마찰교반접합부의 미세조직 관찰 및 유동해석

강석훈 · 조재형 · 이창길 · 김성준 · 오규환 · 한홍남

Microtexture and Material Flow Analysis on Friction Stir Welded Materials

Suk Hoon Kang, Jae-Hyung Cho, Chang Gil Lee, Sung-Joon Kim,
Kyu Hwan Oh and Heung Nam Han

1. 서 론

마찰교반접합법(friction stir welding, FSW)은 일정한 형상을 가진 공구와 접합이 이뤄지는 재료의 표면이 직접 마찰되면서 큰 소성 가공변형과 많은 열을 동시에 발생시키며 결합이 이뤄지는 고상접합법이다¹⁻⁴⁾. 접합공구는 판재의 위쪽 표면과 마찰하여 교반을 일으키는 상판(tool shoulder)과 판재의 두께방향으로 마찰 교반을 일으키는 심(tool pin, 혹은 tool plunger)으로 구성되어 있고, 재료의 미세조직 및 집합조직은 이 두 가지 요소가 만들어내는 혼합 변형에 영향을 받게 된다. 접합 시 재료 내부에서 전단변형이 주로 작동하며 일반적으로 재결정 온도 이상에서 용융점 이하까지의 온도 상승이 발생한다⁵⁻⁷⁾. 복잡한 유동과 소성변형열로 인해서 접합부 위치에 따라서 미세구조가 변화하며, 대략 모재와 재결정부, 열기계적 영향부의 세 부분으로 나누어진다. 접합부의 중심영역인 재결정부는 접합공구에 의해 직접적으로 영향을 받으며, 변형에 의한 소성열이 가장 많이 발생하게 된다. 대개 수 μm 미만의 크기를 갖는 등축형 결정립들로 이루어져 있으며, 이것들은 고온에서의 동적 재결정으로 형성된다고 알려져 있다⁸⁻⁹⁾. 열기계적 영향부는 마찰교반접합의 중심부에서 비껴나 있어 비교적 간접적으로 영향을 받는 부분이며, 재결정부에 비해 소성변형과 발열량이 상대적으로 적은 곳이다. 따라서 열기계적 영향부는 재결정거동보다는 소성 변형에 의한 전위들의 축적 및 열에 의한 소둔이 일어나며 소경각 입계들의 재배열이 일어나는 지역으로 평가할 수 있다¹⁰⁾. 마찰교반접합 후 기계적 특성을 살펴보면 전반적으로 재결정부의 경도나 연신율은 기존의 열용융 접합에 비해 크게 향상되고 접합부의 표면 모양도 유지가 되는 탁월한 장점을 가지고 있다. 재료내부의 미세화된 결정립은 접합조직의 특성을 나타내면서 동시에, 조직의 개질에 의한 성형성 특성 등의 향

상도 가능하게 된다¹¹⁻¹³⁾.

마찰교반 접합 시, 공구는 빠른 회전을 하면서 동시에 진행을 하기 때문에 복잡한 유동현상이 발생하게 된다. 따라서 적절한 공정변수에 의해 접합이 이뤄지지 않으면 재료내부에서 결함이 많이 발생하게 된다. 결함형성은 공구의 회전에 의해 발생하는 마찰열과 함께 재료유동의 시작점과 끝점을 변화시켜주는 공구의 진행속도에 의해서 지배된다. 일반적으로 공구의 회전은 마찰열을 발생시키기 때문에 회전속도는 접합하고자 하는 판재에 열량을 공급하기 위한 변수에 해당하며, 건전한 접합이 이뤄지기 위해서는 공구의 진행속도가 적절히 조절되어야 한다. 공구의 회전속도와 진행속도는 판재의 종류에 따라 결정된다고 할 수 있다. 접합 시 발생하는 재료내부의 결함은 공구의 진행속도와 더 밀접한 관련이 있는데, 이것은 재료유동이 공구를 따라서 완전한 회전을 이루지 못하였을 때 발생하는 것으로 볼 수 있다.

