

음향방출

Acoustic Emission

김영환*, 윤동진*, 권오양**

*한국표준과학연구원 비파괴평가 그룹

**인하대학교 기계공학과

I. 서 설

1. 음향방출의 정의

음향방출(acoustic emission : AE)은 고체내부에 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 그 연원이 비교적 짧지만 재료 내부의 미시적 변형이나 파괴거동의 규명에서부터 대형 압력용기나 구조물의 수압시험 및 보증시험, 그리고 가동 중에 있는 원자력 발전설비나 운항중의 항공기에서의 연속감시체제에 이르기까지 매우 다양한 응용사례를 보이고 있다. 이는 첫째로는 음향방출의 발생과정이 극히 미세한 비가역적 변형에 기인하는 때문이고, 둘째로는 초음파시험이나 방사선투시와 같은 다른 방법에서처럼 피시험체에 어떤 에너지를 주입하기 위하여 인공적인 환경 하에 두지 않아도 되기 때문이다. 고체 내부의 변화에 의해 발생한 탄성파(음향방출)는 물질 고유의 감쇠 특성에 따라서는 수십 미터나 전파된 후에도 충분히 포착할 수 있는 신호로 존재한다. 따라서 다른 비파괴 시험검사법처럼 결함이 존재할 것으로 예상되는 부위에 대하여, 구조물 전체를 센서나 투시장치로 검사할 필요가 없기 때문에 매우 큰 구조물에서도 가동상태를 유지하면서 결함의 발생이나 성장유무를 연속적으로 관측하는 것이 가능하다.

음향방출을 보다 실제적인 시험검사에 적용할 때에 가장 큰 문제점은 현재까지 개발된 기술로는 음향방출의 발생원이 되는 여러가지 현상이 재료 내에서 동시에 일어날 경우 이들을 서로 분명하게 구별할 수 없는 점이다. 그럼에도 불구하고 음향방출이 재료의 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 전위의 움직임도 포착이 가능하므로 재료나 구조물에서 결함이 관측되기 훨씬 이전부터 음향방출신호가 포착되는 것이 보통이며, 이는 저주기 파괴시험등을 통하여 쉽게 입증된다.

2. 역사적 배경

근대적 의미에서 최초로 음향방출을 측정하고 응력하에서의 재료의 변형과 연관지어 설명한 것은 독일의 Joseph Kaiser로 1950년에 제출된 그의 박사학위 논문에서이다[2]. 그는 통상적인 금속재료의 인장시험으로부터 시험내부에서 생성되는 음향 잡음의 종류와 생성과정, 주파수 범위 및 응력-변형을 극선상의 특징치와 주파수와의 관계 등을 결정하였다. 그의 이름을 따서 명명된 카이저효과(Kaiser effect)는 금속재료에서의 음향방출발생의 비가역성을 정의한 매우 중요한 발견일뿐만 아니라 이미 연속형 신호와 돌

발향 신호를 명확히 구분하여 기술하고 있다. Kaiser 에 의해 서지된 음향방출연구는 후일 미국의 B. H. Schofield 등에 의하여 본격적으로 재료과학 연구에 적용되기 시작한다[3].

Schofield의 초기 연구는 대체로 Kaiser의 결과에 대한 검증이었으나 음향방출의 발생원에 대한 탐구의 결과로서 음향방출의 발생은 재질 또는 내부효과에 의한 것이지 표면효과에 의한 것은 아님을 밝혔다. 계속하여 1960년대 음향방출 연구에 있어서 기본적인 방향을 제시하고 이를 하나의 학문적인 연구분야로서 발전시키는데 결정적인 공헌을 한 사람으로 C. A. Tatro와 J. R. Frederick을 들 수 있다[4, 5]. C. A. Tatro의 경우는 일찌기 음향방출을 비파괴시험 검사에 이용할 수 있는 가능성을 제시하였고, 음향방출에 관한 연구를 두개의 큰 줄기로 나눌 수 있음을 예견 하였다. 그 첫째는 음향방출을 발생시키는 현상에 대한 이론적 기구를 규명함으로써 완전한 이해를 추구하는 연구와 둘째는 공업용 재료의 거동을 연구함에 있어서 다른 방법으로 해답을 얻기 힘든 문제의 해결에 음향방출을 적용하는 기술의 개발이다.

한편 항공우주분야에서도 음향방출을 압력용기의 수압시험 등에 적용함으로써, 그때까지 불가능했던 미소균열의 발생이나 발생위치를 정확히 예측할 수 있었으므로 음향방출 응용기술에 많은 연구를 집중하게 되었다. 이 분야에 많은 공헌을 한 사람들로 Aerojet General회사의 A. T. Green[6], Lawrence Livermore 국립연구소의 H. L. Dunegan[7]을 들 수 있는데, 이들은 나중에 각각 음향방출 측정 기기를 제조판매하는 회사를 설립하여 오늘에 이르고 있어 측정기기의 현대화를 통해 음향방출의 실용성을 높이는데 지대한 공헌을 하였다.

음향방출을 비파괴시험 검사의 일환으로 고려할 때 빠뜨릴 수 없는 다른 하나의 분야는 원자력발전이다. 1965년에 Phillips Petroleum회사의 National Reactor Testing Section(현재의 EG & G Idaho)에서 D. L. Parry [8]가 원자로의 냉각수 손실을 찾아내기 위하여 음향방출을 도입하여 성공하였고 이는 곧바로 미국원자력위원회(USAEC)의 후원 아래 Phillips Petroleum과 Battelle북서태평양 연구소(BPNL)의 공동연구과제로 연결된다. BPNL에서의 연구책임자는 P. H. Hutton [9]이었는데, 그는 이미 1965년부터 음향방출에 관한 기초연구를 수행하고 있다. 한편 Argonne국립연구소에서는 T. T. Anderson [10]이

나트륨냉각 원자로에서의 냉매 비등현상을 탐지하는데 음향방출을 응용하였으며 고온침적식 마이크로폰 센서를 고안하여 사용하였다. 이에 관련된 사람으로 Rocky Flats Plant의 T. F. Drouillard를 들 수 있는데 그는 주로 가압 또는 응력하에서의 취성파괴를 일으키는 요인에 관해 연구를 수행하였을 뿐만 아니라, 후일 방대한 양의 자료조사를 통해 집대성한 음향방출 문헌 목록의 발간에 의한 공헌이 더욱 크다[11]. 이 목록은 1979년에 단행본으로 출판되었으며, 1980년 이후의 문헌은 주립캘리포니아대학(UCLA)의 K. Ono에 의해 발행되는 Journal of Acoustic Emission에 게재되고 있다[12].

현재 음향방출에 관한 연구가 가장 많이 이루어지고 있는 곳은 일본이며, 격년으로 국제음향방출심포지엄(IAES)을 개최하고 학계에서의 연구는 물론 각 분야의 산업체에서 실제적인 응용사례가 많이 발표되고 있다[13]. 미국에서는 그간 많은 연구가 여러 대학이나 국립연구소 또는 국립표준기술원(NIST, 구명칭 NBS)을 중심으로 이루어져 왔으나 최근에 들어 정부의 연구비 투자규모 축소에 따라 연구활동이 크게 위축된 실정이다. 다만 항공우주분야나 석유화학 계열의 민간회사들이 응용 기술을 개발하려 하기 때문에, 음향방출 측정기기 개발 등은 당분간 유지될 전망이지만 이러한 활동이 음향방출 분야의 발전에 기여하는 바는 예상외로 작다. 예를 들어 Monsanto Chemical회사의 T. J. Fowler [14]에 의한 FRP 용기에 대한 음향방출 시험기술은 처음부터 공개적으로 개발되어 미국의 50개주 대부분에서 이 시험절차를 의무적으로 요구하고 있을 정도이지만, Boeing항공회사 같은 곳에서는 이미 수십년째 음향방출을 연구하고 적용하고 있음에도 그 내용이 공개된 바는 거의 없다.

