

열하중을 받는 복합재료 적층판의 손상에 대한 열-음향방출해석

Analysis of Thermo-Acoustic Emission from Damage in Composite Laminates under Thermal Cyclic Loading

김영복*, 민대홍*, 이덕보**, 최낙삼**

Young-Bok Kim*, Dae-Hong Min*, Deok-Bo Lee** and Nak-Sam Choi**

초 록 열-음향방출(thermo-AE) 기법을 이용하여 두께 3mm, [+45°/-45°]_s 복합재료 적층판의 열응력 유기 손상에 대한 비파괴평가의 유효성을 연구하였다. 반복적인 열부하 사이클에 의해서 thermo-AE 사상수가 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타나서 열부하에 따른 카이저효과가 관찰되었다. 열부하사이클중의 thermo-AE거동을 분석하여 복합재료의 응력자유온도를 결정할 수 있었다. 초음파 C스캔, 광학현미경, 주사형 전자현미경을 통해 섬유파손과 모재파손이 관찰되었으며, 이들 파손 인자는 thermo-AE 신호의 단시간 푸리에 변환처리에 의해 생성된 3종류의 서로 다른 시간-주파수 특성과 대응하였다. 이 특성을 이용하여 복합재료의 냉각열처리 및 반복 열부하사이클시의 손상발생과정 및 내부 마찰 거동 내역을 추적할 수 있었다.

주요용어: 열-음향방출법, 복합 적층판, 카이저 효과, 응력자유온도, 단시간 푸리에 변환처리, 열응력유기손상

Abstract An investigation on nondestructive evaluation of thermal stress-induced damage in the composite laminates (3mm in thickness and [+45°/-45°]_s lay-up angles) has been performed using the thermo-acoustic emission technique. Reduction of thermo-AE events due to repetitive thermal load cycles showed a Kaiser effect. An analysis of the thermo-AE behavior determined the stress free temperature of composite laminates. Fiber fracture and matrix cracks were observed using the optical microscopy, scanning electron microscopy and ultrasonic C-scan. Short-Time Fourier Transform of thermo-AE signals offered the time-frequency characteristics which might classify the thermo-AE as three different types to estimate the damage processes of the composites.

Keywords: thermo-acoustic emission, composite laminates, Kaiser effect, stress free temperature, short time Fourier transform, thermal stress-induced damage

1. 서 론

복합재료는 비강성(specific stiffness)과 비강도(specific strength)가 기존의 재료보다 높고 내화학성, 진동감쇠특성, 전기절연성 등이 우수하여 최근에 많은 산업적 응용이 이루어지고 있다. 그러나 복합재료는 제조과정 혹은

사용 중에 뒤틀림변형(warpage), 층간파괴(delamination), 잔류응력(residual stress)이 발생할 수 있고, 특히 온도변화로 야기되는 열응력 발생은 우주 항공 산업이나 원자로 및 전자부품과 관련된 구조물의 안전성 문제에 큰 영향을 주므로, 이에 관한 역학적 거동뿐만 아니라 열응력 변형 및 파손에 대한 연구가 필요할 것이다.

열응력에 의해서 야기되는 손상발생기구를 비파괴적으로 검출하여 구조물의 안전성 및 신뢰성을 평가하는 기술에는 음향방출법(acoustic emission evaluation)이 있다. AE계측법은 일반적으로 구조물이나 재료에 외적인 기계적 하중을 가할 때 발생하는 AE를 검출하여 내부 균열의 활동과 진전상황을 탐지하는 것이다. 근래에 기계적으로 무부하 상태에서 선재결합 혹은 선재손상의 정도를 측정하는 열-음향방출법(thermo-acoustic emission)이 Sato et. al. [1]에 의해서 제안되었다. 그렇지만, 이 열-음향 방출법과 관련된 대부분의 연구에서는 열-음향방출의 발생원인에 대한 해명이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 두께 3mm인 [+45₆/-45₆]s 적층판의 열응력으로 인한 파손을 대상으로 열-음향방출법이 비파괴평가법으로서 타당한 결과를 보여줄 수 있는지 확인하고자 한다. 저온냉각실험을 하여 복합적층판의 재료내부에 손상을 주고 이후 반복적 가열-냉각 열사이클을 부여하면서 열-음향방출 신호의 카이저 효과(Kaiser effect)를 평가한다. 또한 열사이클중의 음향방출거동을 분석하여 응력자유온도(stress free temperature)를 측정한다. 복합재료 내부의 열응력에 의한 파손부위를 초음파 C-스캔, 광학현미경, 주사형 전자현미경(scanning electron microscopy)으로 관찰하여 AE 신호특성과의 관련성을 연구한다. 열-음향방출 신호를 단시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform, STFT)처리해서 AE의 발생원을 정량적으로 분류함으로써, 저온냉각과정 및 반복열사이클에 따른 손상기구를 추적한다.

