

고속철도차량 전동기의 열적 특성 연구

A Study on Temperature Characteristics for Traction Motor of High Speed Railway

한영재^{1,a}, 김석원¹, 김상수¹, 김기환¹, 구훈모¹, 최종선², 김정수²
(Young-Jae Han^{1,a}, Seog-Won Kim¹, Sang-Soo Kim¹, Ki-Hwan Kim¹, Hun-Mo Koo¹,
Jung-Sun Choi², and Jung-Su Kim²)

Abstract

There are various elements that have influence on safety and reliability of high speed railway. Among them, mechanical characteristics of traction motors are very important. Therefore, we verified that temperature characteristics have influence on damage and durability of these parts. We designed a measurement system for temperature test, and could measure the temperature of each device by the system. As the result of temperature test, we could confirm that the traction motors on Korean High-Speed Train satisfy the criteria. From this test, we get information of the traction motor about the temperature characteristic during running speed and running time.

Key Words : High speed train, On-line test, Measurement system, Temperature

1. 서 론

전력소자의 발달은 고전압, 고출력의 능형 유도전동기의 가변속 구동을 가능하게 하였다. 한국형 고속전철도 유도전동기를 채용하였는데, 유도전동기를 사용했을 경우에는 기존 직류기보다 많은 장점을 지니게 된다. 유지보수측면에서 유리하고, 정류자 구조의 단점인 회전속도에 제한이 없기 때문에, 고속운전에 의한 소형·경량화가 가능하다. 또한 주전력변환장치에서 주회로의 무접점화가 가능하고 회생제동 및 점착성능을 향상시킬 수 있어서 철도차량용 건인전동기로 채용되고 있는 일반적인 추세이다. 따라서 철도차량용 유도전동기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-5].

유도전동기는 가변속구동과 제어를 위해 인버터를 채용하고 있는데, 이때 인버터 출력전압, 전류에 포함되는 고조파는 유도전동기의 특성에 큰 영

향을 미치게 된다. 또한 건인전동기를 병렬운전하기 때문에 고속전철의 차륜경 및 부하토크의 변화에 따라 전동기 출력토크 및 불평형 전류가 흐르게 된다.

고속철도차량용 건인전동기는 한정된 공간에 취부되어야 함으로 경량화가 필수적이다. 그리고, 전력기에 대한 에너지 고밀도화가 가능해야 함으로 열적 특성에 대한 분석이 체계적으로 이루어져야 한다[6].

본 연구에서는 한국형 고속전철용 전동기에 대한 계절, 주행속도 및 주행시간에 따른 변화를 살펴보고 있다. 이를 통하여 한국형 고속전철 건인전동기의 열적 특성에 대해 확인하였다.

2. 본 론

2.1 건인전동기의 사양 및 제원

한국형 고속전철에 사용되는 건인전동기는 유도전동기로서 독일 및 프랑스에 이어 세계 3번째로 개발되었으며, 1,100 kW급의 대용량으로 동력집중식 고속전철에서 엔진역할을 하게 된다. 이와 같은 건인전동기는 독일의 ICE, 프랑스의 TGV 등과 같은 300 km/h급의 고속전철에 사용되고 있다.

1. 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단
(경기도 의왕시 월암동)

2. 홍익대학교 전자전기공학부

a. Corresponding Author : yjhan@krii.re.kr

접수일자 : 2006. 9. 28

1차 심사 : 2006. 10. 30

심사완료 : 2006. 11. 15

표 1. 견인전동기의 사양 및 제원.

Table 1. Specification of traction motor.

| Items | Specifications |
|-----------------|------------------------------------------|
| Form | 3-Phase Squirrel-Cage Asynchronous Motor |
| Frame Structure | Frameless |
| Traction Device | IGCT Control |
| Phase/Polarity | 3-Phase/4-Polarity |
| Output | 1,100 kW |
| Voltage | 2,183 V |
| Frequency | 143 Hz |

일본의 신간선 고속전철은 동력분산식으로 350 kW 정도의 소용량 전동기를 쓰고 있지만, 한국형 고속전철의 견인전동기는 지하철 차량용 전동기보다 출력이 5배 크면서 무게는 2배 수준으로 소형, 경량화 되었다. 고정자 코일의 전기적 성능과 회전자의 기계적 성능을 강화했고 구조가 간단한 유도전동기 방식으로 설계돼 300 km/h급의 경부고속전철에 도입되는 동기전동기보다 50 km 빠른 350 km/h로 달릴 수 있다[1,3].