재료 내부의 유동변화는 미세집합조직의 해석을 통해서도 이해할 수가 있다^{14,15)}. 재결정부의 미세집합조직은 접합된 판재의 두께 방향과 폭방향을 기준으로 접합공구의 회전에 의해서 직접적으로 영향을 받게 된다. 미세조직과 미세집합조직의 변화를 해석하면, 대변형 회전접합에 의한 재료유동과 결합생성 등의 조건을 이해하는데 큰 도움이 된다. 본 해설논문에서는 알루미늄 합금의 마찰교반접합 시 발생하는 미세조직적, 기계적 특성변화를 본 연구자의 기존 실험과 해석 결과를 바탕으로 기술하였다.

2. 접합부의 미세조직 및 기계적 특성

Fig. 1 은 접합공구의 움직임에 따른 접합부의 미세조직 변화의 개요를 보여준다. 접합부는 접합공구의 진행방향과 회전방향에 따라 두 부분으로 나눌 수 있는데, 접

Fig. 1 Schematic of friction stir welding process and corresponding microstructure evolutions

합진행방향과 공구의 회전방향이 일치하는 변형 부위를 advancing side, 접합진행방향과 회전방향이 서로 반대인 부위는 retreating side라 한다. 변형된 미세조직의 형상은 advancing side 쪽이 retreating side에 비해 좀 더 수평면에 가깝게 기울어져 있는 비대칭 모양임을 도시하였다. 공구의 회전에 의해서 피접합소재가 받는 소성변형 영역의 크기가 retreating side에 비해 advancing side 쪽이 더 크기 때문으로 볼 수 있다.

마찰 교반 접합에 의해 형성되는 접합부위는 소성변형량의 크기와 열적영향 정도에 따라 모재(Base Metal, BM)와 동적재결정 영역(Recrystallization Zone, RXZ), 그리고 열기계적 영향부(Thermomechanically-Affected Zone, TMAZ)의 세 부분으로 나눌 수 있다. 동적재결정 영역은 높은 온도와 큰 소성변형으로 동적재결정된 미세조직을 보이며, 열기계적 영향부는 소성변형과 온도상승이 비교적 적어 재결정 단계에는 이르지 못하고 조대한 결정립들이 존재한다. 재결정부와 모재의 미세조직을 Fig. 2¹¹⁾에 나타내었다. 마찰 교반 접합된 Al 5052-H32에 대해 집속 이온 빔(focused ion beam, FIB)을

Fig. 2¹¹⁾ (a) Cross-sectional macrographs of an FSPed Aluminum sheet of 1.5 mm thickness, and typical microstructure of (b) base material and (c) FSPed region observed in the form of a channeling contrast image obtained by a Ga⁺ ion beam

