

음향방출 특성을 이용한 마찰교반점용접 모니터링 기법 개발 동향

서정진 · 황재현 · 박규열 · 홍성태

Recent Developments in Monitoring of Friction Stir Spot Welding Process Using Acoustic Emissions

Jeong-Jin Seo, Jae-Hyun Hwang, Kyu-Yeol Park and Sung-Tae Hong

1. 서 론

대표적인 고상접합공정 중 하나인 마찰교반용접 (Friction Stir Welding: FSW)¹⁾에서 파생된 마찰교반점용접 (Friction Stir Spot Welding: FSSW)은 FSW와 마찬가지로 회전마찰에 의한 가열 및 재료의 소성유동을 응용한 고상접합 방법²⁾으로 모재를 용융시키지 않아 변형이 극히 작고 용접 후 외관의 상태가 좋아 고품질의 접합부를 얻을 수 있으며 소음 및 유해광선의 발생이 없는 환경친화적인 접합방법³⁾이라는 장점들에 기인하여, 제한적인 용접성을 가지는 알루미늄 합금 등에 적용이 용이한 새로운 알루미늄 합금 점용접법으로 자동차산업을 비롯한 다양한 산업분야에서 주목받고 있다⁴⁻⁵⁾. 오늘날 알루미늄합금의 FSSW 공정을 대량생산분야에서 활용하기 위한 연구가 이종 알루미늄 소재 간의 FSSW에 관한 연구를 포함하여 다양하게 이루어지고 있으나⁶⁾, 대부분의 연구가 접합부의 미세구조 혹은 물성치에 대한 이해에 관하여 행하여져 왔으며 용접품질을 보장하기 위한 공정 모니터링 기법의 개발에는 아직까지 많은 관심이 기울여지지 않고 있는 실정이다.

음향방출(Acoustic Emission: AE)⁷⁻⁸⁾이란 대상 소재에서 발생하는 소성변형, 균열형성 및 전파 등의 현상을 통해서 국부적으로 탄성파가 방출되는 현상이며, 이 탄성파를 AE 센서로 검출하고 비파괴적으로 평가하는 방법을 AE법이라 한다. AE법은 주로 초음파 영역(수십kHz ~ 수MHz)의 신호를 대상으로 하고 있어 초음파탐상법(Ultrasonic Testing: UT)과 비슷하지만 재료의 결함 자체가 방출하는 동적 에너지를 감지한다는 점에서 다른 비파괴검사 방법과 구분된다. Chen 등⁹⁾ 그리고 이용욱 등¹⁰⁻¹¹⁾의 연구 결과에 따르면, AE의 신호들은 FSW 혹은 FSSW 공정을 모니터링 하는 데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 여겨진다. 또한 Zeng 등¹²⁾의 연구결과에 따르면 AE신호는 공구의 마

모가 용접품질에 미치는 영향을 조사, 감시하는 데에도 이용할 수 있다. 본 리뷰 논문에서는 먼저 AE법의 원리를 간단히 소개하고 AE법의 FSW/FSSW 모니터링 기법으로서의 대표적인 응용사례 몇 가지를 요약하여 소개하고자 한다.

2. AE의 소개 및 적용사례

2.1 음향방출법(Acoustic Emission: AE)

부재나 구조물이 외부 혹은 내부에서 작용하는 하중에 의해 변형 또는 내부 균열의 발생과 성장에 따라 부재 내부에 에너지가 축적되고, 축적된 에너지는 파면형상에너지, 열에너지, 격자변형에너지 등의 형태로 공극의 형성과 더불어 급격한 해방에 의해 탄성응력파를 발생시킨다. 이때 발생한 탄성응력파는 부재나 구조물을 따라 사방으로 진동해가며, 압전 센서에 의해 전기적인 신호로 계측 변환된 후 증폭되고 공학적으로 분석하여 응용하게 되는데, 이러한 기술을 음향방출법(AE법)이라고 한다. 주로 마찰이나 마모 거동을 이해하기 위한 연구의 목적으로 이용되고 재료나 기계의 변화 상태를 지속적으로 감지하는 진단 기술로도 활용되고 있다⁸⁾.

