

## 냉각시스템을 고려한 도시철도 차량 견인용 영구자석 동기전동기에 관한 연구

장형관\*, 채수황\*, 고성현\*, 김승주\*\*, 이주\*  
 한양대학교\*, 한국기계전기전자시험연구원\*\*

### A Study on Permanent Magnet Synchronous Motor for Urban Railway Vehicle traction Considering Cooling System

Hyungkwan Jang\*, Soo Hwang Chae\*, Seong Hyeon Go\*, Seung-Joo Kim\*\* and Ju Lee\*  
 Hanyang University\*, Korea Testing Certification

**Abstract** - 본 연구에서는 기존 도시철도차량 견인용 전동기는 유도전동기로 반폐형 냉각구조를 채택하여 적용 중이지만 진동, 소음 개선을 위한 전폐형 냉각구조를 적용한 도시철도 차량 견인용 210 kW급 IPMSM의 설계/제작을 진행하였다. 전폐형 냉각구조에서의 이슈는 온도포화 상승실험으로 냉각구조를 고려한 전자기 설계를 진행하였다. 전폐형 냉각구조 적용 시 고려사항으로는 전류밀도 및 냉각 성능 개선을 냉각 구조 등이 있으며 온도포화 상승 실험을 통한 결과 분석으로 향후 연구 방향 등을 논의하도록 한다.

#### 1. 서 론

도시철도차량, 자동차용 등의 견인용 전동기의 경우 고토크, 고효율을 필요로 하여 최근에는 영구자석형 동기전동기의 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 자동차 견인용 전동기의 경우 엔진룸에 장착되기 때문에 전동기 사이즈 최소화 설계로 발열 특성개선을 위한 냉각구조가 필요하다. 이에 따라 자동차 견인용 전동기의 경우 수냉식 또는 강제 공랭식 방식을 채택하여 냉각 성능을 개선 시켰다 [1-2]. 그러나 도시철도차량 견인용 전동기의 경우 전동차 하부에 장착되어 주행풍에 의한 냉각 효과도 기대할 수 있다. 유도전동기 타입의 도시철도차량 견인용 전동기는 반폐형 냉각구조로 인한 강제 공랭식을 적용하였으며, 본 연구에서는 전폐형 냉각구조를 영구자석형 동기전동기에 적용한 연구 결과를 나타낸다. 전폐형 냉각구조는 도시철도차량의 저소음, 저진동화를 위한 방법 중의 하나로 전동기 설계 시 발열 부분에 대한 고려가 필요하다 [3].

전폐형 냉각구조는 반폐형 냉각구조와는 달리 외부에서 들어오는 바람 없기 때문에 냉각 성능에 있어서는 취약한 부분이 있다. 따라서 전동기 내부 공기 순환을 통해 전동기를 냉각 시켜야 하며 외부로 부터의 이물질이 들어올 수 없는 구조로 전동기 유지보수 측면에서도 생략화가 가능하다.

전동기 설계 시 발열을 고려한 전류밀도 산정 및 전동기 내부에서의 공기 순환을 위한 전폐형 냉각구조 설계가 필요하다. 본 논문에서는 전폐형 냉각방식을 고려한 전류밀도를 산정하여 도시철도 차량 견인용 210 kW급 IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) 설계 및 제작을 통한 온도포화 상승 실험 결과 및 향후 연구방향을 제시한다.

#### 2. 본 론

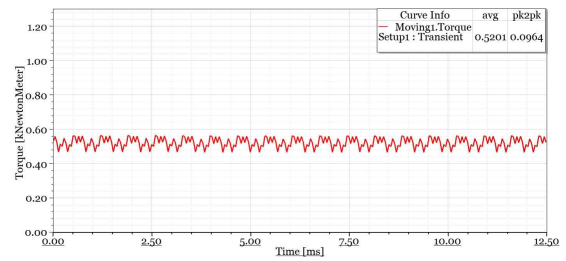
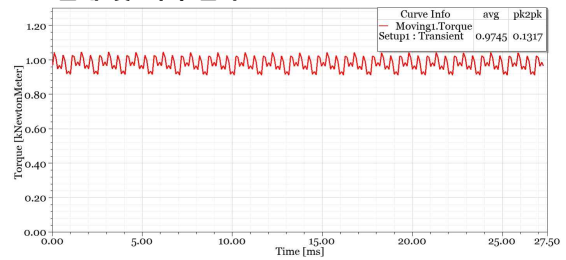
##### 2.1 도시철도차량 견인용 전동기 설계

