

## 고속회전기 적용을 위한 매입형 영구자석 전동기의 설계 및 검증

김성일\*, 홍정표\*, 이우택\*\*, 최진철\*\*, 권혁률\*\*\*, 박정희\*\*\*  
 한양대\*, 창원대\*\*, 현대·기아자동차 환경기술연구소\*\*\*

### Design and Experimental Verification of an Interior Permanent Magnet Motor for a High-speed Machine

Sung-Il Kim\*, Jung-Pyo Hong\*, Wootaik Lee\*\*, Chinchul Choi\*\*, Hyuck-Roul Kwon\*\*\*, Jeong-Hee Park\*\*\*  
 Hanyang University\*, Changwon National University\*\*, HyundaiKia Motors\*\*\*

**Abstract** - On account of small size and light weight, a high-speed machine is regarded as a key technology for many future applications of drive systems. In high-speed applications, permanent magnet (PM) synchronous motors have a number of merits such as high efficiency and high power density. Accordingly, they are suitable for driving the air-blower of a fuel cell electric vehicle (FCEV) where space and energy savings are critical. Particularly, a surface-mounted PM motor of them is mainly used as a high-speed machine. However, the motor has a fatal flaw owing to a retaining can to maintain the mechanical integrity of a rotor assembly. The can results in the increase of magnetic air-gap length in the surface-mounted PM motor. Thus, in this paper, an interior PM motor is designed in order to drive the air-blower of FCEV instead of the surface-mounted PM motor, and the experimental results of two models are compared to verify the capability of the interior PM motor for a high-speed machine.

#### 1. 서 론

최근 구동시스템의 소형화 및 경량화를 위해 고속회전기를 적용하는 사례가 증가하고 있다. 고속을 요구하는 시스템에서 증속 기어를 사용하지 않고 고속회전기를 직접 적용할 경우 기어에서 발생하는 손실 및 유지 비용을 줄일 수 있으며 구조의 단순화로 인해 시스템 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 또한 동력을 전달하기 위한 추가적인 장치 없이 고속회전기에 의한 직구동이 가능하므로 소음을 상당히 저감할 수 있는 장점을 지니게 된다 [1]. 하지만 고속회전기의 경우 기계적인 안전성 및 회전자 냉각 등을 위해 일반 전동기 보다는 큰 기계적 공극을 가지게 된다. 따라서 출력밀도가 높고 역률이 비교적 좋은 영구자석 전동기의 적용은 고속회전기를 좀 더 소형화 하는데 있어 유리하게 작용된다. 특히 표면 부착형 영구자석 전동기의 경우 비교적 간단한 자기회로 설계와 제어 알고리즘 때문에 대부분의 고속회전기에 적용되고 있는 추세이다. 하지만 표면 부착형 영구자석 전동기의 경우 영구자석 및 회전자 형상을 유지하기 위해 필요한 retaining can으로 인해 자기적인 공극이 증가되어 동일한 기자력 확보를 위해서는 영구자석 및 권선의 사용량이 늘어나게 되고 슬롯 고조파 성분에 의한 와전류 손실이 can에서 발생하는 단점을 지니게 된다. 따라서 본 논문에서는 기존 연료전지 차량의 공기 블로어 구동을 위해 적용되고 있는 표면 부착형 영구자석 전동기를 대신하여 매입형 영구자석 전동기의 설계를 제안하였으며 그 두 모델에 대한 실험을 통해 고속회전기 적용에 있어 매입형 영구자석 전동기의 이점을 검토하였다.

