철 도 사 고 조 사 보 고 서

서울메트로

4호선

수유역~미아역 사이(하선, 당고개 기점 7.3km지점)

제9907열차(레일연마차)

열차 화재

2015년 11월 26일(목), 01시 54분경

2016. 11. 7.

항공·철도사고조사위원회

이 조사보고서는 『항공·철도사고조사에 관한 법률』 제2조에 따라 사고조사가 이루어졌으며, 제25조에 따라 작성되었다.

같은 법률 제1조에서 '철도사고 조사는 독립적이고 공정한 조사를 통하여 사고 원인을 정확하게 규명함으로써 철도사고의 예방과 안전 확보에 이바지함'을 목적으로 하고 있다.

또한, 같은 법 제30조에 따라 사고조사는 민·형사상 책임과 관련된 사법절차, 행정처분절차 또는 행정 쟁송 절차와 분리·수행되어야 하고,

같은 법 제32조에서 '위원회에 진술·증언·자료 등의 제출 또는 답변을 한 사람은 이를 이유로 해고·전보·징계·부당한 대우 또는 그 밖에 신분이나 처우와 관련하여 불이익을 받지 아니한다.' 라고 규정하고 있다.

그러므로 이 조사보고서는 철도분야의 안전을 증진시킬 목적 이외의 용도로 사용되어서는 아니 된다.

차례

제목 ····· 1

개요(Synopsis) ····· 2

1. 사실 정보(Factual Information) ····· 4
1.1. 사고 경위 ····· 4
1.2. 피해 사항 ····· 5
1.3. 관계자 인적 정보 및 업무수행 사항 ····· 6
1.4. 작업 승인 ····· 12
1.5. 사고열차 이동 경로 ····· 13
1.6. 위탁 운영 ····· 14
1.7. 차량 정보 ····· 15
1.8. 선로 정보 ····· 20
1.9. 기상 정보 ····· 20

2. 분석(Analysis) ····· 21
2.1. 업무 수행 사항 ····· 21
2.2. 위험도 평가 및 관리 절차서 ····· 21
2.3. 인적자원관리 프로그램 ····· 23
2.4. 사고열차에 대한 유지관리 적정성 ····· 25
2.5. 연료탱크 구조 변경 ····· 31
2.6. 소화 설비 ····· 32
2.7. 전기 및 제어계통 분석 ····· 35
2.8. 레일연마 및 제동 ····· 46
2.9. 국립과학수사연구원 화재 감식 결과 ····· 47

3. 결론(Conclusions) ····· 48
3.1. 조사 결과(Findings) ····· 48
3.2. 사고 원인(Causes) ····· 50

4. 안전 권고(Safety Recommendations) ····· 51

서울메트로 4호선 수유역～미아역 사이 레일연마차 화재사고

○ 운영 기관 : 서울메트로

○ 운행 노선 : 4호선(하행선)

○ 발생 장소 : 수유역～미아역 사이(당고개 기점 7.3km지점)

○ 사고 열차 : 제9907열차(레일연마차)

○ 사고 유형 : 열차 화재

○ 사고 일시 : 2015년 11월 26일(목) 01시 54분경

개요(Synopsis)

2015년 11월 26일(목) 01시 30분경, 서울메트로 소속 제9907호 열차(레일연마차량(A1+A2) 중련운전, 이하 “사고열차”라 한다)는 서울메트로 4호선 동대문역사문화공원역~명동역 사이에서 레일연마 작업을 위하여 [그림 1]과 같이 창동차량기지를 출발하여 명동역 방향으로 약 22㎞/h~23㎞/h의 속도로 운행하던 중, 01시 54분경 수유역과 미아역 사이에서 조작 패닐(터치스크린)에 ‘Synchro’ 표시가 녹색 표시에서 백색 표시로 비활성화되면서 갑자기 엔진이 정지되었고, 레일연마차량 중 A1차량(이하 “사고차량”이라 한다)의 엔진룸에서 화재가 발생하였다.

[그림 1] 사고발생 위치 개략도

운전원과 함께 탑승한 작업원들이 소화기로 화재를 진화하였으나, 잠시 후 2차 화재가 발생하였고 사고차량의 엔진룸 내부 및 엔진계통에 연결되는 배관, 제어배선 등은 대부분 연소되었다.

금번 사고로 인명피해는 없었으나, 사고차량 엔진룸이 [그림 2]와 같이 전소되고 터널 내 궤도·토목, 전기, 통신, 전자 등 선로 주변에 설치된 설비 일부가 훼손되어 간접 피해액을 제외한 약 22억 4천 3백만 원의 물적 피해가 발생하였다.

[그림 2] 레일연마차

『서울메트로 4호선 수유역~미아역 사이 레일연마차 화재사고』의 원인 규명을 위해서는 사고차량을 조사하여야 하나, 금번 화재로 사고차량의 엔진룸 및 엔진계통에 연결되는 배관, 제어 배선 등이 연소로 대부분 소실되어 항공·철도사고조사위원회에서는 사고차량의 화재사고 원인 규명이 불가능하였다.

그렇지만, 향후 동종·유사한 화재사고 예방을 위해 사고 당시 사고차량과 함께 편성(A1+A2)되어 운행한 화재가 발생되지 않은 또 다른 레일연마차(이하 "A2 레일연마차"라 한다)의 현장조사 결과를 바탕으로 화재 발생 가능성을 다음과 같이 결정하였다.

사고 원인은 엔진룸에 설치된 각종 전원 케이블 및 제어전선의 절연저항이 저하되어 차체 또는 각종 전선들이 단락되는 순간 발생한 불꽃이 주변 가연물에 점화되었을 것으로 추정하였다.

기여 요인은 엔진보다 낮은 위치에 수평구조로 설치된 연료탱크를 엔진보다 높은 수직 구조로 연료탱크로 변경하면서 자동 잠금 밸브를 설치하지 않은 것이 화재 확산 요인으로 작용하였을 것으로 추정하였다.

항공·철도사고조사위원회는 사고조사 결과에 따라 서울메트로에 7건의 안전권고를 발행한다.

1. 사실 정보(Factual Information)

1.1. 사고 경위

2015년 11월 26일(목) 01시 30분경 고장열차는 사고차량의 견인운전으로 창동차량기지를 출발하여 01시 35분경에 노원역에 도착, 반대방향 운전을 위하여 A2 레일연마차로 운전실을 변경한 후, 명동역(하선) 방향으로 운행하던 중 01시 54분경에 수유역~미아역 사이에서 사고열차의 운전실 조작 패널(터치스크린)에 앞뒤 차량의 엔진 회전수가 동일하지 않을 때 발생하는 'Synchro' 표시가 녹색에서 백색으로 비활성화되면서, 사고차량의 엔진이 정지되었고 사고차량의 엔진룸에서 화재가 발생하였다.

사고열차에 승차한 6명(운전원 2명, 화재감시원 3명, 운전감독원 1명, 이하 "작업원들"이라 한다)이 사고열차에 있던 소화기(6개, 하론 소화기 2개, ABC 분말 소화기 4개)로 화재를 진화 중 01시 56분경에 119에 출동을 요청하였다.

02시 01분경 소방차가 도착하였으나 지하구간으로 진입하지 못하여 소화 작업을 수행할 수 없었고, 연소는 계속되어 04시 30분경 [그림 3]과 같이 사고차량의 엔진룸 및 엔진계통에 연결되는 배관, 제어전선 등을 태우고 자연 진화되었다.

[그림 3] 사고차량(A1) 전소 상태

화재 현장의 작업원들은 02시 20분경에 수유역으로 대피하여 인명 피해는 없었고, 사고차량을 06시 20분경 창동차량기지로 회송(returning), 입고(06시 44분) 조치하는 과정에서 서울메트로 4호선 당고개역~성신여대역 사이(상,

하선) 첫 열차부터 약 1시간 40분 열차 운행이 중단되었다.

1.2. 피해 사항

1.2.1. 인명 피해

이번 사고로 인하여 인명 피해는 발생하지 않았다.

1.2.2. 물적 피해

차량 전소로 인한 15억 6천 3백만 원(잔존가 기준), 시설물 훼손으로 궤도·토목분야 2억 5천 8백만 원, 전기분야 6천 5백만 원, 통신분야 3억 4천 9백만 원, 전자분야 8백만 원 등 약 22억 4천 3백만 원의 물적 피해가 발생하였으며, 물적 피해내역은 [표 1]과 같다.

분야		계(원)	소계(원)	피 해 내 역
합 계		2,243,681,300		
통신	내부	74,403,900	74,403,900	- 광(C)케이블(755m), DMB케이블(945m) - 열차무선안테나(30m), DMB 안테나 교체(30m)
	외부	275,000,000	75,218,000	- SK텔레콤(주) 광케이블 등 시설물
			199,782,000	- 한국전파기지국:KT 광케이블
전 기		64,769,900	46,800,000	- 수유~미아 전차선로 긴급복구 공사
			17,017,000	- 수유~미아 조명설비 긴급복구 전기공사
			952,900	- 송배전분야 긴급복구 공사
전 자		7,868,772	5,566,295	- 승강장 안전문 구동 모터 교환(7개)
			660,000	- UPS실 하론소화기 가스 충전(3개)
			495,000	- UPS실 하론소화기 자동 작동장치(3개)
			1,147,477	- 승강장 안전문 청소 1식
궤 도		1,566,438,728	3,320,000	- 레일체결구 20개, 타이롯트 2개, 가받침 4개 - 앙카10개, 인건비 20명
			1,563,118,728	- 레일연마차 2호 A1카 전소
토 목		255,200,000	77,000,000	- 본선 BOX구조물 안전진단 비용
			178,200,000	- 본선 BOX구조물 보수·보강 비용

[표 1] 세부 피해 내역

1.3. 관계자 인적 정보 및 업무수행 사항

1.3.1. 운전원

1.3.1.1. 운전원(A)

사고차량 운전원 주○○(남, 37세, 이하 “운전원(A)” 라 한다)은 ㈜○○에 2012년 4월 1일 입사하여 2015년 1월 1일부터 사고차량 운전원으로 사고 당시까지 근무하고 있었다.

업무관련 자격은『철도안전법』(법률 제13436호, 2015.7.24. 개정, 이하 “철도안전법”이라 한다) 제10조(철도차량 운전면허)에 따른 철도차량운전면허(철도장비)를 소지하고 있었다.

운전원(A)의 진술에 따르면, 2015년 11월 25일 19시경 ㈜○○ 신정차량기지 사무실에 출근 후 창동차량기지로 이동하여 2015년 11월 26일 00시 55분경 사고차량에 도착, 냉각수 및 엔진기름 누설상태를 육안으로 확인 후 시동을 걸었다.

날씨가 추워 엔진 온도를 상승시키기 위해 공기압축기 및 각종 기기 스위치를 켜고(On) 출고준비를 마쳤으나 엔진 소리 등 이상을 느끼지 못하였으며, 작업을 시작하기 전 작업원들 모두 음주를 하지 않았다.

야간 레일연마작업을 위해 01시 30분경 창동차량기지에서 사고차량을 운전하여 01시 35분경에 노원역에 도착한 후 운전실을 A2 레일연마차 쪽으로 설정하여 놓았다.

노원역부터 A2 레일연마차 운전원 이○○(남, 38세, 이하 “운전원(B)”라 한다)이 운전하여 수유역을 통과 후 약 18km/h로 운행 중인 상태에서, 갑자기 사고차량 운전실 조작 패널(터치스크린)에 ‘Synchro’ 표시가 녹색 표시에서 백색 표시로 비활성화되어 ‘Synchro’ 백색 표시를 녹색 표시로 복귀시키려고 스위치를 조작하였다.

미아역 접근 시 사고열차가 스스로 정지되어 원인 확인을 위해 차내 모니터를 보던 중 옆에 있던 화재감시원 김○○(남, 56세 이하 “화재감시원(A)”라 한다)이 “연기가 보인다.”고 하여 엔진룸으로 뛰어가 보니 엔진룸 측면에 부착된 부직포 사이로 빨간 불빛이 보여 즉시 화재로 인식하고 운전실에 있는 하론 소화기를 사용, 화재를 진화하여 완전히 소화된 것으로 생각하였다.

잠시 후 다시 화재가 발생하면서 급속히 확산되어 작업원들이 남아 있던 5개의 소화기를 사용하였고, 인근에서 작업 중이던 도상 다짐(MTT)[1] 차의 소화기도 사용하였으나 화재를 진화할 수 없었다.

사고열차 출고 점검 시 엔진룸 점검은 운전감독원을 제외한 작업원 5명이 시행하였고 운전원(A)는 각종 공기, 엔진 오일, 디젤 연료의 누유 상태 점검, 방화수 보충 상태, 각종 표시등을 점검한 결과 이상을 발견하지 못하였다.

사고차량은 사고 발생 2일 전(2015년 11월 23일)에도 별다른 이상이 없었고, 터널 내에서 화재가 발생할 요인이 발견되지 않았다.

또한, 지적환호 확인, 무전기 통화요령 등 직무에 관련된 일일 교육, 월간 교육을 지사장 등 관리자들이 시행하였으며, 레일연마차에 대한 전문교육과 화재감지기 사용법 등에 대한 교육은 받은 사실이 없으나, 견인 요령과 트롤리[2] 복구 등 응급조치 교육 및 훈련에 참여하였으며, 사고차량을 약 11개월 동안 운전한 경험이 있다.

1.3.1.2. 운전원(B)

A2 레일연마차 운전원(B)는 ㈜○○에 2012년 4월 1일 입사하여 2015년 1월 1일부터 A2 레일연마차 운전원으로 사고 당시까지 근무하고 있었다.

---

1) MTT(Multiple Tie Tamper) : 침목과 레일을 받쳐주고 있는 도상(자갈)을 다지기를 할 목적으로 연속해서 도상 밸러스트를 동시에 달고 다짐하는 다기능 궤도보수 차량

2) 트롤리(Trolley) : 유지보수 작업에 필요한 물품들을 실을 수 있도록 제작한 무동력 대차로 동력차와 연결하여 사용함.

업무관련 자격은 『철도안전법』 제10조(철도차량 운전면허)에 따른 철도차량 운전면허(철도장비)를 소지하고 있었다.

운전원(B)의 진술에 따르면, 사고 당일 01시경에 A2 레일연마차로 이동하여 차체 하부의 호스 상태, 브레이크 상태, 트롤리 상태, 각종 누유 상태, 냉각수 등을 점검하였으며, 엔진룸의 주 스위치를 투입 후 운전실로 이동하여 시동을 걸고 운전제어실 전원공급 스위치를 투입하였다.

