

극박 방향성 규소강판과 상용 방향성 규소강판의 철손특성 비교

조성수*, 김상범*, 소준영*, 채우규*, 한상옥**
 한전 전력연구원*, 충남대학교**

Comparison of iron loss characteristics between thin-gauged grain-oriented 3% Si-Fe sheets and commercial 0.3 mm-thick grain-oriented electrical sheets

Seong-Soo Cho*, Sang-Beom Kim*, Joon-Young Soh*, Sang-Ok Han**
 Korea Electric Power Research Institute*, ChungNam National University**

Abstract - Thin-gauged 3% Si-Fe sheets having a high magnetic induction of over 1.9 T have been developed for the purpose of applications where operation frequency is higher than power frequency. In order to clarify requirements of iron loss characteristics for the applications, iron loss characteristics of the newly developed strip were investigated by iron loss separation method and were compared with those of commercially produced 0.3 mm-thick electrical sheets. In case of relatively high excitation induction(1.7 T) and low frequency(60 Hz), reducing hysteresis loss is effective to decrease total iron loss. In case of relatively low excitation induction(1.0 T) and high frequency(1 kHz), reducing eddy-current loss is effective by decreasing thickness and grain size to improve total iron loss.

(anomalous eddy current loss)을 포함하는 광의의 와전류 손실을 말한다. 각각의 주파수에서의 히스테리시스 손실은 직류 히스테리시스 손실에 해당 주파수를 곱하여 산출하였으며 와전류 손실은 전체 손실에서 히스테리시스 손실을 뺀으로써 구하였다.

<표 1> 시편 규격 및 자기적 특성

샘플 No.	B ₁₀ ¹⁾ [T]	두께 [μm]	결정립크기 [μm]	코팅유무
P300 ²⁾	1.908	288	~15,000 (15 mm)	Forsterite + Tension
KT01	1.913	90	<10,000 (over 10 mm)	No coating
KT02	1.918	80	~120	Tension

¹⁾ 외부자계 H = 1,000 A/m에서 측정된 자기유도 값
²⁾ 포스코에서 생산되는 제품, 30PH139

1. 서 론

규소강판이 변압기용 철심재료로 사용되고 N. P. Goss에 의해 방향성 규소강판 제조법이[1] 발명된 이래로 규소강판에 관련된 기술은 비약적인 발전을 거듭하면서 철손을 획기적으로 감소시켜 왔다. 한편 지구온난화와 관련하여 전력기기의 손실감소가 경제성뿐만 아니라 환경적인 측면에서도 그 중요성이 더욱 높아졌다. 또한 기기의 경량화 및 소형화를 위해 상용주파수보다 높은 주파수에 사용되는 응용분야가 점차 늘어나고 있는 추세이다. 특히 항공기나 무인잠수정 등은 400 내지 800 Hz의 주파수를 사용함으로써 기기 소형화 및 경량화에 노력하고 있다. 사용 주파수가 높아지면 현재 상용규소강판의 경우 와전류 손실이 과다하게 커지게 된다. 따라서 이러한 응용분야는 철심재료의 두께를 줄이는 것이 가장 큰 관심사이나 아직 국내에서 극박 방향성 규소강판을 생산하지는 못하고 있다. 일반적으로 전기강판의 두께가 0.1 mm 이하로 얇아지면 현재 상용 규소강판에 적용되고 있는 2차재결정 현상이 불안정하여 자성특성이 열악해지기 때문에 자성특성이 우수한 극박 전기강판 개발이 기술적 난제 중에 하나이기도 하다.

본 논문에서는 기존의 상용규소강판을 이용해 개발한 극박 규소강판의 철손특성을 현재 판매되고 있는 0.3 mm 두께의 상용규소강판과 비교하여 보았으며 사용조건에 따라 철심재료의 요구특성이 다름을 알 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 극박 규소강판 개발시 사용용도에 적합하도록 극박 규소강판의 철손특성을 최적화 할 수 있을 것이다.