이용하여 관찰한 channeling contrast 사진을 통해서 결정립 크기 차이를 선명하게 확인할 수 있다. 집속 이온 빔에서는 Ga⁺ 이온이 시료에 부딪힌 후, 2차적으로 발생시키는 다양한 신호들을 검출함으로써 결정립의 명암 차이를 볼 수 있는데, 접합부의 여러 부위를 관찰하여, 비교적 선명하게 결정립의 크기와 모양을 구분할 수 있다. 재결정부와 모재간에는 뚜렷한 결정립의 크기와 형상변화가 관찰되었고, 평균 크기는 재결정부가 모재에 비해 1/5 이하 수준으로 작아진 것으로 평가 되었다. Fig. 3¹⁰⁾는 재결정부의 평균 결정립 크기를 두께방향으로 관찰한 결과이다. 접합공구에 수직인 방향, 즉, 판재의 평면 방향으로는 결정립의 크기가 비교적 균일하며, 접합공구에 나란한 방향, 즉 판재의 두께방향으로는 결정립의 크기 변화가 심하였다. 이는 마찰접합공정 중 마찰에 의한 잔류열이 수평방향으로는 고르게 분포하고 수직방향으로는 구배를 가지기 때문인 것으로 풀이된다. 공정 중 발생한 잔류열의 대부분은 판재를 지지하고 있는 아래쪽의 받침판 쪽으로 흐르게 되며, 대기중으로 방출되는 양은 거의 무시할 만하다. 따라서 수직방향으로 대부분의 열이 빠져나가면서 결정립 크기의 구배를 만든다고 생각된다. 재결정된 결정립의 크기는 극히 표면부위를 제외하고는 대체적으로 판재의 자유표면에 가까운 위쪽에서 받침판 쪽에 가까운 아래쪽으로 갈수록 점점 작아지게 된다. 세 가지 서로 다른 접합조건이 적용된 예에서 이와 같은 결과가 관찰되었고 공정변수에 따른 차이점도 관찰 되었다. 일반적으로 공정 후 잔류열은 공구의 회전속도가 증가함에 따라 증가하고, 공구의 진행속도가 감소함에 따라 증가한다. Fig. 3의 결과를 살펴보면, 공구의 회전속도가 1600rpm에서 2000rpm으로 빨라지면, 전체적으로 결정립 크기가 2~3μm 커지고, 진행속도가 200mm/min에서 500mm/min으로 증가함에 따라 다시 크기가 작아지는 것을 알 수 있다. 공구의 회전속도, 1600rpm과 이동속도, 200 mm/min의 공정

Fig. 3¹⁰⁾ Grain size distribution along the RXZ centerline at the various welding conditions of welding and rotating speed

조건은 공구의 1회전 당 $125\mu\text{m}$ 를 진행하는 조건이며, 회전속도, 2000rpm과 이동속도, 200mm/min 은 $100\mu\text{m}$, 회전속도, 2000rpm과 이동속도 500mm/min 은 $250\mu\text{m}$ 를 각각 진행하는 조건들이 된다. 잔류열의 영향을 받는 부위의 크기는 $100\mu\text{m}/\text{회전}$, $125\mu\text{m}/\text{회전}$, $250\mu\text{m}/\text{회전}$ 의 순서가 된다. 회전속도가 증가하면 잔류열도 증가되기 때문에, 잔류열의 영향받는 부위가 넓어진다. 회전속도에 의한 잔류열의 증가효과가 공구의 진행속도에 의한 잔류열의 대류방출효과보다 큼을 알 수 있다. Fig. 4¹⁰⁾는 집속 이온빔과 전자 후방 회절 도형 분석장치 (electron back scattered diffraction, EBSD)를 이용하여, 마찰 교반 접합된 알루미늄 합금의 모재와 재결정부, 그리고 열기계적 영향부의 미세조직적 특징을 나타낸 결과이다. EBSD의 결과를 통해서 결정립의 방위 및 결정립계의 방위차를 각각 계산하였고, 그 결과, 결정립계 방위차 분포 (Misorientation distribution), 혹은 경각크기분포도에서 각 부위의 차이를 확인하였다. 특히 열기계적 영향부는 모재(Fig. 4(a))나 재결정부(Fig. 4(c))와 달리 소경각 입계($3^\circ\sim 15^\circ$)가 상대적으로 잘 발달해 있는 것을 확인하였다. 각각의 시편부위의 EBSD 관찰 결과 중 15° 이상의 결정립계는 제외하고 $3^\circ\sim 15^\circ$ 의 소경각입계만 추출하여 결정립 사진 우측에 제시하였고, 전체 결정립계의 분포를 경각크기에 따라 분류한 도표를 추가로 제시하였다. 열기계적 영향부 내에서 소경각 입계가 많이 관찰되는 이유는 소성변형에 의한 전위구조의

