

음향방출법에 의한 SM 490A 강의 복합용접성 평가 (2)

이장규*, 우창기+, 김봉각++, 윤종희+++, 인승현+++

The Evaluation of Mixed Welded SM 490A Steel by Acoustic Emission (2)

Zhang-Kyu Rhee*, Chang-Ki Woo+, Bong-Gag Kim++, Joung-Hwi Yoon+++, Seung-Hyeon In+++

Abstract

The object of this study is to investigate the effect of compounded welding by using an acoustic emission (AE) signals and doing a source location for weld heat affected zone (HAZ) through tensile testing. This study was carried out a SM 490A high tension steel for electronic shielded metal arc welding (SMAW), CO₂ gas arc welding and TIG welding. Data displays are based on the measured parameters of the AE signals, along with environmental variables such as time and load. These history plots are displays showing the chronological course of the test. Also, source location gives the X- and Y-coordinates of the AE source.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Source Location(위치표정), Heat Affected Zone(열영향부), Arc Welding(아크용접), Compounded Welding(복합용접), SM 490A(SM 490A강)

1. 서론

어떤 물체가 내부 또는 외부의 응력에 의해 파괴되면 작용응력의 형태 및 물체의 특성에 따라 독특한 소리를 내게 되는데, 이처럼 물체의 파괴 또는 변형시에 발생하는 물리적인 현상을 공학적인 측면에서 적극적으로 이용하려는 노력이 계속되어 음향방출법(AE,

acoustic emission)이라는 평가방법으로 자리잡게 되었다.^(1,2) AE를 재료의 평가법에 적용하면 (1) 재료의 미세적인 변형과 파괴과정을 실험적으로 해석하는 것이 가능하고, (2) 신소재 개발이나 기존 재료의 재질 개선에 중요한 정보를 제공해 주며, (3) 금속재료와 같은 균질한 재료를 대상으로 개발되어진 대부분의 각종 실험방법들을 복합재료와 같은 불균일 재료나

* 주저자, 인천대학교 기계공학과 (zkrhee@hanmail.net)
주소: 402-749 인천광역시 남구 도화동 177
+ 인천대학교 기계공학과
++ 충청대학 컴퓨터응용기계설계과
+++ 인천대학교 대학원 기계공학과

비금속 재료에 적용시킬 때 파생되는 여러 가지 문제점들을 보완할 수 있다.

한편, 용접은 금속의 가용성을 이용하여 두 개의 금속을 용융온도 이상으로 가열하여 접합하는 야금학적 방법으로 각종 산업의 플랜트 설비나 제품의 사용에 따른 수리 및 보수에서도 필수적인 관리기술로써 현대의 산업에서 용접이 차지하는 비중과 필요성은 이미 잘 알려진 사실이다.⁽³⁾ 또한, 산업현장에서의 실제 구조물은 복잡하고 다양한 구조를 갖기 때문에 용접 자동화가 쉽지 않아 전기피복아크용접, CO₂가스아크용접 및 TIG용접 등 수작업에 의하여 설비비가 싸고 쉽게 용접할 수 있는 단일용접이 통상적으로 이용되고 있지만, 구조물의 질적향상이 요구되는 경우에는 설비비가 많이 들고 공정이 복잡하더라도 복합용접을 택하고 있다.⁽⁴⁾

따라서, 본 연구에서는 SM 490A 강에 전기피복아크용접, CO₂가스아크용접 및 TIG용접을 사용하여 이면비드와 표면비드를 단일용접한 경우와 복합용접한 경우, 정속인장시험시 용접 열영향부에 대한 AE 신호 특성을 분석하여 제품의 품질개선을 위한 복합용접의 효율적인 활용방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편

2.1.1 용접시험편 재료

용접시험편의 모재는 POSCO에서 생산한 SM 490A 강으로 동일한 배취(batch)에서 시료를 채취하였다. Fig.1은 그 규격 및 용접방법으로 두께 6mm에 대하여 각각 3mm씩 이면비드와 표면비드를 부여하였으며, Table 1은 시험편의 화학적 조성과 기계적 성질이다.

