



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

ADC12 알루미늄합금 다이캐스팅 판재의
접치기 마찰교반접합부 특성에 관한 연구

A Study on characteristics of Friction Stir Lap
Welded Joints of ADC12 Aluminum Alloy
Die-Castings

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

김준일

ADC12 알루미늄합금 다이캐스팅 판재의 접치기 마찰교반접합부 특성에 관한 연구

지도교수 권용재

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2021년 02월

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

김 준 일

김준일의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 이 정 구 (인)

심사위원 신 상 용

심사위원 권 용 재 (인)

울산대학교 대학원

2021년 02 월

국문 요약

최근 지구 환경보호와 에너지 절감을 위한 기술개발 요구가 높아짐에 따라, 자동차산업에서는 차량 경량화를 위해 알루미늄과 같은 경량금속의 사용량과 적용 분야가 증가하고 있다. 하지만, 알루미늄합금의 경우, 기존 철강소재 대비 가격 상승 문제가 있어, 전신재 대비 가격 경쟁성이 있는 주조재의 적용 또한 증가하고 있다. 이러한 알루미늄합금에 기존의 사용되고 있는 용융용접법을 적용하는 경우, 표면의 자연 산화막 및 높은 열전도도 등으로 인해 요구되는 용접특성을 얻기가 어렵다는 문제점이 있다. 특히, 주조재의 경우, 전신재에 대비하여 기공과 편석 등과 같은 주조결함을 내포하고 있기 때문에, 더욱 용융용접의 적용이 힘든 점이 있다. 따라서, 이를 해결하기 위해 고상접합기술 중 하나인 마찰교반접합(Friction Stir Welding, FSW)를 적용시 용융 및 응고과정에서 발생하는 문제점을 해결할 수 있다. 하지만, 마찰교반접합(Friction Stir Welding, FSW)의 연구는 대부분 맞대기이음부(butt joint) 형성에 기초를 두고 연구 및 개발이 이루어졌으며, 주로 알루미늄합금 전신재의 적용에 관해 연구가 진행되었다. 하지만 차체부품의 경우, 겹치기이음부(lap joint)에 대한 요구가 많으므로, 겹치기 마찰교반접합 (Friction Stir Lap Welding, FSLW)에 적용에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는, 겹치기 마찰교반접합 기술을 두께가 2.0 mm인 ADC12 알루미늄합금 다이캐스팅 판재에 적용하였다. 또한 접합변수에 따른 겹치기 마찰교반접합부의 특성에 관해 조사하였다. 그 결과, 접합부 영역은 크게 모재부, 열-기계적 영향부, 교반부로 구분되었으며 열영향부는 나타나지 않았다. 교반부의 경우 2차상이 미세한 입자상으로 비교적 균일하게 분산되어 있었으며, Si기지는 재결정에 의해 미세화 되고 크기가 비교적 균일해졌다. 그 결과, 교반부에서의 경도 편차는 모재부에 비해 감소하였다. 접합부 내부결함의 형태는 크게 2가지 형태, 즉, Void형태의 불연속적인 결함이 형성되는 경우와 Tunnel 형태의 연속적인 결함이 형성되는 경우로 구분되었다. 이러한 결함은 모두 상판 AS측 접합부 내부에서 발생하였으며, Tunnel 형태의 결함이 발생하는 경우, 상온인장전단하중값에 악영향을 미치는 것으로 판단된다.

목차

1. 서론.....	- 10 -
1.1. 연구배경	- 10 -
1.2. 연구 목적.....	- 15 -
2. 이론적 배경	- 18 -
2.1. 마찰교반접합.....	- 18 -
2.1.1. 마찰교반접합의 원리.....	- 18 -
2.1.2. 마찰교반접합의 특징.....	- 21 -
2.1.3. 마찰교반접합 공구의 형상 및 특징.....	- 24 -
2.1.4. 겹치기 마찰교반접합부의 조직 특성.....	- 25 -
2.1.5. 마찰교반접합의 공정변수.....	- 28 -
3. 실험방법	- 30 -
3.1. 피접합재	- 30 -
3.2. 겹치기 마찰교반접합 실험.....	- 30 -
3.2.1. 접합용 장비	- 30 -
3.2.2. 공구의 형상	- 32 -
3.2.3. 접합조건	- 33 -
3.3. 특성평가	- 34 -

3.3.1. 모재 특성평가.....	- 34 -
3.3.2. 접합부의 외관형상 관찰	- 35 -
3.3.3. 접합부 조직 관찰.....	- 35 -
3.3.4. 접합부 경도시험.....	- 36 -
3.3.5. 상온인장전단시험.....	- 37 -
4. 실험결과 및 고찰	- 38 -
4.1. 모재의 특성	- 38 -
4.1.1. 모재의 조직 특성.....	- 38 -
4.1.2. 모재의 경도 특성.....	- 44 -
4.1.3. 모재의 인장강도 특성.....	- 45 -
4.2. 접합변수가 외관형상에 미치는 영향	- 46 -
4.2.1. 접합변수가 외부 결함 형성에 미치는 영향	- 46 -
4.2.2. 접합변수가 비드 간격에 미치는 영향.....	- 49 -
4.3. 접합변수가 접합부조직에 미치는 영향	- 51 -
4.3.1. 대표적 접합 조직 특성	- 51 -
4.3.2. 접합변수가 내부결함 형성에 미치는 영향	- 58 -
4.3.3. 접합변수가 접합부 형상에 미치는 영향	- 62 -
4.4. 접합변수가 경도 특성에 미치는 영향.....	- 72 -
4.4.1. 최대 입열 조건에서의 각 영역별 경도 특성.....	- 72 -

4.4.2. 이송속도 변화가 경도 특성에 미치는 영향	- 74 -
4.4.3. 회전속도 변화가 경도 특성에 미치는 영향	- 77 -
4.5. 접합변수가 상온인장전단 특성에 미치는 영향	- 80 -
4.5.1. 접합변수가 외관 형상과 인장전단하중값에 미치는 영향	- 80 -
4.5.2. 상온인장전단시험 후의 파면	- 84 -
4.5.3. 상온인장전단시험시 파괴모드	- 88 -
5. 결론	- 90 -
참고문헌	- 91 -
영문 요약	- 94 -
감사의 글	- 96 -

그림 목차

그림 1 승용차에 대한 차량 CO ₂ 배출 및 연비규제 동향 [10]	- 12 -
그림 2 자동차산업에서 알루미늄 적용 동향 (ALCOA)[1]	- 12 -
그림 3 2013 AUDI A8 알루미늄 차체에 적용된 알루미늄합금 주조재 [11]	- 14 -

그림 4 2018 AUDI A8 알루미늄 차체에 적용된 알루미늄합금 주조재 [11]	- 14 -
그림 5 기존 차체부품 접합에 사용된 용접기법 모식도 GMAW(좌)[12], GTAW(중앙)[13], Laser Welding(우)[14]	- 15 -
그림 6 맞대기 마찰교반접합 모식도[17].....	- 16 -
그림 7 겹치기 마찰교반접합 모식도[18].....	- 17 -
그림 8 마찰교반접합에 적용가능한 이음부 형상 (a) 맞대기 이음부, (b) 모서리 맞대기 이음부, (c) T-맞대기 이음부, (d) 겹치기 이음부, (e) 다중 겹치기 이음부, (f) T-겹치기 이음부, (g) 필릿 이음부 [17].....	- 19 -
그림 9 겹치기 마찰교반접합공정의 모식도[19].....	- 20 -
그림 10 판재 1m 용접 시 용접법 별 길이방향으로의 변형량 차이 (A6061, Length 1 m, thickness 3 mm) [22]	- 22 -
그림 11 총 연간 생산량과 접합 길이 당 FSW 및 MIG 용접 비용 [20].....	- 23 -
그림 12 일반적인 FSW 공구 형상에 대한 모식도 [25].....	- 25 -
그림 13 겹치기 마찰교반접합부의 미세조직 영역 구분 [26].....	- 26 -
그림 14 겹침부 표면의 재료의 수직 흐름의 영향에 의해 형성된 접합부 단면에서의 Hook.....	- 27 -
그림 15 겹치기 마찰교반접합 장비- MTI RM-1 FSW Machine.....	- 31 -
그림 16 겹치기 마찰교반접합용 공구 - 전체.....	- 32 -
그림 17 겹치기 마찰교반접합용 공구 - 핀, 솔더부 확대.....	- 32 -

그림 18	겹치기 마찰교반접합 실험 모식도	- 33 -
그림 19	모재 인장시험 시편 모식도	- 35 -
그림 20	접합부 단면 체취 모식도	- 36 -
그림 21	접합부 비커스 경도 측정 모식도	- 36 -
그림 22	상온인장전단시험 시편 모식도	- 37 -
그림 23	모재 XRD 분석 결과	- 38 -
그림 24	모재 조직의 SEM 분석 및 EDS Point 분석 위치	- 39 -
그림 25	EDS Mapping 분석 결과	- 40 -
그림 26	모재 조직 관찰결과 (A) 광학 저배율, (B) 광학 고배율, (C) SEM 고배율	- 42 -
그림 27	모재의 (A) IPF Map, (B) unique grain color map	- 43 -
그림 28	모재의 α -Al의 결정립 크기 분포 (평균: 12.412 μm , 표준 편차: 10.145 μm , 최소: 1.619 μm , 최대: 42.844 μm)	- 43 -
그림 29	모재 비커스 경도 측정 결과	- 44 -
그림 30	모재 상온인장시험 결과	- 45 -
그림 31	회전속도 1000 rpm일 때, 이송속도에 따른 접합부 외관 형상 변화	- 47 -
그림 32	이송속도 50 mm/min일 때, 이송속도에 따른 접합부 외관 형상 변화	- 48 -
그림 33	이송속도(V)와 회전속도(N)에 따른 비드간격(l)	- 49 -
그림 34	이송속도 (mm/min) 변화에 따른 비드간격 변화	- 50 -

그림 35 회전속도 (rpm) 변화에 따른 비드간격 변화	- 50 -
그림 36 1000rpm-50mm/min일 때 접합부 단면	- 51 -
그림 37 접합부 단면에서의 TMAZ영역 거시 조직과 미세조직 (1000rpm-50mm/min) (A) 광학 저배율, (B) 광학 중배율, (C) 광학 고배율.....	- 52 -
그림 38 접합부 단면에서의 SZ영역 (1000rpm-50mm/min) (A) 광학 저배율, (B) 광학 고배율, (C) SEM 고배율	- 53 -
그림 39 TMAZ의 (A) IPF Map과 (B) unique grain color map	- 54 -
그림 40 TMAZ 영역에서의 α -Al 결정립 크기 분포 (평균: 6.565 μm , 표준 편차: 7.022 μm , 최소: 1.615 μm , 최대: 39.347 μm).....	- 54 -
그림 41 SZT의 (A) IPF Map과 (B) unique grain color map	- 55 -
그림 42 SZT 영역에서의 α -Al 결정립 크기 분포 (평균: 3.063 μm , 표준 편차: 1.651 μm , 최소: 0.323 μm , 최대: 7.613 μm).....	- 56 -
그림 43 SZB의 (A) IPF Map과 (B) unique grain color map	- 56 -
그림 44 SZB 영역에서의 α -Al 결정립 크기 분포 (평균: 2.892 μm , 표준 편차: 1.643 μm , 최소: 0.323 μm , 최대: 7.613 μm).....	- 57 -
그림 45 50 mm/min – 1000 rpm일 때 영역별 α -Al 결정립 크기 분포	- 57 -
그림 46 ADC12의 맞대기 마찰교반접합시 나타나는 결함의 유형	- 59 -
그림 47 이송속도 변화에 따른 접합부 단면 조직 변화	- 60 -
그림 48 회전속도 변화에 따른 접합부 단면 조직 변화	- 61 -

그림 49 유효 접합부 높이와 Hook 높이 기준 (1000 rpm-50 mm/min 조건에서 형성된 AS측에서의 Hook 형상).....	- 63 -
그림 50 이송속도 변화에 따른 접합부 넓이 변화.....	- 64 -
그림 51 교반부에서의 재료유동과 어니언링의 형성[44].....	- 64 -
그림 52 이송속도 변화에 따른 AS측 Hook 높이 변화.....	- 65 -
그림 53 이송속도 변화에 따른 AS측 유효 접합부 높이 변화.....	- 65 -
그림 54 이송속도 변화에 따른 RS측 Hook 높이 변화.....	- 66 -
그림 55 이송속도 변화에 따른 RS측 유효접합부 높이 변화.....	- 66 -
그림 56 회전속도 변화에 따른 접합부 넓이 변화.....	- 67 -
그림 57 회전속도 변화에 따른 AS측 Hook 높이 변화.....	- 68 -
그림 58 회전속도 변화에 따른 AS측 유효접합부 높이 변화.....	- 68 -
그림 59 회전속도 변화에 따른 RS측 Hook 높이 변화.....	- 69 -
그림 60 회전속도 변화에 따른 RS측 유효접합부 높이 변화.....	- 69 -
그림 61 회전속도 변화에 따른 접합부 단면 내부결함 크기 변화.....	- 71 -
그림 62 50 mm/min-3000 rpm 일 때, 형성된 Void형태의 결함 (A) Void 형태의 결함이 나타나는 접합부 단면, (B) 결함 인접 영역에서의 단면.....	- 71 -
그림 63 최대입열조건에서의 각 영역별 비커스 경도 측정 방법(각 영역별 20회 측정)-	73
그림 64 최대 입열조건에서 각영역별 비커스 경도 분포.....	- 73 -

그림 65 이송속도에 따른 SZ영역 비커스 경도 변화.....	- 77 -
그림 66 회전속도 변화에 따른 SZ영역 비커스경도 변화.....	- 79 -
그림 67 이송속도 변화에 따른 상온인장전단시험 후 외관형상	- 81 -
그림 68 회전속도에 따른 상온인장전단시험 후 외관형상.....	- 82 -
그림 69 겹치기 이음부의 인장전단시험 중 응력 분포 시뮬레이션 결과[45].....	- 83 -
그림 70 접합변수에 따른 최대 인장전단하중값과 상온인장전단시험 후 외관형상 (a) 내부결함을 형성하지 않거나 Void 형태의 결함을 가지는 경우 (50 mm/min-1000 rpm), (b) 비교적 큰 크기의 내부결함이 형성되는 경우(50 mm/min- 2000 rpm)-	83 -
그림 71 내부의 Tunnel 형태의 결함을 갖지 않는 경우의 파면 형상 (50 mm/min-1000 rpm) A) 유효 접합부의 연신된 딴플 형상, B) Hook 상부의 딴플 형상, C) Hook 하단부의 부분적인 딴플 형상, D) Hook 시작부의 겹침부 표면 형상	- 86 -
그림 72 이송속도 변화에 따른 접합부 단면에서의 Hook 높이(좌)와 파면에서의 Hook 높이(우).....	- 86 -
그림 73 내부의 Tunnel 형태의 결함을 갖는 경우의 파면 형상 (50mm/min-2000 rpm) (A) Tunnel 형태 결함 발생시 상온인장전단시험 후 파면 형상, (B) Tunnel 형태의 결함부의 파면 형상, (C) Tunnel 형태의 결함이 발생한 접합부 단면형상	- 87 -
그림 74 회전속도 변화에 따른 접합부 단면에서의 Hook 높이와 파면에서의 Hook 높이 -	87 -

그림 75 Mode1의 균열 전파 및 파단 모식도 (내부의 Tunnel 형태의 결함이 형성되지 않는 경우) (A) Lap Tip 부근에서의 응력집중으로 인한 균열 시작, (B) Hook을 따라 균열 전파, (C) Hook 상부의 유효 접합부를 따라 균열 관통 - 88 -

그림 76 Mode2의 균열 전파 및 파단 모식도 (내부의 Tunnel 형태의 결함이 형성되는 경우) (A) Lap Tip 부근에서의 응력집중으로 인한 균열 시작, (B) Tunnel 결함으로 균열 전파, (C) Tunnel 결함 상부로 균열 관통 - 89 -

표 목차

표 1 차량경량화 세부방법 및 특징[2].....	- 13 -
표 2 주요 글로벌 완성차업체의 경량화전략[2]	- 13 -
표 3 FSW와 MIG 용접법의 비교. [23].....	- 23 -
표 4 마찰교반접합시 주요 변수.[35]	- 28 -
표 5 ADC12 알루미늄합금 화학의 조성 (wt.%) [38]	- 30 -
표 6 겹치기 마찰교반 장비 사양	- 31 -
표 7 각 상의 화학 조성 표 (그림25 번호 표시).....	- 41 -
표 8 이송속도의 변화에 따른 상판, 하판의 비커스 경도 분포.....	- 76 -
표 9 회전속도 변화에 따른 상판, 하판 비커스 경도 분포 변화	- 78 -

1. 서론

1.1. 연구배경

최근, 지구온난화 및 자원고갈로 인해 환경보호와 에너지 절감을 위한 기술개발 요구가 높아지고 있다. 이에 따라, 세계 자동차산업에서는 배기가스 배출량 및 연비에 대한 규제가 강화되고 있으며, 이를 해결하기 위한 다양한 방안이 제시되고 있다. 배기가스 배출량 저감 및 연비 향상을 위한 방안으로는 크게 대체 연료의 개발, 엔진/구동계 효율 향상, 주행저항 저감, 차량 경량화등이 있다. 그중 차량경량화의 경우, 가장 현실적 대안이며 향후 그 중요성이 지속적으로 증가할 것으로 예측된다. 실제 공차중량 1,500kg의 5인승 승용차량을 10kg 경량화할 경우, 연비는 2.8% 향상되고, 배기가스인 이산화탄소와 질소산화물은 각각 4.3%, 8.8% 감소한다고 알려져 있다[2].

자동차의 경량화방법으로는 소재 변경, 부품 일체화 및 삭감, 박육화 및 중공화, 차량 소형화 등이 있다. 이 중 소재 변경이 경량화 효과가 가장 뛰어나다고 알려져 있으며, 차체 중량의 30%정도를 차지하는 차체 및 샤시를 경량화하기 위하여 현재 알루미늄 마그네슘, 고분자복합소재, 고강도 철강소재 등이 적용되어 기존의 철강소재를 점차 대체하고 있다[3]. 이 중 알루미늄합금의 경우 비강도가 우수하고 비교적 저렴한 소재 가격으로 자동차산업에서 철강 소재 다음으로 가장 많이 사용되는 경량금속소재이다. 그림2에 나타낸것과 같이, 보면 점차 자동차산업에서 알루미늄의 사용량이 증가하고 있으며, 그 적용 분야 또한 휠, 실린더 헤드, 엔진 블록 등과 같은 부품에서 후드, 도어, 차체부품 등으로 적용분야가 확대되고 있다. 표 1 및 표 2의 주요 글로벌 완성차 업체의 경량화 전략을 살펴보면 소재의 변경을 통한 경량화 전략이 주를 이루고 있는

것을 알 수 있다.

하지만, 알루미늄합금의 경우, 타 경량소재 대비 비교적 가격이 저렴함에도 불구하고 원소재 가격 격차가 철강 대비 3~5배가량 발생하며, 자동차 한대당 소재비 격차는 2~3배까지 발생한다[4]. 따라서, 알루미늄합금 전신재 대비 제조 용이성과 비용 저감의 효과를 향상시켜 시장 경쟁력을 확보할 수 있는 알루미늄합금의 주조재의 적용사례가 증가하고 있다. 그림 3 및 그림 4를 살펴보면 실제 독일 Audi사의 알루미늄 차체에 사용되는 알루미늄합금 주조재의 양이 과거 대비 최근 들어 증가한 것을 알 수 있다.

하지만, 알루미늄합금의 경우, 그림 5와 같은 기존의 차체부품의 접합방법에 주로 사용되었던 용융용접을 적용하는 경우 용융 및 응고 과정에서 산화가 용이하며, 기공 형성, 용접변형 발생 및 크랙 형성등이 용이하다. 그리고 국부가열이 어려우며 다량의 열의 급속주입을 필요하며, 가열색 판단의 어려움, 합금원소의 기화, 석출경화상의 소멸, 낮은 Laser 흡수율[5] 등으로 인해 요구되는 용접특성을 얻기가 어렵다는 문제점등이 있다. 특히, 기존의 저진공 다이캐스팅 등으로 제조된 주조재의 경우 높은 가스 함유량(10~30 cc/100 g Al) [6]에 의해 용융용접의 적용이 거의 불가능하다고 알려져 있으며, 전신재 대비 합금원소 비율이 높아 금속간 화합물 형성이 쉬워 더욱 용융용접이 어려운 문제점이 있다. 한편, 고진공 다이캐스팅기술을 통해 가스 함유량을 현저히 감소시킬 수 있지만[7], 여전히 내부에 가스를 함유하며, 내포된 주조결함에 의해 용융용접 시 요구되는 용접특성을 얻기 어렵다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로, 1991년 영국 TWI(The Welding Institute)에서 개발된 마찰교반접합(Friction Stir Welding, FSW)의 적용 시 고속으로 회전하는 공구(Tool)와 피접합체 간에 발생하는 마찰열을 이용하여, 용접 아래의 온도에서 접합이 이루어지는 고상 접합법으로 용융 및 응고과정에서 발생하는 결함을 피할 수 있다[8]. 그리고

흠(fume)과 스패터(spatter)가 발생하지 않고, 접합부에 응고에 의한 기공 발생이 없어 알루미늄합금 주조재의 접합에 적용시 우수한 접합특성을 가질 수 있다[9].

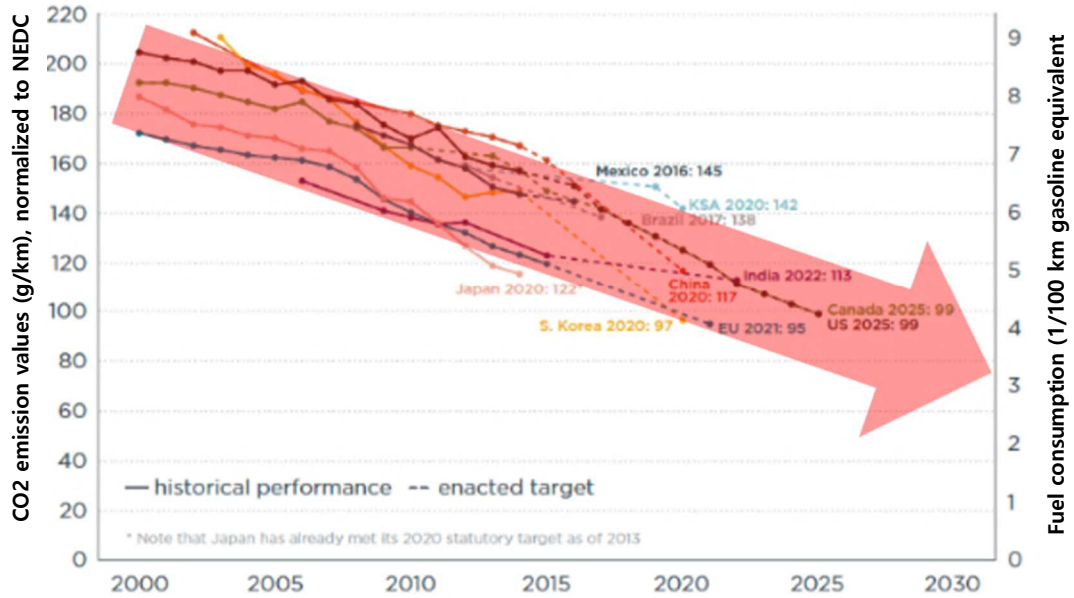


그림 1 승용차에 대한 차량 CO₂ 배출 및 연비규제 동향 [10]

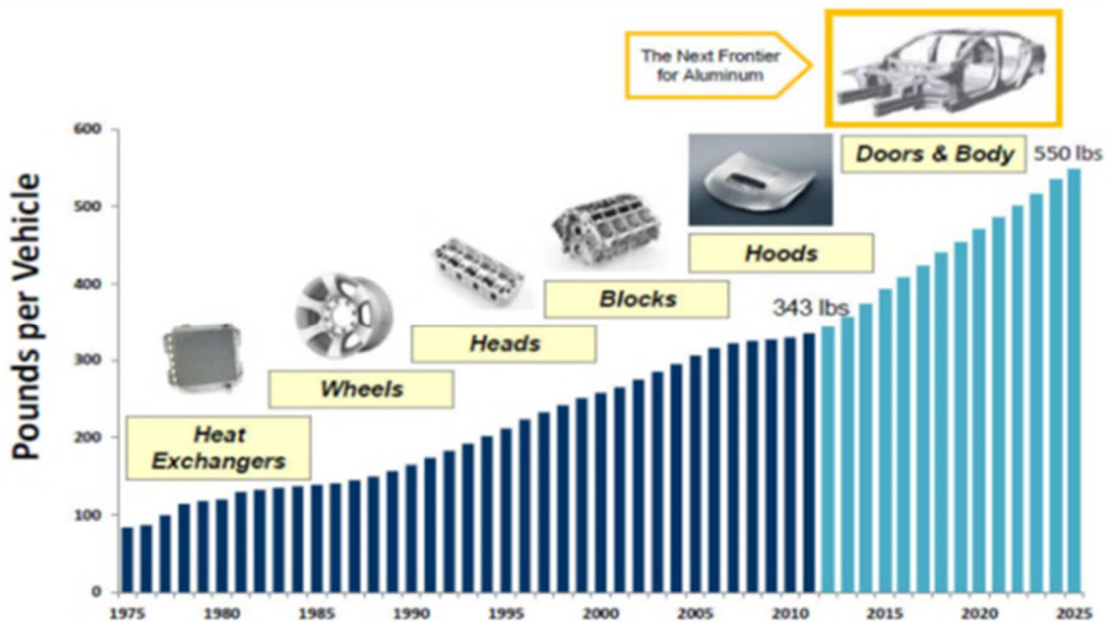


그림 2 자동차산업에서 알루미늄 적용 동향 (ALCOA)[1]

표 1 차량경량화 세부방법 및 특징[2]

차량 경량화 세부 방법 및 특징				
구분	의미	장점	단점	사례
구조의 경량화	요구 강도에 맞는 최적화 구조를 구현하여 소재 사용을 최소화	<ul style="list-style-type: none"> 기존 역량 활용 최대화 개발시간 및 원가상승 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> 혁신적 설계 변경의 한계 한정적인 적용 범위 	<ul style="list-style-type: none"> 튜브구조, 신구조, 복합결합구조 최적 용접 설계 Space Frames
공법의 경량화	기존 소재를 보다 정교하게 가공하여 소재 사용량을 줄일 수 있는 방식	<ul style="list-style-type: none"> 기존소재 활용 가능 원가상승 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> 대규모 설비투자 필요 	<ul style="list-style-type: none"> TWB(맞춤형 플렉싱) 하이드로포밍 핫스탬핑
소재의 경량화	기존 철강소재를 경량소재로 대체 혹은 부분적으로 결합하는 방식	<ul style="list-style-type: none"> 경량화 효과가 가장 뛰어남 	<ul style="list-style-type: none"> 공법 및 설계 변화로 인한 높은 비용 부담 강도 등 기계적 성능 저하 위험 	<ul style="list-style-type: none"> 알루미늄, 마그네슘 고장력강판 플라스틱, 탄소섬유, 섬유유리

