

복합재료 시험편에서의 AE 발생 특성에 관한 연구 Acoustic Emission Measurement on the Composite Material (CFRP)

최 만 용*
M. Y. Choi

ABSTRACT

Acoustic Emission was monitored during tensile test and loading-holding-unloading cycle test for two types (notched and unnotched) of CFRP specimens. AE activities showed that the fiber breakage during tensile tests depended upon the specimen geometry. We obtained new AE parameter such as the ration (damage ratio=AE events during unloading test / AE events during loading test) and the felicity ratio from which we investigated dynamic fracture process of CFRP specimens.

The damage ratio of AE events was shown to be a good indicator to distinguish the generated fracture mechanism, such as fiber breakage and delamination. Also, ultrasonic testing results after loading-holding-unloading cycle test were good agreement with AE test results to detect defects or fiber breakage.

1. 서 론

공업용 복합재료는 각종 프랜트나 건물 등의 파이프, 탱크 및 용기 등으로 광범위하게 사용되고 있다. 또한 항공기, 선박 등에서도 사용하기 시작하고 있다. 그러나 그 재료의 품질평가법이나 안전성, 신뢰성에 대한 평가 기술은 아직 체계적으로 확립되어 있지 않고 있다. 한편 향후 복합 재료를 각종 분야에 사용할 경우 무엇보다도 재

료의 신뢰성 미확보로 설계·제작 및 사용중 검사에 있어 많은 문제를 갖게 된다. 지금까지 압력용기나 기름배관등에서는 CARP¹⁾에서 수행한 시험결과를 토대로 ASMI, ASTM, API의 규격이 제정되었다. 여기서는 AE 발생의 수, 진폭크기, 지속시간, felicity비 등을 기본으로하여 판정을 하고 있다.¹⁻²⁾ 또岸는 FRP 재료를 사용하여 각종 조건의 인장시험편을 만들고 인장시험시 발생하는 AE (Acoustic Emission) 특성으로 부터 파괴 모드의 추정을 시도하였고³⁻⁴⁾ 특히 Source wave 해석으로 부터 AE 파형을 직접 검출하였다⁵⁻⁶⁾

* 正會員 : 한국표준연구소

마찬가지로 AE에 의한 파괴기구의 연구는 山口⁷⁾, 鈴木⁸⁾등에 의하여 활발히 연구되어 왔다.

본 연구에서는 AE 측정법에 의한 FRP의 품질 평가법을 확립하기 위해 CFRP 재료로 인장시험편을 만들고 인장시험시 발생하는 AE 특성과 파괴거동과의 상관관계를 연구하였다. 우선 단축인장시험편을 만들고 노치재료와 판재시험편에 응력을 가하여 이에 따른 진폭분포와 AE 발생위치 변화에 대한 해석과 파괴진행과정을 추정하였다. 한편 부하-유지-부하제거시험에서는 시험 후 피시험체에 대하여 초음파 탐상을 하여 시험결과와 AE 발생위치, 진폭분포의 시간적 변화등을 비교하여 파괴과정을 추정하였다. 또 손상계수(damage ratio)등의 새로운 AE 파라미터를 사용하여 재료의 신뢰성 평가수법에 관한 검토를 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 및 인장시험

시험편은 P3051-30 (일본제, 섬유는 T300, 수는 2500, 130°C 경화형)을 적층하고 Hot Press

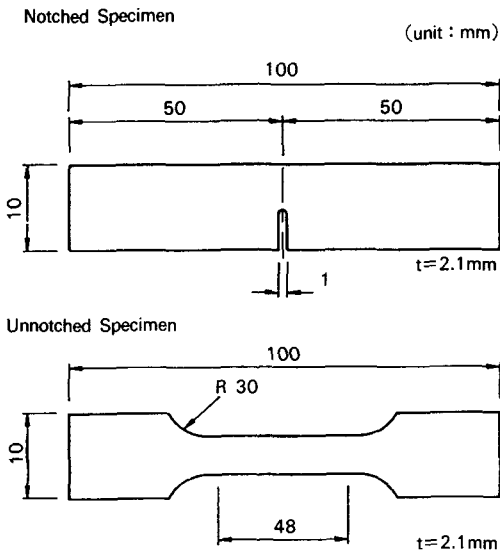


Fig.1 CFRP specimen

에서 가압성형후 기계가공하였다. 이때 성형조건은 130°C에서 2시간, 섬유함유율은 64%이다. Table에서 시험편의 기계적 성질을, Fig.1은 시험편의 형상을 표시한다. 단축 인장시험편은 평활재, 노치재로 나누어 인장시험을 하였으며 이때 시험속도는 0.1mm/min로 일정하게 유지하였다.

