

음향방출법에 의한 저항 점용접부의 파괴특성에 대한 연구

조대회*, 이장규⁺, 박성완⁺⁺, 김봉각⁺⁺⁺, 우창기⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2006. 7. 3, 심사완료일 2006. 12. 7)

Fracture Characteristics of the Resistance Spot Welded Joints by Acoustic Emission

Dae-Hee Jo*, Zhang-Kyu Rhee⁺, Sung-Oan Park⁺⁺, Bong-Gag Kim⁺⁺⁺, Chang-Ki Woo⁺⁺⁺⁺

Abstract

In this paper, the acoustic emission(AE) behaviors were investigated with single- and 2-spot resistance spot welded SPCC specimens. Test specimens were welded horizontally and/or vertically according to the rolling direction of base metal in 2-spot welding. In the case of 2-spot welding, when tensile-shear test has below amplitudes: crack initiation 50~60dB; tear fracture 40~50dB. And when cross tensile test has below amplitudes: early stage 75~85dB; yielding point 65~75dB; post yielding 40~60dB; plug fracture 70~80dB or 90~100dB. Also, from the *b*-value that is slope of AE amplitude, we knew that there are lots of low amplitudes if *b*-value is big(i.e., tensile-shear specimen→tear fracture or shear fracture), and there are lots of high amplitudes if *b*-value is small(i.e., cross tensile specimen→plug fracture). As the results of fracture mechanism analyses through AE amplitude distributions, change of the *b*-value represented fracture patterns of materials. Correspondingly, low amplitude signals appeared in crack initiation, and high amplitude signals appeared in base metal fracture. We confirmed that these amplitude distributions represented the change or degradation of materials.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Resistance Spot Welding(저항 점용접), 2-spot Welding(2점용접), Nugget(너깃), Pitch(피치), Arrangement(배열), *b*-value(*b*-값), Fracture Characteristics(파괴특성)

* 인천대학교 교육대학원 기계교육전공
+ 인천대학교 기계공학과
++ 인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과
+++ 충청대학 항공·자동차·기계설계학부
++++ 교신저자, 인천대학교 기계공학과 (woerwck@incheon.ac.kr)
주소: 402-749 인천시 남구 도화동 177

1. 서론

임의의 부재는 외력 또는 내부 응력에 의해 소성변형이나 균열이 발생하게 되며, 부재 내부에 축적된 변형에너지는 파면형성에너지, 열에너지, 격자변형에너지 그리고 탄성파 등과 같은 형태의 에너지로 변환된다. 외부계측장치에 의해 검출된 탄성파 자체 혹은 탄성파를 검출하는 수단 및 해석을 총칭하여 음향방출법(AE, acoustic emission)이라고 말한다⁽¹⁾. 탄성파는 부재 내부의 미소균열의 진전에 따라 공간이 형성되면서 응력이 해방될 때 발생하여 사방으로 진동하는 현상이다. 압전센서를 사용하여 이러한 진동파를 검출하고 변환시켜 공학적으로 이용하게 된다.

또한, 저항 점용접(resistance spot welding)은 용접모재를 전극 사이에 겹쳐 놓고 가압하면서 극히 짧은 시간에 대전류를 통전시켜 용융 접합시키는 방법으로 용접시간이 짧고 미숙련공으로도 작업능률이 높아 산업현장에서 많이 활용되고 있다. 또한 저항 점용접은 부재의 여러 종류의 물성치(비저항, 열전도도, 비열, 용융점 등)에 따라 용접의 품질이 결정되기도 하지만, 가압력, 통전시간 및 전류의 세기가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그렇기 때문에 다른 용접과는 달리 가압력, 통전시간 및 전류의 세기를 조절하여 자동화가 용이하다는 특징이 있다.

본 연구에서는 가압력과 전류의 세기를 주요인자로 하여 1점용접과 시험편의 압연방향에 대하여 너트의 위치를 수평 및 수직으로 2점용접 했을 경우, 시험편에서 발생하는 AE 신호와 인장시험 시 저항 점용접된 시험편에서 발생하는 AE 신호를 계속하고, 계속된 AE 신호를 분석하여 2점용접의 기계적 특성과 파괴 특성을 파악해 보고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료 및 시험편

시험편은 동부제강(주)에서 생산한 SPCC강을 모재(base metal)로 하여 시료를 채취한 후, Fig. 1과 같이 각각 KS B 0851의 인장-전단시험편⁽²⁾과 KS B 0852의 십자형 인장시험편⁽³⁾으로 제작하였다. 실험에 사용한 시험편의 화학적 조성과 기계적 성질은 각각 Table 1, 2와 같다.

2.2 실험방법

본 연구에서 사용한 저항 점용접기는 대신산업의 ACE-AS-50이며, 사용된 전극 팁의 형상은 D형인 반구형(dome type)으로 호칭직경 16mm⁽⁴⁾이다.

