論文

열-음향방출기법을 이용한 복합재료의 미세손상 검출 및 평가

최낙삼*+, 김영복*, 이덕보**

Detection and Evaluation of Microdamages in Composite Materials Using a Thermo-Acoustic Emission Technique

Nak-Sam Choi*+, Young-Bok Kim* and Deok-Bo Lee**

ABSTRACT

Utilizing a thermo-acoustic emission (AE) technique, a study on detection and evaluation of microfractures in cross-ply laminate composites was performed. Fiber breakages and matrix fractures formed by a cryogenic cooling at -191℃ were observed with ultrasonic C-scan, optical and scanning electron microscopy. Those microfractures were monitored in a non-destructive in-situ state as three different types of thermo-AE signals classified on the basis of Fast-Fourier Transform and Short-Time Fourier Transform. Thus, it was concluded that real-time estimation of microfracture processes being formed during cryogenic cooling could be accomplished by monitoring such different types of thermo-AEs in each time-stage and then by analyzing thermo-AE behaviors for the respective AE types on the basis of the AE signal analysis results obtained during thermal heating and cooling load cycles.

초 록

열-음향방출(*thermo-acoustic emission*)기법을 이용함으로써, 직교형 복합재료적층판의 저온냉각 시에 형성되는 미세손상을 검출하고 평가하여 그 유효성을 검토하였다. 액체질소에 의한 저온냉각(-191℃)으로 생성된 미세손상은 가열-냉각 열부하사이클 시에 발생하는 음향방출(AE)거동의 해석을 통해 평가되었다. 저온냉각에 따른 섬유파단과 모재파손은 초음파 C스캔, 광학현미경, 주사형 전자현미경을 통해 관찰되었으며, 이들 미세파손 모드는 AE신호의 퓨리에 변환(FFT)처리해석, 단시간 퓨리에 변환(STFT)처리해석으로 분류되는 3종류의 서로 다른 특징을 갖는 AE신호로 검출될 수 있었다. 이들 AE신호특성을 시간 단계별로 검출하여 저온냉각시에 형성되는 복합재료 미세파괴의 과정을 실시간으로 평가할 수 있었으며, 또한 열부하 사이클시의 AE신호해석을 통해서 저온 냉각으로 생성된 미세파손의 정도를 추정할 수 있었다.

1. 서 론

복합재료(composite materials)는 두 가지 이상의 서로 다른 재료를 혼합하여 각 재료가 가지는 장점을 극대화할 수 있고 뛰어난 무게대비 비강성(specific modulus)과 비강도(specific strength)를 가지므로 압력용기, 항공우주선, 로켓, 고속선박, 스포츠용품, 군수용품, 고급기계구조물 등의 경량화 설계를 위한 소재로써 적극 활용되고 있는 추세이다. 그러나 복합재료는 구성섬유(직경 6-120 μm)의 형태가 다양하고 섬유와 모재의 특성이 재료마다 다를 뿐만 아니라

*+ 한양대학교 기계정보경영공학부, 교신저자(E-mail:nschoi@hanyang.ac.kr)
* 한양대학교 대학원 기계설계학과, 현 LG전자 멀티미디어사업부
** 한양대학교 BK사업단

재료내부에 손상이 발생하면 그 기계적 성질이 상당히 저하될 수 있다. 또한 복합재료의 제조과정시 또는 사용 중에 가해지는 외부 하중이나 가혹한 외부환경에 의해 내부손상이 발생할 수 있으며, 이들 손상은 복합재료를 이용한 기계구조물의 신뢰성 및 안전성에 치명적 영향을 주게 된다. 이들 손상은 크기가 0.1 μm - 수mm로 다양하며 복합소재의 강도와 강성, 파괴인성에 큰 영향을 주는데, 재료의 신뢰성과 건전성의 관점에서 공학적으로 어느 정도까지 정량화 가능하고 허용(damage tolerance)할 수 있는지 규정하는 것은 중요하다. 또한, 손상의 발생 및 성장과정, 누적손상과정 등을 고려한 복합소재의 미소역학적 해석을 통해 응력-변형률 관계를 규명하고, 각종 비파괴검사법을 활용하여 변형 및 손상의 변화과정을 실시간 검출하여 강도와 파괴인성, 잔여수명에 대한 영향을 평가할 수 있게 되면, 고성능 신소재로서의 복합재료 개발(제조)과 함께 사용전 혹은 사용중에 복합재료구조물의 안전성과 신뢰성 평가에 매우 유익할 것이다.

한편 음향방출(acoustic emission, AE) 측정법은 재료가 외적하중을 받아 재료내부에서 미세한 손상과 균열, 소성변형이 발생할 때에 방출되는 탄성파를 재료 혹은 구조물표면에 장착한 센서로 실시간 검출하여 해석하는 비파괴진단법이며, 재료의 상태와 물성연구 및 구조물의 파괴예측을 가능케 하므로, 다방면에 걸쳐 공학분야에 응용되고 있다. 섬유강화수지 복합재료의 AE발생원으로는 섬유파단, 모재균열, 섬유/모재간 계면박리, 층간분리가 알려져 있다[1-3]. 이들 국부적인 미세파손은 복합재료의 거시적 파괴과정과 관련되어 불규칙하고 복잡하게 일어나게 된다. AE실측 파라미터로는 AE사상수, AE진폭분포, AE에너지, AE주파수분포, AE원위치 표정 등이 있으며 이들 파라미터는 개개의 미세파손과정과 실시간적으로 관련되는 것이다. 또한, 동일한 재료의 시험편이라도 하중형식(정적, 동적, 피로)에 따라 파괴과정이 달라지면 AE특성도 변하게 된다.

