



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

**AZ31 마그네슘합금과 SGC340 아연도금강판
이종 마찰교반점접합부의
기계적 특성 및 부식거동**

Mechanical properties and corrosion behavior of
dissimilar friction stir spot welding joints of AZ31
magnesium alloy and SGC340 steel sheet

울 산 대 학 교 대 학 원
첨 단 소 재 공 학 과
이 동 하

AZ31 마그네슘합금과 SGC340 아연도금강판
이종 마찰교반점접합부의
기계적 특성 및 부식거동

지도교수 이정구

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2024년 02월

울산대학교 대학원
첨단소재공학과
이동하

이동하의 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

2024년 2월

감사의 글

2 년간의 대학원 생활을 마무리하며, 졸업 논문을 작성하는 과정에서 많은 분들에게 도움을 받아 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 연구실 생활 동안 제가 더 성장할 수 있도록 지도해주시고 올바른 방향으로 갈 수 있도록 이끌어주신 이정구 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 본 논문이 좋은 결실을 맺을 수 있도록 많은 조언과 관심을 주신 권용재 교수님, 신상용 교수님께 감사 인사를 드립니다.

처음 연구실에 들어왔을 때 낯선 환경에 잘 적응할 수 있도록 도와주고 알려준 승엽이 형, 기웅이 형, 민구형에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 논문을 준비하면서 많은 도움을 주시고 같이 고민해 주신 정기형, 두원이형 재호형께도 감사드립니다.

연구실에서 생활하는 동안 많은 일이 있었지만 이를 버티고 기댈 수 있게 해준 금속방 동기 준성이와 재영이에게 정말 고맙다는 말을 하고 싶습니다. 그리고 부족하지만, 저를 믿고 따라준 재훈이와 민성이, 상준이를 비롯한 금속 기반 뿌리기술 연구그룹의 후배들에게도 고맙고 앞으로도 금속방을 잘 이끌어줬으면 좋겠습니다.

그리고 제가 여기 있을 수 있도록 많은 사랑과 관심, 믿음으로 저를 키워 주신 아버지 어머니께 진심으로 감사드리며 늘 저를 걱정해 준 가연이 누나와 수빈이 누나에게 고맙다는 말을 전해주고 싶습니다. 그리고 항상 우리 집을 지켜주고 정신적으로 위로가 되어주는 꼬미와 리오에게도 고맙다는 말 전해주고 싶습니다.

그 뿐만 아니라 다른 많은 분의 도움을 통해 대학원 생활을 잘 마무리할 수 있었던 것 같습니다. 도와주신 모든 분에게 보답하기 위해 앞으로도 꾸준히 노력하여 제 역량을 키워 나가도록 하겠습니다. 다시 한번 진심으로 감사드립니다.

국문 요약

현재 자동차 산업에서 환경보호 및 연비 향상을 실현시키기 위해서 자동차의 경량화에 주목하고 있다. 경량금속 중 하나인 마그네슘은 구조용 재료 중 가장 비강도가 높고 기계적 특성도 우수하지만 내식성, 상온 성형성 및 용접성이 열악해 아직까지 다양한 분야에 사용되고 있지 않다. 마그네슘의 적용범위를 넓히기 위해서는 기존 철강소재와의 이종 접합 기술 개발이 필수적이지만 이에 대한 연구는 미미하다.

이를 고려하여 본 연구에서는 마찰교반접합법(Friction Stir Welding, FSW)에서 파생된 마찰교반점접합법(Friction Stir Spot Welding, FSSW)공정을 이용하여 AZ31 마그네슘합금과 SGC340 아연도금강판을 이종 접합하였으며, 접합조건에 따른 기계적 특성 및 부식거동을 비교하고자 하였다. 먼저, 접합 조건에 따른 미세조직 및 hook의 형상, 열영향부의 결정립 크기 등을 비교하였다. 기계적 특성은 인장 전단 시험을 통해 마찰교반점접합부의 접합강도를 측정하였고, 접합부 단면의 경도를 측정하여 열영향부와 모재의 경도를 비교하였다. 부식특성을 비교하기 위해 염수 분무 시험을 진행하여 시간에 따른 부식거동을 관찰하였고, 부식에 따른 무게 감소량을 비교하였다. 그리고 염수 분무 후 접합부 단면을 관찰하였다. 그리고 동전위 분극 시험(Potentiodynamic polarization test)를 통해 접합 조건 및 소재에 따른 E_{corr} 및 I_{corr} 값을 비교하였다.

목차

국문 요약.....	II
1. 서론.....	2
1.1 연구배경.....	2
1.2. 연구목적.....	6
2. 이론적 배경.....	7
2.1 마그네슘합금의 특성.....	7
2.2 마찰교반점접합 (Friction stir spot welding, FSSW).....	12
2.2.1 마찰교반점접합의 원리 및 특징.....	12
2.2.2 마찰교반점접합의 매개변수.....	15
3. 실험방법.....	17
3.1 접합 소재.....	17
3.2 접합 방법 및 조건.....	17
3.3 미세조직 관찰.....	21
3.4 기계적 특성 분석.....	22
3.4.1 인장 전단 시험.....	22
3.4.2 경도시험.....	22
3.5 부식거동.....	24
4. 실험결과.....	25
4.1 미세조직 관찰.....	25
4.2 기계적 특성 분석.....	34
4.2.1 경도 시험.....	34
4.2.2 인장 전단 시험.....	37
4.3 부식거동 관찰.....	39
4.3.1 동전위 분극 시험.....	39

4.3.2	염수 분무 시험	42
4.3.3	염수 분무 시험 후 접합 단면 관찰	45
5.	고찰	47
5.1	공구의 삽입 깊이와 기계적 특성과의 상관관계.....	47
5.2	공구의 삽입 깊이와 부식거동의 상관관계	51
6.	결론	56
7.	참고문헌.....	57
	영문 요약.....	60

List of figures

<i>Figure 1-1 Current Status of Fuel efficiency Regulation and CO2 Regulation by Country [1].....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 1-2 Changes in the average amount of magnesium alloy used per vehicle in North America [2].....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 1-3 Multi-Material Integration (MMI) Body Lightweight Technology by Multi-Materials.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 1-4 Process of Resistance spot welding [3].....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 2-1 Cluth housing and transmission case inside body made of magnesium.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 2-2 galvanic series.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 2-3 Fe-Mg phase diagram [17].....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 2-4 Schematic illustrations of friction stir point bonding [4].....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2-5 Schematic of illustrations of FSSW joint and plastic flow [5].....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2-6 FSSW tool pin profiles [18].....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 3-1 Rolled AZ31 of commercial composition manufactured by Unist.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 3-2 RM-1 FSSW machine made by Manufacturing Technology Inc.</i>	<i>19</i>
<i>Figure 3-3 Shape of tool used in this study.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 3-4 Dimensional schematic of the tools used in this study.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 3-5 Single-lap Shear Test Specification of FSSW.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 4-1 upper sheet panorama and microstructure of FSSW sample joints with plunge depth of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 4-2 lower sheet panorama and microstructure of FSSW sample joints with plunge depth of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 4-3 Microstructure of hook in FSSW joints of plunge depth 0.7 mm, 0.8 mm, 0.9 mm.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 4-4 Low and high magnification SEM images of the upper and lower sheet interfaces</i>	<i>30</i>
<i>Figure 4-5 SEM Panorama image of FSSW joint cross section.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 4-6 SEM-EDS lines and mapping of plunge depths of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm in the region (a) of Figure 4-5.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 4-7 SEM-EDS lines and mapping of plunge depths of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm in the region (b) of Figure 4-5.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 4-8 SEM-EDS and mapping of plunge depths of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm in the region (c) of Figure 4-5.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 4-9 Vickers hardness bar graph of the base material and heat-affected zone with plunge depths of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm of the upper sheet.....</i>	<i>35</i>

<i>Figure 4-10 Vickers hardness line distribution of the base material and heat-affected zone with plunge depths of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm of the lower sheet.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 4-11 Load-displacement curve by plunge depth.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 4-12 Fracture surface OM panorama with plunge depth of 0.7mm, 0.8mm, 0.9mm after tensile shear test.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 4-13 Potentiodynamic polarization curve of Base metal and Heat affected Zone of upper sheet.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 4-14 Potentiodynamic polarization curve of zinc and steel in the lower sheet.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 4-15 Electrochemical tests : potentiodynamic polarization curves.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 4-16 Corrosion behavior of FSSW plunge depth 0.7mm, 8.0mm, 0.9mm by salt spray time43</i>	
<i>Figure 4-17 Comparison of weight loss rates before and after salt spray test.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 4-18 Optical microscope image of joint cross section after salt spray test.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 5-1 Optical microscope images of joint cross section after tensile shear test</i>	<i>49</i>
<i>Figure 5-2 Schematic diagram of failure at FSSW joints.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 5-3 Schematic diagram of FSSW joint cross section.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 5-4 Galvanic corrosion schematic diagram at A of figure 5-3.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 5-5 Crevice corrosion schematic diagram at B of figure 5-3.....</i>	<i>55</i>

1. 서론

1.1 연구배경

최근 전 세계적으로 환경에 대한 관심이 집중되어 환경규제 및 연비규제가 강화되고 있다. Figure 1-1은 국가별 자동차 연비규제가 심화되고 있다는 것을 나타내며[1], 자동차에서 발생하는 이산화 온실가스 배출량 규제와 연비규제를 통해 환경문제를 해결하려고 노력 중이다. 최근에는 전기자동차와 수소자동차같이 새로운 에너지를 연료로 사용하는 미래 모빌리티 기술의 개발을 통해 화석연료의 보존과 환경오염 문제를 동시에 해결하고자 하며 이러한 미래 모빌리티 기술 역시 에너지 효율을 증가시키기 위해 자동차 경량화에 주목하고 있다.

자동차 경량화 방안 중 기존의 철강 소재를 경량화 소재로 대체하는 것은 기존의 자동차 하중의 약 60% 이상까지 경량화 할 수 있는 것으로 알려져 있다. 경량화 방안으로는 고장력 강판(Advanced High Strength Steel, AHSS)을 사용하여 기존 철강의 두께를 줄이는 방법과 알루미늄 합금 및 마그네슘합금과 같은 경량화 소재로 기존 철강을 대체하는 방법이 있다. 이 중 마그네슘의 경우 상용되는 구조용 금속재료 중 비중이 가장 작으며 비강도가 우수하고 강성이 큰 특징을 가지고 있어 Figure 1-2와 같이 기존에도 마그네슘 합금의 적용량이 상승하고 있다. 따라서 연비 상승을 위한 차량의 경량화를 위해서 기존의 철강을 대체할 수 있는 경량화 금속 중 하나이다[2]. Figure 1-3은 다중 소재를 사용함으로써 차체를 경량화하는 MMI(Multi-Material Integration)으로, 기존의 강판과 마그네슘 및 알루미늄 등 다양한 소재들을 활용하여 이종 접합한 예시를 보여주고 있다. 이처럼 자동차에 적용하는 소재를 다양화하기 위해서 이종 소재 간의 접합이 중요해지고 있다.

Figure1-4는 기존에 사용하고 있는 저항 점 용접(Resistance Spot Welding, RSW)법의 공정도이다. 저항 점 용접법은 전극을 이용하여 판재에 압력을 가해 고정시키고, 전류를 흘려보내 판재 내부의 접촉부위에서 저항열을 유도함으로써 판재를 용융시켜 용접부를 형성하는 용융 용접법이다[3]. 마그네슘합금의 경우, 이러한 용융용접을 적용하면 수소 기공, 높은 열팽창 계수로 인한 변형, 응고 균열 및 HAZ의 액화균열과 같은 결함이 발생할 수 있다[8]. 또한, 기존 차체에 부분적으로 적용하기 위해서는 마그네슘합금과 철강의 이종 접합이 필수적인데 마그네슘과 철은 비혼화성 금속이기 때문에 더욱 용융 접합법을 적용하기 힘든 실정이다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 용융점 이하의 온도에서 접합이 가능한 마찰교반점접합법(Friction Stir Spot Welding, FSSW)이 개발되어 사용되고 있다. 마찰교반점접합법은 마찰교반접합법(Friction Stir Welding, FSW)에서 파생된 공법으로, 접합이 용융점 이하의 온도에서 진행되기 때문에 동종 또는 이종 소재 간의 접합이 가능하며 용융 용접법에 비해 잔류응력 및 열변형도 극히 적다. 최근에는 마찰교반점접합법을 이용하여 이종 알루미늄의 접합 또는 알루미늄과 철강재료의 이종 접합에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[3-4]. 하지만 마그네슘의 경우 가장 비강도가 우수한 재료임에도 불구하고 차체에 사용하기 위한 이종 접합 연구가 미미하다. 따라서 경량소재인 마그네슘합금의 적용 범위를 넓히기 위해 마그네슘합금과 철강의 이종 접합에 대한 연구가 활발히 이루어져야 한다.

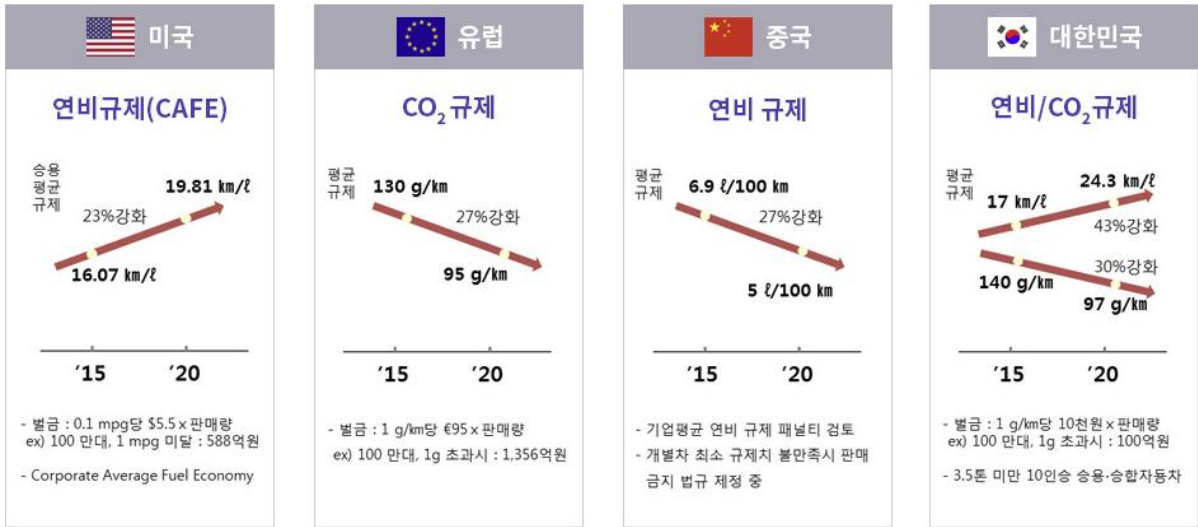


Figure 1-1 Current Status of Fuel efficiency Regulation and CO₂ Regulation by Country [1]

