

철도사고조사보고서

부산교통공사

2호선 구명역 구내(203A호 선로전환기)

시험운전 제2764열차(27편성, 6량)

열차탈선

2022년 1월 26일(수) 01시 54분경



2022. 12. 26.



항공·철도사고조사위원회

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

같은 법률 제1조에서 ‘철도사고 조사는 독립적이고 공정한 조사를 통하여 사고원인을 정확하게 규명함으로써 철도사고의 예방과 안전 확보에 이바지함’을 목적으로 하고 있다.

또한, 같은 법률 제30조에 따라 ‘사고조사는 민·형사상 책임과 관련된 사법절차, 행정처분절차 또는 행정쟁송 절차와 분리·수행’되어야 하고,

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.

차 례

제목	1
개요	2
1. 사실 정보	3
1.1 사고의 경위	3
1.2 피해사항	4
1.3 인적정보 및 업무수행사항	5
1.4 기록정보	13
1.5 차량정보	15
1.6 선로정보	18
1.7 신호·전기정보	22
1.8 전자연동장치 개량사업	25
1.9 기상정보	40
2. 분석	41
2.1 관계자 업무수행 분석	41
2.2 차량분석	44
2.3 선로분석	44
2.4 신호분석	45
2.5 오동작 원인분석	49
2.6 종합분석	56
3. 결론	58
3.1 조사결과	58
3.2 사고원인	61
4. 안전권고	62
4.1 부산교통공사에 대하여	62

부산교통공사 2호선 구명역 구내 시험운전열차 탈선사고

- 운영기관: 부산교통공사
- 운행노선: 2호선
- 발생장소: 구명역 구내(203A호 선로전환기)
- 사고열차: 시험운전 제2764열차(27편성, 전동차 6량)
- 사고유형: 열차탈선
- 발생일시: 2022년 1월 26일(수) 01시 54분경



[그림1] 사고 현장 약도

개요

2022년 1월 26일(수) 01:54경 부산교통공사 2호선(이하 ‘부산 2호선’ 이라 한다.)에서 전자연동장치 개량사업 시행에 따라 시험운전(이하 ‘시운전’ 이라 한다.) 중이던 제2764열차(27편성, 6량, 이하 ‘사고열차’ 라 한다.) 기관사가 구명역 21R 신호기의 진행신호를 확인하고, 운행 중 텅레일이 벌어져 있던 203A호 선로전환기로 진입하여 사고열차 맨 앞 차량(앞·뒤 대차 전부)과 두 번째 차량의 앞 대차가 진행 방향 왼쪽으로 탈선되었다.

이로 인하여 차량 및 궤도 시설물 등이 파손되었으며, 일부 구간의 운행이 일시 중지되었으나 인명피해는 없었다.

이에 항공·철도사고조사위원회는 『항공·철도사고조사에 관한 법률』 제2조 및 제18조에 따라 사고조사를 하였다.

이번 사고의 주원인을 ‘제작사에서 설계·제작한 OC장치가 203A호 선로전환기의 반위쪽 텅레일이 벌어져 있었음에도 정상 동작한 것으로 검지하여 21R 신호기를 진행신호로 잘못 현시한 것’으로 결정하였다.

또한 이번 사고에 영향을 끼친 기여 요인을 ‘선로전환기와 같은 중요한 설비의 표시회로 전원을 단선제어방식으로 구성한 것’으로 결정하였다.

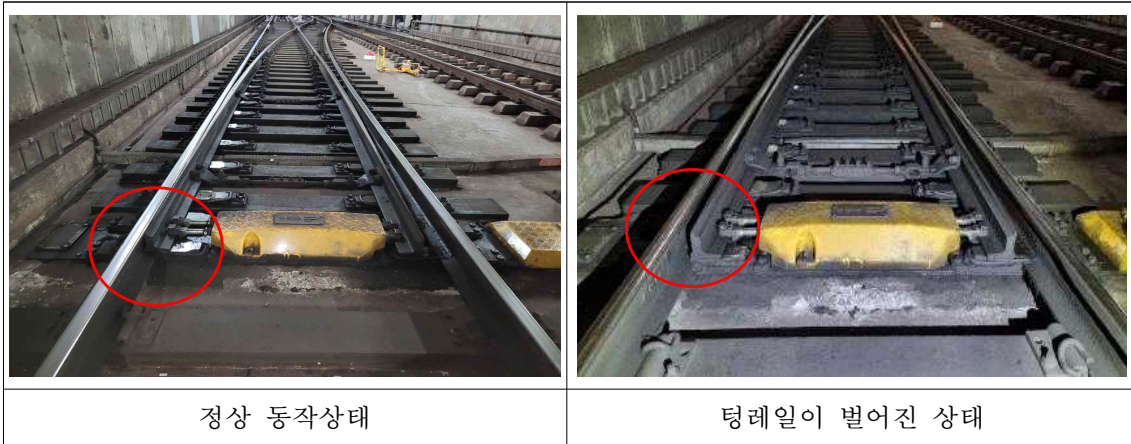
이에 항공·철도 사고조사위원회는 『항공·철도 사고조사에 관한 법률』 제26조에 따라 부산교통공사에 5건의 안전권고를 발행한다.

1. 사실정보

1.1 사고의 경위

2022년 1월 26일 전자연동장치 개량사업 시행에 따라 시운전을 하던 사고 열차가 구명역 상선에서 203A호 선로전환기(반위)를 경유하여 하선으로 운행하기 위해 21R 신호기 앞에 정차(01:53:50)하였다.

구명역의 LCC(Local Control Console)장치 LA(Local Automatic)모드¹⁾에서 21R 신호기가 취급되었을 때, OC(Object Controller)장치²⁾ 2계의 MOT모듈³⁾ 오동작으로 인하여 203A호 선로전환기는 [그림2]의 우측에 보이는 것과 같이 텡레일은 기본레일과 떨어져 있었다. 그러나 LCC장치와 관제실 화면은 203A호 선로전환기가 정상(반위)인 것으로 표시하였고, 현장의 21R 신호기도 진행신호를 현시하였다.



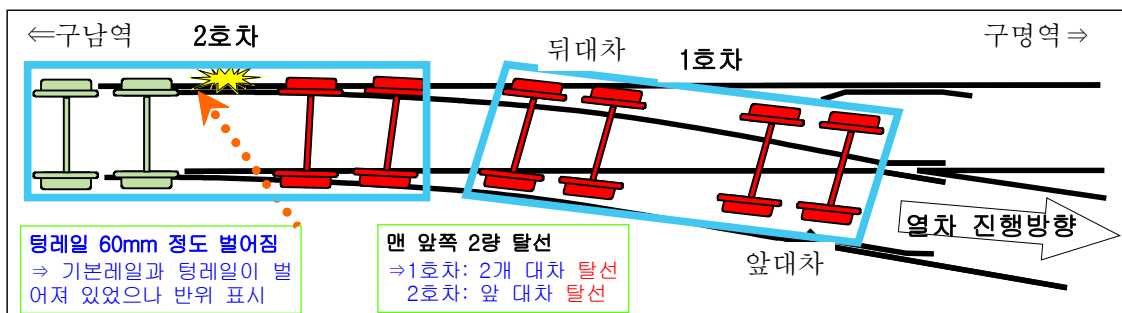
[그림2] 203A호 분기부 텡레일 상태

사고열차의 기관사(이하 ‘기관사’라 한다.)는 구명역 21R 신호기의 진행신호를 확인하고 출발(01:54:13)하였다.

1) 역(驛) 자동취급모드(Mode)로 현장역의 열차운행 계획에 따라 열차의 운행을 제어하는 취급모드, 이하 ‘LA모드’라 한다.
 2) 현장 입출력 제어장치로 연동논리장치와 연결하여 현장 설비의 제어/표시 정보를 전달하고, 궤도 회로에 열차제어 정보를 전송하는 장치. 이하 ‘OC장치’라 한다.
 3) OC장치를 구성하는 선로전환기용 제어모듈(Module). 이하 ‘MOT모듈’이라 한다.

사고열차가 약 21Km/h의 속도로 203A호 선로전환기에 진입할 때 [그림3]에 보듯이 맨 앞 차량의 앞 대차 차륜이 기본레일과 텅레일의 벌어진 틈새(60mm)로 진입하여 텅레일로부터 약 6m 지점에서 선로 왼쪽으로 탈선되었다.

기관사는 탈선 시 발생한 소리와 차체의 흔들림을 느껴 비상제동을 취급하였고, 사고열차는 약 24m를 더 진행하면서 맨 앞 차량(앞·뒤 대차 전부)과 2호 차량의 앞 대차가 탈선된 후 정차(01:54:40)하였다.



[그림3] 203A호 분기기 탈선 현황도

1.2 피해사항

1.2.1 인명피해

이번 사고로 인한 인명피해는 없었다.

1.2.2 물적피해

이번 사고로 발생된 피해액은 [표1]과 같이 약 38,512,000원(차량분야 36,268,000원, 궤도분야 2,244,000원)의 피해가 발생하였고, 일부 구간(수정역~덕포역)의 운행이 일시 중지되었다.

분야	피해 내역	피해액(원)
차량	수직 오일댐퍼, 픽업 코일, 기어유니트 유면계 등	36,268,000
궤도	분기부 베이스플레이트 판, 스크류 스파이크 등	2,244,000
합계	38,512,000원(삼천팔백오십일만이천원)	

[표1] 분야별 피해 금액

1.3 인적정보 및 업무수행사항

1.3.1 기관사

기관사 000(53세, 남)는 2006년 7월 ‘제2종 전기차량 운전면허’를 취득한 후 2007년 5월 23일부터 부산교통공사 호포승무사업소에서 근무하고 있었다.

기관사는 2020년 4월 6일 신체검사에 합격하였고, 2021년 2월 1일 적성검사에 합격하여 모두 유효기간이 경과하지 않았다.

기관사의 사고발생 이전 행적은 1월 22일 휴무, 1월 23일 07:11~15:47 근무, 1월 24일 07:40~19:07 근무, 1월 25일은 22:55에 출근하였고, 승무 적합성 검사에서 ‘적합’ 판정을 받았다.

기관사의 사고 당일 운행 계획은 호포역을 출발하여 모라역에 도착 후 신호 관련 시험을 할 예정이었으나 계획이 변경되어 구명역에서 되돌아가는 일정이었다.

기관사는 “구명역의 선로 상태가 직선이고 평탄하였으며, 21R 신호기에 진행신호가 현시되어있는 것과 선로전환기가 밀착되어있는 것을 확인하고, 약 15Km/h 이하의 저속으로 진입하였다. 운전실에는 제작사의 직원도 동승하고 있었다.” 라고 진술하였다.

기관사는 “사고열차가 203A호 분기기에 진입한 후 진행할 때 ‘쿵’ 소리와 함께 차체가 흔들려 비상제동을 체결하여 열차를 정차시킨 후 동승자

와 함께 운전실 밖으로 나가 차량 상태를 확인하였다.” 라고 진술하였다.

“첫 번째 차량은 전체(2개) 대차가 두 번째 차량은 1개 대차가 왼쪽으로 탈선된 것을 확인하고 무전기로 관제에 보고하였다.” 라고 진술하였다.

1.3.2 관제사

운행관제사 000(38세, 남)는 2008년 6월 1일 부산교통공사에 기관사로 입사하였으며, 2020년 10월 ‘철도교통관제사’ 자격을 갖추어 2020년 11월 3일부터 운행관제사(이하 ‘관제사’라 한다.)로 근무하고 있었다.

사고발생 이전 행적은 1월 23일 휴무, 1월 24일 주간근무, 1월 25일은 야간근무하였고, 1월 25일 출근하여 시행한 적합성 검사에서 ‘적합’ 판정을 받았다.

관제사는 사고 당일 “구명역 신호 유지보수자의 요청에 따라 로컬 취급⁴⁾을 승인한 후 신호 취급상태를 감시하였다.” 라고 진술하였다.

관제사는 “사고열차의 운행 경로는 호포역 상선에서 출발하여 구명역에서 203A호 분기기를 통해 하선으로 이동 후 호포기지로 입고하는 행로였고, 신호 유지보수자가 21R 신호를 취급하였을 때 진행신호가 현시되었고, 선로 전환기 불일치(不一致)표시는 없었다.” 라고 진술하였다.

관제사는 “기관사로부터 탈선하였다는 무전 연락을 받고(02:03경) 사고를 인지하였으며, 무전 연락을 받은 후 열차 운행상황판을 확인했을 때, 21R 신호기부터 203A호 분기기까지 궤도회로가 점유(붉은색 표시)된 것을 확인하고 기관사에게 탈선상태를 다시 확인하라고 지시하였다.” 라고 진술하였다.

관제사는 “기관사로부터 탈선 사실을 보고받은 후 매뉴얼에 따라 구명궤

4) 로컬(Local) 취급: 중앙집중제어의 상대적 개념으로 현장역 운전취급실에서 신호취급 및 진로제어를 하는 것을 의미한다.

도, 호포전기, 호포차량, 구명역, 시설 분야의 초기대응팀 출동을 지시하였고, 종합관제소 내 휴게 중인 관제사들에게도 탈선 사실을 알렸으며, 호포차량기지에 사고복구 차량 출동 등 사고복구에 대하여 지시하였다.” 라고 하였다.

1.3.3 사업총괄 책임자(신호부장)

부산교통공사 신호통신처 신호부장 000(54세, 남)은 1994년 3월 부산교통공사(구 부산교통공단)에 최초 입사하였고, 2022년 1월 1일부터 신호통신처 신호부장으로 발령받아 근무하고 있었다.

신호부장의 임무와 역할은 신호설비의 유지보수, 장애 원인분석, 중장기 계획수립, 물품구매, 용역·공사 발주 등의 업무를 총괄하고 있었다.

전자연동장치 개량 내용과 추진 과정은 “부산 2호선 전자연동장치는 장기 사용으로 인하여 성능이 저하 되었고, 기존 제작사에서 동일 제품을 제작하지 않았다. 그래서 성능이 개선된 신규설비로 적기에 교체하여 유지관리 효율성 향상 및 선제적 장애 예방을 도모하기 위하여 연동장치 개량사업이 추진되었다. 소요 예산을 분산하고 효율적 시험을 위해 EIE장치⁵⁾와 OC장치를 묶어서 교체하고, 부산 2호선 전체에 대해 2021년~2028년 사업 시행을 계획하였다.” 라고 진술하였다.

신호 설비의 절체(切替)작업⁶⁾ 일정과 방법, 시간 등에 대하여는 “2021년 6월 25일 제작사양 승인, 12월 17일 공장검사 시행, 2021. 12. 23.~12. 31. 신규설비를 반입하여 설치하였고, 2022. 1. 2.~1. 27. 자체 종합시험, 2022. 1. 28.~4. 27. 시운전검사 및 기존 설비 철거, 22년 4월 28일 신규설비를 운용하는 절차로 계획하여 시행 중이었다.” 라고 진술하였다.

사고 당일에 작업내용은 “1월 25일 LA모드에서 열차운행 계획에 의한 자

5) Electronic Interlocking Equipment: 신호설비 제어에 필요한 연동 조건을 CPU를 사용하여 software적으로 Logic을 처리하는 연동장치로 전자연동장치(연동논리장치)라 함

6) 기존 전자연동장치를 신설되는 전자연동장치로 교체하는 작업

동(Automatic)⁷⁾ 시험을 하려고 하였으나 하지 못하여 사고 당일은 신설 OC 장치를 2계로 운용한 상태에서 203A호 선로전환기 불일치(고장)가 해소된 것 같아 재차 자동 시험을 하였다.” 라고 진술하였다.

공장검사에 대해서는 “2021. 12. 17. 코로나로 인하여 감독자가 비대면으로 시행하였다.” 라고 진술하였다.

사고 선로전환기의 명칭과 사고 시 현장의 상태에 대하여는 “명칭은 203호이고, 203A호 텅레일은 떨어져 있었고, 203B호 텅레일은 반위쪽으로 전환되어 있었던 것으로 알고 있다. 침목형 선로전환기 전원공급 시간은 8초로 알고 있다.” 라고 진술하였다.

전자연동장치에 기록된 사고 당시의 상황에 대해서는 “사고 당시의 기록은 사고열차가 정상 운행한 것으로 기록되어 있었다.” 라고 진술하였다.

탈선의 원인에 대해서는 “1차 적으로 모듈⁸⁾이나 결선 쪽 문제가 있다고 생각하고, 2차 적으로 열차 시험 시 현장을 확인하지 못한 아쉬움이 있다.” 라고 진술하였다.

1.3.4 연동검사자(신호팀장)

연동검사자 000(48세, 남)은 2001년 1월 부산교통공사(구 부산교통공단) 신호보안원으로 최초 임용되었고, 2022년 1월 1일 신호통신처 신호팀장으로 임명되어 신호설비 유지보수 업무를 수행하고 있었다.

연동검사자는 LCC장치에서 신호와 진로를 취급하고 확인하며, 보조검사자들을 지휘 통제하였다.

7) LA모드에서 열차운행 계획에 따라 자동으로 열차를 운행하기 위한 신호 취급 방법

8) 여기서 모듈은 MOT모듈을 뜻하고, 기능별 논리적으로 분할된 일부분의 PCB(Printed Circuit Board)로 일반적으로 Module, Board, Card 등으로 불린다. 보고서에서는 모듈로 통일하여 사용하였다.

2022년 1월 27일 00:00~03:00 시행한 재현시험에서 OC장치의 MOT모듈이 불량한 것에 대하여는 “제작사가 초기 단계에서 충분한 검사를 하지 못하여 불량 검출을 하지 못한 것으로 생각하고, 설계하면서 안전측 동작(fail safe)⁹⁾을 고려하지 않은 것으로 판단된다.” 라고 진술하였다.

연동검사 시행에 대하여는 “2022년 1월 21일 00:00~04:30경 선로전환기 단동시험¹⁰⁾, 신호현시 시험을 시행한 후에 각 신호기에 대한 취급시험을 하였으며, 진로 시험 시 진로 쇄정, 진로 구분 쇄정, 조건부 쇄정, 상호 쇄정, 철사 쇄정 등을 확인하였다.” 라고 진술하였다.

사고 당일에 신설 전자연동장치 중에 OC장치 2계에 대한 시운전 시 연동검사 또는 준(準)하는 검사 시행 후 시운전을 시행하였는지? 여부와 그것이 필요하다고 생각하는지에 대하여는 “감독자가 당일 시운전의 총괄 책임자로 알고 있고, 검사는 공정별 검사가 시행되었기에 별다른 검사는 없었다. 2계에 대한 연동검사는 이번 사고로 보면 필요할 것 같다.” 라고 진술하였다.

1.3.5 공사감독자(작업책임자)

전자연동장치 개량사업에 공사감독자 000(42세, 남. 이하 ‘감독자’라 한다.)은 2007년 12월경 부산교통공사(구 부산교통공단)에 최초 임용되었고, 2016년 3월경 신호통신처에 발령받아 근무하였다.

감독자는 2021년 5월부터 전자연동장치 납품 설치계약이 체결되어 공사감독자의 업무를 수행하였다. 감독업무는 감독자 외에 보조감독자 7명이 감독자 부재 시 업무 처리 및 업무를 도와주기 위하여 지정되어 있었다.

감독자는 공사와 관련하여 야간 현장작업자 안전관리, 시설물 안전관리, 열차 운행 시 안전관리 등 안전과 공사품질의 향상을 위한 업무를 수행하였다.