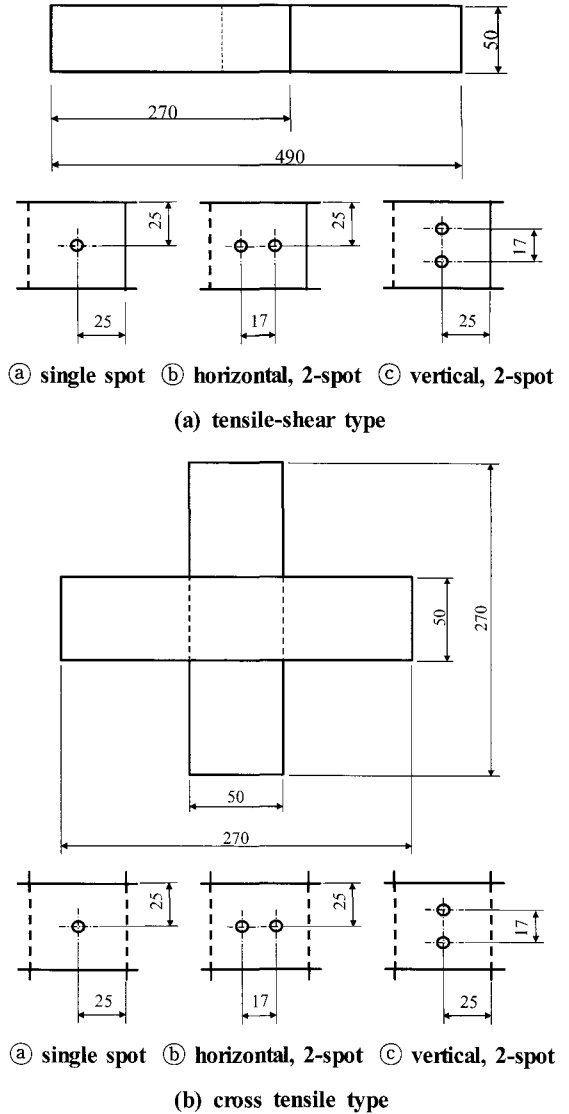


Fig. 1 Configuration of test specimen(unit:mm)

Table 1 Chemical composition of SPCC(wt.%)

C	Si	Mn	S	P	Al
0.017	tr.	0.16	0.006	0.013	0.042

Table 2 Mechanical properties of SPCC

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
203	320	45.1

Table 3 Resistance spot welding cycles at 60Hz

Squeeze time (cycle)	Heat or weld time (cycle)	Hold time (cycle)	Off time (cycle)
5	10	3	3

저항 점용접의 경우 SPCC 강판의 두께가 1mm일 때 통상의 용접조건은 가압력 4.0kN, 전류의 세기 15kA, 통전시간 10cycle/60Hz이다. 본 연구에서는 가압력을 3.5와 4.0kN, 전류의 세기를 14, 15 및 16kA로 설정하였다.

그 밖의 용접조건은 Table 3과 같고, 동일한 조건으로 각각 인장-전단시험편과 십자형 인장시험편에 1점용접(single spot welding)의 경우에는 시험편의 겹치는 부분의 중앙에, 2점용접(2-spot welding)의 경우에는 인장-전단시험편을 기준으로 시험편이 만능재료시험기에 설치되어 있는 상태(시험편의 압연방향)에 대하여 수평과 수직 방향으로 너깃(nugget)을 배열하였으며, 각각의 피치(pitch)는 KS R 9204⁽⁵⁾에 따라 17mm로 하였다.

Autograph 25-TG(Shimadzu, Japan) 만능재료시험기를 사용하여 5mm/min의 정속으로 인장시험 시 발생하는 AE 원 신호(raw signal)를 Spartan 2000 시스템(PAC, USA)의 SP2-DAQ 모듈을 이용하여 획득하였고, 이 경우 R15(사용주파수 50~200kHz, 공진주파수 150kHz) 공진역 센서와 1220A(대역필터 100~300kHz, 게인 40dB) 전치증폭기를 각각 2개씩 사용하였다. 또한 만능재료시험기의 아날로그 출력단자로부터 읽어 들인 하중값이 AE 시스템의 계측 데이터와 함께 저장되도록 데이터 커넥터를 만들어 사용하였고^(6,7), 별도로 설치한 AE2A 광대역증폭기(PAC, USA)를 거쳐 TDS-420 오실로스코프(Tektronix, USA) 상에서 실시간 모니터링을 실시하였으며, 이 경우 전치증폭기가 내장(대역필터 100~1,200kHz, 게인 40dB)된 WDI(사용주파수 100~1,000kHz) 광대역 센서를 1개 사용하였다. 또한 고진공 그리스를 사용하여 시험편에 센서를 압착시킨 후, 샤프심 압절법으로 캘리브레이션을 실시하여 센서의 압착여부를 확인하였으며, 검출된 AE 신호는 주 증폭기에서 2차 증폭하여 디지털 데이터로 저장한 후, 신호분석이 이루어졌다.

