

음향방출 신호를 이용한 SWS 490A 고장력강의 접합성 평가에 대한 실험적 연구

이장규*, 우창기†

(논문접수일 2005. 2. 3, 심사완료일 2005. 4. 12)

Experimental Studies on Joinability of SWS 490A High Tension Steel using Acoustic Emission Signals

Zhang-Kyu Rhee*, Chang-Ki Woo†

Abstract

The object of this study is to investigate the effect of joinability by using acoustic emission(AE) signals and doing a pattern recognition for weld heat affected zone(HAZ) in tensile testing. This study was carried out an SWS 490A high tension steel for electric shielded metal arc welding(SMAW), CO₂ gas arc welding and TIG welding. And correspondingly, the root openings are 3, 4 and 2.8mm. The results of the tensile test of weld HAZ come out electric shield arc welding > CO₂ gas arc welding > TIG welding in case of single welding. It is believed that this is a phenomenon where difference of its root opening or base metal thickness. Also, the technique of AE is ideally suited to study variables which control time and stress dependent fracture or damage process in metallic materials.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Heat Affected Zone(열영향부), Root Opening(루트간격), Joinability(접합성), SWS 490A High Tension Steel(SWS 490A 고장력강), Pattern Recognition(패턴인식), Frequency Analysis(주파수분석)

1. 서 론

어떤 물체가 내부 또는 외부의 응력에 의하여 파괴되면 작용응력의 형태 및 물체의 특성에 따라 독특한 소리를 내

게 되는데, 이처럼 물체의 변형 또는 파괴 시에 발생하는 물리적인 현상을 공학적인 측면에서 적극적으로 이용하려는 노력이 계속되어 음향방출(AE, acoustic emission)이라는 평가방법으로 자리잡게 되었다^(1,2). AE를 재료의 평가법에

* 인천대학교 기계공학과 (zkrhee@hanmail.net)
주소: 402-749 인천시 남구 도화동 177
† 인천대학교 기계공학과

적용하면 (1) 재료의 미시적인 변형과 파괴과정을 실험으로 해석하는 것이 가능하고, (2) 신소재 개발이나 기존 재료의 재질개선에 중요한 정보를 제공해 주며, (3) 금속재료와 같은 균질한 재료를 대상으로 개발되어진 대부분의 각종 실험 방법들을 복합재료와 같은 불균일 재료나 비금속 재료에 적용시킬 때 파생되는 다양한 문제점들을 보완할 수 있다⁽³⁻⁵⁾.

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 관리기술로서 현대의 산업에서 용접이 차지하는 비중과 필요성은 이미 잘 알려진 사실이다⁽⁶⁾. 또한, 산업현장에서의 실제 구조물은 복잡하고 다양한 구조를 갖기 때문에 용접자동화가 쉽지 않아 피복금속아크용접, CO₂ 용접 및 TIG용접 등 수작업에 의하여 설비비가 싸고 쉽게 용접할 수 있는 단일용접이 통상적으로 이용되고 있지만, 구조물의 질적 향상이 요구되는 경우에는 설비비가 많이 들고 공정이 복잡하더라도 복합용접을 택하고 있다⁽⁷⁾.

따라서, 본 연구에서는 SWS 490A 고장력강에 피복금속아크용접, CO₂용접 및 TIG용접을 사용하여 이면비드와 표면비드를 단일용접한 경우와 복합용접한 경우, 정속인장시험 시 얻어진 용접 열영향부에 대한 AE 신호의 분석을 통하여 용접에 따른 접합성을 비교해 보고자 한다.

2. 실험 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편

2.1.1 인장시험편

인장시험편의 모재(base metal)는 POSCO에서 생산한 SWS 490A 고장력강으로 동일한 배취(batch)에서 시료를 채취하였다.

Fig. 1은 모재에 대한 크기 및 용접방법으로 두께 6mm에 대하여 각각 3mm씩 이면비드와 표면비드를 2회에 걸쳐 부여하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 평활재 인장시험편으로 KS B 0833 「강의 맞대기 용접 이음 - 인장 시험 방법」 규격⁽⁸⁾에 따라 제작하였고, Fig. 1에서 보는바와 같이 모든 시험편에 대하여 루트면(root face) f 는 2mm로 하였으며, 루트간격(root opening) R의 경우에는 피복금속아크용접은 3mm, CO₂용접은 4mm, TIG용접은 2.8mm로 하였다. 또한 본 실험에서 사용한 모재(시험편)의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 2에서 보는바와 같다.