9) 설비에 고장이 발생하였을 때 사고나 재해로 이어지지 않도록 오동작방지를 위한 안전설계 방법

10) 선로전환기 현장의 방향과 표시의 일치 여부와 밀착, 철사쇄정 등을 확인하는 검사 방법

연동장치 개량 물품계약에 대한 절체작업의 시행과 작업 시 감독에 대하여는 “2022년 1월 2일부터 야간(00:50~04:00)에 구명역 외 2역에 절체기(切替器)를 설치하고, 절체기를 통한 기존 설비와 신규설비가 정상 동작하는지에 대하여 시험하였으며, 전자연동장치가 제어하는 설비들을 종합적으로 시험하였다.” 라고 진술하였다.

작업이 시행되는 절차에 대하여는 “철도운행안전관리자가 작업계획을 수립하여 신호통신처에 보고하고, 보고 받은 담당자는 관제사와 협의하여 작업 승인을 받았다. 승인사항을 감독자가 철도운행안전관리자에게 통보하여 작업을 시행하였다. 작업이 완료되면 철도운행안전관리자가 현장 상태를 확인하여 감독자에게 보고하고, 감독자는 이상 유무를 확인한 후 관제사에 작업완료 보고하는 절차로 업무를 수행하였다.” 라고 진술하였다.

사고 당일 업무는 “열차 투입에 관한 준비업무, 시험계획 확인, 보조감독자에게 해야 할 업무를 알려주었고, 사고 시 감시 모니터를 감시하면서 이상한 것은 확인하지 못했다.” 라고 진술하였다.

사고 당일 제작사로부터 특별한 업무협의를 대하여는 “전자연동장치와 OC장치는 계절체(係切替) 시 감독자의 승인을 얻은 후 작업을 하지만 사고 당시에 OC장치 2계 절체작업 협의를 들은 바는 없었다. 항상 감독자인 본인과 협의하였기에 타 감독과 협의했다고 생각하지는 않는다.” 라고 진술하였다.

탈선의 원인에 대해서는 “선로전환기가 전환이 완료된 후 선로전환기 반위 표시가 되어야 하는데 전환 도중임에도 불일치를 표시하지 않아서 벌어진 텅레일 사이로 사고열차가 진입하면서 탈선된 것으로 생각되고 모듈과 결선 등을 상세히 검토하겠다.” 라고 진술하였다.

1.3.6 시공책임자(책임매니저)

이 사고와 관련된 시공책임자 000(40세, 남)는 전자연동장치 제작사인 DD

(주)이하 ‘제작사’라 한다.)에 2005년 11월 입사하여 2020년 3월경부터 본 설치공사 책임매니저(PM: project manager)로 시공책임자의 업무를 수행하였다.

시공책임자는 본 사업에 대하여 시행계획을 수립하여 보고하고, 공사가 원만히 수행되도록 사업관리, 협의, 지원 등 당해 프로젝트 지원 분야에 총괄 책임을 맡고 있었다.

본건의 계약에서부터 설치과정에 대하여는 “사업관리(자재 발주, 행정업무 처리, 설치 시험계획 등) 업무를 수행하였다. 전자연동장치를 설계·제작하여 공장검사는 설치 수량, 외관, 시뮬레이터를 이용한 연동검사 등을 비대면 화상으로 감독자와 시행하였다. 2022. 1. 3.~1. 12. 해당역에 전자연동장치와 시험에 사용할 절체기를 설치하였다. 공종별(工種別)검사는 2022. 1. 13.~사고 당일 시행되었고, 감독자의 지시에 따라 설비별 현장시험을 시행하였으며, 현장 시험자들은 보조감독자와 함께 3명이 현장에 투입되어 시행되었다. 1월 18일, 1월 25일, 그리고 1월 26일 00:30부터 열차에 의한 시험을 시행하였다. 이때도 보조감독자 1인과 제작사 1인이 시운전 열차에 동승하였고, 문제점은 없었다.” 라고 진술하였다.

시스템 구성과 각각 장치의 동작에 대하여는 “연동논리장치가 연산하여 현장 제어 정보를 OC장치로 보내주고, OC장치가 제어명령에 따라 현장 설비를 제어한 후 현장 설비에서 표시정보를 OC장치로 보내주고, 다시 OC장치가 받은 정보를 연동논리장치로 보내주면, 이를 처리한 후 처리된 정보를 조작표시판, 관제, 유지보수부 등으로 보내준다.” 라고 진술하였다.

사고 재현시험을 시행한 1월 27일 00:00~03:00에 OC장치 2계의 MOT모듈이 불량하여 사고 당시와 같은 현상이 발생한 것에 대하여는 “지금까지는 잘 되었는데 원인은 잘 모르겠고, 개발팀에서 분석을 해봐야 정확한 원인을 찾을 수 있을 것으로 생각된다.” 라고 진술하였다.

1.3.7 개발책임자

개발책임자 000(50세, 남)는 제작사에 2009년 10월경에 최초 입사하였고, 개발책임자(전문연구위원)로 임명되어 업무를 수행하고 있었다.

개발책임자는 다양한 사업을 시행할 때 하드웨어 및 소프트웨어 개발업무를 수행하였고, 신호 개발팀 팀장도 겸직하고 있어 신호설비 개발 부분에 하드웨어 총괄 책임을 맡고 있었다.

개발업무 과정에 대하여는 “기존 설비를 검토하여 설계할 기본 방향을 결정해 회로설계를 하고, 내부 검토를 거쳐 아트워크(기판설계), PCB 제작, 양산 업체선정, 부품구매, 제작, 펌웨어와 하드웨어 Test 과정으로 제품설계를 하였다. 시스템 시험은 전자연동장치와 OC장치는 같은 제품(기존 승인품)으로 설계를 하여 시스템을 구성하였고, 시스템 전체 시험을 하였다. 전자연동장치와 OC장치는 이더넷 케이블로 연결되어 있고, MOT모듈과는 2개 채널로 구성되어 있어 비교 연산한 후 출력하게 된다.” 라고 진술하였다.

기존에 전자연동장치와 신규 개발되는 연동장치의 안전성에 대하여는 “각각의 장단점은 있고, 신규 전자연동장치는 릴레이리스(relayless)식 전자연동장치와 비슷하다.” 라고 진술하였다.

사고 재현시험이 시행된 2022년 1월 27일 00:00~03:00에 OC장치의 MOT모듈이 불량하여 사고 당시와 같은 현상이 발생한 것에 대하여는 “모듈은 고장이 발생할 수 있는데, 고장 시 안전측으로 동작하지 않은 것에 대하여 원인을 분석하여 대책을 마련하겠다.” 라고 진술하였다.

오동작이 발생한 원인에 대해 “선로전환기는 2회선 모두를 확인하여 표시정보를 주게 되어 있는데 침목형 선로전환기는 정펄스(Π)와 부펄스(⊏)를 이용하여 정·반위 방향을 확인하므로 입력 포토커플러(Photo Coupler)¹¹⁾ 부

11) 빛을 전달해주는 발광 다이오드와 스위치 역할을 해주는 트랜지스터로 구성된 전자부품으로 전기적으로 절연하기 위해 사용

분의 문제로 생각한다.” 라고 진술하였다.

사고 당일 신설 OC장치 2계에 대한 시운전 계획수립은 누가 하였는지? 그리고 시운전을 하기 전에 연동검사 또는 연동검사에 준하는 검사 시행 후 시운전을 시행하였는지? 그것이 필요하다고 생각하는지에 대하여는 “2계 시험은 특별히 계획한 것은 아니고, 사고 당일 2계가 동작하고 있었다는 것은 사고가 발생한 이후에 알게 되었다. 시스템이 1, 2계 같이 동작하기에 특별히 연동검사에 준한 검사는 하지 않았으나 신호기 현시 시험, 선로전환기 동작 시험 등은 시행한 것으로 기억을 하며, 사고로 인하여 1, 2계 시험이 필요할 것 같다고 생각된다.” 라고 진술하였다.

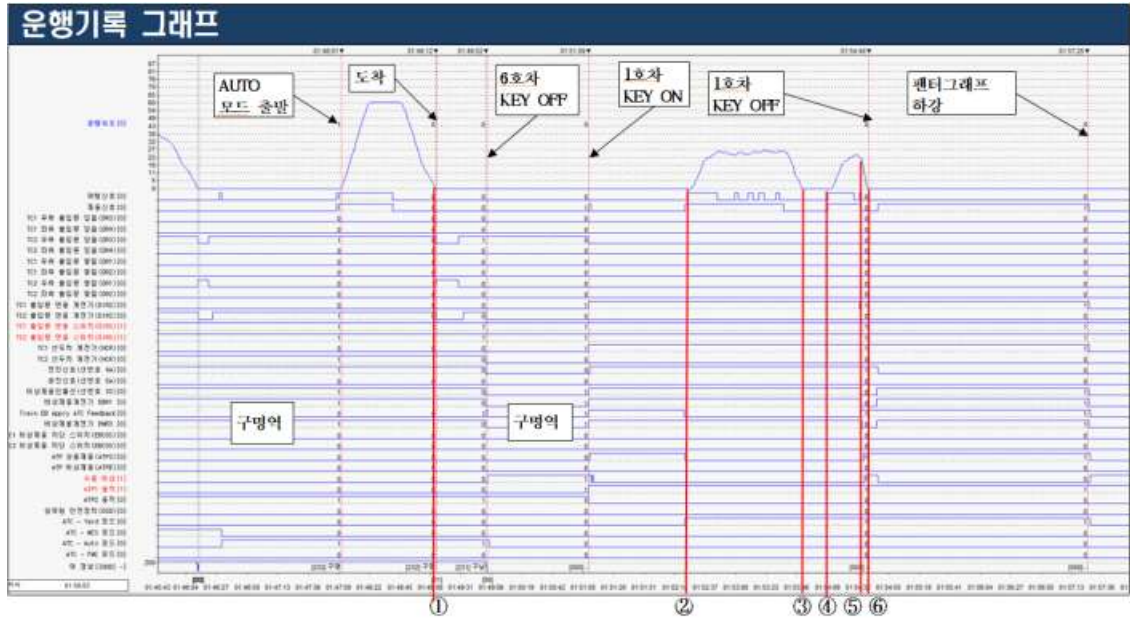
이런 탈선사고 예방을 위한 안전대책에 대하여는 “시험조건을 현장 조건과 일치시켜서 검사하여야 에러를 최소한으로 줄일 수 있을 것으로 생각한다.” 라고 진술하였다.

1.4 기록정보

1.4.1 열차운행 기록

사고열차의 운행기록은 [그림4]에 보듯이 구남역에 도착한 후 6호차에서 1호차로 운전실을 바꾼 후 구남역에서 구명역 방향으로 운행하다가 21R 신호기 앞에 정지하였다.

사고열차는 약 21Km/h의 속도로 203A호 분기기로 진입 중 탈선되었고, 탈선 후 비상제동이 체결되어 약 24m를 지나서 정차한 것으로 나타났다.



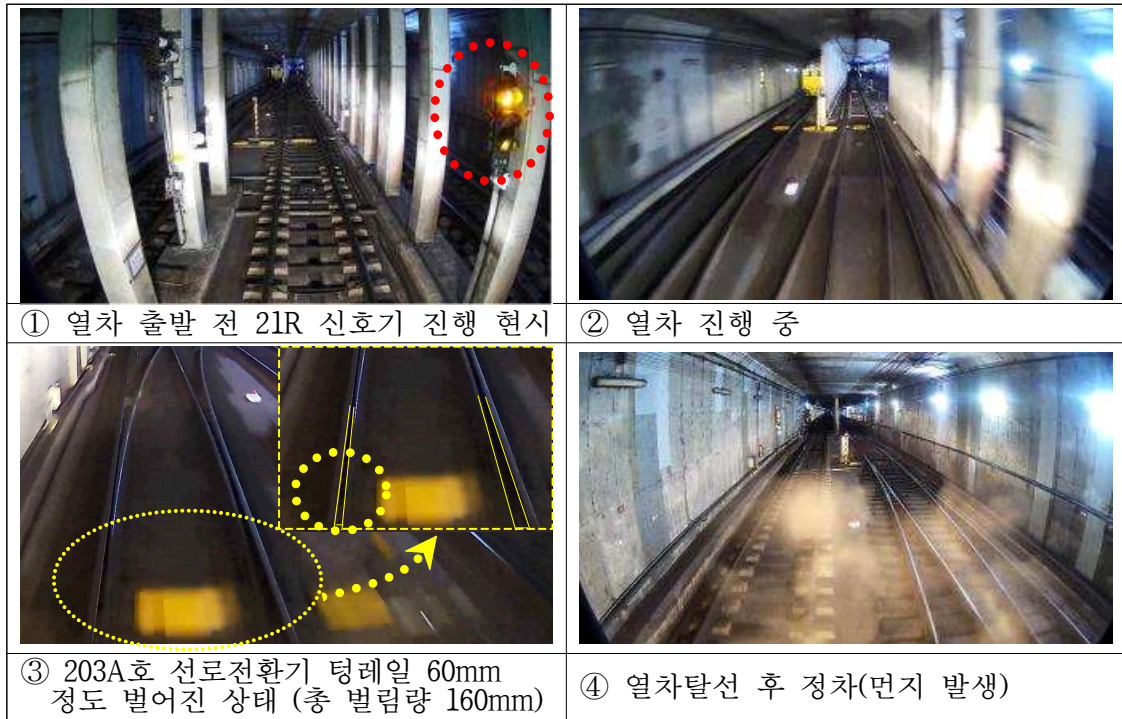
순번	시간	속도	운행상황	운전실 교환	비고
①	01:49:12	Auto	구명역→ 구남역 도착 후 운전실 교환	1호차 Key on	6호차→1호차
②	01:52:27	23Km/h	구명역 21R 신호기 방향으로 출발		
③	01:53:50	0	구명역 21R 신호기 앞에 일단 정차		
④	01:54:13	23Km/h	203A호 분기기 방향으로 출발		21R 신호기 진행신호 현시
⑤	01:54:34	21Km/h	탈선 후 비상제동 취급		
⑥	01:54:40	0	탈선상태에서 정차		24m 이동

[그림4] 사고열차 운행 기록

1.4.2 사고열차 CCTV 영상기록

[그림5]에 보듯이 사고열차의 앞쪽에 설치된 CCTV 녹화영상에는 열차가 출발하기 전 21R 신호기는 진행신호를 현시하고 있었다.

사고열차가 출발하여 운행 중일 때 203A호 선로전환기 텅레일은 벌어진 상태였으며, 탈선 후 정차한 뒤 먼지가 발생하는 것이 확인되었다.

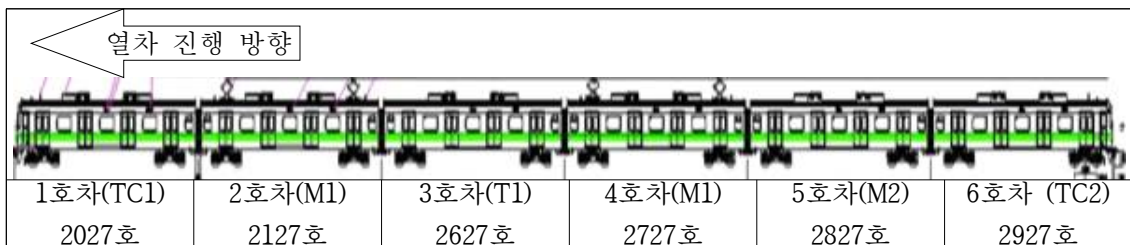


[그림5] 사고열차 CCTV 녹화영상 화면

1.5 차량 정보

1.5.1 열차의 조성·제원

사고열차는 [그림6]과 같이 제어차(TC) 2량, 동력차(M) 3량, 부수차(T) 1량으로 편성되어 있었으며, 집전장치는 M1차에 설치되어 있었고, 1998년 7월 도입되어 시운전을 거쳐 사고일까지 22년 9개월째 운용되고 있었다.



[그림6] 사고열차의 조성(6량 편성)

사고열차는 직류(DC) 1500V용으로 설계속도 100km/h, 영업 최고속도 80km/h

이며, 동력차와 부수차는 답면 제동장치를 적용하였고, 자동열차방호장치/자동열차운전장치¹²⁾ 기능을 갖추고 있었다. ([표2] 참고)

구분		내용
일반사항	영업 최고속도	80km/h
	설계 최고속도	100km/h
	기본 편성	6량 1편성 (3M3T)
	편성 길이	약 107.5m
	최대 견인력	282kN
	최대 가속도	3.0km/h/s
	전원공급	DC 1,500V
	기대수명	25년
	자중	Tc : 29.6 t T : 27.3 t M1 : 32.4 t M2 : 31.3 t
객실 설비	승강문 형식	포켓 슬라이딩 방식
대차	대차 형식	볼스터 대차
	차축	일체형
제동	방식	회생/공기제동
	공기제동	동력차, 부수차: 답면제동
팬터그래프	형식	더블 압
	동작 방식	공기 상승 / 자중 하강
주회로차단기	정격전압	DC 1,500V
	정격전류	DC 1,200A
주전력 변환장치	제어방식	1C4M
견인전동기	방식	유도전동기
	용량	2,520kW(210kW×12대)
차상신호		ATP/ATO
무선 장치		VHF

[표2] 사고열차 제원

1.5.2 전동차 검수기준

전동차의 정기검수는 부산교통공사 「전동차 검수규정」과 「2호선 전동차 검수 기준」에 따라 일상검수, 월상검수, 중간검수, 전반검수로 구분하여 관리하고 있었으며 상세 기준은 [표3]과 같았다.

12)자동열차방호장치:ATP(Automatic Train Protection/자동열차운전장치:ATO(Automatic Train Operation)

구분	주기	공정(편성기준)
일상 검수	주기	5일 이내
	공정	70분/편성
월상 검수	주기	4개월 이내
	공정	3~4일
중간 검수	주기	3년 이내 40만km 이내
	공정	13일
전반 검수	주기	6년 이내 80만km 이내
	공정	16일

[표3] 부산 2호선 전동차 정기검수 기준

1.5.3 전동차 종별 검수 기록

사고열차의 차량은 검수 기준에 따라 [표4]와 같이 검수 종류별 주기에 따라 검수 관리되고 있었다.

사고 전 일상검수는 2022년 1월 21일 시행하였고, 월상검수는 2021년 10월 15일 시행한 후 사고 발생일까지 33,672Km를 주행하였으며, 영업을 시작한 후 총 2,311,335km를 운행하였다.

구분		기간	비고
중수선	중간검수	'20. 9. 2.~'20. 9. 23.	
경수선	월상검수	'21. 1. 26.~'21.01.29.	1주기
	월상검수	'21. 6. 9.~'21. 6. 14.	2주기
	월상검수	'21. 10. 12.~'21. 10. 15.	3주기
	일상검수	'22. 1. 21.	5일 주기
※ 일상검수 : 5일마다 시행 (상급 검수 시행 시 생략)			
구분		거리	기준일
누적 주행키로(영업 시작일~사고일)		2,311,335km	2022. 1. 26.
직전 월상검수 이후 주행거리 ('21.10.16.~사고일)		33,672Km	

[표4] 사고열차 검수 종별 주기 및 주행거리

1.5.4 차륜 치수 측정

사고열차 전동차의 차륜 치수(직경, 플랜지 높이, 플랜지 두께, 내측 거리)

측정 결과는 [표5]와 같이 모두 기준치 이내에 있었다.

