한국동력기계공학회지 제9권 제1호 pp.5~13 2005년 2월

발전설비 건전성평가를 위한 음향방출 비파괴검사 적용기술
- 제1편 : 음향방출 비파괴검사기술 이론(I) -
Nondestructive Testing and Applications for Integrity Assessment of Power Plant Facilities by Acoustic Emission Technology
- Part 1 : The Theory of Acoustic Emission Technology(I) -

이 상 국
S. G. Lee

Key Words : Nondestructive Testing(비파괴검사), Acoustic Emission Technology(음향방출기술), Power Plant Facilities(발전설비), Nuclear Power Plant(원자력발전소), Fossil Power Plant(화력발전소), Hydraulic Power Plant(수력발전소)

Abstract : Acoustic emission(AE) is defined as the transient elastic waves thar are generated by the rapid release of energy. The advantage of AE is that very early crack growth can be detected well before a highly stressed component may fail. At present, an exact diagnosis is the most reliable means for determining the soundness of structures during power plant operations. AE monitoring has been applied successfully in power plants to determine mechanical problems, pressure vessel integrity and external valves leaks, vacuum leaks, the onset of cavitation in pumps and valves, the presence of flow(or no flow) in piping and heat exchange equipment, etc. Acoustic emission(AE) technology has recently strengthened its application base, and practitioners' understanding of the technique's fundamentals. This paper introduces the methods of a survey and assessment on AE monitoring applications in nuclear, fossil and hydraulic power plant. The main objective of this paper was to obtain information on various applications of AE technology in power plant.

1. 서 론

최원자력·화력·수력 등 발전설비들은 우리나라 경제의 원동력을 갖고 있는 설비들로 이들 설비의 안전성 문제는 대단히 중요하게 다루어야할 핵심적인 요소이다. 또한 이러한 설비들의 안전과 관련하여 사고가 발생할 때는 막대한 경제적 손실과 사회적인 큰 문제로 야기될 수 있다. 최근 발전설비의 대부분은 대형화, 정밀화 및 고성능화되고 있어 설비에 대한 안전적인 관리가 더욱 요구되고 있다. 현재 국내 발전설비중 화력발전소의 경우 상당부분은 60~70년대, 원자력발전소는 70~90년대에 건설되어 노후화된 상태의 설비들이 증가하는 추세가 계속되어 이러한 설비들의 진단 및 평가, 유지 및 보수 등 건전성 확보를 위한 대책이 절실히 필요한 시점에 있다. 이들 발전설비 진단에 적용되어온 종래의 비파괴검사 방법으로는 체적검사를 위한 초음파, 와전류, 방사선 등을 이용한 방법과 표면 및 표면직하검사를 위한 침투탐상, 자분탐상 등의 방법들이 각각 적용되어 왔으나, 이들 방법들은 설비의 준공 시나 정기검사 등 발전정지시의 점검 및 진단이 가능하다. 따라서 이러한 방법들로는 설비의 운전 중 계속적인 감시가 불가능하고 대형설비·구조물을 단시간에 점검 및 진단을 할 수 없다. 이러한 단점을 보완할 수 있는 비파괴 진단기술이 음향방출(acoustic emission: AE) 기술이다. 즉 초음파(ultrasonic testing) 진단기술은 초음파신호를 진단하고자 하는 시험체에 직접 입사시킨 후 결함으로부터 되돌아온 수신파를 검출하여 시험체에 대한 정보를 얻어내는 능동적(active)인 비파괴 측정기술인 반면, 음향방출기술은 시험체 내부에서 발생하는 각종 물리량의 변화로 인하여 전파되는 탄성파(elastic wave)를 수신하여 해석함으로써 시험체 내부에서 진행 중인 성질과 상태변

접수일 : 2005년 2월 4일
이상국(책임저자) : 한전 전력연구원 원자력연구실
E-mail : sglee@kepri.re.kr Tel : 042)865-5650

화를 평가하는 수동적(passive)인 비파괴 측정기술이다. 음향방출기술은 종래의 기존 비파괴검사법과는 달리 가동 중인 설비의 건전성을 평가할 수 있으며 실시간으로 설비 상태의 진단이 가능한 실시간 감시기법이다. 즉 기존 비파괴검사법과는 달리 가동 중인 설비에 대해 원격으로 결함을 탐지하고 결함 위치를 판정할 수 있는 연속감시 기능을 가진 비파괴 신기술로 최근 연구개발이 활발히 진행되고 있는 방법이다. 이러한 장점 때문에 대형 산업설비의 각종 기기들에 대한 감시 및 진단에 활용하고 있으며, 그 활용도가 점점 확대되고 있는 추세에 있다. 특히 종합적인 산업설비로 구성되어 있는 발전설비의 진단과 감시에 가장 효과적인 방법이라 할 수 있겠다.

본 해설에서는 음향방출 비파괴검사기술에 대한 이해를 돕기 위하여 음향방출 검사기술의 이론 및 응용 등 전반적인 기술적인 내용을 살펴보고, 원자력·화력·수력발전소 등의 발전설비에 대해 현재 음향방출(이하 AE로 기술함)기술이 어떻게 적용되고 있는지의 적용 예와 새로운 적용기술에 대해 소개하고자 한다. 본 해설의 첫 번째 내용으로 음향방출기술의 원리, 발생기구, 음파특성 및 신호해석기법에 대해 알아본다.