Source: KDB산업은행, 삼성KPMG 경제연구원 재구성

표 2 주요 글로벌 완성차업체의 경량화전략[2]

주요 글로벌 완성차 업체의 경량화 전략		
회사명	경량화 전략 및 목표	모델명
Ford	<ul style="list-style-type: none"> 알루미늄 배디 적용으로 기존 철강 차체 대비 중량 340kg 감소 연비개선과 안전 규제를 동시에 충족시키기 위한 고급 소재 활용 	F-150
GM	<ul style="list-style-type: none"> 알루미늄, HSS, CFRP 집중 투자를 통해 총 중량의 15% 감소 목표 트럭 제품군 무게를 2020년까지 454kg 경량화 목표 	MY2016
BMW	<ul style="list-style-type: none"> 모델별 차별적 소재 적용(라이프 모델은 CFRP, 드라이브 모델은 알루미늄으로 제작) 	i8
Audi	<ul style="list-style-type: none"> 약 20%의 알루미늄과 고합금강 사용으로 이전 모델 대비 100kg 감소 조경량 알루미늄 ASF로 일반 강철 대비 차체 강성 60% 증가 및 중량 140kg 감소 	RS6, A8
VW	<ul style="list-style-type: none"> 이전 모델 대비 중량 100kg 감소 및 23% 연비개선 이중소재 전략을 비용을 절감할 수 있는 경량화 솔루션으로 지목함 	7세대 Golf
Mercedes	<ul style="list-style-type: none"> 알루미늄과 철의 혼합소재로 철강 차체 대비 중량 70kg 감소 및 12% 연비개선 알루미늄 외판 패널로 이전 모델 대비 중량 100kg 감소 	C-Class, S-Class, GL Class
Toyota	<ul style="list-style-type: none"> 차량 전후방 범퍼에 Polypropylene resin 사용으로 이전 모델 대비 중량 50kg 감소 CFRP 사용으로 동급 자동차 중량의 1/3 수준인 420kg 감소 	Avalon Hybrid 1/X
Honda	<ul style="list-style-type: none"> HSS ACE Body structure 적용 알루미늄, 마그네슘, HSS로 본체의 55% 제작하여 기존 모델 대비 중량 125kg 감소 	Odyssey, Acura MDX

Source: ICCT, 언론사 종합, 삼성KPMG 경제연구원 재구성

- Guss(Alu)
Casting (aluminium)
- Profile (Alu)
Section (aluminium)
- Blech (Alu)
Sheet (aluminium)
- Magnesium
Magnesium



그림 3 2013 AUDI A8 알루미늄 차체에 적용된 알루미늄합금 주조재 [11]

Der neue Audi A8
 Aluminium-Gussknoten im Audi Space Frame
 The new Audi A8
 Aluminium castings in the Audi Space Frame
 04/17

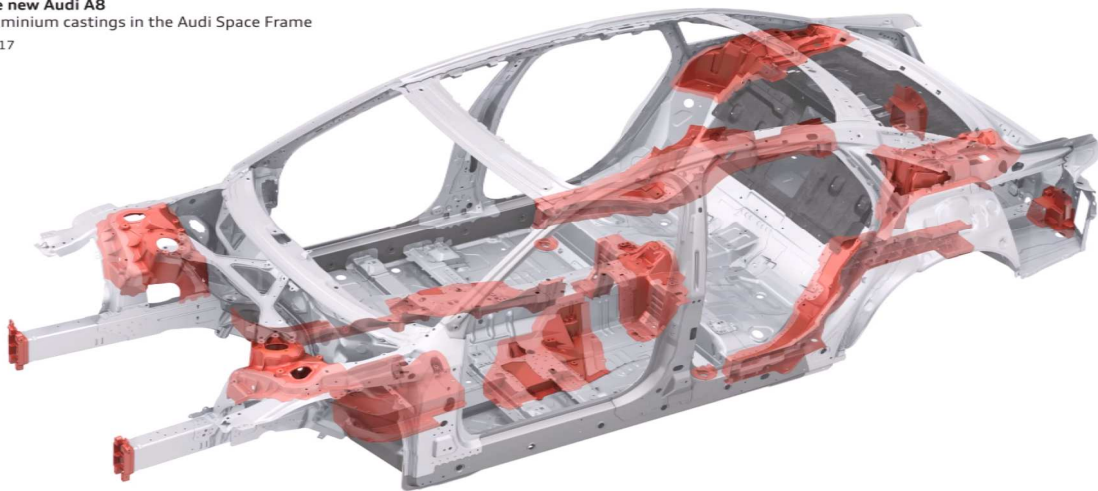


그림 4 2018 AUDI A8 알루미늄 차체에 적용된 알루미늄합금 주조재 [11]

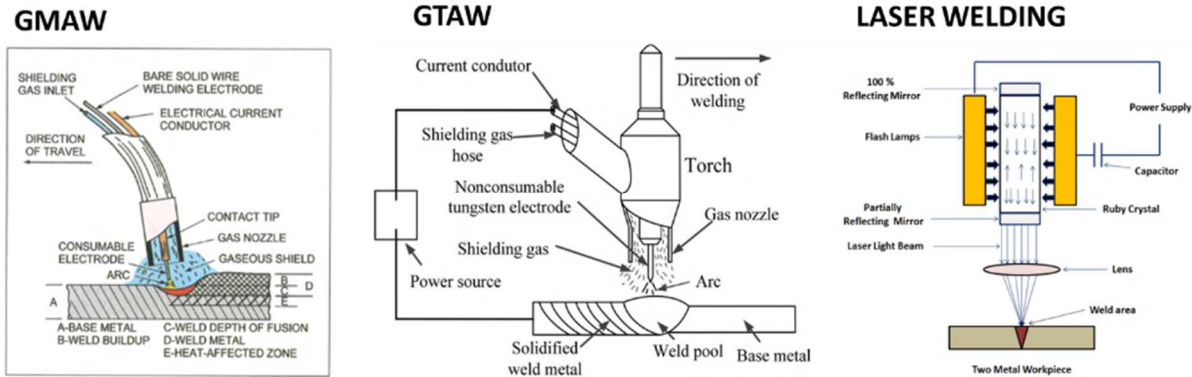


그림 5 기존 차체부품 접합에 사용된 용접기법 모식도

GMAW(좌)[12], GTAW(중앙)[13], Laser Welding(우)[14]

1.2. 연구 목적

자동차산업에서 차체부품의 경우 알루미늄합금 주조재의 적용 시 주물의 박육화, 형상 복잡화, 대형화, 높은 생산성과 고강도, 고인성의 기계적 특성등을 요구하게 된다. 따라서, 다양한 주조방법 중 고진공 다이캐스팅공정의 적용시 금형 캐비티 내부를 50 mbar 이하로 유지하여 주조재에서 가장 큰 문제가 되는 가스 함유량을 현저히 감소시킬 수 있다. 그리고 다이캐스팅공정의 특징상 고속생산 및 치수정확도가 높아 차체부품에 적용하기가 용이하다 [7, 15]. 실제 독일 Audi사의 순 알루미늄 자동차의 차체, 차문, 필러와 같은 부품의 경우, 두께 2~3mm의 대형 박판부품을 다이캐스팅 알루미늄합금으로 적용한 사례가 있다[16].

그리고, 자동차산업에서 주로 사용되는 박판부품의 경우, 두 부재를 맞대어 접합하는 맞대기 접합(Butt Welding)보다는 두 부재의 일부를 겹쳐 접합하는 겹치기 접합(Lap Welding)을 더 많이 필요로 하는 편이다. 하지만, 마찰교반접합의 경우, 맞대기 접합에 기초를 두고 연구 및 개발이 진행되어, 대부분의 연구가 그림 6의 맞대기

마찰교반접합(Friction Stir Butt Welding: FSBW)에 치중되어 있고, 그림 7의 겹치기 마찰교반접합(Friction Stir Lap Welding: FSLW)에 대한 연구는 부족한 실정이다. 특히, 알루미늄합금의 마찰교반접합의 경우, 주로 알루미늄합금 전신재에 대한 연구가 많으며 알루미늄합금 주조재의 적용에 관한 연구가 부족하다. 그로 인해 알루미늄합금 주조재의 겹치기 마찰교반접합에 관한 연구는 더욱 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 ADC12 알루미늄합금 다이캐스팅 판재를 사용하여 동종간 겹치기 마찰교반접합을 수행하여 접합변수가 접합부 특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

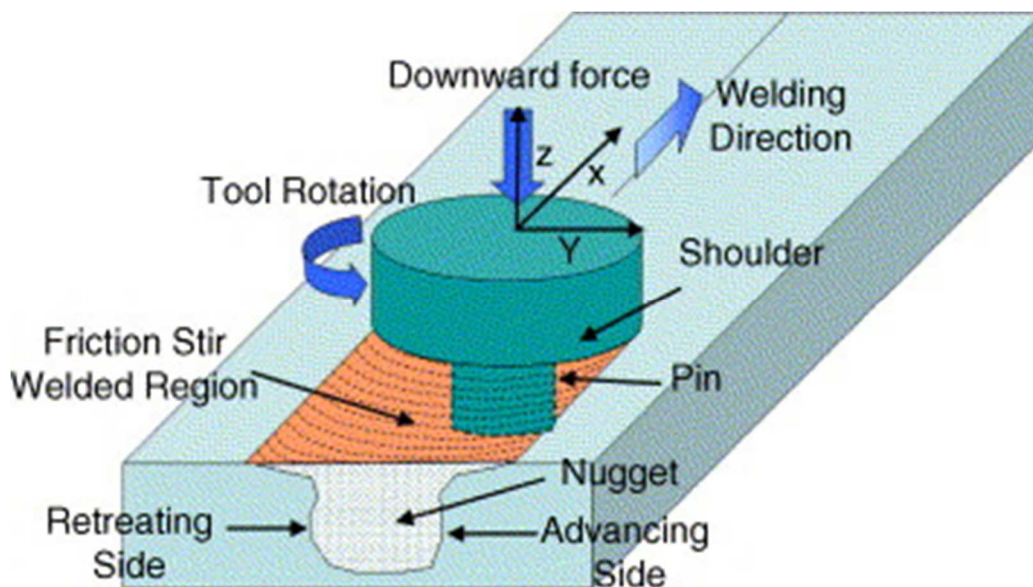


그림 6 맞대기 마찰교반접합 모식도[17]

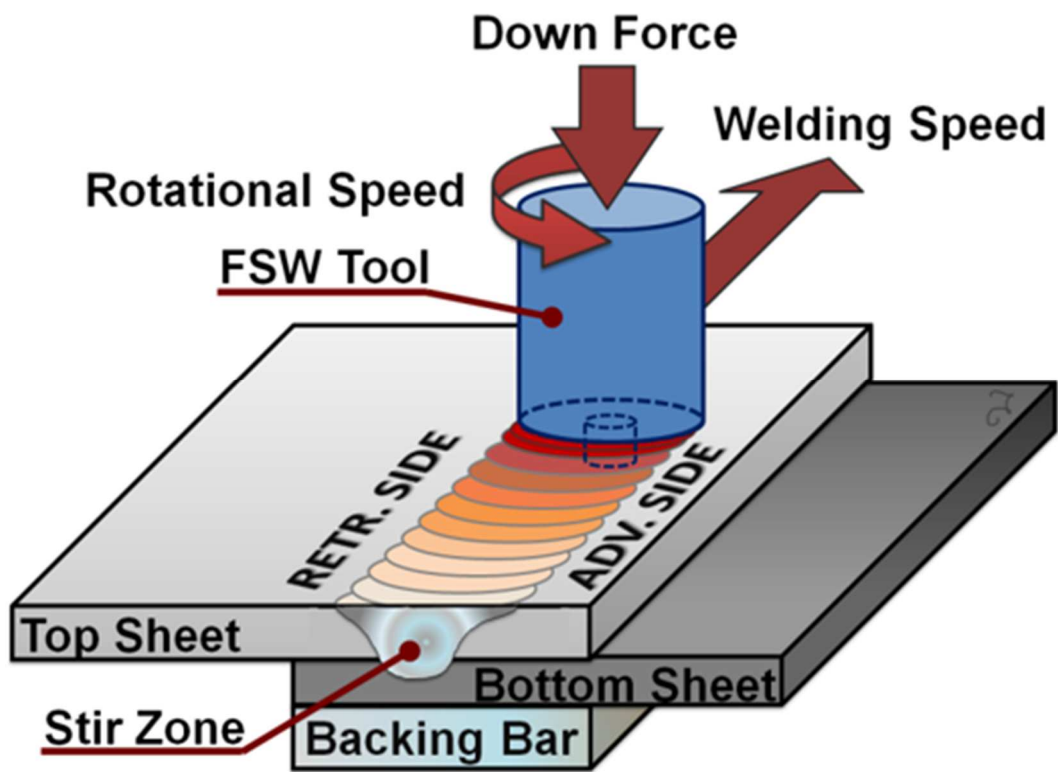


그림 7 겹치기 마찰교반접합 모식도[18]

2. 이론적 배경

2.1. 마찰교반접합

2.1.1. 마찰교반접합의 원리

마찰교반접합은 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 1991년 개발된 새로운 고상접합기술로 알루미늄합금의 접합에 처음 적용되었으며[8], 경량금속재료의 접합에 있어서 획기적인 고상접합법으로 알려져, 현재 유럽 및 미국, 일본 등에서 연구, 개발 및 산업화가 급속히 진행되고 있다. 이러한 마찰교반접합은 그림8에 나타낸 것과 같이 다양한 이음부에 적용이 가능하며 주로 그림8(a) 및 (d)와 같은 맞대기 및 겹치기 이음부에 적용이 용이한 것으로 알려져 있다. 그 외의 이음부의 경우 맞대기 및 겹치기의 조합으로 형성할 수 있으며 필요에 따라 그림8(g)와 같은 필릿 이음부의 적용 또한 가능하다. [17]

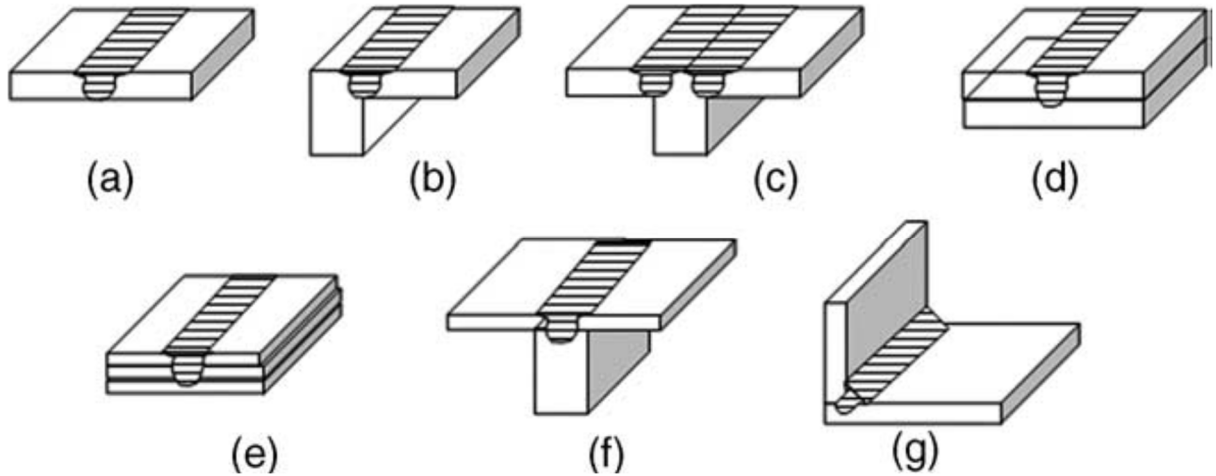
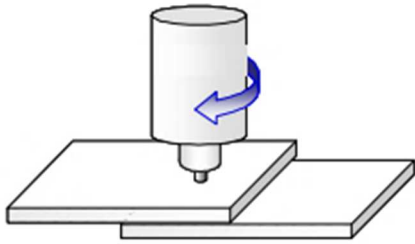


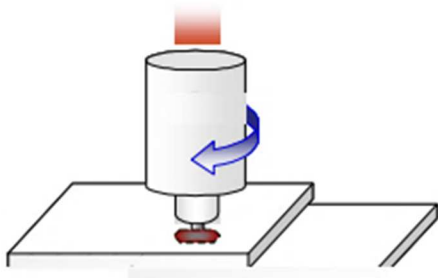
그림 8 마찰교반접합에 적용가능한 이음부 형상

- (a) 맞대기 이음부, (b) 모서리 맞대기 이음부, (c) T-맞대기 이음부, (d) 겹치기 이음부,
 (e) 다중 겹치기 이음부, (f) T-겹치기 이음부, (g) 필릿 이음부 [17]

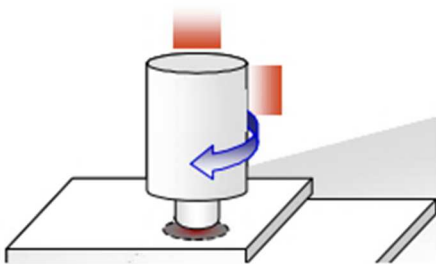
이때, 접합은 공구에 의해 발생한 마찰열에 의해 재료가 소성유동되며 접합되는 원리는 유사하며, 이음부의 형태에 따라 구분된다. 본 연구에서 사용된 겹치기 마찰교반접합을 예로 들어 그 원리를 살펴보면 그림 9와 같이 핀(Pin)과 솔더(Shoulder)로 구성된 비소모성 공구를 고속으로 회전하며 피접합체에 삽입한다. 이때, 핀이 피접합체와 접촉하여 마찰열이 발생된다. 이어서 공구가 삽입되며 솔더 부분이 피접합체에 접촉하여 가열영역을 확대시키게 된다. 이후, 마찰열에 의해 연화된 재료가 공구의 회전과 이송에 의해 소성유동되며, 접합이 이루어진다. 이때, 공구의 회전방향과 진행방향에 따라 두 방향이 같은 쪽을 전진측(Advancing side, AS)이라 하고 부 방향이 반대인 쪽을 후진측(Retreating side, RS)이라 한다.



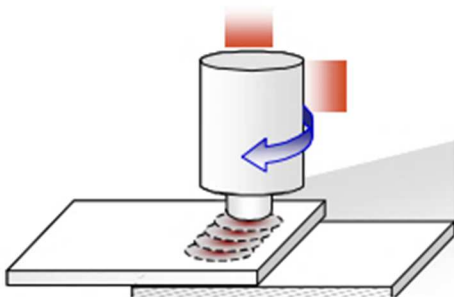
(A) 핀과 솔더로 구성된 비소모성 공구가
고속으로 회전



(B) 회전하는 공구가 피접합체에 천천히
삽입되며, 핀이 피접합체와 접촉하여
마찰열이 발생



(C) 솔더 부분이 접촉되며 가열영역을
확대, 마찰열에 의해 재료가 연화
되며 소성유동 발생



(D) 회전하는 공구가 이송됨에 따라
연화된 재료의 소성유동에 의해 접합

그림 9 겹치기 마찰교반접합공정의 모식도[19]

2.1.2. 마찰교반접합의 특징

마찰교반접합(FSW)은 알루미늄합금의 접합에 적용 시 차폐가스가 필요하지 않고 용가재 또한 요구되지 않는다. 그리고, 접합 중에 흠의 발생도 없고 적외선, 자외선 등의 유해광선도 발생하지 않는 환경친화적 접합공정이다[20]. 산업현장에서 주로 사용되는 용융용접방법인 MIG 및 YAG laser 용접과도 비교하였을 때, 그림 10과 같이 동일한 구속조건에서 접합에 따른 변형이 무시할 정도로 적다. 그리고 표 3과 그림 11에 나타낸것과 같이, 연간 50,000m 용접을 실시한다 가정하였을 때, GMAW에 대비하여 단위길이당 원가가 약 10% 적게 소요되며 연간 용접길이가 일정한 수준을 초과하게 되면 GMAW에 비해 경제성이 우수한 것을 알 수 있다. 특히, 마찰교반접합법은 고상상태에서 접합하기 때문에, 접합에 따른 변형이 매우 적으며, 알루미늄합금, 마그네슘 합금, 다이캐스팅 등으로 제조된 주조 제품, 금속기지복합재료 등 기존 용접기술의 적용이 거의 불가능했던 재료의 접합이 가능하여 피접합재의 선택에 대한 자유도가 높다는 특징이 있다[21].

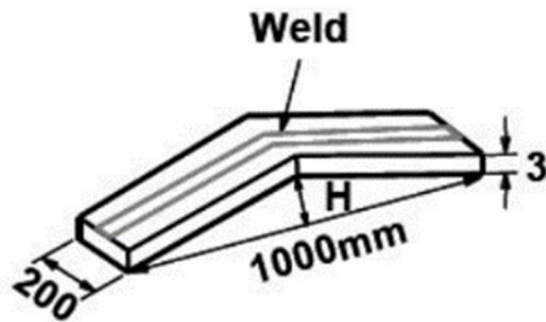
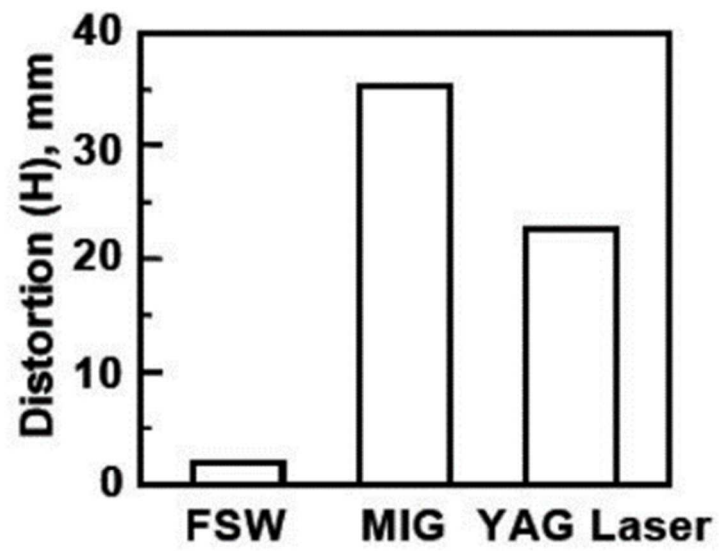


그림 10 판재 1m 용접 시 용접법 별 길이방향으로의 변형량 차이 (A6061, Length 1 m, thickness 3 mm) [22]

표 3 FSW와 MIG 용접법의 비교. [23]

	Unit	FSW	MIG
Machine cost	EUR/m	0.84	0.53
Weld length	m/yy	50000	50000
Weld speed	m/min	1.50	0.54
Arc time	h/m	0.0111	0.0309
Duty cycle	-	0.24	0.34
License cost	EUR/m	0.86	0.00
Labor wages	EUR/m	1.16	2.27
Tool cost	EUR/m	0.05	0.00
Filler cost	EUR/m	0.00	0.26
Energy cost	EUR/m	0.00	0.01
Shielding cost	EUR/m	0.00	0.19
Total cost	EUR/m	2.92	3.25

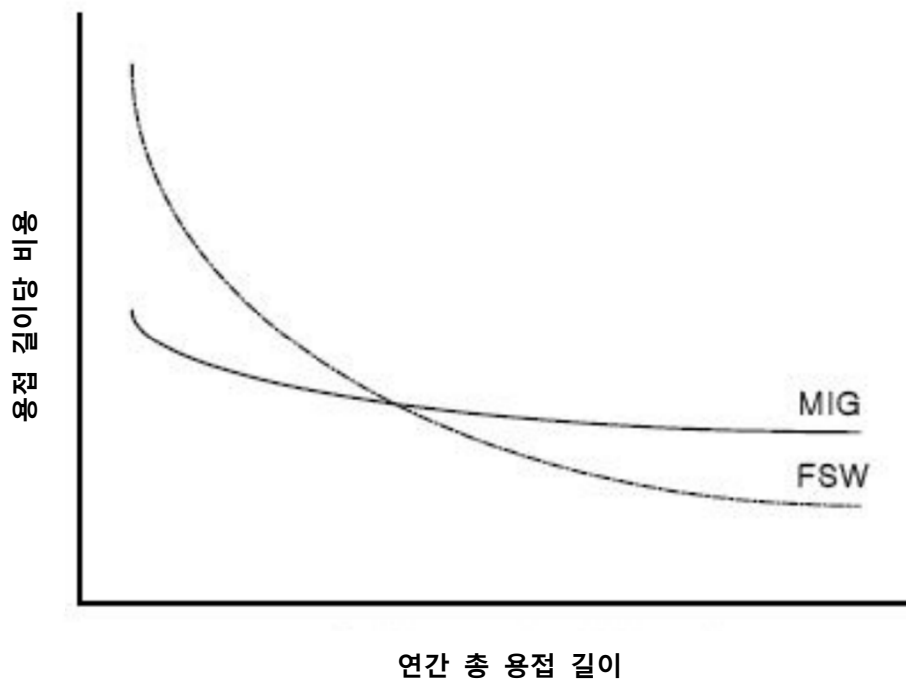


그림 11 총 연간 생산량과 접합 길이 당 FSW 및 MIG 용접 비용 [20]

2.1.3. 마찰교반접합 공구의 형상 및 특징

마찰교반접합에 사용되는 공구는 일반적으로 큰 직경을 가지는 솔더(Shoulder)부와 비교적 직경이 작은 특수한 형상으로 가공된 핀(Pin)부로 구성된다. 각 부분의 역할은 핀의 경우 피접합체에 직접 삽입되어 소성유동을 유도하는 역할을 하며, 겉면에 나사산을 가공하여 교반력을 증가시키기도 한다. 이때 핀의 길이는 피접합체재의 두께 및 종류에 따라 다르게 설계된다. 일반적으로, 겹치기 마찰교반접합의 경우에는 상판과 하판의 강도 차이에 따라 강도 차이가 크지 않는 경우, 핀의 길이를 상판의 두께보다 길게하여 하판 내부까지 삽입하여 상판과 하판의 소성유동을 동시에 일으켜 접합한다. 그리고, 상판과 하판의 강도 차이가 큰 경우, 핀 길이는 하판의 표면 또는 하판의 표면에 약간 삽입되는 길이를 선정한 후, 계면의 반응을 유도하여 접합을 실시한다[24]. 솔더는 피접합체와 접촉하여 마찰열을 발생시키며, 접합 중 재료의 상하유동에 의한 재료의 방출을 방지한다. 공구의 경우, 재료의 교반효과를 증가시키기 위해서 솔더 또는 핀의 형상을 특이한 형태로 가공하기도 한다. 그림 12는 마찰교반접합에서 일반적으로 사용되는 공구 형상의 5가지 모식도를 나타낸다. 일반적으로 알루미늄 및 마그네슘합금과 같은 경량금속재료의 마찰교반접합에 사용되는 공구의 소재는 공구강 (SKD 계열), 고속도강 (SKH 계열) 합금이 많이 사용되며 공구의 소재는 접합과정 중 높은 마찰열과 전단응력이 가해지기 때문에, 내마모성, 인성, 고온 전단강도등이 매우 중요하다.

