



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](#)

2018년 8월

석사학위 논문

STK 400 합금의 마찰접합
특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 경 우

STK 400 합금의 마찰접합 특성에 관한 연구

A study on the properties of
friction welding of STK 400 alloy

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 경 우

STK 400 합금의 마찰접합 특성에 관한 연구

지도교수 송 국 현

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 4월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 경 우

김경우의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 특임교수 방한서 (인)
위 원 조선대학교 교수 방희선 (인)
위 원 조선대학교 조교수 송국현 (인)

2018년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	IV
List of Tables	VI
Abstract	VII
제 1장 서론	1
제 1절 연구배경과 목적	1
제 2장 이론적 배경	4
제 1절 고상접합	4
2.1.1 고상접합	4
2.1.2 마찰접합	6
가. 마찰접합의 원리	6
나. 마찰접합의 공정변수와 그 영향	8
다. 마찰접합의 특징	9
제 3장 실험방법	11
제 1절 마찰접합	11
3.1.1 실험재료	11
3.1.2 마찰접합 장비와 공정조건	14

제 2절 미세조직 평가	16
3.2.1 광학현미경 분석	16
3.2.2 전자후방산란회절법 분석	17
제 3절 기계적 특성 평가	18
3.3.1 비커스경도시험	18
제 4장 실험결과	20
제 1절 마찰접합재의 외관	20
4.1.1 Top View	20
4.1.2 공정조건별 소모량	21
제 2절 미세조직전개	22
4.2.1 결정립 분포양상	22
4.2.2 결정립계특성분포 전개양상	27
가. Inverse pole figure	27
나. 결정립 크기 분포	32
다. Misorientation angle 분포	37
제 3절 기계적 특성	42
4.3.1 경도분포 전개양상	42
4.3.2 인장강도 전개양상	47

5장 . 고찰 49
 제 1절 공정조건과 미세조직전개 49
 제 2절 미세조직발달에 따른 기계적 특성 변화 52

6장 . 결론 54

참고문헌 55

List of Figures

그림 1. 현재 국내에서 사용되고 있는 건설가설재의 외관과 구성부품.	2
그림 2. `16 년도 산업별 사망자 현황과 산업별 재해자 현황.	3
그림 3. 건설 분야에서 기술개발이 시급한 항목.	3
그림 4. 고상접합 종류.	5
그림 5. 마찰접합기술의 기본 공정.	6
그림 6. 시간에 따른 공정변수의 변화.	7
그림 7. 마찰접합재의 온도와 변형량에 따른 영역구분.	10
그림 8. Fe-C 이원계 평형상태도.	13
그림 9. 이 연구에서 사용된 STK 400 합금 PIPE의 제원.	13
그림 10. 마찰접합을 위해 사용된 마찰접합기와 부속품.	15
그림 11. 미세조직 관찰을 위해 사용된 광학현미경과 미세조직 관찰영역.	16
그림 12. 기계적 특성평가를 위해 도입된 비커스 경도계와 마찰접합 된 소재의 경도 측정영역.	19
그림 13. 이 연구에서 사용된 인장시험편 규격.	19
그림 14. 다양한 공정조건으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 Top View.	20
그림 15. 공정조건에 따른 소모량의 변화양상.	21
그림 16. 업셋압력 15 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 미세조직분포.	24
그림 17. 업셋압력 20 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 미세조직분포.	25
그림 18. 업셋압력 25 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 미세조직분포.	26
그림 19. 업셋압력 15 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 Inverse pole figure map.	29
그림 20. 업셋압력 20 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 Inverse pole figure map.	30

그림 21. 업셋압력 25 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 Inverse pole figure map.	31
그림 22. 업셋압력 15 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 결정립 크기분포.	34
그림 23. 업셋압력 20 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 결정립 크기분포.	35
그림 24. 업셋압력 25 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 결정립 크기분포.	36
그림 25. 업셋압력 15 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 입계어긋남각 분포.	39
그림 26. 업셋압력 20 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 입계어긋남각 분포.	40
그림 27. 업셋압력 25 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 입계어긋남각 분포.	41
그림 28. 업셋압력 15 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 경도분포.	44
그림 29. 업셋압력 20 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 경도분포.	45
그림 30. 업셋압력 25 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 경도분포.	46
그림 31. 마찰접합 된 STK 400 합금의 인장특성.	47
그림 32. 마찰접합 된 STK 400 합금의 인장시험 결과(외관 형상).	48
그림 33. STK 400합금의 온도 변화에 따른 상변화.	49
그림 34. 동일 업셋시간 하에 업셋압력 변화에 따른 결정립 크기 변화양상.	51
그림 35. 전위 이동에 대한 결정립계(결정립크기)의 영향.	52

List of Tables

표 1. 서포트 규격별 크기와 허용하중.	3
표 2. 용융용접과 마찰접합의 특성 비교.	10
표 3. STK 400 합금의 화학조성.	12
표 4. STK 400 합금의 물리적 성질.	12
표 5. 이 연구에서 도입된 마찰접합 공정조건.	14

ABSTRACT

Kim, Gyeong-Woo

Advisor : Prof. Song, Kuk-Hyun, Ph.D.

Department of Welding and Joining

Science Engineering, Graduate School
of Chosun University

We evaluate the properties of solid-state-welded STK400 steel tube in terms of the relationship between microstructures and mechanical properties. As a solid-state-welding process, the friction welding which is suitable for tube and rod type metals was introduced in this study. Prior to this, STK400 steel tube with a diameter of 60.5 mm, which has a thickness of 3.3 and 2.2 mm, was prepared by length of 170 and 70 mm, and friction welding was conducted at a rotation speed of 2,000 rpm and upset time of 3 - 7 sec., respectively. To analyse the grain boundary characteristic distributions (GBCDs) such as grain size, shape, misorientation and phase distributions for the welded materials, electron backscattering diffraction (EBSD) method was introduced. As a result, the application of friction welding on STK 400 alloy led to the sound weld without any weld defects such as crack, distortion, fracture and so on. In addition, the welded zone consists of fully equiaxed grains due to dynamic recrystallization occurred by friction heat and metallic flow during welding. These refined grains achieved the significantly enhanced mechanical properties such as microhardness and yield and tensile strengths. Consequently, Vickers microhardness and yield and tensile strengths are increased to 10, 12 and 30% relative to the base material, respectively. In particular, all the tensile tested specimens showed the fracture aspect at the base material zone not at welded zone, which means the soundly welded state at all conditions.

제 1 장 서 론

제 1절 연구배경과 목적

건설가설재는 구조물을 완성하기 위해 임시 혹은 보조적으로 사용하는 부재로서, 구조물의 건설뿐만 아니라 건설자재의 낙하, 구조물의 붕괴, 작업자의 낙상 등의 건설 재해의 방지목적으로 사용된다. 이와 같은 건설가설재는 그림 1에 나타난 바와 같이 상·하부 support, screw와 base plate로 구성되어 있으며, 각각의 부분품을 용접하여 완제품으로 제작하고 있다. 따라서 작업현장의 안전성 확보를 위하여, 용접부의 건전성이 반드시 요구되며, 이를 목적으로 선진국에서는 다양한 접합공정들이 개발되고 있다. 한편, '16년 산업별 재해사망과 재해자의 분포를 분석한 결과, 그림 2에 나타난 바와 같이, 건설업에서 발생한 재해의 수가 타 산업에 비해 압도적으로 높게 나타났다. 그중 가설재의 파괴나 붕괴로 인한 낙상사고가 가장 큰 원인 중 하나인데, 이는 파이프 서포트의 용접불량에 기인하는 것으로 보고된 바 있다.[1, 2]

가설재 부품 중 파이프 서포트는 콘크리트 중량, 거푸집 자중과 작업하중을 지지함으로써, 가설물 안전에 가장 핵심적인 역할을 한다. 이들 부품은 표 1에 나타난 바와 같이 그 크기에 따라 V1, V2, V3, V4, V5와 V6의 여섯 종류로 나뉘며, 이 중 V1, V2, V3와 V4가 한국산업안전공단에서 인증한 규격품으로 사용되고 있다. 이와 같이 파이프 서포트는 한국 공업규격 KS F 8001에 의거하여 규정품이 제시되어 있는데, 부품의 안정성 확보를 위해 ‘가설기자재 성능점검규격’을 만족해야만 사용이 가능하다.[3] 기술 선진국인 미국이 1961년부터 1982년까지 22년간 발생한 85건의 거푸집 붕괴 사건을 조사한 결과, 72% 이상이 콘크리트 타설 중에 발생한 것으로 확인되었다. 이의 대부분이 파이프 서포트에 의한 것으로서, 가설재의 안정성 확보를 위해 그림 3에 나타난 바와 같이, piping 제조기술이 가장 시급하게 요구된다고 조사된 바 있다.

기존 국내에서 사용되고 있는 파이프 서포트는 KS F 8001의 규격을 따르고 있는데, 서포트 간 그리고 서포트와 플레이트 간 접합 시 C02용접과 같은 용융용접기술을 권고하고 있다.[3] 그러나 용융용접은 금속을 녹여서 접합하는 기술이기 때문에, 접합부에서 주조직과 같은 유형의 미세조직이 발달하게 되어, 접합부의 물성이 모재 대비 열악해지는 문제점이 발생하고 있다. 뿐만 아니라, 특유의 높은 입열량으로 인하여 부품 소재의 열변형이나 용접결함을 유발할 가능성이 크며, 흠가스의 발생으로 환경적인 문제도 발생하고 있다.[4, 5] 특히, 건설가설재도 내식성을 고려하여 아연도금강관을 사용하고 있는데, 이 소재에 대해 용융용접을 도입할 경우, 흠가스 발생이 더욱 크며, 열변형 또한 제어하기 힘든 단점이 있다.[6] 따라서 용융용접 대비 입열량이 현저히 적어 부품소재의 결함과 변형을 제어할 수 있는 고상접합의 도입이 절실하며, 가설재가 원형의 파이프라는 것을 고려하면 마찰접합 적용이 적합하다고 판단된다.

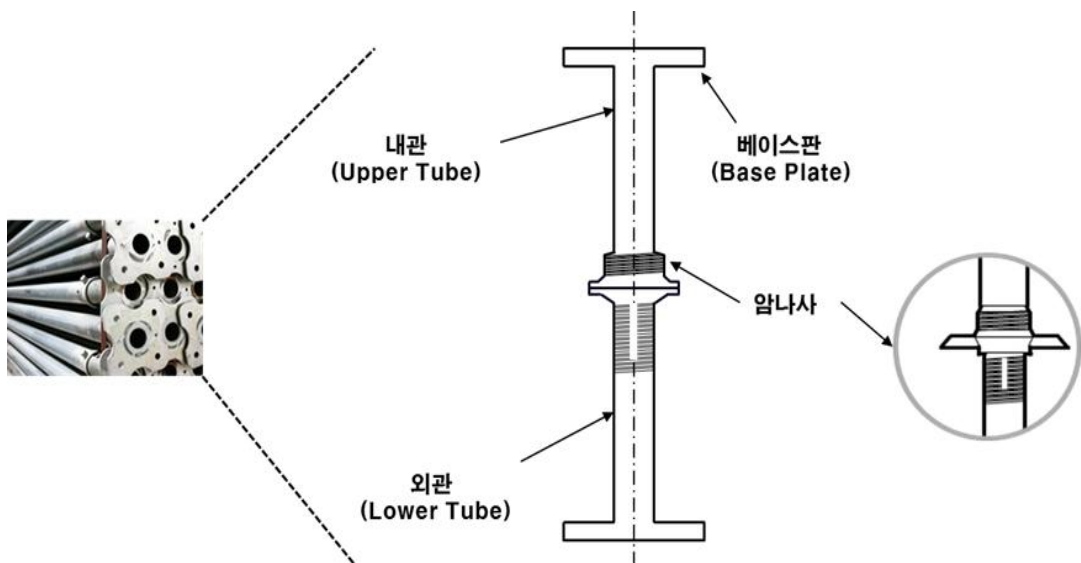


그림 1. 현재 국내에서 사용되고 있는 건설가설재의 외관과 구성부품.

표 1. 서포트 규격별 크기와 허용하중.

규격	허용하중(Ton)	최소(m)	최대(m)	중량(kg)
V1(3.2 m)	1.67	1.8	3.2	10.9
V2(3.4 m)	1.50	2.0	3.4	11.3
V3(3.8 m)	1.45	2.4	3.8	12.6
V4(4.0 m)	1.40	2.6	4.0	13.0
V5(5.0 m)	0.7	3.0	5.0	16.0
V6(5.9 m)	0.5	3.2	5.9	18.25

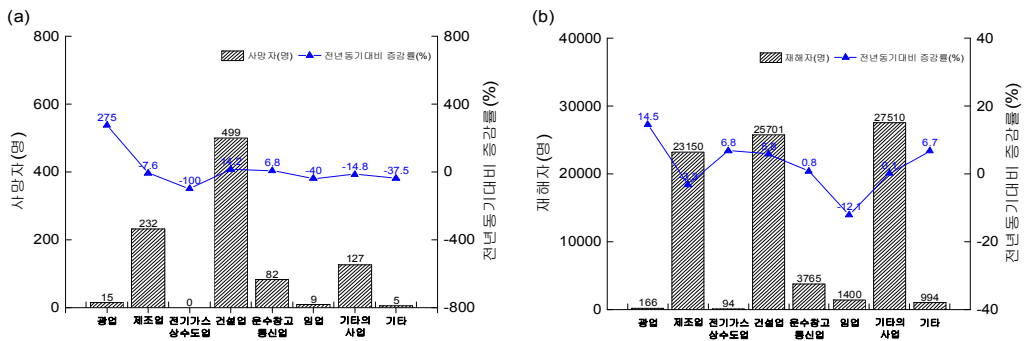


그림 2. '16년도 (a) 산업별 사망자 현황과 (b) 산업별 재해자 현황.

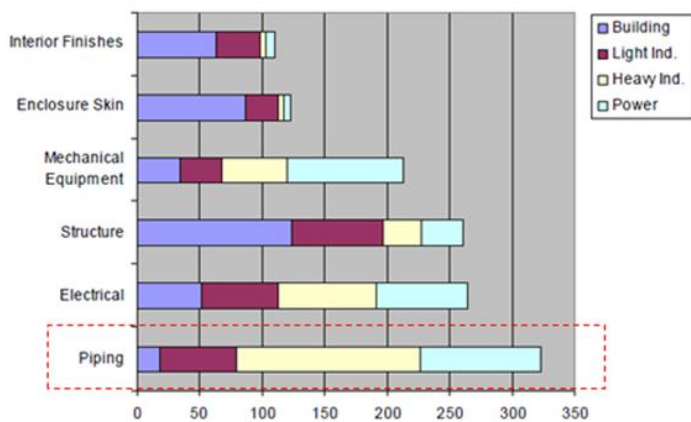


그림 3. 건설 분야에서 기술개발이 시급한 항목.

제 2장 이론적 배경

제 1절 고상접합

2.1.1 고상접합(Solid-State Welding)

금속재료를 서로 연결하는 기술로 사용되는 접합공정은 부여되는 입열량의 크기에 따라 용융용접(Fusion Welding)과 고상접합(Solid State Welding)으로 분류될 수 있다. 그중 용융용접은 별도의 열원을 이용하여 재료를 용융시켜 접합시키는 공정으로서, 아크용접(arc welding), 전기저항용접(electric resistance welding), 레이저용접(laser welding) 등이 이에 해당한다.[7] 이와 같은 용융용접은 금속을 녹여서 접합하기 때문에 접합부의 미세조직 발달에 한계가 있으며, 결과적으로 기계적 특성의 발달 또한 제한적인 문제점이 있다. 이와 반대로 고상접합은 별도의 열원을 이용하지 않고 고체상태에서 접합이 가능한 기술로서, 그림 4와 같이 압접(pressure welding), 마찰접합(friction welding), 확산접합(diffusion welding) 등이 이에 속하며, 용융용접 대비 입열량이 현저히 낮아 결함발생의 빈도가 낮은 특징이 있다.[8, 9, 10] 특히, 이 기술들은 온도, 압력 등의 공정제어를 통해 접합부의 미세조직 발달을 제어할 수 있는데, 이는 결과적으로 접합부의 우수한 물성을 확보하는데 직접적인 역할을 한다.[11, 12, 13]

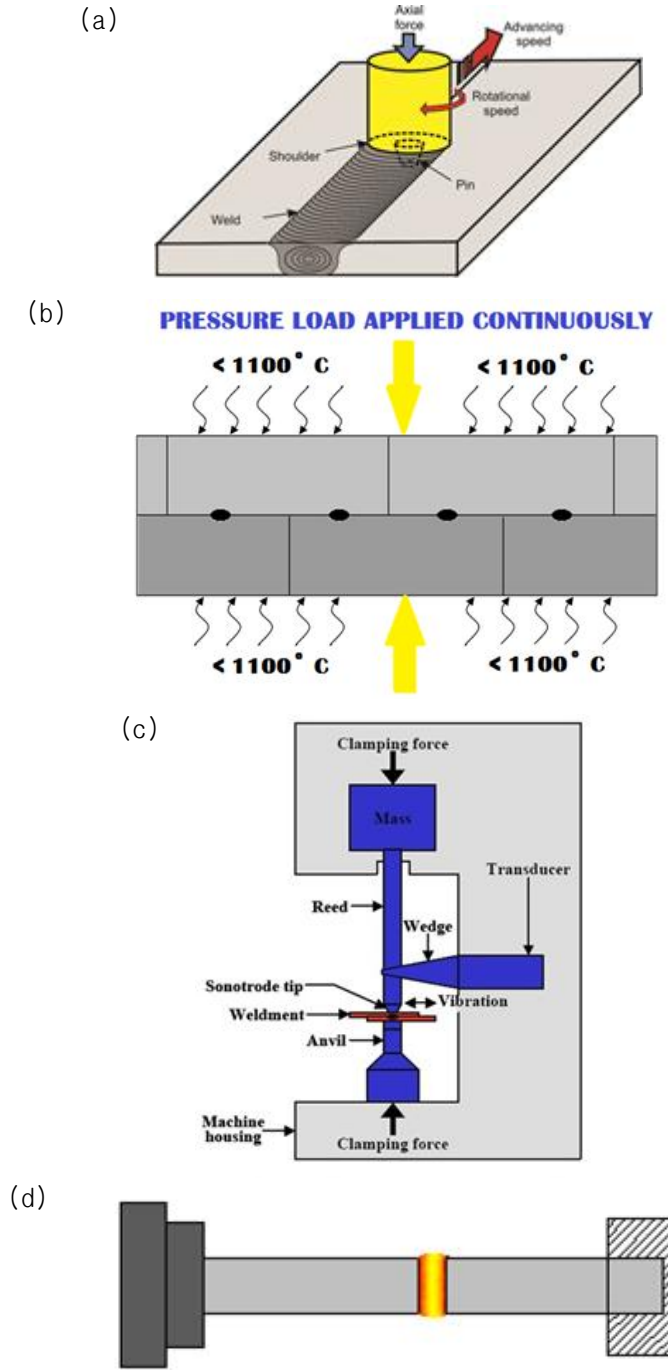


그림 4. 산업에서 다양하게 사용되고 있는 고상접합기술의 종류. (a) 마찰교반접합, (b) 확산접합, (c) 초음파용접과 (d) 마찰접합.

