

음향방출 (Acoustic Emission)의 원리와 응용

權 五 陽

仁荷大學校 機械工學科

I. 서 론

음향방출 또는 acoustic emission(AE)은 고체 내부에 국부적으로 형성되었던 변형에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파로 정의되지만, 이와 같은 물리적 현상 자체는 물론 이 탄성파를 이용한 시험방법까지도 포함하는 넓은 의미로 쓰인다.^[1] 음향방출은 연륜이 비교적 짧지만 재료내부의 미시적 변형이나 파괴거동의 구멍에서부터 대형 압력용기나 구조물의 수압시험 및 보증시험, 그리고 가동중에 있는 원자력 발전설비나 운항중의 항공기에서의 연속감시체제에 이르기까지 매우 다양한 응용사례를 보이고 있다. 이는 첫째 음향방출의 발생과정이 극히 미세한 비가역적 변형에 기인하는 때문이고, 둘째로는 초음파시험이나 방사선투시와 같은 다른 방법에서처럼 피시험체에 어떤 에너지를 주입하기 위하여 인공적인 환경하에 두지 않아도 되는 때문이다. 고체 내부의 변화에 의해 발생한 탄성파인 AE는 물질 고유의 감쇠특성에 따라서는 수십미터나 전파된 후에도 충분히 포착할 수 있는 신호로서 존재한다. 따라서 다른 비파괴 시험검사법에서처럼 결함이 존재할 것으로 예상되는 부위에 대하여 구조물 전체를 센서나 투시장치로 검사할 필요가 없기 때문에 매우 큰 구조물에서 또는 가동상태를 유지하면서도 결함의 발생이나 성장유무를 연속적으로 관측하는 것이 가능하다.

음향방출을 보다 실제적인 시험검사에 적용함에 있어서 가장 큰 문제점은 현재까지 개발된 기술로는 음향방출의 발생원이 되는 여러 가지 현상이 재료내에서 동시에 일어날 경우 이들을 서로 분명하게 구별할 수 없다는 점이다. 그럼에도 불구하고 음향방출이 각종 소재의 특성평가에서부터 대형구조물의 진단에 이르기까지 무한한 잠재력을 가진 것은 극도로 높은 감도 때문이다. 비교적 간단한 장치를 사용하고 압전센서를 쓸 경우 10^{-13}m 의 미소변위나 수 mPa의 압력까지도 측정할 수 있다. 즉, 원리상으로는 원자의 이동이나 전위(dislocation)의 움직임도 포착이 가능하므로 소재나 구조에서 결함이 관측되기 훨씬 이전부터 AE신호가

포착되는 것이 보통이며, 이는 저주기 피로시험 등을 통하여 입증된 바 있다.^[2]

근대적 의미에서 최초로 음향방출을 측정하고 응력하에서의 재료의 변형과 연관지어 설명한 것은 독일의 Joseph Kaiser로 1950년에 제출된 그의 박사학위 논문에서이다.^[3] 그는 통상적인 금속 재료의 인장시험으로부터 1) 시편내부에서 생성되는 음향 잡음의 종류와 생성과정, 2) 주파수 범위, 3) 응력-변형을 곡선상의 특징치와 주파수와의 관계 등을 결정하였다. 그의 이름을 따서 명명된 카이저효과(Kaiser effect)는 금속재료에서의 AE 발생의 비가역성을 정의한 매우 중요한 발견일뿐만 아니라 이미 연속형 신호와 돌발형 신호를 명확히 구분하여 기술하고 있다. Kaiser에 의해 시작된 음향방출연구는 후일 미국의 B.H. Schofield 등에 의하여 본격적으로 재료과학 연구에 적용되기 시작하였으며,^[4] C.A. Tatro에 의하여 비파괴시험 검사에 이용될 수 있는 가능성이 제시되었다.^[5]

음향방출을 비파괴시험 검사의 일환으로 고려할 때 빠뜨릴 수 없는 분야로는 원자력발전과 항공우주산업을 들 수 있다. 초기에 원자로의 냉각수 손실을 찾아내기 위하여 음향방출을 도입하여 성공하였고,^[6] Argonne국립연구소에서 나트륨냉각 원자로에서의 냉매 비등현상을 탐지하는데 음향방출을 응용한 예가 있는가 하면,^[7] 현재는 대부분의 원자로에서 결함 및 누출탐지용으로 건설당시에 미리 수십개의 AE센서를 원자로 압력용기 외벽을 비롯한 1차계통에 설치하여 가동시 안전확보를 위한 연속감시의 수단으로 활용하고 있다. 한편 항공우주분야에서도 음향방출을 압력용기의 수압시험 등에 적용함으로써, 그때까지 불가능했던 미소균열의 발생이나 발생위치를 정확히 예측할 수 있었으며,^[8,9] 최근에는 항공기용 복합재료 및 구조의 건전성에 대한 평가나^[10] 비행중의 항공기 구조에 대한 연속감시의 수단으로 활용되고 있다.^[11] 이러한 과정에서 필연적으로 발전된 것이 오늘날의 현대화된 측정기기이며 음향방출의 실용성을 높이는데 큰 공헌을 하였다.

현재 음향방출에 관한 연구가 가장 활발한 곳은 일본이며, 격년으로 국제음향방출심포지엄(IAES)

을 개최하고 학계와 연구계는 물론 다양한 분야의 산업체에서 실제적인 응용사례를 많이 발표하고 있다.^[12] 미국에서는 기간 많은 연구가 여러 대학이나 국립연구소 또는 국립표준기술원(NIST)을 중심으로 이루어져 왔으나 최근에는 연구실적이 격감하고 있다. 다만 음향방출에 대한 문헌정보의 유지관리나 저널의 발행등은 예전과 같이 아직도 미국을 중심으로 이루어지며^[13,14] 일본과 유럽으로부터의 연구실적은 계속 꾸준한 편이다.

