

철도사고 조사 중간보고서

서울교통공사

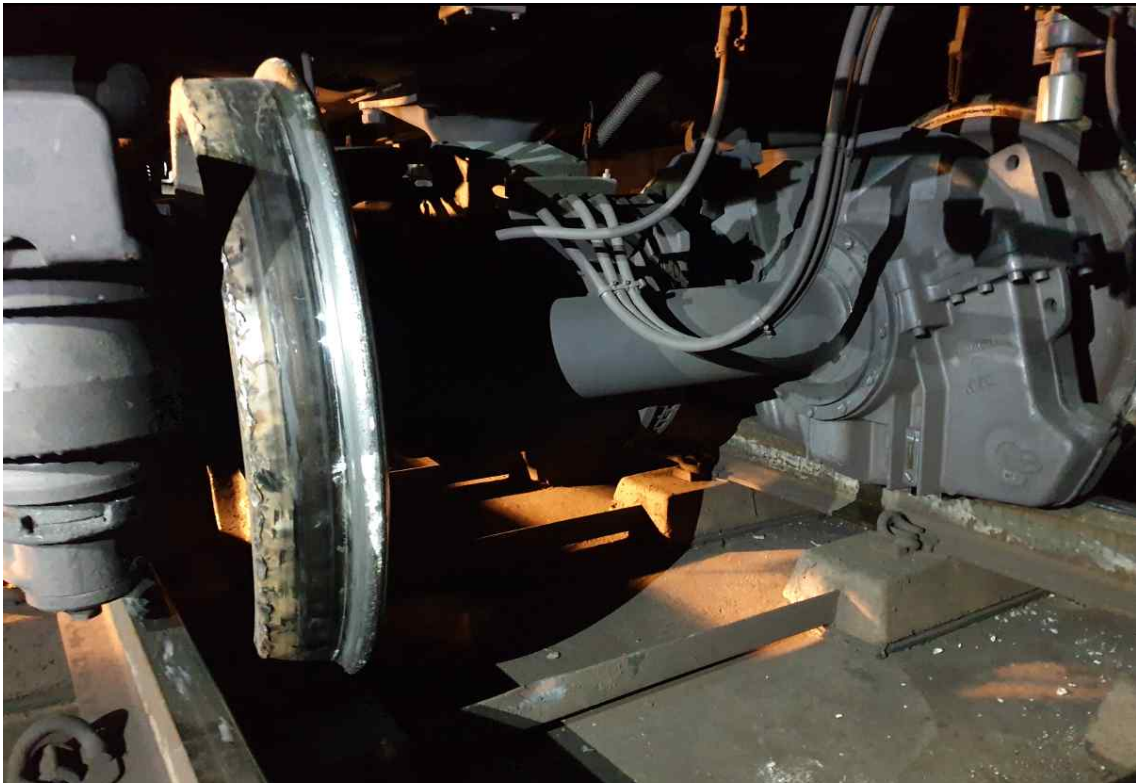
7호선

수락산역 ~ 도봉산역간 (상선)

제7300전동열차(8량)

열차탈선

2019년 3월 14일(목) 19시 18분경



2020. 3. .



항공·철도사고조사위원회

이 조사보고서는 「항공·철도사고조사에 관한 법률」 제2조(정의)에 의거 사고조사가 이루어졌으며, 제25조(사고조사보고서의 작성 등)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, 제30조(다른 절차와의 분리)에 따라 '사고조사는 민·형사상 책임과 관련된 사법절차, 행정처분절차 또는 행정쟁송절차와 분리·수행'되어야 하고,

제32조(불이익의 금지)에서 '위원회에 진술·증언·자료 등의 제출 또는 답변을 한 사람은 이를 이유로 해고·정보·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	3
1.3 관계자 인적정보 및 업무수행사항	4
1.4 선로정보	10
1.5 차량정보	15
1.6 신호·전기정보	19
1.7 기상정보	19
2. 분석	20
2.1 관계자 업무수행사항 분석	20
2.2 선로분석	21
2.3 차량분석	29
2.4 신호·전기분석	33
2.5 종합분석	34
3. 결론	35
3.1 조사결과	35
4. 사고원인 및 안전권고(미확정)	39
5. 향후 계획	39

서울 7호선 수락산역 ~ 도봉산역간 전동열차 탈선사고

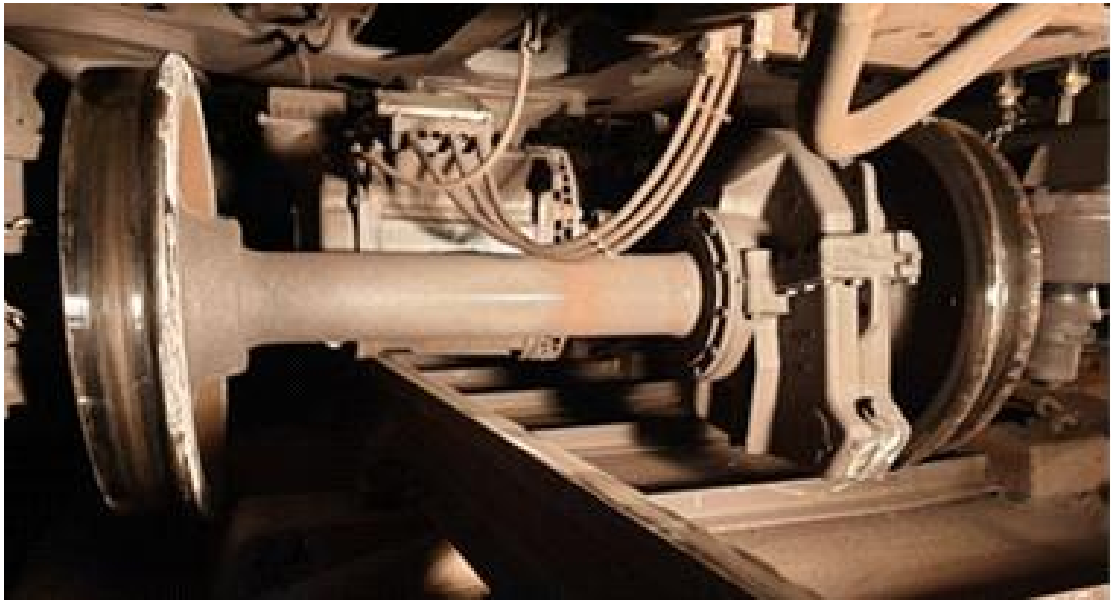
- 운영기관 : 서울교통공사
- 운행노선 : 7호선
- 발생장소 : 수락산역 ~ 도봉산역간 상선
- 사고열차 : 제7300 전동열차(8량)
- 사고유형 : 열차탈선
- 발생일시 : 2019년 3월 14일(목) 19시 18분경



[그림1] 사고현장 개요

개요

2019년 3월 14일 19:17경 제7300열차가 수동운전 모드로 수락산역을 출발하여 R301 좌 곡선(제한속도 65km/h) 구간을 42.5km/h의 속도로 운행 중 19:18경 두 번째 차량 앞 대차의 첫 번째 차륜이 진행 방향 우측으로 타고 올라 탈선되었다.



