

전기기기 코아용 전기강판 소재의 자기적 특성

하경호, 차상운, 김재관  
포스코 기술연구소 전기강판연구그룹

Magnetic Properties of Electrical Steel Material for Electric Machines Core

Electrical Steel Group, Technical Laboratory, POSCO

**Abstract** - The high efficiency for motors has been continuously required for energy saving. The iron losses occurring in motor cores account for high percentage in the energy losses of motors, so that electrical steels with lower iron losses have been desired as core materials. It is necessary to understand the basic characteristic of the electrical steel to design motors and establish manufacturing process for the loss reduction. Therefore, this paper deal with the basic characteristic related with the magnetic properties of electrical steels and describes the cause of core loss in electrical machines.

1. 서 론

산업 시스템이 다양해지고 에너지 절감 요구가 높아짐에 따라 이들 각종 전기기기는 고효율, 고성능 및 고속화되어 가는 추세이다. 그러나, 전기기기의 소형경량, 고속, 고효율화에 의해서 발생하는 발열과 손실은 효율 저하뿐만 아니라 설계 자유도 저해 요소로 작용함에 따라 고효율 소재의 필요성이 더욱 부각되고 있는 실정이다 [1]. 또한, 이러한 요구특성을 만족하는 전기기기를 설계하기 위해서는 효율적인 자기회로 구성과 더불어 구동특성과 사용환경을 고려한 적합한 자성재료의 선택, 그리고 제조공정에서 소재의 자성열화를 최소화할 수 있는 요소기술이 필요하다 [2]. 전기강판은 전동기, 변압기와 같은 에너지변환기에서 중요한 기능 재료로써, 전기강판이 최적의 상태에서 효율적으로 사용되기 위해서는 전기강판에 관한 제반 특성과 이해가 필요하다. 그러나, 국내 전기기기 제조업체 및 설계자들은 이들 소재에 관한 제반 정보의 이해와 소재와 연계한 제품 적용 요소기술이 부족한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 전기강판이 가지는 일반적인 전자기 특성, 즉 전기강판 각종별 자기이력곡선과 철손 특성, 자기 이방성의 자성차이등에 대하여 기술하였다. 또한, 제조 공정과 에너지 변환과정에서 발생하는 철손 증가요인을 기술하고 가공에 따른 자성의 열화 경향을 설명하였다.

2. 본 론

2.1 전기강판의 분류

전기강판은 크게 방향성전기강판(Grain Oriented)과 무방향성전기강판(Non Oriented)으로 분류할 수 있다. 방향성 전기강판은 철에 Si 3~3.3[%]을 첨가하여 결정방향을 압연방향으로 일정하게 배열시킴으로써 압연방향으로 우수한 자기적 특성을 가지도록 한 제품이며, 변압기나 리액터와 같은 정지기에 사용된다. 한편, 무방향성 전기강판은 결정방향이 모든 방향으로 고르게 분포 되어 자성이 균일하도록 만든 제품으로 회전에 주로 적용된다. 그림 1은 무방향성 전기강판의 종류와 제조 공정의 차이를 나타낸 것이다. 여기서, Semi재는 조절압연을 실시하여 생산되는 제품(Si:

0.4% 이상)으로서 사용자가 열처리를 통해 철손 및 자속밀도를 향상시킨다. CRML(Cold Rolled Motor Lamination)재는 조절압연 후 절연 코팅을 하지 않고 생산 되는 제품(Si: 0.6%)으로서 사용자가 열처리시 발생하는 표면 산화막이 절연 효과를 나타낸다.

철손은 전기강판의 특성을 나타내는 가장 중요한 척도로서 철심의 자화 과정에서 발생하는 에너지 손실로 이력손실(Hysteresis loss)과 와전류손실(Eddy current loss)로 구성된다. 전자는 결정방위, 강판의 순도, 내부 응력 등에 의해 좌우되고, 후자는 전기비저항, 판의 두께, 판의 장력, 자구의 크기등에 좌우된다. 한편, 와전류손실에는 자구의 형상에 따른 이상와전류손실(Anomalous loss)이 최근 자구이론이나 자구관찰의 발전으로 밝혀지고 있다. 특히, 방향성 전기강판에서는 전체 철손의 50[%] 정도를 차지하고 있다. 철손의 각 항목은 수식 (1)과 같이 표현할 수 있으며, 주파수 사이클당 철손을 그림 4에 나타내었다 [6,7].

$$W = W_h + W_e + W_a = k_h B^m f + k_e B^2 f^2 + k_a B^{1.5} f^{1.5} \quad (1)$$