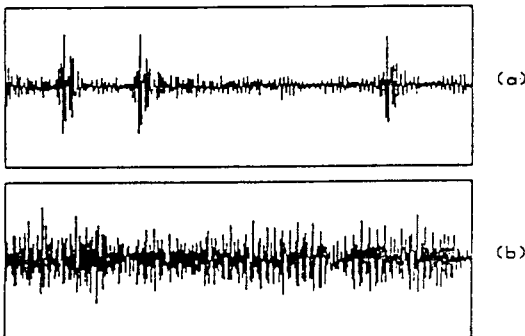
음향방출을 비파괴시험검사의 하나로 볼 수 있는냐의 여부는 다소 주관적인 판단기준상의 문제이겠지만 한가지 분명한 것은 음향방출이 그 속성상 이중성을 띄고 있다는 점이다. 즉, 연속감시나 원격탐지, 수압시험 등에 적용되는 경우에는 분명 비파괴시험검사의 일종이라 하겠지만, 고체 내부에서 진행되는 현상에 대하여 기존의 재료시험 또는 측정방법으로는 불가능했던 정보를 알아내기 위한 수단으로 활용하는 경우에는 이것은 엄밀하게는 비파괴적이 아니며, 따라서 재료시험법으로 분류할 수 있다.

비파괴시험으로 분류되는 경우에도 음향방출은 대부분의 다른 방법들과는 다음 두 가지 점에서 크게 다르다. 첫째, 탐측되는 에너지는 고체 내부에서 방출되는 것인지 초음파시험이나 방사선투시에서처럼 외부에서 주입한 것이 아니다. 둘째, 음향방출로는 구조의 질적저하, 균열의 발생 및 성장, 고체의 소성변형 등 동적인 변화만을 포착할 뿐 이미 존재하고 있는 결함의 크기나 종류, 위치 등은 판별할 수 없다. 다만, 존재하던 결함이 외력에 의해 성장하거나 이동하는 경우는 역시 동적인 변화이므로 음향방출에 의해 가장 효과적으로 위치와 발생빈도를 알 수 있다. 일반적으로 구조가 파손에 이르기 훨씬 이전에 내부에는 국부적인 불안정구역이 형성되는데, 이것은 전체적으로는 외력이 재료의 탄성한계보다 훨씬 낮아도 균열선단부 같은 곳에서는 응력집중에 의한 소성변형이 진행되는 때문이다. 즉, 음향방출은 이러한 미소변형을 탐지하는데 매우 유효한 수단인 것이다.

II. 발생기구

AE의 발생원으로는 고체내에서의 전위(dislocation)의 이동, 미소균열의 생성 및 성장 등이 대표적인 것으로 알려져 있는데, 전자의 경우 연속형 신호를, 후자의 경우 돌발형 신호를 발생하는 것으로 이해하고 있다. 그림 1은 대표적인 돌발형 신호와 연속형 신호의 예를 보여준다. 그러나 실제로 음향방출의 발생원은 대상재료의 특성에 의해 좌우된다. 예를들면 복합재료 중에서도 금속기지 복합재료(MMC)에서는 상기의 두 가지 발생원이 모두 고려될 수 있으나 고분자기지 복합재료(FRP)의 경우에는 전위에 의한 음향방출의 발생은 배제된다. 대신에 고분자기지의 균열발생, 강화섬유와 기지 계면의 분리 및 마찰, 강화섬유의 절단 등이 일반적으로 알려져 있다. 금속재료에서의 발생원으로는 전술의 두 가지 외에도 쌍정이나 결정입계 이동, 그리고 비금속 개재물과 모재의 분리, 고상변태, 용융 및 응고, 자구(magnetic domain)의 이동, 성장 및 소멸 등이 알려져 있다.^[15] 한편, 누설, 마찰, 기포 발생 등은 표면에서의 변화이므로 일종의 가짜 발생원(pseudo source)이나 실제로 이를 이용하여 진단하고 평가하는 방식이 음향방출의 그것과 너무나 유사하므로 흔히 발생원으로 포함되고 있다.

AE는 파동현상의 일종이고, 재료 또는 구조의



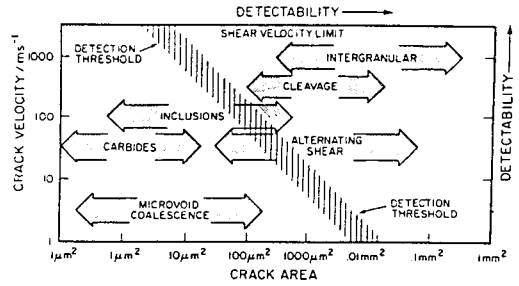
(그림 1) 대표적인 AE신호 유형 ; (a) 돌발형 신호 (b) 연속형 신호

특성이나 현상을 규명하기 위해서는 일정 거리를 전달된 파동을 측정하고 해석해야 한다. 이때 가장 기본이 되는 파형인자는 주파수와 진폭이다. 표 1에는 음향방출 신호의 진폭에 영향을 미치는 재료의 특성 또는 현상의 종류를 나열하였다. 물론 다른 조건들은 일정하다는 전제하에서의 일반적 경향이므로 포괄적으로 이해를 돕는 지표로 간주될 수 있을 따름이다. 이와 관련하여 반드시 짚고 넘어가야 할 사실은 음향방출의 속성중에서 단점으로 작용하는 두 가지이다. 첫째는 음향방출 신호의 발생은 예측할 수 없으며 순간적(transient)이라는 점이다. 따라서 신호대잡음비(SNR)의 향상에 유효한 수단이 없고, 고성능의 측정기기가 필요해진다. 둘째로 더욱 치명적일수도 있는 것으로 균열의 발생과 성장 등 우리가 알고 있는 어떤 발생원이라도 언제나 음향방출을 생성한다는 보장이 없다는 점이다. 이것은 음향방출이 발생하기 위해서는 국부적으로 형성되었던 에너지가 결함을 형성하는 표면에너지나 열에너지로 전부 소모되지 않고 그 일부가 탄성파의 형태로 방출되어야 하는 까다로운 조건을 만족해야 하는 때문이다.^[16,17]