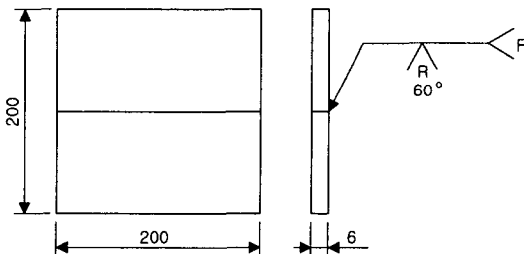


Fig.1 Specimen size and welding method (unit:mm)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SM 490A (wt.%)

C	Si	Mn	S	P
0.086	0.065	1.29	0.018	0.004
Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)		Elongation (%)
380		493		23

2.1.2 실험에 사용한 용접봉

(1) 전기피복아크용접의 용접봉

전기피복아크용접에 사용된 용접기는 교류아크용접기로 AW-30이며, 용접봉은 현장에서 가장 많이 사용되는 저수소계 E4316으로 용접봉의 크기는 $\phi 3.2 \times 350\text{mm}$ 이고, 심선은 저탄소 립드강이며, 용접 시작점에 많은 결함의 위험이 있어 사용전 300~350℃로 30분~1시간정도 건조시킨 후 사용하였다. Table 2는 본 연구에서 사용한 저수소계 용접봉의 화학적 조성과 기계적 성질이다.

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of E4316 (wt.%)

C	Si	Mn	O	N	H
0.08	0.46	0.78	0.031	0.009	0.0001
Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)		Elongation (%)	
343		421		25	

(2) CO₂가스아크용접의 복합와이어

CO₂가스아크용접에 사용된 용접기는 LG산전의 WAC-350A이며, 사용된 용접봉은 복합와이어로 크기는 $\phi 1.2 \times 20\text{kg}$ 이고, 실드가스로 CO₂가스를 사용하였다. Table 3은 본 연구에서 사용한 복합와이어 용접봉의 화학적 조성과 기계적 성질이다.

Table 3 Chemical composition and mechanical properties of flux cored wire (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
<0.12	<0.90	0.50-1.60	<0.03	<0.03	0.30-0.60	0.45-0.75	0.05-0.70
Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)		Elongation (%)			
>392		>490		>20			

(3) TIG용접의 전극봉

TIG용접에 사용된 용접기는 inverter 식으로 AC/DC 겸용인 WAT-300이며, TIG 용접시 insert 가스는 알곤 가스를 사용하였고, 전극봉은 텅스텐 전극봉이며, 용접봉으로는 스테인레스 용가재를 사용하였다. Table 4에 텅스텐 전극봉의 용접전류에 대한 전극, 금속노즐 및 알곤가스의 유량을 나타내었다.

Table 4 Welding electric current of tungsten rod

Electric current ACHF (A)	Tungsten rod diameter (mm)	Ar gas		Metal nozzle (unit: 1/16")	
		cfh (ft ³ /hr)	lpm (L/min)	HW-10	HW-12
10~60	1.0	8~15	4~8	4	6

2.1.3 시험편 채취 및 인장시험편

용접한 모재는 외관 검사 후 결함 유무를 확인하였으며, Fig.2와 같은 방법에 의해 전기피복아크용접, CO₂가스아크용접 및 TIG용접만으로 단일용접한 시험편은 A type으로, 복합용접의 경우에는 시험편의 오차를 줄이기 위하여 A type과 B type으로 각각 시험편을 채취하였다. 한편 Fig.3은 본 연구에서 사용한 평활재 인장시험편으로 KS B 0833 맞대기용접이음의 인장시험방법의 규정에 따라 제작하였다.⁽⁵⁾

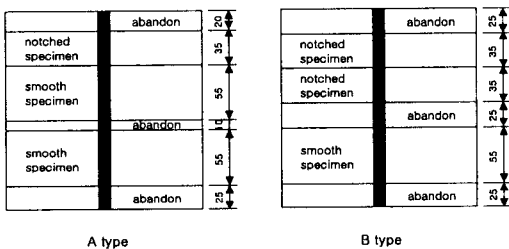


Fig.2 Process method of specimen (unit:mm)