이와 같이 한국형 고속전철의 핵심장치인 유도전동기는 많은 장점을 가지고 있으며, 그 사양 및 제원은 표 1과 같다.

2.2 견인전동기의 냉각 구조

견인전동기 냉각구조는 그림 1과 같이 냉각공기가 고정자(stator), 공극(air gap), 회전자 통풍홀(rotor ventilation holes)을 경유하는 구조로 된 강제냉각방식이다. 냉각성능 향상을 위해, 첫번째로 유도기의 프레임은 직류기와 달리 자속이 흐르는 경로가 아니어서 자속경로를 위한 프레임 두께가 요구되지 않으므로, 프레임레스 구조를 채택하여 외부와의 냉각되는 면적을 확대한 구조를 채택하였다.

두번째로 전동기 냉각공기의 방향은 대부분 inlet에서 outlet으로 배출되는 단방향 구조로 되어 outlet은 inlet에 비해 온도가 높아져 온도상승에 대한 제약을 받게 된다. 설계된 전동기는 반부하측으로부터 냉각공기가 유입되어 고정자 축방향 통풍홀, 공극, 회전자 통풍홀을 경유하여 부하측으로 공기가 배출되는 구조이다.

여기서, 고정자 및 회전자 축방향은 inlet에 유입된 냉각공기 일부가 outlet부의 고정자 코일 및 회전자 bar로 유출시켜 온도상승 감소를 도모하였다.

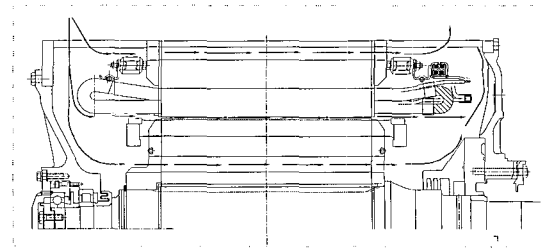


그림 1. 견인전동기 냉각 구조.

Fig. 1. Cooling structure of traction motor.

세번째로 유입되는 냉각공기의 원활한 흐름을 위해 반부하측 브라켓과 클램프간에 압력손실 또는 와류발생을 최소화하는 구조로 설계하였다.

방법은 제작시에 미리 심어둔 온도 센서로부터 온도를 입력받아 컨디셔너를 거친 후에 계측장비로 입력되는 경우이다[8].

한국형 고속전철에는 TP1 1대, TM5 1대, 그리고 TP2 1대가 취부된다. 변압기의 온도 측정에 대해 살펴보면 노이즈 차폐와 차량의 분리가 용이하게 하기 위해 동력차의 변압기는 각각 DAM1과 DAM32에서, 동력객차의 변압기는 DAM32에서 온도를 측정하였다[8-10]. 그림 4는 변압기의 오일온도와 외함온도를 측정하기 위해 동력차와 동력객차의 변압기에 부착된 T-type 온도 센서의 여러 모습을 보여주고 있다.

2.3 측정시스템의 구성

전동기에서 온도가 가장 높게 나타나는 지점은 전체 슬롯방향으로 흡입단에서 2/3지점이 통상적이다. 코어의 양쪽끝단부는 냉각공기의 유입과 배출이 자유로워 전동기 중심보다는 낮고 흡입단에서 출구단으로 가면서 코어에서의 열에너지를 흡수하기 때문이다.

전동기 온도가 가장 높은 위치는 2/3지점의 슬롯내부이지만, 슬롯내부에 센서를 부착시켜 제작하는데 어렵기 때문에 계측을 위한 전동기 온도센서는 냉각공기의 슬롯에서 출구단 바로 앞에 설치하였다.

이곳은 온도가 가장 높은 곳에서 10~14 cm 정도 떨어져 있으며, 공강내 시험에서 실제 측정온도와 가장 높은 지점의 온도차이는 20~30 °C 정도로 측정되었다. 따라서 현재 측정된 온도가 100 °C 라면 온도가 가장 높게 나타나는 곳은 130 °C 정도이다.

