

용접부검사법으로서의 Acoustic Emission

정희돈* · 권영각* · 장래웅*

Application of Acoustic Emission to Weld Evaluation

H. D. Jeong*, Y. G. Kweon*, R. W. Chang**

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Deformation(변형), Fracture(파괴), Material Evaluations(재료평가), Welding Process(용접공정), Cracking(균열), Coating(코팅), Brazing(브레이징), Adhesive-bonding(접착), Spot Welding, Electroslag, Welding, Non-destructive Test(비파괴검사).

1. 머리말

의사가 청진기를 통하여 인체내에서 들려오는 소리를 듣고 환자의 상태를 진단하는 것처럼, 물체에서 나오는 소리를 검출하여 물체의 각종 변형 및 파괴거동 그리고 물리적 현상을 이해하는 기법을 음향방출법(Acoustic Emission : 이하 AE라고 칭함)이라한다. 근년에 들어 다각적인 측면에서 이러한 AE를 적용하기 위한 실험실적 연구와 현장 응용이 활발하게 이루어 지고 있다.

AE를 이용한 중요한 연구 분야중의 하나로서, 재료 평가법으로서의 응용을 들수 있다. 여기서는 재료의 미시적인 변형과 파괴 과정중에 일어나는 국부 응력 변화에 의해 발생하는 소리, 즉 탄성파를 검출하여 역으로 변형/파괴과정을 해석해 나아가는 것에 주 목적을 두고 있으며, 신재료의 개발이나 기존 재료의 개선에 중요한 정보를 제공하고 있다¹⁻³. AE응용의 또하나의 분야는 구조물 부재의

내부에 존재하고 있는 결함의 위치와 위해도를 평가하는 비파괴 검사법으로서의 응용을 들수 있다^{4,5}.

한편, AE신호는 급격한 응력 변화에 의해 발생된다는 특성 때문에 재료 평가법으로서의 응용 이외에도 어떠한 종류의 응력 변화에 상응하는 물리적 현상을 해석 하는 도구로서도 사용 할 수 있다는 것이 AE가 갖는 특징이라 할 수 있다. 이러한 관점에서 보면, 용접 공정중에 야기되는 문제점 특히 균열 생성에 관한 정보도 충분히 얻을 수 있음을 알 수 있을 것이다.

본 해설은 향후 용접부의 평가나 용접공정에 있어서 비파괴 평가 수단으로서 AE를 이용코저 하는 분들을 위한 것으로 AE신호의 정의를 설명하고, 이러한 AE를 이용하여 수행된 용접관련 연구들에 대해서 문헌 조사결과를 소개할까 한다.

*정희원, 산업과학기술연구소 용접연구센터

2. Acoustic Emission(AE)의 기본사항

2.1. AE신호의 정의와 특징

어떤 물체가 외력 또는 내부의 힘에 의해서 국부적으로 변형이나 파괴가 발생되면 탄성파가 방출되는데, 검출된 탄성파를 AE신호라고 하며, 탄성파 자체 그리고 탄성파를 검출하는 수단 및 해석을 통틀어 AE법 또는 AE기법이라 말한다⁶⁾. 탄성파는 본질적으로는 물체의 구성 입자들이 사방으로 진동하여 가는 현상이며, 이러한 진동이 압전센서에 의해서 전기적 신호로 변환된후 가시적으로 검출 되었을때 비로서 AE신호로서 간주되게 된다. AE신호는 신호의 강도 및 특정 주파수의 범위에 따라 인간의 귀로는 들을 수 없는 신호가 대부분이다. 즉, 인간의 귀로 들을 수 있는 소리의 주파수 범위가 대략 수십 헤르츠(Hz)에서 20킬로헤르츠(kHz)정도 인것에 비해서 AE연구에서 다루는 신호의 주파수 범위는 수 MHz까지 이르고 있기 때문이다.

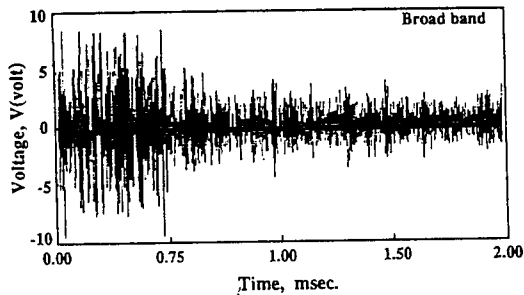


Fig. 1 Example of acoustic emission signals

일반적인 AE신호의 형상은 Fig.1과 같이 시간축에 대해서 감쇄형의 모양을 갖게 된다. 이러한 신호의 특성은, 일차적으로는 대상 물체에서 해방되는 응력의 크기($\Delta\sigma$)와 응력해방에 소요된 시간(Δt)에 의해서 결정되게 된다. AE신호의 발생은 물체의 변형/파괴현상에 기인하는 것이지만, AE기법을 재료 평가 이외의 수단으로 사용 할때는 그와는 관계 없이 발생하는 것도 AE신호의 범주에 속하게 된다. 전자를 1차 AE신호라 하며 후자를 2차 AE신호라 할 수 있다. Table 1에 대표적인 1,2차 AE신호의 종류를 열거 한다⁶⁾. 재료내에서 방출된 AE신호는 수 mV의 매우 미약한 신호이기 때문에 수천

Table 1. Sources of acoustic emission signals(ref 6)

| Unflawed Metals ¹⁾ | Subcritical Crack Growth ¹⁾ |
|---|--|
| Dislocation Movement | Crack Front Movement |
| Dislocation Multiplication | Plastic Zone Growth |
| Slip | |
| Twining | |
| Inclusion Fracture | Pseudo Sources²⁾ |
| Inclusion Debonding | Crack Closure |
| | Frictional Rubbing |
| Composite Materials¹⁾ | Liquid & Gas Leakage |
| Transverse Cracking | Loose Particles & Loose Parts |
| Matrix Splitting | Cavitation |
| Delamination | Phase Transformation |
| Fiber-matrix debonding | Boiling, Freezing, Melting |
| Fiber Pullout | Electric Discharge |
| Fiber fracture | |

(1 : Primary signals 2 : Secondary signals)

내지는 수만배로 증폭시킬 필요가 있다. 증폭된 신호에 대해서 A/D변환을 행한후 컴퓨터에 의해 Fig. 2에 보이는 바와 같은 여러형태의 신호처리를 거쳐 소정의 정보들을 얻게 된다.

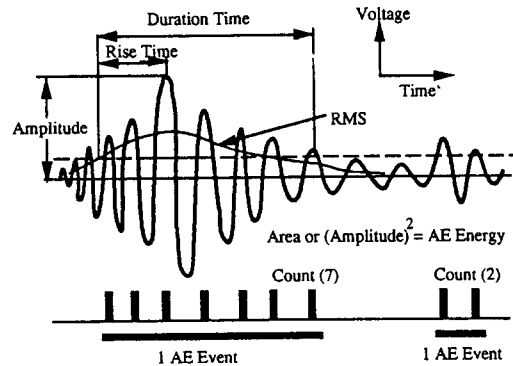


Fig. 2 Parameters of acoustic emission signal.

