

## 코깅토크 DC성분 저감을 위한 모터 철심 열처리

하경호, 김지현, 권오열, 김재관, \*임양수  
포스코 기술연구소 전기강판연구팀, \*포스코 전기강판 개발판매팀

### Heat Treatment of Stator Core for Reduction of DC-Bias of Cogging Torque

Kyung-Ho Ha, Ji-Hyun Kim, Oh-Yeoul Kwon, Jae-Kwan Kim, \*Yang-Su Lim  
Electrical Steel Research Group, Technical Laboratory, POSCO, \*Electrical Steel Development Sales Team, POSCO

**Abstract** - This paper deals with the reduction of DC component of cogging torque by using the heat treatment of the stator core. The stator core is made of electrical steel sheared by the punching die. From the punching process, large mechanical stress at the edge of stator tooth induces significant plastic and elastic deformation and influences magnetic properties. Then, these phenomenon in the sheared region has influence on the magnetic unbalance in the air-gap of motor. This paper investigated the effect of the punching process on the magnetization process and the mechanical deformation and proposed the stress relief annealing method for the reduction of friction torque among one of motor characteristics.

#### 1. 서 론

무방향성 전기강판은 모든 방향으로 자화가 용이하도록 만든 제품으로 자구가 랜덤하게 불규칙 배열하도록 만들고 있으나 가공공정을 거치면서 열적 기계적 응력을 받아 본래의 자기적 특성이 열화되어 모터 성능을 저하시킨다. 따라서, 고정밀 고효율 기기에서 전기강판을 최적의 상태에서 사용하기 위해서는 전기강판 고유의 다양한 자기적 특성의 이해와 더불어 가공에 의한 자기적 기계적 특성 변화에 대한 현상 고찰이 필요하다[1-3]. 한편, 영구자석 모터에서 필연적으로 발생하는 코깅 토크는 설계의 중요한 한 요소이다. 그러나, 이론적으로 계산된 코깅 토크의 결과와는 달리 실제 측정되는 코깅 토크에는 기본파와 같은 일 반적 성분 이외에서도 해석상 나타나지 않는 DC 바이어스 성분(Friction torque or Drag force)과 비정상 성분의 고조파를 포함하고 있으며, 코깅 토크가 작게 설계된 고정밀 소형 모터 일수록 상대적으로 큰 비율로 나타나므로써 무부하 손실로 작용한다[4].

이러한 코깅토크 발생은 전기강판 고유의 자기적 특성의 불균일성, 가공에 의한 변형과 자성 열화 등에 기인한다. 최근에는 해석의 정도 향상과 최적 설계를 위하여 전기강판의 이방성과 기계적 응력 등을 고려한 해석이나 가공 개선 등에 많은 관심을 가지고 있다 [5-7]. 따라서, 본 연구는 영구자석형 모터에서 전기강판 타발 편칭시 전단면에 발생한 국부 자화, 잔류 응력 등에 의한 자기적 기계적 비대칭성을 열처리 방법으로 완화시킴으로써 프리션 토크를 저감한 논문이다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 코깅토크의 DC성분

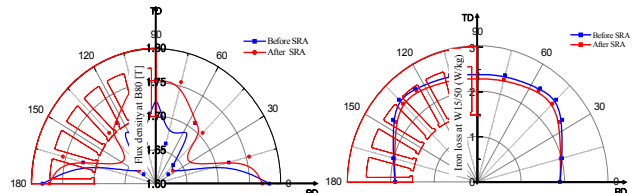
영구자석형 모터의 코깅 토크파형을 그린 것으로 영구자석의 극수와 슬롯수의 최소공배수만큼의 주기로 발생하나, 실제 모터를 무부하 상태로 측정해보면 상기의 주기적 성분 이외에, 극수의 고조파성분, 슬롯수의 고조파 성분 등과 함께 코깅 토크 파형을 +방향 또는 -방향으로 편 치는 직류 성분이 존재한다. EPS 모터에서 이러한 코깅 토크 현상은 운전자의 조작감을 저해 및 무부하 손실 증가의 원인이 되므로 이의 저감이 매우 중요하다. 코깅 토크에서 예측되지 않는 고조파 및 바이어스 성분의 발생 원인으로서는 철심의 자성, 철심의 가공, 영구자석 착자 분포, 기계적 편칭 등으로 분류할 수 있고, 본고에서는 철심가공과 철심 자성에 관련된 인자만을 고찰하였다.

