



2015 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회

KSAE 2015 Annual Conference and Exhibition

기간: 2015. 11. 18(수)~21(토)

장소: **HICO** 경주화백컨벤션센터
GYEONGJU Hwabaek International Convention Center

후원:  **KOFST**
한국과학기술단체총연합회

 **Gride**
Gyeongbuk

 **Gyeongju**
CVB

 **Gyeongju**
CVB



Km/h



한국자동차공학회
The Korean Society of Automotive Engineers

- 1185 소형 하이브리드 전기 자동차 제어 시스템 개발을 위한 BenchTop Test Simulator 제작
김일환*(국민대학교), 김정용(국민대학교), 최웅철(국민대학교)
- 1186 공기공급장치 변경에 따른 상압형 자동차용 연료전지시스템의 효율 분석
김일중*(서울과학기술대학교), 이정재(서울과학기술대학교), 김한상(서울과학기술대학교)
- 1189 양전자교환막 연료전지 기체 확산층 두께에 따른 단일 유로 채널에서의 물방울 특성 횡단면 가시화 연구
김한상*(서울과학기술대학교)
- 1192 태양전지 파노라마 루프의 글라스 구동에 따른 접촉스위치의 최적화
라명수*(베바스토동회홀딩스), 최수윤(베바스토동회홀딩스), 전병윤(베바스토동회홀딩스), 정전기(베바스토동회홀딩스)
- 1197 EV용 WFSM의 최대효율 제어를 통한 효율 개선
박진철*(한양대학교), 차경수(한양대학교), 채승희(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 1202 마그파인 자석의 불가역 감자 특성을 고려한 전기 자동차 구동용 전동기 설계
박호용*(한양대학교), 이수경(한양대학교), 정영훈(한양대학교), 정경태(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 1206 전기차 에어컨용 베인 압축기의 열유동 해석을 통한 성능 설계
배석정*(자동차부품연구원), 허형석(자동차부품연구원), 이준용(자동차부품연구원)
- 1214 EPS용 IPMSM의 토크리플 저감 최적설계
손형수*(한양대학교), 홍정표(한양대학교), 김두영(한양대학교)
- 1218 고조파 전류 인가 방법을 이용한 Electric Power Steering용 매입형 영구자석 동기 전동기의 토크리플 저감
신창욱*(한양대학교), 김두영(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 1223 Kalman Filter와 Least Squares Method를 이용한 전방 타깃의 위치 추정 시스템
유동연*(성균관대학교), 박찬호(성균관대학교), 황성호(성균관대학교)
- 1225 PMP 기반 병렬형 플러그인하이브리드 차량의 동력분배 제어
이성화*(한양대학교), 이형철(한양대학교)
- 1227 연료전지 시스템 운전 시 수소 크로스오버 발생량에 대한 고찰
정애리*(서울대학교), 김민수(서울대학교)
- 1228 ISG 시스템의 테스트 벤치 기반 성능시험 환경 구축
정연수*(한양대학교), 김영준(한양대학교), 박태호(한양대학교), 이형철(한양대학교)
- 1230 HEV LDC의 성능 평가를 위한 실차 환경 모사 시스템 개발
조재동*(신영), 임정식(신영), 남재두(신영), 서종덕(신영), 김대근(신영)
- 1232 1.5 kW급 HEV LDC의 실차 시험을 통한 동작 성능 검증
조재동*(신영), 임정식(신영), 남재두(신영), 서종덕(신영), 김대근(신영)

EPS용 IPMSM의 토크리플 저감 최적설계

손형수* · 김두영 · 홍정표

한양대학교 미래자동차공학과

Optimum Design for Torque Ripple Reduction of EPS Motor

Hyung-Soo Son* · Doo-Young Kim · Jung-Pyo Hong

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

Abstract : Recent automotive industry, environment-friendly automotive business in accordance with environmental regulations has been actively carried out. But, research has also been continuously carried out for stability and improved ride comfort of the vehicle. As a result, it is possible to replace developed several hydraulic power steering system (HPS) to the electric power steering system (EPS). EPS has an advantage in maintenance and fuel efficiency. The torque ripple reduction of the electric motor is essential to implement the smooth steering feel. In this paper 1/4Fractional Factorial Design (FFD) and the Response Surface Method (RSM) by using, to consider the optimal design aimed at reducing the torque ripple of the electric motor

Key words : EPS(전동식 동력 조향 장치), Finite element analysis(유한요소해석), FFD(부분요인 배치법), IPMSM(매입형 영구자석 동기전동기), RSM(반응표면법), Torque ripple(토크 리플),

Nomenclature

β : regression coefficient
 ε : error
 F : response function
 η : objective function
 x : design parameter
 y : true function
 n : number of runs
 n_c : number of replicates

Subscripts

k : number of factors

1. 서론

최근 자동차산업은 환경규제에 따른 친환경자동차사업도 활발히 이루어지고 있지만, 차량의 안정성과 승차감 개선에 대한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다. 그 결과 개발된 여러 기술 중 하나가 유압식 동력 조향 장치(Hydraulic Power Steering, HPS)를 전동식 동력 조향 장치(Electric Power Steering, EPS)로 대체하는 것이다.

