

구조용 알루미늄합금의 마찰교반접합 기술

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 유호천
(yoocho278@reseat.re.kr)

1. 서 론

최근 지구온난화 방지와 자원의 절감이 강하게 요구되고 있는 상황에서, 자동차, 항공기 등 수송수단의 경량화가 추진되고 있다. 경량화 대책의 일환으로 고장력강판의 사용과 동시에 철강재료에서 알루미늄합금으로, 아울러 용융용접에서 고상용접인 마찰교반접합으로 치환되고 있다. 예를 들어, 일본 Hitachi Shinkansen 철도차량과 국내 경전철 객차의 벽체, 지붕재 및 바닥재에 사용되는 알루미늄 표피 구조물은 마찰교반접합 기술로 제작하고 있다. 그리고 유럽의 Hydro Aluminum Co.는 TGV 객차의 지붕재를 마찰교반접합 기술로 제작하고 있다. 선박해양 분야에서도 Marine Aluminum Co.는 마찰교반접합 기술을 상업적으로 적용한 회사로서 선박용 대형부품, 지붕재, 바닥재 등의 알루미늄 제품에 적용하고 있다. 또한 선박용 지붕, 격벽, 여선용 냉동기의 냉각판 등이 마찰교반접합 기술을 적용하여 개발되고 있다.

알루미늄합금은 철강재료에 비해서 열전도율이 약 4배, 비열이 약 2배, 용융잠열이 약 1.5배가 되는 등, 용점이 낮음에도 불구하고 열원의 에너지-집중이 곤란하여 국소적으로 용융되는 것이 어렵다. 또한 표면은 대단히 산화되기 쉽고 형성된 산화알루미늄 피막은 경도가 높고 고융점이기 때문에 제거하는 것이 곤란하므로, 용융용접보다는 마찰교반접합에서의 제조 시에 결함을 감소시키는데 더욱 유리하다¹⁾.

알루미늄합금은 Fe계 합금에 비해서 매우 가벼우며, 강의 약 1/3에 해당하는 비중을 가지고 있다. 예를 들면 시효경화성 A6061합금은 우수한 인성, 가공성 및 내부식성으로 인하여 자동차, 조선, 항공기, 기계 분야 구조물에 광범위하게 사용되고 있으며, 그 수요는 점차적으로 증가하고 있다. 특히 차량으로부터 탄소방출을 감소시키고 연료효율을 증가시키기 위하여 자동차 제조자들은 경량 구조물재료로서 알루미늄합금을 채택하고 있는데, 이에 대한 많은 제조기술 정보의 입수가 필요한 시점에 있다²⁾.

마찰교반접합에 대해서 최근의 제조 상의 관심부분을 살펴보면, 기본 원리와 특징을 포함해서 접합부의 미세조직과 잔류응력 측정, 접합부의 유동해석과 온도분포 해석, 주조체 표면개질과 교반형성의 응용, 알루미늄합금 접합 및 이종접합에의 응용, 접합조건과 공구형상 등의 접합부의 기계적 특성의 영향 등 여러 분야에 걸쳐서 문헌조사가 계통적으로 행해지고 있다. 특히 2000계, 5000계, 6000계, 7000계 알루미늄합금, Al-Li합금, 알루미늄계 복합재의 마찰교반 이음부에 관한 연구논문이 관심의 주요 대상이 되고 있

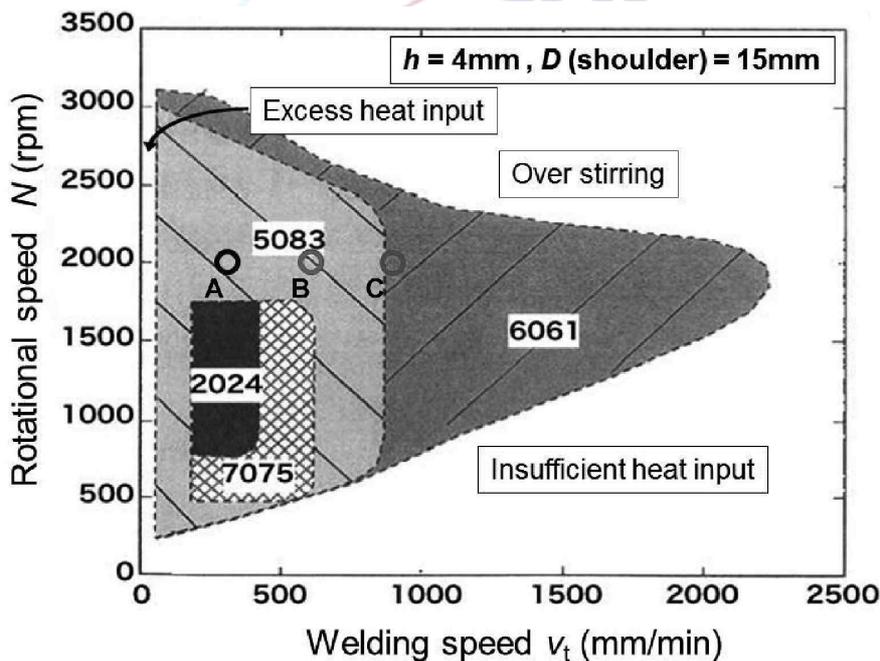
다.

