

음향방출법에 의한 SM45C 고주파 열처리 강의
기계적 특성 평가
—The Estimation of Mechanical Properties of
the High Frequency
Induction Hardening SM45C Steel by
Acoustic Emission—

이 장 규*·김 봉 각**

Zhang-Kyu Rhee*·Bong-Gag Kim**

Abstract

This study is deal with the high frequency induction hardening (HF at 850°C, 120kHz & 50kW condition) SM45C steel. (1) The HF specimen which was tempered at 150°C, did not appear any tempering effect. A brittle fracture occurred at rounded area of the tensile specimen. AE amplitude distribution showed between 45 ~ 60dB. (2) The HF specimen which was tempered at 300°C, slip and fracture occurred at the hole area of the tensile specimen. As it passes the yield point, the AE energy increased intermittently and AE amplitude distribution showed between 70 ~ 85dB. In addition, after the maximum tensile load, it showed high amplitude and energy distribution. The AE amplitude showed between 45 ~ 70dB. (3) The HF specimen which was tempered at 450°C, a brittle fracture occurred as if it is torn in the direction of 45° on parallel area over the both sides of the tensile specimen, which led to several peak to be appeared in AE energy. It was found that the AE amplitude was relatively low and the AE energy was high.

Keywords : Acoustic Emission, High Frequency Induction, Tempering, Mechanical Property

* 인천대학교 기계공학과

** 충청대학 항공자동차기계학부

1. 서 론

강은 자동차, 조선, 기계, 건축, 산업용 소재 및 각종 기계부품 등에 폭넓게 쓰이는 만큼 고기능, 장 수명 및 안전성 등에 대한 요구가 더욱 높아지고 있다. 때문에 강도 개선은 중요한 문제로 이를 위하여 석출경화, 가공경화, 고용강화, 담금질, 마텐자이트 강화, 결정립계에 의한 강화, 합금원소 첨가에 의한 강화 등의 방법이 사용되고 있다.

특히 고주파 유도전류에 의한 금속가열 및 용해방식은 1900년 초기부터 이용되다 1935년 비행기 크랭크 축의 열처리에 실용되면서 각종 기계부품 제조로 급속히 확대되어 지금은 핵융합용 플라즈마 발생장치에까지 확산되고 있다[1].

고주파 열처리(high frequency induction hardening)에 의해 철을 900℃ 전후로 가열한 후 급랭시키면 그 조직이 오스테나이트(austenite)에서 마텐자이트(martensite)로 바뀌면서 경도가 높아진다. 이렇게 퀴칭(quenching)을 하고 나면 철의 조직에 응력이 남아 변형될 수도 있기 때문에 응력을 풀어 주기 위하여 템퍼링(tempering)을 한다.

본 연구에서는 SM45C 강에 시간과 온도를 변수로 하여 고주파 열처리를 하고, 인장시험을 통하여 고주파 열처리조건에 따른 강의 재질변화와 기계적 특성과의 관계를 음향방출법(AE, acoustic emission)[2]으로 분석하여 연구 자료를 산업현장에 제공하고자 한다.

2. 관련 이론

AE란 물체가 변형을 일으킬 때, 고체에서 국부적인 내부 구조의 변화에 의한 결과로 발생하는 탄성응력파이다. 따라서 AE는 소성변형, 균열의 발생과 성장, 마찰기구, 개재물의 파괴 및 상 변화(상 변태) 등에 관한 중요한 정보를 담고 있다. 일반적으로 AE는 두 개의 범주로 구분하는데, 하나는 재료 평가시험으로 미소결함 검출과 동시에 파괴기구에의 이용되고, 다른 하나는 건전성 평가로 구조물이나 부품의 제조 중, 출하 검사나 공정 중의 비파괴 검사 수단으로의 이용된다.