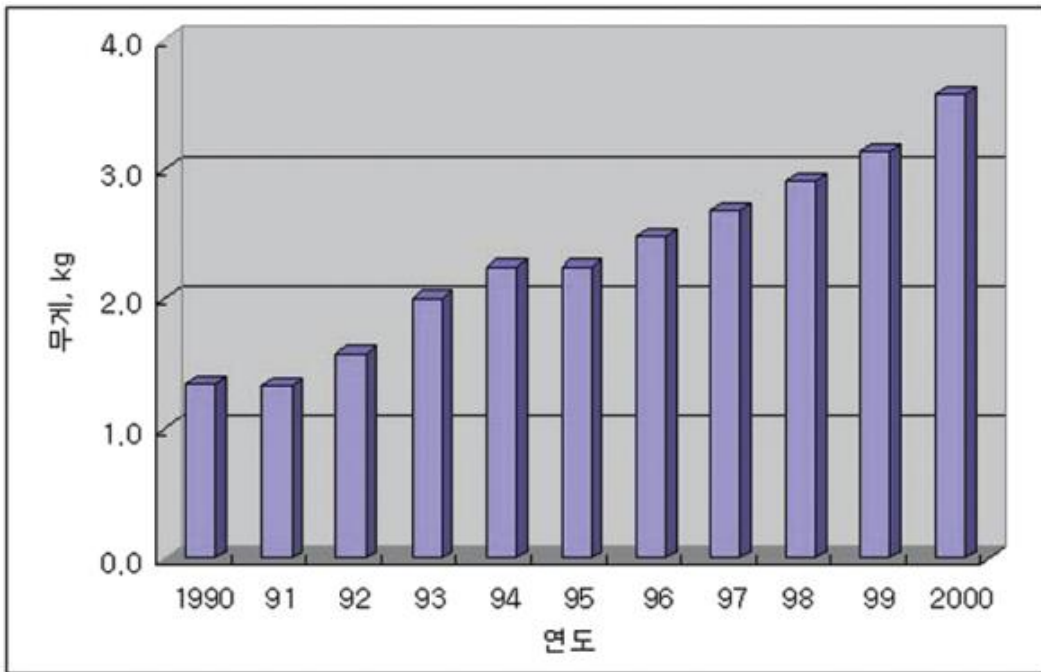


Figure 1-2 Changes in the average amount of magnesium alloy used per vehicle in North America [2]

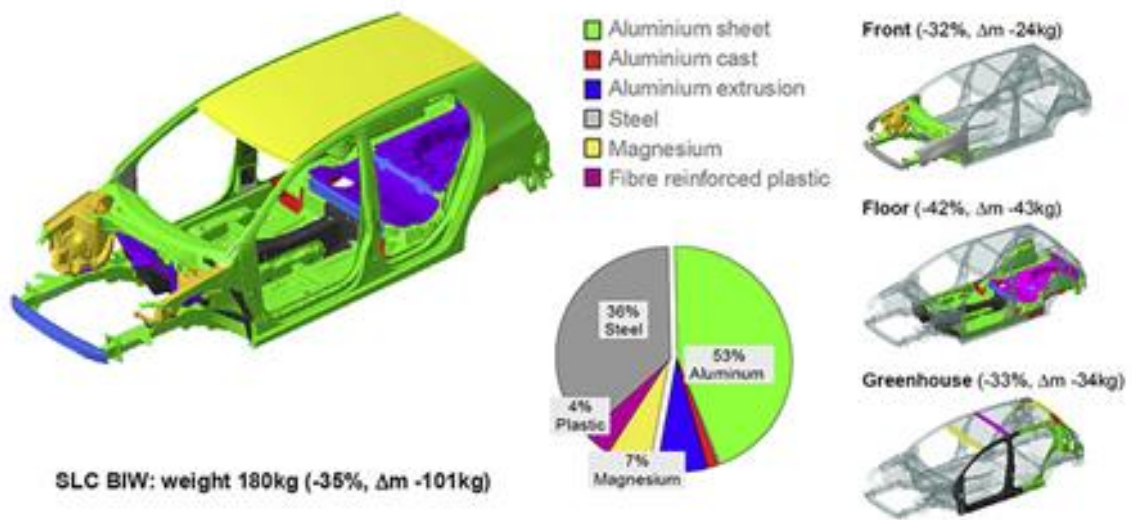


Figure 1-3 Multi-Material Integration (MMI) Body Lightweight Technology by Multi-Materials

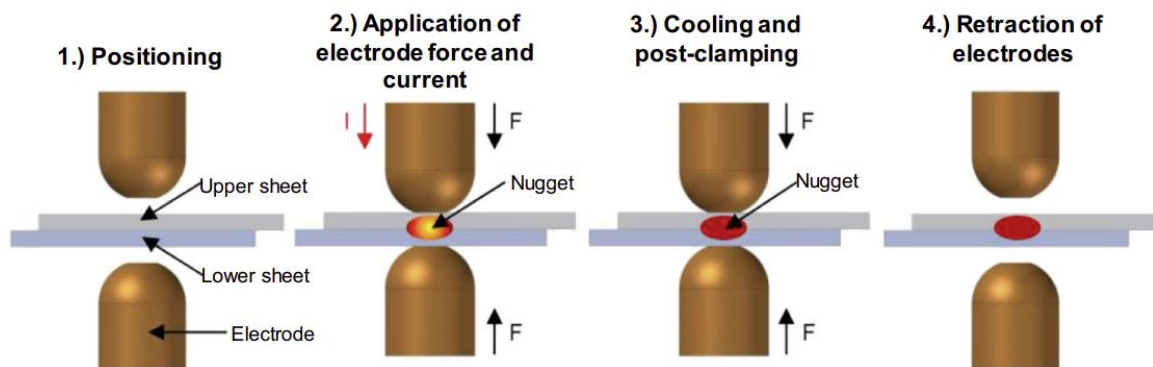


Figure 1-4 Process of Resistance spot welding [3]

1.2. 연구목적

본 연구에서는 마찰교반점접합 공정을 통해 자동차 경량화 부품으로서 그 적용이 확대되고 있는 AZ31 마그네슘합금과 SGC340 아연도금강판을 이종 접합하고 접합 조건에 따른 접합부의 기계적 특성과 부식거동을 비교하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 마그네슘합금의 특성

마그네슘합금은 비중이 1.79~1.81로 알루미늄에 비해 35% 이상 가벼운 대표적인 경량 금속 소재 중 하나이다. 그리고 전기 및 열전도도와 가공성, 고온에서 피로 충격과 같은 물리적 특성과 전자파 차폐성이 우수하여 전자기기, 자동차, 항공기 및 방위 산업과 같은 분야에서 경량화 소재로 사용되고 있다. 그리고 절삭성이 알루미늄 합금의 약 1.67배, 철강에 비해 약 5배 정도 우수하여 구조용 금속 재료 중 절삭속도가 빠른 편에 속한다. 마그네슘합금은 진동 감쇄능도 우수한 편에 속하여 소음 및 진동을 쉽게 감소시켜 전자제품 및 자동차의 소음 감쇄 목적으로 Figure 2-1과 같이 clutch housing 및 transmission case 등에 사용되고 있다. Figure 2-2는 금속의 전위 차이를 나타낸 갈바닉 계열(Galvanic series)이다. 갈바닉 계열에서 나타난 것처럼 마그네슘합금은 표준전극전위가 다른 금속에 비해 낮기 때문에 내부식성이 열악하여 부식환경에서 쉽게 산화되는 특징을 가졌다. 특히 표준전극전위가 높은 다른 금속과 접촉할 시 갈바닉 부식(Galvanic corrosion)에 의해 쉽게 부식되는 경향이 있다. 또한 경도가 철강 재료에 비해 낮기 때문에 내마모성이 약하며 이는 구조재료로서 실용화하는데 제한을 받는 요소이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 화성 처리법(Chemical Conversion), 양극산화법(Anodizing), 전기 도금법(Electro deposition) 및 도장(Painting)과 같은 방법을 사용하고 있다[9].

마그네슘합금은 기화점이 1100°C로 낮아 GMAW(Gas Metal Arc Welding)과 같은 용융 접합법을 적용하게 되면 아크열에 의해 마그네슘합금이 증발해 많은 양의 스패터를 형성할 수 있다. 기존 자동차 접합에 적용되고 있는 저항 점 용접의 경우 마그네슘의 기화점까지 입열량이 상승하지는 않지만 마그네슘의 용융에 의해 열영향부의 물성이 저하되고 변형 및 결함이 발생한다는 단점이 있다. 또한 마그네슘의 장점들을 활용하여 경량소재

로서 차량에 접목시키기 위해서는 기존 철강 소재와의 접합이 필수적이다. 하지만 Figure 2-3과 같이 마그네슘과 철은 비혼화성 금속 재료이므로 용융 접합을 적용할 경우 많은 결함이 발생할 수 있다[10]. 따라서 용융점 이하의 온도에서 접합되는 공정을 적용하여 상용화할 수 있다면 마그네슘의 적용 범위를 확대할 수 있을 것이다.

(a) ←



(b) ←



Figure 2-1 Cluth housing and transmission case inside body made of magnesium

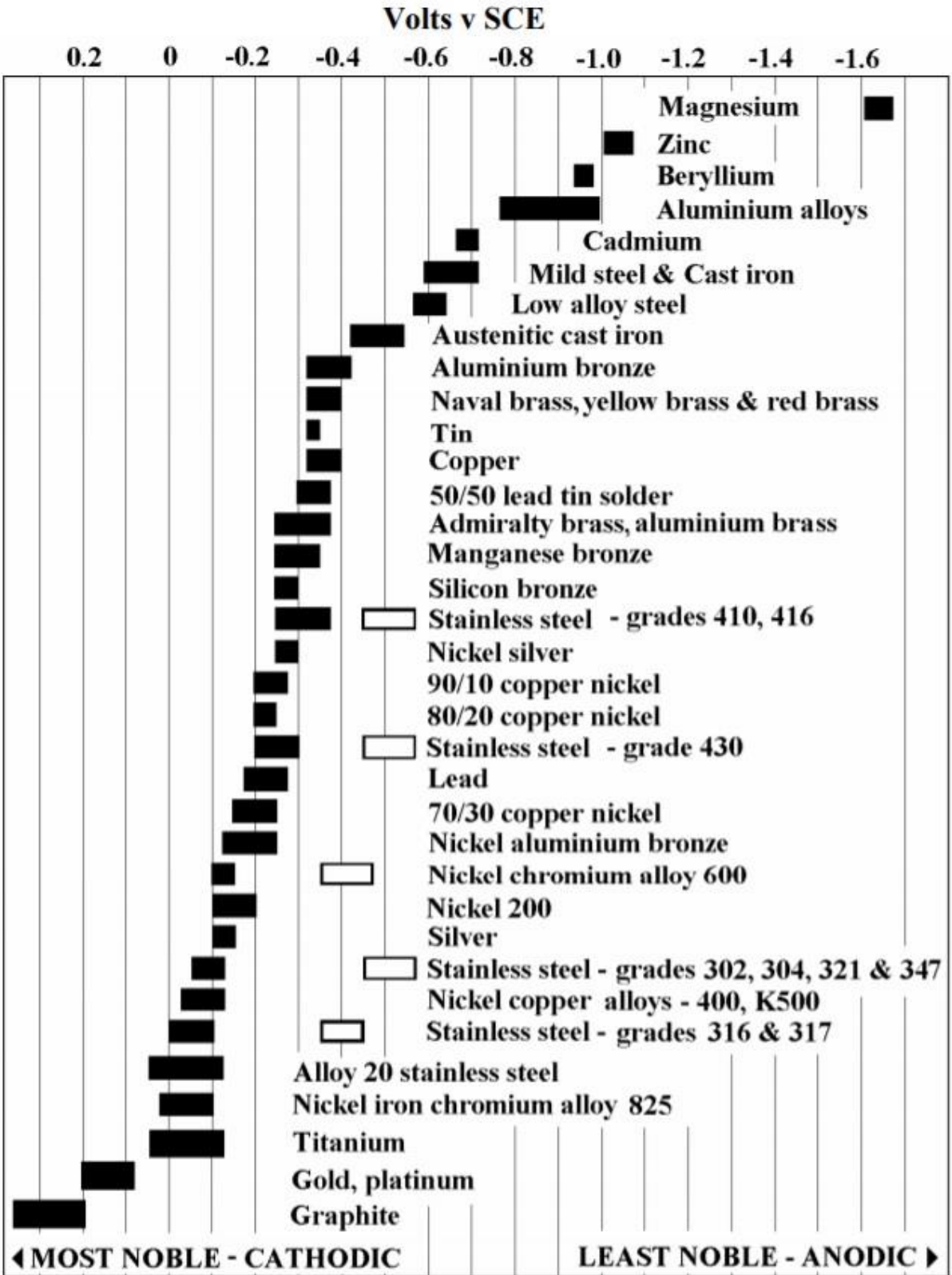


Figure 2-2 galvanic series

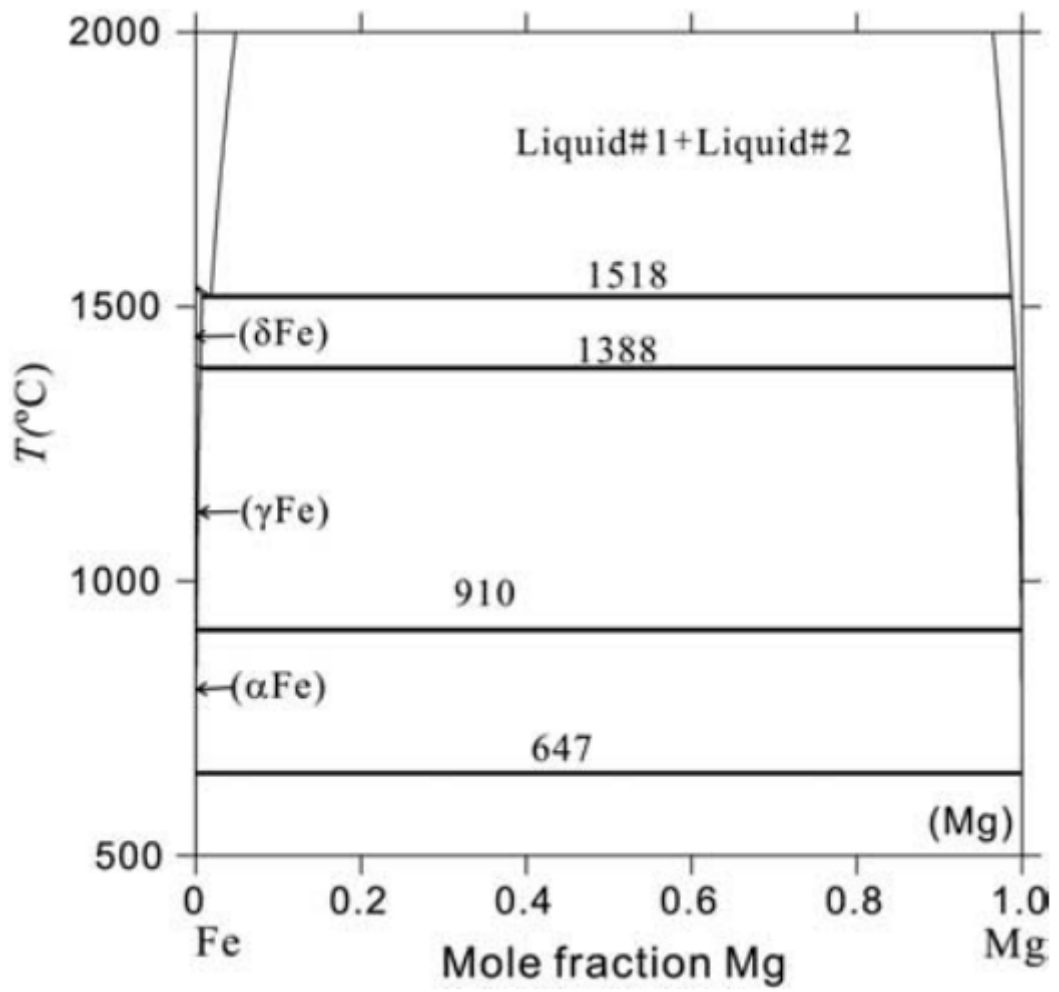


Figure 2-3 Fe-Mg phase diagram [17]

2.2 마찰교반점접합 (Friction stir spot welding, FSSW)

2.2.1 마찰교반점접합의 원리 및 특징

마찰교반점접합법은 1991년 영국의 TWI(The Welding Institute)에 의해 개발된 마찰교반 접합법에서 파생된 공법으로, 알루미늄합금 및 마그네슘합금과 같이 경량금속재료의 접합에 있어 많은 연구 및 개발이 진행되고 있다. Figure 2-4는 마찰교반점접합법의 개략도를 나타낸 그림이다. 상부와 하부 판재를 겹친 후 상부 판재에 고속으로 회전하는 공구를 삽입하게 되면 공구와 피접합재 사이에서 회전과 하중에 의해 마찰열이 발생한다. 이때 생성되는 마찰열에 의해 공구와 접촉하고 있는 피접합재는 연화되어 소성 유동현상이 발생하고 상부 판재와 하부 판재가 서로 교반된다. 이후 공구가 피접합재로부터 후퇴하게 되면 keyhole이 남게 되며 마찰교반점접합이 완료된다. Figure 2-5는 마찰교반점접합 시 재료에서 일어나는 소성 유동현상을 나타낸 것이다[5]. 소성 유동은 pin의 회전에 의해 유발되어 판재 표면과 평행하게 회전 상으로 발생하는 것과 pin 측면의 나선회전 작용에 의해 판재 표면과 직교하는 면 내에서 pin의 축 방향의 대류상으로 일어나는 것이 복합되어 있다[5].