2. 음향방출기술(AE)

2.1 AE의 원리

음향방출은 고체 내에 저장되어 있는 탄성 변형에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성에너지파로 정의한다. AE는 처음 독일의 Kaiser에 의해서 처음으로 알려졌으며 재료나 구조물내의 발생원(source)나 지역 발생원에서 나오는 급속한 에너지 해방에 기인하여 발생하는 탄성파이다. 이러한 탄성파의 재료 내 전달은 재료의 두께에 따라 Rayleigh나 Lamb wave type의 표면파로 이루어지는 것으로 알려져 있다. 실제 재료의 변형이나 결함에서 AE의 주파수 영역은 수십 Hz에서 수십 MHz에까지 이르고 있고 재료의 종류나 파손의 과정에 따라 주파수의 특징이 각각 다르기 때문에 설비 종류나 받는 응력의 변화에 따라 특성의 진단이 가능하다. 탄성파와 재료 내에 전달되는 표면파(surface wave)는 수면에 던져진 돌에 의해 전파되는 물결처럼 물체의 표면을 따라 발생된 표면변위(surface displacement)는 압전 탐촉자(piezoelectric transducer : PZT)에 의해 탐지되게 된다. 이 탐촉자는 물체의 기계적 변위를 전기적인 신호로 바꾸는 역할을 하며 이러한 전기적 신호를 증폭하고 처리하여 AE 신호 특성의 분석이 가능해지며 AE 발생원에 대한 정보를 얻을 수가 있는 것이다. AE 발생원에 의한 탄성파의 물체 표면에서의 표면파(surface wave)의 전달형태는 Fig. 1과 같다.

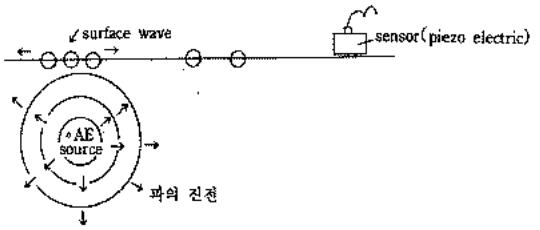


Fig. 1 Propagation mechanism of AE

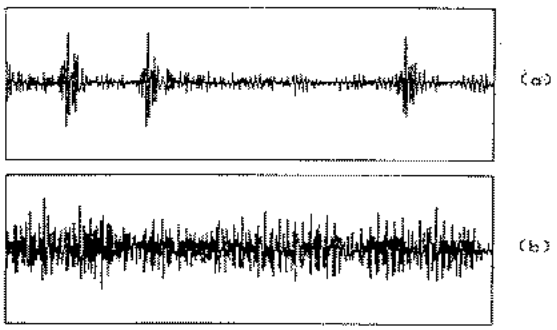


Fig. 2 Type of AE signal(a : burst type, b : continuous type)

탐촉자에 의해 탐지되는 AE 신호도 Fig. 2의 (a)와 (b)와 같이 돌발형(burst type)과 연속형(continuous type)의 2가지의 신호로 구분할 수 있으며, 연속형 신호는 진폭(amplitude)이 주변잡음(background noise)에 비해 낮고, 발생빈도가 높으며 개개의 신호가 시간에 따라 분리되지 않는 신호이며, 돌발형 신호는 진폭이 주변잡음 보다 많이 높고 신호의 나타나는 기간이 짧은(수 μs~ms) 것이 특징이며 개개 신호의 발생은 시간에 따라 잘 분리되는 특성을 갖는다.

대표적인 돌발형 AE 신호의 전형적인 형태는 Fig. 3과 같으며 AE 신호는 여러 가지 변수(parameter)들로 특징지어진다. 서로 다른 AE 발생원은 각각 다른 형태의 파형을 갖는 것으로 알려져 있어 AE 신호의 변수들을 분석함으로서 AE 발생원의 특성을 규명할 수 있다.

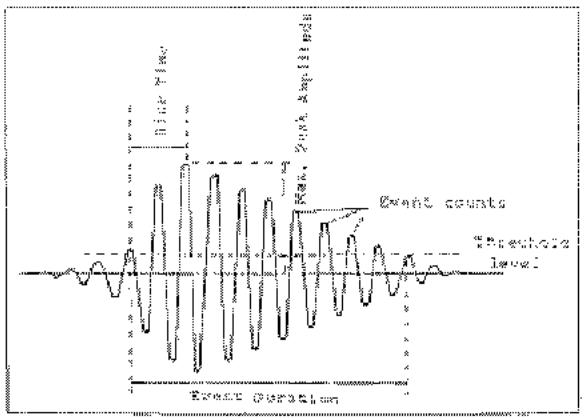


Fig. 3 AE parameters in typical burst type signal

2.2 AE 발생기구

2.2.1 AE 발생원(AE source)

AE는 재료내에서 국부적인 응력(stress)과 변형(strain)의 순간적인 변화가 일어날 때 발생하는데 이러한 변화의 대표적인 현상으로는 소성변형이 있다. 균열로 인해서 재료 내에 저장되었던 변형에너지(strain energy)가 방출될 때 대부분 열로 변환되나 그중 적은 일부분의 에너지만이 탄성파(elastic wave)로 바뀐다. 변형에너지에서 AE로 바뀌는 분량은 재료의 특성이나 파괴과정에 따라 달라지기 때문에 정량적인 측정이나 계산은 불가능하다.

