

음향방출을 이용한 저항 점용접의 용접 품질평가

조대희*, 이장규⁺, 박성완⁺⁺, 조진호⁺⁺⁺, 김봉각⁺⁺⁺⁺, 우창기⁺⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2006. 4. 18, 심사완료일 2006. 5. 9)

Quality Evaluation of Resistance Spot Welding using Acoustic Emission

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

Abstract

In this paper, for the purpose of investigation the acoustic emission(AE) behaviors during resistance spot welding process and tension test of SPCC steels. As the results present the resistance spot welding method that can get suitable welding qualities or structural integrity estimating method. The resistance spot welding process consists of several stages: set-down of the electrodes; squeeze; current flow; forging; hold time; and lift-off. Various types of AE signals are produced during each of these stages. For tensile-shear test and cross tensile test in resistance spot welded specimens, fracture patterns are produced: tear fracture; shear fracture; and plug fracture. Tensile-shear specimens strength appeared higher than cross tensile specimens one. In case of tensile-shear specimen happened tear fracture that crack happens in most lower plate. Also, in case of cross tensile specimens, upper plate and lower plate are detached perfect fracture was exposed increases a little as acting force is lower than ordinary welding condition. Therefore, the structure which is combined by resistance spot welding confirmed that welding design must attain so that shear stress may can interact mainly.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Resistance Spot Welding(저항 점용접), Tensile-Shear Test(인장-전단시험), Cross Tensile Test(십자형 인장시험), Fracture Pattern(파괴양식), Quality Evaluation(품질평가)

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

1. 서론

내부 또는 외부 응력에 의해 임의의 부재에 생성된 균열은 균열의 진전에 따라 부재 내부에 공간이 형성되어 응력이 해방된다. 이때 발생하는 탄성파를 공학적 측면에서 이용한 것이 음향방출법(AE, acoustic emission)이다⁽¹⁾.

AE법은 품질평가에 적용하면 부재의 미시적 변형과 파괴 과정을 실험으로 해석하는 것이 가능하여 신소재 또는 기존 재료의 재질개선에 중요한 정보를 제공해주며, 금속재료와 같이 균질한 재료를 대상으로 개발되어진 대부분의 각종 실험방법들을 복합재료와 같은 불균일 재료나 비금속 재료에 적용시킬 때 파생되는 다양한 문제점을 보완할 수 있다⁽²⁻⁴⁾.

한편, 저항용접은 1875년 영국의 Joule이 발견하여 시도 하였으나 대형전원장치 문제로 실패하였고, 1886년 미국의 Thomson이 전원문제를 해결하여 특허를 취득하였으며, 1890년경 미국의 Hamad가 점용접기를 실용화하였다⁽⁵⁾.

저항 점용접(resistance spot welding)은 용접모재를 전극 사이에 겹쳐 놓고 가압하면서 0.3초 이내의 짧은 시간에 대전류를 통전시켜 접촉저항에 의한 Joule열로 용융 접합시키는 방법이다. 저항 점용접은 부재의 물성치(비저항, 열전도도, 비열, 용융점 등)에 따라 용접의 품질이 좌우되기도 하지만 가압력, 통전시간 및 전류의 세기가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한, 저항 점용접은 다른 용접과는 달리 가압력, 통전시간 및 전류의 세기를 조절하여 자동화가 용이하다는 특징이 있다.

본 연구에서는 가압력과 전류의 세기를 주요인자로 하여 저항 점용접 시 시험편에서 발생하는 AE 신호와 인장시험 시 저항 점용접된 시험편에서 발생하는 AE 신호를 계측하고, 계측된 AE 신호를 분석하여 최상의 용접품질을 얻을 수 있는 방법과 저항 점용접의 자동화 및 현장에서 적용할 수 있는 평가방법을 제시하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 시험편은 동부제강에서 생산한 SPCC 강을 모재(base metal)로 하여 시료를 채취한 후, Fig. 1처럼 KS B 0851의 인장-전단시험편⁽⁶⁾과 KS B 0852의 십자형 인장시험편⁽⁷⁾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 KS C 9606의 CF형인 원추대형(cone flat type)으로 호칭직경 16⁽⁸⁾이다. 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 십자형 인장시험편과 인장-전단시험편에 각각 용접을 하였다.

