디젤전기기관차 전기장치 노후도 평가

Deterioration Analysis of Electric Systems in Diesel Electric Locomotives

김정국† 백승구* 이창영* 권성태* 권석진*
Kim, Jeongguk Baek, Seung-Koo Lee, Chang-Young Kwon, Sung-Tae Kwon, Seok-Jin

ABSTRACT

The deterioration analysis of electric systems in diesel electric locomotives, which were used for over 30 years, was performed to understand current wear and safety information. The electric systems include electric generation, traction motors, control units, high-voltage cables, and wires. In this investigation, various types of performance testing, such as insulation resistance measurement and degradation tests, were conducted to assess the degree of current deterioration. Moreover, an infrared camera was employed to verify abnormal heating in cables and wires. In this paper, the new techniques for evaluation of deterioration in electric systems have been introduced.

1. 서론

구 철도청의 공사화 및 철도구조개혁 이후, 철도의 운행 및 철도시스템의 안전에 관한 관심이 고조되어 이에 대한 결과로서 철도 안전의 확보를 위한 철도안전법이 2004년 10월22일 제정·공포되어 현재 시행중에 있다. 또한, 2005년에는 철도안전법의 시행을 위한 하부법령인 철도안전법시행령 및 철도안전법시행규칙이 제정되어 시행되고 있으며, 철도안전법 제37조에서는 철도차량의 사용내구연한에 관한 규정을 통해 철도차량의 사용내구연한을 규정하고 그 연한을 초과한 철도차량을 운행하고자 할때에는 국토해양부 장관이 실시하는 정밀진단을 받아 안전운행에 적합하다고 인정되는 경우에만 그 사용내구연한을 연장할 수 있도록 하고 있고 철도차량의 정밀진단에 관한 주요 내용과 그 시행절차 등은 철도차량정밀진단시행지침에서 규정하고 있다.

철도차량정밀진단은 차체, 대차, 제동장치 및 전기장치 등으로 나누어 세부적인 진단을 실시하게 되는데, 본 연구에서는 철도안전법의 규정에 따라 신청된 30년 이상 운행된 디젤전기 기관차의 정밀진단에 관한 내용 중 전기장치를 중심으로 노후도 평가 결과를 소개하고자 한다. 디젤전기기관차의 주요 전기장치는 주발전기 및 보조발전기, 견인전동기 등과 같은 회전기기, 계전기, 접촉기, 스위치 등의 제어기기, 그리고 고압케이블과 각종 전선류를 포함하는 부분으로 구성된다. 본 연구에서는 이러한 장치에 대한 성능의 확인, 절연저항 및 내전압 시험 등과 같은 성능 평가를 통하여 현재의 노후도에 대한 진단을 시도하였다. 특히, 고압케이블과 전선류에 대해서는 적외선 열화상 카메라를 이용한 이상발열의 유무 평가를 통해 안전성을 확인하였다. 본 논문에서는 디젤전기 기관차의 전기장치에 대해 새로이 적용된 열화상 기법을 중심으로 노후도 평가 기술을 소개하고자 한다.

2. 본론

디젤 기관차에 장착된 전기장치는 차량의 안전운행에 있어서 없어서는 안 될 장치이지만, 철도차량 유지보수지침에 따라 주발전기를 포함한 주요 고전압 전기 기기와 관련 제어 및 감시 장치를 대상으로

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 주행추진연구실, 선임연구원
E-mail : jkim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5518 FAX : (031)460-5299
* 정회원, 한국철도기술연구원

주기적인 유지보수 및 부품 교체가 이루어지고 있으므로 차량의 전반적인 사용 수명을 결정하는 요소는 없는 것으로 보인다. 따라서 전기장치에 있어서의 정밀 진단은 대상 차량의 전기장치에 대하여 가능한 일반적 시험 및 검사를 실시하여 이상 개소의 발견 및 유지보수 필요여부를 판단하는 것이 요구되며 전체적 성능 확인을 위한 노후도 평가가 필요하다.

