



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

비철 경량 구조 소재 알루미늄 합금에 대한
통전고상 점접합 적용 가능성에 관한 연구

A Study on the feasibility of electrically assisted solid-
state spot joining for non-ferrous lightweight aluminum
alloys

울산대학교 대학원
기계자동차공학과
최현석

비철 경량 구조 소재 알루미늄 합금에 대한
통전고상 점접합 적용 가능성에 관한 연구

지도교수 홍성태

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2024 년 02 월

울산대학교 대학원
기계자동차공학과
최현석

최현석의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원장 천두만  (인)

심사위원 홍성태  (인)

심사위원 이진우  (인)

울산대학교 대학원

2024년 02월

국문 요약

비철 경량 구조 소재 알루미늄 합금에 대한 통전고상 점접합 적용 가능성에 관한 연구

울산대학교 일반대학원
기계자동차공학과
최 현 석

전세계적으로 지구온난화를 방지하기 위한 탄소 중립에 발맞추기 위해서 연비 및 배기가스 배출 규제 등을 시행하고 있으며, 시간이 지날수록 해당 규제는 강화되고 있는 추세다. 이러한 규제는 특히 모빌리티 산업에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 자동차 산업에 영향을 끼치고 있다. 그렇기 때문에 차량 연비를 증가시키기 위해서 차체 경량화 기술에 대한 관심이 빠르게 대두되고 있으며 소재 경량화가 주요 경량화 방식으로 고려되고 있다. 이를 통해서 환경 규제 기준을 만족시킬 수 있으며, 차량 성능 향상도 도모할 수 있다. 자동차 산업계에서는 소재 경량화를 위해서 기존 차체 구조 소재로 사용되고 있는 철강 외에도 비철 금속 소재인 알루미늄 합금을 적극적으로 고려하고 있다. 이러한 이유로 비철 금속 구조 소재의 접합 기술 개발에 대한 관심이 증대되고 있는 상황이다. 기존 차체 구조 접합에 활용되는 저항 점용접 (resistance spot welding) 기술은 알루미늄 합금 접합에도 사용되지만 용융을 통한 접합 방식으로 인해서 열영향부 (heat affected zone)의 기계적 강도 하락 등, 접합용 소재 활용에 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 알루미늄 합금 소재에 대한 통전고상 점접합 (electrically assisted solid-state spot joining, EASSJ) 기술의 적용 가능성에 대해 연구를

수행하였다. 통전고상 점접합은 단계적 전류인가 및 압축하중을 동시에 적용하여 소성변형에 의한 접합 계면 내 원자 간 확산현상을 통한 접합기술이며, 이는 용융점보다 낮은 온도에서 접합 대상 소재 접합이 수행된다. 통전고상 점접합 기술의 적용 가능성을 위해 메인 전류와 추가 전류로 각 단계를 구분하여 접합 조건을 설정하였으며, 접합부의 고상접합부 형성 여부를 판단하기 위해 nugget pull-out 파단 모드를 판단 기준으로 설정하였고 접합부의 기계적 특성 평가를 위해서 전단 인장시험 및 미세구조 분석을 수행하였다. 이를 통해서 저항 점용접에서 얻을 수 있는 접합 지름 (5.65 mm) 기준 대비 접합부의 전단 인장강도 (kN)는 약 43 % 증가하였다. 해당 연구 결과를 기반으로 알루미늄 합금 소재의 통전고상 점접합 기술이 기존 차체 소재 접합에 활용되고 있는 저항 점용접에서 발생하는 문제점을 극복할 수 있고 향상된 기계적 강도를 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다.

차 례

국문 요약	i
차 례	iii
List of Tables	iv
List of Figures	v
I. 서론	- 1 -
1.1 연구 배경	- 1 -
1.2 고상접합 (solid-state joining)	- 4 -
1.3 통전고상접합 (electrically assisted pressure joining)	- 9 -
II. 실험	- 11 -
2.1 통전고상 점접합 (electrically assisted solid-state spot joining)	- 11 -
III. 실험결과	- 18 -
3.1 이종소재 알루미늄 통전고상 점접합	- 18 -
3.2 통전고상 점접합부의 기계적 특성	- 23 -
3.3 통전고상 점접합부의 미세조직 분석 및 경도 측정	- 26 -
IV. 결론	- 32 -
References	- 34 -
영문요약	- 34 -

List of Tables

Table 1. The chemical constituents of aluminum alloy AA6451	11
Table 2. The chemical constituents of aluminum alloy AA6014	11
Table 3. Common parameters	15
Table 4. EASSJ experiment set-up parameter sets.....	15

List of Figures

Fig. 1 Schematic of resistance spot welding process [11].....	2
Fig. 2 Typical macro-and microstructures of the AA6061 rsw joints [18].....	3
Fig. 3 Stages of diffusion welding [19].....	5
Fig. 4 Surface detail of diffusion welded joint [19].....	5
Fig. 5 Example of RFW and LFW [21,22]	6
Fig. 6 a) Actual experimental set-up and (b) a schematic of clamping parts [26]	7
Fig. 7 Schematic drawing of friction stir welding	8
Fig. 8 Schematic of configuration of the joints.....	11
Fig. 9 Schematic of the experiment set-up of EASSJ process	12
Fig. 10 The experimental set-up of EASSJ process.....	13
Fig. 11 Dimension and shape of electrode	14
Fig. 12 Schematic of the electric current and displacement during EASSJ process	15
Fig. 13 Schematic of lap shear tensile test.....	16
Fig. 14 Failure modes after lap shear tensile test	16
Fig. 15 The temperature distribution for increase (a) I_M (test set: T) and (b) I_F (test set: FT)	19
Fig. 16 Joint failure mode for test sets; T and FT	20
Fig. 17 Joint failure mode for MT (I_M : 4.5 ~ 4.9 kA + I_F : 3.25 kA).....	21
Fig. 18 The temperature distribution for test set MT	22
Fig. 19 The Shear tensile test on universal testing machine	23
Fig. 20 (a) Shear strength, (b) joint length and (c) shear stress of joint on test set MT	24-25
Fig. 21 OM analysis of joint cross section: (a) MT-3, (b) MT-4, (c) MT-5	26-27
Fig. 22 EBSD results; (a) IPF maps and (b) KAM maps of AA6451 and AA6014	28
Fig. 23 EBSD results; (a) IPF maps and (b) KAM maps of joint (MT-3, MT-5)	30
Fig. 24 Measurement location of microhardness (Vickers) in joint.....	31
Fig. 25 Microhardness (Vickers) comparison in joint (a) MT-3 & (b) MT-5.....	31

I. 서론

1.1 연구 배경전세계적으로 지구온난화를 방지하기 위한 탄소 중립에 발맞추기 위해서, 각 국가에서 제정된 환경 규제인 배기가스 배출 규제 및 연비 제한 규제 정책은 나날이 강화되고 있는 실정이다. 이러한 정책 변화에 대비하기 위해서 차량 모빌리티 산업계에서는 연비 규제에 대한 대안으로, 기존 내연기관 차량의 연비 향상을 위해서 친환경 연료를 사용하거나 차체 경량화 기술에 대해 지대한 관심을 쏟고 있는 상황이다. 차체 경량화를 위한 방식으로 구조최적설계, 제작 공법 개선, 경량 구조 소재 적용 등이 가능하며, 이를 통해서 제동거리, 가속성능, 내구 수명 및 배기가스 배출 측면에서 다양한 장점을 확보할 수 있다. 그 중 하나의 방법인 경량 구조 소재 적용 방식은 기존 생산되고 있는 대부분의 상용 차량에 적용 가능하고 필수적인 차체 경량화 요구에 용이하게 대응할 수 있다 [1,2]. 이러한 이유로 인해 전세계적인 환경 규제에 발맞추기 위해서 소재 경량화는 가장 효율적인 방식이다. 경량화를 목적으로 종래 차량 제조 소재인 철강의 활용을 위해 고장력강 및 초고장력강은 널리 적용되고 있는 상황이나 [3-5], 7.8 g/cm^3 밀도를 가지는 철강 소재는 다른 금속 소재에 비해 여전히 무거운 소재이므로 차체 경량화 측면에서 어려움이 존재한다. 친환경 자동차 수요의 증가에 따라 철강 소재 기반자동차 구조용 소재의 대안으로, 다양한 경량 금속 소재 중에 주로 활용되고 있는 비철 경량 금속 소재이자 상대적으로 작은 2.7 g/cm^3 밀도를 가지는 소재인 알루미늄 합금 소재가 고려되고 있다. 또한, 열전도성, 전기전도성 및 높은 내부식성과 상대적으로 높은 기계적 강도 등 다양한 특성을 보유하고 있는 매력적인 소재로 꼽힌다. 알루미늄 합금은 합금 조성에 따라 자동차 산업에서 다양한 어플리케이션에 활용될 수 있다 [6-9].

Body In White (BIW)는 기존 완성차 무게의 최대 30 %에 달하는 무게 비중을 차지하기 때문에 차체 판재와 샤시 그리고 서스펜스 등의 알루미늄 합금 소재 비율 증가를 통한 경량화 가능성이 가장 크다 [10]. 이러한 이유로 완성차 업체들의 알루미늄 합금 소재의 차체 내 적용 가능성 증가로 인해 비철 금속 구조 소재의 접합 기술 개발에 대한 관심이

증대되고 있다.

저항 점용접 (resistance spot welding, RSW)은 자동차 제조 산업에서 철강은 물론이고, 알루미늄 합금 소재를 접합하기 위해서 주로 사용되는 일반적인 접합 공정이다 (Fig. 1). 저항 점용접은 짧은 공정 시간동안 저항가열을 통해 모재 (base material, BM) 간 접촉 계면을 급속 가열하고 용융점까지 온도를 상승시켜 너겟 (nugget)을 형성한다 [11,12]. 그래서 저항 점용접으로 접합된 접합부의 품질은 주요 공정 변수인 용접 전류에 큰 영향을 받으며, 인가된 전류 강도 값이 클수록 용접부의 전단 강도는 상승하는 경향을 보인다 [13].

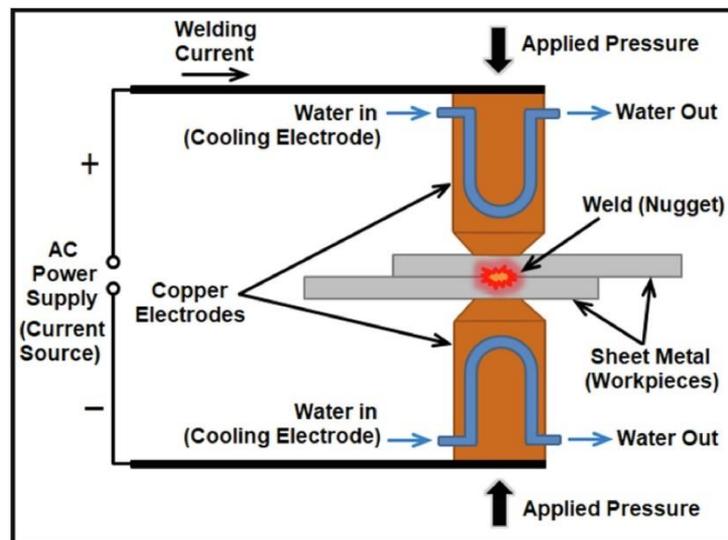


Fig. 1. Schematic of resistance spot welding process [11]

그러나, 알루미늄 합금의 저항 점용접은 소재의 용융 및 고체화를 통해서 nugget을 형성하는 과정 중에 nugget 내부에 기공 및 크랙이 발생할 가능성이 높다 [14,15]. 또한, 짧은 접합 시간에도 불구하고 알루미늄의 높은 열전도성으로 인해서 nugget 주변부의 열영향부 (heat affected zone, HAZ) 확산에 기여하게 되고 (Fig. 2), 그에 따라 모재에 비해

접합부의 기계적 특성이 약화된다는 한계점이 존재한다 [16,17].