이러한 AE의 계측 및 해석에 대해서는 지면 관계상 생략하기로 하고 이에 대한 자세한 내용에 대해서는 참고문헌 (7)을 참조하기 바란다. 다만 본 해설을 전개해 나아가는 데에 있어 필수적이라고 여겨지는 "AE에 의한 결함의 위치표정"의 원리에 대해서는 차절에서 간단히 언급하기로 한다.

2.2 AE에 의한 균열의 위치 표정

현재의 AE의 계측에 있어서는 계측장비의 규격화가 이루어져 있지 않는점 그리고 계측조건의 차이에 의해 AE신호의 방출수가 다르게 나타나기 때문에 어떤 면에서는 측정 결과를 정량화 시키기가 매우 어렵다. 그러나 AE신호의 처리법중 가장 정량적인 결과를 얻을 수 있는 것이 위치 표정이라 할 수 있다. AE에 의한 위치 표정은 구조물에 있어서나 또는 용접 공정중에 발생하는 결함의 장소(위치)와 균열의 시간적 진전의 연속적인 추적 그리고 외부에서 들어오는 잡음의 제거에 매우 유용하게 사용되는 방법이다. 결함의 위치표정은 복수의 센서를 이용하여 신호가 각센서에 도달되는 시간차에 의해서 결정된다. 즉, Fig. 3에 표시되어 있는 바와 같이 두 점간의 센서에 도달하는 시간차를 δt 로 하고 신호의 전파 속도를 V 라 하면 다음식이 성립하게 된다.

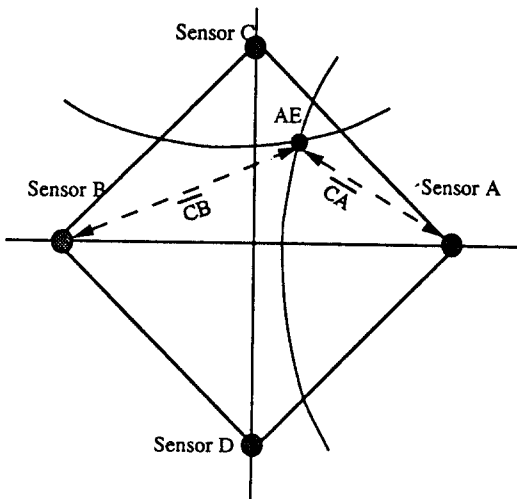


Fig. 3 Principle of determination of the crack location by using the multi-sensor system.

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

두 센서로 부터의 거리의 차가 일정하게 되는 궤적은 그림과 같이 쌍곡선이 되고 AE신호의 발생원은 이 곡선상에 존재하게 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 최소 3개 이상의 센서를 사용하면 복수

의 쌍곡선을 얻을 수 있고 쌍곡선들의 교차점이 얻어져 평면뿐만 아니라 3차원 표정도 가능케 된다.

3. 비파괴 검사법으로서의 AE

서론에서 언급하였듯이 재료 평가법으로서 AE기법은, 시편에 가해지는 하중의 크기나 시편의 변위량등을 측정치로 하는 통상의 평가 방법들에 비해서 보다 미시적이고 정량적인 결과를 도출 할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 재료 평가법으로서 뿐만 아니라 구조물부재의 안정성 평가나 현상태 진단을 행하기 위한 파괴 평가 수단으로 AE를 이용하기 위한 노력이 계속되고 있으며, 실제 현장에 응용되고 있는 분야도 있다⁸⁻¹⁰⁾ 초음파, X-ray, Eddy Current등과 같은 극히 일반적인 비파괴 검사법들은 결과를 얻기 위해서, 외부에서 인위적으로 어떠한 형태로든지 에너지를 가하고 그 에너지의 귀환 거동을 이용하는 형태를 취하게 된다. 또한, 이러한 에너지를 주고 받기 위해서는 대개의 경우 시험 대상체들이 정지의 상태로 되어야 한다든지 또는 작업공정을 중지시켜야 하는등의 제약이 있게 마련이다. 이와 반면에 AE는 재료내부에서 발생하는 어떤 면에서는 자연 발생적인 에너지를 받는, 즉 수동적인 입장을 취하기 때문에 에너지 입력이 필요치 않으며 측정 대상체가 가동 상태에서도 측정이 가능하다는 장점이 있다. 다시말해 상기의 통상적인 검사법들이 주로 정지된 결함의 존재여부와 그의 크기를 평가 하는데에 비해서, 균열의 동적인 거동을 평가 할 수 있다는 것도 AE만이 갖는 특징이기도 하다. 한편, 전절에서 AE를 이용한 결함의 위치 표정에 관하여 언급하였는데, 이러한 기구를 이용하여 한번의 측정으로 넓은 영역의 결함 위치를 찾아 낼 수도 있다. 이상과 같은 AE의 특징을 다른 비파괴 검사법과 비교한 것이 Table 2이다.

AE를 비파괴적 검사방법으로 응용하고 있는 확실한 사항중의 한 예로 일본 비파괴 협회의, 검사규격인 "고장력장을 이용한 구형용기의 AE실험방법과 실험결과의 등급 분류방법"¹¹⁾을 들 수 있다. 여기서는 수많은 실험을 통하여 얻은 결과를 토대로 하여 용기 제작후에 AE측정과 내압시험에 의해 내재되어 있는 균열의 위치도 및 위치를 탐지하도록 하고 있다. 참고로 이 규격에서 제안하고 있는 판정표를

