

Cocure/Precure 경화공정에 의해 제조된 Carbon/Epoxy 복합재료의 미시적 파괴거동에 대한 AE 특성

이진경* · 이준현** · 이민래* · 최흥섭***
(2000년 1월 26일 접수)

AE Characteristics on Microscopic Failure Behavior of Carbon/Epoxy Comosite Prepared by Cocure and Precure Process

Jin-Kyung, Lee, Joon-Hyun, Lee, Min-Rae, Lee and Heung-Sup, Choi

Key Words: Cure Process(경화공정), Carbon/Epoxy Composite(탄소섬유복합재료), Three Point Bending(3점굽힘시험), Single Adhesive Layer(단층접착제필름), Multiple Adhesive Layer(다층접착제필름), Acoustic Emission(음향방출)

Abstract

Mechanical and physical properties of composite materials make a great difference due to their cure process condition. In order to clarify the effect of cure process condition on the microscopic damage behavior and failure mechanism of Carbon/Epoxy composites, three point bend test has been performed. For this purpose, two kinds of specimens with single adhesive and multiple adhesive layers were prepared. For single adhesive layer, four different types of specimen were used, that is, non-sanding, sanding, cocured, laminated specimens. Three different types of specimen were also used for the multiple adhesive layer, non-sanding, sanding, cocured specimens. Acoustic emission technique has also been employed to monitor the damage progresses associated with each micro-failure mechanism. The characteristics of AE parameters associated with micro-failure mechanism of each specimen were discussed.

1. 서 론

복합재료는 금속에 비하여 경량, 고강도, 고탄성률 등의 장점이 있기 때문에 항공기 분야 또는 구조재료로서 많이 사용되어지고 있다. 특히 Carbon/Epoxy 복합재료는 경화 수축률이 적고 내화화성이 우수하며 알루미늄에 비하여 높은 비강도를 가지고 있기 때문에 항공기 구조물의 제작에 적합하다. 그러나 섬유강화 복합재료의 손상 및 파괴현상은 매우 복잡하며 특히 굽힘 하중시에는 인장, 압축 및 전단응력이 동시에 작용하기

때문에 더욱더 복잡한 파괴현상을 나타낸다. 섬유강화 복합재료의 이러한 파괴거동에 대한 일련의 연구가 보고되고 있지만 기존의 연구가 복합재료의 적층방향 및 피로특성, 충격에 의한 손상 및 파괴특성에 연구의 초점이 맞추어 왔다.^(1~4) 그러나 복합재료 구조물은 제작시 적용되는 경화공정 및 접착력에 따라 열적, 기계적 성질이 달라지는 특성⁽⁵⁾이 있기 때문에 경화반응에 대한 연구는 복합재료의 광범위한 적용을 위해서는 대단히 중요하다.

한편 복합재료의 경화공정 방법에는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 복합재료 구조물이 일체 성형되어 한번의 경화공정에 의해 완성되는 cocure 경화공정과 일차적으로 경화를 마친 후 접합을 위해 이차적인 경화과정에서 완성되는 precure의 경화공정으로 나눌 수 있다. 이때 각 공정에 따라 경화된 적층판과 접착제 또는 프리프레그와

* 부산대학교 기계설계공학과

** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

E-mail : johlee@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2430 FAX : (051)512-9835

*** (주)대한항공, 한국항공기술연구원

접착제와의 접합강도가 달라질 수 있는데 접착제를 이용한 cocure의 경화공정에 의해 제작된 경우에는 적층판과 접착제 사이에는 각각의 수지가 서로 섞여서 반응에 참여하는 화학적 결합이 형성되며 precure 경화공정에 의해 제작된 시험편인 경우에는 기계적 결합이 형성된다. 이와 같이 서로 다른 경화과정 방법에 따라 피접착제간의 접착 메커니즘이 서로 크게 달라서 전체 구조물의 기계적 특성에 많은 영향을 미치게 되므로 복합재료의 성형 제작에서뿐만 아니라 사용 중 손상된 복합재료 구조물의 수리에 있어서도 수리된 구조물의 강도에 많은 영향을 미칠 수 있다. 한편 고분자 복합재료 및 장섬유 강화, 휘스커 및 단섬유 강화, 입자 분산 강화 등 다양한 방법에 의해 제작된 복합재료의 손상거동 및 파괴기구는 대단히 복잡하기 때문에 일반적인 금속재료에서와 같이 인장시험, 압축시험, 피로시험 등 기존의 기계적 시험 및 파괴시험에 의해 복합재료의 미시적 파손기구를 명확히 분석하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 최근에는 비파괴 평가기법을 이용하여 복합재료 또는 구조물 내부에 존재하는 결함 및 재료의 기계적 손상을 정량적으로 평가하려는 연구들이 보고(6~8)되고 있다. 특히 음향방출기법(Acoustic Emission, AE)은 복합재료의 균열발생, 성장에 의해 발생하는 탄성파를 이용

