

코깅 토크 저감을 위한 외전형 모터 최적설계

박 종 현* · 김 재 의 · 김 동 민 · 홍 정 표

한양대학교 미래자동차공학과

Optimum Design of Outer rotor SPMSM for Cogging Torque Reduction

Jong-Hyun Park* · Jae-Yui Kim · Dong-Min Kim · Jung-Pyo Hong

Department of Automotive Engineering Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

Abstract : This paper deals with design precess about an outer rotor type surface mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM) used in continuous variable valve timing (CVVT) system in internal combustion engine automobiles. Outer rotor type SPMSM generate large torque and adequate at high rotation speed. For initial design, space harmonic analysis (SHA) is used. In order to minimize cogging torque, optimization was conducted through response surface methodology (RSM). In the end of paper, a finite element analysis (FEA) is performed to verify the performance of the optimum model.

Key words : Cogging torque(코깅 토크), Finite element analysis(FEA, 유한요소해석), Response surface method(RSM, 반응표면론법), Surface-mounted permanent magnet synchronous motor(SPMSM, 표면부착형 영구자석 동기전동기), Space harmonic analysis(SHA, 공간고조파 분석방법), Total harmonic distortion(THD, 고조파 왜형율)

Nomenclature

A : the z-axis component of magnetic vector potential
 J_{pm} : current density of PM, A/m²
 μ_o : permeability of air
 M : the magnetization
 δ : arbitrary value
 g : air gap, m
 h : magnet width, m
 B : magnetic flux density, T

Subscripts

PM : permanent magnet

1. 서 론

최근 자동차 산업의 큰 이슈는 친환경이며, 공해의 상당한 부분이 자동차 배기가스에 의해 발생한다. 환경보호를 위해 유럽, 미국 정부는 자동차 배기가스 배출기준을 엄격하게 규정하였고, 자동차 회사는 기준을 충족하기 위한 기술들을 활발히 연구하고 있다. 그 중 자동차 엔진의 흡·배기 밸브는 개폐 시점과 지속시간에 따라 엔진 성능에 큰 영향을 미친다. 하지만 부정확한 밸브 제어는 CO₂, NO_x의 발생이 증가하여 환경오염을 야기한다. 이를 줄이기 위해 엔진 속도, 주행상태를 감지하여 밸브 개폐 시점을 제어하는 Continuously Variable Valve Timing(CVVT)를 대부분의 엔진에 적용한다.¹⁾

나아가 CVVT에 사용하는 모터의 구동조건은 저속도, 저토크이기 때문에 cogging torque 저감은 필수적이다. 주로 CVVT에 사용하는 모터는 outer rotor Surface-mounted permanent magnet synchronous

* 박종현, E-mail: kamkam123@hanyang.ac.kr.

motor(SPMSM)이다. outer rotor motor SPMSM의 장점은 첫째, 모터의 크기가 동일할 경우, inner rotor motor보다 outer rotor motor가 회전반경이 크므로 토크를 최대화할 수 있다. 둘째, PM(permanent magnet)이 회전자 요크의 안쪽에 부착되어 PM의 비산을 방지할 수 있다. 셋째, outer rotor motor의 경우 모터 하우징에 기어를 직접적 체결이 가능하기 때문에 엔진에 추가적인 기어박스는 필요 없다. 결과적으로 outer rotor motor는 inner rotor motor에 비해 공간적인 측면에서 유리하다.

본 논문에서는 CVVT에 사용하는 SPMSM를 Response surface method(RSM)을 활용하여 cogging torque 저감을 위한 최적설계 후 Finite element analysis(FEA)를 활용하여 Back-EMF, THD, cogging torque를 검증했다.

2. 초기설계

CVVT용 outer rotor motor SPMSM는 요구조건을 만족하는 Back-Electro motive Force(Back-EMF)와 cogging torque 최소화가 필요하다.

초기설계 변수는 Pole-angle으로 설정하고 Space harmonic analysis(SHA)을 활용해 초기설계를 했다. Table 1는 outer rotor motor SPMSM의 사양이다.

Table 1 Specification of the motor.

Specification	Content
Type	Outer Rotor SPM
DC link Voltage [V]	12
Pole/Slot number	8/12
Operation type	BLDC 6-step
Rotor outer diameter [mm]	70
Stack length [mm]	23
Cogging torque [Nm]	Max 0.05
Air gap [mm]	0.5
PM Br [T]	0.44

2.1 공간고조파 분석방법 (SHA)

SHA를 활용하기 위해서 자속밀도가 필요하다. 공극 자속밀도는 PM과 전기자의 magnetic field의 합으로 구해진다. SHA에는 아래와 같은 가정이 필요하다.

- 자기 코어의 투자율은 무한대이다.
- 포화도는 고려하지 않는다.
- 단부효과와 와전류손은 무시한다.
- 선형적인 자기소자 특성을 갖는다.