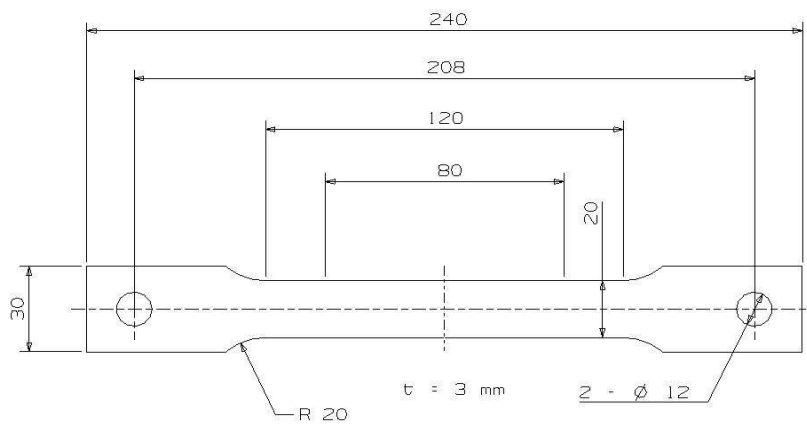
- 재료 평가시험
 - 초기결함검출
 - 파괴기구의 해석
 - 최종 파괴응력의 추정
 - 건전성 평가시험의 보조자료 획득용

- 건전성 평가시험
 - 조립공정검사
 - 부품의 단품검사
 - 제품검사(출하검사)
 - 제조 중 검사
 - 가동 중 검사(잔여수명평가)

3. 실험 재료 및 방법

3.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 POSCO에서 생산한 두께 3mm의 SM45C 기계구조용 강으로 <Fig. 1>과 같이 KS B 0801 「금속재료 인장시험편」 규격[3]을 적용하여 압연 방향으로 시료를 절단하여 와이어 컷 방전가공(W-EDM)을 하였으며, 화학적 성분과 기계적 성질은 <Table 1>, <Table 2>와 같다.



(a) geometry of test specimen



(b) photograph of test specimen

<Fig. 1> Shape and dimensions of tensile specimen

<Table 1> Chemical composition of SM45C(wt.%)

C	Si	Mn	P	S
0.4584	0.194	0.681	0.0162	0.0044

<Table 2> Mechanical properties of SM45C

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HR _B)
300.0	533.3	23	87.9

3.2 실험방법

3.2.1 고주파 유도가열

<Fig. 1>과 같은 인장시험편을 120kHz, 50kW의 850℃ 수평식 자동 고주파 유도가열장치를 이용하여 이동 고주파 표면경화처리를 하였다. 이때 출력 82A±4에 하강 이송속도 120rpm, 시험편 정지 시 가열속도 1초인 이송냉각 방법을 채택하였으며, 냉각수는 삼화공업의 Nacon A 8%, 냉각수 0.01초, 냉각 2.0초 정도로 하였다. 고주파 유도가열은 열처리와 냉각시간을 총합하여 개당 30초 정도의 시간이 걸렸다.

3.2.2 템퍼링 처리

시험편을 고주파 열처리 한 후, 시험편에서의 잔류응력과 표면 안쪽에 있는 인장응력을 감소시키기 위하여 템퍼링[4]을 하였으며, 이때 열처리 시 중요한자인 시간은 30분, 60분, 90분으로 하였고, 온도는 150℃, 300℃, 450℃로 하였다.

3.2.3 AE 신호의 계측

인장시험 중에 발생하는 AE 신호는 DiSP AE system(PAC, USA)을 이용하여 동일한 조건에서 10MSPS의 샘플링 주기로 데이터를 획득하였다. 이 경우 1220A(대역필터 100~300kHz, 게인 40dB) 전치증폭기와 R15(공진주파수 150kHz) 공진역 센서를 각각 2개씩 사용하였다. 또한 고진공 그리스를 사용하여 시험편에 각각의 센서를 압착한 후, 샤프심압절법[5]으로 캘리브레이션(calibration)을 실시하여 센서의 압착여부를 확인하고, 이렇게 해서 검출된 AE 신호를 주 증폭기에서 2차 증폭하여 디지털 데이터로 저장한 후 신호분석을 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 경도시험