A2 레일연마차 운전실에 설치된 제어용 컴퓨터를 켜고 초기화가 이루어지는 동안 각종 라이트 상태를 확인하였고, 차체 하부로 내려가 기동 후 각종 기름 상태와 누유 점검을 마치고 운전실로 돌아와 제어용 컴퓨터 로그인과 각종 기록계(게이지) 지시 상태를 확인하였다.

이와 동시에 운전원(A)는 사고차량을 점검하였고 운전감독자는 작업 내용, 주의 사항, 안전관련 사항 등을 다른 작업자에게 주지시켰다.

사고 당시 약 22km/h 속도로 운행 중 갑자기 장비가 덜컹거려 A2 레일연마차의 조작패널(터치스크린)을 확인하니 'Synchro' 표시가 녹색 표시에서 백색 표시로 비활성화된 상태였고 운전감독원과 화재감시원이 엔진을 확인하러 나갔으며, 인터폰으로 운전원(A)에게 엔진 정지 사실을 통보하니 "이미 알고 있다."고 말하였다.

즉시 무선전화로 종합관제실 시설관제에 화재 사실을 통보하고 사고차량을 견인할 수 있는 모터카를 수배 후 A2 레일연마차 엔진을 정지시키고 밖으로 나가 함께 화재를 진화하였다.

1.3.2. 화재감시원[3)]

3) 화재감시원 : 레일을 연마할 때 불꽃이 튀어 선로 상에 있는 전기, 신호 등 다른 시설물에 불이 옮겨 붙지 않도록 주변에 방화포를 펼쳐놓고 작업개소 선로 주변을 계속 순회하면서 화재 발생 예방 활동을 수행함.

1.3.2.1. 화재감시원(A)

사고차량에 탑승한 화재감시원(A)는 ㈜○○에 2009년 1월 1일 입사하여 모터카 운전원으로 근무하다가 2014년 10월 1일부터 화재감시원으로 근무하고 있었다.

화재감시원(A)의 진술에 따르면, 2015년 11월 25일 09시경 신정차량기지 ㈜○○ 사무실로 출근, 담당 이사와 장비 지사장으로부터 정신 및 안전교육을 받았다.

교육은 매일 조회 시간에 시행하는 일일 교육과 월간 교육으로 구분되며, 내용은 주로 지적환호 확인, 무선전화 통화 요령 등 직무에 관련된 내용으로 지사장 등 간부들이 교육을 시행한다.

교육을 받은 후 창동차량기지로 이동하여 레일 연마에 사용되는 물을 보충하였고 각종 호스 및 누유 상태와 작업 트롤리 등 이상 유무를 육안으로 확인하였다.

23시경 창동차량기지 운전취급실에서 운행허가서를 받은 후 ㈜○○ 창동 사무실에 대기 중 신정사무실에서 출동한 작업원들과 합류하여 2015년 11월 26일 00시 50분경 사고차량 사전 점검(차막이[4] 제거 등 운전준비 점검)을 화재감시원 2명과 함께 실시하였으나 이상이 없어 01시 30분경에 출고하였다.

사고차량이 창동차량기지를 출발할 때 엔진 소리 등 모두 정상이었고 수유역을 지나면서 하얀 연기가 깃털 구름같이 운전실 유리 위로 날리는 것을 보고 배기가스로 생각하였으나 연기가 점점 짙어져 화재임을 알게 되었다.

운전원(A)가 차내 하론 소화기를 들고 운전실 밖으로 나가는 것을 보고 플래시를 들고 동행하여 화재 부위를 비춰주며 소화를 도와주었다.

---

4) 차막이 : 차량을 경사진 곳에 정차시켜 놓을 때, 차량 중량에 의해 스스로 굴러 내릴 우려가 있으면, 차량이 굴러 내려오지 못하도록 나무로 제작된 쐐기 형식의 도구를 말함.

출고 시 연료량은 사고차량(A1)에 설치된 게이지를 통하여 확인한 결과 연료 탱크 용량 2,000ℓ 중 약 1,650ℓ가 남아 있었다.

1.3.2.2. 화재감시원(B)

A2 레일연마차에 탑승한 화재감시원 나○○(남, 63세, 이하 “화재감시원(B)”라 한다)는 ㈜○○에 2008년 12월 31일 입사하여 사고 당일까지 화재감시원으로 근무하고 있었다.

화재감시원(B)의 진술에 따르면, 2015년 11월 25일 09시경 창동량기지로 출근하여 사고열차의 정비, 점검(방화수 보충, 각종 호스 및 누유 상태, 작업 트롤리 육안 확인)을 이상 없이 마치고 16시경 퇴근, 23시경 ㈜○○ 신정 장비사무소로 재 출근 후 전동열차를 이용하여 창동차량기지로 이동하였다.

2015년 11월 26일 00시 50분경 사고차량에 도착하여 제동, 주행, 경적, 물 보충, 유압 상태 등 출고 점검을 실행하고 시동을 걸어 약 30분 동안 모니터 등 이상 유무를 확인하였으나 별다른 이상을 발견하지 못하였다.

창동차량기지를 출발할 때 사고차량 상태는 엔진 등 모두 정상이었으나 수유역을 통과하여 약 2분 후 A2 레일연마차 조작 패널(터치스크린)에 ‘Synchro’ 녹색 표시가 백색 표시로 비활성화되면서 엔진 회전속도가 0(zero)으로 표시된 것과 엔진룸 확인을 통해 화재 사실을 알게 되었다.

1.3.2.3. 화재감시원(C)

사고차량에 탑승한 화재감시원 박○○(남, 43세, 이하 “화재감시원(C)”라 한다)는 ㈜○○에 2015년 11월 1일 입사하여 2015년 11월 5일부터 사고 당시까지 화재감시원으로 근무하고 있었다.

화재감시원(C)의 진술에 따르면, 2015년 11월 25일 23시경 ㈜○○ 신정

차량기지 사무실에 출근하여 창동기지로 작업 배정을 받고 11월 26일 00시 40분경 창동차량기지에 도착하여 대기하다가 01시경 사고차량 하부에 각종 호스 및 누유 상태와 작업 트롤리 등을 육안으로 확인하고 01시 20분경 사고차량에 승차하여 이동하던 중 사고가 발생하였다.

사고차량은 창동차량기지를 출발할 때 엔진 소리 등 모든 상태가 정상이었으며 화재 발생 사실은 수유역 부근에서 화재감시원(A)가 “레일연마차(A1)에서 연기가 난다.”고 하여 엔진룸을 확인하면서 알게 되었다.

1.3.3. 운전감독원

A2 레일연마차에 탑승한 운전감독원 이○○(남, 51세, 이하 “운전감독원”이라 한다)은 1995년 1월 25일 서울메트로에 입사, 2011년 8월 22일부터 운전감독원으로 근무하고 있었다.

운전감독원의 진술에 따르면, 2015년 11월 25일 18시경에 출근하여 주간 상황과 작업계획 변경사항 등 인계인수 후 작업구간과 내용을 문자로 작업원들에게 전송하고 안전사고 예방을 위한 주의사항을 교육하였다.

창동차량기지 장비선에서 유압계통, 모터 및 기어, 각종 펌프, 발전기, 엔진 등 기본적인 출고점검을 이상 없이 마치고 운전원과 별도로 모터 및 기어(각 차 3개씩 6개), 유압 구동 펌프 2개, 상부 운전실 점검, 엔진룸 내 발전기 등 엔진 외관과 기동상태를 점검하였으나 평상시와 다른 점을 발견하지 못하여 무선전화로 창동차량기지 운전취급실에 출고준비 완료를 통보하였다.

신호 및 진로 현시에 따라 11월 26일 01시 30분경에 창동차량기지를 출발하여 01시 35분경에 노원역에 도착 후, 01시 37분경에 운전방향을 바꾸어 운행을 개시하였다.

약 17분 후(01시 54분경) A2 레일연마차의 제어패널(터치스크린) 상단에 있는 ‘Synchro’가 녹색 표시에서 백색 표시로 비활성화되며 사고차량의 엔진 회전속도가 ‘0(zero)’ 임을 확인하고 바로 사고열차 정차를 지시하고 사고차량의

엔진구동 상태를 확인하기 위하여 진행방향 좌측 통로로 이동 중 화재감시원(B)이 “불이야”를 외쳐 화재를 인지하였다.

화원이 넓어서 정확한 발생장소는 확인하기 어려웠으며, 엔진 후부 쪽 하단부와 터보가 위치한 중간부에서 화염이 발생하였고, 엔진룸을 확인하는 동안 화재감시원(B)가 소화기로 진화를 실시하여 01시 56분경 시설관제에 화재사실을 보고하고 119에 신고를 요청하였다.

또한, 119에 별도로 화재신고를 하면서 터널 내 화재 장소 위치 및 대형장비 유류화재임을 통보하고 다수의 소방차 수배를 요청했고, 1차로 화재를 진화시킨 후 엔진 내부 유류계통에 화재가 확산되지 않도록 주변 선로 다짐 장비의 소화기를 사용할 수 있도록 시설관제에 요청하였다.

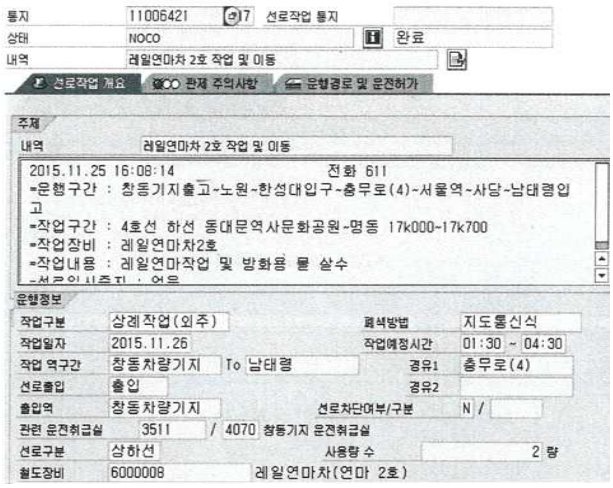
사고차량은 2013년 엔진 상부에 설치된 터보 본체 균열 현상과 연결부 호스의 마모, 파열 현상으로 유지 보수와 교체한 사실이 있다.

02시경 화재가 재발하여 화염이 급속히 번져 A2 레일연마차의 방화수로 화재진압을 시도하였으나 진화에 실패하였다고, 02시 20분경 진화 실패 사실을 시설관제에 통보하고 작업원들과 함께 수유역으로 대피하였다.

사고열차는 배기 파이프 쪽 고무호스 구멍 발생, 고무호수 조임풀림 등으로 ‘Synchro’ 비활성현상이 몇 차례 발생하여 ‘Synchro’ 비활성화 현상에 대한 조치방법을 자연스럽게 습득하였고, 2013년 엔진 상부에 설치된 터보 본체 균열 현상과 연결부 호스의 마모, 파열 현상으로 유지보수와 교체한 적이 있었다.

1.4. 작업 승인

사고차량은 2015년 11월 26일 01시 30분부터 04시 30분까지 4호선(하선) 동대문역사문화공원역～명동역 사이(당고개 기점 17km～17.7km) 레일 연마 작업을 위해 [그림 4]와 같이 작업 승인을 받고 미아역～수유역 사이를 이동 중 화재사고가 발생하였다.



[그림 4] 선로작업 승인

1.5. 사고열차 이동 경로

2016년 11월 26일(목) 01시 30분경 사고열차는 창동차량기지를 출발, [표 2]와 같이 이동 중 01시 54분경 사고열차에서 엔진정지 및 화재가 발생하였다.

순번	역 (㎞정)	상황	시간	시간보정 (+1분15초)	이동시간 (누계)	이동거리 (누계)	비고
1	창동차량기지 모터카선	출발	01:30경	01:30경			사고차량 운전
2	노원역 (2k 255m)	도착	01:34:20	01:35:35	5분 35초 (5분 35초)	1㎞ 346m (1㎞ 346m)	
3		출발	01:35:55	01:37:10	1분 35초 (7분 10초)		A2 레일연마차 (운전실 변경)
4	창동역 (3k 689m)	도착	01:39:29	01:40:44	3분 34초 (10분 44초)	1㎞ 434m (2㎞ 780m)	
5		출발	01:39:54	01:41:09	0분 25초 (11분 09초)		
6	쌍문역 (5k 040m)	도착	01:42:45	01:44:00	2분 51초 (14분 00초)	1㎞ 351m (4㎞ 131m)	
7		출발	01:43:22	01:44:37	0분 37초 (14분 37초)		
8	수유역 (6k 496m)	도착	01:46:20	01:47:35	2분 58초 (17분 35초)	1㎞ 456m (5㎞ 587m)	
9		출발	01:46:50	01:48:05	0분 30초 (18분 05초)		
10	현장 (7k 730m)	도착	01:48:56	01:50:11	2분 06초 (20분 11초)	1㎞ 234m (6㎞ 821m)	

[표 2] 사고차량(A1) 이동 경로 및 시간

1.6. 위탁 운영

사고열차는 발주처인 서울메트로와 ㈜○○은 특수차 (모터카, 철도장비) 운전 및 운영업무에 대하여 2008년 12월 31일 위탁용역 계약을 체결하여 운영하다가 2015년 7월 10일에 재계약을 체결하였으며, 과업 개요는 [표 3]과 같다.

Ⅰ. 과업 개요

1. 용역명 : 특수차(모타카[5], 철도장비) 운전 및 운영업무 위탁 영역.
2. 대 상 : 40대(모터카 33대, 철도장비 7대)
3. 목 적

   모터카 위탁용역 만료에 따라 『특수차(모터카, 철도장비) 운전 및 운영업무 위탁 용역』 신규계약에 따른 용역 수행능력 우수업체를 선정하여 안정적인 주요 시설물 유지관리와 공사 경영개선에 기여하고 자 함.
4. 용역개요

가. 위탁업무

○ 특수차(모터카, 철도장비) 운전 및 운영
○ 특수차(모터카, 철도장비) 점검 및 정비
- 트롤리, 트레일러 및 양방향검지기, 무선통화 장치 등 포함
○ 특수차(모터카, 철도장비) 운영관련 유류 및 소요자재 구매
○ 특수차(모터카, 철도장비) 입환 및 모터카 자재 상.하차
○ 특수차(모터카, 철도장비) 운전업무 협의 및 운전지조
○ 특수차(모터카, 철도장비) 관리 및 운영 등에 관계되는 업무

나. 용역 설계인원 : 113명(직접 인력)

구분	합계	소계	모터카			소계	철도장비	
			궤도	전기	신호		운전원	운영요원
합 계	113명 (40대)	66명 (33대)	32명 (16대)	26명 (13대)	8명 (4대)	47명 (7대)	23명 (7대)	24

※ 사업소별 조별 선임자를 관리책임자로 지정 운전업무 협의 시행

다. 용역 설계 근무형태 : 2조 2교대 (비 숙박)

라. 용역 기간 : 착수일로부터 12개월 (2015.8.1.~2015.12.31., 2016.1.1.~2016.7.31.)

