

## 음향방출 특성을 이용한 알루미늄 합금의 마찰교반점용접 모니터링 기법 개발에 관한 연구

이용욱 · 이학춘 · 박중환 · 박규열 · 홍성태 · 황재현

### Development of Monitoring Process of Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys using Acoustic Emission

Yong-Wook Lee, Hak-Chun Lee, Jong-Whan Park, Kyu-Yeol Park,  
Sung-Tae Hong and Jae-Hyun Hwang

#### 1. 서 론

대표적인 경량화 소재인 알루미늄(Al) 합금은 최근 자동차 산업에서 강하게 일고 있는 경량화 추세와 맞물려 자동차 차체 사시 분야에의 응용이 빠른 속도로 확산되고 있다. 그러나 알루미늄 합금은 용융용접 시 고온균열 및 용접변형 등이 발생하기 쉽다는 취약점을 가지고 있다. 특히 차체 사시 제조의 주요 공정으로서 부품간의 Lap 접합이 사용되고 있음을 고려할 때 알루미늄 합금의 낮은 용접성은 자동차 산업에서 알루미늄 합금의 보급 확대를 위해서 반드시 극복해야 할 문제점이라고 할 수 있다.

알루미늄 합금의 낮은 용접성을 극복할 수 있는 대표적인 신기술로서 주목 받고 있는 고상접합공정인 마찰교반용접(Friction Stir Welding: FSW)<sup>1)</sup>에서 파생된 마찰교반점용접(Friction Stir Spot Welding: FSSW)은 FSW와 마찬가지로 회전마찰에 의한 가열 및 재료의 소성유동을 응용한 고상접합 방법<sup>2)</sup>으로 모재를 용융시키지 않아 변형이 극히 적고 용접 후 외관의 상태가 좋아 고품질의 접합부를 얻을 수 있으며 소음 및 유해광선의 발생이 없기 때문에 환경 친화적인 접합 방법이기도 하다<sup>3)</sup>.

이러한 배경에서 FSSW는 알루미늄 합금의 용융식 Spot용접을 대체할 수 있는 자동차 분야의 새로운 알루미늄 합금 점용접법으로 주목 받고 있다<sup>4-5)</sup>. FSSW는 공정의 원리가 기존의 용융식 Spot용접과 확연히 다르므로, 제품의 품질을 보장할 수 있는 FSSW에 적합한 공정 모니터링 기법의 개발이 요구된다.

음향방출(Acoustic Emission: AE)<sup>6-7)</sup>이란 고체가

변형 또는 파괴시 발생하는 음을 탄성파로 방출하는 현상이며, 이 탄성파를 AE 센서로 검출하고 비파괴적으로 평가하는 방법을 AE법이라 한다. AE법은 주로 초음파 영역(수십kHz ~ 수MHz)의 신호를 대상으로 하고 있어 초음파 탐상법(Ultrasonic Testing: UT)과 비슷하지만 재료의 결함 자체가 방출하는 동적 에너지를 감지 한다는 점에서 다른 비파괴검사 방법과 구분된다. 본 연구에서는 Acoustic Emission 신호를 이용한 FSSW 공정 모니터링 기법의 개발 기초연구로서, 알루미늄 합금의 FSSW 공정 중의 AE 신호 특성에 대하여 고찰하고자 한다.

#### 2. 실험장치 및 방법

##### 2.1 실험장치 개요

본 연구에서는 Fig. 1에 나타내어진 FSW/FSSW 전용 장비 및 FSSW 전용 공구(Fig. 2)를 이용하여 5052 알루미늄 합금의 FSSW 공정을 수행하였으며, AE 센서를 실험 재료에 부착한 후 신호증폭 장비와 A/D 신호 처리장치 및 분석 장치를 이용하여 FSSW 공정 중의 AE 신호를 측정하였다. 실험장치 구성에 사용된 실험장비의 내용은 Table 1과 같다.