3. 음향방출의 특성

음향방출을 비파괴시험검사로 볼 수 있으나 여부는 다소 주관적인 판단기준상의 문제이겠으나 한 가지 분명한 것은 음향방출이 그 속성상 이중성을 지니고 있다는 점이다. 즉, 연속감시나 원격탐지, 수압 시험 등에 적용되는 경우는 분면 비파괴시험검사의 일종이라 하겠으나, 재료 내부에서 진행되는 현상에 대하여 기존의 재료시험 또는 측정방법으로는 불가능했던 정보를 알아낼 수 있다면 이것은 재료시험 또는 특성평가의 수단으로 분류되어야 할 것이다.

비파괴시험인 경우에도 음향방출은 대부분의 다른 방법들과는 다음 두가지 점에서 크게 다르다. 첫째, 감출되는 에너지가 고체 내부에서 방출되는 것이기 초음파시험이나 방사선투시에서처럼 외부에서 주입한 것이 아니다. 둘째, 음향방출로는 구조의 절적 저하, 균열의 발생 및 성장, 고체의 소성변형 등 동적인 변화만을 포착할 뿐 이미 존재하고 있는 결함이 크거나 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 구조물이 파손되기 훨씬 이전에 내부에는 국부적인 불안정구역이 형성되는데, 이것은 전체적으로는 외력이 재료의 탄성한계보다 훨씬 낮아도 균열선단부 같은 곳에서는 응력집중에 의한 소성변형이 진행되기 때문이다. 이러한 미소변형을 탐지하는데는 음향방출이 매우 유효한 수단인 것이다.

II. 발생기구

고체 내에서의 전위(dislocation)의 이동이나 미소 균열의 생성 및 성장 등이 대표적인 발생원으로 알려져 있는데, 전자의 경우는 연속형 신호를, 후자의 경우는 돌발형 신호를 발생하는 것으로 알려져 있다. 그림 1은 대표적인 연속형 신호와 돌발형 신호의 예를 보여준다. 그러나 실제로는 음향방출의 발생원은 대상재료의 특성에 의해 좌우된다. 예를 들면 복합재료 중에서도 금속기지 복합재료(MMC)에서는 상가의 두가지 발생원이 모두 고려될 수 있으나 고분자기지 복합재료(FRP)의 경우에는 전위에 의한 음향방출의 발생은 배제된다. 대신에 고분자기지의 균열발생, 강화섬유와 매트릭스 계면의 분리 및 마찰, 강화섬유의 절단 등의 일반적으로 제시되고 있다. 금속재료에서의 발생원으로는 전위의 두가지 외에도 쌍정이나 결정입계 이동, 그리고 비금속 개재물과 모재의 분리, 상변태, 용융 및 응고, 자구(magnetic domain)의 이동, 성장 및 소멸 등이 알려져 있다[15]. 한편, 누설, 마찰, 기포 발생 등은 일종의 가짜 발생원(pseudo source)이나 실제로 이를 이용하여 진단하고 평가하는 방식이 음향방출의 그것과 너무나 유사하므로 흔히 발생원으로 포함되고 있다. 다만, 전형적인 음향방출 발생원은 응력을 받은 재료 내부에서의 변화로 정의되는 점에서 엄연히 구분되어야 한다.

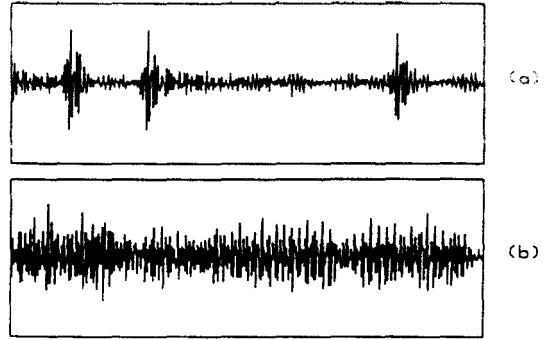


그림. 1. 대표적인 AE신호 유형 : (a) 돌발형 신호 (b) 연속형 신호

음향방출은 파동현상의 일종이고, 재료 또는 구조의 특성이나 현상을 규명하기 위해서는 일정한 거리를 전달된 파동을 측정하고 해석해야 한다. 이때 가장 기본이 되는 과정 인사는 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 속성 중에서 단점으로 작용하는 두가지이다. 첫째는 음향방출 신호의 발생은 예측할 수 없으며 순간적(transient)이라는 점이다. 따라서 신호대잡음비(SNR)의 향상에 유효한 수단이 없고, 고성능의 측정 기기가 필요해진다. 둘째로 더욱 치명적일 수도 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].

음향방출이 재료내부의 국부적으로 형성된 응력의 해소과정에서 자발적으로 방출되는 초음파인 심은 이미 언급하였거니와, 여기서는 음향방출의 발생원이 되는 국부적 불안정영역의 실체를 보다 상세하게 살펴보고자 한다. 고체 내에서 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 탄성

과, 즉 음향방출은 고체내부를 자유롭게 이동하지만 표면 또는 계면에서는 반사와 더불어 모드전환도 일어나게 된다. 탄성파의 전파는 고체 내에 균열이 형성되고 형상의 변화가 발생할 수 있게 함으로써 결국 새로운 평형상태를 이루게 한다.

표 1. 음향방출 신호의 상대적인 크기에 영향을 미치는 주요인자

음향방출 신호의 진폭을 증가시키는 인자	음향방출 신호의 진폭을 감소시키는 인자
높은 강도	낮은 강도
높은 변형률	낮은 변형률
낮은 온도	높은 온도
이방성	동방성
비균질성	균질성
두꺼운 단면	얇은 단면
취성과파괴	연성과파괴
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

이론적인 계산에서는 매질을 완전탄성체로 가정하므로 탄성파는 무한히 멀리 전파할 수 있지만, 실제 재료에서는 파동에너지의 일부가 열에너지로 바뀌는 현상, 즉 흡수(absorption)가 일어나서 파동은 소진되고 새로운 평형상태가 얻어진다. 미시적인 발생원에 대한 정확한 이해는 관심의 대상인 여러 가지 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. 텐서 개념에 입각한 탄성파의 전달이론으로부터 미시적 발생원에 대한 검출가능한계를 설정하기 위한 미소역학적 모델과 이를 이용하여 소성변형, 균열의 형성과 상변태를 수반하는 재료에서의 음향방출 발생원을 판별할 수 있다. 실제로는 모든 금속재료는 약간의 비선형성을 나타내지만 어떤 규칙성을 발견할 수 없으므로 수학적 이론의 전개는 언제나 선형등방성탄성체(linear isotropic elasticity)의 가정 하에서 출발하게 된다.

1. 미시적 발생기구

하나의 음향방출 신호가 검출되기까지의 일련의 과정을 그림 2에 모식적으로 나타내었다. 위치 r 에서 체적 V 로 표시되는 부위에서의 국부적 응력변화는 기계적 진동의 형태로 구면파를 이루며 전파되어 시간의 함수인 표면변위 $u(t)$ 를 야기시킨다. 실제로는 $u(t)$ 값은 발생원과 센서의 위치에 따라 달라지는데, 첫째로는 거리에 따른 감쇠로서 진폭은 거리의 제곱에 반비례하며, 둘째로는 발생원의 방향성 유무에 영향받으며, 마지막으로 표면에서의 반사와 모드변환에 의한 영향이 크다. 발생원을 둘러싸고 있는 탄성영역으로부터 발생원을 바라보는 경우, 이는 고체내의 내부응력변화나 고체표면의 수축력 변화로 간주될 수 있다.