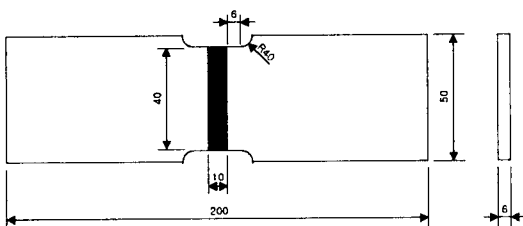


Fig.3 Geometry of test specimen (unit:mm)

2.2 실험방법

본 연구에서 사용한 AE 계측시스템은 Physical Acoustics Corporation의 Spartan 2000 system⁽⁶⁾으로 그 구성은 Fig.4에서 보는바와 같고, MS-DOS V6.2 환경 하에서 sp2-daq, sp2-loc, sp2-3dl, tra-212 및 grafplus를 탑재하고 있으며, 계측된 AE신호는 원시 데이터(raw data)로 실시간에 저장 및 모니터링이 가능하다.

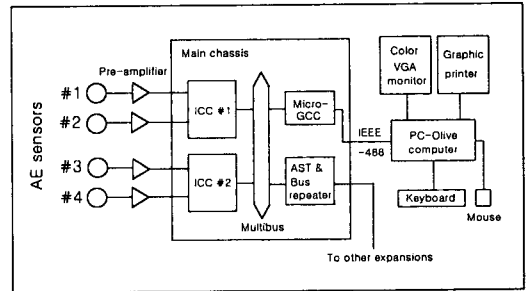


Fig.4 Schematic block diagram of Spartan 2000 system

또한 인장시험기(Autograph 25-TG, Shimadzu)의 부하속도는 공히 2mm/min의 정속신장형 부하이며, 잡음을 줄이기 위하여 케이블의 양 끝에 페라이트 코어 (ferrite core)를 사용한 5730140 컨넥터를 만들어 인장시험기의 아날로그 출력단자에 연결하여 인장시험기로부터 출력되는 하중값을 디지털 신호로 변환시킨 후, 그 값을 각각 인장시험기와 AE 계측시스템에 전송하였다.^(6,7)

한편, AE 파형계측에는 탄성파의 감쇠특성을 감안하여 R15 (resonant frequency 150kHz, PAC) 및 NANO 30 (resonant frequency 300kHz, PAC) 센서를 용접부의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 각각 30mm 떨어진 위치에 고진공 그리스(Dow corning high vacuum grease)를 사용하여 시험편에 대칭이 되도록 압착시키고 절연테이프로 고정된 후 캘리브레이션을 실시하였다.^(1,2,8-11) 또한, 전치증폭기(1220A, PAC)의 gain을 40dB와 45dB로 설정하여 bandpass filter 100~300kHz의 대역에서 잡음을 제거하고, sampling rate 250nsec 간격으로 검출된 아날로그 AE신호를 메인증폭기에서 20dB로 증폭하여 wave memory 디지털 데이터로 변환하여 기억시킨 후, A/D converter로 PC에 전송하였다. CPU에 전송된 SM 490A 강의 하중과 시간에 대한 AE 이벤트수, 누적AE이벤트수, AE진폭 및 주파수 스펙트럼

등은 사전에 작성된 환경에 의하여 sp2-daq와 sp2-loc에서 획득하였다.^(6,7)

Table 5는 AE 계측시스템의 환경조건으로 threshold, gain, PDT(Peak Definition Time), HDT(Hit Definition Time), HLT(Hit Lockout Time)는 신호측정 과정을 제어해 주는 파라미터들이다. 여기서, PDT는 상승시간 측정에 대한 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.

