

철도사고 조사보고서

서울교통공사(구 서울메트로)
창동기지(429A/B호 선로전환기 부근)
제4910호 전동열차(401편성, 10량)
열차탈선
2016년 11월 20일(일) 05시 25분 경



2018. 8. 27.



항공·철도사고조사위원회

이 조사보고서는 「항공·철도사고조사에 관한 법률」 제2조(정의)에 따라 사고조사가 이루어졌으며, 제 25조(사고조사보고서의 작성)에 따라 작성되었다.

같은 법률 제1조(목적)에서 「철도사고 조사는 독립적이고 공정한 조사를 통하여 사고 원인을 정확하게 규명함으로써 철도사고의 예방과 안전 확보에 이바지함」을 목적으로 하고 있다.

또한, 같은 법률 제30조(다른 절차와의 분리)에 따라 「사고조사는 민·형사상 책임과 관련된 사법절차, 행정처분절차 또는 행정쟁송절차와 분리·수행」되어야 하고,

같은 법 제32조(불이익의 금지)에서 「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. 사실정보 3

 1.1 사고의 경위 3

 1.2 피해사항 4

 1.3 인적정보 및 업무수행사항 5

 1.4 현차 확인시험과 긴급안전권고 9

 1.5 선로정보 10

 1.6 차량 정보 18

 1.7 운행정보기록, 연동장치 기록 및 무선통화 내용 25

 1.8 전기·신호 정보 28

 1.9 날씨와 기상 28

2. 분석 29

 2.1 관계자 업무 분석 29

 2.2 선로상태의 적정성 분석 30

 2.3 차량관련 사항의 분석 37

 2.4 신호제어설비의 분석 39

 2.5 ATC 시스템 점검 및 정보공유 절차의 적정성 40

3. 결론 41

 3.1 조사결과 41

 3.2 사고원인 44

4. 안전권고 45

 4.1 국토교통부에 대하여 45

 4.2 서울시에 대하여 45

 4.3 서울교통공사에 대하여 45

서울교통공사 창동기지 전동열차 탈선사고

- 운영기관: 서울교통공사(구 서울메트로)
- 운행노선: 4호선
- 발생장소: 창동기지(429A/B호 선로전환기)
- 사고열차: 제4910호 전동열차[401편성, 10량]
- 사고유형: 열차탈선사고
- 발생일시: 2016년 11월 20일(일) 05시 25분경



[그림1] 창동기지 사고개소의 위성사진

개요

2016년 11월 20일(일) 05시 25분경, 서울교통공사(구, 서울메트로) 창동기지에서 출고 중이던 제4910호 전동열차(노원역→당고개역, 회송열차, 이하 "사고열차"라 한다)가 429B호 선로전환기 침단부(텅레일)에서 열차의 맨 후부 차량(10호차) 앞 대차 좌측 2개 차륜(1, 3위 차륜)이 타고 올라 이동 후 앞 대차 4개 차륜 모두가 진행 방향 좌측으로 궤도를 이탈한 후 정차하였다.



[그림2] 사고개소

이 사고로 인명피해는 발생하지 않았으나 궤도분야 목 침목 등의 파손, 차량분야 밀착연결기 등의 파손 및 신호분야 레일 본드 등이 파손되어 총 17백만 602천원의 재산피해가 있었다.

항공철도사고조사위원회는 창동기지에서 발생한 열차탈선사고의 원인을 급곡선에 부설된 선로전환기의 부품교환개소 리드부에서 횡압이 증가하여 타고 오름 탈선이 발생한 것으로 결정하였으며, 기여요인으로는 곡선부에 설치되는 분기부의 설치기준 결여로 정하였다.

따라서 국토교통부에 1건, 서울시에 1건 및 서울교통공사에 8건의 안전권고를 각각 발행한다.

1. 사실정보

1.1 사고의 경위

2016년 11월 20일 5시 23분경, 사고열차는 노원역으로 출고하기 위하여 창동기지 남쪽 S12번 선로에서 인상선로인 S28 선로로 인상하여 운전실 교체 후 ATC¹⁾ ‘0’ 에서 대기 중 ATC ‘25’ 속도가 현시되어 현시된 지상신호를 확인하고 출발하였다.

S28선로를 출발한 사고열차는 약 1분 15초 후 ATC ‘0’ 모드로 제동이 체결되어 자동정차 되었으며, 이후 ATC ‘25’ 속도 현시로 자동제동이 해방되어, 기관사는 Power를 올려 출발하였고, 출발 후 사고열차는 역행과 타력으로 운행되었으며, 5시24분35초에 AIR Spring Puncture²⁾ 메시지가 현시되어 기관사는 상용제동을 체결하여 5시24분50초에 정차하였다.

열차가 정차하자 기관사는 창동기지 관제를 호출하여 ‘에어스프링 경고와 차량 진동이 많이 발생했다.’라고 통보하였으며, 창동기지 관제에서는 차량고장으로 인식하고 S28 선로로 후진하여 차량을 교체할 것을 지시하였고, 뒤 운전실 차장은 열차후반부가 심하게 흔들렸다고 비상 부저로 기관사에게 열차후부 상태를 통보하였다.

이후 기관사는 운전실에서 열차내부의 통로를 따라 뒤쪽으로 이동하면서 열차의 아홉 번째 차량과 열 번째 차량의 상태를 확인하고 나서 통로가 막혀 열차 밖으로 나와 사고열차의 외부 탈선상태를 확인하고 그 사실을 기지 관제에 무선으로 통고하였다.

1) ATC(Automatic Train Control) 지상(레일)에서 열차의 운전조건을 차상(동력차)으로 전송하여 기관사가 차상신호로 운전할 수 있도록 하는 장치로서 기관사가 제한속도를 초과하여 운전할 경우 자동적으로 지정속도 이하로 운전하게끔 제어하는 장치

2) AIR Spring Puncture : AIR Spring(공기스프링)은 차체와 대차프레임을 완충고무 타이어 형태로 직접 연결하여 철도차량 운행중 진동과 소음을 감지하여 승차감을 향상시키는 역할을 하며 AIR Spring Puncture는 공기스프링이 파손된 고장경보

1.2. 피해사항

1.2.1 인명피해

차량기지에서 역으로 출고하는 열차로서 인명피해는 없었다.

1.2.2 물적피해

이번 사고로 궤도분야 분기침목(목침목) 14개, 나사스파이크 34개, 베이스 플레이트 4개의 파손, 차량분야 밀착연결기 2개, 다이아후렘 2개 디스크라이닝 1개 및 레벨링로드 2개 파손 및 신호분야 레일본드 6개, 전선보호관 2개, 선로전환기 부품 1개 등이 파손되어 총 17백만 602천원의 재산피해가 있었다.

1.2.3 피해액 집계

[표1]은 궤도, 차량, 신호분야의 피해액을 집계한 것이다.

구 분	계	궤도분야	차량분야	신호분야
시설물	-	목침목 등	밀착연결기 등	레일본드 등
금 액	17,602,512원	3,587,800원	13,440,000원	574,712원

[표1] 물적피해 내역

1.3 인적정보 및 업무수행사항

1.3.1 사고열차 기관사

사고열차 기관사(48세, 남)는 2011년 4월 1일 철도차량운전면허 전기2종을 취득한 후 2011년 4월 1일자 차장으로 상계승무사업소에 전입 후 2011년 11월 1일 기관사 발령을 받아 2012년 1월 1일부터 전동열차 운전 단독근무를 시작하여 사고 당시까지 전동차 운전업무에 종사하고 있었다.

사고열차기관사의 사고발생 이전 72시간 행적은 2016년 11월 18일은 휴가(대체휴무)를 사용하였으며, 수면은 8~9시간 정도 취하였고, 출근은 11월 19일 17시경 당고개로 출근, 사당을 다녀와서 창동기지로 이동, 저녁 식사 후 휴식을 취한 후 새벽 4시 20분에 기상하여 사고 열차를 출고하는 업무를 수행하였다.

사고열차기관사는 출고 준비를 하면서 차량상태의 이상은 발견하지 못하였으며, S12번 선로에서 S28 선로로 이동하여 운전실을 교체 시까지도 특별한 사항은 없었고, S28선로에서 출발대기 중 ATC 차내신호가 '0' 모드에서 '25' 로 표시되어 열차를 출발시켰다.

사고열차는 S28선로 출발 후 ATC '0' 모드로 자동정차 되었으며, 다시 ATC '25' 가 표시되어 자동으로 제동이 해방되어 기관사가 Power를 올려 출발하였고, 몇 초 후에 AIR Spring Puncture 메시지가 표시되어 기관사가 역행과 타력을 반복하고 있을 때 차장이 비상부저를 울려와 기관사는 상용 제동을 체결한 후 차장으로부터 인터폰으로 후부차량 흔들림을 통보 받았다.

이후 기관사는 사고열차를 정차시킨 후 기지관제에 상황을 통보하였으며, 객실로 이동하면서 10호차와 9호차사이의 통로막이 막혀있고 차량이 뒤틀려 있는 것을 확인하고 편성 밖으로 나가 탈선상태를 확인한 후 기지관제에 탈선상황을 10호차 무전기로 통보하였다.

1.3.2 창동기지 관제원

창동기지 관제원(55세, 남)은 1988년 6월 15일 종로3가역 역무원으로 임용되어 1994년 5월 2일 창동차량사업소로 전보되었으며, 2008년 3월 17일 제2신호보안사무소 근무 후 2012년 4월 1일부터 상계승무사업소 승무(운용계획)부문에서 사고당시까지 창동기지 운전취급업무를 담당하고 있었다.

창동기지 관제원의 진술에 따르면, 사고 당일 4시50분경 사고열차 기관사로부터 ‘남부 S12번선 4910열차 401편성 출고 준비 완료’ 통보를 받고 S28번선으로 진로를 취급한 후 ‘이동하라.’고 무전으로 통보하였으며, 5시10분경 사고열차 기관사로부터 S28번 선 도착 통보를 받고 출고선으로의 진로를 취급한 후 사고열차 기관사에게 ‘노원 출고선 관계진로 확인 후 출고하세요.’라고 무전으로 통보하였다.

이 후 사고열차 기관사로부터 ‘에어스프링 경고와 차량 진동이 많이 발생했다.’는 무전통보가 있어 개인적으로 차량고장으로 생각하고 S28 선로로 인상한 후 차량을 교체하라고 지시하였으나, 사고열차 기관사가 차량이 탈선됐다고 무선통고를 해왔다.

사고열차 기관사로부터 열차탈선의 무전통보를 받은 기지관제원은 매뉴얼에 따라 운전관제, 검수계획, 토목, 신호분야에 사고 상황을 통보하고 현장에 출동하여 선로전환기 수동취급으로 후속 4912열차부터 비상 출고시켰다.

1.3.3 작업책임자(현장대리인)의 업무수행사항

작업책임자(69세, 남)는 1973년 8월 20일부터 2003년 6월 30일까지 철도청에서 근무하였으며 이후 도림공영 등 10여개의 궤도 부설회사에서 근무하였고, 2016년 4월 20일부터 (주)무강에서 사고발생 시까지 현장대리인으로 근무하고 있었다.

현장대리인은 2016년 11월 18일 01:30에서 04:00까지 시행한 작업은 창동기지 429B호 선로전환기 좌측의 텅레일, 기본레일 및 리드레일 교환이었으며 텅레일, 기본레일 부분의 마모가 심하여 교체하였다고 진술하였다.

당시 작업자들을 관리하면서 확인하고 지시한 사항은 건강과 음주여부 및 중량물 취급 시 안전에 주의 등이었으며 서울시나 서울교통공사로부터 특별히 지시받은 사항은 없었다고 진술하였다.

