

SWS 490A 강의 용접 열영향부 음향방출 특성에 대한 연구(2)

이장규*, 우창기⁺

(논문접수일 2006. 7. 10, 심사완료일 2006. 8. 25)

A Study on the Acoustic Emission Characteristics of Weld Heat Affected Zone in SWS 490A Steel(2)

Zhang-Kyu Rhee*, Chang-Ki Woo⁺

Abstract

The main objective of this study is to investigate the effect of compounded welding by using acoustic emission (AE) signals and doing a source location for weld heat affected zone (HAZ) through tensile testing. This study was carried out an SWS 490A high strength steel for electric shield metal arc welding, SMAW; CO₂ gas metal arc welding, GMAW(CO₂); and gas tungsten arc welding, GTAW/TIG. Data displays are based on the measured parameters of the AE signals, along with environmental variables such as time and load. For instance, Gutenberg-Richter magnitude-frequency relationship (G-R MFR) offers useful *b*-value in data analysis. Namely event identification, source location gives the X- and Y-coordinates of the AE source. And K-means clustering analysis by Euclidean distance confirmed that was powerful to source location. Generally, strength of welded metal zone was stronger than strength of base metal. As the result, confirmed certainly that fracture is produced in HAZ instead of welded metal zone from source location.

Key Words : Heat Affected Zone(열영향부), Compounded Welding(복합용접), Acoustic Emission(음향방출), Gutenberg-Richter Magnitude-Frequency Relationship(구텐베르크-리히터 진폭-빈도 관계식), *b*-value(*b*-값), Source Location(위치표정), K-means Clustering Analysis(K-평균 군집분석), Euclidean Distance(유클리디언 거리)

1. 서론

용접은 금속의 가용성을 이용하여 두 개의 금속을 용융은

도 이상으로 가열하여 접합하는 야금학적 방법으로 각종 산업의 플랜트 설비나 제품의 사용에 따른 수리 및 보수에서도 필수적인 관리기술로써 현대의 산업에서 용접이 차지하는

* 인천대학교 기계공학과 (zkrhee@hanmail.net)

주소: 402-749 인천시 남구 도화동 177

+ 인천대학교 기계공학과

비중과 필요성은 이미 잘 알려진 사실이다⁽¹⁾. 그러나, 산업현장에서의 실제 구조물은 복잡하고 다양한 구조를 갖기 때문에 용접자동화가 쉽지 않아 수작업에 의하여 설비비가 싸고 쉽게 용접할 수 있는 단일용접이 일반적으로 이용되고 있지만, 구조물의 질적 향상이 요구되는 경우에는 설비비가 많이 들고 공정이 복잡하더라도 복합용접을 택하고 있다.

본 연구에서는 SWS 490A 고장력강에 피복금속아크용접(SMAW), 탄산가스아크용접(GMAW(CO₂)) 및 불활성가스 텀스텐아크용접(GTAW/TIG)을 하여 이면비드와 표면비드로 단일용접한 경우와 복합용접한 경우, 정속인장시험 시 열영향부에 대한 음향방출(AE, Acoustic Emission) 신호 특성을 분석하여 제품의 품질개선을 위한 복합용접의 효율적인 활용방안을 제시하고자 한다.

2. 관련 이론

2.1 AE 신호와 적용

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 계속 변환된 후 증폭되고 공학적으로 분석하여 응용하게 되는데, 이러한 기술을 음향방출법(또는 AE법)이라고 한다.

일반적으로 AE 신호의 파형은 연속형(continuous type)과 돌발형(burst type)으로 구분하는데, 돌발형 AE 신호는 여러 종류의 음파들이 시간적인 간격을 가지고 센서에 도달하기 때문에 Fig. 1과 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 특징이다. 또 이 신호는 재료가 파손에 가까워질수록 발생률이 증가하는 경향을 나타낸다. 돌발형 AE 신호에서 진폭의 크기는 균열의 진전에 대응하며, 발생률은 균열의 증가율에 대응한다. 또한 AE 신호의 누적총수는 균열길이의 제곱에 비례하고, 진폭의 총합은 균열의 성장된 길이에 관계되는 것으로 알려져 있다⁽²⁾. 이를 이용하면 균열의 발생과 진행의 감시, 파괴의 예지, 열화상황의 파악 및 잔여수명의 추정 등이 가능하기 때문에 돌발형 AE 신호는 용접균열, 열

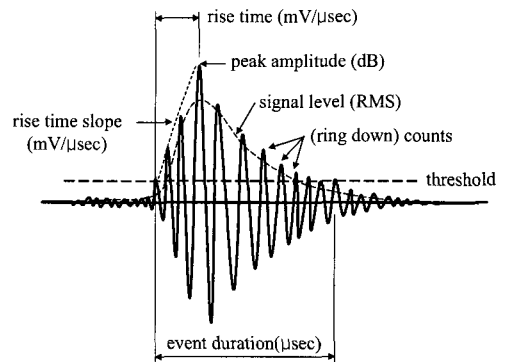


Fig. 1 Definition of AE parameters for sample waveform

처리균열, 피로균열 및 응력부식균열 등의 검출에 주로 응용된다.

한편 진폭분포의 특성을 파악하기 위하여 Pollock 등⁽³⁾이 *b-value*를 제안하였는데, 이는 지진의 발생빈도와 규모를 나타내는 Gutenberg-Richter 진폭-빈도 관계식⁽⁴⁾으로 표현된다.

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

여기서, *a*는 이벤트의 발생빈도로 절편 값이고, *b*는 기울기 값이며, *M*은 진폭의 크기를 의미한다.