AE를 발생시키는 주요 발생원은 1차적 발생원(primary source)와 2차적 발생원(secondary source)로 나눌 수 있는데 각 재료의 거동에 따는 발생원의 종류를 구분하면 Table 1과 같다.

Table 1 Types of AE source

구 분	발생원의 종류
1차적 발생원	균열 발생 성장 상변태 slip, deformation 개재물 박리 및 균열
2차적 발생원	마찰, 산화 피막박리 누출 전기적 noise 공동

여기서, 1차적 발생원은 응력 하에서 발생되는 일반적인 AE 발생원을 의미하고 2차적인 발생원은 기타의 요인에 의하여 발생되는 신호를 뜻한다.

2.2.2 카이저 효과(KAISER effect)

AE의 실질적 시조인 J KAISER가 발견한 현상으로 재료가 처음 응력을 받으면 AE를 발생하게 되지만 응력을 제거했다가 다시응력을 가할 경우에는 처음에 가했던 응력보다 더 큰 응력을 가할 때 까지는 AE가 발생되지 않는 현상을 말한다.

카이저 효과를 실험을 통하여 직접 이해하기 위하여 인스트롱(Instron) 만능시험기에 시편을 설치하여 AE가 발생될 때 까지 응력을 가하다가 AE가 어느 정도 이상 발생된 후 응력을 제거하고 다시 응력을 가했을 때 처음 AE가 어느 정도 이상 발생된 후 응력을 제거하고 다시 응력을 가했을 때 처음 AE가 인스트롱 만능시험기의 어느 하중위치에서 발생하는가를 살펴봄으로써 이 효과를 확인할 수 있다.

2.2.3 AE 센서(AE sensor)

AE 센서는 시험을 하고자 하는 대상물의 표면에 부착하여 AE에 의한 재료내의 기계적 변위를 전기적인 신호를 변환하는 역할을 하게 되는데 이 신호의 감지능력 및 변환되는 전기적 신호는 AE 센서의 종류 및 특성에 따라 크게 영향을 받게 된다. AE 시험에서는 거의 압전소자(piezoelectric element)를 이용한 센서가 이용되며 이 압전소자의 재료는 lead zirconate titanate이다.

AE 센서의 응답주파수는 대부분 30 ㎑~1 ㎒ 범위의 것이 사용되며 감쇠(attenuation)가 심한 재료를 시험할 때는 낮은 주파수의 것을 사용하고, 감쇠가 적거나 주변잡음(background noise)가 높을 때는 높은 주파수의 센서를 사용하는 것이 좋다. AE 신호의 주파수 스펙트럼(frequency spectrum) 특성을 분석하거나 교정의 측정을 위해서는 넓은 주파수 범위에 반응하는 광대역형(wide band type)의 센서를 사용하기도 한다.

2.3 AE 음파 특성

AE 신호는 여러 가지의 파동모드(wave mode)로 전파되며 재료나 모드 및 전파매체의 조건에 따라 모드변환(mode conversion)이 일어난다. 일반적으로 고체 내에서 관찰되는 AE 신호전파 모드에는 종파, 횡파, 표면파 및 판파의 형태로 매질을 움직이게 된다.

2.3.1 종파(longitudinal wave)와 횡파(transverse wave)

AE 신호는 고체매질에서 발생하는 음파가 센서

를 통해 감지되어 나타나는 것으로서 AE가 전해지는 매질의 성질로 인해 공기나 액체 중에서 전달되는 음파와는 달리 복잡하게 나타난다. 음파가 경계가 없는 무한한 크기의 매질에서 전파해 나갈 때 전파형태에 따라 두 종류의 기본적인 음파가 존재한다. 즉 소밀파(疏密波: dilatational, Primary, P wave)와 전단파(剪斷波: distortional, Secondary, S wave)이다.

소밀파가 고체내의 어느 한점 즉 가상적인 작은 입방체를 전파해 나간다고 할 때 작은 입방체의 부피는 변하나 각 모서리는 90°를 유지한 채 변하지 않는다. 그러나 전단파(찌그러짐파)의 경우는 입방체 각모서리의 각도는 변화되나 전체적인 부피는 일정하게 유지된다.

Fig. 4는 종파(longitudinal wave)의 진동모드를 나타낸 것으로 소밀파의 특별한 경우가 되며 파동전면(wave front)의 곡률반경이 작은 한 소밀파가 전파할 때의 매질 내 질량점들의 움직임을 대표한다고 생각해도 무방하다. 그림에서 작은 원들은 매질의 입자(결정구조에서는 원자)를 나타내는데 음파가 매질을 전파해 나갈 때 매질입자사이 간격이 넓어졌다가 지나간 다음 다시 제자리로 돌아온다. 매질입자의 움직이는 방향은 음파의 전해나가는 방향과 평행이며 종파의 전파속도가 각종 파동의 음속중에서 가장 빠르다. Fig. 5는 평면 횡파(plane transverse wave)가 전파 나갈 때 매질입자의 움직임을 나타낸다. 횡파는 전단파의 특별한 경우가 되는데 음파의 전파속도는 종파의 전파 속도의 대략 절반 정도가 되며 파장(wavelength)이 종파보다 짧아 전파할 때 매질 중에서 감쇠가 보다 많이 일어난다. 액체와 기체에는 횡으로 움직이는 탄성 즉 전단력에 대한 저항이 없기 때문에 횡파가 존재하지 않고 종파만이 존재하며 고체 중에는 횡파와 종파 모두 존재한다.