2. 열-음향방출 측정

본 연구에 사용된 복합적층판 시험편은 한국화이버(주)의 두께가 0.125mm인 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그로 제작되었다. 복합적층판은 CFRP 프리프레그 24장을 [+45₆/-45₆]s로 적층하여 진공백 성형(vacuum bag molding)공법을 이용하여 Fig. 1과 같은 조건으로 오토클레이브에서 성형하였다. 다이아몬드휠 컷터를 이용하여 적층판을 Fig. 2와 같이 길이 100mm, 폭 30mm, 두께 3mm로 정밀절단 시험편을 만들었다. 냉각박스 안에 액체질소를 충분히 넣은 다음, 시험편을 일시에 투입함으로써 저온냉각에 의한 내부 손상을 유발시켰다. 냉각온도는 액체 질소의 온도인 -191℃이며 냉각유지시간을 20분으로 하였다.

초음파 C-스캔에 의해 저온냉각시험편의 내부손상의

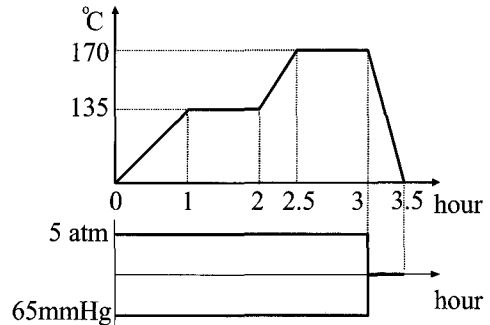


Fig. 1 Curing cycle of the composite plate

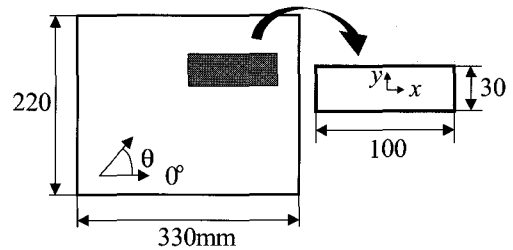


Fig. 2 Sectioning of a composite plate

분포에 관한 시험편의 전체적 이미지를 관찰하였다. 이때, 수조 합침식 초음파검사장치가 사용되었으며 15MHz의 종파를 발진하는 집속형 탐촉자를 이용하였고 주사간격은 0.085mm, 초점면의 크기는 약 0.1mm였다.

초음파 C-스캔 결과 시험편에서 손상이 발생한 부위를 저속 다이아몬드 휠 절단기로 절취하여 다이아몬드 혼합액(입자크기₁μm)으로 단면부의 연마 및 폴리싱을 했다. 이 단면부의 내부 미세손상을 반사식 광학현미경을 통해 관찰하였다. 또한 저온냉각처리에 의해 시험편의 층간분리가 완전히 일어난 부위를 다이아몬드 휠 저속 절단기로 절취 분리하여 증류수 세척 및 진공건조시키고 파면부에 금이온 플라즈마를 이용한 금표막처리를 한 후, 주사형 전자현미경으로 파면에서의 미세손상형태를 관찰하였다.

열-음향방출 분석을 위해서, 우선, 시험편이 부착된 도파봉(wave guide)을 일시에 액체질소속에 투입시킨 직후부터 20분 동안 저온 냉각중의 파손에 의한 thermo-AE 거동을 실시간 검출했다. 시험편에서 발생하는 AE신호는 진공그리스를 통해 도파봉에 전달되어 도파봉의 바깥쪽 끝에 설치된 AE센서(R15센서: 감지주파수 대역 70-500kHz, 공진주파수

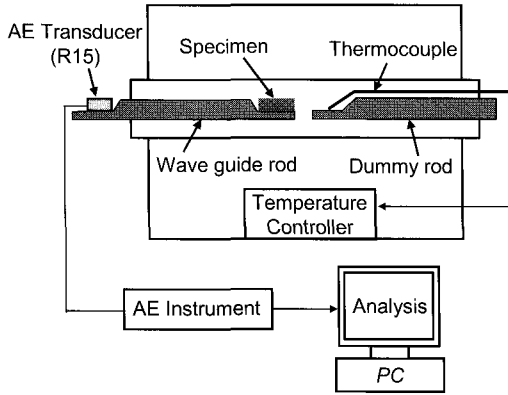


Fig. 3 Schematic of thermo-AE experimental apparatus

150kHz)에 의해 감지되었다. 시험편과 도파봉이 상온으로완 전히 돌아온 후, 가열-냉각중의 thermo-AE 거동을 연구하기 위해 이들을 Fig. 3과 같이 석영관내에 배치하고 이 석영관을 전기로(furnace)속에 설치하였다. 석영관내의 온도는 모의 보(dummy rod)에 접촉된 열전대(thermo-couple)에 의해서 측정되었다. thermo-AE 신호의 측정 및 분석은 PAC사의 MISTRAS 시스템과 MI-TRA 프로그램을 이용하였으며 측정 데이터로는 AE 에너지, 사상수(hits), 링다운카운트(ringdown counts)수, AE진폭분포(amplitude distribution), AE 파형(time-amplitude signal) 등이다. 전기로내의 열사이클 조건으로는 상온(23℃)으로부터170℃까지 평균가열속도 5℃/min로 상승시킨 후 상온까지 냉각시켰으며 냉각시간은 대략 1시간 30분 정도가 소요되었다. 위의 열부하사이클을 2차, 3차로 반복하여 실시하였다.