본 보고서에서는 다양한 알루미늄합금의 마찰교반접합 기술을 적용하기 위하여, 알루미늄합금의 마찰교반접합시 필요한 접합조건, 특히 접합속도, 톨의 제조방법, 예열의 효과에 대한 기술정보를 제공하였으며, 이외에도 마찰교반접합에 의한 다공성(porous) 알루미늄의 최신 제조기술 및 용접구조물의 안정성과 신뢰성을 평가하기 위한 구조부재의 잔류응력 측정법을 제공하여, 중소기업체에 국제적인 경쟁력 확보에 기여할 수 있도록 하였다.

2. 알루미늄합금의 마찰교반접합 기술

2-1. 알루미늄합금의 종류에 따른 마찰교반접합 기술

마찰교반접합은 종래의 용접법에서는 어려움이 있는 2000계, 7000계의 항공기용 알루미늄합금, 6000계의 철도차량용 알루미늄합금 등의 접합에 적합하다. 종래의 레이저용접과 아크용접 등의 용유용접법과 비교해서, 마찰교반접합 이음부는 잔류응력과 변형량이 작고, 이음부 효율이 높고 피로강도도 우수하기 때문에 최근 자동차, 철도차량, 선박, 항공기를 중심으로 하여 다양한 산업분야에 응용이 확대되고 있다. 마찰교반접합 시에 다양한 알루미늄합금종류에 따른 접합조건을 <그림 1>에 제시하였다. 점선의 범위 내는 접합조건인 허용범위를 나타낸 것이다³⁾.



<그림 1> 마찰교반접합 제조 시에 4종류의 알루미늄합금의 접합조건인 허용범위³⁾

2011년 국제용접학회(IIW)에 의해 알루미늄합금의 마찰교반접합에 관한 국제규격 ISO 25239가 제정되었는데, 이를 참조하면 알루미늄합금접합에 도움이 될 수 있을 것이다⁴⁾.

2-2. 마찰교반접합에 미치는 접합조건

마찰교반접합부는 ① 강하게 변형이 되는 교반 지역, SZ(Stir zone), ② 가공열처리된 지역, TMAZ(Thermomechanically affected zone), ③ 열영향부, HAZ(heat affected zone), ④ 모재, BM(Base metal)의 4가지 지역으로 분류된다. 마찰교반접합은 고상용접이므로 고강도 알루미늄합금(예, 2xxx, 7xxx)은 종래의 용융용접을 이용하면 고품질을 얻기 어렵지만, 마찰교반접합 기술의 적용은 그 대안이 될 수 있다.

Saad Ahmed Khodir 등⁵⁾은 알루미늄합금의 마찰교반접합 작업시 실제 활용할 수 있는 제조기술을 다음과 같이 제시하였다.

- ① 접합부의 평균 입도는 접합온도가 낮아지고 접합진행속도(travel speed)가 증가할수록 작아진다. 그리고 접합온도를 조절함으로써 교반지역에서의 입도를 제어할 수 있다. 또한 열영향부에서 석출물이 용해되거나 과도한 성장을 하면 경도의 감소를 나타낼 수 있으며 최종적으로 품질특성 상 바람직하지 못한 결과를 나타내므로 석출물의 형태를 주의깊게 관찰하여야 한다.
- ② 마찰교반접합 시에 최고 온도는 접합진행속도, 톨의 회전속도, 수직압력, 모재의 초기온도 및 급속한 냉각과 같은 여러 가지의 작업인자에 따라 달라진다. 특히 적당한 접합 진행속도와 회전속도는 최고 온도에 대하여 효과가 있는 것으로 알려져 있는데, 최고 온도는 용접속도가 감소하고 회전속도가 증가함에 따라 증가한다.
- ③ 접합진행속도를 감소시키고, 톨의 회전속도를 증가시키면 입열량이 감소하게 되어 입자 미세화가 이루어진다.
- ③ 마찰교반접합 동안에 피크온도, 유지시간, 가열 혹은 냉각속도는 석출물의 용해와 성장거동을 조절하는 중요한 인자이다. 과시효는 573K 이상의 온도에서 열영향부 내에서 일어나며 석출물은 673K 부근에서 용해되기 시작하여 온도가 증가할수록 가속화한다. 이 결과로 열영향부는 경도가 떨어지고, 접합부 품질특성을 떨어지게 된다.
- ④ 접합 시에 가열속도의 증가는 석출물이 성장할 수 있는 시간을 줄여 열영향부에 경화를 가져 온다. 또한 피크온도 후에 냉각속도를 증가시키면 과포화된 용질의 양이 증가하여 용접 후에 더 이상의 석출을 이용할 수 없다. 그래서 과시효(overaging) 온도범위 아래에서 열영향부의 온도를 감소시키거나 가열 혹은 냉각속도를 증가시키면 정도 분포현상을 더욱 양호하게 할 수 있다.