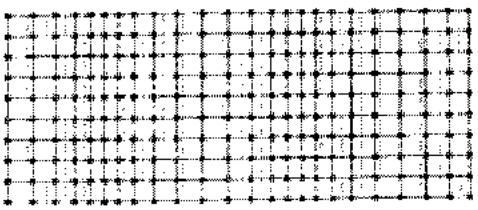


Fig. 4 Longitudinal wave mode

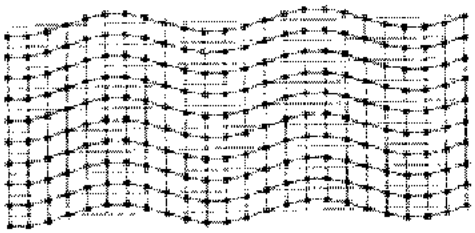


Fig. 5 Transverse wave mode

2.3.2 표면파(surface wave)

종파와 횡파는 무한히 넓은 매질을 전파해 나가는 파이지만 매질에 표면과 같이 경계면이 존재할 때는 음파의 전파해 나가는 모드가 다르다. 매질의 표면을 따라 전파해 나가는 음파를 표면파(surface wave) 또는 레이레이파(Rayleigh wave)라고 하며 표면부근에 에너지가 집중되어 있는 특수한 파이다. 수면파가 표면파의 좋은 예가 된다. 표면파는 매질의 표면에서 한 파장(wave length) 깊이 정도밖에 침투하지 않은 상태에서 매질 표면을 따라 전파해 나간다.

표면파가 전파해 나갈 때 매질입자의 움직임은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 파가 전해지는 평면에서 타원형의 움직임을 나타낸다. 이것은 매질 입자사이에서 강한 탄성력이 있는 고체와 탄성력이 존재하지 않는 기체사이의 경계를 따라 파가 전파해 나가기 때문이다. 그러므로 표면파는 액체에 담긴 고체의 표면에서는 존재하지 않는다. 표면파의 특징은 종파나 횡파보다 매질에서의 감쇠가 적기 때문에 먼 거리까지 에너지를 별로 잃지 않고 전파해 나가는데 있다. 표면파의 전파 속도는 횡파의 약 90%정도로서 비교적 느리다.

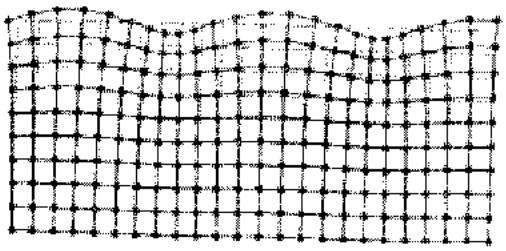


Fig. 6 Surface wave mode

2.3.3 판파(plate wave)

음파가 한 파장의 길이보다 두께가 얇은 고체 평판을 전파해 갈 때는 순수한 표면파는 존재하지 않게 되고 매질두께에 걸쳐 복잡한 진동이 가미되는 형태의 음파가 된다. 이것을 판파(plate wave 또는

lamb wave)라고 하는데 판파의 전파시 매질 입자의 움직임은 Fig. 7에서 보듯이 복잡하며 대칭형(symmetrical type)과 비대칭형(asymmetrical type)이 있다. 대칭형은 부드러운 고무호스에 호스의 직경보다 큰 쇠구슬을 밀어 넣을 때의 고무호스의 움직임과 비슷한 것으로 볼 수 있으며 비대칭형은 담요를 털 때 담요가 상하로 물결무늬 모양으로 움직이는 것과 유사한 움직임이라 할 수 있다.

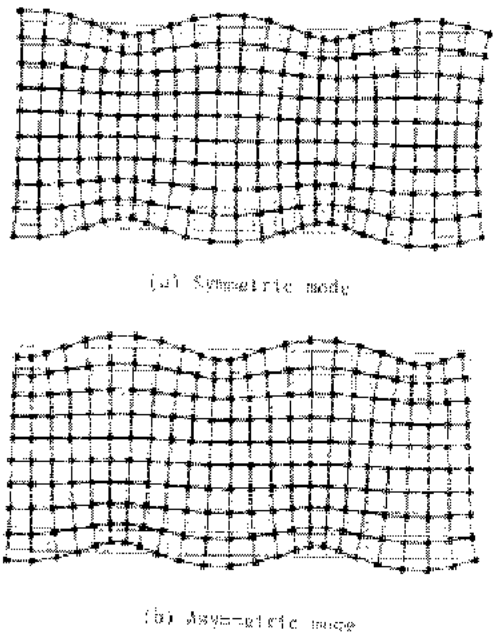


Fig. 7 Plate wave mode

판파의 전파속도는 매질의 재질뿐만 아니라 두께, 음파의 주파수(frequency) 등에도 많이 영향을 받는다. 일반적으로 구조물의 두께가 음파의 파장의 길이의 2배보다 클 때는 주로 표면파에 의해서 파의 에너지가 전달되지만 파장의 2배 보다 얇은 구조물에서는 주로 판파 형태로 파의 에너지가 전달되어진다.

