



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

3% Si 무방향성 전기강판의 철손에 미치는
Y 첨가와 열연판 소둔 온도의 영향



부 경 대 학 교 대 학 원

신소재시스템공학과

박 정 우

공 학 석 사 학 위 논 문

3% Si 무방향성 전기강판의 철손에 미치는
Y 첨가와 열연판 소둔 온도의 영향

지도교수 김 성 규

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2018년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

신소재시스템공학과

박 정 우

박정우의 공학석사 학위논문을 인준함.

2018년 8월



위원장	공학박사	이길근	인
위원	공학박사	김성규	인
위원	공학박사	이병우	인

<제목 차례>

ABSTRACT	iv
제 I 장 서론	1
1.1 무방향성 전기장판	3
1.2 전기장판의 철손	6
제 2장 실험방법	9
2.1 시편제작	10
2.1.1 성분계 설계	10
2.1.2 열처리	11
2.2 시험내용	12
2.2.1 미세조직 관찰	12
2.2.2 자성측정	13
2.2.3 편석 및 석출물 분석	14
제 3장 실험결과 및 고찰	15
3.1 Y 첨가와 열연판 소둔 온도의 영향	15
3.1.1 미세조직에 미치는 영향	15
3.1.2 철손에 미치는 영향	22
3.2 결정립 크기와 철손 관계 고찰	29
3.3 편석 및 석출물 분석	32
제 4장 결론	36
제 5장 참고 문헌	37
감사의 글	41

<표 차례>

Table 1 Chemical compositions of the present study..... 10
Table 2 Heat treatment conditions of the experiment..... 11
Table 3 Grain size of the specimen..... 19
Table 4 Core loss ($W_{15/50}$) of the specimen..... 23
Table 5 Core loss ($W_{10/400}$) of the specimen..... 26



<그림 차례>

Fig. 1 Fe-Si binary alloy phase diagram	4
Fig. 2 Crystal anisotropy in BCC iron	5
Fig. 3 Conventional separation of losses	8
Fig. 4 Heat cycle	11
Fig. 5 Schematic image of optical microscope observation area	12
Fig. 6 Single sheet tester	13
Fig. 7 Microstructure of HBA 950°C	16
Fig. 8 Microstructure of HBA 1000°C	16
Fig. 9 Microstructure of HBA 1050°C	17
Fig. 10 Microstructure of HBA 1100°C	17
Fig. 11 Microstructure of HBA 1150°C	18
Fig. 12 Effect of Y addition on grain size	19
Fig. 13 Effect of HBA temperature on grain size	21
Fig. 14 Effect of Y addition on core loss ($W_{15/50}$)	24
Fig. 15 Effect of HBA temperature on core loss ($W_{15/50}$)	25
Fig. 16 Effect of Y addition on core loss ($W_{10/400}$)	27
Fig. 17 Effect of HBA temperature on core loss ($W_{10/400}$)	28
Fig. 18 Correlation of grain size and core loss ($W_{15/50}$)	30
Fig. 19 Correlation of grain size and core loss ($W_{10/400}$)	31
Fig. 20 SEM images of fracture plane	33
Fig. 21 Y nitride precipitate (x3,000)	34
Fig. 22 Y nitride precipitate (x5,000)	34
Fig. 23 Y sulfide precipitate (x10,000)	35
Fig. 24 Y sulfide precipitate (x1,000)	35

The effects of Y addition and hot band annealing temperature on core loss
in 3% Si non-oriented electrical steel

Jung Woo Park

Department of Advanced materials system engineering,
The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Research on improving core loss of 3% Si non-oriented electrical steels was conducted by Y addition and changes of hot band annealing temperature. Clear effects on facilitating grain growth and lowering core loss were observed with addition of 0.016% of Y. Grain size was reduced and core loss increased in case of Y free steels and steels with more than 0.016% Y. It is assumed that hysteresis loss of 0.029% Y steels is lowered by facilitating grain growth.

Low hot band annealing temperature (950°C, 1000°C) showed lower core loss compared to high hot band annealing temperature (1050°C, 1100°C, 1150°C) in 0.016% Y added steels. Low hot band annealing temperature has advantage in controlling process. Therefore, it is assumed that low Y steel can have advantage on improving core loss in terms of low hot band annealing temperature processing condition.

By results of AES analysis of Y added specimens, Y was not segregated. Instead, Y was located within grain in form of 1 ~ 10 µm diameter Y nitrides and Y sulfides. MnS was not observed. On the contrary, AlN and MnS were observed i

n Y free specimen. Thus, adding small amount of Y is assumed to inhibit formation of micro sulfides(e.g. MnS) which suppress grain growth and deteriorate magnetic property of electrical steels.



Keyword : Non-oriented electrical steel, Core loss, Y, Hot band annealing temperature,
Precipitates

제 1장 서론

전기강판은 전자기적 성질이 뛰어난 연자성 재료이며, 통상 Si 이 첨가되기 때문에 silicon steel 로도 불린다. 에너지 변환을 목적으로 전기 모터, 변압기의 core 의 효율을 높이는 역할을 하는 재료로서, 세계적인 에너지 위기로 인한 에너지 절감에 대한 필요성이 점점 중요해지는 현대 산업에 고급 전기강판 기술의 발달이 필수적이다. 특히 전기 자동차의 수요가 확대되면서 전기자동차의 모터에 쓰이는 핵심 재료인 무방향성 전기강판의 수요도 따라서 커지는 추세이다.

전기강판은 크게 방향성 전기강판과 무방향성 전기강판으로 분류할 수 있다. 방향성 전기강판은 대형변압기의 철심과 같은 고정기에 주로 사용되며, $\{110\}\langle 001 \rangle$ goss texture 가 이상적 집합조직이다. 무방향성 전기강판은 모터의 철심과 같은 회전기에 쓰이며, $\{100\}\langle 0vw \rangle$ cube texture 가 이상적인 집합조직이다. 방향성 전기강판과 무방향성 전기강판의 특성으로는 고자속밀도, 저철손, 뛰어난 가공성, 저렴한 생산비용이 공통적으로 요구된다.

전기강판이 개발된 이래로 일본, 미국, 독일 등 세계적으로 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 전기강판 연구 개발의 트렌드는 제조과정에서 두께, 열처리 온도, 표면처리 등 공정조건을 변화시켜 전기강판의 집합조직을 개선하고, 미세조직과 자구를 제어하여 궁극적으로 철손을 낮추고, 자속밀도를 높여서 자기적 성질을 향상시키는 방법들을 연구하는 것이 주를 이룬다. 특히, 무방향성 전기강판의 연구 분야에서는 편석하기 쉬운 원소들인 P, Sn, Sb 등을 첨가하여 전기강판의 자기적 성질을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. [12, 13] 하지만 편석원소를 첨가하여 우수한 전기강판을 개발하는 연구 결과에 비해 희토류 원소를 첨가하여 전기강판의 자기적 성질을 개선하는 연구는 공학

적인 데이터가 부족하다. 최근 발표된 논문들을 살펴보면 Ce, La 과 같은 희토류 금속을 첨가한 무방향성 전기강판에 관한 연구는 진행되고 있지만, 본 연구에서 다루고 있는 Y 첨가의 경우는 공학적인 데이터가 더욱 부족하다. [23, 24, 25]

본 연구에서는 희토류 원소인 Y 을 미량 첨가하고, hot band annealing 온도를 변화시켜 전기강판의 철손을 개선시키는 연구를 진행하였다. Y 은 각각 0.016%, 0.029%, 0.049%, 0.065%, 0.079% 5 가지 조건으로 첨가하고, Hot band annealing 온도는 950℃, 1000℃, 1050℃, 1100℃, 1150℃ 5 가지로 변화시켰다. 이를 통해 Y 이 첨가되었을 때, 낮은 철손 값을 얻을 수 있는 최적 조건을 연구하였다. 또한 Y 이 시편 내에서 편석이나 석출물로 존재하는 지를 auger electron spectroscopy 실험을 통해 확인하였다.



1.1 무방향성 전기강판

전기강판은 1900년 영국의 Hadfield 가 Fe 에 Si 첨가에 의한 자성향상 현상을 발견하면서 개발되기 시작했다. 다른 강자성체에 비해 포화 자화 값이 높고, 경제성이 우수한 Fe 에 Si 을 첨가하게 되면, 비저항이 커지며 철손이 크게 낮아진다. 전기강판에 첨가되는 Si 은 상용적으로 3.5 wt.% 이내로 첨가된다. Si 을 3.5 wt.% 이내로 첨가하는 이유는 압연성 때문이며, 3.5 wt.% 이상 첨가된 고 Si 계 전기강판은 연신율이 급격히 감소하면서 취성이 증가하여 냉간압연 중 crack 이 발생하기 쉽다. 본 연구에서 사용된 전기강판은 Si 이 3 wt.% 이다.