본 정밀진단에 사용된 차량은 12Y 검수 대기 중인 2량이며, 전기장치에 대한 일반적 시험 및 검사를 시행하기 위해 차량으로부터 각 장치를 분리하여 단독적으로 실시하는 것이 바람직하나 개발 장치의 분리 및 시험에 따른 대상 차량의 운행 일정의 차질을 고려하여 차량에 장착된 상태에서 가능한 진단을 실시하고 필요시 일부 장치의 샘플로서 시험 및 검사를 실시하였다.

2.1 전기장치별 진단 항목 및 판정 기준

전기분야에 대한 진단 절차는 다음과 같은 과정으로 수행하였다.

1) 대상 차량의 검수 이력을 확인하여 차량의 이상여부를 확인 (검수 이력 분석)
2) 주요 전기장치에 대한 사용 환경을 고려하여 시험 및 검사 항목의 도출 : 정적 검사(상태 및 전기적 특성 검사)와 시운전 검사(열적 검사)로 구분함
3) 시험 방법 및 기준의 설정
4) 결과의 분석 및 판정

전기장치별 진단 항목 및 판정은 디젤전기기관차용 전기 장치는 크게 회전기기, 고압 및 저압제어기기, 그리고 기타 장치(고압 케이블 및 축전기)로 구분 하며, 디젤전기기관차 정기검수지침에 따라 분해검수 및 부품교체가 실시되는 회전기기에 대해서는 시험 대상에서 제외하였다. 저압 제어회로, 계전기, 스위치 등 고압 및 저압제어기기에 대해서는 외관 및 상태 검사로서 판정하며, 차량제작 이후 분해 검수 또는 교체가 시행하지 않는 고압케이블에 대해서는 외관 및 상태 검사, 그리고 전기적 시험을 실시하여 교체여부를 판정한다. 그러나 고압케이블의 전기적 시험은 견인전동기로부터 고압 케이블을 분리할 수 없기 때문에 케이블과 견인전동기가 연결된 상태에서 실시한 결과와 유사 사용 년 수의 차량으로부터 채취한 샘플 케이블에 대하여 실시한 결과를 분석하여 교체 여부를 판정한다.

외관 및 상태 점검을 위한 점검방법과 기준은 아래와 같다.

대 상	점검 방법	점검 기준
제어 기기	- 육안 점검 - 시운전 점검	- 충격등에 의한 변형, 깨짐등의 외관상 이상 없을 것 - 발열에 의한 변색 또는 부식의 흔적이 없을 것 - 운전중 이상음 발생 없을 것 - 운전중 기능의 오동작 없을 것
고압 케이블	- 육안점검 - 시운전 점검	- 열화에 의한 케이블 갈라짐, 손상 등 외관상 이상 없을 것 - 케이블 변색 또는 부식의 흔적이 없을 것 - 터미널 지점에서의 접촉불량에 의한 방전 등의 흔적이 없을 것. - 운전중 이상 발열 지점이 없을 것 (열화상 측정)

고압케이블에 대한 절연저항의 측정 방법과 판정기준은 아래와 같다.

측정 조건	측정 방법	판정 기준
차량 설치 상태의 케이블에 대한 측정	고압케이블 도체와 차체사이를 DC 1000V 의 전압을 1분간 인가 한 후 측정값을 읽는다.	- 결과 분석을 위한 참고치로 적용함
샘플 케이블에 대한 측정	케이블을 수조에 넣어 1시간 방치한 후 도체와 수조간 DC 1000V 의 전압을 1분간 인가한 후 측정값을 읽는다.	- 도체와 수조간 절연저항값은 20MΩ 이상일 것. * 철도 차량의 성능시험에 관한 기준에 따름

고압케이블에 대한 내전압 시험 방법과 판정기준은 아래와 같다.