2.3.4 음향 임피던스(acoustic impedance)

AE 시험을 하는데 있어서 이해해야할 중요한 변수(parameter) 가운데 하나가 시험하고 있는 재료의 음향 임피던스(acoustic impedance)이다. 일반적으로 음파는 경계면에서 빛과 같이 반사도 하고 투과도 하는데 경계면에서 수직으로 음파가 입사할 때 음파는 거기서 반사하는 성분과 투과하는 성분으로 나누어진다. 이 2개로 나뉘어 지는 비율은 경계면에 접하는 2개의 물질의 음향 임피던스 Z에 따라 정해지는데 음향 임피던스 Z는 다음의 식 (1)로 정의된다.

$$Z = DV(gm/cm^2\text{-}sec) \times 10^6 \quad (1)$$

여기서, D= Density in gm/cm

V= Velocity of sound wave in the material in cm/sec

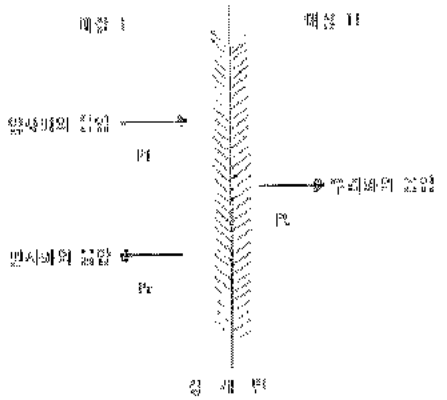
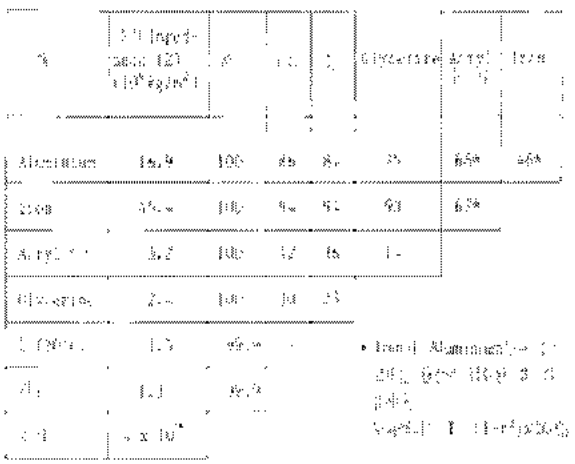


Fig. 8 Refraction and transmission of wave

Fig. 8에서 제1매질과 제2매질의 경계면에 음파가 좌측에서 수직으로 부딪칠 때 입사되는 음의 크기 즉 음압을 Pi라고 하고 경계면에 닿는 순간에 제 1 매질 측에 반사하의 음압 Pr, 제 2매질로 투과한 음의 음압을 Pt, 각 매질의 음향 임피던스를 Z_1, Z_2라 할 때 입사파의 음압에 대한 반사파의 음압비를 음압반사율 r로 표시하면, 식 (2)와 같다.

$$r = \frac{Pr}{Pi} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

Table 2 Acoustic impedance



이 식은 AE 센서를 피시험체에 부착시킬 때 커플란트(couplant)의 선택을 하거나 여러 종류의 재질로 된 복잡한 구조물을 시험할 때 센서까지 전달되는 신호의 크기를 이해하는데 많은 도움이 된다. Table 2는 서로 다른 매질에 대한 음향 임피던스의 예와 음압반사율을 참고로 보여 준다.

2.4 음향방출 신호해석기법

2.4.1 개요

AE 시험에 있어서 신호해석은 음향방출 발생원(AE source)의 존재를 파악하는데서 한걸음 나아가 음향방출 발생원에 대해 가능한 많은 정보를 얻어 음향방출 발생원의 특성을 파악하는 일로서 AE 시험에서 비교적 전문적인 기술을 필요로 하는 분야이다. 일반적으로 AE 신호는 음향방출 발생원의 특성, 음향방출 발생원에서 센서에 이르는 경로, 센서의 특성, 시험장비에 영향을 많이 받기 때문에 이 모든 것을 종합적으로 평가하고 파악해야만 올바른 신호해석이 가능해 진다. 따라서 정확한 음향신호를 분석 및 평가하기 위해서는 각종 신호해석 기법을 알아보고 적정한 신호해석 기법을 결정해야 한다.

2.4.2 평균전압(RMS voltage) 분석

평균전압(RMS voltage) 또는 신호레벨(signal level)분석은 개개의 신호의 특성을 따로 분석할 수 없는 연속형(continuous type) AE 신호에 적용되는 방법으로서, RMS(root mean square) voltmeter 즉 평균전압계로 전압 값을 측정한다. AE 신호의 파워(power)는 다음의 식 (3)과 같이 평균전압(Vrms)의 제곱에 비례한다.

$$\overline{P} \approx (V\ rms)^2 \tag{3}$$

또한 평균전압에 의해서 측정되는 에너지는 다음 식 (4)와 같이 그 신호의 에너지를 나타낸다.

$$E=\frac{1}{R}\int_o^T V(t)^2 dt=\frac{1}{R}\int_0^T V_{rms}^2(t)\,dt \tag{4}$$

평균전압계는 AE 신호뿐만 아니라 전치 증폭기(preamplifier)의 잡음전압(noise voltage)까지 측정하기 때문에 AE 신호의 실제 평균전압을 얻으려면 잡음부분을 제외하여야 한다. 평균전압값 즉 신호레벨이 높고 낮음으로 AE 발생원의 발생정도(activity)를 평가하는데 이러한 방법은 누출탐지(leak detection)에서 누출의 정도를 평가하는데 이용될 수 있다.