차량 번호	측 위수	직경(mm)		플랜지 높이(mm)		플랜지 두께(mm)		내측 거리 (mm)
		L	R	L	R	L	R	
기준치		780~860mm		25~35mm		23~34mm		1354 ⁺² mm
2027 (1호차)	1	856	856	25	25	34	34	1355
	2	856	856	25	25	34	32.5	1355
	3	856	856	25	25	34	34	1355
	4	855	855	25	25	34	32	1354.5
2127 (2호차)	1	856	856	25	25	33.5	33	1355
	2	856	856	25	25	33	33.5	1355
	3	859	859	25	25	33	33	1355
	4	858	858.5	25	25	32.5	33	1354
2627 (3호차)	1	859	859	25	25	33	32.5	1355
	2	854	859	25	25	32.5	32	1355
	3	858.5	859	25	25	33	33	1355
	4	859	859	25.5	25	33.5	33	1355
2727 (4호차)	1	840	840	25	25	33	32	1355
	2	841	841	25	25.5	32	32.5	1355
	3	840	840	25	25	32.5	32	1355
	4	841	840.5	25	25	32	32	1355
2827 (5호차)	1	859	859	25	25	33	33	1354.5
	2	859.5	859	25.5	25	33.5	33.5	1354.5
	3	859.5	859	25	25	32.5	33	1354.5
	4	859	859	25	25	33	33	1354.5
2927 (6호차)	1	859	859	25	25	33	33	1355
	2	854	860	25	25	33	33.5	1355
	3	859	859	25	25	33	33	1355
	4	859	859	25	25	33	33	1355

[표5] 사고열차 차륜 측정 결과

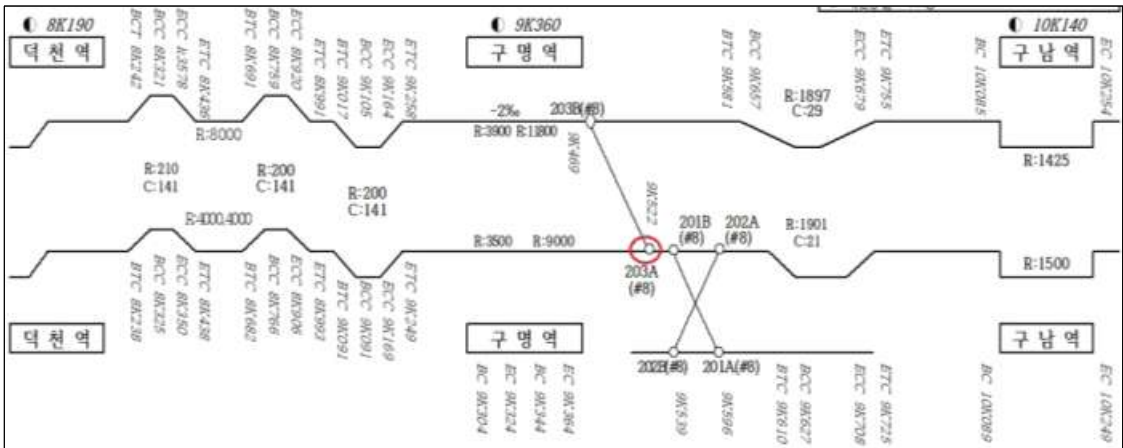
1.6 선로정보

1.6.1 사고 현장 정보

부산 2호선 호포역~서면역 구간은 1999년 6월 30일에 개통하여 운영을 시작하였으며, 사고 구간(구남역~구명역 상선, 203A호 분기기 포함)의 선로는 1998년에 설치되었다.

사고 현장인 구명역 구내 203A호 선로전환기 부근은 [그림6]과 같이 평면 선형은 직선이며, 선로의 기울기는 내리막 2% 구간이었다.

사고 구간의 선로는 침목 플로팅 궤도(STEDEF)¹³⁾ 구조로서 60kg 장대레일에 콘크리트 도상으로 구성되어 있으며, 203A호 분기기는 목침목에 60kg 레일이 부설된 탄성 분기기였다.

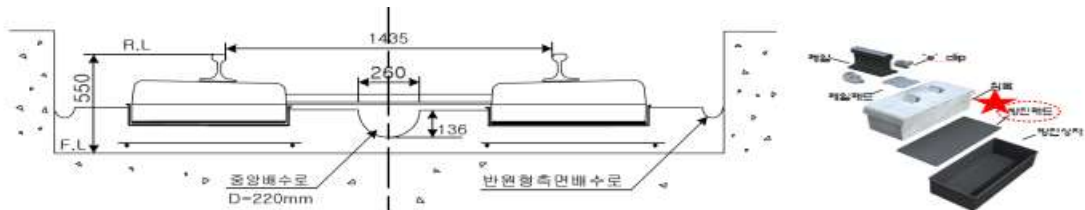


[그림6] 사고 구간 선로일람 약도

1.6.2 선로 유지보수 현황

궤도검측차 검측 시 궤간, 수평 틀림, 면 틀림, 줄 틀림, 평면성 틀림의 정비기준은 부산교통공사 「궤도정비규정」 제2장(궤도 정비의 기준)에 [표6]과 같이 규정되어 있었다.

13) 1964년 프랑스에서 최초로 개발된 무도상 궤도이며, 2개의 철근 콘크리트 블록 침목 밑에 방진 패드를 삽입한 형식으로 진동 흡수에 효과적인 궤도 구조임.



구 분	궤간	수평 틀림	면 틀림	줄 틀림	평면성 틀림
궤도검측차 검측	중 15mm 감 3mm	13mm	16mm	16mm	15mm

[표6] 궤도 정비 기준

궤도검측차에 의한 점검은 부산교통공사 「선로검사내규」에 연 2회 이상하도록 정하고 있었다. 사고 구간은 사고 발생 이전인 2021년 1월 22일과 7월 29일에 궤도 검측을 시행하였고, 점검 결과는 양호하였다.

사고 구간에 대한 궤도검측차 검측 결과에서 궤간, 수평 틀림, 면 틀림, 줄 틀림, 평면성 틀림에 대하여 보수가 필요한 부분은 없었던 것으로 확인되었다.

또한 「선로검사내규」에는 도보 순회점검은 콘크리트 도상의 경우 1주일에 2회 이상 하도록 하고 있었으며, 사고 구간에 대한 도보 순회점검은 2021. 7. 26.~2022. 1. 25. 100회를 시행하였다.

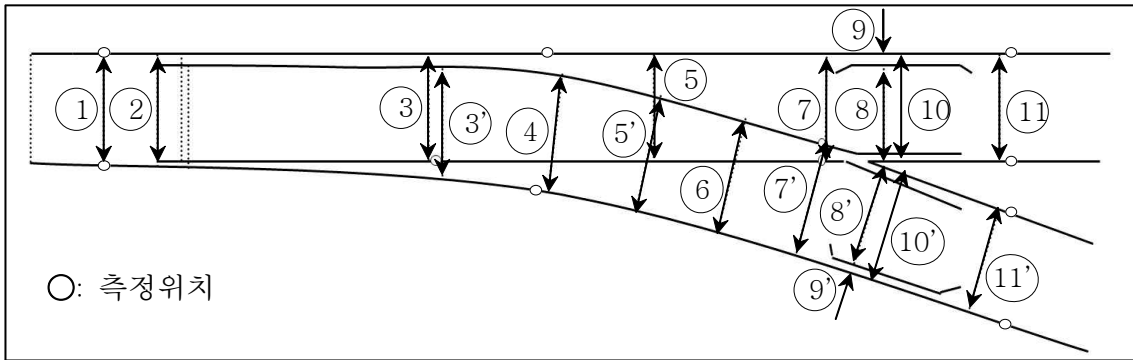
1.6.3 궤도 정비 현황

인력 검측에 의한 궤간, 수평 틀림, 줄 틀림, 면 틀림의 정비기준은 「궤도 정비규정」 제2장(궤도 정비의 기준)에 [표7]과 같이 규정되어 있었다.

구 분	궤간	수평 틀림	줄 틀림	면 틀림
인력검측	중 10mm 감 2mm	본선 7mm 측선 9mm	직선 10m에 5mm 곡선 10m에 7mm	직선 10m에 7mm 곡선 2m에 3mm

[표7] 궤도 정비 기준

사고 당일 궤도 선형을 인력으로 측정한 결과는 [표8]과 같이 궤간 -2~2 mm, 수평 틀림 -4~1mm, 줄 틀림 -4~5mm, 면 틀림 0~1mm로 정비 기준값 이내인 것으로 확인되었다.



궤도 검측지

위치: 상선 구명~구남(9k522)

203A호 분기기

검사일 : 2022.1.26.

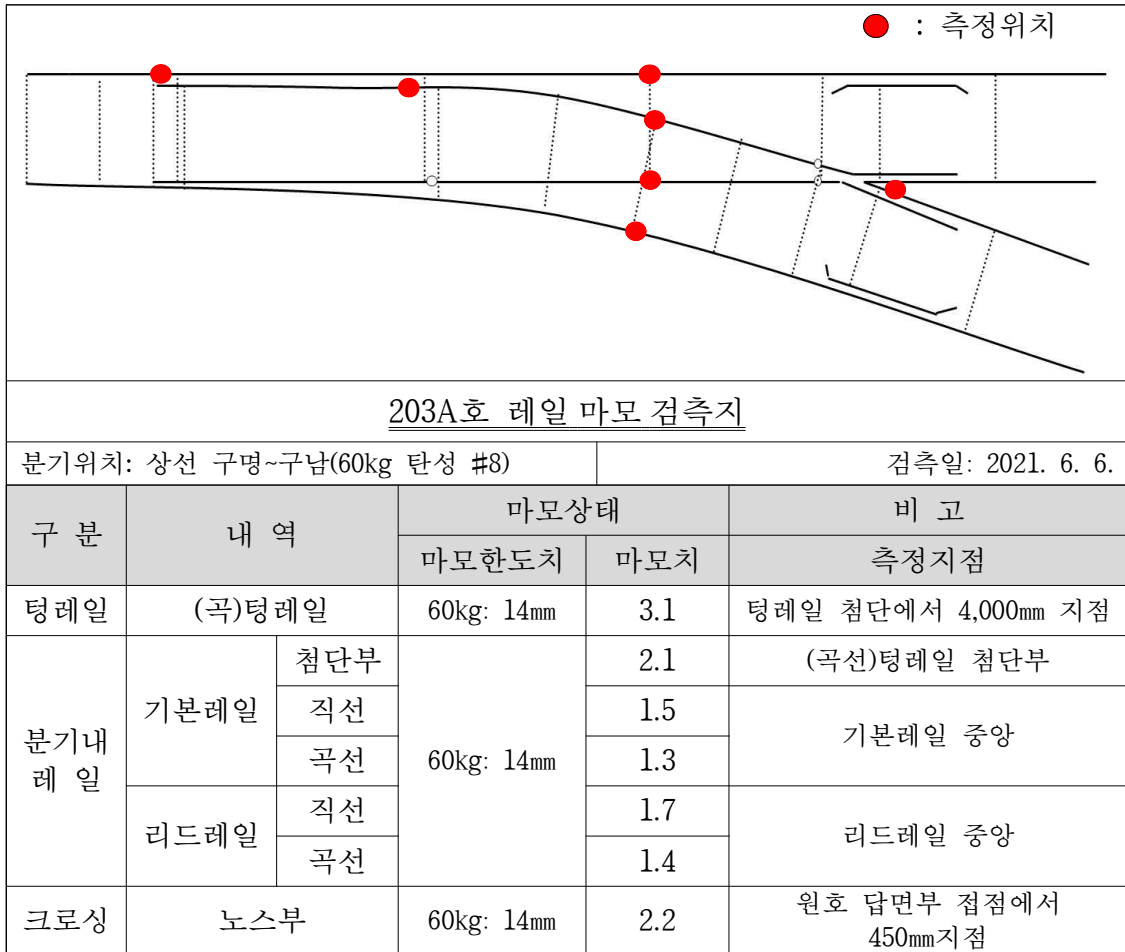
측점번호	종류	궤간(mm)		수평(mm)	줄맞춤(mm)		면맞춤(mm)		비고
		설계치	측정값	측정값	설계치	측정값	좌	우	
1	이음매부	6	8	-1			1	0	
2	침단부	14	14	1					
3	힐 부(직선)	0	0	0					
3'	힐 부(곡선)	10	12	-4					
4	곡 리드1/4	10	8	0	58	54			
5	직 리드1/2	0	0	0			1	1	
5'	곡 리드1/2	10	10	1	77	82	0	1	
6	곡 리드3/4	10	8	0	58	60			
7	크로싱 단(직선)	0	-1	-4					
7'	크로싱 전단(곡선)	0	-2	-2					
8	백계이지(직선)	1390~1396	1393						
8'	백계이지(곡선)	1390~1396	1392						
9	윤연로(직선)	42	42						
9'	윤연로(곡선)	42	42						
10	크로싱 중앙(직선)	0	-2	-4					
10'	크로싱 중앙(곡선)	0	-1	-2					
11	크로싱 후단(직선)	0	0	0			0	1	
11'	크로싱 후단(곡선)	0	0	1			0	1	

[표8] 궤도 선형 측정 결과

1.6.4 분기기 정비 현황

분기기의 교환 기준은 「궤도정비규정」 제5장(분기기)에 따르면 본선 60kg 레일의 경우 두부(레일 윗부분) 마모 높이(마모면에 직각으로 측정, 직마모)가 14mm에 근접하였을 때 분기기를 교환하도록 규정되어 있었다.

사고 구간 분기기에 대한 레일 마모 측정 결과는 다음 [표9]와 같이 직마모 값이 1.3~3.1mm로 정비 기준값 이내인 것으로 확인되었다.



[표9] 레일 마모 측정 결과

1.7 신호 및 전기정보

1.7.1 신호기록 정보

사고 구간인 구명역 신호설비는 [표10]에 보듯이 전자연동장치, 선로전환기, 복선 자동폐색, 차상 신호방식(Distance to go), 궤도회로장치, 자동열차제어장치(ATC) 및 자동열차운전장치(ATO)로 구성되어 있었다.

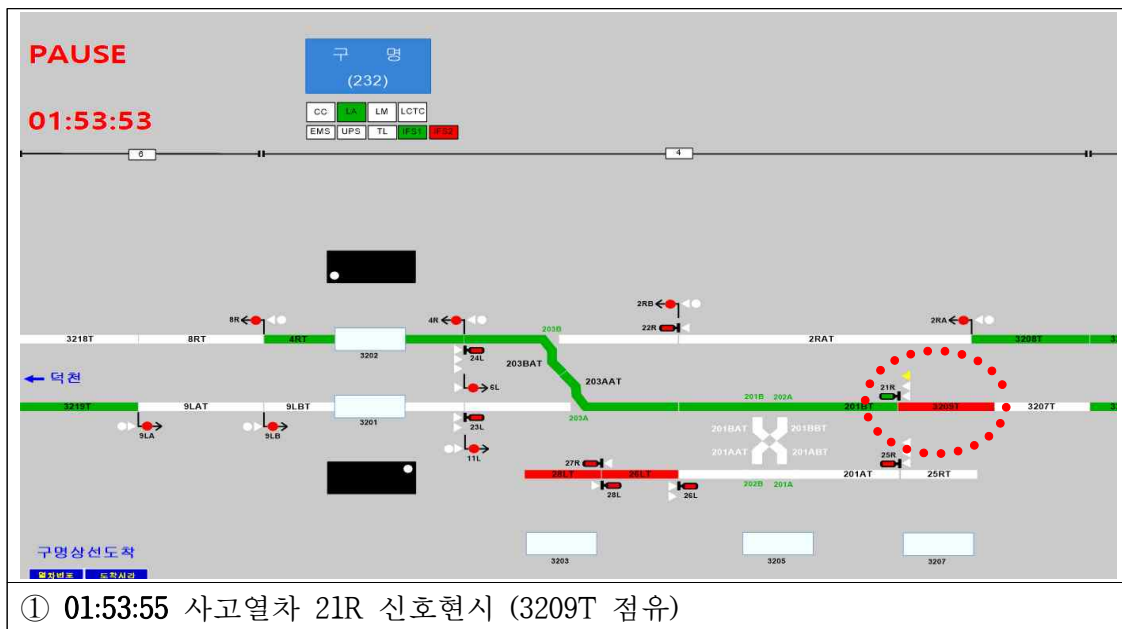
운전 방식	신호 방식	폐색 방식	연동장치 방식	궤도회로 구성방식	궤도신호 전송방식	선로전환기 TYPE
ATP/ATO	차상신호방식 (1인승무운전)	Distance to go	전자연동장치 (EBILOCK 950) 봄바르디어	Z-BOND와 정합트랜스에 의한 무절연궤도회로 공진방식	Telegram 전송 (디지털)	침목형 및 NS-AM형

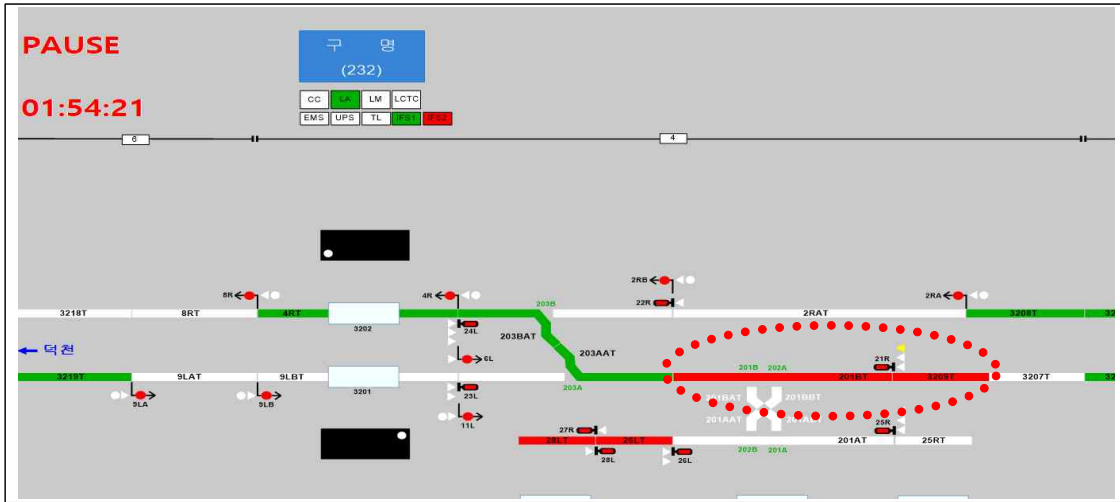
[표10] 구명역 신호 설비 현황

구명역 전자연동장치의 유지보수 컴퓨터는 표준시간보다 2초 느리게 기록 되어 있어 보정 기록하였다.