그런데, 기계적으로 무부하상태에서도 가열 및 냉각 열부하사이클을 부여하여 구조물이나 재료내부의 선재결함(pre-existent defects) 혹은 선재손상(pre-existent damage)에서 발생하는 열적 음향방출(thermo-AE)신호를 검출함으로써 재료내부의 현재 결함상태를 진단할 수 있다. Sato[4,5] 등에 의하여 제안된 이 결함진단기법은, 손상이 전혀 없는 복합재료에서는 thermo-AE가 거의 검출되지 않으나 피로하중, 정적/충격하중 등의 기계적하중이나 열하중으로 야기된 내부손상을 가진 복합재료에서는 다량의 thermo-AE가 검출되므로, 선재손상의 유무나 정도를 간단하게 탐지할 수 있는 비파괴검사법으로 기대되었다. 이들이 연구했던 복합재료는 시트 몰딩 혼합재(SMC), 탄소섬유강화 적층판이었으며 여기에 정적인 인장하중이나 굽힘하중, 피로하중을 주어 손상을 유발시킨 후에 thermo-AE거동을 분석하였던 것이다. 이들 연구에 의하면 thermo-AE의 발생원인은, 외부하중에 의해서 생성된 균열면이 기계적으로 서로 고정(locking)되어 있다가 열팽창 및 수축과정동안 이 고정상태가 풀리게 되면서 내부균열 주변에 축적되어 있었던 잔류응력이 일부 해방되면서 균열면 상호간의 마찰과 함께 변형에너지가 일부 탄성파(AE파)로 방출되는 현상이라고 했다. 또한 이 과정동안 새로운 균열진전은 일어나지 않는다고 보고했다. 따라서 단순히 대상구조물의 환경온도를 일정온도까지 올렸다가 내려줄 때 이 구조물에서 검출되는 AE의 사상수와 에너지를 분석하여 구조물 내부의 손상과 결함정도를 구조물의 형상과 크기에 관계없이 간편하게 검사할 수 있으므로, 현장 적용성이 매우 크다고 볼 수 있어 많은 연구의 필요성이 있는 것이다.

저자들[6,7]은 열-음향방출법을 얇은 복합적층판의 모서리부 파손의 평가에 적용하였는데, 냉각열응력에 의한 손상의 정도는 섬유 적층각도와 적층두께에 따라 큰 차이가 있으며 이는 thermo-AE거동에도 영향을 주었음을 알았다. 1차 가열-냉각 열부하사이클에서 발생했던 thermo-AE사상수는 2차 사이클에서 크게 감소하였고, 가열시의 thermo-AE거동은 냉각시의 거동과 다르며 섬유 적층각에 크게 의존했다. 또한, 적층두께가 두꺼울수록 높은 진폭의 thermo-AE신호가 관찰되었으며, 굽힘진동감쇠계수와 비교한 결과 균열밀도가 클수록 높은 thermo-AE 에너지와 높은 진동감쇠계수가 측정되었다. 이는 손상면적이 클수록 thermo-AE의 발생정도를 크게 하고 있음을 가리켰다. 또한 최근에 저자들[8,9]은 현미경으로 관찰한 재료 내부의 손상부위를 음향방출신호의 처리결과와 관련시켜서, 저온 냉각과정 및 반복 가열-냉각열부하 사이클에 따른 손상진전과정을 연구하였다. 반복 열부하사이클 시에는 열-음향방출 신호의 카이저 효과(Kaiser effects)가 일어남을 정량적으로 해석하였으며 이를 열-음향 방출의 발생 원인과 관련시켜 해명하였다.

본 논문에서는 저온냉각에 의한 손상을 시험편에 부여하고, 가열-냉각 열부하사이클시의 각 단계에서 검출한 AE거동을 통해 손상의 비파괴평가를 시도한다. 특히 저온 냉각으로 생성된 미세파손의 정도가 열부하사이클 시의 AE신호해석 및 분류를 통해서 평가할 수 있을 것인지에 대해 섬유파단과 모재파손이라는 미세파손 모드와 관련시켜 연구하고자 한다.

2. 실 험

2.1 복합재료

본 연구에서 사용된 복합적층판 시험편은 (주)한국화이바의 두께가 0.125mm인 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그로 만들었다. 즉, 복합적층판은 CFRP 프리프레그 24장을 $[90_6/0_6]_s$형식으로 적층하여 진공백 성형(vacuum bag molding)

공법을 이용하여 예열온도 (precuring temperature) 135℃에서 1시간, 경화온도(curing temperature) 175℃에서 30분의 조건으로 오토클레이브에서 성형했다. 다이아몬드휠 컷터로 이 적층판을 절단하여 x-방향 길이 100mm, y-방향 폭 30mm, z-방향 두께 3mm의 시험편을 제작하였다(문헌[9]의 Fig. 1을 참고).

2.2 저온냉각실험 및 음향방출 측정

냉각박스 안에 액체질소를 충분히 넣은 다음, 시험편을 일시에 투입함으로써 저온냉각에 의한 내부 손상을 유발시켰다. 냉각온도는 액체 질소의 온도인 -191℃이며 냉각유지시간을 20분으로 하였다.

