

알루미늄 합금의 이중 마찰교반접합

송 상 우 · 김 남 규 · 강 정 윤

Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminum Alloys

Sang-Woo Song, Nam-Kyu Kim and Chung-Yun Kang

1. 서 론

마찰교반접합(friction stir welding, FSW)의 개발로 인하여 기존 용접법으로는 접합이 매우 어렵거나 불가능한 것으로 여겨져 왔던 이중 재료 간의 접합에 새로운 가능성이 제시되었으며, 마찰교반접합법을 사용한 다양한 이중재료의 접합에 대한 연구가 주목을 받고 있다. 마찰교반접합은 재료의 용융점 아래에서 접합이 이루어지기 때문에 용융용접 시 발생할 수 있는 여러 일반적인 문제점들을 방지할 수 있다¹⁾.

마찰교반접합법은 플라스틱부터 고강도 합금강 및 니켈합금에 이르기까지 다양한 재료에 적용할 수 있으나²⁾, 개발 초기부터 현재까지 주로 알루미늄 합금에 적용되었고, 자동차, 항공기, 철도차량, 선박, 로켓연료탱크와 같은 수송분야에 상업화되어 사용되고 있다. 특히 자동차 산업분야에서는 차체경량화를 이루기 위하여 알루미늄의 수요가 증가하여 엔진, 열교환기, 휠, 서스펜션 암, 범퍼빔 등에 사용되고 있으며, 최근에는 차체에 까지 그 적용이 확대되었다.

거의 모든 구조재료를 실제품에 적용할 경우, 두 가지 이상의 재료가 사용되며 이들 간의 접합이 필수적이기 때문에 마찰교반접합의 적용을 여러 분야로 확대하기 위해서는 동종 재료뿐만 아니라 이중 재료의 접합에 대한 좀 더 많은 연구가 요구된다. 특히 자동차 제조 산업에 사용될 수 있는 마찰교반접합, 겹치기 접합 및 최근 개발된 테일러드 블랭크(Tailor welded blanks, TWBs)의 맞대기 접합과 같은 이중 재료 접합이 필수적인 분야가 늘고 있다.

알루미늄 주조재(casting alloy)와 단련재(wrought alloy) 합금 간의 접합, 열처리계(heat-treatable)와 비열처리계(non-heat-treatable) 합금 간의 접합, 알루미늄기지 금속복합재료(Al-MMC)와 기지합금 간의 접합과 같은 이중 알루미늄 합금 간의 접합, 용접의 차이가 비교적 작은 알루미늄 합금과 마그네슘 합금 간의

접합, 물성의 차이가 많이 나는 알루미늄 합금과 철강 재료의 접합 등 서로 기계적 성질 및 화학조성이 상이한 재료들 사이의 접합 및 두께가 다른 재료간의 마찰교반접합 등에 대한 시도와 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재까지 자동차 분야의 일부를 제외하고 실제 제품의 생산에 적용되는 이중재료의 접합은 많지 않지만 앞으로 그 수요가 매우 증가할 것으로 예측되며 따라서 이에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다.

기존에 보고된 이중 재료의 마찰교반접합에 대한 연구의 대부분은 접합 조건이나 틀 형상과 같은 공정변수가 접합부에 미치는 영향을 고찰하기 위한 목적이 아니라, 접합 시 틀과 접합부 주위의 재료 유동현상을 확인하기 위한 방법으로 고안되어 사용된 것으로서 그 수가 많지 않고 일반적으로 접합부에 다수의 결함이 존재하였다³⁾. 그러나 최근 알루미늄 이중합금 간의 접합, 알루미늄 합금-탄소강 접합, 알루미늄 합금-마그네슘 합금 접합, 알루미늄 합금-티타늄 합금 등에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 최적 조건을 선정하기 위하여 여러 가지 공정변수가 접합부의 미세조직, 기계적 성질 및 결함발생에 미치는 영향을 다루고 있다.

이에 본고에서는 이제까지 보고된 여러 가지 이중 재료 간의 마찰교반접합 중 알루미늄 합금 간의 이중접합 및 알루미늄 합금과 다른 합금 간의 이중 맞대기 접합에 영향을 미치는 주요 인자에 대하여 고찰하며, 이중 재료 접합에 대한 다양한 연구결과를 소개하고자 한다.