또한 저항 점용접 시, 너깃(nugget)의 위치정밀도와 점용

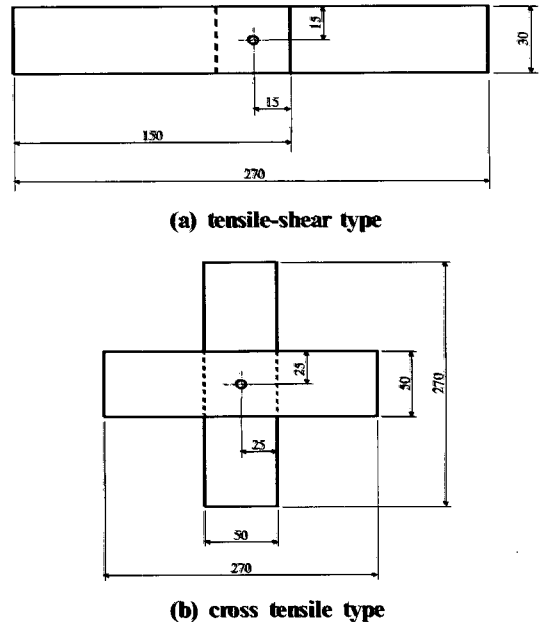


Fig. 1 Geometry of test specimen(unit:mm)

Table 1 Chemical composition of SPCC steel(wt.%)

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

Table 2 Mechanical properties of SPCC steel

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

접에 대한 신뢰도를 높이기 위해 전용 지그(jig)를 제작하여 설치하였다.

저항 점용접 중에 발생하는 AE 원신호(raw signal)는 Spartan 2000 시스템(PAC, USA)의 TRA-212 모듈을 이용하여 획득하였다. 이 경우 광대역 센서인 WDI(사용주파수 100~1,000kHz)와 공진역 센서인 Nano30(사용주파수 125~750kHz, 공진주파수 300kHz)을 사용하였으며, 전치증폭기는 BPF 100~1,200kHz에 40dB로 채택하였다.

한편 저항 점용접이 완료된 시험편에 대해서는 Autograph 25-TG(Shimadzu, Japan) 만능재료시험기를 사용하여 5 mm/min의 정속으로 인장시험 시 발생하는 AE 원신호를 Spartan 2000 시스템의 SP2-DAQ 모듈을 이용하여 획득하였고, 이 경우 공진역 센서인 R15(사용주파수 50~200kHz, 공진주파수 150kHz)를 사용하였으며, 전치증폭기는 BPF 100~300kHz에 40dB로 채택하였다.

이때 인장-전단시험편의 경우에는 회전모멘트를 없애기 위하여 시험편과 동일한 두께의 썬기판을 사용하였고, 십자형 인장시험편의 경우에는 KS B 0852의 규격에 따라 전용 지그를 제작⁽⁷⁾ 사용하였다. 또한 AE 신호 계속 시에는 저항 점용접기 및 지그의 작동에 지장이 없도록 조치하고, 고진공 그리스를 사용하여 시험편에 해당 센서를 압착시킨 후, 샤프 심 압절법으로 캘리브레이션을 실시하여 압착여부를 확인하였다⁽¹⁴⁾. 그리고 검출된 아날로그 AE 신호는 주증폭기에서 2차 증폭하여 디지털 데이터로 저장한 후 파형해석을 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 저항 점용접의 경우

저항 점용접기로 십자형 인장시험편과 인장-전단시험편에 저항 점용접을 하는 과정에서 검출된 AE 신호는 대부분 Fig. 2와 같은 형태를 보였다.

일례로 Fig. 3에서 (a)는 AE 신호가 처음 관측된 곳으로 set-down 구간이다. Set-down 구간은 점용접기의 전극이 시험편을 가압할 때 전극과 시험편의 타격 및 마찰로 두 개의 시험편의 위치가 고정되고 압착이 되면서 발생하는

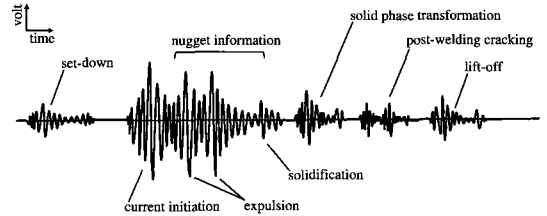
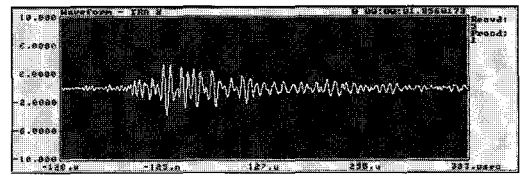
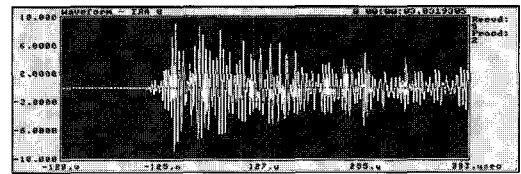


