

비대칭 압연한 IF 강 판의 Goss 집합조직 발달

김인수¹· 남수권¹· 김광희²· 이동녕[#]

Goss Texture Development of Asymmetrically Rolled IF Steel Sheet

I. Kim, S. K. Nam, G.-H. Kim, D. N. Lee

(Received January 18, 2017 / Revised May 23, 2017 / Accepted May 24, 2017)

Abstract

To obtain the Goss texture, {110}<001>, IF steel sheets were asymmetrically rolled by 50-89% reduction in the thickness at room temperature and subsequently annealed at 200, 900, and 1200°C in a box furnace under air atmosphere. The asymmetrically rolled specimens and annealed specimens show well-developed Goss texture, {110}<001>. After the IF steel sheets were asymmetrically rolled at room temperature and subsequently annealed at 900°C for 1 h in a box furnace under air atmosphere, the intensity of the Goss texture, {110}<001> was high in the IF steel sheets.

Key Words : IF Steel Sheet, Asymmetric Rolling, X-ray Diffraction, Goss Texture, Orientation Distribution Function (ODF)

1. 서 론

변압기 철심으로 사용하는 방향성 전기강판(Si강판 또는 Fe-Si강판)은 M-H자화이력곡선에서 보자력이 낮고, 포화자화가 높으며 히스테리시스 루프(hysteresis loop)가 좁은 연자성(soft magnetic) 특성을 가져야 한다. 방향성 전기강판은 Si가 함유되어 있어 Si강판 또는 Fe-Si강판이라고도 부르며 특정한 집합조직을 갖는다. 여기서 특정한 집합조직은 강판면에 평행한 결정구조상의 면이 {110} 이고 압연방향(rolling direction, RD)에 평행한 방향이 <001>인 {110}<001> 집합조직을 말한다. G. P. Goss가 {110}<001> 집합조직을 갖는 방향성 전기강판의 제조방법을 개발[1, 2]하였으므로 이 집합조직을 Goss집합조직으로 부르게 되었다. {110}<001> 집합조직(이하 Goss집합조직)은 RD방향에 평행한 방향이 <001>으로 되어 다른 어떤 방향보다 좋은 연자성 특성을 나타낸다[3]. 현재 방향성 전

기강판의 제조 방법은 제조사마다 생산공정이 비밀이기 때문에 자세히 알려지지 않고 있다. 일반적으로 알려진 대략적인 방향성 전기강판을 생산하는 공정은 다음과 같다. 결정립 성장 억제제(inhibitor)인 미세한 AlN과 MnS를 함유한 열연 강판을 냉간압연 후 800°C정도에서 수 십 시간 동안 탈탄(decarburization)한 후 1200°C정도에서 수 십 시간 동안 Box annealing함으로써 Goss집합조직이 발달하게 하고 결정립 성장 억제제(inhibitor)를 제거하는 장시간의 복잡한 공정을 거치게 된다.

S. H. Lee 등[4, 5]과 K. K. Um 등[6]은 강 판재를 비대칭압연을 하면 전단변형을 쉽게 얻을 수 있다는 연구 결과를 얻었다. 최근 S. K. Nam 등[7]은 열간 비대칭압연에 의하여 Si 강판을 전단변형하고 Goss 집합조직을 얻었다.

D. N. Lee 는 강판을 압연 후 재결정할 때 집합조직의 변화를 strain-energy-release maximization theory

1. 금오공과대학교 신소재공학부

2. 금오공과대학교 신소재공학부, 현재 대신금속㈜

Corresponding Author : Department of Materials Science and Engineering and RIAM, Seoul National University, E-mail: dnlee@snu.ac.kr

로 설명하였다[8~10].

이와 같은 연구를 바탕으로 본 연구에서는 IF (interstitial free)강에서 Goss 집합조직을 얻기 위하여 상온 비대칭압연을 한 후 열처리하여 재결정하고 열처리 전 후의 집합조직의 변화를 관찰하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 소재는 냉연한 두께 3mm 인 IF 급 강 판(steel A)과 냉연한 두께 2mm 인 IF 급 강 (steel B)을 사용하였다. Table 1 에 두 가지 IF 급 강 판의 화학조성을 정리하였다.