식 (1)에 의하여 일반적으로 *b-value*가 클수록 저진폭이 많아지고, *b-value*가 작을수록 고진폭이 많아짐을 알 수 있다. 따라서 AE진폭은 대체로 고강도, 이방성 및 비균질 재료와 결함을 내포하고 있는 취성재료일수록 높게 나타나며, 진폭분포는 파손기구와 밀접한 상관관계를 갖는다. 결국 개개의 이벤트가 발생하는 시간적 빈도나 공간적 위치에 관한 정보를 포함하고 있으므로 AE 파형의 상승으로부터 가해지는 하중의 형태를 구별할 수 있고, 이벤트는 손상의 빈도, 시간분포는 손상의 형태, 진폭이나 에너지로는 손상의 크기 등을 추정할 수 있다.

2.2 군집분석

거대한 데이터 베이스 혹은 자료에서 유용한 정보를 추출하는 일련의 과정뿐 아니라 값진 정보를 사용자가 전문적 지식없이 사용할 수 있는 의사결정지원시스템의 개발과정을 총칭하는 말을 데이터 마이닝(data mining)이라 하며, Fig. 2는 데이터 마이닝과 유관한 분야이다.

그 중에서 군집화(clustering)란 이질적인 집단을 가까운 특성을 갖는 데이터끼리 서로 묶어 몇 개의 동질적인 그룹(군집)으로 나타내는 것을 말하는데, '분류(classification)'

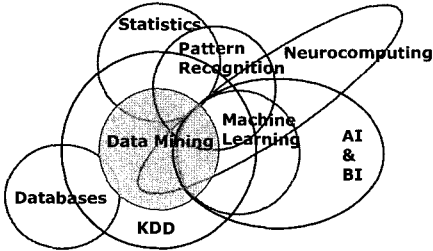


Fig. 2 Data mining and related fields

와는 달리 사전에 어떠한 그룹도 정의되지 않는 것이 특징이다. 즉 군집분석(clustering analysis)이란 어떤 개체나 대상들을 밀접한 유사성(similarity) 또는 근접성(proximity)에 의하여 유사한 특성을 지닌 개체들을 몇 개의 군집으로 집단화하는 다변량분석(multivariate analysis) 법으로 집단의 수 혹은 집단 구조에 대한 가정이 없으며, 오직 개체들 사이의 유사성 또는 거리에 의하여 군집을 형성하고, 형성된 군집의 특성을 파악하여 군집들 사이의 관계를 분석하는 방법이다.

군집분석은 데이터의 범주에 대한 지식이 없어도 학습이 가능하며, 데이터가 갖는 고유한 특성을 객관적으로 찾아내는 것이 가능하다. 또한 군집분석은 데이터의 유사성을 찾아 데이터의 세분화, 패턴인식, 추세분석 등에 활용되며, 그 중 많이 활용되고 있는 K-means 알고리즘은 한 번의 군집이 묶일 때마다 각 군집별로 그 군집의 평균을 중심으로 군집 내 대상들 간의 유클리디언 거리(Euclidean distance)에 기반을 두고 있다. 여기서 거리는 아래와 같은 식⁽⁵⁾으로 표현된다.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

2.3 위치표정

AE 신호의 처리법 중에서 가장 정량적인 결과로 얻어지는 것은 위치표정(source location)이며, 위치표정은 기본적으로 탄성파의 감쇠특성과 전파속도에 의존한다. 신호의 특성에 따라 연속형 신호에는 탄성파의 감쇠특성을 이용하고, 돌발형 신호에는 탄성파의 전파속도를 이용한다.

AE원(AE source)의 위치표정 기술은 다양하게 개발되고 있으며, 대부분은 AE파가 각 센서에 도달하는 시간차로부터 구해진다^(2,6-9).

예를 들어, 4개의 센서가 S1(X1, Y1), S2(X2, Y2), S3(X3, Y3), S4(X4, Y4)인 점에 위치하면, 아래와 같이 AE 신호

전파에 대한 기본방정식을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\text{제1도달센서: } V^2 t^2 = (x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 \quad (3)$$

$$\text{제2도달센서: } V^2 (t + T_1)^2 = (x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 \quad (4)$$

$$\text{제3도달센서: } V^2 (t + T_2)^2 = (x - X_3)^2 + (y - Y_3)^2 \quad (5)$$

$$\text{제4도달센서: } V^2 (t + T_3)^2 = (x - X_4)^2 + (y - Y_4)^2 \quad (6)$$

여기서, t 는 AE원 P(x, y)에서 제1도달센서 (X1, Y1)까지의 전파시간이고, (Xn, Yn)은 제N도달센서의 좌표, V는 음속, 그리고 T1, T2, T3는 신호 도달시간차이다(단, $0 \leq T_1 \leq T_2 \leq T_3 \leq \dots$).

위의 연립2차방정식에서 미지수 x, y 및 t 의 2차 항을 소거하여 선형화하면,

$$\text{식 (4)-(3): } A_1 \cdot x + B_1 \cdot y + C_1 \cdot t = D_1 \quad (7)$$

$$\text{식 (5)-(3): } A_2 \cdot x + B_2 \cdot y + C_2 \cdot t = D_2 \quad (8)$$

$$\text{식 (6)-(3): } A_3 \cdot x + B_3 \cdot y + C_3 \cdot t = D_3 \quad (9)$$

이 된다.