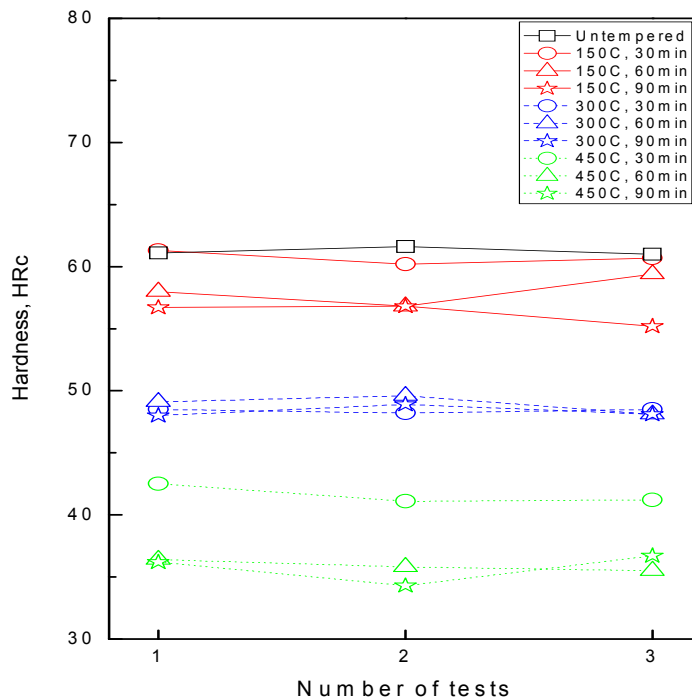
<Fig. 2>는 템퍼링의 온도와 시간에 따른 경도변화를 알아보기 위해 템퍼링한 시험편의 표면에 로크웰 경도계로 각 시험조건에 대하여 각각 3회 측정된 결과이다.

고주파 열처리한 시험편에 템퍼링 온도를 150℃로 고정시킨 후, 시간조건을 30분, 60분, 90분으로 변화시켰을 때, 30분의 HRC값은 61.3, 60.2, 60.7이고, 60분의 HRC값은

58, 56.8, 59.4이며, 90분의 HRC값은 56.7, 56.8 55.2으로 150℃를 기준으로 시간이 경과할수록 경도값이 최대 6 포인트 하락하였다. 또한 퀴칭 시의 경도값보다 최대 6 포인트 하락하였다.

고주파 열처리한 시험편에 템퍼링 온도를 300℃로 고정시킨 후, 시간조건을 30분, 60분, 90분으로 변화시켰을 때, 30분의 HRC값은 48.5, 48.2, 48.5이고, 60분의 HRC값은 49.1, 49.6, 48.1이며, 90분의 HRC값은 48.0, 48.9, 48.1로 300℃를 기준으로 시간이 경과할수록 경도값이 최대 1 포인트 정도로 미소하게 하락하였다. 150℃를 기준으로 경도값이 떨어지는 차이와는 약간 대조를 보이며, 퀴칭 시의 경도값보다 최대 13 포인트 하락하였다.

고주파 열처리한 시험편에 템퍼링 온도를 450℃로 고정시킨 후, 시간조건을 30분, 60분, 90분으로 변화시켰을 때, 30분의 HRC값은 42.5, 41.1, 41.2이고, 60분의 HRC값은 36.4, 35.8, 35.5이며, 90분의 HRC값은 36.2, 34.3, 36.7로 450℃를 기준으로 시간이 경과할수록 경도값이 최대 8 포인트 하락하였다. 150℃ 및 300℃를 기준으로 경도값이 떨어지는 차이보다 가장 많은 차이를 보이고 있으며, 퀴칭 시의 경도값보다 최대 27 포인트 하락하였다.



