

전자빔 조사에 의한 방향성 전기강판의 철손 감소를 위한 소형 전자빔 조사장치 설계

김민*, 조경재*, 차인수**, 조성오***, 이종민***

* 동신대학교 대학원 전기전자공학과

** 동신대학교 전기전자공학부

*** 한국원자력연구소 양자광학팀

Design of a miniature electron beam irradiation apparatus for domain refining grain oriented electrical steel with electron beams

Min Kim*, Kyeng-Jai Cho*, In-Su Cha**, Sung-Oh Cho***, Jong-Min Lee***

* Dept. of Electrical & Electronic Eng. Graduate school of Dongshin Univ.

** Dept. of Electrical & Electronic Eng. Dongshin Univ.

*** Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT

A noncontact technique for reducing the core loss of a grain oriented silicon steel has been developed by the use of mechanical scribing, Q-switched laser, plasma jet or electron beam irradiation.

Among these methods electron beam irradiation has advantages of domain refining without any deformation or damage of insulating film on the surface of a grain oriented Si-Fe.

Over the past years, this processing was performed in vacuum of 10^{-4} Torr or below causing the problem of high cost and difficulty of continuous works.

In this paper, a miniature electron permeable window through which electron beam energy 40~80keV and average current 0.1~2mA were obtained for electron beam irradiating on air was designed and manufactured.

1. 서론

산업발전에 따라 전력수요는 계속해서 증가하고 있고, 지구환경의 오염방지와 에너지 절약의 문제가 점점 심각해지고 있다. 전력은 일반적으로 저장하여 사용할 수 없고 항상 발전소로부터 수용가까지 많은 변압기를 통해 보내 오고 있기 때문에 변압기에서의

전력손실은 막대한 양에 달한다. 이와 같은 변압기의 손실의 대부분은 철심재료에 의해 차지하고 있으므로 철심재료인 규소강판의 철손감소에 대한 연구가 계속 이루어져 왔다.^[1] 규소강판에 장력인가, 표면 스크래치 및 레이저, 플라즈마 제트, 또는 전자빔을 조사하여 자구세분화 처리에 의해 자벽수를 증가시켜 와전류 손실의 감소를 통한 철손을 감소시키는 보고들이 있다. 강의 표면에 국부적 변형을 유도하도록 강의 어떤 처리를 실행하면 입자배향성 규소강판 및 비정질 재료와 같은 전기적 강의 자구 크기 및 코어 손실값이 감소된다. 이러한 처리를 “스크라이빙(scribing)” 또는 “자구정련(domain refining)”으로 일컬어지며 최종 고온 어닐링 공정 후 수행된다. 최종조각 어닐링 이후에 강의 스크라이빙되면 조각 어닐링된 강에 국부적인 응력상태가 유도되어서 자구 벽 간격이 감소된다. 규소강판의 압연방향에 수직으로 기계적인 스크래치나 레이저를 이용한 스크라이빙은 자구벽 간격을 줄이고 손실을 줄이는데 효과적이지만 절연 코팅의 손상을 발생시켜 처리 후 재코팅이 요구된다.^{[2]-[4]} 반면에 전자빔을 이용한 자구 정련은 절연 코팅의 손상없이 우수한 자기적 성질을 갖게 조절할 수 있고 자구벽 간격을 감소시켜 와전류손을 줄일 수 있다. 그러나 기존에는 10^{-4} Torr이하의 진공중에서 일련의 작업들이 이루어져 막대한 비용 문제와 연속 작업이 곤란했다.^[4] 본 논문에서는 대기중에서 전자빔을 방향성 규소강판의 표면에 조사하여 자구미세화 효과를 얻을 수 있도록 소형 전자빔 조사장치를 제작하고, 개발된 소형 전자빔 조사장치 및 동작특성에 대해 기술한다.

2. 실험장치의 구성 및 설계

그림 1은 전자빔을 발생시키기 위한 전자총, 전자빔의 특성을 실험하기 위한 챔버 그리고 발생한 전자빔을 대기중으로 인출하기 위한 윈도우 구조를 나타낸다.