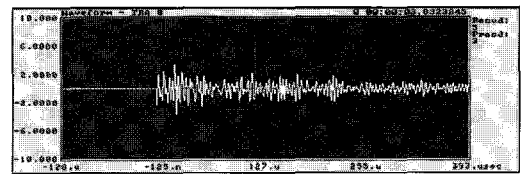
Fig. 2 Typical AE response signals during resistance spot welding



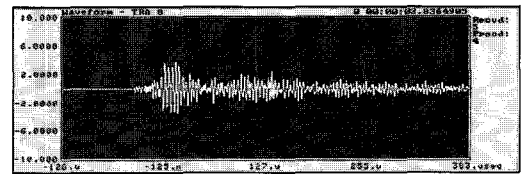
(a) set-down



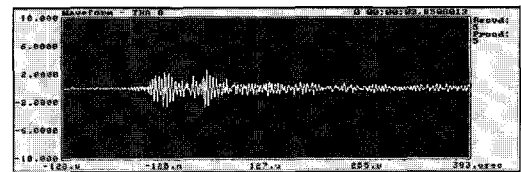
(b) current initiation, nugget information, etc.



(c) solid phase transformation



(d) post-welding cracking



(e) lift-off

Fig. 3 Example of measured AE signals during resistance spot welding

것으로 전극의 형상과 가압력의 크기 등에 따라 AE 신호의 진폭분포가 다르게 나타났다.

(b)는 두개의 전극 사이에 대전류가 흐르면서 접촉저항과 통전시간에 의하여 Joule열이 발생하면서 국부적인 소성변형, 용융과 용융에 의한 팽창, 그리고 응고 등의 과정을 거치면서 너깃을 형성하는 구간이다. 이때 발생한 AE 신호는 다른 구간에 비하여 진폭이 크고 상당히 높은 AE 에너지를 발생하며, 이는 저항 점용접의 특성과 정보를 갖고 있는 신호이다. 여기서, 너깃은 용접결과로 접합부에 생기는 용융 응고한 부분으로 보통은 접합면을 중심으로 바둑돌 모양으로 형성된다. 코로나 본드(corona bond)는 너깃 주위에 존재하는 링 형상의 부분으로 실제 용융하지 않고 열과 압력을 받아 고상으로 압접된 부분이고, 이 부분은 접합부의 강도에는 기여하지 않으며 비파괴검사 시에 너깃치수를 과대평가하기 때문에 주의가 요구된다. 중간날림(expulsion)은 용융 금속이 코로나 본드를 파괴하고 외부로 튀어나가면서 날리는 것을 말하는데, 점용접이나 프로젝션용접에서 가장 해결하기 어려운 문제 중의 하나이다. 또한 표면날림(surface flash)은 전극과 피용접재의 접촉면에서 피용접재나 전극이 용융해서 튀어나가는 것을 말하는데, 중간날림보다는 자주 발생하지 않지만 주로 점용접에서 도전율이 나쁜 전극소재를 사용하거나 냉각부속 또는 전극 팁 직경이 과소한 경우에 자주 발생하며 전극 팁의 손상에 가장 큰 영향을 미친다.

(c)는 대전류가 차단된 후에도 전극에 의하여 가압이 진행되고 있으며, 응고에 따른 상변태가 일어나거나 균열 등의 변형에 의하여 AE 신호가 발생하는 구간으로 너깃의 크기 파악이 가능하여 개재물(inclusion)에 관한 정보를 갖고 있는 신호이다. 특히, 너깃의 크기는 저항 점용접의 건전성 평가에 이용되기도 하므로 이 부분을 제어하기 위한 수단으로 AE를 응용하려는 노력이 진행되고 있다.

(d)는 용접 후 발생하는 균열에 의하여 AE 신호가 발생하는 구간이다.

마지막으로 (e)는 lift-off 구간으로 점용접기의 전극이 시험편에서 떨어질 때 발생한 AE 신호로 전극의 마멸 상태, 이물질의 발생 여부, 시험편과 전극 사이의 소착발생 여부 등 오염(pick up)에 따라 서로 다른 신호의 진폭분포가 나타났다.

3.2 인장시험의 경우

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 인장시험 또는 용접부 피로시험을 행한다.