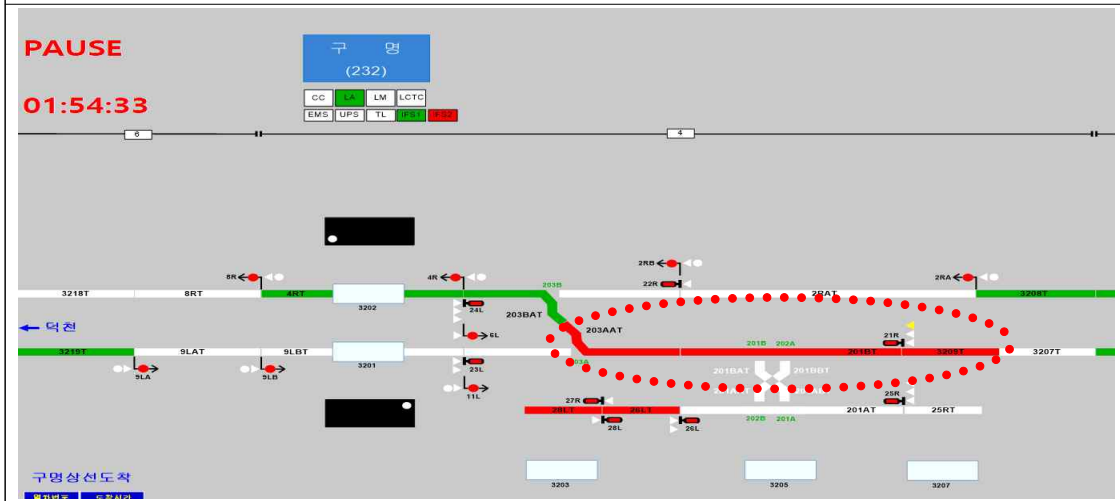
구명역 전자연동장치의 01:53:55~01:54:41 사고열차에 대한 기록에는 [그림 7] ①에 보듯이 사고열차가 운행할 당시 LA모드에서 현장 203A호 선로전환기의 텀레일은 벌어져 있었으나, LCC장치는 203A호 선로전환기가 반위 방향으로 이상 없음을 표시하고 있었고, 21R 신호기(입환)도 진행신호를 현시하는 오동작이 발생하였다.

[그림7] ③을 보면 01:54:35에 203AT 궤도회로 장치가 점유를 표시하고 있어 초속 6m 정도로 운행하던 사고열차는 2초 정도 지난 후인 01:54:37경 맨 앞 차량의 앞 대차가 탈선된 것으로 추정된다.

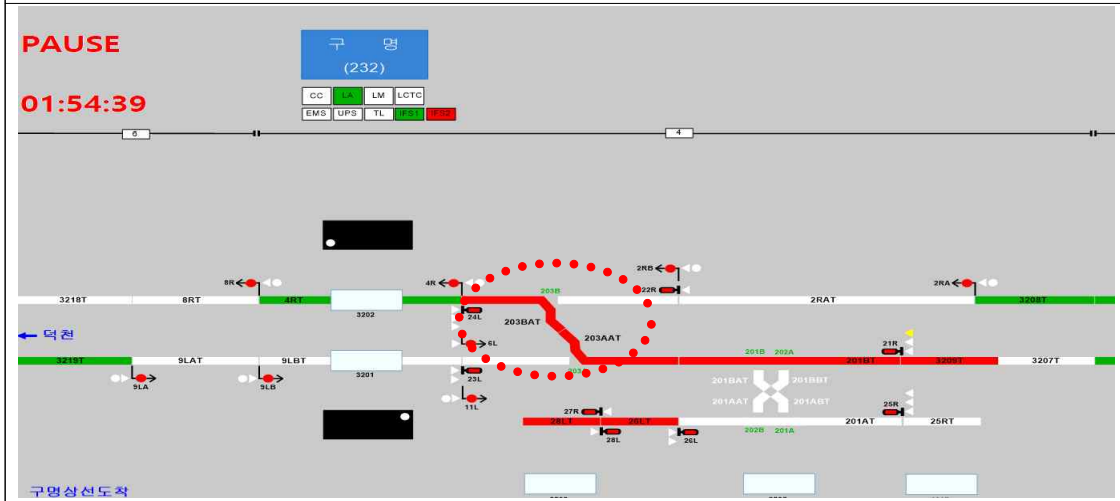




② 01:54:23 사고열차 21R 신호기 내방 진입 (201BT, 3209T 점유)



③ 01:54:35 사고열차 203A호 선로전환기 진입 탈선시점(01:54:37) (203AT, 201BT, 3209T 점유)



④ 01:54:41 사고열차 사고 후 정차 (203BT, 203AT, 201BT, 3209T 점유)

[그림7] 사고열차 운행 당시 전자연동장치 화면기록

1.7.2 전차선 정보

사고 구간은 직류 1,500V를 사용하는 복선 전철화 구간으로 사고와 관련된 이벤트 기록은 없었다.

1.8 전자연동장치 개량사업

부산 2호선 전자연동장치는 1999년 6월 30일 개통하여 장기간 사용으로 인한 성능저하와 제작사(봄바르디어, 스웨덴) 동일 물품이 단종(斷種)되었고,

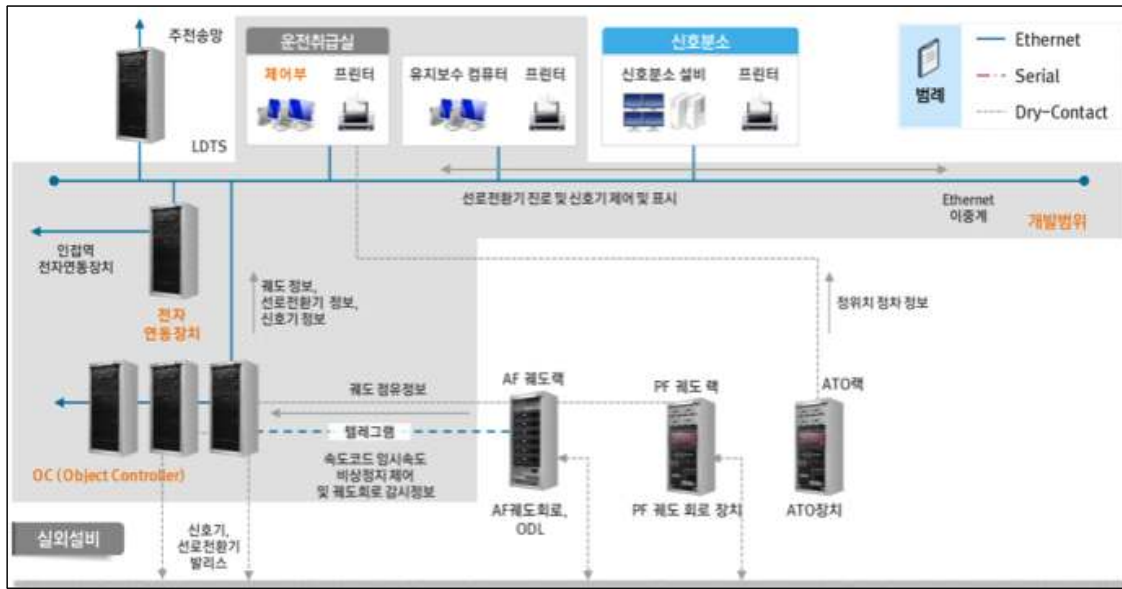
한국건설기술연구원에서 실시한 ‘철도시설 성능평가 및 개량 투자 계획수립 연구용역’에서 성능평가 결과가 C등급으로 ‘일부 결함이 발생하는 단계로 예방적 유지보수 개량이 필요하다.’고 평가되어 부산교통공사는 적기에 신규설비로 교체하여 유지관리 효율성 향상 및 선제적 장애 예방을 통한 열차의 안전 운영을 위하여 전자연동장치 개량을 계획하였다.

개량 방법은 일괄 교체 시 소요 예산 확보에 어려움이 있고, 부산 2호선의 개통도 단계별로 되었기에 효과적인 예산 사용과 시험 등의 효율성을 높이기 위하여 2021년에서 2028년까지 연차적으로 역별 전자연동장치와 OC장치를 묶음으로 교체하는 계획을 마련하여 시행하였다.

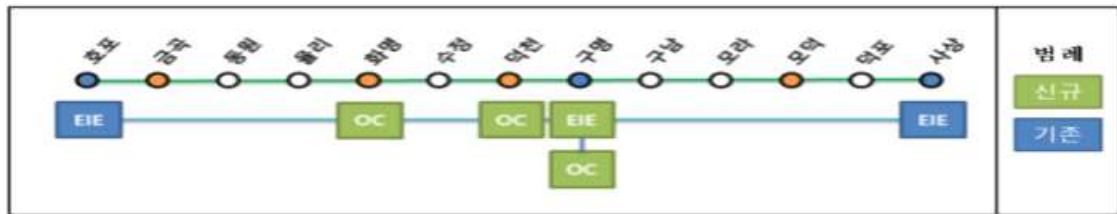
부산 2호선의 전자연동장치와 각 설비의 구성은 [그림8]과 같았고, OC장치를 별도로 설치하여 현장 설비를 제어하도록 설계되어 있었다.

1.8.1 사업추진 계획

부산교통공사 신호통신처는 2021년에 장기간 사용으로 노후된 구명역, 화명역, 덕천역 전자연동장치를 [표11]과 같이 교체 계획을 수립하고, 사업을 추진하였다.



[그림8] 부산2호선 전자연동장치 구성도



계획 년도	대 상 역	비 고
2021년	구명역, 덕천역, 화명역	
2022~2025년	2호선 1단계 호포~전포 구간	
2026~2028년	2호선 2~3단계(문현~장산, 양산~증산)	

[표11] 부산 2호선 전자연동장치 교체 계획(21년 4월 기준)

주요 개선 방향은 [표12]와 같이 설비의 2중계, 광통신 사용, 원격제어·감시 및 고장통계분석 등이 포함되어 있었다.

구 분	기 존	개 선	기대효과	비 고
시스템 이중계	EIE 이중계 OC 단중계	EIE 및 OC 이중계	시스템 안전성 향상	
통신방식	Serial(실선)	Ethernet(광통신)	통신 안정성 네트워크 이중계 구현	
전원장치	단 중 계	이 중 계	전원공급 안전성 확보	
콘솔	단순고장표출	고장통계 분석 원격 제어·감시기능	장애 분석력 향상 유지관리 업무 효율화	

[표12] 주요 개선 방향(21년 노후 전자연동장치 교체 계획 보고 발췌)

1.8.2 입찰 조건과 계약

전자연동장치는 열차 안전운행에 필요한 선로전환기 등 현장 장치를 제어하고, 열차 운행정보를 차량으로 송신하는 신호분야 핵심 설비이며, 「철도안전법」 27조 1항에 따라 높은 안전도가 필요하여 철도용품 형식승인¹⁴⁾ 대상으로 지정된 설비이었다.

그래서 부산교통공사는 입찰에 참여할 수 있는 자격 기준을 기술 보유에 따라 참여할 수 있도록 할 필요성이 있었기에 철도용품 형식승인(전자연동장치) 또는 SIL4¹⁵⁾ 인증을 획득한 업체만 입찰에 참여할 수 있도록 제한경쟁입찰로 추진방안을 결정하였다.

부산교통공사 전자연동장치의 제조구매 입찰은 입찰 참가자격을 증빙하는 철도용품 형식승인 증명서를 제출한 YY(주)와 제작사가 최종 입찰에 참여하여 적격심사(이행실적과 기술능력 평가)를 거쳐 YY(주)가 최종 낙찰되었다.

[표13]과 같이 YY(주) (이하 ‘계약사’ 라 한다.)와 계약 체결한 내용은 계약 기간은 2021. 5. 26.~12. 22.이며, 전자연동장치 1식, OC장치 3식 등을 구명역 외 2역에 납품·설치하고, 시험 및 시운전을 포함하는 조건이었다.

구 분	내 용	비 고
계약 건명	부산도시철도 전자연동장치 제조구매	
계약 내용	전자연동장치 1식, OC장치 3식, 기타 콘솔류 (구명역, 화명역, 덕천역)	시험, 시운전 포함
계약 금액	금 1.365,000,000원	
계약 사	YY(주)	
계약 기간	2021. 5. 26.~12. 22.(211일)	
(납품 기일)	기한 연장 2021. 5. 26.~22. 1. 31.(251일)	반도체 수급 지연

[표13] 전자연동장치 물품구매 계약 내용

14) 철도용품의 설계에 대해 기술기준에 적합한지 국내 인증기관(한국철도기술연구원)에서 승인 철도용품 형식승인은 IEC 62278, 62279, 62425 규격을 요구하고 있음

15) Safety Integrity Level 4: 국제공인기관에 의거 제품에 안전도에 대해 발급받는 인증(국제규격 IEC 62278, 62279, 62425 등)

그 후 전자연동장치 제조구매 계약사는 부산교통공사 전자연동장치를 개발한 제작사와 [그림9]와 같이 물품(구매) 계약을 체결하여 사업관리는 계약사에서 수행하였고, 설계·제작·설치·시험은 제작사가 시행하였다.

물 품(구 매) 계 약 서		
		관리번호 21-103
계약자	발주자	[주] 대표이사
	수급자	[주] 대표이사
계약내용	사업(건)명	부산도시철도 2호선 전자연동장치 제조 구매
	계약금액	
	지체상금을	지체1일당 계약금액의 (0.08%)
	계약/납기일	2021. . . / 2021. 12. 22.
	납품장소	부산교통공사 지정장소
제 7 조 (과업범위) ① 기존 사용 중인 구명관내(구명, 화명, 덕천) 전자연동장치 및 현장제어장치, 콘솔과 기능적으로 호환성을 유지하는 전자연동장치 및 현장제어장치 제작 및 공급 ② 신규 전자연동장치 및 현장제어장치 설치 및 시험 ③ 기존 전자연동장치 및 현장제어장치 철거		

[그림9] 계약사와 제조사 간 물품구매 계약서 발취

제작사는 중소기업부 구매조건부 신제품 개발업체로 선정되어 부산교통공사와 전자연동장치에 대하여 협약(과제번호 S2629537)을 체결하고, 2018년 8월에서 2020년 11월까지 전자연동장치와 OC장치를 개발한 후 부산 2호선 호포 시운전선로와 구명역에 설치하고 동작 시험을 한 업체였다.

1.8.3 제조구매 사양

부산교통공사 신호통신처는 제조구매 사양에서 전자연동장치 및 OC장치를 교체할 때 신규 시스템이 기존 신호시스템, 전자연동장치, OC장치 및 콘솔과 기능적으로 호환이 되도록 하여 열차의 안전 운행에 지장이 없도록 하였다.

시스템 간 통신방식은 기존 직렬(Serial) 통신방식¹⁶⁾에서 이더넷(Ethernet)

16) 연속적으로 통신채널이나 컴퓨터 버스를 거쳐 한번에 하나의 비트단위로 데이터를 전송하는 방식

통신방식¹⁷⁾으로 구성하도록 하였고, 부산 2호선 신호방식에 맞도록 차상 거리연산제어¹⁸⁾(DTG: Distance to Go) 방식 및 2종류의 궤도회로장치와 호환되도록 하였다.

공급물량은 [표14]과 같이 전자연동장치 1식, OC장치 3식, 그리고 유지보수에 필요한 MC장치 3식, SSC장치 1식이었으며 모두 2중계로 구성하도록 하고 있었다.

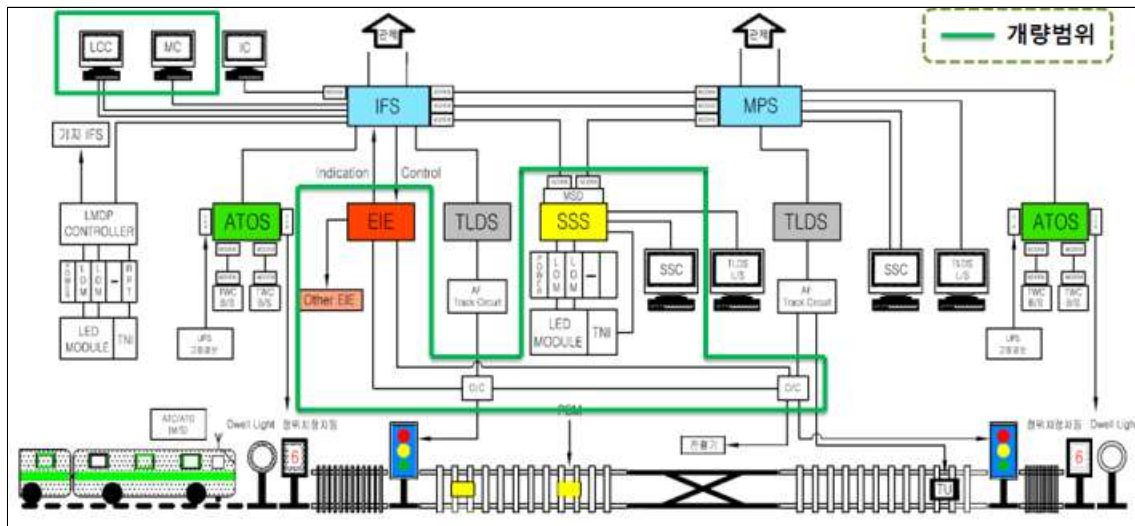
구 분		수 량	비 고
1. 부산 2호선 전자연동장치		1식(2중계)	구명 신호기기실
2. 부산 2호선 현장제어장치(OC장치)		3식(2중계)	구명, 덕천, 화명
3. 콘솔류			
3.1	LCC(Local control Consol)장치	3식(2중계)	구명, 덕천, 화명
3.2	MC(Maintenance Consol)장치	3식(2중계)	구명, 덕천, 화명
3.3	SSC(System Supervision Console)장치	1식(2중계)	구명신호분소
4. 시험 및 시험장비		1식	구명신호분소
5. 예비품		1식	설치품의 10%

[표14] 구명역 외 2역 교체 물량

「구매설명서」 제3장 기술사양에는 ‘신규 시스템은 불안정한 조건이 장치의 고장으로부터 도출될 때에는 언제나 Fail-Safe 조건하에서 열차 운행에 안전측으로 동작하여야 한다.’ 라고 정하고 있었다.

교체 대상 설비인 전자연동장치 및 OC장치에 대하여 [그림10]과 같이 작업 범위 및 인터페이스 구성을 계획하였다.

17) 하나의 통신회선에 유무선 통신장비를 통해 다수 시스템이 랜선 및 통신포트에 연결된 통신방식
 18) 선형 열차의 속도와 거리정보 등 조건을 수신하여 차상에서 이를 연산하여 운행속도를 결정하는 열차 운행제어방식



[그림10] 과업 범위와 인터페이스 구성

1.8.3.1 전자연동장치(EIE)

구명역에 설치하는 전자연동장치는 2중계로 구성하며, 열차의 안전운행에 필요한 논리판단, 제어, 감시기능을 총괄하는 장치로서 열차의 이동상황을 추적하고, 불안전할 때는 안전측으로 동작하여 열차운행을 중지시키고 경보할 수 있는 기능이 있어야 하며, OC장치와 인터페이스(Interface) 하여 현장의 신호기, 선로전환기 등을 제어하도록 하였다.

전자연동장치의 기능은 1) 열차추적기능 수행 2) 자동 및 수동진로의 설정 및 해제 3) 선로전환기, 신호기, 발리스 제어 4) 관제실과 상호 정보 송·수신 기능 5) 열차운전에 관한 자동 및 로컬 제어 모드(Local Control Mode) 기능 6) 임시속도의 설정에 의한 제한속도 명령(command) 기능 7) 비상정지의 설정에 의한 비상정지 명령 기능 8) 주변장치와의 통신 불량 등을 검지하고 고장기록의 타 장치 출력 기능 등이 있었다.

1.8.3.2 OC(Object controller)장치

OC장치는 구명역, 덕천역, 화명역에 설치하여 전자연동장치의 제어 신호에 따라 선로전환기, 신호기, 궤도회로장치를 제어하고, 각 설비의 정보를 전자

연동장치로 송신하는 장치이다.