##### 2.2 슬롯간 자기적 비대칭

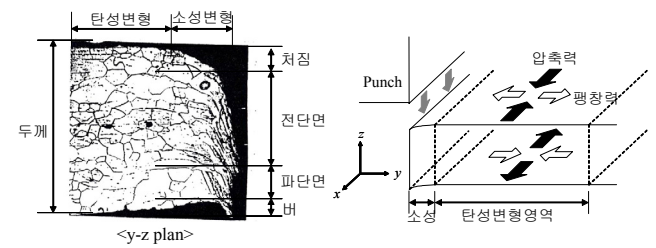
그림 1 좌측은 전기강판에 800[A/m] 자계 인가시 자화 방향별 자속밀도를 측정된 것으로 1사분면에서 같이 자계 인가에 의한 자화 방향별 자속밀도 수치가 일정하지 않으며, 자속밀도 변화는 360도에 2주기 또는 4주기의 변화 특성을 가진다. 그림의 2사분면에 모터 고정자 형상을 중첩해 그려보면 각 치에 해당하는 자속밀도가 균일하지 않은 비대칭의 이방성임을 알 수 있다. 또한, SRA후, 절단 응력 감소와 야금학적 변화로 자속밀도가 다소 증가하고 자기적 이방성 차이도 감소함을 알 수 있

다. 그림 1 우측은 상기와 동일한 방법으로 W15/50에서 자화 방향별 철 손을 측정된 것이다. 철손 또한 자화방향에 의존함을 알 수 있으며, 응력 제거 열처리 후 철손이 향상되었다. 자화방향별 자기적 특성 중 압연 방향직각방향 기준 30°40도 부근이 자속밀도가 가장 낮고 철손이 가장 높음을 알 수 있다.

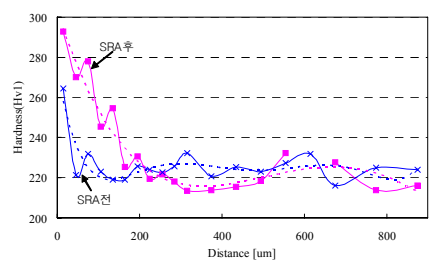
그림 2는 금형으로 전기강판을 타발 가공후 전단면 형상을 관찰한 것으로, 절단면은 처짐(Shear drop), 전단면(Sheared portion), 파단면(Fractured portion), 버(Burr)로 구성되며, 각 영역의 비율은 편칭과 다이 사이의 틈새(Clearance), 가공방법, 소재의 기계적 물성치, 표면 코팅, 절경립의 크기 등에 영향을 받는다. 그림 3에서와 같이 소성변형 영역(Plastic deformation)와 탄성변형영역(Elastic deformation)으로 나눌 수 있는데, 소성변형영역은 절단 과정에서 전기강판 절경립이 영구 변형되면서 기계적 응력을 받은 영역으로 보통 두께의 1/2 정도 된다. 또한, 그림과 같이 소성변형은 상부 표면에 압축 또는 팽창력을 발생시켜 추가적인 탄성변형을 일으키고 이러한 탄성변형에 의한 응력은 최대 두께의 2배 이상까지 작용하기도 하며, 전단력으로 전단 방향으로 자구가 생성되고, 절단면의 수직방향으로는 변형에 의한 팽창력이 작용하여 자구를 한 방향으로 배열케 함으로써 국부 극성을 만든다. 그림 3은 열처리 전후 치끝단에서 비커스 경도(Vickers Hardness: Hv1)를 측정된 것이다. 치의 끝부분에서 경도가 가장 높고 요크방향으로 이동할수록 감소하는데, 치 끝단에서의 경도는 모재 내부의 경도에 비하여 30%가량 증가하였고, 전기강판 두께 만큼 350[um] 거리까지 경도 수치에 영향을 주고 있으며, 열처리후 경도는 급격히 감소하였다. 무방향성 전기강판의 고유의 자기 이방성이나, 전단 가공에 의한 국부적 자화 또는 잔류 응력 등은 열처리를 통하여 완화 시킬 수 있다.



