

# 음향 방출법에 의한 복합재료와 금속재료의 균열 거동 해석



이 강 용

연세대학교 기계공학과 교수

● 1947년생  
● 피로 및 파괴공학을 전공하고 과위원인 및 방지를 위한 이론, 계산, 실험을 수행하며 특히 수명예측 및 AC 현상장적용 연구가 최근의 관심 영역이다.

## 1. 머리 말

음향 방출법은 기존의 비파괴 시험법보다 여러 가지 면에서 장점을 가지고 있고 또 그 응용범위는 매우 넓다. 그러나 아직 우리 나라에서는 그 사용 예가 많지 않다. 이 글에서는 음향 방출법에 대한 개요와 음향 방출법을 이용한 복합재료와 금속재료의 균열 거동 해석 예를 저자의 연구 결과를 중심으로 소개하고자 한다.

## 2. 음향 방출법 개요<sup>(1)</sup>

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 그 외는 문제되지 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 탄성과(elastic wave)를 방출하며 이 탄성과 방출을 음향 방출(acoustic emission)이라 부르고 보통 약어인 AE로 표시한다. AE 신호는 보통 두 가지 형태로 구분하며 그림 1(a),(b)와 같은 연속형 방출과 돌발형 방출이 그 것이다. 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. AE 파형의 매개변수로 event, count, 에너지, 진폭, 지속시간, 상승시간, 쇠퇴시간 등이 있다. 여기서 event라 하면 돌발형 방출 신호 개개를 뜻하며 AE 수를 측정하는 방법으로 크게 두 가지 방법이 있다.

1) ring down count법 : 이 방법은 어떤 주어진 문턱값 이상의 진폭을 가지는 파의 개수를 헤아리는 방법

2) 펄스 면적 측정법 : 이 방법은 어떤 주어진 문턱값 이상의 파의 높이를 네 구간으로 나

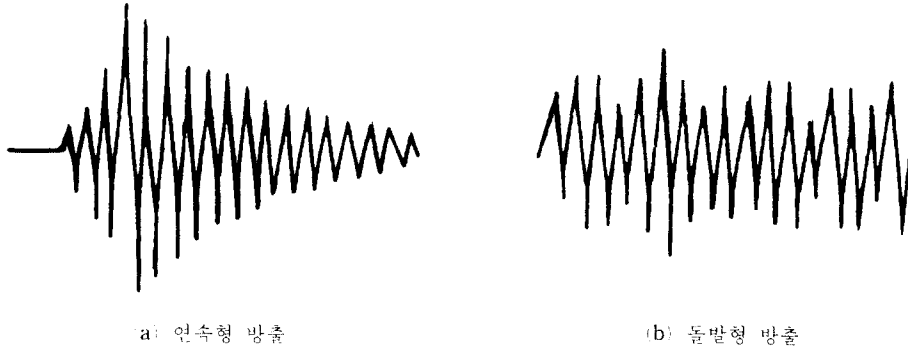


그림 1 AE 신호형태

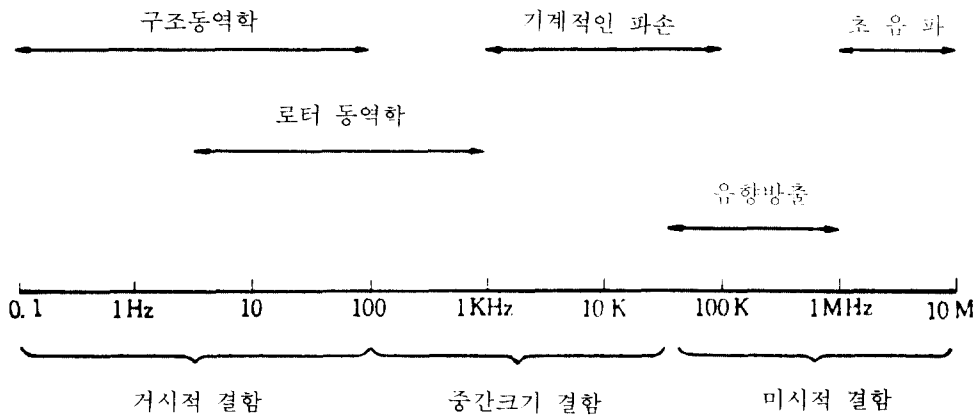


그림 2 주파수 범위

누어서 파에 내접하는 4각형의 면적의 합을 AE 수로 계산하는 방법

이 두 방법 중 펄스 면적 측정법이 ring down count 법에 비해 AE 곡선 아래의 면적대 카

운트수의 곡선에서 선형성이 훨씬 좋고 파 진폭의 크기를 고려하고 있으므로 AE 수 측정법으로 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.