변화와 표면에서 전도된 열에 의한 회복 효과로 이해할 수 있다. 접합재가 변형을 심하게 받으면 EBSD 측정 시 kikuchi pattern의 밴드각과 밴드폭이 영향을 받아, 측정의 정밀도가 감소하는 현상이 일반적으로 나타나지만, 마찰교반접합부의 열기계적 영향부는 모재와 비슷한 정도의 뚜렷한 윤곽의 kikuchi pattern들이 관찰되었다. 이것은 잔류열에 의해서 전위구조의 회복이 일어났음을 의미한다. 열기계적 영향부를 소경각입계가 주로 관찰되는 지역이라고 가정하면, Fig. 5와 같이 소경각 입계만

Fig. 5¹⁵⁾ Cross section of FSWed sample: (a) Optical micrograph, and EBSD maps of subgrain boundary with low angle ($3\sim 15^\circ$) after FSWs with (b) both tool shoulder and pin and (c) only the tool shoulder

Fig. 4¹⁰⁾ Ion beam channeling images observed by FIB. Black lines indicate the $3\sim 15$ low-angle grain boundaries and corresponding low angle grain boundary distributions are shown. (a) base material, (b) thermo-mechanically affected zone, (c) recrystallized zone

을 추출하여 전체 접합부에서의 열기계적 영향부의 분포도를 보여주는 그림을 재구성 할 수 있다.

Fig. 5¹⁵⁾는 EBSD를 이용하여 마찰교반접합부위 전체 단면을 측정하고, Fig. 4에서 설명한 바와 같이 소경각 입계만을 구분해내어 열기계적영향부의 모습을 구성한 결과를 보여준다. 광학현미경으로 관찰한 Fig. 5(a)의 사진을 보면, 전체적인 마찰교반접합부의 특성과 재료유동의 흔적을 찾을 수 있지만, 열기계적 영향부를 뚜렷하게 관찰하기는 쉽지 않다. 이에 반해, EBSD를 이용하여 얻어진 소경각입계 분포도 (Fig. 5(b))에서는 열기계적 영향부의 분포를 잘 알 수 있고 소성변형 영역을 비교적 정확하게 측정할 수 있다. 소경각입계 분포도 활용의 또 다른 예를 Fig. 5(c)에 나타내었다. 마찰교반접합 시, 접합공구의 심을 사용하지 않고, 접합공구 상판만을 이용하여 접합을 실시하면, 소성변형영역은 판재의 상부에 한정되게 된다. 이러한 경향을 소경각입계 분포도를 통해서 확인한 결과, 소성변형지역은 판재의 윗면, 약 1.8mm 정도로 제한적임을 알 수 있다. 또한 열기계적 영향부 자체만의 두께는 약 1mm 정도로 형성됨을 알 수 있다. 이러한 관찰결과로부터 접합공구 상판부가 만드는 소성영역부와 접합공구 심이 만드는 소성영역부를 일정 정도 분리하여 평가할 수 있음을 알 수 있다.

마찰교반접합 결과 얻어지는 결정립 미세화 효과는 재료의 기계적 성질을 향상시키는 역할을 하게 된다. Fig. 6¹¹⁾은 마찰교반접합 이후, 재결정부와 모재부를 각각 인장 시험을 실시한 결과를 보여준다. 재결정부의 항복응력은 모재에 비해서 약 40% 정도 감소하였지만, 연신율은 2배 이상 증가한 것을 알 수 있다. 또한 인장응력은 모재와 비슷한 수준으로 재결정부가 재료의 변형을 수용하면서 가공경화가 더욱 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 가공경화지수의 증가는 재료의 성형성 향상과 관련이 있으며 파단의 발생이 억제되면서 보다 용이하게 성형될 수 있음을 보여준다. Fig. 7¹¹⁾은 판재의 성형

Fig. 6¹¹⁾ Stress - strain curves of the base material and the FSPed region

Fig. 7¹¹⁾ Limit Dome Height values of FSPed sheets as a function of tool diameter