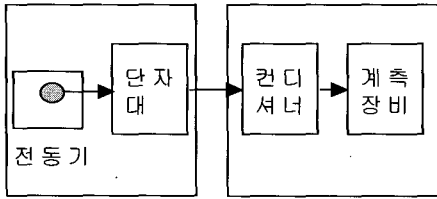


그림 2. 견인전동기 온도 측정 구성도.
 Fig. 2. Temperature measurement organization for main transformers.

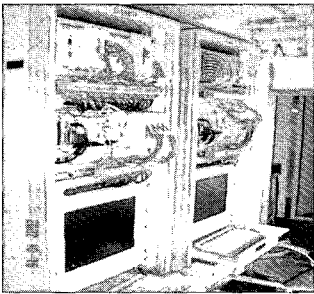


그림 3. 계측시스템의 외형.
 Fig. 3. Shape of measuring system.



그림 4. 3B Module 외형.
 Fig. 4. Shape of 3B module.

전동기 온도 측정을 위해 견인전동기 제작시에 미리 온도센서를 심어두고, 이것으로부터 온도를 입력받아 컨디셔너를 거친 후에 계측장비로 입력되도록 하였다. 그림 2는 견인전동기 온도측정 구성도를 나타낸다.

그림 3은 견인전동기 온도와 관련된 여러 정보를 입력받는 계측시스템의 외형이다. 이 시스템을 통해 견인전동기의 온도를 입력받을 수 있다. 그림 4는 견인전동기에서 오는 신호의 노이즈 차폐를 위해 사용된 3B Module을 보여준다[8].

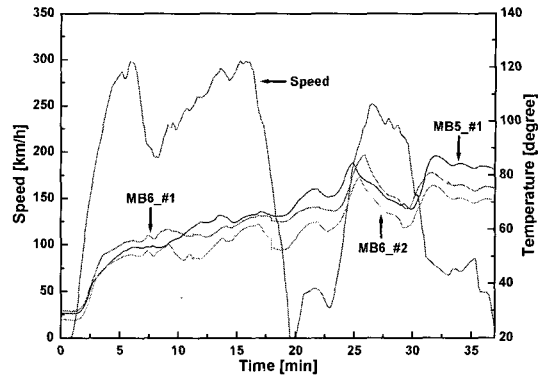


그림 5. 300 km/h 속도에서의 전동기 온도.
 Fig. 5. Traction motor temperature running 300 km/h.

2.4 시험결과

견인전동기는 180 ℃의 기준 온도를 갖고 있으며, 이 기준치를 넘어갈 경우에는 치명적인 고장을 일으킬 수가 있다. 이것을 방지하기 위해서 컨버터와 인버터의 게이트 드라이브 신호 출력을 차단하고 접촉기를 차단하여 모터블록의 가동을 중단시키고 있다.

그림 5는 광명-천안간 시운전 시험 중 300 km/h 속도에서 견인전동기의 온도 변화를 살펴본 것이다. 견인전동기의 초기온도는 차량이 출발하기 전의 온도로서 약 27~30 ℃ 정도로 비교적 정상적인 온도 수치를 보였다.

그림 5를 살펴보면 알 수 있듯이 차량이 운행중일 때는 견인전동기가 항상 가동 중이므로 온도가 계속 상승함을 알 수 있었으며, 견인전동기의 최고 온도가 각각 79~88 ℃로 나타났다. 따라서 전동기의 최고 온도가 기준 온도 180 ℃ 이내에 있다는 것을 알 수 있었고, 초기온도와 최고온도의 차이는 약 52~58 ℃ 정도임을 확인할 수 있었다.

그림 6부터 그림 8까지는 2002년 8월부터 2006년 7월까지 48개월 동안 본선시운전 시험을 수행하면서 얻은 변압기와 전동기 온도 데이터를 월별, 속도별, 시간별로 분석하였다.

시운전 중에 같은 구간을 여러 번 왕복한 것도 포함하였으나, MB를 가동하지 않아 정상적인 데이터를 얻는 것이 어려운 경우에는 자료에서 제외하였다. 차량의 주행속도가 299 km/h 또는 301 km/h를 나타냈어도 300 km/h로 처리하였다.

표 2에서 보는 바와 같이, 시운전 시험을 수행하면서 데이터를 얻은 횟수는 262회이다.

표 2. 시운전시험 내용.

Table 2. Contents of on-line test.