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

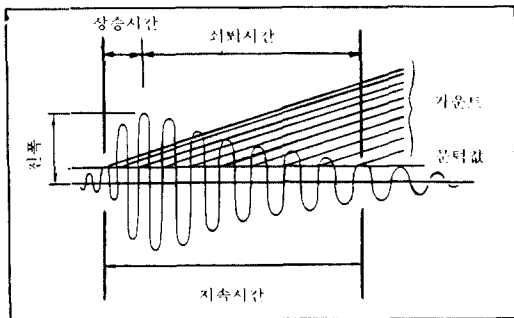
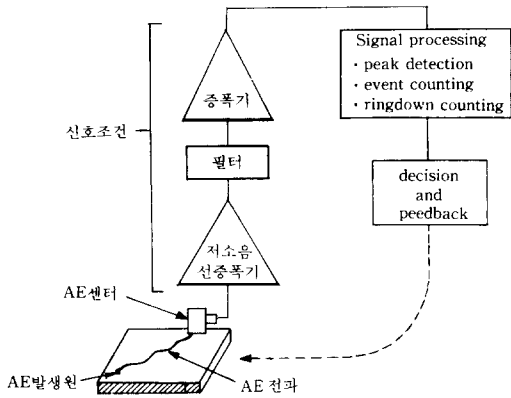
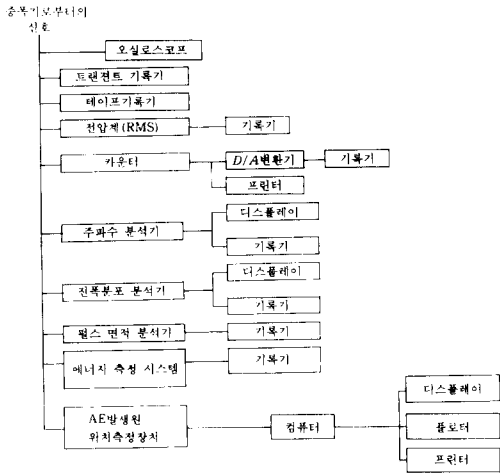


그림 3 파형 매개변수의 정의



(a) AE 기본 블록 다이어그램



(b) 신호처리 단위  
그림 4

그림 4(a)는 AE 해석을 위한 기본 블록 다이어그램을 표시하고 있으며 그림 4(b)는 신호 처리 단위들을 보여 주고 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 동안은 AE 발생이 미소하였다가 172기압 이상으로 기압을 증가시키니까 새로이 AE

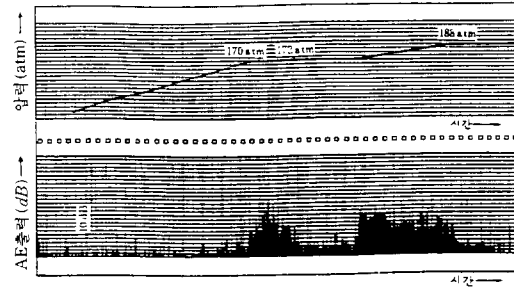


그림 5 Kaiser 효과

가 많이 발생하였다는 것을 보여 주고 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 측정 장비가 개발되어 오늘에 이르고 있다.

### 3. 재료의 파괴 인성치 측정<sup>(2,3)</sup>

DCB 시편으로 열경화성 Gr/Ep 복합재료와 열가소성 APC-2 복합재료의 모드 I 파괴인성치  $G_{IC}$ 를 찾기 위해 ASTM<sup>(4)</sup>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.

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

여기서  $k$ 와  $a$ 는 실험 상수이다. 식 (3)을 변형하여 식 (5)와 같이 표현한다.

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

여기서  $\delta$ 는 하중선 변위이다.

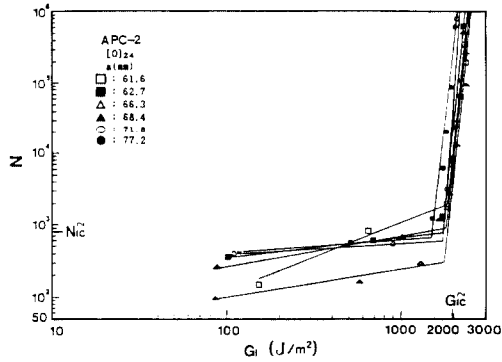


그림 6 APC-2 복합재에 대한 총 AE 수(N)와 에너지 해방률( $G_I$ )과의 관계

그림 6에서 하중 증가에 따른 AE 누계수 N의 증가를 열가소성 APC-2 복합 재료를 예로 들어 보여주고 있다. AE수의 급격한 상승이 일어나는  $G_I$ 값에서 균열진전이 시작되었다고 볼 수 있다. 표 1은 이러한 방법으로 측정된  $G_{IC}$ 값을 ASTM 방법에 의한  $G_{IC}$  값과 비교하고 있다.  $G_{IC}$  값이  $G_{IC}$ 에 비해 약 20% 작은 값을 보이고 있다. 위와 같은 방법을 금속재료에 적용할 때에도 좋은 결과를 얻을 수 있다는 것을 알루미늄 합금재료를 예로 보이고자 한다.

