

# 차세대 고속전철용 영구자석동기 전동기 개발

## Development of Permanent Magnet Synchronous Motor for High-speed Electric Multiple Unit - 400km/h eXperimen

김정철†                      김봉철\*                      박영호\*\*                      김철호\*\*\*  
Kim, Jung-Chul              Kim, Bong-Chul              Park, Yeong-Ho              Kim, Chul-Ho

### ABSTRACT

Up until now, power centralized trains have been produced due to the maintenance convenience and comfortableness, but there are some problems, such as limitation of viscosity and maintenance difficulty of railroad due to recently increasing axle mass. In order to improve the problems, power decentralized trains have been developed to improve traction power. In the case of using electrical braking system, it is possible to improve braking friction power.

Induction motors have been developed for power decentralized high speed train because of less structural defection, and low maintenance and production cost. However, induction motors have limitations, such as assuring enough power capacity and efficiency with reduced size.

PMSM (Permanent magnet synchronous motor) have been newly developed to improve shortcomings of induction motors. The PMSM can be produced small and light weighted. Also if the PMSM and induction motors have the same size and power capacity, the PMSM have better power efficiency.

In this pater, the prototype and modified type of PMSM for "High-speed Electric Multiple Unit-400km/h eXperimmen" will be introduced

### 1. 서론

지금까지 우리나라와 유럽에서는 보수작업과 여객차 내의 쾌적성 측면에서 유리한 동력 집중식으로 생산되었으나 점착성능의 한계, 축중 증가에 따른 궤도 유지보수의 어려움 등이 있다. 이러한 동력집중시의 단점을 보완하고 견인력을 높혀 가속성능을 높일 수 있고, 전기제동을 사용하는 경우에 마찰제동력의 부족을 보완하기에 용이한 동력 분산식 고속전철 시스템이 개발 적용되고 있다.

이러한 동력 분산식 고속전철의 견인전동기는 구조적으로 잔고장이 적고, 유지보수 비용이 적으며 용량 대비 제조원가가 낮은 유도전동기가 주로 개발 적용되었다.

그러나 유도전동기는 충분한 용량 확보를 위해 크기를 줄이는 데 한계가 있고 효율 또한 제한적이다. 이러한 유도전동기의 단점을 보완하여 새로이 개발된 타입이 영구자석 동기전동기이다. 영구자석동기 전동기는 유도전동기에 비해 소형, 경량화가 가능하고 동일 크기 및 용량에서 효율을 높일 수 있는 이점이 있다.

본 논문에서는 차세대 고속전철에 적용되는 영구자석 동기전동기의 시제품과 차량용으로 개선 설계된 모델에 대해 소개하고자 한다.

† 비회원, 현대로템(주), 기술연구소 전장품개발팀, 주임연구원  
E-mail : jckim@hyundai-rotem.co.kr  
TEL : (031)596-9105 FAX : (031)596-9766  
\* 비회원, 현대로템(주), 기술연구소, 주임연구원  
\*\* 비회원, 현대로템(주), 기술연구소, 책임연구원  
\*\*\* 비회원, 현대로템(주), 기술연구소, 수석연구원

## 2. 본론

### 2.1 시작품 설계

#### ① 설계개요

형 식	3상 IPMSM			
목표사양	2138@2040rpm / 802Nm@5441rpm			
제한사항	3400Vrms이하 @ 5441rpm			
전원사양	구동전압	2150Vrms	최대전류	225Arms
사이즈	최대외경	Φ516	냉각방식	Forced-Ventilation