2. 알루미늄 합금 이중 재료의 접합

알루미늄 합금 이중 재료 간의 마찰교반접합에 대한 연구에 사용된 재료들은 대부분이 자동차 제조에 적용되는 것들로서 A5022, A5023, A5182, A6022, A6016, A6111 등이 있으며 주로 내외장 패널에 사용된다^{4,5)}. 또한 알루미늄 주조재도 많이 사용되는데, 기

존의 아크용접으로 접합 시 기공 또는 블로우홀과 같은 결함이 발생되기 쉽기 때문에 그 사용이 제한되어 왔으며, 이에 따라 알루미늄 주조재와 판재를 마찰교반접합하기 위한 연구도 진행되어 왔다. 이는 주조재를 사용할 경우 좀 더 효율적인 설계가 가능하고 비용을 절감할 수 있어 항공 및 자동차 산업에 적용할 수 있는 큰 잠재력을 가지고 있기 때문이다⁶⁾. 이 밖에 항공기 재료로 사용되는 A2024와 A7075 알루미늄 합금에 대한 연구도 다수 보고되고 있다^{9,10,13)}.

알루미늄 주조재와 단련재, 열처리계와 비열처리계 합금, 알루미늄기지 금속복합재료와 기지합금 간의 접합 등과 같이 기계적 강도의 차이가 나는 재료의 이중 접합에 마찰교반접합을 적용하기 위해서는 동종 재료의 접합 시 주로 고려되었던 변수(툴 형상, 회전속도, 접합속도, 하중 등) 이외에 다른 변수들도 고려해야 한다. 마찰교반접합에 의한 접합부는 대칭형상이 아니고 툴의 회전방향과 진행방향에 의하여 전진측(advancing side, AS)과 후진측(retreating side, RS)에 서로 다른 재료유동 및 열이력이 발생하므로 강도, 온도에 따른 유동응력, 강화기구 등이 서로 상이한 이중 재료를 접합할 경우, 재료의 배열 방법 및 접합 중심부로부터의 툴 삽입 위치 등에 따라 상이한 접합부 성질을 얻는다.

따라서 본고에서는 동종재료의 접합에서 주로 연구되었던 툴 회전속도(rotation speed), 접합속도(travers speed)와 같은 공정변수가 접합부의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향보다는 이중재료접합 시 재료배열과 툴 삽입위치에 따른 접합부 특성의 변화를 중심으로 고찰하였다.

강도가 서로 다른 재료를 마찰교반접합할 때, 툴을 접합부 중심선에 일치시켜 삽입할 경우에는 강도가 낮은 연결의 재료를 툴의 회전방향과 용접방향이 일치하는 AS에 배열하는 것이 재료유동성 및 기계적 특성 등에서 우수한 결과를 보인다고 보고되었다. Larsson 등이 이 배열을 제안한 이래 대부분의 연구에서 이와 동

일한 결과를 얻었다. 이 실험에서는 두께 5 mm인 A5083-H12와 A6082-T6이 사용되었으며, 연결인 A6082가 AS에 있을 때 좀 더 높은 강도값을 나타내었고, 너겟의 미세조직에서도 더 균질한 혼합을 나타내었다⁷⁾.

마찰교반접합시 이중 재료의 배열에 따른 전형적인 미세조직을 Fig. 1에 나타내었다. 이 실험에 사용된 재료는 A5052-H32와 A5J32-T4 합금 판재로서, A5J32는 A5023과 상응하는 일본 Kobe Steel의 제품명이며 불순물의 함량이 A5023보다 낮다⁴⁾.

미세조직을 관찰한 결과, 높은 강도의 A5J32가 AS에 있을 경우 지그재그 형상의 접합부가 관찰되었고, AS에 연결의 A5052가 위치할 경우, 소성유동이 충분한 vortex-like lamellar structure를 보였다. 이는 RS에 있는 낮은 강도의 A5052가 AS에 있는 높은 강도의 A5J32에 의해 소성유동이 제한을 받아 발생한 것으로 사료된다⁸⁾. 기계적 성질은 AS에 연결의 A5052가 있을 경우, 보다 높은 인장강도값을 보였으며, 기존에 보고된 연구결과들과도 일치하였다.