이때 Fig. 2와 같이 (a)의 인장-전단시험편의 경우에는 인장시험 시 시험편에 걸리는 회전모멘트를 없애기 위하여 시험편과 동일한 두께의 썬기판을 사용하였고⁽²⁾, (b)의 십자형 인장시험편의 경우에는 전용 지그를 제작하여 사용하였다⁽³⁾.

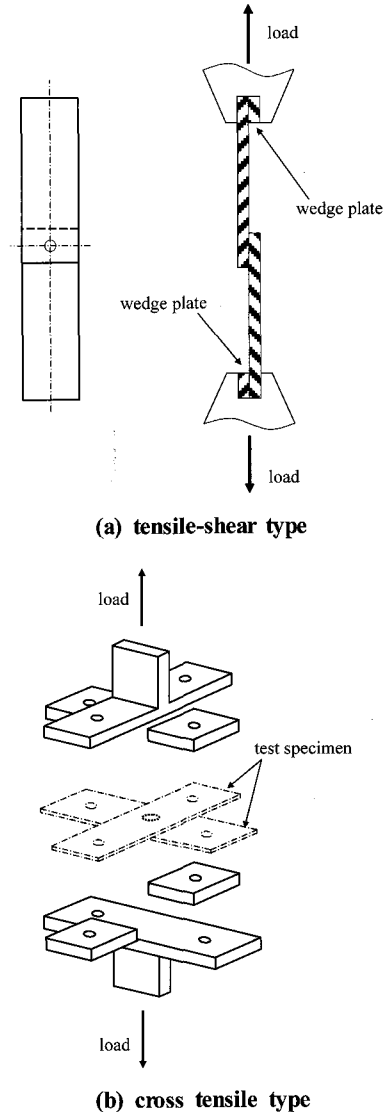


Fig. 2 Schematic illustration of tension test

3. 실험 결과 및 고찰

점용접으로 결합된 구조물은 인장 혹은 압축 하중이 작용할 경우, 용접부에 전단하중이 주로 작용할 수 있도록 용접 설계가 이루어진다. 그러나 실제로는 용접부에 인장과 전단 하중이 동시에 작용하는 경우가 더 많기 때문에 이러한 특성을 평가하기 위하여 규격이 정하는 인장-전단시험을 포함하여 십자형 인장시험을 하였다.

3.1 파단양식과 기계적 특성

저항 점용접에서 같은 크기의 시험편에 대하여 2점용접의 최대하중은 1점용접의 약 1.7배, 4점용접의 최대하중은 1점용접의 약 3.0배로 하중의 증가가 용접 점(spot)의 갯수에 비례하지 않는 것으로 나타났다⁽⁸⁾. 이는 저항 점용접에서 기계적 성질의 증대를 위해 너깃의 갯수만을 증가시키는 것이 제품의 공정설계나 품질관리 측면에서 결코 바람직하지 않음을 의미한다. 또한 너깃의 배열 형태에 따라 동일한 하중

이 작용하더라도 기계적 특성이 다르게 나타날 수 있는데, 결과적으로 1점용접과 2점용접에서 너깃의 수평 또는 수직 배열에 따른 기계적 특성을 파악하여 산업계 현장에서 효과적인 용접 점의 위치를 선정하는 것이 용접부의 품질 예측면에 있어서 훨씬 유리한 것으로 생각할 수 있다.

저항용접 공정의 용접품질 감시방법 중에서 직접적인 방법은 센서의 설치장소와 계측결과와 신뢰성이 문제시 되어 상용화까지는 다소의 시간이 더 필요하며, 간접적인 방법은 용접공정 변수를 이용하여 용접부의 품질을 예측하는 방법과 용접현상을 직접 측정하여 그 결과와 용접품질을 연계시키는 방법이 있다. 생산 공정에서는 각각의 용접조건과 그때의 용접부 품질을 미리 설정하고, 그 설정범위에서 용접이 이루어지게 하는 것이 현장의 관리상 매우 유리하다고 볼 수 있다.

한편 Fig. 3과 같이 저항 점용접의 경우, 파단양식은 (a) 양호한 용접으로 반대쪽(하판) 피용접재를 찢으며 분리되는 찢김파괴(tear fracture), (b) 용접부측으로 인해 너깃부에서 분리되는 전단파괴(shear fracture), 그리고 (c) 과도한 용접으로 반대쪽 너깃부가 썩 빠지는 플러그파괴(plug fracture)로 구분할 수 있다.