##### 2.2 실험재료

본 연구에서 피접합재로 사용된 재료는, 길이 200 mm, 폭 50 mm, 두께 3 mm 의 5052-H32 알루미늄 합금을 사용하였으며 소재의 화학조성과 기계적 성질은 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다.

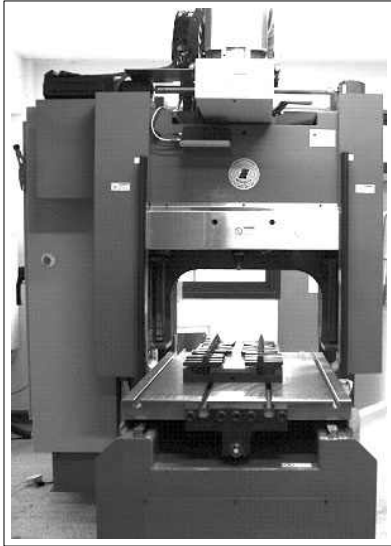


Fig. 1 FSW machine

Table 1 Experimental setup

Item	Specification
FSW machine (Fig. 1)	Manufacturing Technology, Inc Model: RMIA-07
FSSW tool (Fig. 2)	Tapered scrolled pin (root diameter 5.5 mm) with 1°concave shoulder (tool steel)
AE sensor	Ch1: PAC-R15a
	Ch2: PAC-R15a
Preamplifier	PAC-2/4/6
AE research tool	PAC, PCI-2
AE software	AEwin

Table 2 Chemical composition of 5052-H32 Al alloy (wt%)

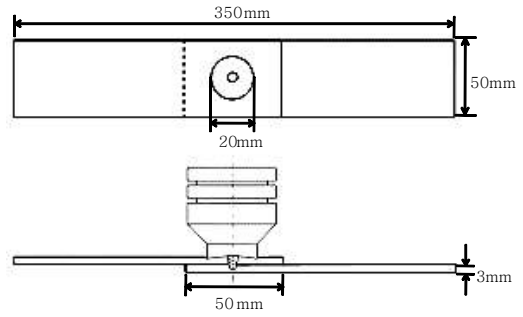
Al alloy	Si	Mn	Mg	Cu	Cr	Fe	Zn
5052-H32	less than 0.25	less than 0.10	2.2~2.8	less than 0.10	0.15~0.35	less than 0.40	less than 0.10

Table 3 Mechanical properties of 5052-H32 Al alloy

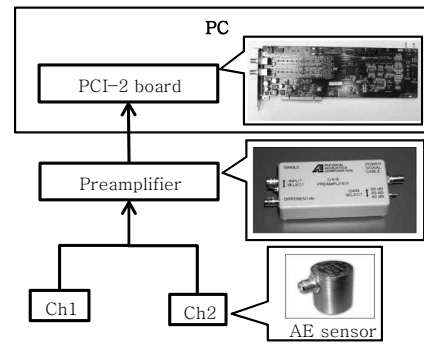
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
230	195	16.67	77



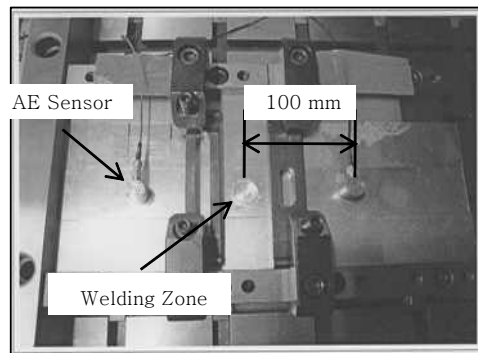
Fig. 2 FSSW tool



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 (a) FSSW set-up for 5052-H32 Al alloys, (b) a schematic of AE measurement set-up, and (c) location of AE sensors during experiments