Fig. 1과 같이 AE법은 주로 초음파 영역(수십kHz ~ 수MHz)의 신호를 대상으로 하고 있어 초음파탐상법

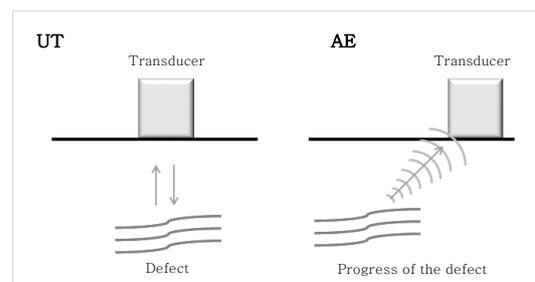


Fig. 1 Comparison of ultrasonic testing and acoustic emission

(Ultrasonic Testing: UT)과 비슷하지만 재료의 결합 자체가 방출하는 동적 에너지를 감지하는 점이 다른 비파괴검사 방법과 다르다. 초음파탐상법은 이미 진행된 결함이나 Crack을 검출하기 때문에 언제 진행되었는지 시점 파악이 되지 않는 반면, AE는 진행 시작점을 찾아내기 때문에 결함이나 Crack의 발생 시점을 정확하게 알 수 있는 장점이 있다.

공학적인 측면에서 본 AE 신호는 신호의 강도 및 특징적인 주파수의 범위가 매우 광범위하므로 사람의 귀로는 들을 수 없는 신호가 대부분이다. 한편 사람이 들을 수 있는 고강도의 가청신호는 최후의 파괴 거동에 의해 발생하는 것이 일반적이기 때문에 AE를 공학적으로 이용하는 측면에서 보면 사실상 큰 의미가 없는 신호라고 할 수 있다. 일반적으로 가청역 주파수 범위가 대략 수십 Hz에서 20kHz 정도인 것에 비해서 AE 연구에서 다루는 신호의 주파수 범위는 대상재료에 따라 50kHz에서 1MHz의 분포를 가진다⁸⁾. AE 신호의 형태는 크게 돌발형과 연속형의 두 가지로 나눌 수 있으며⁷⁾, FSW/FSSW 공정 중 발생하는 AE 신호는 주로 마모나 소성변형 중의 전위의 축적과정과 같은 현상에서 나타나며 단위 시간당 방출 수가 많고 파형이 연속 잡음과 같은 형태를 가지는 연속형 신호일 것으로 예상된다.

AE는 파동현상의 일종이고, 재료 또는 구조의 특성이나 현상을 규명하기 위해서는 일정 거리를 전달된 파동을 측정하고 해석해야 한다. 이와 관련하여 반드시 짚고 넘어가야 할 사실은 음향방출의 속성 중에서 단점으로 작용하는 두 가지이다. 첫째는 음향방출 신호의 발생은 예측할 수 없으며 순간적(transient)이라는 점이다. 따라서 신호 대 잡음 비(SNR)의 향상에 유효한 수단이 없고, 고성능의 측정기기가 필요해진다. 둘째로 더욱 치명적일수도 있는 것으로 균열의 발생과 성장 등 우리가 알고 있는 어떤 발생원이라도 언제나 음향방출을 생성한다는 보장은 없다는 점이다. 이것은 음향방출이 발생하기 위해서는 국부적으로 형성되었던 에너지가 결함을 형성하는 표면에너지나 열에너지로 전부 소모되지 않고 그 일부가 탄성파의 형태로 방출되어야 하는 까다로운 조건을 만족해야 하기 때문이다⁷⁾.

