

음향방출법의 공학적 이용을 위한 기초

정 희 돈

Fundamental of Acoustic Emission Technology for Engineering Applications

Heedon Jeong



- 정희돈 (산업과학기술연구소 용접연구센터)
- 1956년생
- 파괴역학을 전공하였으며, AE를 위한 각종 비파괴검사법과 재료평가 및 구조안정성 평가에 관심이 있다.

1. 머리말

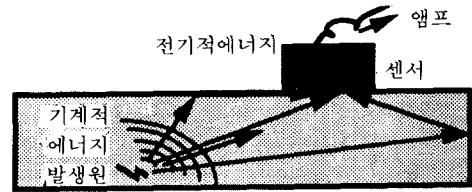
그릇이 깨어질 때와 같이 어떤 물체가 내부 또는 외부의 응력에 의해 파괴되면, 작용 응력의 형태 및 물체의 특성에 따라 독특한 소리를 내게 된다. 이러한 물체의 파괴 또는 변형시에 발생하는 소리는 인간의 귀로 들을 수 있는 것도 있지만, 발생하는 소리의 강도가 미약하거나 그 소리가 가지는 주파수 성분이 가청역(可聽域) 범위를 벗어나는 경우에는 인간의 귀로서는 감지할 수 없는 소리도 존재하게 된다. 오래전부터 공학적 측면에서 이러한 소리라는 물리적 현상을 적극적으로 이용하려는 노력이 계속되어 왔으며 이제는 음향방출법(Acoustic Emission: 이하 AE라고 칭함)이라는 이름을 갖고 하나의 공학적 평가법으로 자리잡게 되었다.

AE연구의 방향은 응용면만을 생각하면 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 재료의 평가법으로서의 응용을 들 수 있는데, 재료

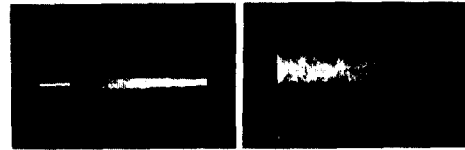
의 미시적인 변형과 파괴 과정을 실험적으로 해석하는 것에 주목적을 두고 있으며, 신재료의 개발이나 기존 재료의 재질 개선에 중요한 정보를 제공하고 있다.^(1~5) 또한 금속재료와 같은 균질한 재료를 대상으로 개발되어진 대부분의 각종 실험 방법들을, 복합재료와 같은 불균일한 재료나 비금속 재료에 적용시킬 때 파생되는 여러가지 문제점들을 보완한다는 차원에서, AE를 이용한 새로운 평가 방법들의 개발도 활발하게 이루어지고 있다.^(6~10)

또 하나의 AE연구 방향은 비파괴 검사법(NDT; Non-destructive Testing)으로서의 응용을 들 수 있는데, 구조물의 현상태를 진단하고 안전도를 평가하는 수단으로 사용하려는 연구가 주로 이루어지고 있다.^(11~15) 통상의 비파괴 검사법들이 결함의 위치와 크기만을 검출하는데에 비해서, AE는 결함의 위해도 그리고 균열 진전과 같은 동적인 거동을 감시하여 대형 사고를 미연에 방지할 수 있다는 측면에서 유용시되고 있다.

지금까지 AE에 대한 유익한 몇 편의 해설이 발표되어 관련연구에 임하는 연구자들에게 많은 도움이 되었으리라 생각된다. 한편, 이미 발표된 대부분의 해설들이 특정 재료의 AE발생 특성에 중점을 두었기 때문에, 이제 낮은 감은 있으나, AE를 응용코자 하는 연구자들을 위한 보다 기본적인 설명이 필요하다고 여겨진다. 본 해설은 AE기법을 공학적으로 응용하려 할 때 필요한 사항들의 이해를 돕기 위한 것으로, AE의 원리 및 기본적인 내용을 소개하고 적용상의 문제점들에 대해서 열거한 것이다.



(a) 신호의 전달과정



(b) 돌발형 신호

(c) 연속형 신호

그림 1 AE신호의 전파와 대표적 AE신호 종류

2. AE신호의 특성

2.1 AE의 정의

어떤 물체가 외력 또는 내부의 힘에 의해 변형이나 파괴가 일어나게 되면 재료 내부에 축적되어 있던 변형에너지(strain energy)는 파면형성에너지, 열에너지, 격자변형에너지 그리고 탄성파와 같은 여러 형태의 에너지로 변환된다. 이 중에서 외부에서 계측장치의 힘에 의해서 가시적으로 검출된 탄성파를 AE신호라고 하며, 탄성파 자체 그리고 탄성파를 검출하는 수단 및 해석을 통틀어 AE법 또는 AE기법이라 말한다.⁽¹⁶⁾ 탄성파는 본질적으로는 물체의 구성 입자들이 사방으로 진동하여 가는 현상이며, 이러한 진동이 압전 센서에 의해서 그림 1과 같이 전기적 신호로 변환될 때 비로서 AE신호로 검출되게 된다.

2.2 AE신호의 특성과 종류

앞에서도 언급했지만 공학적인 측면에서 본 AE신호는 신호의 강도 및 특징적인 주파수의 범위가 매우 광범위하기 때문에 인간의 귀로는 들을 수 없는 신호가 대부분이다. 한편 인간이 들을 수 있는, 소위 고강도의 가청신호는 최후의 파괴거동에 의해 발생하는 것이 일반적이기 때문에 AE를 공학적으로 이용하는 측면에서 보면 사실상 큰 의미가