Fig. 4는 저항 점용접한 시험편을 만능재료시험기로 인장 시험을 하여 얻은 하중-신장량 곡선의 대표적인 결과로 (a)는 1점용접이고, (b)는 2점용접에서 너깃을 수평으로 배열한 것이며, (c)는 2점용접에서 너깃을 수직으로 배열한 것이다. 모든 경우에 대하여 인장-전단시험편이 십자형 인장시험편에 비하여 인장초기부터 급속하게 하중이 증가하고 있으며, 반면에 십자형 인장시험편은 인장-전단시험편에 비하여 대체적으로 완만하게 하중이 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4의 인장-전단시험편의 경우, (a)의 1점용접에서는 대체적으로 4.0kN까지의 탄성영역과 이후 항복점을 지나 소성영역에서는 5.2~5.8kN에서 하중이 급격하게 감소하며 시험편에 균열이 발생하였다. 또한, (b)와 (c)의 2점용접에서는 수평배열의 경우에는 7.5~8.0kN에서 재료에 항복이 일어났으나, 수직배열의 경우에는 8.0~8.5kN으로 수평배열에 비하여 재료의 항복이 나타나는 범위가 약간 높은 경향을 보였다. 그러나, 최대하중까지의 신장량을 살펴보면, 수평배열은 9~10mm, 수직배열은 7~8mm로 수평배열의 경우가 약간 큰 것으로 나타났다. 이는 항복점을 지나 완만한 하중 증가를 보이는 구간이 수평배열이 수직배열보다 긴 것으로도 쉽게 확인할 수 있다. 그 결과 항복점을 통과한 소성영역에서는 수평배열이 수직배열보다 인성이 더 있다는 것으로 제품의 구조상 용접 후 소성가공을 해야 한다면 소성가공의

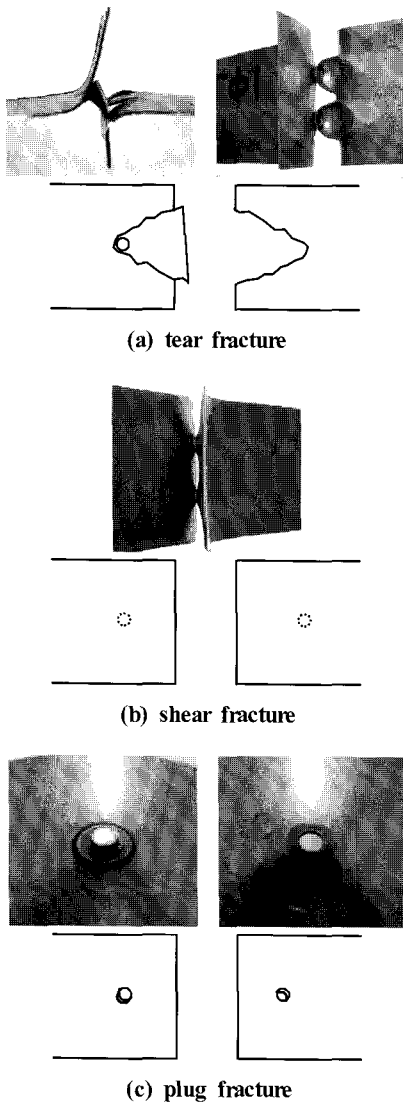
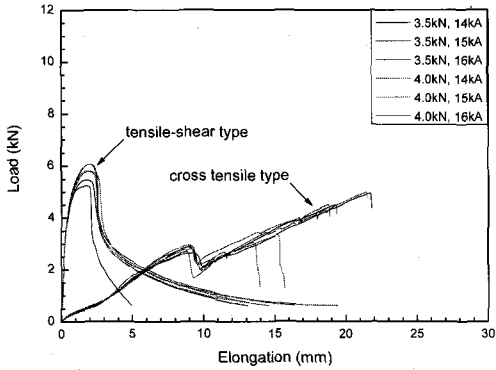


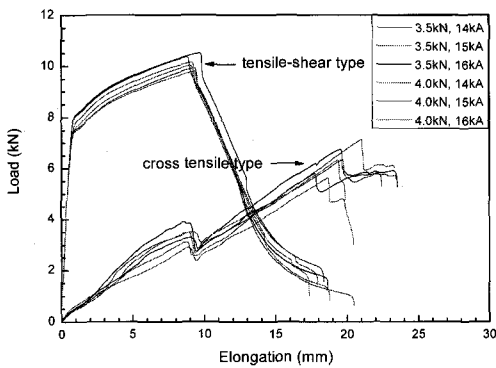
Fig. 3 Fracture patterns in spot welded specimen

방향(압연방향)에 따라 배열을 선택하는 것이 유리하다고 볼 수 있다. 인장-전단시험편은 (b)의 경우와 같이 극소수에 한하여 전단파괴가 발생한 것을 제외하면 모두 하판에서 균열이 발생하는 찢김파괴가 발생하였다.