〈그림 1〉 전기강판의 자기적 이방성 및 치 위치별 자기적 특성



〈그림 2〉 전기강판의 절단면 형상



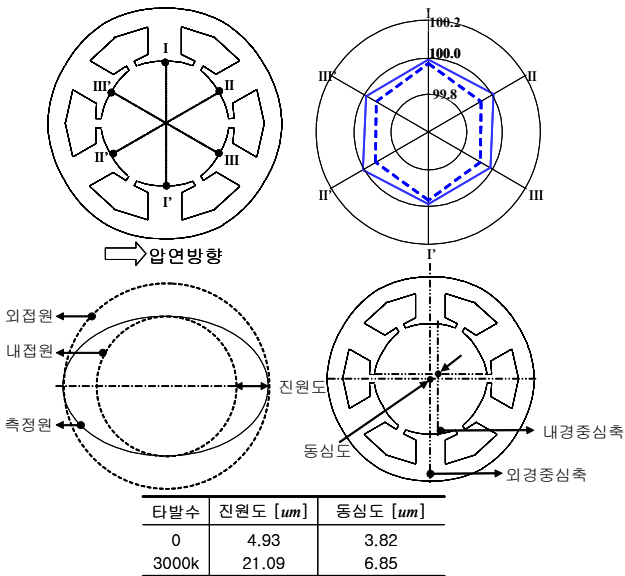
〈그림 3〉 열처리 전후 치끝단에서 경도 변화

### 2.3 슬롯간 기계적 비대칭

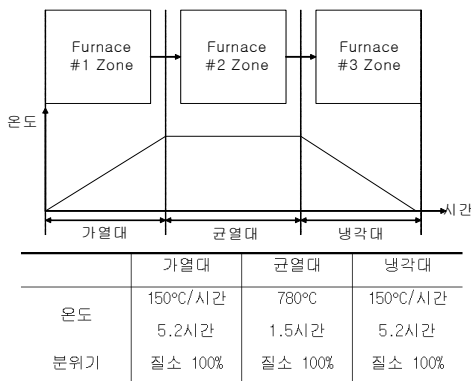
그림 4 상단은 모터 고정자에서 마주보고 있는 치 사이의 내경 치수를 측정된 것으로, 실선은 급형으로 처음 타발 후 나온 고정자 철심의 수치 측정된 것이며, 파선은 300만타를 후 나온 철심의 수치를 측정된 것이다. 그림에서 압연방향보다 압연직각방향의 내경이 크므로 타원형 양상을 가지는데 이는 기계적 이방성 때문이다. 즉, 방향별 연신율(Elongation)이 상이하기 때문에 내경의 수치가 일정하지 않게 된다. 또한, 급형 타발 횟수가 증가할수록 급형의 마모에 따른 모터 내경 치수 변화는 모터 성능에 영향을 줄 수도 있다. 그림의 하단은 고정자 철심에서 진원도(Roundness)와 동심도(Concentricity)를 설명하기 위한 그림이다. 진원도는 그림 상단에서 측정된 내경의 최소치로 그린 내접원과 최대치로 한 외접원의 차이를 의미하며, 동심도(Concentricity)는 고정자 외경의 중심점과 내경의 중심점의 차이를 의미한다. 표에서 처음 타발된 모터 코아에서의 진원도와 동심도는 3<sup>5</sup>[um]이며, 타발 횟수가 증가할수록 이의 수치 또한 증가함을 보이고 있다. 이러한 동심도와 진원도는 소재의 기계적 특성과 편칭과 다이의 축 불일치, 마로 등으로 발생하게 된다. 따라서, 전기강판 가공으로 만들어진 고정자 철심에서 내경의 불균일, 동심도와 진원도의 발생은 모터에 편심 등을 유발하여 공극이 불균일하게 되고 전자기적 힘 또한 불균일하게 된다.

### 2.4 열처리

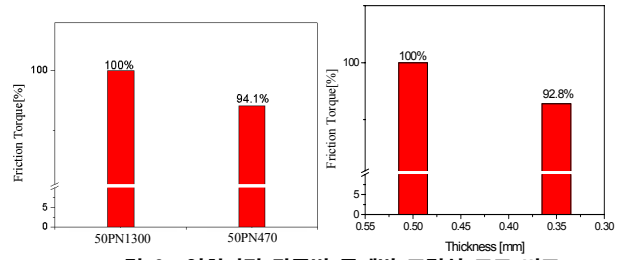
프릭션 토크는 상기에서 설명한 바와 같이 전기강판 고유의 이방성과 가공 후 기계적 자기적 특성의 비대칭이 한 원인이므로 철심의 열처리를 통하여 가공 잔류 응력 및 자기적 비대칭 완화로써 프릭션 토크를 개선하였다. 고정자 철심 열처리를 위한 로(Furnace)는 가열, 균열, 냉각 과정을 위하여 그림 5와 같이 3개의 로로 구성되며, 각 로는 연속라인으로 연결되며, 각 구간별 시간에 따른 온도 패턴과 분위기는 표와 같다. 3개의 강종에 대한 무방향성 전기강판을 선택하여, 강종별 모터를 각각 6대 제작하여 프릭션 토크를 측정하고 평균치를 취하였다.



