

# 음향방출법에 의한 SM 490A 강의 복합용접성 평가 (3)

이장규\*, 인승현<sup>+</sup>, 우창기<sup>++</sup>, 박성완<sup>+++</sup>, 김봉각<sup>++++</sup>

## The Evaluation of Mixed Welded SM 490A Steel by Acoustic Emission (3)

Zhang-Kyu Rhee\*, Seung-Hyeon In<sup>+</sup>, Chang-Ki Woo<sup>++</sup>, Sung-Oan Park<sup>+++</sup>, Bong-Gag Kim<sup>++++</sup>

### Abstract

The object of this study is to investigate the effect of compounded welding by using acoustic emission (AE) signals for weld heat affected zone (HAZ) in tensile testing. This study was carried out a SM 490A high tension steel for electronic shielded metal arc welding (SMAW), CO<sub>2</sub> gas arc welding and TIG welding. And correspondingly, the root openings are 3, 4 and 2.8mm. Data displays are based on the measured parameters of the AE signals, along with environmental variables such as time and load. These history plots give us useful and powerful information to analyze the results of material evaluation testing.

**Key Words :** Acoustic Emission(음향방출), Heat Affected Zone(열영향부), Compounded Welding(복합용접), Root Opening(루트간격), SM 490A(SM 490A강), Tensile Test(인장시험)

### 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.<sup>(1,2)</sup> AE를 재료의 평가법에 적용하면 (1) 재료의 미시적인 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 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. 또한, 산업현장에서의 실제

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

구조물은 복잡하고 다양한 구조를 갖기 때문에 용접 자동화가 쉽지 않아 전기피복아크용접, CO<sub>2</sub>가스아크용접 및 TIG용접 등 수작업에 의하여 설비가 싸고 쉽게 용접할 수 있는 단일용접이 통상적으로 이용되고 있지만, 구조물의 질적향상이 요구되는 경우에는 설비가 많이 들고 공정이 복잡하더라도 복합용접을 택하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 SM 490A 강에 전기피복아크용접, CO<sub>2</sub>가스아크용접 및 TIG용접을 사용하여 이면비드와 표면비드를 단일용접한 경우와 복합용접한 경우, 정속인장시험시 용접 열영향부에 대한 AE 신호 특성을 분석하여 비교해 보고자 한다.

## 2. 실험 및 실험방법

### 2.1 실험재료 및 시험편

#### 2.1.1 인장시험편

인장시험편의 모재는 POSCO에서 생산한 SM 490A 강으로 동일한 배치(batch)에서 시료를 채취하였다. Fig.1은 본 연구에서 사용한 평활재 인장시험편으로 KS B 0833 맞대기용접이음의 인장시험방법의 규정<sup>(3)</sup>에 따라 제작하였으며, 두께 6mm에 대하여 각각 3mm씩 이면비드와 표면비드를 부여하였다. 또한, 루트간격은 전기피복아크용접은 3mm, CO<sub>2</sub>가스아크용접은 4mm, TIG용접은 2.8mm로 하였다. 시험편의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 1과 같다.

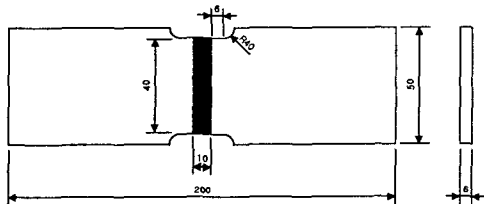


Fig.1 Geometry of test specimen (unit:mm)

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 AW-30의 교류 아크용접기이며, 용접봉은 저수소계 E4316으로 크기는  $\phi 3.2 \times 350\text{mm}$ 이고, 심선은 저탄소 림드강이다. 또한, 용접봉은 사용전 300~350℃로 30분~1시간정도 건조시킨 후 사용하였다.

#### (2) CO<sub>2</sub>가스아크용접의 복합와이어

CO<sub>2</sub>가스아크용접에 사용된 용접기는 LG산전의 WAC-350A이며, 사용된 용접봉은 복합와이어로 크기는  $\phi 1.2 \times 20\text{kg}$ 이고, 실드가스로 CO<sub>2</sub>가스를 사용하였다.