무방향성 전기강판은 BCC 결정구조를 가지며, 이방성을 가지므로 결정 방향에 따라 자화거동이 다르며, 방향은 자기적 성질에 큰 영향을 미친다. 외부에서 자장이 가해지면 자화가 일어난다. Fig. 2 은 자장-자화 곡선을 나타낸다. 그림에서 나타낸 것과 마찬가지로 $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ 순서로 자화되기 쉽다. [1]

무방향성 전기강판은 모터 등 회전기의 철심에 사용되는 재료이며, 철심은 여러 겹의 판재를 쌓아 만들어진다. 회전기의 철심은 자화되는 방향이 일정하지 않고, 계속해서 변하므로 따라서 한 방향의 자화 특성보다 전기강판 판재면의 모든 방향의 자화 특성이 중요하다. 동일한 ND 를 가지는 결정방위들은 RD 가 다르더라도 회전기에 사용될 때는 항상 동일한 자성 특성이 얻어진다. 결정립의 $\{100\}$ 결정면이 판재에 평행하게 배향하여 있으면 우수한 전기강판이다. [1]

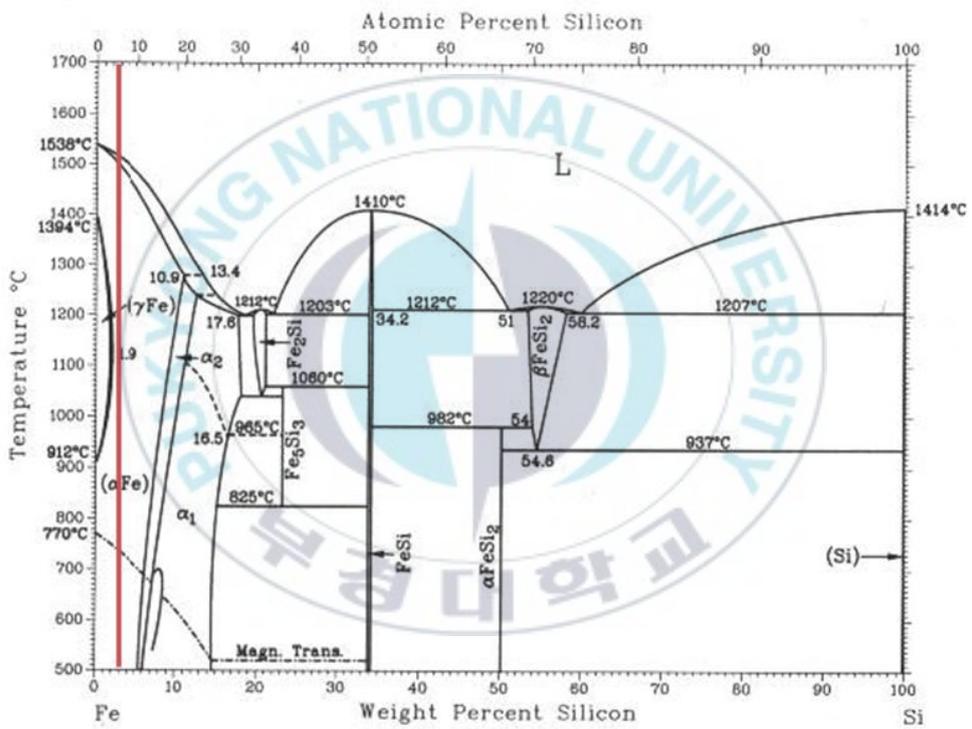


Fig. 1 Fe-Si binary alloy phase diagram [5]

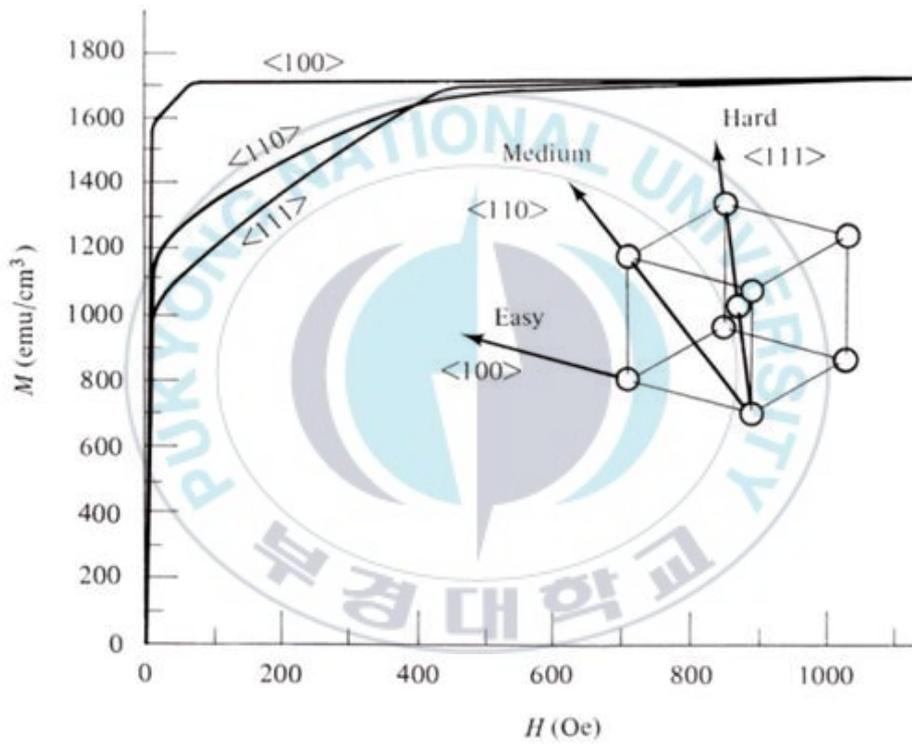


Fig. 2 Crystal anisotropy in BCC iron [1]

1.2 전기강판의 철손

전기강판은 자기에너지와 전기에너지를 변환시켜주는 역할을 한다. 자기에너지와 전기에너지의 변환 과정에서 발생하는 에너지 손실이 철손이며, 철손은 전기강판의 가장 중요한 특성 중 하나이다. 철손은 전기강판의 등급을 결정할 수 있는 중요한 지표이며, 철손이 낮으면 고효율 전기강판이라고 평가할 수 있다.

Fig. 3 은 전기강판의 에너지 손실을 3 가지로 구분하여 표현한 것이다. 철손은 식 (1) 과 같이 hysteresis loss (P_h), eddy current loss (P_e), anomalous loss (P_a) 의 합으로 나타낼 수 있다. [2, 3, 4]

$$P_{total} = P_h + P_e + P_a \dots (1)$$

Hysteresis loss 는 자구벽의 움직임이 방해 받기 때문에 발생한다. 교류자장 사이클이 증가할수록 증가하기 때문에 자구벽의 이동이 용이할수록, 자화의 회전이 쉬울수록 낮아진다. 판재에 존재하는 석출물의 분포, 결정립 크기, 자구 크기가 영향을 미치며, 집합조직이 영향을 미친다.

$$P_h = \frac{f}{D} \oint B_m dH \dots (2)$$

Eddy current loss 는 교류로 인해 자화 방향이 바뀔 때 유도되는 전류 때문에 발생한다. 즉, 판재의 두께 층 전체에 형성되는 맴돌이 전류에 의해 생겨난다. 판재 내에 존재하는 화학조성, 판재의 두께가 영향을 미친다.

$$P_e = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2 t^2}{6\rho} \dots(3)$$

Anomalous loss는 결정립이나 자구 내부에 형성되는 맴돌이 전류에 의해 발생한다. 결정립의 크기와 자구의 크기가 영향을 미친다.

$$P_a = c_1 \frac{\sqrt{d}}{\rho} t^2 B_m^2 f^{3/2} \dots(4)$$

(**D** : grain size, **t** : thickness, **B_s** : saturation magnetic, **v** : magnetic domain wall velocity, **f** : working frequency, **B_m** : maximum magnetic induction at the frequency, **ρ** : electrical resistivity, **L** : width of magnetic domain, **d**: domain width)

전기강판의 미세조직에서 결정립계는 자구벽의 이동을 방해하여 이력손실을 증가시킨다. 전기강판에서 결정립계는 자구의 폭을 줄이기 때문에 결정립계가 많은 전기강판에서 낮은 이상손실이 얻어진다. 또한 전기강판에서 결정립 크기가 증가할수록 결정립계의 면적은 감소하기 때문에 이력손실은 감소하고 대신 이상손실은 증가한다. 따라서 아주 작거나 크지 않은 적절한 결정립 크기를 가질 때 철손이 최소화된다.

