

고자속밀도와 저손실 특성을 갖는 중주파수대 철심재료 개발 및 응용

논문

58P-2-16

Development of Core Material with High Magnetic Induction and Low Iron Loss for Middle-Frequency Applications

조성수* · 한상옥†
(Seong-Soo Cho · Sang-Ok Han)

Abstract – Thin-gauged 3% silicon steel sheets having a highly grain-oriented texture have been developed as a core material for applications of middle-frequency (400 Hz ~ 10 kHz) devices. The newly developed sheets with a tension coating showed an excellent reduction in iron loss at 400 Hz (iron loss at 1.0 T and 400 Hz = 4.677 W/kg, iron loss at 1.5 T and 400 Hz = 9.742 W/kg) due to high magnetic induction, B_{10} (measured induction at 1000 A/m), of over 1.9 T. In cases of frequencies below 400 Hz, magnetic induction, B_{10} , of the sample plays a major role to reduce its iron loss as excitation induction increases, whereas, in case of frequency of 1 kHz, thickness dependence becomes dominant due to a lower iron loss at relatively thinner sample. The sheets with a high magnetic induction, therefore, are favorable for high excitation induction (over 1.0 T) and low excitation frequency (below 400 Hz) applications, whereas the sheets that can reduce eddy current loss by reducing thickness or domain wall width are advantageous for low excitation induction (below 1.0 T) and high excitation frequency (around 1 kHz) applications.

Key Words : Core Materials, Thin-Gauged 3% Silicon Steel Sheets, Tension Coating, Iron Loss

1. 서 론

전력기기에 사용되는 전기강판은 방향성 전기강판과 무방향성 전기강판으로 나뉜다. 방향성 전기강판은 주로 변압기용 철심재료로 사용되고 무방향성 전기강판은 전기모터 등 회전기기에 사용된다. 방향성 전기강판(grain-oriented silicon steel)은 1934년 미국의 N. P. Goss가 [1] 냉간압연법을 이용하여 결정립들의 자화용이축인 <001>방향을 압연방향에 일치시킴으로써 자기유도 B_{10} ($H = 1000$ A/m)의 값을 획기적으로 높였으며 지금까지도 생산공정에서는 동일한 방법을 사용하고 있다. 하지만, 이 방법이 결정립의 <001>방향성을 결정하게 되는 근본이유에 대해서는 여러 이론이 발표되고 있으나 아직 정확히 규명되지는 않고 있다[2-4].

방향성 규소강판의 철손을 감소시키려는 연구는 주로 2가지 방향으로 시도되어 왔다. 첫째가 금속학적으로 결정립의 방향성을 유지하면서 강판의 두께감소[5, 6], 실리콘 함량의 증가[7], 결정립 크기의 최적화[8] 등의 기법으로 철손을 감소시켰다. 둘째는 강판면에 물리적인 장력을 부여함으로써 자구 미세화(magnetic domain refinement)를 통해 철손을 감소시키려는 기법으로 forsterite 베이스 코팅[9] 및 장력코팅[10], 레이저 스크래치(laser scratch)[11], 플라즈마 제트 조사(plasma jet irradiation)[12] 등의 방법이 사용되었다.

이 중에서 강판의 두께감소에 의해 철손을 줄이고자 하는 분야가 극박 규소강판 개발 분야이며 1990년대에는 일본에서 [13], 2000년대에는 국내 한전 전력연구원에서 주로 연구되었다[14]. 방향성 극박 규소강판은 페라이트나 아몰퍼스 철심재료에 비해 포화 자속밀도가 높기 때문에 중주파수대 (400 Hz~10 kHz)에서 이를 철심재료보다 코어의 크기를 작게 할 수 있는 장점이 있어 400 Hz 이상의 주파수를 사용하는 항공기용이나 잠수함용 변압기 철심재료로 적합하다.

본 논문에서는 아직 국내에서는 생산되지 않고 수입에만 의존하고 있는 중주파수대 철심재료인 극박 방향성 3% 규소강판의 개발결과를 주파수별 철손특성에 중점을 두어 검토하였다. 샘플의 B_{10} 과 철손과의 상관성을 살펴보기 위해 전체 철손을 히스테리시스 손실과 광의의 와전류 손실로 분리하여 분석하였다. 또한 철손감소 효과를 극대화시키기 위해 적용한 장력코팅의 철손개선 효과를 평가하고 최종적으로 응용 주파수 대역별로 철심재료가 가져야할 자기적 특성을 제시하였다.

