

Acoustic Emission 방법의 공학적 응용

Engineering Application of Acoustic Emission Method

이 강 용
K. Y. Lee



이 강 용
• 1947년 1월생
• AE, 피로, 파괴, 응력해석
• 정회원, 연세대학교 기계공
학과

1. 序 論

음향 방출법은 기존의 비파괴 시험법보다 여러 가지 면에서 장점을 가지고 있고 또 그 응용범위는 매우 넓다. 그러나 아직 우리나라에서는 그 사용 예가 많지 않다. 이 글에서는 음향 방출법에 대한 개요와 음향 방출법을 이용한 복합재료와 금속재료의 균열 거동 해석 예를 저자의 연구 결과를 중심으로 소개하고 문헌상에서 볼수있는 몇가지 현장 적용예를 보이고자 한다.

2. 음향 방출법 소개¹⁾

기존의 비파괴 시험 검사 방법은 다음과 같은 단점을 내포하고 있다.

- ① 구조물의 넓은 면적을 시험할 수 없다.
- ② 구조물상에 시험할 수 없는 영역이 있을 수 있다.

③ 시험 담당자의 경험과 판단에 상당히 좌우된다.

④ 균열 발생 원인을 규명하지 못한다.

⑤ 정지 상태에서만 검사가 가능하다.

이러한 단점 중 ③은 음향 방출법(acoustic emission method)에서도 역시 약간의 문제로 남지만 그외는 문제시되지 않는다. 따라서 최근에는 이 음향 방출법이 비파괴 시험 검사법의 하나로 각광받고 있다.

물체가 변형을 일으킬 때나 물체내에 균열이 발생하거나 성장할 때 원자의 재배열이 일어나며, 이 때 물체는 탄성파(elastic wave)를 방출하며 이 탄성파 방출을 음향 방출(acoustic emission)이라 부르고 보통 AE로 약어로 표시한다. AE 신호는 보통 두가지 형태로 구분하며 그림 1 (a), (b)와 같은 연속형 방출과 돌발형 방출이 그것이다. 이 AE는 물체 표면에 접촉시킨 트랜스듀서에 의해 감지된다. 트랜스듀서를 하나만 부착하여도 되는 경우는 물체내에 심각한 변형을 일으키는 결함의 위치를 알고 있고 바로 그 결함의 거동을 알고 싶을 때이며, 트랜스듀서를 3개 이상 부착하여야 하는 경우는 물체내에 심각한 변형을 일으키는 위치를 포착하고자 할 때이다. AE의 주파수는 그림 2와 같이 다른 파와 비교하여 상당히 높은 영역을 차지하고 있다.

그림 3은 AE 파형의 매개변수를 정의하고 있다.

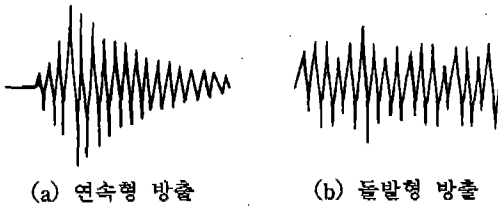


그림 1 AE 신호형태

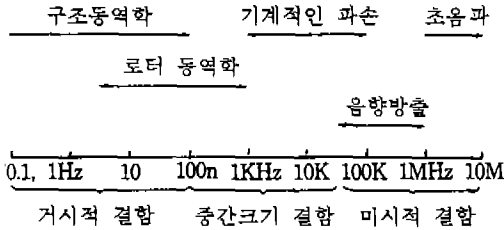


그림 2 주파수 범위

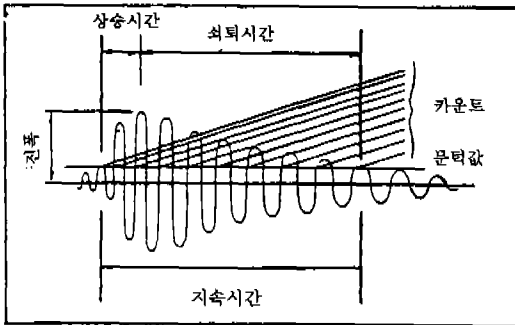


그림 3 파형 매개변수의 정의

AE 파형의 매개변수로 event, count, 에너지, 진폭, 지속시간, 상승시간, 쇠퇴시간 등이 있다. 여기서 event라하면 돌발형 방출 신호 하나하나를 뜻하며 AE 수를 측정하는 방법으로는 크게 두 가지 방법이 있다.

- 1) ring down count법 : 이 방법은 어떤 주어진 문턱값 이상의 진폭을 가지는 파의 갯수를 헤아리는 방법
- 2) 펄스 면적 측정법 : 이 방법은 어떤 주어진 문턱값 이상의 파의 높이를 4구간으로 나누어서 파에 내접하는 4각형의 면적의 합을 AE 수로 계산하는 방법

이 두 방법 중 펄스 면적 측정법이 ring down

count법에 비해 AE 곡선 아래의 면적대 카운트 수의 곡선에서 선형성이 훨씬 좋고 파 진폭의 크기를 고려하고 있으므로 AE 수 측정법으로는 펄스 면적 측정법이 우위에 있다 하겠다. 에너지는 음향 방출 파형 아래의 면적을 뜻하며 식 (1)과 같이 정의된다.

$$U = \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt \quad (1)$$

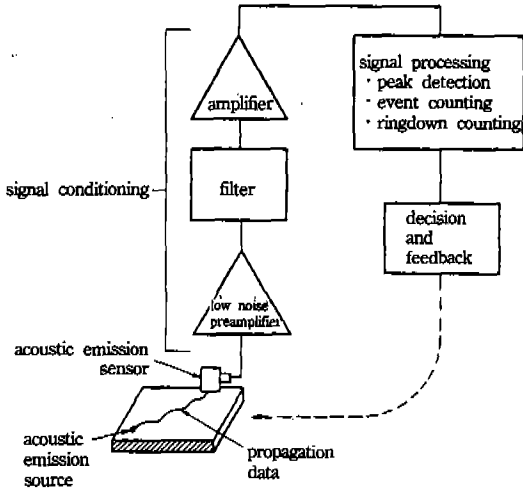
여기에서 U 는 시간 t_1 에서 t_2 까지의 에너지를 뜻하며 V 는 시간 t 에 대한 파의 진폭을 뜻한다. 에너지의 평균값 개념을 가진 RMS 전압 V_{RMS} 은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt} \quad (2)$$