HPS는 조향감은 우수하지만, 오일펌프와 오일탱크, 호스 등으로 구성되어 구조가 복잡하며, 엔진동력손실로 인해 연비가 좋지 않다. 그에 비해 EPS는 전동기로 구동하기 때문에 연비가 우수하고 유지보수 면에서 이점이 있지만, 조향감이 떨어지는 단점을 갖고 있다. 자동차에서 조향 장치는 차량의 주행상태를 운전자가 직접 느낄 수 있는 부분이므로

* 손형수, E-mail: hysson1018@hanyang.ac.kr

부드러운 조향감이 필수적이며, 조향감 개선을 위해서는 EPS내 전동기의 토크리플 저감이 필요하다.

본 논문에서는 1/4부분요인 배치법(Fractional Factorial Design, FFD)과 반응표면법(Response Surface Method, RSM)을 활용하여 전동기의 토크리플 저감을 목표로 최적설계를 검토한다. 부분요인 배치법은 인자의 각 수준에 따른 모든 조합에서 실시되는 실험계획법으로서, 여러 인자가 반응에 미칠 수 있는 효과를 검토하여 핵심 인자를 찾아내는데 좋은 기법이다. 따라서 부분요인 배치법을 통해 반응에 지배적인 영향을 미치는 핵심인자들을 확인하고, 이 인자들을 이용해 반응표면법을 진행하였다.

2. 본 론

2.1 최적화 대상 전동기 초기 모델

최적화를 진행할 대상전동기는 EPS에 이용되는 6극 9슬롯 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)모델이다. Fig. 1은 대상 전동기 초기 모델형상이다.

2.2 부분요인 배치법

요인 배치법은 여러 인자가 반응에 미칠 수 있는 효과를 연구할 수 있게 하는 실험계획법으로 주효과와 교호작용의 효과를 분석하고, 실험계획 초기에 설계인자가 많을 경우 핵심 인자를 찾아내는데 좋은 기법이다. 주효과와 교호작용에 대해서 확인만 할 경우 인자의 모든 조합에서 실험을 하지 않고, 조합 중 일부만을 실험하는 부분요인 배치법을 사용하는 것이 실험시간을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 5개의 설계변수를 Fig. 2와 같이 설정하고 각 인자들에 대한 반응으로 토크리플과 평균토크를 설정하였다. 각 인자들은 2수준으로 설정하였고, 1/4부분요인 배치법을 적용하여 8번의 실험으로 각 인자들의 효과에 대해서 살펴보았다.

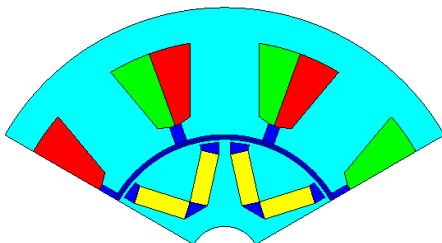


Fig. 1 Configuration of prototype

자세한 각 인자의 수준은 Table 1에 나타내었다.

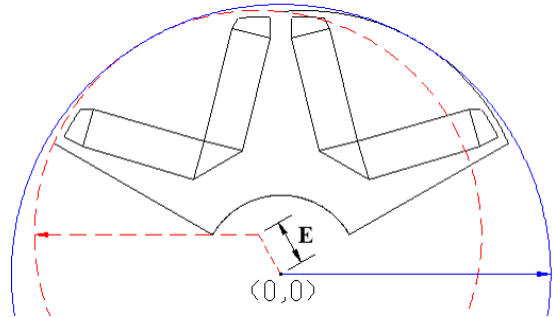
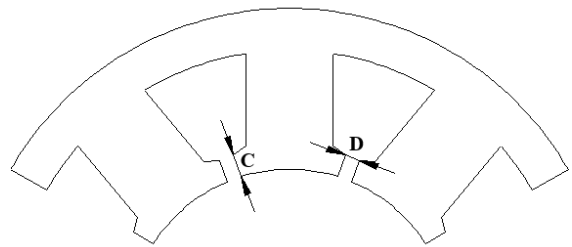
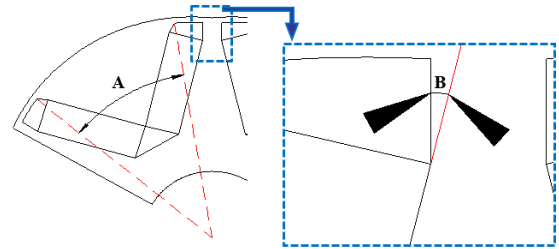