시험편에서 나오는 음향방출파를 측정하고 분석하기 위해서, 우선, 강철재의 도파봉(wave guide)에 부착된 시험편을 일시에 액체질소속에 투입시킨 직후부터 20분 동안 저온 냉각중의 파손에 의한 열-음향방출(thermo-AE) 거동을 실시간 검출했다. 시험편에서 발생하는 AE신호는 진공그리스를 통해 도파봉에 전달되어 도파봉의 바깥쪽 끝에 설치된 AE센서(R15센서: 감지주파수 대역70-560kHz, 공진주파수150kHz)에 의해 감지되었다. thermo-AE신호의 측정 및 분석은 PAC사의 MISTRAS 시스템과 MI-TRA 프로그램을 이용하였으며 측정 데이타로는 AE에너지, 사상수(hit events), 링다운카운트(ringdown counts)수, AE진폭분포(amplitude distribution), AE 파형(time-amplitude signal) 등이다.

2.3 가열-냉각 열부하사이클 실험 및 음향방출 측정

저온 냉각실험 후 시험편과 도파봉이 상온상태로 완전히 돌아온 다음, 가열-냉각 열부하사이클 중의 thermo-AE거동을 연구하기 위해 이들을 석영관내에 배치(문헌[9]의 Fig. 2)하고 이 석영관을 전기로(furnace)속에 설치하였다. 모의봉(*dummy rod*)에 접촉된 열전대(thermo-couple)를 이용하여 석영관내의 온도를 측정하였다. 전기로 내의 열사이클 조건으로는 상온(23℃)으로부터 160℃까지 평균가열속도 5° C/min로 상승시킨 후 상온까지 자연냉각시켰으며 냉각시간은 대략 1시간 30분 정도가 소요되었다. 이와 같은 가열-냉각 열부하사이클 중에 시험편에서 발생하는 음향방출신호를 위에 기입된 음향방출 측정 장치와 방법을 통해 실시간 검출하였다. 또한 위의 가열-냉각 열부하사이클 실험 및 음향방출 측정을 동일 시험편에 대해 2차, 3차로 반복하여 실시하였다.

2.4 손상에 대한 초음파 C스캔 및 현미경관찰

초음파 C-스캔법을 이용하여 저온냉각시험편의 내부손상 분포에 관한 전체적 이미지를 관찰하였다. 수조 함침식 초음파검사장치를 사용하였으며 15MHz의 종파를 발진하는 집속형 탐촉자를 이용하였고 주사간격은 0.085mm, 초점면의 크기는 약 0.1mm였다.

초음파 C-스캔 결과 손상이 발생한 것으로 판단되는 시험편 부위를 저속 다이아몬드 휠 정밀절단기(ISOMET, Buehler사)로 절취하여 절단시에 야기된 절단면 손상부위를 연마지로 고르게 제거하여 광학현미경 관찰용 시편을 만들었다. 이 시편을 몰딩(molding)하고 다이아몬드 혼합액(입자크기 1 μm)으로 시편 단면부를 평면연마 및 폴리싱처리하였다. 이렇게 가공한 시편의 단면부에 나타나는 미세손상을 반사식 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 저온냉각처리에 의해 시험편의 층간분리가 완전히 일어난 부위를 다이아몬드 휠 저속 정밀절단기로 절취 분리하여 증류수 세척 및 진공 건조시키고 파면부에 금이온 플라스마를 이용한 금피막처리를 한 후, 파면에 보이는 미세손상형태를 주사형 전자현미경으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 저온냉각시의 음향방출거동

Fig. 1은 -191℃까지의 급격한 냉각초기부터 매 10초당 축적된 AE사상수(hit events)를 시간축을 따라 20분 동안 히스토그램으로 표시한 AE사상수율(hit-event rate) 거동을 나타낸다. AE 사상수율은 냉각초기 2분 동안 급격한 증가를 보여 최고 약 8000까지 증가한 후에 대략 지수함수적으로 감소하여 12분 이후에는 AE사상수율이 약 2000정도로

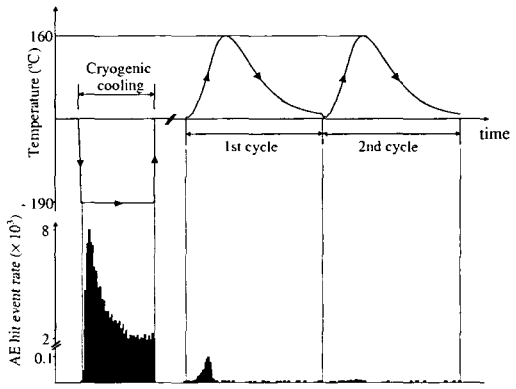

Fig. 1 Behaviors of AE hit-event rates from a composite specimen during cryogenic cooling for 20minutes and, after that, during the 1st and 2nd thermal heating/ cooling load cycles.

