



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](#)

2023년 8월
석사학위 논문

이주속 압연을 통해 제조한 Fe계 이종
금속 바이메탈의 압연 조건에 따른
조직 및 기계적 특성

조선대학교 대학원

치의생명공학과

조 우 빈

이주속 압연을 통해 제조한 Fe계 이종 금속 바이메탈의 압연 조건에 따른 조직 및 기계적 특성

**Microstructure and mechanical properties of Fe-based bimetals
manufactured by differential speed rolling according to rolling
conditions**

2023년 8월 25일

조선대학교 대학원

치의생명공학과

조 우 빈

이주속 압연을 통해 제조한 Fe계 이종
금속 바이메탈의 압연 조건에 따른
조직 및 기계적 특성

지도교수 최 한 철

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 4월

조선대학교 대학원

치의생명공학과

조 우 빈

조우빈의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김병훈 (인)

위원 한국생산기술연구원 박사 전재열 (인)

위원 조선대학교 교수 최한철 (인)

2023년 5월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables	IV
List of Figures	V
ABSTRACT	XII
제 1 장. 서론	01
제 1 절. 연구배경 및 목적	01
1. 바이메탈	01
2. 연구목적	03
3. 바이메탈 제조 공정	04
4. 비대칭 압연	08
5. 압연에 의한 이종 금속 접합 메커니즘	16
6. 이주속 압연의 변형 특성	17
7. 집합조직	19
8. 유한요소해석	23
제 2 절. 동속 및 이주속 압연을 통해 제조한 Fe계 이종 금속 바이메탈의 조직 및 기계적 특성	24
제 3 절. 동속 및 이주속 압연의 패스 스케줄에 따른 Fe계 이종 금속 바이메탈의 조직 및 기계적 특성	24
제 4 절. Outline of the thesis	25

제 2 장. 동속 및 이주속 압연을 통해 제조한 Fe계 이종 금속 바이메탈의 조직 및 기계적 특성 26

제 1 절. 서론	26
제 2 절. 실험 방법	27
제 3 절. 결과 및 고찰	32
1. 이주속 압연의 압하율 및 롤 속도비에 따른 접합 유·무	32
2. 롤 속도비에 따른 압연 하중	33
3. 롤 속도비에 따른 핀 형상	34
4. 전단변형량 및 상당변형량 계산 결과	37
5. 미세조직 및 집합조직	42
6. 동속 및 이주속 압연에 따른 두께별 경도 분포	48
7. 유한요소해석	50
제 4 절. 결론	53

제 3 장. 동속 및 이주속 압연의 패스 스케줄에 따른 Fe계 이종 금속 바이메탈의 조직 및 기계적 특성 54

제 1 절. 서론	54
제 2 절. 실험방법	55
제 3 절. 결과 및 고찰	56
1. 롤 속도비에 따른 핀 형상	56
2. 전단변형량 및 상당변형량 계산 결과	57
3. 집합조직	61
4. 2pass 동속 및 이주속 압연에 따른 두께별 경도 분포	66

5. 유한요소해석	68
제 4 절. 결론	70
제 4 장. 종합 결론	71
참고문헌	73

List of Tables

Table. 1. Previous studies of asymmetric rolling.	4
Table. 2. Chemical composition of alloys used in this experiment (in wt.%).	27
Table. 3. Rolling conditions of differential speed rolling.	28
Table. 4. Cladding results according to reduction ratio and roll speed ratio.	32
Table. 5. Hardness distribution through the thickness of the cladded sheets.	49
Table. 6. Results of friction coefficient according to roll speed ratios.	50
Table. 7. Hardness distribution of 2pass differential speed rolling.	67
Table. 8. Results of friction coefficient of 2pass differential rolling.	68

List of Figures

Fig. 1. Application of bimetals.	02
Fig. 2. The functioning mechanism of bimetallic alloys.	02
Fig. 3. Schematic illustration of Explosive Welding.	05
Fig. 4. Schematic illustration of Twin Roll Casting.	06
Fig. 5. Schematic illustration of Rolling.	07
Fig. 6. Schematic illustration of Cross Rolling.	09
Fig. 7. Interface of bimetal by Cross Rolling.	09
Fig. 8. Schematic illustration of Accumulative Roll Bonding process.	11
Fig. 9. Longitudinal cross section of initial and ARB processed IFsteel strips.	11
Fig. 10. Schematic illustration of (a) ASR process due to rolls diameters mismatch, (b) ASR process of single roll driven rolling and (c) DSR process.	12
Fig. 11. Schematic illustration of Asymmetric Rolling with different roll diameters.	13
Fig. 12. Schematic illustration of Asymmetric Rolling with different roll speed.	14
Fig. 13. Longitudinal cross section of CRB and ARB processed IFsteel strips.	15
Fig. 14. The distribution of average grain size at the height of bimetallic plates after symmetrical $a_v = 1.0$ and asymmetrical rolling process $a_v = 0.75$	15
Fig. 15. Neutral point during conventional rolling.	18
Fig. 16. Change of neutral point during differential speed rolling.	18
Fig. 17. Definition of orientation g	20
Fig. 18. Definition of Euler angles.	21
Fig. 19. Construction of the crystallographic orientation in Euler space (a) individual orientation (b) cloud of orientation and (c) orientation density function.	22
Fig. 20. Schematic illustration of the BCC and FCC rolling textures in Euler space.	22
Fig. 21. Rolling and Cladding process in this experiment.	28
Fig. 22. Schematic illustration of positions measured by EBSD.	30
Fig. 23. IPF map and KAM map of the as-cold rolled 1Mo and Invar.	30
Fig. 24. Schematic illustration of positions measured hardness through the thickness.	31
Fig. 25. Hardness of as-cold rolled 1Mo and Invar.	31
Fig. 26. Rolling load according to roll speed ratio with 50% rolling reduction.	33

Fig. 27. Schematic illustration of embedded pin. 35

Fig. 28. Schematic illustration of embedded pin after rolling. 35

Fig. 29. Deformation of embedded pin according to roll speed ratio. 36

Fig. 30. Variation of the shear strain through the thickness of clad sheets according to roll speed ratio. 39

Fig. 31. Variation of the equivalent strain through the thickness of clad sheets according to roll speed ratio. 41

Fig. 32. Microstructure of clad sheets according to roll speed ratio. 42

Fig. 33. ND plane of IPF maps in thickness direction of the clad sheets according to roll speed ratio. 44

Fig. 34. KAM maps in thickness direction of the clad sheets according to roll speed ratio. 46

Fig. 35. Average KAM values according to roll speed ratio. 46

Fig. 36. ODF sections at $\Phi_2 = 45^\circ$ of 1Mo and Invar according to roll speed ratio. 47

Fig. 37. Hardness distribution through the thickness of the clad sheets according to roll speed ratio. 52

Fig. 38. FEM model of workroll and workpiece. 51

Fig. 39. FEM images and pin shapes according to roll speed ratio. 51

Fig. 40. Strain of calculation and experiment according to roll speed ratio. 52

Fig. 41. 2pass differential speed rolling process. 55

Fig. 42. Pin shapes as the roll speed ratio after 2pass differential speed rolling. 56

Fig. 43. Variation of the shear strain through the thickness of 2pass clad sheets according to roll speed ratio. 58

Fig. 44. Variation of the equivalent strain through the thickness of 2pass clad sheets according to roll speed ratio. 60

Fig. 45. ND plane of IPF maps in thickness direction of the 2pass clad sheets according to roll speed ratio. 62

Fig. 46. KAM maps in thickness direction of the 2pass clad sheets according to roll speed ratio. 64

Fig. 47. Average KAM values of 2pass clad sheets according to roll speed ratio. 64

Fig. 48. ODF sections at $\Phi_2 = 45^\circ$ of 1Mo and Invar by 2pass differential speed

rolling..... 65

Fig. 49. The variation of hardness through the thickness the 2pass cladde sheets according to roll speed ratio..... 67

Fig. 50. FEM images and pin shapes of 2pass conventional rolling and differential speed rolling..... 69

Fig. 51. Strain of calculation and experiment according to roll speed ratio..... 69

ABSTRACT

Microstructure and mechanical properties of Fe-based bimetals manufactured by differential speed rolling according to rolling conditions

Woo Bin Jo

Advisor: Prof. Han Cheol Choe

Dept. of Biodental Engineering

Graduate School of Chosun University

Currently, the power circuit breaker and switchgear market are continuously growing. Accordingly, the demand for heavy electric machines more than 300 kW is increasing. In order to prevent the occurrence of overcurrent in such a heavy electric machine, a high-performance bimetal material for magnetic switch parts is used. Currently, there is no manufacturing technology in domestic, so manufacturing technology is required. A bimetal is a bonded form of two or more metals with different coefficients of thermal expansion, and the curvature changes as the temperature changes. Alloys with various compositions such as Fe-Ni-Cr, Fe-Ni-Mn and Fe-Ni-Mo are used for high thermal expansion alloys for bimetal production and Invar alloys, which are well known for their low thermal expansion coefficient, are used as low thermal expansion alloys.

Bimetals are conventionally manufactured by explosive welding, twin roll casting and rolling. Among them, the cladding process through rolling is widely used in consideration of productivity and economy. However, in conventional rolling, the amount of deformation introduced to the surface and center of the rolled material is not uniform, properties of bimetals through the thickness are different. In order to introduce a uniform deformation for through the thickness to the rolled sheet, differential speed rolling was performed.

Differential speed rolling was performed under two conditions such as 1 pass or 2 pass for high thermal expansion alloy and low thermal expansion alloy with the initial

thickness of 1.5mm, respectively. The roll speed of the upper roll was varied from 5 to 10 RPM and the speed of the lower roll was fixed at 5 RPM. Rolling was performed with a reduction ratio of 50% for 1 pass and then a reduction ratio of 50% for 2 pass with a total reduction ratio of 75%. To evaluate deformation behavior according to roll speed ratios, shear strain and equivalent strain were calculated through the pin embedded method. In addition, texture evolutions of bimetals manufactured by differential speed rolling according to roll speed ratios were analyzed by Electron BackScattered Diffraction.

제 1 장. 서론

1. 연구배경 및 목적

1.1 바이메탈

바이메탈이란 두 종 이상의 열팽창계수가 다른 금속이 접합된 형태로, 이러한 이종 소재를 접합한 구조는 각 금속이 가진 물성과 특성을 조합하여, 새로운 물성과 성질을 지닌 합금을 제조할 수 있다. 부식성이 강한 금속과 함께 부식성이 적은 금속을 접합하면 내부식성이 향상되고, 강도가 낮은 금속에 강도가 높은 금속을 접합하면 낮은 강도를 보완할 수 있다. 이와 같이 각 금속이 가진 단점은 보완하고 장점을 극대화시킬 수 있어 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 전열기기, 변압기, 변성기, 차단기, 온도제어장치 등 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다[1].

바이메탈은 보통 자석과 함께 사용되며, 특정 온도 구간에 도달하면 바이메탈이 작동되는 원리이다. 바이메탈은 전류에 의해 직접 가열되거나 간접적으로 가열될 수 있다. 바이메탈에 열이 가해지면 Fig. 2와 같이 열팽창계수가 큰 금속이 더 많이 팽창하여 열팽창계수가 낮은 금속 쪽으로 휘어지게 되고, 온도가 다시 낮아지면 팽창했던 금속이 수축하여 원 상태로 돌아가게 된다. 온도의 변화에 따라 곡률의 변화가 발생하는 것이 바이메탈의 가장 큰 특징이며, 바이메탈에 사용된 합금의 조성에 따라 팽창하는 정도가 다르다.

바이메탈은 온도, 저항성, 부식성 등 사용되는 환경에 따라 요구 물성과 사용되는 합금계가 달라진다. 현재 상업적으로 가장 많이 사용되고 있는 바이메탈 소재는 Cu/Invar 합금이며, 고온 환경에서 사용되는 바이메탈은 주로 Fe-Ni-Mo합금과 Fe-Ni합금, Fe-Ni-Cr합금과 Fe-Cr합금 등이 사용되고 저온 환경에서 사용되는 바이메탈은 주로 Fe-Ni-Cr합금과 Fe-Ni합금, Fe-Ni-Mn합금과 Fe-Ni합금 등이 있다[2].

본 연구에서 대상으로 한 바이메탈 소재는 일본 Hitachi 사에서 개발 및 상용화된 고전압 전자개폐기용 바이메탈인 BH-1(Fe-Mo-Ni/Fe-Ni)을 개량한 합금을 제조 및 클래딩을 실시하였다. 이하 장에서는 고열팽창합금을 1Mo, 저열팽창합금을 Invar로 명명하였다.



<Power breaker>



<Thermostat>



<Magnetic switch>

Fig. 1. Application of bimetals.

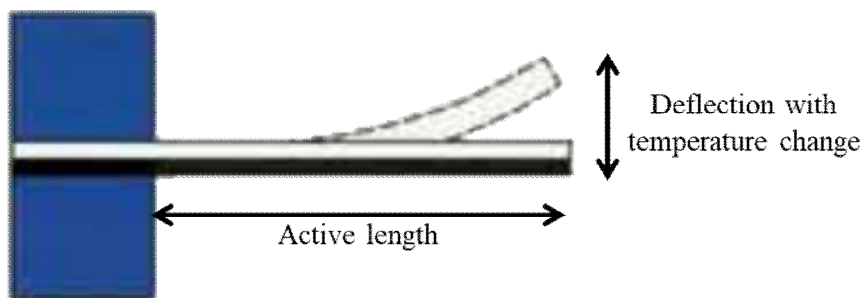


Fig. 2. The functioning mechanism of bimetallic alloys.

1.2 연구목적

현재 전력 차단기 및 개폐기시장은 지속적으로 성장하고 있다. 이에 대전력용 변압기, 계기용 변성기, 차단기 등 300KW 이상 중전기(重電機)의 수요가 증가함에 따라 중전기 제품군의 과전류 발생 방지를 위해 고전압 환경에서도 활용될 수 있는 고온용 바이메탈(Bimetal)의 수요도 함께 증가하는 추세이다. 현재 Hitachi, Mitsubishi 및 Engineered Materials Solutions(EMS) 등 해외 선진사에서 초고전압 전자개폐기용 바이메탈이 제조 및 상용화되었다. 하지만 현재 국내에는 이러한 초고전압 전자개폐기용 바이메탈의 제조 기술이 전무하여 전부 수입에 의존하고 있는 실정이며 무역 적자 품목이다. 바이메탈 소재의 수출 제한 대비 및 소재의 안정적인 수급과 더불어 안정적인 고전압 시스템의 운행과 공급사슬의 선순환을 위해서는 초고전압 전자개폐기용 바이메탈 소재의 제조기술 개발이 필요하다.

현재 초고전압 전자개폐기용 고성능 바이메탈의 합금 조성은 고열팽창합금으로는 Fe-Ni-Mo계 합금이 사용되고 저열팽창합금으로는 Fe-Ni계 합금이 사용된다고 알려져 있으나, 합금 성분의 자세한 조성은 알려진 바가 없다. 바이메탈은 적용환경에 따라 다양한 특성을 요구하기 때문에 맞춤형 합금개발 또한 필요하다. 따라서 본 연구에서는 전자개폐기용 바이메탈 제조를 위해 Hitachi 사의 BH-1 code를 가진 바이메탈을 Motivation하여 Fe-Ni-Mo 조성의 고열팽창합금과 Fe-Ni 조성의 저열팽창합금을 진공 유도 용해를 통해 제조하였다.

일반적으로 압연을 통한 바이메탈은 상·하 롤이 대칭적으로 회전하는 동축 압연을 통해 제조되며, 압연 시 소재 내부에 도입되는 변형량이 상이하다는 단점이 존재한다. 이런 이유로 소재 내부에 균일한 변형량을 도입하기 위해 비대칭 압연(Asymmetric Rolling)이 고안되었다[3-5]. 롤의 직경, 롤의 속도, 압하율 및 마찰계수 등 다양한 변수를 제어하여 소재의 특성을 변화시킬 수 있으며, 이런 압연 조건을 달리하여 실시하는 공정이 비대칭 압연이다. 비대칭 압연은 크게 상·하부롤의 직경이 서로 다른 압연, 한쪽 롤만 회전하여 실시하는 압연, 상·하부롤의 주속이 서로 다른 압연 등 많은 조건의 비대칭 압연이 연구되었다. 비대칭 압연에 관련한 선행 연구들을 하기 Table. 1에 정리하였다.

Fe계 합금을 사용하여 제조한 바이메탈에 이주속 압연을 적용한 사례는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 Fe계 합금에 이주속 압연을 적용하여 바이메탈을 제조하고, 롤 속도비에 따른 영향과 특성에 대해 연구하였다. 이주속 압연 시,

도입되는 전단변형량을 극대화하기 위하여 이주속 압연을 1pass 추가로 실시하여 총 2pass 이주속 압연을 실시하여 1pass와 동일하게 전단변형량, 미세조직 및 기계적 특성을 분석하였다.

Table 1. Previous studies of asymmetric rolling.

Previous studies of asymmetric rolling	
Asymmetric rolling	“G. Vincze et al., D. Pustovoytov et al.” [6,7]
Single roll drive rolling	“T. Sakai et al.” [8]
Differential speed rolling	“, S.H. Lee et al.” [9,10]
1pass cladding by DSR	“H. Yu et al., C.H. Lee et al., X. Li et al.” [11-13]
Shear & equivalent strain	“S. Sakui et al., Y. Saito et al.” [14,15]
2ass cladding by DSR	“S.H. Lee et al., T. Sakai et al., T. Shimamura et al.” [16-18]

1.3 바이메탈 제조 공정

압력에 의해 소재를 접합하는 방식으로 바이메탈의 대량 생산이 가능하며 연속 바이메탈은 일반적으로 폭발성 용접(Explosion Welding), 트윈 롤 주조(Twin Roll Casting), 압연을 통한 클래딩(Cladding) 등의 방법에 의해 얇은 박판 형태로 제조되고 있다. 이 중에서도 생산성과 경제성을 고려하여 압연 공정이 가장 많이 사용되고 있다.

Y. Wei et al. 등[19]은 폭발성 용접을 통해 Al/Cu 클래드재를 제조하였고, B. ZLOBIN. et al. 등[20]은 Fe/Al 클래드재를 제조한 바 있다. 연속 주조 압연은 Al합금의 클래드재를 제조하기에 적합하고 상용화되어 많이 쓰이고 있지만, M. Vidoni. et al, D. Munster et al. 등[21,22]에 의해 Fe-Cr/Fe 클래드재, Fe-Cu 클래드재 등 Fe계 합금의 바이메탈 제조에 트윈 롤 주조 공정을 적용한 연구도 있다.

1.3.1 폭발성 용접

폭발성 용접(Explosive Welding, EXW)은 알루미늄과 구리, 탄소강, 스테인리스강과 같이 다른 물리적 특성을 가진 이종 재료를 접합할 수 있는 공정으로, 폭발물의 폭발에 의해 생성된 충격 에너지를 이용한 고상 접합 공정이다[23]. 폭발성 용접의 개략도를 하기 Fig. 3에 나타내었다. 두 개의 판재 중 상부 판재에 기폭 장치가 연결되어 있어 기폭 장치를 활성화하면 폭발이 발생하고, 이로 인해 상부 판재가 하부 판재에 매우 빠른 속도로 접합된다. Y. Wei et al., B. ZLOBIN. et al. 등은 폭발성 용접을 적용하여 각각 Al/Cu, Fe/Al 조성의 클래드재를 제조하였다[19,20].

폭발성 용접은 다공성이 없고 고강도를 가진 접합이 가능하며 공정이 비교적 간단하고 빠르다. 대부분의 금속은 폭발성 용접으로 인한 접합이 가능하지만 폭발의 충격에 의해서 균열이 발생할 수 있으며 취성이 있는 금속 등에는 사용할 수 없다. 또한 미세하게 용융이 발생할 수 있으며 충격 부위에서 매우 높은 힘은 소수의 원자층이 충격 영역 밖으로 방출되는 plasma jet를 형성하여 오염 및 원치 않는 산화물을 생성할 수 있다는 단점이 존재한다. 폭발성 용접의 모식도는 아래 그림에 나타내었다.

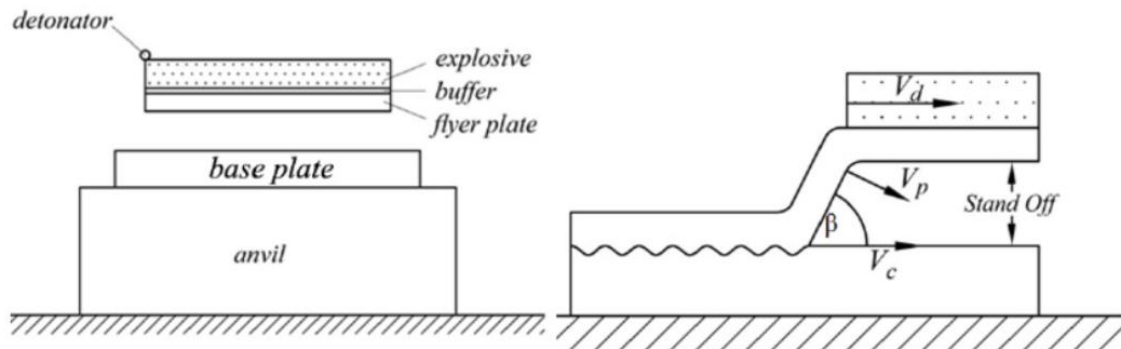


Fig. 3. Schematic illustration of Explosive Welding.

1.3.2 연속 주조 압연

연속 주조 압연(Twin Roll Casting, TRC)은 서로 반대방향으로 회전하는 두 롤 사이에 노즐(Nozzle)으로 용해된 금속을 투입한다. 그 후, 롤에 접촉한 용융금속을 냉각 고상화시키고 고상화된 금속을 압연하여 박판(strip)을 제조하는 공정으로, 얇은 박판의 생산에 적합한 공정이다[24,25]. 개략도를 하기 Fig. 4에 나타내었다. M. Vidoni. et al, D. Munster et al. 등에 의해 Fe-Cr/Fe 클래드재, Fe-Cu 클래드재 등 Fe계 합금의 바이메탈을 제조하였다.

용융금속은 급속 고상화 과정을 통해 무정형 조직(Amorphous structure)를 형성하고 기계적 성질을 향상시킬 수 있다. 또한 공정이 짧고 간단하여 투자비, 에너지 소비의 감소 및 공간 절약 등의 장점이 있으나 공정과 관련된 유체의 흐름, 열전달 및 응고와 같은 복잡한 제어 변수가 존재한다. 트윈 롤 주조 공정은 용융금속이 롤과 접촉 후 최대한 짧은 시간 내에 용융금속을 냉각시켜야 하기 때문에 롤의 온도구배가 주요한 요인으로 작용한다. 하지만 생산성이 낮고 주조할 수 있는 합금의 범위가 제한된다는 것이 단점이다.

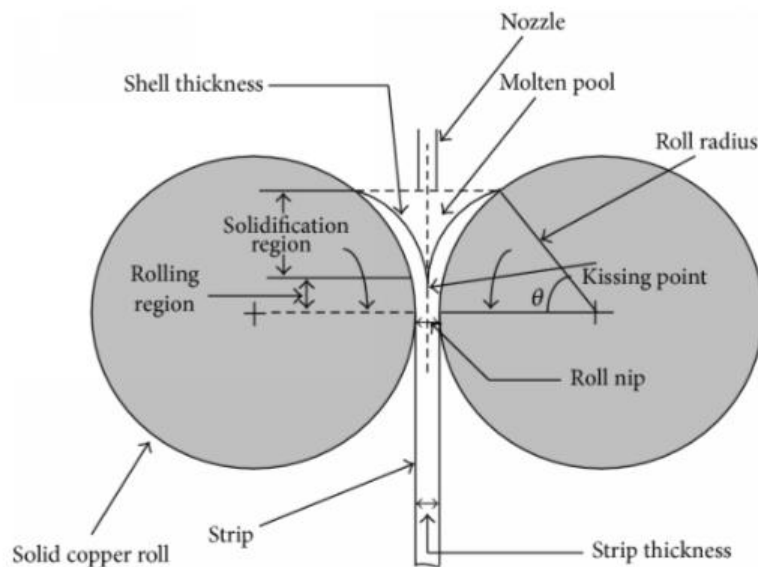


Fig. 4. Schematic illustration of Twin Roll Casting. [3]

1.3.3 압연

압연(rolling)은 서로 반대방향으로 회전하는 1 쌍의 압연기의 롤 사이에 소재를 통과시켜 소성변형을 가하여 박판이나 시트 형태로 제조하는 공정이며 제품을 생산하는 데에 있어 중요한 공정 중 하나이다[26-28]. 압연에 의해 소재가 변형될 때, 소재는 롤의 압하작용으로 인해 높은 압축응력이 가해지고 상·하부롤과 소재 사이에 마찰이 작용하여 표면에 전단응력을 받게 된다. 이 때, 발생한 마찰력으로 인해 소재가 롤과 롤 사이로 통과되는 원리이다. 압연의 개략도를 하기 Fig. 5에 나타내었다.