마찰교반점접합법의 장점으로서는 다음과 같다[12].

- ① 용접결함과 잔류응력이 적다.
- ② 피로강도가 우수하다.
- ③ 연성과 인성이 높다.
- ④ 접합을 하는데 사용되는 에너지 및 생산비용이 낮다.
- ⑤ 공정을 진행하는 동안 유해가스가 발생하지 않는 친환경 공법이다.

마찰교반점접합 접합부의 단면은 크게 공구의 핀 주위에서 마찰열에 의한 열영향과 소성변형에 의한 기계적 변형이 많이 발생하는 SZ(Stir Zone), 공구의 핀과 떨어져 있지만 마찰열의 의한 열영향과 기계적 변형의 간접적 영향을 받는 TMAZ (Thermomechanically Affected Zone), 마찰열에 의한 열영향만 받게 되는 HAZ(Heat Affected Zone), 아무런 영향을 받지 않은 BM(Base Metal)의 네 가지 영역으로 구분할 수 있다.

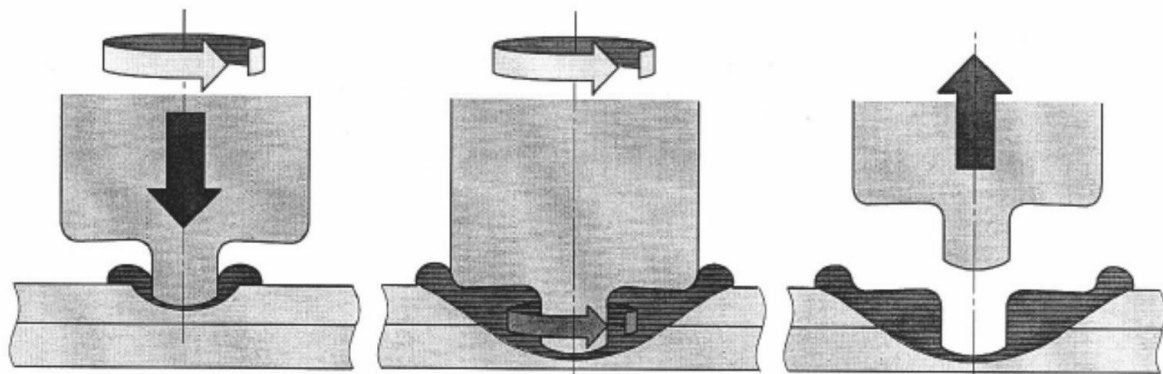


Figure 2-4 Schematic illustrations of friction stir point bonding [4]

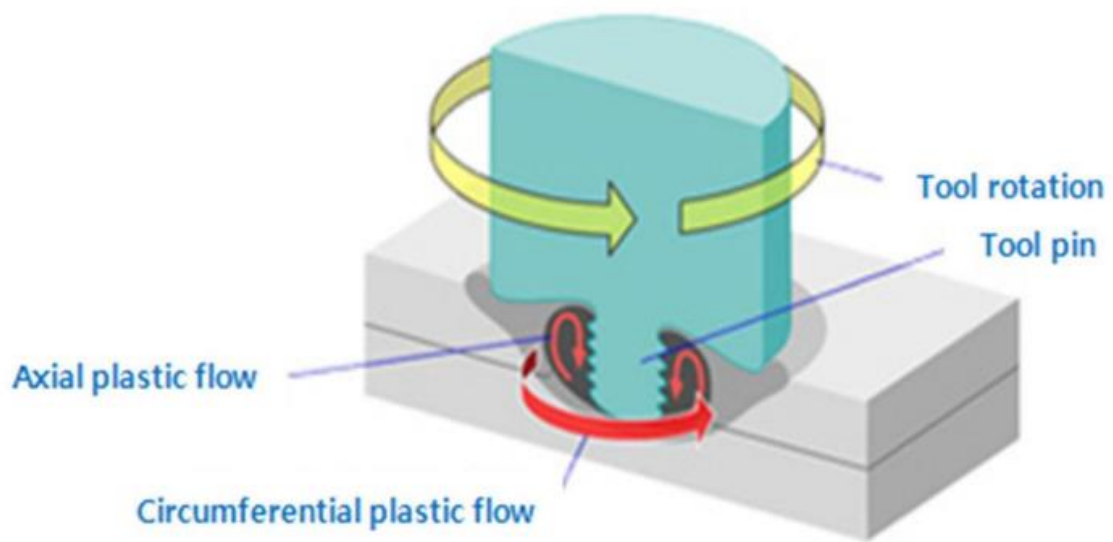


Figure 2-5 Schematic of illustrations of FSSW joint and plastic flow [5]

2.2.2 마찰교반점접합의 매개변수

마찰교반점접합법의 매개변수는 크게 접합재료, 공구 그리고 공정변수 세가지로 구분할 수 있다. 이는 상부와 하부 판재가 서로 접합하는데 필요한 에너지가 얼마나 필요하며 그 에너지를 얻을 수 있도록 마찰열 및 하중을 얼마나 전달해야 하는지와 관련이 있다. 먼저, 접합재료의 종류 및 강도, 두께 그리고 동종 또는 이종 접합에서 상부 및 하부 재료의 위치 등에 따라 해당 재료가 접합하는데 필요한 에너지가 달라지게 되며 이에 따라 공정 변수와 공구의 재료, 공구의 형상 및 규격이 달라지게 된다. Figure 2-6과같이 다양한 공구가 존재하며, 공구의 규격 및 형상에 따라서는 재료의 소성 유동 메커니즘과 소성 유동 발생량이 바뀔 수 있기 때문에 중요한 매개변수이다.[18] 공구의 핀에 존재하는 나선선의 나선형일 경우 더 많은 소성 유동이 발생하며 결과적으로 더 높은 인장 전단 강도를 나타낸다고 보고하고 있다[13]. 마지막으로 공정변수는 공구의 삽입 깊이, 삽입 후 유지시간, 공구의 삽입 및 제거 속도, 공구 회전 속도, 공구의 삽입 각도 등이 있으며 이에 따라 접합 시 공구와 피접합재 사이에서 발생하는 마찰열의 양과 하중이 달라지며 이에 따라 결정립의 크기나 hook의 형상 등이 달라질 수 있다. 위와 같은 변수들을 모두 고려하여 마찰교반점접합을 진행했을 때 적용 범위를 넓힐 수 있는 데이터베이스 구축이 가능하다.

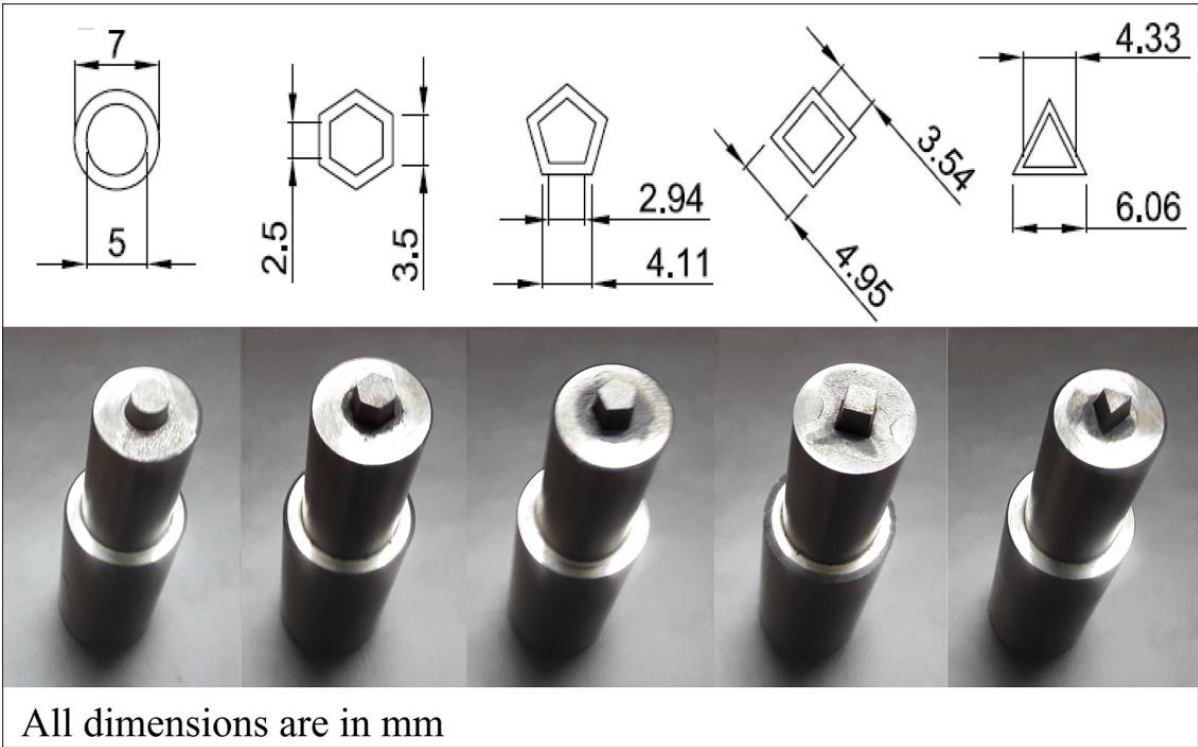


Figure 2-6 FSSW tool pin profiles [18]

3. 실험방법

3.1 접합 소재

본 연구에서는 두께 3mm의 상용 조성 AZ31 마그네슘합금 판재와 두께 1mm의 상용 SGC340 아연도금강판 1mm를 접합 소재로 사용하였다. AZ31 마그네슘합금은 울산과학기술원에서 상용 AZ31 조성을 가지도록 Figure 3-1과 같이 제작하였으며, 실제 조성은 Table 3-1에 나타내었다.

3.2 접합 방법 및 조건

본 연구에서는 AZ31 마그네슘합금과 SGC340 강판을 이중 접합하기 위해 마찰교반점 접합을 진행하였다. 피접합재는 single-lap type으로, AZ31 마그네슘합금을 상부 시트, SGC340 강판을 하부 시트로 지정하고 겹침부의 면적은 30 mm X 30 mm로 지정했다. 이후 공구가 겹침부의 중앙에 위치하도록 조정 후 마찰교반점접합 공정을 실시하였다. 이중 마찰교반점접합에 사용된 장비는 Figure 3-1에 나타낸 것처럼 Manufacturing Technology사에서 제작한 RM-1 모델을 사용하였다. 그리고 공구의 형상은 Figure 3-2에 나타내었으며, pin의 길이가 2.7mm, 직경이 5mm이고 shoulder의 직경은 12mm이다. Shoulder는 concave type이며, 이는 시편과 접촉하는 면을 기준으로 shoulder가 안쪽으로 들어가 있는 형태이다. 본 연구에서는 공구의 삽입 깊이를 변수로 두었으며, 공구의 shoulder가 피접합재와 접촉한 지점을 기준으로 0.7mm, 0.8mm, 0.9mm를 삽입했다. 다른 접합 조건은 공구의 회전속도를 1500rpm, 공구의 삽입 및 후퇴속도를 10mm/min, 삽입 후 유지시간을 3s, 공구의 삽입 각도를 0°로 고정하였다.

Table 3-1 AZ31 of commercial composition manufactured by Unist

	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Mg
AZ31-1	3.39	1.09	0.307	0.0032	0.0121	95.1
AZ31-2	3.35	1.04	0.306	0.0031	0.0109	95.2
AZ31-3	3.33	1.02	0.314	0.0031	0.0163	95.3
AZ31-4	3.32	1.05	0.304	0.0032	0.0265	95.2
AZ31-5	3.26	1.05	0.314	0.0032	0.0232	95.5
AZ31-6	3.31	1.02	0.307	0.0031	0.0167	95.3
AZ31-7	3.39	1.04	0.315	0.0033	0.0167	95.2
AZ31-8	2.96	1.04	0.319	0.0030	0.0156	95.6
AZ31 타겟	3	1	0.3	-	-	Bal.

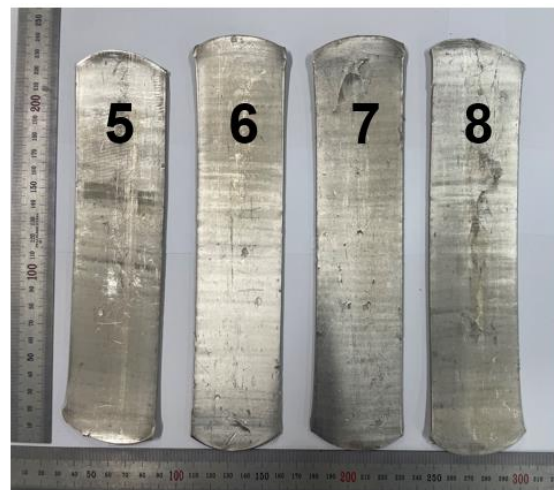
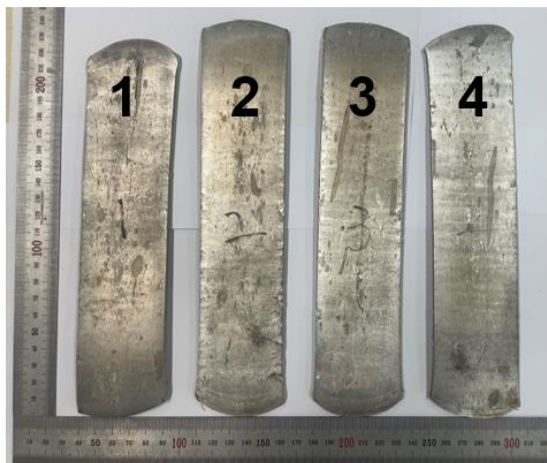


Figure 3-1 Rolled AZ31 of commercial composition manufactured by Unist



Figure 3-2 RM-1 FSSW machine made by Manufacturing Technology Inc.



Figure 3-3 Shape of tool used in this study

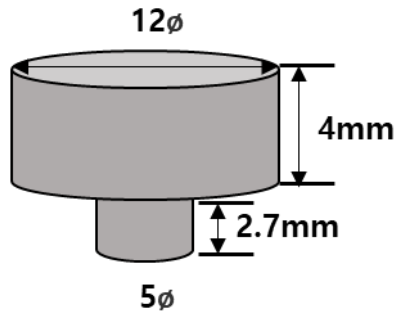


Figure 3-4 Dimensional schematic of the tools used in this study

3.3 미세조직 관찰

본 연구에서는 마찰교반점접합의 삽입 깊이에 따른 미세조직 변화를 비교하기 위해 접합부를 수직으로 절단하고 지름 30mm의 몰드를 이용해 cold 마운팅을 진행하였다. 이후 abrasive paper로 #4000까지 연마 후 diamond suspension으로 3 μ m, 1 μ m 폴리싱을 진행하였으며 마지막으로 OP-S용액과 에탄올을 혼합하여 0.04 μ m final폴리싱을 진행하였다. 에칭은 picric acid 4.2g+acetic acid 10ml+ethanol 70ml와 증류수 10ml를 혼합하여 약 3초간 진행하였다. 접합부 미세조직을 비교하기 위해 OM(Optical Microscope)로 결정립 크기를 측정하였고, SEM(Scanning Electron Microscope)를 이용하여 IMC와 아연도금층의 유무를 확인하였다.