현장대리인은 단순히 레일만 교체했기 때문에 궤간만 검측하였고 결과는 기록하지 않았으며 텅레일과 기본레일은 (주)삼표에서 제작하여 공급 받은 제품을 설치하였으며 작업사항은 현장에 일임하였다고 진술하였다.

1.3.4 작업감독자의 업무수행사항

작업감독자(58세, 남)는 1984년 1월 1일 서울교통공사 제1보선사무소에 특별 채용되었고 2014년 8월 19일에 궤도신호사업소 제10궤도(창동)관리소로 전보되어 사고당시까지 부관리소장으로 재직하고 있었다.

창동기지 429B호 선로전환기의 부품 교체 작업은 2016년도 예산사업에 포함되어 있었으며, 11월 작업계획에 포함되어 11월 18일 영업열차 종료되고 전차선의 전력공급이 중단된 후 429B호 선로전환기 좌측의 레일, 기본레일 및 리드레일을 교환하는 것으로 사업소계획이 확정되었고, 작업감독자가 현장에 출장하여 11월 18일 1시 30분경 기지 내 운전관제실의 승인을 받고 작업을 시행하였으며 4시경에 작업을 종료하고 기지 내 운전관제실에 보고한 다음 관제실의 통제로 텅레일 전환시험을 시행하고 철수하였다.

작업감독자는 현장의 작업을 완료하고 궤간, 수평, 리드레일의 종거 등이 포함된 분기기 검측 기록지를 작성하였으며, 작업개소에 R120 곡선이 게재되어 있고 분기기 전방에 5m 직선이 있는 것으로 알고 있었으며, 작업당시에는 곡선 검측은 하지 않았다.

창동기지 429B호 선로전환기는 분기기 전방에 직선부를 설치하고 직선분기기 부설하였으며 교환 작업 시 교환한 텅레일, 기본레일, 리드레일은 직선분기기에 해당하는 부품으로 교환하였다.

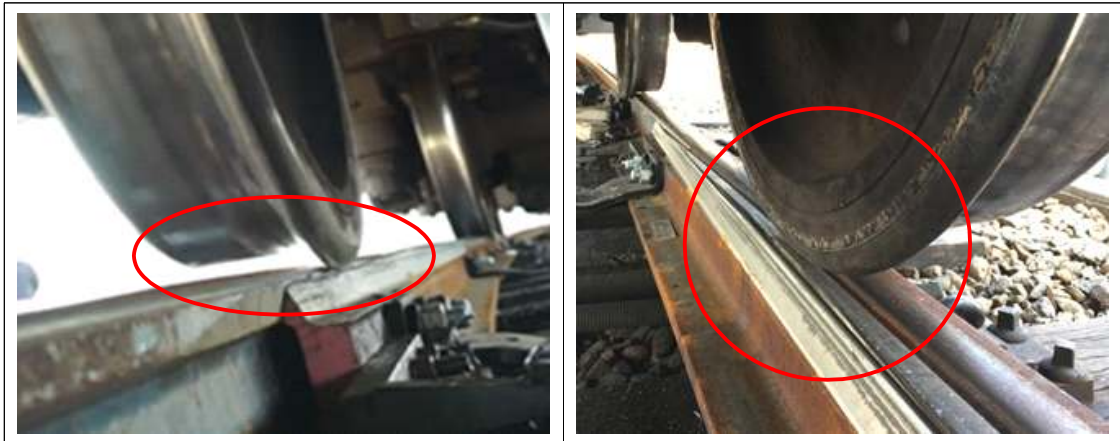
창동기지 429B호는 창동기지관리소에서 지정한 중점관리개소이며 작업 전 관리소장으로부터 안전에 유의하라는 당부를 받았으며 429B호의 적정한 개선방안은 인상선을 도로방향으로 옮겨 근본적인 선형개량이 필요하다고 진술하였다.

1.4 현차 확인시험과 긴급안전권고

1.4.1 현차 확인시험

사고열차 탈선사고의 발생경위와 궤도이탈 상황을 확인하기 위하여 사고구간의 레일 마모상태를 레일마모측정기를 이용하여 측정하고 11월 25일과 29일 사고열차(401편성)와 다른 전동열차(406편성)로 각각 1, 2차 현차 확인 시험을 시행하였다.

사고구간(S28선에서 429A/B호 선로전환기를 경유하는 출고진로)에서 사고열차의 운행기록을 토대로 1, 2차 모두 견인 후 제동 및 견인시험을 시행한 결과 교환된 429B호 선로전환기 밀착부에서 차륜이 레일을 타고 오르는 현상이 확인되었다.



[그림3] 밀착부 접단에서 타고 오름이 발생

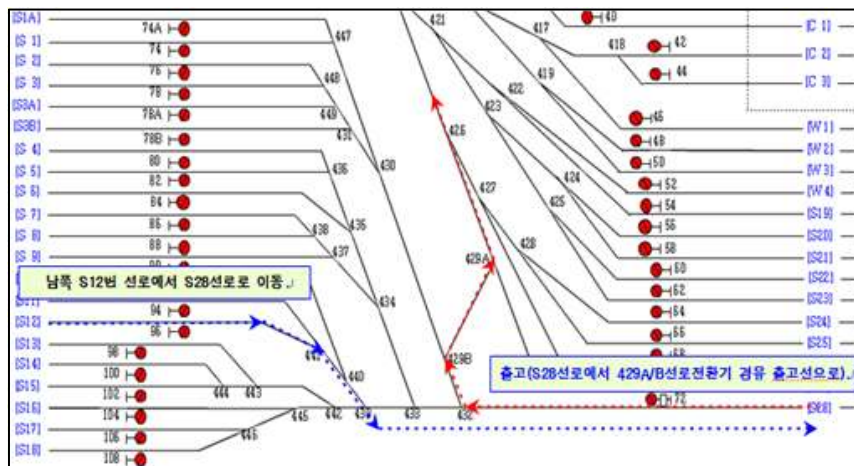
1.4.2 긴급안전권고 발행

탈선사고 재현을 위한 1, 2차 현차 확인시험에서 차륜의 타고 오름 현상이 발생되어 항공철도사고조사위원회에서는 타고 오름에 의한 탈선사고 재발을 방지하기 위하여 원인 해소 시 까지 사고구간(창동 차량기지 S28번선에서 429B호 분기기를 경유하는 선로)의 선로의 사용중지를 긴급 안전권고로 발령하였다.

1.5 선로정보

1.5.1 사고현장의 선로

창동기지는 검수선 11, 남부유치선 20, 북부유치선 13, 기타 1 등 총 45개의 유치선로로 구성되어 있으며, 남부 11개 유치선로는 S28선로를 경유하며 S28선로에서 429A/B 선로전환기를 거쳐 본선진출 및 남부 유치선로로 진입한다. [그림4]는 사고열차의 이동경로이다.



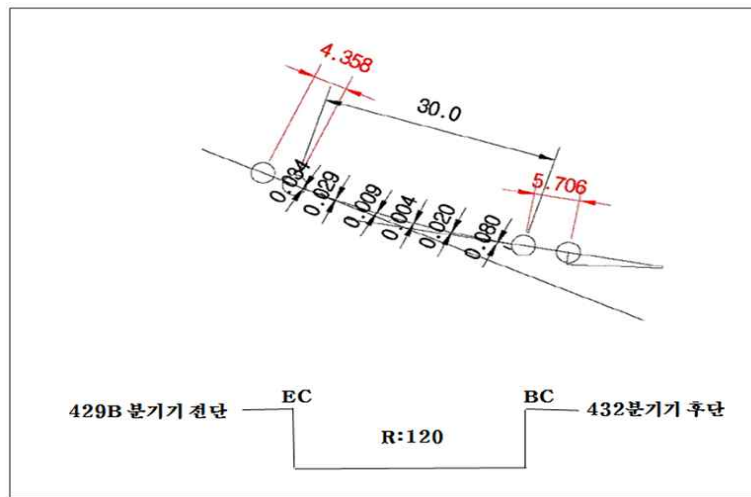
[그림4] 탈선열차의 이동경로

429B호 선로전환기는 [그림5]와 같이 50kgNS형 분기기를 일부 구조가 개선된 50kgNS I형 분기기이며 분기침목은 목침목의 재질을 갖고 있고 체결장치는 팬드롤 형식이었다.



[그림5] 429B호 선로전환기

사고구간의 선형을 측정된 결과는 [그림6]과 같이 432호 분기기 후단에 5.706m의 직선이 있었고 그 다음에 30m연장의 곡선반경 120m가 있었으며 완전한 원곡선이 아닌 곡률의 변화가 곡선 중심으로부터 양방향으로 나타나고 있어 실질적인 완화곡선 형태를 보였으며 429B호 분기기 전단에 4.358m의 직선이 부설되어 있었다.

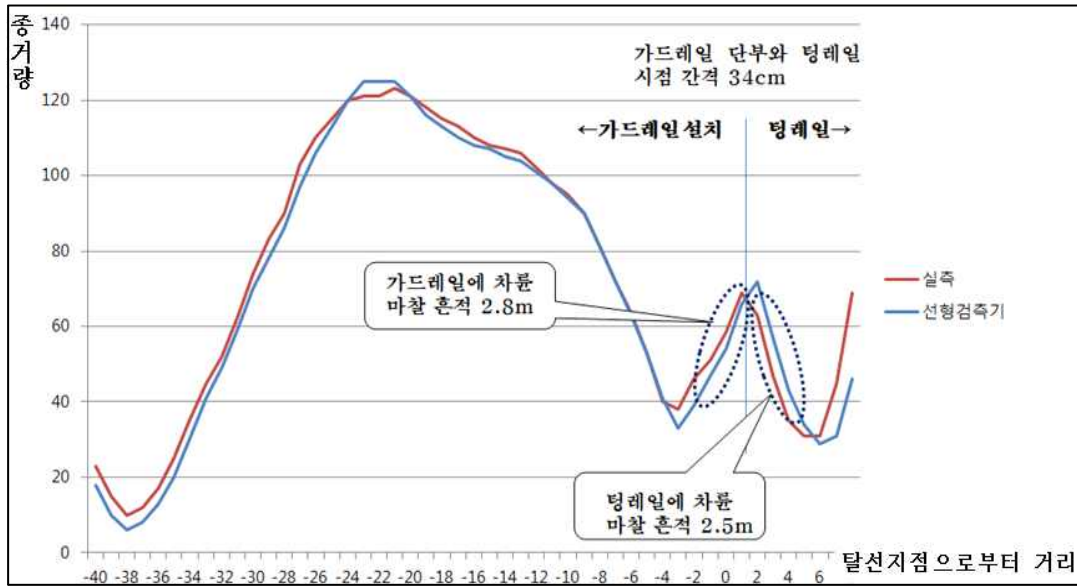


[그림6] 측량기에 의한 선형측정결과

인력검측과 선형검측기로 432호 선로전환기와 429B호 선로전환기 사이 곡선에 대한 10m현의 종거를 측정하였으며 429B호 선로전환기 시점을 측점 0으로 하고 432호 선로전환기 방향을 -로 하여 1m 단위로 측정된 결과는 [표2] 및 [그림7]과 같았다.