OC장치가 제어하는 설비는 현장에 있는 선로전환기, 신호기, 다진로 표시기, 발리스, 궤도회로장치 등이고, 자기진단 기능과 OC장치 동작에 대한 데이터를 기록(Data Logging) 할 수 있도록 하였다.

OC장치는 2중계로 구성하여 상용계(常用係) 고장 시 예비계로 자동 절체(切替)되도록 하였고, 상용계 고장 시에도 열차운행에 지장 없이 안전하게 동작하여야 하며, 절체 시 정보의 일치와 연속성이 보장되도록 하였다.

OC장치의 기능은 1) 현장 및 기기실 설비의 상태 정보를 수신받아 전자연동장치가 열차 안전운행에 필요한 논리판단을 할 수 있도록 정보를 제공 2) 현장 및 신호 설비제어를 위한 각 모듈은 제어 및 처리 상태를 발광 다이오드(LED) 등으로 형태를 표시 3) 제어 및 처리, 통신 불량 등 정상적이지 않은 동작에 따른 고장을 표시하도록 하였다.

1.8.3.3 LCC(Local Control Console)장치

LCC장치는 구명역, 덕천역, 화명역 신호기기실에 설치하여 각 역에서 열차 제어를 할 수 있도록 하였다.

LCC장치의 구성은 산업용 PC 및 모니터, 콘솔(console)로 구성되며, 시스템은 2중계로 구성하였고, CC모드¹⁹⁾에서는 LCC장치의 동작과 무관하게 열차는 정상 운행될 수 있도록 하였다.

LCC장치의 제어모드는 CC(Central Control)모드, LA모드, LM(Local Manual)모드²⁰⁾를 갖추도록 하였다.

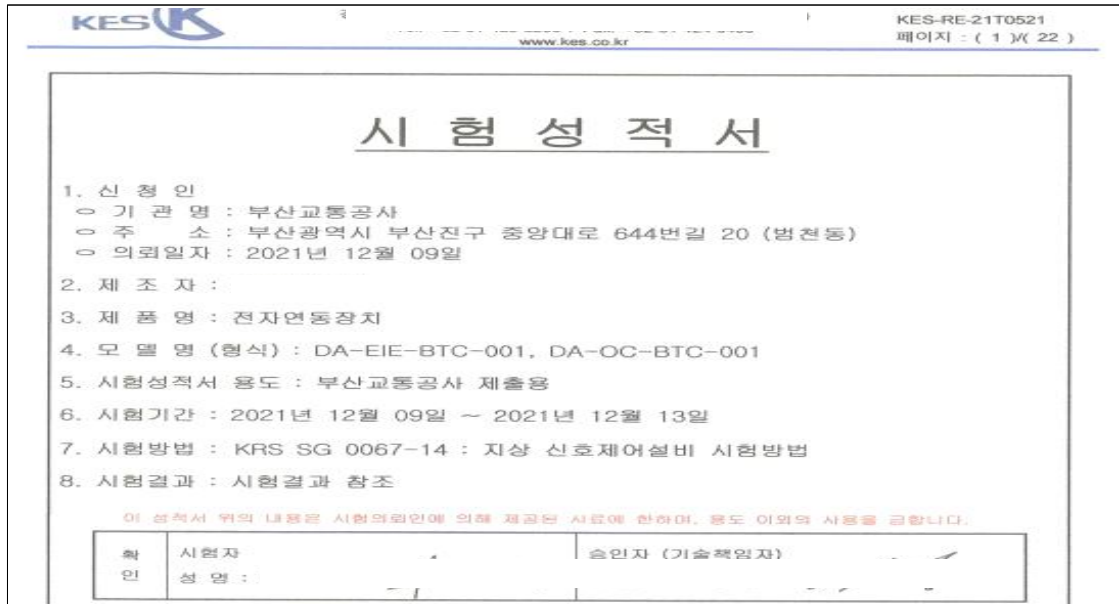
19) CC모드는 관제실의 Computer에 미리 저장된 Schedule에 따라 자동진로설정 및 출발 등을 수행하고, 자동모드의 고장 및 사령조작자의 필요시 제어반에 의한 수동으로 제어를 하도록 함

20) LM모드는 Local Control Console에서 조작자가 수동으로 취급하는 모드이며, 선로전환기 단독전환, 진로의 설정, 강제 채정 등을 수행하며 다른 모드보다 우선으로 처리된다.

LCC장치의 제어 및 표시기능은 1) 제어 모드의 표시 및 설정 2) 운전 모드 표시 3) 열차점유 및 진행방향 표시 4) 선로전환기, 신호기, 궤도회로 제어 및 표시 4) 진로제어, 쉐정, 해정 표시 5) 열차번호 표시 6) 운행 Dia 표시 7) 수동진로 설정 8) 선로전환기 단독전환 9) 각종 고장 표시(경보음성 포함), 10) 비상정지, 임시속도 설정 및 표시 등을 요구하였다.

1.8.4 공인기관시험 및 공장검사

공인기관시험은 제작사가 공인기관인 (주)케이이에스(KES)에 의뢰하여 전원 변동시험, 전기자기 적합성(EMC) 시험, 온·습도 시험, 절연저항 및 내전압 시험은 2021. 12. 10.~12. 11. 시행하였고, 전자파 장해시험, 전도시험, 방사시험, 각종 전기적 내성시험은 2021. 12. 14.~12. 16. 시행하였으며, 모두 ‘적합’ 한 것으로 [그림11]과 같이 결과 보고 되었다.



[그림11] 시험성적서 일부 발췌

공장검사는 제작사에서 납품되는 전자연동장치가 제작 사양과 일치하는지와 적정 동작 등을 확인하기 위하여 감독자가 2021년 12월 17일에 비대면(원격 화상 검사)으로 시행하였다.

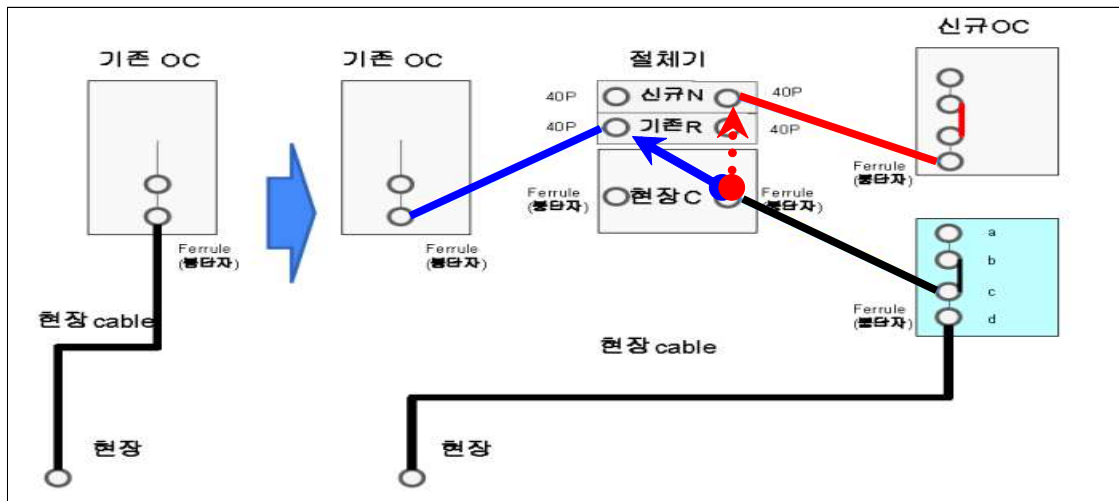
1.8.5 전자연동장치 설치 · 시험

부산교통공사 신호통신처는 전자연동장치 교체에 따른 설치 · 시험 일정을 [표15]와 같이 자체 종합시험, 시운전검사 후 기존 설비를 철거하고, 신규설비를 운용하는 것으로 계획하였다.



[표15] 전자연동장치 교체에 따른 설치 · 시험 계획 발췌

신규설비에 대한 시험은 기존 설비는 유지하고, 신규 반입설비는 기기실 내 임시 설치하여 비영업시간에 [그림12]와 같이 기존 설비와 신규설비 간 절체기를 설치하여 신규설비를 시험하고, 영업시간 개시 전에 기존 설비로 정상 동작시켜 영업 운전을 하도록 하였다.



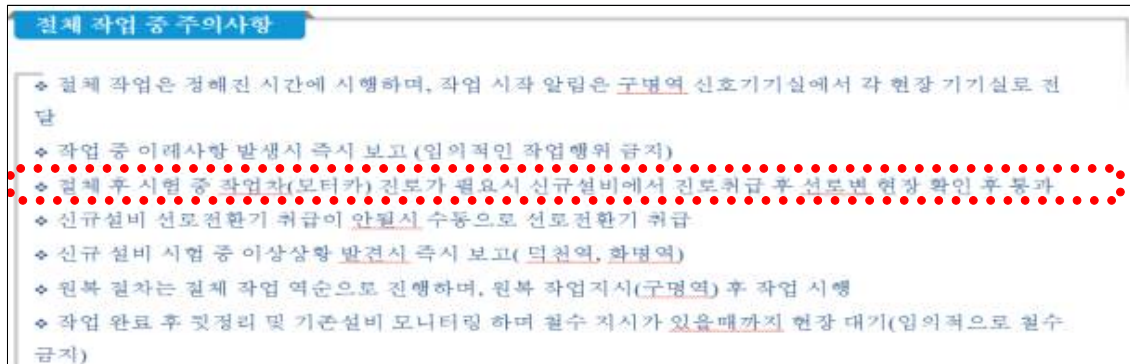
[그림12] 전자연동장치 절체 회로 구성도

안전을 확보하기 위하여 야간 작업시간을 3시간으로 하였고, 작업완료 후 기존 설비로 절체되면 영업개시 후 세 번째 열차까지 정상 운행상태를 확인

하도록 하였으며, 고장에 대비하여 제작사 기술자와 유지보수자 간 긴밀한 연락체계를 구축하였다.

작업시행과 관련하여 제작사 작업자는 11명이었고, 감독은 감독자 외 보조 감독자 7명을 지정하였다.

부산교통공사 신호통신처가 수립한 전자연동장치 절체 계획에는 작업 중 주의사항으로 [그림13]과 같이 ‘절체 후 시험 중 작업자(모터카) 진로가 필요시 신규설비에서 진로 취급 후 선로변 현장 확인 후 통과’ 라고 되어 있었다.



[그림13] 전자연동장치 절체 계획(안) 중 주의사항(발취)

1.8.6 종합시험

자체 종합시험은 [표16]과 같이 공종별(工種別)검사, 시설물 검증시험, 연동 검사, 사용전(使用前)검사, 영업 시운전 순으로 계획하고 시행하였다.

1 단계	공종별검사	⇒	2 단계	시설물 검증 및 열차 투입	⇒	3 단계	사용전검사
	'22. 1. 13~17. (01:00~04:00)			'22. 1. 18~26. (01:00~04:00)			'22. 1. 26. (01:00~04:00)

[표16] 종합시험 단계별 계획 내용 발취

종합시험 시 시간대별 작업내용은 [표17]과 같았다.

시 간	작 업 내 용	비 고
00:00~01:00	- 작업자 안전교육 및 시험내용 확인	
01:00~01:10	- 현장역 (구명, 덕천, 화명) 절체기 스위치 변경(기존→신규) - ITI(Interlocking Track Interface) 통신연결	
01:10~03:20	○ 신규설비 검사 - 신호기 점등시험 - 선로전환기 전환시험 - 궤도회로장치 단락시험	
03:20~03:30	- 절체기 스위치 변경(신규→기존) - ITI 통신 원복	
03:30~04:00	- 현장 뒷정리 및 영업 운행 준비(관제 ↔ 현장 교차 점검) - 궤도회로: 관제 및 기기실 콘솔 정상 점유 확인 - 신호기, 선로전환기: 관제 진로 취급 후 선로전환기 전환, -신호기 점등 현장 확인 및 관제와 기기실 콘솔 정상 표시 확인 (선로전환기 영업 운행 방향 확인) - ITI 통신 전자연동장치 Help Block으로 확인	
04:00~06:30	- 기존 설비 모니터링 및 현장 대기	

[표17] 종합시험 시 시간대별 작업내용

1.8.6.1 공중별검사 및 시설물 검증시험

공중별검사와 시설물 검증시험은 열차를 이용한 시운전 전에 장치의 정상 동작을 확인하기 위한 절차이고, 신규 전자연동장치와 OC장치(신규·기존) 간에 표시/제어가 정상적으로 이루어지는 것을 확인하기 위한 검사로써 2022. 1. 13.~1. 17. 시행된 것을 감독 일지로 확인하였다.

전자연동장치, OC장치, LCC장치, MC장치, SSC장치에 대한 공중별검사 항목은 [표18]과 같았고, 각 사양에 따른 기능을 시험하였다.

NO	대상 장치	검사 항목	비고
1	전자연동장치, OC, LCC, MC, SSC장치	속도코드 표시 시험	
2		연동장치 주계, 부계 절체 시험	
3		메시지 확인 시험	
4		모드(Mode) 제어시험	
5		임시속도 제한 설정 제어	
6		비상 정지 시험	
7		표시 및 제어시험	

8		현장 설비 제어시험	
9		리플레이(Replay) 시험	
10		모듈 제어 시험	
11		연동검사	

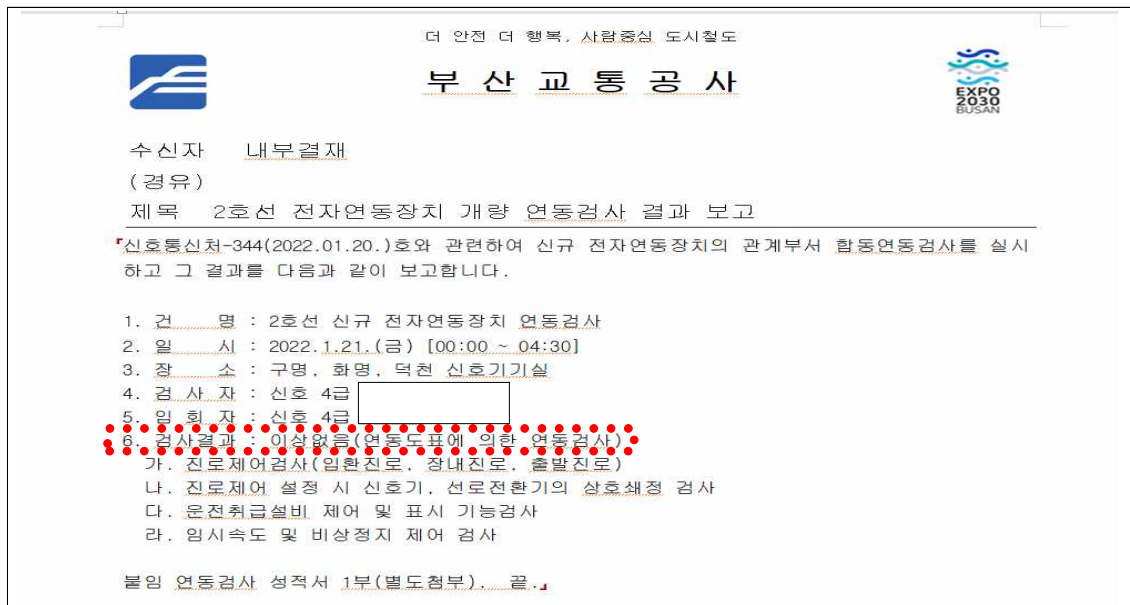
[표18] 공종 별 검사항목

1.8.6.2 연동검사

연동검사는 구명역, 화명역, 덕천역에 대하여 연동도표를 기준으로 선로전환기 단동시험, 진로제어검사(입환진로, 장내진로, 출발진로), 진로제어 설정시 신호기와 선로전환기의 상호 쇄정검사, 운전취급설비 제어 및 표시 기능검사, 임시속도 및 비상정지제어 검사 등에 대하여 시행되었다.

연동검사는 2022년 1월 21일 00:00~04:30 시행되었고, 연동검사자는 신호통신처 신호팀장이었고, 임회자는 신호통신사업소 000이었다.

연동검사 시행 후 결과는 [그림14]와 같이 ‘이상 없음’ 으로 보고되었다.

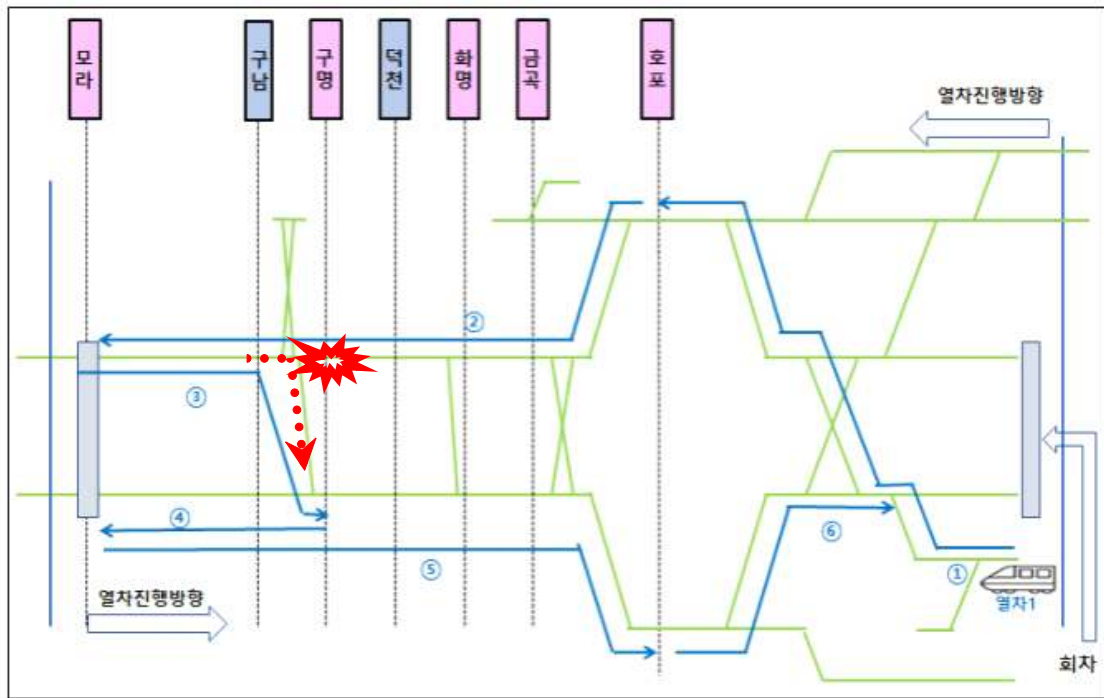


[그림14] 연동검사 결과 보고 문서 발췌

1.8.6.3 비영업시간 시운전검사

부산교통공사 신호통신처는 시운전검사 전에 승무처 등 14개 관련 부서에 시운전에 관한 내용과 협조가 필요한 사항을 알려 주었다.

비영업시간 시운전검사는 [표19]과 같이 호포차량기지를 출발하여 모라역 까지 운행 후 선로를 바꾸어 다시 호포차량기지로 돌아오면서 하는 시험으로 계획되었다. 시험의 주요 내용은 [표21]과 같이 신호정보 송·수신과 근접 운행시험 및 자동 진로제어시험 등이 포함되어 있었다.