3.4 기계적 특성 분석

3.4.1 인장 전단 시험

공구의 삽입 깊이에 따른 접합 강도를 측정하기 위해 인장 전단 시험을 진행하였다. 시험편은 Figure 3-5번과 같이 KS B ISO 14273:2000 항목의 4번 규격을 따라 시험편을 제작하였다. 인장 전단 시험은 각 시험편에 덧판을 사용하여 3mm/min의 속도로 인장하였다.

3.4.2 경도시험

경도란 국부 영역에서 소성변형에 대한 저항성을 수치화 할 수 있는 지표이다. 이러한 경도를 측정하기 위해서 Vickers hardness를 사용하였다. 상용 마그네슘합금은 0.1kg의 하중으로 열영향부와 모재의 경도 평균값을 서로 비교하였고, 상용 SGC340 아연도금강판은 0.3kg의 하중으로 접합부 중심으로 0.5mm의 등간격으로 라인경도를 측정하여 접합부 중심으로부터의 거리에 따른 경도 변화를 관찰하였다. 경도 시험 시 압입 하중에 의한 변형에 영향을 받지 않도록 압입자 크기의 4배 이상의 간격을 두고 측정하였다.

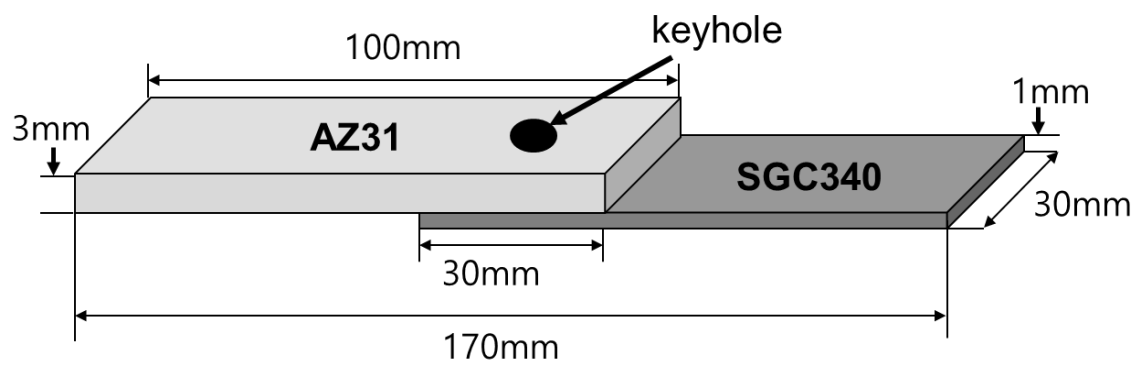


Figure 3-5 Single-lap Shear Test Specification of FSSW

3.5 부식거동

염수 분무 시험(Salt spray test)은 극한 환경인 해수 분위기에서 시험을 진행하기 위해 5wt%의 NaCl 용액을 24시간 동안 분무하고 시간에 따른 부식거동을 확인하였다. 부식시험 후 부식 생성물을 제거하기 위해 KS D ISO 8407의 C.4.1을 참고하여 클리닝 용액(CrO3200g+AgNO310g+Ba(NO3)220g+증류수1000mL)을 만들어 사용하였고 부식 생성물을 제거한 후의 무게를 측정해 각 조건 별 무게 감소율을 계산하여 비교하였다. 그리고 OM을 통해 접합부의 단면을 관찰하여 가장 부식이 활발하게 일어난 위치를 관찰하였다. 그리고 동전위 분극 시험(Potentiodynamic polarization test)을 통해 모재 및 각 조건의 열영향부, SGC340 아연도금강판의 E_{corr} 와 I_{corr} 를 비교하였다.

4. 실험결과

4.1 미세조직 관찰

공구의 삽입 깊이에 따른 소성 유동의 차이를 확인하기 위해 Figure 4-1에 OM으로 관찰한 접합부 단면과 미세조직을 나타내었다. 그 결과, 피접합재 모두 hook이 형성되었으며 성공적으로 접합된 것을 확인하였다.

상판의 경우, 공구 삽입 깊이 0.7mm와 0.9mm에서는 공구의 shoulder가 삽입된 아래 영역에 crack이 발생한 것을 확인하였다. 이는 마찰교반점접합 시 해당 영역에서 부분적으로 액화가 일어나 액체균열이 발생한 것으로 사료된다.[15] 0.8mm에서는 hook이 keyhole을 기준으로 바깥쪽으로 상승하는 형태를 띄고 있으며 균열이 존재하지 않았다. 그리고 각 조건 별 모재와 HAZ, SZ의 미세조직을 관찰하였다. 세 조건 모두 keyhole 주변에서 미세한 결정립 크기를 가지는 영역이 존재했다. 해당 영역은 고속으로 회전하는 공구의 pin 부분에 의해 심한 소성변형을 받게 되어 형성된 SZ이라고 판단했다. 그리고 SZ이후에 모재와 비교했을 때, 상대적으로 결정립 크기가 조대한 영역이 나타났다. 해당 영역은 공구의 회전에 의해 발생한 마찰열의 영향을 받아 재료 내부에서 결정립 성장이 일어나 결정립이 조대해진 HAZ로 판단하였다. 각 결정립 크기는 0.7mm의 경우 BM은 약 $5.24\mu\text{m}$, HAZ는 약 $12.5\mu\text{m}$, SZ는 약 $4.03\mu\text{m}$ 이고 0.8mm의 BM은 $6.34\mu\text{m}$, HAZ는 약 $13.1\mu\text{m}$, SZ는 $3.16\mu\text{m}$ 였으며 0.9의 BM은 $6.70\mu\text{m}$, HAZ는 $11.3\mu\text{m}$, SZ는 $4.00\mu\text{m}$ 로 측정되었다.

하판의 경우, Figure 4-2에 나타낸 것과 같이 각 결정립 크기는 삽입 깊이 0.7mm의 경우 BM은 약 $7.06\mu\text{m}$, SZ는 약 $1.54\mu\text{m}$ 이고 0.8mm의 BM은 약 $9.45\mu\text{m}$, SZ는 약 $1.62\mu\text{m}$ 였으며 0.9mm의 BM은 약 $9.48\mu\text{m}$, SZ는 약 $1.95\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 하판의 경우 keyhole에 가

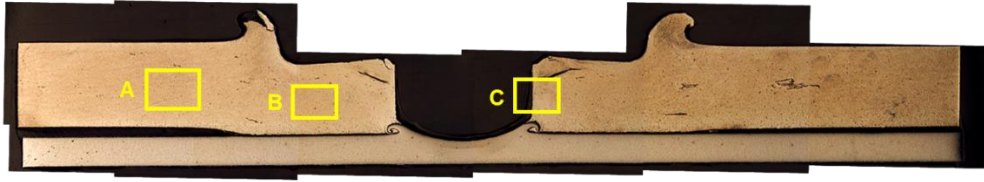
까워질수록 결정립이 미세화되는 경향을 발견했다.

Figure 4-31과 같이 삽입 깊이에 따라 hook의 형상이 달랐다. 삽입 깊이에 따른 hook의 높이 및 폭을 모식도와 같이 측정한 결과, hook의 높이는 삽입 깊이 0.8mm에서 가장 높았으며 0.9mm, 0.7mm 순서로 높이가 감소했다. Hook의 폭은 삽입 깊이 0.9mm에서 가장 높았고 0.7mm 0.8mm 순서로 폭이 감소했다.

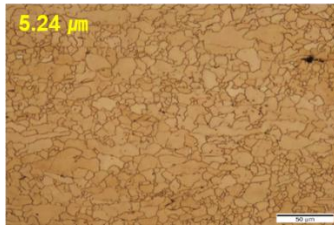
Figure 4-4에서는 마찰교반점접합 후 상판과 하판의 계면에서 IMCs가 생성되었는지 확인하기 위해 SEM으로 고배율 관찰을 진행하였다. 그 결과, 세 조건 모두 상판과 하판의 계면에서 IMCs를 관찰하지 못했다.

하판에 존재하는 아연도금층이 마찰교반점접합에 의해 어떻게 변화하였는지 관찰하기 위해 SEM-EDS mapping 및 line detecting을 진행하였다. 먼저, Figure 4-5의 (a)는 상판과 하판이 맞닿지 않은 영역으로, 기존에 존재하던 아연도금층을 관찰할 수 있었다. (b)는 상판과 하판의 계면으로, 해당 영역에서는 아연도금층이 검출되지 않았다. (c)는 keyhole과 hook 주변부로, 아연도금층이 검출되지 않았다.

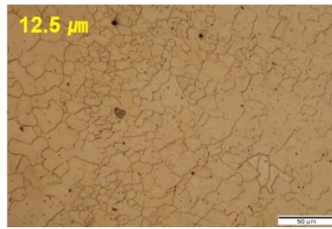
- Plunge depth 0.7mm



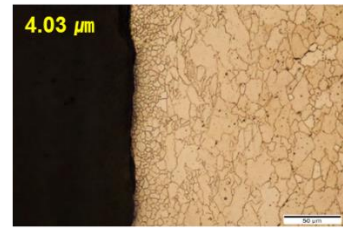
A(BM)



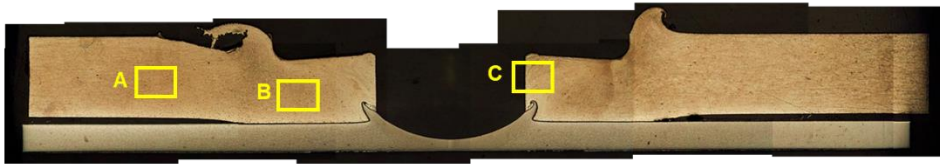
B(HAZ)



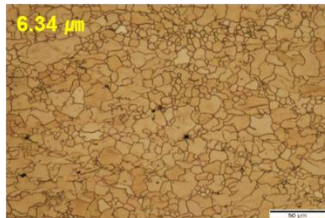
C(SZ)



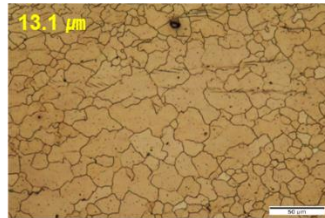
- Plunge depth 0.8mm



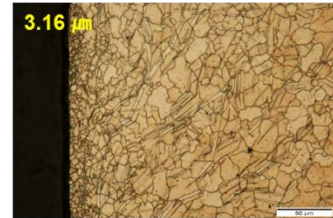
A(BM)



B(HAZ)



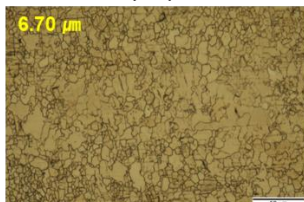
C(SZ)



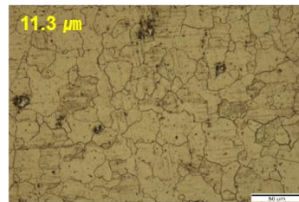
- Plunge depth 0.9mm



A(BM)



B(HAZ)



C(SZ)

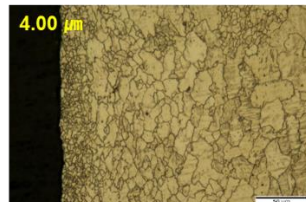
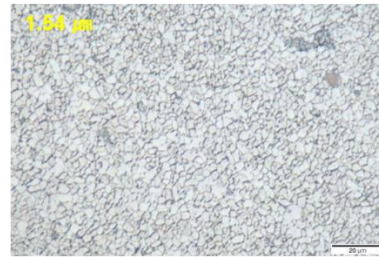
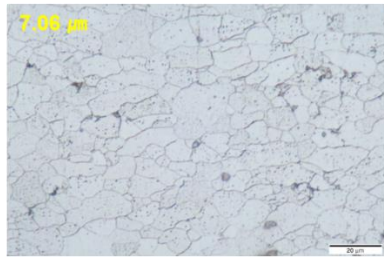
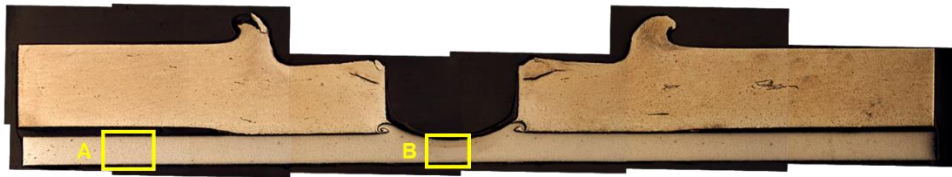
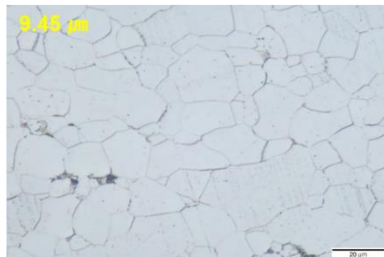
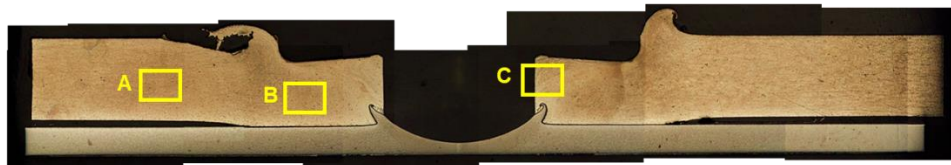


Figure 4-1 upper sheet panorama and microstructure of FSSW sample joints with plunge depth of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm

- Plunge depth 0.7mm



- Plunge depth 0.8mm



- Plunge depth 0.9mm

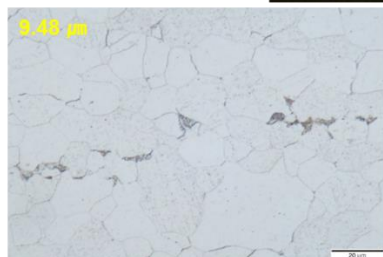
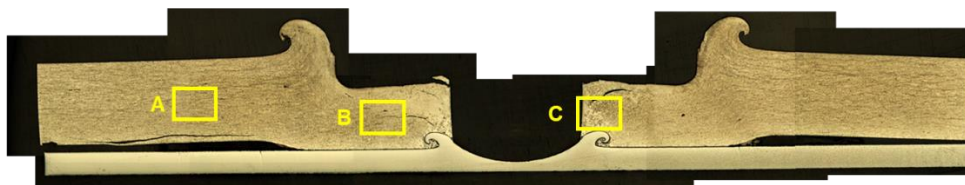


Figure 4-2 lower sheet panorama and microstructure of FSSW sample joints with plunge depth of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm

