

## EPS용 SPMSM의 회전자 형상에 따른 효율 및 열 특성 개선 설계

Improvement Design of Efficiency and Thermal Characteristics of SPMSM for EPS according to Rotor Shape

---

저자 (Authors)	차창준, 박진철, 박민로, 박현진, 홍정표 Chang-Jun Cha, Jin-Cheol Park, Min-Ro Park, Hyeon-Jin Park, Jung-Pyo Hong
출처 (Source)	<a href="#">한국자동차공학회 춘계학술대회</a> , 2019.5, 1233-1237(5 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국자동차공학회</a> The Korean Society Of Automotive Engineers
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08748075">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08748075</a>
APA Style	차창준, 박진철, 박민로, 박현진, 홍정표 (2019). EPS용 SPMSM의 회전자 형상에 따른 효율 및 열 특성 개선 설계. 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1233-1237
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.***.168.162 2019/10/04 12:57 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# EPS용 SPMSM의 회전자 형상에 따른 효율 및 열 특성 개선 설계

차 창 준 · 박 진 철 · 박 민 로 · 박 현 진 · 홍 정 표\*

한양대학교 미래자동차공학과

## Improvement Design of Efficiency and Thermal Characteristics of SPMSM for EPS according to Rotor Shape

Chang-Jun Cha · Jin-Cheol Park · Min-Ro Park · Hyeon-Jin Park · Jung-Pyo Hong\*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Sungdong-gu, Seoul 04763, Korea

**Abstract** : Electrical Power Steering(EPS) system that assist driver's vehicle steering is one of the core parts of the vehicle. In addition, the EPS motors require very low vibration and high performance for vehicle stability. In this paper, the electrical parameters of EPS motor is converted into the function of the rotor shape. Using this function, the efficiency and thermal characteristics of the EPS motor are analyzed according to the rotor shape. Then, the design point with high efficiency and improved thermal characteristics is determined as the sizing effect. Then, the improved model is designed. Finally the validity of the improvement model is confirmed by comparing the efficiency and thermal characteristics of the improved model with the existing model.

**Key words** : Copper loss(동손), Efficiency(효율), Electrical Power Steering(EPS, 전자식 조향 장치), Iron loss(철손), Torque per Rotor Volume(TRV, 회전자 부피당 토크), Shape Ratio(SR, 회전자 형상비)

### Nomenclature

$D_r$  : rotor diameter, mm  
 $L_{stk}$  : stator stack length, mm  
 $K_w$  : winding factor  
 $\lambda_m$  : linkage flux, Wb  
 $F$  : magneto motive force, A  
 $N$  : coil turns  
 $A_{slot}$  : slot area, m<sup>2</sup>  
 $K_{fill}$  : fill factor  
 $J$  : current density, A/m<sup>2</sup>  
 $m$  : phase number

### 1. 서 론

최근 환경문제가 사회적 이슈로 대두되면서 다양한 자동차부품을 전장화하려는 움직임이 일어나고 있다. 전기자동차의 구동을 위한 traction motor, 차체의 자세제어를 위한 ESC(Electrical Stability Control) 및 차량의 조향을 위한 EPS(Electrical Power Steering) 시스템 등이 활발히 연구되고 있다. 특히 EPS 시스템의 고효율, 고출력밀도, 고효율 부품의 수요증가로 인해 EPS 시스템의 핵심 부품인 전동기의 효율 및 열 특성에 대한 연구의 중요해지고 있다.

EPS용 전동기의 개선설계를 위해서는 다양한 전동기 형상에 대한 특성해석이 필요하다. 일반적인

\*Corresponding Author, E-mail: hongjp@hanyang.ac.kr

로 전동기의 특성해석 방법으로는 유한요소해석법이 사용된다. 그러나 초기 전동기 형상 결정 과정에서 유한요소법을 사용한 특성해석은 많은 시간이 소요되기 때문에 비효율적이다.

따라서 본 논문에서는 전동기의 특성해석을 위해 전동기의 전기적 파라미터들을 전동기 형상과 관련된 값의 함수로 변환하여 효율과 열 특성을 계산하였다. 이를 바탕으로 EPS용 전동기의 회전자 형상에 따른 효율 및 특성 개선설계를 진행하였다.

## 2. 회전자 형상에 따른 특성 예측

회전자 형상은 TRV와 SR로 표현할 수 있다.

$$TRV = \frac{4T_{\max}}{\pi D_r^2 L_{stk}}, SR = \frac{L_{stk}}{D_r} \quad (1)$$

식(1)은 회전자의 형상을 결정하는 중요 변수인 TRV와 SR의 정의이다. 회전자 형상에 따른 전동기의 효율과 열 특성을 개선하기 위해 TRV와 SR에 따른 특성을 분석한다.

