

論文

복합재료의 열-음향방출거동에 있어서의 카이저 효과

김영복*, 최낙삼**

Kaiser Effects in Thermo-Acoustic Emission Behavior of Composites

Y.B.Kim*, N.S.Choi**

ABSTRACT

Kaiser effects of 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. For the repetitive thermal cycles, a few number of weak thermo-AE events were generated due to some frictional sliding contact. Such behavior of thermo-AE showed different characteristics according to specimen kinds and the maximum temperature in the thermal load cycles.

초 록

복합적층판에 반복 열부하사이클을 부여하여 열-음향방출(thermo-AE)신호의 카이저효과(Kaiser effects)를 정량적으로 분석하고 이 거동을 음향방출의 발생원인과 관련시켜 해명하였다. 열부하사이클을 반복함에 따라 음향 방출의 총 링다운 카운트수 및 진폭이 급격히 감소하는 카이저 효과를 나타냈다. 이 카이저 효과는 총 링다운 카운트 수의 지수함수로 표현되었다. 열부하 사이클 시에 발생하는 AE는 균열진전에 의한 것이 아니라, 굴곡진 균열면간의 접촉에 의한 마모 및 2차적 미세손상의 발생과 관련되며, 2차 이후의 열부하 사이클 시에는 균열면간의 마찰적 미끄러짐으로 보다 약한 AE가 적은 사상수로 발생했던 것으로 추정되었다. 이러한 열-음향방출 거동은 시험편의 종류 및 열부하 시의 최고온도에 따라 다른 특성을 보였다.

1. 서 론

기계구조물이나 재료가 외적인 기계적 하중을 받게 될 때 발생하는 탄성파를 음향방출파(acoustic emission (AE) waves)라고 하는데, 이 AE파를 검출하여 내부 균열의 활동과 진전상태를 탐지하고 해석하는 방법을 음향방출 비파괴 검사법(AE nondestructive inspection)이라고 한다. 이 기술은 기계적 응력에 의해 야기되는 손상 발생기구를 비파괴적으로 검출할 수 있으므로, 토목 건축 구조물[1-3], 항공

우주 구조물[4], 기계구조물[5], 생산공정[6]에 대한 안전성과 신뢰성의 실시간 평가뿐만 아니라 신소재복합재료의 평가[7,8]에도 적용되어 왔다.

복합재료의 경우에는, 기계적으로 무부하상태에서도 열하중을 주면 열-음향 방출파가 발생하므로, 이를 해석하여 복합재료에 이미 존재하는 결함이나 손상의 정도를 파악 가능하다고 보고된 바 있다[9]. 그렇지만, 이들 연구에서는 열-음향방출거동의 발생원인에 대한 해명이 미흡하여 내부 손상의 정량적 분류에는 한계를 보여주었다.

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 기계 정보경영공학부, 교신저자(E-mail:nschoi@hanyang.ac.kr)

최근에 저자[10,11]는 최근 복합 적층판을 저온 냉각하여 재료 내부에 열적 손상을 주고, 상기의 열-음향 방출법이 결함이나 손상의 정도를 나타낼 수 있음을 확인하였다. 또한 현미경으로 관찰한 재료 내부의 손상부위를 음향방출 신호의 처리결과와 관련시켜서, 저온 냉각과정 및 반복 열부하 사이클에 따른 손상진전과정을 추정하였다. 본 연구에서는 반복 열부하시클 시에 열-음향방출 신호의 카이저 효과(Kaiser effects)[12]를 정량적으로 해석하고 이를 열-음향 방출의 발생 원인과 관련시켜 해명하고자 한다.