단위 : km/h

| 구분 [월] | ~100 | ~150 | ~200 | ~250 | ~300 | ~350 | 계 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1 | 0 | 1 | 6 | 5 | 5 | 0 | 17 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 3 | 23 | 0 | 27 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 2 | 6 | 1 | 11 |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 3 | 6 | 0 | 10 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 2 | 11 | 7 | 20 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 19 | 2 | 22 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 2 | 23 | 8 | 34 |
| 8 | 1 | 1 | 2 | 1 | 12 | 0 | 17 |
| 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 13 | 0 | 14 |
| 10 | 1 | 4 | 4 | 0 | 20 | 2 | 31 |
| 11 | 0 | 2 | 7 | 1 | 21 | 1 | 32 |
| 12 | 0 | 2 | 15 | 1 | 9 | 0 | 27 |
| 계 | 3 | 13 | 36 | 21 | 168 | 21 | 262 |

또한 시운전 시험 중 대부분은 고속선에서의 결과이지만, 2003년 11월부터 2004년 1월 사이는 기존선에서의 결과로서 한국형 고속전철이 경부선과 호남선에서 150~160 km/h 속도로 시운전 시험을 수행하였다.

그림 6부터 그림 8까지는 전동기 온도를 월별, 속도별, 운행시간별로 구분하여 정리한 결과이다. 그림 6은 월별 전동기 온도변화를 나타낸 것으로, 변압기와 마찬가지로 외기온도에 크게 좌우되는 것으로 확인되었다. 11월~1월경에 일부 전동기 온도가 높은 것은 급가속과 급제동 구간이 많은 기존선 구간에서 측정된 데이터가 포함되어 나타난 결과이다.

그림 7은 운행시간 변화에 따른 전동기 온도 변화로 속도 증가에 따라 온도가 높아지고 있다. 시운전 시험시 주행 노선의 한계로 중간에 정차하는 시간이 많기 때문에, 시험 결과의 분석을 통해 운행 시간이 전동기 온도에 미치는 영향을 정확하게 파악하는데 많은 어려움이 있었다. 운행시간 30~40분 부근은 한국형 고속열차가 고속선 구간을 300 km/h 속도로, 135분 근처는 기존선 구간을 150 km/h의 속도로 주행한 시험결과를 나타낸다.

그림 8은 속도 변화에 따른 전동기 온도를 나타낸 것으로, 운행시간과 마찬가지로 속도가 온도변화에 미치는 영향이 적은 것을 알 수 있다. 130~170 km/h 영역에서 온도가 높게 나타난 것은 기존선 구간을 2시간 이상 운행하면서 측정된 결과가 포함되었기 때문이다

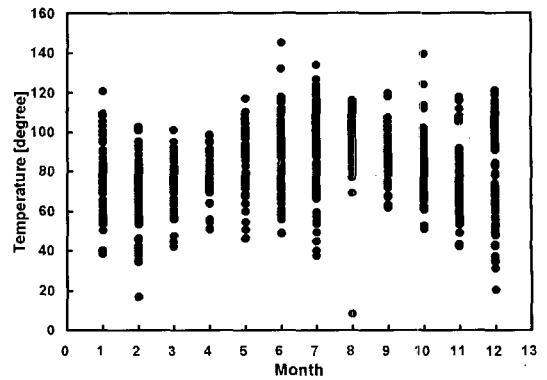


그림 6. 월별 전동기 온도.

Fig. 6. Motor temperature according to month.

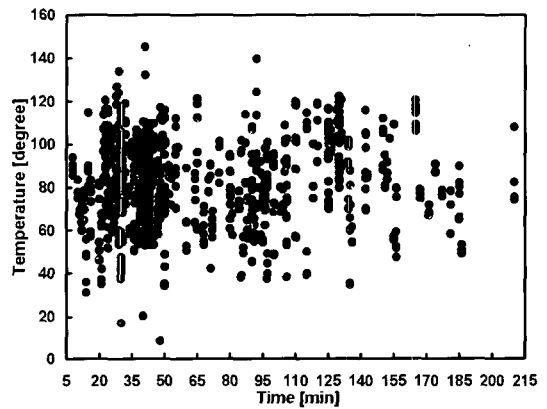


그림 7. 운행시간별 전동기 온도.

Fig. 7. Motor temperature according to running time.