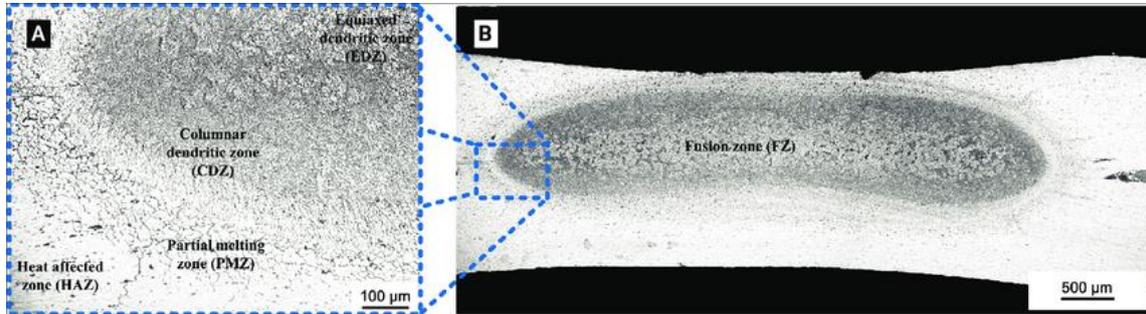


Fig. 2. Typical macro- and microstructures of the AA6061 rsw joints [18]

저항 점용접은 박판 접합 및 대량 생산 측면에서는 적합하나, 명확한 한계점과 용융접합의 가열방식으로 인해서 이종소재 접합 어려움 (예를 들면 용융점 차이가 큰 이종 재료, 열전도가 큰 재료 및 전기적 저항이 작아 저항발열량이 적은 재료) 등 문제점을 피할 수 없다. 그러므로, 친환경 자동차 산업에서 고려되는 다양한 이종금속 소재 접합에 대한 점차 증가하는 기술 수요에 대응하기 위해서 보다 향상된 접합 기술이 요구되었다. 이러한 저항 점용접의 어려움을 보완하고 극복하기 위한 대안으로 고상접합 기술이 활용될 수 있다.

1.2 고상접합 (solid-state joining)

고상접합은 일반적으로 용융점 이하의 고온에서 발생시킨 소성변형에 의한 소재 접합 과정으로, 기존 용융접합의 대안으로 고려된다. 고상접합은 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 고체 상태에서 소재 접합 (열영향부 최소화)
- 모재와 유사한 기계적 성질을 가진 접합부
- 미세구조 결함 (기공, 비금속 내포, 합금 원소 분리) 없음
- 소모성 재료 (filler, fluxes) 필요 없음
- 높은 에너지 효율
- 접합 공정 변수 제어 용이
- 이종소재 접합 가능
- 접합 환경 양호 (flash 및 유독 가스 등 발생 없음)

또한, 고체 상태에서 접합 공정이 진행되지만 용융점 이하의 고온 상태에 얻을 수 있는 접합 소재의 유동 응력 감소효과로 인해서 소성변형은 낮은 하중에서도 발생하게 된다. 접합 소재의 소성변형이 발생함으로써 접합 계면에서의 산화층을 파괴시키고 계면 부근에서 모재 내에 존재하는 원자 간 확산현상에 의한 결합 및 접합이 이루어지게 된다 [19]. 이로 인해 액체 상의 형성 없이도 고상접합부가 형성된다 [20].

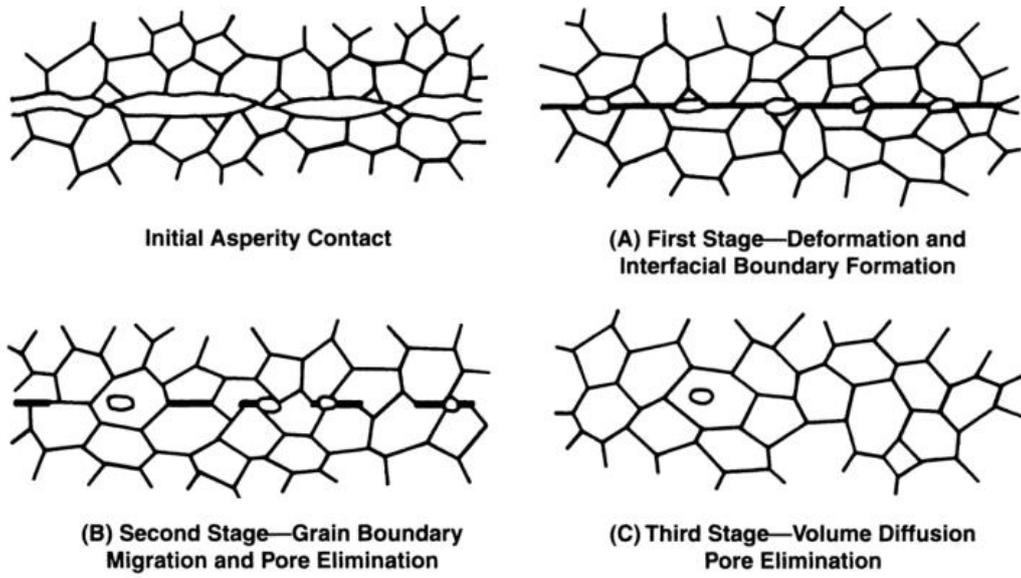


Fig. 3. Stages of diffusion welding [19]

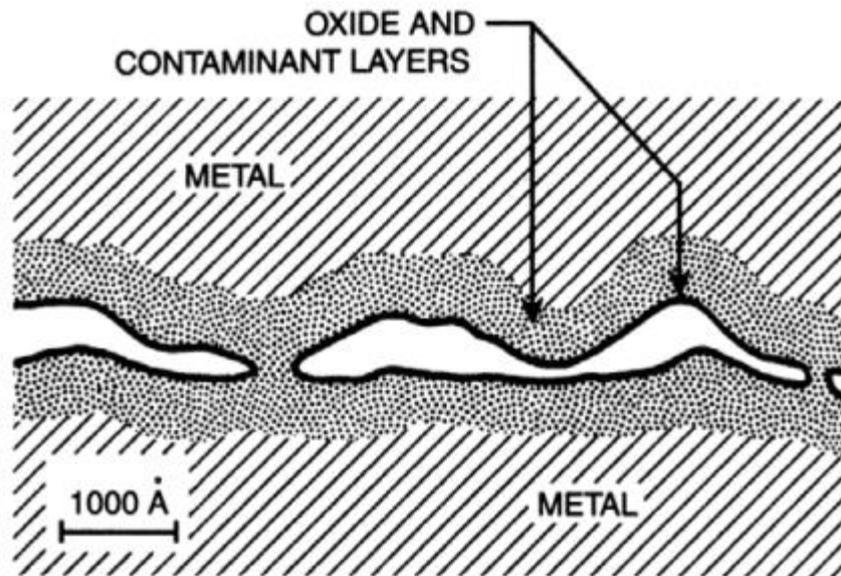


Fig. 4. Surface detail of diffusion welded joint [19]

고상접합의 예로 마찰접합 (friction welding, FW), 마찰교반접합 (friction stir welding, FSW), 초음파접합 (ultrasonic welding) 등이 있다.

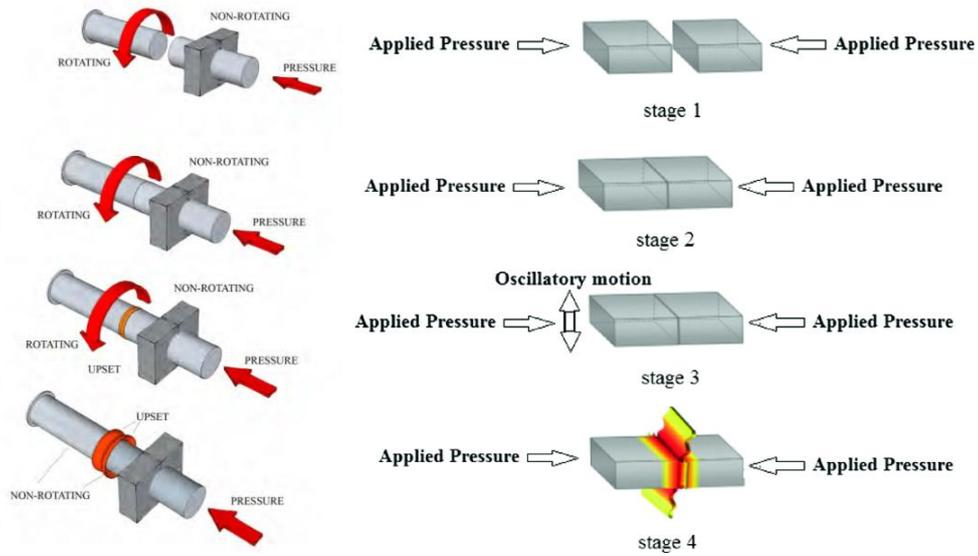


Fig. 5. Example of RFW and LFW [21,22]

마찰접합은 크게 rotation friction welding (RFW), linear friction welding (LFW)으로 구분된다. 마찰접합은 마찰 용접기를 사용하여 한 부분은 고정하고, 다른 부분은 고속으로 회전 및 진동을 발생시켜 생성되는 마찰열을 통해 용융점 이하의 일정 온도에 도달하게 되고 맞닿은 방향 (압축방향)의 가압에 의해 flash 혹은 upset을 생성하면서 소재가 접합되는 방식이다 (Fig. 5).

마찰용접의 특징은 고강도 접합을 가능하게하고 비철 금속 소재간 이종소재 접합도 용이하다. 또한 높은 정밀도와 CO₂ 배출량이 낮기 때문에 친환경적인 기술이면서, 기존의 용융접합에서 발생하는 문제점 중 하나인 접합부 내부에 기포가 생성되는 결함이 마찰용접에서는 전혀 발생하지 않는다. 이러한 기술적인 강점으로 인해서 다양한 소재 접합 및 여러 산업 분야에서 활용되고 있다 [23,24].

Muralimohan [25] 등은 이종금속 소재 조합인 알루미늄-구리 합금에 대해서 연속 구동 마찰용접 방식을 연구하였다. 연속 구동 마찰용접 방식을 통해 제작된 접합부의 인장강도는 알루미늄 합금 모재보다 높았고 접합부 경계면에서 최대 경도 값을 얻을 수

있었다. Kang [26] 등은 이종금속 파이프의 마찰보조 접합을 위해서 기존 마찰접합 기기 형태가 아닌 맨드릴을 활용한 접합 방식을 사용하였다. 맨드릴을 활용하여 파이프를 회전시키고 직선운동을 보조하여 구리와 알루미늄의 접합을 연구하였다 (Fig. 6). 접합부의 기계적 특성과 미세구조는 제안된 접합 방식을 통해서 크게 개선되었고 접합부 계면에서 눈에 띄는 결함 없이 매우 얇은 금속간 화합물 (intermetallic compounds, IMC)이 형성되었다.

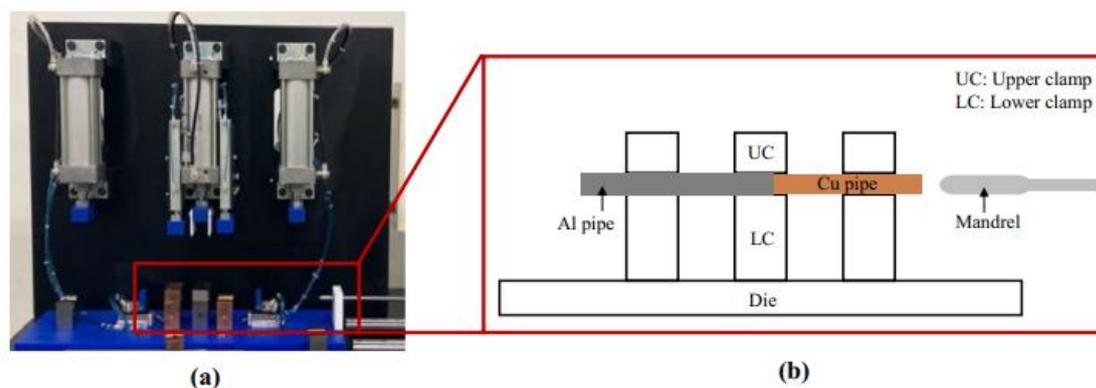


Fig. 6. (a) Actual experimental set-up and (b) a schematic of clamping parts [26]

마찰교반접합은 소재-소재 간 마찰열을 이용하는 마찰접합과 유사한 원리를 기반으로 접합하는 것이 아닌, 소재-공구 간 마찰열을 통해 소재의 유동 응력을 완화시키고 소성변형을 가하면서 고상접합을 수행하는 접합 방식이다. Figure. 7는 마찰교반접합 공정의 개략도이다.

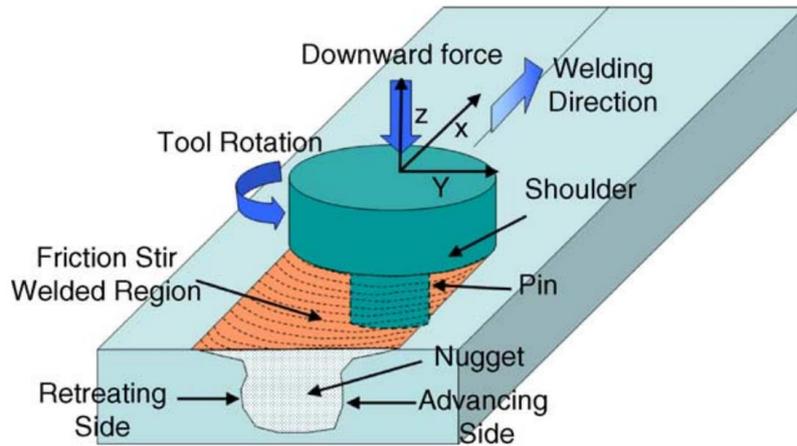


Fig. 7. Schematic drawing of friction stir welding [27]

마찰교반접합은 소재-공구 간 마찰열을 활용하기 때문에 공구의 수명 및 기계적 강도가 상당히 중요하게 여겨진다. 또한, 주요 공정 변수로 공구의 디자인과 소재와의 각도 및 공구의 회전속도, 이동속도 등 고려해야하는 부분이 상당히 많다. 공구가 소재 접합면을 따라 이동하면서 접합이 수행되기 때문에, 접합부 주변으로 열영향부 (heat affected zone, HAZ) 외에도 열/기계적 영향부 (thermal-mechanically affected zone, TMAZ) 포함 4가지 영역으로 구분하여 정의된다.