[그림2] 2호차 전부대차 탈선상태

이번 사고로 인명피해는 발생하지 않았으나 차륜, 기어박스, 견인전동기, 침목, 신호 미니본드, 전기 케이블트레이 등이 파손되어 총 7,211만원의 물적 피해가 발생되었다.

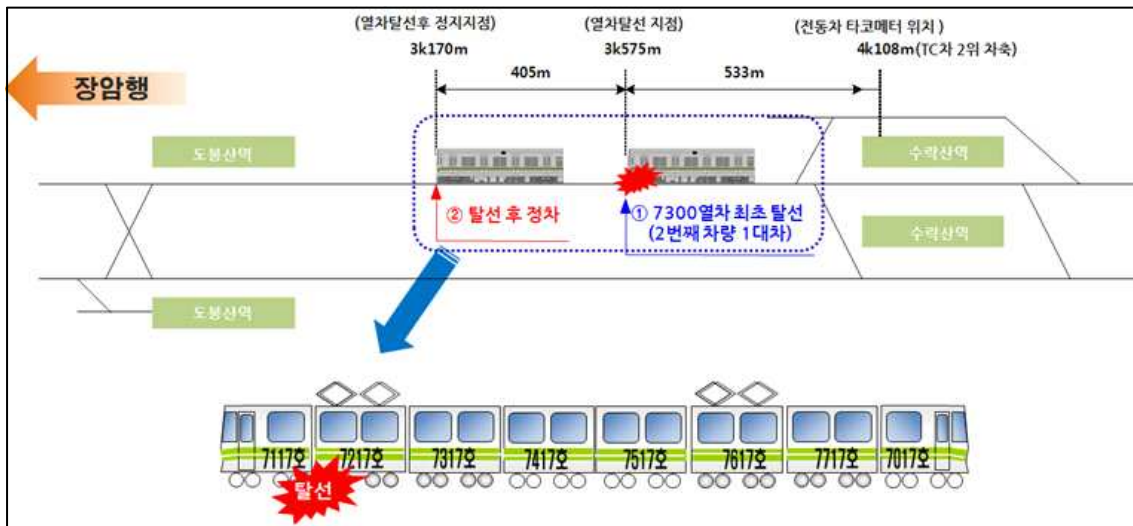
항공·철도사고조사위원회는 『항공·철도사고조사에 관한 법률』 제2조(정의) 및 제18조(사고조사의 개시)에 따라 사고조사를 진행하고 있다.

1. 사실정보

1.1 사고의 경위

제7300열차(이하 “사고열차”라 한다)는 서울 7호선에서 장암역으로 운행하기 위해 2019년 3월 14일 17:36경 부평구청역을 출발하여 온수역, 논현역, 공릉역을 거쳐 수락산역에 3분24초 지연되어 19:17경 도착하였다.

[그림3]과 같이 사고열차는 수락산역에서 승객 승·하차를 위해 50초 정차 후 관제지시에 따라 수동운전모드로 19:17경 출발하여 19:18경 R301 좌 곡선(제한속도 65km/h) 종점 부 완화곡선 구간을 42.5km/h의 속도로 운행 중 장암역 기점 3k575m 지점에서 열차의 두 번째 차량(8량 중 2호차) 앞 대차의 첫 번째 차륜이 진행 방향 우측으로 타고 올라 탈선되어 약 400m 지나서 정차하였다.



[그림3] 탈선 상황도

1.2. 피해사항

1.2.1 인명 피해

이번 사고로 인명 피해는 발생하지 않았다.

1.2.2 물적 피해

이번 사고로 차량 분야에서 차륜, 기어박스, 견인전동기 등이 파손되어 약 984만원, 궤도분야에서 침목 등이 파손되어 약 1,721만원, 신호분야에서 미니본드 등이 파손되어 약 2,643만원, 전기분야에서 케이블트레이 등이 파손되어 약 1,863만원이 발생되어 총 7,211만원의 물적 피해가 발생되었다.

1.3 관계자 인적정보 및 업무수행사항

1.3.1 사고열차 기관사

사고열차 기관사 ○○○(31세, 남)는 『철도안전법(법률 제11690호, 2013년 3월 23일 개정)』 제10조에 따라 2013년 6월 제2종 철도차량 운전면허를 취득한 후 2016년 4월부터 서울교통공사 기관사로 철도차량 운전업무에 종사하고 있었다.

사고열차 기관사의 사고 발생시까지 3일(72시간) 동안의 활동은 특별한 사항이 없었고 사고 당일은 야간근무로 17:30경 출근하여 승무전 적합성 검사에서 적합 판정을 받았으며 서울 7호선 신평역에서 장암역까지 운행하는 사고열차를 운전하였다.

사고열차 기관사는 신평역에서 승무교대 후 ‘자동운전모드’로 운행하여 수락산역에 도착 후 승객 승·하차 중, 관제사로부터 ‘수동운전모드’ 지시를 받고 수동으로 출발하였다.

사고열차 기관사는 수동운전취급 방법에 대해서 “자동운전과 유사한 방법으로 수락산역에서 출발 시 주간제어기¹⁾로 65k/m이하까지 속도를 상승시켰다가 도봉산역 진입시 약 45km/h 속도로 진입하여 정지위치에 정차하는 운전취급으로 평소 속도상승은 단계적으로 한다.”라고 진술하였다.

1) 주간제어기는 기관사가 동력운전, 타력운전 등 속도를 제어하고 제동취급을 하는 전동차 운전용 제어기기를 말한다.

사고열차 기관사는 “관제사로부터 수동운전 지시를 받고 전동차 운전실에 설치되어 있는 운행정보 확인용 태블릿 PC의 운행화면을 확인하니 앞 열차가 도봉산역에 정차해 있어서 수락산역 출발 후 약 45km/h 속도에서 주간제어기 중립에서 타력운전²⁾(惰力運轉, Coasting Operation)을 하였고 재차 동력운전(動力運轉)³⁾을 시작하자 속도상승과 차량의 움직임이 평소와 달라 주간제어기를 중립에 놓고 TCMS⁴⁾ 화면과 고장표시등을 확인하였으나 이상이 없었다.”라고 진술하였다.

이후 동력운전과 제동(制動)취급으로 차량의 움직임을 재차 확인하였으나 이상을 감지할 수 없어 열차를 정지시키고 관제사에게 운행상황을 보고 중전방에 먼지가 뿌옇게 올라오고 운전실내 객실 승객경보 스피커에 “발판이 이상하다.” 라는 말이 들려 객실을 확인한 결과 첫 번째 차량과 두 번째 차량 사이의 발판이 벌어져 있어 관제사에게 탈선한 것 같다고 보고한 뒤 관제지시에 따라 선로에 내려가 열차의 탈선을 확인하였다.

1.3.2 관제사

사고 당일 사고열차를 통제하고 기관사에게 수동운전을 지시한 관제사 ○○(52세, 남)는 2017년 7월 25일 『철도안전법(법률13807호, 2016년 1월 19일 개정)』 제21조의 3호에 따라 철도교통관제사 자격을 취득하고 관제업무에 종사하고 있었다.