#### (3) TIG용접의 전극봉

TIG용접에 사용된 용접기는 인버터식으로 AC/DC 겸용인 WAT-300이며, TIG 용접시 인서트가스는 알곤 가스를 사용하였고, 전극봉은 텅스텐 전극봉이며, 용접봉으로는 스테인레스 용가재를 사용하였다.

### 2.2 실험방법

본 연구에서 사용한 AE 계측시스템은 Physical Acoustics Corporation의 Spartan 2000 system으로 그 구성은 Fig.2와 같다.

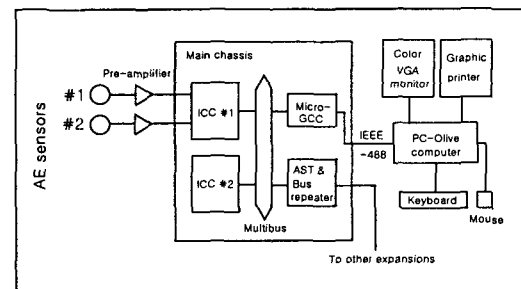


Fig.2 Schematic block diagram of Spartan 2000 system

또한 인장시험기(Augotograph 25-TG, Shimadzu)의 부하속도는 공히 2mm/min의 정속신장형 부하이며, 인장시험기의 아날로그 출력단자로부터 출력되는 하중 값은 디지털 신호로 변환시킨 후, 각각 인장시험기와 AE 계측시스템에 전송하였다.<sup>(4)</sup>

한편, AE 파형계측에는 탄성파의 감쇠특성을 감안하여 R15(공진주파수 150kHz, PAC) 센서를 용접부의 중앙으로부터 인장축 방향에 대하여 각각 30mm 떨어진 위치에 고진공 그리스를 사용하여 시험편에 대칭이

되도록 압착시키고 절연테이프로 고정된 후 캘리브레이션을 실시하였다.<sup>(1,2,5-8)</sup> 또한, 전치증폭기(1220A, PAC)의 gain을 40dB로 설정하여 100~300kHz의 대역에서 잡음을 제거하고, 250ns 간격으로 검출된 아날로그 AE신호를 주증폭기에서 20dB로 증폭하여 디지털 데이터로 변환하여 기억시킨 후, A/D 컨버터로 PC에 전송하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

실험에서 얻은 결과를 대표적으로 Fig.3~Fig.9에 나타내었다. 각 그림에서 ①, ② 및 ④는 시간이력에 대한 AE이벤트수, 누적AE이벤트수 및 진폭분포이고, ③은 시간에 대한 RMS 값이다. 또한 ⑤와 ⑥은 진폭분포에 대한 상관도이다. 그리고, 하단의 괄호는(이면비드+표면비드)의 순으로 용접하였음을 의미한다.

Fig.3에서 ①은 시간에 대한 AE이벤트수로써 재료에 소성변형이 일어나는 부분으로 초기에는 많은 수의 이벤트가 검출되다가 점차 줄어든다. 검출 이벤트수가 가장 적은 약 120초 정도에 크랙이 생성되고 크랙이 진전되면서 AE이벤트수가 증가한다. ②는 시간에 대한 누적AE이벤트수로써 소성변형이 일어나는 초기에 많은 수의 이벤트가 방출되기 때문에 곡선의 기울기가 급하고, 소성변형이 완료되면서 기울기가 완만해진다. 크랙이 생성·진전되기 시작하면서 다시 많은 수의 AE이벤트가 방출되기 때문에 또 다시 곡선의 기울기가 급격해지므로 초기의 소성변형구간과 크랙의 생성·진전구간 사이인 약 120초 정도에서 변곡점이 뚜렷하게 나타난다. ④는 시간에 대한 진폭의 그래프로써 threshold가 40dB이므로 40dB 이하의 진폭을 가진 신호는 검출되지 않았다. 소성변형이 일어나는 120초까지는 진폭이 80dB이고, 크랙이 진전되는 동안에는 진폭이 100dB이상으로 크랙이 진전될 때의 진폭이 더 크다. ⑤는 진폭에 대한 에너지의 그래프로써 진폭에 대한 소성변형이 일어날 때와 크랙이 진전할 때 많은 에너지를 방출함을 알 수 있고, 진폭이 클수록 방출되는 에너지의 양도 크다는 것을 알 수 있다. ⑥은 진폭에 대한 AE이벤트수의 그래프로써 두 개의 센서에서 받아들인 AE신호를 나타낸 것이다.