2. 실험

2.1 복합재료

본 연구에 사용된 복합적층판 시험편은 한국화이바(주)의 두께가 0.125mm인 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그로 제작되었다. 복합적층판은 CFRP 프리프레그 24장을 [+90°/0°]_s, [+45°/-45°]_s으로 적층하여 진공백 성형(vacuum bag molding)공법을 이용하여 예열온도 (precurving temperature) 135℃에서 1시간, 경화온도(curing temperature) 175℃에서 30분의 조건으로 오토클레이브에서 성형하였다. 다이아몬드휠 컷터를 이용하여 이 적층판을 Fig. 1과 같이 x-방향 길이 100mm, y-방향 폭 30mm, z-방향 두께 3mm로 정밀절단하여 시험편을 만들었다. 냉각박스 안에 액체 질소를 충분히 넣은 다음, 시험편을 일시에 투입함으로써 저온 냉각에 의한 내부 손상을 유발시켰다. 냉각온도는 액체 질소의 온도인 191℃이며 냉각유지시간을 20분으로 하였다.

2.2 초음파 C스캔 및 현미경 관찰

먼저, 초음파 C-스캔에 의해 저온냉각시험편의 내부손상

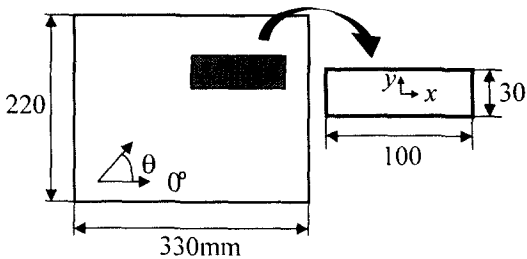


Fig. 1 Preparation of the composite specimens.

의 분포에 관한 전체적 이미지를 관찰하였다. 시험편을 수조에 넣고 초음파 초점(focussing point)을 시험편의 윗표면 바로 아래의 일정깊이에 위치하도록 하였다. 저면에코 (밀표면에서의 반사파)에 신호검출 게이트를 설정하여 저면에코의 진폭을 시험편 전체면에 걸쳐서 C-스캔함으로써, 시험편 내부의 균열과 층간분리를 2차원적 이미지로 검출 type) 탐촉자를 이용하였고 주사간격은 0.085mm, 초점면의 크기는 약 0.1mm였다. 초음파 C-스캔 결과 저온냉각 시험편내에 손상이 발생한 부위를 저속 다이아몬드 휠 절단기 (ISOMET, Buchler사)로 정밀절단하여 광학현미경 관찰용 시편을 만들었으며, 절단시에 야기된 절단면 손상부위를 연마지로 고르게 제거했다. 이 시편을 몰딩(molding)하고 다이아몬드 혼합액(입자크기1mm)으로 절단면의 평면연마 및 폴리싱을 했다. 이렇게 가공한 시편의 표면에 나타난 미세손상을 반사식 광학현미경으로 관찰하였다.

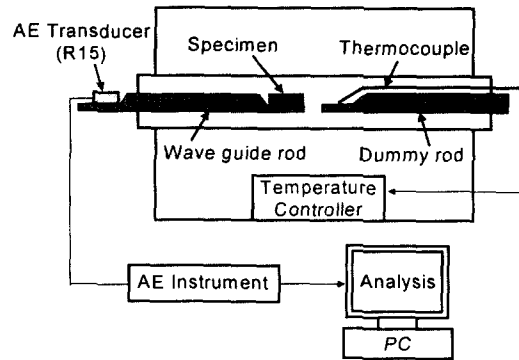


Fig. 2 Schematic diagram of thermo-AE experimental systems.

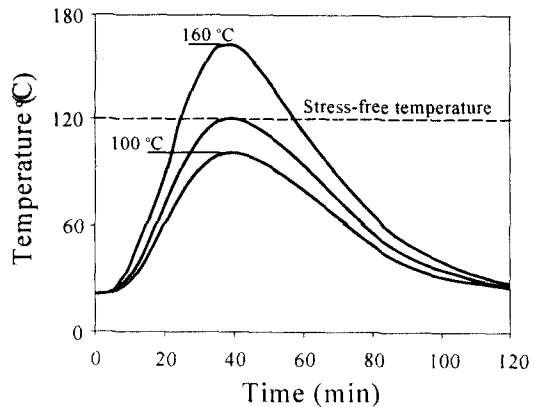


Fig. 3 Three kinds of thermal load cycle.