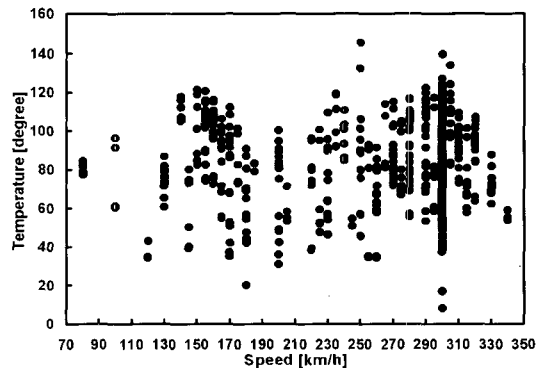


그림 8. 속도별 전동기 온도.

Fig. 8. Motor temperature according to speed.

이러한 시험결과를 통해 견인전동기의 온도가 가장 높게 올라간 때는 145.1 ℃로 기준온도인 180 ℃와 비교할 때 상당히 낮아 한국형 고속전철 전동기가 열적 특성이 우수하며, 견인전동기의 온도가 운행 시간과 주행 속도보다는 외기 온도 영향을 많이 받는다는 것을 확인하였다.

3. 결 론

고속철도차량용 전동기는 차량에 설치되는 핵심 전장품으로, 본 연구에서는 월별, 운행시간별, 속도별로, 2002년 8월부터 2006년 7월까지의 48개월 동안 전동기 온도 데이터 자료를 살펴보았다.

이를 위해 견인전동기 제작사에 미리 고정자 내부에 온도 센서를 부착하였으며, 상시 계측시스템을 통해 온도 데이터를 입력받은 후, 분석프로그램을 통해 여러 조건에 따른 견인전동기의 열적 특성 변화를 분석하였다.

4년 동안의 데이터를 분석하여 견인전동기의 온도가 가장 높게 상승한 온도는 145.1 ℃로 기준온도 180 ℃보다 낮게 나타나 제작된 전동기의 열적 특성이 우수하며, 전동기 온도가 운행 시간과 속도보다는 외기 온도의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.

앞으로는 다양한 차량 운행 조건하에서 고정자 내부온도 뿐만 아니라 고정자 외함도 측정하여 온도특성을 비교 분석할 예정이다.

감사의 글

본 내용은 건설교통부에서 시행한 고속철도기술 개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

참고 문헌

[1] J. Ito, Y. Hagiwara, and N. Yoshie, "Development of the IGBT applied traction

traction system for the series 700 shinkansen high-speed train", International Conference on Developments in Mass Transit System, Conference Publication, No. 543, IEE, p. 25, 1998.

[2] B. Wu, S. B. Dewan, and G. R. Slemon, "PWM-CSI inverter for induction motor drives", IEEE Trans on IAS, Vol. 28, No. 1, p. 64, 1992.

[3] T. Tsuboi and K. Nakamura, "Control system for traction drives", Hitachi Review Vol. 35, No. 6, p. 311, 1986.

[4] 박현준, 장동욱, 이길현, 최종선, 김정수, "과도서지를 이용한 가속열화 시험법에 따른 견인전동기 고정자 코일의 전기적 특성변화", 전기전자재료학회논문지, 16권, 9호, p. 783, 2003.

[5] 왕종배, "전기철도용 견인전동기의 복합가속열화 상태진단에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 15권, 1호, p. 93, 2002.

[6] Y. J. Han, S. W. Kim, Y. G. Kim, C. S. Park, S. G. Lee, and J. Y. Kim, "A study on traction system characteristics of high speed train", ICCAS, p. 1720, 2003.

[7] 김석원, 김영국, 한영재, 박찬경, 김진환, 백광선, "고속철도 시운전시험 계측시스템 개발에 관한 연구", 한국철도학회지, 5권, 3호, p. 158, 2002.

[8] 한영재, 양도철, 장호성, 최종선, 김정수, "고속철도차량용 전기장치의 온도특성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 16권, 12S호, p. 1210, 2003.

[9] 한영재, 김석원, 김영국, 박찬경, 최종선, 김정수, "추진장치 성능측정 시스템에 관한 연구", 한국센서학회지, 12권, 4호, p. 170, 2003.

[10] P. Masini and G. Pulia tti, "Virtual Acquisition Systems for Global Analysis (VASGA) in Experimentation", WCRR, p. 279, 1997.