알루미늄 합금재료 된 콤팩트 인장 표준 시편으로부터 AE 방법에 의해 모드 I 파괴 인성치  $J_{IC}$ 값을 찾기 위하여 식 (6)과 같이 J식을 사용한다.

표 1 ASTM 시험법 및 AE 시험법과 평균  $G_{IC}$  값과의 비교

재료	적용방법	ASTM시험법 $G_{IC}(J/m^2)$	AE시험법 $G_{IC}(J/m^2)$
Gr/E <sub>p</sub>	[0 <sub>2</sub> /90 <sub>8</sub> /0 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	184.5	148.8
	[0 <sub>4</sub> /90 <sub>4</sub> /0 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>	193.6	173.8
	[0] <sub>24</sub>	224.2	185.0
APC-2	[0 <sub>2</sub> /90 <sub>8</sub> /0 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	1711.4	1548.8
	[0 <sub>4</sub> /90 <sub>4</sub> /0 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>	1835.6	1673.8
	[0] <sub>24</sub>	2170.4	1950.3

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

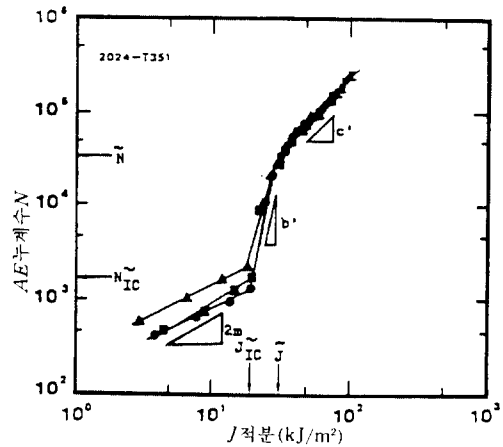
$$\eta_i = 2 \cdot \frac{1 + \alpha}{1 + \alpha^2}$$

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

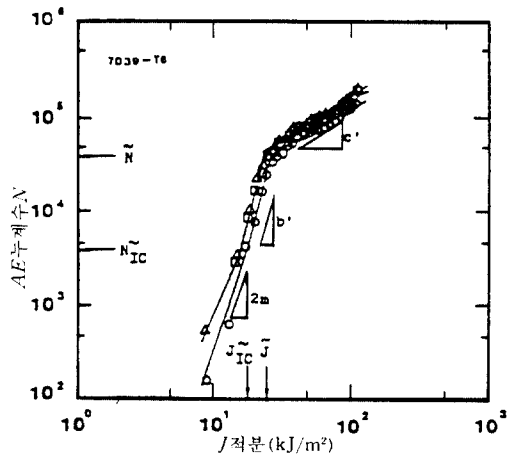
$$b_i = W - a_i$$

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

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



(a) Al 2024-T351



(b) Al 7039-T6

그림 7 AE 누계수(N)대 J-분

표 2 파괴인성치

재료	$J_{IC}$ (KJ/m <sup>2</sup> )	$J_{IC}$ (KJ/m <sup>2</sup> )	error* (%)
Al 2024 -T351	21.84	18.22	16.6
Al 7039 -T6	17.94	15.57	13.2

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

여기서  $P$ 는 하중,  $\delta$ 는 하중선 변위,  $a$ 는 균열길이,  $W$ 는 시편폭,  $B$ 는 시편두께이고, 하첨자  $i$ 는 각각의 부분 하중(unloading) 단계를 뜻한다.

이렇게 계산된  $J$ -적분값에 해당하는 하중점에서의  $AH$  누계수  $N$ 을  $J$ -적분값에 대해 그리면 그림 7(a),(b)와 같다. 그림 7(a),(b)에서  $\dot{N}_{IC}$  이후  $AE$  발생수가 급격하게 증가하는 사실로부터,  $\dot{N}_{IC}$  이전까지는 균열 선단의 소성 변형에 의한 균열둔화(blunting)에 의해  $AE$ 가 발생하다가  $\dot{N}_{IC}$ 에서 균열진전이 시작되었다고 볼 수 있다.

표 2에서 보는 바와 같이 ASTM 방법에 의

한  $J_{IC}$ 보다  $AE$  방법에 의한  $J_{IC}$ 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 ASTM 법이 거시적 변형에 의한 균열진전에 따른 파괴인성치를 주는 반면  $AE$  법은 미시적 변형에 의한 균열진전에 따른 파괴인성치를 주기 때문이다.