한 것으로 복합재료의 미시적 파손기구 및 손상 정도를 정량적으로 평가하는데 아주 유용하게 적용되고 있다.(9,10)

따라서 본 연구에서는 접착제를 이용한 cocure 경화공정과 precure 경화공정에 의해 제작된 Carbon/Epoxy 복합재료의 접합특성과 표면 상태에 따른 접합강도를 분석하고 음향방출기법을 이용하여 3점 굽힘 하중을 받는 Carbon/Epoxy 복합재료의 경화공정과 접합특성에 따른 손상정도 및 미시적 파손기구를 규명하고자 하였다. 또한 광학현미경을 이용하여 시험편의 파단면과 그에 따른 파단양상을 관찰하여 복합재료의 손상정도에 따른 AE 신호특성과 비교, 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

본 연구에 사용된 Carbon/Epoxy 시험편은 Hexcel社 제품으로 Douglas社의 소재규정(material specification)에 등재된 DMS2224 (Type 2, Class W, Grade 4) Carbon/Epoxy 직물형 프리프레그와 American Cyanamid社의 접착제 DMS2177을 사용하였다. 경화공정방법에는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 Precure 시험편은 177. C에서 약 6Mpa로 경화된 프리프레그 1장과 경화되지 않은 필름형 접착제 1장씩을 교대로 적층한 후 상온에서 121. C 경화온도까지 -15. C/min으로 승온하고, 3Mpa 압력을 유지하면서 121. C에서 2시간 경화시킨 후 상온까지 -15. C/min으로 냉각시키는 autoclave 환경하에서 2차 경화로 접합하였다. Cocure 경화공정에 의해 제작된 시험편은 경화되지 않은 프리프레그와 접착제를 1장씩 교대로 적층한 후 177. C, 3Mpa 압력하에서 1회 경화하였다. 그리고 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 프리프레그와 접착제 1장씩 교대로 적층하여 만든 시험편을 다층접착제 필름(multiple adhesive layer) 시험편이라고 하고 프리프레그 4장을 적층하고 경화한 후 1장의 접착제를 접착하고 다시 4장의 프리프레그로 적층한 시험편을 단층접착제 필름(single adhesive layer) 시험편이라고 칭하였다. 한편 precure 시험편인 경우 접착제에서의 표면 거칠기가 접합 강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 사포(sand paper, #340)로 표면을 거칠게 한 경우와 표면처리를 하지 않은 경우에 대하여

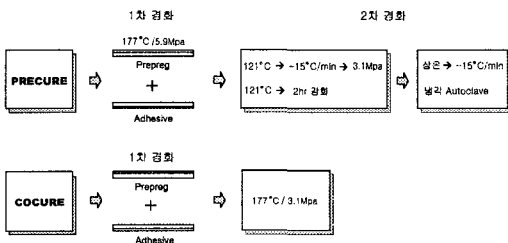


Fig. 1 Illustration of cure process

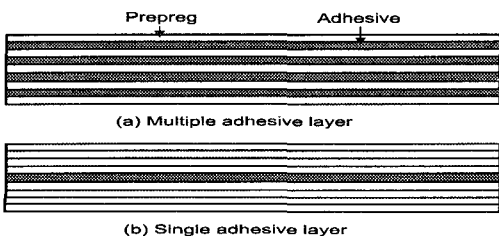


Fig. 2 Multiple and Single adhesive layer specimens

Table 1 The characteristic of each specimens used in this study

Process	Surface Condition	Single Adhesive	Multiple Adhesive
Laminate	-	0_8	
Cocure	-	0_4 /adhesive layer/ 0_4	$(0$ /adhesive layer) $_4$ / 0
Precure	Sanding	0_4 /adhesive layer/ 0_4	$(0$ /adhesive layer) $_4$ / 0
	Non Sanding	0_4 /adhesive layer/ 0_4	$(0$ /adhesive layer) $_4$ / 0

각각 실험을 실시하였으며 시험편의 규격은 100 × 13 × 2mm로 정하였다. Table 1에서는 본 연구에 사용된 시험편의 종류를 나타낸 것이다.

