan등의 실험 결과[13]와 유사한 현상이나 재료가 인장하중을 받을때 항복강도로 부터 인장 강도 사이에서 대부분의 AE가 나타난다는 Dunegan 등의 실험결과 [2]와는 달리 탄성 영역과 소성 영역 모두에서 AE가 발생하였다. 이는 탄성 영역에서도 AE가 발생한다는 식 (4)에 전제된 가정에 대한 타당성을 보여주는 것이라 하였다. 그러나 이러한 결과는 Ohira등[3]이 주장하는 식 (1)의 타당성과는 차이가 있는데 그들의 실험재료인 고장력강 (HT 60)에서는 탄성 변형에 의한 AE는 거의 없었으므로 식 (1)의 타당성을 주장할 수 있었으나 본 실험재료인 알루미늄 5000계열의 합금에서는 탄성 영역에서 상당한 AE가 나타난 관계로 그들의 실험재료와 본 실험재료에 두루 적용하기 위해서는 식 (1)은 불합리하다 하겠다. 다음으로 피로 파괴 시험에서 얻은 결과로 부터 da/dn과 ΔK를 구하여 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었으며 Paris law를 만족하는 Ⅱ 영역과 그 외의 Ⅲ 영역으로 구분하였다. Fig. 7과 Fig. 8에서는 실험값인 dN/dn과 da/dn을 대수눈금으로 나타내고 있는