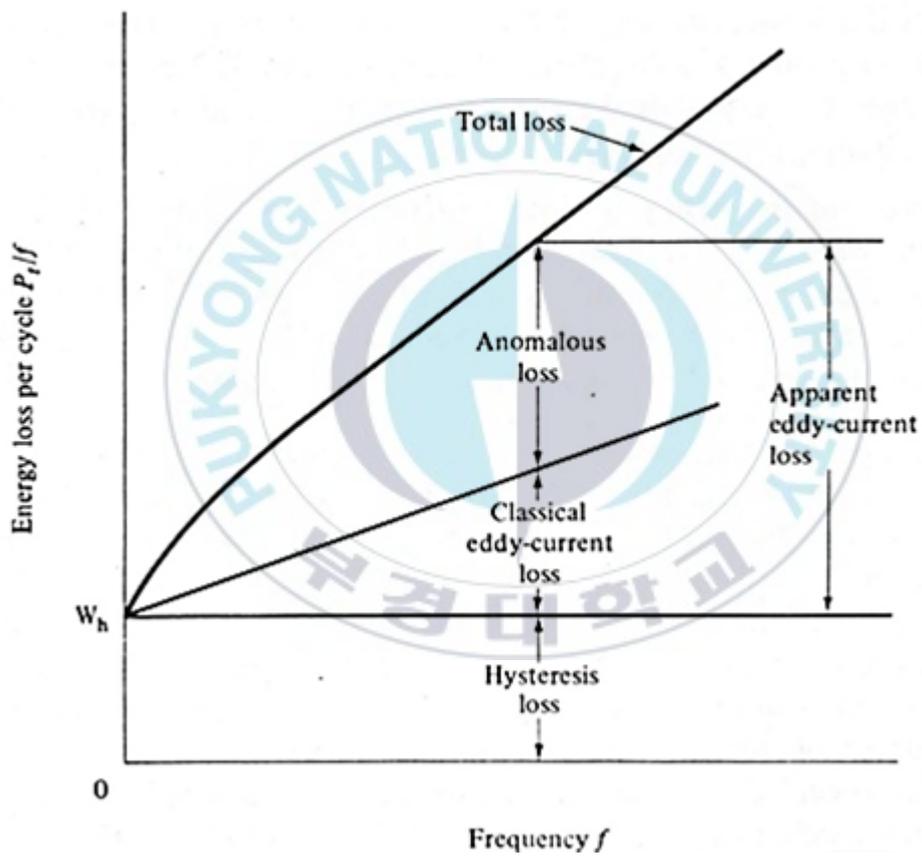
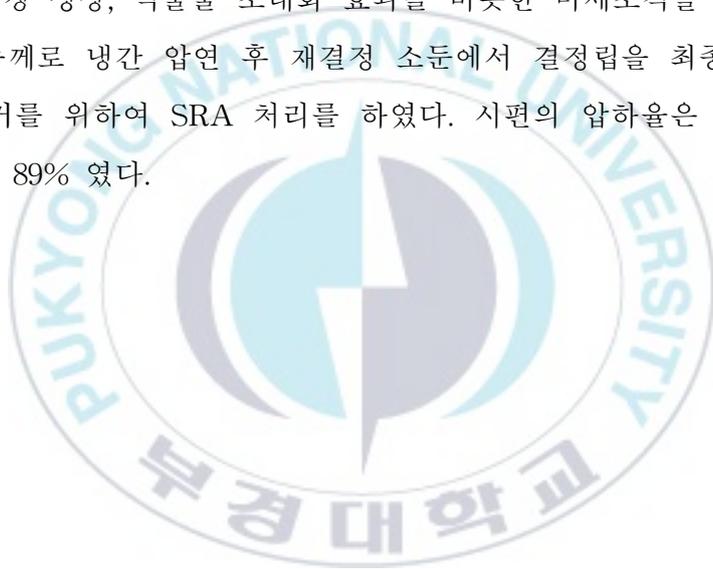


Fig. 3 Conventional separation of losses [1]

제 2장 실험방법

본 실험에 사용된 무방향성 전기강판은 진공용해 - 열간 압연 - 열연판 소둔 - 냉간 압연 - 재결정 소둔 과정을 거쳐 만들어졌다. 제강 과정에서 불순물 원소를 제어하고, 2.2 mm 두께로 열간압연을 진행한 후 열연판 소둔 과정에서 결정립경 성장, 석출물 조대화 효과를 비롯한 미세조직을 제어하였으며, 0.25 mm 두께로 냉간 압연 후 재결정 소둔에서 결정립을 최종 성장시켰다. 잔류응력제거를 위하여 SRA 처리를 하였다. 시편의 압하율은 2.2 mm 에서 0.25 mm 로 89% 였다.



2.1 시편 제작

2.1.1 성분계 설계

본 실험을 진행할 성분계는 비저항 증가로 인한 와전류손을 감소시키기 위해 Si 3.1%, Al 0.9% 공통으로 하였고, Y 첨가량을 6 가지로 구분하여 설계하였다. 성분 분석 결과, 실제 Y 첨가량은 각각 Y1 은 Y 무첨가, Y2 는 0.016%, Y3 는 0.029%, Y4 는 0.049%, Y5 는 0.065%, Y6 는 0.079% 였다. 각 시편의 냉연판에서 성분 분석 시편을 채취하였으며, chip 시편 형태로 가공 후 습식분석을 이용하여 분석하였다. 각 시편의 성분계는 Table 1 과 같다.

Table 1 Chemical compositions of the present study

(wt.%)

Specimen	Fe	Si	Al	Y
Y1	Bal.	3.09	0.94	-
Y2	Bal.	3.08	0.89	0.016
Y3	Bal.	3.14	0.87	0.029
Y4	Bal.	3.11	0.90	0.049
Y5	Bal.	3.09	0.89	0.065
Y6	Bal.	3.09	0.88	0.079

2.1.2 열처리

6가지 성분계 각각에 대하여 2.2 mm 두께의 열연판을 950°C(A), 1000°C(B), 1050°C(C), 1100°C(D), 1150°C(E) 5 가지 온도 조건으로 열연판 소둔 열처리하였다. 열연판 소둔 후 0.25mm 두께로 냉간 압연을 한 후, H₂ 30% 분위기, 990°C에서 재결정 소둔 하였다. 잔류응력 제거 소둔은 H₂ 30% 분위기, 750°C에서 2시간 로냉하였다. 열처리 조건은 Table 2 에 표기하였다.

Table 2 Heat treatment conditions of the experiment

HBA Condition	HBA Temp.	ACL	SRA
A	950°C	990°C, H ₂ 30%	750°C, 2hr, H ₂ 30%
B	1000°C		
C	1050°C		
D	1100°C		
E	1150°C		

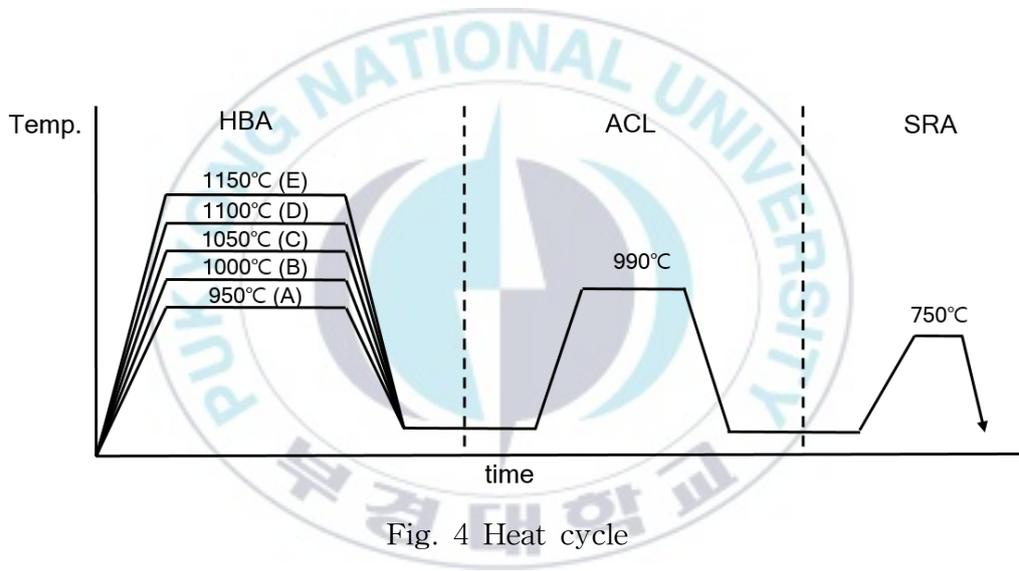


Fig. 4 Heat cycle

2.2 시험내용

2.2.1 미세조직 관찰

열연판 소둔 후의 열연판재와 냉간 압연 후 재결정 소둔 판재에서 시편을 채취하였다. 판재 표면과 내부의 미세조직에 미치는 열연판 소둔 온도와 Y 첨가의 영향을 관찰하기 위해 압연방향의 단면 (TD면) 을 Fig. 5 과 같이 절단하여 가공하였다. 각각의 시편은 사포와 0.04 μm colloidal을 이용하여 연마하였고, 1% Nital (1% HNO₃ + 99% Ethanol) 용액으로 5 ~ 10초간 부식한 후 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였다. 재결정 소둔 후 판재 시편의 광학현미경 사진을 연속해서 3매 촬영한 후 line intercept counting 법을 사용하여 결정립 크기를 정량적으로 측정하였다. [6]

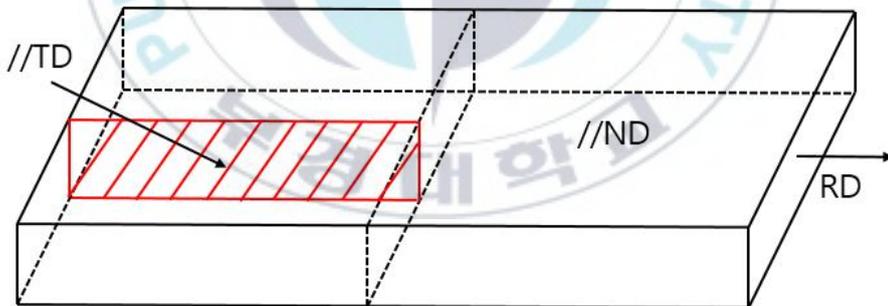


Fig. 5 Schematic image of optical microscope observation area

2.2.2 자성 측정

철손 및 자속밀도는 전기강판의 주요 특성을 평가하는 지표이며, 이러한 자기적 특성을 측정하는 방법에는 단일 판재로 측정하는 single sheet tester 와 여러장 판재를 겹쳐 측정하는 epstein tester 가 있다. 본 실험에서는 재결정 소둔 후 판재에서 가로 60 mm, 세로 60 mm의 정사각형 모양의 시편을 각 3장 채취하여 single sheet tester로 철손 (W_{15/50}) 과 고주파 철손 (W_{10/400}) 을 측정하였다. 철손 (W_{15/50}) 은 주파수 50 Hz에서 자속밀도 1.5 Tesla를 유도하였을 때 재료가 나타내는 손실이며, 고주파 철손 (W_{10/400}) 은 주파수 400 Hz에서 자속밀도 1.0 Tesla를 유도하였을 때 재료가 나타내는 손실이다. 시편의 밀도는 7.60 g/mm³ 이다. Fig. 6 은 single sheet tester 를 모식도로 나타내었다. [1]