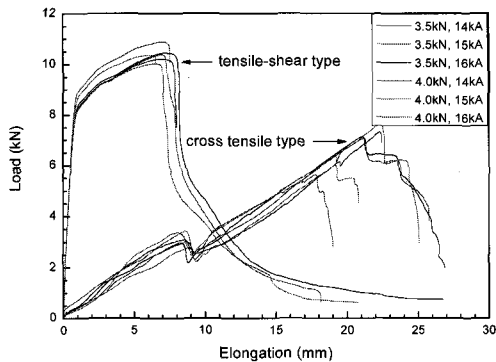
반면에 Fig. 4의 십자형 인장시험편의 경우, (a)의 1점용접에서는 2.7~3.0kN에서, (b)의 수평배열과 (c)의 수직배열 2점용접에서는 3.0~3.5kN에서 일시적으로 급격하게 하중이 감소하는 경향을 보였다. 이것은 각각 재료의 항복점으로 볼 수 있으며, 인장-전단시험편의 경우와는 달리 십자형 인장시험편에서는 수평배열과 수직배열의 경우 그 형태가 유사한 것을 알 수 있다. 한편, 십자형 인장시험편은 상판과 하판이 분리되는 완전파단의 경우, 통상의 용접조건에 비하여 가압력이 낮을수록 다소 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 가압력이 증가하면 완전파단보다는 부분파괴(찢김파괴)의 형태를 갖는 것으로 생각할 수 있다. 마찬가지로 시험편이 파괴된 후 너트는 전류의 세기가 낮으면 하판 쪽에 위치하고, 높으면 상판 쪽에 위치하였는데, 이는 통상의 용접조건에 비하여 전류의 세기가 낮으면 상판에서 균열이 발생하고, 높으면 하판에서 균열이 발생하는 것으로 판단된다.



(a) single spot



(b) horizontal, 2-spot



(c) vertical, 2-spot

Fig. 4 Load-elongation plots as a function of various spot welding conditions

Fig. 5는 인장-전단시험편에 대하여 인장시험 시 계측된 AE 신호의 예이고, Fig. 6은 십자형 인장시험편에 대하여 인장시험 시 계측된 AE 신호의 예이다.

Figs. 5, 6의 각 그림에서 ①, ②, ③ 및 ⑤(⑥)는 시간이력(time history)을 기준으로 하여 계측된 AE 신호를 파라미터별로 도시한 것으로, ①의 막대그래프는 AE 카운트 수를 나타내며, 점선의 그래프는 만능재료시험기로부터 읽어 들인 하중값이다. 한편, ②는 모두 외부장치로부터 읽어 들인 하중과 AE RMS의 관계를 나타내는 2차원 등치선도(2D contour plot)로 Parametric #1은 ①과 같이 만능재료시험기로부터 얻어진 아날로그 신호이며, Parametric #2는 실시간 모니터링을 위해 별도로 장치한 AE2A 광대역증폭기를 거쳐 오실로스코프 상에서 얻어진 AE RMS 값으로 Spartan 2000 시스템에서 획득된 자체 AE RMS 값과 같은 경향을 갖는데, ③의 AE RMS 값으로부터 이 사실을 쉽게 확인할 수 있다. 그리고 ④는 ⑤와 ⑥의 AE 에너지와 진폭과의 관계를 알아보기 위한 것으로 편대수(semi-log) 그래프를 이용하여 나타낸 AE 이벤트와 진폭과의 관계를 나타내며, ⑤는 ⑥의 2차원 등치선도이다. 또한 ④~⑥에서 threshold를 40dB로 고정하였음을 알 수 있다.

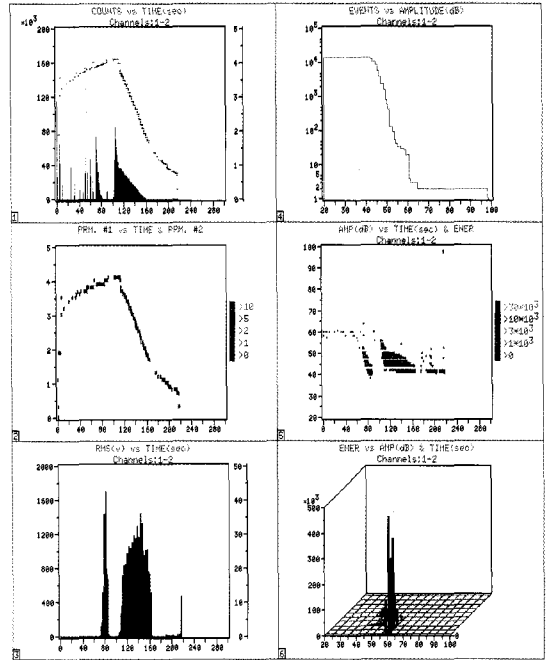
3.2 AE 신호 특성

Fig. 5에서 인장-전단시험편의 경우에는 ①로부터 (a)의 1점용접에서는 35sec, 2점용접에서는 (b)의 수평배열과 (c)의 수직배열 모두 110sec 전후에서 최대인장하중에 도달하며, AE 카운트 수가 증가 또는 집중적으로 나타나는 것으로