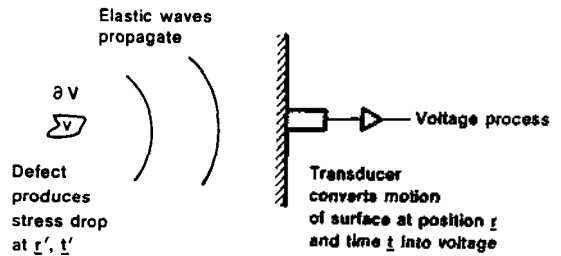


그림 2 음향방출의 생성 및 탐지 과정의 모식도

Green 함수법을 이용하여 시간 t 와 위치 r 에서의 내부응력(volume stress) 또는 표면응력(traction)의 변화에 의한 표면 변위는 탄성 Green 텐서(dynamic elastic Green's tensor)로 표시될 수 있다. Green 텐서(또는 Green 함수)는 단위강도의 임펄스에 대한 탄성체내에서의 파동방정식에 대한 일반해를 뜻한다 [18]. 실제로는 마찰이나 표면 산화물 균열 등의 의사과원을 제외하면 음향방출 발생원 자체는 표면 수축력과 관계가 없으므로, 표면변위 $u_i(r, t)$ 는 시간의 함수인 dipole density와 Green 함수의 공간도함수와 콘볼루션으로 주어진다[9]. Green 텐서는 계산 또는 측정에 의하여 구할 수 있으므로 이론상으로는 표면변위를 구할 수 있게 된다. 그런데 발생원과 센서는 모두 일정한 크기를 갖기 때문에 Green 텐서는 발생원의 모든 점과 센서의 모든 점들에 대하여 각각 구해져야 한다. 이것은 실제로 불가능한 계산이므로 흔히 무한소(infinitesimal)의 발생원으로 가정하는

고사해, 즉 발생원의 크기는 $|x-r|$ 보다 작다는 가정 하에서 근사해를 구하게 된다.

마지막으로 센서(검출자) 자체가 신호에 미치는 영향이 고려되어야 하는데 일정한 면적을 갖는 불간섭형(nondisturbing)센서의 경우만을 고려할 수 있다. 불간섭형이라 함은 센서의 존재에 의한 파형의 변화가 무시할 수 있을 정도로 작은 것을 의미하며 레이저 간섭계 방식이나 전자기음파변환자(EMAT) 그리고 전기용량형 센서는 이에 속하지만 기존의 압전형 센서는 표면에 어떤 하중을 가하게 되므로 파형에 주는 영향이 상대적으로 크다. 점 센서의 경우 출력신호는 발생원 함수와 구조물의 충격 응답, 그리고 센서의 충격 응답의 이중 convolution으로 주어지며, 면적이 있는 센서를 사용할 경우에는 면적에 대한 출력신호를 적분함으로써 얻어질 수 있다. 한가지 주목해야 할 사실은 출력신호는 표면변위의 크기 뿐만 아니라, 방향에 따라서도 달라진다. 실제로는 센서는 어떤 특정한 방향에 한정되는 변위만을 감지하는 것으로 가정하였으나 3차원 교정을 위한 벡터 충격 응답도 구할 수 있다.

2. 전위에 의한 음향방출 발생기구

완전 탄성체 내에서의 전위 형성에 의한 응력변화나 bipole 텐서에 관해서는 음향방출 기술의 발전과는 별개로 이미 많은 연구가 진행되어 있다[20]. 전위에 의한 발생에 대한 검출가능 한계를 결정하기 위하여 그림 3처럼 법선 n 과 깊이 r 로 표시되는 무한반구의 표면에 형성된 판상의 전위 루프를 생각하면 진앙 점에서 검출가능한 최소변위와 최소속도를 결정할 수 있다. 그 결과 중에서 주목할 점은 평면 내에서의 변위에 의한 음향방출 발생은 Burgers 벡터와 슬립 면의 방향에 매우 민감하지만 전위의 이동방향에는 대체로 무관하다는 점이다. 다시 말하면, 칼날형 전위가 한쪽 방향으로 미끄러지는 것과 나사형 전위가 수직방향으로 미끄러지는 것을 구분할 수 없다. 전위의 단면적을 A , 담축사의 여과(filter)효과를 κ , 종파속도를 $6,400\text{m/s}$, 횡파속도를 $3,200\text{m/s}$, Burger's 벡터의 크기를 $2.9 \times 10^{-10}\text{m}$, 전위까지의 거리를 40mm 로 하면, 발생되는 변위는 다음과 같다.

$$d_j < 3.6 \times 10^{-10} \kappa(\tau) \dot{A}(t) \tag{1}$$

여기서 $d_j(j=1, 2)$ 는 수평변위로서 단위는 mm이다.

τ 는 파원의 지속시간이다. 수평변위(d_1, d_2)에 대한 임계치를 10^{-11}m 로 하고 대역폭을 5MHz 로 하면, $\tau = 15\text{ns}$ 동안에 감지된 전위에 대하여 $\kappa(\tau) \geq 0.035$ 가 된다. 이것은 전위 루프가 반경방향으로 $3\text{mm}/\mu\text{s}$ 의 속도로 $45\mu\text{m}$ 이상으로 팽창해야만 검출가능한 것을 의미한다. 다결정 금속에서 불안정한 전위의 이동속도는 대략 횡파속도의 0.1에서 1.0배 ($300\text{-}300\text{ m/s}$)이다. 따라서 하나의 전위가 10내지 $100\mu\text{m}$ 이동한다면 이는 충분히 검출 가능하다. 그러나 전위가 이동할 수 있는 거리는 재료의 미세조직에 의해 크게 제한되며, 이 때문에 모든 전위의 이동을 음향방출로 검출할 수 없다.

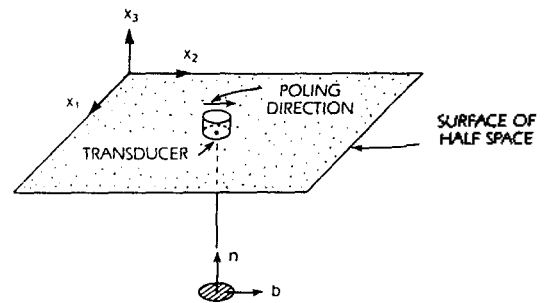


그림 3. 무한소의 전위로부터의 최대 수평변위 : Burgers 벡터는 표면상에 있고, 법선벡터는 표면에 수직할 때

3. 미소균열에 의한 음향방출 발생기구

미소균열에 의한 음향방출 발생은 우선 독립된 하나의 미소균열이 생성될 때와 균열간의 연결에 의해 균열이 성장하는 때를 모두 생각할 수 있다. 균열은 재료의 불 균일성으로 생각할 수 있고, dipole 요소들의 집합체로도 볼 수 있는데 후자의 경우 균열 선단부의 반지름은 물론 주변 응력에 큰 영향을 받는다. 전위의 경우와 같은 방법으로 미소균열 발생원에 대한 검출한계조건을 설정할 수 있다. 예를 들어 수직 변위에 민감한 센서로 모드 I(인장) 미소균열을 탐지하는 경우를 생각해 보면, 강재의 경우 포아송 비가 0.29, 밀도가 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 종파속도가 $5.9 \times 10^3 \text{ m/s}$ 이므로, 검출한계 조건은

$$\sigma_{33} R^2 \dot{R} \geq 1.6 \times 10^{14} \kappa(\tau) r d_3 \tag{2}$$

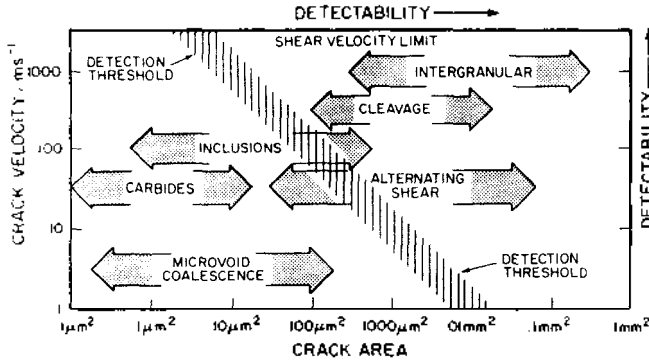


그림 4. 철강재에서의 파괴와 관련한 탐지한계: 검출 문턱값은 센서의 종파에 대한 감도 10^{-13} m, 발생원과 센서의 거리 0.1m, 외부응력 500 MPa로 가정하여 계산

가 된다. 여기에서 σ_{33} 는 균열 주위의 응력, R 은 균열 반경, r 은 균열까지의 거리, d_3 는 수직변위이다. 이 결과로, 주변응력이 높을수록, 균열 반경이 클수록, 균열 전파속도가 클수록 검출가능성이 증가하게 될 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 전이온도(DBTT) 이하에서 화이트조각 강은 결정 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}) 하에서 일어나고 발생원과 센서의 거리를 일정한 것으로 가정하면, 각종의 미세파괴기구를 검출한계조건과 함께 그림 4와 같이 $\dot{\gamma}$, π^2 평면에 도시할 수 있다[19].