Cavaliere 등과 Khodir 등은 각각 A2024와 A6082, A2024와 A7075를 접합하여 유사한 결과를 보였다^{9,10)}. 이 실험에서는 두 재료를 접합할 때 툴 주위의 온도 및 툴과 재료사이의 수직하중을 측정하였으며, 연결 재료인 A6082가 AS에 위치할 경우 접합부에서 두 재료간의 혼합이 더 양호하고 온도구배도 완만하게 측정되었다. 이에 따라 접합부 및 모재에 걸쳐 경도값이 균일하였으며, 더 높은 인장강도와 피로특성을 나타내었다.

그러나 몇몇 연구는 이와 반대의 결과를 보고하였다. A2024와 D357 합금을 접합한 경우에서 높은 강도의 A2024가 AS에 있을 때 더 양호한 접합부를 얻은 경우¹¹⁾ 및 A5082와 A6082의 접합 시 재료배열에 따라 차이가 없는 경우도 있었다¹²⁾. 이는 연구결과에서 보고되지 않은 툴 숄더(shoulder) 및 프로브(probe) 직경, back plate 종류, 회전속도, 접합속도 등의 다른 공정

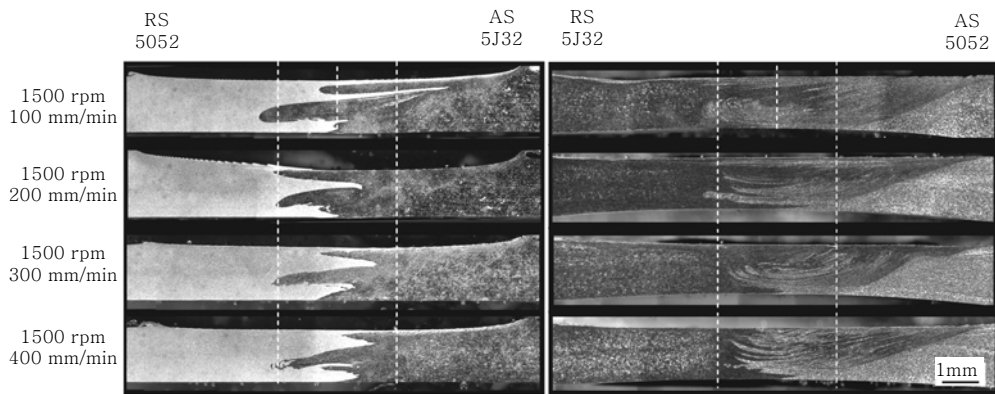


Fig. 1 Effect of materials arrangement and welding condition on nugget shape

변수의 차이가 영향을 미친 것으로 사료된다.

이 밖에 이원배 등은 A356과 A6061을 사용한 연구 결과에서 이종재료의 접합 시 접합부 너겟(nugget)의 미세조직은 RS에 위치한 재료에 의하여 결정된다고 보고하였다. A356이 RS에 있을 경우 Si 입자가 접합부 중심에 걸쳐 분산되고, 반대 배열의 경우 접합부 중심에서 6062의 미세조직이 미세한 등축재결정립으로 나타났다⁶⁾.

그리고 알루미늄 이종재료의 접합 시 접합부 중심선으로부터의 틀 삽입위치에 대한 연구를 Cavaliere 등이 보고하였다. 4 mm 두께의 A2024-T3과 A7075-T6을 사용하였으며, AS에 A2024를 고정하고 접합 중심선으로부터 틀의 위치를 AS 쪽으로 0, 0.5, 1, 1.5 mm의 거리만큼 변경하여 접합하였다. 그 결과 틀 삽입위치가 1 mm인 경우의 단면조직은 일반적인 접합부의 조직을 가지고 있었으나, 1.5 mm에서는 완전히 혼합되지 않고 서로 다른 결정립 크기를 보이는 밴드를 형성하였다. 이에 상응하게 접합부의 인장강도, 피로특성 등의 기계적 성질은 1 mm까지 급격하게 증가하다가 1 mm를 초과해서는 감소하였다¹³⁾.

이 밖에 보고된 재료배열과 관련된 연구로서 AS에 높은 강도의 재료가 위치할 경우와 접합속도가 빨라질 경우 재료와 틀 사이에 작용하는 수직방향 하중이 더 증가한다는 것이 보고되었다¹⁴⁾.