PM의 magnetic field를 포함하여 4개 영역으로 나누면 Fig. 1 (a)과 같고 이를 등가자화전류(EMC)로 표현하면 Fig. 1 (b)과 같다. 각 영역은 아래와 같은 지배 방정식을 따른다.^{2,3)}

$$\frac{\partial A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial A(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad \text{Region I, II, IV}$$

$$\frac{\partial A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial A(x, y)}{\partial y^2} = -\mu_0 J_p(x) \quad \text{Region III}$$

여기서 A 는 자기벡터포텐셜의 z 축 성분이고, J_{pm} 는 PM의 전류밀도이다. PM에 의한 EMC의 분포 즉, J_p 는 아래와 같이 푸리에 급수로 표현된다.

$$J_p = \sum_{n=1,3}^{\infty} b_{pn} \cdot \sin(nkx)$$

$$b_{pn} = \frac{4J_{pm}}{n\pi} [\cos(nka) - \cos nk(a + \delta)], \quad k = \frac{\pi}{\tau}$$

$$J_{pm} = \frac{\oint \vec{M} \cdot d\vec{l}}{\delta \times h} = \frac{M}{\delta} = \frac{B_r}{\mu_0 \delta}$$

여기서 δ 은 0으로 수렴하는 임의의 값이며, PM의 전류밀도 J_{pm} 는 M (magnetization)으로 표현할 수 있다.

PM의 magnetic field는 경계조건을 고려하여 구할 수 있다. 경계조건은 자속밀도의 접선성분과

법선성분이다.

$$B_{II}^x = \frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nkg}} - \frac{e^{nkg}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \sin(nkx) \quad (6)$$

$$B_{II}^y = -\frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \left(\frac{e^{nky}}{e^{nkg}} - \frac{e^{nkg}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \cos(nkx) \quad (7)$$

$$B_{III}^x = -\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nk(g-h))}{\sinh(nkg)} \right) \sinh(nky) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \sin(nkx) \quad (8)$$

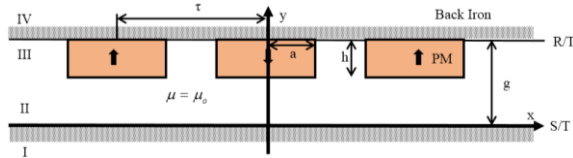
$$B_{III}^y = -\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(1 - \frac{\sinh(nk(g-h))}{\sinh(nkg)} \right) \cosh(nky) \cdot \frac{b_n}{nk} \cdot \cos(nkx) \quad (9)$$

$$b_n = \frac{4J_0}{n\pi} \cos(nka) \quad (10)$$

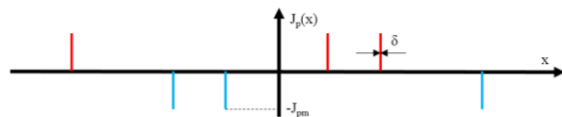
전기자 전류에 의한 magnetic field는 Fig. 2와 같다. II 영역의 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial A(x, y)}{\partial y^2} = -\mu_0 J_p(x) \quad \text{Region II} \quad (11)$$

각 영역에 경계조건을 고려한 후 지배방정식을 풀면 자속밀도를 구할 수 있다. 앞 식을 모두 계산한 후 PM과 전기자 전류에 의해 발생된 각각의 magnetic field를 더하면 최종적으로 공극에서의 magnetic field를 구할 수 있다.



(a) Magnets distribution



(b) Equivalent magnetizing current of magnets

Fig. 1 Magnetic field due to PM

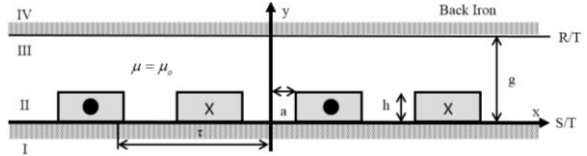


Fig. 2 Magnetic field due to armature current

2.2 파라미터 분석

SHA를 활용하여 outer rotor motor SPMSM의 파라미터를 분석했다. outer rotor motor SPMSM 사양(Table 1)에서 Pole angle을 변경하며 Back-EMF, THD, cogging torque를 분석한 특성은 Fig. 3과 같고 Fig. 3에서 초기설계 Point*를 선택한다. Point*를 선택한 이유는 요구조건을 만족하는 Back-EMF와 최소값과 가까운 cogging torque, THD를 갖는 Point다.

