

# 복합재료의 열-음향방출거동

김영복\*, 우성충\*\*, 최낙삼\*\*

## Thermo-Acoustic Emission Behavior of Composites

Y.B.Kim\*, S.C.Woo\*\*, N.S.Choi\*\*

**Key Words:** Thermo-acoustic emission, Composite laminates, Thermal cycles, AE sources

**Abstract** Thermo-acoustic emission (AE) from composite laminates under the repetitive thermal cyclic loads have been quantitatively analyzed in consideration of AE source mechanisms. The repetitive thermal load brought about a large reduction, i.e. an exponential decrease in AE total ringdown counts and AE amplitudes. It was thought that generation of thermo-AE during the first thermal cycle was not caused by crack propagation but by secondary microfracturing due to abrasive contact between crack surfaces.

### 1. 서 론

음향방출 비파괴검사법(AE nondestructive inspection)은 기계적 응력에 의해 야기되는 손상 발생기구를 비파괴적으로 검출할 수 있으므로, 토목 건축 구조물, 항공 우주 구조물, 기계구조물, 생산공정에 대한 안전성과 신뢰성의 실시간 평가뿐만 아니라 신소재복합재료의 평가[1,2]에도 적용되어 왔다. 복합재료의 경우에는, 기계적으로 무부하상태에서도 열하중을 주면 열-음향 방출과가 발생하므로, 이를 해석하여 복합재료에 이미 존재하는 결함이나 손상의 정도를 파악 가능하다고 보고된 바 있다[3]. 그렇지만, 이들 연구에서는 열-음향방출거동의 발생원인에 대한 해명이 미흡하여 내부 손상의 정량적 분류에는 한계를 보여주었다.

저자[4,5]는 최근 복합 적층판을 저온 냉각하여 재료 내부에 열적 손상을 주고, 상기의 열-음향 방출법이 결함이나 손상의 정도를 나타낼 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 반복 열부하 사이클 시에 열-음향방출 신호의 카이저 효과(Kaiser effects)를 정량적으로 해석하고자 한다.

### 2. 실험

#### 2.1 복합재료

본 연구에 사용된 복합적층판 시험편은 한국 화이버(주)의 두께가 0.125mm인 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그로 제작되었다. 복합적층판은 CFRP 프리프레그 24장을 [+90°/0°]<sub>s</sub>, [+45°/-45°]<sub>s</sub>으로 적층하여 진공백 성형(vacuum bag molding)공법을 이용하여 예열온도(pre-curing temperature)

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과  
\*\* 한양대학교 대학원 기계설계학과, 발표자  
\*\*\* 한양대학교 기계 정보경영공학부

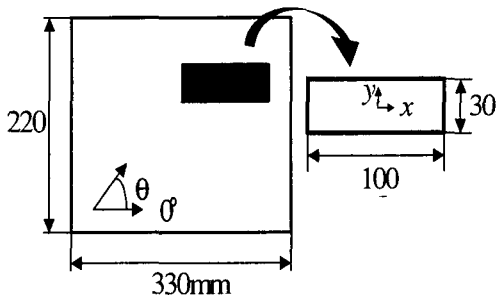


Fig.1 Specimen preparation

135°C에서 1시간, 경화온도(curing temperature) 175°C에서 30분의 조건으로 오토클레이브에서 성형하였다. 이 적층판을 Fig.1과 같이 x-방향 길이 100mm, y-방향 폭 30mm, z-방향 두께 3mm로 정밀절단하여 시험편을 만들었다. 냉각박스 안에 액체질소를 충분히 넣은 다음, 시험편을 일시에 투입함으로써 저온냉각에 의한 내부 손상을 유발시켰다.

## 2.2 초음파 C스캔 및 현미경 관찰

초음파 C-스캔에 의해 저온냉각시험편의 내부 손상의 분포에 관한 전체적 이미지를 관찰하였다. 시험편을 수조에 넣고 저면에코의 진폭을 시험편 전체면에 걸쳐서 C-스캔함으로써, 시험편 내부의 균열과 층간분리를 2차원적 이미지로 검출하였다. 이때, 15MHz의 종파를 발진하는 집속형(focussing type) 탐촉자를 이용하였고 주사간격은 0.085mm, 초점면의 크기는 약 0.1mm였다. 초음파 C-스캔 결과 저온냉각 시험편내에 손상이 발생한 부위를 연마지로 고르게 연마하고 다이아몬드 혼합액(입자크기1mm)으로 절단면의 평면연마 및 폴리싱을 했다. 이렇게 가공한 시험편의 표면에 나타난 미세손상을 반사식 광학현미경으로 관찰하였다.

