

SWS 490A 강의 용접 열영향부 음향방출 특성에 대한 연구(1)

이장규⁺, 우창기*, 박성완⁺⁺, 윤종희⁺⁺⁺, 조진호⁺⁺⁺, 김봉각⁺⁺⁺⁺, 구영덕⁺⁺⁺⁺⁺
(논문접수일 2002. 12. 22, 심사완료일 2004. 6. 10.)

A Study on the Acoustic Emission Characteristics of Weld Heat Affected Zone in SWS 490A Steel(1)

Zhang-Kyu Rhee⁺, Chang-Ki Woo*, Sung-Oan Park⁺⁺,
Joung-Hwi Yoon⁺⁺⁺, Jin-Ho Cho⁺⁺⁺, Bong-Gag Kim⁺⁺⁺⁺, Young-Duk Koo⁺⁺⁺⁺⁺

Abstract

The object of this study is to investigate the effect of compounded welding through the AE(Acoustic Emission) characteristics for weld HAZ(Heat Affected Zone) under the static tensile test. This study was carried out an SWS 490A, high tension steel for electric shield 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. The accumulated AE event curve of HAZ definitely have the point of inflection subject to tensile test. The results of the tensile test of HAZ come out electric shield arc welding > CO₂ gas arc welding > TIG welding in case of single welding, but generally the tensile test of HAZ come out electric shield arc welding > TIG welding > CO₂ gas arc welding. These history plots give us useful and powerful information to analyze the results of material evaluation testing.

Key words : AE(음향 방출), Arc Welding(아크 용접), Compounded Welding(복합 용접), HAZ(열영향부), SWS 490A(SWS 490A강)

1. 서론

용접은 금속의 가용성을 이용하여 두개의 금속을 용융온도

이상으로 가열하여 접합하는 야금학적 접합법으로 각종 산업의 플랜트 설비나 제품의 사용에 따른 수리 및 보수에서도 필수적인 관리기술로서 현대의 모든 산업에 있어서 용접

* 인천대학교 기계공학과 (woerwck@incheon.ac.kr)
주소: 402-749 인천광역시 남구 도화동 177번지
+ 인천대학교 기계공학과
++ 인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과
+++ 인천대학교 대학원 기계공학과
++++ 충청대학 메카트로닉스학부
+++++ 한국과학기술정보연구원(KISTI)

이 차지하는 비중과 필요성은 이미 잘 알려진 사실이다⁽¹⁾. 그러나 산업현장에서의 구조물은 복잡·다양한 구조를 갖기 때문에 용접자동화가 쉽지 않으며, 이로 인해 전기피복아크용접, 탄산가스아크용접 및 불활성가스아크용접(TIG 용접) 등 수작업에 의하여 설비비가 싸고 쉽게 용접할 수 있는 단일용접이 통상적으로 이용되고 있다⁽²⁾.

따라서, 본 연구에서는 고장력 SWS 490A 강에 전기피복아크용접, 탄산가스아크용접 및 TIG용접을 사용하여 이면비드와 표면비드를 단일용접한 경우와 복합용접한 경우, 정속인장시험 시 용접 열영향부에 대한 AE 신호특성을 분석하여 복합용접의 효율적인 활용방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편

2.1.1 용접시험편 재료

용접시험편의 모재(base metal)는 POSCO에서 생산한 고장력강인 SWS 490A로 동일한 성질을 얻기 위하여 동일한 배취(batch)에서 시료를 채취하였다. Fig. 1은 그 규격 및 용접방법으로 시험편 두께 6mm에 대하여 각각 3mm씩 이면비드와 표면비드를 부여하였으며, Table 1은 시험편 모재의 화학적 조성과 기계적 성질이다.

