



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

AZ31 마그네슘 합금 마찰교반접합부의
부식 거동

Corrosion properties of
AZ31 Magnesium alloy Friction Stir Welded Joints

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

오재영

AZ31 마그네슘 합금 마찰교반접합부의 부식 거동

지도교수 이정구

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함


2024년 02월

울산대학교 대학원
첨단소재공학과
오재영

오재영의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 신 상 용  (인)

심사위원 권 용 재  (인)

심사위원 이 정 구  (인)

울 산 대 학 교 대 학 원

2024 년 2 월

감사의 글

3 년의 연구실 생활을 마무리하며, 졸업논문 감사의 글을 쓰게 되는 날이 왔다니 시간이 참 빠르다는 생각이 듭니다. 많은 사람들과 인연을 쌓을 수 있었고, 실력도 쌓을 수 있었던 시간이었던 것 같습니다. 본 논문이 좋은 결실을 맺을 수 있게 아낌없는 지도를 해주신 이정구 지도교수님께 진심으로 감사드리며, 권용재 교수님, 신상용 교수님께도 감사 인사를 드립니다.

처음 연구실에 들어왔을 때 많은 관심과 애정을 주었던 태우, 승훈, 범수, 정수, 승엽, 민구, 기웅 오빠들에게도 감사드립니다. 실험에 많은 도움을 주셨던 유니스트에 백수민, 이시영 박사님, 정기, 재호, 두원 오빠들에게도 감사드립니다. 뒤에서 항상 응원해 준 동현이 오빠, 재훈이, 민성이, 상준이에게 고맙다는 말을 전합니다. 이외에 금속방을 거쳐 갔던 여러 학부연구생들, 역학방에게도 감사드립니다. 또한 같이 대학원 생활을 하며 힘들 때 항상 힘이 되어준 동기 준성, 동하 오빠들에게도 더 큰 감사를 드립니다. 그 외에 언급하지 못한 많은 분들에게도 감사의 말을 전합니다.

마지막으로 오늘이 있기까지 헌신적인 사랑으로 저를 아껴주시고 믿어주신 부모님께 감사하고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 자주 보지는 못하지만, 늘 힘이 되어주는 오빠에게도 감사의 말을 전합니다.

본 논문을 쓰기 위해 정말 많은 분들의 도움과 격려를 받았습니다. 그 덕에 대학원 생활을 잘 마무리할 수 있었습니다. 연구실 생활을 하며 얻을 수 있었던 값진 경험들은 앞으로의 제 삶에 큰 원동력이 될 것이라 생각합니다. 꾸준히 노력하며 앞으로 나아가겠습니다.

국문 요약

자동차 산업에서는 환경 보호와 연비 향상을 위해 경량금속인 마그네슘 합금에 대한 관심이 높아지고 있으나 플라스틱, 알루미늄 합금 등 경쟁소재와 비교하여 열악한 내식성을 나타내 아직 다양한 분야에 적용되지 못하고 있다. 특히, 마그네슘 합금을 구조용 재료로 적용하기 위해서는 접합 기술이 필수적이지만 일반적으로 금속재료의 접합에 사용되는 용융 접합의 경우, 고온 균열, 침전물, 합금 원소의 조성 분리 등의 문제점이 있으므로 고상 용접법인 마찰교반접합(Friction Stir Welding, FSW) 공정에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 상용 AZ31 합금 마찰교반접합부의 미세조직, 특성에 대한 연구는 보고되고 있지만, 미세조직학적 특성 차이에 대한 정량적 해석과 마찰교반접합 시 부식 특성에 미치는 미세조직학적 인자 변화에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한, 접합부 미세조직과 특성에 대하여 내식성을 향상시킨 Modified-AZ31 과 상용 AZ31 간의 비교도 필요하다.

따라서 본 연구에서는 내식성을 향상시킨 Modified-AZ31 압출재 및 압연재와 상용 AZ31 압연재 총 3 종의 AZ31 합금을 마찰교반접합 공정을 이용하여 맞대기 접합하였으며, 각 접합부의 미세조직 변화에 따른 부식 거동을 합금별 및 영역별로 비교·분석하고자 하였다. 광학현미경과 주사전자현미경을 통하여 미세조직을 분석하고 정량화하고자 하였다. 부식 특성의 경우에는 염수분무시험과 침지시험을 시행하여 BM 과 SZ 의 부식 거동을 관찰하였다. 개방 회로 전위 측정 및 동전위 분극시험을 시행해 각 합금의 BM, SZ 에 대하여 E_{corr} , I_{corr} 값을 정량화하였다. 또한 접합 전과 후의 미세조직을 비교·관찰하여 미세조직의 변화와 부식 거동을 연관 지어 해석하였다.

실험 결과, Modified-AZ31 압출재, 압연재, 상용 AZ31 압연재 총 3 종의 마그네슘 합금의 BM 에 비하여 SZ 의 결정립이 미세화되었다. Modified-AZ31 압출재의 경우 SZ 의

이차상이 BM 의 이차상에 비하여 Mn 의 함량은 증가하고 'X'와 Fe 의 함량은 감소하였으며, 이차상의 크기는 증가하고 분율은 유사하였다. Modified-AZ31 압연재의 경우 SZ 의 이차상이 BM 의 이차상에 비하여 Mn 의 함량은 증가하고 'X'의 함량은 감소하였으며, 이차상의 크기는 증가하고 분율은 유사하였다. 상용 AZ31 압연재의 경우 SZ 의 이차상이 BM 의 이차상에 비하여 Mn 의 함량은 증가하였으며, 이차상의 크기와 분율은 유사하였다.

Modified-AZ31 압출재와 압연재는 희토류 원소 'X'를 미량 첨가하여 이차상과 기지 간의 전위 차이가 감소하였다. 이에 'X'가 첨가되지 않은 상용 AZ31 압연재보다 우수한 내식성을 나타냈다. 염수분무, 침지시험 결과 마찰교반접합된 시편에서 대체적으로 SZ 에 부식이 집중되는 현상이 관찰되었다. 침지시험 시 측정된 무게감소량으로 부식속도를 계산한 결과, 마찰교반접합된 상용 AZ31 압연재, 상용 AZ31 압연재, Modified-AZ31 압출재, 마찰교반접합된 Modified-AZ31 압연재, Modified-AZ31 압연재, 마찰교반접합된 Modified-AZ31 압출재 순으로 부식속도가 빠르게 나타났다. 동전위 분극시험 결과 합금별로 비교해보았을 때 상용 AZ31 의 환원 영역에서의 전류밀도가 크게 나타났다. 영역별로 비교해보았을 때는 Modified-AZ31 압출재는 BM 과 SZ 의 환원 영역에서의 전류밀도가 비슷하였고, Modified-AZ31 압연재, 상용 AZ31 압연재는 BM 에 비하여 SZ 의 환원 영역에서의 전류밀도가 높게 나타났다.

Modified-AZ31 압출재는 마찰교반접합에 의하여 일어난 미세조직 변화가 이차상보다 결정립 크기에서 크게 나타나 부식 특성에 영향을 미치는 주요 인자를 결정립 크기로 볼 수 있었다. Modified-AZ31 압연재와 상용 AZ31 압연재는 마찰교반접합에 의하여 일어난 미세조직 변화가 결정립 크기보다 이차상에서 크게 나타나 부식 특성에 영향을 미치는 주요 인자를 이차상의 성분으로 볼 수 있었다.

목차

국문 요약.....	3
1. 서론.....	10
1.1 연구배경.....	10
1.2. 연구목적.....	16
2. 이론적 배경.....	17
2.1 마그네슘 합금.....	17
2.1.1 마그네슘 합금의 특징.....	17
2.1.2 AZ31 합금의 미세조직 및 부식 거동.....	18
2.1.3 마그네슘 합금의 자동차 산업에서의 적용.....	21
2.2 마찰교반접합 (Friction Stir Welding, FSW).....	24
2.2.1 마찰교반접합의 원리.....	24
2.2.2 마찰교반접합의 특징 및 적용재료.....	27
2.2.3 마찰교반접합부의 미세조직.....	28
3. 실험 방법.....	30
3.1 대상 접합 소재.....	30
3.2 접합 방법 및 조건.....	30
3.3 미세조직 분석.....	33
3.4 부식 시험.....	34
3.4.1 염수분무시험 및 침지시험.....	34
3.4.2 개방 회로 전위 측정 및 동전위 분극시험.....	35
4. 실험 결과.....	36
4.1 미세조직.....	36
4.2 부식 거동 관찰.....	53
4.2.1 염수분무시험.....	53

4.2.2 침지시험	56
4.2.3 개방 회로 전위 측정 및 동전위 분극시험	60
5. 고찰	70
5.1 마찰교반접합에 의한 미세조직 변화.....	70
5.1.1 마찰교반접합에 의한 결정립 변화	70
5.1.2 마찰교반접합에 의한 이차상 변화	73
5.2 마찰교반접합에 의한 부식 특성 변화.....	78
5.3 접합부 미세조직 변화와 부식 특성과의 상관관계	81
6. 결론	87
7. 참고문헌	89
영문 요약.....	92

List of Tables

Table 4-1 Average grain size, average secondary phase size, and secondary phase fraction of A, B, C	46
Table 4-2 Open circuit potential value.....	64
Table 4-3 Corrosion potential(E_{corr}) value and current density(I_{corr}) value	69

List of figures

Figure 1-1 Greenhouse gas and fuel efficiency trends in major countries (KAMA).....	12
Figure 1-2 Average greenhouse gas and average fuel efficiency standards.....	12
Figure 2-1 Phase diagram of Mg-Al (full line), Mg-Al-1Zn (dotted line).....	19

Figure 2-2 Figure Galvanic corrosion between α -Mg and β phases: (a) discontinuous β phase along grain boundary (b) continuous β phase along grain boundary	20
Figure 2-3 Prospects for Application of Magnesium alloys automotive parts(Mg 2020, DOE).....	22
Figure 2-4 Examples of automotive components made of Magnesium alloys (a- Engine block, b- Steering column module, c- Door frame / Key lock housing, d- Oil pan).....	23
Figure 2-5 Basic principle of friction stir welding	25
Figure 2-6 Friction Stir Welding Tool.....	26
Figure 2-7 Friction Stir Welding process.....	26
Figure 2-8 Microstructural regions overview in FSW of AZ31	29
Figure 3-1 (a) Schematic diagram of FSW tool, (b) FSW tool	31
Figure 3-2 Schematic diagram of butt joint specimen.....	31
Figure 3-3 RM-1 FSW machine (Manufacturing Technology Inc).....	32
Figure 3-4 (a) Schematic diagram of Salt spray test specimen, (b) Schematic diagram of Immersion test specimen	34
Figure 3-5 Schematic diagram of Potentiodynamic polarization test specimen (a) BM, (b) SZ	35
Figure 4-1 Panorama images of (a) A(Modified-AZ31 압출재), (b) B(Modified-AZ31 압연재), (c) C(상용 AZ31 압연재).....	38
Figure 4-2 OM images of A(Modified-AZ31 압출재) BM(Base metal).....	39
Figure 4-3 OM images of A(Modified-AZ31 압출재) SZ(Stir zone).....	40
Figure 4-4 OM images of B(Modified-AZ31 압연재) BM(Base metal).....	41
Figure 4-5 OM images of B(Modified-AZ31 압연재) SZ(Stir zone)	42

Figure 4-6 OM images of C(상용 AZ31 압연재) BM(Base metal).....	43
Figure 4-7 OM images of C(상용 AZ31 압연재) SZ(Stir zone).....	44
Figure 4-8 SEM images of (a) A(Modified-AZ31 압출재), (b) B(Modified-AZ31 압연재), (c) C(상용 AZ31 압연재)	45
Figure 4-9 SEM images and SEM-EDS results of A(Modified-AZ31 압출재).....	47
Figure 4-10 SEM images and SEM-EDS results of A(Modified-AZ31 압출재) BM(Base metal).....	48
Figure 4-20 Corrosion behavior of A, B, C by immersion time	57
Figure 4-21 Corrosion behavior of Friction stir jointed A, B, C by immersion time	58
Figure 4-22 Corrosion rates of A, B, C by immersion test.....	59
Figure 4-23 Open circuit potential tests results of A(Modified-AZ31 압출재).....	61
Figure 4-24 Open circuit potential tests results of B(Modified-AZ31 압연재)	62
Figure 4-25 Open circuit potential tests results of C(상용 AZ31 압연재).....	63
Figure 4-26 Potentiodynamic polarization curve compared of each magnesium alloy	65
Figure 4-27 Potentiodynamic polarization curve for SZ and BM of A(Modified-AZ31 압출재)	66
Figure 4-28 Potentiodynamic polarization curve for SZ and BM of B(Modified-AZ31 압연재)	67
Figure 4-29 Potentiodynamic polarization curve for SZ and BM of C(상용 AZ31 압연재).....	68
Figure 5-1 Microstructure changes before and after FSW.....	71
Figure 5-2 Grain size distribution before and after FSW.....	72
Figure 5-3 Secondary phase of A(Modified-AZ31 압출재), B(Modified-AZ31 압연재), C(상용 AZ31 압연재)	74

Figure 5-4 Secondary phase change after FSW	75
Figure 5-5 Phase diagram of A(Modified-AZ31 압출재), B(Modified-AZ31 압연재).....	76
Figure 5-6 Phase diagram of C(상용 AZ31 압연재)	77
Figure 5-7 SEM images of secondary phase change before and after FSW.....	79
Figure 5-8 Salt spray test and Immersion test results of FSWed specimens	80
Figure 5-9 Corrosion Rate results graph.....	80
Figure 5-12 OM images, Average Grain size graph, Corrosion Rate graph of A(Modified-AZ31 압출재)	84
Figure 5-13 Secondary phase change before and after FSW.....	85
Figure 5-14 Potentiodynamic graphs of B(Modified-AZ31 압연재), C(상용 AZ31 압연재)	85
Figure 5-15 Corrosion Rate graph of B(Modified-AZ31 압연재), C(상용 AZ31 압연재)	86

1. 서론

1.1 연구배경

최근 화석 연료의 고갈 및 지구 온난화에 대한 심각성이 대두되고 있다. Figure 1-1, Figure 1-2 에 나타난 바와 같이 세계 각국의 온실가스 및 연비에 대한 규제가 점차 강화되는 추세이다. 자동차 관련 여러 환경규제에 대응하기 위하여 자동차 경량화의 필요성이 제기되었다. 자동차 연비 향상의 방안에는 설계 최적화를 통한 소형화, 엔진 효율 향상, 소재 부품의 중량 저감 등이 있다. 그 중 경량 소재 적용을 통한 소재 부품 경량화가 가장 현실적인 대안으로 주목받고 있다. 이에 마그네슘 합금, 알루미늄 합금과 같은 경량 소재에 대한 관심이 증가하였다.[1][2] 특히, 구조용 금속재료 중 가장 가벼운 소재로 높은 비강도를 가지는 마그네슘 합금에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. Figure 1-3 은 자동차 부품에 마그네슘 합금을 적용하였을 때를 나타내고 있으며 자동차 부품의 중량을 22~70%까지 줄여 경량화를 달성할 수 있다는 것을 보여주고 있다.[3] Figure 1-4 은 마그네슘 합금 시장의 규모가 점차 성장할 것으로 전망됨을 나타낸다.[4]

이러한 마그네슘 합금이 Figure 1-5 와 같이 구조용 재료로 사용되기 위해선 접합이 필수적이다. 마그네슘은 용점이 낮고, 용융접합에서는 기공 형성 방지가 어렵다는 문제점이 있다. Figure 1-6 은 마찰교반접합(Friction Stir Welding, FSW) 공정도로 이 접합법은 용점 이하의 온도에서 접합이 이루어지는 고상접합법으로 마그네슘 합금의 접합에 적합하다 볼 수 있다.

이처럼 마그네슘 합금은 경쟁소재 대비 용접성이 좋지 않아 적용범위 확대를 위하여 마그네슘 합금의 접합부 미세조직 및 특성에 대한 연구가 필요하다. 또한 마찰교반접합 시 발생하는 마찰열과 소성변형으로 인한 상용 AZ31 합금 접합부의 미세조직, 특성에

대한 연구는 보고되고 있지만, 유니스트 개발 신합금 접합부의 미세조직과 특성 변화에 대한 연구는 미흡한 실정이기에 이에 대한 연구가 필요하다.

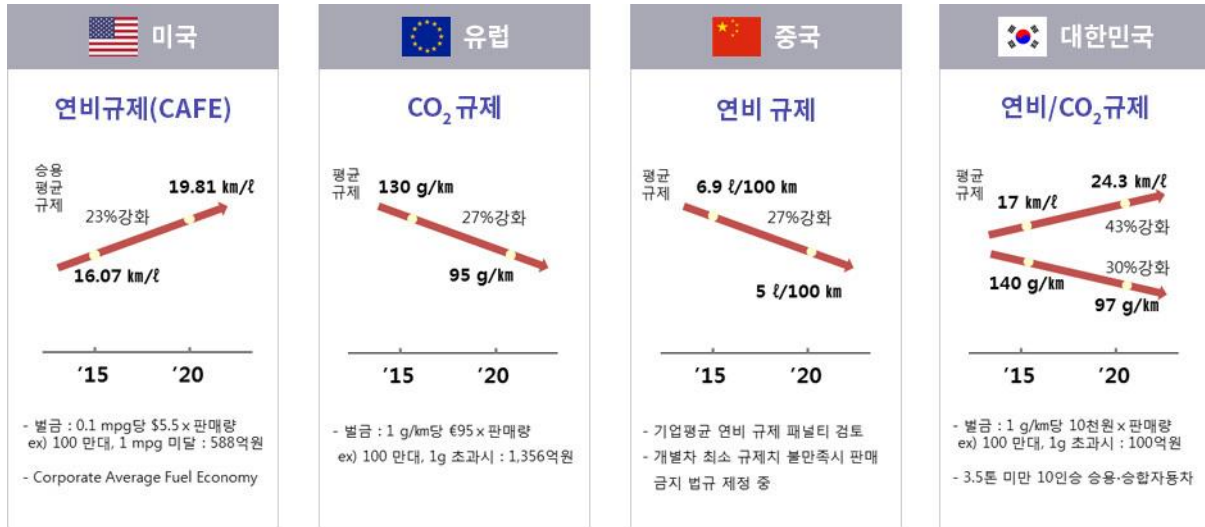


Figure 1-1 Greenhouse gas and fuel efficiency trends in major countries (KAMA)

[자동차 평균 온실가스 차기 기준(안)] (단위 : g/km)

분류 \ 연도	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30
10인 이하 승용승합	97	97	95	92	89	86	83	80	75	70
승합(11~15인)소형화물	166	166	164	161	158	158	155	152	149	146

[자동차 평균 연비 차기 기준(안)] (단위 : km/L)

분류 \ 연도	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30
10인 이하 승용승합	24.3	24.3	24.4	25.2	26.0	27.0	27.9	29.0	30.9	33.1
승합(11~15인)소형화물	15.2	15.2	15.4	15.7	16.0	16.0	16.3	16.6	16.9	17.3

Figure 1-2 Average greenhouse gas and average fuel efficiency standards

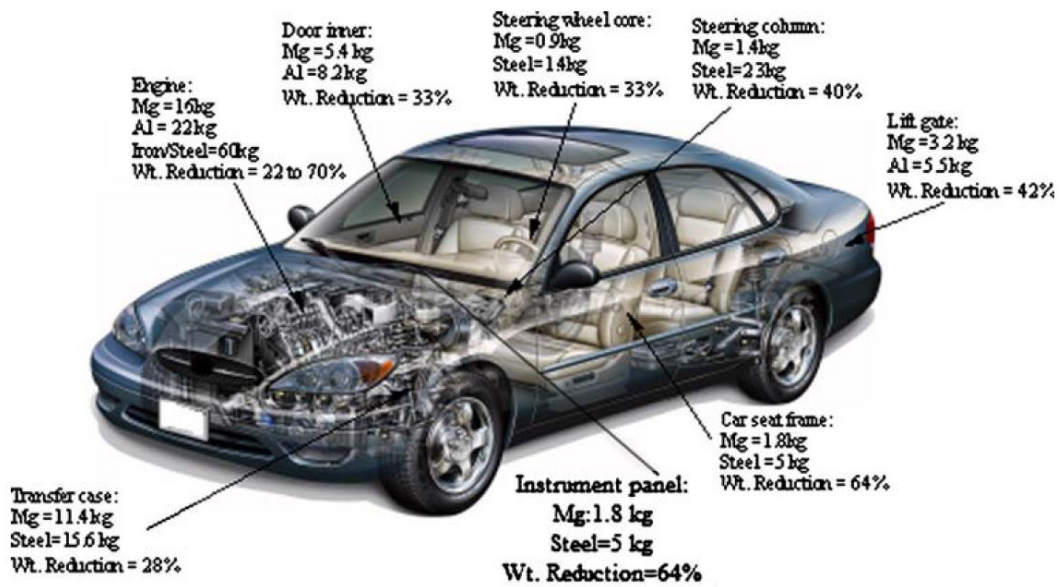


Figure 1-3 Automobile components made of Magnesium alloys

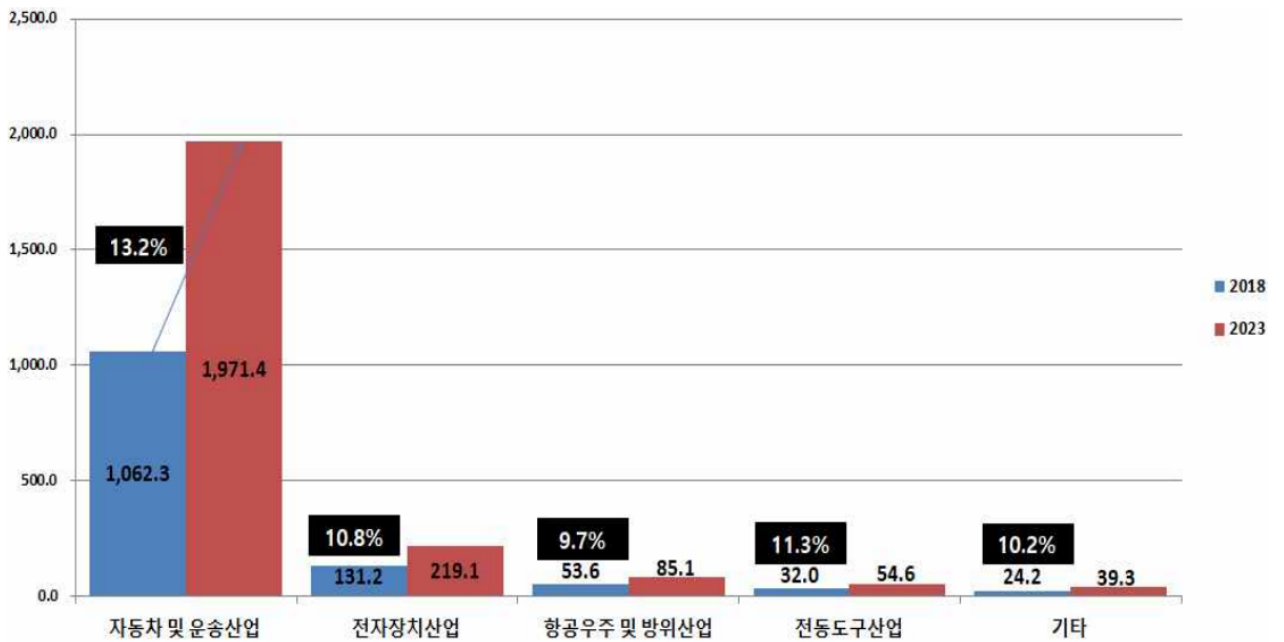


Figure 1-4 Global Magnesium alloy market size and forecast by industry (Unit: USD Million)

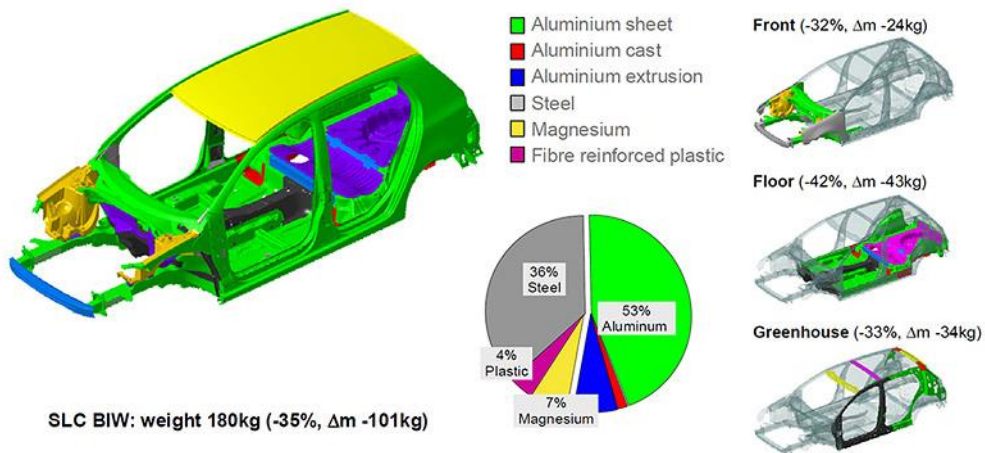


Figure 1-5 Super light car concept lightweight car body material distribution (WorldAutoSteel)

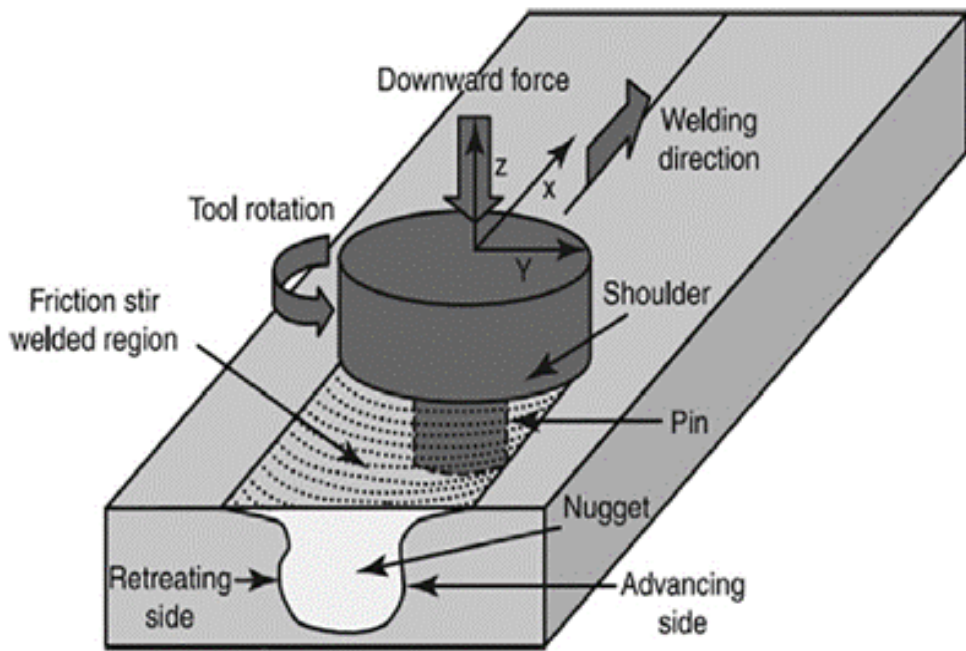


Figure 1-6 Schematic diagram of FSW process

1.2. 연구목적

본 연구에서는 마찰교반접합 공정을 이용하여 Modified-AZ31 압출재, 압연재, 상용 AZ31 압연재를 각각 맞대기 접합하였다. Modified-AZ31 과 상용 AZ31 의 접합부 특성 차이를 분석하고, AZ31 마그네슘 합금 마찰교반접합부의 미세조직 변화가 부식 거동에 미치는 영향을 밝히는 것이 본 연구의 목표다.