측정 조건	시험 방법	판정 기준
차량 설치 상태의 케이블에 대한 시험	고압케이블 도체와 차체사이에 AC 1050V-1분간 인가함.	- AC 1050V-1분간 절연파괴 없을 것 * 현장 내전압 시험은 파괴 시험으로서 차량의 전기장치 및 회로에 지장을 줄 수 있기 때문에 견인전동기 계자권선에 대한 내전압 시험 검수기준에 따라 시험전압을 결정함.
샘플 케이블에 대한 시험	케이블을 수조에 넣어 1시간 방치한 후 도체와 수조간 AC 2500 V의 전압을 5분간 인가함.	- 2500V / 5분간 절연파괴 없을 것. * KS C IEC 60245-1 (정격전압 450/750V 이하 고무 절연 케이블 - 제1부 : 일반요구사항)의 기준에 따름

2.2 열화상검사

본 전기장치 정밀진단 대상 디젤 전기기관차는 7205호 및 7233호 2량으로서 이들 기관차에 대해 고압케이블과 케이블 연결부위 및 터미널 지점에 대한 노화 평가로서 열화상 카메라를 이용한 열화상 분석이 이루어졌다. 전기분야 정밀진단 항목 중 고압 케이블, 전선, 또는 이들 간의 접속부위에 대해 열화상 검사를 실시하여 부식, 열화, 누전, 조임 불량 등으로 인한 이상 부분에서 접촉 저항이 증대됨으로 발생된 발열을 점검하여 이상 부분을 조사하였다.

2.2.1 시험개요 및 방법

절대 영도 (絶對零度 : Absolute Zero : -273.15 ℃) 이상의 온도 값을 가지는 모든 물체는 빛의 속도로 적외선 에너지를 방사하며, 이때 이 에너지를 적외선 온도계의 렌즈 및 측정기를 통하여 감지 및 수집한다. 감지 및 수집된 에너지 량은 측정기가 에너지 량에 비례하는 전기적 신호로 바꾸어 주고, 바뀐 전기적 신호가 본 기기의 마이크로 프로세스를 통해서 온도 값으로 표시된다. 방사율 (ε, Emissivity) 값이란 물체가 외부 적외선 에너지를 흡수, 투과 및 반사하는 비율을 말하며, 이론적으로 외부 에너지를 흡수만 하고 반사하지 않는 물체를 흑체 (Blackbody)라 하며, 이때의 방사율 값은 1로 규정된다. 그러나 일반적인 물체들은 표면상태 (광택, 거칠기, 산화 등)에 따라서 흡수, 반사하는 에너지 량이 변화한다. 즉, 흡수하고 반사하는 에너지 비율이 흑체를 기준으로 할 때 실제로 1보다 작은 값을 갖게 된다.

전기장치의 열화상 진단을 위해 FILR사의 ThermaCAM T 400 모델로서, 휴대가 가능한 열화상 카메라가 사용되었다.

2.2.2 설비별 열화 판정 기준

적외선 열화상 카메라로 온도측정을 하고 이에 따른 판정을 할 필요가 있다. 각각의 측정된 온도에 따라 정상, 불량 내지는 주의 점검 등 여러 판정 사항이 있을 수 있는데 현재까지 나와 있는 여러 자료를 수집하여 본 결과 다음과 같은 판정 기준이 있다. 여기서 온도는 ΔT를 나타내고 있고 측정된 온도에서 설비 주변의 온도를 빼준 온도이다. 이 방법은 적외선 열화상 장치로 열화 진단 시에 가장 보편적으로 이용되는 방법이다.

2.2.2.1 NETA (International Electrical Testing Association)

온 도	판 정
1 ℃ ~ 10 ℃ O/A 1 ℃ ~ 3 ℃ O/S	열화 가능성
11 ℃ ~ 20 ℃ O/A 4 ℃ ~ 15 ℃ O/S	추후 결함으로 진전
21 ℃ ~ 40 ℃ O/A > 15 ℃ O/S	결함
> 40 ℃ O/A > 15 ℃ O/S	치명적 결함

* O/A - Over Ambient (대기온도 대비 증가),
O/S - Over Similar (유사설비대비증가)