<Fig. 2> Results of hardness test, HRC

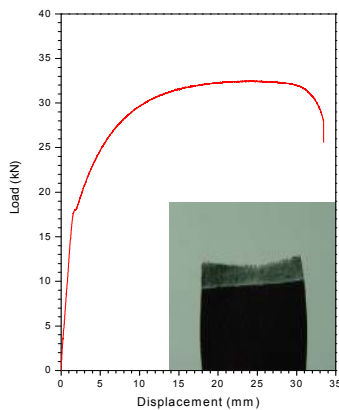
4.2 인장시험과 파단면

<Fig. 3>에 무처리한 시험편과 850℃, 120kHz, 50kW의 고주파 열처리 조건에 맞춰 열처리를 한 후, 온도조건을 150℃, 300℃, 450℃로, 시간조건을 30분, 60분, 90분으로 템퍼링한 시험편에 대하여 만능재료시험기로 인장시험을 하여 얻은 하중-변위 곡선과 이들의 대표적인 파단면 사진을 제시하였다.

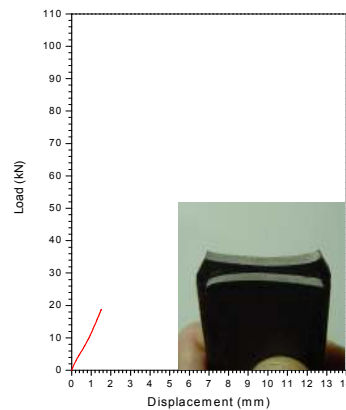
먼저 <Fig. 3(a)>는 무처리한 SM45C 시험편에 대한 하중-변위 곡선이다. 파단 시까지 시험편이 늘어난 길이 약 34.0mm, 인장강도 약 32kN으로 뚜렷한 항복점이 존재하고 있다. 또한 파단면은 네킹현상으로 인장시험편의 두께에 대하여 45° 방향으로 파단면이 발생하였음을 볼 수 있다.

<Fig. 3(b)>는 850℃, 120kHz, 50kW의 고주파 열처리 조건에 맞춰 열처리를 한 후, 템퍼링을 하지 않은 시험편에 대한 하중-변위 곡선이다. 파단 시까지 시험편이 늘어난 길이 약 1.5mm와 그 때의 파단하중 약 20kN으로 뚜렷한 항복점을 찾아볼 수 없다. 또한 파단면은 동일조건인 모든 시험편에 대하여 인장시험편의 곡선부인 R20의 위치에서 취성파괴가 발생하였으며, 이는 고주파 열처리 후 퀴칭 시 단면적이 급격하게 변하는 부분에서의 냉각능의 차이에 따라 미소크랙이 발생했기 때문으로 판단된다.

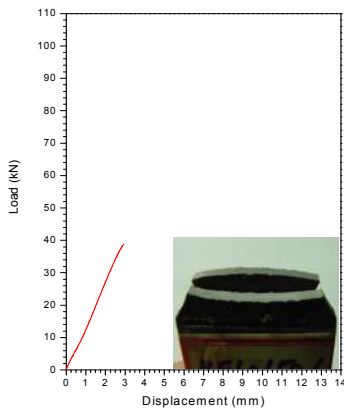
<Fig. 3(c)>는 고주파 열처리 후 150℃, 60분으로 템퍼링하여 얻은 하중-변위 곡선으로 뚜렷한 항복점을 찾아보기 어렵다. 또한 파단면은 동일조건인 모든 시험편에 대하여 인장 시험편의 곡선부인 R20의 위치에서 취성파괴가 발생하였으며, 마찬가지로 이는 고주파 열처리 후 퀴칭 시 단면적이 급격하게 변하는 부분에서의 냉각능의 차이에 따라 미소크랙이 발생했기 때문으로 판단되며, 150℃의 템퍼링 온도조건이 고주파 열처리된 시험편에 미치는 영향이 미미한 것으로 보인다.



