



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](#)

2021 년 2 월

석사학위 논문

고성능 유압실린더 개발을 위한  
고상접합기술에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

김 영 규

# 고성능 유압실린더 개발을 위한 고상접합기술에 관한 연구

A study on solid-state-welding technology for the development of  
hydraulic cylinder with high performance

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

김 영 규

# 고성능 유압실린더 개발을 위한 고상접합기술에 관한 연구

지도교수    박 정 수

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

기계공학과

김 영 규

## 김영규의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 창 래 (인)

위 원 조선대학교 교수 조 흥 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 정 수 (인)

2020년 11월

조선대학교 대학원

## CONTENTS

<b>List of Figures .....</b>	<b>III</b>
<b>List of Tables.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>제 1 장 서 론 .....</b>	<b>1</b>
제 1 절 연구배경과 목적 .....	1
<b>제 2 장 이론적 배경 .....</b>	<b>4</b>
제 1 절 고상접합(solid state welding) .....	4
제 2 절 마찰접합(friction welding) .....	7
2.2.1 마찰접합의 개념 .....	7
2.2.2 마찰접합의 특징 .....	11
<b>제 3 장 실험방법 .....</b>	<b>13</b>
제 1 절 마찰접합 .....	13
3.1.1 실험재료.....	13
3.1.2 마찰접합 공정 장비와 조건 .....	18
제 2 절 미세조직 분석과 물성평가.....	21
3.2.1 광학현미경 분석 .....	21

3.2.2 전자후방산란회절법 분석 .....	23
3.2.3 기계적 특성 평가 .....	24
<b>제 4 장 실험결과와 고찰 .....</b>	<b>27</b>
제 1 절 마찰접합 된 소재의 외관 형상.....	27
4.1.1 Top view .....	27
제 2 절 미세조직 평가 .....	29
4.2.1 광학현미경 분석 .....	29
4.2.2 결정립계특성분포 전개양상 .....	35
제 3 절 기계적 특성 평가 .....	39
3.1.1 비커스 경도시험 .....	39
3.1.2 인장시험.....	41
3.1.3 파단면 분석 .....	44
<b>제 5 장 결론 .....</b>	<b>47</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>48</b>

## List of Figures

그림 1. 국내·외 의료기기 시장과 국내 의료기기 제조기업과 수출 규모.....	3
그림 2. 의료, 헬스케어, 바이오 등에 사용되는 각종 의료기기와 의료용 유압실린더 .....	3
그림 3. 산업에서 주로 활용되고 있는 용융용접기술.....	5
그림 4. 고부가가치 부품의 접합기술로 사용되고 있는 고상접합기술.....	6
그림 5. 이 연구에서 도입된 마찰접합의 공정 개념도.....	8
그림 6. 연속구동 마찰접합의 시간에 따른 공정변수의 변화.....	10
그림 7. 냉간인발 된 소재의 미세조직.....	16
그림 8. Fe-Fe <sub>3</sub> C 이원계(binary system) 상태도 .....	17
그림 9. 이 연구에서 사용된 장비와 제원.....	20
그림 10. 접합재의 미세조직 관찰에 사용된 광학현미경.....	22
그림 11. 마찰접합 된 소재의 미세조직 관찰 영역.....	22
그림 12. 접합재의 기계적 특성 평가에 사용된 장비.....	25
그림 13. 마찰접합 된 소재의 경도분포 측정 영역.....	25
그림 14. 이 연구에서 사용된 인장시험편 규격.....	26
그림 15. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 Top view .....	28
그림 16. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 소모량 변화 양상.....	28
그림 17. 압셋압력 30 MPa에서 다양한 burn-off length로 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 광학조직 .....	32
그림 18. 압셋압력 40 MPa에서 다양한 burn-off length로 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 광학조직 .....	33
그림 19. 압셋압력 50 MPa에서 다양한 burn-off length로 마찰접합 된 AISI 1020	



합금의 광학조직 .....	34
그림 20. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 접합부 EBSD 분석 결과 .....	38
그림 21. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 경도분포 .....	40
그림 22. 전위의 이동과 결정립계의 관계에 대한 모식도.....	40
그림 23. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 인장특성 .....	42
그림 24. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 인장시험편 Top view .....	43
그림 25. SEM으로 관찰된 모재와 마찰접합 된 소재의 파단면 이미지.....	45
그림 26. 파단면의 EDX 분석 결과 .....	46

## List of Tables

표 1. AISI 1020 합금의 화학조성.....	15
표 2. AISI 1020 합금의 기계적 특성.....	15
표 3. 이 연구에서 도입된 마찰접합의 공정조건.....	19

## ABSTRACT

### A study on solid-state-welding technology for the development of hydraulic cylinder with high performance

Kim, Young-Kyu

Advisor: Prof. Park, Jung-Soo, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

In this study, friction welding was applied to carbon steel tubes at a high speed condition to achieve an eco-friendly welding process and a superior mechanical performance. Friction welding is a very efficient process for joining materials without defects, especially with joint rods or tubes. For this study, cold drawn carbon steel tubes (AISI 1020) were introduced as the base material and successfully joined by friction welding. Friction welding was performed with parameters of a burn-off length (1, 2 and 5 mm). In order to analyze the welds, the electron backscattering diffraction method was introduced and observed the grain boundary characteristic distributions such as grain size, shape and orientation. To evaluate the relationship between the mechanical properties and microstructure, Vickers microhardness and tensile tests were introduced. As a result, the yield strength of the welds significantly increased relative to the base material at all conditions, and which derived from the microstructure development like a refined acicular ferrite grains through the dynamic recrystallization during the welding. Consequently, we suggest the optimum conditions of the friction welding with the interdependence of the microstructures and mechanical properties in this study.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경과 목적

고령화 인구의 증가는 의료, 바이오, 헬스케어 등에 대한 관심과 수요를 꾸준히 증가시키고 있고, 그 결과 의료기기(진료대, 베드, 물리치료기 등)의 수요 또한 비례적으로 증가하고 있다. Fortune Business Insight 의 ‘MEDICAL DEVICES MARKET’ report 에 따르면, 세계 의료기기 시장규모는 2017 년 3,975 억 달러로 연평균 5.4%씩 성장하고 있고, 2025 년에는 6,121 억 달러에 이를 것으로 예상하고 있다. 국내시장의 경우, 연평균 8%의 성장세를 지속하여 2018 년 기준 6 조원을 상회하는 것으로 보고되고 있다(식품의약품안전처 자료). 그 중 진료대, 수술베드, 검사용 베드 등의 수요가 전체 시장의 12 - 15% 정도를 차지하고 있는데, 이러한 기기의 구동에 있어서 유압실린더(oil hydraulic cylinder)가 핵심부품으로 사용되고 있다. 유압실린더의 제조 시 용융용접(fusion welding)이나 볼트결합(bolting)의 기술을 도입하여 제조하고 있으나, 시간이 경과함에 따라 접합부 혹은 결함부에서 누유가 발생하여, 유압실린더의 성능이 저하되는 문제가 종종 발생하고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 기술선진국인 미국, 유럽, 일본 등은 유압실린더의 제조기술로 고상접합 중 마찰접합을 도입함으로써, 고성능 제품을 양산하고 있다[1,2].

탄소강(carbon steel)은 수송기, 기계, 의료기기 등의 산업에서 다양한 부품소재로 사용되고 있으며, 그 중 관재(tube material)는 기계산업의 유·공압실린더 부품에 핵심소재로 사용되고 있다. 이러한 실린더는 튜브재의 접합이나 결함으로 제작되는데, 실린더 제조기술로서 주로 피복아크용접(shield metal arc welding, SMAW), 가스텅스텐아크용접(gas tungsten arc welding, GTAW) 등과 같은 용융용접이나 볼트결합(실린더 베럴과 실린더 커버 간 접합이나 체결)을 채택하여 사용하고 있다. 그 중 용융용접은 금속을 녹여서 접합하는 방식이기 때문에 높은 입열량(heat input)으로 인하여 열변형, 조직불균형, 열영향부(heat affected zone, HAZ)의 형성, 상변태(마르텐사이트 혹은 베이나이트의 형성) 등의 발생빈도수가 매우 높은 단점이 있다. 이와 더불어 접합부에 void, crack, segregation 등의 결함이 빈번하게 발생하기

때문에, 모재 대비 접합부의 물성(physical property)이 열악해지는 문제점이 발생하고 있다. 한편, 탄소함량이 많은 중·고탄소강을 채택하여 용접할 경우, 재료의 열변형과 조직불균형을 해소하기 위한 전/후 열처리가 필수적으로 요구되며, 접합부의 물성확보를 위한 filler metal 과 보호가스의 사용이 반드시 필요하기 때문에, 생산·환경적 측면에서도 악영향을 미치고 있다[3-6].

마찰접합(friction welding, FW)과 마찰교반접합(friction stir welding, FSW)은 대표적인 고상접합(solid state welding)기술로서, 기계, 전자, 항공, 조선, 자동차 등 여러 산업분야에서 고부가가치 부품의 제조에 적용되고 있다. 그 중 봉재(rod)와 관재(tube)로 이루어진 제품의 경우, 주로 마찰접합을 채택하는데, 이 기술은 고속회전과 압력을 이용하여 상당히 짧은 시간(대략 5 - 7 초)에 접합부를 형성하기 때문에, 결함발생이 거의 없고 조직발달에 기초하여 우수한 물성을 갖는 접합재를 확보할 수 있다. 따라서 이 연구는 탄소강관에 대하여 마찰접합을 도입하였고, 접합재에서 전개되는 미세조직과 기계적 특성을 평가함으로써, 접합재의 건전성을 논의하고자 수행하였다. 뿐만 아니라, 접합 시 burn-off length 의 변화가 접합부의 결정립계특성분포(grain boundary characteristic distribution, GB CD)의 발달, 즉, 결정립 크기, 형상, 방위(orientation), 어긋남각(misorientation angle) 등의 형성에 미치는 영향을 평가하여, 접합재의 기계적 특성과 이들 간의 관계를 규명하고자 한다.



그림 1. (a) 세계 의료기기 시장규모, (b) 국내 의료기기 시장규모와 (c) 국내 의료기기 제조기업의 규모와 수출규모

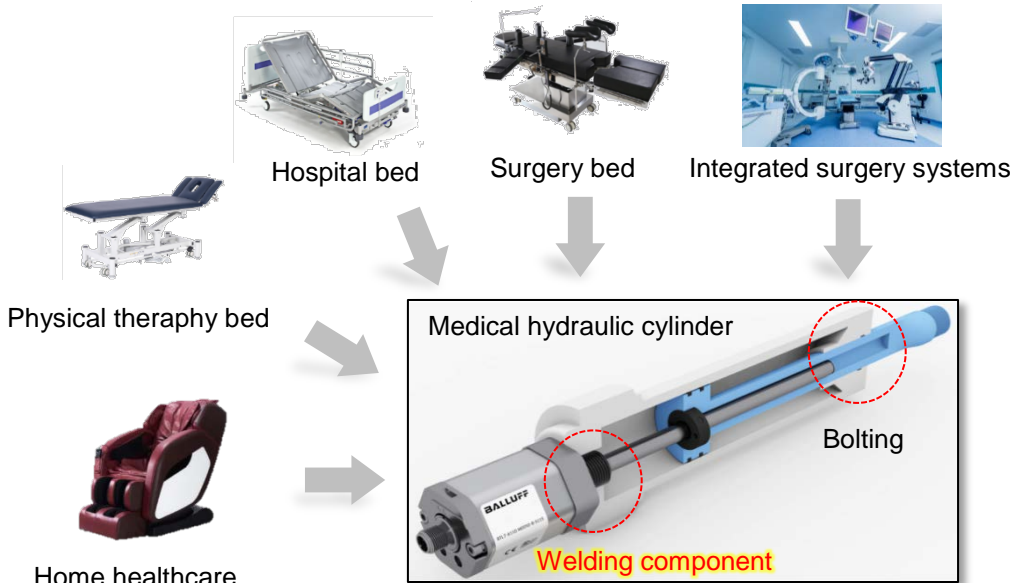


그림 2. 의료, 헬스케어, 바이오 등에 사용되는 각종 의료기기와 의료용 유압실린더

## 제 2장 이론적 배경

### 제 1절 고상접합(solid state welding)

용접·접합공정은 접합기구에 따라 분류되며, 크게 용융용접과 고상접합으로 나눌 수 있다. 그 중 용융용접은 접합부를 국부적으로 가열하여 모재의 용융을 수반하는 방법으로써, 용융점이 같거나 비슷한 금속재료의 접합에 주로 이용되며, 대표적으로 아크용접(arc welding), 레이저용접(laser welding), 전자빔용접(electron beam welding) 등이 있다. 반면, 고상접합은 금속을 녹이지 않고 고체상태(solid state)에서 접합할 수 있는 기술이기 때문에 별도의 열원이나 용가재를 사용하지 않으며, 대표적인 기술로서 마찰접합과 마찰교반접합이 있다[7]. 일반적으로 고상접합은 용융용접 대비 현저히 낮은 입열량을 갖기 때문에, 접합부에서 발생하는 void, crack, blow hole 등과 같은 결함발생이 적은 특징이 있다. 특히, 공정변수의 제어를 통해 접합부의 미세조직 제어가 원활하여, 조직발달에 기초한 접합부의 물성이 모재 대비 우수한 것으로 보고된 바 있다[8,9].