2. 실험 및 고찰

2.1 실험방법

극박 규소강판 제조를 위해 사용한 모재료는 포스코에서 생산되고 있는 상용 방향성 규소강판(30PH139)이다. 상용 규소강판의 코팅층은 forsterite 코팅층과 장력코팅층으로 구성되어 있으며 냉간압연을 위해 기계적인 방법으로 이들 코팅층을 제거하였다. 0.28 mm 두께의 규소강판은 중간소둔 과정 없이 70 및 80 μm 두께로 냉간압연 하였다. 냉간압연된 시편은 승온속도 50°C/h로 1200 °C까지 가열한 후, 1200 °C

* 교신저자, 시니어회원 : 충남대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail: sohan@cnu.ac.kr

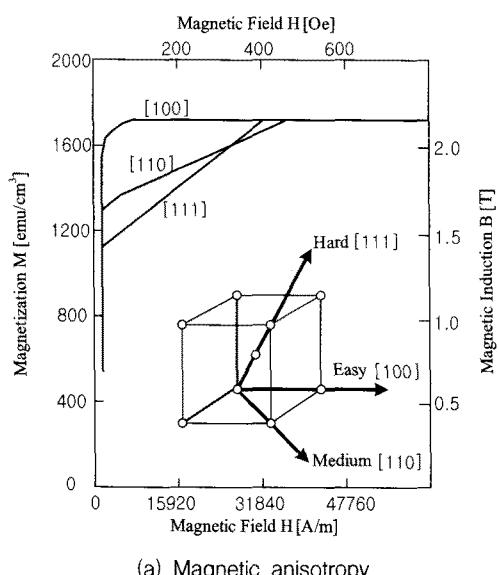
† 정회원 : 한전 전력연구원 선임연구원
접수일자 : 2009년 3월 10일
최종완료 : 2009년 3월 31일

에서 24시간동안 비산화성 분위기에서 열처리 하였다. 고온에서 샘플 간에 서로 달라붙는 것을 방지하기 위하여 열처리 전에 수용성 SiO_2 슬러리를 냉간압연판 표면에 도포하였다. 최종 열처리된 시편은 인산염계통의 무기질 코팅액을 사용하여 800 °C에서 수초간 경화시킴으로써 장력코팅을 시행하였다. 장력코팅 전후에 70 mm × 100 mm 또는 10 mm × 100 mm 크기의 샘플을 취하여 교류 철손특성 및 직류 자기적 특성을 측정하였다. 이러한 교류 및 직류 자기적 특성은 독일 Brockhaus 사의 MPG 100D 및 단판측정기를 이용하여 측정하였다.

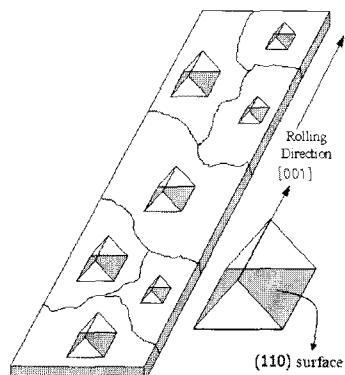
2.2 자기유도 B_{10} 과 철손과의 상관성

3% 규소강판에서 자기유도 B_{10} (외부자계 1000 A/m에서 측정된 샘플의 자기유도 값)의 이론치는 2.03 T이며 이 값에 근접할수록 자성특성이 우수하게 나타난다. 현재 고품질의 전기강판은 B_{10} 이 1.9 T 이상이며 기술적으로 포화상태에 이르러 더 이상 B_{10} 값의 개선은 없을 것으로 예상하고 있다.

일반적으로 방향성 규소강판에서는 $\langle 110 \rangle <001\rangle$ 의 금속학적 방위를 갖는 집합조직이 이상적이며 이때 B_{10} 은 이론치에



(a) Magnetic anisotropy



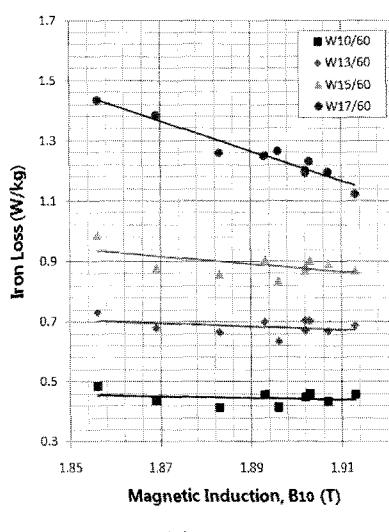
(b) $\langle 110 \rangle <001\rangle$ texture