압연은 재결정온도 이상의 고온에서 실시하는 열간 압연(Hot Rolling)과 상온에서 실시하는 냉간 압연(Cold rolling)으로 구분할 수 있다. 열간 압연은 치수 정밀도가 낮고 표면이 거칠지만 소재에 전위밀도를 축적시키지 않고 적은 힘으로도 압연이 가능하다는 장점이 있다. 냉간 압연은 가공에 큰 힘이 필요하지만 치수 정밀도가 상대적으로 높고 표면이 미려하다. 롤의 지름, 롤의 주속, 압하율, 마찰계수 등 다양한 변수의 제어가 가능하고, 압연 과정에서 소재는 압력을 받아 두께가 감소하고 너비가 소폭 증가하며 기계적 강도가 향상된다.

압연을 통해 제조된 바이메탈 클래드재의 접합면의 경우 마찰에 의해 야금학적 결합되므로 압하율, 롤의 주속, 마찰 계수 등 여러 복합적인 요인이 접합면의 품질에 영향을 미친다.

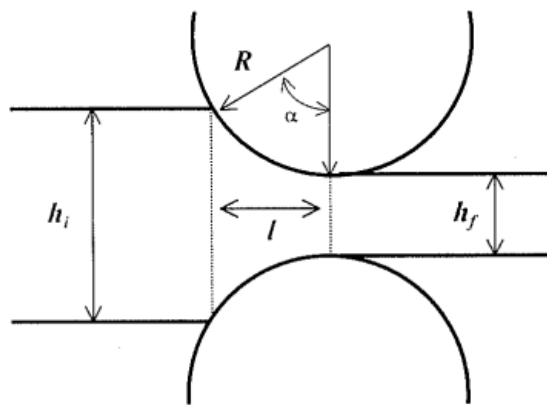


Fig. 5. Schematic illustration of Rolling.

1.4 비대칭압연

기 언급한 압연의 단점들을 보완하고 결정립 미세화를 통한 성형성 및 강도 향상을 위해 다양한 압연에 관한 연구가 꾸준히 진행되었다. 파형 압연(Corrugated Flat Rolling), 반복접합겹침압연(Accumulative Roll Bonding, ARB) 및 비대칭압연(Asymmetric Rolling, AR), 등 다양한 압연 공정이 활발하게 연구되었다.

1.4.1 파형 압연

파형 압연(Corrugated Flat Rolling, CFR)은 한 롤이 주름진 물결 모양을 띠는 파형 롤로 구성되어 있는 압연이다. 파형 압연의 개략도를 Fig. 6에 나타내었다. 총 4개의 롤로 구성되어 있는 파형 압연은 Huang et al. 등에 의해 고안되었으며, 총 2pass로 구성된다. 1pass 시 파형 압연에 의해 클래드재의 표면은 물결 형상을 띠며, 2pass 시 표면의 물결 형상의 클래드재는 일반 압연에 의해 평평한 표면의 클래드재로 제조된다. 이 압연 공정은 클래드재의 계면 접합 강도와 기계적 특성을 크게 향상시킬 수 있다[29]. 또한 파형 롤은 압연 시 발생하는 마찰 응력과 교차 전단 영역(Cross shear zone)을 크게 증가시킬 수 있다. 파형 압연은 Mg/Al, Al/Cu 등 주로 Al 합금의 복합재의 클래딩에 주로 적용된다.

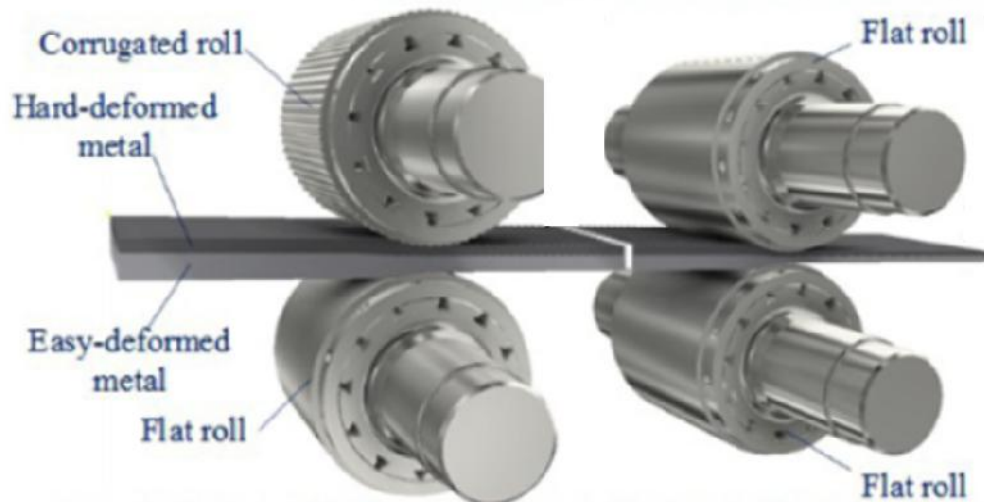


Fig. 6. Schematic illustration of Cross Rolling.

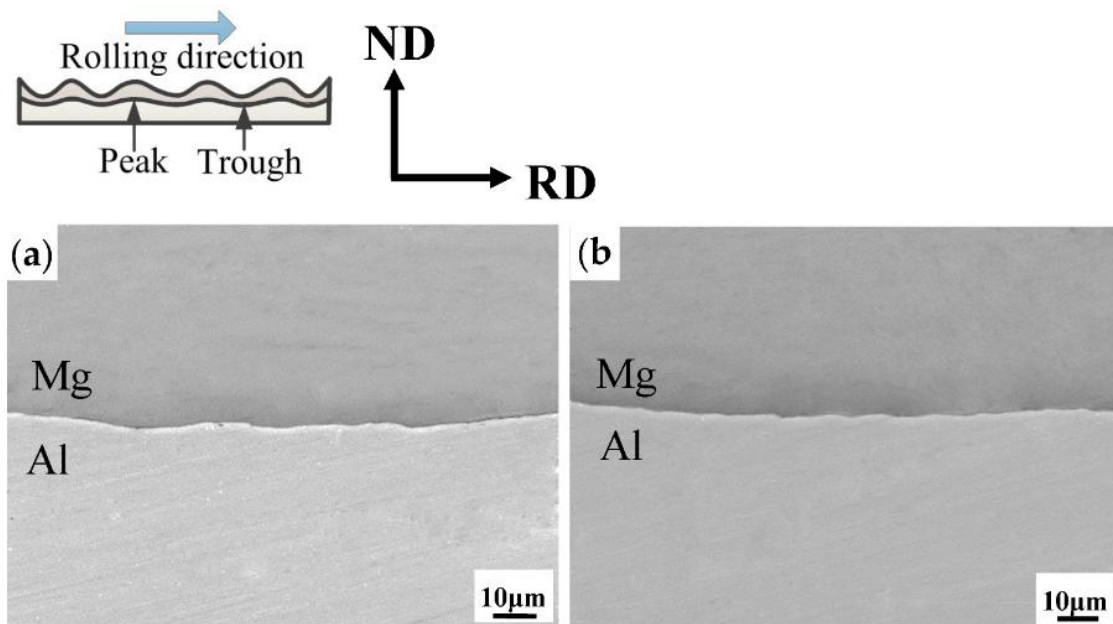


Fig. 7. Interface of bimetal by Cross Rolling.

1.4.2 반복접합겹침압연

반복접합겹침압연(Accumulative Roll Bonding, ARB)은 일본 오사카 대학의 Y. Saito 연구그룹에 의해 연구개발된 공정으로, 클래드 접합 공정을 반복함으로써, 결정립을 초미세화시켜 고강도를 갖는 소재를 제조하는 강소성가공법(severe plastic deformation)이다[30-32]. 결정립이 미세화될수록, Hall-Petch 관계식에 따라 강도와 인성이 증가한다는 것이 실험적으로 확립되어 있다. 동일 크기를 가진 두 판재를 적층하여 압접시킨 후 접합된 클래드재를 2등분하여 재적층하는 공정이다. 이를 반복하면 소재에 강소성가공을 부여하여 고강도를 갖는 판재를 제조할 수 있다. 접합이 반복되는 공정이므로, 양호한 접합 계면 확보하기 위해 적층 전 탈지 및 와이어 브러싱 등의 표면처리가 중요하다. 반복접합겹침압연의 모식도를 아래 Fig. 8에 나타내었다.

반복접합겹침압연은 Y. Saito et. al, S.H. Lee et al.에 의해 Al 합금, Cu 합금 등에 적용되어 결정립초미세화 및 고강도화를 달성한 연구 결과가 있다[31]. 또한 R. P. Godoi et al. 등에 의해 AA 1050 합금에 이주속을 적용한 반복접합겹침압연 및 어닐링 후 조직 분석이 수행되었다[33]. 350℃에서 이주속반복접합겹침압연 후 결정립 크기는 약 0.6 ~ 1.0um로 매우 미세하였고, 전단 조직 구성 요소 분포가 균일하였다. 또한 반복겹침접합압연 대비 접합계면의 접합이 더욱 개선되었다. Al합금 뿐만 아니라 Fe계 합금에도 반복겹침접합압연을 적용하여 실험을 진행한 연구 결과가 있다. Fig. 9에 IF강의 반복접합겹침압연 실시 후 압연 패스 횟수에 따른 단면을 나타내었으며, 패스 횟수가 많아질수록 접합된 판재가 기하급수적으로 증가하였다. 이에 따라 결정립도 매우 미세화되었다[34].

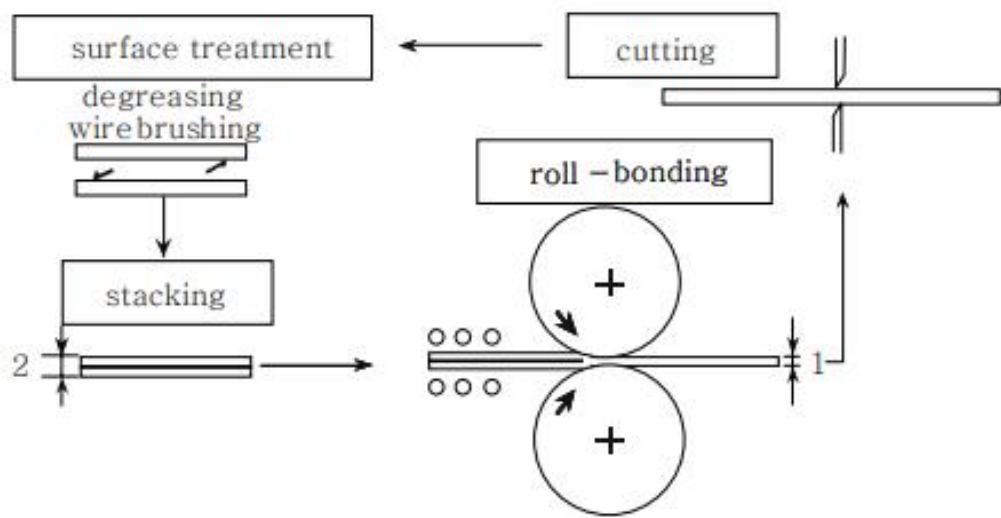


Fig. 8. Schematic illustration of Accumulative Roll Bonding process.

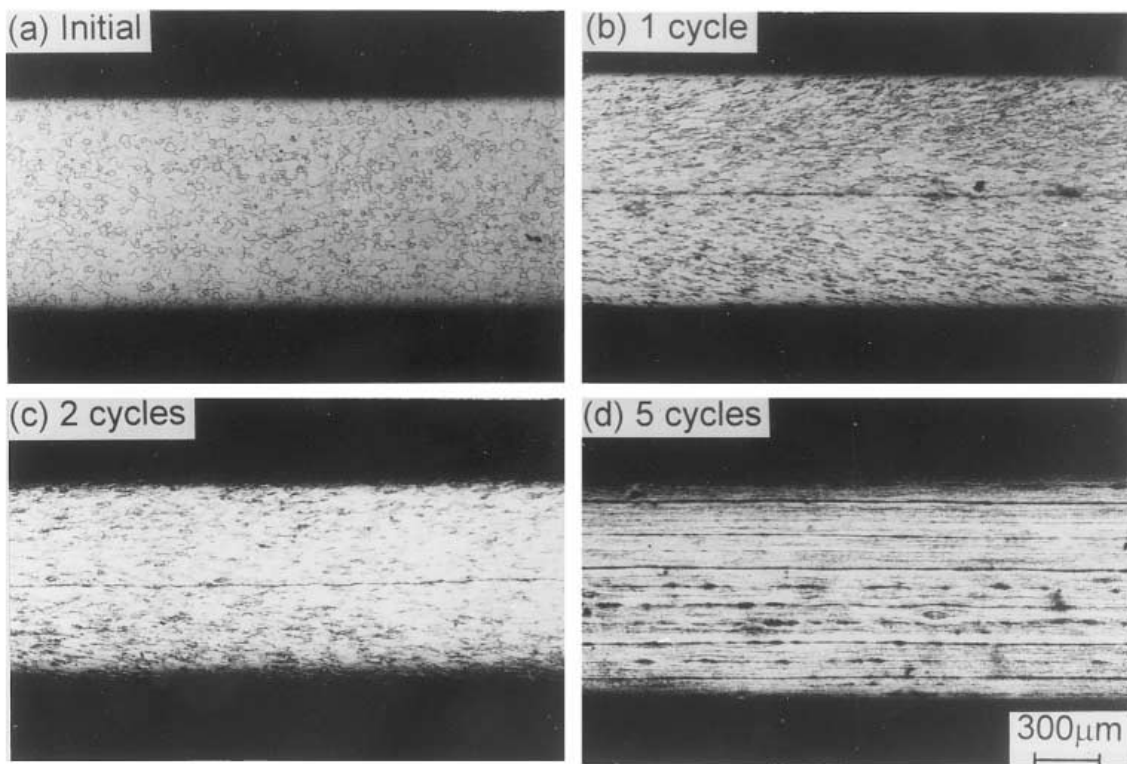


Fig. 9. Longitudinal cross section of conventional and ARB processed IFsteel strips[34].

1.4.3 비대칭압연

비대칭압연(Asymmetric Rolling, AR)은 롤의 회전 속도는 같고 직경이 서로 다른 압연, 롤의 회전 속도 및 직경은 같고 롤의 재질이 서로 다른 압연, 롤의 마찰계수가 서로 다른 압연, 한쪽 롤은 정지 상태로 한쪽 롤만 구동하여 실시하는 압연 및 롤의 직경은 같고 회전속도가 서로 다른 압연 등 다양한 종류의 비대칭 압연 방법이 있다. 이와 같은 다양한 비대칭 압연을 도식화 하여 Fig. 10에 나타내었다. 본 연구에서는 롤의 직경이 같고 회전속도가 서로 다른 이주속 압연을 실시하였다.

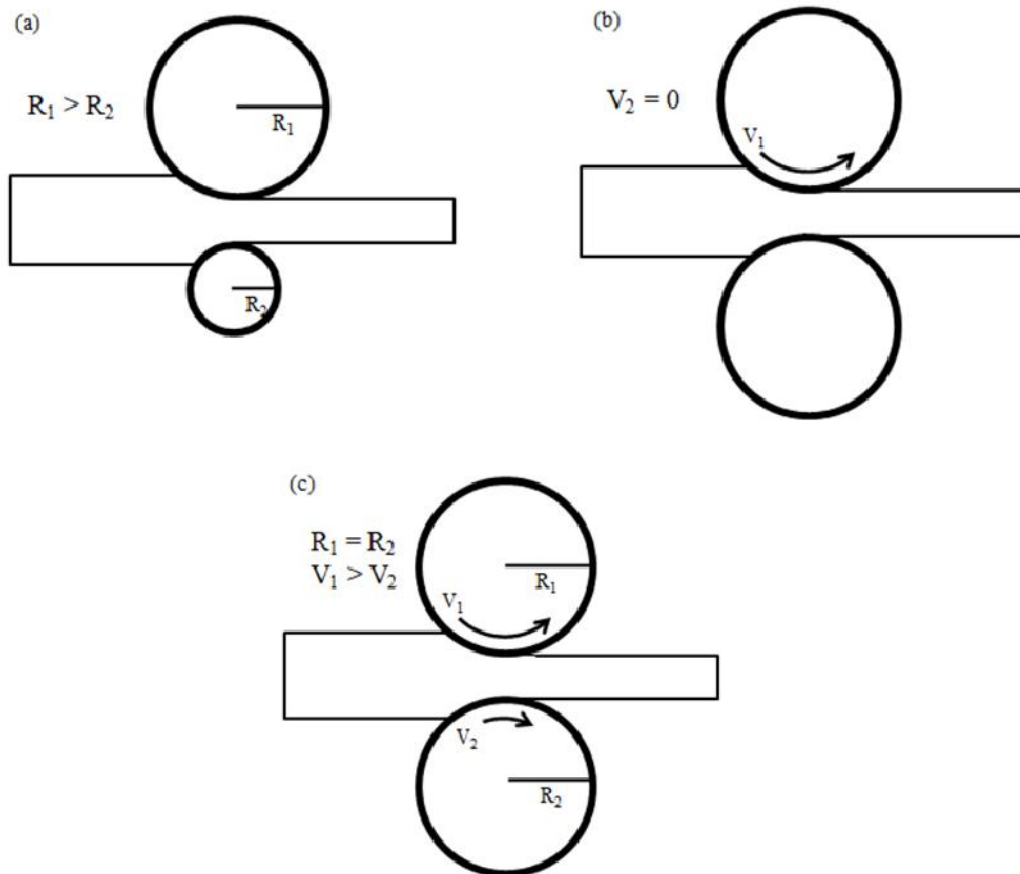


Fig. 10. Schematic illustration of (a) ASR process due to rolls diameters mismatch, (b) ASR process of single roll driven rolling and (c) DSR process.

1.4.4 롤 직경이 서로 다른 비대칭 압연

롤의 직경이 서로 다르면 직경이 작은 롤 축의 변형량이 증가하게 된다. Fig. 11에 비대칭 압연을 통한 바이메탈의 클래딩 모식도를 나타내었다. 많은 선행 연구에 의해 롤의 직경이 서로 다른 비대칭 압연을 통한 AI 합금의 클래딩이 연구되었다. 비대칭 압연을 통한 접합 시 일반 압연 대비 접합 계면의 마찰 계수가 감소하였으며 접합 강도가 증가하였다.

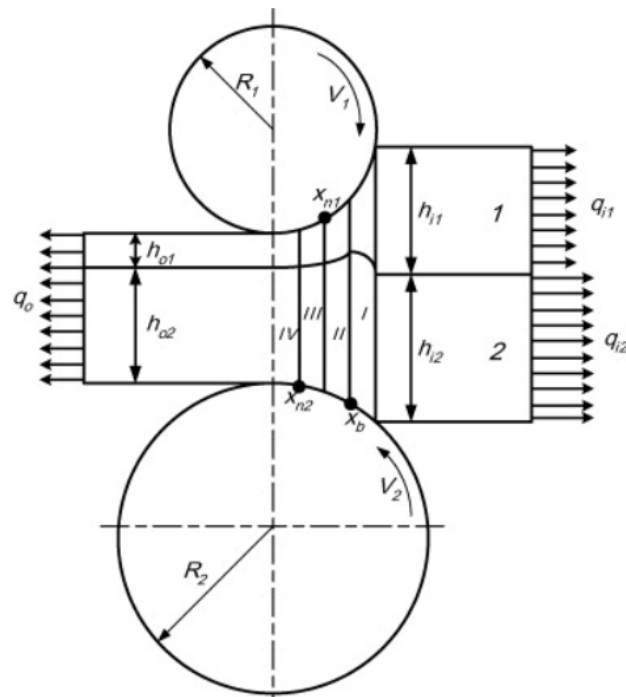


Fig. 11. Schematic illustration of Asymmetric Rolling with different roll diameters.

1.4.5 롤 속도가 서로 다른 비대칭 압연

상·하부롤의 속도가 서로 다른 비대칭 압연(Differential speed rolling)은 롤 속도비가 증가할수록 소재에 가해지는 변형량이 증가하게 된다. 주로 T. Sakai et al., S.H. Lee et al. 등에 의해 이주속 압연이 꾸준히 연구되었다[8-10]. 또한 H. Yu et al., M. Vini et al. 등에 의해 이주속 압연을 통한 Al계 이종 금속의 접합을 실시한 사례도 존재한다[11,35].

Fig. 12에 롤 속도가 서로 다른 비대칭 압연을 적용한 바이메탈 클래딩 공정 모식도를 나타내었으며, 롤 속도비가 증가할수록 압연 하중이 감소하고 접합 강도가 증가하였다. 롤 속도비 1.2:1.0에서 압연 후 곡률이 감소하였다는 연구 결과도 있다. 또한 Fig. 13과 Fig. 14에 나타낸 바와 같이, D. Rydz et al. 등 이주속 압연을 통한 Fe계 바이메탈을 제조한 바 있다. Al계 합금과 마찬가지로, 롤 속도비가 증가할수록 압연 하중이 감소하였으며 일반 압연 대비 결정립이 더욱 미세화되었다.

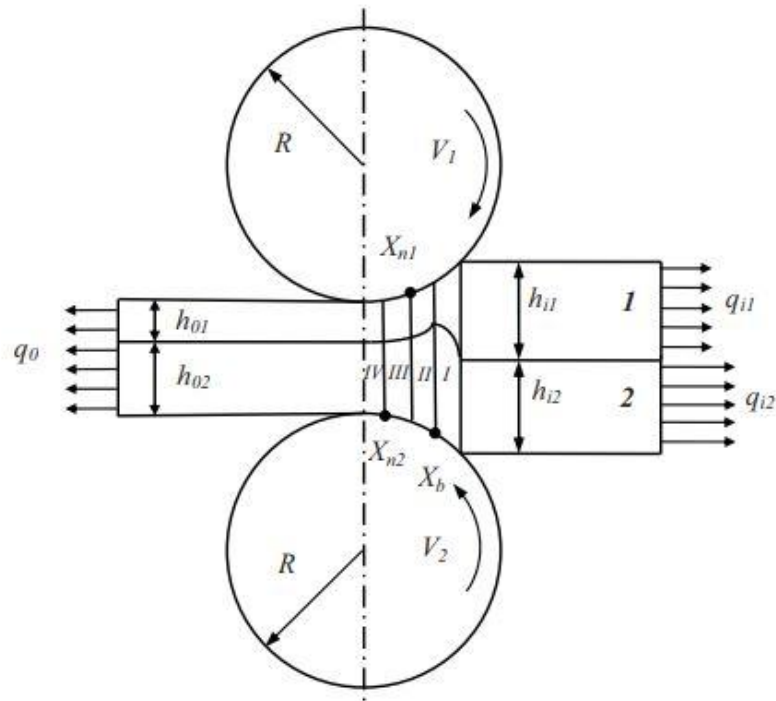


Fig. 12. Schematic illustration of Asymmetric Rolling with different roll speed.

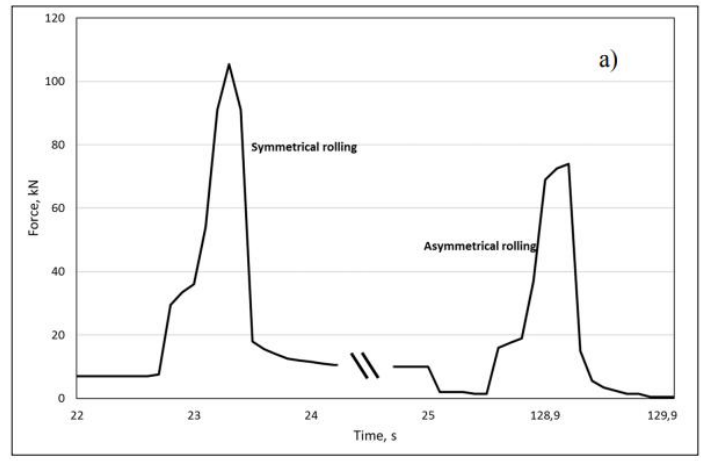


Fig. 13. Longitudinal cross section of conventional and ARB processed IFsteel strips.

