

패턴인식을 이용한 고장력강의 용접
구조건전성 평가에 대한 음향방출 사례연구
- Acoustic Emission Studies on the Structural
Integrity Test of Welded High Strength Steel
using Pattern Recognition -

김길동* · 이장규**

Kim Gil-Dong* · Rhee Zhang-Kyu**

Abstract

The objective of this study is to evaluate the mechanical behaviors and structural integrity of the weldment of high strength steel by using an acoustic emission (AE) techniques. Simple tension and AE tests were conducted against the 3 kind of welding test specimens. In order to analysis the effectiveness of weldability, joinability and structural integrity, we used K-means clustering method as a unsupervised learning pattern recognition algorithm for obtained multivariate AE main data sets, such as AE counts, energy, amplitude, hits, risetime, duration, counts to peak and rms signals. Through the experimental results, the effectiveness of the proposed method is discussed.

Keywords : Acoustic Emission(AE), Tensile Testing, Structural Integrity, Pattern Recognition, K-means, Clustering, Unsupervised learning

† 본 연구는 2007년도 충청대학 학술연구비 지원으로 수행되었음.

* 충청대학 품질경영과 교수

** 영평기계설비(주) 기술고문

1. 서 론

용접은 금속의 가용성을 이용하여 두개의 금속을 용융온도 이상으로 가열하여 접합하는 야금학적 접합법으로 각종 산업의 플랜트 설비나 제품의 사용에 따른 수리 및 보수에 있어서 필수적인 관리기술로 산업현장에서 용접이 차지하는 비중과 필요성은 널리 알려진 사실이다. 또한 현장에서 사용되고 있는 부재는 기술의 발전과 더불어 구조물의 설계가 합리화되면서 가볍고 충분한 강도를 지닌 이상적인 구조로 최적화되고 있지만, 에너지의 수요증대 및 생산설비의 합리화에 따른 구조물의 대형화와 사용조건이 가혹화 등으로 인하여 사용 도중에 예기치 못한 구조물의 갑작스런 파괴가 종종 큰 피해를 야기하고 있다. 이처럼 산업현장에서의 구조물은 복잡하고 다양한 구조를 갖기 때문에 용접자동화가 쉽지 않으며, 이로 인하여 피복금속아크용접(SMAW), 탄산가스아크용접(GMAW(CO₂)) 및 불활성가스텀스텐아크용접(GTAW/TIG) 등 주로 수작업에 의한 설비비가 싸고 쉽게 용접할 수 있는 용접법이 보편적으로 활용되고 있다.

한편 구조물이 대형화되고 사용조건이 가혹화됨에 따라 파손원인에 대한 해석 또한 대형사고의 방지차원에서 더 높은 안전성과 신뢰성 평가를 요구하고 있다. 그러나, 파손해석에서 기본이 되는 재료내의 미시적인 균열성장기구를 구분하고 감지하는 실험적 기술이 아직 정립되어 있지 않다. 따라서 손상량을 정량화하려면 어떠한 방법으로든 재료내의 미시적인 거동을 측정할 필요가 있게 된다. 여기서 도입하고자 하는 음향방출법(AE, acoustic emission)은 재료의 변형과 파괴 등의 미소변화에 대한 고감도 검출이 가능하며 미시파괴의 동적측면을 규명할 수 있는 현재의 유일한 수단이기도 하다.(1)

본 연구에서는 용접한 고장력강(모재)에 대하여 인장시험이 가능한 형태로 시험편을 샘플링하고, 인장시험 중에 획득된 AE신호를 여러 차례에 걸쳐 후처리 하는 과정에서 여러 가지 AE 파라미터들에 대한 패턴인식을 행하여 용접재의 기계적 특성 및 구조건전성과 그 상관관계에 대해 보다 상세히 알아보하고자 한다.

2. 관련 이론

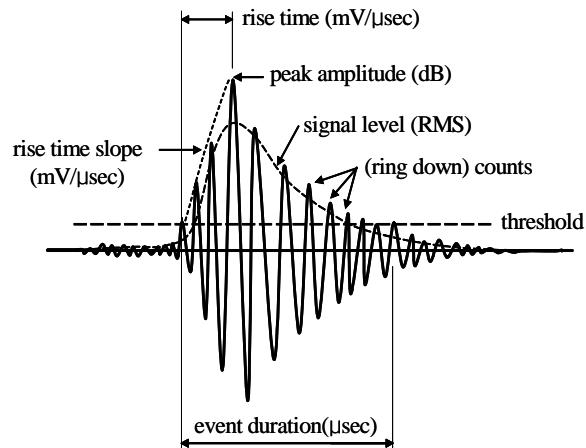
2.1 음향방출(acoustic emission)

부재나 구조물이 외부 혹은 내부에서 작용하는 하중에 의해 변형 또는 내부 균열의 발생과 성장에 따라 부재 내부에 에너지가 축적되고, 축적된 에너지는 파면형성에너지, 열에너지, 격자변형에너지 등의 형태로 공극의 형성과 더불어 급격한 해방에 의해 탄성응력파를 발생시킨다. 이때 발생한 탄성응력파는 부재나 구조물을 따라 사방으로 진동해가며, 압전센서에 의해 전기적인 신호로 계측 변환된 후 증폭되고 공학적으로 분석하여 응용하게 되는데, 이러한 기술을 음향방출법(이하 AE법)이라고 한다.