2.1.2 마찰접합(Friction welding)

가. 마찰접합의 원리

마찰접합공정의 기본적인 과정을 그림 5에 나타내었다. 초기 접합할 소재를 그림 5(a)에 나타낸 바와 같이, 정위치 시킨 후 고속으로 회전시켜 두 소재를 맞닿게 하면, 그림 5(b)와 같이, 접합의 초기 공정이 시작된다. 이때 회전력에 의하여 두 소재 간에 마찰열이 발생하게 되며, 이를 통해 그림 5(c)에 나타낸 바와 같이, 피접합부가 연화되기 시작한다. 이후 추가적인 가압이 진행되면 그림 5(d)에 나타낸 바와 같이, 두 소재가 완전히 접합되는 방식이 마찰접합기술이다.[9, 14]

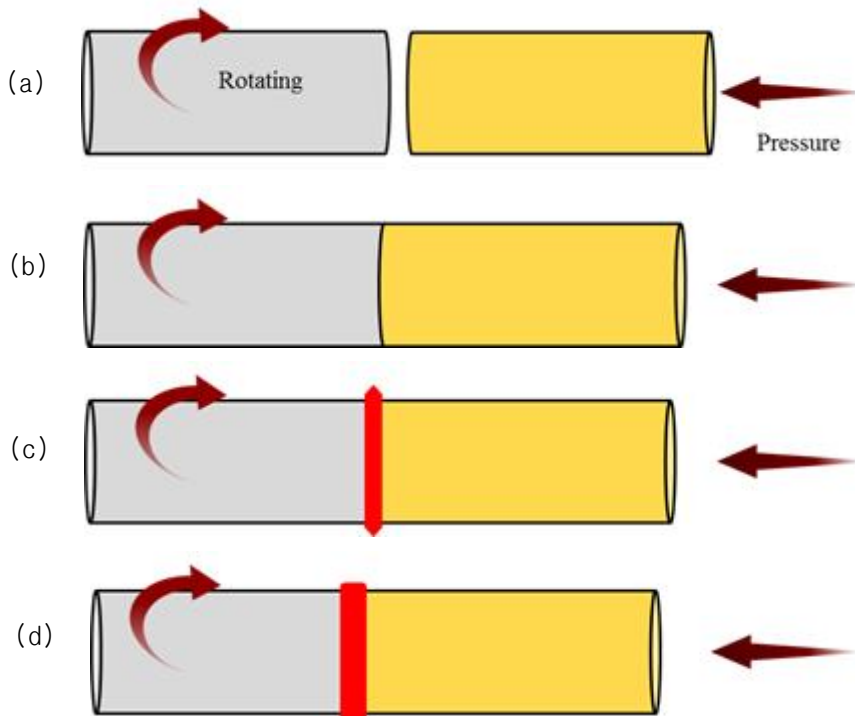


그림 5. 마찰접합기술의 기본 공정. (a) preparation, (b) material contact, (c) heat transfer와 (d) forge pressure/weld finish.

이 연구에서 사용된 연속구동 마찰접합의 구동방식과 원리를 그림 6에 나타내었다.[15] 이 마찰접합기는 스피들이 모터에 의해 직접 구동되도록 하거나 모터와 스피들 사이에 클러치를 설치한 구조로써, 스피들에 고속 브레이크를 장착하여 설정된 마찰시간과 축 수축량에 급격히 마찰운동을 정지시켜, 접합부의 길이와 용접 변수를 조절하도록 설계되어 있다. 이 장치를 이용한 접합공정은 가열단계와 업셋 단계로 구분되며, 가열단계에서 일정압력과 속도로 마찰 운동시켜 가열과 단조공정까지 이르게 한 다음, 업셋단계를 거치면 고상접합이 완결된다.[16, 17, 18] 업셋단계는 가열단계 최종시점에서 브레이크를 작동시켜, 마찰운동속도를 급격히 감속시킬 때에 토크의 증가에 의해 압착이 이루어지는데, 압축압력을 높여 계면에 단조 작용 부여와 함께 열영향부의 열간 가공량을 증가시킬 수 있다. 또한, 최종적으로 밀려 나온 Flash는 접합 후 절삭 등의 기계가공으로 제거하지만, 경우에 따라 그대로 남겨 두기도 한다.

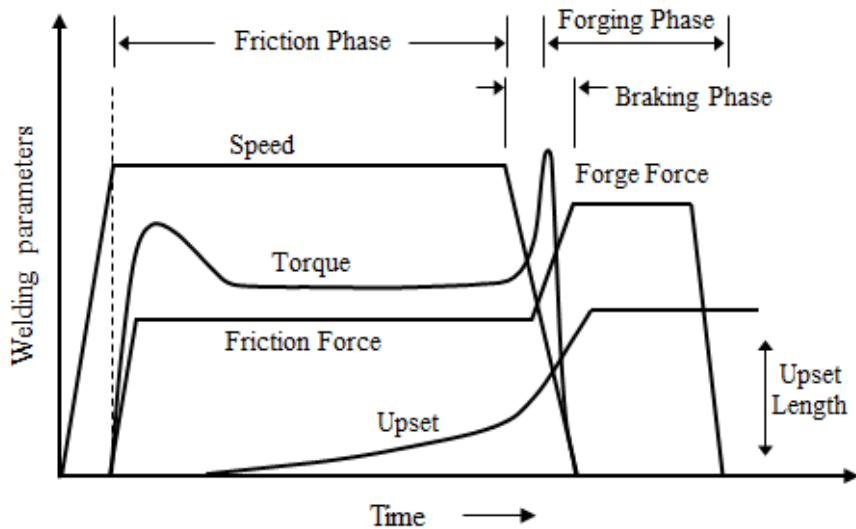


그림 6. 연속구동 마찰접합의 시간에 따른 공정변수의 변화.

나. 마찰접합의 공정변수와 그 영향

(1) 회전속도(Rotation speed)

회전속도는 접합될 재료와 접합계면의 직경과 직접적인 관련이 있다. 회전속도의 증가는 계면에서 더 큰 마찰열을 발생시키게 되며, 재료의 연화, 재결정의 정도, 금속간화합물 형성 등에 영향을 주어, 최종적으로 접합부의 기계적 특성에 다양한 영향을 미치게 된다. 따라서 접합될 재료 즉, 기계적 특성에 맞게 적절한 회전속도를 선정해야하며, 접합부 품질에 악영향을 미치지 않도록 해야 한다.[19, 20, 21]

(2) 압력(Pressure, force)

압력은 접합부의 온도구배 그리고 요구되는 구동력과 축방향 수축량을 제어할 수 있다. 특정 압력은 접합될 재료와 접합부 형상에 따라 달라지며, 가열압력은 산화를 방지하기 위하여 접촉면이 밀착되어 있도록 충분히 높아야한다. 일정한 회전속도에서, 압력이 낮을 경우 발열이 불충분하거나 축방향 수축량이 거의 없다. 이와 반대로, 압력이 높은 경우, 과입열을 유도하며 급격한 축방향 수축량을 초래하게 된다.[22, 23]

(3) 가열시간(Heating time)

과도한 입열은 생산성을 제한시키며 재료를 낭비하게 된다. 이와 반대로 가열시간이 부족하게 되면 균일하게 열이 발생하지 않을 뿐만 아니라 산화물이 접합부 내에 남아 있게 되거나, 계면에 접합이 되지 않는 경우도 발생하게 된다.

다. 마찰접합의 특징

마찰접합재는 일반적으로 소성변형량과 온도의 분포에 따라 크게 4가지 영역으로 나뉘는데, 이를 그림 7에 나타내었다.[24, 25, 26] (a)영역은 마찰이 직접적으로 발생하여, 연화 된 재료가 바깥쪽으로 배출되며, 회전속도에 의해 변형률이 제어됨으로써, 극심한 소성변형을 받아 미세한 결정립들이 분포하는 영역이다. (b)영역의 경우, 상당한 소성변형이 일어나지만 직접적인 마찰이나 재료의 배출이 일어나지 않는다. 이 영역은 높은 전위밀도와 온도분포로 인하여 동적재결정이 동반되며, 그 결과 등축정형태의 미세한 결정립들이 분포하게 된다. (c)영역은 변형률, 온도 그리고 소성변형량이 (b)영역보다 낮아 상대적으로 조대한 결정립이 분포한다. (d)영역의 경우, 소성변형의 영향을 받지 않고, 재료는 온도의 영향으로 미세조직의 변화를 동반하는데, 이로 인해 결정립의 성장이 나타날 수도 있다.[9]

마찰접합은 용융용접과 비교하였을 때 접합계면에서 기계적 에너지가 열에너지로 직접적으로 전환되는 프로세스으로써, 매우 좁은 열영향부를 얻을 수 있으며, 이로 인해 용접변형을 최소화시킬 수 있다.[8, 27] 마찰접합은 고상접합 중 하나이기 때문에 기공, 슬래그흔입 등과 같은 용융 - 응고 현상과 관련된 결함들이 나타나지 않는 장점을 가지고 있다. 또한, 단조구간 혹은 burn-off 구간 동안, 고온으로 소성변형 된 재료가 계면 외부로 배출이 되는데, 이때 표면산화층과 오염물질이 제거 되는 효과를 볼 수 있다.[20] 이러한 장점들로 인하여, 용융용접 대비 우수한 접합부를 얻을 수 있으며, 고상접합이 갖는 우수성을 용융용접과 비교하여 표 2에 나타내었다.

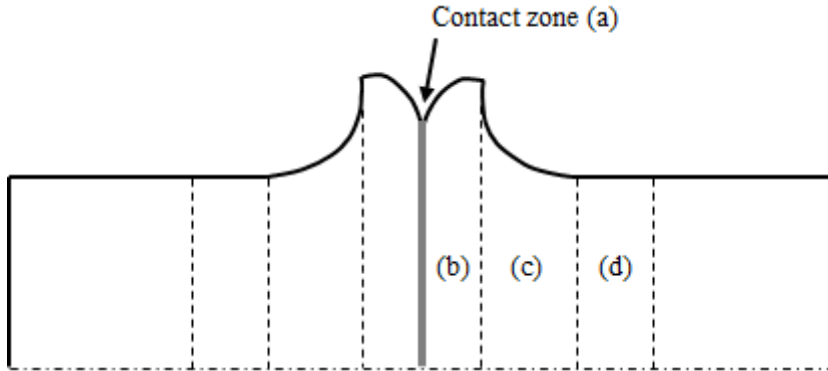


그림 7. 마찰접합재의 온도와 변형량에 따른 영역구분.

표 2. 용융용접과 마찰접합의 특성 비교.

	마찰접합 (Friction welding)	용융용접 (Fusion welding)
입열량	낮음	높음
소모에너지	낮음	높음
유해가스	발생 없음	발생
접합강도	모재 대비 강함	모재 대비 약함
미세조직	재결정조직과 유사	주조조직과 유사
작업 안정성	별도의 열원이 없어 비교적 안전함	열원 사용으로 위험성 높음
생산원가	열원과 부재의 사용이 없어 낮음	열원과 부재의 사용으로 높음

제 3장 실험방법

제 1절 마찰접합

3.1.1 실험재료

이 연구에서 도입된 소재는 건축, 토목, 철탑, 발판 등의 구조물에 주로 사용되는 STK 400 합금으로서, 일반 구조용 탄소강이었으며, 이에 대한 화학조성과 기계적 특성을 표 3과 표 4에 나타내었다. 초기의 STK 400 일반 구조용 탄소강은 0.25 wt.% 정도를 탄소를 함유하고 있었으며, 인장강도, 항복강도와 연신율이 각각 400 MPa, 235 MPa과 25%를 갖고 있었다. 일반적으로 철강재료는 다양한 상변태를 동반하는 것으로 보고된 바 있는데, 그 중 마르텐사이트 변태가 강재의 용접부에서 주로 유발된다. 이러한 상변태의 동반은 접합부의 강도는 증가시킬 수 있지만, 기본적으로 접합부에 큰 열이 동반된 상태이기 때문에, 열영향부의 형성을 억제하는데 어려움이 있다. 따라서 이를 제어하기 위한 공정조건이 요구되며, Fe-C 이원계 상태도(그림 8)를 도입함으로써, 상변태 제어방안을 설계하였다.

이 연구에서 사용된 재료의 제원과 명칭을 그림 9에 나타내었다. 파이프의 외경이 60.5 mm로 동일하지만, 두께가 각각 2.2 mm(A1), 3.3 mm(A2)로 서로 다른 내경을 갖는 파이프가 도입되었다. 실험을 위하여, 재료는 마찰접합기와 파이프두께를 고려하여 길이를 각각 70 mm(A1), 170 mm(A2)로 절단하였고, 이를 초기재료로 사용하였다.

표 3. STK 400 합금의 화학조성.

Material	Chemical Composition				
	C	Si	Mn	P	S
STK 400	0.25	-	-	0.04	0.04

표 4. STK 400 합금의 기계적 특성.

Material	Mechanical Properties		
	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
STK 400	400	230	23

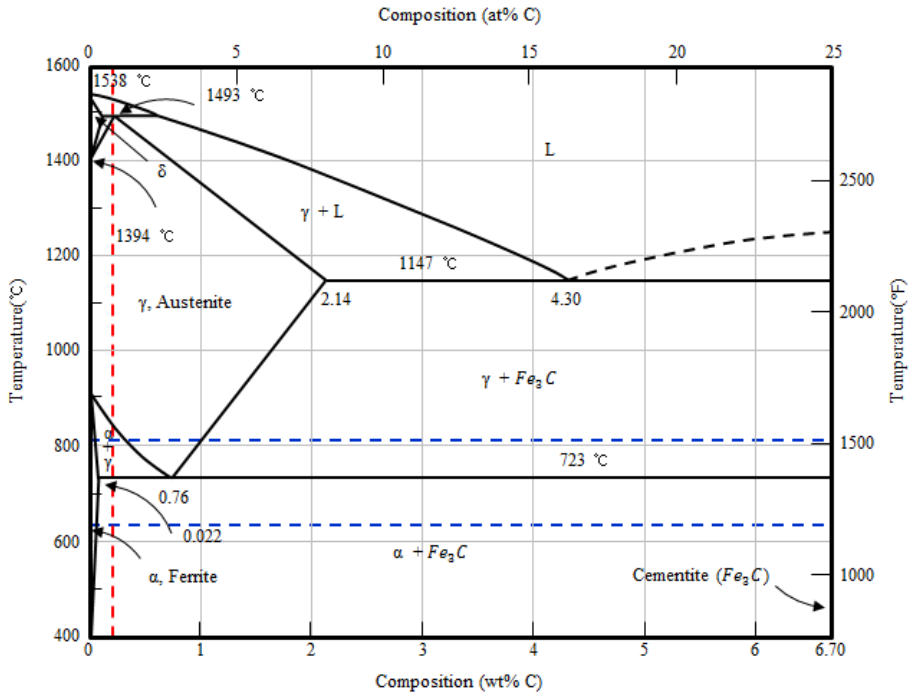


그림 8. Fe-C 이원계 평형상태도.

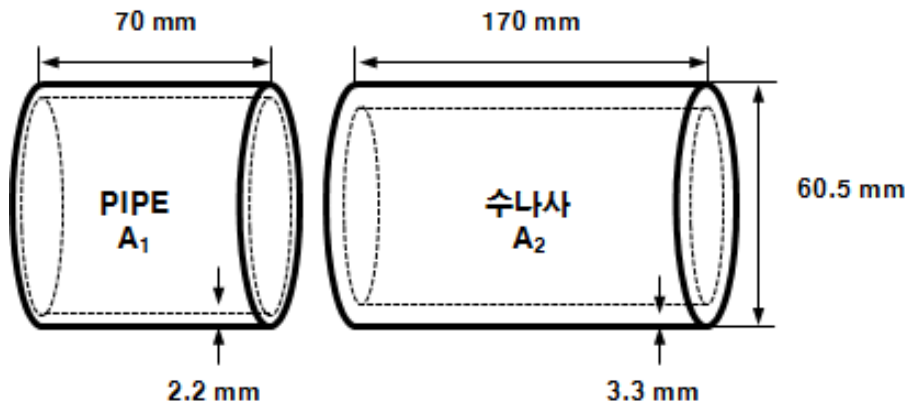


그림 9. 이 연구에서 사용된 STK 400 합금 PIPE의 제원.

3.1.2 마찰접합 장비와 공정조건

마찰접합을 위하여 Nitto Seike사의 마찰접합기(모델명 FF-45II-C)를 도입하였고, 이를 그림 9(a)에 나타내었다. 이 장비는 브레이크 구동방식의 마찰접합기이며, 회전속도 1600 RPM, 최대추력 P_1 : 10,000 Kg, P_2 : 20,000 kg(140 kg/cm^2), 업셋시간: 0~ 99.9 sec 까지 제어가 가능하다. 실험장비와 소재의 특성을 고려하여 가공된 A_1 과 A_2 를 그림 9(c, d)와 같이, A_1 을 회전축에 A_2 를 전진축에 고정시켜 실험을 진행하였다. 그리고 공정 중 시험편의 변형제어와 건전한 접합재의 확보를 위하여, 시험편 크기와 형상에 맞는 콜렛척(그림 9(b))을 제작하여 사용하였다. 공정조건에 따른 미세조직과 기계적 특성의 변화양상을 확인하기 위하여, 업셋압력(P_1)과 업셋시간(t)을 공정변수로 선정하였고, 회전속도와 마찰압력을 각각 1600 RPM과 10 kg/cm^2 으로 일정하게 유지한 상태에서, 업셋압력과 업셋시간을 각각 $15 \sim 25 \text{ kg/cm}^2$ 과 $3 \sim 7 \text{ sec}$ 범위에서 제어하여 마찰접합 하였다. 이에 대한 구체적인 실험조건을 표 5에 나타내었다.

표 5. 이 연구에서 도입된 마찰접합 공정조건.