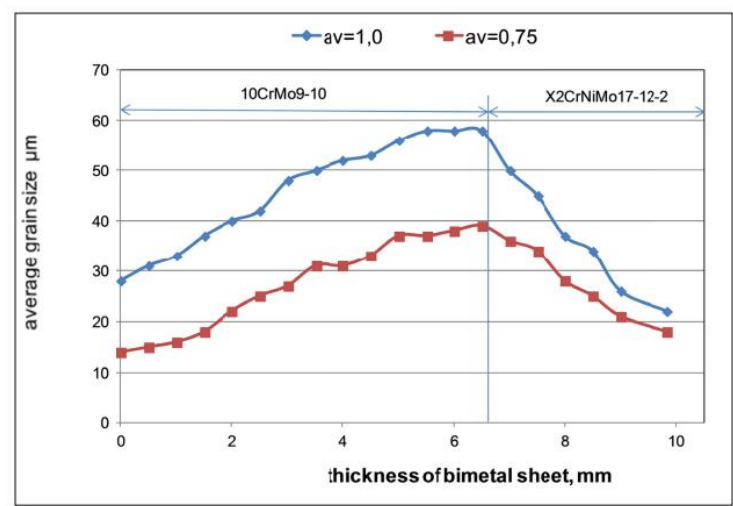


Fig. 14. The distribution of average grain size at the height of bimetallic plates after symmetrical $a_v = 1.0$ and asymmetrical rolling process $a_v = 0.75$.

1.5 압연에 의한 이종 금속 접합 메커니즘

지금까지 이종 금속 간 접합 메커니즘을 이해하고 규명하기 위한 많은 연구가 R. Jamaati et al. 등에 의해 수행되었다[36]. 이 현상을 설명하기 위해 많은 가설들이 세워졌는데, 그 중 가장 널리 받아들여지는 가설은 깨끗한 금속 표면에서 음(-)전하와 양(+)전하를 띤 원자 사이에 발생하는 기계적 결합이다.

접합 강도는 박판의 접합 시 변형량과 두께 감소량에 큰 영향을 받는다. 서로 다른 두 금속이 결합되기 위해서는 항복강도와 연신율의 차이가 적어야 한다. 또한 두 금속에서 일어나는 변형이 임계 변형을 초과해야 하며, 임계 응력 미만에서는 탄성 응력으로 인해 하중이 제거되면 접합되지 않고 떨어지게 된다. 임계 변형은 금속의 조합이나 공정 조건에 따라 다르며, 변형이 증가함에 따라 접합 강도의 값은 점진적으로 증가한다.

공정 조건이나 합금 성분 외에도 접합 시 온도의 영향도 접합에 대한 주요인자이다. 온도가 증가하게 되면 더 적은 압하 조건에서도 접합이 가능하였으며 접합 강도 또한 증가하였다.

압연을 통한 이종 금속 바이메탈 접합 시, 접합을 위해 탈지 및 표면 스크래치 그라인딩 등의 방법이 주로 사용된다. 표면을 거칠게 함으로써 이종 금속 간 마찰을 증대시켜 효과적인 접합이 가능하다. 본 연구에서도 고열팽창합금과 저열팽창합금에 각각 표면 거칠기를 부여하여 냉간 접합을 실시하였다.

1.6 이주속 압연의 변형 특성

압연 시, 롤의 회전 속도와 소재가 롤을 통과하는 속도가 동일해지는 위치를 중립점(Neutral point, N)이라 한다. 이 때, 롤의 회전 속도를 V_R 이라 정의하고, 중립점 도달 전 소재의 통과 속도를 V_1 , 중립점 도달 후 소재의 통과 속도를 V_2 라 정의할 때, 압연은 중립점을 기준으로 중립점에 도달하기 전 입구부 측 소재의 통과 속도는 롤의 속도보다 느리고($V_1 < V_R$), 중립점 도달 이후 출구부 측 소재의 통과 속도는 롤의 속도보다 빠르다($V_R < V_2$). 일반적인 압연에서는 중립점의 위치가 롤의 입구부 측에 위치하게 된다(Fig. 15).

이주속 압연의 경우, 상부롤과 하부롤의 회전 속도가 달라 롤의 회전 속도와 소재의 중립점의 위치가 달라지게 된다(Fig. 16). 상부롤 측 롤의 회전 속도가 빠를 경우($V_{R2} < V_{R1}$) 상부롤 측 중립점은 출구부에 가깝게 위치하고, 하부롤 측 중립점은 입구부에 가깝게 위치하게 된다. 이 때, 입구부 측의 중립점 위치로부터 출구부 측의 중립점 위치까지 교차 전단 영역(Cross shear zone)이 형성되는데, 이 교차 전단 영역에 의해 소재가 롤을 통과하면서 받는 압연 압력의 분포가 변화하여 하중 또한 감소하게 된다.

이주속 압연을 통한 이중 금속의 바이메탈 소재 접합 시, 두께별 전단 변형 도입의 증가는 plastic flow의 이동을 촉진하고 접합계면에서의 마찰을 증가시켜 동속 압연 대비 낮은 압하율에서도 이중 금속간의 성공적인 접합에 기여한다.

더불어, 이주속 압연은 두께 전체에 전단변형을 도입하는 것이 가능하기 때문에, 일반 압연집합조직 뿐만 아니라, 전단집합조직도 관찰된다[37-39]. 이러한 전단집합조직은 뒤틀로잉성을 향상시킨다는 연구 결과가 있으며 결정립 미세화, R-value값의 증가 등 다양한 장점이 있다.

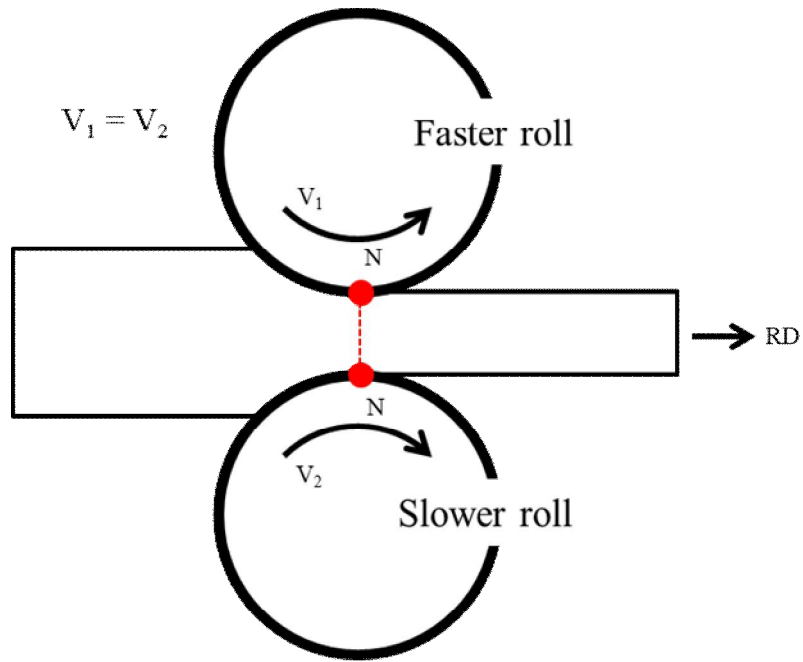


Fig. 15. Neutral point during conventional rolling.

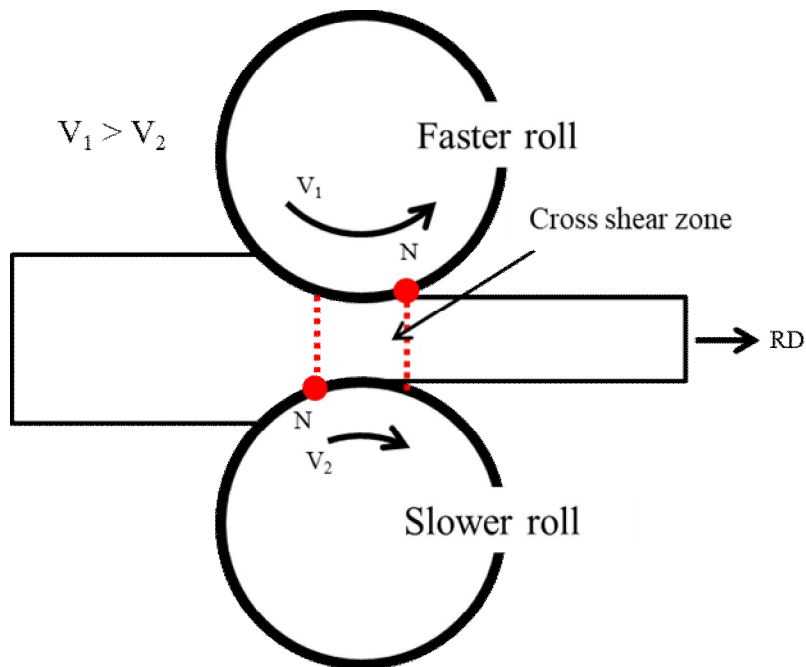


Fig. 16. Change of neutral point during differential speed rolling.

1.7 집합조직

1.7.1 집합조직의 정의

다양한 산업 분야에서 사용되고 있는 대부분의 금속은 수많은 방위를 갖는 결정들로 구성되어 있다. 이러한 방위들은 특정 방향을 선호하는 우선 방위(preferred orientation)를 갖는 경우가 많은데, 이 경우에 집합조직(texture)이 발달했다고 표현한다. 집합조직은 열처리, 응고, 소성변형 등에 의해 각각 다르게 발달하는데, 발달 정도에 따라 소재의 물리적 특성, 자기적 성질 등이 달라지게 된다. 또한 집합조직은 판재가 가지는 평면이방성에 많은 영향을 끼친다.

1.7.2 집합조직의 측정

집합조직은 관찰자의 방향을 기준으로 하며, 압연재의 경우 압연방향(Rolling Direction, RD), 측면방향(Transverse Direction, TD) 및 수직방향(Normal Direction, ND)을 축으로 하여 결정방위 g 는 시편좌표계(sample coordinate system) K_A 에 대한 결정좌표계(crystal coordinate system) K_B 로 결정할 수 있다[40-42]. 이를 Fig. 17에 나타내었다. 결정의 방위분포는 다결정 소재 내의 단결정 방위는 시편좌표계를 결정좌표계로 회전시킬 때, 이 회전을 g 로 정의하면 다음 (1)식으로 표현할 수 있다.

$$K_B = g \cdot K_A \quad (1)$$

결정회전 g 를 표현하는 방법은 다양하지만, 밀러지수(Miller indices)와 오일러각(Euler's angles)이 대표적으로 가장 많이 쓰이는 방법이며 두 표현 방법을 다음에 기술하였다.

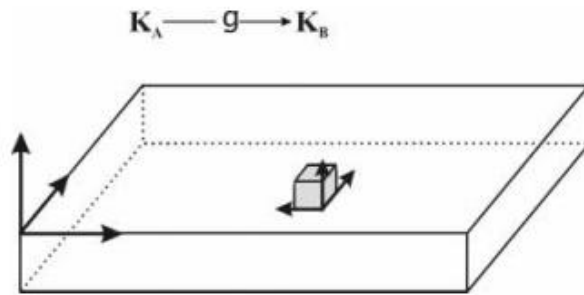


Fig. 17. Definition of orientation g

1.7.3 밀러지수(Miller indices)

다양한 문헌에서 가장 많이 사용되는 표현 방법으로, 압연방향(RD), 측면방향(TD) 및 수직방향(ND)에 일치하는 결정의 방위를 밀러지수로 나타낸 것이다. 일반적으로 압연방향과 수직방향을 사용하여 압연면에 평행인 결정면의 지수를 (hkl)로 나타내고 압연방향에 평행한 결정방향을 [uvw]로 표현할 수 있다. 이 식은 우선 방위를 표현하는데 있어서 아주 간단한 방법으로 다음 식 (2)로 표현한다. 하지만 밀러지수로는 연속적인 방위분포를 표현할 수 없다는 단점이 있다.

$$g = (hkl)[uvw] \quad (2)$$

1.7.4 오일러각(Euler's angles)

오일러각(ϕ_1, ψ, ϕ_2)은 3개의 독립변수를 사용하여 연속적인 방위분포를 나타낼 수 있다. 오일러각은 Fig. 18.과 같이 Z축(ND)을 중심으로 ϕ_1 만큼 회전, 회전된 X축(TD)을 중심으로 ψ 만큼 회전, 회전된 Z축(ND)을 중심으로 ϕ_2 만큼 회전한 특정 방위의 밀도분포를 나타내는 오일러 공간(Euler Space)으로 표현할 수 있다. 오일러 공간에서 나타내는 한 점은 결정방위를 뜻한다. 모든 결정이 가지는 방위들을 정량적으로 나타내는 방법이 Fig. 19의 방위분포함수(Orientation Distribution Function, ODF)이다. 집합조직의 발달은 방위분포함수의 방위밀도 $f(g)$ 로 표현이 가능하며, 다음 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{dV(g)}{V} = f(g)dg \quad (3)$$

금속의 집합조직을 방위분포함수를 사용하여 일반적으로 표현할 때, 방위 공간을 $\Delta\psi_1 = 5^\circ$ 간격으로 절단하여 $(\psi_1, \varphi, \psi_2)$ 면의 방위분포로 나타낼 수 있다. 하지만 방위분포함수는 결정립의 형태나 크기, 결함 등 미세적인 정보를 제공해주지는 않는다.

오일러 공간을 통해 면심입방정금속(Body-Centered Cubic, BCC)과 체심입방정금속(Face-Centered Cubic, FCC)의 주요한 집합조직성분을 표기할 수 있는데, Fig. 20에 BCC와 FCC의 압연집합조직을 나타내었다.

1.7.5 집합조직의 표현

집합조직을 표현할 때, Pole figure와 ODF가 주로 사용된다. 본 연구에서는 롤의 속도비에 따라 형성되는 집합조직에 미치는 영향을 평가하기 위하여 롤 속도비에 따른 이주속 압연 실시 후 동속 압연과 비교 및 분석하였다.

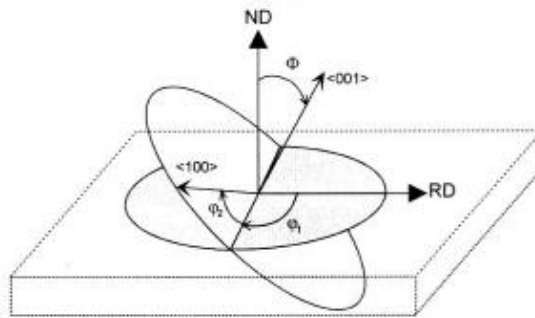


Fig. 18. Definition of Euler angles.

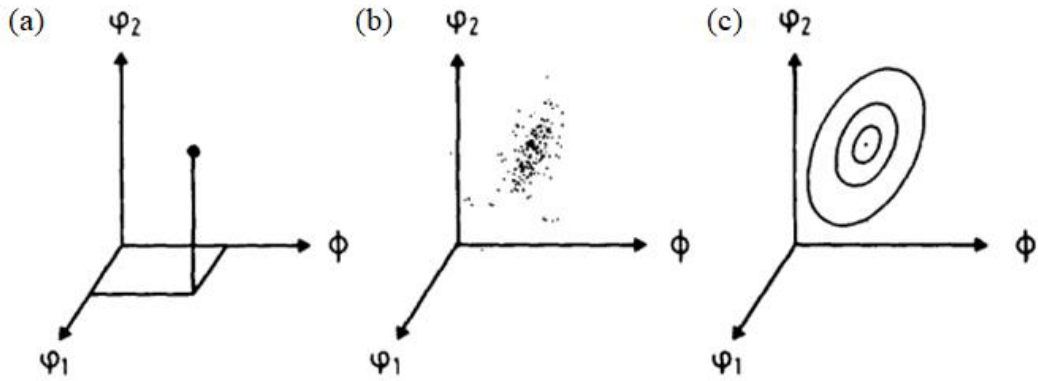


Fig. 19. Construction of the crystallographic orientation in Euler space (a) individual orientation (b) cloud of orientation and (c) orientation density function.

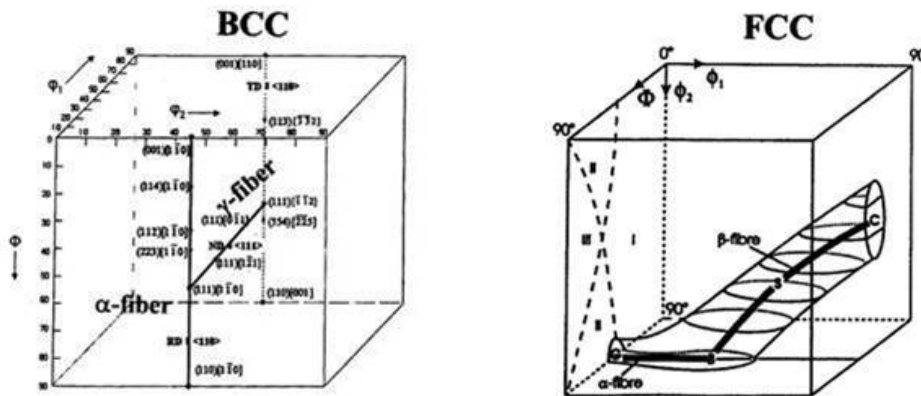


Fig. 20. Schematic illustration of the BCC and FCC rolling textures in Euler space.

1.8 유한요소해석

1.8.1 유한요소해석의 정의

유한요소해석은 복잡한 물리적 현상을 해석하기 위해 수치적인 방법을 사용하는 공학적 분석 기법이다. 이 기법은 해석 대상의 구조를 유한 개의 요소로 나누어 각 부분의 동작을 정확하게 모델링하고 이들 간의 상호작용을 고려한다. 일반적으로 삼각형이나 사각형과 같은 간단한 형상의 요소로 표현하며, 구조물 내부에서의 응력, 변형 및 온도 분포 등과 같은 물리적 특성뿐만 아니라 상변태, 재결정, 미세조직 변화 등과 같은 금속학적 특성을 계산하기 위해 각 유한요소의 동작을 수학적으로 모델링하고 연결한다. 이러한 모델링은 일반적으로 행렬 연산 및 반복적인 계산을 통해서 수행된다[44-46].

유한요소해석은 실제 실험을 수행하는 대신 구조물의 동작을 예측하고 분석하는데 사용되며 다양한 산업 관련 열·기계적 공정 모델링에서 주로 사용된다. 이를 통해 제품 개발의 초기 단계에서 설계 결함을 식별하고 개선하는 등의 작업을 수행할 수 있다.

1.8.2 유한요소해석을 통한 압연 해석

유한요소해석은 압연과 같은 열간·냉간 가공 공정의 해석에도 널리 사용되고 있다. 유한요소해석을 통해 압연 과정을 모델링하고 다양한 공정변수를 예측하는 것이 가능하다.

압연 해석을 위해 고려해야 할 요소들은 다음과 같다. 물리적 모델링을 수행할 때, 압연 과정에서 재료의 변형, 응력 분포, 열전달 등 물리적 현상을 정확하게 예측할 수 있도록 재료의 초기 조건을 설정해야 한다. 그 후, 유한요소 메쉬를 생성하여 압연 영역을 세분화하고 경계 조건을 정의해야 한다. 또한 롤과 소재 사이의 마찰 또한 중요한 공정 변수이므로 마찰 계수를 정확하게 설정하여야 한다.

상기 요소들을 고려하여 유한요소해석을 사용하여 압연 과정 중 소재의 변형, 응력, 마찰 특성 등을 예측이 가능하다. 또한 공정 매개 변수를 변경하여 다양한 해석 결과를 분석하고 최적의 조건을 도출할 수 있다.

2. 동속 및 이주속 압연을 통해 제조한 Fe계 이종 금속 바이메탈

1장에서 언급했듯이, 기존의 압연 공정은 대부분 상·하 롤의 속도가 동일한 동속 압연이 실시되고 있으며, 동속 압연의 단점을 보완하고 더욱 많은 변형량을 부과하기 위해 이주속 압연을 적용한 다양한 연구 결과들이 있다[8-18]. 또한 이주속 압연을 통한 바이메탈 제조 시, 동속 압연에 비해 압연 하중이 감소하고 이종 합금의 접합에 더욱 효과적이라는 연구 결과가 있다.

따라서 본 연구에서는 압하율 50%에서 롤 속도비에 따른 이주속 압연을 통한 Fe계 이종 합금 바이메탈을 제조하였고, 동속 압연 바이메탈 또한 비교재로 제조하였다. 그 후 롤 속도비에 따른 영향을 평가하기 위해 EBSD, 경도 등을 측정 후 비교하였다.

3. 동속 및 이주속 압연의 패스 스케줄에 따른 Fe계 이종 금속 바이메탈의 조직 및 기계적 특성

1장에서 롤 속도비에 따른 이주속 압연을 1pass 실시한 후, 롤 속도비에 따른 변형량, 미세조직 및 기계적 특성을 평가하였다. 본 연구에서는 이주속 압연을 통해 도입된 변형량을 증대시키고 상부를 측 표면부터 하부를 측 표면까지 더욱 균일한 변형을 부과하기 위하여 초기 두께 3mm의 시료를 이주속 압연을 pass 당 50%의 압하율로 총 2pass 실시하여 최종 두께 0.75mm의 클래드재를 제조하였다. 2pass 이주속 압연의 경우, 클래드재를 TD면을 기준으로 180° 회전하여 저열팽창합금이 상부를 측에 위치하게 하여 이주속 압연을 실시하였다. 그 후 속도비에 따른 변형량, 미세조직 및 기계적 특성을 평가하였다.

4. Outline of the thesis

본 논문은 다음과 같이 구성되었다.

제 1 장. 연구목적, 연구배경 및 개요

제 2 장. 이주속 압연을 통해 제조한 Fe계 이종 합금 바이메탈의 조직 및 기계적 특성

제 3 장. 동속 및 이주속 압연의 패스 스케줄에 따른 Fe계 바이메탈의 조직 및 기계적 특성

제 4 장. 최종 결론

제 2 장. 동속 및 이주속 압연을 통해 제조한 Fe계 이종 금속 바이메탈의 조직 및 기계적 특성

1. 서론

제 1 장에서 언급했듯이, 이주속 압연은 일반적인 동속 압연 대비 압연 하중이 감소하고 도입되는 변형량의 증가 등 다양한 장점이 있다. S.H. Lee et al.과 T. Sakai et al.에 의해 Al, Cu 합금의 이주속 압연에 관련한 많은 연구가 진행된 바 있다[8-10]. 하지만 Fe계 이종 합금을 사용하여 이주속 압연을 통한 클래딩 접합에 관한 사례는 거의 없다.

이에 본 연구에서는 전자개폐기용 바이메탈의 제조를 위해 고열팽창합금으로 Fe-Mo-Ni합금을 사용하였고, 저열팽창합금으로는 Fe-Ni(Invar)를 사용하였다. 위 두 종의 합금을 선정한 이유는 현재 전자개폐기용 바이메탈은 국내에 생산기술이 전무하며, 전량 수입에 의존하고 있다. 또한 바이메탈용 고열팽창합금으로 알려진 Fe-Mo-Fe합금의 정확한 조성은 알려진 바가 없다. 이러한 이유로 전자개폐기용 바이메탈을 제조하기 위해 고열팽창합금을 Fe-Mo-Ni합금으로 선정하였다. 두 합금을 통해 이종 Fe계 합금의 롤 속도비 변화에 따른 1pass 이주속 압연을 실시하였다. 동속 및 이주속 압연 시 접합을 위한 클래딩은 모두 상온에서 무윤활 조건으로 실시되었으며 고열팽창합금이 상부를 측, 저열팽창합금이 하부를 측에 위치하였다.

동속 압연과 이주속 압연 간 접합 특성을 평가하기 위해 압하율 35%부터 66.7%까지 다양한 압하율 조건 하에서 압연을 실시한 후, 클래드재의 접합 여부를 평가하였다. 이후 핀 삽입법을 통해 롤 속도비에 따른 이주속 압연에 의해 도입된 두께별 변형량의 크기를 정량적으로 측정하였다. 이주속 압연에 의해 도입된 전단변형량 및 상당변형량의 크기는 T. Sakai et al. 등이 핀 삽입법을 통해 계산한 선행연구 결과가 있다[14,15]. 이주속 압연에 의해 도입된 변형량의 크기에 따른 미세조직 변화를 관찰하기 위해 OM(Optical Microscope) 및 EBSD(Electron Backscatter diffraction)를 통해 분석하였다. 또한 롤 속도비 변화에 따른 두께별 기계적 특성을 평가하기 위해 비커스 경도를 측정하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 합금은 Fe-Ni-Mo 조성의 고열팽창합금과 Fe-Ni(Invar) 조성의 저열팽창합금이다. 상세한 화학조성을 하기 Table. 2에 표기하였다.