구분	-40	-39	-38	-37	-36	-35	-34	-33	-32	-31	-30	-29	-28	-27	-26	-25	-24
실측	23	15	10	12	17	25	35	45	52	62.5	74	83	90	103	110	115	120
선형	18	10	6	8	13	20	30	41	49	59	70	78	86	97	106	113	120
구분	-23	-22	-21	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7
실측	121	121	123	121	118	115	113	110	108	107	106	102	98	95	90	81	72
선형	125	125	125	121	116	113	110	108	107	105	104	101	98	94	90	81	72
구분	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	-
실측	63.5	53	40	38	46	51	58.5	69	63	47	35	31	31	45	69	91	-
선형	63	53	41	33	39	47	54	66	72	57	43	34	29	31	46	61	

[표2] 432호 선로전환기에서 429B호 선로전환기 사이의 종거 측정결과



[그림7] 인력검측과 선형검측기 결과 비교 및 레일마찰개소

1.5.2 429B호 선로전환기의 부품교체작업

사고개소 429B호 선로전환기는 [표3] 및 [그림8]의 ‘2016년 4호선 궤도시설 보수공사’ 계획에 따라 2016년11월18일 01:00~04:00까지 출고선 방향으로 좌측의 텅레일(8.85m), 기본레일(10.25m) 및 리드레일(12m)을 각각 교체하였고, 11월19일 궤간, 고저, 방향, 다짐 분기기 정정작업을 시행하였다.

구 분	내 용
공 사 명	2016년 4호선 궤도시설보수 보강공사
공사기간	2016.04.22.~2017.04.21
공사금액	1,319백만원
도 급 자	(주)무강
주요공종	레일 2.04km 교체 등

[표3] 서울지하철 4호선 궤도시설보강공사 현황



교체 전 무너지고 손상이 심했던 침단부

새로 교체된 침단부(사고개소)

[그림9] 429B호 선로전환장치의 텅레일 교체 전과 후의 모습

1.5.3 사고개소의 레일 현황

최초 레일에 차륜이 타고 오른 개소는 텅레일 시점부에서 힐부 방향으로 35cm 진입된 지점이며 이 지점을 측점 0으로 하여 전·후 5m에 대해 매 1m마다 기본 형상의 레일에 대해 마모량을 측정하였다. 측정방향은 432호 선로 전환기에서 429B호 선로전환기 방향으로 보는 것을 기준으로 좌측레일, 우측레일로 구분하였으며 측정결과, 마모 허용 값 이내에 있었다.

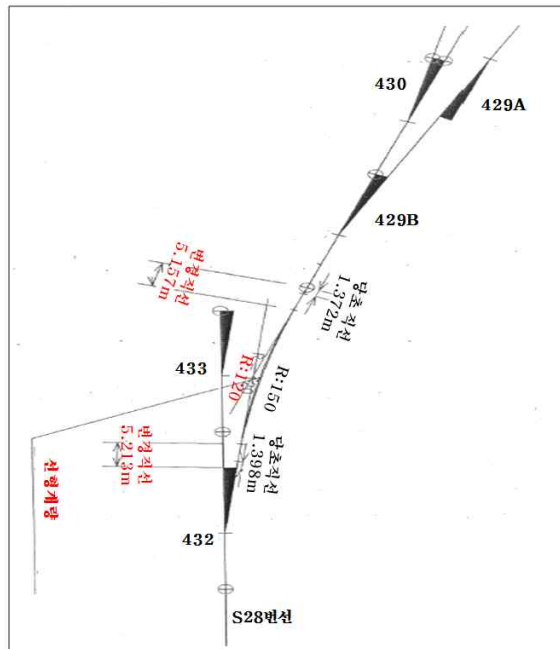
구 분	좌측레일		우측레일		비 고
	직마모 (허용값15mm)	편마모 (허용값18mm)	직마모 (허용값15mm)	편마모 (허용값18mm)	
-5m	0	1.0	1.0	0	
-4m	용설장치 간섭으로 측정곤란		1.0	0	
-3m	0	1.0	1.0	0	
-2m	0	1.0	1.0	0	
-1m	0	2.3	2.3	0	
0	텅레일이 있어 일반 마모계 이지 측정곤란		0.5	0	최초 차륜부상개소
1m			0.5	0	
2m			4.0	3.5	
3m			2.0	0	
4m			0	0.5	
5m			2.0	0.5	

[표4] 사고발생구간 부근의 레일마모 현황

1.5.4 사고구간의 선형개량

사고개소인 432호 선로전환기와 429B호 선로전환기 사이의 궤도는 2007년 4월 23일 개량이전까지 곡선반경 150m, 슬랙 15mm, 캔트 30mm와 직선길이 1.3m의 취약성을 고려하여 429B호 분기기 침단부 전방 2m부터 서행15km/h로 운전속도를 제한해 오다가 2006년 두건의 탈선사고로 선형이 개량되었다.

서울메트로는 2007년 4월 23일 [그림9]과 같이 사고구간의 곡선반경을 120m로 하고 432선로전환기와 곡선(R:120) 사이, 곡선(R:120)과 429B 선로전환기 사이에 각각 직선을 약 5.2m, 슬랙 6mm와 캔트 18mm를 부여하고 분기기는 50kgNS형에서 50kgNS I형으로 변경하였다.(서울메트로 철도공사팀-2097, 2006.12.21. 및 제2철도토목사무소-3775, 2007.04.23.)



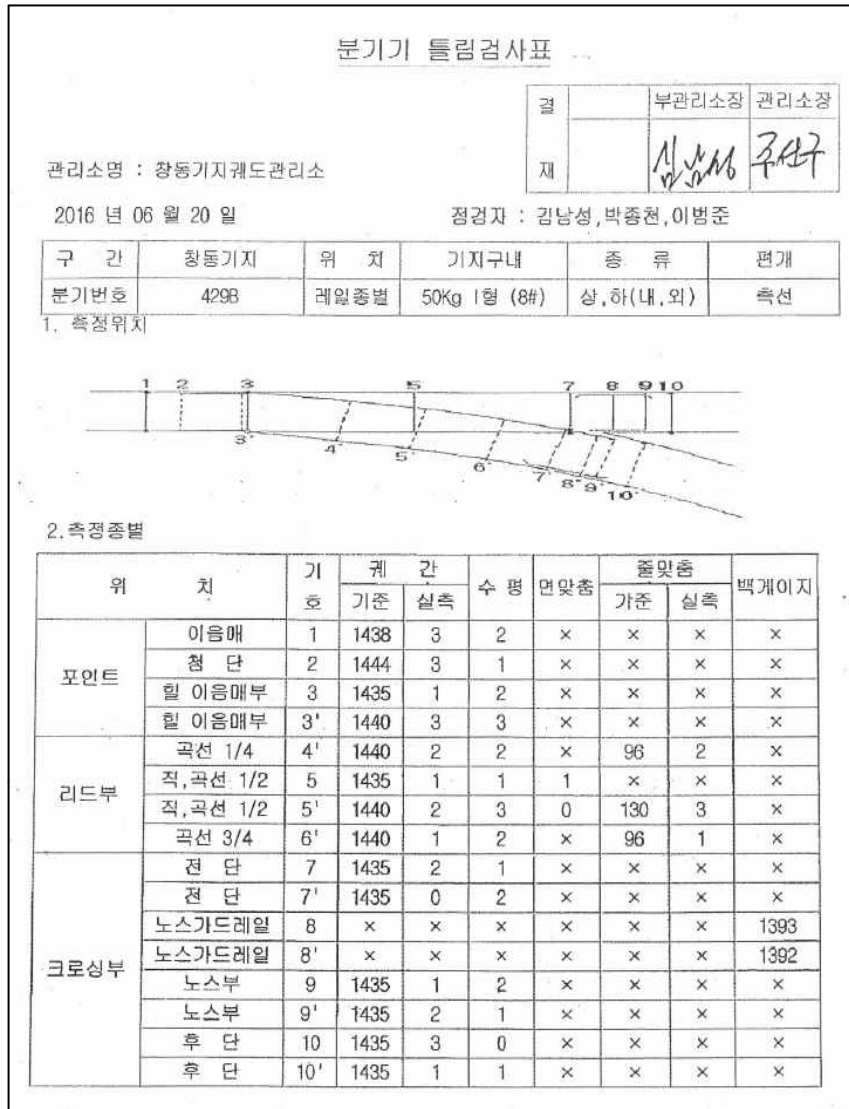
[그림10] 선형변경(철도공사팀-2097, 2006.12.21.)

개량이후 429B호 선로전환기에 부과하였던 서행 15km/h를 해제하고 열차타력운전 표식을 건식하여 429B호 선로전환기 앞부분부터 열차의 최후부가 해당분기기를 통과하는 지점까지 무동력으로 운전하도록 하는 운전제한 지시(승무팀-334, 2006.09.04.)가 사고당시까지 이어지고 있었다.

1.5.5 사고구간 선로유지보수 현황

429B 선로전환기에 대한 최근 보수이력은 2015년 11월 12일에 궤간정정 및 줄맞춤, 고저정정, 다짐작업을 시행하였고 2016년 10월 24일에 분기부 이음매 해체점검 시행한 것으로 제출된 자료를 통해 확인하였다.

선로 순회 점검은 2일 1회에 걸쳐 시행하고 있었으며 순회 구간 및 점검자가 포함된 업무일지를 작성하고 있었으며 2016년 6월 20일에는 [그림11]과 같이 분기기 틀림검사가 시행되었다.



[그림11] 429B호 선로전환기 점검기록

1.5.6 사고열차의 탈선흔적 및 탈선상태

사고열차 10호차의 앞 대차 좌측 2개 차륜(1, 3위 차륜)이 429B호 선로전환기 침단부에서 타고 올라 약 7.5m 이동 후 앞 대차 4개 차륜 모두가 진행방향 좌측으로 궤도를 이탈하여 약 46.3m를 더 진행하다가 정차 되었다. [그림12]는 타고 오른 흔적, 최초 탈선시점, 파손된 침목 및 탈선상태의 사진이다.



[그림12] 사고열차의 탈선흔적과 탈선상태

1.6 차량 정보

1.6.1 사고열차 조성

사고열차는 [TC1-M'-M'-T1-M'-T2-T1-M'-M'-TC2]로 구성되어 있었으며, 사고 당시 열차 진행방향에 따른 차호의 위치는 아래 [표5]와 같다

차종	TC1	M'	M'	T1	M'	T2	T1	M'	M'	TC2
번호	4001	4101	4201	4301	4401	4501	4601	4701	4801	4901
차호	10호	9호	8호	7호	6호	5호	4호	3호	2호	1호
사고 당시 열차 진행방향 →										

[표5] 사고 당시 열차 진행방향을 고려한 차호

1.6.2 사고열차의 제원

사고전동차는 1993년 현대정공으로부터 도입 되었으며, 직류(1,500V) 전용으로 최고 영업속도 100km/h, 출력 4,000kW의 전기동차이고, 자중은 TC차 33.1톤, M차 41.2톤, M'차 42톤, T1차 26.5톤, T2차 32톤, 차체 길이 19.5m, 차체 폭 3.12m, 높이 3.75m, 차륜직경 860mm, 열차의 전체 길이(10량 편성)는 약 200m이다.

1.6.3 사고열차의 검수현황

전동차의 검수이력을 조사한 결과 검수주기 초과 등의 문제는 발견되지 않았다. 사고열차의 정기검수³⁾ 내역은 [표6]과 같다. 사고열차는 2013년 11월 전반검사를 마쳤으며 2016년 9월에 월상검사를 마치고 출고하였다.

3) 정기검수(定期檢修, regular inspection and repair) : 철도차량을 사용기간 및 주행거리에 따라 각 장치의 전반 또는 부분에 대하여 정기적으로 시행하는 검사 및 수선

신조도입	일상검사 (3일)	월상검사 (3개월)	중간검사 (2년)	전반검사 (4년)
'93	'16. 11.18.	'15.9.11. '15.12.10. '16.3.10. '16.6.7. '16.9.7.	'10.12.22.~ '11.1.17.	'13.11.15.~ 12.23.