Table 1. Mechanical properties of CFRP specimen

Mecanical propety	CFRP specimen
• Density, gr / cm ³	1.51
• Tensile strength, kg / mm ²	133(0°), 9.0(90°)
• Young modulus, kg / mm ²	13.080(0°), 907(90°)
• Fiber volume fraction	64%
• Fiber	T300(p3051-30(東L))
• Matrix	epoxy
• Elongation	0.5%

2.2 AE 측정 및 교정

AE 측정에는 PAC사 3000/3104 AE 어나라이저를 사용하였다. AE 신호를 검출하기 위해 고감도의 AE sensor를 사용하였고 공진주파수는 150kHz이다. AE 신호는 2채널을 통하여 수집되었으며 Pre-Amp에서 20dB 증폭, 주증폭기에서 20 dB 증폭을 하여 어나라이저에 입력하였다. 또한 Threshold 값은 100μV로 하였다. 이때 입력신호는

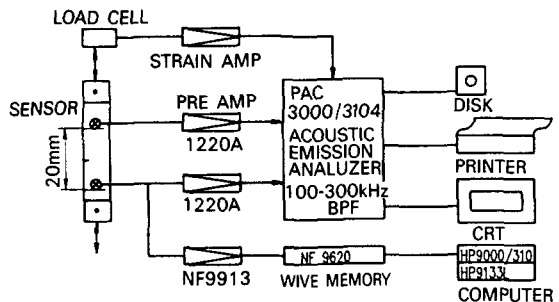


Fig.2 block diagram of AE instrumentation

AE 에너지, AE 발생수, AE 발생위치 등이 AE 파라미터로 해석되고 기록된다. 시험편을 지그에 물린 후 AE 계측 시스템을 교정하기 위해서 시험편의 중앙에서 연필심 ($\phi 0.5\text{mm}$, 2H)을 압결하고 자연적으로 발생하는 AE 음원을 대신하였다. 이것은 또한 AE 발생위치의 결정에 있어서 교정 자료로서 결함 발생위치, 분포등의 계산에 귀중한 역할을 하였다. Fig.2는 AE 계측시스템의 블럭다 이그램이다.

2.3 초음파탐상시험

시험편에 대하여 인장시험 전·후에 초음파탐상시험을 실시하여 내부손상도를 확인하였다. 탐상은 초음파를 시험편의 두께 방향으로 퍼치를 약 1mm씩 일정하게 이동시키며 시험편 전면적을



Photo.1 Experimental apparatus for tensile test on CFRP specimen

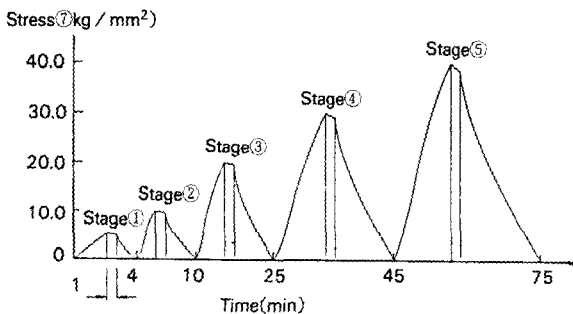


Fig.3 Loading-Holding-Unloading Cycle

탐상하였으며 C-scope으로 영상처리를 하여 평면적인 결함분포를 알 수 있었다. 이때 사용한 초음파의 시험주파수는 25MHz이다.

2.4 부하-유지-부하제거시험

부하는 전시험에서 모두 일정속도 0.1mm/min로 하였다. Fig.3은 부하사이클 시험의 조건을 표시하고 있다. 부하유지시간은 각 단계별로 일정하게 1분간으로 유지하였고 부하-유지-부하제거시험을 반복하였다. 즉 40kg/mm²까지 5단계로 나누어 부하를 가하고 제거하여 반복시험을 수행하였으며 이때 시험편 양끝에 접착시킨 AE sensor를 통하여 각 단계별로 AE 발생특성을 파악할 수 있었고 CFRP 파괴과정을 좀더 명확히 규명하게 되었다. 또한 시험이 다 끝난 시험편에 대하여 초음파탐상시험을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단축인장시험에서의 AE 발생결과