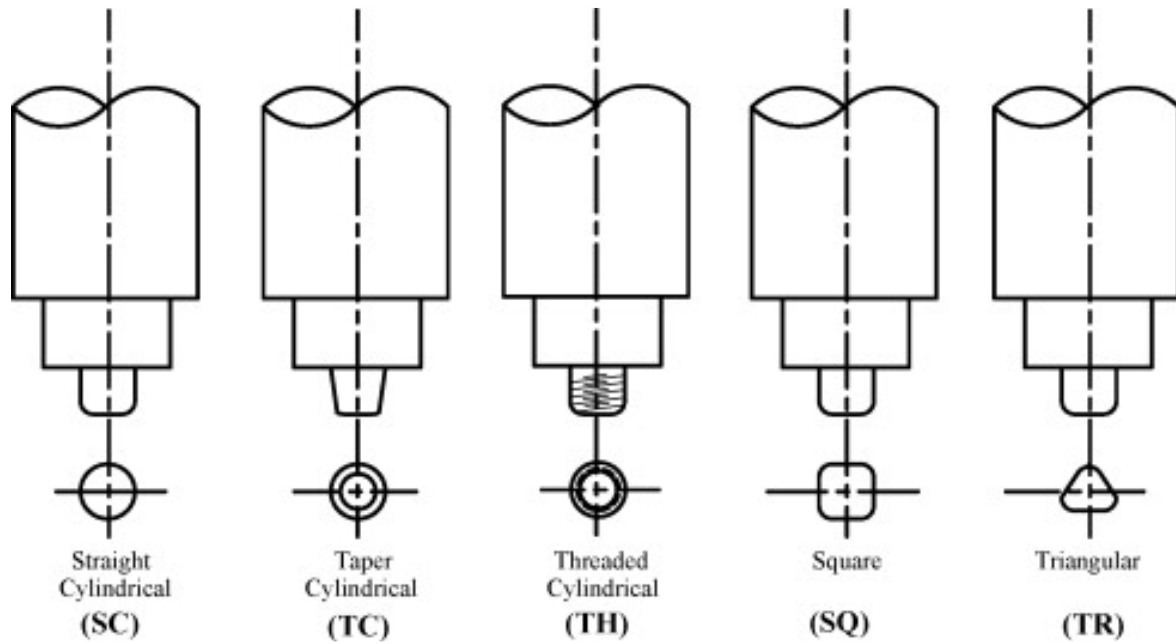


그림 12 일반적인 FSW 공구 형상에 대한 모식도 [25]

2.1.4. 곁치기 마찰교반접합부의 조직 특성

2.1.4.1. 곁치기 마찰교반접합부의 미세조직적 영역 구분

곁치기 마찰교반접합시 나타나는 접합부 단면의 거시조직은 그림 13과 같이 크게 모재부(Base metal, BM), 열영향부 (Heat Affected Zone, HAZ), 열-기계적 영향부(Thermo-Mechanical Affected Zone, TMAZ), 교반부(Stir Zone, SZ)로 4가지 영역으로 구분된다[26]. TWI에서는 접합 이음부의 단면의 거시조직을 크게 4가지 영역으로 구분하여 개념적으로 다음과 같이 정의 하였다[27].

- A. 모재부 (BM): 마찰열과 기계적 교반에 의한 소성변형의 영향을 받지 않아 미세조직 및 기계적인 특성의 변화가 없는 모재 부분
- B. 열영향부 (HAZ): 열-기계적 영향부와 인접한 영역으로 소성변형의 영향은 받지 않지만 마찰열에 의해 미세조직 및 기계적 특성이 변하는 영역
- C. 열-기계적영향부 (TMAZ): 교반부에 인접한 영역으로 접합 공구에 의한 극심한 소성변형 및 마찰열의 영향을 받는 부분으로 교반부의 재료 유동에 따라 연신된 결정립 형태를 가지는 영역
- D. 교반부 (SZ): 접합 공구에 의해 직접 교반 되는 영역으로 마찰열과 기계적 교반에 의해 동적 재결정현상이 발생하며, 주로 Onion ring 형태가 발생하는 영역.

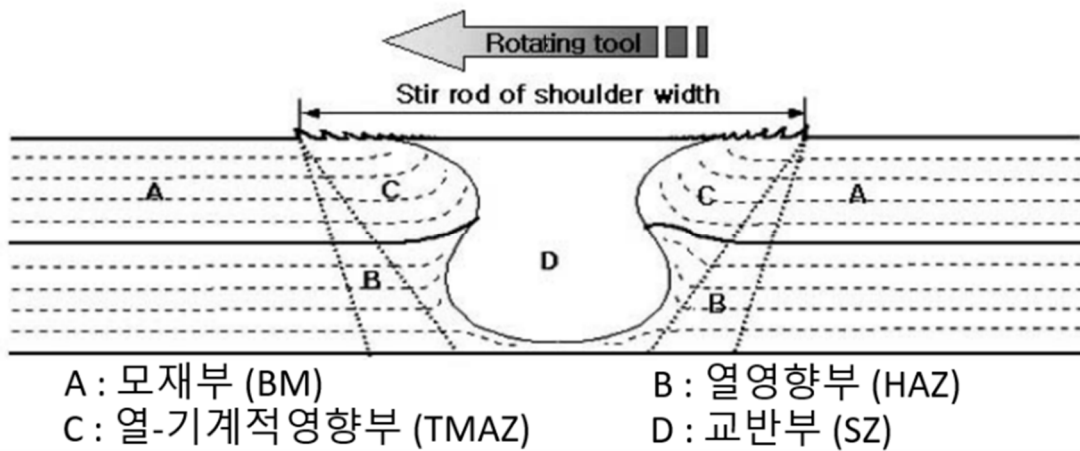


그림 13 겹치기 마찰교반접합부의 미세조직 영역 구분 [26]

2.1.4.2. Hook

Hook이란 맞대기 마찰교반접합과 달리 겹치기 마찰교반접합시 나타나는 구조로서, 초기의 겹침부표면이 교반부 인근 RS 와 AS측에서 공구의 교반에 의해 소성유동에 따라 접합되지 않은 채 그림 14 와 같이 Pull-up과 Pull-down되어 형성된다[28]. 이러한 Hook은 금속간 결합을 이루지 못하고, 연속된 산화물층이 맞닿아 있거나 부분적으로 산화물층이 제거되고 금속간 결합을 이루어 불연속적인 선형태로 형성된다. 기존의 연구에 따르면, Hook의 높이는 회전속도에 비례하며 접합속도에는 반비례하는 것으로 알려져 있다[29-31]. 특히, Hook의 높이가 높아짐에 따라 상판의 유효두께(Effective sheet thickness, EST)는 감소하게 되어 접합강도는 감소하는 것으로 알려져 있다[29-33]. 그 외에도 Hook의 높이 뿐만 아니라 크기와 방향에 따라서도 접합강도에 영향을 미친다는 연구 또한 존재한다[34].

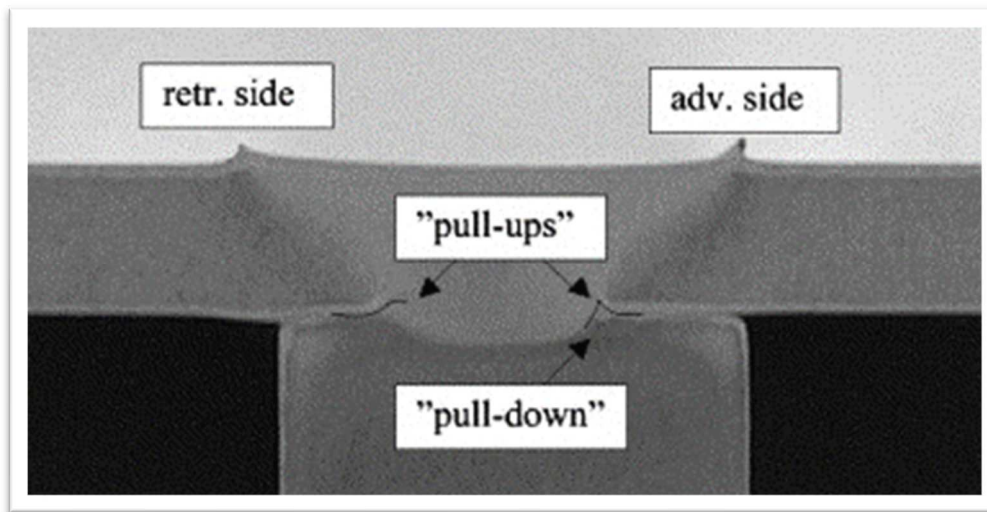


그림 14 겹침부 표면의 재료의 수직 흐름의 영향에 의해 형성된 접합부 단면에서의 Hook

2.1.5. 마찰교반접합의 공정변수

마찰교반접합의 경우 주요접합변수는 표 4와 같이 공구 형상, 회전속도, 접합속도, 공구 각도, 접합재의 구속방법, 유지시간 등이 있으며, 이러한 변수는 피접합재의 재질, 형상 및 두께 등에 따라 주로 선택된다. 다양한 접합변수 중 Mishra et al.은 두 가지 매개 변수의 영향이 중요하다고 언급하였다. 이는 시계 방향 또는 시계 반대 방향으로 공구 회전속도 (ω , rpm)와 공구 이송속도 (v , mm/min)이다. 공구의 회전은 회전하는 핀 주변의 재료를 교반하고 혼합하는 결과를 가져오고, 공구의 이송은 교반 된 재료를 핀의 앞쪽에서 뒤쪽으로 이동시켜 접합공정을 완료하기 때문이다[17]. 이러한 두 인자는 아크용접에서 용접전류/아크전압과 용접속도와 유사한 접합변수이다.

표 4 마찰교반접합시 주요 변수.[35]

welding factors		contents
tool shape		quality, shapes, thickness
tool depth	probe	base metal thickness
	shoulder	base metal thickness
tilting angel		advancing tilting angel
rotating speed		quality, Thickness, pin shapes
welding speed		compare with rotation speed
fixing		jig connecting

마찰교반접합의 경우, 고속으로 회전하는 공구가 피접합재에 삽입되고 이송됨에 따라 접합이 이루어지는 원리이며, 이때 공구와 피접합재 사이의 마찰열과 기계적 교반에 의해 접합부 특성이 결정된다. 따라서 공구의 크기 및 삽입 깊이가 일정한 경우, 회전속도와 이송속도가 입열량 및 기계적 교반에 미치는 영향을 보면 다음과 같다.

1) 회전속도와 이송속도에 따른 입열량 이론[36].

$$q_1 = \frac{q_0}{V} = \frac{4 \pi \mu N R^3}{3 v} \text{ -----(1)}$$

$$q_1 \propto \frac{N}{V} \text{ -----(2) [q}_1\text{: 단위길이당 입열량 } (\frac{J}{mm})]$$

여기서, q_0 : heat input per unit area(W/mm²)

μ : friction coefficient

N: Rotation Speed (rev/min)

R: radius of shoulder (mm)

V: Welding Speed (mm/s)

2) 회전속도와 이송속도에 따른 기계적 교반 이론[37].

$$P_0 = 2\pi NT = N_p N^3 D^5 h^5 \rho \text{ ----(1)}$$

$$P_1 = \frac{N_p N^3 D^5 h^5 \rho}{V} \text{ -----(2) [P}_1\text{: 단위길이당 교반세기 } (\frac{J}{mm})]$$

여기서, P: Stirring intensity (W)

T: torque (N·mm)

N: Rotation speed(rev/min)

N_p : Power number (Constant)

D: Diameter of shoulder (mm)

h: Probe length (mm)

ρ : density (N/mm²)

3. 실험방법

3.1. 피접합재

본 연구에서 피접합재로는 길이 125 mm, 폭 40 mm, 두께 2mm의 ADC12 알루미늄합금 다이캐스팅 판재를 사용하였다. 이에 대한 화학 조성은 표에 나타내었다[38].

표 5 ADC12 알루미늄합금 화학의 조성 (wt%)[38]

Element	Al	Si	Cu	Fe	Mg	Ni	Sn	Zn	Other
Chemical									
Composition	77.3~86.5	10.5~12.0	3.0~4.5	≤ 1.3	≤ 0.10	≤ 0.50	≤ 0.35	≤ 3.0	≤ 0.50
(wt%)									

3.2. 겹치기 마찰교반접합 실험

3.2.1. 접합용 장비

본 연구에서 사용된 겹치기 마찰교반접합용 장비는 그림 15에 보이는 MTI RM-1 FSW Machine을 사용하였다. 이 장비의 사양은 표 6에 나타내었다.



그림 15 겹치기 마찰교반접합 장비- MTI RM-1 FSW Machine

표 6 겹치기 마찰교반 장비 사양

Materials	Alloys: Al, Mg, Ti, Steels, Superalloys, etc.	Z-Axis	Stroke: 400 mm (16 in) Max velocity: 1000 mm/min (39 ipm) Max force: 67 kN (15000 lbf)
Spindle	Speed range: 100-3000 rpm Torque: 300 Nm at 50 to 766 rpm	A-Axis	+/- 6 deg min (hardstop-to-hardstop) +/- 5 deg min (softstop-to-softstop/working range) +/- 5 deg min (range requirement)
X-Axis	Stroke: 700 mm (27.5 in) Max velocity: 3000 mm/min (118 ipm) Max force: 22.5 kN (5000 lbf)	Service Requirements	Air: 80 psi (5.5 bar) 3.5 scfm Argon: 60 ft ³ /hr (28 l/min) Supply voltage: 480 VAC/60 Hz, 3 phase, 100A
Y-Axis	Stroke: 305 mm (12 in) Max velocity: 3000 mm/min (118 ipm) Max force: 22.5 kN (5000 lbf)	Data Monitoring	Temperature telemetry system (MegaStir™)

3.2.2. 공구의 형상

본 연구에서 사용한 겹치기 마찰교반접합용 공구의 형상은 그림 16 및 그림 17에 나타내었다. 접합용 공구는 핀의 형상은 M5, 직경은 5 mm, 길이는 2.7 mm이며, 솔더 직경은 10 mm로 제작하였다.



그림 16 겹치기 마찰교반접합용 공구 - 전체

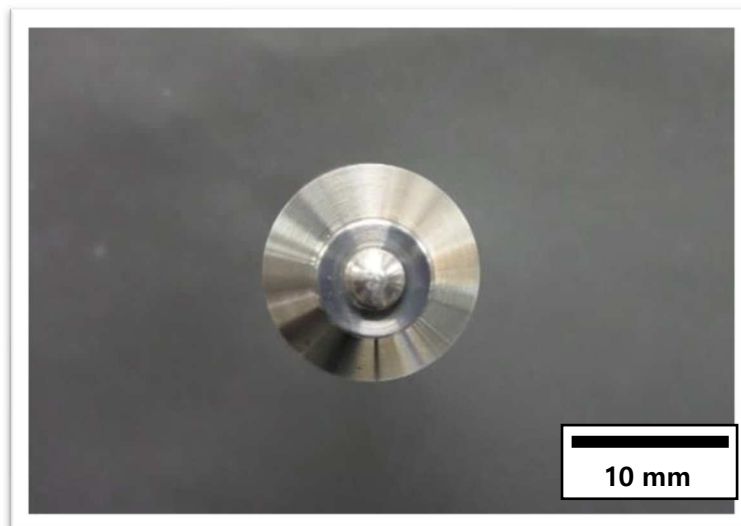


그림 17 겹치기 마찰교반접합용 공구 - 핀, 솔더부 확대

3.2.3. 접합조건

본 연구에서는 그림 18과 같이 접합을 실시하였다. 이때, 접합조건은 ADC12 알루미늄합금 다이캐스팅 판재의 겹치기 마찰교반접합시 접합변수에 따른 접합부 특성을 알아보기 위하여, 접합용 공구의 각도는 0°, 삽입깊이는 2.8 mm로 유지하며, 접합용 공구의 회전속도를 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 rpm으로 공구의 이송속도를 50, 100, 150, 200, 300 mm/min으로 변화시켰다.

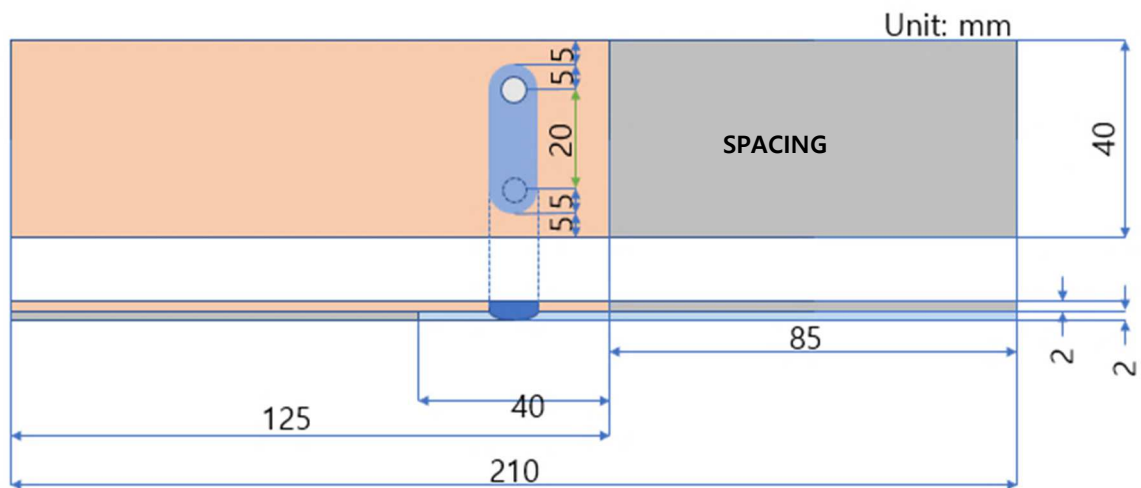


그림 18 겹치기 마찰교반접합 실험 모식도

3.3. 특성평가

3.3.1. 모재 특성평가

3.3.1.1. 모재 조직특성

모재의 미세조직 관찰을 위하여 BUEHLER사의 Phoenix 4000 장비를 이용해 #600, #800, #1000, #1200, #1500, #2000 사포를 통해 조연마 실시하였다. 조연마 후 미세연마의 경우 3 μ m 및 1 μ m Diamond suspension과 0.05 μ m 알루미나를 이용하여 경면으로 연마하였다. 실온에서 Keller 용액을 이용하여 12초간 에칭한 후 Olympus사의 광학현미경 BX51M 장비와 SEM를 이용하여 모재의 조직 관찰을 실시하였다. 모재의 상분석을 위해 EDS(Energy-dispersive X-ray spectroscopy)와 XRD(X-Ray Diffractometer)를 이용하여 분석을 실시하였다.

3.3.1.2. 모재 경도특성

모재의 경도분포를 관찰하기 위하여, KS B ISO 14271에 의거하여, 경도시험을 실시하였다. 측정장비는 Mitutoyo사의 Vickers micro-hardness 시험기 HM-200을 이용하였다. 인가하중은 100gf로 설정하고, 유지시간은 10 sec로 일정하게 유지하여 시험하였다.

3.3.2.3. 모재 인장특성

모재의 인장특성을 측정하기 위하여 INSTRON사의 5985장비를 이용하여 상온인장시험을 실시하였다. 이때, 인장시편은 KS B 0801에 의거하여 제작하였으며, 상온인장시험 시 Crosshead speed를 5mm/min으로 일정하게 유지하여 실시하였다.

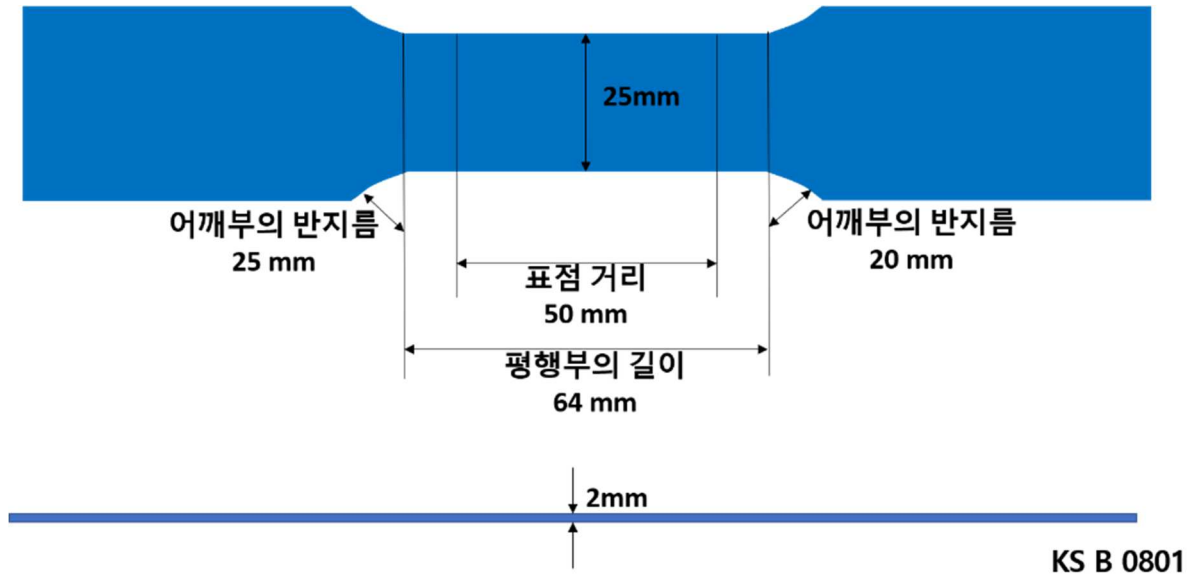


그림 19 모재 인장시험 시편 모식도

3.3.2. 접합부의 외관형상 관찰

겹치기 마찰교반접합 후 접합변수에 변화에 따른 접합부의 외관형상을 관찰하였다. 외관형상을 통해 외부 결함 유무, Weld pitch 간격, 접합 후의 피접합재 변형 정도, 접합부 뒷면의 상태 등을 디지털카메라를 이용하여 관찰하였다.

3.3.3. 접합부 조직 관찰

겹치기 마찰교반접합 후 접합부 조직을 관찰을 위하여 접합부 단면을 그림 20와 같이 절단하여 BUEHLER사의 Phoenix 4000 장비를 이용해 #600, #800, #1000, #1200, #1500, #2000 사포를 통해 조연마 실시하였다. 조연마 후 미세연마의 경우 $3\mu\text{m}$ 및 $1\mu\text{m}$ Diamond suspension과 $0.05\ \mu\text{m}$ 알루미나를 경면으로 연마하였다. 실온에서 Keller용액을 이용하여 5초간 에칭한 후 Olympus사의 광학현미경 BX51M장비와 SEM 및 EDS(Energy-dispersive X-ray spectroscopy)를 이용하여 접합부 및 모재 조직을 관찰하였다.

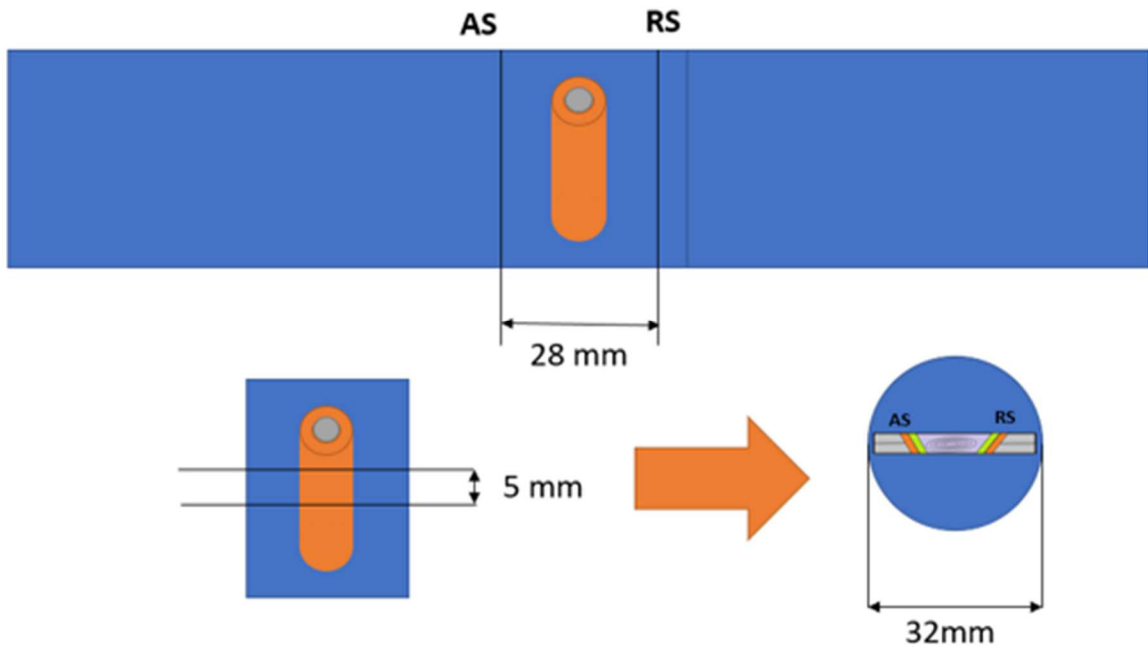


그림 20 접합부 단면 채취 모식도

3.3.4. 접합부 경도시험

겹치기 마찰교반접합 후 접합부의 경도분포를 관찰하기 위해 KS B ISO 14271에 의거하여 경도시험을 실시하였다. 측정장비는 Mitutoyo사의 Vickers micro-hardness 시험기 HM-200을 이용하였다. 인가하중은 100gf로 설정하고, 유지시간은 10 sec로 일정하게 유지하며 압흔간 간격은 0.5 mm로 하여 비커스 경도를 측정하였다.

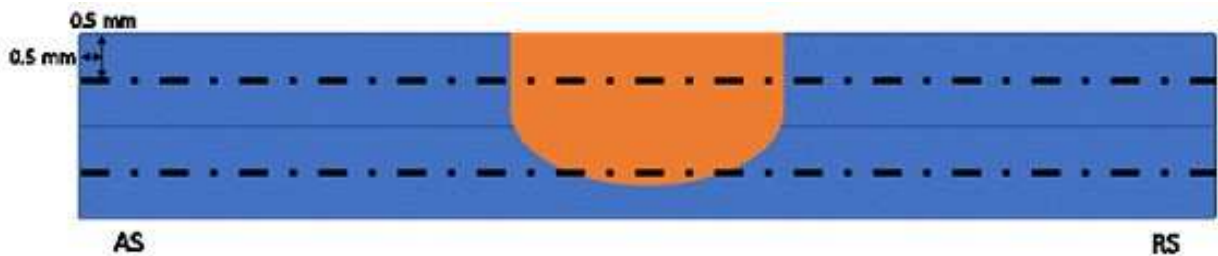


그림 21 접합부 비커스 경도 측정 모식도

3.3.5. 상온인장전단시험

겹치기 마찰교반접합 후 접합시편에 대한 상온인장전단시험은 INSTRON사의 5985 장비를 이용하여 실시하였다. 이때 시편은 KS B ISO14273 규격에 의거하여 제작하였으며, 상온인장전단시험 시 Crosshead speed를 10 mm/min으로 일정하게 유지하여 실시하였다.