단일용접한 Fig.3~Fig.5에서 ①을 보면 Fig.3과 Fig.4는 소성변형구간과 크랙의 진전구간이 뚜렷하나

Fig.5는 소성변형이 일어남과 동시에 크랙이 생성·진전되어 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. ②도 ①과 같은 경향을 보이고 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 용접입열량, 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 조립역의 신율이나 인성이 현격히 저하되어 용접부 조직중에서 가장 취약된 특성을 갖는다. 그리고, 누적이벤트수가 Fig.3, Fig.4 및 Fig.5의 순인 것으로 볼 때, 재료의 강도는 Fig.3의 전기피복아크용접이 가장 크고, Fig.5의 TIG 용접이 가장 작을 것으로 예상된다. ④와 ⑤의 진폭범위와 방출에너지도 Fig.3과 Fig.4에서는 초기 소성변형구간에서 중진폭범위의 신호가 많이 검출되었고, 크랙진전구간에서 고진폭의 신호가 많이 검출되었으나 Fig.5에서는 초기에 80dB정도의 진폭이 방출되고 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, ⑤로부터 초기 시험 단계에서는 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.

복합용접한 Fig.6~Fig.9에서도 단일용접의 경우와 비슷한 경향을 보이고 있는데, Fig.8에서 ①과 ②의 그림이 소성변형구간과 크랙진전구간이 뚜렷하게 나타나지 않아 다른 경향을 보이고 있다.

한편 AE진폭은 대체로 고강도, 이방성 및 비균질 재료와 결함을 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 주파수 성분을 갖는다. 따라서 AE신호의 진폭분포에 대한 파괴기구와 균열진전 과정의 해석을 비교·검토한 결과 저진폭의 AE신호는 모재균열의 발생에, 고진폭의 AE신호는 모재파괴에 각각 대응되는 것으로 판단된다.

각종 용접에서 용접부의 강도는 모재보다 강하기 때문에 용접부보다 열영향부에서 먼저 파단이 일어난다. 그러므로 평활재 인장시험편은 전류의 밀도와 용접시 용융온도가 모재에 미치는 영향을 알아보기 위한 시험편이다. 인장시험 및 AE 신호분석 결과 단일용접의 경우 열영향부의 강도는 전기파복아크 용접 > CO<sub>2</sub>가스아크용접 > TIG용접 순으로 나타났다. 복합용접의 경우 열영향부의 강도는 TIG용접(TIG+SMAW)에 한하여 다소 다른 경향을 보이지만 통상 이면비드와 표면비드의 순서에는 무관하며, 특히 TIG 용접에서 나타났던 열영향부의 강도를 보완할 수 있음을 알 수 있다.

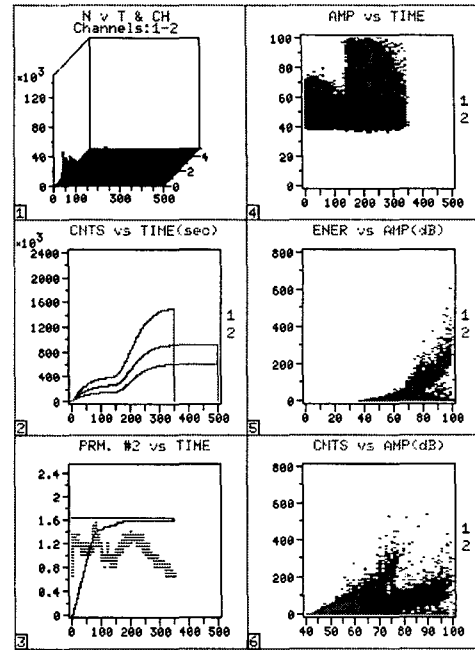


Fig. 4 Results of detected AE signals (CO<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>)