[표6] 사고열차 종별 검수이력

1.6.4 사고열차 현수장치 교체실적

사고열차의 차륜삭정 및 교체이력은 [표7]과 같다.

차호	작업일	삭정한 축
1호(4901)	2016.10.22.	1번, 2번, 3번, 4번 축
7호(4301)	2016.11.19.	1번, 2번, 3번, 4번 축
10호(4001)	2016.10.23.	1번, 2번, 3번, 4번 축

[표7] 사고열차 차륜삭정 및 교체이력

[표 8]과 같이 1차 스프링과 공기스프링은 중간검사 또는 전반검사 시 신 품으로 교환한 것이 확인되었다.

『4호선 VVVF 전동차검사 시행요령』에는 공기스프링과 1차 스프링의 정기검사 시 공기스프링 표면의 흠, 마모, 박리 등의 결함과 완충고무 접촉부 균열 등 외부 결함 발견 시 제품을 교환토록 되어 있을 뿐 특성 값 측정시험을 통해 부품을 교체하거나 내구 연한을 설정한 규정은 없었으나 2010년 4월 11일 과천선 범계~금정역 구간에서 발생한 탈선사고 이후 1차 스프링과 공기스프링은 특성 값이 설계기준 이내로 유지되도록 내구 연한을 설정하여 시행중인 것이 확인되었다.

차호	점 검 일	조치내역
0호, 5호, 9호	2010.12.22.~2011.1.17.(중간검사)	1차스프링 량당 16개 교체
3호, 6호	2013.11.25.~12.23.(전반검사)	1차스프링 량당 16개 교체
1호, 2호, 4호, 7호, 8호	2013.11.25.~12.23.(전반검사)	공기스프링 교체

[표8] 사고열차 1차 스프링 및 공기스프링 교체실적

1.6.5 차륜측정

[그림13]과 같이 사고차량의 차륜 직경 및 플랜지 치수를 측정하였으며 그 결과는 [표9]와 같다.



[그림 13] 차륜 직경 및 플랜지 치수 측정

차호	차측 번호	차륜 직경 (삭정 한도 780mm)		플랜지 두께 (34~23mm)		플랜지 높이 (25~35mm)	
		왼쪽 차륜	오른쪽 차륜	왼쪽 차륜	오른쪽 차륜	왼쪽 차륜	오른쪽 차륜
10호(4001)	1	821	821	31	28	26	26
	2	821	821	33	32	26	27
	3	821	821	30	31	26	26
	4	820	820	28	27	26	26

[표9] 차륜 치수 측정결과

1.6.6 축상고의 측정결과

[그림14]와 같이 차량의 축상고를 측정한 결과는 [표10]과 같다



[그림14] 축상고 측정

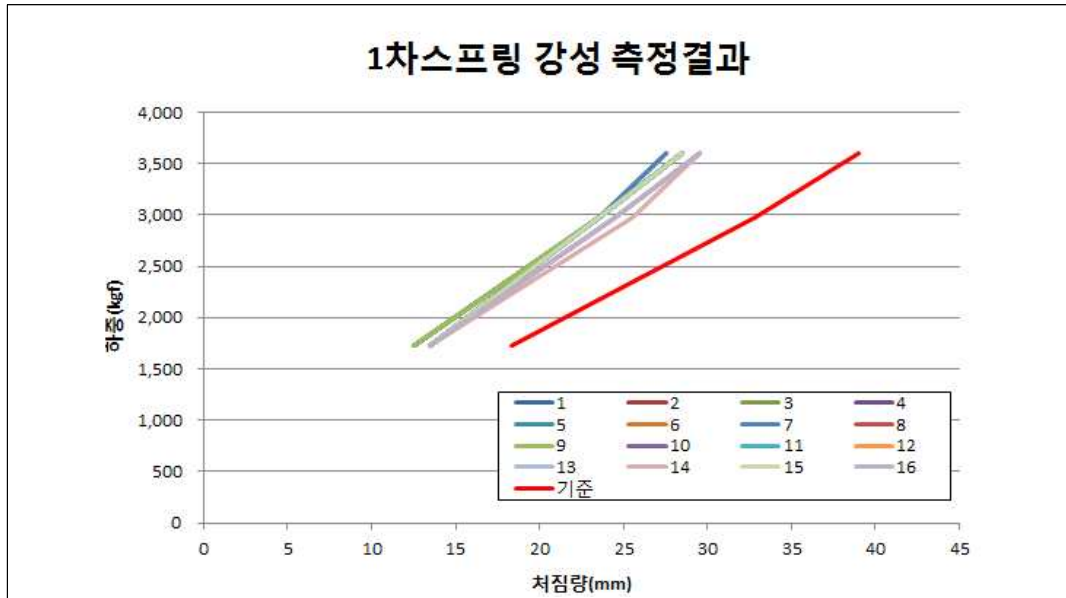
차호	차종	차측	측상고_좌	측상고_우	대차내 높이차
1호(4901)	TC2	10-1	45.2	44.9	1.5
		10-2	46.4	45.2	
		10-3	41.9	43.5	2.7
		10-4	43.5	44.6	
2호(4801)	M'	9-1	45.4	46.6	1.3
		9-2	45.3	46.3	
		9-3	45	45.6	2.7
		9-4	47	44.3	
3호(4701)	M'	8-1	47.7	46.6	2.5
		8-2	47.2	45.2	
		8-3	43.4	48.5	5.1
		8-4	46.1	45.4	
4호(4601)	T1	7-1	45.4	45	0.5
		7-2	45.2	44.9	
		7-3	44.6	44.7	0.9
		7-4	44.4	45.3	
5호(4501)	T2	6-1	44.2	45.5	1.3
		6-2	45.3	44.9	
		6-3	44.9	45.2	0.4
		6-4	44.8	45.1	
6호(4401)	M'	5-1	45.2	44.7	1.7
		5-2	46.4	45.3	
		5-3	44.8	45.2	1.4
		5-4	44.7	46.1	
7호(4301)	T1	4-1	46.4	44.9	1.5
		4-2	45.4	44.9	
		4-3	44.6	45.8	1.2
		4-4	44.7	44.8	
8호(4201)	M'	3-1	44.8	45.9	1.1
		3-2	45.3	44.8	
		3-3	45.4	45.2	0.7
		3-4	45.5	44.8	
9호(4101)	M'	2-1	46	44.7	1.9
		2-2	46.6	45.8	
		2-3	44.5	46.4	3
		2-4	45.4	43.4	
10(4001)	TC1	1-1	44.6	43.2	1.4
		1-2	43.4	43.8	
		1-3	43.4	47.2	3.8
		1-4	44.9	45.8	

[표10] 측상고 측정결과 (mm)

(기준: 높이 45±5mm, 한 대차내 높이차 2mm 이내)

1.6.7 1차 스프링 강성측정값

사고차량의 1차 스프링 강성을 측정한 결과가 [그림15]와 같으며, 수직하중 1,722kgf일 때의 스프링 강성을 계산하면 [표11]과 같다



[그림15] 1차스프링 강성 측정결과

번호	스프링계수 (kgf/mm)	설계치 대비 증가율	번호	스프링계수 (kgf/mm)	설계치 대비 증가율
1	137.8	46%	9	137.8	46%
2	127.6	36%	10	127.6	36%
3	137.8	46%	11	127.6	36%
4	127.6	36%	12	127.6	36%
5	127.6	36%	13	127.6	36%
6	137.8	46%	14	127.6	36%
7	137.8	46%	15	127.6	36%
8	127.6	36%	16	127.6	36%

[표11] 스프링 강성 측정결과 (설계치: 94.1kgf/mm)

사고열차에 장착된 1차 스프링의 현황은 [표12]와 같았다.

1차 스프링 종류	차종	비고
롤고무 타입 (M차용)	M' (2, 3, 6, 8, 9호차)	
코니컬스프링 타입 (M차용)	TC1(10호차), TC2(1호차), T2(5호차)	보조전원장치 장착차량
코니컬스프링 타입 (T차용)	T1(4, 7호차)	

[표12] 1차 스프링 장착 현황

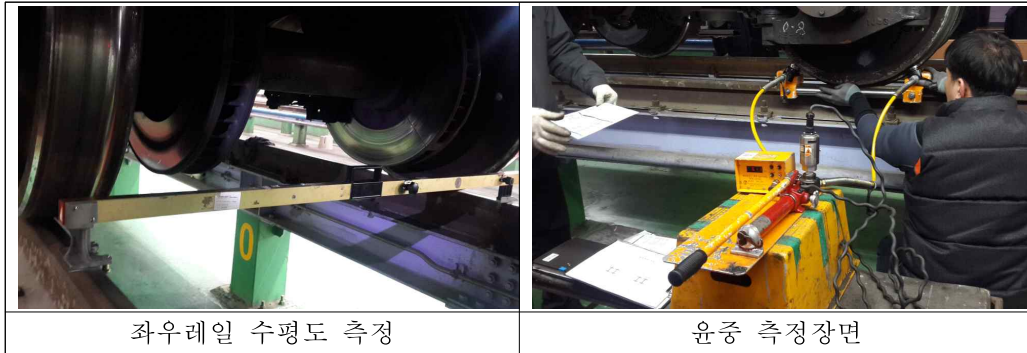
타고오름이 발생한 지점의 정적 선형궤도검측결과를 이용하여 10호차 (TC1)에 대한 윤중감소율을 계산한 결과는 아래 [표13]과 같다.

비틀림(3m): 13mm	스프링 강성(M차용) kgf/mm		스프링 강성(T차용) kgf/mm
	설계치	측정치	설계치
	94	138	85
윤중감소율	0.27	0.37	0.25

[표13] 윤중감소율 계산 결과

1.6.8 사고차량 및 동일형식 차량의 윤중측정

사고차량(10호차) 및 사고차량과 동일한 형식의 차량(TC)인 1호차의 윤중을 측정하였다. 10호차는 사고 이후 1차 스프링을 신품으로 교체하였고 축상고를 조정(±45mm)한 상태였고, 1호차는 사고 이후 수선을 하지 않은 상태였다. 윤중측정은 [그림16]과 같이 지축기지 검수고 내에서 좌우 레일의 수평도가 0인 지점에서 측정하였다.



[그림16] 윤중 측정 장면

10호차의 윤중 측정결과는 [표14]와 같으며 최대 좌우 윤중비는 약 ±9%로 나타났습니다. 1호차의 윤중 측정결과는 [표15]와 같고 최대 좌우 윤중비는 약 ±7%로 나타났습니다.