Table 5 Experimental condition

Threshold (dB)	Gain (dB)	PDT (μ sec)	HDT (μ sec)	HLT (μ sec)
Fixed, 40/45	20	300	600	1,000
Parametric sample time (msec)		Time driven data set (msec)		
100		1,000		

3. 실험결과 및 고찰

3.1 AE 신호특성

실험에서 얻은 결과를 대표적으로 Fig.5~Fig.11에 나타내었다. 각 그림에서 ①, ② 및 ④는 시간이력에 대한 AE이벤트수, 누적AE이벤트수 및 진폭분포이고, ③은 하중이력에 대한 누적AE에너지로 이는 통상 Kaiser effect 혹은 Felicity effect를 확인함으로써 재료의 손상 혹은 불안정한 상태의 발달을 파악하는데 이용한다. 또한 ⑤와 ⑥은 진폭분포에 대한 상관도이다. 그리고, 하단의 괄호는 (이면비드+표면비드)의 순으로 용접하였음을 의미한다.

각 그림에서 ②의 형상은 ①의 AE이벤트수가 누적된 것으로 Fig.7의 (TIG+TIG) 단일용접을 제외하고는 대부분 뚜렷한 변곡점을 갖는 것으로 나타났다. 이는 아크 또는 그 이외의 열을 이용해서 용접한 경우 용접 금속의 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 나타난다. 통상 강재에 대한 열영향부의 기계적 성질은 마르텐사이트 조직에 기인한 조직역의 신율이나 인성이 현격히 저하되어 용접부 조직중에서 가장 취약된 특성을 갖는다. 그리고 ②의 변곡점에서는 ①의 AE이벤트수의 증가와 더불어 ④의 AE진폭은 중진폭 범위에서 고진폭 범위로 폭넓게 발생하고 있다.

또한, ⑤와 ⑥으로부터 초기 시험단계에서는 소성변형에 대응하는 낮은 진폭의 AE신호가 다수 발생하며 균열의 진전이 예상되는 시점부터 고진폭의 신호가 증가하고 있으므로 이러한 진폭분포의 파악은 재료의 성질변화와 열화정도를 평가하는데 유효하다. 따라서 AE 파형의 상승으로부터 가해지는 하중의 형태를 구별할 수 있으며, 이벤트는 손상의 빈도, 시간분포는 손상의 형태, 진폭이나 에너지로는 손상의 크기 등을 추정할 수 있다.

한편 Pollock 등⁽¹²⁾은 진폭분포의 특성을 파악하기 위하여 b-value를 제안하였으며, 일반적으로 b-value가 커질수록 저진폭이 많아지고, b-value가 작아질수록 고진폭이 많아진다고 보고하였다. AE진폭은 대체로 고강도, 이방성 및 비균질재료와 결합을 내포하고 있는 취성재료일수록 높게 나타나며, 진폭분포는 파손기구와 밀접한 상관관계를 갖는다. 초기의 응력상태는 소성변형 과정에서 개재물과 같은 불연속부에 응력이 집중되어 모재와의 박리현상에 의한 공극이 생성되고, 이 때의 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.

결국 AE 신호특성은 진폭분포 또는 이벤트수로써 정량화되며 결합, 파손 및 균열의 진전량 등을 파악한 후, 보다 정확한 설비수명을 예측하여 대형사고를 미

연에 방지할 수 있는 측면에서 유용하다.

각종 용접에서 용접부의 강도는 모재보다 강하기 때문에 용접부보다 열영향부에서 먼저 파단이 일어난다. 평활재 인장시험편은 전류의 밀도와 용접시 용융온도가 모재에 미치는 영향을 알아보기 위한 시험편이다.

인장시험결과 단일용접의 경우 열영향부의 강도는 전기피복아크용접 > TIG용접 > CO₂가스아크용접 순으로 나타났다. 왜냐하면 CO₂가스아크용접의 특징은 전류밀도가 TIG용접의 2배이고, 전기피복아크용접의 6배에 이르며, 용접시 용융온도에 있어서도 5,000℃ 이상으로 TIG용접과는 비슷하나 전기피복아크용접의 3,500℃에 비하여 높기 때문이다. 따라서, 열영향부는 용접시 전류밀도와 용융온도가 높을수록 기계적 강도가 낮아지는 것을 알수 있다. 복합용접의 경우 열영향부의 강도는 TIG용접(TIG+SMAW)에 한하여 다소 다른 경향을 보이지만 통상 이면비드와 표면비드의 순서에는 무관하며, 특히 전기피복아크용접과 CO₂가스아크용접을 혼합하면 CO₂가스아크용접의 단점인 열영향부의 강도를 보완할 수 있음을 알수 있다.