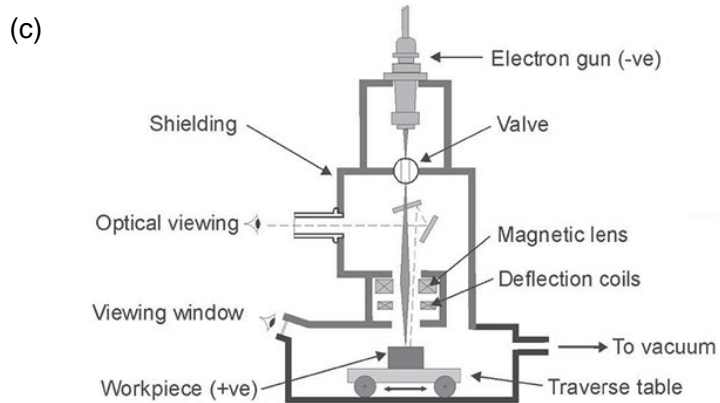
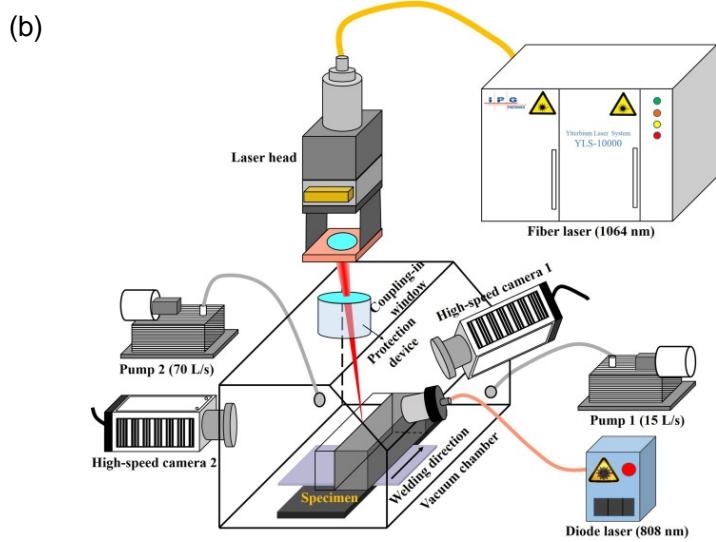
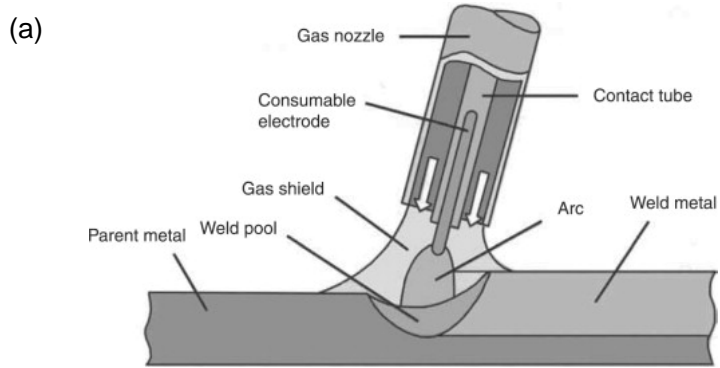


그림 3. 산업에서 용융용접기술로 주로 활용되고 있는 (a) 아크용접, (b) 레이저용접과 (c) 전자빔용접



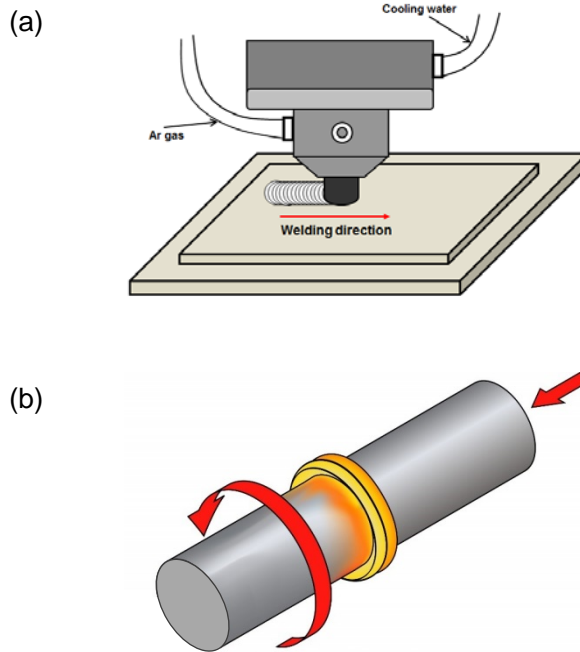


그림 4. 고부가가치 부품의 접합기술로 사용되고 있는 고상접합기술. (a) 마찰교반접합과 (b) 마찰접합

## 제 2절 마찰접합(friction welding)

### 2.2.1 마찰접합의 개념

마찰접합은 회전하는 한쪽의 재료에 축방향으로 힘을 가할 때 발생하는 마찰열로 접합하는 기술로서, 그림 5 에 나타난 바와 같이, 고속으로 회전하는 봉재에 압력을 주면, 마찰열의 발생을 통하여 금속이 연화되고, 추가되는 가압력에 의해 연화된 소재가 접합되는 신개념의 접합기술이다. 이와 같은 마찰접합은 에너지 적용 방법에 따라 연속구동 마찰접합과 관성 마찰접합으로 분류된다. 그 중 연속구동 마찰접합은 회전하는 재료가 모터에 의해 일정한 속도로 회전하고, 반대쪽 재료가 축방향 압력을 가하면서 미리 설정한 시간 또는 **burn-off length** 의 값에 도달하면 마찰운동을 정지시킨 후 가압하여 접합하는 방식이다. 반면, 관성 마찰접합은 플라이 휠의 크기에 의해 정해진 마찰운동 속도에 이르기까지 마찰시킨 후, 구동장치와 휠을 분리하고 축방향으로 압력을 가하여 접합하는 방식이다.

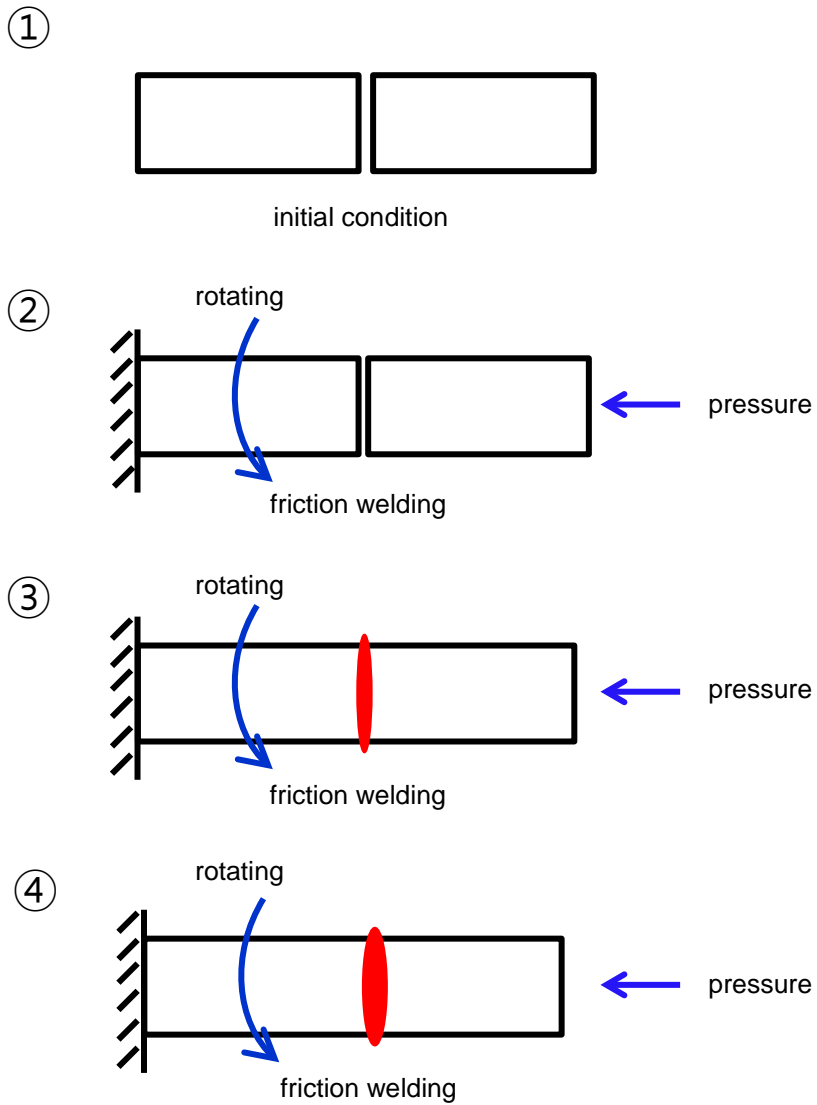


그림 5. 이 연구에서 도입된 마찰접합의 공정 개념도

이 연구에서는 연속구동 마찰접합 공정을 채택하였고, 연속구동 마찰접합 공정 중 시간에 따른 공정변수의 변화양상을 그림 6 에 나타내었다. 연속구동 마찰접합의 공정변수는 회전속도(rotation speed), 마찰압력(friction force), 마찰시간(friction time), 업셋시간(upset time), 업셋압력(upset pressure), burn-off length 등으로 관성 마찰접합에 비해 많고, 최적공정의 확립이 비교적 어려운 편이다[7]. 접합 시 공정은 크게 마찰구간과 업셋구간으로 구분되며, 마찰구간에서 일정한 압력과 속도로 마찰시켜 접합부를 일정 온도까지 이르게 한 후, 업셋구간을 거쳐 접합을 마무리하게 된다[10-12]. 이 때, 초기 마찰구간은 건식마찰과 마모에 의해 토크 값이 급격히 증가하는 현상을 보이며, 완전한 접촉 후, 온도상승에 의한 유동응력의 저하로 최초의 토크 정점 값보다 낮고 일정한 토크를 유지한다. 이어지는 업셋구간에서 마찰운동속도가 급격히 감소함으로써, 토크 값이 증가하여 압착이 이루어진다. 또한, 업셋구간에서 가압력을 증가시켜 열간-가공량을 증가시킬 수 있는데, 이를 통해 접합 후 생성되는 flash 의 크기가 달라지게 된다.

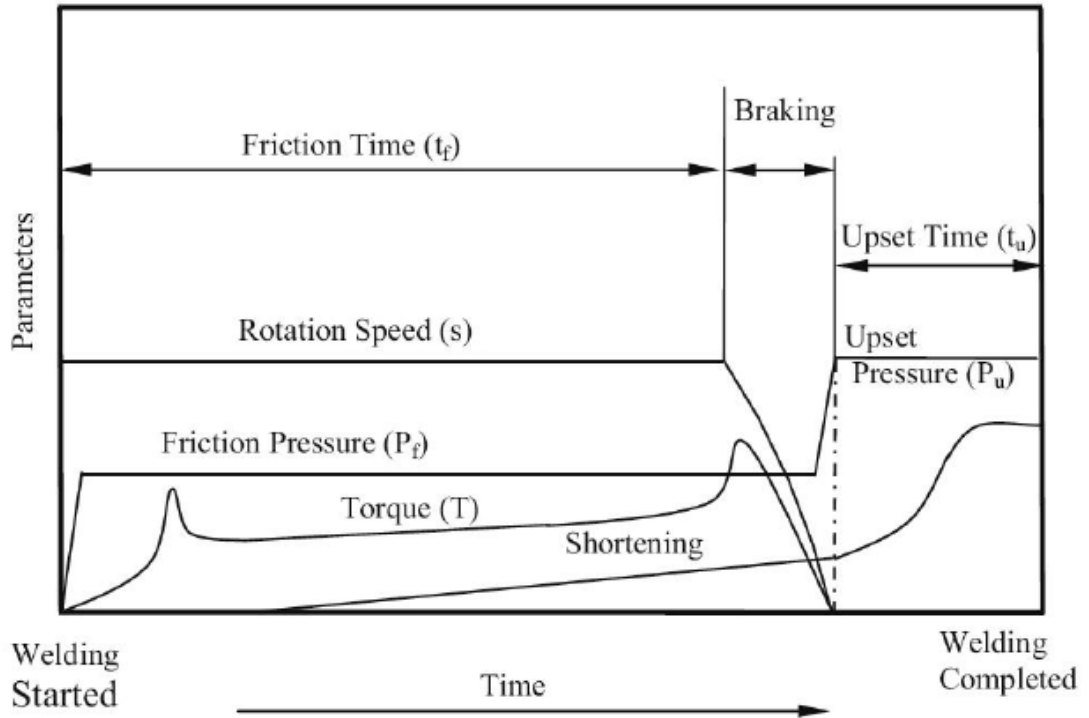


그림 6. 연속구동 마찰접합의 시간에 따른 공정변수의 변화

## 2.2.2 마찰접합의 특징

마찰접합은 회전속도와 압력으로 접합을 완결하기 때문에, 접합 중 소재의 소성유동(plastic flow)과 마찰열(friction heat)이 동반되며, 이를 통해 접합부가 동적재결정(dynamic recrystallization)되는 특징이 있다. 이러한 현상은 회전속도와 압력의 크기에 따라 달라지며, 공정변수의 제어를 통해 접합부의 미세조직 전개양상을 조절할 수 있기 때문에, 접합부의 기계적 특성 또한 효과적으로 제어가 가능하다. 특히, 접합공정 중 회전속도의 증가는 접합계면의 마찰열을 증가시키기 때문에, 접합재의 결정립 크기, 상분포, 금속간화합물 형성, 재결정 정도 등에 영향을 미친다[13-15]. 접합 시 인가되는 압력은 축방향으로의 수축량 즉, 소모량과 접합부에서의 온도구배에 큰 영향을 미치는 인자로서, 접합부의 형상과 소재의 종류에 따라 압력의 크기는 달라지며, 마찰구간에서 압력은 발열이 충분히 일어날 수 있도록 높아야 한다. 압력이 낮을 경우, 불충분한 발열량으로 인해 접합부에서 축방향으로의 수축량이 거의 없어 건전한 접합이 이루어지지 않게 되며, 반대의 경우, 과입열로 인해 급격한 재료의 소모량을 초래하게 된다[16,17]. 이와 같은 공정변수의 제어를 통하여, 소성유동과 동적재결정의 정도(크기)가 결정되며, 이는 접합재의 미세조직 발달에 직결된다. 일반적으로 금속재료의 물성은 결정립의 크기, 상분포, 입계어긋남각 등에 의해 좌우되는데, 그 중 결정립 크기분포는 접합재의 물리적 성질(경도, 강도, 연성 등)의 전개에 가장 직접적인 영향을 미친다. 따라서, 접합공정의 변화를 통한 접합재의 미세조직 제어는 기계적 특성의 발달을 촉진시킬 수 있다.

마찰접합 공정은 마찰단계와 업셋단계로 구분되며, 마찰단계에서는 회전속도와 마찰압력에 의해 마찰열이 발생하며, 업셋단계에서 회전이 멈추고 업셋압력이 가해지면서 접합이 완료된다[10,11,18,19]. 마찰접합 공정에서 입열량은 계산식(1)과 같이 마찰열과 소성변형 작업을 포함하며, 마찰열은 회전속도와 마찰토크로 계산할 수 있으며, 추력과 burn-off rate 로 소성변형 작업을 계산할 수 있다. 하지만, 마찰토크 곡선과 burn-off rate 의 값이 필요하기 때문에, 계산식(1) 대신 기존에 제시되었던 계산식 중 에너지보존법을 이용한 입열량 계산식을 사용하여 계산하였다. 압력과 마찰접합 전·후의 길이 변화에 의해 주어진 입열량은 계산식(2)에 나타난 바와 같이 계산될 수 있다[20,21].

$$Q = 2 \times \pi \times N \times T + F \times V_{\delta} \quad (1)$$

$Q$ : Heat input [J/s]

$N$ : Friction speed [ $s^{-1}$ ]

$T$ : Friction torque [N·m]

$F$ : Thrust [N]

$V_{\delta}$ : burn-off rate [m/s]

$$J = A\delta \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_1 + P_2} \quad (2)$$

$J$ : Heat input [N·m]

$A$ : Sectional area of welded material [ $m^2$ ]

$\delta$ : Amount of material length change after welding; consumption length [m]

$P_1$ : Friction pressure [ $N/m^2$ ]

$P_2$ : Forge pressure [ $N/m^2$ ]

## 제 3장 실험방법

### 제 1절 마찰접합

#### 3.1.1 실험재료

이 연구에 사용된 재료는 기계, 건축, 항공 등의 부품소재에 주로 사용되는 기계 구조용 탄소강으로서, tube 형태의 냉간인발 된 AISI 1020 합금이었다. 이에 대한 화학조성과 기계적 특성을 표 1과 표 2에 각각 나타내었으며, 냉간인발 된 AISI 1020 합금의 전자후방산란회절(electron back scattering diffraction, EBSD) 분석결과(결정립계특성분포)를 그림 7에 나타내었다. 초기 AISI 1020 합금은 그림 7에 나타난 바와 같이, 입내(grain inner side)에 저각각입계(low angle grain boundary, LAGB)가 분포하는 것을 통하여 변형조직으로 구성됨을 확인하였다. 이 때 약 10 – 30  $\mu\text{m}$  크기의 결정립들이 인발방향으로 길게 연신된 형태로 분포하였고, 결정방위가 랜덤하게 분포하였다. 변형을 통해 수반된 결정립의 응력분포를 KAM (kernel average misorientation) map으로 확인한 결과, 그림 7(b)에 나타난 바와 같이, 입계와 입내에서 높은 angle 값을 나타내었다. 한편, IQ map + Phase map(그림 7(c))의 결과를 통하여, 초기 소재는 구조용 탄소강에서 주로 나타나는 단일 상( $\alpha$  ferrite) 구조임을 확인하였다.