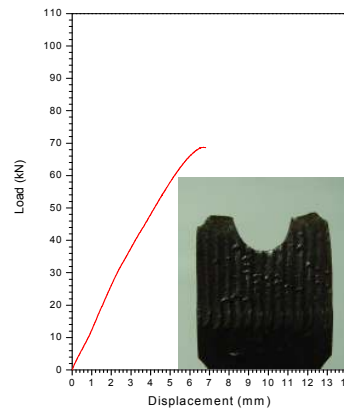
(a) virgin



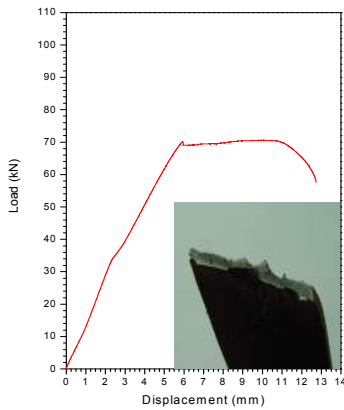
(b) HF at 850℃, 120kHz & 50kW



(c) HF, tempered at 150°C, 60min



(d) HF, tempered at 300°C, 30min



(e) HF, tempered at 450°C, 60min

<Fig. 3> P- δ curve and fractography of the test specimen

<Fig. 3(d)>는 고주파 열처리 후 300°C, 30분으로 템퍼링하여 얻은 하중-변위 곡선으로 파단면은 동일조건인 모든 시험편에 대하여 그립부에서 미끄럼 발생과 더불어 인장시험편의 구멍부인 $\phi 12$ 의 위치에서 최종파단이 발생하였으며, 이는 고주파 열처리 시 시험편을 상하로 이송시키기 위해 고정된 부분이 고주파 열처리가 되지 않아 인장시험편의 평행부에 비해 상대적으로 강도가 약하기 때문으로 예상치 못했던 구멍부 파단은 결국 여기에서는 인장하중 값이 큰 의미가 없음을 뜻하며, 템퍼링(재질개선)의 효과가 잘 나타나고 있음을 반증하는 것으로 여겨진다.

<Fig. 3(e)>는 고주파 열처리 후 450°C, 60분으로 템퍼링하여 얻은 하중-변위 곡선으로 파단면은 동일조건인 모든 시험편에 대하여 인장시험편의 평행부에서 폭방향으로 양면에 걸쳐 45°로 찢겨지듯 취성파괴가 발생하였으며, 역시 고주파 열처리 후 템퍼링 효과가 잘 나타나고 있음을 보여주고 있다.

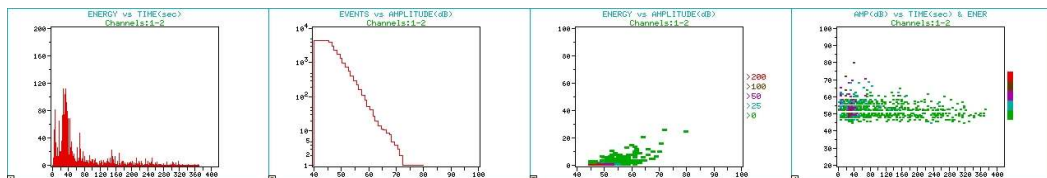
4.3 AE시험

<Fig. 4>는 인장시험에서 획득한 AE 신호로 시험편 파단 전까지의 대표적인 결과이다. 각 그림에서 ①은 시간과 에너지의 관계이고, ②는 진폭의 크기와 이벤트수의 관계를 편대수(semi-log) 그래프에 나타낸 것으로 진폭의 기울기 값(b-value)으로부터 그 값이 클수록 낮은 진폭이 많아지고, 작을수록 높은 진폭이 많아지는 경향이 알려져 있어 고강도 결함을 내포하고 있는 취성재료일수록 기울기가 높아짐을 참고지표로 활용하면[6], [7] 각각의 열처리 조건에 대한 재료의 성질변화와 열화정도를 평가하는데 유효하다. 또한, ③은 진폭의 크기와 에너지의 관계이고, ④는 시간에 대한 진폭의 크기를 에너지 값을 기준으로 하여 나타낸 등치선도(contour plot)이다.