용점이 낮은 알루미늄의 접합, 철강재료의 접합, 알루미늄과 철강재료의 접합, 철강재료와 마그네슘의 접합 등이 실용화를 겨냥한 활발한 연구가 진행되고 있다. 알루미늄재의 마찰교반접합은 고상교반작용을 기본으로 한 접합방법이기 때문에 교반 톨로부터의 입열량 및 모재의 연화정도가 접합품질에 크게 영향을 받는다. 또한 접합조건으로 되어 있는 접합속도가 기계적 특성에 영향을 미친다는 보고도 있으며, 안정된 접합상태를 얻

기 위해 비교적 저속의 접합속도로 접합이 실시되고 있다⁶⁾.

상온에서 5000계 알루미늄합금의 마찰교반접합가능영역은 톨 회전수가 저속(200rpm)에서 접합속도 100mm/min이지만, 회전수를 빠르게 함으로써 접합가능속도가 증대시켜, 회전수 700rpm으로 600mm/min 정도의 접합속도가 얻어진다. 그러나 회전수 700rpm 이상에서는 접합속도의 향상은 거의 기대할 수 없는데, 예를 들면, 1200rpm 이상의 회전수에는 접합결합이 발생할 우려가 많다. 접합가능속도의 범위로서 6000계 알루미늄합금의 접합가능속도의 상한선인 2000mm/min에 비해서 매우 좁다고 볼 수 있다. 5000계와 6000계 알루미늄합금으로서는 소성변형 저항이 다르다. 5000계 알루미늄합금의 소성변형저항은 6000계에 비해서 크고, 접합 시에 톨에 걸리는 부하도 증대된다. 이 때문에 접합속도를 증대시켜 접합을 실시하면 톨의 파손과 교반부족이 발생할 우려가 많다⁶⁾.

1050-H24 알루미늄접합재의 기계적 특성을 검토⁴⁾한 바에 의하면 접합속도 400mm/min 이상에서 인장강도 및 연성이 저하하는 것으로 보고되고 있다. 안정된 접합상태를 얻기 위해서는 접합속도를 저속으로 설정하는 경우가 많다. 마찰교반접합의 보급에 따라, 많은 알루미늄합금에 이 결과가 참조되고 있다.

알루미늄 소재를 마찰교반접합을 하는 경우, 안정된 접합상태를 얻기 위해서는 접합속도의 설정이 중요하다. 400mm/min 이상의 접합속도에서는 인장강도 및 연성이 저하하므로 안정된 접합부 품질특성을 확보하기 위하여 예를 들어 50, 160mm/min의 저속에서 접합하는 경우도 있다. 그러나 접합속도를 과도하게 늦춤으로써 접합부에서의 인장강도 및 연성은 저하한다는 사실에 주의해야 한다. 이 접합속도는 TIG용접, MIG용접, 레이저용접 및 이들의 하이브리드용접 등에서 관두께 2mm 이하에서 1000mm/min~수천 mm/min에 비해서 늦으므로, 실용화를 위해서는 접합 시에 고속화가 필요하다. 또한 접합속도의 증가에 따라 입열량의 부족에 의해 소성유동부족에 의한 회전 톨의 파손 등도 문제가 된다⁷⁾.

2-3. 접합조건에 따른 품질특성의 변화

마찰교반접합 이음부의 강도평가에서는 주로 횡방향(접합선 방향과 수직)의 인장특성이 조사되어 있기 때문에 종방향(접합선 방향과 평행)의 인장특성과 비교검토한 예는 거의 없으며, 접합부의 국소적인 단축 구성식의 결정도 거의 없는 상태에 있다⁴⁾. Takashi Yokoyama 등⁴⁾은 6061-T6 알루미늄합금 마찰교반접합 시에 계면접합부의 정적 인장특성 평가와 접합부의 국소적인 구성식을 결정하였다. 종래의 계면접합부의 기계적 특성의 평가는 횡방향의 인장시험이 일반적이지만 종방향의 인장시험도 같이 실시하여 그 부하방위의존성을 규명함과 동시에 양방위에 의한 구성식을 결정하였다. 이 구성식에 의해 컴퓨터에 의한 구조해석이 용이하게 되어 마찰교반접합 계면 구조물의 안전설계에의 응용이 기대된다.

Takashi Yokoyama 등⁴⁾에 의하면 ① 접합속도(회전 피치)가 상승하면 입열량이 작아지게 되고 계면접합부의 온도상승이 억제되기 때문에 이음부의 인장특성값은 증가하게 된다. ② 이음부의 유동응력의 수준은 종·횡 방향에서도 모재에 비해서 크게 저하하지만

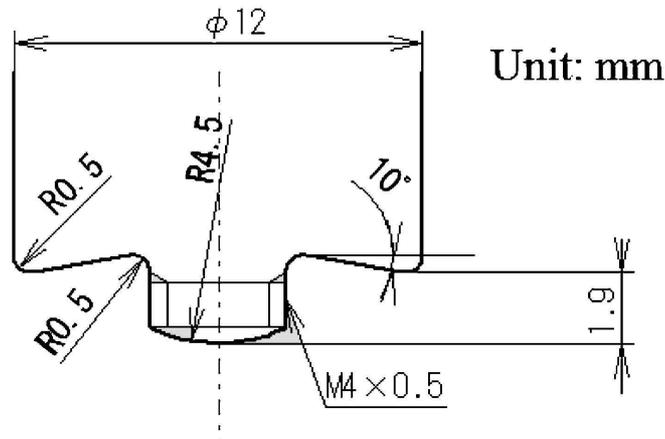
소성역의 가공경화율은 반대로 증가한다. 이러한 현상은 마찰교반접합에 의한 마찰열에 의해 고온에서의 강소성 변형에 따른 미세조직의 변화로 기인된다. ③ 동일 접합조건에서 이음부의 종방향의 인장특성값은 횡방향에서보다 일반적으로 미세조직의 차이로 인하여 크게 된다.