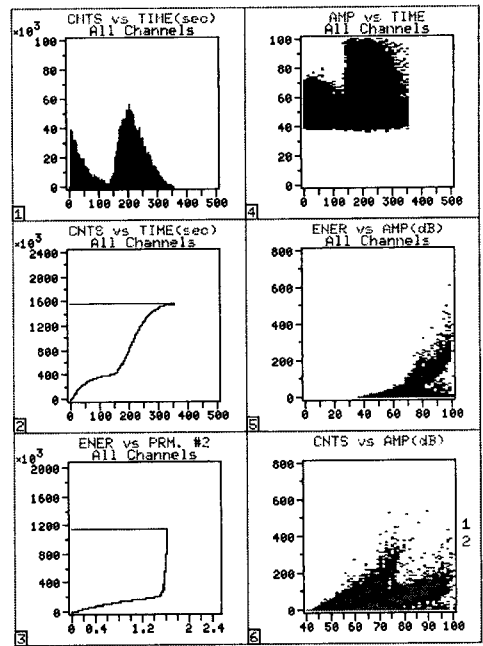


Fig.6 Results of detected AE signals (CO₂+CO₂)

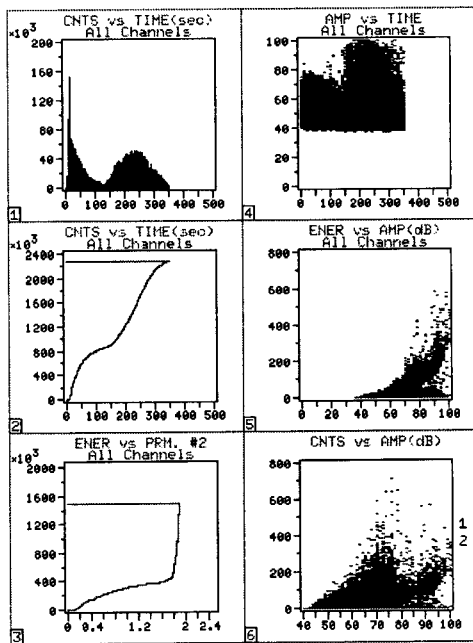


Fig.5 Results of detected AE signals (SMWA+SMWA)

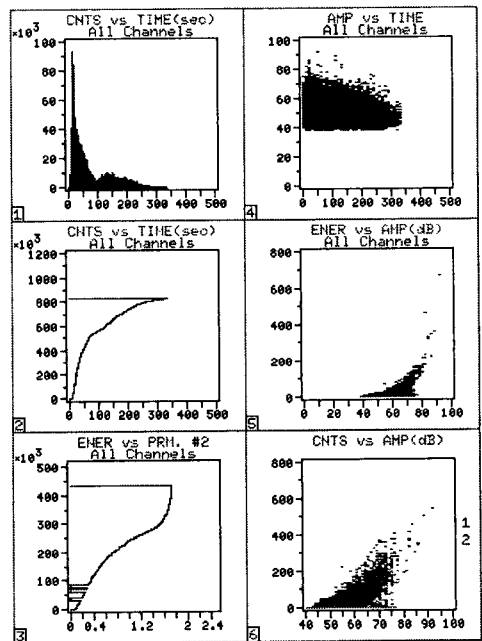


Fig.7 Results of detected AE signals (TIG+TIG)

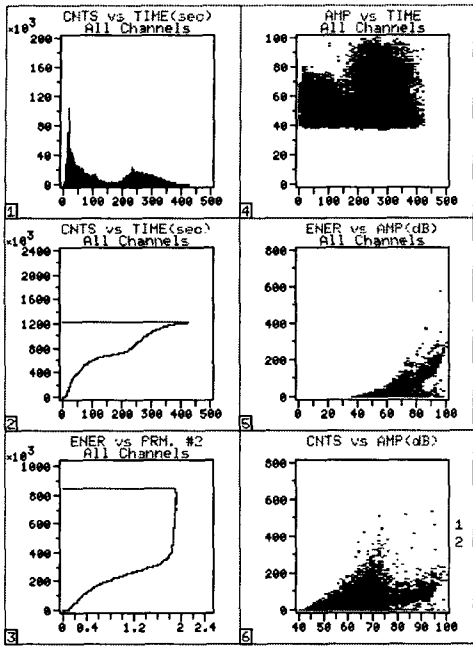


Fig.8 Results of detected AE signals (SMAW+CO₂)