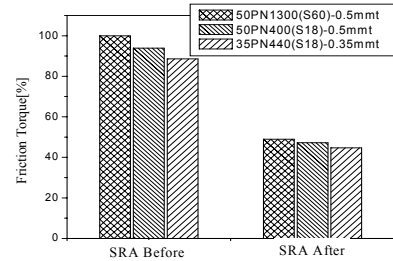
〈그림 4〉 타발후 고정자 내경의 변화 및 동진도와 진원도



〈그림 5〉 열처리 로의 구성 및 열처리 조건



〈그림 6〉 열처리전 강종별 두께별 프릭션 토크 비교



〈그림 7〉 열처리 전후 프릭션 토크 비교

그림 6의 좌측은 50PN1300(S60)과 50PN470(S18)을 가진 모터의 프릭션 토크를 비교한 것으로, 50PN470 모터의 프릭션 토크가 약 6% 작음을 알 수 있다. (50PN1300의 수치를 100으로 환산한 그래프임). 그림 6 우측은 두께가 0.5[mm], 0.35[mm]인 S18급 전기강판으로 만든 모터의 프릭션 토크를 비교한 것이다. 0.5[mm] 모터가 0.35[mm]비하여 프릭션 토크가 크게 나타났다. 즉, 두께가 작을수록 프릭션 토크 또한 감소함을 보이고 있다. (0.5[mm]의 모터 수치를 100으로 환산한 그래프임).

그림 7은 열처리 전후의 프릭션 토크를 비교한 것이다. (프릭션 토크가 가장 큰 열처리전 50PN1300 수치를 100으로 환산한 그래프임). 여기서, 열처리 후 프릭션 토크가 전 강종에서 50%이상 현격히 감소함을 보이고 있다. 이는 예상한 바와 같이 열처리로 가공 잔류응력을 완화함으로써 자기적 비대칭의 감소와 전기강판 이방성의 완화에 기인하기 때문이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 코깅 토크 성분중 DC바이어스 및 고조와 성분을 발생시키는 가능 인자를 전기강판의 가공 및 자기적 특성 관점에서 조사를 했으며, EPS모터를 대상으로 고정자 철심을 열처리하여 치 끝단에서 가공 왜에 의한 잔류응력을 완화시켜 자기적 기계적 비대칭성을 개선함으로써 프릭션 토크가 저감됨을 보였다. 본 연구는 자기회로 설계 및 제작시 전기강판을 조금 더 효율적으로 사용할 수 있는 자료로써 고정밀 고효율 기기 등의 모터 제작에서 유용할 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] M. Nakaoka et. al, "Investigation of Effects of Cutting Strain and Compressive Force on Magnetic Properties Using a Single Sheet Tester," Proc. of 16th Soft Magnetic Materials Conf., T2-28, 2003.
- [2] M. Satoh, S. Kaneko and M. Tomita, "Stator Shape Improvement to Decrease Iron Loss Caused by Shrink Fit Utilizing Physical Properties of Electrical Steel Sheet," IEEJ Trans. IA, Vol. 127, No. 1, pp.60-68, 2007
- [3] K. Yamamoto, E. Shimomura, K. Yamada and T. Sasaki, "Effects of External Stress on Magnetic Properties in Motor Core," IEEJ, Vol. 117-A, No. 3, pp.311-316, 1997
- [4] C. Kaido, J. Yamasaki and K. Hanzawa, "Core Material Parameter Analysis of Torque Characteristics of Small Motor," IEEJ Tans. IA, Vol. 126, No. 12, pp.1706-1711, 2006.
- [5] M. Takezawa et al., "Effect of Strain by Mechanical Punching on Non-Oriented Si-Fe Electrical Sheets for 9-slot Motor Core," IEEE Trans. on Magnetics, Vol 42, No. 10, pp. 2790-2792, 2006.
- [6] S. Yamaguchi and A. Daikoku and N. Takahashi, "Cogging Torque Calculation Considering Magnetic Anisotropy for Permanent Magnet Synchronous Motors," COMPEL, Vol. 23, No. 3, pp.639-645, 2004.
- [7] A. Daikoku et al. "Cogging Torque Calculation Considering Stator Core Stress Resulting from Frame in Permanent Magnet Motor," IEEJ, RM-03-74, pp.13-18, 2003.