2. 이론적 배경

2.1 마그네슘 합금

2.1.1 마그네슘 합금의 특징

마그네슘의 밀도는 1.74 g/cm^3 로 알루미늄의 $2/3$, 철강의 $1/5$ 에 해당하는 경량 금속재료이며 기존 자동차 부품에 적용되고 있는 철강소재 대비 40~50% 경량화가 가능한 소재로 주목받고 있다. 구조용 소재 중에서 최소의 밀도를 가질 뿐만 아니라 비강도, 비탄성 계수, 치수안정성, 충격 저항성, 기계가공성 등에서 우수한 물성을 나타낸다. 하지만, 경쟁 소재 대비 낮은 내식성, 성형성, 용접성 등의 단점으로 적용 범위가 제한적이다.[6]

마그네슘의 제한적인 적용 범위를 확대하기 위하여 가장 먼저 해결해야 할 문제는 마그네슘 합금의 열악한 내식성을 개선하는 것이다. 내식성을 향상시키는 방안에는 소재 자체의 내식성을 향상시키는 방법과 표면처리를 하는 방법이 있다. 주로 표면처리에 대한 연구가 진행되어왔으나 최근에는 표면 피막 특성을 제어하거나 기지와 이차상 간의 미소 갈바닉 부식 제어를 통한 소재 자체의 내식성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다.[2]

상용 마그네슘 합금은 첨가된 합금원소의 성분, 종류에 따라 다양한 합금계가 존재한다. AZ 계열(Mg-Al-Zn), AM 계열(Mg-Al-Am), AE 계열(Mg-Al-RE), ZK 계열(Mg-Al-Zr) 등이 주로 사용된다. 구조용으로 사용되는 마그네슘 합금은 주조용(casting) 합금과 단련용(wrought) 합금으로 구별된다.[7, 8]

2.1.2 AZ31 합금의 미세조직 및 부식 거동

본 연구에서는 AZ 계열의 AZ31 합금이 사용되었다. AZ31 합금은 마그네슘 3wt%, 알루미늄 1wt%, 아연이 첨가되어 적절한 강도와 연성을 가진다. Figure 2-1, 2-2 에서 나타나듯이 냉각과정에서 α 상(α -Mg)이 형성된 후에 금속간 화합물인 β 공정상(β -Mg₁₇Al₁₂)이 형성된다. 아연은 주로 β 상에 고용되어 금속간 화합물 Mg₁₇(Al, Zn)₁₂ 이 형성되어 고용강화 효과를 나타낸다.[8]

위에서 언급한 바와 같이 마그네슘 합금은 열악한 내식성을 가진다. 순수 마그네슘의 경우 단상조직을 가져 표면 전체에 균일하게 부식이 진행되지만, 마그네슘 합금은 다상조직을 가져 pit 생성에 의한 국부부식(localized corrosion)의 형태를 나타낸다. 이는 Figure 2-2 에 나타난 바와 같이 서로 다른 부식전위(corrosion potential)를 가지는 α -Mg 상과 β 상 사이에 미소 갈바닉 셀(micro galvanic cell)이 형성되어 상대적으로 낮은 부식전위를 가지는 α -Mg 상에서 pit 가 생성되게 된다.

마그네슘의 부식 거동은 결정립 크기, 결정립 내부의 전위밀도, 쌍정, 기지와 이차상 간의 전위차 등에 따라 변화한다. 마그네슘 합금의 결정립 크기가 감소하면 내식성이 향상된다. 그러나 결정립 내부에 전위밀도가 높거나 쌍정이 존재하는 경우 내식성은 감소한다. 기지와 이차상 간의 전위차가 감소하면 내식성은 향상된다.[9]

울산과학기술원에서 개발한 합금은 AZ31 에 희토류 원소를 미량 첨가해 α -Mg 상과 β 상 사이의 전위차를 줄여 내식성을 향상시켰다.[23, 24]

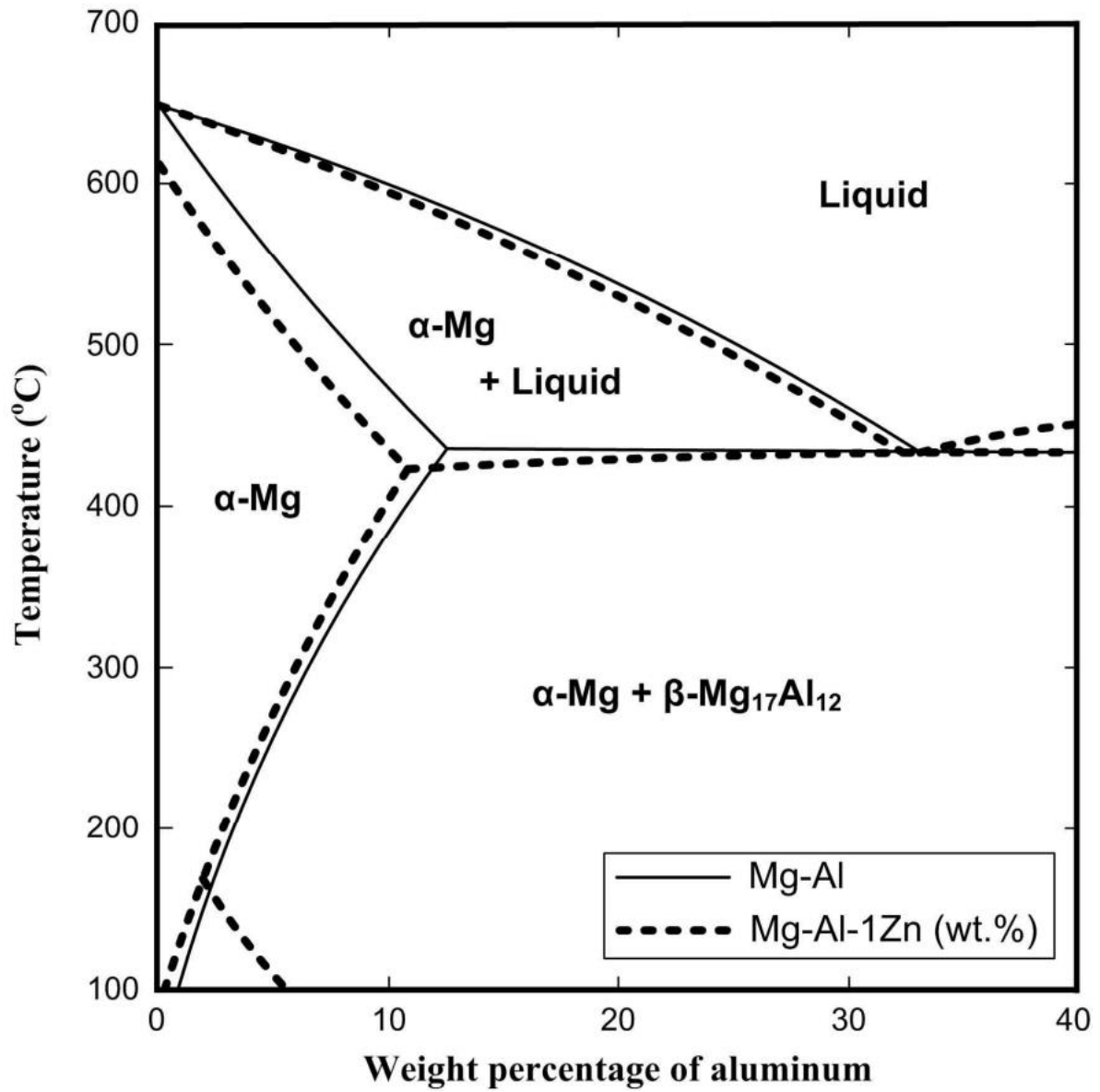


Figure 2-1 Phase diagram of Mg-Al (full line), Mg-Al-1Zn (dotted line)

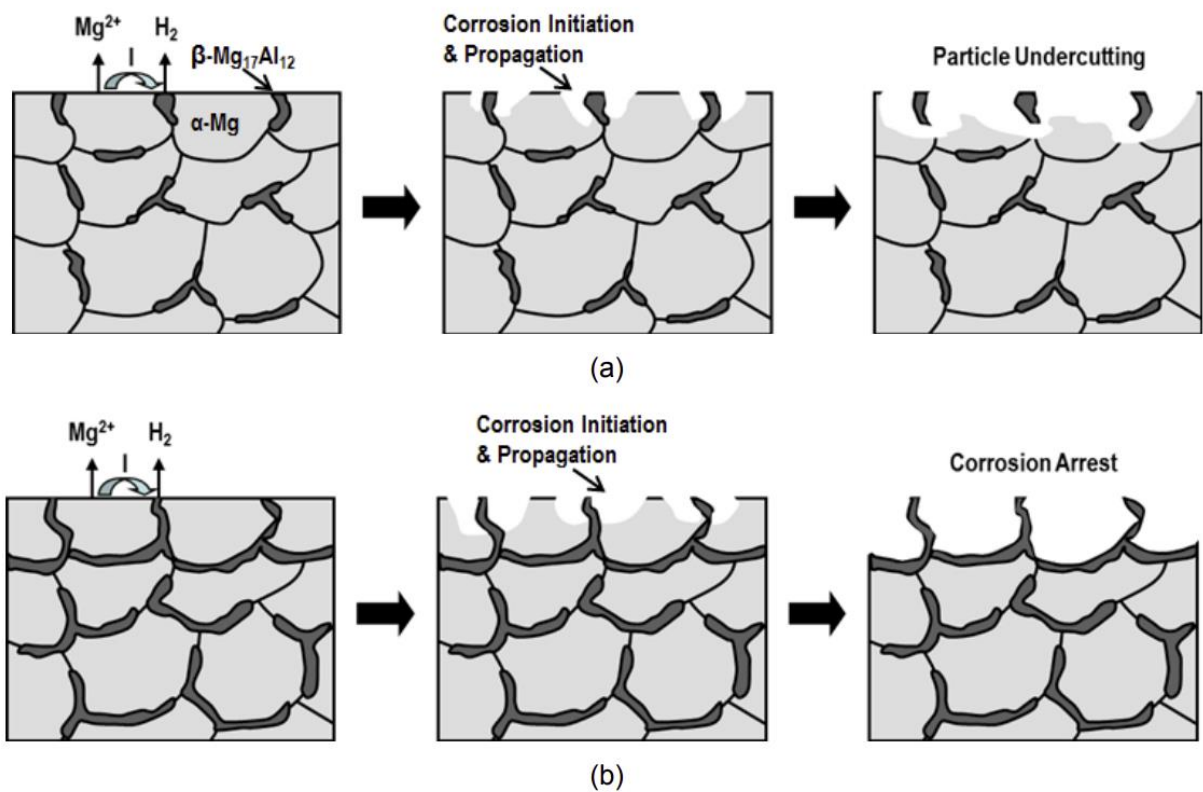


Figure 2-2 Figure Galvanic corrosion between α -Mg and β phases: (a) discontinuous β phase along grain boundary (b) continuous β phase along grain boundary

2.1.3 마그네슘 합금의 자동차 산업에서의 적용

자동차의 연비 향상을 위하여 기존 자동차 부품에 적용되고 있는 철강 소재를 대체하는 소재로 마그네슘 합금, 알루미늄 합금, 플라스틱 등이 제시되고 있다. 그 중 마그네슘 합금은 구조용 금속재료 중 가장 가볍고 비강도가 우수한 소재로 자동차 산업에서 주목받고 있다.

Figure 2-3 와 같이 자동차 산업에서 적용될 것으로 전망된다. AZ 계열의 범용합금은 비강도, 내식성, 주조성이 우수하여 주로 engine valve cover, engine bracket 등에 적용된다. AM 계열의 고인성합금은 steering wheel, seat frame 등으로 적용이 확대되고 있으며, AS, AE 계열의 내열합금은 transmission case, transmission side cover 등에 적용되고 있다.[10] Figure 2-4 은 마그네슘 합금으로 만든 자동차 부품 사례를 보여준다.[11]

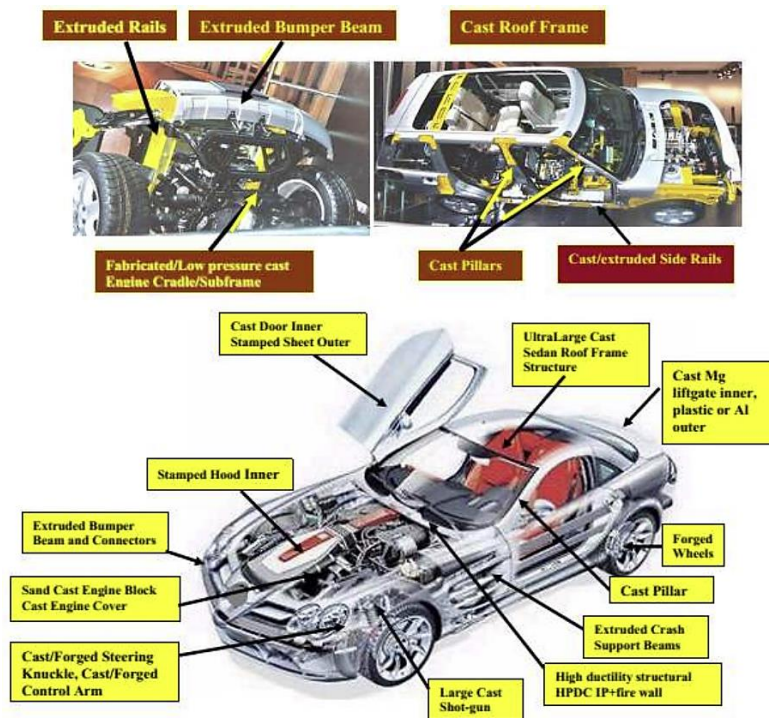


Figure 2-3 Prospects for Application of Magnesium alloys automotive parts(Mg 2020, DOE)

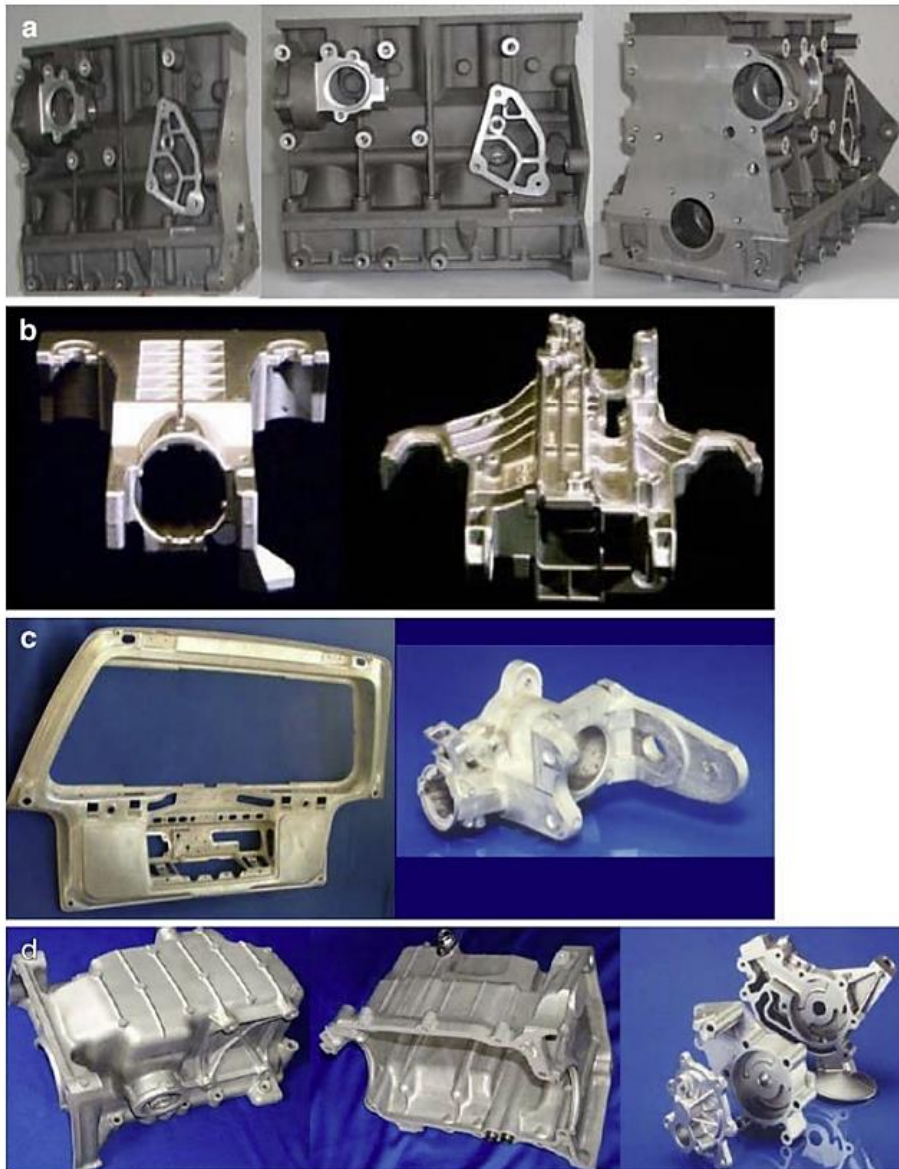


Figure 2-4 Examples of automotive components made of Magnesium alloys (a- Engine block, b- Steering column module, c- Door frame / Key lock housing, d- Oil pan)

2.2 마찰교반접합 (Friction Stir Welding, FSW)

2.2.1 마찰교반접합의 원리

마찰교반접합은 Figure 2-5 에 나타나듯이 회전 공구에 의하여 마찰열과 소성변형이 발생하여 재료가 연화되며 소성유동으로 접합이 이루어지는 고상접합법이다. 공구는 Figure 2-6 와 같이 pin 과 shoulder 가 있고[13], 접합모재에 비해 경한 재질인 비소모식 회전 공구를 사용한다. Figure 2-7 는 맞대기 마찰교반접합의 공정도이며 4 단계로 구분된다.[12]

- (1) : Plunging 단계로, 회전하는 공구를 피접합재에 삽입시켜 열을 발생시킨다. 이어서 shoulder 부분이 삽입되어 가열 영역을 확대시킨다.
- (2) : Stirring 단계로, 마찰열에 의해 연화된 재료가 공구를 통해 소성유동되어 FSW nugget 을 형성함으로써 접합이 이루어진다.
- (3) : Traversing 단계로, 삽입된 공구가 접합선을 따라 이동하며 고체상태의 이음부를 형성한다.
- (4) : Retracting 단계로, 접합이 완료된 후에 공구를 피접합재로부터 후퇴시킴으로써 keyhole 이 형성된다.

Figure 2-5 의 마찰교반접합 공구에서 Advancing side(AS)는 공구의 회전 방향과 용접 방향이 동일하고, Retreating side(RS)는 공구의 회전 방향과 용접 방향이 반대이다. AS 의 재료는 아래로 이동하는 반면 RS 의 재료는 아래로 이동한다.[14]

마찰교반접합의 기본적인 접합 조건변수에는 공구 형상, 공구 회전수, 접합 속도 등이 있다. 이러한 조건은 접합재의 재질, 형상, 두께 등에 의해 적절히 선택되어야 한다.[12]

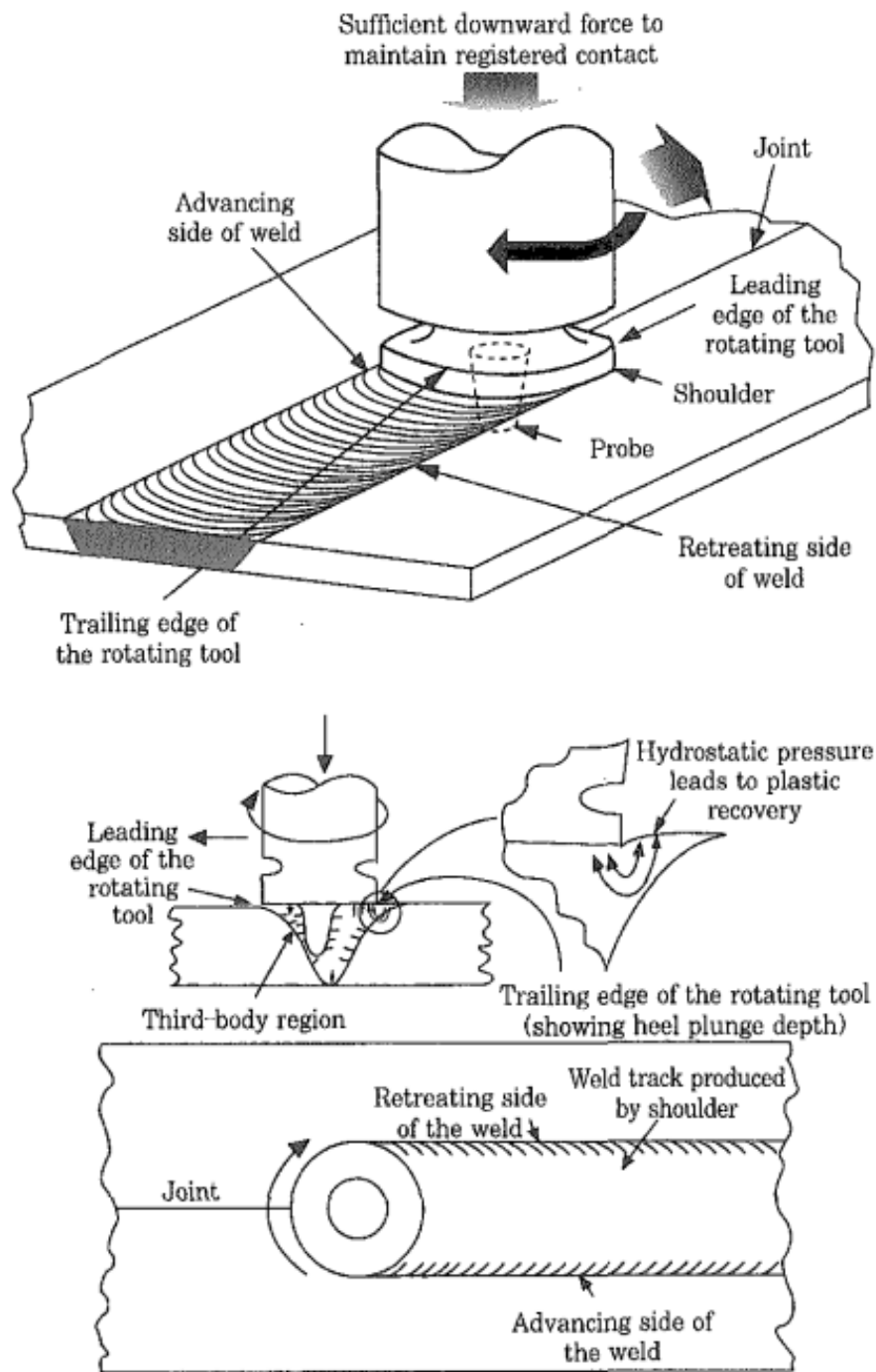


Figure 2-5 Basic principle of friction stir welding

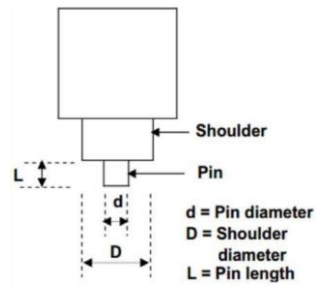


Figure 2-6 Friction Stir Welding Tool

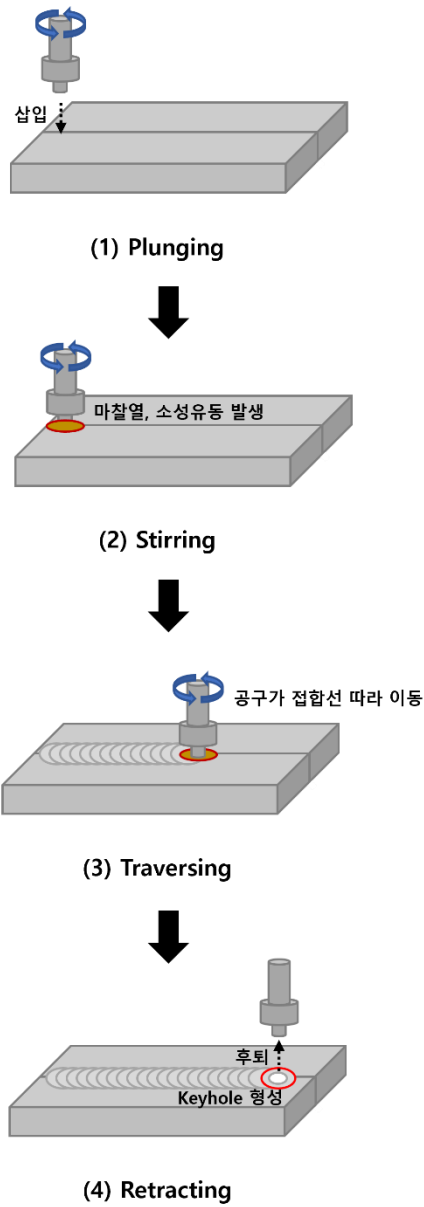


Figure 2-7 Friction Stir Welding process

2.2.2 마찰교반접합의 특징 및 적용재료

마찰교반접합의 장점은 다음과 같다.[12]

- ① 고상접합 기술이다.
- ② 접합에 따른 변형이 없거나 있어도 용융용접에 비해 적다.
- ③ 용융용접 시 발생하기 쉬운 기공, 균열 등의 결함이 적게 발생한다.
- ④ 접합부 조직에 주상정 등이 생기지 않고 소성유동에 의해 결정립 미세화가 가능하다.
- ⑤ 접합 중 적외선, 자외선 등의 유해광선이 발생하지 않는다.
- ⑥ 차폐가스, 용가재가 필요하지 않다.