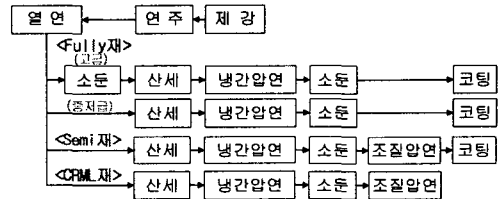


그림 1. 무방향성 전기강판의 종류와 제조공정

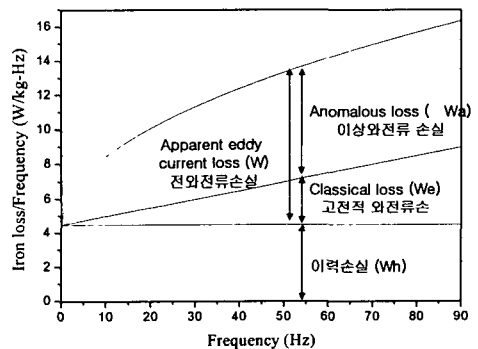


그림 1. 철손의 구성과 주파수 한 주기당 손실

2.2 자성과 기계적 특성

전기강판의 성분에서 Si와 Al은 비저항을 증가시킴으로써 철손을 감소시키는 역할을 하며, Si의 함유량이 증가할수록 철손은 감소하게 되며 철손이 낮을수록 고급제품으로 분류하고 있으나, 그림 2과 같이 철손이 낮아지면 자속밀도가 낮아지는 문제점이 있다. 또한 Si의 증가는 기계적 강도를 증가시켜 타발을 어렵게 한다. 따라서, 자기회로의 포화상태, 손실분포, 구동특성, 가공성을 고려한 자성재료의 선택이 중요하며, 최근에는 모터의 특성에 맞

는 다양한 용도의 저철손고자속, 박형, 고토코 및 고가공 등의 성능을 가지는 다양한 특성을 가지는 전기강판이 개발되고 있다 [3-5].

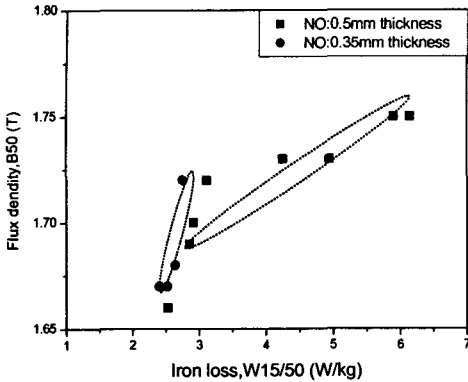


그림 2. 자속밀도와 철손과의 관계(무방향성 전기강판)

### 2.3 자왜

자왜(Magnetostriction)란 외부인가자계시 자성체의 외형이 변화하는 현상으로 전기기기에서 전기적 소음의 원인이 된다. 그림 3에서 철심 내부의 자속밀도가 높을수록 자성체의 변형이 증가하며, 압연방향(R)보다 압연직각방향(C)에서 자왜가 크게 발생한다.

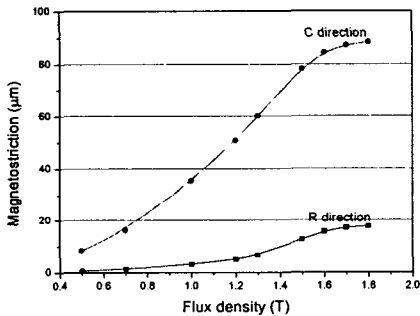


그림 3. 자속밀도에 따른 압연방향과 압연직각 방향에서 자왜

### 2.4 R방향과 C방향의 자성차이

무방향성 전기강판은 이상적으로 모든 방향으로 자성이 균일한 등방성 재질이 좋으나 실제로는 자성편차를 가진다. 그림 4과 같이 압연방향(R)은 압연직각 방향(C)보다 자속밀도가 높고 철손은 낮다. 그림 5는 전기강판의 등급별 R/C 자성차이를 비교한 것으로 고급강종일수록 철손과 자속밀도의 자성차이가 더욱 커진다. 그림 6은 압연방향을 기준으로 각도 변경에 따른 각 위치에서 철손의 변화를 측정된 것으로, 철손은 위치의 함수로 비선형적 특성을 가지고 있으며 28°에서 철손이 가장 크다. 압연방향(90°)과 압연직각방향(0°)에서 두 철손의 평균은 2.98[W/kg]이며, 0~90°사이의 평균 철손 3.13[W/kg]와는 큰 차이를 가진다. 전기강판 제조사에서 제시하는 자성치는 R과 C방향의 평균 철손으로 Epstein방법으로 측정된 것이다. 따라서, 전기기기의 신뢰성 있는 성능을 예측을 위해서는 R/C 자성차이의 반영이 필요하다.