이종재료배열과 함께 알루미늄 이종재료의 접합에서 고려되어야 할 사항은 접합시의 연화부의 발생에 관한 것인데, 이는 주로 열처리계와 비열처리계 합금을 접합할 경우에 발생한다. 2XXX, 6XXX 및 7XXX계 합금과 같은 열처리계 알루미늄 합금은 고용화 열처리(solution heat treatment)에 의해 과포화고용체를 만든 후 인공 또는 자연 시효처리를 하여 Al₂Cu나 Mg₂Si 등의 석출물로 강화시키는 기구를 가지고 있다. 반면 5XXX계 합금과 같은 비열처리계 알루미늄 합금은 용질을 과포화 고용시키거나 가공에 의해 경화를 얻는 기구를 가지고 있다. 따라서 마찰교반접합 시 발생하는 열에 의하여 열처리계 알루미늄 합금의 HAZ에서 GP zone이 사라지고 과시효로 인한 석출물의 조대화가 일어난다. 그 결과 기계적 성질이 급격하게 저하되는 연화부가 발생하여 강도를 유지할 수 없게 된다. 이 때문에 Fig. 2에 나타난 바와 같이 대부분의 연구에서 이종접합부 단면의 경도는 열처리계 모재의 HAZ 부근에서 최소값을 나타내며¹⁵⁾, 횡방향 인장시험(transverse tension test)시 이 부위에서 파단이 일어난다. 이에 반하여 비열처리계 합금도 HAZ에서 낮은 경도와 강도 값을 나타내지만, 이는 전위밀도의 감소에 따른 것으로

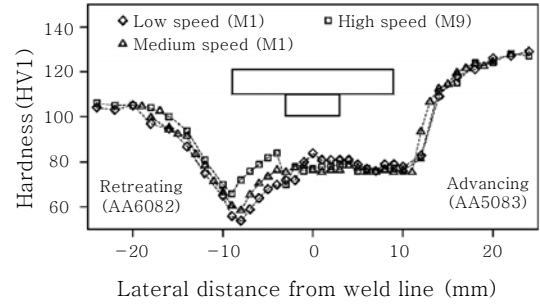


Fig. 2 Variation in hardness across dissimilar FS welds

열처리계 합금처럼 모재와 큰 차이를 보이는 연화부는 발생하지 않는다. 따라서 열처리계와 비열처리계 알루미늄 합금을 서로 접합할 경우, 열처리계 합금의 열영향부(HAZ)에서 연화부가 생성되는 문제도 고려해야 한다.

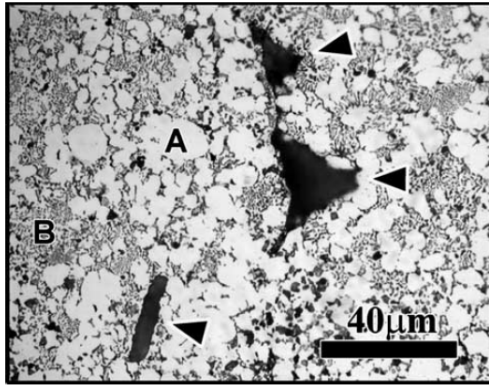
3. 알루미늄 합금-마그네슘 합금

제품의 중량을 감소시키기 위하여 알루미늄 합금의 대체재로서 비강도가 양호한 마그네슘이 사용될 수 있으나, 용융용접 시 결정립 조대화, 금속간화합물(IMC) 생성으로 인하여 그 사용이 제한적이다. 현재까지 알루미늄과 마그네슘 합금 간의 이종접합에 대한 연구는 많지 않으며, 상대적으로 강도가 낮은 순 알루미늄 합금과의 접합과 점용접 등으로 한정되어 있다.

이종 접합이긴 하지만 두 재료 모두 연질이기 때문에 일반 공구강의 틀을 사용하더라도 마모가 거의 발생하지 않는 재료들이다. 그러나 두 모재의 강도차이에 따라 틀 삽입 위치 및 재료의 배열 방법은 큰 변수로 작용한다.