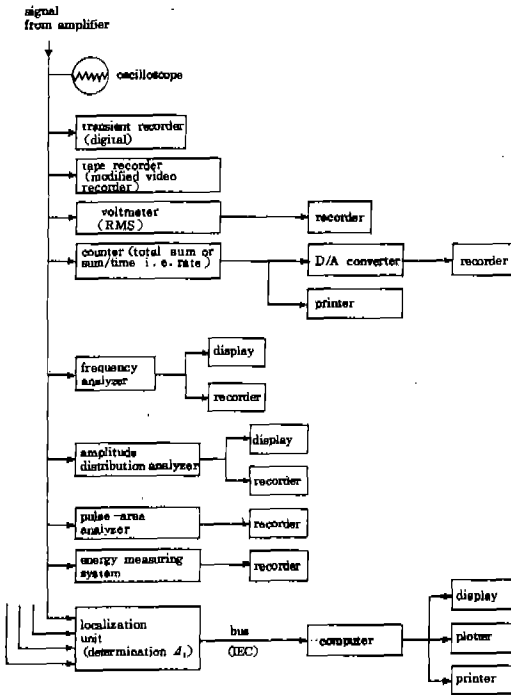
그림 4(a)는 AE 해석을 위한 기본 블록 다이어그램을 표시하고 있으며 그림 4(b)는 신호처리 단위들을 보여주고 있는데 필요한 정보를 얻기 위한 것 외에는 제외하여도 무방하다. 그림 5는 170기압에 해당하는 내압을 이미 받은 압력용기를 0기압에서 증가시켰을 때 과거에 받은 내압, 즉 170기압까지는 AE가 거의 나타나지 않았지만, 170기압을 넘어서면서 AE가 상당히 많이 발생되었으며 172기압에서 유지하는 동안 AE 발생이 미소하였다가 172기압 이상으로 기압을 증가시키니까 새로이 AE가 많이 발생하였다는 것을 보여주고 있다. 여기에서 0~170기압까지와 172기압을 유지하는 동안은 과거에 받은 하중 역사가 있기 때문에 이 범위에서는 AE가 거의 발생하지 않았다. 이 현상을 Kaiser 효과라고 칭한다. Kaiser는 AE에 대한 최초의 논문을 1950년도에 발표하였으며, 그 뒤 1964년도에 AE 측정장비가 개발되어 오늘에 이르고 있다.

3. 재료의 파괴인성치 측정^{2,3)}

DCB 시편으로 열경화성 Gr/Ep 복합재료와 열가소성 APC-2 복합재료의 모드I 파괴인성치



(a) AE 기본 블록 다이어그램



(b) 신호처리 단위

그림 4 AE 시스템

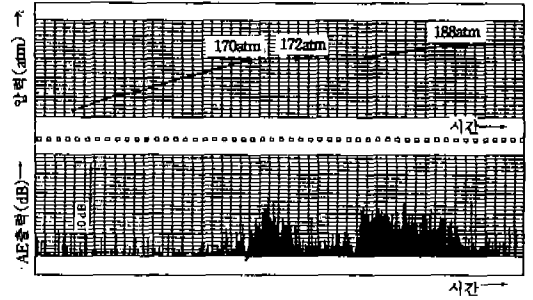


그림 5 Kaiser 효과

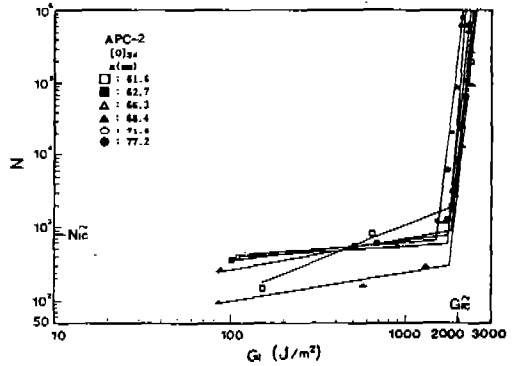


그림 6 APC-2 복합재에 대한 총 AE 수(N)와 에너지 해방률(G)과의 관계

G_{IC} 를 찾기위해 ASTM⁴⁾에서 제시하는 식(3)의 모드 I 에너지 해방률 G_I 식을 사용한다.

$$G_I = \frac{P^2}{2W} \cdot \frac{dc}{da} \quad (3)$$

여기서 P 는 하중, W 는 시편폭, c 는 컴플라이언스, a 는 균열길이이며 컴플라이언스 c 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$c = \frac{a^\alpha}{k} \quad (4)$$

여기서 k 와 α 은 실험상수 식(3)을 변형하여 식(5)와 같이 표현한다.

$$G_I = \frac{a}{2W} \cdot \frac{P\delta}{a} \quad (5)$$

여기서 δ 는 하중선 변위이다.

그림 6에서 하중 증가에 따른 AE 누계수 N 의 증가를 열가소성 APC-2 복합재료를 예를 들어 보여주고 있다. AE수의 급격한 상승이 일어나는 G_k 값에서 균열진전이 시작되었다고 볼 수 있다. 표 1은 이러한 방법으로 측정된 \bar{G}_k 값을 ASTM 방법에 의한 G_k 값과 비교하고 있다. \bar{G}_k 값이 G_k 에 비해 약 20% 작은 값을 보이고 있다. 위와 같은 방법을 금속재료에 적용할 때에도 좋은 결과를 얻을 수 있다는 것을 알루미늄 합금재를 예로 보이고자 한다.

표 1 ASTM 시험법 및 AE 시험법의 평균 G_k 값과의 비교

재 료	적층방법	ASTM 시험법 $G_k(J/m^2)$	AE 시험법 $\bar{G}_k(J/m^2)$
Gr/Ep	$[0_2/90_8/0_2]_S$	184.5	148.8
	$[0_4/90_4/0_4]_S$	193.6	173.8
	$[0]_{24}$	224.2	185.0
APC-2	$[0_2/90_8/0_2]_S$	1711.4	1548.8
	$[0_4/90_4/0_4]_S$	1835.6	1673.8
	$[0]_{24}$	2170.4	1950.3

알루미늄 합금재로 된 콤팩트 인장 표준 시편 으로부터 AE 방법에 의해 모드I 파괴인성치 J_k 값을 찾기 위하여 식(6)과 같은 J 식을 사용한다.

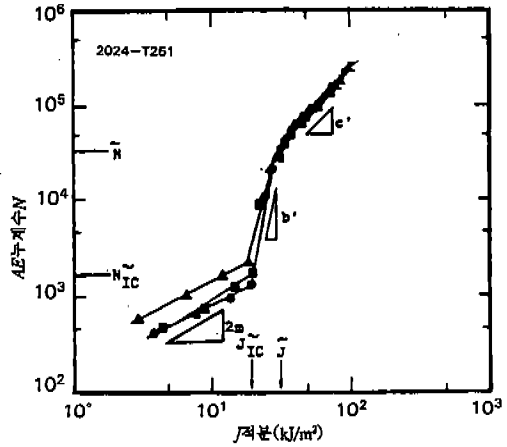
$$J_{i+1} = \left[J_i + \frac{\eta_i}{b_i} \cdot \frac{A_{i,i+1}}{B} \right] \cdot \left[1 - \frac{r_i}{b_i} (a_i + 1 - a_i) \right]$$

$$\eta_i = 2 \cdot \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha^2}$$

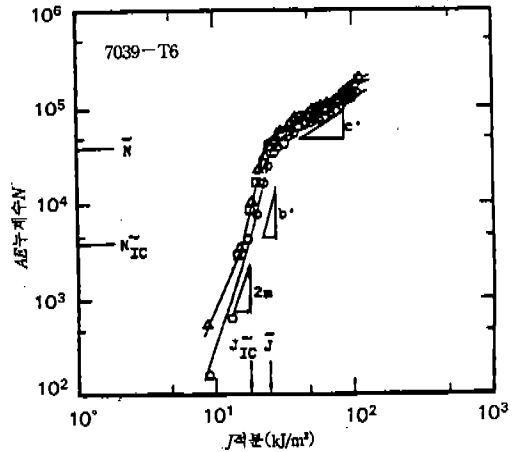
$$\alpha = \left[\left(\frac{2a_i}{b_i} \right)^2 + 2 \left(\frac{2a_i}{b_i} \right) + 2 \right]^{1/2} - \left(\frac{2a_i}{b_i} + 1 \right) \quad (6)$$

$$b_i = W - a_i$$

$$A_{i,i+1} = \int_{\delta_i}^{\delta_{i+1}} P \, d\delta$$



(a) A1 2024-T351



(b) A1 7039-T6

그림 7 AE누계수(N)대 J분포

$$r_i = 1 + 0.76 \frac{b_i}{W}$$

여기서 B 는 시편두께이고, 하첨자 i 는 각각의 부분 해중(unloading) 단계를 뜻한다.