2.4.3 파형변수(waveform parameter) 분석

AE 신호를 분석하는 방법으로 일반적으로 많이 쓰이는 것이 파형의 변수(wave parameter) 분석이다. 파형의 각 변수는 AE를 발생시키는 음향방출 발생원의 종류가 다르면 같은 측정 시스템하에서는 다르게 나타난다. 그러나 AE 변수는 단지 음향방출 발생원의 종류뿐만 아니라 시험대상체의 기하학적인 형태라든가 센서의 특성, 측정 장비의 특성에 의해서도 영향을 받을 수 있기 때문에 신호해석에 있어서 주의를 요한다. AE 변수들을 이용한 AE 신호 분석방법을 들어 보기로 한다.

1) 링다운 횟수(ringdown counts)

센서에 의해 탐지되는 AE 신호가 카운터(counter)의 설정된 문턱값(threshold)를 넘어 나타나는 신호의 갯수를 링다운 횟수(ringdown counts)라 한다(Fig. 3중의 event counts). Fig. 9에 나타낸 이상적인 AE 신호는 다음의 식 (5)로 나타낼 수 있다.

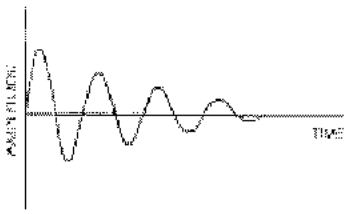


Fig. 9 Typical AE waveform

$$V=V_o \exp(-Bt)\sin wt \tag{5}$$

여기서, V = output voltage of sensor
V_0 = initial signal amplitude
B = decay constant (>0)
t = time
w = angular frequency

이다. 식(5)를 기초로 해 링다운 횟수 N은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$N=\frac{W}{2\pi B}\ \ln\ \frac{V_o}{V_t} \tag{6}$$

여기서 V_t는 카운터의 문턱 전압값(threshold voltage) 이다.

AE 신호의 크기가 크면 링다운 횟수도 커지는데 이 링다운 횟수는 발생한 AE 신호의 강도(intensity)나 지속된 정도를 평가하는 척도가 될 수 있다. 그러나 링다운 횟수는 시험체의 기하학적인 형상이나 센서 특성, 센서와 시험체의 밀착정도 등에 영향을 크게 받기 때문에 링다운 횟수의 방법으로 음향방출 발생원의 특성을 파악할 때는 다른 변수에 의한 분석방법과 병행할 필요성이 있다.

2) AE 에너지(AE energy) 분석

AE가 재료내에서 에너지의 급격한 방출에 의해 발생되는 것이기 때문에 AE 신호의 에너지를 측정하고 분석함으로 AE 발생원의 특성을 간접적으로 평가할 수 있다. AE 신호의 전기적인 에너지 U는 다음과 같은 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$U=\frac{1}{R}\int_{o}^{\alpha} V^2(t)\ \ dt \qquad (7)$$

여기서, R은 전기저항이다.

에너지 분석방법의 장점은 에너지가 AE 신호를 발생시키는 기구인 기계적 에너지(mechanical energy), 변형율(strain rate) 또는 변형기구(deformation mechanism)와 같은 중요한 물리적인 변수들과 직접적으로 관련되어 있기 때문에 음향방출 발생원의 특성에 대해 중요한 정보를 제공하는데 있다. 일반적으로는 측정되는 평균전압계는 에너지 크기(energy rate) 또는 AE 신호의 파워(power)에 직접적인 관련이 있다.

3) AE 진폭(amplitude) 분석

AE 신호의 최대 진폭값(peak amplitude)은 AE 신호를 발생시키는 재료에 있어서 음향방출 발생원의 강도와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 진폭분석에서는 진폭의 분포 함수를 구해서 비교하는 방법이 많이 이용된다. 설정된 문턱값을 넘는 신호의 수를 N(a)라고 하면 식 (8)과 같이

$$N(a)=\left(\frac{V}{V_o}\right)^{-b} \qquad (8)$$

로 수식화 할 수 있는데 여기서, V는 센서로 탐지되는 AE 신호의 전압, V_0는 문턱값 전압, b는 진폭의 분포 특성을 나타내는 상수이다. 식 (8)에서 b값은 서로 다른 AE 발생기구에 대해서 진폭의 분포함수를 구해 보면 다른 형태를 갖게 되고 유사한 AE 발생기구는 진폭의 분포함수도 같은 형태를 가지는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 이러한 방법도 절대적인 분석방법이 될 수 없다. 왜냐하면 진폭의 발생 자체가 시험체의 기하학적인 형태나 센서의 특성, 센서와 시험체와의 밀착(bonding) 상태 등에 의해서 영향을 받을 수 있기 때문이다.