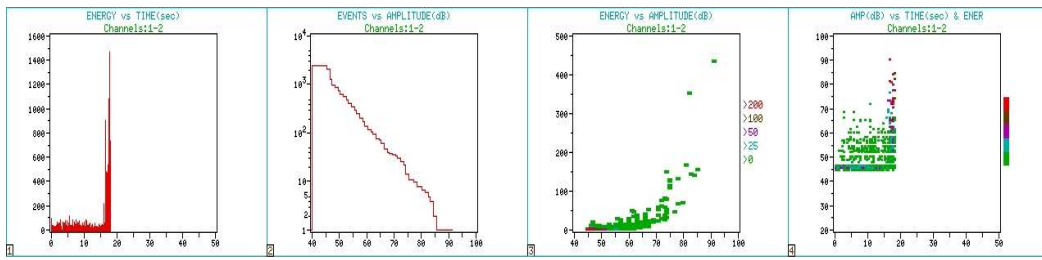
먼저 <Fig. 4(a)>는 무처리한 SM45C 시험편에 대한 것으로 통상 강에서 볼 수 있는 AE 측정결과라 할 수 있으며, <Fig. 3>의 하중-변위 곡선과 관련지어 보면 항복점이 지나는 시점에서 ①의 에너지 값이 최대가 됨을 알 수 있다. 그리고 ④에서와 같이 항복점이 지나는 시점에서 상대적으로 낮은 진폭에 높은 에너지가 출현함을 알 수 있다.

<Fig. 4(b)>는 850℃, 120kHz, 50kW의 고주파 열처리 조건에 맞춰 열처리를 한 후, 템퍼링을 하지 않은 시험편에 대한 AE 결과이고, <Fig. 4(c)>는 고주파 열처리 후 150℃, 60분으로 템퍼링하여 얻은 AE 결과이다. 앞 절의 인장시험의 경우에서 확인한 바에 의하면 템퍼링 효과가 미미하여 AE 신호에 대한 경향 역시 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 비교적 짧은 시간에 시험편의 파단이 이루어졌고, 시험편의 거시적 파단 시 에너지가 최대값을 가짐을 확인할 수 있다. 그리고, b-value가 무처리재 시험편에 비하여 감소하는 것으로 나타나 상대적으로 높은 진폭의 신호가 많이 발생했으며, 대체적으로 45~60dB의 진폭이 주류를 이루고 있다.

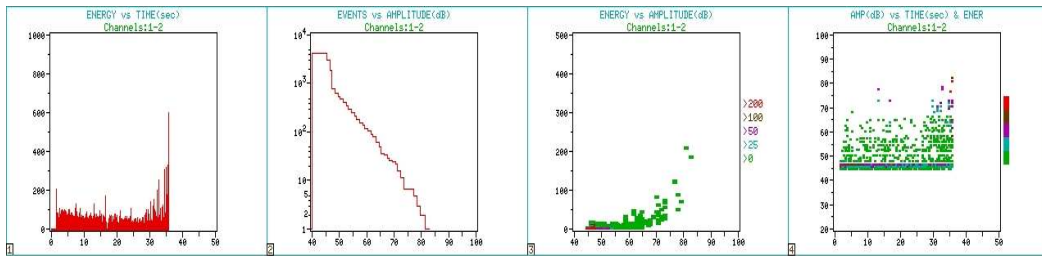
<Fig. 4(d)>는 고주파 열처리 후 300℃, 30분으로 템퍼링하여 얻은 AE 결과이다. <Fig. 3(d)>의 파단면 사진에서 알 수 있듯이 만능재료시험기의 그림부와 시험편 체결부위 사이의 미끄럼변형에 대한 AE 신호가 상당량 포함되어 있을 것으로 판단된다. 앞서와 마찬가지로 시험편의 거시적 파단 시에 최대의 에너지 값과 높은 진폭의 신호가 나타나고 있으며, 대체적으로 45~70dB의 진폭이 주류를 이루고 있다. 그러나, 고주파 열처리 후 템퍼링을 하지 않은 시험편과 온도조건 150℃에서 템퍼링을 한 시험편에 비하여 뚜렷한 항복점이 존재하기에 항복점을 지나는 순간부터 간헐적으로 에너지 값이 커지며, 70~85dB의 진폭분포를 보이고 있다. 특히 최대인장하중 이후부터는 높은 진폭에 높은 에너지 분포를 갖는 AE신호가 방출되고 있음을 알 수 있다.