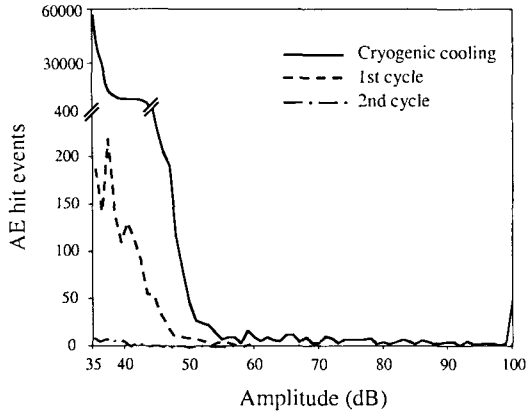

Fig. 2 AE hit-events versus peak amplitude distributions of a composite specimen according to various thermal loads in Fig. 1.

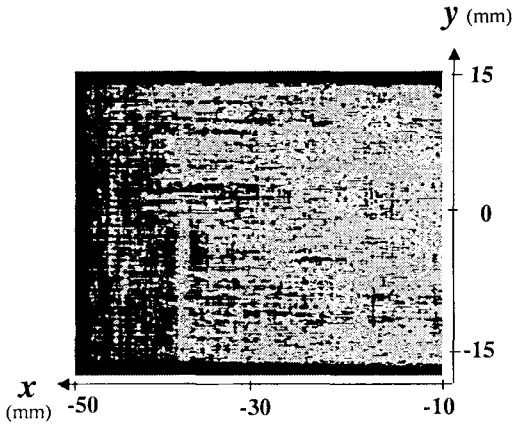

Fig. 3 Ultrasonic C-scan image of a cryogenically-treated composite specimen: The dark image indicates some damaged region due to cryogenic cooling.

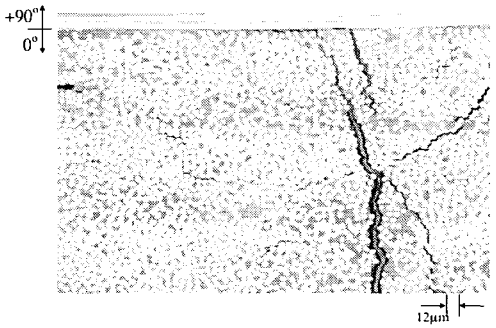

Fig. 4 Optical micrograph taken from the cross-section of the damaged free-edge region in Fig. 3.

낮게 검출되었다. 냉각초기에 AE거동이 활발한 것은, 냉각에 의한 거시적 파괴가 급격히 진전하였음을 가리키며, 냉각후기에도 AE사상수율이 계속하여 검출되는 것은 미세한 파괴가 여전히 발생되고 있음을 나타낸다. 저온냉각에 의한 균열발생은 유한요소 모사해석에 따른 열응력 해석결과[6,7,10]로 이해할 수 있는데, $[90_6/0_6]_s$ 복합재료 시험편의 경우 응력자유온도(120℃)보다 -311℃ 낮은 액체질소 속에서 시험편 모서리부의 중앙부위에 응력분포의 자유단 효과(free-edge effects)가 크게 나타나 시험편 두께방향의 층간응력 σ_z와 평면응력 σ_y가 에폭시수지의 파괴강도(약 50 MPa)를 초과하였음에 기인한다고 볼 수 있다.

Fig. 2는 20분동안의 저온냉각중에 복합재료로부터 검출한 AE신호의 진폭분포별 사상수를 나타낸다. 전체 AE사상수(hit events) 중에서 약 97%이상이 50dB이하의 작은 AE 진폭으로 발생하였으나, 50~100dB의 큰 진폭을 가진 AE 사상도 적지 않게 발생하였다. 큰 진폭의 AE는 수지보다 훨씬 강도가 크고 취성적인 탄소섬유의 파단을 수반하는 거시적 파괴의 발생 및 진전중에 방출되었을 것이며, 작은 진폭의 AE는 주로 수지의 국부적이고 미세한 균열진전으로부터 방출되었을 것으로 사료된다[1-3].

3.2 손상의 발생기구

Fig. 3은 액체질소에 넣어 저온냉각 처리한 $[90_6/0_6]_s$ 시험편의 초음파 C스캔 이미지이다. 그림에서 어두운 이미지는 균열이나 층간분리 (delaminations)등의 파손이 시편 내부에서 발생한 영역을 나타낸다. -191℃의 저온상태를 3차원 유한요소 응력해석결과[6,7,10], 왼쪽 단부에서 인장형 층간응력 σ_z가 크게 집중되어 층간분리가 많이 발생한 것이다.

Fig. 4는 위 시험편의 왼쪽 끝단부에서 y-z단면을 관찰한 광학현미경사진이다. 90°층과 0°층의 경계근처의 0°층 내부로 층간분리가 진전하였으며 이와 동시에 0°층내에서 횡단형 균열(transverse cracks)도 일어났음을 보여준다. 또한, 균열이 진전중에는 섬유파단(fiber breakage)이 발생했을 가능성이 크며 이때에는 높은 강도의 AE가 발생하였을 것이다. 균열진전은 지그재그형의 복잡한 경로로 진행되었다. 이렇게 형성된 균열면은 가열-냉각의 열부하가 주어지면, 섬유(fiber)와 모재(matrix)사이의 열변형 차이로 인해 균열면간의 마찰(friction), 마모(abrasion)를 일으키고 모재에서 2차적인 미세균열(secondary microfracture)을 유발할 수 있을 것이다.