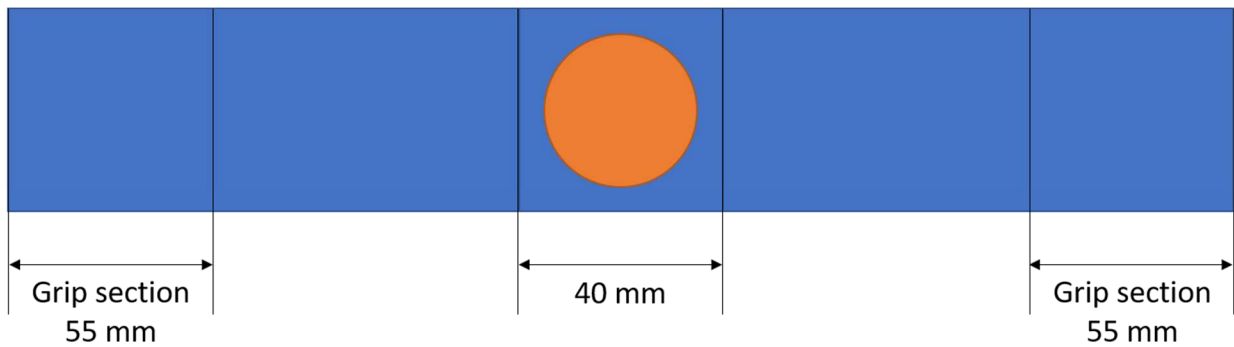


그림 22 상온인장전단시험 시편 모식도

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 모재의 특성

4.1.1. 모재의 조직 특성

본 실험에서 사용된 ADC12 알루미늄합금 다이캐스팅 판재의 XRD분석결과를 그림 23에 나타내었다. 모재 조직에서 주로 나타나는 상은 Al상과 Si상이었다. 일반적으로, ADC12의 경우 응고 중에 Al과 Si이 주로 생성되며, Si의 경우 초정상이거나 공정상에 포함된 Si상으로 형성된다. 이 외에도 θ (Al₂Cu), Q(Al₅Cu₂Mg₈Si₆), β (Al₉Fe₂Si₂), τ_9 (Al₉Mn₂Si)등이 형성되는 것으로 알려져 있으나[39], 이는 이러한 상들의 분율이 매우 작기 때문에 XRD 분석결과에서 나타나지 않은 것으로 판단된다. 또한, 모재조직의 각 상에 대해 EDS 분석을 실시하였으며, 이를 그림 24~ 25과 표 7에 나타내었다.

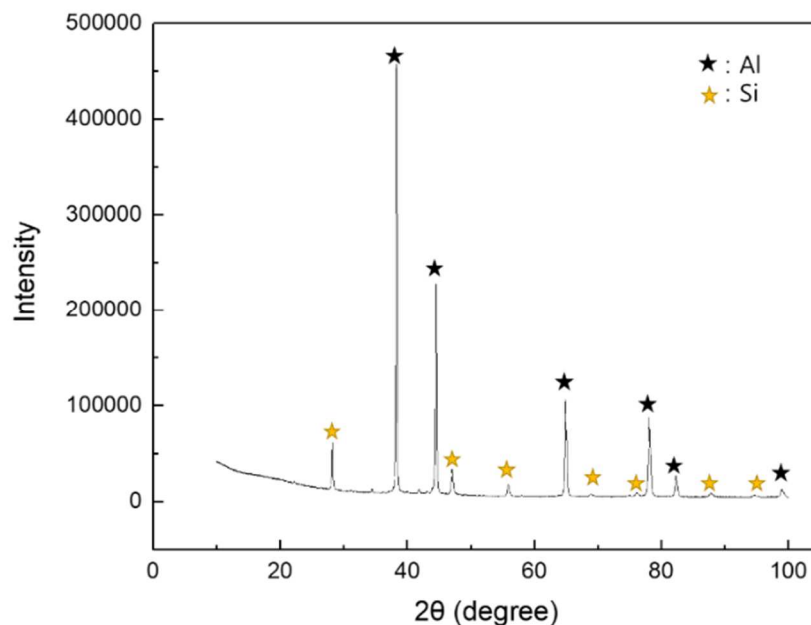


그림 23 모재 XRD 분석 결과

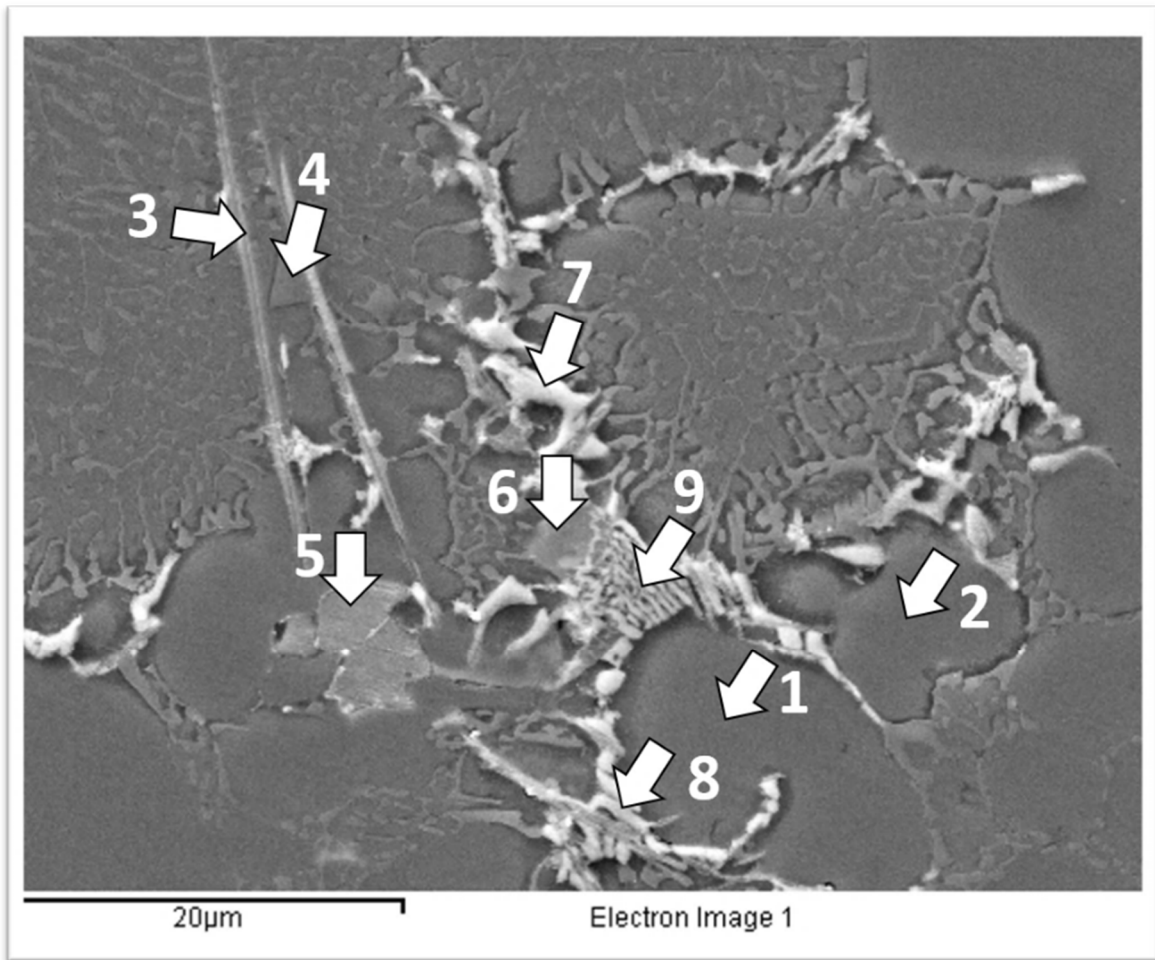


그림 24 모재 조직의 SEM 분석 및 EDS Point 분석 위치

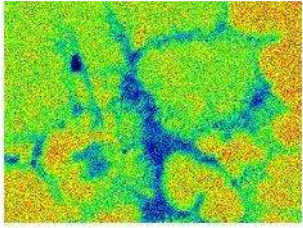
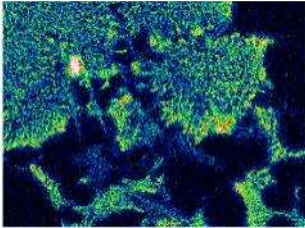
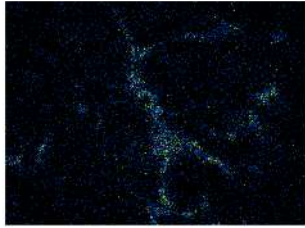
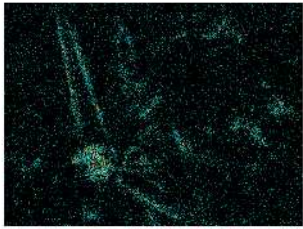
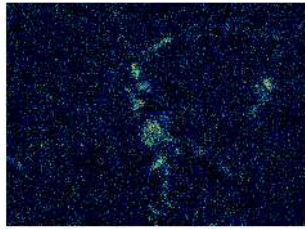
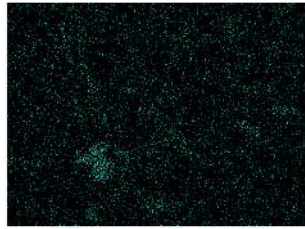
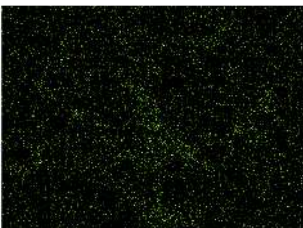

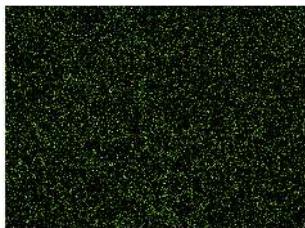
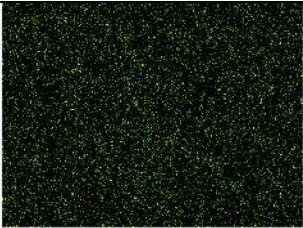
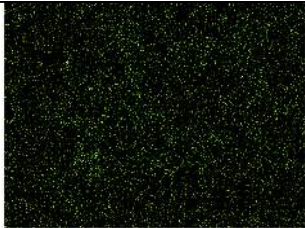
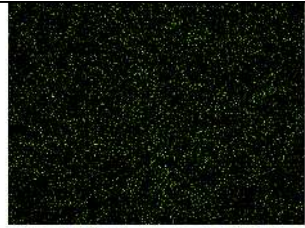
		
Al	Si	Cu
		
Fe	Mg	Mn
		
Ni	Ti	Ca
		
Sn	Cr	Zn

그림 25 EDS Mapping 분석 결과

표 7 각 상의 화학 조성 표 (그림25 번호 표시)

모재 조직의 SEM-EDS Point 분석									
Element(wt%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Al	95.50	96.27	64.29	18.07	58.57	53.73	50.28	49.33	52.97
Si	2.05	2.02	21.28	78.22	10.77	71.27	8.06	5.05	3.51
Cu	1.24	0.71	0.14	-	1.26	13.17	33.24	40.02	36.60
Fe	1.21	1.00	11.99	1.59	20.34	3.15	3.47	0.50	0.40
Mg	-	-	-	-	-	8.92	2.72	3.07	-
Mn	-	-	1.68	0.30	7.76	-	0.45	-	-
Etc.	Bal.								
Expected Phase	Al	Al	β	Si	β	Q	θ	θ	θ

분석 결과, Al상과 Si상이 주를 이루고 있는 것을 확인할 수 있으며, XRD분석결과에서 관측되지 않았던 Al-Cu계, Al-Fe-Si계, Al-Cu-Mg-Si계, Al-Mn-Si계 2차상들이 확인되었다. 그리고, 그림 25을 보면, 그림 23의 XRD 분석결과와 같이 Al상과 Si상으로 주로 구성되어 있다.

모재의 미세조직을 광학현미경과 SEM을 통해 관찰한 결과를 그림 26에 나타내었다. 그림 26(A) 및 (B)에 나타낸 것과 같이, 시편 전체에 수지상정의 Al 상, 공정 조직과 다양한 정출상들이 분포되어 있다. 이때 그림 26(C)를 살펴보면 모재에 주로 분포하고 있는 공정 조직의 경우 Al과 Si의 공정조직으로 주로 구성된 것을 알 수 있다.

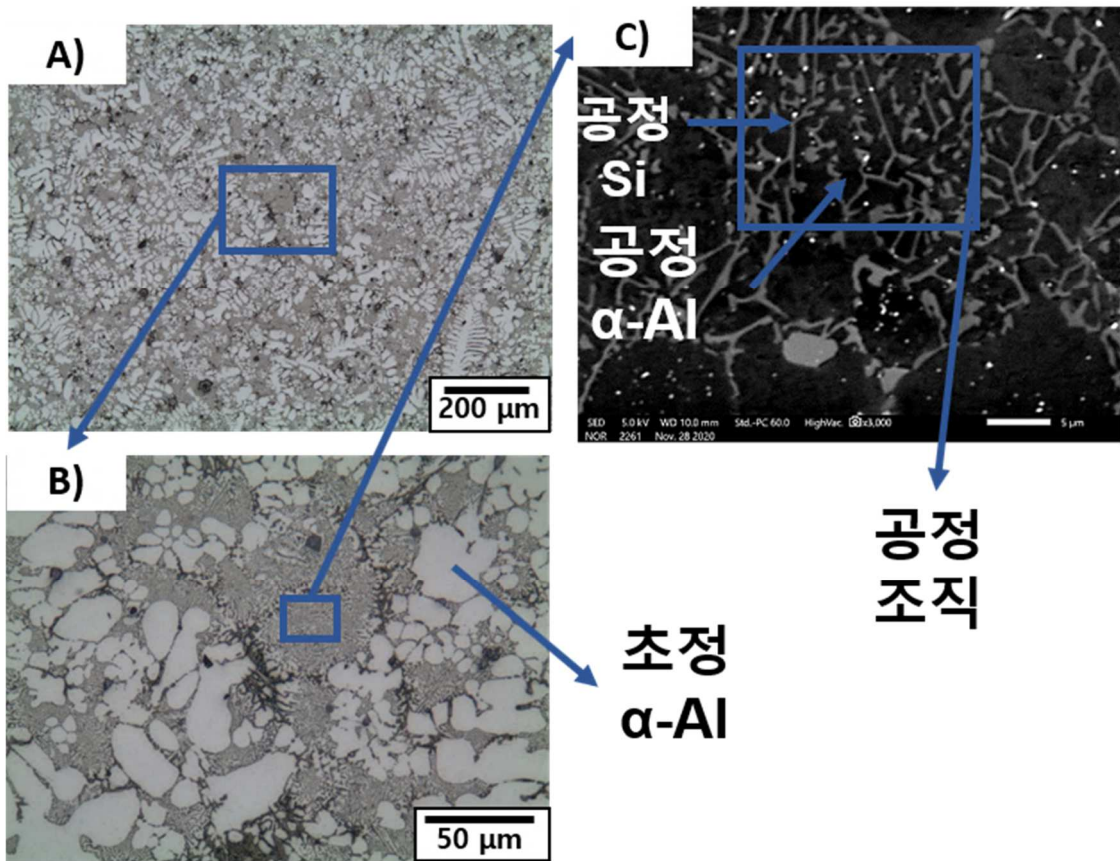


그림 26 모재 조직 관찰결과

(A) 광학 저배율, (B) 광학 고배율, (C) SEM 고배율

그림 27은 모재 조직의 EBSD 분석 결과로 그림 27(A)는 IPF map이며, 그림 27(B)는 Unique grain color map이다. 이때 그림 27(A)의 굵은 검은선은 고경각입계를 나타낸다. 이를 통해 모재 조직의 α -Al의 결정립 크기를 살펴보면 그림 28과 같이 α -Al의 평균 결정립 크기는 12.412 μm 로 관측되었으며, 결정립 크기분포의 표준편차는 10.145 μm 로 평균 결정립 크기 대비 큰 편차를 보였으며, 이때 측정된 최소 결정립 크기는 1.619 μm , 최대 결정립 크기는 42.844 μm 로 측정되었다.

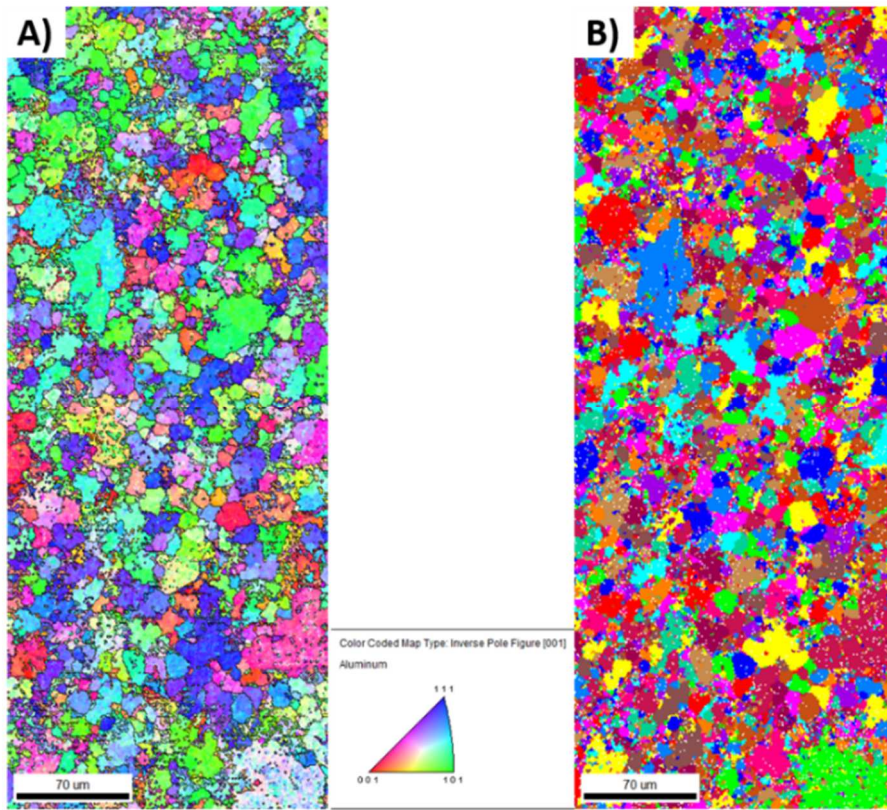


그림 27 모재의 (A) IPF Map, (B) unique grain color map

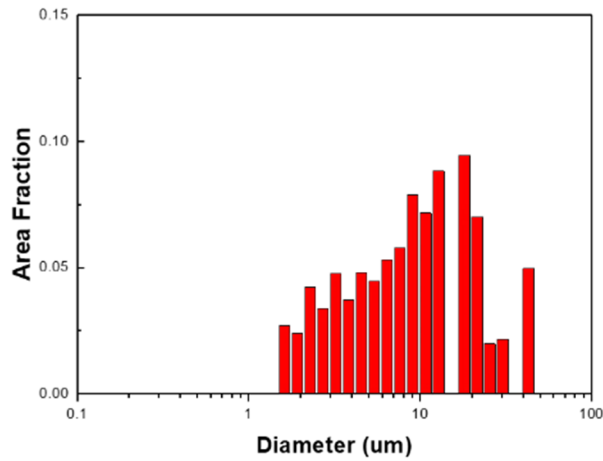


그림 28 모재의 α -Al의 결정립 크기 분포

(평균: 12.412 μm , 표준 편차: 10.145 μm , 최소: 1.619 μm , 최대: 42.844 μm)

4.1.2. 모재의 경도 특성

그림 29은 본 실험에서 사용된 ADC12 알루미늄합금 다이캐스팅 판재의 접합 전 비커스 경도를 0.5mm간격으로 20회 측정된 값이다. 측정된 경도값은 평균 112.1 HV였으며, 약 ± 21 정도의 편차를 보였다. 이러한 편차는 ADC12 알루미늄합금의 경우, α -Al의 결정립이 크기 편차를 가지며, 응고 시 형성된 공정조직과 다양한 2차상에 의한 조직 불균일성에 기인하는 것으로 판단된다.

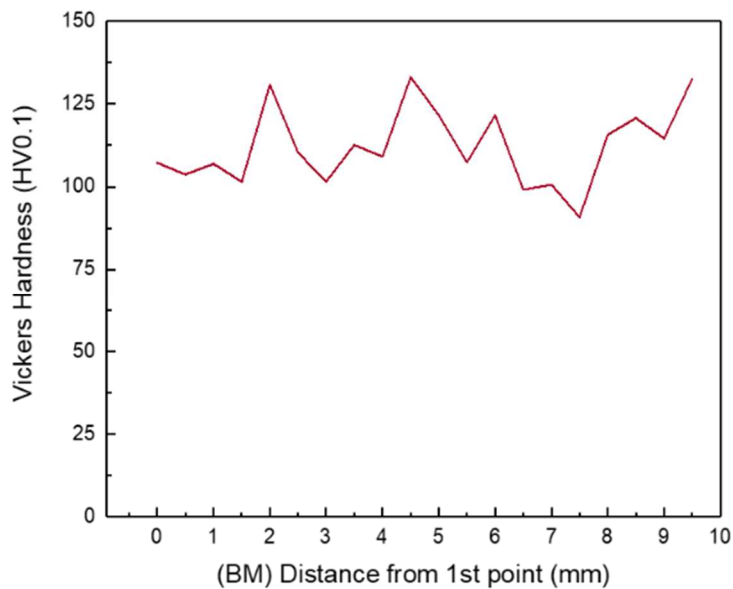


그림 29 모재 비커스 경도 측정 결과

4.1.3. 모재의 인장강도 특성

모재의 인장특성을 조사하기 위하여, 총 5회의 반복시험을 실시하였으며, 그 결과는 아래의 그림30과 같다. 분석결과 평균 217Mpa의 최대 인장강도 값을 가졌으며 $\pm 18.5\text{MPa}$ 편차를 보였다. 이는 주조재의 전신재에 대비하여 경우 내부에 다양한 주조결함을 내포하고 있으며, 조직의 특성이 불균일하여 이러한 편차가 발생한 것으로 예측된다.

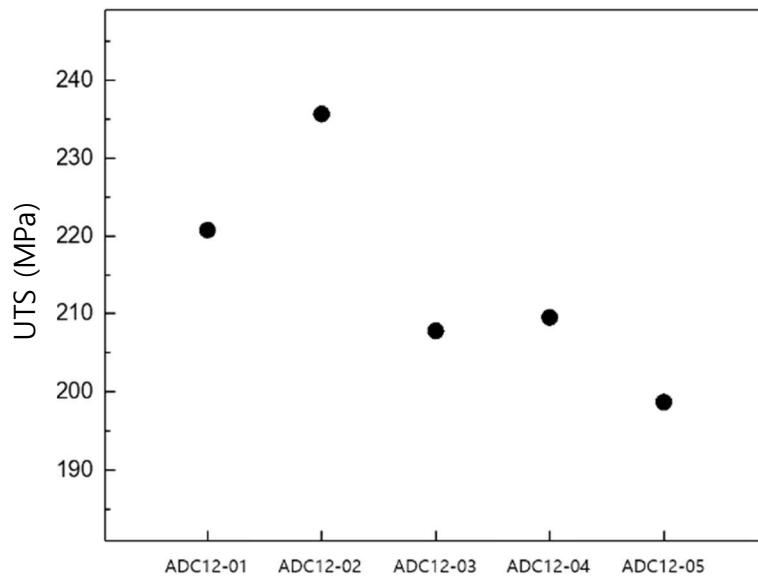
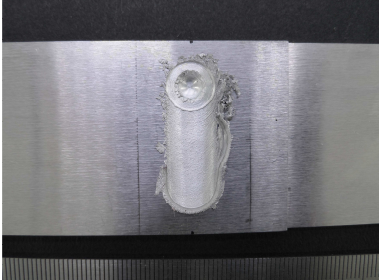
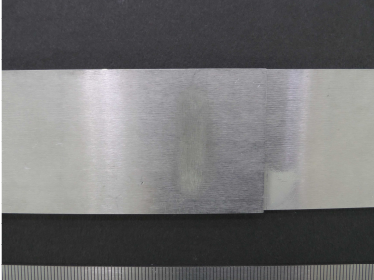
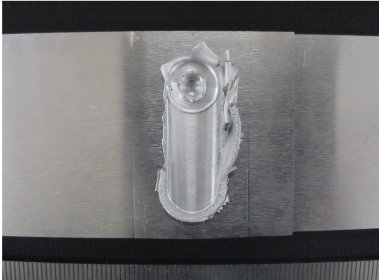
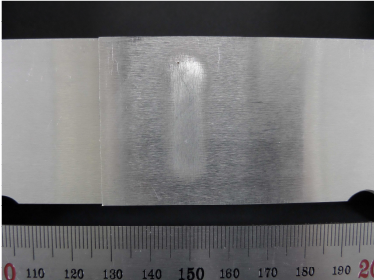

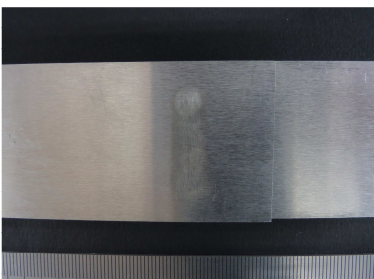

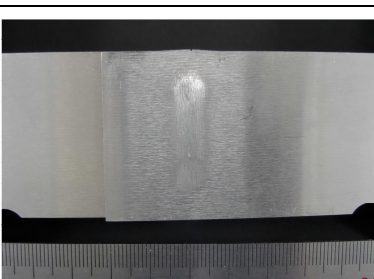


그림 30 모재 상온인장시험 결과

4.2. 접합변수가 외관형상에 미치는 영향

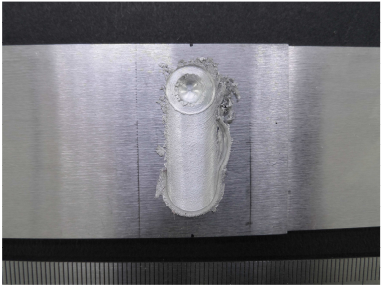
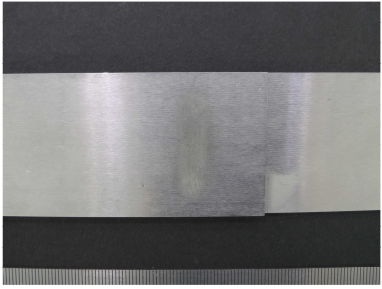

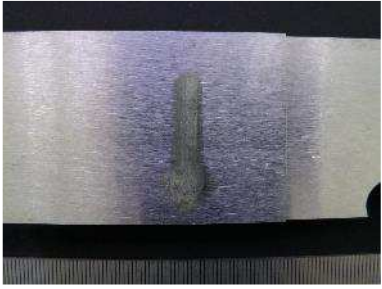

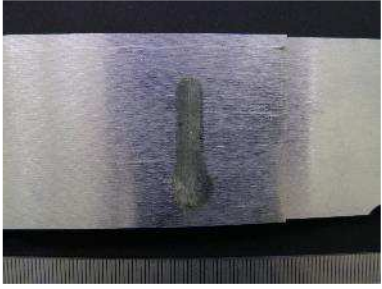



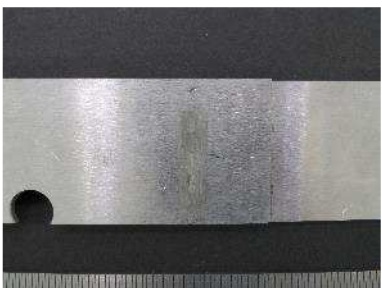
4.2.1. 접합변수가 외부 결함 형성에 미치는 영향

ADC12 알루미늄합금 다이캐스팅 판재를 이용하여 접합변수에 따라 접합을 실시하였다. 이후 외관형상을 관측하였다. 그 결과, 본 연구의 접합변수 조건 내에서 50 mm/min-1000 rpm을 기준으로 이송속도를 50, 100, 200, 300 mm/min로 변화시키거나 회전속도를 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 rpm으로 변화시켰을 때, 육안으로 관찰되는 외부결함이 나타나지 않는 건전한 접합부를 얻을 수 있었다. 이는 그림 31 및 그림 32에 나타내었다.