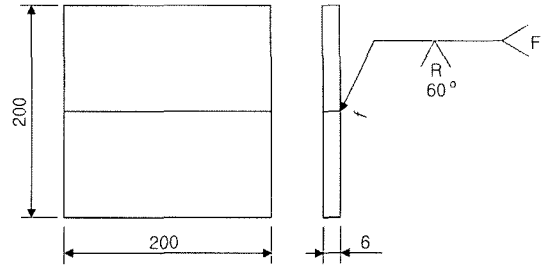


Fig. 1 Welding size and method(unit:mm)

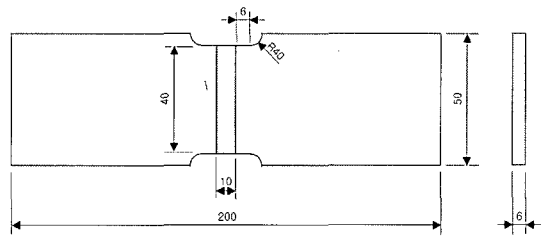


Fig. 2 Geometry of test specimen(unit:mm)

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) 피복금속아크용접의 용접봉

피복금속아크용접에 사용된 용접기는 AW-30의 교류아크용접기이며, 용접봉은 저수소계 E4316으로 크기는 $\phi 3.2 \times 350$ mm이고, 심선은 저탄소 림드강이다. 또한, 용접봉은 사용 전 300~350°C로 30분~1시간정도 건조시킨 후 사용하였다.

(2) CO₂용접의 복합와이어

CO₂용접에 사용된 용접기는 LG산전의 WAC-350A이며, 사용된 용접봉은 복합와이어로 크기는 $\phi 1.2 \times 20$ kg이고, 실드가스로 CO₂가스를 사용하였다.

(3) TIG용접의 전극봉

TIG용접에 사용된 용접기는 인버터식으로 AC/DC 겸용인 WAT-300이며, TIG 용접 시 불활성 가스는 알곤가스를

사용하였고, 전극봉은 텅스텐 전극봉이며, 용접봉으로는 스테인리스 용가재를 사용하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서 사용한 AE 계측시스템은 Physical Acoustics Corporation의 Spartan 2000 system으로 그 구성은 Fig. 3에서 보는바와 같고, MS-DOS V6.2 이상의 환경 하에서 SP2-DAQ(데이터 획득), SP2-LOC(2차원 위치표정), SP2-3DL(3차원 위치표정), TRA-212(주파수 분석) 및 GRAFPLUS(출력 및 가시화) 모듈을 탑재하고 있으며, 계측된 AE신호는 원시 데이터로 실시간에 저장 및 모니터링이 가능하다. 또한, 인장시험기(Autograph 25-TG, Shimadzu)의 부하속도는 모두 2mm/min의 정속신장형 부하이며, 잡음을 줄이기 위하여 케이블의 양 끝에 페라이트 코어(ferrite core)를 사용한 5730140 커넥터^(9,10)를 만들어 인장시험기의 아날로그 출력단자에 연결하여 인장시험기로부터 출력되는 하중값을 각각 인장시험기와 AE 계측시스템에 전송하였다.

한편, AE 파형계측에는 탄성파의 감쇠특성을 감안하여 R15(공진주파수 150kHz, PAC) 센서를 용접부의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 전면 및 후면에 각각 30mm 떨어진 위치(SP2-DAQ 및 TRA-212 모듈 사용 시 R15센서로 #1센서(0, 30), #2센서(0, -30)의 위치에 센서 배치)에 고진공 그리스(Dow coming high vacuum grease)를 사용하여 시험편에 대칭이 되도록 압착시키고 절연테이프 또는 자체 제작한 고정구를 사용하여 고정한 후, 프로그램내의 자동센서테스트(AST, Auto Sensor Test) 옵션에 의한 샷프임압절을 통하여 캘리브레이션을 실시하고, 센서의 압착여부를 확인하였다⁽¹¹⁻¹⁴⁾. 또한, 전치증폭기(1220A, PAC)의 gain을 40dB로 설정하였으며, 100~300kHz의 대역에서 잡음을 제거하고, 샘플링 주기 250nsec 간격으로 검출된 아날로그 AE 신호를 주증폭기에서 20dB로 증폭하여 웨이브 메모리 디지털 데이터로 변환하여 기억시킨 후, PC에 전송하였다. CPU에 전송된 SWS 490A 고장력강의 하중과 시간에 대한 AE이벤트수, 누적AE이벤트수, AE진폭 및 주파수 스펙트럼 등은 사전에 작성된 환경에 의해 SP2-DAQ와 TRA-212에서 획득하였다. Table 2는 AE 계측 시 설정한 실험 환경조건이며, 여기서 threshold, gain, PDT(Peak Definition Time), HDT(Hit Definition Time), HLT(Hit Lockout Time)는 신호측정과정을 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 가능