탄소강은 그림 8에 나타난 바와 같이, 매우 다양한 상변태를 동반하는 것으로 확인되었다. 일반적으로 용융용접 시, 접합부가 완전히 용융될 정도의 큰 입열량이 동반되고, 용융 후 빠른 냉각이 이루어지는데, 이 과정에서 마르텐사이트 혹은 베이나이트 조직들이 형성될 수 있다. 이러한 상변태의 발생은 접합부의 강도와 경도를 증가시킬 수 있으나, 취성이 강하여 잘 부스러지기 쉽기 때문에, 접합재의 인성확보에 어려움이 있을 수 있다. 뿐만 아니라, 이와 같은 상변태의 발생은 접합재에 열영향부 형성을 동반하며, 이를 통하여 접합재의 물성이 저하되는 문제점을 야기하기도 한다. 따라서, 이러한 문제점들을 해소하기 위하여, 마찰접합의 최적공정조건이 요구되며, 그림 8의 Fe-Fe<sub>3</sub>C 상태도(phase diagram)를 통해 상변태를 제어하는 공정조건을 설정하였다.

표 1. AISI 1020 합금의 화학조성(wt%)

	Fe	C	Si	Mn	P	S
AISI 1020	Balance	0.25	0.35	0.30 - 0.90	0.04	0.04

표 2. AISI 1020 합금의 기계적 특성

	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
AISI 1020	380	510	15

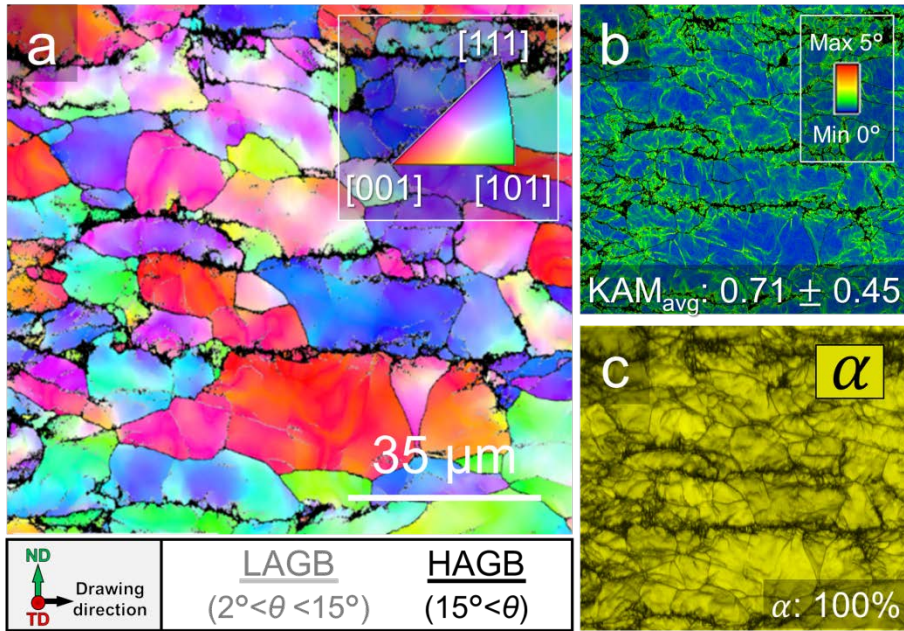


그림 7. 냉간인발 된 모재의 (a) IPF map, (b) KAM map과 (c) IQ + Phase map

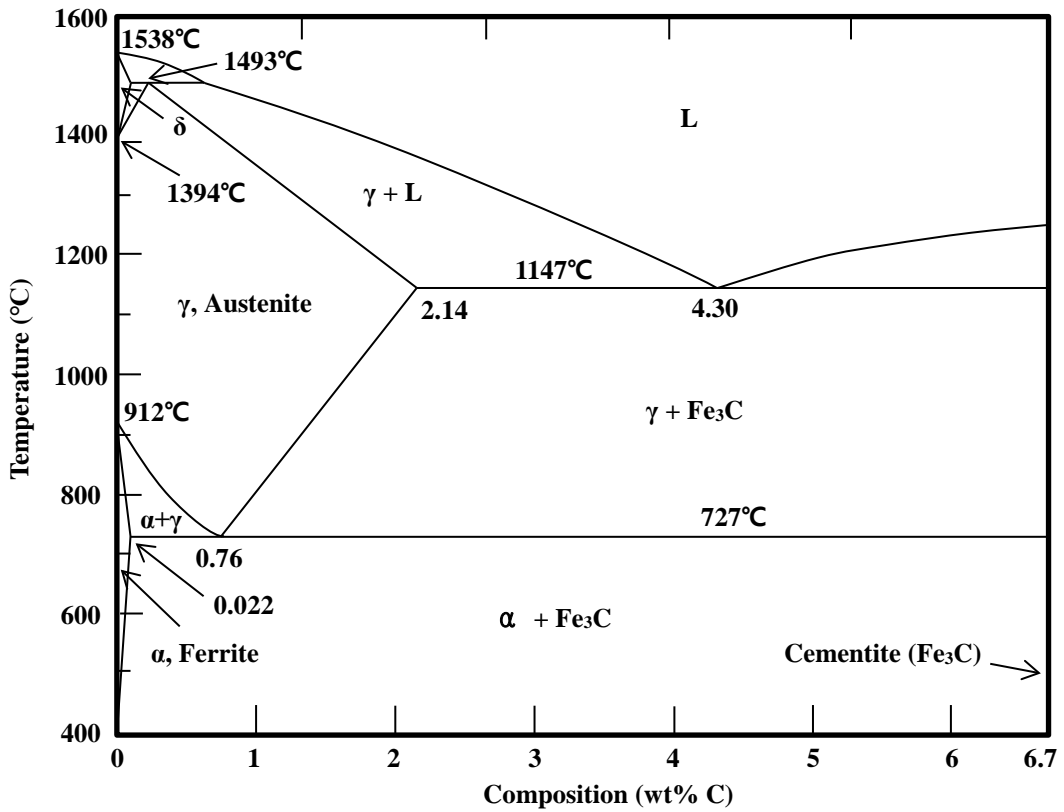


그림 8. Fe-Fe<sub>3</sub>C 이원계(binary system) 상태도

### 3.1.2 마찰접합 공정 장비와 조건

이 연구에서 사용된 마찰접합 장비와 재료의 제원을 그림 9 에 나타내었다. 마찰접합은 회전속도: 2,000 RPM, 최대추력: 137.2 kN, burn-off length: 0 – 99 mm 까지 제어가 가능한 브레이크 구동방식의 연속구동장비(FF-30 II -C, Nitto-Seiki™)로 수행하였다. 초기 재료는 외경 35 mm, 두께 5 mm 와 100 mm 길이의 Tube 로서, 그림 9(b)에 나타난 바와 같이, 하나는 스피들의 척에 다른 하나는 반대편 척에 고정시켜 마찰접합을 진행하였다. 이 때, 접합재에서 발현되는 미세조직과 기계적 특성의 전개양상을 평가하기 위하여, 회전속도와 마찰압력을 각각 2,000 RPM 과 30 MPa 로 고정한 채, 업셋압력(pressure 2, 30 – 50 MPa)과 burn-off length (1 – 5 mm)를 변수로 두어 접합하였다. 이 연구에서 도입된 마찰접합의 공정조건을 표 3 에 자세히 나타내었다.

표 3. 이 연구에서 도입된 마찰접합의 공정조건

	<b>Rotation Speed (RPM)</b>	<b>Pressure 1 (MPa)</b>	<b>Pressure 2 (MPa)</b>	<b>Burn-off length (mm)</b>	<b>전장 (mm)</b>
1	2,000	30	30	1	100
2				2	
3				3	
4				5	
5			40	1	
6				2	
7				3	
8				5	
9			50	1	
10				2	
11				3	
12				5	

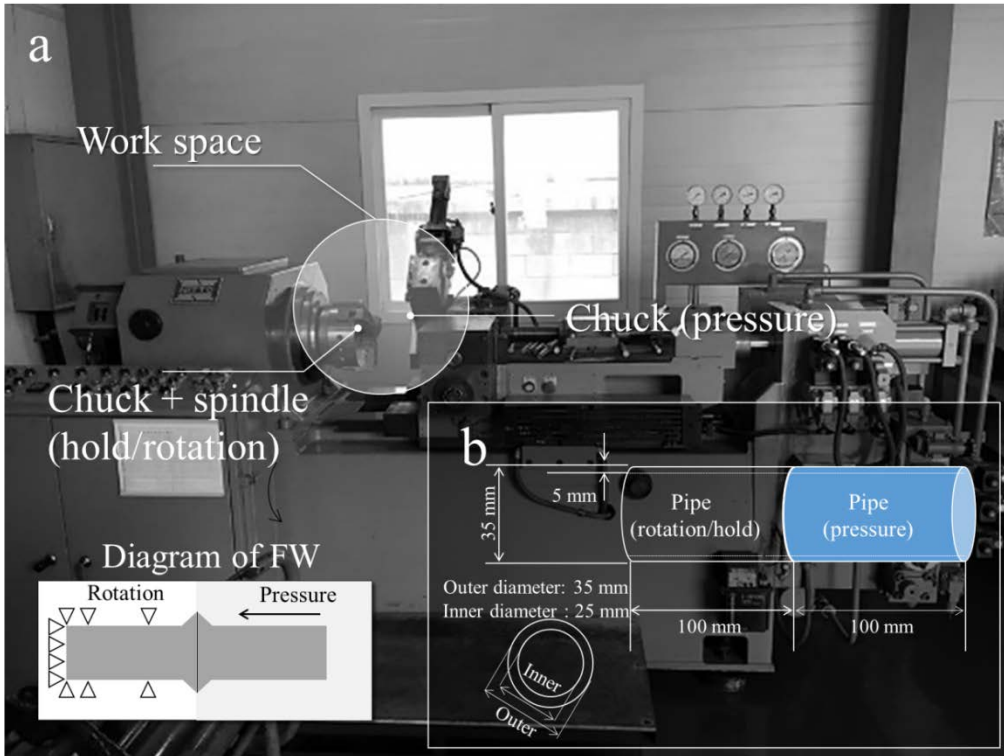


그림 9. 이 연구에서 사용된 (a) 마찰접합 장비와 (b) AISI 1020 합금의 제원

## 제 2절 미세조직 분석과 물성평가

### 3.2.1 광학현미경 분석

마찰접합부의 미세조직을 관찰하기 위해 그림 10의 광학현미경(OM, LEICA/DM4500P)이 도입되었고, 절단기(Struers/labotom5)를 이용하여 그림 11에 나타난 바와 같이, 20 mm (l) × 5 mm (w)크기의 시험편으로 제작하였다. 이 후 자동성형기(Struers/Citopress-5)를 사용하여 마운팅 한 후, 샌드페이퍼와 연마포를 이용하여 시험편 표면을 경면으로 연마하였다. 연마 후, 실온에서 5 % Nital 용액을 사용하여 시험편의 표면을 부식하였고, 이에 대하여 결정립 크기, 형상, 상의 분포, 석출물 등의 미세조직을 관찰하였다.





그림 10. 접합재의 미세조직 관찰에 사용된 광학현미경

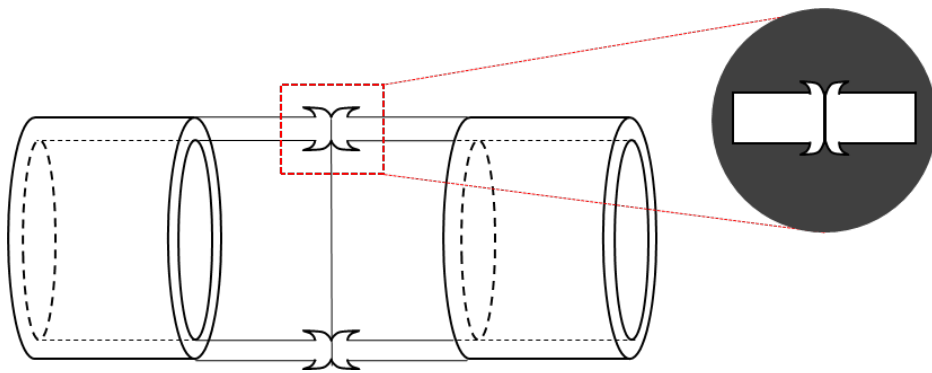


그림 11. 마찰접합 된 소재의 미세조직 관찰 영역

### 3.2.2 전자후방산란회절법 분석

전자후방산란회절(EBSD) 분석은 가속 전자가 시료에 주입되었을 때, 반사되는 전자를 검출하여 재료의 방위를 측정하는 방법이다. EBSD 분석 중 IPF (invers pole figure) map 을 통해, 결정립의 크기, 형상과 방위를 분석하였으며, IQ (image quality) map 으로 결정립의 전위밀도의 차이를 분석하였다. 또한, KAM 은 측정점과 인접한 점들의 결정방위 차이를 나타내는 값인데, 이를 통해 결정립의 응력분포를 측정하였다. 이와 더불어, GOS (grain orientation spread) 분석을 통해 결정립 내 점들 사이의 평균 입계어긋남각을 계산한 후,  $3^\circ$  미만의 결정립들을 다각형-페라이트(polygonal ferrite, PF)로 결정하였으며, burn-off length 의 변화에 따른 PF 의 분율을 측정하였다. 추가적으로, Line Scan 을 통해 PF 와 침상-페라이트(acicular ferrite, AF) 같은 구조의 입계특성을 분석하였다. 이러한 분석을 위해, 시험편을 20 mm (l) × 2 mm (w)의 크기로 제작 후, 샌드페이퍼와 연마포로 시험편 표면을 경면연마하였다. 또한, 인장시험 시 관찰된 파단양상을 분석하기 위하여, 에너지 분산형 X 선 분광법(energy dispersive x-ray spectrometer, EDX)을 도입하였고, 이를 통하여 파단면의 형상, 석출물, 불순물 등을 평가하였다.