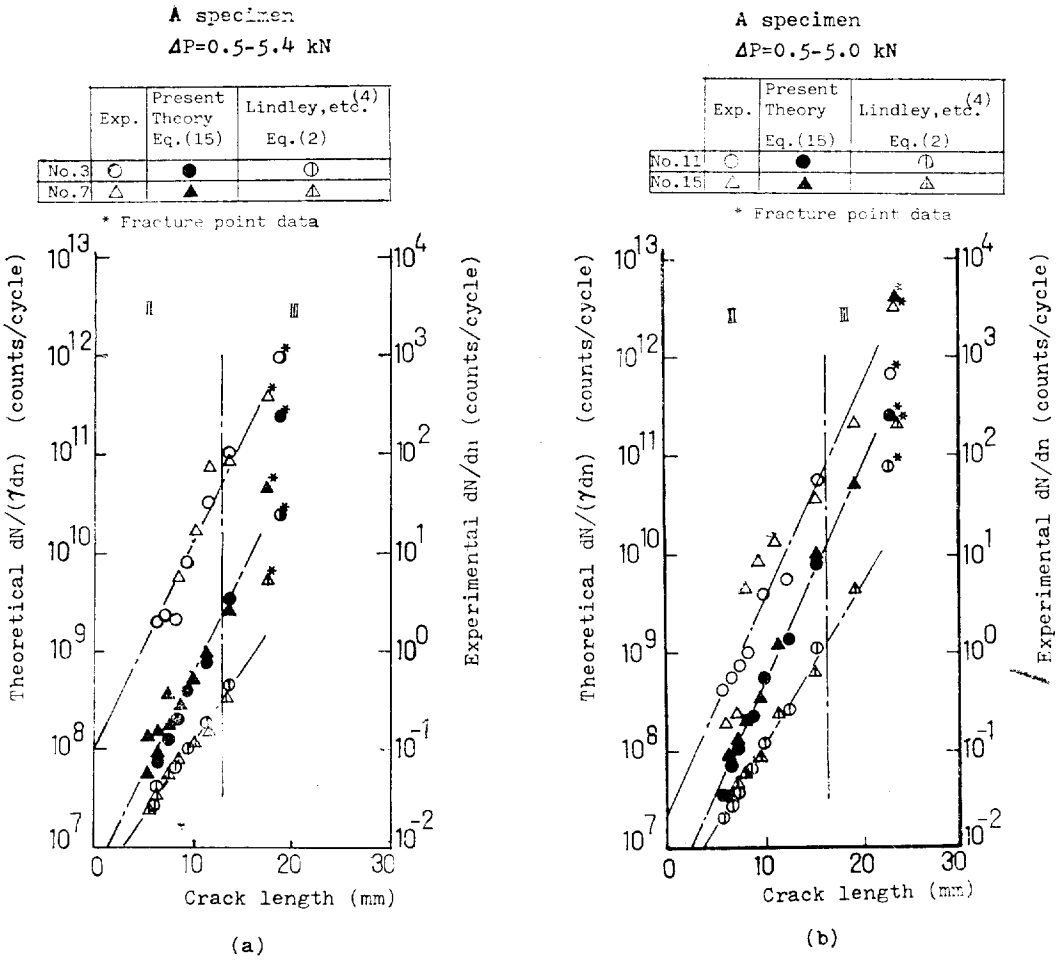
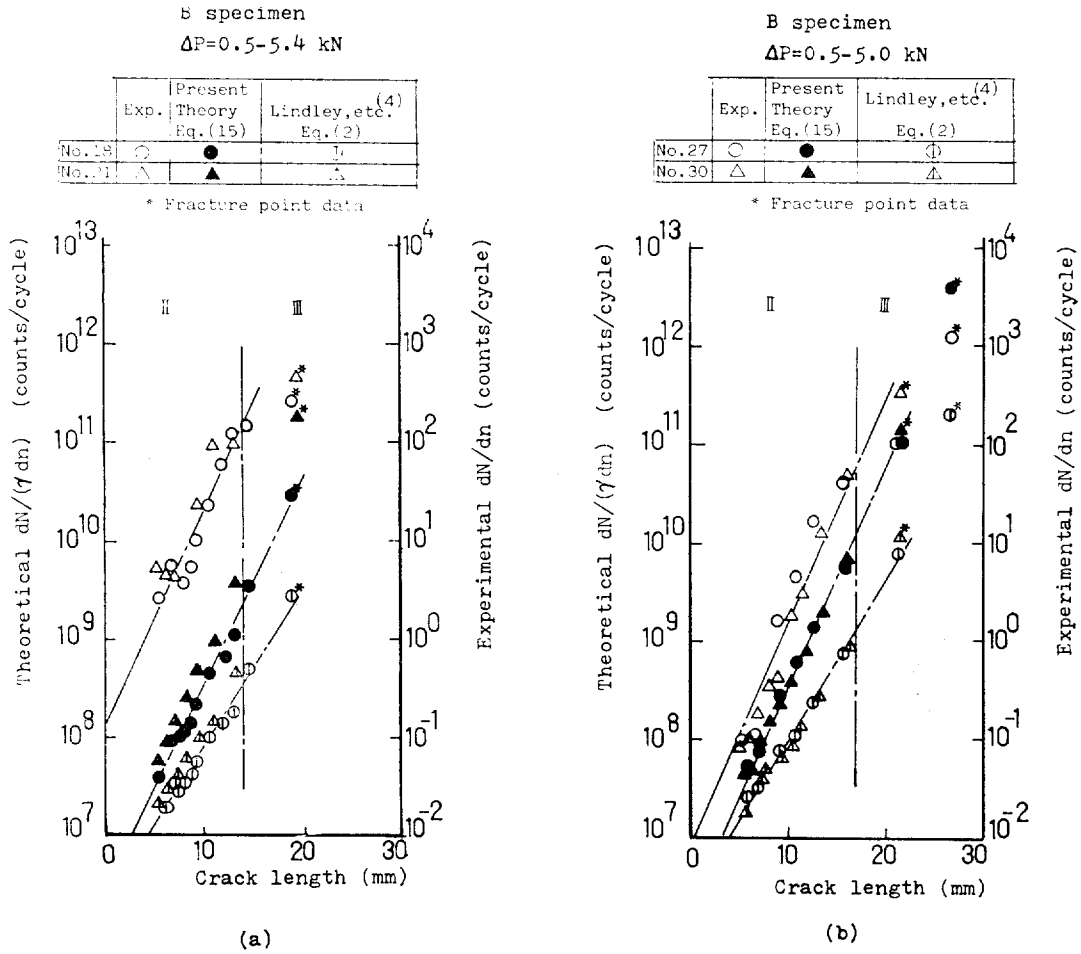


Fig. 9 Comparison between total acoustic emission counts per cycle (dN/dn) vs. crack length (a) of experiment, present theory and Lindley, etc. equation for A specimen
(a) ΔP=0.5~5.4kN (b) ΔP=0.5~5.0kN

Table 3 Comparison between slopes of curves about total acoustic emission counts per cycle (dN/dn) vs. crack length (a) obtained from experiment, present theory and Lindey, etc. equation

Specimen Classification		A Specimen		B Specimen	
Load Range (kN)		0.5~5.4	0.5~5.0	0.5~5.4	0.5~5.0
Slopes	Experiment	0.210	0.218	0.217	0.228
	Present theory Eq. (15)	0.208	0.225	0.213	0.229
	Lindley, etc.[4] Eq. (2)	0.153	0.166	0.160	0.175

데 Ⅱ 영역과 Ⅲ 영역에 걸쳐서 서로 곡선 관계에 있는것 같이 보인다. Fig. 9와 Fig. 10에서는 dN/dn을 균열 길이에 대해 반 대수 눈금으로 나타낸 것인데 상첨자 *로 표시한 시편 파단시의 최종점을 제외하고는 하나의 직선으로 표시할 수 있음을 알 수 있다. 최종점에 해당하는 데이타는 시편 파단시의 기계적 소음을 포함하고 있어 신빙성을 결여하고 있으므로 이를 제외하고 해석함이 타당하다. 여기서 dN/dn에 대한 이론값은 실험에서 균열 길이 및 AE수의 측정이 최대 피로 하중에서 이루어 졌으므로 식 (15)에 의해 구하