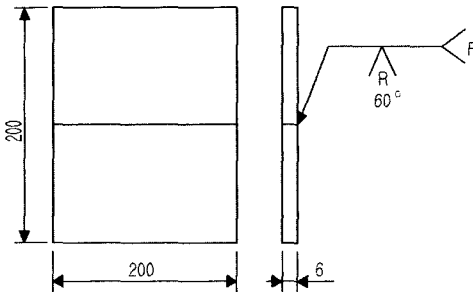


Fig. 1 Specimen size and welding method

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SWS 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 용접봉은 교류아크용접기로 AW-30이며, 용접봉은 현장에서 가장 많이 사용되는 저수소계 E4316으로 용접봉의 크기는 $\phi 3.2 \times 350\text{mm}$ 이고, 심선은 저탄소 림드강이며, 용접 시작점에 많은 결함의 위험이 있어 사용 전 300~350℃로 30분~1시간정도 건조시킨 후 사용하였다. Table 2는 본 연구에서 사용한 저수소계 용접봉의 화학적 조성과 기계적 성질이다.

(2) 탄산가스아크용접의 복합와이어

탄산가스아크용접에 사용된 용접봉은 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.

(3) TIG용접의 전극봉

TIG용접에 사용된 용접봉은 인버터(inverter) 식으로 AC/DC 겸용인 WAT-300이며, TIG 용접 시 inert 가스는 알곤가스를 사용하였고, 전극봉은 텅스텐 전극봉이며, 용접봉으로는 스테인리스 용가재를 사용하였다. Table 4는 텅스텐 전극봉의 용접전류에 대한 전극, 금속 노즐 및 알곤가스의 유량을 나타낸 것이다.

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	

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			

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 모재를 외관 검사한 후 결함 유무를 확인하였다. Fig. 2는 시험편의 채취방법을 나타낸다. 전기피복아크용접, 탄산가스아크용접 및 TIG용접만으로 단일용접한 시험편은 A type으로, 복합용접의 경우에는 시험편의 오차를 줄이기 위하여 A type과 B type으로 각각 채취하였다. 한편, Fig. 3은 본 연구에서 사용한 평할재 인장시험편으로 KS B 0833 맞대기용접이음의 인장시험방법의 규정에 따라 제작하였다⁽³⁾.

2.2 실험방법

본 연구에서 사용한 인장시험기(Autograph 25-TG,

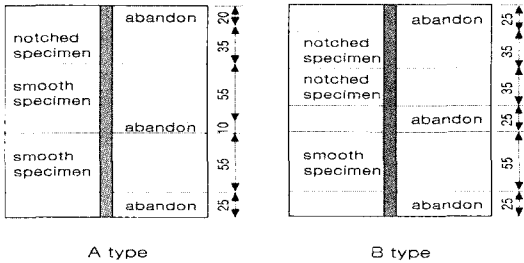


Fig. 2 Process method of specimen

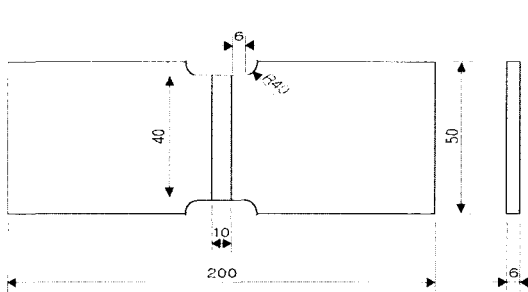


Fig. 3 Geometry of test specimen(unit:mm)

Shimadzu)의 부하속도는 모든 경우에 있어서 2mm/min의 정속신장형 부하이며, 잡음을 줄이기 위하여 케이블의 양 끝에 페라이트 코어(ferrite core)를 사용한 5730140 컨넥터⁽⁴⁾를 인장시험기의 아날로그 출력단자에 연결하고 인장시험기로부터 출력되는 하중값을 인장시험기와 AE 계측시스템(Spartan 2000, PAC)에 전송하였으며^(4,5), 그 실험장치 구성도는 Fig. 4와 같다.