마찰접합, 마찰교반접합은 이종소재 접합에 활용하기 용이하고 여러 장점을 보유하고 있다. 그러나, 회전 및 진동에 의한 마찰열을 열원으로 사용하기 때문에 모터 및 브레이크와 같은 복잡하고 값비싼 설비 시스템이 필수적으로 요구된다 [28,29].

마찰접합과 기존 용융접합의 결점을 극복하고 다양한 이종금속 소재 접합 수요에 대응하기 위해서 저항 점용접과 유사한 가열방식을 사용하는 통전고상접합 (electrically assisted pressure joining, EAPJ)이 자리를 대체할 수 있다.

1.3 통전고상접합 (electrically assisted pressure joining)

통전고상접합은 전류인가 방식을 통해서 전류에 의한 비열효과 (athermal effect) [30-31]에 의한 전류 유기 키네틱 향상 효과 (electric current-induced kinetic enhancement effect) [36-38]를 기반으로 접합을 수행한다. 이는 열에 의한 유동 응력 감소효과보다 훨씬 큰 감소 효과를 야기한다. 또한, 소재 내 전위 (dislocation)가 결정립 경계 (grain boundary)에 축적되어있는 경우, 전류 흐름이 전위 풀림 현상을 일으켜 발생한다. 통전고상접합 방식을 활용하는 lap joining 및 bulk joining을 통해 이종금속 소재 및 clad 소재, Ti 및 고엔트로피 합금 등 여러 소재 접합 연구가 진행되고 있다.

Zhang [32] 등은 알루미늄과 스틸 간의 이종소재 접합에 대한 lap joining을 수행하였다. 펄스 전류를 활용하여 전류인가를 진행하였고 전류 밀도의 증가에 따라 계면에서의 전단 인장강도가 증가하는 양상을 확인하였다. Nguyen [33] 등은 배터리 케이스에 적용되는 Al-clad-Al 소재의 통전고상접합 가능성을 연구하였다. 통전고상접합 접합 계면은 기존 용융접합에서 발생하는 nugget 및 열영향부의 경도 감소 문제와 달리 전류로 인한 원자간 확산현상과 소성변형에 의한 가공 경화 현상들을 통해서 경도가 향상되는 결과를 발표하였다. Jo [34] 등은 고엔트로피 합금에 대한 통전고상접합 적용 가능성에 평가하였고 통전고상접합으로 접합할 시, 기계적 물성치가 향상되고 기존 고엔트로피 합금의 용융접합에서 발생하는 문제점을 극복할 수 있음을 확인하였다.

위에서 서술하였듯, 고상접합은 알루미늄 합금 소재에 대한 용융접합의 대안이 될 수 있으며, 그 중 저항 점용접과 유사한 소재 접합 원리를 활용하는 통전고상접합은 이종소재 접합에 많은 연구가 되고 있다. 연구 결과에서는 통전고상접합의 적용 가능성에 대해 긍정적인 부분이 많음을 알 수 있다. 따라서, 저항 점용접에서 발생하는 문제점들을 극복하고 동일한 공정을 대체하기 위해서는 통전고상 점접합이 고려될 수 있다.

통전고상 점접합은 접촉 계면에서의 국부적인 가열이 수반되고, 기존 고상접합

기술에서 필요한 복잡한 시스템 없이 고상접합부를 형성할 수 있다. 그 결과, 발열량에 따른 접합 대상 소재의 열적 영향을 최소화하고 공정 시간을 상당히 줄일 수 있다. 또한, 고체 상에서 접합부가 형성되어 모재와 유사한 기계적 특성을 유지할 수 있다. 따라서 통전고상 점접합 기술을 구현하는 것은 상당히 간단하며 에너지소비 측면에서 효율적이고 저항 점용접의 단점을 보완할 수 있다.

본 연구에서는 비철 경량 소재인 이종 알루미늄 합금의 통전고상 점접합 적용 가능성 평가를 위한 실험을 수행하였으며, 접합부 파단 모드에 따라, 알루미늄 합금의 고상접합부 형성 여부를 판단하였다. 기계적 시험과 미세구조 분석을 통해 접합부의 소재 특성을 평가하였다.

II. 실험

2.1 통전고상 점접합 (electrically assisted solid-state spot joining)

본 연구에서는 차량 구조체에 사용되는 이중 알루미늄 6000 계열 (Al-Si-Mg계)인 AA6014 와 AA6451 합금 판재를 사용하였다. 소재의 두께는 각 2 mm, 폭 30 mm 그리고 길이 100 mm이다. 소재에 대한 화학 조성은 각각 Table 1에 명시되어있다. 통전고상 점접합은 기존 용융접합 기술인 저항 점용접과 유사한 방식으로 구성되어있으며, 동일한 접합 기기 구조 형태로도 고상접합부를 형성할 수 있다 (Fig. 8).

Table 1. The chemical constituents of aluminum alloy AA6451 (in wt%)

Elements	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	V	Zn
AA6451	Bal.	0.1	0.4	0.4	0.8	0.4	1	-	0.1	0.15

Table 2. The chemical constituents of aluminum alloy AA6014 (in wt%)

Elements	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	V	Zn
AA6014	Bal.	0.2	0.25	0.35	0.8	0.2	0.6	0.1	0.2	0.1

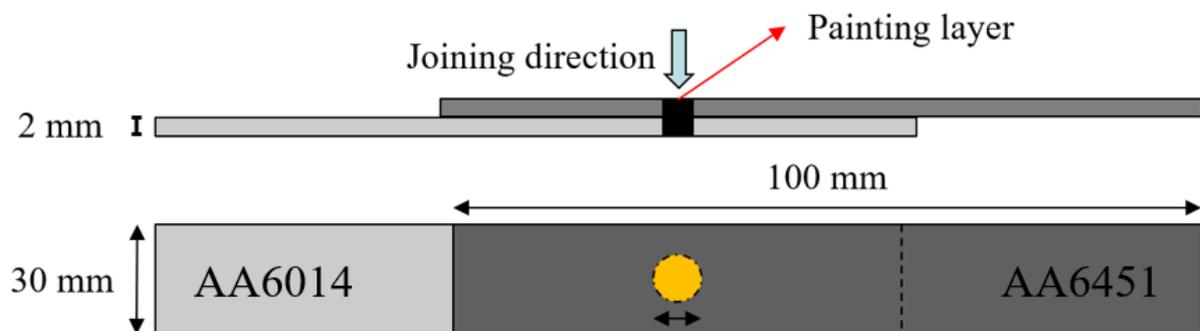


Fig. 8. Schematic of configuration of the joints

통전고상 점접합 실험은 data acquisition (DAQ)가 내장되어있는 서보 프레스 기계 (servo-press machine) (DTU-800SP, Daekyoung, South Korea)와 DC 전류 발전기 (VADAL SP-1000U, Hyosung, South Korea)를 사용하여 수행되었다. 짧은 시간동안 접합 대상 계면에서 발생하는 저항가열을 통한 급속 가열을 위해서 인가되는 전류와 확산접합을 위한 변형량은 접합 공정 시간 전체에 걸쳐서 동시에 적용된다. 압축하중 및 전류인가를 동시에 입력시키기 위해서 접합 공정 이전에 DC 전류인가 조건을 프로그래밍을 통해 설정하였다. Servo-press 시스템 내에서 절연을 위해서 베이클라이트 (bakelite)로 제작된 절연체를 압축하중 및 전류인가 역할로 사용되는 편치 검 전극의 아래에 삽입하였다 (Fig. 9, 10).

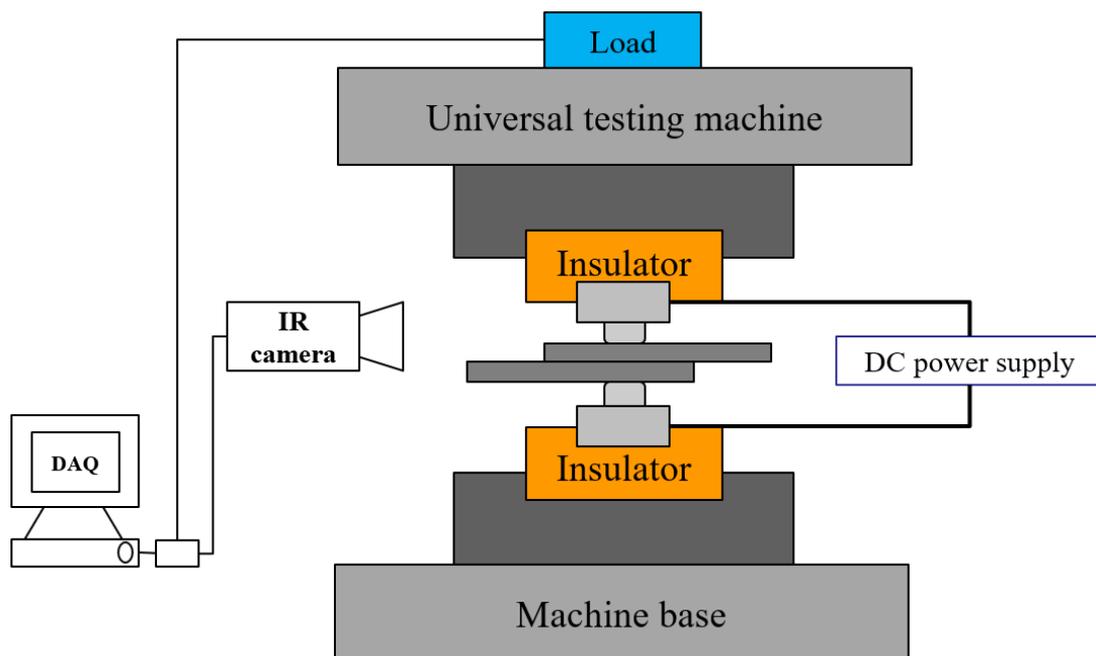


Fig. 9. Schematic of the experiment set-up of EASSJ process

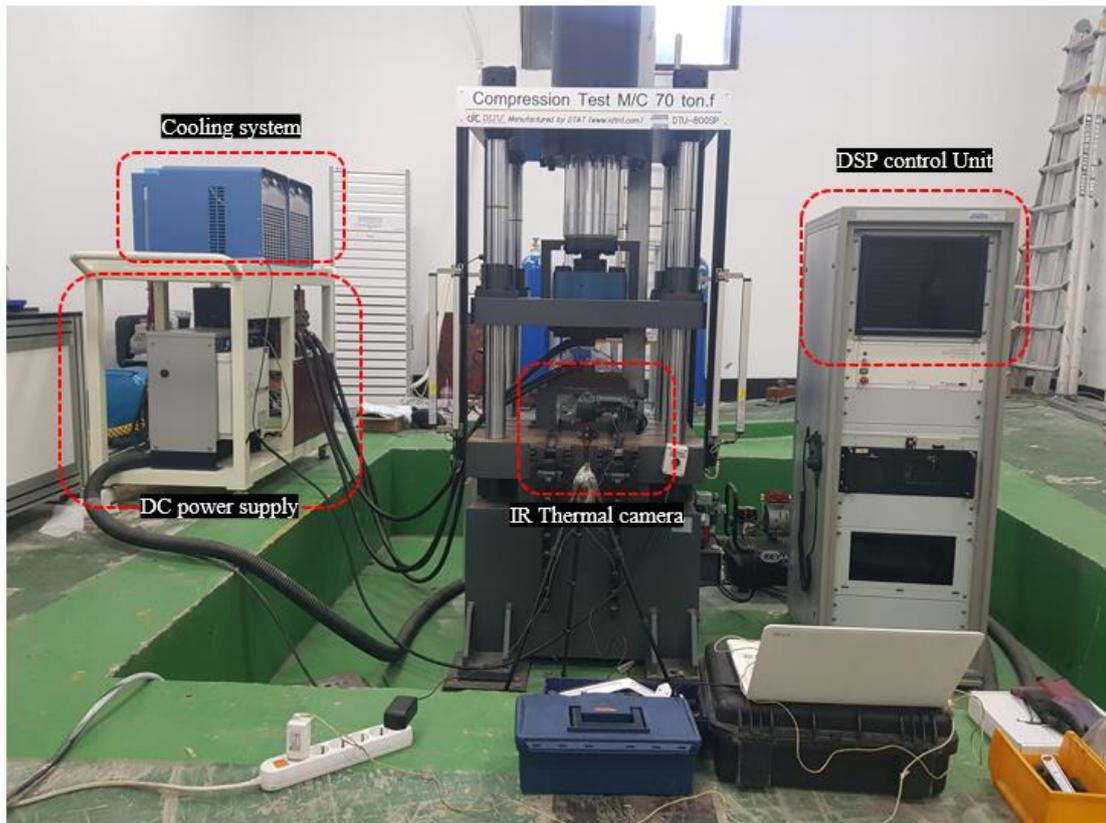


Fig. 10. The experimental set-up of EASSJ process

접합 대상 소재 측면부에는 흑체 스프레이를 도포한 후에 접합 계면 온도를 측정하기 위해서 적외선 카메라 (FLIR-T440, FLIR Systems, Wilsonville, USA)을 사용하였다. 일반적으로 물질 고유 방사율 차이로 인한 적외선 카메라가 기록하는 온도 데이터의 오류가 발생할 수 있다. 그래서 측정 오류를 최소화하고자 흑체에 가까운 일정한 방사율 값 (emissivity: 0.9)을 유지하기 위해서 흑체 스프레이를 사용하였다.