<표 1> 음향방출 신호의 상대적인 크기에 영향을 미치는 주요 인자

음향방출 신호의 진폭을 증가시키는 인자	음향방출 신호의 진폭을 감소시키는 인자
높은 강도	낮은 강도
높은 변형율	낮은 변형율
낮은 온도	높은 온도
이방성	등방성
비균질성	균질성
두꺼운 단면	얇은 단면
취성과파괴	연성 파괴
재료내의 불연속들	불연속이 없는 것
마르텐사이트 상변태시	확산에 의한 상변태시
균열(crack)의 성장	소성 변형
주조 제품	단조 제품
큰 결정 입도	작은 결정 입도
기계적으로 인가된 비틀림	열적으로 인가된 비틀림

음향방출이 재료내부의 국부적인 영역의 해소과정에서 자발적으로 방출되는 초음파인 점은 이미 언급하였거니와, 여기서는 음향방출의 발생원이 되는 국부적 불안정영역의 실체를 보다 상세하게 살펴보고자 한다. 고체내에서 하나의 미소균열이 발생한 경우에 균열표면은 외부하중에 의한 응력을 해소하는 방향으로 움직일 것이며, 바로 이 과정이야말로 고체내부에 형성된 국부적인 에너지를 방출하는 과정이다. 에너지 방출의 한 형태로서 발생한 탄성파, 즉 음향방출은 고체내부를 자유롭게 이동하지만 표면 또는 계면에서는 반사와 더불어 모드전환도 일어나게 된다. 탄성파의 전파는 고체내에 균열이 형성되고 형상의 변화가 발생할 수 있게 함으로써 결국 새로운 평형상태를 이루게 한다. 이론적인 계산에서는 완전탄성체를 가정하지만 그렇다면 탄성파는 무한하게 전파가능하고 역학적 평형상태는 끝내 얻어질 수 없다. 실제 재료에서는 파동에너지의 일부가 열에너지로 바뀌는 현상, 즉 흡수(absorption)가 일어나서 파동은 소진되고 새로운 평형상태가 얻어진다. 미시적인 발생원에 대한 정확한 이해는 관심의 대상인 여러가지 신호들 사이의 유사성과 차이점을 구별할 수 있는 바탕이다. 특히 어떤 고체의 표면변위를 유발할 수 있는 미시적 발생원으로는 전위의 이동, 미소균열의 생성과 성장, 마르텐사이트 변태와 같은 예를 들 수 있다. 텐서개념에 입각한 탄성파의 전달이론으로부터 미시적 발생원에 대한 탐측가능한계를 설정하기 위한 미소역학적 모델과 이를 이용하여 소성변형, 균열의 형성과 상변태를 수반하는 재료에서의 음향방출 발생원을 판별할 수 있다. 금속재료에서 변형에 의해 발생하는 미소균열의 크기는 결정입도나 개재물 또는 석출물의 직경이나 이들 상호간의 거리등 미세조직상의 구성요소의 크기와 밀접한 관계가 있다. 예를들어 연성-취성 천이온도(DBTT) 이하에서 웨라이트조직 강은 결정입도 정도의 벽개 균열을 발생함이 보통이다. 벽개와 같은 취성 미세균열은 일반적으로 횡파의 전파속도에 가까운 속도로 진행한다고 알려져 있다. 반면에 미소기공의 연합과 같은 연성파괴는 거의 정적인 과정으로 진행된다. 모든 음향방출이 일정한 응력(σ_{33})



〈그림 2〉 철강재에서의 파괴와 관련한 탐지한계 ; 탐측 문턱값은 센서의 종파에 대한 감도 $10^{-13}m$, 발생원과 센서의 거리 0.1m, 외부응력 500MPa로 가정하여 계산

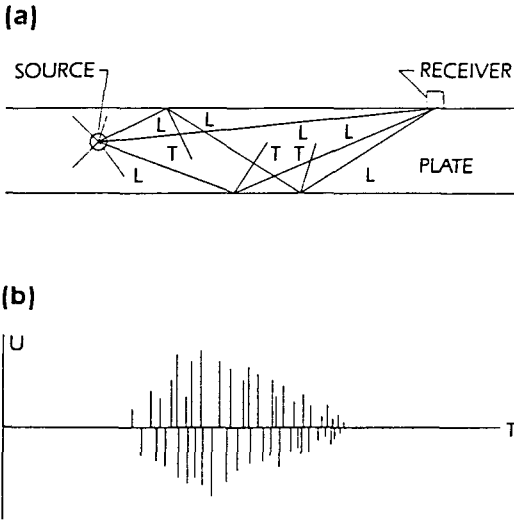
하에서 일어나고 발생원과 센서의 거리를 일정한 것으로 가정하면, 각종의 미세파괴기구를 검출한계 조건과 함께 그림 2와 같이 $r, \pi r^2$ 평면에 도시할 수 있다.^[18]

III. 신호의 전달과 측정

1. 탄성파의 전파

탄성파의 전파에서 가장 간단한 경우는 바로 경계면이나 표면을 갖지 않는 구조, 즉 무한공간을 이루는 고체를 가정할 수 있다. 이 경우에는 오직 두 가지 파동만이 존재하는데, 종파(P파 또는 L파)와 횡파(S파 또는 T파)이다. 그러나 유한공간에서는 자유표면이 존재하므로 표면파 또는 Rayleigh파로 불리우는 새로운 형태의 파동이 생겨난다. 표면파의 진폭은 표면으로부터의 깊이에 따라 급격히 감소하며 대부분의 파동에너지는 한파장 이내의 표면층을 통하여 전달된다. 표면파와 체적파는 이론적으로는 서로 독립적이지만 구석진 모서리 등을 가진 실제 구조에서는 양자간의 결부됨을 피하기는 힘들다.