Trenseverse speed(mm/min)	Top surface	Bottom surface
50		
100		
200		
300		

10mm

그림 31 회전속도 1000 rpm일 때, 이송속도에 따른 접합부 외관 형상 변화

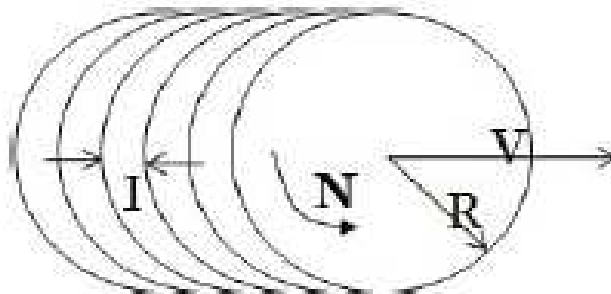
Rotation speed(mm/min)	Top surface	Bottom surface
1000		
1500		
2000		
2500		
3000		

10mm

그림 32 이송속도 50 mm/min일 때, 이송속도에 따른 접합부 외관 형상 변화

4.2.2. 접합변수가 비드 간격에 미치는 영향

비드간격은 아래의 그림 33과 같이 형성되며, 접합변수와의 관계는 이송속도에 비례하며, 회전속도에는 반비례하는 관계를 가지는 것으로 알려져 있다[17]. 본 실험에서 측정된 접합변수에 따른 비드간격은 그림 34 및 그림 35에 나타내었다. 측정 결과, 이송속도의 변화에 따른 비드 간격, 회전속도 변화에 따른 비드간격을 살펴보았을 때, 이론 값과 실험값이 유사한 값으로 측정되었다. 따라서 2.1.6장에서 언급하였던 회전속도와 이송속도에 따른 입열량과 교반량과의 관계와 연관지어 살펴보면, 비드간격이 증가함에 따라 솔더에 의한 모재와의 접촉 시간이 감소하며 그에 따라, 입열량 및 교반량이 감소하는 관계를 가지는 것을 알 수 있다.



$$I(\text{비드 간격}) = V(\text{mm/min})/N(\text{rev/min})$$

그림 33 이송속도(V)와 회전속도(N)에 따른 비드간격(I)

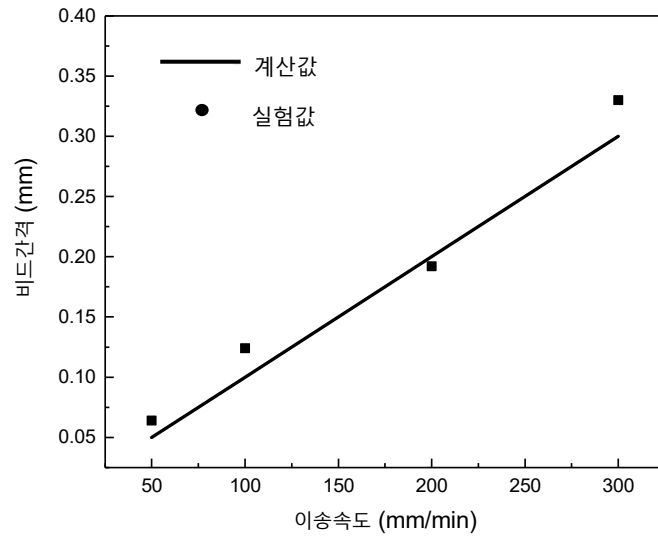


그림 34 이송속도 (mm/min) 변화에 따른 비드간격 변화

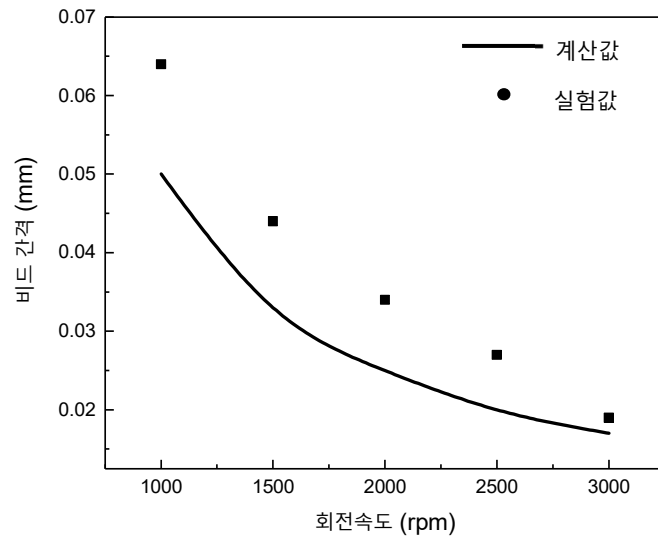
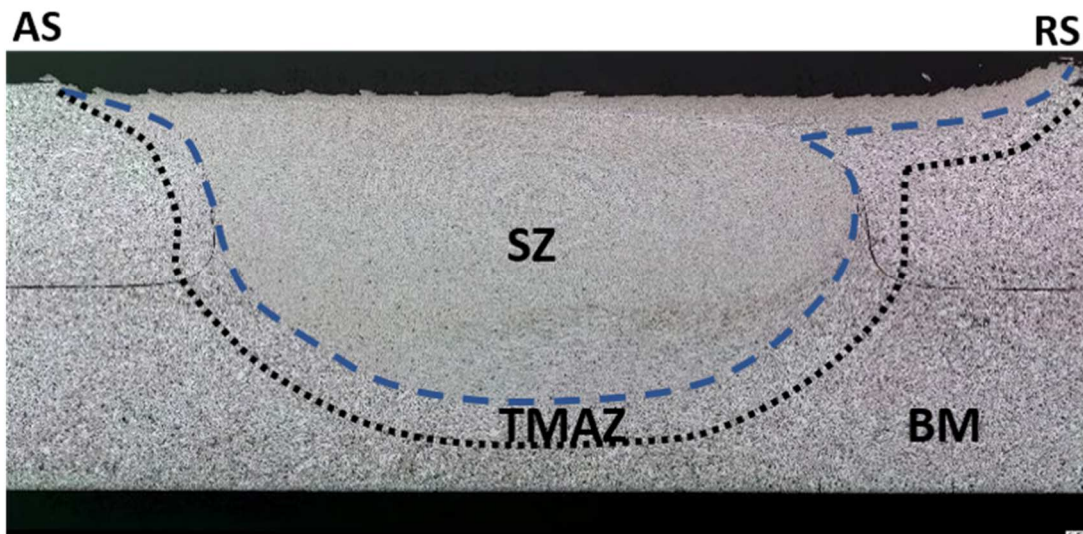


그림 35 회전속도 (rpm) 변화에 따른 비드간격 변화

4.3. 접합변수가 접합부조직에 미치는 영향

4.3.1. 대표적 접합 조직 특성

접합부조직의 각 영역별 특성 관찰을 위해 본 실험 조건의 기준 조건인 50 mm/min-1000 rpm하에서의 접합시편의 접합부단면분석을 실시하였다. 광학현미경을 통해 관측한 결과를 그림 36에 나타내었다. 접합부 단면은 거시적으로 모재 (Base Metal, BM)영역, 열-기계적 영향부 (Thermo-mechanically affected zone, TMAZ) 영역, 교반부 (Stir Zone, SZ)영역으로 구분되었으며 열영향부 (Heat affected zone, HAZ) 영역의 경우 관측되지 않았다.



BM : Base metal

TMAZ: Thermo-Mechanically Affected Zone

SZ : Stir Zone

그림 36 1000rpm-50mm/min일 때 접합부 단면

그림 36에서의 각 영역의 특징을 살펴보면, 그림 37과 같이 TMAZ의 경우 SZ과 BM 사이의 영역에서 공구에 의한 교반과 마찰열에 의해 BM영역에서의 조직이 연신된 형태를 가진다. 그림 38의 SZ은 BM 영역 및 TMAZ영역과 달리 공정조직 내의 Si입자가 미세하게 분산되며, 공정 조직과 수지상이 관찰되지 않는다. 이는 마찰교반접합의 특징으로 SZ의 경우 공구에 의해 직접적으로 교반이 일어나는 영역이다. 따라서, 재료가 교반되어, 유동됨에 따라 공정조직 내의 Si입자가 파쇄되며 미세하게 분산되기 때문이다. 그리고, SZ의 경우, 다른 두 영역과 달리 접합부단면의 수지상정 형태의 초정 Si상이 관측되지 않는데, 이는 SZ 영역에서 재결정에 의해 등축정의 미세한 결정립이 형성됨에 따른 것으로 예측된다.

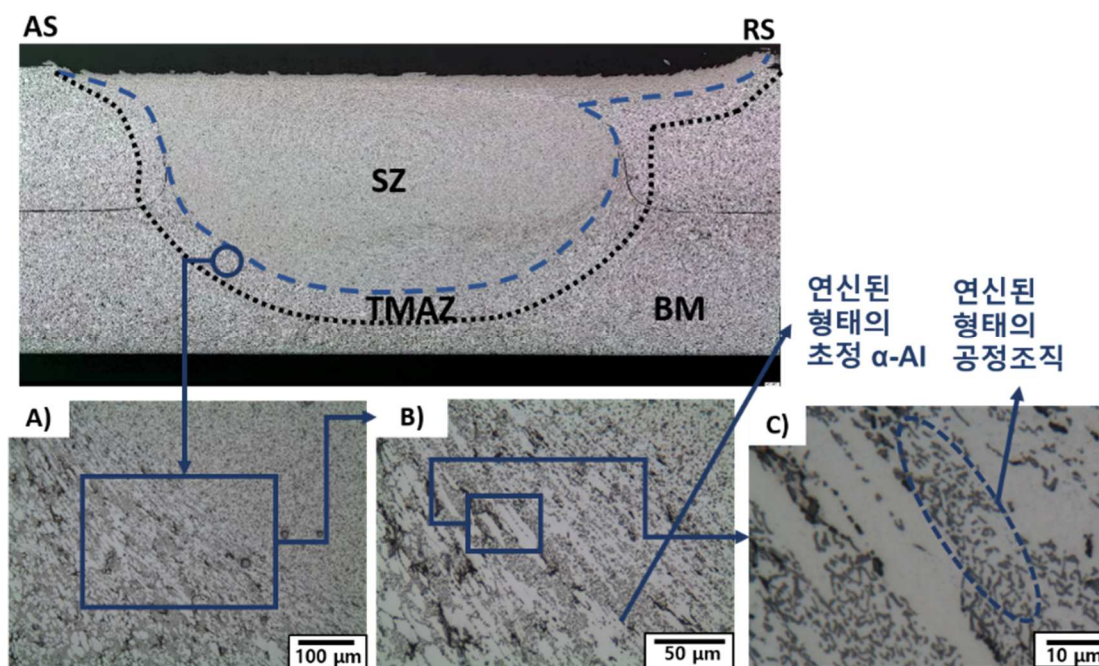


그림 37 접합부 단면에서의 TMAZ영역 거시 조직과 미세조직 (1000rpm-50mm/min)

(A) 광학 저배율, (B) 광학 중배율, (C) 광학 고배율

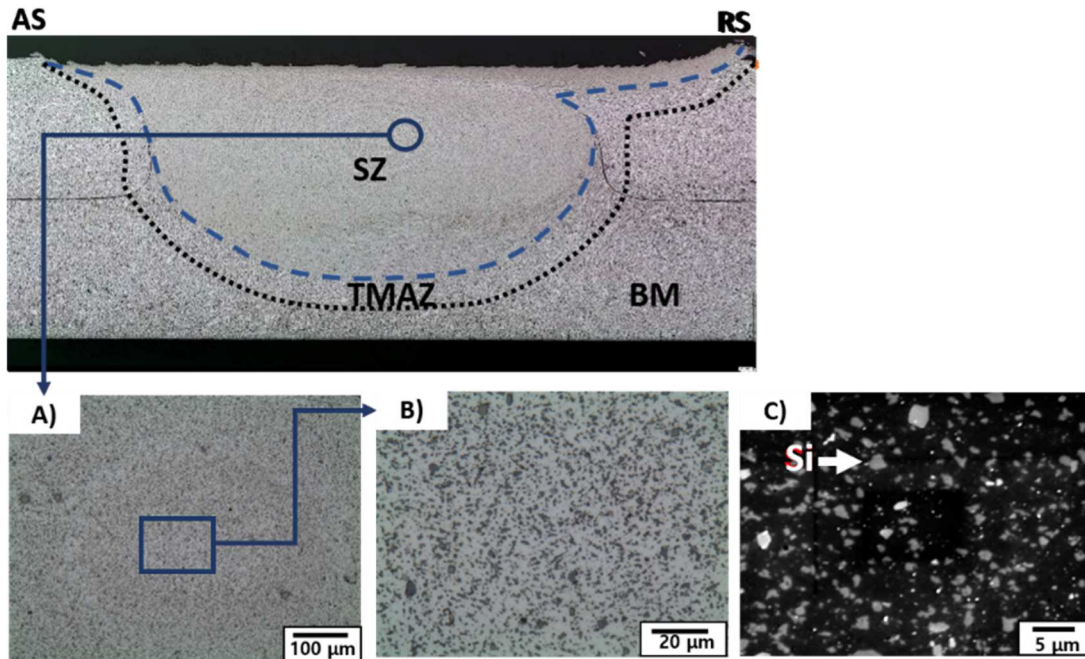


그림 38 접합부 단면에서의 SZ영역 (1000rpm-50mm/min)

(A) 광학 저배율, (B) 광학 고배율, (C) SEM 고배율

그림 39 및 그림 40은 TMAZ 영역의 EBSD분석을 실시한 결과이다. 측정된 α -Al의 평균 결정립 크기는 $6.565 \mu\text{m}$, 결정립 크기분포의 표준편차는 $7.022 \mu\text{m}$, 최소 및 최대 결정립 크기는 $1.165 \mu\text{m}$ 및 $39.347 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이는 앞서 언급한 모재 영역과 비교하였을 때, 결정립 크기 분포의 표준 편차가 각 $10.145 \mu\text{m}$, $7.022 \mu\text{m}$ 으로 큰 편차값을 가지며, 측정된 최소, 최대 결정립 크기가 유사한 것으로부터 TMAZ의 경우 BM영역에서의 결정립이 재결정되지 않은채 SZ에 인접한 영역에서의 기계적 교반과 발생한 마찰열에 의해 연신되며 소성변형 된 것이다.

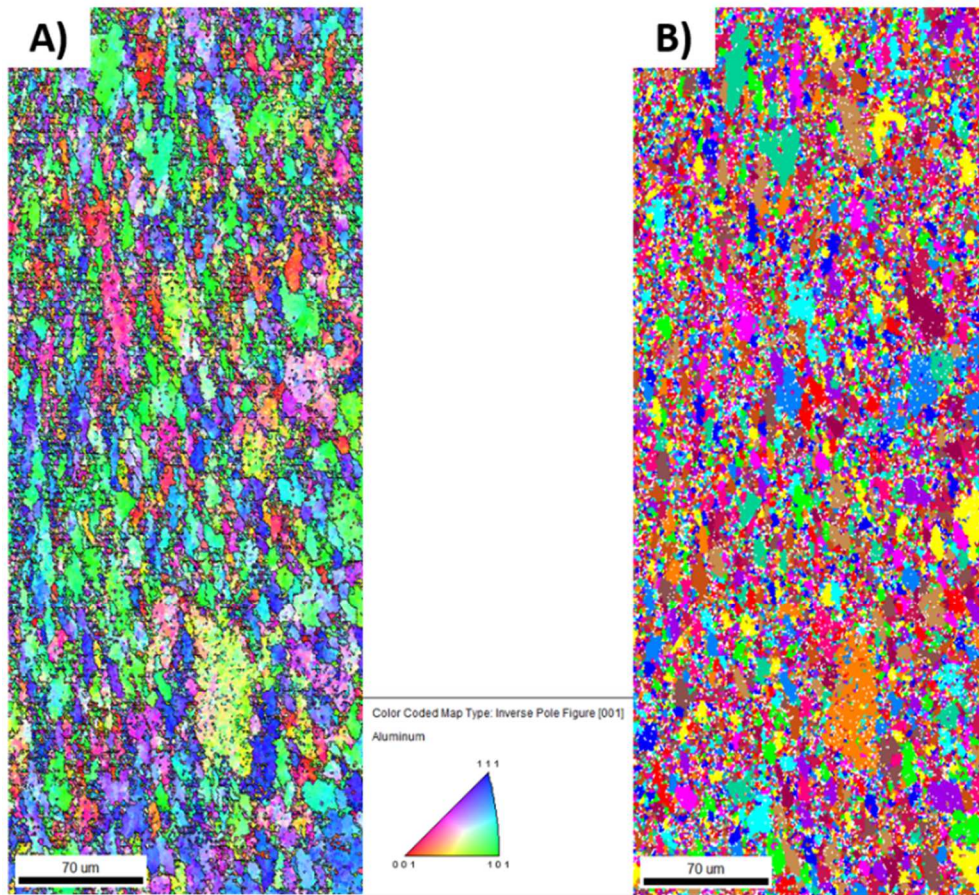


그림 39 TMAZ의 (A) IPF Map과 (B) unique grain color map

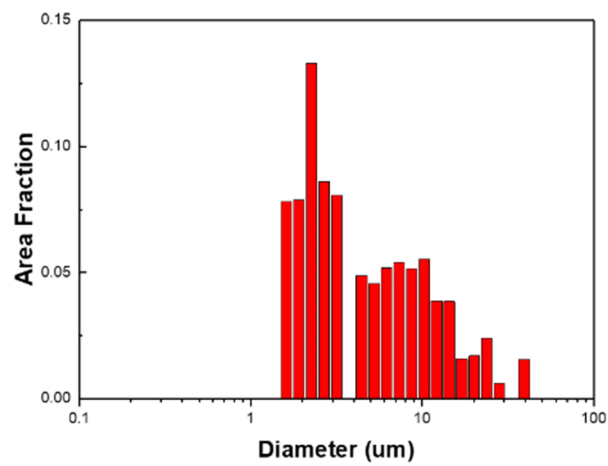


그림 40 TMAZ 영역에서의 α -Al 결정립 크기 분포

(평균: 6.565 μm , 표준 편차: 7.022 μm , 최소: 1.615 μm , 최대: 39.347 μm)

그림 41 및 그림 44은 상판의 SZ영역을 SZT, 하판의 SZ영역을 SZB로 구분하여 EBSD분석을 실시한 결과이다. 이때, 각 영역에서 측정된 α -Al의 평균 결정립 크기는 상판 SZT영역의 경우 3.063 μm , 하판 SZB 영역의 경우 2.982 μm 로 측정되었다. 결정립 크기분포의 경우 표준 편차 값은 각 1.651 μm , 1.643 μm 로 측정되었으며, 최소, 최대 결정립 크기는 상·하판 모두 동일하게 0.323 μm , 7.613 μm 로 측정되었다. 이로부터 SZ영역의 경우 상판과 하판에서의 결정립 크기는 유사하며, BM영역의 α -Al의 결정립이 공구에 의한 직접적인 교반에 의해 재결정되어 작아짐을 알 수 있다. 이는 SZ영역에서의 동적재결정현상에 의한 것으로[40] SZ영역에서 다양한 α -Al결정립 크기 편차와 공정조직 등에 의해 비교적 불균일한 BM 영역의 미세조직이 교반부에서 Si입자의 분산과 동적 재결정에 의해 균일해 지는 것으로 관측되었다.

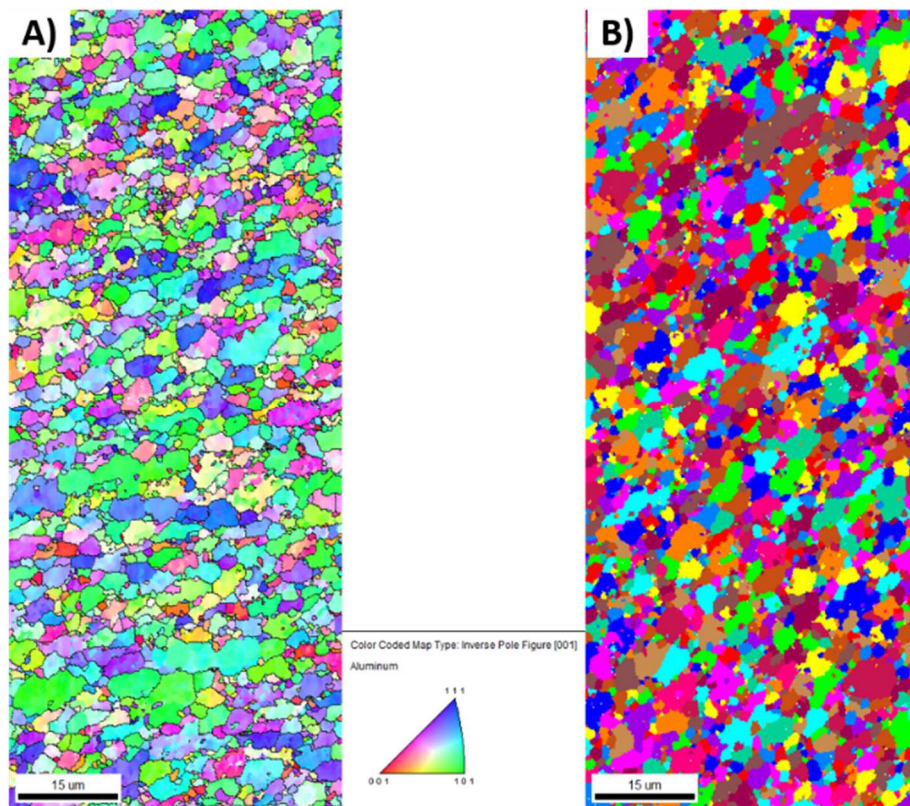


그림 41 SZT의 (A) IPF Map과 (B) unique grain color map

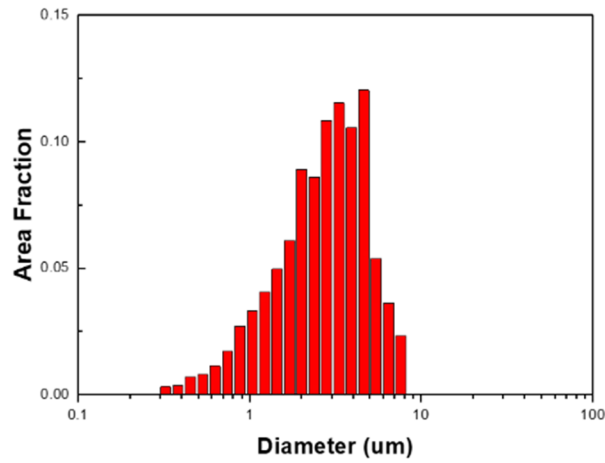


그림 42 SZT 영역에서의 α -Al 결정립 크기 분포

(평균: 3.063 μm , 표준 편차: 1.651 μm , 최소: 0.323 μm , 최대: 7.613 μm)

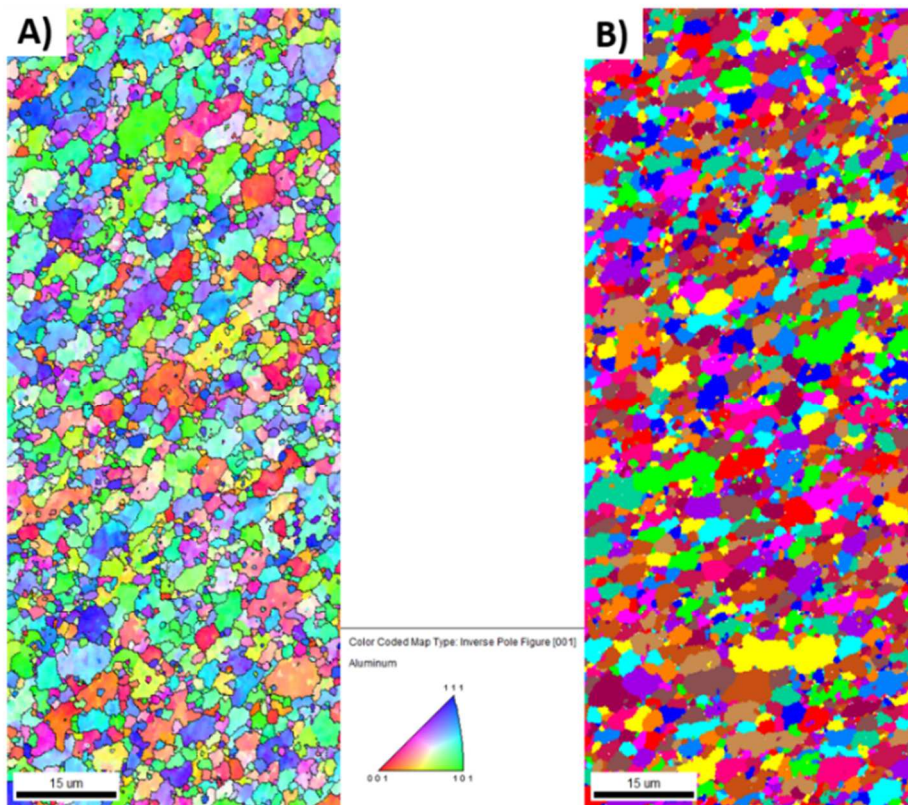


그림 43 SZB의 (A) IPF Map과 (B) unique grain color map

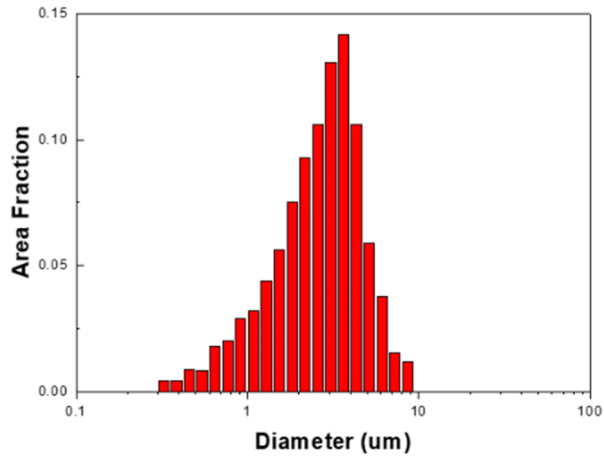


그림 44 SZB 영역에서의 α -Al 결정립 크기 분포

(평균: 2.892 μm , 표준 편차: 1.643 μm , 최소: 0.323 μm , 최대: 7.613 μm)

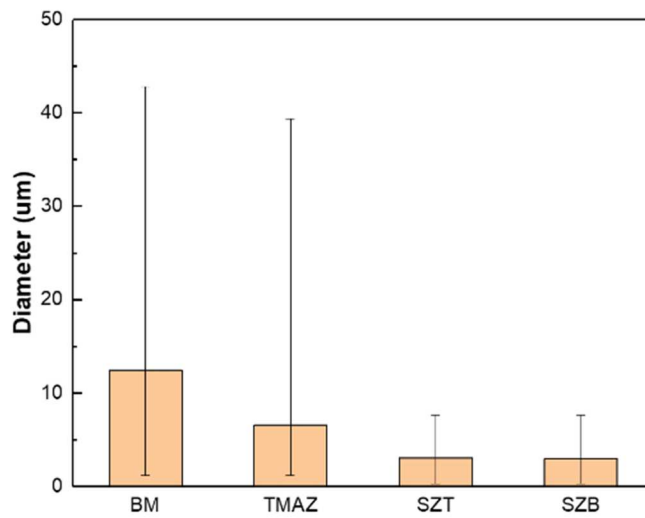


그림 45 50 mm/min - 1000 rpm일 때 영역별 α -Al 결정립 크기 분포

4.3.2. 접합변수가 내부결함 형성에 미치는 영향

그림 47 및 그림 48은 접합변수 변화에 따른 접합부 단면의 변화를 나타낸 것이다. 관찰 결과, 외부 결함이 형성되지 않은 조건하에서 접합부 단면을 확인하였을 때, <1000rpm-250 mm/min> 및 <50 mm/min-1500, 2000, 2500, 3000 rpm> 하에서는 내부에는 결함이 나타났다. 내부결함은 모두 상판의 접합부 내 AS측에서 형성되었으며, 50 mm/min- 2500, 3000 rpm과 1000 rpm-200 mm/min의 경우 상판의 AS측 접합부 내부에 비교적 작은 형태의 결함이 형성되었으며, 50 mm/min-1500, 2000 rpm 하에서는 상판의 AS측 접합부 내부에 상대적으로 크기가 큰 형태의 결함이 형성되었다. 선행연구에 따르면 겹치기 마찰교반접합부의 주요 결함 및 각각의 결함의 발생원인은 다음과 같이 정리하였다.[24].