용접부의 성능을 확인하기 위하여 기존의 규격에서는 파괴시험에 의한 용접부의 기계적 강도측정 또는 미세조직을 확인하고 그 결과를 이용하여 용접부의 품질을 평가하며, 여기서는 하나의 방편으로 AE법을 활용한다.

일반적으로 십자형 인장시험 또는 인장-전단시험에서의 파단양식은 용접부측으로 인해 너깃부에서 분리되는 전단파괴(shear fracture), 양호한 용접으로 반대쪽(하판) 피용접재를 찢으며 분리되는 찢김파괴(tear fracture), 그리고 과도한 용접으로 반대쪽 너깃부가 쏙 빠지는 것과 같은 플러그파괴(plug fracture)로 구분할 수 있다.

한편 위에 도시한 Fig. 4는 저항 점용접한 시험편을 만능재료시험기로 인장시험 하여 얻은 하중-신장량 곡선의 대표적인 결과이다.

Fig. 4 (a)의 인장-전단시험편의 경우에는 대체적으로 인장초기에서 3.8kN까지는 하중이 급격히 증가하고, 이후 완만해지다가 4.3~5.2kN 부근에서 하중이 급격하게 감소하며 시험편에 파단이 발생하였는데, 각 조건에 대하여 하판에서 모두 균열이 발생하는 찢김파괴가 발생하였다.

반면에 Fig. 4 (b)의 십자형 인장시험편의 경우에는 Fig. 4 (a)의 인장-전단시험편에 비하여 대체적으로 완만한 하중 증가를 보이며, 1.7~2.4kN과 3.5~3.9kN 부근에서 일시적으로 하중이 감소하였다. 그 결과 십자형 인장시험편은 상판과 하판이 분리되는 완전파단(전단파괴)의 경우, 통상의 용접조건에 비하여 가압력이 낮을수록 다소 증가하는 것으

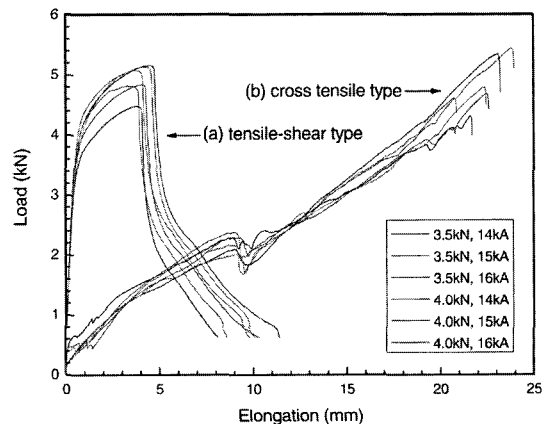
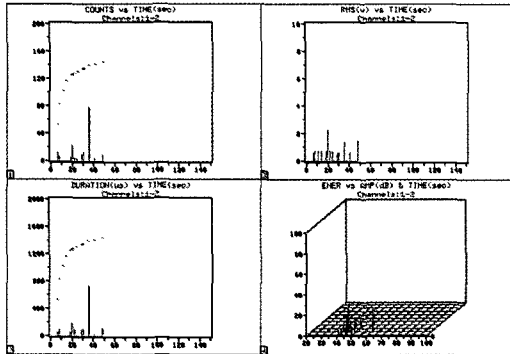


Fig. 4 Representative plots for load-elongation

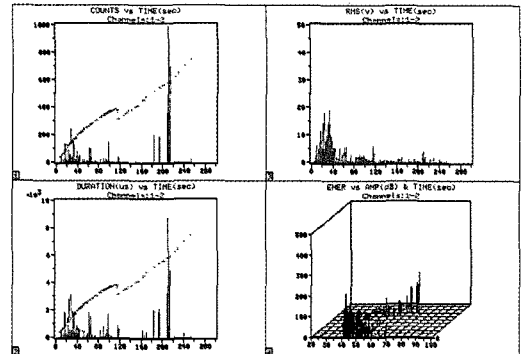
로 나타났는데, 이는 가압력이 증가하면 완전파단(전단파괴) 보다는 부분파괴(찢김파괴)의 형태를 갖는 것으로 생각할 수 있다. 마찬가지로 시험편이 파괴된 후 너깃은 전류의 세기가 낮으면 하판 쪽에 위치하고, 높으면 상판 쪽에 위치하였는데, 이는 통상의 용접조건에 비하여 전류의 세기가 낮

면 상판에서 균열이 발생하고, 높으면 하판에서 균열이 발생함을 의미한다.