Table 2. Nondestructive methods for evaluating materials

| Method | Measures or Detects | Applications | Advantages | Limitations |
|-----------------------------------|---|---|---|--|
| Penetrant (Dye or fluorescent) | Defects open to surface of parts ; cracks, porosity, seams, laps, etc. Through-wall leaks | All parts with non absorbing surfaces(forging, weldments, casting, etc.) Note ; Bleed out from porous surfaces can mask indication of defects. | Low cost, Portable. Indication may be further examined visually. Results easily interpreted. | Surface films, such as coatings, scale and smeared metal may prevent detection of defects. Parts must be clean. Defect must be open to surface. |
| Eddy Current | Surface and substructure cracks and seams. Alloy content, Heat treatment, Wall and coating thickness, Crack depth, Conductivity. Permeability. | Tubing, Wire, Ball bearing "Spot checks on all types of surfaces. Proximity gage Metal detector. Metal sorting. Measure conductivity in % IACS, | No special operator skills required. High speed, low cost. Automation possible for symmetrical parts. Permanent record capability for symmetrical parts. No couplant. | Conductive materials. shallow depth of penetration(thin wall only) Masked of false indications caused by sensitivity to variation, such as part geometry. |
| Radiography (X-ray film) | Internal defects and variation ; porosity, cracks, inclusions, lack of fusion, geometry variation. Density variation. Thickness, gap and position. Misassembly. | Castings, Electrical assemblies Weldments, Small, thin, complex wrought products. Nonmetallics, Composites. Solid propellant rocket motors. | Permanent record ; film. Adjustable energy level. High sensitivity to density changes. No couplant required. Geometry variation do not effect direction of X-ray beam | High initial cost. Orientation of linear defect in part may not be favorable. Radiation hazard. Depth of defect not indicated. Sensitivity decreases with increase in scattered radiation. |
| Ultrasonic (0.1-25MHz) | Internal defects and variation ; cracks, lack of fusion, porosity, inclusion, delaminations, lack of bond, Thickness. Poisson ratio, young modulus. | Wrought metal. Welds, Brazed joints. Adhesive bonded joints, Nonmetallics. In-service parts | Most sensitive to cracks. Test results known immediately. Automating and permanent record. Portable. High penetration. High preparation capability. | Couplant required. small, thin complex parts may be difficult to check. reference standards required. Trained operators for manual inspection. Special probes. |
| Magnetic particle | Surface and slightly subsurface defects ; cracks, seams, porosity, inclusions, Permeability variations. Extremely sensitive for locating small tight cracks. | Ferromagnetic materials ; bar, forgings, weldments, extrusions, etc. | Advantage over penetration in that it indicates subsurface defects particularly inclusions. Relatively fast and low cost. may be portable. | Alignment of magnetic field is critical. Demagnetization of parts required after tests. Parts must be cleaned before and after inspection. Masking by surface coatings. |
| Acoustic emission (AE) | Crack initiation and growth rate. Internal cracking in welds during cooling. Boiling and cavitation. Friction or wear. Plastic deformation. Phase transformation. | Pressure Vessels, stressed structures. Turbing or gearbox. Fracture mechanics research. Weldments. Sonic signature analysis. | Remote and continuous surveillance. Permanent record. Dynamic detection of crack. Portable. | Transducers must be placed on part surface. Highly ductile materials yield low amplitude emissions. Part must be stressed or operating. Noise problems. |

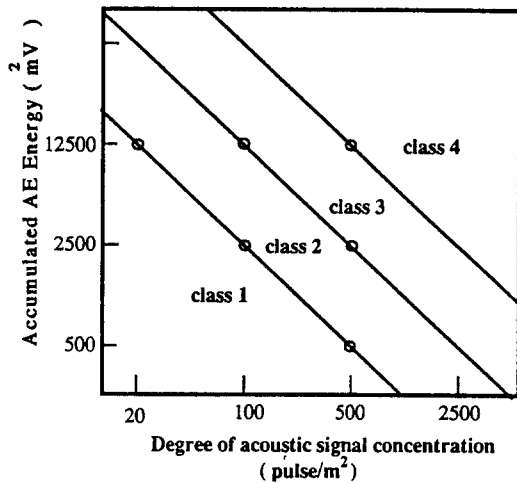


Fig. 4 Standard to determine the crack severity about large pressure vessel made by 60 kg/mm² high strength steel. (ref.11)

Fig. 4에 나타낸다. 그림은 단위 면적당의 AE신호 발생의 집중도 (발생빈도)와 각 신호들의 에너지의 상관 관계에 주목하여 균열의 위해도를 평가하고 있다. 즉, 그림에서 1급에 해당하는 신호는 미소결함 또는 잡음에 의해 방출되는 신호이며, 2급은 안정적인 결함의 존재에 해당되며, 3급은 향후 확대 가능한 결함이 존재하고 있음을 의미하고 있다. 그리고 4급에 해당 되는 신호는 내압 시험중에 균열이 진전되고 있음을 반영하는 신호로 간주하고 있다. 물론 AE 신호가 측정조건 및 주위환경에 의해 많은 영향을 쉽게 받기 때문에 이 규격에서는 엄밀한 시험요건을 전제로 하고 있다. 한편, 이러한 개념은 FRP제의 용기에도 적용되어 미국을 중심으로 규격화가 되어 있다¹²⁾.

4. 용접에 있어서의 AE응용

용접분야에 있어서의 AE의 응용은 ①파괴 시험과 병행한 용접부 재질의 평가, ②용접 구조물 부재에 대한 비파괴적 결함 검출 그리고 ③용접공정중에서의 이상 현상들의 on-line monitoring에 초점이 맞추어져 있다. 이하에서는 각각에 대해서 대표적인 예만을 간단히 소개하기로 한다.

4.1 용접부 평가법으로서의 AE

4.1.1 용접부 재질평가

상기와 같이 세가지 측면의 응용대상중에 ①의 AE에 의한 용접부의 재질 평가는 다른 분야에 비해 연구의 강도가 그다지 높지 않는 감이 있다. 그 중에서도 AE를 이용한 용접부의 미시적 파괴기구의 해명에 관한 연구가 일반적인 재료 평가와 함께 다수 이루어져 왔으며, 특히 변형/파괴거동에 미치는 용접조건 및 열처리의 영향등¹³⁾이나, 용접부의 피로 진전 거동에 관한 연구^{14, 15)}들이 주류를 이루어 왔다. 여기서 피로 파괴에 관한 연구는 구조물의 사용환경하에서의 균열감시 수단으로서 AE를 응용기 위한 기초 연구가 대부분이다. 내용으로서는 균열의 위치 표정과 더불어 피로균열 진전량과 AE 신호의 방출수와의 관계도출등에 목적을 두고 있다. Handa등¹⁵⁾은 고속증식로의 냉각계 배관의 안전감시 수단을 확립하기 위해서 SUS304강재의 T자 용접부에 대해서 피로 실험을 행하고, Fig.5와 같은 결과를 제시하고 있다. 그들은 이 연구 결과를 통하여, AE신호의 검출에 의해 균열의 발생 위치를 정확히 검지 할 수 있다는 것과, AE 신호 방출 활성도의 조사에 의해 균열진전 양을 예상 할 수 있음을 보였다. 또한 균열이 관통되기 훨씬 전부터 높은 활성도의 AE가 검출되어 표면 균열의 피로에 의한 진전 및 관통을 사전에 검지 할 수 있음도 아울러 설명했다. 한편 Watanabe등¹⁶⁾도 SUS304의 용접부 인장시험을 실시하면서 AE실험을 병행하고, 용접

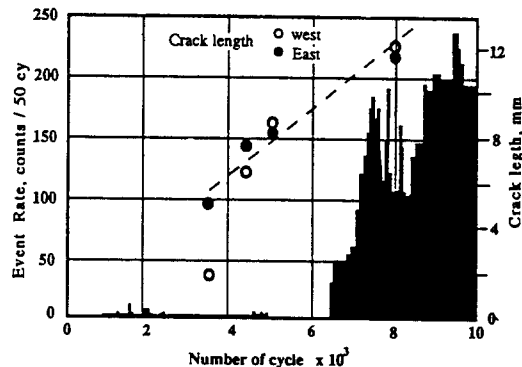


Fig. 5 Relation between surface crack length and acoustic emission count (ref. 15)

결합이 많을 수록 결합 선단에서의 소성변형 단계에서 부터 AE신호의 활성도가 높은 것에 주목하여 AE에 의한 용접부의 판정기준의 작성을 시도 했다.