①	호포차량기지 → 호포역 상선홈
②	호포역 상선홈 → 모라역 상선홈
③	모라역 상선홈 → 구명역 하선 4RT
④	구명역 하선 4RT → 모라역 하선홈
⑤	모라역 하선홈 → 호포역 하선홈
⑥	호포역 하선홈 → 호포차량기지

[표19] 비영업시간 시운행 계획

구분	시험 내용	시험일시	시험구간	열차	기관사	비고
----	-------	------	------	----	-----	----

1일차	- 신호정보 송수신 제어시험	1.18(화)	울리~구남	2개 편성	2명	
2일차	- 근접 시험 - 자동 진로 제어시험	1.25(화)	울리~구남	2개 편성	2명	
3일차	- 자동 진로 제어시험	1.26(수)	울리~구남	2개 편성	2명	

[표20] 시운전검사 세부 계획

NO	구분	시험 항목	비고
1	투입 열차 시험 (2개 편성)	제어 모드의 표시 및 설정, 운전 모드 표시	
2		열차 점유 및 진행 방향 표시	
3		선로전환기, 신호기, 궤도회로 제어 및 표시	
4		진로제어, 쉐정, 해정표시	
5		접근열차 정보 예고, 열차번호 표시	
6		출발열차 및 도착열차 예고표시	
7		스케줄 자동진로 시험 외부 I/F시험(TDE)	
8		출입문 동작상태 확인	
9		비상정지 및 임시속도 설정표시	
10		종합관제소 자동열차 운행시험	
11		신호기, Dwell light, 선로전환기 동작 시험	

[표21] 비영업시간 시운전 시험의 주요 내용

2022년 1월 18일에는 시운전에 따른 신호정보가 정상적으로 송·수신되고 열차제어가 되는지에 대하여 시험하였고,

2022년 1월 25일에는 열차운행 계획에 따라 열차가 자동제어 되는지를 확인하고, 근접 운전 시 안전에 문제가 없는지에 대하여 시험하였다. OC장치를 2계로 사용하였고, [표22]과 같이 01:56경 21R 신호기 진로취급 시 최초 203A호 선로전환기에 불일치가 발생하였다. 고장 이벤트가 발생하여 4회 전환 조치를 통한 복구 조치를 하였으나 불일치가 해소되지 않아 02:07경 OC장치를 1계로 절제한 후 02:09경 21R 신호기 진로취급에 따라 203A호 선로전환기가 전환된 것을 확인하고 시운전을 진행하였다.

발생 일시	동작 내용
2022-01-25 01:56:19	구명역 203A 선로전환기 고장

2022-01-25 01:58:16	구명역 203A 선로전환기 정상
2022-01-25 01:58:22	구명역 203A 선로전환기 고장
2022-01-25 01:59:39	구명역 203A 선로전환기 정상
2022-01-25 01:59:54	구명역 203A 선로전환기 고장
2022-01-25 02:00:17	구명역 203A 선로전환기 정상
2022-01-25 02:00:32	구명역 203A 선로전환기 고장
2022-01-25 02:07:11	구명역 203A 선로전환기 정상

[표22] 2022년 1월 25일 203A호 선로전환기 고장정보

2022년 1월 26일에는 연동논리장치는 1계, OC장치는 2계를 운용하였고, 사고열차는 모라역까지 운행하지 않고 구남역까지 운행한 후 다시 구명역으로 선로를 바꾸어 시운전 하던 중에 탈선사고가 발생하였다.

종합시험계획에는 영업 시운전을 하기 위한 사용전검사 방법으로 [표23]과 같이 ‘시설물 검증 시행과 동일하게 연동검사 시행’ 이라고 되어 있었다.

- | |
|---|
| <input type="checkbox"/> (3단계) 시운전 시험을 위한 사용전검사 시행(1.26)
<input type="radio"/> 시설물 검증 시행과 동일하게 연동검사 시행
<input type="radio"/> 모든 신호제어설비의 기능 시험 |
|---|

[표23] 종합시험 계획 중 사용전검사 내용 일부 발췌

1.8.6.4 사용전(前)검사

사용전검사의 목적은 부산 2호선 구명역 전자연동장치 구매 사업을 통해 공급되는 시스템이 목적에 적합한지 운영 준비상태를 확인하는 것에 초점을 두어 제3자가 확인하는 것이었다.

사용전검사를 담당한 업체의 검사자는 2022년 1월 26일 01:00~04:00경 구명역·화명역 연동검사, MOT·LMP²¹⁾·CTK²²⁾ 모듈 제어 및 표시 시험, 전자연동장치 주계·부계 절체시험, 속도코드(Code) 생성 및 전송 시험, OC장치의 주계·부계 절체 시험에 입회하여 사용전검사를 시행하던 중 당일 사고로 인하여 중지하였다.

21) OC장치를 구성하는 신호기용 제어모듈(Modure)

22) OC장치를 구성하는 궤도회로용 제어모듈(Modure)

1.8.6.5 영업시간 시운전검사

신규 장비의 정상 동작과 열차의 정상 운행 여부를 확인하기 위한 영업시간 시운전검사를 계획하였으나 사고로 시행되지 않았다.

1.9 기상 정보

기상청 자료에 의하면 2022년 1월 26일(수) 02:00경 부산광역시의 기온은 5.4℃, 풍속은 2㎞/s, 습도는 68%였다.

2. 분석

2.1 관계자 업무수행사항

2.1.1 기관사

사고열차가 구명역에서 21R 신호기에 진행신호가 현시된 후 출발한 것은 CCTV 녹화영상으로 확인되었고, 사고 직전의 운행속도는 사고열차 운행기록에서 21km/h였던 것으로 분석되었다.

기관사는 선로전환기 밀착상태를 확인하였다고 하였으나 사고 당시 시운전을 위하여 상선에서 하선으로 넘어가는 지점인 203A호 선로전환기의 텅레일이 벌어져 있었던 것은 확인하지 못하였다.

이는 [표24]의 부산교통공사 「기관사 작업내규」 제32조 2항에 ‘반복역 또는 운전선로의 분기기가 있는 지점을 진출·입 할 때 신호와 진로를 확인하여야 한다.’ 고 하는 규정을 제대로 준수하지 않은 것으로 조사되었다.

기관사 작업내규

제32조(열차운전 중의 확인) ① 기관사는 열차운전 중 선로전방의 이상 유무 및 운전실내 각종기기, 계기상태를 지속적으로 확인하여야 한다.
 ② 반복역 또는 운전선로의 분기기가 있는 지점을 진출,입할 때는 신호와 진로를 확인하여야 한다.

[표24] 기관사 작업 내규 일부 발췌

또한 전자연동장치를 사용개시하기 전(前)에는 설비에 대한 안전을 신뢰할 수 없는 상태이기 때문에 기관사는 시운전을 위하여 분기부를 운행하거나 근접 운행시험을 할 때는 주의운전을 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

2.1.2 관제사

사고 당일 시운전 계획에 따라 구명역 신호 유지보수자가 로컬 취급(역 취

급) 요청을 하고, 관제사가 로컬 취급을 승인(2호)한 절차와 방법은 적절하였던 것으로 조사되었다.

관제사는 사고 당시 구명역 신호실 유지보수 직원이 21R 신호기를 취급하였을 때 진행신호가 현시되고 진로가 구성되는 것을 확인하였으나, 203A호 선로전환기에 대한 불일치 표시가 없었기에 텅레일이 떨어져 있던 현장 상태는 알 수 없었던 것으로 조사되었다.

관제사는 기관사의 보고 및 CCTV를 통해 사고열차의 탈선상태를 확인한 후 부산교통공사 「탈선시 현장조치 매뉴얼」에 따라 궤도, 전기, 차량, 역, 시설 분야의 직원들에게 초기대응팀 출동을 지시하는 등 후속 조치는 적절하였던 것으로 조사되었다.

2.1.3 연동검사자(신호팀장)

신호팀장은 2022년 1월 21일 연동검사자로 지정되어 보조검사자를 지휘, 통제하면서 구명역 외 2역에 대하여 00:00~04:30 연동검사를 하였다.

연동검사자는 전자연동장치와 OC장치를 1계로 운용하면서 구명역 LCC 장치로 선로전환기 단동시험, 신호기 현시 시험을 하면서 현장과 일치하는지 확인한 후 각 신호기 진로시험을 하였다. 진로시험 시 진로쇄정, 진로구분쇄정, 상호쇄정, 철사쇄정 등을 확인하고 입회자와 연동검사표에 서명한 것으로 조사되었다.

연동검사와 관련하여 연동도표, 연동검사표, 전자연동장치 기록 등을 확인하였지만 연동검사자가 수행한 업무에서 잘못된 부분은 확인할 수 없었다.

2.1.4 공사감독자(작업책임자)

감독자는 2021년 5월부터 전자연동장치 납품 설치계약이 체결되어 공사감

독자의 업무를 수행하였다. 감독자는 작업자의 안전관리, 시설물의 안전관리, 열차운행의 안전관리와 공사시공 품질관리 등의 업무를 수행하였다.

감독자는 사고 당일 열차 투입에 관한 준비업무, 시험계획을 확인하였고, 보조감독자들에게 해야 할 업무를 알려주었다.

감독자는 시설물 검증시험과 시운전검사의 책임자로서 2022년 1월 25일 시운전검사 중 203A호 선로전환기 고장이 발생하였을 때 현장을 확인하지 않았고, 2022년 1월 26일 시운전(사용전검사 포함) 시 선로전환기 확인자를 배치하지 않았다. 이는 시운전검사를 시행하는 방법으로 적절하지 않은 것으로 조사되었다.

2.1.5 개발책임자

개발책임자는 진술에서 “모듈은 고장이 발생할 수 있는데, 고장 시 안전측으로 동작하지 않은 부분에 대하여 원인 규명하여 해소방안을 마련하겠다.” 라고 하였다. 이는 시스템을 개발하면서 국토교통부 「철도시설의 기술기준」 제96조 1호에서 정한 ‘장애가 발생하면 안전상태로 전환될 것’을 지키지 못한 것으로 분석되었다. ([표25] 참고)

<p>제96조(철도신호제어설비의 구조) 철도신호제어설비의 주요 장치를 제작·설치할 때에는 다음 각 호의 사항을 준수하여야 한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 기능, 인터페이스 등에 대한 무결성을 스스로 진단·감시·저장되어야 하며, 장애가 발생하면 안전상태로 전환될 것 2. 장치를 설계·개발하는 과정에서 오류 등이 발생되지 않도록 소프트웨어의 분석·시험 및 검증을 수행할 것

[표25] 철도시설의 기술기준 일부 발췌

개발책임자는 MOT모듈을 설계하면서 외부 잡음에 대한 안전성 검증을 위해 입력 펄스의 주기를 검증하도록 설계하였으나 케이블에 발생하는 정전용량의 영향으로 출력신호가 입력으로 유도(誘導)되어 표시회로를 구성하는 문제는 고려하지 못한 것으로 분석되었다.

2.2 차량분석

2.2.1 검수 주기 준수의 적정성

사고열차의 검수 이력을 조사한 결과 부산교통공사 「전동차 검수규정」과 「2호선 전동차 검수기준」의 검수 주기에 따라 차량 검수를 시행한 것으로 조사되었다.

2.2.2 차륜 관리의 적정성

사고열차 차륜을 측정된 결과 차륜 직경은 840~860mm이고, 플랜지 높이는 25~25.5mm, 플랜지 두께는 32~34mm이고, 내측 거리는 1354~1355mm로 모두 기준치 이내로 조사되었다.

2.3 선로분석

2.3.1. 궤도 정비

부산교통공사 「궤도정비규정」 제2장에 따라 궤도검측차 점검 및 인력에 의한 궤도 검측을 시행하였으며 궤도검측차 점검 결과 궤도틀림이 궤도 정비 기준에서 정한 기준치 이내로 조사되었다.

인력에 의한 선형 궤도 검측 결과에서도 궤간, 수평 틀림, 면 틀림, 줄 틀림도 궤도 정비기준에서 정한 기준치 이내인 것으로 조사되었다.

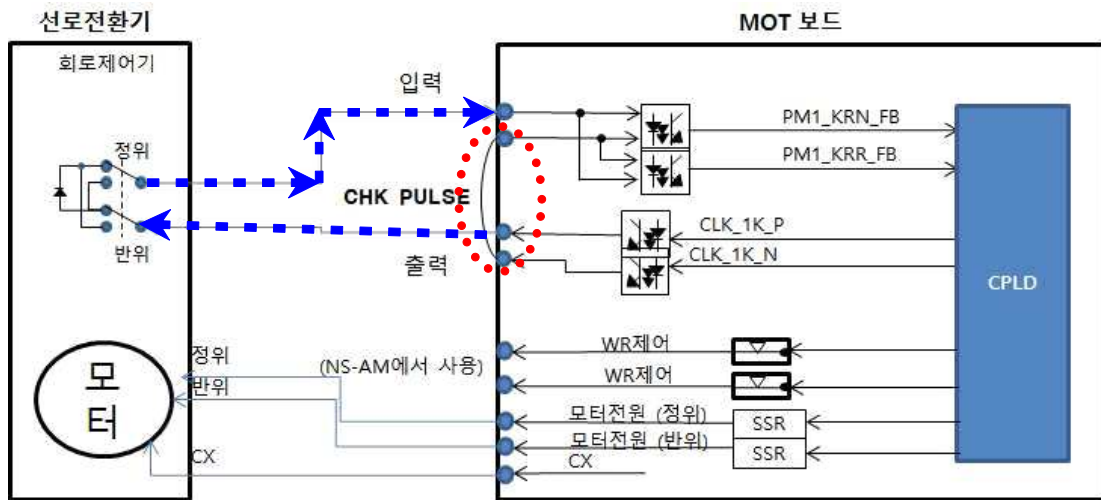
2.3.2 분기기 정비

「궤도정비규정」 제5장에 따라 분기기를 정비하였으며 인력에 의한 레일 마모를 측정된 결과 궤도 정비기준에서 정한 기준치(직마모 14mm) 이내로 조사되었다.

2.4 신호 분석

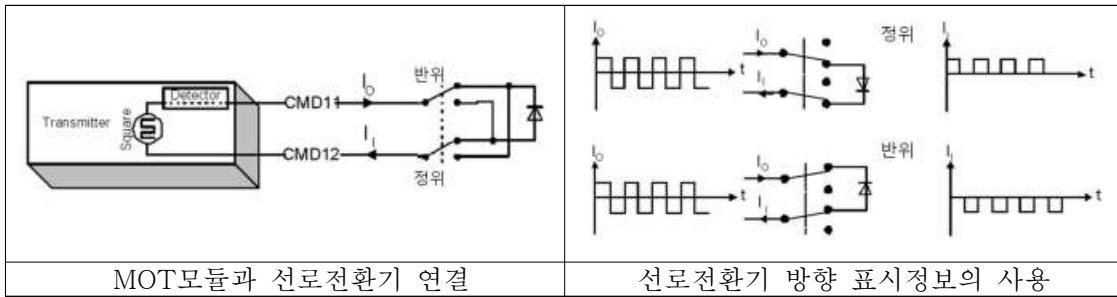
2.4.1 선로전환기 표시회로

부산교통공사에서 사용하는 침목형 선로전환기는 [그림15]와 같이 동작하고 있었다. 선로전환기의 표시회로 방향 정보를 받는 방법으로 한 선은 MOT 모듈에서 입·출력을 바로 연결하였고([그림15] 적색 원), 한 선만 현장 선로전환기로 연결하여 출력하고, 회로제어기 조건을 거쳐 입력정보를 받아 계전기를 동작시키는 단선제어방식으로 설치되어 있었다. ([그림15] 청색 점선)



[그림15] 선로전환기 동작 계통도

선로전환기를 제어하고 정/반위 표시 방향을 결정하는 MOT모듈 표시회로는 [그림16] 좌측과 같이 구성되어 있었다. 표시정보는 [그림16] 우측 그림에서 보듯이 정 펄스(pulse, \square)가 입력되면 정위로 처리하고, 부 펄스(\sqcap)가 입력되면 반위로 처리하도록 하였다. 그 외의 모든 경우(정 펄스 및 부 펄스가 모두 입력되거나 모두 입력되지 않은 경우)는 전환 중 또는 고장(불일치)으로 처리하였다.



[그림16] 선로전환기 방향 표시회로 구성과 펄스

부산교통공사 신호통신처 전자연동장치 「구매설명서」 제3장 기술사양에는 ‘신규 시스템은 불안전한 조건이 장치의 고장으로부터 도출될 때에는 언제나 Fail-Safe 조건하에서 열차운행에 안전측으로 동작하여야 한다.’ 라고 정하고 있었다.

또한, 국가철도공단 「철도설계편람(신호편)」 KR S-01030(2020.3.31. 개정) 신호제어설비 일반조건(4.3 안전측 동작(Fail-safe) 원칙)에 따르면 ‘신호제어설비는 다음과 같이 설비하며 고장 발생 및 어떠한 경우라도 안전 측으로 동작하여야 한다.’ 고 되어 있고, 그에 대한 방법으로 ‘(4) 계전기는 양선(+,-) 모두를 제어하는 방식’ 으로 하도록 규정되어 있다.([그림17] 참조)

KOREA RAIL NETWORK AUTHORITY

KR S-01030
Rev. 7, 31. March 2020

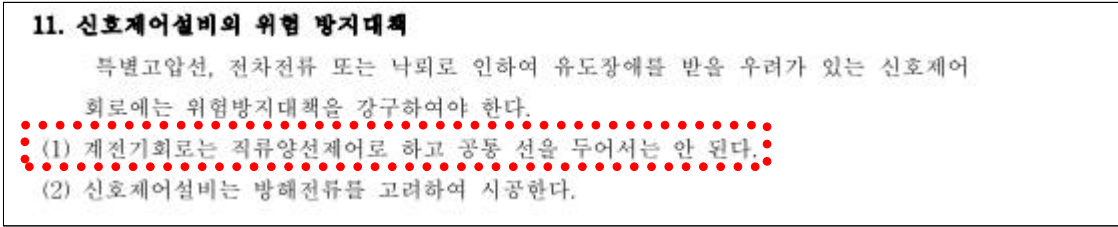
신호제어설비 일반조건

4. 신호제어설비 선정 시 중점 고려 사항

4.3 안전측 동작(Fail-safe) 원칙

신호제어설비는 다음과 같이 설비하며 고장 발생 및 어떠한 경우라도 안전 측으로 동작하여야 한다.

- (1) 궤도회로는 폐전로식
- (2) 계전기 회로는 무여자시 기기를 채정하는 방식
- (3) 점원과 계전기의 위치를 양단으로 하는 방식
- (4) 계전기는 양선(+,-)모두를 제어하는 방식
- (5) 계전기는 무여자시 전원을 차단하는 방식
- (6) 기타 특수 주파수 등을 사용할 경우 역류, 미세전류, 혼선에 의한 계전기의 오동작이 방지되는 방식



[그림17] 철도설계편람(신호편) 일부 발췌

또한, 같은 편람에 신호제어설비의 위험방지 대책에 따르면 ‘계전기 회로는 직류 양선제어로 하고 공동선을 두어서는 안 된다.’ 라고 되어 있다.

부산교통공사 신호통신처는 선로전환기와 같은 중요한 회선을 양선제어방식으로 구성하지 않고 단선제어방식으로 표시회로를 구성한 것은 안전측 동작 원칙과 위험방지 대책으로 적절하지 않았고, 이것이 탈선에 영향을 미친 것으로 분석되었다.