#### 4. 열가소성 복합재(APC-2)의 균열 거동에 대한 AE 특성<sup>(5)</sup>

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. 시편의 적층방법은  $[0]_{24}$ (A시편),  $[+45/-45_2/O_6/-45_2/+45]_s$ (B시편)으로 한다. 그림 9는 정하중 하에서 실험결과로서 A시편의  $G_{IC}$ 가 B시편의  $G_{IC}$ 보다 큰 것을 알 수 있다. 또 A시편은 계속적으로 자가(self-similar) 균열 진전을 하고 있으나 B시편은 어

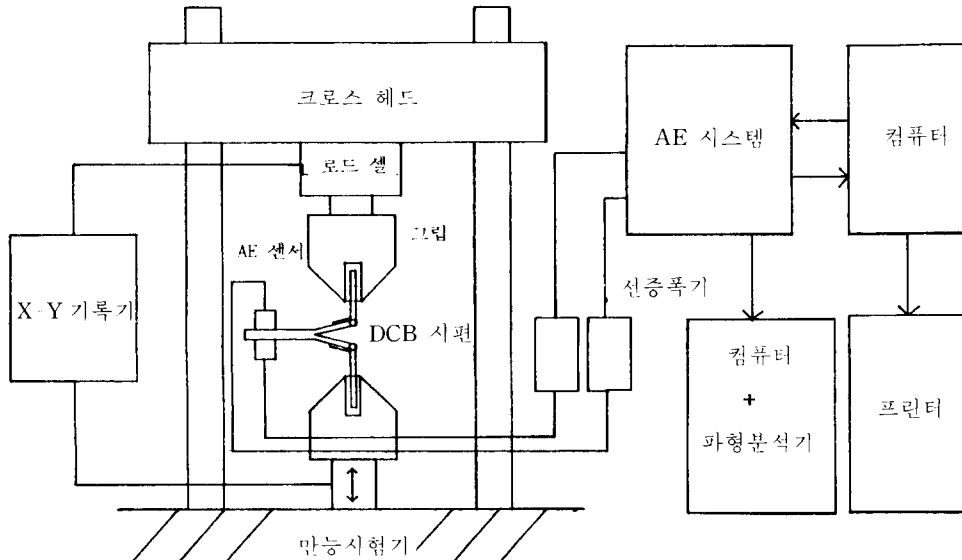


그림 8 시험계

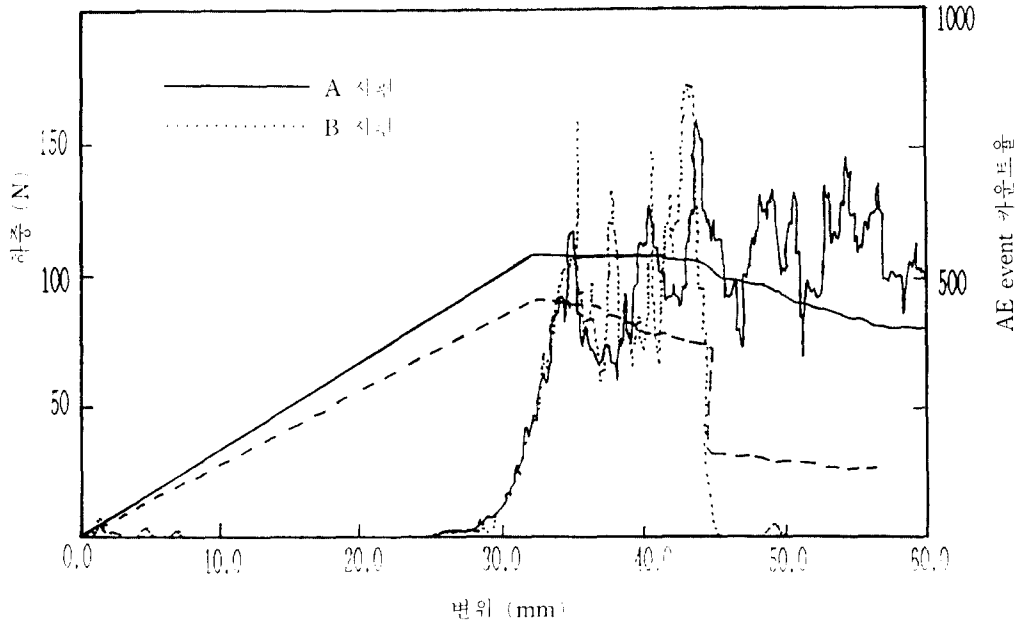


그림 9 하중-변위-AE event 카운트를 곡선

는 정도까지는 자가균열진전을 하나 섬유엉킴으로 균열진전이 방해되었다가 갑자기 섬유엉킴이 풀림으로써 갑작스런 균열 진전이 발생하였음을 알 수 있다. 자가균열진전이 일어나는 영역에서는 A시편보다 B시편이 더 많은 AE를 발생하고 있다.