2.2 실험방법

Fig. 3은 본 연구의 전체적인 시험 개요도를 나타낸 것으로 최대용량 10ton의 유압식 재료시험기(INSTRON 8501)를 사용하여 0.5mm/min으로 시험편에 하중을 가하게 되면 시험편 내에 균열이 발생, 성장함에 따라 탄성파가 발생하게 된다. 이때 발생된 탄성파는 시험편에 부착된 AE 센서에 의해 감지된 후 예비증폭기(PAC 1220A, 100~1200kHz)에서 40dB 증폭시켰다. 증폭된 신호는 AE 본체(MISTRAS 2001)에서 AE 카운트, 지속시간, 진폭 등의 AE 인자들에 의해 분석되어진다. 그리고 AE 신호의 파형을 분석하기 위하여 디지털 오실로스코프(LeCroy 4310A)를 이용하여 각 발생원에 대한 신호의 형태를 분석하였다. 또한 3점 굽힘 시험시, 양 지지점 사이의 길이는 70mm로 정하였으며 AE 센서는 광대역 센서(WD)를 사용하였다. 또한 주위의 노이즈를 제거하기 위하여 문턱전압값은 10mV로 설정하였으며 광학 현미경(Olympus)을 사용하여 시험편의 파단면과 그에 따른 파단양상을 관찰하여 복합재료의 손상정도에 따른 AE 신호특성과 비교, 검토하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경화공정에 따른 파괴거동 특성

본 연구에서는 음향방출(AE)을 이용하여 Carbon/Epoxy 복합재료의 손상 메커니즘 및 경화공정에 따른 미시적 파괴양상을 규명한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. Fig. 4는 3점 굽힘 시험을 통한 Carbon/Epoxy 복합재료에 대한 크로스

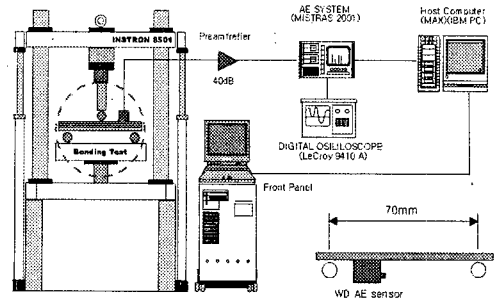
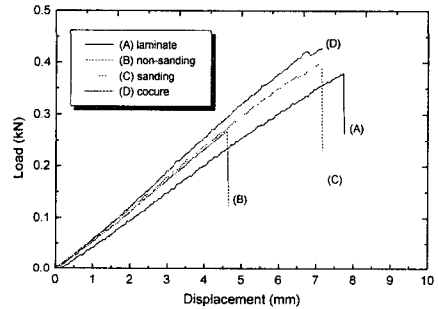
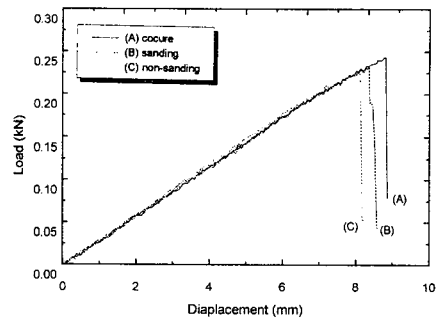


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental set-up



(a) Single adhesive layer



(b) Multiple adhesive layer

Fig. 4 Load versus displacement curve

헤드의 변위와 하중곡선을 나타낸 결과이다. 그림에서 보여 주는 바와 같이 4가지 경우의 방법에 의해 제조된 시험편 모두 변위에 따라 하중이 선형적으로 증가하였으며 파단에 이르러 급격하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 먼저 Fig.

4(a)의 경우는 단층접착제 필름 복합재료에 대한 굽힘 강도를 나타낸 결과로서 그림에 나타난 바와 같이 라미네이터(laminate) 시험편이 가장 변위를 나타내었으며 cocure 경화공정에 의해 제작된 시험편이 가장 높은 굽힘 강도를 나타내었다. 그리고 precure 경화공정에 의해 제작된 시험편 중에서 표면을 표면처리(sanding)한 시험편이 표면처리를 하지 않은 비표면처리(non-sanding) 시험편에 비하여 약 30% 정도 높은 굽힘 강도를 나타내었다. 따라서 precure 경화공정에 의해 복합재료를 제작하더라도 어느 정도 표면처리를 할 경우 굽힘 강도를 현저히 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 다층접착제 필름 복합재료의 경우 Fig. 4(b)에서 보여주는 바와 같이 앞의 단층접착제 필름형과 마찬가지로 cocure 경화공정에 의해 제작된 복합재료가 가장 높은 굽힘 강도를 나타내었다. 그러나 비표면처리 시험편에서는 앞의 단층접착제 필름형과는 달리 표면처리 시험편과 비슷한 굽힘 강도를 보였다. 따라서 다층접착제 필름형으로 성형 제작할 경우 표면 상태에 따라 굽힘 강도는 크게 영향을 받지 않았다. 그리고 Fig. 4(a)에서 cocure 경화공정에 의해 제작된 시험편인 경우 하중과 변위의 기울기의 값이 다른 시험편에 비해 높게 나타났다. 이것은 단층접착제 필름형에서 cocure 시험편이 precure 경화공정에 의해 제작된 시험편에 비해 화학적 결합으로 형성되었기 때문에 접합강도와 취성의 성질이 더욱더 강하게 나타난 반면 다층접착제 필름형에서는 cocure 시험편, precure 시험편 모두 비슷한 기울기를 나타내고 있다. 이것은 다층접착제 필름형인 경우 접착제 필름이 각각 4장씩 들어있기 때문에 하중-변위 관계에서 경화공정보다는 접착제 필름의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다. 또한 위의 결과에서 나타난 바와 같이 일반적으로 프리프레그를 여러장 적층하여 제조한 단층접착제 필름 시험편의 굽힘 강도가 프리프레그 사이에 접착제 필름을 적층한 다층접착제 필름 시험편의 굽힘 강도보다 높게 나타남을 알 수 있다.