위의 1차 연립방정식을 Cramer의 법칙으로 풀면, 아래와 같이 진짜 음원 P(x, y)를 쉽게 구할 수 있다⁽⁹⁾.

$$x = \frac{\begin{vmatrix} D_1 & B_1 & C_1 \\ D_2 & B_2 & C_2 \\ D_3 & B_3 & C_3 \end{vmatrix}}{D}, \quad y = \frac{\begin{vmatrix} A_1 & D_1 & C_1 \\ A_2 & D_2 & C_2 \\ A_3 & D_3 & C_3 \end{vmatrix}}{D} \quad (10)$$

여기서,

$$D = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{vmatrix} = A_1 \cdot B_2 \cdot C_3 + A_2 \cdot B_3 \cdot C_1 + A_3 \cdot B_1 \cdot C_2 - A_1 \cdot B_3 \cdot C_2 - A_2 \cdot B_1 \cdot C_3 - A_3 \cdot B_2 \cdot C_1 \neq 0$$

이다.

3. 실험 및 실험방법

3.1 실험재료 및 시험편

용접시험편의 모재(base metal)는 POSCO에서 생산한 SWS 490A 고장력강으로 동일한 배치(batch)에서 시료를 채취하였다. Fig. 3은 그 규격 및 용접방법으로 두께 6mm에 대하여 각각 3mm씩 이면비드와 표면비드를 부여하였다. 그리고, 모든 시험편에 대하여 루트면(root face) f 는 2mm로 하였으며, 루트간격(root opening) R의 경우에는 SMAW는 3mm, GMAW(CO₂)는 4mm, GTAW/TIG는 2.8mm로 하였다. 또한 Table 1은 시험편 모재의 화학적 조성이며, Table 2는 기계적 성질이다.

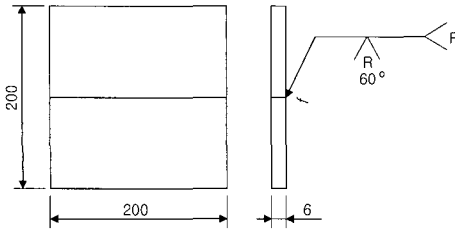


Fig. 3 Welding size and method(unit:mm)

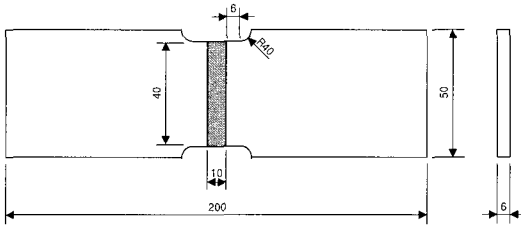


Fig. 4 Geometry of test specimen(unit:mm)

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

한편, 용접한 모재는 외관 검사 및 초음파탐상 검사를 실시하여 용접부의 결함 유무를 확인하였으며, Fig. 4에서 보는바와 같이 KS B 0833 「맞대기 용접 이음의 인장 시험 방법」⁽¹⁰⁾의 규격에 따라 평활재 인장시험편을 제작하였다.

3.2 실험방법

본 연구에서 사용한 AE계측시스템은 Physical Acoustics Corporation(PAC)의 Spartan 2000이고, 만능재료시험기 (Autograph 25-TG, Shimadzu)의 부하속도는 모두 2mm/min의 정속신장형 부하로 하였다. 또한 AE 계측 시 외부입력신호의 잡음을 줄이기 위하여 케이블의 양 끝에 페라이트 코어(ferrite core)를 사용한 커넥터^(11,12)를 만들어 만능재료시험기의 아날로그 출력단자로부터 출력되는 하중값을 AE계측시스템으로 전송되도록 하였다.

Table 3 Experimental setup condition

Threshold (dB)	Gain (dB)	PDT (μsec)	HDT (μsec)	HLT (μsec)
Fixed, SP2-DAQ: 40, SP2-LOC: 45	20	300	600	1,000
Parametric sample time (msec)	Time driven data set (msec)			
100	1,000			

AE 파형계측에는 탄성파의 감쇠특성을 감안하여 R15(공진주파수 150kHz) 및 Nano30(공진주파수 300kHz) 센서를 용접부의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 각각 30mm 떨어진 위치(SP2-DAQ 모듈 사용 시 S1(0, 30), S2(0, -30)의 위치에 R15센서 2개, SP2-LOC 모듈 사용 시 S1(-15, 30), S2(-15, -30), S3(15, 30), S4(15, -30)의 위치에 Nano30센서 4개 배치)에 고진공 그리스(Dow coming high vacuum grease)를 사용하여 시험편에 대칭이 되도록 압착시키고 절연테이프 또는 자체 제작한 고정구를 사용하여 고정된 후, 샤프트압접을 통하여 캘리브레이션을 실시하고, 센서의 압착여부를 확인하였다.

또한 1220A 전기증폭기의 이득(gain)을 40dB로 설정하였으며, 100~300kHz의 대역에서 잡음을 제거하고, 샘플링 주기 250nsec 간격으로 검출된 아날로그 AE 신호를 다시 증폭기에서 20dB 증폭하여 웨이브 메모리에 의해 디지털 데이터로 변환하여 기억시킨 후, PC에 전송하였다.