실험실용 비대칭 압연기는 상부와 하부 롤 지름은 각각 15cm 이며 상부와 하부 롤의 회전 속도비는 1.5 였다[11]. 상부 롤의 속도는 8rpm 으로 회전하였다.

Steel A 와 B 의 IF 급 강 판은 상온 상태로 비대칭 압연하였다. 각각의 시편을 압연기에 3-5 번 통과하여 최종 압하율로 하였다. 비대칭 압연에서 전단방향을 반대로 주기 위하여 IF 급 강 판은 매번 통과할 때 마다 압연방향(RD)을 축으로 180° 회전하며 실험하였다. 모든 비대칭 압연은 롤과 판재 사이에 마찰계수를 증가시켜 전단변형을 잘 일으키기 위하여 무윤활 상태로 진행하였다. 비대칭 압연한 시편은 공기 분위기에서 열처리하였다.

Table 2 와 3 에 시편의 제작과정을 정리하였다.

Table 2 에서 3mm 두께의 IF 급 강 판 Steel A 인 원 소재 시료 a 를 50% 비대칭 냉간 압연한 상태가 시료 b 이고, 시료 a 를 60% 비대칭 냉간 압연한 상태가 시료 c 이다.

Table 3 은 Table 2 의 실험의 결과를 바탕으로 비대칭압연 압하율을 Table 2 보다 높게 정하였다.

Table 3 에서 2mm 두께의 IF 급 강 판 Steel B 인 원 소재 시료 a 를 69% 비대칭 냉간 압연한 상태가 시료 b 이고, 시료 b 를 공기 중 700°C 에서 1시간 열처리한 것이 샘플 c 이다. 시료 a 를 71% 비대칭 냉간 압연한 상태가 시료 d 이고, 시료 d 를 공기 중 200°C 에서 1시간 열처리한 것이 시료 e 이고, 시료 d 를 공기 중 200°C 에서 10시간 열처리한 것이 시료 f 이고, 시료 d 를 공기 중 900°C 에서 1시간 열처리한 것이 시료 g 이고, 시료 d 를 공기 중 1200°C 에서 10분 열처리한 것이 시료 e 이다. 또 시료 a 를 89% 비대칭 냉간 압연한 상태가 시료 i 이다.

Table 2 와 3 의 각각의 시료는 두께 층에 따라 집합

Table 1 Chemical composition of extra low carbon steel A and B (wt%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al
A	0.0025	0.08	0.12	0.013	0.009	0.002
B	0.0016	0.002	0.086	0.0053	0.0059	0.002

Table 2 Specimens a through c and their fabrication procedures of steel A

Samples	Fabrication procedures
a	Extra low carbon steel sheet of 3mm in the initial thickness of steel A
b	Sample a is asymmetrically rolled by 50% reduction
c	Sample a is asymmetrically rolled by 60% reduction

Table 3 Specimens a through i and their fabrication procedures of steel B

Samples	Fabrication procedures
a	Extra low carbon steel sheet of 2mm in the initial thickness of steel B
b	Sample a is asymmetrically rolled by 69% reduction in thickness
c	Sample b is annealed at 700°C for 1 h
d	Sample a is asymmetrically rolled by 71% reduction in thickness
e	Sample d is annealed at 200°C for 1 h
f	Sample d is annealed at 200°C for 10 h
g	Sample d is annealed at 900°C for 1 h
h	Sample d is annealed at 1200°C for 10 min
i	Sample a is asymmetrically rolled by 89% reduction in thickness

조직이 다른지를 검토하기 위하여 위 층, 중간 층 및 아래 층의 3 개 층 또는 위 층에 대하여 측정하였다. 여기서 3 개 층은 d 를 강판 두께의 중심부로부터 거리, t 를 강 판의 두께라고 할 때, $s = 2d/t$ 라는 매개변수로 정의하여 분류하였다. 이 때 $s = 1$ 은 강 판재의

위 층 표면이고, s=0 는 강 판재의 중심 층 이며, s=-1 은 강 판의 아래 층 표면이다. 본 연구에서는 X-Ray Diffraction(XRD)를 이용하여 각 샘플의 s =0.9, s=0 및 s=-0.9 층의 (110), (200) 및 (211)면 불완전 극점도를 측정하였다. 측정한 극점도를 이용하여 사방정 대칭을 바탕으로 방위분포함수(orientation distribution function: ODF)[12,13]를 전개하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 1 은 Table 2 에서 제시한 IF 급 강 판 Steel A 의 여러가공 시료들의 s=0.9 층 (110), (200) 및 (211) 면의 불완전 극점도를 측정하여 정리한 결과이다.