Fig.4는 AE 계측결과와 파단하중과의 관계를 나타내는 것으로 AE 발생수가 급증하는 점은 인

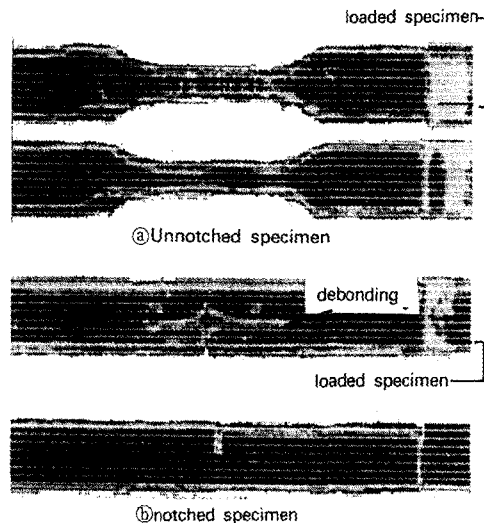


Photo.2 Ultrasonic test result after loading-holding-unloading

장시험편에서 파괴활동이 활발히 일어나고 있음을 의미하고 있다. 즉 평활재에서는 판단하중의 60%, 노치재의 경우는 판단하중의 20% 부근에서 AE 발생수가 급증하는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 AE 측정방법을 사용하여 복합재료로 구성된 구조물이 판단하중에 이르기전에 균열부나 결함

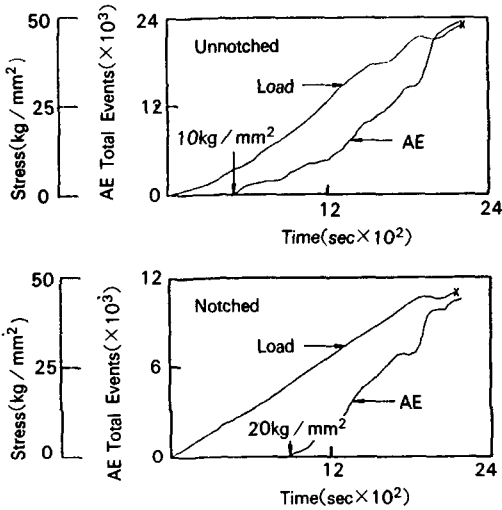


Fig.4 Relationship between load and AE total events during tensile testing for CFRP

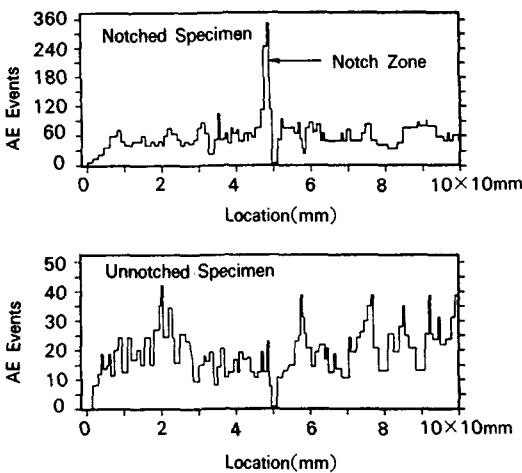


Fig.5 AE location and events on CFRP specimen

부들을 발견할 수 있게되었고 사고방지를 위한 감시시스템을 구성할 수 있다.¹⁻² AE 발생 위치는 노치재의 경우 중앙부에서 집중적으로 발생하나 평활재의 경우는 시험편의 굴곡부에서 보다 많은 AE가 발생한 것으로 나타났다. Fig.5는 AE 발생 위치를 AE 신호도착시간차에 의하여 구한 것으로 평활재의 경우 AE 발생이 시험편 전체에서 일어난 것을 알 수 있다. Fig. 5에서의 횡축은 시험편의 길이와 같은 크기이다. 평활재 시험편에서 20이상의 AE Events가 발생된 지점은 수지와 섬유가 파단된 곳으로 초음파탐상 시험결과와 잘 일치하고 있다.

