

극박 방향성 전기강판에서 장력코팅에 의한 철손 감소효과 고찰

조성수¹, 김상범¹, 허남희¹, 소준영¹, 서판석², 한상옥³
¹한전 전력연구원 신소재그룹, ²키스타(주), ³충남대학교 전기공학과

Effect of tension coating on reducing iron losses of thin grain-oriented electrical steel sheets

S. S. Cho¹, S. B. Kim¹, N. H. Heo¹, J. Y. Soh¹, P. S. Seo², S. O. Han³
¹Korea Electric Power Research Institute, ²KISTAR, ³Chungnam National University

Abstract - Effect of tension coating on reducing iron losses of thin grain-oriented 3% Si-Fe steel sheets was investigated. Conventional grain-oriented electrical steel sheets have a forsterite coating layer and a tension coating layer in order to apply tensile stress to the rolling direction of the sheets. However the proposed coating method in this paper is to form only a tension coating layer on the both surfaces of the sheets. Iron losses with the tension coating were reduced by 8% under the condition of 1.7 T and 60 Hz. Consequently the proposed coating is applicable to 80 μ m-thick 3% Si-Fe steel sheets.

되는 무기질 코팅 액(C-10규격)과 유사한 조성의 코팅 액을 사용하였다. 코팅 액은 금속성분의 조성만을 조금씩 달리하여 5가지 유형으로 분류 하였으며 주성분에는 큰 차이가 없다. 철손 및 B₁₀은 독일 Brockhaus사의 MPG 100D와 Single strip tester를 이용하여 측정하였다. 철손 측정 조건은 주파수 60Hz와 자속밀도 1.0, 1.3, 1.5, 1.7 T 조건에서 각각 측정 하였다. 일반적으로 유사한 집합조직을 갖는 재료는 유사한 B₁₀ 값과 철손특성을 갖는다[6]. 따라서 본 실험에서는 동일한 냉간압연판에서 발췌한 샘플이므로 B₁₀이 유사한 것은 유사한 집합조직을 갖는다는 가정 하에 B₁₀이 유사한 샘플들만을 비교데이터로 사용하였다. B₁₀은 외부자계 H=1000 A/㎠일 때, 재료에 유도되는 자화의 세기(=자속밀도, 자기유도)이다.

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. Goss[1]가 냉간 압연법을 이용하여 결정립들의 자화용이축인 <001> 방향을 압연방향에 일치시킴으로써 자기유도 B₁₀의 값을 획기적으로 높였으며, 지금까지도 생산 공정에서는 동일한 방법을 사용하고 있지만, 이 방법이 결정립의 <001> 방향성을 결정하게 되는 근본이유에 대해서는 여러 이론이 발표되고 있으나 아직 정확히 규명되지는 않고 있다[2].

변압기에서 발생하는 철손을 줄이려는 최근의 노력은 주로 자구거동을 포함하는 개념의 와류손을 줄이는데 집중되고 있으며 그 방법으로 자구 미세화(magnetic domain refinement), 두께감소, 결정립 크기 제어 등의 연구가 진행되고 있다[3]. 이 중에서 두께감소에 의해 철손을 줄이고자 하는 분야가 극박 규소강판 개발 분야이며 국내에서는 한전 전력 연구원에서 2000년부터 관련연구를 진행하고 있다[4]. 상용 방향성 규소강판은 주로 2개의 코팅층으로 구성되어 있다. 첫 번째 코팅층은 MgO 분말을 강판표면에 도포한 후 열처리과정을 거치면 MgO가 표면의 SiO₂와 반응하여 형성되는 forsterite (Mg₂SiO₄)층이다. 이 층은 베이스 코팅층이라고도 불리며, 표면에 장력을 인가하는 동시에 고온 열처리시 분리제의 역할도 병행한다. 두 번째 코팅층은 이 베이스 코팅층 위에 추가적인 장력부여로 철손을 줄이고자 형성시키는 인산염계통의 무기질 코팅층이다. 일반적으로 고품질 방향성 규소강판은 C-10규격(ANSI의 C-5규격과 동일)을 따르게 되는데 코팅 두께는 2-4 μ m이고 절연성은 50-100 Ω -cm이다. 이러한 장력코팅은 180° 자구의 자구벽 간격(domain wall spacing)을 줄이고 재료가 자화되는 과정에서 발생하는 lancet 보조 자구구조를 제거함으로써 철손특성을 개선하는 것으로 보고되고 있다. 또한 변압기 제조시 자성물질에 악영향을 주는 압축력을 제거하는 데에도 장력코팅이 효과가 있다고 한다[5].