실험은 균일한 형상 구조의 접합부를 형성하고 일정한 50 %의 두께 감소율을 확보하기 위해 일정한 소성변형량을 설정하였다. 이를 위해 변위 제어 모드 (displacement control mode)로 수행되었으며, 압축 소성변형량은 소재 최소 두께와 동일하게 설정되었다. 또한, 초기 가압력은 접합 대상 소재 정렬, 소재가 포함된 전류 회로 생성 및 전극-소재 간 일정한 접촉 저항 구현을 위하여 설정되었다.

사용된 펀치 겸 전극은 SKD51로 제작되었고 접합부 내 압입 지름 6 mm를 확보하기 위한 선단경 d: 6 mm의 접촉면 및 전극 내 저항 발열 감소를 위한 측면 R: 20 mm의 전극 형상을 사용하였다. 해당 펀치 겸 전극은 가압축과 전류인가 역할을 동시에 수행한다 (Fig. 11).

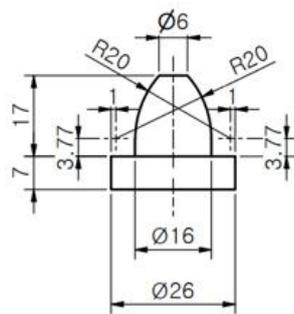


Fig. 11. Dimension and shape of electrode

이중 알루미늄 합금 소재인 A6014 와 A6451의 통전고상 점접합 적용 가능성 검증을 목표로 메인 전류 (I_M) & 추가 전류 (I_F) 조건 별 접합 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 펀치 겸 전극은 냉각 채널 방식을 택하지 않았기 때문에 접합 소재와의 접촉 계면에서 발생하는 열로 인해서 전극 표면에 알루미늄 합금 소재의 부착 현상이 발생할 가능성이 존재한다. 해당 이유로 인하여 고전류 영역에서는 펀치 겸 전극 표면 상태를 확인하고 드레싱을 진행한 후에 실험을 지속하였다.

실험에 사용된 접합 조건은 Table 2,3에 명시되었으며, 실험은 각 접합 조건 별로 수행되었으며, 접합부의 특성 평가를 위해 단면 분석 및 전단 인장시험을 수행하였다. 공정 초기에 접합부의 급격한 온도 상승을 위해서 I_M 이 인가되고 접합 계면 내 원자 간 확산현상을 강화하기 위한 접합부의 온도 유지를 위해서 I_M 에 이어서 I_F 를 적용하였다 (Fig. 12).

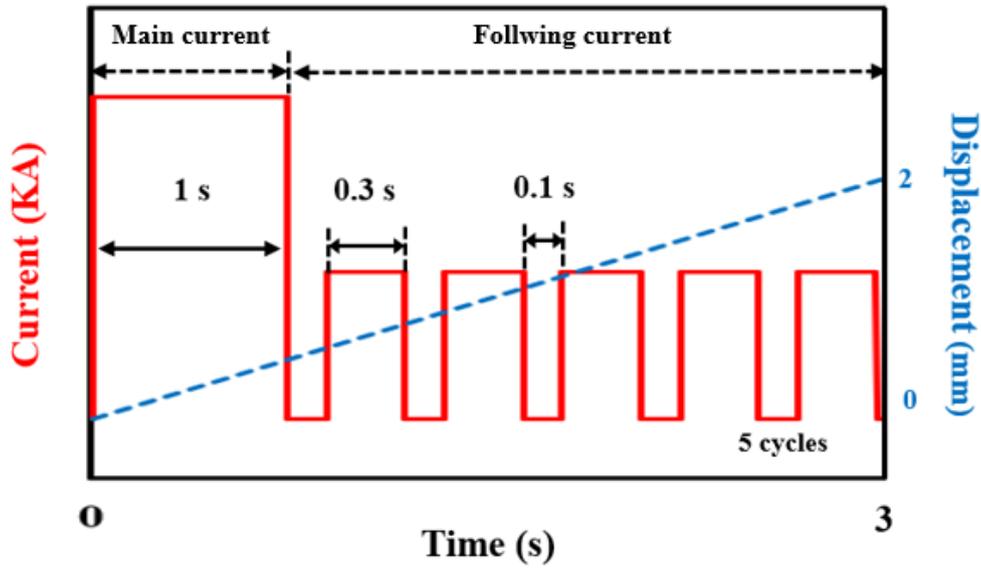


Fig. 12. Schematic of the electric current and displacement during EASSJ process

Table 3. Common parameters

Displacement (mm)	Process time (s)	Pre-load (kN)
2	3	4

Table 4. EASSJ experiment set-up parameters

Test sets	Test label	Main current (I_M)				Following current (I_F)			Times
		Current intensity (kA)	Current density* (A/mm ²)	Duration (s)	Interval (s)	Current intensity (kA)	Current density* (A/mm ²)	Duration (s)	
T	T-1	3	106.1	1	0.1	2.5	88.4	0.3	5
	T-2	3.5	123.8						
	T-3	4	141.5						
	T-4	4.5	159.1						
FT	FT-1	4.5	159.1	1	0.1	2.5	88.4	0.3	5
	FT-2					2.75	97.2		
	FT-3					3	106.1		
	FT-4					3.25	114.9		
MT	MT-1	4.5	159.1	1	0.1	3.25	114.9	0.3	5
	MT-2	4.6	162.7						
	MT-3	4.7	166.2						
	MT-4	4.8	169.7						
	MT-5	4.9	173.3						

*선단경 d: 6 mm 넓이 기준

고상접합부 형성 여부의 판단과 접합부 특성 평가를 위해서 전단 인장시험과 접합부의 단면 및 미세구조를 분석하였다. 전단 인장시험은 인장시험기 (DTU-900MH, Daekyoung, South Korea)를 사용하여 단축 인장방향 변형률 1 mm/min 조건으로 각 3회씩 수행되었다. 인장 시험 시 접합 시편 정렬을 위해 인장 방향을 따라 양 끝 부분에 spacer를 부착하였다 (Fig. 13).

통전고상 점접합에서 고상접합 가능성 판단 기준은 전단 인장시험 결과에 따라서 Figure. 14에서 볼 수 있는 전단 파단 형태가 아닌 nugget pull-out 파단 형태가 발생하는 경우로 설정하였다. 또한, 접합 성능 비교를 위해서 동일한 접합 지름(5.65 mm) 기준의 저항 점용접의 전단 인장강도 값 (2.2 kN)을 사용하였다.

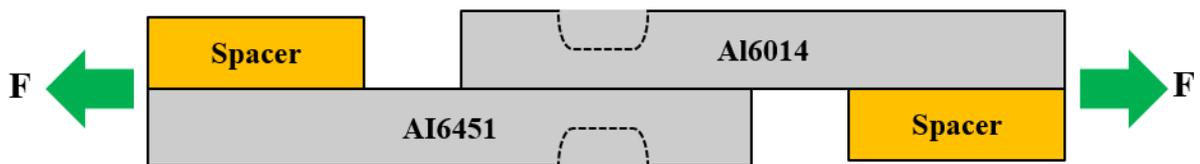


Fig. 13. Schematic of lap shear tensile test



Fig. 14. Failure modes after lap shear tensile test

고상접합부가 성공적으로 형성되었는지 확인하기 위해서 통전고상 점접합 시편의 단면을 컷팅하여 폴리싱을 진행한 후, 광학 현미경 (OM; OLYMPUS BS51M, Olympus, Japan)을 활용하여 계면에서의 기공이나 균열 등 결함 유무를 확인하였다. 그리고 EBSD (EDAX/TSL, Hikari, USA) 분석을 통해 계면층에서의 grain size 및 KAM degrees를 바탕으로 접합부의 미세구조를 분석하였다. 또한, 접합부 단면에 대하여 경도 특성 변화를 분석하기 위해서 마이크로 비커스 경도 측정 (AMT-X7BFS, Matsuzawa, Japan)을 수행하였다. 결과 비교를 위해서 접합부, 열영향부 및 모재를 포함하는 영역에서 측정하였고 압입 하중은 300 gf, 압입 시간은 10초로 수행하였다.

Ⅲ. 실험결과

3.1 이중소재 알루미늄 통전고상 점접합

용융점 이하의 온도에서 이중소재 알루미늄의 통전고상 점접합 적용 가능성에 대한 메인 전류 (I_M) 및 추가 전류 (I_F) 범위를 파악하기 위해서 실험을 수행하였다. 알루미늄 합금 소재의 통전고상 점접합을 위해서는 저항 점용접과는 다르게 용융점 이하의 온도에서 접합이 수행되고 동시에 충분한 소성변형이 필수적으로 요구된다. 또한, 접합 계면 내에서 전류인가에 의해 강화된 원자 간 확산현상은 접합 온도 유지를 통해서 유지될 수 있다. 따라서, 적절한 접합 온도 범위를 파악하기 위해서 메인 전류 (I_M) 및 추가 전류 (I_F)에 따른 접합 실험의 결과 비교가 필요하다.

진행된 실험의 접합 조건 Table 2,3에 따라, 접합 시간 3초, 초기 가압력은 4 kN로 설정하였으며, 실험군 T에 대해서 I_M 을 3, 3.5, 4, 4.5 kA로 설정하고 I_F 을 2.5 kA로 고정하였다. 첫번째 실험군인 T 조건에 따른 펀치 및 전극 접촉 계면에서 측정된 접합 최대 온도는 I_M 증가에 비례하는 경향을 확인할 수 있다 (Fig. 15). 그러나, I_F 값은 고정값이기에, 전류인가 1초 이후에는 온도가 감소하는 양상을 보인다. Figure.16은 I_M & I_F 별 접합부 형성 여부를 보여준다. I_M : 4.5 kA + I_F : 2.5 kA부터 전단 파단 및 nugget pull-out이 모두 형성된다 (Fig. 16). 따라서, I_M : 4.5 kA + I_F : 2.5 kA의 접합 조건에서부터 고상접합부 형성 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 T-4 조건에선 접합 소재로부터의 펀치 및 전극 탈착 과정에서 nugget pull-out 파단 모드가 발생한 이유는 충분한 접합 온도가 유지되지 않았고 이로 인해 접합 계면 내 원자 간 확산현상이 적게 발생하면서 접합부의 접합 지름이 짧게 형성되었기 때문이라고 생각된다.