Fig. 5는 시험편을 저온냉각하여 발생한 파면의 주사형 전자현미경(SEM) 사진들이다. Fig. 5(a)와 같은 파면은 주로 모재의 파손거동(Type I 파면)을 나타내며, 이 경우 저주파수, 저진폭의 AE를 발생시키는 것으로 알려져 있다[2,3]. 이러한 모재파손은 저온냉각과정과 1차, 2차, 3차 열사이클

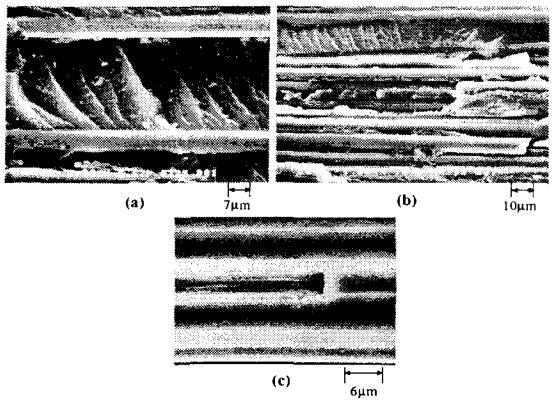

Fig. 5 SEM photographs taken from the fracture surface corresponding to the cryogenically damaged portion of a composite specimen: (a) type I fracture: the fracture of matrix and fiber-matrix interface part, (b) type II fracture: the fracture of both fibers and matrix, (c) type III fracture: fiber breakage with little matrix debris.

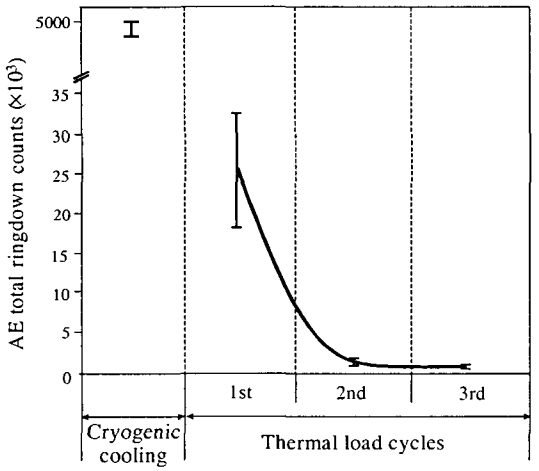

Fig. 6 Total AE ring-down counts measured from the damaged composite for the respective thermal load cycles in comparison with that for cryogenic cooling.

과정 전체에 걸쳐 파손의 정도를 달리하여 일어날 수 있다. Fig. 5(b)와 같은 파면은 섬유파단(fiber breakage)과 모재의 균열이 함께 발생한 경우(TypeⅡ파면)이다. 섬유파단시에는 고주파수의 고진폭 AE가 발생하는 것[2,3]으로 간주할 때, TypeⅡ의 파괴에서는 모재 균열시에 발생하는 저주파수의 AE와 함께 섬유파단시에 발생하는 고주파수의 AE가 혼합된 형태로서 높은 AE에너지가 방출했을 것으로 추정된다. 섬유파단은 저온냉각과정의 높은 열응력 발생시

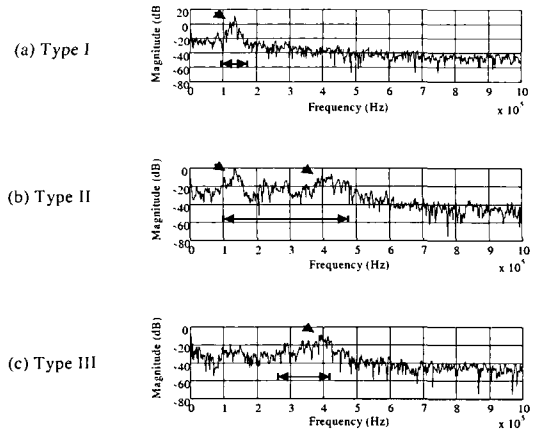

Fig. 7 Fast Fourier transforms for AE signals obtained during the 1st thermal load cycle : (a) type-I signal with a low frequency band, (b) type-II signal with a combination of low and high frequency bands and (c) type-III signal with a high frequency band.

에 많이 일어나고, 그 후의 1차~3차 열부하사이클 과정시에는 적게 발생할 것으로 생각된다. TypeⅢ의 파면(Fig. 5(c))으로는 모재의 파손이 거의 없는 섬유만의 파괴가 있겠으며 이 경우는 주로 고주파수(high frequency)의 AE를 발생하겠지만, 아주 적게 관찰되었다.

3.3 가열-냉각 열부하사이클시의 음향방출거동

저온냉각을 받아 손상이 발생한 복합재료에 대해 상온에서 160℃까지 가열한 후 상온까지 냉각시키는 열부하사이클을 가하면, Fig. 1에 보이는 바와 같이 AE사상수율이 매우 작아져 저온냉각시의 최대 사상수율과 비교하여 약 1/80 수준으로 적어졌다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 각 AE사상의 진폭은 저온냉각시보다 훨씬 작아져 65dB이하에 머물고 대부분은 45dB이하에 분포하였다. 2차 가열-냉각 열사이클에서는 검출되는 AE사상수율이 더욱 적어지고 그 진폭도 43dB이하로 미약해졌다.