마찰교반접합에 있어서 발생하는 결함은 입열량에 관계되는 것이 알려져 있다. Okamura Hisanori 등⁹⁾에 의하면 입열량은 교반부의 압력, 회전속도, 솔더부 반경의 3승에 비례하여 증가하고, 또한 틀이 1회전하는 사이에 이동하는 거리, 즉 회전피치의 증가에 의해서도 입열량이 감소한다고 보고되고 있다. 그래서 적당한 입열량을 파악하는 것도 접합부 품질향상에 필요하다고 사료된다.

2-4. 알루미늄합금을 위한 틀의 제조 기술

2-4-1. 5052 알루미늄합금을 위한 틀의 제조 기술

Nobuo Hatanaka 등¹⁾은 5052알루미늄합금에 대해서 각종 접합조건에서 <그림 2>에 보는 바와 같은 틀(tool)로서, 마찰교반접합을 실시하여, 얻어진 계면의 기계적 성질에 대



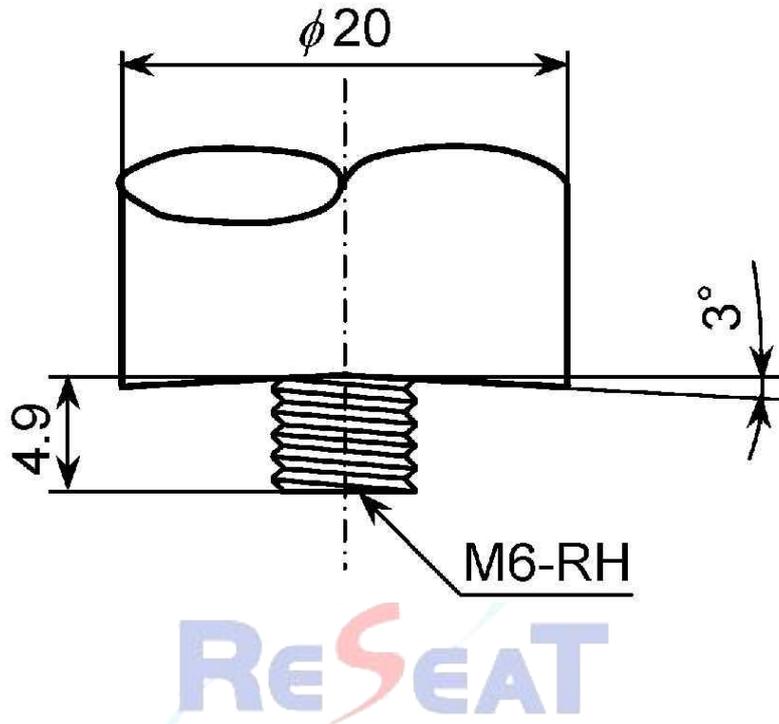
<그림 2> 마찰교반접합을 위한 틀의 형태와 치수¹⁾

해서 검토하였다. 틀재료는 SKD61, 틀형태와 치수는 <그림 2>와 같으며 솔더의 직경은 12mm, 프로브부 M4 우측 나사이며, 프로브 길이는 1.9mm이며, 솔더부는 약간 오목한 면이 되도록 10° 경사를 두었다. 접합조건은 주축 회전속도 500~2500rpm, 접합속도 100~1500mm/min로 행하였다. 주축의 전진각은 3°로 일정하게 하여 양호한 결과를 얻었다.

2-4-2. 6061 알루미늄합금을 위한 틀의 제조 기술

Takashi Yokoyama 등⁴⁾에 의하면 변위제어형 FSW기(日東制機FN-II型)에 의해 6061-T6 알루미늄합금 이음부의 제작 시에 틀의 모습을 <그림 3>에 나타내었다. 좌회전시킨 공구를 돌출시킨 2장의 모재의 접합면에 삽입 후에, 일정시간(약 30초간) 정지시켜 발생

된 마찰열에 의해 예비가열한 다음, 일정속도로 이동시켜 접합하였다. 이 때에 모재는 판두께 25mm의 일반구조용 압연강(JIS S440) 위에 지그로서 단단히 고정시키는 구조로 마찰교반접합 장치를 제작하였다.