[표 3] 과업 개요

5) 모타카(Motor Car) : 작업용 차량을 통칭하여 말하며, 모터카가 순화된 용어임.

1.7. 차량 정보

사고열차(RR16MX-1 CAR)는 2000년 12월 스위스 SPENO사에서 제작, 2001년 1월 서울메트로에서 도입하였다. 사고 당시 사용한 연수는 약 15년, 사용 가능 햇수[6]는 25년으로 되어있었다.

주요 기능은 손상된 레일 표면을 연마하여 레일의 수명 연장, 소음 및 진동을 감소시킨다.

주요 제원은 길이 28.7m, 높이 3.64m, 중량 76ton, 디젤연료 최대 2,000ℓ, 방화수 최대 9,700ℓ까지 저장할 수 있으며 운행정보 기록 장치는 설치되어 있지 않았다.

엔진 출력은 205kW(1,800rpm)로 속도는 일반 주행 시 80km/h, 레일 연마 작업 시 4~6km/h로 주행하며 1대당 일일 1.5시간 기준 약 600m의 레일 연마 작업이 가능하며 동일 형식 차 2량을 1편성으로 조성하여 운행하였다.

차량의 세부 제원은 [표 4]와 같다.

장비명	레일연마차		
모델명	RR16MX-1.CAR	제작사	SPENO (SWISS)
제작일	2000년 12월	취득일	2001년 01월
수량	2량 1편성	취득가격	47억 원
장비번호	1600003253	내용연수	25년
사용 목적	레일표면 연마로 인한 레일 수명 연장 및 소음진동 감소		
관리책임자	궤도사업소장	운용처	제2철도장비관리소
제원(mm)	길이 28,700, 높이 3,640, 중량 76ton		
주행 속도	일반 주행 80㎞/h, 연마 작업 4~6㎞/h		
일일 작업량	600m/1.5h/8 pass		
엔진	제작사 GM, 모델명 50시리즈, 출력 205kW/1,800rpm		
연료	2,000ℓ	방화수	9,700ℓ

[표 4] 주요 제원(구조 변경 전)

6) 사용 가능 햇수: '내구 연한(耐久 年限)'의 순화된 말, '국립국어원 표준국어대사전' 참조

1.7.1. 정기 점검

사고열차의 정기 점검은 ㈜○○에서 『계약 특수조건 및 과업지시서』(서울메트로와 ㈜○○간 2015년 7월 10일 체결한 계약서류) 제14조(정기점검표)에 의하여 월간 점검, 반년 검사, 연간 검사, 일일 점검을 하고 있었다.

㈜○○은 사고열차에 대하여 중정비를 [표 5]와 같이 시행한 후 2015년 11월 24일 시행결과를 서울메트로에 통보하였다.

점검일	장소	점검 총평	소견
'15.10.7	수서 차량 기지	인젝터[7]에 소량의 수분 유입으로 출력 저하현상 발생	
'15.10.20		운행 안전성 확보와 규정 준수를 위해 제동거리 측정 필요	- 노후화에 따른 제동라인 및 기타 라인과 기기 교체 정비 필요
'15.11.4		유압 작동유 변색, 교체 요망	- 유압 작동유, 유압탱크가 신품에 비해 변색, 교체요함. - 유압 펌프 및 모터를 2년 주기로 탈거 분해하여 부품상태 점검 및 교체 필요

[표 5] 외부 전문 업체 점검결과

1.7.2. 검수 현황

사고열차에 대한 검수는 창동차량기지 및 수서차량기지에서 ㈜○○이 [표 6]과 같이 검수를 시행하였다.

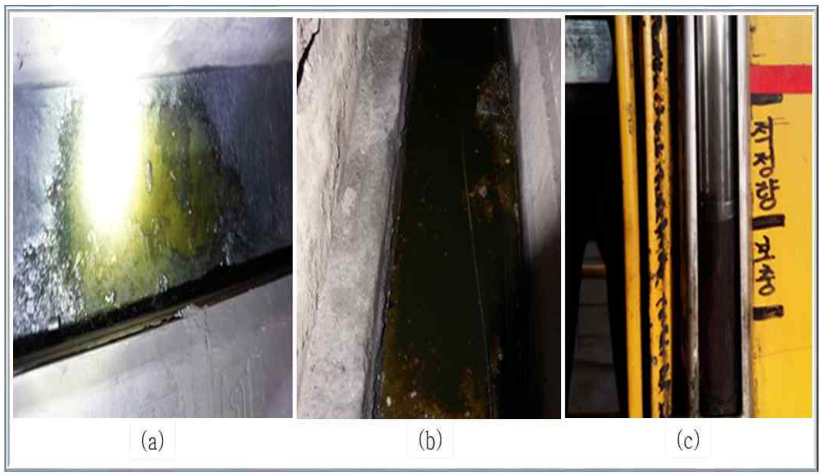
점검종류	횟수	주요 검수 내용
일상 정비	60회	각종 부품교체 및 기름 냉각수 보충 등
1개월 검사	2회	엔진기름 및 각종 필터 교환 등 (2015년 8.28.~2015.9.24.)
2개월 검사	2회	엔진기름 및 각종 필터 교환 등 (2015.8.28.~2015.9.24.)
3개월 검사	2회	엔진기름 및 각종 필터 교환 등 (2015.8.28.~2015.9.24.)
6개월 검사	1회	기관, 유압, 공기, 전기, 주행 장치 계통 분해청소 및 기름 교환 등 (2015.4.28.~2015.4.29.)
1년 검사	1회	기관, 유압, 공기, 전기, 주행 장치 분해청소, 기름 교환 등 (2015.10.24.)
특별 검사	1회	A1, A2 Car 엔진 오버홀[8](2014.12.16.)

[표 6] 검수 현황

7) 인젝터(injector) : 디젤 엔진의 연소실에 연료를 분사하는 장치를 말함.

1.7.3. 연료 잔여량

연료탱크 용량은 2,000ℓ이며 출고 시 약 1,650ℓ의 디젤 연료가 남아있는 것으로 게이지에 확인되었으나, [그림 5]와 같이 사고 발생 이후 화재로 연소되었거나 사고 현장에 흘러내려 연료 잔여량이 게이지에 나타나지 않았다.



[그림 5] (a), (b)선로 변 부유물, (c)연료 게이지

1.7.4. 화재감지기

사고열차의 화재감지기는 [그림 6]과 같이 운전실 내부에 연기감지기, 엔진룸 내부에 열 감지기가 설치되어 있었으나 전원 스위치가 꺼진 상태(Off)로 운행하였고, 사고차량의 열 감지기는 화재 사고로 연소되어 소실되었다.

2015년 12월 11일 14시 30분경 창동차량기지에서 화재가 발생하지 않은 A2 레일연마차에 대해 화재감지기의 전원을 켠 상태(On)로 연기 및 열 감지기 동작 상태를 시험한 결과, 정상적으로 동작하고 있는 것으로 확인하였다.

운전원(A)는 “사고열차 화재감지기 전원스위치가 꺼져 있었고, A2 레일연마차 화재감지기 동작시험 시 정상적으로 동작한 것과 화재감지기에 대해 교육받은 사실이 없다.”고 확인서를 제출하였다.

8) 오버홀(overhaul) : 레일연마차의 엔진을 완전히 분해하여 점검, 수리, 조정하는 행위로, 노후되거나 고장이 우려되는 부품은 모두 교체하여 정상기능을 유지할 수 있도록 함.

[그림 6] 화재 및 열 감지기

1.7.5. 소화기

사고열차에는 [그림 7]과 같이 하론 소화기 3kg 2개, ABC분말 소화기 3.3kg 4개가 비치되어 있었고 초기 화재시 하론소화기 1대로 진화하였고, 2차 화재 발생 시 나머지 5개 소화기와 인근 현장에서 작업하던 선로 다짐장비(MTT)의 ABC분말 소화기(3.3kg 2개)도 사용된 것으로 확인되었다.

[그림 7] 화재 소화에 사용한 소화기

1.7.6. 부품 교체 및 구조 변경

사고열차는 2013년 4월 1일부터 2013년 5월 31일까지 ㈜○○은 서울메트로와 협의 후 [표 7]과 같이 부품 교체 및 물탱크, 연료탱크 등 구조 일부를 변경하였다.

구 분		개선내용
소화 장치	물탱크	○ 물탱크 위치변경 및 용량 변경 - 1호차 2톤 물탱크를 연료탱크로 변경 - 연료탱크(750ℓ×2)를 물탱크로 변경사용 - 변경 후 용량 : 9.5톤(1호차 3.75톤, 2호차 5.75톤)
엔진부	연료탱크	○ 연료탱크 : 수평 → 수직형태로 구조 변경 - 위치 : 엔진 하부(1, 2호차) → 1호차 상부 압축기 옆(기존 1호차 물탱크) - 용량 : 750ℓ×2 → 2,000ℓ×1
	엔진 냉각팬	○ 엔진 냉각팬 보호망 제작 설치
전기 시스템	AC 발전기	○ 발전기 편각 이설
		○ 발전기 베어링 커버 육성 가공
구동 시스템	구동 기어 공압 실린더	○ 기어변환 실린더 신규 제작
	액슬 기어	○ 변속 기어 및 감속 기어 제작 교환 : 24개
	테크노 드라이브	○ 테크노 드라이브와 cardan shaft 간 편각 조정 ○ 드라이브 기어 제작 교체 : 3개 ○ 스풀 라인 기어 제작 교체 : 6개
그라인딩 트롤리	스키	○ 트롤리 스키 좌·우측 제작 교환 : 8개
	지석 가이드	○ 지석 가이드 좌·우측 제작 교환 : 12개
집진장치	필터 백	○ 필터 백 제작 교환 : 216개
유·공압 시스템	유압 쿨러	○ 2호차 유압 쿨러 신규 제작 설치 : 2개
	공압 실린더	○베어링 고정용 핀, 실린더 플레이트 제작 교환

[표 7] 사고차량(A1) 구조 변경 및 부품 교체

1.8. 선로 정보

사고 발생 구간의 선로는 노원역~창동역은 지상 구간이었고 사고차량(A1)이 전소한 수유역~미아역 사이는 지하구간으로 전차선이나 선로 등 외적 요인에 의하여 사고에 영향을 미칠 요인은 발견되지 않았다.

1.9. 기상 정보

기상청 자료에 따르면 2015년 11월 26일(목) 01시 50분경 사고지역의 기온은 0.5℃, 상대습도는 63.8%, 풍속은 3.7m/s, 맑은 날씨로 레일연마차 운행에는 문제가 없었다.

2. 분석(Analysis)

2.1. 업무 수행 사항

운전원 및 화재감시원은 『궤도작업 및 특수차작업 안전규정』(㈜○○ 내규, 2015년 8월 1일 개정) 제21조제1호 및 제10호에 따르면 '작업 시행 전에 기계, 유압, 전기, 공기계통의 철저한 점검을 시행하여야 하며, 레일연마차 내 작업 제어시스템 등의 설비를 항상 깨끗이 유지하여야 하고, 비치된 조작 및 정비 설명서와 도면을 참조하되 임의로 변경을 하여서는 아니 된다'고 규정하고 있다.

그러나 사고차량과 함께 직렬(중련)로 연결하여 운행한 A2 레일연마차의 엔진룸 및 차체 하부에 설치된 각종 배선에는 수분을 포함한 기름 등이 흡착되어 있었고, 엔진룸 하부에 기름과 물이 섞여 고여 있었으며, 각종 전선이 손상된 상태에서 장기간 전기 및 제어 배선 등이 기름이 섞인 물에 노출, 절연저항이 저하되어 누전으로 인한 화재발생 가능성이 있었을 것으로 판단되었다.

또한, 사고열차 운전실에 설치되어있는 화재감지기 전원을 차단한 상태(Off)로 운행하여 화재 발생당시, 화재 경보장치 미 동작으로 인해 탑승자들이 화재 발생 사실을 즉시 인지하지 못하여 초기 진화에 실패하였을 가능성이 있으며, 이와 같은 사유로 인하여 화재 확산 가능성을 배제할 수 없었다.

2.2. 위험도 평가 및 관리 절차서

서울메트로(이하 '공사'라 한다)의 '안전경영방침'은 예방중심의 체계적이고 과학적인 안전관리에 관한 유기적 체계를 갖추고 철도안전법, 같은 법 시행령 및 시행규칙과 철도안전관리 체계 기술기준에 부합하는 안전관리시스템을 공사와 시설관리 등의 업무를 위탁받은 계약자에게 적용하게 되어있다.

2.2.1. 위험도 평가 적정성

공사는 『서울메트로 철도안전관리체계』(서울메트로 2015년 3월 27일 개정, 이하 “철도안전관리체계”라 한다) 3.1 ‘위험도 평가 및 관리’에 따라 위험요인의 식별 및 관리, 위험도 분석, 평가 및 안전대책 수립 등을 시행하여 사고를 예방하고 피해를 최소화해야 한다.

위험요인 별 위험도 분석은 단순하게 레일 연마 작업 절차에 국한하는 것이 아니라 조직 구성의 문제, 관리감독의 문제, 불안전한 요소, 불안전한 행동 등을 포함하여 안전수준을 측정하고 허용 위험도를 판단할 필요가 있다.

공사는 위험관리 기본 원칙에 따라 [그림 8]과 같이 위험요인 목록을 작성하여야 하고, 인명 및 재산 피해, 환경적 손상을 일으킬 우려가 있는 경우 위험도 평가를 정량적으로 실시하도록 되어있다.

[그림 8] 위험 목록 관리 및 위험도 평가

그러나 공사는 『철도안전관리체계』 3.1.2 ‘위험도 평가 절차’에 따라 레일 연마차의 화재요인을 식별 한 후 화재사고의 발생 가능성과 화재발생에 따른 심각도를 산출하여 조합한 후 위험도 산정을 하지 않았고, 『철도안전관리체계』

12.9 ‘위탁계약자 감독 등 위탁업무 관리에 관한 사항’을 지속적으로 확인, 관리하지 않아 계약자 관리를 부적정하게 수행한 것으로 판단된다.

2.2.2. 위험도 평가 등 문서화 적정성

『철도안전관리체계』 3.1.5 ‘위험도 평가 등의 문서화’에 따라 위험도 평가 전에 실시한 사전 조사결과, 위험도 평가 범위 및 대상, 위험요인 식별, 위험도 분석 및 평가 등에 관한 문서나 기록은 문서관리 절차와 기록관리 절차에 의해 5년 이상 보존하여야 한며, 『철도안전관리체계』 1.1.1 ‘일반사항’에 따라 특수차 운전 및 운영 업무의 위험요인 발굴, 평가, 대책 등에 대한 문서를 생산하여 위탁업체에 제공하여한다.