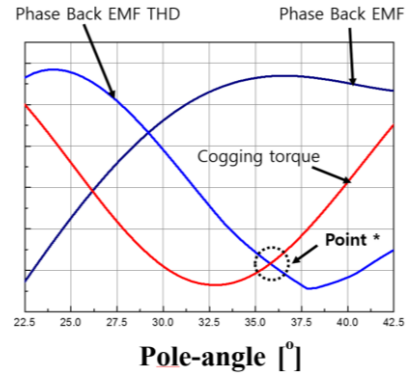


Fig. 3 Result of SHA

2.3 초기설계 결과

Outer rotor motor SPMSM 초기설계 모델의 형상과 특성값은 각각 Fig. 4과 Table 2이며 요구조건을 만족하기 위해 cogging torque 저감이 필요하다.

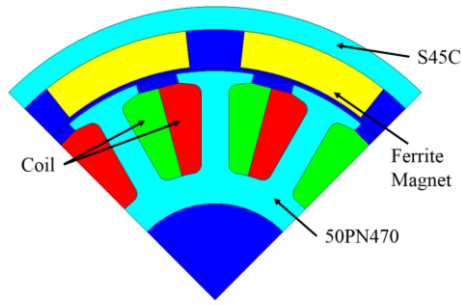


Fig. 4 Initial model

Table 2 Characteristic value of the initial model.

Item	Value	2
Back-EMF [Vrms]	1.16	@ 1,000 rpm @ 25°C
THD [%]	7.87	
Cogging torque [Nm]	0.16	

3. 최적설계

3.1 반응표면론법 (RSM)

반응표면론법(RSM)은 설계 변수들이 복합적인 작용으로 파라미터에 영향을 주고 있을 때, 목적함수 즉, 반응에 대한 실험이나 시뮬레이션 해석으로 얻은 수치를 바탕으로 반응 표면을 생성하여 통계적으로 분석하는 방법이다.⁴⁾

추가적으로 RSM에서 가장 중요한 것은 최소의 실험으로 최적의 실험결과를 얻기 위한 실험계획법이다. 설계 변수들의 다양한 조합을 모두 해석하는 것은 적절하지 못하다. 따라서, 적은 횟수의 실험으로 반응표면을 추정하기 위하여 2차 반응표면을 적합 시키기 위한 중심합성계획법(CCD)을 사용한다.^{5,6)} CCD의 실험 점은 2^k 개의 2^k 요인실험의 실험점과 $2k$ 개의 축점 그리고 중심점으로 이루어져 총 실험점의 수는 $2^k + 2 \cdot k + 1$ 이다. 추가한 을 각각 3개의 레벨을 갖는 2개의 변수에 대해 수행하여 총 9개의 해석 포인트를 선정했다.

본 논문에서는 3의 레벨을 갖는 2개의 변수에 대해 수행하여 9개의 해석포인트를 선정했다.

$$NS_{CCD} = 2^k + 2 \cdot k + 1$$

3.2 최적모델설계

Cogging torque에 영향을 미치는 slot open width과 eccentricity를 최적설계 변수로 선정했다.

Slot open width 최소값은 코일 지름의 2배 ($0.85 \times 2 = 1.7\text{mm}$)이고, 최대값은 초기설계 모델의 slot open width값인 4.5mm 이다. eccentricity의 최소값은 1mm 이고, 최대값은 제조공정의 한계 때문에 11mm 이다. 두 변수의 형상과 범위는 각각 Fig. 5, Table 3이다.

설계변수를 배열하고 파라미터를 분석한 결과 Back-EMF은 slot open width과 eccentricity가 크면 클수록 증가하는 반면에 cogging torque는 slot open width가 작으면 작을수록 작아지며, eccentricity는 클수록 작아진다. 이를 나타낸 RSM 결과는 Fig. 6이다.

Table 3 The range of design variables

Factor	Min	Max
Slot open width [mm]	1.7	4.5
Eccentricity [mm]	1	11

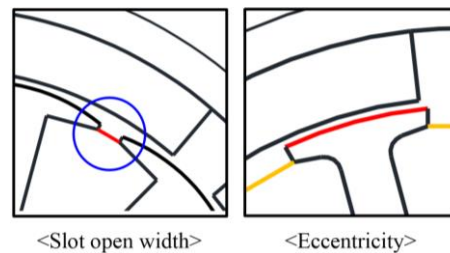


Fig. 5 Two design variables

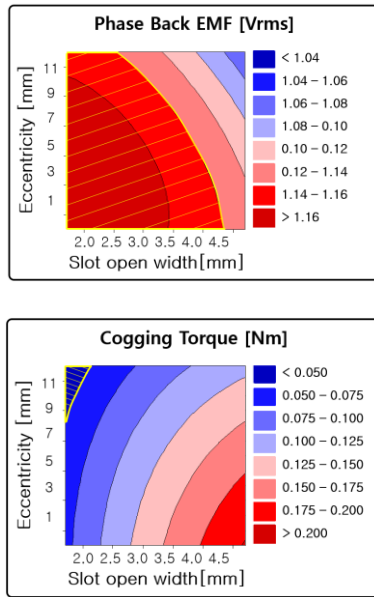


Fig. 6 Result plot of RSM

3.3 결과

결과적으로 요구조건을 만족하는 Back-EMF와 최소값에 가까운 cogging torque를 동시에 만족하는 최적설계 값은 slot open width = 1.7 mm, eccentricity = 11mm이며, 최적설계 모델과 비교할 초기설계 모델은 slot open width = 4.5 mm, eccentricity = 0mm이며, 각각의 형상은 Fig. 7에 나타났다.