그림 10은 피로 하중에서 B시편이 A시편보다 더 많은 AE를 발생하고 있으며 사이클수의 증가에 따라 AE발생이 감소하고 있음을 알 수 있다. B시편이 A시편보다 더 많이 AE를 발

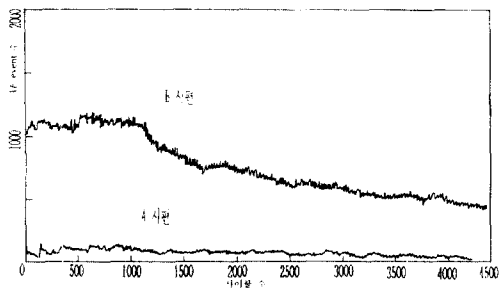


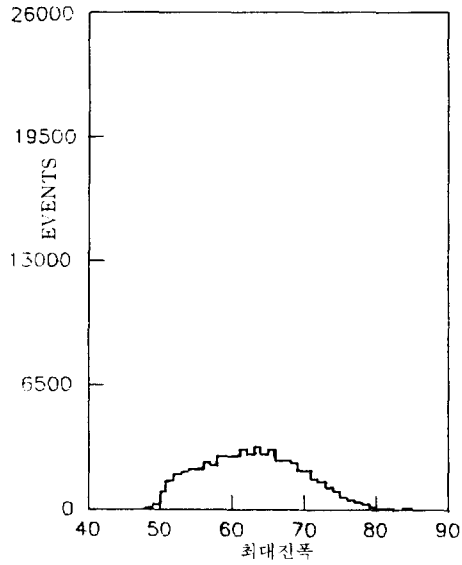
그림10 사이클 수와 AE event와의 관계

생하는 것은 B시편에서 섬유엉킴이 발생하기 때문이며 사이클수에 따른 AE 발생의 감소는 변위 제어 모드에 기인한다.

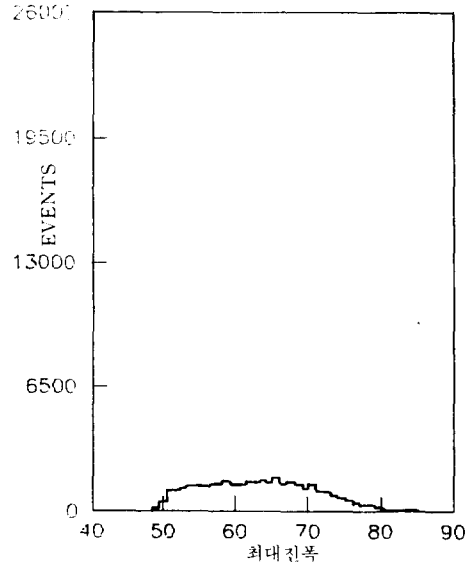
그림 11는 최대 진폭의 분포를 보이는 것으로 정하중에서는 50dB~85dB의 넓은 분포를 보이나 피로 하중에서는 55dB의 최대 진폭이 지배적으로 발생함을 보인다.

그림 12는 섬유엉킴으로 인한 마찰만 발생하고 균열진전을 억제하는 상태로 피로 하중을 주었을 때 최대 진폭 분포이다. 그림 12 (a)에서 event발생이 시간에 따라 일정하게 발생하여 단지 섬유끼리의 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 섬유엉킴에 의한 섬유끼리의 마찰에 의해 발생한 AE가 지배적임을 알 수 있다.

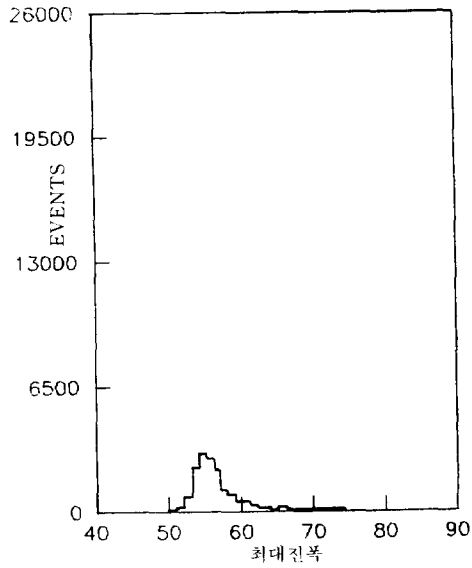
그림 13 (a)은 프리프레그 1장을 사용하여 모재만의 파괴를 일으키게 하기 위해 모드 III 하중을 주어 섬유방향으로 균열을 진전 시켰을



