論文

음향방출법을 이용한 Glass Fiber/PET 복합재료의손상평가

김상태*† · 김덕윤*

Damage Evaluation of Glass Fiber / PET Composite Using Acoustic Emission Method

Sangtae Kim*† and Duckyun Kim*

ABSTRACT

In this study, damage evaluation of glass fiber reinforced thermoplastic composites was investigated with acoustic emission method. Specimens of 1.7mm thickness laminate were made from PET and 7 layers of glass fabrics. Notch and impact loading were added to the specimen and normal tensile test and tensile test with the dead load were carried out. AE signal was measured as the functions of notch ratio to the width and impact energy in order to find out the correlation between fracture mode and AE parameters. The result has shown that low amplitude of AE signal was due to the microcrack of matrix and its growth, whereas the amplitude in the mid range was the response to the delamination and interfacial separation. In the range of high amplitude above 90dB, the fracture of glass fabric was found. Tensile strength decreased with increasing notch ratio to the width and impact energy because of the effect of delamination, the cracking of matrix and stress concentration. In proportion to the size of damaged area, AE signal showed its wider range of frequency and energy as well as increased number of hits.

초 록

본 연구에서는 유리 섬유 강화 열가소성 복합재료의 손상평가를 음향방출법을 이용하여 관찰하였다. 시편은 PET와 유리섬유를 7겹으로 적층시켜 만들었으며 두께는 1.7mm이다. 노치 시험편과 충격 시험편을 제작하여 단순인장시험과 부하-제하 시험을 수행하였다. AE 신호의 파라미터와 파괴모드간의 관계를 찾아내기 위해 충격 에너지와 노치비의 함수로 AE신호를 측정하였다. 실험결과 모재의 미소균열과 성장 때문에 저진폭 AE 신호가 나타났고, 중진폭 신호는 섬유와 모재간의 층간분리와 계면분리에 대응됐다. 또한 90dB의 고진폭 영역에서는 유리섬유의 파단과 대응되었다. 층간분리와 모재의 균열과 응력집중의 영향 때문에 노치비와 충격 에너지가 증가할수록 인장강도는 감소했다. 손상영역의 비율에 따라 AE 신호는 넓은 영역의 주파수가 나타날 뿐만 아니라 신호도 증가하였다.

1. 서 론

유리섬유강화 플라스틱 복합재료(GFRP)는 비강도, 비강성, 내부식, 중량감소의 측면에서 우수한 특성을

*† 영남대학교 기계공학부, 교신저자 (E-mail: stkim@ynucc.yeungnam.ac.kr)
* 영남대학교 기계공학부

나타내며 보강재의 방향을 임의로 조정하여 재료의 이방성을 변화시킬 수 있는 것 등 여러 가지 장점들 때문에 실제 구조물에 사용되는 빈도는 점차 증대되고 있다. 그러나, 이러한 복합재료의 적용에 있어 가장 큰 문제점은 재료가 하중을 받을 때 강도, 강성 및 수명의 감소를 일으키는 손상의 복잡한 기구와 불규칙한 파괴양상에 의한 신뢰도의 부족이다[1-2]. 섬유강화 복합재료에 있어서 손상의 전개는 재래식 금속재료와는 근본적으로 큰 차이를 나타내며 모재의 균열, 모재와 섬유의 분리, 층간분리, 섬유 파단 등의 복잡한 형태로 구성되어 있으므로 손상된 재료의 파괴거동은 매우 복잡한 양상을 보인다[3-4]. 따라서 종래에 금속재료의 파괴특성을 파악하기 위하여 행하였던 실험만으로는 복합재료의 파괴특성을 정확하게 파악하기란 거의 불가능하다. 이러한 복합재료의 파괴특성을 파악하고 신뢰성을 확보하기 위해서는 먼저 손상과 파괴기구에 대한 정량적 규명을 행한 결과를 바탕으로 파괴특성의 평가를 행하는 것이 중요한 과제로 되어 있다. 한편, 섬유강화 복합재료의 평가법으로서 비파괴 평가법은 확립되어져 있다고 할 수는 없다[5-8]. 그것은 종래의 비파괴 검사법이 금속재료 등의 균일 등방성체를 대상으로 발전되어진 방법으로써 섬유강화 복합재료와 같은 불균일 재료에 그대로 적용시키기에는 많은 문제점을 안고 있을 뿐만 아니라 실시간 평가법이 아니므로 복잡한 파괴기구를 갖고 있는 복합재료의 평가법으로는 부적당한 점이 많았다. 그 중에 AE (acoustic emission)에 의한 비파괴검사법은 대상물에 붙인 AE 변환자에서 미시적인 파괴에 따른 탄성파방출을 수신하여 광범위하게 손상의 위치, 크기, 종류를 실시간으로 평가할 수 있는 잠재력을 갖고 있는 평가법으로서 주목받고 있으나 금속뿐만 아니라 세라믹, 복합재료 등에 적용하기 위하여서는 많은 연구가 이루어져야만 한다[9-10]. 따라서, 섬유강화 복합재료에 대한 비파괴검사법의 적용방법 및 평가기준을 설정하고 이를 기초로 하여 섬유강화 복합재료의 정확한 파괴특성 평가법을 개발하기 위하여 본 연구에서는 glass fiber/PET 복합재료를 이용하여 시험편의 폭에 대한 노치의 길이가 다른 시험편과 충격손상이 가해진 시험편을 이용하여 각 시험편에 대한 인장시험과 하중의 부하-제하의 반복에 의한 인장시험을 실시함과 동시에 AE변환자를 시험편에 붙여 시험시에 발생한 AE신호를 수록 해석하였다. AE신호의 해석에는 AE이벤트 발생수, AE에너지, 진폭 분포 등의 파라미터로써 해석하고 SEM 사진을 촬영·비교하여 AE 검사법의 유효성과 평가기준을 설정함과 동시에 파괴기구에 관한 정확한 이해를 하고 이 결과를 기초로 하여 섬유강화 복합재료의 새로운 파괴특성 평가법을 개발함에 목적이 있다.