보다 실제적인 조건은 일정한 두께의 무한 평판에서의 발생원과 전파특성이다. 이 경우에는 무한 또는 반무한 공간의 경우보다 해석적으로 해를 구



(그림 3) 평판에서의 파동의 전파: (a) 발생원로부터 출발하여 센서에 도달하는 파동의 성분 (b) 센서에서 수신된 직접 전파 및 반사 전파 파동 성분의 합

하는 것이 매우 복잡하며 보통 평판 두께의 수배까지의 전파과정에 한하여 수치해석에 의한 해를 얻는 것이 보통이다. 그림 3(a)와 같이 발생원이 오직 종파 성분을 방출하는 경우에도 자유표면에서의 반사는 횡파 성분을 낳는다. 평판 두께의 수배 거리에 위치한 센서에 도달한 파동은 그림 3(b)의 형태를 가지며 이것은 실로 복잡한 경로로 전파된 종파 및 횡파 성분의 합인 것이다. 주목할 점은 평판상에서 변위나 속도 또는 가속도 파형과는 달리 주파수 스펙트럼은 거의 변화가 없다는 점이다. 따라서 주파수 성분을 신호해석에 이용할 수 있다.^[19] 여러 가지 다른 주파수 성분은 다른 속도로 전파되므로 위상은 변하더라도 단순 하모닉 성분은 변함이 없고 따라서 파워스펙트럼도 변하지 않는다. 다른 한 가지는 무한 평판에서의 결보기 전파속도는 종파속도와 횡파속도의 사잇값이라는 점이다. 실제로 신호 에너지의 대부분을 수반하는 최대진폭부의 전파속도는 판파의 속도, C_p 보다 약 9% 낮은 값으로 측정된다.

2. 감쇠와 분산

실제 응용시 반드시 고려하여야 할 유한공간에서의 탄성파의 전파특성으로는 감쇠(attenuation)가 있다. 여기서 감쇠라함은 파동이 고체속을 진행함에 따라 그 진폭이 감소하는 것을 말한다. 감쇠의 형태로는 기하학적인 감쇠, 재료 구성요소에 의한 산란이나 흡수, 분산 등을 들 수 있는데, 모든 감쇠기구가 반드시 에너지의 손실을 수반하는 것은 아니며, 어떤 경우에는 단순한 에너지의 분포상태가 바뀔 따름이다.

기하학적 감쇠는 점으로 가정된 발생원으로부터 바깥쪽으로 구면에 수직인 모든 방향으로 파동이 진행되는 때문에 나타난다. 무손실공간을 가정하면 파동선단의 에너지의 합은 일정하지만 바깥쪽으로 갈수록 파동선단의 면적이 늘어나므로 결과적으로 진폭은 줄어들게 된다. 무한 또는 반무한 공간에서의 평면파, 평면 또는 판재에서의 일차원 발생원에 의해 발생한 파동, 줄이나 막대 등 일차원 구조를 전파하는 파동 등에서는 기하학적인 감쇠가 없다.

다른 하나의 감쇠현상으로는 분산(dispersion)에 의한 효과를 들 수 있는데, 이것은 어떤 특정한 환경하에서 파동의 전파 속도가 주파수에 의존하는 때문에 발생한다. 전파속도가 주파수의 함수이므로 몇가지의 주파수 성분을 가진 파동은 막대를 따라 전파되면서 파형이 바뀌게 되는데 이 때문에 진폭의 변화가 있게 된다. 일반적으로 유한 크기의 고체속을 진행하는 파동은 파장이 고체 구조의 어느 한 치수에라도 접근하는 경우 분산이 일어난다. AE와 관련하여 생각하면 복합재료 구조물처럼 얇은 판재에서 국부적인 발생원을 갖는 경우 현저한 분산 현상을 보이는데, 주파수가 감소하고 신호의 길이가 상대적으로 증가하게 되어 복합재 압력용기 등 구조물에서의 위치표정에 불리한 요인으로 작용한다.^[20, 21]

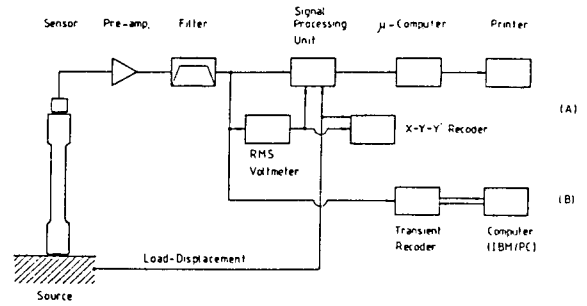
3. 신호의 전달과 측정의 실제

AE의 발생원과 고체내에서의 탄성파의 전파특성에 관해서는 이미 언급하였거니와 이 두 가지가 바로 신호의 파형을 결정해 주는 요소이다. 특히 탄성파의 전파과정은 파원에서의 정보를 센서에

전달해 주는 과정이므로 감쇠특성이나 파동 모드별 전파속도에 관한 정보는 위치표정에서는 필수적이다. 그러나 실제 응용에 있어서 파동 모드나 방향성은 고려되지 않는데, 이것은 자연발생적인 AE 신호가 센서에 도달하였을 때에는 실제로 여러가지 파동 모드가 매우 복잡하게 섞여 있는 때문이고, 또한 파원은 일반적으로 점원이므로 구형파면을 이루며 전달되는 것으로 생각하기 때문이다.