최종적으로 FEA를 사용하여 최적설계 모델의 특성을 검증했고 초기설계 모델의 Back-EMF, cogging torque 특성비교는 Fig. 8와 Table 4이다.

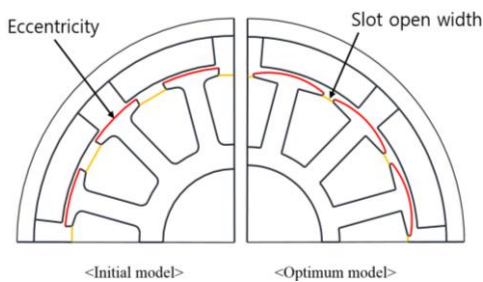


Fig. 7 Initial model and optimum

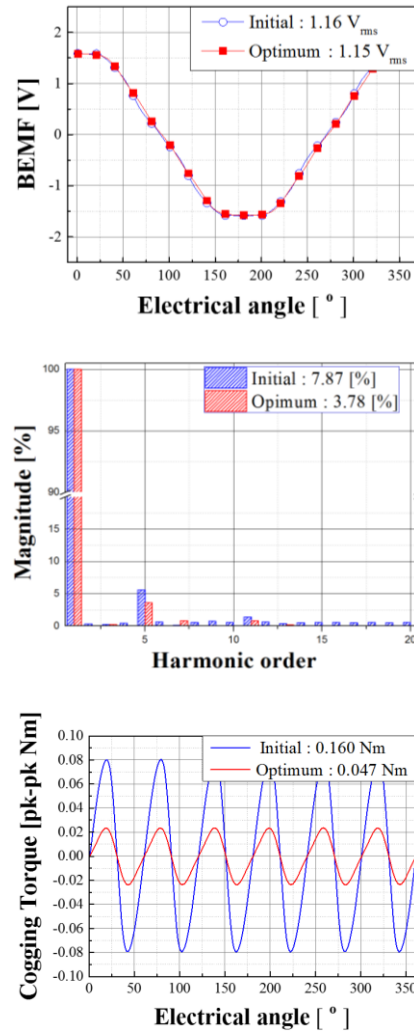


Fig. 8 FEA result

Table 4 Result data

25°C	B-EMF [V _{rms}] @1,000 rpm	THD [%]	Cogging torque [Nm]
Initial model	1.16	7.87	0.14
Optimum model	1.15	14.42	0.047

4. 결 론

본 논문에서는 CVVT에 사용하는 outer rotor motor SPMSM의 성능향상을 위해 cogging torque를 저감했다. SHA를 활용하여 outer rotor motor SPMSM 초기설계를 진행했다. 초기설계 모델의 특성은 요구조건보다 큰 cogging torque를 갖기 때문에 이를 저감하기 위해 RSM를 활용하여 최적화를 진행했다. 최적화 설계변수로 slot open width, eccentricity을 선정하고 FEA으로 성능 타당성을 검증했다.

References

- 1) P. Barkan, and T. Dresner, "A Review of Variable Valve Timing Benefits and Modes of Operation," SAE Technical Paper Series, paper 891678, 1989.
- 2) K.C. Lim, J.P. Hong, and G.T.Kim. "The Novel Technique Considering Slot Effect by Equivalent Magnetizing Current," IEEE Transactions on Magnetics, pp.3691 -3693, 1998.
- 3) NADY BOULES, "Prediction of No-Load Flux Density Distribution in Permanent Magnet Machines," IEEE Transactions on Industry Application," vol.IA-21, pp.63-643, 1985.
- 4) S.I. Kim, J.Y. Lee, Y.K. Kim, J.P. Hong, Y. Hur, and Y.H. Jung. "Optimization for Reduction of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motor by Using the Taguchi Method," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 41, NO5, pp.1796-1799. May 2005.
- 5) Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design Experiments," John Wiley & Sons, 1995.
- 6) S.W. Hwang, D.M. Kim, S.H. Chai and J.P. Hong. "Optimum Design for Minimizing Cogging Torque of EPS motor Using Rotor Eccentricity and Pole Arc/Pole Pitch Ratio," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1340-1344, May 2014.