성 시험 결과를 보여준다. 공구의 상판에 의한 재료의 미세조직 개질 효과를 이해하기 위해 상판의 지름 크기를 각각 달리하여 마찰교반접합을 적용한 후, 각각의 판재를 재결정부를 중심으로 deep drawing 하여 성형한계를 측정하였다. 그 결과, 공구지름이 5, 8, 10 mm로 증가할수록 20% 이상 성형한계는 늘어났고 이는 마찰교반 접합에 의한 미세조직 개질영역이 넓어질수록 판재의 성형성은 증가한다는 결과를 보여주고 있다. 이상으로부터 마찰교반 접합법은 미세조직 측면에서 우수하며, 재료의 기계적 특성도 우수함을 살펴보고, 이러한 장점을 바탕으로 향후 응용분야를 더욱 넓혀 갈 것으로 예상된다.

3. 접합부의 유동해석 및 관찰

접합공정을 실시한 후 접합부의 부피변화를 최소화하며 결함의 발생을 억제하는 것도 마찰교반접합이 가지는 중요한 특성중의 하나이다. 마찰교반접합이 이루어지는 과정을 이해하고 재료의 소성유동을 예측하는 결과들을 살펴보면, 결함과 유동의 상관관계에 대해 살펴보고, Fig. 8⁷⁾은 마찰교반 접합이 이루어진 이후에 결함이 없는 건전한 접합단면과 결함이 생긴 단면을 예시로 각각 보여주고 있다. 통계적으로 관찰한 결과 결함은 접합부 내에서도 retreating side 보다는 advancing side 쪽에서 생겼고, 위치도 판재의 두께방향에서 위쪽이나 아래쪽보다는 중간부위에서 주로 발달하는 경향이 있다.

Fig. 8⁷⁾ Optical micrographs of (a) sound weld, and (b) defective weld

Fig. 9¹⁴⁾ (a) Simulation of material flow by using FEM, (b) corresponding microtexture variations around circumference of tool pin

이는 재료의 유동흐름이 불연속적이 될 수 있는 부분이 advancing side일 가능성이 높다는 의미이며, 동시에 공구 상판 보다는 공구 심에 의해서 결함이 유발될 가능성이 많다는 점을 시사한다.

Fig. 9¹⁴⁾는 결정소성에 기반한 유한요소법을 이용하여 마찰교반접합 시에 재료유동과 집합조직에 대한 전산 모사 결과를 보여주고 있다. 공구의 상판은 고려하지 않고 공구 심의 회전에 의한 재료의 유동 변화를 2차원의

로 계산하였다. 공구에 입출 되는 총 9개의 재료 유동 흐름을 추적하여 분석한 결과, 기본적으로 재료는 공구의 외원을 따라서 회전을 하며 advancing side에서 흐름이 시작되어 공구가 지나간 후 같은 곳에서 그 흐름을 끝내게 됨을 알 수 있다. 이는 유동흐름이 완전한 폐원을 이루지 못하면 집합조직 역시 완전히 이루어지지 않을 것임을 시사한다. 집합조직의 변화를 재료유동의 속도구배를 계산하여 예측하였는데, 유동선 3부터 8까지 변형에 의한 특정모양들이 나타나고 있다. 유동선 3에서 6까지는 두 가지 종류의 섬유집합조직이 타나는데 하나는 단순 전단 (simple shear)과 순수전단 (pure shear) 집합조직이 혼합되어 관찰되는 것이고 다른 하나는 면심입방 (Face centered cubic, fcc) 금속재료의 인발에서 관찰되는 집합조직 (111/LD, 100/LD)이 관찰되는 것이다. 유동선 7에서는 약하게 six-fold 섬유 집합조직이 발달하고 유동선 8에서는 평면변형 조건에서의 단순 전단 집합조직이 관찰되었다. 같은 2차원 회전운동에 의해서도 공구와 재료가 맞닿는 위치에 따라서, 혹은 유동의 속도에 따라서 집합조직의 구배가 발생하고 있음을 알 수 있다.