그림 1 철 단결정의 자기 이방성과 Goss 집합조직

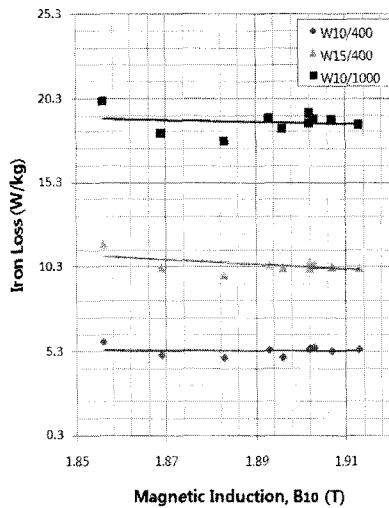
Fig. 1 Magnetic anisotropy(a) for single crystal of iron[15] and Goss texture(b)

가까운 값을 갖게 된다. $\langle 110 \rangle <001\rangle$ 집합조직이란 결정의 방위(orientation)를 밀려지수로 표현할 때 결정의 면이 $\langle 110 \rangle$ 이고 $<001\rangle$ 축의 방향이 압연방향과 동일한 결정립들을 말한다. 이러한 집합조직을 발명자의 이름을 붙여 Goss texture라고도 부른다. 즉, 규소강판과 같은 BCC 구조에서는 결정의 $<001\rangle$ 방향이 자화용이축(easy magnetization axis)을 이루며 이 자화용이축이 압연방향과 일치할 때 높은 자기유도 값을 갖게 된다(그림 1).

그림 2는 80 μm 두께 샘플을 50 °C/h의 송온속도로 1200 °C 까지 열처리하고 1200 °C에서 24시간을 유지한 뒤, 샘플표면에 장력코팅을 하고 철손과 자속밀도를 측정한 결과이다. 그림 2(a)의 W17/60(여자 자속밀도 1.7 T, 여자 주파수 60Hz에서 측정한 철손)에서 볼 수 있듯이, 샘플의 B_{10} 값이 높을수록 철손이 낮게 나타나는 것을 알 수 있으며 이러한 상관성은 재료 내의 자속밀도가 높을수록 뚜렷하게 나타나고 있다.



(a) 60Hz



(b) 400 Hz and 1 kHz

그림 2 자기유도 B_{10} 과 철손과의 상관성

Fig. 2 A dependence in magnetic induction, B_{10} , and iron loss

B_{10} 값이 높다는 것은 동일한 외부자계에 대해 쉽게 자화가 된다는 것을 의미하며 그 만큼 각 자구들의 자구 벽(magnetic domain wall) 이동이 쉽다는 것을 의미한다. 따라서 B_{10} 값이 높을수록 자화과정 중에 필요한 에너지가 적게 소요되기 때문에 철손이 낮게 나타난다. 또한 재료가 어느 정도 높은 자속밀도(약 1.5 T이상)를 유지해야 할 경우, B_{10} 값이 낮은 샘플은 B_{10} 값이 높은 샘플에 비해 단순한 180° 도메인의 자구벽 이동에 의한 자화로는 그 자속밀도를 유지하기가 상대적으로 부족할 것이다. 따라서 B_{10} 값이 낮은 샘플은 상대적으로 큰 에너지가 소요되는 회전자화(rotation magnetization)를 더 많이 필요로 하게 되므로 특히 유지하고자 하는 자속밀도가 높은 경우 B_{10} 에 대한 상관성은 더욱 높아지게 된다.

한편, 재료 내의 자속밀도를 1.0 T로 비교적 낮게 유지할 때 서로 다른 B_{10} 값을 갖는 샘플들은 B_{10} 값에 큰 영향을 받지 않고 유사한 수준의 철손 값을 보여주었다. 이것은 자속밀도가 낮은 영역에서는 자구 벽의 이동이 쉬운 자구들만 자화시키면 되므로 단순한 180° 도메인의 자구벽 이동에 의한 자화만으로도 충분하기 때문이다. 따라서 이때 자화에 필요한 에너지는 B_{10} 값에 크게 영향을 받지 않고 비슷한 수준의 철손특성을 보여주게 될 것이다. 1.0 T 정도의 낮은 자속밀도에서 철손이 B_{10} 값에 큰 영향을 받지 않는 경향은 그림 2 (b)에 보인 바와 같이 여자 주파수를 400 또는 1000 Hz로 상승시켜도 크게 변하지 않았다.