Fig. 2 는 Fig. 1 에 측정된 극점도를 바탕으로 전개한 ODF[12,13]를 정리한 결과이다.

Fig. 3 은 Fig 2 에서 얻어진 특정 ODF 값, f(g)의 강도변화를 나타낸 것이다.

Fig. 1, 2 및 3 에서 IF 급 강 판 Steel A 원소재 시편의 표면 층은 결정립이 커서 특별히 잘 발달한 집합조직으로 표현하기가 어려움이 있다.

IF 급 강 판 Steel A 원소재를 50 및 60% 상온 비대칭 압연한 시편에서 판재의 표면 층에서 특별히 잘 발달한 집합조직으로 표현하기 어려움을 보여주고 있으나 50 및 60% 상온 비대칭 압연에서 Goss 집합조직, {110}<001> 이 나타나기 시작함을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 냉간 비대칭 압연의 압하율은 60% 이상으로 정하여 실험했다.

Fig. 4 는 Table 3 에서 제시한 IF 급 강 판 Steel B 의 각 샘플들 s=0.9, s=0 및 s=-0.9 층의 (110), (200) 및 (221) 면의 불완전 극점도를 측정하여 정리한 것이다.

Fig. 5 는 Fig. 4 에 측정된 극점도를 바탕으로 전개한 ODF[12,13]를 정리하였다.

Fig. 6 은 Fig 5 에서 얻어진 특정 ODF, f(g)의 강도변화를 나타낸 것이다.

Fig. 4, 5 및 6 에서 원소재 시편 판재의 위와 아래 표면과 중간 층 집합조직이 유사함을 나타내고 있다. 또한 IF 급 강을 상온 비대칭 압연 후에도 표면과 중간 층 집합조직은 유사함을 나타내고 있다.

Fig. 4, 5 및 6 의 a 에서 IF 급 강 Steel B 원소재 시편 판재의 양 표면과 중간 층 모두에서 집합조직은 γ -fiber (ND//<111>)가 잘 발달한 판재임을 보여주고 있다.

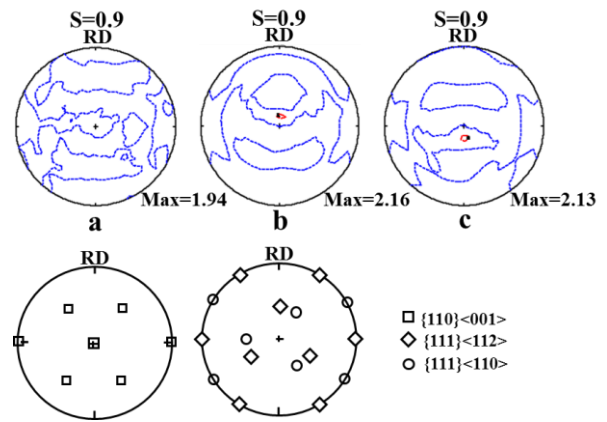


Fig. 1 The measured (110) pole figures for the near top surface(s=0.9) for extra low carbon steel A samples a through c. Max = the maximum intensity

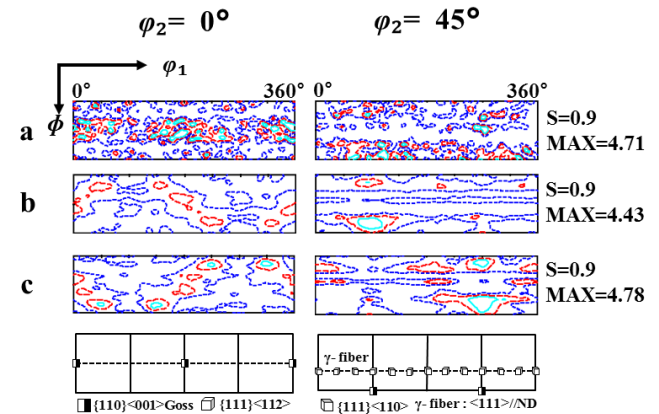


Fig. 2 ODFs ($\phi_2 = 0^\circ$ and 45° sections) for extra low carbon steel A samples a through c. Max = the maximum intensity