Table 3은 AE 계측 시 설정한 환경조건으로 threshold, gain, PDT(Peak Definition Time), HDT(Hit Definition Time), HLT(Hit Lockout Time)는 신호측정과정을 제어해주는 파라미터들이다. 여기서, PDT는 상승시간 측정에 대한 피크(peak) 신호의 정확한 동정을 가능하게 하며, HDT는 구조물로부터 얻어지는 단 하나의 hit로써 측정된 AE신호로 hit의 끝과 측정과정의 종료 및 저장을 가능하게 한다. 또한 HLT는 AE가 지속되는 동안 탄성파의 반사(reflection) 혹은 늦게 도착한 AE신호의 측정을 억제함으로써 잘못된 측정을 피하고 데이터 획득속도를 증가시켜 주는 역할을 한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 인장시험과 AE 신호 특성

실험에서 얻은 결과를 대표적으로 Fig. 5~Fig. 11에 나

타내었다. 각 그림에서 ①의 막대그래프는 시간이력에 대한 AE카운트수이고, 선그래프는 누적AE카운트수이다. ②는 시간이력에 대한 외부입력신호(만능재료시험기의 하중값) 및 외부입력신호인 하중값에 대한 AE에너지로 통상 Kaiser effect 또는 Felicity effect를 확인함으로써 재료의 손상 혹은 불안정한 상태의 발달을 파악하는데 이용한다. ③은 시간이력에 대한 AE진폭이며, ④는 진폭에 대한 누적AE이벤트수로 진폭의 기울기 값인 *b-value*를 나타내고 있다. 또한 ⑤와 ⑥은 시간에 따른 에너지와 진폭분포에 대한 상관도이다. 그리고 괄호 안은 ‘이면비드+표면비드’의 순으로 용접하였음을 의미한다.

4.1.1 단일용접의 경우

단일용접한 경우의 결과인 Fig. 5~Fig. 7의 설명은 다음과 같다.

각 그림 ①에서 재료에 탄성변형 및 소성변형이 일어나는 인장초기구간에서는 AE카운트수가 최대에 이른 후 점차 감소하여 누적AE카운트수 그래프의 기울기가 매우 급하고, 재료에 소성변형이 마무리되고 크랙이 생성되는 구간에서는 비교적 AE의 방출량이 적어 기울기가 완만해지고 변곡점이 형성되며, 변곡점을 지나 생성된 크랙이 진전하는 구간에서

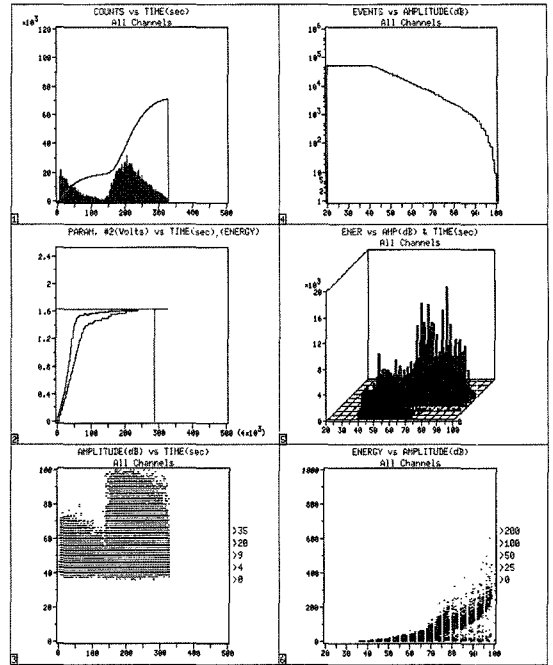


Fig. 6 Detected signals of (GMAW(CO₂)+GMAW(CO₂))

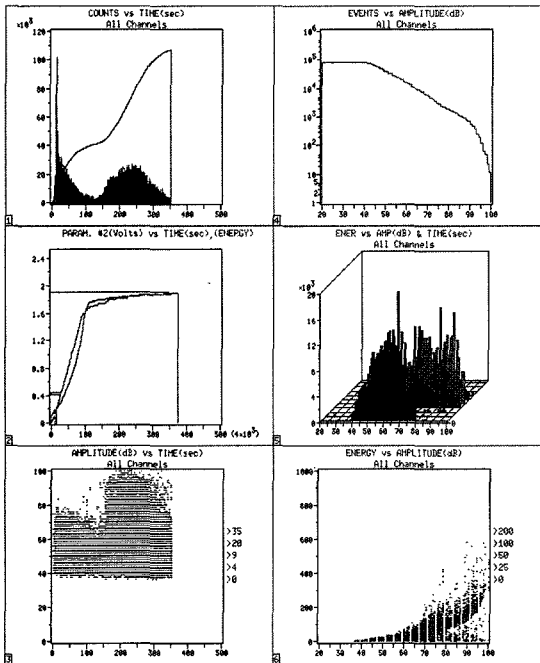


Fig. 5 Detected signals of (SMAW+SMAW)

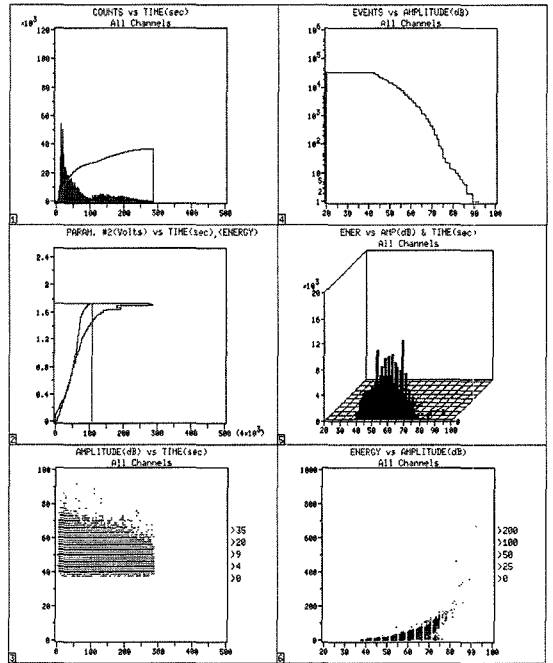


Fig. 7 Detected signals of (GTAW/TIG+GTAW/TIG)