측정의 실제적 문제로는 오히려 수 μV 에서 수백 mV 에 이르는 신호의 진폭변화, 수 μsec 에서 수백 msec 에 이르는 신호의 길이변화, background 잡음의 변화, 가짜 신호의 혼입 등이 더욱 문제시 된다. 따라서 AE 시험은 다음과 같은 몇가지 요소기술을 확보할 때 비로소 자연현상을 이해하고 실제적으로 가치있는 기술이 될 수 있을 것이다. (1) 특정한 재료와 현상으로부터의 AE를 규명할 수 있는 기술과, 잡음을 제거할 수 있는 방법과, 구조물에서의 탄성파의 전파특성을 규명하고 이를 실험계획에 반영할 수 있을 것, (2) 구조물의 기능저하를 초래하는 손상을 주지 않고도 필요한 AE 데이터를 얻을 수 있도록 하중을 가하는 방법과, 대략적이라도 위치표정을 할 수 있을 것, (3) 데이터를 해석하고 설명할 수 있는 능력과, 최종적인 합격, 불합격의 판단능력을 갖출 것 등이 그것이다.

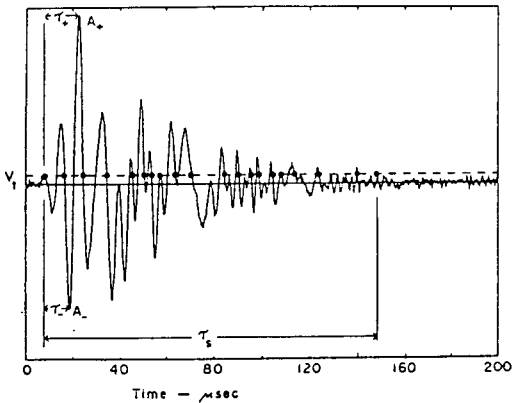
AE 신호를 효율적으로 포착하고 처리하기 위한 장치는 실험목적과 그에 따른 처리 및 기록방법에 따라 소형의 이동가능한 것에서부터 컴퓨터로 처리되는 수십 채널짜리 대형장비에 이르기까지 다양하다. 그림 4에는 현대적인 AE 측정장치의 구성도를 나타내었는데, 이는 재료시험 등의 실험실적 구성에 맞춘 것이며 현장적용을 위해서는 필요한 만큼의 센서를 증설한 복수채널형이어야 하는데, 전치증폭기와 filter는 물론 신호처리부의 채널수도 함께 증설되어야 한다. 특별한 경우를 제외하면 AE의 현장적용은 발생원의 위치표정이 우선적인 목적이므로 평균평방배계급(RMS) 전압의 측정은 생략되지만, 하중-변위 곡선은 X-t 레코더를 사용하여 기록함으로써 AE 데이터와 기계적 변형 사이의 연관관계를 이끌어 낼 수 있다. 또한 그림



(그림 4) 현대적인 AE 측정장치의 구성

4는 실제로 두 가지의 신호처리 방법을 함께 보여주는데, (A)부분이 AE 신호로부터 몇 개의 미리 설정된 파형인자를 추출하고 기록하는데 비하여 (B)부분은 신호의 파형 자체를 아날로그-디지털 변환기(ADC)를 통하여 기록한 다음 보다 고성능의 중대형 컴퓨터에서 분석할 수 있다. 그림 5에는 (A)루트로 처리될 때 파형인자를 추출하는 예를 나타내었는데 실제의 신호를 충분히 대표할 수 있는지의 의문이 남는다 하더라도, 통상 초당 수백개의 비율로 발생하는 신호의 처리방법으로서는 거의 유일한 것이므로 대부분의 상업화된 측정장치는 이 방식을 채택하고 있다. 실제로 (B)루트로 기록할 수 있는 능력은 기껏해야 초당 수천 바이트 정도이며, 이는 개개의 신호가 아무리 짧더라도 초당 수십개 정도의 신호만 처리할 수 있는 수준이고 아직은 장비의 가격도 비싸서 일반화되지 못하고 있다.

측정장치를 구성하는 요소중에서 가장 중요한 것은 센서이다. 센서의 역할은 내부의 파원으로부터 도달한 AE신호에 의해 발생하는 표면미소변위를 전기적인 신호로 바꾸어 주는 것이다. 센서에는 압전형(piezoelectric), 전기용량형(capactive), 간섭계형(interferometry) 등이 있으며 한편으로는 공진형(resonant type)과 광대역형(broadband type)으로 나누는데 선택의 기준은 요구되는 주파수 대역, 감도 및 주위환경 등에 따라 좌우된다. 상용화된 많은 센서는 압전형이며 그 대부분이 공진형인 반면에 전기용량형이나 간섭계형은 모두 광대역형이며 특수한 용도로만 쓰이고 있다. 전치



AE Signal parameters :
 Peak Amplitude (A , or A_0)
 Rise Time (r , or r_0)
 Signal Duration (τ_s)
 AE (ringdown) Count (20)
 Event Count (1)
 Signal energy ($E = 1/2R \cdot A_0 \cdot \tau_s$)

(그림 5) 그림 4의 (A)루트를 통한 신호처리 방법의 개요

증폭기는 될수록 센서에 가깝게 위치하고 40dB 또는 60dB 증폭함으로써 μV 수준의 신호를 mV 수준으로 바꾸어 준다. 여기에는 흔히 bandpass filter가 포함되어 시험목적과 AE 파원의 주파수 범위에 맞추어 신호를 통과시키게 된다. 이론적으로 AE는 가청주파수 상단부터 50MHz까지의 광대역에 걸친 신호이지만 실제로는 30kHz에서 2MHz 정도이면 가장 광대역이 된다. 측정기기의 성능, 특히 신호대잡음비(SNR)에 의한 제한도 물론이지만 높은 주파수 성분이 활용되지 못하는 것은 주로 AE가 표면까지 전달되는 과정에서의 감쇠가 심한 때문이다. 컴퓨터가 측정장치의 일부로서 도입되기 시작한 것은 1970년대 말인데, 이는 데이터의 선택적 기록 및 각종 사후분석을 가능케 하였으며 이후 컴퓨터 기술의 급속한 발전에 힘입어 점차로 모든 AE시험에서 실시간 처리가 가능해졌다. 이밖에 측정기기와 관련된 여러 가지 원리나 설명 중 더 자세한 내용은 참고문헌에서 찾아보기 바란다.^[15, 22]