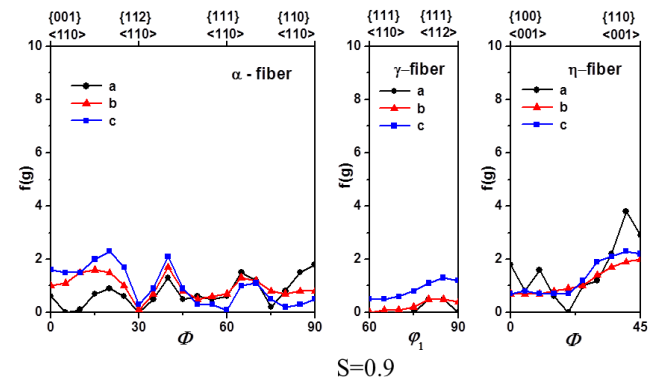


Fig. 3 Main texture component f(g) variation based on ODFs data at S=0.9 for extra low carbon steel sheet A samples a through c

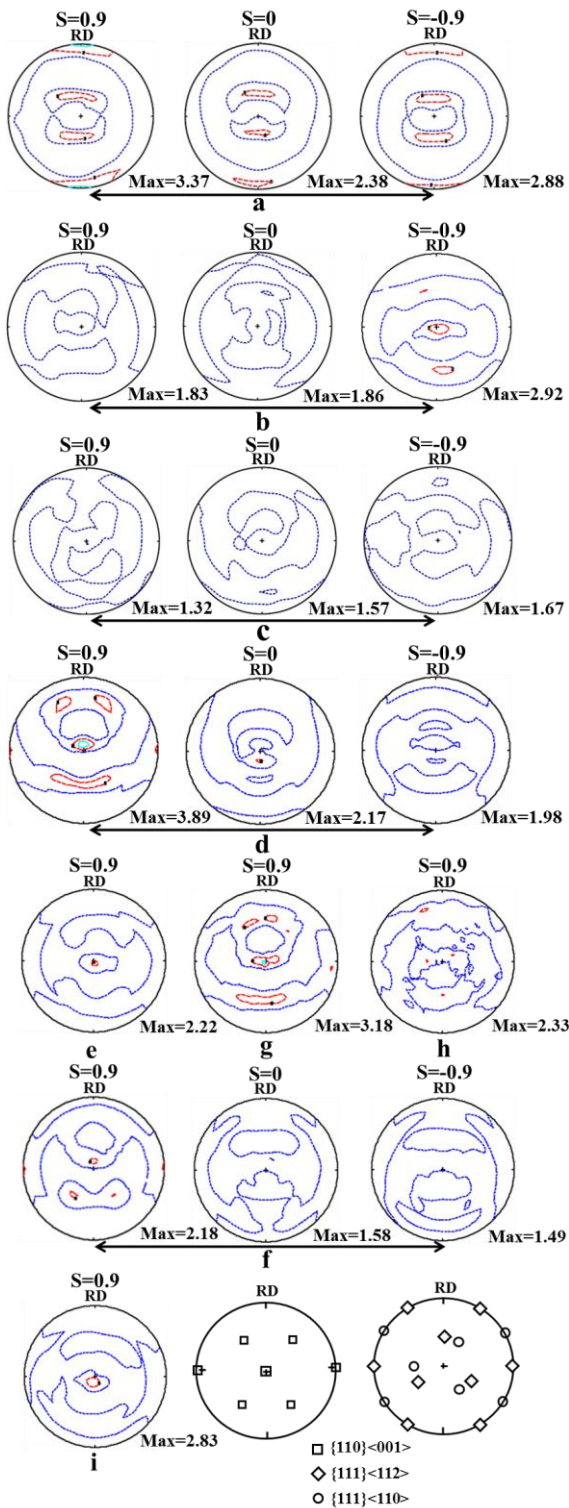


Fig. 4 The measured (110) pole figures for the near top surface(s=0.9), the center plane(s=0), and the bottom surface(s=-0.9) for extra low carbon steel B samples a through i. Max = the maximum intensity