시험편 No.	회전속도 N (RPM)	마찰압력 P_1 (kg/cm^2)	업셋압력 P_2 (kg/cm^2)	업셋시간 t (sec)	PIPE 전장 (mm)	수나사 전장 (mm)
1	1,600	10	15	3	70	170
2				5		
3				7		
4			20	3		
5				5		
6				7		
7			25	3		
8				5		
9				7		

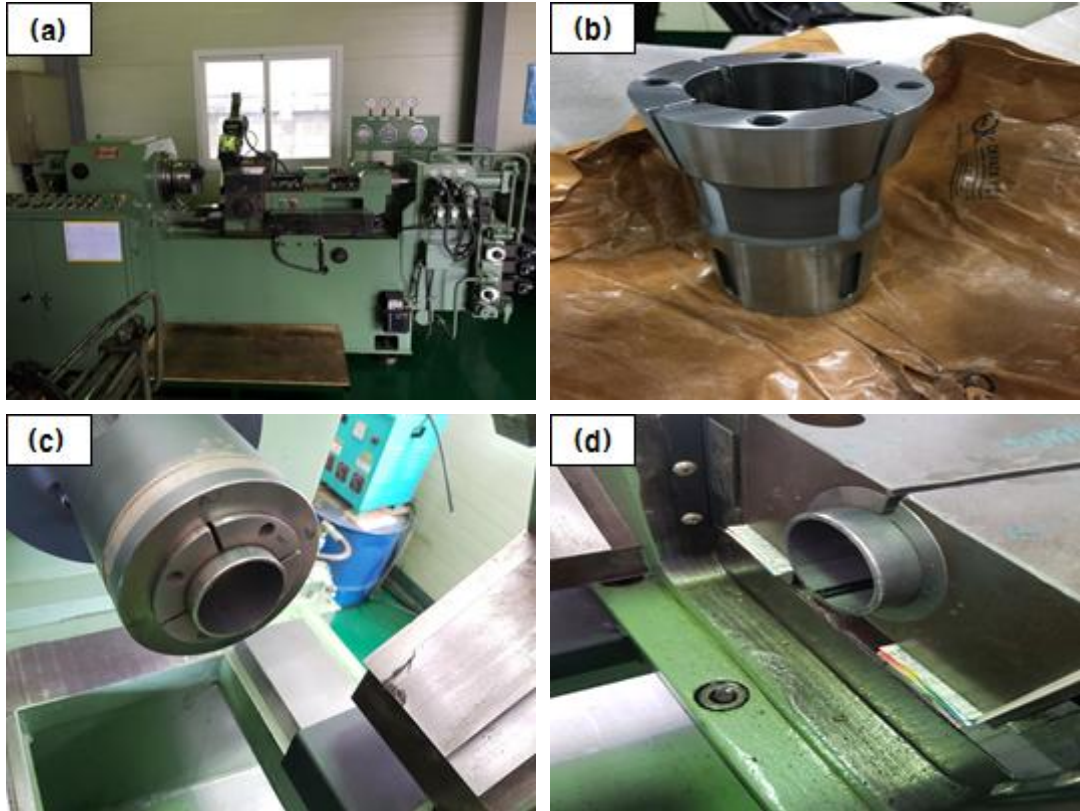


그림 10. 마찰접합을 위해 사용된 마찰접합기와 부속품. (a) 마찰접합기, (b) 콜릿척, (c) PIPE SET-UP 회전축과 (d) 수나사 SET-UP 전진축.

제 2절 미세조직평가

3.2.1 광학현미경분석

공정변수에 따른 마찰접합부의 결정립의 크기, 형상, 상분포 등을 관찰하기 위하여, 그림 11(a)의 광학현미경(Optical Microscope, OM)을 도입하였다. 미세조직 관찰을 위하여, 시험편은 그림 11(b)와 같이 접합부에 수직인 면을 가로 2 mm X 세로 3.3 mm 의 크기로 절단하여 채취되었다. 이후 채취된 시험편을 마운팅 한 후, 샌드페이퍼와 연마포를 사용하여 시험편 표면을 경면으로 제작하였다. 시험편 표면의 선택적 부식을 위하여, Nital 5% 용액을 제조하였고, 이를 이용하여 표면을 에칭한 후 미세조직을 관찰하였다.

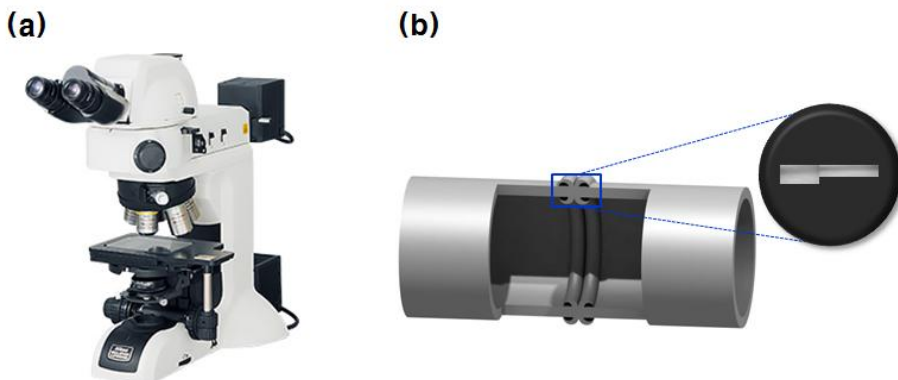


그림 11. 미세조직 관찰을 위해 사용된 (a) 광학현미경과 (b) 미세조직 관찰영역.

3.2.2 전자후방산란회절법(EBSD) 분석

공정조건에 따른 마찰접합부의 결정립계특성분포 전개양상을 관찰하기 위하여, 전자후방산란회절법(electron backscattering diffraction, EBSD)이 도입되었다. 이를 위해, 시편을 기계적으로 연마하여 경면을 확보한 후, 전계방출 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscopy, FE-SEM)에 부착된 EBSD(TSL-OIM™)를 이용하여 시험편 표면을 분석하였다. 이를 통하여 업셋압력과, 업셋시간 변화에 따른 마찰접합부의 결정방위, 결정립의 크기와 입계어긋남각에 대한 데이터를 정량적으로 분석하였다.

제 3절 기계적 특성평가

3.3.1 비커스경도시험과 인장시험

서로 다른 공정조건에서 마찰접합 된 소재의 기계적 특성을 평가하기 위하여 경도시험과 인장시험이 도입되었다. 마이크로 비커스경도의 경우, 그림 12(a)에 나타낸바와 같이, Shimadzu사의 비커스경도계를 도입하였고, 시험편 상단에서 1 mm 아래 중앙부 영역을 기준으로 좌우 0.5 mm 간격으로(그림 12(b)), 다이아몬드 압자를 HV0.5(4.903 N) 하중으로 10초간 유지한 상태에서 측정하였다. 한편, 인장시험을 위해 시험편은 와이어 커팅방법을 이용하여, 그림 13과 같이 표점거리 50 mm, 어깨반지름 15 mm 이상의 호 형상으로 제작하였다. 인장시험은 경도분포 측정을 통해 확보된 6종류의 시험편에 대하여 수행되었는데, ASTM E8 (Standard Test Methods for Tension Test of Metallic Materials)규격에 의거하여 시험되었고, 이를 통해 마찰접합재의 인장강도, 항복강도와 연신율을 평가하였다.

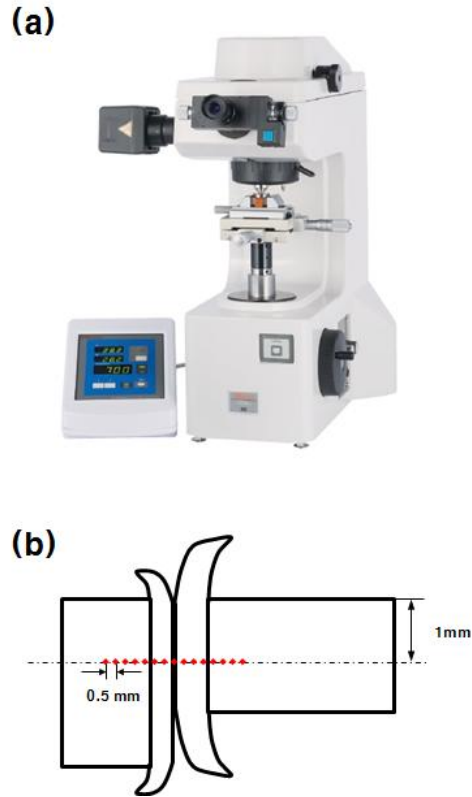


그림 12. 기계적 특성평가를 위해 도입된 (a) 비커스 경도기와 마찰접합 된 소재의 (b) 경도분포 측정영역.

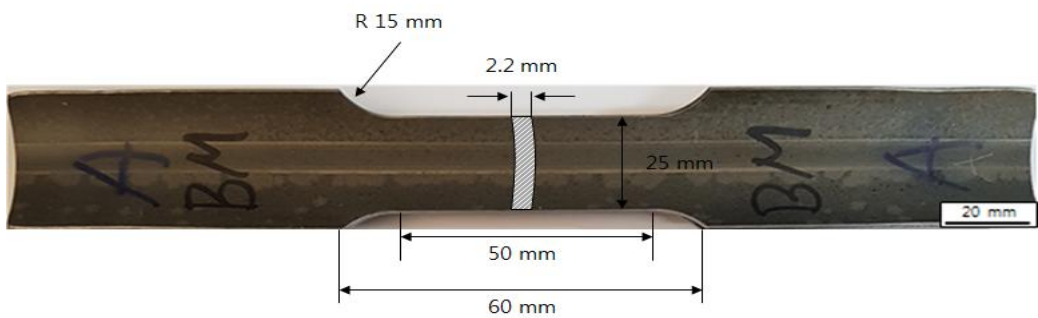


그림 13. 이 연구에서 사용된 인장시험편 규격(ASTM E8).

제 4장 실험결과

제 1절 마찰접합재의 외관

4.1.1 Top View

마찰접합 공정조건에 따른 접합재의 Top view를 관찰하였고, 그 결과를 그림 14 나타내었다. 실험결과, 다양한 조건에서 접합된 시험편 모두 균열, 스파터, 기공, 변형 등의 결함이 없이 건전하게 접합된 것으로 관찰되었다. 한편, 접합시간의 증가는 그림 14에 나타난 바와 같이, 비드의 형성을 촉진시켰는데, 이로 인하여 비드의 크기가 0.8 mm에서 8.13 mm까지 증가되는 결과를 나타내었다.

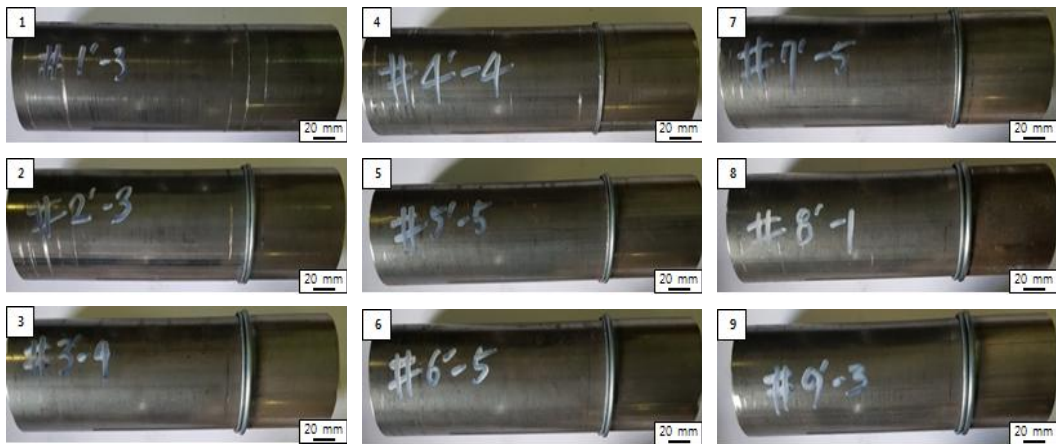


그림 14. 다양한 공정조건에서 마찰접합 된 STK 400 합금의 Top View.

4.1.2 공정조건별 소모량

마찰접합 된 소재의 전장변화를 측정하였고, 공정조건에 따른 소모량을 그림 15에 나타내었다. 소모량은 업셋압력과 업셋시간이 가장 작은 1번 조건에서 약 1.3 mm로 가장 낮게 나타났으며, 업셋압력과 업셋시간이 가장 큰 9번 조건에서 11.6 mm로 가장 크게 나타났다. 특히, 20 kg/cm^2 으로 증가된 5번과 6번 조건이 15 kg/cm^2 인 2번과 3번 조건보다 적은 소모량을 나타내었으나, 전체적으로 동일 업셋 압력 하에 업셋시간이 증가함에 따라 소모량이 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

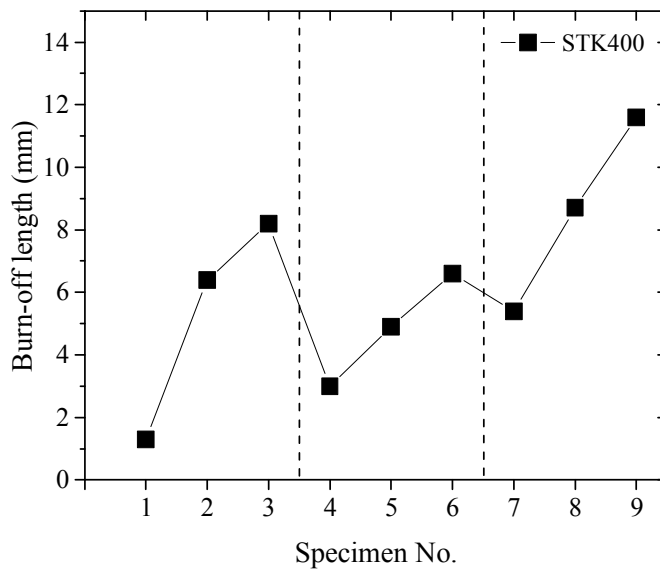


그림 15. 공정조건에 따른 소모량의 변화양상.

제 2절 미세조직평가

4.2.1 결정립 분포양상

업셋압력과 업셋시간의 변화에 따른 미세조직을 관찰하였고, 접합부 미세조직전개양상을 그림 16 ~ 18에 나타내었다. 초기모재(그림 16(a))는 일반적인 연강에서 나타나는 페라이트 결정립과 펄라이트 결정립들이 등축정 형태로 각각 9 ~ 30 μm 와 2 ~ 8 μm 정도로 분포하고 있었으며, 약 15 μm 정도의 평균입도를 나타내었다. 업셋압력 15 kg/cm^2 과 업셋시간 3 sec인 1번 조건(그림 16(b))은 파이프 접촉면 중 외곽에서 미 접합 영역이 분포하였는데, 이와 같은 현상은 불충분한 입열량으로 재료가 충분히 연화되지 않은 상태에서 접합되었기 때문이라고 판단된다. 동일 업셋압력에서 업셋시간을 5 sec로 증가시킨 2번 조건은 그림 16(c)에 나타난 바와 같이, 마찰열과 압력에 의해 변형된 페라이트와 펄라이트가 분포하고 있었으며, 일부 페라이트 결정립 내에 탄소원자가 침입된 페라이트 (Ferrite-carbide-aggregate, F-C-A) 등으로 구성되어 있었다. 용융용접 후 관찰되는 미세조직 중 마르텐사이트나 베이나이트 조직이 관찰되지 않았기 때문에, 공정 중 상변태가 일어나지 않은 것으로 판단된다. 입도분포는 약 5 ~ 30 μm 정도로 분포하고 있었으며, 초기모재에 비하여 결정립이 미세화 되었다. 업셋시간이 7 sec로 증가된 3번 조건의 경우, 그림 16(d)에 나타난 바와 같이, 2번 조건과 같은 상분포를 보였고, 페라이트 내에 탄소가 침입된 형태의 결정립이 차지하고 있는 영역이 더 넓게 분포하고 있었다. 이때 입도분포가 약 5 ~ 35 μm 정도로 위 조건들과 유사하게 관찰되었으나, 평균입도가 약 17 μm 로 초기 모재에 비하여 조대화 되었다.

압력 20 kg/cm^2 에서 압력시간을 3, 5와 7 sec로 달리하여 접합시킨 소재의 미세조직 전개양상을 그림 17에 나타내었다. 압력시간이 3 sec인 4번 조건은 그림 17(a)에 나타난 바와 같이, 초기모재에 비하여 현저히 미세화 된 등축정 페라이트와 펄라이트결정립으로 구성되어 있었으며, 이들은 약 2 ~ 5 μm 정도의 입도분포를 나타내었다. 압력시간이 5 sec으로 증가되어 접합된 소재의 경우, 그림 17(b)에 나타난 바와 같이 길게 연신된 형태의 변형페라이트가 전반적으로 분포하고 있었고, 등축정 펄라이트와 균집된 F-C-A 조직이 낮은 비율로 분포하고 있었다. 접합시간의 증가에 따른 입열량의 증가는 결정립의 성장을 촉진하였는데, 그 결과 약 5 ~ 30 μm 정도의 결정립들로 구성되었고, 평균입도가 약 14 μm 로 증가되었다. 압력시간이 7 sec로 증가된 경우, 그림 17(c)와 같이 5번 조건에 비하여 작은 결정립들로 구성되어 있었으며, F-C-A 조직이 상대적으로 높은 비율로 분포하고 있었다. 또한 약 5 ~ 30 μm 정도의 결정립들로 구성되어 있었으며, 평균입도가 5번 조건에 비하여 감소하였다.

압력을 25 kg/cm^2 으로 증가시킨 상태에서 압력시간을 3, 5와 7 sec로 달리하여 접합시킨 소재의 미세조직 전개양상을 그림 18에 나타내었다. 압력시간이 3 sec의 미세조직은 그림 18(a)에 나타난 바와 같이, 페라이트, 펄라이트 그리고 F-C-A조직으로 구성되어 있었으며, 이들은 약 2 ~ 25 μm 정도의 입도분포를 나타내었다. 압력시간이 5 sec로 증가된 경우, 그림 18(b)에 나타난 바와 같이 7번 조건에 비하여 조대한 페라이트 결정립과 펄라이트 결정립 그리고 상대적으로 낮은 비율의 F-C-A조직으로 구성되어 있었다. 또한, 약 5 ~ 45 μm 정도 분포를 보였으며, 평균입도가 약 19 μm 로 초기모재 대비 조대화 되었다. 압력시간이 7 sec로 증가된 9번 조건의 경우, 그림 18(c)에 나타난 바와 같이, 페라이트 결정립이 8번 조건과 비슷한 크기였지만, 펄라이트 결정립은 다소 감소하였고 더 넓은 영역에 걸쳐 분포하고 있었다. 또한, 평균입도와 입도분포가 각각 약 5 ~ 35 μm 와 약 18 μm 로 8번 조건과 유사한 분포를 보였다.