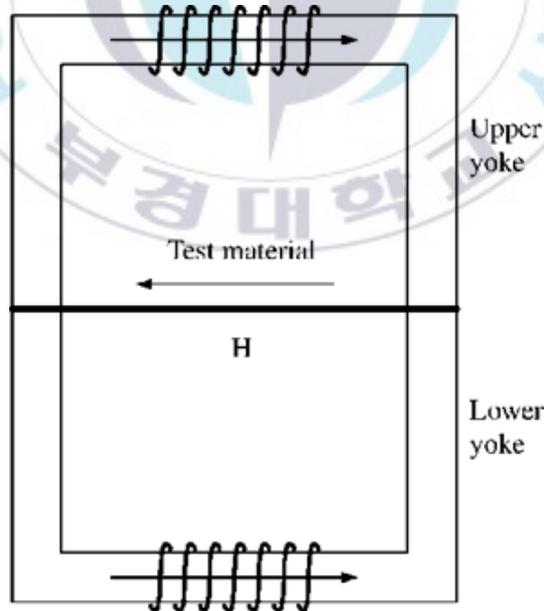


Fig. 6 Single sheet tester

2.2.3 편석 및 석출물 분석

AES 분석용 시편은 Fig. 7 과 같이 열연판 소둔 후 열연판재의 중앙 부분의 시편을 채취하여 길이 18.8 mm × 너비 2 mm 크기로 절단한 뒤 길이 11.4mm 부분을 Notch 가공하였다. 가공된 시편은 5×10^{-10} torr의 진공도에서 액체 질소 온도까지 냉각한 후 파단하여 파단면에 존재하는 Y 의 편석 유무와 석출물을 오제주사현미경 (PHI-700, ULVAC-PHI, Japan) 으로 분석하였다. Y 의 관찰을 용이하게 하기 위해 전자빔은 10 kV 조건으로 실험을 진행하였다. [9, 10]



제 3장 실험결과 및 고찰

3.1 Y 첨가와 열연판 소둔 온도의 영향

3.1.1 미세조직에 미치는 영향

Fig. 8 는 열연판 소둔 온도가 950℃, Fig. 9 는 열연판 소둔 온도가 1000℃, Fig. 10 는 열연판 소둔 온도가 1050℃, Fig. 11 는 열연판 소둔 온도가 1100℃, Fig. 12 는 열연판 소둔 온도가 1150℃ 인 경우의 Y 첨가량에 따른 미세조직 사진이다. Table 3 는 미세조직 사진 Fig. 8 ~ Fig. 12 를 이용하여 측정된 결정립경 크기를 나타냈다.

열연판 소둔 온도가 950℃ 인 경우, Y 이 소량 첨가된 Y2, Y3 가 결정립 크기가 각각 91 μm , 73 μm 로 Y 무첨가의 62 μm 보다 결정립이 더 크다. 열연판 소둔 온도가 1000℃ 인 경우, Y 이 소량 첨가된 Y2, Y3, Y4 가 각각 89 μm , 79 μm , 64 μm 로 Y 무첨가의 61 μm 보다 결정립이 더 크다. 열연판 소둔 온도가 1050℃ 인 경우, Y 이 소량 첨가된 Y2 가 86 μm 로 Y 무첨가의 83 μm 보다 결정립이 더 크다. 열연판 소둔 온도가 1100℃ 인 경우, Y 이 소량 첨가된 Y2 가 93 μm 로 Y 무첨가의 81 μm 보다 결정립이 더 크다. 열연판 소둔 온도가 1150℃ 인 경우, Y 이 소량 첨가된 Y2, Y3 가 각각 92 μm , 76 μm 로 Y 무첨가의 64 μm 보다 결정립이 더 크다.

Fig. 13 에서 Y 첨가가 결정립 크기에 미치는 영향을 살펴보면, 열연판 소둔 온도에 관계없이, Y 이 0.016% 첨가된 경우가 결정립 크기가 컸다. Y 첨가량이 0.029%, 0.049%, 0.065%, 0.079% 로 증가할수록 결정립 크기는 작아지

는 경향을 보인다.

Fig. 14 를 보면 Y 의 소량 첨가가 결정립 성장에 뚜렷한 영향을 미치는데 비해 열연판 소둔 온도가 결정립 크기에 미치는 영향은 뚜렷하지 않다.



