

시운전시험을 통한 변압기의 열적 특성 변화

한영재*, 김기환*, 이태형*, 서승일*, 이수길*, 김종영*
*한국철도기술연구원

Thermal Characteristics of Transformer through On-Line Test

Young-Jae Han*, Ki-Hwan Kim*, Tae-Hyung Lee*, Sung-Il Seo*, Su-Gil Lee*, Jong-Young Kim*
*Korea Railroad Research Institute

Abstract - 변압기는 판토크래프를 이용하여 가선으로부터 전력을 공급받아 전력변환장치, 견인전동기 등의 각종 장치에 필요한 전원을 공급해주는 중요한 역할을 한다. 또한 전장품에서 가장 무겁고 부피가 큰 변압기는 차량의 주행 속도에 큰 영향을 미치고 변압기를 설치할 수 있는 공간상의 제약이 다르므로 소형, 경량화가 매우 필수적이다. 본 논문에서는 변압기의 오일온도와 외함온도의 변화를 확인하기 위해 차량에 취부된 변압기에 온도 센서를 부착하였다. 또한 한국형 고속전철이 운행하는 동안 변압기의 온도가 기준 온도를 넘어갈 경우 차량의 치명적인 고장을 일으킬 수 있으므로 차량 내에 상시 계측시스템을 설치하여 변압기의 온도를 실시간으로 감시하고 측정하였다. 이를 통해서 변압기의 온도 변화와 열적 특성을 분석할 수 있었다.

1. 서 론

2004년 4월부터 상업 운행중인 경부고속전철을 비롯하여 국내 기술을 총동원하여 제작된 한국형 고속전철을 시험 운행하고 있는 우리나라도 어느덧 세계에서 몇 안 되는 300km/h급 고속철도 보유국이 되었다. 하지만 일찍이 고속전철에 발을 들여놓은 유럽이나 일본의 선진 기술을 따라잡기 위해서는 아직도 가야 할 길이 험하고 멀다. 따라서 시운전 시험을 통해 한국형 고속전철에 취부된 전장품에 대하여 세밀하고 정확한 분석이 필요하며, 이를 토대로 그 특성 및 성능을 파악하여 고속전도 선진국들과 어깨를 나란히 할 수 있어야 한다. 한국형 고속전철의 여러 전기장치 중에서 변압기는 인간에 비유한다면 심장과 같이 매우 중요한 역할을 수행한다.

변압기는 전자선으로부터 교류 전압 25kV 60Hz를 공급받아 견인전동기, 냉난방기기, 조명기기 및 각종 보조기 등에 필요한 전원을 인가해주는 중요한 전기장치이다. 그러나 변압기는 다른 전장품에 비해 매우 크고 무거우므로 소형, 경량화가 필수적이며, 이를 해결하기 위해서는 권선의 전류 밀도를 높일 필요가 있다. 하지만 이것은 권선에 매우 높은 열을 발생시키며, 절연지와 절연물을 짧은 시간에 심하게 열화시킬 수 있다. 따라서 한국형 고속전철의 변압기에서 발생하는 열을 효율적으로 냉각시키기 위한 냉각시스템으로 실리컨유를 이용한 강제송유풍냉식의 구조를 사용하였다.

한국형 고속전철이 주행하는 동안 변압기의 온도가 설계 정해놓은 기준 온도를 넘어갈 경우 차량의 치명적인 고장을 일으킬 수 있으므로 변압기의 온도 변화를 항상 감시하고 측정해야 한다. 따라서 본 논문에서는 차량에 취부된 변압기 오일온도와 외함온도의 변화를 확인하기 위해 변압기에 온도 센서를 부착하였으며, 차량에 상시 계측시스템을 설치하여 그 온도를 실시간으로 감시 및 측정하고 그 데이터를 저장하였다. 상시 계측시스템을 통해 획득한 변압기의 온도 데이터를 바탕으로 변압기의 열적 특성을 월별, 주행 속도별 그리고 운행 시간별로 비교하고 분석하였다.

2. 본 론

2.1 변압기

고속전철용 변압기는 사용 목적상 일반 전력용 변압기와는 달리 운행 중에 차량의 최대속도, 궤도높이, 레일 형태, 짐목의 크기, 지형의 특성에 따라 진동 및 충격을 겪으므로 구조 안정성이 확보되어야 한다. 따라서 변압기의 무게 중심을 하부쪽으로 이동시킬 필요가 있으며, 이를 위해 중신을 일반적인 전력용 변압기와는 달리 수평으로 배치하여 변압기 외함의 구조를 공기 덕트의 역할을 하는 상부 탱크와 중신군이 들어있는 하부 탱크의 두 부분으로 분리된 구조로 제작하였다.