이러한 여러 장점을 가져 자동차 산업에서 주목받고 있으며 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, 강철을 접합하는 용도로 사용되고 있다.[15]

마찰교반접합은 피접합재의 용융점 이하의 온도에서 공정이 진행되기에 용융용접이 불가능한 소재에 용이하게 적용할 수 있다. 용점이 1375-1530°C 인 철에 비하여 알루미늄 660°C, 마그네슘 650°C 과 같이 용점이 낮은 소재에도 유용하다. 특히, 마그네슘은 증발온도가 1090°C 가량으로 대부분의 용융접합에서는 이 온도를 초과하여 기공 형성을 방지하는 것이 쉽지 않기에 마찰교반접합법이 적합하다.[12]

2.2.3 마찰교반접합부의 미세조직

마찰교반접합부의 미세조직에 영향을 미치는 3 가지 주요 요인은 변형 온도, 소성 변형률, 변형 속도이다. 접합 공정이 시작되었을 때 재결정화가 일어나 새로운 결정립이 형성된다. 접합이 진행됨에 따라 지속적인 변형이 발생하여 재결정화된 결정립에 새로운 전위가 형성된다. 더 많은 변형이 일어나 재결정화를 위한 새로운 핵 생성 사이트가 제공된다. 이는 동적 재결정화 현상으로 결정립을 미세하게 만든다.[16]

마찰교반접합부의 미세조직은 사용 재료와 공정 조건에 따라 매우 가변적이다. 접합부의 단면을 나타낸 Figure 2-8 에서 마찰교반접합부의 특징적인 미세조직이 나타나 있다 [12]. Base metal(BM), Stir zone(SZ), Thermo-mechanically affected zone(TMAZ), Heat-affected zone(HAZ)으로 구성된다. BM 은 열 영향과 소성변형의 영향을 모두 받지 않은 영역이다. SZ 과 TMAZ 는 열 영향과 소성변형의 영향을 모두 받은 영역이다. HAZ 는 소성변형의 영향은 받지 않고 열 영향만 받은 영역이다. 열 영향과 소성변형이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 공구 설계, 접합 조건 등의 다양한 조건에 따라 미세조직이 다르게 나타난다.[17]

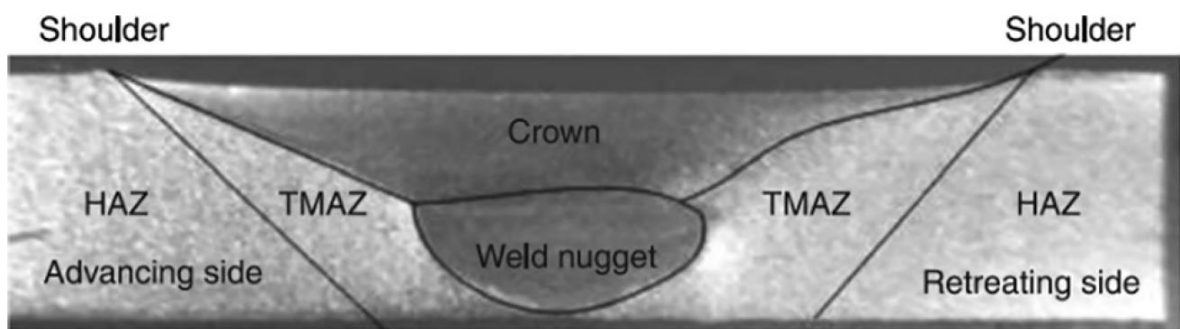


Figure 2-8 Microstructural regions overview in FSW of AZ31

3. 실험 방법

3.1 대상 접합 소재

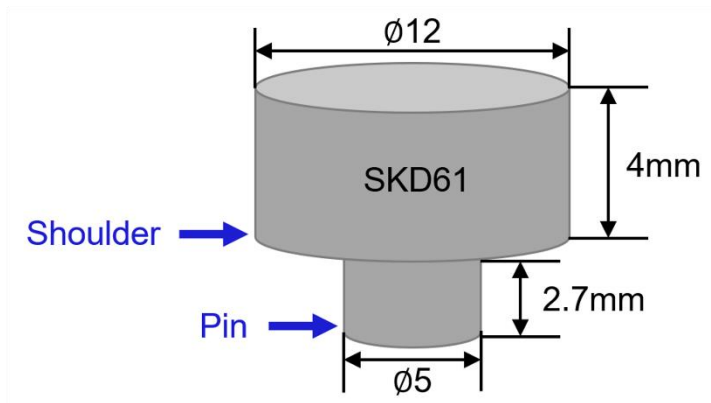
본 연구에서 다른 AZ31 합금의 경우 3mm 두께의 내식성이 향상된 Modified-AZ31 압출, 압연 판재와 상용 AZ31 압연 판재로 총 3 가지의 합금을 사용하였다. Modified-AZ31 은 울산과학기술원에서 개발된 합금으로 Mg-4Al-0.2Zn-0.04Mn 의 조성에 희토류 원소 'X'가 첨가되었다. 상용 AZ31 은 Mg-3Al-0.8Zn-0.34Mn 의 조성을 가진다. 압출재의 경우 410°C 에서 8 시간 균질화 처리한 후에 300°C 에서 30mm/sec 로 열간 압출되었다. 압연재의 경우 420°C 에서 1 시간 균질화 처리한 후에 350°C 에서 20% 압하율로 열간 압연되었고, 345°C 에서 1 시간 어닐링 열처리되었다. Modified-AZ31 압출재는 A, Modified-AZ31 압연재는 B, 상용 AZ31 압연재는 C 로 명명하였다.

이번 연구는 울산과학기술원에서 AZ31 합금을 제공해 주어 진행되었다.

3.2 접합 방법 및 조건

본 연구에서는 A, B, C 총 3 종의 마그네슘 합금을 각각 마찰교반접합하였다. Figure 3-1 은 마찰교반접합을 하기 위하여 사용한 공구이다. 이 공구는 SKD61 소재에 직경 12mm 의 shoulder, 직경 5mm, 길이 2.7mm 의 pin 으로 구성되어 있다. 공구 회전속도(rotation speed) 1500rpm, 공구 이송속도(traverse speed) 100mm/min, 공구 삽입 깊이(plunge depth) 0.1mm, 공구 삽입/토출 속도(plunge speed) 10mm/min, 접합 시작과 후의 유지 시간(dwell time) 3 초의 접합 조건으로 Figure 3-2 에 나타난 바와 같이 압연, 압출 방향과 동일한 방향으로 맞대기 접합하였다. Figure 3-3 의 Manufacturing Technology Inc 장비를 사용하여 접합을 진행하였다.

(a)



(b)



Figure 3-1 (a) Schematic diagram of FSW tool, (b) FSW tool

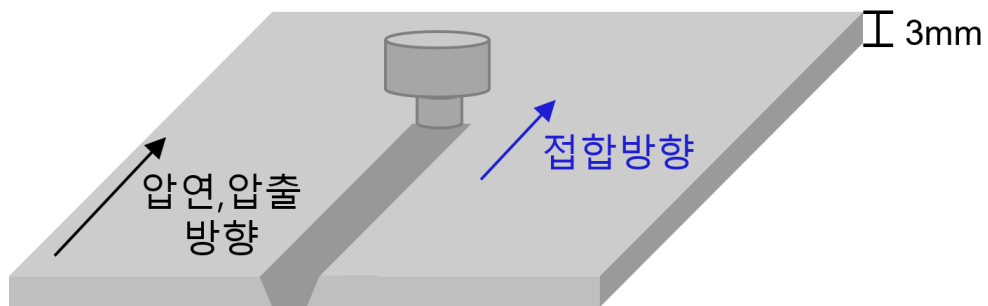


Figure 3-2 Schematic diagram of butt joint specimen



Figure 3-3 RM-1 FSW machine (Manufacturing Technology Inc)

3.3 미세조직 분석

본 연구에서 사용된 3 종의 마그네슘 합금의 접합부 단면(T-S plane)에 대한 미세조직 관찰을 위해 800grit - 1200grit - 2400grit - 4000grit 사포로 연마 후 3 μm diamond suspension - 1 μm diamond suspension - 0.04 μm Colloidal silica suspension 순으로 연마를 진행하였다. picric acid 4.2g, acetic acid 10ml, ethanol 70ml, distilled water 10ml 를 혼합한 용액에 3 초간 에칭 후 OLYMPUS 사의 BX51M 광학현미경(Optical Microscope, OM)과 Jeol 사의 JSM-IT200 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 통해 미세조직을 분석하였다. 또한 Image analysis 를 통해 각 합금 미세조직의 상분을 정량화 및 결정립, 이차상 크기 측정을 하였다. 이차상의 조성 및 상을 분석하기 위하여 주사전자현미경 분광분석(SEM-EDS)을 진행하였다.

3.4 부식 시험

3.4.1 염수분무시험 및 침지시험

본 연구에서 사용된 3종의 마그네슘 합금별(A, B, C) 및 용접부 영역별(BM, SZ) 갈바닉 부식 거동을 비교하기 위해 염수 환경에서 염수분무시험(Salt spray test)과 침지시험(Immersion test)을 진행하였다. Figure 3-4에 나타난 바와 같이 염수분무시험의 경우 25mm X 16mm X 2mm 규격의 시편을 사용하였고, 침지시험의 경우 24mm X 7mm X 2mm 시편에 1 ϕ hole 이 있는 시편을 사용하였다. 마찰교반접합된 시편을 800-1200-2400-4000grit 까지 연마하고 무게를 측정 한 후에 염수분무시험과 침지시험을 진행하였다. 염수분무시험의 경우 KS D 9502 표준 시험법을 사용해 5wt% NaCl 용액 환경에서 최대 48h 동안 분무하였으며, 침지 시험의 경우 KS D 0306 표준 시험법을 사용해 3.5wt% NaCl 용액 환경에서 최대 72h 동안 침지하였다. 부식 시험 이후 CrO₃ 200g, Barium acetate 20g, Silver Nitrate 10g, distilled water 100ml 를 혼합한 클리닝 용액으로 시편의 표면 및 내부의 부식생성물을 제거한 후 무게를 측정해 부식 속도를 계산하여 마그네슘 합금별 부식 속도를 비교하였다.

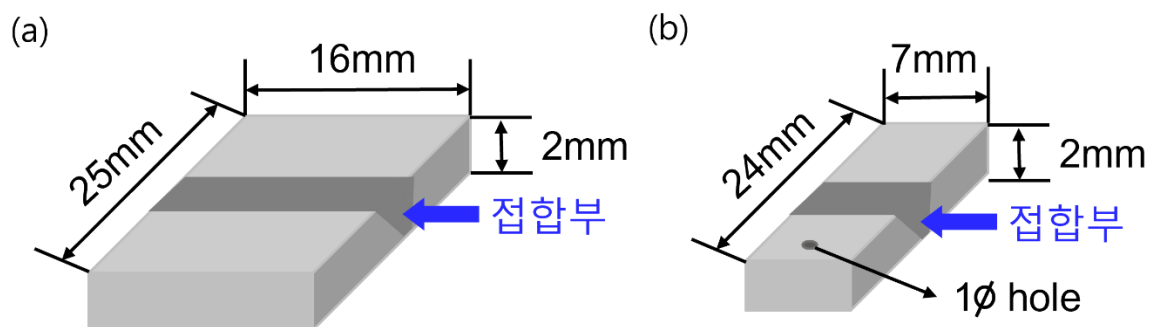


Figure 3-4 (a) Schematic diagram of Salt spray test specimen, (b) Schematic diagram of Immersion test specimen

3.4.2 개방 회로 전위 측정 및 동전위 분극시험

본 연구에서 사용된 3 종의 마그네슘 합금별(A, B, C) 및 용접부 영역별(BM, SZ) 전기화학 전위에 따른 부식 거동을 측정하기 위해 개방 회로 전위(Open circuit potential, OCP) 측정과 동전위 분극시험이 진행되었다. 실험을 시작하기 전 시편을 800grit - 1200grit - 2400grit - 4000grit 사포로 연마하였으며 통상적인 3 전극 셀을 이용해 실험을 진행하였다. 작업전극(working electrode)에는 시편을, 상대전극(counter electrode)으로는 Pt 를, 기준전극(reference electrode)으로는 Ag/AgCl 을 사용했다. 3.5wt% NaCl 용액 환경에서 동전위 분극시험 전에 900 초 동안 -200mV 로부터 1mV/s 로 스캔하여 OCP 를 측정하였다. Figure 3-5 와 같이 접합부 표면(L-T plane)의 BM(Base metal), SZ(Stir zone)에 대하여 지름 1mm 의 원만큼만 노출시켜 각각 6 회 반복 시험해 3 종의 마그네슘 합금 BM, SZ 영역의 E_{corr} , I_{corr} 값을 정량화하였다.

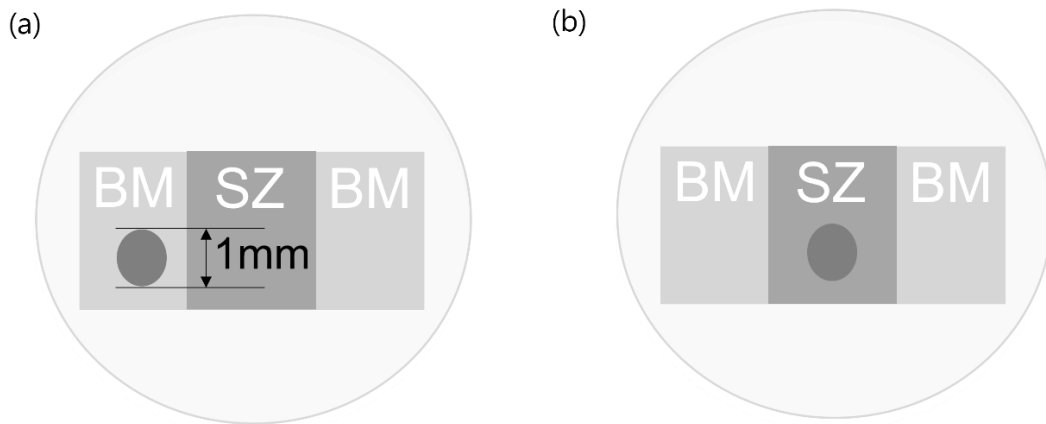


Figure 3-5 Schematic diagram of Potentiodynamic polarization test specimen (a) BM, (b) SZ

4. 실험 결과

4.1 미세조직

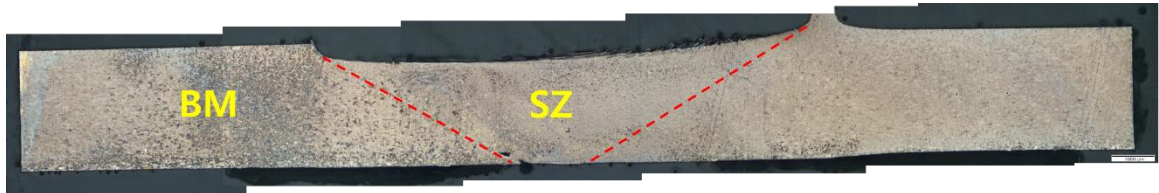
Figure 4-1, 4-2, 4-3, 4-4, 4-5, 4-6, 4-7 에 각 마그네슘 합금에 대하여 광학현미경(OM)으로 관찰한 미세조직을 나타내었고, Table 4-1 에 정량적으로 결정립 크기를 측정한 결과를 나타내었다. A BM 의 평균 결정립 크기가 약 $33\mu\text{m}$ 로 다른 합금들에 비하여 매우 조대한 결정립이 나타났다. B BM, C BM 의 경우 각각 평균 결정립 크기가 $9\mu\text{m}$, $11\mu\text{m}$ 로 비슷하게 나타났다. A 의 경우 $33\mu\text{m}$ 에서 $10\mu\text{m}$, B 의 경우 $9\mu\text{m}$ 에서 $8\mu\text{m}$, C 의 경우 $11\mu\text{m}$ 에서 $7\mu\text{m}$ 로 3 종의 마그네슘 합금 모두 BM 에 비하여 SZ 의 결정립이 미세화된 것을 알 수 있었다.

Figure 4-8, 4-9, 4-10, 4-11, 4-12, 4-13, 4-14, 4-15, 4-16, 4-17 에는 각 마그네슘 합금에 대하여 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 이차상과 주사현미경 분광분석(SEM-EDS Point, Mapping)으로 이차상을 조성 분석한 결과를 나타내었다. Table 4-1 은 주사전자현미경 사진을 기반으로 이차상 크기와 분율을 정량화한 결과이다.

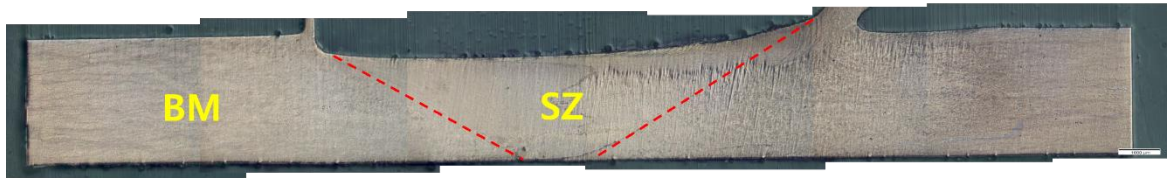
Figure 4-8, Table 4-1 을 보면 알 수 있듯이, A 합금은 마찰교반접합에 의하여 BM 에 비해 SZ 의 이차상 크기는 증가하였고, 분율은 유사하게 나타났다. Figure 4-9 에 나타난 바와 같이 A 합금은 Modified-AZ31 압출재로 희토류 원소 'X'가 함유된 이차상이 존재하며, 마찰교반접합에 의해 전반적으로 SZ 에 존재하는 이차상의 Mn 함량이 증가하였고, 'X'와 Fe 의 함량이 감소하였다. Figure 4-10, 4-11 과 같이 BM 에는 Al-Fe-'X'(-Mn) 이차상을 관찰할 수 있었고, SZ 에는 비교적 조대하고 Mn rich 한 Al-Mn(-'X')-Fe 상을 관찰할 수 있었다.

Figure 4-8, Table 4-1 을 보면 알 수 있듯이, B 합금은 마찰교반접합에 의하여 BM 에 비해 SZ 의 이차상 크기는 증가하였고, 분율은 유사하게 나타났다. Figure 4-12 에 나타난 바와 같이 B 합금은 Modified-AZ31 압연재로 희토류 원소 'X'가 함유된 이차상이 존재하며, 마찰교반접합에 의해 전반적으로 SZ 에 존재하는 이차상의 Mn 함량이 증가하였고, 'X'의 함량이 감소하였다. Figure 4-13, 4-14 와 같이 BM 에는 Al-Mn(-'X'-Fe) 이차상을 관찰할 수 있었고, SZ 에는 비교적 조대하고 Mn rich 한 Al-Mn(-'X'-Fe) 상을 관찰할 수 있었다.

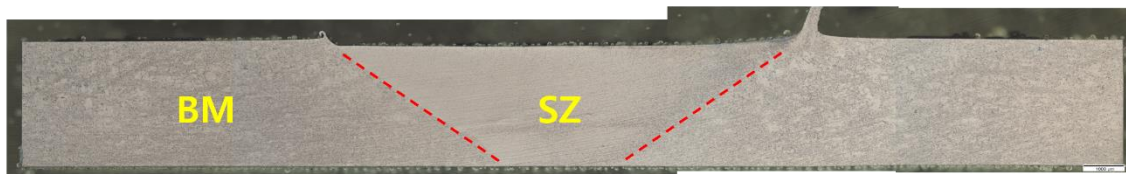
Figure 4-8, Table 4-1 을 보면 알 수 있듯이, C 합금은 마찰교반접합에 의하여 BM 에 비해 SZ 의 이차상 크기와 분율이 유사하게 나타났다. Figure 4-15 에 나타난 바와 같이 마찰교반접합에 의해 전반적으로 SZ 에 존재하는 이차상의 Mn 함량이 증가하였다. Figure 4-16, 4-17 과 같이 BM 에는 Al-Mn(-Fe) 이차상을 관찰할 수 있었고, SZ 에는 Al-Mn 상을 관찰할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Figure 4-1 Panorama images of (a) A(Modified-AZ31 압출재), (b) B(Modified-AZ31 압연재), (c) C(상용 AZ31 압연재)

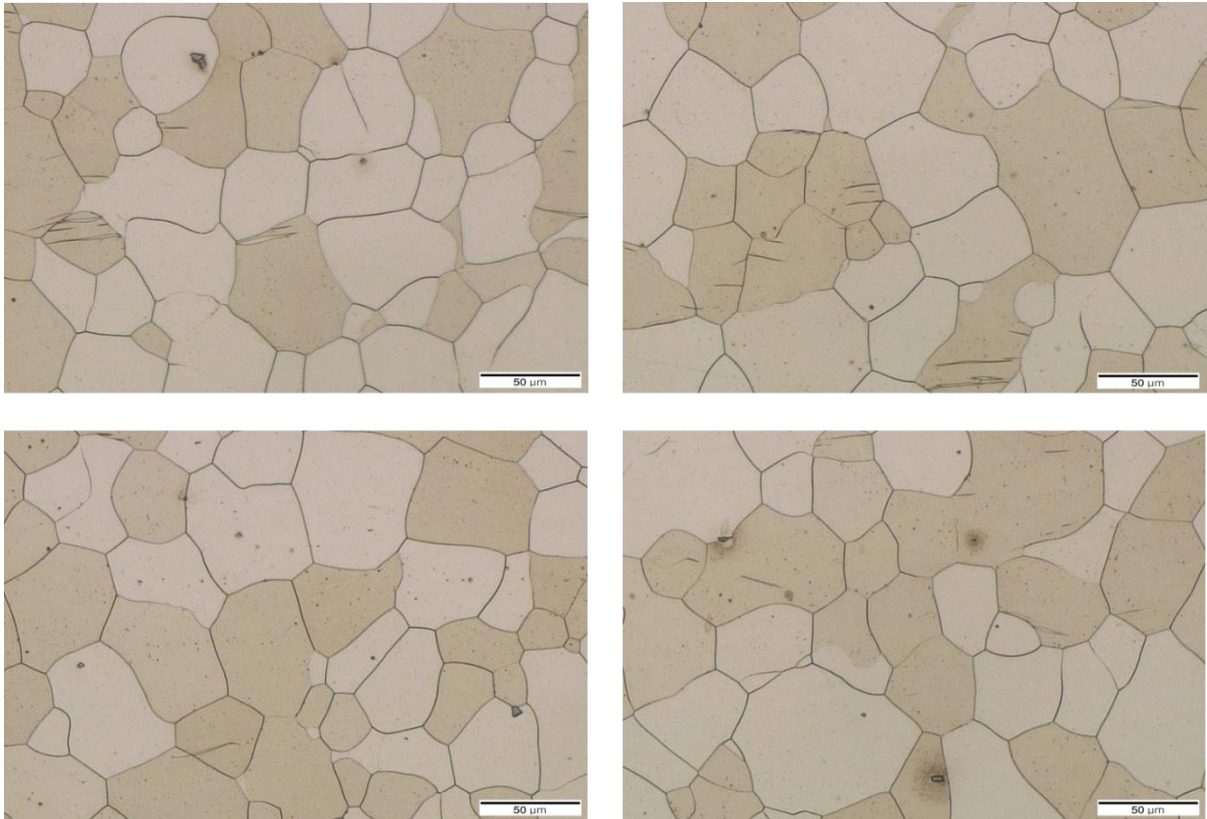


Figure 4-2 OM images of A(Modified-AZ31 압출재) BM(Base metal)

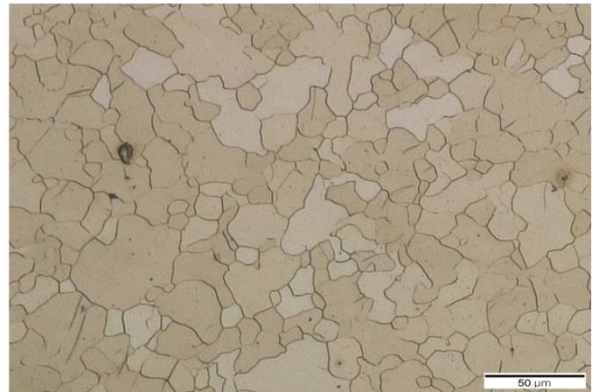
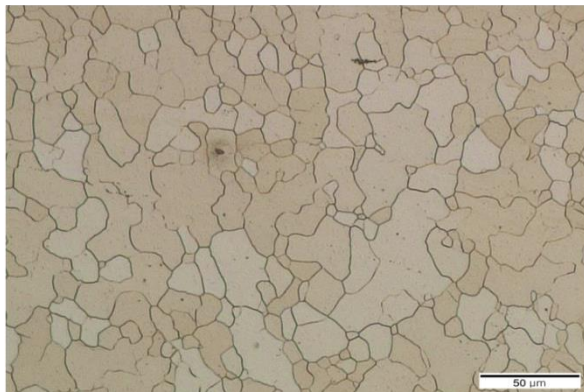
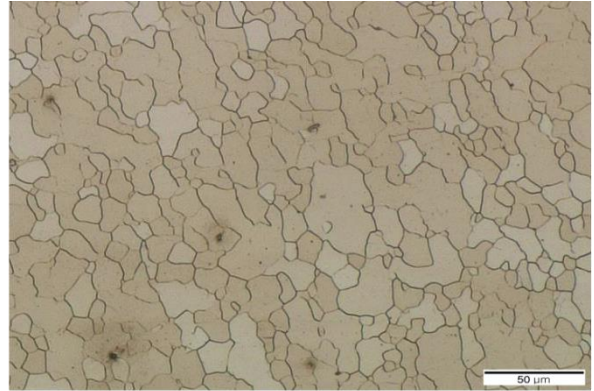
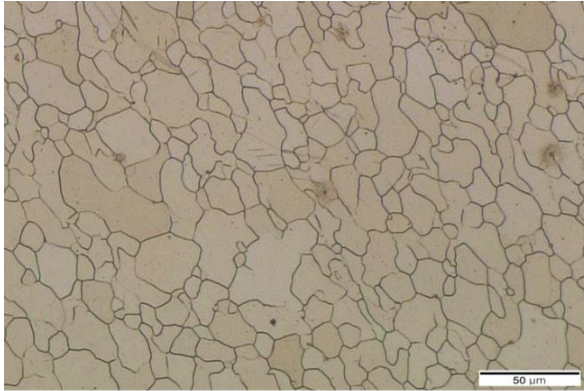


Figure 4-3 OM images of A(Modified-AZ31 압출재) SZ(Stir zone)

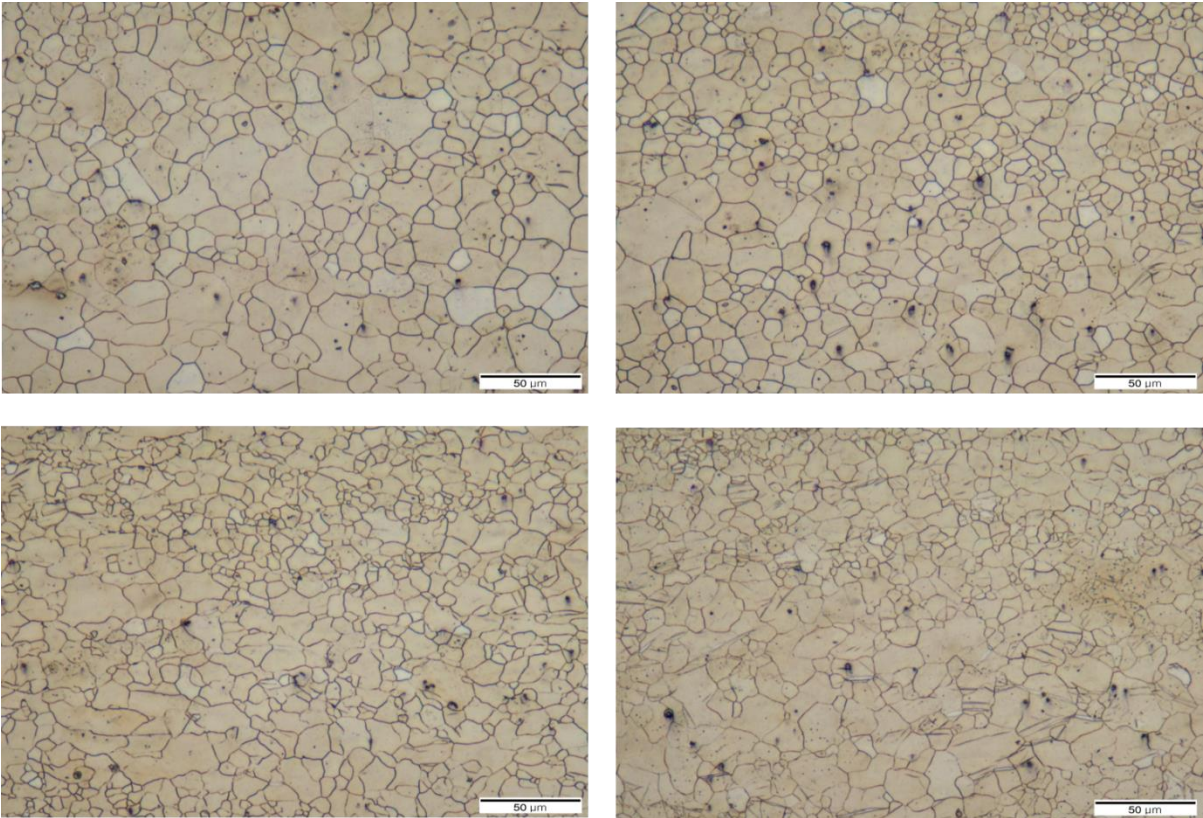


Figure 4-4 OM images of B(Modified-AZ31 압연재) BM(Base metal)