	1축	2축	3축	4축
우측(R)	3.74	3.86	4.64	4.44
좌측(L)	4.27	4.32	3.9	3.88
평균	4.01	4.09	4.27	4.16
윤중비%(L)	6.6%	5.6%	-8.7%	-6.7%

[표14] 윤중 측정결과 (10호차)

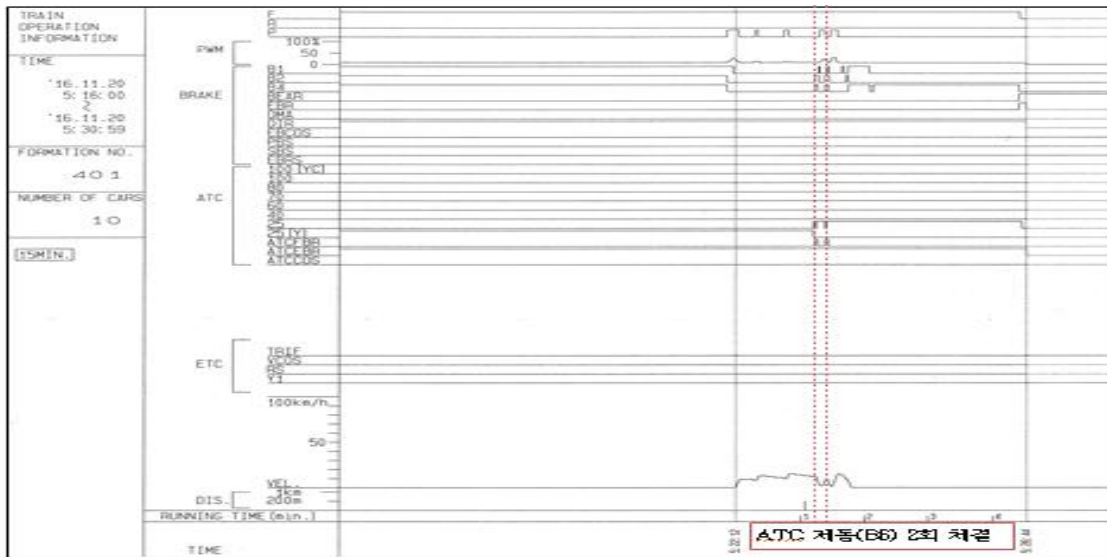
	1축	2축	3축	4축
우측(R)	4.11	4.4	3.57	3.81
좌측(L)	4.04	3.88	4.12	4.02
평균	4.08	4.14	3.85	3.92
윤중비%(L)	-0.9%	-6.3%	7.2%	2.7%

[표15] 윤중 측정결과 (1호차)

1.7 운행정보기록, 연동장치 기록 및 무선통화내용

1.7.1 사고열차의 운행정보기록

사고열차는 [그림17]과 [표16]에 의하면 5시23분경 출발하여 15km/h이하로 운행 중 5:24:15경 1차 ATC제동 후 완해되어 운행하였으며, 5:24:25경 2차로 ATC제동 후 완해되어 운행 중 5:24:35경 차량의 AIR Spring Puncture 정보 발생으로 5:24:50경 기관사가 제동을 체결하여 정차하였다.



[그림17] 사고열차 운행기록 그래프

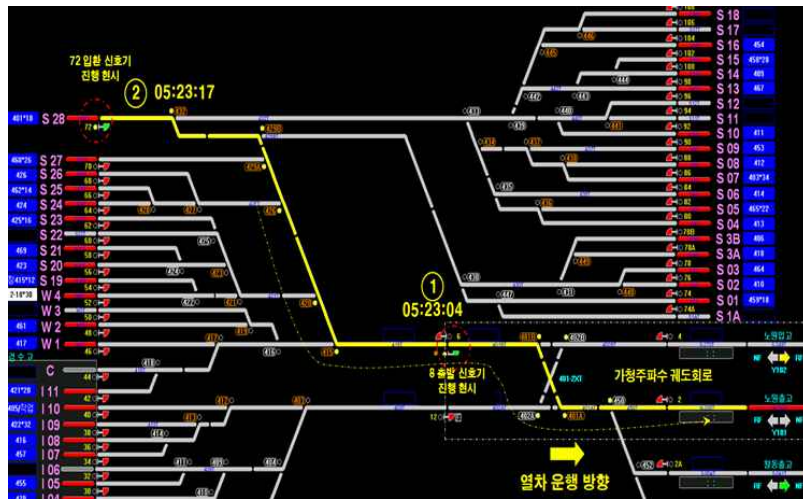
기록시간 (현차시간)	보정시간 (기록+50초)	속도 (km/h)	내용	4901호 (운전실)	4001호 (탈선차량)	비고
05:22:10	05:23:00	0→2	열차출발	역행4(27%)		
05:22:15	05:23:05	7~9	타행			
05:22:30	05:23:20	8~9	역행	역행(13%)		
05:22:33	05:23:23	11~13	타행			
05:22:57	05:23:47	10~12	역행	역행(13%)		
05:23:01	05:23:51	10~15	타행			
05:23:25	05:24:15	12→4	제동	6step ⁵⁾		ATC 1차 제동
05:23:30	05:24:20	2~5	역행	역행(13~23%)		
05:23:35	05:24:25	8→6	제동	6step		ATC 2차 제동
05:23:40	05:24:30	2~12	역행	역행(13~28%)		탈선 추정
05:23:45	05:24:35	10	역행	역행(28%)	AS Puncture	공기스프링 펑크
05:23:47	05:24:37	15→10	타행			
05:23:55	05:24:45	10	제동	수동(2step)		
05:23:57	05:24:47	7	제동	수동(5step)		
05:24:00	05:24:50	0	열차정차			

[표16] 사고열차 운행정보 분석표

4) 역행 기본값(0단)은 8%이며 1단은 23%, 4단은 56%로 최대값임.
 5) 6Step : 제동Step이란 1~7Step까지 있으며, ATC에 의한 제동체결은 6Step이다.

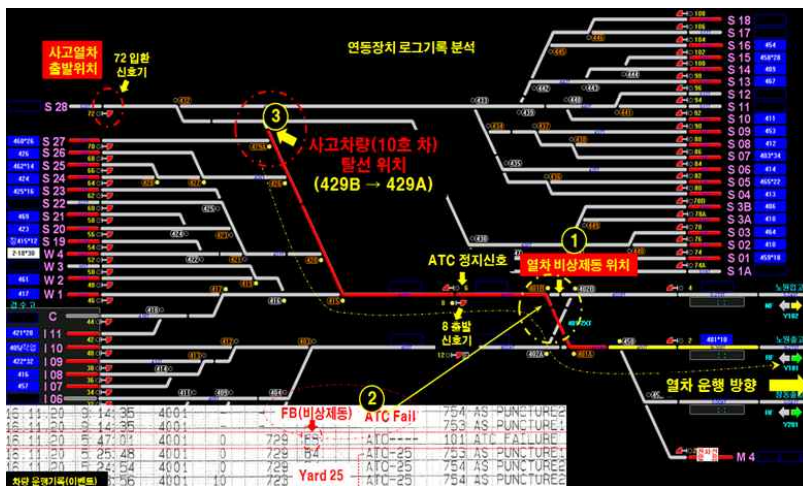
1.7.2 연동장치기록(신호진로 설정)

[그림18]과 같이 사고열차를 출고시키기 위해 신호취급자가 5시 22분 13초경 본선구간 8번 출발신호기 진로를 설정하여 5시 23분 4초경 진행신호를 출력하였고, 5시 23분 9초경에 기지구내 72번 입환신호기 진로를 설정하여 5시 23분 17초경에 진행신호를 정상 출력하였다.



[그림18] 사고열차 출발을 위한 진로설정

5시 23분 17초경 사고열차는 기지구내 72번 입환신호기 진행신호에 의해 출발하였고, 5시 25분 13초경 본선 구간 8번 출발신호기를 통과하여 401AT로 운행 중, [그림19]의 ①, ②와 같이 차상 신호장치에서 무신호 수신에 의한 경고음이 발생하여 비상제동을 체결, 사고열차를 정차시켰다.



[그림19] 사고열차 비상제동 체결 위치 및 차상장치 로그파일

1.7.3 무선통화 내용

시 각	통 화 자	통 화 내 용
05:01:48	4910기관사	S12번 401편성 시험하겠습니다.
	기지관제	네 S12번 401편성 시험하세요.
05:02:27	4910기관사	관제 S12번 4910열차 401편성 신호진로 확인 28번 인상하겠습니다.
	기지관제	401편성 신로진로 확인 28번 인상하세요.
05:24:59	4914기관사	타워 나와 보세요. 4914 타워 나와 보세요. 이상
	기지관제	타워 이상
	4914기관사	지금 출고 차 그게 지금 나갔는데 굉장히 뒤가 흔들리는데 그거 좀 확인해야겠는데
	기지관제	차가 흔들린다고요?
	4910기관사	관제이상
	기지관제	네 말씀하세요.
05:26:29	4910기관사	출고 차 401편성 후부에서 차장이 심하게 요동친다고 합니다. 이상 그리고 현재 에어스프링 처치 컷 아웃 들어왔습니다.
	기지관제	401편성 기지 이상
	4910기관사	401편성 이상
	기지관제	운행 하는 데는 문제 있죠?
	4910기관사	네 지금 문제 있습니다.
	기지관제	그러면 운전실 빨리 바꾸셔서 28번에 집어넣고 26번에 462편성을 차주세요
05:26:53	4910기관사	네 운전실 바꾸겠습니다.
	4910기관사	기지이상
	기지관제	네 말씀하세요.
	4910기관사	네 후부차장이 그러는데 탈선입니다. 탈선 후부로 가보겠습니다
05:27:28	기지관제	탈선 아닌데요.
	4910기관사	검수원 불러 주세요. 이상
	기지관제	차 공기 스프링 안 좋아요.
	4910기관사	후부로 가볼텐데 검수원 보내주세요 이상
05:29:32	기지관제	일단은 28번에 유치시키고 26번 462로 바꿔 타세요.
	4910기관사	관제 출고열차 401편성 이상
	기지관제	401편성 28번으로 들어가세요. 그대로 들어가세요.
	4910기관사	아 탈선이에요 탈선
05:45:00	기지관제	예?
	4910기관사	탈선이에요 탈선 검수원 보내주세요 이상
	4922기관사	4922(465)편성 이상
	관제	관제 이상
	4922기관사	예. 이거 지금 인상해야 되는 거 아녜요?
	관제	그거 지금 차가 못 나가고 있거든요. 인상 안 해도 되요. 지금 앞 차가 못 나가고 있어요.
	4922기관사	원인이 뭐예요?
	관제	뒤차 맨 뒤 칸이 떨어졌어요. 맨 뒷 칸이 떨어졌다고요.
4922기관사	뭐가 떨어졌다고요.	
05:45:00	관제	탈선~, 뭐가 떨어졌어요. 이탈 됐어요.
	4922기관사	아, 알았습니다.

[표17] 사고시간 무선통화내용

1.8 전기·신호 분야

1.8.1. 전기(전차선) 설비

사고 구간의 가선전압은 직류 1,500V이며 전차선은 심플커터너리방식으로 구성하여 전동열차에 전원을 공급한다. 사고열차의 탈선 차량이 집전장치기 없어 전차선 및 전기설비에 피해가 없었다.

1.8.2. 신호 설비

사고구간은 상용주파수 궤도회로⁶⁾와 가청주파수 궤도회로⁷⁾(3.2khz~16.8khz)를 사용하여 열차를 검지하고, 전자연동장치에 의해 신호기와 선로전환기를 제어하는 구간이다.

사고열차는 72번 입환신호기 진행신호로 출발하였고, 5:25:13경 본선 구간 8번 출발신호기를 통과하여 401AT로 진입 중, 차상 신호장치에 ATC무신호가 수신되면서 비상제동으로 정차된 후 다시 ATC신호가 발현되어 출발하다가 탈선되었다.

1.9 날씨와 기상

사고당일 서울북부지방의 기상상황은 아침최저 기온이 11.7℃ 이었으며, 사고시간대인 05:00~07:00까지 대기온도는 11.0℃에서 11.5℃이었고, 습도는 55%에서 57%로 날씨가 맑았다.