III. 신호의 전달과정

1. 탄성파의 전파특성

탄성파의 전파에서 가장 간단한 경우는 바로 경계면이나 표면을 갖지 않는 구조, 즉 무한공간을 이루는 고체를 가정할 수 있다. 이 경우에는 오직 두가지 파동만이 존재하는데, 흔히 P파와 S파로 불리는 종파와 횡파이다. 유한공간에서는 자유표면이 존재하므로 표면파 혹은 Rayleigh파로 불리는 새로운 형태의 파동이 생겨난다. 표면파의 진폭은 표면으로부터

의 깊이에 따라 급격히 감소하며 대부분의 파동에너지는 한 파장 이내의 표면 층을 통하여 전달된다. 표면파와 체적파는 이론적으로는 서로 독립적이지만 구석진 모서리 등을 가진 실재구조에서는 양자간의 결부됨을 피하기는 힘들다.

보다 실제적인 조건은 일정 두께의 무한 평판 상에서의 발생원과 전파특성이다. 이 경우의 해석적인 해는 무한 또는 반무한 공간에서의 그것보다 매우 복잡하며 평판 두께의 수배까지의 전파과정에 한하여 수치해석에 의한 해를 얻는 것이 보통이다. 그림 5(a)와 같이 발생원이 오직 종파성분을 방출하는 경우에

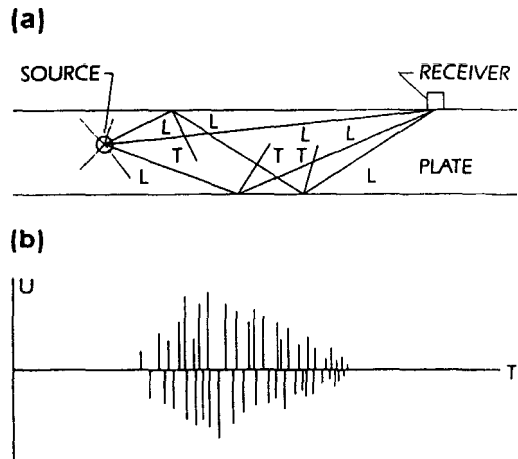


그림 5. 평판에서의 파동의 전파: (a) 발생원으로부터 출발하여 센서에 도달하는 파동의 성분의 전파과정 (b) 센서에서 수신된 직접 전파 및 반사 전파 파동 성분의 합

노 주파수 영역에서 관찰할 때에는 횡파 성분이 생긴다. 평판 두께의 수배 거리에 위치한 센서에 도달한 파동은 그 뒤 끝난이 전례가 가지며 이것은 주로 복잡한 경도로 전달된 복잡한 경도로 (신뢰된 종파 및 횡파 성분의 합인 것이다. 주목할 만한 것은 경관 상에서 변위나 속도 또는 가속도 파형과는 달리 주파수 파워 스펙트럼은 거의 변화가 없다는 점이다. 따라서 주파수 성분을 신호해석에 이용할 수 있다[21]. 여러 가지 다른 주파수 성분은 다른 속도로 전파되므로 위상은 변하더라도 단순 조화진동 성분은 변함이 없고, 스펙트럼도 변하지 않는다. 다른 한가지는 무한 평판 상에서의 길보가 전파속도는 종파와 횡파의 사이 값이라는 점이다. 신호 에너지의 대부분을 수반하는 최대 진폭부의 전파속도는 판파의 속도, c_p 보다 약 9% 낮은 값으로 측정되었다.

2. 감쇠와 분산

유한공간에서의 탄성파의 전파에 있어서 실제적인 응용목적상 반드시 고려되어야 할 문제로는 감쇠(attenuation)가 있다. 여기서 감쇠라 함은 파동이 고체 속을 진행함에 따라 그 진폭이 감소하는 것을 말한다. 감쇠의 원인으로서는 기하학적인 감쇠, 금속의 결성립이나 복합재료의 섬유등에서의 산란이나, 재료의 흡수등 몇 가지의 서로 다른 기구가 존재한다.

기하학적 감쇠는 발생원으로부터 바깥쪽으로 모든 방향으로 파동이 진행하기 때문에 나타난다. 무신실 공간을 가정하면 파동전단의 에너지의 합은 일정하지만 바깥쪽으로 갈수록 파동전단의 면적이 늘어나므로 결과적으로 진폭은 줄어들게 된다. 무한 또는 반무한 공간에서의 평면파, 평면 또는 판재에서의 일차원 발생원에 의해 발생한 파동, 줄이나 막대등 일차원 구조를 전파하는 파동에서는 기하학적인 산란이 없다.

다른 하나의 전파 특성으로는 감쇠현상으로는 분산(dispersion)이 있는데, 이것은 어떤 특정한 환경하에서 파동의 전파 속도가 주파수에 의존하기 때문에 발생한다. 분산이 존재할 경우에 에너지 전파속도(군속도, c_g)는 ω 를 중심치로 하는 몇가지의 서로 다른 주파수 성분으로 이루어진다. 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 구조물

의 크기와 비슷되는 경우 분산이 일어난다. 음향방출과 관련하여 생각하면 복합재료 구조물처럼 얇은 판재에서 고체 크기의 판재와는 다른 식으로 전파를 분산 현상을 보이는데, 주파수가 감소하고 신호의 길이가 상대적으로 증가하게 되어 위치표정에 불리한 요인으로 작용한다[22, 23].

IV. 음향방출 신호측정

음향방출의 발생원에 관해서는 이미 언급하였거니와 다른 하나의 문제는 고체 내에서의 응력파의 전파 특성인데 이것이 바로 신호의 파형을 결정해 주는 과정으로서 파원에서 정보를 센서에 전달해 주는 과정이기도한 때문이다. 특히 감쇠특성이나 파동 모드별 전파속도에 관한 정보는 위치표정에서는 필수적이다. 그러나 실제 응용에 있어서 파동 모드나 방향성은 고려되지 않는데, 이것은 자연발생적인 음향방출 신호는 실제로 여러가지 파동 모드가 매우 복잡하게 섞여 있기 때문이고 파원은 일반적으로 점원이므로 구형파면을 이루며 전달되는 것으로 생각하기 때문이다. 측정의 실제적 문제로는 오히려 수 μV 에서 수백 mV 에 이르는 신호의 진폭변화, 수 μs 에서 수백 ms 에 이르는 신호의 길이변화, 배경잡음의 변화, 가짜 신호의 혼입 등이 더욱 문제시된다. 따라서 음향방출 시험은 다음과 같은 몇가지 요소기술을 확보할 때 비로소 자연현상을 이해하고 실제적으로 가치 있는 기술이 될 수 있을 것이다. 첫째로, 특정한 재료와 현상으로부터의 음향방출을 구별할 수 있는 기술과, 잡음을 제거할 수 있는 방법과, 구조물에서의 탄성파의 전파특성을 규명하고 이를 실험계측에 반영할 수 있을 것, 둘째로, 구조물에 감지할 수 있는 상치를 주지 않고도 필요한 음향방출 데이터를 얻을 수 있도록 하중을 가하는 방법과, 대략적이라도 위치표정을 할 수 있을 것, 셋째로, 데이터를 해석하고 설명할 수 있는 능력과, 최종적인 합성, 불합격의 판단능력을 갖춘 것 등을 말한다.