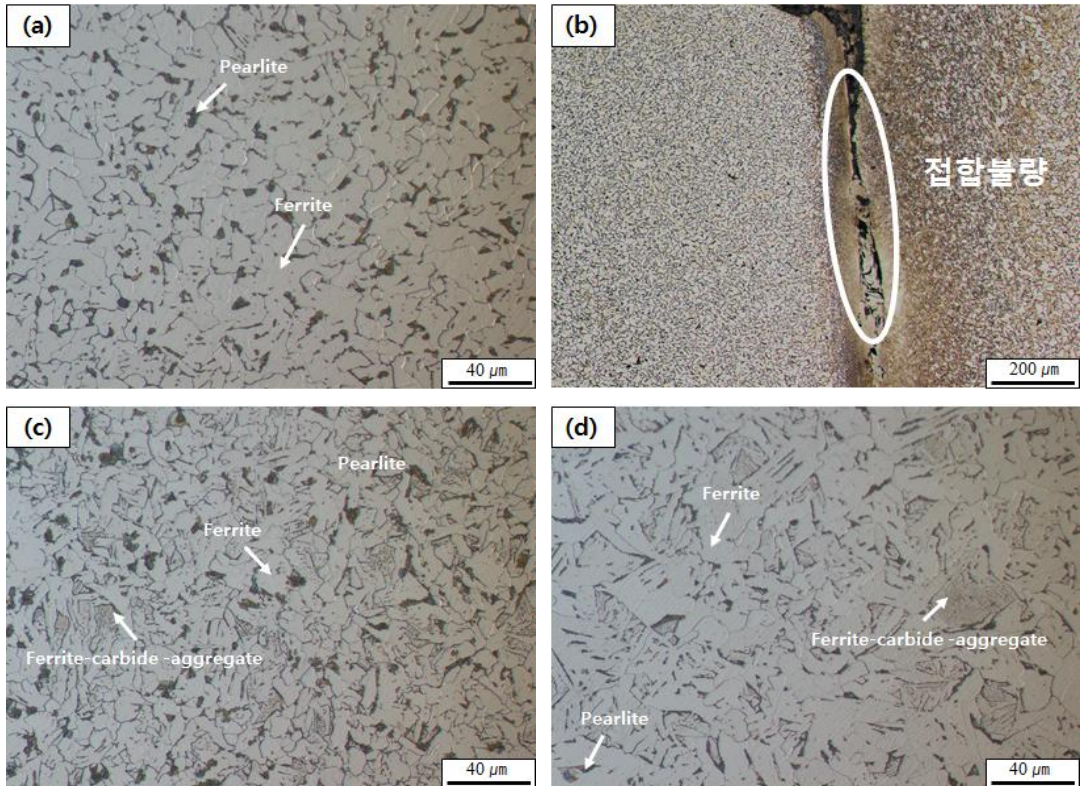


그림 16. 압셋압력 15 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 미세조직분포.
 (a) 모재 (b) 압셋시간 3 sec, (c) 압셋시간 5 sec와 (d) 압셋시간 7 sec.

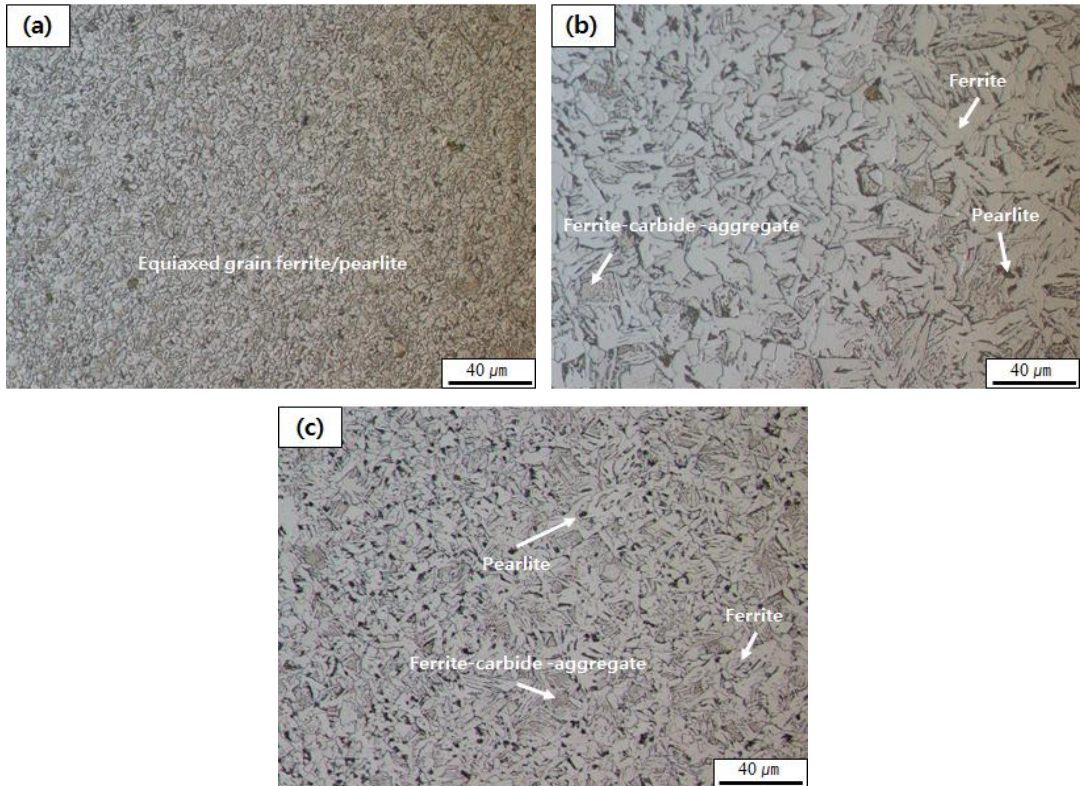


그림 17. 압셋압력 20 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 미세조직분포.
 (a) 압셋시간 3 sec, (b) 압셋시간 5 sec와 (c) 압셋시간 7 sec.

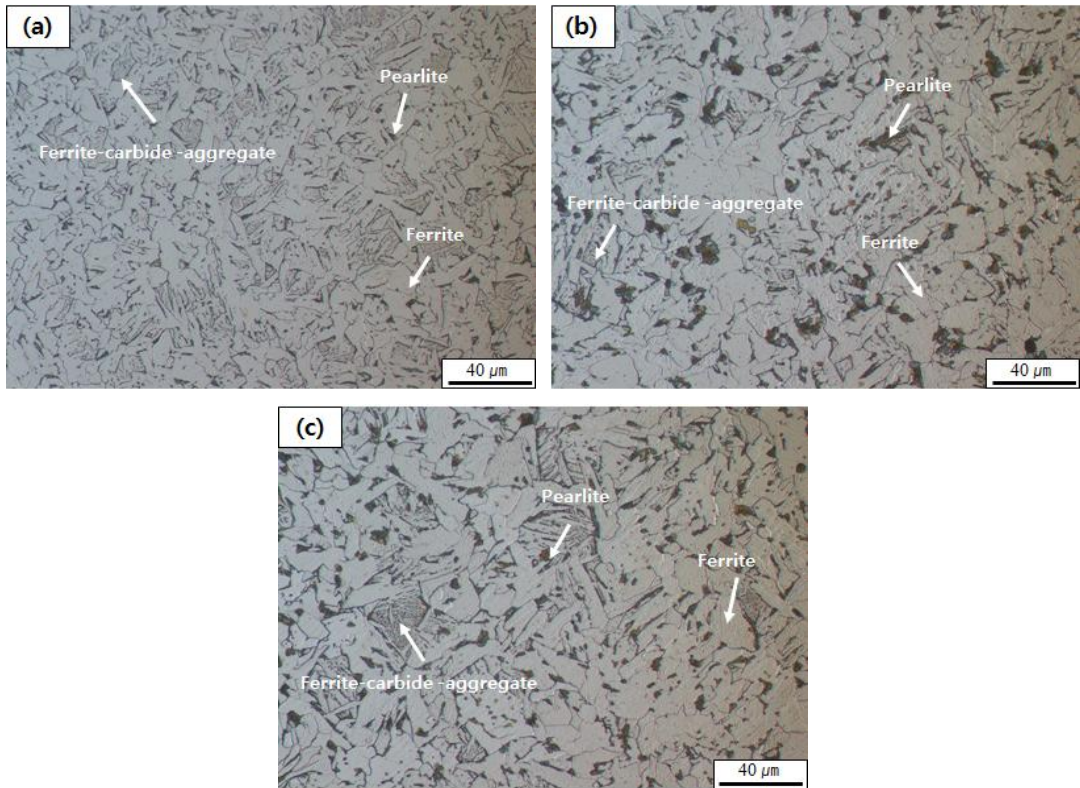


그림 18. 압셋압력 25 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 미세조직분포.
 (a) 압셋시간 3 sec, (b) 압셋시간 5 sec와 (c) 압셋시간 7 sec.

4.2.1 결정립계특성분포 전개양상

가. Inverse pole figure map

업셋압력과 업셋시간 변화에 따른 IPF map(Inverse pole figure map)을 그림 19에 나타내었다. 초기모재는 그림 19(a)에 나타낸 바와 같이 5 ~ 30 μm 크기의 등축정들이 분포하고 있었으며, 결정립 내 저각각입계(Low angle grain boundary)를 확인 할 수 있었다. 업셋압력 15 kg/cm^2 에서 업셋시간의 변화에 따른 IPF map을 그림 19(b-d)에 나타내었다. 업셋시간이 3 sec인 경우, 그림 19(b)에 나타낸 바와 같이, 크기가 1 μm 이하부터 최대 10 μm 정도의 등축정과 길게 연신된 결정립이 분포하고 있었고, 초기모재와 비교하였을 때 현저히 미세한 결정립들이 확인되었다. 업셋시간이 5 sec로 증가된 2번 조건은 그림 19(c)에 나타낸 바와 같이, 5 ~ 30 μm 크기의 결정립들이 분포하고 있었으며, 1번 조건에 비해 결정립 크기가 급격히 조대화 되었지만 모재와 비교하였을 때 감소한 결과를 나타내었다. 이에 반해, 업셋시간이 7 sec로 증가된 3번 조건은 그림 19(d)와 같이, 모재 대비 현저히 조대화 된 결정립 분포를 보였다. 마찰열과 압력에 의해 연신된 형태와 등축정 형태의 결정립들이 분포하고 있었으며, 이들의 크기는 약 5 ~ 40 μm 정도로 확인되었다. 또한, 2번 조건에 비해 저각각입계 분포율이 높게 나타났으며, 결정립의 크기가 조대화 된 결과를 나타내었다.

업셋압력 20 kg/cm^2 에서 업셋시간 변화에 따른 IPF map을 그림 20에 나타내었다. 업셋시간이 3 sec인 4번 조건은 그림 20(a)에 나타낸 바와 같이 등축정들이 분포하고 있었으며, 약 5 ~ 10 μm 정도의 크기로 구성되어 있었다. 또한, 1번 조건에 비해 업셋압력의 증가로 인해 결정립은 조대화 되었지만, 모재대비 현저히 미세한 크기분포를 나타내었다. 업셋시간이 5 sec로 증가된 5번 조건의 경우, 그림 20(b)와 같이, 돌기형태로 돌출된 결정립이 여러 위치에 분포하고 있었으며, 이들의 크기는 약 5 ~ 30 μm 로 2번 조건에 비하여 조대화 되었다. 업셋시간이 7 sec로 증가된 6번 조건은 그림 20(c)에 나타낸 바와 같이, 5 ~ 30 μm 정도의 결정립이 분포하고 있었으나, 5번 조건에 비해 더욱 조대화 된 것으로 나타났다. 또한, 돌기형태로 돌출된 결정립은 감소하였으나, 연신된 결정립의 비율이 증가되었

다.

업셋압력 25 kg/cm^2 에서 업셋시간 변화에 따른 IPF map을 그림 21에 나타내었다. 업셋시간이 3 sec인 7번 조건은 그림 21(a)에 나타난 바와 같이 등축정들이 분포하고 있었으며, 이들의 크기는 약 $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 정도를 나타내었다. 또한, 4번 조건에 비해 업셋압력의 증가로 인해 결정립은 조대화 되었지만, 모재 대비 미세한 것으로 확인되었다. 업셋시간이 5 sec로 증가된 8번 조건의 경우, 그림 21(b)와 같이 길게 연신된 결정립과 sub-grain들이 분포하고 있었다. 또한, 이들의 크기는 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ 정도로 7번 조건과 모재에 비하여 조대화 되었다. 업셋시간이 7 sec로 증가된 9번 조건은 그림 21(c)에 나타난 바와 같이 변형된 결정립들과 다양한 크기의 등축정들이 분포하고 있었고, 이들의 크기는 $5 \sim 45 \mu\text{m}$ 정도로 나타났으며, 모재대비 조대화 된 것으로 나타났다.

공정변수 변화에 따른 IPF map을 분석한 결과 그림 19 ~ 21에 나타난 바와 같이, 등축정과 연신된 결정립들로 구성되어 있었다. 특히 1, 4, 7번 조건에서는 주로 등축정들로 구성되어 있었으나, 이들을 제외한 조건들은 다소 길게 변형된 결정립들이 나타내었다. 또한, IPF map에 나타난 바와 같이 입도편차가 큰 결정립들이 분포하고 있었는데, 이는 마찰접합 공정프로세스 동안 위치에 따라 받는 소성 변형량(전위밀도)과 온도의 차이가 동적회복, 동적재결정과 결정립성장의 속도에 변화를 주기 때문에 발생한 결과라 판단된다. 또한 업셋압력의 증가는 마찰접합프로세스 마지막 단계에서 입열량의 증가를 초래하였으며, 이를 통해 동적재결정 이후 결정립 성장을 촉진하였다. 그 결과 평균 결정립의 크기가 $2.5 \mu\text{m}$ (1번 조건)에서 $19.6 \mu\text{m}$ (8번 조건)까지 조대화 되었다.

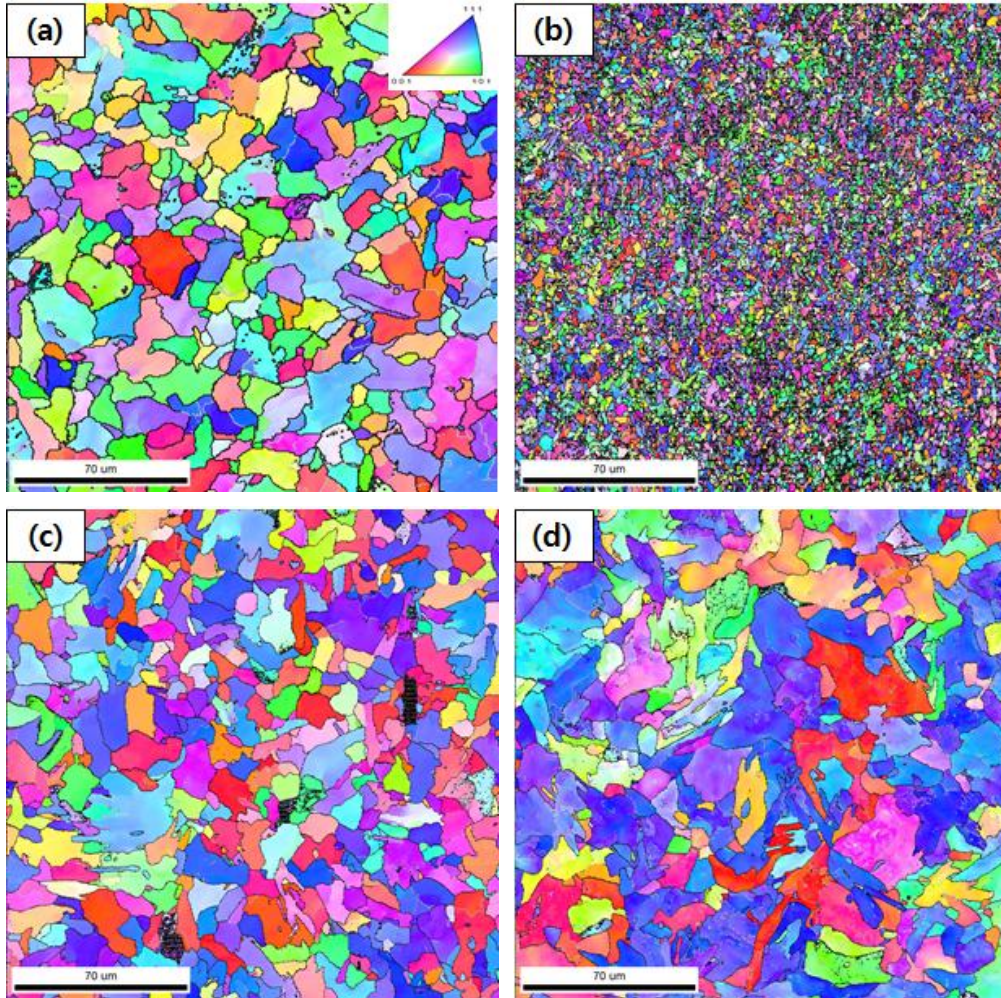


그림 19. 업셋압력 15 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 Inverse pole figure map. (a) 모재 (b) 업셋시간 3 sec, (c) 업셋시간 5 sec와 (d) 업셋시간 7 sec.