2.2.2.2 경험에 의한 판정 기준

온 도	판 정
10 ℃ ~ 20 ℃ O/A	열화 가능성
21 ℃ ~ 40 ℃ O/A	추후 결함으로 진전
> 40 ℃ O/A	결함

* 미국 내 열화 진단 용역회사 판정기준

2.2.2.3 배전설비 (가공설비)

온 도	판 정
10 ℃ ~ 20 ℃ O/A	열화 가능성
21 ℃ ~ 40 ℃ O/A	추후 결함으로 진전
> 40 ℃ O/A	결함

2.2.3 7205호 및 7233호 열화상 평가 결과

전기분야 정밀진단중 열화상 기법을 이용하여 고압케이블 및 견인전동기와 연결된 케이블에 대한 정밀진단이 실시되었다. 7205호 및 7233호 전기기관차에 대한 열화상 평가는 열화상 평가를 용이하게 하기 위하여 부산-기장 간 시운전 후, 기관차 및 전기장치에 충분한 발열이 가해진 상태에서 각 량 당 6개의 견인전동기 주변의 케이블을 대상으로 이상 발열 유무를 평가하였다. 열화상 평가 결과에서 나타난 바와 같이 견인전동기 주변의 이상발열은 대상 기관차에서 발견되지 않았으며, 이들 케이블에 대한 상태는 비교적 양호한 것으로 판단되었다 (그림 1-4). 대상 기관차의 배전반 열화상 평가의 경우에도 케이블이나 접속부위에 대해서 이상 발열이 발생하지 않았으며, 대체로 판단기준의 허용 범위 이내에 있어 배전반 주변의 케이블의 상태도 비교적 양호한 것으로 판단되었다.