한편, AE 파형계측에는 R15(공진주파수 150 kHz, PAC) 센서를 시험편 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 각각 30mm 떨어진 위치에 고진공그리스(Dow corning high vacuum grease)를 사용하여 시험편에 대칭이 되도록 2개의 AE 센서를 각각 압착시키고 절연테이프로 고정된 후 캘리브레이션을 실시하였다⁽⁶⁻¹¹⁾. 실험 중 센서에 의한 신호는 인장시험기의 로드셀에 의하여 검출된 하중신호와 함께 각각

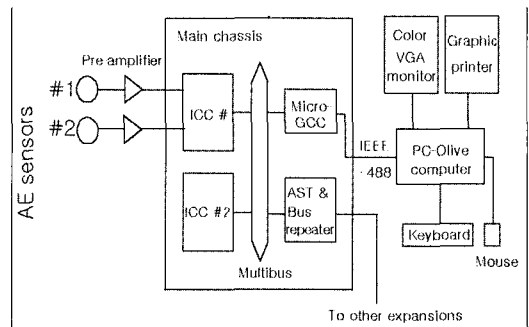


Fig. 4 Experimental Setup and schematic block diagram of Spartan 2000 AE system

AE 계측장치에 입력된다. 이 때 전치증폭기(1220A, PAC)의 gain은 40dB로 설정하였으며 100~300kHz의 대역에서 잡음을 제거하였다. 또한 실험 중에 샘플링 주기 250nsec 간격으로 검출된 아날로그 AE 신호를 주증폭기에서 20dB로 증폭하여 웨이브 메모리 디지털 데이터로 변환하여 기억시킨 후, PC에 전송하였다. 이 때 threshold 값은 40dB로 고정하였으며, 그 후 CPU에 전송된 하중과 시간에 대한 AE 이벤트수, 누적 AE 이벤트수, AE 진폭 등은 사전에 작성된 SP2-DAQ(Spartan 2000, PAC) 내의 환경에 의하여 획득하였다^(4,5).

3. 실험결과 및 고찰

실험으로부터 얻은 결과의 일부를 대표적으로 Fig. 5~Fig. 11에 나타내었다. 각 그림의 좌측 하단의 □은 x축을 시간, y축을 AE 이벤트수로 하는 그래프로 매순간 방출하는 AE 이벤트를 나타내며, ②는 AE 이벤트의 누적량을 보여준다. ③은 x축을 하중, y축을 에너지 값으로 하는 그래프이고, ④는 x축을 시간, y축을 진폭으로 하는 그래프이다. ⑤는 x축을 진폭, y축을 에너지 값으로 하는 그래프이며, ⑥은 x축을 진폭, y축을 AE 이벤트수로 하는 그래프로 #1과 #2 센서에서 검출한 AE 신호의 분포를 보여준다. 또한 하단의 괄호는 (이면비드+표면비드)의 순으로 용접하였음을 의미한다.

Fig. 12~Fig. 17은 ①부터 ⑥까지의 그림을 자세히 설명하기 위한 것이다. Fig. 12에서 ①은 재료의 탄성변형 및 소성변형이 일어나는 부분으로써 AE 이벤트의 방출량이 점차 감소한다. ②는 재료에 소성변형이 마무리되고 크랙이 생성되는 부분으로 AE 이벤트의 방출량이 매우 적다. ③은 ②에서 생성된 크랙이 진전하는 부분으로 많은 수의 AE 이벤트가 방출된다. ④는 재료에 생성된 크랙의 진전이 완료된 부분으로써 재료가 파단되기 바로 전의 AE 이벤트 수이다. Fig. 13에서 ①은 재료의 탄성변형 및 소성변형이 일어나는 부분으로써 AE 이벤트의 방출량이 많기 때문에 그래프의 기울기가 매우 급하다. ②는 소성변형이 마무리되고 크랙이 생성되는 부분으로써 방출되는 AE 이벤트 수가 적기 때문에 기울기가 매우 완만하여 변곡점이 형성된다. ③은 크랙이 진전하는 부분으로 많은 수의 이벤트가 방출되기 때문에 그래프의 기울기가 매우 급하다. ④는 재료에 생성된 크랙의 진전이 완료된 부분으로 방출되는 AE 이벤트가 적기 때문에 기울기가 완만하다. Fig. 14에서 ①은 재료에 잠재되어 있는 변형에너지로 재