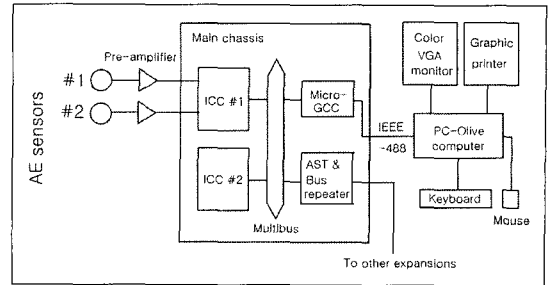


Fig. 3 Schematic block diagram of Spartan 2000 system

Table 2 Experimental condition

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

하게 한다. 또한 HLT는 AE가 지속되는 동안 탄성파의 반사(reflection) 혹은 늦게 도착한 AE신호의 측정을 억제함으로써 잘못된 측정을 피하고 데이터 획득속도를 증가시켜 주는 역할을 한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 AE 신호특성

데이터획득 실험(SP2-DAQ module)에서 얻은 결과를 대표적으로 Fig. 4~Fig. 10에 나타내었다. 각 그림에서 ①, ② 및 ④는 시간이력(time history)에 대한 각 채널별 AE이벤트수, 누적AE이벤트수 및 진폭분포이고, ③은 시간에 대한 하중(UTM X-T mode)과 RMS 값이다. 또한 ⑤와 ⑥은 진폭분포에 대한 상관도이다. 그리고, 하단의 괄호는 (이면비드+표면비드)의 순으로 용접하였음을 의미한다. Fig. 11~Fig. 16의 그림(Fig. 4 ①~⑥)은 본 실험으로부터 얻은 AE 신호에 대한 특성을 전반적으로 파악하기 위해 도시한 그림이다.

Fig. 11에서 ①은 재료의 탄성변형 및 소성변형이 일어나는 부분으로써 AE이벤트의 방출량이 점차 감소한다. ②는 재료에 소성변형이 마무리되고 크랙이 생성되는 부분으로 AE이벤트의 방출량이 매우 적으며, ③은 ②에서 생성된 크

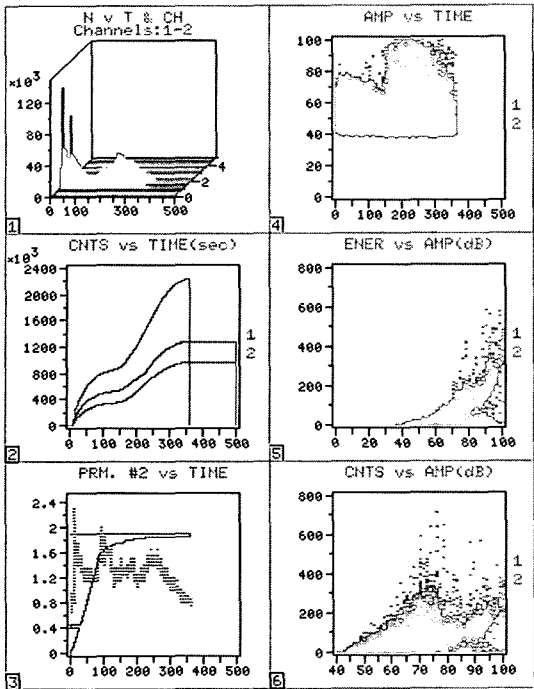


Fig. 4 Results of detected AE signals (SMAW+SMAW)

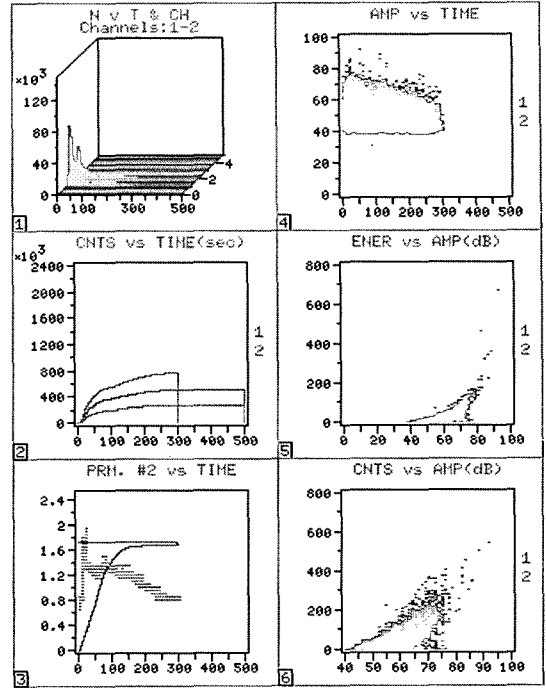


Fig. 6 Results of detected AE signals (TIG+TIG)