3. 열-음향방출 거동의 해석

3.1. 열사이클하에서 AE 거동의 카이저 효과

3.1.1. Thermo-AE 거동에 미치는 저온냉각 손상의 효과

Fig. 4(a)와 4(b)는 각각 저온냉각을 받지 않은 시험편과 저온냉각처리를 한 시험편에서의 AE 링다운카운트율(ringdown count rate)거동을 나타낸다. 그림에서 오른쪽 방향을 나타내는 화살표는 온도축을 가리키며 왼쪽을 나타내는 화살표는 AE 링다운카운트율을 가리킨다. 저온냉각 처리한 경우에는 가열중에 AE신호 발생빈도가 아주 컸으며, 이는 AE 발생원에 해당하는

결함이나 내부손상이 많았음을 의미한다. 저온냉각처리가 없었던 시험편에서 AE가 미약하게 발생했는데, 이는 복합재료 제조시에 경화온도(curing temperature)로부터 상온까지의 냉각과정에서 시험편에 열응력 유기손상이 약간 발생하였거나 시편 절단시의 손상발생에 기인한 것으로 추정된다.

Fig. 5는 1차 열사이클동안 측정된 복합재료 시험편의 AE 진폭의 분포를 나타낸다. 저온냉각 처리를 가한 시험편의 진폭 분포(amplitude distribution: Fig. 5 (b))는 냉각처리가 없었던 시험편(Fig. 5(a))과 비교하여 매우 높은 진폭의 강한 신호가 발생했음을 알 수 있다. 이는 저온냉각처리를 한 시험편에서 손상영역이 크게 발생하여, 열 사이클동안 균열면 상호간의 마찰이 격렬했음을 나타낸다.

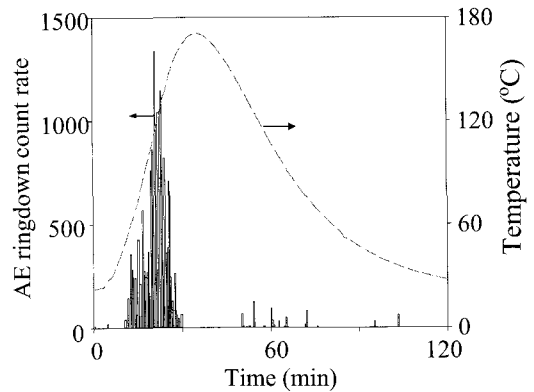
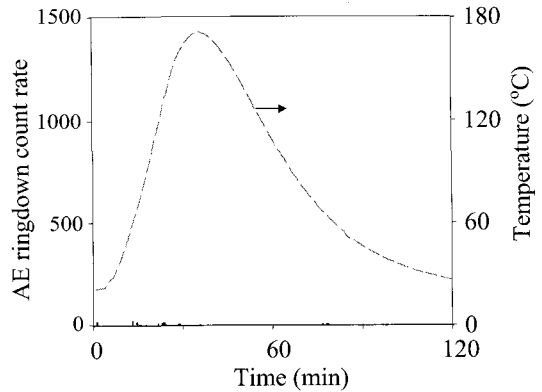


Fig. 4 Behaviors of AE ringdown count rate from cryogenically untreated (a) and treated (b) [+45/-45]s specimens

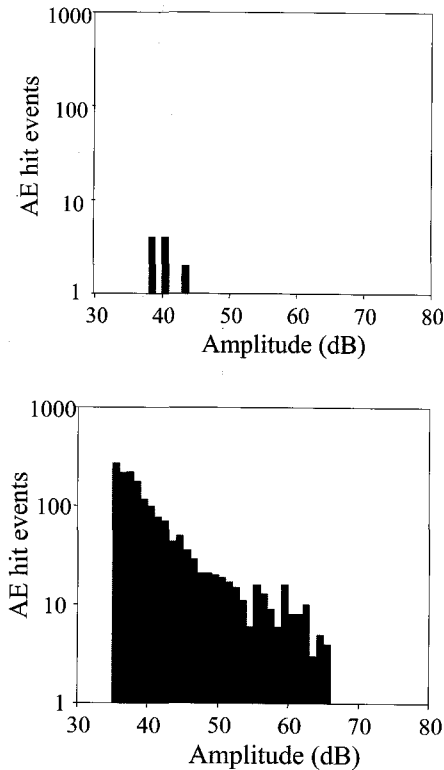


Fig. 5 Behaviors of AE hit events vs. amplitude distribution from cryogenically untreated (a) and treated (b) [+45/-45]_s specimens