재결정부내의 공구의 움직임과 그에 따른 집합조직 형성을 이해하기 위한 기본 좌표계를 Fig. 10(a)에서 설명하였다. 마찰에 의한 전단변형상태에서 전단변형이 일어나는 방향과 그에 수직한 방향을 각각 전단방향 (shear direction, SD), 전단수직성분 (shear plane normal, SPN)으로 명기하였다. 마찰교반접합 공구는 상판과 심으로 나누어져 있어 회전방향으로의 전단방향은 서로 같지만 각각의 전단수직성분은 달라 상판에 의한 전단변형상태와 심에 의한 전단변형상태가 서로 수직한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 하지만 이렇게 서로 다른 수직성분에 의해 형성된 변형조직도 EBSD 로 관찰할 때

Fig. 10 (a) Geometry of the FSW tool and two different shear deformation modes. (b) A corresponding shear deformation texture (111 pole figure) in a global coordinate of shear plane normal and shear direction

일정한 좌표로 일치시켜서 해석하면 거의 유사한 모양의 집합조직으로 나타남을 확인하였다. Fig. 10(b)의 극점도를 보면 매우 또렷한 111 섬유를 기본으로 SPN // $\langle 112 \rangle$ 에 가까운 집합조직임을 알 수 있다. 이것은 fcc 결정에서 관찰될 수 있는 이상적인 단순 전단에 의한 우선방위와 일치한다. 전단변형에 의한 집합조직은 위와 같이 전단변형상태를 일정하게 일치시키면 같은 방위로 배열되는 것을 알 수 있고, 극강도의 크기는 다를 수 있으나 극점도의 모양도 일정하게 형성됨을 알 수 있다. 이렇게 전단변형에 의한 재료의 반응을 단순화하여 기준 극점도를 측정하여 놓으면 전단방향이나 전단수직성분이 변하는 경우에도 극점도의 관찰을 통해 접합부의 위치에 따른 집합조직의 차이를 정량화 할 수 있다. 마찰교반접합의 경우 공구의 움직임에 따라 재료가 완전히 같이 회전하지 않으면, 극점도에서 나타나는 극강도의 피크 역시, 재료의 회전량에 상응하는 일정한 회전이 생길 것으로 예측 된다.

Fig. 11¹⁵⁾에서는 마찰교반접합 이후에 공구의 심 주변에서 재료의 유동을 EBSD로 관찰한 결과를 보여준다. 공구 상판부분의 영향을 받은 깊이 1.8mm 이내의 재료부위는 잘라내고 공구 심에 의해서만 변형을 받는 영역을 관찰하였다. Advancing side의 재결정 영역이 retreating side의 재결정 영역보다 두 배 가량 더 넓게 나타나고, 재결정영역의 미세한 결정립들과 열기계적 영향부의 비교적 큰 결정립들의 유동이 관찰되었다. 공구가 지나가고 난 뒷방향의 재료들은 모두 재결정된 조직들로 공구의 앞부분에서 변형을 받아 공구의 원주를 따라 뒷부분까지 흘러와 채워진 조직이다. 이때 공구의 진행속도가 충분히 빠르다면 공구가 지나간 후 채워지는 재료들이 공구의 회전에 따라 충분히 회전되지 못하고

Fig. 11¹⁵⁾ EBSD orientation map around circumference of tool pin near end of trace.