3.2 재료손상 및 파괴거동에 따른 AE 특성

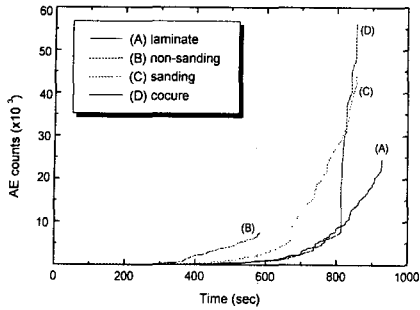
Fig. 5(a)는 단층접착제 필름형의 시험편에 대한 시간에 따른 AE 카운터의 누적분포와의 관계를 나타낸 것으로서 4가지 경우의 시험편에서 AE

카운터는 시간에 따라 선형적인 비례관계를 가지고 있으며 파단에 이르러 급격하게 증가하는 양상을 나타내고 있다. 특히 cocure 경화공정에 의해 제작된 (D) 시험편인 경우, AE 신호가 발생하는 초기에 다른 시험편에 비하여 AE 카운터가 현저히 적게 발생함을 알 수 있다. 이것은 cocure 시험편인 경우 한번의 경화공정에 의해 제작되어 모재와 접착제 필름 사이에 화학적 결합으로 형성되기 때문에 모재와 접착제 필름 사이에 계면 손상은 거의 발생하지 않고 인장 모드에 의한 모재의 손상에 의해 소수의 AE 카운터만 발생하였기 때문이다. 이러한 결과는 Fig. 11의 파단면 관찰에서도 cocure 경화공정에 의해 제작된 시험편인 경우 모재와 접착제 필름 사이에 계면 분리현상이 관찰되지 않는 것과 잘 일치하고 있다.

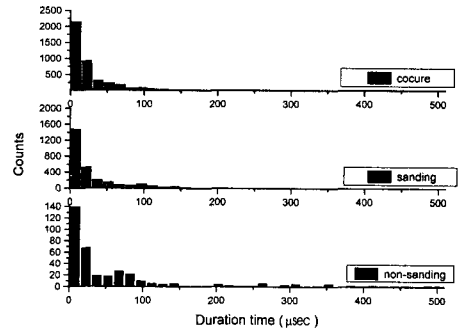
그러나 비표면처리 시험편인 (B)의 경우 초기에 다수의 AE 카운터가 발생하고 있다. 비표면처리 시험편인 경우 파단면 관찰에서 모재의 손상보다는 모재와 접착제 필름 사이의 계면손상에 따른 계면박리(delamination)에 의해 AE 카운터가 발생하며 하중이 증가함에 따라 계면손상은 현저하게 발생하여 계면분리 현상에 의해 완전 파괴에 도달하였다. 계면 분리 현상에 의해 발생하는 AE 신호는 하나의 AE 신호에 다수의 AE 카운터가 발생하는 파형을 나타내므로 하중 초기에 누적된 AE 카운터는 다른 시험편에 비하여 많이 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 다층접착제 필름형으로 성형 제작된 시험편의 AE 카운터의 누적분포를 나타낸 것으로 앞의 단층접착제 필름형과 마찬가지로 cocure 경화공정에 의해 제작된 시험편에서 AE 신호 발생초기에 가장 적은 수의 AE 카운터를 나타내었다. 따라서 단층접착제 필름형 또는 다층접착제 필름형으로 적층을 하더라도 cocure 경화공정으로 시험편을 제조하는 것이 precure 경화공정으로 제조하는 것보다 하중초기 계면박리 현상이 거의 발생하지 않아 굽힘강도가 높게 나타남을 알 수 있다.