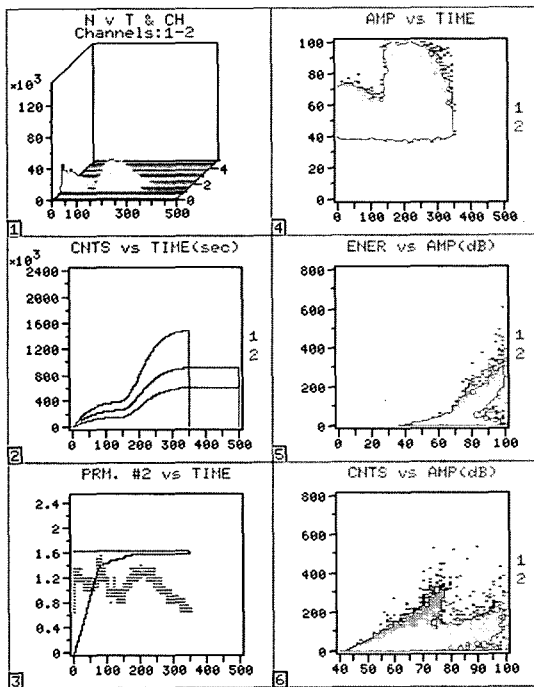


Fig. 5 Results of detected AE signals (CO₂+CO₂)

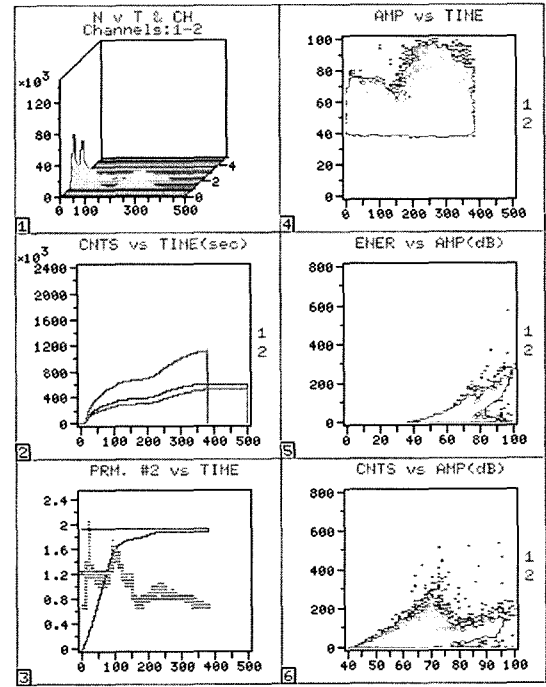


Fig. 7 Results of detected AE signals (SMAW+CO₂)

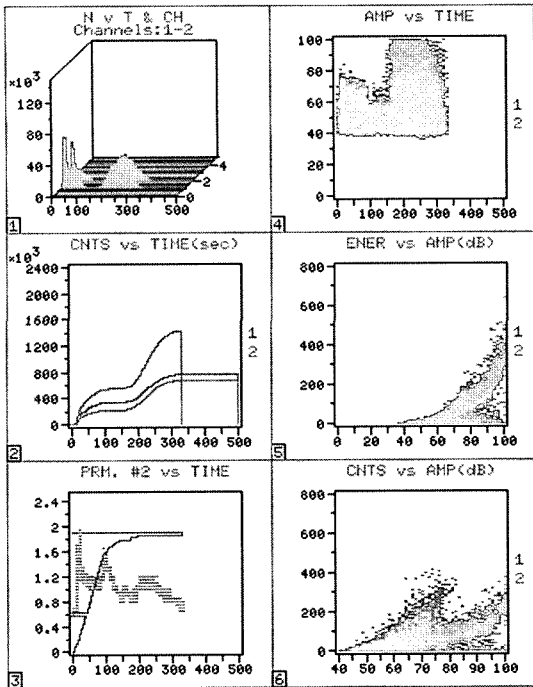


Fig. 8 Results of detected AE signals (CO₂+SMAW)

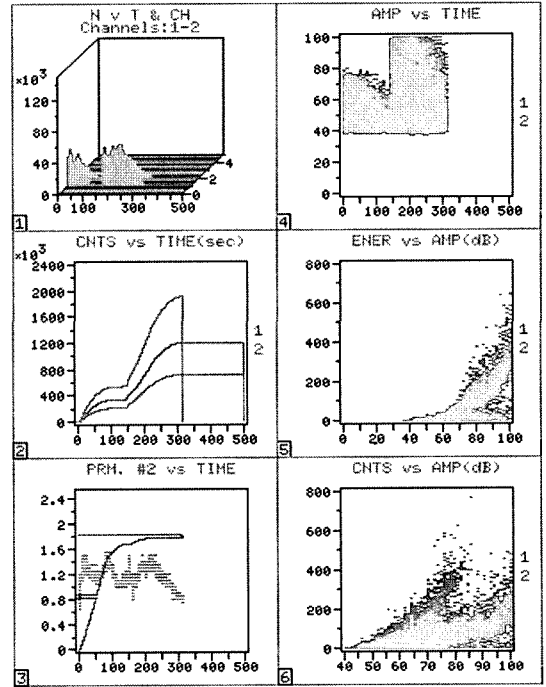


Fig. 10 Results of detected AE signals (CO₂+TIG)