Fig. 12 Local coordinate of EBSD measurements around circumference of tool pin near end of trace

채워지는 양과 속도도 불충분해져서 결함을 유발할 가능성이 높아진다. 또한 공구 심 주변의 결정립들이 충분히 회전하지 못하였다면 Fig. 10(b)에서 보여진 것과 같이 공구에 따라 완전히 회전된 후의 극점도가 관찰되지 않고 전단수직성분과 전단방향이 차이가 나는 덜 회전된 극점도가 관찰될 것이다. 따라서 공구심에 가장 가까이 (100μm 이내)에서 영향을 받은 결정립들의 극점도를 부위별로 측정하여 관찰하였다. Fig. 12는 0° 시편위치부터 180° 위치까지 시계방향으로 30° 씩 시편을 돌려가면서 공구심에 근접해서 영향을 받은 결정립들의 EBSD 분석을 실시한 개략도를 보여주고 있다. 전단방향을 공구심이 이루는 원의 접선방향과 일치시키고 전단수직성분을 원주반지름 방향과 일정하게 맞추어 전단변형상태를 동일하게 설정하였다. 또한 500개에서 1000개 정도의 결정립이 측정부위에 포함되도록 하였다. 단순한 완전 회전이 일어난다면 모든 지점에서 극점도 결과는 같다고 예측할 수 있다.

Fig. 13¹⁵⁾은 측정한 EBSD 결과를 극점도를 통해서

Fig. 13¹⁵⁾ (111) pole figures around circumference of tool pin after FSW under conditions of (a) 2000 rpm-200 mm/min and (b) 2000 rpm-500 mm/min, respectively. Each pole figure corresponds to evolved texture at each rotating angle

나타낸 것인데, 모든 극점도들의 형상이 Fig. 10(b)의 기준모양의 틀을 크게 벗어나지 않은 것을 알 수 있었다. 다만 0° 시편위치부터 180° 위치까지 Fig. 10(b)와 비슷하게 분포하다가 210°와 240° 부근에서 변화가 심해지는 것을 확인하였다. Fig. 10(b)와 비교하면 극점도의 회전현상을 관찰할 수 있는데, 이러한 현상은 공구의 진행속도를 더욱 빠르게 하면 더 심한 경향을 보였다. 회전속도, 2000rpm과 이동속도, 200mm/min 조건에서는 회전량이 45° 정도로 평가되었는데 회전속도, 2000rpm과 이동속도, 500mm/min 조건에서는 60°까지 차이가 나는 것으로 평가 되었다. 이러한 극점도의 회전 현상은 재료가 공구의 움직임과 일치하여 완전히 회전하지 못하였음을 나타낸다. 즉 회전속도, 2000rpm과 이동속도, 500mm/min 조건의 경우, 불완전한 회전의 정도가 60°에 이르는 것으로 이해할 수 있다.

4. 맺 는 말

마찰교반 접합은 기존 접합공정의 개념을 넘어서 새로운 고상접합 기술로서 종전에는 난접합성 소재로 분류되었던 여러가지 합금 판재의 용이한 접합을 가능하게 하였다^{1-4,16)}. 초기에는 공구의 한계로 인해 경량재료 위주로 응용연구가 진행되었는데 최근에는 철강재료, 특히 우수한 내열재료인 oxide dispersion strengthened (ODS) 합금에의 적용도 점차 늘고 있다. 재결정온도 이상, 용융점 이하의 접합온도를 갖는다는 매우 유리한 공정이점을 바탕으로 그 적용분야는 더욱더 눈부시게 늘어날 것으로 기대하고 있다.

이 해설논문에서는 경제소재인 알루미늄합금의 마찰교반접합 후, 미세조직/집합조직, 기계적 특성 및 소성유동의 특성 등에 관한 기존의 연구결과 등을 종합적으로 살펴보았다. EBSD를 이용하여 마찰 접합부의 미세구조를 관찰하였고, 결정립크기가 현격히 미세화된 재결정부와 소경각 입계가 밀집되어 있는 열기계적 영향부를 구분하였다. 접합방향과 공구의 회전방향이 서로 일치하는 advancing side와 일치하지 않는 retreating side 쪽의 전체적인 미세조직 형태는 비대칭 모양이며, 마찰교반접합이후의 접합부는 우수한 인장특성과 증가된 성형성을 보여주었다. 재결정부에서 관찰되는 집합조직은 접합공구를 구성하는 접합공구 상판과 공구 심의 각기 서로 다른 전단변형에 의해서 형성됨을 알 수 있었다. 접합 시 발생하는 재료내부의 결함은 재료의 소성유동의 결과이며 공구의 진행속도와 밀접한 관계가 있다. 공구심 주변의 전단변형 집합조직을 해석한 결과 공구가 지나가고 난 이후에 재료의 advancing side 쪽에서 결정립들의 방위가 상대적으로 적게 회전된 것을 관찰하였고,