AE 시험의 궁극적인 목적은 발생원의 존재유무를 측정하고, 파원에 관하여 최대한 많은 정보를 얻는 데 있다. 탐측기술과 위치표정기술은 비교적

잘 확립되었으므로 이제는 파원 특성평가에 많은 연구가 집중되고 있다. 실제로 파원해석은 발생원의 종류(indentification)를 결정할 뿐 아니라 발생원의 강도나 위험도(intensity 또는 severity)를 센서로 측정된 신호에서부터 추정해야 하는 가장 어려운 작업이다. 센서의 출력신호는 발생원에서의 AE가 표면에 위치한 센서까지 전달되는 과정에서 한번 왜곡되고, 센서의 특성과 접촉매질에 의해 또 한번 왜곡된 것이므로 이로부터 출발하는 파원해석은 결코 쉬운 작업일 수 없다. 매우 단순한 조건하에서라면 전술의 파형인자 추출법에 의해서도 가능하겠으나 보다 복잡한 환경하에서 그것도 신속한 처리를 요구하는 가동중 감시를 위해서는 컴퓨터의 이점을 최대한 활용하는 인공지능 방식의 도입이 필요하다. 이것은 패턴인식^[23] 또는 신경회로망 처리^[24] 등으로 전자의 경우에는 상품화된 경우도 있다. 어느 경우어나 통계적인 데이터와 사전 지식에 근거한 분류(knowledge-based classification)를 기초로 하고 있으므로 개별적인 발생원 보다는 어떤 공통된 특성을 지닌 발생원의 집합체를 규명한다고 볼 수 있다.

IV. 응용분야

음향방출 기술의 응용분야는 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 인장시험이나 피로시험과 같은 재료시험에 AE시험을 병행함으로써 기존의 방법으로는 측정할 수 없는 고체내부의 미시적 변형 및 파괴기구에 대한 추가적인 정보를 얻는 것이며, 둘째는 산업현장에 적용되어 실 구조물이나 산업설비의 안전성평가 또는 생산공정에서의 품질관리에 필요한 정보를 제공하는 것이다. 전자의 예로는 전통적인 금속재료는 물론 세라믹스, 반도체, 복합재료, 목재에 이르기까지 각종 소재의 주로 기계적 특성평가에 사용된 예가 수천건의 문헌으로부터 확인된다. 후자에 속하는 예는 초기에 AE기술의 발전이 주로 원자력 설비와 항공우주 구조물의 개발과정에서의 필요성에 힘입은 바 크기 때문

에 이러한 분야에서 가장 일찍부터 응용되어 왔으며, 부분적으로는 시험절차가 규격화 되었다.^[25~28] 구체적으로는 압력용기의 보증시험, 석유 화학 설비중 배관 및 저장 탱크에서의 결함 검출, 원자력 설비의 연속 감시, 용접 공정의 공정관리, 암석이나 지질 연구 등 토목공학에의 응용, 반도체 및 전자부품의 품질관리, 생체 의공학에의 응용, 절삭 및 성형 등의 생산라인에서의 연속감시 등을 들 수 있다. 다만 본고에서는 독자들의 관심도와 제한된 지면을 고려하여 전자 및 후자에 속하는 예를 각각한 가지씩만 소개하고자 한다.

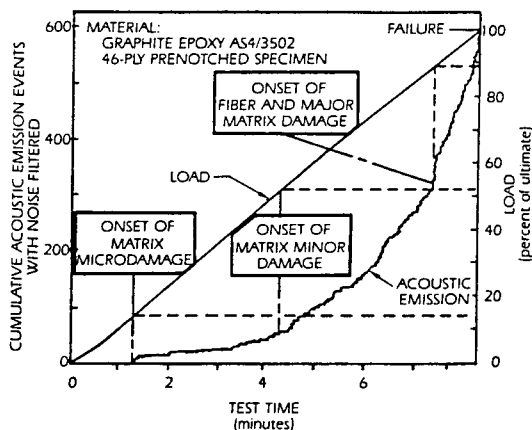
1. 항공용 고분자 복합재료에 대한 AE 시험

복합재료는 두 가지 또는 그 이상의 서로 다른 재료로 구성되어 잘 조절된 특성과 구성요소간의 상승작용으로 훨씬 우수한 성질을 얻을 수 있도록 개발된 신소재이다. 고분자 복합재료는 유기고분자 매트릭스와 유리, 무기 또는 금속인 강화섬유로 이루어져 있다. 대표적인 항공용 복합재료로는 에폭시 매트릭스에 탄소섬유가 매몰되어 경화된 CFRP를 들 수 있다. 가벼우면서도 강인하여 높은 비강도, 비탄성율을 가지고 부식에도 강하며 온도 변화에 대한 치수의 안정성이 높은 등의 장점으로 최근에 군수용은 물론 민수용 항공우주 구조물에는 고분자 복합재료의 사용이 급격히 증가하는 추세이다. 예를들면 미국이 자랑하는 우주왕복선의 고체연료 로켓케이스는 탄소/에폭시 복합재료를 필라멘트 와인딩으로 만들며, 항공용으로는 날개의 리딩엣지, 수평꼬리날개, 엔진 두껍(nacelle), 헬리콥터 주날개 등이 있다.

고분자 복합재료는 외력에 의해 변형될 때 엄청난 양의 AE를 발생시킨다. 고분자 복합재료 및 구조에 대한 AE시험은 손상의 발생과 결함의 성장을 실시간에, 가동에 영향을 주지않으면서 평가할 수 있는 비파괴적 검사법으로서 활용된다. 건전한 복합재료 구조에서는 최대하중의 약 40에서 60 퍼센트에서 AE가 발생하기 시작하는 반면에 심각한 결함을 이미 가진 구조에서는 약 20퍼센트부터 이미 AE가 발생하기 시작한다. 따라서 AE를 평가의 수단으로 활용하는 기술자는 AE 자체는 물

론 복합재료 내에서 어떻게 AE가 발생하는가에 대하여 상당한 지식을 갖고 있어야 한다. AE를 이용한 특성평가와 실시간 감시는 복합재료에 대한 다른 여러 가지 시험검사 방법들이 한계를 갖는 까닭에 더욱 적합한 것으로 간주되고 있다.