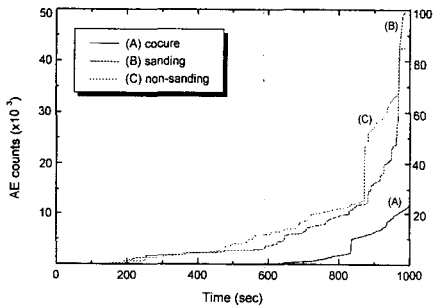
Fig. 6은 각 시험편에 발생한 AE 신호의 지속 시간과 AE 카운터와의 관계를 히스토그램 분포로 나타낸 것이다. 먼저 단층접착제 필름형 시험편의 경우 Fig. 6(a)에서 보여주는 바와 같이 cocure, 표면처리, 비표면처리 시험편 모두 지속시간이 100 μ s 이하의 신호들이 지배적이지만 표면



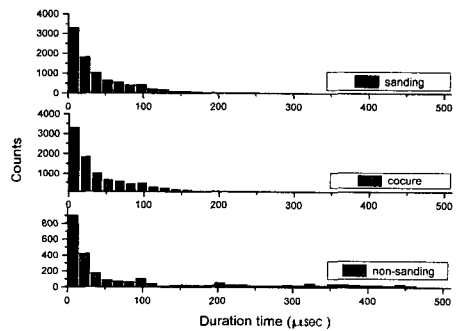
(a) Single adhesive layer



(a) Single adhesive layer



(b) Multiple adhesive layer



(b) Multiple adhesive layer

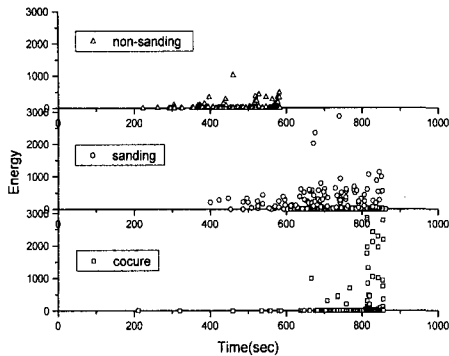
Fig. 5 AE cumulative counts versus time

처리를 하지 않은 비표면처리 시험편인 경우 200 μ s 이상의 지속시간을 갖는 신호가 다수 검출되었다. 이것은 앞에서 언급하였듯이 계면손상에서 오는 계면박리의 영향으로 인하여 하나의 AE 신호에 다수의 AE 카운터가 발생하여 비교적 지속시간이 긴 형태의 신호들이 다수 발생하였기 때문이다. 따라서 200 μ s 이상의 지속시간을 갖는 신호가 발생하였다는 것은 간접적으로 굽힘강도가 그만큼 저하하였다는 것을 알 수 있다. 한편 다층접착제 필름형의 경우에서도, 단층접착제 필름형의 시험편과 마찬가지로 cocure, precure 경화공정에 의해 제작된 시험편 모두 100 μ s 이하의 신호들이 지배적이며 비표면처리 시험편에서는 지속시간이 200 μ s 이상인 신호가 다수 검출되었다. 이것은 뒤의 파단면 관찰에서도 알 수 있는 바와 같이 다층접착제 필름형의 비표면처리 시험편에

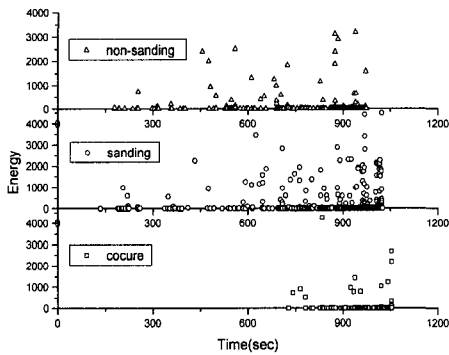
Fig. 6 AE cumulative events versus duration time

서 하중이 가해짐에 따라 압축 모드가 작용하는 시험편 윗부분의 최외각 프리프레그와 접착제와의 계면에서 계면분리현상이 발생하기 때문에 이때 발생하는 신호는 비교적 지속시간이 긴 신호가 발생하였다.

Fig. 7에서는 각 시험편에 발생한 AE 신호의 에너지 분포를 나타낸 것으로 Fig. 7(a)는 단층접착제 필름형의 시험편을 나타낸 것으로 비표면처리 시험편인 경우 발생한 AE 신호의 에너지는 대부분 600이하의 신호들이다. 이것은 파단면 관찰에서 모재의 손상은 관찰되지 않고 모재와 접착제 필름과의 계면으로 계면박리에 의해 최종 파괴에 도달하기 때문에 계면손상으로 발생하는 AE 신호는 600이하의 에너지를 갖는다는 것을



(a) Single adhesive layer



(b) Multiple adhesive layer

Fig. 7 Energy versus time

알 수 있다. 또한 표면처리 시험편에서는 600 이상에서 1000 사이의 에너지를 갖는 신호가 다수 발생하며 특히 cocure 경화공정에 의해 제작된 시험편인 경우 파단 직전에 2000이상의 현저히 높은 에너지를 갖는 신호가 다수 발생하였다. 즉 접합강도가 증가하여 굽힘 강도가 클수록 파단될 때 AE 신호는 더욱더 높은 에너지를 발생한다는 것을 알 수 있다.

