

論文

음향방출법을 응용한 노즐 조립체의 구조건전성 평가

설창원*, 이기범*

Structural Integrity Evaluation of Nozzle Assembly using Acoustic Emission Technique

Chang-Won Shul* and Kee-Bhum Lee*

ABSTRACT

An acoustic emission technique was applied to the structural strength test for the structural integrity evaluation of the nozzle assembly. These AE results were compared with data from the strain gages and displacement transducer. NDT using X-ray technique was performed to improve the test reliability before and after each test. In this structural integrity evaluation of the nozzle assembly, the internal crack initiation in the structure could not be precisely revealed by the strain and displacement results but the location and load level of the initiated crack could be precisely evaluated by using AE technique. From this test, it was proven that some new cracks can be generated in composite liner of nozzle assembly under the unexpected load due to interference between obturator and nozzle and these can be a cause of the unexpected abnormal failure.

초 록

노즐 조립체에 대한 구조건전성을 평가하기 위한 구조강도시험에 음향방출 기법을 적용하였다. 이들 결과는 스트레인 및 변위 측정 결과와 비교 분석 되었으며, AE 기법의 신뢰도를 향상시키기 위하여 X-ray를 이용한 NDT 기법이 각 시험 전과 후에 실시되었다. 노즐 조립체에 대한 구조건전성 평가 시험에서 스트레인 및 변위 결과로는 구조물의 국부적인 균열 생성 현상을 정확하게 규명하기 곤란하였으나, AE 기법을 이용함으로써 균열들의 생성위치 및 하중을 정확하게 평가할 수 있었다. 이 시험을 통하여, 사출판과 노즐 조립체 사이에 존재한 간섭현상으로 인한 예기치 않은 하중에서 노즐 조립체의 복합재 내에 새로운 균열이 생성될 수 있음이 확인되었으며, 이들 균열은 구조물의 급격한 기능 상실의 원인이 될 수 있는 것으로 파악되었다.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출기법), Structural Integrity Evaluation(구조건전성 평가), Structural Strength Test(구조강도시험), Nozzle Assembly(노즐 조립체), Crack Initiation(균열 생성), NDT(비파괴 시험)

1. 서 론

비행시험 중 생성된 유도탄의 이상 폭발현상에 대한 원인을 규명하고자 지상에서 여러 연구조사가 실시되었으며, 조사과정에서 발사관의 사출판과 추진기관 노즐부의 내열재 간에 간섭현상이 생성될 수 있음이 확인되었다. 이러한 간섭

† 2006년 3월 15일 접수 ~ 2006년 7월 23일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 3-2-5

연락처, E-mail : shulcw@add.re.kr

대전시 유성구 유성우체국 사서함 35-3호

현상은 초기 폭발볼트 조립시나 유도탄 발사 시에 노즐 확대부 복합재 라이너에 비정상 하중으로 작용되어 이 부재에 균열을 생성시킬 수 있고, 이 균열들이 궁극적으로는 비정상 비행 폭발의 원인이 될 수 있을 것으로 판단되어 그 가능성을 확인할 필요성이 대두되었다. 이에 노즐 조립체의 구조적 건전성을 판단하고자 음향방출기법을 적용하였다.

기체 구조물의 구조건전성을 평가하기 위한 구조시험에는 전통적으로 내부의 변형을 측정하기 위한 스트레인게이지, 구조물의 강성변화에 따른 거시적인 변형을 평가하는 변위게이지 등이 사용되고 있다. 그러나 이러한 전통적인 계측 수단만을 이용해서는 실제 하중부가 중 내부에 생성되는 손상이나 균열 등을 평가하는 것이 매우 어려우며 그 정확성을 확신할 수 없다. 그러나 음향방출 기법은 원자운동과 같은 재료 내부의 변화를 감지할 수 있고, 정지 없이 실시간으로 재료나 구조물내의 결함에 대한 초기 정보를 제공해준다.

AE 기법은 공정감시, 재료연구, 구조건전성 평가, 기계설비 모니터링 및 누기 시험 등의 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히 시험중에 균열생성 위치를 찾아내고, 균열 생성을 분석할 수 있는 강력한 수단으로 사용되어질 수 있다[1,2]. 또한 AE 모니터링은 복합재 등의 구조 건전성을 평가하는 비파괴 시험으로 널리 사용되어지고 있다 [3-5]. 국내에서도 구조건전성을 평가하기 위한 각종 구조시험에 AE 기법이 적용되어[6-9] 균열 생성 위치나 시점 등을 평가하는 유용한 도구로 활용되고 있다.