이종 접합에서 용점이 낮은 재료, 혹은 낮은 온도의 공정점을 갖는 화합물을 생성할 수 있는 재료의 접합 시, 접합조건에 따라 접합부에서 액화가 일어나는 경우도 보고되고 있다.

Yan 등은 A1060 알루미늄 합금을 AS에, AZ31 마그네슘 합금을 RS에 위치시키고 틀을 접합면의 중심과 Al측 및 Mg측으로 이동시켜 삽입하여 마찰교반접합한 연구결과를 발표했다. 접합면의 중심선을 따라 틀을 이동시킨 경우, Al(Mg), Mg(Al) 고용체 외에 β-Al₃Mg₂ 및 γ-Al₁₂Mg₁₇과 같은 공정조성을 보이는 취약한 금속간화합물이 생성되어 매우 낮은 강도를 갖는 접합부를 형성한다. 반면, Al측과 Mg측으로 틀 삽입위치를 이동시킨 경우에는 vortex-like lamellar structure를 갖는 접합부를 형성하지만 취약한 금속간화합물은 생성되지 않아 강도가 향상되는 결과를 보였다¹⁶⁾.



A : primary phase of $Al_{12}Mg_{17}$
 B : eutectic structure consisting of $Al_{12}Mg_{17}$ and the Mg solid solution
 Arrow : porosity

Fig. 3 Optical micrograph of the irregular shaped region in the weld of A1050 Al alloy-AZ31 Mg alloy

Sato 등은 A1050 알루미늄 합금과 AZ31 마그네슘 합금의 이중 마찰교반접합을 매우 빠른 톨 회전속도(2450rpm)로 실시한 결과, Fig. 3과 같은 미세조직을 얻었다. EDS, XRD 분석과 상태도를 통하여 접합부는 $Al_{12}Mg_{17}$ 의 금속간화합물 및 $Al_{12}Mg_{17}$ 과 Mg 고용체 간의 공정조직을 갖고 있고, 이 상들은 조성적 액화(constitutional liquation)에 의하여 생성된 것으로 보고되었다¹⁷⁾.

동일한 용접조건, 동일한 형상 및 재질의 톨을 사용하더라도 접합하고자 하는 재료에 따라 접합부 온도는 다르게 나타난다. 용접 차이가 큰 재료를 마찰교반접합할 경우, 계면에서 저용점 재료가 용융되는 현상이 발생하기도 한다. 용접 차이가 크지 않은 재료간의 접합에서도 조성적 액화가 일어날 수 있기 때문에 마찰교반

접합의 가장 큰 장점이라 할 수 있는 완전한 고상접합이 이루어 지지 않고 금속간화합물이 다량으로 형성되는 연구 결과들도 보고되고 있다.

4. 알루미늄 합금-철강재료

자동차, 항공과 같은 수송산업에서 제품의 중량을 감소시키기 위하여 알루미늄 합금의 사용이 점차 증가되고 있으나, 생산비용이 증가하고 제품형상이 제한적이라는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 철강재료와 알루미늄 합금을 적절한 비율로 동시에 사용하는 것이 이상적이지만 기존의 용융용접으로는 알루미늄과 철강재료 간의 건전한 용접부를 얻을 수 없었다. 이는 용접 중 확산에 의하여 이음경계에서 취성을 가진 금속간화합물이 생성되기 때문이며, 이를 억제하기 위해서는 용접 시 입열량을 감소시키는 것이 매우 중요하다¹⁸⁾. 따라서 마찰교반접합법이 기존의 용융용접이나 점용접의 적합한 대안으로 제시되었다.

알루미늄 합금을 철강재료와 같은 강도가 매우 높은 재료와의 이중접합할 경우는 톨의 중심을 두 재료의 맞댄 면의 중심에 일치시키지 않는다. PCBN, W-Re, 또는 WC계 초경합금 등과 같은 내구성이 갖추어진 톨을 사용하더라도 철강재료에 적용할 경우 마모로 인해 사용수명이 감소하며, 강도가 다른 두 재료에 동일한 소성유동(plastic flow)을 가할 수도 없다. 따라서 톨 프로브 직경의 10% 정도를 경질의 재료에 접촉하도록 톨을 삽입한 경우가 우수한 강도를 보인다는 연구 결과가 보고되었다. 이 경우에는 연질의 재료(soft metal)를 톨의 회전방향과 용접방향이 반대인 RS에 배열하는 것이 AS에 배열하는 것에 비하여 우수한 접합성을 보인다. Fig. 4와 같이 연질의 재료를 RS에 배열한 경우 (a), 우수한 유동을 보이는 연질의 재료가 톨의 회전에