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. 석영관내의 온도는 모의 보(dummy rod)에 접촉된 열전대(thermo-couple)에 의해서 측정되었다. 시험편에서 발생하는 AE신호는 진공그리스를 통해 도파봉에 전달되어 도파봉의 바깥쪽 끝에 설치된 AE센서(R15센서: 감지주파수 대역 70-560kHz, 공진주파수 150kHz)에 의해 감지되었다.

thermo-AE 신호의 측정 및 분석은 PAC사의 MISTRAS 시스템과 MI-TRA 프로그램을 이용하였으며 측정 데이터로는 AE사상수(hits), AE 링다운카운트(ringdown counts)수, AE진폭분포(amplitude distribution), AE 파형(time-amplitude signal) 등이다. 전기로내의 열사이클 조건으로는 Fig. 3과 같이 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

3.1.1 손상의 발생 및 진전형태

Fig. 4는 저온 냉각과정을 거친 [+90°/0°]_s 시험편의 초음파 C스캔 이미지이다. 그림에서 어두운 부분으로 나타나는 균열이나 층간분리(delaminations)현상으로 인한 파손이 시험편 내부에서 발생하였음을 나타낸다. 왼쪽 단부

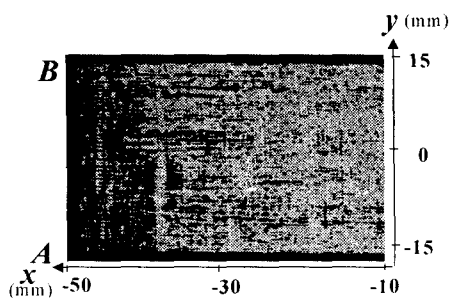


Fig. 4 Ultrasound C-scan image of a cryogenically-terated [+90°/0°]_s specimen.

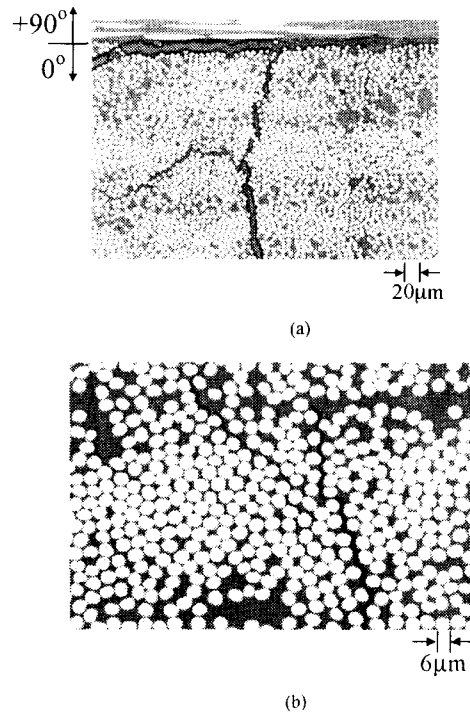


Fig. 5 Microscopic observation (a) and its enlarged one (b) of the cross-section near the free edge of a [+90°/0°]_s specimen.

에서는 응력해석결과(Fig. 6(a))로 알 수 있듯이 -191°C에서 인장형 층간응력 σ_z 가 크게 집중되어 층간분리가 많이 발생한 것이다.

Fig. 5(a)와 5(b)는 위 시험편의 단면부에서 y-z면을 관찰한 광학현미경 사진들이다. Fig. 5(a)에서는 +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 균열이 진전중에는 섬유파단(fiber breakage)이 발생했을 가능성이 크며 이때에는 높은 강도의 AE가 발생하였을 것이다. Fig. 5(b)는 단면부의 확대사진으로 균열진전과정이 지그재그형의 복잡한 경로로 진행되었음을 보여준다. 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°]_s 시험편의 경우에도 저온냉각처리에 의해서 시험편의 구석부에서 층간분리가 발생하였고 내부층(core layer)에서는 횡단형 균열이 많이 발생하였다.