일반적으로 AE파형은 연속형(continuous type)과 돌발형(burst type)으로 구분한다.

돌발형 AE신호는 여러 종류의 음파들이 시간적인 간격을 가지고 센서에 도달하기

때문에 <Fig. 1>과 같이 시간축에 대하여 감쇠형의 모양을 갖게 되며, 그 모양은 일차적으로 재료 내부에서 해방되는 응력의 크기와 소요된 시간에 의해 결정된다. 이러한 형태의 신호는 파괴, 상변태, 응력부식 시에 주로 발생하며, 발생 에너지가 높고 비교적 발생률이 낮은 펄스형태를 갖는 것이 특징으로 이 신호는 재료가 파손에 가까워질수록 발생률이 증가하는 경향을 보인다.



<Fig. 1> Definition of AE parameters

또한 진폭분포의 특성을 파악하기 위해 Pollock 등(2)이 b-value를 제안하였는데, 이는 지진의 발생빈도와 규모를 나타내는 Gutenberg-Richter 진폭-빈도 관계식(3)으로 표현된다. 식에 의하면 대체로 b-value가 클수록 저진폭이 많아지고, b-value가 작을수록 고진폭이 많아진다. 그러므로 AE진폭은 고강도, 이방성 및 비균질 재료와 결함을 내포하고 있는 취성재료일수록 높게 나타나며, 진폭분포는 파손기구와 밀접한 상관관계를 가진다.

2.2 패턴인식(pattern recognition)

패턴이란 사람이 인지할 수 있는 물리적으로 표현된 정보의 외형을 말하며, 인식이란 패턴을 구체적인 부류로 확정하는 일을 말한다. 패턴인식은 일반적으로 '패턴→관측→(관측공간)→전처리→(패턴공간)→특징추출→(특징공간)→식별→인식결과'의 단계를 거친다.

일반적으로 관측된 자료는 다소의 불필요한 정보를 포함하고 있기 때문에 컴퓨터에서의 인식을 위해 필요한 자료만을 얻어내는 전처리를 하게 되고, 입력된 패턴을 인식하기 용이한 작은 단위로 분할하는 과정을 거친다. 또한 여러 가지 다른 환경 하에서 관측된 패턴은 동일한 패턴이라도 스케일이 크게 다르게 되는데, 인식을 위해서 크기, 길이 등의 정규화를 하게 된다. 특징추출 단계에서는 인식에 중요한 실마리가 되는 특

징을 얻어내고, 이 특징을 비교하여 패턴의 식별을 하게 된다. 여기서 각 단계는 절대적인 것이 아니며, 전처리, 분할, 정규화, 특징추출 등의 순서를 일부 바꾼다든지, 일부를 생략할 수도 있다. 특히 분할은 어려운 문제를 많이 포함하기 때문에 패턴을 완전히 인식하고 나서 비로소 분할이 가능한 경우도 많다.

한편 특징추출은 변형에 대하여 안정된 물리량을 추출하는 것으로, 정보의 손실없이 패턴의 차원을 줄여 중복성(redundancy)을 없애고, 인식에 필요한 시간 및 기억공간을 줄이는데 목적이 있다. 그리고 식별은 미지의 패턴이 주어졌을 때 그 패턴이 어느 범주에 속하는가를 결정하는 것이다. 일반적인 식별에 있어서 카테고리는 확정되어 있고, 그 식별함수도 이미 알고 있는 경우가 많다. 그러나 경우에 따라서 카테고리가 확정되어 있지 않거나, 카테고리가 정해져 있어도 그 안에서의 패턴의 분포가 흩어져 있어 한 개의 식별함수로 기술이 곤란한 경우도 있다. 여기서 패턴분포가 주어졌을 때, 같은 종류라고 생각할 수 있는 몇 개의 서브클래스(subclass)로 분할하는 것을 군집화(clustering)라 한다. 군집을 형성할 때에는 두 개의 패턴이 동일 군집에 속하는지 여부를 결정할 필요가 있으며, 패턴간의 거리를 정의해야 한다. 흔히 사용되는 방법에는 K-means 알고리즘과 Isodata 알고리즘 등이 있다.(4)

군집분석은 실험의 결과나 표본 등에서 얻어진 자료들을 어떤 성질에 따라 분류하여 동질적인 몇 개의 군집(cluster)으로 나누어 분류하고자 할 경우에 사용한다. 즉 이 기법은 n개의 개체를 대상으로 p개의 변수들을 측정하였을 때, 이 변수들을 이용하여 n개의 개체들 사이의 유사성 또는 비유사성의 정도를 측정하여 개체들을 가까운 순서대로 연결해 나가는 분석방법이다.