Fig. 6은 각 열부하사이클에서 구한 AE링다운카운트 총수를 비교한 그래프로, 1차 열부하사이클의 링다운카운트 총수는 저온 냉각시의 약 1/200에 불과함을 나타내고 있다. 저온 냉각시에는 섬유파단과 모재균열을 수반하는 거시적 균열의 발생 및 진전이 있었을 것으로 추정되지만, 이후의 가열-냉각 열부하사이클에서는 더 이상의 균열진전은 일어나지 않고 각 층에서의 열변형차이로 인해 이미 발생했던 균열의 상하면이 어긋나게 움직이면서 서로 마찰 및 마모가 일어나 AE가 발생한 것[8]으로 생각된다. 따라서 균열면간의 이들 마찰·마모는 2차적인 미소파손을 일으키지만, 2차 열부하사이클부터는 마찰·마모로 인한 균열면에

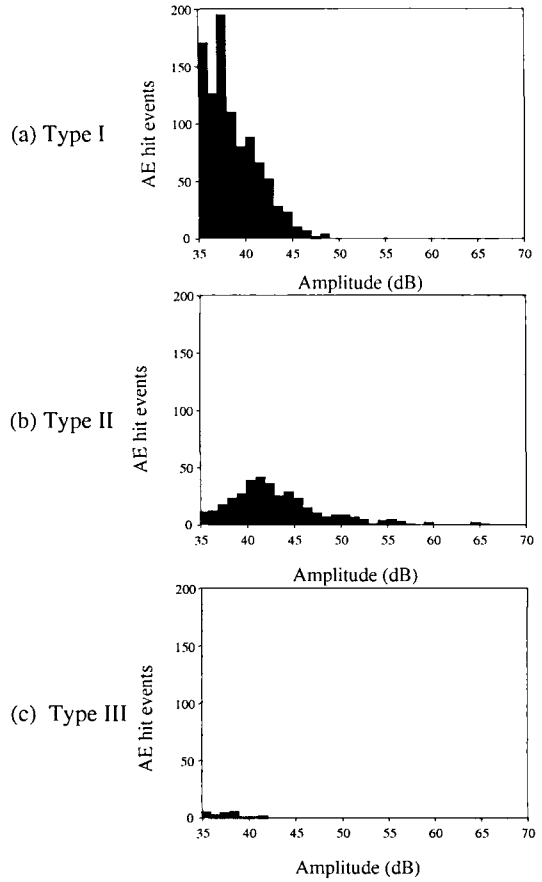

Fig. 8 AE hit events versus peak amplitude distributions for (a) type-I, (b) type-II and (c) type-III signals in Fig. 7.

서의 2차 미소파손이 더욱 적어져 반복 열부하사이클시의 카이저 효과[9]가 AE거동에 나타났던 것으로 생각된다.

1차 열부하 사이클에서 발생한 모든 AE신호를 퓨리에 변환(FFT)하여 각 신호별 주파수 분석을 수행하였는데, 이들은 세 가지의 서로 다른 주파수 특징을 갖는 것으로 분류되었다. 즉, Fig. 7(a)-(c)의 화살표로 가리킨 영역과 같이 저주파가 주된 영역(70~200kHz)을 보이는 Type I, 저주파와 고주파가 동시에 검출되는 영역(70~480kHz)을 보이는 Type II, 고주파가 주된 영역(270~480kHz)을 보이는 Type III로 분류할 수 있었다. 또한, Type II 신호는 Type I과 Type III의 주파수 대역을 함께 갖고 있는 신호라고 볼 수 있다.

이와 같은 주파수 특성을 갖는 각 Type의 AE신호들에 대한 진폭분포곡선을 Fig. 8에 나타낸다. Type I신호들의 경우(Fig. 8(a)), AE진폭은 최대 47dB까지 나왔으나, 주로 40dB 이하에 분포하여 미약한 신호들이었음을 알 수 있다.

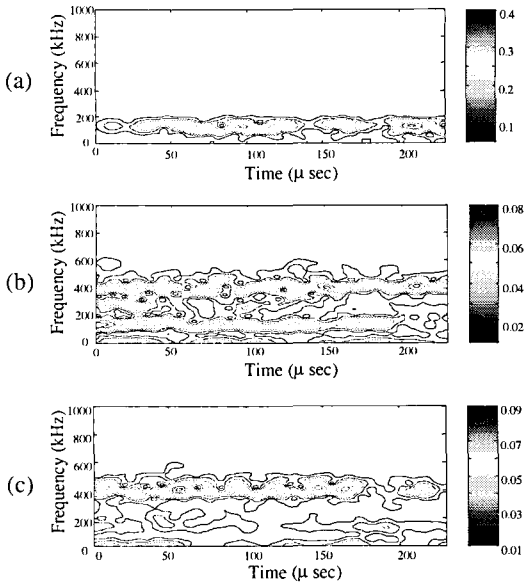

Fig. 9 Short-time Fourier transforms for AE signals obtained during the 1st thermal load cycle : (a) type-I, (b) type-II and (c) type-III signals.

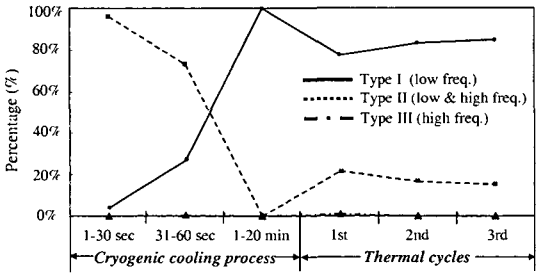

Fig. 10 Relative percentages in AE hit-events for type-I, type-II and type-III signals detected during the entire process of cryogenic cooling and then the thermal load cycles.