(a) (b)

Fig. 10 Comparison between total acoustic emission counts per cycle (dN/dn) vs. carack length(a) of experiment, present theory and Lindley, etc. equation results for B specimen
(a) P=0.5~5.4kN (b) P=0.5~5.0kN

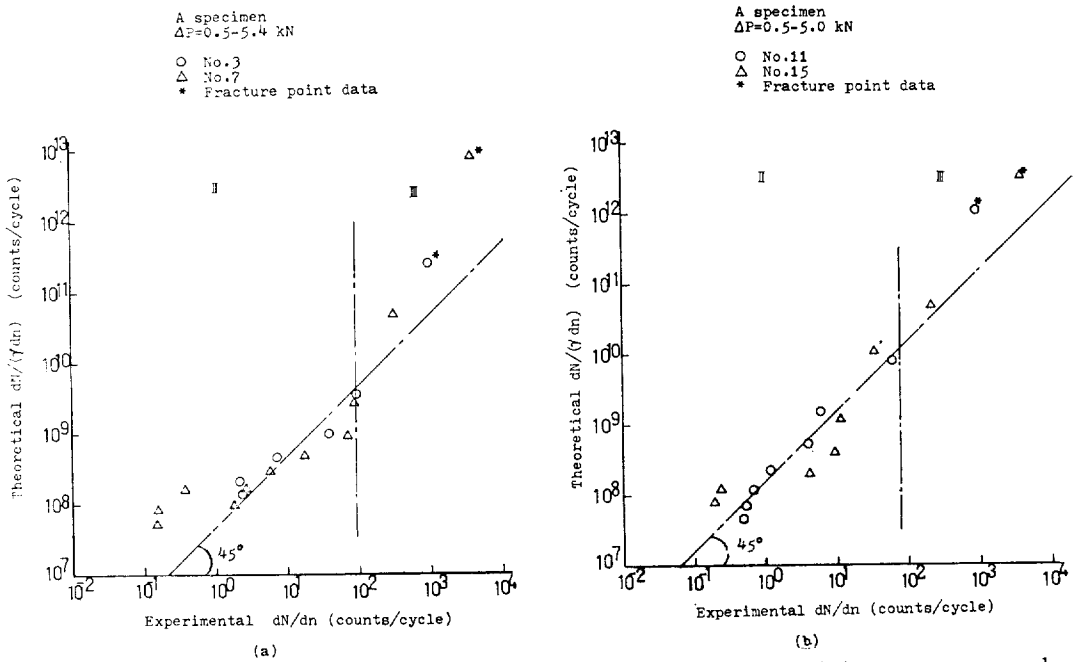


Fig. 11 Comparison between theoretical and experimental total acoustic emission counts per cycle (dN/dn) for A specimen
(a) ΔP=0.5~5.4kN (b) ΔP=0.5~5.0kN