### 2.1 Sizing Effect 및 열 등가회로

#### 2.1.1 Sizing Effect

Sizing Effect란 전동기의 전기적 파라미터인  $d$ ,  $q$  축 등가회로의 인덕턴스, 역기전력 등을 TRV와 SR로만 이루어진 함수로 표현하여 전동기 회전자의 형상 변화에 따른 특성을 알 수 있는 방법이다.<sup>1)</sup>

$$L_{d,q} = \frac{3}{\pi} \mu_0 \left( \frac{K_w N_s}{2P} \right)^2 \frac{D_r L_{stk}}{g} \Leftrightarrow L_{d,q}(TRV, SR) \quad (2)$$

$$\lambda_m = \frac{4}{\pi} \frac{K_w N_s}{P} D_r L_{stk} B_g \Leftrightarrow \lambda_m(TRV, SR) \quad (3)$$

식(2), (3)은 SPMSM의  $d$ ,  $q$  축 전압방정식의 전기적 파라미터인 인덕턴스와 역기전력을 TRV와 SR로만 이루어진 값으로 변환할 수 있음을 보여준다.

TRV와 SR만을 가지고 전동기의 전압방정식을 표현함으로써 전동기의 공극자속밀도, 토크, 손실,

효율 등의 수학적 계산이 가능하다.

Fig. 1, 2, 3은 Sizing effect를 통해 전동기의 형상의 변화에 따른 손실과 효율 그래프이다. Sizing effect를 통해 높은 효율과 낮은 동손, 철손을 갖는 지점을 결정한다.

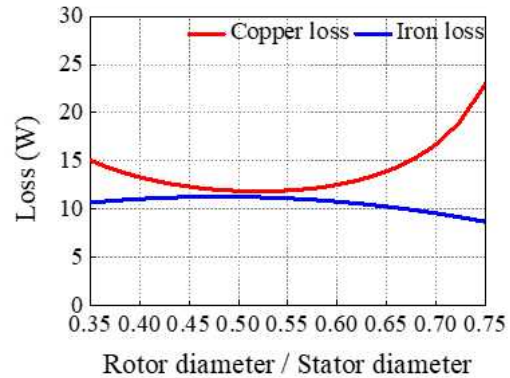


Fig. 1 Copper and iron loss according to rotor shape

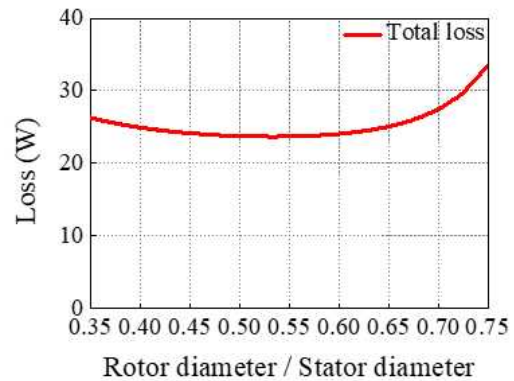


Fig. 2 Total loss according to rotor shape

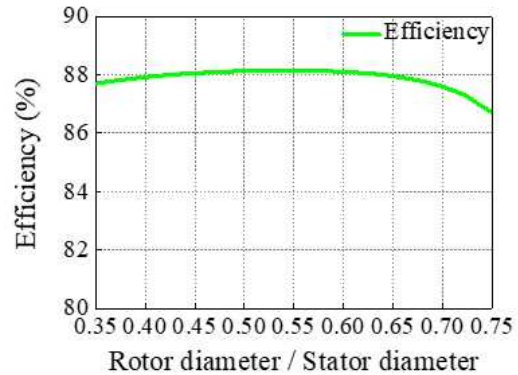


Fig. 3 Efficiency according to rotor shape

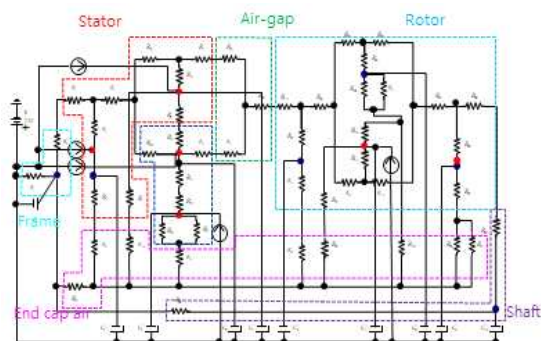


Fig. 4 Thermal equivalent circuit

### 2.1.2 열 등가회로

유한요소해석법을 이용한 열 해석은 다양한 형상을 해석해야 하는 초기설계 과정에서 적합하지 않다. 대신 열 등가회로를 이용한 열 해석 방법은 해석 시간이 상대적으로 짧고 간단하여 설계 단계에서 형상 치수에 따른 온도 분포를 효율적으로 예측할 수 있다.<sup>2)</sup>