이것은 소성변형된 재료와 회전되는 공구의 불완전한 접촉이 원인으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. W. M. Thomas, and E. D. Nicholas: Mater. Design, **18** (1997) 269
2. J.-Q. Su, T. W. Nelson, R. Mishra and M. Mahoney: Acta Mater., **51** (2003) 713
3. Y. S. Sato, Y. Kurihara, S. H. C. Park, H. Kokawa and N. Tsuji: Scripta Mater., **50** (2004) 57
4. W. M. Thomas, P. L. Threadgill and E. D. Nicholas: Sci. Technol. Weld. Joining, **4** (1999) 365
5. H.G. Salem, A.P. Reynolds, J.S. Lyons: Scripta Mater. **46** (2002) 337
6. C. Zhou, X. Yang, G. Luan: Scripta Mater. **53** (2005) 1187
7. S. Lim, S. Kim, C.G. Lee, S.-J. Kim: Metall. Mater. Trans. A **35A** (2004) 2837
8. J. -H. Cho, D.E. Boyce, P.R. Dawson: Mater. Sci. Eng. A **398** (2005) 146
9. S. Hong, S. Kim, C.G. Lee, S.-J. Kim: Scripta Mater. **55** (2006) 1007
10. S. H. Kang, W. H. Bang, J. -H. Cho, H. N. Han, K. H. Oh, C. G. Lee and S. -J. Kim: Mater. Sci. Forum. 495-497 (2005) 901
11. S. H. Kang, H. -S. Chung, H. N. Han, K. H. Oh, C. G. Lee and S. -J. Kim: Scripta Materialia **57** (2007) 17
12. H. N. Han, C. G. Lee, S.-J. Kim: Korea Patent No. 0543160 (2006), UK Patent 200326324 (2003)
13. C. G. Lee, S. -J. Kim, H. N. Han: J. Korean Inst. Met. Mater. **43** (2005) 718
14. J. -H. Cho, S. H. Kang, H. N. Han, K. H. Oh: Met. Mater. Int., **14** (2008) 247
15. S. H. Kang, H. N. Han, K. H. Oh, J. -H. Cho, C. G. Lee and S. -J. Kim: Met. Mater. Int., **15** (2009) 1027
16. Y.-B.Ko, J.-W. Choi and K.-C. Park : Journal of KWJS, 28-1 (2010), 34-40 (in Korean)

• 강석훈
• 1976년생
• 한국원자력연구원
• 원자력재료연구부
• e-mail : shkang77@kaeri.re.kr

• 조재형
• 1970년생
• 한국기계연구원부설 재료연구소
• 구조재료연구본부
• e-mail : jhcho@kims.re.kr

- 이창길
- 1963년생
- 한국기계연구원부설 재료연구소
- 구조재료연구본부
- e-mail : cglee@kims.re.kr

- 오규환
- 1957년생
- 서울대학교 재료공학부
- 재료가공 및 공정, 집합조직제어
- e-mail : kyuhwan@snu.ac.kr

- 김성준
- 1958년생
- 한국기계연구원부설 재료연구소
- 구조재료연구본부
- e-mail : sjkim@kims.re.kr

- 한홍남
- 1968년생
- 서울대학교 재료공학부
- 철강재료 및 미소역학
- e-mail : hnhan@snu.ac.kr