K-means은 군집의 수를 미리 정하고, 각 개체가 어느 군집에 속하는지를 분석하는 방법으로서 대규모의 자료에 대한 군집분석에 유용하게 이용되는 방법으로 이를 활용한 군집절차는 다음과 같다.

1. 초기화
모든 학습벡터와 최대반복횟수를 입력한다.
2. 군집 형성
모든 학습벡터에 대하여 임의의 중심 벡터와의 거리가 가장 가까운 중심벡터를 찾아 군집을 형성한다.
3. 중심점 갱신
형성된 군집에 존재하는 벡터들의 평균으로 중심벡터를 갱신한다.
4. 종료조건
모든 군집의 중심벡터의 이동이 없다면 종료하고 그렇지 않다면 2번부터 반복한다.

K-means에서 자료의 상호 연관성을 판단하는 지표로 통상 유클리드 거리 (Euclidean distance)를 적용한다. 즉 p-차원상의 두 관찰 값 $X=(x_1, x_2, \dots, x_p)$ 와 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_p)$ 간의 유클리드 거리는 다음 식과 같이 정의된다.

$$d(X, Y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_p - y_p)^2}$$

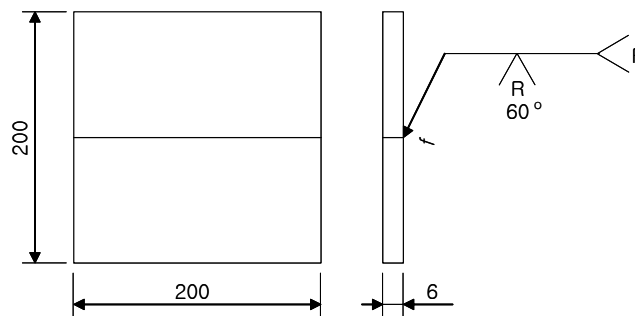
$$= \sqrt{(X - Y)^T (X - Y)}$$

3. 실험재료 및 실험방법

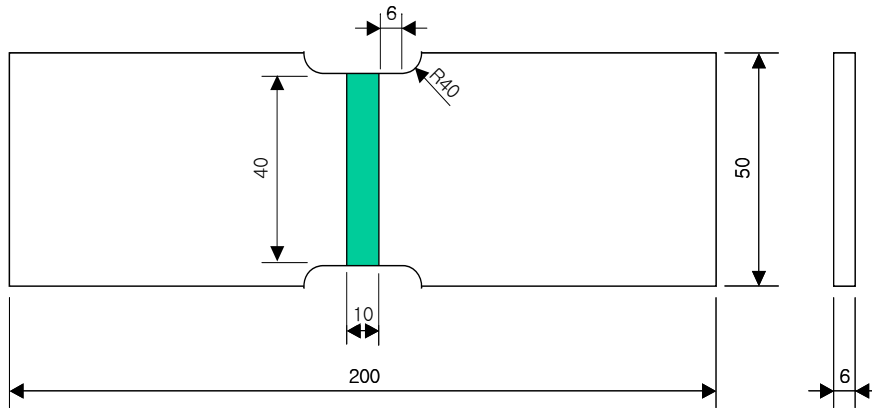
3.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 SMAW에 사용된 용접기는 AW-30의 교류아크용접기이며, 용접봉은 저수소계 E4316으로 크기는 $\phi 3.2 \times 350\text{mm}$ 이고, 심선은 저탄소 립드강으로 사용 전 $300 \sim 350^\circ\text{C}$ 에서 30분~1시간정도 건조시킨 후 사용하였다. GMAW(CO₂)에 사용된 용접기는 LG산전의 WAC-350A이며, 사용된 용접봉은 복합와이어로 크기는 $\phi 1.2 \times 20\text{kg}$ 이고, 실드가스로 CO₂가스를 사용하였다. 그리고 GTAW/TIG에 사용된 용접기는 인버터식으로 AC/DC 겸용인 WAT-300이며, 용접 시 불활성 가스는 알곤가스이고, 전극봉은 텅스텐 전극봉이며, 용접봉은 스테인리스 용가재를 사용하였다.