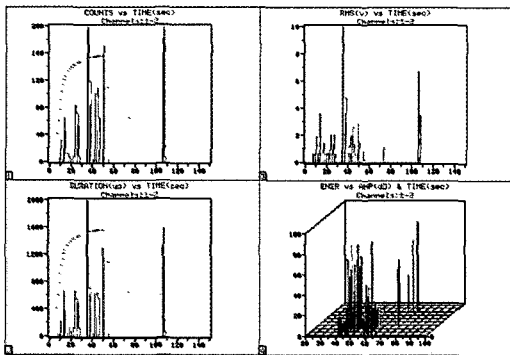
Fig. 5에 도시한 (a)~(c)는 인장-전단시험편에 대하여 인장시험 시 계측된 AE 신호의 예이고, (d)~(f)는 십자형 인장시험편에 대하여 인장시험 시 계측된 AE 신호의 예이다.



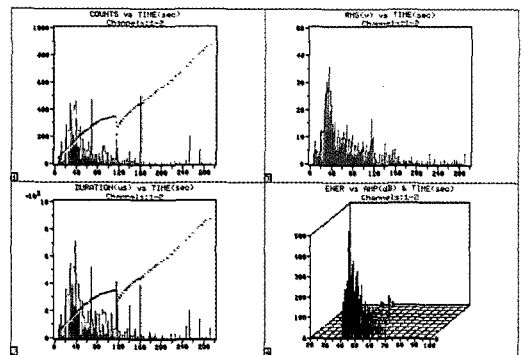
(a) tensile-shear type (3.5kN, 14kA)



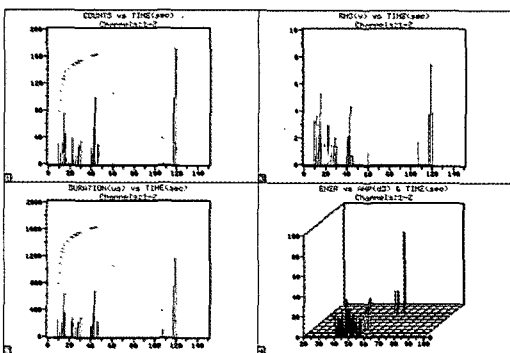
(d) cross tensile type (4.0kN, 14kA)



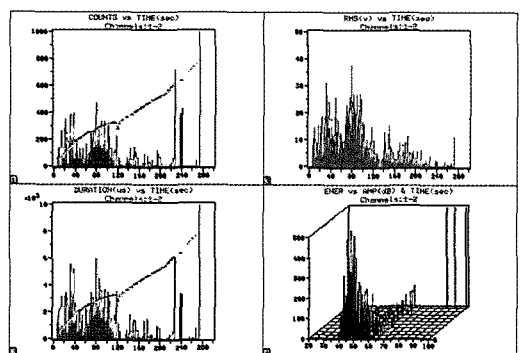
(b) tensile-shear type (4.0kN, 14kA)



(e) cross tensile type (4.0kN, 15kA)



(c) tensile-shear type (4.0kN, 15kA)



(f) cross tensile type (4.0kN, 16kA)

Fig. 5 Example of measured AE signals during tensile test

각 그림은 시간이력(time history)에 대하여 도시한 것으로 ①은 AE 이벤트 수, ②는 지속시간, ③은 AE RMS, 그리고 ④는 AE 에너지와 진폭에 대한 관계를 나타낸다.

또한 ①과 ②에서 초록색 점선은 만능재료시험기로부터 얻어진 하중-시간에 대한 아날로그 신호를 외부입력단자를 통하여 읽어 들인 값(parametric #1)으로 Fig. 4에서 보는바와 같다. 그리고 ③에서 초록색 막대는 실시간 모니터링을 위해 별도로 장치한 AE2A 광대역증폭기를 통하여 오실로스코프 상에서 얻어진 AE RMS의 값(parametric #2)이며, Spartan 2000 시스템에서 얻어진 AE RMS 값과 유사함을 알 수 있다.