### 2.5 가공에 의한 자성특성 변화

전기강판에서 전단이나 굽힘등에 의한 소성변형은 자성을 열화시킨다. 그림 7에서 전단에 의한 변형량 증가로 철손이 크게 열화되고 열화율은 전단방향에 따라 다른데 고급강종 일수록 자성의 열화가 더 심하다. 전기강판 전단으로 열화된 자성은 응력제거 열처리(Stress Relief Annealing)를 통하여 그림 8과 같이 자성을 향상시킬 수 있으며, 특히 고주파에서 자성 향상이 크다. 그림 9에

서 탄성범위내의 응력이 부가시 자성특성이 변화하는데 인장응력에 의하여 압연방향은 철손이 감소하지만 압연직각방향은 철손이 증가한다. 그림 10에서 인장응력에 의해서 투자율은 증가하지만 압축응력에 의해서 투자율은 감소하게 된다.

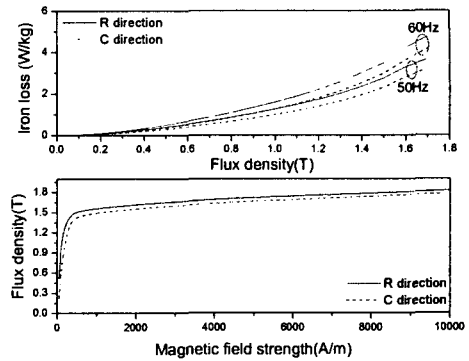


그림 4. 자기이력곡선과 철손의 R/C 자성편차

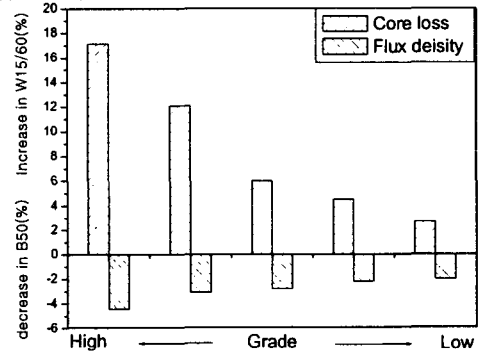


그림 5. 강종별 R/C 자성차이

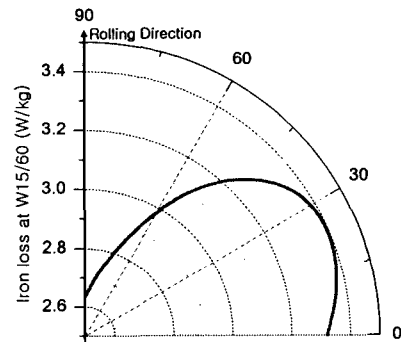


그림 6. 전기강판 위치별 철손의 변화

### 2.6 철손의 증가 요인

전기강판 소재에서 철손이 증가하는 원인은 철심 제조공정과 에너지 변환 과정에서 코어 내부의 자계분포에 의한 손실로 크게 분류할 수 있다. 그림 11은 전동기의 제조공정으로 강판 절단, 타발, 용접, 조립등의 과정을 거치는 중에 내부 응력의 증가로 자성이 나빠진다. 그림 12는 전기기기에 전원 투입으로 운전중 코어 내부에서 손실이 증가하는 원인을 그림으로 나타낸 것으로, 입력 전원에 고조파 함유(time harmonic), 고정자와 회전자에 기인한 자계 중첩(flux superposition), 코어 내부 자계의 변화(Flux distribution), 회전자계의 의한 손실 증가(Rotational flux), 적층시 절연 파괴에 의한 층간 단락(Short circuit), 발열에 의한 자성특성

저하(Temperature), 볼팅 또는 하우징 결합에 의한 응력 증가(Stress/Strain), 치 슬롯 구조에 의한 고조파 발생(Space harmonic) 으로 분류할 수 있다.