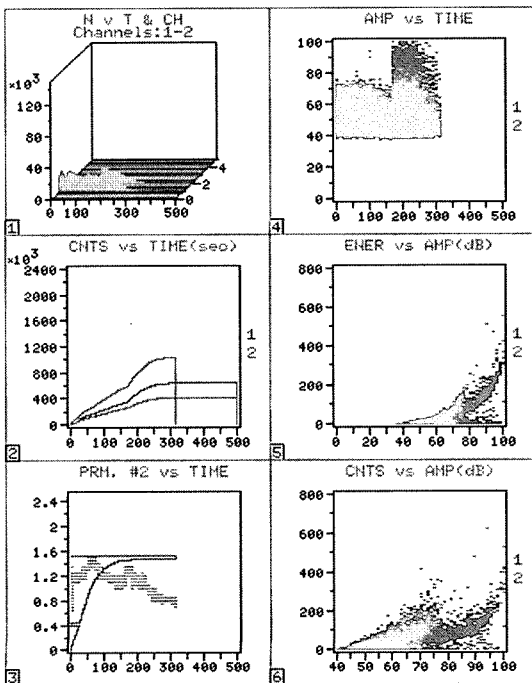


Fig. 9 Results of detected AE signals (TIG+SMAW)

랙이 진전하는 부분으로 많은 수의 AE이벤트가 방출된다. Fig. 12에서 ①은 재료의 탄성변형 및 소성변형이 일어나는 부분으로써 AE이벤트의 방출량이 많기 때문에 그래프의 기울기가 매우 급하며, ②는 소성변형이 마무리되고 크랙이 생성되는 부분으로써 방출되는 AE이벤트수가 적기 때문에 기울기가 매우 완만하여 변곡점이 형성된다. 한편, ③은 크랙이 진전하는 부분으로 많은 수의 이벤트가 방출되기 때문에 그래프의 기울기가 매우 급하다. Fig. 13의 시간에 대한 ①하중 및 ②RMS의 그래프에서는 재료의 파단에 대한 저항성을 확인할 수 있으며, 세로축의 값은 인장시험기의 아날로그 신호가 AE계측장비의 외부입력신호에 의해 병합처리된 것으로 예비인장시험에서 얻어진 최대하중 98kN을 해당전압으로 환산하여 플롯한 그림이다. Fig. 14에서 ①은 threshold가 40dB임을 시사하며, ②는 초기에 탄성변형 및 소성변형이 일어나는 부분으로 진폭이 70~80dB정도로 중진폭 범위에서 분포한다. 또한 ③은 소성변형이 마무리되고 크랙이 생성되는 부분으로 진폭이 70dB정도이고, ④는 크랙이 진전하는 부분으로 진폭이 90~100dB정도로 고진폭 범위에서 분포한다. Fig. 15에서 ①은 threshold가 40dB임을 나타내며, ②는 고진폭의 범위를 갖는 신호가 높은 에너지를 방출