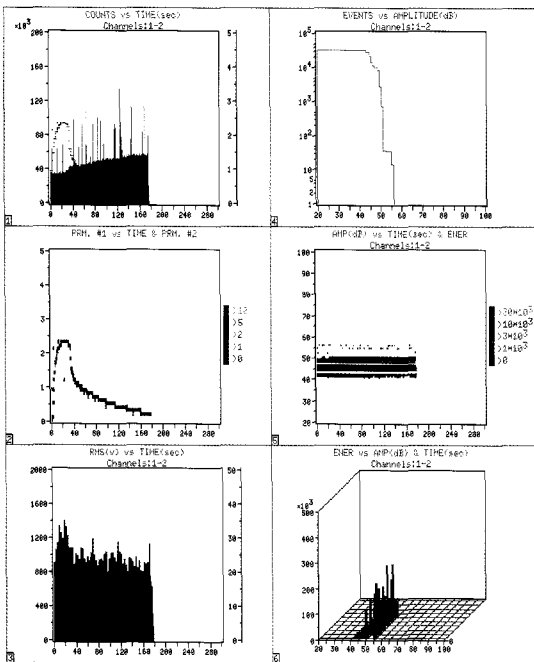
Fig. 5에서 인장-전단시험편의 경우에는 ①로부터 (a)의 1점용접에서는 35sec, 2점용접에서는 (b)의 수평배열과 (c)의 수직배열 모두 110sec 전후에서 최대인장하중에 도달하며, AE 카운트 수가 증가 또는 집중적으로 나타나는 것으로

보아 시험편의 초기 공극발생에 기인하여 성장한 균열이 서로의 합체를 통해 주균열로 발전하는 과정으로 보인다. 이후 짧은 시간 내에 모재에 파단(찢김)이 일어나는 것으로 생각되며, 각각 모든 조건에 대하여 하판에서 찢김파괴가 발생하였다. 특히, (b)의 2점용접 수평배열에서는 하중의 급속한 증가로 인하여 재료에 항복이 일찍 나타나며, 소성영역에서 ①의 AE 카운트 수와 ③의 AE RMS가 80~100sec에서 나타나지 않은 것은 너깃의 수평배열에 따른 카이저 효과(Kaiser effect)로 생각된다. 한편, 110sec 부근에서 균열이 발생한 이후, (c)의 수직배열에서는 균열의 급속한 진전으로 인하여 파괴로 이어지나 (b)의 수평배열에서는 균열이 발생한 이후에도 비교적 오랫동안 하중에 견디며 완만하게 파괴에 이르는 것으로 나타났는데, 이는 시험편의 압연방향의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 ④~⑥의 진폭분포로부터 시험편에 균열이 발생할 때에는 50~60dB, 찢김파괴가 일어날 때에는 40~50dB의 진폭을 갖는 것으로 나타났다.

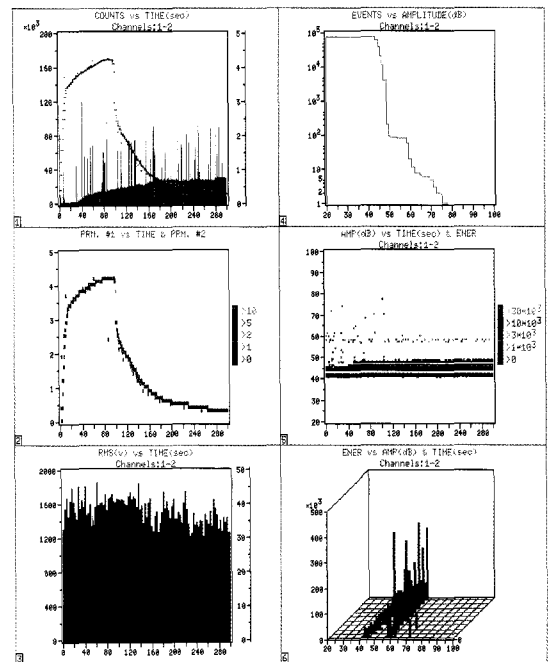
반면에 Fig. 6의 십자형 인장시험편의 경우에는 점용접부에서 변형이 일어나기 이전에 만능재료시험기의 그립(grip)에 설치한 지그의 영향으로 인하여 시험초기에 시험편의 상판을 기준으로 아래로 볼록한 모양의 굽힘변형이 일어나고,



(b) horizontal, 2-spot(4.0kN, 14kA)



(a) single spot(4.0kN, 15kA)



(c) vertical, 2-spot(3.5kN, 14kA)