2. 실험 및 고찰

2.1 실험방법

모든 시편은 10 mm × 100 mm의 크기로 자른 후, 800 °C의 질소분위기에서 1시간동안 응력제거 열처리를 시행하였다. P300 시편은 forsterite 베이스 코팅층과 장력코팅 처리가 되어 있으며 KT02는 장력코팅 처리만 하였으며 KT01은 장력코팅을 적용하지 않았다. KT01은 전해철에 3%의 규소와 70 ppm의 황을 포함하고 있으며 그 외의 불순물 영향을 배제하기 위해 고순도의 모재료를 진공유도로(vacuum induction furnace)에서 용해하였다. 열간압연 및 냉간압연을 거쳐 최종 두께 90 μm의 시편을 얻었으며 표면에너지 유기 선택적 결정성장법을 이용하여 [2, 3] 결정립의 크기가 10 μm를 넘도록 제어하였다. KT02는 P300을 모재료로 하여 forsterite 코팅층과 장력코팅층을 제거하고 80 μm 두께로 냉간압연 하였다. 1200 °C에서 최종 열처리된 시편은 인산염계통의 무기질 코팅액을 사용하여 800 °C에서 수 초간 경화시킴으로서 장력코팅을 시행하였다[4]. 각 시편의 규격 및 자기유도 값을 <표 1>에 나타내었다.

시편의 직류 및 교류 자기적 특성은 독일 Brockhaus 사의 MPG 100D 및 단판 철손측정기(single strip tester)를 사용하여 측정하였다. 측정된 철손은 히스테리시스 손실과 와전류 손실로 분리(loss separation)하여 분석하였다. 여기에서 와전류 손실은 고적적인 와전류 손실(classical eddy current loss)과 자구의 거동과 관련된 이상손실

2.2 실험결과 및 고찰

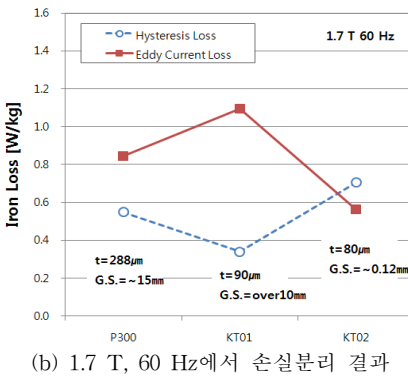
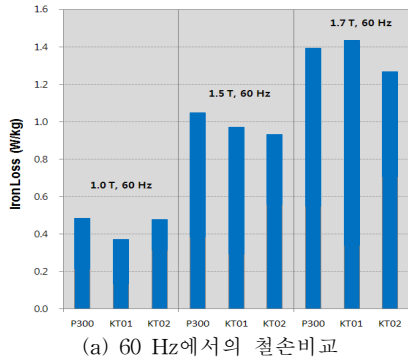
두께 0.1 mm이하의 극박 방향성 규소강판과 두께 0.3 mm의 상용 방향성 규소강판의 철손특성을 비교하기 위해 우선 여자 주파수를 60 Hz로 고정하고 여자 자속밀도를 1.0 T에서 1.7 T로 변화시켜가며 철손을 측정하였다. 다음으로 여자 자속밀도를 1.0 T로 고정하고 주파수를 400 Hz와 1 kHz로 변화시켜서 철손을 측정하였다.