한편 다층접착제 필름형인 Fig. 7(b)의 비표면처리 시험편에서 발생하는 AE 신호의 에너지는 표면처리, cocure 시험편과 비슷한 에너지를 갖는 신호가 다수 발생하였다.

이러한 결과는 앞의 Fig. 4의 각 시험편의 굽힘 강도변화 결과에서 알 수 있었던 바와 같이 다층

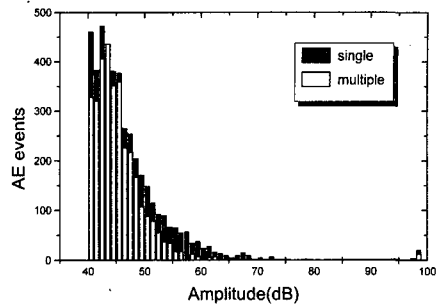


Fig. 8 AE events versus amplitude in the specimen prepared by cocure process

접착제 필름형에서의 비표면처리 시험편의 굽힘 강도는 단층접착제 필름형과는 달리 타 시험편과 비슷한 굽힘 강도를 나타내는 것과 일치하는 결과를 나타낸다.

한편 동일한 경화공정으로 제작된 시험편 중 단층접착제 필름형으로 적층한 경우와 다층접착제 필름형으로 적층한 경우의 시험편에 대하여 미시적 손상에 대한 AE 신호특성을 평가하기 위하여 Fig. 8과 Fig. 9에서는 cocure 경화공정으로 제작된 시험편 중 단층접착제 필름형과 다층접착제 필름형에서 발생한 AE 신호 특성을 나타낸 것이다. Fig. 8은 AE 사상수와 진폭과의 관계를 나타낸 것으로 60dB 이상의 고진폭을 가지는 신호는 단층접착제 필름형의 시험편이 다층접착제 필름형에 비하여 다수 발생하고 있다. 따라서 동일한 경화 공정으로 제작한 시험편 중 단층접착제 필름형으로 적층하는 것이 다층접착제 필름형으로 적층하는 것보다 접착력이 우수하다는 것을 의미한다. 이것은 단층접착제 필름형은 접착제 필름이 1장인 반면 다층접착제 필름형은 4장으로 적층되어 있기 때문에 프리프레그간의 화학적으로 결합한 경우가 프리프레그와 접착제 필름간의 접착력보다 우수하며 결과적으로 굽힘 강도가 단층접착제 필름형이 다층접착제 필름형보다 높게 나타나는 것과 같은 결과를 나타낸다.

Fig. 9는 발생한 AE 신호의 상승시간을 나타낸 것으로 다층접착제 필름형의 시험편과 단층접착제 필름형 시험편 모두 하중이 점차적으로 증가함에 따라 AE 신호는 비슷한 상승시간을 갖는 신호가 발생하지만 파단에 도달하면 50 μ s 이상의

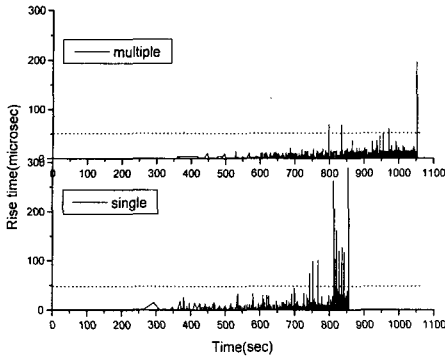


Fig. 9 Distribution of rise time in the specimen prepared by cocure process

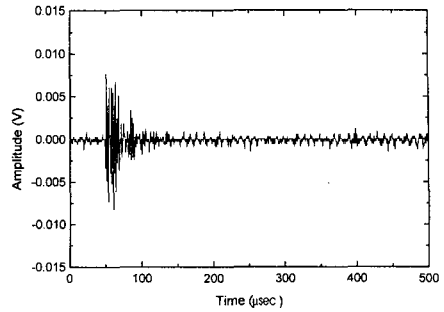
비교적 긴 상승시간을 갖는 신호가 발생한다. 특히 단층접착제 필름형인 경우 상승시간이 긴 신호가 다수 발생하는데 이러한 결과는 다층접착제 필름형으로 적층하는 것보다 프리프레그간의 화학적 결합으로 적층되어 있기 때문에 프리프레그의 파단시 두드러지게 큰 신호가 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 10에서는 디지털 오실로스코프를 이용하여 시험편에서 발생하는 파형을 나타낸 것으로서 Fig. 10(a)는 cocure 경화공정에 의해 제작된 시험편의 파단시 발생하는 전형적인 파형을 나타낸 것으로 주로 기지재 균열(matrix cracking)에 의한 파괴 메커니즘이 지배적이므로 지속시간이 짧은 돌발형 형태의 신호가 발생하였다.