음향방출 기술의 응용분야는 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 인장시험이나 피로시험과 같은 재료시험에 AE법을 병행함으로써 기존의 방법으로는 측정할 수 없는 고체 내부의 미시적 변형 및 파괴기구에 대한 추가적인 정보를 얻는 것이며, 둘째는 산업현장에 적용되어 실 구조물이나 산업설비의 안전성 평가 또는 생산공정에서의 품질관리에 필요한 정보를 제공하는 것

이다. 전자의 예로는 전통적인 금속재료는 물론 세라믹스, 반도체, 복합재료, 목재에 이르기까지 각종 소재의 기계적 특성평가에 사용된 예가 수천 건의 문헌으로부터 확인된다. 후자에 속하는 예는 초기에 AE 기술의 발전이 주로 원자력 설비와 항공우주 구조물의 개발과정에서의 필요성에 힘입은 바 크기 때문에 이러한 분야에서 가장 일찍부터 응용되어 왔으며, 부분적으로는 시험절차가 규격화되었다. 구체적으로는 압력용기의 보증시험, 석유 화학 설비 중 배관 및 저장 탱크에서의 결합 검출, 원자력 설비의 연속 감시, 용접 공정의 공정관리, 암석이나 지질 연구 등 토목공학에의 응용, 반도체 및 전자부품의 품질관리, 생체 의공학에의 응용, 절삭 및 성형 등의 생산라인에서의 연속감시 등을 들 수 있다.

2.2 FSW/FSSW에서의 AE 적용사례

기존의 응용분야에 더하여 AE법은 고상접합공정인 FSW/FSSW 공정 모니터링 기법으로서 그 응용분야를 점차 넓혀가고 있으나 이에 관한 체계적인 연구는 아직 제한적으로만 이루어지고 있다. Chen 등⁹⁾은 6061 알루미늄 합금의 FSW 공정 중 발생하는 AE의 웨이브렛 해석(wavelet transform analysis)을 수행하였다. AE 측정을 위하여 Chen 등은 6061 알루미늄 판재간의 맞대기 FSW를 수행하였으며(Fig. 2(a)), 또한 FSW중 발생하는 결함이 AE에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 접합부를 따라 등간격의 인위적인 3개의 노치를 가지는 6061 알루미늄 판재(Fig. 2(b))와 노치가 없는 6061 알루미늄 판재 간의 맞대기 FSW를 수행하였다.

이들은 전체 FSW공정(공구의 삽입, 이송, 그리고 사출) 중의 AE 측정결과에 웨이브렛 해석을 시행하여

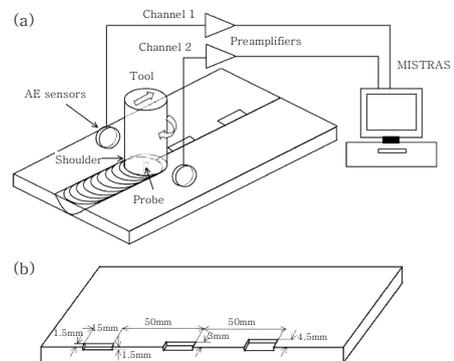


Fig. 2⁹⁾ Diagram of the (a) Experimental set up and (b) test plate with three notches made along the edge

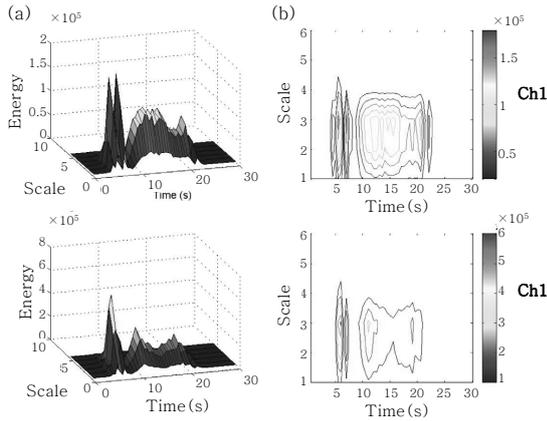


Fig. 3⁹⁾ The three-dimensional profile (a) and contour map of band energy vs time and scale; (b) through WT of AE wave forms (for the entire FSW static process)

특정 주파수 영역에서의 대역별 에너지 값을 산출하였는데 이들이 전체 에너지 값 대신 주파수 대역별 에너지 값을 사용한 이유는 다른 종류의 결함은 각기 다른 주파수의 AE를 방출할 것으로 여겨지기 때문이다.