Fig.6은 AE 진폭분포를 나타낸 것으로 평활재가 더 큰 AE 진폭신호를 나타내고 있다. 여기서 40~52dB는 수지의 균열, 52~64dB는 층간박리, 그리고 64dB 이상은 섬유파단 및 이들의 합체에 의한 균열진전에 의한 대진폭의 AE가 발생한 것이다. 노치재에서 0-90° 적층판의 인장하중에 의한 파괴과정은 노치균열부의 90°층의 파괴 (transpass crack)나 수지파단이 생겨서 층간박리 등이 축방향으로 전파한 것이며 이것은 노치재의 AE 진폭분포를 통하여도 알 수 있다. 노치재는 이미 노치에 의하여 수지가 파손되었고 층간 박리에 의한

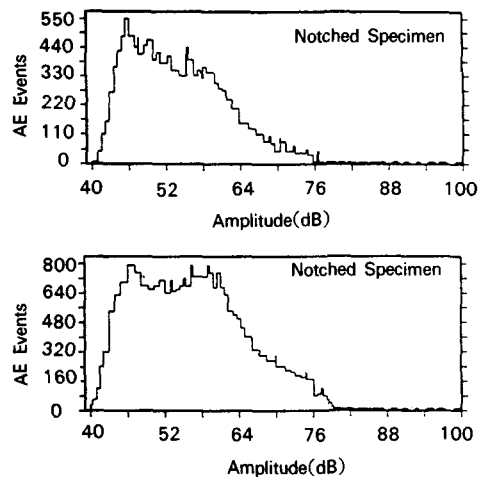


Fig.6 AE amplitude distribution on CFRP specimen

AE의 발생이 평활재 보다 적게 발생하였다. 평활재의 경우는 우선 0° 방향의 섬유파단이 발생한 후 90° 층의 파괴 (transpass crack)가 발생하고 층간박리로 되고 합체되어 간다고 추정할 수 있다.

3.2 부하-유지-부하제거실험결과

노치재시험편의 끝부분에서 인장시험기로서 인장하중을 가하는 제1단계에서는 AE 진폭이 70 dB 부근의 것이 많이 검출되고 제2, 제3단계에서는 60dB, 제4, 제5단계에서는 50dB의 AE 진폭이 많이 발생하였다. 노치부로부터 6mm 떨어진 부근에서는 제2단계 까지도 거의 AE가 검출되지 않았다. 한편 제3단계에서는 50dB, 제5단계에서는 60dB 부근에서 AE 발생이 크게 증가하였다. Fig.7 은 노치재의 2단계 부하시험에 발생한 AE 특성을 나타낸것으로 노치부분에 집중적으로 AE가 발생한 것과 인장하중의 증가 및 유지시에 대진폭의 AE가 다량으로 발생함을 알 수 있다. 이것은 복합재료의 섬유파단에 의한 대진폭 AE의 발생을 의미하고 있다. 초음파 탐상에 의한 결과를 사진1

에서 비교해 보면 더욱 명확하게 된다. 즉 노치부의 섬유파단부분은 큰 결함상태로 있는 것이 나타나고 있으며 인장하중이 증가해도 대진폭의 AE가 많이 발생하지 않고 오히려 점점 진폭크기가 작아지며 다수의 AE가 발생함은 노치부와 같은 결함부분의 섬유파단은 끝이나고 평활재 CFRP의 시험편에서 발생하는 AE 발생특성을 갖는다. 이것은 Fig.8의 (A) 같이 평활재의 인장-부하제거 시험에서 알 수 있듯이 부하인장하중이 적게되면 AE 발생도 적고 소진폭의 AE가 발생함을 알 수 있다. 그러나 하중의 증가와 더불어 섬유주변의 박리등에 의한 소진폭 AE의 증가와 대진폭의 AE가 발생한다. 이때 섬유파단은 일어나게 된다.

Fig.8의 AE 발생지역을 d지역과 c지역으로 구분하여 각각 d지역의 진폭분포를 (B)에, c지역의 진폭분포를 (C)에 표시하였다. 대진폭 AE는 (C)에서 보다 (B)에서 더 많이 발생하였다. 즉, 섬유주변의 박리가 합체되어 큰 결함형태로 작용하게 됨을 알 수 있고 이것은 노치재의 CFRP 시험편을 시험하는것과 똑같은 결과를 가져온다.

