



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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

AA5182-O 알루미늄합금 판재와
SPRC440 강판 간의 이종 Refill-FSSW
접합부 특성에 관한 연구

A study on the characteristics of dissimilar
Refill-FSSW joint between AA5182-O aluminum
alloy and SPRC440 steel sheets

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

박 수 영

AA5182-O 알루미늄합금 판재와
SPRC440 강판 간의 이중 Refill-FSSW
접합부 특성에 관한 연구

지도교수 권용재

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2021년 08월

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

박수영

박수영의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 신 상 용 (인)



심사위원 이 정 구



심사위원 권 용 재 (인)



울산대학교 대학원

2021년 08월

감사의 글

지난 대학원 생활을 마무리하며, 감사의 글을 쓰게 되는 날이 오니 감회가 새롭습니다. 석사과정 중의 많은 일들은 저의 삶에서 잊을 수 없는 너무나 값진 경험이었으며, 너무나 부족한 제게 많은 도움을 주신 고마운 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

우선, 논문을 완성하기까지 아낌없는 지도와 배려로 학문뿐만 아니라 참된 삶을 가르쳐 주신 권용재 지도교수님의 은혜에 고개 숙여 감사드리며, 본 논문에 대해 아낌없이 조언해주시고 힘들 때마다 차 한 잔의 여유로 저를 다독여 주신 신상용 교수님, 대학원 생활 동안 많은 가르침과 올바른 연구 방향으로 갈 수 있도록 도움을 주신 이정구 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한, 대학원 과정에서 많은 격려와 관심을 베풀어 주신 첨단소재공학부 여러 교수님들, 바쁘신 가운데에도 불구하고 실험분석에 도움을 주신 공동기기센터 강미리 실장님, 본 연구의 실험을 위해 많은 시간을 할애해주신 신영의 서종덕 수석연구원님, 조재동 책임연구원님, 박수완 책임연구원님, 생산기술연구원의 윤필환 연구원님께도 이 자리를 빌려 감사의 마음을 전합니다.

처음 연구실에 들어왔을 때, 연구실 생활 및 실험진행에 많은 도움을 주었던 원석이형, 가족처럼 편안하게 대해줬던 현욱이형, 건희형에게도 고마운 마음을 전합니다. 그리고, 어려울 때 힘이 되어 주고 많은 충고와 조언을 해준 연구실 동기 원구형, 대현이형, 준일이형, 해원이형, 훈이형, 종희에게도 고맙다고 전해주고 싶습니다. 또한, 학위 논문을 무사히 마칠 수 있게 묵묵히 도와준 정수, 항상 응원해주던 범수, 태우, 승훈이, 승엽이, 민구, 기웅이, 동원이, 종혁이, 재영이에게도 고맙고 앞으로 남은 대학원 생활 잘 마무리하길 기원합니다.

마지막으로, 지금 이 자리까지 설 수 있도록 믿음을 가지고 지켜봐 주신 아버지, 어머니, 친형에게 정말 감사하다는 말을 전해 드리고 싶고, 이 작은 결실을 바칩니다.

대학원 생활 동안, 정말 많은 분들께 많은 도움을 받았습니다. 많은 분들의 도움과 응원으로 대학원 생활을 잘 마무리할 수 있었습니다. 항상 노력하는 모습으로 그 보답을 갚는다는 마음으로 살아가겠습니다. 또한, 대학원이라는 삶의 경험은 앞으로의 제 삶의 가장 큰 원동력이 될 것을 믿어 의심치 않습니다.

국문 요약

전 세계적으로 지구온난화로 인한 환경문제 관심이 증가함에 따라, 자동차산업에서는 연비 향상을 위해 기술 개발을 하고 있다. 이 중 소재 변경의 경우, 고강도 강으로 대체하거나 알루미늄합금으로 대체하고 있다. 이처럼, 소재 변경이 진행됨에 따라 소재의 혼용 사용 가능성이 증가하기에, 이종 소재 간 용접/접합 기술의 중요성이 증가하고 있다. 점 결합 기술 중 리필마찰교반점접합 (Refill-Friction Stir Spot Welding, Refill-FSSW) 기술은 타 공정 대비 여러 문제점을 보완하기 때문에, 이에 관한 연구 필요성 및 관심이 증가하고 있다. 본 연구에서는 상판 두께 1.0 mm의 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 하판 두께 0.7 mm의 SPRC440 강판 간의 접합에 Refill-FSSW를 적용했으며, 공구의 삽입 깊이를 변화시켜 겹치기 접합을 진행했다. 실험 결과, 삽입 깊이 0.6 mm 이외의 모든 삽입 깊이에서 접합되었으며, 결정립 크기의 경우 접합부 영역이 모재 영역보다 결정립 크기가 작았고, 접합부에서도 상부, 중부 및 하부 영역으로 갈수록 결정립 크기가 커졌다. 하부 판재의 경우 슬리브 상부를 제외하고는 모든 영역이 모재의 결정립 크기와 유사했다. Al/Steel 계면부에서는 Fe_4Al_{13} 의 금속간화합물 (Intermetallic compound, IMC)과 불연속 IMC 영역이 관측되었고, 삽입 깊이에 따라 계면 거칠기 변화가 관측되었다. 삽입 깊이가 증가함에 따라 IMC 길이와 두께 및 계면 거칠기는 증가하는 경향을 보였고, 불연속 IMC 길이는 감소하는 경향을 보였다. 비커스 경도의 경우, 알루미늄합금 판재에서는 모든 삽입 깊이에서 접합부 영역이 모재 영역보다 높은 경도 값을 보였으며, 접합부 영역에서도 슬리브 영역이 핀 영역보다 높은 경도 값을 보였다. 또한, 모든 접합변수에서 상부, 중부 및 하부 영역으로 갈수록 경도 값이 감소하는 경향을 보였다. Steel 판재에서의 경도 값은 삽입 깊이 0.9 mm의 슬리브 상부 및 중부 영역을 제외하고, 삽입 깊이에 따른 모든 영역에서 모재의 경도 값과 유사했다. 상온인장전단하중의 경우, 삽입 깊이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 이를 미세조직 영향 인자들과 상관관계를 파악해본 결과, IMC 길이와 계면 거칠기가 상온인장전단하중 변화에 주된 영향 인자로 판단된다.

목차

1. 서론	1
1.1. 연구배경.....	1
1.2. 연구목적.....	8
2. 이론적 배경	9
2.1. Refill-FSSW	9
2.1.1. Refill-FSSW 원리 및 특징	9
2.1.2. Refill-FSSW 접합용 공구의 역할 및 특징	15
2.1.3. Refill-FSSW 접합부 미세조직	16
2.2. 금속간화합물	20
2.2.1. 금속간화합물의 특징	20
2.2.2. Al-Fe 금속간화합물	22
3. 실험방법	25
3.1. 피접합재.....	25
3.2. Refill-FSSW 실험.....	26
3.2.1. 접합용 장비	26
3.2.2. 공구의 형상 및 특징	28
3.2.3. 접합조건	31
3.3. 특성 평가	33

3.3.1. 접합부의 외관형상 관찰	33
3.3.2. 접합부의 계면부 및 미세조직 관찰	33
3.3.3. 비커스 경도 측정	35
3.3.4. 상온인장전단시험	36
3.3.5. XRD 분석	37
4. 실험결과 및 고찰	38
4.1. 피접합재 특성평가	38
4.1.1. 미세조직 특성	38
4.1.2. 경도특성	40
4.2. 공구의 삽입 깊이가 접합부 특성에 미치는 영향	42
4.2.1. 외관형상	42
4.2.2. 미세조직 특성	46
4.2.3. 기계적 특성	75
5. 결론	97
참고문헌	98

그림 목차

그림 1-1 국가별 자동차 CO ₂ 배기가스 규제 추이[2]	4
그림 1-2 미래 자동차용 소재의 비중 변화	5
그림 1-3 저항 점용접 공정도[6]	6
그림 1-4 셀프 피어싱 리벳 공정도[8]	7
그림 1-5 마찰교반점접합 공정도: (A) 회전, (B) 삽입, (C) 교반, (D) 후퇴[10]	7
그림 2-1 키홀 형성된 FSSW 접합부 형상[20]	10
그림 2-2 키홀 제거된 REFILL-FSSW 접합부 형상[21]	10
그림 2-3 REFILL-FSSW 공구 형상[23]	12
그림 2-4 REFILL-FSSW 공정도: (A) TOUCHDOWN, (B) PLUNGING, (C) DWELLING, (D) REFILLING, (E) TRIMMING, (F) RETREATING[24]	13
그림 2-5 REFILL-FSSW의 대표적인 접합부 미세조직 형상: (A) S-SZ, (B) P-AZ, (C) 접합부의 절단면, (D) HAZ, (E) TMAZ[26]	17
그림 2-6 동적 재결정 모식도[27]	18
그림 2-7 EBSD IPF MAP을 통한 접합부 영역별 미세조직 형상: (A) (B)~(F) 영역의 위치를 나타내는 매크로 조직, (B) TMAZ 영역, (C) TMAZ~SZ 영역 (D)~(F) SZ 영역[29]	19
그림 2-8 마찰교반접합시 금속간화합물 형성 메커니즘 모식도[34]	23
그림 2-9 AL-FE 상태도[35]	24
그림 3-1 REFILL-FSSW용 장비	27
그림 3-2 REFILL-FSSW용 공구 - 핀	29
그림 3-3 REFILL-FSSW용 공구 - 슬리브	29
그림 3-4 REFILL-FSSW용 공구 - 클램핑 링	30
그림 3-5 REFILL-FSSW용 공구 - 전체	30

그림 3-6 REFILL-FSSW 공정 모식도	31
그림 3-7 REFILL-FSSW용 지그.....	32
그림 3-8 KS B ISO 14273 규격 및 접합 시편 모식도	32
그림 3-9 알루미늄합금 판재 및 고강도 강판에 따른 비커스 경도 LINE 분석 위치 모식도	35
그림 3-10 상온인장전단하중 시편 모식도 옆면 및 윗면.....	36
그림 3-11 XRD 분석 위치 모식도	37
그림 4-1 시편의 RD, ND, TD 방향[40].....	38
그림 4-2 모재 OM 미세조직 이미지: (A) AA5182-O, (B) SPRC440.....	39
그림 4-3 RT, RN, TN면에 따른 모재 경도 결과: (A) AA5182-O, (B) SPRC440.....	41
그림 4-4 삽입 깊이에 따른 상/하판 정면 저배율 외관형상	43
그림 4-5 삽입 깊이에 따른 상/하판 정면 고배율 외관형상	44
그림 4-6 삽입 깊이에 따른 상/하판 옆면 저배율 및 고배율 외관형상	45
그림 4-7 시편 저/고배율 절단면 단면 및 영역 설명 사진: (A) 저배율, (B) 고배율	47
그림 4-8 삽입 깊이에 따른 단면: (A) 0.6 MM, (B) 0.7 MM, (C) 0.8 MM, (D) 0.9 MM	48
그림 4-9 삽입 깊이 0.9 MM 조건에서의 알루미늄합금 판재 영역별 EBSD IPF MAP 결과: (A) 모재, (B) 슬리브 중부, (C) 핀 중부.....	50
그림 4-10 삽입 깊이 0.9 MM 조건에서의 알루미늄합금 판재 슬리브 및 핀 영역별 EBSD IPF MAP 결과: (A) 슬리브 상부, (B) 슬리브 중부, (C) 슬리브 하부, (D) 핀 상부, (E) 핀 중부, (F) 핀 하 부	51
그림 4-11 삽입 깊이 0.9 MM 조건에서의 알루미늄합금 판재에서의 영역별 EBSD KAM MAP 결 과: (A) 모재, (B) 슬리브 영역, (C) 핀 영역, (D) KAM 분포	53
그림 4-12 삽입 깊이 0.9 MM 조건에서의 알루미늄 판재 슬리브 및 핀 영역별 EBSD KAM MAP 결과: (A) 슬리브 상부, (B) 슬리브 중부, (C) 슬리브 하부, (D) 슬리브 영역의 KAM 분포, (E) 핀 상부, (F) 핀 중부, (G) 핀 하부, (H) 핀 영역의 KAM 분포	54

그림 4-13 삽입 깊이 0.9 MM 조건에서의 SPRC440 강판 영역별 EBSD IPF MAP 결과: (A) 모재, (B) 슬리브 상부, (C) 슬리브 중부, (D) 핀 상부, (E) 핀 중부.....	56
그림 4-14 삽입 깊이 0.9 MM 조건에서의 SPRC440 강판 영역별 EBSD KAM MAP 결과: (A) 모재, (B) 슬리브 상부, (C) 슬리브 중부, (D) 핀 상부, (E) 핀 중부, (F) 영역별 KAM 분포.....	57
그림 4-15 슬리브 영역 소성유동패턴 OM 분석 결과: (A) 접합부 단면, (B) 소성유동패턴 저배율, (C),(E) 소성유동패턴 고배율, (D) 소성유동패턴 이외 영역.....	59
그림 4-16 슬리브영향부 소성유동패턴 SEM 이미지: (A) 접합부 단면, (B) 소성유동패턴 저배율, (C) 소성유동패턴 이외 영역 저배율, (D),(E) 소성유동패턴 고배율, (F) (E)의 하안영역 고배율, (G) (E)의 검은영역 고배율.....	60
그림 4-17 삽입 깊이에 따른 계면 거칠기 SEM 이미지: A) 0.7 MM, (B) 0.8 MM, (C)0.9 MM.....	62
그림 4-18 계면 거칠기 변화에 따른 힘 분포 변화.....	63
그림 4-19 삽입 깊이에 따른 계면 거칠기 정량화 결과.....	64
그림 4-20 삽입 깊이 0.9 MM에서의 대표적인 2차상 SEM 이미지 및 삽입 깊이에 따른 2차상 크기: (A) 모재, (B) 핀 영역, (C) 슬리브 영역, (D) 영역별 2차상 크기.....	66
그림 4-21 삽입 깊이에 따른 2차상 크기 분포: (A) 0.7 MM 핀 영역, (B) 0.7 MM 슬리브 영역, (C) 0.8 MM 핀 영역, (D) 0.8 MM 슬리브 영역, (E) 0.9 MM 핀 영역, (F) 0.9 MM 슬리브 영역... ..	67
그림 4-22 접합부 계면의 금속간화합물 OM, SEM 분석 결과: (A) 접합부 단면 (B),(C) 슬리브 경계 부 영역 OM, SEM (D),(E) 슬리브 중앙부 영역 OM, SEM (F),(G) 핀 경계부 영역 OM, SEM, (H),(I) 핀 중앙부 영역 OM, SEM.....	69
그림 4-23 삽입 깊이에 따른 접합부 계면 정량적 측정 결과: (A) 금속간화합물 길이, (B) 금속간화 합물 두께, (C) 불연속 IMC 길이.....	71
그림 4-24 SEM-EDS MAPPING 결과: (A) SEM 이미지, (B) MG, (C) AL, (D) MN, (E) FE.....	73
그림 4-25 IMC SEM-EDS 결과: (A) SEM 이미지, (B) POINT 분석 결과, (C) LINE 분석 결과.....	74
그림 4-26 상판 알루미늄합금 판재에서의 삽입 깊이에 따른 LINE 경도 분포 및 영역별 경도: (A),	

(B) 상부 영역, (C), (D) 중부 영역, (E), (F) 하부 영역	76
그림 4-27 하판 SPRC440 강판에서의 삽입 깊이에 따른 LINE 경도 분포 및 영역별 경도: (A), (B) 상부 영역, (C), (D) 중부 영역, (E), (F) 하부 영역	78
그림 4-28 삽입 깊이에 따른 최대평균상온인장전단하중	79
그림 4-29 상온인장전단시험 후 삽입 깊이에 따른 AA5182-O 알루미늄합금 판재 및 SPRC440 강판의 정면/후면 외관형상	82
그림 4-30 상온인장전단시험 후 삽입 깊이에 따른 AA5182-O 알루미늄합금 판재 및 SPRC440 강판의 옆면 저/고배율 외관형상	83
그림 4-31 이종 소재 간 상온인장전단시험 응력분포 모식도[51].....	84
그림 4-32 상온인장전단시험 중 발생하는 응력 분포[52].....	84
그림 4-33 삽입 깊이 0.9 MM에서의 대표적인 파면 이미지: (A) 거시적 파면, (B) 저배율 파면, (C),(D) 상부 판재 파면 및 DIMPLE, (E),(F) 하부 판재 파면 및 DIMPLE	86
그림 4-34 상부 판재 파면에서의 SEM-EDS 및 SEM 이미지 결과: (A) 상부 판재의 SEM 파면 이미지, (B) (A)의 AL 조성의 EDS MAPPING 결과, (C) (A)의 FE 조성의 EDS MAPPING 결과, (D) AA5182-O 모재 표면의 SEM 이미지, (E) 파면에서 모재 표면과 유사한 영역의 SEM 이미지, (F) IMC 영역 EDS POINT 결과	88
그림 4-35 불연속 IMC와 모재표면과 유사한 영역 SEM 이미지 및 길이 비교: (A) 접합부 절단면에서의 불연속 IMC, (B) 상부 판재 파면에서 모재표면과 유사한 영역, (C) 불연속 IMC 길이와 모재 표면과 유사한 영역 길이 비교 값.....	89
그림 4-36 하부 판재 파면에서의 SEM-EDS 및 SEM 이미지 결과: (A) 하부 판재의 SEM 파면 이미지, (B) (A)의 AL 조성의 EDS MAPPING 결과, (C) (A)의 FE 조성의 EDS MAPPING 결과, (D) DIMPLE, (E) SPRC440 모재 표면의 SEM 이미지, (F) 파면에서 모재 표면과 유사한 영역의 SEM 이미지.....	91
그림 4-37 삽입 깊이에 따른 XRD 분석 결과: (A) 상부 판재, (B) 하부 판재	93

그림 4-38 삽입 깊이 변화에 따른 대표적인 파단면 분석 결과: (A) 거시적 단면, (B),(C) 상부 판재 계면부의 OM 이미지, (D),(E) 상부 판재 계면부의 SEM 이미지, (F),(G) 하부 판재 계면부의 OM 이미지, (H),(I) 하부 판재 계면부의 SEM 이미지	95
그림 4-39 영역별 파괴 위치.....	96

표 목차

표 2-1 공구 영역별 온도[15, 17, 26].	15
표 2-2 금속간화합물 종류에 따른 특성	21
표 3-1 AA5182-O 화학 조성 (WT.) [38]	25
표 3-2 SPRC440 화학 조성 (WT.) [37, 39]	25
표 3-3 REFILL-FSSW용 장비 사양	26

1. 서론

1.1. 연구배경

전 세계적으로 지구온난화로 인한 환경문제에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 온실가스 중 CO₂ 배출량의 경우 약 9% 정도가 자동차로부터 배출되고 있어, 자동차 환경규제와 관련된 정책이 강화되고 있다. 그림 1-1은 국가별 자동차 CO₂ 배기가스 규제를 나타내고 있으며, 유럽연합(EU)은 2021년을 기점으로 CO₂ 배출 규제가 대폭 강화될 예정이다 때문에 자동차 산업에서 큰 전환점이 될 전망이다[1].

CO₂ 배출 규제는 기존 130g CO₂/km에서 95g CO₂/km(20년)으로 감소하고, 2023년에는 62g CO₂/km, 2050년에는 10g CO₂/km으로 지속적으로 강화된다. 연비 또한 기업평균연비제도(CAFÉ) 기준을 감안 했을 때, 우리나라도 16.8km/L 수준이던 승용차 평균 연비를 2030년 28.1km/L까지 끌어올릴 계획이다[2].

이처럼 강화되는 규제에 따라 CO₂ 배출량 감소를 목적으로 자동차 경량화, 대체연료 개발, 주행저항 저감, 파워트레인 효율 향상 등의 다양한 기술들이 활발히 개발되고 있다[3]. 이 중 자동차 경량화 방법의 경우, 연비 개선 효과가 우수하다고 알려져 있다[4]. 예를 들어 8백만 대, 하루평균 50km 주행, 평균 연비 12km/L 라고 가정을 했을 때 10kg 정도 자동차 경량화를 진행한다면 연비는 2.8%, CO₂는 4.5%, NO_x는 8.8% 감소한다고 알려져있다[5].

자동차 경량화 방법으로는 소재 변경, 차체 소형화 및 박육화 방법 등이 있다. 특히, 소재 변경의 경우 기존의 철강 소재를 고강도화 함으로써 판재의 두께를 얇게 하는

고강도 강을 적용하거나 비철 경량금속재료로 대체해 자동차 경량화를 진행 중이다. 자동차 경량화를 위한 차체용 비철 경량금속재료의 경우, 마그네슘합금과 알루미늄합금이 있으며, 마그네슘합금은 비강도가 크며 가공성 및 진동 흡수성이 우수하다는 장점이 있으나 내열성이나 부식성이 문제점으로 지적됐다. 알루미늄합금의 경우 비중이 철의 30% 수준으로 경량성이 탁월하며 내식성, 열전기전도성 및 재활용성이 우수하여 자동차용 재료로 사용하면 경량화 효과가 매우 크다. 특히, 5000계열 알루미늄합금의 경우 고용강화 원소인 Mg의 첨가로 가공경화 효과를 증대함으로써 고강도 및 고 성형성을 얻을 수 있다는 이점이 있다. 그림 1-2에 나타난 바와 같이 고강도강과 비철 경량금속소재인 알루미늄합금의 사용량이 점차 확대됨에 따라, 혼용 사용 가능성이 증가할 것이라고 예상되기 때문에, 이종 소재 간 용접/접합 기술이 필요한 실정이다[4].

그림 1-3은 자동차용 점용접의 경우 전기 저항 열과 압력을 이용하여 부재를 접합시키는 저항 점용접(Resistance Spot Welding, RSW)의 공정도를 나타낸다[6]. 저항 점용접은 자동차용 점용접에서 가장 많이 사용되고 있는 용접방법이지만, 용융용접이기 때문에 이종 소재 간 저항 점용접을 적용할 경우, 두 재료의 물리적, 화학적 차이로 인해 요구되는 용접특성을 얻기 어렵다. 특히 접합 계면에서 두꺼운 금속간화합물의 형성으로 접합부의 기계적 성질을 저하하는 원인이 된다[7]. 또한 이종 소재 간 포화증기압의 차이 발생 시 기화되는 정도가 달라지는 현상도 나타나며, 열팽창계수의 차이로 인해 용접 후 수축하는 정도가 달라 잔류응력을 형성 및 응고 균열이 발생하게 된다. 그 외에도 알루미늄합금 표면에 존재하는 산화피막과 전극과의 반응 때문에 전극을 주기적으로 드레싱 또는 교체해주어야 하는 문제점이 있다. 이러한 문제점으로 인해 현재 자동차 이종 소재 결합의 경우 셀프 피어싱 리벳팅(Self-Piercing Riveting, SPR)과 같은 기계적

접합기술과 구조용 접착제를 혼용하여 사용하는 방식이 주로 사용되고 있다. 그림 1-4는 셀프 피어싱 리벳의 공정도를 의미하며[8], 이는 기계적 체결 방식이기 때문에 용융용접으로 인한 여러 문제점은 발생하지 않는다. 하지만 SPR의 경우 리벳(Rivet) 사용으로 자동차 경량화 측면에서 무게 증가로 인한 문제점이 발생하며, 소모성 리벳을 사용하기에 고가의 공정이라는 단점이 있다[9].

이러한 용융용접 및 리벳의 사용으로 인한 문제점들을 극복하고자, 2001년에 마찰교반접합(Friction Stir Welding, FSW)의 원리를 응용한 마찰교반점접합(Friction Stir Spot Welding, FSSW) 기술이 개발되어 새로운 점 접합 기술로서 주목받고 있다. 그림 1-5는 마찰교반점접합의 공정도를 나타내며[10], 마찰교반점접합 기술은 고상 접합 방법으로 마찰열과 재료의 소성 유동 현상을 이용하여 용점 이하의 온도에서 접합이 이루어지기 때문에, 접합 계면에서 얇은 금속간화합물을 형성하며 용융으로 인한 잔류응력 형성 및 응고 균열 문제점을 피할 수 있다. 특히 소모성인 리벳을 사용하지 않고 비소모성 공구를 사용하기 때문에 경제성 및 자동차 경량화 측면에서도 우수하다.

하지만 마찰교반점접합기술의 경우, 접합 후 삽입된 공구가 피접합재에서 빠져나오며 따라 키홀(keyhole), 프로브 홀(probe hole), 핀 홀(pin hole) 또는 익시트홀(exit hole)이라 불리는 빈 공간을 형성하게 된다. 이러한 키홀이 존재할 경우, 응력집중으로 인한 기계적 물성 저하 및 도장의 불균일성으로 인한 부식 가속화에 대한 우려가 있다. 현재 이 문제점을 해결하기 위해서 다양한 연구가 진행되고 있다. 연구되고 있는 기술 중 하나가 리필마찰교반점접합(Refill-Friction Stir Spot Welding, Refill-FSSW)이다. Refill-FSSW은 새로운 고상상태 접합기술이며, 독일의 Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG, former GKSS)에 의해 개발된 기술로서 마찰교반점접합 기술과 기본적인 원리는 유사하지만,

Refill-FSSW 기술의 경우 3개의 공구가 한 세트로 구성된 특이한 공구의 형상 및 작동으로 인해 키홀이 형성되지 않는 것이 가장 큰 특징이다[11].

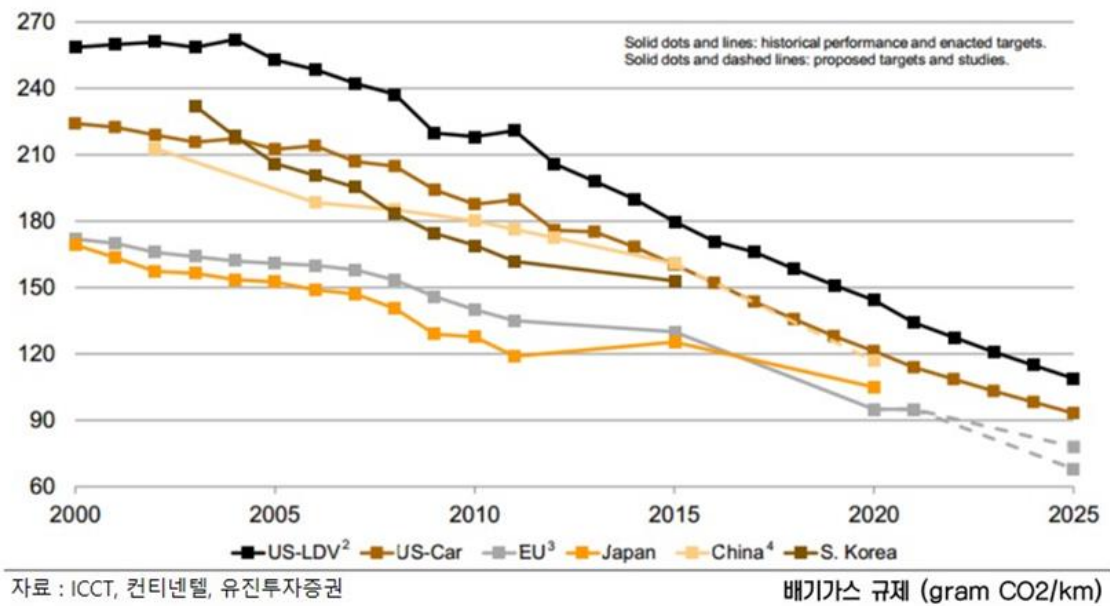
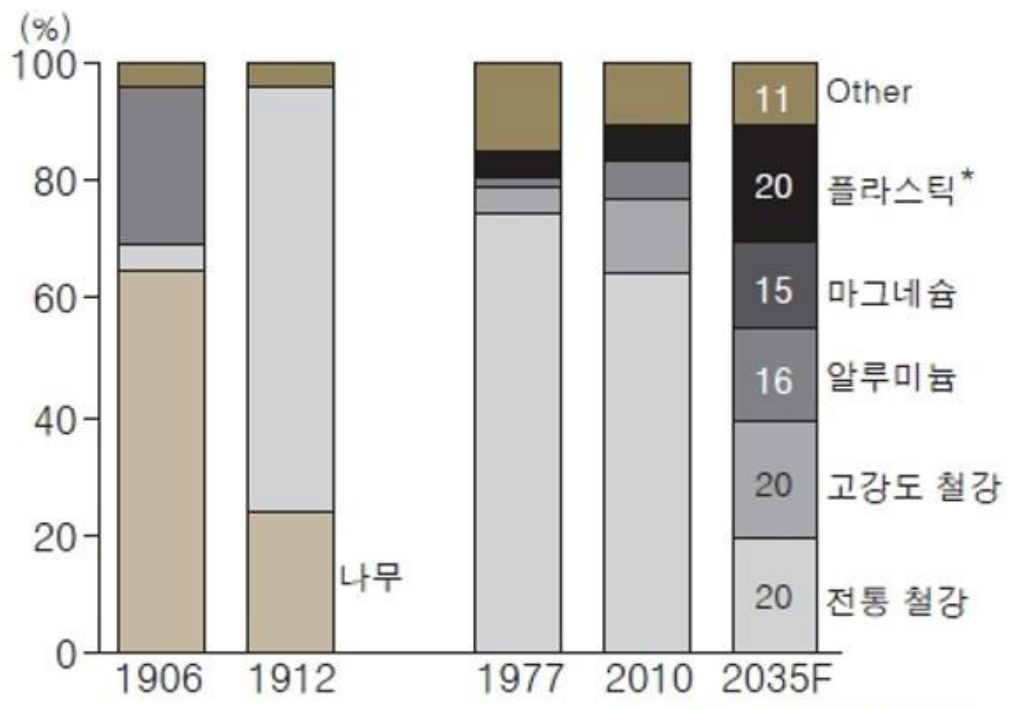


그림 1-1 국가별 자동차 CO₂ 배기가스 규제 추이[2]



자료 : Oica President 'steel & Automobile' 자동차용 소재의 비중 변화

그림 1-2 미래 자동차용 소재의 비중 변화

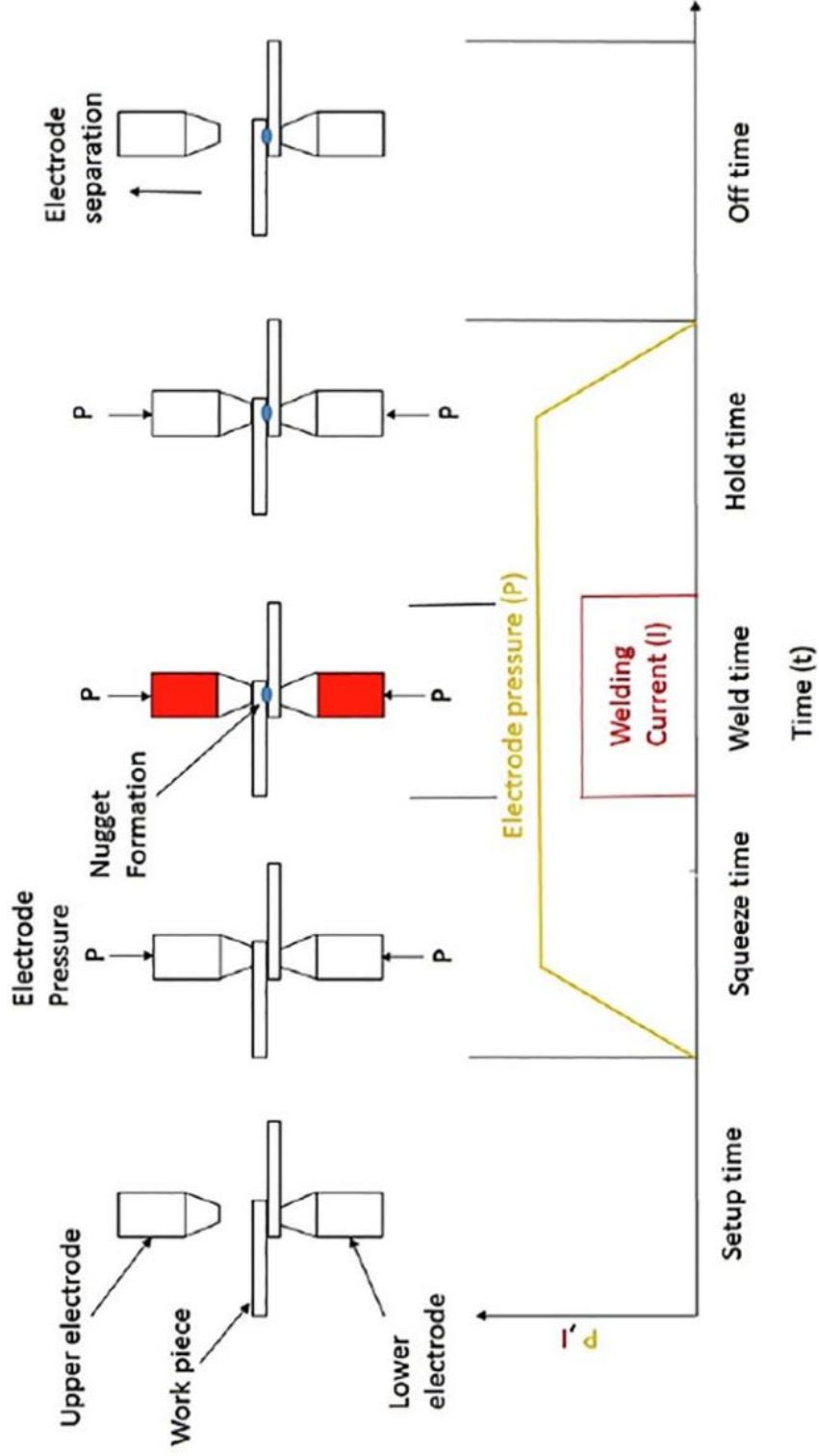


그림 1-3 저항 점용접 공정도[6]

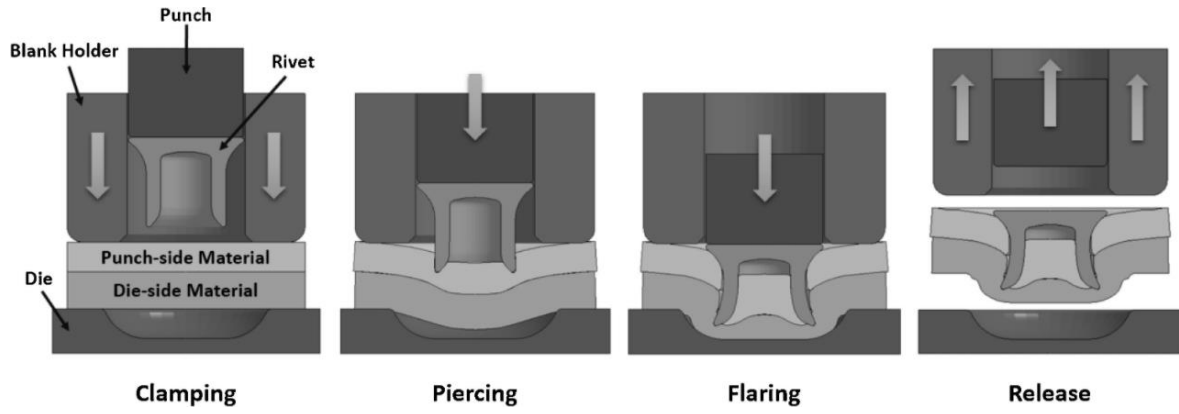


그림 1-4 셀프 피어싱 리벳 공정도[8]

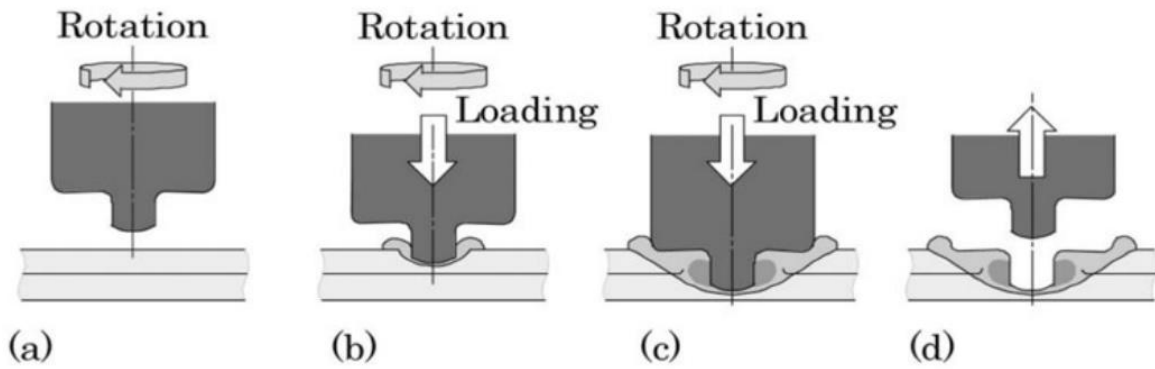


그림 1-5 마찰교반점접합 공정도: (a) 회전, (b) 삽입, (c) 교반, (d) 후퇴[10]

1.2. 연구목적

자동차 경량화 동향을 보면, 알루미늄합금과 고강도강의 혼용 사용 가능성이 증가함에 따라, 자동차 산업에서 많이 사용되는 점 용접/접합기술 개발의 필요성이 증가하고 있다. 이 중 Refill-FSSW 기술의 경우, 이종 소재 간 용접/접합 시 타 공정대비 여러 문제점을 보완하기 때문에 연구의 필요성이 증가하고 있다.