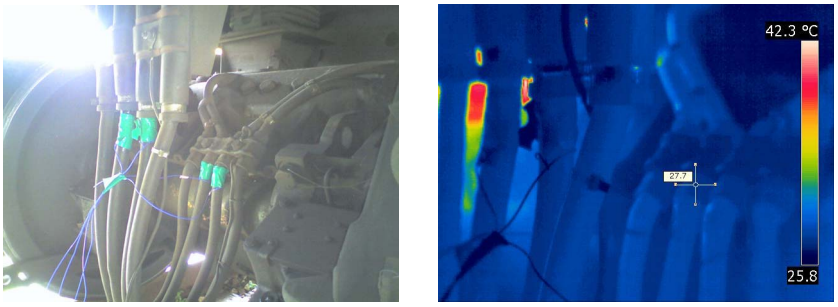

그림 1. 7205호 견인전동기 주변 케이블 실화상 및 열화상

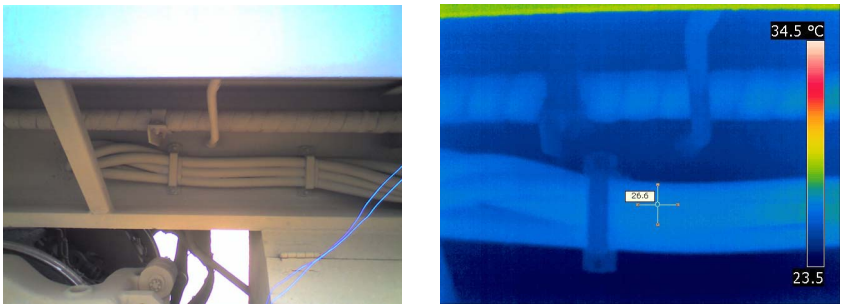

그림 2. 7205호 고압케이블 주변 실화상 및 열화상

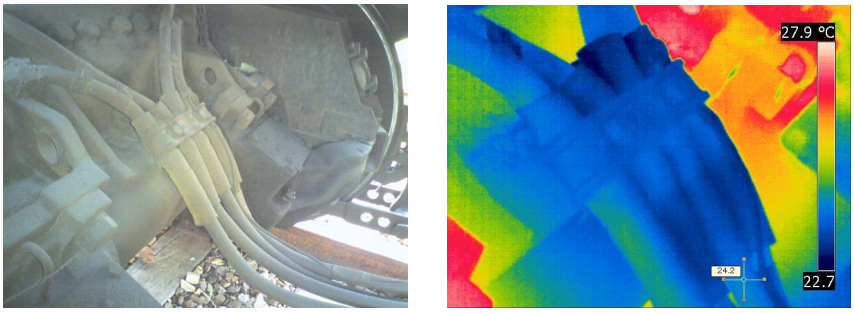

그림 3. 7233호 견인전동기 주변 케이블 실화상 및 열화상

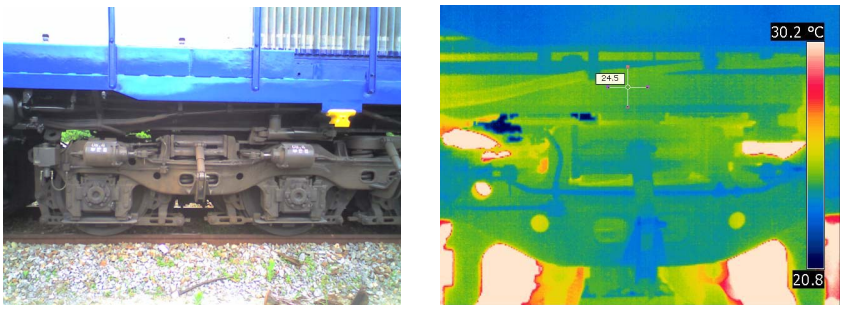

그림 4. 7233호 고압케이블 주변 실화상 및 열화상

2.3 케이블 온도변화시험

차량의 견인전동기 모터와 주 발전기와 연결된 고압용 케이블에 K-type 온도 보상도선(측정범위 : -20℃~150℃, 허용오차 : ±3℃)을 견인전동기 1번과 3번의 케이블 커넥터와 피복에 설치하여 차량의 속도 변화(0 km/h~ 80 km/h)에 의해 발생하는 온도 변화를 측정하였으며, 차량의 운행중 이상 발열 현상의 발생 여부 확인 할 수 있다.

열화에 의한 이상 발열 현상의 진단에 사용되는 판정방법은 INTA(International Electrical Testing Association)에서 제시한 대기온도 대비 증가분과 유사설비 대비 증가분을 이용한 판정 방법과 전자 기기용 커넥터에 대한 시험 및 측정을 위한 규격으로 실온에 지시된 온도상승을 초과하지 않으면서 정해진 전류를 전송시키는 부품의 능력을 평가하기 위한 표준 시험 방법을 기술한 KS C IEC 60512-5-1(전자 기기 용 커넥터-시험 및 측정-제5-1부:전기운송능력시험-시험 5a:온도상승)이 있다. INTA에서 제시한 판정기준의 경우 케이블과 커넥터의 온도측정 결과 뿐만 아니라 모든 주변 발열체의 온도를 측정하여 온도대비 증가분을 ΔT로 나타내고 이 값에 따라서 해당 판정기준을 확인하는 방법이므로 보상도선을 이용한 온도측정방법의 경우 모든 주위 발열체에 보상도선을 설치해야하므로 현 시험방법에 적합하지 않다. 따라서, 규정된 시간동안 전류를 전송하고 온도상승 증가분에 따라 이상 발열 현상발생 여부의 판단이 가능한 KS C IEC 60512-5-1의 측정방법 및 판정기준을 적용하였다.