3.1.2. 반복열하중시의 thermo-AE 링다운카운트를 거동

Fig. 6은 1차, 2차 및 3차 가열/냉각 열사이클에 따라 복합재료 시험편에 대한 thermo-AE의 카이저(Kaiser) 효과를 나타내고 있다. 1차 열사이클의 가열 기간에서 활발했던 AE 링다운카운트를 거동이 최대 온도 이후의 냉각 기간중에 급감하였고, 다시 2차 열사이클에서는 가열과 냉각 시에 더욱 감소하였으며, 3차 열사이클에서는 아주 저조하였다. 이는 가열/냉각 과정을 반복함에 따라 시험편의 내부손상이 계속 진행되는 것이 아니라 균열의 활동성이 작아지고 균열이 보다 안정하게 정지되어 있음을 나타낸다. 즉, 액체질소에 의한 저온냉각 시에 발생한 균열이나 손상의 주변에 축적되었던 잔류내부응력이 가열/냉각과정 중에 완화되거나 방출되었으며, 이 때 내부응력 변화에 따라 균열 상하면이 움직이면서 서로 마찰이 일어나는 동안 AE가 발생한 것으로 생각된다. 또한 온도의 하강시에

는 균열면 상호간에 생기는 마찰이 극히 적었다고 추정된다.

3.2. 응력자유온도 평가

적층판 내의 층간에서 열변형을 불일치 효과가 없어져서 내부응력이 존재하지 않는 상태의 온도를 응력자유온도(stress free temperature)[2]라고 한다. 본 연구에서는 저온냉각처리한 시험편을 대상으로 열부하사이클중의 음향방출거동을 분석하여 응력자유온도를 구하였으며 한편으론, 상온에서 열변형이 크게 나타나는 비대칭형 복합적층 시험편을 동일한 종류의 프리프레그로 제작하여 온도 제어가 가능한 기름로(oil bath)에 넣어 완전히 평평해질 때 측정된 온도(이하에서, 외견상 변형자유온도라고 함)와 시험편 제작시 오토클레이브에서 가한 예비경화온도(pre-curing temperature: Fig. 1에서 135°C 일정) 및 경화온도(curing temperature: Fig. 1에서 170°C 일정)를 서로 비교하였다.

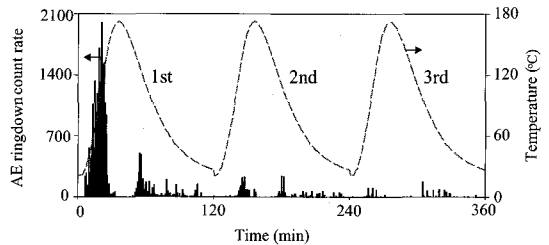


Fig. 6 Behaviors of AE ringdown count rate from a cryogenically treated specimen of [+45/-45]_s during the repetitive thermal load cycles

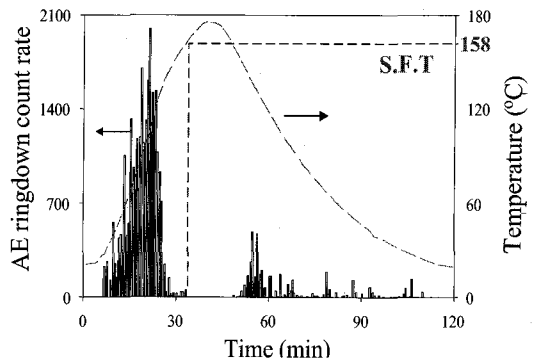


Fig. 7 Measurement of the stress free temperature on the basis of the thermo-AE feature

Table 1 Estimated stress-free temperatures

Measuring Method	Estimated temperatures
Acoustic emission-free	+4 157°C -4
Apparent derormation-tree	120°C
Pre-curing temp.	135°C
Curing temp.	170°C