그림 3은 샘플 중에서 B_{10} 이 가장 높은 샘플과 B_{10} 이 가장 낮은 샘플을 선택하여 직류 히스테리시스 손실을 측정하여 보았다. 직류 히스테리시스 손실은 여자 자속밀도가 증가할수록 증가하는 경향을 보여주고 있으며 B_{10} 이 낮은 A1 샘플이 A2 샘플보다 1.5 T 이상에서 더 높은 증가율을 보여주고 있다. 이것은 앞서 설명한 자화과정의 차이로 설명될 수 있다. 이 두 샘플의 특성을 좀더 자세히 비교해 보기 위해 그림 4와 같이 여자 자속밀도 및 여자 주파수를 변화시켜 가며 측정한 철손을 와전류 손실과 히스테리시스 손실로 분리하여 관찰하였다.

그림 4의 (a)는 60 Hz에서 여자 자속밀도를 변화하여 인가하였을 때의 철손을 히스테리시스 손실과 와전류 손실로 분리하여 보여주고 있다. 여기에서 와전류 손실은 고전적인 와전류 손실(classical eddy current loss)과 자구의 거동과 관련된 이상손실(anomalous loss)을 포함하는 광의의 와전류

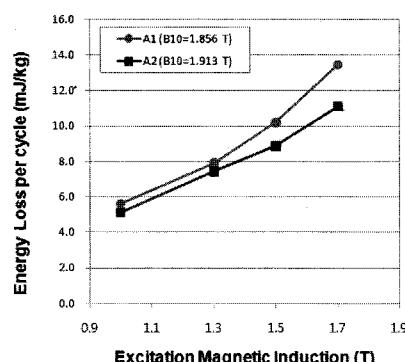
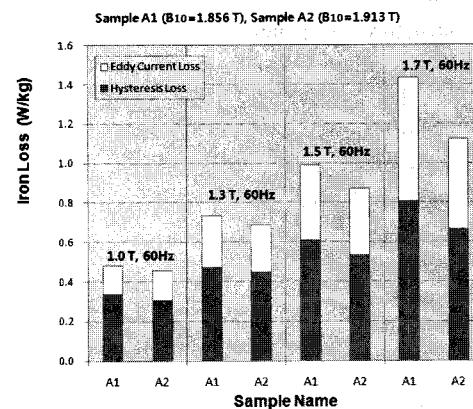
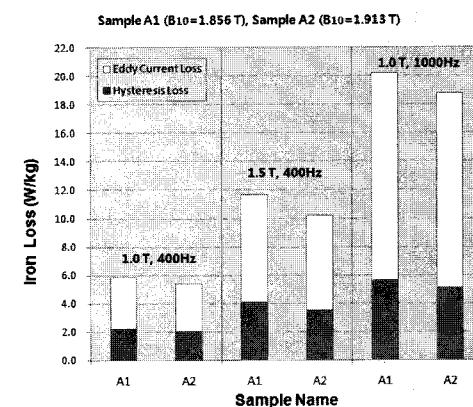


그림 3 직류 히스테리시스 손실

Fig. 3 DC hysteresis loss



(a) 60 Hz



(b) 400 Hz and 1 kHz

그림 4 히스테리시스 손실과 와전류 손실 비교
Fig. 4 Comparison of hysteresis and eddy-current loss

손실이다. 각각의 주파수에서의 히스테리시스 손실은 직류 히스테리시스 손실에 해당 주파수를 곱하여 산출하였으며 와전류 손실은 전체 철손과 히스테리시스 손실의 차이로 구하였다.

인가된 여자 자속밀도가 증가할수록 히스테리시스 손실과 와전류 손실이 함께 증가하는 경향을 보이고 있으며 전반적으로 히스테리시스 손실이 전체 철손에서 차지하는 비중이 줄어들고 있다. 즉 여자 자속밀도가 낮은 영역에서는 히스테리시스 손실이 전체 철손을 좌우하게 되며 자속밀도가 높은 영역에서는 약 60:40 비율로 히스테리시스 손실과 와전류 손실이 차지하고 있다. 전체구간에서 재료의 자기유도 B_{10} 이 높을수록 히스테리시스 손실과 와전류손실이 낮게 나타났으며 결과적으로 여자 자속밀도가 증가할수록 전체 손실이 B_{10} 에 반비례하는 상관성이 높게 나타났다.