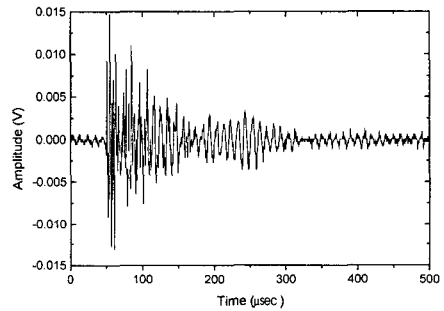
그러나 비표면처리 시험편에서 발생하는 파형은 Fig. 10(b)에서 보여주는 바와 같이 모재의 손상에 의한 신호보다는 모재와 접착제 필름 사이의 계면손상에 의한 계면박리에 의해 비교적 지속시간이 긴 형태의 신호가 다수 검출되었다.

3.3 시험편의 균열진전 및 파괴양상

Fig. 11은 광학 현미경을 이용하여 단층접착제 필름형으로 적층한 시험편의 파단면을 관찰한 것과 균열진전 양상을 스케치한 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 cocure 경화공정에 의해 제작된 시험편인 Fig. 11(a)의 경우 굽힘 모우멘트가 최대로 작용하는 시험편 배면 중앙에서 균열이 발생하여 두께 방향으로 진전하는 파괴 양상을 보여주었다. Precure 경화공정에 의해 제작된 시



(a) Waveform for matrix cracking



(b) Waveform for delamination

Fig. 10 Waveforms for matrix cracking in cocure specimen(a) and delamination in non-sanding specimen(b)

험편 중 표면처리를 한 표면처리 시험편인 Fig. 11(b)인 경우 cocure 시험편과 마찬가지로 시험편 배면 중앙에서 균열이 발생하여 두께 방향으로 진전하며 또한 접착제 필름과 모재와의 계면으로도 약간의 균열이 진전하였음을 관찰할 수 있었다. 그러나 precure 비표면처리 시험편인 Fig. 11(c)에서는 모재의 손상은 전혀 발생하지 않고 접착제 필름과 프리프레그와의 계면으로 균열이 발생, 성장하여 계면손상에 의한 계면분리 현상이 현저히 발생하였다. 그리고 다층접착제 필름형으로 적층한 경우의 시험편에서도 위와 비슷한 파괴양상을 나타내었지만 cocure 시험편인 경우 모재와 접착제 필름과의 계면으로의 계면손상이 약간 관찰되었다.

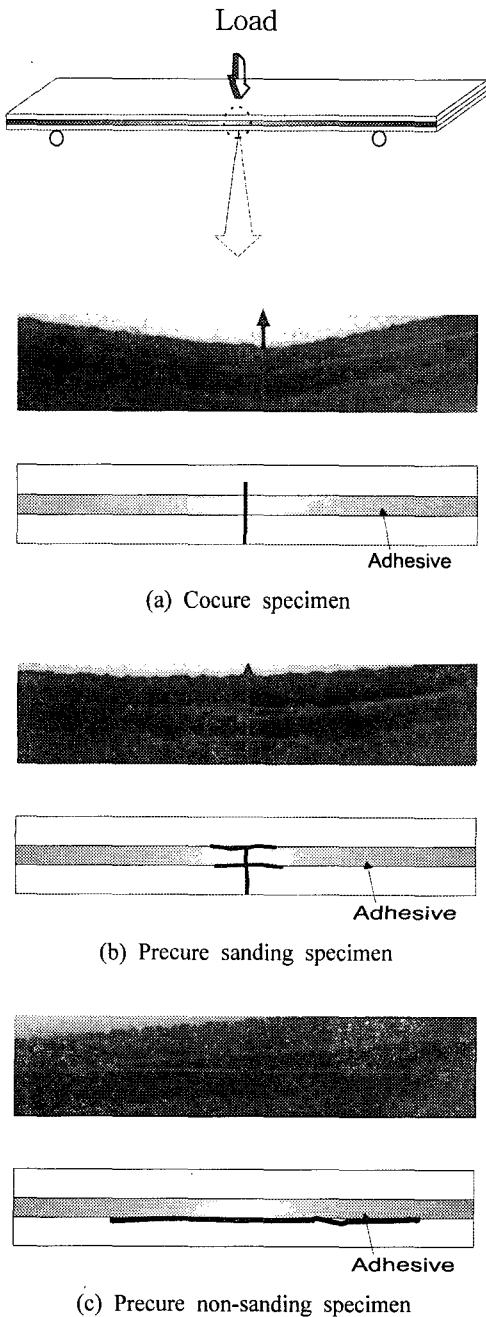


Fig. 11 Fracture behaviors at thickness direction of specimen and schematic diagram of crack path