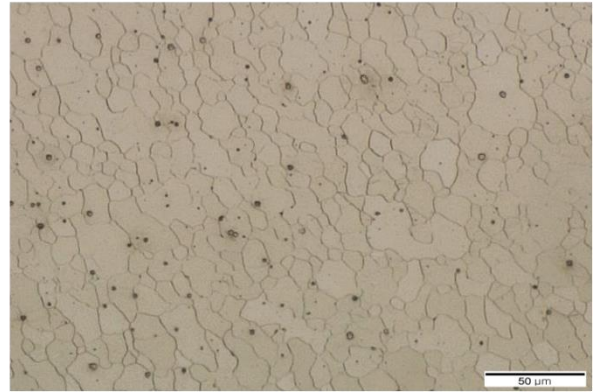
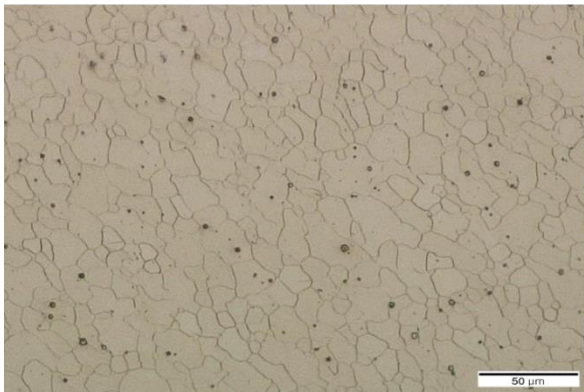
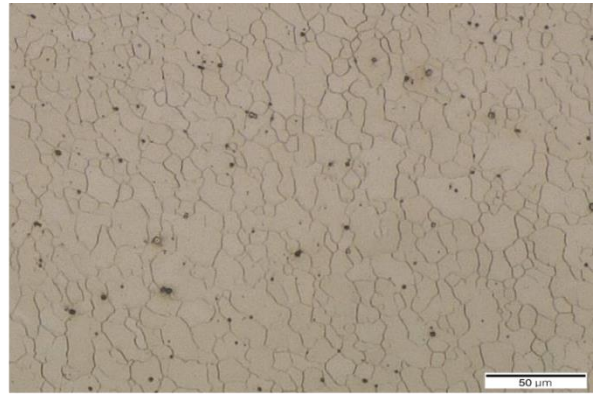
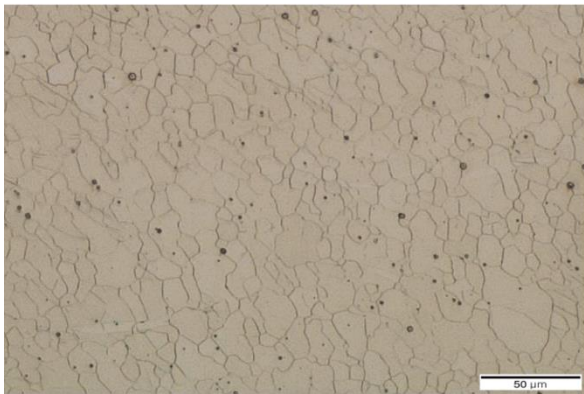


Figure 4-5 OM images of B(Modified-AZ31 압연재) SZ(Stir zone)

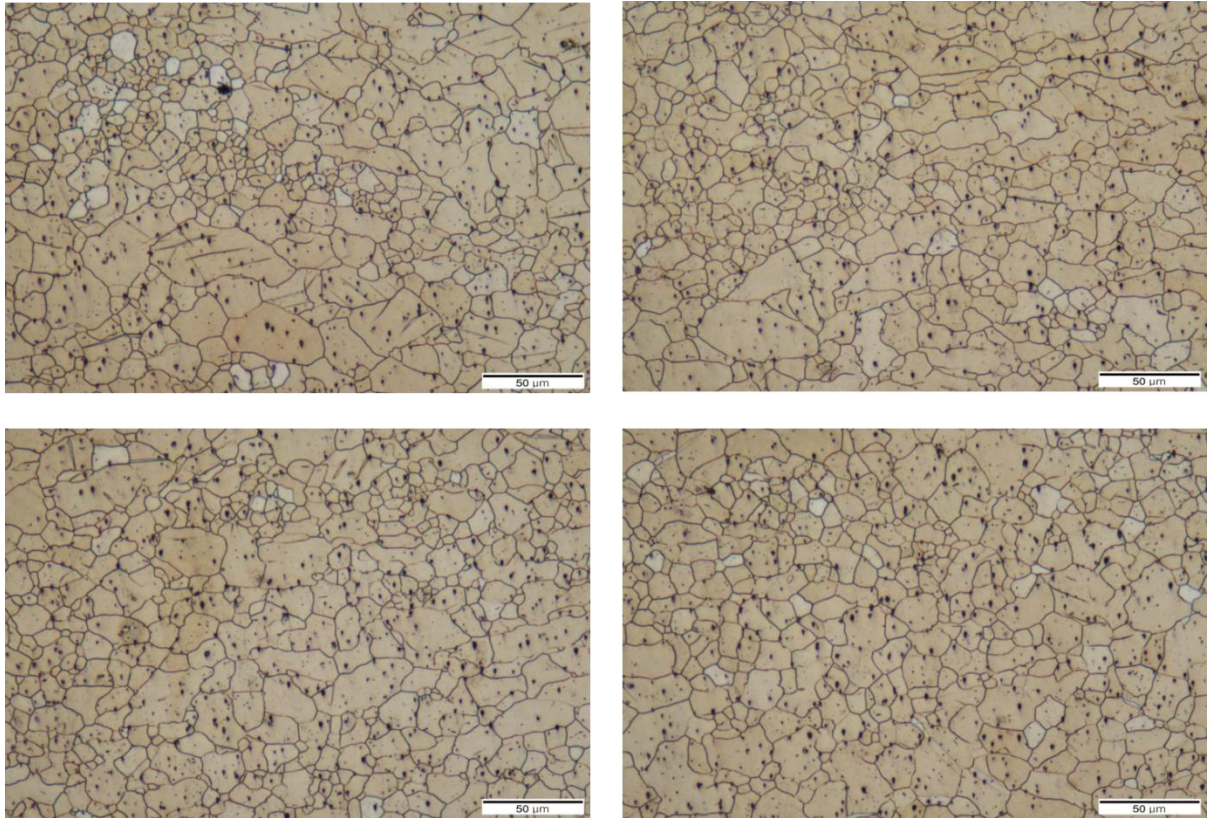


Figure 4-6 OM images of C(상용 AZ31 압연재) BM(Base metal)



Figure 4-7 OM images of C(상용 AZ31 압연재) SZ(Stir zone)

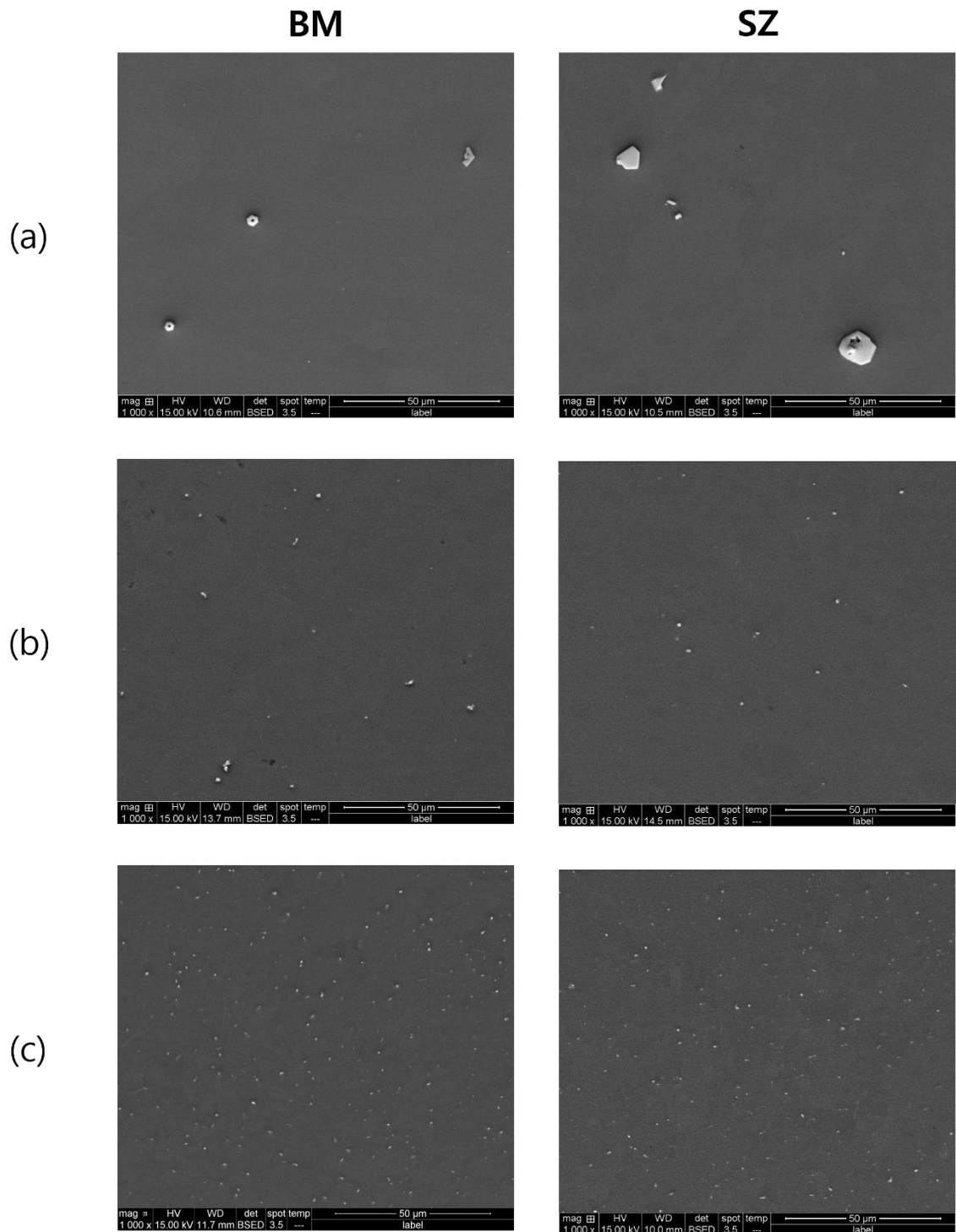
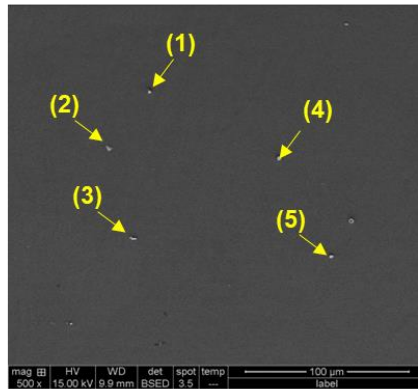


Figure 4-8 SEM images of (a) A(Modified-AZ31 압출재), (b) B(Modified-AZ31 압연재), (c) C(상용 AZ31 압연재)

Table 4-1 Average grain size, average secondary phase size, and secondary phase fraction of A, B, C

	A		B		C	
	BM	SZ	BM	SZ	BM	SZ
평균 결정립 크기 (μm)	33.95	10.98	09.03	08.68	11.02	07.04
평균 이차상 크기 (μm)	04.51	06.94	00.61	00.96	00.16	00.11
이차상 분율 (%)	00.12	00.13	00.63	00.58	00.43	00.37

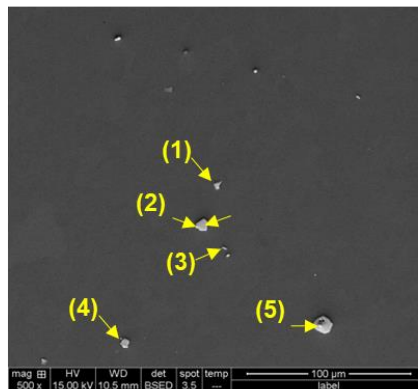
BM



Unit: wt%

Element	(1)	(2)	(3)	(4)		(5)
				core	shell	
Mg	11.05	07.63	35.00	27.00	11.90	17.11
Al	33.75	58.97	43.59	15.74	17.64	32.77
Si	02.58	00.45	00.22	12.72	18.04	02.42
'X'	21.04	31.59	19.07	29.41	32.67	18.67
Mn	06.04	01.07	01.56	10.00	12.24	09.40
Fe	25.55	00.29	00.56	05.13	07.50	19.62

SZ



Unit: wt%

Element	(1)	(2)		(3)	(4)	(5)	
		core	shell			core	shell
Mg	04.12	12.47	00.80	30.00	01.11	09.65	17.11
Al	45.47	39.48	45.72	43.61	44.38	38.95	32.77
Si	00.46	01.51	00.00	00.58	00.49	03.23	02.42
'X'	09.12	12.83	09.79	00.55	08.41	17.41	18.67
Mn	39.85	22.17	42.76	24.39	44.46	12.39	09.40
Fe	00.98	11.53	00.94	00.87	01.15	18.37	19.62

Figure 4-9 SEM images and SEM-EDS results of A(Modified-AZ31 압출재)

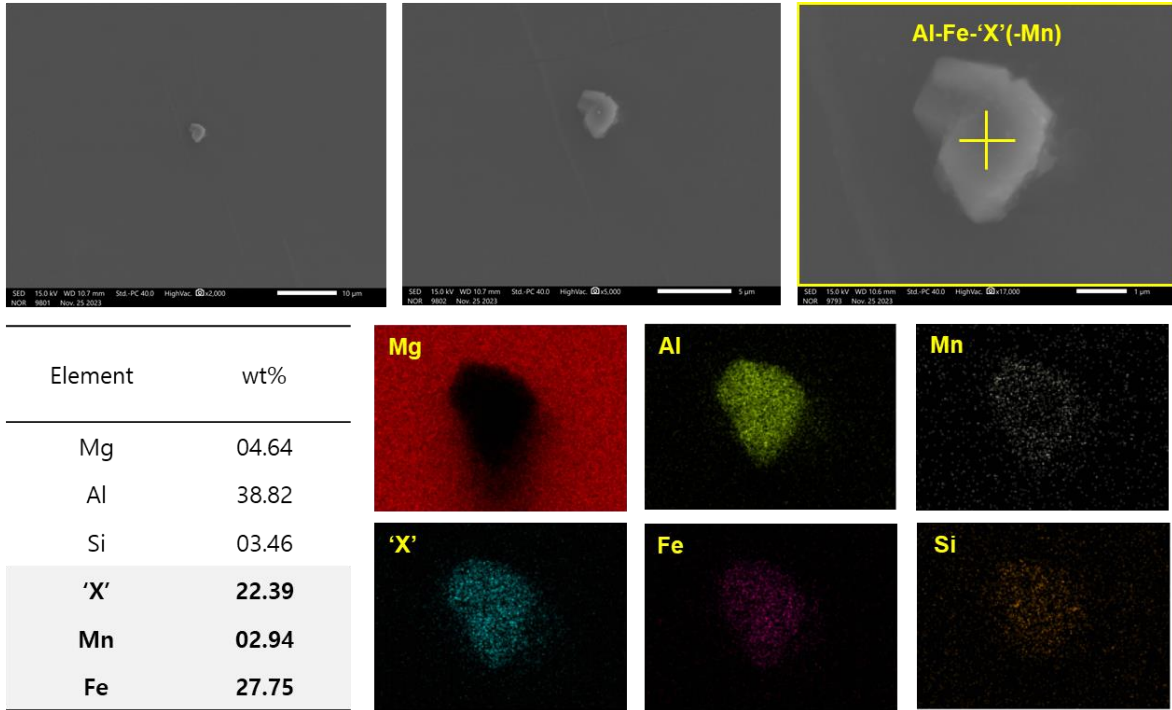


Figure 4-10 SEM images and SEM-EDS results of A(Modified-AZ31 압출재) BM(Base metal)

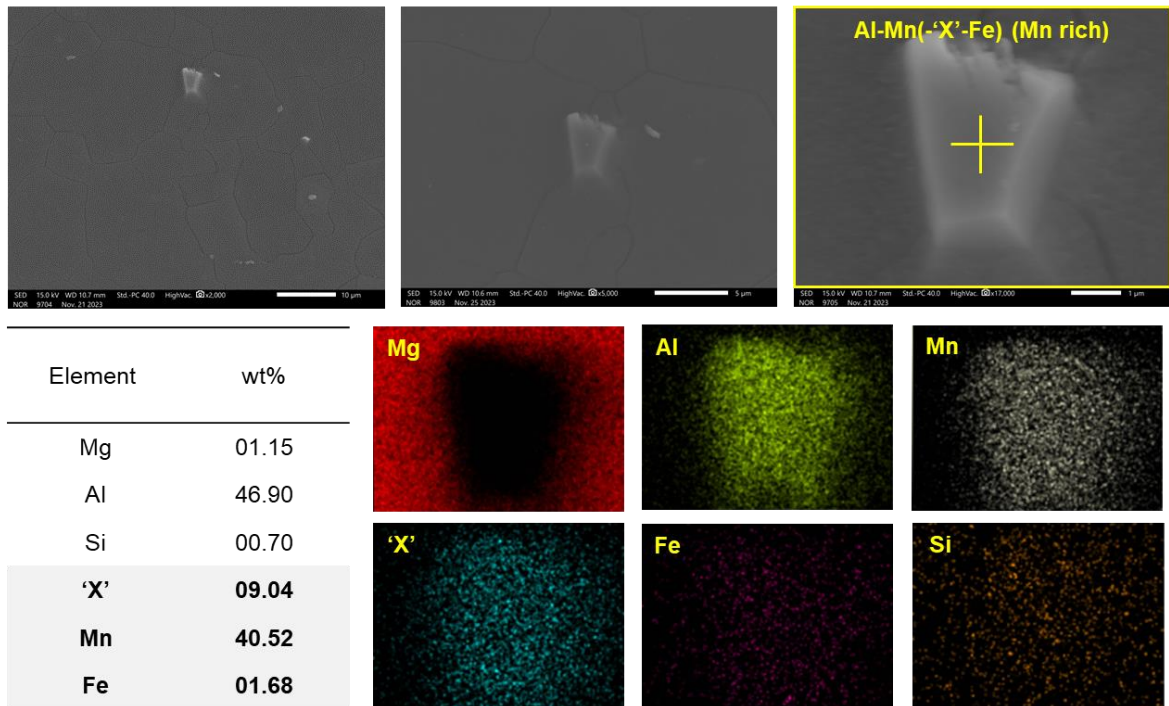
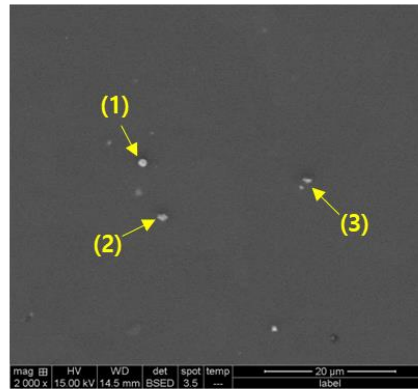


Figure 4-11 SEM images and SEM-EDS results of A(Modified-AZ31 압출재) SZ(Stir zone)

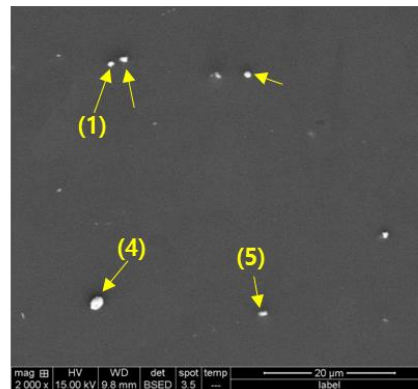
BM



Unit: wt%

Element	(1)		(2)	(3)
	core	shell		
Mg	53.54	44.29	47.43	58.85
Al	23.56	27.80	29.16	11.97
Si	01.08	01.15	02.96	08.51
'X'	08.29	06.97	16.55	12.41
Mn	11.57	17.50	02.49	04.89
Fe	01.96	02.29	01.41	03.37

SZ



Unit: wt%

Element	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Mg	50.06	47.65	53.43	29.49	60.58
Al	27.21	28.73	27.55	33.03	21.49
Si	00.23	00.15	00.00	00.26	00.00
'X'	02.82	00.28	03.00	01.59	02.23
Mn	19.18	22.64	15.36	34.71	14.56
Fe	00.50	00.54	00.67	00.93	01.15

Figure 4-12 SEM images and SEM-EDS results of B(Modified-AZ31 압연재)

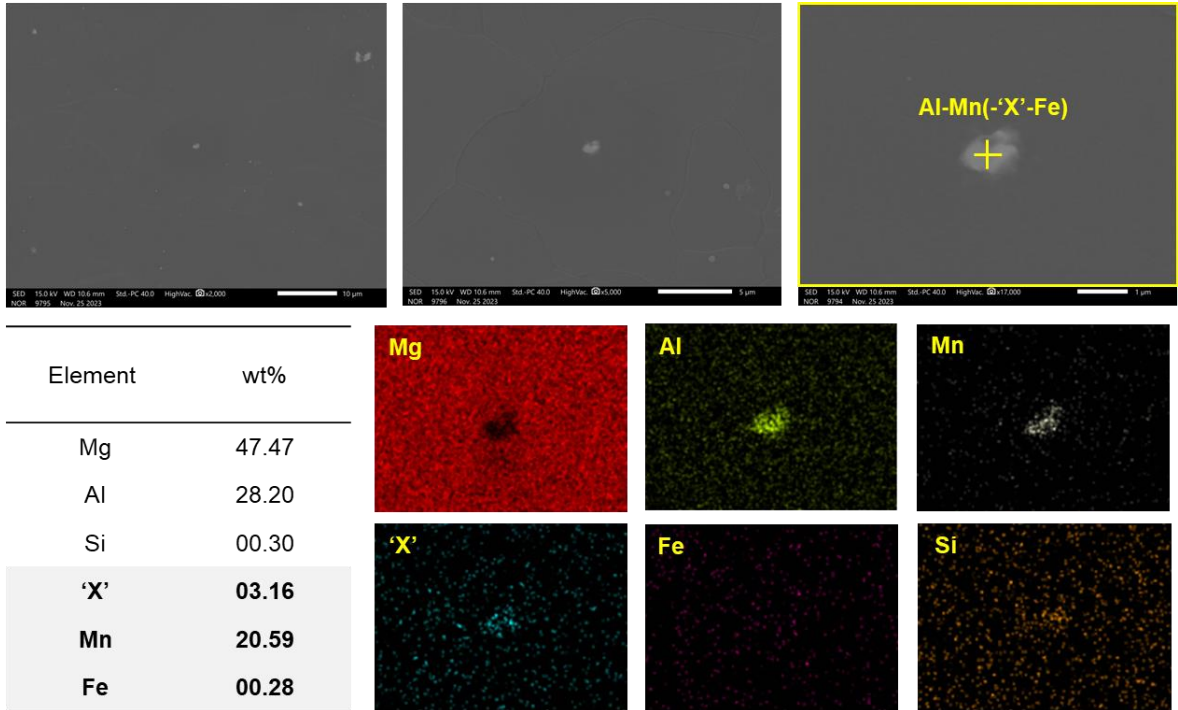


Figure 4-13 SEM images and SEM-EDS results of B(Modified-AZ31 압연재) BM(Base metal)

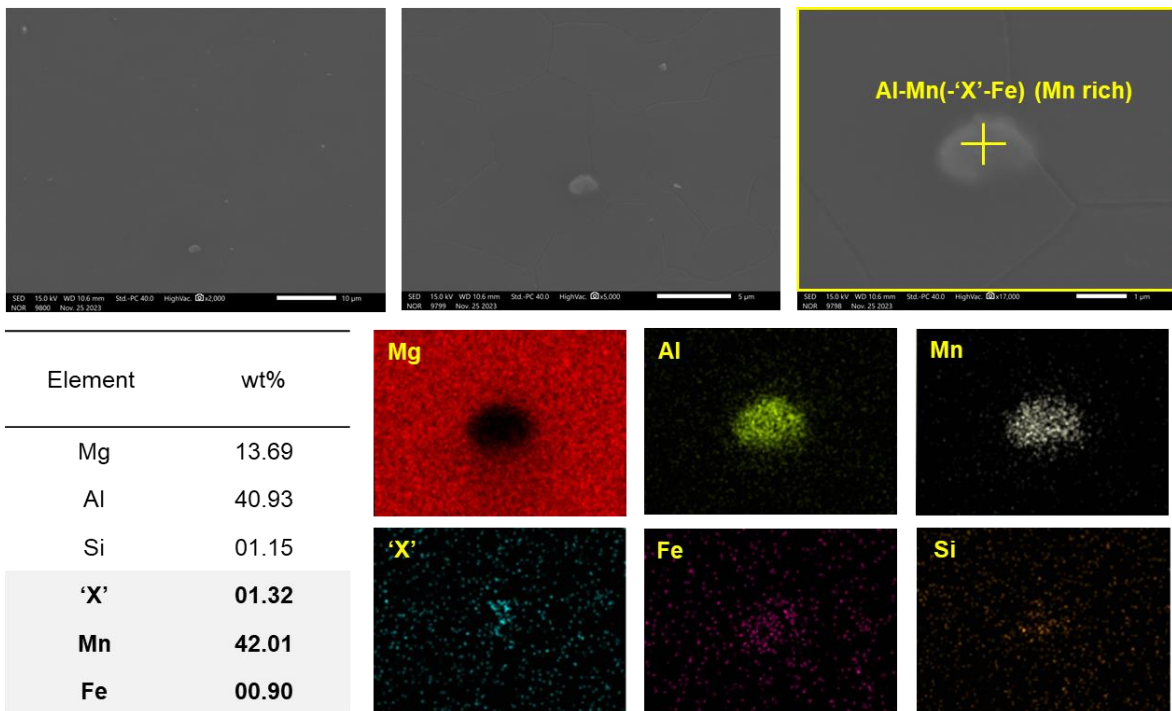
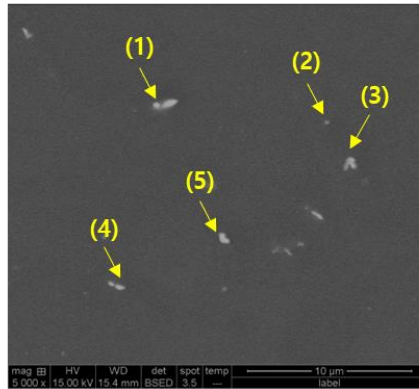


Figure 4-14 SEM images and SEM-EDS results of B(Modified-AZ31 압연재) SZ(Stir zone)

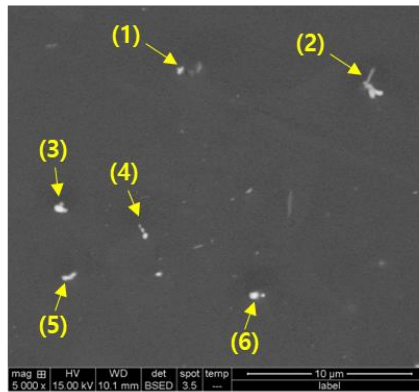
BM



Unit: wt%

Element	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Mg	60.35	78.05	65.21	64.19	56.51
Al	20.53	14.64	20.51	20.55	22.80
Si	00.73	00.34	00.40	00.53	00.65
Mn	14.94	06.57	13.34	14.19	19.20
Fe	00.45	00.40	00.55	00.54	00.84

SZ



Unit: wt%

Element	(2)	(3)	(4)	(4)	(6)
Mg	63.55	57.54	65.10	65.84	57.77
Al	20.11	22.94	18.89	18.51	23.18
Si	00.46	00.67	00.67	00.50	00.27
Mn	25.23	17.71	24.05	33.85	18.06
Fe	00.65	01.14	00.28	01.29	00.71

Figure 4-15 SEM images and SEM-EDS results of C(상용 AZ31 압연재)