Fig. 2 Design variables; A : Pole arc, B : Beta, C : Alpha, D : Slot open, E : Eccentricity

Table 1 Design area for FFD

설계인자	설계범위
Pole arc	35 ~ 50
Beta	5 ~ 25
Alpha	1 ~ 3
Slot open	1.5 ~ 3
Eccentricity	0 ~ 7

2.3 부분요인 배치법 결과

Figure. 3,4에 각 인자들의 토크리플과 평균토크에 대한 주효과를 나타내었다. 결과에 확연하게 드러나듯이 설계인자 중 Beta는 토크리플에 거의 영향을 미치지 못함을 확인할 수 있다. 나머지 인자들 중에 평균토크보다 토크리플에 더 큰 영향을 미치는 인자를 확인하기 위해 각 인자 별로 토크리플에 대한 주효과 기울기와 평균토크에 대한 주효과 기울기간의 비율의 절대값을 비교하였고, 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

종합하면 토크리플에 큰 영향을 미치고, 평균토크에 둔감한 인자는 Slot open, Pole arc, Alpha임을 확인할 수 있다. 이 3가지 인자들로 반응표면법을 통해 최적화를 수행할 것이며, 유한요소해석(Finite-Element Analysis, FEA)을 이용하여 평균토크와 토크리플을 확인한다.

Table 2 Rate of change of Torque ripple and Average Torque

설계인자	비율
Pole arc	9.27
Beta	4.99
Alpha	7.88
Slot open	5.56
Eccentricity	1.78

2.4 반응표면법

반응표면법은 k개의 인자들이 어떤 목적함수 η 에 영향을 미칠 때, 이들의 관계를 실험이나 시뮬레이션을 통해 얻은 반응값들로부터 근사적인 반응표면을 생성하여 통계적으로 분석하는 방법을 말한다.

$$\eta = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (1)$$

식 (1)의 실제 반응 함수 F 는 Taylor 급수전개를 기본으로 하여 2차 다항식모델로 근사한다. 본 연구의 대상이 곡면의 반응표면을 가질 것이라고 예측 가능하므로 2차 다항식 모델을 사용한다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{j>1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

여기서 ε 은 반응의 오차항이 되고 x, β, ε 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포로 가정한다.

반응표면법에는 여러 실험법이 있지만, 본 논문에서는 실험시간을 줄이기 위해 중심합성계획법(Central Composite Design, CCD)를 이용하였다. CCD는 2^k 요인실험에 중심점과 축점을 추가한 방법으로 본 논문에서는 3개의 인자로 반응표면법을 수행하기 때문에 다음 식 (3)을 따라 15회의 실험을 실시한다.

$$n = 2^k + 2k + n_c \quad (3)$$

여기서 n 은 총 실험횟수, 2^k 는 요인배치법에 의한 설계를 위한 실험 수, $2k$ 는 축점의 수, n_c 는 중심점에 대한 반복실험 횟수이다. 15회의 실험을 할 때 Slot open, Pole arc, Alpha의 설계범위는 Table 1과 같다.