3.1.2 내부응력분포에 미치는 시험온도의 효과

상기와 같은 저온냉각에 의한 미세균열의 발생을 이해하기 위해, 본 연구에서는 유한요소 상용프로그램인 Ansys 5.3을 이용하여 냉각에 의한 복합적층판 내부의 열응력분포를 [+90°/0°]_s, [+45°/-45°]_s 적층판에 대해 해석하였다. 해석용 시험편 모델의 치수와 물성을 냉각실험용 시험편과 유사하게 정하고 응력자유 온도(stress-free temperature)를 120°C로 하였으며 해석상의 여타 조건은 문헌[10,13,14]과 동일하게 하였다.

Fig. 6(a)는 [+90°/0°]_s 적층 시험편(길이 L=100mm, 폭 W=30mm, 두께 H=3mm)에 대한 응력 해석 결과를 나타내며 시험편의 중앙부(y=0)에 위치하면서 +90°/0°층간(z=H/4)부근의 0°층내(z=0.92H/4)에서 층간응력 성분 σ_z 를 길이방향인 x 축을 따라 도시한 것이다. 이 그림에서 가로축 왼쪽 끝단은 Fig. 4의 초음파 이미지에서 손상이 많이 발생한 왼쪽 끝단 위치(x=-50mm, y=0)에 대응하는데, 온도 저하에 따라 큰 인장응력이 발생하였으며 x값이 $1-|2x/L|=0.1 \sim 0.001$ 의 범위에서 σ_z 의 변동이 컸음을 알 수 있다. 액체 질소(-191°C) 속에서 시험편의 단부가 위의 두께방향 인장응력 σ_z 에 의해 파손되고 층간분리 됨으로써, Fig. 5(a)와 같이 층간의 경계부에서 열림형 층간파손이 발생한 것이다. 그렇지만, 응력자유 온도보다 높은 160°C의 온도에서는 σ_z 가 오히려 미약한 압축응력으로 시험편 단부에서 분포하고 있었다. Fig. 6(b)는 Fig. 4의 초음파 이미지에서 왼쪽 끝단(x=-50mm)에 위치하는 부위의 0°층내(z=0)에 발생한 폭방향 인장응력 σ_y 를 y축을 따라 도시한 것이다. 저온냉각에 의해 시험편 단부의 구석(y=±W/2)에서는 응력 발생이 없었으나($\sigma_y=0$), 가운데 부위(y=0)에서는 수치의 파괴강도(50MPa)를 초월하는 인장응력이 발생하여, Fig. 5(a) 및 5(b)와 같은 두께 방향 균열이 내부층인 0°층내에서 생긴 것이다. 또한 여기에서도 온도가 160°C에서는 압축응력이 작용함을 알 수 있다. 만일 시험온도를 상온(23°C)에서 160°C까지 변화시키면, σ_z 와 σ_y 가 함께 인장응력에서 압축응력으로 바뀌게 되어 시험편 내부에서의 변형거동이 크게 달라질 것으로 예상된다. [+45°/-45°]_s 적층 시험편의 경우에도, 저온냉각영역에서 시험편의 구석부

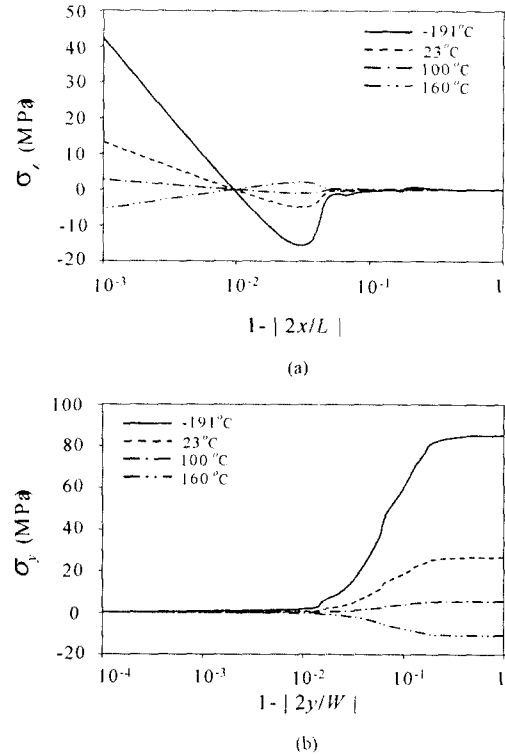


Fig. 6 (a) Interlaminar normal stresses σ_z in 0°layer near the ply-interface ($z=0.92H/4, y=0$) and (b) in-plane normal stresses σ_y in 0°layer ($z=0, x=-50mm$) of [+90°/0°]_s specimen as a function of the test temperature