## 2.3 열부하사이클 실험 및 음향방출 측정

가열-냉각중의 thermo-AE 거동을 연구하기 위해 위와 같은 처리를 한 복합재료를 Fig. 2와 같이 석영관내에 배치하고 이 석영관을 전기로(furnace)속에 설치하였다. 시험편에서 발생하는 AE신호는 진공그리스를 통해 도파봉에 전달

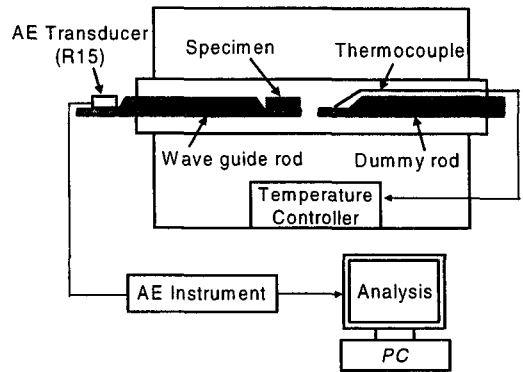


Fig.2 Schematic diagram of thermo-AE experimental systems

되어 도파봉의 바깥쪽 끝에 설치된 AE센서(R15 센서: 감지주파수 대역70~560kHz, 공진주파수 150kHz)에 의해 감지되었다. thermo-AE 신호의 측정 및 분석은 PAC사의 MISTRAS 시스템과 MI-TRA 프로그램을 이용하였으며 측정 데이터로는 AE사상수(hits), AE링다운카운트(ringdown counts)수, AE진폭분포(amplitude distribution), AE 파형(time-amplitude signal) 등이다. 전기로 내의 열사이클 조건으로는 상온(23°C)으로부터 최고온도까지 평균가열속도 약 5°C/min로 상승시킨 후 상온까지 냉각시켰으며 냉각시간은 대략 1시간 30분 정도가 소요되었다. 가열시의 최고온도는 160°C, 120°C, 100°C의 3종류로 하였다. 위의 열부하사이클을 2차, 3차로 반복하여 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 저온냉각에 의한 손상발생기구

Fig.3는 저온 냉각과정을 거친 [+90/0<sub>0</sub>]<sub>s</sub> 시험편의 초음파 C스캔 이미지이다. 그림에서 어두운 부분으로 나타난 이미지는 균열이나 층간분리(delaminations)현상으로 인한 파손이 시험 내부에서 발생하였음을 나타낸다. Fig.4는 위 시험편의 단면부에서 y-z면을 관찰한 광학현미경 사진이다. +90°층과 0°층의 경계층으로부터 시작된 층간분리로부터 0°층의 내부로 손상이 진전하였으며 동시에 0°층내에서 횡단형 균열(transverse cracks)도 일어났음을 보여준다. 이와 같은 큰 균

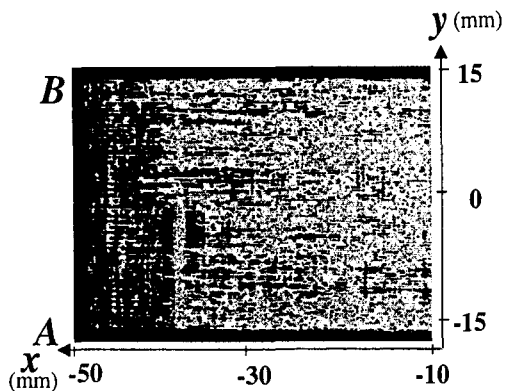


Fig.3 Ultrasonic C-scan image of a cryogenically-treated [+90°/0°]<sub>s</sub> specimen

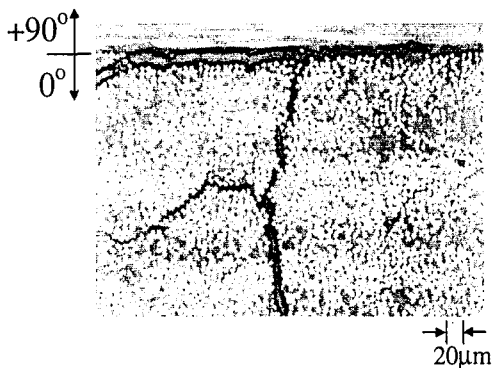


Fig.4 Microscopic observation of the y-z cross section of a [+90°/0°]<sub>s</sub> specimen