관제사는 사고 당일 6·7호선 야간(C근무, 18:00~02:00) 관제업무를 담당하는 관제부장이며 7호선 전구간의 관제업무를 총괄하였고 사고 발생 전 “관제실 열차 감시모니터에 수락산역~도봉산역간 사고열차와 앞 열차의 간격이 좁아지고 도봉산역 회차열차 등을 고려하여 사고열차에 대해 [표1]과

2) 타력운전은 동력을 이용하지 않고 달리는 관성의 힘에 의하여 차량이나 열차를 움직이는 것

3) 동력운전은 견인전동기나 엔진 등의 동력을 이용하여 차량이나 열차를 움직이는 것

4) TCMS(Train Control Monitoring System) : 제어용 컴퓨터에 의해 차량의 운전을 제어하고 차량의 기작동상태와 고장상태 등을 표시하여 주는 장치

같이 『서울교통공사 운전취급규정』 제62조, 제330조에 따라 열차 간격조정을 위한 수동운전을 지시하였다.”라고 진술하였다.

이후, 사고열차 기관사로부터 열차탈선을 보고받고 후속열차와 인접열차 운행통제 및 사고 상황을 전파 후 119, 112에 신고를 하였으며, 관련부서에 탈선복구를 위한 장비출동 및 인력지원을 요청한 뒤 다른 열차의 운전정리를 시행하였다.

제62조(운전정리의 종류 및 방법)

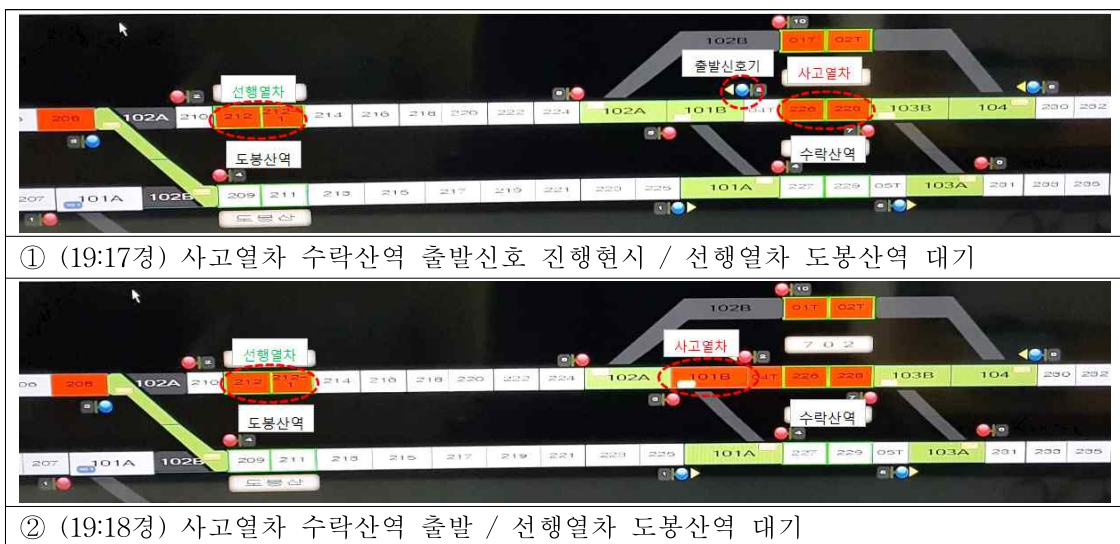
16. 간격조정 : 승객혼잡, 운행장애, 기타의 사유로 열차의 운행간격이 일정하지 않을 경우 일정시격을 유지하여 운행하도록 특정열차를 정거장에서 출발 대기시키거나 정차시간을 조정하는 등 열차의 운행간격을 조정하는 것을 말한다.

제330조 ① 본선구간에서의 운전방식은 자동운전을 원칙으로 한다. 다만 다음 각 호의 경우에는 수동운전에 의한다.

4. ATO 기능이상, 간격조정 등으로 운전관제의 수동운전 지시에 따르는 경우

[표1] 서울교통공사 운전취급규정 발췌

[그림4]와 같이 관제센터 운행기록 화면을 확인한 결과 19:17경 수락산역 출발신호기는 진행 상태였고 19:18경 선행열차가 도봉산역에 정차중인 상태에서 사고열차는 출발하였으며 이후 사고열차는 탈선하여 정차하였다.





③ (19:18경) 사고열차 탈선 / 선행열차 도봉산역 대기

[그림4] 관제센터 운행기록 화면

[표2]와 같이 사고 당시 열차무전 녹취록을 확인한 결과 19:03경 사고열차 기관사는 관제사로부터 앞·뒤 열차 지연으로 공릉역에서 1분 추가정차 지시를 받았다.

19:06부터 19:17까지 7호선 상·하행 열차의 지연에 따라 관계열차 기관사는 관제사로부터 ‘신속한 회차, 30초·1분 추가정차, 수동운전 등’ 간격조정을 위한 운전정리 지시를 받았다.

19:15경 사고열차 기관사는 수락산역에서 관제사로부터 ‘수동운전’ 지시를 받았으며, 19:18경 사고열차 기관사는 관제사에게 “7300열차 도봉산인데 연기가 나서 정차했습니다.” 라고 통보하여 열차 탈선을 확인하였다.

시 간	기관사	관제사	비 고
19:03		공릉 상선 7300열차! 앞·뒤열차 지연되고 있습니다. 공릉에서 1분 추가 정차하십시오.	사고열차
	7300열차 수신했습니다.		
19:08		천왕 하선 7323열차 관제 이상!	
	7323열차입니다.		
		선행열차 아직 운수 진입 못했습니다. 천왕에서 30초 추가 정차하시고 운수까지 1구간 수동운전 하겠습니다.	
	수신했습니다. 이상!		
19:15		수락산 7300열차 관제 이상!	사고열차
	7300열차 이상!		
		도봉산까지 수동운전 하겠습니다. 이상!	

	네, 수신했습니다.		
19:16		노원 하선 7365열차 관제 이상!	
	65열차 이상!		
		뒷 열차가 지연되고 있습니다. 노원, 중계 1분씩 정차하겠습니다. 이상!	
	예, 알겠습니다.		
19:17		공릉~태릉 하선 7363열차 태릉에서 1분 정차하겠습니다. 이상!	
	예, 63열차 수신했습니다.		
19:17		상도 하선 7341열차! 선행열차가 아직 장승배기 도착 못했습니다. 상도 1분 정차 해 주십시오.	
	1분 정차 수신했습니다.		
19:18	관제 나오세요. 7300열차입니다.		사고열차
		관제이상!	
	7300열차 도봉산인데 <u>연기가 나서</u> 정차했습니다.		열차탈선