Fig. 7 Microstructure of HBA 950°C

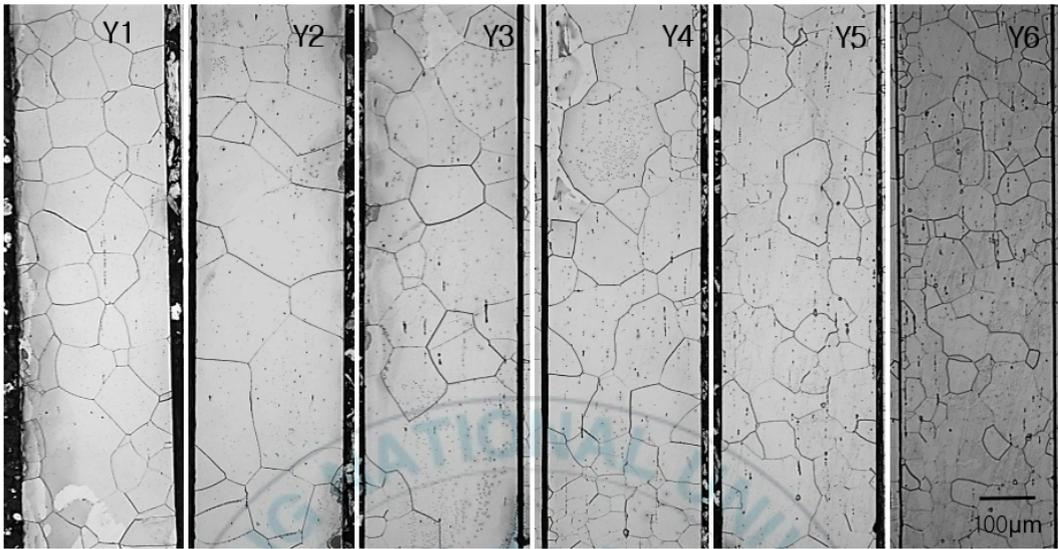


Fig. 8 Microstructure of HBA 1000°C

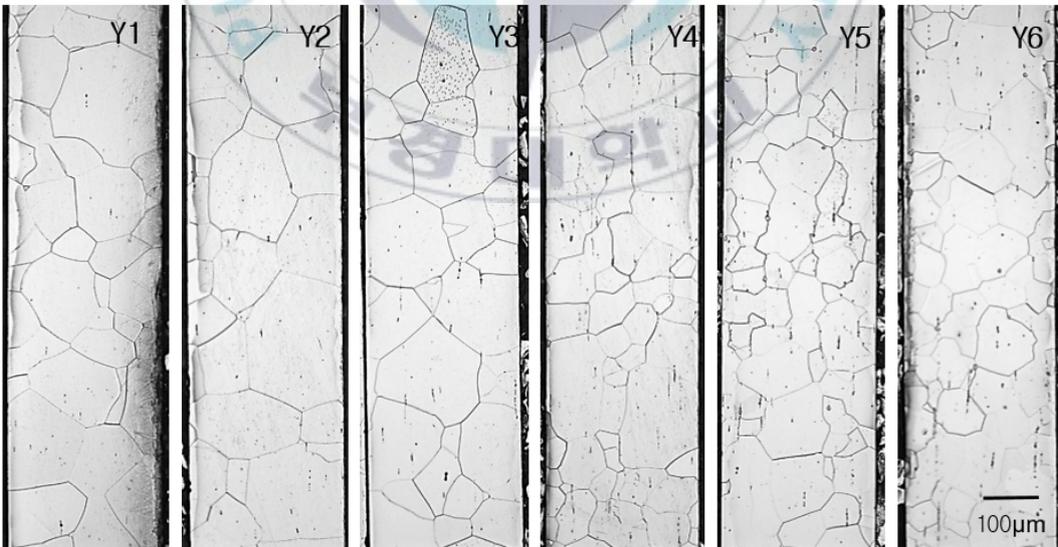


Fig. 9 Microstructure of HBA 1050°C

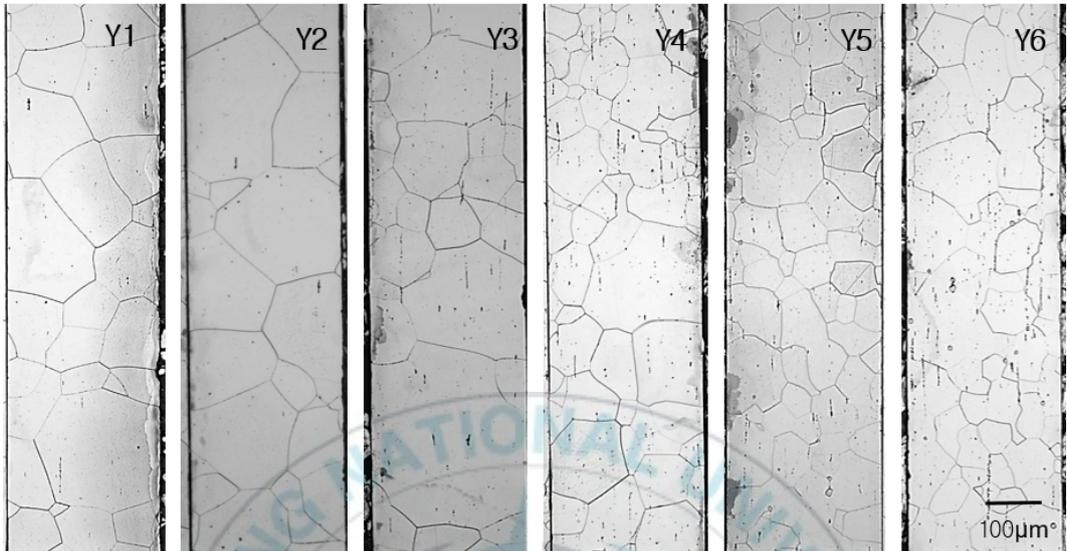


Fig. 10 Microstructure of HBA 1100°C

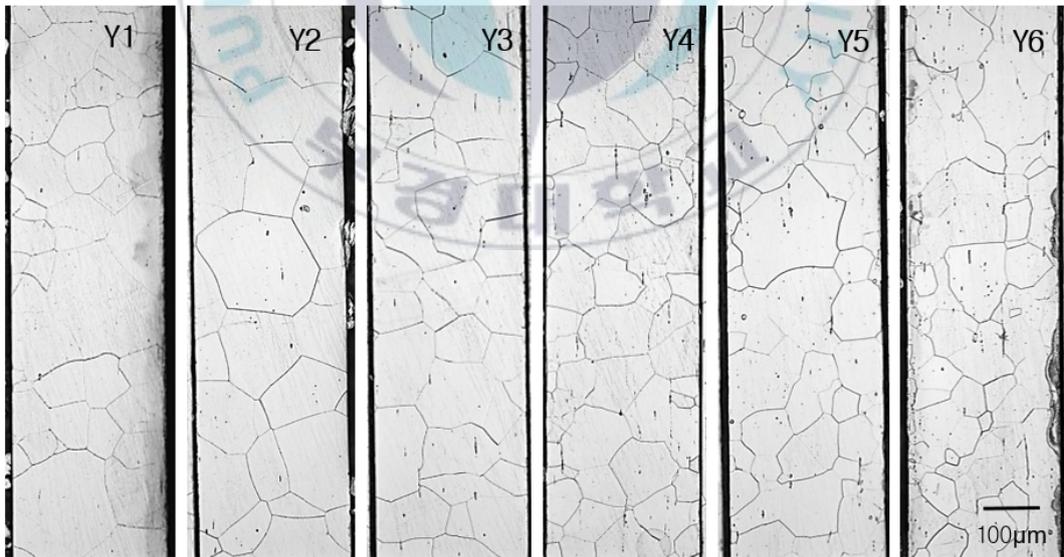


Fig. 11 Microstructure of HBA 1150°C

Table 3 Grain size of the specimen

(μm)

HBA Temp. Specimen	950°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
Y1	62	61	83	81	64
Y2	91	89	86	93	92
Y3	73	79	75	78	76
Y4	56	64	57	58	61
Y5	54	49	54	59	62
Y6	56	52	44	47	53

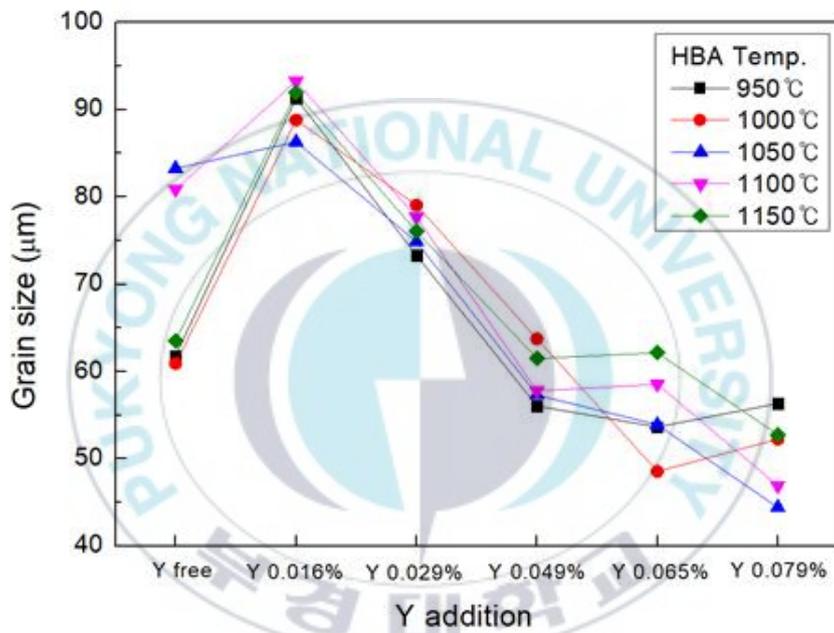


Fig. 12 Effect of Y addition on grain size

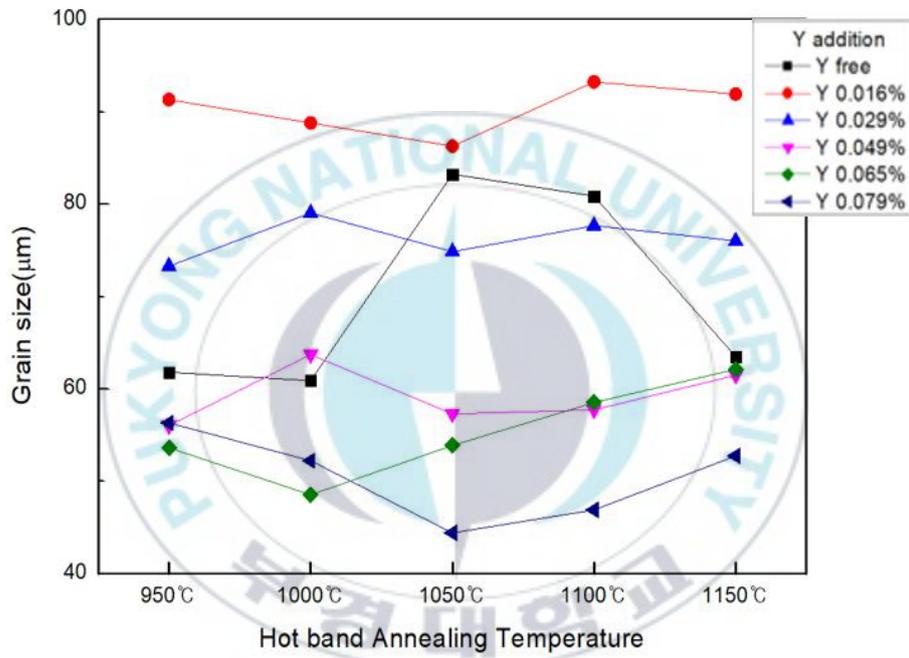


Fig. 13 Effect of HBA temperature on grain size

3.1.2 철손에 미치는 영향

Fig. 15 는 Y 첨가가 철손 ($W_{15/50}$) 에 미치는 영향을 나타내었고, Fig. 16 은 열연판 소둔 온도가 철손 ($W_{15/50}$) 에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

Y 첨가가 철손 ($W_{15/50}$) 에 미치는 영향을 살펴보면, 열연판 소둔 온도 1150°C를 제외하고, Y 이 0.016% 로 소량 첨가된 경우에 철손이 가장 낮게 측정되었다. Y 첨가량이 0.029% 이상 증가하면 오히려 철손이 높아지는 경향을 보이고 있다. 이는 결정립 크기에 미치는 영향과 유사한 결과로 결정립 성장과 철손이 관련이 있는 것으로 생각된다.

열연판 소둔 온도의 영향의 측면에서는, 철손 ($W_{15/50}$) 은 전체적으로 열연판 소둔 온도가 높아질수록 철손이 낮아지는 경향을 보인다. 하지만 Y 이 0.016% 소량 첨가된 Y2 의 경우, 열연판 소둔 온도가 950°C, 1000°C 으로 낮은 조건에서, 철손이 가장 낮다.

Fig. 17 는 Y 첨가가 고주파 철손 ($W_{10/400}$) 에 미치는 영향을 나타내었으며, Fig. 18 은 열연판 소둔 온도가 고주파 철손 ($W_{10/400}$) 에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

고주파 철손 ($W_{10/400}$) 도 전체적으로 열연판 소둔 온도가 높아질수록 철손이 낮아지는 경향을 보인다. 철손 ($W_{15/50}$) 과 마찬가지로 Y 이 0.016% 소량 첨가된 Y2 의 경우, 열연판 소둔 온도가 950°C, 1000°C 으로 낮은 조건에서, 철손이 가장 낮다.