Fig. 4는 전동기를 열 등가회로로 변환한 전동기를 보여준다. Fig. 5는 sizing effect를 통해 구한 손실 값을 이용하여 end coil 지점에서의 온도 특성을 예측한 그래프이다. 열원은 전류원으로, 열에너지 저장은 커패시터로, 열저항은 저항으로 등가화 하여 열 등가회로를 만들 수 있다. 열 등가회로 해석을 통해 end coil의 온도 특성을 확인한다.

## 3. 전동기 초기 설계

Sizing effect에 따른 효율과 열 특성의 최적지점에서 회전자와 고정자의 설계를 진행한다. 공간고조파를 통해 회전자의 영구자석을 설계한다. 그 다음, 주어진 전압과 전류의 제한조건에서 고정자의 치, 요크 폭을 설계한다.

### 3.1 회전자 설계

#### 3.1.1 Pole angle 결정

전동기의 특성을 해석할 때는 유한요소해석법을 주로 사용한다. 하지만 초기설계 단계에서는 해석에 시간이 많이 소요되는 유한요소해석법은 적합하지 않다. 대신 공간고조파를 이용한다면 해석의 정밀도는 떨어지지만 여러 형상 변수에 따른 전동기

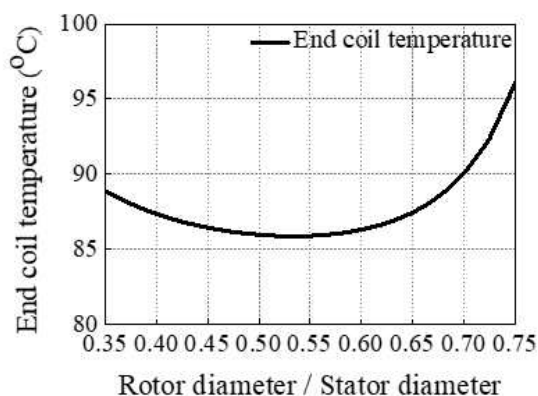


Fig. 5 End coil temperature by thermal equivalent circuit

특성 결과를 효율적으로 얻을 수 있다.<sup>3)</sup> 공간고조파는 전자계 지배방정식을 직접 푸는 수치 해석적 방법이다. 전자계 지배방정식의 간단한 풀이를 위해 몇 가지 가정이 필요하다. 첫째, 철심은 등방성이며 투자율은 무한대이다. 둘째, 전동기의 고정자의 치슬롯 구조를 무시한 평활철심이라 생각한다. 셋째, 고정자 권선은 대칭성을 가지며 단부효과 및 와전류 손실은 무시한다.

Fig. 6은 Pole angle에 따라 전동기의 역기전력, 코깅토크, 고조파의 정도를 공간고조파를 이용하여 분석한 결과이다. EPS 용 전동기의 특성상 낮은 코깅토크와 THD, 높은 역기전력을 확보할 수 있는 Pole angle을 선정하였다.

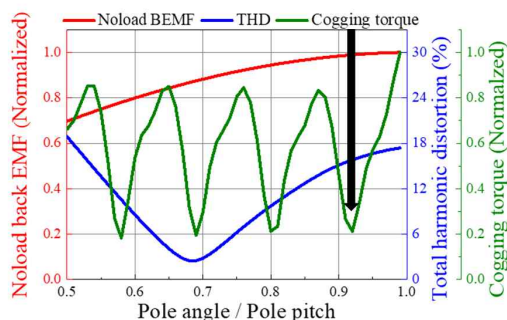


Fig. 6 Back-EMF, THD of back-EMF and cogging torque according to pole angle

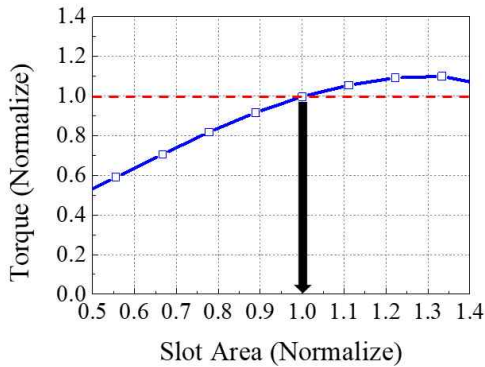


Fig. 7 Maximum torque according to slot area

### 3.2 고정자 설계

#### 3.2.1 슬롯 면적, 코일 턴 수 결정

기자력을 이용하여 고정자의 슬롯 면적과 코일 턴 수를 결정할 수 있다.