<그림 1> (a)는 60 Hz에서 여자 자속밀도별로 측정된 철손이며 (b)는 1.7 T, 60 Hz 측정조건에서 총 손실을 히스테리시스 손실과 와전류 손실로 분리하여 나타내었다. P300과 KT01은 결정립의 크기가 비슷하지만 P300의 두께가 약 3배정도 두껍다. 여자 자속밀도가 1.5 T이하에서는 두께가 얇은 KT01의 철손이 작지만 여자 자속밀도가 1.7 T로 높아지면 오히려 KT01의 전체 철손이 다소 크게 나타났다. 1.7 T에서의 철손을 히스테리시스 손실과 와전류 손실로 분리해보면 KT01의 경우 히스테리시스 손실이 매우 작지만 와전류 손실이 제일 커서 결과적으로 전체손실이 가장 크게 나타났다. KT01의 히스테리시스 손실이 작은 이유는 전반적으로 결정립의 크기가 크고 불순물의 함량이 제일 작기 때문이다[5]. 반면 두께가 얇은 KT01이 결정립의 크기가 유사한 P300보다 와전류 손실이 큰 이유는 장력코팅층이 없기 때문이다. P300의 표면에 있는 forsterite 베이스 코팅층과 인산염계 무기질 코팅층이 함께 존재하는데, 이때 압연방향으로 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%내외의 정도로 알려져 있다[6]. 한편 forsterite 코팅층은 철손을 증가시키는 요인으로 작용한다고 보고되었다. 이것은 forsterite 코팅층이 급속한 계면조도를 증가시키고 계면에 산화물 입자를 형성시킴으로써 domain wall 이동시 pinning site로 작용하기 때문이다. 즉 자구의 운동이 방해받게 되어 결과적으로 철손의 증가를 초래한다는 것이다. 따라서 MgO 대신 Al₂O₃를 사용함으로써 상대적으로 평탄한 코팅계면을 얻어 철손을 개선한 실험결과가 보고되었다[7].

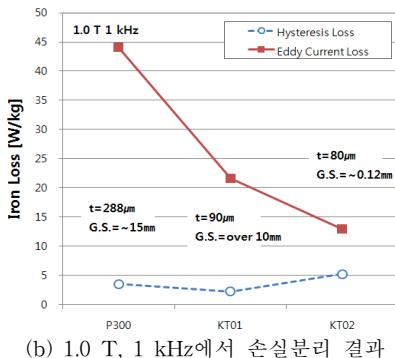
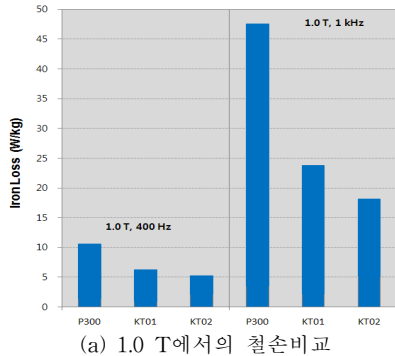
극박 규소강판의 결정립 크기를 획기적으로 줄이고 표면에 장력코팅을 인가한 KT02의 경우 1.7 T, 60 Hz에서 가장 낮은 철손을 얻을 수 있었다. KT02의 조성은 P300과 동일하므로 불순물의 함량이 상대적으로 높으며 결정립의 크기가 매우 작기 때문에 결정입계 에너지가 증가하여 히스테리시스 손실이 가장 높았다. 하지만 얇은 두께와 결정립 크기의 작용으로 인해 와전류 손실은 가장 작으므로 결과적으로 총 손실이 가장 낮았다. 그러나 여자 자속밀도가 1.0 T로 낮아지게 되면 히스테리시스 손실의 비중이 매우 높아지기 때문에 총 손실은 KT01보다 높아지게 된다.

<그림 2> (a)는 1.0 T의 여자 자속밀도에서 여자 주파수를 400 Hz 및 1 kHz 변화시켜가며 측정된 철손이며 (b)는 1.0 T, 1 kHz 측정조건에서 총 손실을 히스테리시스 손실과 와전류 손실로 분리한 결과이다. 이미 예상한 바와 같이 두께가 가장 두껍고 결정립의 크기가 큰 P300의

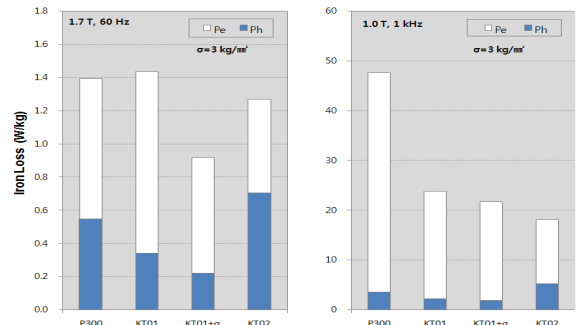
철손이 주파수가 높아지면서 철손이 가장 크게 나타났다. 또한 장력코팅 효과도 여자 자속밀도가 낮아지면서 그 영향력이 1.7 T인 경우보다 약화되었으며 전반적으로 총 손실에서 히스테리시스 손실이 차지하는 비중이 매우 작아졌다. 두께가 유사하고 결정립의 크기가 다른 KT01과 KT02를 비교하여 보면, KT02가 결정립의 크기가 작아 히스테리시스 손실이 다소 증가하지만 장력코팅 효과와 더불어 결정립의 크기가 작기 때문에 와전류 손실이 매우 작아짐을 알 수 있다. 여자 주파수가 높아지면 시편의 두께가 가장 큰 영향을 주었으며 더불어 결정립의 크기와 장력코팅 효과가 추가적으로 철손에 영향을 줄을 유추할 수 있다.