이렇게 계산된 J -적분값에 해당하는 하중점에서의 AE누계수 N 을 J -적분값에 대해 그리면 그림 7(a), (b)와 같다. 그림 7(a), (b)에서 \tilde{N}_k 이후 AE 발생수가 급격하게 증가하는 사실로부터, \tilde{N}_k 이전까지는 균열 선단의 소성변형에 의한 균열둔화(blunting)에 의해 AE가 발생하다가

\bar{N}_k 에서 균열진전이 시작되었다고 볼 수 있다.

표 2에서 보는 바와 같이 ASTM 방법에 의한 J_{Ic} 보다 AE 방법에 의한 \bar{J}_{Ic} 값이 2024-T351 알루미늄 합금에서는 16.6%, 7039-T6 알루미늄 합금에서는 13.2% 작다.

표 1과 2에서 \bar{G}_{Ic} , \bar{J}_{Ic} 값이 G_{Ic} , J_{Ic} 보다 작은 이유는 ASTM법이 거시적 변형에 의한 균열진전에 따른 파괴 인성치를 주는 반면 AE 법은 미시적 변형에 의한 균열진전에 따른 파괴인성치를 주기 때문이다.

표 2 파괴인성치

재 료	J_{Ic} (KJ/m ²)	\bar{J}_{Ic} (KJ/m ²)	error* (%)
AI 2024 -T351	21.84	18.22	16.6
AI 7039 -T6	17.94	15.57	13.2

$$* \text{error} = \frac{J_{Ic} - \bar{J}_{Ic}}{J_{Ic}} \times 100$$

4. 열가소성 복합재(APC-2)의 균열 거동에 대한 AE 특성⁶⁾

정하중과 피로 하중하에서 APC-2 복합재의 균열 거동에 관한 AE 특성을 조사하기 위해 DCB 시편을 그림 8과 같이 UTM에 걸고 AE 시스템을 연결한다. 정하중은 5m/min로, 피로 하중은 변위 제어 모드에서 변위비 0.1에서 1.5Hz로 가한다.

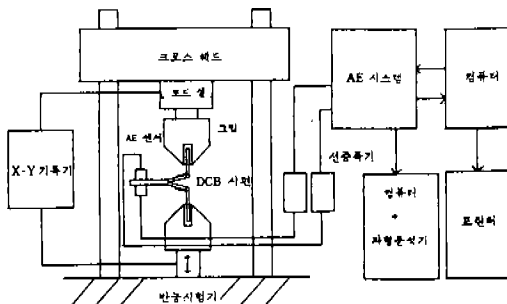


그림 8 시험계

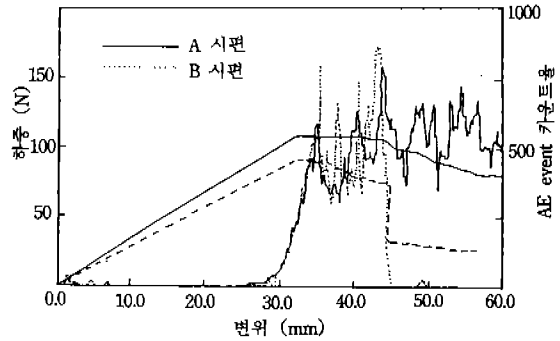


그림 9 하중-변위-AE event 카운트를 곡선

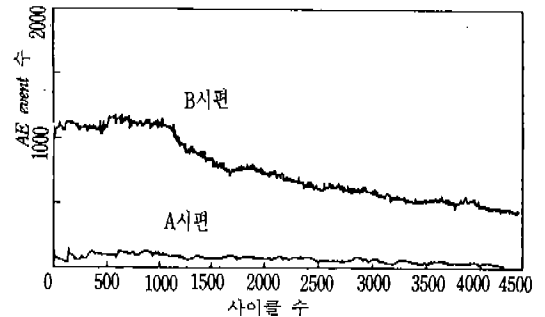
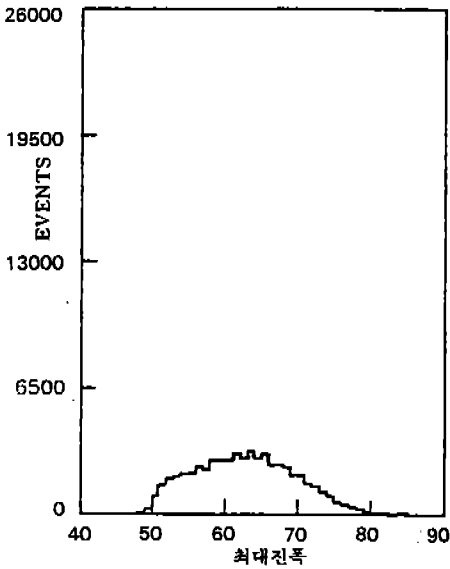


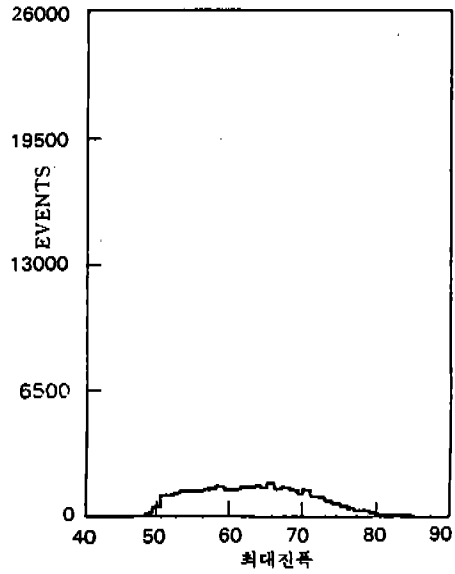
그림 10 사이클 수와 AE event와의 관계

시편의 적층방법은 $[0]_{24}$ (A시편), $[+45/-45/0/-45/+45]_6$ (B시편)으로 한다. 그림 9는 정하중 하에서 실험결과로서 A시편의 G_{Ic} 가 B시편의 G_{Ic} 보다 큰것을 알 수 있다. 또 A시편은 계속적으로 자가(self-similar) 균열진전을 하고 있으나 B시편은 어느 정도까지는 자가균열진전을 하나 섬유영킴으로 균열진전이 방해되었다가 갑자기 섬유영킴이 풀림으로써 갑작스런 균열진전이 발생하였음을 알 수 있다. 자가균열진전이 일어나는 영역에서는 A시편보다 B시편이 더 많은 AE발생이 감소하고 있음을 알 수 있다. B시편이 A시를 발생하고 있다.

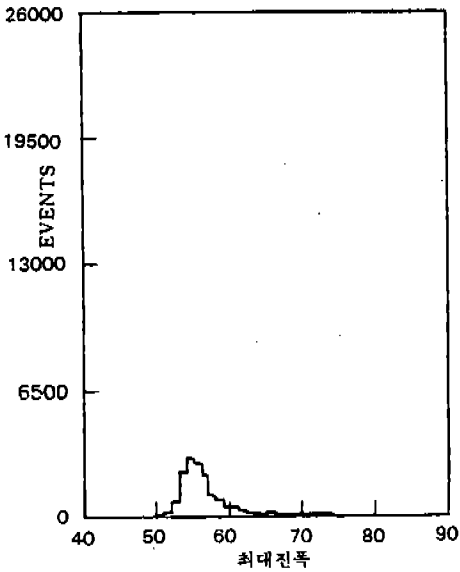
그림 10은 피로 하중에서 B시편이 A시편보다 더 많은 AE를 발생하고 있으며 cycle수의 증가에 따라 AE발생이 감소하고 있음을 알 수 있다. B시편이 A시편보다 더 많이 AE를 발생하는 것은 B시편에서 섬유영킴이 발생하기 때문이며 cycle 수에 따른 AE 발생의 감소는 변위 제어 모드에 기인한다.