[표2] 열차무선 녹취록

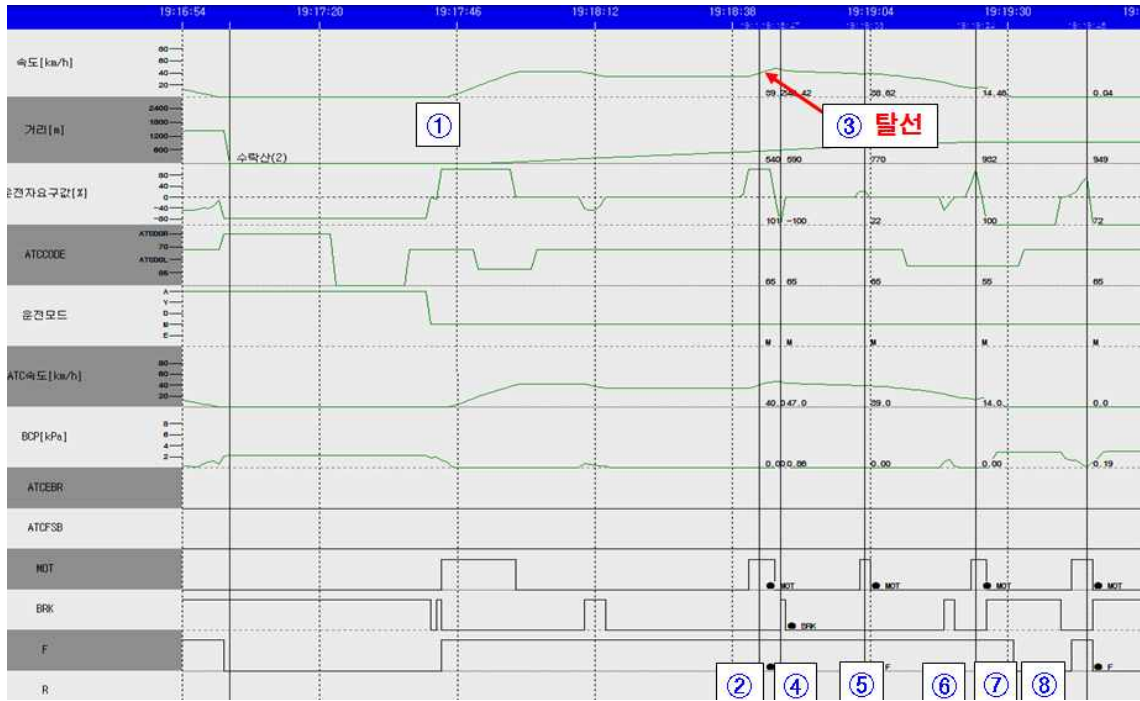
1.3.3 사고열차 운행기록

[표3]과 같이 사고열차의 운행기록을 살펴보면 사고열차 기관사는 19:17:44경 수락산역에서 속도코드 65⁵⁾상태에서 수동운전 모드로 출발하여 19:18:40경 33.5km/h속도에서 역행 6%에서 100%로 상승하여 운행하던 중 약 4초 뒤 42.5km/h속도에서 열차가 탈선하였다.

19:18:46경 타력운전 중 19:18:47경 46.3km/h속도에서 제동취급(-100%)을 하였고 1초 뒤 타력운전을 하였으며 이후 속도코드 55상태에서 타력운전과 동력운전, 제동취급을 병행하였다.

사고열차는 탈선 후 약 400m 더 운행한 뒤 19:19:31경 정차하였으며 탈선 이후 정차할 때까지 주공기 압력저하, 비상제동 동작 등 차량의 고장 이벤트·경보는 발생하지 않았다.

5) 기관사의 운전을 허용하는 전동차의 ATC CODE로 제한 속도이며 80, 65, 55, 45 등이 있다.



구분	시간	속도 코드	속도 (km/h)	거리(m)		차량상태(역행,제동)	운전모드	비고
				1호차	2호차 ⁶⁾			
①	19:17:44	65	0	0	-18	수락산역 출발	수동	
	19:18:40	65	33.4	511	493	역행 6%	수동	
②	19:18:41	65	33.8	519	501	역행 100%	수동	
	19:18:43	65	39.3	540	522	역행 100%	수동	
③	19:18:44	65	42.5	551	533	역행 100%	수동	탈선
	19:18:46	65	46.9	577	539	0%(중립위치)	수동	
④	19:18:47	65	46.3	590	572	제동 -100%	수동	
	19:18:48	65	43.9	603	585	0%(중립위치)	수동	
⑤	19:19:02	65	38.5	759	741	역행 22%	수동	
	19:19:04	65	38.6	770	752	0%(중립위치)	수동	
⑥	19:19:18	55	23.8	903	885	제동 -47%	수동	
	19:19:19	55	21.5	910	892	제동 -21%	수동	
	19:19:20	55	18.9	915	897	0%(중립위치)	수동	
⑦	19:19:23	55	14.5	928	910	역행 52%	수동	
	19:19:24	55	14.4	932	914	역행 100%	수동	
⑧	19:19:25	55	15.6	936	918	역행 3%	수동	
	19:19:26	55	14.9	941	572	제동 -90%	수동	
⑧	19:19:27	55	12.5	944	926	제동 -100%	수동	
	19:19:31	55	0	949	931	제동 -100%	수동	정지

[표3] 사고열차의 운행기록 정보

6) 1호차 속도센서와 탈선차량 2호차 차축간 거리가 18m 차이가 발생하여 (-)보정(차감)함

1.4 선로정보

1.4.1 사고현장 정보

서울 7호선은 1996년 10월에 장암역~부평구청역간, 2000년 2월에 장암역~건대입구역간, 2000년 8월에 온수역~신풍역간, 2012년 10월에 신풍역~건대입구역간이 개통되었다.

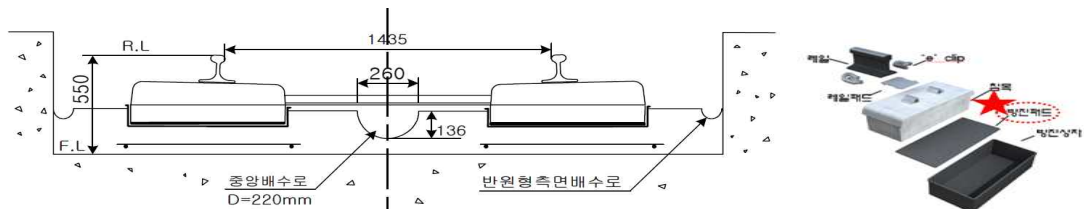
사고현장은 수락산역~도봉산역(상선) 사이로 최초 탈선지점(장암역 기점 3km575)은 열차 진행방향 곡선반경 301m 좌 곡선의 완화곡선 종점으로 선로 기울기는 하향 4‰이고 STEDEF⁷⁾ 콘크리트 궤도구조로 60kg 장대레일에 곡선 외측레일은 열처리 경두레일⁸⁾로 부설되어 있었다.

사고구간의 선로선형은 곡선반경 301m, 길이 349m(원곡선 164m, 완화곡선 전후 각각 92m, 완화곡선 시점 3km499, 완화곡선 종점 3km847)이었고, 슬랙⁹⁾을 설치하지 않은 곡선으로 설정 캔트¹⁰⁾는 153mm였으며, 탈선이 일어난 개소의 완화곡선부는 115mm(기준 113.5mm)로 캔트체감이 되는 구간으로 열차의 제한속도는 65km/h였다.