용접시험편의 모재(base metal)는 POSCO에서 생산한 SWS 490A 고장력강으로 동일한 배취(batch)에서 시료를 채취하였다. <Fig. 2>는 그 규격 및 용접방법으로 모든 시험편에 대하여 루트면(root face) f는 2mm로 하였으며, 루트간격(root opening) R의 경우 SMAW는 3mm, GMAW(CO₂)는 4mm, GTAW/TIG는 2.8mm로 하였다. 이렇게 용접한 모재는 외관 검사 및 초음파탐상 검사를 실시하여 용접부의 결합 유무를 확인하였으며, <Fig. 3>에서 보는바와 같이 KS B 0833 『맞대기 용접 이음의 인장 시험 방법』(5)의 규격에 따라 인장시험편을 제작하였다. 그리고 <Table 1>과 <Table 2>는 각각 시험편 모재의 화학적 조성과 기계적 성질이다.



<Fig. 2> Welding size and method(unit:mm)



<Fig. 3> Geometry of test specimen(unit:mm)

<Table 1> Chemical composition of SWS 490A(wt.%)

C	Si	Mn	S	P
0.086	0.065	1.29	0.018	0.004

<Table 2> Mechanical properties of SWS 490A

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
380	493	23

3.2 실험방법

본 연구에서는 Shimadzu사의 만능재료시험기(Autograph 25-TG, Japan)를 사용하여 모든 조건에서 2mm/min인 정속신장형 부하로 인장시험을 하였으며, PAC사의 AE계측시스템(Spartan 2000, USA)을 이용하여 AE 신호를 계측하였다. 한편 AE 계측 시 외부입력신호의 잡음을 줄이기 위하여 케이블의 양 끝에 페라이트 코어(ferrite core)를 사용한 커넥터(6~8)를 만들어 만능재료시험기의 아날로그 출력단자로부터 출력되는 하중 값을 AE계측시스템으로 전송하여 신호처리 시 용이성을 확보하였다.

AE 파형계측은 응력탄성파의 감쇠특성을 고려하여 R15(resonant frequency 150kHz) 공진형 센서를 용접부의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 각각 30mm 떨어진 위치

(센서#1(0, 30), 센서#2(0, -30))에 고진공 그리스로 시험편에 대칭이 되도록 압착시키고, 고정구와 절연테이프를 사용하여 단단히 고정된 후, 샤프심 압절법으로 캘리브레이션(calibration)을 실시하여 센서의 압착여부를 확인하였다.(9) 또한 1220A 전치증폭기의 이득(gain)은 40dB로 설정하였으며, BPF 100~300kHz의 대역에서 잡음을 제거하고, 10MSPS의 샘플링 간격으로 검출된 아날로그 신호를 다시 주증폭기에서 20dB 증폭하여 웨이브 메모리에 의해 디지털 데이터로 변환하여 기억시킨 후, PC에 전송하였다.

4. 실험결과 및 고찰

인장시험을 통해 얻은 (a) SMAW, (b) GMAW(CO₂) 및 (c) GTAW/TIG의 대표적인 결과를 <Fig. 4>에 도시하였다.

각 그림에서 ①의 막대그래프는 시간이력에 대한 AE카운트수로 통상 그 경향이 ②에서의 시간이력에 대한 AE에너지와 흡사한 경향을 가지며, 선그래프는 만능재료시험기의 아날로그 출력신호가 AE계측시스템의 외부신호 입력에 의하여 병합 처리된 하중-시간(또는 변위) 선도이다. 따라서 ①과 ②에서 시간이력에 대한 외부입력신호(UTM X-T mode에서의 하중 값) 및 외부입력신호인 하중 값에 대한 AE에너지로 Kaiser effect 또는 Felicity effect를 확인함으로써 재료의 손상 혹은 불안정한 상태의 발단을 파악하는데 활용할 수 있다. 또한 ②는 시간에 따른 외부입력신호와 AE에너지와의 관계를 나타내는 그래프로, 시간에 대하여 막대그래프의 형상이 사선을 따라 나타나는 것은 주어진 실험조건이 정속신장형 부하로 만능재료시험기의 크로스헤드 속도가 일정하기 때문이다. 그리고 ③은 ①과 ②를 기반으로 하여 작성한 시간에 따른 진폭분포와 AE에너지와의 관계이다. 한편 ④는 진폭분포에 따른 외부입력신호와 AE 이벤트(RMS-Noise)와 관계를 나타낸 것이며, ⑤는 진폭에 대한 누적AE이벤트(Hits)수로 진폭의 기울기 값인 b-value에 대한 경향을 나타내는 그래프이다.