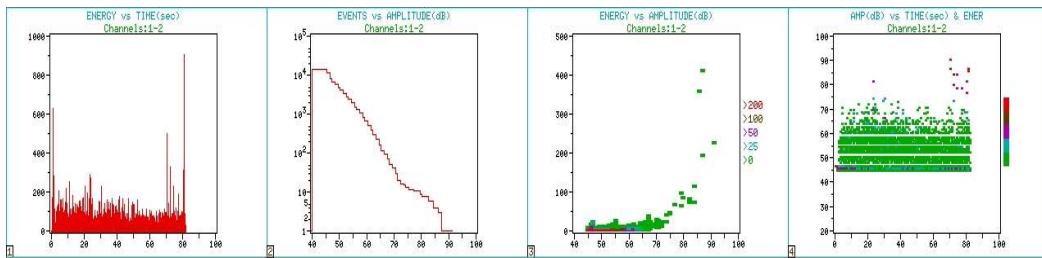
(a) virgin



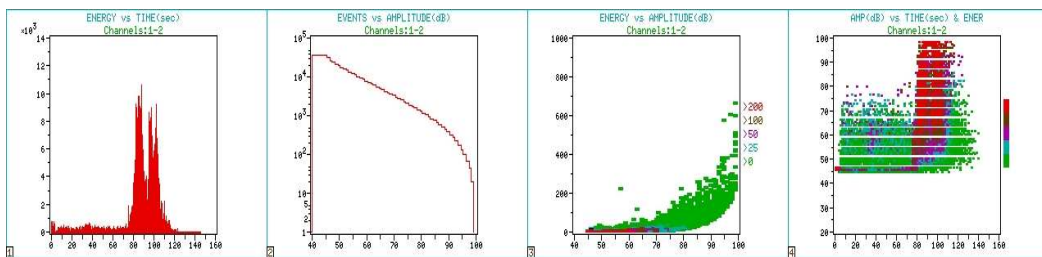
(b) HF at 850°C, 120kHz & 50kW



(c) HF, tempered at 150°C, 60min



(d) HF, tempered at 300°C, 30min



(e) HF, tempered at 450°C, 60min

<Fig. 4> Representative plots of the measured AE signals

<Table 3> Result of the AE parameters from <Fig. 4>

	Hit	Σ Count	Σ Energy	Load
(a) virgin	4,669	13,717	1,989	-0.0180
(b) HF at 850°C, 120kHz & 50kW	2,542	20,154	9,313	-0.0162
(c) HF, tempered at 150°C, 60min	4,307	27,922	11,814	-0.0159
(d) HF, tempered at 300°C, 30min	14,570	67,495	20,997	-0.0159
(e) HF, tempered at 450°C, 60min	36,694	491,955	281,325	-0.0189

<Fig. 4(e)>는 고주파 열처리 후 450°C, 60분으로 템퍼링하여 얻은 AE 결과이다. 앞의 조건들과는 달리 확연히 다른 양상을 보이는데, 특히 Ⅰ의 에너지의 경우에는 <Fig. 3(e)>에서와 같이 시험편의 양면에 걸쳐 45°로 찢겨지듯 취성파괴가 일어나는 양상을 여러 번의 피크치(peak)에 의한 AE 신호로 반영하고 있으며, 비교적 낮은 진폭에 높은 에너지 값을 갖는 것으로 나타났다.