2. 실험방법

2.1 시험편제작

사용된 재료는 (주)한국 화이바에서 제작된 618CR 유리섬유 7겹과 새한 미디어(주)의 필름형태의 PET 3장을 1겹으로 하여 총 8겹을 유리섬유 사이에 적층, 예열후 가압한 인장시험편을 ASTMD3039/D3039M의 규격에 의해 Fig. 1과 같이 제작하였다.

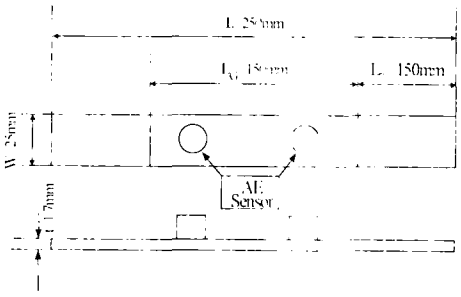


Fig. 1 시험편 형상.

2.1.1 노치 시험편

노치 시험편은 건전재 시험편의 양단에 균열길이의 변화를 주어(2a/W = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5) 단순인장시험과 부하-제하 시험을 하여 건전재와 인장강도의 변화, AE파라미터의 변화 등을 측정한다. 저속 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 시편 가공시에 생기는 notch 외적인 영향을 최소화했다.

2.1.2 충격 시험편

Fig. 2의 공기압식 충격시험기를 사용하여 공기압의 변화에 따른 충격량의 변화를 주어 충격량과 파단강도, AE파라미터와의 상관관계를 관찰한다. 실험방법은 노치재와 동일하게 단순 인장실험과, 부하-제하 실험을 수행했다.

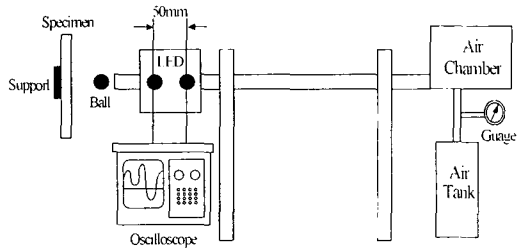


Fig. 2 공기 압축식 충격시험기 장치도.