열이 진전중에는 섬유파단(fiber. breakage)이 발생했을 가능성이 크며 이때에는 높은 강도의 AE가 발생하였을 것이다. 이러한 균열면은 가열-냉각의 열부하가 주어지면, 섬유(fiber)와 모재(matrix)사이의 열변형 차이로 인해 균열면간의 마찰(friction), 마모(abrasion)를 일으키고 모재에서 2차적인 국부 균열(secondary microfracture)을 유발할 수 있을 것이다. [+45°/-45°]<sub>s</sub> 시험편의 경우에도 저온 냉각처리에 의해서 시험편의 구석부에서 층간분리가 발생하였고 내부층(core layer)에서는 횡단형 균열이 많이 발생하였다.

### 3.2 열부하중의 음향방출거동

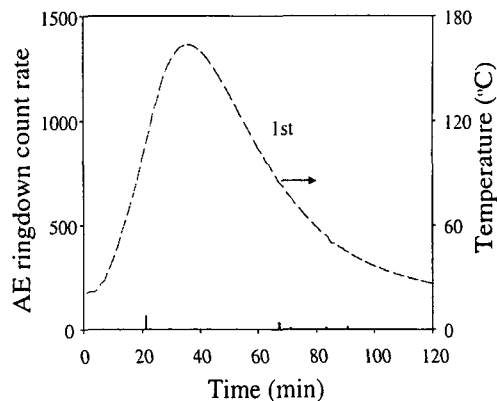


Fig.5 Behavior of AE ringdown count rate for an as-moulded [+90°/0°]<sub>s</sub> specimen

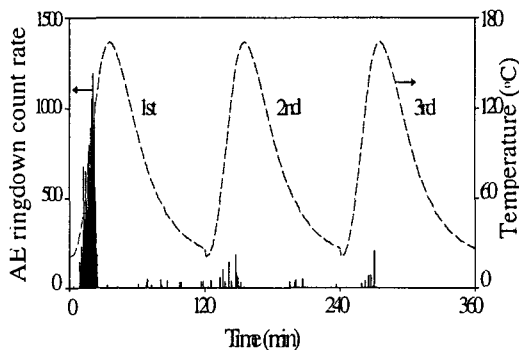


Fig.6 Behavior of AE ringdown count rate for a cryogenically treated [+90°/0°]<sub>s</sub> specimen during the repetitive thermal load cycles

저온냉각을 받지 않은 [+90°/0°]<sub>s</sub> 시험편에서의 AE링다운카운트를 거동은 Fig.5에서와 같이 미약하게 발생하였지만, 저온냉각처리한 시험편에서는, Fig.6에서와 같이 1차 열부하사이클의 가열과정중에 100°C 근처에서 AE신호 발생빈도가 아주 컸으며 135°C 근처에서 급감하고 157°C 이상에서는 AE신호의 발생이 관찰되지 않았다. 이와 같은 열부하중의 AE거동은 [+45°/-45°]<sub>s</sub> 시험편에서도 유사하게 관찰되었다. 이는 AE발생원에 해당하는 결함이나 손상이 시험편 내부에 많았으며, 가열온도의 수준에 따라 내부 열응력의 변화가 변형거동의 변동을 일으키게 되어 AE신호의 발생률에 큰 차이를 주었음을 의미한다.

### 3.3 반복 열부하사이클시의 카이저 효과

Fig.6에서 볼 수 있듯이, 1차 가열-냉각 열부하사이클과 비교하여 2차 열사이클에서는 AE링다운 카운트율이 급격히 감소하였으며, 3차 열사이클에서는 아주 저조하였다. 이는 thermo-AE의 카이저효과를 나타내고 있는 것이다. 본 복합재료에서는 시험온도에 따라 층별로 열변형의 크기가 다른 상태에 있는데, 가열/냉각과정을 반복함에 따라 AE가 급격히 감소하는 거동은 첫째, 시험편의 내부손상이 계속 진전하는 것이 아니라 정지되어 있으며 둘째, 지그재그형상의 균열 상하면의 교차이동시에 발생한 마모나 마찰이 AE 발생원에 해당한다고 생각할 수 있다.