는 또다시 AE카운트수가 증가하여 그래프의 기울기가 급하게 나타나는 경향을 보였다. 그런데, Figs. 5, 6의 경우에는 탄성 및 소성변형구간과 크랙의 생성 및 진전이 뚜렷하게 구분되는 변곡점이 있으나, Fig. 7의 경우에는 뚜렷한 변곡점이 나타나지 않는 것으로 볼 때, 탄성 및 소성변형이 일어남과 동시에 크랙이 생성 및 진전된 것으로 볼 수 있다. 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 마르텐사이트 조직에 기인한 조립역의 신율이나 인성이 현격히 저하되어 용접부 조직 중에서 가장 취약된 특성을 갖는 것으로 생각된다. 또한 누적AE카운트수가 Fig. 5 > Fig. 6 > Fig. 7의 순인 것으로 볼 때, 열영향부의 강도는 Fig. 5의 SMAW가 가장 크고, Fig. 7의 GTAW/TIG가 가장 작을 것으로 예상된다.

[2]의 시간(또는 에너지)에 대한 하중 그래프에서는 재료의 파단에 대한 저항성을 확인할 수 있으며, 세로축의 값은 만능재료시험기의 아날로그 신호가 AE계측시스템의 외부 입력신호에 의해 병합처리된 것으로 예비인장시험에서 얻어진 최대하중 98kN을 해당전압으로 환산하여 나타낸 그림이다. 그림에서 하중(또는 에너지)의 면적이 Fig. 5 > Fig. 6 > Fig. 7의 순이며, 본 연구의 실험조건에서는 재료의 인성이 SMAW > GMAW(CO₂) > GTAW/TIG 순임을 알 수 있다. 또한 [1]과 [3]을 토대로 한 [4]에서 절편 값은 Fig. 5 > Fig. 6 > Fig. 7의 순이지만, 기울기의 경우 Figs. 5, 6은 비슷하나 Fig. 7은 다른 경향을 보이고 있다. 일반적으로 GMAW(CO₂)의 특징은 전류밀도가 GTAW/TIG의 2배이고, SMAW의 6배에 이르며, 용접 시 용융온도에 있어서도 5,000℃ 이상으로 GTAW/TIG와는 비슷하나 SMAW의 3,500℃에 비하여 높기 때문에 SMAW > GTAW/TIG > GMAW(CO₂) 용접 순일 것으로 예상되나, 본 연구의 실험 조건에서 GTAW/TIG는 비소모성 전극을 이용한 0.6~3mm의 박판용접에, GMAW(CO₂)는 소모성 전극을 이용한 3mm 이상의 후판용접에 주로 사용되기 때문에 다소 다르게 나타난 것으로 생각된다. 그러나 열영향부는 용접 시 전류밀도와 용융온도가 높을수록 기계적 강도가 낮아짐을 추측할 수 있다.

[3], [5] 및 [6]에서 threshold는 40dB로 고정되어 있음을

알 수 있고, 인장초기에 탄성변형 및 소성변형이 일어나는 구간에서는 70~80dB, 소성변형이 마무리되고 크랙이 생성되는 구간에서는 70dB, 크랙이 진전하는 구간에서는 90~100dB의 진폭을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 변곡점에서는 [1]의 AE카운트수의 증가와 더불어 [3]의 AE진폭이 중진폭 범위에서 고진폭 범위로 폭넓게 발생하였는데, 이는 [3]에서 Figs. 5, 6은 탄성 및 소성변형구간에서 70~80dB의 진폭을 가진 신호를 방출하고, 비슷한 시간에 크랙이 생성되며, 크랙진전구간에서 90~100dB의 진폭을 가진 신호를 방출하는 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 7의 경우에는 초기에 70~80dB의 진폭을 가진 신호를 방출하고는 진폭이 점차 감소하였다. [5]와 [6]에서 Figs. 5, 6은 80~100dB의 높은 진폭에서 많은 에너지를 방출하는 신호가 많이 검출되었으나, Fig. 7은 80dB이하의 진폭에서 작은 에너지를 방출하는 신호가 많이 검출되는 것으로부터 재료의 특성과 인성이 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 [5]와 [6]으로부터 초기 시험단계에서는 소성변형에 대응하는 낮은 진폭의 AE 신호가 다수 발생하며 균열의 진전이 예상되는 시점부터 고진폭의 신호가 증가하고 있으므로 이러한 진폭분포의 파악은 재료의 성질변화와 열화정도를 평가하는데 유효하다.

4.1.2 복합용접의 경우

복합용접한 경우의 결과인 Fig. 8~Fig. 11의 설명은 다음과 같다.

각 그림 [1]에서 모두 탄성 및 소성변형구간과 크랙이 진전하는 구간이 구분되고 있으나, Fig. 10은 크랙의 발생과정에도 많은 양의 AE카운트수를 방출하는 다소 다른 경향을 보이고 있다. 그러나, [2]를 통하여 볼 때 단일용접에서 보였던 GTAW/TIG용접의 강도상의 문제가 보완되었음을 알 수 있으며, 마찬가지로 단일용접의 경우와 비교해 볼 때 [4]의 기울기의 변화로부터 이 사실을 확인할 수 있다.

[3], [5] 및 [6]에서 보면 모두가 탄성 및 소성변형구간에서는 70~80dB의 진폭을 갖는 신호를 방출하며, 크랙이 진전하는 구간에서는 90~100dB의 진폭을 갖는 신호를 방출하고, 고진폭 범위에서 많은 양의 에너지가 방출됨을 알 수 있다.