Refill-FSSW 공정을 통해 동종 경량금속 소재[12, 13], 이종 소재[14, 15]를 접합하는데 성공적으로 적용되었으며, 최근에 Suhuddin 등은 알루미늄합금과 아연 도금 강판의 Refill-FSSW 회전속도에 따른 기계적 특성에 관한 연구를 진행했다[16]. 또한, Shen 등은 AA6022-T4 알루미늄합금과 DP600 강판 간의 Refill-FSSW 삽입 깊이와 유지시간에 따른 미세조직 및 기계적 특성에 관한 연구를 진행했으며[17], Roger Navarro Verastegui 등은 AA6181-T4 알루미늄합금과 DP600 강판 간의 Refill-FSSW 삽입 깊이, 회전속도, 유지시간에 따른 기계적 특성에 관한 연구를 진행했다[18]. 그 외에도 Peng Li 등은 PX/ST-AI과 ST16 강판 간의 Refill-FSSW를 통한 미세조직 및 기계적 특성에 관한 연구를[19], Z. Shen 등은 AA6022, AA5754 알루미늄합금과 DP600 강판의 Refill-FSSW 결합 메커니즘에 관한 연구를 진행했다[15]. 이처럼 6000계열 알루미늄합금과 고강도 강판 간의 이종 Refill-FSSW의 미세조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 규명하는 연구는 진행되었지만, 5000계열 알루미늄합금과 고강도 강판 간의 Refill-FSSW 미세조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 규명하는 연구는 많이 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 5000계열 알루미늄합금 중 하나인 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 SPRC440 고강도 강판 간의 이종 소재를 Refill-FSSW 기술을 통해 겹치기 접합을 수행하였으며, 삽입 깊이에 따른 미세조직과 기계적 특성과의 상관관계를 규명해보았다.

2. 이론적 배경

2.1. Refill-FSSW

2.1.1. Refill-FSSW 원리 및 특징

Refill-FSSW 기술은 2002년에 GKSS-GmbH에 의해 개발된 것으로서 마찰교반점접합의 원리와 유사한 고상 접합공정이다. 그림 2-1[20]은 마찰교반점접합의 절단면을 나타낸 것이며, 절단면을 보면 키홀이 형성된 것을 확인할 수 있다. 하지만 그림 2-2[21]에서처럼 Refill-FSSW의 경우, 접합 후에도 키홀이 생기지 않는다는 특징을 가지고 있다.

이 기술의 경우 초기에는 주로 열처리 가능한 알루미늄합금을 접합하는데 사용되었으며, 현재 알루미늄과 마그네슘, 강철, 티타늄, 구리 및 탄소 섬유 복합체와 같은 서로 다른 소재 간의 접합을 위해 연구되고 있으며 성공적인 결과를 보이고 있다. 이처럼 Refill-FSSW 기술은 현재 연구 개발 용도로만 주로 사용되고 있지만, 앞으로 사용 가능한 산업 분야는 다음과 같다[22].

1. 조선 및 해양 -> 갑판, 칸막이, 바닥용 패널
2. 항공 우주 -> 동체 및 날개 구조
3. 철도 산업 -> 바닥 및 지붕 패널
4. 자동차 -> 엔진 새시 및 차체 구조

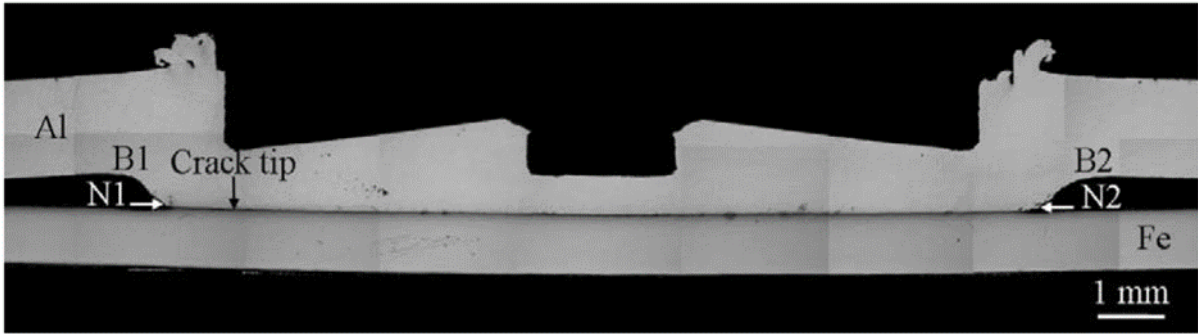


그림 2-1 키홀 형성된 FSSW 접합부 형상[20]

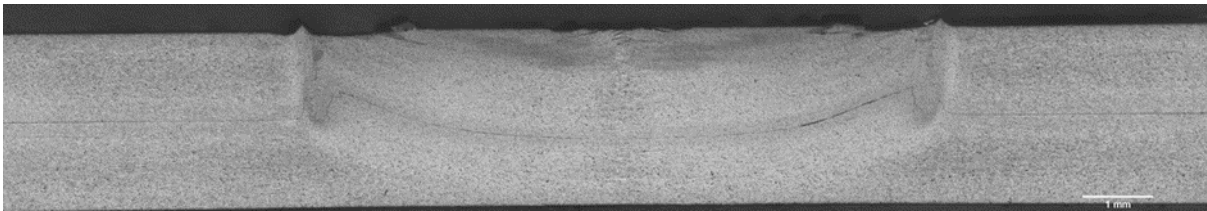


그림 2-2 키홀 제거된 Refill-FSSW 접합부 형상[21]

Refill-FSSW의 공구는 그림 2-3에서처럼 핀(Pin), 슬리브(Sleeve), 클램핑 링(Clamping ring)으로 3개의 공구가 하나의 세트로 구성되어있으며[23], 그림 2-4는 Refill-FSSW의 공정도이며 6단계로 구분된다[24].

- (1) Touchdown 단계로서, 클램핑 링은 피접합재를 고정시키고 핀과 슬리브는 피접합재 표면에 닿을 때까지 회전하여 마찰열을 발생시켜 피접합재가 가열되어 국부적으로 연화된다.
- (2) Plunging 단계로서, 마찰열로 인해 국부적으로 연화된 피접합재에 핀은 위로 이동하고 슬리브는 아래로 이동함으로써 재료가 상/하로 소성유동된다.
- (3) Dwelling 단계로서, 고속회전하는 핀과 슬리브가 지정된 위치에서 이동이 중지되고 특정 시간동안 유지함으로써 기계적으로 교반시킨다. 이 후 연화된 피접합재에서 소성유동이 발생함으로써 접합이 이루어진다.
- (4) Refilling 단계로서, 핀은 아래로 이동하고 슬리브는 위로 이동함으로써 공구의 초기 위치로 서서히 돌아가며, 소성유동된 재료가 핀과 슬리브의 이동으로 인해 비어있는 피접합재의 공간을 다시 채워준다.
- (5) Trimming 단계로서, 핀과 슬리브가 초기 위치인 피접합재 표면으로 고속회전하며 이동한다. 이때 공구의 압착으로 인해 원통형의 빈공간이 성공적으로 다시 채워진다.
- (6) Retreating 단계로서, 핀과 슬리브의 회전이 멈추고 비소모성 접합용 공구가 피접합재 표면위로 이동하면서 공정이 마무리된다.

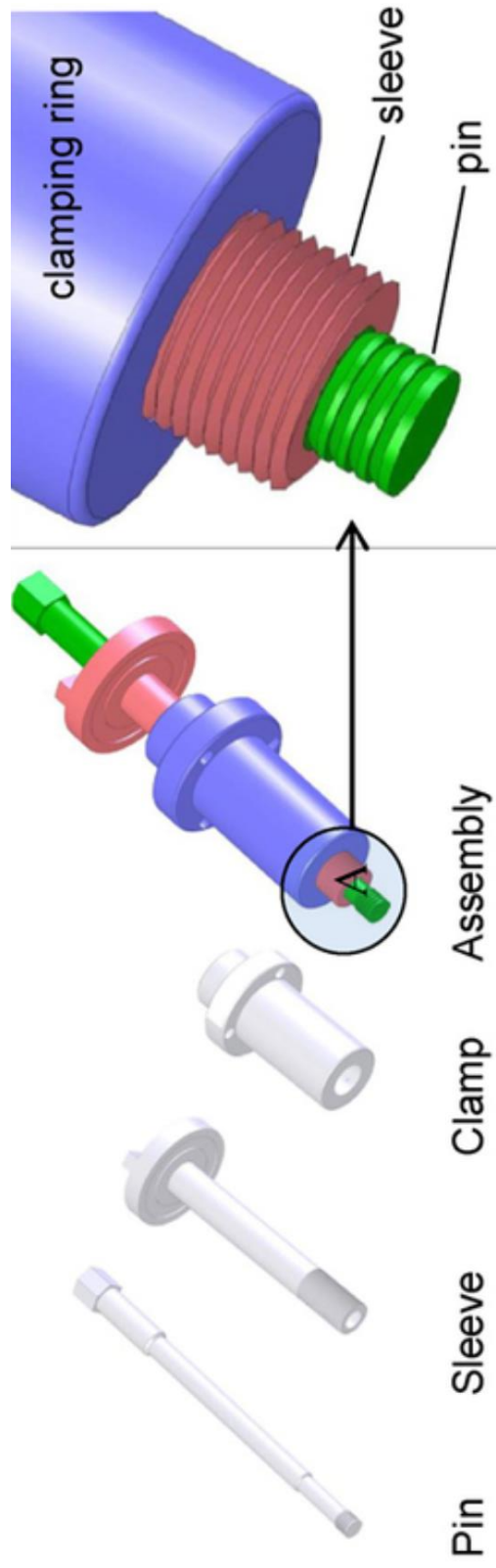


그림 2-3 Refill-FSSW 공구 형상[23]

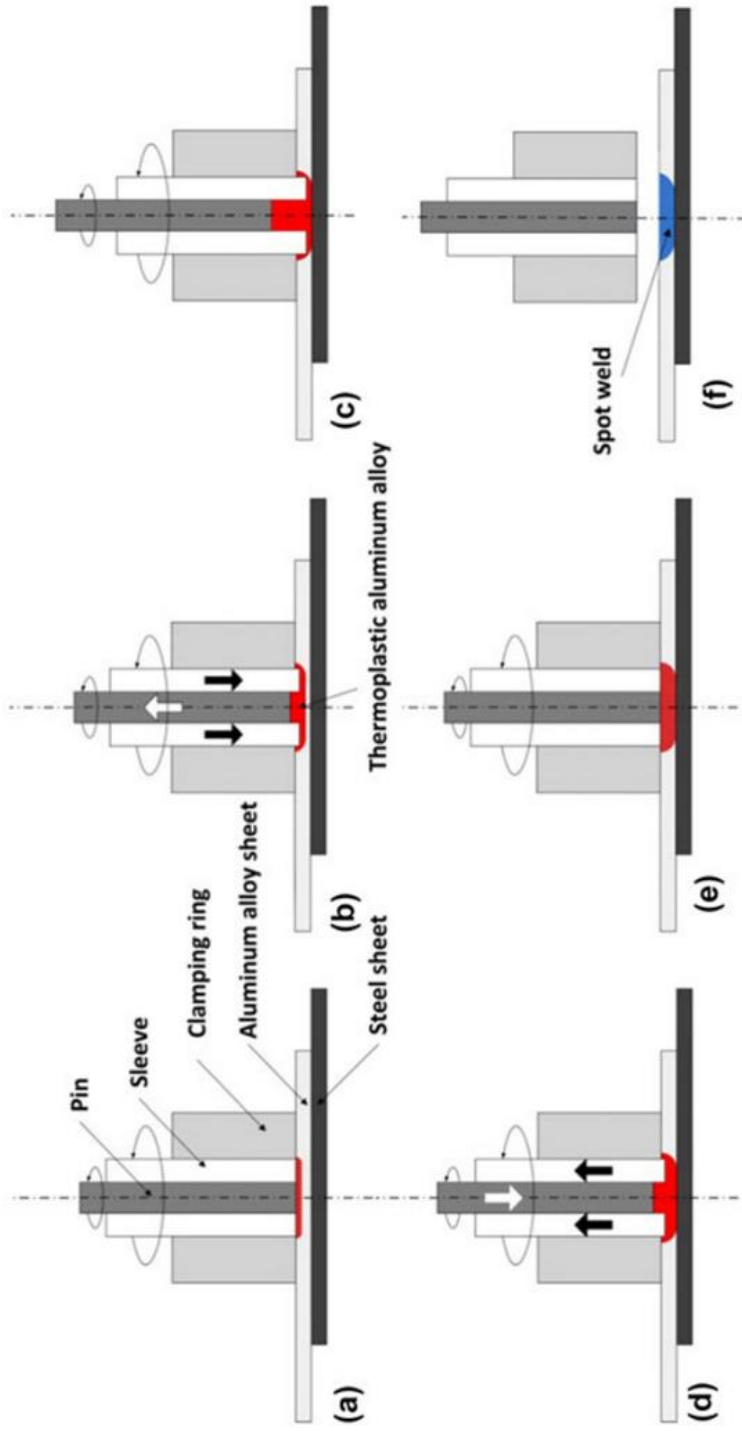


그림 2-4 Refill-FSSW 공정도: (a) Touchdown, (b) Plunging, (c) Dwelling, (d) Refilling, (e) Trimming, (f) Retreating [24]

이러한 Refill-FSSW의 장점으로서는 다음과 같다[22].

- ① 고상상태 접합이기에, 용융용접으로 인해 발생하는 기공, 응고 균열과 같은 결함들이 발생하지 않는다.
- ② 접합 중 최고 도달 온도가 낮으므로, 비틀림 변형 및 수축이 줄어든다.
- ③ 다른 용가재 또는 필러 재료가 필요없다.
- ④ 키홀이 없고, 접합부 거칠기가 모재보다 낮다.
- ⑤ 폼, 스파터가 발생하지 않는다.
- ⑥ 자동화로 인해 생산에 적합한 공정이다.
- ⑦ 에너지 사용이 효율적이다.
- ⑧ 용접이 어려운 2000계열 및 7000계열 알루미늄합금에 적용 가능하다.

2.1.2. Refill-FSSW 접합용 공구의 역할 및 특징

Refill-FSSW 접합용 공구는 접합과정 중 마찰열과 응력이 가해지기에 내마모성 및 고온 강도가 중요하다. 공구 소재로는 H13와 같은 공구강 등의 소재를 주로 사용한다[25]. 앞서 기술된 바와 같이, 일반적인 Refill-FSSW 공구는 3개의 공구가 한 세트로 구성되어 있으며, 클램핑 링의 경우 접합 공정 중 피접합재가 움직이지 않도록 판재를 고정하는 역할과 접합 중 재료가 외부로 배출되는 것을 방지하는 역할을 한다. 핀과 슬리브의 경우, 두 공구의 회전을 통해 마찰열을 발생시키고, 상/하 운동에 의해 기계적 교반을 통해 접합한다. 뿐만 아니라, 재료 흐름을 개선하고 공극 형성을 방지하기 위해 공구 표면에 나사산 있다. 또한, 하나의 모터와 독립적인 액추에이터에 연결되어 있어 동일한 회전속도로 회전하지만 서로 독립적으로 움직일 수 있다[23]. 공구 영역별 온도의 경우 표 2-1에서처럼 저입열, 과입열 조건에 따라 클램핑 링, 핀 및 슬리브 영역에 따른 온도 분포를 가진다[15, 17, 26].

표 2-1 공구 영역별 온도[15, 17, 26].

저입열 ~ 과입열 온도 (°C)	
클램핑 링	197 ~ 383
핀	353 ~ 443
슬리브	406 ~ 480

2.1.3. Refill-FSSW 접합부 미세조직

Refill-FSSW의 접합부 미세조직은 접합 동안 기계적 교반의 영향과 마찰열에 의해 영향을 받으며 대표적인 접합부 미세조직은 교반 영역(Stir Zone, SZ), 기계적 열 영향부(Thermo-Mechanical Affected Zone, TMAZ), 열 영향부(Heat Affected Zone, HAZ) 및 모재(Base Metal, BM)로 분류된다. 그림 2-5는 영역별 접합부 미세조직을 나타내고 있다. 교반 영역에서도 핀에 의해 교반되는 영역(Pin Stir Zone, P-SZ), 슬리브에 의해 교반되는 영역(Sleeve Stir Zone, S-SZ)으로 나뉜다[26, 27]. 이처럼 교반 영역은 접합 중 접합용 공구인 핀과 슬리브의 고속회전 의해 피접합재에 마찰열을 형성하게 되고, 마찰열로 인해 연화된 금속 재료가 기계적 교반에 의해 소성유동이 발생하게 되며, 이로 인해 동적 재결정(Dynamic Recrystallization, DRX)이 발생해 결정립의 크기 및 2차상 입자가 모재나 열 영향부에 비해 작아진다[22]. 여기서 동적 재결정이란, 그림 2-6에서처럼 재료의 변형에 의해 이동하는 전위가 재결정 거동에 기여하는 것으로서, 외부 열에 의해 변형에너지를 줄이며 격자확산에 의한 전위 이동의 이동으로 전위밀도가 낮은 결정립을 형성하는 정적 재결정(Static Recrystallization, SRX)과는 발생 메커니즘에 차이가 있다[28].

그림 2-7과 같이 기계적 열 영향부는 핀과 슬리브의 마찰열과 기계적 교반을 간접적으로 영향을 받는 영역으로, 교반 영역보다 변형이 적고 동적 재결정이 일어나지 않는 특징을 가진다. 뿐만 아니라, 교반 영역과는 다르게 결정립이 연신된 형태로 나타나는 것이 가장 큰 특징이다. 열 영향부는 접합 시 열에 영향을 받는 영역으로 열에 의해 기계적 성질 또는 미세조직이 변하는 영역으로 Refill-FSSW 공정 적용 시 온도 상승으로 인해 결정립 및 석출물이 조대해지는 특징을 가진다[29].

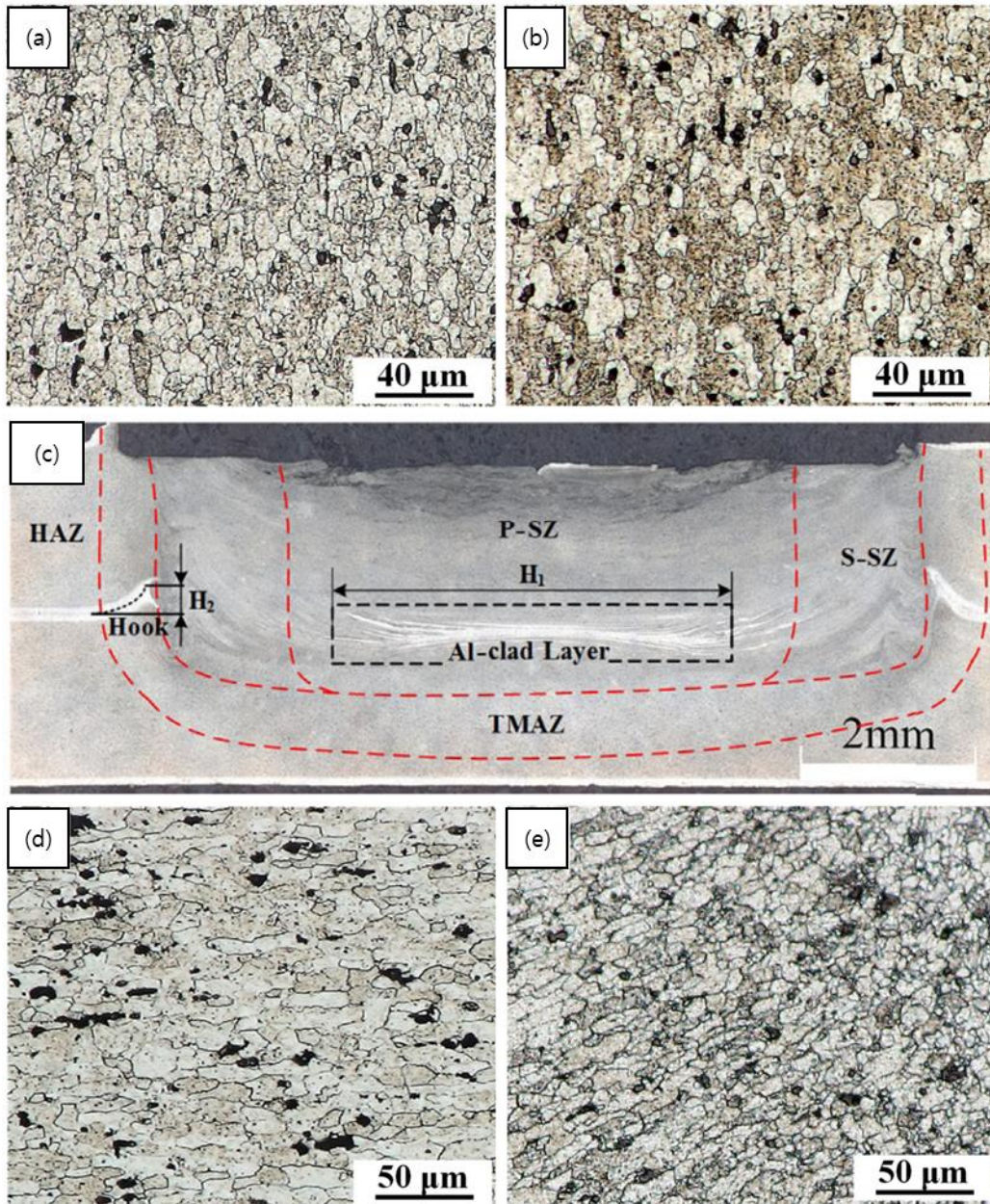


그림 2-5 Refill-FSSW의 대표적인 접합부 미세조직 형상: (a) S-SZ, (b) P-AZ, (c) 접합부의 절단면, (d) HAZ, (e) TMAZ[26]

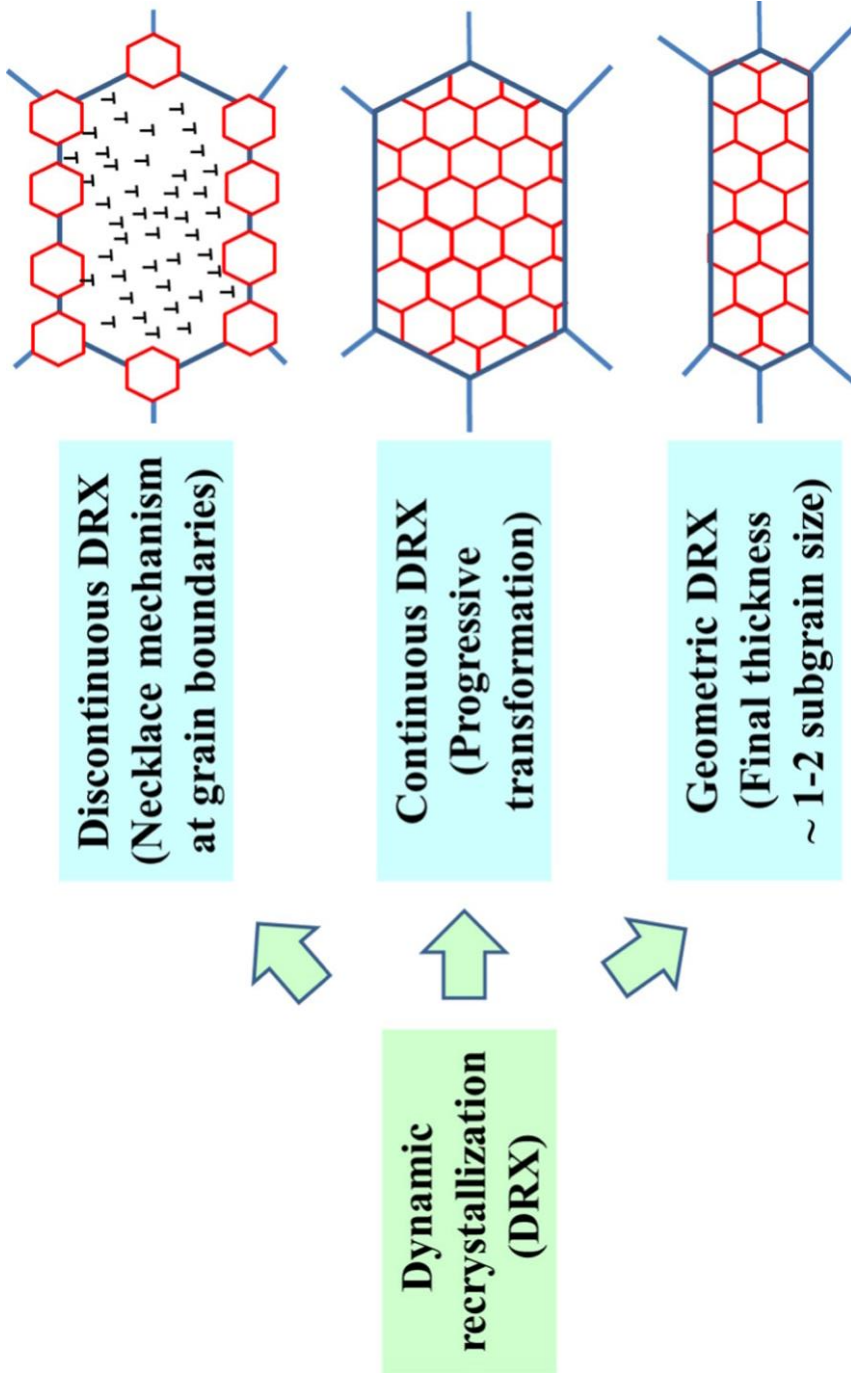


그림 2-6 동적 재결정 모식도[27]

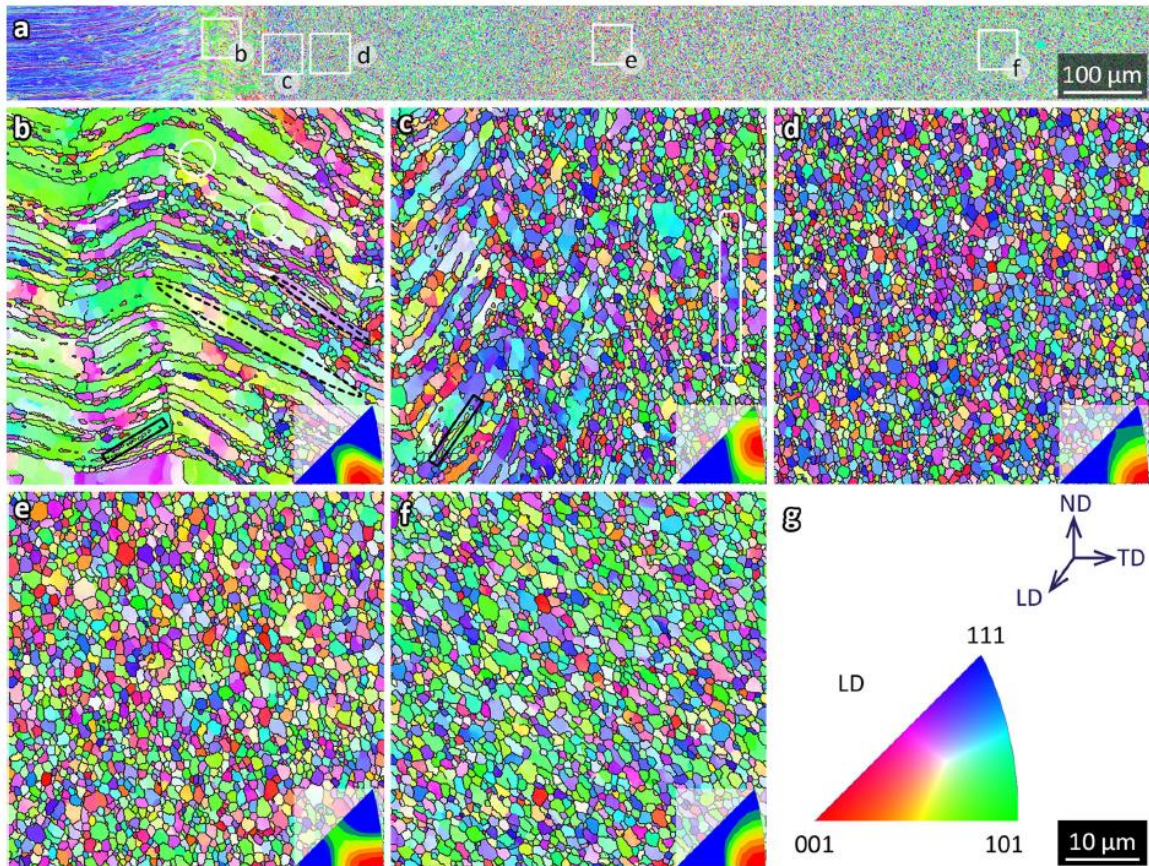


그림 2-7 EBSD IPF Map을 통한 접합부 영역별 미세조직 형상: (a) (b)~(f) 영역의 위치를 나타내는 마크로 조직, (b) TMAZ 영역, (c) TMAZ~SZ 영역 (d)~(f) SZ 영역[29]

2.2. 금속간화합물

2.2.1. 금속간화합물의 특징

금속간화합물(Intermetallic compound, IMC)은 두가지 이상의 금속원소가 간단한 정수비로 결합한 화합물로서, 각 금속 원자가 특정한 방향성 및 결정격자내에 원자들이 선호하는 특정 위치가 존재하는 화합물을 말한다. 금속간화합물은 기존 물질과는 다른 새로운 화합물이 되기에 일반적인 고용체와는 차이가 있다. 금속간화합물은 일반적으로 결합력이 고용체보다 매우 강하며, 복잡한 결정구조 및 높은 경도를 지니고 있지만 강한 취성의 성질을 가진다[30-32]. 금속간화합물이 경도가 높고 취약한 이유는 금속간화합물을 형성하면서 원자배열이 전혀 다르게 되기 때문이다. 즉 원자가 특정방향으로 강하게 결합되기 때문에 경도가 높아지나, 특정 결합방향 이외의 부분에서는 결합이 약하기 때문에 특정 면으로 파괴가 쉬워 취성의 성질을 갖게 된다. 표 2-3은 본 연구와 관련이 있는 Al-Fe 금속간화합물의 결정구조, 조성 등의 특징을 나타낸 것이다. 이 중 알루미늄의 비중이 큰 금속간화합물의 경우 경도가 너무 높아 균열에 민감하여 취성의 성질을 가지고 있다고 알려져 있다. 뿐만 아니라 좋은 내산화성과 낮은 밀도를 가지고 있다고 알려져 있다[30, 31, 33].

표 2-2 금속간화합물 종류에 따른 특성

Phase	Al content / at%	Structure	Microhardness, HV	Density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
Fe_3Al	25	bcc	250–350	6.67
FeAl	50	bcc	400–520	5.37
Fe_2Al_7	63	bcc	650–680	—
FeAl_2	66–67	Rhombohedral	1000–1050	4.36
Fe_2Al_5	69.7–73.2	Orthromobic	1000–1100	4.11
FeAl_3	74–76	Monoclinic	820–980	3.95

2.2.2. Al-Fe 금속간화합물

알루미늄합금과 철강소재를 결합하는 연구는 경량 구조에 대한 수요가 증가함에 따라 운송산업에서 큰 관심을 받고 있다. 고상 접합 중 하나인 마찰교반접합(Friction Stir Welding, FSW)을 통해 알루미늄합금과 철강소재의 이종 소재 결합 시 계면에서 합금층이 형성되면서 접합이 이루어진다. 이러한 현상은 Refill-FSSW에서도 비슷하게 나타난다.

열과 기계적 사이클에 의해 원자 간 상호확산 및 화학반응에 의해 계면 합금층이 형성되면서 접합이 이루어진다. 이 때 형성되는 합금층을 금속간화합물이라고 일컫는다. 그림 2-8은 마찰교반접합시 Al-Fe 금속간화합물 형성 메커니즘을 보여주는 이론적 모델이다[34]. 알루미늄과 철강소재의 이종 소재 접합에서는 나타나는 금속간화합물의 종류의 경우 그림 2-9[35]의 Al-Fe 상태도에 나타나 있는 것과 같이 Fe_4Al_{13} (820 HV), Fe_2Al_5 (1100 HV), $FeAl_2$ (1000 HV), $FeAl$ (400 HV) 등의 금속간화합물이 형성된다. 이 상태도에서 실선은 평형상태를 의미하며, 점선은 준 안정상태를 나타내는 것이다. 이처럼 금속간화합물은 일반적으로 모재보다 높은 용점 또는 경도를 가지며 취성의 성질을 띤다. 따라서, Al-Fe 고상접합시 계면에 형성되는 금속간화합물의 취성의 성질로 인해 접합 강도를 저하시키는 요소로 작용한다[34].

Qian WANG 등에 따르면 접합 후 냉각 시 알루미늄과 철의 서로 다른 열팽창 계수, 상호 확산계수 차이로 인해 잔류응력 및 Kirkendall effect에 의해 금속간화합물 내부에 마이크로 크랙을 발생시킨다고 한다. 이러한 마이크로 크랙 역시 접합 강도를 저하시키는 요소가 될 수 있다[36].