본 논문에서 다루게 될 극박 규소강판은 상용 규소강판과 달리 베이스 코팅층을 생략하고 장력코팅층만을 형성하는 공법을 시도하고 있으며 이러한 공법이 처음 시도되고 있는 점을 고려하여 본 논문에서는 전기절연성 보다는 장력코팅층의 철손감소 효과에 대해서 검토하였다.

2. 실험 및 고찰

2.1 실험방법

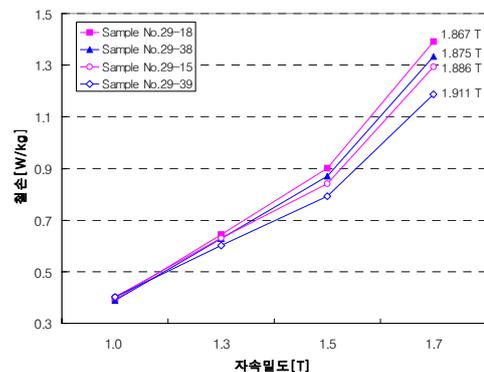
실험에 사용한 극박 규소강판의 크기는 가로 90 mm, 세로 270 mm, 두께 80 μ m의 판재로서 상용 규소강판(30PH139, POSCO)의 코팅층을 제거한 후, 냉간압연과 고온 열처리과정을 마친 후에 철손을 측정하였다. 철손 측정 전에 800°C 질소 분위기에서 2시간동안 응력제거 소둔을 시행하였다. 철손 측정을 마친 시편은 장력코팅효과를 측정하기 위해 바코터를 이용하여 한 면씩 코팅 액을 도포한 후, 응력제거 소둔분위기와 동일한 분위기에서 코팅 액을 건조시킴으로써 장력코팅 효과를 부여하였다. 실험에 사용된 장력코팅 액은 현재 상용 방향성 규소강판에 적용

2.2 실험결과 및 고찰

2.2.1 자기유도 B₁₀과 철손과의 관계

3% 규소강판에서 자기유도 B₁₀의 이론치는 2.03 T이며 이 값에 근접할수록 자성특성이 우수하게 나타난다. 현재 고품질의 전기강판은 이 값이 1.9 T 이상이며 기술적 포화상태에 이르러 더 이상의 B₁₀ 값의 개선은 없을 것으로 예상하고 있다. 한편, 이 B₁₀ 값은 그 재료의 집합조직에 따라 달라지므로 금속조직학적으로 유사한 집합조직을 갖는 샘플은 유사한 B₁₀ 값을 갖는다. 일반적으로 방향성 규소강판에서는 (110)<001>의 방위를 갖는 집합조직이 이상적인 경우이며, 이러한 집합조직을 Goss texture라고 부른다. 즉, 규소강판과 같은 BCC구조에서는 결정의 <001>방향이 자화용이축을 이루며, 이 자화용이축이 압연방향과 일치할 때 높은 B₁₀ 값을 갖게 되기 때문이다.

결국 재료의 자기적 특성은 재료의 집합조직과 밀접한 상관성이 있기 때문에 3% 극박 규소강판에서 장력코팅에 의한 자기적 특성만을 관찰하려면 집합조직이 같은 샘플을 선택해야만 한다. <그림 1>에서 볼 수 있듯이, B₁₀ 값이 높을수록 철손이 낮게 나타나는 것을 알 수 있으며 재료내의 자속밀도가 높아질수록 그 차이가 커짐을 알 수 있다. B₁₀ 값이 높으면 동일한 외부자계에 대해 쉽게 자화가 된다는 것을 의미하고 그만큼 자구의 이동이 쉽다는 것을 의미한다. 따라서 B₁₀ 값이 높을수록 자화과정 중에 필요한 에너지가 적게 소요되기 때문에 철손이 낮은 것으로 판단된다. 한편 재료내의 자속밀도를 1.0 T로 비교적 낮게 유지할 때 B₁₀ 값에 관계없이 철손은 비슷하게 측정되었다. 이것은 자속밀도가 낮은 영역에서는 이동하기 쉬운 자구들만 자화시키면 되므로 이때 필요한 에너지는 B₁₀ 값에 관계없이 유사할 것이고 결국 비슷한 철손 값을 갖게 되는 것이다. 반면 상대적으로 B₁₀ 값이 낮은 샘플은 B₁₀ 값이 높은 샘플에 비해 높은 외부자계에서만 이동할 수 있는 자구와 lancet 같은 보조자구들이 많을 것이므로 자속밀도가 높은 영역에서는 상대적으로 철손 값이 높아지는 것이다.