Table 4 Core loss ($W_{15/50}$) of the specimen

(W/kg)

HBA Temp. Specimen	950°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
Y1	2.42	2.31	2.22	2.13	2.18
Y2	2.23	2.17	2.20	2.25	2.16
Y3	2.40	2.37	2.32	2.29	2.30
Y4	2.82	2.76	2.74	2.71	2.70
Y5	2.98	2.95	2.89	2.92	2.84
Y6	3.24	3.18	3.14	3.12	3.12

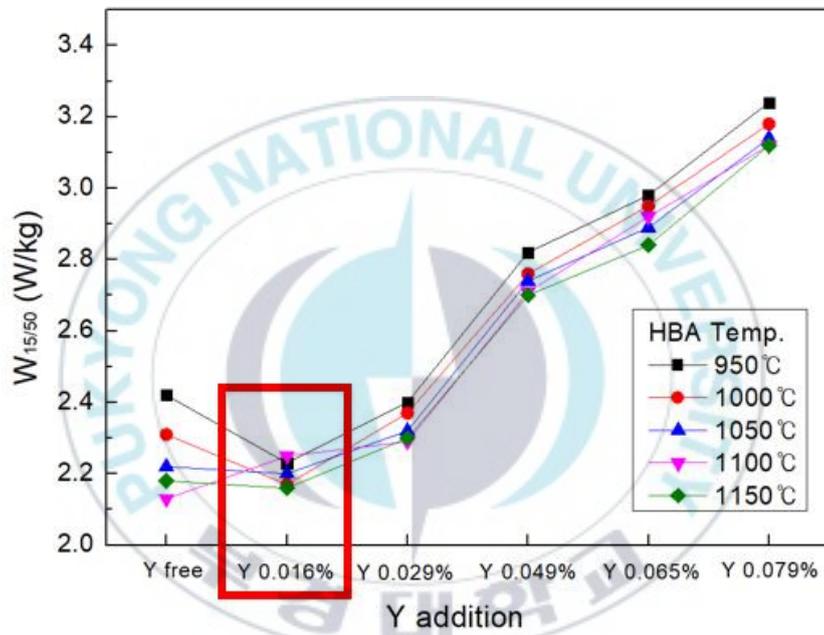


Fig. 14 Effect of Y addition on core loss ($W_{15/50}$)

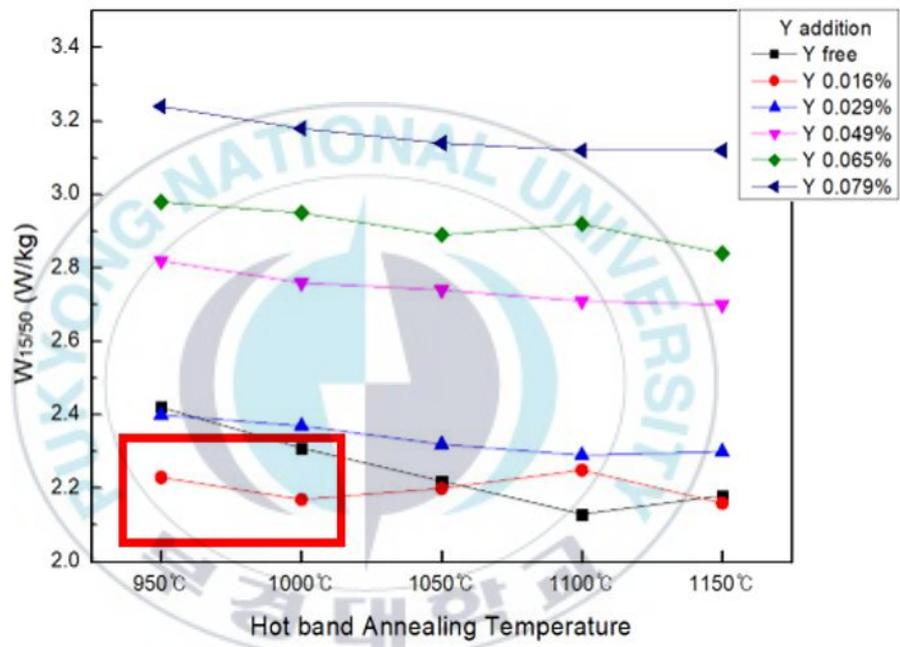


Fig. 15 Effect of HBA temperature on core loss ($W_{15/50}$)

Table 5 Core loss ($W_{10/400}$) of the specimen

(W/kg)

HBA Temp. Specimen	950°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
Y1	14.40	14.05	13.78	13.60	13.73
Y2	13.27	13.19	13.79	14.14	13.35
Y3	13.92	14.15	14.10	13.71	14.89
Y4	15.55	15.28	15.01	14.98	15.08
Y5	15.78	15.58	15.47	15.55	15.36
Y6	16.40	16.36	16.08	16.06	16.06

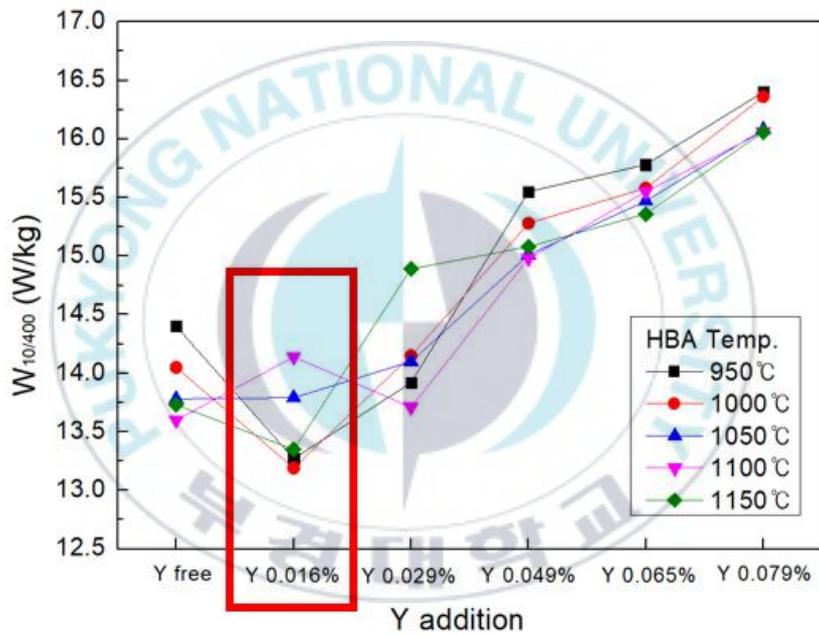


Fig. 16 Effect of Y addition on core loss ($W_{10/400}$)

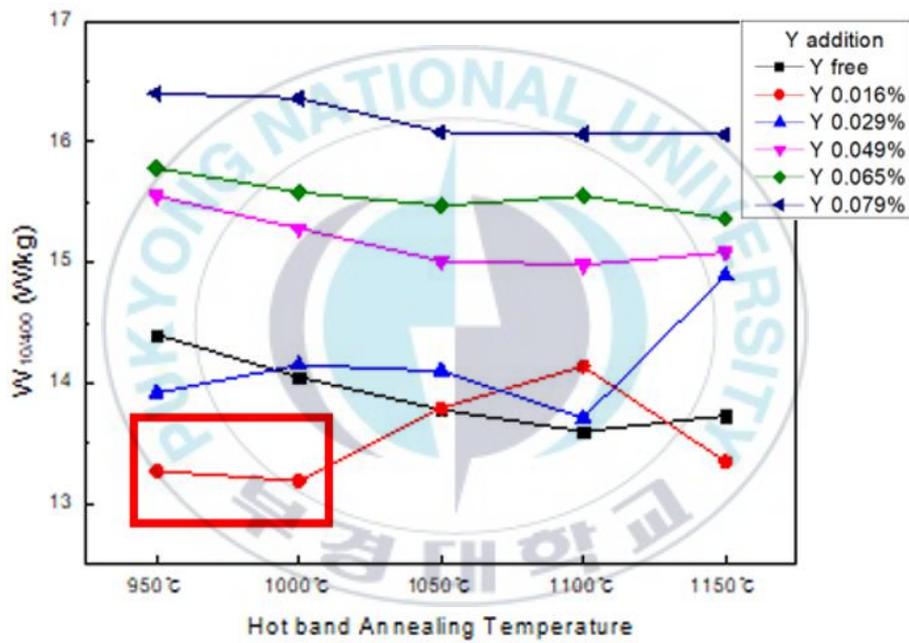


Fig. 17 Effect of HBA temperature on core loss ($W_{10/400}$)

3.2 결정립 크기와 철손의 관계 고찰

Fig. 19 는 결정립 크기와 상용주파수 철손 ($W_{15/50}$) 의 관계, Fig. 20 는 결정립 크기와 고주파 철손 ($W_{10/400}$) 의 관계를 그래프로 나타냈다. 그래프를 살펴보면, 상용주파수 철손 ($W_{15/50}$) 와 고주파 철손 ($W_{10/400}$) 모두 결정립 크기와 철손 값이 반비례하는 것을 뚜렷하게 확인 할 수 있으며, 결정립 크기가 커질수록 철손이 낮아지는 것을 나타낸다. [7, 8]

이것은 1.2 절에서 Hysteresis loss 식 (2) 에서 언급했듯이, 결정립 크기가 커지면 Hysteresis loss 가 낮아지는 것을 입증한다.

$$P_h = \frac{f}{D} \oint B_m dH \dots (2)$$

또한, 철손이 낮은 영역의 결정립 크기는 대략 80 ~ 95 μm 정도이다. 따라서 Y 이 소량 첨가가 결정립을 80 ~ 95 μm 크기로 성장시켜 Hysteresis loss 를 낮추는 뚜렷한 효과를 보인다고 생각된다.