먼저 변압기의 소형, 경량화를 위하여 권선의 전류 밀도를 일반 전력용 변압기보다 2~3배 정도로 높게 설정하고, 절연 체계는 아라미드 계열인 II종 절연물 및 난연성 절연유인 실리컨유를 사용한 고온도 절연 시스템을 적용하였다. 이때 발생하는 열은 직접강제송유풍냉식으로 냉각되어진다.

그림 1은 변압기의 냉각을 위한 오일과 공기 흐름을 보여주고 있다. 강제송유풍냉식을 냉각 방식으로 채택하고 있는 변압기의 상부 탱크는 통풍구의 역할을 하며 좌우에 설치된 냉각기를 통해 찬 공기가 공기 덕트와 팬을 통하여 순환하게 된다. 그리고 변압기 내의 실리컨유는 냉각기에서 냉각된 후 변압기 내에서 도체 표면 및 철심 측면을 지나면서 발생한 열을 흡수하여 오일 펌프로 흡출되고, 다시 냉각기로 보내져 열 교환된다.

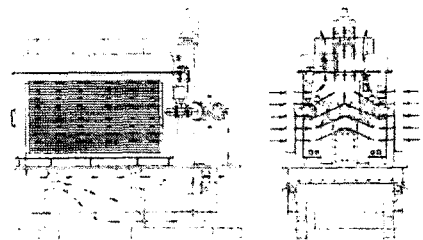


그림 1. 변압기의 오일 및 공기 흐름도

한국형 고속전철에 취부되어 있는 변압기의 주요 사양은 표 1과 같다.

표 1. 변압기의 주요 사양

| 구분 | 동력차용 | 동력객차용 | |
|----------|------|-----------|-----------|
| | | 단상 | 60Hz |
| 상수 및 주파수 | 입차 | 8,900 | 2,640 |
| | 견인 | 1,250 × 6 | 1,250 × 2 |
| | 보조 | 350 × 4 | 140 |
| 용량(kVA) | 입차 | 25 | 25 |
| | 견인 | 1.4 × 6 | 1.4 × 2 |
| | 보조 | 0.380 × 4 | 0.3 |

2.2 온도측정

한국형 고속전철에 설치된 계측시스템은 4개의 계측 모듈과 2개의 모니터링 장치 및 메인 서버(안전 모니터링으로 이용)로 구성되며, 각 계측 모듈 및 별도의 모니터링 장치에서 계측 신호를 상시 감시할 수 있도록 되어 있다. 4개의 계측 모듈은 DAM(Data Acquisition Module)1, DAM2, DAM31, DAM32로 구성되며 2개의 모니터링 장치는 주행과 제동으로 구분된다. 메인 서버는 네트워크 라인으로 계측 모듈과 모니터링 장치와 서로 연결되어 시험 데이터를 공유하고 있으며, 메인 서버에 의해 제어된다. 그림 2는 상시 계측시스템의 구성도를 보여주고 있다.

변압기의 온도 측정을 위해 계측시스템에 입력되는 방법은 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째 방법은 그림 3과 같이 측정 위치로부터 직접 계측장비에 온도값이 입력되도록 한 경우이다. 이 때는 노이즈 방지를 위해 접촉 부위에 운모를 사용하였다. 두 번째 방법은 제작시에 미리 심어둔 온도 센서로부터 온도를 입력받아 컨디셔너를 거친 후에 계측장비로 입력되는 경우이다.

한국형 고속전철에서 변압기의 온도 측정에 대해 살펴보면 노이즈 차폐와 차량의 분리가 용이하게 하기 위해 동력차의 변압기는 각각 DAM1과 DAM32에서, 동력객차의 변압기는 DAM3에서 온도를 측정하였다. 그림 4는 변압기의 오일온도와 외함온도를 측정하기 위해 동력차와 동력객차의 변압기에 부착된 온도 센서의 여러 모습을 보여주고 있다.