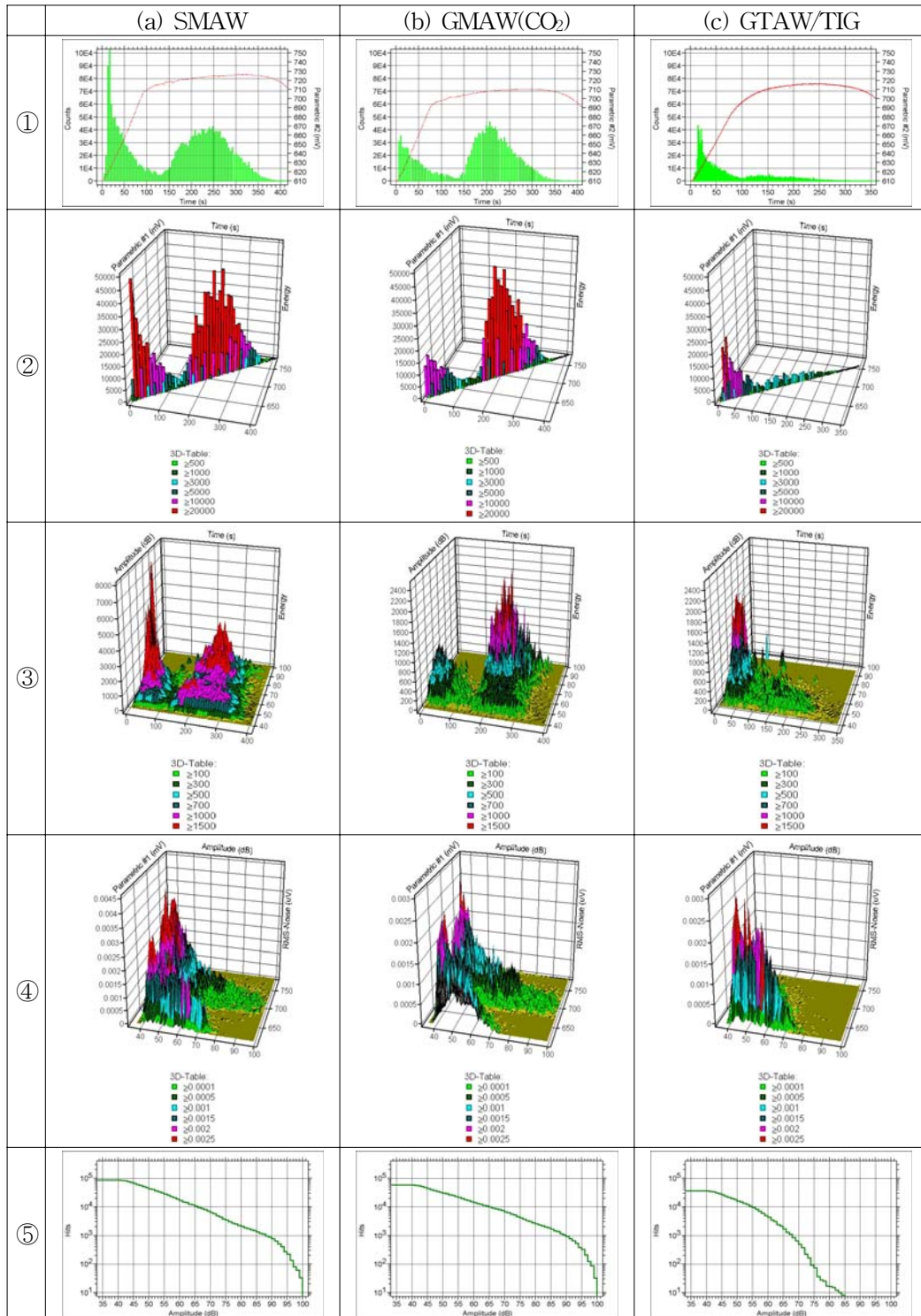
각 그림 ①(또는 ②)의 막대그래프에서 재료에 탄성 및 소성변형이 일어나는 인장초기 구간에서는 AE카운트수(또는 AE에너지)가 최대(1차 피크)에 이른 후 점차 감소하여 AE카운트수(또는 AE에너지) 그래프의 기울기가 매우 급하고, 재료에 소성변형이 마무리되고 크랙이 생성되는 구간에서는 비교적 AE의 방출량이 적어 기울기가 완만해지고 변곡점이 형성되며, 변곡점을 지나 생성된 크랙이 진전하는 구간에서는 또다시 AE카운트수(또는 AE에너지)가 증가(2차 피크)하여 그래프의 기울기가 급하게 나타나는 경향을 보였다. 그런데, (a)와 (b)의 경우에는 탄성 및 소성변형구간과 크랙의 생성 및 진전이 뚜렷하게 구분되는 변곡점이 있으나, (c)의 경우에는 뚜렷한 변곡점이 나타나지 않는 것으로 볼 때, 탄성 및 소성변형이 일어남과 동시에 크랙이 생성 및 진전된 것으로 보인다. 이는 아크 또는 그 이외의 열을 이용해서 용접한 경우 용접금속의 바깥쪽, 즉 용융선과 모재사이에 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)가 형성되며, 또한 열영향부에서 결정립의 성장속도는 용접 입열량, 모재의 열적, 기계적 이력 등이 관계되기 때문이다. 따라서 결정립의 성장, 2상(탄·질화물) 또는 입자의 고용 및 석출, 잔류응력 등이 발생하므로 열영향부의 성질은 용융역과 모재의 성질과는 아주 다르게