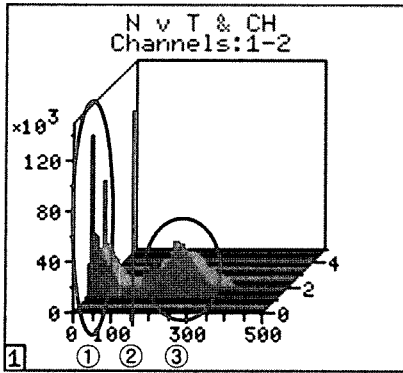


Fig. 11 Results of detected AE signals for counts vs. time and-channel

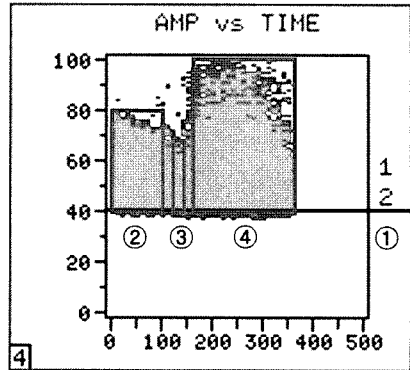


Fig. 14 Results of detected AE signals for amplitude vs. time

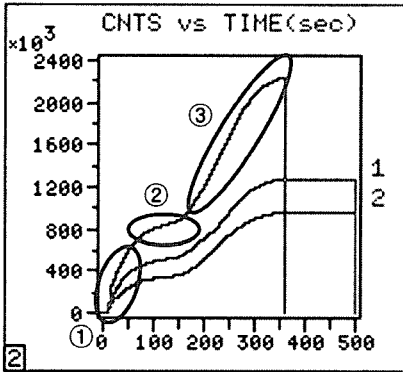


Fig. 12 Results of detected AE signals for cumulative counts vs. time

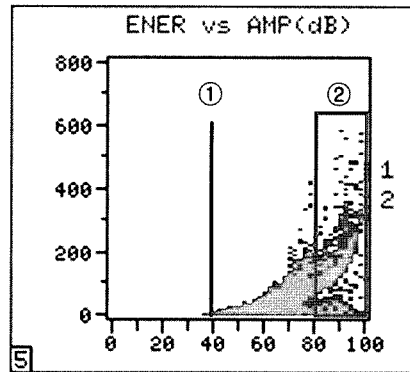


Fig. 15 Results of detected AE signals for energy vs. amplitude

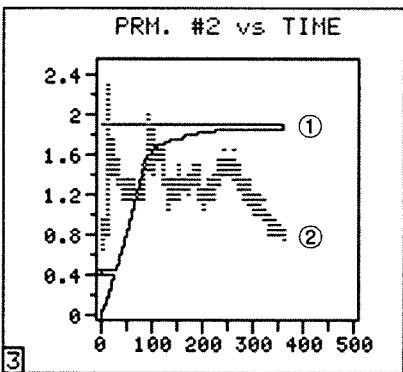


Fig. 13 Results of detected AE signals for parametric#2 (load) and RMS vs. time

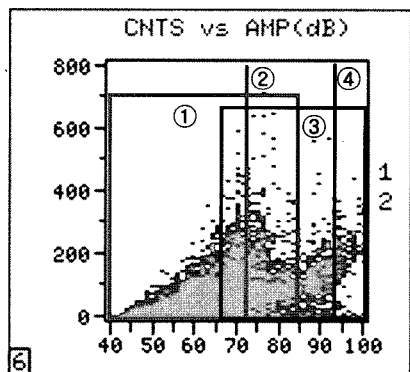


Fig. 16 Results of detected AE signals for counts vs. amplitude

한다는 것을 의미한다. Fig. 16에서 ①은 #1센서에서 받아들인 신호의 범위이며, ②는 #1센서에 받아들인 신호 중 큰 에너지를 방출한 신호의 진폭을 나타낸 것이다. 또한 ③은 #2센서에서 받아들인 신호의 범위이며, ④는 #2센서에서 받아들인 신호 중 큰 에너지를 방출한 신호의 진폭을 나타낸 것이다.

3.1.1 단일용접의 경우

단일용접한 경우에 대한 결과인 Fig. 4~Fig. 6에 대한 설명은 다음과 같다.

각 그림에서 ①과 ②를 보면 Fig. 4와 Fig. 5의 (SMAW+SMAW)와 (CO₂+CO₂)인 경우에는 탄·소성변형구간과 크랙의 생성·진전이 뚜렷하게 구분이 되어 있으나, Fig. 6의 (TIG+TIG)인 경우에는 뚜렷한 구분이 없는 것으로 볼 때, 탄·소성변형이 일어남과 동시에 크랙이 생성 및 진전된 것으로 볼 수 있다. 이로 인해 Fig. 4와 Fig. 5에 비해 변곡점이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 아크 또는 그 이외의 열을 이용해서 용접한 경우 용접금속의 바깥쪽, 즉 용융선과 모재 사이에 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 것이 일반적이다. 또한, 누적이벤트수가 Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6의 순인 것으로 볼 때, 재료의 강도는 Fig. 4의 피복금속아크용접이 가장 크고, Fig. 6의 TIG용접이 가장 작을 것으로 예상되는데, ③의 RMS 및 하중의 면적(에너지) 값이 Fig. 4 > Fig. 5 > Fig. 6인 것을 통하여 재료의 인성이 Fig. 4의 피복금속아크용접이 가장 크고, Fig. 6의 TIG용접이 가장 작음을 알 수 있다. 이는 ④에서 Fig. 4와 Fig. 5는 탄·소성변형구간에서 70~80dB의 진폭을 가진 신호를 방출하고, 비슷한 시간에 크랙이 생성되며 크랙진전구간에서 90~100dB의 진폭을 가진 신호를 방출한다. 그러나 Fig. 6은 초기에 70~80dB의 진폭을 가진 신호를 방출하고 진폭이 점점 감소한다. ⑤와 ⑥에서 Fig. 4와 Fig. 5는 80~100dB의 높은 진폭에서 많은 에너지를 방출하는 신호가 많이 검출되었으나 Fig. 6은 80dB이하의 진폭에서 작은 에너지를 방출하는 신호가 많이 검출되는 것을 통해 재료의 특성과 인성이 차이가 있음을 알 수 있다.

3.1.2 복합용접의 경우

복합용접한 경우의 결과인 Fig. 7~Fig. 10의 설명은 다음과 같다. 각 그림에서 ①과 ②를 보면 모두 탄·소성변형구간과 크랙이 진전하는 구간이 구분되고 있으나, Fig. 9는 크랙의 발생과정에도 많은 양의 AE이벤트를 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 90~100dB정도의 진폭범위를 갖는 신호를 방출하고 고진폭 범위에서 많은 양의 에너지가 방출됨을 알 수 있다.