<그림 3> 특별히 설계한 실린더형 툴의 모습⁴⁾

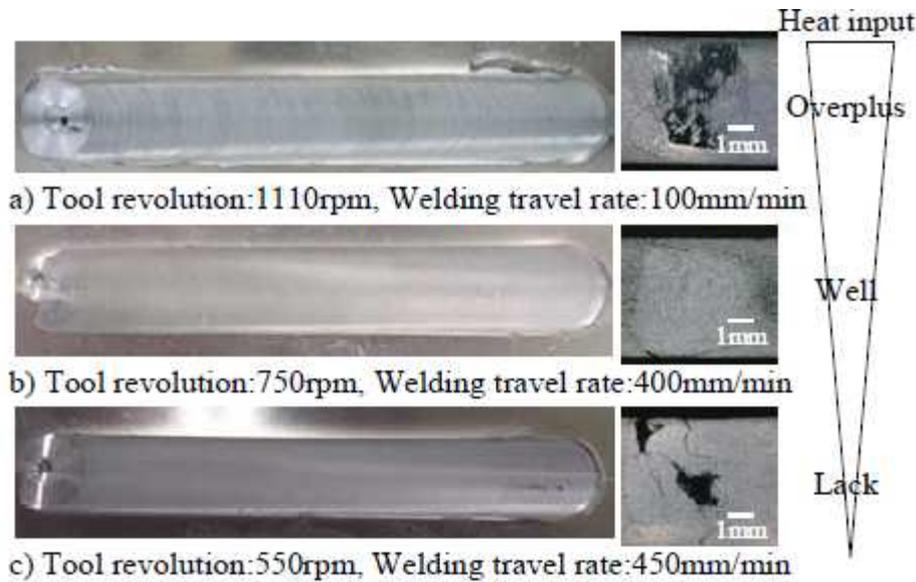
(솔더: JIS SKD61, 프로브: JIS SCM435)

3. 예열을 이용한 마찰교반접합 기술

Suzuki Riichi 등⁷⁾에 의하면, 통상의 마찰교반접합을 실시하는 전단계에서 접합재를 미리 가열함으로써 툴에 의한 입열을 보조하고, 접합속도의 증가에 따른 입열부족과 접합 시에 툴에 걸리는 부담을 저감시켜 접합속도의 향상을 도모하였다. 그래서 접합재의 소성유동을 일으키게 쉽게 하고 접합품질을 높이는 성과를 거두었다. 그러나 마찰교반접합에서 연화된 접합재에 툴을 압입 후에, 툴에 접합하기 때문에 툴의 압입시 및 툴의 진행시에는 툴뿐만 아니라 접합재에도 큰 부하가 걸릴 수 있다는 부담이 있다. 따라서 가열온도가 높으면 접합재의 연화영역이 확대되고, 접합 시에 접합재의 크게 변형될 수 있다는 우려가 있다. 그래서 접합품질을 보증할 수 있는 가열 마찰교반접합을 실현하기 위해서는 가열온도의 하한 및 상한을 조사하여, 적절한 가열온도범위에서 가열마찰교반

접합을 실시해야 한다. 접합재의 예열온도의 하한을 결정하여, 예열온도를 상승시켜 가열마찰교반접합을 실시하고 이 예열의 접합에 미치는 영향을 외관관찰, 단면관찰 및 인장시험에 의해 검토해야 한다.

Suzuki Riichi 등⁷⁾에 의하면, 톨의 회전수, 접합속도를 각각 1110rpm, 250mm/min로 일정하게 하고 300℃까지의 예열온도에서 가장 양호한 표면양상과 품질특성을 얻을 수 있었으며 350℃ 이상에서 과열로 인한 접합결함이 관찰되었다. 접합속도와 입열량의 조절은 용접부 품질에 결정적인 영향을 미치는데, <그림 4>에서 보는 바와 같이 접합속도가 400mm/min인 경우에 결함이 없는 가장 양호한 표면형태를 나타내고 있음을 알 수 있다.



<그림 4> 접합속도와 입열량에 따른 마찰교반접합 시험편의 표면 모습⁷⁾

A5052-H34재 접합에 의한 접합속도의 향상을 목표로 Suzuki Riichi 등^{6),7)}에 의해 예열을 이용하여 가열마찰교반접합을 실시한 제조조건 변화에 따른 결과는 다음과 같다.

- ① 예열온도 150℃를 이용한 가열마찰교반접합에서는 접합속도 700mm/min까지의 접합에서는 접합결함이 보이지 않고 양호한 접합이 가능하였다.
- ② 150℃의 예열에서 입열부족이 생긴 경우에, 예열온도를 올려서 외부에서 입열을 보충함으로써 양호한 접합이 가능하게 하였다. 예열온도 300℃까지는 접합속도 900mm/min까지 접합이 가능하였다.
- ③ 가열마찰교반접합에 의한 접합속도의 적절한 고속화에 의해, 열영향부의 범위를 감소시켰다.
- ④ 예열온도 150℃에서는 접합속도 600, 700mm/min에서 예열온도 300℃까지에서는 600~900mm/min의 접합속도에서 상온에서의 양호한 접합과 동등한 접합강도가 얻어졌다.
- ⑤ 가열마찰교반접합은 접합가능범위가 좁은 5000계 알루미늄재의 접합조건 범위의

확대에 유효하다.