나타나며, 강재에 대한 열영향부의 기계적 성질은 마텐자이트 조직에 기인한 조립역의 신율이나 인성이 현격히 저하되어 용접부 조직 중에서 가장 취화된 특성을 갖는 것으로 생각된다. 또한 누적AE카운트수가 (a)>(b)>(c)의 순인 것으로 볼 때, 열영향부의 강도는 (a)의 SMAW가 가장 크고, (c)의 GTAW/TIG이 가장 작을 것으로 예상된다.

역시 ①의 하중-시간(또는 변위) 선도에서도 재료의 파단에 대한 저항성(인성)을 확인할 수 있다. 여기서 세로축의 값은 만능재료시험기의 아날로그 신호가 AE계측시스템의 외부신호 입력에 의하여 병합 처리된 것으로 예비인장시험에서 얻어진 최대하중 98kN을 해당전압으로 환산하여 도시한 것이다. 그림에서 하중-변위 선도의 면적(에너지 값)이 (a)>(b)>(c)의 순이므로, 본 연구의 실험조건에서는 재료의 인성이 (a)>(b)>(c) 순임을 알 수 있다.

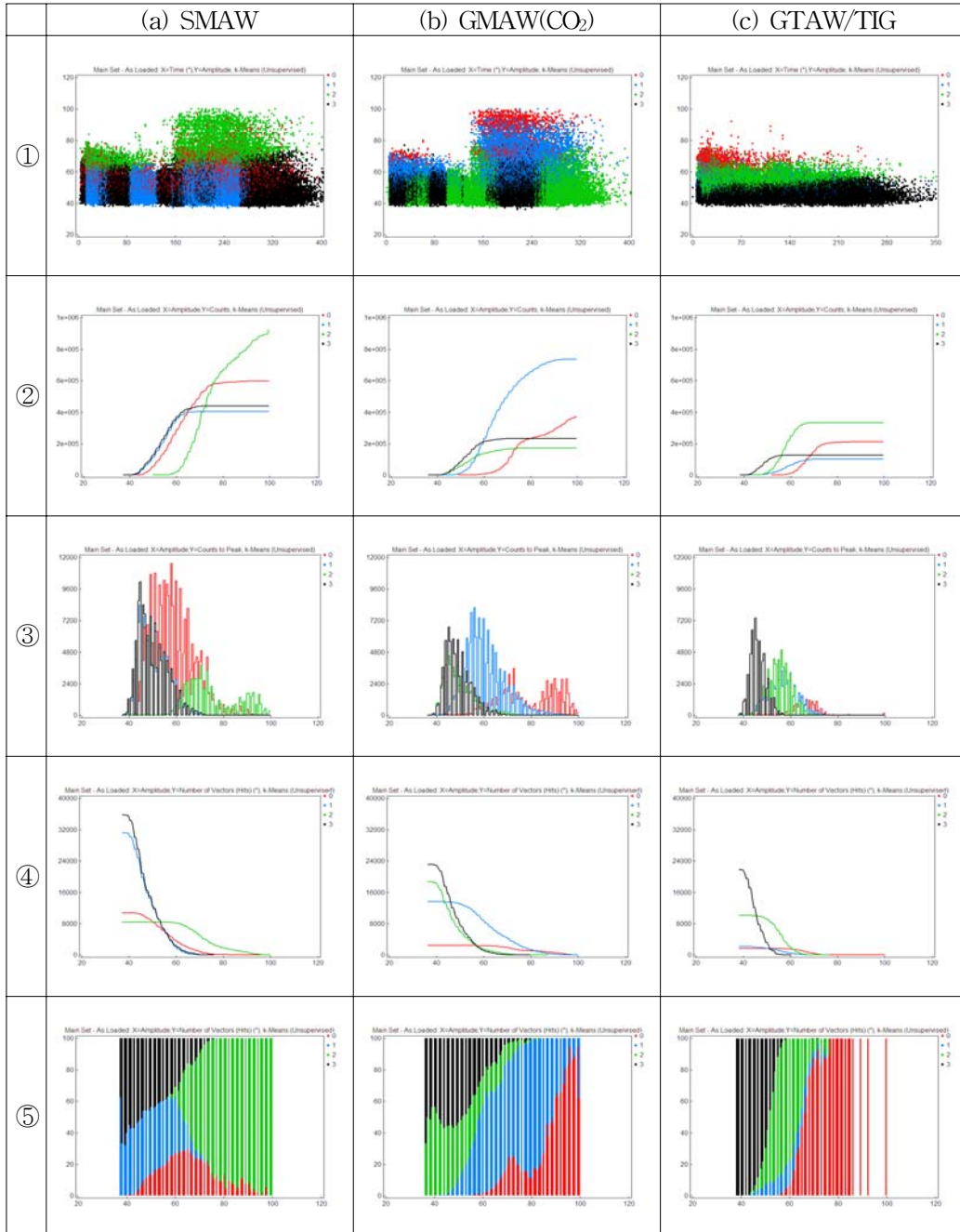
그리고 ③으로부터 인장초기에 탄성 및 소성변형이 일어나는 구간에서는 70~80dB, 초기소성변형이 마무리되고 크랙이 생성되는 구간에서는 70dB, 실질적인 소성변형과 더불어 크랙이 진전하고 거시적인 파괴에 이르는 구간에서는 90~100dB 정도의 진폭을 가짐을 알 수 있다. 따라서 (a)와 (b)의 경우에는 탄성 및 소성변형구간에서 70~80dB의 진폭을 가진 신호를 방출하고, 비슷한 시간에 크랙이 생성되며, 실질적인 소성변형과 함께 크랙이 진전하고 거시적인 파괴에 이르는 구간에서 90~100dB의 진폭을 가진 신호를 방출하는 것으로 나타났지만, (c)의 경우에는 초기에 70~80dB의 진폭을 가진 신호를 방출하고는 그 진폭이 점차 감소하였다. 