그러나 공사는 2015년 7월 10일 계약을 체결하고 용역업무가 수행된 시점(2015년 8월 1일)으로부터 약 3개월 이상 지연된 2015년 11월 23일 특수차 비상대응매뉴얼 배포 및 교육시행 계획을 통보하는 등 철도안전관리시스템 프로그램을 부적정하게 수행한 것으로 판단된다.

2.3. 인적자원관리 프로그램

공사는 『철도안전관리체계』 8.1 ‘인적자원관리 프로그램’ 이행을 위해 안전업무수행자[9]를 선정하고 이들의 안전 활동 실행을 위해 적절한 교육 및 훈련을 실시하여 직무별 계층별로 필요한 역량을 확보하고 적정 자격을 유지하도록 관리해야 한다.

2.3.1. 교육 및 훈련

레일연마차 운전 및 운영요원의 교육 훈련은 “매일 조회 시간에 일일 교육과 월간 교육이며, 교육 내용은 주로 지적환호 확인, 무선전화 통화요령 등 직무에 관련된 내용으로 지사장 등 간부들이 교육을 시키고 있고, 레일 연마차 운영

9) 안전업무수행자 : 본사 및 현업의 철도안전업무를 수행하는 직원 및 계약자를 말함. (서울메트로 인적자원관리프로그램)

및 유지보수 교육은 받은 사실이 없다.”고 진술하였다.

공사는 위탁용역 계약 시 공사 직원들이 강사로 참여하여 각 장비별 특성에 맞게 실무 수습 및 숙달 교육을 3주간(2012년 4월 1일부터 2012년 4월 22일까지) 시행하였으나, 운전원, 작업원들이 변경되는 과정에서 교육이 원활히 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

레일연마차 운전 및 운영업무 종사하는 안전업무 수행자들은 『철도안전관리체계』 8.1 ‘인적자원관리 프로그램’ 에 따라 철도안전 법령 및 안전관련 제규정, 철도사고 사례 및 사고 예방대책, 이례 상황 및 화재 등 비상시 응급조치 및 대책, 기타 안전에 관하여 필요한 사항에 대해 적정하게 교육을 분기별 3시간 이상 수행하여야 한다.

그러나 공사는 레일연마차 운전 및 운영업무를 위탁하면서 2014년 4월 22일 이후 ㈜○○에 입사한 안전업무 수행자들에게 운전 및 운영 실무 수습 및 숙달교육을 시행하지 않았고, 화재발생시 운전취급 요령 등 특별교육은 화재사고 발생 이후 계획되어 시행하지 못하였다.

이에 따라 레일연마차 운전 및 운영업무를 담당하는 위탁업체의 안전업무 수행자들은 장비 특성, 화재 위험요인 및 화재 감시설비 동작, 설비 유지보수 등에 대한 전문 지식을 숙지하지 못한 상태로 레일 연마작업을 수행한 것으로 판단된다.

따라서 레일연마차 운전 및 운영업무 위탁계약자에게 적절한 교육 및 훈련을 실시하여 직무별, 계층별로 필요한 역량을 확보할 수 있도록 공사의 인적자원 관리프로그램을 적용하여 관리할 필요가 있다.

2.3.2. 안전 관리

『철도안전관리체계』에 따라 임직원 및 계약자의 관련 업무에 대한 이해와 시행을 지원하고 공사가 수행하는 철도안전관리시스템 기본원칙과 안전관리

절차의 기준을 수립, 적용하여 지속적인 안전관리가 필요하다.

적용범위는 1~4호선 및 9호선 2단계를 운영하는 공사와 열차운행 및 시설관리 등의 업무를 위탁받은 계약자에게 적용하며 안전관리 업무에 관해서 철도관련법령에서 정한 것을 제외하고는 철도안전관리시스템 프로그램이 정하는 바에 따르게 되어있다.

공사는 동일 또는 유사한 사고를 예방하기 위해『철도차량 기술기준』,『철도안전관리체계』,『특수차 관리 및 검사예규』(서울메트로 사규, 2014년 12월 26일 개정, 이하 “특수차 관리 및 검사예규”라 한다)에 따라 장비 점검계획을 수립하고, 위탁업체에 대하여 기술지도 및 관리가 필요한 것으로 판단된다.

2.4. 사고열차에 대한 유지관리 적정성

2.4.1. 유지관리 근거

유지보수 조직은 레일연마차의 성능을 유지하고 효율적 운용을『특수차 관리 및 검사예규』제1조(목적)에 따라 [표 8]과 같이 적정하게 유지 및 관리를 하여야 한다.

검사종류	약호	검사 기준
일상검사	D	매 작업 전후 또는 장비이동 전후시행
1개월 검사	1M	1개월 전후 시행
2개월 검사	2M	2개월 전후 시행
3개월 검사	3M	3개월 전후 시행
6개월 검사	6M	6개월 전후 시행
1년 검사	1Y	1년간 전후 시행
2년 검사	2Y	2년간 전후 시행
임시검사	T	돌발적인 고장 발생시
특별검사	R	사장(기술본부장) 지시에 의거 시행

[표 8] 검사 종류별 기준

유지보수 조직이 수행하는 검사의 종류는『특수차 관리 및 검사예규』제7조(검사 종류별 기준)에 따라 장비취급자가 사용 전·후 기능점검, 주유, 청소, 가벼운 수선 등을 시행하는 일상검사와 팀장(궤도, 철도장비)이 장비의 일부 또는 전반에 걸쳐 주기적으로 시행하는 정기검사, 기술본부장의 지시에 의하여 장비의 구입이나 개조, 폐기 또는 특별히 검사할 필요가 있을 때 시행하는 특별검사로 구분되어 있다.

2.4.2. 유지관리 적정성

특수차의 유지관리 시행은『특수차 관리 및 검사예규』제8조(검사의 시행)에 따라 검사 시행일 기준 기간의 15% 범위 내에서 [표 9]와 같이 하도록 되어있다.

검사 종별	D (일상)	1M (1개월)	2M (2개월)	3M (3개월)	6M (6개월)	1Y (1년)	2Y (2년)	T (임시)	R (특별)
검사 책임	철도장비 관리소장	철도장비 관리소장	철도장비 관리소장	철도장비 관리소장	철도장비 관리소장	철도장비 팀장	철도장비 팀장	철도장비 팀장	사업소장

[표 9] 검사 종별 책임자

팀장(사업소장)은『특수차 관리 및 검사 예규』제12조(검사 시행 절차)에 따라 전사적 자원관리 시스템(ERP)에 의하여 점검 및 정비를 시행, 시행 결과는 ERP 시스템에 등록하여야 하고, 해당 장비를 대수선, 외주 수선을 시행한 경우에는 철저한 관리를 위하여 중요 사항은 전산시스템에 등록하여 관리하도록 되어있다.

공사는 특수차(모터카, 철도장비) 운전 및 운영업무 위탁을 시행하면서 운전 및 운영업무 수탁자인 ㈜○○에서 정기검사, 주간 및 야간 점검업무를 수행하도록 하였고, 공사의 ERP시스템에 레일연마차 전기 배선에 대한 절연저항 점검 및 기록을 유지·관리하지 않았다.

사고열차)의 유지관리의 적정성을 판단하기 위하여 점검 및 관리 이력(2015년 1월 1일부터 2015년 11월 25일까지)을 확인한 결과, ㈜○○은『철도차량 기술기준』'5.3.5 절연저항시험'에 의한 전기배선 절연저항 측정 등을 수행하지 않았다.

㈜○○이 수행한 주요 점검 항목은 장비의 하부, 엔진 룸, 엔진 시동 후 트롤리 조작상태, 양방향 감시 장치 등을 점검하였으며, 장비의 하부에 각종 제어 전선이 누유 및 습기 등으로 오염되어 있었으나, 점검 결과는 양호로 기록되어 점검 및 유지관리업무를 부적정하게 수행한 것으로 판단된다.

사고열차의 경우, 발전기, 각종 전기 제어설비가 탑재되어 있어 『철도차량 기술기준』에 따라 관리할 필요가 있다.

2.4.3. 유지관리 현황 분석

2.4.3.1. 기름 누유

2.4.3.1.1. 엔진 기름 누유

A2 레일연마차의 엔진 외부를 조사한 결과, [그림 9]와 같이 엔진 연결부에서 엔진기름 누유가 있었음이 확인된 점을 고려할 때, 동일한 유지보수를 시행한 사고차량의 엔진부에서도 누유가 있었을 것으로 추정된다.

[그림 9] 엔진부 누유 상태

2.4.3.1.2. 작동 기름 누유

A2 레일연마차의 주행 펌프 및 작업 펌프 부위에 작동유가 [그림 10]과 같이 누유 흔적이 발견 된 점을 고려할 때, 동일한 유지보수를 시행한 사고차량의 주행펌프 및 작업펌프 부위에 작동유가 누유 되었을 것으로 추정된다.

[그림 10] 펌프 부위 누유 상태

2.4.3.1.3. 누유 방지 대책

사고열차에 사용하는 엔진 및 작동 계통은 운행 중 진동, 사용 자재의 노후 등으로 유압 배관 부분, 엔진부분의 틈으로부터 누유의 가능성이 항상 존재하고 있어, 엔진 및 배관 접속 부분에 설치된 누유방지용 자재(개스킷)를 정기적으로 점검하고 교체 할 필요가 있다.

2.4.3.2. 엔진룸 전선 및 바닥상태

A2 레일연마차의 엔진룸의 각종 케이블에는 먼지가 덮여 있었으며, 엔진룸 바닥에도 기름과 냉각수가 섞인 채 [그림 11]과 같이 고여 있었던 점을 고려할 때, 동일한 유지보수를 시행한 사고차량에도 기름과 냉각수가 섞인 상태로 엔진룸 바닥에 고여 있었을 것으로 추정된다.

[그림 11] 엔진룸 케이블 먼지 및 냉각수

2.4.3.3. 배터리 케이블 단자 이완

A2 레일연마차의 배터리는 12V용 두 개를 직렬로 연결하여 24V 전원을 사용하고 있다. 두 개의 배터리를 직렬로 연결하는 연결 케이블 단자 중 하나가 [그림 12]와 같이 손으로 들어 올리면 쉽게 탈락되고 있어, (+)전압이 인가되는 연결 케이블이 탈락되어 차체에 접촉하면서 불꽃(스파크)이 발생할 가능성이 있으므로 주기적 점검이 필요한 것으로 판단된다.

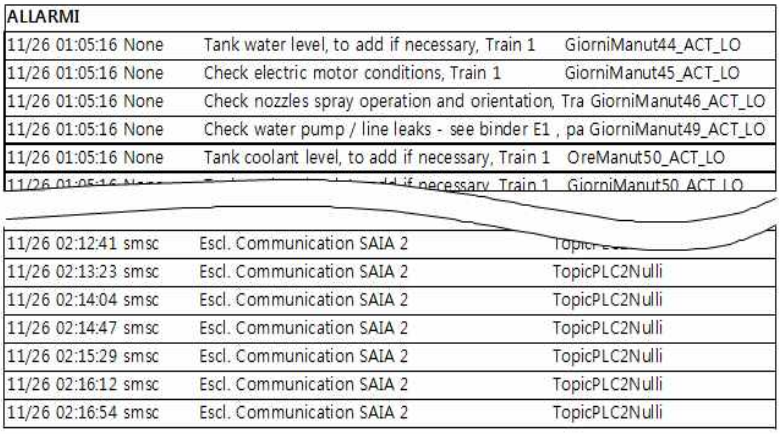
[그림 12] 배터리 연결 케이블

2.4.3.4. 차량 고장 및 시스템 운영기록

사고열차에는 각각 동일한 컴퓨터가 설치되어 있고, 2대의 컴퓨터에서 동일한 내용의 차량고장 및 시스템 운영기록이 저장되고 있다.

사고차량의 컴퓨터 하드디스크에 저장(2015년 7월 29일부터 2015년 11월 26일까지)된 로그 파일의 내용을 분석하였다.

[그림 13]과 같이 사고 당시 차량의 알람 파일을 저장하는 폴더(ALLARMI)에는 마지막 4개월 동안 2015년 7월 29일부터 2015년 11월 26일까지)의 로그 파일이 저장되도록 프로그래밍 되어 있으나, 사고 당시 차의 상태를 나타내는 물리량(엔진, 냉각수, 작동유 온도, 압력 등)은 기록되지 않는 것으로 확인되었다.

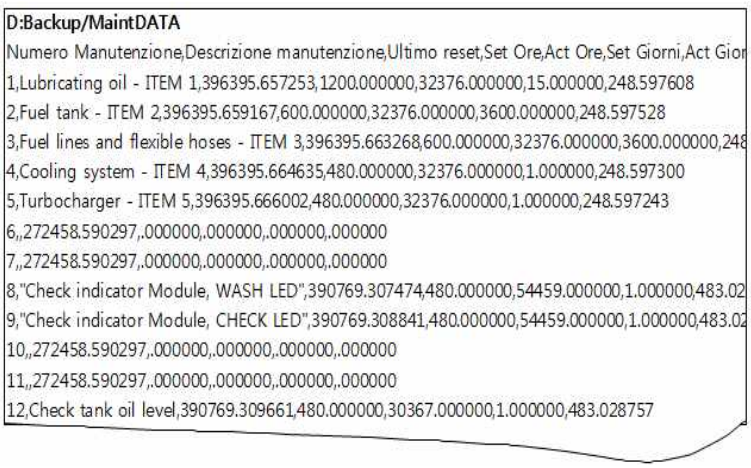


ALLARMI		
11/26 01:05:16 None	Tank water level, to add if necessary, Train 1	GiorniManut44_ACT_LO
11/26 01:05:16 None	Check electric motor conditions, Train 1	GiorniManut45_ACT_LO
11/26 01:05:16 None	Check nozzles spray operation and orientation, Tra	GiorniManut46_ACT_LO
11/26 01:05:16 None	Check water pump / line leaks - see binder E1 , pa	GiorniManut49_ACT_LO
11/26 01:05:16 None	Tank coolant level, to add if necessary, Train 1	OreManut50_ACT_LO
11/26 01:05:16 None	Tank coolant level, to add if necessary, Train 1	GiorniManut50_ACT_LO
11/26 02:12:41 smsc	Escl. Communication SAIA 2	TopicPLC2Nulli
11/26 02:13:23 smsc	Escl. Communication SAIA 2	TopicPLC2Nulli
11/26 02:14:04 smsc	Escl. Communication SAIA 2	TopicPLC2Nulli
11/26 02:14:47 smsc	Escl. Communication SAIA 2	TopicPLC2Nulli
11/26 02:15:29 smsc	Escl. Communication SAIA 2	TopicPLC2Nulli
11/26 02:16:12 smsc	Escl. Communication SAIA 2	TopicPLC2Nulli
11/26 02:16:54 smsc	Escl. Communication SAIA 2	TopicPLC2Nulli

[그림 13] 알람 로그 파일

[그림 14]와 같이 정비를 해야 할 항목은 기록되고 있었으며 정비하거나 초기화를 시행한 항목은 정비 로그 폴더(Maintenance.log)에 기록되는 것과 정비 로그 파일(*.log)에 있는 항목은 예방정비를 해야 하는 모든 항목을 나열한 것임을 확인하였으며 예방정비를 해야 하는 날짜가 도래하면 컴퓨터 화면에 해당 항목이 나타나게 하는 것이다(check hydraulic lines, hydraulic pump(oil leaks) contact supplier 등).