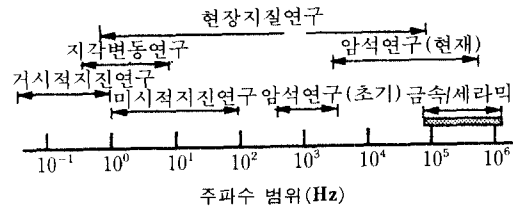


그림 2 AE연구 대상의 신호주파수 범위

없는 신호라고 할 수 있다. 그림 2에는 AE를 공학적으로 이용할 때 대상 물체에 따라 발생하는 신호의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 가청역 주파수 범위가 대략 수십 헬츠(Hz)에서 20킬로헬츠(kHz) 정도인 것에 비해서 AE연구에서 다루는 신호의 주파수 범위는 대상재료에 따라 매우 넓게 분포하고 있는 것을 알 수 있다.⁽¹⁷⁾ 한편, 오실로스코프상에서 관찰되는 아날로그 신호는 그림 1(a)에 표시된 바와 같이 여러 종류의 음파들이 시간적 간격을 가지고 센서에 도달하기 때문에, 시간축에 대해서 그림 1(b)와 같은 감쇄형의 모양을 갖게 되며, 그 모양은 일차적으로 재료 내부에서 해방되는 응력의 크기와 소요된 시간에 의해서 결정되게 된다. 이러한 형태의 신호를 돌발형 AE라고 부른다. 돌발형 AE신호의 특징으로는 발생 에너지가 높으며 비교적

표 1 AE신호의 분류

1차 AE (본래의 AE)	미끄럼변형	재료의 항복, Luders 변형, 세레이션
	쌍정 변형 상 변 태	용해, 응고, 마르텐사이트 변태
	미시적균열	(탄화물, 개재물)의 파괴 및 박리 (환경인자에 의한) 입계 및 벽개파괴
	거시적균열	미시균열의 합체, 주균열의 성장
2차 AE	마찰, 균열의 개폐, 리크, 캐비테이션, 산화피막파괴	

발생률이 낮은 펄스형태를 갖는다. 이에 반해서 마모나 소성변형중의 전위의 축적과정과 같은 연속적인 변형현상에 대응하는 AE는 그림 1(c)와 같은 연속형 AE로 나타난다. 이 신호의 특징으로서는 단위 시간당 방출수가 많고 파형이 연속 잡음과 같은 형태를 가진다. 일반적으로 AE신호의 발생은 물체의 변형 및 파괴현상에 기인하는 것이지만, AE기법을 재료 평가 이외의 수단으로 사용할 때는 그와는 관계없이 발생하는 것도 AE 신호의 범주에 속하게 된다. 전자를 1차 AE신호라 하며 후자를 2차 AE신호라 할 수 있다. 표 1에 대표적인 1,2차 AE신호의 대표적 예를 나타낸다.^(16,18)

를 사용한다. 센서는 그림 4와 같이 불평형형(不平衡形)과 차동형(差動形)의 두 가지로 대별된다. 여기서, 차동형은 백색잡음과 같은 연속적인 잡음 제거에 탁월한 효과를 가지고 있으며, 최근에 들어서는 차동형의 센서가 일반화되고 있는 감이 있다. 한편 응답

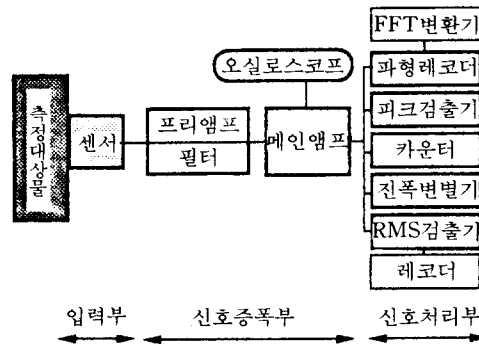


그림 3 AE계측장치의 개요

2.3 AE의 계측

AE계측 장치는 그림 3에 표시된 바와 같이 기능별로 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 즉, AE센서를 중심으로 하는 입력부, 센서에 의해 검출된 미약한 신호를 증폭시키는 증폭부 그리고 각종 신호처리를 행하는 신호처리부가 그것이다. 이하에서는 각각에 대해서 설명하기로 한다.

2.3.1 입력부(AE센서)

AE센서는 재료 내부에서 전달되어 오는 진동을 전기적 신호로 변환시키기 위한 것이며, 변화자로서는 압전소자(壓電素子;PZT)

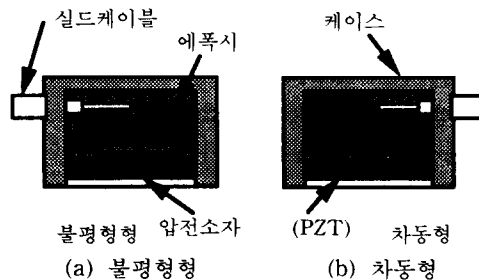


그림 4 AE센서의 종류와 구조

주파수의 특성에 따라 공진형 (Resonant type) 센서와 광대역 (Wide band type) 센서의 두 가지로 나눌 수 있다. 공진형 센서는 특정 주파수 성분에서 높은 수신 감도를 나타내는 것이며, 광대역 센서는 넓은 주파수 범위내에서 균일한 감도를 보이는 것이다. 공진형 센서는 광대역에 비해서 상대적으로 높은 감도와 잡음 레벨이 낮은 것이 특징이며, 시험재료의 AE신호 특성을 반영하여 적절한 공진 주파수를 갖는 센서를 선택해야 할 것이다. 반면, 재료내부에서 방출된 AE신호의 파형 분석이나 주파수 해석을 행할 때에는 반드시 광대역센서를 사용하여야 하나 감도가 낮기 때문에 방출되는 신호의 강도(強度)가 낮을 경우에는 사용상의 제약이 있다. 피측정물에 센서를 부착시키는 방법으로는 접착제를 이용하는 방법과 사이에 그리스를 넣고 고정지그 등을 이용하여 부착시키는 방법이 있다. 그리고 현재 판매되고 있는 센서의 대부분이 상온용으로서 고온중에서 장시간 실험을 할 때에는 웨이브 가이드(Wave guide)를 사용하여 센서를 보호할 필요가 있다.