4.1.2 Martensite 변태와 AE

AE신호 발생원중에 중요한 것중의 하나로 마르텐사이트 변태를 들 수 있다. Speich등¹⁷⁾은 일반 탄소강의 용해후 냉각 속도의 차이에 의한 생성 조직의 변화를 유도하고 여러가지 조직의 생성에 따른 AE신호의 발생 거동을 관찰 한 결과, 마르텐사이트 조직이 생성 될때 매우 높은 에너지의 신호가 방출됨을 실험적으로 증명했다. 또한 그들은 탄소 함유량에 따른 마르텐사이트의 생성량의 차이도 AE신호의 발생거동이 대변하고 있음을 보였다. 이러한 마르텐사이트 변태와 AE방출 관계를 용접공정에 응용시킨 일례로서 Liu등¹⁸⁾의 연구를 들 수 있다. 그들은 AISI4340강에 대해서 건전한 용접부, 기공(porosity)을 갖는 용접부 그리고 마르텐사이트 변태를 유도한 세가지 조건의 용접공정중에서 방출되는 AE신호를 해석하고, Fig 6과 같이 각각의 용접조건에 따라 방출되는 신호의 특성이 다름을 설명함과 동시에 용접공정중에서 방출되는 신호의 발생원은 Fig 7과 같은 같이 특징화시키는 것이 가능함을 보였다. 또한 이러한 결과를 통하여 용접후 균열을 야기시키는 마르텐사이트 변태를 적극적으로 로 제어 할 수 있는 기본적인 개념을 정리했다.

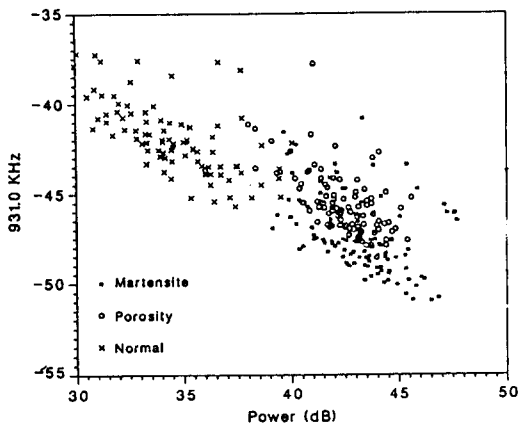


Fig. 6 Feature space plot for martensite formation-porous weld, sound weld.(ref. 18)

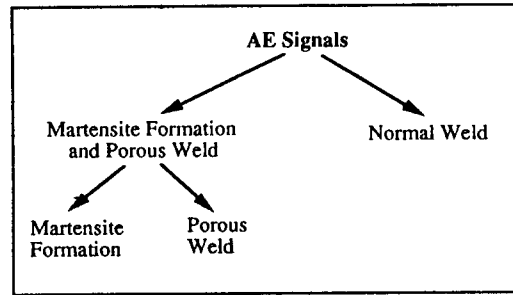


Fig. 7 Classification of acoustic emission signals (ref. 18)

4.1.3. 육성용접부의 박리와 AE

고온고압의 수소를 취급하는 석유 정제 탈유장치에서 내면육성 용접부의 박리 현상이 자주 발견되고 있는데 이러한 현상을 AE를 응용하여 검출하려는 시도도 행하여 졌다. Yuyama등¹⁹⁾은 2.1/4 Cr-1Mo강에 5mm의 스테인레스 육성용접을 행하고 AE기법을 적용하여 수소에 의한 박리현상을 정량적으로 평가 했다. 그들은 이 실험을 통하여 AE신호의 발생거동과 초음파탐상에 의한 박리균열의 발생여부를 확인한 결과 두결과가 일치함을 보이고, 직경 10 μ m의 박리 균열까지 AE로 검출이 가능하다고 설명하고 있다.

4.1.4 각종압력용기및 수송관의 용접부위의 평가

각종 수송관이나 압력용기등은 거의 용접에 의해서 제작되는데, 이러한 용접 부위에 존재하는 균열의 성장이 구조물의 기능을 정지시킨 수 많은 예가 있었다. 이러한 이유에서 용접부에서의 균열을 감시하는 수단으로서의 AE응용이 활발하게 검토되어 왔다. 여기서는 2,3절에서 언급한 바와 같이 구조체 내부에 존재하는 균열의 위치 표정에 관한 연구와 측정 대상체내에 존재하는 결함의 위해도를 판정하는 기준을 결정하기 위한 연구가 주로 행하여져 왔다. Jeong²⁰⁾등은 화학공장의 파이프라인 용접부에서의 균열 진단을 정량적으로 검출하기위한 실험실적 연구를 통하여 용접부의 균열의 진단에 대응하는 AE신호가 매우 낮은 주파수 성분을 갖는 것을 알았다. 이것에 착안하여 Fig.8과 같이 파피역학적 개념과 연속적인 AE계측을 병용한 비파괴적

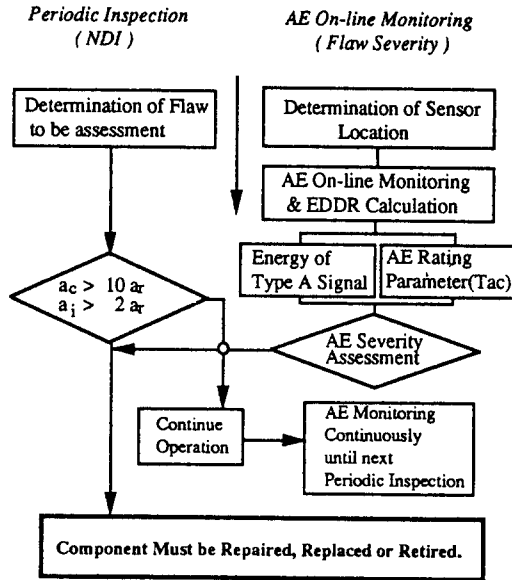


Fig. 8 Structural integrity assessment procedure based on acoustic emission monitoring and fracture mechanics concepts. (ref. 20)

평가 절차를 제안 했다. 여기서는 먼저 저주파역 AE신호의 축적에너지와 균열진전량의 상관관계를 도출해놓은 다음, 운전중에 방출되는 저주파역 AE 신호의 축적 에너지를 연속적으로 감시하면서 보수여부 및 정밀검사를 결정하는 단계를 밟고 있다. 이와 같이 구조물의 안정적 운전을 위한 비파괴 검사법으로서의 AE의 응용에 관한 연구는 압력용기나 수송관이외에도 수많은 대상을 가지고 있다. 예를들어 보일러의 Steam line²¹⁾, Boiler Head²²⁾, Turbine Rotor²³⁾, 교량²⁴⁾등과 같은 각종구조물의 균열 거동을 비파괴적으로 검출하기 위한 연구도 적극적으로 진행되어 왔다.