본 연구에서는 비정상적인 간섭 현상에서 생성할 수 있는 하중이 균열의 생성이나 성장에 영향을 미치는 지를 확인하기 위하여 초기에 결함을 함유하고 있는 복합재 라이너 노즐 조립체와 초기결함을 가지 않은 노즐 조립체에 대하여 AE 기법을 응용한 정적 압축 강도시험을 수행하였다. 정확한 AE 신호 분석을 위하여 먼저 내열 노즐부 구조물 시험 평가에 적합한 AE 시험 평가 절차를 확립하고, 균열 생성 및 성장을 적절히 평가할 수 있는 AE 매개변수를 결정하였다. 이 결과를 바탕으로 AE 기법을 적용하여 정적강도시험을 수행하고, 균열이 생성되거나 성장하는 지를 평가하였다. 또한 AE 기법에 의한 구조 건전성평가의 신뢰도를 향상시키기 위하여 시험 전·후에 X-ray 단층촬영을 실시하였으며, 두 결과가 서로 비교되었다. 시험결과 AE 기법이 이러한 종류의 노즐 조립체에 대한 구조건전성을 평가하는데 유용한 시험평가 기법임이 확인되었다.

II. 시험설계

2.1 시험품

시험품은 Fig. 1과 같이 토출관, 스킨, 사출판과 금속 노즐에 복합재 라이너가 부착된 노즐 조립체로 구성되어 있다. 사출판과 노즐사이에서 간섭 현상이 일어날 수 있고, 이들 간섭현상에 의해 야기될 수 있는 비정상 응력생성은 폭발볼트 조립 토오 크 하중과 사출하중에 의해 복합적으로 생성될 수 있다. 이러한 노즐 조립체 내에는 복합재 라이너와 금속 노즐의 접합부에 존재할 수 있는 미 접착과 내부균열 등의 여러 가지 형태의 결함들이 존재할 수 있다. 그런데 복합재 라이너 내에 존재할 수 있는 내부균열은 사출하중 하에서 층간분리와 같은 심각한 손상으로 발전될 수 있기 때문에 복합재 라이너와 금속 노즐사이의 미 접착 보다는 훨씬 심각한 문제를 생성시킬 수 있다. 다음 Table 1은 초기 균열을 가진 시험 대상품과 초기 균열이 없는 시험 대상품에 대한 정보를 보여주고 있다. 여기서 균열은 X-ray 단층촬영에 의한 방법으로 확인 되었으며, 30°각도로 촬영된 것으로서 상대적으로 심각한 손상으로 발전할 수 있는 층간분리 만을 초기 균열로 간주하였다.

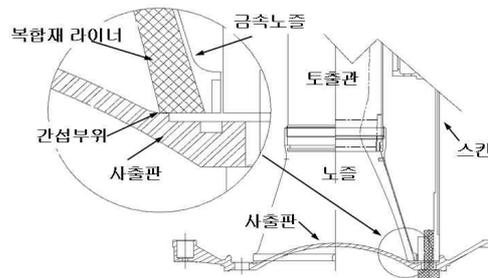


Fig. 1. Interference between obturator and nozzle

Table 1. Two type specimens description

구분	시험하중	결함형태	위치(°)/크기(mm)
No.1 (초기균열)	100%(8톤)	층간분리	0°/(7-8), 60°/(17-18), 330°/(7)
	150%(12톤)	미 접착	0°~360°/(55)
No.2 (균열없음)	100%(8톤)	미 접착	0°~360°/(69-122)
	200%(16톤)		

2.2 시험조립

Fig. 2는 시험 조립개념을 보여주고 있다. 하중 부가용 장비와 자료획득 장비로는 각각 MTS810

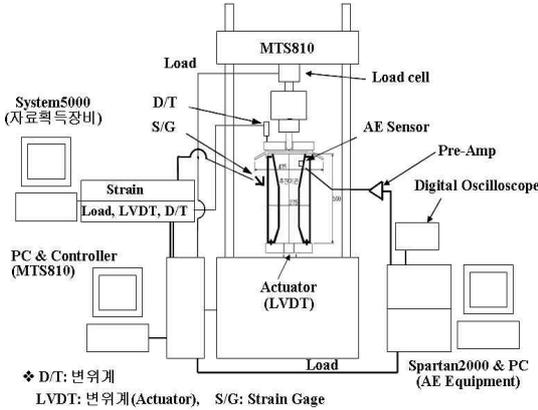


Fig. 2. Test set-up concept

Table 2. Sensors information

Description	S/G	D/T	AE Sensors	Remarks
Skin	4			
Nozzle	16		8	AE: 2groups, 90° interval
Blast Tube	4			
Obturator	8	3		DT: 120° interval
sum	32	3	8	