Chen 등⁹⁾의 연구결과에 따르면, 아래의 Fig. 3에 나타내어진 바와 같이 FSW 중 측정된 AE의 웨이브렛 해석 결과의 3차원 프로파일과 등고선도(contour map)는 소재에 존재하는 결함(노치)의 존재 여부와 그 형상에 따른 영향을 명확히 보여준다. 이러한 결과를 고려할 때 FSW 중 발생하는 AE의 대역별 에너지 값의 변화를 모니터링 함으로서 공정 중 발생하는 결함의 존재 여부, 위치, 그리고 크기에 관한 정보를 얻을 수 있을 것으로 여겨진다.

한 편 Zeng 등¹²⁾은 공구의 마모가 6061 알루미늄 합금의 FSW 접합부의 미세구조, 기계적 특성, 그리고 AE에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 실험결과에 따르면 FSW 중에 측정된 AE는 공구의 마모상태에 따라 확연히 다른 형태를 보이며 접합부에 발생하는 균일이나 기공의 존재 여부도 나타내어 준다(Fig. 4).

또한 공구 마모 상태에 따라 AE의 주파수 대역도 변하며, Zeng 등의 실험에서 사용된 공정조건 하에서는 공구의 마모가 심할수록 FSW 중 발생하는 AE의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다(Fig. 5).

최근, 이용욱 등¹⁰⁾은 FSW 혹은 FSSW 공정의 모니터링에 AE를 활용할 수 있는 좀 더 간단한 방법을 제시하였다. 이용욱 등은 아래의 Fig. 6에 나타내어진 FSW/FSSW 전용 장비와 Fig. 7에 나타내어진 바와 같은 실험장치를 사용하여 두 장의 3 mm 두께의 5052-H32 알루미늄 판재 간의 FSSW 공정 중의 AE 신호의 amplitude 변화를 측정하였으며 공정 중의 측

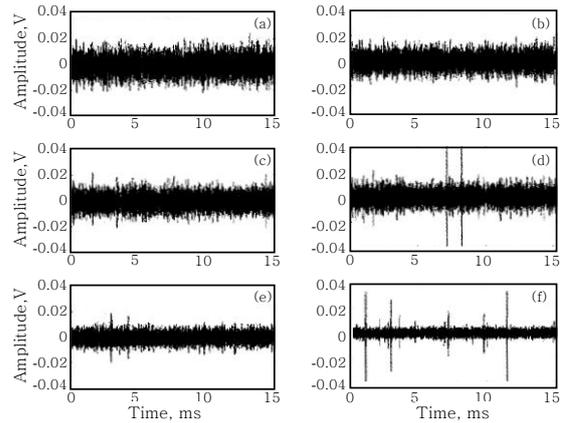


Fig. 4¹²⁾ Acoustic emission acquired during welding in different tool wears: (a) 0 mm; (b) 0.08 mm; (c) 0.15 mm; (d) 0.23 mm; (e) 0.38 mm; (f) 0.64 mm (the burst signal features crack or void formation in the weld zone)

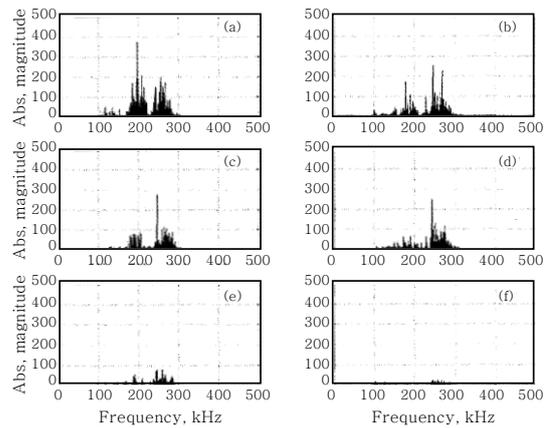


Fig. 5¹²⁾ Frequency domain AE signal feature corresponding to Fig. 4, showing that the magnitude of AE decreases with the pin wear: (a) 0 mm; (b) 0.08 mm; (c) 0.15 mm; (d) 0.23 mm; (e) 0.38 mm; (f) 0.64 mm