1.4.2 탈선흔적

[그림5]와 같이 사고열차는 수락산역 출발 후 도봉산역으로 약 551m 운행

7) STEDEF 궤도 :



8) 경두레일(head hardened rail)이란 레일의 두부를 열처리하여 경도를 높이고 차륜으로 인한 내마모성을 향상시킨 레일

9) 슬랙(Slack)이란 차량이 곡선부를 원활하게 통과하도록 바깥쪽레일을 기준으로 궤간을 확대하는 것

10) 캔트(Cant)란 차량이 곡선부를 원활하게 통과하도록 안쪽레일을 기준으로 바깥쪽 레일을 높게 부설하는 것

중 열차 진행방향 좌측 원곡선을 지나 완화곡선부에서 두 번째 차량 1대차의 차륜이 우측으로 탈선하였고 탈선 후 콘크리트 침목과 선로 중앙의 신호미니본드를 타격하며 진행한 뒤 직선구간에 정차하였다.



[그림5] 탈선현장 약도

1.4.3 궤도정비 현황

서울교통공사 『선로정비규정(2018. 4. 19. 개정 제125호 이하 “선로정비규정”이라 한다)』 제2장(궤도정비기준)에 궤간, 면틀림, 줄틀림, 평면성틀림의 정비기준은 [표4]와 같이 정하고 있다.

(괄호는 정적치수¹¹⁾임)

구 분	궤간	면틀림	줄틀림	평면성틀림
정비기준 ¹²⁾	증 14mm(10mm) 감 4mm(2mm)초과시	15mm(9mm) 초과시	15mm(9mm) 초과시	15mm 초과시
유지기준 ¹³⁾	증 14mm(10mm) 감 4mm(2mm)이내	15mm(9mm) 이내	15mm(9mm) 이내	15mm이내
시공기준 ¹⁴⁾ (정비목표)	증 6mm(4mm) 감 3mm(2mm)이내	7mm(5mm) 이내	7mm(5mm) 이내	9mm이내

[표4] 궤도정비 기준 요약

『선로검사내규(2018. 4. 19. 개정 제62호 이하 “선로검사내규”라 한다)』 제2장(궤도보수검사)에 궤도틀림검사(궤도검측차검사, 인력검사), 레일간격검사, 그 밖의 선로일반검사로 구분하여 궤도보수를 시행하고 있다.

사고구간과 같은 본선 궤도는 궤도검측차 검사(분기 1회), 본선 분기기 및 측선은 인력검사를 시행하도록 정하고 있으며 탈선위치 전·후 50m 구간의 2019년 1/4분기(2019. 2. 26) 궤도검측 결과는 [표5]와 같다.

위치	면		궤간	수평	줄		트위스트	궤도틀림				
	우	좌			우	좌		면우	면좌	수평	줄우	줄좌
3k617.	-0.9	-0.9	17.1	163.9	47.6	41.7	-1.1	0	0.1	-0.3	6.9	1.8
3k616.75	-0.9	-0.8	17.5	163.6	47.6	41.4	-1.7	0	0.2	-0.6	7	1.6
3k616.5	-0.9	-0.8	17.5	163.2	46.9	40.8	-1.2	0	0.2	-1	6.3	0.9
3k616.25	-0.9	-0.8	17.6	162.4	46.5	40.3	0.1	-0.1	0.2	-1.8	5.8	0.4
3k616.	-0.9	-0.8	17.8	162.5	46.3	40	1.5	-0.1	0.2	-1.7	5.7	0.1
3k615.75	-0.8	-0.8	18.1	162.6	46.3	39.8	1.7	0	0.2	-1.5	5.6	-0.1
3k615.5	-0.8	-0.8	18.4	163.4	46	39.5	1.9	0	0.2	-0.7	5.4	-0.4

[표5] 탈선개소 전·후 궤도검측 결과 일부분

- 11) “정적치수”는 인력 측정검사 기준을 말한다.
- 12) “정비기준”이란 유지기준치를 초과한 것으로서 보수작업을 시행하여야 하는 상태를 말한다.
- 13) “유지기준”이란 정비기준치에 도달하지 않은 양호한 궤도상태를 말한다.
- 14) “시공기준(정비목표)”이란 궤도부설공사, 개량공사 및 보수공사의 검사 기준치를 말한다.

1.4.4 레일정비 현황

『선로정비규정』 제3장(레일) 제18조(레일의 마모한도 및 수명)에 레일마모 한도 등을 [표6]과 같이 정하고 있다. 탈선위치 전·후 50m 구간의 2019년 1/4분기(2019. 2. 26) 레일마모 검측결과는 [표7]과 같다.

구 분	직마모	편마모	누적 통과톤수	비 고
마모한도	13mm 초과 전	15mm 초과 전	10억톤 초과 전 (0.1mm/5천만톤 레일연마 또는 밀링작업)	

[표6] 레일정비 기준 요약

Metric	곡선외측							곡선내측						
	G	C1	C0	C2	V1	V0	V2	G	C1	C0	C2	V1	V0	V2
3525.677	-0.317	-1.845	-1.551	-1.298	-0.765	-0.706	-1.032	-0.396	-0.464	-0.542	-0.808	-2.089	-2.014	-2.143
3526.665	-0.508	-1.952	-1.775	-1.558	-0.807	-0.718	-1.067	-0.366	-0.463	-0.574	-0.843	-2.077	-2.006	-2.12
3527.597	-0.397	-1.838	-1.561	-1.275	-0.79	-0.688	-1.053	-0.355	-0.48	-0.571	-0.815	-2.091	-2.03	-2.14
3528.648	-0.231	-1.659	-1.307	-1.032	-0.785	-0.683	-1.048	-0.343	-0.49	-0.599	-0.841	-2.101	-2.02	-2.129
3529.698	-0.221	-1.536	-1.204	-0.917	-0.782	-0.676	-1.047	-0.274	-0.434	-0.53	-0.773	-1.962	-1.903	-1.999
3530.694	-0.14	-1.404	-1.011	-0.703	-0.759	-0.653	-1.033	-0.276	-0.426	-0.595	-0.789	-1.949	-1.878	-1.984
3531.632	-0.122	-1.4	-1.038	-0.742	-0.754	-0.678	-1.032	-0.286	-0.496	-0.641	-0.792	-2.029	-1.96	-2.064
3532.687	-0.201	-1.641	-1.294	-1	-0.758	-0.684	-1.038	-0.289	-0.532	-0.624	-0.76	-2.114	-2.052	-2.15
3533.687	-0.945	-2.14	-1.969	-1.777	-0.743	-0.637	-1.033	-0.291	-0.59	-0.627	-0.741	-2.353	-2.287	-2.388
3534.63	-1.505	-2.468	-2.473	-2.297	-0.765	-0.623	-1.062	-0.295	-0.791	-0.624	-0.733	-2.519	-2.45	-2.567
3535.69	-2.153	-2.944	-2.977	-3.038	-0.8	-0.61	-1.078	-0.277	-0.8	-0.535	-0.675	-2.667	-2.651	-2.69
3536.692	-2.821	-3.495	-3.656	-3.622	-0.823	-0.617	-1.09	-0.272	-0.834	-0.514	-0.668	-2.701	-2.668	-2.746
3537.638	-2.864	-3.499	-3.668	-3.667	-0.853	-0.652	-1.109	-0.274	-0.809	-0.57	-0.722	-2.677	-2.605	-2.696
3538.702	-2.464	-3.391	-3.461	-3.412	-0.895	-0.703	-1.132	-0.266	-0.594	-0.565	-0.717	-2.454	-2.393	-2.491

[표7] 탈선개소 전·후 레일마모 검측결과 일부분

1.4.4.1 레일 보수작업 현황

사고 구간의 연간 누적 통과톤수는 20,662,548톤이고 개통(1996. 10. 11) 이후 2018년 12월말 기준 누적 통과톤수는 409,527,823톤으로 레일수명 기준 10억톤 대비 약 41%로 레일교환 주기는 도래하지 않았다.