2.2 실험방법

본 연구에 앞서 사용될 AE변환자의 교정은 두 단계에 걸쳐 이루어졌다. 첫 단계로서 공진주파수 150kHz인 압전변환자의 단독 교정에는 접촉법을 이용하여 펄스 위에 진공 그리스를 바른 후 펄스와 변환자를 압착시킨 후 150kHz의 정현파를 입력시켜 여러 개의 변환자중 검출감도의 차가 1dB이하인 2개의 변환자를 선택하여 노치를 중심으로 각각 40mm떨어진 시험편의 표면에 변환자를 부착하였다. 본 실험에 사용된 인장시험기는 Shimadzu사에서 제작한 AG-5000E 5Ton 만능재료시험기이며 단순 인장 실험은 실온 대기중에서 크로스헤드 속도 1mm/min으로 인장하중을 가하며 하중부하-제하 실험법을 이용한 인장 실험은 크로스헤드를 0.5mm/min으로 속도를 제어하였다. 이렇게 하중이 가해진 재료가 손상됨에 따라 발생되는 탄성파는 변환자로 검출되어 100㎑~1.2㎒의 밴드패스필터(bandpass filter)를 이용하고 있는 예비증폭기(gain : 40dB)를 통하여 추가증폭기(gain : 20dB)의 지원을 받는 PAC사 제품인 Mistras-2001로 수록, 해석을 수행했다. 이 시스템의 threshold값은 예비증폭기 입력환산 100㎶(45dB)이다. 또 실험은 AE계측과 동시에 응력, 변형율, AE신호의 파라미터, 파괴기구, 손상과정을 실시간으로 비교, 분석할 수 있도록 했다. 이렇게 검출된 AE신호는 에너지, 이벤트, 진폭분포등의 파라미터를 이용하여 파괴기구를 규명하는데 이용되어진다. 하중 부하-제하를 이용한 인장시험법(FR인장)은 Fig. 3에서 알 수 있듯이 Kaiser effect를 응용한 시험법이며, 카이저 효과는 소성변형에 있어서 동일 방향에 연속으로 변형을 줄 경우 응력을 제거하면 원래의 응력에 도달할 때까지는 AE신호가 관찰되어 지지 않는 현상이다. 이것은 소성 변형을 동반하는 재료에 있어서 재료의 응력 이력을 알 수 있는 중요한 현상이다. 복합재료는 응력을 제거하였다가 다시 응력을 가하면 원래의 응력에 도달하기 이전에 AE신호가 검출되는데 이것은 재료의 열화에 의한 AE신호이다.

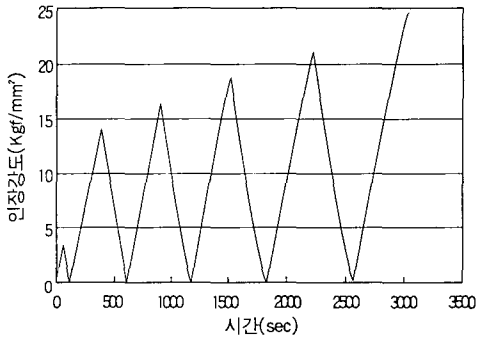


Fig. 3 하중 부하-제하에 의한 인장실험 예.

3. 실험결과 및 검토

3.1 노치재

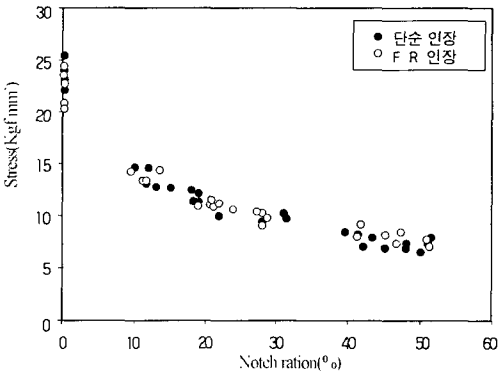


Fig. 4 노치비와 최대인장강도의 상관관계.

Fig. 4에서 보면 Y축에 나타나 있는 건전재의 인장강도는 200kN ~ 250kN의 값을 나타내고 있으며, 단순인장과 FR인장에 의한 인장강도가 노치비에 비례해서 선형적인 감소를 보이고 있으나 두 실험 모드사이에서 인장강도의 차이는 없는 것을 볼 수 있다. 0.2% 노치재의 단순인장 실험을 한 결과를 Fig. 5에서 보면 초기의 낮은 하중상태에서는 70dB이하의 진폭을 가지는 신호가 발생되다가 파단에 가까워지면서 90dB이상의

신호가 검출되었다. 이는 일반적인 섬유강화 복합재료의 파괴 순서로 보면 초기의 낮은 하중에서는 모재의 균열과 진전, 섬유와 모재의 분리가 발생된 후 최종적으로 섬유의 파단과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

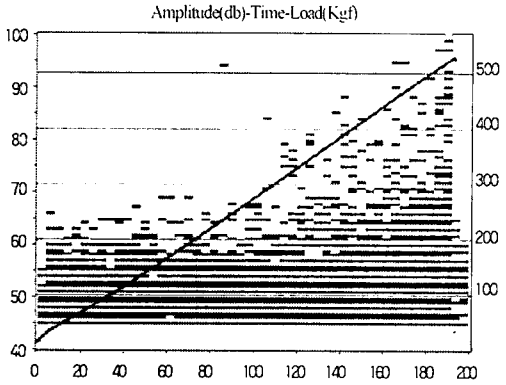


Fig. 5 0.2% 노치재의 진폭분포.

