

## 연료전지 전기자동차용 초고속 영구자석 동기전동기의 효율 최적설계

Optimum Design for Efficiency of Ultra-high-speed Permanent Magnet Synchronous Motor for Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle

---

저자 (Authors)	김재현, 김동민, 박현진, 홍정표, 최규성, 양현섭, 조경석 Jae-Hyun Kim, Dong-Min Kim, Hyeon-Jin Park, Jung-Pyo Hong, Kyu-Sung Choi, Hyun-Sup Yang, Kyung-Seok Cho
출처 (Source)	<a href="#">한국자동차공학회 춘계학술대회</a> , 2019.5, 1248-1251(4 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국자동차공학회</a> The Korean Society Of Automotive Engineers
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08748081">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08748081</a>
APA Style	김재현, 김동민, 박현진, 홍정표, 최규성, 양현섭, 조경석 (2019). 연료전지 전기자동차용 초고속 영구자석 동기전동기의 효율 최적설계. 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1248-1251
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.***.168.162 2019/10/04 12:55 (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.

# 연료전지 전기자동차용 초고속 영구자석 동기전동기의 효율 최적설계

김 재 현<sup>1)</sup> · 김 동 민<sup>1)</sup> · 박 현 진<sup>1)</sup> · 홍 정 표<sup>\*1)</sup> · 최 규 성<sup>2)</sup> · 양 현 섭<sup>2)</sup> · 조 경 석<sup>2)</sup>

한양대학교 미래자동차공학과<sup>1)</sup> · 한온시스템 선행부품개발팀<sup>2)</sup>

## Optimum Design for Efficiency of Ultra-high-speed Permanent Magnet Synchronous Motor for Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle

Jae-Hyun Kim<sup>1)</sup> · Dong-Min Kim<sup>1)</sup> · Hyeon-Jin Park<sup>1)</sup> · Jung-Pyo Hong<sup>\*1)</sup>  
Kyu-Sung Choi<sup>2)</sup> · Hyun-Sup Yang<sup>2)</sup> · Kyung-Seok Cho<sup>2)</sup>

<sup>\*1)</sup>Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

<sup>2)</sup>Advanced Component Team, Hanon systems, 95 Sinilseo-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34325, Korea

**Abstract** : In this paper, optimum design for efficiency of ultra-high-speed permanent magnet synchronous motor for hydrogen fuel cell electric vehicle air blower is performed. First, the design factors that greatly affect the copper loss, iron loss and eddy current loss were selected using analysis of variance. Then, the experimental points were selected using the Latin hypercube sampling method, which is a statistical method for generating a near-random samples of the design factor values from a multidimensional distribution and the test was carried out using an electromagnetic finite element method. Based on the test results, the Gaussian process is used to optimize the efficiency. Finally, the loss and efficiency of the optimum model were verified by using finite element analysis.

**Key words** : Analysis of variance(분산분석), Gaussian process(가우시안 프로세스), Hydrogen fuel cell electric vehicle(수소 연료전지 자동차), Latin hypercube sampling(라틴 초입방추출), Optimum design(최적설계), Ultra-high-speed motor(초고속 전동기)

### Nomenclature

$SST$  : sum of squares  
 $SSTr$  : sum of squares for regression  
 $SSE$  : sum of squares for errors  
 $y$  : response value  
 $F$  :  $F$ -value  
 $n$  : the number of experiments for each level  
 $k$  : the number of levels

### Subscripts

$m$  : mean

### 1. 서 론

환경규제에 따른 친환경자동차 사업이 활발히 이루어짐에 따라, 수소 연료전지 자동차(FCEV : Fuel Cell Electric Vehicle)에 대한 연구도 증가하고 있는 추세이다. FCEV는 기존 내연기관 자동차에 비해 큰 에너지 효율을 가지며, 주행 시 환경오염 물질을 만들어내지 않기 때문에 친환경자동차로 각광받고 있다. FCEV의 소형화 및 고 효율화를 위해서는 공기 블로워용 모터의 소형화 및 고효율화가 필수적인

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

데, 초고속 영구자석 동기전동기는 가벼운 무게와 작은 부피를 가지면서도 높은 효율을 낼 수 있기 때문에 차량용 전동기로써 매우 적합하다.<sup>1)</sup>