2.1 전자총

전자총의 기본 변수를 근거로 EGUN code를 이용하여 전자총에서 인출되는 전자빔의 제적과 에미턴스를 계산함으로써 그 구조를 최적화 하였다. 전자총 음극의 재질은 금속형태의 열 전자 빔 방출 원으로 널리 쓰이고 있는 LaB₆를 사용하였다. 순도 99.5 % 3.1×8.2 mm인 미국의 CERAC사 제품을 사용하였다. LaB₆는 방출 전류밀도가 높고 evaporation rate가 낮으며 poisoning에 강하다는 장점이 있다. 또 5×10⁻⁵ torr 정도의 비교적 저 진공에서도 전자빔 인출 특성이 변하지 않는 장점이 있다. 본 실험에서는 LaB₆를 필라멘트에 끼워 필라멘트를 지지하고 Feedthrough와 연결하기 위해 제작된 Adapter를 이용하여 LaB₆가 중앙에 위치하도록 하였다. 필라멘트[22]는 직경이 0.6 mm 텅스텐을 사용하였다. LaB₆의 ϕ가 3.1 mm임을 감안하여 LaB₆ 지지하기 위하여 ϕ를 3.2 mm 정도로 1.5 번 감고 나머지 부분은 LaB₆의 중앙에 위치하고 열효율을 좋게 하도록 하였다.

2.2 전자빔 윈도우

전자빔 윈도우는 진공상태로 유지된 전자총에서 발생하는 전자빔이 기압이 높은 영역, 즉 공기중으로 인출되는 창이다. 알려진 가장 간단한 윈도우 구조는 얇고 가스 불침투성의 포일을 vaccum-tight 방식으로 전자총쪽의 진공과 대기압의 압력차를 지탱하도록 되어 있다. 전자빔이 윈도우를 통과하는 동안 전자빔과 포일 물질이 피할 수 없는 상호작용을 일으켜 포일에 열이 발생한다. 따라서

윈도우용 포일 물질로서는 포일에서 전자빔의 에너지 손실을 최소화하고 포일에서의 빠른 power dissipation을 위해서 가능한 얇은 것이 요구되어질 뿐만 아니라 진공과 대기압간의 압력차에 의해 발생하는 물리적인 힘을 견딜수 있어야만 한다. 주로 윈도우용 포일 물질로서 알루미늄, 티타늄 그리고 베릴륨등이 사용되고 있다.^[5]

본 실험장치는 70~80 [keV], 0.1~2 [mA]의 전자빔 발생기이므로 적절한 윈도우용 포일 물질을 선정하기 위해서 알루미늄, 티타늄 그리고 현재까지는 윈도우 포일로 용으로 사용된 적이 없는 Havar 포일에 대한 물리적인 특성들을 표 1에 나타내었고 그림 2와 그림 3은 각각 물질에 대한 전자의 레인지(range, R)와 Stopping Power를 나타낸다.

표 1 전자빔 윈도우용 재료의 특성 비교
Table 1 Physical properties of materials for window

	Be	Al	Ti	Havar
원자번호(Z, Z _{ef})	4	13	22	28
원자량(A, A _{ef})	9.01218	26.98154	47.88	60.676
밀 도(gcm ⁻³)	1.848	2.70	4.5	8.3
녹는점(°C)	1278	660.4	1660	-
온도계수 @ 0-100 °C (K ⁻¹)	0.0090	0.0045	0.0038	9.5~11 ×10 ⁻⁶
비열 @ 25°C(JK ⁻¹ kg ⁻¹)	1825	900	523	-
장력강도(MPa)	310~550	50~195	230~460	1860
여기포텐셜(eV)	-	160	246	302

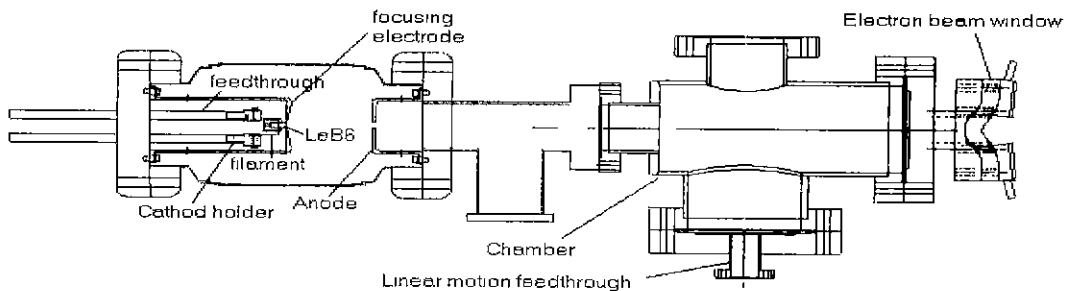


그림 1 전자총과 전자빔 조사장치
Fig. 1 Electron gun and EB irradiation apparatus

3. 실험 및 고찰

본 실험에서는 윈도우 포일로서 4 μm의 Havar를 사용하였다. 에너지에 따라 윈도우에서의 에너지 손실량을 조사하기 위해서 윈도우 Havar 포일에서 전류 transmission rate를 측정하여 이론치와 비교하여 그림에 나타내었다.