해당 항목을 초기화하면 그 항목은 [그림 14]와 같이 Maintenance.log 파일에 기록되나 실제 정비를 하고 초기화를 했는지 정비하지 않고 초기화를 했는지는 구분이 되지 않는다. 초기화하지 않은 정비가 필요한 항목은 ALLARMI 폴더의 *.alg 파일에 저장되고 있으며 이는 조작 패널(터치스크린) 상에서 확인 가능하였다.



D:Backup/MaintDATA

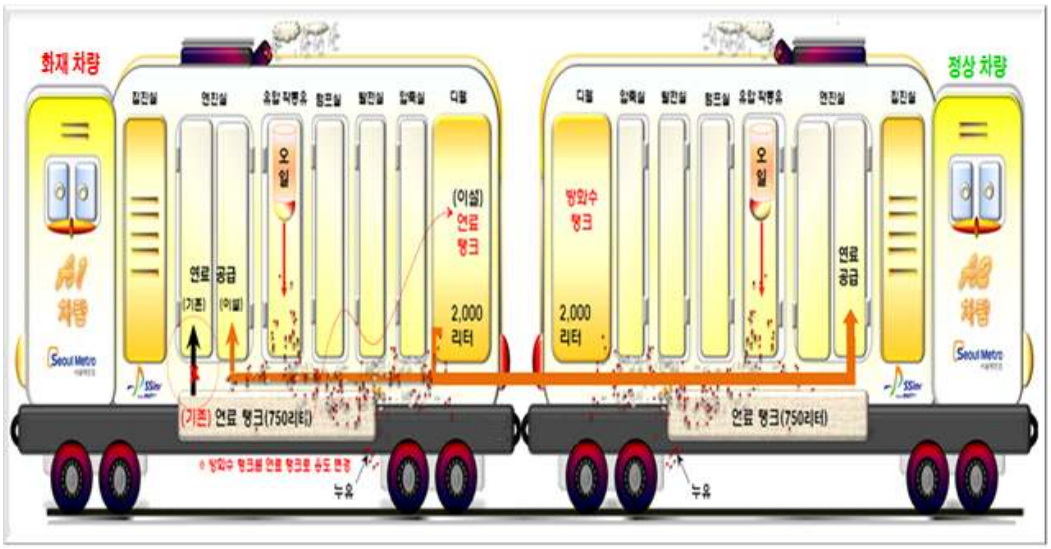
Numero Manutenzione,Descrizione manutenzione,Ultimo reset,Set Ore,Act Ore,Set Giorni,Act Gior
1,Lubricating oil - ITEM 1,396395.657253,1200.000000,32376.000000,15.000000,248.597608
2,Fuel tank - ITEM 2,396395.659167,600.000000,32376.000000,3600.000000,248.597528
3,Fuel lines and flexible hoses - ITEM 3,396395.663268,600.000000,32376.000000,3600.000000,248
4,Cooling system - ITEM 4,396395.664635,480.000000,32376.000000,1.000000,248.597300
5,Turbocharger - ITEM 5,396395.666002,480.000000,32376.000000,1.000000,248.597243
6,,272458.590297,.000000,.000000,.000000,.000000
7,,272458.590297,.000000,.000000,.000000,.000000
8,"Check indicator Module, WASH LED",390769.307474,480.000000,54459.000000,1.000000,483.02
9,"Check indicator Module, CHECK LED",390769.308841,480.000000,54459.000000,1.000000,483.02
10,,272458.590297,.000000,.000000,.000000,.000000
11,,272458.590297,.000000,.000000,.000000,.000000
12,Check tank oil level,390769.309661,480.000000,30367.000000,1.000000,483.028757

[그림 14] 정비 로그 파일

2.5. 연료탱크 구조 변경

공사는 사고열차 중정비 수행과정에서 “엔진 연료탱크의 용량 및 설치위치가 적합하게 설치되어있지 않아 언덕이 높거나 낮은 선로를 운행할 때 연료 공급이 차단되는 현상이 발생하고 있어, 수평구조의 연료탱크를 수직구조로 변경하여야 잦은 연료 주입 및 연료 차단현상을 방지하고 운영효율을 높여야 한다.”는 ○○엔지니어링의 의견(2015년 5월 13일)에 따라 2013년 5월 31일 연료탱크 구조를 변경하였다.

그러나 [그림 15]와 같이 연료탱크 구조변경과 같은 주요부분에 대하여 변경작업을 할경 우에는 공사의 『철도안전관리체계』 ‘철도안전관리 프로그램 3.2.1 안전대책 수립’에 따라 안전대책을 수립하고 ‘철도안전관리 프로그램 3.2.3 다른 철도운영자등의 참여’에 따라 차량제작사(SPENO)로부터 구조변경 적정성 및 안전성 등 검토 과정을 거친 후 시행하여야 하나 해당 절차를 적정하게 이행하지 않은 것으로 판단된다.



[그림 15] 연료탱크 구조 변경

이에 따라 사고 당시, 사고차량의 연료공급 배관이 화재로 손상되어 연료가 지속적으로 흘러나오면서 [그림 16]과 같이 화재를 확산시킨 것으로 판단된다.

a) 터널 내부 b) 지상 환기구

[그림 16] 화재 당시 사진

따라서 레일연마차 등 철도차량(특수차)의 주요한 부분의 구조를 변경할 경우, 『철도안전관리체계』 12.3.2. 유지관리기준, 12.3.3. 유지관리 이행절차, 12.3.4. 노후 철도차량평가(상태, 안전성, 성능)절차를 준수하고, 『철도차량 기술기준』 3.2.4.3, 화재예방을 참조하여 제작사 또는 전문 인증기관 등으로부터 기술검토 후 시행할 필요가 있다.

2.6. 소화 설비

2.6.1. 차내 소화설비

사고차량의 엔진정지로 당고개 기점으로부터 7.3km지점(수유역~미아역 사이)에서 정차하여 사고열차에 비치된 소화기 6개 중 하론소화기 1개를 사용하여 1차 화재를 진화하였다.

그러나 잠시 후 2차 화재가 발생하여 사고열차에 비치된 나머지 5개(ABC 소화기 4개, 하론소화기 1개)와 인근에 있는 선로 다짐차량(MTT)에 비치된 소화기(ABC분말 2개)를 사용하였으나 화재가 확산되어 사고차량이 전소되었다.

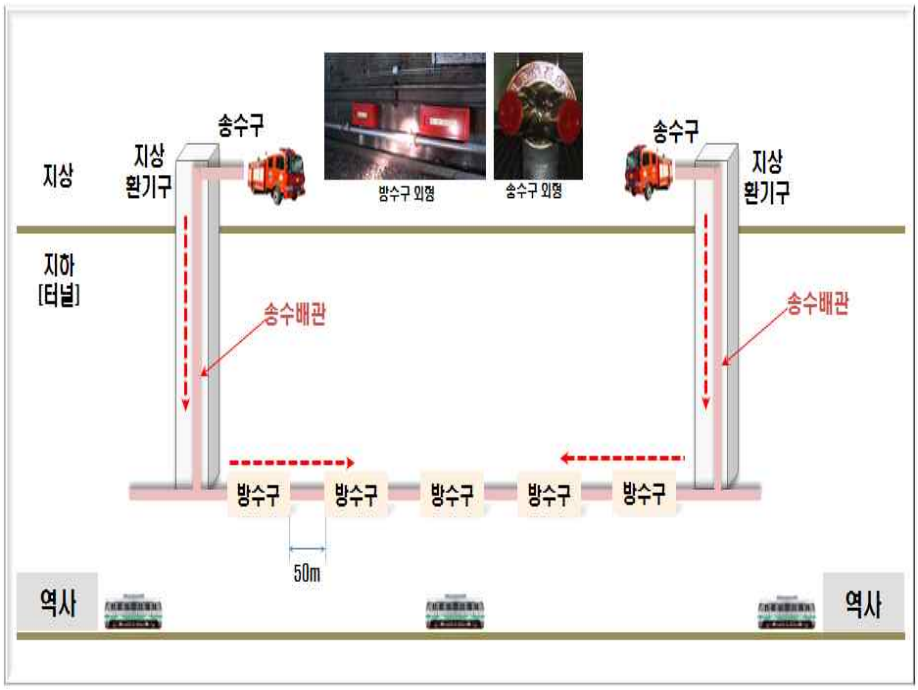
사고열차는 화재감지기가 설치되어있었으나 사고조사를 수행하는 과정에서 전원스위치가 차단된 상태를 확인하였다. 사고열차는 화재 사고 발생 당시에도

화재감지기 전원이 차단되어 화재감지를 할 수 없었던 것으로 판단되며, 이에 따라 작업원들은 화재발생 사실을 조기에 인지할 수 없어 초기 진화에 실패한 것으로 추정된다.

차내 소화설비 관리는『철도차량 기술기준』3.2.4(화재 안전)을 반영, 차내에 설치된 화재감지기 및 소화기 점검을 철저하게 점검하여 항상 정상 기능을 확보하고 점검 결과를 ERP에 기록·관리하여야 한다.

2.6.2. 터널 안 소화설비

사고구간을 포함한 서울메트로 4호선 쌍문~남태령구간은 1985년 4월 20일 개통된 터널 구조의 선로로써『도시철도 건설규칙』(건설교통부령 제412호 2004년 12월 4일 개정) 부칙의 경과조치에 따라 위 규칙 시행 당시 이미 건설된 선로이기 때문에 위 규칙 제71조에 따른 [그림 17]과 같이 소방관이 지상부에 설치된 송수구를 통하여 소화 용수를 투입하고 방수구에 소방 호스를 연결하여 화재를 진화할 수 있는 '연결송수관설비'의 설치의무가 없는 선로인 관계로 터널 안 연결송수관설비 등이 설치되어 있지 않았다.

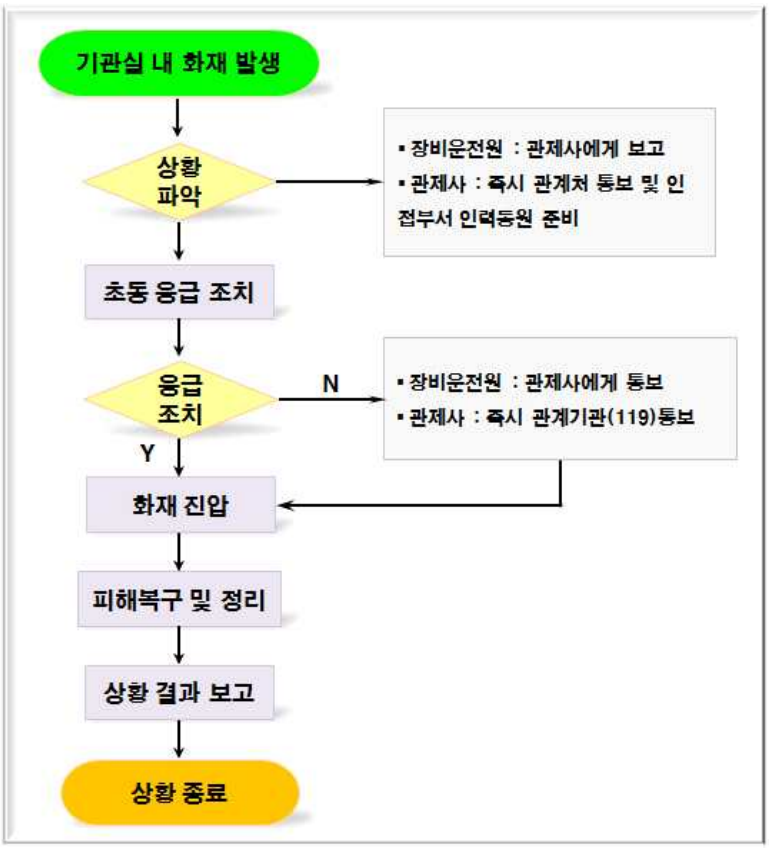


[그림 17] 연결송수관 설치 개념도

그러나 금번 사고와 같이 지하구간의 역과 역 사이에서 대형 화재사고 발생 시 화재를 진화할 수 있도록 『도시철도 건설규칙』(국토교통부령 제106호 2014년 7월 8일 개정) 제71조에 따른 '비상시 소화용으로 활용할 수 있도록 연결송수관 설비를 설치'하여야 할 것으로 판단된다.

6.2.3. 화재 대응 체계

레일연마차 등 특수차량 운행 중 화재가 발생하였을 경우 공사의 비상대응 절차는 '운전원은 즉시 차량 정지시키고 엔진 시동을 끄고 전기 메인 스위치를 차단한 후 [그림 18]과 같은 절차에 의한다.'고 되어있다.



[그림 18] 기관실 내 화재발생 시 조치 요령

그러나 사고 구간(7k300)은 미아역(7k849m) 진입 약 500m 전에 정차하여 터널 안에 연결송수관 설비가 설치되지 않았고, 차내에 비치된 소화기로 화재를 진압할 수 없었다.

따라서 터널 안을 운행 중 레일연마차 등 특수차에서 화재가 발생할 경우 해당 구간에 외부 소화설비 설치 여부, 초동 조치 가능성 여부, 가까운 역까지 진입 여부 등을 신속하게 판단하여 조치할 수 있도록 매뉴얼을 수정·보완할 필요가 있다.