### 3.2.3 기계적 특성 평가

공정변수에 따른 접합부의 기계적 특성을 평가하기 위해, 그림 12 의 경도 시험기((Struers/Duramin-40)와 만능시험기(UTM, Zwick roell/Z250)가 도입되었다. 마이크로 비커스경도는 그림 13 에 나타난 바와 같이, 시험편 상단에서 1.6 mm 아래의 중앙부를 0.2 mm 간격으로 측정하였으며, 10 초간 1.96 N의 하중으로 압입하는 방식을 채택하였다. 이 때, 측정은 각각의 시험편에 대하여 12 회씩 진행하였고, 그 중 최대·최소값을 제외한 나머지에 대하여 평균값을 취하였다. 인장시험의 경우, 그림 14 의 ASTM-E8 (standard test methods for tension test of metallic materials) 규격에 의거하여 시험편을 제작하였고, 실온에서 10 mm/min의 속도로 인장하여, 접합재의 인장강도, 항복강도와 연신율을 평가하였다.

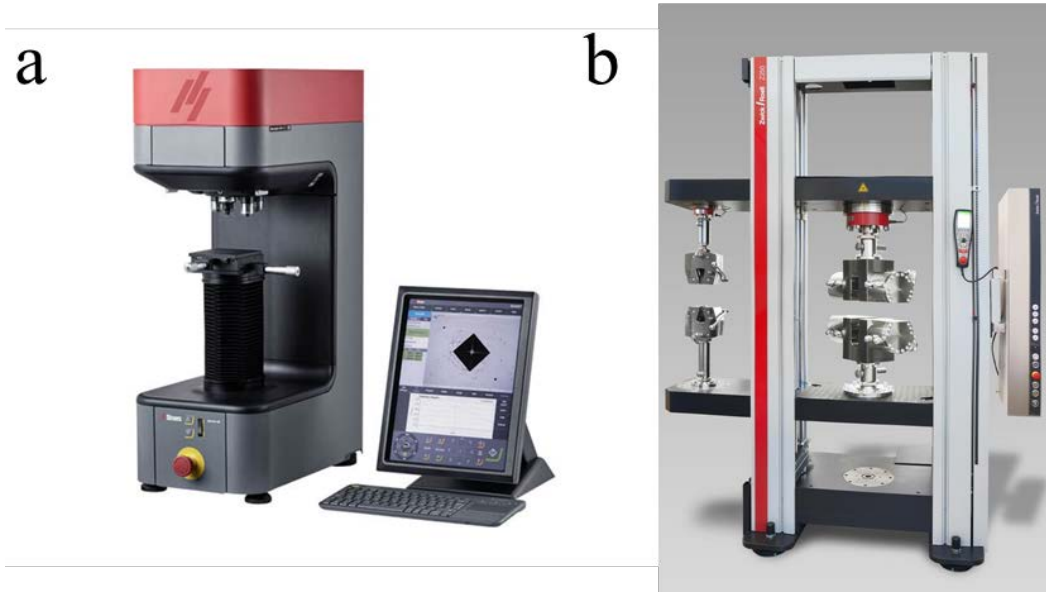


그림 12. 접합재의 기계적 특성 평가에 사용된 (a) 비커스 경도기와 (b) 만능시험기

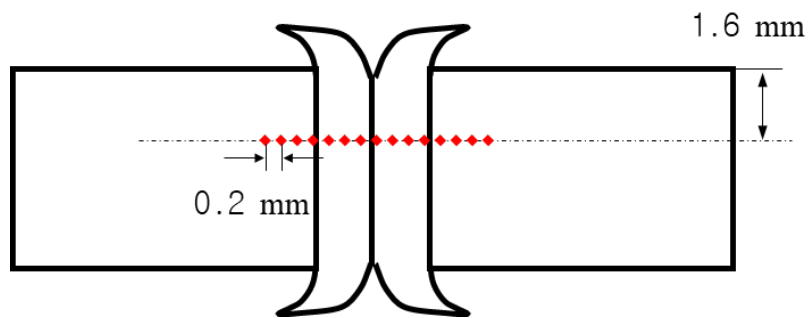


그림 13. 마찰접합 된 소재의 경도분포 측정 영역

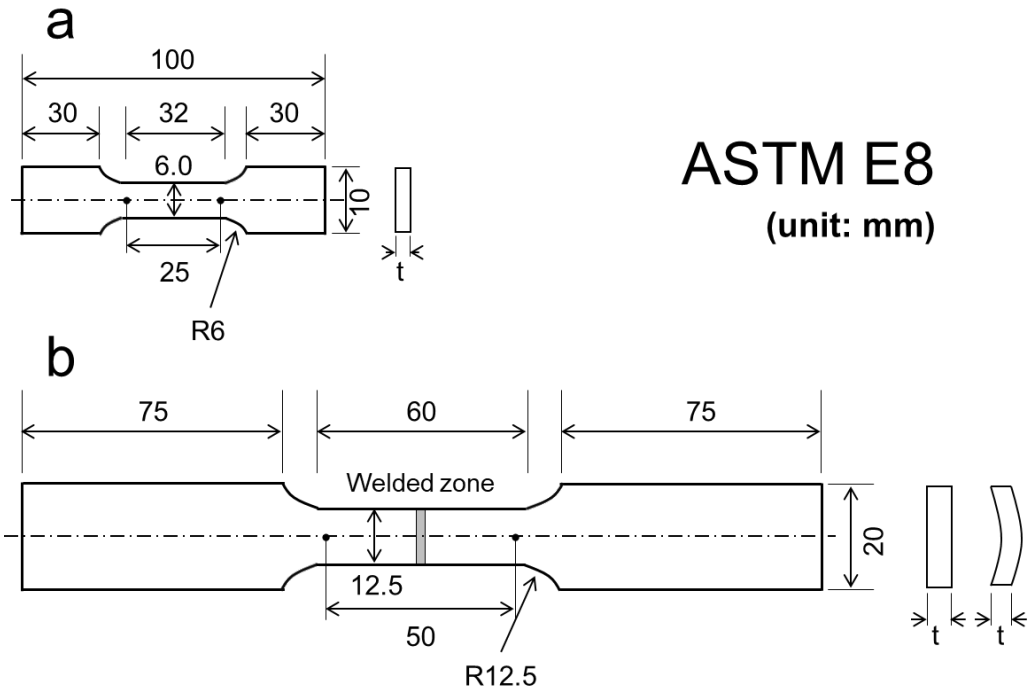


그림 14. 이 연구에서 사용된 인장시험편 규격. (a) 모재의 sub-size 시험편과 (b) 마찰접합된 소재의 시험편 규격

## 제 4장 실험결과와 고찰

### 제 1절 마찰접합 된 소재의 외관 형상

#### 4.1.1 Top view

업셋압력과 burn-off length 에 변화를 주어 AISI 1020 합금을 접합하였고, 이 과정에서 관찰된 접합재의 외관형상(top view)를 그림 15 에 나타내었다. AISI 1020 tube 에 대하여 마찰접합을 적용한 결과, 모든 조건에서 crack, void, under-cut 등과 같은 결함이 발견되지 않고 건전하게 접합된 것을 확인하였다. 실험결과 중 업셋압력의 증가는 그림 15 에 나타난 바와 같이, 접합부의 flash 형성을 촉진시킴으로써, 압력의 증가에 비례하여 flash 의 양 또한 증가하는 양상을 보였다. 뿐만 아니라, burn-off length 의 증가 역시 업셋압력의 증가에서 관찰되었던 양상과 동일하게 flash 의 양이 점차 증가하는 양상을 나타내었다. 그러나 burn-off length 의 증가가 업셋압력의 증가에 비해 flash 의 양을 증가시키는데 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 그림 15 에 나타난 바와 같이, flash 가 증가함에 따라 접합부의 열에 의한 산화현상이 더욱 커지는 것을 확인할 수 있었다. 그 결과, 마찰접합 동안 업셋압력보다 burn-off length 의 영향을 더욱 크게 받았음을 확인하였으며, 공정조건에 따른 소모량을 그림 16 에 나타내었다.

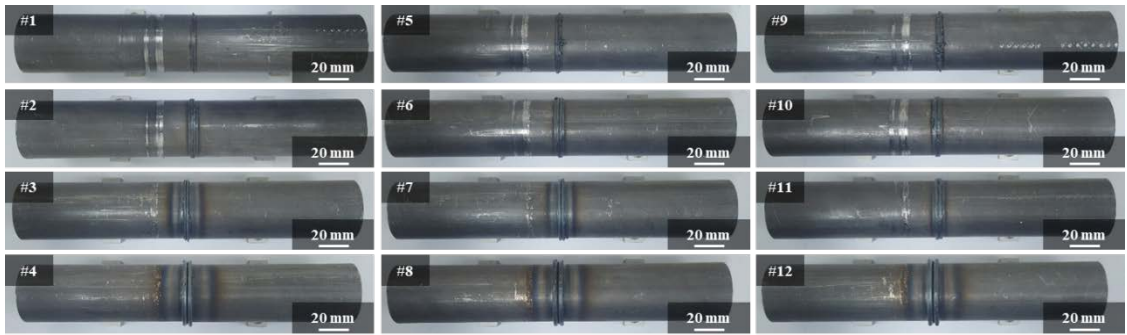


그림 15. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 Top view

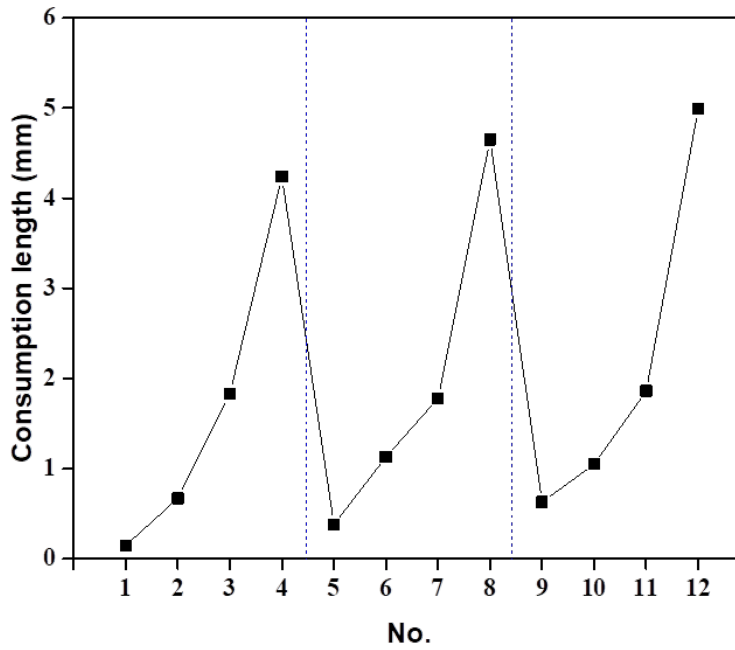


그림 16. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 소모량 변화 양상

## 제 2절 미세조직 평가

### 4.2.1 광학현미경 분석

업셋압력과 burn-off length의 변화에 따른 AISI 1020 Tube의 미세조직을 관찰하였으며, 이 과정에서 관찰된 접합부의 광학현미경 결과를 그림 17 - 그림 19에 나타내었다. 실험결과, #1을 제외한 모든 조건에서 주목할만한 결함 없이 건전하게 접합되었고, burn-off length의 증가에 비례하여 접합부의 폭과 결정립 크기가 발달되는 경향을 보였다. 반면, 업셋압력의 증가에 비례하여 접합부의 폭과 결정립 크기가 감소하는 경향을 보였다. 업셋압력 30 MPa에서 burn-off length 1 mm로 접합된 소재는 그림 17(#1)에 나타난 바와 같이, 마찰열과 압력에 의해 침상으로 변형된 페라이트와 펄라이트 조직들이 1 - 10  $\mu\text{m}$  크기로 분포하고 있었고, 접합부는 약 265  $\mu\text{m}$ 로 확인되었으며, 미 접합 영역이 발견되었다. Burn-off length를 2 mm로 증가시킨 소재의 경우, 그림 17(#2)에 나타난 바와 같이, 침상의 결정립들이 모재 대비 미세한 약 5 - 25  $\mu\text{m}$ 의 크기로 분포하고 있었으며, 접합부는 500  $\mu\text{m}$  이상으로 확장됨을 확인하였다. Burn-off length를 3과 5 mm로 증가시킨 소재는, 그림 17(#3과 #4)에 나타난 바와 같이, 5 - 35와 5 - 50  $\mu\text{m}$  크기의 침상 페라이트와 펄라이트 결정립들로 구성되었으며, 모재 대비 조대화 된 것을 확인할 수 있었다.



업셋압력을 40 MPa로 고정한 채, burn-off length를 1, 2, 3과 5 mm로 변화시킨 AISI 1020 tube의 미세조직 전개양상을 그림 18 에 나타내었다. Burn-off length가 1 mm로 접합된 소재는 그림 18(#5)에 나타난 바와 같이, 초기 모재 대비 미세한 침상의 페라이트와 펄라이트 조직들이 1 – 15  $\mu\text{m}$  크기로 분포하고 있었으며, 접합부는 약 330  $\mu\text{m}$  크기였다. Burn-off length가 2 mm로 접합된 소재의 경우, 그림 18(#6)에 나타난 바와 같이, 침상의 결정립들이 5 – 20  $\mu\text{m}$  크기로 분포하고 있었고, burn-off length 1 mm 소재에 비해 결정립이 조대화 되었지만, 초기 모재 대비 미세한 것을 확인할 수 있었으며, 접합부의 크기 또한 최소 500  $\mu\text{m}$  크기 이상으로 확장되었다. Burn-off length 3과 5 mm로 접합된 소재는 그림 18(#7과 #8)에 나타난 바와 같이, 5 – 30과 5 – 50  $\mu\text{m}$ 의 크기의 결정립들로 구성되었으며, 모재 대비 조대화된 것을 확인할 수 있었다.

업셋압력을 50 MPa로 증가시키고 burn-off length를 1, 2, 3과 5 mm로 변화시킨 AISI 1020 tube의 미세조직 전개양상을 그림 19에 나타내었다. Burn-off length 1 mm의 경우 그림 19(#9)에 나타난 바와 같이, 침상의 결정립들이 1 – 15  $\mu\text{m}$  크기로 분포하고 있었으며, 접합부는 약 365  $\mu\text{m}$  크기였다. Burn-off length를 2 mm로 증가시킨 소재는, 그림 19(#10)에 나타난 바와 같이, 접합부가 500  $\mu\text{m}$  이상으로 확장되었고, 5 – 15  $\mu\text{m}$  크기의 침상 결정립들이 분포하고 있었으며, 모재 대비 미세한 것을 확인할 수 있었다. Burn-off length 3과 5 mm로 접합된 경우, 그림 19(#11과 #12)에 나타난 바와 같이, 5 – 30과 5 – 50  $\mu\text{m}$  크기의 침상의 페라이트와 펄라이트 결정립들이 분포하고 있었다.