료의 파단에 대한 저항성을 확인할 수 있다. ②는 재료의 최대하중으로 98kN을 5V로 하여 환산한 값이다. Fig. 15에서 ①은 초기에 탄성변형 및 소성변형이 일어나는 부분으로 진폭이 70~80dB 정도로 중진폭 범위에서 분포한다. ②는 소성변형이 마무리되고 크랙이 생성되는 부분으로 진폭이 70dB 정도이다. ③은 크랙이 진전하는 부분으로 진폭이 90~100dB 정도로 고진폭 범위에서 분포한다. ④는 크랙의 진전이 완료되고 재료의 파단이 일어나기 바로 전의 진폭분포이다. ⑤는 threshold가 40dB임을 시사한다. Fig. 16에서 ①은 threshold가 40dB임을 나타낸다. ②는 고진폭의 범위를 갖는 신호가 높은 에너지를 방출한다는 것을 나타낸다. Fig. 17에서 ①은 #1 센서에서 받아들인 신호의 범위이다. ②는 #1 센서에 받아들인 신호 중 큰 에너지를 방출한 신호의 진폭을 나타낸 것이다. ③은 #2 센서에서 받아들인 신호의 범위이다. ④는 #2 센서에서 받아들인 신호 중 큰 에너지를 방출한 신호의 진폭을 나타낸 것이다.

단일용접한 경우에 대한 결과인 Fig. 5~Fig. 7에 대한 설명은 다음과 같다.

각 그림에서 ①과 ②를 보면 Fig. 5와 Fig. 6은 탄·소성 변형구간과 크랙의 생성·진전이 뚜렷하게 구분이 되어 있으나 Fig. 7은 뚜렷한 구분이 없는 것으로 볼 때 탄·소성 변형이 일어남과 동시에 크랙이 생성·진전된 것으로 볼 수 있다. 이로 인해 Fig. 5와 Fig. 6에 비해 변곡점이 뚜렷하게 나타나지 않았다. ③의 에너지 값이 Fig. 5 > Fig. 6 > Fig. 7인 것을 통하여 재료의 인성이 Fig. 5의 전기피복아 크용접이 가장 크고, Fig. 7의 TIG용접이 가장 작음을 알 수 있다. ④에서 Fig. 5와 Fig. 6은 탄·소성변형구간에서 70~80dB의 진폭을 가진 신호를 방출하고, 비슷한 시간에 크랙이 생성하며 크랙진전구간에서 90~100dB의 진폭을 가진 신호를 방출한다. 그러나 Fig. 7은 초기에 70~80dB의 진폭을 가진 신호를 방출하고 진폭이 점점 감소한다. ⑤와 ⑥에서 Fig. 5와 Fig. 6은 80~100dB의 높은 진폭에서 많은 에너지를 방출하는 신호가 많이 검출되었으나 Fig. 7은 80dB 이하의 진폭에서 작은 에너지를 방출하는 신호가 많이 검출되는 것을 통해 재료의 특성과 인성이 차이가 있음을 알 수 있다.

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

각 그림에서 ①과 ②를 보면 모두 탄·소성변형구간과 크랙이 진전하는 구간이 구분되고 있으나 Fig. 10은 크랙의 발생과정에도 많은 양의 AE 이벤트를 방출하는 다소 다른

경향을 보이고 있다. 그러나 ③을 통하여 볼 때 단일용접에서 보였던 TIG용접의 강도상의 문제가 보완되었음을 알 수 있다. ④, ⑤ 및 ⑥에서 보면 모두가 탄·소성변형구간에서는 70~80dB의 진폭범위를 갖는 신호를 방출하며, 크랙이 진전하는 구간에서는 90~100dB 정도의 진폭범위를 갖는 신호를 방출하고 고진폭 범위에서 많은 양의 에너지가 방출됨을 알 수 있다.