또한 (a)와 (b)는 80~100dB의 높은 진폭에서 다량의 AE에너지를 방출하는 신호가 검출되었으나, 상대적으로 (c)는 80dB 이하의 진폭에서 소량의 AE에너지를 방출하는 신호가 많이 검출되어 용접방법에 따라 재료의 용접성(접합성)과 인성에 차이가 있음을 알 수 있다. 결국 인장변형 초기구간에서는 상대적으로 소성변형에 대응하는 낮은 진폭범위의 AE신호가 다수 발생하며, 균열의 진전이 예상되는 시점부터 높은 진폭범위의 신호가 증가하고 있으므로, 이와 같은 진폭분포의 파악은 재료의 성질변화와 열화정도를 평가하는데 유효하다고 할 수 있다.

한편 ④를 토대로 하여 도시한 ⑤에서의 세로축 즉, 절편 값은 (a)>(b)>(c)의 순이며, 진폭의 기울기 값인 b-value의 경우에는 (a)와 (b)는 비슷하고, (c)는 다소 다른 경향을 보이고 있다. 일반적으로 열영향부는 용접 시 전류밀도와 용융온도가 높을수록 기계적 강도가 낮아진다. GMAW(CO₂)는 전류밀도가 GTAW/TIG의 2배이고, SMAW의 6배에 이르며, 용접 시 용융온도에 있어서도 5,000℃ 이상으로 GTAW/TIG와는 비슷하지만 SMAW의 3,500℃에 비하여 높기 때문에 열영향부의 기계적 강도가 (a)>(c)>(b)의 순일 것으로 예상된다. 그러나 본 연구의 실험조건에서 시험편의 두께와 루트간격(문헌상의 권장 루트간격)의 차이에 따른 직접적인 원인 외에, GTAW/TIG는 비소모성 전극을 이용한 0.6~3mm의 박판용접에, GMAW(CO₂)는 소모성 전극을 이용한 3mm 이상의 후판용접에 주로 사용되기 때문에 이론상의 결과와 다르게 나타난 것으로 보인다.



〈Fig. 4〉 Post-processing results of the detected AE signals

또한, <Fig. 5>는 AE신호를 통계처리가 가능한 데이터 셋(data sets)으로 변환하여 K-means 알고리즘에 의해 처리한 비지도학습 패턴인식의 결과이며, 여기서 군집의 수 K는 4이다.