AISI 1020 tube 에 대한 마찰접합의 적용은 접합부의 결정립 미세화를 초래하였다. 초기 모재의 결정립 크기는 약 15 – 16  $\mu\text{m}$  였으며, burn-off length 1 과 2 mm 의 조건에서 접합부의 평균 결정립 크기는 모재 대비 약 50%까지 미세화 된 것을 확인할 수 있었다. 반면 burn-off length 3 과 5 mm 의 소재는 모재 대비 평균 결정립 크기가 약 77%까지 조대화 된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 과열로 인한 냉각 중 회복, 재결정 그리고 결정립 성장 과정에서 나타나는 전형적 결과로 판단된다. 일반적으로 마찰접합은 동적재결정이 충분히 일어날 수 있는 온도( $0.5 - 0.6T_m$ )에서 이루어지는데, 마찰접합 과정 중 발생한 큰 변형량과 마찰열이 지속적인 전위의 축적과 재결정 핵생성을 반복적으로 촉진시키기 때문에, 모재 대비 미세한 결정립을 얻을 수 있다[22–25]. 한편, 접합과정 중 인가되는 입열량은 접합재의 결정립 크기에 직접적인 영향을 미치는데, 이 실험에서도 나타난 바와 같이, 입열량의 증가(식(2) 참조)와 비례하여 결정립 크기가 증가함을 확인하였다.

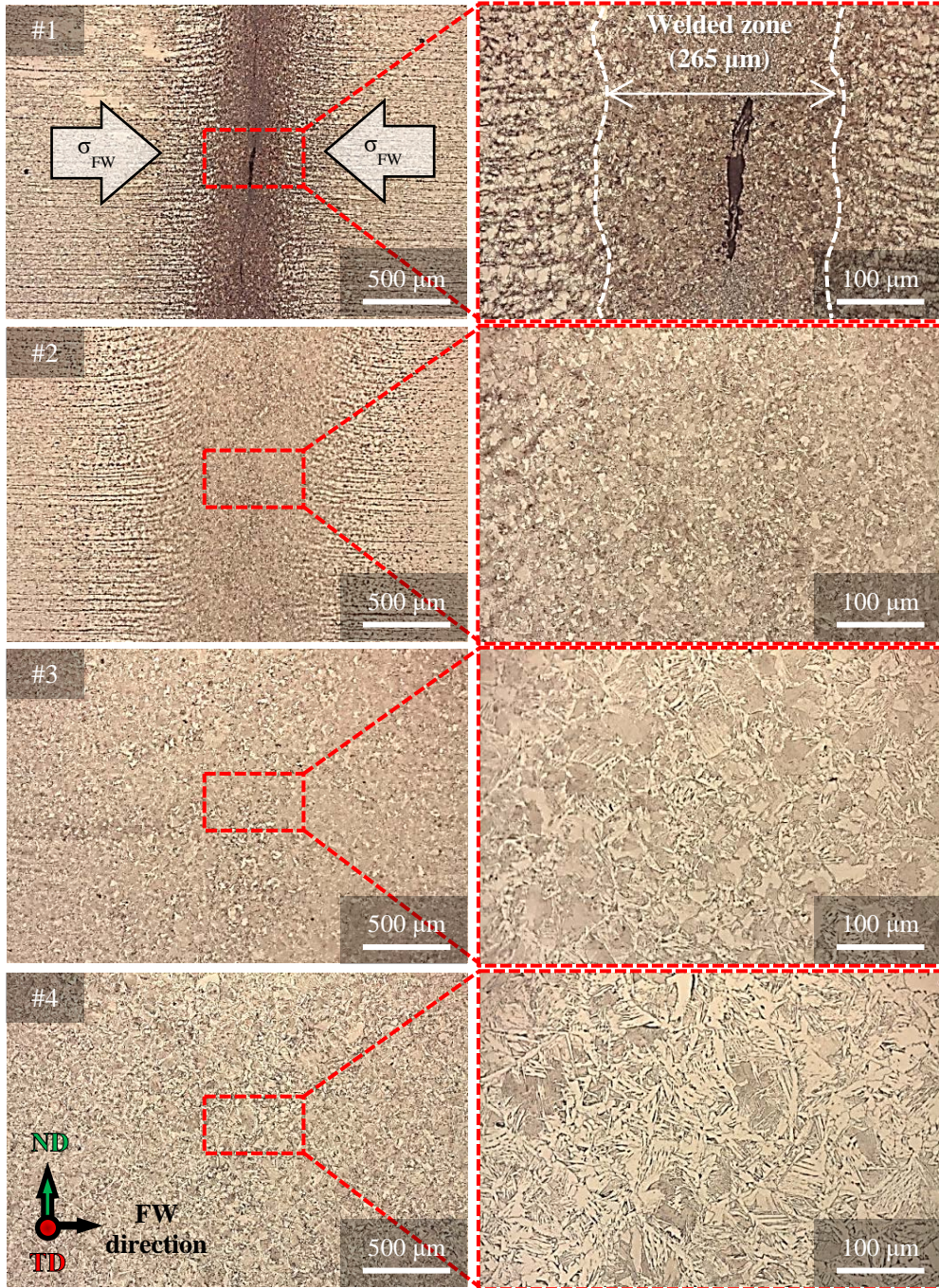


그림 17. 업셋압력 30 MPa에서 다양한 burn-off length로 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 광학 조직. (1) 1 mm, (2) 2 mm, (3) 3 mm와 (4) 5 mm

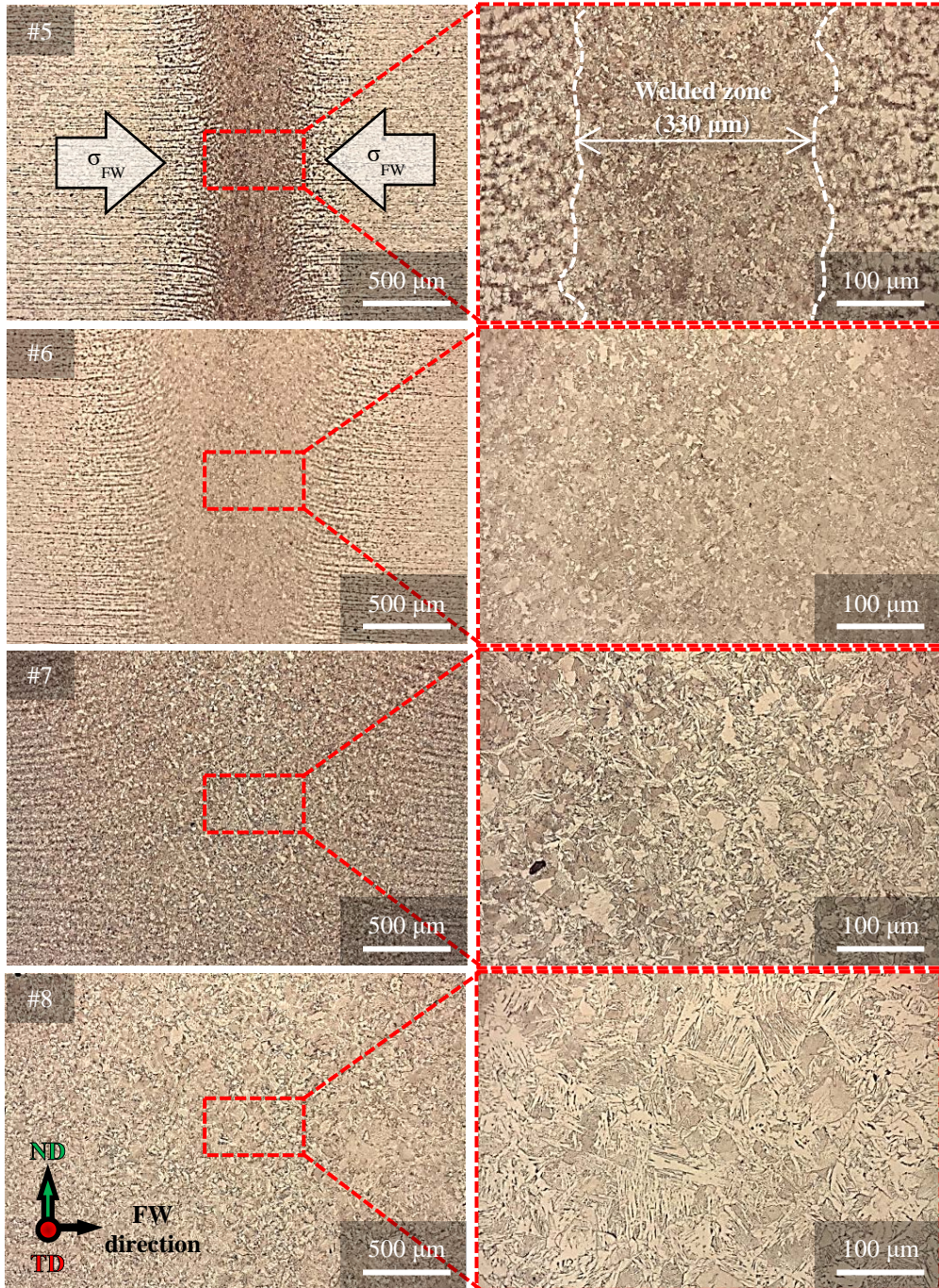


그림 18. 업셋압력 40 MPa에서 다양한 burn-off length로 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 광학 조직. (1) 1 mm, (2) 2 mm, (3) 3 mm와 (4) 5 mm

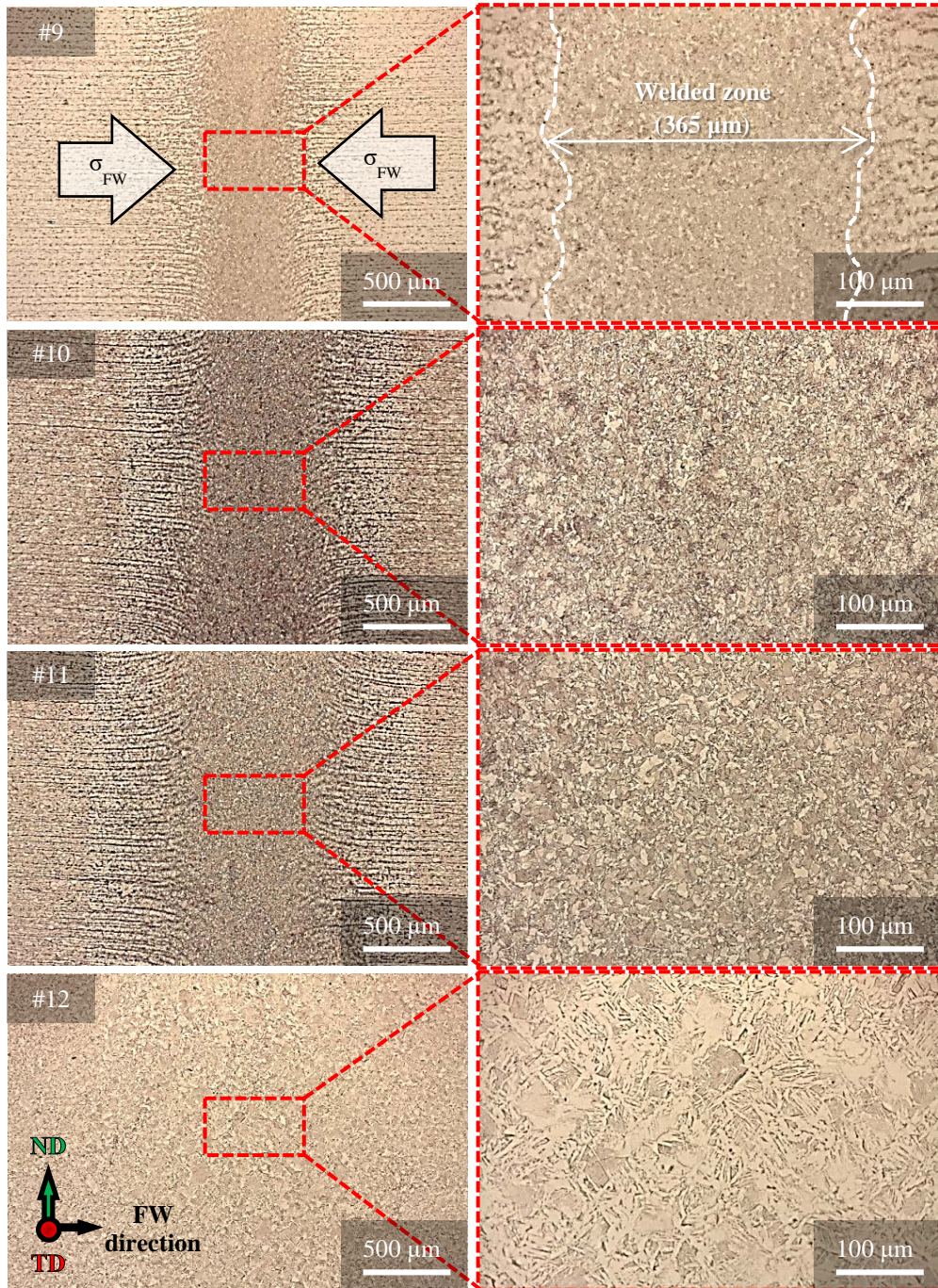


그림 19. 업셋압력 50 MPa에서 다양한 burn-off length로 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 광학 조직. (1) 1 mm, (2) 2 mm, (3) 3 mm와 (4) 5 mm

## 4.2.2 결정립계특성분포 전개양상

마찰접합 과정 중 burn-off length 의 변화에 따른 접합부의 상변태, 결정립계특성, 방위분포 등과 같은 결정립계특성분포를 분석하기 위해 EBSD 분석을 도입하였고, 압축압력을 40 MPa 로 고정한 채, burn-off length 에 변화를 주어 마찰접합 한 소재의 분석 결과를 그림 20(a)에 나타내었다. Burn-off length 1 mm 로 접합된 소재는 침상의 결정립들이 1 - 15  $\mu\text{m}$  크기로 분포하고 있었으며, 평균 결정립 크기는 6  $\mu\text{m}$  로 나타났다. Burn-off length 2 와 5 mm 의 경우, 결정립 크기가 5 - 20 과 5 - 50  $\mu\text{m}$  크기로 분포하였고, 평균 결정립 크기는 각각 8 과 28  $\mu\text{m}$  로 확인되었다. 따라서 미세조직 관찰에서도 확인한 바와 같이, burn-off length 가 증가함에 따라 평균 결정립 크기가 점차 증가하는 양상을 재차 확인하였다. 한편, IQ map (image quality)의 결과를 통하여(그림 20(b)) burn-off length 가 증가함에 따라 black and white zone 의 분율이 확연히 달라지는데, 이는 입열량 증가에 의한 전위밀도의 감소로 동반된 결과라 할 수 있다. 그 중 burn-off length 1 mm 의 소재에서 가장 낮은 IQ 값을 나타내었는데, 이는 그림에서도 확인된 바와 같이, 낮은 입열량으로 인한 결정립 조대화의 억제(즉, 더욱 미세한 입자)를 통하여, 결정립계의 분포가 더 많기 때문에 나타난 결과라 할 수 있다.