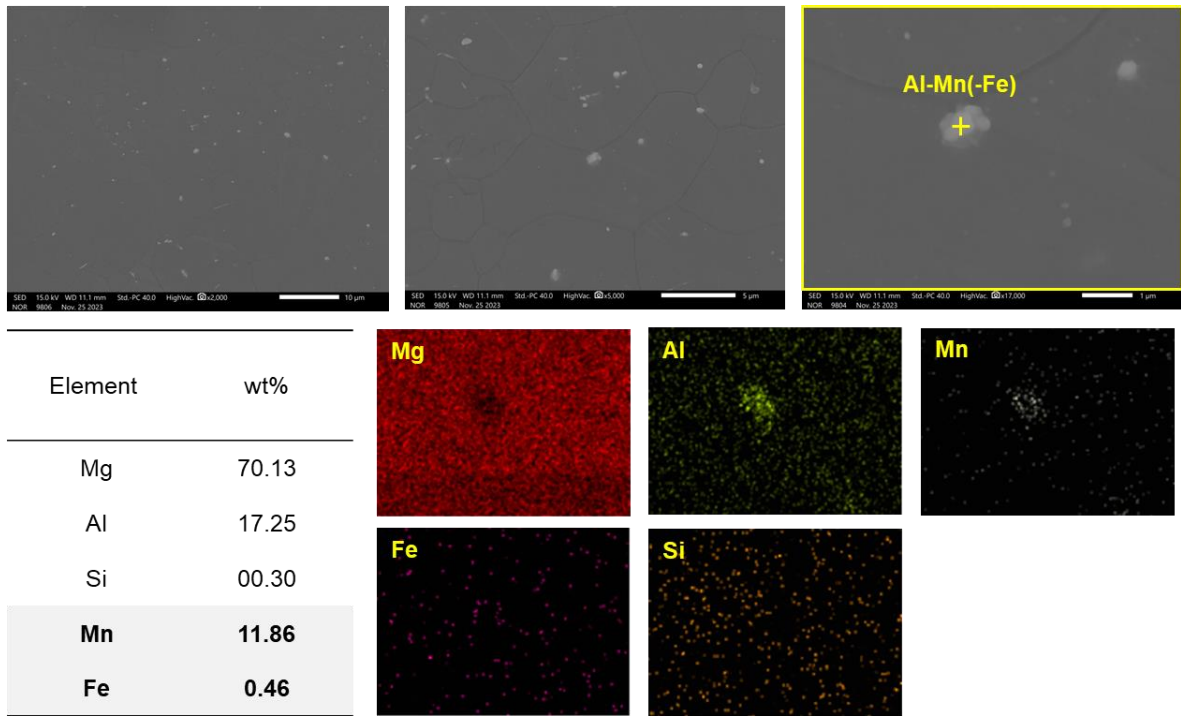


Figure 4-16 SEM images and SEM-EDS results of C(상용 AZ31 압연재) BM(Base metal)

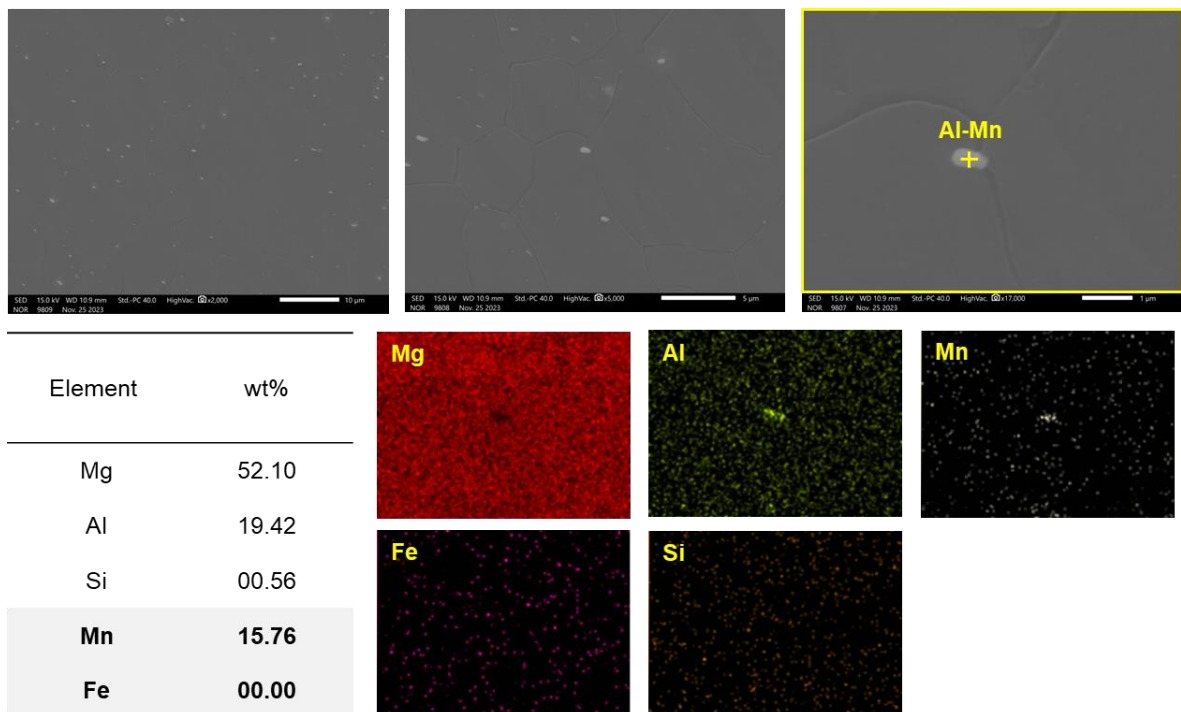


Figure 4-17 SEM images and SEM-EDS results of C(상용 AZ31 압연재) SZ(Stir zone)

4.2 부식 거동 관찰

4.2.1 염수분무시험

Figure 4-18, 4-19 는 각 마그네슘 합금의 BM 시편과 FSW 접합된 시편에 대하여 염수 분무 시험 시간에 따른 부식 거동을 나타낸다. 시간별 부식 거동을 파악하기 위해 0min-1min-5min-30min-1h-2h-4h-8h-12h-24h-48h 마다 시편 표면을 관찰하였다. 5min 부터 모든 마그네슘 합금의 BM 과 SZ 에서 표면 부식이 시작되는 것을 육안으로 관찰할 수 있었으나 마그네슘 합금에 의한 차이나 접합 여부에 의한 확연한 차이는 확인할 수 없었다.

마그네슘 합금에 의한 차이는 BM 시편 염수분무 12h 부터 A, B, C 각 시편의 표면에서 확연한 차이가 나타나기 시작했다. C 는 시편 표면 전반적으로 갈바닉 부식이 점점 확산되는 양상을 나타냈고, A 와 B 는 C 에 비하여 부식이 더디게 진행되는 것을 확인할 수 있었다. A 와 B 는 비교적 비슷한 속도로 부식이 진행되는 것을 볼 수 있었다. 24h 경과 후 C 시편의 표면 전반에 부식 생성물이 덮여 있으며 갈바닉 부식이 매우 활발히 진행되는 것을 관찰하였다. B 와 C 시편 역시 갈바닉 부식이 진행되었지만, 시편 표면의 일부분에만 부식 생성물이 덮여 있었다. 48h 후에는 모든 시편에서 표면 전반적으로 부식생성물이 덮여 있는 것을 관찰할 수 있었다.

접합 여부에 의한 차이는 BM 시편과 FSW 접합된 시편의 염수분무시험 결과를 비교해 보아 확인할 수 있었다. 표면 전반에 걸쳐 부식이 진행되다가 C 의 경우 2h 부터 FSW 접합된 시편 표면의 접합부에 부식생성물이 많이 덮이고, 부식이 집중되는 것을 확인할 수 있었다. B 와 C 의 경우에는 12h 부터 마찰교반접합부에 부식생성물이 많이 덮이고, 부식이 집중되는 현상이 나타났다. 48h 후 BM 시편의 경우 시편 표면 전반에 걸쳐 부식이 진행되었지만, FSW 접합된 시편은 접합부에 집중되어 부식이 진행되었다.

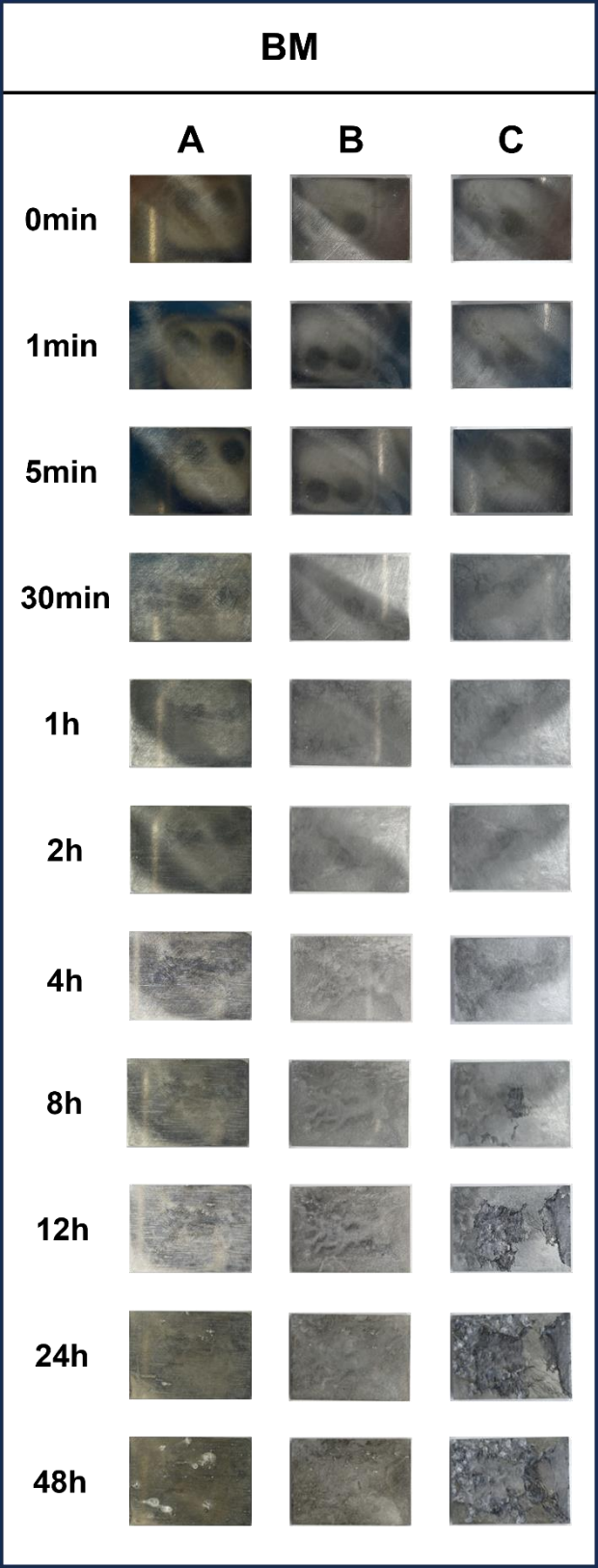


Figure 4-18 Corrosion behavior of A, B, C by salt spray time

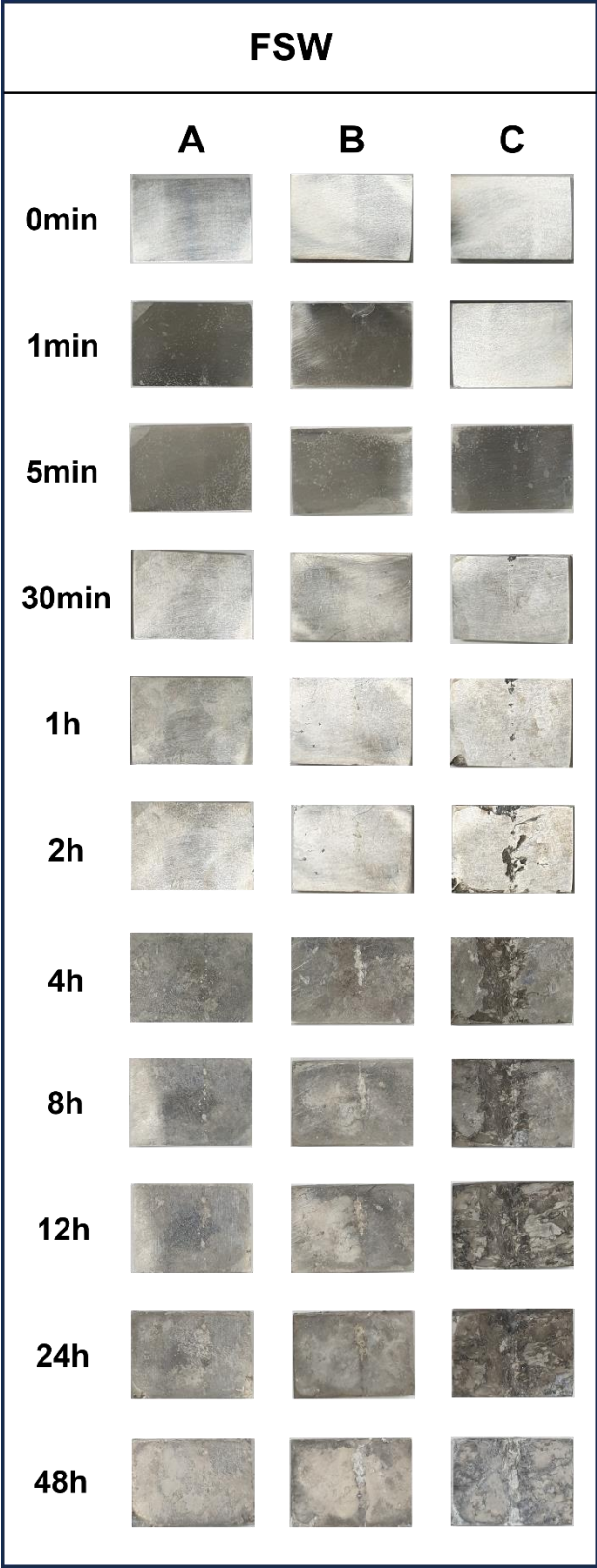


Figure 4-19 Corrosion behavior of Friction stir jointed A, B, C by salt spray time

4.2.2 침지시험

Figure 4-20, 4-21 은 각 마그네슘 합금의 BM 시편과 FSW 접합된 시편에 대하여 침지시험 시간에 따른 부식 거동을 나타낸다. 시간별 부식 거동을 파악하기 위해 0min-1min-5min-30min-1h-2h-4h-8h-12h-24h-48h-72h 마다 시편 표면을 관찰하였다.

BM 시편은 침지 1h 부터 A, B 에 비하여 C 시편의 표면 전반이 부식생성물로 덮여있으며 부식이 빠르게 진행되는 것을 볼 수 있었다. FSW 접합된 시편은 30min 부터 접합부에 부식이 집중되었다.

부식 속도를 정량적으로 측정하기 위하여 침지시험 전 시편 무게를 측정하고, 침지시험 후에는 클리닝 작업을 통해 부식생성물을 제거한 뒤 무게를 측정하였다. Figure 4-22 는 마그네슘 합금 및 접합 여부에 따른 부식 속도를 보여준다. C FSW, C BM, A BM, B FSW, B BM, A FSW 순으로 부식 속도가 빠르게 나타났다.

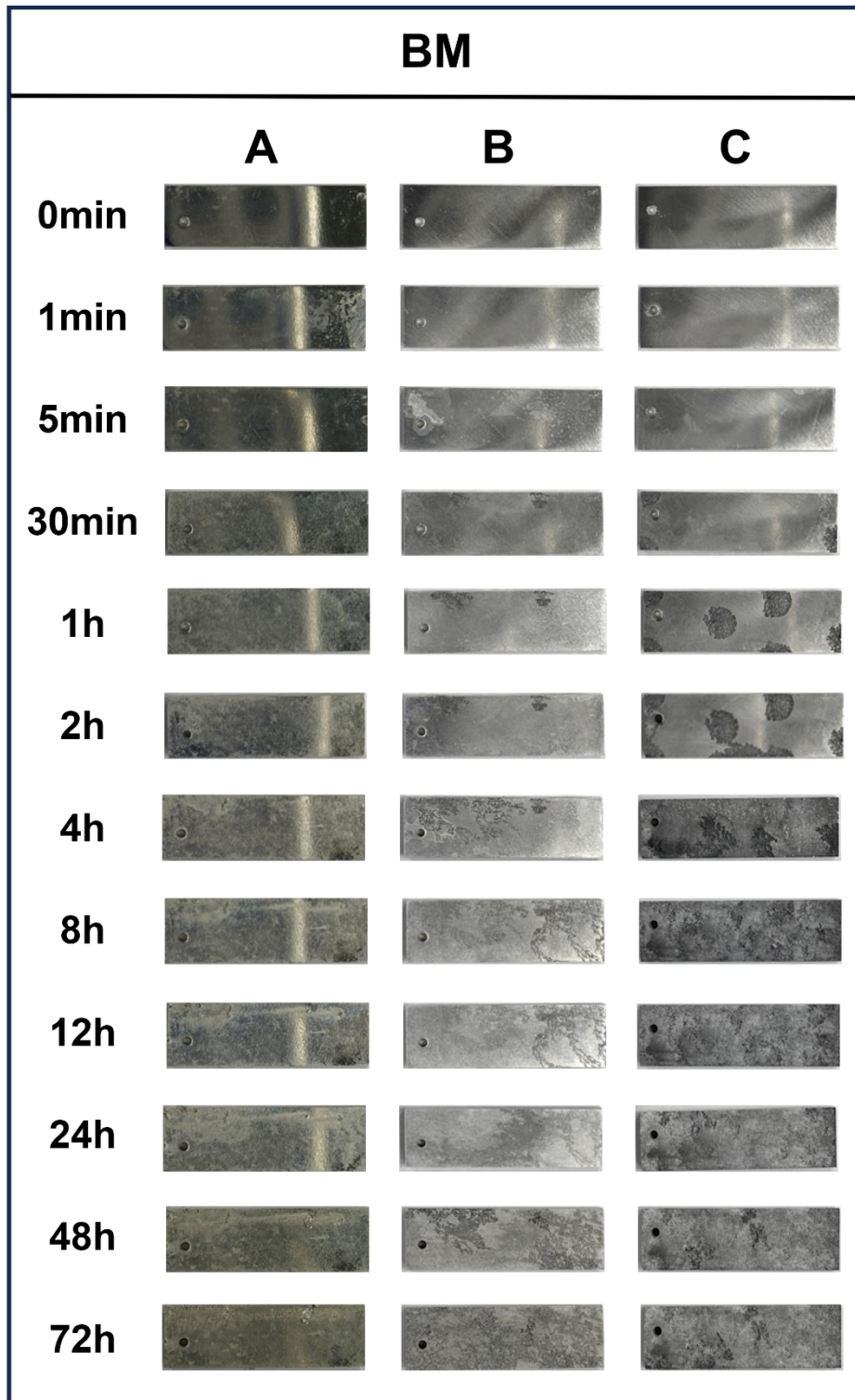


Figure 4-11 Corrosion behavior of A, B, C by immersion time

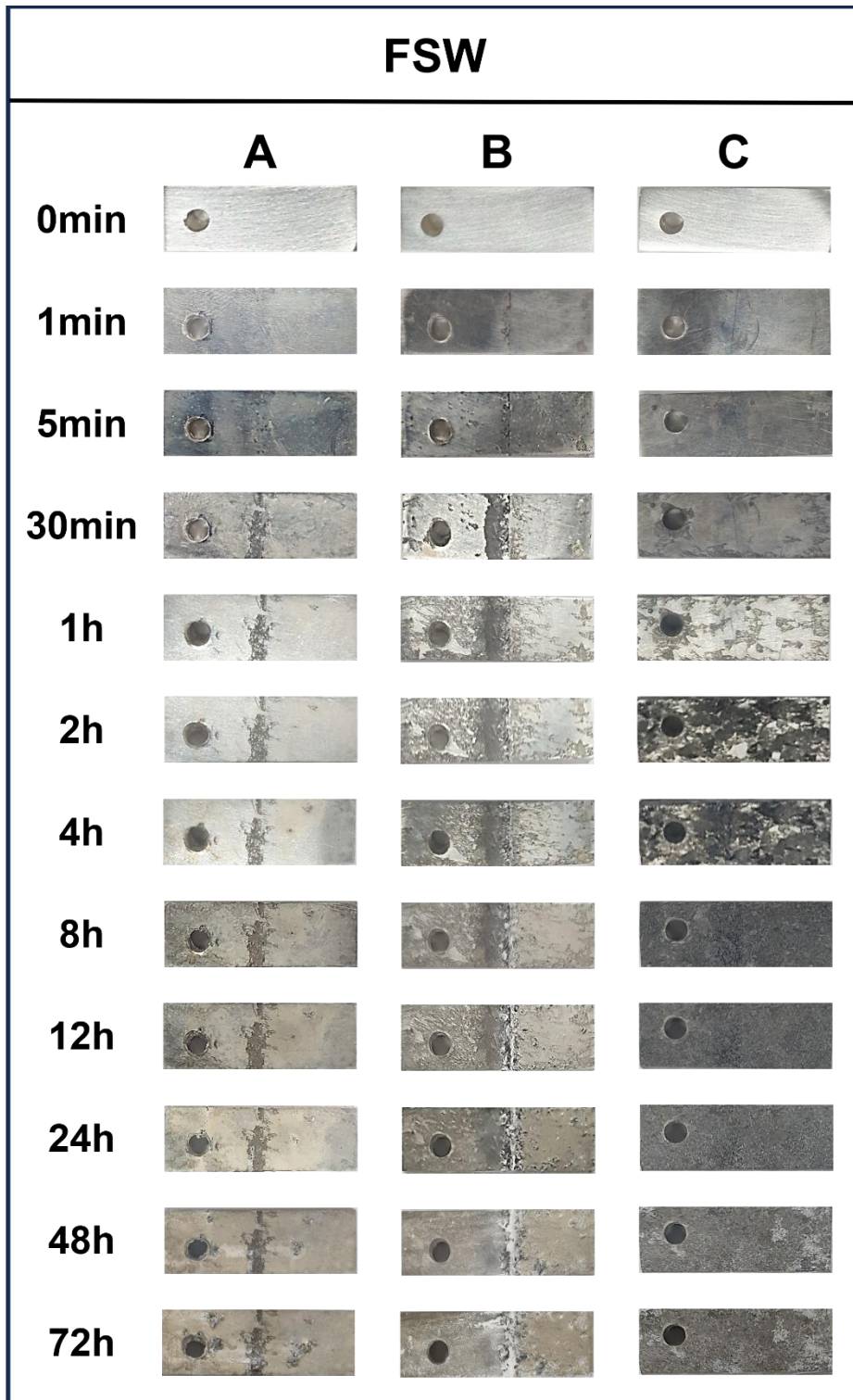


Figure 4-12 Corrosion behavior of Friction stir jointed A, B, C by immersion time

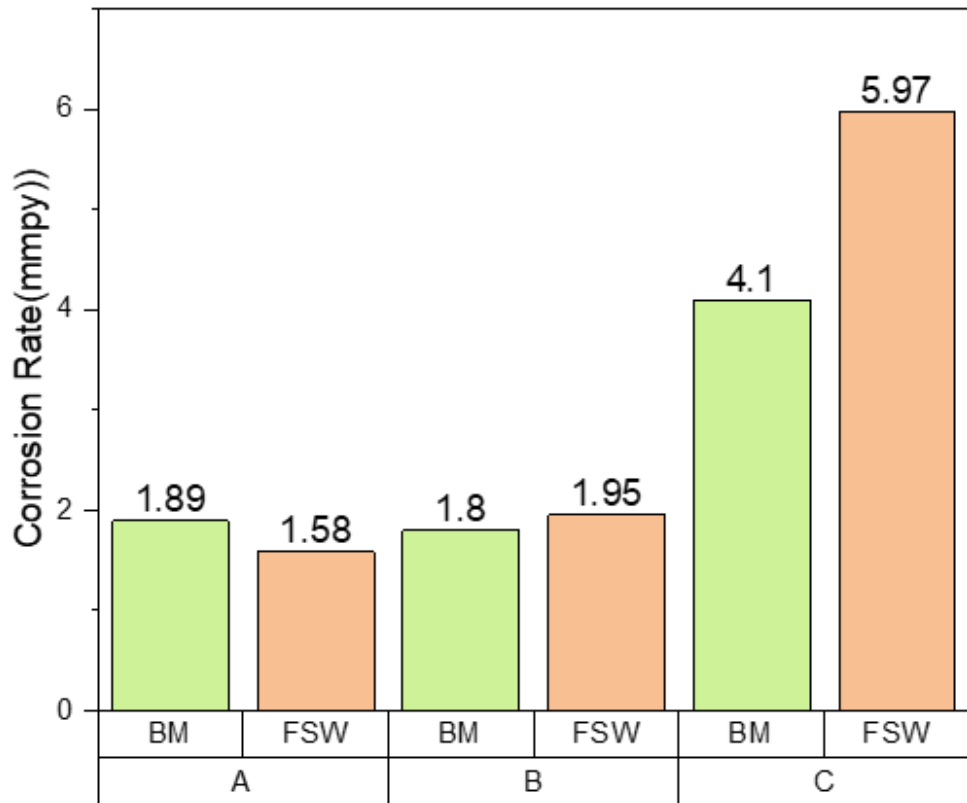


Figure 4-13 Corrosion rates of A, B, C by immersion test

4.2.3 개방 회로 전위 측정 및 동전위 분극시험

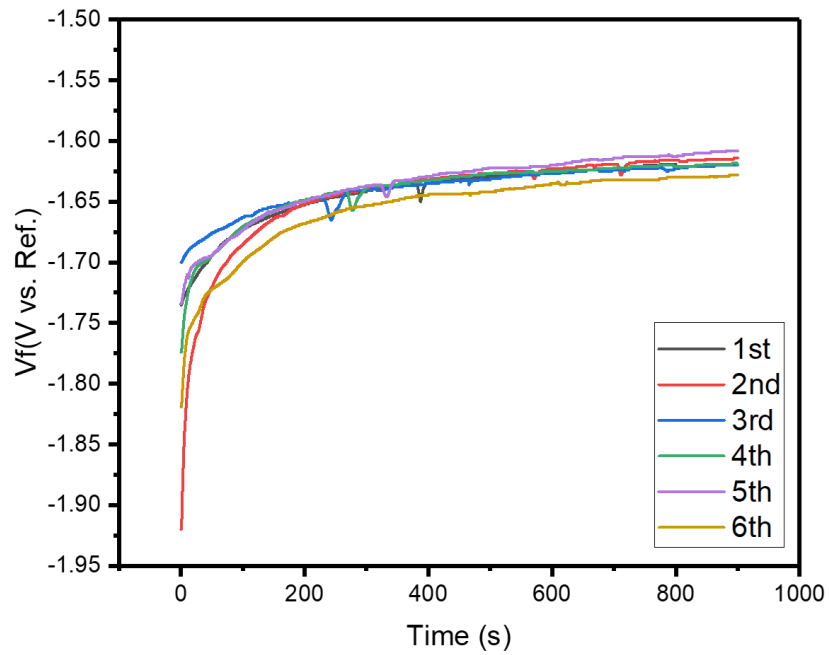
갈바닉 부식 거동은 potential 차이가 부식에 큰 영향을 미친다. 이에 A, B, C 각 합금의 BM 과 SZ 의 potential 값을 정량화하였다. 개방 회로 전위 측정(OCP test)과 동전위 분극시험을 실시하였고, 재현성을 위하여 총 6 번씩 실험을 반복하였다.

개방 회로 전위는 흐르는 전류가 없는 상태에서 전해질 속에 위치할 때 금속마다 나타내게 되는 고유 potential 값이다. 900s 동안 측정한 결과 Table 4-2 에 나타난 바와 같이 A 의 경우 BM 은 -1.62V, SZ 는 -1.61V 로 측정됐다. B 의 경우 BM 은 -1.62V, SZ 는 -1.60V 로 측정됐다. 마지막으로 C 의 경우 BM 은 -1.54V, SZ 는 -1.53V 로 측정되었다.