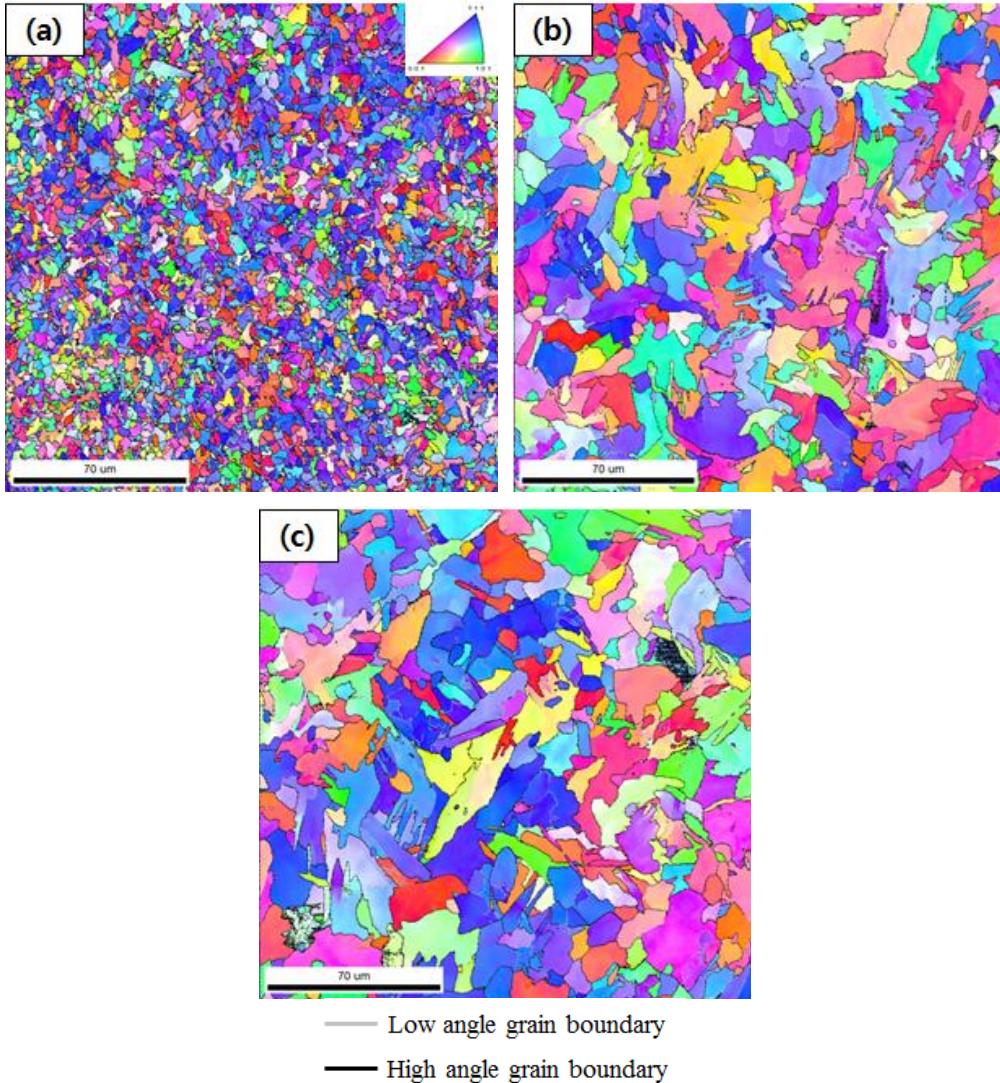


그림 20. 업셋압력 20 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 Inverse pole figure map. (b) 업셋시간 5 sec와 (c) 업셋시간 7 sec.

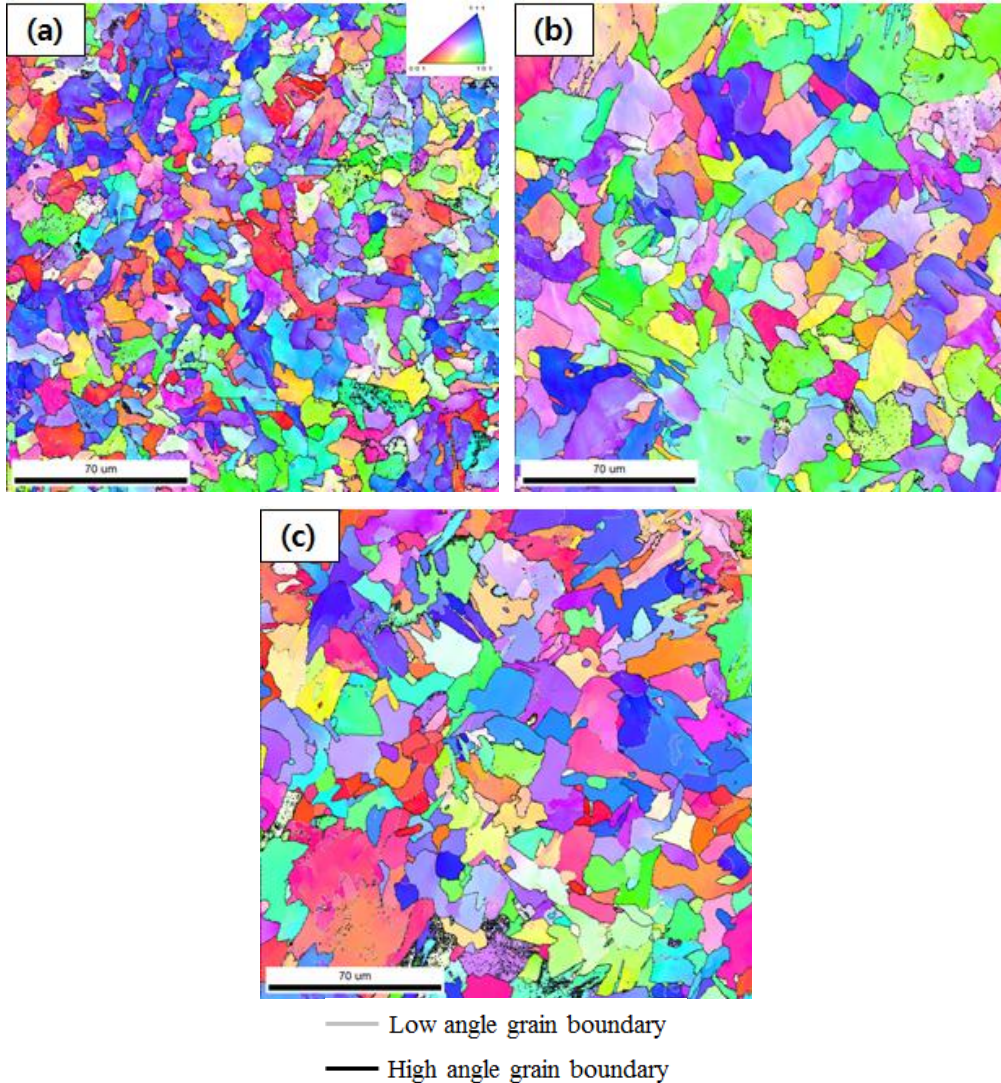


그림 21. 업셋압력 20 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 Inverse pole figure map. (a) 업셋시간 3 sec, (b) 업셋시간 5 sec와 (c) 업셋시간s 7 sec.

나. Grain size distribution

초기모재와 조건별 접합부 입도분포 변화양상을 분석하였다. 초기모재는 그림 22(a)에 나타낸 바와 같이 5 ~ 30 μm 정도의 입도분포를 보였으며, 평균입도는 15.1 μm 로 나타났다. 업셋압력 15 kg/cm^2 에서 업셋시간 3, 5와 7 sec에 따른 입도분포를 그림 22에 나타내었다. 업셋시간이 3 sec인 1번 조건은 그림 22(b)와 같이 1 ~ 5 μm 정도의 좁은 입도분포와 2.5 μm 의 평균입도를 보였다. 업셋시간이 5 sec와 7 sec인 2번과 3번 조건의 입도분포는 그림 22(c)와 (d)에 나타낸 바와 같이, 두 조건 모두 5 ~ 30 μm 정도의 입도분포를 보였으나, 2번 조건에 비하여 3번 조건이 약 30 μm 크기의 결정립이 상대적으로 더 많이 분포하고 있었다. 그 결과, 평균입도가 각각 12.6 μm 와 17.3 μm 로 차이가 나타났으며, 업셋시간이 증가함에 따라 조대화되었다.

업셋압력 20 kg/cm^2 에서, 업셋시간의 변화에 따른 결정입도분포를 그림 23에 나타내었다. 업셋시간이 3 sec인 4번 조건의 경우, 그림 23(a)에 나타낸 바와 같이 2 ~ 8 μm 정도의 입도분포를 보였으며, 4 μm 와 5 μm 의 결정립이 전체 30%를 차지하고 있었다. 그 결과로, 평균입도는 4.5 μm 로 현저히 미세화 된 것을 확인되었다. 업셋시간이 5 sec로 증가된 5번 조건의 입도분포는 그림 23(b)에 나타낸 바와 같이, 5 ~ 25 μm 정도의 입도분포를 보였고, 약 13 μm 와 16 μm 의 결정립들이 전체 35%를 차지하고 있었다. 또한, 평균입도가 14.5 μm 로 4번 조건에 비하여 조대화되었으나, 초기모재와 유사한 크기를 나타내었다. 업셋시간이 7 sec로 증가된 6번 조건의 경우, 그림 23(c)에 나타낸 바와 같이 입도분포가 약 5 ~ 30 μm 정도로 5번 조건과 유사한 입도분포를 보였다. 하지만, 약 18 μm 와 22 μm 크기의 결정립이 전체 42%를 차지하고 있었으며, 평균입도가 약 16.5 μm 로 조대화 되었다.

업셋압력 25 kg/cm^2 으로 증가시킨 상태에서, 업셋시간의 변화에 따른 결정입도 분포를 그림 24에 나타내었다. 업셋시간이 3 sec인 7번 조건은 그림 24(a)와 같이 $5 \sim 25 \mu\text{m}$ 정도 입도분포를 보였으며, $10 \mu\text{m}$, $13 \mu\text{m}$ 와 $15 \mu\text{m}$ 의 결정립이 전체분포 중 50%를 차지하고 있었다. 또한, 평균입도는 $10.9 \mu\text{m}$ 로 초기모재에 비하여 미세화 되었다. 업셋시간이 5 sec로 증가된 경우, 그림 24(b)에 나타낸 바와 같이 $6 \sim 43 \mu\text{m}$ 정도의 입도분포를 보였으며, 평균입도는 $19.6 \mu\text{m}$ 로 9개 조건 중 가장 조대화 된 결과를 보였다. 업셋시간이 7 sec인 9번 조건의 입도분포는 그림 24(c)에 나타낸 바와 같이, $7 \sim 40 \mu\text{m}$ 정도로 8번 조건과 유사한 입도 분포를 보였으나, 평균입도가 $18.1 \mu\text{m}$ 로 감소하였다.

조건별 접합부 입도분포 변화양상을 분석한 결과, 업셋시간이 3 sec인 1번, 4번과 7번 조건들에서는 모재대비 미세화 되었고, 업셋시간이 7 sec인 3번, 6번과 9번 조건들은 모두 조대화 되는 결과는 결과를 나타내었다. 또한 업셋시간이 가장 짧은 3 sec에서, 평균입도가 $15.1 \mu\text{m}$ 에서 $2.5 \mu\text{m}$ 와 $4.5 \mu\text{m}$ 로 현저히 미세화 된 양상을 보였다.

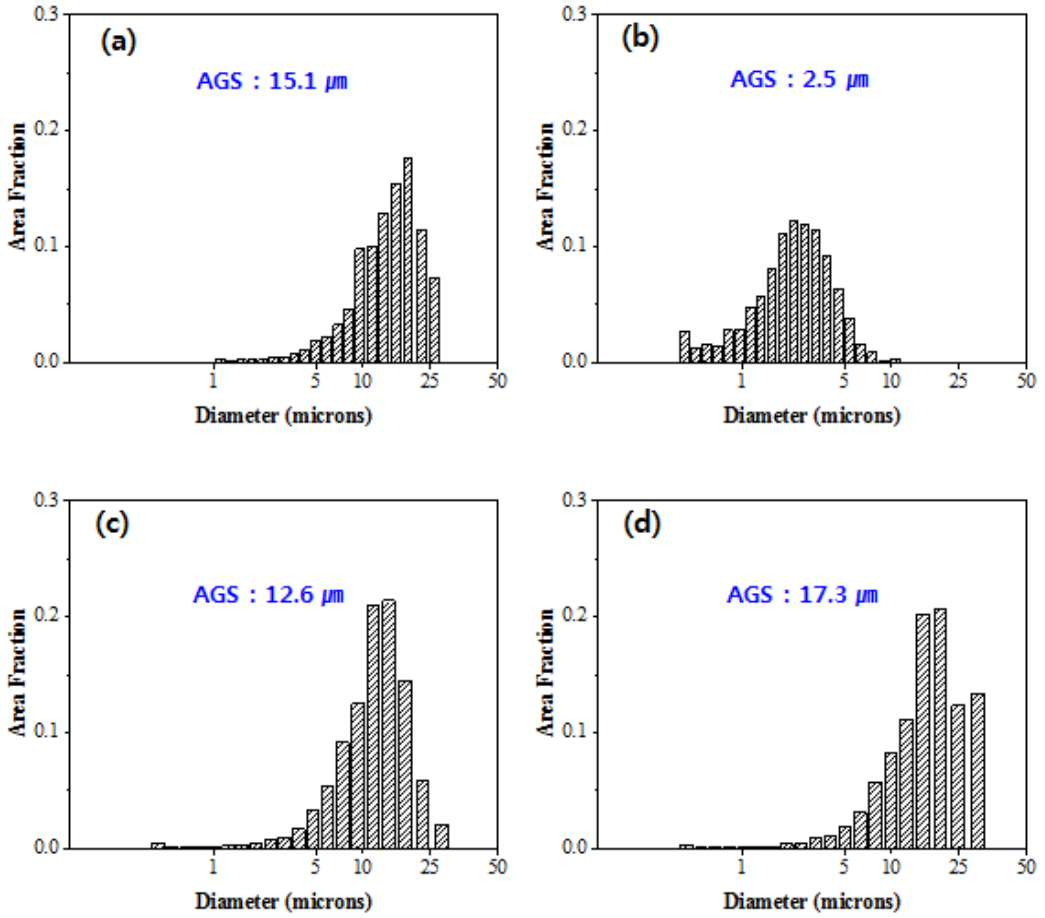


그림 22. 압셋압력 15 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 결정립 크기분포.
(a) 모재 (b) 압셋시간 3 sec, (c) 압셋시간 5 sec와 (d) 압셋시간 7 sec.

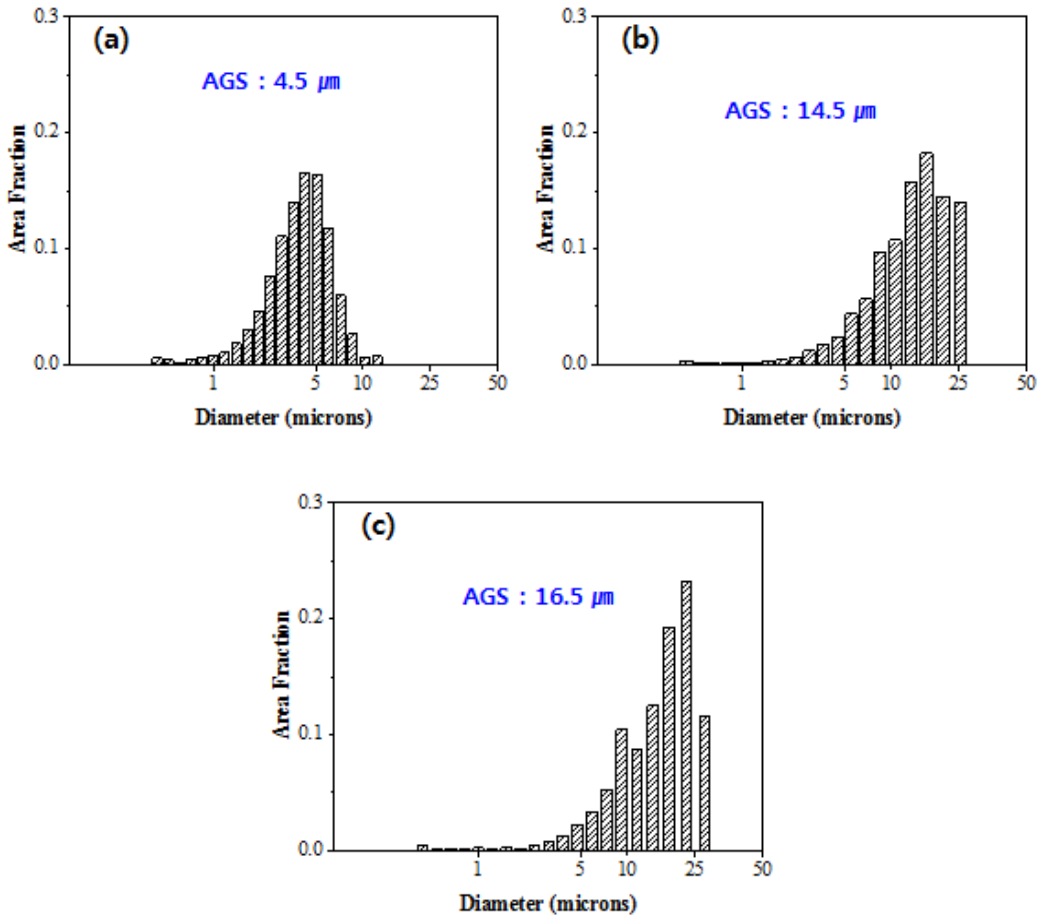


그림 23. 압셋압력 20 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 결정립 크기분포.
(a) 압셋시간 3 sec, (b) 압셋시간 5 sec와 (c) 압셋시간 7 sec.

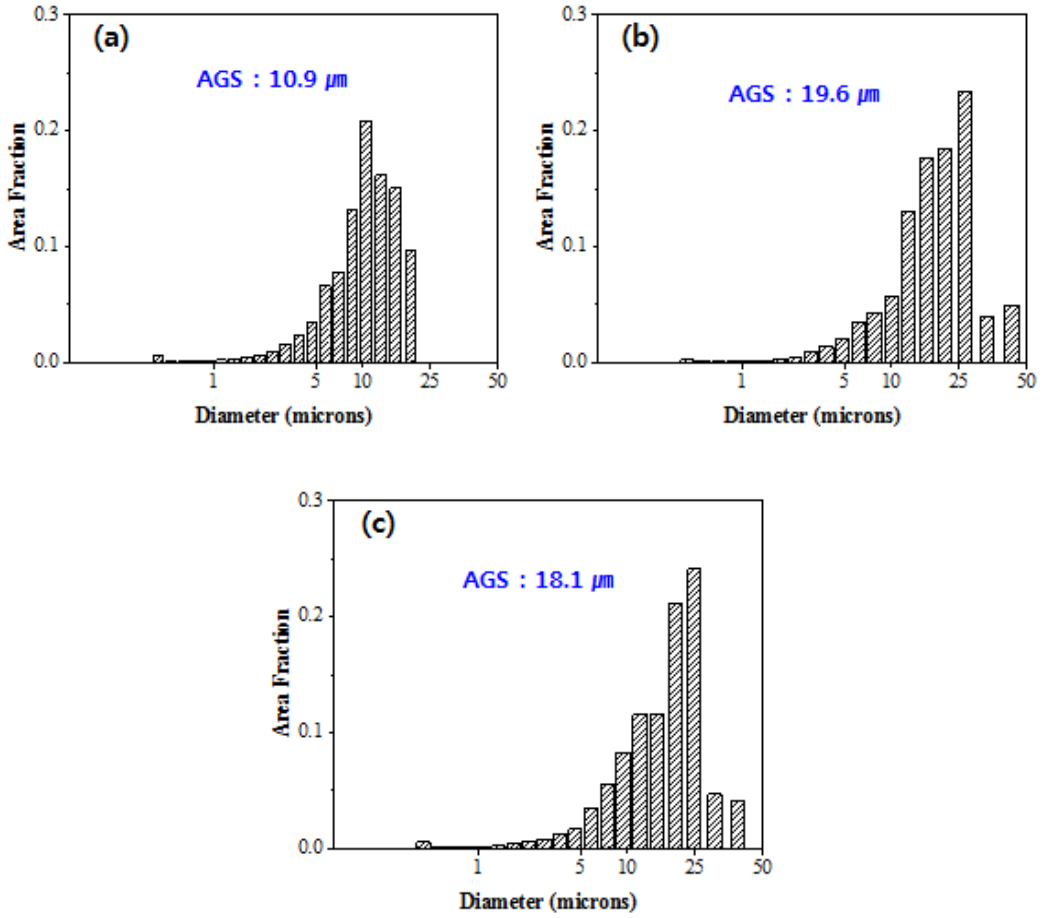


그림 24. 압셋압력 25 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 결정립 크기분포.
(a) 압셋시간 3 sec, (b) 압셋시간 5 sec와 (c) 압셋시간 7 sec.