동속 및 이주속 압연에 필요한 시료를 제조하기 위해 고열팽창합금과 저열팽창합금을 진공유도용해(Vacuum Induction Melting, VIM)를 통해 55 ϕ , T:80mm의 잉곳을 제조한 후 L:70, W:25, T:15mm의 크기를 가진 판재 형상으로 가공하였다. 그 후, 4단 압연기를 통해 1180 $^{\circ}$ C에서 윤활 열간 압연을 총 3pass 실시하여 초기두께 15mm에서 4mm까지 압연한 후 무윤활 조건에서 냉간 압연을 1pass 실시하여 3mm의 두께로 제조하였다. 냉간 압연된 3mm의 판재를 L:40, W:16, T:1.5mm의 크기로 추가 가공을 실시하였다. 가공된 1.5mm의 고열팽창합금과 저열팽창합금의 접합부 표면을 클래딩 시 더욱 큰 마찰을 발생시키기 위해 Hand Grinder로 연마하여 접합면을 거친 표면상태로 만들고 알코올로 세척 후 고열·저열팽창합금을 포개어 각 모서리를 Fe소재의 Wire로 묶어 서로 고정시켰다. 또한, 압연에 의해 도입된 변형량을 계산하기 위해 판재 중앙에 Hole 가공을 실시한 후 ϕ 1.6, T:3mm의 Fe소재 핀을 삽입하였다. 그 후, 고열팽창합금(1Mo)을 상부를 측, 저열팽창합금(Invar)을 하부를 측에 위치시켜 동속 및 이주속 압연을 1pass 실시하였다.

본 연구에서 실시한 동속 및 이주속 압연 과정은 Fig. 21에 나타내었다. 이주속 압연 시 압연 조건은 하기 Table. 3에 나타내었다. 상부롤의 주속(V_1)은 5 ~ 10 RPM까지 달리 하였으며, 하부롤의 주속(V_2)은 5 RPM으로 고정하였으며, 1pass 시 모든 롤 속도비 조건에서 50%의 압하율로 압연을 실시하였다.

Table. 2. Chemical composition of alloys used in this experiment (in wt.%).

Alloys		Fe	Ni	Mo	Co	Mn	Si	C
HEA	1Mo	Bal.	36.2	0.96	0.04	0.16	0.01	0.013
LEA	Invar	Bal.	36.1	-	0.02	0.15	0.1	0.013

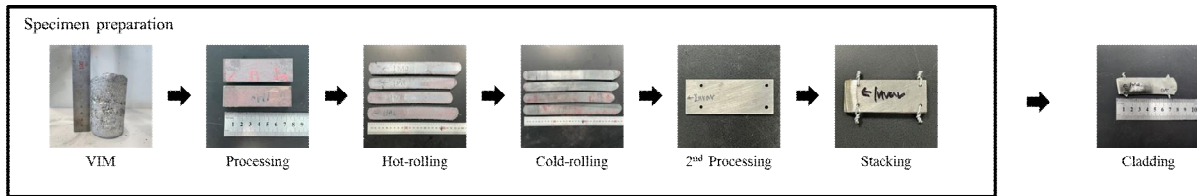


Fig. 21. Rolling and Cladding process in this experiment.

Table. 3. Rolling condition of differential speed rolling.

Method of rolling	Upper roll	Lower roll	Roll speed ratio
	Roll speed (RPM)	Roll speed (RPM)	
CR	5	5	1.0 : 1.0
DSR	6	5	1.2 : 1.0
	7	5	1.4 : 1.0
	8	5	1.6 : 1.0
	10	5	2.0 : 1.0

클래드재 제조 후, 롤 속도비에 따른 이주속 압연에 따른 미세조직 변화를 평가하기 위해 압연된 클래드재의 TD면을 EBSD를 통해 측정하였다. 클래드재의 종양부위에서 TD면에 평행하도록 시편을 절단한 후, Hot mounting을 실시하여 클래드재를 고정시켰다. 이후 0.04um까지 미세연마를 실시한 후 EBSD를 측정하였다. EBSD의 해석은 Tex SEM Laboratory(TSL)사의 TSL OIM 프로그램(Version. 8)을 통해 진행하였다. 각 클래드재의 EBSD의 측정 부위를 Fig. 22에 나타내었으며, 측정된 EBSD 데이터로부터 롤 속도비에 따른 Inverse Pole Figure(IPF), Kernel Average Misorientation(KAM) map을 관찰하였고 집합조직을 평가하기 위해 Pole Figure(PF) 및 Orientation Distribution Function(ODF) map을 분석하였다. Fig. 23는 As-cold rolled 상태의 IPF-ND plane과 KAM map을 나타낸 것이다. 이전에 열간압연 공정을 실시했기 때문에 결정립이 매우 크며 압연방향으로 길게 연신된 것을 확인할 수 있다. KAM에서는 열간압연 시 발생된 재결정된 결정립이 아직 잔류하고 있다는 것을 보여준다.

또한 롤 속도비에 따른 기계적 특성을 평가하기 위해 두께별 경도를 측정하였다. 측정부위는 Fig. 24의 모식도와 같이 클래드재의 압연 길이 방향 및 폭 방향의 중심부에서 분석 시료를 채취하였으며, 고열팽창합금판재의 표면직하에서 0.1mm 떨어진 위치에서 저열팽창합금판재 표면에서 0.1mm 위치까지 0.15mm 간격으로 측정하였다. 경도는 100g의 하중을 10초간 유지한 후 압입자의 D_1 (Diameter)과 D_2 값을 통해 산술평균값을 취하였다.

Fig. 25은 동속 및 이주속 압연 후 경도를 비교하기 위해 As-hot rolled 상태와 As-cold rolled 상태의 고열팽창합금과 저열팽창합금의 경도 측정 결과를 나타내고 있다. 합금 조성의 차이에 의해 고열팽창합금판재의 경도가 소폭 높게 나타났다.

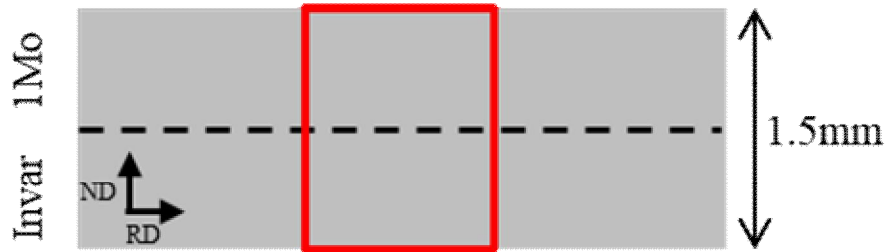


Fig. 22. Schematic illustration of positions measured by EBSD.

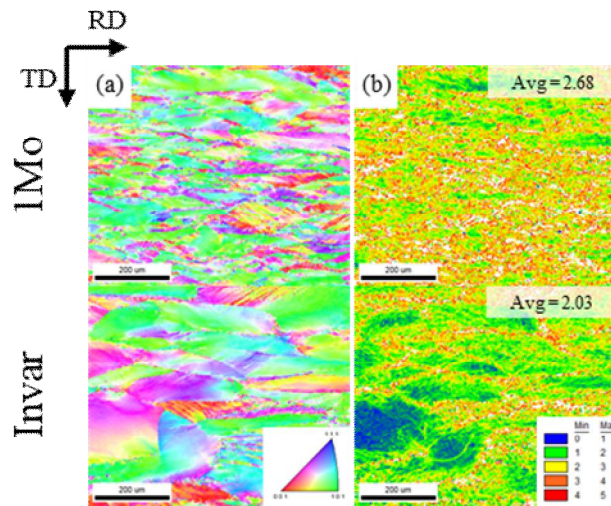


Fig. 23. (a) IPF map and (b) KAM map of as-cold rolled 1Mo and Invar.

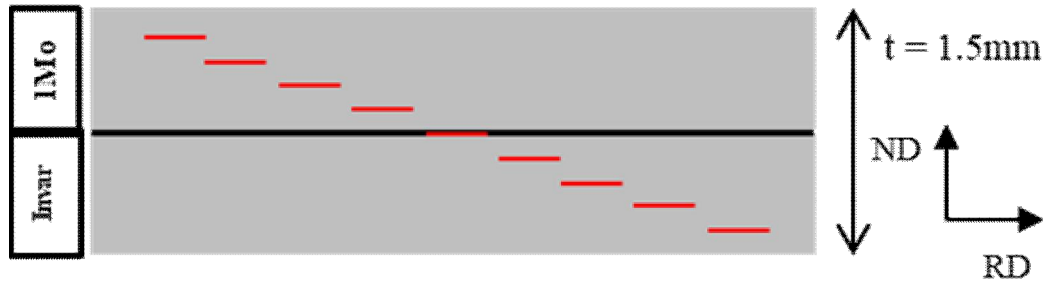


Fig. 24. Schematic illustration of positions measured hardness through the thickness.

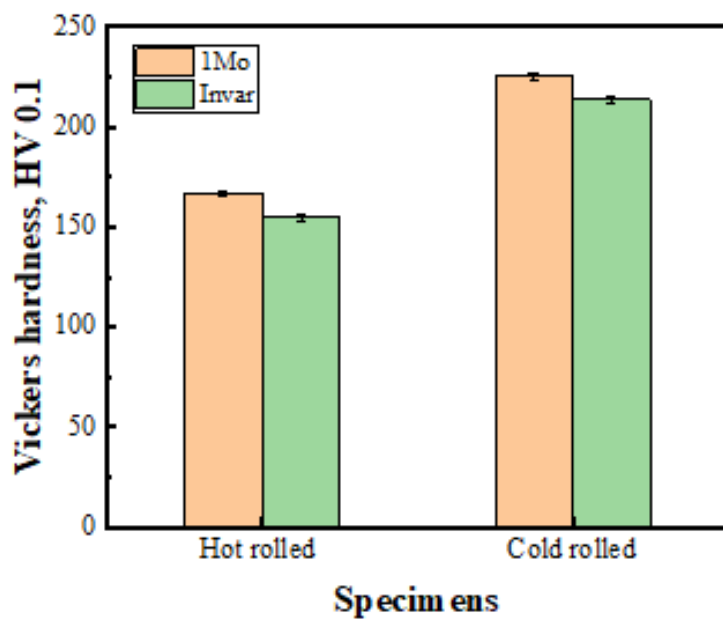


Fig. 25. Hardness of as-cold rolled 1Mo and Invar

3. 결과 및 고찰

3.1 이주속 압연 시 압하율에 따른 접합 특성

롤 속도비(Roll speed ratio)에 따른 이주속 압연을 실시한 바이메탈의 접합 유무를 평가하기 위하여 압하율을 35%에서 66.7%까지 달리 하여 롤 속도비 1.0:1.0 ~ 2.0:1.0의 조건 하에서 동속 및 이주속 압연을 실시하였다. 압연 후 바이메탈의 접합 유무를 하기 Table. 4에 나타내었다.

압하율과 롤 속도비에 따른 동속 및 이주속 압연을 실시한 결과, 동속 압연에서는 압하율 50% ~ 66.7% 범위에서는 성공적으로 접합되었지만, 50% 미만인 35%와 43%의 압하율에서는 접합되지 않았다. 롤 속도비 1.2:1.0의 이주속 압연을 실시한 결과, 동속 압연과 동일하게 압하율 최소 50% 이상에서 성공적으로 접합되었으며 35%와 43%의 압하율 조건에서는 접합되지 않았다. 롤 속도비 1.4:1.0에서도 마찬가지로 압하율 50% 이상에서는 성공적으로 접합되었고, 35%와 43%의 압하율 조건에서 접합에 실패하였다. 롤 속도비 1.6:1.0에서는 앞의 결과와는 달리, 압하율 43%, 50%, 60% 및 66.7%의 압하율 조건에서 성공적으로 접합되었고 압하율 35%에서는 접합되지 않았다. 롤 속도비 2.0:1.0에서도 압하율 43% 이상에서 성공적으로 접합되었다. 이주속 압연은 1.6:1.0 이상의 롤 속도비에서 더 낮은 압하율에서도 접합이 가능하다는 것을 시사한다.

Table. 4. Cladding results according to reduction ratio and roll speed ratio.

Reduction ratio (%)	CR	DSR			
	1.0 : 1.0	1.2 : 1.0	1.4 : 1.0	1.6 : 1.0	2.0 : 1.0
66.7	O	O	O	O	O
60	O	O	O	O	O
50	O	O	O	O	O
43	X	X	X	O	O
35	X	X	X	X	X

O : Successful bonding
X : Failure bonding

3.2 롤 속도비에 따른 압연 하중의 영향

압하율 50% 조건에서 롤 속도비에 따른 압연 하중의 변화를 아래 Fig. 26에 나타내었다. 속도비 1.0:1.0의 경우 평균 하중은 31.6 ton이다. 전체적으로 롤 속도비가 증가할수록 하중은 감소하는 경향을 보이며, 롤 속도비 1.2:1.0에서의 하중은 30 ton, 롤 속도비 1.4:1.0에서는 28.6 ton으로 동속 압연 대비 하중이 소폭 감소하였다. 롤 속도비 1.6에서의 하중은 24.7 ton, 롤 속도비 2.0:1.0에서의 하중은 약 21.2 ton으로 동속 압연 대비 하중이 더욱 큰 폭으로 감소하였다.

이는 앞서 언급한 이주속 압연 시 발생하는 중립점의 위치 차이에 기인한 교차 전단 영역(Cross shear zone)의 형성에 의한 것으로, 상·하 롤 속도비가 증가할수록 상·하 중립점의 위치가 멀어져 교차 전단 영역이 확장되어 소재가 받는 하중이 분산된 것으로 사료된다.

동속 압연과 롤 속도비 2.0:1.0의 이주속 압연 하중 차이는 약 12 ton으로, 동속 압연 대비 속도비 2.0:1.0의 이주속 압연을 실시할 경우, 하중을 약 40% 감소시킬 수 있다. 이는 바이메탈 소재의 접합을 비롯한 압연 공정 시, 압연 하중을 효과적으로 감소시켜 상업적 관점에서 봤을 때 충분히 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

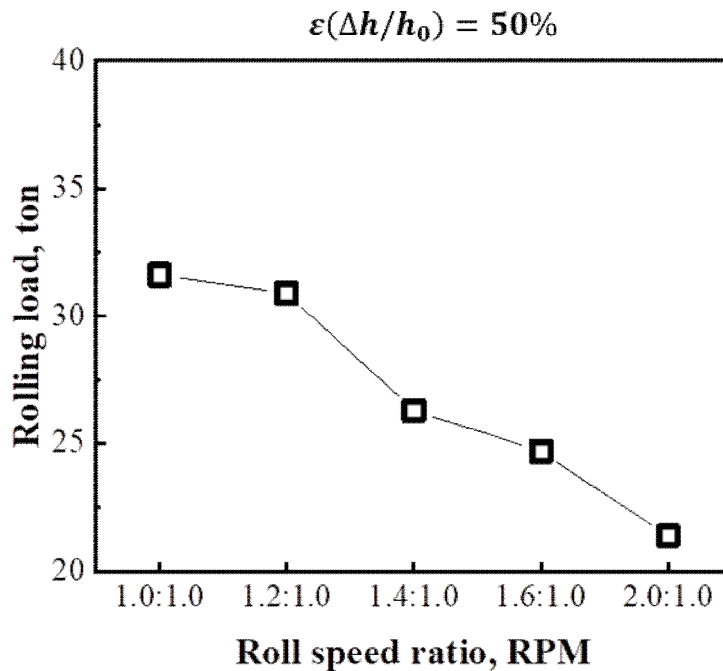


Fig. 26. Rolling load according to roll speed ratios with 50% rolling reduction.

3.3 롤 속도비에 따른 핀 형상

이주속 압연에 의해 도입된 변형량의 변화를 측정하기 위하여 본 연구에서는 핀 삽입법을 도입하였다. 동속 및 이주속 압연을 실시하기 전, 시료 중앙에 1.6 ϕ hole을 뚫어 Fe소재의 핀을 삽입하여 롤 속도비에 따른 이주속 압연 후 변형된 핀 형상을 관찰하였다. 핀 형상을 관찰하기 위해 동속 및 이주속 압연된 클래드재의 중심부를 절단 후 TD면을 1 μ m까지 미세연마하여 핀의 형상을 광학현미경(Optical Microscope, OM)으로 관찰하였다. 핀 삽입법의 모식도를 Fig. 27와 Fig. 28에 나타내었으며, 롤 속도비에 따른 핀 형상은 Fig. 29에 나타내었다.

동속 압연에서는 상·하부와 시료의 표면 간 마찰에 의해 상부를 측고열팽창합금부는 압연방향으로, 하부를 측저열팽창합금부는 압연반대방향으로 전단변형이 작용하여 핀 형상이 전형적인 완만한 C-Curve 형상을 나타내었다.

이주속 압연의 경우, 롤 속도비 1.2:1.0에서는 동속 압연 대비 압연방향으로의 전단변형이 하부를 측에 도입되어 압연반대방향으로 작용하는 전단변형량이 감소하였다. 롤 속도비 1.4:1.0에서도 압연방향으로의 전단변형이 하부를 측까지 도입되어 압연반대방향으로 작용하는 전단변형량이 속도비 1.2:1.0보다 감소하였다. 롤 속도비 1.6:1.0에서는 상부를 측에서 롤 속도비 1.2:1.0, 1.4:1.0에 비해 전단변형이 더욱 많이 도입되어 핀 형상의 기울기가 가파른 형상을 나타내었다. 또한 전단변형이 하부를 측까지 도입되어 마찰에 의한 압연 반대방향으로의 전단변형이 거의 도입되지 않았다. 롤 속도비 2.0:1.0의 이주속 압연 결과, 전단변형이 상부를 측 표면부터 하부를 측 표면까지 두께 전체에 도입되어 핀 형상이 사선 형상을 나타내었다.

핀 형상을 통해 롤 속도비가 증가할수록, 소재에 도입되는 전단변형이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 전단변형량 및 상당변형량 수식을 통해 도입된 변형량을 정량적으로 계산하였다.

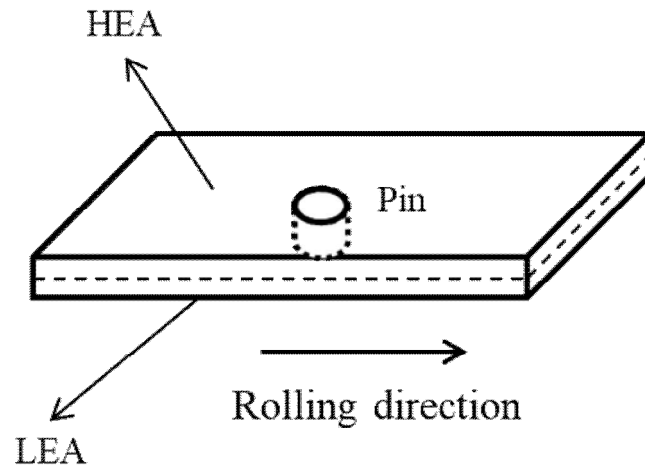


Fig. 27. Schematic illustration of embedded pin.

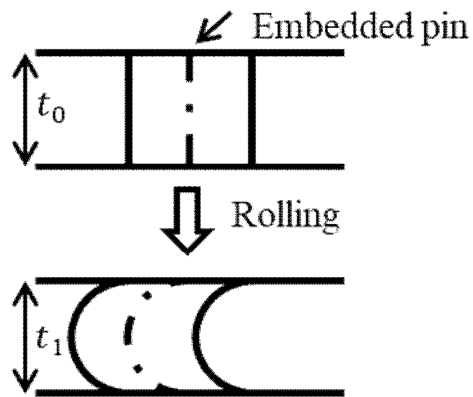


Fig. 28. Schematic illustration of embedded pin after rolling.

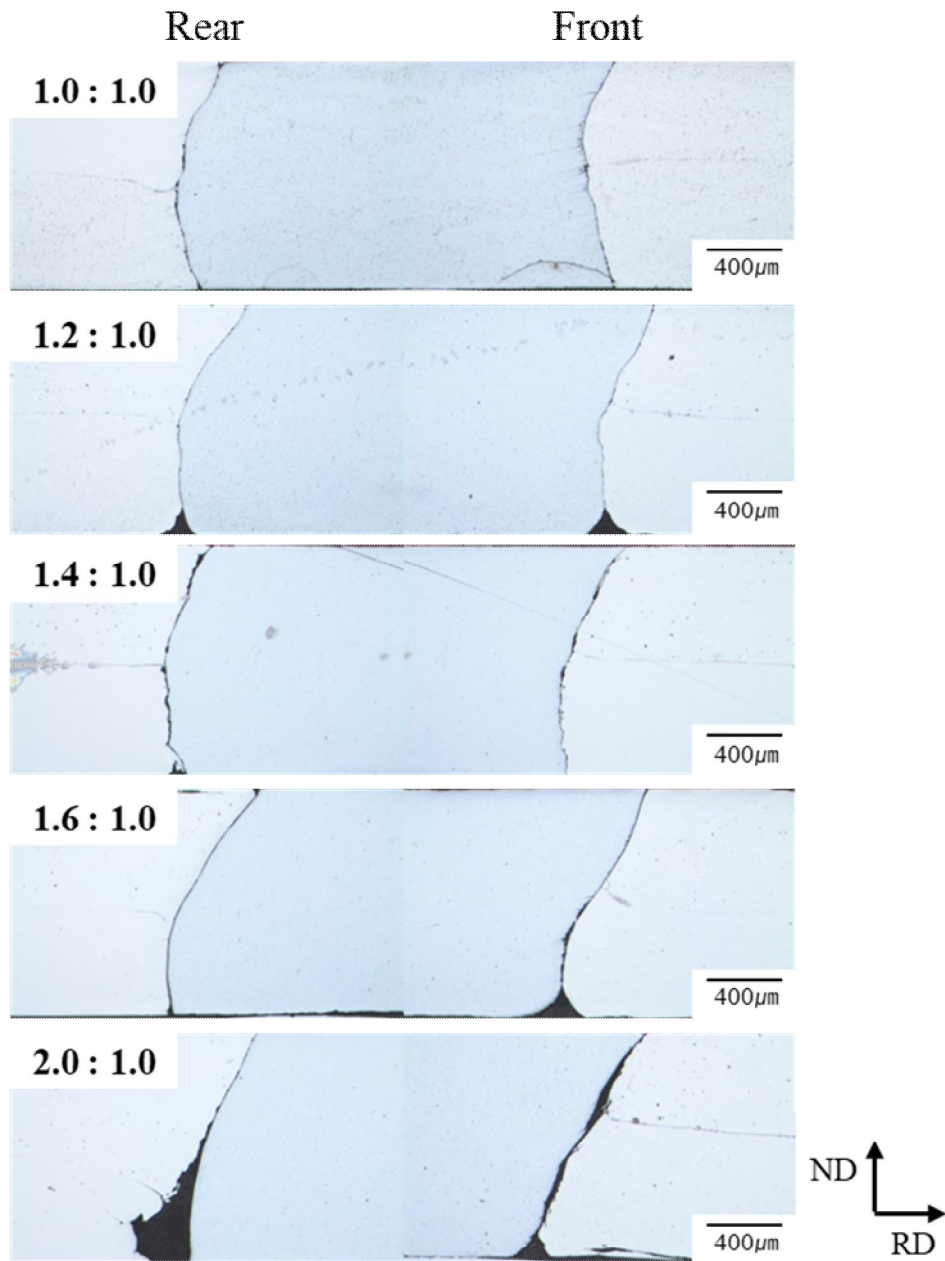


Fig. 29. Deformation of embedded pin according to roll speed ratio.