6) 상용주파수 궤도회로 : 가정에 사용하는 교류 110V~220V 60hz과 같이 60hz의 교류전원을 사용하여 레일에 전기회로를 구성하여 열차의 위치를 검지하며, 주로 차량기지 등에 사용함 열차가 상용주파수 궤도회로를 통과하여 가청주파수 궤도회로에 진입할 때 지상 신호장치로 부터 운전방식과 제한속도코드를 수신하여 차내 신호장치(ATC:Automatic Train Control)에 표출한다. 기관사는 차내신호장치가 제시하는 속도이하로 운전을 해야 하며, 제한속도를 초과할 경우 비상제동이 체결됨.

7) 사람이 들을 수 있는 주파수(20hz~20kHz)를 사용하여 열차의 위치를 검지하며, 열차제어를 위한 각종 정보를 레일을 통하여 차량으로 전송함.

2. 분석

2.1 관계자 업무 분석

2.1.1 사고열차기관사의 업무 분석

사고열차의 기관사는 출고 중 운전속도를 최고속도 15km/h이하로 운전하여 속도(제한속도 25km/h이하)초과는 없었으며, 창동기지 출고선의 8번 신호기 통과 중 ATC무신호에 의한 제동체결 후 다시 진행하다가 사고차량의 AS Puncture 정보발생으로 사고열차를 정차시키고 기지관제에 사실을 통보하고 열차상태를 확인한 기관사의 업무수행에서 소홀함은 없었던 것으로 분석되었다.

2.1.2 현장대리인과 작업책임자의 업무분석

현장대리인과 작업감독자는 2016년 11월 18일 1시에서 4시까지 창동기지 429B호 분기기의 출고선 방향좌측의 텅레일, 기본레일 및 리드레일을 교체하고 11월19일 궤간, 고저, 방향, 다짐 분기기 정정작업을 시행하였다.

현장대리인은 레일교환 시 곡선반경에 맞게 (주)삼표에서 제작된 제품을 설치하였으며, 작업사항은 현장에 일임하였고, 교체 후 확인 사항은 현장에서 측정하였는데 측정 결과기록에 대하여 서울교통공사 감독이 입회하고 있어 시공사에서는 기록하지 않는다고 하였다.

작업감독자는 429B호 선로전환기 좌측의 텅레일, 기본레일, 리드레일을 직선분기기에 해당하는 부품을 사용하여 작업을 완료하고 궤간, 수평, 리드레일의 종거 등이 포함된 분기기 검측 기록지를 작성하였으며, 작업개소의 곡선 검측은 하지 않은 것으로 확인 되었다.

2.2 선로상태의 적정성 분석

2.2.1 선형개량 적정성여부 분석

건설 당시 432호와 429B호 선로전환기 사이에 [그림10]과 같이 곡선반경을 150m로 부설한 후 개선안으로 120m의 급곡선을 설치한 시공은 건설 당시에는 『서울특별시 지하철도 건설규칙』(교통부령제679호, 1980.09.20.공포.) 제10조(곡선의 반경)⁸⁾에 분기부대인 경우 1~4호선 모두 145m로 정하고 있어 이를 준용, 150m로 부설한 것으로 판단되었다.

곡선반경 120m의 개선안은 『선로정비규정』(서울메트로 2014월 12월 24일 개정.) 제2조(정의) 제8항에 ‘분기부대곡선’이라 함은 ‘분기 내에 포함되어 있는 리드곡선과 분기기 전후에 이루어지는 곡선을 말한다.’라고 규정으로 볼 때, 432호 선로전환기와 429B호 선로전환기 사이의 곡선은 분기부대곡선으로 최소곡선반경 145m이상이어야 하므로 적절치 못하였다.

[그림10]처럼 건설당시 432호 선로전환기와 곡선반경 150m 사이, 곡선반경 150m와 429B호 선로전환기 사이에 각각 1.4m의 직선을 삽입한 후 2007년 개량 시에 곡선반경을 120m로 조정하고 각각 5.2m의 직선을 설치하면서 [표18] 도시철도건설규칙에서 정한 검토를 소홀히 한 것으로 판단되었다.

429B호 선로전환기 첨단 전방에 삽입된 직선에서 곡을 급변화에 의한 횡압이 크게 작용하여 공격 각이 큰 분기부의 텅레일 시점부에서 타고 오름 탈선이 발생한 것으로 판단되었다.

8) 제10조(곡선의 반경) : ① 선로의 곡선반경을 다음의 크기 이상으로 한다. (단위 : m)

구분		1호선	2호선	3,4호선	비고
정거장외 본선	일반의 경우	160	180	250	
	부득이한 경우	135	140	180	
정거장 내 본선		400	400	400	
측선		120	120	120	
분기부대		145	145	145	

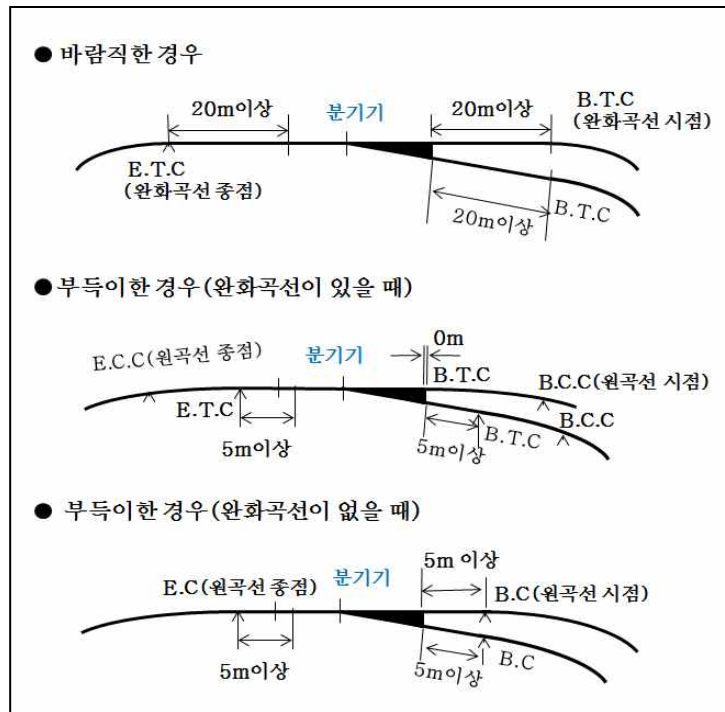
② 원형곡선의 순원부 길이는 20m 이상이다.

서울특별시 지하철도 건설규칙(1980.09.20.)	도시철도건설규칙(2004.12.04.)
<p>제11조(칸트) ① ~. 다만, <u>분기부에 부대되는 곡선인 경우에는 그러하지 아니한다.</u></p>	<p>제11조(칸트) ① ~. 다만, <u>분기부에 연속되는 곡선의 경우에는 그러하지 아니한다.</u></p>
<p>제13조(완화곡선) ①본선의 경우에 곡선 반경이 800미터 이하인 곡선과 직선이 접속하는 곳에는 상당한 완화곡선을 삽입하여야 한다. 다만, <u>분기부에 부대되는 곡선에서는 그러하지 아니한다.</u></p>	<p>제13조(완화곡선) ①본선의 경우에 곡선 반경이 800미터 이하인 곡선과 직선이 접속하는 곳에는 상당한 완화곡선을 삽입하여야 한다. 다만, <u>분기부에 부대되는 곡선에서는 그러하지 아니한다.</u></p>
<p>제14조(직선의 삽입 등) ① 본선에 있어서 인접한 2곡선 간에는 칸트체감 후에 20미터 이상의 직선을 삽입하여야 한다. ② 제1항의 규정에 의한 직선을 삽입할 수 없는 경우에는~ ③ <u>분기에 부대할 경우와 측선에 있어서는 제1항 및 제2항의 규정에 의하지 아니할 수 있다.</u></p>	<p>제14조(직선의 삽입 등) ① 본선에 있어서 인접한 2곡선 간에는 칸트체감 후에 20미터 이상의 직선을 삽입하여야 한다. ② 제1항의 경우에 반대방향의 2개 곡선인 선로가~ ③ 제1항 및 제2항의 규정에 불구하고 <u>분기부에 부대하는 경우와 측선의 경우로서 안전에 지장이 없는 경우에는 직선을 삽입하지 아니하거나 제2항의 기준과 다른 복심곡선으로 할 수 있다.</u></p>

[표18] 선형관련 당시 적용한 규칙 비교

국내 정거장선로배선연구회에서 발간한 ‘정거장선로배선 핸드북’과 일본의 ‘신간선 궤도시설에 관한 실시설계 규정(2002.08)’ 제6조에서 분기기와 곡선사이에 설치할 직선길이는 [그림20]과 같으며, 사고구간에서 개선안으로 적용한 방안은 부득이한 경우(완화곡선이 없을 때)에 해당된다.

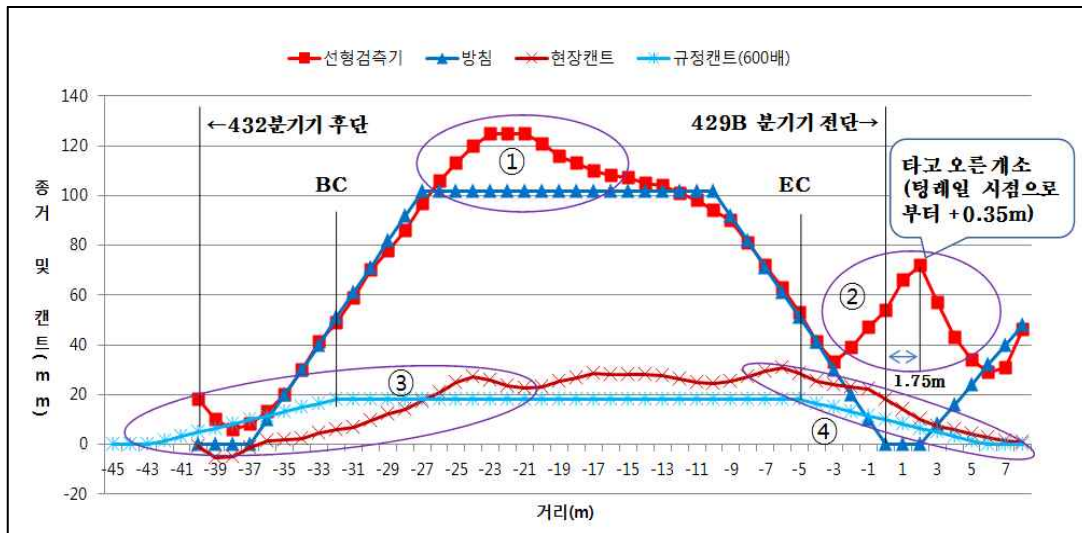
따라서 현재 적용되고 있는 도시철도건설규칙을 따를 경우 곡선반경 145m에 직선이 삽입되지 않고 바로 분기기의 텅레일에 접속되도록 설치될 수 있으므로 [그림20]과 같이 직선 최소연장을 도시철도건설규칙 등에 정함으로서 탈선의 위험을 저감 시킬 수 있을 것으로 분석되었다.



[그림20] 분기기와 직선 사이에 설치할 직선길이

432호 선로전환기와 429B호 선로전환기 사이의 120m 곡선반경의 정상적인 종거량은 104mm이고 유지보수기준의 허용오차 $\pm 11\text{mm}$ 를 고려하면 89~115mm 범위에 있어야 하나 [그림21]의 ①에서 보는바와 같이 -18~-25측점 사이에서 기준을 초과한 125mm로 관리되고 있었으며 이때의 곡선반경은 100m에 해당되므로 더욱 선형조건이 좋지 않은 상태였다.