<그림 1> 자기유도 B₁₀과 철손과의 관계

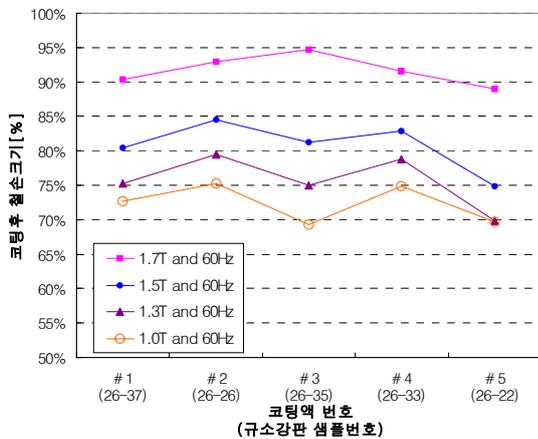
2.2.2 장력코팅에 의한 철손저감 효과

실험샘플은 두께가 80 μ m인 40개의 규소강판 냉연샘플을 고온 열처리 과정을 마친 후, 각각의 B₁₀과 철손을 측정하였다. 이 중에서 B₁₀ 값이 유사한 샘플들을 골라 코팅 전, 후의 철손을 측정하였으며 그 결과를 <표 1>과 <그림 2>에 정리하였다.

<표 1> 코팅액 조성별 철손특성 측정결과

코팅액 번호	B ₁₀ ¹⁾ [T]	W _{10/60} ²⁾ [W/kg]		W _{13/60} [W/kg]		W _{15/60} [W/kg]		W _{17/60} [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) B₁₀: 외부 자계 H=1000 A/m를 인가했을 때, 측정되는 유도자화 값으로 코팅 후 측정값임.
- 2) W_{10/60}: 자속밀도 1.0 T, 주파수 60Hz에서 측정된 철손을 의미함.



<그림 2> 코팅액 조성별 측정조건에 따른 철손저감 효과

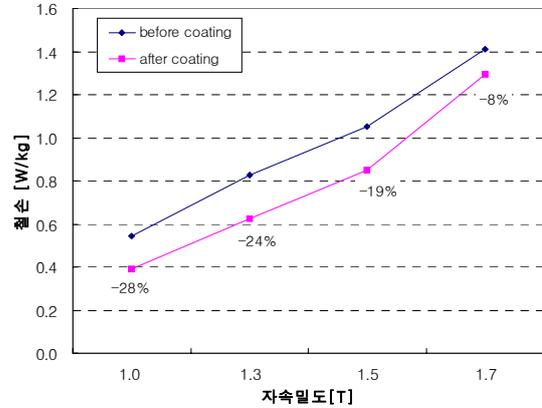
<표 1>에서 볼 수 있듯이, 자속밀도가 낮아질수록 장력코팅에 의한 철손감소 효과는 크게 나타났으며 자속밀도가 높아질수록 철손감소율은 작아졌다. 이것은 자속밀도가 낮은 영역에서는 큰 영향을 주지 않던 lancet과 같은 보조자구(supplementary domain structure)들이 자속밀도가 높아지면서 철손에 악영향을 주기 때문으로 생각된다.

일반적인 방향성 규소강판에는 forsterite 베이스 코팅층과 인산염계의 무기질 코팅층이 존재함을 앞서 설명하였는데, 이때 압연방향으로 전기장판에 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%내외 인 것으로 보고 되고 있다[5]. 한편 forsterite층은 철손을 증가시키는 요인으로 작용한다는 보고도 있다. 이러한 현상은 forsterite층이 급속간의 계면조도를 증가시키고 계면에 산화물 입자를 형성시킴으로써 자구벽(domain wall) 이동시 pinning site로 작용하기 때문이다. 즉 자구의 운동이 방해받게 되어 결과적으로 철손의 증가를 야기하게 된다는 것이다. 따라서 MgO 대신 Al₂O₃를 사용함으로써 상대적으로 평탄한 코팅계면을 얻었으며 철손감소의 효과도 얻을 수 있었다고 한다[7].