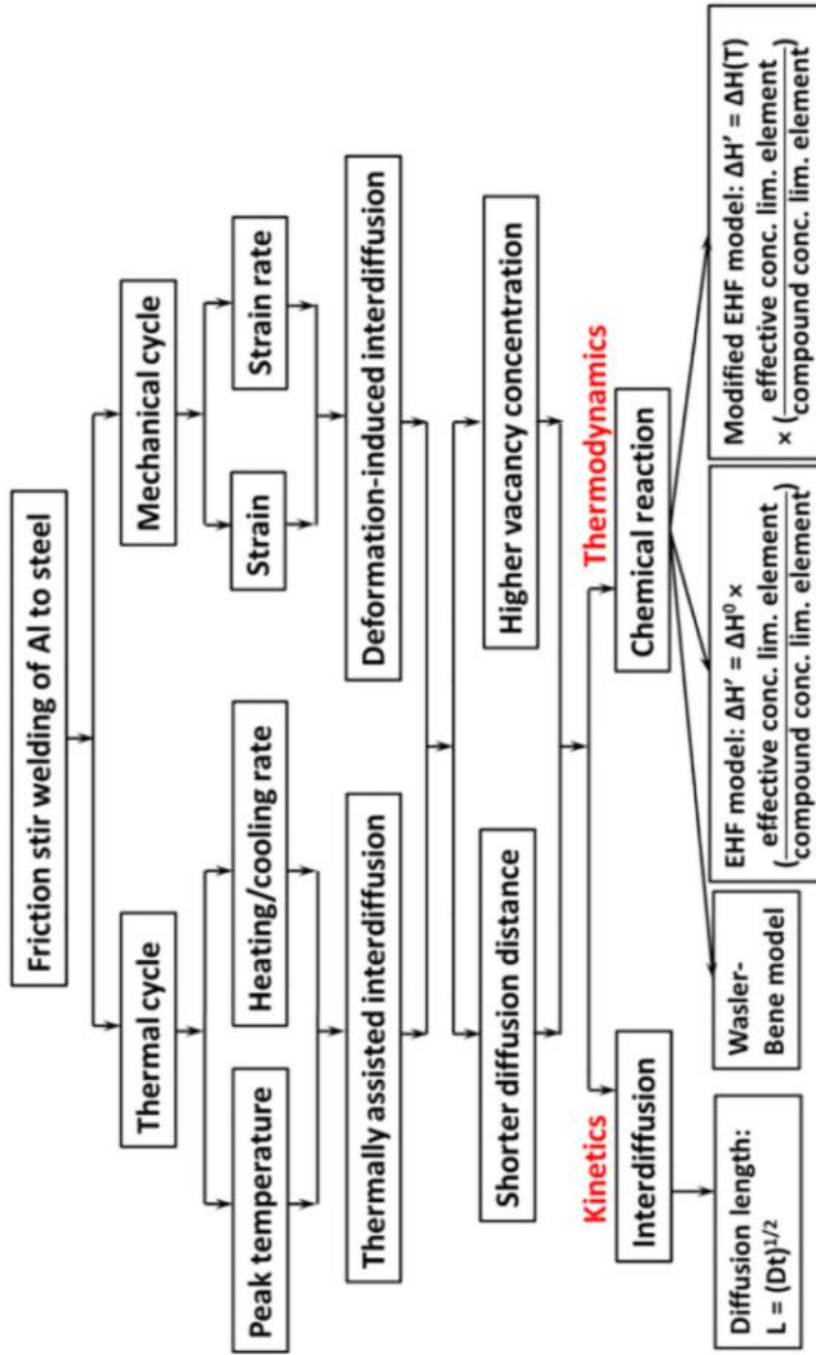


그림 2-8 마찰교반접합시 금속간화합물 형성 메커니즘 모식도 [34]

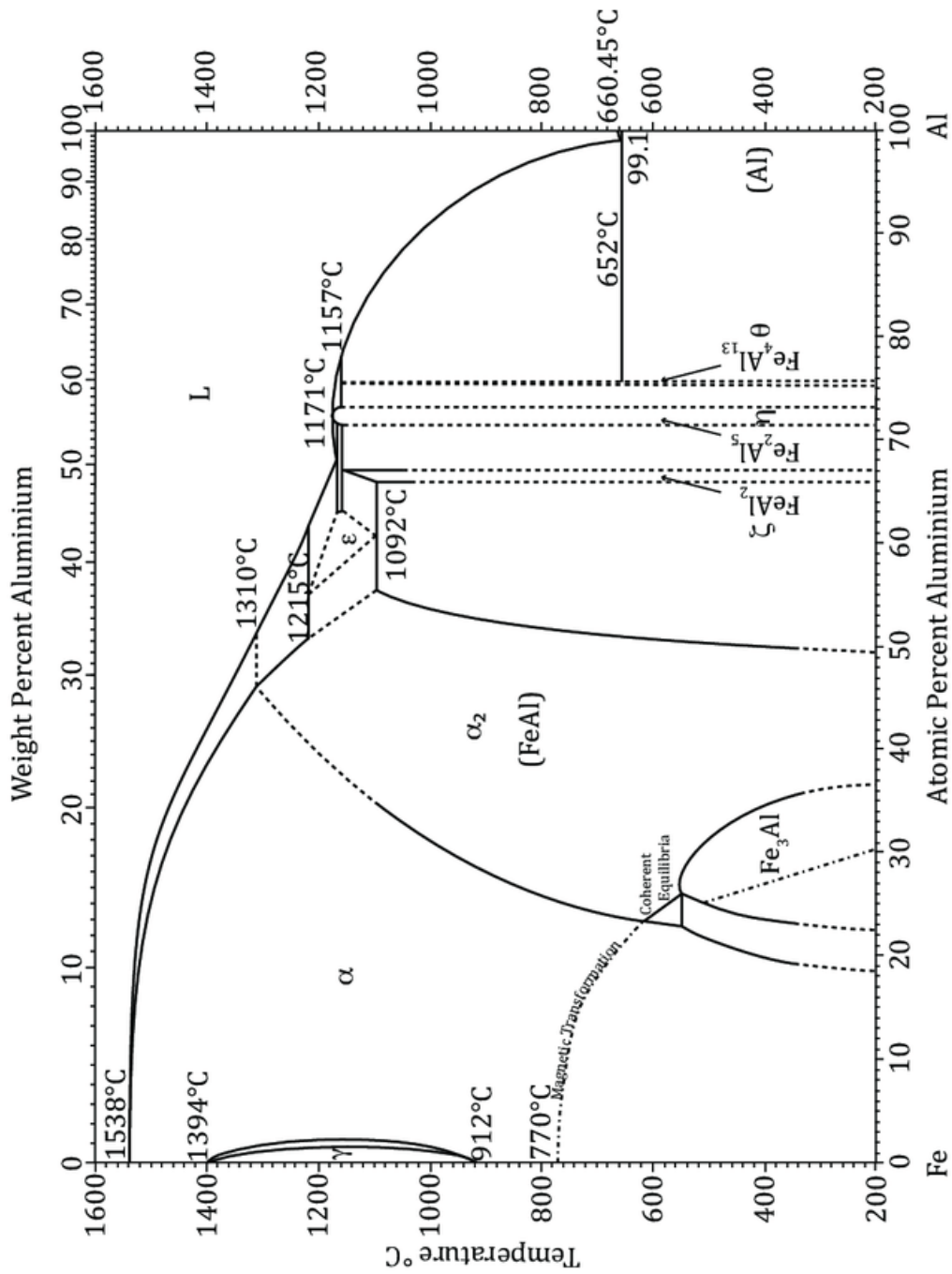


그림 2-9 Al-Fe 상태도[35]

3. 실험방법

3.1. 피접합재

본 연구에서 피접합재는 KS B ISO 14273 규격에 의거하여 길이 100 mm, 폭 30 mm, 두께 1.0 mm의 AA5182-O 알루미늄합금을 상부 판재로 사용하였고, 길이 100 mm, 폭 30 mm, 두께 0.7 mm의 SPRC440 강판을 하부 판재로 사용했다. 이에 대한 공칭화학조성은 표 3-1, 3-2에 나타내었다[37-39].

표 3-1 AA5182-O 화학 조성 (wt.%) [38]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.09	0.21	0.06	0.33	4.44	0.02	0.02	0.03	Bal.

표 3-2 SPRC440 화학 조성 (wt.%) [37, 39]

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.08	0.001~0.02	1.28~1.38	0.01~0.017	0.002~0.004	Bal.

3.2. Refill-FSSW 실험

3.2.1. 접합용 장비

본 연구에서 사용된 Refill-FSSW용 장비는 RPS 100 KS10으로 Harms & Wende에서 제작한 Refill-FSSW 전용장비를 사용했다. 표 3-3은 장비 사양으로 표에 나타나 있는 것처럼 최대 삽입 깊이는 4.6 mm까지 가능하며, 최대 회전 속도는 3,300 rpm까지 가능하다.

본 연구에서는 접합용 공구의 삽입 깊이를 0.6 ~ 0.9 mm 변화시켰고, 회전속도와 최대 삽입 깊이에서의 유지시간은 각각 1500 rpm, 3 s로 동일하게 적용했다. 그림 3-1는 Refill-FSSW용 장비 사진을 나타낸다.

표 3-3 Refill-FSSW용 장비 사양

Voltage	440 Va.C, 50/60 Hz	Insertion depth (max)	4.6 mm
Rotation speed (max)	3,300 rpm	Torque	14.5 Nm
Idle time (max)	32 sec	Controller size	0.60 X 0.40 m
Insertion time (max)	32 sec	Welding machine size	1.00 X 1.20 M



그림 3-1 Refill-FSSW용 장비

3.2.2. 공구의 형상 및 특징

본 연구에서 사용한 Refill-FSSW용 각각의 공구 형상 및 3개의 공구를 합친 형상을 그림 3-2, 3-3, 3-4 및 3-5에 나타내었다. 일반적인 Refill-FSSW 접합용 공구와 동일하게 핀, 슬리브 및 클램핑 링으로 구성되어 있으며, 3개의 공구가 한 세트이다.

앞서 기술된 바와 같이 클램핑 링의 경우, 접합 공정 중 피접합재가 움직이지 않도록 판재를 고정하는 역할과 접합 중 재료가 외부로 배출되는 것을 방지하는 역할을 한다. 핀과 슬리브의 경우, 두 공구의 회전을 통해 마찰열을 발생시키고, 상/하 운동에 의해 기계적 교반을 통해 접합한다. 뿐만 아니라 재료 흐름을 개선하고 공극 형성을 방지하기 위해 공구 표면에 나사산 있다. 또한 하나의 모터와 독립적인 액추에이터에 연결되어 있어 동일한 회전속도로 회전하지만 서로 독립적으로 움직일 수 있다.

Refill-FSSW 접합용 공구의 직경에 있어서, 핀의 직경은 5 mm, 슬리브의 직경은 9 mm, 클램핑 링의 직경은 18 mm로 제작했다.



그림 3-2 Refill-FSSW용 공구 - 핀



그림 3-3 Refill-FSSW용 공구 - 슬리브



그림 3-4 Refill-FSSW용 공구 - 클램핑 링



그림 3-5 Refill-FSSW용 공구 - 전체

3.2.3. 접합조건

본 연구에서는 두께 1.0 mm인 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 두께 0.7 mm인 SPRC440 강판을 접합용 지그를 이용하여 고정시킨 후 접합을 진행했다. Refill-FSSW 모식도 및 지그는 그림 3-6 및 3-7에 나타내었다. 각 판재의 폭 및 길이는 그림 3-8과 같이 KS B ISO 14273 규격에 따라 각각 30 mm 및 100 mm로 하였으며, 겹침부의 길이를 30 mm로 유지했다. 접합부가 판재 겹침부의 중앙에 형성될 수 있도록 접합용 공구의 핀 선단부가 겹침부의 중앙부에 위치하도록 하였으며, 지그를 통해 고정시켰다. 금속간화합물 형성의 주요 영향인자가 입열량으로 알려져있기 때문에, 본 연구에서는 입열량에 가장 큰 영향을 미치는 접합변수인 공구의 삽입 깊이를 주요 접합변수로 하여 연구를 진행했다. 접합용 공구의 삽입 깊이의 경우, 회전속도가 1500 rpm로 동일할 때 삽입 깊이를 0.6 mm, 0.7 mm, 0.8 mm 및 0.9 mm로 변화시켰다. 각 변수마다 4회씩 접합을 진행했으며 시편의 외관 형상을 관찰했다. 4개의 접합 시편 중 1개는 미세조직 분석용으로 사용했으며, 3개의 접합 시편은 상온인장전단시험용으로 사용했다.

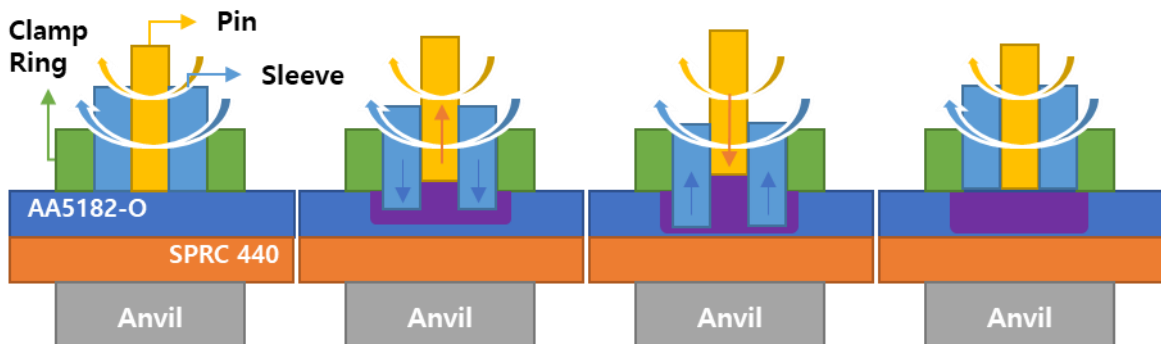


그림 3-6 Refill-FSSW 공정 모식도

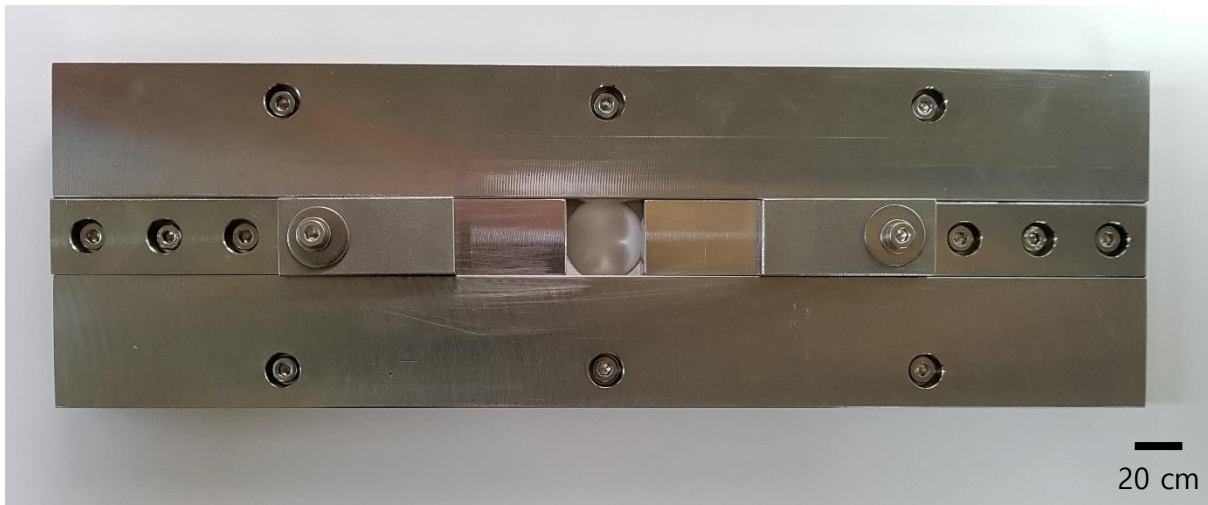


그림 3-7 Refill-FSSW용 지그

호칭 판두께 t	판너비 W (mm)	결침여유 L (mm)	시험편 길이 A (mm)	클램프 간 거리 B (mm)
0.3 이상 ~ 0.8 미만	20	20	75	70
0.8 이상 ~ 1.3 미만	30	30	100	90
1.3 이상 ~ 2.5 미만	40	40	125	100
2.5 이상 ~ 5.0	50	50	150	110

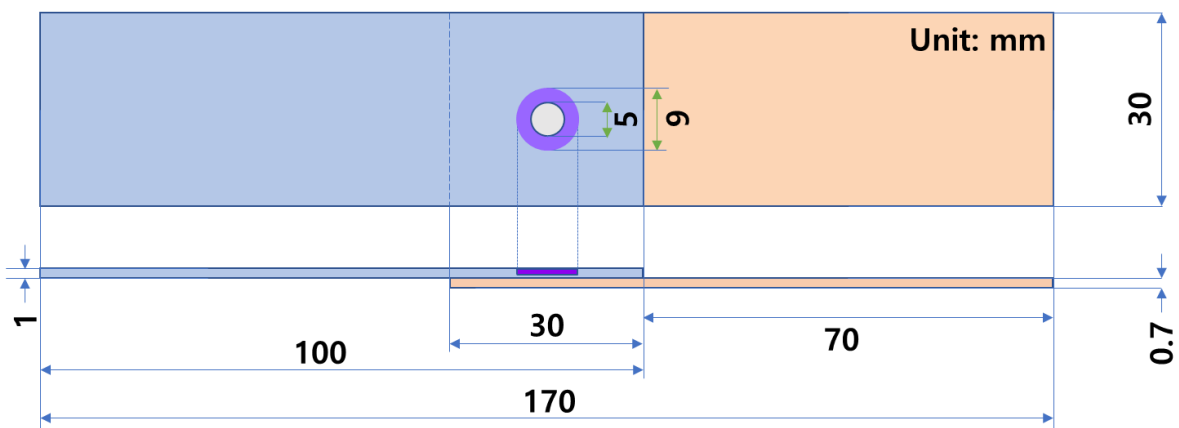


그림 3-8 KS B ISO 14273 규격 및 접합 시편 모식도

3.3. 특성 평가

3.3.1. 접합부의 외관형상 관찰

Refill-FSSW 후 접합용 공구의 삽입 깊이 변화에 따른 접합부의 외관형상을 관찰했다. 외관형상을 통해 결함 유무, 접합 후의 피접합재 변형 정도, 접합부 뒷면 상태 등을 육안으로 관찰하고, 디지털카메라를 통해 사진으로 기록했다.

3.3.2. 접합부의 계면부 및 미세조직 관찰

접합부 미세조직 관찰을 위해 Allied사의 Techcut5 장비를 이용해 시편을 공구 삽입 깊이가 진행방향과 평행한 방향으로 절단 및 채취했다. 이 후, 투명수지 및 Polyfast 마운팅 수지를 이용하여 BUEHLER사의 Simplimet 3000장비를 이용해 핫마운팅(Hot mounting)을 진행했다. 핫마운팅 후 BUEHLER사의 Phoenix 4000 장비를 이용해 #600, #800, #1000, #1200 사포로 조연마 실시했다. 조연마 후 3 μm & 1 μm Diamond suspension, OPS 용액을 통해 미세연마를 진행했다. EBSD(Electron Backscatter Diffraction) 분석 시편의 경우 최종 연마 시, OPS 용액과 에탄올 1:1.5 비율로 제조된 용액을 사용한 것 외에는 위와 동일하게 미세연마를 진행했다. 세척 완료 후 에칭 전 광학현미경(OM, model; Olympus BX51M) 및 주사전자 현미경(SEM, model; JEOL JSM-IT200)로 피접합재 및 접합부의 미세조직, 접합부 형상, 소성유동패턴, 계면 거칠기, 파면, 파단면 등을 관찰했다. 또한, 모재와 접합부 영역을 주사전자현미경 내에서 EBSD 분석했으며 모든 영역을 2000배율, Step size 0.07 μm 로 진행했다. 결정방위는 Oxford사에서 제공되는 AZtecHKL Analysis 소프트웨어를 이용하여 분석했다.

이외에도 소성유동패턴, 2차상 및 금속간화합물의 종류 등을 파악하기 위해 주사전자 현미경에 부착된 EDS(Energy-dispersive X-ray spectroscopy) Point, Line, Mapping을 이용해 성분분석을 진행했다. 정량적 측정은 Image analyzer 프로그램을 이용하여 2차상의 크기 및 분율과 금속간화합물의 두께 및 길이 등을 측정했다. 계면 거칠기의 경우, OM 이미지를 Matlab 프로그램을 통해 그래프화 시켰으며, KS B 0161에 의거하여 최대 높이 거칠기 방법을 통해 계면 거칠기를 측정했다. 이후 소성유동패턴 등과 같은 결과를 얻어내기 위해 증류수 175 ml, 질산 20 ml, 염산 3 ml, 불산 2 ml의 켈러 용액(Keller's reagent)을 사용하여 15초간 알루미늄합금 영역을 에칭했다. 알루미늄합금의 결정립크기 파악의 경우, 5 ml acetic acid, 1 ml HNO₃, 94 ml H₂O 에칭 용액을 통해 확인했다. SPRC440 강판의 경우 결정립과 같은 미세조직을 분석하기 위해 에탄올 198 ml, 질산 2 ml의 2% 나이탈 용액을 통해 8초간 에칭했다. 파단면 분석의 경우, 폴리싱으로 인한 시편의 끝단부 라운딩 문제해결 및 시편의 계면부 영역을 명확히 관찰하기 위해 Ni 코팅 후 파단면 분석을 진행했다. Ni 코팅은 증류수 600 ml, EN-8100NP(M) 250 ml, EN-8100NP(A) 150 ml로 제조된 용액을 사용했으며, 200 °C 온도로 5시간 진행했다.

3.3.3. 비커스 경도 측정

Refill-FSSW 후 모재 및 접합부 영역의 경도 분포를 조사하기 위해 KS B ISO 14271에 의거하여 비커스 경도기(Vickers micro-hardness, model; Mitutoyo HM-200)를 통해 경도시험을 실시했다.

모재 경도의 경우, RT면, RN면, TN면에 따라 각각 측정했다. 측정 시 AA5182-O 알루미늄합금 판재의 경우 100gf의 인가하중으로, SPRC440 강판의 경우 300gf의 인가하중으로 시험하였으며 유지시간은 10 sec, 압흔 간 간격은 0.5 mm로 일정하게 유지하여 시험했다.

접합부 영역의 경우, 아래 그림 3-9의 모식도와 같이 AA5182-O 알루미늄합금 판재 및 SPRC440 강판에 따라, 각각 상부, 중부 및 하부 영역으로 나누어 시험했다. 상판의 알루미늄합금 판재의 경우 50gf의 인가하중으로, 하판의 SPRC440 강판의 경우 100gf의 인가하중으로 설정하였으며, 유지시간은 10 sec, 압흔 간 간격은 0.35 mm로 일정하게 유지하여 시험했다.

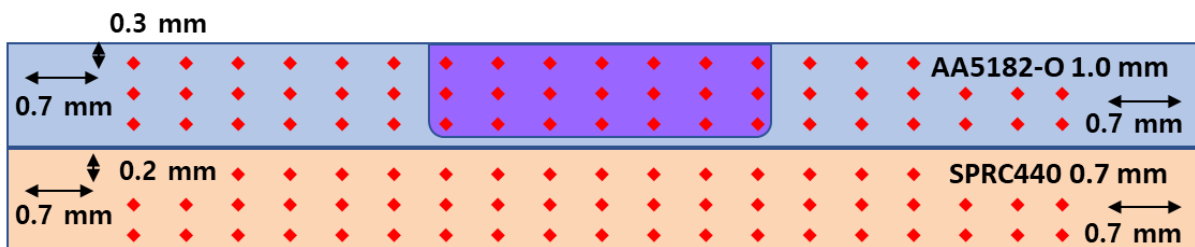


그림 3-9 알루미늄합금 판재 및 고강도 강판에 따른 비커스 경도 Line 분석 위치 모식도

3.3.4. 상온인장전단시험

Refill-FSSW 후 만능 시험기(Universal Testing machine, model; INSTRON 5985) 장비를 이용해 상온인장전단시험을 실시했다. 상온인장전단 시편 제작의 경우 KS B ISO 14273 규격에 의거하여 제작 및 실험하였으며, 접합용 공구의 삽입 깊이에 따라 각각 3번의 상온인장전단시험을 진행했다. 규격에 따라, 그림 3-10에서와 같이 상/하판의 두께만큼의 덧판(Spacer)를 사용했다. Grip section은 55 mm, Gage length는 50 mm로 설정했으며, Cross-head speed는 10 mm/min으로 상온에서 일정하게 유지하며 실시했다.

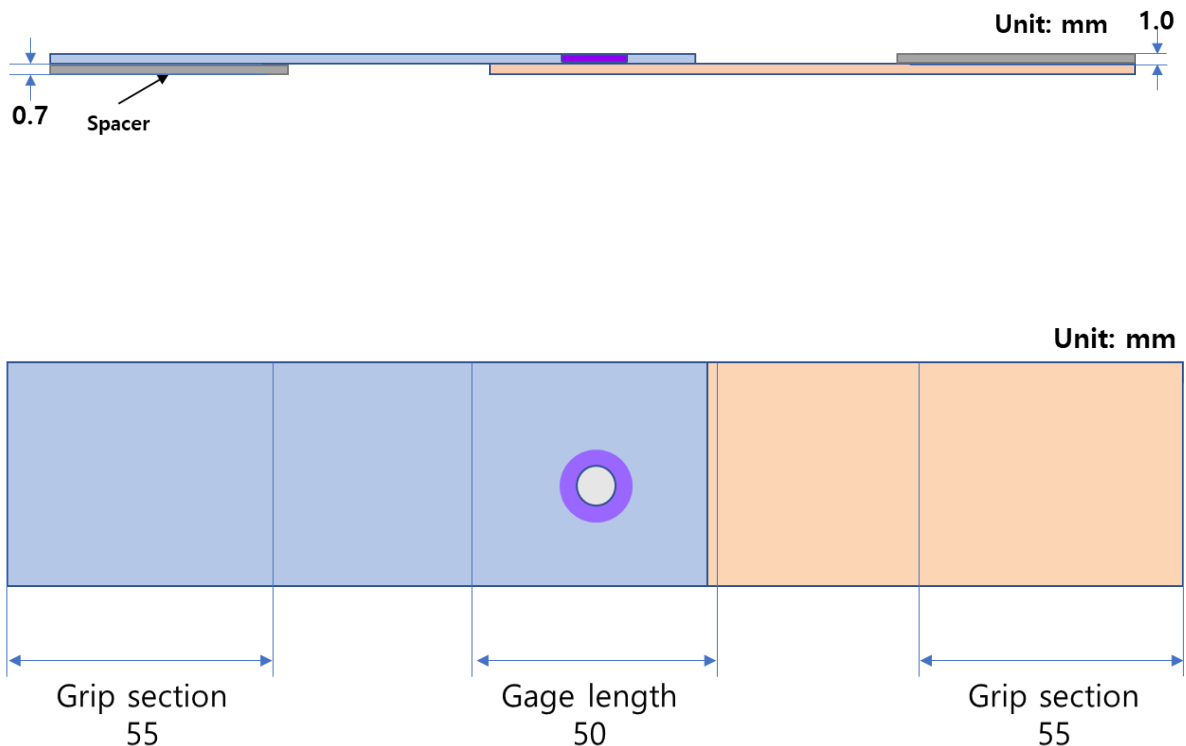


그림 3-10 상온인장전단하중 시편 모식도 옆면 및 윗면

3.3.5. XRD 분석

그림 3-11과 같이 상온인장전단시험 후 상판 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 하판 SPRC440 고강도 강판의 금속간화합물의 존재 유/무와 종류를 파악하기 위해, XRD 장비(X-ray diffraction, model; ULTMA 4)를 통해 파면영역 분석을 진행했다. XRD 분석 조건의 경우 경우, Scanning speed 2.00 deg/min, Scanning angle 20° ~ 100°, Cu K α radiation 타겟으로 진행했다.

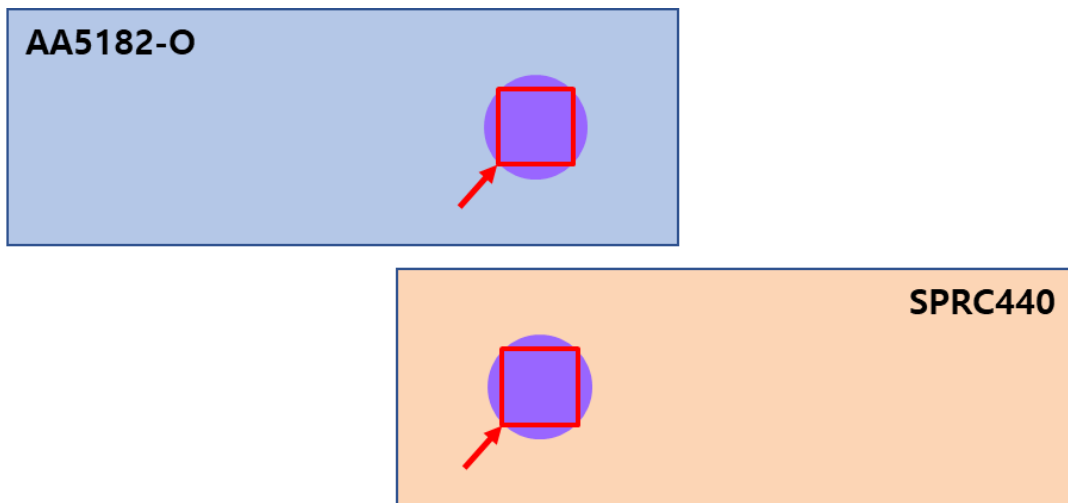


그림 3-11 XRD 분석 위치 모식도

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 피접합재 특성평가

4.1.1. 미세조직 특성

그림 4-1[40]은 RT(Rolling direction-Transverse direction)면, RN(Rolling direction - Normal direction)면, TN(Transverse direction - Normal direction)면을 의미하는 그림이며, 그림 4-2는 본 연구의 피접합재인 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 SPRC440 강판의 모재 미세조직을 나타낸 것이다. AA5182-O 알루미늄합금의 결정립의 경우, 압연 후 어닐링 열처리를 진행함으로써 등축형 형태에 가까운 결정립이 관찰됨을 확인할 수 있었다. SPRC440의 경우, 주로 페라이트 조직을 가지며 등축형 형태에 가까운 결정립을 확인할 수 있었으며 다른 선행연구에서도 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있었다[39]. 이러한 미세조직적 특성은 RT, RN, TN면 모두 유사했다.

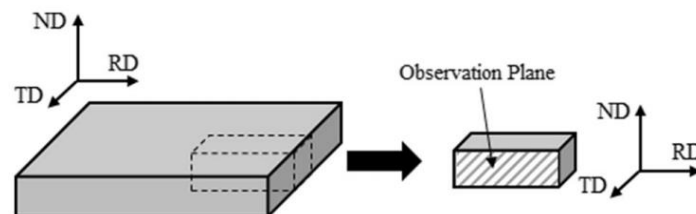


그림 4-1 시편의 RD, ND, TD 방향[40]

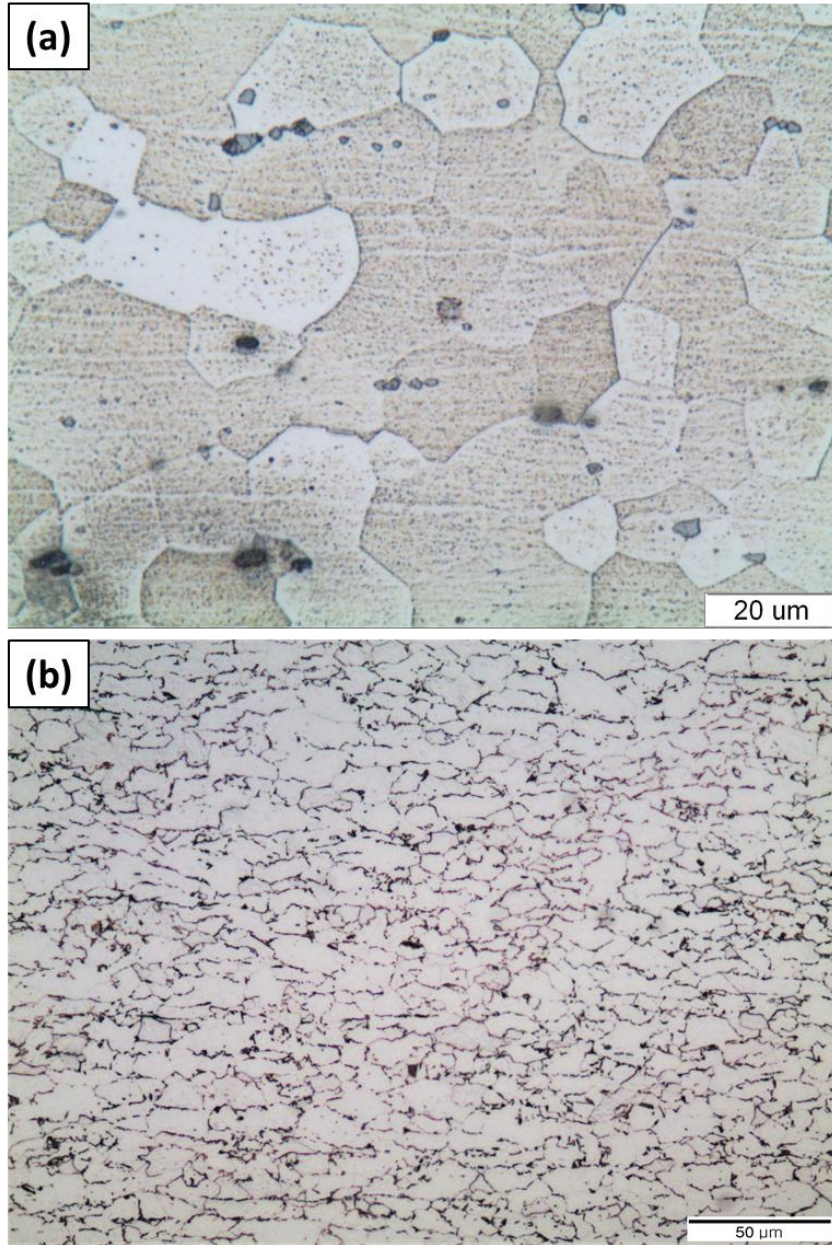


그림 4-2 모재 OM 미세조직 이미지: (a) AA5182-O, (b) SPRC440

4.1.2. 경도특성

그림 4-3은 본 연구의 피접합재인 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 SPRC440 강판의 RT, RN, TN면의 평균 경도 값을 나타낸 것이다. 평균 경도 측정 결과, 피접합재 AA5182-O 알루미늄합금 판재의 경우, RT면은 평균 78.5 HV, RN면은 평균 78.1 HV, TN면 평균 77.6 HV의 경도 결과 값을 보였다. SPRC440 강판의 평균 경도 측정 결과 RT면은 평균 156.9 HV, RN면은 평균 158.1 HV, TN면 평균 157.5 HV의 경도 결과 값을 보였다. 이처럼 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 SPRC440 강판의 각 면에 따른 평균 경도 결과 값을 보면, 모두 유사한 결과 값이 나타남을 확인할 수 있는데, 이는 앞서 기술된 바와 같이 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 SPRC440 강판에 따라 RT, RN, TN면의 결정립 크기가 유사하기 때문이라고 추정된다.

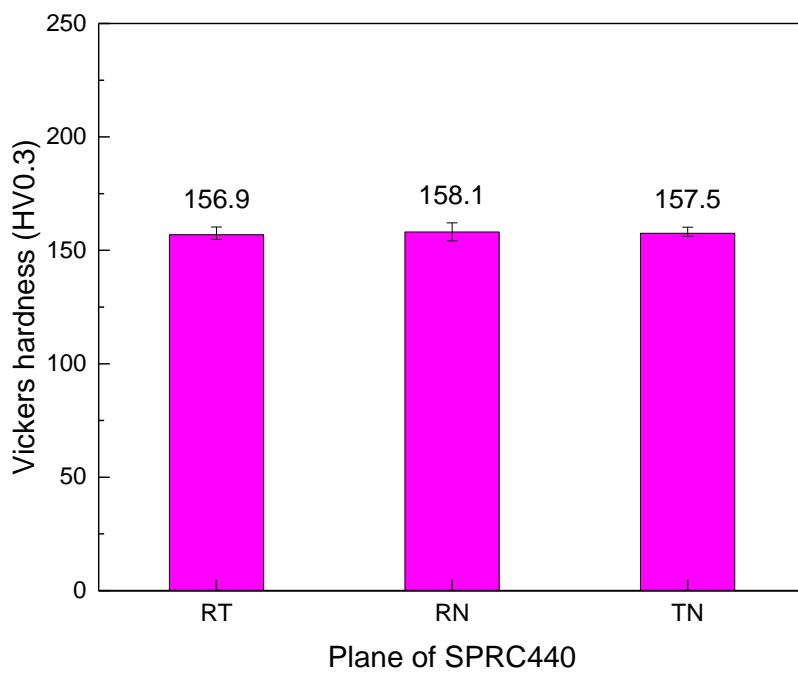
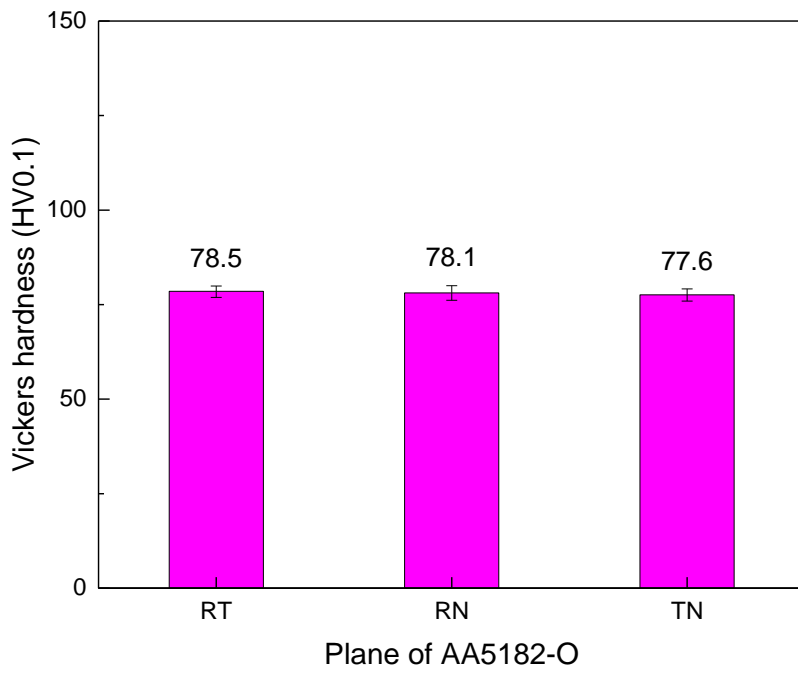


그림 4-3 RT, RN, TN면에 따른 모재 경도 결과: (a) AA5182-O, (b) SPRC440

4.2. 공구의 삽입 깊이가 접합부 특성에 미치는 영향

4.2.1. 외관형상

그림 4-4, 4-5 및 4-6은 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 SPRC440 강판의 이중 접합 후 삽입 깊이에 따른 앞면, 뒷면 및 옆면의 저배율 및 고배율 외관형상을 나타낸다.