복합용접의 경우, 열영향부의 강도는 GTAW/TIG(GTAW/TIG+SMAW)에 한하여 다소 다른 경향을 보이지만 통상 이면비드와 표면비드의 순서에는 무관하며, 특히 SMAW과 GMAW(CO₂) 용접을 혼합하면 GMAW(CO₂)의 단점인 열영향부의 강도를 보완할 수 있음을 알 수 있다.

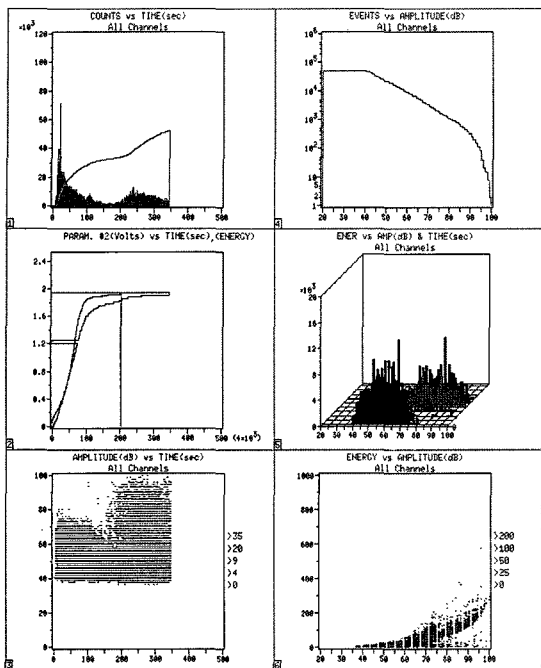


Fig. 8 Detected signals of (SMAW+GMAW(CO₂))

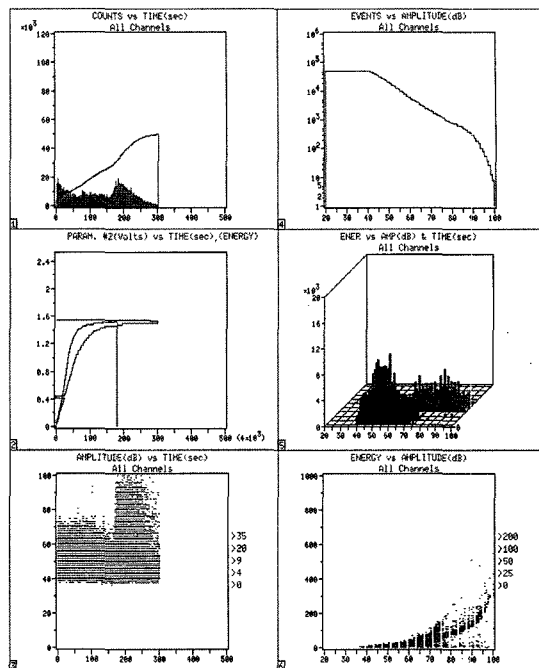


Fig. 10 Detected signals of (GTAW/TIG+SMAW)

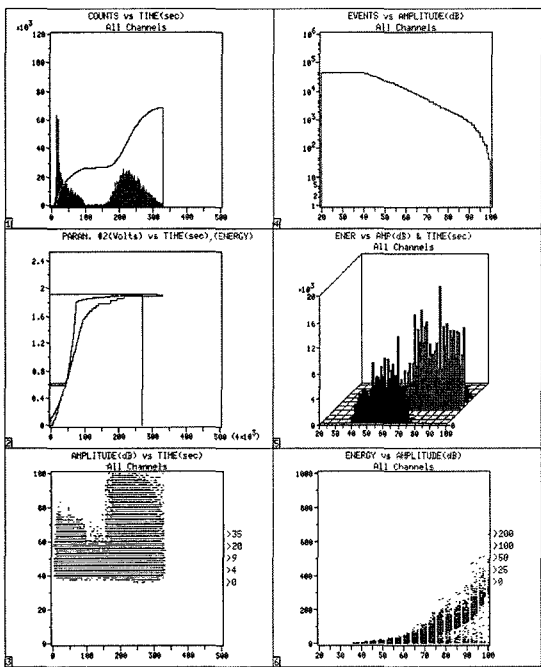


Fig. 9 Detected signals of (GMAW(CO₂)+SMAW)