이와 같이 AE 신호는 AE 발생량에 대한 개개의 이벤트에 의해 관측되고 AE 에너지와 지속시간 그리고 개개의 이벤트가 발생하는 시간적 빈도나 공간적 위치에 관한 정보를 포함한다. 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 AE 신호특성은 진폭분포 또는 이벤트 수로써 정량화되며 결합, 파손 및 균열의 진전량 등을 파악한 후, 보다 정확한 설비수명을 예측하여 대형사고를 미연에 방지할 수 있는 측면에서 유용하다.

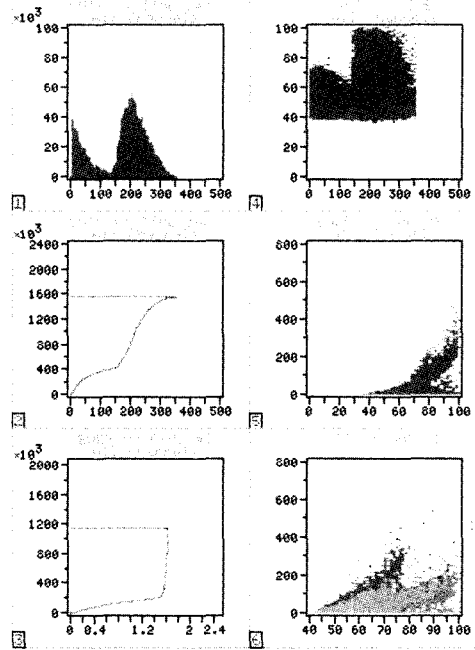


Fig. 6 Results of detected AE signals (CO₂+CO₂)

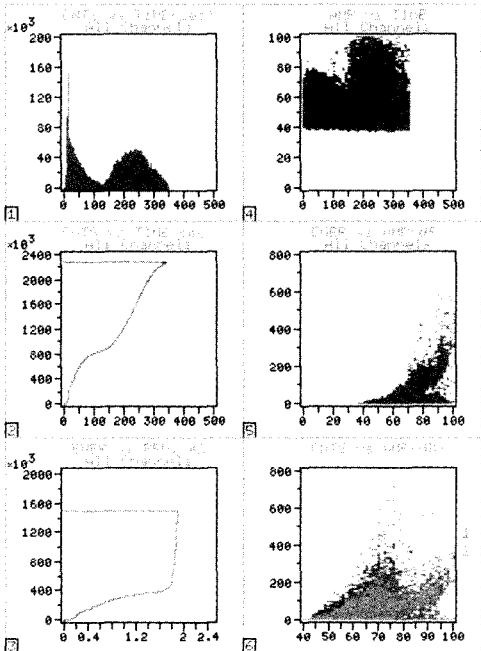


Fig. 5 Results of detected AE signals (SMAW+SMAW)

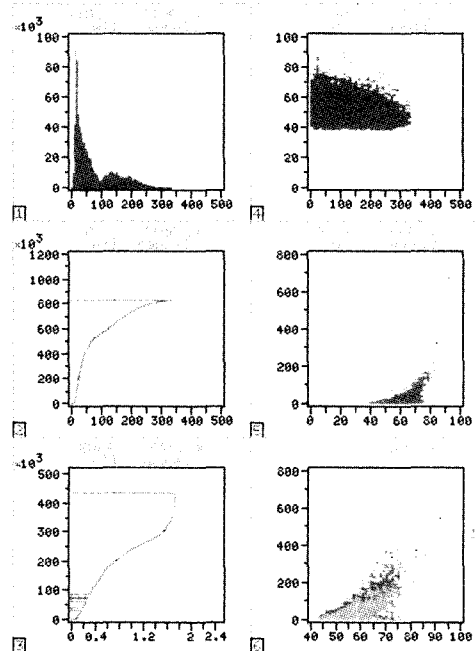


Fig. 7 Results of detected AE signals (TIG+TIG)