접합용 공구의 삽입 깊이가 접합된 시편의 외관형상에 미치는 영향에 대해 관찰했으며, 삽입 깊이가 0.6 mm의 조건일 때 접합이 이루어지지 않았음을 확인할 수 있었다. 이는 낮은 삽입 깊이로 인해 접합부 계면에서 충분한 입열량이 형성되지 않아 접합이 이루어지지 않는 것으로 추정된다. 그 외의 삽입 깊이 변화 조건에서는 기공 등과 같은 특별한 결함이 관찰되지 않았으며, 키홀 역시 발생하지 않는 접합부가 얻어지는 것을 확인할 수 있었다.

접합부 상부의 경우 고속으로 회전하고 있는 접합용 공구와 피접합재의 마찰에 의해 원형의 접합부가 형성되었으며, 접합부 하부 판재의 경우 상부 판재까지 만 공구가 삽입되었음에도 불구하고 뒷면에 검은색 원형 형태가 나타남을 확인했다. 이는 공구가 회전함에 따라, 마찰열에 의해 열이 하판까지 전달되어 생성된 것으로 예상된다. 판재의 변형, 표면 결함, Burr의 유/무의 경우 삽입 깊이에 따른 변화는 크게 나타나지 않았다.

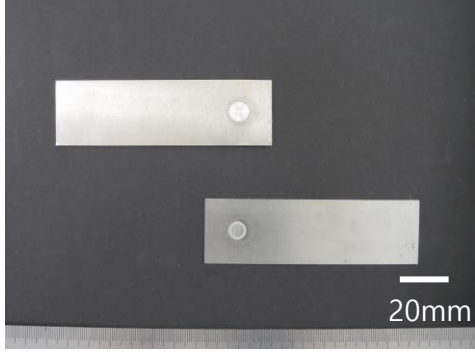
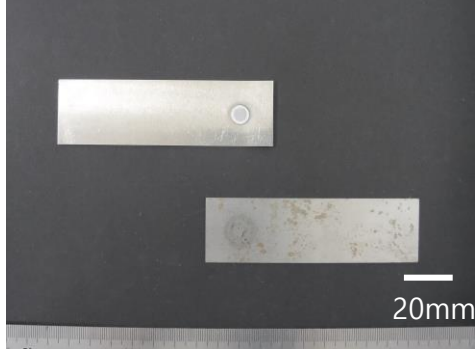
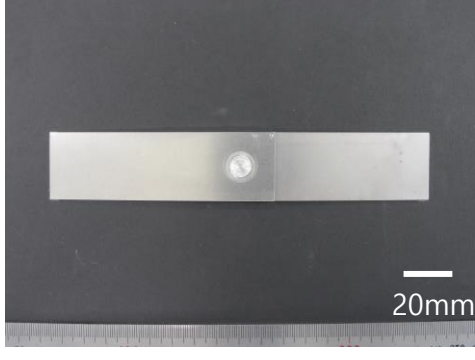
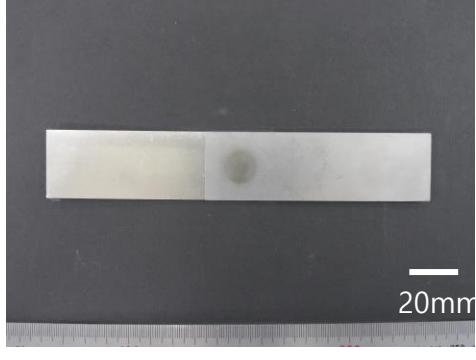
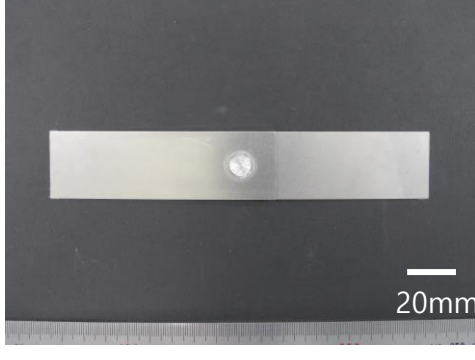
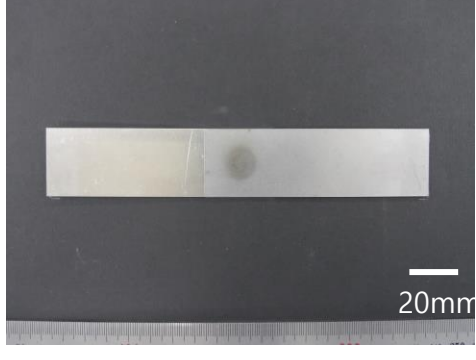


Tool plunge depth (mm)	Top surface	Bottom surface
0.6		
0.7		
0.8		
0.9		

그림 4-4 삽입 깊이에 따른 상/하판 정면 저배율 외관형상

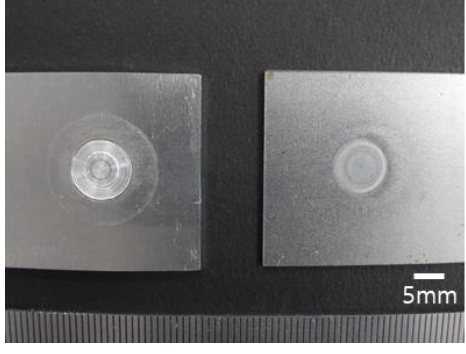
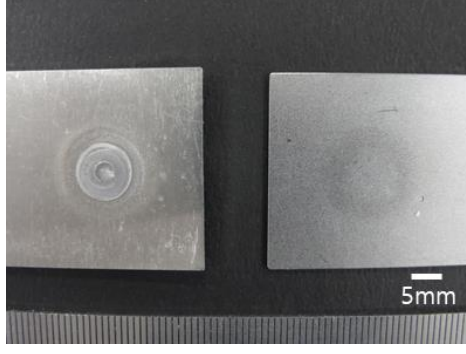
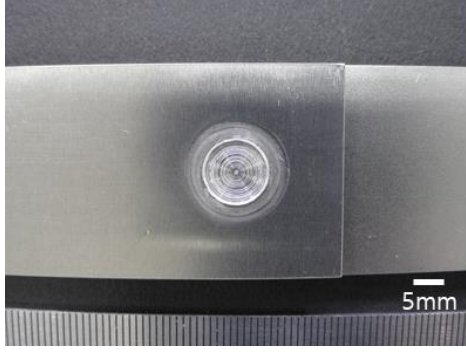
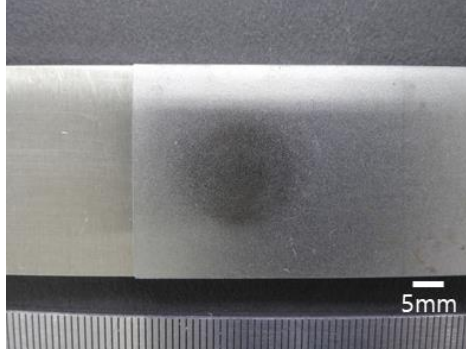

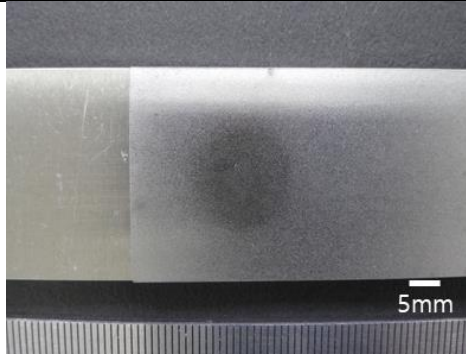

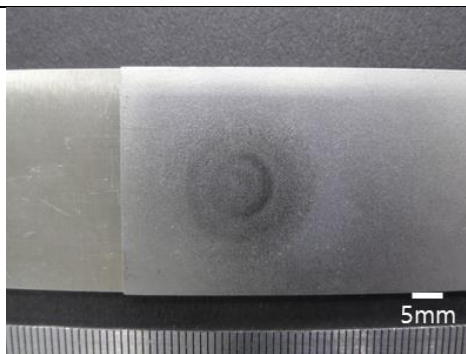
Tool plunge depth (mm)	Top surface	Bottom surface
0.6		
0.7		
0.8		
0.9		

그림 4-5 삽입 깊이에 따른 상/하판 정면 고배율 외관형상

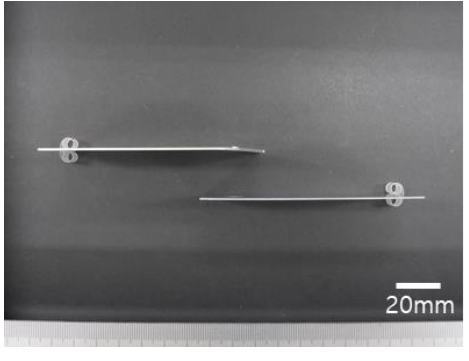

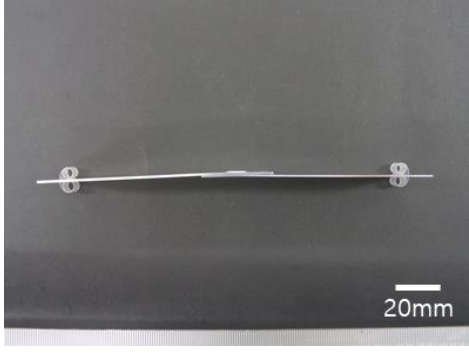

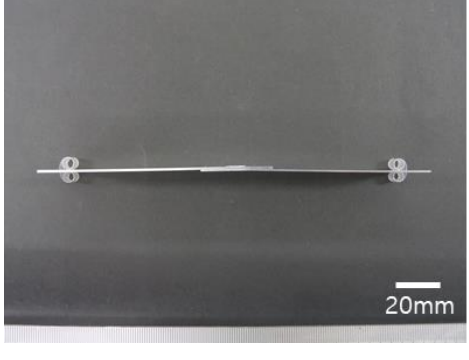



Tool plunge depth (mm)	Low magnification	High magnification
0.6		
0.7		
0.8		
0.9		

그림 4-6 삽입 깊이에 따른 상/하판 옆면 저배율 및 고배율 외관형상

4.2.2. 미세조직 특성

4.2.2.1 접합부 영역

그림 4-7은 절단 후 저/고배율 절단면 단면 사진이다. 그림 4-7 (a)와 같이 가운데 부분을 접합부라 하며, 그 외 영역은 모재를 의미한다. 접합부 영역을 확대한 그림 4-7 (b)을 보면, 접합부 또한 슬리브 영역과 핀 영역으로 구분된다. 또한, 접합부 영역에서 상/하판이 만나는 영역이 계면부이다. 그림 4-8은 접합용 공구의 삽입 깊이에 따른 고배율 접합부 단면 사진이다. 삽입 깊이가 0.6 mm인 경우 접합이 진행되지 않았으며, 0.7mm ~ 0.9 mm의 경우 접합이 진행되었다. 접합부에서 키홀은 관찰되지 않았고, 접합부 단면을 통해 아래와 같은 요인을 분석했으며, 계면부 영역은 뒤에서 따로 다루었다.

- ① 내부 결함
- ② 결정립 크기 및 결정립 내부에서의 변형량(전위밀도)
- ③ 소성유동패턴
- ④ 계면 거칠기
- ⑤ 2차상 크기 및 분포

그림 4-8을 보면, 재료 손실 결함이 발생했음을 알 수 있다. 일반적으로 Refill-FSSW의 경우 Clamping ring 공구로 인해 재료의 손실을 막아준다. 이는 공구의 가공 과정에서 공구간 마모 발생을 줄여 주기 위해 약간의 공차를 형성해주기 때문에 이 틈사이로 상판 소재가 들어가게 되어 재료손실이 발생한 것으로 추측된다. 따라서, 그림 4-8과 같이 Burr처럼 양 끝단이 올라간 형상과 접합부 중앙부가 상부시편 두께보다 얇아지게 된다. 이외에 내부 기공과 같은 결함은 관찰되지 않았다.

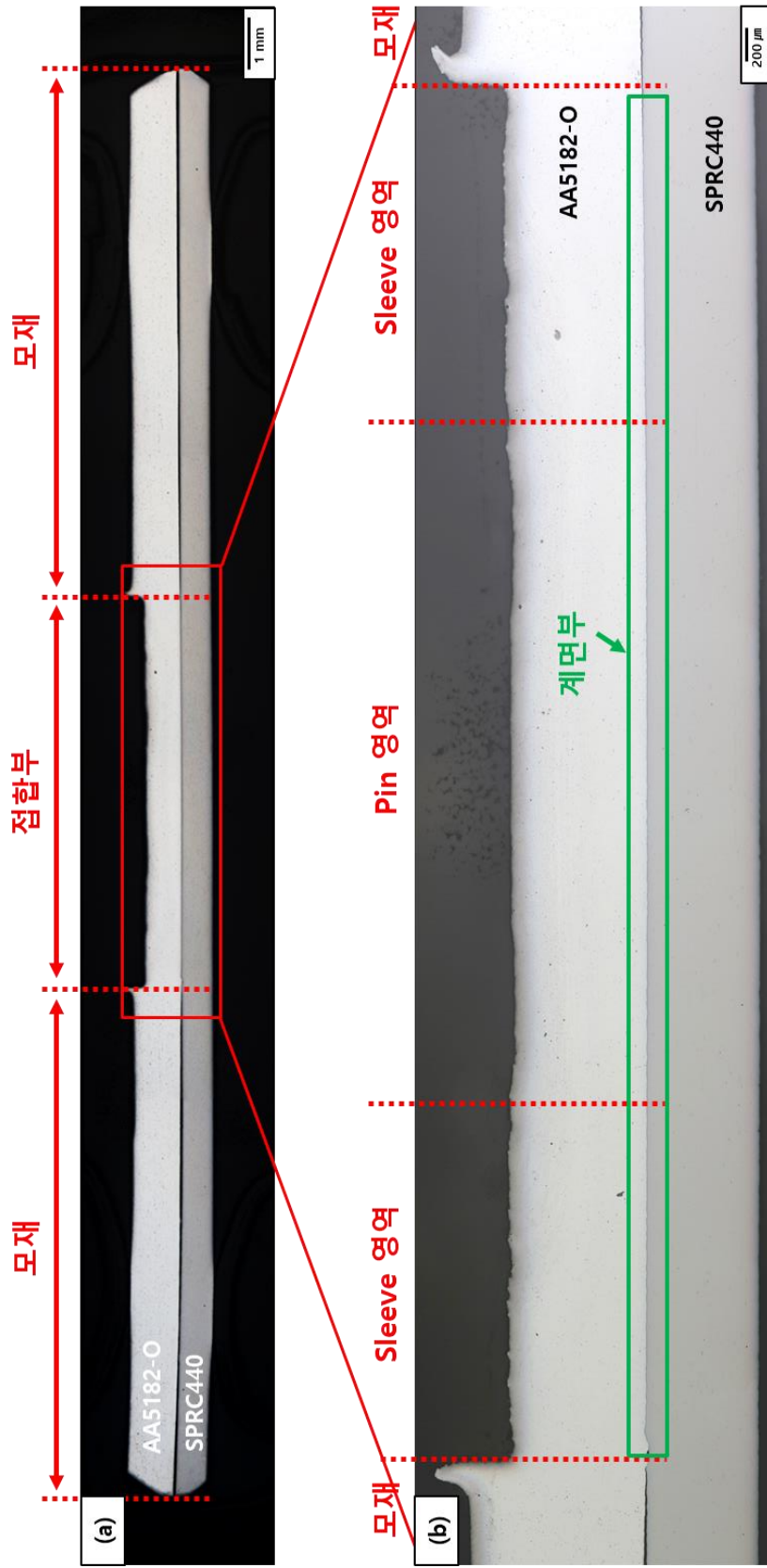


그림 4-7 시편 저/고배율 절단면 단면 및 영역 설명 사진: (a) 저배율, (b) 고배율



그림 4-8 삽입 깊이에 따른 단면: (a) 0.6 mm, (b) 0.7 mm, (c) 0.8 mm, (d) 0.9 mm

그림 4-9은 접합용 공구의 삽입 깊이 0.9 mm 조건의 알루미늄합금 판재에서 모재와 슬리브 및 핀 영역의 EBSD IPF map 결과를 나타낸다. 그림과 같이 모재, 슬리브 중부, 핀 중부 영역의 결정립 크기는 각각 12.59 μm , 3.65 μm , 4.01 μm 로 측정되었다. 이처럼 모재의 결정립 크기보다 교반부의 결정립이 훨씬 미세한 것을 알 수 있는데, 이는 Refill-FSSW 공정으로 인해 발생하는 마찰열과 기계적 교반에 의한 동적 재결정으로 인한 결과로 판단된다[29]. 뿐만 아니라 슬리브 영역의 결정립 크기가 핀 영역의 결정립 크기보다 작음을 확인할 수 있다. 이는 식을 통해서도 확인할 수 있다. 슬리브의 공구 직경이 핀의 공구 직경보다 더 크기 때문에 원주속도 식을 통해 확인해보면, $v = \frac{D \times \pi \times n}{60 \times 1000}$ (v : 원주속도, D : 공구직경, n : 회전속도)로 슬리브 영역에서의 원주속도가 빨라 소성변형량이 더 높기 때문에 결정립 크기가 작아짐을 추정할 수 있다.

그림 4-10은 슬리브 및 핀 영역별 EBSD IPF map 결과를 나타낸다. 슬리브 영역별 결정립 크기를 비교해보면, 슬리브 상부, 중부 및 하부 영역으로 갈수록 결정립 크기가 커짐을 알 수 있었다. 핀 영역도 핀 상부, 중부 및 하부 영역으로 갈수록 결정립 크기가 커지는 경향을 보였다. 이러한 이유는 앞서 기술된 원인과 유사하게, 하부로 갈수록 마찰열과 기계적 교반량이 감소했기 때문으로 추정된다. 또한, 슬리브 및 핀의 영역별 상부, 중부 및 하부 영역을 각각 비교해봤을 때, 모든 슬리브 영역에서 핀 영역의 결정립 크기보다 더 작음을 알 수 있고, 이는 앞서 기술된 이유와 유사한 원리로 인한 결과로 추정된다.

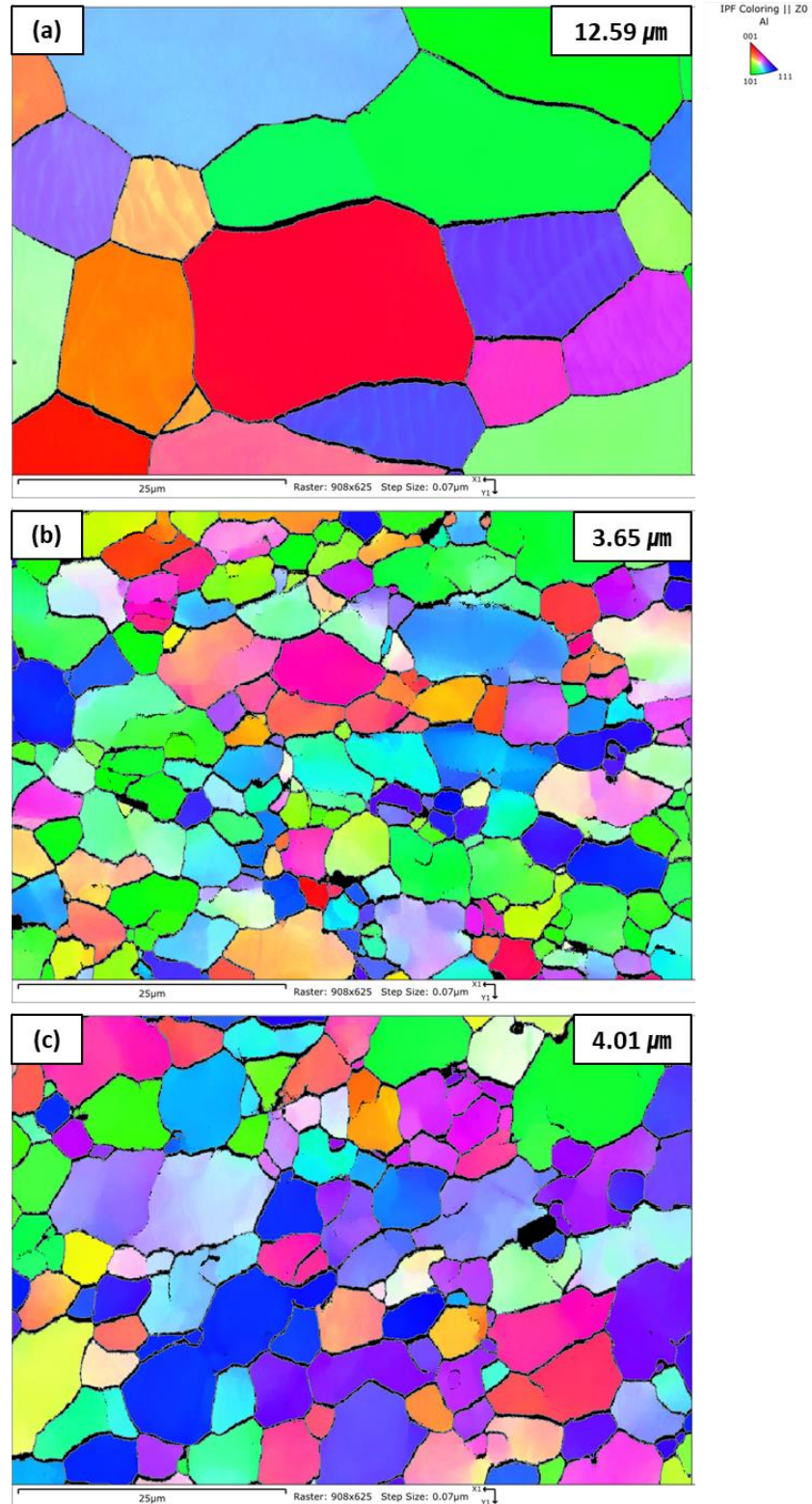


그림 4-9 삽입 깊이 0.9 mm 조건에서의 알루미늄합금 판재 영역별 EBSD IPF Map 결과:
(a) 모재, (b) 슬리브 중부, (c) 핀 중부

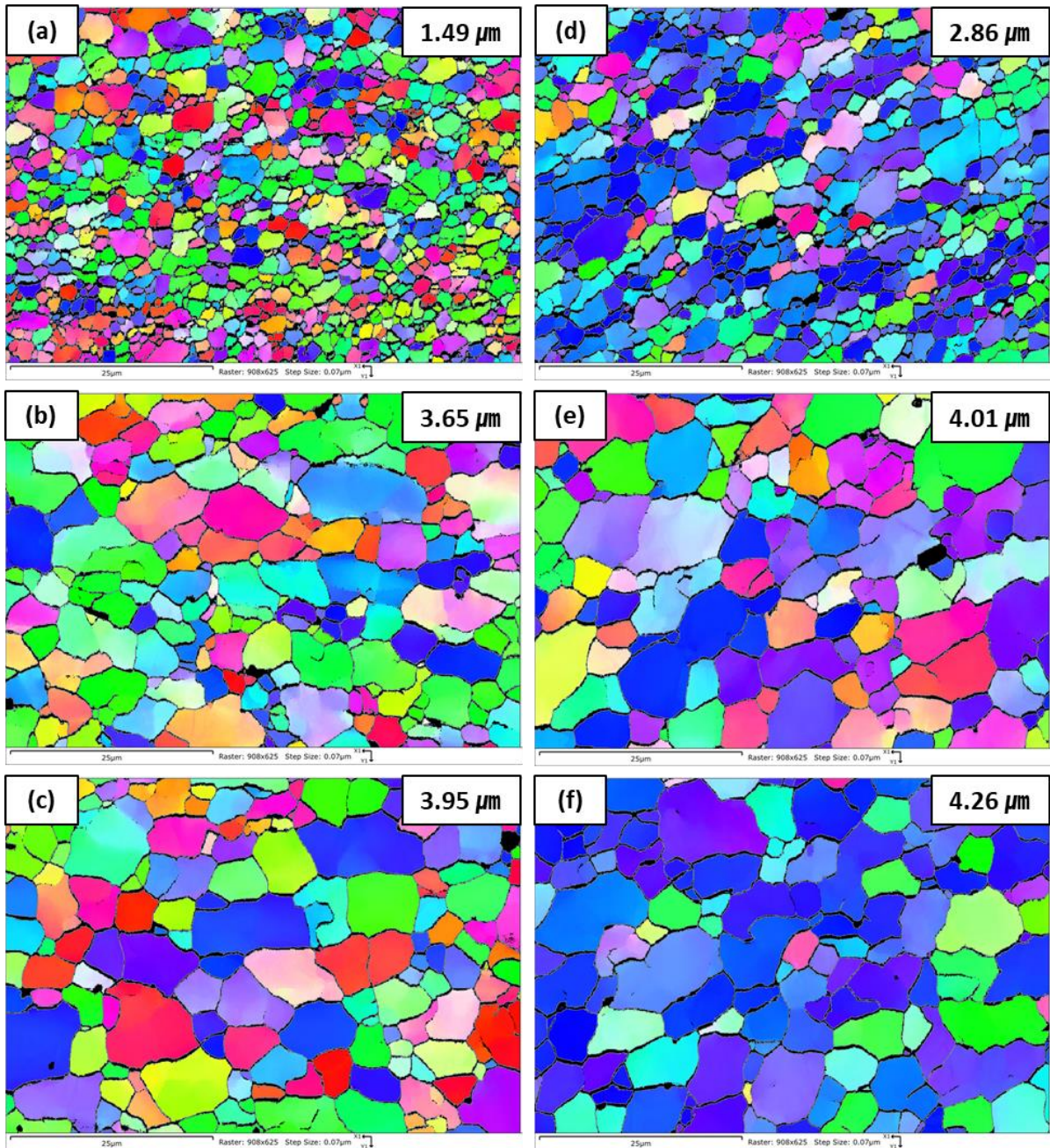


그림 4-10 삽입 깊이 0.9 mm 조건에서의 알루미늄합금 판재 슬리브 및 핀 영역별 EBSD IPF map 결과: (a) 슬리브 상부, (b) 슬리브 중부, (c) 슬리브 하부, (d) 핀 상부, (e) 핀 중부, (f) 핀 하부

그림 4-11은 접합용 공구의 삽입 깊이 0.9 mm 조건에서 알루미늄합금 판재의 영역별 EBSD KAM map 결과를 나타낸다. 그림 4-11 (d)에서 영역별 평균 Kernel average misorientation (KAM) 분포를 확인해보면, 모재 영역이 0.22 °, 슬리브 영역이 0.33 °, 핀 영역이 0.32 °의 결과 값을 보였다. 이처럼, 모재 영역이 교반부 영역보다 결정립내에서의 변형량이 더 낮음을 확인할 수 있었으며, 이는 곧 전위밀도가 더 낮음을 의미함을 알 수 있다. 이러한 결과가 나타난 이유는 알루미늄합금 모재가 어닐링열처리 효과로 때문이라고 추정된다.

그림 4-12는 슬리브 및 핀 영역별 EBSD KAM map 결과를 나타낸다. 그림과 같이, 슬리브 상부, 중부 및 하부 영역으로 갈수록 변형량이 다소 감소하는 경향을 보인다. 슬리브 상부 영역은 0.45 °, 슬리브 중부 영역은 0.33 °, 슬리브 하부 영역은 0.28 °의 KAM의 평균 값을 보였다. 이러한 결과가 나타난 이유는 $T = D^5 \times h^5 \times N^2$ (T : 공구로 인해 형성되는 토크, D : 공구 직경, h : 공구가 삽입 되는 높이, N : 회전속도)[41]식을 통해 생각해봤을 때, 하부 영역으로 갈수록 T 가 낮아지기 때문에 변형량이 감소하는 경향을 보인다고 추정된다. 핀 영역 역시 상부, 중부 및 하부 영역으로 갈수록 KAM 평균 값이 0.35 °, 0.32 °, 0.29 °로 변형량이 다소 감소하는 경향을 보인다. 이러한 결과가 나타난 이유 역시 앞서 기술된 원인 때문이라고 추정된다.

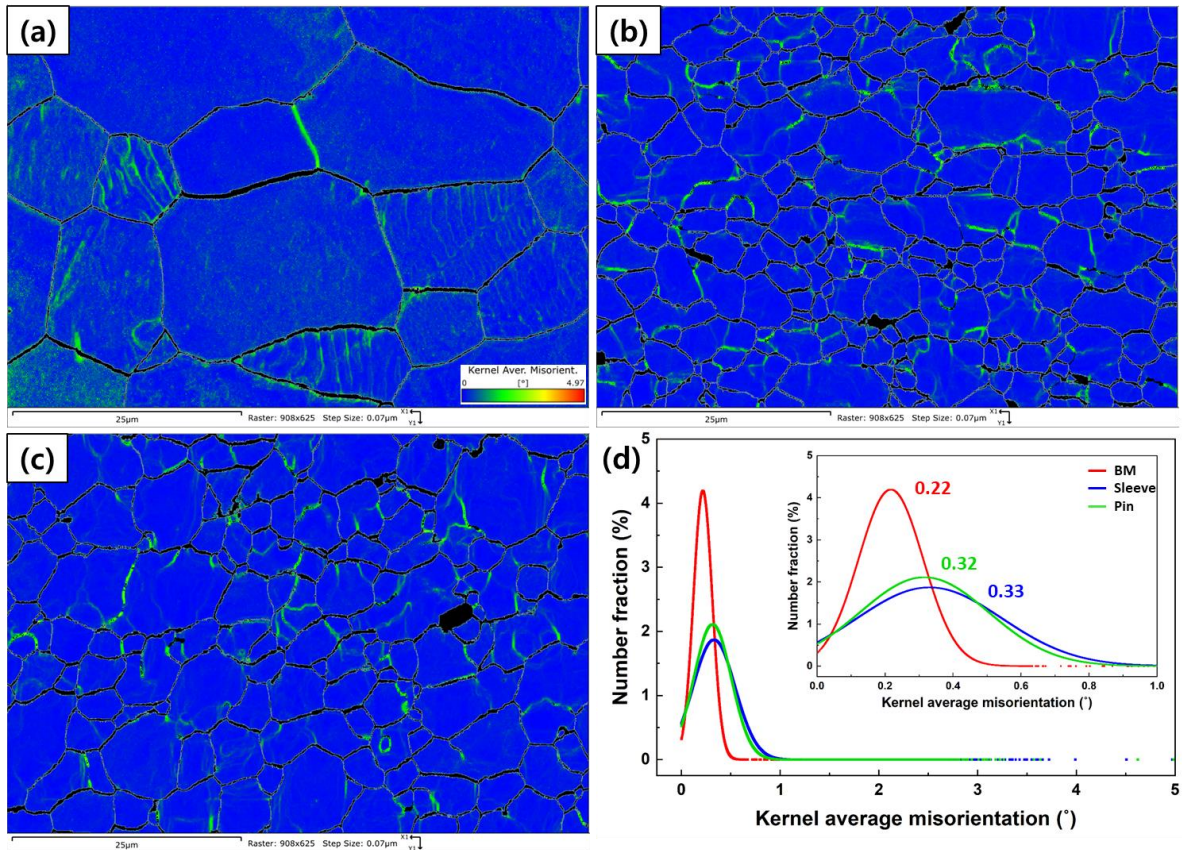


그림 4-11 삽입 깊이 0.9 mm 조건에서의 알루미늄합금 판재에서의 영역별 EBSD KAM map 결과: (a) 모재, (b) 슬리브 영역, (c) 핀 영역, (d) KAM 분포

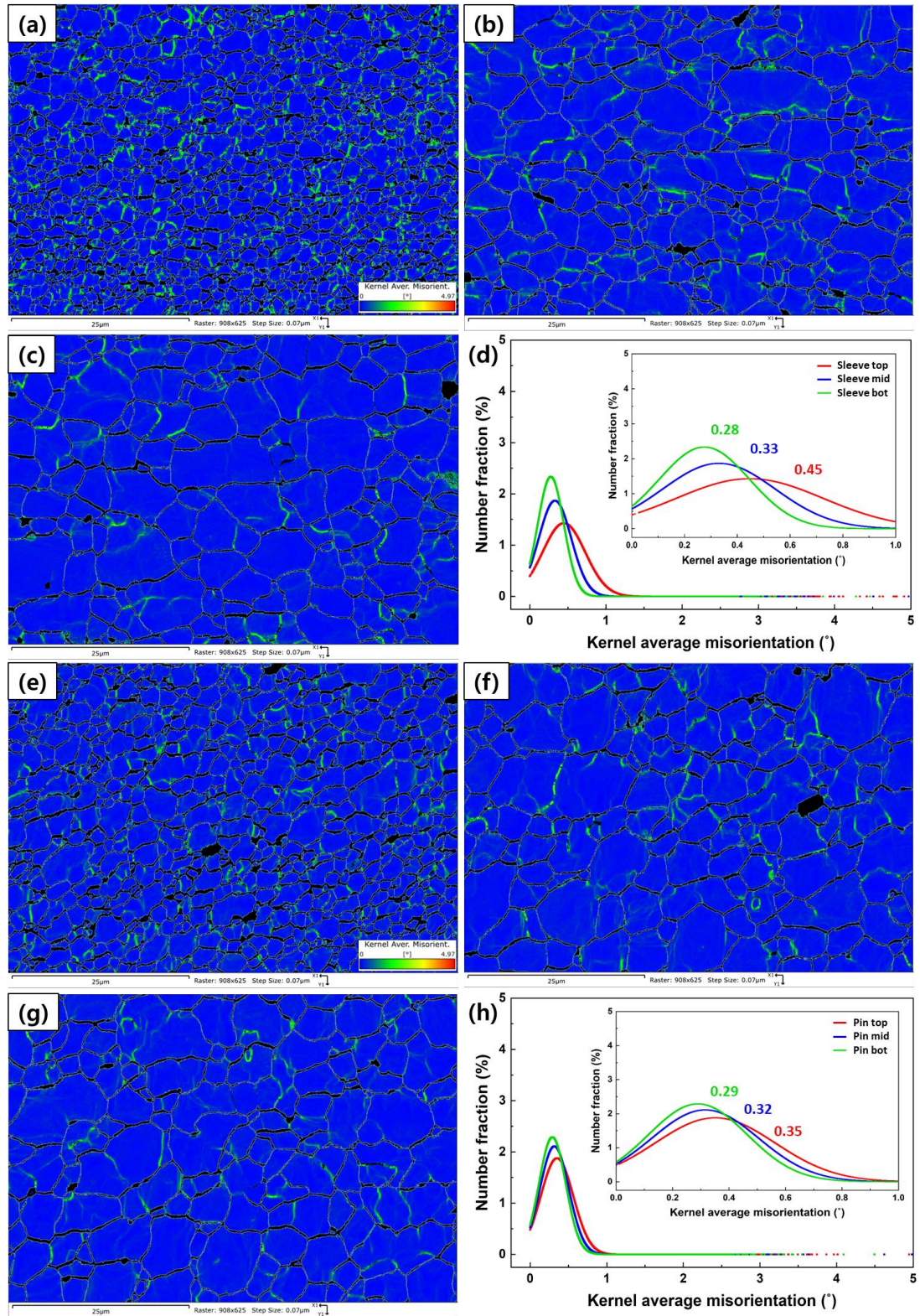


그림 4-12 삽입 깊이 0.9 mm 조건에서의 알루미늄 판재 슬리브 및 핀 영역별 EBSD KAM map 결과: (a) 슬리브 상부, (b) 슬리브 중부, (c) 슬리브 하부, (d) 슬리브 영역의 KAM 분포, (e) 핀 상부, (f) 핀 중부, (g) 핀 하부, (h) 핀 영역의 KAM 분포

그림 4-13은 접합용 공구의 삽입 깊이 0.9 mm 조건에서 SPRC440 강판의 모재, 슬리브 및 핀 영역별 EBSD IPF map 결과를 나타낸다. 그림과 같이, 각 영역별 결정립 크기의 경우 모재는 3.20 μm , 슬리브 상부는 2.18 μm , 슬리브 중부는 3.21 μm , 핀 상부는 3.18 μm , 핀 중부는 3.12 μm 로 측정되었다. 실험결과를 살펴보면, 슬리브 상부를 제외하고는 결정립 크기가 모재와 유사함을 확인할 수 있었다. 이처럼, 공구가 상부 판재까지만 삽입됨에도 불구하고 다음과 같은 결과가 발생하는 이유는 두가지로 추정된다. 첫째, Refill-FSSW 공정은 공구가 삽입되는 영역만 소성변형을 일으키는 것이 아니라, 회전에 의해 공구 주변 영역도 소성변형을 일으키기 때문이며, 두번째 Refill-FSSW 공정은 클램핑 링에 의해 재료가 밖으로 나가기 어려운 상태를 가지기 때문에 단순히 연한 재료에서만 소성변형이 발생하는 것이 아니라 경한 재료에서도 소성변형이 발생하기 때문에 하부 판재인 SPRC440 강판의 상부 영역이 소성변형을 받게 되는 것으로 추정된다.