동전위 분극시험 결과 합금별, 영역별로 비교하여 A, B, C 각 합금의 내식성을 평가하였다. 합금별로 비교해 보았을 때, BM 과 SZ 에서 동일한 경향성이 나타났다. 부식전위(E_{corr})와 전류밀도(I_{corr}) 모두 C 가 A, B 에 비하여 높게 나타났다. 이는 같은 부식 환경에서 C 가 A, B 에 비하여 더 빠르게 부식이 시작되고 진행된 것으로 보인다. 환원 영역에서의 전류밀도 역시 C 가 A, B 에 비하여 높게 나타났다. 영역별로 비교해 보았을 때는 A 와 B 는 BM 과 SZ 이 비슷한 부식전위(E_{corr}), 전류밀도(I_{corr})를 나타냈다. C 는 SZ 이 BM 에 비하여 다소 높은 부식전위(E_{corr}), 전류밀도(I_{corr})를 나타냈다. 환원 영역에서의 전류밀도는 A 의 경우 BM 과 SZ 이 비슷하게 나타났고, B 와 C 의 경우 SZ 이 BM 에 비하여 다소 높게 나타났다.

따라서 A 와 B 의 내식성이 C 의 내식성보다 좋다고 볼 수 있고, B 와 C 는 BM 의 내식성이 SZ 에 비해 비교적 좋다고 볼 수 있다.

A BM



A SZ

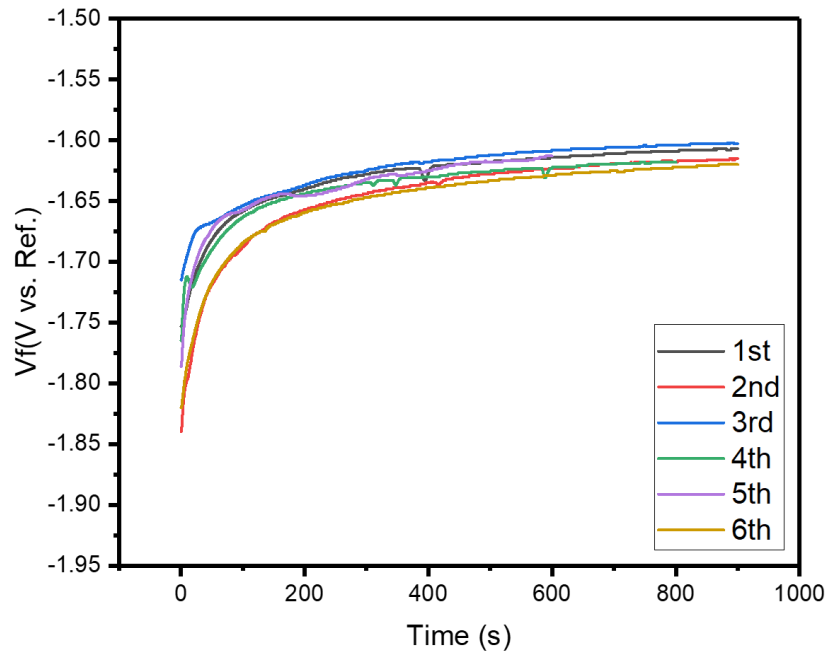


Figure 4-14 Open circuit potential tests results of A(Modified-AZ31 압출재)

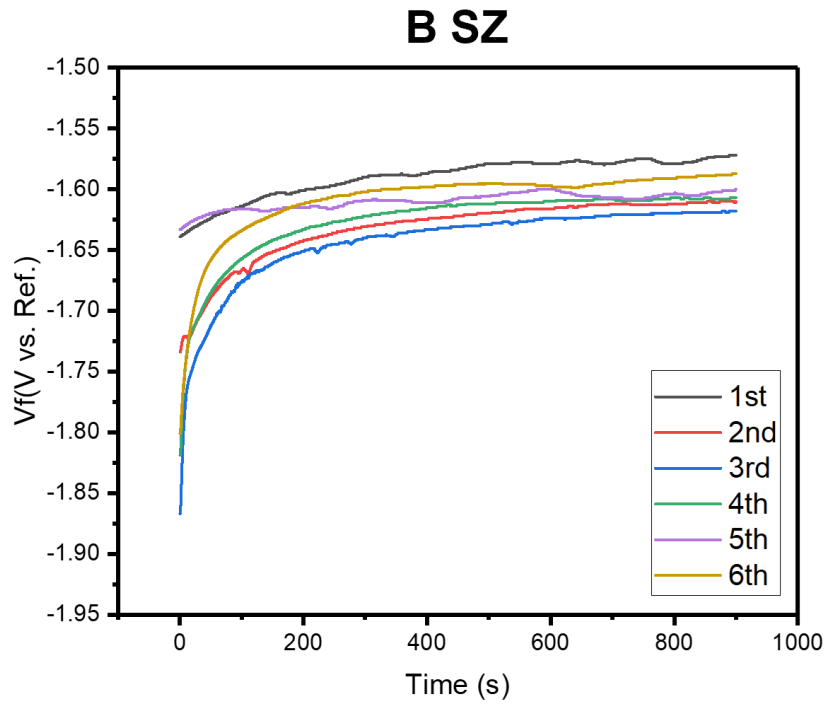
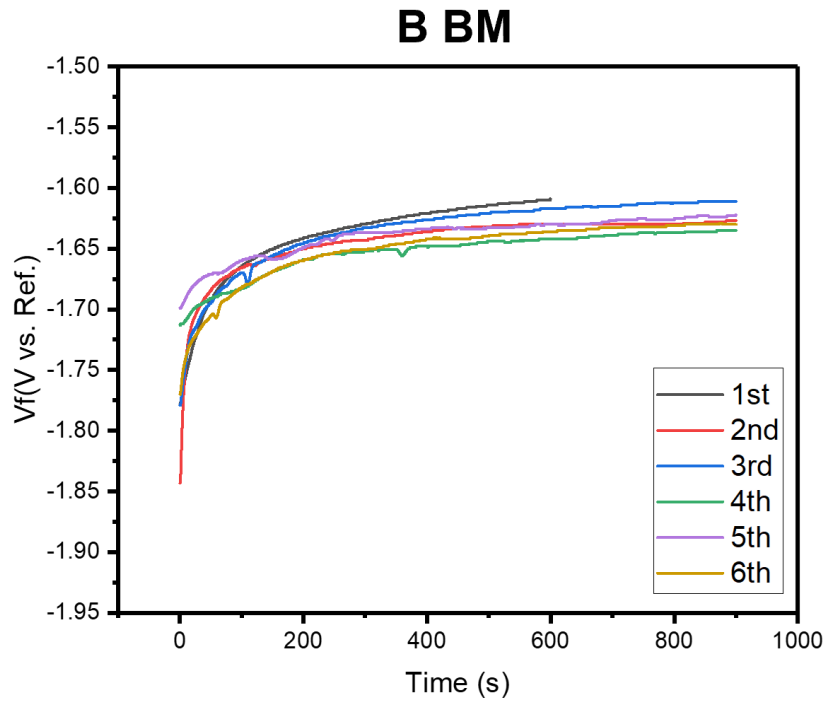


Figure 4-15 Open circuit potential tests results of B(Modified-AZ31 압연재)

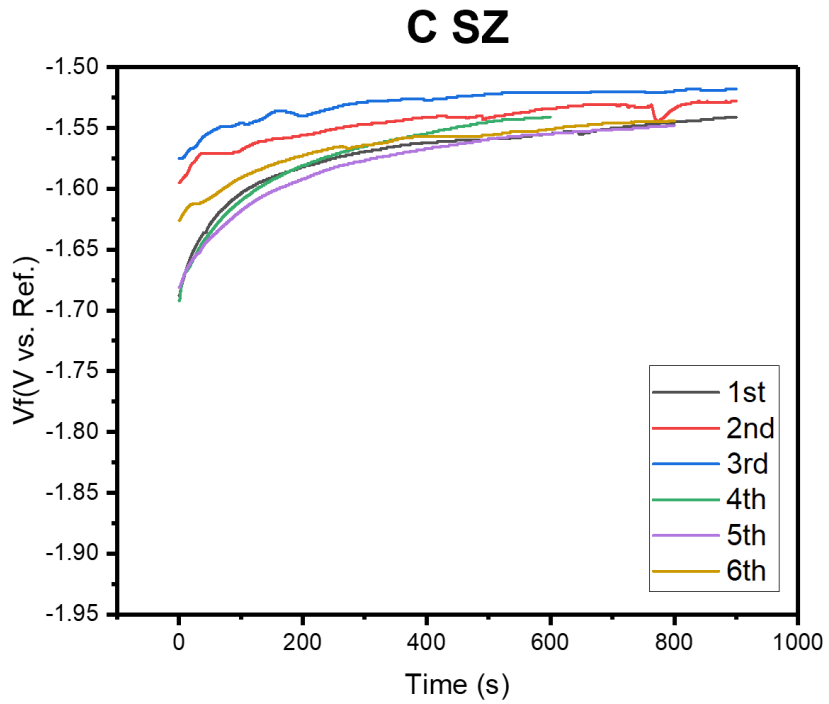
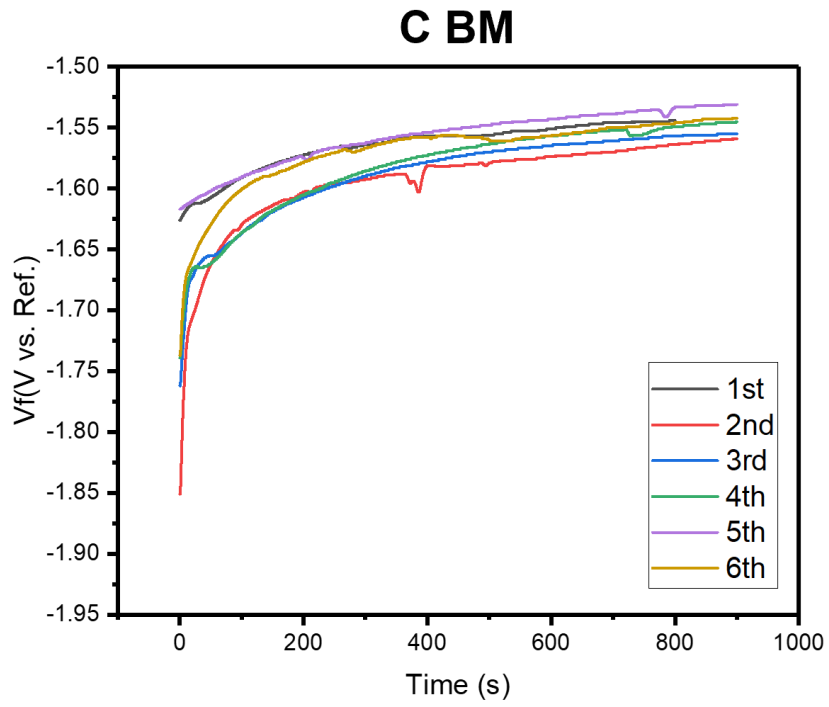


Figure 4-16 Open circuit potential tests results of C(상용 AZ31 압연재)

Table 4-2 Open circuit potential value

Unit: V						
	A		B		C	
	BM	SZ	BM	SZ	BM	SZ
1st	-1.62	-1.60	-1.61	-1.57	-1.54	-1.54
2nd	-1.61	-1.62	-1.63	-1.60	-1.54	-1.53
3rd	-1.62	-1.60	-1.61	-1.62	-1.55	-1.52
4th	-1.62	-1.62	-1.63	-1.61	-1.55	-1.54
5th	-1.61	-1.61	-1.62	-1.60	-1.53	-1.55
6th	-1.63	-1.62	-1.63	-1.59	-1.54	-1.54
AVG	-1.62	-1.61	-1.62	-1.60	-1.54	-1.54

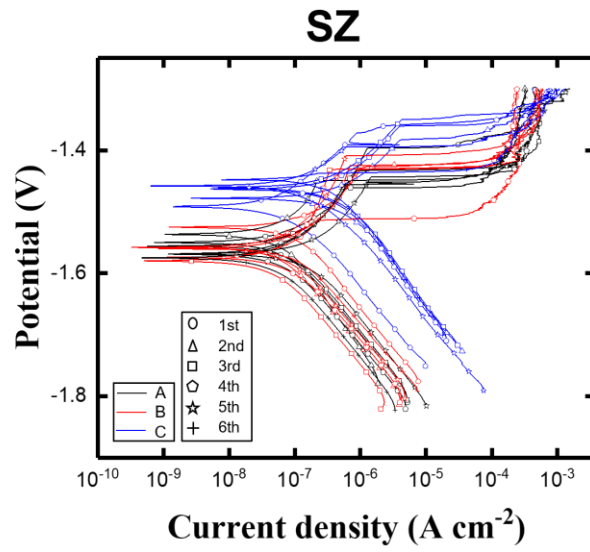
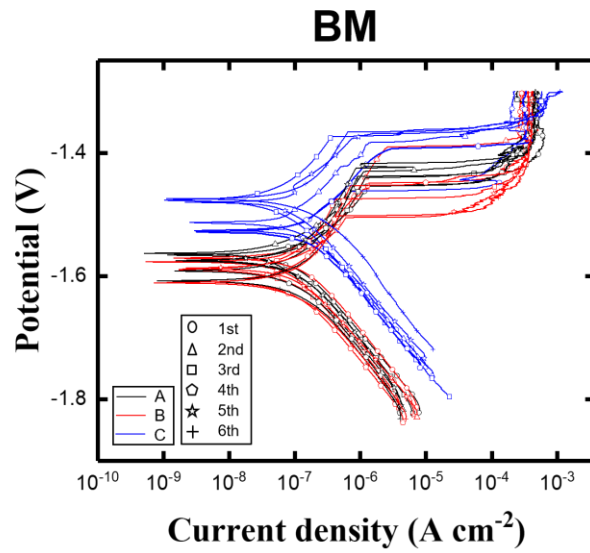


Figure 4-17 Potentiodynamic polarization curve compared of each magnesium alloy

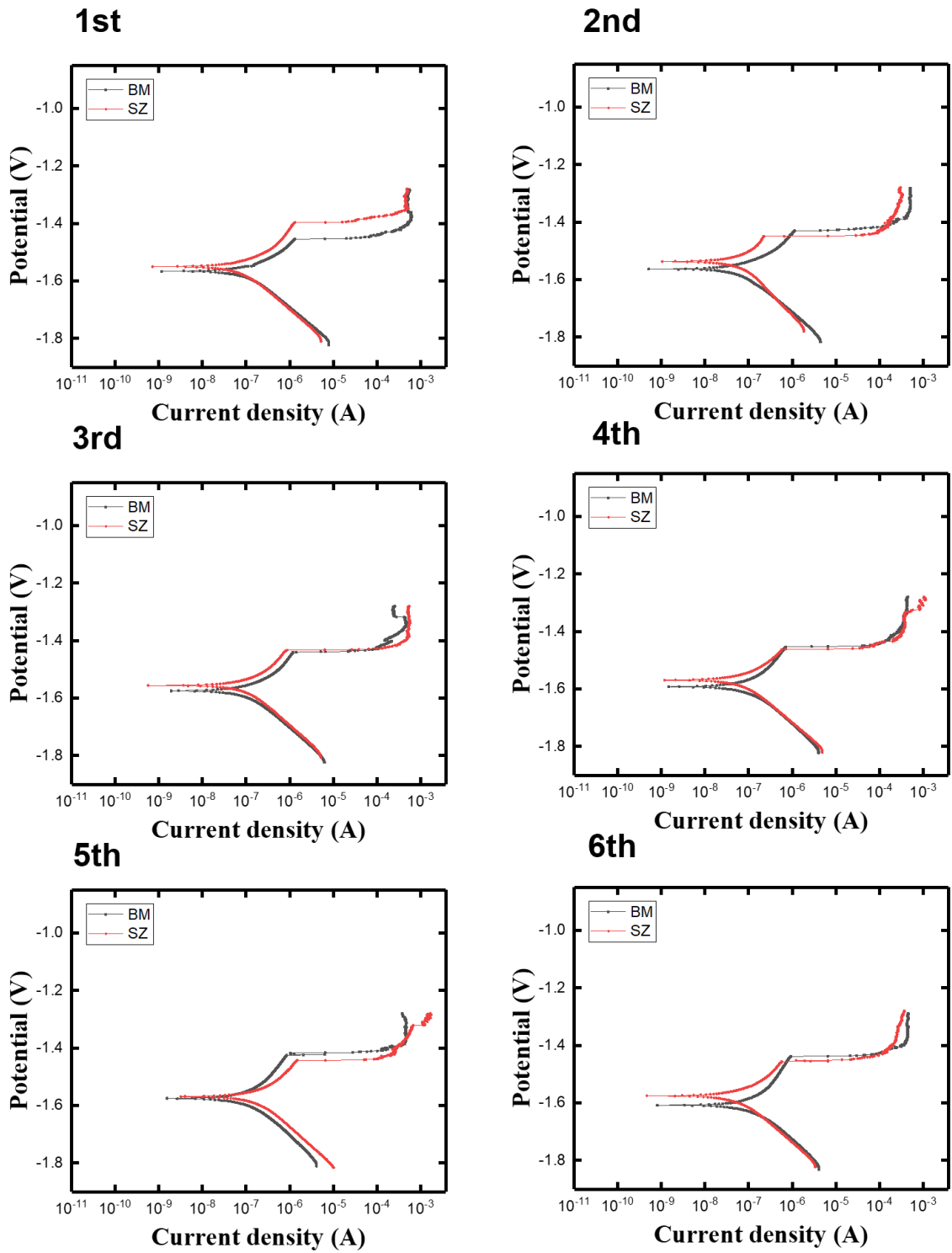


Figure 4-18 Potentiodynamic polarization curve for SZ and BM of A(Modified-AZ31 압출재)

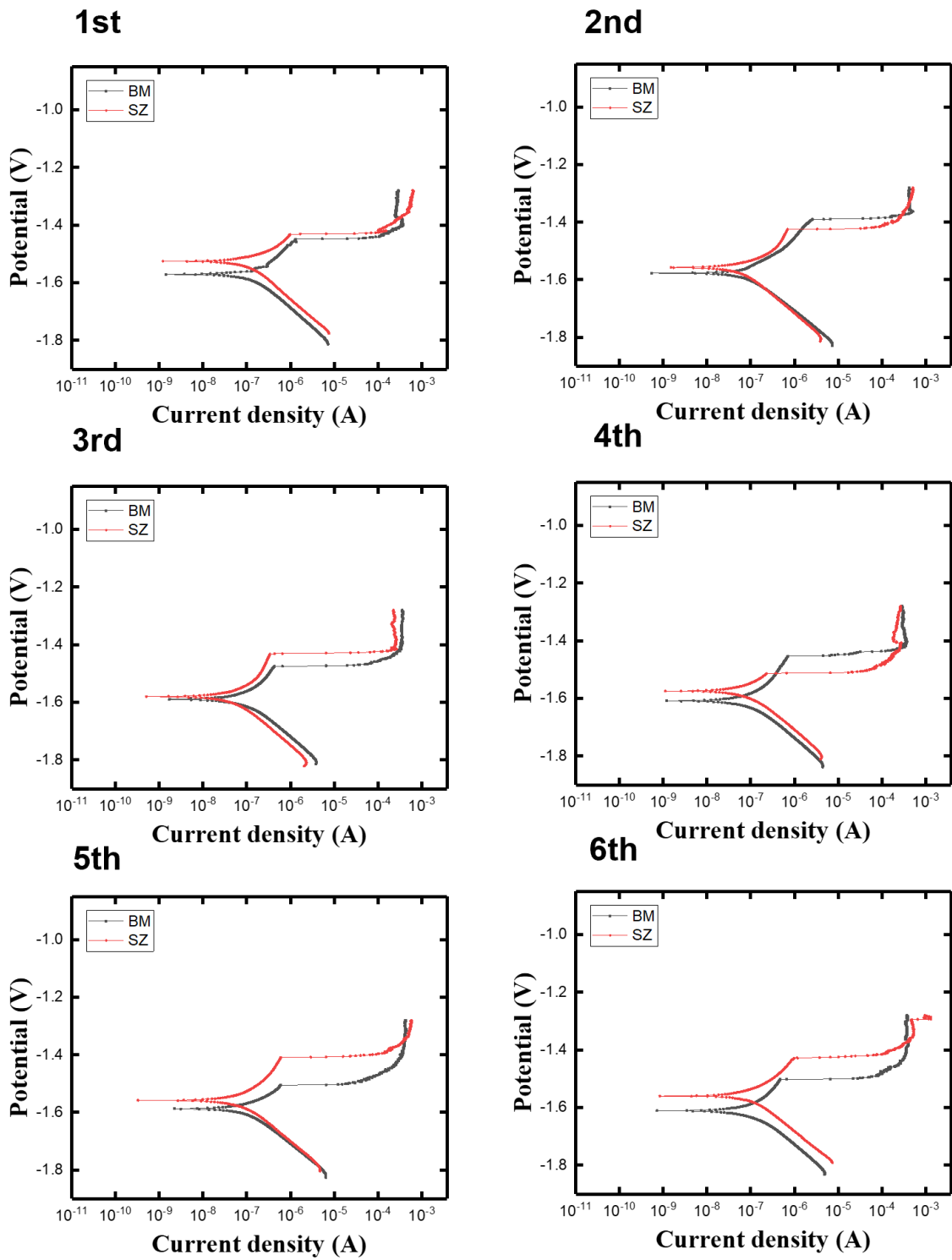


Figure 4-19 Potentiodynamic polarization curve for SZ and BM of B(Modified-AZ31 압연재)

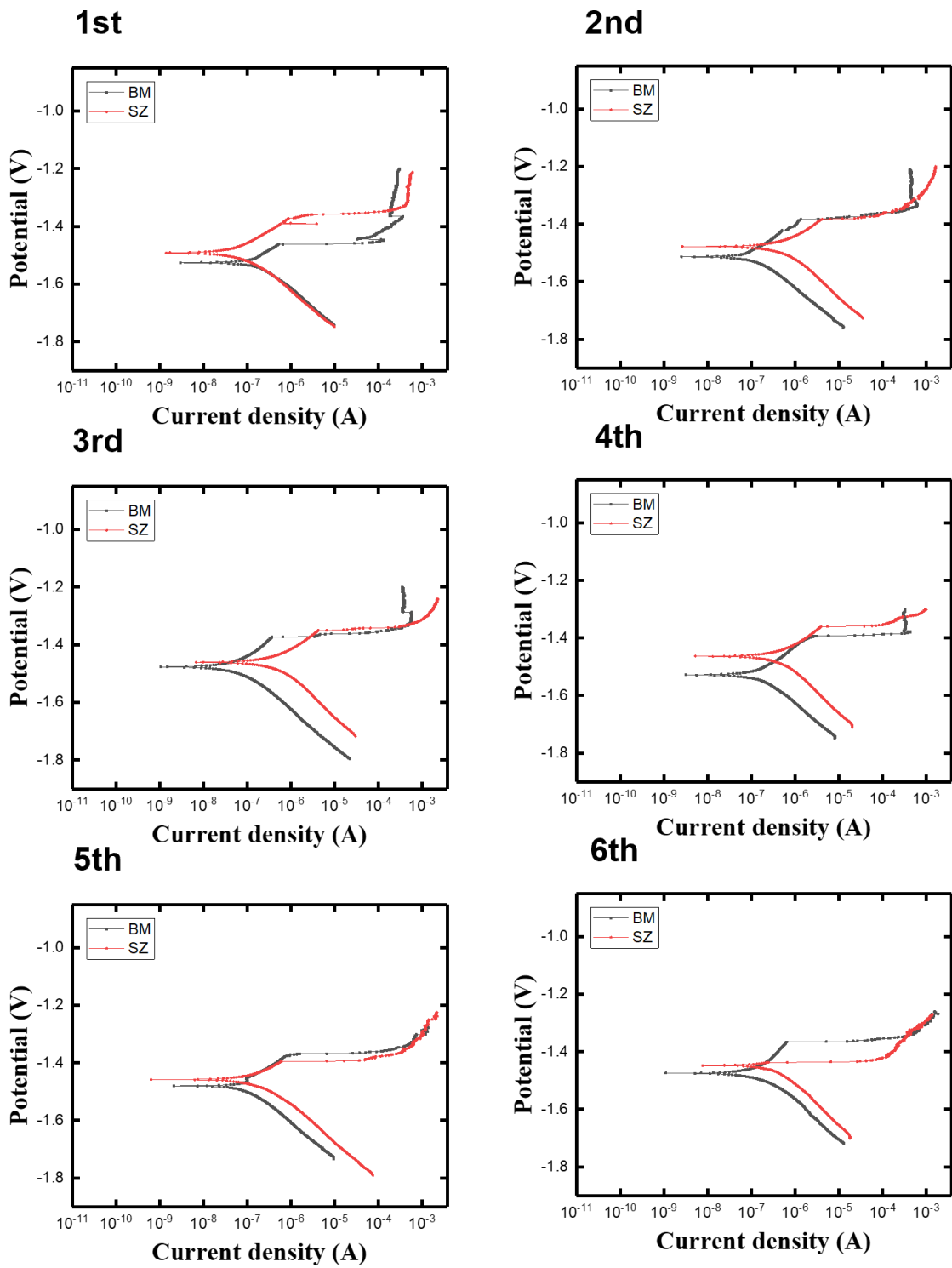


Figure 4-20 Potentiodynamic polarization curve for SZ and BM of C(상용 AZ31 압연재)

Table 4-3 Corrosion potential(E_{corr}) value and current density(I_{corr}) value

Unit: E_{corr} (V), I_{corr} (nA)

A	BM		SZ	
	E_{corr}	I_{corr}	E_{corr}	I_{corr}
1st	-1.57	122.0	-1.55	098.3
2nd	-1.56	166.0	-1.54	097.2
3rd	-1.57	141.0	-1.56	126.0
4th	-1.59	152.0	-1.57	087.3
5th	-1.58	213.0	-1.57	078.4
6th	-1.61	189.0	-1.58	071.5
B	BM		SZ	
	E_{corr}	I_{corr}	E_{corr}	I_{corr}
1st	-1.57	126.0	-1.53	176.0
2nd	-1.58	086.9	-1.56	114.0
3rd	-1.59	083.2	-1.58	137.0
4th	-1.61	111.0	-1.57	144.0
5th	-1.59	106.4	-1.56	125.0
6th	-1.61	128.0	-1.56	156.0
C	BM		SZ	
	E_{corr}	I_{corr}	E_{corr}	I_{corr}
1st	-1.53	274.0	-1.49	184.2
2nd	-1.51	178.0	-1.48	306.0
3rd	-1.48	079.9	-1.46	268.5
4th	-1.53	212.0	-1.46	265.5
5th	-1.48	121.0	-1.46	223.0
6th	-1.47	276.0	-1.44	194.0

5. 고찰

5.1 마찰교반접합에 의한 미세조직 변화

5.1.1 마찰교반접합에 의한 결정립 변화

본 연구에서는 서로 다른 조성을 가지는 총 3 종의 마그네슘 합금에 대하여 마찰교반접합을 진행하여 마찰교반접합에 의한 결정립의 변화를 분석하였다.

A 의 경우 BM 의 평균 결정립 크기가 $33.95\mu\text{m}$ 로 매우 조대한 결정립이 나타났다. 이는 압출 후 어닐링 열처리를 하지 않아 정적 재결정이 발생하지 않은 것으로 보인다. B 와 C 의 경우 BM 의 평균 결정립 크기가 각각 $9.03\mu\text{m}$, $11.02\mu\text{m}$ 로 A 에 비하여 훨씬 미세한 결정립이 나타났다. B 와 C 에는 미세한 결정립과 비교적 조대한 결정립이 함께 나타난 것을 Figure 5-1 에서 확인할 수 있다. 이는 압연 후 어닐링 열처리로 재결정과 결정립 성장이 발생한 것으로 볼 수 있다.