음향방출 신호를 효율적으로 포착하고 처리하기 위한 장치는 실험목적과 그에 따른 처리 및 기록방법에 따라 소형의 이동가능한 것에서부터 컴퓨터로 처리되는 수십 채널 처리 대형장비에 이르기까지 다양하다. 그림 6에는 현대적인 음향방출 측정장치의 구성을 모식적으로 나타내었는데, 이는 재료시험 등의 실험실적 구성에 맞춘 것이며 현장적용을 위해서는

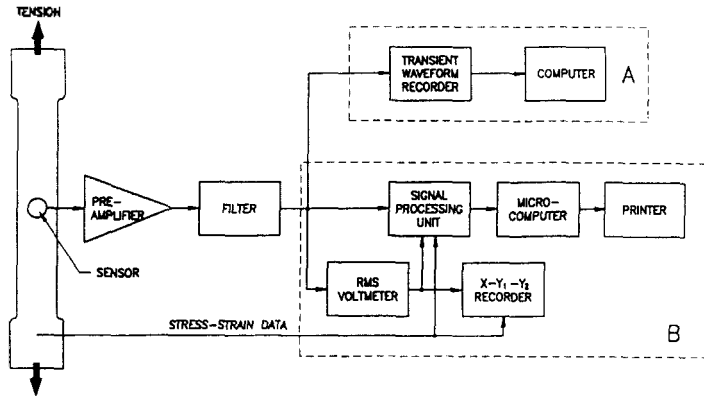


그림 6. 현대적인 음향방출 측정장치의 예를 보여주는 모식도

필요한 만큼의 센서를 증설한 복수채널형이어야 하는데, 전치증폭기와 여파기는 물론 신호처리부의 채널수도 함께 증설되어야 한다. 특별한 경우를 제외하면 현장에서의 음향방출의 이용은 발생원의 위치표정이 우선적인 목적이므로 평균평방제곱근(RMS) 전압의 측정은 생략되지만, 하중-변위 곡선은 범용 X-Y 레코더를 사용하여 기록함으로써 음향방출 데이터와 기계적 변형 사이의 연관관계를 이끌어 낼 수 있다. 또한 그림 6은 실제로 두가지의 신호처리 방법을 함께 포함하고 있는데, (A)부분이 음향방출 신호로부터 몇 개의 미리 설정된 파형 인자를 추출하고 기록하는데 비하여 (B)부분은 신호의 파형 자체를 아날로그-디지털 변환기(ADC)를 통하여 기록한 다음 보다 고성능의 중대형 컴퓨터에서 분석할 수 있다.

그림 7에는 (A)루트로 처리될 때 파형 인자를 추출하는 예를 나타내었는데 실제의 신호를 충분히 대표할 수 있는지의 의문이 남는다 하더라도, 통상 매 초당 수백개 이상의 비율로 발생하는 신호의 처리방법으로서는 거의 유일한 것이므로 대부분의 상업화된 측정장치는 이 방식을 채택하고 있다. 실제로 (B) 루트로 기록할 수 있는 능력이 제한되어 있어서, 각각의 신호의 길이가 아무리 짧더라도 초당 수십개 정도의 신호만 처리할 수 있는 수준이며 장비의 가격도 비싸서 일반화되지 못하고 있다.

측정장치를 구성하는 요소 중에서 가장 중요한 것은 역시 센서이다. 센서의 역할은 내부의 파원으로부터 도달한 음향방출에 의해 발생하는 고체의 표면 미소변위를 전기적인 신호로 바꾸어 주는 것이다. 이러한 센서로는 압전형(piezoelectric), 전기용량형(ca-

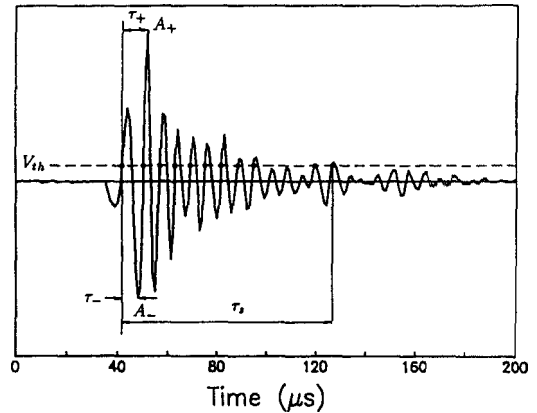


그림 7. 그림 6의 (A)루트를 통한 신호처리 방법의 개요

pacitive)[24, 25], 간섭계형(interferometry)[26-28] 등이 있고, 이들은 흔히 공진형(resonant type) 광대역형(broadband type)으로 나누며, 선택의 기준은 요구되는 주파수 대역, 감도 및 주위환경 등에 따라 좌우된다. 상용화된 많은 센서는 압전형이며 그 대부분이 공진형인 반면에 전기용량이나 간섭계형은 모두 광대역형이며 특수한 용도로만 쓰이고 있다. 전치증폭기는 될수 있는한 센서에 가깝게 위치하고 40-60 dB로 증폭하여 μV 수준의 신호를 mV 수준으로 바꾸어 준다. 여기에는 흔히 고정 대역 통과 여파기가 포함되어 시험목적과 음향방출 파원의 주파수 범위에 맞추어 신호를 통과시키게 된다. 음향방출을 설비 진단에 응용하는 경우에 있어서 실제적인 상황에 알맞은 측정기술과 장치의 개발이 뒤따라야 하는데, 측

정장치와 관련된 문제 중에서 압전센서를 사용하는 검출방법은 접촉식인 때문에 고온의 피시험체나 회전하는 구조물에는 센서를 직접 부착할 수 없다는 점이다. 특히 발전설비와 같은 많은 부분이 회전기계로 이루어진 설비진단에는 이를 극복하기 위한 방안의 하나로 FM 송수신을 이용한 무선식 음향방출 측정장치를 고안하여 적용하기도 한다[29, 30].

이론적으로 음향방출은 가청주파수 상단부터 50MHz까지의 광대역에 걸친 신호이지만 실제로는 30kHz에서 2MHz 정도이면 가장 광대역이 된다. 측정기기의 성능, 특히 신호대잡음비에 의한 제한도 물론이지만 주로 높은 주파수 성분이 활용되지 못하는 것은 음향방출이 표면까지 전달되는 과정에서의 감쇠가 심하기 때문이다. 마이크로 컴퓨터가 측정장치의 일부로서 도입되기 시작한 것은 1970년대 말인데, 이는 데이터의 선택적 기록 및 각종 사후 분석을 가능케 하였으며 컴퓨터 기술의 급속한 발전에 힘입어 점차로 모든 음향방출시험에서 실시간 처리도 가능해졌다. 이밖에 측정기기와 관련된 여러가지 원리나 설명은 참고문헌[15, 31]에 자세히 설명되어 있다.