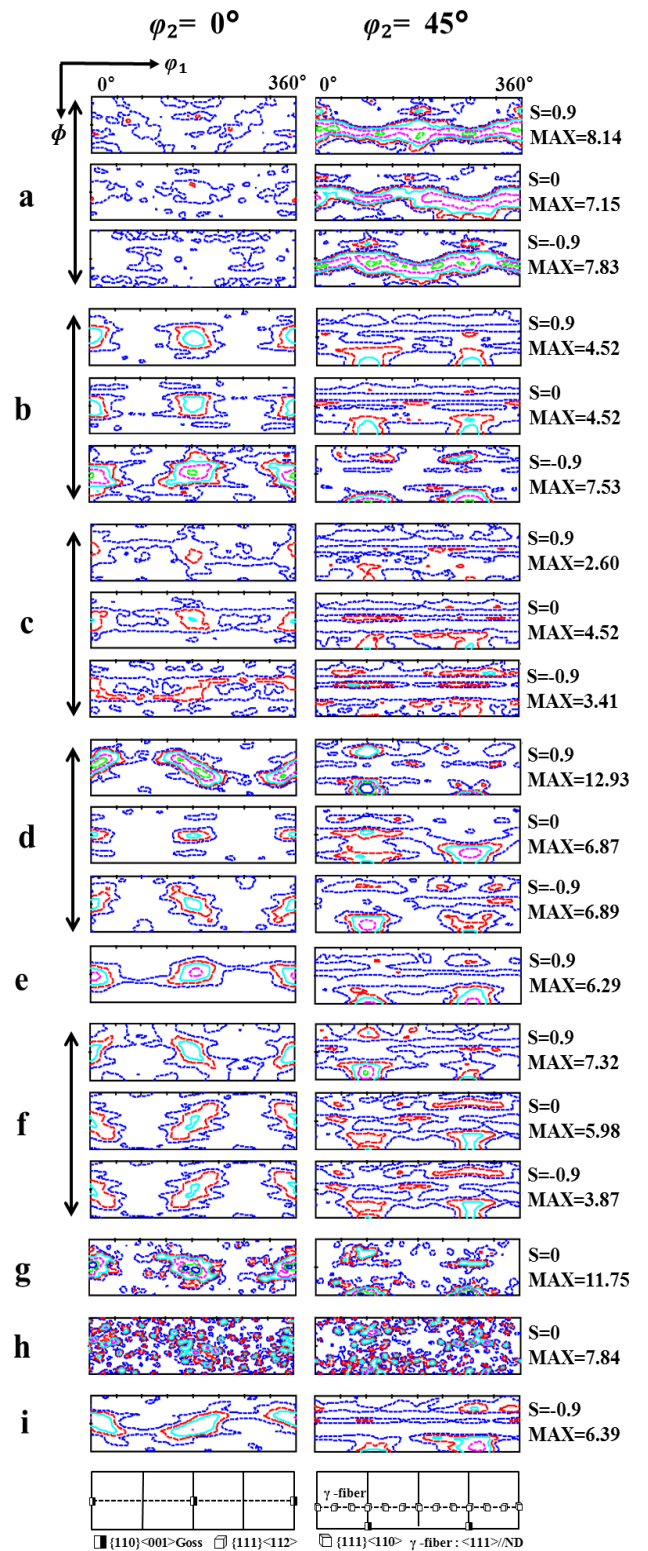


Fig. 5 ODFs ($\phi_2 = 0^\circ$ and 45° sections) for extra low carbon steel B samples a through i. Max = the maximum intensity