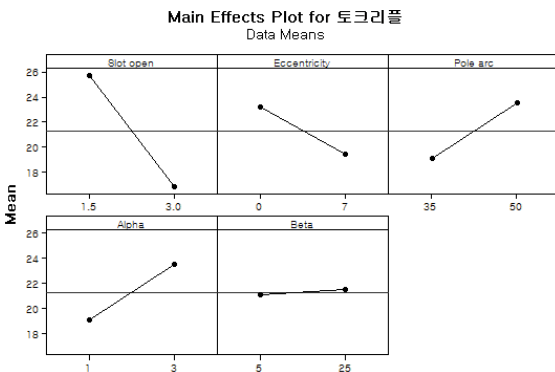


Fig. 3 Main effects plot for torque ripple

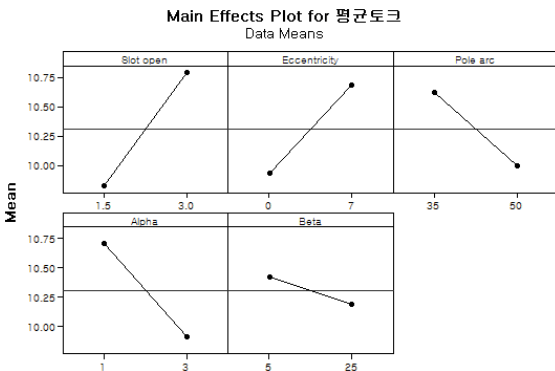


Fig. 4 Main effects plot for average torque

2. 5 반응표면법 결과

유한요소해석을 통해 얻은 반응값들을 가지고 상용 소프트웨어인 MINITAB을 이용하여 Fig. 5와 같은 토크리플에 대한 반응표면 등고선을 얻을 수 있다. Fig. 5로부터 Slot open, Pole arc, Alpha와 목적함수와의 관계를 도식적으로 파악가능하며, 최적설계의 방향을 확인하였다. 평균토크는 인자들의 변화에 따른 영향이 작았고, 목표토크 이상의 값들이 실험값으로 나왔기 때문에 더 이상 고려하지 않았다.

반응표면 등고선을 통해 최적 point를 결정하였고, 최적화한 전동기형상을 Fig. 6에 나타내었다. 유한요소해석을 통해 얻은 최적모델과 기존 대상전동기의 전동기 특성이 Table 3에 비교되어 있고, 전동기 특성이 최적화 과정을 통해 개선되었음을 확인하였다.

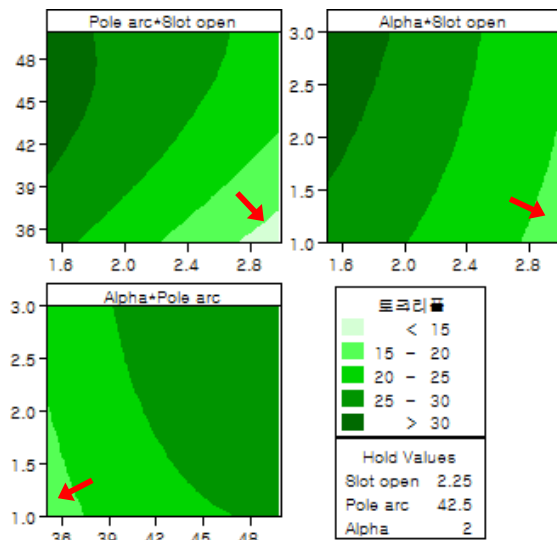


Fig. 5 Response surface contour plots of torque ripple

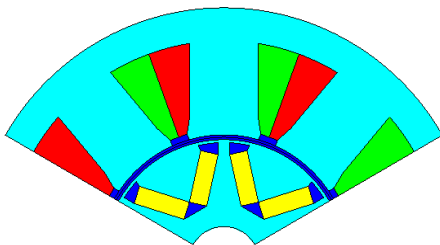


Fig. 6 Configuration of Optimized model

Table 3 Result of optimization

	Torque ripple[%]	Normalized Average Torque[Nm]
Initial	24.75	1
Optimized	12.20	1.14

3. 결 론

본 논문에서는 자동차의 EPS에 이용되는 IPMSM의 조향감 개선을 위한 토크리플 저감 최적설계를 진행하였다. 전동기의 여러 설계인자 중에 토크리플에 가장 큰 영향을 미치는 인자들을 판별하기 위해 1/4요인배치법을 사용하였다. 그래서 5가지 설계인자 중 토크리플에 가장 영향을 많이 미치는 인자로 Slot open, Pole arc, Alpha를 선정할 수 있었다. 이 3가지 인자들과 토크리플과의 수식적인 관계는 매우 복잡하기 때문에 반응표면법을 이용하였고, 최소의 실험으로 최대의 정보를 얻기 위해 CCD를 이용하였다. 상용소프트웨어 MINITAB을 이용하여 Slot open, Pole arc, Alpha의 최적설계 point를 찾아 설계한 최적모델을 유한요소해석으로 해석하였다. 대상전동기 초기모델에 비해 토크리플이 50.7[%]의 감소율을 가짐을 확인하였다.

References

- 1) Ji-Hyoung Ban, Sung-Il Kim, Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong, "Optimal Rotor Design of Interior Permanent Magnet Motor for High Torque Using Response Surface Methodology", pp. 123-125, KIEE fall conference, 2005.
- 2) Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, "Response Surface Methodology," John Wiley & Sons, 2009.
- 3) Sang-Ho Lee, Jae-Woo Jung, Jung-Pyo Hong, "Reduction design of eddy current loss in IPMSM using response surface methodology" pp. 1218-1221, ICEMS, 2010.