2.3.2 증폭부

센서에 의해 검출된 신호는 대부분 μV - mV 오더의 매우 미약한 신호이기 때문에 신호처리를 위해서는 수천 또는 수만 배의 증폭이 필요하게 된다. AE신호의 증폭은 통상 dB(decibel)로 표시되며, 다음과 같이 정의된다.

$$dB = 20 \log(V_o / V_i) \quad (1)$$

여기서, V_i 와 V_o 는 각각 증폭전후의 AE신호의 크기를 나타낸다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 60 dB은 1,000배, 그리고 80 dB은 10,000배에 해당하는 신호의 증폭을 의미함을 알 수 있을 것이다.

신호의 증폭은 프리앰프(pre-amplifier)와 메인앰프(main-amplifier)에 의해서 이루어진다. 여기서, 프리앰프는 센서와 메인앰프

간의 케이블 거리가 멀어짐에 따라 야기되는 신호의 감쇄현상을 막기 위한 것으로, 시판되고 있는 대부분의 프리앰프는 증폭도 40~60 dB의 범위를 가지고 있다. 시험시의 총증폭도는 프리앰프 dB과 메인앰프 dB의 합으로 나타낸다. 필자의 경험으로는 80dB 이상에서는 계측기 자체가 갖는 잡음이 증폭되는 등의 여러가지 문제가 발생되어, 일반적인 AE실험에서는 실효성이 없다고 본다.

증폭부에 포함되어 있는 또 하나의 중요한 기능은 필터링(filtering)이다. 필터는 특정 주파수 범위의 신호만을 통과시킴으로써 잡음제거를 행하거나, 목적으로 하는 신호만을 받아들이기 위한 것으로 다음과 같이 세 가지의 종류가 있다. 즉,

- ① 고주파필터(High Frequency Filter):특정주파수 이상의 신호만을 통과시킨다.
- ② 저주파필터(Low Frequency Filter):특정주파수 이하의 신호만을 통과시킨다.
- ③ 대역필터(Band Pass Filter):특정범위안의 주파수 성분만을 통과시킨다.

3. AE신호처리법과 응용

입력부와 증폭부를 통과한 아날로그 AE신호는 각종 신호처리를 위한 A/D변환기에 의해 디지털화된다. 디지털화된 AE신호의 대

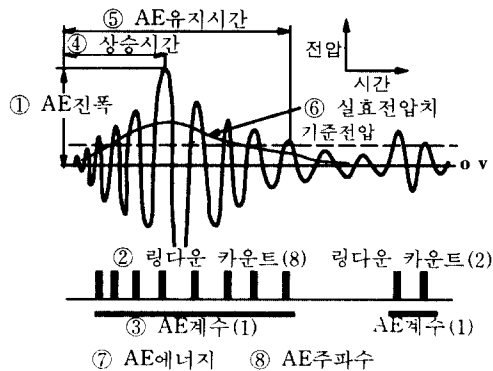


그림 5 AE신호 파형과 각종 신호처리법

표적인 처리법(parameter)으로서 그림 5와 같은 것들이 있다. 여기서 데이터 해석을 위해 어떤 파라미터를 이용할 것인가는 AE응용의 성공여부를 결정하는 중요한 위치를 차지한다. 파라미터의 선정에 의해 정반대의 결과를 도출할 수 있고, 중요한 정보를 놓칠 수도 있기 때문이다. 이하에서는 각종 파라미터들의 정의와 역할들을 AE의 일반적 사항과 함께 설명하기로 한다.

3.1 AE계수와 링다운 카운트

AE시험에 있어서, 계측기 자체가 같은 백색잡음을 제거하기 위해, 소정의 기준치(threshold voltage)를 설정하게 되어 있다. 입력된 신호중 이 기준값을 넘는 신호만을 데이터로서 받아들여지게 된다. 여기서 AE계수란, 센서에 도달된 신호의 시작점과 끝점이 기준치를 넘는 범위에서 1개의 AE신호로서 간주하는 것이다. 링다운 카운트(AE Ring Down Count)는 기준치를 넘는 모든 진폭에 대해서 그 횟수를 세는 것을 말한다. 초기의 AE연구에서는 이 두 파라미터가 가장 많이 사용되었으며, 재료내부에서 일어나는 현상의 발생빈도를 직접적으로 대변하는 것으로 알려져 있다.^(19,20) 또한 금속재료의 소성변형 거동의 연구에 적합한 파라미터로 알려져 있고, 특히 다공성 재료의 파괴 시험에 있어서는 이 파라미터는 거시적 균열의 진전에 관한 정보를 제공하기도 한다. 일반적으로 다공성 재료는 초기 응력상태의 프로세스 영역(process zone)에서는 수 많은 미시균열이 생성되며, 응력이 증가하여 감에 따라 소수의 거시적 균열로 발전해 나아가는 파괴기구를 갖고 있다.^(21,22) 이와 마찬가지로 AE신호의 발생빈도도 초기에는 높으나 어느 응력을 기점으로 저하하는 현상을 나타낸다. 이때의 신호를 AE 계수법이나 링다운카운트로 정리했을 때 나타나는 변곡점은 거시적 균열의 시작을 대변하게 된다. 한편, 전술한 바와 같이 AE신호는 신호 발생조건에 따라

돌발형과 연속형으로 나누어지는데, 이중 감쇄현상이 일어나지 않는 연속형의 신호에 대해서는 AE계수법이나 링다운카운트법은 그의 정의로부터 적용할 수 없다는 것을 알 수 있을 것이다.