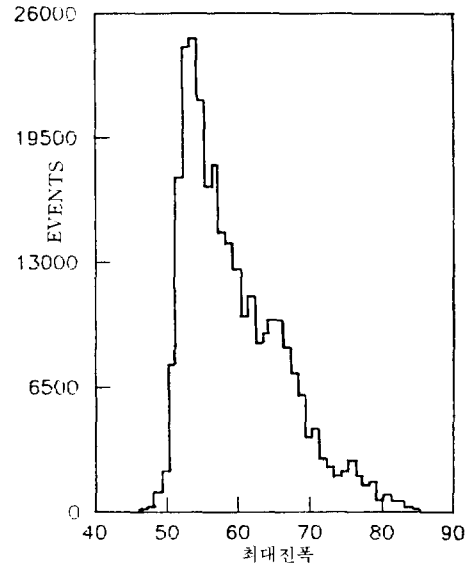
(a) 정하중 하에서 A시편



(b) 정하중 하에서 B시편



(c) 피로하중 하에서 A시편

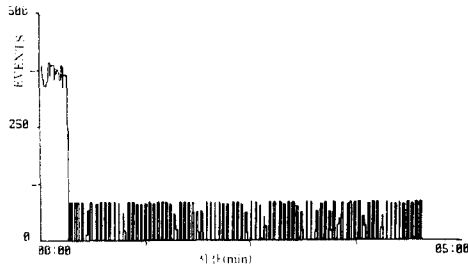


(d) 피로하중 하에서 B시편

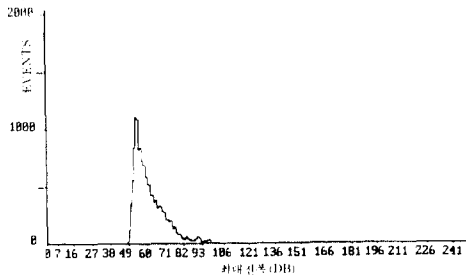
그림11 Events 대 최대진폭 분포

때 주파수 특성을 보여주고 있으며, 그림 13(b)는 섬유와 파괴를 일으키게 하기 위해 프리프레그 1장을 섬유방향과 수직방향으로 굽힘을 주어 프리프레그가 깨졌을 때 나타난 주

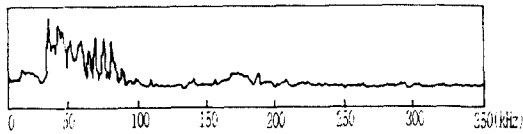
파수 특성이다. 그림 13(a)에서 45~100 KHz, 그림 13(b)에서 210~260KHz에서 큰 에너지를 가진 AE파가 나타났음을 알 수 있다.



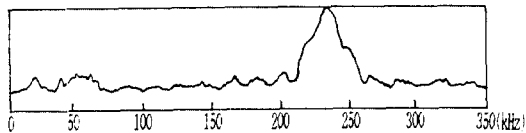
(a) event 대 시간분포



(b) event 대 최대진폭의 분포  
그림12 섬유마찰에 대한 응답 그래프

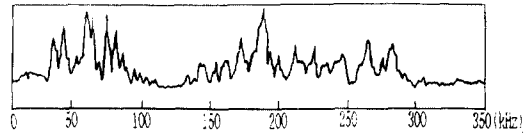


(a) 모드 III 하중에 의한 기지파괴

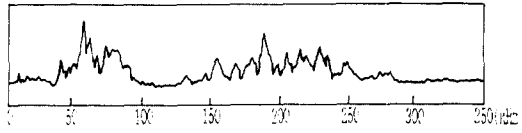


(b) 굽힘 하중에 의한 기지와 섬유파괴  
그림13 프리프레그의 에너지 스펙트럼

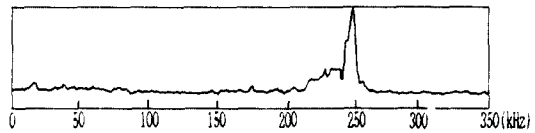
그림 14(a)는 정하중 하에서 A시편의 주파수 특성을 보이는 것으로 그림 13의 결과로 미루어 보아 45~100KHz의 주파수는 모재의 파괴로 인한 것이고 150~300KHz의 주파수는 섬유이탈과 섬유파괴로 인한 것으로 풀이된다. 그림 14(b)는 정하중 하에서 B시편의 주파수 특성을 보이는 것으로 역시 45~100KHz의 주파수는 모재파괴로 인한 것이고 150~300KHz



(a) A시편



(b) B시편



(c) C시편

그림14 정하중 하에서 에너지 스펙트럼

는 섬유 끼리의 마찰, 섬유이탈, 섬유파괴로 인한 것으로 풀이된다.

정하중 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<sup>(6,7)</sup>

최근에 이르러 사이클에 따른 AE수 증가율(cumulative AE count rate)과 피로 균열 성장률과의 상관 관계를 찾고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 대한 대부분의 논문은 Dunegan 가정, 즉 AE 누계수는 균열 선단 소성역 크기에 비례한다는 가정에 근거를 두고 있다. 이러한 가정에 대한 배경은 Dunegan 등이 N50A 베릴륨과 알루미늄 7075-T6 합금에 대해 균열이 없는 인장시험편을 갖고 인장 시험을 하여 AE 누계수를 측정된 결과, 시험편의 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.