(x=-50mm, y=+15mm)에 갈수록 σ_z 와 σ_y 의 인장응력집중이 커졌고, 고온인 160°C에서는 약간의 압축응력이 발생하였다. 즉, 인장/압축응력의 발생위치가 [+90°/0°]_s 시험편과 달랐지만, 내부응력과 변형거동은 온도변화에 따라 크게 변화하고 있음을 알았다.

3.2 열부하중의 음향방출거동

Fig. 7은 저온냉각을 받지 않은 [+90°/0°]_s 시험편에서의 AE링다운카운트를 거동을 나타낸다. 최고온도 160°C까지의 열부하사이클에서 AE거동은 미약하게 발생하였는데, 이는 복합재료 제조시에 경화온도로부터 상온까지의 냉각과정에서 시험편에 열응력 유기손상이 미약하게 발생하였거나 시편절단시에 다소의 미세손상이 발생했던 것과 관련될 것이다. 저온냉각처리한 시험편에서는, Fig. 8에서와 같이 1차 열부하사이클의 가열과정중에 100°C근처에서 AE신호 발생빈도가 아주 컸으며 135°C근처에서 급감하고 157°C 이

상에서는 AE신호의 발생이 관찰되지 않았다. 이와 같은 열부하중의 AE거동은 [+45/-45]_s 시험편에서도 유사하게 관찰되었다. 이는 AE발생원에 해당하는 결함이나 손상이 시험편 내부에 많았으며, 가열온도의 수준에 따라 Fig. 6에서와 같은 내부응력의 변화가 변형거동의 변동을 일으키게 되어 AE신호의 발생률에 큰 차이를 주었음을 의미한다.

3.3 반복 열부하사이클시의 카이저효과

Fig. 8에서 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 총별로 열변형의 크기가 다른 상태에 있는데, 가열/냉각과정을 반복함에 따라 Fig.8과 같은 AE의 급격한 감소거동은 첫째, 시험편의 내부손상이 계속 진전하는 것이 아니라 정지되어 있으며 둘째, 지그재그형상의 균열 상하면의 교차이동시에 발생한 마모나 마찰이 AE발생원에 해당한다고 생각할 수 있다.

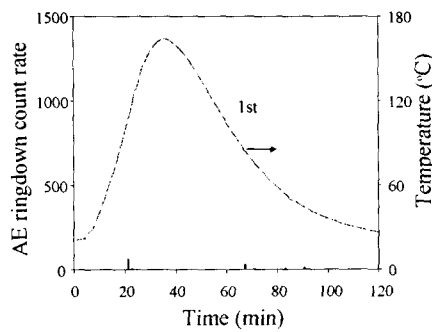


Fig. 7 Behavior of AE ringdown count rate for an as-moulded [+90/0]_s specimen during the 1st thermal load cycle.

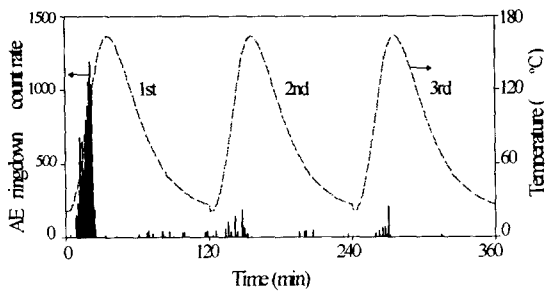


Fig. 8 Behavior of AE ringdown count rate for a cryogenically treated [+90/0]_s specimen during the repetitive thermal load cycles.