4. 결론

본 연구에서는 Carbon/Epoxy 복합재료의 경화공정에 따른 손상거동 및 미시적 파손기구를 평가하기 위하여 음향방출기법과 광학현미경을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 단층접착제 필름형의 cocure 경화공정으로 제조한 시험편의 굽힘 강도가 최대로 나타났으며 precure 경화공정으로 제조한 시험편 중 표면을 표면처리한 시험편의 굽힘 강도가 비표면처리 시험편에 비하여 30%정도 높게 나타났다. 한편 단층접착제 필름형의 cocure 시험편 역시 가장 높은 굽힘 강도를 나타내었으며 precure 표면처리 시험편과 비표면처리 시험편은 비슷한 굽힘 강도를 보여 단층접착제 필름형과 다른 양상을 나타내었다.

(2) 파단면 관찰에서 cocure 경화공정에 의해 제조된 시험편인 경우 굽힘 모우멘트가 최대로 작용하는 시험편 배면중앙에서 모재의 파단에 의해 최종파괴가 발생하며 precure 표면처리 시험편인 경우에는 모재와 접착제 필름과의 계면으로 균열의 진전이 관찰되지만 모재의 파단에 의해 최종파괴에 도달한다. 그러나 비표면처리 시험편인 경우 모재의 손상은 전혀 관찰되지 않고 모재와 접착제 필름과의 계면에서 균열이 발생, 성장하여 완전파괴에 도달하였다.

(3) Carbon/Epoxy 복합재료에 대한 손상거동 및 미시적 파괴기구를 규명하는데 있어서 음향방출기법을 적용하여 그 타당성을 평가한 결과 AE 인자들 중 지속시간, 에너지, 진폭, 상승시간 등이 복합재료에 대한 모재 및 계면손상을 평가하는데 있어서 매우 유용함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 최낙삼, Dinloch, A.J., 1998, "모드 I 하중조건 하에 있는 다방향 적층 복합재료의 층간파괴거동," 대한기계학회 논문집 A, Vol. 22, No. 3, pp. 611~623.
- (2) Poursatip, A., Ashby, M. F. A., and Beaumont, P. W. R., 1986, "The Fatigue Damage Mechanics of a Carbon Fiber Composite Laminate : I-Development of the Model," *Composite Science and Technology*, Vol. 25, pp. 192~218.
- (3) 한경섭, 송정일, 1995, "단섬유 보강 금속복합재료의 피로균열전파거동과 파괴기구," 대한기계학

- 회 논문집, 1995, Vol. 19, No. 11, pp. 2817~2829.
- (4) Daniel, I. M. and Lee, J. W., 1990, "Damage Development in Composite Laminates under Monotonic Loading," *J. of Composite Technology and Research*, Vol. 12, pp. 98~102.
- (5) 최홍섭, 정정화, 하종민, 안규중, 남재도, 1997, "Cocure/Precure 경화과정 및 수분흡수에 따른 복합재료 적층판의 접합면 강도평가," 한국복합재료학회 춘계학술대회, pp. 1~6.
- (6) Qing-Qing NI, 1998, "Application of Time-frequency Analysis to Acoustic Emission Signals for Composites," *ICCE/5*, pp. 663~664.
- (7) Lee, J. H. and Park, J. M., 1995, "Acoustic Emission Study of Micro-Failure Mechanisms of Dual Basalt filaments Reinforced Epoxy Composites(DFC)," *AECM-5*, pp. 240~249, Sweden.
- (8) Lee, J. H., Kim, J. H., Yoon, D. J. and Kwon, O. Y., 1992, "Acoustic Emission Monitoring of Fracture Process of SiC/Al Composites under Cyclic Loading," *AECM-4*, pp. 300~309, Seattle, U.S.A.
- (9) 이강용, 1992, "음향방출법에 의한 복합재료와 금속재료의 균열거동해석," 대한기계학회지, Vol. 32, No. 1, pp. 28~38.
- (10) Lee, Joon-Hyun. and Kwon, Oh-Yang., 1996, "On-line Monitoring of Micro-Failure Mechanism of SiC/Al Composite by Acoustic Emission," *J of Japan Soc. for Strength and Fracture of Materials*, Vol. 30, pp. 91~104.