이와 같이 AE 신호는 AE 발생량에 대한 개개의 이벤트에 의해 관측되고 AE에너지와 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 이벤트수로써 정량화되며 결함, 파손 및 균열의 진전량 등을 파악한 후, 보다 정확한 설비수명을 예측하여 대형사고를 미연에 방지할 수 있는 측면에서 상당히 유용하다.

3.2 주파수분석

주파수분석 실험(TRA-212 module)에서 얻은 통상의 결과를 Fig. 17과 Fig. 18에 나타내었다. Fig. 17은 획득된 데이터를 통계처리가 가능한 데이터 셋(data set)으로 변환하여 Max-Min Distance 알고리즘에 의한 패턴인식(PR, Pattern Recognition)의 결과로 각각 시간에 대한 진폭과 에너지의 관계를 나타내고 있다. Fig. 17(a)의 경우 3.1절에서 도시한 각 그림에서의 ④와 동일한 양상을 보이고 있으며, 오른쪽 상단의 범례(legend)는 전체 획득된 파형(waveform)에 대한 해당 백분율을 의미하고 있다. 또한 Fig. 17(b)는 AE에너지 크기에 대한 범위를 저·중·고의 3가지로 나누어 대별할 수 있음을 시사하고 있으며, 비로소 진폭과 에너지의 관계가 명확해짐을 알 수 있다. 한편, Fig. 18은 시간영역에서의 파형을 주파수영역으로 변환한 전형적인 FFT(Fast Fourier Transform) 진폭크기에 대한 결과로 Fig. 17의 패턴인식으로부터 시간의 경과에 따른 대표적인 예를 도시한 것이다. 강재의 경우 탄·소성변형에 의해 방출되는 AE 주파수는 약 100~300kHz이며, 그 중심주파수는 약 130~180kHz인 것으로 나타났다.

Fig. 17과 Fig. 18로부터 AE진폭은 대체로 고강도, 이방

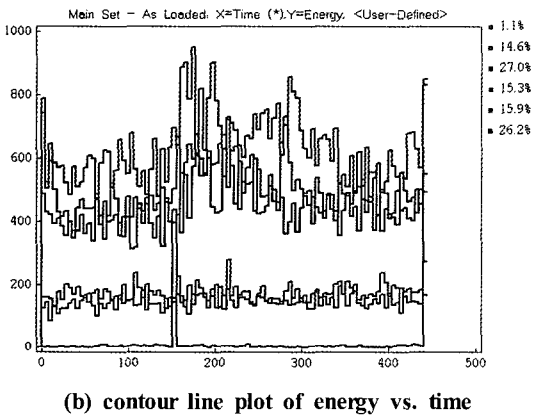
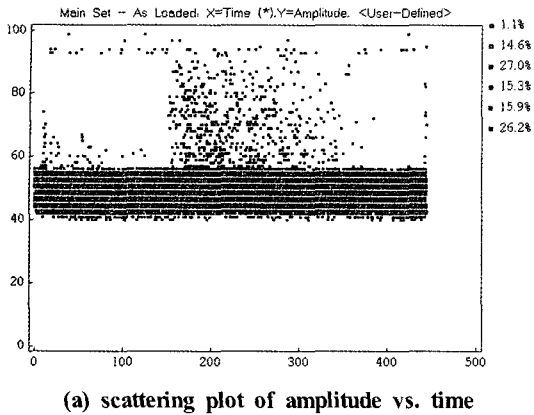


Fig. 17 Results of Max-Min Distance PR

성 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 박리 현상에 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 주파수 성분을 갖는다. 따라서 AE신호의 진폭분포에 대한 파괴기구와 균열진전 과정의 해석을 비교·검토한 결과 저진폭의 AE신호는 모재균열의 발생에, 고진폭의 AE신호는 모재 파괴에 각각 대응되는 것으로 판단된다.