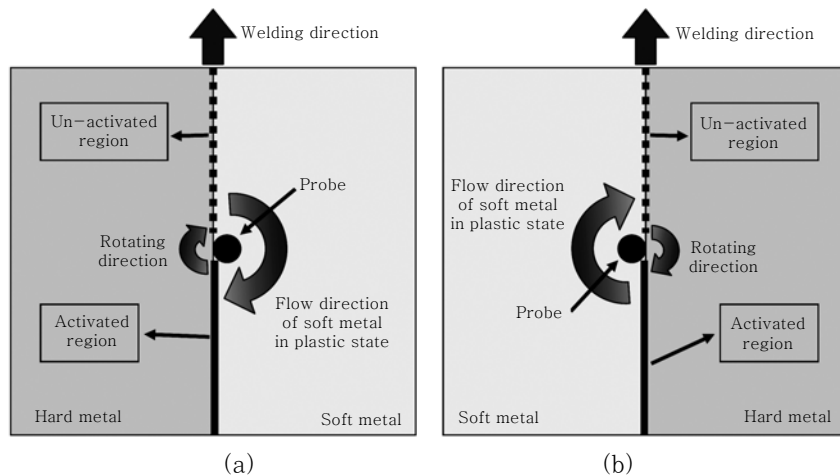


Fig. 4 Plastic flow direction of soft metal for soft-hard metal FSW

의해 진행 방향의 뒤쪽으로 이동한다. 이 때, 회전하는 툴의 프로브 및 솔더에 의해 마찰되어 활성화된 경질의 재료로 밀착되고 두 재료의 접합이 이루어진다. 반면에 반대의 배열의 경우(b), 연질의 재료는 툴 진행 방향의 앞쪽으로 이동되고, 프로브의 회전으로 인한 마찰을 받지 않은 경질의 재료로 밀착되어 접합이 이루어지지 않는 결과를 보인다¹⁹⁾.

그리고 알루미늄 합금과 철강재료의 이중 마찰교반접합에 있어서 Al-Fe계 금속간화합물의 제어가 중요하다. 입열량이 클수록(느린 용접속도 및 빠른 툴 회전속도) 금속간화합물이 형성되기 용이하고, 접합강도는 접합부에 형성되는 금속간화합물의 두께에 반비례하는 경향을 보이는 것으로 나타난다¹⁸⁾.

툴 회전속도가 너무 느릴 경우, 입열량이 적은 상태에서 툴이 이동하기 때문에 마모가 심하게 발생하고 접합이 잘 되지 않는 결과를 보인다. 반면, 회전속도가 빠를 경우에는 계면에서 온도가 연질의 재료 용점 이상으로 올라가거나, Al-Fe 금속간화합물의 형성이 용이해져 접합부가 취약한 결과를 초래한다¹⁹⁻²¹⁾. 또한, Mg를 많이 포함하는 5XXX계에서는 합금 내의 Mg가 기화된 연구 결과도 보고되고 있다¹⁹⁾.

툴의 회전은 연질의 재료에서 주로 일어나도록 설정하는데, 툴의 마모를 방지하는 목적 이외에 상대적으로 용점이 낮은 연질의 재료에 과열을 억제하는 효과도 줄 수 있기 때문이다²⁰⁾. 그러나 경질의 재료를 마찰시키지 않고 연질의 재료만 마찰시킨 접합부는 강도가 매우 낮게 나타나기 때문에, 프로브 직경의 10~20% 정도를 steel에 접촉하도록 툴을 삽입하는 경우가 가장 우수한 접합 강도를 보이는 것으로 나타난다¹⁹⁾.