KAM (kernel average misorientation) map 은 접합재의 응력분포 변화 추이를 관찰하기 위하여 도입되었고, 그 결과를 그림 20(c)에 나타내었다. IQ map 에서 확인했던(그림 20(b)) black zone 은 white zone 에 비해 상대적으로 높은 KAM 값을 나타내었으며, burn-off length 가 증가함에 따라, 평균 KAM 값은 1.17 에서 0.53 으로 감소하였다. 한편, GOS (grain orientation spread) map 을 통하여 침상의 결정립들을 분석하였으며, 그 결과를 그림 20(d)에 나타내었다. PF 는 모든 결정립계가 고경각입계(high angle grain boundary, HAGB)로 구성되어 있었고, 입자 내부의 전위밀도가 매우 낮았으며, burn-off length 가 증가함에 따라 PF 의 분율이 감소함을 확인하였다. 또한, PF 와 AF 같은 구조의 입계특성을 분석하기 위해, Line Scan 을 수행한 결과, burn-off length 1 과 2 mm 로 접합된 소재의 경우, AF 로 간주되는 영역의 입계어긋남각은 매우 미세하고 불규칙하게 나타났다. 이에 반해, burn-off length 5 mm 소재는 sub-boundaries 와 lath boundaries 시스템 구조로 확인되었다.

마찰접합 된 AISI 1020 tube 의 미세조직 전개양상을 분석한 결과, 용융용접에서 주로 형성되는 마르텐사이트와 베이나이트 조직이 관찰되지 않았으며, 이를 통해 접합과정 중 상변태가 동반되지 않았음을 확인하였다. 통상적으로 탄소강의 상변태 발생온도가 약 1200 - 1350°C임을 고려하면(그림 8 의 Fe-Fe<sub>3</sub>C 상태도 참조), 접합이 그 이하의 온도에서 이루어졌음을 알 수 있다[8,23,26-29]. 결과적으로 초기 모재가 페라이트( $\alpha$ )와 오스테나이트( $\gamma$ )가 공존하는 영역까지 온도 상승 후, 냉각되는 과정에서 오스테나이트가 미세한 페라이트와 펄라이트로 변태되었으며, 이때 입내의 석출물 혹은 개재물을 핵으로 하여 페라이트가 불균일하게 생성되어 강도가 높고 인성이 우수한 AF 를 형성하였다.

일반적으로 재료가 소성변형을 수반하면, 재료 내부에 변형을 구배(strain gradient)가 존재하여 기하학적 필요 전위(geometrically necessary dislocation, GND)가 발생하게 되며, 이를 통해, KAM 수치가 증가하는 것으로 보고된 바 있다[30-32]. 이러한 맥락에서, 짧은 burn-off length 의 미세조직 전개양상은 압력에 직접적인 영향을 받았으며, 긴 burn-off length 의 미세조직 발달은 열이 지배적인 요인임을 확인하였다. 따라서, 높은 KAM 값은 실제로 높은 강도의 전위밀도를 가지며, burn-off length 5 mm 로 접합된 소재의 KAM 값은 과도한 입열에 의해 전위가 해소되었기 때문에 급격히 감소한 것으로 판단된다.

GOS map 과 Line Scan 은 다각형 페라이트(PF), 베이나이트 페라이트(BF), 침상 페라이트(AF)와 과립형 베이나이트(GB)의 다양한 미세조직을 판별하는 방법으로 사용되고 있다[33]. 보고된 바에 따르면, AF 는 결정립 크기가 5 - 15  $\mu\text{m}$  인 것으로서, 결정립 크기와 전위밀도 측면에서 Widmanstätten 조직과 구별된다[34-36]. 이러한 이유로, 상대적으로 전위밀도가 높게 나타났던 burn-off length 1 과 2 mm 접합재의 침상 결정립들은 AF 로 판단된다. Burn-off length 5 mm 의 접합재는 기존 연구들과 유사하게 sub-boundaries 와 lath boundaries 를 가진 베이나이트 시스템 구조로 판단된다[37-39]. 결과적으로 burn-off length 1 과 2 mm 의 조건이 AF 의 발달을 유도하였는데, 이를 통해 치밀한 미세조직을 확보할 수 있는 최적조건이라고 판단된다.



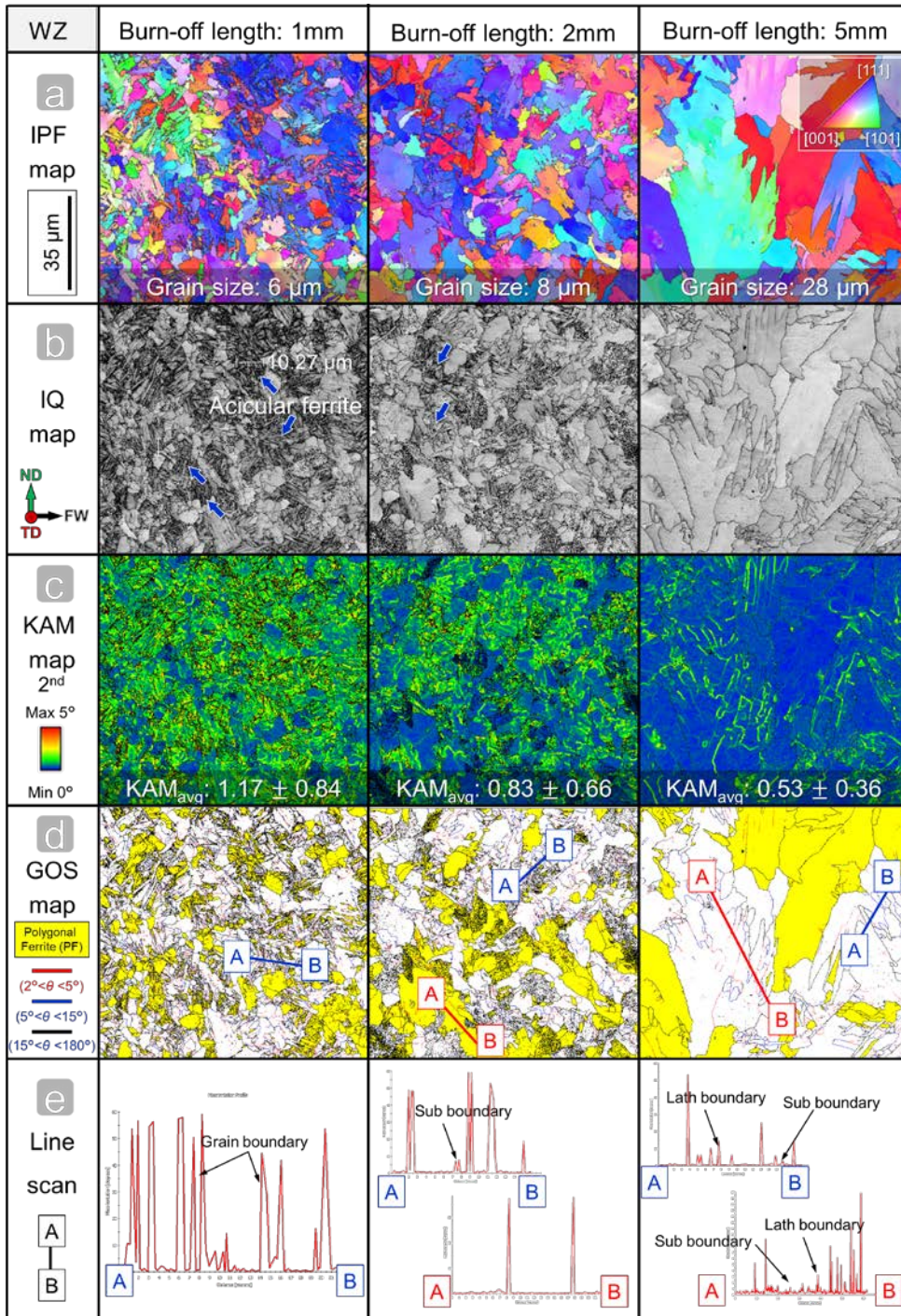


그림 20. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 접합부 EBSD 분석 결과. (a) IPF map, (b) IQ map, (c) KAM map, (d) GOS map과 (e) Line Scan

## 제 3절 기계적 특성 평가

### 3.1.1 비커스 경도시험

Burn-off length 의 변화에 따라 접합된 소재의 기계적 특성을 분석하기 위해, 비커스 경도시험이 수행되었으며, 그 결과를 그림 21 에 나타내었다. 모재는 200 – 220 Hv 의 경도분포를 보였으며, burn-off length 1 mm 로 접합된 소재는 그림 21(a)에 나타난 바와 같이, 모재 대비 약 42% 증가한 300 Hv 를 나타내었다. Burn-off length 가 2 mm 로 증가된 소재의 경우, 그림 21(b)에 나타난 바와 같이, 모재 대비 약 14% 증가한 240 Hv 의 경도값을 나타내었다. 그러나, burn-off length 5 mm 의 소재는 그림 21(c)에 나타난 바와 같이, 모재 대비 약 14% 감소한 180 Hv 의 경도값을 보였다. 이를 통해, burn-off length 가 증가함에 따라 접합부의 경도분포가 감소하는 것을 확인하였다.

금속의 소성변형에 대한 능력은 전위의 이동에 의존적이며, 전위의 유동성을 억제하면 기계적인 강도는 향상된다. 결정립계에 의한 강화는 결정립계에 전위가 축적되어 재료의 강도가 증가하는 것을 의미하며, 이를 그림 22 에 나타내었다. 전위의 이동과 결정립계의 관계는 그림 22 에 나타난 바와 같이, A 결정립의 슬립면(Slip plane)에서  $a_1$  슬립방향(Slip direction)으로 이동하던 전위가 B 결정립을 만나면 이전의 슬립방향과 다르기 때문에 이동을 방해 받게 되고, 그 결과 결정립계에 전위가 축적된다[40]. 결정립계가 많을수록 즉, 결정립의 크기가 작을수록 전위의 이동이 억제되며, 재료의 강도가 증가한다. 일반적으로 다결정 재료의 경우, 평균 입자 크기에 대한 경도 의존성은 다음과 같이 Hall-Petch 관계식에 의해 설명될 수 있다[41]:

$$Hv = Hv_0 + kd^{-1/2} \quad (2)$$

여기서, Hv 는 다결정 금속의 경도, d 는 결정립 크기,  $Hv_0$  와 k 는 각각 상수이다. 이러한 경도시험 결과는 그림 21(d)에 나타난 바와 같이, Hall-Petch 관계식에 의한 입자 크기의 경향과 직접적인 상관관계가 있음을 보여준다. 따라서 결정립의 미세화에 의해 경도값이 증가함을 이 연구에서도 분명하게 확인되었다.

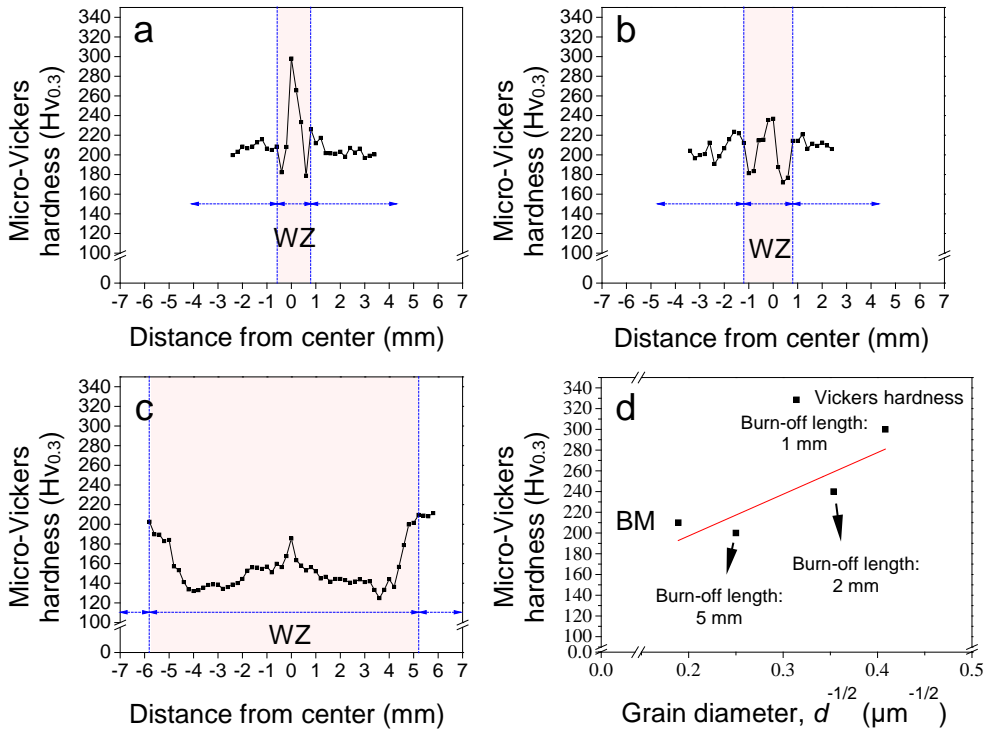


그림 21. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 경도분포. (a) 1 mm, (b) 2 mm, (c) 5 mm와 (d) 경도와 결정립 크기의 관계

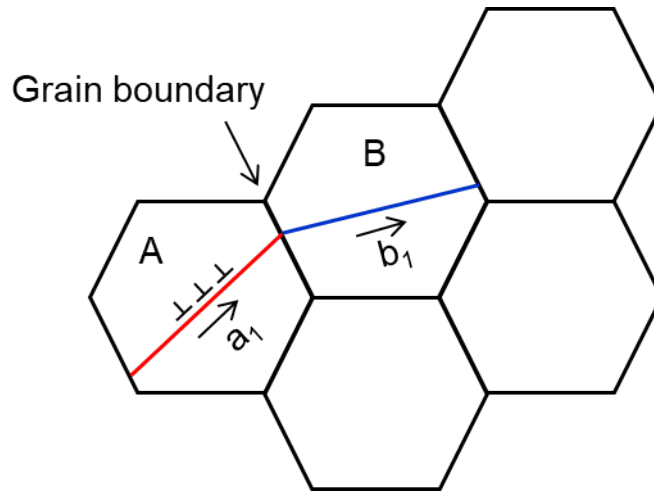


그림 22. 전위의 이동과 결정립계의 관계에 대한 모식도

### 3.1.2 인장시험

초기 모재와 엽셋압력을 40 MPa 로 고정한 채 burn-off length 의 변화에 따라 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 인장특성을 그림 23 에 나타내었다. 초기 모재의 인장강도, 항복강도와 연신율은 각각 531, 419 MPa 과 13%로 확인되었다. Burn-off length 1 과 2 mm 로 접합된 소재의 인장강도는 각각 551 과 554 MPa 로 초기 모재 대비 약 4% 증가하였으나, burn-off length 5 mm 로 접합된 소재의 인장강도는 모재 대비 약 6% 감소한 497 MPa 로 확인되었다. 항복강도의 경우, 1 과 2 mm 로 접합된 소재는 모재의 항복강도보다 약 25% 증가한 536 과 540 MPa 이었으며, 5 mm 조건은 모재 대비 약 18% 증가한 495 MPa 로 확인되었다. 또한, 모든 조건에서 연신율은 모재 대비 소폭 감소하였지만, 모재와 유사한 10 – 15%로 나타내었다.