Fig. 9(a)와 9(b)는 1차, 2차, 3차 열부하사이클 시에 각각 [+90/0]_s 시험편과 [+45/-45]_s 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. 응력자유온도인 120°C보다 큰 160°C의 경우에도 총 링다운카운트수가 크게 증가한 것은, 손상이 복잡하게 내재하는 시험편에서는 손상이 없는 경우와 달리 응력자유온도가 불명확해지며 복잡하게 굴곡진 균열면간의 열변형에 의한 이동량이 많아지고 이때상호접촉 혹은 마찰 마모의 기회가 많아져 총 링다운카운트수가 크게 증가했던 것으로 생각된다.

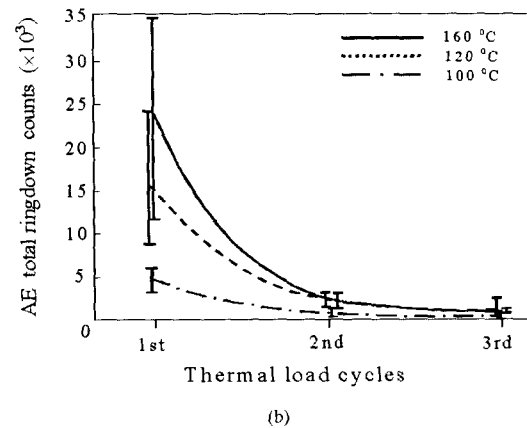
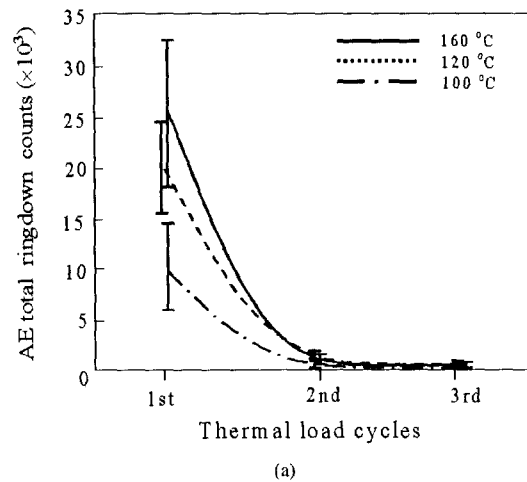


Fig. 9 Reduotion features of AE total ringdown counts from cryogenically treated specimens during the repetitive thermal load cycles: (a) [+90/0]_s, (b) [+45/-45]_s.

어느 최고온도의 경우에도 제1차 가열-냉각 열사이클 과정 중에 발생한 총 링다운 카운트 수는 제2차 열사이클에서 급격히 감소하였고 제3차 열사이클에서도 추가로 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 총 링다운 카운트수 N 의 감소 거동은 반복 열부하 사이클 시의 카이저 효과를 나타내고 있다고 볼 수 있는데, 이를 다음식과 같은 지수함수로 표현할 수 있을 것이다.

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

여기서 n 은 열부하 사이클의 차수(1차, 2차, 3차)를 나타내며, α 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 1 Average values of α and N obtained for $[+90_0/0_0]_s$ and $[+45_0/-45_0]_s$ specimens under thermal cyclic loads with the various maximum temperatures

Maximum temperature		160 °C	120 °C	100 °C
$[+90_0/0_0]_s$	N_1	25600	20100	9500
	α	1.62	1.50	1.47
$[+45_0/-45_0]_s$	N_1	24200	15700	5100
	α	1.54	1.29	1.06

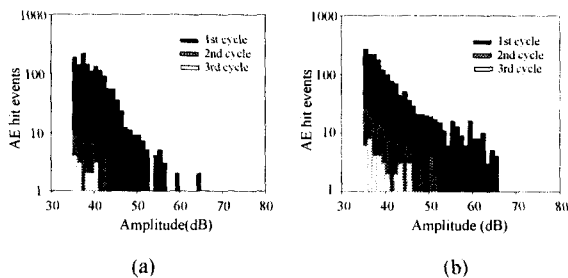


Fig. 10 AE amplitude distributions during the repetitive thermal load cycles: (a) $[+90_0/0_0]_s$, (b) $[+45_0/-45_0]_s$.