1. 입열 과잉: 버(Burr)의 발생, 표면 결함, 상판 연화에 의한 경도 감소
2. 상하유동 과잉: 훅킹 (Hooking), 시닝 (Thinning)
3. 소성유동 이상: 보이드 (Void), 터널 결함 (Tunnel hole)

이 중 3.의 경우 재료의 소성유동이 부족할 경우 공구가 지나간 빈공간을 채우지 못하고 AS측 또는 교반부 중앙에서 발생한다고 알려져있다[41]. 그리고 Y.G. Kim에 따르면 ADC12 다이캐스팅 알루미늄합금의 맞대기 마찰교반접합시 형성되는 결함의 유형은 그림 46과 같다고 언급하였다.

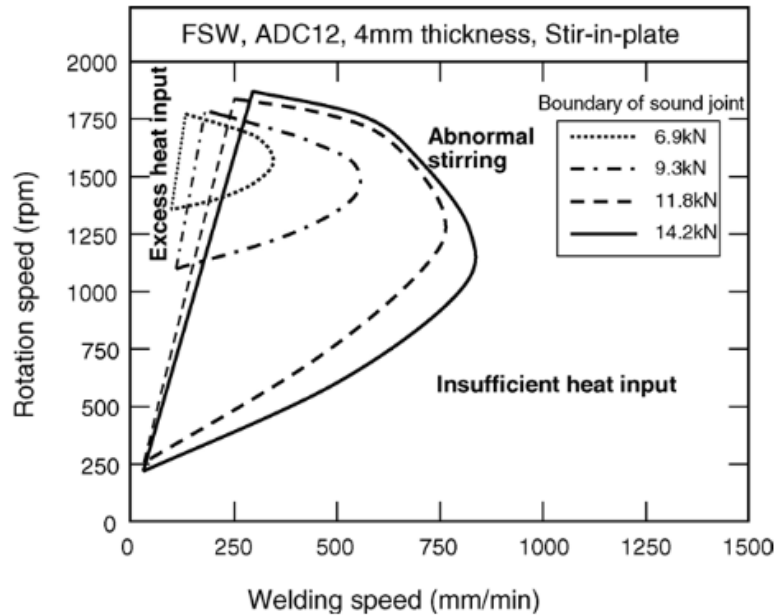
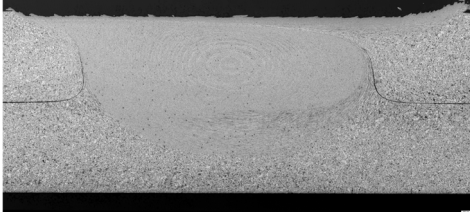
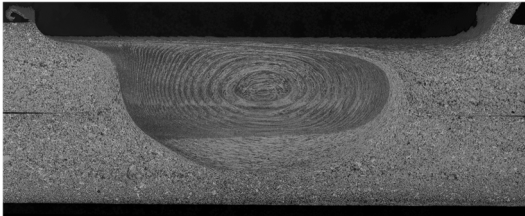
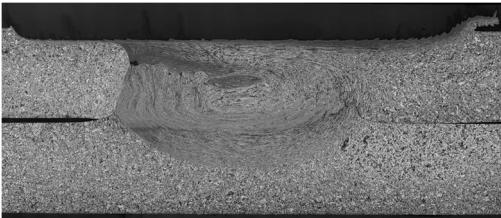
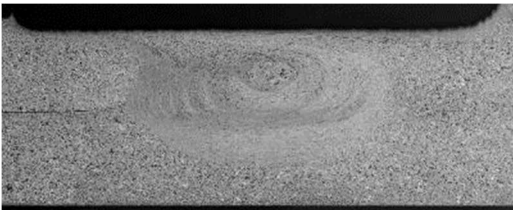


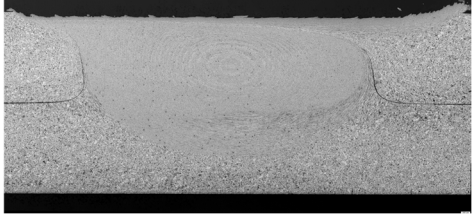
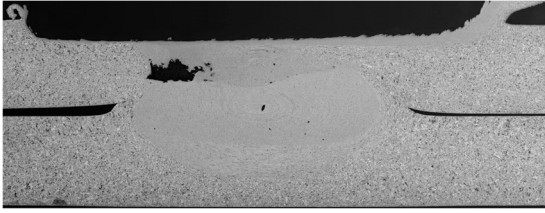

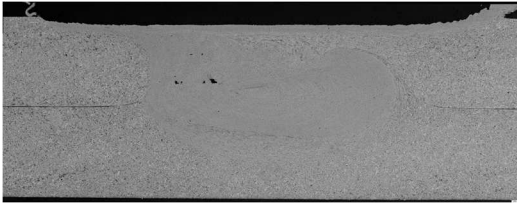
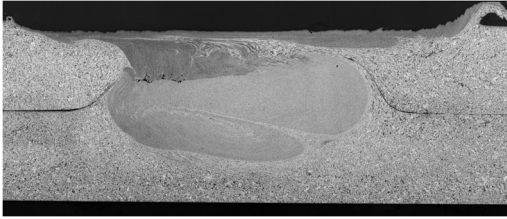
그림 46 ADC12의 맞대기 마찰교반접합시 나타나는 결함의 유형

하지만, 본 연구에서는 접합변수 내에서 중간 이상의 입열을 가지는 50 mm/mmin-1500 rpm, 2000 rpm 조건에서 비교적 큰 결함이 발생하였다. 이는 회전속도가 증가함에 따라 입열량이 증가하게 되고, 그 결과 솔더 아래의 재료가 과연화 되게 된다. 그로 인해 피접합체 표면에 재료와 솔더간의 압착이 감소하게 되어 피접합재의 일부가 손실되게 된다[42, 43]. 본 실험에서 사용된 마찰교반접합 장비의 경우 공구의 삽입깊이를 위치 제어로 조정하기 때문에 상판의 재료가 손실되어도 공구의 위치는 동일하다. 그 결과, 손실된 재료의 양만큼 교반부를 충전시키지 못하여 결함이 형성된 것으로 예측된다. 하지만, 이후 회전속도가 증가함에 2500 rpm이상의 접합조건하에서 결함의 크기가 감소하게 되며, 앞선 선행연구와는 다른 결과가 나타났다. 따라서, 이 부분은 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

접합변수	이송속도에 따른 접합부 단면
50mm/min- 1000rpm	<div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> AS RS </div> 
100mm/min- 1000rpm	
200mm/min- 1000rpm	
300mm/min- 1000rpm	

2mm

그림 47 이송속도 변화에 따른 접합부 단면 조직 변화

접합변수	회전속도에 따른 접합부 단면 조직변화
50mm/min- 1000rpm	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> AS RS </div> 
50mm/min- 1500rpm	
50mm/min- 2000rpm	
50mm/min- 2500rpm	
50mm/min- 3000rpm	

2mm

그림 48 회전속도 변화에 따른 접합부 단면 조직 변화

4.3.3. 접합변수가 접합부 형상에 미치는 영향

4.3.3.1. 이송속도 변화가 접합부 형상에 미치는 영향

그림 50 및 그림 52~그림 55는 이송속도 변화에 따른 접합부 넓이, AS측과 RS측의 Hook 높이 및 유효접합부 높이(E_{st})를 측정된 값이다. 접합부 넓이는 그림 36에 나타난 것과 같이 SZ과 TMAZ의 경계를 따라 측정하였으며, Hook높이와 유효접합부 높이의 경우 그림 49과 같이 측정하였다. 측정값을 살펴보면 이송속도가 <1000 rpm-300 mm/min>에서 <1000 rpm - 50 mm/min>으로 감소함에 따라 접합부의 넓이가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 이송속도가 감소함에 따라 공구와 피접합체 사이의 접촉시간과 면적이 증가하게 되고, 그 결과, 입열량과 교반세기가 증가하게 됨에 따라 접합부의 넓이가 증가하는 것이다.

그림 47을 살펴보면 이송속도가 200mm/min이상일 때, 접합부 내의 Onion ring 형태가 사라지는 것을 관측할 수 있다. 이는 이송속도가 증가함에 따라, 솔더와 피접합체 사이의 접촉 시간이 감소하게 된다. 그 결과, 입열량과 교반세기가 감소하여 핀 영향부에서 유동된 재료와 솔더 영향부에서 유동된 재료가 병합되지 않은 것으로 생각된다. 그 결과, 어니언링이 형성되지 않은 조건하에서 상판의 AS측 접합부 길이가 감소한 것을 알 수 있다. 어니언링의 형성은 마찰교반접합시 접합부 내의 재료유동 현상으로부터 형성된다. K. kumar et al.에 따르면 마찰교반접합시 재료의 유동은 그림 51과 같이 공구가 고속으로 회전하며 피접합재에 삽입됨에 따라 용접 공동이 생성된다. 그리고 핀 영향부에서 재료가 층류로 유동하게 되고 이후 솔더의 영향에 의해 재료의 유동이 발생하며, 두 영역에서 재료가 병합된다. 마지막으로 공구가 이동함에 따라 피접합재가 용접부 내로 이동하며 접합이 이루어지며 용접부를 형성하게 된다. 이때, 핀

영향부와 슬더 영향부의 재료가 병합됨에 따라 Onion ring 형태의 접합부가 형성되는 것이다.[44].

그림 52 ~그림 55의 측정 결과를 살펴보면 이송속도가 증가함에 따라, AS측의 Hook 높이는 감소하며 그에 따라 유효접합부 높이는 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 RS측의 Hook 높이와 유효접합부 높이의 경우 이송속도에 따른 경향성이 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

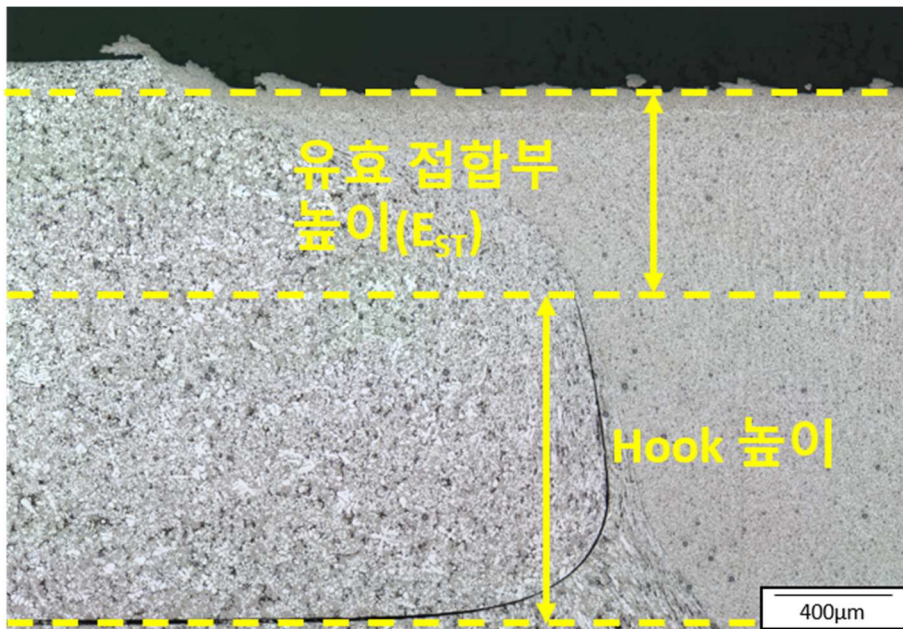


그림 49 유효 접합부 높이와 Hook 높이 기준

(1000 rpm-50 mm/min 조건에서 형성된 AS측에서의 Hook 형상)

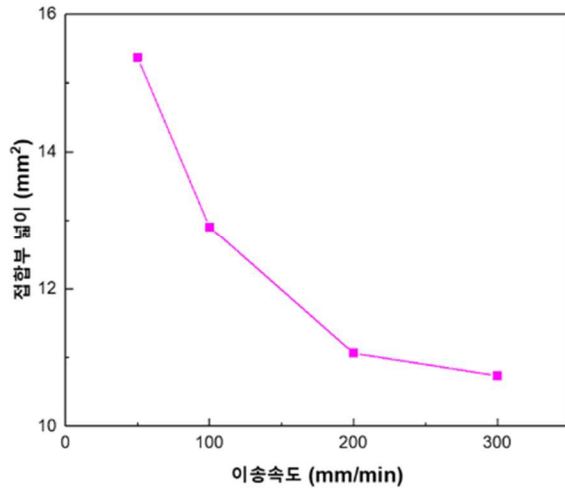


그림 50 이송속도 변화에 따른 접합부 넓이 변화

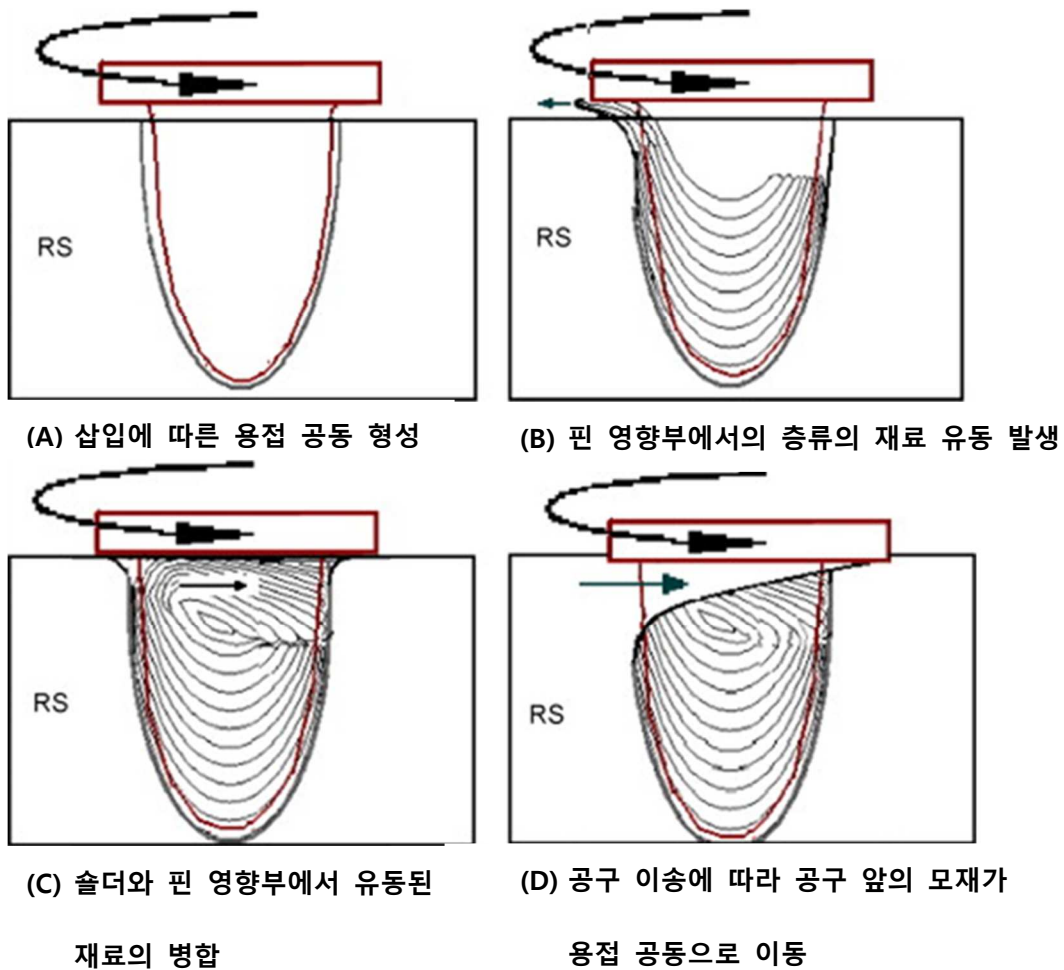


그림 51 교반부에서의 재료유동과 어니언링의 형성[44]

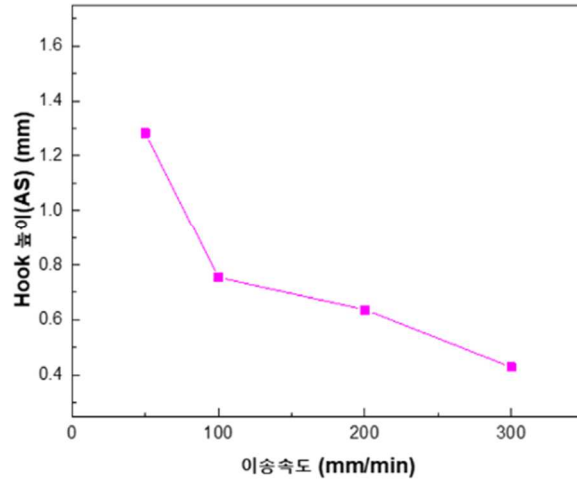


그림 52 이송속도 변화에 따른 AS측 Hook 높이 변화

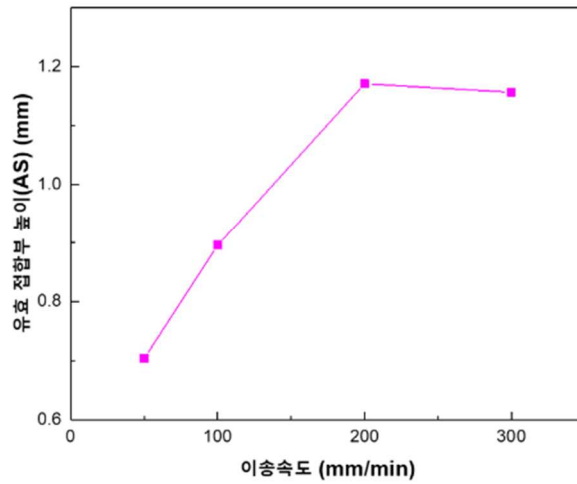


그림 53 이송속도 변화에 따른 AS측 유효 접합부 높이 변화

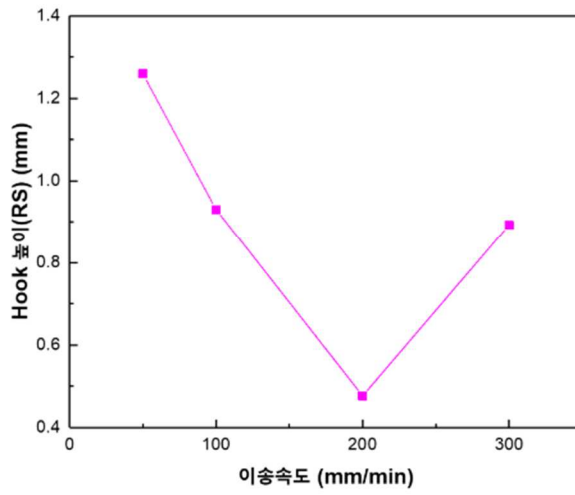


그림 54 이송속도 변화에 따른 RS측 Hook 높이 변화

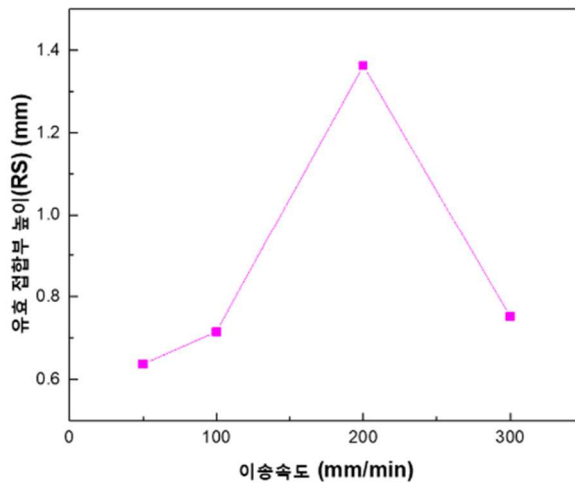


그림 55 이송속도 변화에 따른 RS측 유효접합부 높이 변화

4.3.3.2. 회전속도 변화가 접합부 형상에 미치는 영향

그림 56~그림 60은 회전속도 변화에 따른 접합부 넓이, AS측과 RS측의 Hook 높이 및 유효접합부 높이(E_{st})를 측정된 값이다. 측정값을 살펴보면, 앞서 언급한 이송속도의 변화와는 달리, 접합부 넓이는 회전속도가 증가함에 따라, 입열량과 교반세기가 증가함에도 불구하고, 1500rpm에서 급격히 감소하였다가, 이후 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고, AS측과 RS측의 Hook높이와 유효접합부 높이 또한, 경향성이 나타나지 않는다.

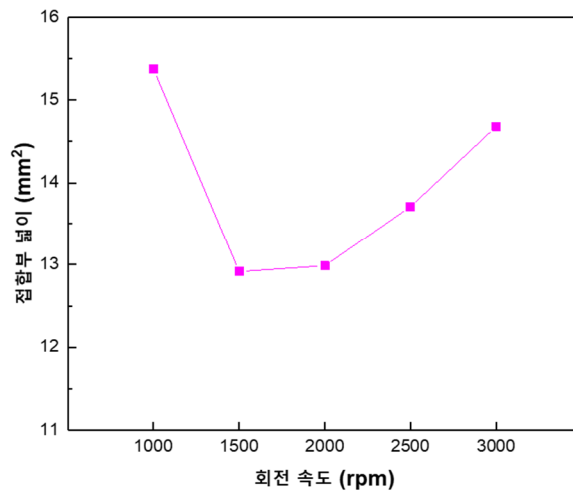


그림 56 회전속도 변화에 따른 접합부 넓이 변화

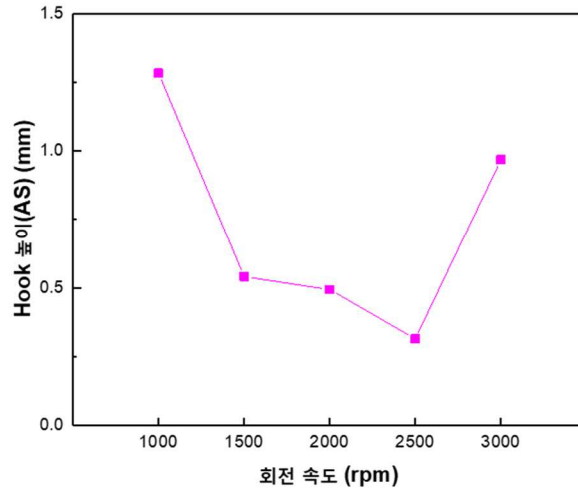


그림 57 회전속도 변화에 따른 AS측 Hook 높이 변화

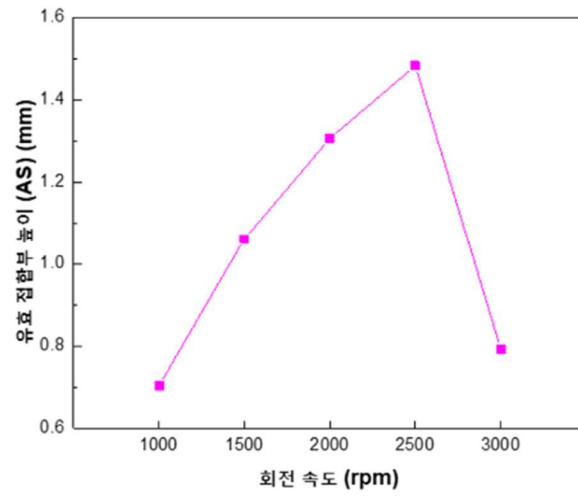


그림 58 회전속도 변화에 따른 AS측 유효접합부 높이 변화

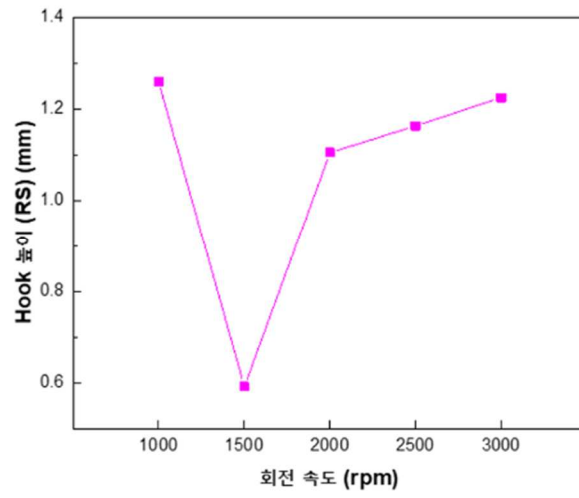


그림 59 회전속도 변화에 따른 RS측 Hook 높이 변화

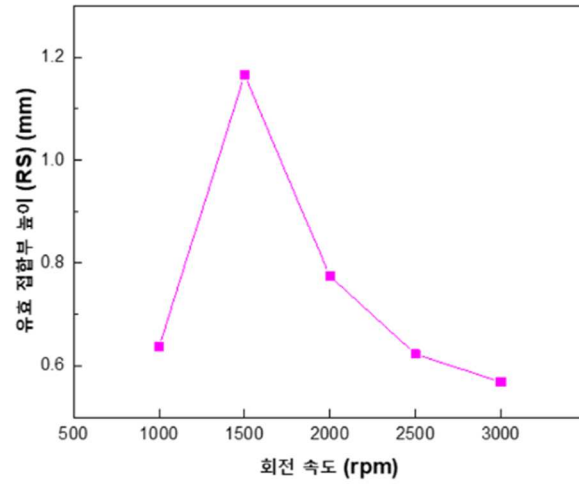


그림 60 회전속도 변화에 따른 RS측 유효접합부 높이 변화

그림 61은 회전속도 변화에 따른 접합부 단면에서, 측정된 내부결함 크기변화를 나타낸 것이다. 이때 결함의 크기에 따른 결함의 종류를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 내부결함이 형성되지 않은 경우 (50mm/min-1000rpm)
- 2) 비교적 큰 크기의 내부결함을 형성하는 경우 (50 mm/min-1500 rpm, 2000 rpm)
- 3) 비교적 작은 크기의 내부결함을 형성하는 경우 (50 mm/min-2500 rpm, 3000 rpm)

이때, 3)의 경우에는 그림 62과 같이 결함에 인접한 영역에서 결함이 나타나지 않은 것으로부터 3)의 경우에 형성된 결함의 경우 불연속인 Void형태의 결함인 것으로 판단되었다.