포일에 입사된 전자빔의 투과에 대한 간단한 공식은 Rao^[6]에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\eta = [1 + \exp(-gh)] / [1 + \exp[g(t/r - h)]]$$

여기서, η 는 두께 t 를 갖는 물질에 투과하는 실질적인 전자빔의 투과 정도를 나타내고, 상수 g 와 h 는 그 물질의 원자번호 Z 와 원자량 A 에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$g = 9.2Z^{-0.2} + 16Z^{-2.2}$$

$$h = 0.63Z/A + 0.27$$

윈도우용 포일이 혼합물이나 화합물인 경우에는 원자번호 Z 와 원자량 A 대신에 실효원자번호와 실효원자량이 사용된다.

입사된 전자빔의 전류량은 HV dc power supply의 출력단에 ammeter를 설치하여 측정하였으면 윈도우 포일을 투과한 전자빔 전류는 진공중에서 포일 아래에 패러데이 컵을 설치하여 측정하였다. 또 포일 아래에 현광판을 설치하여 CC Camera로 눈으로 투과실험을 확인할 수 있도록 하였다. 그림 6(a)와 6(b)에 실험방법과 관측 결과를 나타내었다.

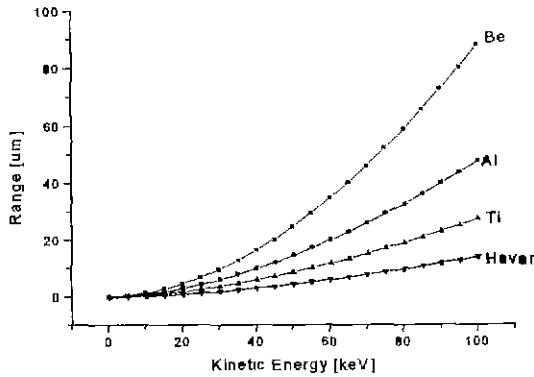


그림 2 가속 전압에 따른 각 물질에서 전자의 범위
Fig. 2 Electron range in each material versus Kinetic Energy

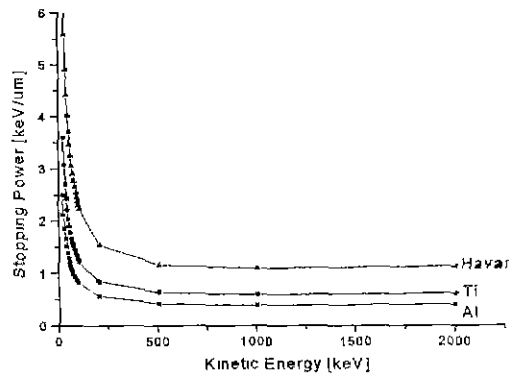


그림 3 가속 전압에 따른 각 물질에서 전자의 Stopping Power
Fig. 3 Stopping Power in each material versus Kinetic Energy

2.3 냉각장치

전자빔이 윈도우를 통과하는 동안 전자빔과 포일 물질간의 상호작용에 의해 발생하는 열을 빨리 냉각시켜 포일에서 전자빔의 에너지 손실을 최소화하고 power dissipation을 사키기 위해 공냉식을 사용하였다.



그림 4 설계 제작된 전자빔 윈도우의 외관
Fig. 4 Appearance of the window designed and manufactured

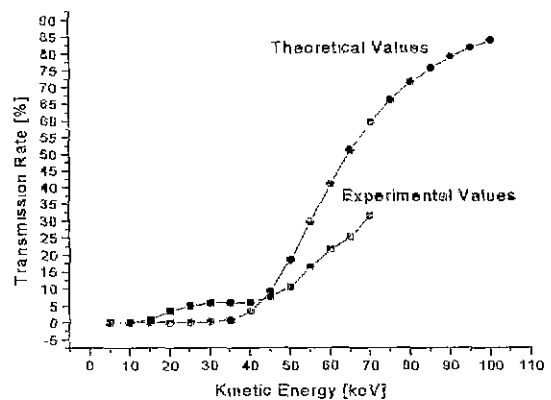


그림 5 Havar 포일에서 가속전압에 따른 전자 투과율
Fig. 5 Transmission rate of electron through havar foil versus Kinetic energy