본 논문에서는, FCEV의 고 효율화를 위해 FCEV의 공기 블로워용 초고속 영구자석 동기전동기의 효율 최적설계를 진행하였다. 먼저, 분산분석(ANOVA : Analysis of Variance)를 이용하여 여러 설계 인자들 중 동손, 철손 그리고 와전류손에 영향을 크게 미치는 설계 인자들을 결정하였다. 그 후 다차원 분포로부터 설계 인자 값의 근사 샘플을 생성하기 위한 통계적 방법인 라틴 초입방추출(LHS : Latin Hypercube Sampling) 기법을 이용하여 실험점을 구하였고, 전자기 유한요소해석(FEM : Finite Element Method)으로 실험을 진행하였다. 시험 결과를 바탕으로 가우시안 프로세스(Gaussian process)를 이용하여 효율 최적설계를 진행하였다. 최종적으로 설계된 모델의 손실 및 효율을 유한요소해석을 이용하여 검증하였다.

## 2. 분산분석을 이용한 설계 인자 선정

### 2.1 대상 모델

대상 모델은 2극 6슬롯 초고속 영구자석 동기전동기로, 회전자는 중공 축, 영구자석 및 슬리브로 구성되어 있다. 정격 운전 조건은 회전속도 125krpm에 토크 1.1Nm이다.

### 2.2 직교배열표를 활용한 분산분석

초고속 영구자석 동기전동기의 손실은 크게 고정자 권선에서 발생하는 동손, 전기 강판에서 발생하는 철손, 그리고 회전자의 영구자석 및 슬리브에서 발생하는 와전류손으로 나뉜다. 본 절에서는 이러한 손실에 크게 영향을 미치는 인자를 선정하기 위해 분산분석을 진행한다. 분산분석을 진행할 설계 인자는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 tooth tip 두께(X1), slot opening 폭(X2), 치의 fillet radius(X3), 치와 요크 사이의 fillet radius(X4), 그리고 슬롯 면적 일정 조건에서의 요크의 두께(X5)로 선정하였다. 분산분석을 진행하기 위해 3수준의 직교배열을 활용한 실험계획을 구성하였다. 직교배열은 모든 조합들에 대해

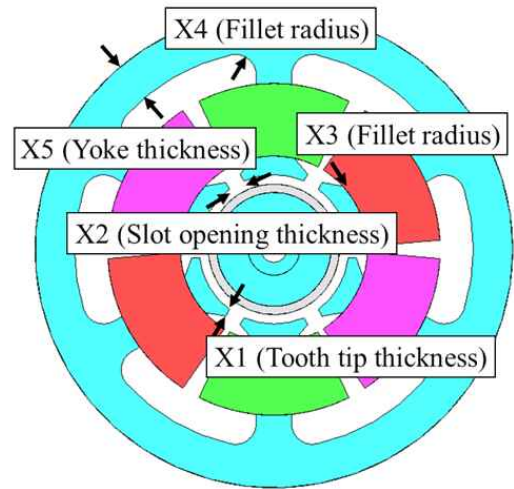


Fig. 1 Configuration of the target motor and design factors

서 실험을 하는 full factorial design 보다 적은 실험 횟수로 모든 설계조건에 대한 실험값을 예측 가능한 실험 계획법이다. 실험 결과 데이터는 모의 실험에 해당되는 유한요소해석을 이용하여 구하였다. 3D 유한요소해석으로 정격 운전조건에서의 동손, 철손 및 와전류손을 구하였고 이를 바탕으로 분산분석을 진행하였다. 분산분석은 편차의 총 제곱합을 처리 제곱합과 잔차 제곱합으로 나누어 잔차에 비하여 특히 큰 영향을 주는 요인들을 찾아내는 분석방법이다.<sup>2)</sup> 총 제곱합, 처리 제곱합 및 잔차 제곱합은 각각 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_m)^2 \quad (1)$$

$$SSTr = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{i,m} - y_m)^2 \quad (2)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_{i,m})^2 \quad (3)$$