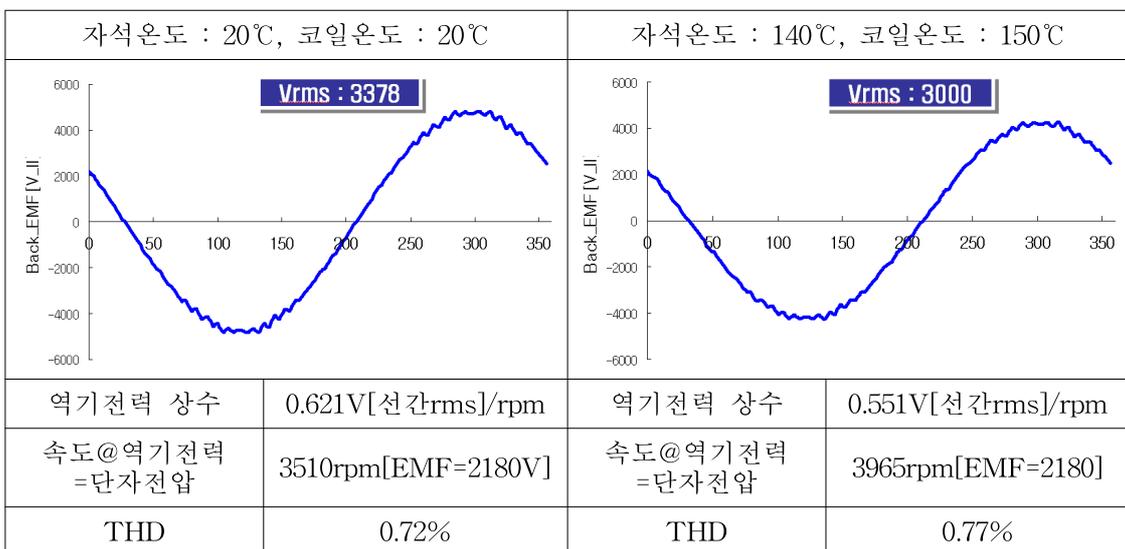
#### ② 설계제원

표 1. 차세대 고속전철용 PMSM 설계제원

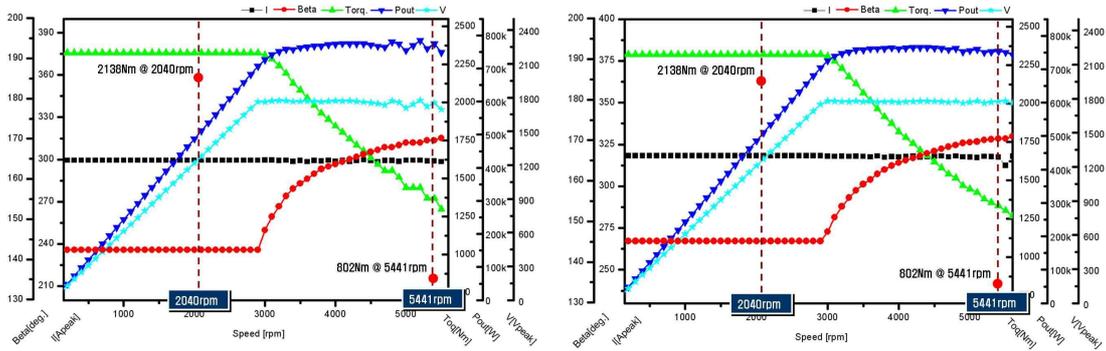
구 분		제 원
극수/상수/슬롯수		4극, 3상, 42슬롯
고 정 자	외경	516 mm
	Coil	Polyimide covered
	Core	무방향성 실리콘 Steel
회 전 자	Magnet	NdFeB (소결형)
	Core	무방향성 실리콘 Steel

#### ③ 역기전력 해석결과[5441rpm]

상기 설계제원을 바탕으로 설계 최대속도인 400km/h에 해당하는 회전수인 5441rpm에서 역기전력을 해석하면 다음과 같다. 그림에서 보는 것과 같이 자석의 온도가 올라감에 따라 역기전력이 조금 떨어지는 현상을 보인다.



#### ④ 속도 vs 토크



[자석/코일 온도 : 20°C/20°C, 212Arms] [자석/코일 온도 : 140°C/150°C, 225Arms]

그림 1. 자석 및 코일 온도에 따른 속도&토크 특성곡선

#### ⑤ 시작품 제작



회전자



완성품

그림 2. 시작품 제작 형상

### 2.2 시제품 설계

#### ① 설계개선

상기 시작품으로 제작된 PMSM의 경우 전폐형 냉각구조가 적용되도록 코일의 단면적을 충분히 확보 되도록 설계되었다. 그러나 전폐형 냉각 구조에 비해 구조가 간단하고 부가적인 장치가 적으며, 외부와의 공기 순환이 용이한 강제 송풍 냉각방식이 결정되어 전체 성능에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 코일의 단면적을 줄이고 적층길이를 줄여 중량저감을 목표로 개선 설계하였다.

설계개선은 고정자와 회전자의 슬롯 조합은 시작품과 동일하게 하였으며 슬롯의 폭을 줄여 코일의 전류밀도를 크게 하고, 반면 슬롯 치의 자속밀도를 줄여 성능이 개선되도록 하였다.

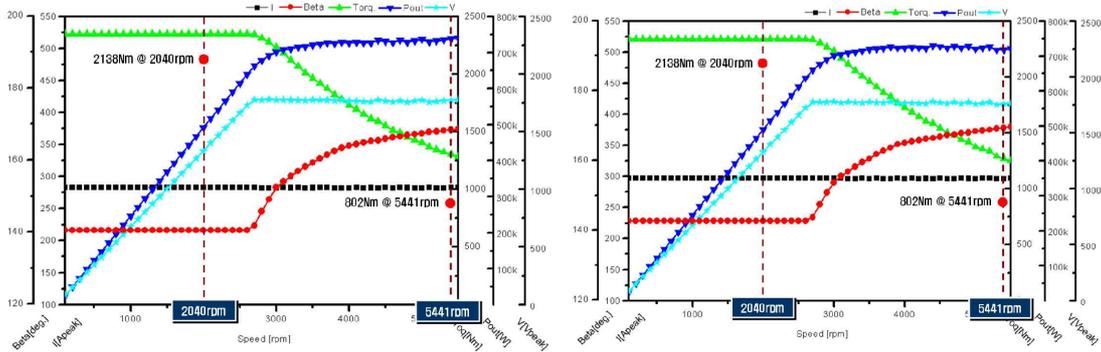
전동기의 외형의 구조는 중량과 부피를 줄이기 위해 양쪽 엔드 프레임에 용접 구조로 프레임을 제작하였고, 베어링 하우징은 견고함을 유지하면서도 가볍게 만들기 위해 알루미늄 재질을 사용하였다.