[표8]과 같이 사고구간의 레일 보수작업 실적을 확인한 결과 『선로정비규정』 제17조(레일의 바꿔놓기 및 돌려놓기) “레일은 그 마모와 진행 형태를 고려하여 바꿔놓기(전체) 또는 돌려놓기(전환)를 하여 사용할 수 있다.”에 따라 2003년 10월에 곡선 내측레일과 외측레일(당시 최대 마모량 13.5mm, 평균 마모량 11.5mm)간 바꿔놓기를 시행하였고 2009년 6월에 곡선 외측 레일

을 교환한 후 사고 당시까지 약 9년 9개월 사용 중이었다.

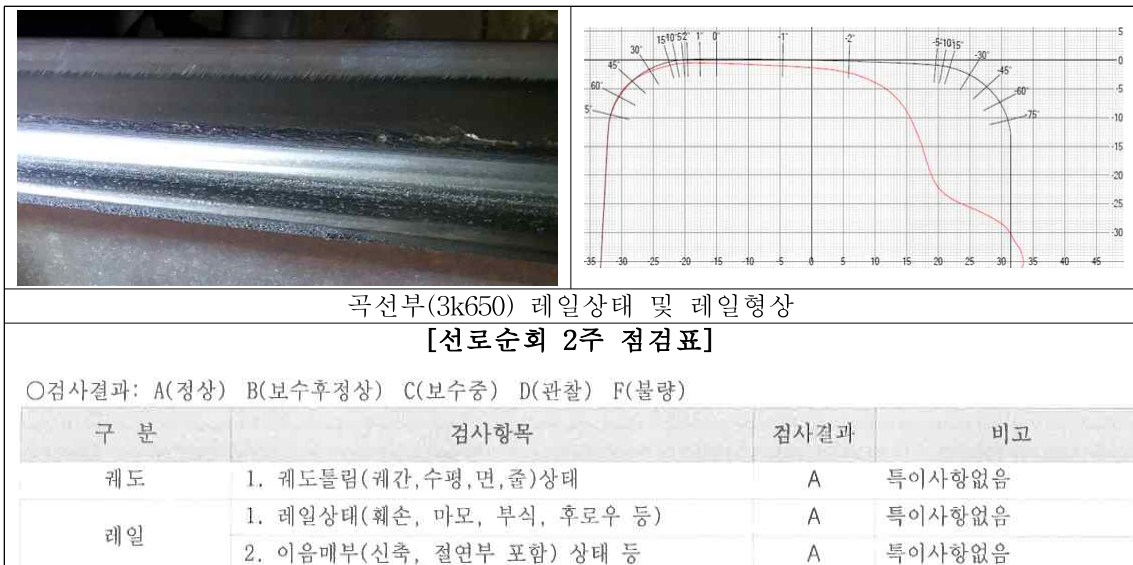
또한 ‘장대레일은 누적 통과톤수 5천만톤마다 0.1mm이상 연마 또는 밀링 작업을 시행하여야 한다.’라고 정하고 있으며 개통 이후 2018년 말까지 약 8.2회 연마 또는 밀링 작업을 시행했어야 하나 2018년 8월에 레일연마작업¹⁵⁾을 단 1회 시행하였다.

일자	작업위치	작업내용	비고
2003.10.16	도봉산~수락산 3km515~3km815	곡선 내·외측 레일 바꿔놓기 291m	개통 후 7년 경과
2009.06.23	도봉산~수락산 3km515~3km815	곡선 외측레일 교환 300m (경두레일)	교환 후 5년 8월 경과
2018.08.31	도봉산~수락산 3km197~3km937	레일연마 740m	

[표8] 사고구간 궤도 보수작업 현황

1.4.4.2 도보순회 점검 현황

『선로검사내규』 제21조(도보순회점검)에 따라 사고구간을 2주 선로 도보순회를 시행하고 있었으나 [그림6]과 같이 레일의 마모와 훼손이 있는데도 불구하고 점검표에는 레일상태(훼손, 마모, 부식, 후로우 등) “A(정상), 특이사항 없음”으로 기록하고 있었다.



[그림6] 사고구간 레일상태 및 점검표

15) 레일연마작업 : 차륜과 레일의 접촉에 의하여 레일표면에 발생하는 결함 제거(삭정)

1.5 차량정보

1.5.1 사고열차 주요제원 및 조성

사고열차는 1996년 7월에 도입되었고 직류(1,500V) 전용 VVVF 인버터 차량으로 차량 최고속도 100km/h이며 운행 최고속도는 80km/h이다.

[표9]와 같이 사고열차는 8량 1편성으로 운행 중이었고 최초 탈선한 차량은 열차진행 방향으로 2번째인 M1차이다.

◀ 도봉산역	↔ 진행방향							▶ 수락산역
차 호	7117	7217	7317	7417	7517	7617	7717	7017
차 종	TC	M1	M2	T1	T2	M1	M2	TC
중 량	33.8톤	36.8톤	36톤	28.7톤	28.7톤	36.8톤	36톤	33.8톤

(TC: 운전실 있는 제어부수차, M1: 제1구동차, M2: 제2구동차, T1: 1부수차, T2: 2부수차)

[표9] 사고열차의 조성현황

1.5.2 사고열차 검사현황

사고열차의 검사¹⁶⁾ 내역은 [표10]과 같고 사고열차는 서울교통공사 『전동차관리규정』 제6조(검사주기)에 따라 4년 주기로 시행하는 전반검사(4Y)를 마치고 2018년 1월 11일 출고하였으며 사고 당일까지의 누적 주행키로는 2,299,866km이었다.

신조도입	일상검사(7D)	월상검사(4M)	전반검사(4Y)	검사장소
1996. 7. 1.	'19.3.8. '19.3.1. '19.2.22.	'19.2.14. '18.10.16. '18.6.12	'18.1.11. '13.10.8. '09.6.22.	도봉차량사업소

[표10] 사고열차 종별 검수이력

16) 검사: 전동차 각 장치별 기기와 부품의 마모, 손상 및 변화 등 상태를 확인하여 정비, 교환 및 시험하는 것

1.5.3 사고차량 차륜치수 및 축상높이 측정

서울교통공사 7·8호선 VVVF 『전동차 검사시행예규』(이하 “전동차 검사시행예규”라 한다.) [별표5]에 정한 기준값에 따라 사고차량의 차륜과 플랜지의 두께, 플랜지 높이, 차륜 직경, 차륜 내면간 거리에 대한 측정한 결과는 [표11]과 같고 사고열차의 축상높이를 측정한 결과는 [표12]와 같다.