이와 같이 각종 용접 구조물의 현상태 진단을 위한 AE의 적용은 매우 큰 잠재력을 가지고 있다. 여기서 이와 같은 잠재력을 현실화 시키기 위해서는 반드시 해결해야 할 사항들이 있다. 즉, 대상에 따라서는 상당한 환경잡음 또는 진동이 동반되는 경우가 있는데, 이때 목적으로 하는 AE신호이외의 잡음을 여하히 완벽하게 제거하느냐가 중요한 과제로 남는다.

4.1.5 AE에 의한 코팅층의 평가

AE의 성공적인 응용예중의 하나로 코팅층의 평

가를 들 수 있다. 코팅층의 평가에 있어서 유의해야 할 점으로는 다음 세가지를 들 수 있다²⁵⁾. 즉, ①코팅 처리중에 생기는 결함의 존재, ②모재에 대한 코팅층의 접합력 그리고 ③ 여러형태의 응력이 작용 할 때의 코팅부의 건전성등을 들 수 있다. 이중에서도 대부분의 코팅 부위는 내열을 목적으로 하고 있기 때문에 열응력에 의한 열충격 또는 열피로 특성을 정량적으로 평가하여야만 한다. 기존의 열충격이나 열피로 시험법들은 많은 노력과 시간을 필요로 하는 반면, AE를 적용시킴으로 해서 보다 정량적인 열특성을 간단하게 검토 할 수 있다. Yoshioka등²⁶⁾은 스테인레스강 표면에 플라즈마에 의해 $Zr_2-Y_2O_3$ 코팅층을 만든 다음 열싸이클을 가하면서 AE를 측정했다. 여기에서 그들은 Y_2O_3 의 함유량이 적은 경우에 AE신호의 방출수가 감소하는 것으로 부터, 코팅작업중에 생성되는 porosity와 미세균열의 양이 Y_2O_3 함유량에 관계하고 있음을 보였다. 한편, Hira 등은²⁷⁾여러 종류의 조성치를 갖는 Al_2O_3 와 Cr_2O_3 의 분말을 이용한 플라즈마 코팅층을 만들어 AE를 병용한 열피로 시험을 행하고 Fig.9와 같은 결과를 도출하면서, 70% Al_2O_3 -30% Cr_2O_3 의 성분이 가장 안정된 박리특성을 가지고 있음을 설명했다. 또한, 용사피막 구조의 불균질성이 나 박리성들이 AE방출특성과 밀접한 관계가 있음을 보였다. 근래에들어 이와같이 내열재료들의 AE를 이용한 열특성 평가법의 확립을 위하여 다각적인 연구들이 진행되어

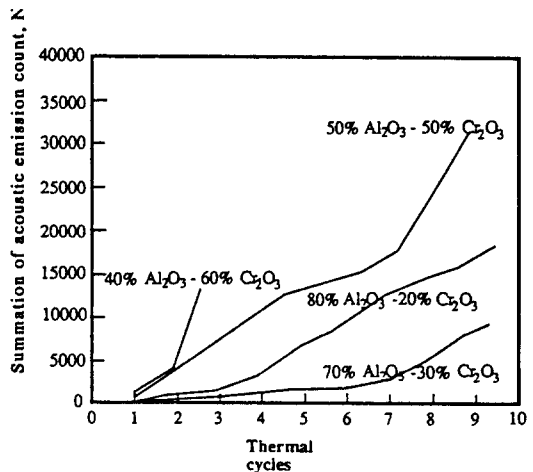


Fig. 9 Variation of acoustic emission count due to the thermal cycles in Al_2O_3 - Cr_2O_3 coating materials. (ref. 27)

나름대로의 시험방법들을 제시하고 있다²⁸⁻³⁰). 그리고 코팅층의 대기중 파괴시험중에 AE를 측정 함으로서 코팅층의 미시균열 생성 및 열화도를 평가하는 연구 결과도 나오고 있다²⁵).

4.1.6 AE에 의한 접착강도의 평가.

한편, AE기법은 접착제의 강도 평가에서도 이용되고 있다. 접착부의 신뢰성을 확보하기 위해서는 접착부에서의 미시 균열 개시조건을 우선적으로 평가하여야만 한다. 이러한 관점에서 Takahashi 등의 연구³¹⁾는 접착제 평가에 있어서 AE의 적용이 매우 타당하다는 것을 보여주고 있다. 그들의 대표적인 결과의 하나로써 Fig.10를 들 수 있다. 그림을 보면 파단하중의 50% 정도의 부하에서 높은 에너지의 신호가 검출되기 시작하는데, 이미 이부하 조건에서 미시적 파괴가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그들은 AE 신호의 에너지가 급증하기 시작하는 하중을 이용하여 파괴인성치를 구하였으며, 이렇게 구한 값들은 접착강도의 정도 향상뿐만 아니라 품질관리 면에서도 매우 유용함을 역설했다. 한편에서는 각종

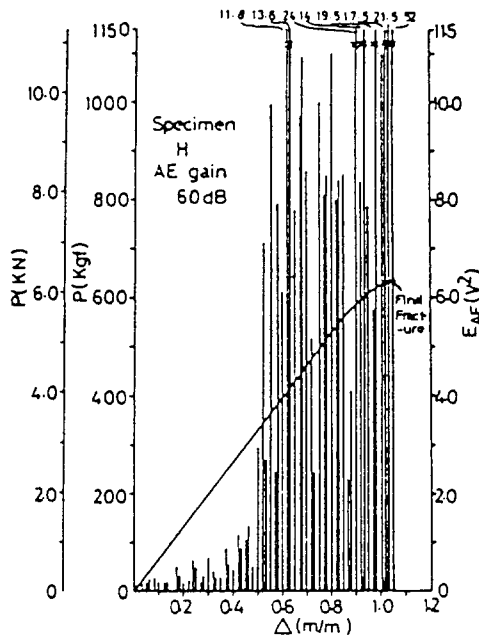


Fig. 10 Typical example of load-displacement curve and AE emitted at 2sec interval obtained in tensile test of adhesive specimen (rdf. 31)

접착제의 AE를 이용한 파괴강도와 미시파괴 과정 평가에 관한 연구^{32,33)}도 이루어 졌다.

4.1.7. 고상접합과 AE

최근 들어 활발하게 진행되고 있는 브레이징(brazing)도 AE연구에서 취급하고 있는 주요한 대상중의 하나이다. AE와 브레이징을 연관 시킨 연구는 브레이징 접합부의 강도평가와 브레이징에 의한 AE센서의 개발등을 들 수 있다. 현재 생산되고 있는 센서는 대부분이 압전세라믹(PZT)를 금속마운트에 접착제를 사용하여 고정시키는데, 접착부위가 고온에서는 열경화 그리고 저온에서는 열수축에 의한 영향으로 접합면에서 박리가 일어나기 쉽다. 또한 고온에서는 사용 할 수 없는 단점을 안고 있다. 최근에 들어 AE를 고온 구조물의 진단 수단으로 적용코져 하는 움직임에 발 맞추어 브레이징에 의한 내열 AE센서의 개발도 실행되고 있다³⁴⁾.