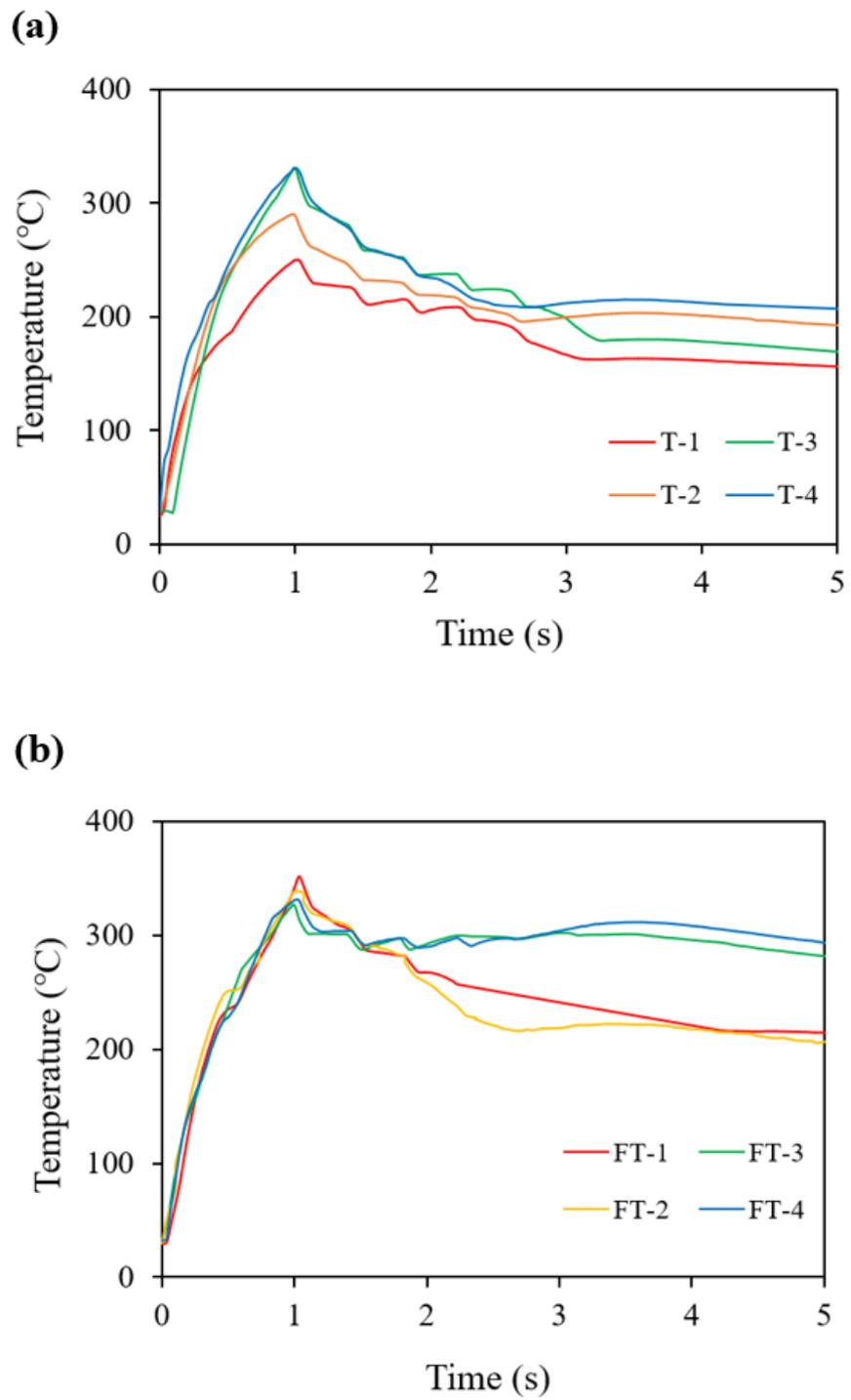


Fig. 15. The temperature distribution for increase (a) I_M (test set: T) and (b) I_F (test set: FT)

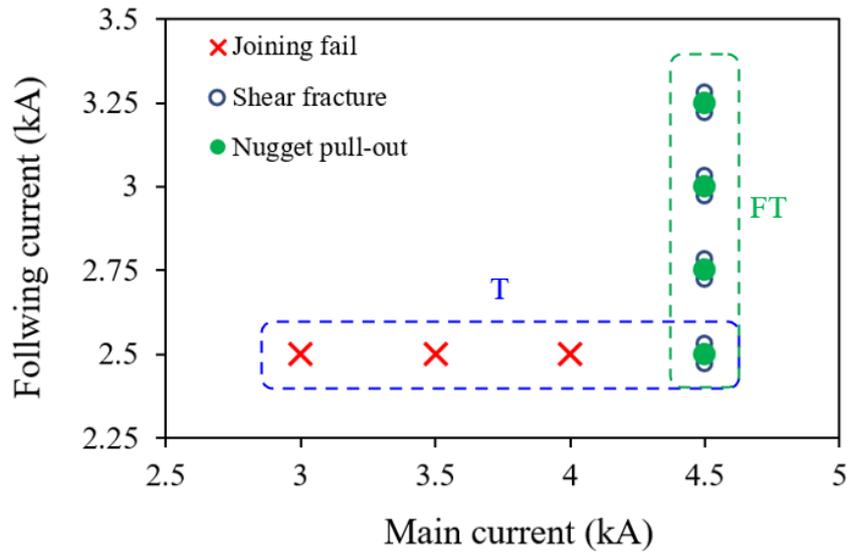


Fig. 16. Joint failure mode for test sets; T and FT

따라서, 접합 지름의 증가를 통해서 nugget pull-out 파단을 안정적으로 확보하기 위해, 실험군 FT 조건인 I_M : 4.5 kA로 고정하고 I_F : 2.5 ~ 3.25 kA 로 0.25 kA씩 증가시키면서 I_F 의 영향을 분석하였다. I_F : 3.25 kA에서 I_M 에 의해 상승된 온도 유지를 확인할 수 있었다 (Fig. 15(b)). 그러나, 앞선 실험군 T 조건의 결과를 기반으로 I_F 이 증가한다면 접합부의 전단 파단이 발생하지 않을 것이라고 예측하였으나, 여전히 접합부에서는 전단 파단이 발생하였다. 이는 I_M 로 인해 접합 초기 (1초)에 상승되는 접합 계면의 온도가 I_F 보다 접합부 형성에 보다 지배적인 접합 조건이기 때문으로 판단된다. 그래서 I_M 에 따른 접합 조건의 상한경계를 확인하기 위해 I_M : 5 kA + I_F : 3.25 kA 조건에서 접합을 수행하였다 (Fig. 17).

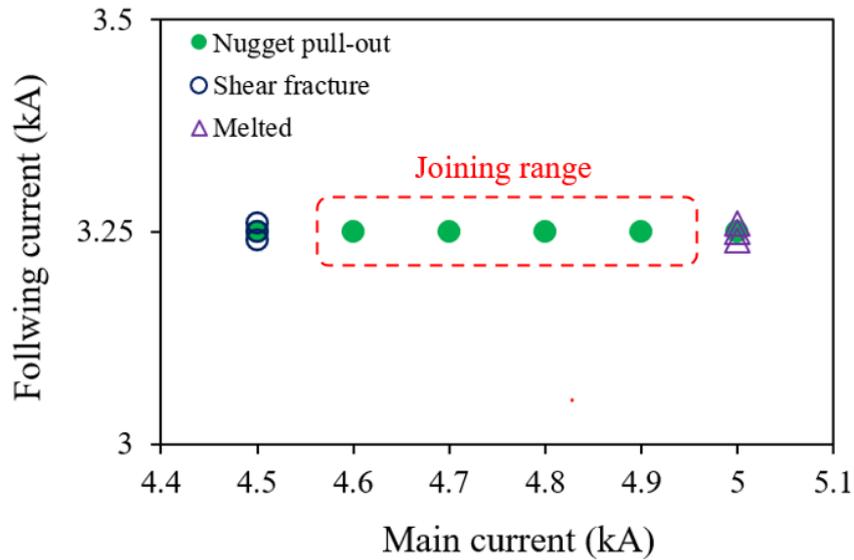


Fig. 17. Joint failure mode for MT (I_M : 4.5 ~ 4.9 kA + I_F : 3.25 kA)

실험 결과, I_M : 5 kA + I_F : 3.25 kA 조건에서 전단 파단이 아닌 nugget pull-out 파단 모드가 발생하였다. Nugget pull-out 파단 모드가 안정적으로 발생할 수 있는 접합 조건의 가능성을 확인하기 위한 반복 실험 진행하였을 때, 펀치 및 전극 접촉 계면에서 과도한 저항가열에 의한 발열이 발생하였고 이로 인해서 알루미늄 합금 소재의 용융과 동시에 펀치 및 전극의 파손이 동반되었다. 펀치 및 전극의 파손 및 변형이 발생하게 되면 통전고상 점접합 기술의 유지비용 측면에서 효율이 감소할 수밖에 없는 문제점이 발생하게 된다.

따라서, 펀치 및 전극의 파손 문제를 피하고 AA6014, AA6451의 접합 공정에서 통전고상 점접합을 지속적으로 사용할 수 있도록 적정 공정 조건을 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해서 실험군 MT 조건인 I_M : 4.5 ~ 4.9 kA + I_F : 3.25 kA 에서의 통전고상 점접합 실험을 추가 수행하였다 (Fig. 17).

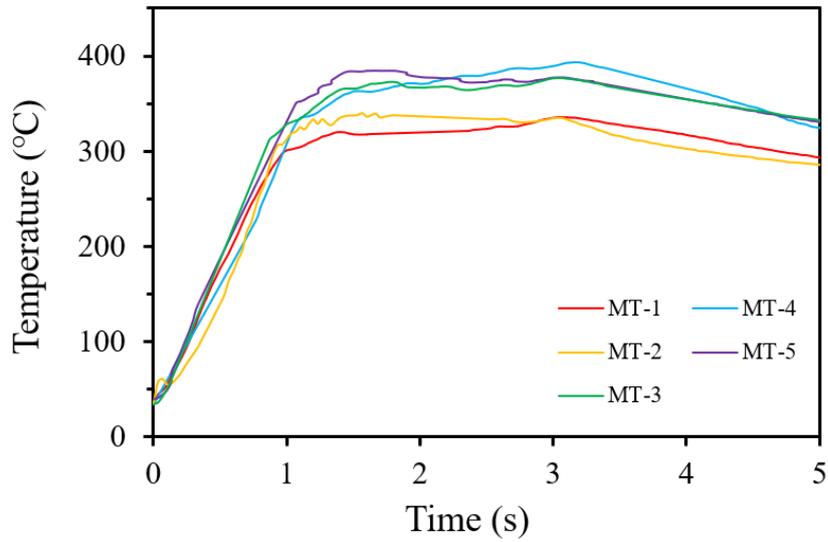


Fig. 18. The temperature distribution for test set MT

실험군 MT 조건에 대한 실험 결과에 따라, 모든 접합 조건에서 접합 온도는 용융점 이하에서 유지되었고 (Fig. 18), 해당 조건에서 nugget pull-out 파단 모드가 관찰되었다 (Fig. 17). 따라서, 실험군 MT 조건 전체에서 소재의 용융 없이 고상접합이 형성된다고 판단된다. 전단 파단이 발생하는 MT-1 (기존 실험군 FT-4 조건과 동일) 조건을 제외시키고 선정된 접합 조건 (Joining range)에서는 nugget pull-out이 발생함을 확인하였고 이는 펀치 및 전극의 파손 발생없이, 고상접합부를 형성할 수 있는 접합 구간으로 판단된다.

3.2 통전고상 점접합 접합부의 기계적 특성

통전고상 점접합으로 제작된 접합부의 기계적 특성 평가를 진행하였다 (Fig. 19). 시험준 MT 조건으로 접합된 접합부에 대해서 기계적 특성 평가 결과를 바탕으로 전단 인장강도를 비교하였다 (Fig. 20(a)). 또한, 전단 인장시험을 통해 nugget pull-out 파단이 발생한 시편에 대해서 접합 지름을 측정 및 비교하였다 (Fig. 20(b)). 접합 지름은 nugget pull-out 파단면 기준의 수평 방향 및 직각 방향 접합 지름의 평균값으로 산정하였으며, 이는 저항 점용접에서 nugget의 크기를 측정하는 방식과 동일하다.