다. Misorientation angle distribution

모재와 9개 공정조건에 대한 입계어긋남각 분포를 분석하였다. 초기모재는 그림 25(a)에 나타낸 바와 같이 모재의 경우, 고경각입계(High angle grain boundaries, HABs)가 전체 입계분포 중 86%를 차지하고 있으며, $2 \sim 60^\circ$ 에 걸쳐 전체적으로 비슷한 비율로 분포하고 있었다. 압셋압력 15 kg/cm^2 에서 압셋시간의 변화에 따른 입계어긋남각 분포를 그림 25(b-d)에 나타내었다. 압셋시간이 3 sec 인 1번 조건의 입계어긋남각 분포는 그림 25(b)와 같이, 저경각입계(Low angle grain boundaries, LABs)가 19%를 차지하였고, 그 중 3° 분포가 11%를 차지하고 있었다. 또한, HABs가 81%로 초기모재에 비해 감소하였다. 압셋시간이 5 sec로 증가된 2번 조건의 경우, 그림 25(c)에 나타낸 바와 같이, HABs가 전체입계분포 중 90%를 차지하였고, 그 중 30° 와 60° 분포가 약 20%정도를 나타내었다. 또한 1번 조건에 비하여 HABs분포가 초기모재에 비하여 증가하였다. 이에 반해, 압셋시간이 7sec로 증가된 3번 조건은 그림 25(d)에 나타낸 바와 같이, HABs 분포가 71%로 초기모재에 비하여 10%가량 감소한 결과를 보였다.

압셋압력을 20 kg/cm^2 에서, 압셋시간의 변화에 따른 입계어긋남각 분포를 그림 26에 나타내었다. 압셋시간이 3 sec인 4번 조건은 그림 26(a)에 나타낸 바와 같이, HABs가 전체 입계 중 87%를 차지하고 있었으며, HABs 중 $45 \sim 60^\circ$ 가 가장 높은 비율을 차지하였다. 또한, 압셋시간이 5 sec로 증가된 5번 조건의 경우, 그림 26(b)와 같이 4번 조건과 유사한 입계어긋남각 분포를 나타내었고, HABs가 84%로 다소 감소하였다. 이와 유사하게, 압셋시간이 7 sec로 증가된 6번 조건은 그림 26(c)에 나타낸 바와 같이, HABs 분포가 전체입계 중 85%를 차지하고 있었으나, 4번과 5번 조건과는 달리 HABs 중 30° 와 60° 분포가 가장 높은 비율을 나타내었다.

업셋압력 25 kg/cm^2 에서, 업셋시간의 변화에 따른 입계어긋남각 분포를 그림 27에 나타내었다. 업셋시간이 3 sec인 7번 조건은 그림 27(a)와 같이, HABs가 전체 입계 중 74%를 차지하였으며, LABs의 분포가 26%로 상당히 증가하였고, LABs중 3° 분포가 18%로 높은 비율을 차지하고 있었다. 업셋시간이 5 sec 증가된 8번 조건의 경우, 그림 27(b)와 같이 3° 분포가 17%로 전체입계 중 가장 높은 비율로 차지하고 있었고, HABs가 75%정도로 7번 조건과 유사한 분포를 나타내었다. 업셋시간이 7 sec인 9번 조건은 그림 27(c)에 나타낸 바와 같이 HABs가 전체입계 중 80%를 차지하였으며, 그 중 30° 와 60° 분포가 가장 높은 비율로 나타났다. 업셋압력이 25 kg/cm^2 로 증가된 7, 8과 9번 조건은 LABs의 분포가 20% 이상으로, 업셋압력이 20 kg/cm^2 인 조건에 비해 현저히 증가된 결과를 나타내었다.

조건별 접합부 입계어긋남각의 변화양상을 분석한 결과, 고경각입계분포가 2번과 3번 조건에서 각각 90%와 71%로 최대와 최소치를 보였고, 1번부터 9번까지 모든 조건에서 HABs의 분포가 70% 이상을 차지함으로써, 마찰접합프로세스 동안 동적재결정이 건전하게 일어났음을 확인하였다.

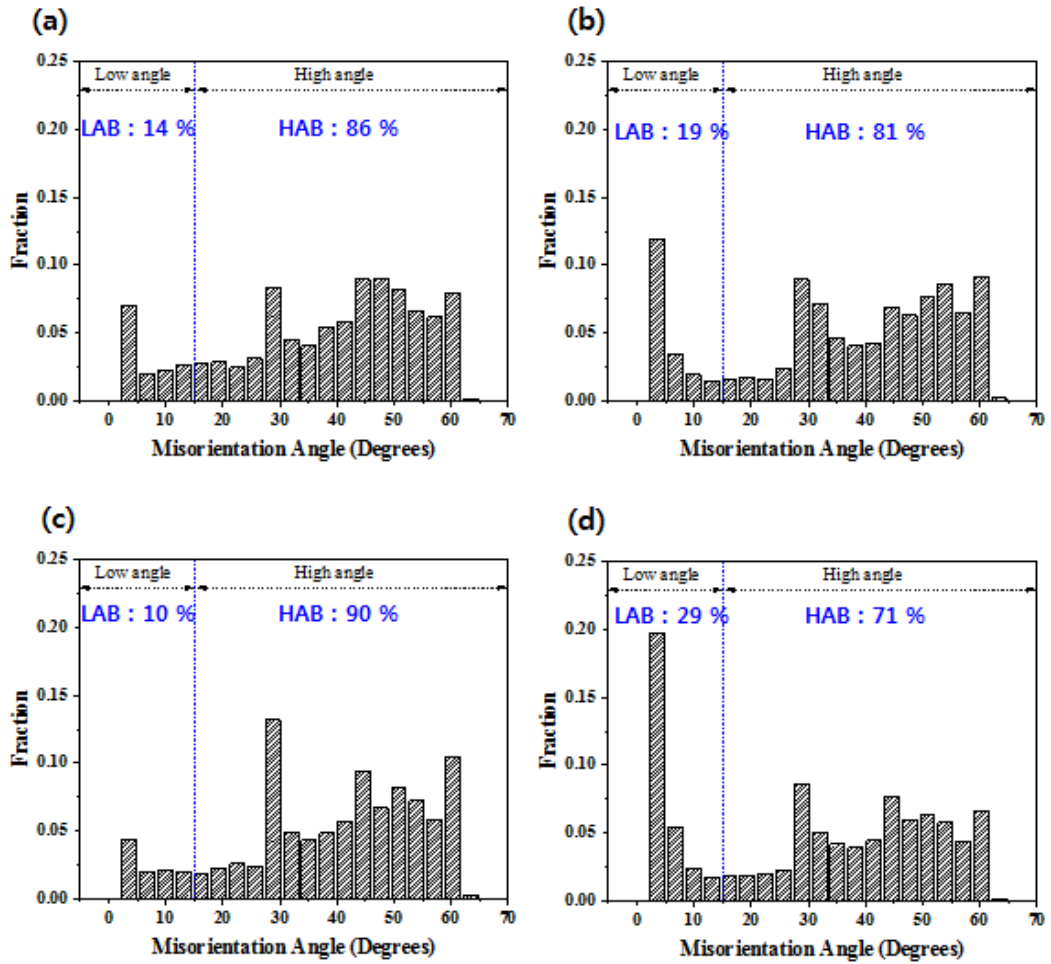


그림 25. 업셋압력 15 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 입계어긋남각 분포. (a) 모재 (b) 업셋시간 3 sec, (c) 업셋시간 5 sec와 (d) 업셋시간 7 sec.

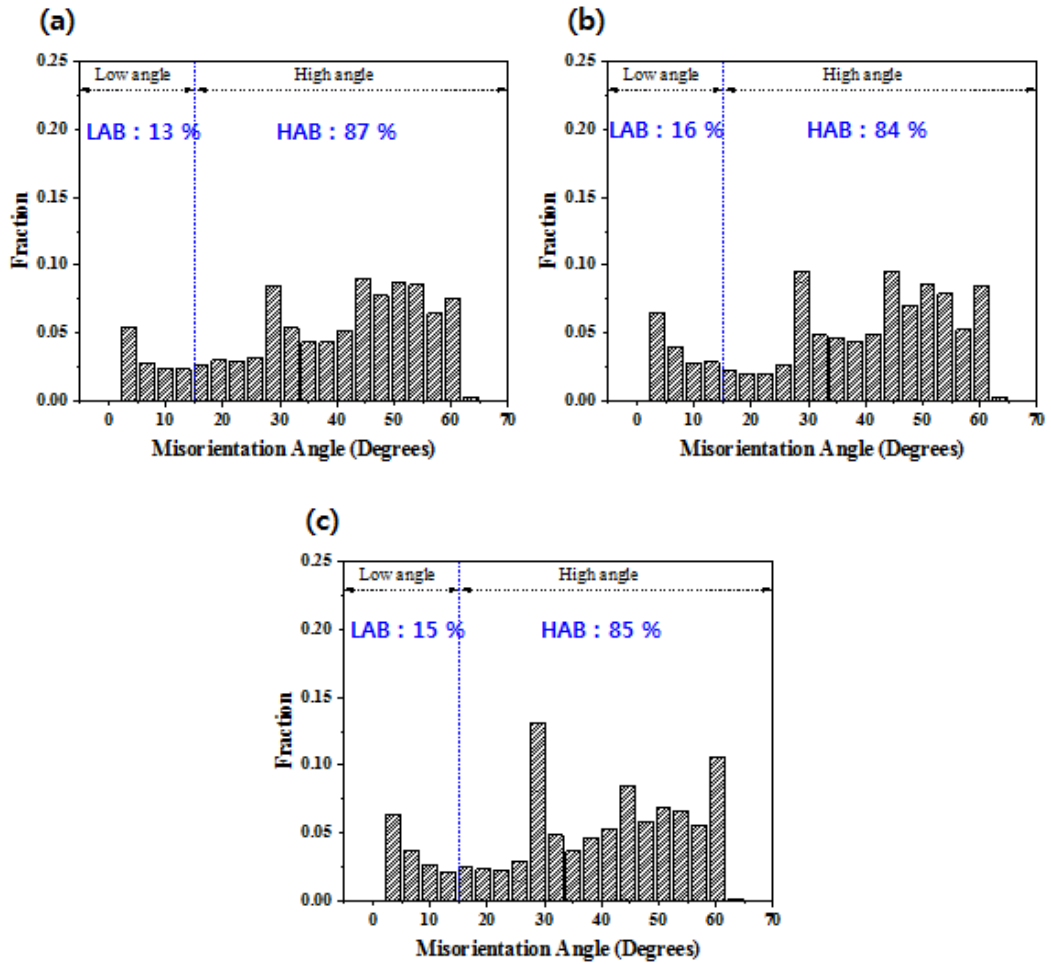


그림 26. 업셋압력 20 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 입계어긋남각 분포. (a) 업셋시간 3 sec, (b) 업셋시간 5 sec와 (c) 업셋시간 7 sec.

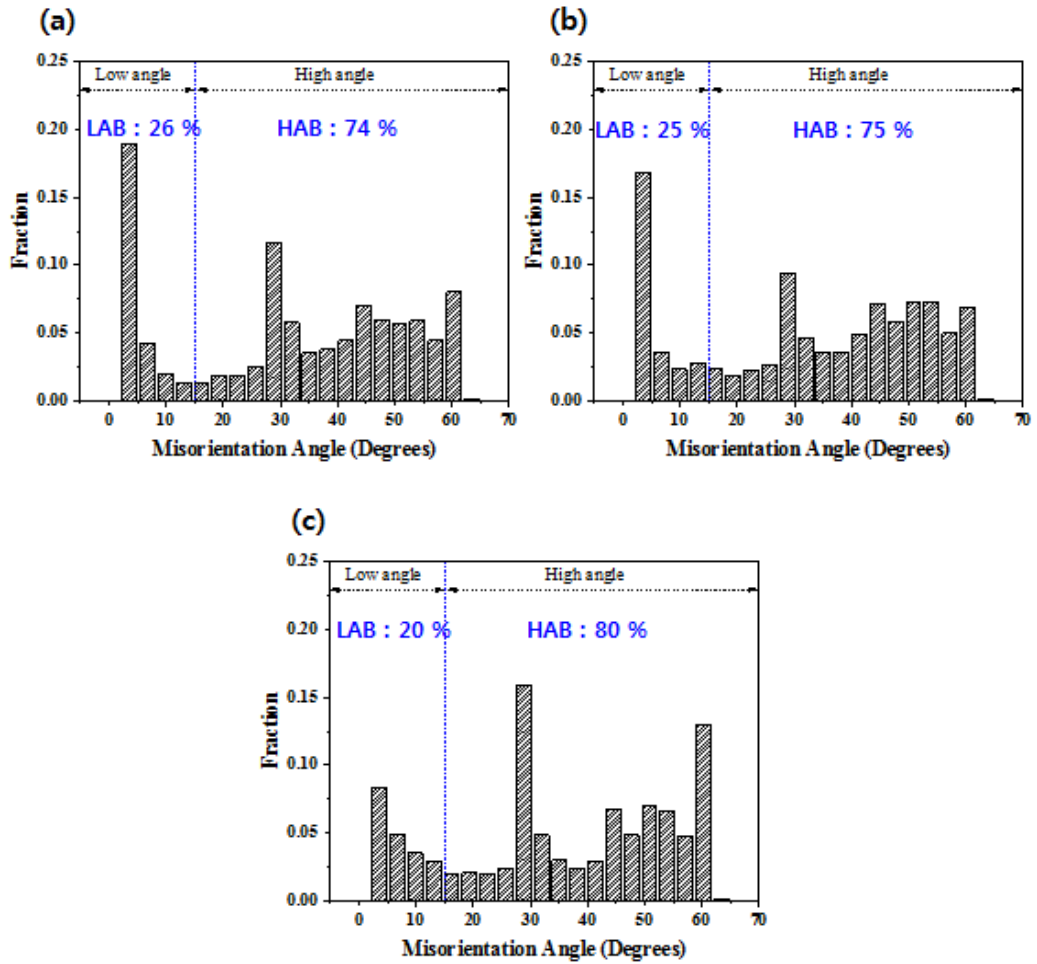


그림 27. 업셋압력 25 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 입계어긋남각 분포. (a) 업셋시간 3 sec, (b) 업셋시간 5 sec와 (c) 업셋시간 7 sec.

제 3절 기계적 특성

4.3.1 경도분포 전개양상

공정조건에 따른 경도분포전개양상을 분석하였다. 초기 모재의 경도가 125 ~ 140 Hv 정도 분포하고 있음을 확인하였다. 업셋압력 15 kg/cm^2 하에 업셋시간을 3, 5 와 7 sec을 달리하였을 때, 경도분포 전개양상을 그림 28에 나타내었다. 업셋시간이 3 sec인 1번 조건의 접합부 경도분포는 그림 28(a)에 나타난 바와 같이, 160 ~ 325 Hv 정도를 보였으며, 접합부 중앙에서 경도가 325 Hv로 모재(140 Hv) 대비 약 130% 증가하는 결과를 보였다. 이에 반해, 업셋시간이 5 sec로 증가된 2번 조건의 경우, 그림 28(b)에 나타난 바와 같이 135 ~ 145 Hv로 모재에 비하여 증가된 분포를 보이고 있었으나, 1번 조건에 비하여 상당히 감소한 결과를 나타내었다. 업셋시간이 7 sec로 증가된 3번 조건은 그림 28(c)에 나타난 바와 같이, 125 ~ 135 Hv로 모재와 거의 유사한 크기를 보였고, 모재에 인접한 접합부에서 다소 연화 된 영역이 나타났다. 위 결과들을 통해, 접합시간이 증가함에 접합부의 폭이 약 1 mm에서 약 4.5 mm로 넓어졌으며, 접합부 경도분포가 감소하는 결과를 보였다.

업셋압력을 20 kg/cm^2 으로 증가시킨 상태에서, 업셋시간의 변화에 따른 경도분포 전개양상을 그림 29에 나타내었다. 업셋시간이 3 sec인 4번 조건은 그림 29(a)에 나타난 바와 같이 약 155 - 180 Hv 정도를 보였으며, 접합부 최대 경도가 약 180 Hv로 모재(140 Hv)대비 약 30% 정도 증가하는 결과를 보였다. 업셋시간이 5 sec로 증가된 5번의 경우, 그림 29(b)에 나타난 바와 같이 130 - 145 Hv 정도로, 4번에 비하여 상당히 감소한 결과를 나타내었으며, 2번 조건과 유사한 분포를 보이고 있었다. 업셋시간이 7 sec로 증가된 6번 조건은 그림 29(c)와 같이, 128 - 150 Hv로 모재와 유사한 분포를 보였지만, 3번 조건과 유사하게 모재에 인접한 접합부에서 연화된 영역이 관찰되었다. 위 결과들을 통해, 접합시간이 증가함에 따라 접합부의 폭이 약 2 mm에서 5 mm로 넓어졌으며, 접합부 경도분포가 업셋시간 3 sec에서 상당히 증가하고 5 sec 이후에는 모재와 유사한 수준을 보이고 있음을 확인하였다.

업셋압력을 25 kg/cm^2 에서, 업셋시간의 변화에 따른 경도분포 전개양상을 그림 30에 나타내었다. 업셋시간이 3 sec인 7번 조건의 경도분포는 그림 30(a)에 나타난 바와 같이 125 ~ 135 Hv 정도를 나타내었으며, 모재와 유사한 분포를 나타내었다. 또한, 업셋시간이 5 sec와 7 sec 인 8번 조건과 9번 조건의 경도분포는 그림 30(b)와 (c)에 나타난 바와 같이 130 ~ 145 Hv 정도로 나타났고, 모재에 인접한 영역에서 연화된 영역이 존재하였다. 동일압력(25 kg/cm^2)에서 업셋시간이 증가함에 따라 접합부 폭이 약 2 mm에서 약 4 mm로 증가하였고, 경도분포는 모재와 유사한 분포를 나타내었다.