그리고 각종의 고상 접합공정중에 열팽창 계수의 차이에 의해 발생하는 접합 부위의 미시균열을 제어하는 기술이 요구되고 있다. 이에 대한 해결책을 찾기 위해서는 균열의 발생기구를 실험적으로 해석하는 한편 균열발생 조건들에 대한 정보가 우선적으로 필요하다고 생각된다. 이러한 정보를 얻는데에도 AE의 응용 한다면 좋은 결과를 도출해 낼 수 있을 것으로 생각된다.

4.2 용접공정중에서의 AE

전술의 용접부평가를 위한 AE에 대해서는 많은 연구가 활발하게 진행되어 왔으나 용접공정중에서의 응용은 용접공정이 갖는 수많은 난점들 때문에 제한적으로 이루어져 왔다. 이하에서는 일반적인 사항과 더불어 특수한 용접에 있어서의 AE응용의 적용예를 소개하기로 한다.

4.2.1. 다층용접과 AE

일반적인 용접부의 비파괴적 검사는 전체적인 용접공정후에 이루어지기 때문에 각층간에 균열이 발생된다 했을 때는 품질 및 공정상에 문제를 발생하게 된다. 이러한 사항을 극복하기 위해서는 가능한 빠른 시간안에 한 용접공정중 발생된 균열을 비파괴적으로 검출할 필요가 있다. 이때문에 용접중

발생되는 균열을 AE를 이용하여 검출하려는 많은 연구가 수행되어 왔다^{33,34}. 그러나 용접중에는 필연적으로 AE검출을 방해하는 다음과 같은 요인들이 존재하게 된다. 즉,

- ① 결합에 관계 없이 용융금속의 냉각과정에서의 응고 및 변태에 의한 소리의 방출.
- ② 아-크 용접에 있어서 발생하는 “아-크 잡음”
- ③ 슬래그의 파단 등에 의한 잡음등을 들 수 있다.

결합발생을 on-line으로 검출하는 수단으로서 AE를 사용하기 위해서는 이와 같은 방해요인들을 목적으로 하는 신호와 구별시키는 특별한 방법들이 필요하게 된다. 이를 위해서 몇몇의 연구들이 행하여져 왔으며 그중에서도 Kwon³⁵ 등은 SAW용접중에 방출된 모든 신호들에 대해 패턴 처리를 행한 결과 인위적으로 발생시킨 고온균열의 생성에 의해 방출되는 AE신호를 다른 프로세스에 의한 신호들과 분리시키는 것이 가능하다는 것을 보였다. 향후 다층 용접중의 결합생성을 보다 정량적으로 검출하기 위해서는 많은 연구가 수행되어야 하리라 본다.

한편 용접후에 시간적인 여유를 가지고 발생하는 저온균열에 대해서는 상기의 세가지 난점들이 큰 영향을 미치지 않기 때문에 비교적 간단하게 측정할 수 있을 것으로 여겨진다.

4.2.2 spot용접과 AE

Resistance spot용접에 있어서 그 공정은 일반적으로 Fig.11과 같은 분류 할 수 있다³⁶. 그림에는 이러한 용접과정에 있어서 일어나는 AE신호의 응답도 함께 표시되어 있다. 먼저 용접재료에 전극이 와닿을 때와 압착이 행하여 질때 신호가 방출되며, 전극의 형상조건과 용접재의 표면에 따라 방출특성이 달라진다.

두번째로 발생되는 신호는 전류가 흐르기 시작하는 단계에서 발생되는데, 그의 발생원으로서 소성변형, nugget형성, 마찰 그리고 용융과 팽창등을 들 수 있다. 이중 nugget형성에 관계하는 신호가 높은 에너지를 가진다고 알려져 있으며, 이때 발생하는 신호는 spot용접부의 특성을 대변하는 정보를 가지고 있다. 용접전류가 차단된 후에도 응고에 의한 신호가 방출되며, 이 신호에 의해 nugget의 크기와 inclusion에 관한 정보를 얻을 수 있다. 또한, nugget이 응고되는 과정에서 상변태가 일어나거나 균열이 발생되는 수도 있는데 이러한 현상도 AE신호를 방출하게 된다. 여기서 nugget크기는 용접부의 건전성에 직접적인 영향을 주는 것으로 이를 적당하게 제어 할 필요가 있고 이러한 제어 수단으로서 AE를 응용 하려는 노력이 계속되어 왔다. Fig.12는 용접입열조건을 일정하게 하고 nugget 크기를 인위적으로 변화 시켰을 때의 AE방출의 관계를 나타낸

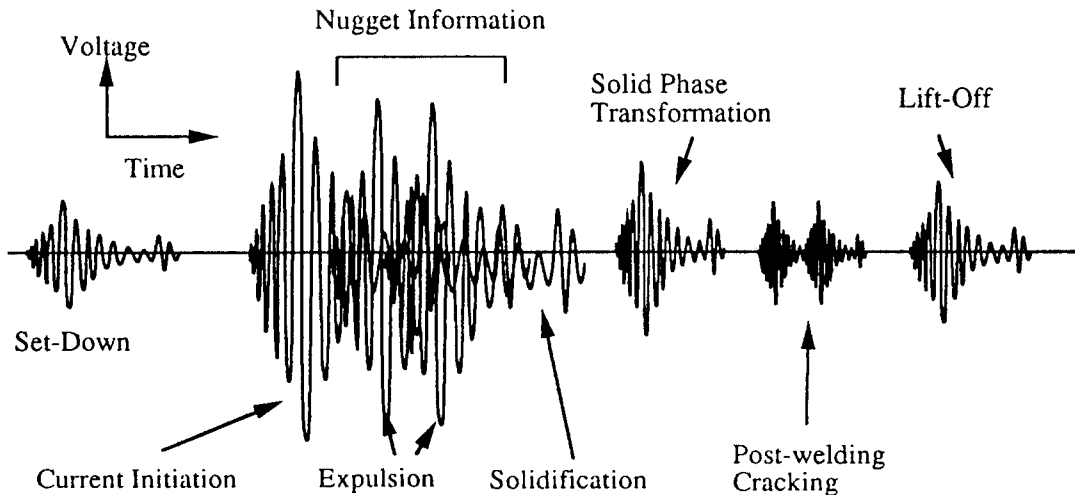


Fig. 11 Typical acoustic emission response signals during resistance spot welding