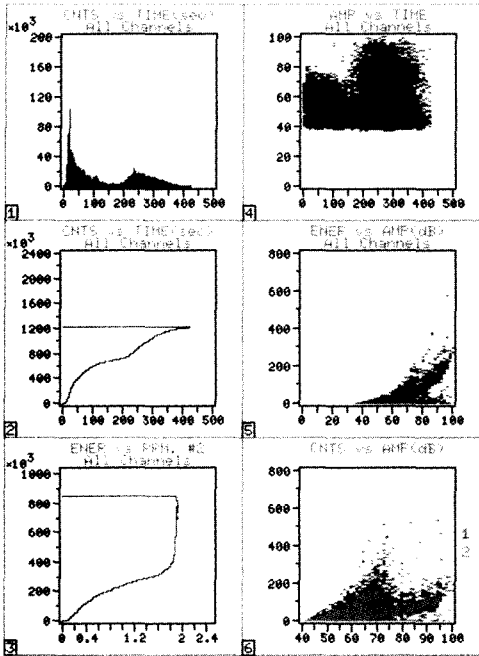


Fig. 8 Results of detected AE signals (SMAW+CO₂)

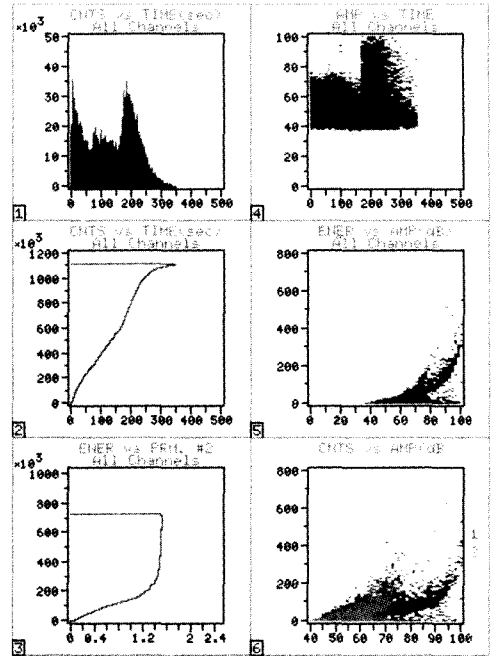


Fig. 10 Results of detected AE signals (TIG+SMAW)

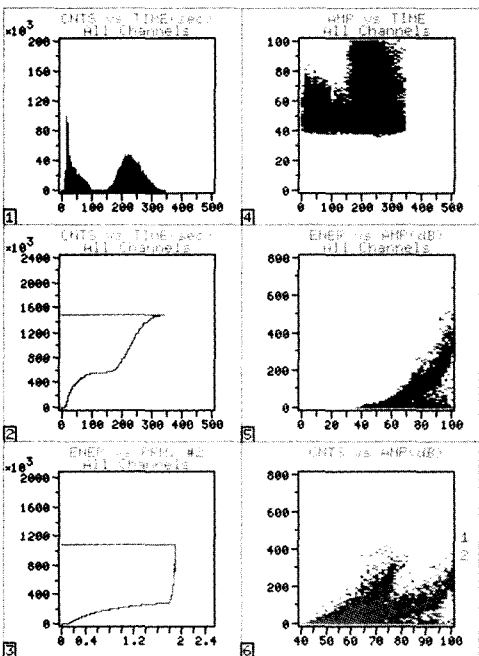


Fig. 9 Results of detected AE signals (CO₂+SMAW)

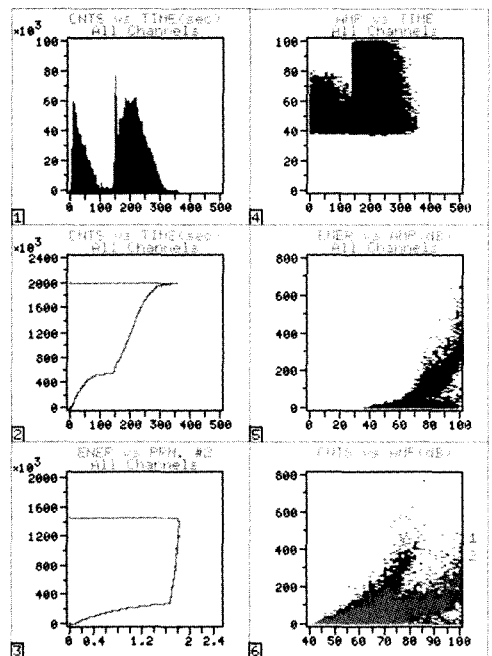


Fig. 11 Results of detected AE signals (CO₂+TIG)