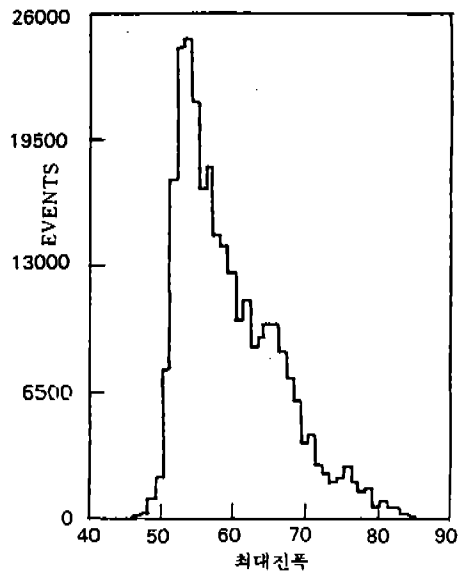
(a) 정하중 하에서 A시편



(b) 정하중 하에서 B시편

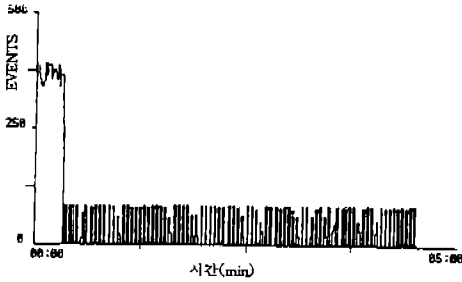


(c) 피로하중 하에서 A시편

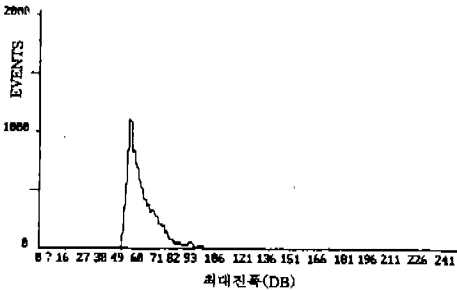


(d) 피로하중 하에서 B시편

그림 11 Events 대 최대진폭 분포

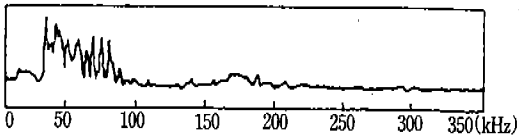


(a) event대 시간분포

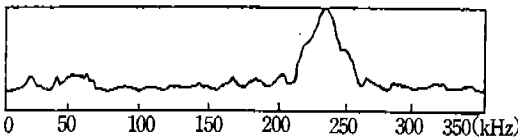


(b) event대 최대진폭의 분포

그림 12 섬유마찰에 대한 응답 그래프



(a) 모드 III 하중에 의한 지지파괴

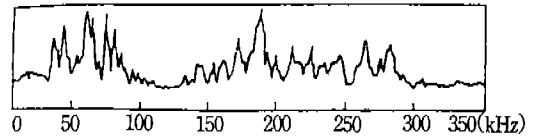


(b) 굽힘 하중에 의한 지지와 섬유파괴

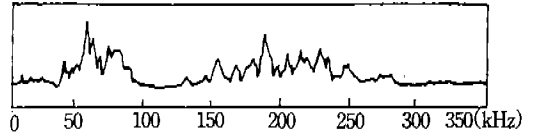
그림 13 프리프레그의 에너지 스펙트럼

그림 11은 최대 진폭의 분포를 보이는 것으로 정하중에서는 50dB~85dB의 넓은 분포를 보이나 피로 하중에서는 55dB의 최대 진폭이 지배적으로 발생함을 보인다.

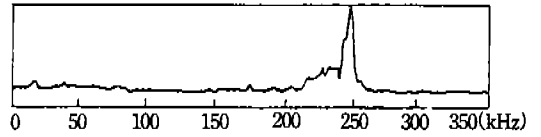
그림 12는 섬유영킴으로 인한 마찰만 발생하고 균열진전을 억제하는 상태로 피로 하중을 주었을 때 최대 진폭 분포이다. 그림 12 (a)에서 event 발생이 시간에 따라 일정하게 발생하여 단지 섬유



(a) A시편



(b) B시편



(c) B시편

그림 14 정하중 하에서 에너지 스펙트럼

유끼리의 마찰에 의해서만 발생된 AE파임을 알 수 있다. 그림 12 (b)의 분포와 그림 11 (d)의 분포를 비교할 때 매우 유사하다는 것으로 미루어 B시편은 주로 섬유영킴에 의한 섬유끼리의 마찰에 의해 발생한 AE가 지배적임을 알 수 있다.

그림 13(a)는 프리프레그 1장을 사용하여 모재만의 파괴를 일으키게 하기위해 모드 III 하중을 주어 섬유방향으로 균열을 진전 시켰을때 주파수 특성을 보여주고 있으며, 그림 13 (b)는 섬유의 파괴를 일으키게 하기 위해 프리프레그 1장을 섬유방향과 수직방향으로 굽힘을 주어 프리프레그를 깰때 나타난 주파수 특성이다. 그림 13 (a)에서 45~100KHz, 그림 13 (b)에서 210~260 KHz에서 큰 에너지를 가진 AE 파가 나타났음을 알 수 있다.

그림 14 (a)는 정하중 하에서 A시편의 주파수 특성을 보이는 것으로 그림 13의 결과로 미루어 보아 45~100KHz의 주파수는 모재의 파괴로 인한 것이고 150~300KHz의 주파수는 섬유이탈과 섬유파괴로 인한 것으로 풀이된다. 그림 14 (b)는 정하중 하에서 B시편의 주파수 특성을 보이는 것으로 역시 45~100KHz의 주파수는 모재파괴로 인한 것이고 150~300KHz는 섬유끼리의 마찰,

섬유이탈, 섬유파괴로 인한 것으로 풀이된다. 정 하중 하에서 B시편으로부터 경우에 따라서는 그림 14 (c)와 같은 256KHz 주위의 좁은 주파수 분포를 볼 수 있는데 이는 섬유다발이 동시에 파괴된 것으로 풀이된다.