<Fig. 5> Pattern recognition results by using K-means clustering analysis

<Fig. 5> ①이 <Fig. 4> ③과 동일한 양상을 보여, 이를 바탕으로 ① 시간-진폭, ② 진폭-AE카운트수, ③ 진폭-피크카운트수, 그리고 ④와 ⑤에 진폭-누적AE이벤트(Hits)수와 그에 대한 Distribution Stacked Bar (%)의 관계를 도시하였다. 그 결과 진폭과 AE카운트수(또는 AE에너지)와의 관계가 보다 명확해짐을 확인하였다.

<Fig. 5>로부터 AE진폭은 대체로 고강도, 이방성 및 비균질 재료와 결합을 내포하고 있는 취성재료일수록 높게 나타나며, 진폭분포는 파손기구와 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 초기의 응력상태는 소성변형 과정에서 개재물과 같은 불연속부에 응력이 집중되어 모재와의 박리현상에 의한 공극이 생성되고, 이때의 응력변화는 AE를 발생시키며 그 신호는 낮은 에너지와 높은 주파수를 갖는 것이 일반적이다. 이렇게 생성된 공극은 응력이 증가함에 따라 서로 합체되고 주균열로 발전하여 최종적으로 거시적인 파괴를 유도하게 된다. 이러한 합체과정 및 주균열 진전에 의해 발생하는 신호는 상대적으로 높은 에너지와 낮은 주파수성분을 갖는다. 따라서, AE신호의 진폭분포에 대한 파괴기구와 균열진전 과정의 해석을 비교 검토한 결과, 저진폭의 AE신호는 모재균열의 발생에, 고진폭의 AE신호는 모재파괴에 각각 대응되는 것으로 판단된다.

5. 결 론

용접 시 전류밀도와 용융온도가 높을수록 열영향부의 기계적 강도가 낮아지기 때문에 열영향부의 강도가 SMAW > GTAW/TIG > GMAW(CO₂)일 것으로 예상되었으나, 본 연구에서는 SMAW > GMAW(CO₂) > GTAW/TIG으로 나타났다. 이는 시험편의 두께와 루트간격의 차이에 따른 직접적인 원인 외에, GTAW/TIG는 비소모성 전극을 이용한 0.6~3mm의 박판용접에, GMAW(CO₂)는 소모성 전극을 이용한 3mm 이상의 후판용접에 주로 사용되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 K-means 군집분석으로부터 탄성 및 소성변형에 의해 방출되는 AE신호의 진폭분포에 대한 파괴기구 및 균열진전 과정에 대하여 저진폭의 AE신호는 모재균열의 발생에, 고진폭의 AE신호는 모재파괴에 각각 대응됨을 보다 명확히 하였고, 그 유효성을 보였다. 따라서 재료의 변형 및 파괴 등의 미소변화에 대한 고감도 검출이 가능한 AE법을 이용하면, 시간에 따른 재료의 응력이력 및 손상에 관한 정보를 추론함으로써 사용조건 하에서 구조물의 구조건전성을 평가하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

6. 참 고 문 헌

- [1] R. K. Miller and P. McIntire, 1987, Nondestructive testing handbook (2nd ed.), Vol.5, Acoustic emission testing, ASNT.
- [2] A. A. Pollock, 1973, "Acoustic Emission—Acoustic Emission Amplitudes," Nondestructive Testing, 6 (5), pp.264-269.
- [3] O. Kulhanek, 2005, "Seminar on b-value," Prague Centre of MATHematical Geophysics, Meteorology, and their Applications(MAGMA), Charles University, Prague, Czech.
- [4] J. T. Tou and R. C. Gonzalez, 1974, Pattern Recognition Principles, Addison-Wesley.
- [5] Korean Standards Association, 2001, KS B 0833, KSA.
- [6] Z. K. Rhee, C. K. Woo, S. O. Park, J. H. Yoon, J. H. Cho, B. G. Kim and Y. D. Koo, 2004, "A Study on the Acoustic Emission Characteristics of Weld Heat Affected Zone in SWS 490A Steel(1)," Transactions of KSMTE, 13 (4), pp.113-120.
- [7] Z. K. Rhee and C. K. Woo, 2005, "Experimental Studies on Joinability of SWS 490A High Tension Steel using Acoustic Emission Signals," Transactions of KSMTE, 14 (3), pp.87-85.
- [8] Z. K. Rhee and C. K. Woo, 2006, "A Study on the Acoustic Emission Characteristics of Weld Heat Affected Zone in SWS 490A Steel(2)," Transactions of KSMTE, 15 (5), pp.104-113.
- [9] J. D. Leaird, 1997, Acoustic emission training guide—How to ensure an accurate and valid acoustic emission, Greensland publishing company, Sacramento, California.

저 자 소 개

김길동 : 충청대학 품질경영과 교수

이장규 : 교신저자(zkrhee@hanmail.net), 영평기계설비(주) 기술교문