Fig.7은 1차, 2차, 3차 열부하사이클 시에 [+90°/0°]<sub>s</sub> 시험편에서 검출한 총 링다운 카운트 수를 나타낸다. 열부하 시의 최고온도가 가장 높은 160°C의 경우에 총 링다운 카운트 수는 가장 많이 검출되었고, 최고온도가 120°C, 100°C로 낮아질수록 총 링다운 카운트 수는 적어졌다. 어느 최고온도의 경우에도 제1차 가열-냉각 열사이클 과정 중에 발생한 총 링다운 카운트 수는 제2차 열사이클에서 급격히 감소하였고 제3차 열사이클에서도 추가로 감소하는 경향을 보였다. 이

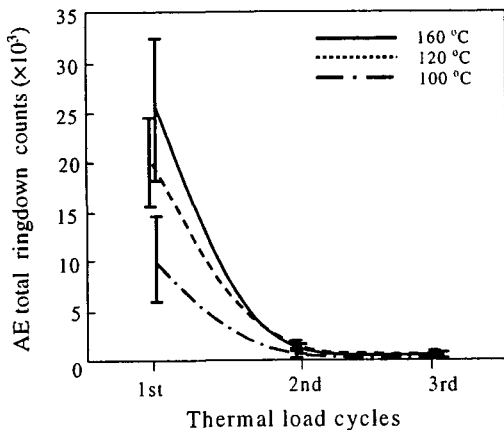


Fig.7 Reduction features of AE total ringdown counts from cryogenically treated [+90°/0°]<sub>s</sub> specimens during the repetitive thermal load cycles

Table 1 Average values of  $\alpha$  and  $N$  obtained for [+90°/0°]<sub>s</sub> and [+45°/-45°]<sub>s</sub> specimens

Maximum temperature		160 °C	120 °C	100 °C
[+90°/0°] <sub>s</sub>	$N_1$	25600	20100	9500
	$\alpha$	1.62	1.50	1.47
[+45°/-45°] <sub>s</sub>	$N_1$	24200	15700	5100
	$\alpha$	1.54	1.29	1.06

와 같은 총 링다운 카운트 수  $N$ 의 감소 거동은 반복 열부하 사이클 시의 카이저 효과를 나타내고 있다고 볼 수 있는데, 이를 다음식과 같은 지수함수로 표현할 수 있을 것이다.

$$N = N_1 \exp(-a(n-1)) \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 열부하 사이클의 차수(1차, 2차, 3차)를 나타내며,  $a$ 는 차수  $n$ 의 증가에 따른 총 링다운 카운트 수의 지수함수적 감소율을 나타내며,  $N_1$ 은 제1차 열부하 사이클에서 검출된 총 링다운 카운트수를 나타낸다.

Table 1에 보인 바와 같이 최고온도가 높은 열부하 과정일수록  $N_1$ 값이 커졌으며, 이와 함께  $a$ 값도 커졌다.  $N_1$ 과  $a$ 값의 거동은 시험편 종류에 따라 달랐지만, [+90°/0°]<sub>s</sub> 시험편에서 큰 값을 보였다. 즉, 최고온도가 높은 경우일수록  $a$ 값이 커져서 특히 2차 열사이클에서  $N$ 값의 급격한 감소가 나타난 것이다. 금속재료의 경우와는 달리 복합재료에서는, 한번 부하한 후 제하하고 다시 부하할 경우, 이전에 받은 최대하중보다 낮은 하중 수준에서 AE의 발생이 시작하므로 카이저효과를 펄리티티 비율(falicity ratio)로써 평가하고 있다. 본 연구에서 최고온도는 최대응력의 수준에 대응하므로, 열부하사이클의 반복에 따른 파라미터  $a$ 값이 커질수록 펄리티티 비율이 크게 됨을 의미한다고 생각된다.