### 2.3 실험방법

본 연구에서는 Fig. 3(a)와 같이 시편들의 끝단이 겹치도록 하고 Table 4에 나타내어진 공정변수를 사용

Table 4 Process parameter of FSSW

Tool rotation	Clockwise
Tool speed(rpm)	750
Tool depth(mm)	4.35
Operation of FSSW	Position control

Table 5 Parameters for AE signal recoding

Channel	Threshold (dB)	Pre-Amp (dB)	Sample Rate (MSPS)	Analog Filter	
				Lower (kHz)	Upper (MHz)
1	45	40	1	1	3
2	45	40	1	1	3

하여 5052-H32 알루미늄 합금의 FSSW를 수행하였다. AE 신호의 측정을 위해서 2개의 AE 센서(R15a, PAC)를 사용하였고, 2/4/6 Preamplifier를 사용하여 신호를 증폭하였다. AE 측정 시스템의 개략도를 Fig. 3(b)에 나타내었다.

일반적으로 AE 센서의 부착위치가 접합부와 가까울수록 좀 더 정확한 AE신호를 측정할 수 있을 것으로 예상되나 접합 시 발생하는 열이 재료를 통해 전달되어 AE센서에 영향을 미칠 수 있으므로 본 연구에서는 Fig. 3(c)와 같이 접합부 중심에서 10 cm 떨어진 양쪽 위치에 AE 센서를 부착하였다. 이때 AE신호의 감쇠현상을 최대한 줄이기 위해 고진공 그리스(high vacuum grease, Dow corning)를 사용하여 AE센서를 시험편의 표면에 압착 고정시켰다.

FSSW 공정시 시험편으로부터 발생하는 신호는 AE 센서로부터 프리앰프를 통해 노이즈가 제거 되어 신호가 증폭된 후 (gain 40 dB) A/D PCI-2에서 변환되어 저장되었다. Table 5는 AE 신호의 측정 및 저장을 위하여 사용된 설정치 들을 보여준다.

### 3. 실험결과 및 분석

실험을 통하여 측정된 AE 신호의 물리적 의미를 명확하게 이해하기 위하여 FSSW 공정시 발생하는 공구의 축방향 하중(Z-Force)과 AE amplitude(즉, 재료 교반부의 소성변형에 의해서 발생하는 소재 내부의 탄성파에 의한 변형의 정도에 따른 AE 신호)를 비교, 분석하였다. Fig. 4 와 Fig. 5는 각각 Z-force 그리고 AE amplitude의 변화를 시간의 함수로 보여준다.

FSSW 공정은 공정 초반에 공구가 상부에 놓여있는

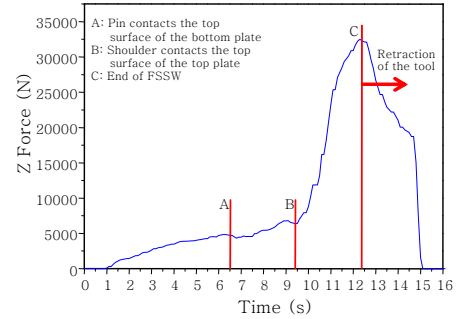


Fig. 4 A Z-force during FSSW of 5052-H32 Al alloy as a function of time

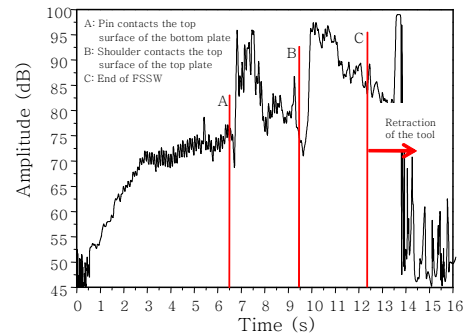


Fig. 5 AE Amplitude during FSSW of 5052-H32 Al alloy as a function of time

소재만을 교반하며, 공정의 중반부 이후에 핀이 하부에 놓여있는 소재까지 삽입되면서 상부와 하부의 소재들을 교반하여 접합부를 형성하는 공정이다. Figs. 4 와 5에 나타내어진 바와 같이 소재에 대한 공구 핀의 위치에 따라서 축방향 하중 및 AE 신호의 변화가 확연히 나타남을 알 수 있다.