Fig. 6은 노치재의 최종 파단면을 나타낸 것이며 이것을 확대한 Fig. 7에서는 모재의 균열과 모재에서 섬유가 뽑혀나간 흔적을 발견할 수 있다.

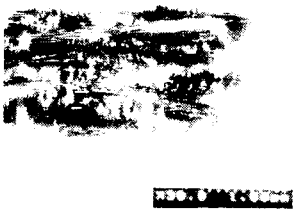


Fig. 6 노치근방의 파단면(SEM).

Fig. 7 파단면 확대(SEM).

3.2 충격재

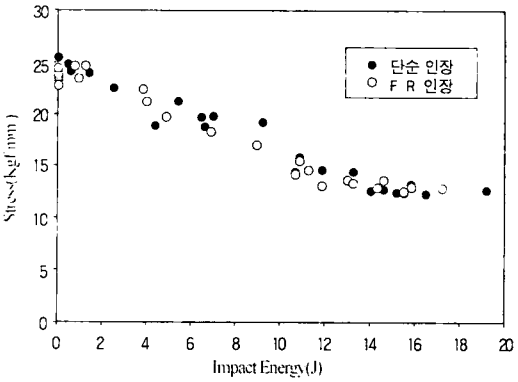
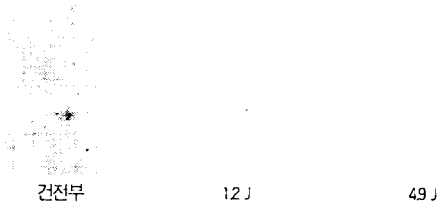


Fig. 8 충격에너지와 최대인장강도의 상관관계.

충격에 의한 인장강도의 변화는 Fig. 8에서 보듯이 15J이상의 충격에너지에서는 인장강도의 감소 현상이 없어지는 것을 알 수 있는데, Fig. 9에서는 충격에너지가 증가함에 따른 표면 손상 면적과의 상관관계를 생각해 볼 수 있다. 공기 압축식 충격시험기에 사용된 지름이 14.267mm의 강구의 크기에 의해서 충격에 의한 손상면적은 더 이상 늘어나지 않기 때문인 것으로 생각된다. 충격량이 증가하면서 충격손상 단면적이 증가하고 동시에 충격 손상부위의 변형량이 증가하고 모재의 균열과 계면분리 섬유의 파단이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 충격 손상부에 응력집중을 일으켜서 인장강도의 저하를 가져오는 요인으로 작용을 한다.

충격 손상재를 부하-제하에 의한 인장실험을 하면서 AE상비로 신호를 검출한 결과 Fig. 10 에서 시간과 에너지의 관계, 시간과 진폭과의 관계를 보면 초기 하중상태에서는 낮은 에너지 레벨과 저 진폭의 신호가 나타나며 에너지 레벨이 높아짐에 따라서 진폭의 크기도 점점 커지는 것을 알 수 있다.



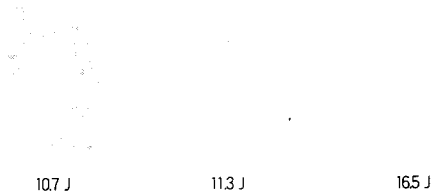


Fig. 9 충격면 정면 사진.