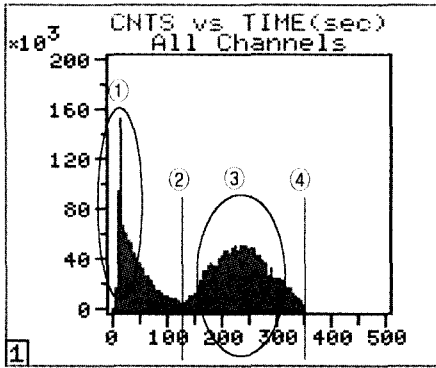


Fig. 12 Results of detected AE signals for counts vs. time

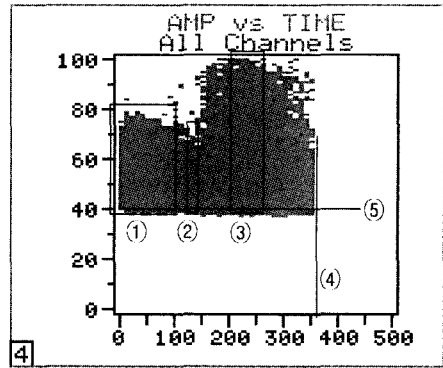


Fig. 15 Results of detected AE signals for amplitude vs. time

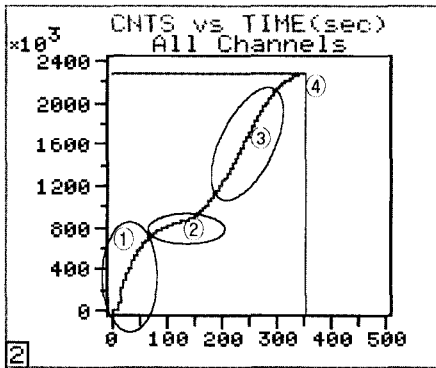


Fig. 13 Results of detected AE signals for cumulative counts vs. time

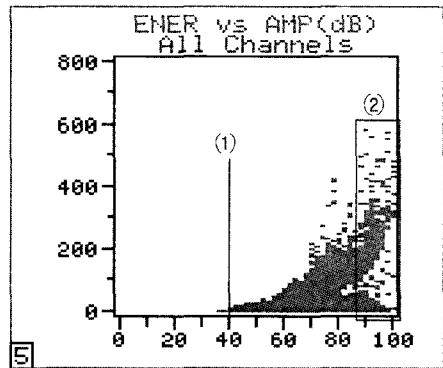


Fig. 16 Results of detected AE signals for energy vs. amplitude

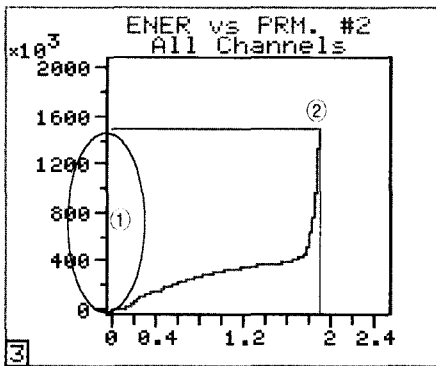


Fig. 14 Results of detected AE signals for energy vs. parametric#2(load)