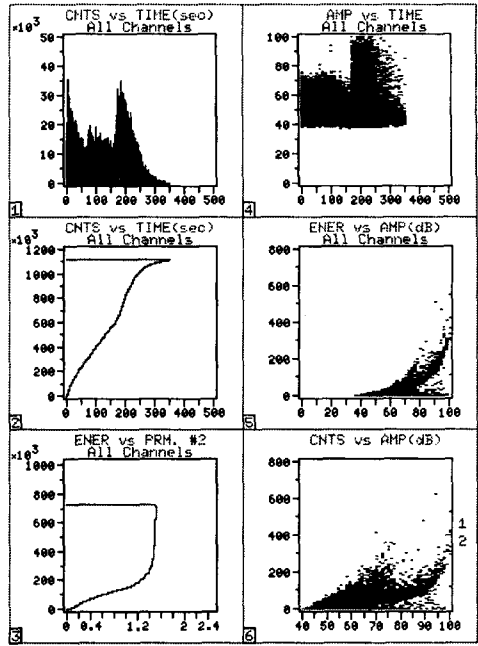


Fig.10 Results of detected AE signals (TIG+SMAW)

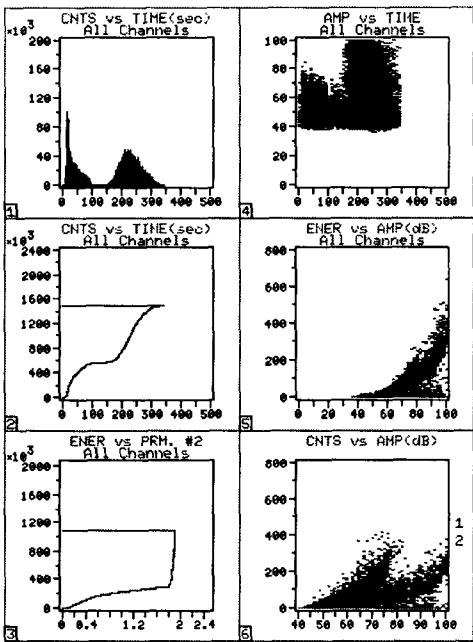


Fig.9 Results of detected AE signals (CO₂+SMAW)