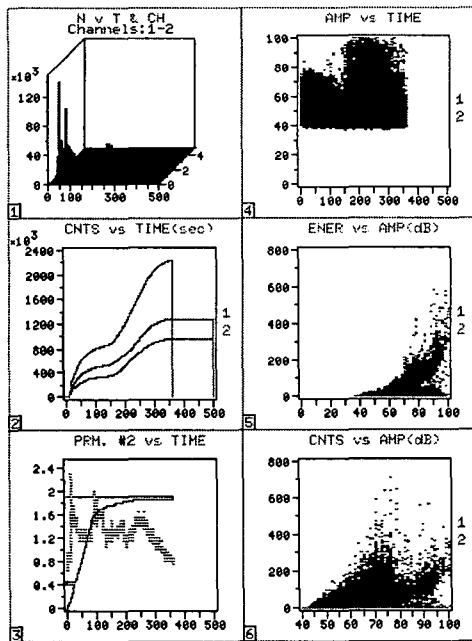


Fig.3 Results of detected AE signals (SMAW+SMAW)

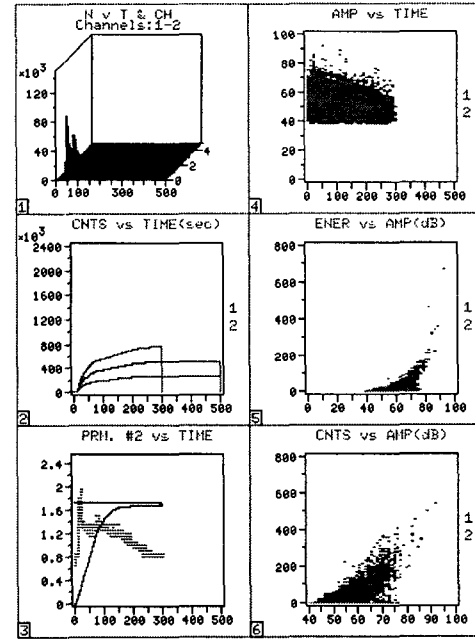


Fig.5 Results of detected AE signals (TIG+TIG)

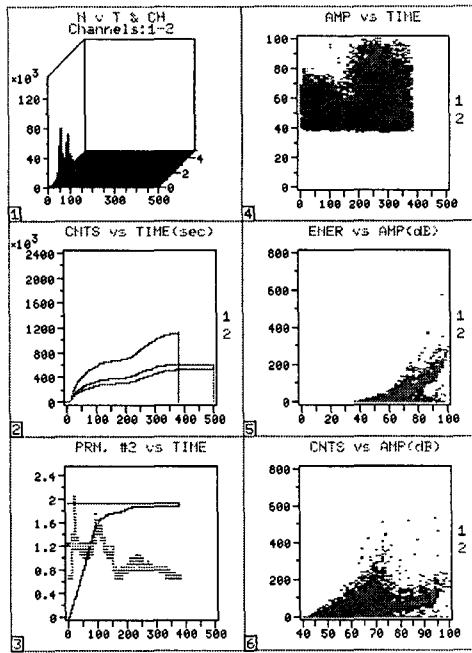


Fig.6 Results of detected AE signals (SMAW+CO<sub>2</sub>)

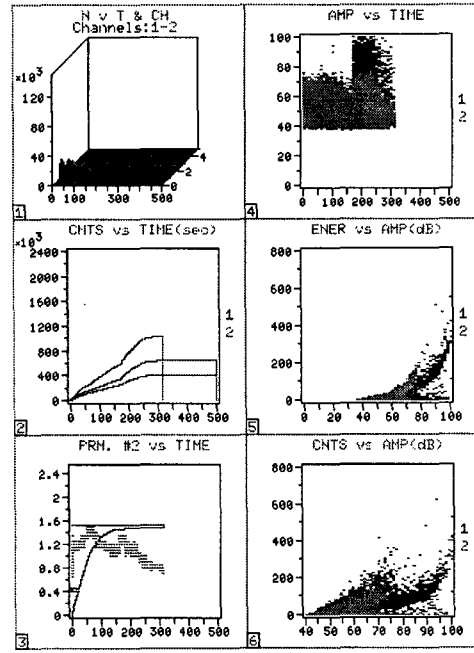


Fig.8 Results of detected AE signals (TIG+SMAW)