또한 429B호 선로전환기의 텅레일 시점부분에서 계획과 달리 곡선형태가 [그림21]의 ②와 같아 졌는데 그 종거량은 69mm(현장 측정, 선형검측기인 경우 71mm)였다. 이러한 방향틀림은 원화곡선 없이 원곡선에서 바로 직선으로 열차가 운행되면서 곡률의 급변화로 생성되며, 직선구간에 설치한 가드레일에 횡압이 가해졌다가 가드레일이 없는 텅레일 시점부로 이동하면서 차륜과 레일간의 횡동유간 17mm(1,448-(31+1,355+45))의 횡방향 충격하중이 궤도강성이 약한 텅레일에 반복적으로 가해져 방향틀림이 [그림22]와 같이 발생하여 공격각이 크게 작용함으로써 차륜 부상 조건을 만든 것으로 판단되었다.



[그림21] 사고개소의 곡선 종거와 켄트설정상태



[그림22] 사고개소의 방향틀림

사고개소의 설정켄트는 건설 당시 30mm에서 개선안으로 18mm로 낮추었으나 [그림21]의 ③과 ④에서 보듯이 30mm를 유지하고 있었다. 이는 개선안을 반영하면서 선로를 낮추는 작업을 하지 않았거나 유지관리 과정에서 낮추어진 켄트를 원 상태로 높인 것으로 보인다.

‘정거장선로배선 핸드북’에 분기곡선이라 함은 ‘분기기 자체에 들어간 곡선과 그 전·후에 들어간 곡선 모두를 포함한 것이며 분기부대곡선이 일반 곡선과 틀린 점은 켄트가 붙어있지 않은 것, 완화곡선을 갖고 있지 않은 것, 슬랙의 체감방법이 틀리다는 것’이라고 되어 있으며 도시철도건설규칙에서도 분기기에 부대되는 곡선에는 켄트를 설치하지 않도록 되어 있으나 사고개소의 경우 약 30mm정도의 켄트가 부설되어 있었다.

또한 캔트체감은 432호 선로전환기 부근인 경우 [그림21]의 ③과 같이 분기 후단에서 시작하여 원곡선 시점(BC)을 지나 6m 더 들어간 지점까지 체감구간을 확보함으로써 432호 선로전환기에 캔트체감구간이 포함되지 않도록 하였다. 반면에 429B호 선로전환기 부근인 경우 [그림21]의 ④와 같이 도시철도건설규칙 제12조(캔트의 체감거리) 2항에 의거 원곡선 종점(EC)으로부터 429B호 선로전환기 방향으로 캔트량(18mm)의 600배인 10.8m를 확보하여 429B호 선로전환기의 힐부까지 캔트가 부설되어 체감되고 있었다.

분기부대곡선에는 캔트를 부설하지 않도록 규칙에 되어 있으나 부득이 캔트를 부설하고 캔트를 체감할 때에는 [그림21]의 ③과 같이 직선구간에서 캔트 체감을 종료시키고 선로전환기에는 영향을 주지 않도록 하여야 할 것으로 분석되었다.

432호 선로전환기 후단에서 429B호 선로전환기 전단 사이의 곡선에 탈선 방지레일이 [그림23]과 같이 설치되어 있었다.



[그림23] 탈선방지 가드레일 설치 현황

선로정비규정 제36조의 2(레일 측마모 및 탈선방지 가드레일)에 의하면 ‘후랜지 웨이 간격을 65mm로 하고 그 양단 끝부분은 150mm이상의 길이를 깔데기형으로 구부려서 끝부분은 본선레일에 대하여 85mm이상의 간격이 되도록 하여야 한다.’로 되어 있다. 반면에 제36조(탈선방지레일)에서는 ‘후랜지 웨이 간격을 65mm에 슬랙을 가한 치수로 부설하며 그 양단 끝부분은 300mm이상의 길이를 깔데기형으로 구부려서 끝부분은 본선레일에 대하여 200mm이상의 간격이 되도록 하여야 한다.’로 되어 있다.

사고 현장에서는 선로정비규정 제36조의 2(레일 측마모 및 탈선방지 가드레일)에 의거 탈선방지 가드레일이 설치되어 있으나 [그림23]에서 보는 바와 같이 끝단 부분이 너무 짧아 완충구간 없이 바로 가드레일에 작용한 횡압이 바로 429B호 선로전환기의 텅레일부에 충격하중이 발생하는 결과를 초래한 것으로 보인다. 따라서 선로정비규정 제36조의 2(레일 측마모 및 탈선방지 가드레일)에 대하여 분기기와 연결되는 경우에 대한 안전성을 검토하고 제36조(탈선방지레일)와의 관계를 정립할 필요가 있는 것으로 분석되었다.

2.2.2 궤도시설보강공사(429B호 선로전환기) 적정성 검토

‘2016년 4호선 궤도시설보수 보강공사’ 계약관련 서류에 포함된 ‘공사지침서’의 ‘서. 분기부 보수’에 분기기 궤간 및 줄맞춤은 공사감독관의 지시에 따라 시행토록 되어 있으며 현장에서는 [그림11]과 같이 분기기 틀림 검사표에 의한 검측만 시행하였기 때문에 [그림21]의 ②와 같이 텅레일부에 있는 방향틀림을 확인하지 못하고 작업을 시행한 것으로 판단된다.

분기기를 갱환하거나 일부 부속품을 교체할 때에는 분기기 전체에 대하여 교체 전·후의 궤도틀림을 측정하도록 계약관련 서류에 명확하게 명시할 필요가 있는 것으로 분석되었다.

2.2.3 선로유지관리의 적정성 검토

사고현장인 차량기지는 선로검사 내규(서울메트로, 내규 제721호, 2014년 12월 24일 개정. 이하 “선로검사내규”라 한다.)의 제7조(인력궤도틀림검사)에 차량기지 측선구간(분기기포함)은 연 1회 측정하고 유치선은 2년 1회 시행토록 되어 있으며 틀림검사 방법은 인력 또는 궤도선형검측기를 활용하여 검사토록 되어 있다. 또한 분기기의 궤도틀림 검사는 제8조(분기기 인력궤도틀림검사)에서 정한 서식에 의해 작성토록 되어 있다.

사고현장에서 궤도틀림검사는 1.4.2 사고구간 선로유지보수 현황에서 언급한 바와 같이 429A/B 선로전환기에 대하여만 2016년 6월 20일 검사한 것으로 파악되었다. 사고열차가 운행한 구간인 S28선~432호선로전환기~곡선(R:120)~429B호선로전환기~429A선로전환기 구간에 대하여 선로검사 내규 제7조(인력궤도틀림검사)의 검측방법인 인력 또는 궤도선형검측기를 활용한 검사결과를 요청하였으나 제출받지 못하였다. 따라서 사고열차가 운행한 구간에 대하여 궤도틀림검사가 내규대로 시행되지 않은 것으로 판단된다.

선로 순회는 선로검사내규 제21조(선로 순회의 주기)에 2일 1회 순회와 선로 검사내규 제22조(순회보고 및 확인)에 의거 순회결과를 전산시스템에 등록하도록 되어 있으며 이를 준수하고 있었다.

2.3 차량관련 사항의 분석

2.3.1 검수현황의 분석

전동차의 검수이력을 조사한 결과 검수주기 초과 등의 문제는 발견되지 않았으나 1차 스프링과 공기스프링은 중간검사 또는 전반검사 시 신품으로 교환한 것이 확인되었다.

『4호선 VVVF 전동차검사 시행요령』에는 공기스프링과 1차 스프링의 정기검사 시 공기스프링 표면의 흠, 마모, 박리 등의 결함과 완충고무 접촉부 균열 등 외부 결함 발견 시 제품을 교환토록 되어 있을 뿐 특성 값 측정시험을 통해 부품을 교체하거나 내구 연한을 설정한 규정은 없었으나 2010년 4월 11일 과천선 범계~금정역 구간에서 발생한 탈선사고 이후 1차 스프링과 공기스프링은 특성 값이 설계기준 이내로 유지되도록 내구 연한을 설정하여 시행중인 것이 확인되었다.

2.3.2 차륜 치수관련 사항의 분석

사고차량의 차륜 직경과 플랜지 치수를 측정한 결과 [표9]에서 차륜 직경, 플랜지 두께 및 플랜지 높이는 모두 기준치 이내인 것으로 확인되었으며, 차륜 내면간 거리 측정결과도 모든 차축에서 기준치 이내임이 확인되었다.

2.3.3 축상고 측정 결과의 분석

사고열차의 축상고를 측정한 결과 [표10]과 같이 모든 차축에서 축상고 기준치를 만족하고 있으나 총 20개의 대차 중 6개의 대차에서 한 대차내 높이 차에 대한 기준(2mm 이내)을 만족하지 못하고 있었다.

2.3.4 1차 스프링 강성 측정결과에 대한 분석

사고차량의 1차 스프링 강성을 측정한 결과 [그림14]와 수직하중 1,722kgf 일 때의 스프링 강성을 계산한 [표11]에서 알 수 있듯이 모든 스프링이 설계

치 보다 30% 이상 증가한 것을 알 수 있다.

타고오름이 발생한 지점의 정적 선형궤도검측결과를 이용하여 10호차 (TC1)에 대한 윤중감소율 계산한 결과 [표13]에 의하면 10호차에 M차용 스프링을 장착할 경우의 윤중감소율은 T차용 스프링을 장착할 경우 보다 증가하나 그 차이는 미미하며 (0.25 -> 0.27), 이 보다는 스프링이 노후화 되면서 강성이 증가한 영향이 더 크다고 할 수 있다 (0.27 -> 0.37). 그러나 이 경우에도 윤중감소율의 기준치인 0.6 보다는 작은 것을 알 수 있다.

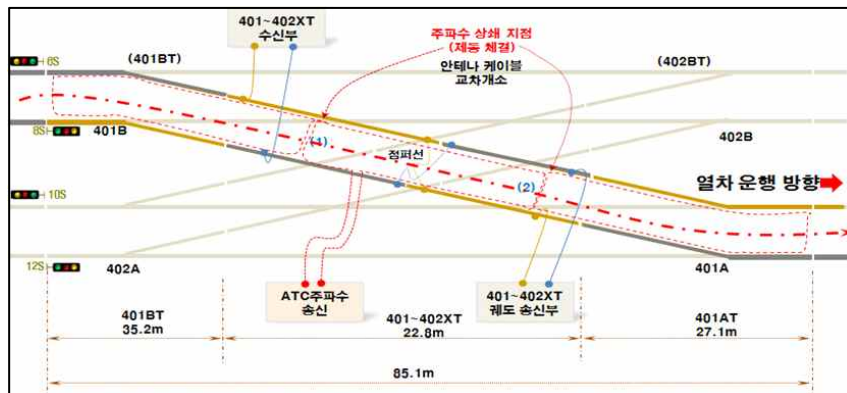
2.3.5 윤중측정 결과의 분석

사고차량(10호차) 및 사고차량과 동일한 형식의 차량(TC)인 1호차의 윤중을 측정된 결과 [표14]와 [표15]에서 사고차량인 10호차의 최대 좌우 윤중비는 약 $\pm 9\%$, 동일형식 차량인 1호차의 최대 좌우 윤중비는 약 $\pm 7\%$ 로 이 정도의 크기는 이번 사고에 영향을 주지는 않는 것으로 판단되었다.