재료시험기와 MM사의 System5000이 사용되었다. AE 시험을 위해서 PAC사의 Sparton2000 AE 시험장비가 사용되었으며, 시험 중 AE 신호의 파형을 관찰하기 위하여 디지털 오실로스코프가 사용되었다. 시험에 사용된 센서들은 Table 2와 같다. 여기서, 센서는 유도탄 스킨(skin), 노즐 조립체, 토출관 및 사출관에 총32개의 스트레인게이지, 3개의 변위계 및 8개의 AE 센서가 사용되었다. 시험 중 재료시험기의 하중 및 스트로크 자료도 동시에 자료획득 시스템에 저장되도록 하였다. AE 센서는 시험의 곡률을 고려하여 100-600kHz의 주파수 대역을 가진 공진형 micro 30 센서를 사용하였고, 예비 앰프는 100-300kHz 대역의 필터를 사용하였다. 또한 시험중에 AE 장비의 문턱 값은 45-50dB가 되도록 설정하였다. 시험 중 균열 생성위치를 확인하기 위하여 노즐의 상단과 하단에 Fig. 3과 같이 각각 4개씩 90도 간격으로 AE 센서를 배열하였으며, 2개의 위치표정 그룹으로 분리하였다. Fig. 4는 최종 시험 형상을 보여주고 있다.

비등방성 복합재 내에서의 AE 신호의 전파는 매우 복잡한 양상을 띤다. 특히 복합재 라이너 노즐 조립체가 콘형으로 제작되어 있으므로 이러한 복합재 라이너의 곡률과 두께는 AE 신호의

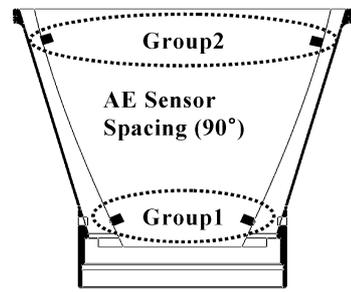


Fig. 3. AE sensors location

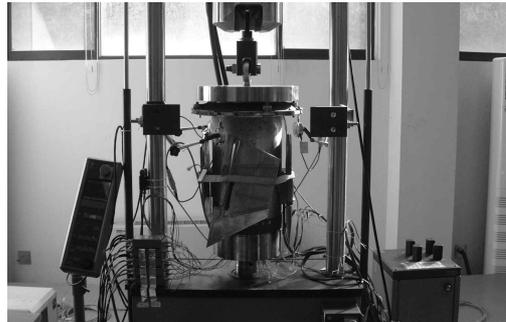


Fig. 4. Test set-up overview

산란이나 전파 등에 상당한 영향을 미치게 된다. 그러한 이유로 이러한 비등방성 복합재 내의 신호의 전파 속도를 정확히 평가한다는 것은 매우 어렵다고 할 수 있다. 본 시험에서는 예비 교정 시험을 통해서 길이 방향으로 부착한 AE 센서와 파형을 생성시키는 펄스 센서를 사용하여 디지털 오실로스코프로 계측된 AE 신호 데이터를 분석하여 길이 방향의 신호 전달 속도를 결정하였다.

III. 시험수행 결과 및 분석

3.1 시험평가 기준 설정

AE 신호는 생성원에 따라 여러 가지 특성들을 나타낸다. 그러한 이유로 인하여 AE 시험에서 가장 중요한 연구 중에 하나는 적절한 AE 매개변수를 결정하는 것이며, 이러한 매개변수의 설정은 시험의 목적이나 환경에 따라 크게 좌우된다. 전통적으로 사용되고 있는 AE 매개변수들로서는 카운트, 사상수, 에너지, 최대 진폭, 상승시간 및 지속 시간 등이다. 전통적인 매개변수 분석은 충분한 교정시험 과정 및 필터링 과정을 거침으로서 양호한 시험 평가 결과를 나타낼 수 있는 것으로 판단된다.