4) 기타의 변수를 이용한 신호분석

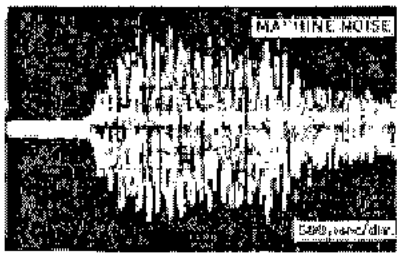
앞서 언급한 링다운 횟수, 에너지, 진폭 외에도 AE 변수 중에 Fig. 3의 상승시간(rise time), 지속시간(event duration)을 이용하여서도 서로 다른 음향방출 발생원을 구분해 내고 AE 신호의 특성과 AE를 발생시키는 서로 다른 과정(process) 사이의 차이를 알아 낼 수도 있다. 또한 상승시간과 최대 진폭값의 비율을 이용하는 방법도 AE 시험에서 활용되고 있다. 마찰에 의해서 발생되는 AE 신호는 Fig. 10의 (a)와 같이 상승시간이 길고 지속시간도 길지만 금속재료의 파괴시에 발생되는 신호는 Fig. 10의 (b)와 같이 상승시간이 짧고 지속시간도 짧음을 알 수 있다.

이상의 파형의 여러 변수들을 이용한 AE 신호분석방법은 어느 변수를 단독으로 쓰이기도 하지만은 몇 개의 변수를 종합적으로 병용하여 서로 다른 AE 발생원을 구분해 내고 AE 발생원의 특성을 파악하기도 한다. 경우에 따라서는 각 변수들 간의 상관관계를 통계적으로 분석해 봄으로서, 전체적인 AE 신호의 크기는 다르다 할지라도 같은 발생기구에 의한 AE 신호들을 분류해 낼 수도 있다. 파형의 변수들을 이용한 분석을 할 때는 시간에 따른 사건 발생율(event rate)이나 변수의 값뿐만 아니라 각 변수들의 분포함수(distribution function)를 구해 봄으로서 AE를 발생시키는 기구의 차이점을 구분해 내는 방법을 많이 사용한다.

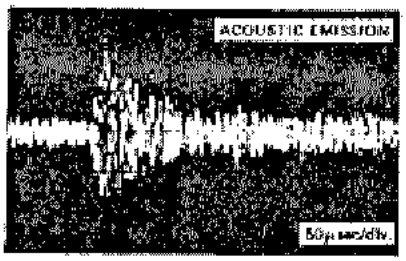
2.4.4 AE 주파수(frequency) 분석

파형의 변수 분석은 시간영역(time domain)에서의 분석방법인데 시간영역을 주파수영역(frequency domain)으로 변환시키면 AE 신호의 주파수 스펙트럼(frequency spectrum)을 얻을 수 있다. 이 주파수 스펙트럼은 AE의 발생기구에 따라 서로 달라지므로 이를 이용해 AE 발생원을 구분해 낼 수 있다. 시간영역의 신호를 디지털 레코더(transient digital recorder)에 의하여 계수화(digitizing)시킨 다음 컴퓨터를 이용해 퓨리에 변환(fourier transform)하면

주파수영역의 정보를 얻게 되는데 요즘에는 주파수 스펙트럼분석기(frequency spectrum analyzer)에 의해, 보다 신속하게 입력되는 아날로그(analogue) 신호의 파형으로부터 주파수 스펙트럼을 얻을 수 있다. 광대역형(wideband type)의 센서를 사용해 얻은 신호정보가 주파수분석에 유리하지만 협대역형 필터(bandpass filter)를 사용한 공진형(resonant type)의 센서를 이용해서 얻는 AE 신호에 대해서도 효과적인 분석이 가능하다. AE 신호의 주파수 스펙트럼을 서로 비교 분석할 때 서로 다른 주파수 스펙트라(frequency spectra)를 찾아내고 스펙트럼의 변화를 파악하는 데는 전문성이 필요하다.



(a) Machine noise 신호



(b) Crack에 의한 AE신호

Fig. 10 AE signals by machine noise and crack

2.4.5 패턴인식(pattern recognition)에 의한 AE 신호분석

AE 변수에 의한 신호분석 보다 진보한 방법이 AE 신호의 패턴인식(pattern recognition) 방법이다. 이 방법은 센서에 의해 탐지되는 AE 신호들을 신호 패턴(pattern)의 특성을 인지하여 유사한 신호끼리 분류해 내는 방법이다. 일반적으로 AE 신호는 재현성이 적기 때문에 같은 발생원이 AE 신호를 발생시킨다 할지라도 센서에 의해 탐지되는 신호는 AE 변수들이 서로 틀릴 경우가 있다. 그러나 같은 발생원에 의한 신호의 AE 변수들은 일정한 범위 내에 있다고 볼 수 있으므로 신호 형태에 대한 통계적인 특징을 가지고 서로 다른 신호들은 분류해 낼 수 있다. 구체적인 패턴인식의 한 방법으로 knowledge representation방법이 있다. 이것은 AE 신호에 관한 정보를 효과적인 방법으로 나타내고 통계적인 방법을 이용하여 같은 발생원에 의해서 발생한 AE 신호군(signal group)에 관한 데이타를 추출해 내는 방법이다.