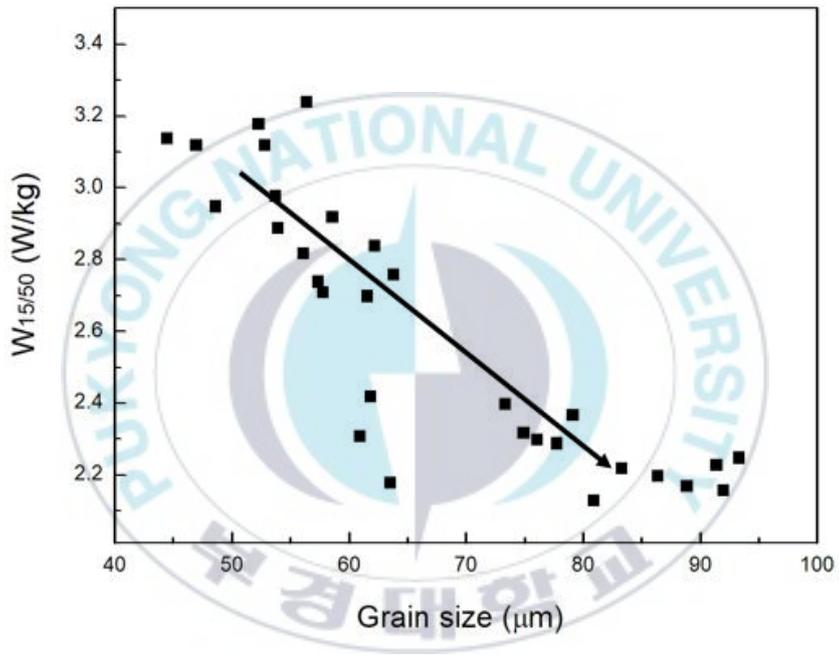


Fig. 18 Correlation of grain size and core loss ($W_{15/50}$)

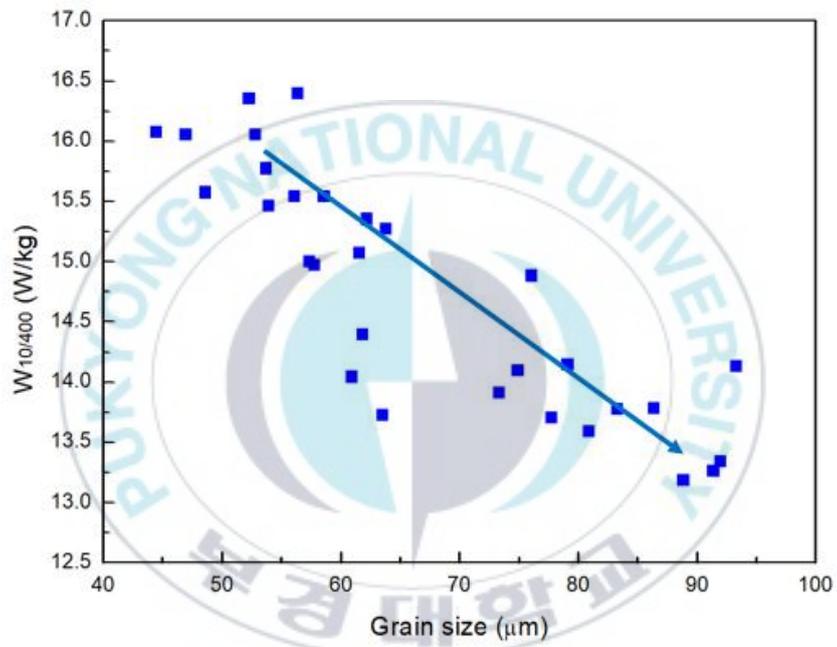


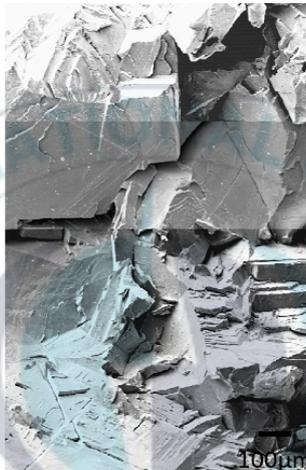
Fig. 19 Correlation of grain size and core loss (W_{10/400})

3.3 편석 및 석출물 분석

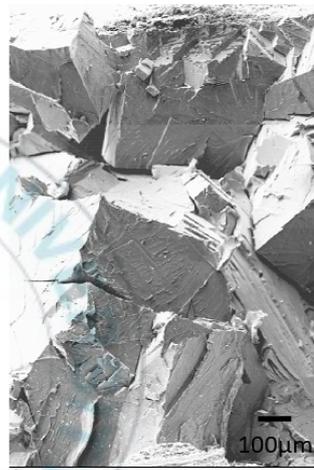
Y 의 편석 유무와 석출물을 확인하기 위해 열연판 소둔 후 열연판재를 AES 분석하였다. Fig. 21 에서 나타나듯이 과단면을 살펴본 결과, Y 첨가 시편의 과단면 전체에 걸쳐 편석이 된 부분은 확인할 수 없었으며, 고배율 ($\times 1000$ 이상) 에서 과단면에 존재하는 석출물을 관찰할 수 있었다. Fig. 22 ~ Fig. 25 은 Y 첨가 시편에 존재하는 Y Sulfide 와 Y Nitride 의 석출물과 AES peak 을 나타낸 것이다. AES peak 를 분석 결과, Y 이 첨가된 열연판재에서는 Y Nitride와 Y Sulfide가 석출물 형태로 관찰되었고, Y Nitride 의 크기는 직경이 약 $1 \sim 3\mu\text{m}$, Y Sulfide 의 크기는 직경이 약 $1 \sim 10\mu\text{m}$ 정도 였다. Y 이 첨가되지 않은 경우에는 AlN, MnS 석출물이 관찰되었다. 분석 결과를 통해 Y 이 첨가되면 편석되지 않고, 결정립내에 조대한 Y Nitride, Y Sulfide 형태로 존재하는 것을 확인 할 수 있었다.



a. Y2A Fracture plane(x120)



b. Y2D Fracture plane(x120)



c. Y2E Fracture plane(x120)

Fig. 20 SEM images of Fracture plane

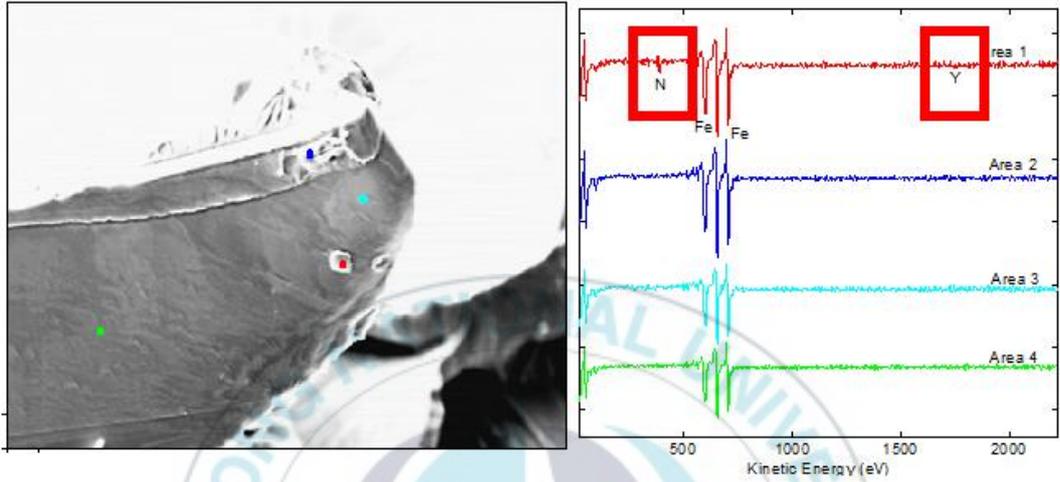


Fig. 21 Y nitride precipitate ($\times 3,000$)

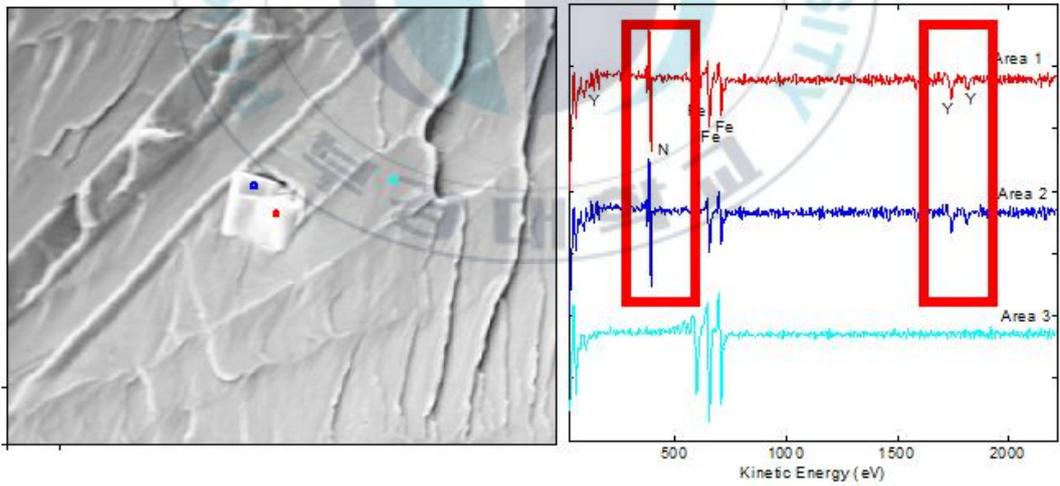


Fig. 22 Y nitride precipitate ($\times 5,000$)

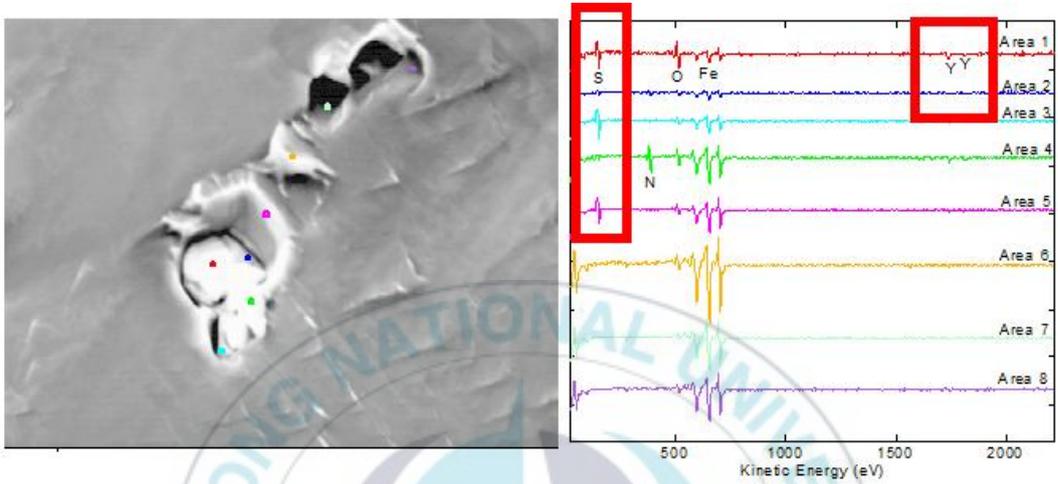


Fig. 23 Y sulfide precipitate ($\times 10,000$)