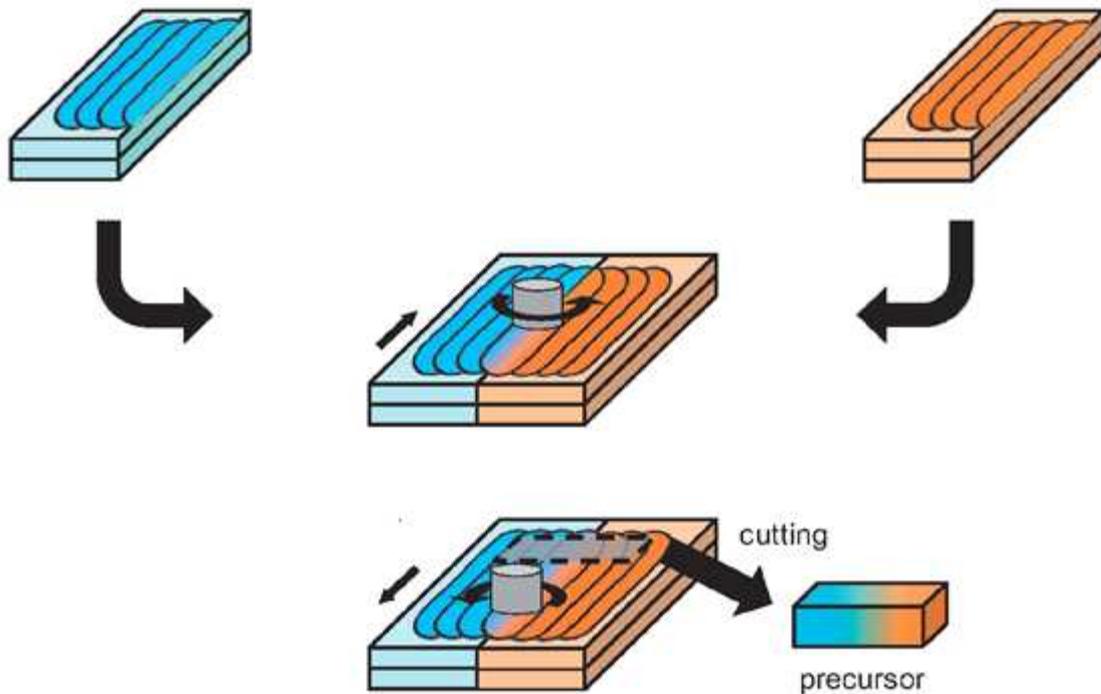
4. 마찰교반접합에 의한 경사기능/다공성 알루미늄의 제조기술

다공성 알루미늄은 경량성과 우수한 충격에너지흡수 특성을 병행하여 갖고 있는 다기능 소재이다. 자동차의 연비향상과 충돌안전성 향상의 양립이 가능한 고기능 구조용 소재로서 기대되고 있다. 다공성 알루미늄을 예를 들면, 표면은 내식성이 우수하고 내부는 고강도를 유지한 이중 특성을 가진 알루미늄합금에 의해 경사기능성을 부여하고, 이음새가 없는 구조물의 제작이 가능하여 자동차용 부재의 고기능화가 실현될 수 있을 것으로 기대된다. 다공성 알루미늄의 제조방법은 다양하게 제안되고 있는데, 그 중 하나로 전구체(precursor) 제조법이 있다. 전구체를 가열함으로써 발포제가 분해되어 가스가 발생하는데, 이것이 알루미늄 모재를 팽창시킴으로써 다공성화 한다. 전구체 방법에는 분말야금법, 압연접합법, 마찰교반접합법⁹⁾ 등이 제안되고 있다.

전구체를 이용하여 경사기능/다공성 알루미늄을 제작하기 위해서는 다음과 같은 2가지 방법이 종래부터 고려되고 있다.

- ① 전구체의 제작 시에 어떠한 방법으로 이중재료의 접합 등을 행하고, 전구체 자체의 조성성분이 경사화한 전구체를 제작하여 그 후에 발포시키는 방법.
- ② 각각 단일의 알루미늄합금으로 제작된 전구체를 미리 제작하여 그것을 함께 동일 형 내에 발포시키는 방법¹⁰⁾.

Yoshihiko Hangail 등¹¹⁾은 <그림 5>과 같이 마찰교반접합에 의해 경사조성 전구체를 제작하여, 경사기능/다공성 알루미늄의 제작하였다. 마찰교반법에 의한 A1050와 A6061에 대한 단일조성의 전구체를 제작한 후에 이것을 마찰교반접합에 의해 접합하는 방법이다. 조성성분이 서서히 변화된 경사조성 전구체를 제작한 후, 발포시킴으로써 조성성분을 서서히 변화시켜 이음새 없는 경사기능/다공성 알루미늄을 제조하였다. 마찰교반접합 시에 Hitachi Engineering Co.의 장치(SHH204-720)를 이용하였으며, 톨은 SKH51 고속도 공구강재, 솔더 직경 17mm, 프로브 직경 6mm, 프로브 길이 5mm의 나선형으로 선정하였다. 톨의 회전속도는 A1050의 경우, 2200rpm, A6061의 경우, 1000rpm으로 톨 이동속도는 100mm/min, 전진각은 3°로 하였다. 2매의 알루미늄합금판 사이에 발포제분말을 넣어, 판과 판의 접합을 행함과 동시에 발포제 분말을 알루미늄합금 중에 혼합시킨다.