온저냉각처리한 시험편에 대해 계측한 1차 열부하 사이클중의 열-음향방출 측정결과(Fig. 7)에서 볼 수 있듯이 139°C까지의 온도 상승기에 활발한 AE 링다운카운트율이 관찰되었으며 온도가 그 이상으로 상승함에 따라 AE신호가 급히 미약하게 되었다. 더욱이 온도가 158°C 이상에서는 AE의 발생이 나타나지 않았는데, 이는 재료의 내부에서 섬유방향의 차이에 기인한 열변형의 차이가 작아져 내부응력이 거의 없는 상태로 되어 균열면간의 마찰현상이 없어졌기 때문으로 생각된다. 본 AE실험에서 측정된 응력자유온도는, 1차 열부하시클의 온도상승기에 30초당 생성된AE 링다운카운트율값이 활발히 검출되다가 미약해져 0으로 떨어지는 시간에 대응하는 온도(AE-free temperature)로 하였다. Table 1은 thermo-AE 방법으로 구한 응력자유온도, 외견상의 변형자유온도, 예비경화 온도 및 경화온도를 보여주고 있다. 열-음향방출법에서 구한 응력자유온도는 복합재료 성형시의 예비경화 온도 135°C보다 크고 경화온도 170°C보다 작은 158°C를 보였다. 예비경화온도에서 진공펌프에 의한 적층 프리프레그의 내부기공 제거와 함께 약간의 경화(curing)가 일어나고 이후 경화온도에서 제조자가 원하는 복합재료 경화상태를 얻게 됨을 고려할 때, 정확한 응력자유온도는 경화온도보다 약간 낮은 것으로 예상되므로, 열-음향방출법을 이용한 측정값은 복합재료의 정확한 응력자유온도 값을 가리킨다고 생각된다. 또한 응력자유온도로서 보통 사용되는 외견상의 변형자유온도 120°C는 실제의 응력자유온도값과는 큰 차이를 나타내고 있음에 주의해야 할 것이다.

4. 초음파 C-스캔 및 현미경 관찰결과

4.1. 초음파 탐상

Fig. 8은 각각 저온냉각과정을 거친 복합재료 시험편의 초음파 C-스캔 이미지이다. 그림에서 어두운 부분으로

나타난 이미지는 균열이나 층간분리 현상으로 인한 파손이 시편 내부에서 발생하였음을 나타낸다. 구석부인 A부근에서 손상의 정도가 가장 심했으며 섬유방향을 따라 내부 쪽으로 진전하였음을 알 수 있다. 이것은 A부근에서 인장형 층간응력 σ_z 크게 집중된 문헌[3,4]의 유한요소 응력해석결과와 일치하고 있다. 또한 가열/냉각 열사이클 후의 복합재료 결합상태를 초음파 C스캔에 의해 검사한 결과 저온냉각 직후의 C-스캔 이미지와 거의 차이가 없었음을 알았다.

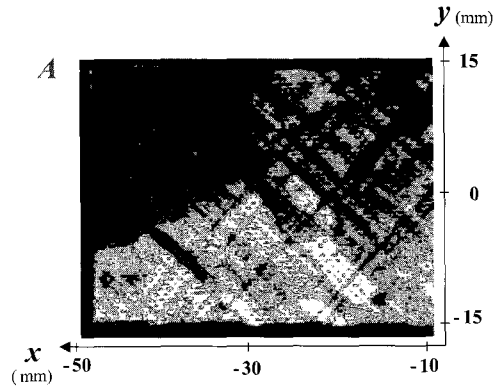


Fig. 8 Ultrasonic C-scan image of a cryogenically treated [+45/-45]_s laminate

4.2. 광학현미경 관찰 결과

Fig. 9(a)와 (b)는 복합재료 시험편의 단면부에서 관찰한 광학현미경 사진들이다. Fig. 9(a)는 +45° 층과 -45° 층의 경계층으로부터 시작된 층간분리(delaminations)로부터 -45° 층의 내부로 손상이 진전하였으며 동시에 횡단형 균열(transverse cracks)도 일어났음을 보여준다. 이와 같은 큰 균열이 진전중에는 섬유파단(fiber breakage)이 발생했을 가능성이 크며 이때에는 높은 강도의 고주파(high frequency) AE가 방출하였을 것이다[5,6]. Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)의 확대 사진으로 균열진전 과정이 복잡한 경로로 진전하고 있음을 보여주며, 이와 같은 균열은 가열-냉각사이클 과정동안 섬유(fiber)와 모재(matrix)간의 열변형 차이로 인해 균열면간의 마찰(friction), 마모(abrasion)를 일으키고 모재에서 2차적인 국부균열이 진전했을 가능성을 보여주고 있다. 균열면간의 마찰과 2차적인 국부균열의 발생은 thermo-AE를 유발시킬 수 있으며 이에 대응하는 AE 발생기구는 마모파손과정에서 나올 것이다.