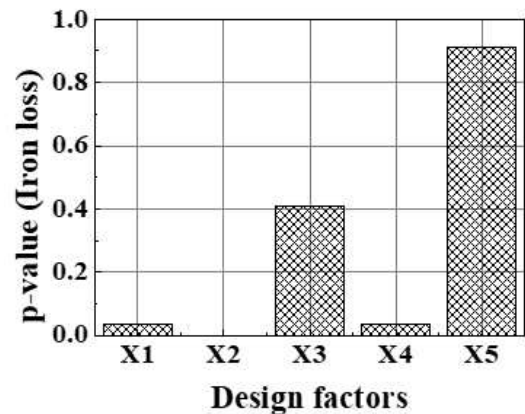
이 때, 집단 간 분산과 잔차 분산의 비율을  $F$ 값으로 다음의 수식과 같이 정의하며 이는 오차에 대한 해당 설계인자의 중요도를 나타낸다.

$$F_0 = \frac{\frac{SSTr}{(k-1)}}{\frac{SSE}{k(n-1)}} \quad (4)$$

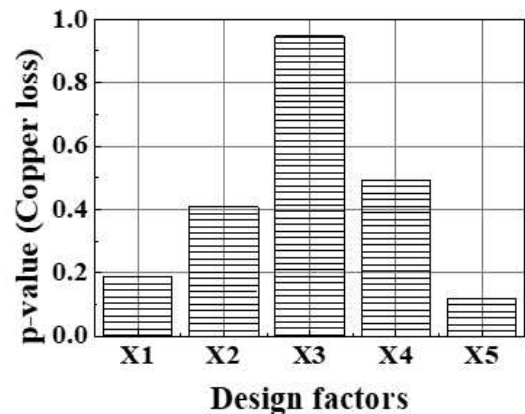
$F$ 분포에서  $F_0$  값 보다 큰 영역의 넓이를  $p$  값으로 정의하는데,  $p$  값은 설계 인자가 성능에 영향을 미치지 않을 확률을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 유의수준 0.05에서  $p$  값이 0.05 이하인 설계 인자를 최적설계 변수로 선정하였다. 분산분석 결과로 얻은 손실 별  $p$  값을 Fig. 2에 나타내었다. 와전류손은 slot opening (X2)이, 철손은 tooth tip 두께(X1), slot opening 폭(X2) 및 치와 요크 사이의 fillet radius(X4)이 크게 영향을 미치며 동손에 크게 영향을 미치는 설계 인자는 없음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 X1, X2, X4를 최적설계 변수로 선정하여 최적 설계를 진행하였다.

### 3. 효율 최적설계

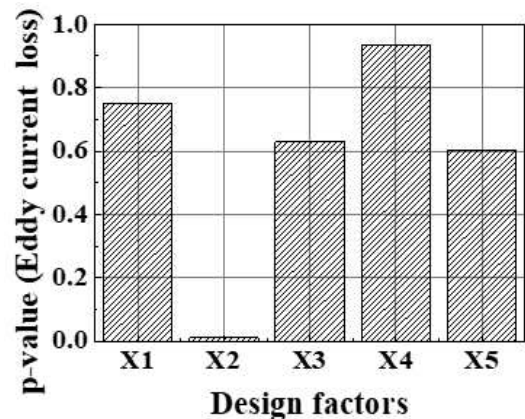
본 절에서는 분산분석을 통해 얻은 효율에 영향을 크게 미치는 설계 변수들로부터 최적 설계를 진행한다. 실험계획은 다차원 분포로부터 설계 인자 값의 근사 샘플을 생성하는 통계적 방법인 LHS 기법을 이용하여 구하였다.<sup>3)</sup> LHS 기법을 이용하여 구한 총 30개의 실험 결과를 전자기 유한요소해석을 이용하여 산정하였다. 해석 결과를 바탕으로 가우시안 프로세스를 통하여 Fig. 3과 같이 설계 변수에 대한 효율 맵을 산정하였다. 효율 맵을 통해 최적점을 결정하였고, 유한요소해석을 이용하여 최적 모델의 정격 운전 조건에서의 철손, 동손, 와전류손 및 손실을 산정하였다. 그리고 최적 모델의 철손, 동손 및 와전류손과 효율을 기존 모델과 비교하여 Table 1에 정리하였다. 결정된 최적 모델은 기존 모델에 비해 동손은 0.9W 증가하였으나 철손과 와전류손은 각각 7.1W, 24.9W 저감하였다. 결과적으로 효율은 기존 95.76%에서 95.96%로 0.2% 증가하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 p-value according to design factors (a) iron loss (b) copper loss (c) eddy current loss