5. 알루미늄 합금-기타 합금

알루미늄 합금과 구리 합금의 접합은 대용량 변압기 및 고출력 전자 부품 및 장치에 적용되고 있다. 지금까지 주로 플래시버트(flash butt)로 용접하고 있으나, "Kiss Bonding" 및 기계적 성질의 저하로 문제가 많이 발생하여 전자기성형(Electro Magnetic Forming, EMF)법과 더불어 마찰교반접합에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 그러나 구리 합금은 합금원소에 따라 기계적 성질이 급격히 변하고, 재료 자체의 우수한 열전도도로 인하여 적정 조건을 설정하는 것이 다른 재료보다 어려움이 있다. 현재까지 알루미늄 합금과 순수 구리의 접합에 관한 연구결과가 주로 보고되고 있다.

Luan 등은 순수 알루미늄과 순수 구리의 마찰교반접합 시 배열 위치에 따른 영향을 분석하였다. 앞서 알루미늄 이중재료접합에서 설명한 바와 같이 맞댄 면의 중

심을 따라 접합을 할 경우, 상대적으로 연질인 알루미늄을 AS에 배열한 경우가 더 우수한 접합성을 보였다²²⁾.

또한, A6061 알루미늄 합금과 순수 구리의 접합부에서는 CuAl_2 , CuAl , Cu_9Al_4 등의 금속간화합물이 형성되고, A6061 알루미늄 합금은 접합 시 최고온도가 580°C까지 올라가 $\alpha\text{-Al}/\text{CuAl}_2$ 공정상이 생성되었다는 것이 보고되었다²³⁾.

상온에서 우수한 안정성을 보이는 티타늄은 고온에서 산화가 매우 잘 일어나기 때문에 용융용접으로 접합하기 어려운 금속 중 하나로 잘 알려져 있다. 항공산업 등에 활용하기 위하여 알루미늄 합금과 티타늄 합금간의 마찰교반접합 연구가 계속 진행되고 있으나, 알루미늄 합금과의 큰 용점차 및 고강도의 티타늄 합금에 적용할 툴 재질 등의 문제로 보고된 연구 결과는 많지 않다. 따라서 티타늄 합금을 교반하지 않고 알루미늄 합금만을 교반하여 확산접합의 가능성을 알아보는 연구가 최근 늘고 있다.

Dressler 등은 내마모 코팅을 한 공구강(Tool steel) 툴을 사용하여 A2024 알루미늄 합금 쪽으로 툴 삽입 위치를 옮겨 TiAl6V4 티타늄 합금과의 마찰교반접합을 실시한 결과에서 A2024 알루미늄 합금의 73% 정도의 인장강도를 가지는 접합부를 얻을 수 있었다고 최근 보고하였다. 대부분 알루미늄 합금과 티타늄 합금의 계면에서 파단이 발생하였으나, 파면에서 매우 강하게 접합되어 알루미늄 모재에서 파단이 발생된 흔적도 발견되었다²⁴⁾. 툴 재질의 문제가 해결된다면 알루미늄 합금과 티타늄 합금의 접합가능성은 매우 높을 것으로 사료된다.

6. 맺 음 말

마찰교반접합법은 기존의 용융용접법에 비하여 매우 짧은 기간에 많은 연구 결과가 발표되고 대체 접합법으로 각광을 받고는 있지만, 앞에서 살펴본 바와 같이 이중재료간의 마찰교반접합에 대한 연구는 아직까지 많지 않고 여러 인자들의 영향이 정확하게 밝혀지지 않은 상태이다.

본고에서는 알루미늄 합금의 이중접합 시 재료배열 및 툴 삽입위치를 중심으로 하여 고찰하였으나, 재료배열이 재료유동, 접합부 특성 및 결합생성에 미치는 영향에 대하여 아직까지 명확하게 설명한 연구결과는 없는 실정이다. 이는 마찰교반접합에는 매우 다양한 변수들이 존재하며, 재료종류, 두께, 강도, 열처리성질 등에 따라 서로 상이한 결과가 나오기 때문이다. 이러한 모든 변수들을 전체적으로 고려하여야 이중재료에 대한 최적의 마찰교반접합을 얻을 수 있을 것이다. 따라서

실질적으로 상용화되기 위해서는 충분한 데이터베이스 구축이 필수적이다.