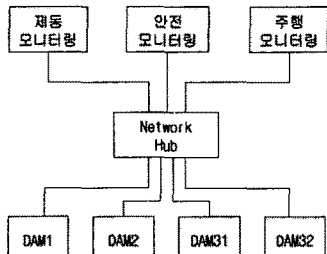


그림 2. 계측시스템의 구성도

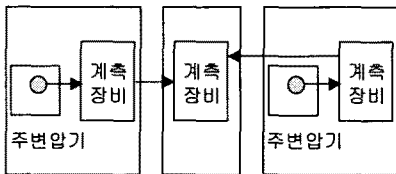


그림 3. 변압기의 온도측정 구성도

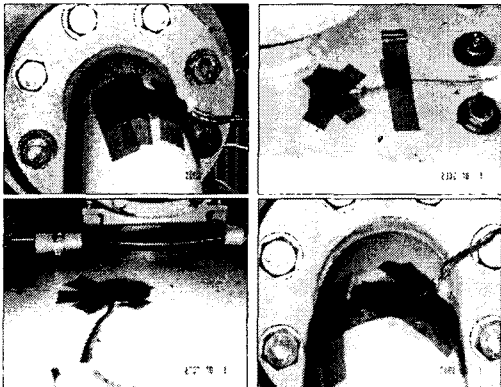


그림 4. 변압기 온도센서의 부착 모습

2.3 시험결과

변압기는 설계시 기준 온도를 갖고 있으며, 이 기준치를 넘어갈 경우에는 치명적인 고장을 일으킬 수가 있다. 이것을 방지하기 위해서 컨버터와 인버터의 게이트 드라이브 신호 출력을 차단할 뿐만 아니라 접촉기를 차단한다. 또한 모터블록의 경우에는 네트워크 라인을 통해 SCU(Supervisory Control Unit)에 고장 신호를 보내 보내 가동을 중단시키고 있다. 변압기 오일의 기준 온도는 135℃로, 변압기 외함의 기준 온도는 190℃로 정해져 있다.

그림 5는 광명-천안간 시운전 시험 중 300km/h 속도에서 변압기의 온도 변화를 살펴본 것이다. 변압기의 초기 온도는 차량이 출발하기 전의 온도로서 약 28℃ 정도로 나타났다. 그림 5를 살펴보면 변압기의 오일온도와 외함온도가 계속 상승하다가 (a)에서 최고치를 기록하였으며, 최고 온도가 36~38℃로 나타났다. 그림 6의 (a)에서 변압기의 온도가 가장 높게 상승한 이유는 차량이 주행중일 때는 변압기의 냉각팬이 가동되어 변압기의 열을 식혀주지만, 차량이 정차해 있을 경우에는 변압기의 냉각팬이 가동되지 않기 때문에 변압기의 온도가 상승한다. 여기서 오일과 외함의 최고 온도가 기준 온도 135℃와 180℃ 이내에 있음을 각각 확인할 수 있었다. 또한 초기 온도와 최고 온도의 차이는 약 7~9℃로 나타났다.

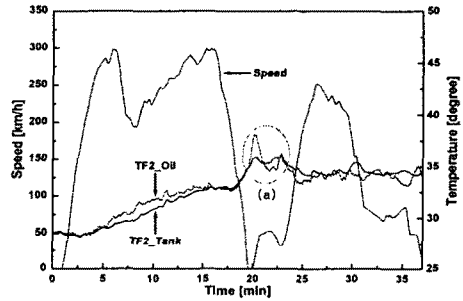


그림 5. 300km/h에서의 변압기의 온도

그림 6부터 그림 8까지는 외기 온도, 주행 속도 및 운행 시간이 변압기의 온도에 미치는 영향을 파악하기 위해 2002년 8월부터 2004년 5월까지, 약 21개월 동안 현차 시험을 수행한 내용을 월별, 주행 속도별, 운행 시간별로 변압기의 온도를 정리하여 분석한 결과이다. 표 2는 월별과 주행 속도별로 약 21개월 동안 수행한 결과로, 이 자료는 시운전 시험 중에 같은 시험 구간을 여러 조건 하에 여러 번 반복한 횟수를 모두 포함한 횟수이다. 실제 시운전 시험을 수행한 일수는 약 75회 정도이다.

참고로 표 2에서 150km/h 속도로 시운전 시험을 한 경우는 차량의 주행 속도가 순간적으로 149km/h 또는 151km/h를 나타냈어도 150km/h로 처리하여 표기하였다. 월별의 경우 3월에 수행한 시운전 시험 횟수가 전혀 없는데, 이것은 한국형 고속전철의 정기적인 차량 정비로 인해 시운전 시험 일정이 잡히지 않았기 때문이다. 또한 시운전 시험 중 대부분은 고속선에서의 결과이지만, 2003년 11월부터 2004년 1월 사이는 기존선에서의 결과로서 경부선과 호남선에서 한국형 고속전철이 150~160km/h 속도로 시운전 시험을 수행하였다.

표 2. 시운전 시험의 수행 내용

| 구분 [월] | 100 [km/h] | 150 [km/h] | 200 [km/h] | 250 [km/h] | 300 [km/h] | 350 [km/h] | 계 |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----|
| 1 | 0 | 1 | 5 | 5 | 1 | 0 | 12 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 3 | 10 | 0 | 14 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 2 | 3 | 0 | 6 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 2 | 10 | 6 | 18 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 3 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 4 |
| 8 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 0 | 8 |
| 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 | 0 | 6 |
| 10 | 1 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 10 |
| 11 | 0 | 4 | 6 | 2 | 3 | 0 | 15 |
| 12 | 0 | 2 | 13 | 1 | 2 | 0 | 18 |
| 계 | 2 | 14 | 31 | 18 | 43 | 6 | 114 |

그림 6부터 그림 8까지는 변압기의 오일 및 외함온도를 월별, 주행 속도별, 그리고 운행 시간별로 측정된 결과이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 여름철에 외기 온도가 가장 높기 때문에 변압기의 경우에도 온도가 7, 8월이 가장 높게 나타나게 된다.