5. 음향 방출수 증가율과 균열 성장률의 관계^{6, 7)}

최근에 이르러 사이클에 따른 AE수 증가율(cumulative AE count rate)과 피로 균열 성장율과의 상관 관계를 찾고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 대한 대부분의 논문은 Dunegan 가정, 즉 AE 누계수는 균열 선단소성역 크기에 비례한다는 가정에 근거를 두고 있다. 이러한 가정에 대한 배경은 Dunegan 등이 N50A 베틸륨과 알루미늄 7075-T6 합금에 대해 균열이 없는 인장시험편을 갖고 인장 시험을 하여 AE 누계수를 측정 한 결과, 시편의 파단시까지 나타난 AE 누계수를 측정 한 결과, 시편의 파단시까지 나타난 AE 누계수의 대부분이 항복점으로부터 인장 강도 범위에서 발생하였다는 데에 있다. Dunegan의 가정을 이용하면 AE 수 증가율과 균열 성장률 사이에 식(7)과 같은 선형 관계가 얻어진다.

$$\frac{dN}{dn} = AK_{max}^2 \frac{da}{dn} \quad (7)$$

여기서 N 은 AE 누계수, n 은 사이클 수이고 dN/dn 은 AE수 증가율이라고 부르며 da/dn 은 균열 성장률, K_{max} 는 최대하중하에서 응력세기계수(stress intensity factor), A 는 실험상수이다. 한편 AE 수 증가율은 응력세기계수범위(stress intensity factor range) ΔK 와 Paris법칙 형태인 식 (8)과 같은 실험식으로 표현된다.

$$\frac{dN}{dn} = D(\Delta K)^M \quad (8)$$

여기에서 D , M 은 실험상수이다. 그러나 균열 소성역이 커지면 위와 같이 응력세기계수를 적

용할 수 없으며, 균열 소성역이 크더라도 적용할 수 있는 새로운 매개변수(예를 들면 J)를 도입 하여야 한다. 일 예로서 KS SS41 일반 구조용 강으로 만들어진 콤팩트 인장 시편을 가지고 저 주기 피로시험한 결과를 중심으로 설명하기로 한다.

피로 하중 작용방법은 하중조절조건(load control condition)이 사용된다. 하중 범위는 균열선단 소성변형을 크게 발생시키기 위하여 330~3300 Kgf 하중 범위로 하여 1×10^4 사이클 이전에 파괴가 일어나도록 한다. J 적분 범위인 ΔJ 는 식 (9)와 같은 콤팩트 인장 시편식을 사용한다.

$$\Delta J = \frac{s}{Bb} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (9)$$

식 (9)에서

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

$$\phi = \left[\left(\frac{2a}{b} \right)^2 + 2 \left(\frac{2a}{b} \right) + 2 \right]^{1/2} - \left[\left(\frac{2a}{b} \right) + 1 \right] \quad (10)$$

$$b = W - a$$

여기서, s 는 Dowling등이 정의하는 하중과 하중점 변위 선도상의 면적이다.

그림 15는 균열성장율과 ΔJ 의 관계를 보이고 있다. 점선은 곡선맞춤선(curve fitted lind)이다. 이들 그림에서 보듯이 균열성장율은 ΔJ 에 대하여 Dowling 등이 제안한 잘 알려진 식(11)로 표현 됨을 알 수 있다.

$$\frac{da}{dn} \propto (\Delta J)^m \quad (11)$$

여기서, a 와 ΔJ 의 단위를 각각 mm, Kgf/mm로 나타낼 때 실험상수 m 은 1.287으로 얻어졌다. AE 수 변화율(AE count rate)을 ΔJ 에 대하여 표시하면 그림 16과 같고 이 그림으로부터 dN/dn 과 ΔJ 의 실험식을 식(12)와 같이 표현한다.

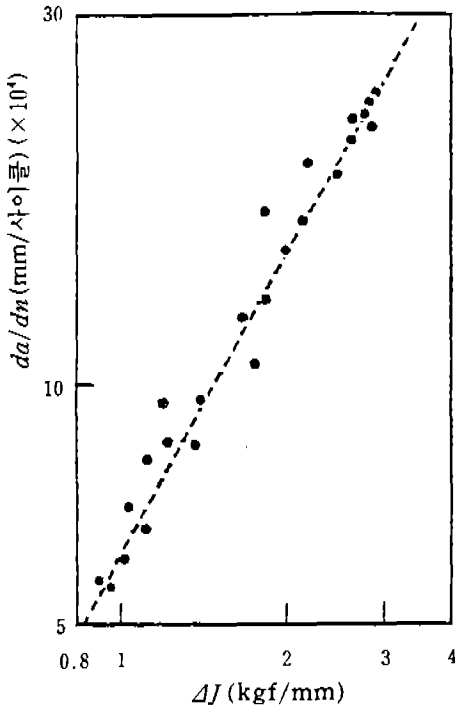


그림 15 균열 성장률 대 ΔJ 분포

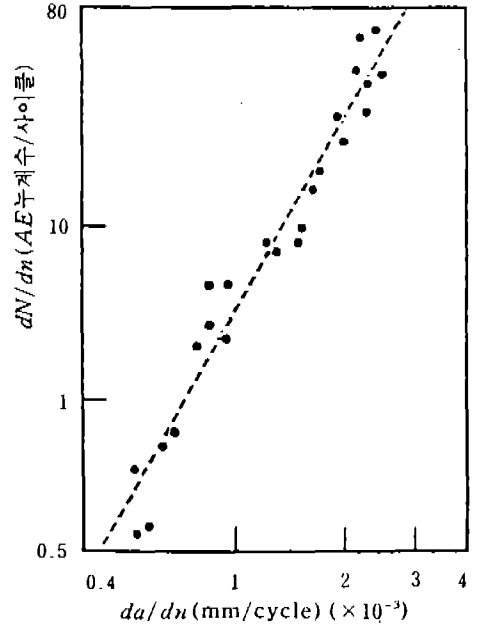


그림 17 음향 방출률 대 ΔJ 분포

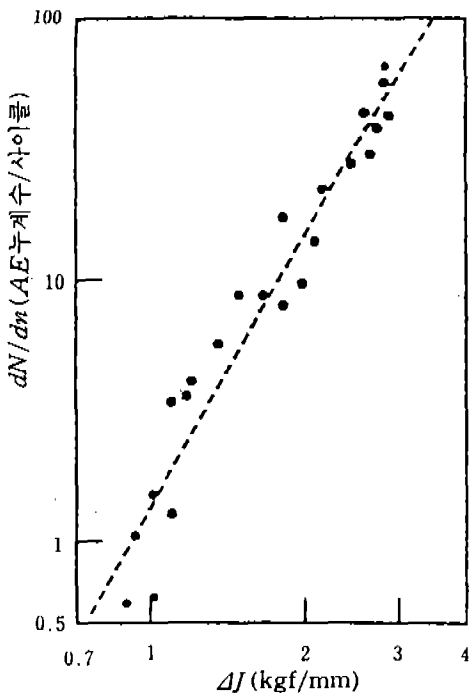


그림 16 AE 카운트를 대 ΔJ 분포

$$dN/dn \propto (\Delta J)^m \quad (12)$$

여기서 ΔJ의 단위는 Kgf/mm로 나타낼 때 실험 상수 m은 3.611으로 얻어진다.

식 (11)과 식 (12)으로부터 식(13)이 얻어진다.

$$\frac{dN}{dn} \propto \left[\frac{da}{dn} \right]^p \quad (13)$$

여기서 a의 단위를 mm로 나타낼 때 실험상수 p는 실험결과로부터 2.783으로 얻어진다. 식 (13)에 대한 관계 그림을 그림 17에서 보여주고 있다.

dN/dn과 ΔJ의 관계와 da/dn과 dN/dn의 관계를 이론적으로 유도하기 위해 AE 수와 균열선단 소성역 체적 V_p의 관계에 대한 Dunegan의 가정을 사용한다.

$$N \propto V_p \quad (14)$$

피로인 경우에 식 (14)를 다음과 같이 표현한다.

$$\frac{dN}{dn} \propto \frac{dV_1}{dn} = \frac{dV_2}{da} = \frac{da}{dn} \quad (15)$$

반경이고, a_0 는 초기 균열길이 있다.