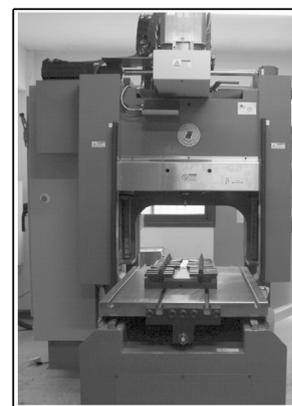


Fig. 6 FSW machine

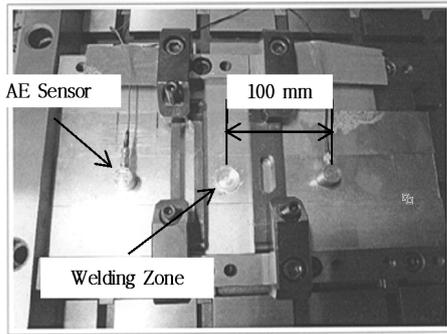


Fig. 7¹⁰⁾ Experimental set-up for AE measurement during FSSW of aluminum alloys

방향 하중의 변화와 AE의 변화를 비교하여, 웨이브렛 해석 등의 신호 분석 과정 없이 단순히 AE 신호의 amplitude 변화를 관찰함으로써 FSW/FSSW 공정을 모니터링 할 수 있는 가능성을 확인하였다.

이에 대한 후속 연구로서 이용욱 등¹¹⁾은 기존 실험 장치의 구조와 공구형상을 개선하여 5052-H32 알루미늄 판재의 FSSW 공정 중의 축 방향 하중과 AE의 변화에 대하여 좀 더 자세한 비교 연구를 수행하였다. 이용욱 등¹¹⁾의 후속 연구에서 사용된 FSSW 주요 공정 변수들 및 AE 측정 변수들은 아래의 Table. 1과 같다.

Figure 8(a) 와 (b)는 각각 5052-H32 알루미늄 합금 간의 FSSW 공정 중 축 방향 하중과 AE amplitude의 변화를 시간의 함수로 나타낸다¹¹⁾. 기존의 연구결과에서와 다른 형상의 AE amplitude의 원인(특히 공정 후반부에 발생하는 AE amplitude의 평탄역 부분은 아마도 실험 장치의 개선을 통한 공구 shoulder와 소재간의 접촉 시 발생하는 떨림 현상의 제거 및 공구형상의 변화 때문으로 여겨진다. 아래의 결과의 반복성 확인을 위하여 동일 실험을 4회 실시하였으며, 모두 매우 유사한 실험 결과를 얻었다.

위의 Fig. 8(a)와 (b)에 표시된 A, B, C, D 점들은 이들 과정이 진행되는 동안에 접촉되어지는 소재들

Table 1 Experimental set-up¹¹⁾

| | | | |
|-------------|---------------------|------------------|---|
| FSSW set-up | Tool rotation | Clockwise | |
| | Tool speed (rpm) | 750 | |
| | Plunging depth (mm) | 5 | |
| | Shoulder | 1° concave | |
| | Operation of FSSW | Position control | |
| AE set-up | Threshold (dB) | 50 | |
| | Preamplifier (dB) | 40 | |
| | Sample rate (MSPS) | 1 | |
| | Analog filter | Lower (KHz) | 1 |
| | | Upper (MHz) | 3 |

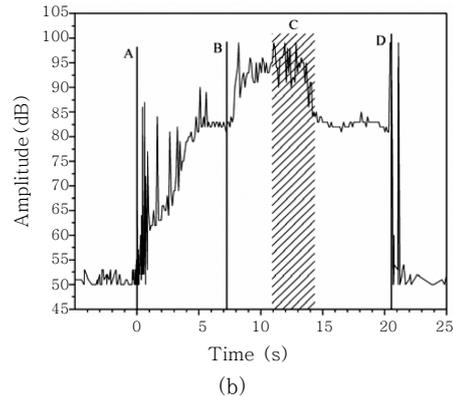
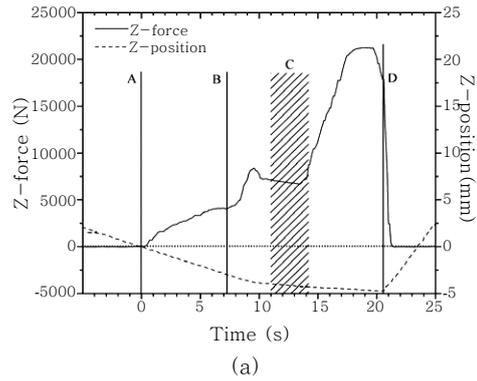