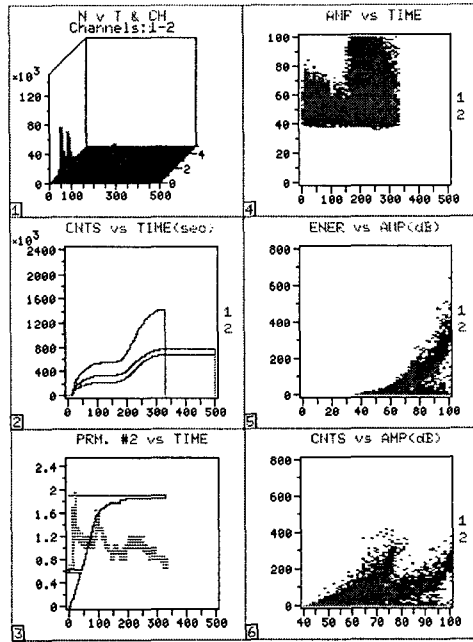


Fig.7 Results of detected AE signals (CO<sub>2</sub>+SMAW)

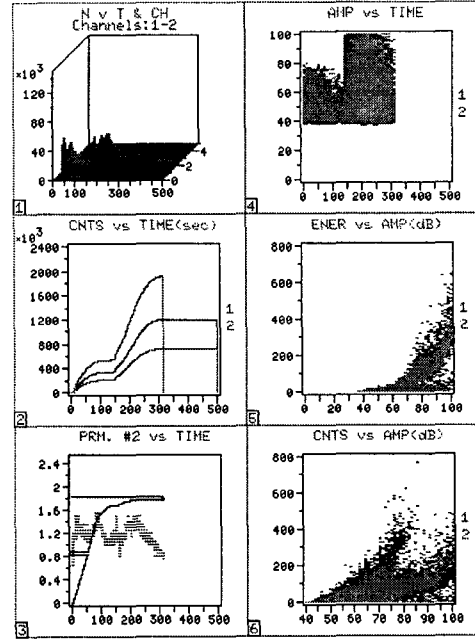


Fig.9 Results of detected AE signals (CO<sub>2</sub>+TIG)

#### 4. 결 론

단일용접 및 복합용접한 SM 490A 강의 인장시험편에 대한 정속인장시험에서 AE신호를 측정한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. 평활재 용접인장시험편에서 열영향부에 대한 누적AE이벤트 곡선은 대부분 뚜렷한 변곡점을 갖으며, 그곳으로부터 고진폭 범위의 AE가 폭넓게 발생하는 등 재료평가의 유용성을 확인하였다. 그 결과 단일용접의 경우 열영향부의 강도는 전기피복아크용접 > CO<sub>2</sub>가스아크용접 > TIG용접 순으로 나타났다. 통상 열영향부의 강도는 전기피복아크용접 > TIG용접 > CO<sub>2</sub>가스아크용접 순으로 나타나는 것이 보편적인데 이와같은 결과를 보인 것은 용접시험편에 적용된 루트간격의 차이에 의한 것으로 판단된다. 또한, 복합용접의 경우 열영향부의 강도는 TIG용접에 한하여 다소 다른 경향을 보이지만 이면비드와 표면비드의 순서에는 무관하며, TIG용접에서 나타났던 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) Hiroyasu Nakasa, 1994, Theoretical Bases and Practical Applications of Acoustic Emission, Chijin Shokan Co., Ltd.

(3) KSA, 1995, KS B 0833.

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

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

(6) 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.

(7) 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.

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