식 (16)을 식 (15)에 대입하면

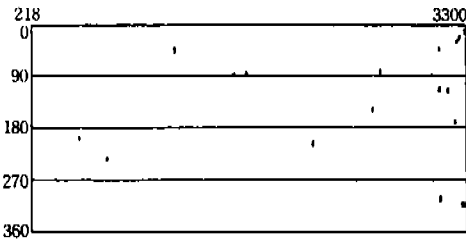
여기서,

$$\frac{dN}{dn} \propto r_p(a) \frac{da}{dn} \quad (17)$$

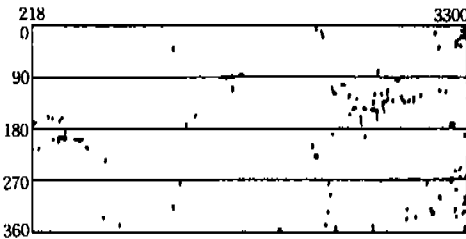
$$V_p = 2B \int_{a_0}^a r_p(a) da \quad (16)$$

$r_p(a)$ 는 HRR 응력분포식과 von-Mises 항복조건식에 의하면 식 (18)이 주어진다.

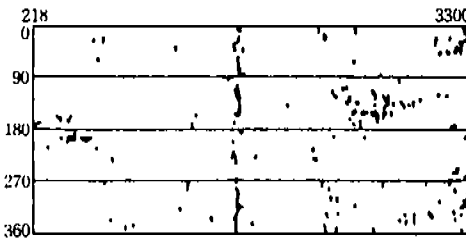
r_p 는 피로 하중하에 있는 균열선단의 원형 소성역



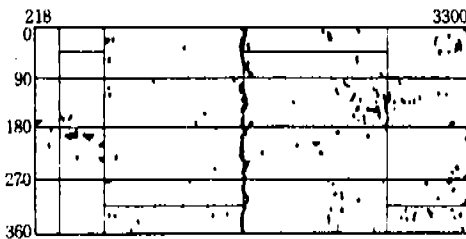
(a) P=0-60 kg/cm²



(b) P=0-100 kg/cm²



(c) P=0-120 kg/cm²



(d) P=0-143.5 kg/cm²

그림 18 AE source 위치

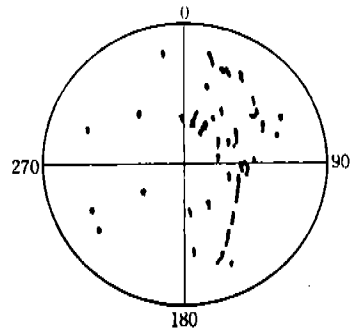
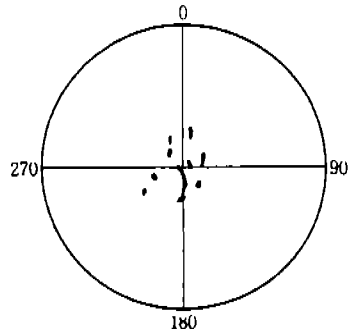
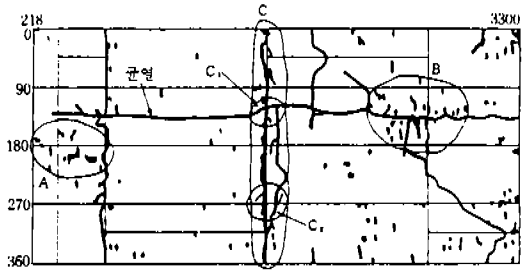


그림 19 AE source 위치와 균열

$$r_p(a) \propto \Delta J(a) \quad (18)$$

식(11), (17), (18)로부터 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{dN}{dn} \propto (\Delta J)^{m+1} \quad (19)$$

$$\frac{dN}{dn} \propto \left[\frac{da}{dn} \right]^{\frac{m+1}{m}} \quad (20)$$

식 (12)와 식 (19)를 비교하면 식 (21)과 같으며,

$$m' = m + 1 \quad (21)$$

실험과 이론의 m' 오차는 약 36.7%이다. 식 (13)과 식 (20)을 비교하면 식 (22)와 같으며 실험과 이론의 β 오차는 약 36.1%이다.

$$\beta = \frac{m+1}{m} \quad (22)$$

이러한 오차의 크기로 보아서, 균열시편이 아닌 시편에서 얻어진 결과를 균열시편에 적용한 Dug-negan의 가정에 연구의 여지가 있다고 하겠다.

6. Rocket Motor Case의 AE시험

실린더형 motor case상에 여러개의 AE 트랜스듀서를 부착하여 그림 18과 같이 단계별로 압력 p 를 주었을 때, AE 발생원 위치를 AE신호의 시간차에 의한 계산결과로부터 얻을 수 있다. 이러한 결과로 그림 19와 같이 C group에서 균열이 발생하는 지점을 예상할 수 있으며 또 실제 그곳에서 균열이 발생하였음을 알 수 있다. 그림 20은 motor case에 허용압력과 파괴압력을 AE방법에 의해 구할 수 있음을 보여주고 있다.

7. 저널베어링 진단

저널베어링이 힘을 받아 babbit금속면이 저널과 접촉하면 babbit면의 마모가 일어나는데 접촉여

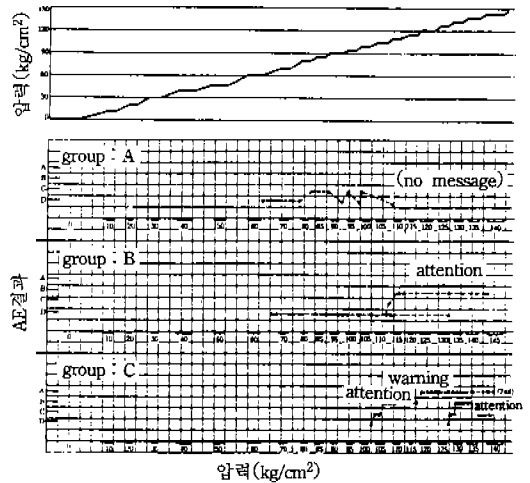


그림 20 Motor case의 위험 압력

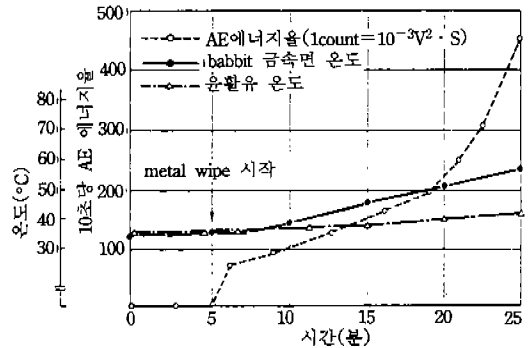
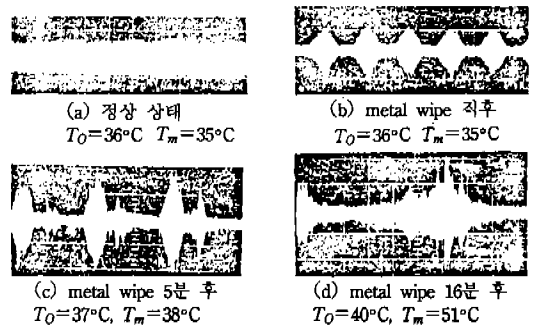


그림 21 Metal wipe 시점



(c) metal wipe 5분 후
 $T_0=37^\circ\text{C}$, $T_m=38^\circ\text{C}$
 1) $N=5\text{rpm}$, 진폭: 2V/div , 시간: 20ms/div
 2) T_0 : 윤활유 온도
 3) T_m : Babbit 금속면 온도