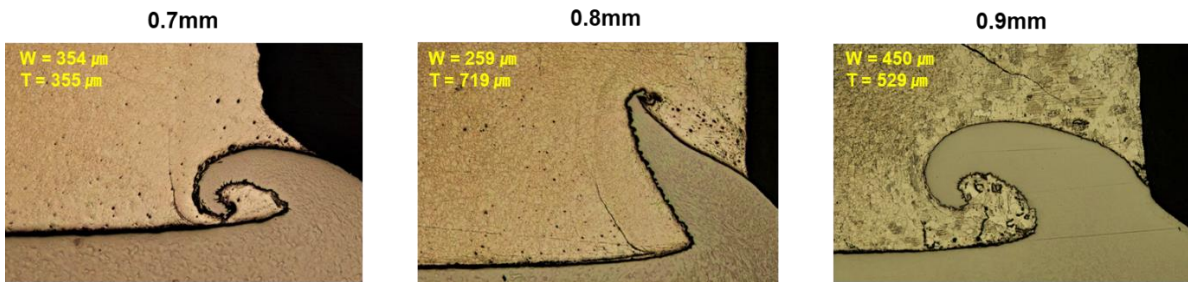
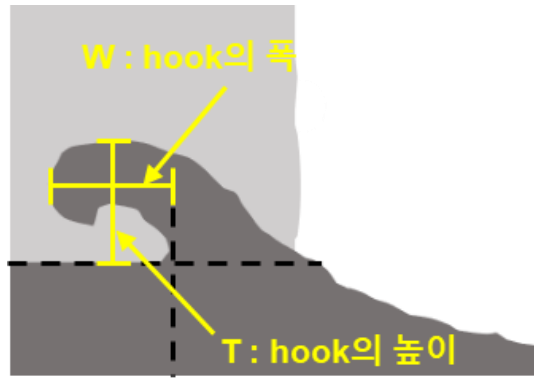
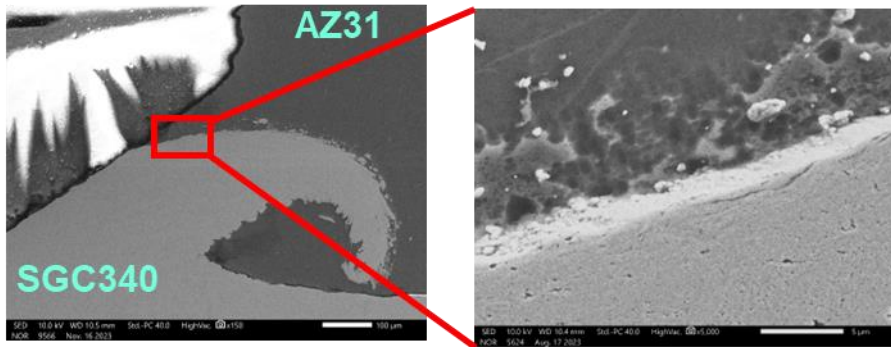
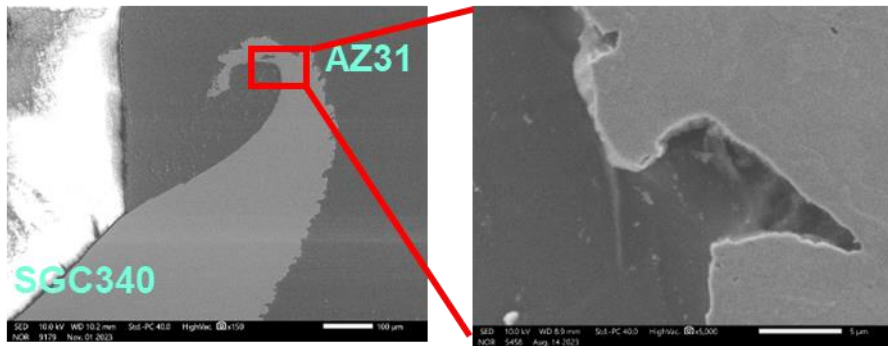


Figure 4-3 Microstructure of hook in FSSW joints of plunge depth 0.7 mm, 0.8 mm, 0.9 mm

0.7mm



0.8mm



0.9mm

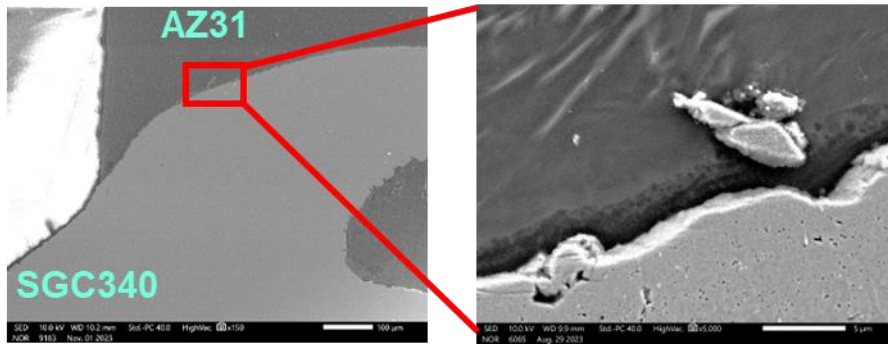


Figure 4-4 Low and high magnification SEM images of the upper and lower sheet interfaces

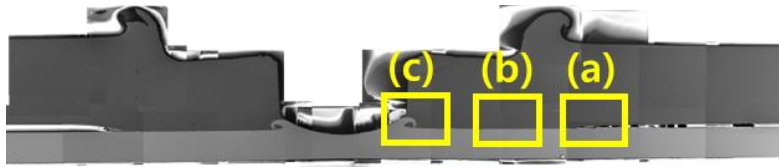
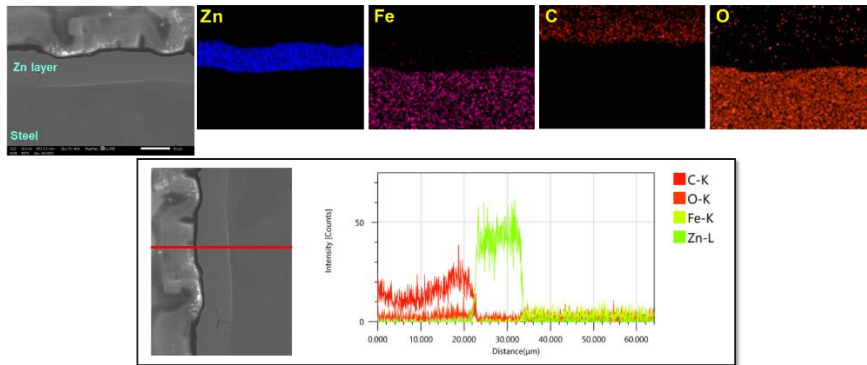
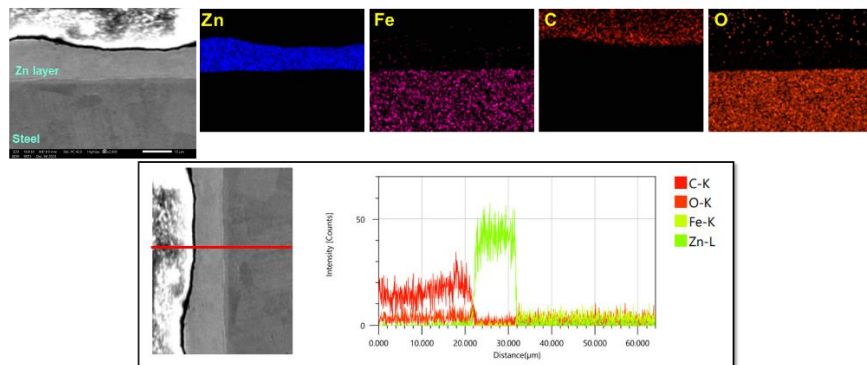


Figure 4-5 SEM Panorama image of FSSW joint cross section

(a) 0.7mm



(a) 0.8mm



(a) 0.9mm

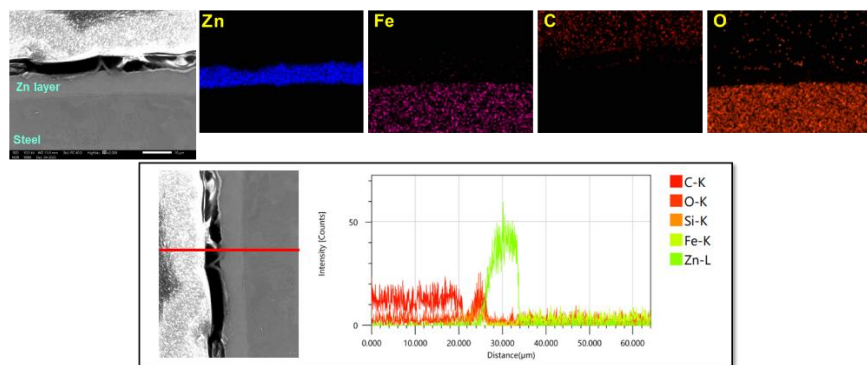
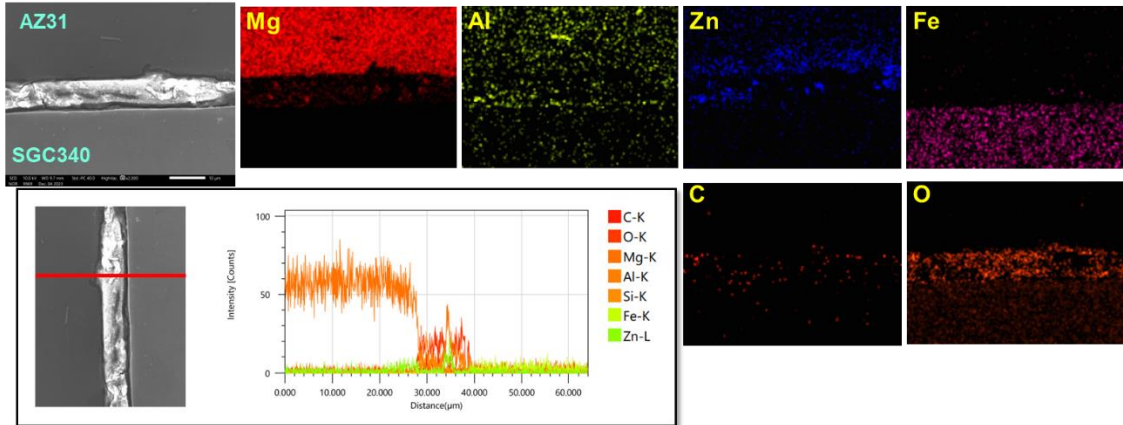
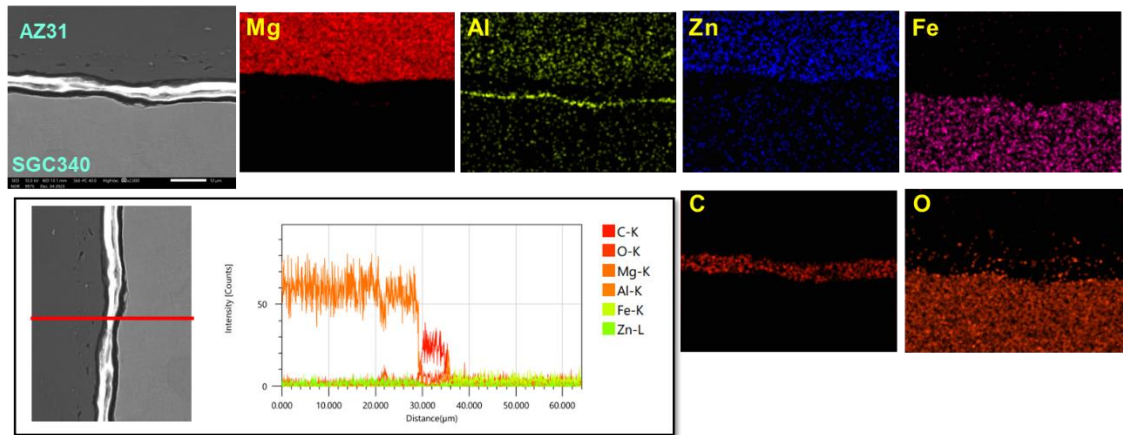


Figure 4-6 SEM-EDS lines and mapping of plunge depths of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm in the region (a) of Figure 4-5

(b) 0.7mm



(b) 0.8mm



(b) 0.9mm

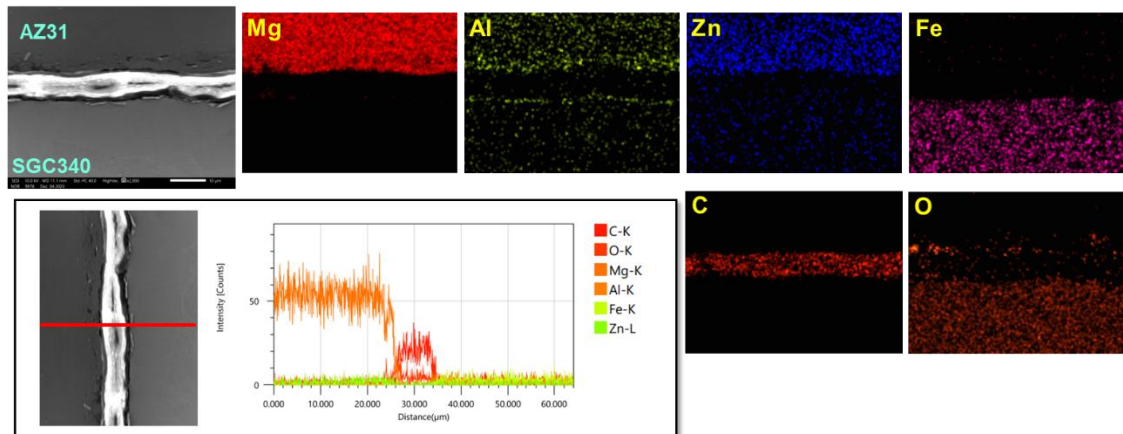


Figure 4-7 SEM-EDS lines and mapping of plunge depths of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm in the region (b) of Figure 4-5

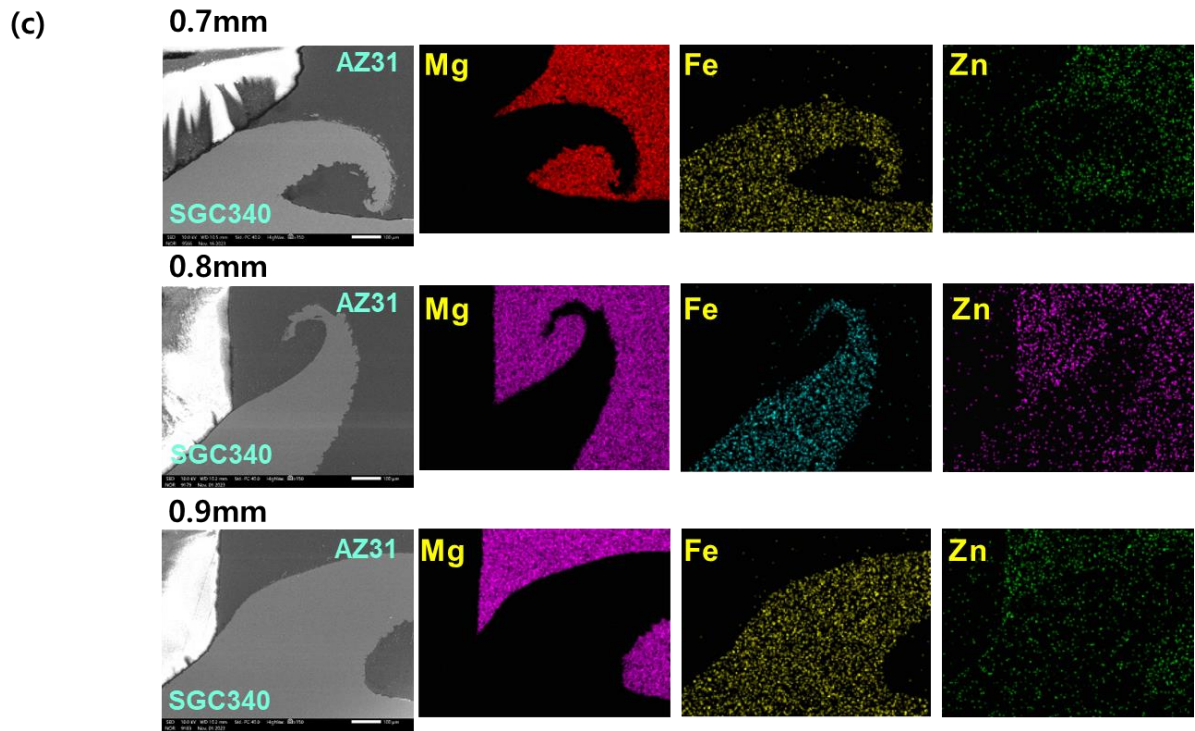


Figure 4-8 SEM-EDS and mapping of plunge depths of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm in the region (c) of Figure 4-5

4.2 기계적 특성 분석

4.2.1 경도 시험

삽입 깊이 및 열영향부에 따른 경도 값을 비교하기 위해 비커스 경도 시험을 진행했다. Figure 4-6은 삽입 깊이에 따른 상부 판재의 BM 및 열영향부의 경도 값의 평균을 나타낸 그래프이다. SZ의 경우, 비커스 경도를 측정할 수 없을 정도로 미세하여 SZ의 경도를 측정하지 못하였다. 세 접합 조건에서 모두 HAZ의 비커스 경도가 BM보다 낮은 경향을 나타내었다. 이는 고속으로 회전하는 공구와 피접합재 사이에서 발생하는 마찰열의 영향으로 결정립이 성장했기 때문으로 사료된다[16]. Figure 4-7은 하부 판재인 SGC340 아연도금강판의 경도를 나타낸 그래프이다. 하부 판재의 경우, 라인 경도를 측정하였으며 keyhole에 가까워질수록 경도 값이 크게 증가하는 경향을 보였다. 이는 마찰교반점접합 과정에서 공구 근처의 재료가 심한 소성변형과 마찰열을 받게 되어 동적재결정이 일어나 결정립이 미세화되어 경도 값이 상승한 것으로 사료된다. 따라서 상부 판재의 SZ에서도 결정립 미세화 현상이 발생했기 때문에 경도가 상승했을 것으로 추측할 수 있다.