항공용 복합재료에 AE를 적용하는 분야는 크게 세 가지로 나누어 볼 수 있다. (1) 기계적, 열적, 분위기적 응력하에서 재료의 거동에 대한 평가; (2) 재료 및 구조의 생산과정에서의 품질관리; (3) 가동중 또는 비행중 연속감시가 그것이다. 복합재료의 파괴기구와 AE 신호 사이의 연관관계에 대해서는 매우 많은 연구가 진행되어 있으며, 주로 매트릭스 균열, 섬유와 매트릭스 계면의 분리, 섬유의 뽑힘, 섬유의 파단, 층간분리 등에 대한 분별을 내용으로 하고 있다. 기술자들은 당연히 손상의 발생과 성장에 따르는 AE 발생에 관하여 많은 관심을 가지고 있다. AE 센서를 복합재료 시험편에 부착하고 기계적 시험을 행함으로써 AE 발생과 하중과 스트레인을 동시에 기록할 수 있다. 그림 6과 같은 기록에서부터 일련의 파괴과정이 진행되는 하중을 읽을 수 있다. 하중의 증가에 따라 처음에는 매트릭스의 균열에서부터 AE가 발생하지만, 대부분의 신호는 결국 섬유와 매트릭스 사이의 계면에서 유래된다. 하중이 최대하중에 접근하면



〈그림 6〉 균열을 가진 탄소/에폭시 복합재료 다방향 적층판의 하중과 AE 발생

AE 발생량이 격증하는데 이것은 기지균열 외에도 층간분리, 섬유-기면 분리, 섬유과단 등 복잡한 파괴현상이 짧은 시간 동안에 일어나는 때문이다.^[29]

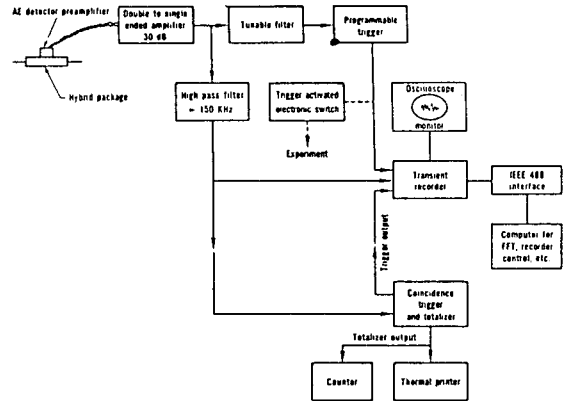
2. 전자산업에서의 AE 응용

AE는 전자산업에서도 쓰이고 있으나 비교적 최근의 일이며, 부분적으로 생산제품의 품질관리에 이용되고 있다. 이것은 반도체 칩 등의 크기가 전술의 압력용기나 기계구조 등 다른 응용분야의 대상체에 비하여 워낙 작아서 AE 측정기술을 적용하기가 어려웠던 때문이다. 즉, 첫째로는 통상적인 유효 주파수 대역에서 AE의 파장이 수십 mm이므로 충분한 분해능을 갖지 못하며, 둘째로는 보다 실제적으로 어떻게든 센서를 붙일 수만 있다면 신호를 받아서 분석할 수밖에 없는 여건에서 수학적 인 해에 접근하는 신호해석의 결과를 기대하기 힘들다. 주로 전자부품의 품질관리에 이용된 예가 많은데, 이 경우에도 역시 이를 활용하고자 하는 기술자는 전자부품의 파손양상에 상당한 사전지식을 가지고 있어야 하며, AE가 발생하도록 가해지는 하중이나 응력에 의한 모든 변화를 고려할 수 있어야 함은 물론이다.

전자부품의 품질관리나 제조공정 등에 AE기술을 적용한 사례를 열거해보면 다음과 같다.

1. 다층 세라믹 커패시터의 균열, 기공, 층간분리 탐지
2. 해저 발신기의 제조공정 중 용접시 열간균열과 제조후 냉간균열 탐지
3. 열압축 접착시 세라믹 기관의 균열발생 탐지
4. TAB 접착한 전자부품의 접착계면 품질검사
5. Hybrid package의 열충격 저항 특성평가
6. 웨이퍼의 양측굽힘시험시 IC의 파손탐지
7. 초전도 자석의 상태진단과 연속감시
8. 전자부품 또는 조립품의 건전성 확보를 위한 PIND(Particle Impact Noise Detection)

그림 7은 hybrid package의 열충격 손상 탐지를 위한 AE시험 장치의 구성을 보여준다.^[30] 이러한 시험의 결과로 제품의 합격과 불량률을 판정할 수 있었는데, 불량률의 주된 형태는 비교적 낮은 응력하에서도 기밀성(hermeticity)을 상실하는 것이었



(그림 7) Hybrid package의 열충격 손상을 탐지하기 위한 AE 시험장치의 구성

다. 이러한 기밀성 부족은 육안검사나 다른 어떤 간편한 방법으로도 찾아낼 수 없는 것이었음은 물론이다.

참고 문헌

- [1] ASTM-E610, "Standard Definition and Terms Relating to Acoustic Emission", ASTM, Philadelphia, PA, 1982.
- [2] M. Houssny-Emam and M.N. Bassim, "Study of the Effect of Heat Treatment on Low Cycle Fatigue in 4340 Steel by Acoustic Emission", Materials Science and Engineering, Vol.61, pp 79~, 1983.
- [3] J. Kaiser, "Untersuchungen uber das auftreten Gerauschen beim Zugversuch(An Investigation into the Occurrence of Noises in Tensile Tests or a Study of Acoustic Phenomena Tensile Tests)", Ph. D. Thesis, Technische Hochschule Munchen, Munich, Germany, 1950(in German).
- [4] B. Schofield, R.A. Bareiss and A.A.