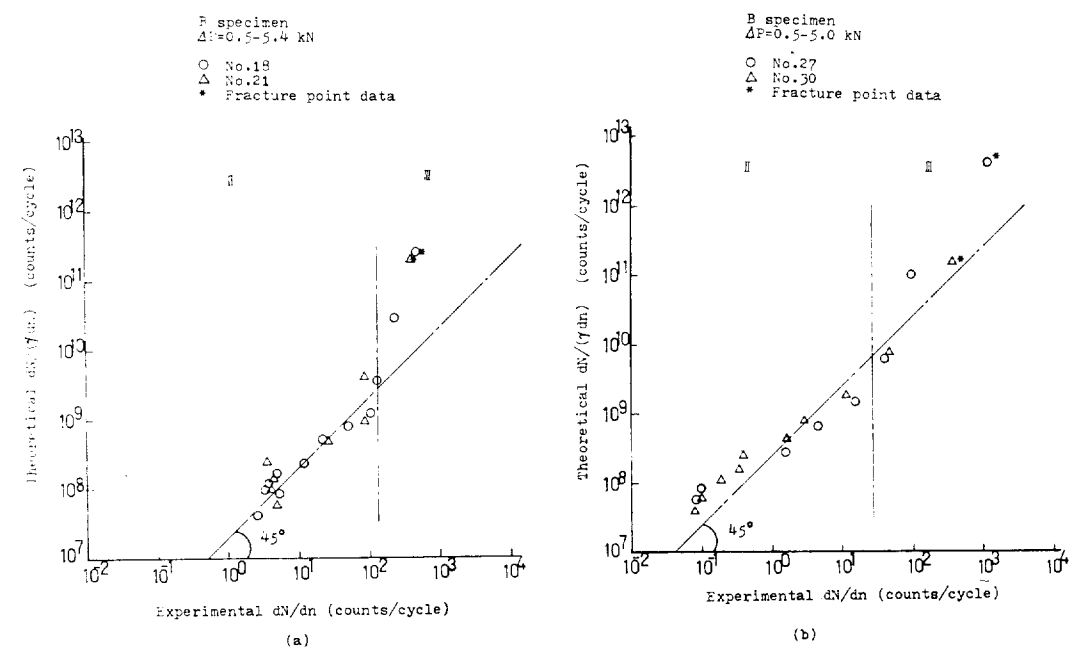


Fig. 12 Comparison between theoretical and experimental total acoustic emission counts per cycle (dN/dn) for B specimen
(a) ΔP=0.5~5.4kN (b) ΔP=0.5~5.0kN

였다.

Table 3에 Fig. 9와 Fig. 10의 결과들을 최소자승법 (least square method)에 의해 직선으로 가정한 기울기를 나타내고 있는데 본 논문의 식 (15)에 의한 것이 Lindley 등의 식 (2)에 의한 것 보다 실험값의 기울기에 더 근사하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 실험과 이론의 경향을 나타낸 최소 자승법에 의한 직선 사이의 거리는 식(15)에서의 상수 γ의 크기를 말하며 실험에 의해 균열길이에 관계없이 대략 $10^{-7.5}$~$10^{-8.0}$의 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 식 (4)의 AE수 N와 체적사이에 선형적인 가정이 합리적이라는 것을 뜻한다. 한편 Fig. 11과 Fig. 12에서는 dN/dn에 대한 본 논문의 이론 값과 실험 값을 종축과 횡축으로 하여 나타내고 있는데 실험과 이론이 100% 일치하는 경우를 나타낸 직선 주위에 대체로 데이타들이 모여 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

피로 파괴에 대한 AE 거동을 이론적으로 연구하고 알루미늄 5000계열 합금에 대해 정하중 시험 및 피로 파괴시험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피로파괴에 의한 균열 성장율과 싸이클에 따른 AE증가율과의 관계가 응력세기계수를 매개 변수로 하는 새로운 이론식으로 표현된다.

2. 실험과 이론에 의한 싸이클에 따른 AE증가율의 대수치와 균열길이는 직선관계에 있으며 그 직선의 기울기가 서로 잘 일치한다.

후 기

이 원고는 한국과학재단의 후원으로 UCLA에 초청부교수로 있는 동안 작성되었다.

참 고 문 헌

[1] ASTM standard E610-82, "Standard Definitions of Relating to Acoustic Emission", 1982.

[2] Dunegan, H.L., Harris, D.O., and Tatro, C.A., "Fracture Analysis by use of Acoustic Emission", *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 1, No. 1, 1968, pp. 105-122.

[3] Ohira, T., Homma, H., and Kishi, T., "Effect of Mechanical Condition on Acoustic Emission during Fracture Toughness Test in high strength steel", *J. Japan Inst. Metals*, Vol. 46, No. 2, 1982, pp. 190-198.

[4] Lindley, T.C., Palmer, I.G. and Richards, C.E., "Acoustic Emission Monitoring during Fatigue Crack Growth", *Materials Sci. and Engng.*, Vol. 32, 1978, pp. 1-15.

[5] Sindair, A.C.E. and Cornnors, D.C., "Acoustic Emission Analysis during Fatigue Crack Growth in Steel", *Mat. Sci. and Engng.*, Vol. 28, 1977, pp. 263-273.

[6] Paris, P.C and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans, ASME, *J. Basic Engng.*, 1963, pp. 528-534.

[7] Morton, T.M., Smith, S. and Harrington, R. M., "Effect of Loading Variables on the Acoustic Emissions of Fatigue Crack growth", Exp. Mech., May, 1974, pp. 208-213.

[8] Harris, D.O. and Dunegan, H.L. "Continuous Monitoring of Fatigue Crack growth by Acoustic Emission Techniques", Dunegan/Endevco Technical Report DE-73-2, 1973.

[9] Irwin, G.R., Fracture, Handbuch der Physik, VI, Springer-Verlag, Heidelberg, 1958.

[10] Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., The stress Analysis of cracks Handbook, Del Research Corporation, Hettertown, Pensylrania, 1973.

[11] ASTM Standard E647-81, "Standand Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack growth Rates above 10^{-8}m/cycle", 1981.

[12] Torben, L., Acoustic Emission, Brüel Kjer Technical Review, No. 2, 1979.

[13] Dunegan, H.L. and Green, A.T., "Factors Affecting Acoustic Emission Response from Materials", in Acoustic Emission, ASTM STP 505, 1972, pp. 100-113.