그림 4-14는 접합용 공구의 삽입 깊이 0.9 mm 조건에서 SPRC440 강판의 모재, 슬리브 및 핀 영역별 EBSD KAM map 결과를 나타낸다. 영역별 KAM 분포를 확인해보면, 모재 영역이 0.16 $^{\circ}$, 슬리브 상부 영역이 0.93 $^{\circ}$, 슬리브 중부 영역이 0.18 $^{\circ}$, 핀 상부 영역이 0.17 $^{\circ}$, 핀 중부 영역이 0.18 $^{\circ}$ 의 결과 값을 보였다. 이처럼, 슬리브 상부 영역을 제외하고는 결정립 내부에서의 변형량은 거의 유사하게 관찰되었다. 슬리브 상부 영역의 변형량이 높게 나타난 이유는 앞서 기술된 원인과 유사하기 때문이라고 추정된다.

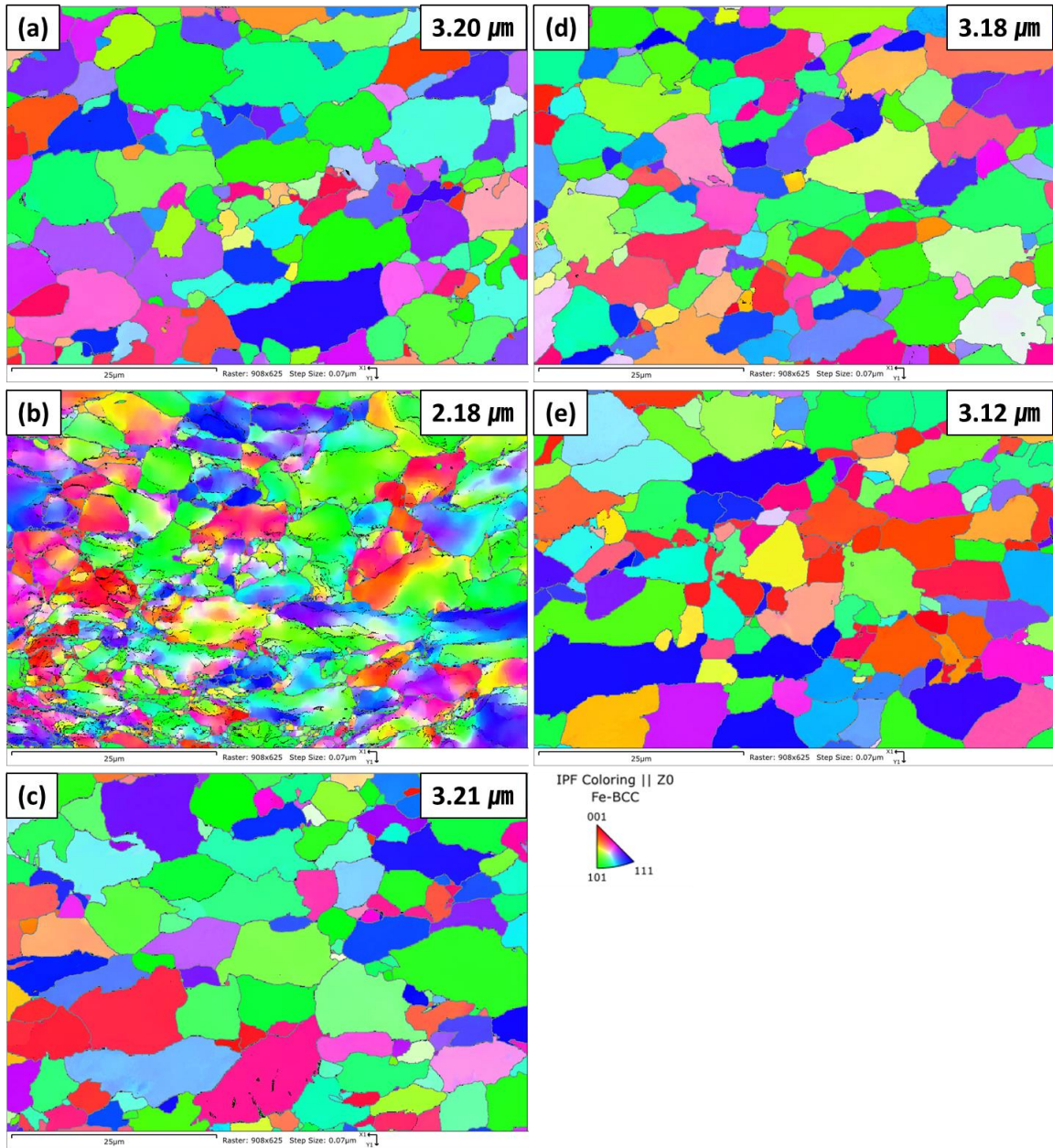


그림 4-13 삽입 깊이 0.9 mm 조건에서의 SPRC440 강판 영역별 EBSD IPF map
 결과: (a) 모재, (b) 슬리브 상부, (c) 슬리브 중부, (d) 핀 상부, (e) 핀 중부

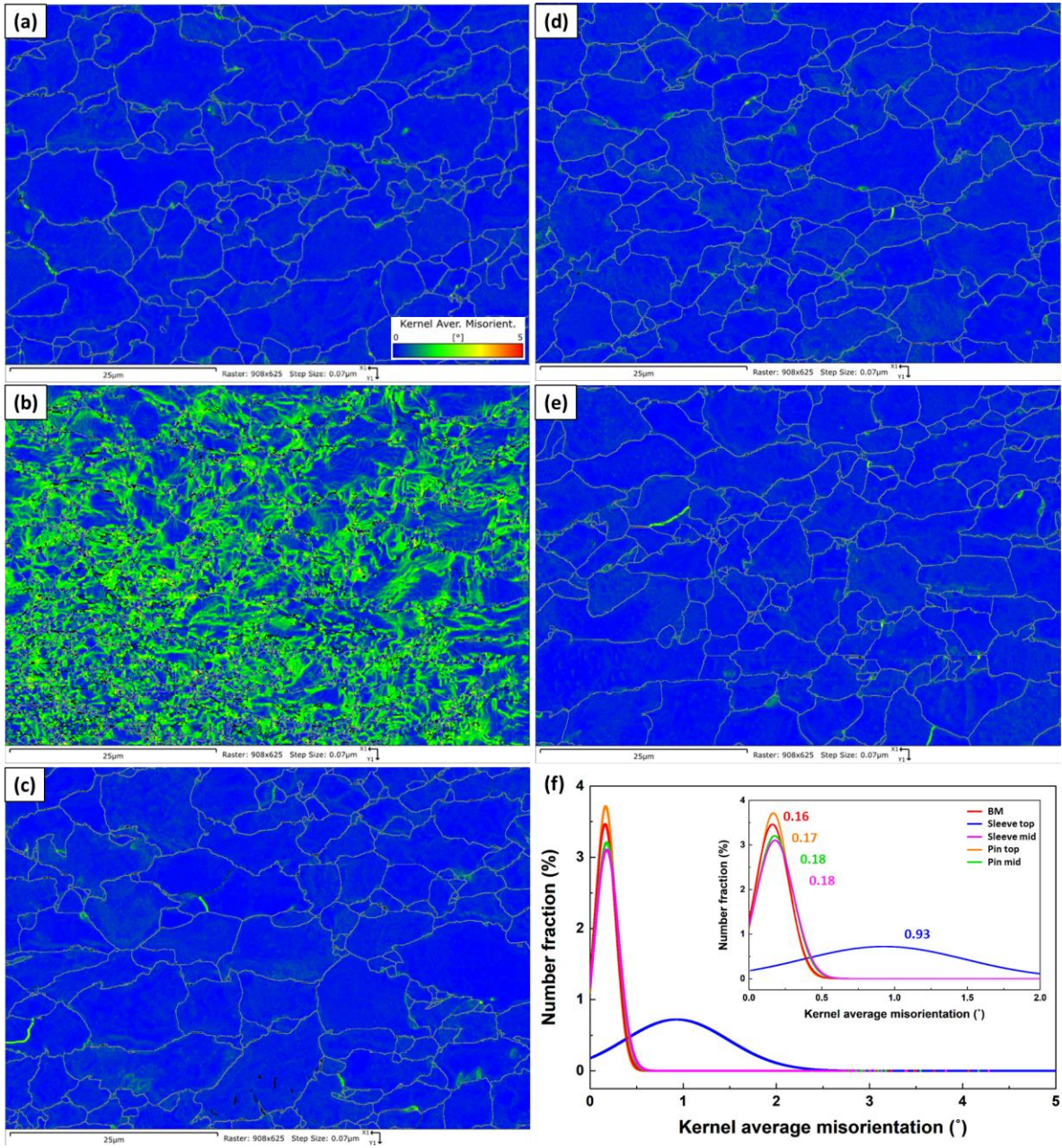


그림 4-14 삽입 깊이 0.9 mm 조건에서의 SPRC440 강판 영역별 EBSD KAM map 결과: (a) 모재, (b) 슬리브 상부, (c) 슬리브 중부, (d) 핀 상부, (e) 핀 중부, (f) 영역별 KAM 분포

소성유동패턴과 같은 경우 OM 및 SEM-EDS 장비를 통해 분석을 진행했으며, 그림 4-15, 4-16은 OM, SEM을 통한 슬리브 영역에서의 소성유동패턴 분석결과를 나타낸다. OM 및 SEM-EDS 장비를 통해 관측한 결과, 소성유동패턴은 2차상이 집중되어 생긴 것으로 판단되었다. 이처럼, 소성유동패턴의 경우 핀, 슬리브의 상/하 운동 및 수축력으로 인해 2차상이 미세해지고 특정영역에서 분율의 증가로 인한 결과로 판단된다. 즉, 소성유동패턴영역의 2차상의 분율은 전체에 약 19%를 차지했으며, 비소성유동패턴영역의 경우 전체에 약 9%를 차지했다. 이 결과를 통해 소성유동패턴영역의 경우 비소성유동패턴의 영역보다 2차상의 분율이 약 2배정도 많음을 확인할 수 있었다.

또한, 소성유동패턴의 경우 에칭 전에는 분명하게 보이지 않고, 에칭 후에만 관찰되는 것이 특징인데, 이는 에칭 용액으로 인해 2차상 및 산화물들이 빠져나가게 됨으로써 뚜렷하게 보이는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 소성유동패턴영역에서도 하얀색 밴드 층과 검은색 밴드 층으로 구분되어 관찰되는데 이는 Refill-FSSW 접합용 공구 표면의 나사산에 의한 결과로 추정된다. 또한, 소성유동패턴영역의 하얀색 밴드 층의 경우 슬리브의 삽입 깊이에 의해 결정된다고 알려져 있다. 이처럼, 이러한 결과는 기존의 선행 연구에서도 소성유동패턴은 특정영역에서 2차상 및 다른 합금원소들의 미세화 및 분율 상승으로 인한 결과라고 밝혀져 있다[13, 25, 42].

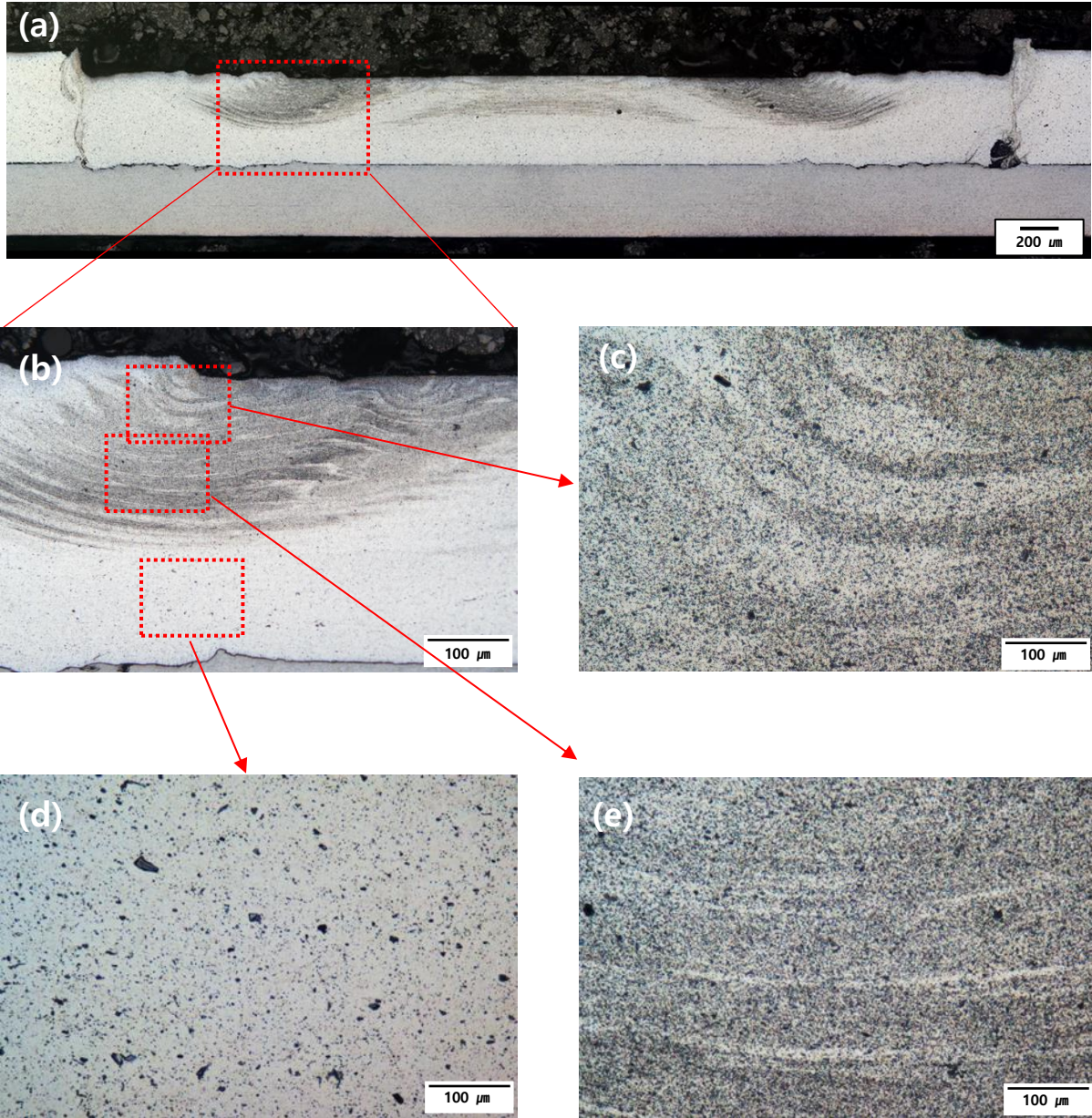


그림 4-15 슬리브 영역 소성유동패턴 OM 분석 결과: (a) 접합부 단면, (b) 소성유동패턴 저배율, (c),(e) 소성유동패턴 고배율, (d) 소성유동패턴 이외 영역

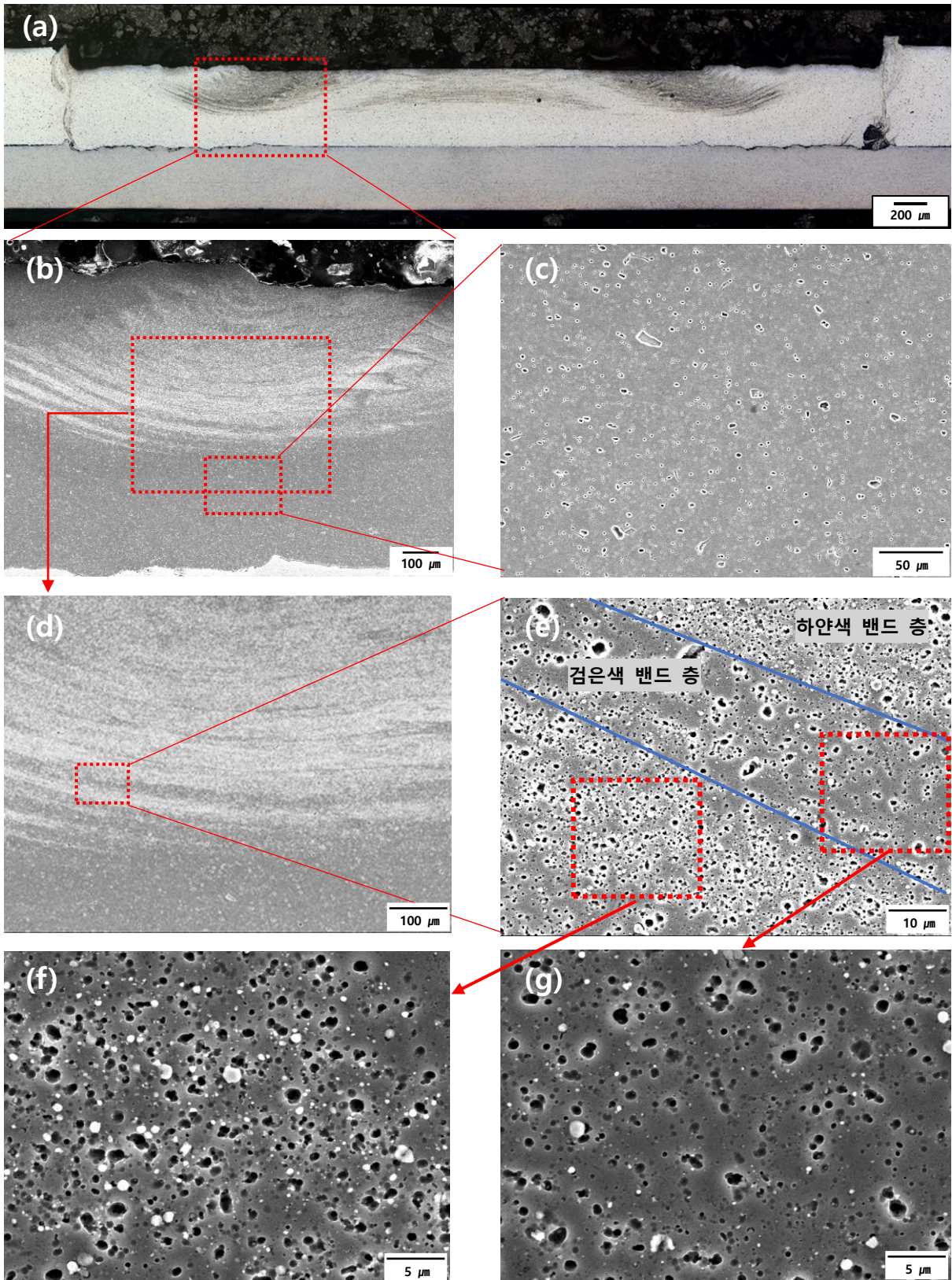


그림 4-16 슬리브영향부 소성유동패턴 SEM 이미지: (a) 접합부 단면, (b) 소성유동패턴 저배율, (c) 소성유동패턴 이외 영역 저배율, (d),(e) 소성유동패턴 고배율, (f) (e)의 하얀영역 고배율, (g) (e)의 검은영역 고배율

그림 4-17는 삽입 깊이에 따라 슬리브 영역에서 가운데 부분의 계면 거칠기 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 접합용 공구의 삽입 깊이에 따라 계면부를 관찰했을 때, 삽입 깊이가 0.7, 0.8 mm의 경우 매끄러운 계면부 표면을 보이는 반면, 삽입 깊이가 0.9 mm의 경우 거친 계면부 표면을 보임을 확인할 수 있었다. 이처럼, 거친 계면부 표면을 가질 경우 Mechanical Interlocking 효과에 의해 기계적 특성을 향상시킨다고 알려져 있다[43, 44].

이를 좀더 명확히 하기 위해 그림 4-18와 같이, 나사산 힘 분포 모델을 활용해 본 연구의 계면 거칠기에 따른 힘 분포 변화를 나타내 보았다. 나사산 힘 분포 모델에서 알려진 식, $S = Q \sin\alpha + P \cos\alpha$ (S: 계면에 가해지는 하중, Q: 수평하중, P: 수직하중, α : 거칠기 각)[45]을 토대로 생각해보았으며, 본론에 들어가기 전에 가정 두가지를 설정했다. 첫째, 계면 거칠기에 따라 계면으로 파괴가 일어나기 위한 하중인 파괴 하중은 동일하다고 가정하며, 둘째 인장전단시험의 하중인 Load 값은 동일하다고 가정했다. 시험 Load 값이 동일하기 때문에 Q와 P 값은 동일하게 되고, 계면 거칠기가 증가할수록 거칠기 각이 감소해 계면에 가해지는 하중인 $Q \sin\alpha$ 값이 감소하게 된다.

따라서, 계면 거칠기가 클 경우의 $Q \sin\alpha$ 값이 거칠기가 작을 때의 $Q \sin\alpha$ 값과 같아지기 위해서는 인장하중시험의 Load를 증가시켜야 한다. 따라서, 계면 거칠기가 클수록 더 큰 하중이 요구됨을 파악했다.

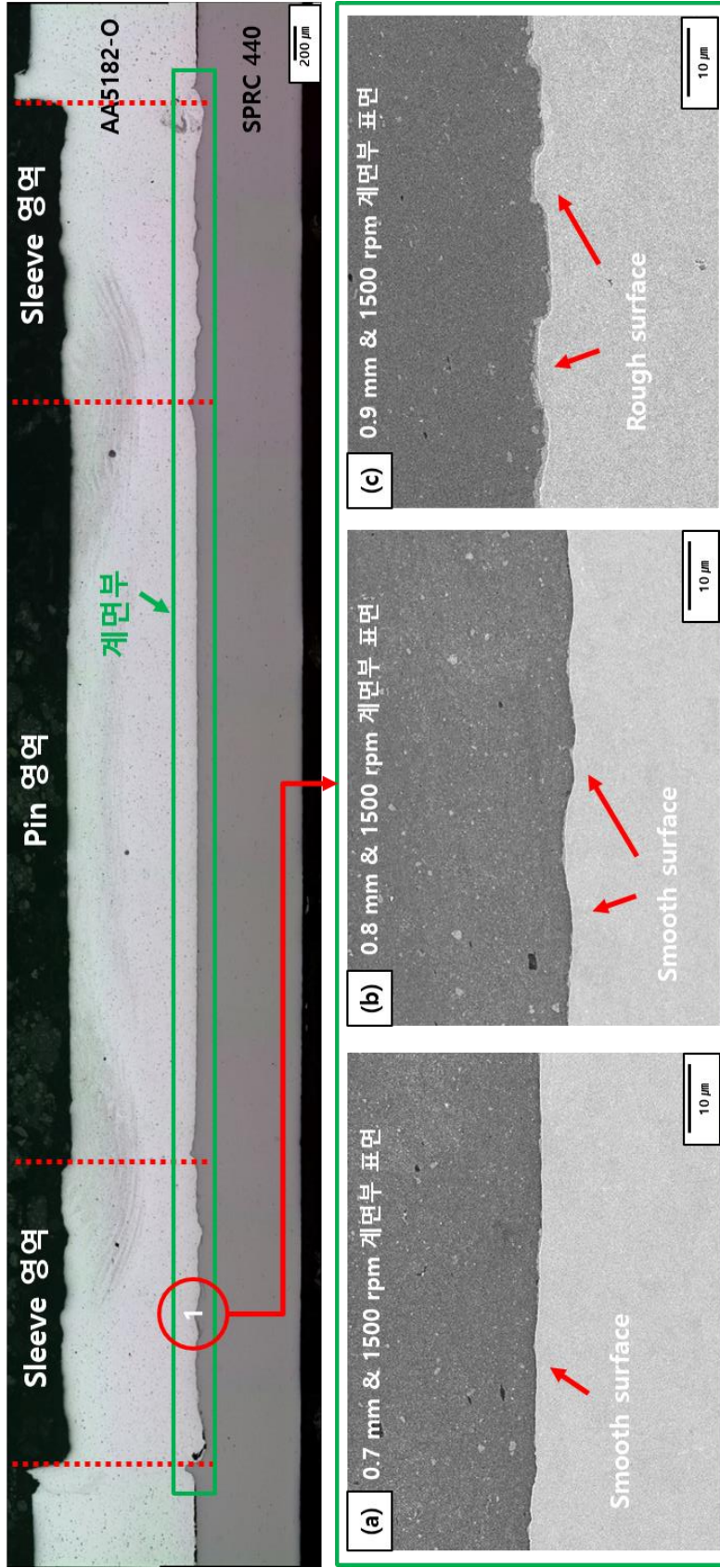


그림 4-17 삽입 깊이에 따른 계면 거칠기 SEM 이미지: a) 0.7 mm, (b) 0.8 mm, (c) 0.9 mm

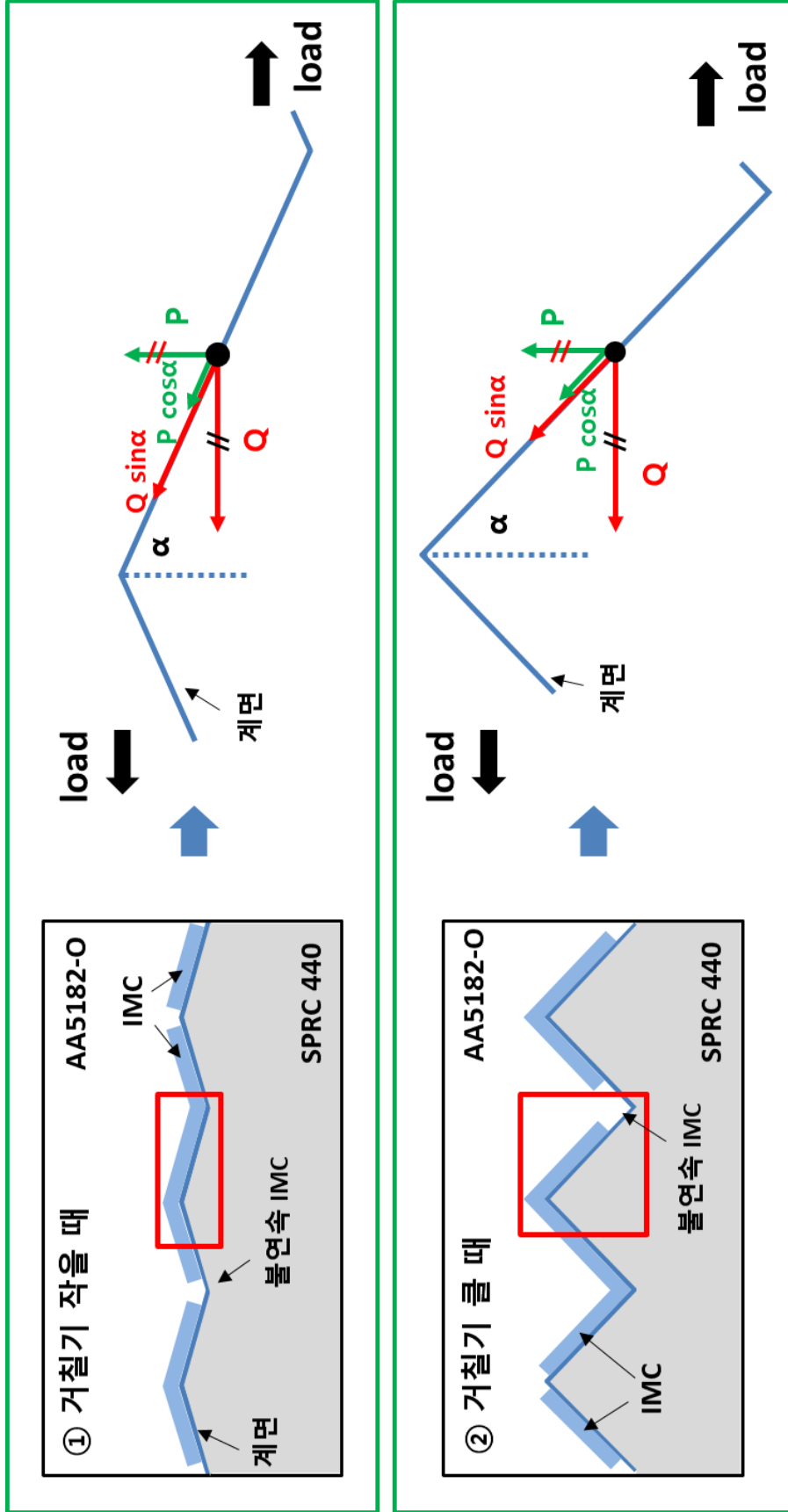


그림 4-18 계면 거칠기 변화에 따른 힘 분포 변화

그림 4-19는 접합용 공구의 삽입 깊이에 따른 계면 거칠기 정량화 결과이며, 삽입 깊이가 증가함에 따라서 계면 거칠기가 1.32 μm , 1.48 μm , 2.45 μm 로 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 계면 거칠기의 영향인자가 교반 세기라는 선행연구 및 $Q \propto T, \omega, \Delta t$ (Q : 공정에서 발생하는 입열량, T : 공구로 인해 형성되는 토크, ω : 공구 의 각속도, Δt : 공정 시간), $T \propto D, h, N$ (D : 공구 직경, h : 공구가 삽입 되는 높이, N : 회전속도), $P \propto N, T$ (P 는 기계적 교반 세기, N 은 회전 속도, T 는 공구로 인해 형성되는 토크) 식들을 참고했을 때[41, 46-48], 삽입 깊이가 증가함에 따라 토크 T 가 증가해 교반세기 P 가 증가하는 결과로 인해 계면 거칠기가 증가한다고 추정된다.

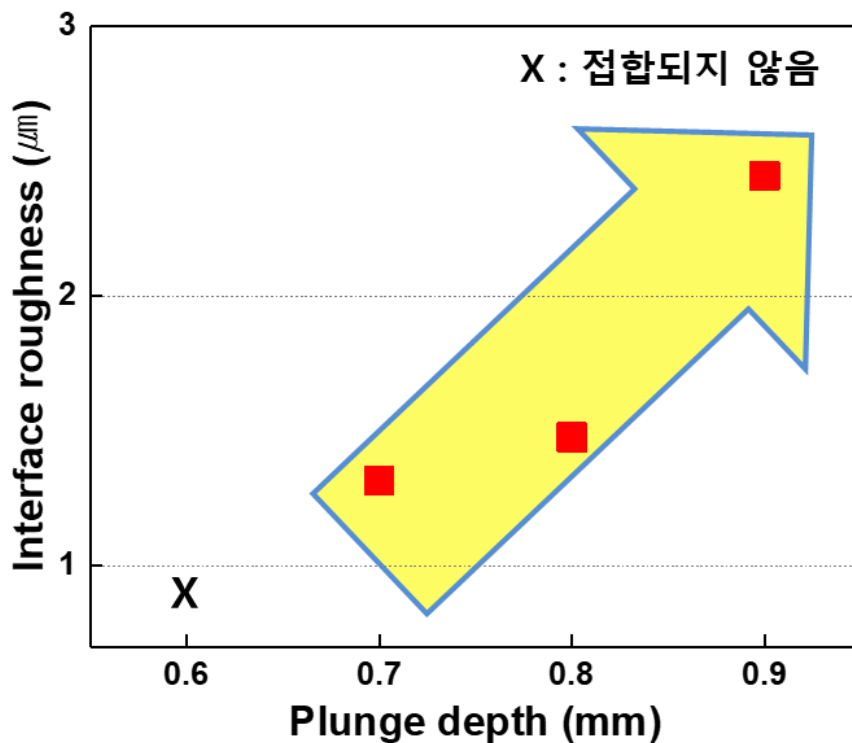


그림 4-19 삽입 깊이에 따른 계면 거칠기 정량화 결과

다음은 2차상의 크기 및 종류에 관한 설명이다. 그림 4-20은 접합용 공구의 삽입 깊이 0.9 mm 조건에서 SEM 장비를 통해 슬리브, 핀 및 모재 영역별 서로 다른 위치의 9곳을 관찰 후 대표적인 2차상 SEM 이미지를 나타낸다. 영역별 2차상 크기의 경우 슬리브 영역의 경우 1.69 μm , 핀 영역의 경우 1.92 μm , 모재의 경우 2.51 μm 로 슬리브 영역에서 2차상의 크기가 가장 작았다. 이는 $v = \frac{D \times \pi \times n}{60 \times 1000}$ (v : 원주속도, D : 공구직경, n : 회전속도)식에 의해 슬리브 영역에서 원주속도가 더 빨라 소성변형량이 높기 때문에 슬리브 영역의 2차상의 크기가 더 작아지게 됨을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 삽입 깊이 0.7, 0.8 mm에서도 비슷한 결과를 보였다. 2차상 크기 분율의 경우 그림 4-21에서처럼 삽입 깊이에 따라 슬리브 및 핀 영역 모두 미세한 2차상이 많은 분율을 차지하고 있었고, 결과 값 역시 유사했다. 또한, 그림 4-20 (d)와 같이 삽입 깊이에 따른 2차상 크기가 슬리브 및 핀 영역 모두 다소 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 삽입 깊이에 따라 변형률 및 축힘의 증가로 인한 결과로 추정된다[15].

2차상의 종류를 파악하기 위해 SEM-EDS Point 분석을 진행했다. 분석 결과 파란색 동그라미의 경우 Mg_2Si , 빨간색 동그라미의 경우 $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$, 노란색 동그라미의 경우 Mg_2Al_3 임을 확인했다[49]. 그림 4-20에서처럼 삽입 깊이에 따른 2차상의 종류는 모재, 슬리브 및 핀 영역 모두 동일하였으며, 상/하/좌/우 2차상의 종류 역시 동일함을 확인할 수 있었다. 이는 AA5182가 비열처리형 알루미늄합금이기 때문에 열 또는 기계적 교반에 의해 새로운 2차상이 생성되거나 사라지지 않아, 삽입 깊이 및 접합부 위치에 따라 2차상의 종류가 변하지 않는 것으로 판단된다.