4. 결 론

대기중에서 전자빔을 이용하여 방향성 규소강판의 자구정렬을 위한 소형 전자빔 조사장치를 설계, 제작하였으며 윈도우로써 Havar 포일을 사용할 수 있다는 것을 보였다. 제작된 소형 전자빔 조사장치의 기본 변수는 표 2와 같다.

표 2 제작된 소형 전자빔 조사장치의 기본 변수
Table 2 Basic parameters of the miniature electron beam irradiation apparatus manufactured

전 자 의 에 너 지	~80 keV
전 류	≤2 mA
조사 유효 단면적	20 × 20 mm ²
조사창의 재 질	Havar 포일
조사창의 두께	4 μm
냉 각 방 식	공냉식

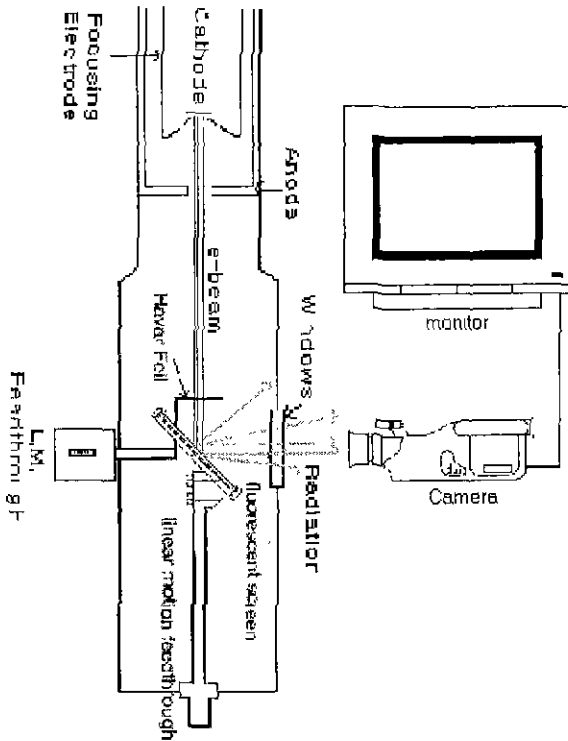


그림 6(a) Havar 포일에서 전자빔 투과 관측 실험
Fig. 6(a) Setup for observing the transmission of electron through havar foil



그림 7(b) CC Camera에 관측된 전자빔의 Havar 포일 투과
Fig. 7(b) The transmission of electron monitored on CC camera

이론상으로 70kV의 가속전압에 Havar 포일에서 전자빔 투과율은 61%인데 반하여 본 실험 결과는 이론치보다 약 2배정도 적은 33%정도였다. 이것은 진공내에서 Havar 포일을 지탱하기 위해서 사용되었던 프레임에도 전자빔이 입사되어 예기치 못한 손실이 발생하였으므로 프레임 구조를 개선하면 이론치에 근사한 전자빔 투과율을 얻을 수 있을 것이다.

전자빔 처리에 대한 주 매개변수는 빔 전력이 아닌 에너지밀도가 재료의 처리정도에 결정적인 요인인데 결정립이 큰 배향성 규소강판의 표면에 전자빔을 조사하여 표면 또는 코팅에 손상을 발생시키지 않고 자구정렬의 효과를 얻을 수 있는 적절한 에너지 밀도의 상한을 얻을 수 있을 거라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 김영학 외 Journal of The Korean Magnetics Society, Vol 6, Number 3, June 1996
- [2] K. I. Arai, H. Mogi and K. Ishiyama : JEEF Trans. Magn.,26, 1966(1990)
- [3] B. Verbrugge and D. C. Jiles J. Appl. Phys Vol 85. 14 April 1999
- [4] Salsgiver et al U.S. Patent Number 4,919,733 Apr, 1990
- [5] S. Sciller, U. Heisig, S. Panzer, Electron Beam Technology, A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, 1982
- [6] E. J. Kobetich and Robert Katz Phys. Rev. 170 391(1968)