최근에는 이중접합의 가능성을 확인하는 단계를 넘어 서 실제 적용할 수 있도록 마찰교반접합 기술을 규격화 하는 노력이 진행되고 있다. 특히, 알루미늄 및 마그네슘 합금에서는 마찰교반접합이 가장 우수한 접합성을 나타내고, 알루미늄 합금과 철강재료의 접합 역시 기존의 다른 접합법 이상의 강도를 보이기 때문에, 접합부의 신뢰성 평가에 관한 연구가 뒷받침 된다면 빠른 시간 내에 상용화가 이루어 질 것으로 생각된다. 또한, 접합기술 뿐만 아니라 표면개질 등 다양한 산업에서 응용분야가 확대되고 있어 앞으로 마찰교반접합법에 관한 연구가 더 활발해 질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. L. Luijendijk : Journal of Materials Processing Technology, **103** (2000), 29-35.
2. K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki : Joining Dissimilar Aluminum Alloys, Welding Journal, **85-4** (2006), 38-41
3. R.S. Mishra and Z.Y. Ma : Materials Science and Engineering R **50** (2005), 1-78
4. T. Inaba and K. Tokuda : Kobelco Technology Review, **26** (2005), 55-62
5. T. Sakurai : Kobelco Technology Review, **28** (2008), 22-28
6. W.B. Lee, Y.M. Yeon and S.B. Jung : Scripta Materialia **49** (2003), 423-428
7. H. Larsson, L. Karlsson, S. Stoltz and E.L. Bergqvist : Proceeding of 2nd International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, 2000
8. N.K. Kim, B.C. Kim, Y.G. An, B.H. Jung, S.W. Song and C.Y. Kang : Metals and Materials International, **15-4** (2009), 671-675

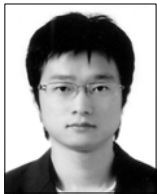
9. P. Cavaliere, A. De Santis, F. Panella and A. Squillace : Materials and Design **30** (2009), 609-616
10. S.A. Khodir and T. Shibayanagi : Materials Science and Engineering B **148** (2008), 82-87
11. R.J. Lederich, J.A. Baumann and P.A. Oelgoetz : Friction Stir Welding and Processing, (2001) 71-81
12. M.J. Peel, A. Steuwer, P.J. Withers, T. Dickerson, Q. Shi, and H. Shercliff : Metallurgical and Materials Transaction, **37A** (2006), 2183-2193
13. P. Cavaliere and F. Panella : Journal Of Materials Processing Technology, **206** (2008), 249-255
14. P. Cavaliere, A. De Santis, F. Panella and A. Squillace : Materials and Design, **30** (2009), 609-616
15. M.J. Peel, A. Steuwer, P.J. Withers : Metallurgical and Materials Transaction, **37A** (2006), 2195-2206
16. J. Yan, Z. Xu, Z. Li, L. Li and S. Yang : Scripta Materialia, **53** (2005), 585-589
17. Y. Sato, S.H. Park, M. Michiuchi and H. Kokawa : Scripta Materialia, **50** (2004), 1233-1236
18. T. Tanaka, T. Morishige and T. Hirata : Scripta Materialia, **61** (2009), 756-759
19. T. Watanabe, H. Takayama and A. Yanagisawa : Journal of Materials Processing Technology, **178** (2006), 342-349
20. W.B. Lee, G. Biallas, M. Schmuecker and S.B. Jung : Journal of the Korean Welding and Joining Society, **23-5** (2005), 62-69 (in Korean)
21. H. Uzun, C. Donne, A. Argagnotto, T. Ghidini and C. Gambaro : Materials and Design, **26** (2005), 41-46
22. G. Luan, C. Sum, H. Guo and Y. Yu : Proceeding of 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Utah, USA, 2003
23. J. Ouyang, E. Yarrapareddy and R. Kovacevic : Journal of Materials Processing Technology, **172** (2006), 110-122
24. U. Dressler, G. Biallas and U.A. Mercado : Materials Science and Engineering A, **526** (2009), 113-117



- 송상우
- 1973년생
- 한국기계연구원 부설 재료연구소
- 마찰교반접합, 용접기술기준
- e-mail : swsong@kims.re.kr



- 강정운
- 1953년생
- 부산대학교 재료공학부
- 마찰교반접합, 브레이징, 용접야금
- e-mail : kangcy@pusan.ac.kr



- 김남규
- 1981년생
- 한국기계연구원 부설 재료연구소
- 마찰교반접합
- e-mail : nkkim@kims.re.kr