3.4 전단변형량 및 상당변형량 계산 결과

동속 및 이주속 압연에 의해 도입된 전단변형량(γ)과 상당변형량($\bar{\varepsilon}$)의 계산은 T. Sakai et al.과 S.H. Lee et al. 등이 실시했던 연구결과를 바탕으로 핀 삽입법을 통해 실시하였다[14,15]. 동속 및 이주속 압연 이후 TD면에서 관찰한 핀의 두께별 경사각(θ)을 측정 후 다음 식 (4)에 대입하여 계산하였다.

$$\gamma = \frac{2(1-r)^2}{r(2-r)} \tan\theta \ln \frac{1}{1-r} \quad (4)$$

$$r = 1 - \left(\frac{t_1}{t_0}\right) \quad (5)$$

이 때 r 은 압하율로 식 (5)에 나타내었으며 t_0 는 초기 두께, t_1 은 압연 후의 두께이다. 본 연구에서는 동속 및 이주속 압연을 1pass 실시하였으므로 초기 두께 $t_0 = 3\text{mm}$, 압연 후 두께 $t_1 = 1.5\text{mm}$ 가 된다. 따라서 압하율 $r = 0.5$ 이며, 압하율(r)을 식 (4)에 대입하여 두께별 전단변형량을 구하였다.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\ln \frac{1}{1-r}\right)^2 + \frac{\gamma^2}{4}} \quad (6)$$

식 (4)를 통해 전단변형량을 계산한 후 식 (6)에 대입하여 상당변형량($\bar{\varepsilon}$)을 구할 수 있다. 상당변형량은 다음 식 (6)에 의해 계산하였다.

위 식을 통해 동속 및 이주속 압연된 클래드재의 두께별 변형량을 측정하였다. 클래드재의 두께를 t , 클래드재의 두께 위치를 Δt 라 정의하고, 클래드재의 각 측정영역의 두께 위치를 $\Delta t/t$ 로 표현하였다. 이 때, 상부를 부위의 표면, 클래드재의 중심부 및 하부를 부위의 표면은 각각 $\Delta t/t = 0, 0.5, 1.0$ 으로 나타내었다.

3.4.1 롤 속도비에 따른 전단변형량 계산 결과

롤 속도비에 따른 이주속 압연 후 식 (4)를 통해 계산한 두께별 전단변형량(Shear strain)의 분포를 하기 Fig. 30에 나타내었다. 전단변형량의 계산은 핀 삼입법을 통해 관찰한 핀 형상에서 각 두께별 경사각을 측정 후 대입하여 계산한 것이다. 경사각이 클수록 전단변형량 값은 증가하며, 핀의 형상이 압연 반대방향이면 경사각도 음(-)의 값으로 계산하였다.

동속 압연의 경우 상부를 측 부위(고열팽창합금부)는 롤과 표면 간 마찰에 의해 압연방향으로의 전단변형이 도입되어 전단변형량 값이 양(+)의 값을 나타내고 중심부는 전단변형이 도입되지 않아 변형량의 값이 0을 나타낸다. 하부를 측 부위(저열팽창합금부)는 마찬가지로 롤과의 마찰에 의해 전단변형이 압연 반대방향으로 도입되어 전단변형량 값이 음(-)의 값을 나타낸다.

이주속 압연의 경우 롤 속도비가 증가할수록 롤의 속도가 빠른 상부를 측에 도입되는 전단변형이 증가하고 하부를 표면까지 전단변형이 도입된다. 속도비 1.2:1.0에서는 전단변형량이 0이 되는 지점은 $\Delta t/t = 0.55$, 속도비 1.4:1.0에서는 $\Delta t/t = 0.7$, 속도비 1.6:1.0에서는 $\Delta t/t = 0.8$ 으로 속도비 2.0:1.0에서는 모든 부위에서 전단변형량 값이 양(+)의 값을 나타내었다. 이를 통해 롤 속도비가 증가할수록 하부를 측 부위까지 전단변형이 도입되는 것을 알 수 있으며, 롤 속도비 2.0:1.0에서 전단변형량이 가장 균일한 값을 나타내었고 압연방향으로의 전단변형만이 작용한 것을 알 수 있다.

동속 클래드재의 전단변형량 값의 범위는 상부를 표면 0.2부터 ~ 하부를 표면 -0.21의 값을 나타내었다. 롤 속도비 1.2:1.0에서의 값의 범위는 0.26 ~ -0.2, 롤 속도비 1.4에서의 값은 0.28에서부터 ~ -0.1, 롤 속도비 1.6:1.0에서는 상부를 표면 0.3에서부터 하부를 표면에서는 0의 값을 나타내었다. 롤 속도비 2.0:1.0에서 전단변형량 값의 범위는 0.32부터 0.2로 롤 속도비가 증가할수록 시료에 도입되는 전단변형이 증가하였다.

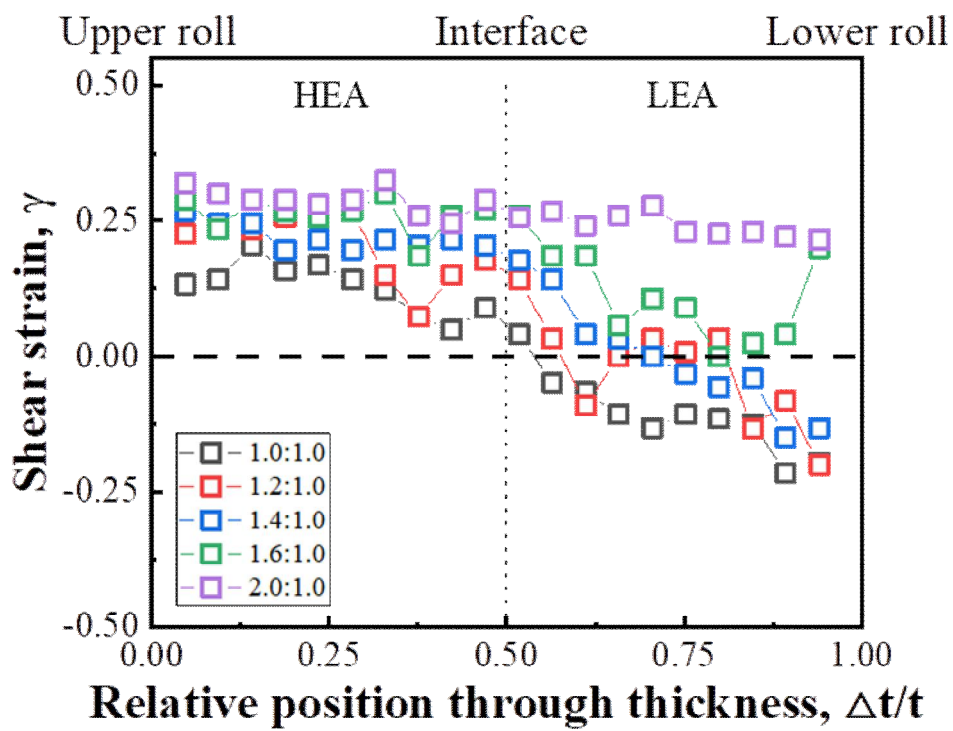


Fig. 30. Variation of the shear strain through the thickness of clad sheets according to roll speed ratio.

3.4.2 롤 속도비에 따른 상당변형량 계산 결과

상당변형량(Equivalent strain)은 응력에 의한 변형의 절대적인 크기를 나타내는 척도로, 롤 속도비에 따른 이주속 압연 후 식 (5)를 통해 계산한 두께별 상당변형량의 분포를 하기 Fig. 31에 나타내었다. 압하율 50%에서 전단변형이 도입되지 않았을 때, 즉 평면변형만 도입되었을 때의 상당변형량 값은 0.8이다. 상당변형량 값이 증가할수록, 소재에 도입된 전단변형이 증가하였다는 것을 의미한다.

동속 압연의 경우, 상부를 부위의 표면과 하부를 부위의 표면에 롤과의 마찰에 의한 전단변형이 도입되고 중심부에는 전단변형이 도입되지 않아 표면부가 비교적 높은 값을 나타내고 중심부가 낮아 상당변형량 값이 완만한 U자 곡선을 나타낸다.

이주속 압연의 경우 상부를 부위에 전단변형이 더 많이 도입되기 때문에 $\Delta t/t$ 의 값이 낮을수록 상당변형량이 비교적 높게 나타나고 $\Delta t/t$ 의 값이 1에 수렴할수록 상당변형량 값이 낮게 나타난다. 상당변형량이 0.8이 되는 지점은 속도비 1.0:1.0에서 $\Delta t/t = 0.5$, 속도비 1.2:1.0에서는 $\Delta t/t = 0.55$, 속도비 1.4:1.0에서는 $\Delta t/t = 0.7$, 속도비 1.6:1.0에서는 $\Delta t/t = 0.8$ 이다. 여기서 $\Delta t/t$ 의 값이 높을수록 전단변형이 하부를 측까지 도입되었다는 것을 의미한다. 속도비 2.0:1.0은 두께 전체에 전단변형이 도입되었기 때문에 전체 $\Delta t/t$ 구간에서의 값이 모두 0.8 이상을 나타낸다. 상당변형량 값의 범위는 동속 압연은 0.8 ~ 0.84, 속도비 1.2:1.0은 0.8 ~ 0.85, 속도비 1.4:1.0은 0.8 ~ 0.85, 속도비 1.6:1.0은 0.8 ~ 0.86, 속도비 2.0:1.0에서는 0.84 ~ 0.87의 결과를 나타내었다. 속도비 2.0:1.0에서 상당변형량이 가장 균일하게 도입되었으며, 가장 높은 값을 나타내었다.

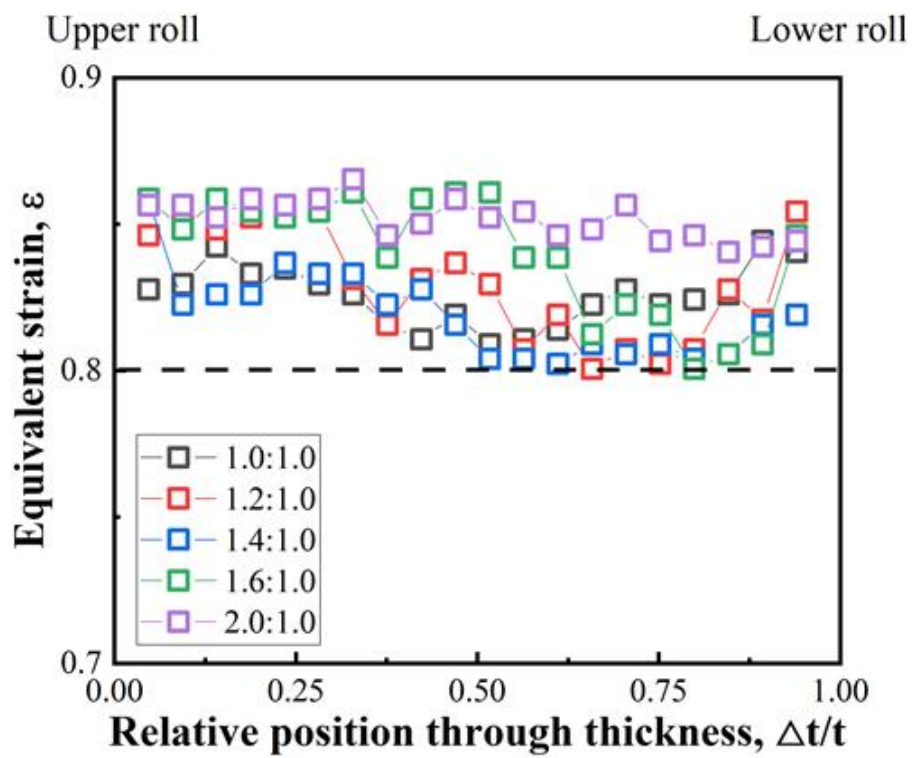


Fig. 31. Variation of the equivalent strain through the thickness of clad sheets according to roll speed ratio.

3.5 미세조직 및 집합조직

롤 속도비에 따른 이주속 압연의 영향을 평가하기 위해 미세조직을 측정 후 분석하였다. 미세조직은 광학현미경 및 EBSD를 통해 측정하였으며 OIM 프로그램을 통해 측정된 데이터로부터 IPF map, KAM map 및 ODF 데이터를 추출하여 분석을 실시하였다.

3.5.1 OM을 통한 미세조직 관찰

Fig. 32는 압하율 50%에서 동속 및 이주속 압연을 실시한 클래드재를 에칭한 후의 조직을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 모든 롤 속도비 조건에서 양호한 접합계면이 관찰되었으며 이주속 압연 시 동속 압연에 비해 접합계면의 곡률이 감소하였다. 또한 동속 압연 및 이주속 압연된 클래드재 모두 압연방향으로 크게 연신된 조직을 나타내고 있으며, 롤 속도비가 증가함에 따라 더욱 미세화된 결정립이 관찰되었다.

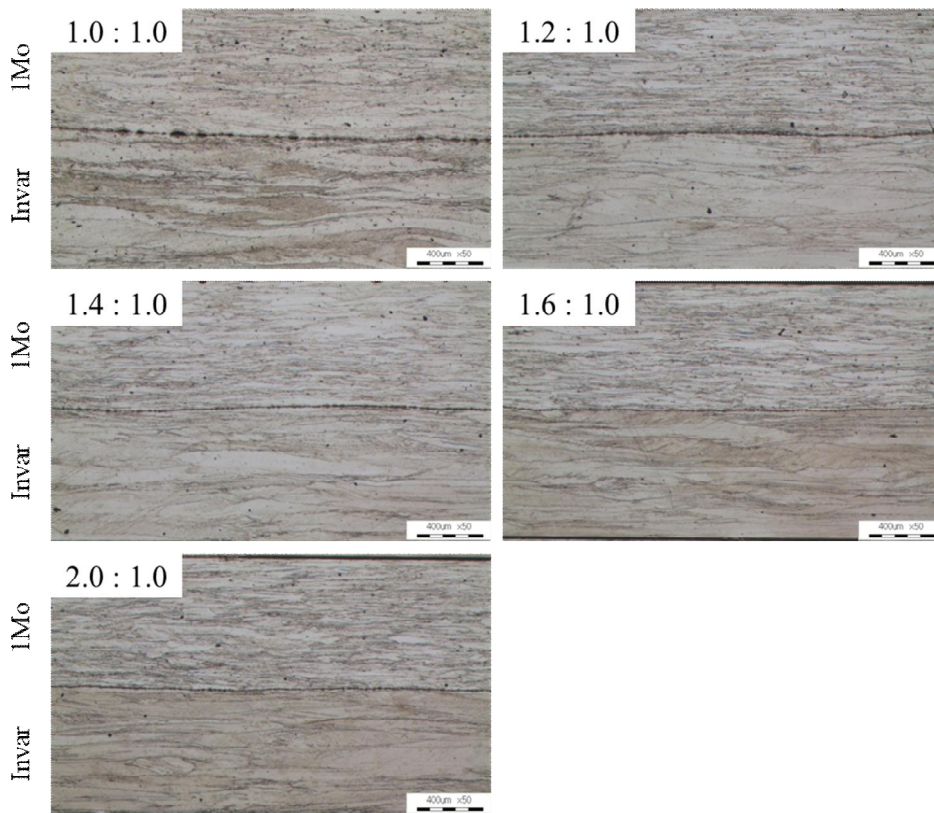


Fig. 32. Microstructure of clad sheets according to roll speed ratio.

3.5.2 집합조직_IPF

Fig. 33은 1Mo와 Invar의 압하율 50%에서 동속 및 이주속 압연된 클래드재의 IPF(Inverse pole figure) map을 나타낸 것이다. IPF map 상에서의 방위는 컬러 코드(Color code)를 통해 확인할 수 있다. IPF map이란 Kikuchi 회절패턴에 의해 얻어진 집합조직에 각 측정 점의 (x,y) 좌표에서 얻어진 방위를 측정함으로써 방위를 확인하는 가장 대표적인 방법이다. 본 연구에서는 이주속 압연한 클래드재 중 속도비 1.4:1.0과 2.0:1.0을 선정하여 미세조직을 분석하였고 비교재로 동속 클래드재 또한 분석을 실시하였다. Fig. .에 법선 방향(ND)에 대한 IPF map을 나타내었다.

동속 압연의 경우, 결정립이 압연방향으로 길게 연신되었으며 초기 출발재료에서부터 나타난 결정립 크기 차이로 인해 Invar 측에서 보다 조대한 결정립이 관찰되었다. 1Mo와 Invar 측 모두 냉간 압연 시 관찰되는 전형적인 압연 방위인 $\langle 101 \rangle // ND$ 와 $\langle 112 \rangle // ND$ 방위가 주로 관찰되었다. 이는 $\{001\}$ 면에서 관찰한 IPF map에서도 확인할 수 있으며, 집합조직의 집적도는 각각 1.82, 2.76의 값을 나타내었다.

이주속 압연의 경우 압연집합조직과 전단집합조직이 주로 관찰되었는데, 롤 속도비 1.4:1.0의 경우 OM으로 관찰한 것과 같이 전단변형에 의해 동속 압연 대비 결정립이 미세화되었으며 보다 random한 방위들이 관찰되었다. 집합조직의 집적도는 각각 1.51, 1.41로 동속 압연 대비 감소하였다. 롤 속도비 2.0:1.0도 마찬가지로, random한 방위들이 관찰되며 집적도는 각각 1.3, 2.54의 값을 나타내었다.

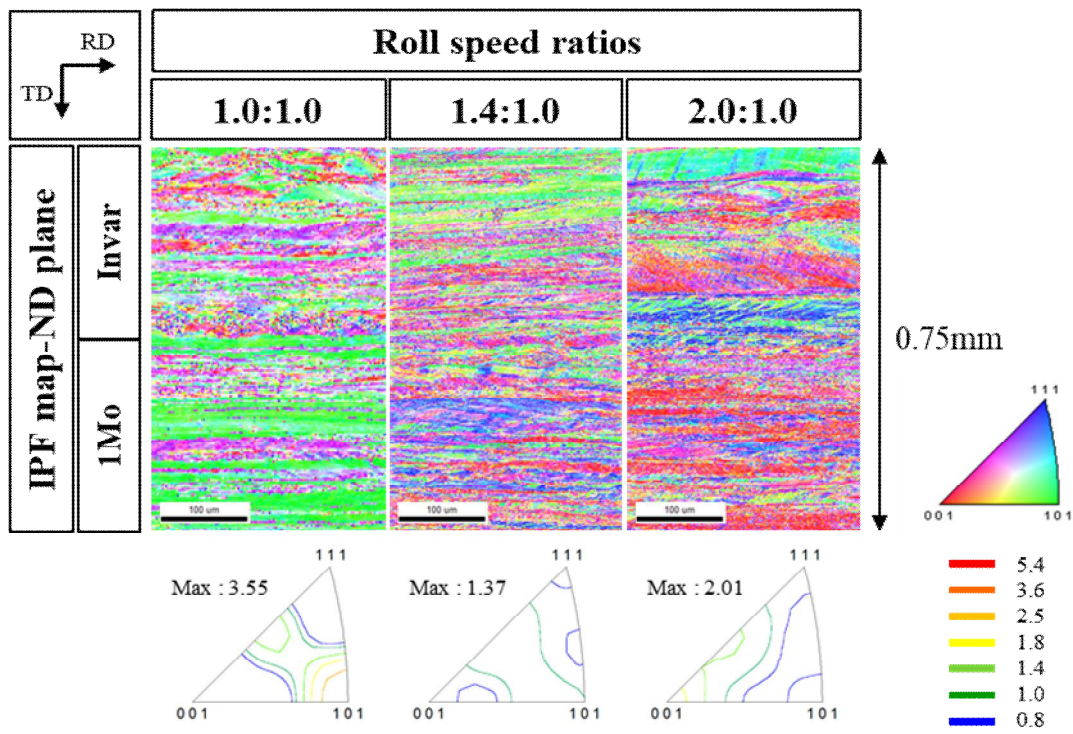


Fig. 33. ND plane of IPF maps in thickness direction of the cladded sheets according to roll speed ratio.

3.5.3 KAM map

Fig. 34은 압하율 50%에서 1Mo와 Invar의 동속 및 이주속 압연된 클래드재의 KAM(Kernel Average Orientation) map을 나타낸 것이다. KAM은 일반적으로 EBSD 데이터에서 파생되는 결정립의 한 측정 지점에서 인접한 측정 지점들 간의 국부적인 방위 차이를 측정하여 평균으로 나타낸 값이다. KAM map을 통해 소성 변형량을 간접적으로 표현할 수 있으며 KAM 값이 높을수록 전위밀도 또는 내부 변형에너지가 증가한 것이다. 동속 압연의 경우 초기 출발재료의 차이에 의해서 전위밀도의 축적이 고열팽창합금부인 1Mo에서 더 높게 나타났다. 롤 속도비가 증가할수록 클래드재에 도입된 전단변형량이 증가하여 Fig. 37.에 나타낸 것과 같이 KAM 분율이 증가하는 것을 확인하였으며, Fig. 35에 롤 속도비에 따른 평균 KAM 값을 그래프로 나타내었다. 롤 속도비가 증가할수록 평균 KAM 값이 증가하였으며 동속 압연의 경우 평균전위밀도는 2.45, 1.4:1.0의 경우 2.61, 그리고 2.0:1.0의 경우 2.89이다. KAM을 통해 이주속 압연은 동속 압연 대비 소재에 도입되는 전단변형량이 증가하고 전위밀도 또한 증가시킬 수 있다.

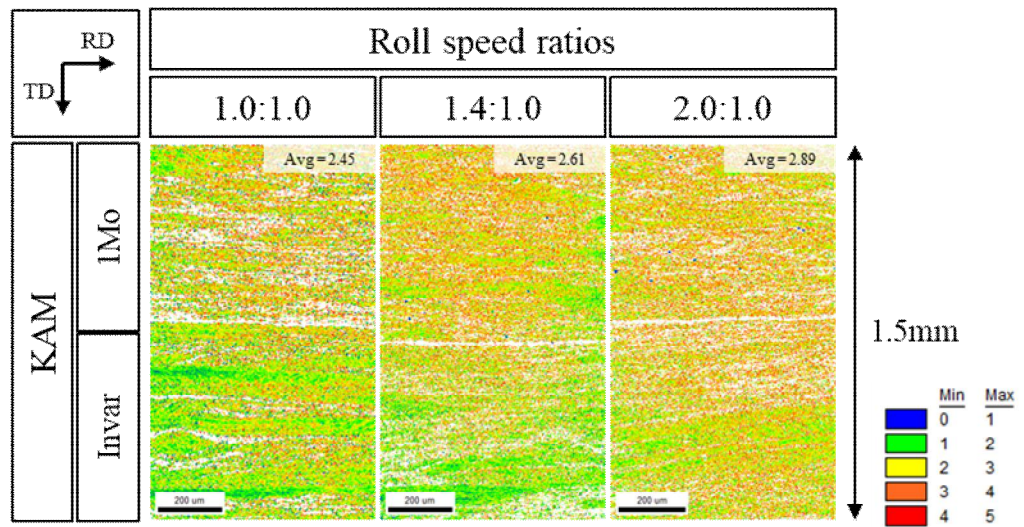


Fig. 34. KAM maps in thickness direction of the clad sheets according to roll speed ratio.

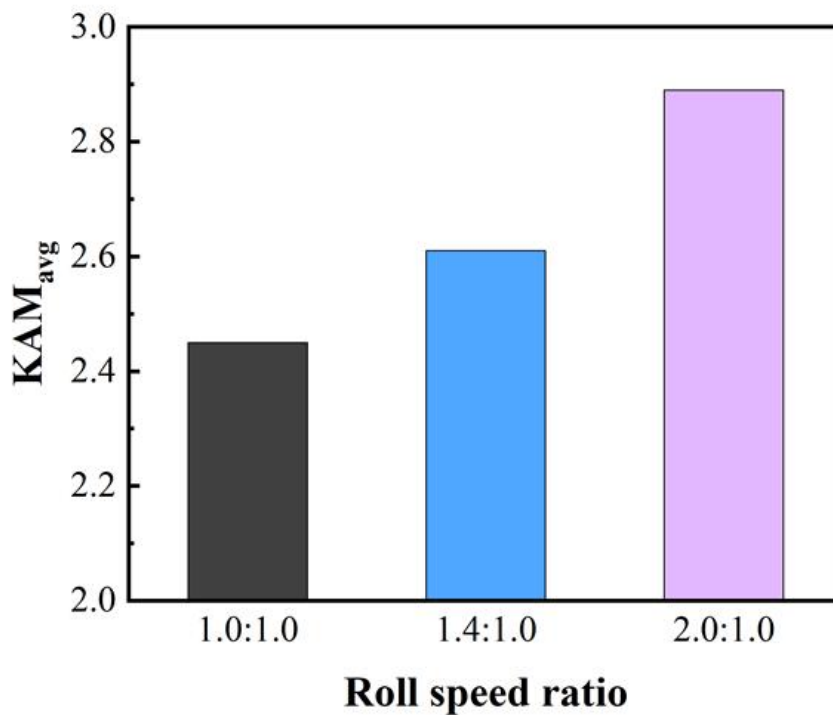


Fig. 35. Average KAM values according to roll speed ratios.