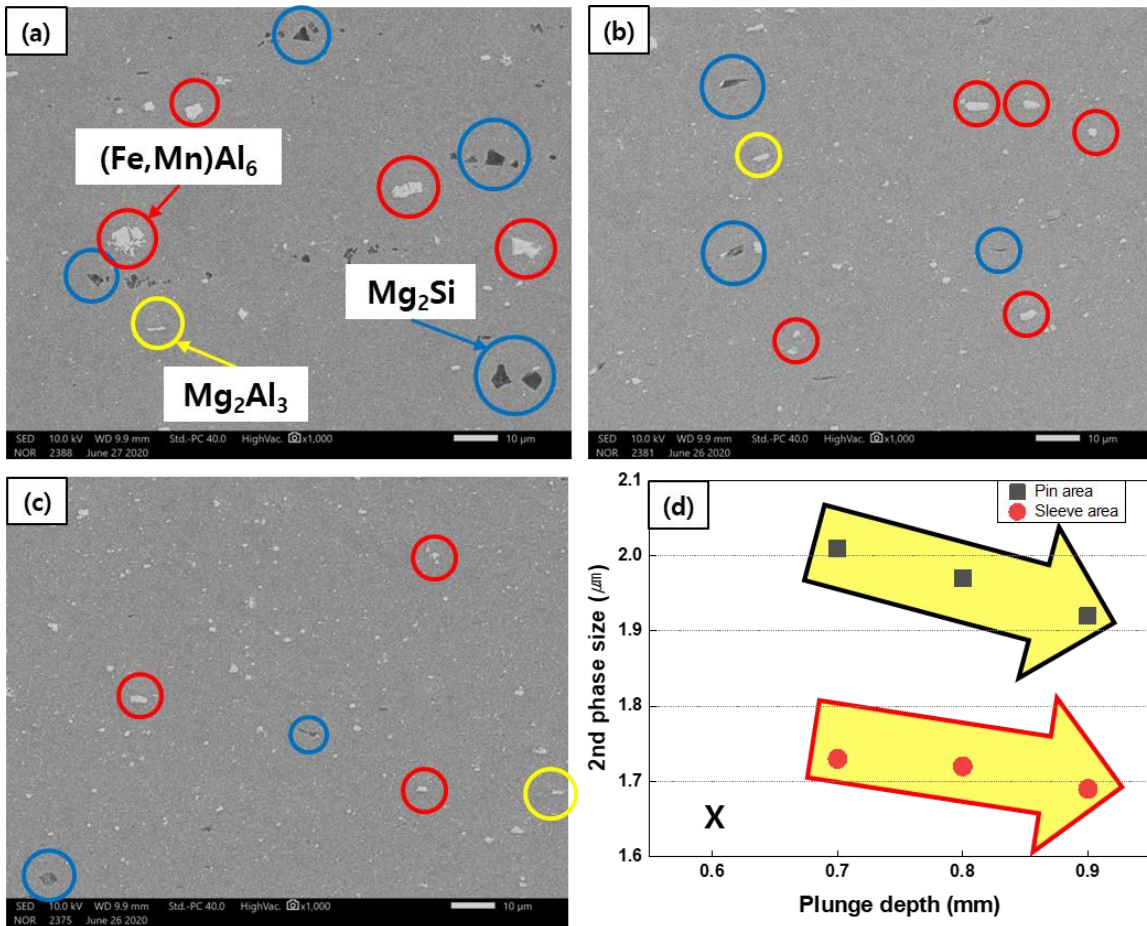


그림 4-20 삽입 깊이 0.9 mm에서의 대표적인 2차상 SEM 이미지 및 삽입 깊이에 따른 2차상 크기: (a) 모재, (b) 핀 영역, (c) 슬리브 영역, (d) 영역별 2차상 크기

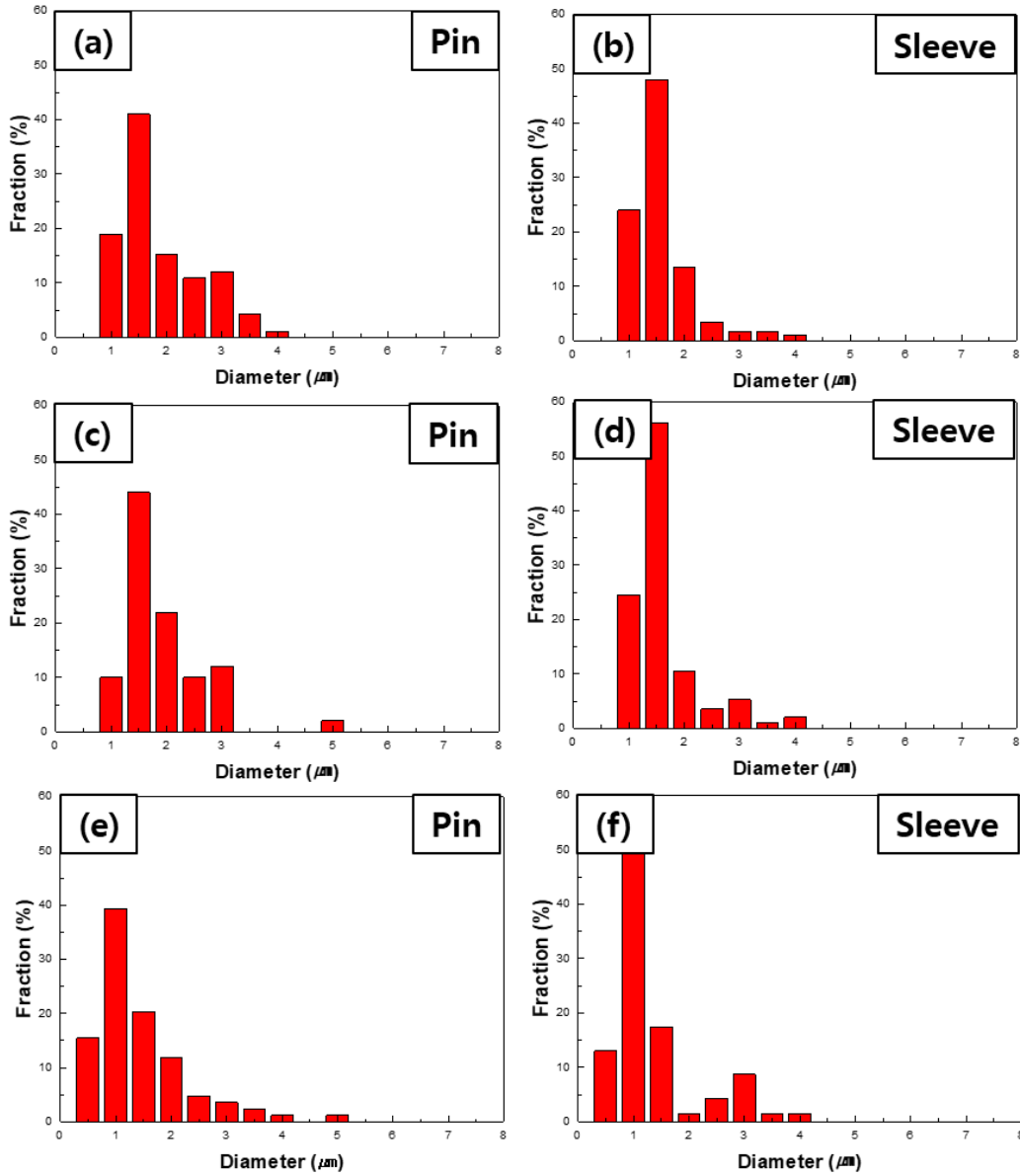


그림 4-21 삽입 깊이에 따른 2차상 크기 분포: (a) 0.7 mm 핀 영역, (b) 0.7 mm 슬리브 영역, (c) 0.8 mm 핀 영역, (d) 0.8 mm 슬리브 영역, (e) 0.9 mm 핀 영역, (f) 0.9 mm 슬리브 영역

4.2.2.2 계면부 영역

그림 4-22는 접합용 공구의 삽입 깊이 0.9 mm 시편에서 각 영역별 대표사진을 OM, SEM 장비를 통해 접합부 계면에서의 금속간화합물을 분석한 결과이다. OM 분석을 통해 영역별 금속간화합물 층이 균일한 두께를 가지고 있음을 파악할 수 있었으며, 점 접합으로 인한 대칭적인 구조로 슬리브 및 핀 영역의 왼쪽 영역과 오른쪽 영역은 유사한 결과를 보였다. 이는 삽입 깊이가 변하더라도 유사하게 관찰되었다.

그림 4-22의 (b),(c)는 슬리브 영역의 경계부 근처 영역, 그림 4-22의 (d),(e)은 슬리브 영역의 중앙부 근처 영역, 그림 4-22의 (f),(g)는 핀 영역의 경계부 근처 영역, 그림 4-22의 (h),(i)는 핀, 슬리브 영향 중앙부 근처 영역의 계면부 미세조직을 의미한다. 각각의 SEM 이미지의 경우, OM 이미지에서 고배율 확대한 사진을 의미하며, 그림에서처럼 슬리브 및 핀 영역 계면부 영역 모두에서 금속간화합물이 관찰됨을 확인할 수 있었다. 특히, 그림 4-22의 (h),(i)는 슬리브 및 핀 영역 계면의 중앙부 근처 영역에서 금속간화합물이 끊어진 영역, 즉 금속간화합물이 형성되지 않은 영역인 불연속 IMC 영역이 관찰되었으며, 이는 다른 삽입 깊이 변수에서도 동일하게 관찰됨을 확인했다. 이처럼, 불연속 IMC가 형성된 이유는 Al과 Fe 원자가 상호확산하여 계면에서 금속간화합물을 형성하기에 충분한 시간과 온도가 주어지지 않기 때문이라고 알려져있다. 또한, 불연속 IMC의 경우 기계적 특성을 향상시키는 역할을 한다는 선행 연구도 있고, 악영향을 준다는 선행 연구 결과도 있는 것처럼 아직 의견이 분분한 실정이다[19, 50, 51].

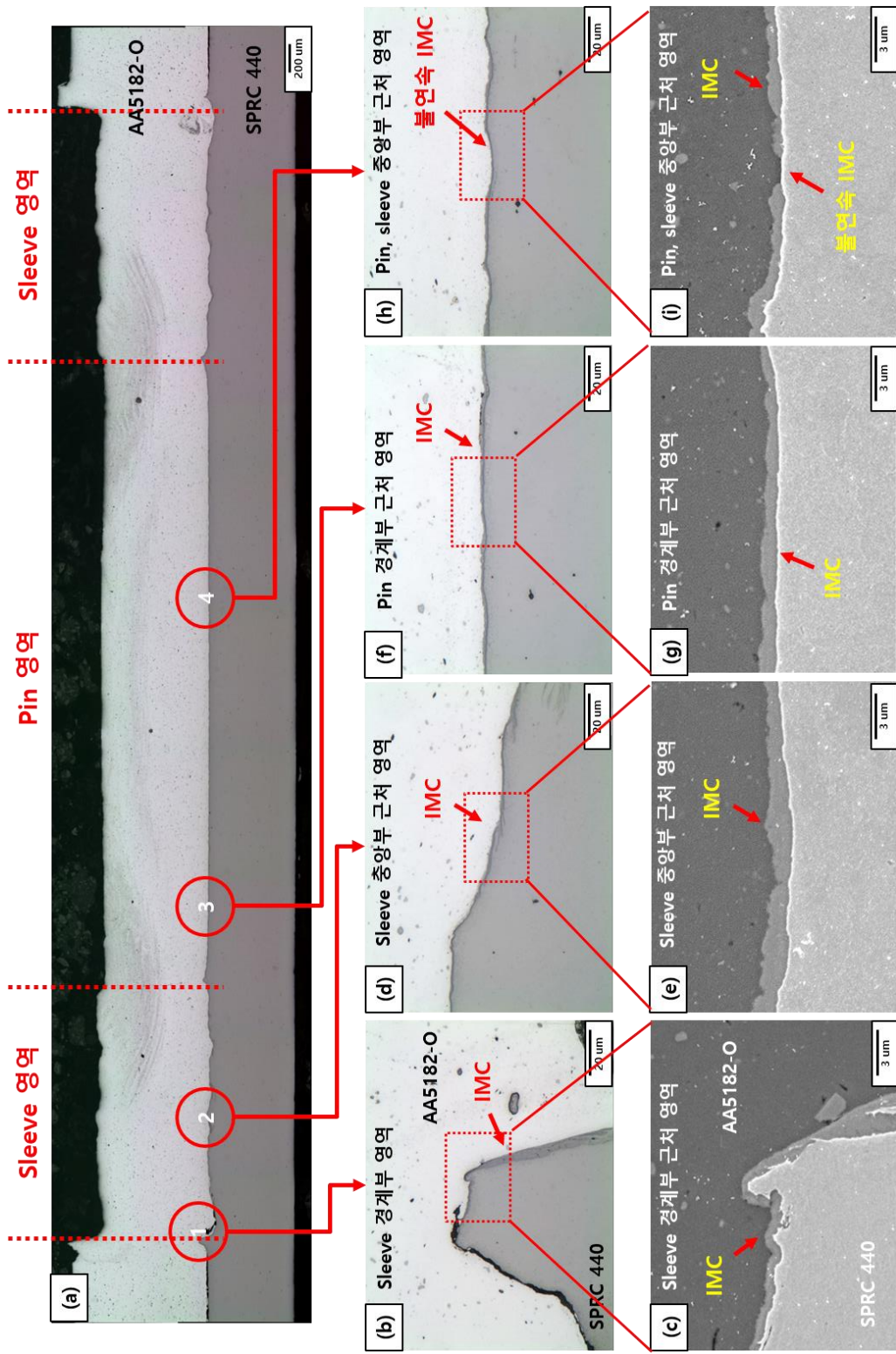


그림 4-22 접합부 계면의 금속간화합물 OM, SEM 분석 결과: (a) 접합부 단면 (b),(c) 슬리브 경계부 영역 OM, SEM (d),(e) 슬리브 중앙부 영역 OM, SEM (f),(g) 핀 경계부 영역 OM, SEM, (h),(i) 핀 중앙부 영역 OM, SEM

그림 4-23는 접합용 공구의 삽입 깊이에 따른 접합부 계면에서의 금속간화합물 길이와 두께 및 불연속 IMC의 길이를 정량적으로 측정된 결과 값이다. 삽입 깊이에 따른 금속간화합물의 길이는 각각 8.13 mm, 8.49 mm, 9.01 mm, 금속간화합물의 두께는 각각 1.19 μm , 1.36 μm , 1.51 μm , 불연속 IMC의 길이는 0.23 mm, 0.06 mm, 0.04 mm라는 결과를 얻었다. 이처럼, 삽입 깊이가 증가함에 따라 금속간화합물의 길이와 두께는 증가하는 경향을 보였고, 불연속 IMC의 길이는 감소하는 경향을 보였다.

삽입 깊이가 증가함에 따라 금속간화합물의 길이와 두께가 증가하고, 불연속 IMC의 길이가 감소하는 이유는 삽입 깊이가 증가함에 따라, 입열량이 증가하기 때문이라고 추정된다. 즉, 입열량이 증가함에 따라 Al, Fe 원자의 상호확산이 증가하여 계면에 금속간화합물의 형성이 촉진되기 때문이다. 선행 연구에서 알려진 바에 의하면 금속간화합물의 형성에서 가장 큰 영향인자는 입열량이라고 알려져있으며, 삽입 깊이가 증가함에 따라 입열량이 증가한다고 알려져있다[15, 16, 50]. 또한, 알루미늄합금과 철강소재 간의 이종점 접합에서 금속간화합물의 길이가 길고, 금속간화합물의 두께가 1.0 ~ 2.0 μm 를 가지거나 8 μm 이하의 금속간화합물 두께를 가지는 시편의 경우, 기계적 물성이 향상된다고 알려져있다. 앞서 기술된 바와 같이 불연속 IMC의 길이의 경우 아직까지 의견이 분분한 실정이다[11, 15, 19, 52].

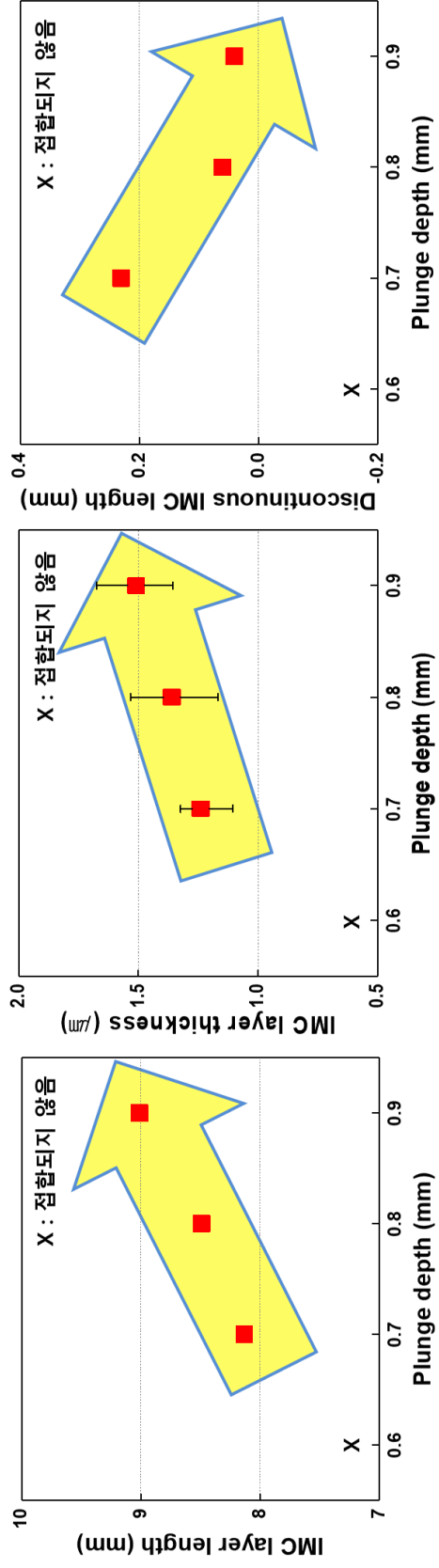


그림 4-23 삽입 깊이에 따른 접합부 계면 정량적 측정 결과: (a) 금속간화합물 길이, (b) 금속간화합물 두께, (c) 불연속 IMC 길이

그림 4-24, 4-25는 대표적인 금속간화합물 층의 SEM-EDS Mapping, Point, Line 분석 결과이다. 그림 4-24 (b),(c),(e),(d)의 SEM-EDS Mapping 분석 결과를 보면, 빨간색 네모와 같이 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 SPRC440 강판의 계면에서 Al 원자와 Fe 원자가 공존하고 있음을 확인할 수 있으며, 소량의 Mn도 관찰되었다.

그림 4-25 (b)의 SEM-EDS Point 분석 결과, 평균적으로 알루미늄 원자가 약 74.47 at.%, 철 원자가 23.61 at.%을 차지하는 결과 값을 보였다. 또한, 그림 4-25 (c)의 SEM-EDS Line 분석 결과를 보면 AA5182-O 알루미늄합금 판재에서 SPRC440 강판으로 갈수록 초록색 선인 Al 원자의 Intensity는 점점 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 분홍색 선인 Fe 원자의 Intensity는 점점 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 Al 원자와 Fe 원자가 계면부 영역에서 서로 공존하고 있음을 확인할 수 있었으며, SEM-EDS Mapping, Point 및 Line의 결과를 종합적으로 분석해봤을 때 금속간화합물의 종류는 Fe_4Al_{13} 으로 예상된다. 이는 삽입 깊이가 변하더라도 유사한 SEM-EDS 결과 값을 보였으며, 기존의 선행 연구에서 알려진 금속간화합물의 종류와 동일했다[17, 53, 54]

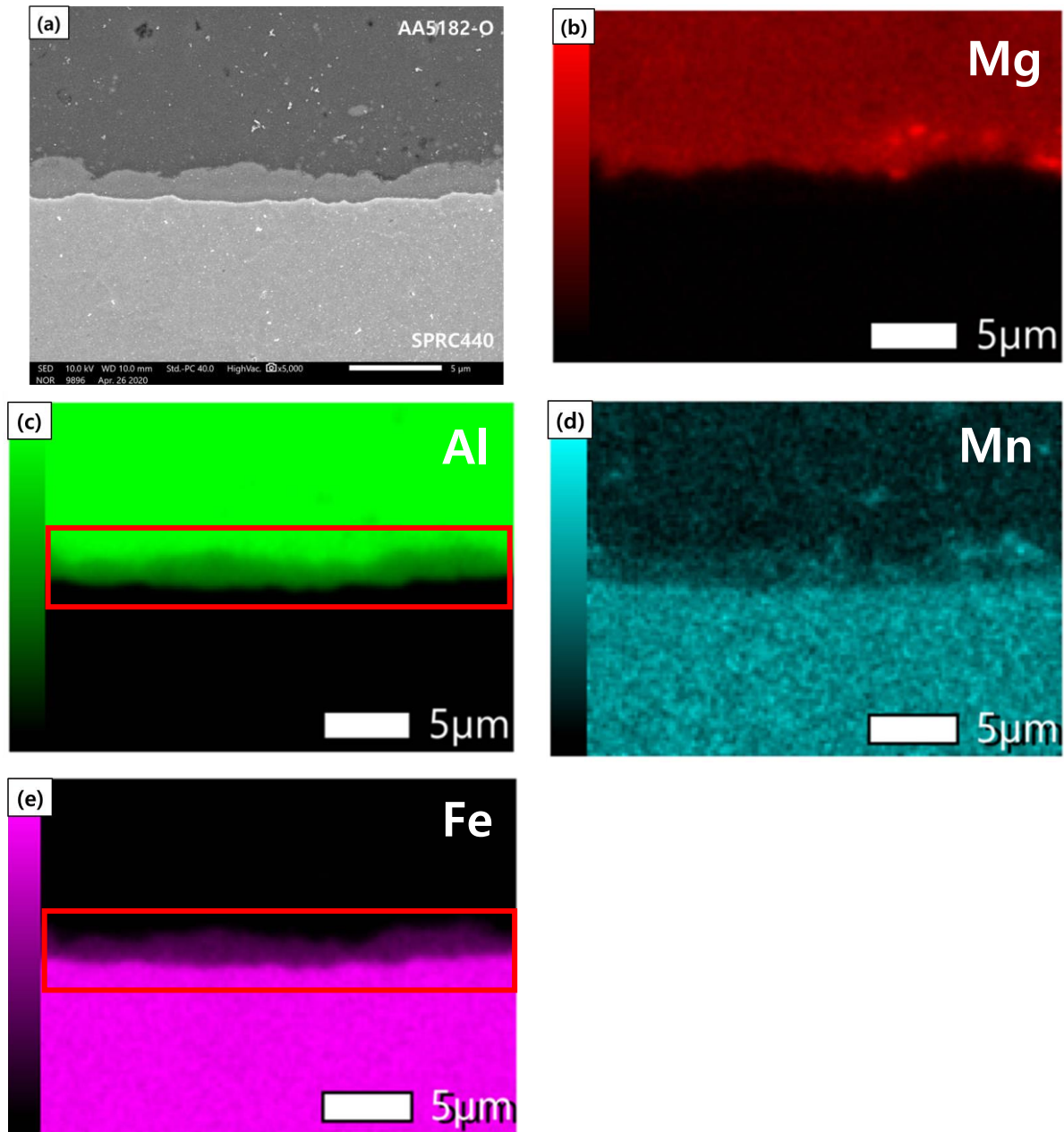


그림 4-24 SEM-EDS Mapping 결과: (a) SEM 이미지, (b) Mg, (c) Al, (d) Mn, (e) Fe

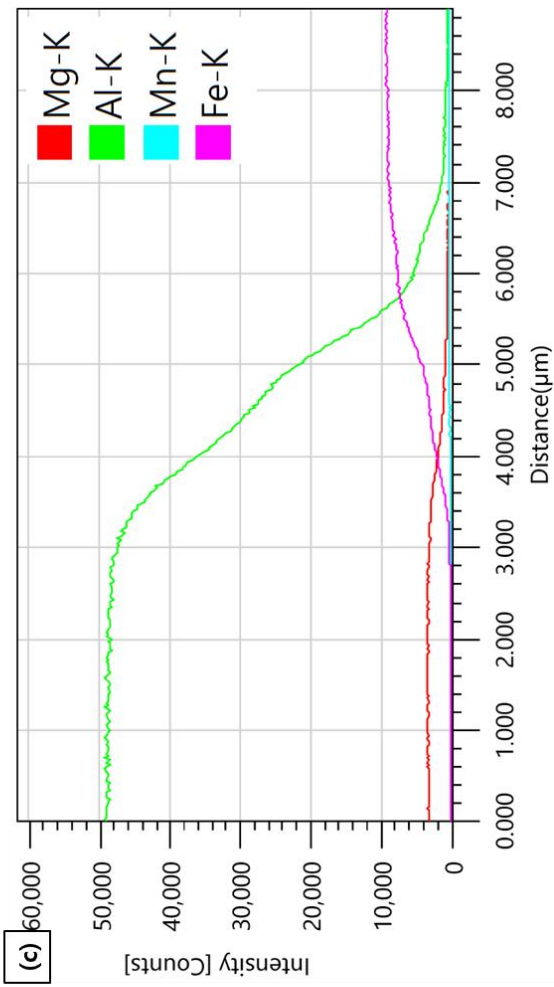
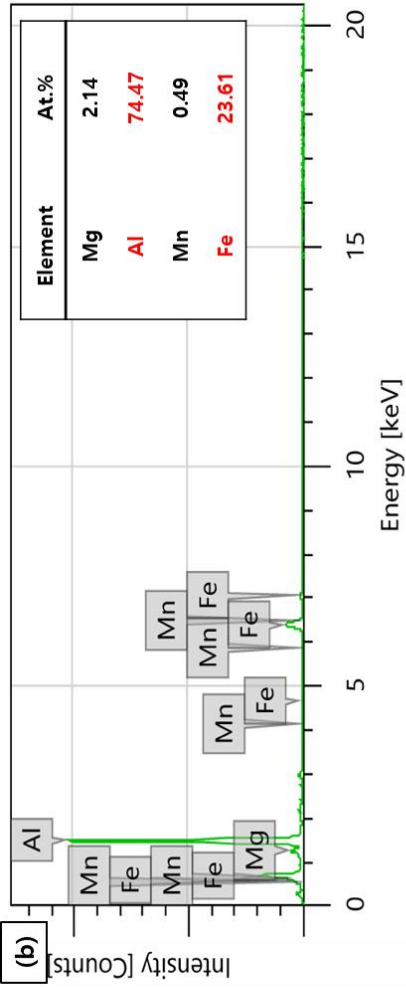
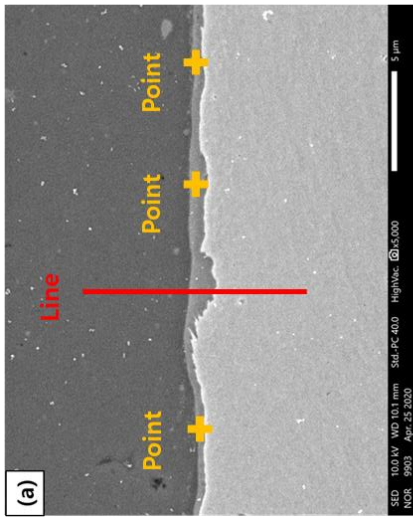


그림 4-25 IMC SEM-EDS 결과: (a) SEM 이미지, (b) Point 분석 결과, (c) Line 분석 결과

4.2.3. 기계적 특성

4.2.3.1 경도 특성

그림 4-26은 상부 판재인 알루미늄합금 판재에서 접합용 공구의 삽입 깊이 변화에 따른 Line 경도 분포 및 접합부 영역별 경도를 나타낸 것이다. 그림과 같이, 모든 접합변수에서 모재의 경도 값보다 접합부에서의 경도 값이 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 상부 판재인 AA5182-O 알루미늄합금 판재의 경우, 비열처리형 알루미늄합금에 속하기 때문에 결정립의 크기와 2차상의 크기 및 전위밀도가 경도에 주요한 영향 인자이며, 모재의 결정립보다 접합부에서의 2차상 크기가 작고, 결정립이 미세하기 때문에 Hall-Petch 식에 따라 다음과 같은 결과가 도출되었다고 판단된다. 또한, 슬리브 영역의 경도 값이 핀 영역의 경도 값보다 조금 높게 나타나는 결과를 얻었는데, 이는 앞서 기술된 바와 같이 슬리브 영역의 경우, 핀 영역에 비해 결정립크기 및 2차상 크기가 작아 더 높은 경도 값을 가진다고 판단된다.

접합조건 상부, 중부 및 하부 영역별 경도를 각각 비교해보면, 모든 접합변수에서 하부 영역으로 갈수록 경도 값이 감소하는 경향을 보였다. 이는 삽입 깊이 0.9 mm에서의 상부, 중부 및 하부 영역의 결정립 크기를 토대로 생각해봤을 때, 모든 접합변수에서 하부 영역으로 갈수록 앞서 기술된 바와 같이 소성변형량이 감소해 결정립 크기가 증가했기 때문에 경도 값이 감소했다고 추정된다. 또한, 삽입 깊이에 따른 상부, 중부 및 하부 영역의 경도 값을 각각 비교해보면 삽입 깊이가 증가함에 따라, 영역별 경도 값이 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 기술된 바와 같이, 삽입 깊이가 증가함에 따라 변형량의 증가로 인한 소성변형량 증가로 결정립의 미세화 및 2차상의 크기 감소로 인한 결과로 판단된다.

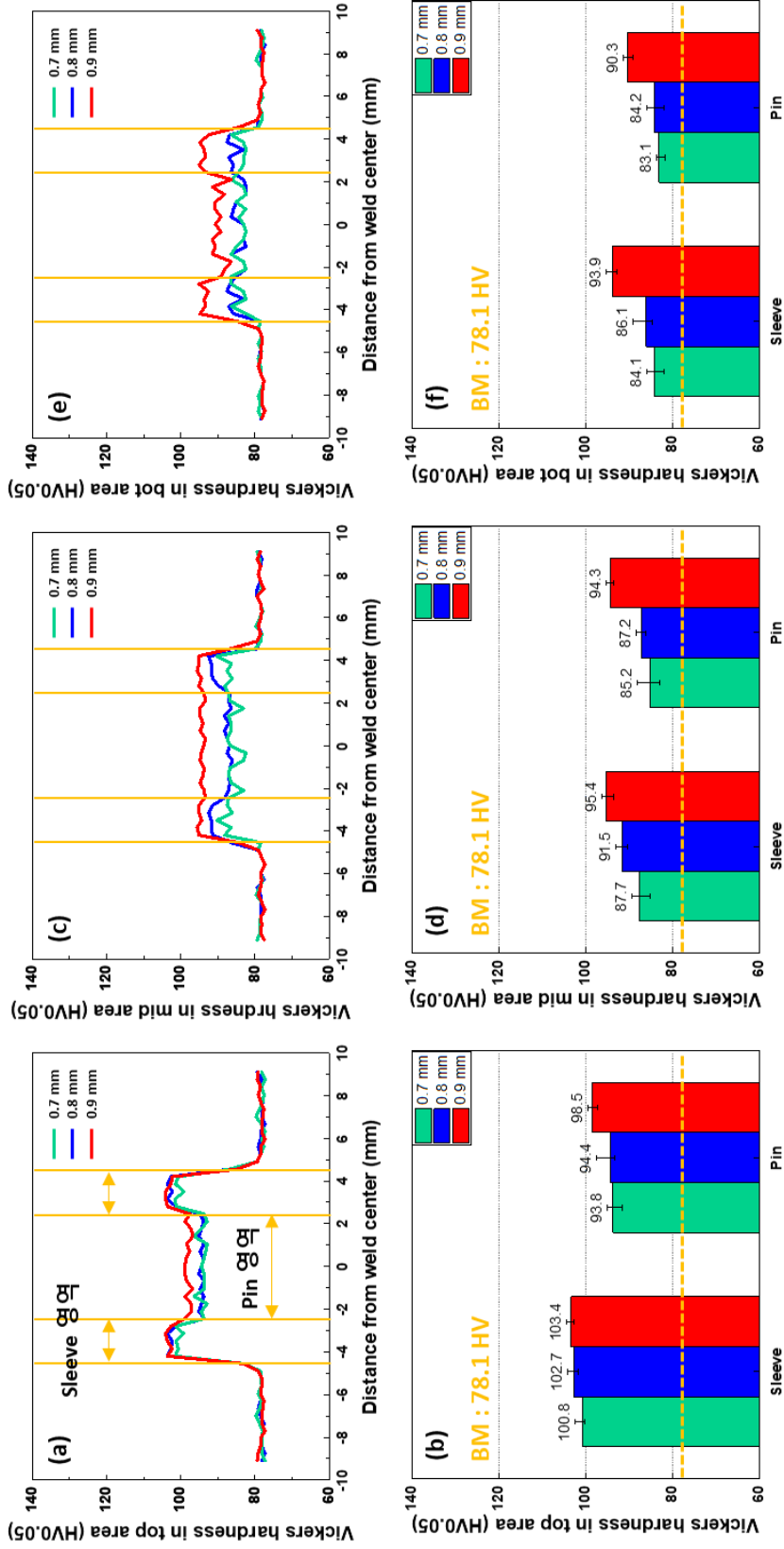


그림 4-26 상판 알루미늄합금 판재에서의 삽입 깊이에 따른 Line 경도 분포 및 영역별 경도: (a), (b) 상부 영역, (c), (d) 중부 영역, (e), (f) 하부 영역

그림 4-27은 하부 판재인 SPRC440 강판에서 접합용 공구의 삽입 깊이 변화에 따른 Line 경도 분포 및 접합부 영역별 경도를 나타낸 것이다. 그림과 같이, 삽입 깊이 0.9 mm에서의 슬리브 상부 및 중부를 제외하고는 모든 영역에서 모재의 경도 값과 유사하게 나타났다.

이처럼, 슬리브 상부 영역의 경도 값이 높게 나타난 원인은 앞서 기술한 바와 같이 슬리브 상부 영역의 경우, 다른 영역에 비해 결정립이 작고 높은 전위밀도를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 슬리브 상부 영역의 경도가 높게 나타난 이유는 결정립 미세화 및 높은 전위밀도의 영향으로 인해 높은 경도 값을 가진다고 판단된다. 슬리브 중부 영역의 경우, 결정립 크기 및 전위밀도가 다른 영역과 유사한 결과 값을 보이는데, 경도 값은 다른 영역에 비해 보다 높게 나타남을 확인할 수 있다. 이처럼 슬리브 중부 영역의 경도 값이 높은 원인은 잔류응력에 의한 영향으로 추정된다. 이외의 영역의 경우 모재의 경도 값과 유사함을 확인할 수 있는데, 이는 결정립 크기 및 전위밀도가 유사하기 때문으로 판단된다.