그림 7은 고속전철의 속도 변화에 따른 변압기의 온도 변화를 보여주고 있다. 주행 속도가 상승함에 따라 변압기 온도도 상승하는 현상을 볼 수 있다.

그림 8은 운행 시간에 따른 변압기의 온도 변화를 보여주는데, 시운전 시험시 주행 노선의 한계로 중간에 정차하는 시간이 많았기 때문에 시험 데이터를 통해 정확하게 분석하는 데는 한계가 있었다.

전체적으로 모터블록 3대에 전력을 공급해주는 변압기(TF)1의 오일 및 외함온도가 모터블록 2대에 전력을 공급하는 변압기(TF)2보다 높은 온도를 형성하는 것을 볼 수 있다. 또한 180~200km/h 속도 대역에서 가장 낮은 온도 분포를 보이는 이유는 이 속도 영역에서의 시운전 시험이 주로 겨울철에 수행되었기 때문이다.

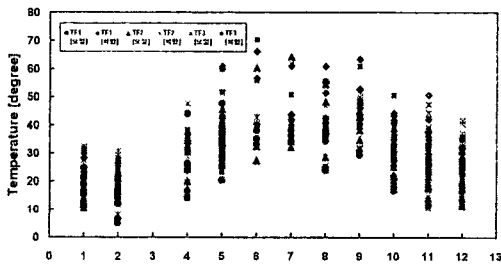


그림 6. 월별 변압기 온도

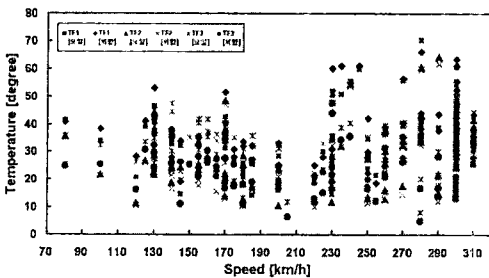


그림 7. 주행속도별 변압기 온도

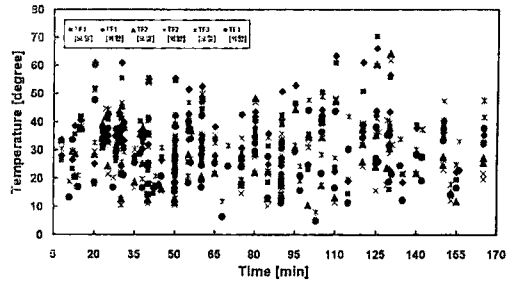


그림 8. 운행시간별 변압기 온도

3. 결 론

한국형 고속전철의 변압기는 차량에 취부되는 전기장치에 전원을 공급하는 주요 전장품으로, 본 연구에서는 계절별, 주행 속도별, 운행 시간별로 변압기의 오일온도와 외함온도 변화를 살펴보았다. 이를 위해 한국형 고속전철의 변압기에 온도 센서를 부착하였으며, 상시 계측 시스템과 분석프로그램을 통해 변압기의 온도 변화를 여러 조건에 따라 비교하고 분석할 수 있었다.

이를 통해 변압기의 오일온도와 외함온도는 운행 시간보다는 외기 온도와 주행 속도에 더 많은 영향을 받는 것으로 확인되었다. 향후에는 보다 다양한 조건하의 변압기 온도 변화 특성과 함께 변압기의 기동시간 경과에 따른 변압기의 열화 특성을 분석하여 변압기의 수명, 절연 특성 및 성능 변화를 파악할 필요가 있다고 여겨진다.

감사의 글

본 내용은 건설교통부에서 시행한 고속철도기술개발사업의 기술결과임을 밝힌다.

[참 고 문 헌]

- [1] Paolo Masini and Giovanni Puliatti, "Virtual Acquisition Systems for Global Analysis(VASGA) in Experimentation", WCRR, pp.279~286, 1997.
- [2] Y.J.Han et al., "A study on traction system characteristics of high speed train", pp. 1720~1723, ICCAS 2003.
- [3] 한영재외 4명, "고속철도차량용 전기장치의 온도특성에 관한 연구", 전기전자재료 학회지, pp. 1210~1216, 2003. 12.
- [4] 한영재외 4명, "고속철도 전기장치의 특성에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회, pp. 435~437, 2003. 4.
- [5] 변압기 견인전동기 개발, 고속전철기술개발사업연차보고서(1999), 건설부, 산자부, 과기처.