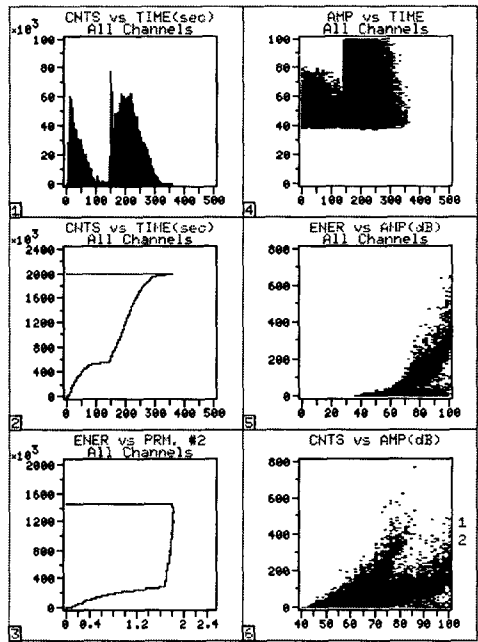


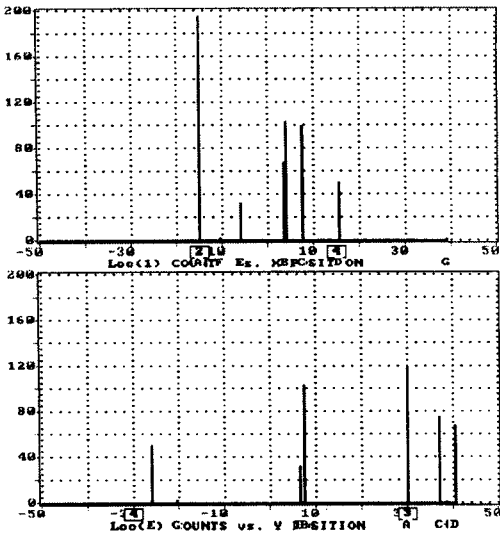
Fig.11 Results of detected AE signals (CO₂+TIG)

3.2 위치표정 결과

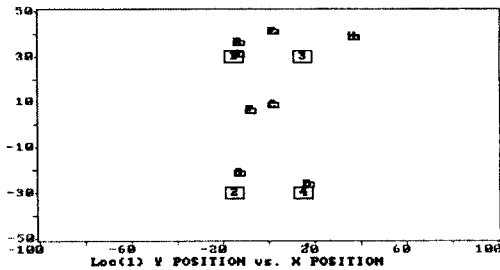
AE신호의 처리법 중에서 가장 정량적인 결과로 얻어지는 것이 위치표정이며, 위치표정은 기본적으로 탄성파의 감쇠특성과 전파속도에 의존한다. 신호의 특성에 따라 연속형 신호에는 탄성파의 감쇠특성을 이용하고, 돌발형 신호에는 탄성파의 전파속도를 이용한다. 그러므로 AE에 의한 위치표정은 압력용기와 같은 구조물에 있어서 결함의 위치 및 균열의 시간적 진전에 따른 연속적인 추적과 외부로부터 들어오는 잡음의 제거에 매우 적합한 방법이다. AE 발생원(AE source)의 위치표정기술은 다양하게 개발되고 있으며,

통상 AE파가 각 센서에 도달하는 시간차로부터 지진의 진원지를 구하는 것과 같은 방법으로 구한다.⁽¹³⁾ 또한 위치표정에는 1차원(직선상), 2차원(평면상) 및 3차원(입체내)의 3종류가 있고, 원리적으로 필요한 센서의 갯수는 각각 2개, 3개 및 4개이며 정도를 높이기 위하여 일반적으로 4개 이상의 센서가 사용된다.^(1,2,6-8)

본 실험에서 얻은 대표적인 결과를 Fig.12와 Fig.13에 나타내었다. 전술한 바와 같이 용접부의 강도는 모재의 강도보다 강하기 때문에 위치표정 결과로부터 용접부가 아닌 열영향부에서 파단이 발생됨을 명확히 확인할 수 있다.

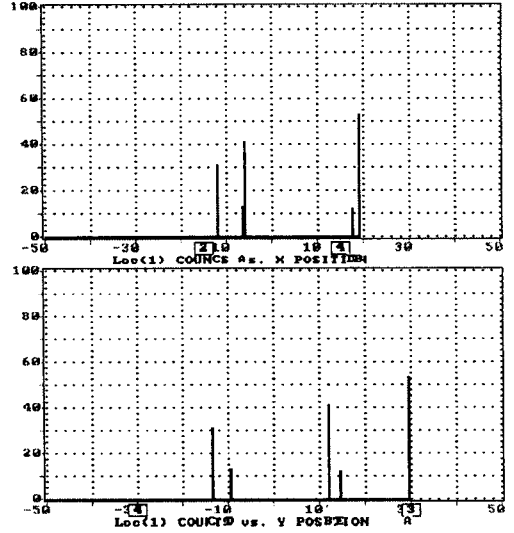


(a) Event identification

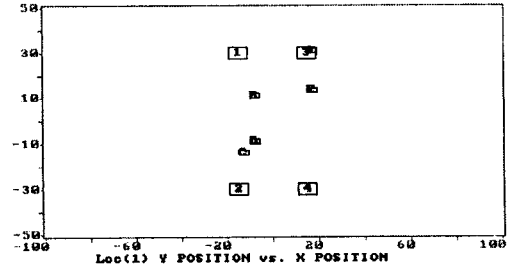


(b) Planar clustering display

Fig.12 Results of source location (SMAW+CO₂)