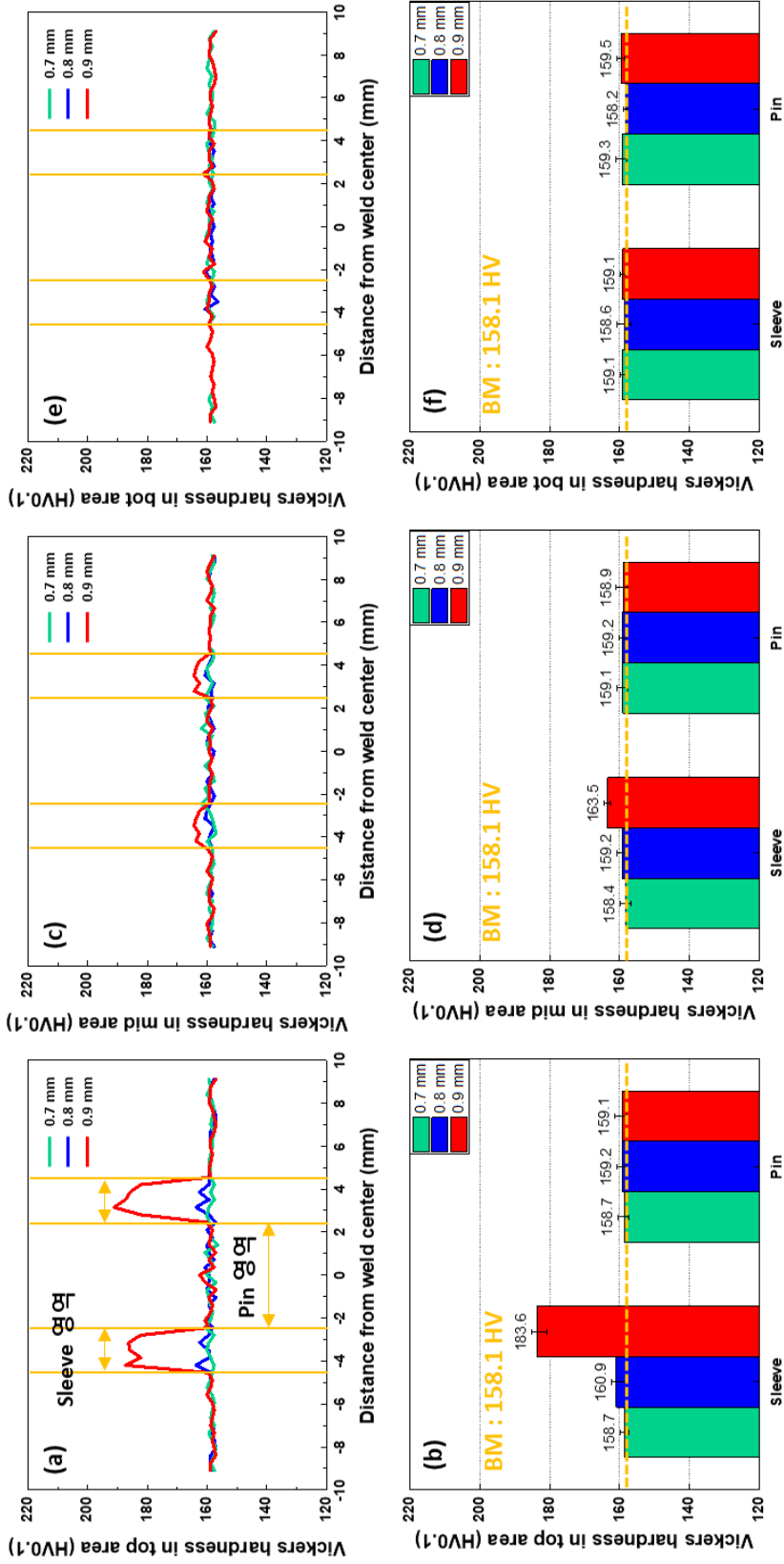


그림 4-27 하판 SPRC440 강판에서의 삽입 깊이에 따른 Line 경도 분포 및 영역별 경도: (a), (b) 상부 영역, (c), (d) 중부 영역, (e), (f) 하부 영역

4.2.3.2 상온인장전단 특성

그림 4-28는 접합용 공구의 삽입 깊이 변화에 따른 최대평균상온인장전단하중 값을 나타낸다. 공구의 삽입 깊이가 증가함에 따라 최대평균상온인장전단하중 값 2.94 kN, 3.46 kN, 3.95 kN으로 증가함을 확인할 수 있다. 최대평균상온인장전단하중 값은 삽입 깊이 0.9 mm에서 가장 높은 값을 보였으며, 삽입 깊이 0.6 mm의 경우 접합이 진행되지 않아 상온인장전단하중 값을 얻을 수 없었다.

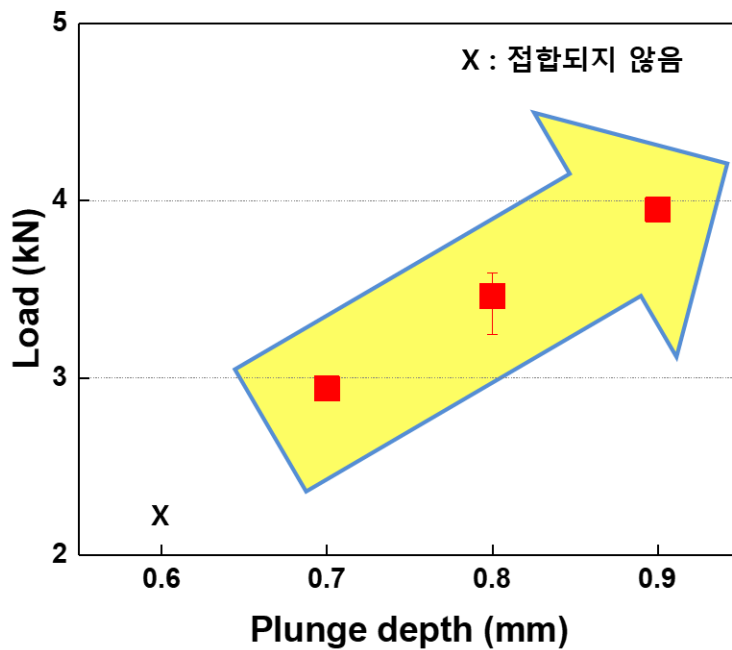


그림 4-28 삽입 깊이에 따른 최대평균상온인장전단하중

선행 연구에 따르면 일반적으로 기계적 특성인 상온인장전단하중 값에 영향을 미치는 요소는 ① 접합부의 미세조직, ② 기계적 결합 및 야금학적 결합, ③ 접합부의 균일성, ④ 금속간화합물의 두께 등에 많은 영향을 받는다고 알려져있다[11]. 따라서, 본 연구에서도 ① 금속간화합물 길이, ② 금속간화합물 두께, ③ 불연속 IMC 길이와 상온인장전단 특성과의 상관관계를 알아보았으며, 추가적으로 계면 거칠기와의 상관관계까지 파악해보았다.

결과적으로, 많은 선행연구에서 금속간화합물 길이와 두께가 하중에 가장 큰 영향인자로 알려져 있지만, 본 연구에서는 IMC 길이와 두께의 영향뿐만 아니라 계면 거칠기도 상온인장전단하중에 큰 영향인자로 판단된다. 금속간화합물 길이의 증가는 금속 결합영역을 증가시키기 때문에 금속간화합물 길이의 증가는 하중을 증가시키는 영향인자로 판단되며, 금속간화합물 두께의 경우 본 연구에서는 1~2 μm 의 두께를 가지는데 이는 선행 연구에 따르면 금속간화합물 두께가 1~2 μm 변화는 인장전단하중 변화에 미치는 영향이 작다고 알려져 있다[24, 55, 56]. 따라서, 본 연구에서도 금속간화합물 두께 변화가 상온인장전단하중 변화에 미치는 영향은 작다고 판단된다. 또한, 불연속 IMC 영역의 경우, 미접합부 영역으로 판단되기 때문에 상온인장전단하중에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되며, 마지막으로 계면 거칠기의 경우, 거칠기가 증가함에 따라서 앞서 기술된 바와 같이 계면 거칠기가 증가할 수록 Mechanical interlocking 효과에 의한 축력 또는 분력의 증가로 인해 더 높은 하중이 요구될 것으로 판단된다.

4.2.3.2.1 상온인장전단시험 후의 외관형상

접합용 공구의 삽입 깊이 변화에 따라 접합한 시편에 있어서, 상온인장전단시험 후의 외관형상을 관찰했다. 그림 4-29의 경우 삽입 깊이에 따른 상부 판재인 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 하부 판재인 SPRC440 강판의 정면 및 후면 외관형상을 나타낸다. 그림과 같이 삽입 깊이 0.6 mm의 경우 접합이 진행되지 않았기 때문에 상온인장전단시험을 진행할 수 없었으며, 그 외 삽입 깊이변수에 따른 외관형상을 관찰한 결과 전부 계면 파괴가 발생했음을 확인할 수 있었다. 또한, 외관형상 관찰 중 특이한 점은 삽입 깊이 0.9 mm에서 정면부 하판, 후면부 상판을 보면 슬리브 영역에 원형의 띠가 많이 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 기술된 바와 같이, 삽입 깊이 0.9 mm의 깊은 삽입 깊이의 경우 공구 주변영역까지 소성유동을 일으켜 다음과 같이 나타난다고 추정된다. 또한, 이러한 영향들이 계면 거칠기에도 영향을 주는 것으로 추정된다.

그림 4-30의 경우 삽입 깊이에 따른 상온인장전단시험 후 알루미늄합금 판재와 SPRC440 강판의 옆면 저배율 및 고배율을 나타낸다. 그림과 같이, 삽입 깊이 0.9 mm 시편의 외관형상을 보면 0.7 mm, 0.8 mm보다 상판 알루미늄합금 판재 변형이 심한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 삽입 깊이 0.9 mm의 시편의 경우 0.7 mm, 0.8 mm 보다 상온인장전단시험 중 상판 알루미늄합금 판재의 변형이 더욱 발생했음을 파악할 수 있다.

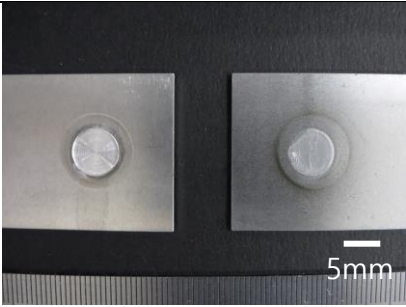
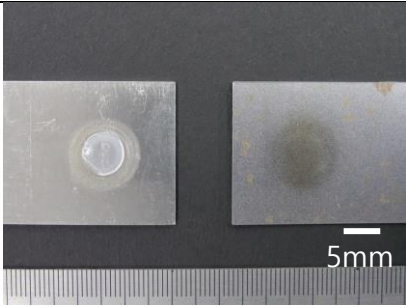
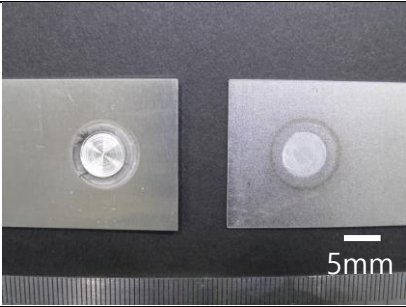
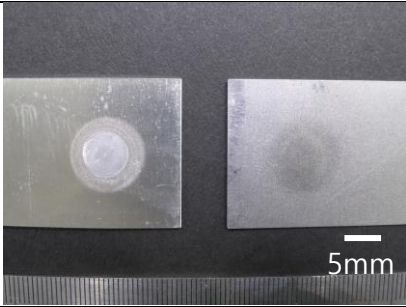
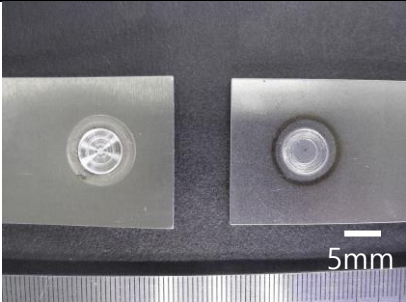
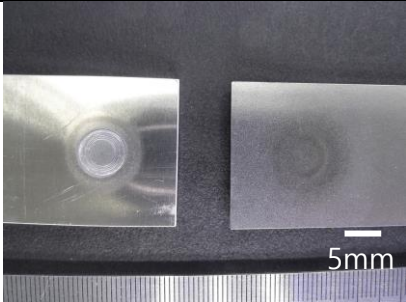
Tool plunge depth (mm)	Top surface	Bottom surface
0.6	접합 X	접합 X
0.7		
0.8		
0.9		

그림 4-29 상온인장전단시험 후 삽입 깊이에 따른 AA5182-O 알루미늄합금 판재 및 SPRC440 강판의 정면/후면 외관형상

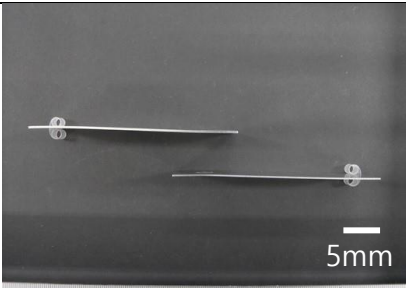

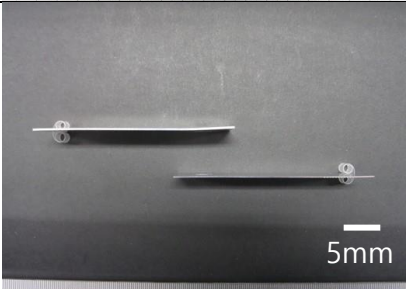

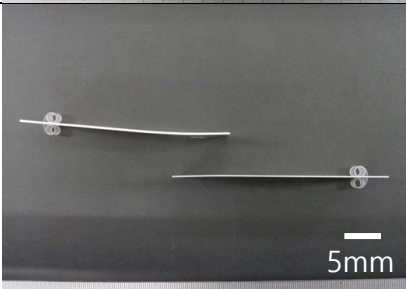
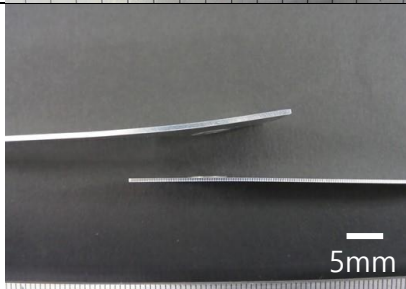
Tool plunge depth (mm)	Low magnification	High magnification
0.6	접합 X	접합 X
0.7		
0.8		
0.9		

그림 4-30 상온인장전단시험 후 삽입 깊이에 따른 AA5182-O 알루미늄합금 판재 및 SPRC440 강판의 옆면 저/고배율 외관형상

4.2.3.2.2 상온인장전단시험 후의 파면

그림 4-31은 응력 개시부를 나타낸다. 선행 연구에 따르면, 이종 소재 간 상온인장전단 시험을 진행할 경우, 강도가 낮은 영역과 상온인장전단시험으로 인해 형성되는 인장응력이 걸리는 영역을 동시에 만족하는 영역이 응력 개시부로 알려져 있다[57]. 그림 4-32은 상온인장전단시험 중에 발생하는 인장응력과 압축응력이 걸리는 영역을 표시한 모식도이다[58]. 또한, 본 연구에서 상온인장전단시험 중 촬영한 동영상 및 상온인장전단시험 후의 외관형상을 통해서 상판의 알루미늄합금 판재에서 균열 개시가 진행됨 추정할 수 있었다.

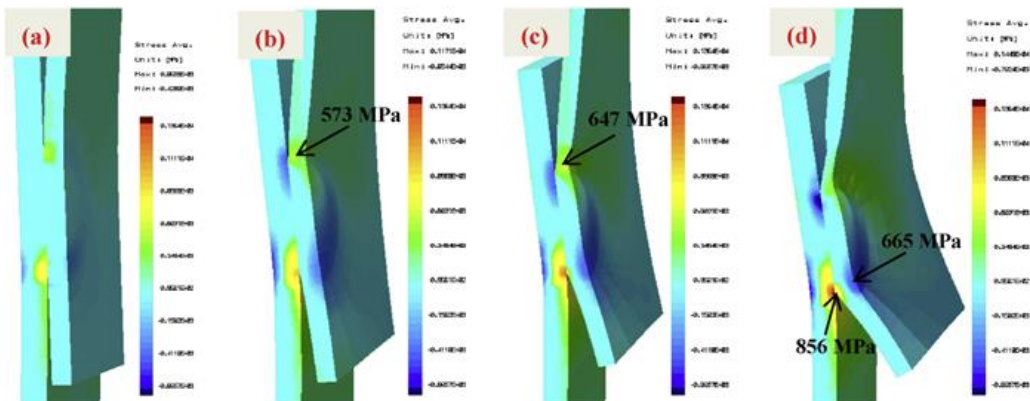


그림 4-31 이종 소재 간 상온인장전단시험 응력분포 모식도[51]

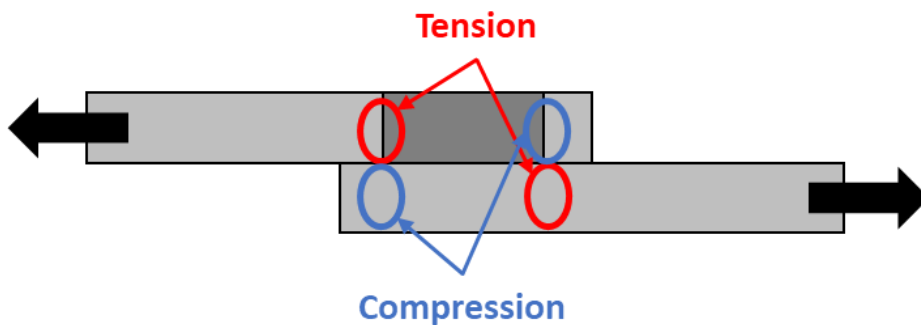


그림 4-32 상온인장전단시험 중 발생하는 응력 분포[52]

그림 4-33은 상온인장전단시험 후의 상부 판재 및 하부 판재의 대표적인 파면을 나타낸다. 파면의 경우, 앞서 기술된 바에 의해 응력 개시부로 예상되는 지점을 분석했다. 응력 개시부 지점의 파면을 관측한 이유는 상온인장전단시험 최대 평균 상온인장전단하중의 경우 응력 개시부에서 결정된다고 판단되기 때문이다. 이는 상온인장전단시험 동영상을 관측했을 때, 균열 개시가 일어나기까지 많은 변형이 발생되고 균열 전파의 경우 순식간에 파괴가 발생하기 때문이다. 뿐만 아니라 균열 개시부인 슬리브 영역의 외관형상을 관찰했을 때, 앞서 기술된 바와 같이 슬리브 영역의 파면 거칠기가 거친 것을 통해 최대 평균 상온인장전단하중은 응력 개시부에서 결정된다고 판단했다.

상부 판재의 파면을 분석한 결과, 삽입 깊이에 따라 AA5182-O 모재 표면과 유사한 영역, IMC 영역 및 Dimple이 관찰되었으며, 관찰된 파면의 종류는 동일하지만 종류마다 형성되는 양은 달랐다. 삽입 깊이가 낮은 경우에는 AA5182-O 모재 표면과 유사한 영역 및 Dimple이 형성된 영역은 삽입 깊이가 깊은 경우보다 상대적으로 많이 관측되었으며, 삽입 깊이가 높을수록 AA5182-O 모재 표면과 유사한 영역 및 Dimple이 형성된 영역의 양은 줄어들고 IMC 영역은 증가하는 경향을 보였다. 이는 앞서 기술된 바와 같이, 삽입 깊이가 증가함에 따라 입열량이 증가하여 IMC 영역이 증가했다고 판단되며, Dimple의 경우는 힘 분포 모델을 생각해봤을 때, 계면 거칠기의 영향으로 인한 결과로 추정된다.

하부 판재의 파면을 분석한 결과, SPRC440 모재 표면과 유사한 영역과 Dimple이 관찰되었으며, 삽입 깊이에 따라 관찰된 파면의 종류는 동일하지만 삽입 깊이가 증가함에 따라 SPRC440 모재 표면과 유사한 영역은 증가하고, Dimple이 형성된 영역은 감소했다. 이는 위와 유사한 원인이라고 판단되며, 이러한 결과를 토대로 파괴가 대부분 IMC-Steel로 전파됨을 파악할 수 있었다.

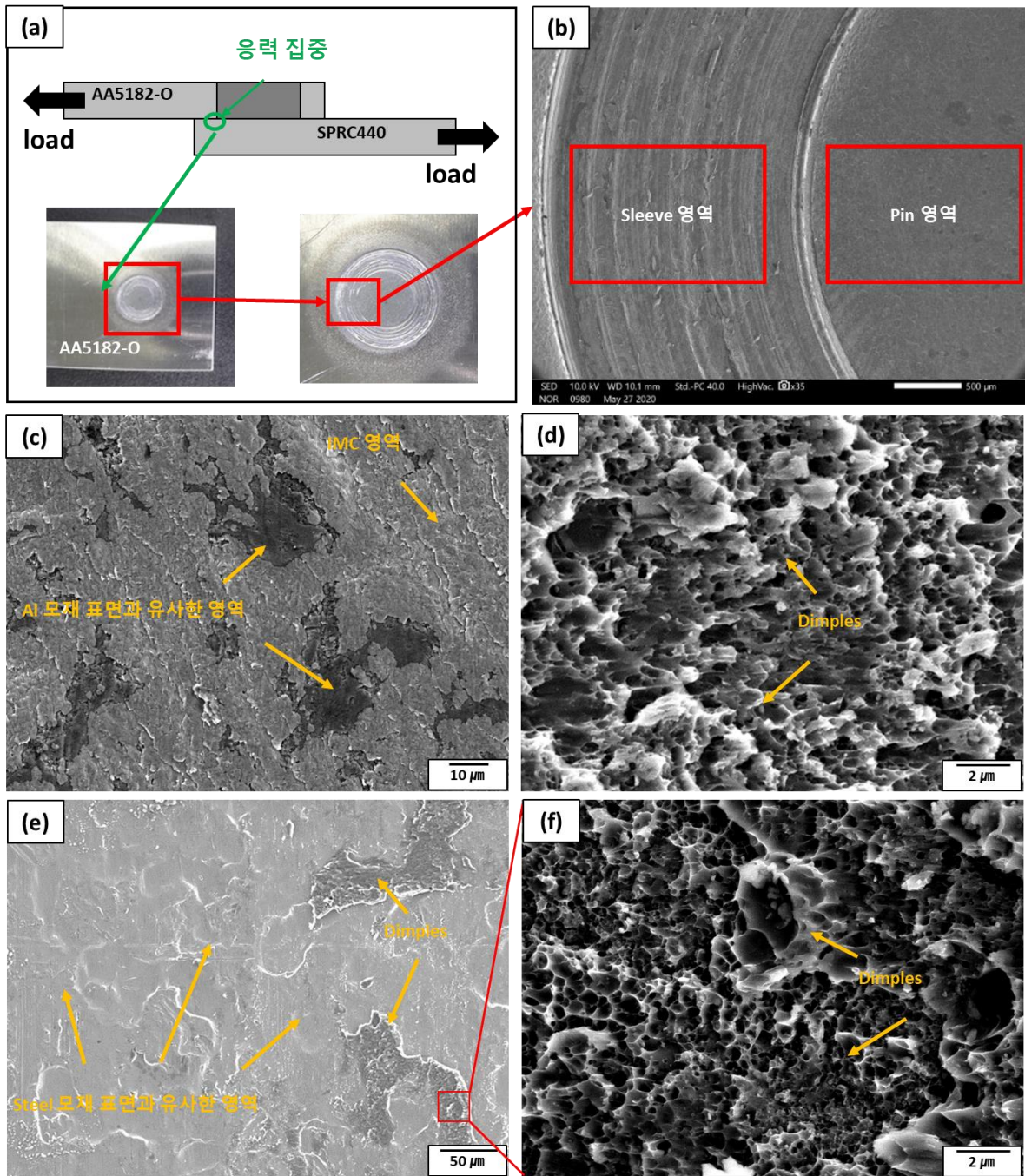


그림 4-33 삽입 깊이 0.9 mm에서의 대표적인 파면 이미지: (a) 거시적 파면, (b) 저배율 파면, (c),(d) 상부 판재 파면 및 Dimple, (e),(f) 하부 판재 파면 및 Dimple

그림 4-34~36은 앞서 기술된, AA5182-O 모재 표면과 유사한 영역, IMC 영역, Dimple 영역이라고 주장하는 근거를 보여주는 그림들이다. 그림 4-34는 상부 판재인 AA5182-O 알루미늄합금 판재에서의 파면 결과 값을 나타낸다. 그림 4-34의 (b), (c) 영역은 그림 4-34 (a) 영역의 SEM-EDS Mapping 분석 결과이다. 결과를 토대로 생각해봤을 때, 빨간색 동그라미 영역의 경우 대부분 Al의 조성으로 구성되어 있었으며, Fe의 조성은 거의 관찰되지 않았다. 또한, 그림 4-34 (d)의 AA5182-O 알루미늄합금 판재의 모재 표면과 (e)의 주황색 영역의 SEM 이미지를 비교해봤을 때, 거의 유사한 이미지를 보임을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 그림 4-34 (a)의 빨간색 동그라미는 AA5182-O 모재 표면과 유사한 영역이며, 미접합부 영역으로 판단된다.

그림 4-34 (a)의 하얀색 동그라미의 경우, 그림 4-34 (b), (c)의 SEM-EDS Mapping 분석 결과를 보면, Al 조성과 Fe의 조성이 공존함을 확인할 수 있었다. 또한, 다음과 같은 영역을 SEM-EDS Point 분석을 진행한 결과, Al의 조성이 약 74%, Fe의 조성이 약 25%로 Fe_4Al_{13} 의 금속간화합물 조성을 보였다[17, 53, 54]. 이러한 결과를 토대로 생각해봤을 때, 그림 4-34 (a)의 하얀색 동그라미의 경우 IMC 영역으로 판단된다.

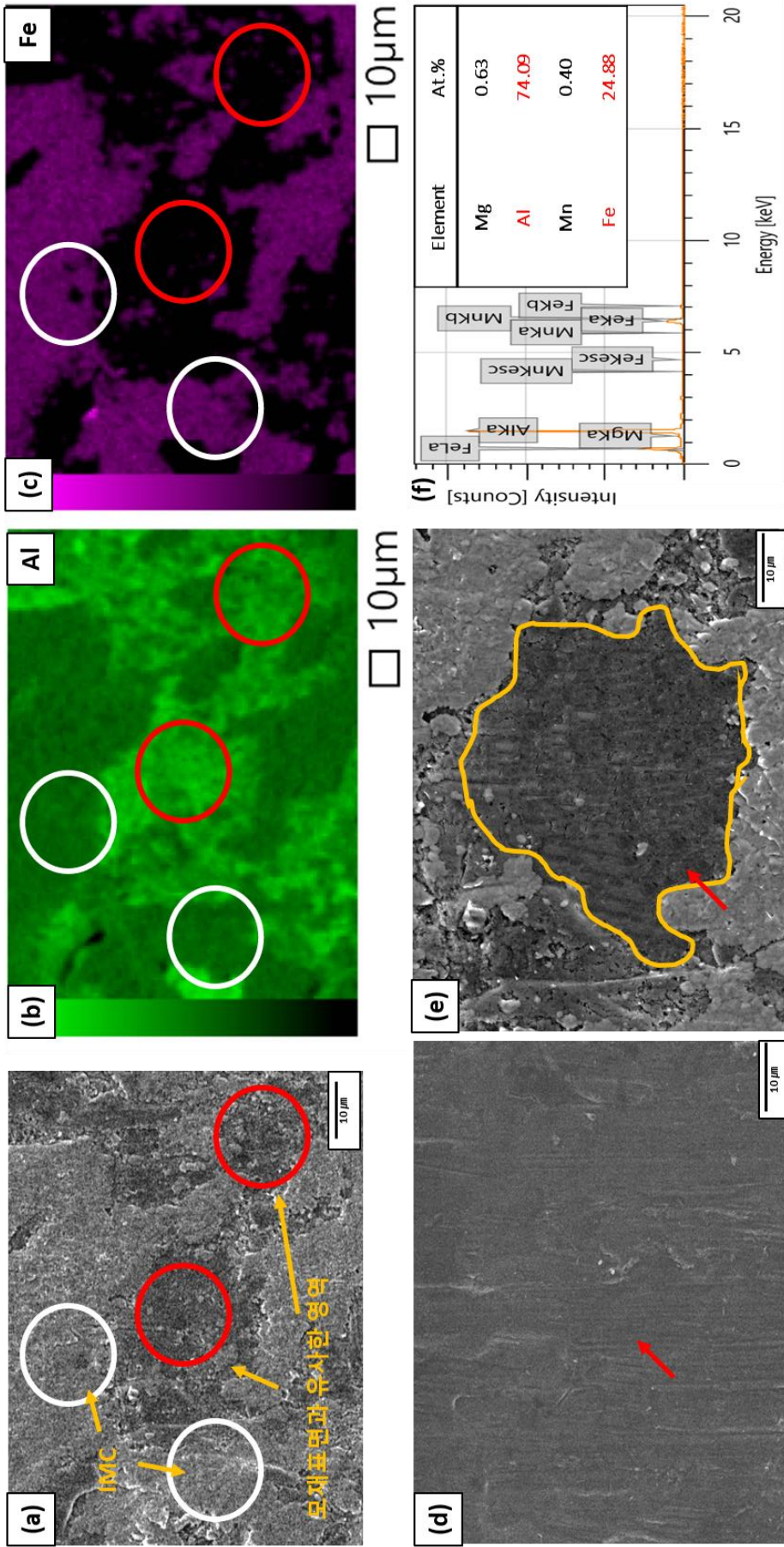


그림 4-34 상부 판재 표면에서의 SEM-EDS 및 SEM 이미지 결과: (a) 상부 판재의 SEM 표면 이미지, (b) (a)의 Al 조성의 EDS Mapping 결과, (c) (a)의 Fe 조성의 EDS Mapping 결과, (d) AA5182-O 모재 표면의 SEM 이미지, (e) 파면에서 모재 표면과 유사한 영역의 SEM 이미지, (f) IMC 영역 EDS Point 결과

그림 4-35 (a), (b)는 절단면에서의 불연속 IMC 영역과 파면에서 모재 표면과 유사한 영역의 SEM 이미지를 나타내며, 그림 4-35의 (c)는 절단면에서의 불연속 IMC 영역의 길이와 파면에서 모재 표면과 유사한 영역의 길이를 정량적으로 비교한 결과 값이다. 삽입 깊이에 따라 각 영역의 길이를 비교해본 결과, 거의 비슷한 결과 값을 보임을 확인할 수 있었고, 이러한 결과를 토대로 파면에서의 모재 표면과 유사한 영역은 절단면에서의 불연속 IMC 영역으로 인해 형성된 영역이라는 결론을 도출했다.

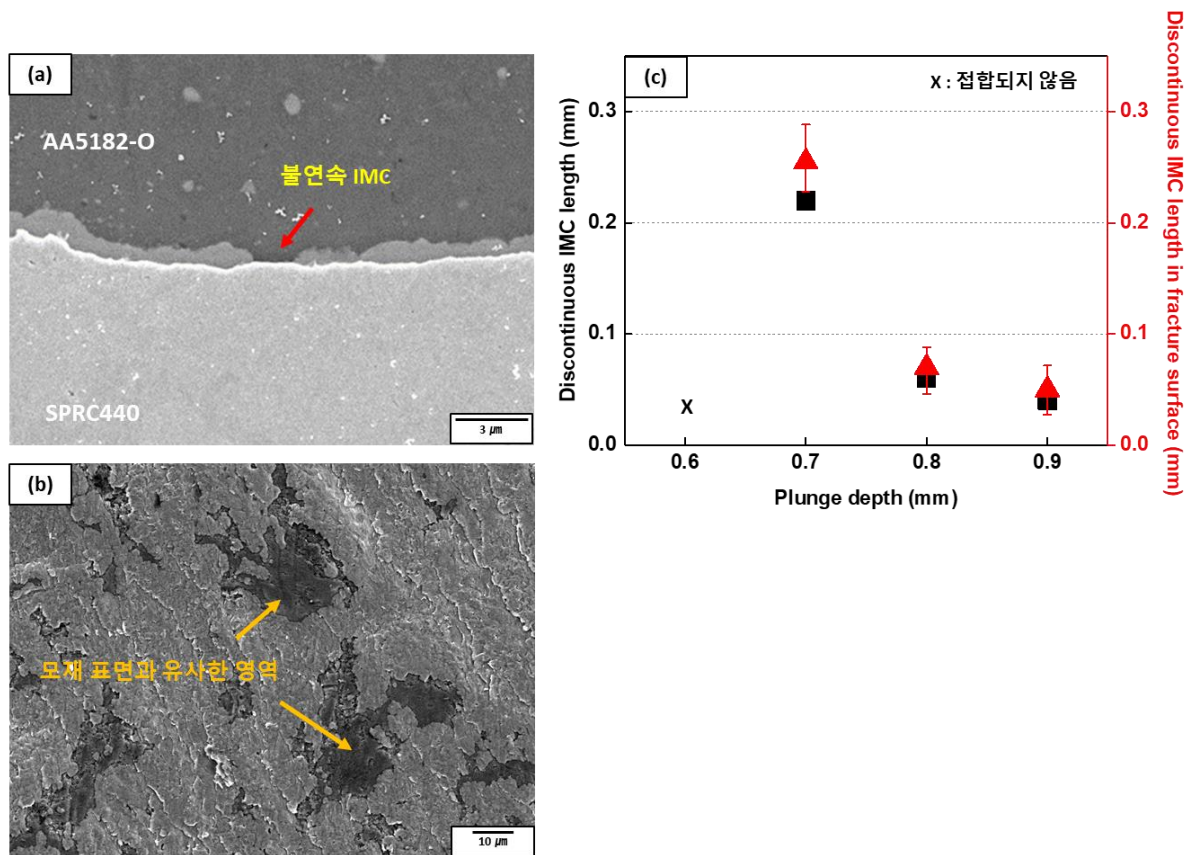


그림 4-35 불연속 IMC와 모재표면과 유사한 영역 SEM 이미지 및 길이 비교: (a) 접합부 절단면에서의 불연속 IMC, (b) 상부 판재 파면에서 모재표면과 유사한 영역, (c) 불연속 IMC 길이와 모재 표면과 유사한 영역 길이 비교 값

그림 4-36은 하부 판재인 SPRC440 강판에서의 파면 결과 값을 나타낸다. 그림 4-36의 (b), (c) 영역은 그림 4-36 (a) 영역의 SEM-EDS Mapping 분석 결과이다. Mapping 결과, 하안색 화살표의 경우 대부분 Fe의 조성으로 구성되어 있었으며, Al의 조성은 거의 관찰되지 않았다. 또한, 그림 4-36 (e)의 SPRC440 강판의 모재 표면과 (f) 영역의 SEM 이미지를 비교해봤을 때, 거의 유사한 이미지를 보임을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 그림 4-36 (a)의 하안색 화살표의 경우, SPRC440 강판의 모재 표면과 유사한 영역으로 판단된다.

그림 4-36 (a)의 주황색 화살표의 경우, 그림 4-36의 (d)와 같이 고배율로 관측했을 때 Dimple이 관찰됨을 확인할 수 있었다. 그림 4-36 (b), (c)는 Dimple 영역을 SEM-EDS Mapping 분석 결과이다. 분석결과 대부분 Al 조성으로 구성되어 있으며 Fe의 조성은 거의 관찰되지 않음을 확인할 수 있다. 또한, Dimple의 경우 상부 판재에서도 발생했는데, 상부 판재의 파면에서 Dimple을 분석했을 때에도 SPRC440 강판에서의 Dimple 결과 값과 유사하게 나타났다. 이러한 결과를 종합적으로 생각해봤 때, Dimple의 경우 AA5182-O 알루미늄합금에서 파괴가 진행되어 나타난 것으로 판단되었다.