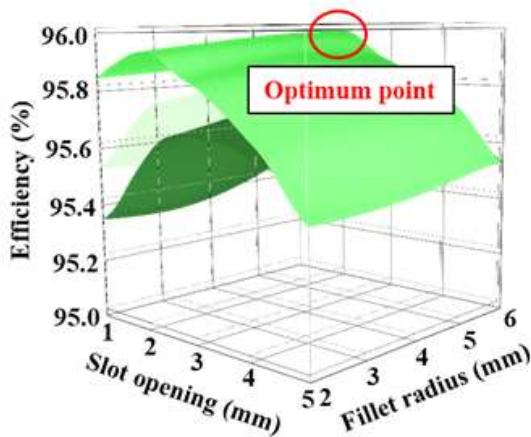


Fig. 3 Efficiency map

#### 4. 결 론

본 논문에서는 수소 연료전지 자동차용 초고속 영구자석 동기전동기의 효율 최적설계를 진행하였다. 전동기에서 발생하는 주요 손실인 철손, 동손 및 와전류손에 크게 영향을 미치는 설계인자를 찾기 위하여 직교배열을 활용한 분산분석을 진행하였다. 분산분석 결과 tooth tip 두께, slot opening 폭 및 치와 요크 사이의 fillet radius가 손실에 영향을 크게 미치는 인자임을 확인하였다. 따라서 이 설계인자들을 설계 변수로 하여 최적설계를 진행하였다. 다차원 분포로부터 설계 인자 값의 근사 샘플을 생성하기 위한 통계적 방법인 라틴 초입방추출 기법을 활용하여 총 30개의 실험 점을 산정하였고, 유한요소해석을 이용하여 실험 결과를 구하였다. 실험 결과로부터 가우시안 프로세스를 이용하여 효율 맵을 산정 후, 효율 맵을 통하여 최적의 효율을 갖는 지점을 선정하였다. 마지막으로 기존 모델과 최종 모델의 손실 및 효율을 유한요소해석을 이용하여 산정 후 비교하였다. 기존 모델에 비해 최적 모델의 철손 및 와전류손이 각각 7.1W, 24.9W 감소함을 확인하였고 이에 따라 효율은 95.76%에서 95.96%로 0.2% 증가함을 확인하였다. 철손 및 와전류손이 감소함에 따라 고정자 및 회전자의 온도가 감소할 수 있으며, 이는 영구자석의 잔류자속밀도 증가로 이어지므로 추가 손실 감소 또한 예상할 수 있다.

Table 1 Loss and efficiency of the initial model and optimum model

	초기 모델	최적 모델	증감
철손 (W)	149.0	149.9	+0.9
동손 (W)	258.6	251.5	-7.1
와전류손 (W)	230.2	205.3	-24.9
효율 (%)	95.76	95.96	+0.2

#### Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “수소연료전지차 부품실용화 및 산업기반육성사업” (과제번호 R0006468) 으로 수행된 연구결과입니다.

#### References

- 1) Jae-Hyun Kim, Dong-Min Kim, Jeong-Min Lee, Jung-Pyo Hong, Kyu Sung Choi, Hyun Sup Yang, and Kyung Seok Cho, “Design of Ultra-high-speed Synchronous Motor for Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle considering Mechanical Stress”, KSAE Conf., 1141-1145, 2018.
- 2) Jong-Cheon Park and Seung-Min Shin, “A Simulation-based Optimization of Design Parameters for Cooling System of Injection Mold by using ANOVA with Orthogonal Array”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 5, 121-128, 2012.
- 3) Sung Hyun Woo, Hyun koo Chung, Yong Bae Kim, Pan Seok Shin, Jin Seok Oh and Yeong Kyung Kong, “A Study of Cogging Torque Minimization for a Outer-Rotor Type Small BLDC Motor by using Latin Hypercube Sampling strategy (II)”, KIEE Conf., 646-647, 2009.