2.4.2 공인기관시험 및 공장검사

공인기관시험은 계약사가 공인기관인 (주)케이이에스(KES)에 의뢰하여 2021년 12월 9일 전원변동시험, 전기자기 적합성(EMC) 시험, 온·습도 시험, 절연저항 및 내전압시험 등 시험결과에서 문제점은 없었던 것으로 조사되었다.

다만, 감독자가 납품되는 전자연동장치에 대하여 2021년 12월 17일에 제조사 공장검사를 비대면(원격 화상 검사)으로 시행한 것은 제작 사양에 따른 제품의 일치 여부와 장치의 동작, 연동 논리 검사 등을 확인하는 방법으로 적절하지 않은 것으로 판단된다.

2.4.3 연동검사

2022년 1월 21일 00:00~04:30 시행한 연동검사는 구명역, 화명역, 덕천역에 대하여 연동도표를 기준으로 시행하였다. 연동검사에서 제어 취급에 따라 현장 설비의 정상 동작과 표시의 일치 여부, 연동 논리와 조건의 검사 등을 확

인한 것으로 조사되었다. ([표26] 참조)

진로명 (Route Type)	신호기명 (Signal Name)	시작궤도 (Beginning Track)	끝궤도 (End Track)	진로표시기 (Route Indicator)	연속진로 (Fleeting)	선로전환기 설정 (Point Locked in Route)	권대칭 (Point Locked in Overlap)	신호기대칭 (Signal Lock)	궤도정유조건 (Required Track Circuits)	접근궤장 (Approach Lock)	종합 결과	검사일자 및 검사자	
21R	A	3209T	4RT	↘		202N 203N 203R		21RB 21BC 21BA 25RB 21A 21A 21B 21L 21A 21B 21C 21C 2RB 2R 2R	20BT 20AT 20BT 21T	3209T 30sec	✓	OK	
	B	3209T	21BT	↘		202N 203N 203R		21RA 21RC 21RB 21CC 21C 21B 21A 21B 21L 21RA 21RB 21A	20BT 20AT 20BT	3209T 30sec	✓	OK	
	C	3209T	25AT	↘		202R		21BA 21RB 21LB 21C 21C 21B 21A 21B 21L 21BA 21RB 21RC 21B 21B	20BT 20AT 20CT	3209BT 30sec	✓	OK	
탐색	철사대칭 (Detector Lock)			Point번호	연결진로(연진로의 필합)							결과	검사일자 및 검사자
	철사대칭 확인(Point)			신로전환기 안동취급	Route Number	시작궤도 (Beginning Track)	끝궤도 (End Track)	동작신호 (Operation Signals)	연속진로 (Fleeting) 사용여부				
	201	202	203	✓201 A, B	1	3206T	25AT	2RA	USE	OK			
201AT, 201BT OK OK	201AT, 201BT OK OK	203AT, 203BT OK OK	✓202 A, B	2	2RAT	200BT	2RB	USE	OK				
			✓203 A, B	3	203BT	4RT	4R	USE	OK				

[표26] 연동검사 체크리스트(21R 신호기, 203호 선로전환기)

연동검사의 절차나 방법에서 드러난 문제는 없었으나 연동검사는 전자연동장치 1계(연동논리장치 1계, OC장치 1계)에서 시행되었고, 전자연동장치 1계는 정상적으로 동작하였다. 그러나 OC장치 2계의 MOT모듈은 시운전과 재현시험에서 오동작한 것으로 확인되어 향후 연동검사를 시행하는 절차나 방법을 개선해야 할 것으로 판단된다.

또한 연동검사 후 결과에는 검사자와 유지보수자만 입회하여 서명한 것으로 되어 있어 운전취급자, 제작사 등 관련자 모두가 입회하여 서명할 필요가 있는 것으로 판단된다.

2.4.4 종합시험

부산교통공사 신호통신처는 전자연동장치 절체작업을 계획하면서 작업 중 주의사항으로 ‘절체 후 시험 중 작업자(모터카) 진로가 필요시 신규설비에서 진로 취급 후 선로변 현장 확인 후 통과’ 라고 되어 있었다.

이는 전자연동장치 사용개시 전에는 설비에 대한 안전을 확보할 수 없기에 시험 중에 열차를 운행(작업 또는 시운전)할 때는 반드시 현장 확인을 한 후 열차를 운행하여야 하고, 기관사도 시운전을 위하여 분기부를 운행하거나 근접 운행시험을 할 때는 주의운전을 할 필요가 있는 것으로 조사되었다.

또한 열차 시운전 및 사용전검사를 계획하면서 ‘시설물 검증 시행과 동일하게 연동검사 시행’ 이라고 한 것은 연동검사처럼 현장에 확인자를 배치하여 현장과 표시제어부(LCC)의 정보가 일치하는 것을 확인하도록 하고 있었다.

그러나 2022년 1월 25일 OC장치 2계 운용 중에 203A호 선로전환기가 4회에 걸친 고장이 표시되었으나 감독자가 관념적²³⁾으로 판단하고, 현장 선로전환기를 확인하지 않은 것으로 조사되었고,

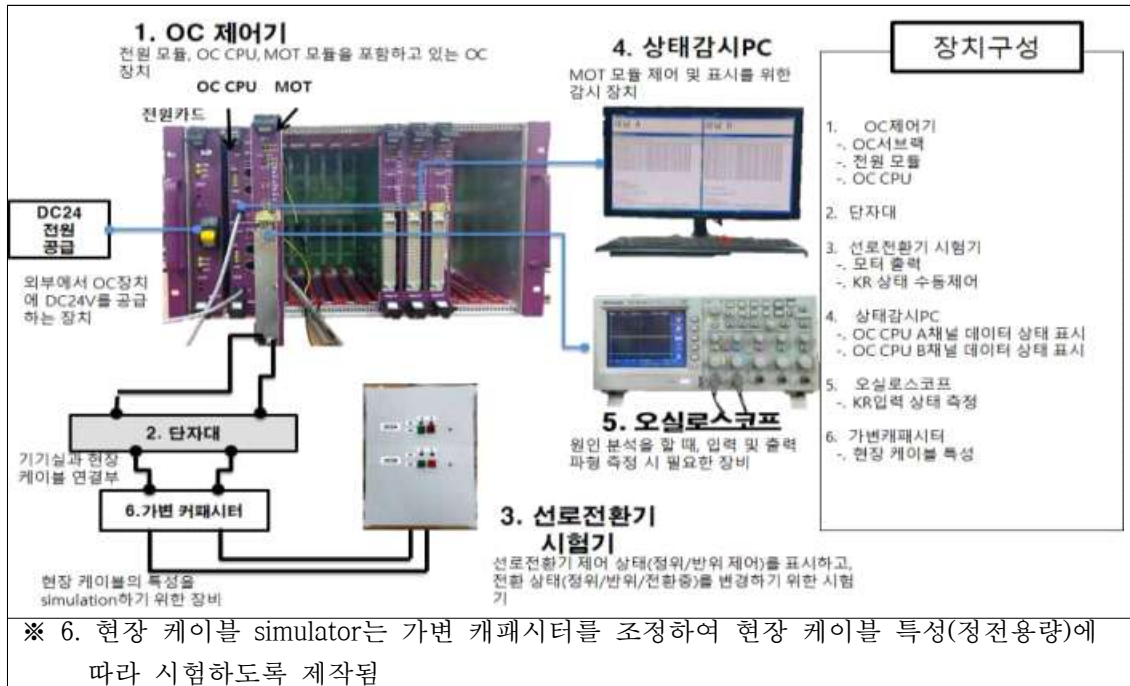
2022년 1월 26일 OC장치 2계를 CA 모드에서 스케줄에 따라 열차 시운전과 사용전검사를 시행하면서 현장에 선로전환기의 이상 유무를 확인하는 인력을 배치하지 않은 것으로 조사되었다.

2.5 오동작 원인분석

2022년 1월 26일 사고 당시와 1월 27일 00:00~03:00경 우리 위원회에서 시행한 사고 재현시험²⁴⁾에서 나타난 오동작이 발생한 원인을 파악하기 위하여 제작사에서 [그림18]과 같이 장비를 설치하고 2022. 1. 27.~2. 9. 원인을 분석하였다.

23) 203A호 선로전환기가 OC장치 1계에서는 정상 동작하고, OC장치 2계에서는 고장을 표시하였기에 현장설비(선로전환기)에는 문제가 없다고 판단함

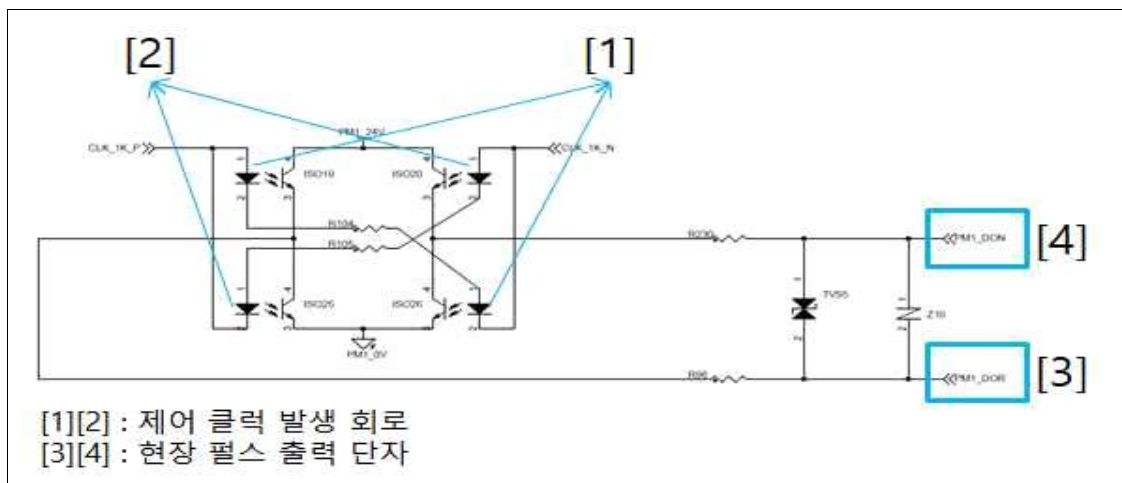
24) 재현시험 당시 3회 시행하여 3번째 오동작 발생되어 지속적으로 발생하는 것이 아니고 간헐적으로 발생하는 것을 확인함



[그림18] 오동작 분석시험 장비 구성도

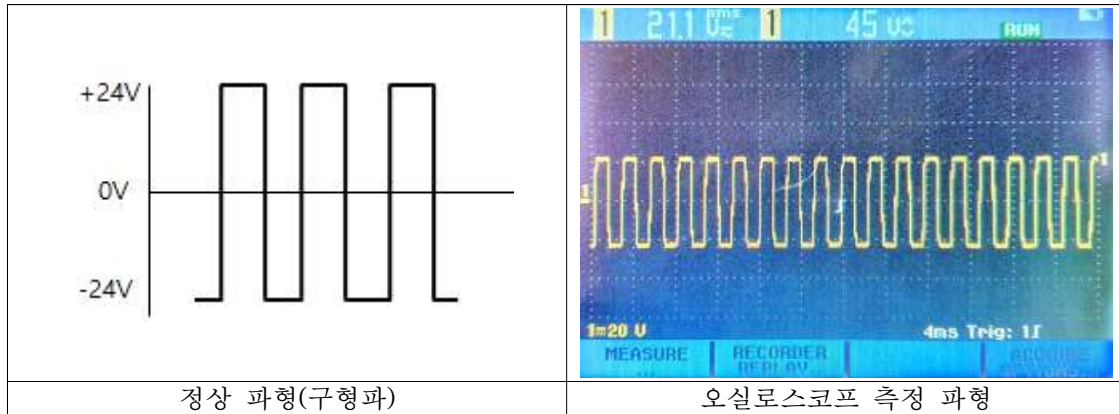
2.5.1 MOT모듈 부품시험

[그림19]의 MOT모듈 출력 회로도를 보면, [1]과 [2]의 포토커플러를 펄스 구동(驅動) 소자로 사용하였다. [1]번이 구동되면 [3]에는 직류 +(B24V)가 [4]에는 직류 -(C24V)가 출력되고, [2]번이 구동되면 [3]에는 직류 -가 [4]에는 직류 +가 출력된다. 즉, 극성이 바뀌어 나타나는 구형과 출력회로이다.



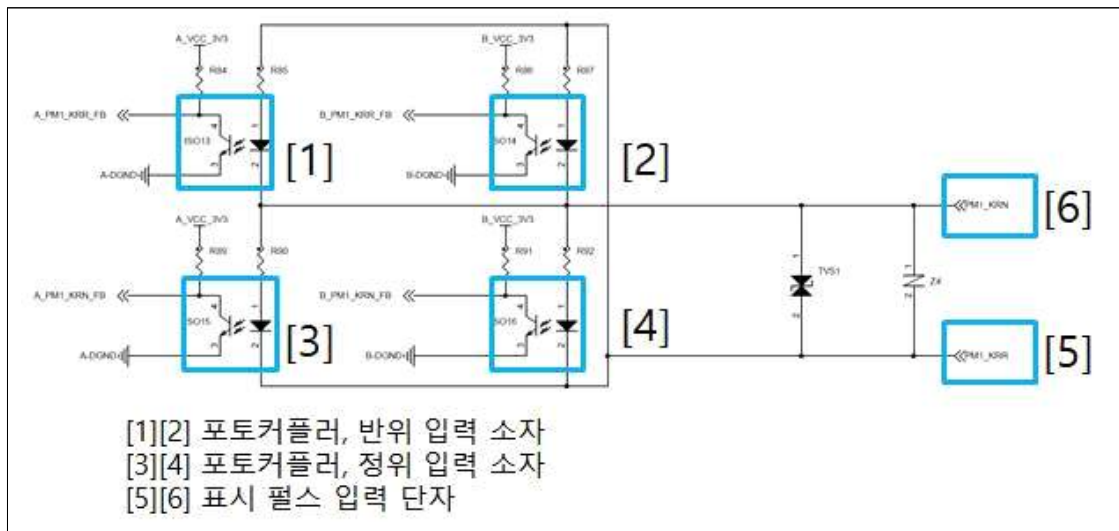
[그림19] MOT모듈 출력 회로도

오실로스코프로 측정된 출력소자의 파형을 비교한 결과 [그림20]과 같이 좌측의 정상적인 구형 파형과 우측의 측정된 파형이 일치하여 1번 포토커플러 2개와 2번 포토커플러 2개는 모두 정상으로 확인되었다.



[그림20] 오실로스코프에 측정된 출력 파형

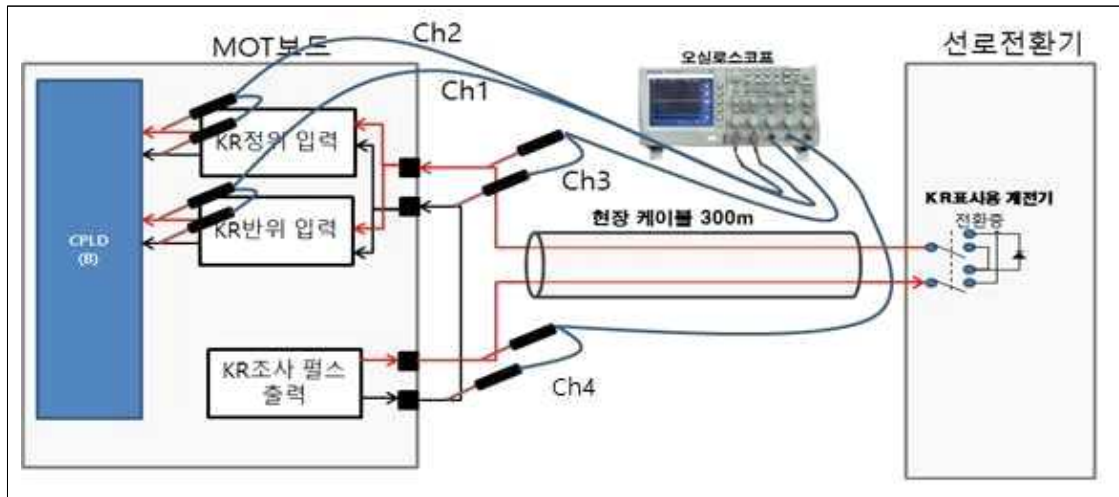
입력 소자를 확인하기 위해 [그림21]과 같이 [5], [6]번 현장 펄스 입력 단자에 펄스 전압을 인가하고 포토커플러 특성을 측정하였으며, [1], [2]번 포토커플러 반위 입력 소자와 [3], [4] 포토커플러 정위 입력 소자는 이상이 없는 것으로 확인되었다.



[그림21] MOT모듈 입력 회로도

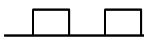
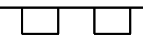
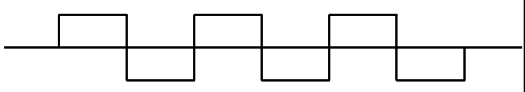
2.5.2 케이블 특성시험

현장 선로전환기 케이블 특성을 알아보기 위하여 [그림22]와 같이 구명역 203A호 선로전환기에 오실로스코프를 설치하고 케이블 특성을 측정하였다.



[그림22] 케이블 특성 측정을 위한 시험 장비 구성도

각 채널(ch) 별 측정된 결과는 [표27]와 같았다.

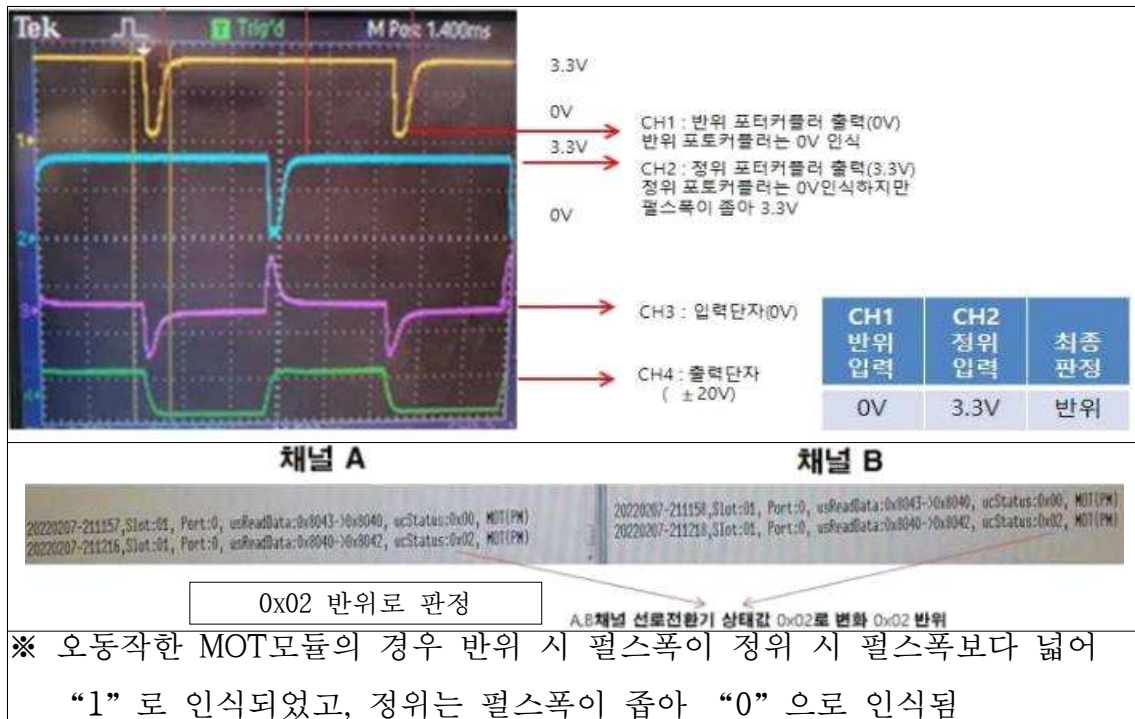
구분	정위 시	반위 시	불일치 시	비고
Ch1: 반위 데이터	3.3V	0V	3.3V	반위 최종 입력
Ch2: 정위 데이터	0V	3.3V	3.3V	정위 최종 입력
Ch3: MOT모듈 입력 (현장 입력 단자)	 상측과 입력 (20V)	 하측과 입력 (-20V)	0V	
Ch4: MOT모듈 출력 (현장 출력 단자)	 구형과 출력(±20V)			
※ Ch1, Ch2 입력이 없을 때 3.3V, 입력이 있을 때 0V로 동작				

[표27] 현장 MOT모듈 각 채널 별 측정 내용

2.5.3 오동작 재현시험

제작사는 구명역 203A호 선로전환기 표시회로 케이블에 축적된 정전용량²⁵⁾이 반위 판정에 영향을 미치는지를 확인하기 위하여 OC장치를 2계로 운용하고, 케이블 정전용량 값을 19nF~24nF으로 설정하여 표시회로에 검지 입력 신호가 있는지를 시험하였다.