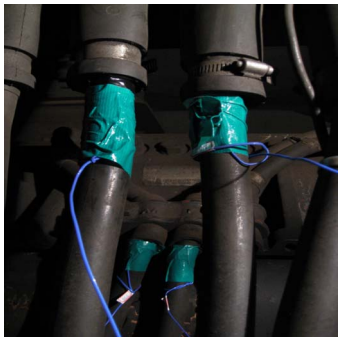

그림 5. 견인전동기(1번) 보상도선 설치위치

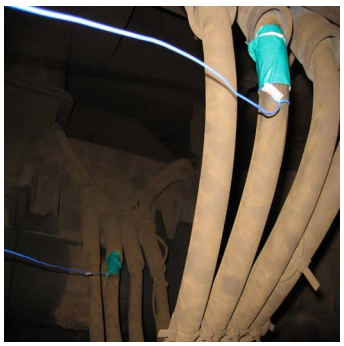

그림 6. 견인전동기(3번) 보상도선 설치위치

본 시험은 정밀진단 대상차량 중 7205호에 대하여 실시되었으며, 차량의 속도 변화에 의한 케이블 커넥터 및 케이블의 온도 변화 결과는 Table 1과 같다. 측정위치는 그림 5와 그림 6과 같이 주발전기와 견인전동기를 연결한 총 4개의 고압케이블 중 1번과 3번의 케이블에 대하여 샘플링으로 검사를 진행 하였으며, Table 1의 누적시간은 최초 출발 시간으로부터 속도 변화가 발생 할 경우 또는 차량이 정차 혹은 출발할 경우 등의 이벤트가 발생하였을 때 최초 측정시간으로 부터의 경과시간이다.

Table 1. 차량 속도변화에 대한 케이블 온도변화 (주위온도 : 21℃)

누적 시간 (min)	차량 속도 (Km/h)	측정온도 (℃)						
		TM1모터 커넥터 (LINE2)	TM1모터 커넥터 (LINE3)	TM1모터 라인 (LINE2)	TM1모터 라인 (LINE3)	TM3모터 커넥터 (LINE2)	TM3모터 라인 (LINE2)	RELAY BOX 내부
0	0	22.1	21.6	21.7	22.1	22.1	22.3	21.5
10	60	24.5	23.4	23.6	23.6	25	24.4	22.2
20	40	24.9	24.3	25.3	25.2	24.7	25.1	22.5
22	80	26	24.8	25.1	25.3	26.5	25.3	23
25	80	26	25.7	26.3	26.6	26	26.8	23.2
29	0	25.3	25.2	25.8	25.7	25.1	25.9	23.3
40	30	25.5	25.5	26	26.2	25.1	25.9	24.5
45	80	26.3	26.2	26.5	27.2	26.2	26.5	24.7
50	50	27	26.7	27.3	27.4	26.9	28.2	25.2
55	0	27	27	27.7	27.7	26	26.4	25.2
91	30	25.3	25.1	25.1	25.3	24.5	26.5	25.8
96	50	25.5	24.9	24.4	24.2	25	25.1	25.9
101	0	25.2	25.5	25.4	25.6	25.1	25.2	26.1
109	30	25.7	24.6	24.5	26.5	25.2	26.5	26.7
117	70	26	24.5	24.9	26.6	27.1	27.5	26.7
122	70	25.1	25.4	25.2	25	25.7	26	27.5
127	0	25.8	25.3	25.1	24.8	26.3	25.5	27.7

Table 1의 온도 데이터에 의한 온도 변화 추세를 확인 하기위한 그래프는 그림 7과 같다. 차량속도(주황색:우측보조선) 변화에 따른 케이블의 온도 변화를 보면 속도의 증가/감소에 따라 케이블의 온도도 증가/감소하는 추세를 보이고 있다. 이는 주 발전기의 부하를 증가시킴으로써 견인전동기에 케이블을 통해 전달되는 전류의 양이 늘어남에 따라 발생하는 열에 의한 것으로 판단된다. 만일 케이블의 노화가 많이 진행되어 각 심선 간 공극이 커지게 되면 케이블 및 커넥터의 선간 저항이 늘어나게 되고 줄열로 인한 발열량 계산($H = 0.24IR^2$)에 의해 온도는 케이블 저항의 제곱의 곱으로 증가하게 된다. 그림 7의 경우 전류 및 저항 성분의 증가와 무관한 차량 제어부인 RELAY BOX 내부를 제외하고 모든 측정 개소가 속도의 증가와 감소에 따라 온도는 초기 최소 측정값인 21.5℃에서 증가하기 시작하여 최종 측정값인 최대 28.2℃를 넘지 않고 있으며, 온도편차는 6.2℃이내임을 확인 할 수 있다. 이는 KS C IEC 60512-5-1(전자 기기용 커넥터-시험 및 측정-제5-1부:전기운송능력시험-시험 5a:온도상승) 규격에서 정하고 있는 30℃의 온도 상승값 기준을 만족하고 있으며, 시험 전, 시험 중 그리고 시험 후에 정상적인 동작을 손상시키는 어떠한 결함도 발견되지 않았으므로 케이블 및 커넥터의 온도변화 시험결과는 이상이 없는 것으로 판단할 수 있다.