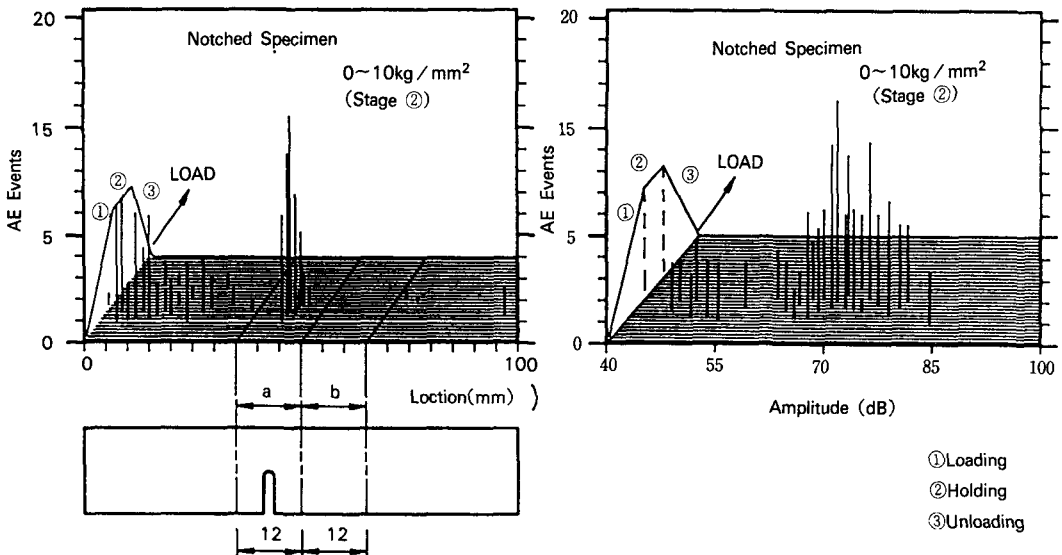


Fig.7 Acoustic emission from notched specimen on the second during loading-holding-unloading test

사진 2에서 결합부분으로 나타난 곳과 Fig.8의 결합위치는 잘 일치하고 있다.

3.3 손상계수 및 Felicity비

손상계수 (부하제거시의 AE 발생수 / 부하시의 AE 발생수) 및 Felicity비 (재부하시에 AE가 발생하는 하중 / 과거에 받은 최대하중)에 대해서는 Table 2에 정리하였다. Table 2에서 알 수 있듯이 평활재와 같이 건전부를 유지하고 있는 시험편에서는 카이저효과가 그대로가 잘 나타남을 알 수 있고 노치재와 같은 경우는 값이 변함을 알 수 있다. 그러므로 복합재료의 건전부 평가에서는 Felicity비 만이 적절한 파라미터가 아님을 잘 나타내고 있다. 즉 손상의 정도 판단에는 Felicity비

만으로 부족하다. 그러나 본 실험에서 나타난 바와 같이 평활재와 노치재가 새로이 정의된 AE 파라미터에 의하여 손상정도가 명확히 규명됨을 알 수 있었다. 손상계수를 사용하여 손상정도를 고감도 판단하는 필요하며, 즉 본 실험에서는 파단 하중에 가까울수록 AE 손상계수가 크게 증가함을 알 수 있었다.

복합재료의 파괴과정을 이해하는데 철강재료나 세라믹재료와 같이 최악 링크설에 의한 취성 파괴를 기본으로하는 파괴역학 파라미터를 사용하는 데는 문제가 있다. 복합재료의 파괴진행과정은 많은 초기결합의 성장 또는 사용중의 새로운 결합성장으로 최종적인 파괴에 도달하는 누적 손상과정에 이르게 된다. 그러므로 종래의 재료평