<그림 5> 마찰교반접합에 의한 경사기능 전구체의 제조방법¹¹⁾

분말야금법과 압연접합법에 비해서 일반적으로 유통되고 있는 알루미늄합금판재의 이용에 의해 원재료(출발재) 코스트의 절감과 마찰교반접합기술의 적용으로 단순하게 고속 프로세스화 함으로써 생산시간의 단축을 꾀하고, 다공성 알루미늄의 저코스트화가 기대된다. 또한 단일의 조성성분을 가진 알루미늄합금에 의한 전구체(precursor)를 제작할 수 있음은 물론, 접합하는 판을 변화시키는 것만으로 용이하게 경사조성 전구체를 제작하는 것이 가능하다. 특히 마찰교반영역에 각각의 알루미늄합금이 혼합된 영역이 형성되기 때문에 알루미늄합금으로 된 전구체를 미리 제작하여 발포 시에 동일 형 내에서 발포시키는 방법에 비해서, 보다 이음새가 없는 경사기능/다공성 알루미늄을 제작할 수 있을 것으로 기대된다¹¹⁾.

5. 잔류응력 측정기술

5-1. 잔류응력 측정방법

용접구조물의 안정성과 신뢰성을 평가하기 위해서는 제조시 및 사용 중에 구조부재에 생기는 잔류응력의 상태를 정확히 파악할 필요가 있다. 특히 용접구조물에 의한 손상과 파괴의 기점이 되기 쉬운 용접부의 잔류응력을 정확히 평가하는 것은 대단히 중요한 기

술과제 중의 하나이다. 용접 잔류응력의 평가기술은 수치 시뮬레이션에 의한 방법과 실험계측에 의한 방법으로 크게 분류할 수 있으며 실험계측에 의한 방법은 다시 파괴법과 비파괴법으로 분류된다¹²⁾.

측정사례와 실적이 풍부하고 신뢰성이 높은 종래기술로서, 파괴법의 하나이고 응력이 완법(변형게이지법)이 거론되고 있지만 측정에 걸리는 수고와 비용적인 면에서 문제가 되고 있다. 또한 피측정물을 완전히 파괴해 버리기 때문에 사용 중에 구조물에의 적용이 곤란하므로, 보다 간편하고 비파괴적인 방법의 구축이 강하게 요구되고 있다⁸⁾.

비파괴법의 하나로 X선·중성자 등의 회절을 이용한 응력측정법은 최근 용접부에 적용을 목표로 실용적인 대처법도 있지만 용접부의 금속조직에 기인되는 측정정확성이 떨어질 염려가 아직 해소되지 않았으며 반드시 충분한 신뢰를 얻고 있지 않았다는 점이 현재의 상태이다. 상(phase)을 이용한다는 점에서는 거의 비파괴로 보여질 수 있는데, 준(semi) 비파괴적인 응력측정법으로서 유용할 것으로 기대된다¹²⁾.

5-2. 인텐테이션법을 이용한 응력측정법

인텐테이션법을 이용한 응력측정법은 대칭형상을 갖는 비커스 압자를 사용하기 때문에 제안되었지만 용접잔류응력분포와 같은 비등 2축인 응력장에서의 적용에는 아직 과제로 남아 있다. 그래서 최근에는 비대칭 형상을 갖는 누프(Knoop) 압자를 이용한 비등(non-equibiaxial) 2축응력장의 분리방법^{13),14)}이 제안되고 있다. 그렇지만 지금까지의 방법은 모두 응력이 존재하지 않은 상태와 존재하는 상태에서 압자를 누를 때의 하중치(혹은 관찰된 경도)의 차이를 이용한 방법이다. 따라서 용접열 사이클에 동반된 연화·경화와 사용 중의 사고 등으로 기인되는 소성손상이 생긴 부위, 혹은 기계적 성질이 규명되지 않은 실제의 구조물 등에는 적용할 수 없다. 이러한 점이 인텐테이션법을 이용한 준(semi) 비파괴 응력측정법의 적용을 목표로 한 대형 과제가 되고 있지만 Shigetaka Okano 등^{12),15)}이 최근 제안한 “비커스압자와 누프압자를 병용함으로써 무응력 하에서의 기준하중을 필요로 하지 않는 인텐테이션법에 의한 준비파괴 응력측정법”은 향후에 실제 기기에 적용과 다양한 측정대상에 적용이 확대할 것으로 기대된다.

Shigetaka Okano 등¹²⁾은 알루미늄합금의 용접에서 발생하는 용접변형과 잔류응력을 정확도가 높게 예측평가할 수 있는 기술을 구축하려는 목적으로, 무응력에서 기준하중을 필요로 하지 않는 인텐테이션법에 의한 준비파괴 응력측정법의 알루미늄합금 용접부에서 적용성을 검토한 결과는 다음과 같다.

- ① 누프압자와 비커스압자를 병용함으로써 무응력 하에서 기준하중을 필요로 하지 않는 인텐테이션법에 의한 준비파괴 응력측정법을 알루미늄합금에 적용하기 위해 응력산출에 필요한 「무응력에서의 누프압자와 비커스압자의 하중비」와 「누프압자와 비커스압자에 의한 응력과 하중변화량의 변환계수」의 2개의 정수를 실험적으로 취득하였다.
- ② 이 방법을 이용하여 알루미늄합금 용접부에서의 잔류응력분포의 측정을 실시하여, X선회절법·응력이완법에 의한 계측치와 수치시뮬레이션에 의한 계산치와 비교한

결과, 용접잔류응력분포의 전체적인 경향은 잘 일치하였으므로 인텐테이션법에 의한 응력측정법은 종래의 방법과 비교해서, 같은 정도의 정확성이 있는 것으로 확인되었다.