본 시험에서는 AE 에너지 및 최대 진폭 등이

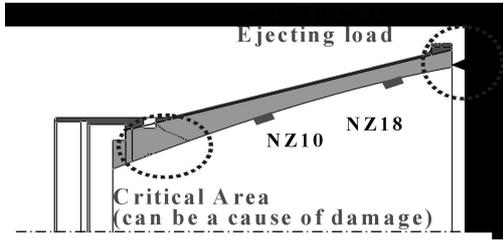


Fig. 5. Critical location & strain gage

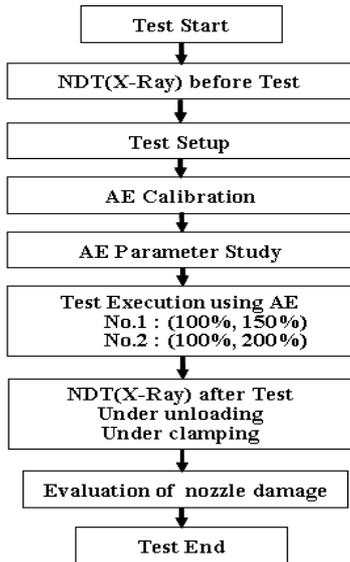


Fig. 6. Test procedure

AE 매개 변수로 사용되었다. AE 에너지는 AE 신호를 생성시키는 기구의 물리적 매개변수들과 관계가 있고, 최대진폭은 AE 신호를 생성시키는 AE 생성원의 강도와 밀접한 관계가 있으며, 그 분포특성이 생성 기구에 따라 다른 특성을 나타낸다. 또한 상승 시간은 노이즈를 필터링하는 도구로 사용되었으며, 지속시간은 충전 분리 모드를 규명하는데 사용되었다. 낮은 진폭신호와 짧은 지속시간을 갖는 AE 자료는 초기 손상 단계를 나타내거나 금속노즐과 내열 복합재 사이 접합부의 미접착 상태를 나타낸다. 반면에 높은 진폭과 긴 신호지속시간을 갖는 AE 신호는 충전분리와 같은 보다 심각한 손상과 관계가 있는 것으로 알려지고 있다[3,10]. 그리고 높은 AE 에너지와 긴 신호지속시간을 갖는 AE 신호는 주요 균열의 성장에 따른 최종 파괴 시에 나타난다. 실제 시험 중에 나타나는 많은 AE 신호들은 금속노즐과 복합재 라이너사이의 미접착 부위와 복합재 노즐부 하중작용점의 시험치구 직접 눌림 부

위에서 생성하지만 Fig. 5에 보여 주는 것처럼 실제 복합재 노즐에 취약한 부위의 균열 생성과는 크게 연관이 없으며, 이들 영역에서 생성하는 대부분의 AE 신호들은 낮은 진폭과 짧은 지속시간 같은 특성을 보여주고 있다.

Fig. 6는 시험 절차를 보여주고 있다. 본 시험에 있어서 가장 중요한 사항은 육안으로는 관찰 할 수 없는 내부의 균열 생성 여부를 정확히 판단하는 것이다. 그러나 복합재가 갖는 특성상 여러 가지 신호 생성원으로 인하여 시험 중에 많은 AE신호가 생성하게 되고 이들 신호들은 위에서 언급한 바와 같은 매개변수 분석 및 필터링의 과정을 통해서 균열 생성여부를 평가하게 된다. 이러한 실험적인 과정에 신뢰성을 향상시키기 위하여 시험 전·후에 X-ray 촬영을 통한 비파괴 검사를 병행하도록 하였다. 그러나 앞서 언급한 X-ray 등의 기존의 비파괴 평가 기법의 한계로 인하여 미소 균열을 정확히 찾아낼 수 없을 뿐만 아니라 하중이 제거된 시험 후의 X-ray 시에는 균열이 닫히는 현상으로 인하여 생성된 균열을 정확히 찾아내는 것이 어려운 실정이다. 이 문제를 보완하기 위하여 시험 후의 X-ray 시에 실제 하중이 부가되던 때와 마찬가지로 복합재 노즐에 압축하중이 부가되도록 클램핑 볼트형 지그를 제작하여 -9,000kgf의 압축하중을 부가한 상태로 X-ray를 실시하여 완전 하중제거 상태의 X-ray 결과와 비교하도록 하였으며, 최종적인 균열생성 평가기준은 Table 3과 같다.

Table 3. Crack Evaluation Criterion

구분	균열생성 평가 기준
1	누적 AE에너지 선도의 급격한 증가.
2	최대진폭 80dB이상의 AE 신호
3	전영역의 센서에서 동시에 누적 AE에너지 선도의 급격한 증가.
4	충간분리균열 : 300μsec이상 AE Event Duration을 가진 200이상의 AE Energy분포신호
5	AE 신호생성 위치에 따른 구분 (G1 : 취약지점 균열, G2 : 하중작용지점 균열)
6	X-ray사진 under clamping after Test
균열	1부터 5조건 동시 만족, 6은 비교 평가

3.2 시험결과 및 분석

내부에 균열을 가지고 있는 No.1 시편에 대해서는 100% 설계하중시험과 150% 설계하중시험을 실시하였으며, 내부에 균열을 가지고 있지 않은 No.2 시편에 대해서는 100% 설계하중시험과 200% 설계하중시험을 실시하였다. 여기서, 같은

종류의 시편에 대해 시험하중 크기를 다르게 부가한 것은 AE 특성시험을 통해서 파악된 균열 결과와 X-ray 검사 기법으로 발견된 균열 결과를 비교 분석함에 있으며, AE 특성시험 이전에 실시된 비파괴 검사에서 No.2 시편은 No.1 시편에 비해 건전성 관점에서 더 양호한 결과를 보여 주어 No.2 시편에 추가로 균열을 생성시키기 위해서는 No.1 시편에 부가한 하중보다 더 큰 시험하중이 필요하였다.