한편, 여자 주파수를 400 Hz 또는 1 kHz로 증가시킨 경우의 철손변화를 그림 4 (b)에 나타내었다. 여자 주파수가 400 Hz 이상이 되자 전체 손실을 결정하는 것은 주로 와전류 손실임을 알 수 있으며 히스테리시스 손실의 차이는 크지 않았다. 즉, 400 Hz 이상의 주파수에서는 재료의 자기유도 B_{10} 보다는 와전류 손실에 영향을 주는 샘플의 두께, 결정립의 크기, 자구의 크기 등이 전체 손실에 더 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

2.3 장력코팅의 철손감소 효과

실험 샘플은 두께가 70 또는 80 μm 인 규소강판 냉연샘플을 고온 열처리과정을 마친 후, 각각의 B_{10} 과 철손을 측정하였다. 이 중에서 B_{10} 값이 유사한 샘플들을 골라 코팅 전, 후의 철손을 측정하였으며 그 결과를 표 1과 그림 5에 정리하였다. 장력코팅 실험은 바코터를 이용하여 수작업으로 샘플의 한쪽 표면에 코팅액을 입힌 후, 800 °C의 질소분위기에서 수초간 경화시킨 후, 다른 한쪽 표면을 코팅하였다.

표 1 장력코팅 전후 철손특성 측정결과

Table 1 Iron losses before and after coating

| 샘플 번호 | B_{10} ¹⁾ [T] | W10/60 ²⁾ [W/kg] | | W13/60 [W/kg] | | W15/60 [W/kg] | | W17/60 [W/kg] | |
|-------|----------------------------|-----------------------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
| | | 코팅 전 | 코팅 후 | 코팅 전 | 코팅 후 | 코팅 전 | 코팅 후 | 코팅 전 | 코팅 후 |
| #1 | 1.892 | 0.5265 | 0.3829 | 0.8138 | 0.6130 | 1.0464 | 0.8412 | 1.3953 | 1.2605 |
| #2 | 1.887 | 0.5277 | 0.3974 | 0.7917 | 0.6130 | 1.0166 | 0.8591 | 1.4092 | 1.3103 |
| #3 | 1.883 | 0.5478 | 0.3792 | 0.8275 | 0.6290 | 1.0517 | 0.8545 | 1.4134 | 1.3387 |
| #4 | 1.885 | 0.5217 | 0.3903 | 0.7844 | 0.6207 | 1.0170 | 0.8430 | 1.4151 | 1.2956 |
| #5 | 1.900 | 0.5857 | 0.4079 | 0.9075 | 0.6177 | 1.1378 | 0.8517 | 1.4219 | 1.2653 |

1) B_{10} : 외부 자계 $H=1000 \text{ A/m}$ 을 인가했을 때, 측정되는 자기유도 값으로 코팅 후 측정값 임.

2) W10/60: 자속밀도 1.0 T, 주파수 60Hz에서 측정한 철손을 의미함.

그림 5에서 볼 수 있듯이, 여자 자속밀도(excitation magnetic induction)가 낮을수록 장력코팅에 의한 철손감소 효과는 크게 나타났으며 자속밀도가 높아질수록 철손감소율은 낮아졌다. 이것은 자속밀도가 낮은 영역에서는 거의 관찰되지 않던 lancet과 같은 보조자구(supplementary domain structure)들이 재료 내의 자속밀도가 높아지면 재료 표면에 생성과 소멸을 반복하면서 와전류 손실을 발생시키기 때문이며[10], 이들의 존재를 효과적으로 없애려면 장력코팅보다 훨씬 큰 장력을 재료 표면에 인가해야 한다. 이러한 lancet 같은 보조자구들은 재료의 자화용이축이 압연면에 대해 수직방향으로 벗어나 있을 때 생성되는 자구로서 변압기 소음의 원인이 되는 철심재료의 자왜(magnetostriction) 특성을 결정짓는 요소로도 알려져 있다[16].

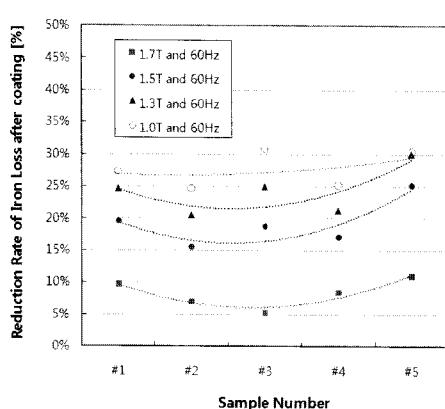
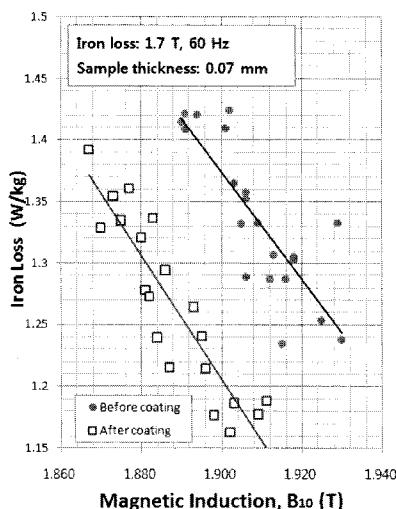