실험결과에서 알 수 있듯이 AE 신호와 축방향 하중의 그래프는 모두 비슷한 경향성을 나타내고 있으나, AE 신호의 경우가 공정의 진행에 따른 신호의 변화가 축방향 하중에 비하여 더 명확히 구분되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에서 나타내어진 바와 같이, 최초로 회전하는 공구 핀이 소재와 접촉한 후 삽입 및 교반과정 초기에 AE 신호는 매우 급격한 상승을 보인다. 이 후 핀의 삽입 및 교반이 계속 진행되면서 AE 신호는 계속 증가하나 그 기울기가 현격하게 완만해지는 것을 볼 수 있다. Fig. 4의 축방향 하중 측정 결과도 이와 일치하는 경향을 보여주나, AE 신호에 비하여 그 변화가 확연히 나타나지는 않는다.

FSSW 공정 중의 초반부에 나타나는 이러한 신호의 급격한 변화는 FSSW가 진행될수록 교반부의 온도가 상승하면서 재료의 인장강도가 급격히 낮아지기 때문인

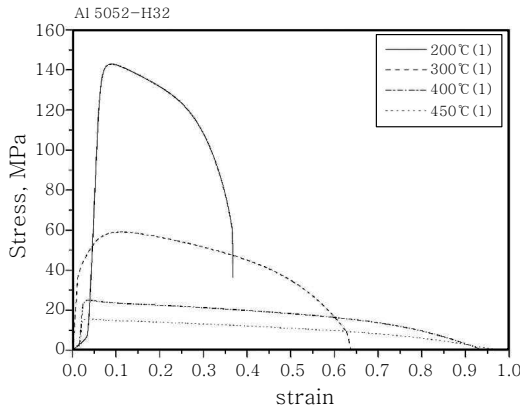


Fig. 6 Strain-stress diagram of Al 5052-H32 at various temperatures

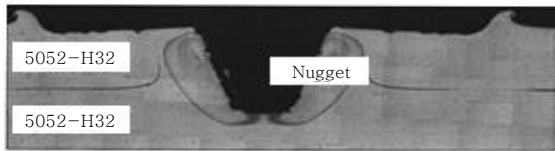


Fig. 7 Cross section of FSSW joint

것으로 짐작된다. Fig. 6은 고온인장실험을 통해 온도 변화에 따른 5052-H32 알루미늄 합금의 기계적 성질의 변화를 보여준다. Fig. 6에서 나타나듯이 온도가 상승함에 따라서 5052-H32 알루미늄 합금은 급격한 인장강도의 저하와 연신율의 증가를 보여준다.

공구의 핀이 하부 소재의 윗면에 접촉하기 시작하면서(point A in Figs. 4 and 5) AE amplitude에서 발생하는 peak는 상부소재와 하부소재 간 접촉면의 표면 거칠기 등의 차이로 인하여 존재하는 미세한 공간들이나 불순물의 영향 때문인 것으로 짐작된다. 핀이 하부 소재의 내부로 계속 삽입되어가면서 하부 소재의 온도상승으로 인한 교반부의 연화가 발생하여 peak 이후에 AE 신호의 크기가 감소하는 것을 볼 수 있다.

Point B이후에 발생하는 축방향 하중과 AE amplitude의 급격한 증가는 공구 어깨부가 상부 소재에 완전히 닿으면서(point B) 교반영역이 급격히 확대되고, 소재 내부의 소성 유동량이 증가함을 보여준다.