이러한 결과로 극박 규소강판에 부여된 장력은 장력코팅층에 의한 효과편임을 알 수 있으며 그 크기가 약 5 MPa정도로 추정할 수 있다. <그림 3>에서와 같이 5개 코팅액 조성의 평균 철손감소치를 보면 1.7 T 60 Hz 조건에서 약 8%의 철손개선 효과가 있음을 알 수 있다. forsterite층에 의한 장력부여 효과가 없음에도 2개의 코팅층에 의한 철손감소효과와 큰 차이가 나지 않는 것은 철손에 나쁜 영향을 주는 forsterite층이 없기 때문이다.

한편, 극박 규소강판 제조과정에서는 forsterite층이 없는 대신 고온 열처리분리제로 실리카(SiO₂)분말을 사용하고 있다. 열처리 공정이 완료되면 실리카 분말을 제거하고 장력코팅을 하고 있는데 실리카 분말이 제거된 극박 규소강판의 표면조도가 그다지 좋지 못한 문제점이 있다. 이것은 철손에 나쁜 영향을 줄 것이 확실하므로 표면조도를 개선시킬

수 있는 공법개발이 필요하다. 또한 현재 극박 규소강판에 사용하는 장력코팅층은 forsterite 코팅층과 조합되어 쓰이는 구성과 동일한 것을 사용하고 있으며 그 성능은 앞서 살펴본 정도의 철손감소 효과를 기대할 수 있었다. 하지만 forsterite층이 생략됨으로 인해 전기적 절연성은 상당히 미흡할 것으로 생각된다. 따라서 전기절연성을 보강할 수 있는 극박 규소강판 전용 장력코팅액을 개발해야 할 것이다.



<그림 3> 장력코팅의 철손 저감효과(5개 샘플 평균치)

3. 결 론

두께 80 μ m의 극박 규소강판의 철손성능 개선을 위해 현재 상용제품에 사용하는 장력코팅액과 유사한 조성의 코팅액을 극박 규소강판에 적용해 보고 철손감소 효과를 평가하여 보았다. 특히 이번에 시도된 코팅층 형성방법은 기존의 방향성 규소강판에 적용하고 있는 forsterite 코팅층을 생략하고 곧바로 무기질 코팅층만을 형성하는 것으로 1.7 T, 60 Hz 측정조건에서 약 8%의 철손개선효과를 얻을 수 있었다. 이것은 forsterite 코팅층을 생략함으로써 전기장판에 가해지는 장력은 줄어들지만 이 코팅층이 철손에 나쁜 영향을 주는 요인이 없어지기 때문에 철손 개선 효과가 기존 2중 코팅층에 비해 크게 떨어지지 않고 있는 것이다. 이러한 결과로부터 본 실험에 사용된 장력코팅액은 극박 규소강판에 충분한 장력을 부여하고 있음을 알 수 있었다.

한편 자속밀도가 높아질수록 장력코팅에 의한 철손감소 효과가 낮아지는 것은 자속밀도가 낮은 영역에서 철손에 큰 영향을 주지 않던 lancet과 같은 보조자구들이 자속밀도가 높아지면서 철손에 악영향을 주기 때문으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 전력산업연구개발사업(국가전략과제) 연구비로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] N. P. Goss, U.S. Patent 1965559, 1934
- [2] 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, p.6022-6024, 1999
- [3] 차상윤, 우중수, "방향성 전기장판의 철손감소 방법", 대한금속학회회보, 제6권, 제1호, p.3-9, 1993
- [4] N. H. Heo, S. B. Kim, Y. S. Choi, S. S. Cho, K. H. Chai, S. O. Han, "Selective nucleation and growth in 3% silicon steel", IEEE Trans. Magn., Vol. 38, No. 5, p.3195-3197, 2002
- [5] 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, p.1586-1591, 1979
- [6] K. Takeda and T. Yamaguchi, "Magnetic properties in thinned grain oriented Si-Fe sheet", IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-23, No. 5, p.3233-3235, 1987
- [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, p.743-745, 1980