3.2 AE진폭과 AE에너지

여러 종류의 파괴형태중 연성파괴의 기구는 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 또한 그림에는 각각의 기구에 대응하는 AE의 발생양상도 함께 나타낸다.^(23,24) 초기의 응력상태 즉, 소성변형 과정에서 개재물과 같은 불연속부에 응력이 집중되어 모재와의 박리현상

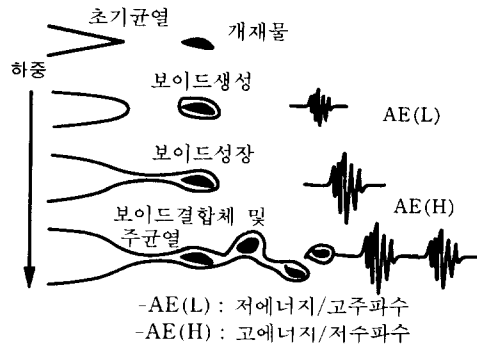


그림 6 연성파괴 기구와 AE방출 특성

표 2 각종 AE에너지의 계산법과 특징

계산법	특징	문제점
$\int_{t_1}^{t_2} e^2(t) dt$	높은 정확도	·고속처리가 필요 ·적분회로의 안정성 필요 ·시편내의 반사파의 영향
$\int_{f_1}^{f_2} F(f) ^2 df$	주파수 스펙트럼과의 대응관계	·고가의 장비가 필요
V_{op}^2	가장 간단	·파형이 다른 경우 비교 평가 곤란 ·오차가 크다.
$V_{op}^2 \times td$		·유지시간 td를 측정해야함.

에 의한 보이드가 생성된다. 이때의 응력변화는 AE를 발생시키며, 신호는 낮은 에너지와 높은 주파수를 갖는 게 일반적이다. 이렇게 생성된 보이드는 응력의 증가에 따라 서로 합체되어 주균열로서 발전, 최종적으로 거시적 파괴를 유도하게 된다. 이러한 합체 과정 및 주균열 진전에 의해 발생하는 신호는 상대적으로 높은 에너지와 낮은 주파수 성분을 갖는다. 이러한 파괴과정을 잘 대변해주는 파라미터는 AE에너지와 진폭 그리고 후술하는 주파수분석이 유효하다. 여기서 AE에너지는 여러가지로 정의될 수 있다. 표 2에는 AE에너지의 계산 방법과 특징에 대해서 열거되어 있다. AE진폭과 AE에너지는 서로 상관관계에 있고 얻는 정보도 거의 비슷하다.

AE에너지로부터 얻을 수 있는 대표적 정보로서는 재료의 파괴인성치($\log \sum E_{AE} - \log J$)와 균열진전량^(24,25) 그리고 신호 발생원의 성질구명(characterization) 등을 들 수 있다. 그림 7에는 AE를 이용하여 파괴인성치를 구하는 방법을 설명하고 있다. 종축은 J-integral 값을 나타내며, 횡축은 각각의 J값에 해당하는 AE에너지의 축적값들을 표시한 것이다. 전술한 바와 같이 거시적 균열의 진전시에는 높은 에너지의 신호가 방출된다는 사실에 근거를 둔 것으로 축적 에너지의 급격한 상승점을 파괴인성 J_{IAE} 로 정의한 것이다. 이 방법은 한 개의 시편에서 파괴인성치를 구할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

AE진폭은 신호의 최대전압치로 정의된다. 그리고 각각의 신호가 갖는 최대진폭을 그러한 진폭을 갖는 신호의 발생수의 함수로 표시한 것이 진폭 분포이다. 그림 8은 연강의 피로시험시에 방출되는 신호의 진폭분포를 표시한 것으로, 초기시험 단계에서는 소성 변형에 대응하는 낮은 진폭의 신호가 다수 발생하고 균열의 진전이 예상되는 시점부터 고진폭의 신호가 늘고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 log그래프상에 나타나는 진폭 기

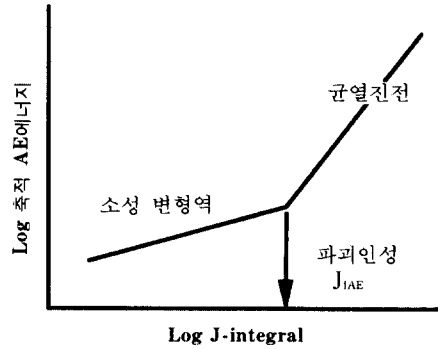


그림 7 AE에 의한 파괴인성치 계산

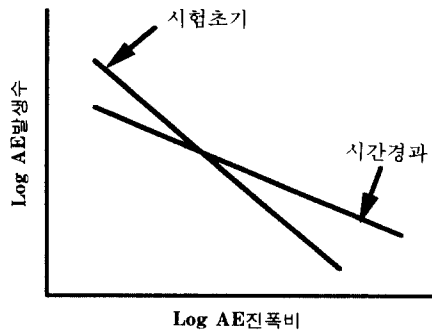


그림 8 AE 진폭비와 발생수

울기에 따라 재료 내부의 거동을 알 수 있다. 이러한 진폭 분포의 파악은 재료의 성질 변화 및 열화 정도를 평가하는 데에도 유효한 것으로 알려져 있다.⁽²⁶⁾

3.3 실효전압치

고체의 변형 및 파괴는 그림 6에서도 알 수 있었듯이 미시적으로는 개개의 현상들이 단속적으로 발생하는 수가 많은데, 이러한 현상들과 대응하여 발생하는 AE신호는 돌발형의 양상을 가지게 된다. 그러나 재료에 따라서는 소성변형시 연속적으로 발생하는 특수한 경우도 있고, 특히 마모나 마찰에 의해 발생하는 신호는 연속형의 AE가 발생되게 된다.⁽²⁷⁾ 이러한 신호에 대해서는 상기의 파라미터들을 적용할 수 없으며, 이때 적용할

수 있는 파라미터로서 실효전압치(RMS)를 들 수 있다. 측정기에 따라서는 이값을 AE 에너지로 정의한 것이 있으므로 검토가 필요하다. 여기서, 실효 전압치는 다음의 식으로 계산된다. 즉, 시간축(t)을 기준으로 한 AE 파형을 $x(t)$ 로 가정하면, 실효전압치는 식(2)와 같다.

$$RMS = (\int^{td} x^2(t) dt)^{1/2} \quad (2)$$

3.4 유지시간과 상승시간

상승시간(rise time)은 신호가 기준 전압치를 넘는 순간부터 최대 전압치까지 도달하는데 요구되는 시간을 나타낸다. 그리고 유지시간(duration time)은 기준 전압치의 범위를 넘어 신호가 유지된 시간을 나타낸다. 이 두 신호처리법은 재료 거동에 관한 정보를 얻기보다는 잡음의 제거에 유효하게 사용될 수 있는 파라미터이다.