음향방출 시험의 궁극적인 목적은 발생원의 존재 유무를 측정하고, 파원에 대하여 최대한 많은 정보를 얻는데 있다. 검출기술과 위치표정기술은 비교적 잘 확립되었으므로 이제는 파원 특성평가에 많은 연구가 집중되고 있다. 실제로 파원해석은 발생원의 종류(identification)를 결정할 뿐 아니라 발생원의 강도나 위협도(intensity 또는 severity)를 센서로 측정된 신호에서부터 추정해야 하는 가장 어려운 작업이다. 센서의 출력신호는 발생원에서의 음향방출이 표면에 위치한 센서까지 전달되는 과정에서 한번 왜곡되고, 센서의 특성과 접촉매질에 의해 또 한번 왜곡된 것이므로 이를 이용한 파원해석은 결코 쉬운 작업일 수 없다. 매우 단순한 조건하에서라면 전술의 파형 인자 추출법에 의해서도 가능하겠으나 보다 복잡한 환경하에서 그것도 신속한 처리를 요구하는 자동 감시를 위해서는 컴퓨터의 이점을 최대한 활용하는 인공지능 방식의 도입이 필요하다. 이것은 패턴인식[32] 또는 신경회로망 처리[33] 등으로 전자의 경우에는 부분적으로 상품화된 경우도 있다. 이 또한 컴퓨터 기술의 급속한 발전에 따라 가능해진 것이며, 어느 경우에도 통계적인 데이터와 사전지식에 근거한 분류(knowledge based classification)를 기초로 하고 있으므로 개별적인 발생원보다는 어떤 공통된

특성을 지닌 발생원의 집합체를 규명한다고 볼 수 있다.

V. 산업적 응용

음향방출 기술의 물 구조물이나 산업설비에의 적용은 음향방출에 대한 많은 연구의 결과로서 빠른 성장을 하였으며 약 1960년대 중반부터 그 적용이 시작되어 최근부터 매우 활발하게 그에 대한 연구 및 응용이 진행되고 있는 실정이다. 이 분야의 급성장은 음향방출 관련 연구자들이나 음향방출 측정장치 제작 회사들이 공동 노력에 의해서 이루어졌다고 보며 최근 전자산업의 성장에 따른 음향방출 측정장치 및 소프트웨어 부분의 향상이 큰 몫을 했다고 해도 과언이 아닐 것이다. 따라서 산업설비 및 기타 음향방출 적용분야에서의 그 범위는 점차 증가하고 있는 실정이며 현재는 거의 모든 분야에서 음향방출 기술 적용이 확대되고 있다. 그러나 아직도 음향방출 기술의 단점인 신호해석의 어려움 및 특정 분야에서의 발생원의 규명에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것이며, 일부 시험 검사에서는 그 절차가 규격화되어 있지만 앞으로의 많은 응용에 대한 연구결과를 서로 교환하여 시험 검사에 대한 절차 및 분석의 확립이 필요하다고 본다.

음향방출 기술의 응용으로서는 석유 화학 설비에서의 압력 용기 및 저장 탱크에서의 결함 검출, 원자로 설비에서의 연속 감시, 용접 공정시의 적용, 지질 연구 및 토목공학에의 응용, 반도체 및 마이크로 부품관련 전자 산업에의 도전, 우주 항공 산업에의 적용, 생체 공학에의 응용, 절삭 및 성형등의 생산 라인에서의 감시도구로의 적용등 수많은 분야에 이 기술이 응용되고 있는 실정이며 최근에는 얼음 및 빙하에서의 음향방출 메카니즘 연구 등의 특수 분야에까지 접근하려는 경향도 보이고 있다. 다음은 대표적인 음향방출의 산업체 응용 예이다.

1. 석유화학 공업에의 음향방출 응용

음향방출 시험의 상업적인 첫 적용은 그에 관련된 시험법이 개발된 즉시 항공 우주용 압력용기 및 구조물을 감시하기 위하여 적용되었으며, 1968년에는 석유화학용 용기를 제작한 다음 알고 있는 용접 불량을 가진 크랙성 결함 용기에 대해 음향방출 시험이 수행되었다[34]. 그 이후로 음향방출 시험은 석유 및 화학산업에의 비파괴 시험에 중요한 기술의 하나로 자

리잡새 되었다.

이 음향방출 시험은 대형 용기나 구조물에 대해 부분적으로 행하는 탐상이라기 보다는 한번의 시험으로써 전체 구조물에서 발생하는 결함들을 검출 및 위치표정 그리고 평가할 수 있는 능력을 갖고 있기때문에 다른 비파괴시험 방법에 비해 큰 장점을 갖는다고 할 수 있다.

일반적으로 음향방출 기술은 압력용기 및 저장용 탱크에 대한 비파괴 시험으로서 널리 사용되고 있는데 주로 다음의 세가지 경우에 적용되고 있다. 1. 새로 만든 압력용기에 대한 품질 보증 2. 사용 기간에 따른 중간 건전성 평가 3. 용기에 대한 사용중 연속적인 감시

2. 산업용 가스 운반 용기에 대한 적용

현재 외국에서는 특정 회사의 경우 1983년 이후부터 이들 용기에 대하여 수압시험 대신에 음향방출 시험을 채택하여 구행하고 있는 상황이다. 또한 가스 및 화학산업 관련 회사에서도 이에 대한 음향방출 시험의 데이터 베이스를 축적하고 있으며 현재도 계속 진행중이다. 그리고 미국의 경우는 정부 방침으로 운반용 가스 용기의 경우 사용기간 매 5년마다 이 음향방출 시험을 요구하고 있다.

음향방출 시험검사의 경우 먼저 센서를 용기에 설치한 후 각 용기에 대해 사용 압력의 약 110퍼센트로 가압하게 된다. 여기서 집중적이면서 많은 음향방출 사건을 발생하는 위치에 대해서는 차후 초음파 탐상으로 검사를 하게 된다. 기존의 표준 수압시험법의 절차는, 먼저 검사할 용기의 사용을 중지하고 시험설비로 운반한 다음 분해하여 수압시험용 재킷에 넣어진 후 사용 압력의 약 1.7배로 가압하게 되면 용기의 부파 팽창을 측정한다[35]. 허용 부파 팽창을 초과한 용기는 사용을 못하게 된다. 반면 음향방출 시험법에서는 용기가 사용중에 검사된다는 것이다. 즉 계속 사용중에 있으며 분해되지도 않고 용기의 내부가 물에 젖지도 않게 된다. 가스 운반 용기에 대한 음향방출 시험의 장점을 간추려 보면 다음과 같이 요약할 수 있다. (1) 결함의 정확한 위치나 범위를 찾을 수 있다. (2) 비용면에서 매우 경제적이다. (3) 용기의 건전성에 관한 많은 정보를 얻을 수 있다.

3. 누출 탐지를 위한 음향방출 시험

누출 탐지에 대한 음향방출 시험의 적용은 지하매

설 송유관이나 가스배관에 대해 누출 위치를 찾기 위해 사용되고 있을뿐 아니라, 압력 용기 및 원자로 등의 밸브나 연결 부위에서의 누출을 감지할 목적으로도 사용되고 있다. 매설 배관의 경우는 임의 간격으로 센서를 배관에 부착하게 되는데, 센서의 접근이 가능하도록 배관의 표면을 극부적으로 노출시킨 후 측정하는 법과 waveguide를 사용하여 매설 배관에 접촉시킨 후 waveguide에 센서를 부착하여 측정하는 방법이 있다. 즉 누출시 발생하는 음향방출 신호를 측정하게 되며 거리에 따른 신호의 감쇠 또는 압력이나 유량등에 따른 누출 신호의 세기 등의 변화를 일정한 거리에 부착된 센서를 통해 측정함으로써 그 위치를 알 수 있게 된다. 현재 누출 탐지를 목적으로 한 전용 leak detector 형태의 장비가 몇몇 있으나, 이는 결국 음향방출을 이용한 측정신호의 세기로서 위치를 결정하고 있으며, 이와는 달리 cross correlation 방법을 사용하여 위치를 결정하는 장비도 나오고 있다.