3.5.4 집합조직_ODF

Fig. 36은 오일러각(ϕ_1, ψ, ϕ_2)을 통해 동속 및 이주속 압연에 따른 $\phi_2 = 45^\circ$ 의 1Mo와 Invar 측의 방위분포함수(Orientation distribution Function, ODF)를 측정된 실험결과를 나타낸 것이다. 동속 압연의 경우 1Mo와 Invar 모두 전형적인 압연집합조직인 Brass 방위 $\{110\}\langle 211 \rangle$ 와 Copper 방위 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 가 주로 관찰되었다.

이주속 압연 시 전단변형의 도입으로 인해 압연 시 나타나는 방위와는 다른 방위들이 관찰되는데, 롤 속도비 1.4:1.0의 경우 Brass 방위, Copper 방위와 인접한 $\{112\}\langle 232 \rangle$ 방위가 관찰되었으며, 약한 Rotated-cube 방위 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 또한 관찰되었다. 이 때, $\{112\}\langle 232 \rangle$ 방위에서 집적도를 보인다. 또한 이주속 압연에 의해 1Mo와 Invar 측이 서로 상이한 집합조직을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 롤 속도비 2.0:1.0에서는 Rotated-cube 방위와 Copper 방위 및 전단변형 시 나타나는 방위인 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 과 $\{112\}\langle 110 \rangle$ 방위가 관찰되었다. 또한 롤 속도비가 증가함에 따라 집합조직의 집적도가 완화되었는데, 이는 도입된 전단변형의 양 또한 크기 때문이다.

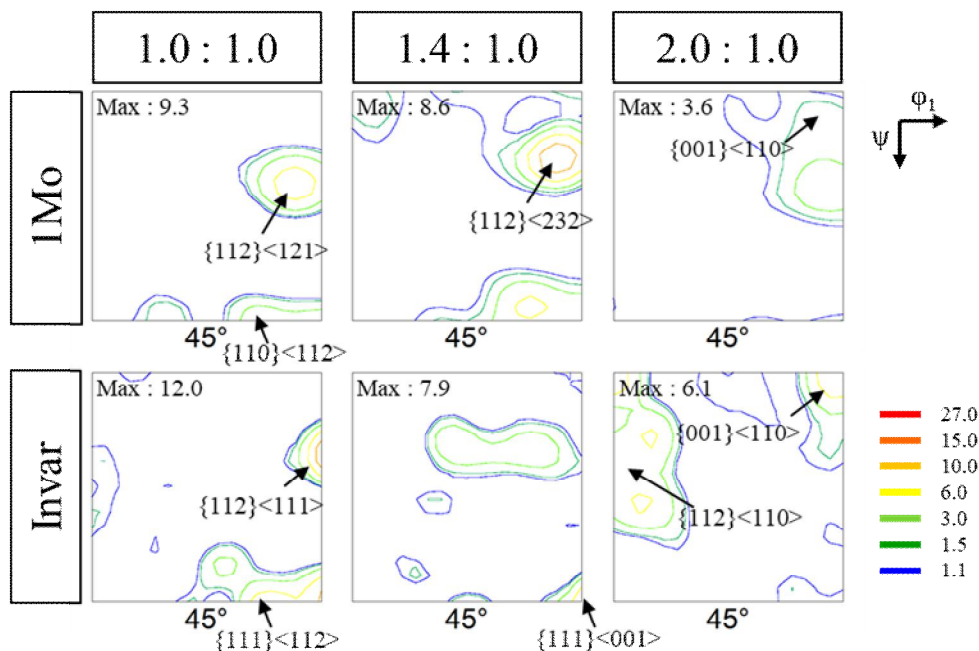


Fig. 36. ODF sections at $\phi_2 = 45^\circ$ of 1Mo and Invar according to roll speed ratio.

3.6 동속 및 이주속 압연에 따른 Fe계 바이메탈의 두께별 경도 분포

Fig. 37.은 동속 및 롤 속도에 따른 이주속 압연된 클래드재의 기계적 특성을 평가하기 위하여 두께 방향으로의 경도 분포를 나타내었다. 제 2장의 실험방법에서 언급한 것처럼 소재의 조성 차이에 의해 As-cold rolled 상태의 압연재에서부터 1Mo의 경도가 높은 결과를 나타내고 있다. 냉연재 상태의 1Mo의 두께 전체의 평균 경도는 약 225 HV, Invar의 두께 전체의 평균 경도는 213 HV로 서로 약 12 HV의 경도 차이를 나타내었다. Table. 5에 각각의 경도값을 표로 나타내었다.

동속 압연을 통해 접합한 클래드재의 경우, 고열팽창합금부의 경도 분포는 표면에서 중심부까지 237 ~ 238 HV, 저열팽창합금부는 234 ~ 237 HV를 나타내었다. 롤과의 마찰에 의해 표면에 도입된 전단변형으로 인해 클래드재의 중심부보다 표면에서의 경도가 더 높게 측정되었다.

이주속 압연의 경우, 속도비 1.2:1.0에서 고열팽창합금부의 경도 분포는 243 ~ 240 HV, 저열팽창합금부는 237 ~ 238 HV를 나타내었다. 속도비 1.4:1.0에서 고열팽창합금부의 경도는 243 ~ 241 HV, 저열팽창합금부의 경도는 237 ~ 238 HV를 나타내었다. 속도비 1.6:1.0에서의 경도 분포는 각각 243 ~ 241 HV, 236 ~ 238 HV이며 속도비 2.0:1.0에서의 경도 분포는 각각 244 ~ 243 HV, 237 ~ 239 HV를 나타내었다.

동속 압연 대비 이주속 압연에서 1Mo 측과 Invar 측의 경도 분포의 편차가 각각 감소하였다. 롤 속도비에 따라 경도가 높게 측정되었는데, 이는 도입된 전단변형의 크기가 롤 속도비에 따라 증가하였기 때문이다. 또한 롤 속도비 2.0:1.0에서 두께별 경도가 가장 균일하게 측정되었다. 경도 측정 결과는 기연급한 전단변형량 및 상당변형량의 결과와도 잘 부합된다.

Table. 5. Hardness distribution through the thickness of the cladded sheets.

Hardness distribution, HV 0.1					
Roll speed ratios		1Mo (HEA)		Invar (LEA)	
		surface	center	center	surface
As-cold rolled		225 ~ 218 (Δ 7)		210 ~ 215 (Δ 5)	
CR	1.0:1.0	238 ~ 234 (Δ 4)		235 ~ 237 (Δ 2)	
DSR	1.4:1.0	243 ~ 241 (Δ 2)		237 ~ 238 (Δ 1)	
	2.0:1.0	244 ~ 243 (Δ 1)		238 ~ 239 (Δ 1)	

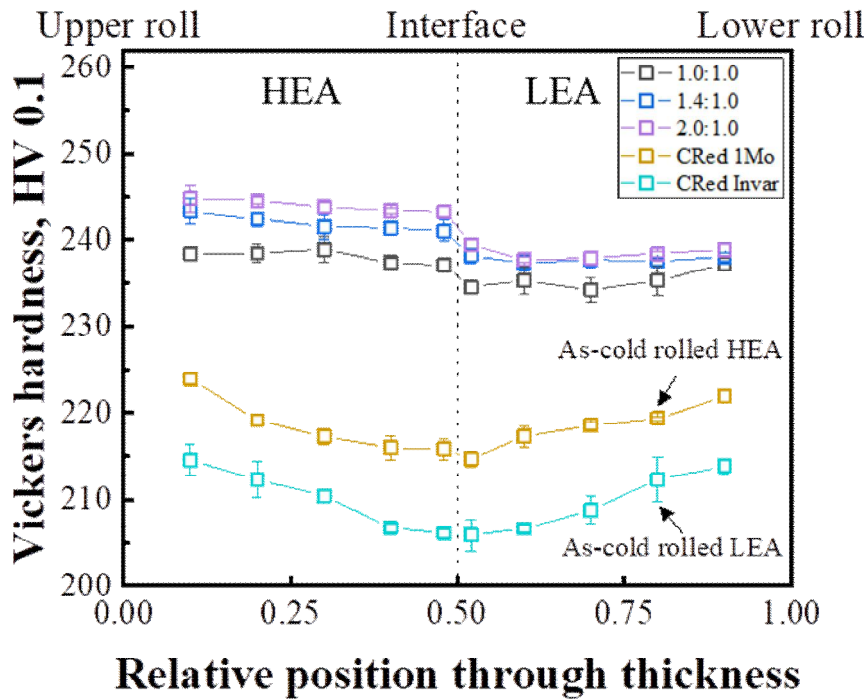


Fig. 37. The variation of hardness distribution through the thickness the cladded sheets after conventional rolling and differential speed rolling.

3.7 유한요소해석

동속 및 이주속 압연 시, 마찰계수는 압연 중 변형에 영향을 주는 주요 인자이다. 하지만 실험을 통해 마찰계수를 구하는 데에 어려움이 있어 2D 시뮬레이션을 통하여 롤 속도비에 따른 마찰계수를 도출하였다. 시뮬레이션 시 소재의 기계적인 물성치인 유동응력과 변형률은 1Mo, Invar의 As-cold rolled 상태의 변형률 0.001 ~ 0.1까지의 인정시험결과를 이용하였으며, 워크롤 및 푸셔는 강체, 소재는 약 2500개의 메쉬로 이루어진 강소성체로 설정하였다. Fig. 38에 롤과 소재를 나타내었으며, 이외의 모든 압연 조건은 실제 실험과 동일한 환경 하에서 실시하였다. 동속 및 이주속 압연 후, 롤 속도비의 변화에 따른 마찰계수의 변화는 하기 Table. 6에 나타내었다.

롤 속도비에 따른 2D 시뮬레이션 후, 후처리기에서 단류선을 측정하여 롤 속도비에 따른 핀 형상과 비교한 데이터를 Fig. 39에 나타내었다. 동속 압연의 경우, 상부롤과 하부롤의 마찰계수가 0.2일 때, 실험적 데이터인 핀 형상과 유사하게 완만한 C-curve를 나타내는 결과를 얻었다. 롤 속도비 1.4:1.0의 경우, 상부롤의 마찰계수는 0.24로 동속 압연 대비 0.04 증가하였다. 이는 롤 속도가 마찰계수와 변형에 영향을 주는 주요 인자임을 입증한다. 롤 속도비 2.0:1.0의 경우, 상부롤의 마찰계수는 0.3으로 해석한 조건 중 가장 높게 나타났다. 위 마찰계수들을 통해 도출한 단류선의 전단변형량과 실제 핀 형상의 전단변형량을 계산 후, 서로 비교한 결과를 아래 Fig. 40에 나타내었다. 실험을 통한 핀 형상과 단류선을 비교한 결과, 모든 롤 속도비 조건에서 변형량은 유사하게 관찰되었다.

Table. 6. Results of friction coefficient according to roll speed ratios.

Conditions		Upper roll side			Lower roll side		
		Roll diameter (mm)	Roll speed (RPM)	Friction factor [μ]	Roll Diameter (mm)	Roll speed (RPM)	Friction factor [μ]
CR	1.0:1.0	200	5	0.2	200	5	0.2
DSR	1.4:1.0		7	0.24		5	0.2
	2.0:1.0		10	0.3		5	0.2

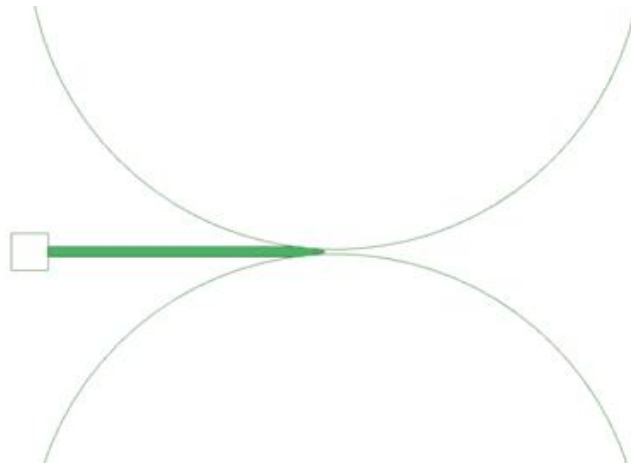


Fig. 38. FEM model of roll and workpiece

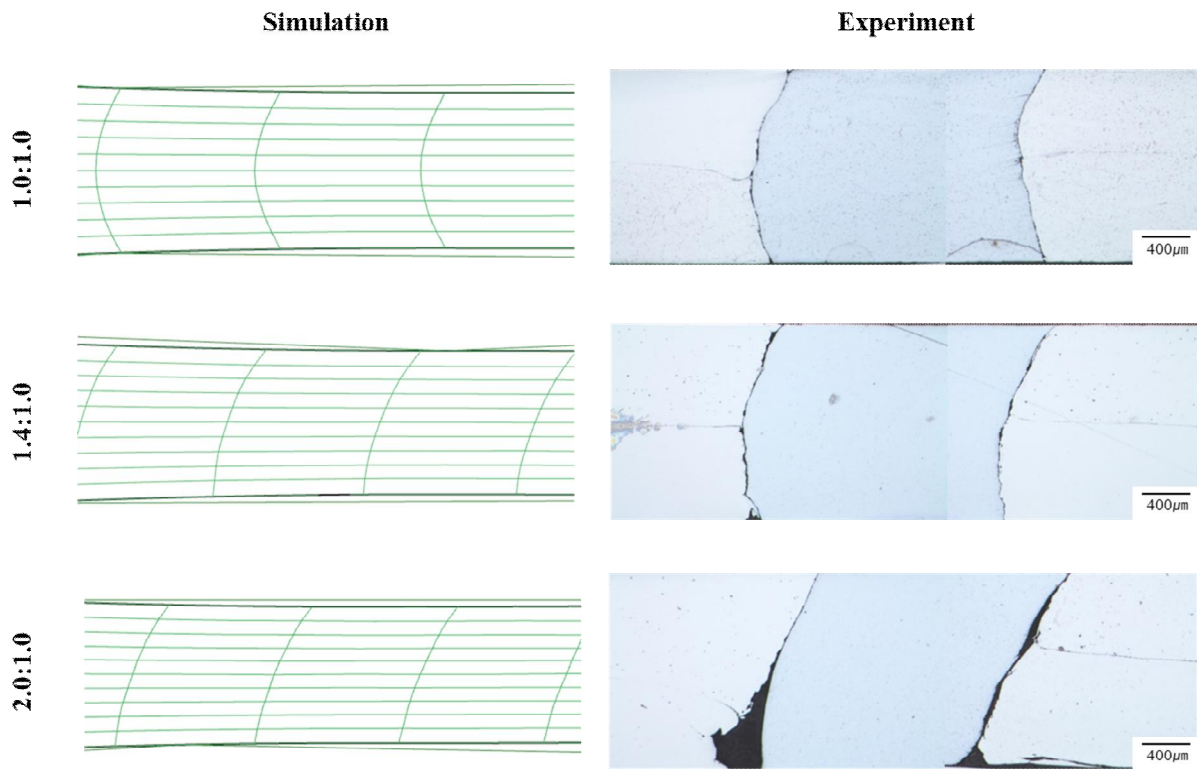


Fig. 39. FEM images and pin shapes according to roll speed ratio.

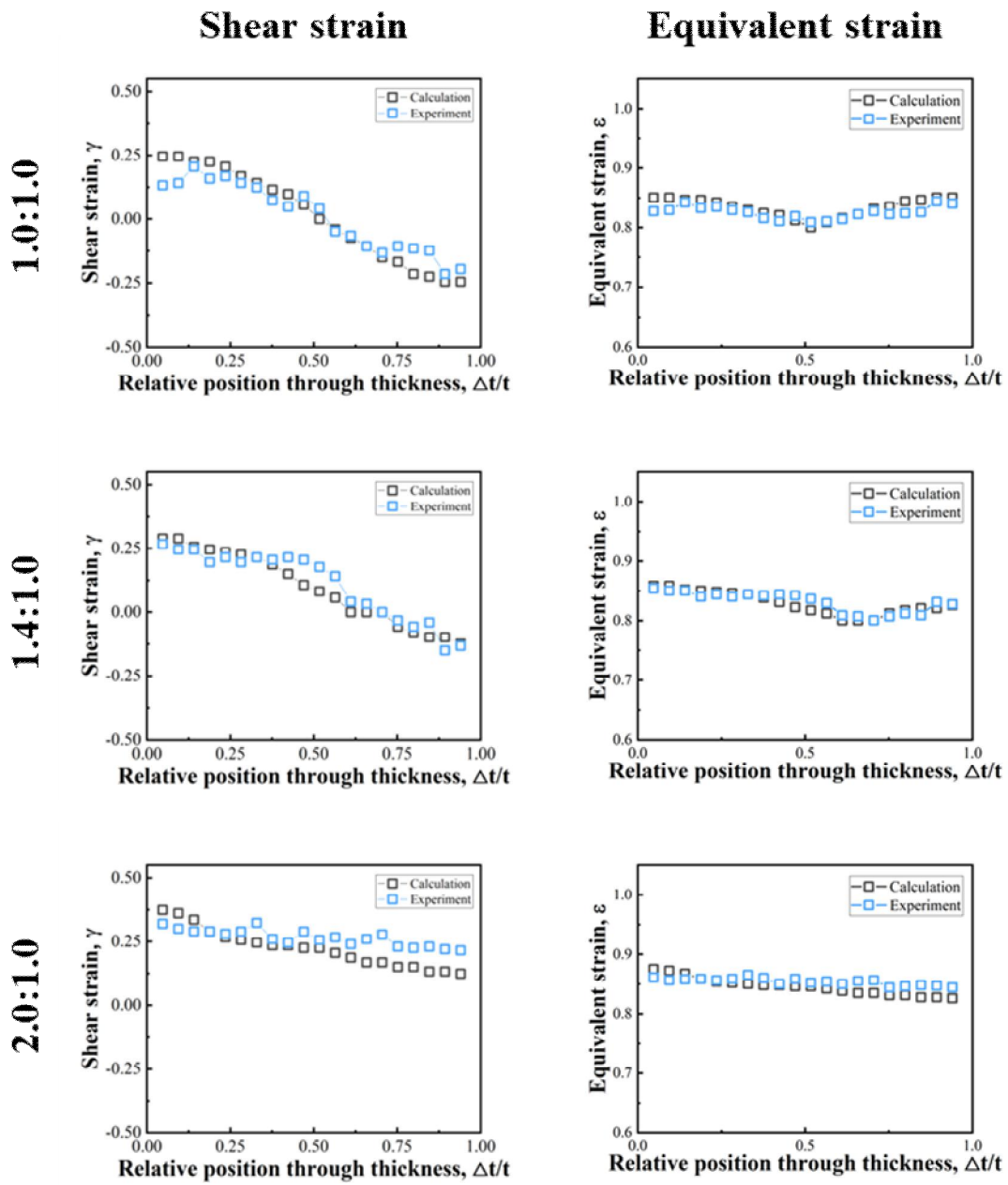


Fig. 40. Strain of calculation and experiment according to roll speed ratio.

4. 결론

1. 이주속 압연 시, 롤 속도비 1.6:1.0 이상에서 동속 압연 대비 더 낮은 압하율인 43%에서도 성공적으로 접합되었으며, 롤 속도비가 증가할수록 압연 하중은 감소하였다.
2. 롤 속도비가 증가할수록 전단변형량 및 상당변형량은 증가하였으며, 롤 속도비 2.0:1.0에서 도입된 변형량이 가장 균일하였다.
3. 롤 속도비가 증가할수록, 도입된 전단변형에 의해 결정립이 미세화되고 전위밀도의 분율이 증가하였으며 집합조직의 집적도가 감소하였다.
4. 롤 속도비가 증가할수록 기계적 특성이 향상되었으며, 이는 마찰계수의 증가로 인한 전단변형량이 증가하였기 때문이다.

제 3 장. 동속 및 이주속 압연의 패스 스케줄에 따른 Fe계 이중 금속 바이메탈의 조직 및 기계적 특성

1. 서론

제 2 장에서, 클래드재의 두께 전체에 균일한 변형량을 부과하기 위해 롤 속도비에 따른 이주속 압연을 실시하였다. 이주속 압연 결과, 롤 속도비 2.0:1.0의 조건에서 가장 균일한 변형량이 부과되었으며 이를 뒷받침하기 위해 핀 형상을 관찰하였고, OM 및 EBSD를 통해 미세조직을 분석하였다. 또한 비커스 경도를 통해 기계적 특성을 평가하였다.

본 연구에서는 클래드재에 보다 많은 전단변형을 도입하고 그에 따른 특성을 알아보기 위하여 롤 속도비에 따른 2pass 이주속 압연을 실시하였다. T. Sakai et al., S.H. Lee et al. 등이 소재에 보다 많은 전단변형을 도입시키기 위해 알루미늄합금의 2pass 이주속 압연을 실시하였다[16-18]. 2pass 이주속 압연을 통해 압연방향으로의 전단변형이 1pass 이주속 압연 대비 더욱 많이 도입되었고 소성변형률비인 r -value가 증가하였고 결정립이 미세화되었으며 $\{111\}\langle 110\rangle$, $\{112\}\langle 110\rangle$ 및 $\{001\}\langle 110\rangle$ 과 같은 전단집합조직이 발달하였다.

본 연구에서는 롤 속도비에 따른 동속 및 이주속 압연을 1pass 실시 후, 이주속 압연된 클래드재를 TD축을 기준으로 180° 회전시켜 기존의 상부를 측에 위치해있던 고열팽창합금(1Mo)을 하부를 측에 위치시켜 이주속 압연을 1pass 추가로 실시하였다. 이 때, 압하율은 50%로 총 압하율 75%, 최종 두께 0.75mm의 클래드재를 제조하였다. 비교재로 2pass 동속 압연 또한 실시하였다. 이후 제 2장에서와 마찬가지로 핀 삽입법을 통해 도입된 변형량을 측정하였으며, 이를 통해 전단변형량 및 상당변형량을 계산하였다. 이후, EBSD를 측정하여 집합조직을 관찰하고 1pass 이주속 압연된 클래드재와 비교·분석하였으며, 비커스 경도를 통해 기계적 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

고열팽창합금과 저열팽창합금의 롤 속도비에 따른 이주속 압연을 실시 후 이주속 압연된 클래드재를 TD축을 기준으로 180°회전시킨 후 저열팽창합금이 상부를 측에 위치하게 하여 클래딩을 실시하였다. 2pass 이주속 압연의 모식도는 아래 Fig. 41에 나타내었다.

2pass 이주속 압연 이후, 2pass 이주속 압연된 클래드재의 중앙부위에서 TD면에 평행하도록 시편을 절단한 후 연마하여 롤 속도비에 따른 핀 형상을 관찰하였다. 핀 형상을 통해 2장과 동일한 식을 사용하여 전단변형량과 상당변형량을 계산하였다. 그 후 1pass 이주속 압연된 클래드재와 비교·분석하기 위해 EBSD를 측정하였다. KAM map을 통해 롤 속도비 별 이주속 압연에 의해 클래드재에 도입된 전위밀도 분포를 확인하였으며, PF map, IPF map 및 ODF를 통해 집합조직을 분석하였다. 또한 비커스 경도를 통해 두께별 경도를 측정하였다.

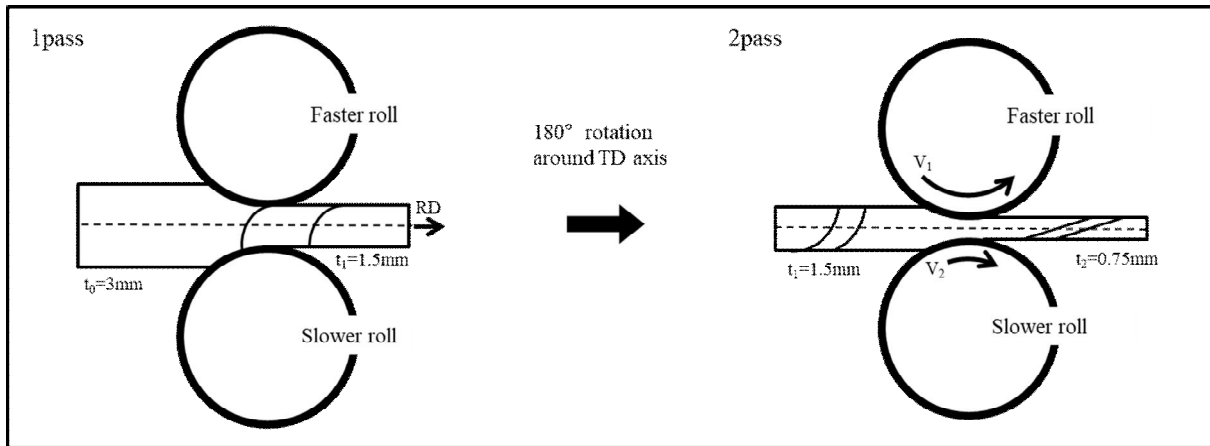


Fig. 41. 2pass differential speed rolling process.