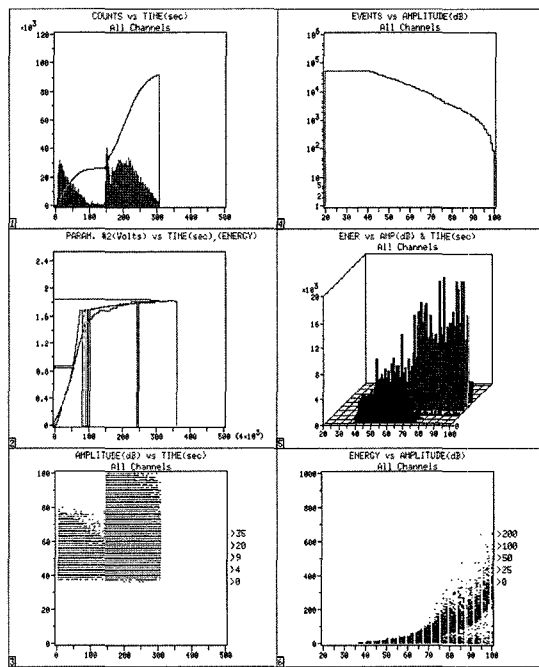
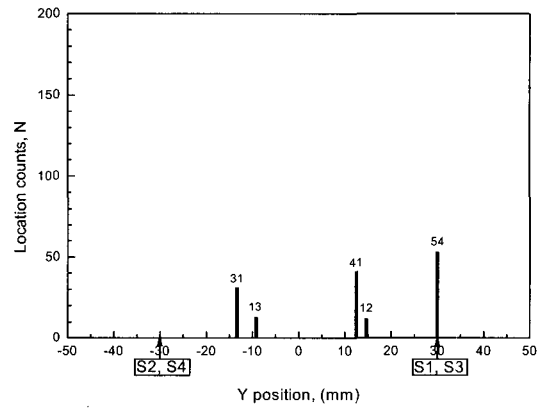
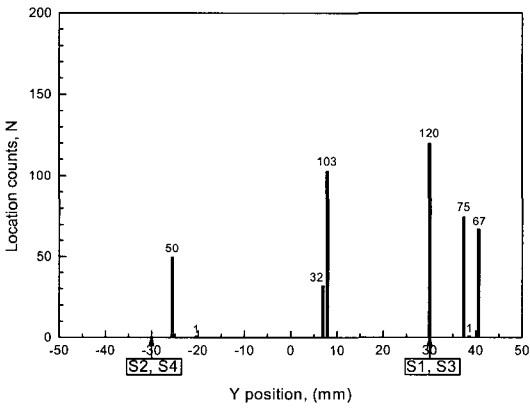
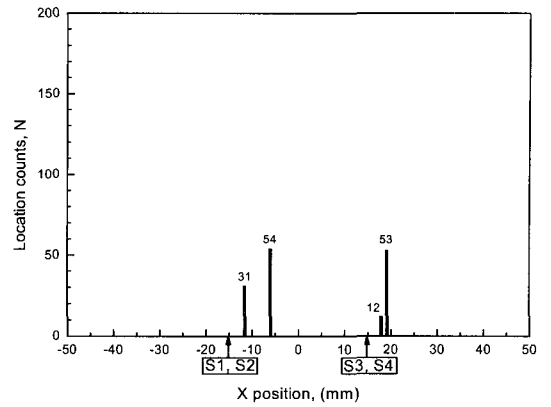
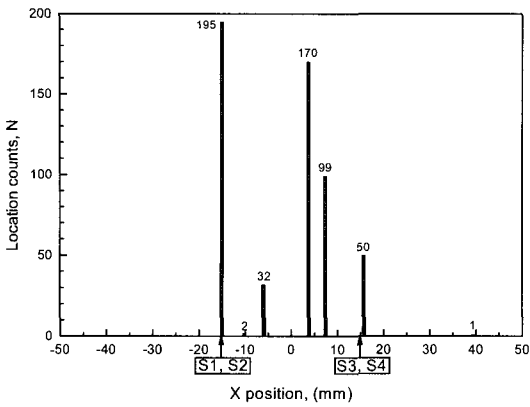
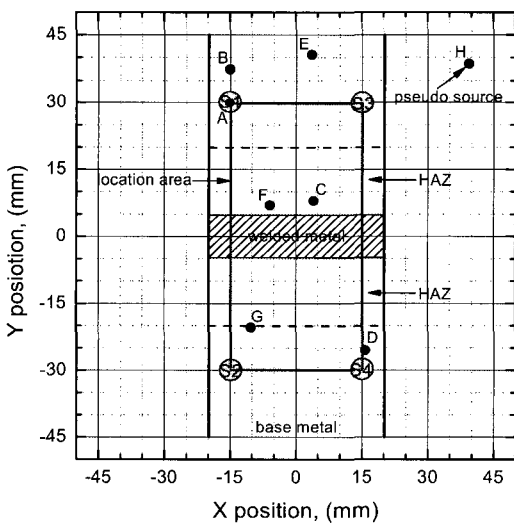


Fig. 11 Detected signals of (GMAW(CO₂)+GTAW/TIG)

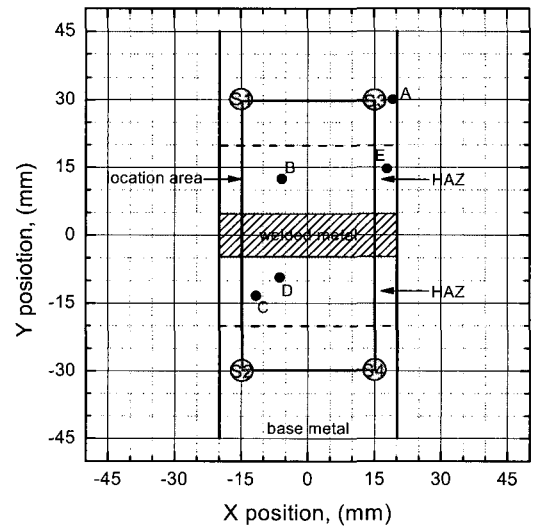


(a) event identification

(a) event identification



(b) planar clustering display



(b) planar clustering display

Fig. 12 Source location of (SMAW+GMAW(CO₂))

Fig. 13 Source location of (GMAW(CO₂)+GTAW/TIG)

Table 4 Clustering analysis result of AE source location

Name	Events	Total energy	Average position		Decision
			X	Y	
SMAW+GMAW(CO ₂)					
A	2	84	-15.000	30.000	F
B	1	40	-14.990	37.355	F
C	1	39	4.027	7.918	P
D	1	32	15.726	-25.565	F
E	1	29	3.552	40.589	F
F	1	19	-5.938	6.949	P
G	1	10	-10.209	-20.361	P
H	1	9	39.409	38.563	-
GMAW(CO ₂)+GTAW/TIG					
A	1	32	19.117	29.995	F
B	1	23	-5.782	12.442	P
C	1	22	-11.603	-13.380	P
D	1	13	-6.258	-9.352	P
E	1	12	17.852	14.652	P