(단위: mm)

차호	위수	차륜직경	플랜지 두께	플랜지 높이	차륜 내면거리
7117호 (탈선차량 뒤)	1위	820	25	25	1,354
	2위	821	25.5	26	
	3위	819	28.5	25	1,355
	4위	819	27	26	
	5위	819	27.5	26	1,356
	6위	819	30.5	25	
	7위	818.5	28	26	1,356
	8위	819	28	27	
7217호 (탈선차량)	1위	815	33.5	25	1,356.4
	2위	817	34	25	(차륜 내측면 손상)
	3위	815	34	24.5	1,355.5
	4위	816	34	25	
	5위	815.5	34	25	1,355.5
	6위	815	34	25	
	7위	815.5	33	25	1,356.5
	8위	816	33.5	25	(차륜 내측면 손상)
기준치		878~860	23~34	25~35	1,354 +2

[표11] 차륜치수 측정결과

차호	차축	축상높이(좌) mm	축상높이(우) mm
7117호 (탈선차량 뒤)	1	40	42
	2	41	42
	3	42	43
	4	42	41
7217호 (탈선차량)	1	42	44
	2	44	42
	3	42	43
	4	44	44

[표12] 축상높이 측정결과 (기준치: 45±5mm)

1.5.4 사고열차 차륜삭정 및 교체이력

『전동차 검사시행예규』에 따른 사고열차의 차륜삭정 및 교체이력은 [표 13]과 같다.

일 자	내 용
2003.07.02.~07.10.	차륜교환검사(신차륜 교환)
2013.10.8.~10.30.	4년검사 및 차륜교환검사(신차륜 교환)
2018.01.11.~02.02.	4년검사 전량 삭정 후 차륜측정
2019.03.08.	6호차(1~8위) 삭정
2019.03.12.	2호차(1~8위), 3호차(1~4위) 삭정
2019.03.13.	3호차(5~8위), 4호차(1~8위) 삭정

[표13] 사고열차 차륜삭정 및 교체이력

1.5.5 사고열차 1차 스프링 강성측정

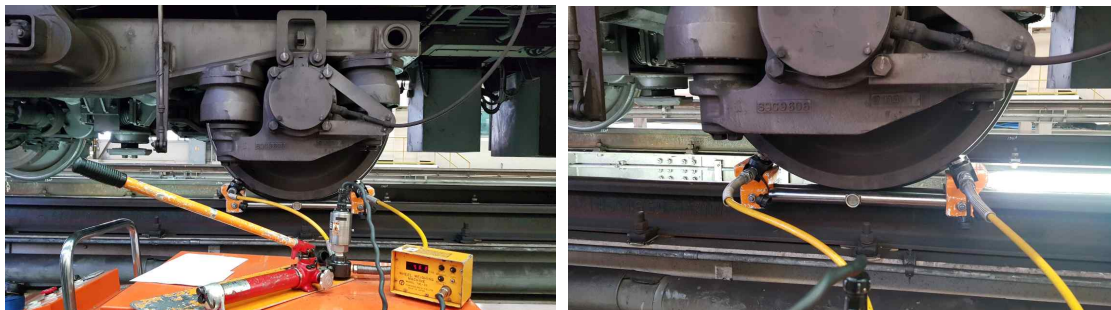
『전동차검사시행예규』 제7조(대차 및 상하기기)의 검사방법에 따라 사고 열차의 1차, 2차 현수장치는 점검 및 분해검사를 시행하고 있으나 신차 도입 이후 사고 당시까지 교체한 이력은 없었고 1차 스프링(물고무 스프링)의 강성을 측정한 결과 [표14]와 같이 모든 스프링의 강성이 설계치보다 약 2배 증가한 것이 확인되었다.

특성치	강성 (kgf/mm)
설계치	90
측정치	173
증가율	191% ↑

[표14] 1차 스프링 강성 측정결과

1.5.6 사고열차 윤중 측정 및 윤중비 계산

[그림7]과 같이 사고열차 1호차, 2호차 및 4호차의 윤중을 측정하고 이를 이용하여 윤중비를 계산하였으며 결과는 [표15]와 같다.



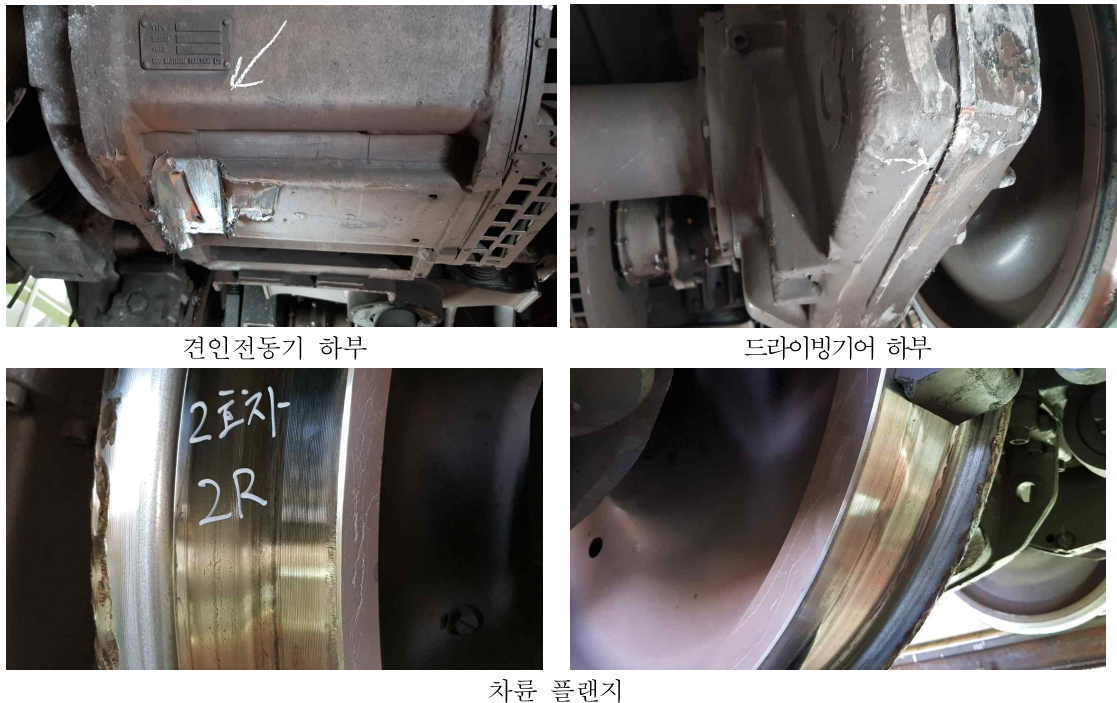
[그림7] 윤중측정

차호	차종	차측	좌측차륜	우측차륜	측중	윤 중 비	비고
1 (7117)	TC	1	4.52	3.88	8.40	-7.6%	
		2	4.92	3.40	8.32	-18.3%	
		3	3.65	4.60	8.25	11.5%	
		4	3.91	4.45	8.36	6.5%	
		합	17.00	16.33	33.33	-2.0%	
2 (7217)	M1	1	5.92	3.27	9.19	-28.8%	탈선 차량
		2	5.00	4.20	9.20	-8.7%	
		3	3.78	5.25	9.03	16.3%	
		4	3.97	5.24	9.21	13.8%	
		합	18.67	17.96	36.63	-1.9%	
4 (7417)	T1	1	4.14	3.05	7.19	-15.2%	
		2	4.40	2.92	7.32	-20.2%	
		3	3.51	5.25	8.76	19.9%	
		4	4.47	5.24	9.71	7.9%	
		합	16.52	16.46	32.98	-0.2%	

[표15] 윤중 측정결과 및 윤중비 계산결과

1.5.7 사고열차 차량피해 상황

탈선사고로 인한 차량의 흔적은 [그림8]에서 보듯이 2번째 차량(7217)의 견인전동기와 드라이브기어 하부 및 차륜 플랜지가 파손되어 있었다.