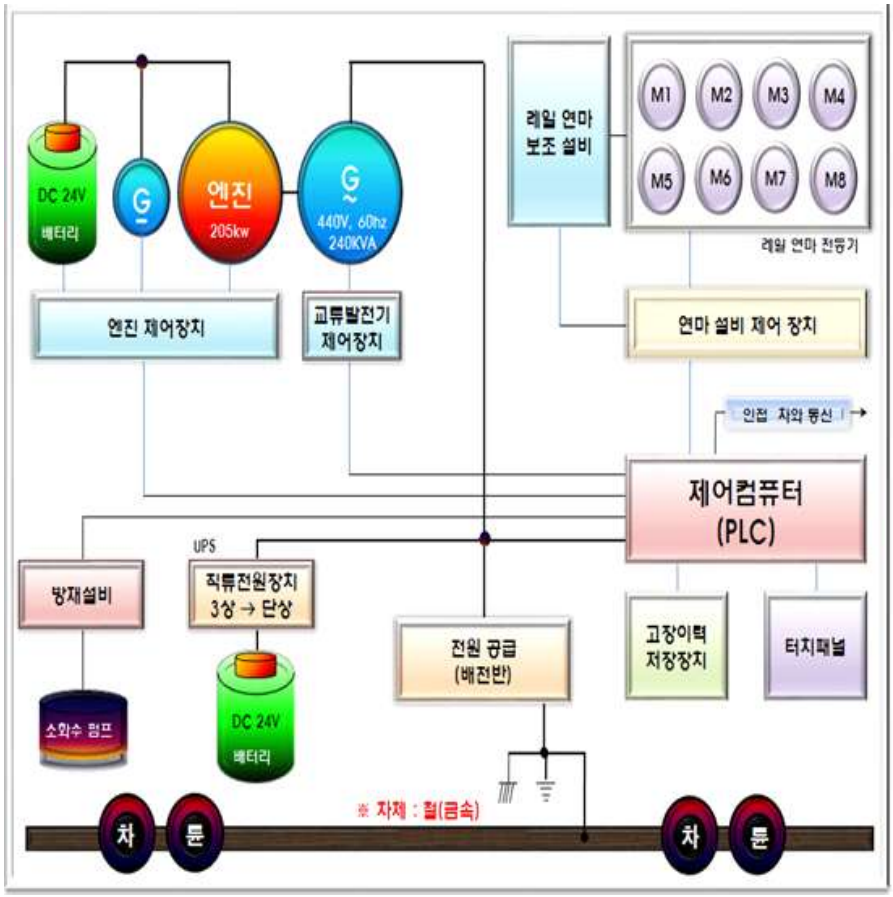
2.7. 전기 및 제어계통 분석

[그림 19]와 같이 사고차량이 전소됨에 따라 화재 원인을 규명할 수 없어, 사고 당시 함께 직렬로 연결하여 운행했던 동일한 종류의 A2 레일연마차의 유지 관리 상태를 확인하여 전기 및 제어계통을 분석하였다.

[그림 19] 사고차량(A1)과 정상차량(A2) 상태

전기 및 저어계통은 디젤 엔진에 연결된 3상 4선식 발전기에서 교류 60Hz 440V 240kVA의 전기를 생산하여 부하에 공급한다.

발전기 보호를 위해 프로그램 로직장치(PLC : Programmable Logic Controller)에서 상시 사용 전류를 감시하여 400A 이상의 부하 전류가 흐를 경우 과전류 차단기를 동작시키도록 되어 있으며 전기 및 제어 계통은 [그림 20]과 같이 요약할 수 있다.



[그림 20] 전기 및 제어 계통 구성

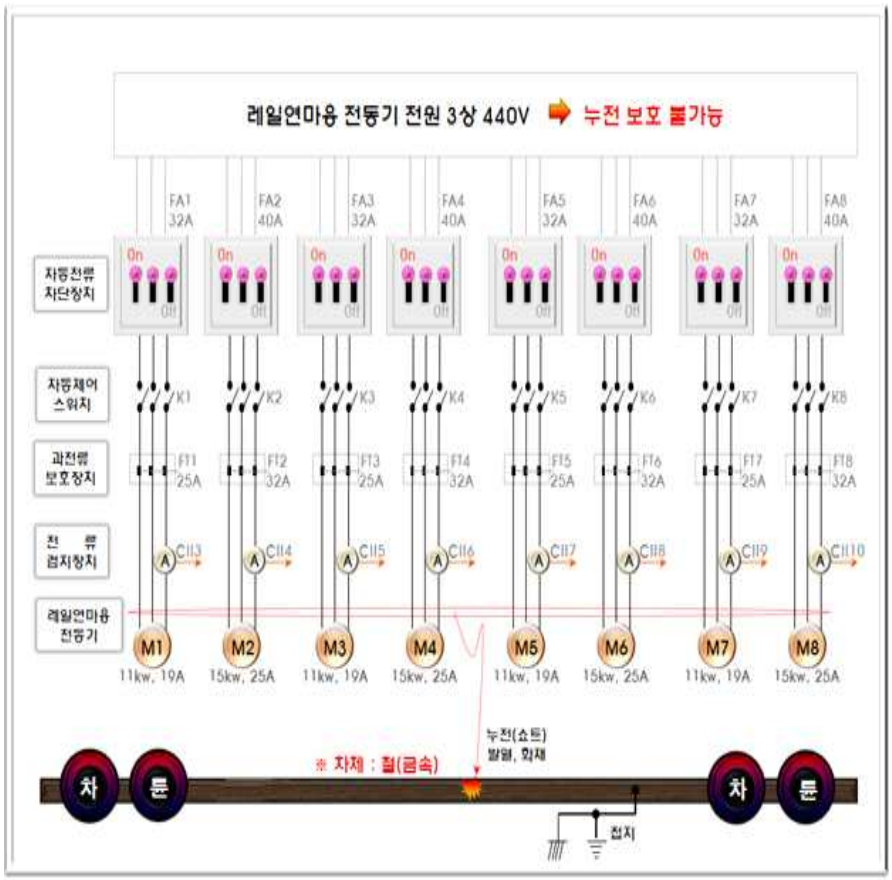
레일연마 설비는 레일 연마용 전동기(8대), 압력(압축공기) 생성용 전동기(2대), 방화수 분사용 전동기(1대), 각종 제어장치, 장비 이상 감시용 센서 등으로 구성되어 있으며, 전기(전기 및 제어)설비 사용 중 전기 계통 이상 시 각종 보호회로가 동작하여 전기 설비를 보호하도록 구성되어 있다.

2.7.1. 레일 연마용 전동기

레일 연마용 전동기(grinding motor) 8대(3상 11kW × 4대, 15kW×4대)는 사용자가 운전실 조작 장치에서 레일 연마용 전동기 제어를 수행하면 PLC의 제어 명령에 따라 레일 연마 작업이 이루어지도록 되어 있다.

과부하(과전류)로부터 전동기를 보호하기 위해 11kW 19A 전동기의 경우 32A의 자동 전류차단기, 15kW 25A의 경우 40A의 자동 전류 차단기가 설치

되어 있으며 레일 연마용 전동기 회로 구성은 [그림 21]과 같다.



[그림 21] 레일 연마용 전동기 구성

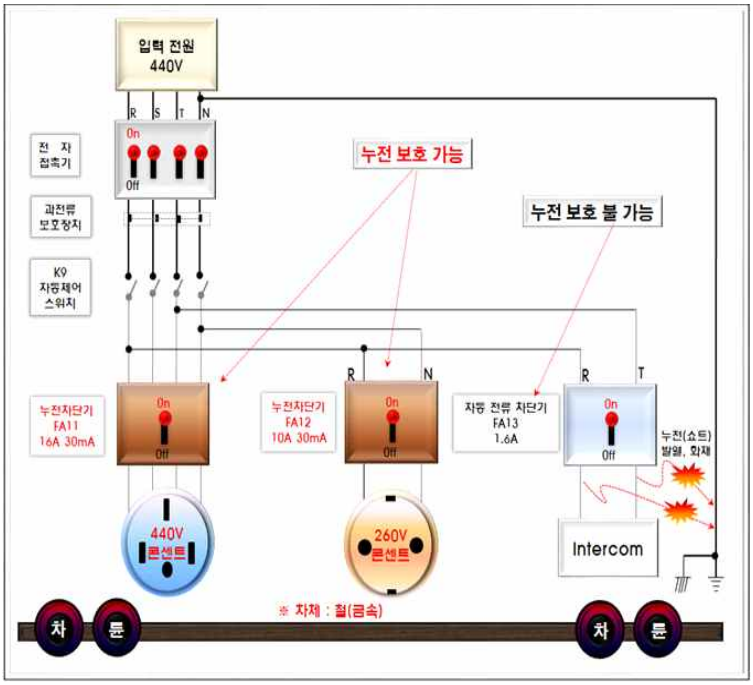
각각의 전동기마다 흐르는 전류 검출을 위해 전류 검출기를 설치하여 검출된 전류 값을 PLC에서 감시하며 설정값 초과 시 전자 접촉기를 제어하여 전동기를 보호할 수 있도록 되어 있다.

전선 손상 등으로 전선 피복 내에 습기 등이 침투하여 차체, 전선 상호간 접촉 등으로 누전이 발생할 경우 누전차단기[10]가 설치되어 있지 않아 감전 및 화재발생 가능성이 있다.

2.7.2. 보조 전원 공급

10) 누전차단기(earth leakage breaker, 漏電遮斷機) : 전기회로에서 하나의 전선(+극)이 손상 등으로 절연이 파괴될 경우 누전 현상이 발생하게 되며, 전류가 대지나 인체로 흐르는 것을 차단하여 화재 및 감전을 예방하며 영상 전류를 검출하여 동작함.

[그림 22]와 같이 레일 연마 작업 중 보조 장비를 사용하기 위해 2종류의 콘센트와 인터콤 전원을 설치하였다. 3상 4선식 440V 콘센트의 경우 부하 최대 허용전류는 16A, 누전 검지 및 차단 전류 30mA의 누전 차단기를 설치하였다. 단상 260V 콘센트의 경우 부하 허용 전류 10A, 누전 검지 및 차단 전류 30mA의 누전 차단기를 설치하여 인체 감전 및 화재를 방지토록 하였다.

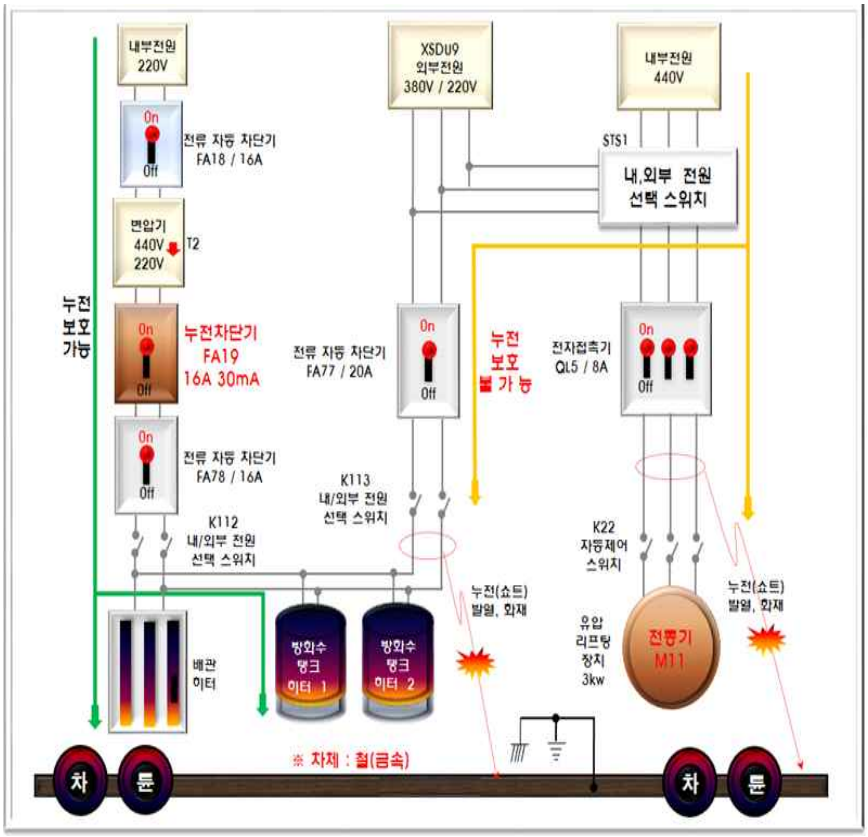


[그림 22] 보조 전원 공급

그러나 인터콤 전원은 누전차단기를 설치하지 않아 전원을 공급하는 전선에 습기 침투, 손상으로 인한 대지(차체)와 접촉 등으로 누전이 발생할 경우 누전되는 전류를 차단할 수 없어 감전 및 화재발생 가능성이 있다.

2.7.3. 히터, 유압 리프팅 장치

[그림 23]과 같이 발전기에서 생산된 440V의 교류 전력을 전자 접촉기 하단에 설치된 과전류 차단 장치(50A)를 통하여 유압 리프팅 장치에 공급하고, 단상(v, w) 220V (2.5kVA)로 낮춘 다음 부하 허용 전류 16A, 누전 검지 및 차단 전류 30mA의 누전 차단기(FA19)를 통해 배관 동결 방지용 히터, 압축기 동결 방지 히터에 공급한다.



[그림 23] 배관 히터, 방화수 탱크 히터, 유압 리프팅 장치

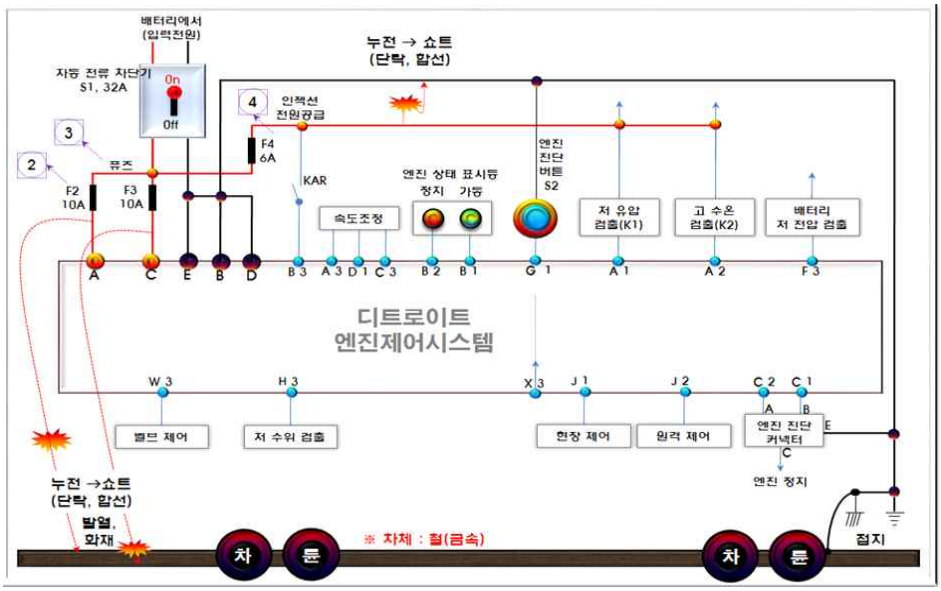
각 장치에 50A 이상의 과부하가 발생할 경우 전원을 자동 차단시키는 자동 전류차단기가 설치되어 있었으며, 전선의 손상이나 피복 내에 습기 침투 등으로 누전이 발생할 경우 감전 및 화재를 방지할 수 있도록 누전 차단기가 설치되어 있었다.