3.5 AE주파수

향후 AE연구에서 다루어져야 할 가장 중요한 항목 중의 하나가 결함의 성질을 평가하는 것이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 파괴시험중 방출된 신호의 적절한 처리에 의해 신호를 분류하고, 분류된 각 신호들의 발생원을 명확하게 하는 것이 필요하다. 이때의 적절한 신호처리 방법으로서 신호의 주파수 해석을 들 수 있다. 메인 앰프를 통과한 신호를 레코더에 기록한 후 각각의 신호를 순서대로 주파수 분석기(FFT)에 넣어 해석하는 방식이 일반적이다.

그림 9에는 주파수해석에 의한 재료의 미시파괴 기구를 규명하는 기본적 개념이 표시되어 있다. 또한 그림 10은 발포복합 콘크리트의 미시적 파괴과정을 주파수 해석에 근거하여 얻은 결과이다.⁽²⁸⁾ 그림 중의 영문 기호는 탁월한 주파수 성분이 서로 다른 신호들의 분류를 나타낸 것으로, 여러 종류의 파괴 기구에 대응하여 각각의 AE 신호도 그의 주파수 특성이 다를 수 있을 것이다. 이

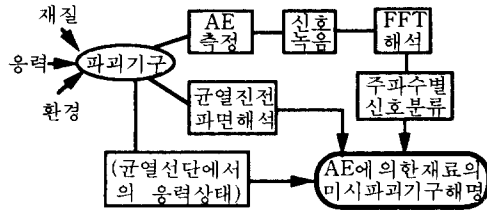


그림 9 AE를 이용한 재료의 파괴기구 해명

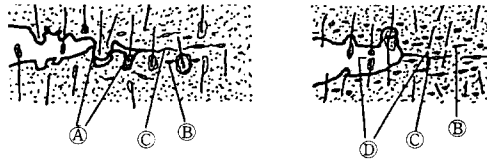


그림 10 AE발포 복합화 콘크리트의 파괴시험에서의 방출된 신호의 종류와 미시적 파괴기구

- A - D : 탁월한 주파수가 서로 다른 AE신호의 분류
- A : 마찰에 의한 신호
 - B : 미시균열 생성에 의한 신호
 - C : 균열진전에 의한 신호
 - D : 파이버의 파단 신호

결과가 갖는 중요한 의의는 복합재의 파괴 거동에 관한 역학적 조건을 실험적으로 알 수 있으며, 재료의 개선에 중요한 정보를 제공한다. 한편 주파수해석의 장점 중의 하나는 외부 잡음을 적극적으로 제거할 수 있는 정보를 제공한다. 한가지 예로, 구조물의 진단중 재료의 실제 파괴 거동에 대응하는 신호의 주파수성분을 실험실적으로 파악하고 거기에 상응하는 주파수 필터를 사용한다면, 잡음제거는 물론 측정장치의 간소화를 꾀할 수 있을 것이다.

3.6 위치 표정

AE의 신호 처리법중 가장 정량적인 결과를 얻을 수 있는 것이 위치 표정이라 할 수 있다. AE에 의한 위치 표정은 압력 용기와 같은 구조물에 있어서의 결함의 장소와 균열의 시간적 진전의 연속적인 추적 그리고 의

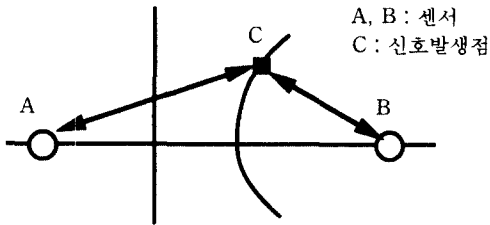


그림 11 AE를 이용한 위치표정의 원리

부에서 들어오는 잡음의 제거에 매우 적합한 방법이다. 위치표정은 복수의 센서를 이용하여 신호가 각센서에 도달되는 시간차에 의해서 결정된다. 즉, 그림 11에 표시되어 있는 바와 같이 두 점간의 센서에 도달하는 시간차를 δt 로 하고 신호의 전파 속도를 V 라 하면 다음식이 성립하게 된다.⁽²⁹⁾

$$CA - CB = V \times \delta t \quad (3)$$

두 센서로부터의 거리의 차이가 일정하게 되는 궤적은 그림과 같이 쌍곡선이 되고 AE 신호의 발생원은 이 선상에 존재하게 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 최소 3개 이상의 센서를 사용하면 복수의 쌍곡선을 얻을 수 있고 쌍곡선들의 교차점이 얻어져 평면뿐만 아니라 3차원 표정도 가능하게 된다.⁽³⁰⁾

4. AE신호 발생의 두 법칙

본래 AE가 금속재료를 대상으로 하여 본격적으로 이용되기 시작한 것은 소위 Kaiser Effect라는 법칙이 발표된 후부터라고 알려져 있다. 또한 근년에 들어서는 Kaiser Effect의 적용한계와 AE를 이용한 구조물의 안전도 평가 기준을 논한 Felicity Effect가 발표되어 AE연구에 있어서 이 두 가지의 법칙은 매우 중요한 위치를 차지하게 되었다. 이하에서는 두 법칙의 내용 및 의미에 대해서 살펴보기로 한다.