(a) Event identification



(b) Planar clustering display

Fig.13 Results of source location (CO₂+TIG)

4. 결 론

단일용접 및 복합용접한 SM 490A 강의 인장시험편에 대하여 정속인장시험으로 AE신호를 계측한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장시험편에서 열영향부에 대한 누적AE이벤트 곡선은 대부분 뚜렷한 변곡점을 갖으며, 그곳으로부터 고진폭 범위의 AE가 폭넓게 발생하였다. 이는 결정립의 성장, 2상(탄·질화물) 또는 입자의 고용 및 석출, 잔류응력 등의 발생에 의하여 열영향부의 성질이 용융역과 모재의 성질과는 아주 다르게 변하였기 때문이다.

(2) AE신호의 진폭분포에 대한 파괴기구와 균열진전 과정의 해석을 비교·검토한 결과 저진폭의 AE신호는 모재균열의 발생에, 고진폭의 AE신호는 모재파괴에 각각 대응되는 것으로 판단된다.

(3) 단일용접의 경우 열영향부의 강도는 전기피복아크용접 > TIG용접 > CO₂가스아크용접 순으로 나타났으며, 용접시 전류밀도와 용융온도가 높을수록 열영향부의 기계적 강도가 낮아지는 것을 확인하였다.

(4) 복합용접의 경우 열영향부의 강도는 TIG용접에 한하여 다소 다른 경향을 보이지만 이면비드와 표면비드의 순서에는 무관하며, 특히 전기피복아크용접과 CO₂가스아크용접을 혼합하면 CO₂가스아크용접의 단점인 열영향부의 기계적 강도를 상호 보완할 수 있으므로 제품의 질적향상이 기대된다.

참 고 문 헌

(1) Ronnie K. Miller and Paul McIntire, 1987, Non-destructive Testing Handbook (2nd ed.), Vol.5, Acoustic Emission Testing, ASNT.

(2) 仲佐博裕, 1994, アコースティックエミッションの理論と實際, 地人書館.

(3) 溶接學會編, 1990, 溶接·接合便覽, 丸善株式會社.

(4) 한국산업인력공단 중앙인력개발센터 교재팀, 1999, 특수용접이론, 한국산업인력공단.

(5) 한국규격협회, 1995, KS B 0833, 맞대기용접이음의 인장시험방법.

(6) Spartan 2000 User's manual & Technical manual, 1995, Physical Acoustics Corporation.

(7) Zhang-Kyu Rhee, 2001, "Analyses of Identification and Inverse Problem in Cracked Body by Acoustic Emission", Ph.D. thesis, Incheon, Korea.

(8) James D. Leaird, 1997, Acoustic Emission Training Guide - How to Ensure an Accurate and Valid Acoustic Emission, Greensland Publishing Company, Sacramento, California.

(9) Daniel R. Smith Jr. and Steve H. Carpenter, 1988, "Identification of Crack Propagation Modes in 304 Stainless Steel by Analysis of Their Acoustic Emission Signatures", Journal of Acoustic Emission, Vol.7, No.1, pp.9-19.

(10) T. Chelladurai, A.S. Sankaranarayanan and K.K. Purushothaman, 1994, "Acoustic Emission Response of Centre Cracked M250 Maraging Steel Welded Specimens", Journal of Acoustic Emission, Vol.12, Nos.3-4, pp.111-115.

(11) Steve H. Carpenter and Christian Pfliederer, 1994, "Acoustic Emission from AISI 4340 Steel as a Function of Strength", Journal of Acoustic Emission, Vol.12, Nos.3-4, pp.141-148.

(12) Adrian A. Pollock, 1979, "Acoustic Emission Inspection", Metals Handbook (9th ed.), Vol.17, pp.278-294.

(13) Masayasu Ohtsu, 1988, "Source Inversion of Acoustic Emission Waveform", Structural Eng. / Earthquake Eng., Vol.5, No.2, pp.275s-283s.