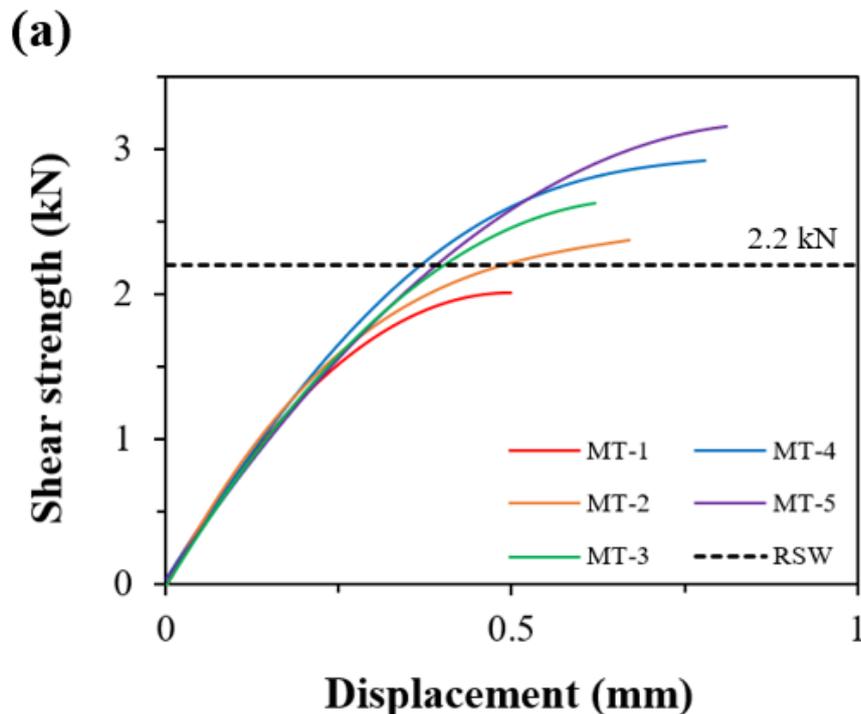


Fig. 19. The shear tensile test on universal tensile testing machine

전단 인장강도 및 접합 지름은 I_M 증가에 비례하여 증가하는 경향을 보이며, 동일한 접합 소재(AA6451, AA6014)에 대한 저항 점용접의 전단 인장강도 기준인 2.2 kN 보다 큰

값인 최대 3.19 kN을 얻을 수 있었다. 이는 I_M 에 의해 초기 접합 온도 상승으로 인해 접합 계면 간 확산현상이 더욱 활발하게 발생하였기 때문이다. 그리고 접합 지름이 증가할수록 전단 인장강도가 증가함을 알 수 있다. 그러나, MT-1의 경우, 전단 인장강도 및 접합 지름 측면에서 저항 점용접의 기준을 넘지 못하였음에도 nugget pull-out 파단 모드가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 펀치 및 전극의 정렬 문제와 접합 계면에서의 접합 온도가 충분히 상승하지 않음으로써 고상접합부의 접합 지름이 짧게 형성되었기 때문에 작은 인장 하중에도 파단이 발생하는 것으로 생각된다. 따라서, 두 가지 기준 (전단 인장강도와 접합 지름)을 모두 초과한 MT-4, MT-5 실험에 따른 접합 조건을 공정에 사용했을 때, 더욱 강한 기계적 강도를 보유한 접합부를 얻을 가능성이 높다.

전단 인장응력 측면에서 비교 시 MT-3의 경우에는 접합 지름이 기준 미달임에도 전단 인장강도는 저항 점용접 기준을 초과하였고 nugget pull-out 파단도 발생하였다. 이를 바탕으로 모재의 최소 전단응력은 약 110MPa으로 사료된다 (Fig. 20(c)).



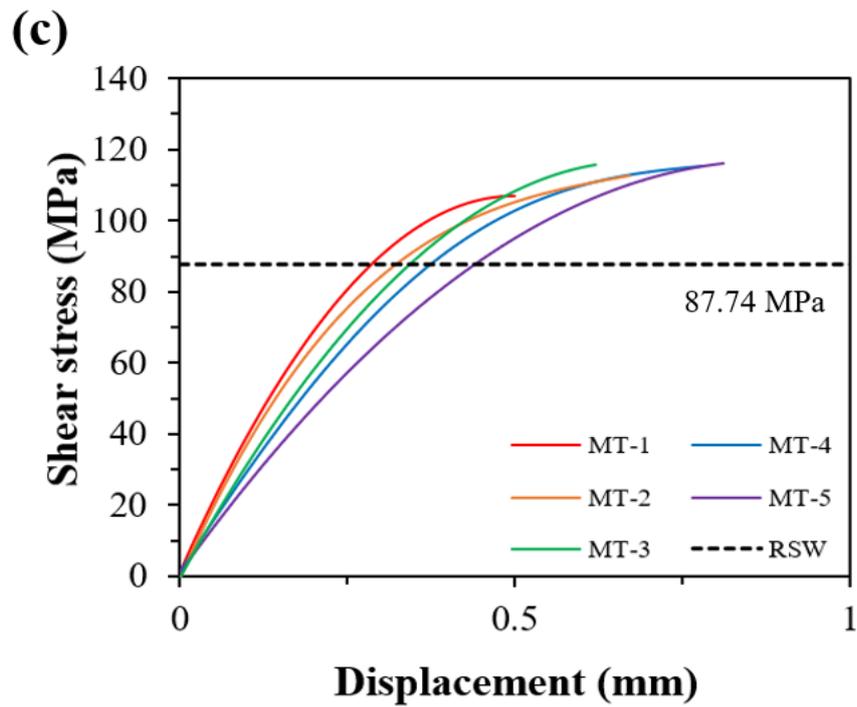
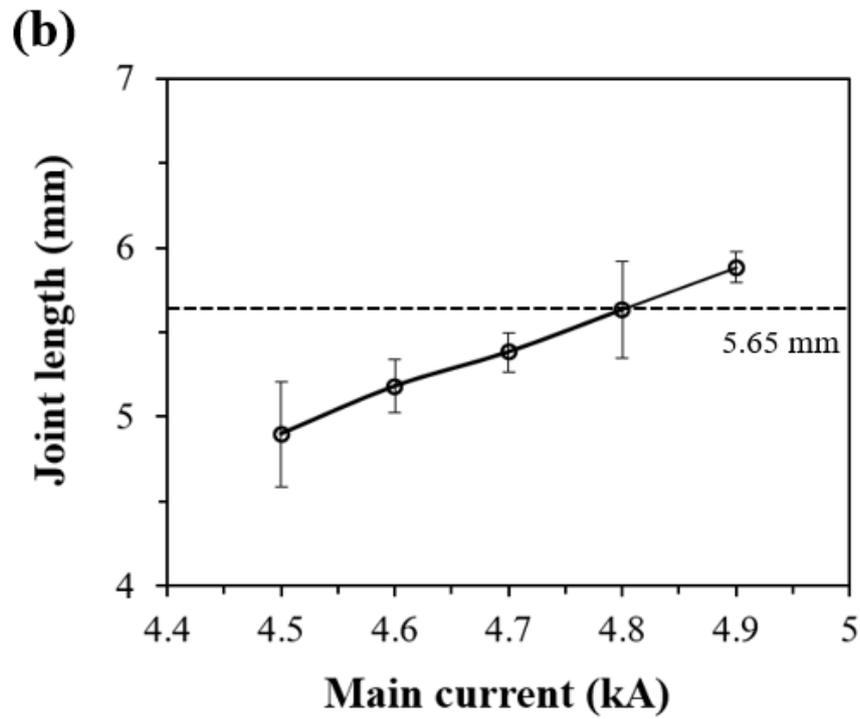
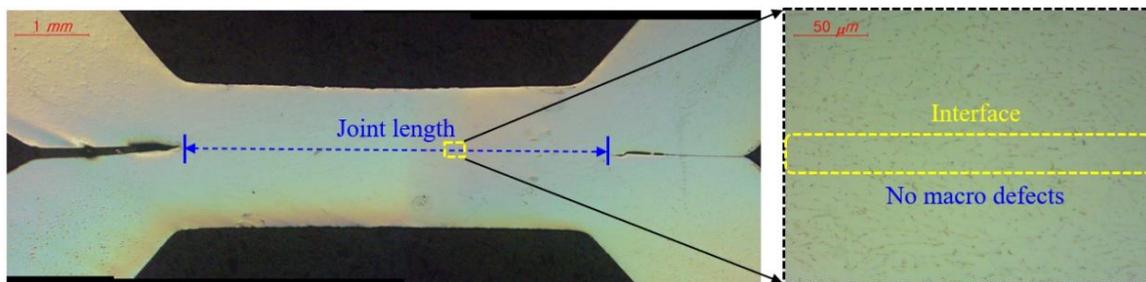


Fig. 20. (a) Shear strength, (b) joint length and (c) shear stress of joint on test set MT

3.3 통전고상 점접합부의 미세조직 분석 및 경도 측정

통전고상 점접합부의 특성 평가를 위해서 접합 방향에 따른 절단면에 대해서 계면 내 기공 및 macro한 결함 유무 여부를 확인하기 위해서 광학현미경 (optical microscope, OM)을 사용해 촬영하였다 (Fig. 21).

알루미늄 합금 6000계열 중, 이종소재인 AA6014 & AA6451은 물질 구성 원소가 상당히 유사하기 때문에 거시적으로는 큰 차이를 보이지 않는다. 또한, 접합 계면 기준으로 양쪽 측면에서 유사하게 변형된 것을 볼 수 있다. 이는 펀치 검 전극의 중심축을 기준으로 압축하중 및 전류가 인가되는 축이 접합면과 수직으로 정렬되어있음을 알 수 있다. Figure.21에서 노란색 점선 영역은 접합부 계면 부근으로, 해당 영역 내의 계면에서는 눈에 띄는 macro한 결함이나 void 등은 관찰되지 않았다. 이를 바탕으로 AA6014 & AA6451은 용융으로 인한 재결정화 (recrystallize) 없이 고상에서 성공적으로 고상접합부를 형성하였다고 판단된다.



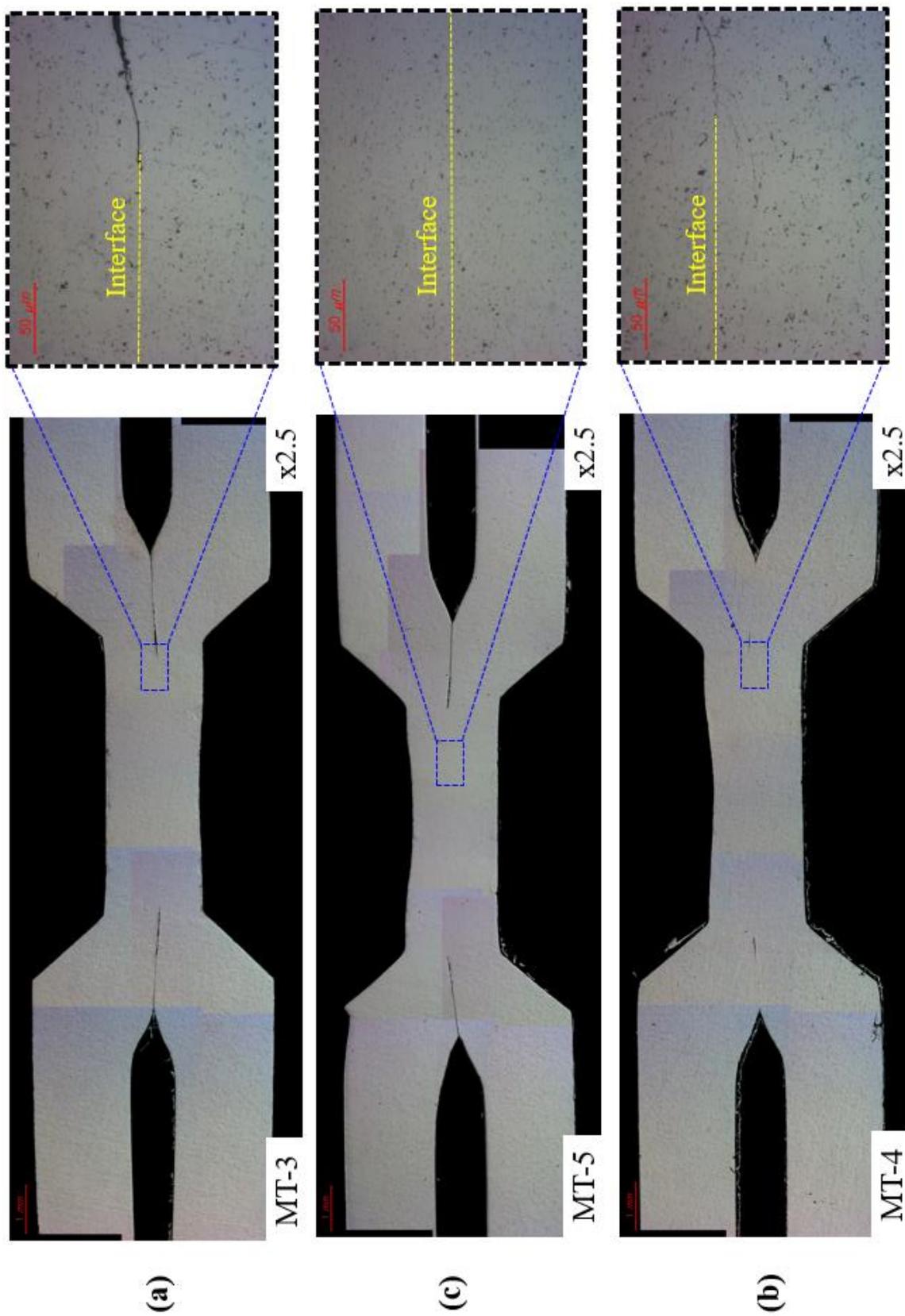


Fig. 21. OM analysis of joint cross section: (a) MT-3, (b) MT-4, (c) MT-5

모재 AA6014, AA6451 및 접합부(MT-3, MT-5)에 대해 수행된 EBSD (Electron BackScatter Diffraction) 분석을 통해 IPF (Inverse Pole Figure) maps과 KAM (Kernel Average Misorientation) maps를 얻었다 (Fig. 22). 그림 내, JD, ND 및 TD는 각각 접합방향, 수직방향 그리고 횡축 방향을 의미한다.