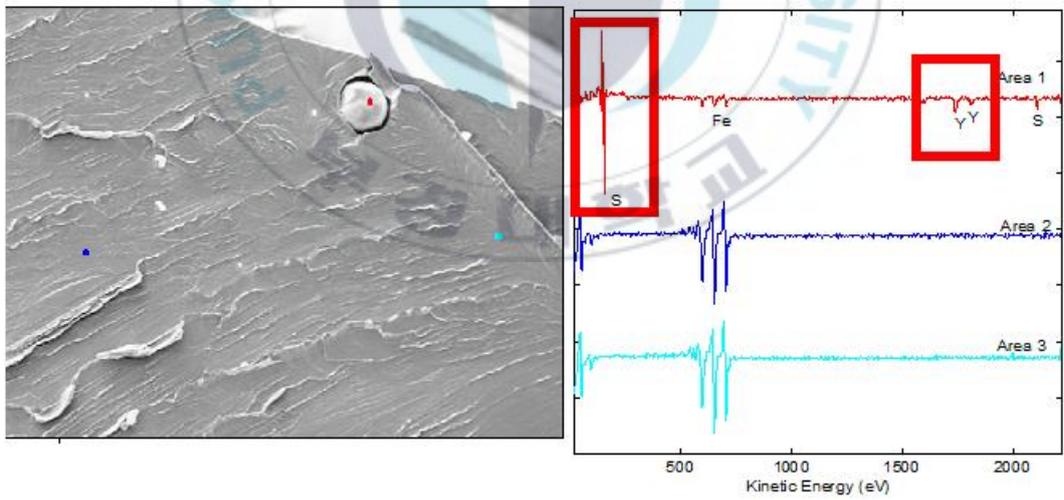


Fig. 24 Y sulfide precipitate ($\times 1,000$)

제 4장 결론

3% Si 무방향성 전기강판의 철손에 미치는 Y 첨가와 열연판 소둔 온도의 영향을 고찰한 결론은 다음과 같다.

(1) Y 이 0.016 % 소량 첨가 되면, Y 이 첨가되지 않은 시편과 Y 이 0.029% 이상 첨가된 시편들보다 결정립 크기가 더 컸다.

(2) Y 이 0.016 % 소량 첨가 되면, Y 이 첨가되지 않은 시편과 Y 이 0.029% 이상 첨가된 시편들보다 철손이 낮았다. 이는 Y 의 소량 첨가가 결정립 크기를 성장시키는 효과를 보이고, 성장된 결정립은 hysteresis loss를 감소시키는 것을 나타낸다.

(3) Y 이 0.016 % 소량 첨가 된 경우, 열연판 소둔 온도가 낮으면 철손을 낮추는 영향이 크다.

(4) Y 의 편석을 확인하기 위해 열연판 소둔 후 판재를 AES 분석한 결과, Y 의 편석은 관찰되지 않았다. 첨가된 Y 은 Y nitride, Y sulfide 석출물 형태로 존재하였으며, Y nitride 는 각이 진 네모 형태로 직경 약 1~3 μm 정도이다. Y sulfide 는 둥근 형태를 띄고 있으며, 직경은 약 1~10 μm 크기였다. Y 을 첨가하지 않은 시편에서는 AlN 과 MnS 등 미소 석출물이 발견되었다.

이것은 Y 첨가시, Y 이 석출물 형태를 이루면서 결정립 성장과 자기적 성질에 악영향을 미치는 MnS 와 같은 미소 석출물의 생성을 억제하는 것으로 생각된다.

제 5장 참고 문헌

- [1] B.D. Cullity, C.D. Graham (2011), Introduction to magnetic materials, Wiley. com.
- [2] M.F. de Campos, J.C. Teixeira, F.J.G. Landgraf, (2006) Journal of Magnetic and Magnetism Materials. 301, 94
- [3] T.D. Yensen, N.A. Ziegler, (1935), Trans. ASM 23, 536.
- [4] J.J. Thomson, (1892), Electrician 28, 599.
- [5] ASM handbook Vol. 3 phase diagram.
- [6] ASM handbook Vol. 5 Microstructure.
- [7] E.T.Stephenson, A.R.Marder, (1986), IEEE, Vol. Mag-22, 101-106
- [8] M.Shiozaki, Y.Kurosaki, (1989), Journal of Materials science, 11, 37-43
- [9] Chuan C. Chang, (1971), Surface science 25, 53-79
- [10] A.Mosser, S.C.Srivastava, B. Carriere, (1987), Surface Science 133, 441-4746
- [11] Wang Jian. (2010), Journal of iron and steel research, int, 17(11), 54-61
- [12] Byung Deug Hong, Kyu Seok Han, Jae Kwan Kim, Kyung Mox Cho, (2005), Materials technology-Electrical steels, steel research int. 76, 448-450
- [13] Marcio Ferreira Rodrigues, Marco Antonio da Cunha, (2013), Journal of Magnetism and Magnetic Materials 331, 24 - 27
- [14] Tasei nakayama, Masashi Takahashi, (1995), Journal of Materials

science 30, 5979–5984

[15] Tasei Nakayama, Noriyuki Honjou, (2000), Journal of Magnetism and Magnetic Materials 213, 87 - 94

[16] Tasei Nakayama, Noriyuki Honjou, (2001), Journal of Magnetism and Magnetic Materials 234, 55–61

[17] Je Sik Shin, Zin Hyoung Lee, Taek Dong Lee and E.J Lavernia (2001), Scripta Materialia 45, 725–731

[18] Yuriy Sidoir, Frantisek Kovac, (2005), Materials Characterization 55,1–11

[19] R. PremKumar, I. Samajdar, (2003), Journal of Magnetism and Magnetic Materials 264, 75 - 85

[20] A. Chaudhury, R. Khatirkar, (2007), Journal of Magnetism and Magnetic Materials 313, 21–28

[21] Marco A. da Cunha and Sebastiao C. Paolinelli, (2005), Materials technology-Electrical steels, steel research int. 76, 421–425

[22] Dong Hao, Zhao Yu, (2009), Journal of iron and steel research, int. 16(6), 86–89.

[23] Cheng-yi Zhu, Xian-hong Chen, (2016), Materials science forum, Vol. 852, 38–48

[24] Chun-kan Hou, Chun-chih Liao, (2008), ISIJ Int., Vol. 48, 531–539

[25] Yong Wan, Wei qing Chen, Shao-jie Wu, (2014), High Temp. Mater. Proc., 33, 115–121

[26] Hao-Ze Li, Hai-Tao Liu, (2015), Materials Characterization 103,101–106

[27] I.Tanaka, H.Yashiki, (2006), Journal of Magnetism and Magnetic Materials 304, e611-e613



감사의 글

석사과정 동안 많은 도움을 주신 분들께 감사함을 전하며 이 글을 올립니다. 먼저 저에게 학부시절부터 지금까지 진심어린 충고와 가르침을 주신 김성규 지도 교수님, 박홍일 교수님께 감사의 말씀 드립니다. 그리고 항상 아낌없는 격려를 해주시고, 귀한 가르침으로 도움을 주신 김재관 교수님께도 감사드립니다.

저의 석사 논문을 완성하기까지 잘못된 부분을 지적해주시고, 심사해주신 이병우 교수님, 이길근 교수님, 서원찬 교수님께도 감사드립니다.

부산을 떠나 포항에 와서 좋은 환경에서 열심히 연구할 수 있도록 도와주신 포항공과대학교 철강대학원 구양모 교수님, 이재상 교수님, 권세균 교수님 감사드립니다.

논문을 완성할 수 있게 많은 도움 주신 포스코 김재훈 박사님, 김재성 박사님, 김정우 박사님, 이현주 연구원님께도 감사의 인사를 드립니다. 연구원으로 일하며, 학위를 무사히 마칠 수 있게 도와준 포항공과대학교 철강대학원 ATL 연구실 형, 동생들 너무나 고맙습니다. 기쁜 일, 슬픈 일 함께 나누며, 즐겁게 함께 연구 할 수 있게 도와준 이지용 형, 오은지, 최영원, 홍재완, 문현우, 나정균, 최현서 고맙습니다. 석사과정 기간 동안 힘이 되어준 친구들 강재현, 강태욱, 강해송, 고건호, 권대원 형, 문창호, 이대우 형, 차민욱 형, 최진호 형, 허인 형, 홍민영, 고맙습니다. 그리고 항상 옆에서 힘이 되어준 여자친구 서현이에게도 너무나 감사합니다.

마지막으로 저를 항상 지지해주시고, 응원해주신 아버지, 어머니께도 감사드립니다.

그리고 글로 다 담지 못 했지만 석사과정동안 저에게 많은 도움과 격려, 응원해주신 모든 분께 감사드립니다. 감사한 마음 잊지 않고, 많은 사람들이 필요로 하는 인재가 되도록 하겠습니다.



2018 년 8 월
박정우 올림