Fig. 7은 본 연구과제에서 제작된 FSSW 접합부 중 하나의 광학현미경(SEM) 사진을 보여준다. Fig. 7에서 나타나듯이, FSSW를 통하여 상부와 하부의 소재간의 교반 접합부가 성공적으로 생성되었음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실험을 통하여 5052-H32 알루미늄

합금의 FSSW 중의 AE 특성을 고찰하였다. FSSW 중에 공구 축방향 하중과 AE amplitude의 변화를 시간의 함수로 측정 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) FSSW 중의 소재에 대한 공구 핀의 위치에 따라서 축방향 하중 및 AE 신호는 큰 변화를 보인다.

2) AE 신호와 축방향 하중의 그래프는 모두 비슷한 경향성을 나타내고 있으나, AE 신호가 공정의 진행에 따라 축방향 하중에 비하여 좀 더 명확한 변화를 보여준다.

3) FSSW 공정 중에서 초반부에 나타나는 AE 신호의 급격한 변화는 FSSW가 진행될수록 교반부의 온도가 상승하면서 재료의 인장강도가 급격히 낮아지기 때문인 것으로 짐작된다.

4) 공구의 핀이 하부 소재의 윗면에 접촉하기 시작하면서 AE amplitude에서 발생하는 peak는 상부소재와 하부소재 간 접촉면의 표면 거칠기 등의 차이로 인하여 존재하는 미세한 공간들이나 불순물의 영향 때문인 것으로 짐작되어진다.

5) FSSW 공정 후반부에 발생하는 축방향 하중과 AE amplitude의 급격한 증가는 공구 어깨부가 상부 소재에 완전히 닿으면서 교반영역이 급격히 확대되어 소재내부의 소성 유동의 양이 증가함을 보여준다.

6) FSSW 공정시 소재 내부의 소성유동 변화를 명확히 보여주는 AE신호를 FSSW 모니터링 기법으로 활용함으로써 공정 중에 발생하는 용접 결함 등을 실시간으로 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

This work was supported by the development program of local science park funded by the ULSAN Metropolitan City and the MEST(Ministry of Education, Science and Technology)

#### 참 고 문 헌

1. Journal of KWS, 23-3 (2005), 228-232 (in Korean)
2. W. M. Thomas et al.: Friction Stir Butt Welding, International Patent Application No. PCT/GB92 Patent Application No. 9125978.8, 1991
3. Y. M. Yeon at al.: Joint Characteristics of Spot Friction Welded A 5052 Alloy Sheet, Journal of KWS, 24-1 (2006), 71-76 (in Korean)
4. Proceeding of 3th International Friction Stir Welding symposium, Kobe( 2001.9) (in Japanese)
5. 古賀信次 : 輕金屬溶接 42 (2004), 523-529 (in Japanese)

6. 權五陽 : 음향방출(Acoustic Emission)의 원리와 응용, 5월  
電子工學會誌, 22-5 (1995), 571-581 (in Korean)



- 이용욱
- 1981년생
- 울산대학교 기계자동차공학부
- 기계자동차공학
- e-mail : lunarcy0@naver.com



- 이학춘
- 1980년생
- 울산대학교 기계자동차공학부
- 기계자동차공학
- e-mail : hcllee@utp.or.kr



- 박종환
- 1982년생
- 울산대학교 기계자동차공학부
- 기계자동차공학
- e-mail : longki1@naver.com

7. Heedon Jeong : Fundamental of Acoustic Emission  
Technology for Engineering Applications, Journal of  
KWS, 34-1 (1994), 20-32 (in Korean)



- 박규열
- 1960년생
- 울산대학교 기계자동차공학부
- 정밀가공
- e-mail : kypark@mail.ulsan.ac.kr



- 홍성태
- 1971년생
- 울산대학교 기계자동차공학부
- 소성공학, 고급공학재료
- e-mail : sthong@ulsan.ac.kr



- 황재현
- 1959년생
- 울산자동차부품혁신센터
- 기계공학
- e-mail : wooi2000@utp.or.kr