총 32채널의 스트레인 결과는 어느 것도 내부의 균열 거동과 관계있는 이상 특이거동을 나타내주지는 못하고 있다. 이 중에서 Fig. 5에 보여주는 바와 같이 균열 생성 예상 취약부위에 가까운 복합재 라이너 안쪽면에 부착된 축방향의 NZ10 과 NZ18 스트레인 게이지에 대해서는 Fig. 7 및 8과 같이 고찰되었다. 하지만 어느 것도 균열 생성과 같은 급격한 변화를 설명해주지 못하고 있다. 그 이유는 구조적 형상에 의해 생성하는 층간 분리 균열이 구조강성을 바꿀 정도로 최종 파단분리되기 전까지는 하중전달 경로에 영향을 미치지 않고 있기 때문이다. Fig. 9와 10은 시험하중

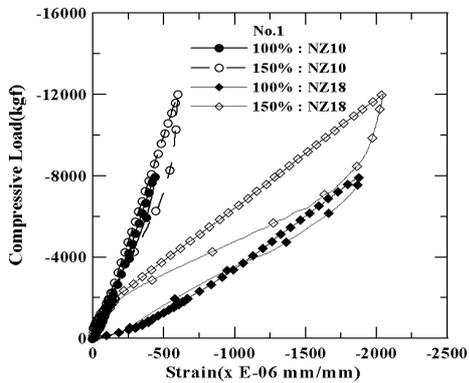


Fig. 7. Load & Strain for No.1

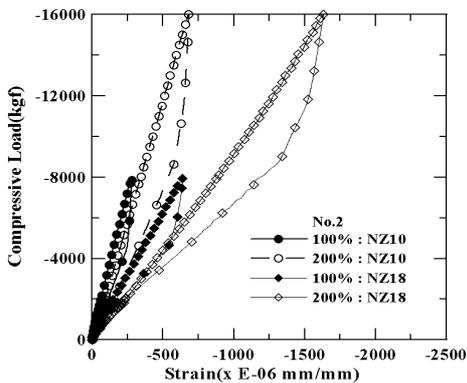


Fig. 8. Load & Strain for No.2

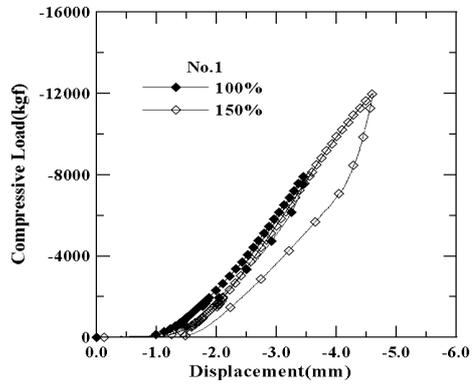


Fig. 9. Load & Displacement for No.1

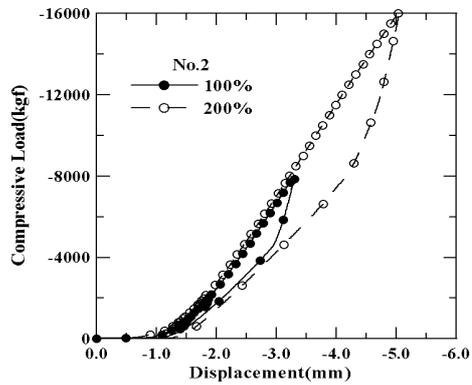


Fig. 10. Load & Displacement for No.2

에 대한 유압 액추에이터의 LVDT 변위를 나타낸 것이며, 초기의 로드베어링의 유격에 의한 비선형 구간을 제외하면 구조적으로 안정적인 거동을 보여주고 있으며, 스트레인파 마찬가지로 균열생성과 같은 내부 변형을 나타내 주지 못하고 있다.