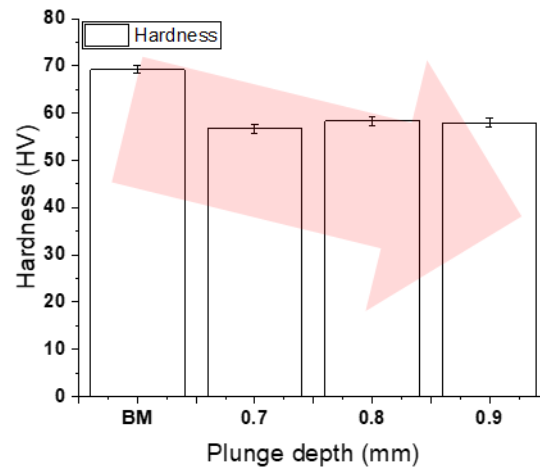


Figure 4-9 Vickers hardness bar graph of the base material and heat-affected zone with plunge depths of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm of the upper sheet

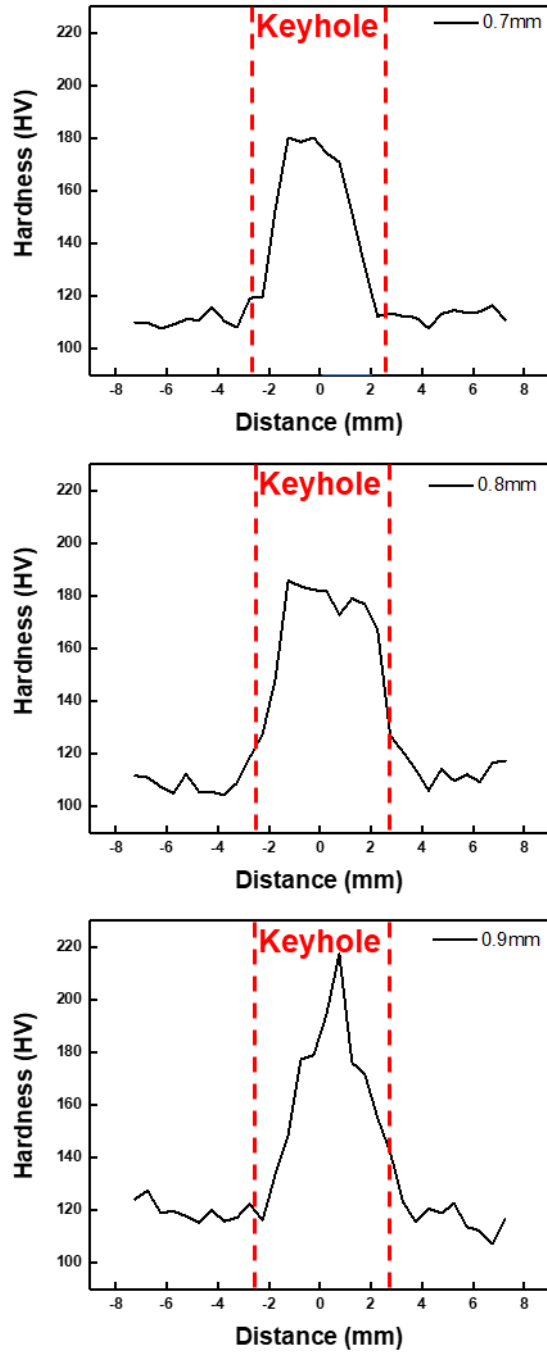


Figure 4-10 Vickers hardness line distribution of the base material and heat-affected zone with plunge depths of 0.7 mm, 0.8 mm, and 0.9 mm of the lower sheet

4.2.2 인장 전단 시험

공구의 삽입 깊이에 따른 접합 강도를 비교하기 위해 인장 전단 시험을 진행했다. Figure 4-8은 접합 조건에 따른 접합강도를 Load-Displacement 그래프로 나타낸 것이다.

인장 전단 시험 결과, 공구 삽입 깊이가 가장 깊은 0.9mm 의 접합강도가 가장 높았으며 0.7mm 0.8mm 순서로 접합 강도가 감소했다. Figure 4-9 는 인장 전단 시험 후 파단부를 OM 으로 관찰한 사진이다. 세 접합재 모두 상부 판재인 AZ31 마그네슘합금의 일부가 상대적으로 강도가 높은 하부 판재의 hook 에 의해 뜯겨져 나간 형상을 보여준다. 그중에서도 접합강도가 높은 0.9mm 와 0.7mm 의 경우, keyhole 의 중심부를 기준으로 왼쪽과 오른쪽에서 모두 파단이 발생했지만 0.8mm 의 경우 오른쪽에서만 파단이 발생한 것을 관찰하였다.

- Load-displacement curve

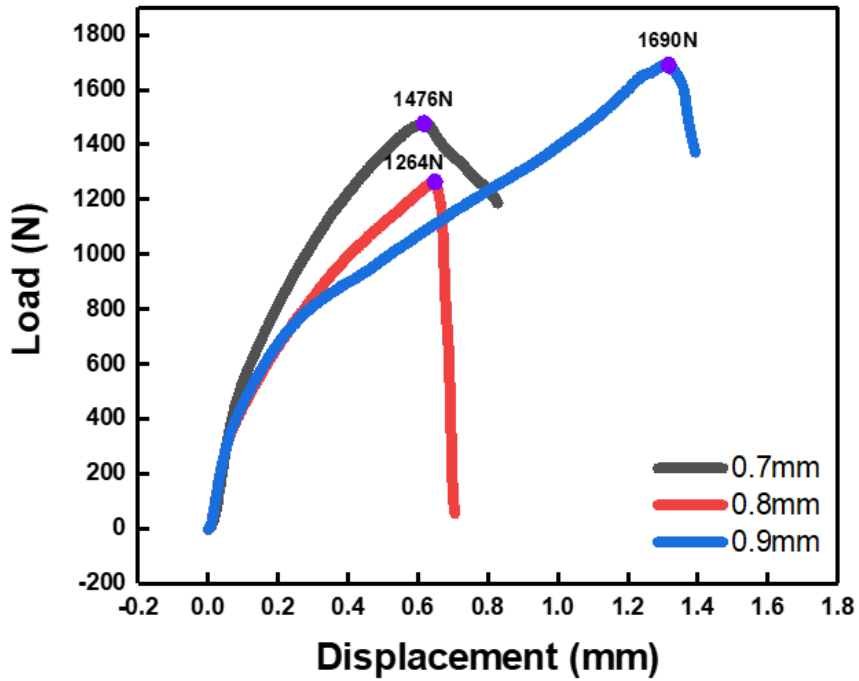


Figure 4-11 Load-displacement curve by plunge depth

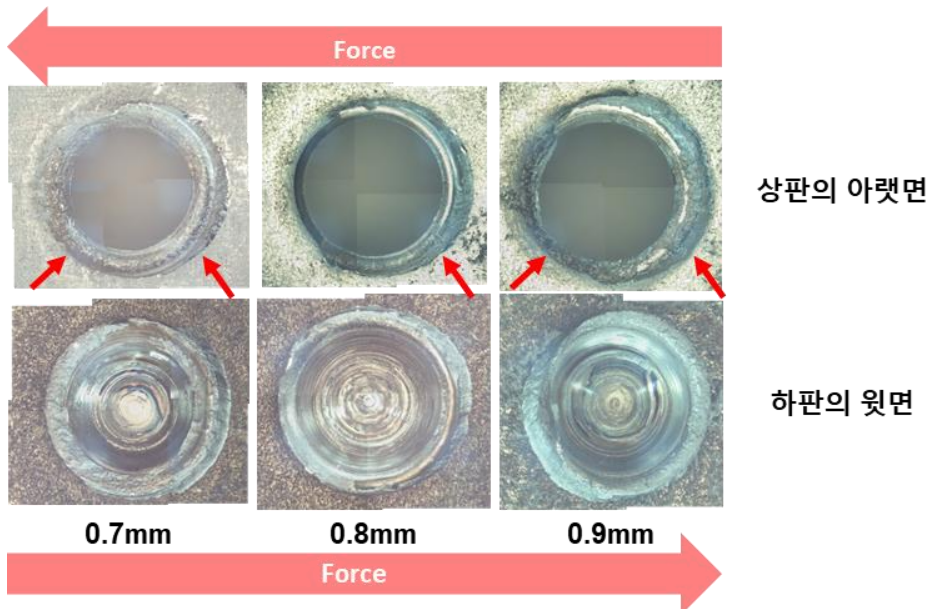


Figure 4-12 Fracture surface OM panorama with plunge depth of 0.7mm, 0.8mm, 0.9mm after tensile shear test

4.3 부식거동 관찰

4.3.1 동전위 분극 시험

갈바닉 부식은 재료가 가지고 있는 고유한 potential 값의 차이에 의해 발생한다. Potential의 차이가 클수록 부식속도가 빨라지기 때문에 피접합재의 potential 값을 정량화하여 염수 분무 시험의 결과를 예상할 수 있다. Figure 4-10은 접합 조건에 따른 열영향부의 동전위 분극 시험의 결과 값을 나타낸다. 접합 조건 별 열영향부의 potential 값의 차이는 미미한 것을 보아 마찰교반점접합에 의해 변화된 2차상 및 미세조직 변화는 전기화학적 특성에 큰 영향을 주지 않는 것으로 보인다. SEM-EDS 결과, keyhole에 노출되어 있는 하부 판재에 아연도금층이 존재하지 않는 것을 확인하였다. 아연도금층과 철강의 전위 값이 다르기 때문에 이에 대한 동전위 분극 실험 결과를 Figure 4-11에 나타내었다. 그 결과, 철강의 평균 E_{corr} 값은 $-0.48V$ 로 측정되었고 아연도금층의 E_{corr} 값은 $-1.00V$ 로 측정되었다. 따라서 상부 판재는 아연도금층과의 전위차이보다 철강과의 전위차이가 약 $0.5V$ 더 크기 때문에 부식환경에서 keyhole이 상대적으로 부식에 취약할 것이라고 추측된다. Figure 4-12에 모든 시편의 동전위 분극 시험의 결과를 하나의 그래프로 나타내었다.

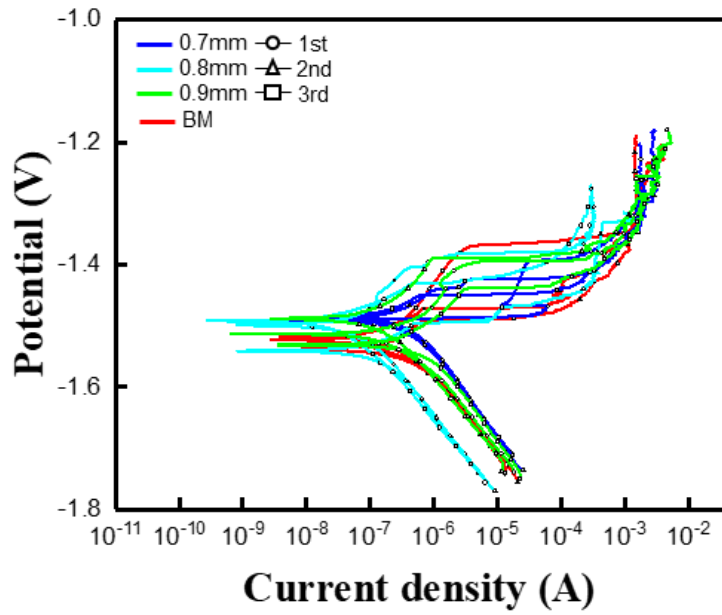


Figure 4-13 Potentiodynamic polarization curve of Base metal and Heat affected Zone of upper sheet

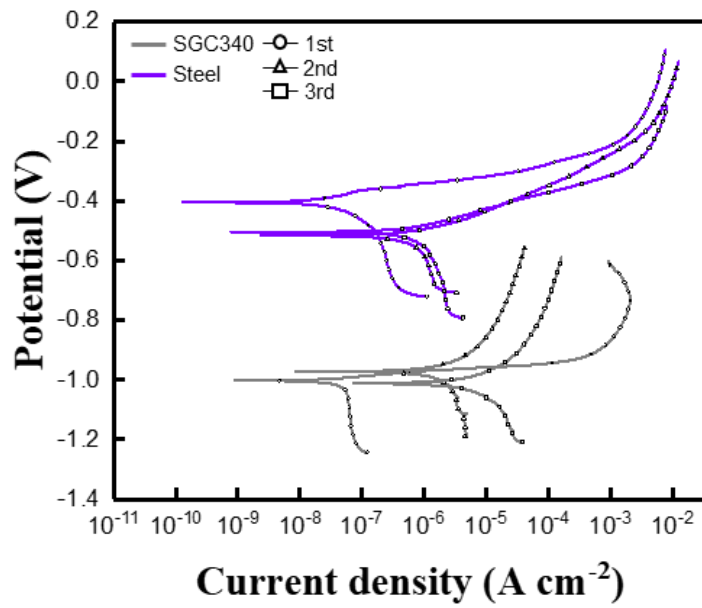


Figure 4-14 Potentiodynamic polarization curve of zinc and steel in the lower sheet

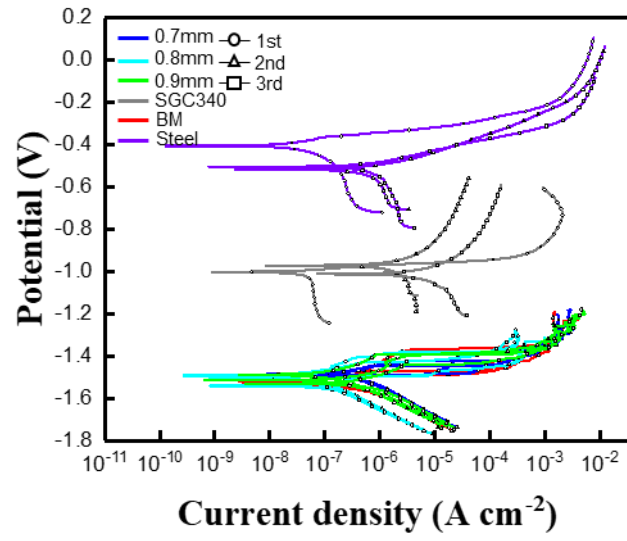


Figure 4-15 Electrochemical tests : potentiodynamic polarization curves

4.3.2 염수 분무 시험

Figure 4-13는 24h 동안 염수 분무 중 피접합재의 삽입 깊이에 따른 부식거동을 나타낸다. 염수 분무를 진행하는 동안 피접합재에서 어떤 변화가 나타났는지 관찰하기 위해 정해진 시간마다 피접합재를 관찰하였다. 염수분무 시작 10min 후, 피접합재의 keyhole에서 부식이 시작되었다. 24시간 염수분무 결과, 세 조건 모두 keyhole 및 겹치기부 주위에서 심한 부식이 발생한 것을 관찰할 수 있었다. Figure 4-14는 염수 분무 전과 후의 무게를 측정하여 비교한 결과이다. 무게 감소율은 0.32~0.34%로 비슷한 무게 감소율을 보였다.