<그림 1> 1.0 ~ 1.7 T, 60 Hz 조건에서의 철손 분석결과



<그림 2> 1.0 T, 400 Hz 또는 1 kHz 조건에서의 철손분석 결과



<그림 3> KT01 시편에 장력인가시 철손특성 비교

<그림 3>은 표면에 코팅층이 없는 KT01 시편에 장력코팅층의 효과를 알아보기 위해 시편의 한쪽을 고정하고 다른 한쪽에 3 kg/mm²의 단방향 장력을 인가한 상태에서 측정한 철손결과이다. 철손감소 효과는 1.7 T, 60 Hz에서 가장 크게 나타났으며 히스테리시스 손실과 와전류손실 모두 감소했음을 알 수 있다. 특히 결정립의 크기가 커서 전체 손실에 차지하는 비중이 높은 와전류 손실이 크게 감소했음을 알 수 있다. 반면 1.0 T, 1 kHz에서는 장력을 인가하였음에도 KT01이 KT02보다 철손이 큼을 알 수 있는데 KT02는 장력코팅외에도 결정립 크기가 작기 때문이다. 따라서 비교시편 중에서 KT02가 히스테리시스 손실이 가장 큼에도 불구하고 와전류 손실이 가장 작기 때문에 총 손실이 가장 낮게 나타났다.

3. 결 론

상용주파수보다 높은 주파수에 대응하기 위해 개발된 극박 방향성 규소강판의 철손특성을 현재 시판되고 있는 상용규소강판의 철손특성과 비교함으로써 사용조건에 적합한 극박 규소강판의 요구 철손특성을 도출하였다.

사용주파수가 상대적으로 낮고 자속밀도가 높은 경우에는 총 손실이 히스테리시스 손실의 영향을 크게 받기 때문에 와전류 손실을 줄이는 것보다는 히스테리시스 손실을 최소화 하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 어느 정도 결정립의 크기를 크게 개발하는 것이 필요하다. 반면 사용주파수가 높아지게 되면 총 손실은 대부분 와전류 손실에 의해서 결정되기 때문에 히스테리시스 손실보다는 와전류 손실을 최소화해야 한다. 따라서 두께감소가 가장 효과적이며 다음으로 결정립의 크기를 적절하게 조절함으로써 사용주파수에 적합한 철손특성을 얻을 수 있다. 1 kHz 주파수에서의 철손특성을 살펴보면, 현재 시판되는 0.3 mm 두께의 상용 규소강판에서 철손이 매우 높아짐을 알 수 있었으며 상대적으로 개발된 극박 규소강판의 철손특성이 매우 우수함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] N. P. Goss, U.S. Patent 1965559, 1934.
- [2] N. H. Heo, K. H. Chai, and J. G. Na, "Correlation between interfacial segregation and surface-energy-induced-selective grain growth in 3% silicon-iron alloy", Acta Mater., vol. 48, pp. 2901-2910, 2000.
- [3] S. B. Kim and N. H. Heo, "Heating rate and anomalous final texture in 3% Si-Fe alloy strips", J. Appl. Phys., vol. 97, pp. 10F914-1~3, 2005.
- [4] 조성수, 한상욱, "고자속밀도와 저손실 특성을 갖는 중주파수대 철심 재료 개발 및 응용", 전기학회논문지, 58P권 2호, 2009년
- [5] 차상운, 우종수, "방향성 전기강판의 철손감소 방법", 대한금속학회보, vol. 6, No. 1, pp. 3-9, 1993.
- [6] 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.
- [7] 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.