Figure 5-2 에 마찰교반접합에 의한 결정립 변화를 그래프로 나타내었다. A 의 SZ 은 $10.98\mu\text{m}$, B 의 SZ 은 $8.68\mu\text{m}$, C 의 SZ 은 $7.04\mu\text{m}$ 로 3 종의 마그네슘 합금 모두 SZ 의 평균 결정립 크기가 BM 에 비하여 미세화되었다. 이는 접합 과정에서 마찰열과 소성유동이 발생하여 동적 재결정이 일어나 이러한 결과가 나타난 것을 알 수 있다.

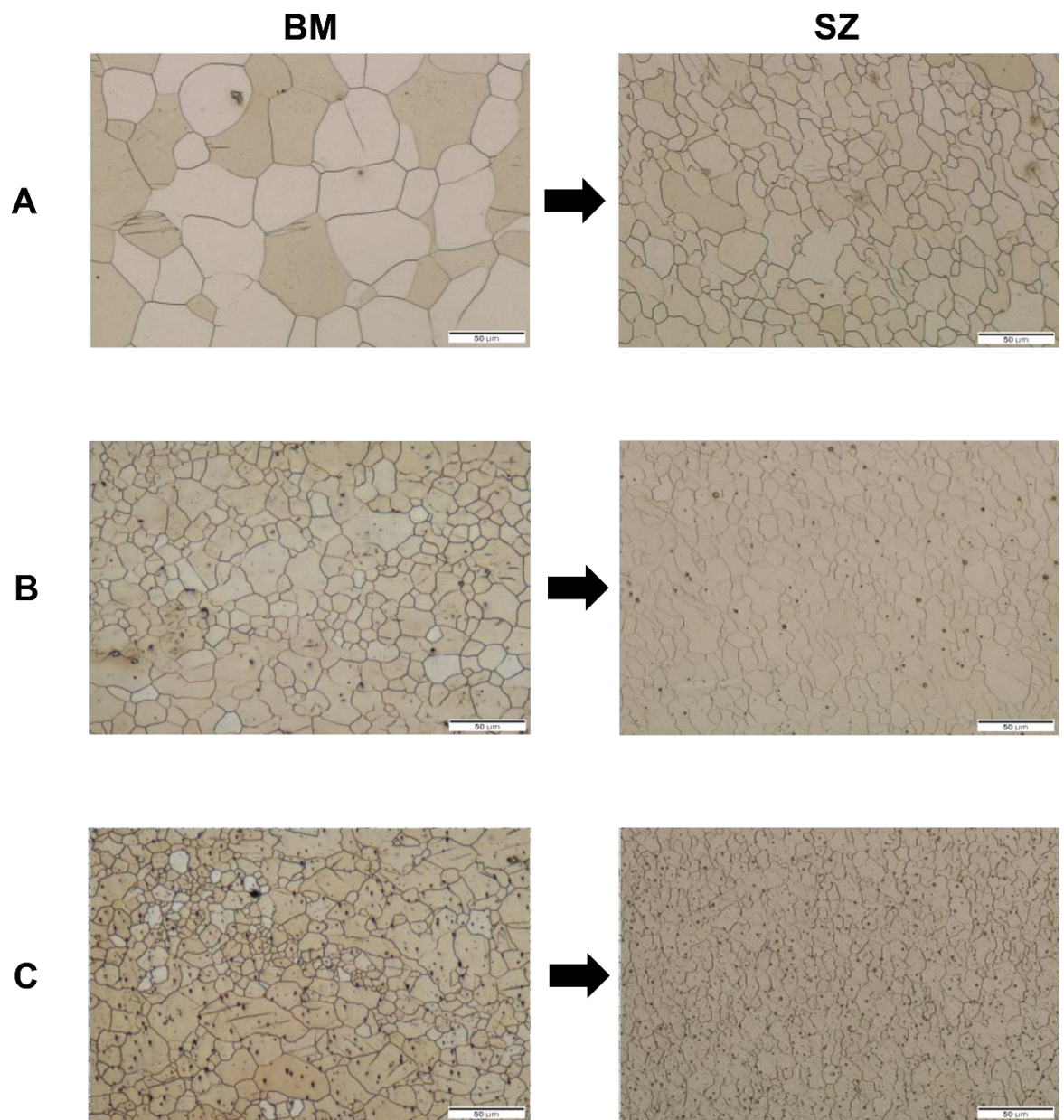


Figure 5-1 Microstructure changes before and after FSW

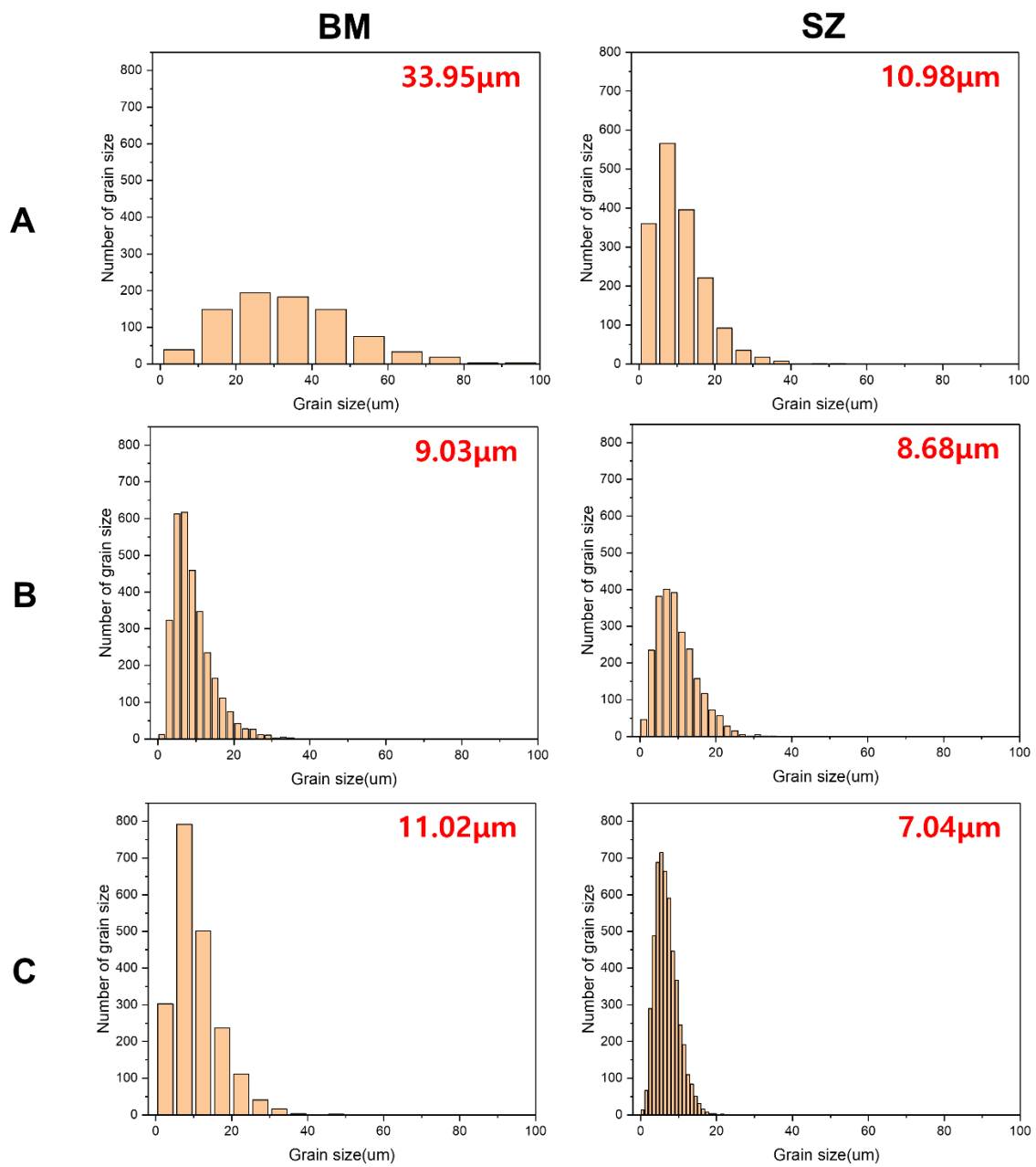


Figure 5-2 Grain size distribution before and after FSW

5.1.2 마찰교반접합에 의한 이차상 변화

본 연구에서는 서로 다른 조성을 가지는 총 3 종의 마그네슘 합금에 대하여 마찰교반접합을 진행하여 마찰교반접합에 의한 이차상의 변화를 분석하였다. Figure 5-3 은 각 마그네슘 합금에 존재하는 마찰교반접합 전과 후의 이차상 형상과 조성을 나타내었다. Figure 5-3, 5-4 에 나타난 바와 같이 A 는 마찰교반접합에 의하여 SZ 의 이차상이 BM 의 이차상에 비하여 Mn 의 함량이 증가하였고, 'X'와 Fe 의 함량은 감소하였다. B 는 마찰교반접합에 의하여 SZ 의 이차상이 BM 의 이차상에 비하여 Mn 의 함량이 증가하였고, 'X'의 함량은 감소하였다. A 와 B 모두 공통적으로 이차상의 크기는 증가하였고, 분율은 유사하게 나타났다. 마찰교반접합 시 최대 400~470°C 까지 온도가 상승할 것으로 추정되는데[12, 13, 14], Figure 5-5 의 상태도를 보면 400 °C 이하의 온도에서 형성된 정출상이 용해되었을 것으로 생각된다. 또한 마찰교반접합 시 온도가 상승한 후에 급격하게 떨어지기 때문에 비평형상이 형성될 수 있다. 이에 400~470°C 구간에서 형성될 수 있는 Al-Mn-Fe 석출상이 새롭게 형성된 것으로 예상된다.

Figure 5-3, 5-4 를 보면 알 수 있듯이, C 는 마찰교반접합에 의하여 SZ 의 이차상이 BM 의 이차상에 비하여 Mn 의 함량이 증가하였고, 이차상의 크기와 분율은 유사하게 나타났다. Figure 5-6 의 상태도를 보면 400°C 이하의 온도에서 형성된 정출상이 용해되었을 것으로 생각되고, 400~470°C 구간에서 형성될 수 있는 Al_8Mn_5 석출상이 새롭게 형성된 것으로 예상된다.

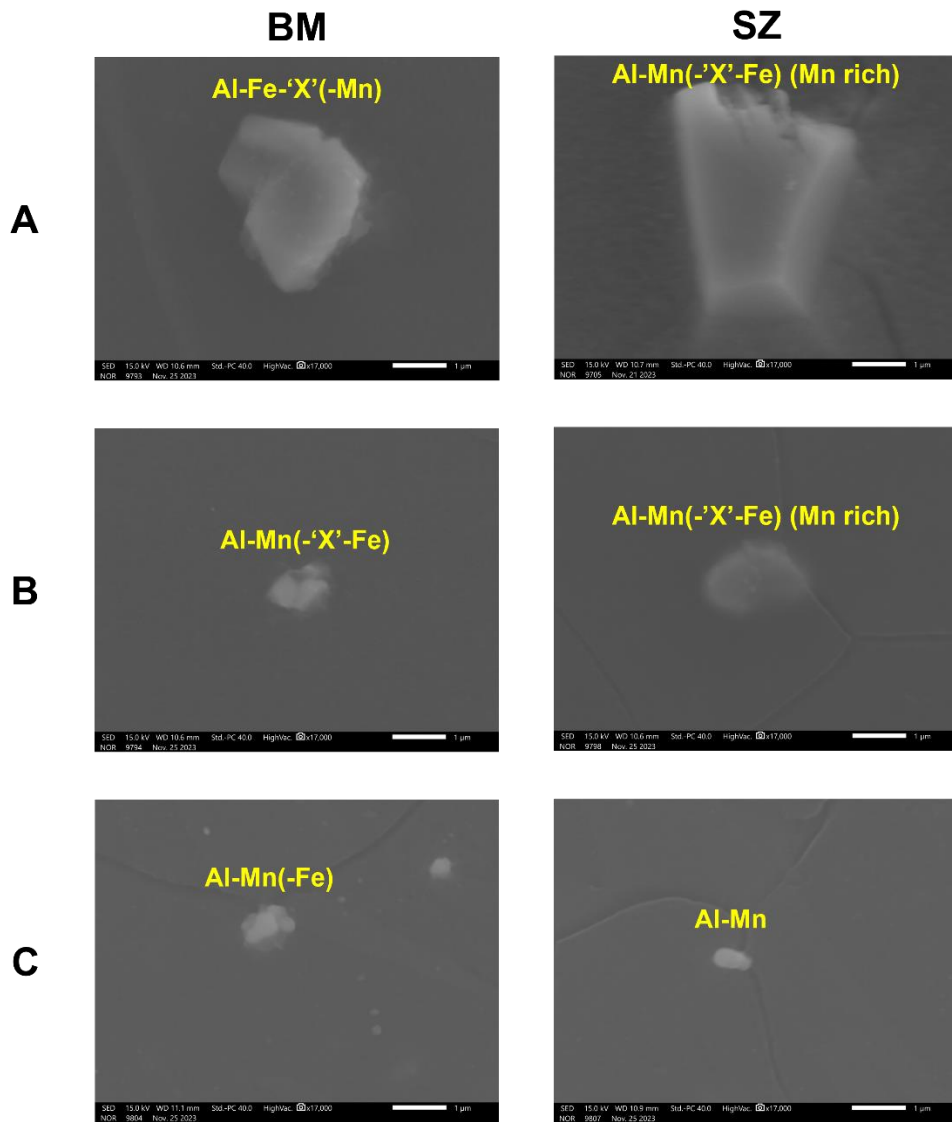
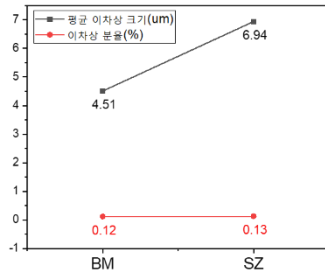
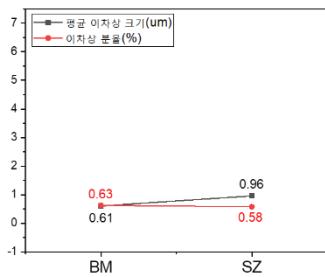


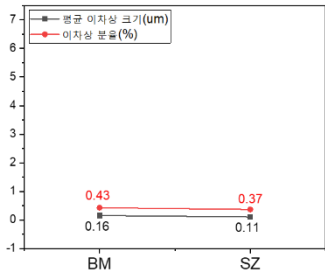
Figure 5-3 Secondary phase of A(Modified-AZ31 압출재), B(Modified-AZ31 압연재), C(상용 AZ31 압연재)



이차상 성분	Mn (↑), 'X' (↓), Fe (↓)
이차상 크기	↑
이차상 분율	유사



이차상 성분	Mn (↑), 'X' (↓)
이차상 크기	↑
이차상 분율	유사



이차상 성분	Mn (↑)
이차상 크기	유사
이차상 분율	유사

Figure 5-4 Secondary phase change after FSW

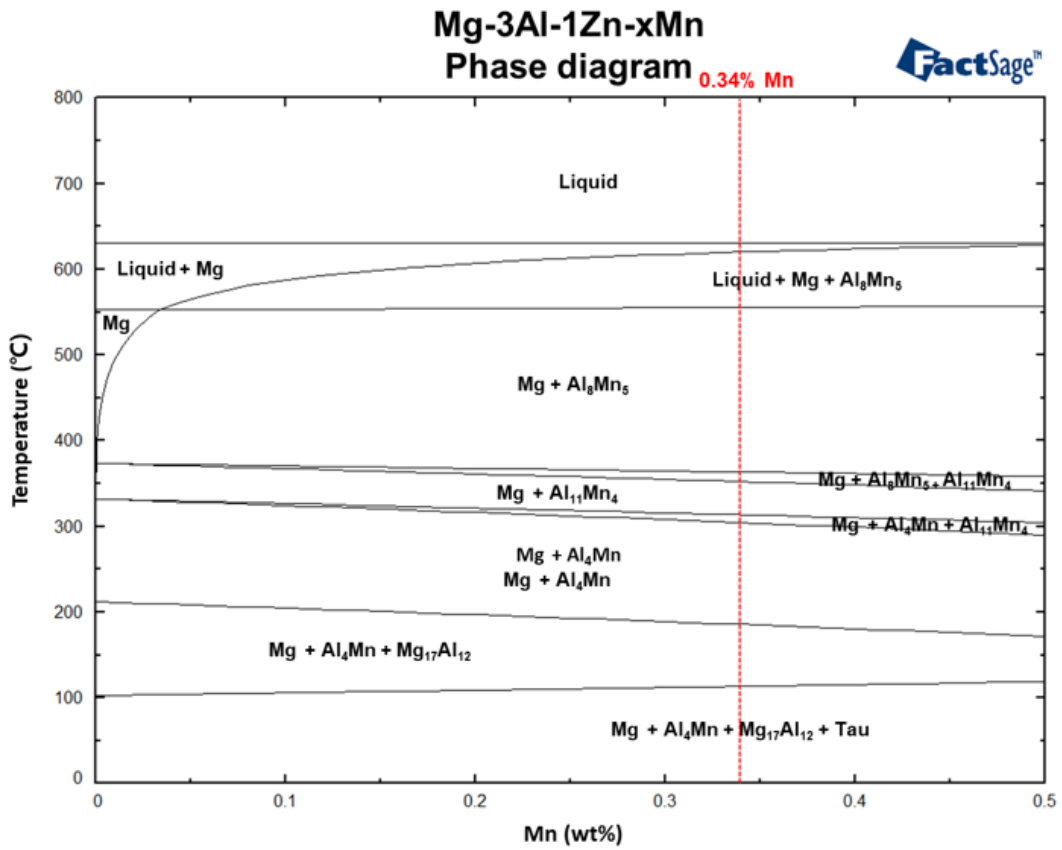


Figure 5-6 Phase diagram of C(상용 AZ31 압연재)

5.2 마찰교반접합에 의한 부식 특성 변화

본 연구에서는 총 3 종의 마그네슘 합금에 대하여 마찰교반접합이 진행되었고 BM 시편과 FSW 접합된 시편에 대한 부식 시험을 진행하였다. 이에 BM의 부식 특성과 SZ의 부식 특성을 비교 및 분석하였다.

C의 부식속도가 A와 B에 비하여 확연히 빨라 내식성이 나쁜 것을 Figure 5-8, 5-9에서 확인할 수 있었다. 이는 A와 B는 희토류 원소 'X'가 미량 첨가되었고, C는 희토류 원소 'X'가 첨가되지 않았기 때문이다. 여러 선행 연구에 따르면 희토류 원소가 미량 첨가되었을 때 내식성이 향상되었다고 한다.[23, 24] 선행 연구를 바탕으로 희토류 원소 'X'가 첨가되면 기지와 이차상 간의 전위차가 줄어들어 이차상 주변에서 반응하는 환원 반응이 감소하게 되어 내식성이 향상된 것을 알 수 있다.

Figure 5-7를 보면 알 수 있듯이, 마찰교반접합으로 인하여 A와 B는 SZ의 이차상이 BM의 이차상에 비하여 Mn의 함량이 증가하였고, 'X'의 함량이 감소하였다. C는 Mn의 함량이 증가하였다. 이에 접합부에 부식이 집중되는 양상을 Figure 5-8에서 확인할 수 있었는데, Mn의 함량이 증가함에 따라 Al-Mn 상의 몰타 전위가 증가하게 되어 기지와 이차상 간의 전위차가 늘어나 이차상 주변에 pitting이 많이 발생된 것으로 보인다.[23]

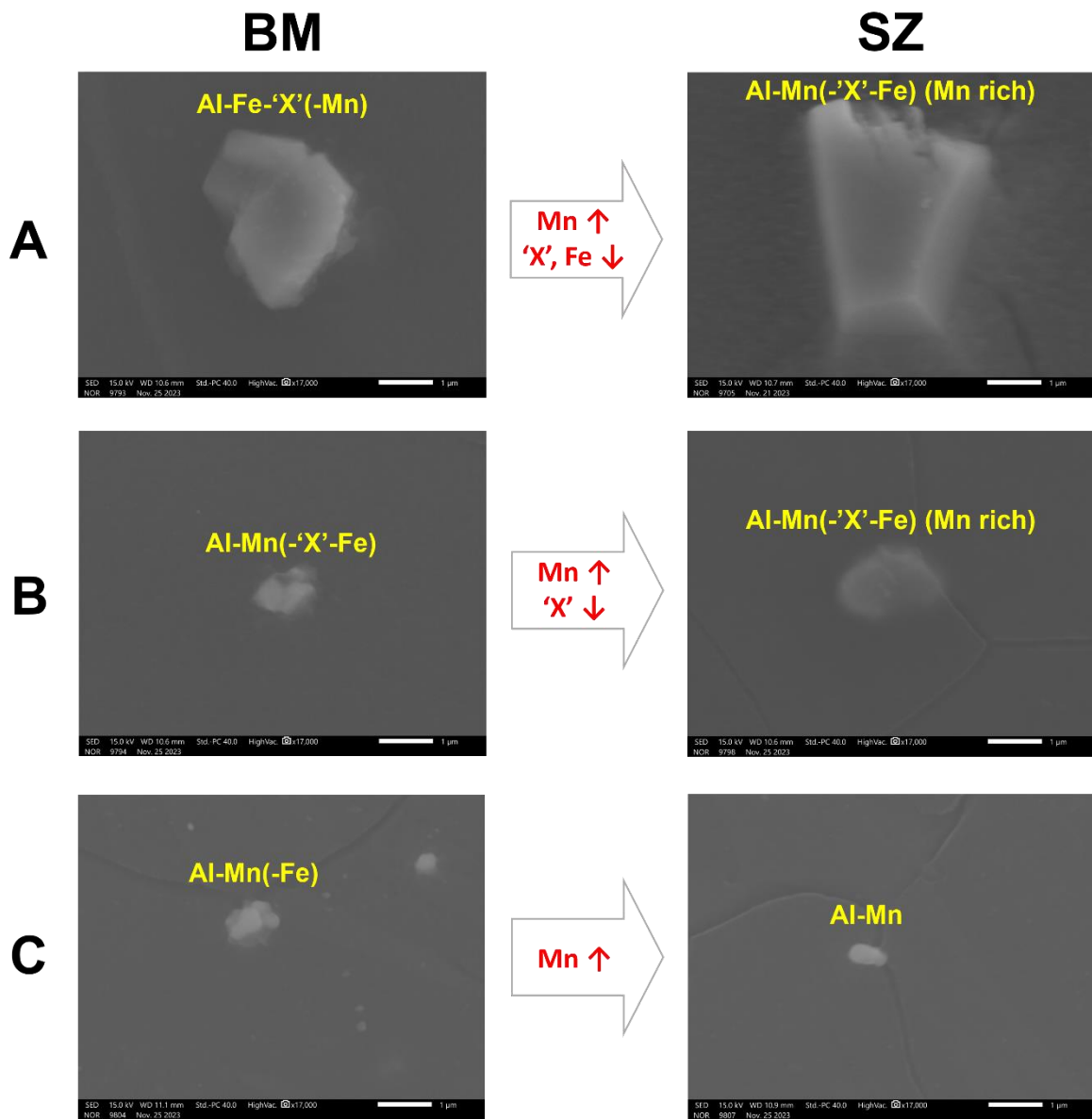


Figure 5-7 SEM images of secondary phase change before and after FSW

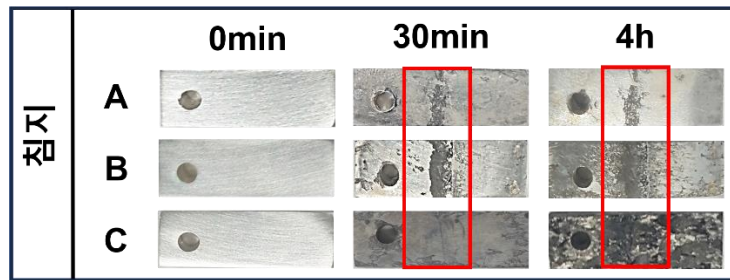
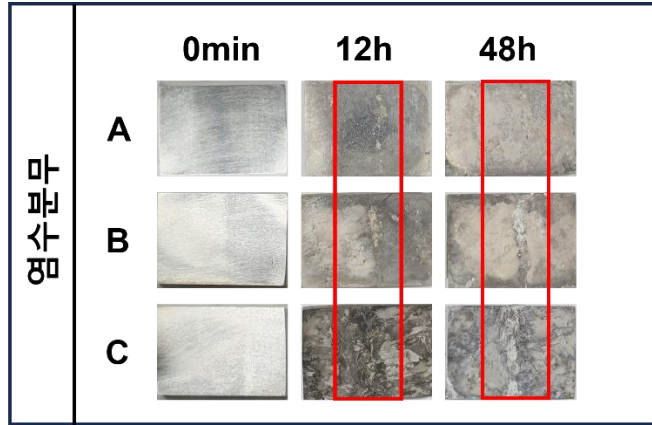


Figure 5-8 Salt spray test and Immersion test results of FSWed specimens

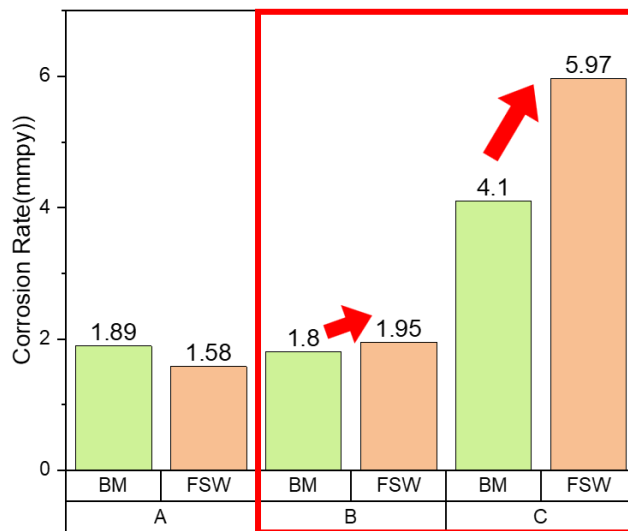


Figure 5-9 Corrosion Rate results graph

5.3 접합부 미세조직 변화와 부식 특성과의 상관관계

본 연구에서는 총 3 종의 마그네슘 합금에 대하여 마찰교반접합이 진행되었고 BM 시편과 FSW 접합된 시편에 대한 부식 시험을 진행하였다. 이에 접합부 미세조직 변화와 부식 특성과의 상관관계를 분석하였다.

Figure 5-10에 마찰교반접합에 의한 미세조직 변화를 도식적으로 나타내었다. A의 경우 다른 합금과 비교해 보았을 때, 마찰교반접합에 의하여 결정립 크기가 가장 크게 변화하였다. 이에 부식 특성에 영향을 미치는 주요 인자를 결정립 크기로 볼 수 있었다. B와 C의 경우 마찰교반접합에 의한 결정립 크기, 이차상의 크기, 분율에서의 변화보다 이차상의 성분이 가장 크게 변화하였다. 이에 부식 특성에 영향을 미치는 주요 인자를 이차상의 성분으로 볼 수 있었다.