Fig. 11과 12는 내부 균열을 가지고 있는 No.1 시험 대상품의 100% 및 150% 설계하중에 대한 AE 매개변수 분포와 상관 관계 그림을 보여주고 있다. 여기서 G1과 G2는 Fig. 3에서 보여주고 있는 상단과 하단의 위치표정 그룹을 나타낸다. 많은 AE 신호들이 낮은 진폭, 짧은 상승시간 및 지속시간을 나타내었다. AE 신호 중에서 균열 생성과 무관한 이들 신호를 제거하기 위하여 50 μ sec 이하의 상승시간을 갖는 AE 신호는 필터링되었다. 또한 층간 분리 모드를 유용하게 분리하기 위하여 최대 진폭 값 80dB를 기준으로 상.하로 구분하였다. Fig. 11과 Fig. 13은 각각 100% 설계하중과 150% 설계하중 시험에 대한 누적 에너지 그림으로서 최대 진폭 80dB이상을 나타내는 하중

이 각각 -7,150kgf와 -7,660kgf, -8,440kgf에서 나타나기 시작 했으며, 이들 신호들은 Fig. 12와 14에서 보여주는 바와 같이 긴 신호지속 시간을 나타내주는 특징을 보여주는 층간분리 모드를 보여주고 있음을 알 수 있다. Fig. 15 및 Fig. 20은 시험 후 30도의 단층 촬영 각도를 따라 실시한 X-ray 결과 중의 일부를 보여주고 있으며, 그림상에서의 숫자는 밀리미터 단위의 균열 길이를 나타낸다. 여기서, Fig. 15(a)와 (b)는 하중이 없는 상태에서의 X-ray 단층사진과 이들을 그림으로 나타낸 모습을 보여주고 있다. Fig. 15(c)는 클램핑 하중을 부가한 상태에서 실시한 X-ray 단층촬영 결과를 보여주고 있는데 동일 위치의 균열도 더 크게 나타나고 있고 더 많은 균열이 관찰됨을 알 수 있다. 실제로 비행시험 중에 노즐부에 이와 같은 균열이 존재한다면 이들은 급격한 파괴의 원인이 될 수 있을 것이다. Fig. 16과 18은 균열이 없는 No.2 시편에 대한 100% 및 200% 설계하중에 대한 AE 매개변수분포와 상관관계 그림을 보여주

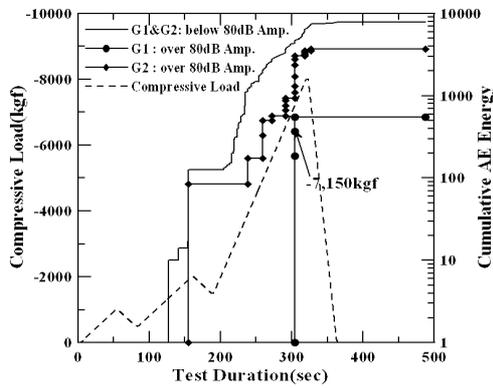


Fig. 11. Cum. Energy & load for No.1 100%

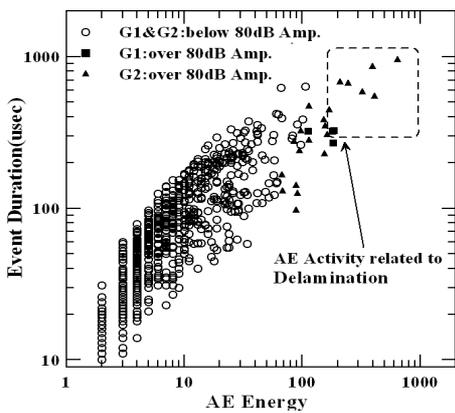


Fig. 12. Duration & energy for No.1 100%

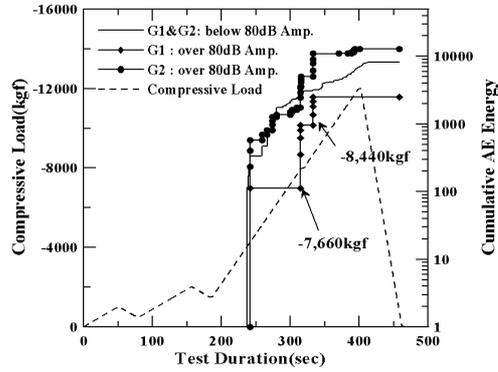


Fig. 13. Cum. Energy & load for No.1 150%

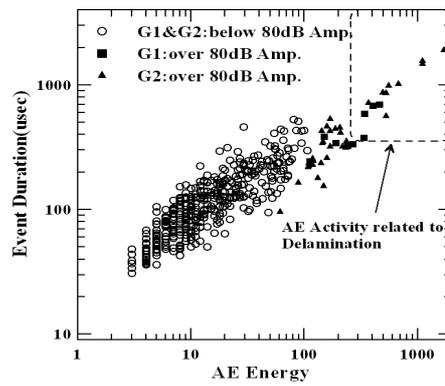
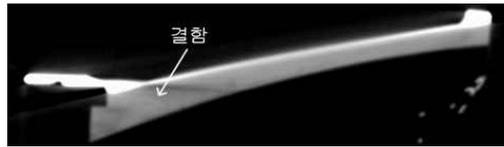
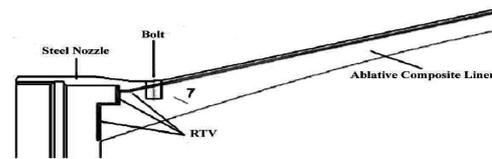