#### 2. 본 론

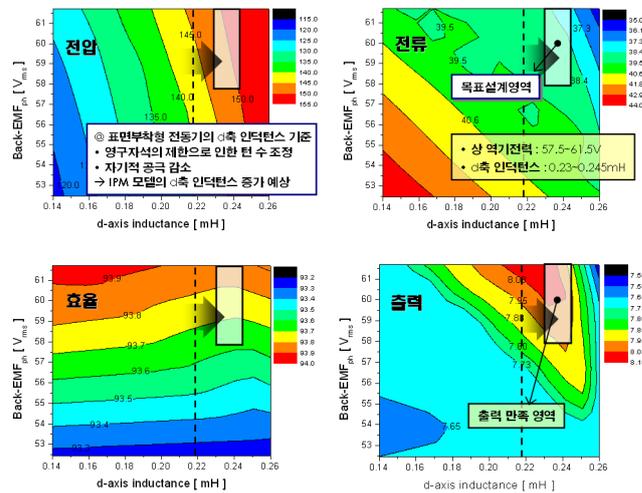
##### 2.1 매입형 영구자석 전동기의 설계방향 및 제약조건

표 1은 연료전지 차량에 적용되고 있는 표면 부착형 영구자석 전동기의 설계사양으로 매입형 영구자석 전동기 역시 이 조건을 만족시켜야 한다. 따라서 표면 부착형 영구자석 전동기의 설계 파라미터를 바탕으로 매입형 영구자석 전동기의 파라미터 범위를 설정하였으며 그 결과를 그림 1에 나타내었다 [2]. 이 때 매입형 영구자석 전동기의 돌극비는 2.1로 가정하였다. 그림 1의 결과를 바탕으로 매입형 영구자석 전동기의 설계방향 및 제약조건은 다음과 같다.

- 고정자 형상, 회전자 크기, 기계적 공극 길이, 권선 방식 그리고 영구자석은 표면 부착형 영구자석 전동기와 동일
- 돌극비 확보를 위한 다중 매입형 구조의 회전자 형상
- 표면 부착형 영구자석 전동기와 동등 수준의 전류밀도 및 점적률
- 영구자석 사용량 저감
- 기계적인 강성을 만족하는 회전자 형상설계

〈표 1〉 표면 부착형 영구자석 전동기의 설계사양

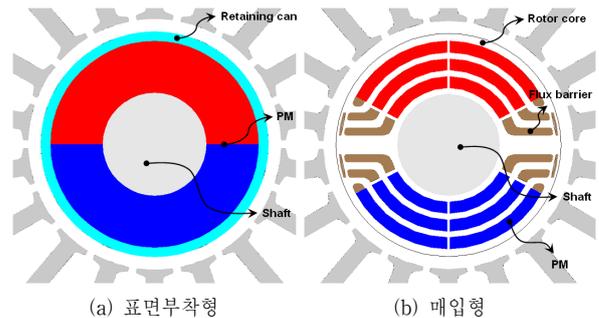
항 목	사 양
극 수 / 슬롯 수	2 / 18
DC link 전압	240V
정격 출력	8kW
전류 제한	40A
정격 속도	4000rpm



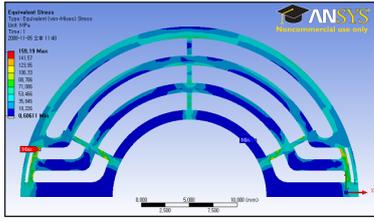
〈그림 1〉 매입형 영구자석 전동기의 설계 파라미터 범위

##### 2.2 매입형 영구자석 전동기의 형상설계 및 구조해석

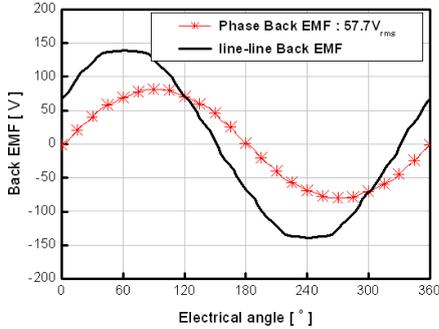
그림 2는 표면 부착형 및 최종 설계된 매입형 영구자석 전동기의 회전자 형상을 각각 보여주고 있다. 회전자 내부에 영구자석을 원주 방향으로 다중 삽입함으로써 고속회전 시 회전자에 작용하는 응력을 고르게 분산시킬 수 있도록 하였으며 그림 3에 나와 있는 구조해석 결과 회전자 코어에 작용하는 최대응력이 159.2MPa 이었다 [1]. 이 값은 전기장판의 항복점 300MPa의 약 50%에 해당하므로 충분한 기계적 강성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 1에 주어진 역기전력 및 인덕턴스의 만족 여부를 확인하기 위하여 유한요소해석에 의해 산정된 결과를 그림 4에 나타내었다.