Figure 5-12에 나타난 바와 같이 A는 BM의 평균 결정립 크기가 $33.95\mu\text{m}$ 에서 SZ의 평균 결정립 크기 $10.98\mu\text{m}$ 로 마찰교반접합으로 인한 결정립 미세화가 발생하였다. 결정립이 미세화됨에 따라 부식 속도 역시 1.89mmpy 에서 1.58mmpy 로 감소하였는데, 이는 많은 결정립계가 생성되어 물리적 부식 장벽 역할을 해 내식성이 향상된 것으로 보인다.[9, 25, 26, 27, 28]

Figure 5-13에 나타난 바와 같이 B는 마찰교반접합으로 인하여 Mn의 함량이 $20.59\text{wt}\%$ 에서 $42.01\text{wt}\%$ 로 증가하였고, 'X'의 함량은 $3.16\text{wt}\%$ 에서 $1.32\text{wt}\%$ 로 감소하였다. C는 마찰교반접합으로 인하여 Mn의 함량이 $11.86\text{wt}\%$ 에서 $15.76\text{wt}\%$ 로 증가하였다. SZ에 존재하는 이차상의 Mn의 함량이 증가함에 따라 Figure 5-14의 동전위 분극 곡선의 환원 영역에서의 전류밀도도 SZ이 크게 나타났으며, Figure 5-15의 부식 속도 그래프의 FSW 접합된 시편의 부식 속도가 더 빠르게 나타났다. 이는 이차상의 Mn

함량이 증가함에 따라 이차상의 불타 전위가 증가하여 내식성이 나빠진 것으로 보인다.[23]

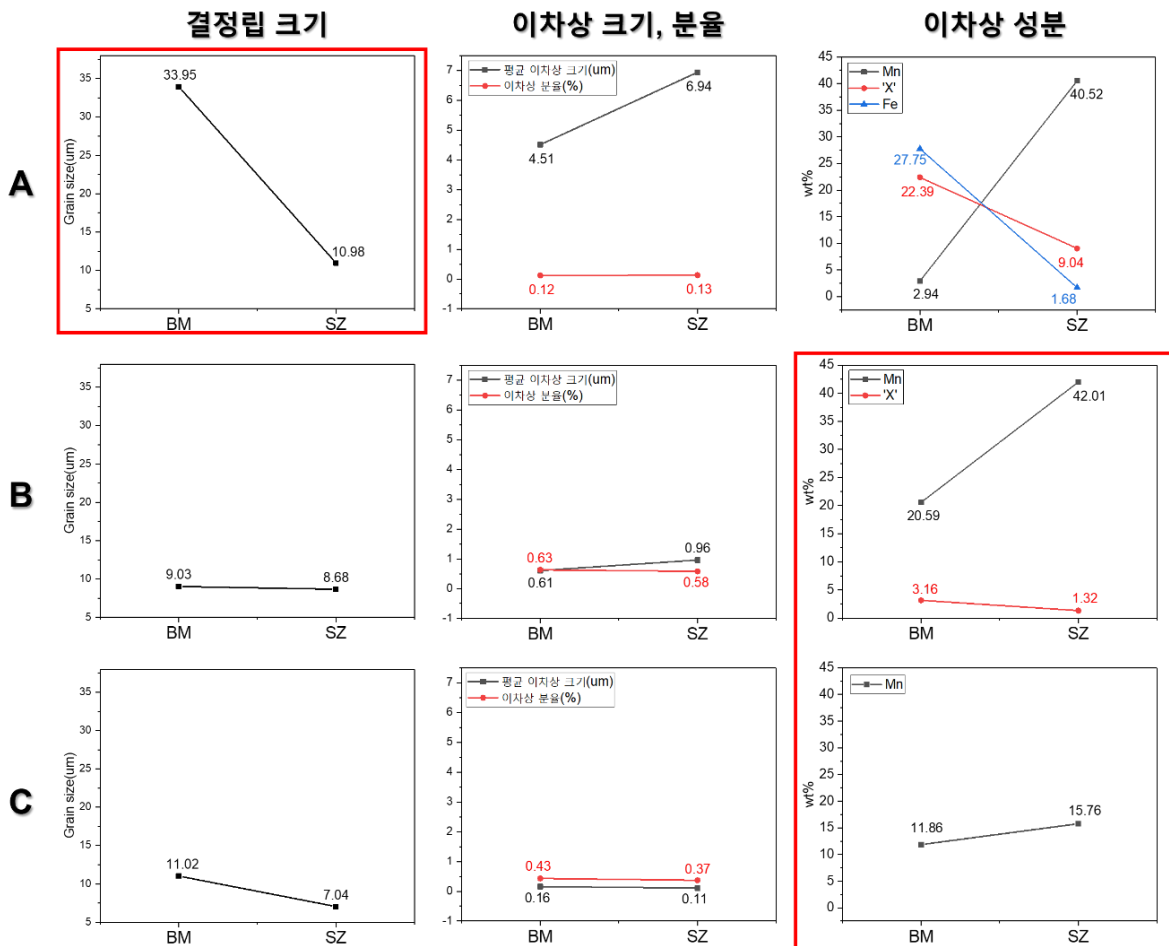


Figure 5-10 Grain size, Secondary phase size, fraction and Secondary phase composition change curve

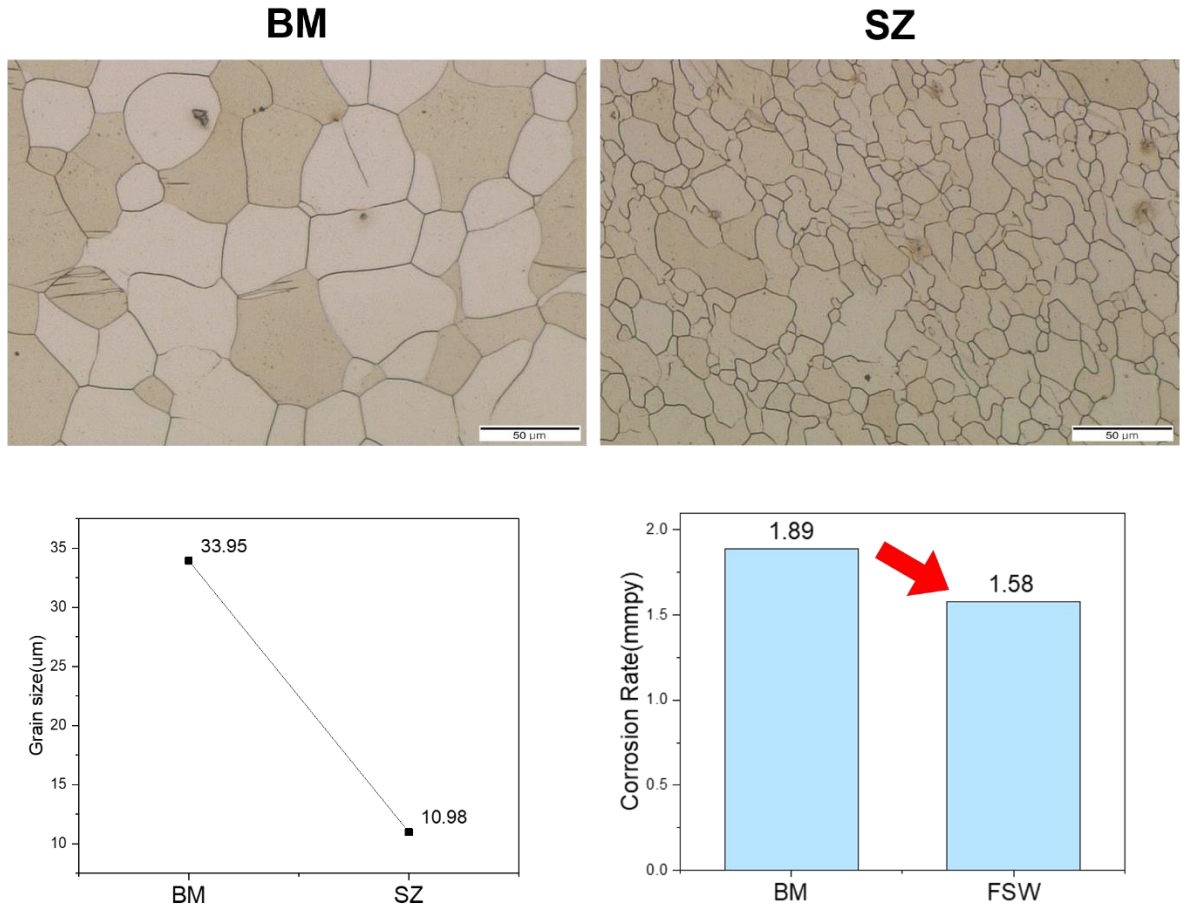


Figure 5-10 OM images, Average Grain size graph, Corrosion Rate graph of A(Modified-AZ31 압출재)

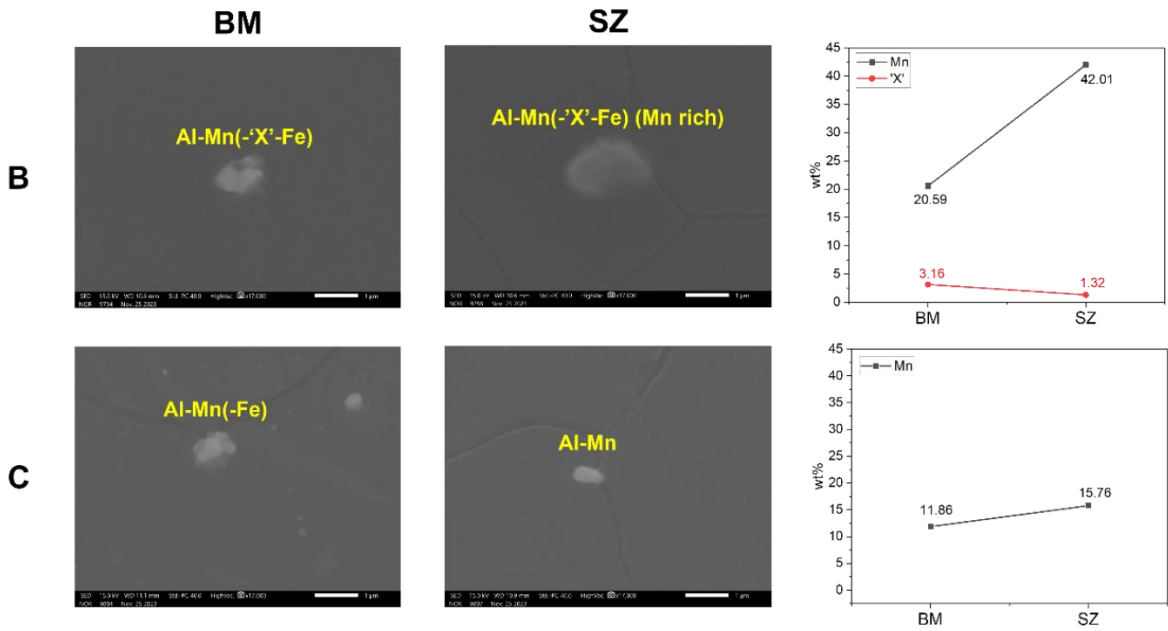


Figure 5-11 Secondary phase change before and after FSW

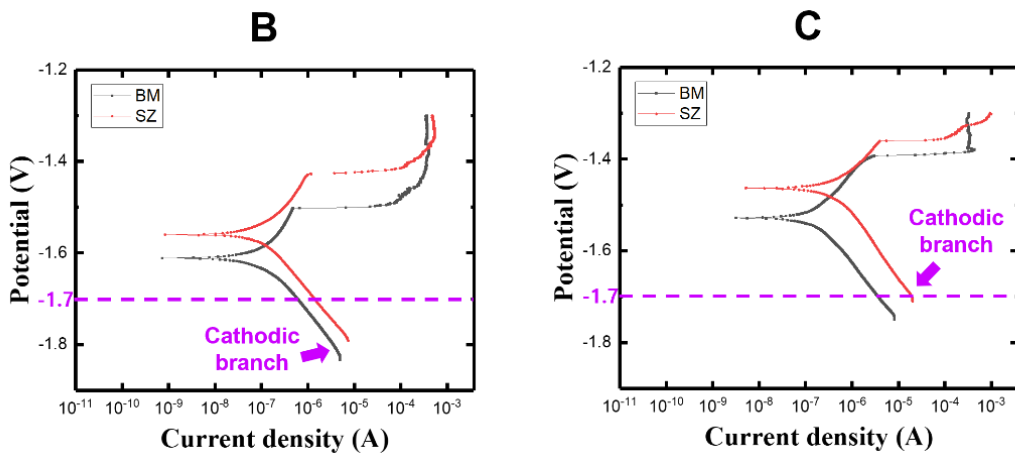


Figure 5-12 Potentiodynamic graphs of B(Modified-AZ31 압연재), C(상용 AZ31 압연재)

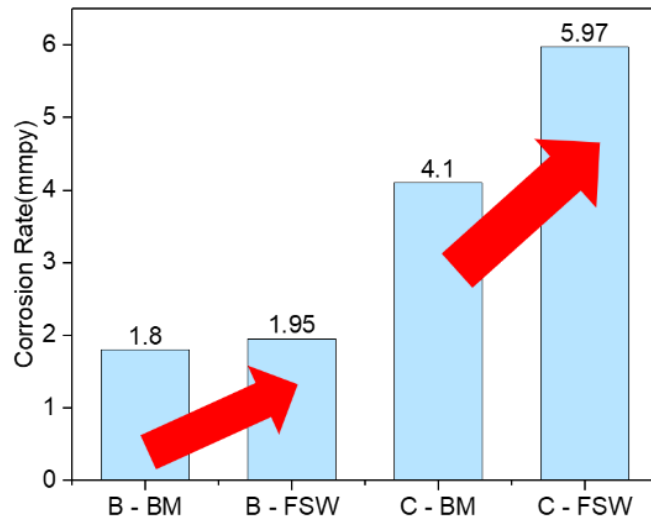


Figure 5-13 Corrosion Rate graph of B(Modified-AZ31 압연재), C(상용 AZ31 압연재)

6. 결론

구조재로서의 마그네슘 합금의 적용을 확대하기 위해 고체 상태의 접합 공정인 마찰교반접합 공정을 적용하였고, Modified-AZ31 과 상용 AZ31 총 3 종의 마그네슘 합금을 비교 및 분석하고, 마찰교반접합부의 미세조직 변화에 따른 부식 특성 간의 상관관계를 밝히고자 연구를 진행하였다.

1. Modified-AZ31 압출재(A)의 경우 33 μm 에서 10 μm 로, Modified-AZ31 압연재(B)의 경우 9 μm 에서 8 μm 로, 상용 AZ31 압연재(C)의 경우 11 μm 에서 7 μm 로 BM 에 비하여 SZ 에서 결정립 미세화가 나타났다.
이는 마찰교반접합 과정 중에 발생한 소성변형과 열 영향으로 동적재결정이 발생했기 때문이다.
2. Modified-AZ31 압출재(A)의 경우 SZ 의 이차상의 Mn 함량은 증가하였고, 'X'와 Fe 의 함량은 감소하였다. 평균 이차상 크기는 4 μm 에서 6 μm 로 증가하였고, 분율은 유사하게 나타났다.
Modified-AZ31 압연재(B)의 경우 SZ 의 이차상의 Mn 함량은 증가하였고, 'X'의 함량은 감소하였다. 평균 이차상 크기는 0.6 μm 에서 0.9 μm 로 증가하였고, 분율은 유사하게 나타났다.
상용 AZ31 압연재(C)의 경우 SZ 의 이차상의 Mn 함량은 증가하였고, 평균 이차상 크기와 분율은 유사하게 나타났다.
이는 마찰교반접합 시 최대 400-470 $^{\circ}\text{C}$ 까지 온도가 상승하여 이 온도 구간에서 형성될 수 있는 석출상이 새롭게 형성된 것으로 추정된다.

3. Modified-AZ31 압출재(A)의 경우 다른 합금과 비교해 보았을 때, 마찰교반접합에 의하여 결정립 크기가 가장 크게 변화하였다. 이에 부식 특성에 영향을 미치는 주요 인자를 결정립 크기로 볼 수 있었다.

Modified-AZ31 압연재(B)와 상용 AZ31 압연재(C)의 경우 마찰교반접합에 의한 결정립 크기, 이차상의 크기, 분율에서의 변화보다 이차상의 성분이 가장 크게 변화하였다. 이에 부식 특성에 영향을 미치는 주요 인자를 이차상의 성분으로 볼 수 있었다.

4. Modified-AZ31 압출재(A)의 경우 BM 이 SZ 보다 높은 부식 속도를 나타내어 비교적 BM 의 내식성이 좋지 않은 것을 알 수 있다. A 합금의 BM 은 압출 후 어닐링 열처리를 하지 않아 정적 재결정이 발생하지 못하여 조대한 결정립을 가진다. 마찰교반접합으로 인하여 SZ 에 결정립 미세화가 일어나게 되었고, 많은 결정립계가 생성되어 물리적 부식 장벽 역할을 해 SZ 의 내식성이 향상된 것으로 보인다.

5. Modified-AZ31 압연재(B)와 상용 AZ31 압연재(C)의 SZ 이 BM 에 비하여 환원 영역에서의 전류밀도가 다소 높게 나타나 비교적 내식성이 좋지 않은 것을 알 수 있다.

Modified-AZ31 압연재(B)의 경우 이차상의 Mn 함량은 증가하고, 희토류 원소 'X'의 함량은 감소하여 Mn rich 한 Al-Mn-'X'-Fe 상이 형성되었다.

상용 AZ31 압연재(C)의 경우 이차상의 Mn 함량이 증가하였다.

이는 이차상과 기지 간의 전위차가 증가한 것이 원인으로 보인다.

7. 참고문헌

- [1] Myoung-Gyu Lee. Lightweight Materials Technology in the Transition to Electric Mobility. Auto Journal (2021) 38-40.
- [2] 첨단 경량소재 신소재 산업의 동향과 향후 트렌드. 재료연구소 금속재료연구본부. 소재·부품산업 이슈 보고서 (2016) 1-50.
- [3] Mustafa Kemal Kulekci. Magnesium and its alloys applications in automotive industry. Int J Adv Manuf Technol (2008) 851-864.
- [4] 마그네슘 합금 시장. INNOPOLIS Foundation (2019) 1-12.
- [5] Magnesium Alloys Market. MarketsandMarkets (2018).
- [6] 한범석, 김세훈, 신재혁, 김진평, 김동욱, 성시영. 자동차 기술 동향과 경량화 기술. 한국주조공학회지 제 42 권 제 2 호 (2022) 97-104.
- [7] Mok-Young Lee, Chung-Seon, Woong-Seong Chang. Trends in Application of Magnesium Alloy and Its Welding Characteristics with Laser. Journal of KWJS, Vol. 25, No. 5 (2007) 29-35.
- [8] Shin-Wook Kang. Effect of solidification rate and aluminum content on microstructure and mechanical properties of magnesium alloys. Dept. of Advanced Materials Engineering, Graduate School of Chosun University (2016).
- [9] Chang Dong Yim, Young Min Kim, Sung Hyuk Park, Bong Sun You. Corrosion Behavior of AZ91 Magnesium Alloy. Korean J. Met. Mater. Vol. 50, No. 9 (2012) 619-627.
- [10] 임창동, 유봉선, 손근용. 마그네슘합금의 자동차 부품 적용 현황. 기계와재료 특집: 차세대 자동차 기술. 16 권 4 호 (2004) 66-75.
- [11] Ruth Heuss, Nicolai Muller, Wolff van Sintern, Anne Starke, Andreas Tschiesner. Lightweight, heavy impact. Mckinsey (2012).
- [12] Woong-Seong Chang, Ki-Yong Choi, Moon-Jin Kang, Young-Gak Kweon. Up-and-Coming Friction Stir Welding. Journal of KWS, Vol. 18, No. 6 (2000) 705-712.

- [13] Chandrasekhar Sunnapu, Murahari Kolli. Tool shoulder and pin geometry's effect on friction stir welding: A study of literature (2020) 1-5.
- [14] C.B. Jagadeesha. Flow analysis of materials in friction stir welding. Journal of the Mechanical Behavior of Materials (2018) 1-12.
- [15] V.P. Singh, Rajan Kumar, Ashish Kumar, Ashok K. Dewangan. Automotive light weight multi-materials sheets joining through friction stir welding technique: An overview. Materials Today: Proceedings (2022) 1-4.
- [16] Oyindamola Kayode, Esther Titilayo Akinlabi. An overview on joining of aluminium and magnesium alloys using friction stir welding (FSW) for automotive lightweight applications. Mater. Res. Express 6 (2019) 1-14.
- [17] Ashish M. Desai, Bharat C. Khatri, Vivek Patel, Harikrishna Rana. Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy: A review. Materialstoday proceedings Vol 47 (2021) 6576-6584.
- [18] Sun Kyoung Jeoung, Jin Uk Ha. Lightweighting Technology Development and Trends in Automotive. Auto Journal (2018) 30-34.
- [19] 김영민, 김하식, 유봉선, 임창동. KR101258470B1 (2011). 고강도 고연성 난연성 마그네슘 합금. Worldwide applications.
- [20] Jiangfeng Song, Jia She, Daolun Chen, Fusheng Pan. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. Journal of Magnesium and Alloys Vol 8 (2020) 1-41.
- [21] 2021~2030 년 자동차 온실가스 연비 기준 행정예고. 대한민국 환경부 (2020)
- [22] Cian-Huei Shih. Chao-Yu Huang, Ting-Hsuan Hsiao, Chao-Sung Lin. The effect of the secondary phases on the corrosion of AZ31B and WE43-T5 Mg alloys. Corrosion Science Vol 211 (2023).
- [23] Soo-Min Baek, Si-Young Lee, Jong Chan Kim, Jaeho Kwon, Hoseok Jung, Sooseok Lee, Ki-Suk Lee, Sung Soo Park. Role of trace additions of Mn and Y in improving the corrosion resistance of Mg-3Al-1Zn alloy. Corrosion science 178 (2021) 1-10.

- [24] Daseul Lee, Beomcheol Kim, Sooseok Lee, Soo-Min Baek, Jong Chan Kim, Hyeon-Taek Son, Jung Gu Lee, Ki-Suk Lee, Sung Soo Park. Enhanced corrosion resistance of Mg-Sn-Zn-Al alloy by Y microalloying. *Scripta Materialia* 163 (2019) 125-129.
- [25] Y. Savguira, T. H. North, A. P. Gerlich, S. J. Thorpe. The Effect of Second Phase Particle Dissolution on the Corrosion of Friction Stir Spot Welded AZ31B. *Journal of The Electrochemical Society* (2018) 1-14.
- [26] K. D. Ralston, N. Birbilis. Effect of Grain Size on Corrosion: A Review. *Corrosion* Vol. 66, No. 7 (2010). 1-13
- [27] Rajan Ambat, Naing Naing Aung, W Zhou. Evaluation of microstructural effects on corrosion behaviour of AZ91D magnesium alloy. *Corrosion Science*, Vol 42 (2000) 1433-1455.
- [28] Guangling Song, Andrej Atrens, Matthew Dargusch. Influence of microstructure on the corrosion of diecast AZ91D. *Corrosion Science*, Vol 41 (1998) 249-273
- [29] S Lu, D L Yang, S Y Xiao, S J Chen. Three-dimensional investigation on temperature distribution and mechanical properties of AZ31 Mg alloy joint welded by FSW. *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding* (2013) 67-72.
- [30] Gianluca Buffa, David Campanella, Archimede Forcellese, Livan Fratini, Michela Simoncini. In-process tool rotational speed variation with constant heat input in friction stir welding of AZ31 sheets with variable thickness. *AIP Conference Proceedings* (2017) 1-
- [31] Ali Lu, Sheng Lu, Shujin Chen, Daili Yang. Study on the Flow Field of Friction Stir Welding of AZ31 Magnesium Alloy Based on the Temperature Variation. *Material Science Forum* (2014) 282-289.
- [32] Kim Minjoo. A Study on the European Commission's Proposal on Post-2020 CO2 Emission Targets for Cars and Vans. *Korea legislation research institute* (2018).
- [33] Mark Easton, Aiden Beer, Matthew Barnett, Chris Davies, Gordon Dunlop, Yvonne Durandet, Stuart Blacket, Tim Hilditch & Peter Beggs. Magnesium alloy applications in automotive structures. *Magnesium for Automotive Applications*, Volume 60 (2008) 57-62.

영문 요약

In the automobile industry, there is a growing interest in magnesium alloy, a lightweight metal, to protect the environment and improve fuel efficiency. However, its application to various fields has been limited due to its poor corrosion resistance compared to competing materials such as plastic and aluminum alloys. Specifically, for the application of magnesium alloy as a structural material, joining technology is crucial. However, in the case of fusion welding, commonly used for joining metal materials, issues such as high-temperature cracks, deposits, and composition separation of alloy elements. Therefore, active research is underway on the Friction Stir Welding (FSW) process, a solid-phase joining process. Studies on the microstructure and characteristics of the FSWed commercial AZ31 alloy joint have been reported, but quantitative interpretation of the difference in microstructural characteristics and studies on the change of microstructural factors on the corrosion characteristics during Friction Stir Welding are insufficient. Additionally, a comparison between Modified-AZ31 and commercial AZ31 regarding the microstructure and properties of the joint is necessary.

Therefore, in this study, three types of AZ31 alloys of extruded Modified-AZ31, rolled Modified-AZ31, and rolled commercial AZ31 were butt weld using a Friction Stir Welding process, and the corrosion behavior according to the microstructure change of each joint was to be compared and analyzed by alloy type and region. Microstructure was analyzed and quantified through Optical and Scanning Electron microscopes. In the case of corrosion characteristics, Salt spray test and Immersion test were performed to observe the corrosion behavior of BM(Base metal) and SZ(Stir Zone). Open circuit potential measurement and Potentiodynamic polarization test were conducted to quantify the E_{corr} and I_{corr} values for BM(Base metal) and SZ(Stir Zone) of each alloy. In addition, the microstructure change and corrosion behavior were analyzed in relation by comparing and observing the microstructure before and after joining.

As a result of the experiment, the grains of SZ were recrystallization compared to BM of three magnesium alloys of extruded Modified-AZ31, rolled Modified-AZ31, and rolled commercial AZ31. In the case of extruded Modified-AZ31, the content of Mn increased and the content of 'X' and Fe decreased compared to the secondary phase of BM, and the

size of the secondary phase increased and the fraction was similar. In the case of rolled Modified-AZ31, the secondary phase of the SZ increased and the content of 'X' decreased compared to the secondary phase of the BM, and the size of the secondary phase increased and the fraction was similar. In the case of rolled commercial AZ31, the content of Mn increased in the secondary phase of the SZ compared to the secondary phase of the BM, and the size and fraction of the secondary phase were similar.

The potential difference between the secondary phase and the matrix was reduced by adding a small amount of the rare earth element 'X' to the extruded Modified-AZ31 material and the rolled Modified-AZ31. Accordingly, it showed better corrosion resistance than rolled commercial AZ31 to which 'X' was not added. As a result of the Salt spray and Immersion test, it was observed that corrosion was generally concentrated in the SZ in the FSWed specimens. As a result of calculating the corrosion rate with the amount of weight reduction measured during the Immersion test, the FSWed rolled commercial AZ31, rolled commercial AZ31, extruded Modified-AZ31, FSWed rolled Modified-AZ31, and FSWed extruded Modified-AZ31 showed rapid corrosion rates in the order. As a result of the Potentiodynamic polarization test, when compared by alloy, the current density in the reduction region of the rolled commercial AZ31 was large. When compared by region, the extruded Modified-AZ31 had similar current density in the reduction region of BM and SZ, and the rolled Modified-AZ31 and the rolled commercial AZ31 had higher current density in the reduction region of SZ than the BM.

In Modified-AZ31 extruded material, microstructure changes induced by Friction Stir Welding were more significant in grain size than in the secondary phase, and the main factors influencing corrosion properties could be viewed as grain size. Rolled Modified-AZ31 and Rolled commercial AZ31 showed that microstructure changes caused by Friction Stir Welding were larger in the secondary phase than in the grain size, and the main factors influencing corrosion properties could be viewed as components of the secondary phase.