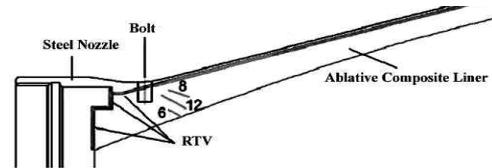
Fig. 14. Duration & energy for No.1 150%



(a) X-ray tomography under unloading



(b) X-ray result after 150% test



(c) X-ray result under clamping after 150% test

Fig. 15. X-ray result at 330° scanning angle for cracked No.1 specimen after 150% test

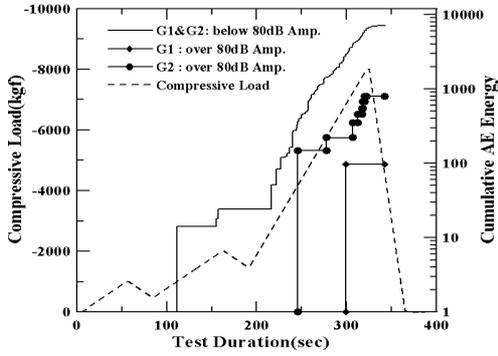


Fig. 16. Cum. Energy & load for No.2 100%

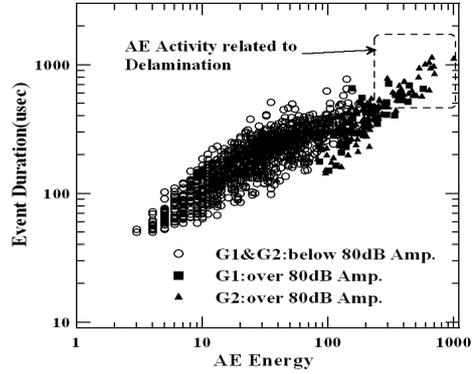


Fig. 19. Duration & energy for No.2 200%

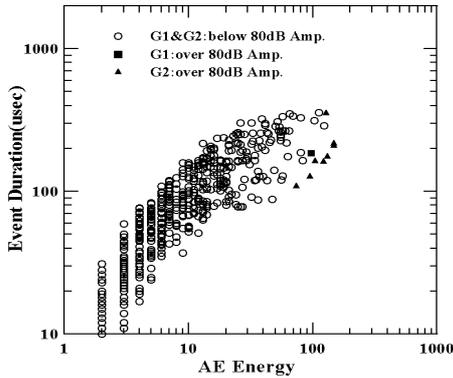
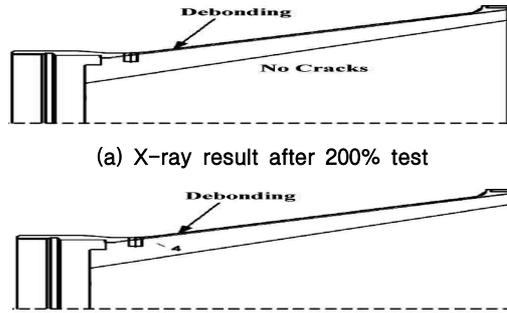


Fig. 17. Duration & energy for No.2 100%



(a) X-ray result after 200% test

(b) X-ray result under clamping after 200% test

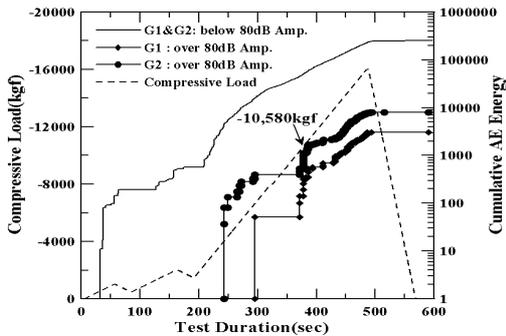


Fig. 18. Cum. Energy & load for No.2 200%

고 있다. 여기서도 AE신호는 상승시간을 기준으로 필터링 되었고, 최대 진폭 값 80dB를 기준으로 상. 하로 구분되었다. Fig. 17은 100% 설계하중에 대한 누적 에너지 그림으로서 최대 진폭 80dB이상을 나타내는 하중레벨이 존재하지만 Fig. 16에 보여주는 바와 같이 낮은 신호 지속시간만을 나타내고 있고, 층간분리와는 무관한 AE 신호를 나타내고 있다. 이에 반하여 200% 설계하중시험에 대한 Fig. 18에는 10,580kgf에서 80dB이상의 신호가 급격히 증가하는