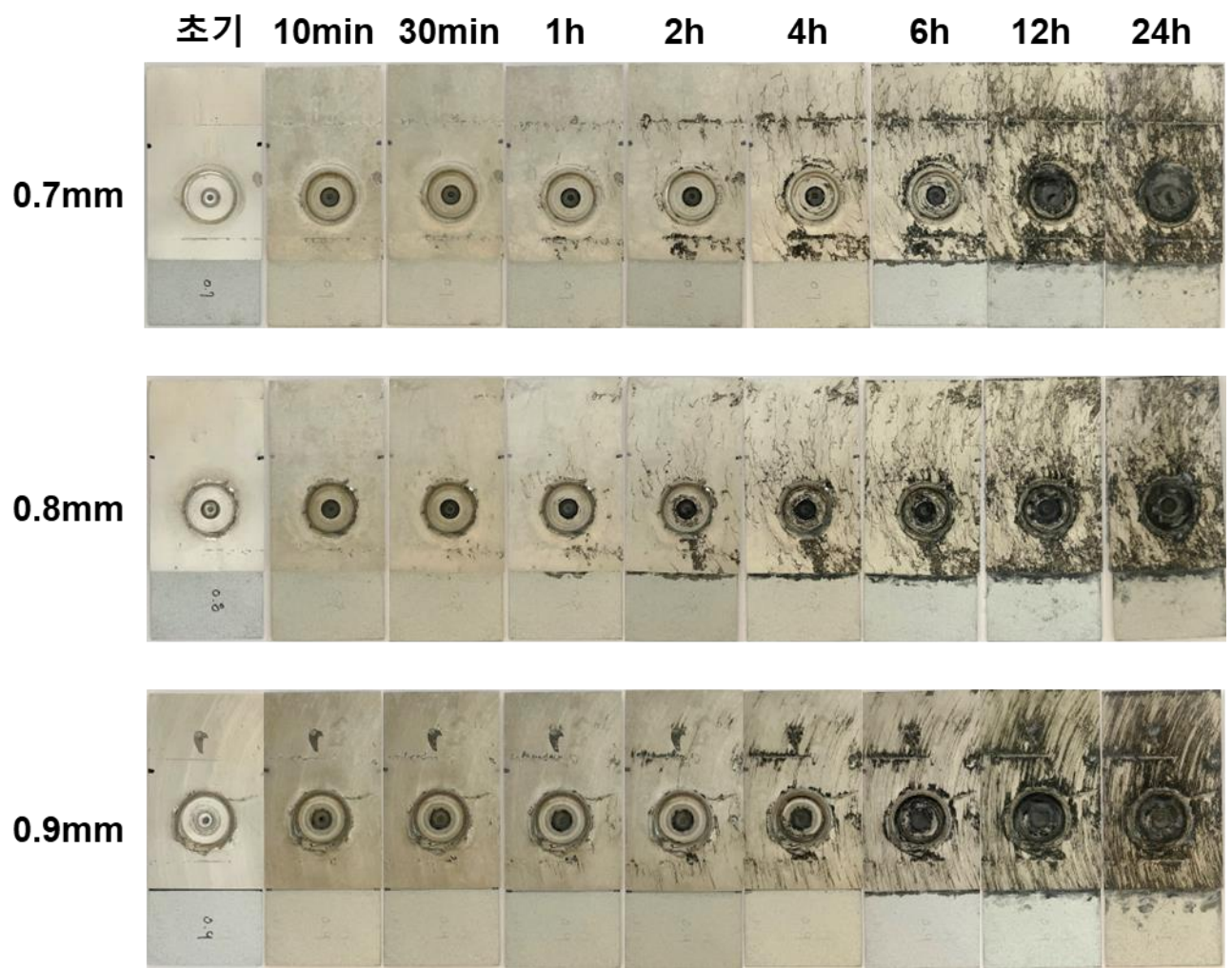


Figure 4-16 Corrosion behavior of FSSW plunge depth 0.7mm, 8.0mm, 0.9mm by salt spray time

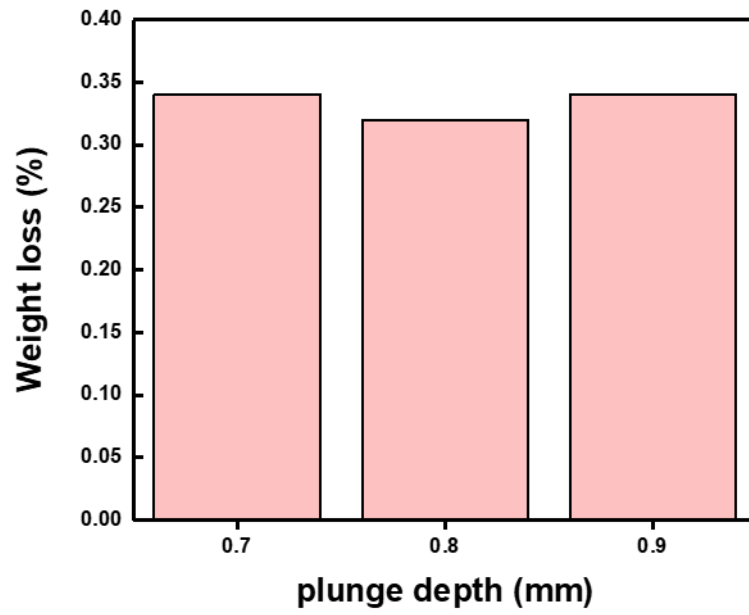


Figure 4-17 Comparison of weight loss rates before and after salt spray test

4.3.3 염수 분무 시험 후 접합부 단면 관찰

Figure 4-15에 염수 분무 시험 후 접합부 단면을 OM으로 관찰한 결과를 나타내었다. 동전위 분극 시험의 결과에서 예상한 것과 달리 모든 접합조건에서 접합부 양 끝의 틈새에서 부식이 심하게 발생하였다. 이는 하부 판재인 SGC340에 존재하는 아연도금층과 상부 판재인 AZ31 마그네슘합금의 전위차이에 의한 갈바닉 부식에 의한 것으로 판단된다. 그리고 아연도금층이 손실된 keyhole 주변부에서는 부식이 비교적 균일하게 발생했다.

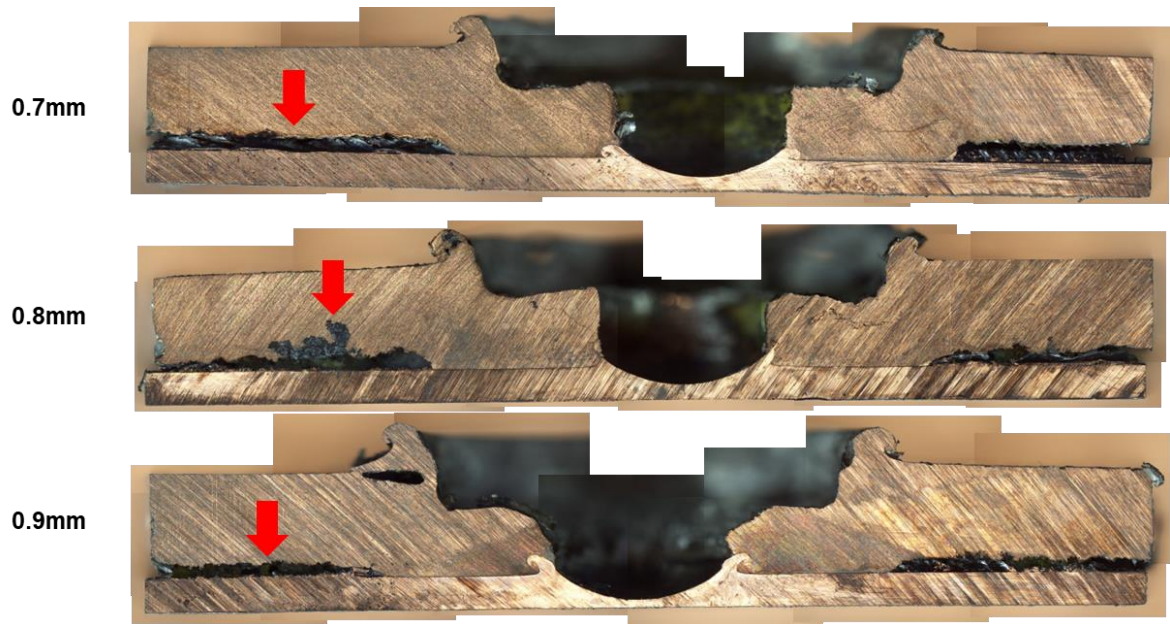


Figure 4-18 Optical microscope image of joint cross section after salt spray test

5. 고찰

5.1 공구의 삽입 깊이와 기계적 특성과의 상관관계

본 연구의 접합 변수인 공구의 삽입 깊이에 따른 미세조직 및 hook의 형상을 관찰한 결과, 열영향부의 결정립 크기는 유사한 결과를 보였다. 그리고 경도는 미세조직의 결정립 크기가 많은 영향을 주기 때문에 공구의 삽입 깊이에 따른 열영향부의 경도 값이 비슷한 경향을 보였다. 하지만 공구의 삽입 깊이에 따른 hook의 형상은 다소 차이를 보였다. Figure 4-3에서 측정했듯 hook의 높이는 0.8mm, 0.9mm, 0.7mm 순서로 높았고 폭은 0.9mm, 0.7mm, 0.8mm 순서로 넓었다. 그리고 인장 전단 시험 결과, 접합강도는 0.9mm, 0.7mm, 0.8mm 순서로 높았다. 이는 hook의 폭이 접합강도에 영향을 미치는 인자라고 볼 수 있다. 일반적으로 hook의 높이를 상부 판재의 두께로 나눈 값이 클수록 접합강도가 낮아진다고 알려져있다[22]. 하지만 본 연구에서는 hook의 높이가 가장 낮은 0.7mm 보다 0.9mm의 접합강도가 더 높았다.

일반적으로 이종 접합 시 생성되는 IMCs가 두 판재의 접합 강도를 향상시키는 요인으로 지목되어왔다. 하지만 본 연구에서 사용된 피접합재는 상부 판재와 하부 판재의 비혼화성에 의해 계면에서 금속간 화합물(Intermetallic Compound, IMC)의 생성이 제한되었다. 이는 마그네슘합금과 강판의 마찰교반점접합의 경우 계면에 생성된 금속간 화합물에 의한 접합강도의 상승 효과가 미미하며 hook의 생성으로 발생한 클린칭 결합이 접합강도에 많은 영향을 줄 것으로 추측된다[7]. 따라서 마그네슘합금과 강판 사이의 마찰교반점접합에서 강판의 강도가 상대적으로 높기 때문에 전단 하중에 영향을 받는 하판의 면적이 증가할 경우 접합강도가 상승할 것이다.

공구의 삽입 깊이가 증가할 경우, 상승하는 하부 판재의 부피가 증가하게 된다. 따라서

hook의 면적도 증가하며 이는 전단 하중에 영향을 받는 하판의 면적이 증가하여 접합강도가 상승할 것이다. 하지만 Figure 5-1에서 나타낸 것과 같이 인장 시편의 파면을 관찰했을 때, 0.8mm에서는 우측에서만 파단이 발생하고 좌측에서는 파단이 발생하지 않았다. 반면, 폭이 넓은 0.9mm와 0.7mm의 경우 우측과 좌측에서 모두 파단이 발생했다. 이는 인장 전단 시험 중 폭이 넓은 0.9mm와 0.7mm는 keyhole을 기준으로 양쪽에서 응력을 받았지만 폭이 좁고 높이가 높은 0.8mm의 경우 단면을 기준으로 좌측에서 응력을 받아주지 못하여 우측에서 응력이 집중되었고 이로 인해 접합 강도가 가장 낮게 측정된 것으로 사료된다.

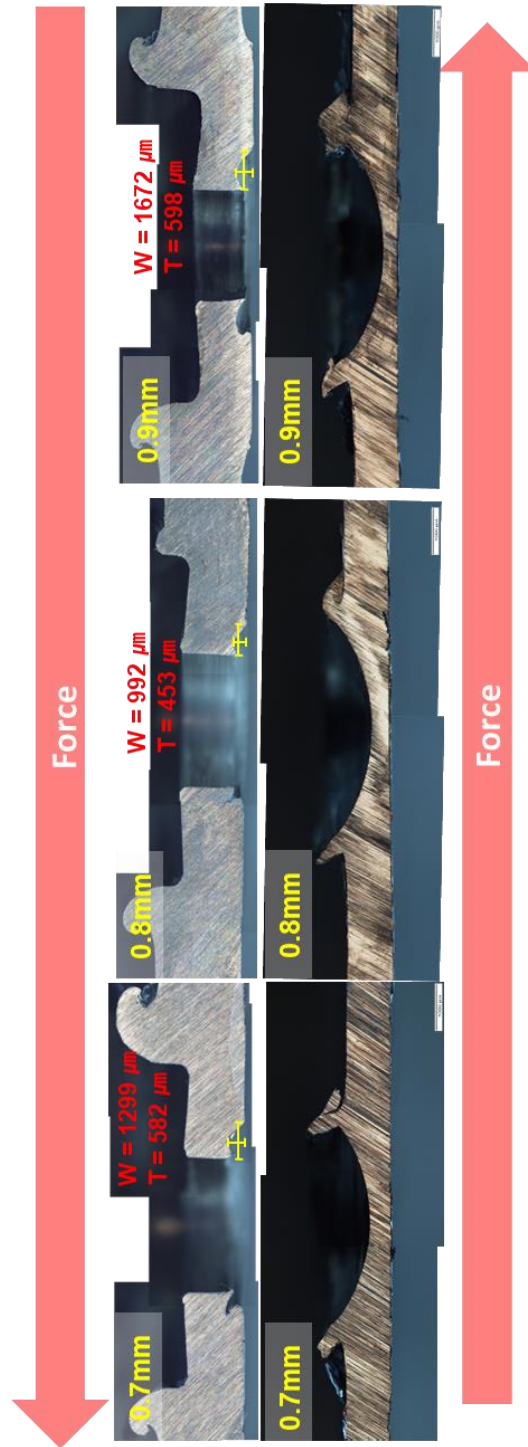


Figure 5-1 Optical microscope images of joint cross section after tensile shear test

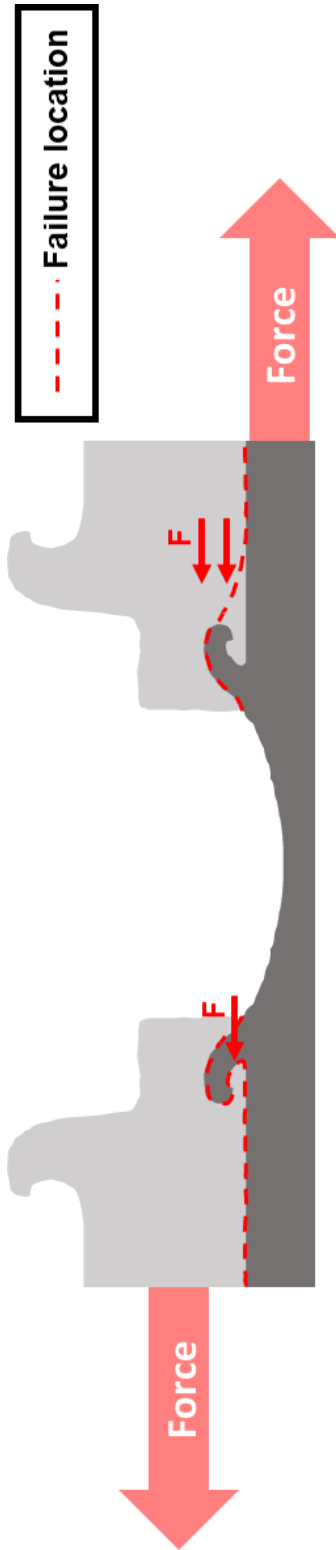


Figure 5-2 Schematic diagram of failure at FSSW joints.