그림 5 장력코팅 후 철손감소 효과

Fig. 5 Effect of tension coating for reduction in iron loss

일반적인 방향성 규소강판에는 forsterite 베이스 코팅층과 안산염계의 무기질 코팅층이 함께 존재하는데, 이때 압연 방향으로 전기강판에 가해지는 장력의 크기는 전자가 약 5~7 MPa, 후자가 약 4~6 MPa로서 총 9~13 MPa 정도의 장력이 부여되는 것으로 알려져 있으며, 철손감소 효과는 1.7 T, 60 Hz 조건에서 약 10%내외인 것으로 보고되고 있다[10]. 한편 forsterite층은 철손을 증가시키는 요인으로 작용한다는 보고도 있다. 이러한 현상은 forsterite층이 금속간의 계면조도를 증가시키고 계면에 산화물 입자를 형성시킴으로써 자구 벽(domain wall) 이동시 pinning site로 작용하기 때문이다. 즉 자구의 운동이 방해를 받게 되어 결과적으로 철손의 증가를 야기하게 된다는 것이다. 따라서 MgO 대신 Al_2O_3 를 사용함으로써 상대적으로 평탄한 코팅계면을 얻었으며 철손개선의 효과도 얻을 수 있었다고 한다[17]. 이러한 검토 결과로부터 시편에 부여된 장력은 장력코팅층에 의한 효과뿐임을 알 수 있으며 그 크기를 약 5 MPa ($\approx 0.5 \text{ kg/mm}^2$)정도로 추정할 수 있다.

그림 6은 약 20개의 샘플에 대해 장력코팅에 의한 철손감소 효과를 보여주고 있다. 다양한 B_{10} 값을 갖는 샘플에 대해 약 10%정도의 철손개선 효과가 있음을 보여 주고 있다. forsterite층에 의한 장력부여 효과가 없음에도 2개의 코팅층에 의한 철손감소 효과와 큰 차이가 나지 않는 것은 철손에 나쁜 영향을 주는 forsterite층이 없기 때문으로 사료된다.

그림 6 장력코팅에 의한 철손감소 효과 및 자기유도 B_{10} 과 철손과의 상관성Fig. 6 Reduction in iron loss due to tension coating and relationship between magnetic induction B_{10} and iron loss at 1.7 T, 60 Hz.

2.4 중주파수대 철손특성과 응용분야

그림 7은 최종적으로 코일형태로 열처리한 후, 연속공정에 의한 장력코팅을 마친 70 및 80 μm 두께의 방향성 규소강판의 중주파수대 철손특성을 보여주고 있다(샘플 A와 샘플 B). 샘플 C1과 샘플 C2는 일본 Nippon Kinzoku 회사의 생산품인 두께 50 μm 인 GT50과 두께 100 μm 인 GT100을 의미하며 샘플 A와 샘플 B의 철손특성을 상용제품과 비교하기 위해 그림 7에 함께 나타내었다. 샘플 C1의 철손특성은 제조

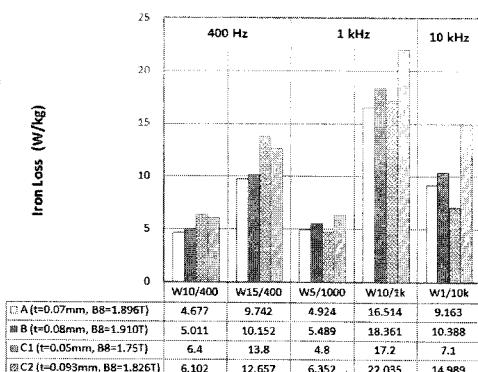


그림 7 극박 방향성 3% 규소강판의 중주파수대 철손특성 및 상업용 제품과의 특성 비교

Fig. 7 Comparison of iron losses at middle-range frequencies between newly developed thin grain-oriented 3% silicon steel sheets and commercially produced sheets.