knowledge representation의 첫 단계는 파형에 관한 정보를 최대한으로 이끌어 내고 시간영역에서의 정보뿐만 아니라 시간영역의 신호를 주파수영역으로 변환시켜 주파수영역에서의 정보도 충분히 활용한다. Table 3은 knowledge representation에서 이용되는 AE 신호 패턴의 특징을 추출하는 목록(list)이다. 이러한 AE 신호의 여러 특징 중 필요한 정보를 선정하고 조합하여 신호를 구분해 내는데 이 방법은 컴퓨터의 활용과 신호해석을 수행하는 사람의 전문성이 요구된다. 패턴인식의 전문성을 키우기 위해서는 신호분류를 의한 훈련이 필요하다. 패턴인식을 보다 능률적으로 하기 위하여 신호해석을 위한 분류 시스템(classification system)이 개발되어 이용되고 있는데 그 종류로는 훈련 세트(training set)에 근거한 통계적인 정보를 이용하는 empirical bayesian classifier와 K-nearest neighbor classifier, linear discriminant function classifier 등이 있다.

Table 3 Extraction list of AE signal properties for pattern recognition

- Standard deviation of acoustic emission signal
- Skewness coefficient(third moment) of acoustic emission signal
- Kurtosis coefficient (fourth moment) of acoustic emission signal
- Coefficient of variation of acoustic emission signal
- Rise time of the largest pulse in time domain
- Fall time of the largest pulse in time domain
- Pulse duration of the largest pulse in tine domain
- Pulse width of the largest pulse in time domain
- Rise time of second largest pulse in time domain
- Fall time of second largest pulse in time domain

- Pulse duration of second largest pulse in time domain
- Pulse width of second largest pulse in time domain
- Pulse ratio of the second largest pulses
- Distance between the two largest pulses
- Partial power in frequency band 0 to 0.25 MHz
- Partial power in frequency band 0.25 to 0.5 MHz
- Partial power in frequency band 0.5 to 0.75 MHz
- Partial power in frequency band 0.75 to 1.0 MHz
- Partial power in frequency band 1.0 to 1.25 MHz
- Partial power in frequency band 1.25 to 1.5 MHz
- Partial power in frequency band 1.5 to 1.75 MHz
- Partial power in frequency band 1.75 to 2.0 MHz
- Ratio of the two largest partial powers
- Ratio of the smallest and largest partial power
- Frequency of the largest peak in power spectrum
- Amplitude of the largest peak in power spectrum
- Frequency at which twenty-five percent of accumulated power was observed
- Frequency at which fifty percent of accumulated power was observed
- Frequency at which seventy-five percent of accumulated power was observed
- Number of peaks exceeding a present threshold

3. 결 언

발전설비의 건전성 평가를 위한 음향방출 비파괴검사 적용기술에 대한 도입부로서 음향방출기술의 이론중에서 첫 번째 내용인 음향방출기술의 원리, 발생기구, 음파특성 및 신호해석기법에 대해 살펴보았다. 이들 내용을 알아봄으로서 향후 소개할 위치표정기술, 음향방출기술의 응용, 역할, 측정시스템 및 설비 적용에 도움이 되고자 하였다. 본 해설 내용은 발전설비뿐만 아니라 여러 가지 산업설비의 손상감시를 위한 감시기술에 응용할 수 있으므로 타 연구 및 설비 적용분야에 기초 자료가 되었으면 한다.

참고문헌

1. ASNT, 1987, "Nondestructive Testing handbook", Vol. 5, Acoustic Emission Testing, pp. 11~19.
2. Trevor J. Holroyd, 2000, "The Acoustic Emission & Ultrasonics Monitoring Handbook", Coxmoor Publishing Co., pp. 17~44.
3. Ian G. Scott, 1991, "Basic Acoustic Emission", Gordon and Breach Science Publishers, pp. 35~37.
4. Jack C. Spanner, 1974, "Acoustic Emission Techniques and Application", Intex Publishing Co., pp. 12~35.
5. 이상국, 2004, "음향방출기술에 의한 발전설비 비파괴검사 및 응용", 한국비파괴검사학회지, 제24권, 제4호, pp. 396~397.
6. J. C. Spanner and J. W. McElroy, 1974, "Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission", American Society for Testing and Materials, pp. 3~10.
7. J. A. Kleppe, 1989, "Engineering Application of Acoustics", Artech House Press, pp. 14 ~16.
8. J. R. Matthews, 1983, "Acoustic Emission", NDT Monographs and Tracts, Vol.2, pp. 14~6.
9. H. N. G. Wadley, C. B. Scruby and J. H. Speake, "Acoustic Emission of Physical Examination of Metal".
10. R. W. B. Stephens and H. C. Kim, "Acoustic Emission-A Diagnostic Tool in Non-destructive Testing", Ultrasonic Testing, ch. 12, pp. 459~492.
11. ASTM STP624, 1976, "Nondestructive Testing Standards-A Review".
12. 탄성파이용기술연구회, 1991, "음향방출", 탄성파이용기술 입문시리즈 제1권, pp. 1~15.

저자소개

이상국 박사

- 1960년 8월21일생
- 1995년 2월 부경대학교 대학원 박사과정 수료(공학박사)
- 1996년4월부터 한국전력연구원 근무, (현)선임연구원
- 주요업무 : 발전설비 재료열화 측정, 기기 건전성 및 비파괴평가 연구