그러나 레일연마차를 사용하지 않은 상태에서 차고 등에 보관할 경우 배관과 방화수 물탱크 동결 방지를 위하여 외부 전원(XSDU9 : 380V/220V 50Hz)을 연결하여 사용할 수 있도록 구성된 회로에는 누전차단기가 설치되어 있지 않아 감전 및 화재 발생 가능성이 있다.

유압 리프팅 장치용 전동기는 8A이상의 과전류가 발생할 경우 전자 접촉기(QL5) 하단에 설치된 전류 검출기에서 과전류를 검출하여 전동기를 보호할 수 있으나, 누전차단기가 설치되어 있지 않아 감전 및 화재 발생 가능성이 있다.

2.7.4. 엔진 제어시스템

[그림 24]와 같이 엔진 제어시스템은 사용자가 키 스위치를 조작하면 엔진 제어시스템에 전원이 공급되어 기동하게 되며 엔진의 상태 감시와 엔진기름 유압 및 냉각수 온도 검출, 배터리 저 전압을 검출하고 엔진 가동 및 정지 여부를 표시등으로 표시하도록 되어 있다.



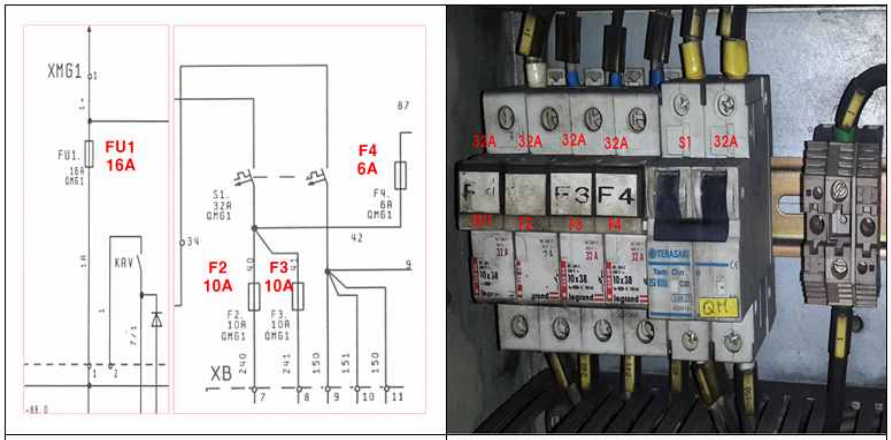
[그림 24] 엔진 제어 시스템 전원 공급

엔진제어시스템은 자동 전류 차단기(S1), 퓨즈(F2, F3, F4)에 의해 보호되나 [표 10]과 같이 설계 용량보다 2배~3배를 초과한 과전류 차단장치가 설치되어 있어, 이상 전류가 발생하면 엔진 제어회로의 보호가 불가능하며, 누설전류로 인한 화재발생 가능성이 있다.

구분		용량		판단 근거
		설계	설치	전기설비기술기준 제38조
자동전류차단기		32A	32A	적정
퓨즈	FU1	16A	32A	- 부적정 ・설계용량보다 2~3배 이상 과전류 차단퓨즈 설치 ・모든 과전류 차단 시설은 설계 용량과 동일하거나 동일 용량 이하의 과전류 차단 퓨즈 설치 필요
	F2	10A	32A	
	F3	10A	32A	
	F4	6A	32A	

[표 10] 자동 전류 차단기 및 퓨즈 설치 상태

[그림 25]는 회로 보호를 위한 자동 전류차단기(S1)와 퓨즈(FU1, F2, F3, F4)에 대한 설계 도면과 사고 당시 A2 레일연마차의 설치상태이다.



[그림 25] 과전류 차단장치 용량 비교

엔진룸 내 수분 함유량 증가 및 엔진가동 시 엔진룸 온도 증가에 따라 엔진룸 내 전원 케이블과 제어전선의 절연피복에 열화(劣化)가 발생할 수 있으며, 차량 진동에 의한 전원 케이블 및 제어전선 사이, 마찰 마모에 의한 기계적 열화(劣化) 가능성이 있다.

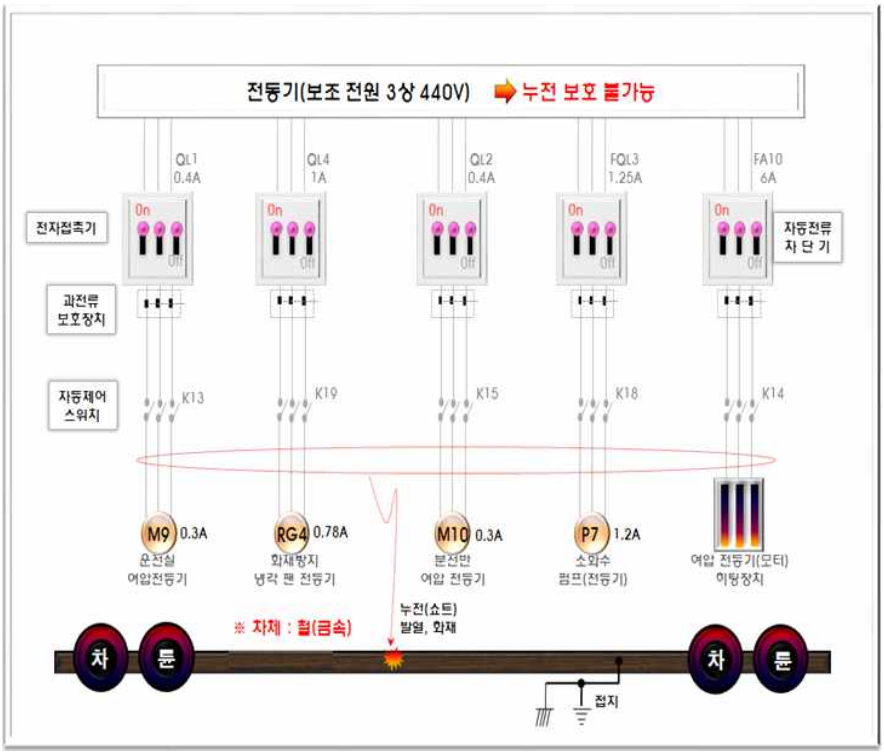
엔진룸 청소, 전원 케이블 및 제어전선에 대한 내열성 확보 및 진동 등에 의한 영향을 최소화하기 위해 전원 케이블 단자 및 제어선 단자 등에 방진 대책이 필요할 것으로 판단된다.

2.7.5. 소화용 펌프 및 기타 설비

[그림 26]과 같이 레일 연마 기능을 수행하기 위한 보조 설비는 압력 생성용 전동기(0.12kW, 0.3A×2대), 소화용 펌프(0.33kW, 1.2A), 냉각팬용 전동기(0.29kW, 0.78A), 압력 생성용 전동기 히팅 장치(1.8kW, 4A)로 구성되어 있으며, 각각 전자 접촉기 하단에 설치된 자동 전류 차단기에 의해 보호된다.

사고열차는 레일 연마과정에서 발생할 수 있는 화재를 예방하기 위해 소화용

펌프, 냉각팬 등이 설치되었으나, 누전에 대비한 누전차단기와 엔진룸 화재를 예방할 수 있는 자동소화설비는 설치되지 않았다.



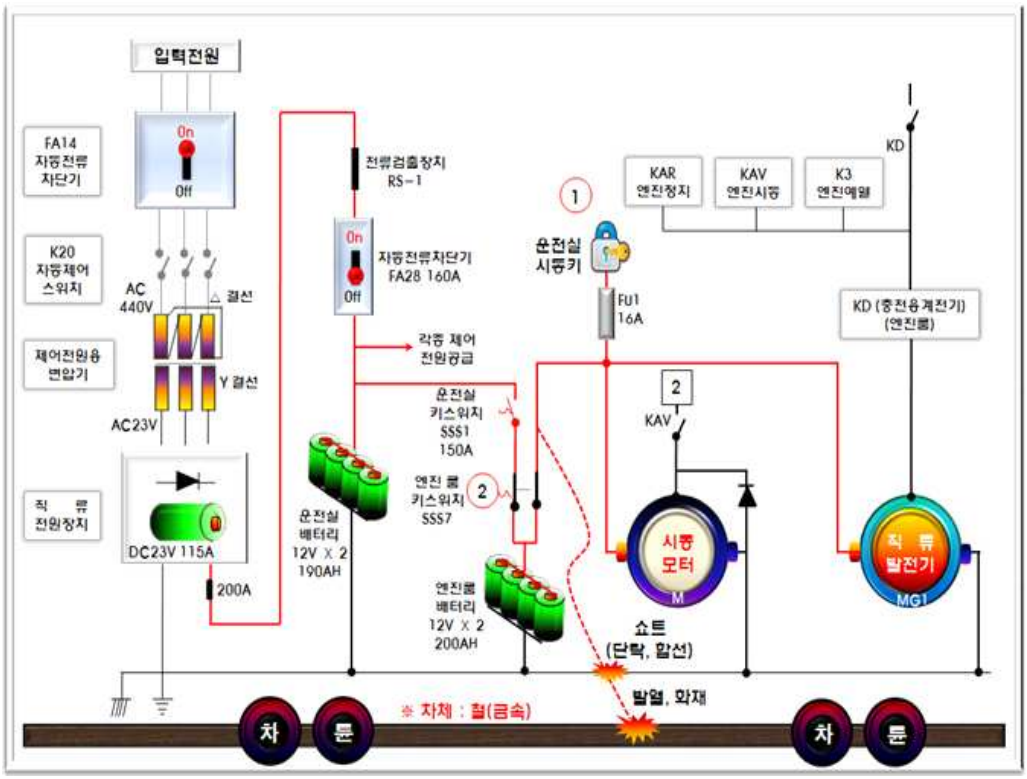
[그림 26] 각종 전동기 및 히팅장치

소화용 펌프 및 기타 설비는 프로그램 로직장치(PLC : Programmable Logic Controller)의 입력장치와 출력장치에 의해 자동으로 동작하는 설비이나 사고차량(A1)은 화재 발생 당시 엔진이 정지되면서 교류 발전 중단으로 인한 정전으로 소화용 펌프, 여압장치, 냉각팬 등이 동작할 수 없었다.

2.7.6. 배터리 계통

[그림 27]과 같이 엔진 제어 전원 공급은 사용자가 운전실 키 스위치와 엔진룸 키 스위치를 동작시키면 운전실 및 엔진룸에 설치된 배터리에 의해 시동 전동기에 전원을 공급하며, 엔진은 기동을 시작한다.

엔진에 종속되어 연결된 직류 발전기는 24V 전압을 생산하여 배터리 충전 및 각종 제어 전원으로 사용한다.



[그림 27] 엔진 기동 및 제어 전원 공급

시동 및 제어 회로에 160A이상의 과전류가 발생하면 자동 전류차단기(FA28)에 의해 회로를 보호할 수 있으나, 누설 전류가 발생할 경우 상용화된 직류용 누전차단기가 없어 누전보호가 불가능할 것으로 판단된다.

화재 당시 [그림 27]의 ①, ②와 같이 키 스위치가 켜져(On) 있었고, 만약 스위치가 꺼져(Off) 있더라도 배터리와 연결된 전선에 절연이 파괴되어 차체와 접지 또는 단락현상으로 불꽃이 발생하여 발화점으로 작용할 수 있어 화재 발생 가능성이 있다.

2.7.7. 절연저항 측정

레일연마차의 제어설비는 각종 비닐절연전선으로 구성되어 있어 전선의 손상 및 습기 침투 등으로 전선 심선과 심선 사이, 전선과 대지(금속) 사이에 절연저항이 저하될 경우 교류, 직류 전류가 누전되어 인체 감전 및 화재 발생 요인으로 작용할 수 있다.

화재 발생 이전의 유지 관리 실태를 판단하기 위해 A2 레일연마차의 전기 설비에 대하여 절연저항을 측정하였다. 절연저항 유지관리 적합성은『철도안전법』제26조제3항에 따른 철도차량 형식승인, 같은 법 제26조의6제1항에 따른 철도차량 완성검사, 같은 법 제31조제1항 및 제32조제1항에 따른 형식승인 등의 사후 관리에 필요한『철도차량 기술기준』5.3.5 절연저항시험(기준 : 1㏁이상)에 따라 판단하였다.

절연저항 측정 시 주변 환경은 측정값에 영향을 미치나 측정 당일(2016년 3월 17일 10시 50분부터 11시 20분까지) 창동 차량기지 주변 기온은 10.5℃, 습도 25%로 양호한 상태였다.

측정값의 신뢰성 확보를 위하여 2종류의 500V 절연저항계를 사용하였고, 측정 위치, 측정 결과, 적정성 판단은 [표 11]과 같다.