AA6451, AA6014 순서에 따라, IPF Map에서 average grain size는 $41.26 \mu\text{m}$, $37.38 \mu\text{m}$ 이고 KAM map에서 average KAM degrees는 0.647, 1.284이다. 분석 결과를 통해 AA6451은 등방성 결정구조 형상을 보이고 rolling 가공 후, 풀림 (annealing) 처리된 소재로 판단되고 AA6014는 TD 방향으로 신장된 형상을 띄는 결정구조를 보이고 rolling에 의해 가공 경화된 소재로 판단된다.

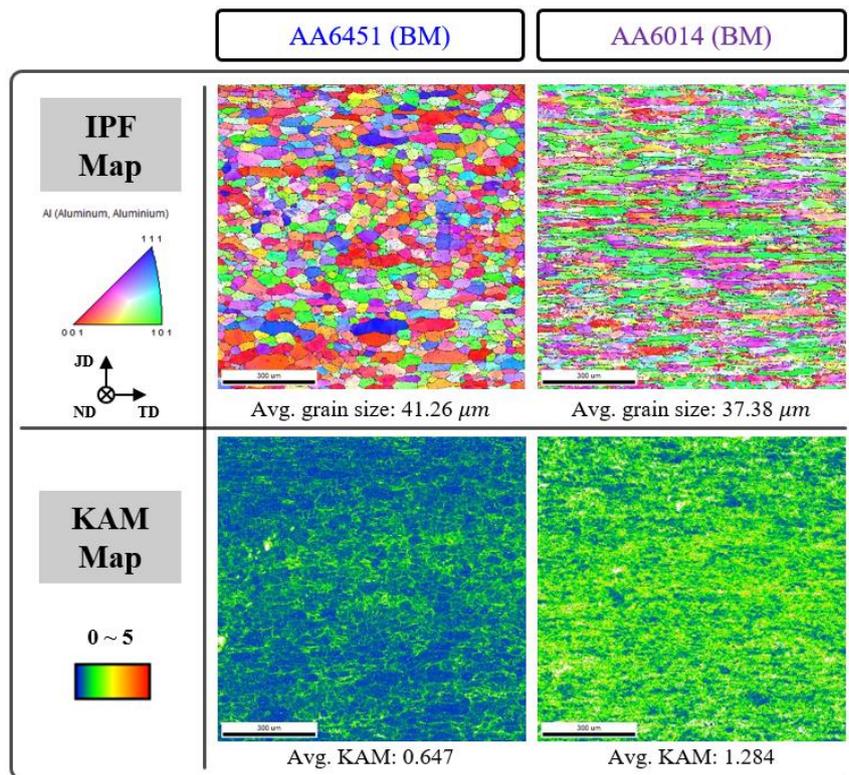


Fig. 22. EBSD results; (a) IPF maps and (b) KAM maps of AA6451 and AA6014

통전고상 점접합을 통해 형성된 접합부 (MT-3, MT-5)의 IPF map 및 KAM map 을 분석하였다 (Fig. 23). AA6451, AA6014 은 통전고상 점접합 중에 계면 온도 상승 및 소성변형을 겪음으로써, 접합부에서 결정립 (grain) 성장, 재결정화 (recrystallize) 및 내부 미세구조 변화가 관찰되었다. IPF map 결과, AA6451 은 모재와 유사하게 대부분 등축 결정구조를 보인다. AA6014 는 rolling 으로 인한 신장된 결정구조만 보이는 모재와 달리, 등축 결정구조와 신장된 결정구조가 동시에 관찰된다. 접합부 전체에 대한 KAM 값을 모재와 비교하여 분석하였을 때, AA6451 은 정성적으로 증가하는 경향을 보이고 AA6014 는 정성적으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 통전 및 압축하중을 통해서 두 소재 전부, 용융점 이하의 고온에서 소성변형을 겪으면서 재결정화 및 소재 두께의 50 % 이상의 소성변형에도 불구하고 동적 재결정 (dynamic recrystallization)현상이 발생하였기 때문이라 판단된다.

또한, MT-3 과 MT-5를 비교하였을 때, 인가된 전류 밀도가 상승할수록 통전저항가열에 의한 발열량이 증가하여 grain size는 $55.86 \mu\text{m}$ 에서 $57.73 \mu\text{m}$ 로 증가하고, 전위 풀림 현상이 발생하여 avg. KAM degrees은 감소하는 경향을 확인할 수 있다 (Fig. 23). 이는 전류 유기 키네틱 향상으로 인한 결과라고 판단할 수 있다 [35-38].

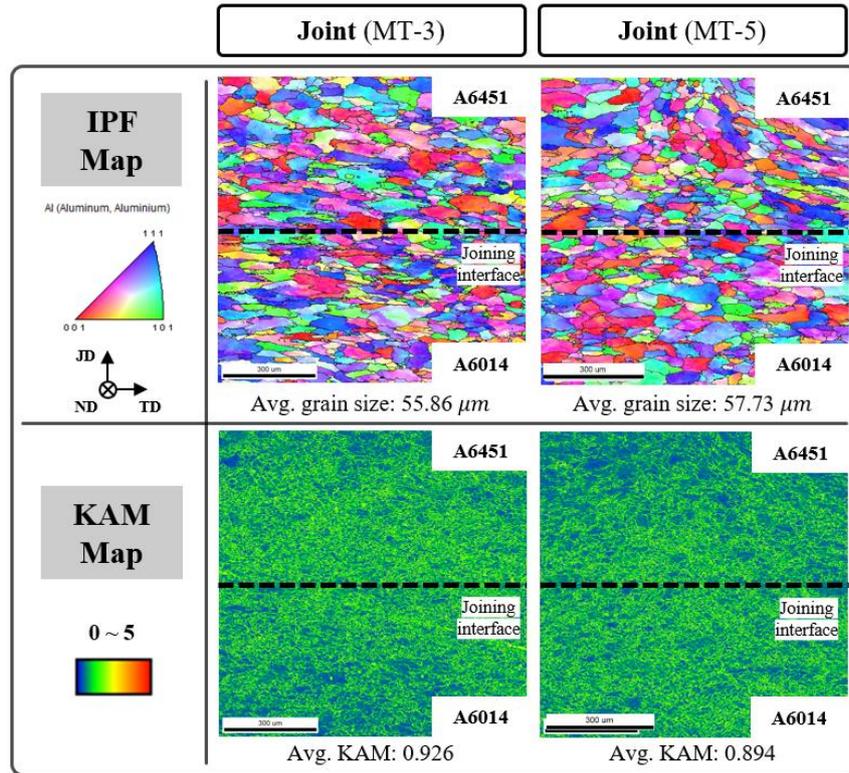


Fig. 23. EBSD results; (a) IPF maps and (b) KAM maps of joint (MT-3, MT-5)

통전고상 점접합에 따른 접합부 특성 변화를 확인하기 위해서 마이크로 비커스 경도 (300 gf, 10 s) 측정을 수행하였다. 접합부는 시편 중심부에 대칭으로 형성되기 때문에 접합부 우측면인 노란색 영역에서 측정하였다 (Fig. 24). 알루미늄 합금 소재간 통전고상 점접합으로 접합된 접합부는 RSW와 다르게 접합부에서 상당한 경도 감소 현상은 관찰되지 않았다. 그러나, 모재보다 다소 낮은 경향을 보였다. 이유는 알루미늄 합금 소재간 저항 점용접은 용융점 이상의 온도에 의한 재결정, 결정립 성장 등으로 인해 경도가 감소하는 현상을 보이지만, 통전고상 점접합은 가열과 동시에 소성변형을 경험하면서 가공 경화가 발생하였기 때문에 경도 감소량이 크지 않다.

그리고 접합부의 경도는 전류 밀도가 증가함에 따라 전반적으로 감소하였는데, 이는 일정한 소성변형량 조건에서 동일한 상태의 소성변형에 의한 가공 경화 효과를 받으면서

동시에 높은 전류 밀도와 접합 온도로 인해 전기적 풀림 처리 효과를 더욱 경험하게 되었기 때문이다 [39].