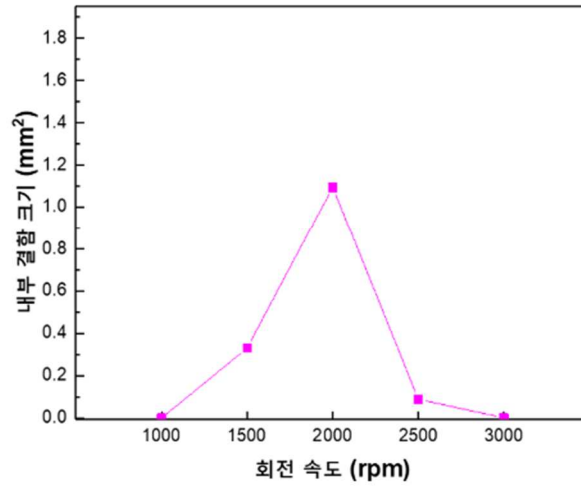


그림 61 회전속도 변화에 따른 접합부 단면 내부결함 크기 변화

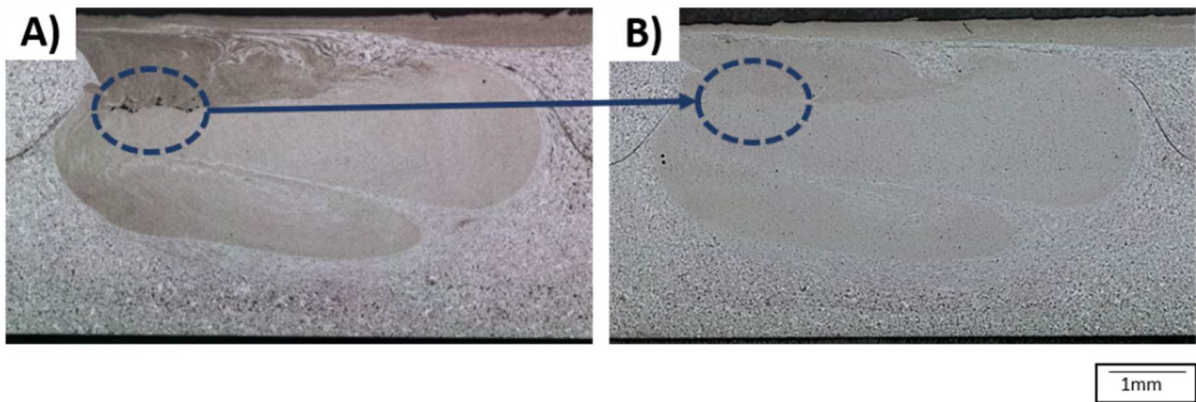


그림 62 50 mm/min-3000 rpm 일 때, 형성된 Void형태의 결함

(A) Void 형태의 결함이 나타나는 접합부 단면, (B) 결함 인접 영역에서의 단면

4.4. 접합변수가 경도 특성에 미치는 영향

4.4.1. 최대 입열 조건에서의 각 영역별 경도 특성

각 영역별 경도 분포를 관측하기 위해, 본 실험조건에서 최대 입열 조건인 50 mm/min-3000 rpm에서, 그림 63과 같이 비커스 경도를 각 영역별 20회 측정하였다. 이는, 그림 64에 나타냈으며, 관측결과 각 영역의 평균 비커스 경도는 BM: 99.4 HV, TMAZ인접 BM: 96.3 HV, TMAZ: 94.3 HV, SZ: 100.1 HV로 측정되었다. 이로부터 앞서 언급하였듯이, 광학현미경상에서 HAZ부가 관찰되지 않으며, 최대 입열 조건하에서도 TMAZ에 인접한 BM의 평균 비커스 경도 값이 차이가 나지 않는 것으로부터, 본 실험조건하에서 HAZ는 나타나지 않는 것으로 생각된다. 그리고 각 영역의 비커스 경도 편차를 살펴보면 그림 64와 같이 BM 대비 SZ의 경도 편차가 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 본 실험에서 사용된 모재의 경우 주조조직으로 조직의 불균일성이 커 기계적 특성의 편차가 크다. 하지만 SZ에서는 동적재결정현상과 제2상의 미세한 분산으로부터 SZ조직이 균질화 된 결과, 평균 비커스 경도의 편차가 감소한 것으로 보인다.

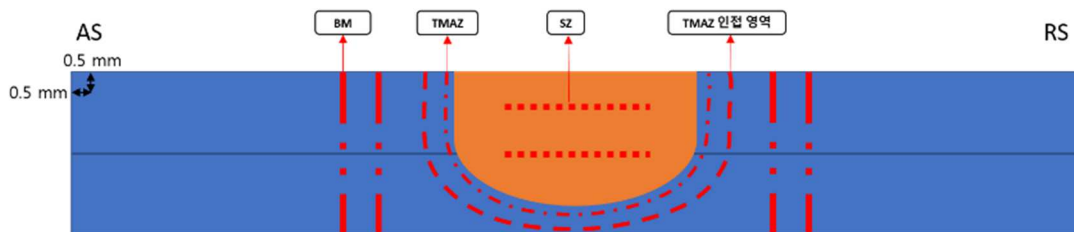


그림 63 최대입열조건에서의 각 영역별 비커스 경도 측정 방법(각 영역별 20회 측정)

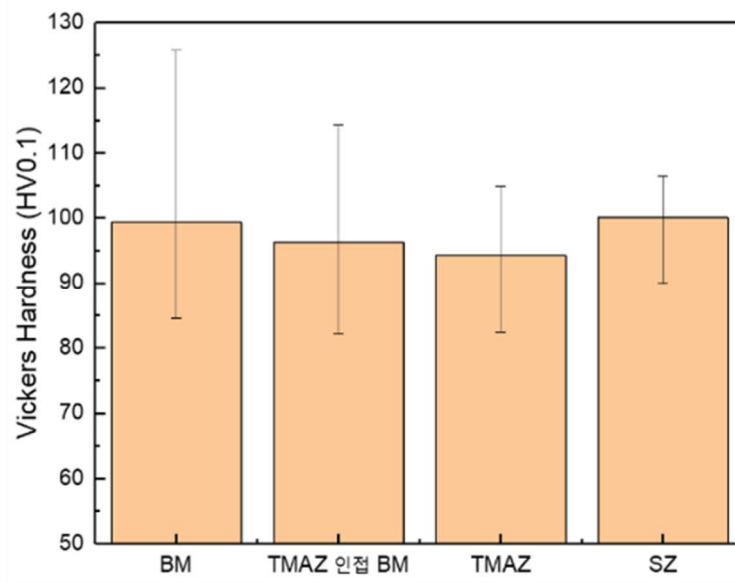


그림 64 최대 입열조건에서 각영역별 비커스 경도 분포

4.4.2. 이송속도 변화가 경도 특성에 미치는 영향

표 8은 공구 이송속도의 변화에 따른, 상판과 하판의 경도분포, 그림 65은 교반부에서의 측정된 비커스 경도의 평균 경도를 나타낸 것이다. 횡측 접선은 앞서 언급한 모재부의 비커스 경도 편차를 나타낸 것이며, 가로측 실선의 경우 모재부 비커스 경도의 평균 값을 나타낸 것이다. 종측의 실선의 경우 파란선은 각 영역 내부의 경도가 측정된 값 주황색 실선의 경우 영역의 경계에 경도가 측정된 값을 표시하였다. 앞서 언급하였듯이, 교반부의 경우, 모재부에 비해 경도의 편차가 감소한 것을 알 수 있다. 그리고 모재부의 평균 경도 값과 유사한 값을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 이송속도 변화에 따른 경도 변화는 크게 나타나지 않는다.

일반적으로, 마찰교반접합시 비열처리형 알루미늄의 경우, 교반부에서 동적재결정 현상에 의해 모재부 보다 경도 값이 증가하는 것으로 알려져 있다. 그리고 열처리형 알루미늄합금의 경우에는 석출물의 재용해 현상에 의해 교반부의 경도가 모재부 보다 감소하는 것으로 알려져 있다. 하지만 본 실험에서 측정된 경도값의 경우 비커스 경도의 편차만 감소할 뿐, 평균 경도 값은 유사하게 측정된다.

이는, 본 실험에서 사용된 ADC12 알루미늄합금의 경우 Al-Si-Cu-Mg계 합금으로 주조 후 T6 열처리를 진행 하는 경우, $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 상과 Q ($\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$) 상이 석출되며, 추가적으로 Mg_2Si 상이 석출되어 시효경화 효과가 있다고 알려져 있다[39]. 하지만 본 실험에서 사용된 모재는 별도의 열처리를 진행하지 않은 채 as-Cast 상태에서 접합을 실시하였다. 즉, 석출물의 재용해에 의한 경도 감소 효과가 크지 않다고 가정한다면, 비열처리형 알루미늄합금과 유사하게 접합부에서 동적재결정 현상에 의한 결정립 미세화에 의해 경도가 상승하여야 된다. 하지만 주조재의 경우 초기에 주조 잔류응력이

존재하고, 이러한 잔류응력이 접합시 교반부에서 해소됨에 따라 경도의 감소효과로 작용하여 모재부와 유사한 경도 값을 가진 것으로 예상된다.

표 8 이송속도의 변화에 따른 상판, 하판의 비커스 경도 분포

Trenseverse speed(mm/min)	상판 비커스 경도 분포	하판 비커스 경도 분포
50		
100		
200		
300		

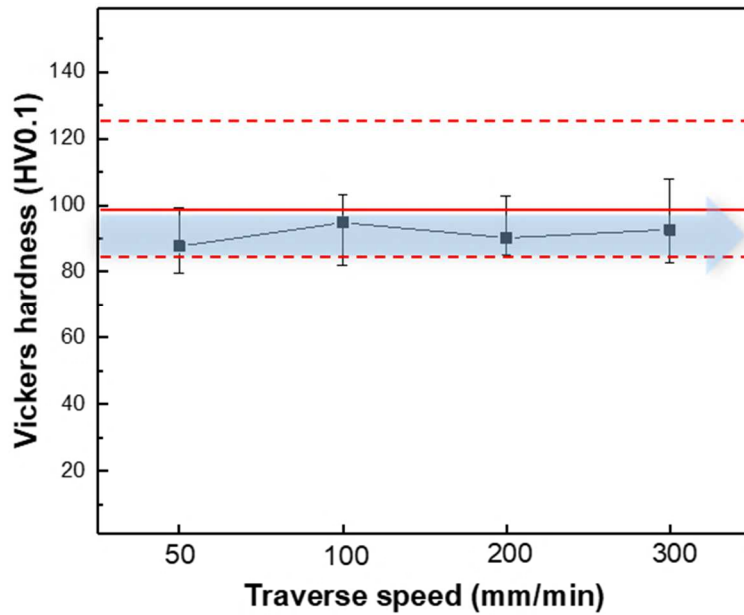


그림 65 이송속도에 따른 SZ영역 비커스 경도 변화

4.4.3. 회전속도 변화가 경도 특성에 미치는 영향

표 9는 공구 회전속도의 변화에 따른 상판과 하판의 경도분포, 그림 66은 교반부에서의 측정된 비커스 경도의 평균 경도를 나타낸 것이다. 이송속도의 변화와 유사하게 교반부의 경우, 모재부에 비해 경도의 편차가 감소한 것을 확인할 수 있으며, 모재부의 평균 경도 값과 유사한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 회전속도 또한 회전속도가 증가함에 따라, 경도변화는 크게 나타나지 않는다.

표 9 회전속도 변화에 따른 상판, 하판 비커스 경도 분포 변화

Rotation speed (rpm)	상판 비커스 경도 분포	하판 비커스 경도 분포
1000		
1500		
2000		
2500		
3000		

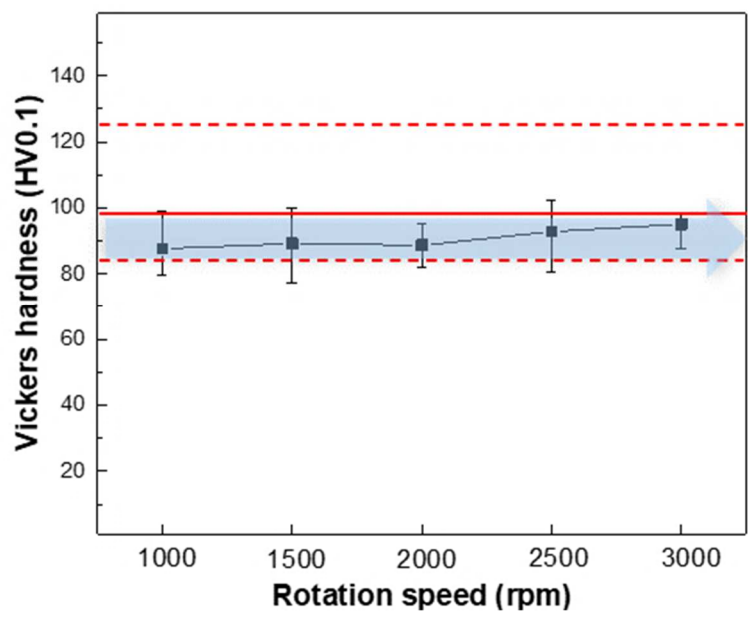


그림 66 회전속도 변화에 따른 SZ영역 비커스경도 변화

4.5. 접합변수가 상온인장전단 특성에 미치는 영향

4.5.1. 접합변수가 외관 형상과 인장전단하중값에 미치는 영향

본 실험에서, 대부분의 파괴는 그림 67 및 그림 68과 같이 접합부 인근의 상판의 AS측에서 발생하였다. 이는 그림 69의 겹치기 이음부의 인장전단시험 중 응력 분포 시뮬레이션 결과를 살펴보면 알 수 있다. 그림 69에 나타난 것과 같이 겹치기 이음부의 인장전단시험시 시편에는 국부적인 영역에서 응력 집중이 일어난다. 따라서, 본 실험에서 나타나는 파괴의 형태가 접합부 인근의 상판 AS측에서 발생하는 것은 응력집중부에 인접한 영역에서의 AS측의 Hook과 내부결함에 의한 것으로 판단된다. 그리고 그림 70의 접합변수에 따른 최대 인장전단 하중 값을 살펴보면, 회전속도와 이송속도를 변화시킴에 따라, 대부분 약 5.1kN이상의 최대 인장전단하중을 가진다. 반면, 비교적 큰 결함이 존재하는 조건의 경우에는 약4.7kN이하의 최대 인장전단 하중 값을 가지며, 시험후 외관형상이 타 조건과 달리 거친면으로 나타난다. 이로부터, 본 실험에서는 내부결함이 형성되는 경우 Void 형태의 불연속적인 결함이 형성되는 경우, 최대 인장전단 하중에는 악영향을 주지 않지만 비교적 큰 결함이 형성되는 경우, 최대 인장전단하중 값에 악영향을 주는 것으로 판단된다.

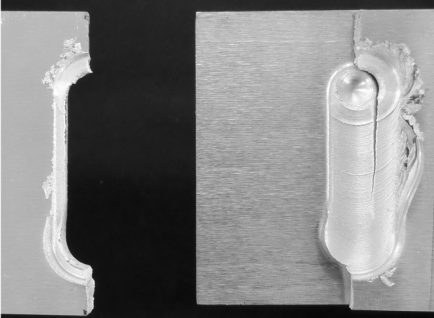
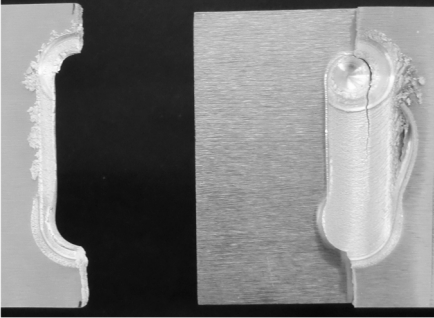
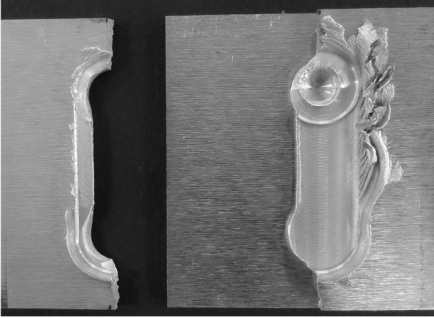
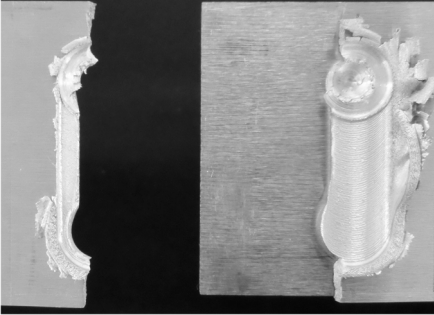
접합변수	이송속도에 따른 접합부 단면	
50mm/min- 1000rpm	AS	
100mm/min- 1000rpm		
200mm/min- 1000rpm		
300mm/min- 1000rpm		

그림 67 이송속도 변화에 따른 상온인장전단시험 후 외관형상




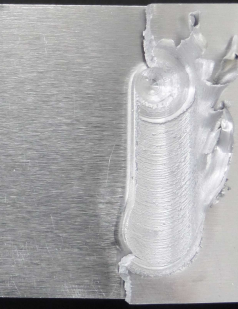
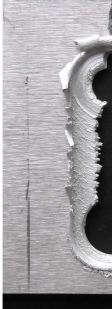
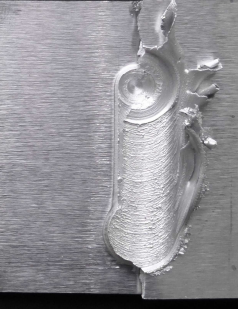

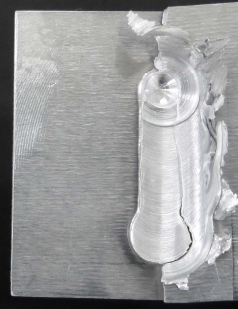


접합변수	회전속도에 따른 접합부 단면 조직변화		
50mm/min- 1000rpm	AS		RS 
50mm/min- 1500rpm			
50mm/min- 2000rpm			
50mm/min- 2500rpm			
50mm/min- 3000rpm			

그림 68 회전속도에 따른 상온인장전단시험 후 외관형상

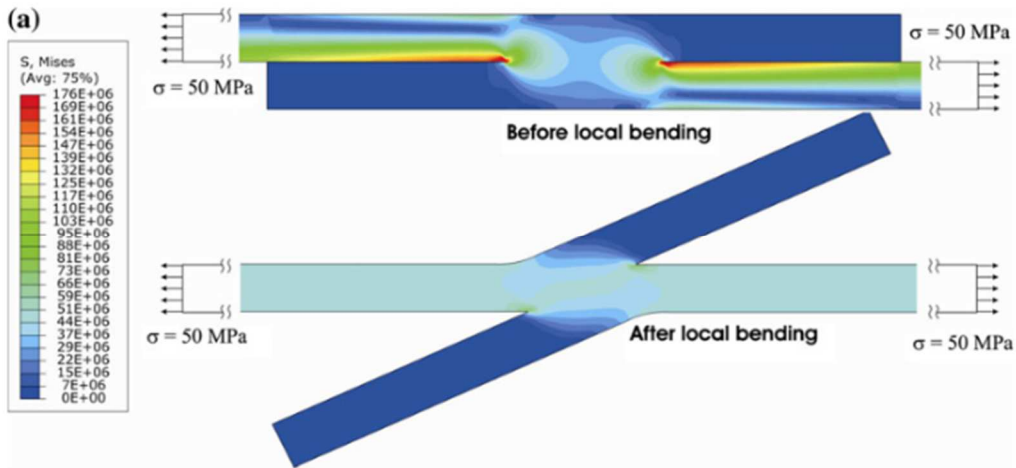


그림 69 겹치기 이음부의 인장전단시험 중 응력 분포 시뮬레이션 결과[45]

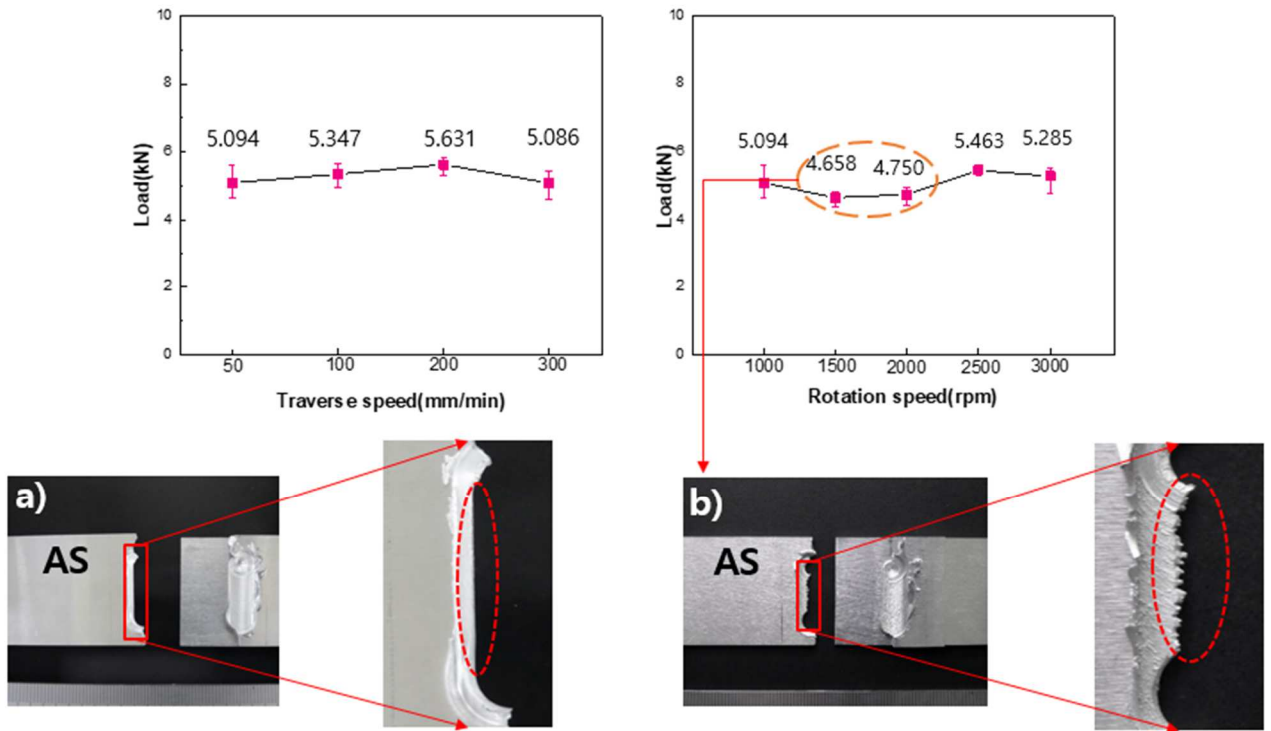


그림 70 접합변수에 따른 최대 인장전단하중값과 상온인장전단시험 후 외관형상

(a) 내부결함을 형성하지 않거나 Void 형태의 결함을 가지는 경우 (50 mm/min-1000 rpm),

(b) 비교적 큰 크기의 내부결함이 형성되는 경우(50 mm/min- 2000 rpm)

4.5.2. 상온인장전단시험 후의 파면

파면 관찰결과 앞서 언급하였던, 내부결함의 형태에 따라 파면은 크게 2가지로 구분되었다.

- 1) 내부의 결함을 형성하지 않거나 불연속적인 Void형태의 결함이 형성되는 경우
- 2) 내부에 연속적인 Tunnel 형태의 결함을 형성하는 경우

Tunnel 형태의 결함의 경우, 앞서 언급한 불연속적인 Void 형태의 결함과 달리 접합부 내부에 연속적인 형태로 형성된 것으로부터 Tunnel 형태의 결함으로 관측되었다. 이때, 각각의 파면을 살펴보면 우선 1)의 경우 그림 71과 같이 파면형태가 크게 3가지 영역으로 구분된다. 우선, 그림 71(A)의 검게 보이는 영역의 경우, 고배율로 확인하였을 때, 표면과 같은 매끄러운 형태를 것으로부터 접합이 이루어지지 않은 Lap Tip부근 인 것을 알 수 있다. 즉, 금속간 결합을 이루지 못한, 겹침부의 표면인 것이다. 이후 중단부의 경우 빗살무의 형태를 가진다. 그리고, 그림 71(B) 및 (C)과 같이, 일부는 금속간 결합을 이루어 뒨플이 관찰되며, 결합을 이루지 못한부분이 혼재되어 있다. 이때, 상부로 올라옴에 따라 뒨플의 양은 많아지는 것을 알 수 있다. 일반적으로, 인장전단 시험 시 파면에서 형성되는 뒨플의 경우 전단 응력에 의해 연신 된 형태를 갖는 반면, 중단부 영역에서의 뒨플은 일반적인 인장시험에서의 뒨플과 유사한 형태를 가지는 것을 알 수 있다. 이는, 앞서 언급한 Hook의 형태를 보았을 때, Hook의 경우에는 겹침부에 수직인 방향으로 상승된 형태를 가지므로, 인장전단 시험 시 전단 응력이 아닌 인장 응력을 받는 상황에 유사하다. 그 결과, 인장시험에서 나타나는 뒨플의 형태와 유사한 형태를 가지는 것으로 생각된다. 그로 인해, 그림 72를 살펴보면, 접합부 단면에서 관측된

이송속도 변화에 따른 hook의 높이와 파면부에서 관측되는 hook 높이가 유사한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

2) 의 경우에는 상판의 파면 하부에 그림 73(C)와 같이 금속간 결합을 이루지 못한 매끈한 면이 관측된다. 이는 Tunnel결함의 표면부로 관측되며, 이러한 파면 형태가 그림 73(A)와 같이 파면 전체에 걸쳐 연속적으로 나타난다. 그 결과, 그림 74와 같이 접합부 단면에서 관측된 회전속도에 따른 hook 높이가 내부에 Tunnel 형태의 결함이 형성되지 않는 조건에서는 파면에서의 hook 높이와 유사 하지만 결함이 형성되는 경우 파면에서 hook으로 보이는 부분은 관측되지 않는다.