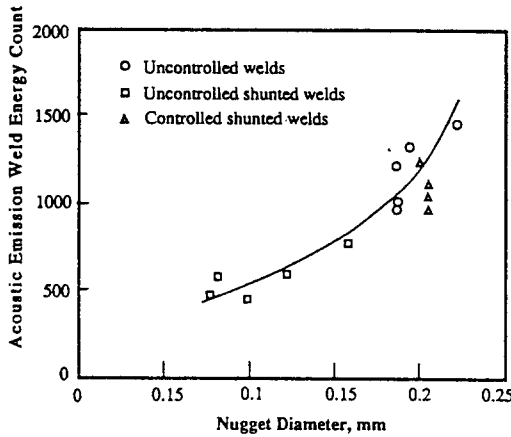


Fig. 12 Effect on nugget size from adjacent weld shunting (ref. 38)

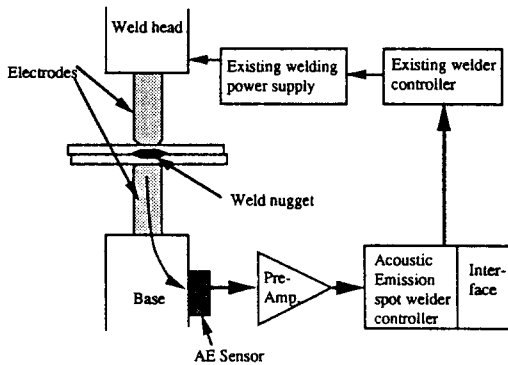


Fig. 13 Acoustic emission feedback control of the spot welding process. (ref. 6)

것으로, AE신호의 방출수를 조사하는 것에 의해서 nugget의 크기를 예상할 수있음을 알 수 다³⁹⁾. 한편 다각적인 결과들의 통합에 의해 Fig.13고 같이 Spot 용접에 있어서의 최적용접부를 얻기 위한 AE적용 시스템³⁹⁾이 제안되고 있다.

이와 같은 Spot용접에서의 AE응용은 전자부품의 가공에도 적용된 보고⁴⁰⁾가 있다

4.2.3 Electroslag용접에 있어서의 AE

Electroslag 용접은 낮은 경비와 용접변형이 적은 이점 때문에 후판의 용접에 매우 적절한 방법으로 적용되고 있다. 그러나 다른 용접법들과는 달리 작업자가 용접중에 직접 용접부위를 관찰 할 수 없다는

단점을 안고 있다.이러한 단점을 보완하는 수단으로 AE를 적용할 수 있다는 보고가 Schwenk⁴¹⁾등에 의해서 이루어 졌다. 그들은 Fig.14와 같이 Electroslag용접시에 AE를 동시에 측정하면서, 공급되는 플럭스의 양과 와이어의 공급속도 그리고 용접중에 형성되는 균열이 AE신호의 발생 특성에 어떠한 영향을 미치는 가를 검토 했다. 여기서 용접중에 플럭스의 양과 와이어의 공급속도 그리고 용접중에 형성되는 균열이 AE신호의 발생 특성에 어떠한 영향을 미치는 가를 조사했다. 특히 용접중에 플럭스의 양이 모자랄 때에 AE신호의 에너지가 증가하는 것에 착안하여 Fig.15와 같이 AE에너지가 증가 하는 단

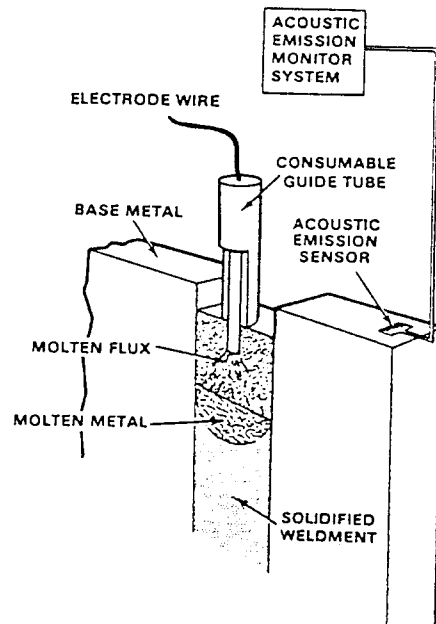


Fig. 14 Simplified schematic of acoustic emission-electroslag weld test arrangement. (ref. 41)

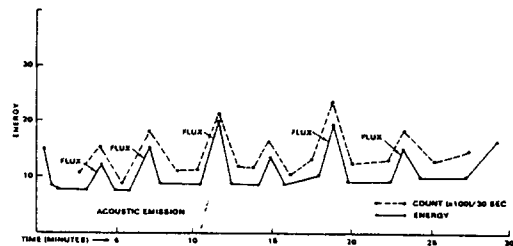


Fig. 15 Broadband acoustic emission system response during electroslag weld. (ref. 41)

계에서 플럭스양을 증가 시킴으로써 AE신호의 에너지를 인위적으로 감소시켰다(그림에는 플럭스의 증가후에 AE신호의 응답이 약간 늦게 나타나고 있다). 이러한 과정을 통하여 얻은 용접부위에 대해서 X-ray투과 시험을 실시한 결과 무결함의 양호한 용접부를 얻었음을 보고 하고 있다. 한편, 플럭스 공급량의 조절과 함께 와이어의 공급속도도 변화시켜 가면서 AE특성을 조사하여 최적의 용접 조건을 검토 하였다. 그리고 비정상적인 조건하에서 용접을 하면서 복수의 AE센서를 이용하여 용접중에 생성되는 균열의 위치를 검지하였다. 이들의 연구 결과중에서 특기할 만한 사항은 용접중에 발생하는 잡음이 실험결과에 큰 영향을 미치지 않는다는 점과, AE신호를 정리하는데 있어서 에너지의 상대적인 크기에 기준을 두었기 때문에 AE측정 조건이 까다롭지 않다는 점이다.

5. 결 론

용접과 관련되는 분야에서, 재료평가와 비파괴 검사법으로서의 Acoustic Emission의 응용을 살펴 보았다. 재료 평가법으로서의 AE는 다른 시험 방법들이 검출해 내지 못하는 재료 내부에서의 미시적인 현상들을 정량적으로 평가 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 앞으로 새로운 용접재료의 개발이라든지, 고도의 신뢰성이 요구되는 용접부위의 정량적인 평가를 위해서 AE의 응용은 중요한 정보들을 제공하게 될 것이다. 한편 용접구조물의 비파괴적 평가법으로서의 AE는 균열의 동적인 거동 및 균열의 위치를 검지 할 수 있다는 장점 때문에 응용범위는 더욱 더 넓어질 것이다. 여기서 유의해야 할 점은, 목적으로 하는 AE신호를 수만배 까지 증폭시키는 과정에서 환경잡음의 영향을 무시할 수 없는 경우에는 우선적으로 잡음을 적극적으로 제거하는 고도의 연구도 함께 병행되어야 한다는 것이다.

용접분야에서의 전반적인 AE 응용을 한편의 기사로서 설명한다는 것은 매우 어려운 일이라 생각한다. 다만, 용접관련 실무자 및 연구자들께서 본 기사의 내용을 이용하여 AE를 이해하고 자신의 업무에 조금이나마 보탬이 되었으면 한다.