Table 4. AE activities about cracks and X-ray

Test No.	Load(kgf) of AE activity			X-ray after test		Initial defect
	100%	150%	200%	unloading	clamping	
No.1	7,150	7,660, 8,440	No test	-	Several cracks	Yes
No.2	-	No test	10,580	-	One crack	No

모습을 보여주고 있으며, Fig. 19에 보여주는 바와 같이 높은 신호 진폭과 긴 신호 지속시간을 나타내는, 즉 층간 분리모드를 보여주는 신호 특성임을 알 수 있다. Fig. 20은 시험 후의 X-ray 결과를 보여주고 있다. 여기서 Fig. 20(a)는 하중이 완전히 제거된 상태의 X-ray 결과인데 전혀 균열을 나타내지 못하고 있다. 반면에 클램핑 하중을 부가한 상태에서 실시한 X-ray 결과에서는 Fig. 20(b)와 같이 한 개의 균열이 발견되었다. Table 4는 시험 중에 나타났던 균열과 관련된 AE 활성도와 시험 후에 실시된 X-ray 결과를 종합하여 보여준다. AE결과와 X-ray 단층촬영 결과와는 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다. 그것은 X-ray 단층촬영기법이 갖는 단

충촬영 간격에 따른 한계와 하중을 완전히 제거한 후에 균열 단힘이 일어나는 균열은 발견하기 어려운 한계 등의 이유로 나타난 현상이다. 이러한 한계를 보완하기 위하여 9,000kgf의 클램핑 하중 부가 상태에서 실시한 X-ray 결과 몇 가지 균열이 추가로 시편에서 발견되었으며, 이들 균열들은 강도 시험 중에 AE 기법에 의해서 이미 확인된바 있다. X-ray기법은 AE 기법만큼 내부의 크고 작은 균열을 포괄적으로 정확히 평가할 수 없음을 알 수 있다.

IV. 결 론

AE기법이 내열복합재 노즐 조립체에 대한 구조건전성 평가에 성공적으로 적용되었다. 이들 결과는 스트레인게이지 및 변위계 결과와 비교 분석 되었으며, AE 기법의 신뢰도를 향상시키기 위하여 X-ray 단층촬영 기법이 각 시험 전과 후에 실시되었다.

복합재 노즐 조립체에 대한 구조건전성 평가 시험에서 스트레인과 변위 결과로는 구조물의 국부적인 균열 생성 현상을 정확하게 규명하기 곤란하였으나, AE 기법을 이용함으로써 균열들의 생성위치 및 하중을 정확하게 평가할 수 있었다.

AE기법을 응용한 구조건전성 평가 결과, 사출판과 노즐 조립체 사이에 존재한 간섭현상으로 인한 예기치 못한 하중으로 인하여 복합재 라이너 노즐 조립체 내에 새로운 균열이 생성될 수 있음이 확인되었고, 이들 균열은 비행중 급격한 파손의 원인이 될 수 있는 것으로 파악되었으며, 이들은 실제 현상과 동일한 결과를 나타내었다.

참고문헌

1) J.M. Carlyle, "Acoustic emission testing the F-111", NDT International Vol. 22, No.2, 1989, pp. 6.

2) Dan Lindahai and Markku Knuuttila, "Acoustic Emission Monitoring of the JAS 39 Gripen Combat Aircraft", The Japanese Society for NDI, 2000.

3) L. Dong and J. Mistry, "Acoustic emission monitoring of composite cylinders", Composite Structures Vol.40, No.2, 1998, pp. 149.

4) Eckles, W., "Monitoring acoustic emission in cross-ply graphite/epoxy laminates during fatigue loading", J. Reinf. Plas. Comp., Vol.7, 1988, pp. 265.

5) A. Quispitupa, B. Shafiq, F. Just and D. Serrano, "Acoustic emission based tensile characteristics of sandwich composites", Composites: Part B 35, 2004, pp. 563.

6) 설창원의 3명, "음향방출법을 응용한 복합재 단성관 착륙장치의 충격손상 평가", 한국복합재학회지 제8권, 제3호, pp. 74 -83, 1995.

7) 설창원의 1명, "음향방출법을 응용한 복합재 날개 구조물의 정적 구조강도 평가", 대한기계학회충청지부 추계학술대회, pp. 143-149, 1998. 11.

8) 박재성의 3명, "복합재료 적층 구조물의 음향방출 특성 연구", 한국복합재학회지 제16권, 제 6호, pp. 16 -22, 2003.

9) 설창원, 이기범, "음향방출기법을 응용한 플라스틱 셀 구조물의 건전성평가 연구", 한국항공우주학회지 제33권, 제12호, pp. 39-47, 2005.

10) Y.A. Dzenis and J. Qian, "Analysis of microdamage evolution histories in composites", Int. J. Solids and Structures, Vol.38, 2001, pp 183.