측 정 위치 (엔진 제어 패널)		측정값[㏁]		적정성 판단
		절연저항계		저압회로와 대지사이 : 1㏁ 이상 철도차량기술기준, 일반철도차량 5.3.5 절연저항시험
		KYORITSU 3007	HIOKI 3453	
메인 전원(NFB)		0.01[㏁]	0.01[㏁]	부적정
KAR (엔진 정지)	1	0.01[㏁]	0.01[㏁]	부적정
	2	0.00[㏁]	0.00[㏁]	부적정
KAV(엔진 시동)		0.01[㏁]	0.01[㏁]	부적정
K1(저 유압)		0.01[㏁]	0.01[㏁]	부적정
K2(고수온)		0.01[㏁]	0.01[㏁]	부적정
V1(다이오드)		0.01[㏁]	0.01[㏁]	부적정
FU1(시동 전동기)		0.01[㏁]	0.01[㏁]	부적정
F2	엔진 제어	0.01[㏁]	0.01[㏁]	부적정
F3		0.01[㏁]	0.01[㏁]	부적정
F4		0.01[㏁]	0.01[㏁]	부적정

[표 11] 엔진 제어 시스템 절연저항 측정 결과

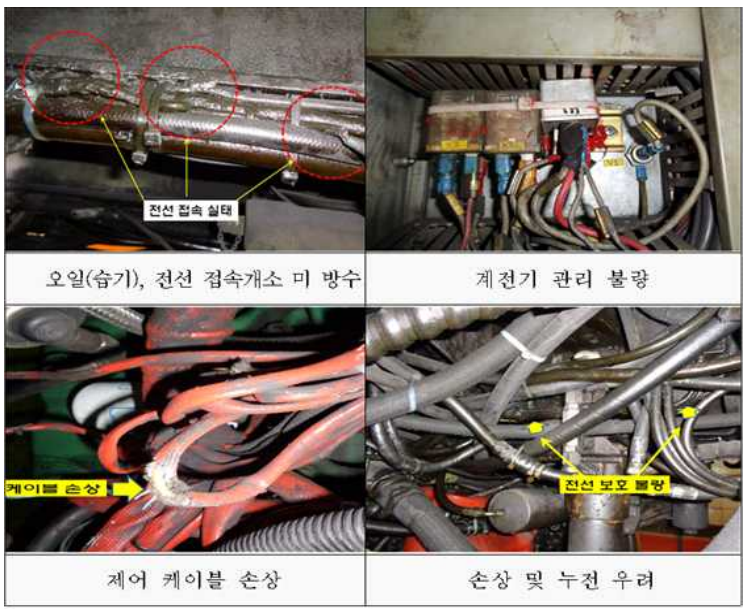
전기에 의한 화재는 주로 단락(합선), 과부하, 누전 등에 의해 발생 될 수 있으며 특히 누전에 의한 화재의 경우 초기에는 미세한 전류가 차체(대지)로

흐르다가 점차 전류가 증가하여 누전 차단기가 회로를 보호하지 못할 경우 전선을 구성하고 있는 여러 가닥의 소선이 단선되고 단면적 감소로 인한 저항의 증가로 열이 발생할 수 있다.

이러한 현상이 지속하면 전선 피복이 손상되면서 대지(차체)와 전선 사이에 불꽃(아크)이 발생하여 점화원이 되고 주변에 인화 물질이나 가연성 물질 등이 있으면 점화하여 화재로 이어질 수 있다.

엔진 제어시스템 절연저항 측정결과 [표 11]과 같이 『철도차량 기술기준』 5.3.5에서 정한 기준 값(저전압회로와 대지사이 : 1㏁)이하로 측정되어 부적정하게 관리되고 있음을 알 수 있다.

A2 레일연마차의 관리 실태는 [그림 28]과 같이 제어 계통의 전선에 습기를 함유한 기름과 먼지 등 불순물이 흡착되어 있어 절연저항 저하로 인한 누설전류 발생 가능성이 있다.



[그림 28] 각종 전선 상태

A2 레일연마차의 엔진룸 내부 배선의 절연저항이 저하된 상태와 사고차량에 대한 국립과학수사연구원 감정결과를 종합하면 사고차량의 엔진룸에서 전선 절연저하에 의한 단락으로 인한 발화 가능성이 있었을 것으로 추정된다.

따라서 동종 또는 유사 화재 확산 방지를 위해 엔진 룸 내 케이블과 전선은 난연성 또는 불연성 적용 검토와 수직으로 변경 설치된 연료탱크 배관에 자동 잠금 밸브 설치가 필요할 것으로 판단되며, 『철도차량 기술기준』을 참조하여 유지보수를 시행할 필요가 있다.

2.8. 레일연마 및 제동

2.8.1. 레일연마

사고차량이 레일연마작업 중 연마석과 레일의 마찰로 인해 발생하는 불꽃에 의해 발화 가능성을 추정하기 위해 작업 승인서와 열차 이동 경로, 작업원들의 진술을 확인한 결과, 동대문역사문화공원역~명동역 사이 레일 연마 작업을 위해 이동 중이었으므로 레일연마 작업으로 인한 화재발생 가능성은 없는 것으로 판단된다.

2.8.2. 제동

사고열차가 제동 시 발생한 불꽃에 의해 발화 가능성을 추정하기 위해 사고구간(수유역~미아역 사이)을 확인한 결과, 오르막 언덕(2‰)으로 제동을 체결하는 지점이 아니어서 차륜(철제 바퀴)과 제륜자[11] 마찰열에 의해 불꽃 발생 및 화재 확산 가능성은 없었던 것으로 판단된다.

2.8.3. 화재예방을 위한 차량관리

사고열차는 가연성 각종 기름과 각종 전기 배선 등이 설치되어 레일 연마 작업 또는 운행 중 제동 시 발생하는 불꽃에 의해 화재가 발생할 수 있다.

따라서 화재 예방을 위해 근본적인 누유 방지대책을 수립하고, 차체 하부에

11) 제륜자(制輪子, brake shoe) : 차량의 마찰 제동에서 차륜을 누르는 부품, 제륜자는 차량이 가지고 있는 운동 및 위치 에너지를 열에너지로 변환함.

설치된 전기배선에 오염된 기름 등 이물질을 제거하고, 전선보호용 금속 덮개로 보호할 필요가 있다.

2.9. 국립과학수사연구원 화재 감식 결과

국립과학수사연구원은 사고차량에 대한 화재사고 감식결과(법안전감정서)에 대해 “엔진룸 내부가 심하게 연소된 상태이고, 같은 부위에서 발견된 전기배선에서 [그림 29]와 같이 단락 흔적이 식별되어 엔진룸 내부에서 최초 발화된 것으로 추정된다.”는 의견을 제시하였다.

[그림 29] 전기 배선 단락 흔적

발화 원인 규명에 대하여는 “엔진룸 내부가 심하게 연소되었고, 특히 구성부품 및 전기 배선 등이 대부분 연소 과정에서 유실되어 현장 조사를 통한 구체적인 발화 원인에 대한 논단은 어렵다.”고 판단하였다.

3. 결론(Conclusions)

3.1. 조사 결과(Findings)

3.1.1 사고열차에는 각각 엔진룸에 열감지기, 운전실에 연기감지기가 설치되어 있으며, 이들에 대한 전원 스위치가 운전실 뒷면에 설치되어 있었으나, 스위치는 모두 꺼져 있었다. 운전원은 화재감지기에 대해 교육받은 사실이 없다고 진술하였다.

3.1.2 공사는 위탁용역 계약 시공사 직원에 의한 실무수습 및 숙달 교육을 각 장비별 특성에 맞게 교육일정표를 작성, 장비별 강사를 지정하여 현장 실무교육을 ㈜○○의 운전원, 작업원들에게 3주간(2012년 4월 1일부터 2012년 4월 22일까지) 시행하였으나, 운전원 등이 변경되는 과정에서 교육이 원활히 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

3.1.3. 사고열차의 전기 및 제어계통 전선에 대해 절연저항 점검을 시행하지 않아 전사적 자원관리 시스템(ERP)에 기록·유지 상태를 확인할 수 없었다.

3.1.5. A2 레일연마차의 엔진룸의 제어배선이 기름이 섞인 물에 장기간 노출되어 절연 저항이 저하된 점과 엔진 연결부, 주행 펌프 및 작업 펌프 부위에서 누유가 있었던 점 등을 비추어 볼 때, 사고차량)의 유지보수 상태도 정상차량(A2)과 유사한 상태였을 것으로 판단된다.

3.1.6. 전기 및 제어계통의 절연저항 측정 및 전기설비에 대한 절연저항 측정 및 관리가 이루어지지 않은 사실, A2 레일연마차에 대한 절연저항 측정결과 기준값보다 낮게 측정된 사실과 두 개의 배터리를 직렬로 연결하는 연결 케이블 중 하나가 손으로 들어 올리면 쉽게 탈락하는 사실을 비추어 볼 때, 사고차량의 전기설비에 대한 유지보수도 부적정하게 수행된 것으로 판단된다.

3.1.7. A2 레일연마차의 레일 연마용 전동기, 보조 전원장치의 인터콤, 배관과 방화수 동결 방지를 위한 외부전원 및 유압 리프팅 전동기용 전원에 누전차단기가 설치되어 있지 않은 점을 비추어 볼 때, 사고차량에도 누전차단기가 설치되지 않았을 것으로 판단된다. 이에 따른 각종 전선의 절연저항 저하로 인한 누전 발생 시 전원이 차단되지 않을 경우 화재가 발생되었을 가능성이 있다.

3.1.8. A2 레일연마차의 엔진 제어시스템 전원용 퓨즈가 설계 기준값보다 큰 용량의 퓨즈가 설치된 점을 비추어 볼 때, 사고차량의 퓨즈도 설계 기준값보다 큰 용량이 설치되어 있었을 것으로 판단되며, 이에 따른 누전 발생 등으로 인한 이상 전류 발생 시 적절하게 차단하지 못하여 화재가 발생되었을 가능성이 있다.

3.1.9. 2013년 5월 31일 사고열차 제작사의 기술 검토 없이 엔진룸 하부에 수평으로 설치되어 있던 연료탱크를 기존 위치보다 상부에 수직으로 구조를 변경, 설치하면서 자동 잠금 밸브를 설치하지 않아 연료가 중력에 의해 계속 엔진룸에 유입되었을 가능성과 유입된 연료에 의해 화재가 확산되었을 것으로 판단된다.

3.1.10. 로그 파일에는 당시의 차량 상태를 나타내는 물리량(엔진, 냉각수, 작동유 온도, 압력 등)은 기록하지 않는 것으로 확인되었다.

3.1.11. 정비 로그 파일에는 예방정비를 해야 하는 모든 항목이 표시되고, 예방정비를 해야 하는 날짜가 되면 컴퓨터 화면에 해당 항목이 나타나는 것이 확인되었다. 또한, 해당 항목을 초기화하면 그 항목은 하드디스크에 기록되지만 실제로 정비를 하고 초기화를 했는지, 정비하지 않고 초기화만 했는지는 구분하지 못하고 있었다. 단, 초기화를 하지 않은 정비가 필요한 항목은 알람 폴더에 저장되고 있으며 이는 터치스크린 상에서 확인 가능하였다.

3.2. 사고 원인(Causes)

『서울메트로 4호선 수유역～미아역사이 레일연마차 화재사고』의 원인 규명을 위한 중요한 단서인 사고차량의 엔진룸 및 엔진계통에 연결되는 배관, 제어 배선 등이 연소로 대부분 소실되어 항공·철도사고조사위원회에서는 사고차량의 화재사고 원인 규명이 불가능하였다.

그렇지만 향후 동종·유사한 화재사고 예방을 위해 사고차량과 동일 차종이면서 사고 당시 함께 편성되어 운행한 A2 레일연마차에 대한 현장조사 결과를 바탕으로 화재사고 발생 가능성을 다음과 같이 결정하였다.

사고 원인은 엔진룸에 설치된 각종 전원 케이블 및 제어전선의 절연저항이 저하되어 차체 또는 각종 전선들이 단락되는 순간 발생한 불꽃이 주변 가연물에 점화된 것으로 추정하였다.

기여 요인은 엔진보다 낮은 위치에 수평구조로 설치된 연료탱크를 엔진보다 높은 수직 구조로 연료탱크로 변경하면서 자동 잠금 밸브를 설치하지 않은 것이 화재 확산 요인으로 작용하였을 것으로 추정하였다.

4. 안전 권고(Safety Recommendations)

항공・철도사고조사위원회는 2015년 11월 26일 01시 51분경, 『서울메트로 4호선 수유역~미아역 사이 레일연마차 화재사고』에 대한 조사결과에 따라 다음과 같이 안전 권고를 발행한다.

4.1. 서울메트로에 대하여

4.1.1. 사고열차에 설치된 화재감지설비가 꺼진 상태로 운용되고 있고, 화재 발생 시 초기 진화가 이루어지지 않은 점을 고려, 레일연마차 등의 철도차량(특수차) 등에 설치된 화재감지설비에 대해 정밀점검을 시행하고, 관계자들에게 화재감지기 사용법 및 화재예방교육을 철저히 시행할 것.

4.1.2. 공사의 유지관리프로그램에 따라 레일연마차 등의 철도차량(특수차)에 대하여 적정한 유지보수 항목을 선정・시행하고 유지보수 결과는 공사의 전사적 자원관리시스템(ERP)에 기록, 철저하게 관리할 것.

4.1.3. 엔진룸, 엔진 연결부, 작업펌프 등에 물과 유류가 섞여 장기간 노출된 점, 전기 및 제어계통의 절연저항 저하로 절연저항이 기준값보다 낮은 점, 엔진 룸 내부에 난연성 및 불연성 전선을 사용하지 않은 점, 배터리의 연결선이 쉽게 빠지는 점, 전원계통의 일부 배선에 누전차단기가 설치되어 있지 않은 점, 엔진 제어시스템 전원용 퓨즈가 설계 용량보다 큰 퓨즈가 설치된 점, 차체 하부에 각종 전선이 덮개로 보호되지 않은 점 등을 고려하여 레일연마차 등의 철도차량(특수차)에 대하여 『철도차량 기술기준』에 맞춰 유지보수계획을 수립하고 조속히 시행할 것.

4.1.4. 연료탱크의 경우 중력에 의한 기름 누출이 심하므로 사용하지 않고 장기간 대기할 경우를 대비하여 레일연마차 등 철도차량(특수차)의 연료탱크에 자동 잠금 밸브를 설치하고, 엔진 및 기름 배관에서 기름이

누출되지 않도록 근본적인 기름 누출 방지 대책을 검토하여 시행할 것.

4.1.5. 레일연마차 등 철도차량(특수차)의 주요한 부분의 구조를 변경할 경우, 『철도안전관리체계』 및 『철도차량 기술기준』 등을 참조하여 제작사 또는 전문 인증기관으로부터 기술검토를 수행 한 후 시행할 것.

4.1.6. 지하구간의 역과 역사이의 터널구간에서 대형 화재사고 발생을 대비하여 연결송수관설비 설치 등을 검토하여 설치할 것.

4.1.7. 공사의 인적관리프로그램에 따라 안전업무수행자인 특수차 운영 및 유지보수 요원들에게 직무 전문교육 및 훈련을 주기적으로 실시, 평가, 관리할 것.

이 보고서는 사고조사 과정에서 관계인들로부터 청취한 진술 및 개인정보 등이 포함되어 있어,

『항공·철도사고조사에 관한 법률』 제28조(정보의 공개금지) 및 같은 법 시행령 제8조(공개를 금지할 수 있는 정보의 범위)에 의하여 이 보고서(인쇄본)에 개인정보는 공개하지 않았으며,

국민여러분의 이해를 돕기 위해 전문 철도용어를 쉽게 풀어서 쓴 점을 양해하여 주시기 바랍니다.

자세한 사항은 항공·철도사고조사위원회로 문의하여 주시기 바랍니다.

항공・철도사고조사위원회
http://www.araib.go.kr
전화: 044-201-5427
E-mail: sajio0131@korea.kr