회사의 데이터 책자에서 인용하였으며 샘플 C2의 철손특성은 본 실험에서 사용한 측정기로 실험샘플 A 및 B와 동일한 방법으로 측정하였다. 동일한 조건에서의 비교를 위해 B_{10} (외부자계 1000 A/m에서 샘플의 자기유도 값) 대신에 B_8 (외부자계 800 A/m에서 샘플의 자기유도 값, ≈ 10 Oe) 값을 사용하였다.

그래프에서 볼 수 있듯이, 1 kHz에서의 철손 값은 샘플의 B_8 에 관계없이 대체로 샘플두께에 반비례했다. 즉 $C1 \approx A < B < C2$ 의 순서로 두꺼울수록 철손이 크게 나타났다. 또한 10 kHz에서는 주파수가 높아짐에 따라 샘플두께 의존성이 더욱 확연하게 나타났다. 이것은 상대적으로 낮은 자속밀도(1.0 T이하)에서 주파수가 높아지면 철손은 샘플의 두께와 밀접한 관련이 있는 와전류 손실에 의해 결정되기 때문이다. 따라서 이 영역에서의 응용을 위한 철심재료는 재료의 자기유도 값을 높이기보다는 재료의 두께나 자구의 크기를 작게 하는 것이 훨씬 효과적이다. 만약 비교샘플의 두께와 결정립의 크기가 같다면 철손은 샘플의 자기유도 값에 반비례하게 되므로 자기유도 값이 높은 샘플일수록 철손은 낮아지게 된다.

반면, 400 Hz에서의 철손특성은 B_8 의 영향을 많이 받는 히스테리시스 손실과 샘플 두께의 영향을 많이 받는 와전류 손실이 복합적으로 영향을 주고 있으나, 대체로 $A \approx B < C2 < C1$ 의 순서로 B_8 이 클수록 철손이 작아지는 경향을 보여주고 있다. 즉 샘플 C1의 경우 두께가 가장 얇지만 가장 낮은 자기유도 특성 때문에 가장 열악한 철손특성을 보여주고 있다. 따라서 이 영역에서는 상대적으로 높은 자속밀도(1.0 T이상)가 요구되므로 철심재료 개발에 있어 자기유도 값이 높은 재료를 개발하는 것이 효과적이다. 본 연구에서 개발한 극박 규소강판은 상대적으로 높은 자기유도 값을 가지고 있기 때문에 특히 400 Hz 영역에서 기존 상용제품에 비해 우수한 철손특성을 보여 주었다.

3. 결 론

중주파수대 철심재료로 개발된 극박 방향성 3% 규소강판의 철손특성을 자기유도 B_{10} 과의 상관성, 여자 주파수 및 자속

밀도와의 상관성, 장력코팅의 철손감소 효과 등을 평가하고 최종적으로 상용제품과 중주파수대(400 Hz 및 1 kHz) 철손 특성을 비교하였다.

여자 주파수가 400 Hz 이하인 경우에는 여자 자속밀도가 증가할수록 철손의 자기유도(B_{10}) 의존성이 높게 나타났다. 즉, 자기유도 B_{10} 이 높은 샘플일수록 높은 여자 자속밀도에서 훨씬 낮은 철손특성을 보였다. 반면, 여자 주파수가 1 kHz로 증가하게 되면 철손의 샘플 두께 의존성이 두드러지게 나타났다. 이것은 주파수가 높아지면 전체 철손은 와전류 손실 특성에 의해 결정되기 때문이다. 따라서 자속밀도가 높고(1.0 T이상) 주파수가 낮은(400 Hz이하) 영역에서는 철심재료의 B_{10} 이 높은 것을 사용하여야 하며, 자속밀도가 낮고(1.0 T이하) 주파수가 높은 영역(1 kHz 내외)에서는 B_{10} 이 높은 재료보다는 두께나 자구의 크기를 줄인 철심재료를 사용하는 것이 훨씬 효과적이다. 한편, 극박 규소강판의 철손을 줄이기 위해 적용된 장력코팅은 약 10% 이상의 철손 감소 효과를 발휘했으며 코팅된 극박 규소강판은 특히 400 Hz에서 상용제품에 비해 우수한 철손특성을 보였다.