인장시험편의 파단양상을 분석하기 위해 인장시험편의 Top view 를 그림 24 에 나타내었다. 모재는 전체적으로 균일하게 연신되었고, 시험편의 중앙부에서 파단이 일어난 것을 확인할 수 있었다. Burn-off length 1 과 2 mm 로 접합된 소재는 그림 24 에 나타난 바와 같이, 접합부가 아닌 모재 부분에서 파단되는 양상을 보였으나, 5 mm 로 접합된 소재의 경우, 접합부에서 파단된 것을 확인할 수 있었다. Burn-off length 1 과 2 mm 로 접합된 소재의 접합부는 결정립이 모재 대비 현저히 미세화되었기 때문에, 인장시험 진행 시 모재 부분에서 우선적인 변형이 유발되었고, 그 결과, 모재 부분에서 파단이 발생하였다. 따라서 접합부의 미세한 결정립들이 상대적으로 모재 보다 더 큰 강도를 갖게 되어 인장강도와 항복강도의 향상을 초래한 것으로 판단된다.

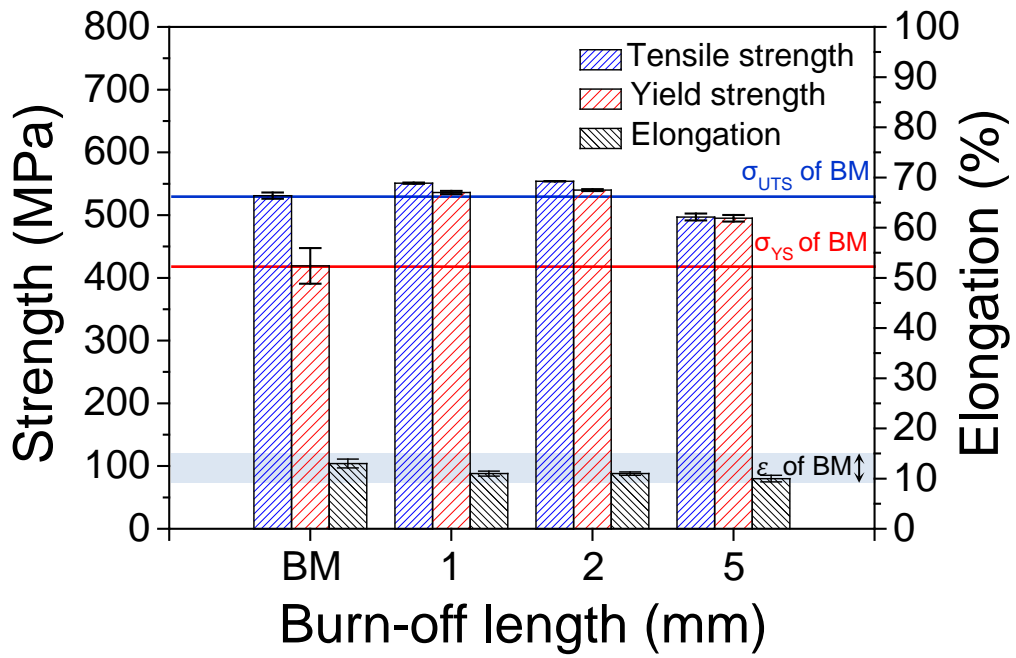


그림 23. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 인장특성

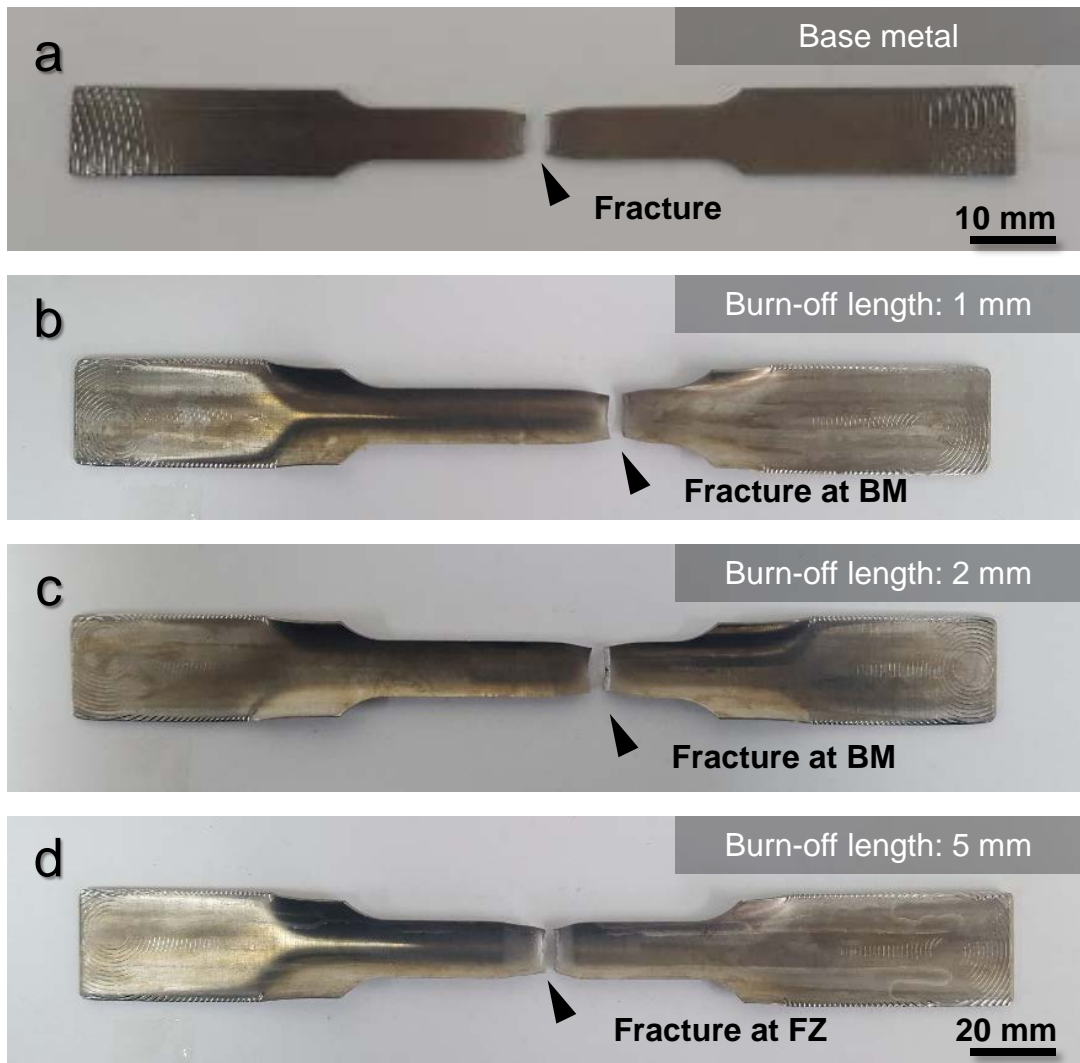


그림 24. 마찰접합 된 AISI 1020 합금의 인장시험편 Top view. (a) 모재, (b) 1 mm, (c) 2 mm와 (d) 5 mm

### 3.1.3 파단면 분석

초기 모재와 압셋압력을 40 MPa 로 고정한 채 burn-off length 를 달리하여 마찰접합한 AISI 1020 합금의 인장시험 파단면 이미지를 그림 25 에 나타내었다. Burn-off length 1 과 2 mm 의 기계적 특성이 유사하여 1 mm 시험편만 나타내었으며, 모든 시험편에서 그림 25 의 (a - c)에 나타난 바와 같이, 연신의 증거로 단면적의 비율 감소가 명확하게 나타났다. 그 결과, 인장강도와 연신율이 상대적으로 감소된 5 mm 소재는 다른 소재에 비해 더욱 거친 파단면을 나타내었다. 또한, 덩플의 형상과 크기를 관찰한 결과, 모재부에서 파단된 시험편은 그림 25(d - f)에 나타난 바와 같이, 상대적으로 더 큰 크기를 갖는 것으로 확인되었다. 특히, burn-off length 5 mm 로 접합된 소재는 취성파단의 원인으로 인식될 수 있는 벽개면과 석출물이 부분적으로 관찰되었다.

파단면을 보다 명확하게 분석하기 위해 EDX 분석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 26 에 나타내었다. 모재에서 파단된 시험편은 그림 26(a 와 b)에 나타난 바와 같이, 탄소와 산소가 균질하게 분산되어 있었다. 이와 달리, 접합부에서 파단된 시험편은 그림 26(d 와 e)에 나타난 바와 같이, 응축된 탄소와 산소 혼합물이 검출되었다. 특히, burn-off length 5 mm 의 시험편에서 관찰된 과열 조직은 탄화물의 석출로 연결되었고, 이를 통해 기지조직과 탄화물간의 계면에서 파단이 발생한 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과는 접합 시 인가된 큰 입열량에 기인하며, 이로 인해 기지와 탄화물 간의 계면이 부정합 관계를 이루므로, 취성파괴로 이어진 결과라 할 수 있다. 따라서, 파단면에서 발달된 벽개면과 탄화물은 연신율 감소에 직접적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

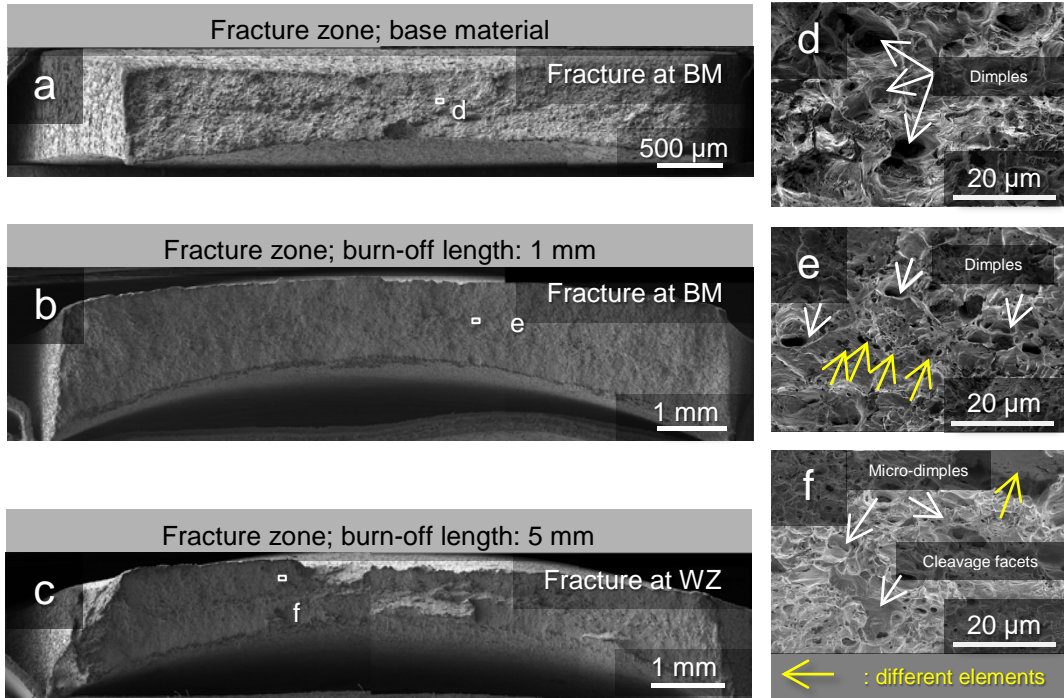


그림 25. SEM으로 관찰된 모재((a)와 (d))와 마찰접합((b), (e), (c)와 (f)) 된 소재의 파단면 이미지.



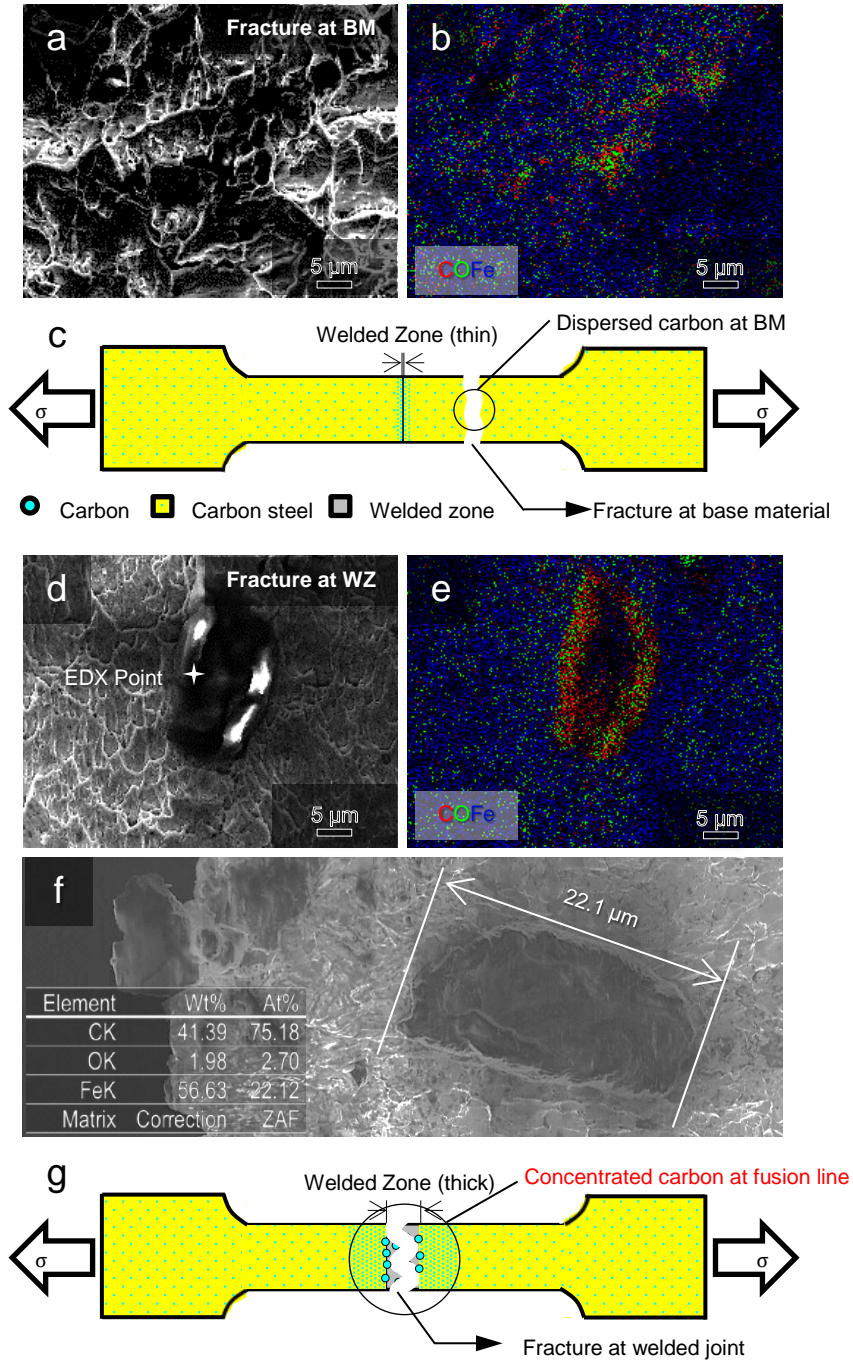


그림 26. 파단면의 EDX 분석 결과. (a) SEI: 모재에서 발생한 파단, (b) EDX element face mapping, (c) 모재에서의 파단 모식도, (d) SEI: 접합부에서 발생한 파단, (e) EDX element face mapping, (f) Point 분석결과와 (g) 접합부에서의 파단 모식도