참 고 문 헌

1. 鄭熙敦: AE周波數解析による材料の微視破壞過程の破壞力學的評價に關する研究, 日本東北大學學位論文, 1987
2. E. P. Papadakis: Physical Acoustics and Microstructure of Iron Alloys, Int'l Met. Rev., Vol. 29, No. 1, (1984), 1~23
3. A. F. Vargas: Acoustic Emission for Quality Control in Composites, Fabricating Composite Conference, Jun. 12, 1985
4. R. Groenwald: Acoustic Leak Detection for Reactor Coolant Systems, Nuclear Eng. & Design, 86(1985), 13~20
5. EPRI: Acoustic Emission Monitoring of Steam Turbines, EPRI CS-2367 Final Report, Apr.(1982)
6. R. K. Miller and P. McIntire: Nondestructive Testing Handbook-Vol. 5, Acoustic Emission, ASNT, 2nd Edition(1987)
7. 鄭熙敦: Acoustic Emission의 工學的 利用을 위한 基礎, 大韓機械學會誌(1993) 印刷中
8. T. J. Holroyd: Acoustic Emission from an Industrial Application Viewpoint, J. of Acoustic Emission, Vol. 7, No. 4(1988), 193~199
9. P. B. Blackburn and M. D. Rana: Acoustic Emission Testing and Structural Evaluation of Seamless Steel Tubes in Compressed Gas Service, Trans. of the ASME, Vol. 108, May(1986), 234~240
10. I. Sato, T. Yoneyama and M. Yanagibashi: Machine Condition Diagnosis System using Acoustic Emission Technique and Application to Diagnosis to Roll Bearing, JSND, Vol. 38, No. 5(1992), 432~438
11. 日本非破壞協會規格: 高張力鋼を用いた球形タンクのア-コステイシクエミシソ試験方法と實驗結果の等級分類方法, NDIS2412~80
12. ASNT: Acoustic Emission Tests of Fiber Reinforced Plastic Vessels, Ref. 6, 203-212
13. C. P. Debel, A. Niesen and W. E. Swindlehurst: Acoustic Emission from structural Steels and Weldments, Met. Sci., Vol. 15, (1981), 492
14. D. O. Harris and H. L. Dunegan: Continuous Monitoring of Fatigue-Crack Growth by Acoustic Emission Technique, Exp. Mech., Feb. (1974), 71
15. 飯田 等: ス테인レス鋼 大球徑T字疲勞試片におけるAE連續監視, Nat'1 Conf. on AE. JSNT Oct. (1981), 93~98
16. 渡邊 等: ス테인レス鋼 SUS 304溶接部のAEによる缺陷評價, Nat'1 Conf. on AE. JSNT, Nov.

- (1989), 31~36
17. G. R. Speich and A. J. Schwoeble : Acoustic Emission during Phase Transformation in Steel, STP 571, ASTM(1975), 40
 18. X. Lie and E. Kannatey : Classification of AE signals for monitoring martensite formation from welding, Welding J. Oct. (1990), 389
 19. 邊山 等 : AE波形解析による肉盛溶接部 剝離の定量的評價 Nat'1 Conf. on AE, JSNT Nov. (1985), 36~41
 20. H. D. Jeong and H. Takahashi : On-Line Evaluation Procedure for structural Integrity by Acoustic Emission Frequency Analysis-Weld Defects Containing, Pro. PVP, ASME PVP Conf. (1989), Hawaii, 107~112
 21. E. Ammenday, G. Grugini and C. Pazami : On-Line Acoustic Emission Monitoring of Welds of the Stainless Steel steam Lines in a Thermal Power plant, Pro. 3rd AE Symp. (1976), 442~541
 22. J. M. Carilye, R. S. Evans and T. Sherlock : Acoustic Emission Characterization of a Hot Reheat Line Rupture, Ref. 20 113~119
 23. I. Sato, T. Yoneyama : Rotating Machinery Diagnosis with Acoustic Emission Technique, J. of AE. Vol. 2, Np1/2, (1983), 1~9
 24. Z. Gong, E. O. Nyborg : Acoustic Emission Monitoring of Steel Railroad Bridges, Mat. Eval., Jul. (1992), 883~887
 25. 池田活治 等 : AE信號を用いたセラミックスコテイツ層の評価 Pro. 2nd Symp. on NDE for New Mat., JSNT Dec. (1987), 157~162
 26. T. Yoshioka, K. Shinohara : Acoustic Emission and Microstructural Variation of Plasma-sprayed ZrO_2 - Y_2O_3 Coatings during Thermal Cyclings, Pro. of AE IV, JSNT (1988), 605~218
 27. 平等 : セラミックス溶射被膜の昇降温度に伴う AE發生舉動, Nat'1 Conf. on AE, JSNT Oct. (1987), 214~218.
 28. 鄭熙敦 等 : AEを用いたセラミックス 熱衝擊破壊試験, Ref. 25의 169~174
 29. 石田,西川 : AE法によるセラミックコーティング膜の評価, ibid, 163~168
 30. T. Hashida, H. Takahashi : Laser/AE technique for Evaluating the Thermal Shock Resistance of Functionally Gradient Materials, Pro. of AE V., (1990), 66~74
 31. 高橋 等 : AE法による絶縁形ヒートシールド接合部の破壊強度評価と品質管理, Nat'1 Cnof. on AE, JSNT Oct. (1981), 136~141
 32. 佐藤等 : レツルツノ-ル木材接着部のAE實驗 6th Nat'1 Conf. on AE, JSNT Oct. (1987), 25~30
 33. 大川 等 : チタソおよびチタソ合金を接着したレツソンの破壊時におけるAEについて. 8th int'1 Conf. on AE, JSNT Oct. (1991), 265~270
 34. Y. Sato and Y. Taguchi : Development of Heatproof AE sensor for Rotating Machinery Diagnosis, ibid., 13~18
 35. C. F. Hung and Iner : Acoustic Emission Analysis of Flaws during Welding, 3rd Pan Pacific conf. for NDT, (1980), 97~106
 36. 石原,山田 : AEによる多層溶接のリウムタイル-モニタリング
 37. O. Y. Kwon, K. Ono : Monitoring of Submerged-Arc Welding by Acoustic Emission, Pro. AE IV, (1988), 114~120
 38. V. C. Paek, S. J. Vahaviolos : Thermal analysis of Capacity Discharge welding and Its Correlation with Observed Stress Wave Emission, J. Eng. Mat. Test., Oct. (1977), 379~386
 39. S. J. Vahaviolos : Method and Apparatus for the Real Time Evaluation of Welds Emitted Stress Wavws, US Patent, 3.965.726., Jun. (1976)
 40. G. C. Knoliman and J. L. Weaver : Evaluation of An Acoustic Emission Monitor for On-Line Quality Control in Spot Welding of Electronic Components, 3rd AE Symp. (1976), 413~427
 41. E. B. Schwenk, G. D. Shever : Monitoring of Electroslag Welding by Acoustic Emission, ibid., 428~441