3. 결과 및 고찰

3.1 롤 속도비에 따른 핀 형상

2pass 이주속 압연에 따라 도입된 변형량을 계산하기 위해, 2장과 동일한 방법으로 핀 삽입법을 통하여 핀 형상을 관찰한 결과를 하기 Fig. 42에 나타내었다. 동속 압연에서는 1pass 대비 더 굴곡진 C-curve 형상이 관찰되었다. 이는 pass 횟수가 증가함에 따라 총 압하량이 증가하였기 때문에 클래드재에 도입된 변형량 또한 증가하였기 때문이다.

2pass 이주속 압연 시, 롤 속도비 1.4:1.0에서는 2pass 이주속 압연에 의해 전단변형이 상부를 부위 표면부터 하부를 부위 표면까지 두께 전체에 도입되어 전단변형이 압연방향으로만 도입된 사선 형상이 관찰되었다. 롤 속도비 2.0:1.0에서는 롤 속도비가 증가함에 따라 전단변형이 가장 많이 도입되었으며, 압연방향으로 가파른 경사도를 갖는 핀 형상이 관찰되었다. 롤 속도비에 따른 핀 형상을 통해 2pass 동속 및 이주속 압연에 의해 도입된 전단변형량 및 상당변형량을 정량적으로 계산하였다.

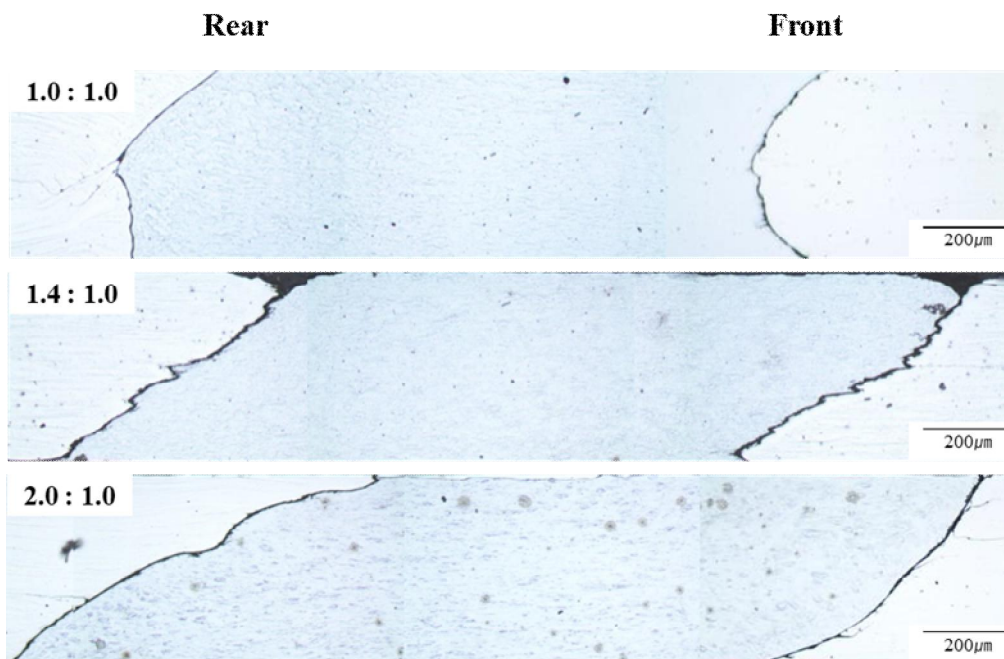


Fig. 42. Pin shapes as the roll speed ratios after 2pass differential speed rolling.

3.2 전단변형량 및 상당변형량 계산 결과

본 장에서는 2pass 아주속 압연된 클래드재의 전단변형량과 상당변형량을 계산하였으며, 계산은 제 2장의 1pass와 동일하게 식 (4)와 식 (6)을 사용하였다. 이때, 2pass 압연 후 총 압하율은 75%이므로 압하율 r 의 값은 0.75를 대입하여 계산하였다.

3.2.1 롤 속도비에 따른 전단변형량 계산 결과

롤 속도비에 따른 2pass 이주속 압연 후 식 (4)를 통해 계산한 각 두께별 전단변형량의 분포를 하기 Fig. 43에 나타내었다. 동속 압연의 경우 1pass와 동일하게 상부를 측 부위는 압연 방향의 전단변형이 도입되고 하부를 측 부위는 압연 반대방향으로의 전단변형이 도입되었다. 동속 압연에 의한 전단변형량 값의 범위는 -0.2 ~ 0.24를 나타내었다. 이는 1pass 동속 압연과 비교하였을 때, 0.05 높은 값으로, 동속 압연 시 전단변형량 값에 비해 소폭 증가한 값을 나타내었다.

2pass 이주속 압연의 경우 상부를 측 부위부터 하부를 측 부위까지 압연방향으로의 일축전단변형이 도입되었으며 롤 속도비가 증가할수록 도입된 전단변형량이 증가하였다. 속도비 1.4:1.0에서 전단변형량 값의 범위는 0.15 ~ 0.32이며, 1pass 1.4:1.0의 전단변형량인 -0.15 ~ 0.26과 비교하였을 때, 음수값을 갖는 Invar 측 전단변형량과의 편차는 약 0.4로 전단변형량이 1pass 대비 크게 증가하였다. 속도비 2.0:1.0에서는 전단변형량 값의 범위는 0.45 ~ 0.69를 나타내었다. 이는 1pass 전단변형량 값인 0.2 ~ 0.3 보다 약 두 배 증가한 값을 나타내며, 2pass 이주속 압연 시, 롤 속도비 2.0:1.0에서 전단변형량 값이 가장 큰 폭으로 증가하였다는 것을 보여준다. 이는 총 압하율의 증가와 더불어 1pass 이주속 압연 후 이미 압연방향으로 전단변형이 도입된 상태의 클래드재를 TD축을 기준으로 회전시킨 후, 일축방향으로 이주속 압연을 실시하여 전단변형의 도입을 증대시켰기 때문으로 사료된다.

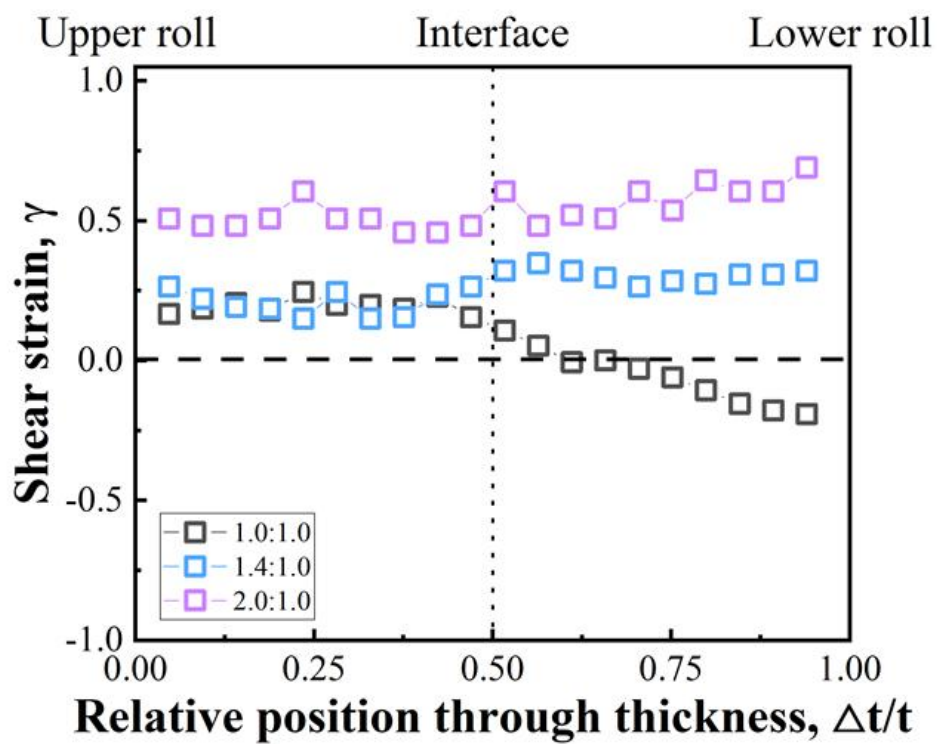


Fig. 43. Variation of the shear strain through the thickness of 2pass clad sheets according to roll speed ratio.

3.2.2 롤 속도비에 따른 상당변형량 계산 결과

롤 속도비에 따른 2pass 동속 및 이주속 압연 후 식 (6)을 통해 계산한 두께별 상당변형량의 분포를 하기 Fig. 44에 나타내었다. 총 압하율 75%에서 전단변형이 도입되지 않았을 때의 상당변형량 값은 1.6이다. 동속 압연의 경우 상부를 부위의 표면과 하부를 부위의 표면에 전단변형이 도입되고 중심부에는 전단변형이 도입되지 않아 상당변형량 값이 1pass와 동일한 완만한 U자 곡선을 나타낸다.

2pass 이주속 압연의 경우 1pass 대비 변형이 균일하게 도입되어 상당변형량 또한 상부로부터 하부까지 비교적 균일한 값을 나타내었다. 동속 압연의 상당변형량 값의 범위는 1.6 ~ 1.62, 속도비 1.4에서의 상당변형량 값의 범위는 1.61 ~ 1.63, 속도비 2.0의 상당변형량 값의 범위는 1.64 ~ 1.67의 값을 나타내었다. 이는 1pass 동속 및 이주속 압연과 비교하였을 때, 총 압하율의 증가로 인해 약 두 배 높은 값을 나타낸다. 핀 형상을 관찰하였을 때, 이주속 압연 시 상부를 측이 하부를 측보다 변형이 적게 작용하여 전단변형량 값이 더 낮게 측정되었기 때문에 상당변형량 또한 변형이 많이 작용한 하부를 측에서 더 높은 값을 나타내어 전단변형량 값과 유사한 경향을 나타내었다.

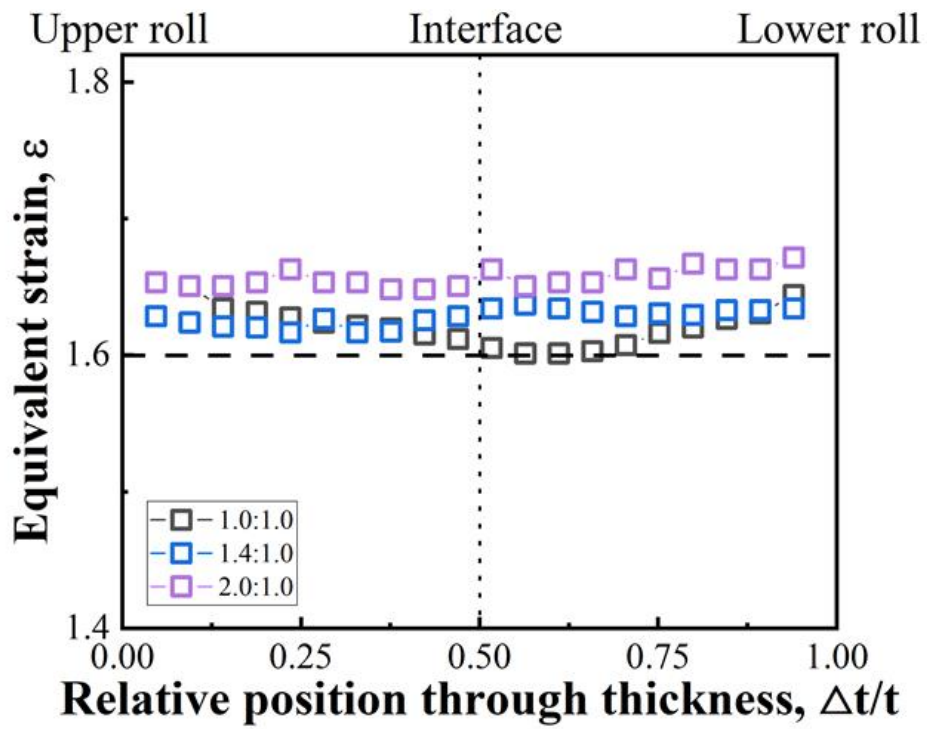


Fig. 44. Variation of the equivalent strain through the thickness of 2pass clad sheets according to roll speed ratio.

3.3 집합조직

3.3.1 집합조직_IPF

Fig. 45는 압하율 50%에서 2pass 동속 및 이주속 압연된 클래드재의 IPF map을 나타낸 것이다. IPF map은 클래드재의 ND 면을 나타내고 있다. 2pass 시, Invar가 상부를 측, 1Mo가 하부를 측에 위치하여 EBSD 또한 Invar가 상부를 측, 1Mo가 하부를 측에 위치시켜 측정하였다.

2pass 동속 압연의 경우, 결정립이 압연방향으로 길게 연신되었으며 1pass시 집합조직과 동일하게 $\langle 101 \rangle // ND$ 방위와 $\langle 112 \rangle // ND$ 방위가 지배적으로 관찰된다. 또한 집합조직의 집적도는 1pass 대비 약 0.9 증가하였는데, 이는 동속 압연을 통해 동일한 방향으로 변형이 반복적으로 작용하였기 때문이다.

롤 속도비 1.4:1.0의 경우, 두께 전체에 걸쳐 도입된 전단변형의 효과에 의해 1pass와 마찬가지로 random한 방위들이 관찰되었으며 집적도는 1pass 대비 0.5 감소하여 1.37의 값을 나타내었다. 롤 속도비 2.0:1.0에서는 $\langle 101 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ 외에도 $\langle 001 \rangle // ND$ 방위가 발달한 것을 관찰할 수 있다. 집적도는 1pass 값인 1.39에서 2pass 시 2.01의 값을 나타내었는데, 이는 전단집합조직 중 하나인 $\langle 001 \rangle // ND$ 방위의 집적도가 증가하였기 때문으로 사료된다. 이처럼 롤 속도비 및 이주속 압연의 패스 횟수 증가는 전단집합조직을 형성하는 주요 인자로 작용한다.

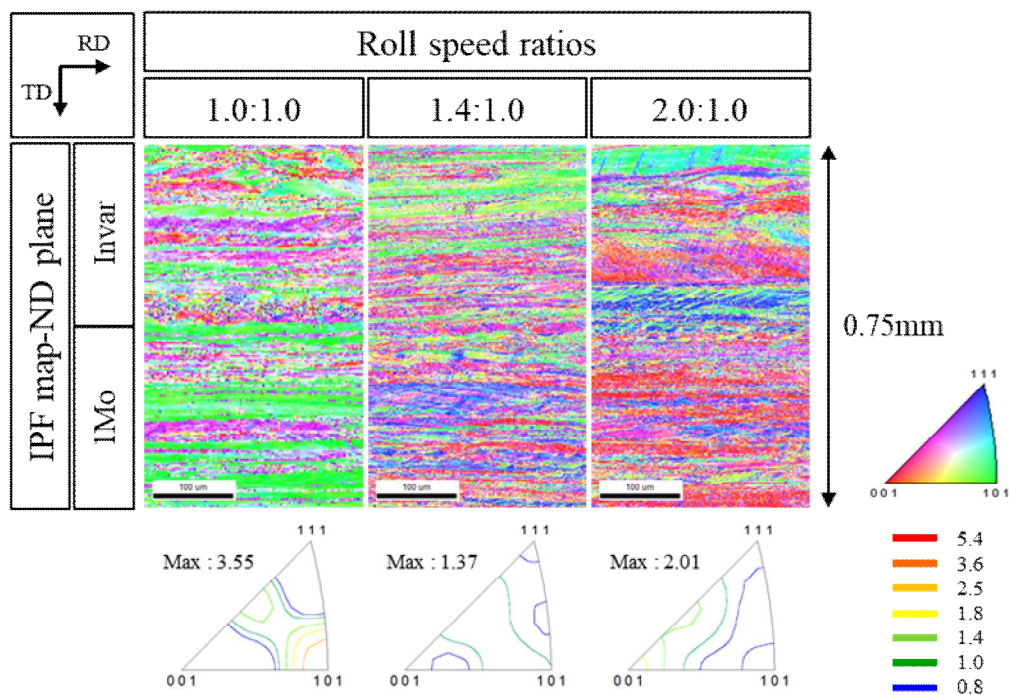


Fig. 45. ND plane of IPF maps in thickness direction of the 2pass cladde sheets according to roll speed ratio.

3.3.2 KAM map

Fig. 46은 2pass 동속 및 이주속 압연된 클래드재의 KAM map을 나타낸 것이다. 이주속 압연 시, TD축을 기준으로 180° 회전하였기 때문에 기존의 고열팽창합금 (1Mo)이 하부를 축으로, 저열팽창합금(Invar)이 상부를 축으로 이동하여 상부를 축에서 KAM 값의 분율이 비교적 낮게 측정되었다. 2pass 이주속 압연 시, 1pass와 마찬가지로 롤 속도비가 증가할수록 KAM 값은 증가하였다.

2pass 동속 압연 클래드재의 KAM 값은 2.69로 1pass 동속 압연 대비 0.24 증가하였다. 2pass 이주속 압연 시 롤 속도비 1.4:1.0의 경우 KAM 값은 2.86으로 1pass 1.4:1.0 대비 0.25 높은 값을 나타내었다. 속도비 2.0:1.0의 KAM 값은 2.93으로 1pass 2.0:1.0의 KAM 값인 2.89보다 0.04 증가하였다. 속도비 2.0:1.0에서 1pass와 2pass KAM 값은 서로 유사하였다.

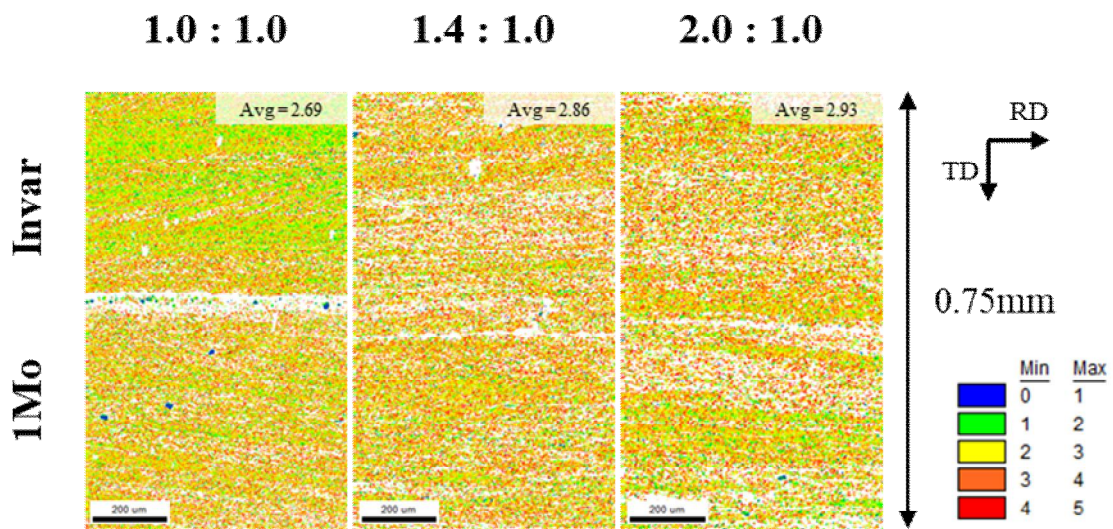


Fig. 46. KAM maps in thickness direction of the 2pass clad sheets according to roll speed ratio.

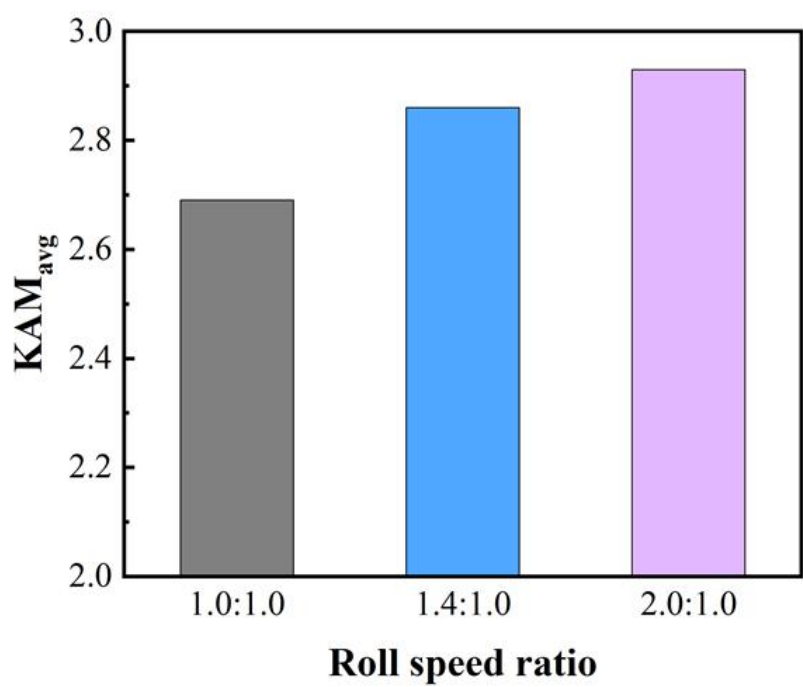


Fig. 47. Average KAM values of 2pass clad sheets according to roll speed ratio.

3.3.3 ODF map

Fig. 48은 오일러각(ϕ_1, ψ, ϕ_2)을 통해 2pass 동속 및 2pass 이주속 압연에 따른 $\phi_2 = 45^\circ$ 의 상부롤과 하부롤 축의 ODF를 나타낸 것이다. 2pass 동속 압연의 경우 1pass 동속 압연과 동일한 압연 방위인 $\{011\}\langle 211 \rangle$ 방위, $\{112\}\langle 111 \rangle$ 방위 등이 발달하였고 집합조직의 집적도는 더욱 증가하였다.

2pass 이주속 압연 시 롤 속도비 1.4:1.0에서는 Copper 인접방위인 $\{113\}\langle 221 \rangle$ 방위가 관찰되었다. 또한 Rotated-cube 집합조직이 발달하였는데, 이는 2pass 이주속 압연에 의해 전단변형이 두께 전체에 도입되었기 때문이다. 롤 속도비 2.0:1.0에서는 Cube조직과 Rotated-cube조직, 더불어 $\{111\}\langle 110 \rangle$, $\{112\}\langle 110 \rangle$ 과 같은 전단집합조직이 발달하였다. 이를 통해 이주속 압연이 전단변형집합조직의 형성에 크게 기여한다는 것을 알 수 있다.

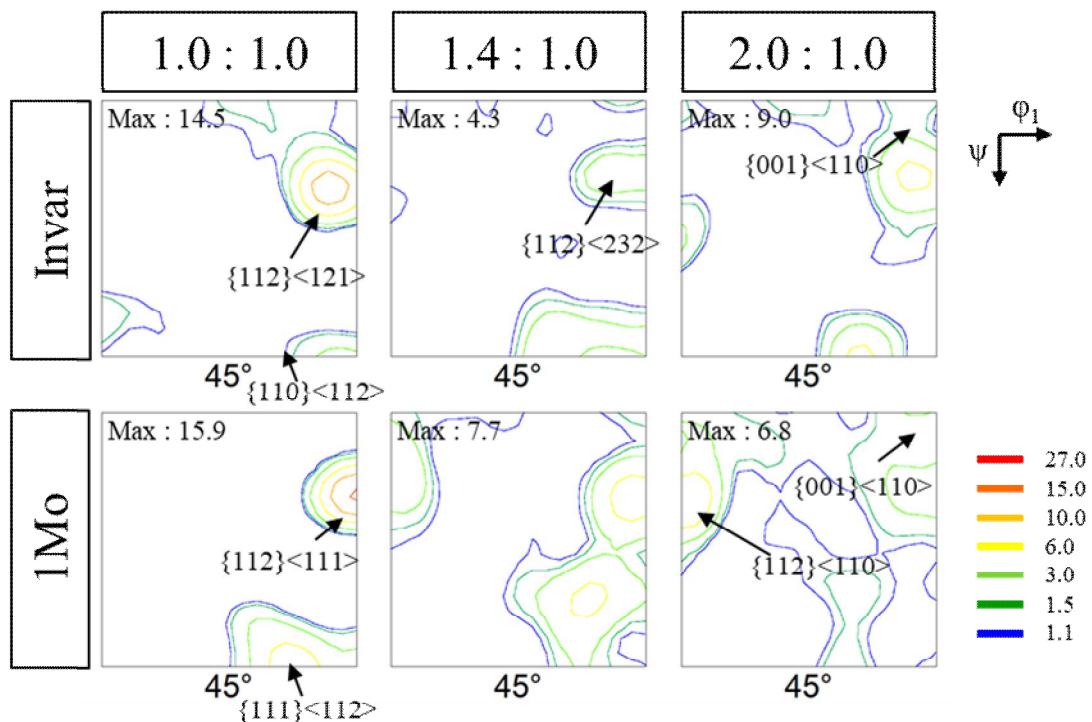


Fig. 48. ODF sections at $\phi_2 = 45^\circ$ of 1Mo and Invar by 2pass differential speed rolling.