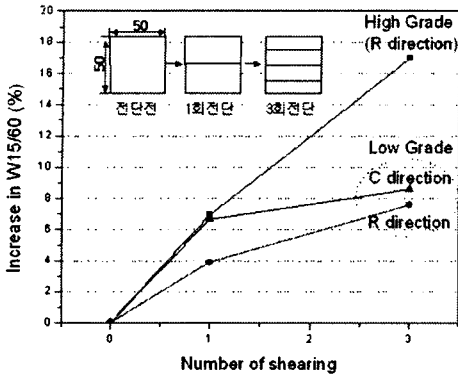


그림 7. 전단횟수에 따른 철손의 변화

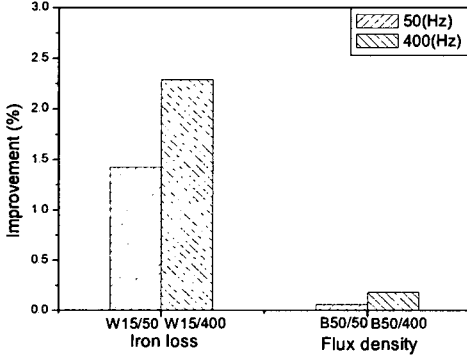


그림 8. 전기강판 위치별 철손의 변화

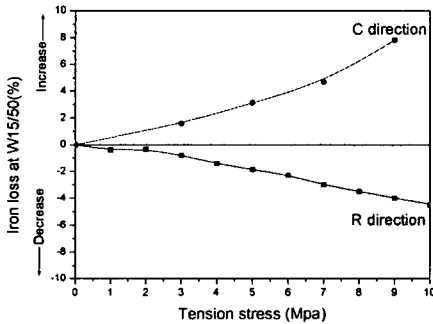


그림 9. 인장응력이 철손에 미치는 영향

### 3. 결 론

본 고에서는 전기강판의 일반 특성을 기술하였으며 제조공정과 전자기 현상에 의해서 발생하는 손실 증가 요인을 분석하였다. 우수한 성능의 전자기 시스템을 개발하기 위해서는 전자기 현상을 기초로한 자기회로 설계와 같은 전기적 요소기술뿐만 아니라 자성재료와 관련된 요소기술 또한 중요하다. 전자기기에서 전기강판 소재는 자기에너지 전달 경로로써 중요한 역할을 담당하지만, 손실, 발열, 진동 소음 등의 부정적 부산물을 동반하기도 한다. 또한, 전기강판의 기계적 특성은 제조 과정에서 타발, 격충, 용접등의 가공성이나 사용환경에 영향을 준다. 따라서, 본 내용은 전자기기 설계, 전기강판 소재의 선택 및 이용에 많은 도움이 될 것으로 사료된다. 국내는 소재에 관한 연구와 전자기기의 제조 및 설계에

관한 연구가 이원화되어 진행되고 왔다. 따라서, 자성재료 분야와 이를 이용하는 응용기기 분야의 상호 협력으로 자성특성에서부터 가공에 이르기까지 성능을 만족하는 고기능 고성능의 제품 개발이 필요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J. P. Hong, et al., "A Study on Iron Loss Analysis Method Considering the Harmonics of the Flux Density Waveform Using Iron Loss Curves Tested on Epstein Samples", *IEEE Magn.*, Vol. 39, No. 3, May 2003.
- [2] A. Honda et al., "Efficiency of Model Induction Motor Using Various Non-Oriented Electrical Steels", *Journal of Material Science Technology*, Vol. 16, No. 2, pp.238-248, 2000.
- [3] M. Kohno, K. Senda, Y. Hayakawa, "Electrical Steels Having Excellent Punchability for Compact and High-Functional Automotive Electrical Components", *川崎製鐵技報*, Vol. 35, pp.1-6, 2003.
- [4] K. sadahiro, M. Ishida, A. Honda, "Material Properties and Applications of High-Frequency Thin Electrical Steel Sheets "HiFreq s" with Superior Magnetic Properties and Workability", *川崎製鐵技報*, Vol. 35, pp.7-10, 2003.
- [5] M. Yabumoto, C. Kaido, T. Wakisaka and T. Kubota, "Electrical Steel Sheet for Traction Motor of Hybrid/Electric Vehicles", *新日鐵技報*, Vol. 378, pp. 51-54, 2003.
- [6] B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, 1972. 7. わかる電氣鋼板, *新日本製鐵, 電氣鋼板技術部編*
- [7] Y. Chen and P. Pillay, "An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux density Excitation", *IEEE 37th IAS Annual Meeting*, Vol. 2, pp.759-766, 2002.

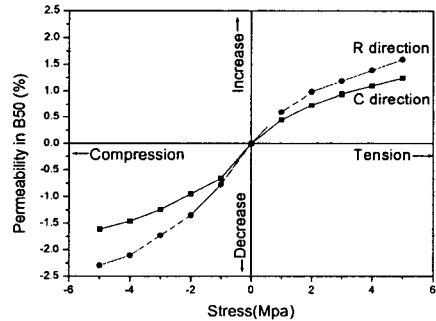


그림 10. 인장 압축응력이 투자율에 미치는 영향

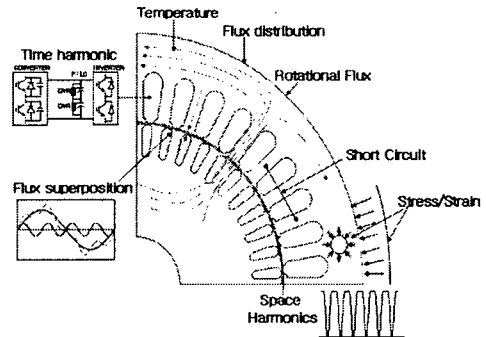


그림 12. 코어 내부에서 손실 발생 원인