재현시험에서 현장 203A호 선로전환기가 반위쪽으로 전환하던 중 반위를 검지하는 입력측으로 [그림23]에 오실로스코프 황색 파형에서 보듯이 ‘1’로 인식할 수 있는 신호가 입력되어 OC장치 MOT모듈은 203A호 선로전환기를 반위 판정하였다. 이때 203A호 선로전환기는 텅레일이 벌어진 상태에서 정지되었다.

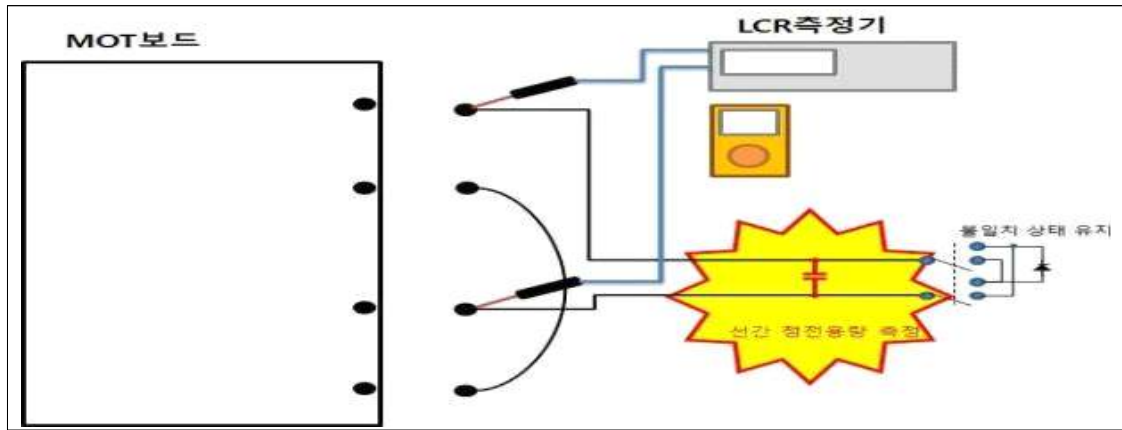


[그림23] 정전용량 19~24nF 일 때 측정 파형과 OC장치 CPU 입력값



2.5.4 케이블 정전용량 측정

2022년 02월 09일 03:00경 제작사는 [그림24]와 같이 구명역 203A호 선로 전환기 표시용 케이블의 현장 출력 단자를 분리(Diode Open)하고 케이블에 발생하는 정전용량을 측정하였다.



[그림24] 203A호 선로전환기 표시회로 정전용량 측정도

측정 결과는 [표28]과 같이 연결되지 않은 상태에서 24.2nF으로 확인되었다.

구 분	측정값 (nF)	비 고
현장 다이오드 정위 연결 시	25.7	단자대를 분리하여 측정
현장 다이오드 미연결 시	24.2	수동핸들로 전환 중에 발생

[표28] 203A호 선로전환기 현장 케이블 정전용량 측정값

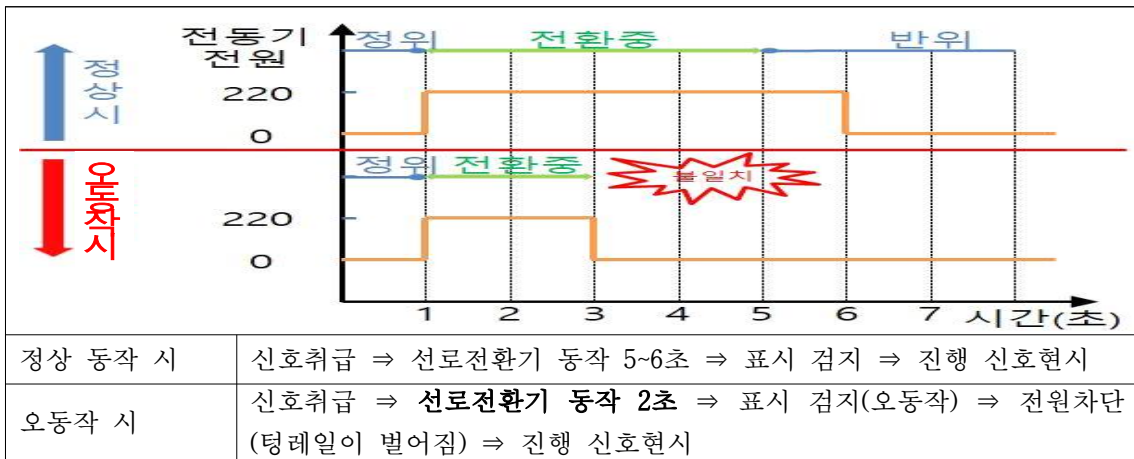
2.5.5 오동작 원인분석

구명역 현장에서 203A호 선로전환기를 재현시험 하였을 때 OC장치의 1계와 2계 MOT모듈은 응답 반응이 서로 달랐다. 케이블 정전용량이 추정치인 24nF 주변에서 2계에서는 반위로 표시(오동작)되어 사고 당시와 같은 상황이 재현되었으나 OC장치 1계에서는 불일치로 표시(정상)하였다. 표시용 케이블에 정전용량은 24nF 정도로 측정되었고, 이때 오동작이 되는 것으로 분석되었다. ([표29] 참조)

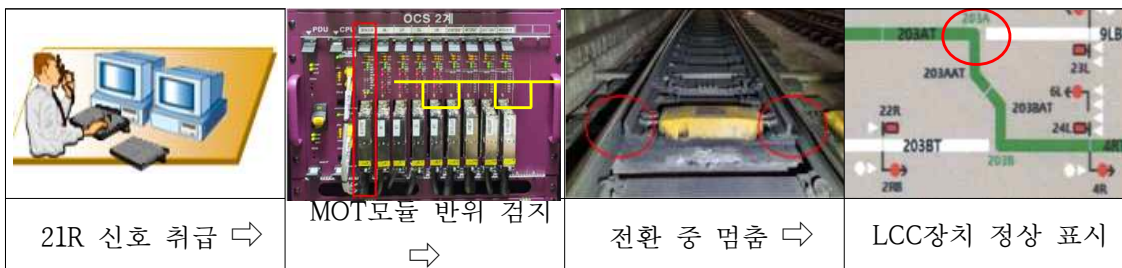
정전 용량	Ch1 (반위 데이터)	Ch2 (정위 데이터)	판정	비 고
0F~19nF	3.3V	3.3V	불일치	
19nF~24nF	0V	3.3V	반위	재현시험 24nF 일 때 오동작
24nF 이상	0V	0V	불일치	

[표29] 2계 MOT모듈 정전용량에 따른 데이터 결과값

오동작이 발생한 원인은 203A호 선로전환기 표시회로의 현장쪽 케이블 양단에 발생한 정전용량(24nF)으로 인하여 표시회로 출력신호가 입력쪽으로 유도되어 1) 선로전환기가 전환 중(2초)에 반위 검지 2) 선로전환기 전원 차단 3) 선로전환기 전환 중 멈춤 4) LCC장치 반위쪽 정상 표시하는 순서로 오동작 된 것으로 분석되었다. ([표30], [그림25] 참조)



[표30] 203A호 선로전환기 MOT모듈 정상·오동작 비교



[그림25] 203A호 선로전환기 OC장치 2계에서 MOT모듈 오동작 과정

2.6 종합분석

기관사는 시운전을 위하여 구명역 21R 신호기에 진행 신호가 현시됨에 따라 사고열차를 출발하였으나, 상선에서 하선으로 넘어가는 지점에서 203A호 선로전환기의 텅레일이 벌어져 있는 것을 확인하지 못한 것은 부산교통공사 「기관사 작업내규」를 제대로 준수하지 않은 것으로 조사되었다.

부산교통공사 신호통신처는 전자연동장치 교체사업에 따라 2022년 1월 26일 전자연동장치와 OC장치 2계를 열차운행 계획에 따라 열차 시운전 시험과 사용전검사를 시행하면서 현장에 선로전환기의 이상 유무를 확인할 수 있는 인력을 배치하지 않은 것으로 조사되었다.

개발책임자는 케이블에 발생하는 정전용량에 영향으로 표시회로의 출력신호가 입력으로 유도되어 표시회로를 구성하는 문제는 고려하지 못한 것으로 분석되었다.

부산교통공사 신호통신처는 선로전환기의 표시회로와 같은 중요한 회선을 양선제어방식으로 구성하지 않고 단선제어방식으로 구성한 것은 안전측 동작 원칙과 위험방지 대책으로 적절하지 않았고, 이것이 탈선에 영향을 미친 것으로 분석되었다.

오동작이 발생한 원인은 203A호 선로전환기 표시회로의 현장 측 케이블 양단에 발생된 정전용량(24nF)으로 인하여 정·반위를 표시하기 위한 출력신호가 입력으로 유도되어 OC장치의 2계 MOT모듈은 203A호 선로전환기가 전환 중임에도 반위로 검지하였고, 선로전환기의 동작 전원이 차단되어 선로전환기는 전환 중 멈추었다. 반위를 검지한 MOT모듈은 오정보²⁶⁾를 전자연동장치로 전달하였다. 오정보를 받은 전자연동장치는 203A호 선로전환기를 반위로 처리하고, LCC장치에 반위를 표시(오동작)한 것으로 분석되었다.

26) 203A호 선로전환기 텅레일이 벌어져 있었으나 반위쪽으로 전환한 것으로 검지한 잘못된 정보

탈선 원인은 사고 당시 OC장치를 2계로 운용 중 CA모드에서 21R 신호기가 하선으로 취급되었을 때 MOT모듈은 203A호 선로전환기가 전환 중임에도 반위쪽으로 전환 완료한 것으로 오동작하여 텅레일이 벌어진 상태에서 멈추었고, 21R 신호기는 진행신호가 현시되었으며, 기관사는 203A호 선로전환기 텅레일이 벌어진 것을 확인하지 못하고 운행하면서 사고열차가 탈선된 것으로 분석되었다.

3. 결론

3.1 조사 결과

- 3.1.1 기관사는 시운전 중 구명역 203A호 선로전환기의 텅레일이 벌어져 있었으나 확인하지 못하였다. 이는 부산교통공사 「기관사 작업내규」 제32조에 명시된 ‘반복역 또는 운전선로의 분기기가 있는 지점을 진출·입할 때 신호와 진로를 확인하여야 한다.’ 라는 내규를 준수하지 않은 것으로 조사되었다.
- 3.1.2 관계사가 수행한 로컬(Local) 취급 승인 절차와 사고 후 「탈선 시 현장 조치 매뉴얼」에 따라 관계부서에 사고 발생상황을 통보하고 초기 대응반을 출동시키는 등의 사고 후 조치는 적절했던 것으로 조사되었다.
- 3.1.3 연동검사자는 연동검사표에 따라 선로전환기 단동시험, 신호기 현시 시험을 시행하면서 현장과 일치하는지 확인한 후 각 신호기 진로 시험을 시행하였다. 연동도표, 연동검사표, 전자연동장치 기록을 확인하였으나 문제점은 없는 것으로 조사되었다.
- 3.1.4 감독자는 시설물 검증시험과 시운전검사의 책임자로서 2022년 1월 25일 시운전검사 중 203A호 선로전환기 고장 발생하였을 때 현장을 확인하지 않았고, 2022년 1월 26일 시운전(사용전검사 포함) 시 선로전환기 확인자를 배치하지 않았다. 이는 시운전검사를 시행하는 방법으로 적절하지 않은 것으로 조사되었다.
- 3.1.5 개발책임자는 OC장치의 MOT모듈을 설계하면서 선로전환기 케이블에 발생한 정전용량의 영향으로 표시회로가 연결되지 않은 상태에서 출력신호가 입력쪽으로 유도되어 표시회로를 구성하는 문제를 고려하지 못한 것으로 분석되었다.

- 3.1.6 CCTV 녹화영상에는 구명역 21R 신호기에 진행신호가 현시된 후 사고 열차가 출발한 것과 203A호 선로전환기의 텅레일이 벌어져 있었던 것이 확인되었고, 열차운행기록에는 사고열차의 사고 직전 운행속도가 21km/h였던 것으로 분석되었다.
- 3.1.7 사고열차의 검수는 「전동차 검수규정」과 「2호선 전동차 검수기준」의 검수 절차에 따라 주기적으로 시행하였고, 사고차량의 차륜은 기준치 범위 내에서 관리된 것으로 조사되었다.
- 3.1.8 사고 구간에 대한 궤도검측차 점검, 인력에 의한 궤도틀림 점검 및 레일 마모 측정을 통한 분기기의 정비는 「궤도정비기준」에 따라 시행하여 선로 유지관리에는 문제가 없었던 것으로 조사되었다.
- 3.1.9 부산교통공사는 선로전환기의 표시회로와 같은 중요한 회선을 단선제어방식으로 설치한 것은 안전측 동작 원칙과 위험을 방지하는 대책으로 적절하지 않았고, 이것이 탈선에 영향을 미친 것으로 분석되었다.
- 3.1.10 전자연동장치 공장검사를 감독자가 비대면(원격 화상 검사)으로 시행한 것은 제작 사양에 따른 제품의 일치 여부와 적정 동작, 연동 논리 검사 등을 확인하는 방법으로 적절하지 않은 것으로 판단된다.
- 3.1.11 연동검사서 절차나 방법에서 드러난 문제는 없었으나 연동검사는 전자연동장치 1계에서 시행되었고 정상적으로 동작하였다. 그러나 전자연동장치 중 OC장치 2계의 MOT모듈은 시운전과 재현시험에서 오동작한 것으로 확인되어 향후 연동검사를 시행하는 절차나 방법을 개선해야 할 것으로 판단된다.
- 3.1.12 연동검사 후 결과에 대하여 검사자와 유지보수자만 입회하여 서명한 것으로 되어 있어 운전취급자, 제작사 등 관련자 모두가 입회하여 서명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

- 3.1.13 부산교통공사는 종합시험 계획을 수립하면서 신규설비에서 진로취급 후 선로변 현장을 확인할 것과 열차 시운전 시험 시 시설물 검증 시행과 동일하게 연동검사를 시행하는 것으로 계획하였으나 실제 시운전 시험을 할 때는 현장에 선로전환기 확인자를 배치하지 않은 것으로 조사되었다.
- 3.1.14 MOT모듈 오동작 원인분석을 위한 부품시험에서 입·출력 소자는 모두 양호한 것으로 분석되었다.
- 3.1.15 재현시험에서 현장 203A호 선로전환기가 반위쪽으로 전환하던 중 검지 입력측으로 반위로 판정할 수 있는 신호가 입력되었다. MOT모듈은 203A호 선로전환기를 반위로 판정하였고, 전원을 차단하여 203A호 선로전환기는 텅레일이 떨어진 상태에서 정지한 것으로 확인되었다.
- 3.1.16 제작사가 구명역 203A호 선로전환기 표시회로 케이블의 출력 단자를 분리하고 측정된 정전용량은 24.2nF으로 조사되었다.
- 3.1.17 MOT모듈의 오동작이 발생한 원인은 203A호 선로전환기 표시회로의 현장측 케이블 양단에 발생한 정전용량(24nF)으로 인하여 표시회로 출력신호가 입력측으로 유도(誘導)되어 1) 선로전환기가 전환 중(2초)에 반위 검지 2) 선로전환기 전원 차단 3) 선로전환기 전환 중 멈춤 4) LCC장치 반위쪽 정상 표시 순서로 오동작 된 것으로 분석되었다.
- 3.1.18 탈선 원인은 사고 당시 OC장치를 2계로 운용 중 CA 모드에서 21R 신호기가 하선으로 취급되었을 때 MOT모듈은 203A호 선로전환기가 전환 중임에도 반위쪽으로 전환 완료한 것으로 오동작하여 텅레일이 떨어진 상태에서 멈추었고, 21R 신호기는 진행신호가 현시되었으며, 기관사는 203A호 선로전환기 텅레일이 떨어진 것을 확인하지 못하고 운행하면서 사고열차가 탈선된 것으로 분석되었다.

3.2 사고원인

항공·철도사고조사위원회는 이번 사고의 주원인을 ‘제작사에서 설계·제작한 OC장치가 203A호 선로전환기의 반위쪽 텅레일이 벌어져 있었음에도 정상 동작한 것으로 검지하여 21R 신호기를 진행신호로 잘못 현시한 것’으로 결정하였다.

또한 이번 사고에 영향을 끼친 기여 요인을 ‘선로전환기와 같은 중요한 설비의 표시회로 전원을 단선제어방식으로 구성한 것’으로 결정하였다.

4. 안전권고

항공·철도사고조사위원회는 「항공·철도사고조사에 관한 법률」 제26조에 따라 2022년 1월 26일 부산교통공사 2호선 구명역 구내에서 발생한 시운전 열차 탈선사고에 대하여 다음과 같이 권고한다.

4.1 부산교통공사에 대하여

4.1.1 전자연동장치의 동작 오류 및 고장 시에는 안전측으로 동작하도록 재 설계하여 설치하고, 안전측으로 동작하는지 여부를 확인할 수 있는 검사 방안을 마련하여 시행할 것

4.1.2 신호설비의 제어 및 표시회로는 국가철도공단 「철도설계편람(신호편)」에 따라 ‘양선제어방식’으로 개선할 것

4.1.3 전자연동장치 교체·신설 시에 안전을 확보할 수 있는 검사방법과 시운전 방안을 마련하고, 교육 등을 통하여 지속적으로 관리할 것(현장 확인자 배치, 시운전 기관사 교육 등 포함)

4.1.4 전자연동장치는 1계, 2계 모두 사용계가 될 수 있으므로 안전을 확보할 수 있는 연동검사 방안을 마련하여 시행할 것

4.1.5 전자연동장치 등 주요 설비를 공장검사할 때는 연동논리, 동작상태 등을 직접 확인할 필요가 있으므로 대면으로 시행하도록 교육하고 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(공개할 수 있는 정보의 범위)에 의하여 이 보고서(인쇄본)에 개인정보는 공개하지 않았으며,

국민 여러분의 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: hanibsul@korea.kr