3.4 2pass 동속 및 이주속 압연에 따른 두께별 경도 분포

Fig. 49는 동속 및 롤 속도에 따른 2pass 이주속 압연된 클래드재의 기계적 특성을 평가하기 위하여 2장과 동일한 방법으로 두께 방향으로의 경도 분포를 나타내었다. 또한 Table. 7에 표면부터 계면까지의 분포를 나타내었다.

2pass 동속 압연의 경우 Invar의 경도 분포는 표면에서부터 계면까지 약 243 ~ 239, 1Mo의 경도 분포는 계면에서부터 표면까지 242 ~ 248 HV의 값을 나타내었다. pass 횟수 증가에 따라 1pass 동속 압연 대비 1Mo의 경도는 약 10 HV, Invar의 경도는 약 6 HV 증가하였다. 이는 표면에 반복적으로 도입된 롤과의 마찰에 의한 전단변형에 의해 클래드재의 중심부보다 변형량이 크므로 상·하부 표면에서의 경도가 더 높은 값을 나타내었다.

이주속 압연의 경우, 속도비 1.4:1.0에서 Invar의 경도 분포는 246 ~ 244 HV, 1Mo의 경도 분포는 252 ~ 255 HV의 값을 나타내었다. 이는 1pass 1.4:1.0 대비 1Mo의 경도는 12 HV, Invar의 경도는 8 HV 증가하여 1Mo의 경도값이 Invar보다 더 크게 증가하였다. 속도비 2.0:1.0에서의 Invar와 1Mo의 경도 분포는 각각 249 ~ 247 HV, 255 ~ 257 HV로, 1pass 2.0:1.0의 1Mo보다 13 HV, Invar는 10 HV 증가한 값이다. 롤 속도비가 증가할수록 1Mo와 Invar의 경도값은 증가하였으며, 1Mo가 Invar에 비해 경도값이 더욱 크게 증가한 이유는 2pass 이주속 압연 후 핀 형상에서 본 것과 같이 Invar 대비 1Mo의 전단변형량과 상당변형량이 더욱 많이 도입되었기 때문이라 사료된다.

Table. 7. Hardness distribution of 2pass differential speed rolling.

Hardness distribution, HV 0.1					
Roll speed ratios		Invar (LEA)		1Mo (HEA)	
		surface	center	center	surface
As-cold rolled		210 ~ 215 ($\Delta 5$)		218 ~ 225 ($\Delta 7$)	
2pass CR	1.0:1.0	243 ~ 239 ($\Delta 8$)		240 ~ 248 ($\Delta 8$)	
2pass DSR	1.4:1.0	246 ~ 244 ($\Delta 2$)		252 ~ 255 ($\Delta 3$)	
	2.0:1.0	249 ~ 247 ($\Delta 2$)		255 ~ 257 ($\Delta 2$)	

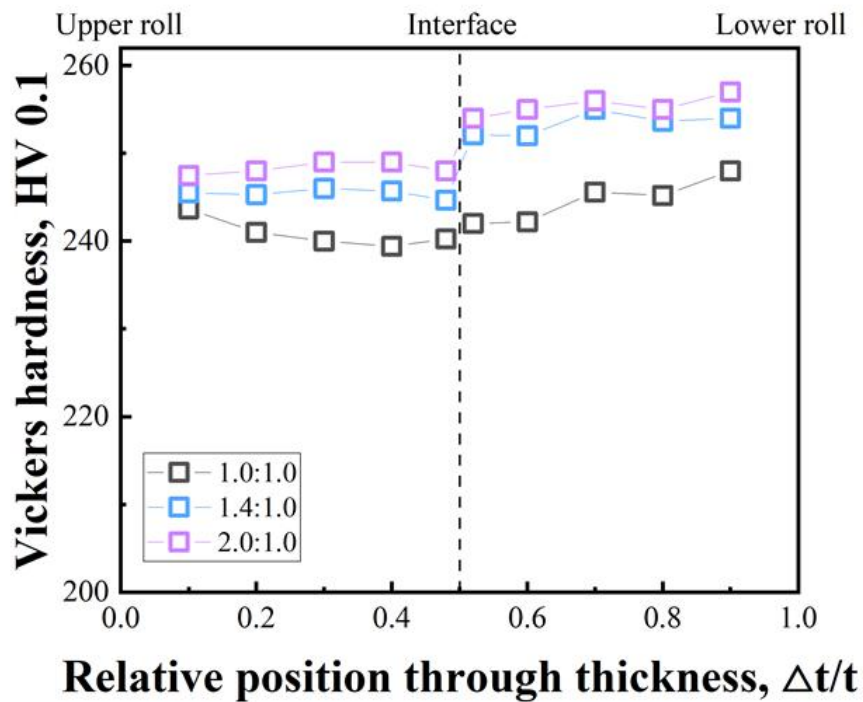


Fig. 49. The variation of hardness through the thickness the 2pass cladded sheets according to roll speed ratio.

3.5 유한요소해석

2pass 이주속 압연의 변형 거동을 예측하기 위해 DEFORM을 통해 2pass 이주속 압연 시뮬레이션을 실시하였다. 소재와 롤의 직경 등은 1pass와 동일하게 설정하였다.

TD축을 기준으로 180° 회전 후, 2pass 이주속 압연을 실시하였을 때, 속도비 1.4:1의 경우 시뮬레이션 결과에서도 상부를 측이 하부를 측에 비해 변형이 적게 작용하였다. 마찰계수 측정 결과는 하기 Table. 8에 나타내었다. 마찰계수는 각각 0.36, 0.27로 1pass 대비 마찰계수는 증가하였다. 속도비 2.0:1.0의 경우, 1.4:1.0 대비 마찰계수가 더욱 증가하였으며 그 값은 각각 0.45, 0.32이다. 1pass 대비 마찰계수가 더욱 큰 폭으로 증가하였으며 1pass 시에는 하부롤의 마찰계수의 변화가 없었으나, 2pass 시에는 하부롤 측의 마찰계수도 함께 증가하였다. Fig. 51에 실험을 통한 핀 형상과 시뮬레이션 데이터를 나타내었으며 그 값을 Fig. 52에 나타내었다. 2pass 이주속 압연 후 단류선은 기울기가 가파른 사선 형상을 나타내었다. 이는 롤 속도비 2.0:1.0에서 가장 변형이 많이 도입되며 상부롤 표면부터 하부롤 표면까지 균일한 변형을 도입할 수 있음을 시사한다.

Table. 8. Results of friction coefficient of 2pass differential rolling.

Conditions		Upper roll side			Lower roll side		
		Roll diameter (mm)	Roll speed (RPM)	Friction factor [μ]	Roll Diameter (mm)	Roll speed (RPM)	Friction factor [μ]
DSR	1.4:1.0	200	7	0.36	200	5	0.27
	2.0:1.0		10	0.45		5	0.32

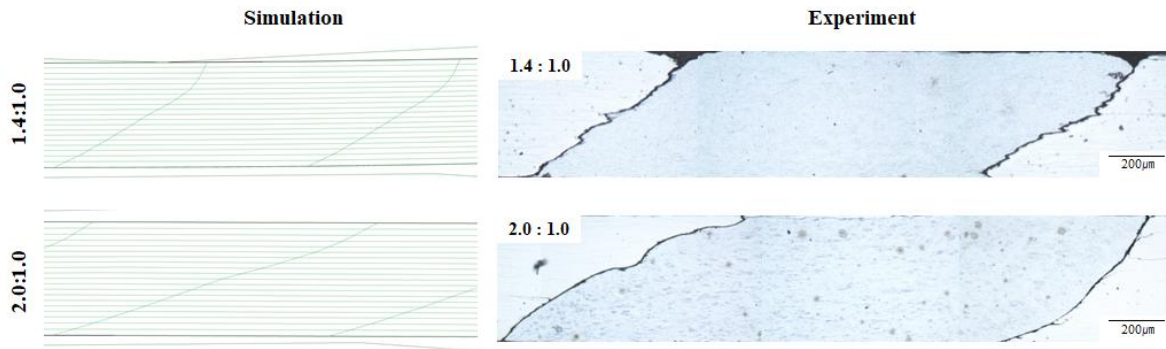


Fig. 50. FEM images and pin shapes of 2pass conventional rolling and differential speed rolling.

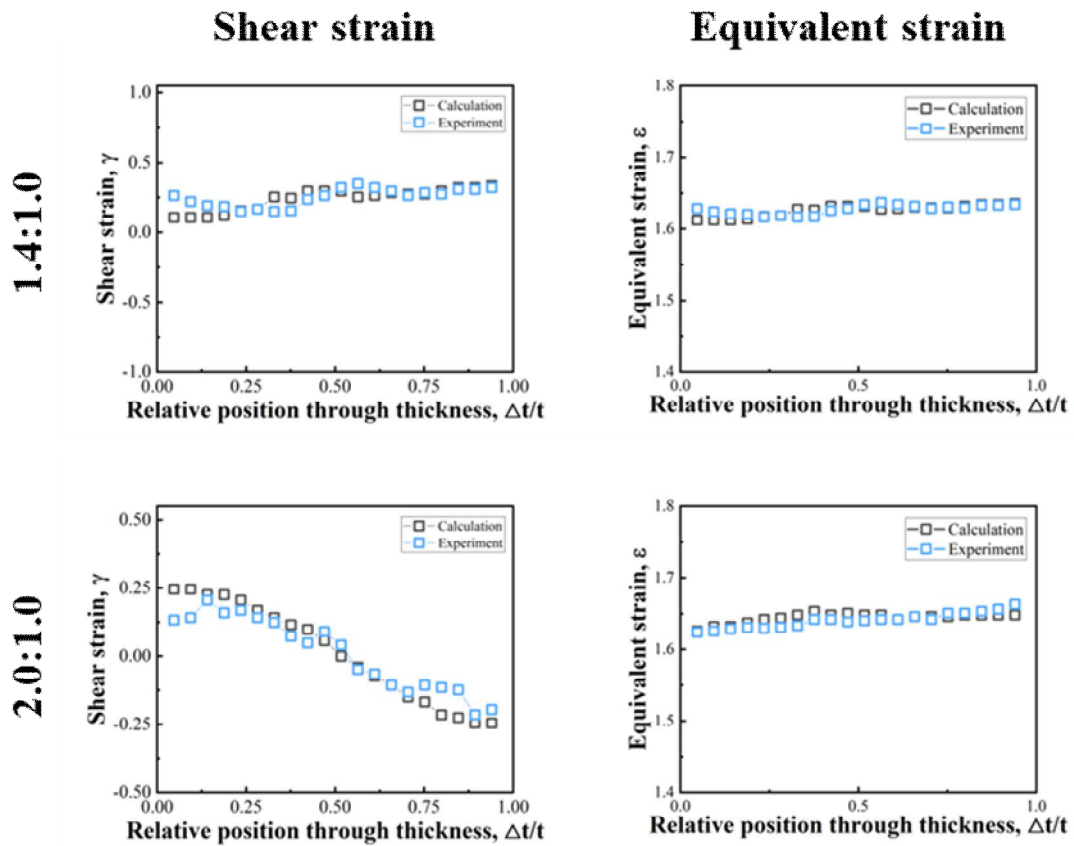


Fig. 51. Strain of calculation and experiment according to roll speed ratio.

4. 결론

1. 2pass 이주속 압연 시, 전단변형량 및 상당변형량은 1pass 대비 증가하였으며 롤 속도비 1.4:1.0 이상의 조건에서 전단변형량이 모두 양의 값을 나타내었다.
2. 2pass 이주속 압연에 의해 롤 속도비가 증가할수록 방위가 random해지며 $\{111\}\langle 110 \rangle$, $\{112\}\langle 110 \rangle$ 와 같은 전단집합조직이 발달하였다.
3. 2pass 이주속 압연 시 롤 속도비가 증가할수록 기계적 특성이 향상되었으며 속도비 1.4:1.0 이상에서 두께별 균일한 경도값을 나타내었다. 또한 속도비 2.0:1.0에서 1pass 대비 경도가 가장 크게 증가하였다.

제 4 장. 종합 결론

Summary

본 연구에서는 두께 전체에 균일한 전단변형을 부과하기 위해 이주속 압연을 실시하여 Fe계 이중 금속 바이메탈을 제조하였고, 더욱 큰 전단변형량의 도입을 위해서 2pass 이주속 압연 또한 실시하였다.

제 1장에서, 본 연구의 연구배경과 목적 및 개요를 간결하게 서술하였다.

제 2장에서, 전자개폐기용 바이메탈의 제조를 위해 Fe-Mo-Ni/Fe-Ni 합금을 선정하여, 압하율 및 롤 속도비에 따른 이주속 압연을 실시하여 이에 따른 접합 유무를 평가하였다. 동속 압연 대비 롤 속도비가 증가할수록 더욱 낮은 압하율에서도 접합이 가능하였으며 하중 또한 감소하는 경향을 보였다. 핀 삽입법을 통해 롤 속도비에 따른 핀 형상을 관찰한 결과, 롤 속도비가 증가할수록 도입된 전단변형량 및 상당변형량의 값은 증가하였으며, 롤 속도비 2.0:1.0에서 가장 균일한 전단변형량 및 상당변형량 값을 나타내었다. EBSD를 통해 측정된 미세조직 및 집합조직 관찰 결과, 동속 압연 시 전형적인 압연집합조직인 $\langle 101 \rangle // ND$ 와 $\langle 112 \rangle // ND$ 방위가 관찰되었고, 이주속 압연 시 롤 속도비가 증가할수록 random한 방위가 관찰되며 집합조직의 집적도 또한 감소하였다. 더불어, 롤 속도비 증가에 따라 더 많은 전위밀도의 축적으로 인해 KAM 값은 증가하였다. ODF에서, 동속 압연의 경우 압연 시 주로 발달하는 Brass $\{110\} \langle 112 \rangle$ 방위와 Copper $\{112\} \langle 111 \rangle$ 방위가 관찰되었으며, 롤 속도비가 증가할수록 $\{111\} \langle 110 \rangle$, $\{112\} \langle 110 \rangle$ 과 같은 전단집합조직이 관찰되었고 집적도 또한 감소하였다. 동속 및 이주속 압연 후 두께별 경도 분포 측정 결과, 기존의 냉간압연재에서는 롤과 표면 간 마찰에 의한 전단변형으로 인해 표면의 경도가 더 높게 측정되었다. 또한 초기 출발재료의 차이로 인해 1Mo의 경도가 Invar의 경도보다 높게 측정되었다. 동속 압연을 통한 1Mo와 Invar의 클래딩 시, 표면-중심부 간 경도 편차는 냉연재 대비 감소하였으며, 1Mo의 경도가 Invar의 경도보다 약 4 HV 더 높게 측정되었다. 이주속 압연 시, 롤 속도비가 증가함에 따라 경도 또한 증가하였으며 1Mo, Invar 부위의 두께별로 발생하는 편차가 동속 압연 대비 감소하였다. 동속 및 이주속 압연 시, 롤 속도변화에 따른 마찰계수의

변화를 구하기 위해 유한요소해석을 실시하였으며, 롤 속도비가 증가함에 따라 상부를 측의 마찰계수가 증가하였다. 또한 해석을 통해 도출된 단류선 결과와 실험을 통해 관찰한 핀 형상의 전단변형량 및 상당변형량 값은 유사하였다.

제 3장에서, 이주속 압연된 클래드재에 더욱 많은 전단변형을 부과하기 위해 TD축을 기준으로 180° 회전시켜 총 압하율 75%의 2pass 이주속 압연을 실시하였고 비교재료 동속 압연 또한 실시하였다. 2pass 동속 및 이주속 압연 후 핀 형상 관찰한 결과, 전체적인 변형량은 증가하였으나, Invar 대비 1Mo 측에서 더욱 많은 핀의 변형이 관찰되었다. 이를 토대로 변형량을 계산하였을 때, 압하율의 증가에 따라 전단변형량 및 상당변형량은 증가하였고 롤 속도비가 증가할수록 변형량도 더욱 증가하였다. EBSD를 통해 미세조직 및 집합조직을 관찰한 결과, 동속 압연의 경우, 1pass와 동일하게 $\langle 101 \rangle // ND$ 와 $\langle 112 \rangle // ND$ 방위가 발달하였으며 압하율의 증가로 인해 집적도는 더욱 증가하였다. 속도비 1.4:1.0의 경우, 동속 압연과는 달리 random한 방위들이 관찰되었으며 1pass 대비 집적도가 더욱 감소하였다. 속도비 2.0:1.0의 경우, random한 방위가 관찰되지만 1pass 대비 집적도는 약 0.6 증가하였다. 이는 더욱 많은 전단변형의 도입으로 인해 Invar 부위에서 $\langle 001 \rangle // \langle ND \rangle$ 가 발달하였기 때문이라 사료된다. KAM 값의 경우 1pass와 동일하게 롤 속도비가 증가할수록 그 값은 증가하였다. ODF에서는 동속 압연의 경우 IPF map의 결과와 동일하게 1pass 대비 압연집합조직의 발달로 인해 집적도가 증가하였고 1.4:1.0은 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 방위가 약하게 관찰되었고 1pass 대비 집적도가 더욱 감소하였다. 속도비 2.0:1.0은 전단집합조직이 더욱 많이 관찰되었으며 집적도는 1pass 대비 증가하였다. 이는 도입된 전단변형량의 증가로 인한 것이라 사료된다. 경도 분포 측정 결과, 롤 속도비가 증가함에 따라 1Mo와 Invar의 경도값은 증가하였고, 1Mo의 경도값의 증가폭이 더욱 큰 것은, 핀 형상에서 본 것과 같이 변형이 Invar 대비 1Mo에서 더욱 많이 도입되었기 때문이라 사료된다. 유한요소해석 결과, 1pass 대비 마찰계수의 값은 상부롤과 하부롤 모두에서 증가하였고 실험을 통해 얻은 핀 형상과 시뮬레이션을 통한 단류선의 전단변형량과 상당변형량은 유사하였다.

참고문헌

1. Y. Nakamura, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 12, No. 4, 278 (1976)
2. P. Chen, H. Huang, C. Ji, X. Zhang and Z. Sun, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 28, pp.2460-2469 (2018)
3. J. -S. Lu, O. -K. Harrer, W. Schwenzfeier and F. D. Fischer, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 42, No. 1, pp.49-61 (2000)
4. Y. K. Jee, H. T. Jeong and M. Y. Huh, Transactions of Materials Processing, Vol. 12, No. 3, pp.244-250 (2003)
5. O. Engler, M.Y. Huh, C.N. Tom, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 31, pp.2299-2315 (2000)
6. G. Vincze, F. Simoes and M. Butuc, Metals, Vol. 10, pp.1126 (2020)
7. D. Pustovoytov, A. Pesin and P. Tandon, Metals, Vol. 11, pp.956 (2021)
8. T. Sakai, S. Hamada and Y. Saito: Scripta Materials, Vol. 44, pp.2569 (2001)
9. T. Sakai, Y. Saito, K. Hirano and K. Kato, Transactions ISIJ, Vol. 28, pp.1028-1035 (1988)
10. S.H. Lee, J.Y. Lim, S.H. Lee, J.Y. Lim, H. Utsunomiya, G.J. Euh and S.Z. Han, Kor. J. Met. Mater, Vol. 48, No. 10, pp. 942~950 (2010)
11. H. Yu, K. Tieu, C. Lu and A. Godbole, Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 45, pp. 4038 (2014)
12. C.H. Lee, J.P. Park and Y.H. Moon, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 2014, pp. 1-7 (2014)
13. X. Li, G. Zu, M. Ding, Y. Mu and P. Wang, Materials Science and Engineering A, Vol. 529, pp. 485 (2011)
14. S. Sakai, T. Sakai and K. Takeishi, Transactions ISIJ, Vol. 17 (1977)
15. Y. Saito, T. Sakai, K. Takeda and K. Kato, Transactions ISIJ, Vol. 9 (1987)
16. S.H.Lee, J.H. Jang and H.Utsunomiya, Kor. J. Mater., Vol. 23, No. 7 (2013)
17. T. Sakai, K.Yoneda and Y. Saito, Materials Science Forum, Vol. 396-402, pp. 309 (2002)
18. T. Shimamura, T. Sakai, H. Utsunomiya and S. Kaneko, Materials Science Forum, Vol. 558, pp. 1443 (2007)

19. Y. Wei, H. Li, F. Sun and J. Jou, *Metals*, Vol. 9, No. 2, pp.237 (2019)
20. B. Zlobin, *Combustion, Explosion, and Shock Waves.*, Vol. 38, No. 3, pp.374-377 (2002)
21. M. Vidoni, R. Ackermann, S. Richter and G. Hirt, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 07, No. 11 (2015)
22. D. Munster and G. Hirt, *Metals*, Vol. 9, No. 11, pp.1156 (2019)
23. S. C. Seong, S. H. Shim and B. I. Lee, *Journal of Korean Welding Society*, Vol. 15, No. 6 (1997)
24. D. V. Edmonds, J. D. Hunt, D. J. Monaghan and P. M. Thomas, *Proceedings of Metallurgical Society of Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, pp.257-271 (1991)
25. M. Yun, S. Lokyer and J.D. Hunt *Materials Science and Engineering*, pp.116-123 (2000)
26. D. Pan, K. Gao and J. Yu, *Materials Science and Technology*, Vol. 5 (1989)
27. D. Manesh and K. Taheri, *Mechanics of Materials*, Vol. 37, No. 5, pp.531-542 (2005)
28. A. Shaparev and I. Savin, *Materials Science Forum*, Vol. 870, pp.328-333 (2016)
29. T. Wang, S. Li, Z. Ren, J. Han and Q. Huang, *Materials Letters*, Vol. 234, pp.79-82 (2019)
30. J. Gattmah, F. Ozturk and S. Orhan, *ICAMMEN 2018*, pp.8-9 (2018)
31. Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai and R. G. Hong, *Scripta Mater.*, Vol. 39, pp.1221 (1998)
32. N. Tsuji, Y. Saito, H. Utsunomiya and S. Tanigawa, *Scripta Mater.*, Vol. 40, pp.795 (1999)
33. R. P. Godoi, D. C. Magalhaes and A. M. Kliauga, *Materials Science and Engineering*, Vol. 771 (2020)
34. Y. Saito, H. Utsunomiya and T. Sakai, *Acta mater.*, Vol. 47, No. 2, 99. 579-593 (1999)
35. M. Vini and S. Daneshmand, *Advances in Computational Design*, Vol. 4, No. 1, pp. 33-41 (2019)
36. R. Jamaati and M. R. Toroghinejad, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No.

- 7 (2011)
37. K.-H. Kim, D.N. Lee, *ActaMater.*, Vol. 49, pp. 2583 (2001)
 38. D.N. Lee, *Materials Science Forum*, Vol. 449 (2004)
 39. D.N. Lee, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 13, No. 7 (2004)
 40. S. H. Lee, H. Inagaki, H. Utsunomiya, Y. Saito, T. Sakai: *Mater. Trans.*, Vol. 44, pp.1376 (2003)
 41. E. R. Howard and H. A. Wilson, *Engineering and Science*, Vol. 5, pp.16-24 (1942)
 42. M. Ishio, M. Umeda, H. Inoue and K. Morii, *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 85, No. 7 (1999)
 43. J.H. Jo, 판재의 이방성과 집합조직 (2011)
 44. S. H. Lee and D. N. Lee, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 1997-2015 (2001)
 45. Y. H. Ji and J. J. Park, *Materials Science and Engineering*, Vol. 499, pp. 14-17 (2009)
 46. P. Alexander and P. Denis, *Key Engineering Materials*, Vol. 622, pp. 929-935 (2014)