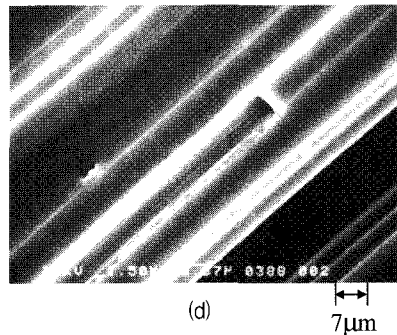
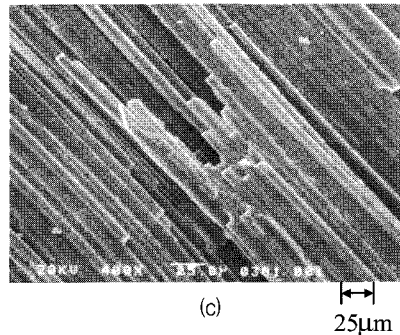
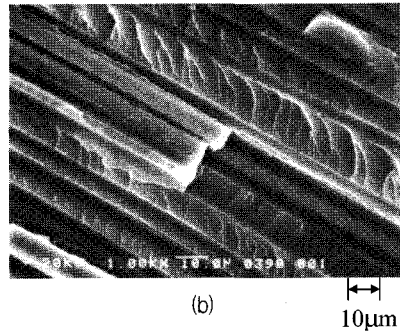
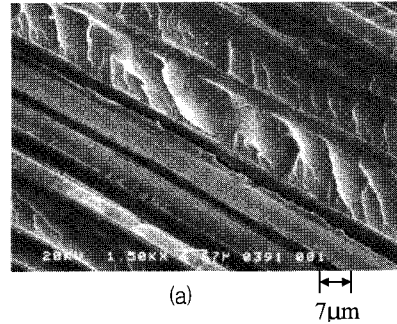
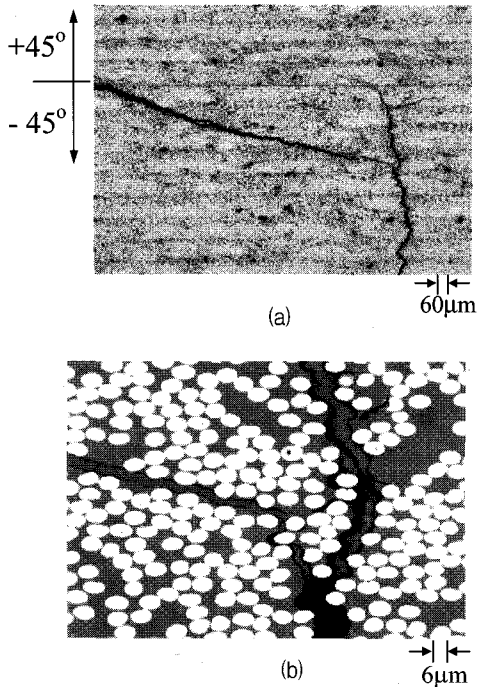


Fig. 9 Microscopic photograph (a) of the cross-section near $[+45/-45]_s$ laminate (b) is an enlarged one of area A in (a)

4.3. 주사형 전자현미경 관찰결과

Fig. 10은 복합재료 시험편을 저온냉각함으로써 발생한 파면에서 촬영한 주사형 전자현미경(SEM) 사진들이다. Fig.10(a)와 같이 Type I의 파면은 주로 모재의 파손거동을 나타내고 있으며 이 경우 저주파수, 저진폭의 AE를 발생시키는 것으로 추정[5,6]된다. 이러한 모재파손은 파손의 정도를 달리하여 저온냉각과정과 1차, 2차, 3차 열사이클과정 전체에서 일어날 수 있다. Type II는 다시 두 가지로 구분할 수 있는데 Fig. 10(b)와 같이 소량의 섬유 파단(fiber breakage)과 모재의 균열이 발생한 경우와 Fig. 10(c)와 같이 다량의 섬유파단(fiber breakage)과 모재균열(matrix crack)이 발생한 경우이다. 이들은 높은 AE에너지를 방출하는데, 모재 균열시 저주파수의 저진폭 AE가, 섬유파단시에는 고주파수의 고진폭 AE가 발생하는 것[5,6]으로 간주할 때, Type II의 경우에는 저주파수와 고주파수가 혼합된 AE가 발생했을 것으로 추정된다. 섬유파단은 저온냉각 초기 과정의 높은 열응력 발생시에 많이 일어났으며, 그 후의 저온냉각과정 및 1차 열사이클

Fig. 10 SEM photographs of various failure types in cryogenically treated $[+45/-45]_s$ laminates: (a) type I, (b) type II-1, (c) type II-2 and (d) type III

과정시에는 적게 발생했으리라 추정된다. Fig. 10(d)와 같이 TypeⅢ는 섬유만의 파단을 나타내며 주로 고주파수 (high frequency)의 AE를 발생하지만, 이런 경우는 극소하게 관찰되었다.