## 제 5장 결론

고성능 유압실린더 개발을 위하여 고상접합기술에 대한 연구를 수행하였으며, 그 과정에서 관찰되는 미세조직 전개양상과 기계적 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. AISI 1020 tube 에 마찰접합을 도입한 결과, 외관상 용융용접에서 종종 관찰되는 void, crack, blow hole 등과 같은 결함의 발생 없이 건전하게 수행되었다. 뿐만 아니라, 접합 시 인가되는 특유의 낮은 입열량이 접합부의 상변태와 접합재의 변형을 충분히 억제함으로써, 접합재의 내부 또한 우수한 건전성이 확인되었다.
2. 마찰접합의 도입은 동적재결정을 유발함으로써, 접합부의 결정립 미세화를 촉진하였는데, burn-off length 가 감소함에 따라 결정립이 더욱 미세화 되었다. 이와 같은 현상은 저입열의 공정에서 잘 형성되는 침상-페라이트(AF)의 분율과 연관이 있음을 확인하였다.
3. 접합부의 결정립 미세화는 접합재의 기계적 특성을 향상시켰다. 그 결과, 접합부의 경도분포가 모재 대비 약 42% 증가하였고, 인장시험 시 접합부가 아닌 모재부에서 파단 됨으로써, 접합재의 물성이 모재 대비 우수함을 확인하였다. 따라서 AISI 1020 tube 에 대한 마찰접합의 적용은 미세조직발달에 기초한 기계적 특성의 향상에 효과적임을 확인하였고, 이를 통해 고성능 유압실린더의 제작 시 마찰접합기술이 우수함을 입증하였다.

## 참고문헌

- [1] Fitch Solutions, Worldwide Medical Devices Market Factbook, 2019.
- [2] 한국보건산업진흥원, 의료기기산업 분석 보고서, 2019.
- [3] J.M. Antonini, A.B. Lewis, J.R. Roberts, D.A. Whaley, Pulmonary effects of welding fumes: Review of worker and experimental animal studies, *Am. J. Ind. Med.* 43 (2003) 350–360. <https://doi.org/10.1002/ajim.10194>.
- [4] J.W. Elmer, T.A. Palmer, W. Zhang, B. Wood, T. DebRoy, Kinetic modeling of phase transformations occurring in the HAZ of C-Mn steel welds based on direct observations, *Acta Mater.* 51 (2003) 3333–3349. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00049-1).
- [5] Y. Lee, J. Lim, Y. Moon, Mechanical characteristics of low-carbon-steel pipe bent by local induction heating with small bending radii, *Mater. Trans.* 53 (2012) 847–852. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201123>.
- [6] N.R.J. Hynes, P.S. Velu, Effect of rotational speed on Ti-6Al-4V-AA 6061 friction welded joints, *J. Manuf. Process.* 32 (2018) 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.02.014>.
- [7] 대한용접접합학회, 용접·접합 편람 III 공정 및 열가공, 2007.
- [8] W.M. Thomas, P.L. Threadgill, E.D. Nicholas, Feasibility of friction stir welding steel, *Sci. Technol. Weld. Join.* 4 (1999) 365–372. <https://doi.org/10.1179/136217199101538012>.
- [9] E.H. Kim, H. Fujii, J.H. Kim, K.H. Song, Microstructure and mechanical properties of friction-welded S20C and SCM415H steels, *Mater. Trans.* 59 (2018) 503–506. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2017354>.
- [10] P. Li, J. Li, X. Li, J. Xiong, F. Zhang, L. Liang, A study of the mechanisms involved in initial friction process of continuous drive friction welding, *J. Adhes. Sci. Technol.* 29 (2015) 1246–1257. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1022499>.
- [11] J.T. Xiong, J.L. Li, Y.N. Wei, F.S. Zhang, W.D. Huang, An analytical model of steady-state continuous drive friction welding, *Acta Mater.* 61 (2013) 1662–1675. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.042>.
- [12] M. Sahin, H.E. Akata, T. Gulmez, Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding, *Mater. Charact.* 58 (2007) 1033–1038. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.09.008>.
- [13] Í. Kirik, N. Özdemýr, Effect of process parameters on the microstructure and mechanical properties of friction-welded joints of aisi 1040/aisi 304l steels, *Mater. Tehnol.* 49 (2015) 825–832. <https://doi.org/10.17222/mit.2014.235>.

- [14] C. Misirli, M. Sahin, H. Kuscü, Temperature determination of St-Al joints during friction welding, *Adv. Mater. Res.* 463–464 (2012) 1538–1542.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.463-464.1538>.
- [15] T.N. Prasanthi, C. Sudha, Ravikirana, S. Saroja, N. Naveen Kumar, G.D. JanakiRam, Friction welding of mild steel and titanium: Optimization of process parameters and evolution of interface microstructure, *Mater. Des.* 88 (2015) 58–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.141>.
- [16] P. Sathiya, S. Aravindan, A. Noorul Haq, Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 31 (2007) 1076–1082. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0285-5>.
- [17] H. Ates, M. Turker, A. Kurt, Effect of friction pressure on the properties of friction welded MA956 iron-based superalloy, *Mater. Des.* 28 (2007) 948–953.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.09.015>.
- [18] M.R. Kelly, S.R. Schmid, D.C. Adams, J. Fletcher, R. Heard, Experimental investigation of linear friction welding of AISI 1020 steel with pre-heating, *J. Manuf. Process.* 39 (2019) 26–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.038>.
- [19] R. Winiczenko, Effect of friction welding parameters on the tensile strength and microstructural properties of dissimilar AISI 1020-ASTM A536 joints, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 84 (2016) 941–955. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7751-5>.
- [20] T. Sawai, K. Ogawa, H. Yamaguchi, H. Ochi, Y. Yamamoto, Y. Suga, Evaluation of joint strength of friction welded carbon steel by heat input, *Weld. Int.* 16 (2002) 432–441.  
<https://doi.org/10.1080/09507110209549556>.
- [21] J. HoShin, B. KookSoo, Friction Weldability of Grey Cast Iron - by the Concept of Friction Weld Heat Input Parameter-, *J. Weld. Join.* 32 (2014) 95–101.  
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.3.95>.
- [22] K. Colligan, Material flow behavior during friction stir welding of aluminum, *Weld. J. (Miami, Fla.)*. 78 (1999) 229-s.
- [23] F.D. Duffin, A.S. Bahrani, Frictional behaviour of mild steel in friction welding, *Wear.* 26 (1973) 53–74. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(73\)90150-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90150-6).
- [24] A. Rollett, F. Humphreys, G.S. Rohrer, M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena: Second Edition*, 2004. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044164-1.X5000-2>.
- [25] S. Suwas, N.P. Gurao, Crystallographic texture in materials, *J. Indian Inst. Sci.* (2008).
- [26] N. T.C., W. D.C., A thermal and microstructure evolution model of direct-drive friction welding of plain carbon steel, *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.* 37 (2006) 275–292.

- [27] H.H. Cho, S.H. Kang, S.H. Kim, K.H. Oh, H.J. Kim, W.S. Chang, H.N. Han, Microstructural evolution in friction stir welding of high-strength linepipe steel, *Mater. Des.* 34 (2012) 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.010>.
- [28] M.D. Tumuluru, Parametric Study of Inertia Friction Welding for Low Alloy Steel Pipes., *Weld. J.* (Miami, Fla). 63 (1984) 5–10.
- [29] H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata, K. Nogi, Friction stir welding of carbon steels, *Mater. Sci. Eng. A.* 429 (2006) 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.118>.
- [30] W. Heinz, R. Pippan, G. Dehm, Investigation of the fatigue behavior of Al thin films with different microstructure, *Mater. Sci. Eng. A.* 527 (2010) 7757–7763. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.046>.
- [31] E. Demir, D. Raabe, N. Zaafarani, S. Zaeferrer, Investigation of the indentation size effect through the measurement of the geometrically necessary dislocations beneath small indents of different depths using EBSD tomography, *Acta Mater.* 57 (2009) 559–569. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.09.039>.
- [32] M. Calcagnotto, D. Ponge, E. Demir, D. Raabe, Orientation gradients and geometrically necessary dislocations in ultrafine grained dual-phase steels studied by 2D and 3D EBSD, *Mater. Sci. Eng. A.* 527 (2010) 2738–2746. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.004>.
- [33] D.H. Lee, S.S. Sohn, H. Song, Y. Ro, C.S. Lee, S. Lee, B. Hwang, Effects of Start and Finish Cooling Temperatures on the Yield Strength and Uniform Elongation of Strain-Based API X100 Pipeline Steels, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 49 (2018) 4536–4543. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4738-5>.
- [34] D. Loder, S.K. Michelic, C. Bernhard, Acicular Ferrite Formation and Its Influencing Factors-A Review, *J. Mater. Sci. Res.* 6 (2016) 24. <https://doi.org/10.5539/jmsr.v6n1p24>.
- [35] D.W. Kim, S.S. Sohn, W.K. Kim, K.S. Kim, S. Lee, Study of Bauschinger effect of acicular ferrite and polygonal ferrite through ex-situ interrupted bending tests in API X80 linepipe steels, *Sci. Rep.* 8 (2018) 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34046-x>.
- [36] L. Cheng, K.M. Wu, New insights into intragranular ferrite in a low-carbon low-alloy steel, *Acta Mater.* 57 (2009) 3754–3762. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.04.045>.
- [37] S.I. Lee, J. Lee, B. Hwang, Microstructure-based prediction of yield ratio and uniform elongation in high-strength bainitic steels using multiple linear regression analysis, *Mater. Sci. Eng. A.* 758 (2019) 56–59. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.113>.
- [38] S.S. and J.E.I. P.F. Chaveriat, G.S. Kim, Low Carbon Steel Weld Metal Microstructures: The Role of Oxygen and Manganese, *J. Mater. Eng.* 9 (1987) 253–267.
- [39] S. BHOLE, Interface properties in friction welding : a technical note, *Weld. J.* 70 (1991) 168.

- [40] kim Gyeong-woo, A study on the properties of friction welding of STK 400 alloy, Chosun University, 2018.
- [41] D. Du, R. Fu, Y. Li, L. Jing, J. Wang, Y. Ren, K. Yang, Modification of the Hall-Petch equation for friction-stir-processing microstructures of high-nitrogen steel, Mater. Sci. Eng. A. 640 (2015) 190–194. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.05.069>.

## 감사의 글

어느덧 2년간의 석사학위를 마무리하고 새로운 시작을 앞두고 있습니다. 석사학위 동안 연구는 물론 여러 방면에서 도움을 주셨던 모든 분들께 진심으로 감사의 인사를 드립니다. 2년이라는 시간 동안 인생에서 소중한 인연들을 만들 수 있었고, 가치 있는 경험을 할 수 있었습니다. 특히, 공학적인 지식뿐만 아니라, 인생을 살아가는데 있어서 필요한 지혜와 인간관계 등의 세세한 부분까지 배우고 느낄 수 있는 시간이 되었던 것 같습니다.

먼저 석사학위 기간 동안 많은 지도와 격려를 통해 이 자리까지 이끌어주신 송국현 교수님께 감사의 인사를 올립니다. 교수님께서 학문에 임하는 자세와 열정, 그리고 가르침은 경험이 많이 부족했던 저를 앞으로 나아가는데 있어서 가장 중요한 지침이 되었습니다. 교수님께서 보여주셨던, 그리고 지도해주셨던 모든 것들을 마음속에 간직하며 앞으로 더 나은 사람이 되도록 노력하겠습니다. 또한, 제가 석사학위를 잘 마무리 할 수 있도록 도와주신 박정수 교수님께 감사 드립니다. 박정수 교수님께서 저에게 베풀어 주신 은혜 잊지 않겠습니다. 이 자리를 빌어 다시 한번 감사의 인사를 드립니다. 그리고, 제가 처한 상황을 잘 이해해 주시고 바쁘신 와중에도 학위논문을 심사해주신 김창래 교수님과 조흥현 교수님께도 감사의 인사를 올립니다. 또한, 학부생과 대학원생을 위해 매주 광주로 오시는 정우현 박사님께도 감사의 인사를 올립니다. 항상 학생들을 먼저 생각해주는 모습에서 감동을 받았고, 특히 교수님께서 해주신 진심 어린 조언은 저를 더욱 성숙한 사람으로 만들어 주었습니다. 진심으로 감사 드립니다.

석사학위를 받기까지 동고동락하며, 많은 도움을 주었던 에너지공정연구실의 만형 동진이형, 가장 오랜 시간 함께 했던 경우형, 그리고 우리 막내 용수에게도 감사의 인사를 전합니다. 그리고, 고민이나 어려운 점이 있을 때 연락 드리면 항상 웃으시면서 많은 도움을 주신 임용덕 박사님께도 깊은 감사의 인사를 드립니다.

짧은 시간이었지만, 많은 가르침과 조언을 해주신 한국원자력연구원의 천영범 박사님께 감사 드립니다. 그리고, 한국원자력연구원에서 같이 생활하면서 여러 가지

고민을 나누고 서로 의지했던 연두형에게도 감사의 인사를 전합니다.

마지막으로 항상 저를 믿고 응원해주는 우리 가족들에게 감사의 인사를 올립니다. 묵묵히 지켜봐 주시는 아버지, 항상 걱정해주시는 어머니 그리고 응원해주는 동생 수진이, 감사 드리고 사랑합니다. 이 글을 빌어 저에게 도움을 주신 모든 분들께 다시 한번 감사의 인사를 드립니다.

2020년 12월 김 영 규 올림