4.1 카이저 효과

카이저 효과(Kaiser Effect)는 다음과 같

이 정의된다. 즉, “일단 한번의 응력을 받은 재료에 대해 재차 하중을 부과할 때 이미 경험한 응력레벨 이하에서는 AE신호가 방출되지 않는다”라는 것이다.^(31,32) 다시 말해서 AE 신호가 발생되기 위해서는 전보다 높은 하중이 부과되어야만 한다는 것이다. 이러한 현상은 시험 및 검사 대상으로 하는 물체의 하중 경력을 AE 측정에 의해서 유추할 수 있다는 점에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 또한 파괴시험전에 잡음의 발생이 염려되는 핀연결부나 고정지그 부분에 예상되는 최고 시험응력 이상의 응력을 사전에 부과해두면, 시험시에 시편의 변형과는 관계없는 잡음을 제거할 수 있는데 이것 또한 카이저 효과를 이용한 한 예라고 할 수 있다.

4.2 페리서티 효과

FRP제 용기에서 관찰되는 현상중의 하나로, 이미 경험한 응력보다 낮은 응력이 작용한 경우에도 AE가 발생되는 수가 있다. FRP는 점탄성 거동을 나타내는 재료이기 때문에, 변형기구에 관여하는 인자로서 응력의 크기 이외에 응력의 작용 경과시간을 들 수 있다. 그리고 파괴 기구 또한 매우 복잡하기 때문에 이미 경험한 응력의 크기와 작용시간의 대소에 따라, 생성된 균열 선단은 금속재료에 비하여 불안정한 상태라 할 수 있다. 이러한 불안정성 때문에 경험 응력보다 낮은 응력하에서도 AE 신호가 발생할 수 있다. 한편 금속재료에서도 응력의 작용방향이 변화하였다든지, 환경요인에 의해서 균열 선단의 상태가 열화되었을 경우에도 이와 같은 현상이 일어날 수 있으며, 이것은 앞서 말한 Kaiser Effect에 반하는 것이다. 이와 같이 Kaiser Effect의 제한을 보완한 것이 펠리서티 효과(FR; Felicity Ratio)이며, 식 (4)와 같이 정의된다.^(33,34)

$$FR = P_{AE} / P_{1ST} \quad (4)$$

식 (4)에서, P_{1ST} 는 이전에 경험한 하중이

며, P_{AE} 는 현재 시험시의 AE가 발생하는 하중을 나타낸다. 결국 FR비가 1보다 클 때에는 대상 시험체는 안전하다는 것과, 1보다 작을 때는 균열 선단이 열화되었다는 불안정한 상태를 의미하게 된다. 즉, $FR < 1$ 의 조건은 대상체의 열화도를 평가하는 하나의 기준으로 삼을 수 있다.

5. AE측정에 있어서의 고려 사항

5.1 AE신호 특성과 영향인자

AE의 응용 범위가 매우 넓고 신호 특성 또한 다양각색이기 때문에 신호 특성에 미치는 영향인자들을 설명한다는 것은 그리 간단치가 않다. 여기서, 고체재료의 변형에만 국한시켰을 때, AE의 신호 특성은 재료의 미시적 파괴 기구와 밀접한 관계를 가지고 있다. 이 때문에 AE의 발생에 미치는 영향인자로서는, 피측정체의 조건, 응력 조건, 환경 조건 그리고 센서 및 측정기 조건들이 관여하게 된다. 또한 상기의 네 조건들도 각각 별도의 인자들을 내포하고 있기 때문에 신호 특성은 더욱 복잡한 양상을 띄게 된다. 이러한 문제들 때문에 AE측정 결과는 정량화되기 어려우며 구하여진 각 결과들을 일정한 기준에 대응시켜 비교 검토하는 것이 곤란할 때가 있다. 바로 이 점이 AE를 처음 대하는 이들에게 가장 큰 문제로 대두되고 있다. 이를 극복하기 위해서는, 기존의 결과에 기준을 둔 선입관보다는, 주어진 실험 및 측정조건하에서 얻은 결과들을 축적해 나아가면서 경험적 지식을 쌓는 게 중요하다고 여겨진다. 그림 12는 파괴인성 시험시 AE발생의 재질 의존성을 나타낸 것이다. 이 결과는 대기중에서 얻은 결과로서 재료에 따라 발생 거동이 현저히 다름을 알 수 있을 것이다. 즉, 소성변형 영역에서 집중적으로 방출되는 타입 A형과 균열의 진전이 개시되면서 높은 에너지의 신호가 방출되는 타입 C 그리고 중간간의 형태를 보이는 타입 B로 구별할 수

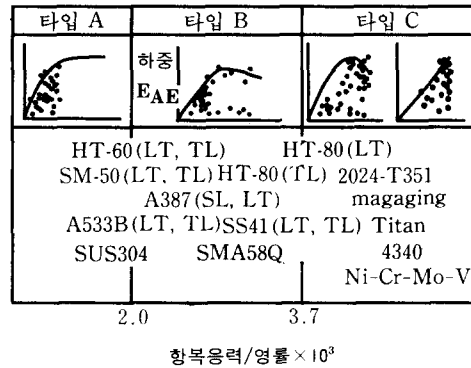


그림 12 AE 신호발생의 재료의존성⁽¹³⁾

있다. 그림에서 알 수 있듯이 AE발생에는 재료의 항복응력과 영률이 깊이 관여하고 있다. 그리고 앞절에서도 말했듯이 AE를 이용한 파괴 인성의 평가는 주로 타입 C의 재료에서 확실하게 나타날 수 있음을 알 수 있을 것이다.

물론 여기에서 간과해서는 안될 점은 그림과 같은 타입 분류도 다른 시험조건 또는 측정 조건하에서는 그 의미가 없을 수도 있다는 것이다.