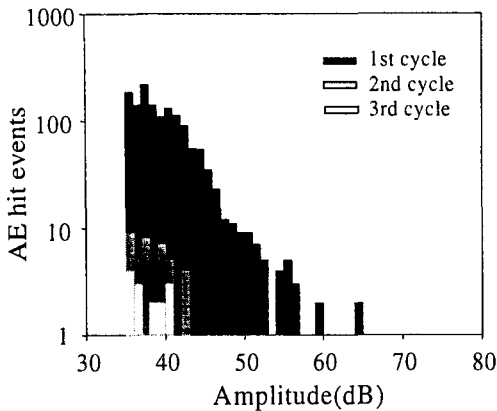


Fig.8 AE amplitude distributions during the repetitive thermal load cycles

Fig.8은 최고온도 160℃의 열부하사이클에서 검출한 [+90<sub>6</sub>/0<sub>6</sub>]<sub>s</sub> 시험편의 AE사상(hits events) 별 진폭분포를 나타낸다. 본 열부하사이클에서 검출한 AE 진폭값은 1차 열부하 사이클과 비교하여 2차 열부하 사이클에서 급격한 저하가 발생하였는데, 이는 AE 진폭의 크기가 총 링다운 카운트 수  $N$ 과 거의 선형적 비례관계로 나타남을 가르킨다. 즉, 열부하 사이클이 반복됨에 따라 시험편에서는 보다 짧은 유지시간(duration time)을 가진 미소한 진폭(weak amplitude)의 AEG가 발생하였던 것이다.

위와 같이 반복 열부하 사이클에 의해서 AE 진폭과 링다운 카운트 수가 급격히 감소한다는 것은, 복합재료 시험편이 1차, 2차, 3차의 반복 열부하사이클을 받게 될 때 균열이 더 이상 진전하지 않았음을 가리킨다. 즉, 저온냉각 시에 발생한 균열이나 손상의 주변에 축적되었던 잔류 내부응력이 1차 가열/냉각 과정 중에 완화되거나 방출되어 내부응력이 변하고 또한 층간의 열변형을 불일치에 의해, Fig.4와 같은 지그재그식으로 굴곡진 균열의 상하면이 움직임으로써 서로 접촉하는 동안 AEG가 발생한 것으로 볼 수 있다. 따라서 이러한 열-음향방출(themo-AE)의 발생원(source)은 1차 열부하 사이클을 받을 때 굴곡진 균열면 사이의 접촉에 의한 마모(abrasion)와 마찰(friction), 또는 이에 따른 2차적 미세 손상(secondary microfracture)의 발생에 해당하는 것

으로 생각된다. 한편 2차 이후의 반복 열부하 사이클을 받는 동안에는 균열면에서의 마모나 2차적 미세 손상이 급격히 줄었고, 균열면간의 마찰적 미끄러짐(frictional sliding)이 일어남으로써 미약한 AEG가 적은 사상수로 발생했던 것으로 생각된다

#### 4. 결론

저온 냉각한 [+90<sub>6</sub>/0<sub>6</sub>]<sub>s</sub> 및 [+45<sub>6</sub>/-45<sub>6</sub>]<sub>s</sub> 복합 적층판에 반복 열부하사이클을 부여하여 열-음향 방출(thermo-AE)신호의 카이저효과(Kaiser effects)를 정량적으로 분석하고 이 거동을 음향 방출의 발생원인과 관련시켜 해명하였다. 열-음향방출 거동은 시험편의 종류 및 열부하 시의 최고온도에 따라 다른 특성을 보였으며, 열부하사이클을 반복함에 따라 음향 방출의 총 링다운 카운트수 및 진폭이 급격히 감소하는 카이저 효과를 나타냈다. 또한 이 카이저 효과는 총 링다운 카운트 수의 지수함수로 표현할 수 있었다.

후 기: 본 연구는 BK21사업 및 2001년도 한국 과학재단의 지원(2000-1-30400-004-3)에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

- 참고문헌: (1) Choi,N.S. Takahashi,K. Hoshino, K., *NDT & E International*, Vol.25, No. 6, 1992, pp.271-278.
- (2) Choi,N.S. and Takahashi,K. *Journal of Materials Science*, Vol.33, 1998, pp. 2357-2363 .
- (3) Sato,N., Durauchi, T. and Damigaito,O. *Journal of Composite Materials* Vol.22, 1988, pp.447-458
- (4) Choi,N.S. and Lee,S.H. *Journal of Materials Science*, Vol.21, 2001, pp.261-268.
- (5) 김영복,민대홍,이덕보,최낙삼, 한국비파괴검사 학회지, 제21권 3호, 2001, pp.261-268 .
- (6) 이성혁, 최낙삼, 한국복합재료학회지, Vol.12, 1999, pp.28-36.
- (7) 이성혁, 최낙삼, 이정기, 한국비파괴검사학회 지, 제19권 5호, 1999, pp.347-355.