3. 결론

본 디젤전기기관차의 전기장치의 노후도 평가연구에서 유도된 결론은 다음과 같다.

1) 전기장치에 대한 이력관리 기록과 현장에서의 외관 및 상태 점검 결과, 진단 대상 차량의 전기장치는 전반적으로 특이한 이상점이 발견되지 않았다.
2) 시운전에 의한 열화상 측정 결과에 따라, 고압케이블 및 단말부, 그리고 관련 제어기기 등에서의 국

부적 발열 현상은 나타나지 않았으며, 따라서 각 기기의 배치 및 접촉 상태는 양호한 것으로 판단된다.

3) 두 대의 차량에서 측정된 절연저항은 모두 1MΩ 이하로서, 고압케이블과 견인전동기를 동시에 측정하여 얻어진 결과이며, 고압케이블 보다는 견인전동기의 절연상태에 따라 측정값에 영향을 주게 된다. 이는 견인전동기가 수분 흡습이나 열화 등으로 인해 절연특성이 저하된 것으로 판단되며 따라서 견인전동기에 대해서는 분해 검수가 필요할 것으로 판단된다.

4) 고압케이블의 경우 현장설치상태에서의 시험과 샘플에 의한 시험 결과에 따라, 열화에 의한 전기적 성능저하는 나타나지 않았으며, 또한 외관상 열화로 추정되는 갈라짐이나 변색 등의 이상점이 발견되지 않았다. 따라서 디젤전기기관차용 고압케이블의 경우 교체 없이 연장 사용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 차량 외부로 노출된 케이블 부위에 대해서는 화학약품이나 충격에 의한 케이블 손상의 우려가 있으므로 주기적인 외관 점검 관리가 필요하다.

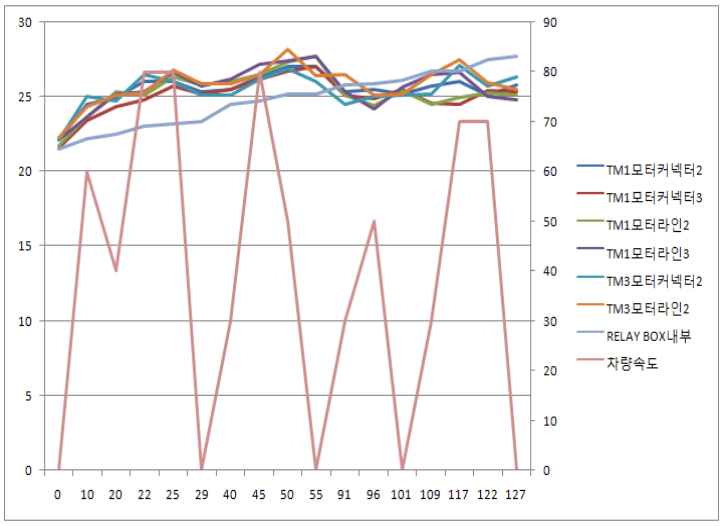

그림 7. 차량 속도변화에 대한 케이블 온도변화 그래프

참고문헌

1. 철도차량 정밀 진단 시행 지침(건교부 고시 제2005-445호)

2. 철도차량 성능 시험 시행 지침(건교부 고시 제2005-441호)

3. 철도차량 유지보수 지침 및 관련 절차서(개정 2006. 6. 29 제 2006-99호)

4. 디젤전기기관차(GT26CW-2형) 검수 지침서 (철도청, 2000)

5. KS C IEC 60245-1 (정격전압 450/750V 이하 고무 절연 케이블 - 제1부 : 일반요구사항)