유도전동기의 연속 정격은 210 kW 급으로 본 연구에서 진행하는 IPMSM도 동일 사양으로 설계를 진행하였다. 정격 토크 및 정격 속도는 950 Nm 및 2200 rpm이며, 최고 속도에서의 토크 및 속도는 368 Nm 및 4810 rpm이다. 전동기의 설계 제한 사항으로는 표 1과 같으며 DC-Link 전압 및 SVPWM 방식을 고려하여 상전압 제한치는 779 Vph로 제한한다. 회전자 극수는 기존 도시철도 차량의 인버터 스위칭 주파수를 고려하여 6극 이내로 제한한다.

<표 1> 철도차량 견인용 전동기 설계 제한 사항

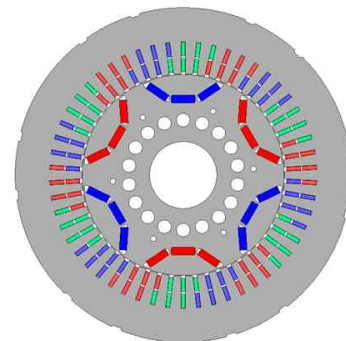
내 용	설계 사양	단 위
회전자 극수	6	극
DC-Link 전압	1500	V <sub>dc</sub>

##### 2.1.1 설계 및 해석 결과

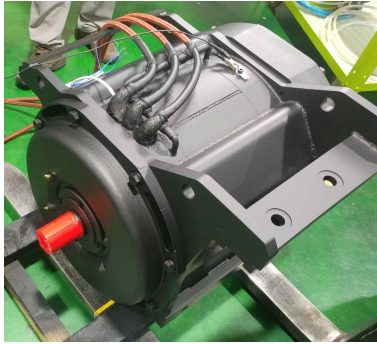


<그림 1> 210 kW급 IPMSM의 출력 토크 해석 결과  
 (a) 정격 속도 (2200 rpm)에서의 토크 (b) 최고 속도 (4810 rpm)에서의 토크

210 kW급 IPMSM은 6극 54슬롯 구조이며, 전동기의 외경은 500 mm, 축 방향 길이는 220 mm 이다.



<그림 2> 210 kW급 IPMSM



〈그림 3〉 도시철도차량 견인용 210 kW급 IPMSM 시제품

전폐형 냉각구조로 전동기 내부 온도를 고려하여 열감자에 강한 SmCo 계열의 영구자석을 채택하였다. 전자계 설계 해석 결과 정격 속도 및 최고 속도에서의 토크는 그림 1과 같이 설계 요구 사양을 만족하였다. 그림 2는 210 kW급 IPMSM의 전자계 설계도면이며, 그림 3은 210 kW급 IPMSM 실 제작된 사진이다.

설계/제작 오차 확인을 위해 무부하 역기전력 FEM (Finite Element Method) 해석 결과와 실험결과를 비교한 결과 해석치 881 V<sub>max</sub>, 실험치 883 V<sub>max</sub> 로 오차가 거의 없는 것으로 확인되었다.

또한 제작된 210 kW 급 IPMSM의 고정자 권선 3상 모두 120도 위상차 및 크기가 모두 같은 것을 확인하였다.

## 2.2 온도 포화 실험

철도차량 견인용 전동기의 온도포화 실험은 정격운전 조건에서의 온도 포화 실험 및 1시간 정격운전 조건에서의 온도 포화 실험을 진행한다. 연속운전 조건의 정격전류는 170 Arms로 정격속도인 2200 rpm에서 온도 포화 실험을 진행했다. 본 전동기 설계 시 SmCo 계열의 영구자석을 채택하여 열 감자 현상은 크게 고려되지 않지만 권선 온도가 200℃ 이상 되면 영구자석이 열 감자 현상이 나타날 수 있다.