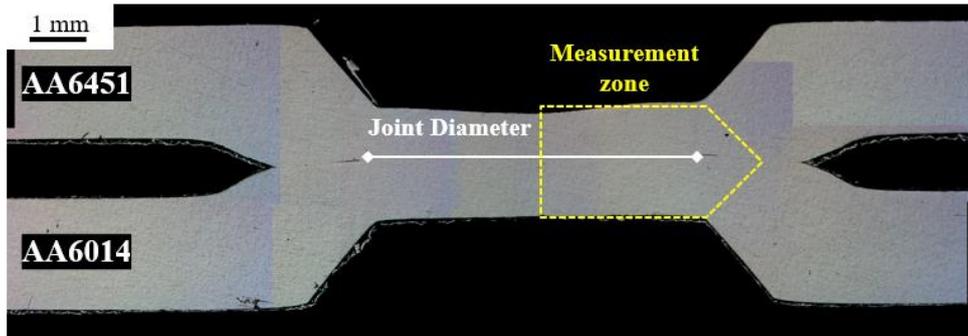


Fig. 24. Measurement location of microhardness (Vickers) in joint

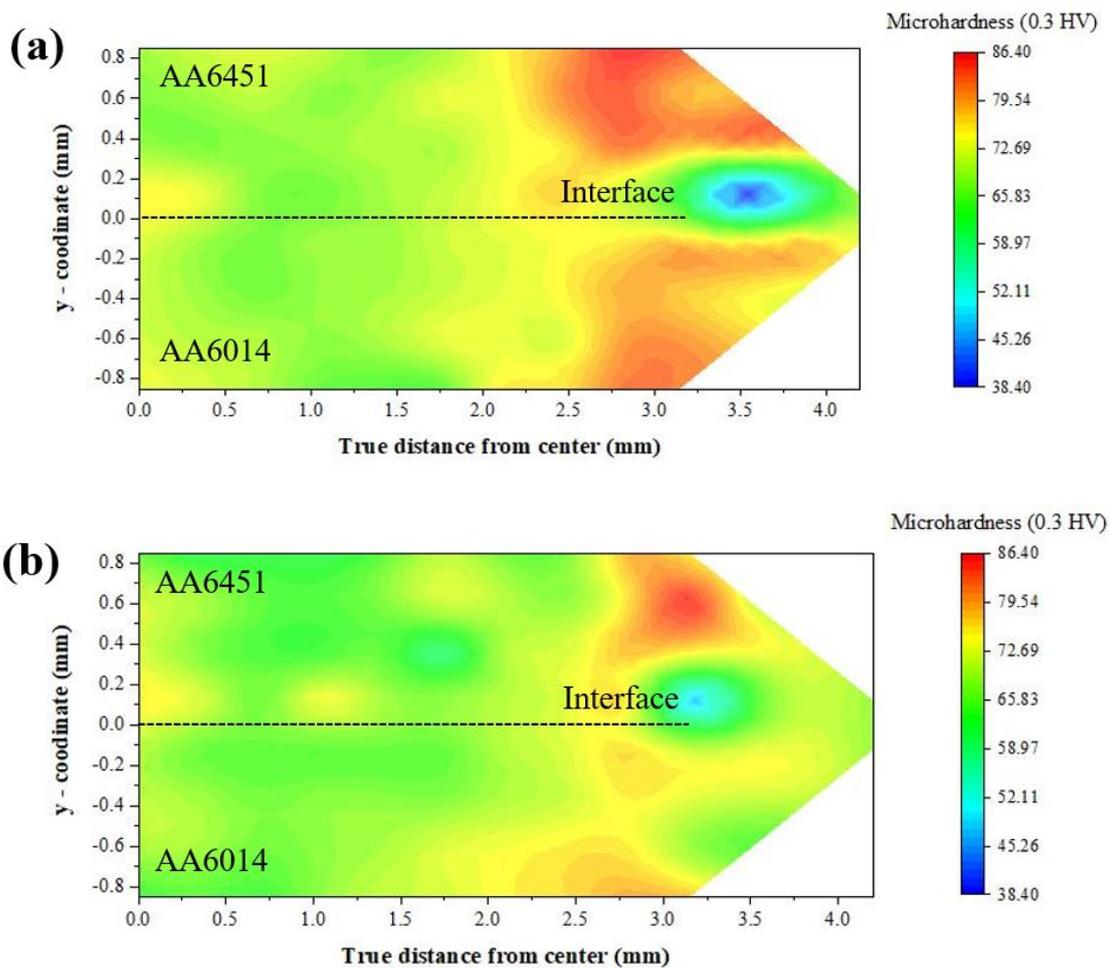


Fig. 25. Microhardness (Vickers) comparison in joint (a) MT-3 & (b) MT-5

IV. 결론

1. 알루미늄 합금 소재 AA6451 와 AA6014에 대하여 통전고상 점접합 가능성에 대해 조사하기 위해 메인 전류 (I_M) 및 추가 전류 (I_F)에 따른 접합부 온도 분포 분석, 고상접합부 형성 여부 판단을 위한 파단 모드 분석과 접합부 특성 평가를 위한 전단 인장강도, 미세조직 분석 및 경도 측정을 수행하였다.
2. 메인 전류 (I_M)와 추가 전류 (I_F)에 따른 통전고상 점접합 결과, 적정 접합 범위는 하한 경계는 $I_M: 4.5 \text{ kA} + I_F: 3.25 \text{ kA}$, 상한 경계는 $I_M: 5 \text{ kA} + I_F: 3.25 \text{ kA}$ 임을 확인하였다. 접합 초기 온도를 유지하여 접합 계면 내 원자 확산현상을 강화하기 위한 추가 전류 조건은 $I_F: 3.25 \text{ kA}$ 이다.
3. 적정 접합 범위 내에서 I_M 값이 증가할수록 전단 인장강도 (최대 $3.19 \text{ kN} - 43 \%$ 증가) 및 접합 지름이 증가하는 양상을 확인할 수 있었다.
4. 최적 접합 조건은 $I_M: 4.8 \sim 4.9 \text{ kA} + I_F: 3.25 \text{ kA}$ 으로 판단되며, 저항 점용접 대비 접합부의 접합 지름 기준 ($4\sqrt{t} = 5.65 \text{ mm}$)과 유사한 $5.80, 5.95 \text{ mm}$ 를 형성하였고, 전단 인장강도 기준 (2.2 kN) 보다 높은 인장강도 ($2.99, 3.19 \text{ kN}$)를 얻었다. 이를 바탕으로 통전고상 점접합 접합부는 저항 점용접에 비해 높은 전단 인장강도를 견딜 수 있다고 사료된다.
5. 통전고상 점접합의 고상접합부 단면은 광학현미경을 통해 관찰되었다. 계면에서의 기공, 불순물 같은 결함 및 macro한 틈새는 발견되지 않았다.
6. EBSD 분석을 통해서 모재 AA6451, AA6014의 미세구조를 분석하였다. AA6451은 rolling에 의한 가공 경화 이후에, 풀림 (annealing)을 겪어서 grain은 등방성 구조를 가지고 있다. AA6014는 rolling으로 인한 가공 경화된 상태이며, grain boundary에 전위 축적 및 이방성 (TD) 구조를 구성하고 있는 것을 볼 수 있다.
7. 통전고상 점접합으로 제작된 접합부는 통전에 의한 저항 가열 및 소성변형을

경으면서 접합 계면 부근에서 결정립 (grain) 성장, 재결정화 (recrystallize) 및 내부 미세구조 변화가 관찰되었다.

8. MT-3 와 MT-5를 비교하였을 때, 인가된 전류 밀도가 클수록 통전 저항가열에 의한 접합부의 발열량이 증가하면서 grain size 증가, KAM degrees 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 전류 유기 키네틱 향상 현상에 의한 전기적 풀림효과로 인한 결과라고 판단된다.
9. 결론적으로, 알루미늄 합금 소재에 대한 통전고상 점접합 적용 가능성을 확인하였고 향후 자동차 산업의 친환경 차량 구조 소재에 고려될 수 있는 비철 금속 경량화 소재에 대한 통전고상 점접합 기술 적용 가능성 판단에 기여할 수 있을 것이라고 예상된다.

References

1. 한범석, et al. "자동차 기술 동향과 경량화 기술." 한국주조공학회지 (주조) 42.2 (2022): 97-104.
2. Wadas, T., and M. Tisza. "Lightweight manufacturing of automotive parts." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 903. No. 1. IOP Publishing, 2020.
3. Singh, Mayank Kumar. "Application of steel in automotive industry." International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 6.7 (2016): 246-253.
4. J. J. Lee, C. S. Son, and Y. W. Park, Resistance Spot Welding Characteristic of 1500 MPa Steel Sheet Using Simulation(II) - Estimation Model for Nugget Diameter of Resistance Spot Welds, J. Weld. Join. 36(3) (2018) 51-56.
5. Rajarajan, Chakkaravarthi, et al. "Resistance spot welding of advanced high strength steel for fabrication of thin-walled automotive structural frames." Forces in Mechanics 7 (2022): 100084.
6. Ambroziak, A., and M. Korzeniowski. "Using resistance spot welding for joining aluminium elements in automotive industry." Archives of civil and Mechanical Engineering 10.1 (2010): 5-13.
7. Harrison, Nia R., and S. George Luckey. "Hot stamping of a B-pillar outer from high strength aluminum sheet AA7075." SAE International Journal of Materials and Manufacturing 7.3 (2014): 567-573.
8. Stojanović, Blaža, and Lozica Ivanović. "Application of aluminium hybrid composites in automotive industry." Tehnički vjesnik 22.1 (2015): 247-251.
9. Liu, Yong, et al. "Formability and lubrication of a B-pillar in hot stamping with 6061 and 7075 aluminum alloy sheets." Procedia Engineering 207 (2017): 723-728.
10. Hirsch, Jürgen. "Aluminium in innovative light-weight car design." Materials transactions 52.5 (2011): 818-824.
11. Watmon, Titus Bitek, Catherine Wandera, and James Apora. "Characteristics of resistance spot welding using annular recess electrodes." Journal of Advanced Joining Processes 2 (2020):

100035.

12. Manladan, Sunusi Marwana, et al. "A review on resistance spot welding of aluminum alloys." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90 (2017): 605-634.
13. Florea, R. S., et al. "Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation." *Materials & Design* 34 (2012): 624-630.
14. Kim, Gu-Cheol, et al. "Effect of welding time on resistance spot weldability of aluminum 5052 alloy." *Metals and Materials International* 25 (2019): 207-218.
15. Kim, Wonho, et al. "Effects of Electro-force Control on the Microstructure and Welding Characteristic During Resistance Spot Welding." *Korean Journal of Metals and Materials* 60.5 (2022): 350-359.
16. Wu, Sai-nan, et al. "Microstructure characterization and quasi-static failure behavior of resistance spot welds of AA6111-T4 aluminum alloy." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 24.12 (2014): 3879-3885.
17. Qin, Qingdong, et al. "Microstructures and mechanical properties of Al-Mg₂Si-Si alloys resistance spot welded with Al-Si interlayers." *Journal of Materials Research and Technology* 8.5 (2019): 4318-4332.
18. Zhang, Y., et al. "Bake-strengthening of resistance spot welded aluminum alloy 6061." *Weld. J* 98 (2019): 337S-350S.
19. Clark, Denis, Ronald Mizia, and Piyush Sabharwall. *Diffusion Welding of Alloys for Molten Salt Service-Status Report*. No. INL/EXT-12-24589. Idaho National Lab.(INL), Idaho Falls, ID (United States), 2012.
20. Cooper, Daniel R., and Julian M. Allwood. "Influence of diffusion mechanisms in aluminium solid-state welding processes." *Procedia engineering* 81 (2014): 2147-2152.
21. Garcia, AM Mateo. "BLISK fabrication by linear friction welding." *Advances in gas turbine technology* (2011): 411-434.
22. Akinlabi, Esther Titilayo, and Rasheedat Modupe Mahamood. *Solid-state welding: friction*

and friction stir welding processes. New York, NY, USA: Springer International Publishing, 2020.

23. Meshram, S. D., T. Mohandas, and G. Madhusudhan Reddy. "Friction welding of dissimilar pure metals." *Journal of Materials Processing Technology* 184.1-3 (2007): 330-337.
24. Li, Wenya, et al. "Linear and rotary friction welding review." *International Materials Reviews* 61.2 (2016): 71-100.
25. Muralimohan, C. Haribabu, et al. "Evaluation of microstructures and mechanical properties of dissimilar materials by friction welding." *Procedia Materials Science* 5 (2014): 1107-1113.
26. Kang, Ji-Won, et al. "Friction-Assisted Dissimilar Solid State Lap Joining of Aluminum and Copper Pipes." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 24.2 (2023): 199-208.
27. Mishra, Rajiv S., and Z. Y. Ma. "Friction stir welding and processing." *Materials science and engineering: R: reports* 50.1-2 (2005): 1-78.
28. Manjhi, Shambhu Kumar, Ashish Das, and Shashi Bhushan Prasad. "Review on joining of aluminum alloy by solid-state welding technique." *Materials Today: Proceedings* 26 (2020): 1255-1261.
29. Singh, Rudra Pratap, et al. "A review paper on friction stir welding process." *Materials Today: Proceedings* 38 (2021): 6-11.
30. Kim, Moon-Jo, et al. "Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials." *Applied Materials Today* 21 (2020): 100874.
31. Kim, Moon-Jo, et al. "Electric current–assisted deformation behavior of Al-Mg-Si alloy under uniaxial tension." *International Journal of Plasticity* 94 (2017): 148-170.
32. Zhang, Shengwei, et al. "Electrically assisted solid state lap joining of dissimilar steel S45C and aluminum 6061-T6 alloy." *Journal of Materials Research and Technology* 12 (2021): 271-282.
33. Nguyen, Thi Anh Nguyet, et al. "Electrically assisted pressure joining of thin bi-layer aluminum-clad aluminum sheets." *The International Journal of Advanced Manufacturing*

Technology 121.7-8 (2022): 4713-4723.

34. Jo, Min-Gu, et al. "Electrically assisted solid-state joining of CrMnFeCoNi high-entropy alloy." *Metallurgical and Materials Transactions A* 51 (2020): 6142-6148.
35. Liang, Chien-Lung, and Kwang-Lung Lin. "The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A review." *Materials Characterization* 145 (2018): 545-555.
36. Choi, H., et al. "Study on Electrically Assisted Pressure Solid State Joining Between Aluminum Alloys." *Transactions of Materials Processing*, vol. 31, no. 6, (2022): 337–343.
37. Park, Ju-Won, et al. "Effect of electric current on recrystallization kinetics in interstitial free steel and AZ31 magnesium alloy." *Materials Characterization* 133 (2017): 70-76.
38. Kim, Moon-Jo, et al. "Electric current-induced annealing during uniaxial tension of aluminum alloy." *Scripta Materialia* 75 (2014): 58-61.
39. Li, Yong-Fang, et al. "Electrically assisted pressure joining of titanium alloys." *Journal of Manufacturing Processes* 35 (2018): 681-686.

A Study on the feasibility of electrically assisted solid-state spot joining for non-ferrous lightweight aluminum alloys

Choi Hyeon-Seok

Department of Mechanical Engineering

Graduate School, University of Ulsan

Abstract

To keep pace with carbon neutrality to prevent global warming around the whole world, fuel efficiency and exhaust gas emission regulations are being implemented, and the regulations are on the rise as time passes. These regulations are particularly affecting the automobile industry, which occupies the largest proportion in the mobility industry. Therefore, to increase vehicle fuel efficiency, interest in light-weight vehicle is rapidly increasing, and light-weight materials are considered as a major method. Through this, environmental regulation may be satisfied, and vehicle performance may also be improved.

In addition to steel, which is used as a material for commercial vehicle body structure, the automobile industry is actively considering aluminum alloys, which are non-ferrous metal materials as a light-weight material. For this reason, interest in the development of joining technology for non-ferrous metal structural materials is increasing.

Resistance spot welding (RSW) technology, which is used for joining vehicle body structure, is also used for aluminum alloys, but there is a limit to the use of joining materials, such as a decrease in the mechanical strength of the heat affected zone due to the fusion welding through melting. In this paper, to overcome this problem, a study was conducted on the applicability of electrically assisted

solid-state spot joining (EASSJ) technology to aluminum alloys.

The EASSJ is for making solid-state joining due to the diffusion phenomenon between atoms in the joining interface with plastic deformation by simultaneously applying step-by-step current and compressive load, which performs the joining materials below temperature lower than the melting point. The joining parameter conditions were set by separating each stage into a main current and an following current to determine the applicability of the EASSJ, and the nugget pull-out fracture mode was set as a criterion for determining whether a solid-state joint was formed at the joint. Also, the shear tensile tests and microstructure analysis were performed to evaluate the mechanical properties of the joint. Through this, the shear tensile strength (kN) of the joint increased by about 43% compared to the same joining diameter from criteria of RSW (base: 5.65 mm).

Based on study results, it was confirmed that the EASSJ of aluminum alloys can overcome the problems from resistance spot welding used to vehicle body structure materials and secure improved mechanical strength.

Keywords: Solid-state joining, Spot joining, Dissimilar material, Aluminum alloy