Fig. 5 Examples of measured AE signals during tension test in tensile-shear type

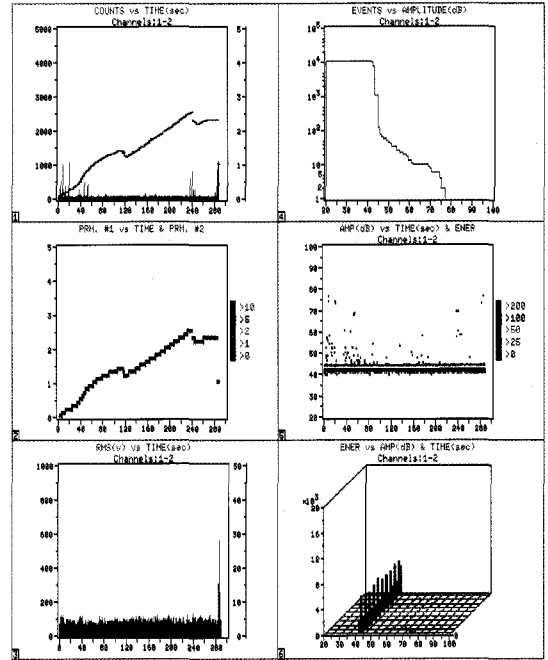
그 후 너깃에 변형이 일어나는 것으로 생각된다. 이때 초기에 얻어진 AE 신호는 주로 지그와 시험편 사이에서 발생하는 마찰과 시험편의 굽힘변형에 의한 것으로 ②와 ③의 AE RMS 값이 이 사실을 증명해주고 있다. 또한 ①과 ②로부터 약 110sec에서 하중값이 일시적으로 감소하는 경향을 보였는데, 이 지점에서 재료에 항복이 일어나는 것으로 여겨진다. 그리고 ④~⑥의 진폭분포로부터 인장초기에는 75~85dB, 재료에 항복이 일어날 때에는 65~75dB, 재료의 항복이후에는 40~60dB, 플러그파괴가 일어날 때에는 70~80dB과 90~100dB의 진폭을 갖는 것으로 나타났다.

한편 진폭분포의 특성을 파악하기 위하여 Pollock⁽¹⁰⁾, Nakamura 등⁽⁹⁾이 *b*-value를 제안하였는데, 이는 지진의 발생빈도와 규모를 나타내는 Gutenberg-Richter 진폭-빈도 관계식^(11,12)으로 식 (1)과 같이 표현된다.

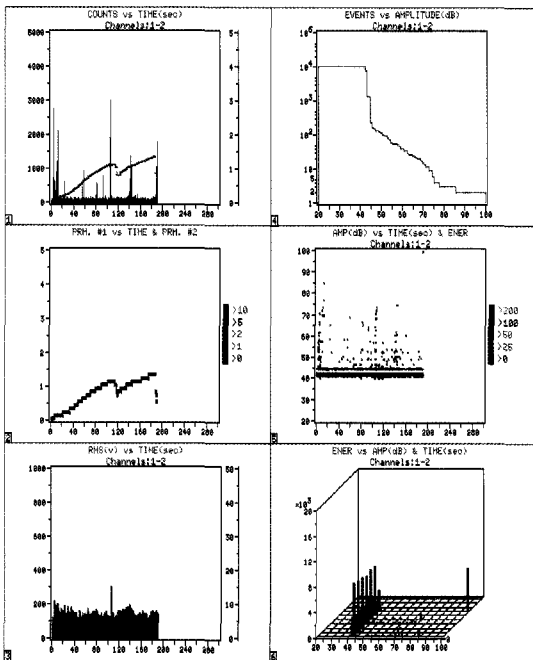
$$\log N = a - bM \quad (1)$$

여기서, *a*는 이벤트의 발생빈도로 절편 값이고, *b*는 기울기 값이며, *M*은 진폭의 크기를 의미한다.

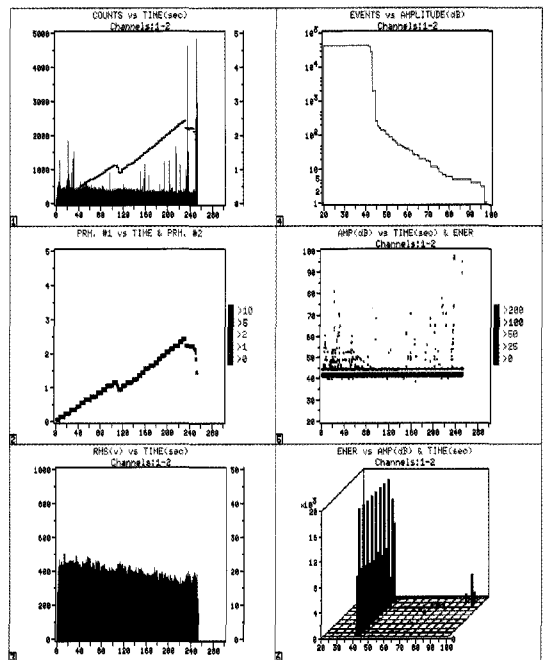
식 (1)에 의하여 ④에서 AE 진폭의 기울기 값인 *b*-value⁽⁹⁻¹²⁾



(b) horizontal, 2-spot(3.5kN, 15kA)



(a) single spot(4.0kN, 15kA)



(c) vertical, 2-spot(4.0kN, 15kA)