5.2 잡음의 제거

AE실험에 있어서 가장 골치 아픈 문제는 잡음의 존재를 들 수 있으며, 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 전기적 잡음, 기계적 잡음 그리고 환경잡음이 그것이다. 전기적 잡음이란 시험기나 어스선을 따라 들어오는 신호로서 유지 시간 및 상승시간이 매우 짧아 통상의 AE신호와와는 확실하게 구별되는 신호이다. 기계적 잡음은 측정체의 고정부라든지 기계적 마찰 등에 의해서 나오는 신호로서 AE신호와 구별이 어려운 경우가 많다. 그리고 환경 잡음이란 측정체의 주위에서 오는 각종 소음 등을 말하는 것으로 AE측정시에 이러한 잡음들을 적극적으로 제거하는 것이 중요하다. 간단한 제거 방법들을 나열해 보면 다음과 같다.

표 3 AE 연구분야와 논문 발표수

분야	연도	1976	1982	1984	1986	1988	1990	1992
	금속재료		16	20	14	18	15	4
구조물		10	8	17	14	15	8	7
계측기 및 센서		1	9	16	13	15	16	10
복합재료			5	10	10	19	14	15
암석 / 콘크리트		1	2	11	4	6	8	5
지하 (subsurface)				9	13	10	15	12
세라믹재료			2	4	6	5	7	3
가공 (자동화)		2	1				4	10
목재 (wood)				3	1	3	3	1
의료 (medical)					6	7	2	4
기타						2	3	

5.2.1 각종 신호처리법의 윈도우 처리

AE신호 처리법에 대해 유효한 범위를 사전에 설정하고 신호의 특성이 그 범위 안에 들어오는 신호만을 처리하는 것이다. 예를 들어 유지시간과 상승시간이 매우 짧은 전기적 잡음에 대해서는 유지시간과 상승시간에 대해서 유효상한값을 설정해두면, 데이터의 수집에서 제외되는 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법을 진폭이나 에너지에도 적용시킬 수 있으나, AE신호자체를 제거할 위험도 있기 때문에 유효범위를 정하는 데 있어서는 충분한 검토가 필요하게 된다.

5.2.2 전기적 필터회로의 사용

본격적인 AE측정 전에 각종 잡음들의 주파수 특성을 파악, 또는 파괴거동시에 예견되는 유효신호의 주파수 특성을 파악하여 둔 다음, 측정시에 적절한 필터를 사용하는 방법이다.

5.2.3 공간 필터의 사용

이 방식은 신호가 두 개의 센서에 도달하

는 순서에 의해 게이트 회로를 개폐하여 잡음을 제거하는 방식이다. 즉, 계측용 AE센서와는 별도로 측정 범위의 바깥쪽에 게이트용 센서를 놓고 게이트 센서에 먼저 도달하는 신호는 잡음으로 간주하고 제거하는 방법이다.

5.2.4 측정영역의 제한

이것은 위치표정의 원리를 그대로 채택하는 것으로 두 개 이상의 센서를 이용하여 측정 범위를 인위적으로 지정하는 방식이다. 현재 실험실에서 가장 간단히 사용할 수 있는 방법이다.

5.2.5 기타

한편, 광대역 센서보다는 공진형 센서를 그리고 차동형 프리앰프를 사용하는 것도 잡음레벨을 낮추는 한 방법이다. 그리고 전기적 잡음에 대해서는 센서나 프리앰프의 어스선을 그라운드시키는 등 이론적 배경이 없는 방법들이 의외로 효과를 나타낼 때도 있다.

6. 맺음말

지금까지 AE의 연구를 위해 기본적인 사항이라 여겨지는 것들에 대해서 간략하게 열거하여 보았다. AE발생에 미치는 영향인자들이 수없이 많을 뿐만 아니라 규격화되지 못하는 부분이 많기 때문에 AE를 짧은 시간에 설명한다는 것은 무리일 것이다. 다만, 지면 관계상 부족한 면이 너무 많다고 생각되지만 AE를 이해하는 데에 조금이나마 보탬이 되었으면 한다. 서두에서도 언급하였듯이 AE는 여러 분야에서 응용되어 보다 가치 높은 정보를 얻을 수 있는 기법이다. 표 3에는 2년마다 개최되는 국제 AE 학술대회의 논문집에서 발췌한 것으로서, 각종의 응용분야와 연도별 논문발표수를 정리한 것이다. 표에서 알 수 있듯이, 금속재료를 위주로 했던 초기에 비해 요즘은 신소재와 지하에너지의 개발 그리고 산업체에서의 생산성 향상을 위한 적용에까지 그의 응용 범위가 넓어져 가고 있음을 알 수 있다. 또한 AE는 고체 재료의 변형 및 파손에 관한 정보뿐만 아니라, 의료진단 수법으로서의 개발은 물론, 기체 및 액체에서 발생하는 각종 물리적 현상의 이해에도 응용될 수 있는 등, 앞으로도 그의 응용범위는 노력 여하에 따라 더욱 넓어지고 종래의 평가 방법으로는 기대하기 어려웠던 많은 정보들을 제공하게 될 것이다. 향후 시간이 주어지면 AE의 응용에 관한 정보들을 소개할까 한다.