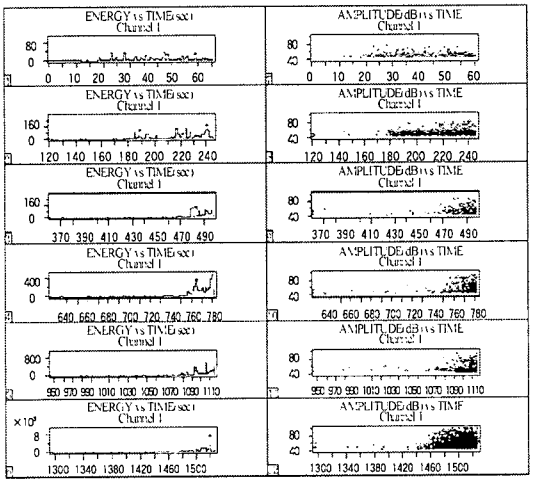
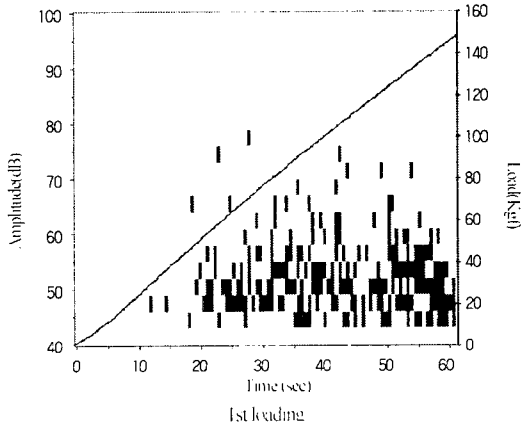
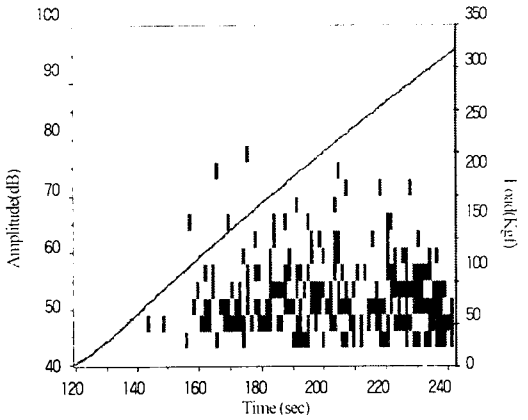


Fig. 10 충격손상재의 AE 에너지와 진폭분포.

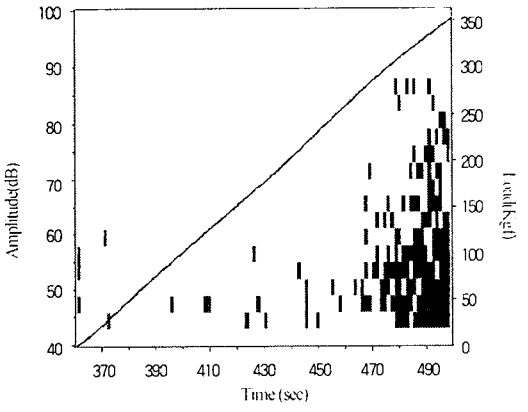
Fig. 11에서는 하중-시간-진폭의 상관관계를 알아보기 위한 그림으로 비교적 낮은 진폭의 신호가 나타날 때 하중그래프는 선형적인 반면에 파단에 이르러서 90dB이상의 신호가 나타나기 시작하는 시점에서는 비선형성을 보인다. 이는 섬유강화 복합재료의 중대한 손상을 미치는 인자는 섬유의 파단임을 나타낸다.