#### ② 역기전력 해석결과[5441rpm]

설계 최대속도인 400km/h에 해당하는 회전수인 5441rpm에서 역기전력을 해석하면 다음과 같다. 그림에서 보는 것과 같이 시제품보다 역기전력 파형이 좀 더 정현파에 가깝게 나왔다.

자석온도 : 20℃, 코일온도 : 20℃		자석온도 : 140℃, 코일온도 : 150℃	
역기전력 상수	0.575V[선간rms]/rpm	역기전력 상수	0.494V[선간rms]/rpm
속도@역기전력 =단자전압	3791rpm[EMF=2180V]	속도@역기전력 =단자전압	4412rpm[EMF=2180]
THD	0.874%	THD	1.082%

### ③ 속도 vs 토크

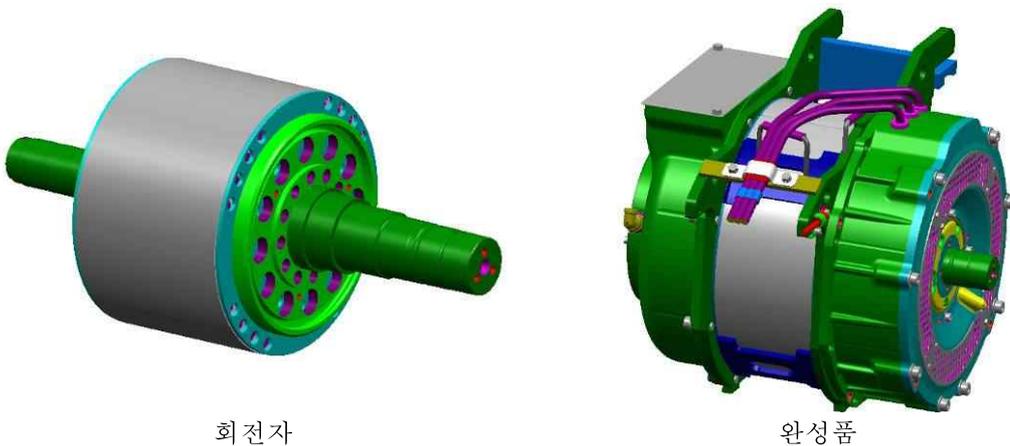


[자석/코일온도 : 20℃/20℃, 200Arms]

[자석/코일온도 : 140℃/150℃, 210Arms]

그림 3. 자석 및 코일 온도에 따른 속도&토크 특성곡선

### ④ 시제품 모델



회전자

완성품

그림 4. 시제품 모델링

### 3. 결론

이상과 같이 동력 분산 방식 고속전철용 410kW 급 영구자석동기전동기의 시작품과 시제품의 설계를 비교한 결과 시작품과 시제품 모두 요구성능을 만족하도록 설계되었으며 kg당 kW를 증가시키기 위해 시제품의 경우 시작품 대비 크기 및 중량을 절감하였으며 두 모델을 차이점을 요약하면 아래 표 2와 같다.

전인전동기의 시험은 전용 인버터를 이용하여 실시할 예정이며, 시험 결과와 설계치 검증을 통해 중량 저감이 가능한 부분을 개선하여 kg당 kW를 증가 시킬 계획이다.

표 2. 시작품 & 시제품 비교 요약표

구분			시작품 설계사양		시제품 설계사양	
			상온 [212Arms]	고온 [225Arms]	상온 [200Arms]	고온 [210Arms]
운전 성능	토크 성능	2138Nm ↑ @ 2040rpm	2330Nm	2322Nm	2349Nm	2340Nm
		802Nm ↑ @ 5441rpm	1353Nm	1300Nm	1295Nm	1261Nm
	선간 역기전력(RMS) (3400V ↓ @5441rpm)		3378Vrms	3000Vrms	3102Vrms	2658Vrms
	THD		0.72%	0.77%	0.874%	1.082%
	코깅토크		10.3Nm	9.07Nm	6.22Nm	3.45Nm
설계 제원	전체 사이즈		516×220mm		516×190mm (13.63% ↓)	
	영구자석 사이즈		2.6928 kg		2.3256 kg (13.63% ↓)	
	코일 단면적		10,685 mm <sup>2</sup>		6,300 mm <sup>2</sup> (41.04% ↓)	
	전류밀도		5Arms/mm <sup>2</sup>		8Arms/mm <sup>2</sup>	
	점적률		0.6		0.56	
	코어재질		PN08		50PN400	

### 4. 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Kondo, M. et al. (2003), “velopment of Totally enclosed Type Traction Motor Using Permanent Magnet Synchronous Motor” RTRI REPORT, Vol. 17, No. 4, pp. 17-22.
2. 김민석 · 박지성 · 김대광 · 김정철 · 정상용(2008년), “차세대 전동차용 직접 구동용 매입형 영구자석 동기전동기의 특성 고찰” 한국철도학회논문집제11권 제4호