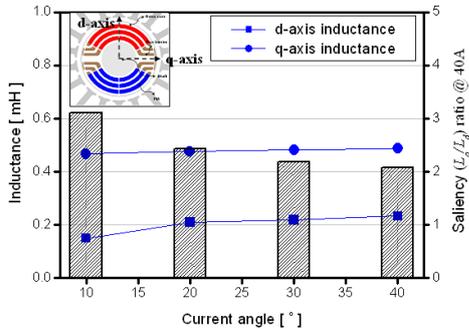
〈그림 2〉 각 영구자석 전동기의 회전자 형상



〈그림 3〉 매입형 영구자석 전동기의 구조해석 결과



(a) 역기전력 산정결과 @ 4000rpm, 상온



(b) 전류위상각에 따른 인덕턴스 및 돌극비 @ 40A

〈그림 4〉 매입형 영구자석 전동기의 파라미터

### 2.3 특성비교 및 실험결과

공기 블로어 구동을 위해 제작된 표면부착형 및 매입형 영구자석 전동기의 형상을 그림 5에서 보여주고 있으며 그림 6과 그림 7은 각각 부하실험을 위한 시험 장비들의 구성 및 역기전력 측정 결과를 나타내고 있다. 표 2는 영구자석 전동기의 등가회로에 의한 특성해석 및 최종 설계결과를 비교하였으며 표 3에서는 특정 부하에서의 특성해석 및 부하실험 결과를 나타내고 있다. 이 때 특성해석 결과의 효율이 부하실험 결과보다 낮은 것을 확인할 수 있는데 이는 기계손의 측정 결과가 정확하게 반영되지 못한데서 비롯된 것으로 판단되어 진다.



(a) 표면부착형



(b) 매입형

〈그림 5〉 공기 블로어 구동을 위한 영구자석 전동기의 제작형상

〈표 2〉 영구자석 전동기의 특성해석 및 최종 설계결과

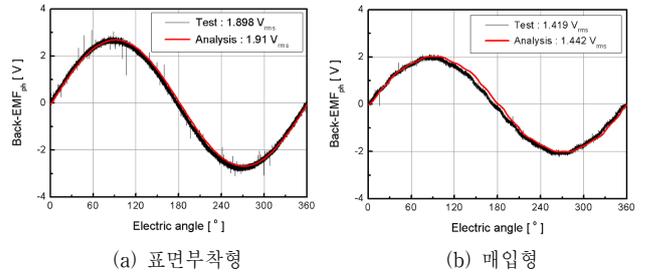
항 목	표면부착형	매입형
출력	8.9kW	8.1kW
토크	2.1Nm	1.9Nm
상 전압	86.9V	88.2V
전류	39.9A	39.9A
극 당 영구자석 vol.	$10.6 \times 10^3 \text{mm}^3$	$5.0 \times 10^3 \text{mm}^3$
전류밀도 @ 40A	15.1A/mm <sup>2</sup>	15.1A/mm <sup>2</sup>
점적률	31.9%	35.0%

〈표 3〉 측정 및 해석결과 @ 4000rpm

항 목	표면부착형	매입형	
측정결과	토크	1.0Nm	0.96Nm
	상 전압	78.8V	74.2V
	전류	20.9A	25.8A
	효율	89.2%	89.8%
	전류위상각	0°	20°
해석결과	토크	1.0Nm	0.96Nm
	상 전압	79.8V	73.3V
	전류	21.5A	23.8A
	효율	83.9%	85.3%
	전류위상각	0°	20°



〈그림 6〉 부하실험을 위한 시험장비 구성



(a) 표면부착형

(b) 매입형

〈그림 7〉 영구자석 전동기의 역기전력 측정결과 @ 1000rpm, 상온

### 3. 결 론

본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기의 고속회전기 적용을 위한 회전자 형상설계를 수행하였다. 그 결과 기존 연료전지 차량의 공기 블로어 구동을 위해 적용되고 있는 표면부착형 영구자석 전동기에 비해 영구자석 사용량을 50%이상 줄이면서도 설계 및 성능적인 면에서 크게 차이가 나지 않음을 실험을 통해 검증하였다. 따라서 회전자의 구조적인 설계만 고려한다면 고속회전기 적용에 있어 매입형 영구자석 전동기는 큰 장점을 지니게 된다.

### [참 고 문 헌]

[1] A. Binder, T. Schneider, and M. Klohr, "Fixation of buried and surface-mounted magnets in high-speed PM synchronous machines", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 4, pp. 1031-1037, 2006  
 [2] S. I. Kim, G. H. Lee, J. P. Hong, and J. H. Bhan, "Design process of interior PM synchronous motor for 42-V electric air-conditioner system in HEV", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 6, pp. 1590-1593, 2008