참고문헌

- (1) Choi, N. S. and Takahashi, K., 1990, "Characteristics of AE Wave Attenuation in Short Fiber Reinforced Plastic," *J. of Composite Materials*, Vol. 24, pp. 1012~1028.
- (2) 鄭熙敦, 薺藤, 高橋秀明, 1990, "AE法を利用した金屬/セラミックス複合材料の微視破壊過程に関する研究," *日本分體および冶金*, 第37卷 2號, pp. 120~126.
- (3) Fowler, T. J., Blessing, J. A. and Conlisk, P. J., 1989, "New Directions in Testing," *3rd Int'l Symp. on AE from Composite Materials (AECM-3)*, July 17~21, Paris, pp. 17~27.
- (4) Papadakis, E. P., 1984, "Physical Acoustics and Microstructure of Iron Alloys," *International Materials Review*. Vol. 29, No. 1, pp. 1~23.
- (5) Agarwal, A. B. L., 1968, "An Investigation of the Acoustic Emission from Metals and a Proposed Mechanism for its Generation," Ph. D Thesis of Univ. of Michigan.
- (6) 鄭熙敦, 1987, "AE周波數解析による材料の微視破壊過程の破壊力學的 評價に関する研究," *日本 東北大學 博士學位論文*.
- (7) 鄭熙敦, 高橋秀明, 1986, "AE周波數 解釋による Cu-Be-Co 合金の破壊靱性および微視破壊過程の評價," *日本機械學會論文集*, 第52卷 pp. 1089~1096.
- (8) Khan M. A., Shoji T. and Takahashi, H., 1980, "Application of AE Technique to the Study of Crack Instability," *5th Int'l AE Symposium*, Tokyo, pp. 395~410.
- (9) Vargas, A. F., 1985, "Acoustic Emission for Quality Control in Composites," *Fabricating Composite Conference*.
- (10) 정희돈, 권영각, 장래웅, 1993, "Acoustic Emission 기법을 이용한 글래스복합재료의 파괴인성 및 미시파괴과정 평가," *대한기계학회논문집*, (특고중).
- (11) Jeong, H. D., Takahashi, H. and Murakami, Y., 1989, "On-line Evaluation Procedure for Structural Integrity by AE Frequency Analysis-Weld Defect Containing Pressure Vessel," *ASME-JSME Joint Conference, PVP Division*, Hawaii.

- (12) 정희돈, 권영각, 장래웅, 1993, "용접부 검사법으로서의 Acoustic Emission" 대한용접학회지, 제11권 제2호, pp. 1~12.
- (13) McBride, S. L., Hong, Y. and Pollard, M. D., 1992, "Enhanced Fatigue Crack Detection in Ageing Aircraft using Continous AE Monitoring," *Proceedings of 11th IAES*, pp. 325~332.
- (14) EPRI, 1982, "Acoustic Emission Monitoring of Steam Turbines," *EPRI CS-2367*, Final Report, April.
- (15) Blackburn, P. B. and Rana, M. D., 1986, "Acoustic Emission Testing and Structural Evaluation of Seamless Steel Tubes in Compressed Gas Service," *Trans. of the ASME*, Vol. 108, May, pp. 234~240.
- (16) ASNT., 1987, "Nondestructive Testing Handbook-Volume 5 Acoustic Emission Testing," 2nd Edition, *American Society for Nondestructive Testing*.
- (17) Hardy, H. R. Jr., 1984, "Geotechnical Application of Acoustic Emission Techniques; Present States and Future Goals," in *Proceedings of the 7th Int'l AE Symposium*, pp. 632~641.
- (18) 岸, 栗林, 1981, "AEによる材料評價," 日本金屬學會誌 會報, 第20卷 3號, pp. 167~175.
- (19) Bassim, M. N., 1992, "Detection of Fatigue Crack Propagation with Acoustic Emission," *NDT & E International*, Vol. 25, No. 6, pp. 287~289.
- (20) Lee, K. Y., 1989, "Cyclic AE Count Rate and Crack Growth Rate under Low Cycle Fatigue Fracture Loading," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 34, No. 5~6, pp. 1069~1073.
- (21) 鄭熙敦, 齋藤, 高橋秀明, 1988, "AEによる金屬/セラミックス複合材料の破壊靱性評價," 第2回 新素材およびその製品の非破壊評價 シンポジウム 論文集, 日本非破壊検査協會, pp. 187~192.
- (22) 佐藤一志, 1989, "マイクロクラックひずみ軟化則に基づくき裂進展評價に関する研究," 日本東北大學 碩士學位 論文.
- (23) Rice, J. R. and Johnson, M. A., 1970, "Inelastic Behavior of Solids," (ed., Kanninen, M. F., et al.), McGraw-Hill, p. 641.
- (24) 日本機械學會, 1981, "彈塑性破壊靱性 J試驗方法," JSME S 001~1981.
- (25) Kikuchi, 1980, "固體材料の破壊過程と音波放出に関する破壊力學的研究," 日本東北大學 博士學位論文.
- (26) Nagata, T., Kobayashi, K., Imazu, A. and Miura, R., 1976, "An Application of the AE Technique to Low-cycle Fatigue Test of Piping Components," *the 3rd AE Symposium*, Sept. 16~18, Tokyo, 11~30.
- (27) Kwon, O. Y., Yoon, D. J. and Park, S. K., 1992, "Acoustic Emission During Unlubricated Sliding Wear of Silicon Nitrides," *The 11th Int'l AE Symposium*, Oct. 26~27, Fukuoka, Japan, pp. 71~76.
- (28) Jeong, H. D. and Takahashi, H., 1987, "Low Temperature Fracture Behavior and AE Characteristics of AAC," *J. of Cement and Concrete*, Vol. 17, pp. 743~754.
- (29) 日本NF株式會社 카탈로그, 1978, "Acoustic Emission 計測裝置."
- (30) Niitsuma, H., Nakasuka, K. and Chubachi, N., 1984, "New Evaluation Method of Geothermal Reservoir by Field AE Measurement," *the 7th Int'l AE Symposium*, Oct. 23~26, Zao, Japan, pp. 642~652.
- (31) Keiser, J., 1950, "An Investigation into the Occurrence of Noises in Tensile Tests or a Study of Acoustic Phenomena in

- Tensile Tests," Ph. D. Thesis, Munich, Germany.
- (32) Hardy, H. R. Jr. and Shen, W., 1992, "Recent Kaiser Effect Studies on Rock," *the 11th Int'l AE Symposium*, Pct. 26~29, Fukuoka, Japan, pp. 149~158.
- (33) Fowler, T. J. and Gray, E., 1979, "Development of an Acoustic Emission Test for FRP Equipment," Preprint 3583, *American Society of Civil Engineering*, Newyork, Apr. 2~6.
- (34) Whittaker, J. W., Brosey, W. D. and Hamstad, M. A., 1989, "Felicity Ratio Behavior of Pneumatically and Hydraulically Loaded Spherical Composite Test Specimens," *AECM* ~3, July, Paris, pp. 168~179. ■