공정조건에 따른 경도분포전개양상을 분석한 결과, 접합시간이 길어짐에 따라 접합부의 경도는 감소하거나 모재와 유사한 분포를 보였고, 접합부의 폭이 길어지는 결과를 나타내었다. 특히, 접합시간이 가장 짧은 1번 조건과 4번 조건에서 경도가 각각 329 Hv와 180 Hv로 모재 대비 현저히 증가된 경도분포를 보였다. 이와 같은 결과는 접합부의 결정립 미세화로 설명될 수 있다. 일반적으로 기계적 물성은 결정립 크기에 가장 큰 영향을 받게 되는데, 그림 22(b)와 그림 23(a)에 나타난 바와 같이, 접합부에서 모재대비 현저히 미세화 된 결정립이 1번 조건과 4번 조건의 경도향상에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

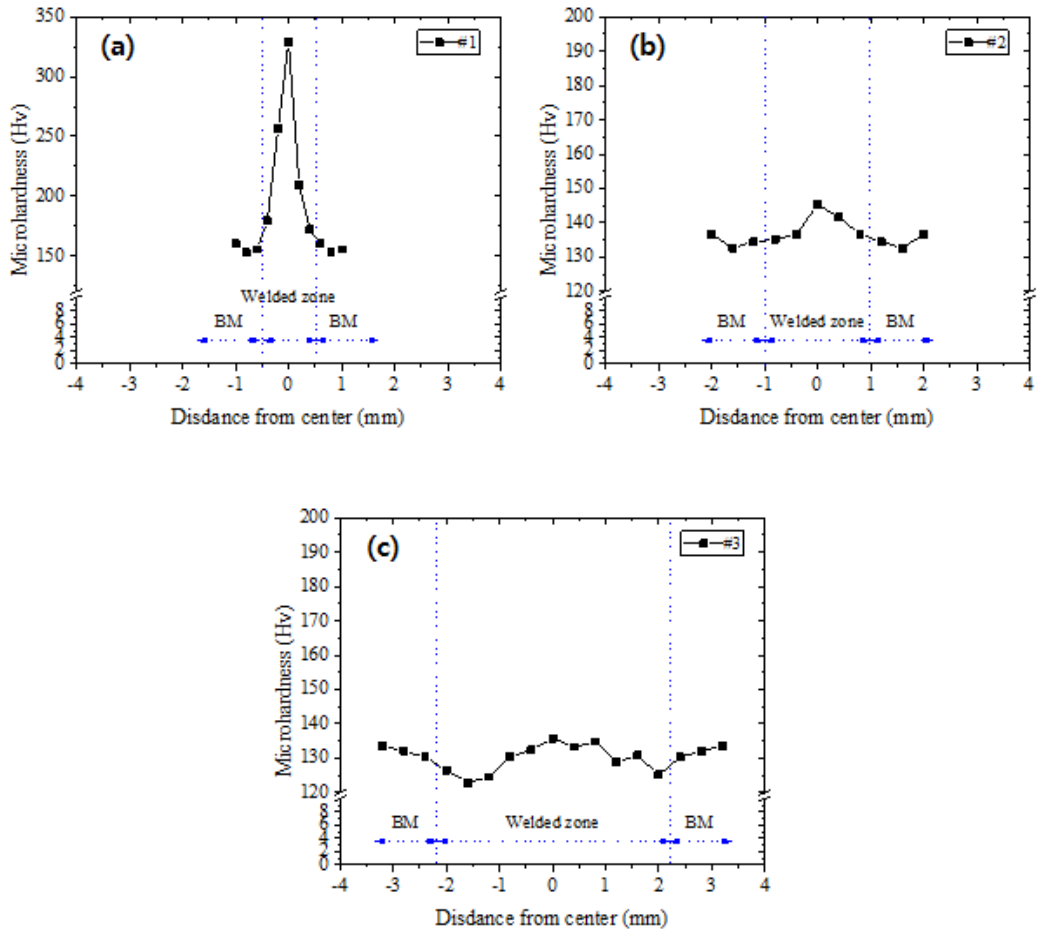


그림 28. 압셋압력 15 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 경도분포. (a) 압셋시간 3 sec, (b) 압셋시간 5 sec와 (c) 압셋시간 7 sec.

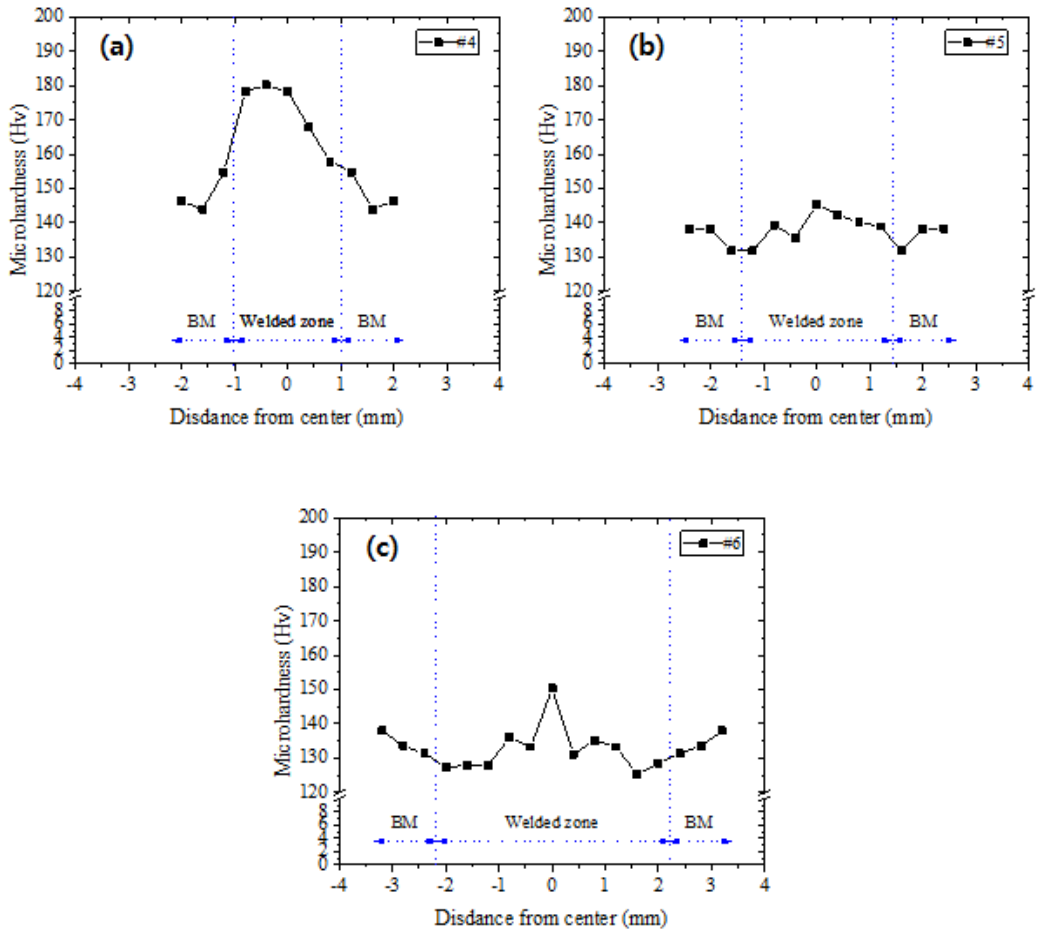


그림 29. 압셋압력 20 kg/cm²으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 경도분포. (a) 압셋시간 3 sec, (b) 압셋시간 5 sec와 (c) 압셋시간 7 sec.

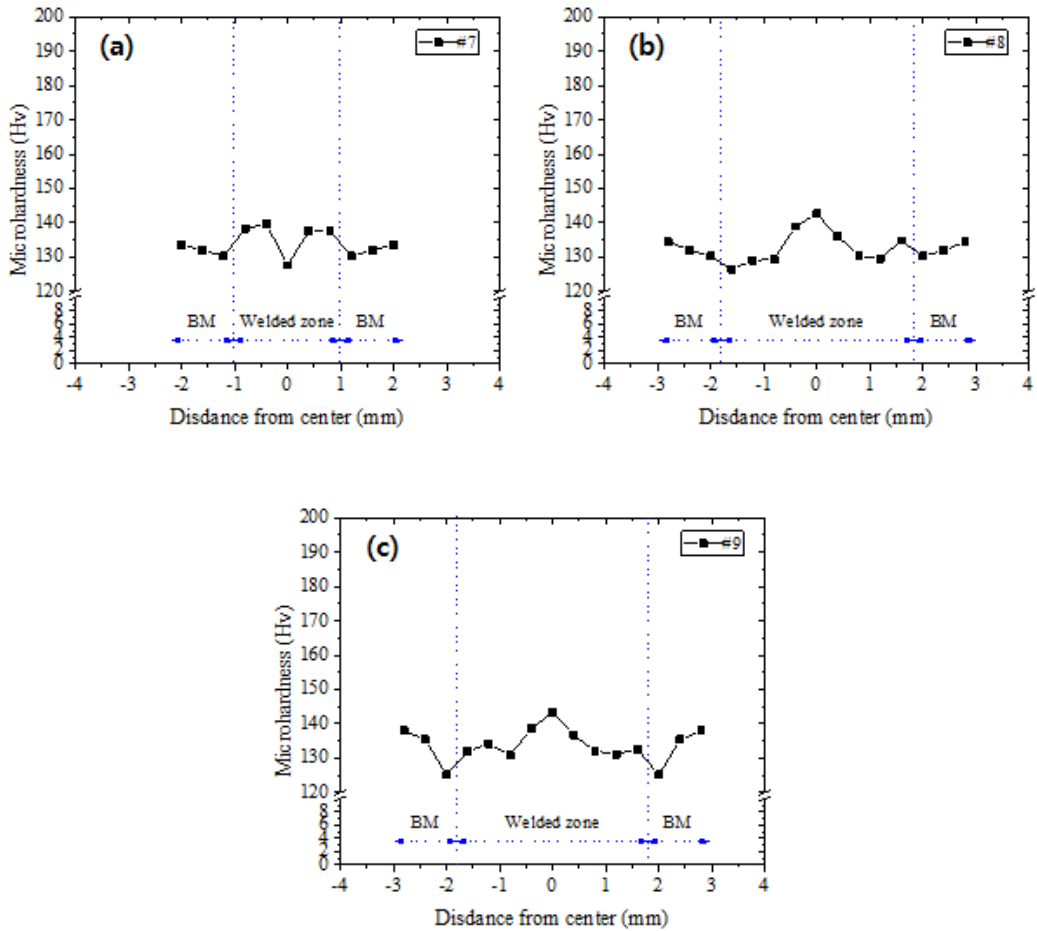


그림 30. 압셋압력 25 kg/cm^2 으로 마찰접합 된 STK 400 합금의 경도분포. (a) 압셋시간 3 sec, (b) 압셋시간 5 sec와 (c) 압셋시간 7 sec.

4.3.2 인장시험 전개양상

초기모재와 공정조건에 따른 마찰접합재의 인장특성을 그림 31에 나타내었다. 모재의 인장강도, 항복강도와 연신율은 각각 455 MPa, 408 MPa과 21%를 나타내었다. 마찰접합재의 경우, 4번 조건(업셋압력 20 kg/cm^2 , 업셋시간 3 sec)에서 458 MPa로 가장 낮은 인장강도 값을 나타내었고, 2번 조건(업셋압력 15 kg/cm^2 , 업셋시간 5 sec)에서 478 MPa로 가장 높은 인장강도 값을 나타내었다. 하지만 3, 5와 6번 조건에서 인장강도가 각각 473, 476과 476 MPa로 최대 인장강도(2번 조건)와 큰 차이를 보이지 않았다. 인장시험결과에 따른 인장시험편의 파단양상을 그림 32에 나타내었다. 모재의 경우, 표점거리 전체적으로 변형이 일어나면서 연신되었고, 시편의 중앙부에서 파단되었다. 마찰접합을 적용한 결과, 그림 32와 같이 모든 조건은 모재부분에서 변형이 일어나면서 파단되는 양상을 보였다. 그 결과, 항복강도와 연신율 또한 기존모재 수준 이상으로 우수한 결과를 나타내었다.

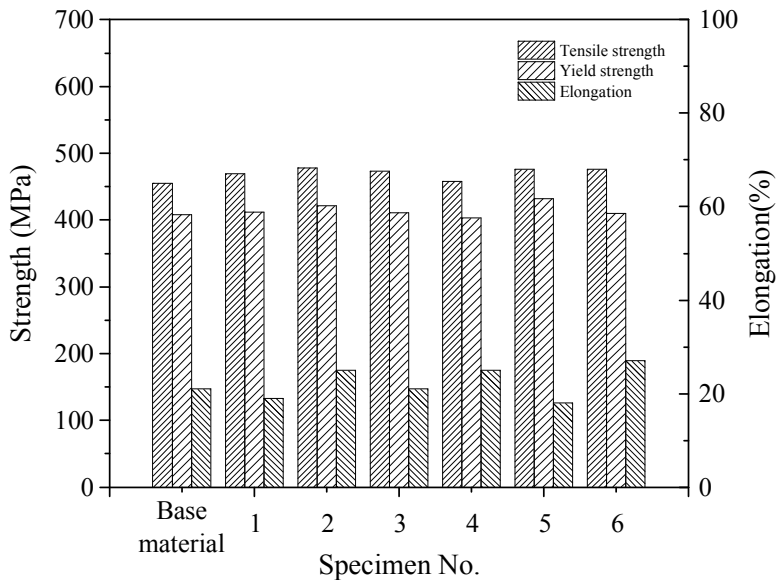


그림 31. 마찰접합 된 STK 400 합금의 인장특성.

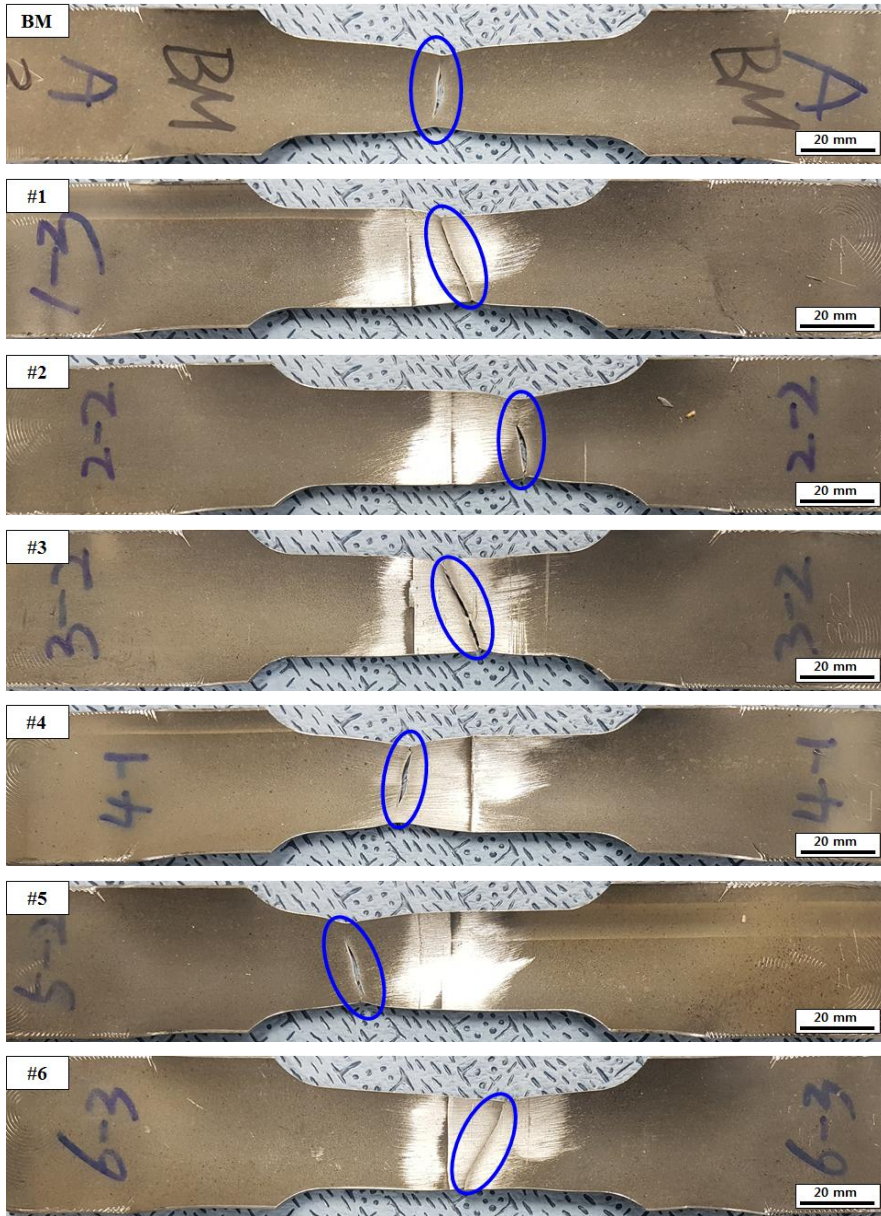


그림 32. 마찰접합 된 STK 400 합금의 인장시험 결과(외관 형상).