5.2 공구의 삽입 깊이와 부식거동의 상관관계

공구의 삽입 깊이에 따른 결정립 크기의 변화는 크지 않은 것으로 보인다. 그리고 동전위 분극 시험 결과, 삽입 깊이에 따른 potential 값 역시 차이가 크지 않았다. 하지만 Figure 4-6, 7, 8에서 관찰했을 때, 마찰교반점접합을 진행하면서 하부 판재인 SGC340 아연도금강판의 아연도금층이 keyhole에서 존재하지 않은 것을 확인하였다. 이는 마찰교반점접합 중 공구의 회전에 의한 마찰열에 의해 아연도금층이 용융되어 밀려 나간 것으로 추측된다. 따라서 아연도금층이 존재하는 겹치기 부에서는 아연과 상부 판재인 AZ31 마그네슘합금의 전위 차이에 의한 갈바닉 부식이 일어나고 keyhole에서는 강판과 AZ31 마그네슘합금의 전위 차이에 의한 갈바닉 부식이 발생했을 것으로 추측된다. 갈바닉 시리즈에 따르면 강판의 전위가 아연보다 높아 마그네슘합금과 접촉하게 되면 아연과 접촉했을 때보다 부식이 더 빨리 일어나는 경향을 나타낸다. 그리고 동전위 분극 시험 결과, 아연도금층이 없는 keyhole 주변부에서 전위차이가 크기 때문에 부식환경에서 더 심한 부식이 발생할 것으로 추측하였다. 하지만 본 연구에서 24시간 염수 분무 후 접합부의 단면을 관찰한 결과, Keyhole 주위보다 상부 판재와 하부 판재 사이의 틈새에서 상대적으로 더 심한 부식이 발생했다. Keyhole부에서는 Mg와 Fe의 전위차이가 크기 때문에 Mg 이온을 방출하게 되면 OH⁻가 생성된다. OH⁻가 방출된 Mg이온과 만나게 되어 Mg(OH)₂라는 부식 부산물을 만들게 되며 이 부식 부산물은 염수에 존재하는 Cl⁻에 의해 파괴되고 부식이 가속화된다. 이러한 반응은 부식 초기 단계에서 부식이 발생하는 구동력으로 작용했다고 볼 수 있다. 해당 반응의 모식도를 Figure 5-4에 나타내었다. 이후 접합부에 존재하는 틈새에서 틈 부식이 발생하게 된다. 해당 반응의 반응식과 모식도는 Figure 5-5에 나타내었다. 틈 부식(Crevice corrosion)은 균열 부식으로도 명명하며, 폭이 수 mm 또는

수 μm 이하의 틈에서 발생하는 국부적인 전기화학적 부식 형태를 말한다.[19] 틈 부식의 메커니즘은 다음과 같다. 먼저 갈바닉 부식에 의해 Mg^{2+} 가 생성되면 틈 내의 용존 산소량이 감소하게 되며 이로 인해 틈 내에 존재하는 양이온의 농도가 상대적으로 증가한다. 틈 내의 양이온의 농도를 상쇄시키기 위해 외부에서 Cl^- 가 확산에 의해 틈 내로 유입되어 부식이 가속화된다. 따라서 부식 초기단계에서는 keyhole에서 발생한 갈바닉 부식에 의한 구동력이 작용하여 이후 접합부에 존재하는 틈에서 발생하는 틈새 부식에 의해 부식이 가속된다.

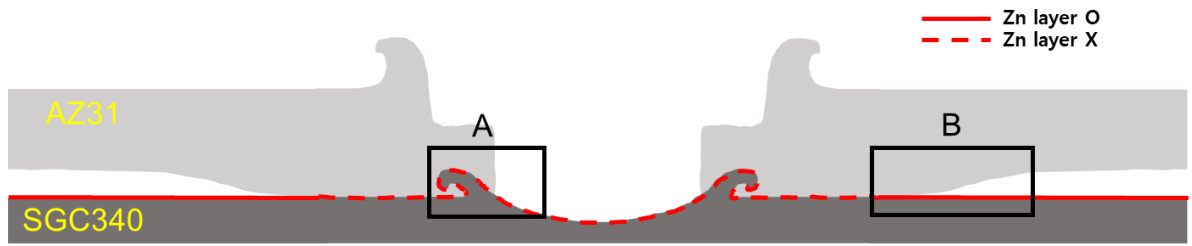


Figure 5-3 Schematic diagram of FSSW joint cross section

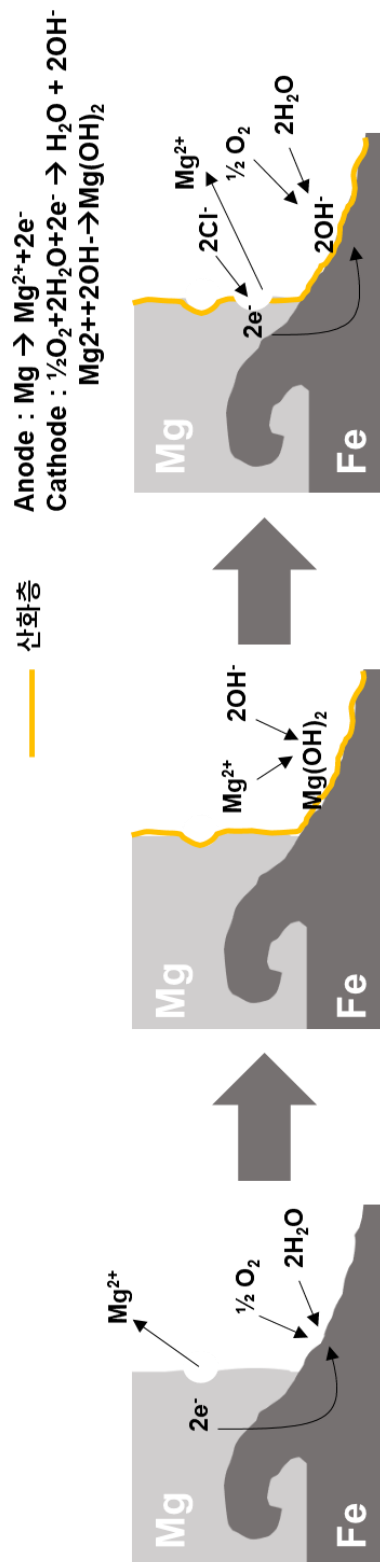


Figure 5-4 Galvanic corrosion schematic diagram at A of figure 5-3

(B)

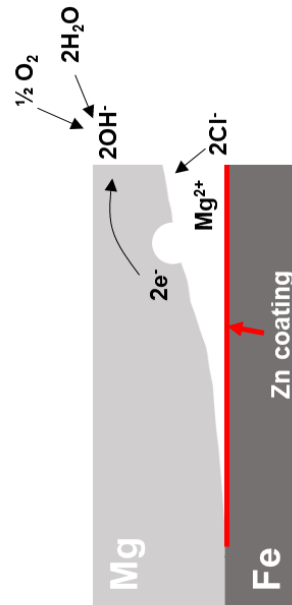
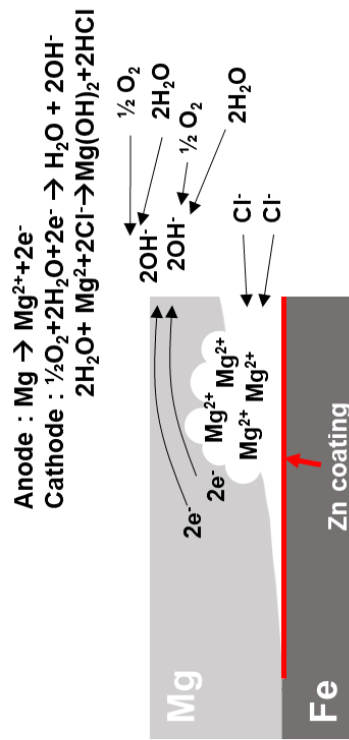


Figure 5-5 Crevice corrosion schematic diagram at B of figure 5-3

6. 결론

마그네슘합금의 적용 범위를 넓히기 위해 상용 AZ31 마그네슘합금과 SGC340 아연도금강판을 마찰교반점접합 공정을 통해 이중 접합하여 공구의 삽입 깊이에 따른 기계적 특성과 부식거동을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마찰교반점접합을 통해 AZ31 마그네슘합금과 SGC340 아연도금강판을 이중 접합한 결과, SZ에서 결정립 미세화가 일어났고 HAZ에서 결정립 조대화가 발생했다.

2. 인장 전단 시험 결과, Hook 폭의 넓이 증가에 따른 접합 강도 증가를 볼 수 있었다. 이는 hook 폭의 길이 증가에 의해 상대적으로 강도가 높은 하부 판재의 전단 하중의 영향을 받는 면적이 증가해 접합 강도가 상승한 것으로 보인다.

3. 마찰교반점접합에 의해 소성변형 및 마찰열의 영향을 받은 영역에서 하부 판재의 표면에 존재하던 아연도금층이 제거되었다.

4. 염수 분무 시 keyhole에서 마찰교반점접합에 의해 아연도금층이 손실되어 AZ31 마그네슘합금과 철강의 갈바닉 부식이 발생했다. 이는 초기 부식 환경에서 부식의 구동력이 된 것으로 추측된다.

5. 겹치기부에 존재하는 틈새에서 틈새 부식이 발생하였으며 이로 인해 갈바닉 부식이 촉진된 것으로 추측된다.

6. 따라서 본 연구에서는 마찰교반점접합 중 삽입 깊이 차이로 인한 hook의 넓이가 접합 강도에 영향을 미치는 인자로 작용하였다. 아연도금층이 손실된 keyhole이 전위차이가 높아 해당 영역에서 발생한 갈바닉 부식이 초기 부식이 구동력으로 작용하였으며 이후 접합부 틈새에서 발생하는 틈새 부식에 의해 부식이 가속화되었다.

7. 참고문헌

- [1] 성시영, 자동차 차체 경량화 동향과 전망, KAMA Web Journal 330, 2016
- [2] Im, Chang-Dong, Bong-Seon Yu, and Geun-Yong Son. "마그네슘합금의 자동차 부품 적용 현황." *기계와재료* 16.4 (2004): 66-75
- [3] Schmal, Christopher, and Gerson Meschut. "Refill friction stir spot and resistance spot welding of aluminium joints with large total sheet thicknesses (III-1965-19)." *Welding in the World* 64.9 (2020): 1471-1480.
- [4] Arul, S. G., et al. *Effects of surface treatment (lubricant) on spot friction welded joints made of 6111-T4 aluminum sheets*. No. 2007-01-1706. SAE Technical Paper, 2007.
- [5] Y.M Yeon, C.Y. Lee, W.B. Lee, S.B. Jung, W.S. Chang, Spot Friction Stir Welding and Characteristics of Joints in Aluminium alloys Journal of KWS, Vol. 23, No. 3, June, 2005
- [6] Liu, Lei, et al. "Nanostructure of immiscible Mg–Fe dissimilar weld without interfacial intermetallic transition layer." *Materials & Design* 92 (2016): 445-449.
- [7] Liyanage, T., et al. "Joint formation in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds." *Science and Technology of Welding and Joining* 14.6 (2009): 500-508.
- [8] 박영근. "AZ31B-0 마그네슘 합금의 마찰교반점접합부의 기계적 특성에 관한 연구." 국내석사학위논문 울산대학교 대학원, 2015. 울산
- [9] Shim, Jae-Dong, and Ji-Young Byun. "R&D Trend on Surface Treatment of Magnesium Alloys." *Korean Journal of Materials Research* 23.1 (2013): 72-80.
- [10] Fu, Banglong, et al. "Revealing joining mechanism in refill friction stir spot welding of AZ31 magnesium alloy to galvanized DP600 steel." *Materials & Design* 209 (2021): 109997.
- [11] Shen, Jun, Dong Min, and Dan Wang. "Effects of heating process on the microstructures

- and tensile properties of friction stir spot welded AZ31 magnesium alloy plates." *Materials & Design* 32.10 (2011): 5033-5037.
- [12] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, "Friction Stir Welding and Processing", 2007 ASM International, p236
- [13] Effect of tool geometry on joint strength of Mg alloy by spot friction welding
- [14] Su, p. et.al : Energy Generation and Stir Zone Dimensions in Friction Stir Spot Welds, SAE technical Paper, 2006-01--971, SAE 2006 World Congress, April 3-6, 2006, Detroit, MI, USA
- [15] Horie, S., et al. "Local melting and cracking during friction stir spot welding on Mg-Al binary alloy." *QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY* 27.2 (2009): 94s-98s.
- [16] 전상혁, 고영봉, 박경채, "솔더 지름과 회전속도에 따른 AZ31 마그네슘합금의 마찰교반접합 특성", 한국표면공학회지 제 46 권 제 1 호, pp36-41, (2013)
- [17] J. Tibballs, in: I. Ansara, A.T. Dinsdale, M.H. Rand (Eds.): COST 507, Thermochemical database for light metal alloys Vol. 2, EUR 18499 (1998) 195.
- [18] Shamsudeen, Shanavas, and John Edwin Raja Dhas. "Optimization of multiple performance characteristics of friction stir welded joint with grey relational analysis." *Materials Research* 21 (2018).
- [19] DENNY A.JONES, 부식과 방식의 원리, 2002.07.10
- [20] 윤진영, 김철희, and 이세현. "툴 경로제어를 이용한 Al/Fe 이중금속 마찰교반점용접 공정특성 평가." *대한용접·접합학회지* 34.3 (2016): 6-11.

- [21] Campbell, F. C. "Adhesive bonding and integrally cocured structure: a way to reduce assembly costs through parts integration." *Manufacturing Processes for Advanced Composites*; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands (2004): 241-301.
- [22] Yin, Y. H., et al. "Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds." *Journal of Materials Processing Technology* 210.14 (2010): 2062-2070.

영문 요약

In the automobile industry, interest in magnesium alloy, a lightweight metal, is increasing to protect the environment and improve fuel efficiency, but it is not applied to various fields due to its poor corrosion resistance, formability, and weldability compared to competing materials, such as plastic, aluminium alloy, etc. In particular, heterogeneous bonding with existing steel materials is an essential technology to expand the scope of application of magnesium alloys, but research on this is insignificant.

In this study, AZ31 magnesium alloy and galvanized steel plate (SGC340) were heterogeneously bonded using a self-piercing riveting (SPR) process, and the mechanical characteristics and corrosion behavior of the joints were evaluated according to the type of rivet and pressing force to derive optimal bonding conditions. The mechanical characteristics measured the bonding strength of self-piercing rivet joints through a shear tensile test and interpreted the changes in bonding strength depending on the length of the junction interlock in relation to the fracture behavior of the joints. In the case of corrosion characteristics, a salt spray test and an immersion test were performed, and the galvanic corrosion behavior of the joints according to the bonding conditions was compared and analyzed. In addition, the values of E_{corr} and I_{corr} of AZ31 magnesium alloy plate, galvanized steel plate, and Rivet were quantified by conducting an open circuit potential and a Potentiodynamic polarization test for each bonding material.