Fig. 8¹¹⁾ (a) Z-force during FSSW of 5052-H32 aluminum alloy as a function of time; (b) AE amplitude during FSSW of 5052-H32 aluminum alloy as a function of time

과 FSSW 공구 사이에서 발생하는 접촉현상을 나타내고 있다. 점 A는 접합의 시작점 즉, 공구의 pin이 상부 시편의 윗면과 접촉하는 순간을 나타내며 점 B는 공구의 pin이 상부 시편을 관통하여 하부 시편 윗면과 접촉하는 순간을 나타낸다. 또한 구간 C는 공구의 shoulder와 상부 시편의 윗면이 접촉하는 구간을 나타낸다. 이용욱 등¹¹⁾의 연구에서는 오목한 shoulder를 가지는 공구 (concave shoulder tool)를 사용하였기 때문에 FSSW 공정 중 공구의 pin이 접합 대상 소재들 내부로 삽입됨에 따라 교반되는 소재들이 상부로 밀려 올라오게 된다. 따라서 shoulder와 시편의 윗면 사이에서의 접촉이 발생하는 정확한 순간을 찾는 것은 매우 어려우며, Fig. 8(a), (b)에서와 같이 특정 순간이 아닌 대략적인 영역(구간 C)으로 나타내는 것이 타당할 것이다.

마지막으로 점 D는 FSSW 공정의 종료 시점으로 접합 대상 소재로부터 공구가 빠져나오기 시작하는 시점을 나타낸다. Fig. 8(a)와 (b)에 각각 나타내어진 바와 같이 공정 초반에 고속 회전하는 공구의 pin이 상부 시편으로 삽입되면서 AE amplitude와 Z축 하중 모두 빠르게 증가함을 보여준다. 이때 AE amplitude의 시작부에서 관찰되는 peak는 상부 시편과 공구 pin의 접

축이 시작되면서 발생하는 noise에 기인한 것으로 여겨진다. 공정 시작 후 공구 pin이 하부 시편의 윗면과 접촉하는 시점 B까지 Z축 하중은 기울기가 조금씩 감소하면서도 지속적으로 증가한다. 이에 반하여 AE amplitude는 일정 시간 후에는, 공구 pin의 삽입 깊이의 증가에 따른 pin과 소재 간의 접촉 면적의 증가에도 불구하고 시점 B까지 평탄역(plateau region)을 보여준다. 공구의 pin이 하부 시편과 접촉(시점 B)을 시작한 직후에 AE amplitude와 Z축 하중은 모두 매우 급격한 증가를 보여주며, 이는 상부 시편에 비하여 아직 충분히 연화가 이루어지지 않은 하부 시편과 공구 pin과의 접촉에 기인한 것으로 여겨진다. 특히 공구 pin과 하부 시편의 윗면과의 접촉 시에 발생하는 AE amplitude의 급격한 변화는 FSSW 공정 중 발생하는 접합부 내부 결함의 감지에 AE amplitude를 이용하는 것에 대한 가능성을 제시해 준다. Pin이 더욱 깊게 삽입되면서 공구의 shoulder는 상부 시편의 윗면과 완전히 접촉하게 되고(구간 C) 당연히 Z축 하중을 받는 소재의 양의 급격한 증가에 따라 Z축 하중은 매우 빠르게 증가한다. 이때 흥미로운 점은 공구 shoulder와 소재 간의 접촉으로 인해 교반되는 소재의 양이 급격히 증가했음에도 불구하고 공구 shoulder와 시편 간에 완전히 접촉이 이루어진 후의 AE amplitude는 시점 B 직전에 보여준 것과 매우 유사한 크기의 평탄역을 보여준다는 것이다. 이는 공구 shoulder 아래에서 발생하는 소재의 소성유동(plastic flow)의 음향학적 특성이 공구 pin 주변의 소성유동의 그것과 매우 유사하다는 것을 짐작케 한다. 이러한 특성을 고려할 때, FSSW 중의 AE amplitude의 변화를 공정 중 최초로 발생하는 평탄역을 기준으로 관찰함으로써 접합부 내의 결함 발생 여부 및 공정 진행 상황 등을 모니터링 할 수 있을 것으로 여겨진다. 물론 이러한 가설의 증명을 위해서는 Chen 등⁹⁾의 연구에서와 같이 FSSW 공정 중 인위적인 결함을 유도하여 이에 따른 AE amplitude의 변화를 관찰하여야 할 것이다. 또한 AE amplitude의 평탄역의 크기와 접합 대상 소재의 물성치와의 연관성 파악을 위한 다양한 소재를 사용한 FSSW 실험의 수행도 필수적으로 요구된다. 이에 관하여 울산대학교에서는 현재 다양한 동종 혹은 이종 알루미늄 합금 간의 FSSW 중의 AE 측정 실험을 활발히 수행 중이다.