4. 원자력 및 에너지 산업에의 음향방출 응용

원자력 발전설비중 원자로의 연속 감시를 위한 음향방출 기술적용의 개념은 1960년대 이후로 긍정적인 면 뿐만아니라 비난의 대상으로도 위치하게 되었다. 초창기에는 이 기술의 주장자들에 의한 너무 지나친 과대 평가로 말미암아 기대에 어긋나는 적용의 결과를 초래하는 곤혹을 치루기도 하였으며, 또한 원자력 설비의 음향방출 기술 적용을 산업 code화 하고자 하는 노력이 있었으나 시기상조이어서 결과적으로는 실패하였다. 그 결과 연속 감시에 대한 음향방출 기술의 적용은 비판적으로 되었으나 다행히 이에 대한 실질적인 검토 작업은 매우 귀중한 역할을 하게된 셈이었다. 결국 전반적으로 긍정적인 평가가 있었으며 연속감시에 있어서 유용한 기술을 만드는데 무엇이 필요한지를 명확히 하기 위한 검토의 댓가가 음향방출 기술의 발전에 큰 도움이 되었다고 볼 수 있다[36, 37].

그 이후로 1970년도 말에 미국 필라델피아 전기회사의 Peach Bottom 원자력 발전소 3호기에서 음향방출 시험이 수행되었으며, 역시 연속감시를 위한 음향방출 적용으로서 Battelle Memorial Institute의 Pacific Northwest Lab(BMI-PNL)에 의해 적용 연구가 수행된 적이 있다[38]. 현재는 대부분의 원자로의 결함 및 누출탐지용으로 건설시 미리 음향방출 센서를 설치하여 연속감시에 이용하고 있다.

원자력 발전설비에 음향방출 기술을 적용하는데 있

여서의 애로점은 설비 가동시 주변잡음(background noise) 수준이 높고 외부 잡음의 발생이 많은 점과 방사능에 의한 센서등의 측정기기의 열화가 발생하여 측정 성능이 떨어진다는 점이다. 이 분야에서 적용되는 주요설비는 원자로 압력용기와 1차 계통의 배관을 들 수 있으며 주로 누출탐지를 목적으로 하고 있다. 그외에도 loose part 감시를 위해서 필요한 부위에 센서를 부착하여 감시를 하고 있다. 원자로 용기에 센서를 부착할 때는 waveguide를 사용하고 있으며 냉각수의 잡음에 의한 신호탐지 방해문제를 해결하기 위해 공진주파수가 300-500 kHz의 범위를 가진 센서를 사용하는 것이 보통이다. 또한 원자력 설비에서는 방사능에 의한 재료의 열화 등에 의한 응력부식 균열이 주요 문제가 되고 있는데 이러한 결함이 발생하였을 경우에는 원자로 용기의 주요 재료로 사용되는 A533B 강에 대한 지금까지 연구되어진 방대한 음향방출시험 결과를 토대로 설비의 수명을 예측하기도 한다.

원자력 설비에서 누출탐지는 안전관리 측면에서 대단히 중요한 것인데 종래에는 레벨 감소 및 압력감소 탐지, 온도변화 측정, 습도 측정 등의 방법이 사용되어 왔다. 미국 원자력 규정에 의하면 경수로의 경우 $63\text{cm}^3/\text{s}$ 이하의 누출을 1시간내에 탐지할 수 있는 누출탐지 시스템을 요구하고 있는데 현재 원자력 발전소의 1차 계통에 대한 누출탐지로 이용되는 방법중 격납용기내의 방사선량 감시법의 경우 $63\text{g}/\text{s}$ 이상의 유량이 10분 이상 압력경계를 통해 누출이 계속되어야만 알아낼 수 있는데 이 정도의 민감도로는 원자력 발전소의 안전도를 생각해 볼 때 이상적이라 할 수 없으며, 음향방출을 이용한 방법이 개발되어 다른 방법보다 민감도가 높은 누출탐지 기술로 인정받게 되었다. 실제 사례로서 CANDU 원자로의 390개 튜브에 대해 중수 누출을 음향방출 방법으로 탐지하였는데 300-600 kHz 범위의 센서를 사용하여 8.3MPa 압력하에 있는 유체의 누출을 $0.3\text{cm}^3/\text{s}$ 안 것까지 탐지한 사실이 보고되고 있다. 원자력 발전 설비 분야에서의 음향방출 기술의 적용은 성공적인 사례들을 기초로 가속화되고 있으며 응용분야 확대를 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

5. 토목 및 기계구조물에서의 음향방출 응용

1939년 미국 오하이오주의 Portsmouth에 있는 현수교의 양단에 위치한 주 케이블에서 응력부식 균열

이 발생하였는데 그 부근에 있던 감시자에 의해 검출되었으며, 계속하여 이들은 진전되고 있는 케이블 파단 소리를 아주 조용한 밤중에 들었으며 이 사실을 기록하였다. 이 상황이 보고된 뒤 바로 교각의 케이블을 교체하기로 결정이 내려졌다고 한다[39]. 아마 이것이 구조물 응용에 있어서의 음향방출 현상의 사용에 대한 최초의 기록된 사례라고 할 수 있을 것이다.

역시 1930년대 말에 미국 광산국에서 암석 광산에서 음파 실험을 하였는데 그들은 응력을 받은 암석기 등에서 소리를 방출한다는 것을 발견하고는 매우 놀랐었다[40]. 이것은 나중에 "rock talk"라는 명칭으로 사용되었다. 이를 출발점으로 한 토목 공학에서의 음향방출 기술의 사용은 상당히 많은 발전을 해왔으나 이들 응용의 대부분은 아직도 개발 단계에 있다.

음향방출을 이용한 토목 및 지질 관련의 현장 적용 연구로서는 기반 구조물의 감시, 터널의 불안정성 감시, 제방의 건전성 감시, 광산에서의 암석의 파괴나 지주의 파손 그리고 경도의 무너짐등을 감시하는 것을 들 수 있으며, 이외에도 흙으로된 댐의 경우 흙의 이동이나 물의 통과등을 탐지하는데도 응용이 되고 있다.

VI. 맺음말

이번 기술해석에서는 지면상 기초적인 내용만 다루고, 산업체의 응용을 간단히 언급하였다. 이외에도 파원해석과 같은 미세기구의 해석 [41-43], 인장 또는 피로시험과 같은 재료시험과 음향방출 시험의 병행을 통한 재료과학적 접근 [44-47] 등은 생략되어 있다.

음향방출은 어느 한 전문분야가 아닌 물리, 기계, 재료, 토목, 전자 등 여러 분야가 관련된 복합학문으로, 그 응용범위는 매우 넓다. 이 음향방출이 초기의 미국에서 그러했던 것과 같이 마치 만능으로 생각되어서는 안되고, 단지 음향방출의 특성과 그 한계를 정확히 판단하여 이용해야 한다.