제 5장 고찰

제 1절 공정조건과 미세조직전개

이 연구에서는 STK 400 합금에 대한 마찰접합의 적용을 통해 접합부내 상변태를 억제 할 수 있었다. 그 결과, 접합부 미세조직은 그림 16 ~ 18과 같이 조건에 따라 등축 혹은 변형페라이트, 펄라이트 그리고 F-C-A 조직으로 구성되어 있었고, 베이나이트나 마르텐사이트와 같은 복잡한 상변태 조직은 관찰되지 않았다. 이와 같은 결과는, 마찰접합 시 베이나이트나 마르텐사이트가 나타난 문헌들의 경우, 접합온도범위가 1200 ~ 1350 °C 임을 고려했을 때, 그 이하 온도 범위인 760 ~ 910 °C 범위에서 접합되었다고 판단된다.[8, 11, 28, 24, 29, 30] 이들의 결과는 온도변화에 따른 상의 변화를 나타낸 그림 33과 같이 마찰열에 의해 초기모재(페라이트+펄라이트)조직 중 펄라이트가 페라이트+오스테나이트 영역에 도달 후 냉각되는 과정에서 오스테나이트결정립이 미세한 페라이트와 펄라이트로 변태 되는 과정으로 설명될 수 있다.[30, 31]

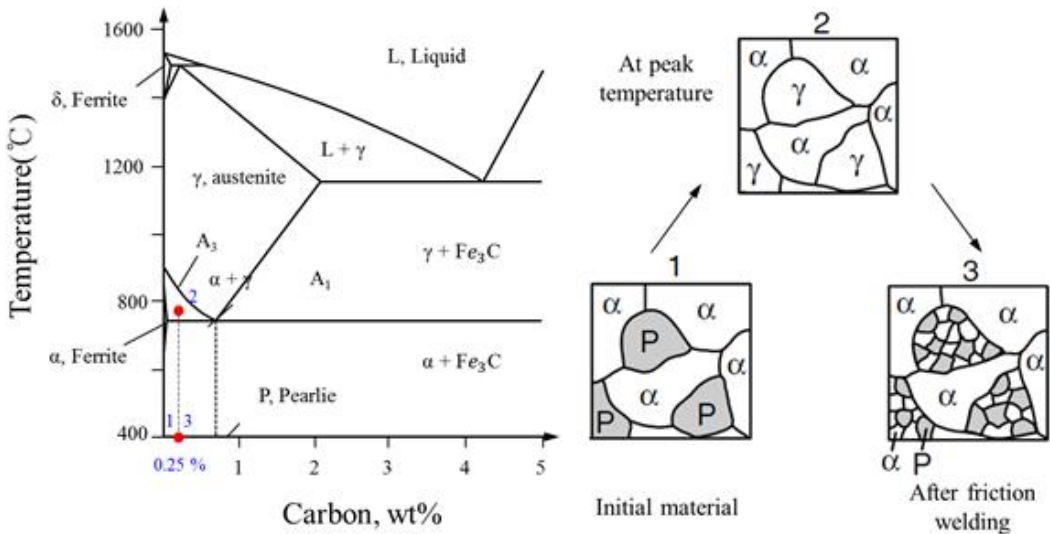


그림 33. STK 400합금의 온도 변화에 따른 상변화

또한, STK 400 합금에 대한 마찰접합의 적용은 접합부에서 결정립 미세화를 초래하였고, 압력과 접합시간이 감소함에 따라 더욱 가속화되었다. 그 결과, 초기 모재에서 $15.1 \mu\text{m}$ 였던 평균입도가 그림 23과 같이 4번 조건에서 $4.5 \mu\text{m}$ 로 현저히 미세화되었다. 이러한 결과는 마찰접합 시 동반되는 동적재결정으로 설명될 수 있다.[24, 32, 33] 일반적으로, 마찰접합 동안 발생한 마찰열과 재료의 소성유동은 동적재결정이 발생하는데 기여하며, 이로 인해 접합부에서 현저히 미세화 된 등축정 결정립을 형성하게 된다. 특히, 이 연구에서 사용된 재료인 STK 400 합금은 주로 ferrite 결정립으로 구성되어있는 재료로써, 마찰접합과 같은 고온 가공 프로세스 동안 연속동적재결정(Continuous dynamic recrystallization, CDRX)이 발생하게 된다.[34, 35, 36, 37] 이러한 연속동적재결정은 접합과정 중 발생한 큰 변형량과 마찰열로 인해 결정립계를 따라 지속적으로 전위가 축적되면서 결정립의 회전과 저각각입계가 고각각입계로 전환되는 과정을 통해 결정립계와 결정립내부에서 더욱 많은 재결정 핵생성이 유발됨으로써, 결정립미세화가 초래되었다.[38, 39]

하지만, 위와 반대로 그림 24와 같이 8번 조건과 9번 조건의 평균입도는 각각 19.6 , $18.1 \mu\text{m}$ 로 조대화 되었다. 일반적으로, 동적재결정에 의해 형성된 결정립은 변형량이 클수록 더욱 미세한 결정립을 확보할 수 있다. 하지만, 마찰접합 공정에서 압력은 재료 내 변형량뿐만 아니라 접합시간과 함께 입열량에도 영향을 미치는 변수로 작용하였다. 이로 인하여, 압력과 접합시간이 증가함에 따라 입열량이 증가하게 되었고, 상대적으로 동적회복, 동적재결정이 빠르게 완결되어, 접합시간이 짧은 조건들에 비해 조대화 된 결과를 초래하였다.

이 연구에서는 마찰접합공정을 통해 접합부에서 미세결정립 확보하고 복잡한 상변태를 피하기 위해서는 동적재결정이 충분히 일어날 수 있는 온도(0.5 ~ 0.7 T_m)와 접합시간을 최소화하는 4번 조건(업셋압력 20 kg/cm^2 , 업셋시간 3 sec)이 최적 조건이라 판단된다.

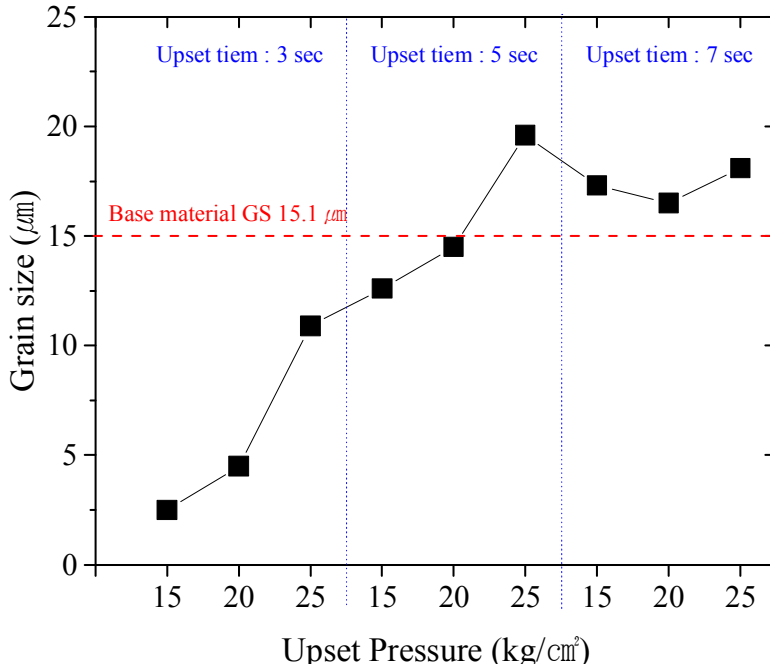


그림 34. 동일 업셋시간 하에 업셋압력 변화에 따른 결정립 크기 변화양상

제 2절 미세조직 발달에 따른 기계적 특성 변화

접합부의 결정립 미세화는 기계적 특성의 향상에 영향을 주었다. 마찰접합동안 큰 변형량과 마찰열이 동반되어, 이들로 인하여 접합부내 동적재결정이 유발되었고, 그 결과 접합부 내 결정립 미세화가 나타났다. 또한, 접합시간이 감소함에 따라 결정립이 미세화가 가속화되었고 1번 조건과 4번 조건에서 접합부 평균입도가 15.1 μm (모재)에서 각각 2.5 μm (1번 조건)와 4.5 μm (4번 조건)로 현저히 미세화되었다. 결정립 미세화는 경도향상에 영향을 주었는데, 그 결과, 초기모재의 경도가 140 Hv에서 각각 320 Hv(1번 조건)와 180 Hv(4번 조건)로 향상되었다. 미세화에 따른 접합부 경도의 향상은 그림 35에 나타난 바와 같이 결정립계의 강화(Hall-Petch equation)로 설명될 수 있다.[40, 41] 서로 다른 방위를 갖는 결정립들은 서로 다른 방향의 슬립면을 가지고 있는데, A 결정립의 슬립면에서 버거스벡터 b_1 방향으로 이동하던 전위가 B 결정립에 도달하게 되면 슬립면의 방향이 다르기 때문에 더 이상 이동할 수 없게 되고, 그 결과 결정립계에 전위가 축적되게 된다. 즉, 결정립의 크기가 작아질수록 결정립계의 길이 증가하게 되어 전위의 이동을 막아줄 수 있게 되어 결과적으로 재료의 소성변형에 대한 저항성을 증가시킬 수 있다

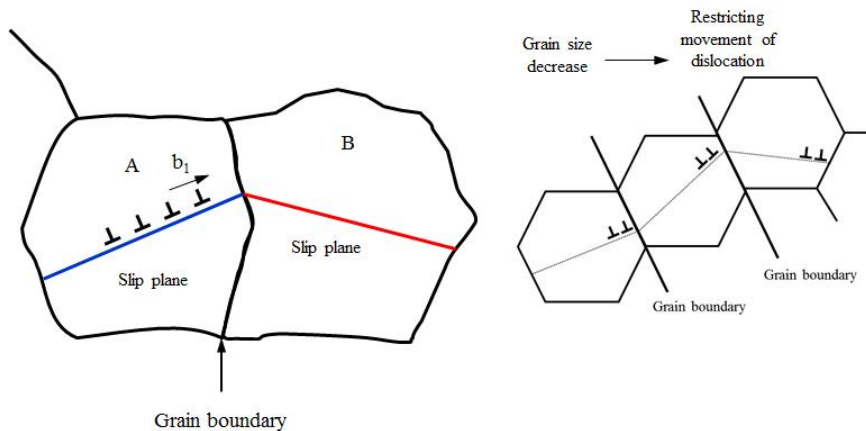


그림 35. 전위 이동에 대한 결정립계(결정립크기)의 영향

모든 마찰접합재의 인장시험 시 그림 32에 나타난 바와 같이 모재에서 우선 변형이 발생한 후 파단 되는 결과를 보였는데, 이는 마찰접합부의 결정립 미세화에 의한 결과로 판단된다. 마찰접합부가 더 큰 강도를 갖고 있기 때문에, 상대적으로 약한 모재에서 우선적으로 변형이 발생되었고, 그 결과 모재에서 파단되는 결과를 초래하였다. 이로 인하여, 모든 마찰접합재는 모재와 거의 같거나 더 높은 인장강도를 보였다. STK 400 합금에 대한 마찰접합의 적용으로 접합부에서 결정립미세화를 초래 할 수 있었고, 이에 따른 우수한 기계적 물성을 확보 할 수 있었다.

제 6장 결론

STK 400 합금에 대하여 마찰접합과정에서 관찰되는 미세조직전개와 기계적 특성에 관한 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. STK 400 합금에 대한 마찰접합의 적용으로, 용융용접(Fusion welding)에서 발견되는 기공, 균열, 열변형 등과 같은 결함 없이 건전하게 수행되었다. 또한, 마찰접합은 저입열 공정으로 고상상태에서 접합이 가능하기 때문에 접합부에서 복잡한 상변태를 억제할 수 있었으며, 동적재결정에 의한 결정립 미세화를 초래 할 수 있었다.
2. 접합부의 결정립 미세화는 업셋압력(변형량, 입열량)과 업셋시간(접합시간)이 감소함에 따라 더욱 가속화 되었는데, 이를 통해 평균입도가 15.1 μm (초기모재)에서 4.5 μm 까지 현저히 미세화 되었다. 또한, 모든 조건에서 고경각입계의 분포가 전체 입계 중 70% 이상을 차지함으로써, 접합과정 중 동적재결정이 건전하게 완결되었음을 확인하였다.
3. 접합부의 결정립 미세화는 기계적 특성에 직접적인 영향을 주었는데, 그 결과, 접합부의 경도(180 Hv)가 모재대비 약 28% 증가하였고, 인장시험 시 접합부가 아닌 모재에서 파단 되는 양상을 보임으로써, 접합부의 기계적 특성이 모재 대비 우수함을 확인하였다. 따라서 STK 400 합금에 대한 마찰접합의 적용은 미세 조직 발달에 기초한 기계적 특성의 향상에 효과적임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 2016 산업재해분석. 고용노동부, 2017.
- [2] 황정현, 신상태, 윤상문, 김경화 : 강제파이프서포트의 성능평가 및 영향요인에 대한 연구, 한국콘크리트학회, Vol. 16, No. 2, pp. 139-146, 2004.
- [3] 강재 파이프 서포트 KS F8001, 한국표준협회, 2016.
- [4] Takeshi SHINODA, Shiniti KAWATA : Friction welding of A 6061 aluminum alloy and S45C carbon steel, Material science forum, Vol. 449-452, pp. 437-440, 2004.
- [5] 정호신, 방국수 : 회주철의 마찰용접 특성에 관한 연구 -입열량 이론식을 중심으로, 대한용접·접합학회지, Vol. 32, No. 3, 2014.
- [6] Rehan Akhter, W. M. Steen, K. G. Watkins : Welding Zinc-Coated Steel with a Laser and the Properties of the Weldment, Journal of laser applications, Vol. 3, No. 2, pp. 9-20, 1991.
- [7] 대한용접·접합학회, 용접·접합편람 III 공정 및 열가공, 2007.
- [8] T. C. Nguyen, D. C. Weckman : A Thermal and Microstructure Evolution Model of Direct-Drive Friction Welding of Plain Carbon Steel, Metallurgical and materials transactions B, Vol. 37, No. 2, pp. 275-292, 2006.
- [9] M. Maalekian : Friction welding - critical assessment of literature, Science and technology of welding and joining, Vol. 12, No. 8, pp. 738-759, 2007.
- [10] M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati, A. B. Ismail : Advances in friction welding process: a review, Science and technology of welding and joining, Vol. 15, No. 7, pp. 534-558, 2010.
- [11] W. M. Thomas, P. L. Threadgill, and E. D. Nicholas : Feasibility of friction stir welding steel, Science and technology of welding and joining, Vol. 4, No. 6, pp. 365-372, 1999.
- [12] H. A Mohamed and J. Washburn : Mechanism of Solid State Pressure Welding, Welding research supplement, pp. 302-310, 1975.

- [12] E. A Mohamed and J. Washburn : Mechanism of Solid State Pressure Welding, Welding research supplement, pp. 302-310, 1975.
- [13] Eun Hye Kim, Hidetoshi Fujii, Jae Ha Kim, Kuk Hyun Song : Microstructure and Mechanical Properties of Friction-Welded S20C and SCM415H Steels, Materials transactions, Vol. 59, No. 3, pp. 503-506, 2017.
- [14] 정호신, 소전강 : 마찰용접의 이론과 실제의 적용, 대한용접·접합학회지, Vol. 15, No. 6, pp. 1-12, 1997.
- [15] M. Sahin : Characterization of properties in plastically deformed austenitic-stainless steels joined by friction welding, Materials and design, Vol. 30, No. 1, pp. 135-144, 2009.
- [16] 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, Journal of adhesion science and technology, Vol. 29, No. 12, pp. 1246-1257, 2015.
- [17] 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 materialia, Vol. 61, No. 5, pp. 1662-1675, 2013.
- [18] Mumin Sahin, H. Erol. Akata, Turgut Gulmez : Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding, Materials characterization, Vol. 58, No. 10, pp. 1033-1038, 2007.
- [19] I. Kirik, N. Ozdemir : Effect of process parameters on the microstructure and mechanical properties of friction-welded joints of AISI 1040/AISI 304L steels, Materials and technology, Vol. 49, No. 5, pp. 825-832, 2015.
- [20] M. Cenk, S. Mumin, K. Hilmi : Temperature Determination of St-Al Joints during Friction Welding, Advanced materials research, Vol. 463-464, pp. 1538-1542, 2012.
- [21] 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, *Materials and design*, Vol. 88, pp. 58-68, 2015.
- [22] P. Sathiya, S. Aravindan, A. Noorul Haq : Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel, *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 31, No. 11-12, pp. 1076-1082, 2007.
- [23] Hakan Ates, Mehmet Turker, Adem Kurt : Effect of friction pressure on the properties of friction welded MA956 iron-based superalloy, *Materials and design*, Vol. 28, No. 3, pp. 948-953, 2007.
- [24] F. D. Duffin, A. S. Bahrani : Frictional behaviour of mild steel in friction welding, *Wear*, Vol. 26, No. 1, pp. 53-74, 1973.
- [25] O. T. Midling, Grong : A process model for friction welding of AlMgSi alloys and AlSiC metal matrix composites-II. Haz microstructure and strength evolution, *Acta metallurgica et materialia*, Vol. 42, No. 5, pp. 1611-1622, 1994.
- [26] O. T. Midling, Grong : A process model for friction welding of AlMgSi alloys and AlSiC metal matrix composites-I. Haz temperature and strain rate distribution, *Acta metallurgica et materialia*, Vol. 42, no. 5, pp. 1595-1609, 1994.
- [27] Andrzej Sluzalec : Thermal effects in friction welding, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 32, No. 6, pp. 467-478, 1990.
- [28] Hoon Hwe Cho, Suk Hoon Kang, Sung Hwan Kim, Kyu Hwan Oh, Heung Ju Kim, Woong Seong Chang, Heung Nam Han : Microstructural evolution in friction stir welding of high-strength linepipe steel, *Material and design*, Vol. 34, pp. 258-267, 2012.
- [29] M. D. Tumuluru : Parametric Study of Inertia Friction Welding for Low Alloy Steel Pipes, *Welding research supplement*, Vol. 63, No. 9, pp. 5-10, 1984.
- [30] Hidetoshi Fujii, Ling Cui, Nobuhiro Tsuji, Masakatsu Maeda, Kazuhiro Nakata, Kiyoshi Nogi : Friction stir welding of carbon steels, *Materials science engineering A*, Vol. 429, No. 1-2, pp. 50-57, 2006.

- [31] S. Kou : Welding Metallurgy, No. 2. 2003.
- [32] R. S. Mishra, Z. Y. Ma : Friction stir welding and processing, Materials science engineering R, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [33] M. N. Ahmad Fauzi, M. B. Uday, H. Zuhailawati, A. B. Ismail : Microstructure and mechanical properties of alumina-6061 aluminum alloy joined by friction welding, Material and Design, Vol. 31, No. 2, pp. 670-676, 2010.
- [34] S. Mironov, Y. S. Sato, H. Kokawa : Microstructural evolution during friction stir-processing of pure iron, Acta materialia, Vol. 56, No. 11, pp. 2602-2614, 2008.
- [35] S. Emami, T. Saeid, R. A. Khosroshahi : Microstructural evolution of friction stir welded SAF 2205 duplex stainless steel, Journal of alloys and compounds, Vol. 739, pp. 678-689, 2018.
- [36] P. Cizek, B. P. Wynne : A mechanism of ferrite softening in a duplex stainless steel deformed in hot torsion, Materials science engineering A, Vol. 230, No. 1-2, pp. 88-94, 1997.
- [37] T. F. A. Santos, E. A. Torres, J. C. Lippold, A. J. Ramirez : Detailed Microstructural Characterization and Restoration Mechanisms of Duplex and Superduplex Stainless Steel Friction-Stir-Welded Joints, Journal of materials engineering and performance, Vol. 25, No. 12, pp. 5173-5188, 2016.
- [38] F. J. HUMPHREYS, M. HATHERLY : Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Elsevier, No. 2, 2004.
- [39] S. Suwas, R. K. Ray, R. K. R. Satyam Suwas : Crystallographic Texture of Materials, Springer, 2014.
- [40] J. Pelleg, Mechanical Properties of Materials, Springer, 2013.
- [41] Kuk Hyun Song, Hidetoshi Fujii, Kazuhiro Nakata : Evaluation of Grain Refinement and Mechanical Property on Friction Stir Welded Inconel 600, Materials transactions, Vol. 50, No. 4, pp. 832-836, 2009.