한편, <Table 3>은 <Fig. 4>에 대한 AE 신호처리 결과를 정량적인 값으로 정리한 것이다. (a)의 무처리한 SM45C 시험편의 경우에는 상대적으로 히트수(Hit)가 누적 카운트수(Σ Count)나 누적 에너지(Σ Energy)에 비해 큰 값을 보이고 있다. (b)~(e)에서 히트수, 누적 카운트수, 누적 에너지의 경우에는 전체적으로 각각 시험편 파단 전까지 진행된 시간이력(time history)에 대하여 상대적으로 그 값이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이로써 템퍼링(재질개선) 효과를 재차 확인할 수 있다. 그리고, 하중(Load)에서의 음의 부호는 시험편에 실질적인 파단이 발생하였음을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 SM45C 인장시험편을 850°C, 120kHz, 50kW의 조건으로 고주파 유도 가열 하고 150°C, 300°C, 450°C의 온도조건과 30분, 60분, 90분의 시간조건으로 템퍼링 한 후, 인장시험에서 획득한 AE 신호를 분석하여 아래의 결과를 얻었다.

1. 고주파 열처리 후 150°C 온도조건에서 템퍼링한 시험편의 경우 템퍼링 효과가 나타나지 않았으며, 모든 조건에 대하여 인장시험편의 곡선부에서 취성파괴가 발생하였고, 그 때 45~60dB의 비교적 낮은 진폭을 갖는 것으로 나타났다.

2. 300°C 온도조건에서 템퍼링한 시험편의 경우, 모든 조건에 대하여 인장시험편의 구멍부에서 미끄럼이 발생하며 파단이 발생하였다. 항복점을 지나는 순간 간헐적으로 에너지 값이 증가하고, 그 때 70~85dB의 진폭을 갖는다. 또한 최대인장하중 이후엔 비교적 높은 진폭에 높은 에너지 분포를 가지며, 전체적으로 45~70dB의 진폭을 갖는 것으로 나타났다.

3. 450°C 온도조건에서 템퍼링한 시험편의 경우, 모든 조건에 대하여 인장시험편의 평행부에서 시험편 양면에 걸쳐 45°로 찢겨지듯 취성파괴가 일어나면서 AE 에너지 값에 여러 번의 피크치가 나타났고, 비교적 낮은 진폭에 높은 에너지 값을 가짐을 알았다.

6. 참고 문헌

- [1] <http://www.bmhf.co.kr/html/tech.htm>
- [2] Lanchon-Magnin, I., Fleischmann, P., Rouby, D. and Goutte, R., 1982, "Application of Signal Processing to Acoustic Emission Signals Emitted by Steel Specimens during Tensile Tests," *Ultrasonics*, Vol. 20, No. 1, pp. 18 ~ 24.
- [3] Korean Standards Association, 2002, Test pieces for tensile test for metallics materials, KS B 0801.
- [4] Shim, J. J. and Lee, S. Y., 1990, "Tempering Behavior of 0.45% Carbon Steel Treated by a High Frequency Induction Hardening Technique," *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, Vol. 3, No. 2, pp. 10 ~ 19.
- [5] Woo, C. K. and Rhee, Z. K., 2008, "Case Study on the Load-Deflection and Acoustic Emission Analysis of SM45C Coupons with a Circular Hole Defect under Tensile Loading," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp. 50 ~ 58.
- [6] Rhee, Z. K. and Woo, C. K., 2006, "A Study on the Acoustic Emission Characteristics of Weld Heat Affected Zone in SWS 490A Steel(2)," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 5, pp. 104 ~ 113.
- [7] Jo, D. H., Rhee, Z. K., Park, S. O., Kim, B. G. and Woo, C. K., 2007, "Fracture Characteristics of the Resistance Spot Welded Joints by Acoustic Emission," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 2, pp. 14 ~ 22.