참 고 문 헌

1. ASTM-E610, "Standard Definition and Terms Relating to Acoustic Emission," ASTM, Philadelphia, PA, 1982.
2. 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, Germany, 1950(in German)
3. B.Schofield, R. A. Bareiss and A. A. Kyrala, "Acoustic Emission under Applied Stress," WADC Technical Report 58-194, Lessels and Associates, Boston, MA, April, 1958.
 4. C. A. Tatro, "Acoustic Emission from Crystalline Materials Subjected to External Loads," Michigan State University, East Lansing, MI, April, 1960.
 5. C. A. Tatro and R. G. Liptai, "Acoustic Emission from Crystalline Substances," pp.145-158, Proc. 3rd Symposium on Physics and NDT, SWRI, San Antonio, TX, October, 1962.
 6. 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]
 7. H. L. Dunegan, D. O. Harris A. S. Tetelman, "Detection of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission Techniques," UCRL-71457, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, CA, March, 1969 (also found in Mater. Eval. Vol.28, No.10, pp. 221-227, Oct, 1970)
 8. D. Parry, "Nondestructive Flaw Detection by Use of Acoustic Emission," IDO-17230, Phillips Petroleum Co., Idaho falls, ID, May, 1967.
 9. P. Hutton, R. N. Ord, H. N. Pederson and J. C. Spanner, "Crack Detection in Pressure Piping by Acoustic Emission," BNWL-885, Batelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA, Oct, 1978.
 10. 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.
 11. T. F. Drouillard, "Acoustic Emission: A Bibliography with Abstracts," IFI Plenum Press, New York, 1978.
 12. Journal of Acoustic Emission, K. Ono, Editor, Vol.1 (1982) to Vol.11(1993), Acoustic Emission Group, University of California, Los Angeles, CA.
 13. Progress in Acoustic Emission I (1982) to VI (1992), Procs. International Acoustic Emission Symposium(IAES), Japanese Society for Nondestructive Inspection, Tokyo, Japan.
 14. T. J. Fowler et al., "New Directions in Testing," pp.16-27, Proc. 3rd International Symposium on AE from Composite Materials(AECM-3), held in Paris, France, July 17-21, 1989, published by ASNT, Columbus, OH, 1989.
 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. Appl. Phys., Vol.46, pp.107-112, March, 1979.
 17. L. R. Rose, "The stress wave radiation from growing cracks," Int. J. Fract. Vol.17, pp.45-60, Feb, 1981.
 18. J. A. Simmons and R. B. Clough, "Theory of Acoustic Emission," Proc. International Conference on Dislocation Modeling of Physical Systems, J. Hirth and M. Ashby, Eds., Pergamon Press, 1981.
 19. D. G. Eitzen and H. N. G. Wadley, "Acoustic Emission: Establishing the Fundamentals," J. Res. NBS, Vol.89, No.1, pp.75-100, Jan/Feb, 1984.
 20. J. D. Eshelby, "The Continuum Theory of Lattice Defects," Solid State Physics, F. Seitz and D. Turnbull, Eds., Vol.3, pp.79, Academic Press, 1956.
 21. R. W. B. Stephens and A. A. Pollock, "Waveforms and Frequency Spectra of Acoustic Emission," J. Acoust. Soc. Am. Vol.50, No.3, pp.9-4-910, 1971.
 22. D. M. Egle and A. E. Brown, "Consideration of the Detection of Acoustic Emission Waves in Thin Plates," J. Acoust. Soc. Am. Vol.57, No.3, pp. 591-597, 1975.
 23. 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.
 24. F. R. Breckenridge and M. Greenspan, "Surface-wave Displacement: Absolute Measurements Using a Capacitive Transducer," J. Acoust. Soc. Am., Vol.68, S68 1980.
 25. K. Y. Kim, L. Niu, B. Castagnede and W. Sachse, "Miniaturized capacitive transducer for detection of broadband ultrasonic displacement signals," Rev. Sci. Instrum., Vol.60, pp.2785-2788(1986)
 26. C. H. Palmer and R. E. Green, Jr., "Optical

- probing of acoustic emission wave," pp.347-378 in *Nondestructive Evaluation of Materials*, J. J. Burke and V. Weiss, Eds., Plenum, New York, NY(1979)
27. D. C. Emmony, M. W. Godfrey and R. G. White, "A miniature optical acoustic emission transducer," *J. Acoustic emission*, Vol.1, pp.263-265(1982)
 28. 김영환, 소철호, 권오양, "광로차 보상회로가 부착된 마이켈슨 간섭계에 의한 탄성파 신호검출," *한국비파괴검사학회지*, Vol.13, No.4, pp.32-41 (1993)
 29. I. Sato, T. Yoneyama, S. Sasaki, Y. Suzuki, T. Inoue, T. Koga and T. Watanabe, "Rotating Machinery Diagnosis with Acoustic Emission Techniques," *J. Acoustic Emission*, Vol.2, No.(1/2), pp.1-10(1983)
 30. 권오양, 김영환, 윤동진, "회전기 진단을 위한 무선식 AE 측정장치 개발" *한국비파괴검사학회지*, Vol.11, No.2, pp.15-21 (1991).
 31. A. G. Beattie, "Acoustic Emission, Principles and Instrumentation," *J. Acoustic Emission*, Vol.2, 1/2, 1983.
 32. 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.
 33. 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.
 34. A. T. Green, "Necessity: The Mother of Acoustic Emission Testing(1961-1972)," *Mater. Eval*, Vol. 43, No. 5, pp. 600-610, 1985.
 35. "Cylinder Service Life," *Seamless High Pressure Cylinders*, Pamphlet C-5, Arlington, VA, Compressed Gas Association.
 36. K. E. Stahlkopf and G. J. Dau, "Acoustic Emission : A Critical Assessment," *Nuclear Safety*, Vol. 17, No. 1, 1976.
 37. P. G. Bentley, "Review of Acoustic Emission for Pressurized Water Reactor Applications," *NDT Int'l*, Vol. 14, No. 6, pp. 313-360, 1981.
 38. J. W. McElroy and W. F. Hartman, "An Experimental Study of Advanced Continuous Acoustic Emission Monitoring of BWR Components," US Department of Energy, Report No. C00-35208_3, 1982.
 39. "Bridge Recabled after Twelve Years Service," *Engineering News Record*, pp.63-67, 1984.
 40. L. Obert, "Measurement of Pressures on Rock Pillars in Underground Mines-Part I," RI 3444, US Bureau of Mines, 1939.
 41. K. Y. Kim and Sachse, "Characteristics of acoustic emission signals of Hertzian and unloading cracks in glass," *J. Appl. Phys.*, Vol.55, pp.2847-2856 (1984).
 42. F. R. Breckenridge, T. M. Proctor, N. N. Hsu, S. E. Fick and D. G. Eitzen, "Transient sources for acoustic emission work," *Progress in Acoustic Emission V*, Jap. Soc. NDI, p.10(1990).
 43. Y. H. Kim and H. C. Kim, "Source function determination of glass capillary breaks," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.26, pp.253-258 (1993).
 44. H. L. Dunegan and D. O. Harris, "Acoustic Emission: A New Nondestructive Testing Tool," *Ultrasonics*, Vol.7, No.3, pp.160-166(1969).
 45. M. N. Bassim, "Assessment of Fatigue Damage with Acoustic Emission," *J. Acoust. Emission*, "Vol.4, pp.S224-S227(1985).
 46. F. Hamel, J. P. Bailon and M. N. Bassim, "Acoustic Emission Mechanisms During High Cycle Fatigue," *Eng. Fract. Mech.* Vol.14, pp.865(1981).
 47. M. Houssny-Eman and M. N. Bassim, "Study of the Effect of Heat Treatment on Low Cycle Fatigue in 4340 Steel by Acoustic Emission," *Mater. Sci. Eng.* Vol.61, pp.79(1983).

▲金榮煥(Young H. Kim) 1956년 6월 27일생



1979년 2월 : 서울대학교 사범대학 물리교육과(이학사)
 1981년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학석사)
 1980년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학박사)
 1981년 3월 ~ 현재 : 한국표준과학연구원 책임연구원

1992년 8월 ~ 1993년 9월 : 미국 Ames Lab. 객원연구원

▲尹東珍(Dong-Jin Yoon) 1959년 11월 2일생



1983년 2월 : 부산대학교 공과대학 기계설계학과(공학사)
 1985년 2월 : 부산대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
 1990년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술원 정밀공학과(박사과정)

1986년 9월 ~ 현재 : 한국표준과학연구원 선임연구원

▲權五陽(Oh-Yang Kwon) 1952년 5월 8일생



1976년 2월 : 서울대학교 공과대학 공업교육과(공학사)
 1987년 12월 : 미국 UCLA 재료공학과(공학박사)
 1978년 3월 ~ 1983년 8월 : 국방과학연구소 연구원
 1988년 4월 ~ 1994년 8월 : 한국표준과학연구원 책임연구원(비파괴평가연구실장 역임)

1994년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 부교수