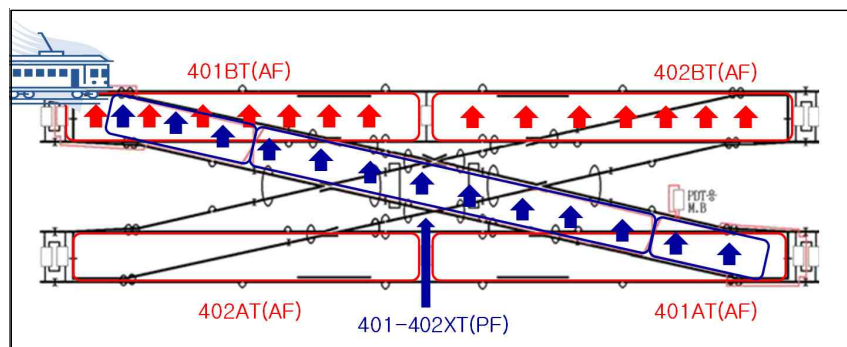
2.4 신호제어설비의 분석

2.4.1 차상장치 무신호 원인 분석

[그림24]는 분기부에 열차 위치검지를 위한 가청주파수 궤도회로(401~402XT)와 ATC 주파수 송신안테나가 독립적으로 설치된 상태이다. ATC 주파수 송신 안테나는 창동기지 신호시설물을 최초 구축할 때 [그림2-7-3]의 (1), (2)부분에서 발생하는 자속이 상쇄되도록 서로 교차되도록 설치하였다.



[그림24] 궤도(열차검지)회로 및 ATC 주파수 전송 회로



[그림25] 차상 신호장치 무신호 원인 분석

[그림25]에서 열차의 첫 번째 차륜이 401AT-402XT를 점유하게 되면, 열차가 운행할 진로의 선로전환기 방향과 전방 궤도회로에 열차가 없는 상태(비점유)확인하고 차상장치로 5khz 주파수(25km/h)를 전송한다.

[그림25]과 같이 사고 발생 분기부 진입지점은 AF궤도회로 송신 주파수와 PF궤도회로(loop coil) 주파수가 중복되어 구성된 지점으로 탈선 사고 당시 사고열차가 진입하자 두 개의 지상 신호장치(AF궤도회로, loop coil)에서 동시에 990khz 주파수(25km/h) 주파수가 전송되어 차상 안테나가 순간 주파수 혼선으로 속도코드를 수신하지 못하여 차상에 제동표시가 현시되었다.

2.4.2. 지상신호장치 유지보수 적정성 분석

비상제동 체결구간의 ATC안테나 설치는 창동기지 설비 구축 시 설치하여 사고 당일까지 사용되고 있었다. 사고 발생 이전 비상제동 체결현상이 간헐적으로 발생되었으나 원인 분석 및 대책 강구 등 유지보수를 소홀히 하였다.

따라서 사고 발생 구간의 주파수 중복 송신 현상이 발생하지 않도록 AF궤도회로 주파수 송신 조건을 변경(삭제)하여 분기부 진입 시 해당 PF궤도회로(loop coil)의 CAB Signal만 송신할 수 있도록 AF궤도회로 연동조건을 개선할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

2.5 ATC 시스템 점검 및 정보공유 절차의 적정성

공사는 창동기지 출고선의 비정상적인 급제동(ATC 제동6단)이 반복 체결되는 불량개소에 대하여 개통 이후 사고 당일까지 관계 부서 간 통보 또는 해당부서의 인지가 없는 등 분야별 정보공유가 체계적으로 이루어지지 않은 것으로 조사되었다.

3. 결론

3.1 조사결과

3.1.1 사고열차 기관사는 최고속도 15km/h이하로 운행하여 속도(25km/h)초과는 없었으며, 8번 신호기 통과 중 ATC에 의한 6단 제동이 10초 간격으로 2회 체결되었으며, 10초 후 4001호 차량의 AS Puncture(공기스프링 펌프) 고장경보가 발생되어 기관사가 수동으로 제동(2~5Step)을 체결하여 정차하였다.

3.1.2 현장대리인은 작업사항은 작업반장에 일임하였으며, 부품 교체 후 확인사항은 작업반장이 측정하여 그 결과를 기록하지 않았고, 작업 후 현장에서 궤간, 수평, 리드레일의 종거 등 분기기 검측 기록지를 작성하였으나 당일 곡선에 대한 검측은 하지 않았다.

3.1.3 창동기지의 429B호 선로전환기 텅레일 시점부에서 금 번 사고까지 3번 모두 열차 진행방향 좌측 텅레일 두부 측면으로부터 상면으로 타고 오름 탈선이 발생되었다.

3.1.4 사고열차 운행경로인 432호와 429B호 선로전환기 사이의 곡선을 건설 당시 『서울특별시 지하철도 건설규칙』 제10조의 기준(145m)을 초과하는 150m를 설치하여 2006년 두 번의 사고가 발생하였고 이후 선형 개선시에도 기준을 만족하지 못하는 곡선반경 120m를 채택하였다.

3.1.5 사고열차의 운행경로인 432호 선로전환기와 429B호 선로전환기 사이의 곡선에 대하여 곡선반경 120m를 채택하였으나 실제 현장의 최소곡선반경은 100m로 측정되었다.

3.1.6 432호 선로전환기와 곡선(R:150)사이, 곡선(R:150)과 429B호 선로전환기 사이에 직선을 건설당시에는 1.4m, 선형개량 시에는 5.2m를 삽입하였다.

- 3.1.7 429B호 선로전환기의 텅레일 시점부분에서 계획되어 있지 않은 곡선형태의 방향틀림 69mm를 확인하였다.
- 3.1.8 사고개소의 설정캔트는 건설 당시 30mm에서 개선안에서는 18mm로 낮추었으나 현재는 건설당시 그대로 최대 30mm를 유지하고 있었다.
- 3.1.9 캔트 체감은 429B호 선로전환기 부근인 경우 부설된 캔트 30mm가 원곡선 종점(EC)을 시작으로 429B호 선로전환기의 힐부까지 체감되고 있었으며 텅레일부에서의 캔트 체감은 3점 지지를 유발할 수 있는 조건이 되며 최초 타고 오른 개소가 포함되어 있었다.
- 3.1.10 432호 선로전환기와 429B호 선로전환기 사이의 곡선에 탈선방지 가드레일을 설치하면서 후랜지 웨이 간격을 65mm, 양단 끝부분은 150mm이상의 길이를 깔대기형으로 구부리고 끝부분은 본선레일에 대하여 85mm이상의 간격으로 설치하여 가드레일에 작용한 횡압이 바로 429B호 선로전환기의 텅레일부에 충격하중이 발생하는 결과를 초래하였다..
- 3.1.11 429B호 선로전환기 레일류를 공사에 반영하여 교체하면서 텅레일부에 발생된 방향틀림을 보수하지 않았으며, 계약관련 서류에 시공사가 하여야 한다는 명확한 근거가 없어서 분기기 전체 또는 일부 부속품을 교체 시 교체 전·후의 궤도틀림을 측정하지 않았다.
- 3.1.12 사고현장인 차량기지는 인력 또는 궤도선형검측기를 활용하여 연 1회 측정하고 유치선은 2년 1회 시행토록 되어 있으나 사고열차 운행 구간인 S28선~429A선로전환기 구간에 대하여 검사가 진행되지 않았으며 분기기틀림검사만 시행하고 있었다.
- 3.1.13 사고열차의 축상고를 측정한 결과 총 20개의 대차 중 6개의 대차에서 한 대차내 높이차에 대한 기준을 만족하지 못하고 있었다.

-
- 3.1.14 창동기지 출고선 지상 ATC장치 안테나 설치 오류로 인하여 차상 ATC장치로 25km/h 속도코드를 제공할 수 없었다.
- 3.1.15 사고열차가 창동기지를 출발하여 본선으로 운행하던 중 지상 ATC안테나에서 제공하는 25km/h 속도코드를 수신하지 못하여 비상제동이 체결되었다.
- 3.1.16 공사는 창동기지 출고선의 비정상적인 급제동(ATC 제동6단)이 반복 체결되는 불량개소에 대하여 개통 이후 사고 당일까지 관계 부서간 통보 및 정보공유가 체계적으로 이루어지지 않았다.

3.2 사고원인

항공철도사고조사위원회는 창동기지에서 발생한 열차탈선사고의 원인을 급곡선에 부설된 선로전환기의 부품교환개소 리드부에서 횡압이 증가하여 타고 오름 탈선이 발생한 것으로 결정하였으며, 기여요인으로는 곡선부에 설치되는 분기부의 설치기준 결여로 정하였다.

4. 안전권고

4.1 국토교통부에 대하여

4.1.1 도시철도건설규칙(국토부령 제106호, 2014. 7. 8. 시행)에 선로전환기와 곡선사이에 직선을 삽입하지 않아도 되는 것으로 규정하고 있으나 직선이 삽입되지 않을 경우 텅레일부에서 급격한 횡압으로 타고 오름 탈선이 발생될 수 있으므로 안전성을 확보하기 위하여 직선 최소연장에 대한 기준을 마련할 것

4.2 서울시에 대하여

4.2.1 사고개소 432호 선로전환기와 429B호 선로전환기 사이는 분기부대곡선으로 도시철도건설규칙(국토부령 제106호, 2014. 7. 8. 시행)에 캔트를 부설하지 않도록 규정하고 있으나 실제로 30mm의 캔트가 부설되어 있었다. 서울시 전 운영노선을 점검하여 잘 못 부설된 개소가 있는지 확인하고 개선할 것

4.3 서울교통공사에 대하여

4.3.1 사고개소인 429B호 선로전환기의 텅레일부에서 큰 방향틀림이 크게 관리되고 있는 것은 연 1회 시행토록 되어 있는 인력레도틀림검사가 제대로 시행되지 않은 결과이므로 종합계획을 마련하여 시행할 것

4.3.2 곡선과 일반 편개 분기기 사이에 직선이 삽입된 선로에서 캔트부설 상태에 대한 현황을 파악하고 분기기에서 캔트체감이 되지 않도록 개선할 것

4.3.3 분기기와 인접하여 탈선방지 가드레일을 설치할 경우 급격한 횡압이 분기기에 작용할 수 있으므로 선로정비규정 제36조의 2(레일 측마모

및 탈선방지 가드레일) 대신에 제36조(탈선방지레일)의 기준을 적용하는 것에 대하여 검토 후 시행할 것

4.3.4 분기기 전체 또는 일부 부속품을 공사로 발주하여 교체할 때에는 분기구간 전 연장에 대하여 교체 전·후 궤도틀림을 측정하도록 계약관련 서류에 명확하게 명시할 것

4.3.5 1차스프링 계수가 설계치를 초과하는 것이 확인되었으므로 운영 중인 차량에 대해 주행안전성을 보장하는 스프링계수의 변동범위를 결정하고, 스프링계수를 주기적으로 측정하여 스프링계수가 이 변동범위 이내에 있도록 관리할 것

4.3.6 사고열차의 축상고를 측정결과 한 대차 내 높이차에 대한 기준을 초과하는 것이 확인 되었으므로, 축상고 기준을 만족하기 위한 대책을 수립하고 시행할 것

4.3.7 출고선의 지상 ATC 안테나 케이블 교차 개소를 검토하여 교차 개소 없이 재시공할 것.

4.3.8 공사는 운행장애, 시설물 불량개소 등에 대하여 운전, 차량, 토목, 궤도, 건축, 전기, 전자, 신호, 정보통신, 기계 등 분야별 직원들이 모여 합동 토론회를 주기적으로 실시하여 안전운행 저해요인을 발굴·제거하고 전사적 정보 시스템을 활용하여 전 직원에게 자료를 공유할 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,

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: araib@korea.kr