인장-전단시험편의 경우에는 십자형 인장시험편의 경우와는 달리 지그를 사용하지 않았기 때문에 ②와 ③의 지속시간과 AE RMS 값으로부터 인장초기에는 마찰에 의한 AE 신호가 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 ①로부터 약 45 sec 경과한 시점에 이르러 시험편에 초기균열이 발생하여 짧은 시간 내에 모재에 파단(찢김)이 일어나는 것으로 생각된다. 그 결과 (a) 3.5kN, 14kA, (b) 4.0kN, 14kA 및 (c) 4.0kN, 15kA 조건 모두 하판에서 찢김파괴가 발생하였다. 또한 (a)는 (b)와 (c)에 비하여 용접조건이 상대적으로 낮아 비교적 일찍 파단되고 있음을 알 수 있다. 따라서 ④의 진폭 분포로부터 모재에 찢김파괴가 일어날 때의 진폭은 40~50dB, 모재가 파단될 때 나타나는 진폭은 70~80dB인 것으로 판단된다.

한편, 십자형 인장시험편의 경우에는 점용접부에서 변형이 일어나기 이전에 만능재료시험기의 그림(grip)에 설치한 지그의 영향으로 인하여 시험초기에 시험편에 “<”자 모양의 굽힘변형이 일어나고, 그 후 너깃에 변형이 일어나는 것으로 생각된다. 이때 초기에 얻어진 AE 신호는 주로 지그와 시험편 사이에서 발생하는 마찰과 굽힘변형에 의한 것으로 ②의 비교적 긴 지속시간으로부터 확인할 수 있으며, ③의 AE RMS 값이 이 사실을 증명해주고 있다. 또한 ①과 ②로부터 약 120sec 경과한 시점에 이르러 하중값이 일시적으로 감소하는 경향을 보였는데, 이 지점에서 재료에 항복이 일어나고, 그 후 용접부에 초기균열이 발생하여 균열이 조금씩 성장해 가는 것으로 추측된다. 그 결과 (d) 4.0kN, 14kA 조건에서는 상판에 균열이 발생하였고, (e) 4.0kN, 15kA와 (f) 4.0kN, 16kA 조건에서는 하판에 균열이 발생한 것으로 나타났다. 또한 (e)와 (f)의 ④에서 AE 에너지는 전류의 세기가 높은 (f) 조건에서 상대적으로 많은 양의 AE 에너지가 방출됨을 알 수 있다. 따라서 ④의 진폭분포로부터 재료에 항복이 일어날 때의 진폭은 65~75dB, 균열이 발생하여 성

장할 때 나타나는 진폭은 50~60dB인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 가압력과 전류의 세기 등 용접조건을 달리 하여 SPCC 강에 저항 점용접을 한 경우, 저항 점용접을 할 때 재료의 물리적 기계적 특성의 변화에 의하여 발생하는 AE 신호를 계측하고, 용접한 시험편에 대하여 인장시험과 인장-전단시험을 하여 계측된 AE 신호에 의하여 용접부의 품질을 평가하였다.

그 결과 저항 점용접부의 파단양식은 양호한 용접으로 반대쪽(하판) 피용접재를 찢으며 분리되는 찢김파괴, 용접부 쪽으로 인해 너깃부에서 분리되는 전단파괴, 그리고 과도한 용접으로 반대쪽 너깃부가 쏙 빠지는 플러그파괴로 구분할 수 있었다. 여기서 인장-전단시험편의 강도가 십자형 인장시험편보다 높아 저항 점용접으로 결합된 구조물은 전단하중이 주로 작용할 수 있도록 용접설계가 이루어져야 됨을 확인하였다. 또한, SPCC 강은 통상의 저항 점용접 권장조건에 비하여 가압력이 클 경우 완전파단(플러그파괴) 보다는 부분파괴(찢김파괴)가 일어남을 알았고, 마찬가지로 전류의 세기가 낮을 경우에는 상판에서 균열이 발생하고, 높을 경우에는 하판에서 균열이 발생하는 경향이 있음을 알았다. 따라서 통상의 용접조건을 효과적으로 활용할 수 있다면 실시간에 저항 점용접의 용접부 품질평가가 가능할 것으로 판단한다.

참고 문헌

- (1) Miller, R. K. and McIntire, P., 1987, *Nondestructive Testing Handbook(2nd ed.)*, Vol. 5, *Acoustic Emission Testing*, ASNT.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.

- (5) Cho, S. M., 1997, "Principle of Resistance Welding and Analysis of Monitoring Results," *Journal of Korean Welding Society*, Vol. 15, No. 2, pp. 1~10.
- (6) Korean Standards Association, 2001, *KS B 0851*,

Method of tension shear test for spot welded joint.

- (7) Korean Standards Association, 2001, *KS B 0852*,
Method of tension test for spot welded joint.
- (8) Korean Standards Association, 2001, *KS C 9606*,
Shapes and dimensions of spot welding electrodes.