F: Fail, P: Pass, -: Pseudo source

4.2 군집분석과 위치표정

전술한 바와 같이 AE원의 위치표정을 위하여 4개의 Nano30 센서를 직사각형(S1(-15, 30), S2(-15, -30), S3 (15, 30), S4(15, -30))으로 배열하였고, 실험에서 얻은 대표적인 결과를 Figs. 12, 13의 (a)에 나타내었다. Fig. 12 (a)에서 X값이 대략 40mm 위치에서 AE카운트가 1회 발생하였는데, 이는 시험편의 치수보다 큰 범위에 존재하는 의사원(pseudo source)이며, 나머지 값들은 유효한 데이터이다. 또한 Fig. 13 (a)의 값들도 모두 유효한 데이터이다.

이를 토대로 Table 4의 위치표정에 대한 군집분석 결과를 얻었으며, 그 결과를 Figs. 12, 13의 (b)에 도시하였다. Fig. 12 (b)에서 H의 의사원을 제외하면, 인장시험 초기에 나타난 C, F 및 G는 열영향부에서 발생한 음원으로 판단되며, 나머지는 인장시험과정 중에 나타난 음원으로 센서와 시험편 사이의 마찰이나 기계적인 잡음 등이 포함되었을 것으로 생각된다. 마찬가지로 Fig. 13 (b)의 A를 제외한 B, C, D 및 E는 열영향부에서 발생한 음원으로 판단된다.

따라서 용접부의 강도는 모재의 강도보다 강하기 때문에 위치표정 결과로부터 용접부가 아닌 열영향부에서 파단이

일어남을 명확히 확인할 수 있다.

5. 결론

단일용접 및 복합용접한 SWS 490A 고장력강의 인장시험편에 대하여 측정된 AE신호를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인장시험편에서 열영향부에 대한 누적AE이벤트 곡선은 대부분 뚜렷한 변곡점을 갖으며, 그곳으로부터 고진폭 범위의 AE가 폭넓게 발생함을 알았다. 이는 결정립의 성장, 2상(탄·질화물) 또는 입자의 고용 및 석출, 잔류응력 등의 발생에 의하여 열영향부의 성질이 용융역과 모재의 성질과는 아주 다르게 변하였기 때문이며, 또한 군집분석에 의한 위치표정 결과로부터 열영향부에서 파단이 일어남을 확인하였다.
- (2) 단일용접의 경우, 용접 시 전류밀도와 용융온도가 높을수록 열영향부의 기계적 강도가 낮아지므로 열영향부의 강도가 SMAW > GTAW/TIG > GMAW(CO₂) 용접 순일 것으로 예상되나, 본 연구에서는 SMAW > GMAW(CO₂) > GTAW/TIG 용접 순으로 나타났다. 이와 같은 결과를 보인 것은 용접 시 시험편에 적용된 루트간격의 차이 또는 시험편의 두께에 대한 영향으로 판단된다.
- (3) 복합용접의 경우, 열영향부의 강도는 GTAW/TIG에 한하여 다소 다른 경향을 보이지만 이면비드와 표면비드의 순서에는 무관하며, 특히 SMAW와 GMAW(CO₂) 용접을 혼합하면 GMAW(CO₂)의 단점인 열영향부의 기계적 강도를 상호 보완할 수 있으므로 제품의 질적 향상이 기대된다.

참고 문헌

- (1) Japan Welding Society, 1993, *Welding and Joining Handbook*, Maruzen.
- (2) Miller, R. K. and McIntire, P., 1987, *Nondestructive Testing Handbook (2nd ed.)*, Vol. 5, *Acoustic Emission Testing*, American Society for Nondestructive Testing.
- (3) Pollock, A. A., 1973, "Acoustic Emission—Acoustic Emission Amplitudes," *Nondestructive Testing*, Vol. 6, No. 5, pp. 264~269.

- (4) Kulhanek, O., 2005, "Seminar on b-value," *Prague Centre of MATHematical Geophysics, Meteorology, and their Applications (MAGMA)*, Charles University, Prague, Czech.
- (5) Anton, H. and Busby, R. C., 2003, *Contemporary Linear Algebra*, Jon Wiley & Sons.
- (6) Rhee, Z. K., Park, S. O. and Woo, C. K., 2004, "AE Source Location in Planar Defects using Spot Excitation," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 5, pp. 87~95.
- (7) Ge, M., 2003, "Analysis of Source Location Algorithms, Part I: Overview and Non-iterative Methods," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 21, pp. 14~28.
- (8) Ge, M., 2003, "Analysis of Source Location Algorithms, Part II: Iterative Methods," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 21, pp. 29~51.
- (9) Nakasa, H., 1994, *Theoretical Bases and Practical Applications of Acoustic Emission*, Chijin Shokan.
- (10) Korean Standards Association, 2001, *KS B 0833, Methods of tensile test for butt welded joints*.
- (11) Rhee, Z. K., Woo, C. K., Park, S. O., Yoon, J. H., Cho, J. H., Kim, B. G. and Koo, Y. D., 2004, "A Study on the Acoustic Emission Characteristics of Weld Heat Affected Zone in SWS 490A Steel(1)," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 4, pp. 113~120.
- (12) Rhee, Z. K. and Woo, C. K., 2005, "Experimental Studies on Joinability of SWS 490A High Tension Steel using Acoustic Emission Signals," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 87~85.