Fig. 6 Examples of measured AE signals during tension test in cross tensile type

로부터 일반적으로 b -value가 클수록(Fig. 5 인장-전단시험편의 경우→찢김파괴 또는 전단파괴) 저진폭이 많아지고, b -value가 작을수록(Fig. 6 십자형 인장시험편의 경우→플러그파괴) 고진폭이 많아지는 것을 알 수 있다. 반면에 AE 진폭은 대체로 고강도, 이방성, 비균질 재료와 결합을 내포하고 있는 취성재료일수록 높게 나타난다. 그러므로 이러한 진폭분포의 파악은 재료의 성질변화와 열화정도를 평가하는데 있어서 매우 유효하며, 균열진전에 의한 AE 신호는 상승시간과 지속시간이 짧고 큰 진폭을 갖는 것이 특징으로 알려져 있으므로 진폭분포는 파손기구와 서로 상관관계를 갖는다. 따라서 AE 신호의 진폭분포 해석을 통한 파괴기구와 균열진전 과정의 해석을 비교 및 검토한 결과, b -value의 변화가 재료의 파괴과정을 잘 나타내는 것으로 볼 수 있으므로 저진폭의 AE 신호는 모재의 균열발생에, 고진폭의 AE 신호는 모재파괴에 각각 대응되는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 SPCC강을 모재로 가압력, 전류의 세기 등 용접조건과 너트의 방향을 달리하여 저항 점용접한 인장-전단시험편 및 십자형 인장시험편에서 인장시험 과정 중에 발생하는 AE 신호를 계속하였다. 그리고 계속된 AE 신호를 분석하여 용접시험편의 종류에 따른 기계적 특성과 파괴 특성을 평가하였다.

- (1) 인장-전단시험편을 기준으로 하중의 작용방향(압연방향)에 대하여 너트의 위치를 수평으로 배열한 것이 수직으로 배열한 것보다 동일한 하중에 대하여 소성구간을 포함하여 신장량이 길게 나타났으며, 이것으로부터 저항 점용접 후 재료에 2차가공이 이루어질 경우, 가공 시 하중이 작용하는 방향에 따라서 너트의 방향(배치)을 고려하여 설계하는 것이 점용접 품질에 있어서 구조상 유리함을 알았다.
- (2) 인장하중과 전단하중이 동시에 작용하는 인장-전단시험편의 경우에는 시험편에 균열이 발생할 때에는 50~60dB, 찢김파괴가 일어날 때에는 40~50dB의 진폭을 갖는 것으로 나타났고, 순수 인장하중이 작용하는 십자형 인장시험편의 경우에는 인장초기에는 75~85dB, 재료에 항복이 일어날 때에는 65~75dB, 재료의 항복이 후에는 40~60dB, 플러그파괴가 일어날 때에는 70~80dB과 90~100dB의 진폭을 갖는 것으로 나타났다.
- (3) AE 진폭의 기울기 값인 b -value로부터 b -value가 클수

록(인장-전단시험편의 경우→찢김파괴 또는 전단파괴) 저진폭이 많아지고, b -value가 작을수록(십자형 인장시험편의 경우→플러그파괴) 고진폭이 많아짐을 알았다.

- (4) AE 신호의 진폭분포 해석을 통한 파괴기구와 균열진전 과정의 해석을 비교 검토한 결과, b -value의 변화가 재료의 파괴과정을 잘 나타내는 것으로 볼 수 있으므로 저진폭의 AE 신호는 모재의 균열발생에, 고진폭의 AE 신호는 모재파괴에 각각 대응되는 것으로 판단된다. 그러므로, 이러한 진폭분포의 파악은 재료의 성질변화와 열화정도를 평가하는데 매우 유효함을 알았다.

참고 문헌

- (1) Miller, R. K. and McIntire, P., 1987, *Nondestructive Testing Handbook(2nd ed.)*, Vol. 5, Acoustic Emission Testing, ASNT.
- (2) Korean Standards Association, 2001, *KS B 0851, Method of tension shear test for spot welded joint.*
- (3) Korean Standards Association, 2001, *KS B 0852, Method of tension test for spot welded joint.*
- (4) Korean Standards Association, 2001, *KS C 9606, Shapes and dimensions of spot welding electrodes.*
- (5) Korean Standards Association, 2001, *KS R 9204, Welded joints of stainless steel railway rolling stock—Design methods.*
- (6) Rhee, Z. K. and Woo, C. K., 2005, "Experimental Studies on Joinability of SWS 490A High Tension Steel using Acoustic Emission Signals," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 87~85.
- (7) Jo, D. H., Rhee, Z. K., Park, S. O., Cho, J. H., Kim, B. G. and Woo, C. K., 2006, "Quality Evaluation of Resistance Spot Welding using Acoustic Emission," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp. 98~104.
- (8) Chu, S. J., 2002, "Fatigue Test and Analysis of Multi-spot Welded Joints," *Transactions of the Korean Society of Machine Engineers*, Vol. 26, No. 3, pp. 471~478.
- (9) Pollock, A. A., 1973, "Acoustic Emission—Acoustic Emission Amplitudes," *Nondestructive Testing*, Vol. 6, No. 5, pp. 264~269.

- (10) Nakamura, Y., Veach, C. L. and McCauley, B. O., 1972, "Amplitude Distribution of Acoustic Emission Signals," *ASTM Special Technical Publication 505*.
- (11) Kulhanek, O., 2005, "Seminar on *b*-value," *Prague Centre of Mathematical Geophysics, Meteorology, and their Applications(MAGMA)*, Charles University, Prague, Czech.
- (12) 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.