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

여기서  $N$ 은 AE 누계수,  $n$ 은 사이클 수이고  $dN/dn$ 은 AE수 증가율이라고 부르며  $da/dn$ 은 균열성장률,  $K_{max}$ 는 최대하중 하에서 응력세기계수(stress intensity factor),  $A$ 는 실험상수이다. 한편 AE 수 증가율은 응력세기 계수 범위(stress intensity factor range)  $\Delta K$ 와 Paris법칙 형태인 식 (8)과 같은 실험식으로 표현된다.

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

여기서  $D, M$ 는 실험상수이다. 그러나 균열 소성역이 커지면 위와 같이 응력세기계수를 적용할 수 없으며, 균열 소성역이 크더라도 적용할 수 있는 새로운 매개변수(예를 들면  $J$ )를 도입하여야 한다. 일 예로서 KS SS41 이란 구조용 강으로 만들어진 콤팩트 인장 시편을 가지고 저주기 피로시험한 결과를 중심으로 설명하기로 한다.

피로 하중 작용방법은 하중조절조건(load control condition)이 사용된다. 하중 범위는 균열선단 소성변형을 크게 일어나게 하기 위하여 330~3300Kgf 하중 범위로 하여  $1 \times 10^4$  사이클 이전에 파괴가 일어나도록 한다.  $J$ 적분 범위인  $\Delta J$ 는 식 (9)와 같은 콤팩트 인장 시편 식을 사용한다.

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

식(9)에서

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

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

$$\frac{2a}{b} = \frac{2a}{W-a} \quad (10)$$

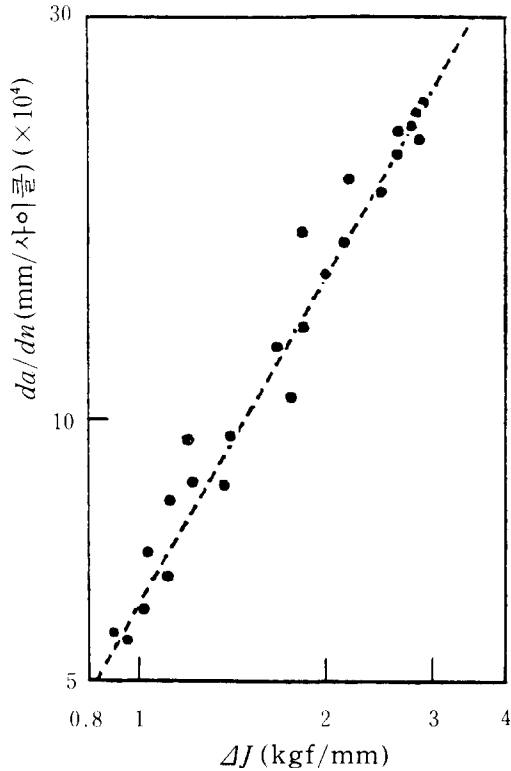


그림15 균열 성장률 대  $\Delta J$  본보

여기서,  $s$ 는 Dowling 등이 정의하는 하중과 하중점 변위 선도상의 면적이다.

그림 15는 균열성장률과  $\Delta J$ 의 관계를 보이고 있다. 점선은 곡선맞춤선(curve fitted line)이다. 이들 그림에서 보듯이 균열성장률은  $\Delta J$ 에 대하여 Dowling 등이 제안한 잘 알려진 식 (11)로 표현됨을 알 수 있다.

$$da/dn \propto (\Delta J)^m \quad (11)$$

여기서  $a$ 와  $\Delta J$ 의 단위를 각각 mm, Kgf/mm로 나타낼 때 실험상수  $m$ 은 1.287로 얻어졌다.

AE 수 변화율(AE count rate)을  $\Delta J$ 에 대하여 표시하면 그림 16과 같고 이 그림으로부터  $dN/dn$ 과  $\Delta J$ 의 실험식을 식 (12)와 같이 표현한다.