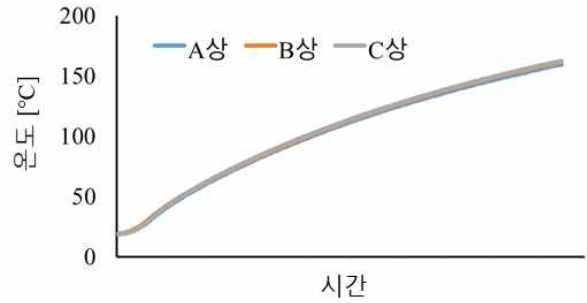
210 kW 급 IPMSM의 냉각구조는 외부 공기 유입이 안되는 전폐형 구조이며 내부 공기순환을 위해 회전자 부분에 vent hole을 만들었으며 고정자 최외각 부분 (하우징 부분)에 팬에 의한 공기 순환이 되도록 공기 순환 구조를 만들었다. 전동기의 크기 제약 사항으로 인해 냉각 구조 설계에는 한계가 있었으며 본 실험 결과를 바탕으로 추후 전자계 설계 시 실험결과를 반영한 전자계설계를 진행할 계획이다.

### 2.2.1 온도 실험 결과

정격운전 상태에서의 전동기는 토크 950 Nm, 효율 97%로 운전 중이며 온도 센서는 고정자 권선 A상, B상, C상 및 고정자 코어, 베어링 등에 부착되어 온도 포화 실험이 진행되었다. 온도 포화 실험 시작 시 주위온도는 약 18.4℃였으며 전동기에 주행 풍은 모사하지 않았다. 타사 도시철도차량 견인용 전동기의 온도 포화 실험의 경우 주행 풍을 고려한 2 m/s의 바람을 전동기로 불어준다 [3].

실험 결과는 그림 4와 같으며 정격운전 약 1시간 30분 만에 권선 온도가 160도 까지 상승하였다. 상승 추이 곡선을 이용하여 온도 포화 점 계산 시 전동기의 포화 온도는 약 225℃ 로 추정되어 절연과피 방지 및 전동기 보호 차원에서 온도포화 실험을 중지하였다.

전류밀도를 고려하여 전동기 설계를 진행하였지만 냉각구조 개선을 통한 냉각성능 개선 또는 발열원을 더 낮추는 방안인 전류밀도를 더 낮게 설계할 필요가 있다고 분석된다. 베어링 및 고정자 코어부분의 온도는 각각 약 76℃, 약 160℃로 측정되었다. 고정자 코어부분의 온도와 권선온도 상승을 같은 온도 상승을 나타내는 것을 확인 할 수 있으며 베어링 온도의 경우 100℃를 초과 하지 않는 범위에서 온도 상승을 고려해야 한다. 본 온도포화 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 개선 모델에 반영할 계획이다.



〈그림 4〉 정격운전 조건에서의 온도 포화 실험 결과

## 3. 결 론

전폐형 냉각 구조를 고려한 도시철도 차량 견인용 210 kW급 IPMSM의 제작을 통해 설계/제작 오차를 확인하였으며 온도포화 실험을 진행하였다. 전폐형 냉각구조는 전동기 내부에서 발생하는 열을 순환시키는 방식으로 전동기 설계 시 열 발원이 되는 전류밀도 선정이 매우 중요하다. 일반적인 자냉식 냉각방식을 고려한 전동기 설계 시의 전류밀도 보다 낮게 설계하여 온도 포화 실험 결과 냉각구조 개선을 통한 냉각성능 개선 또는 발열원이 되는 전류밀도의 값을 더 낮춰야 할 필요성이 있다. 향후 연구 방향으로 위에서 언급한 냉각구조 개선 또는 전류밀도를 낮추는 방안으로 연구를 진행할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임 (19TBIP-C143153-02).

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201750)

### [참 고 문 헌]

- [1] J. Bai, Y. Liu, Y. Sui, C. Tong, Q. Zhao and J. Zhang, "Investigation of the Cooling and Thermal-Measuring System of a Compound-Structure Permanent-Magnet Synchronous Machine," *Energies*, Vol. 7, pp. 1393-1426, Mar. 2014.
- [2] S. Wang, Y. Li, Y. Li, J. Wang, X. Xial and W. Guo, "Transient cooling effect analyses for a permanent-magnet synchronous motor with phase-change-material packaging," *App. Thermal Eng.*, Vol. 109, pp. 251-260, Aug. 2016.
- [3] K. Matsuoka, M. Kondo and Y. Shimizu, "A Totally Enclosed Traction Motor Using a Permanent Magnet Synchronous Motor," *Electric. Eng. in Japan*, Vol. 151, No. 3, pp. 71-80, Feb. 2005