- Kyrala, "Acoustic Emission under Applied Stress", WADC TR 58-194, Lessells and Associates, Boston, MA, April, 1958.
- [5] C.A. Tatro, "Acoustic Emission from Crystalline Materials Subjected to External Loads", Michigan State University, East Lansing, MI, April, 1960.
- [6] D. Parry, "Nondestructive Flaw Detection by Use of Acoustic Emission", IDO-17230, Phillips Petroleum Co., Idaho falls, ID, May, 1967.
- [7] T. Anderson, T. Mulcahey and C. Hsu, "Survey and Status Report on Application of Acoustic Emission from Boiling Water Reactors", ANL-7469, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, April, 1970.
- [8] A.T. Green, "Testing of Glass Hemispheres Using Aerojet-General Stress-Wave Analysis Technique", Final Report, ONR N00014-67-C-0333, Aerojet-General Corp., Sacramento, CA, Sept, 1967 「NTIS : AD-825542」.
- [9] H.L. Dunegan, D.O. Harris and A.S. Tetelman, "Detection of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission Techniques", UCRL-71457, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, CA, March, 1969(also in Materials Evaluation 28 (10) : 221-227, Oct, 1970).
- [10] W.C. Boyce and R.K. Miller, "Assessment of Structural Damage in Composites Utilizing Acoustic Emission Technology", Proc. 41st American Helicopter Society Conf., May, 1985.
- [11] S.L. McBride, "In-Flight Acoustic Emission Monitoring of a Wing Attachment Components", *J. Acoustic Emission*, Vol.1, No.4, pp223~228, 1982.
- [12] Progress in Acoustic Emission I(1982) to VII(1994), Procs. the International Acoustic Emission Symposium(IAES), Japanese Society for Nondestructive Inspection, Tokyo, Japan.
- [13] T.F. Drouillard, "Acoustic Emission : A Bibliography with Abstracts", IFI Plenum Press, New York, 1978.
- [14] Journal of Acoustic Emission, Vol.1 (1982) to Vol.12(1994), K. Ono, Editor, Acoustic Emission Group, University of California, Los Angeles, CA.
- [15] ASNT Handbook, 2nd Edition, Vol.5, "Acoustic Emission Testing", R.K. Miller and P. McIntire, Eds., ASNT, Columbus, OH, 1987.
- [16] J.D. Achenbach and J.G. Harris, "Acoustic Emission from a Brief Crack Propagation Event", *J. Applied Physics*, Vol.46, pp.107~112, March, 1979.
- [17] L.R.F. Rose, "The stress wave radiation from growing cracks", *Int. J. Fracture*, Vol.17, pp.45~60, Feb, 1981.
- [18] D.G. Eitzen and H.N.G. Wadley, "Acoustic Emission : Establishing the Fundamentals", *J. Research of NBS*, Vol.89, No.1, pp.75~100, Jan/Feb, 1984.
- [19] R.W.B. Stephens and A.A. Pollock, "Waveforms and Frequency Spectra of Acoustic Emission", *J. Acoustical Society of America*, Vol.50, No.3, pp.904~910, 1971.
- [20] D.M. Egle and A.E. Brown, "Consideration of the Detection of Acoustic Emission Waves in Thin Plates", *J. Acoustical Society of America*, Vol.57, No.3, pp.591~597, 1975.
- [21] R.A. Klein and S.S. Ali, "Method of Calculating Attenuation and Dispersion Effects on Acoustic Emission Signals", *J. Acoustic Emission*, Vol.4, No.4, pp.107~114, 1985.

- [22] A.G. Beattie, "Acoustic Emission, Principles and Instrumentation", *J. Acoustic Emission*, Vol.2, No.1/2, 1983.
- [23] D.R. Hay et al., "Classification of Acoustic Emission Signals from Deformation Mechanisms in Aluminum Alloys", *J. Acoustic Emission*, Vol.3, No.3, pp.118~129, 1984.
- [24] W. Sachse, "The Processing of AE Signals", *Progress in Acoustic Emission IV*, K. Yamaguchi et al., Eds., Proc. 9th IAES held in Kobe, Japan, Nov 14~17, 1988.
- [25] ASTM E1067-85, "AE Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin(FRP) Tank/Vessels", ASTM, Philadelphia, PA, 1985.
- [26] ASTM E1106-86, "Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors", ASTM, Philadelphia, PA, 1985.
- [27] ASTM F914-85, "Standard Test Method for Acoustic Emission for Insulated Aerial Personnel Devices", ASTM, Philadelphia, PA, 1985.
- [28] ASME Code Section V Article 12, "AE Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing", ASME, New York, NY, 1992.
- [29] C.D. Bailey, J.M. Hamilton, Jr. and W.M. Pless, *Acoustic Emission of Impact Damaged Graphite/Epoxy Composites*, *Materials Evaluation*, Vol. 37, No. 5, pp.43~, 1979.
- [30] G.G. Harman, "The Use of Acoustic Emission to Determine the Integrity of Large Kovar Glass-Sealed Microelectronic Packages", NBS SP 400-70, National Bureau of Standards, Washington D.C., May 1982.

저 자 소 개



權 五 陽

1952年 5月 8日生

1976年 2月 서울대학교 공과대학 공업교육과(공학사)

1978年 2月 서울대학교 대학원 공업교육과(공학석사)

1987年 12月 미국 UCLA 재료공학과(공학박사)

1978年 3月~1983年 9月 국방과학연구소(ADD) 연구원

1983年 9月~1988年 3月 UCLA 재료공학과 연구조교

1988年 4月~1994年 8月 한국표준과학연구원 비파괴평가연구실장

1994年 9月~현재 인하대학교 공과대학 기계공학과 부교수

주관심분야 : 구조용 재료의 기계적 특성평가, 비파괴 시험검사, 복합자료 평가