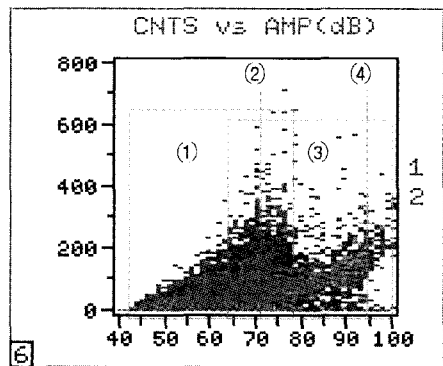


Fig. 17 Results of detected AE signals for counts vs. amplitude

4. 결론

단일용접 및 복합용접한 SWS 490A 강의 인장시험편에 대하여 정속인장시험으로 AE 신호를 측정한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인장시험편에서 열영향부에 대한 누적AE 이벤트 곡선은 대부분 뚜렷한 변곡점을 갖으며, 그곳으로부터 고진폭 범위의 AE가 폭넓게 발생하는 등 재료평가의 유용성을 확인하였다. 이는 결정립의 성장, 2상(탄 · 질화물) 또는 입자의 고용 및 석출, 잔류응력 등의 발생에 의하여 열영향부의 성질이 용융역과 모재의 성질과는 아주 다르게 변화했기 때문인 것으로 사료된다.
- (2) 단일용접의 경우 열영향부의 인성은 피복아크용접 > 탄산가스아크용접 > TIG용접 순으로 나타났다. 통상 열영향부의 인성은 전기피복아크용접 > TIG용접 > 탄산가스아크용접 순으로 나타나는 것이 보편적인데, 이와 같은 결과가 나타나는 것은 용접 시 시험편에 적용된 루트간격이나 시험편의 두께에 따른 것으로 판단된다.
- (3) AE 신호의 진폭분포에 대한 파괴기구와 균열진전과정의 해석을 비교 · 검토한 결과 저진폭의 AE 신호는 모재균열의 발생에, 고진폭의 AE 신호는 모재파괴에 각각 대응되는 것으로 판단된다.
- (4) 복합용접의 경우 열영향부의 강도는 TIG용접에 한하여 다소 다른 경향을 보이지만 이면비드와 표면비드의 순서에는 무관하며, 특히 전기피복아크용접과 탄산가스아크용접을 혼합하면 탄산가스아크용접의 단점인 열영향부의 기계적 강도를 상호 보완할 수 있으므로 제품의 질적 향상이 기대된다.

후 기

본 연구는 2003년도 인천대학교 학술연구조성비지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Japan Welding Society, 1993, *Welding and Joining Handbook*, Maruzen Co., Ltd.
- (2) Cary, 2001, *Modern Welding Technology(5th ed.)*, Prentice Hall.
- (3) Korean Standards Association, 1995, *KS B 0833*.
- (4) Rhee, Z. K., 2001, *Analyses of Identification and Inverse Problem in Cracked Body by Acoustic Emission*, Ph. D. thesis, University of Incheon, Incheon, Korea.
- (5) Physical Acoustics Corporation, 1995, *Spartan 2000 User's manual & Technical manual*.
- (6) Smith Jr., D. R., and Carpenter, S. H., 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.
- (7) Chelladurai, T., Sankaranarayanan, A. S., and Purushothaman, K. K., 1994, "Acoustic Emission Response of Centre Cracked M250 Maraging Steel Welded Specimens," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 12, No. 3-4, pp. 111~115.
- (8) Carpenter, S. H., and Pfleiderer, C., 1994, "Acoustic Emission from AISI 4340 Steel as a Function of Strength," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 12, No. 3-4, pp. 141~148.
- (9) Leaird, J. D., 1997, *Acoustic Emission Training Guide: How to Ensure an Accurate and Valid Acoustic Emission*, Greensland Publishing Company, Sacramento, California.
- (10) Miller, R. K., and McIntire, P., 1987, *Nondestructive Testing Handbook(2nd ed.)*, Vol. 5, *Acoustic Emission Testing*, ASNT.
- (11) Nakasa, H., 1994, *Theoretical Bases and Practical Applications of Acoustic Emission*, Chijin Shokan Co., Ltd.