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

여기서,  $\Delta J$ 의 단위는 Kgf/mm로 나타낼 때

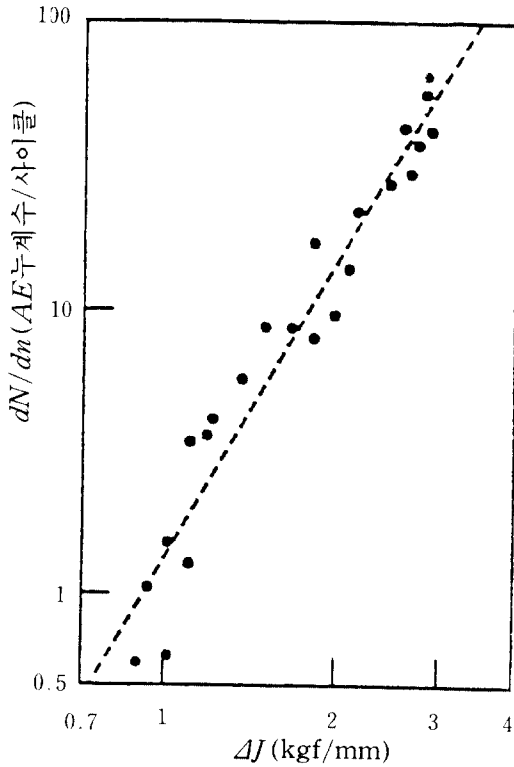


그림16 AE 카운트를 대  $\Delta J$  분포

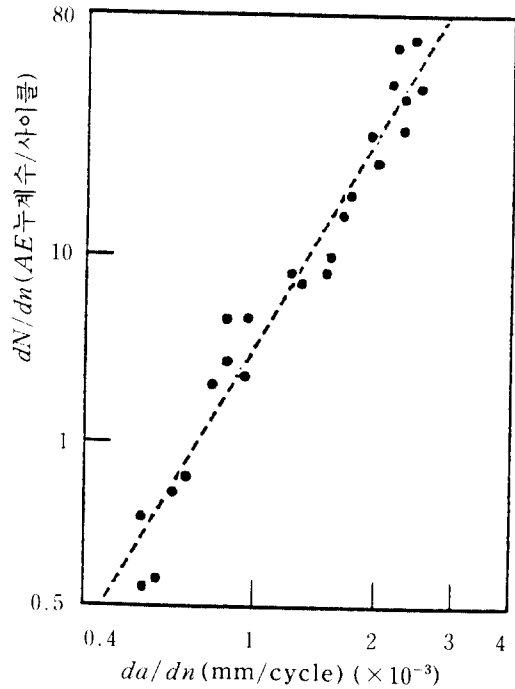


그림17 음향 방출률 대  $\Delta J$  분포

실험상수  $m'$ 은 3.611로 얻어진다.

식 (11)과 식 (12)로부터 식 (13)이 얻어진다.

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

여기서  $a$ 의 단위를 mm로 나타낼 때 실험상수  $\beta$ 는 실험결과로부터 2.783으로 얻어진다. 식 (13)에 대한 관련 그림을 그림 17에서 보여주고 있다.

$dN/dn$ 과  $\Delta J$ 의 관계와  $da/dn$ 과  $dN/dn$ 의 관계를 이론적으로 유도하기 위해 식 (14)와 같이 AE 수와 균열선단 소성역 체적  $V_p$ 의 관계에 대한 Kunegan의 가정을 사용한다.

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

피로인 경우에 식 (14)를 다음과 같이 표현한다.

여기서,

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

$r_p$ 는 피로 하중하에 있는 균열선단의 원형 소성역 반경이고,  $a_0$ 는 초기 균열 길이이다.

식 (16)을 식 (15)에 대입하면

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

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

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

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)을 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  $\beta$ 오차는 약 36.1%이다.

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

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

## 6. 맺음말

이 글에서 현재 여러 학문분야에서 다양하게 응용되고 있는 음향방출법에 대해 기본적인 소개를 하고 복합재료와 금속재료의 균열 거동 해석에도 훌륭히 적용할 수 있음을 몇 가지 예로 제시하였다. 이 음향방출법은 아직도 응용분야를 넓혀가고 있으며 차차로 산업체에서도 적용할 예를 제시하는 시점에 와 있다. 그러나 아직도 우리 나라에서는 이 방법의 우수성에 대해 아는 바가 미약한 실정임에 이 글을 원고를 통하여 조금이라도 도움이 되길 바란다. 특히 복합재료에 이 방법을 적용함으로써 복합재료의 물성치뿐만 아니라 변형 및 파괴 기구를 이해하는데 크게 도움을 주고 있으며 그 결과로 새로운 복합재료 개발에 일조를 하고 있다.

앞으로 우리 나라도 본격적인 항공기 산업시대가 오면 복합재료에 대한 연구가 활성화될 것이고 그와 동반해서 음향방출법에 대한 인식이 새로이 될 것으로 기대한다. 이를 위해 음향방출법에 의한 복합재료 구조물의 손상해석 기법이 개발되어야 할 것으로 생각한다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이강용, 1990, "선형파괴역학개론," 동명사.
- (2) 이강용, 권순만, 1991, "복합재료의 층간 파괴인성", 대한기계학회 논문집, 제15권, 제5호, pp. 1479~1485.
- (3) 이강용, 백충현, 1989, "음향방출법에 의한 파괴인성치 측정 및 파괴 안정성 평가를 위한 연구," 대한기계학회 논문집, 제13권, 제1호, pp. 96~104.
- (4) ASTM D30.02 Round Robin, 1985, "Test Procedure for the Double Cantilever Beam (DCB) Test."
- (5) 이강용, 손태익, 1991, "모드 I 하중하에서 열가소성 복합재의 AE 특성," 한국 복합재료 학회, 추계 학술 대회.
- (6) 이강용, 김형규, 1986, "피로균열성장률과 사이클당 AE수 증가율간의 상호관계," 대한조선학회지(논문), 제23권, 제3호, pp.17~26.
- (7) Lee, K. Y., 1989, "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. 