5. 열-음향방출 신호처리 및 손상기구 추적

복합적층판에서 발생하는 손상의 종류에는 모재균열, 층간분리, 섬유파단 등으로 구분할 수 있다. 이러한 손상 발생에 따라 탄성파인 음향방출파가 발생하며, 손상의 종류와 파손모드에 따라 다른 주파수 대역 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 시험편에서 감지되는 모든 thermo-AE 신호에 대해서 상용소프트웨어인 MATLAB 5.3을 사용한 단시간 푸리에 변환 시간-주파수 분석법(Short-Time Fourier Transform, STFT)으로 처리하여 시간과 주파수 영역에서 해석함으로써 시험편 내부에서 발생하는 손상의 특성을 실시간으로 파악하고자 하였다. 시험편의 저온냉각과정중에 AE파는 Fig. 11과 같이 저주파가 주된 영역인 Type I (0~230kHz), 저주파와 고주파가 동시에 검출되는 영역인 Type II (0~560kHz), 그리고 고주파가 중점적으로 발생하는 Type III (230~560 kHz)으로 분류할 수 있었다. Fig. 11의 오른쪽 히스토그램은 신호의 강도(intensity)를 나타내는데, Type II는 Type I의 약 30배, Type III는 2배 정도임을 알 수 있다. 이들은 각각 4.3절의 파손기구인, 모재파손, 섬유와 모재의 동시파손, 섬유만의 파손으로 대응시킬 수 있을 것으로 생각된다. 즉, STFT처리와 SEM 사진관찰에 의거하여 본 저온냉각실험에서 검출한 AE신호를 3가지의 Type으로 구분할 수 있었으며, 섬유파단(fiber breakage)은 230kHz~560kHz 영역의 고주파수(high frequency)의 AE를 방출시키는 반면에 모재균열(matrix crack)과 균열면간의 마찰은 주로 230kHz 이하의 저주파수(low frequency)의 AE를 발생시킨다고 생각된다. 또한, 큰 균열이 급격하게 진전할 때 섬유파단과 함께 모재균열이 동시에 발생하는 경우 저주파수와 고주파수를 포함하는 광대역의 고진폭 AE파를 발생하는 것으로 생각된다.

Fig. 12는 복합재료 시험편에서 저온냉각과정부터 3차 열사이클까지의 Type I, II, III의 AE 신호의 비율 추이를 보여주고 있다. 저온냉각과정은 거시적 손상의 발생 빈도가 큰 초기부분을 두 영역 (1-30 sec, 31-60sec)으로 나누고, 그 후의 나머지 부분 (1min-20min)으로 분할하여 검토하였다. 저온냉각 초기에는 Type II의 고진폭AE파가 압도적으

로 많이 발생하여 섬유파단을 수반하는 큰 균열이 주로 일어났음을 나타내고 시간이 흐름에 따라 Type I의 저진폭 AE파가 주로 발생하여 모재의 미세균열이 진전하고 있음을 나타냈다. Type III의 AE는 전과정에 걸쳐서 드물게 발생하였는데, 이는 모재균열의 진전을 수반하지 않는 섬유만의 파단은 그다지 일어나지 않았음을 나타낸다.

또한, 가열-냉각 사이클중에 각 신호Type의 AE진폭의 수준은 저온냉각중에 발생한 AE의 진폭에 비교하여 약 1/10 이하로 매우 작아졌으며, 이 열사이클을 반복하면서 Type I 신호의 발생비율은 80%이상으로 점점 높아짐에 반해서 Type II신호의 비율은 감소하는 경향을 보였다. 초음파 C스캔에 의해 가열/냉각 사이클 전후의 복합재료 결합상태를 검사한 결과 거의 차이가 없었는데, 이것은 가열-냉각 열사이클이 가해짐에 따라 섬유파단(fiber breakage)을 포함한 균열진전이 진행하지 않았던 것을 말하며, 그럼에도 불구하고 낮은 진폭의 AE신호가 발생

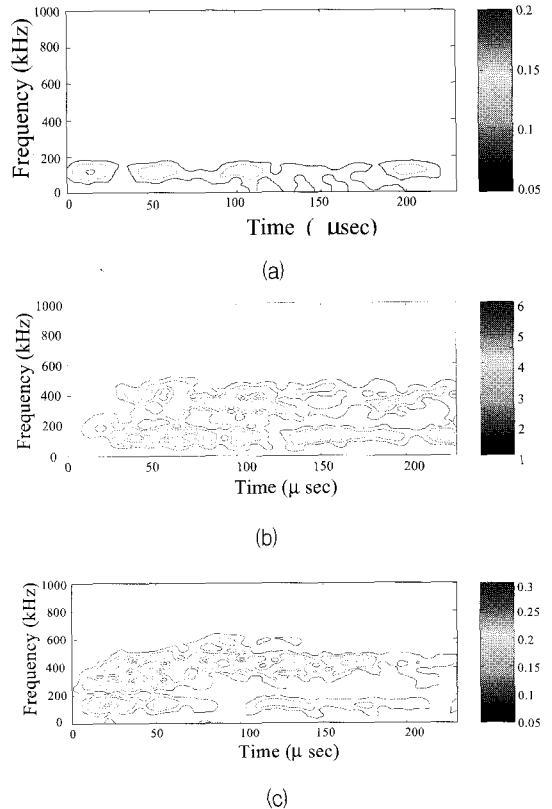


Fig. 11 Classification of thermo-AE signals: (a) Type I AE (low freq.), (b) type II AE (low & high freq., high ampl.), (c) type III (high freq.)