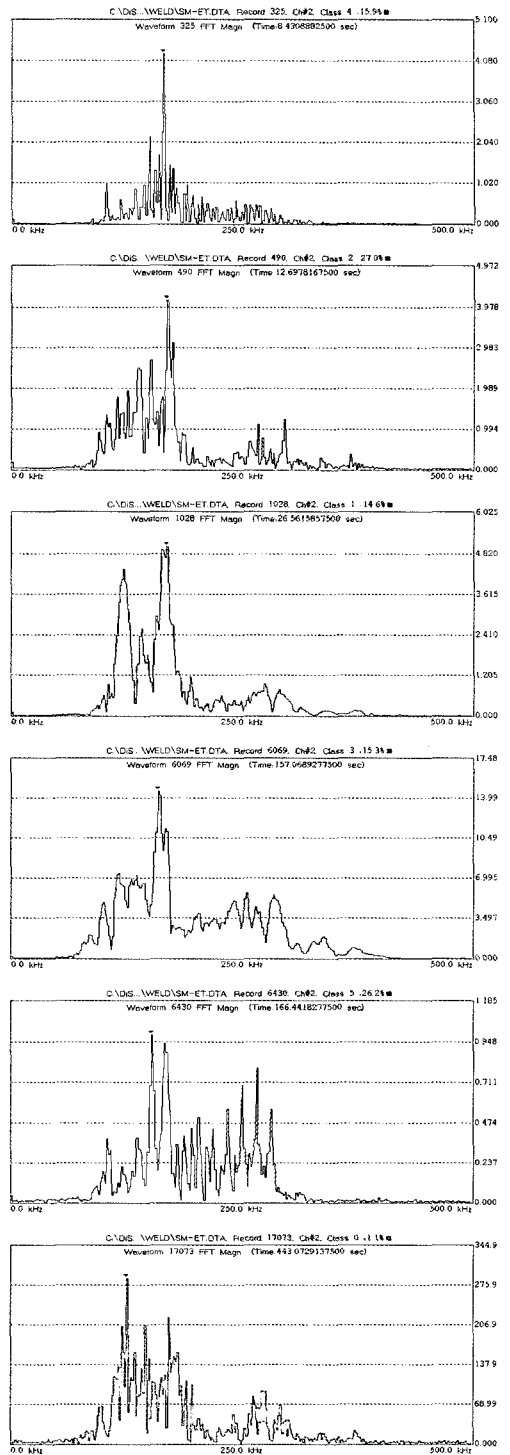


Fig. 18 Typical results of the FFT magnitude

4. 결 론

단일용접 및 복합용접한 SWS 490A 고장력강의 인장시험편에 대한 정속인장시험에서 측득된 AE신호를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

평활재 용접인장시험편에서 열영향부에 대한 누적AE이벤트 곡선은 대부분 뚜렷한 변곡점을 갖으며, 그곳으로부터 고진폭 범위의 AE가 폭넓게 발생하는 등 재료평가의 유용성을 제시하였다. 그 결과 단일용접의 경우 열영향부의 강도는 피복금속아크용접 > CO₂용접 > TIG용접 순으로 나타났다. 통상 열영향부의 강도는 피복금속아크용접 > TIG용접 > CO₂용접 순으로 예상되는데, 이와 같은 결과를 보인 것은 용접 시 시험편에 적용된 루트간격의 차이 또는 시험편의 두께에 대한 영향으로 판단된다. 또한, 복합용접의 경우 열영향부의 강도는 TIG용접에 한하여 다소 다른 경향을 보이지만 이면비드와 표면비드의 순서에는 무관하며, TIG용접에서 나타났던 열영향부의 기계적 강도를 상호보완할 수 있으므로 제품의 질적향상이 기대된다.

한편 주파수분석으로부터 강재의 경우 탄·소성변형에 의해 방출되는 AE 주파수는 약 100~300kHz이며, 그 중심 주파수는 약 130~180kHz인 것으로 나타났다. 그 결과 AE 신호의 진폭분포에 대한 파괴기구 및 균열진전 과정에 대하여 저진폭의 AE신호는 모재균열의 발생에, 고진폭의 AE신호는 모재파괴에 각각 대응됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Miller, R. K., and McIntire, P., 1987, *Nondestructive Testing Handbook(2nd ed.)*, Vol. 5, *Acoustic Emission Testing*, American Society for Nondestructive Testing.
- (2) Nakasa, H., 1994, *Theoretical Bases and Practical Applications of Acoustic Emission*, Chijin Shokan Co., Ltd.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Carpenter, S. H., and Pfeleiderer, 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.
- (6) Japan Welding Society, 1993, *Welding and Joining Handbook*, Maruzen Co., Ltd.
- (7) Cary, H., and Helzer, S., 2004, *Modern Welding Technology(6th ed.)*, Prentice Hall.
- (8) Korean Standards Association, 2001, *KS B 0833*.
- (9) 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.
- (10) Rhee, Z. K., Park, S. O., Kim, B. G., and Woo, C. K., 2005, "A Study on the Damage Estimation of Uni-directionally Oriented Carbon Fiber Reinforced Plastics using Acoustic Emission," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 1, pp. 30~36.
- (11) Rhee, Z. K., 2001, *Analyses of Identification and Inverse Problem in Cracked Body by Acoustic Emission*, Ph. D. Thesis, University of Incheon, Incheon, Korea.
- (12) 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.
- (13) Physical Acoustics Corporation, 1995, *Spartan 2000 User's manual & Technical manual*.
- (14) Leaird, J. D., 1997, *Acoustic Emission Training Guide: How to Ensure an Accurate and Valid Acoustic Emission*, Greensland Publishing Company, Sacramento.