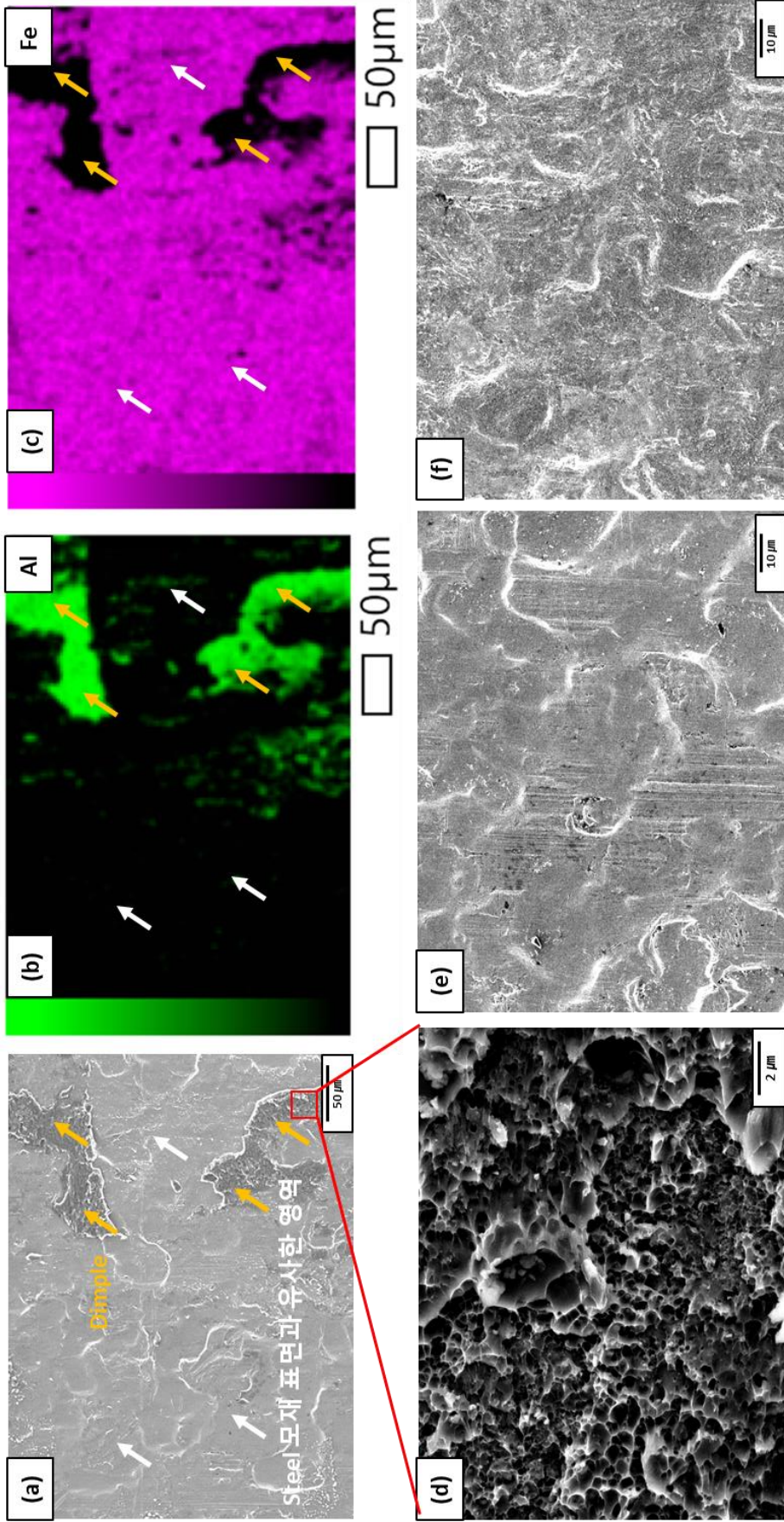


그림 4-36 하부 판재 표면에서의 SEM-EDS 및 SEM 이미지 결과: (a) 하부 판재의 SEM 표면 이미지, (b) (a)의 Al 조성의 EDS Mapping 결과, (c) (a)의 Fe 조성의 EDS Mapping 결과, (d) Dimple, (e) SPRC440 모재 표면의 SEM 이미지, (f) 표면에서 모재 표면과 유사한 영역의 SEM 이미지

그림 4-37은 상온인장전단시험 후 접합용 공구의 삽입 깊이에 따른 상부 판재 및 하부 판재의 파면 영역 XRD 분석 결과를 나타낸다. XRD 분석의 경우, 앞서 기술된 바와 같이 접합부 계면에서 형성되는 금속간화합물의 종류를 파악하기 위해서 진행했다. 파면 영역을 XRD 분석한 이유는 XRD의 경우 너무 적은 양으로 존재하게 되면 분석자체가 안되기 때문에 파면을 XRD 분석했다. 즉, 접합부 단면에서 XRD 분석을 진행할 경우, 검출되는 금속간화합물의 양이 너무 적어 XRD로 나타나지 않을 수 있기 때문이다.

상부 판재의 파면 XRD 분석결과, 금속간화합물의 종류는 Fe_4Al_{13} 임을 확인할 수 있었으며, 이는 앞서 기술된 바와 같이 SEM-EDS Point 분석 결과와 동일했다. 이외에도 AA5182 알루미늄합금의 주요 2차상인 Mg_2Si 와 Mg_2Al_3 역시 검출됨을 확인할 수 있었으며, 금속간화합물의 종류는 삽입 깊이가 변하더라도 동일함을 파악할 수 있었다. 따라서, XRD 분석 결과와 SEM-EDS 분석 결과를 종합적으로 생각해봤을 때, 접합부 계면에 형성된 금속간화합물의 종류는 Fe_4Al_{13} 라고 판단된다.

하부 판재의 파면 XRD 분석결과, 모든 삽입 깊이에서 금속간화합물의 Peak은 확인되지 않았으며, 오직 Fe의 Peak만 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 토대로, 앞서 기술된 바와 같이 균열전파가 IMC-Steel 계면파괴로 진행됨을 다시한번 확인할 수 있었다.

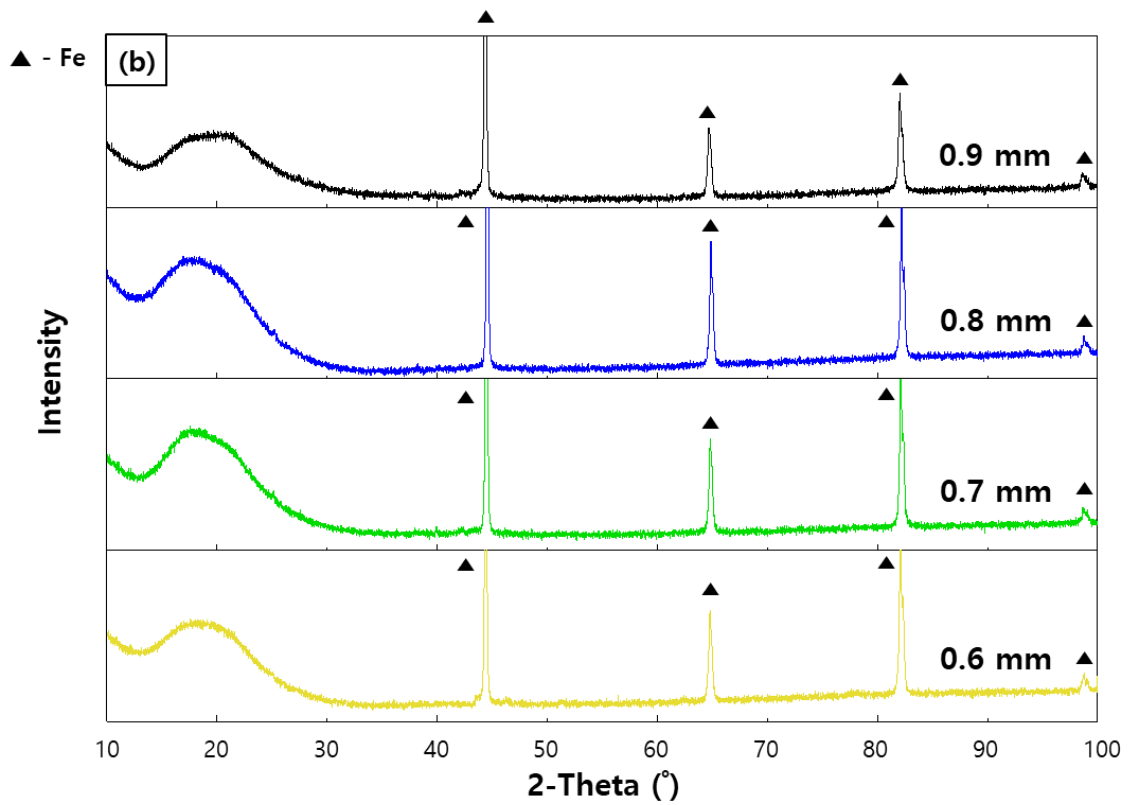
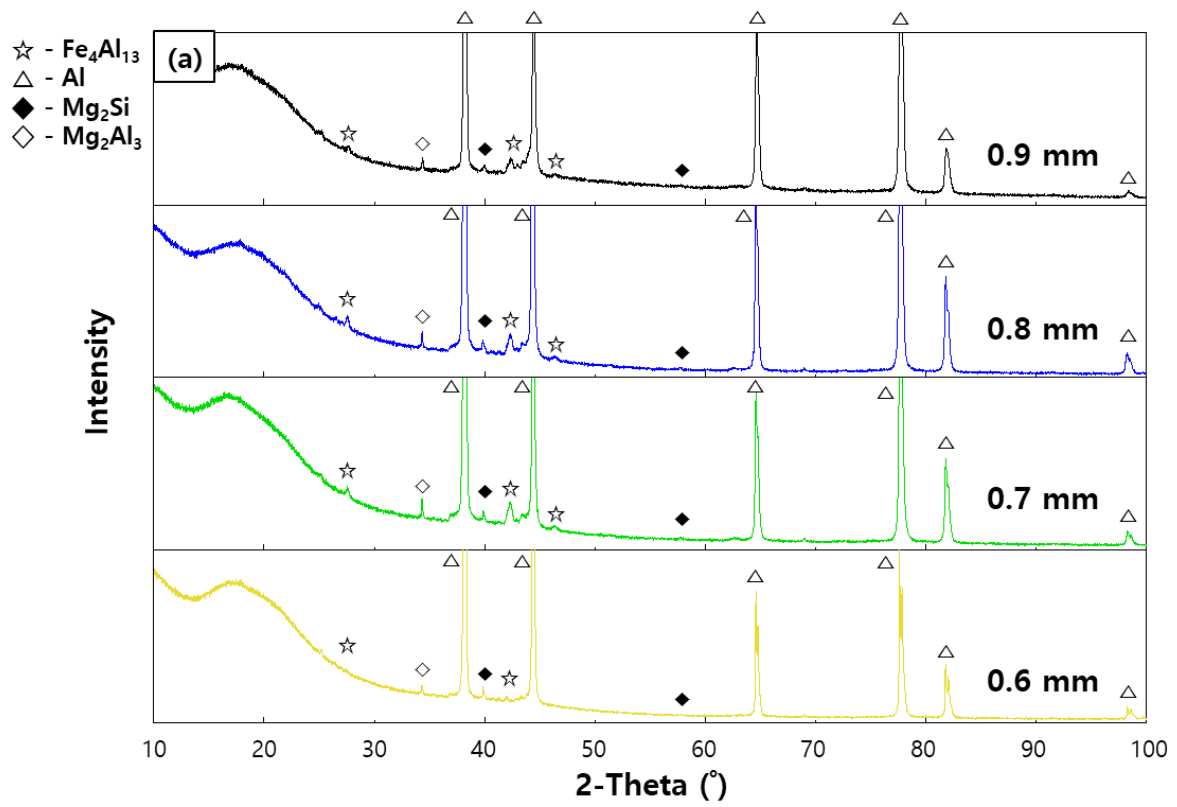


그림 4-37 삽입 깊이에 따른 XRD 분석 결과: (a) 상부 판재, (b) 하부 판재

4.2.3.2.3 상온인장전단시험 후의 파단면

파단면 분석의 경우 니켈 코팅을 진행한 후 분석을 진행했으며, 계면부 영역의 파단면 분석을 통해 각 영역별 파괴 위치를 파악했다. 그림 4-38는 상온인장전단시험 후의 대표적인 OM 및 SEM 이미지 파단면 결과를 나타낸다. 상부 판재의 파단면의 경우 AA5182-O와 니켈 코팅 층 사이에 금속간화합물 및 불연속 IMC가 확인되었다. 이는 앞서 기술된 바와 유사하게 삽입 깊이가 증가함에 따라 금속간화합물이 형성된 영역은 증가하고 불연속 IMC 영역은 감소했다. 하부 판재의 파단면의 경우 SPRC440 소재와 니켈 코팅 층 사이에서 금속간화합물은 알루미늄 소재가 존재하는 영역 아래에서 대개 관찰되었으며, 대부분 SPRC440 소재와 니켈 코팅 층 사이에서 특별하게 관찰되는 것은 없었다. 이러한 결과를 토대로, 대부분의 파괴는 IMC-Steel 계면 파괴로 진행됨을 파악할 수 있었으며, 금속간화합물이 형성되지 않은 영역에서의 파괴는 Al-Steel 계면부의 파괴가 발생함을 파악할 수 있었다. 또한, Dimple은 금속간화합물이 존재할때, AA5182-O 내에서 계면부의 파괴가 발생해 형성됨을 확인했다. 즉, 금속간화합물이 형성된 영역에서의 파괴 위치는 ① IMC-Steel 계면부, ② AA5182-O 내에서 계면부에서 파괴가 발생함을 파악할 수 있었으며, 금속간화합물이 형성되지 않은 영역에서의 파괴 위치의 경우 Al-Steel 계면부의 파괴가 진행됨을 파악할 수 있었다. 이러한 근거를 토대로 불연속 IMC의 영역은 두 판재가 서로 맞닿아있는 영역, 즉 접합이 이루어지지 않은 영역임을 다시한번 파악할 수 있었다. 이처럼 금속간화합물이 형성되지 않은 영역의 경우 접합이 이루어지지 않은 영역이기 때문에 다음과 같이 Al-Steel 계면부의 파괴가 발생함을 파악할 수 있었지만, 금속간화합물이 형성된 영역에서의 파괴가 왜 IMC-Steel 계면부와 AA5182-O 내에서 계면부의 파괴가 발생하는지에 대해서는 좀 더 연구가 필요해 보일 것으로 파악된다. 그림 4-39는 위의 내용을 영역별 파괴 위치를 정리한 그림이다.

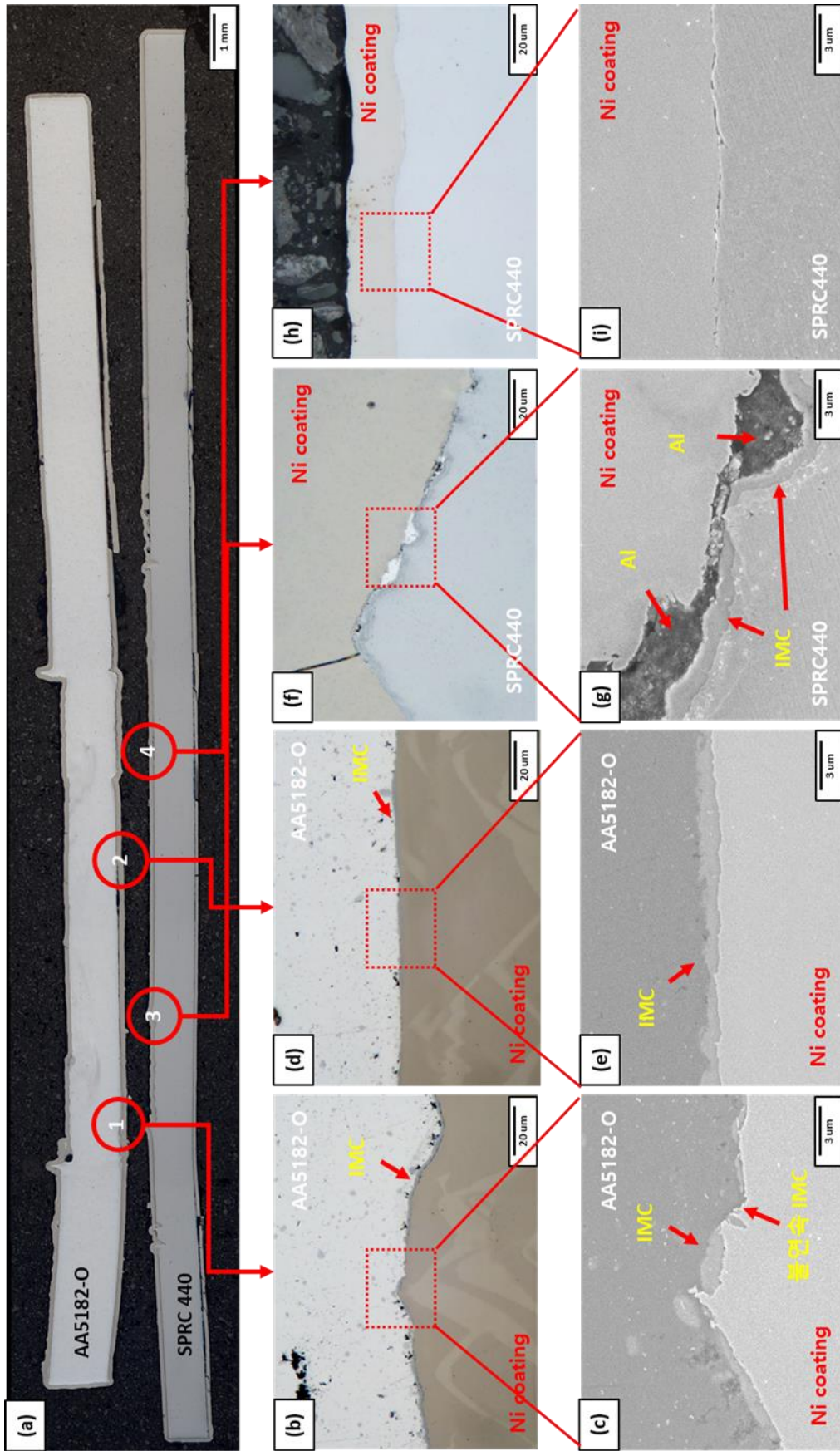
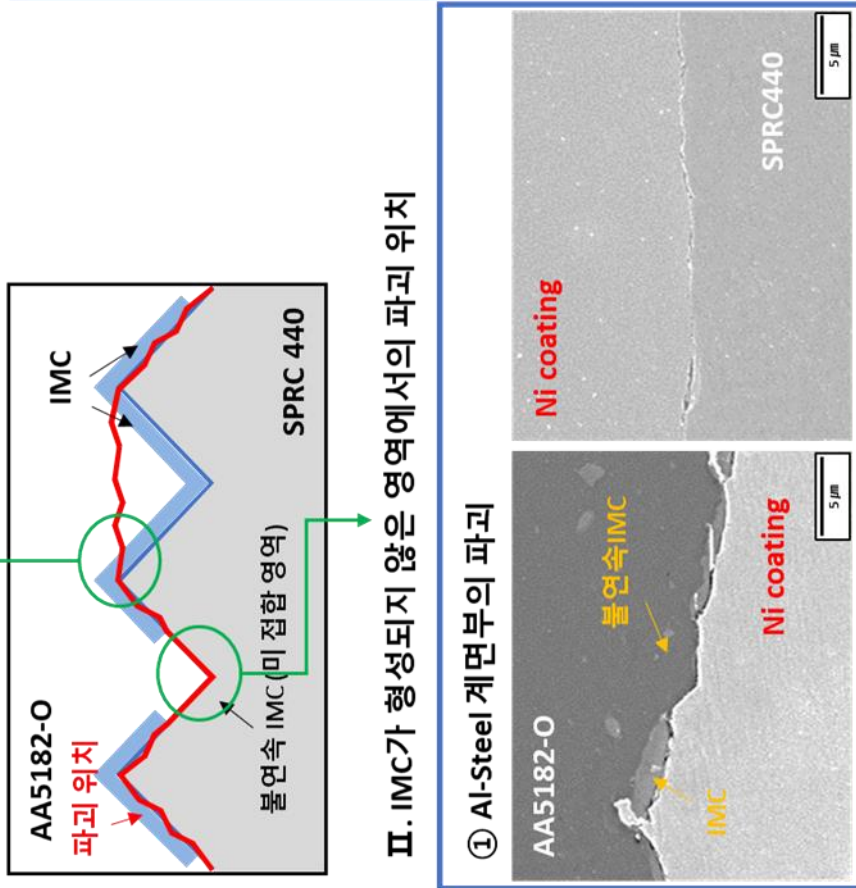
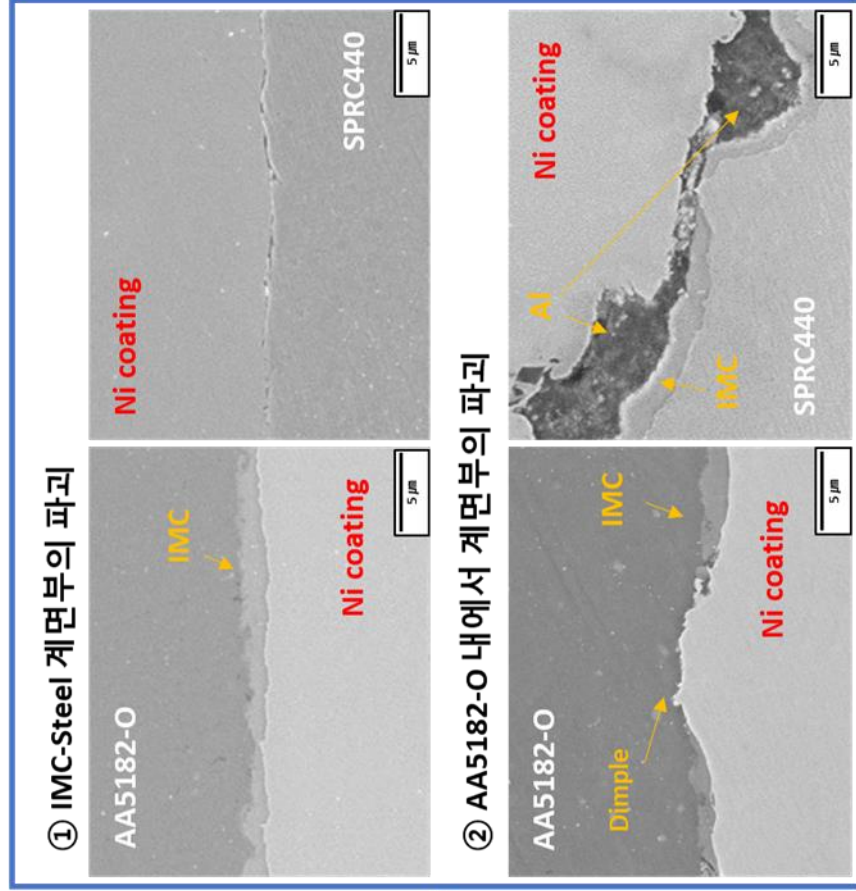


그림 4-38 삽입 깊이 변화에 따른 대표적인 파단면 분석 결과: (a) 거시적 단면, (b),(c) 상부 판재 계면부의 OM 이미지, (d),(e) 상부 판재 계면부의 SEM 이미지, (f),(g) 하부 판재 계면부의 OM 이미지, (h),(i) 하부 판재 계면부의 SEM 이미지

I. IMC가 형성된 영역에서의 파괴 위치



II. IMC가 형성되지 않은 영역에서의 파괴 위치

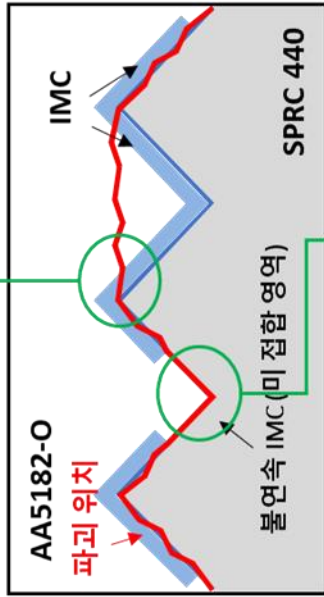


그림 4-39 영역별 파괴 위치

5. 결론

본 연구에서는 AA5182-O 알루미늄합금 판재와 SPRC440 강판 간의 Refill-FSSW 기술을 적용했다. 접합용 공구의 삽입 깊이, 접합부의 미세조직특성, 비커스 경도 및 상온인장전단특성 간의 상관관계에 대해 조사했다.

1. 삽입 깊이 0.6 mm을 제외하고 모든 삽입 깊이 공정변수에서는 접합이 진행되었으며 내부 기공과 같은 결함은 관찰되지 않았다.
2. 상부 판재에서 모재의 결정립 크기는 $12.59\ \mu\text{m}$ 였고 슬리브 및 핀 영역의 결정립 크기 $3.65\ \mu\text{m}$ 및 $4.01\ \mu\text{m}$ 보다 조대했다. 접합부에서도 상부, 중부, 하부 영역으로 갈수록 결정립 크기가 커졌다. 즉, 슬리브 영역은 $1.49\ \mu\text{m}$, $3.65\ \mu\text{m}$, $3.95\ \mu\text{m}$ 의 결정립 크기를 가졌고, 핀 영역은 $2.86\ \mu\text{m}$, $4.01\ \mu\text{m}$, $4.26\ \mu\text{m}$ 의 결정립 크기를 가졌다. 하부 판재의 경우, $2.18\ \mu\text{m}$ 의 결정립 크기를 가지는 슬리브 상부를 제외하고는 모든 영역이 $3.21\ \mu\text{m}$, $3.18\ \mu\text{m}$, $3.12\ \mu\text{m}$ 의 결정립 크기로 모재의 결정립 크기와 유사했다.
3. IMC의 종류는 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 이었으며, 삽입 깊이가 증가함에 따라 IMC 길이는 $8.13\ \text{mm}$, $8.49\ \text{mm}$, $9.01\ \text{mm}$ 로 증가하였고, IMC 두께 및 계면 거칠기는 $1.19\ \mu\text{m}$, $1.36\ \mu\text{m}$, $1.51\ \mu\text{m}$ 및 $1.32\ \mu\text{m}$, $1.48\ \mu\text{m}$, $2.45\ \mu\text{m}$ 로 증가하는 경향을 보였다.
4. 상부 판재에서 비커스 경도의 경우, 접합부 영역이 모재 영역보다 경도 값이 컸으며, 접합부에서 상부, 중부, 하부 영역으로 갈수록 경도 값이 감소하는 경향을 보였다. 하부 판재의 경우, 슬리브 상부 및 중부 영역을 제외하고는 영역별 유사한 경도 값을 보였다.
5. 상온인장전단하중은 삽입 깊이가 증가함에 따라 $2.94\ \text{kN}$, $3.46\ \text{kN}$, $3.95\ \text{kN}$ 으로 증가하였고, 이는 IMC 길이 및 계면 거칠기의 증가로 인한 영향으로 판단된다.
6. 파괴 위치의 경우 금속간화합물이 형성된 영역에서는 IMC-Steel 계면부, AA5182-O 내에서 계면부에서 파괴가 발생했으며, 금속간화합물이 형성되지 않은 영역의 경우 Al-Steel 계면부 파괴가 발생했다.

참고문헌

1. 류희선, EU 자동차 기업 CO₂ 배출 규제 강화. 2020.03.05: MIT press.
2. 오세성, 벌금이나 손해나 초강력 CO₂ 규제에 차 수익성 빨간불. 2019.09.16.
3. 유영상, 자동차 기술개발 동향 및 향후 과제. 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 2006. **30-48**.
4. 최성배, 김상우, and 정선영, 자동차 경량화 기술동향과 개발전략.
5. 장문수, 방민진, and 곽진희, 왜 지금 현대차는 가벼워지려 하는가.
6. Ravichandran, P., et al., Process parameter optimization and performance comparison of AISI 430 and AISI 1018 in resistance spot welding process. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
7. Kim, Y.G., et al., Effect of welding parameters on microstructure in the stir zone of FSW joints of aluminum die casting alloy. *Materials Letters*, 2006. **60**(29-30): p. 3830-3837.
8. Rusia, A. and S. Weihe, Development of an end-to-end simulation process chain for prediction of self-piercing riveting joint geometry and strength. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020. **57**: p. 519-532.
9. 김용, 박기영, and 이보영, 아크 열원을 이용한 스틸과 알루미늄의 이종접합에 관한 연구 (II). *Journal of Welding and Joining*, 2018. **36**(4).
10. Shen, Z., Y. Ding, and A.P. Gerlich, Advances in friction stir spot welding. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2019: p. 1-78.
11. Dong, H., et al., Refilled friction stir spot welding of aluminum alloy to galvanized steel sheets. *Materials & Design*, 2016. **94**: p. 457-466.
12. Uematsu, Y., et al., Comparative study of fatigue behaviour in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds fabricated by scroll grooved tool without probe. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012. **17**(5): p. 348-356.
13. Shen, Z., et al., Effects of tool design on the microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welding of dissimilar Al alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018. **252**: p. 751-759.
14. Shen, Z., et al., Influence of processing parameters on microstructure and mechanical performance of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014. **20**(1): p. 48-57.
15. Shen, Z., et al., Interfacial bonding mechanism in Al/coated steel dissimilar refill friction stir spot welds. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019. **35**(6): p. 1027-1038.
16. Suhuddin, U., et al., Microstructure evolution in refill friction stir spot weld of a dissimilar Al-Mg alloy to Zn-coated steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017. **22**(8): p. 658-665.
17. Shen, Z., et al., Role of interfacial reaction on the mechanical performance of Al/steel dissimilar refill friction stir spot welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018.

- 23(6):** p. 462-477.
18. Verastegui, R.N., et al. Welding of aluminum to DP600 steel plates by refill friction stir spot welding process (Refill FSSW): preliminary results. in *Advanced Materials Research*. 2015. Trans Tech Publ.
 19. Li, P., et al., Interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar aluminum/steel joint fabricated via refilled friction stir spot welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020. **49**: p. 385-396.
 20. Haghshenas, M. and A. Gerlich, Joining of automotive sheet materials by friction-based welding methods: A review. *Engineering science and technology, an international journal*, 2018. **21(1)**: p. 130-148.
 21. Fernandes, C.A., et al., Effects of Geometrical Feature on Microstructures and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welding 6061 Aluminum Alloy. *Materials Research*, 2019. **22(6)**.
 22. REFILL FRICTION STIR SPOT WELDING. twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/refill-friction-stir-spot-welding-150.
 23. Tier, M., et al., The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds. *Journal of materials processing technology*, 2013. **213(6)**: p. 997-1005.
 24. Mehta, K.P., A review on friction-based joining of dissimilar aluminum–steel joints. *Journal of Materials Research*, 2019. **34(1)**: p. 78-96.
 25. Shen, Z., et al., Material flow during refill friction stir spot welded dissimilar Al alloys using a grooved tool. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020. **49**: p. 260-270.
 26. Li, G., et al., Microstructural evolution and mechanical properties of refill friction stir spot welded alclad 2A12-T4 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019. **8(5)**: p. 4115-4129.
 27. Huang, K. and R.E. Logé, A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials. *Materials & Design*, 2016. **111**: p. 548-574.
 28. Ding, R. and Z. Guo, Coupled quantitative simulation of microstructural evolution and plastic flow during dynamic recrystallization. *Acta materialia*, 2001. **49(16)**: p. 3163-3175.
 29. Shen, J., et al., Texture development and material flow behavior during refill friction stir spot welding of AlMgSc. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018. **49(1)**: p. 241-254.
 30. 김영우, 금속간화합물기술동향.
 31. 강민정, MIG 브레이징을 이용한 Al-Fe의 이종재료 접합부의 금속간화합물 거동. 2012, 인하대학교 공학대학원: 인천.
 32. 최시연, 금속간 화합물 석출 제어를 이용한 합금의 기계적 물성 및 색 변화 연구. 2019, 세종대학교 대학원: 서울.
 33. 2명, 이.외., 고온구조용 규칙격자 금속간화합물의 개발.
 34. Wang, T., et al., Evaluation of intermetallic compound layer at aluminum/steel interface joined by friction stir scribe technology. *Materials & Design*, 2019. **174**: p. 107795.

35. Sina, H., et al., A study on the formation of iron aluminide (FeAl) from elemental powders. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015. **636**: p. 261-269.
36. Qian, W., et al., Effects of Fe—Al intermetallic compounds on interfacial bonding of clad materials. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 2014. **24**(1): p. 279-284.
37. POSCO, AUTOMOTIVE STEEL 자동차 강판. 2014.
38. 양시훈, AA5182-O 알루미늄합금 판재와 TRIP 강판 간의 이종 마찰교반점접합부의 기계적 특성에 관한 연구. 2017.
39. 이성희, et al., SPRC440 강판재의 미세조직 구성이 동적 인장 특성에 미치는 영향. *소성가공*, 2011. **20**(4): p. 309-315.
40. Sato, H., et al., Three-Dimensional Analysis of Fragmentation Process of Al 3 Ti Platelet Particles in Al—Al 3 Ti Multiphase Alloy Deformed by Asymmetric Rolling. *JOM*, 2020. **72**(1): p. 57-64.
41. Rushton, J.H., Mixing of liquids in chemical processing. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1952. **44**(12): p. 2931-2936.
42. Liu, Z., K. Yang, and D. Yan, Refill Friction Stir Spot Welding of Dissimilar 6061/7075 Aluminum Alloy. *High Temperature Materials and Processes*, 2019. **38**(2019): p. 69-75.
43. Chen, Y. and K. Nakata, Effect of the surface state of steel on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal lap joints of aluminum and steel by friction stir welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008. **39**(8): p. 1985.
44. Stegmüller, M.J., R.J. Grant, and P. Schindele, Quantification of the interfacial roughness when coating stainless steel onto aluminium by friction surfacing. *Surface and Coatings Technology*, 2019. **375**: p. 22-33.
45. 박진수, 복합 구조물에 체결된 나사의 풀림 현상에 관한 연구. 2017, 성균관대학교 일반대학원: 서울.
46. Silva, B.H., et al., Refill friction stir spot welding of AA6082-T6 alloy: Hook defect formation and its influence on the mechanical properties and fracture behavior. *Materials Science and Engineering: A*, 2020. **773**: p. 138724.
47. Li, G.-h., et al., Material flow behavior and microstructural evolution during refill friction stir spot welding of alclad 2A12-T4 aluminum alloy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. **28**: p. 1-11.
48. de Castro, C.C., et al., Investigation of geometrical features on mechanical properties of AA2198 refill friction stir spot welds. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018. **36**: p. 330-339.
49. Gong, T., et al., Effects of Ce-Rich Mischmetal on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 5182 Aluminum Alloy. *Materials*, 2019. **12**(24): p. 4230.
50. Fereiduni, E., M. Movahedi, and A. Kokabi, Aluminum/steel joints made by an alternative friction stir spot welding process. *Journal of materials processing technology*, 2015. **224**: p. 1-10.
51. Fereiduni, E., et al., Effect of dwell time on joint interface microstructure and strength of

- dissimilar friction stir spot-welded Al-5083 and St-12 alloy sheets. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017. **48**(4): p. 1744-1758.
52. Bozzi, S., et al., Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds. *Materials Science and Engineering: A*, 2010. **527**(16-17): p. 4505-4509.
 53. Lee, J.-M., et al., Evolution of iron aluminide in Al/Fe in situ composites fabricated by plasma synthesis method. *Materials Science and Engineering: A*, 2003. **362**(1-2): p. 257-263.
 54. Qiu, R., C. Iwamoto, and S. Satonaka, Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy joints welded by resistance spot welding with cover plate. *Journal of Materials processing technology*, 2009. **209**(8): p. 4186-4193.
 55. Yılmaz, M., M. Çöl, and M. Acet, Interface properties of aluminum/steel friction-welded components. *Materials Characterization*, 2002. **49**(5): p. 421-429.
 56. Herbst, S., et al., Microstructure and mechanical properties of friction welded steel-aluminum hybrid components after T6 heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2017. **696**: p. 33-41.
 57. Liu, C., et al., Effect of work hardening on mechanical behavior of resistance spot welding joint during tension shear test. *Materials & Design*, 2016. **100**: p. 188-197.
 58. Rosendo, T., et al., Mechanical performance of AA6181 refill friction spot welds under Lap shear tensile loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015. **38**(12): p. 1443-1455.

영문 요약

Automobile industries develop technologies to improve fuel efficiency and meet environmental regulations because of growing interests in environmental problems caused by global warming and climate change. In the case of material selection of automobiles, thinner sheets of strength improved steels or lightweight aluminum alloys are employed. Among various spot joining processes, the Refill-Friction Stir Spot Welding (Refill-FSSW) technology improves upon several problems observed in other processes. Hence, great interests in related research are taken around the world. In this study, Refill-FSSW was employed on AA5182-O aluminum alloy plate with a thickness of 1.0 mm and SPRC440 steel plate with a thickness of 0.7 mm. The effect of plunge depth on the microstructure and mechanical properties was studied. Welding was successful except for the plunge depth of 0.6 mm. For the aluminum plate, grain size of weld zone was smaller than that of the base metal. Also, the grain size increased from top to bottom in weld zone. For the steel plate, the whole weld zone was similar to the grain size of the base metal except for the top of the sleeve zone. At the Al/Steel interface, intermetallic compound (IMC) of Fe_4Al_{13} and discontinuous IMC were observed. Also, change in the interface roughness occurred with increase in plunge depth. Analysis of above microstructure features affecting mechanical properties, IMC length and thickness and interface roughness increased with increasing plunge depth, and the length of discontinuous IMC decreased. In the case of Vickers hardness, the hardness of weld zone was higher than that of the base metal zone for all conditions. Within the weld zone, hardness at the sleeve zone was higher than that of the pin zone. However, hardness decreased from top to bottom for all area. For steel plates, hardness was same to that of the base metal except for the top and middle area of sleeve for the plunge depth of 0.9 mm. In addition, maximum tensile shear load increased with increasing plunge depth. Finally, through analysis of correlation between the tensile shear load and microstructural features, the IMC length and interface roughness were found to be the main factors affecting the tensile shear load.