그림 22 Metal wipe에 의한 AE 파형

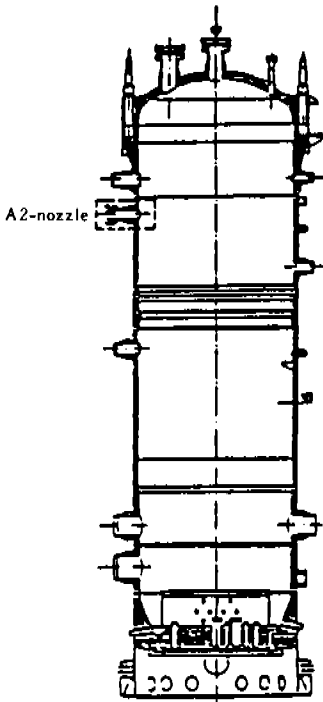
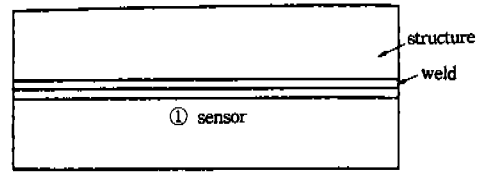
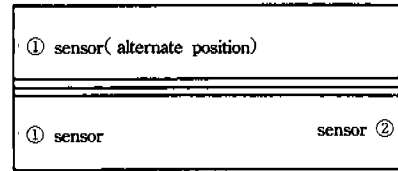


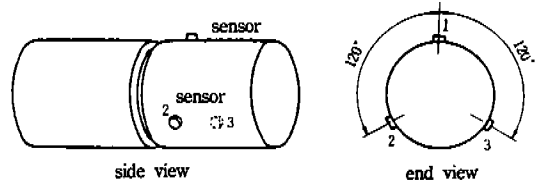
그림 23 HDR 압력용기



(a) 단일 트랜스듀스



(b) 2개 트랜스듀스 부



(c) 3개 트랜스듀스 부착

그림 26 고정식 트랜스듀스

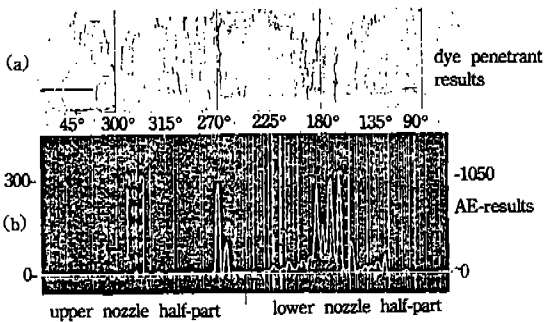


그림 24 400번째 열충격 반복하중이 가해질 때 발생한 AE 결과

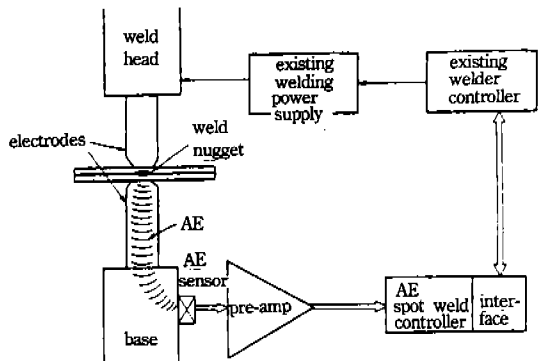


그림 27 저항 점용접의 트랜스듀스 위치

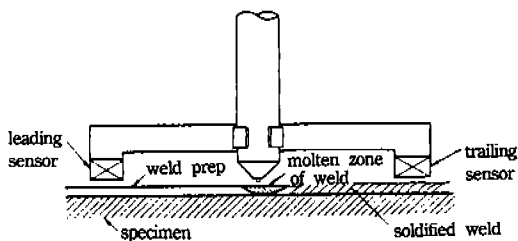


그림 25 이동식 트랜스듀스

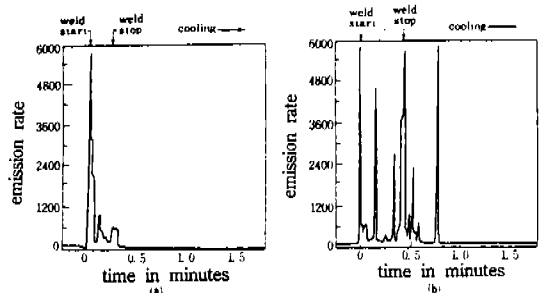


그림 28 용접시 미소균열이 발생하지 않는 경우 (a)와 발생한 경우 (b)에 대한 AE 반응

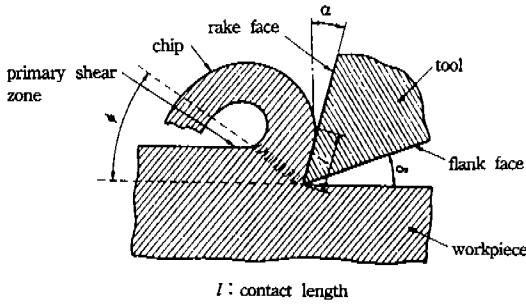


그림 29 절삭 공구각

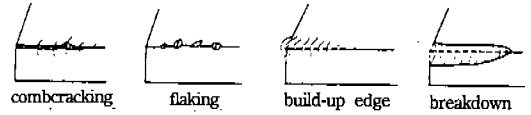
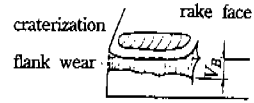