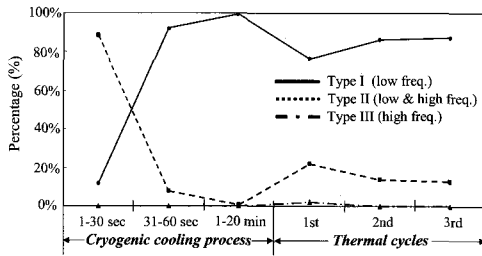


Fig. 12 Percentage of Type I, II, III AE signals detected during the cryogenic cooling process and the repetitive thermal cycles of a [+45s/-45s] laminate

하는 것은 국부적으로 균열면간의 마찰/마모 및 모재의 2차 균열발생으로 기인했기 때문이라고 사료된다. 또한 반복 열사이클 중에 Type II의 고주파수 대역을 갖는 신호가 다소 발생하는 것은, 저온냉각중에 파단한 섬유들의 단부가 균열 상하면에 있으면서 가열-냉각중에 균열면이 서로 반대방향으로 이동하면서 섬유단부간 마찰을 일으켰기 때문으로 생각된다. Fig.6과 같이 가열/냉각 과정을 반복함에 따라 AE의 발생이 급격히 감소하여 열적 카이저효과를 나타낸 것은, 시험편내의 균열이 더 이상 진전하지 않고 보다 안정하게 정지되어 있으면서 저온냉각시에 발생한 균열이나 손상의 주변에 축적되었던 잔류내부응력이 가열/냉각과정 중에 완화되거나 방출되었으며, 이 때 내부응력 완화에 따라 균열 상하면 사이의 마찰력이 작아져 AE가 급감한 것으로 생각된다.

6. 결 론

복합재료의 열응력 손상의 검출에 열-음향방출(thermo-AE)법을 적용하여 비파괴 평가로서의 유효성을 검토하였다. 저온냉각처리를 하여 내부손상이 발생한 시험편에서는 많은 양의 AE 신호가 검출된 반면, 저온냉각처리를 하지 않은 시험편에서는 AE 신호가 거의 발생하지 않았다. 반복적인 열하중이 가해짐에 따라 thermo-AE 신호는 카이저(Kaiser) 효과를 나타내 AE신호의 발생이 급감하였다. 시험편의 응력자유도를 thermo-AE로 측정된 결과는 예비경화온도보다 크고 경화온도보다는 낮은 값을 보였다. AE신호의 시간-주파수 분석처리결과, AE 신호는 3가지 Type으로 분류될 수 있었으며 이 경향은 광학현미경, 주사형 전자현미경, 초음파 C-스캔에 의한 파손거동 관찰결과와 일치하였다. 저온냉각초기에 발생하는 거시적 파괴와 이에 수반되는 섬유파단은 신호

강도가 높고 고주파수인 AE파를 주로 발생하였으며, 반면에 가열-냉각의 반복사이클에서는 균열면간의 마찰로 인해 모재의 2차 미세파손(secondary microfracture)이 일어나 저주파의 약한 AE가 많이 발생하였다. 이와 같이 저온냉각과정부터 3차 열사이클까지 Type I, II, III의 AE 신호의 비율 추이를 분석함으로써, 열응력에 의한 시험편 내부에서의 손상거동과 균열면 사이의 마찰거동 내역(history)을 각 과정별로 시간의 흐름에 따라 추적할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2000년도 학술진흥재단의 지원(KRF-2000-E00058)에 의하여 연구되었으며 이에 감사합니다.

참고문헌

- [1] N. Sato, T. Durauchi and O. Damigaito, "Detection of Damage in Composite Materials by Thermo-Acoustic Emission Measurement," *Journal of Composite Materials*, Vol. 22, pp. 447-458 (1988)
- [2] O. H. Griffin, Jr., "Three-Dimensional Curing Stresses in Symmetric Cross-Ply laminates with Temperature-Dependent Properties," *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 449-463 (1983)
- [3] 이성혁, 최낙삼, 이경기, "복합적층박판의 열응력파손에 대한 진동활용 비파괴평가", 비파괴검사학회지, 제 19권 5호 pp. 347-355 (1999)
- [4] N. S. Choi and S. H. Lee, "Nondestructive evaluation of thermal stress-induced damage in thin composite laminates," *Journal of Materials Science*, Vol. 36, pp. 1685-1693(2001)
- [5] N. S. Choi, K. Takahashi, K. Hoshino "Characteristics of acoustic emission during the damage process in notched short-fiber-reinforced thermoplastics," *NDT & E International*, Vol. 25, No. 6, pp. 271-278 (1992)
- [6] N. S. Choi and K. Takahashi, "Characterization of the damage process in short fibre/thermoplastic composites by acoustic emission," *Journal of Materials Science*, Vol. 33, pp. 2357-2363 (1998)