Table1 에 보인 바와 같이 최고온도가 높은 열부하 과정일수록 N_1 값이 커졌으며, 이와 함께 α 값도 커졌다. N_1 과 α 값의 거동은 시험편 종류에 따라 달랐지만, $[+90_0/0_0]_s$ 시

험편에서 큰 값을 보였다.

즉, 최고온도가 높은 경우일수록 α 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 펄리티 비율(falicity ratio, [12])로써 평가하고 있다. 본 연구에서 최고온도는 최대응력의 수준에 대응하므로, 열부하사이클의 반복에 따른 파라미터 α 값이 커질수록 펄리티 비율이 크게 됨을 의미한다고 생각된다.

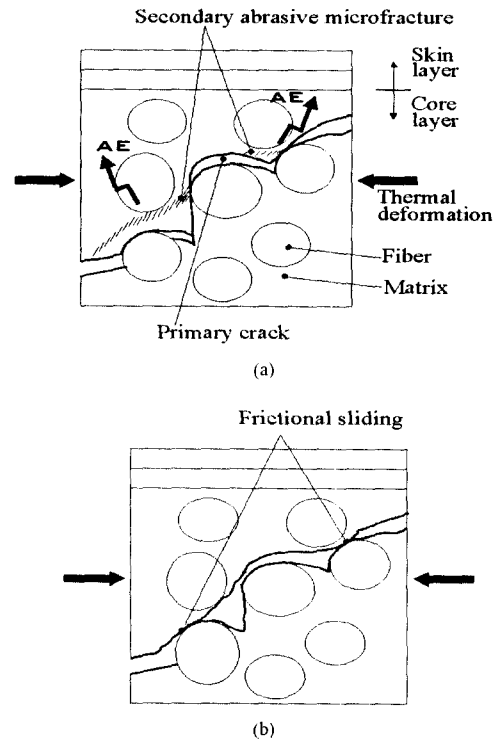


Fig. 11 Schematic of Ae generation (a) from abrasive microfracture during the 1st thermal cycle and (b) from frictional sliding during the repetitive cycle.

Fig. 10(a)와 10(b)는 각각 최고온도 160°C의 열부하사이클에서 검출한 $[+90_0/0_0]_s$ 시험편과 $[+45_0/-45_0]_s$ 시험편의 AE 사상(hits events)별 진폭분포를 나타낸다. 본 열부하사이클에서 검출한 AE 진폭값은 65dB이하의 영역에 분포하였는데, 각 사이클에서 $[+45_0/-45_0]_s$ 시험편의 AE 진폭은 $[+90_0/0_0]_s$ 시험편의 경우보다 높은 영역에까지 분포하였다. 1차 열부하 사이클과 비교하여 2차 열부하 사이클에서 AE

진폭의 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 AE가 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 가르킨다. 즉, 저온냉각 시에 발생한 균열이나 손상의 주변에 축적되었던 잔류 내부응력이 1차 가열/냉각 과정 중에 완화되거나 방출되어 내부응력이 변하고 또한 층간의 열변형률 불일치에 의해, Fig. 5(a)와 5(b)와 같은 지그재그식으로 굴곡진 균열의 상하면이 움직임으로써 서로 접촉하는 동안 AE가 발생한 것으로 볼 수 있다.

따라서 이러한 열-음향방출(thermo-AE)의 발생원(source)은 Fig. 11(a)에서 볼 수 있듯이, 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 것으로 생각된다.

한편 2차 이후의 반복 열부하 사이클을 받는 동안에는 균열면에서의 마모나 2차적 미세 손상이 급격히 줄었고, Fig. 11(b)와 같이 균열면간의 마찰적 미끄러짐(frictional sliding)이 일어남으로써 미약한 AE가 적은 사상수로 발생했던 것으로 생각된다.

4. 결론

저온 냉각한 $[-90/0_c]$, 및 $[+45/-45_c]$ 복합적층판에 반복 열부하사이클을 부여하여 열-음향방출(thermo-AE) 신호의 카이저효과(Kaiser effects)를 정량적으로 분석하고 이 거동을 음향방출의 발생원인과 관련시켜 해명하였다.