3. 결 론

본 리뷰 논문에서는 먼저 AE법의 원리 및 AE법의 FSW/FSSW 모니터링 기법으로서의 대표적인 응용사례 몇 가지를 소개하였다. 선행 연구결과들에서 볼 수 있

듯이 FSW/FSSW 중의 AE의 웨이브렛 해석을 수행하거나, 혹은 특정 AE 특성(예를 들어 AE amplitude)의 변화를 실시간으로 관찰함으로써 공정 중 각종 결함(기공, 균열 등)의 발생 여부를 판단할 수 있다. 이러한 기초연구의 실제적 적용을 위해서는 결함의 종류에 따른 AE의 변화를 특정 지을 수 있기 위한 다양한 실험적/이론적 추가 연구들이 이루어져야 할 것이다. 특히 공정 모니터링 변수로 AE amplitude를 이용하기 위해서는 AE amplitude의 평탄역의 크기와 접합 대상 소재의 물성치와의 연관성 파악을 위한 다양한 소재를 사용한 FSW/FSSW 실험의 수행이 필수적으로 요구된다.

후 기

이 논문은 2010년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

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 et 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), Japan (in Japanese)
5. 古賀信次: 輕金屬溶接 **42** (2004), 523-529 (in Japanese)
6. C. K. Chun et al.: Dissimilar Friction Spot Joining : A5052-H32 /A6022-T4, RIST 研究論文 **21-4** (2007), 281-286 (in Korean)
7. 權五陽: 음향방출(Acoustic Emission)의 원리와 응용, 5월 電子工學會誌 **22-5** (1995), 571-581 (in Korean)
8. H. Jeong: Fundamental of Acoustic Emission Technology for Engineering Applications, Journal of KWS, **34-1** (1994), 20-32 (in Korean)
9. C. Chen et al.: Wavelet Transform Analysis of Acoustic Emission in Monitoring Friction Stir Welding of 6061 Aluminum, International Journal of Machine Tools & Manufacture **43** (2003), 1383 - 1390
10. Y.-W. Lee et al.: Development of Monitoring Process of Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys using Acoustic Emission, Journal of KWJS, **28-5** (2010), 502-506 (in Korean)
11. Y.-W. Lee et al.: Characterization of Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys using Acoustic Emissions, Proceeding of 21st International Offshore and Polar Engineering conference, Maui, Hawaii, USA, June, **19-24** (2011)
12. W. M. Zeng et al.: Effect of Tool Wear on Microstructure, Mechanical Properties and Acoustic Emissions of Frictions Stir Welded 6061 Al Alloy, Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), **19-1** (2006), 9-19



- 서정진
- 1985년생
- 울산대학교 기계공학부 대학원
- 기계공학
- e-mail : s2jmazda@hanmail.net



- 박규열
- 1960년생
- 울산대학교 기계공학부, 교수
- 정밀가공
- e-mail : kypark@ulsan.ac.kr



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



- 홍성태
- 1971년생
- 울산대학교 기계공학부, 조교수
- 소성공학, 마찰교반가공
- e-mail : sthong@ulsan.ac.kr