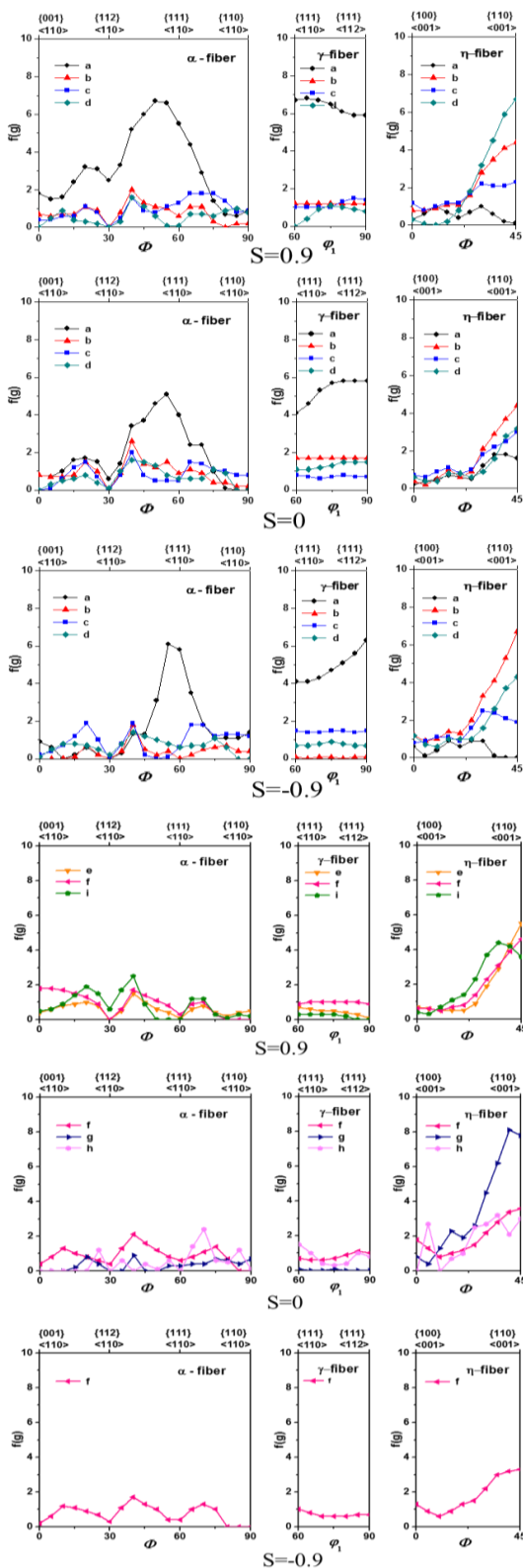


Fig. 6 Main texture component $f(g)$ variation based on ODFs data at $S=0.9$, $S=0$, and $S=-0.9$ for extra low carbon steel sheet B samples a through i

Fig. 4, 5 및 6 의 IF 급 강 의 원소재 를 69, 71 및 89% 상 온 비대칭 압연 한 b, d 및 i 시편 에서 시편 에서 판재 의 표면 과 중간 층 집합 조직 은 γ -fiber, ND// $\langle 111 \rangle$ 의 강도 가 낮아 지고 Goss 집합 조직, $\{110\}\langle 001 \rangle$ 이 잘 발달 함을 알 수 있다.

이와 같은 현상 을 S. H. Lee 등[4,5]은 강판 을 비대칭 압연 하면 비대칭 압연 시 작용 하는 전단 변형에 의하여 Goss 집합 조직, $\{110\}\langle 001 \rangle$ 이 잘 발달 한다고 해석 하였다.

이것 뿐만 아니라 Fig. 4, 5 및 6 의 IF 급 강 을 71% 압하율 로 상 온 비대칭 압연 한 판재 를 공기 분위기 에서 각각 200°C 에서 1 시간 과 10 시간, 700°C 에서 1 시간, 900°C 에서 1 시간 및 1200°C 에서 10 분 간 공기 분위기 에서 열처리 한 c, e, f, g 및 h 시편 에서도 비대칭 압연 에서 생긴 Goss 집합 조직, $\{110\}\langle 001 \rangle$ 이 사라 지지 않고 그대로 남아 있음 을 알 수 있었다. 특히 900°C 에서 1 시간 공기 분위기 에서 열처리 한 g 시편 의 Goss 집합 조직, $\{110\}\langle 001 \rangle$ 강도 가 가장 높음 을 알 수 있었다.