(1) 저온 냉각에 의해서 유한요소 열응력 해석으로 예상되는 국부적 층간분리와 횡단형 균열이 복합적층판의 단면부 근처에서 발생하였으며, 이들 손상은 열부하사이클 시에 발생하는 음향방출(thermo-AE)의 원인으로 작용했다.

(2) 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.

(3) 열부하 사이클 시에 발생하는 AE는 균열진전에 의

한 것이 아니라, 굴곡진 균열면간의 접촉에 의한 마모 및 2차적 미세손상의 발생과 관련되며, 2차 이후의 열부하 사이클 시에는 균열면간의 마찰적 미끄러짐으로 보다 약한 AE가 적은 사상수로 발생했던 것으로 추정되었다.

후 기

본 연구는 BK21사업 및 2001년도 학술진흥재단의 지원(KRF-2000-E00058)에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- 1) Muravin, G., Lezvinsky, L., Muravin, B., "Acoustic Emission Diagnostics of Reinforced Concrete Bridges Condition," *Progress in Acoustic Emission IX*, 1998, pp. II89-II98.
- 2) 이준현, 이진경, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 온라인 모니터링," *비파괴검사학회지*, Vol. 19, 1999, pp. 25-33.
- 3) 김기복, 윤동진, 정중채, 박휘립, 이승석, "주성분회기분석 및 인공신경망을 이용한 AE번수와 응력확대계수와 상관계수해석," *비파괴검사학회지*, Vol. 21, 2001, pp. 80-90.
- 4) 권일범, 김조권, 김천근, 홍창선, "삽입된 광섬유마이크로 센서에 의한 복합재료의 변형률 및 모재균열파손의 동시감시," *한국복합재료학회지*, Vol. 9, 1996, pp. 74-84.
- 5) Cherfaoui, M. and Herve, C. "Acoustic Emission for the Evaluation of Integrity for Pressure Vessel," *Progress in Acoustic Emission IX*, 1998, pp. 145-149.
- 6) Dong, J.W.P. "Improvement of Grinding/Dressing Monitoring Using Acoustic Emission," *Progress in Acoustic Emission IX*, 1998, pp. 11-19.
- 7) Choi, N.S., Takahashi, K., Hoshino, K., "Characteristics of Acoustic Emission during the Damage Process in Notched Short-Fiber-Reinforced Thermoplastics," *NDT & E International*, Vol. 25, No. 6, 1992, pp. 271-278.
- 8) C. S. Lee and S. J. Kim, "Investigation on the validity of the rule of mixtures," *Proceeding of 99 Korean Society for Composite Materials*, 1999, pp. 111-117.
- 9) Choi, N.S. and Takahashi, K. "Characterization of the

- Damage Process in Short Fibre/ Thermoplastic Composites by Acoustic Emission," *Journal of Materials Science*, Vol. 33, 1998, pp. 2357-2363.
- 10) Sato,N., Durauchi, T. and Damigaito,O. "Detection of Damage in Composite Materials by Thermo-Acoustic Emission Measurement," *Journal of Composite Materials* Vol. 22, 1988, pp. 447-458
- 11) Choi,N.S. and Lee,S.H. "Nondestructive Evaluation of Thermal Stress-Induced Damage in Thin Composite Laminates," *Journal of Materials Science*, Vol. 21, 2001, pp. 261-268.
- 12) 김영복, 민대홍, 이덕보, 최낙삼, "열하중을 받는 복합재료 적층판의 손상에 대한 열-음향방출해석," *한국비파괴검사학회지*, 제21권 3호, 2001, pp. 261-268 .
- 13) Onoe,M. et al., *Acoustic Emission-Bases and Applications*, Corona Publishing Co., Tokyo, 1976, p. 2.
- 14) 이성혁, 최낙삼, "열응력에 의한 얇은 복합적층판의 자유경계단 부위파손," *한국복합재료학회지*, Vol. 12, 1999, pp. 28-36.
- 15) 이성혁, 최낙삼, 이정기, "복합적층박판의 열응력파손에 대한 진동활용 비파괴평가," *한국비파괴검사학회지*, 제19권 5호, 1999, pp. 347-355.