그림 30 전형적인 공구 손상

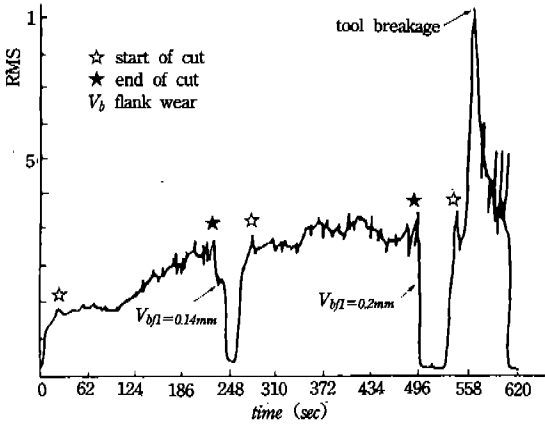


그림 31 공구마모와 AE 거동

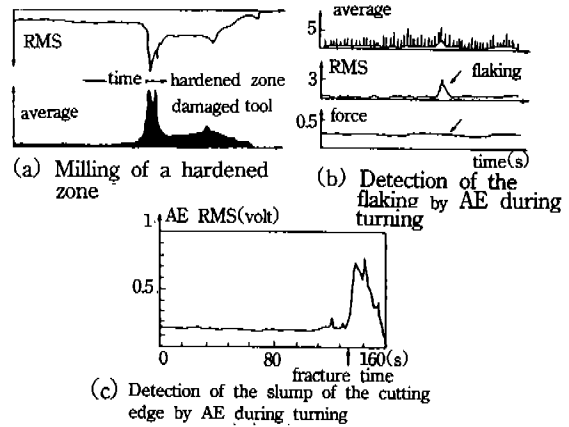


그림 32 공구 이상 상태에서의 AE 거동

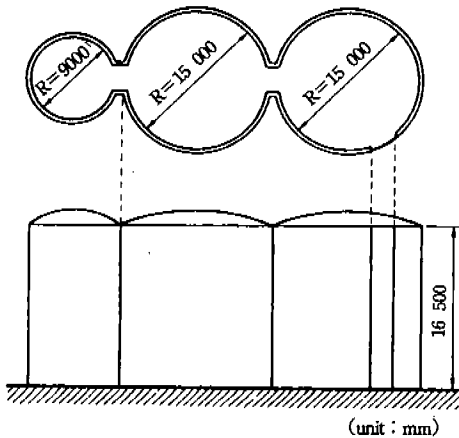


그림 33 사일로

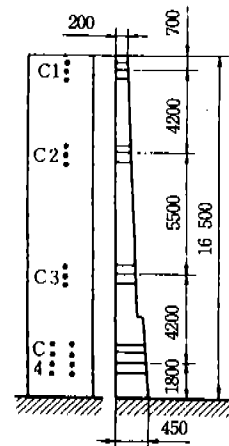


그림 34 시험편 채취 위치

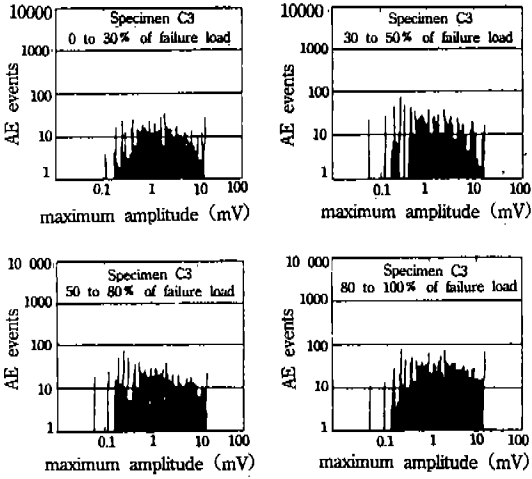


그림 35 채취한 시험편의 AE 거동

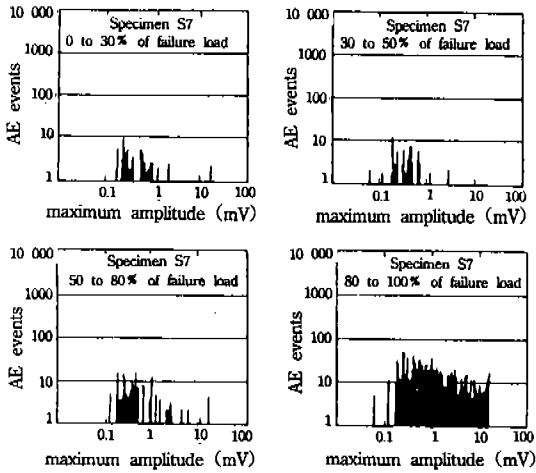


그림 36 virgin시험편의 AE 거동

부를 초기에 알 수 있는 방법으로 AE법을 사용할 수 있다. 그림 21은 metal wipe시점을 babbit금속 온도 측정이나 윤활유온도 측정보다 AE법이 훨씬 신속하고 정확하다는 것을 보인다. 그림 22는 metal wipe가 일어날 때와 일어나지 않을 때의 파형의 차이가 있음을 보이며 wipe가 계속되면 AE 진폭의 크기가 커져 babbit금속면에 상당한 마멸을 주고 있음을 알 수 있다.

8. Pipe Line Leak 검출

여러개의 transducer를 예상되는 지점 양쪽에 부착하여 AE수를 각 transducer 위치에서 찾아서 AE수 대 transducer위치로 데이터를 찍어 extrapolation시켜 만나는 교점으로 leak위치를 찾을 수 있다.

9. 원자력 압력 용기 노즐이 열충격 균열 감지

그림 23과 같은 HDR 압력 용기 노즐이 열충격을 반복해서 받았을 때 원주 표면에서 발생하는 균열을 액상 침투 방법에 의해 탐지한 것이 그림 24(a)이고 그림 24(b)는 같은 원주 상에서 AE수를 표시하고 있다. 180° 근방에서 많은 표면 균열로 인한 AE수의 다량 발생을 볼 수 있으며 270°에서 표면균열로 인한 AE수 증가 현상을 알 수 있다.

10. 용접시 균열 감지

용접중 on-line에서 균열을 감지하는 AE방법은 이미 ASTM에서 표준서를 제시하고 있을 정도로 선진국에서는 알려져 있다. 연속 용접중에 on-line으로 AE법에 의해 균열을 감지하는 방법으로는 그림 25와 같은 이동식 트랜스듀서 탐지 방법과 그림 26과 같은 고정식 트랜스듀서 탐지 방법이 있다. 저항 점 용접(resistance spot welding)인 경우에는 그림 27과 같이 lower grounded electrode holder에 트랜스듀서를 고정하여 AE를 감지하기도 한다. 그림 28은 용접 상태가 양호한 경우와 미소균열이 발생한 경우에 AE수 증가율을 비교한 것이다.

11. 절삭공구 마멸 및 파손에 AE 적용

절삭공구각을 그림 29에서 정의하고 있다. 절삭공구의 대표적인 damage 양상을 그림 30에서 보여 주고 있다.

그림 32(a)-(c)는 공구에 이상상태를 주는 각 경우에 대한 AE 반응이다.

12. 콘크리트 구조물의 건전성 평가

그림 33과 같은 콘크리트 사이로의 건전성을 평가하기 위해 그림 34와 같이 4곳에서 시험편을 채취하여 mix portion을 시험하여 채취한 시험편과 같은 mix portion으로 virgin specimen을 만들어 그림 35와 같은 채취한 시험편 결과와 그림 36과 같은 virgin specimen에 대한 결과를 얻었다.

여기에서 채취한 시험편쪽이 높은 진폭파를 virgin specimen보다 많이 방출한 것을 알 수 있다. 이는 채취한 시험편에 기존 존재하는 균열이 있었으며 적은 압축 하중하에서도 성장하고 또 새로운 균열이 발생하였음을 알 수 있다.

13. 맺음말

이 글에서 현재 여러 학문분야에서 응용되고 있는 음향 방출법에 대해 기본적인 소개를 하고 복합재료와 금속재료의 균열 거동 해석에도 훌륭히 적용할 수 있다는 것과 공학적인 문제에도 다양하게 응용되고 있음을 예로 보였다. 이 음향방출법은 아직도 응용분야를 넓혀가고 있으며 차차로 우리나라 산업체에서도 적용한 예를 제시하는 시점에 와 있다. 그러나 아직도 우리나라

에서는 이 방법의 우수성에 대해 아는 바가 미약한 실정임에 이 글을 통하여 조금이라도 도움이 되길 바란다.

참 고 문 헌

1. 이강용, "선형파괴역학개론", 동명사, 1990.
2. Kang Yong Lee and Soon Man Kwon, "Interlaminar Fracture Toughness for Composite Materials", Engineering Fracture Mechanics, in press.
3. 이강용, 백충현, "음향방출법에 의한 파괴인성치 측정 및 파괴 안정성 평가를 위한 연구", 대한기계학회 논문집, 제13권, 제1호, pp.96-104, 1989.
4. ASTM D30.02 Round Robin, "Test Procedure for the Double Cantilever Beam(DCB) Test", 1985.
5. 이강용, 손태익, "모드 I 하중하에서 열가소성 복합재의 AE 특성", 한국 복합재료 학회, 추계 학술 대회, 1991.
6. 이강용, 김형규, "피로균열성장률과 사이클당 AE수 증가율간의 상호관계", 대한조선학회지(논문), 제23권, 제3호, pp.17-26, 1986.
7. Kang Yong, Lee, "Cyclic AE Count Rate and Crack Growth Rate under Low Cycle Fatigue Fracture Loading", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 34, No. 5/6, pp.1069-1073, 1989.