이와 같이 IF 급 강 을 상 온 비대칭 압연 에서 생긴 Goss 집합 조직, $\{110\}\langle 001 \rangle$ 이 열처리 후 에 재결정 이 일어나 도 사라 지지 않고 집합 조직 이 변하 지 않는 현상 을 D. N. Lee[8~10]는 strain energy release maximization theory 로 설명 하였다. 즉 strain energy release maximization theory[8~10]는 소성 변형 된 재료 가 재결정 될 때, 소성 변형 된 재료 의 최대 절대 응력 방향 (absolute maximum stress direction) 이 재결정 된 결정 의 최소 탄성 계수 방향 (minimum Young's modulus direction) 과 평행 하게 되도록 재결정 방위 가 결정 된다는 내용 으로 본 연구 결과 에도 적용 이 가능 하였다.

Fig. 4, 5 및 6 의 IF 급 강 을 69%, 71% 및 89% 압하율 로 상 온 비대칭 압연 하였을 때 압하율 이 증가 할수록 집합 조직 은 γ -fiber, ND// $\langle 111 \rangle$ 성분 의 강도 가 낮아 지고 Goss 집합 조직, $\{110\}\langle 001 \rangle$ 성분 이 잘 발달 함을 알 수 있었다.

4. 결론

- (1) IF 강판 을 상 온 비대칭 압연 한 후 집합 조직 을 측정 한 결과 Goss 집합 조직, $\{110\}\langle 001 \rangle$ 은 압하율 60% 이하 에서는 잘 발달 하지 않았다.
- (2) IF 강판 을 상 온 비대칭 압연 한 후 집합 조직 을 측정 한 결과 Goss 집합 조직, $\{110\}\langle 001 \rangle$ 이 잘 발달

하였다.

(3) IF 강판을 상온 비대칭 압연한 후 얻어진 Goss 집합조직, $\{110\}\langle 001\rangle$ 은 공기분위기 200-1200°C 에서 열처리하여 재결정 후 집합조직이 변하지 않았다. 이 현상을 strain energy release maximization theory 로 설명할 수 있었다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교의 학술연구비의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] N. P. Goss, 1934, Electrical Sheet and Method and Apparatus for Its Manufacture and Test, US patent No 1965559.
- [2] N. P. Goss, 1934, New Development in Electrical Strip Steels Characterized by Fine Grain Structure Approaching the Properties of a Single Crystal, Trans. ASM, Vol. 23, pp. 511~531.
- [3] K. Honda, S. Kaya, 1926, On the Magnetisation of Single Crystals of Iron, Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ. Ser. 15, pp. 721~754.
- [4] S. H. Lee, D. N. Lee, 2001, Analysis of Deformation Textures of Asymmetrically Rolled Steel Sheets, Int. J. Mech. Sci., Vol. 43, No. 9, pp. 1997~2015.
- [5] S. H. Lee, D. N. Lee, 1998, Shear Rolling and Recrystallization Textures of Interstitial-free Steel Sheet, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 249, No. 1, pp. 84~90.
- [6] K.-K. Um, H.-T. Jeong, J.-K. An, D. N. Lee, G. Kim, O. Kwon, 2000, Effect of Initial Sheet Thickness on Shear Deformation in Ferritic Rolling of IF-steel Sheets, ISIJ Int., Vol. 40, No. 1, pp. 58~64.
- [7] S. K. Nam, 2017, Change of Plastic Strain Ratio of Al Sheet and Magnetic Property of Steel Sheet after Asymmetry Rolling, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea.
- [8] D. N. Lee, 1995, The Evolution of Recrystallization Textures from Deformation Textures, Script. Metall. Mater. Vol. 32, No. 10, pp. 1689~1694.
- [9] D. N. Lee, 2005, Relationship between Deformation and Recrystallization Textures, Phil. Mag., Vol. 85, No. 2-3, pp. 297~322.
- [10] D. N. Lee, H.-T. Jeong, 1998, The Evolution of the Goss Texture in Silicon Steel, Scr. Mater., Vol. 38, No. 8, pp. 1219~1223.
- [11] K.-H. Kim, D. N. Lee, 2001, Analysis of Deformation Textures of Asymmetrically Rolled Aluminum Sheets, Acta Mater., Vol. 49, No. 13, pp. 2583~2595.
- [12] H. J. Bunge, 1982, Texture Analysis in Material Science, Butterworth, Guildford, UK, pp. 47~118, pp. 330~338.
- [13] H. J. Bunge, C. S. Esling 1982, Quantitative Texture Analysis, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Germany and Société Française de Métallurgie, France, Alle Rechte vorbehalten, pp. 129~160.