Type II신호들의 경우(Fig. 8(b)), AE진폭은 최대 62dB까지 나왔으며 주로 40~47dB에 집중적으로 분포하여 비교적 강한 신호들이었다. 이 결과는 Type I과 Type II의 AE신호들이 진폭분포의 측면에서도 크게 달랐음을 보여주며 AE 발생원(AE sources)이 전혀 다른 것임을 시사하고 있다. Type II신호의 사상수는 Type I의 전체 사상수의 약 30% 정도로 적게 발생하였다. Type III신호들의 경우, 해당 AE 사상수(hit events)가 Type I의 전체 사상수의 약 2%로서 극히 소량으로 발생하였으나, AE진폭은 42dB이하에 분포하고 주로 37dB 근처에 집중하였다(Fig. 8(c)). 이는 진폭분포 영역만으로 볼 때 Type I의 진폭분포영역과 중복되며 미약한 신호들이었음을 가리킨다.

3.4 AE신호해석을 통한 미세손상의 검출 및 평가

복합재료의 국부적 파괴는 모재균열, 층간분리, 섬유파단 등으로 구분할 수 있다. 이러한 국부적 미세파괴의 생성시에 음향방출파가 발생하며, 손상의 종류와 파손모드에 따라 다른 주파수 대역 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 시험편에서 감지되는 모든 thermo-AE 신호에 대해서 상용소프트웨어인 MATLAB 5.3을 사용한 단시간 퓨리에 변환 시간-주파수 분석법(Short-Time Fourier Transform, STFT)으로 처리하여 시간-주파수 영역에서 해석함으로써 시험편 내부에서 발생하는 손상의 특성을 실시간으로 파악하였다. 시험편의 1차 열부하사이클 중에 검출한 AE신호들은 Fig. 9와 같이 저주파가 주된 영역인 Type Ⅰ (70～200kHz), 저주파와 고주파가 동시에 검출되는 Type Ⅱ (70～500kHz), 그리고 고주파가 중점적으로 발생되는 Type Ⅲ (270～500 kHz)으로 분류할 수 있었다. 이들은 각각 3.3절의 파손기구인, 모재파손, 섬유와 모재의 동시파손, 섬유만의 파손과 관련시킬 수 있을 것으로 생각된다. 고주파수 대역(270～500kHz)의 AE는 섬유파단에 대응하고 200kHz 이하의 저주파수 대역의 AE는 모재균열(matrix cracking)에 대응한다고 전제[2,3]할 때, 위의 Type Ⅰ 신호는 모재균열 발생 및 진전중에 방출되고 Type Ⅲ 신호는 섬유파손과 관련될 것이다. Fig. 8(c)와 Fig. 9(c)에서 볼수 있듯이 Type Ⅲ 신호의 진폭은 미약하여 모재균열에 대응하는 Type Ⅰ 신호의 진폭보다도 약한데, 이는 섬유간의 마찰/마모로 인한 섬유표면의 미소파괴가 음향방출원이 되어 그 방출에너지가 작았기 때문으로 추정된다. 또한, 저주파수와 고주파수를 포함하는 광대역의 Type Ⅱ 신호는 섬유파손과 모재파손이 거의 동시에 발생하는 경우와 관련될 것이다.

저온냉각과정부터 3차 열사이클까지의 전 과정에 걸쳐서 Type Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ의 주파수 특성을 갖는 AE신호가 본 연구의 복합재료 시험편에서 검출되었는데, Fig. 10은 그들 신호의 상대적 백분율 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 고진폭 AE파가 압도적으로 많이 발생하여 섬유파단을 수반하는 큰 균열이 주로 일어났음을 나타내고 시간이 흐름에 따라 Type Ⅰ의 저진폭 AE파가 더 많이 발생하여 모재의 미세균열이 활발하게 진전하였음을 나타냈다. 이 결과는 강화섬유의 파단이 초기에 발생한 다음에 모재의 균열이 발생하여 진행하는 것을 가리키며, 복합재료의 파괴기구 해명에 중요한 단서가 될 수 있다. Type Ⅲ의 AE는 전과정에 걸쳐서 드물게 발생하였는데, 이는 모재균열의 진전을 수반하지 않는 섬유만의 파단은 극히 소량으로 일어났음을 나타낸다.

한편 가열-냉각 열부하사이클중에 각 신호Type의 AE진폭의 수준은, Fig. 2에서 보이는 바와 같이 저온냉각중에 발생한 AE의 진폭과 비교하여 약 1/10 이하로 매우 작아졌으며, 이 열사이클을 반복함에 따라 Type Ⅰ신호의 백분율은 86% 정도까지 높아짐에 반해서 Type Ⅱ신호의 백분율은 상당히 감소하였다. 가열-냉각 열부하사이클 전후의 복합재료 손상상태를 초음파 C스캔으로 검사한 결과 거의 차이가 없었는데, 이것은 가열-냉각 열부하사이클에 의해 균열진전이 없었던 것을 말하며, 그럼에도 불구하고 AE신호가 낮은 진폭으로 발생하는 것은 균열 상하면간의 마찰/마모 및 모재의 2차 균열이 미세하게 발생했기 때문이라고 생각된다. 또한 열부하사이클 중에 Type Ⅱ의 고주파수 대역을 갖는 신호가 다소 발생하는 것은, 저온냉각중에 파단한 섬유들의 단부가 균열 상하면에 있으면서 가열-냉각중에 균열 상하면이 서로 반대방향으로 이동하면서 섬유단부간 마찰이나 미세파손을 일으켰기 때문으로 생각된다. Fig. 3과 같이 열부하사이클을 반복함에 따라 AE의 발생이 급격히 감소하여 열적 카이저효과를 나타낸 것은, 시험편내의 균열이 더 이상 진전하지 않으면서 1차 열부하사이클시에 균열 상하면간의 마찰/마모 및 모재의 2차 균열이 일정수준 이상 진행된 데다, 저온냉각 시에 발생하여 축적되었던 손상 주변의 잔류 내부응력이 가열-냉각과정중에 완화되거나 방출된 것으로 생각되므로, 균열 상하면 사이의 접촉력(혹은 마찰력)이 작아져 AE가 급감한 것으로 볼 수 있다.