6. 결 론

최근 지구온난화 방지와 자원의 절감이 강하게 요구되고 있는 상황에서, 자동차, 항공기 등 수송수단의 경량화가 추진되고 있다. 경량화 대책의 일환으로 철강재료에서 알루미늄합금으로, 아울러 용융용접에서 고상용접인 마찰교반접합으로 치환되어 가고 있는 실정에 있다. 이에 대비하여 알루미늄합금에 대한 마찰교반접합 기술의 필요성이 현재 급속히 증가되어 가고 있다.

알루미늄합금의 마찰교반접합 기술을 확립하기 위해서는 우선 용접속도, 회전속도, 수직압력, 모재의 초기온도 및 급속한 냉각과 같은 다수의 작업인자에 대한 최적의 조건 설정이 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히 용접속도를 감소시키고, 회전속도를 증가시킴에 따라 입열량이 감소하게 되어 입자미세화가 이루어지기 때문에 이에 대한 제조기술확립이 중요하다고 사료된다.

또한 다공성 알루미늄은 경량성과 우수한 충격에너지흡수 특성을 모두 갖고 있는 다기능 소재이므로 자동차의 연비향상과 충돌안전성 향상의 양립이 가능한 고기능 구조용 소재로서 기대되고 있다. 다공성 알루미늄의 제조방법은 다양하게 제안되고 있는데, 전구체(precursor)를 이용하여 마찰교반접합법에 의한 제조기술의 국내 조기정착이 필요한 시점에 있다.

아울러 알루미늄합금으로 된 용접구조물의 손상과 파괴를 미리 방지하기 위하여 제조시 및 사용 중에 마찰교반접합 구조부재에 생기는 잔류응력의 상태를 정확히 파악할 필요가 있는데, 이에 대비하여 인텐테이션법을 비롯하여 최신 응력측정기술의 확립이 필요한 시점이라고 생각된다.

<참고문헌>

1. Nobuo Hatanaka et al. "Mechanical properties of friction stir welded joints of 5052 aluminum alloy" Journal of Light Metal Welding 52(12) (2014) 463-469
2. Eun Hye Kim, Kazuhiro Nakata, Kuk Hyun Song, "Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap-Jointed A6061/HT590 Alloys" Materials Transactions, 57(5) (2016) 686-690
3. 社団法人溶接学会編：摩擦攪拌接合-FSW のすべて-，産報出版（2006）. p.18
4. H. J. Liu; H. Fujii; M. Maeda; K. Nogi. "Mechanical properties of friction stir welded joints of 1050-H24 aluminum alloy", Science and Technology of Welding and Joining,

- 8(6) (2003) 450-454
5. Saad Ahmed Khodir et al. "Control of Hardness Distribution in Friction Stir Welded AA2024-T3 Aluminum Alloy" *Materials Transactions*, 47(6) (2006) 1560-1567
 6. Suzuki Riichi et al. "Improvement of Welding Rate in Aluminum Alloy Using Friction Stir Welding with Heating" *Quarterly Journal of the Japan Welding Society* 25(1) (2007) 135-139
 7. Suzuki Riichi et al., "On Pre-heating Effect for Friction Stir Welding of Aluminum Alloy", *Quarterly Journal of The Japan Welding Society* 24(3) (2006) 281-286
 8. Okamura Hisanori, Aota Kinya, Takai Hideo and Ezumi Masakuni: "Problems for Application and Situation of Development in Friction Stir Welding", *Journal of The Japan Welding Society*, 72(5) (2003) 436-444
 9. Y. Hangai and T. Utsunomiya: *Metall. Mater. Trans. A* 40 (2009) 1284-1287
 10. M. Kobashi, R. Sato and N. Kanetake: *Mater. Trans.* 47 (2006) 2178-2182
 11. Yoshihiko Hangai et al. "Manufacturing of Functionally Graded Porous Aluminum of Dissimilar Aluminum Alloy" *J. Japan Inst. Metals*, 74(4) (2010) 285-287
 12. Shigetaka Okano and Masahito Mochizuki et al. "Semi-nondestructive Measurement of Weld Residual Stress Distribution using Indentation Technique without Reference Load under Non-stressed State according to Measurement Positions, 53(10) *Journal of Light Metal Welding* (2015) 408-415
 13. J. H. Han, J. S. Lee, Y. H. Lee, M. J. Choi, G. Lee, K. H. Kim and D. Kwon "Residual Stress Estimation with Indentation of Stress Directionality Using Instrumented Indentation Technique", *Key Engineering Materials*, 345-346 (2007), 1125-1128
 14. M. J. Choi, Y. C. Kim, W. S. Song and D. Kwon. "Nondestructive Measurement of Non-Equibiaxial Welding Residual Stresses using Instrumented Indentation Technique with Knoop Indenter Residual Stress", *Proceedings of the 2010 ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, (2010), PVP2010-25689.
 15. 岡野成威, 望月正人, "無応力下での基準硬さに依存しない インデンテーション法による非等二軸残留応力場の準非破壊 計測法の提案", *日本機械学会論文集*, 80-820 (2014) SMM0355

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.