현재 극박 규소강판은 중주파수대의 의료장비용 X-ray 전원공급 변압기에 주로 적용되고 있다. 이외에도 변압기의 크기와 중량을 줄이기 위해 사용 주파수를 높여 사용하는 항공기, 잠수용 장비 등에 극박 규소강판이 적합하며 향후 전력전자 장비 등이 대용량화되어 갈수록 극박 규소강판의 용용분야는 늘어날 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] N. P. Goss, U.S. Patent 1965559, 1934
- [2] C. G. Dunn, "On the determination of preferred orientations", J. Appl. Phys., Vol. 30, No. 6, pp. 850-857, 1959.
- [3] K. Foster, J. J. Kramer and G. W. Wiener, "Growth rates of surface controlled secondary grains in 3 pct Si-Fe Sheets", Trans. AIME, vol. 227, pp.185-188, 1963.
- [4] N. H. Heo, K. H. Chai, J. G. Na, J. Kim, J. S. Woo, "Nucleation and development of Goss texture and magnetic induction in thin-gauged 3% Si-Fe alloy", J. Appl. Phys., Vol. 85, No. 8, pp. 6022-6024, 1999.
- [5] M. Nakano, K. Ishiyama and K. I. Arai, "Production of ultra thin grain oriented silicon steel sheets" IEEE Trans. Magn., Vol. 31, No. 6, pp. 3886-3888, 1995.
- [6] N. H. Heo, S. B. Kim, Y. S. Choi, S. S. Cho, K. H. Chai and S. O. Han, "Selective nucleation and growth in 3% silicon steel" IEEE Trans. Magn., Vol. 38, No. 5, pp. 3195-3197, 2002.
- [7] Hiroi Yamaguchi, Mineo Muraki, Michiro Komatsubara, "Application of CVD method on grain-oriented electrical steel", Surface & Coating Tech., 200, pp. 3351-3354, 2006.
- [8] T. Shimazu and M. Shiozaki, "Effect of grain size and frequency on eddy current loss in Si-Fe sheets", IEEE Trans. Magn., Vol. 26, No. 5, pp. 1972-1974, 1990.
- [9] W. G. Morris, J. W. Shilling, D. R. Fecich and P.

- Rao, "Effect of forsterite coatings on the domain structure of grain-oriented 3-percent Si-Fe", IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-14, No. 1, pp. 14-17, 1978.
- [10] S. D. Washko and E. G. Choby, "Evidence for the effectiveness of stress coatings in improving the magnetic properties of high permeability 3% Si-Fe" IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-15, No. 6, pp. 1586-1591, 1979.
- [11] M. Nakamura, K. Hirose, T. Iuchi, S. Yamaguchi and Y. Ohya, "Characteristics of laser irradiation grain oriented silicon steel", IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-18, No. 6, pp. 1508-1510, 1982.
- [12] K. Sato, A. Honda, K. Nakano, M. Ishida, B. Fukuda, and T. Kan, "Development of domain refined grain-oriented silicon steel by grooving", J. Appl. Phys., Vol. 73, No. 10, pp. 6609-6611, 1993.
- [13] M. Nakano, K. Ishiyama, K. I. Arai, "Production of ultra thin grain oriented silicon steel sheets", IEEE Trans. Magn., Vol. 31, No. 6, pp. 3886-3888, 1995.
- [14] K. H. Choi, N. H. Heo, S. S. Cho, J. G. Na, S. R. Lee, "Effect of flow rate of hydrogen on selective growth kinetics and magnetic induction in thin-gauged 3% Si-Fe strip", J. Appl. Phys., Vol. 91, No. 10, pp. 8192-8194, 2002.
- [15] K. Honda, S. Kaya, "On the magnetization of single crystals of iron", Sci. Reports Tohoku Univ., Vol. 15, pp. 721-753, 1926.
- [16] Y. Ushigami, M. Mizokami, M. Fujikura, T. Kubota, H. Fujii, K. Murakami, "Recent development of low-loss grain-oriented silicon steel," J. Magn. Magn. Mater. 254-255, pp. 307-314, 2003.
- [17] K. Foster and J. M. Jackson, "Effect of anneal coatings and surface condition on magnetic properties of grain oriented 3% Si-Fe", IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-16, No. 5, pp. 743-745, 1980

저자 소개



조 성 수 (趙 成 淚)

1968년 4월 7일 생. 1994년 건국대학교 전기공학과 졸업. 2000년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 송배전연구소 선임연구원

Tel : 042-865-5948

Fax : 042-865-5904

E-mail : onlycho@kepri.re.kr



한 상 옥 (韓 相 玉)

1946년 5월 12일 생. 1974년 충남대학교 공업교육과(전기) 졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5655

E-mail : sohan@cnu.ac.kr