또한 저온냉각에 의해 형성된 복합재료의 파단면중에서 섬유파단면적이 모재파손면적의 1/10 이하임(Fig. 8참조)을 고려할 때 1차～3차 열부하사이클에서 발생한 Type Ⅰ과 Type Ⅱ AE신호의 백분율은 각각 모재파손, 모재와 섬유의 동시파손들에 관련된 것임을 입증한다고 말할 수 있다. 따라서 이들 Type의 AE신호에 의해 저온 냉각과정중의 서로 다른 특성의 국부적 미세파괴과정 즉, 모재파손, 모재와 섬유의 동시파손, 섬유만의 파단을 Fig. 10과 같이 검출하여 각 미세파손 모드를 평가하는 것은 유효하다고 할 수 있다.

4. 결 론

복합재료의 미세손상의 검출 및 평가에 열-음향방출(thermo-AE)법을 적용하여 비파괴 평가로서의 유효성을 연구하였다. 저온냉각처리를 하여 내부손상이 발생한 시험편에서는 많은 양의 AE 신호가 검출되었다. 가열-냉각 열부하사이클이 반복적으로 가해짐에 따라 thermo-AE 신호는 카이저(Kaiser) 효과를 나타내 AE신호의 발생이 급감하였다. AE신호의 시간-주파수 분석처리결과 AE 신호는 3가지 Type으로 분류될 수 있었으며, 이 결과는 광학현미경, 주사

형 전자현미경, 초음파 C-스캔에 의한 파손거동 관찰결과를 통해 해석되었다. 저온냉각초기에 발생하는 거시적 파괴와 이에 수반되는 섬유파단은 신호강도가 높고 고주파수인 AE파를 주로 발생하였으며, 저온냉각 후기에는 모재파손시에 발생하는 저주파수의 AE신호가 주로 발생하였다. 한편 가열-냉각의 열부하사이클에서는 균열면간의 마찰/마모로 인해 모재의 2차 미세파손(secondary microfracture)이 일어나 주로 저주파수의 약한 AE가 많이 발생하였다. 이와 같이 저온냉각과정부터 3차 열부하사이클까지 Type Ⅰ,Ⅱ, Ⅲ의 AE 신호의 백분율 추이를 분석함으로써, 열응력에 의한 시험편 내부에서의 손상거동과 균열면 사이의 마찰거동 내역(history)을 각 과정별로 시간의 흐름에 따라 추적할 수 있었다. 또한, 1차 열부하사이클에서의 AE신호분석 및 분류를 통해 저온 냉각과정중의 미세파손 모드의 상대적 정도나 백분율을 평가할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2001년도 학술진흥재단의 지원(KRF-2000-E00058)에 의하여 연구되었으며 이에 감사합니다.

참고문헌

1) Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks / Vessels, *ASTM Designation : E1067-01, American Society for Testing and Materials*, September, 2001.
2) Choi,N.S., Takahashi,K. and 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.
3) 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.
4) Sato,N., Kurauchi,T. and Kamigaito,O., "Detection of Damage in Composite Materials by Thermo-Acoustic Emission Measurement," *Journal of Composite Materials* Vol. 22, 1988, pp. 447-458.
5) Sato,N., Kurauchi,T. and Kamigaito,O., "Process monitoring by acoustic emission technique for metal matrix composite components," *Progress in Acoustic Emission V*, 1990, pp. 59-65.
6) 이성혁, 최낙삼, 이정기, 복합적층박판의 열응력파손에 대한 진동활용 비파괴평가, *한국비파괴검사학회지*, 제19권 5호, 1999, pp. 347-355.
7) Choi,N.S. and Lee,S.H., "Nondestructive evaluation of thermal stress-induced damage in thin composite laminates," *Journal of Materials Science*, Vol. 36, 2001, pp. 1685-1693.
8) 김영복, 민대홍, 이덕보, 최낙삼, "열하중을 받는 복합재료 적층판의 손상에 대한 열-음향방출해석," *한국비파괴검사학회지*, Vol. 21, No. 3, 2001, pp. 261-268.
9) 김영복, 최낙삼, "복합재료의 열-음향방출거동에 있어서의 카이저 효과," *한국복합재료학회지*, Vol. 14, No. 5, 2001, pp. 38-45.
10) 이성혁, 최낙삼, "열응력에 의한 얇은 복합적층판의 자유경계단 부위 파손," *한국복합재료학회지*, Vol. 12, 1999, pp. 28-36.