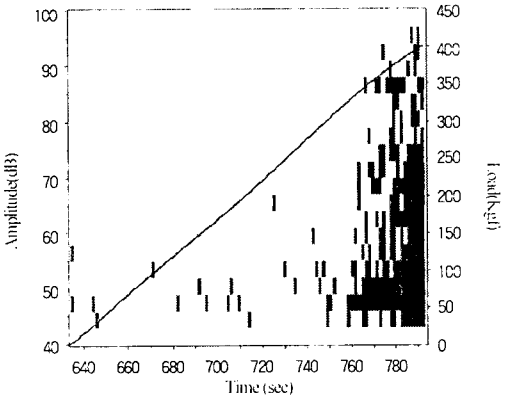
1st loading



2nd loading



3rd loading



4th loading

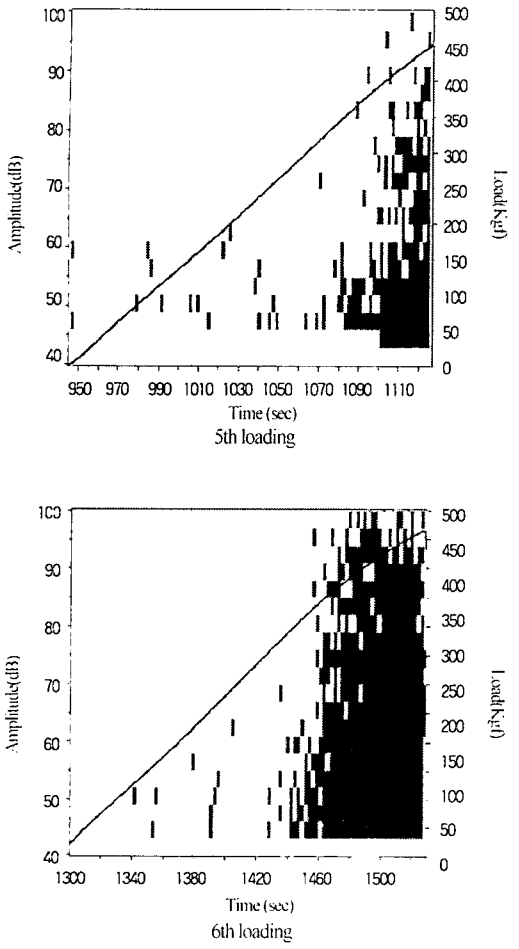


Fig.11 FR인장에 의한 AE진폭분포와 하중관계.

4. 결 론

본 연구는 노치 손상과 충격손상을 가한 glass fiber / PET 복합재료의 손상에 따른 파괴양상의 변화를 알아보기 위하여 비파괴검사법의 한 방법인 음향방출법(AE)을 이용하였다. 실험 방법으로는 단순 인장실험과 FR인장 실험방법을 적용하였고, 음향방출법의 각종 파라미터와의 관계를 살펴보았을 때 다음과 같은 결과를 알 수 있다.

1. 파괴모드와 진폭을 살펴보면 저진폭(70dB이하의 경우는 모재의 미소균열과 성장에 대응되며, 중 진폭(70dB~90dB)은 섬유와 모재의 분리, 계면 분리에 대응되며, 고진폭(90dB이상)은 섬유의 파단에 대응되는 것을 알 수 있다.
2. 노치비와 충격량의 증가에 따라 손상부위에서의 응력 집중 등에 의해서 인장강도가 감소하였다.
3. 하중의 부하-제하를 이용한 인장 실험법에서 보면 재료의 파단이 모재의 파괴나 계면분리보다는 섬유의 파단이 재료의 중대한 손상을 일으키는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 영남대학교 2000학년도 교비 자유공모과제연구비와 두뇌한국21사업에 의해 지원된 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Cooper, G.A., "Micromechanics Aspects of Fracture and Toughness Composite Materials." Willy, New York, 1976. pp. 415-448.
(2) Smith, T.R. and Owen, M.J., "Progressive Nature of Fatigue Damage in FRP." *Modern Plastics*, 1969. pp. 128-133.
(3) 이유태, 김상태, 김광수 "음향방출법을 이용한 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)의 파괴인성 평가." 한국복합재료학회지, 제10권, 제1호, 1997. pp. 23-33.
(4) Vaidya U.K, Raju P.K., "Identification of Failure Modes of Carbon-Carbon Composites at Various Processing Stage Using the Acoustic Emission Technique." *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 118, 1996. pp. 446-453.
(5) 金原 勲, 岸輝雄, H.C. Kim, "複合材料の 超音波による材質評價, 日本機械學會誌 第82권 제721979. pp. 77-82.
(6) 金原勲, "複合材料の非破壞檢査の現狀と問題点." 新素材びその製品の非破壞檢査シンポジウム, 日本非破壞檢査協會, 東京, 1985. pp. 37-42.
(7) Fowler, T.J., "Acoustic Emission Testing of Chemical Process Industry Vessels." *Progress in Acoustic Emission II* JSNDI, Sendai, 1984. pp. 421-449.
(8) Holroyd, T.J. "AE from and Industrial Application View Point." *Progress in Acoustic Emission IV* JSNDI, Kobe, 1988. pp. 39-48.
(9) Drozdov, A.V., Velodva O. Galenko, George A.Gogotsi, and

Michael V. Swain, "Acoustic Emission during Micro and Macrocrack Growth in Mg-PSZ," *J. Am. ceram. soc.*, 1991, pp. 1922-27.

(10) Rouby, D. "Acoustic Emission: a micro -investigation technique for interface mechanisms in fiber composites," *AECM3 proceeding Ed. by ASNT*, 1989, pp. 313-322.