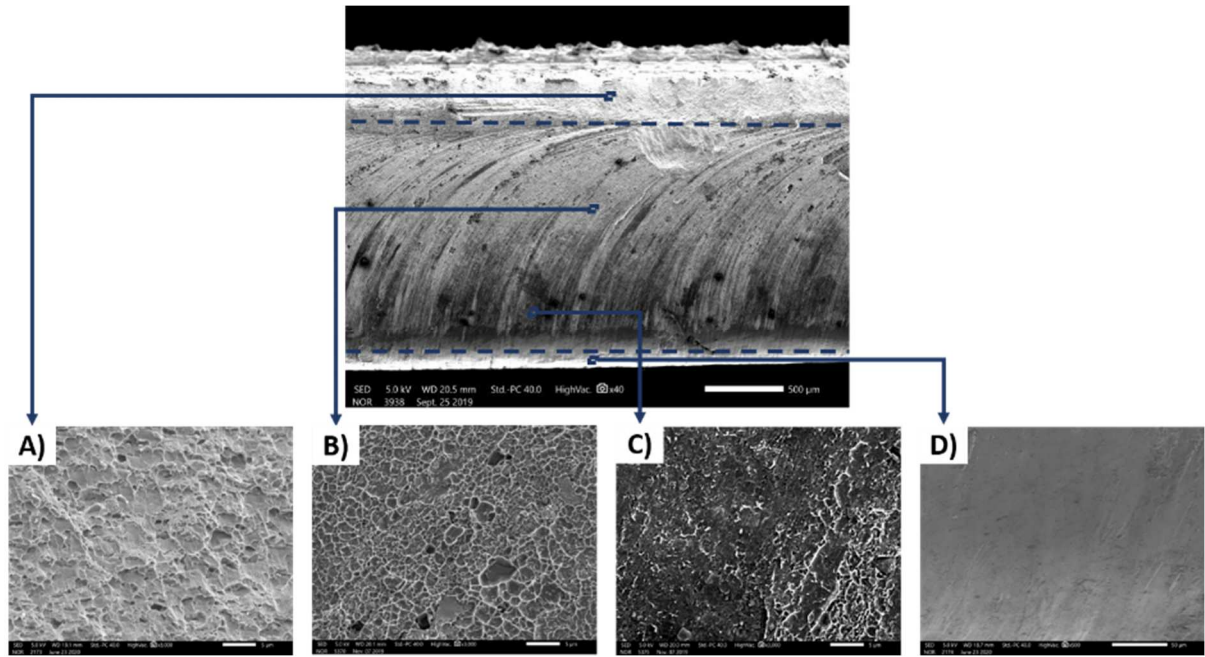


그림 71 내부의 Tunnel 형태의 결함을 갖지 않는 경우의 파면 형상 (50 mm/min-1000 rpm)

A) 유효 접합부의 연신된 딥플 형상, B) Hook 상부의 딥플 형상, C) Hook 하단부의 부분적인

딥플 형상, D) Hook 시작부의 겹침부 표면 형상

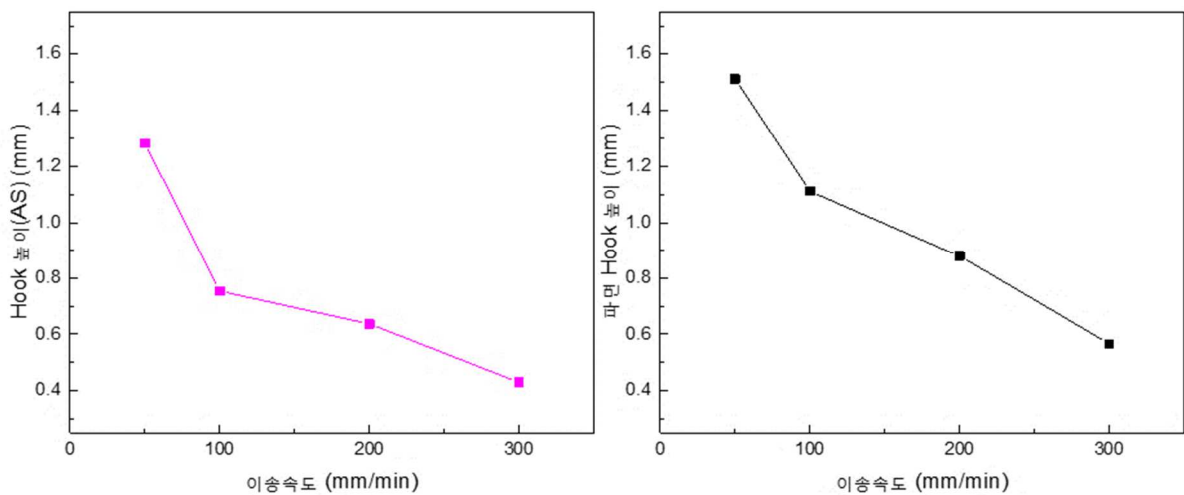


그림 72 이송속도 변화에 따른 접합부 단면에서의 Hook 높이(좌)와 파면에서의 Hook 높이(우)

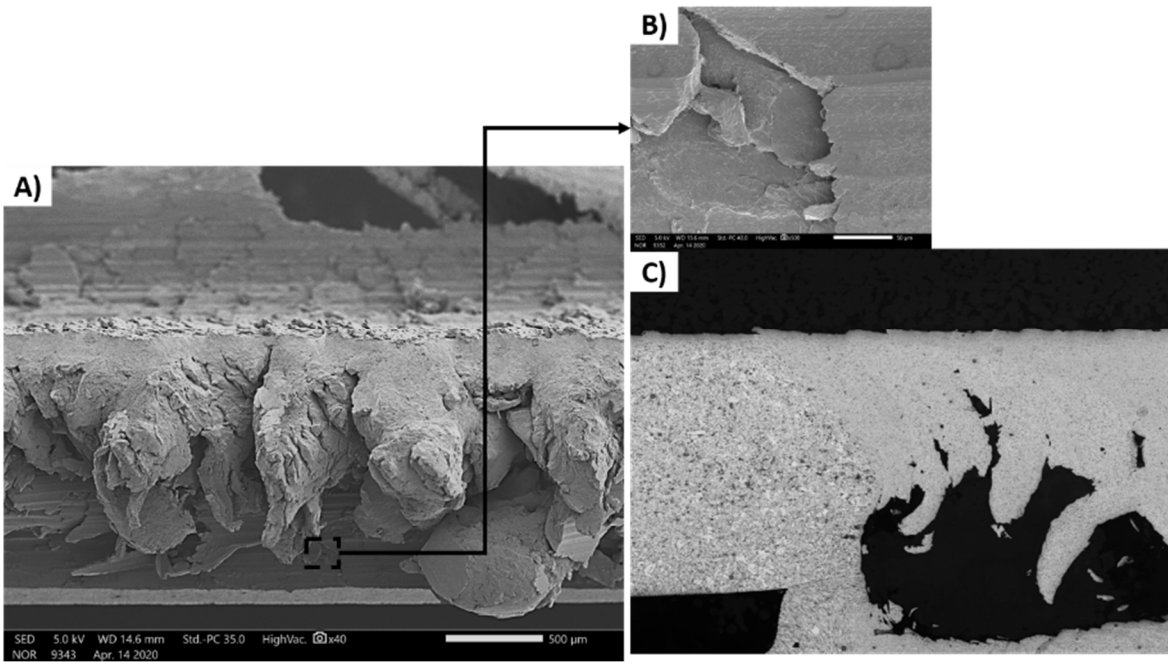


그림 73 내부의 Tunnel 형태의 결함을 갖는 경우의 파면 형상 (50mm/min-2000 rpm)

(A) Tunnel 형태 결함 발생시 상온인장전단시험 후 파면 형상, (B) Tunnel 형태의 결함부의 파면 형상, (C) Tunnel 형태의 결함이 발생한 접합부 단면형상

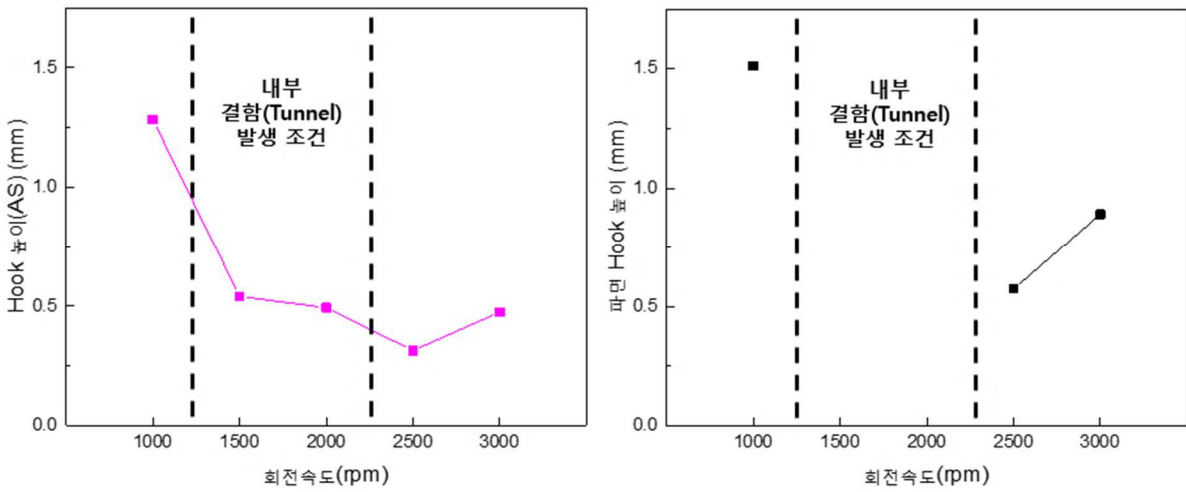


그림 74 회전속도 변화에 따른 접합부 단면에서의 Hook 높이와 파면에서의 Hook 높이

4.5.3. 상온인장전단시험시 파괴모드

파면 관측에 따라 본 실험에서 상온인장전단시험시 나타나는 파괴모드는 크게 2가지로 구분할 수 있으며 파괴전파 거동은 다음과 같다.

1) Mode1: 상판 AS측 파단 -Hook-

: 상온인장전단시험시, 국부적인 영역에서 응력집중이 발생하며, 이때, 접합되지 않은 Lap Tip은 노치로 작용하게 되어, 균열이 시작된다. 이후, 상판 AS측 Hook을 따라 균열이 전파되고, Hook 상부의 유효접합부로 균열이 관통됨에 따라, 파단이 이루어진다.

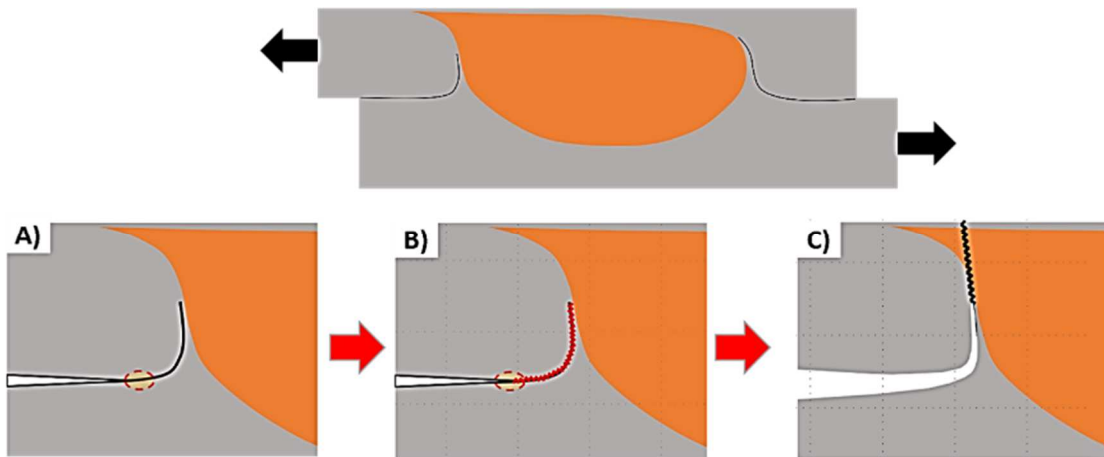


그림 75 Mode1의 균열 전파 및 파단 모식도 (내부의 Tunnel 형태의 결함이 형성되지 않는 경우) (A) Lap Tip 부근에서의 응력집중으로 인한 균열 시작, (B) Hook을 따라 균열 전파, (C) Hook 상부의 유효 접합부를 따라 균열 관통

2) Mode2: 상판 AS측 파단 -Tunnel 결함-

: 상온인장전단시험시, 국부적인 영역에서 응력집중이 발생하며, 이때 Tunnel 결함에서 응력이 집중되어, 균열이 시작된다. 이후, 결함의 상부로 균열이 관통됨에 따라 파단이 이루어진다.

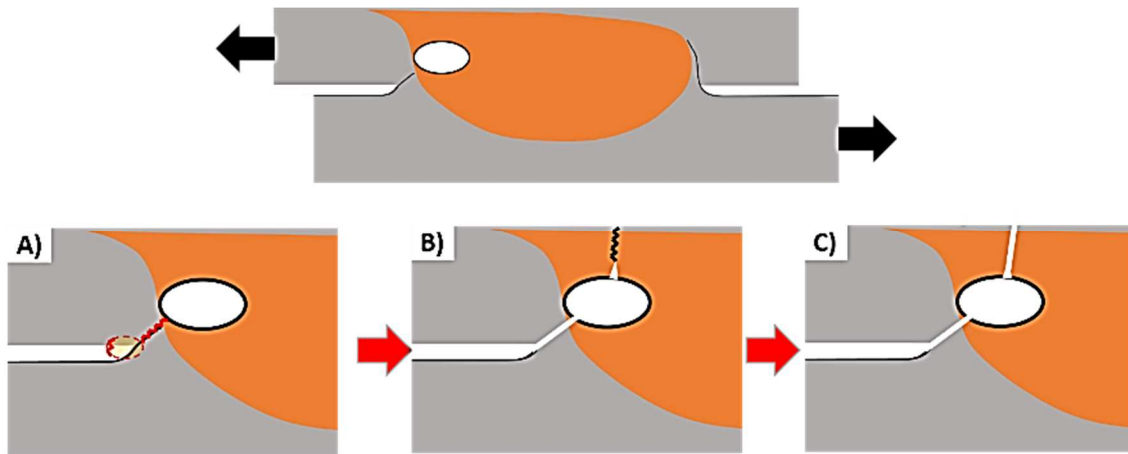


그림 76 Mode2의 균열 전파 및 파단 모식도 (내부의 Tunnel 형태의 결함이 형성되는 경우)

- (A) Lap Tip 부근에서의 응력집중으로 인한 균열 시작, (B) Tunnel 결함으로 균열 전파,
- (C) Tunnel 결함 상부로 균열 관통

5. 결론

본 연구에서는 ADC12 알루미늄합금 다이캐스팅 판재의 접합에 겸치기 마찰교반접합기술을 적용하였다. 또한, 접합공구의 회전속도 및 이송속도를 접합변수로 하여 접합부 형상, 미세 조직, 비커스경도특성 및 상온인장전단특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과는 아래와 같다.

1. BM의 공정 조직내의 Si이 SZ에서 비교적 등축정형태의 Si 입자상으로 균일하게 분산되었다.
2. SZ에서는 BM의 공정조직과 수지상 조직이 관측되지 않으며, α -Al 결정립의 평균 크기는 약 10 μm 에서 약 3 μm 로 감소하였다. 또한 크기 분포의 표준 편차 또한 약 10.1 μm 에서 약 1.6 μm 정도로 감소하였다.
3. 최대 입열 시편에서의 BM, TMAZ, TMAZ인접 영역, SZ영역의 평균 경도는 $\pm 3\text{HV}$ 로 유사하며, 접합변수에 따른 SZ의 평균 경도의 차이도 거의 유사하였다. 하지만 모든 접합조건에서 SZ의 경도 편차는 BM 대비 감소하였다. 이는 BM보다 SZ의 미세조직이 더욱 균일해지기 때문이다.
4. 접합부 내부에 형성된 결함은 불연속적인 Void 형태와 연속적인 Tunnel 형태로 나타났으며, 두 가지 결함 모두 상판 AS측에서 형성되었다.
5. 내부결함이 형성되지 않거나 Void 결함이 형성된 시편들의 평균 상온인장전단하중값은 약 5.1 kN이상의 값을 나타내었다. 하지만 Tunnel형태의 결함이 형성된 시편들은 평균값에 비해, 비교적 낮은 약 4.7 kN 이하의 약간 낮은 상온인장전단하중값을 나타내었다.

참고문헌

1. 김형욱, 자동차 차체 경량화 및 차체용 알루미늄합금판재의 개발동향. 2015: 재료연구소. p. 1-13.
2. KPNG, 삼., <자동차 경량화 트렌드의 중심이동, 소재의 경량화>. 삼성KPNG 경제연구원, 2018: p. p1-26.
3. 최성배, <자동차 경량화 기술동향과 개발 전략>. 한국과학기술정보원 정보분석연구소, 2013.08: p. 1-77.
4. 최부식, <철강 vs 알루미늄, 車 소재 전쟁 전망>. 2015.03: 포스코경영연구원.
5. Kim, C.-H., Y.-N. Ahn, and H.-S. Lim, Laser Welding of Automotive Aluminum Alloys. Journal of Welding and Joining, 2011. 29(4): p. 21-26.
6. 조영건, 고진공 다이캐스팅 공법 적용한 알루미늄 서브프레임 개발. 한국자동차공학회, 2012. 제20권 제4호: p. 52-59.
7. 윤광민, 고진공 다이캐스팅 공법 적용한 자동차 부품 개발. 2009. 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회: p. 1540-1546.
8. Thomas, W., Friction stir butt welding. Int. Patent No. PCT/GB92/02203, 1991.
9. Mishra, R.S., et al., Friction stir welding and processing VI. 2011: John Wiley & Sons.
10. bandivadekar, Z.y.a.A., <LIGHT-DUTY VEHICLE GREENHOUSE FAS AND FUEL ECONOMY STANDARDS.pdf>. 2017: ICCT.
11. TV, C. 2018 Audi A8 Body Structure- Engineering Wonder (Excellence). 2017; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=ZuJMtW3xeNQ>.
12. Linnert, G.E. Welding Metallurgy 4Th ed. Vol. Figure 6.12. 1994, Mialmi: American Welding Society.
13. Zhang, W.z., Real-Time Measurement of Three Dimensional Weld Pool Surface in GTAW. IntechOpen, 2012: p. Figure 1.
14. TOM. Laser Beam Welding – Equipment. Working with Advantages and Disadvantages 2017; Available from: <https://www.theweldingmaster.com/laser-beam-welding/>.
15. CFS. Aluminum Die Casting for Automotive Industry. 2017 [cited <http://www.investmentcastchina.com/aluminum-die-casting-for-automotive-industry>].
16. 최성수, 자동차용 알루미늄합금 다이캐스팅 설비의 최신 동향 한국과학기술정보연구원, 2005: p. 1-7.
17. Mishra, R.S. and Z. Ma, Friction stir welding and processing. Materials science and engineering: R: reports, 2005. 50(1-2): p. 1-78.
18. INNOCATION, P. Friction Stir Welding. Available from: <https://www.theweldingmaster.com/laser-beam-welding>.

19. 이중헌, AI 5052 합금 및 AI 6061 합금의 겹치기 마찰교반접합특성. 2007, 경북대학교 대학원: 대구.
20. LCH, 마찰교반용접, 기술산업정보분석. 2003.12: KISTI.
21. 서종덕, AA5454-O 알루미늄합금 판재의 겹치기 마찰교반접합에 관한 연구. 2012, 울산대학교 자동차·선박 기술 대학원: 울산.
22. Shinoda, T., et al. Recent trends of research and development of FSW technology in Japan. in 3rd International FSW Symposium. 2001.
23. Mononen, J., M. Sirén, and H. Hänninen, Cost comparison of FSW and MIG welded aluminium panels. *Welding in the World*, 2003. 47(11-12): p. 32-35.
24. 박상원, 이종 알루미늄 A6111/A5023 겹치기 마찰교반접합부의 솔더 직경과 입열량이 전단인장하중에 미치는 영향. 2016, 부산대학교 대학원: 부산.
25. Elangovan, K. and V. Balasubramanian, Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Journal of materials processing technology*, 2008. 200(1-3): p. 163-175.
26. 朱秀元, AI 5052 합금의 겹치기 마찰교반접합특성. 2005, 慶北大學校 産業大學院: 대구.
27. Threadgill, P., Friction stir welds in aluminium alloys-preliminary microstructural assessment. *TWI Bulletin*, 1997: p. 30-33.
28. Ericsson, M., L.-Z. Jin, and R. Sandström, Fatigue properties of friction stir overlap welds. *International journal of fatigue*, 2007. 29(1): p. 57-68.
29. Yadava, M., et al., Study of friction stir joining of thin aluminium sheets in lap joint configuration. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010. 15(1): p. 70-75.
30. Dubourg, L., A. Merati, and M. Jahazi, Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin. *Materials & Design*, 2010. 31(7): p. 3324-3330.
31. Cao, X. and M. Jahazi, Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy. *Materials & Design*, 2011. 32(1): p. 1-11.
32. Cederqvist, L. and A. Reynolds, Factors affecting the properties of friction stir welded aluminum lap joints. *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, 2001. 80(12): p. 281-s.
33. Buffa, G., et al., Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 2009. 519(1-2): p. 19-26.
34. Chen, Z. and S. Yazdanian, Friction Stir Lap Welding: material flow, joint structure and strength. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2012. 55(2): p. 629-637.
35. 고영봉, A5052-H112 합금의 겹치기 마찰교반접합특성. 2010, 경북대학교 대학원: 대구.
36. Colegrove, P., 3 dimensional flow and thermal modelling of the friction stir welding process. 2001.

37. Rushton, J.H., Mixing of liquids in chemical processing. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1952. 44(12): p. 2931-2936.
38. matweb.
39. 강신욱, et al., 다이캐스팅 ADC12 합금의 열처리 전후의 기계적 특성변화. *한국주조공학회지 (주조)*, 2016. 36(3): p. 88-94.
40. Nakata, K., et al., Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A*, 2006. 437(2): p. 274-280.
41. Oosterkamp, A., L.D. Oosterkamp, and A. Nordeide, Kissing bond'phenomena in solid-state welds of aluminum alloys. *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, 2004. 83(8): p. 225-S.
42. Kim, Y., et al., Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2006. 415(1-2): p. 250-254.
43. Soundararajan, V., E. Yarrapareddy, and R. Kovacevic, Investigation of the friction stir lap welding of aluminum alloys AA 5182 and AA 6022. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2007. 16(4): p. 477-484.
44. Kumar, K. and S.V. Kailas, The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. *Materials Science and Engineering: A*, 2008. 485(1-2): p. 367-374.
45. Yazdanian, S., Z. Chen, and G. Littlefair, Effects of friction stir lap welding parameters on weld features on advancing side and fracture strength of AA6060-T5 welds. *Journal of materials science*, 2012. 47(3): p. 1251-1261.

영문 요약

In recent years, as the demand for technology development for global environmental protection and energy saving increases, the amount of use and application of lightweight metals such as aluminum is increasing in the automobile industry to reduce vehicle weight. However, in the case of aluminum alloys, there is a problem of rising prices compared to existing steel materials, So the application of cast materials that are price-competitive compared to wrought materials is also increasing. when fusion welding is applied to an aluminum alloy, there is a problem in that it is difficult to obtain required welding properties due to the natural oxide film on the surface and high thermal conductivity. In particular, the cast material contains casting defects such as Pores and Segregation, etc. compared to the wrought material, making it difficult to apply fusion welding. Therefore, when applying friction stir welding (FSW), which is one of the solid-state welding technologies, to solve this problem, it is possible to solve the problems that occur during the melting and solidification process. But, the research and development of Friction Stir Welding (FSW) were mostly based on the formation of butt joints, and it was mainly conducted on the application of wrought aluminum alloy. However, in the case of car body parts, there is a lot of demand for lap joints, so in order to apply cast aluminum alloy to car body parts, a study on application to friction stir lap welding (FSLW) is required.

In this study, FSLW technology was applied to ADC12 aluminum alloy die-casting plates with 2.0 mm thick. Also, the characteristics of friction stir lap joint according to the welding parameters were investigated. As a result, the cross-section of joint area was largely divided

into <Base metal, BM>, <Thermal-mechanically affected zone, TMAZ>, <Stir zone, SZ>. And <Heat affected zone, HAZ> did not appear. In the case of SZ, the secondary phase was relatively uniformly dispersed in the form of fine particles, and Al matrix was refined by recrystallization, and the size was relatively uniform. As a result, as the microstructure in SZ became uniform compared to the BM structure, the hardness variation also decreased. There were two types of internal defects in the joint, first was discontinuous defect in the form of void type defect, and second was continuous defect in the form of tunnel type defect. All of these defects occurred inside the junction on the AS side of the upper plate, and when tunnel-type defects occur, it was judged that the tensile shear load is adversely affected.

감사의 글

대학원 생활의 마무리인 석사 학위 졸업 논문을 마무리하며, 많은 분들에게 너무나 큰 도움을 받아 미흡하지만 이렇게 감사의 마음을 전하고자 합니다.

우선, 제가 여기까지 있게 저를 키워 주시며 늘 힘이 되어 주신 할머니, 아버지, 어머니에게 감사합니다.

그리고 진학을 결심하게 해주시고, 연구와 인생에 있어 많은 조언과 가르침을 주시며, 물심양면으로 도와주신 권용재 지도교수님께 큰 감사드립니다. 그리고 다양한 관점에서 바라보며 생각의 폭을 넓혀주신 신상용 교수님과 이정구 교수님께 감사의 인사드립니다.

연구실에 처음 들어와 아무것도 모를 때, 많은 것을 알려주며 실험을 진행하고 분석할 때, 많은 도움을 주었던 원석이와 연구실에 잘 적응할 수 있도록 도와준 현욱이, 건희도 고맙습니다. 그리고 2년 동안 함께 생활하며 동고동락한 원구형, 대현이형, 해원이, 훈이, 수영이, 종희에게도 고마운 마음을 전하며 각자의 길에서 최선을 다하길 기원합니다.

선배로서 큰 도움을 주지 못하였는데 잘 따라주었던, 태우, 승훈이, 범수, 승엽이, 민구, 기웅이도 석사과정 잘 마무리하고 앞으로도 저의 금속기반 뿌리기술 연구그룹을 잘 이끌어주길 부탁드립니다.

마지막으로 제가 여기까지 있기에 도움을 주신 많은 분들에게 모두 감사의 인사를 전하지 못해 죄송하며, 덕분에 학위 논문을 잘 마무리하고, 졸업할 수 있었습니다. 진심으로 감사드립니다.