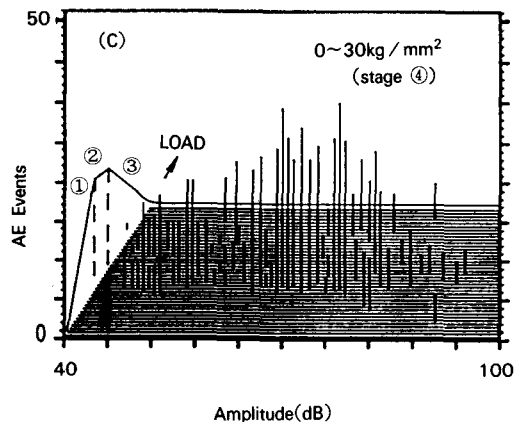
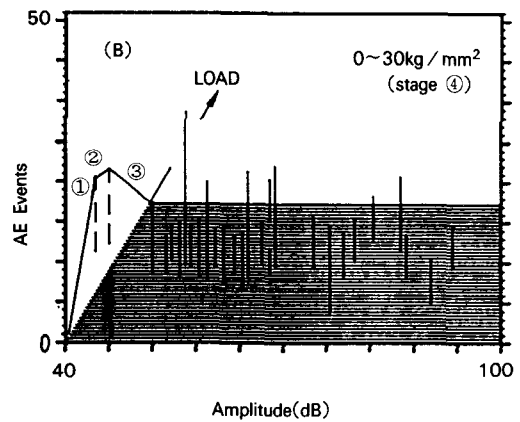
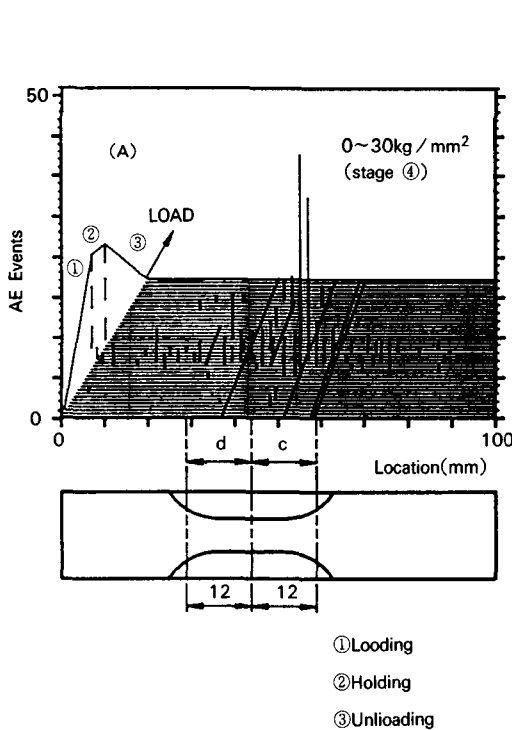


Fig.8 Acoustic emission from unnotched specimen on the 4th stage during loading-holding-unloading test

Table 2. Damage ratio and felicity ratio from loading cycle on the specimen

Loading Cycle (kg/mm ²)	Damage ratio		felicity ratio	
	Notched	Unnotched	Notched	Unnotched
0 - 10	0.06	0.15	1	1
0 - 20	0	0.10	1	1
0 - 40	0.10	0.18	0.95	1
0 - 60	0.14	0.46	0.88	1

가법이 잘 적용안되었다고 생각된다.

4. 결 론

CFRP의 평활재 (unnotched)와 노치재의 인장 시험편을 사용하여 단축 인장시험시 및 부하-유지-부하제거 인장시험시 발생하는 AE 신호를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 노치재의 인장시험편과 건전부로 되어 있는 평활재 시험편에서 AE에 의한 손상계수 및 Felicity비 값은 CFRP의 파괴진행과정을 거시적으로 또는 미시적으로 평가하는데 적절한 AE 파라미터이다.
- ② AE 발생의 진폭분포와 발생위치는 인장응력에 의존하고 있으며 이것은 초음파 탐상결과와 잘 일치하고 있다. 그러므로 CFRP의 동적파괴거동을 명확하게 규명할 수 있을 것으로 기대하며 이 기술을 활용하여 복합재료로 구성된다.

참 고 문 헌

- 1) Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Fiberglass Reinforced Plastic Tanks / Vessels by CARP(Committee on Acoustic Emission from Reinforced Plastics)
- 2) 志波, 湯山, "FRP의 構造物의 AE 試驗規格" JSNDI 006 特別研究委員會-131 (1987) pp16~25
- 3) 志波, 榎, 岸 "GFRP의 負荷-保持, 除荷 試驗의 AE 特性", 日本複合材料學會誌 Vol. 14, No 12. 1988, pp 63~72
- 4) 志波, 岸, "朱子GFRP의 試驗における AE 特性" 日本複合材料學會誌, Vol. 14 No4, (1988) pp 143~153
- 5) 大平, 岸, "AE 原波形解析と微視割れの 動的拳動研究への適用", 鉄と鋼 Vol. 70 No. 16 (1984), pp 12~19
- 6) 岸, "粒界割れの割れ面積および" 割れ速度の AE原波形解析による評価 "日本金屬學會 Vol. 22 No. 2 (1983) pp 142~144
- 7) 山口 등, "AE 波形マルチパラ미터による GFRP 破壊モード "および"拳動の解析", 1989, National Conference on Acoustic Emission, pp 117~122
- 8) 鈴木 등, "AE法による GFRP의 破壊機構に関する研究" 日本機械學會 論文集 (A) Vol. 53, No 492, 1987, pp 1459~1465
- 9) 鈴木 등, "AE法によるクラス A-SMC의 破壊機構に関する研究" 材料 Vol. 36, No 402, 1987, pp229~235