$$F = NI = \frac{A_{slot} \times K_{fill} \times N_{slot} \times J}{2 \times m} \quad (4)$$

식 (4)는 기자력 수식이다. 동일 기자력 하에서 턴 수와 전류의 관계를 볼 수 있다. 또한 슬롯 면적, 점적률, 전류밀도의 관계 또한 볼 수 있다. 식 (4)를 사용하면 전동기의 냉각 방식에 따른 전류제한조건에 부합하는 슬롯 면적, 코일 턴 수, 점적률을 결정할 수 있다.

#### 3.2.2 치 요크 폭 최적화

수식(4)로 결정된 슬롯 면적일 때, 자기저항이 최소값이 되는 치 요크 폭을 선정해야 전동기는 최대 토크를 출력한다.

Fig. 7은 슬롯면적 변화에 따른 최적의 치 요크 폭 일 때의 전동기 최대 출력 토크 그래프이다. EPS 용 전동기의 스펙에 맞는 토크를 낼 수 있는 슬롯 면적을 선정하였다.

## 4. 전동기 효율 및 열 특성 비교

### 4.1 효율 및 손실 비교

Fig. 8, 9는 기존모델과 개선모델의 형상을 보여 준다.

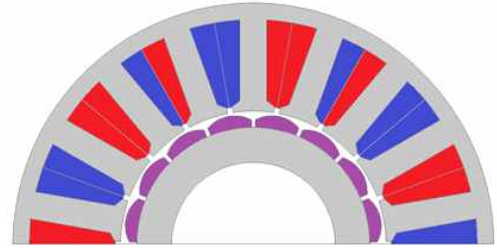


Fig. 8 Configuration of the base motor

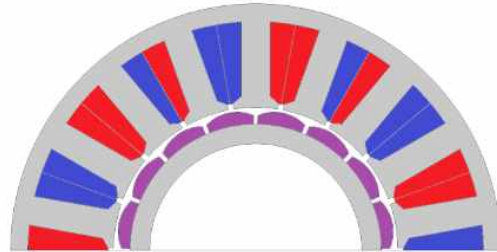


Fig. 9 Configuration of the improved motor

Table 1 기존 및 개선 모델의 성능 특성

	기존모델	개선모델
동손	1	0.92
철손	1	0.96
End coil 온도	1	0.82
정격전류	1	0.86
효율	1	1.04

Table 1은 기존 모델과 개선모델의 정격상태에서의 전동기의 특성을 비교하고 있다. 동손과 철손이 각각 8%, 4% 감소했으며, 정격 전류는 약 14% 감소했다. 전동기의 효율은 약 4% 상승하였다. End coil의 포화온도는 약 14% 낮아졌다.

## 5. 결 론

본 논문은 기존의 EPS용 전동기의 회전자 형상에 따른 효율 및 열 특성의 변화를 확인한다. 전동기의 특성 해석을 위해 전동기의 전기적 파라미터를 TRV와 SR만으로 이루어진 형태로 변환하여 회전자의 형상에 따른 효율, 동손, 철손 및 열 특성을 확인 한다. Sizing

effect를 통해 회전자 형상에 따른 효율을 확인한다. 그리고 동손 및 철손 값을 이용하여 정격 운전영역에서 end coil 의 온도를 열 등가회로를 통해 확인한다.

그 다음으로 전동기의 효율 및 열 특성이 높은 개선 설계 지점을 선정하여 개선모델을 설계한다. 공간고조파를 이용하여 회전자의 영구자석 형상을 결정하고, 기자력을 사용하여 고정자를 설계를 한다. 마지막으로 개선모델의 전동기 효율 및 열 특성이 기존모델과 비교하여 개선됨을 확인한다.

## References

- 1) Hae-Joong Kim, Choong-Sung Lee, Jung-Pyo Hong, "Design of In-Wheel Motor for Automobiles Using Parameter Map", Journal of the Korean Magnetics Society 25(3), 92-100, 2015.
- 2) Park-Ho Yong, "Thermal Equivalent Circuit of Generator Considering Forced Air Cooling by Fan", 8-13, Graduate School of Hanyang University, 2017.
- 3) Jeong-Min Lee, Jin-Cheol Park, Myung-Hwan Yoon, Jung-Pyo Hong, "Analysis of PMSM Characteristic for EPS according to Pole and Slot Combination considering the Effect of Static Eccentricity of Rotor", KSAE, 1355-1360, 2017.