[그림8] 사고열차의 피해 상황

1.6 신호·전기정보

1.6.1 신호정보

사고구간의 신호설비는 전자연동장치, AF 궤도회로, ATC/ATO 방식으로 구성되어 있고, [그림4] 관제센터 기록화면에서 살펴본 바와 같이 사고열차는 수락산역에서 정상적인 신호현시와 진로가 구성된 상태에서 운행하였으며 사고발생 전 신호 관련 이벤트 기록은 없는 것으로 조사되었다.

1.6.2 전기정보

사고구간은 지하 터널구간으로 전차선은 강체가선 T바 형식이고 직류 1,500V 전기를 전동차에 공급하고 있으며, 사고발생 전 해당구간의 전기 관련 이벤트 기록은 없는 것으로 조사되었다.

1.7 기상정보

2019년 3월 14일 19시 00분경 서울시 도봉구의 기온은 8.2℃, 습도 39%이었으며 기상조건이 탈선 사고에 영향을 미치지 않은 것으로 조사되었다.

2. 분석

2.1 관계자 업무수행사항 분석

2.1.1 사고열차 기관사

사고열차 기관사는 관제사 지시에 따라 수락산역에서 수동운전 모드로 출발신호기 진행 상태에서 출발하였고 열차운행기록 분석결과 속도코드 65 상태에서 42.5km/h 동력운전 중 탈선이 일어났으며 최고속도 46km/h 이하로 제한속도를 준수하는 등 적정하게 운전업무를 수행하였다.

사고열차 기관사는 열차탈선 이후 속도상승과 차량의 움직임이 평소와 달라 주간제어기를 중립에 놓고 TCMS 화면과 고장표시등을 확인하였으나 차량의 고장 이벤트·경보가 없어 열차의 탈선을 즉시 인지하지 못한 것으로 분석되어 열차 운전취급에 특별한 문제점은 없었다.

2.1.2 관제사

관제사는 사고발생 전 관제실 열차 감시모니터에 수락산~도봉산역간 사고열차와 앞 열차의 간격이 좁아지고 도봉산역 회차 열차 등을 고려하여 사고열차에 대해 서울교통공사 『운전취급규정』 제62조, 제330조에 따라 열차 간격조정을 위한 수동운전을 지시하였고 사고열차 기관사로부터 열차탈선을 보고받고 후속열차와 인접열차 운행통제 및 사고 상황전파 등 관제업무를 적정하게 수행하였다.

2.2 선로분석

2.2.1 궤도정비

탈선위치 전·후 50m 구간의 2019년 1/4분기(2019. 2. 26) 궤도검측차 측정 결과의 궤도분석 내용은 다음과 같다.

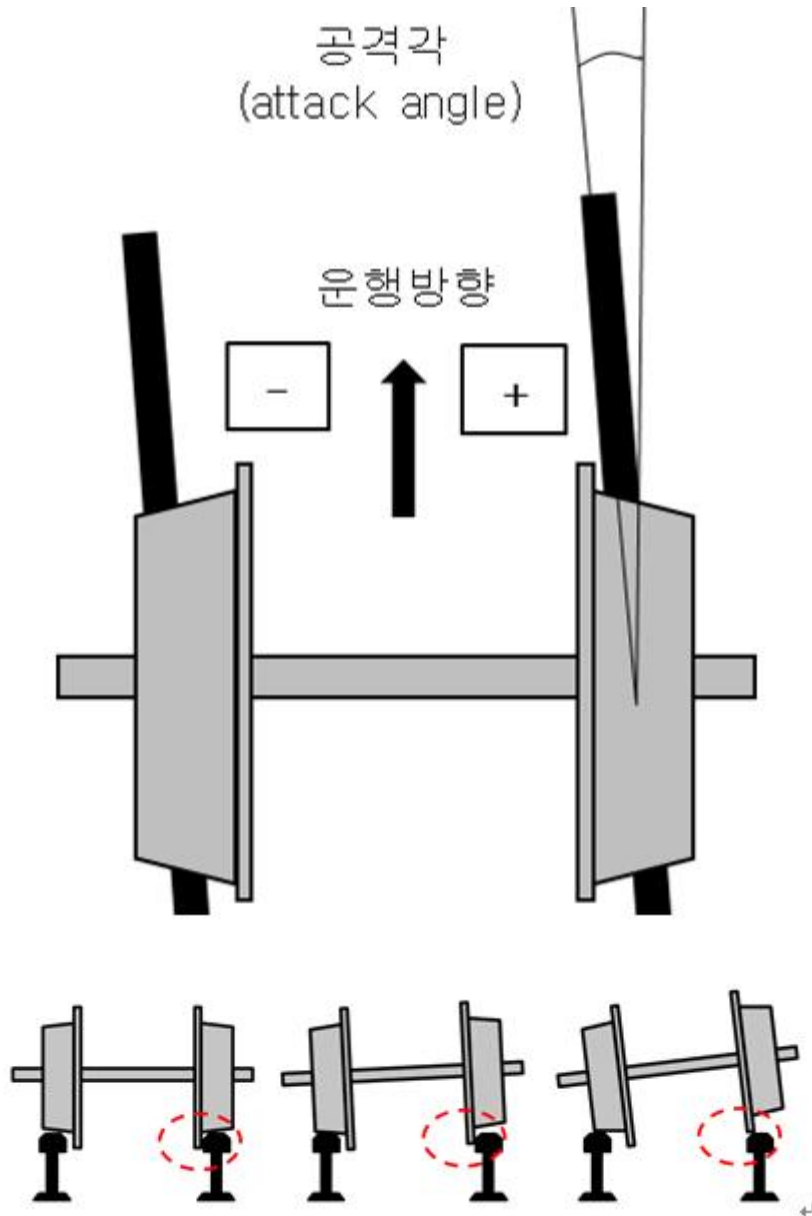
2.2.1.1 궤간 검측결과

[그림9]와 같이 사고구간의 궤간은 최고 19.1mm로 『선로정비규정』의 정비기준 14mm를 5.1mm초과하고 있었으며 슬랙은 0mm로 없었고 2호차 탈선위치에서는 정비기준을 0.1mm초과하고 있었다.



[그림9] 궤간 분석그래프

궤간 검측결과 탈선차량이 타고 오른 지점(3.575km)에서 궤간이 기준을 초과하여 곡선부에서 궤간이 확대되어 대차 회전량이 커져 [그림10]과 같이 공격각이 증가(+)하며 횡압(Q)증가에 따른 탈선계수(Q/P)가 증가하여 차륜 플랜지가 레일을 타고 올라 탈선된 것으로 분석되었다.

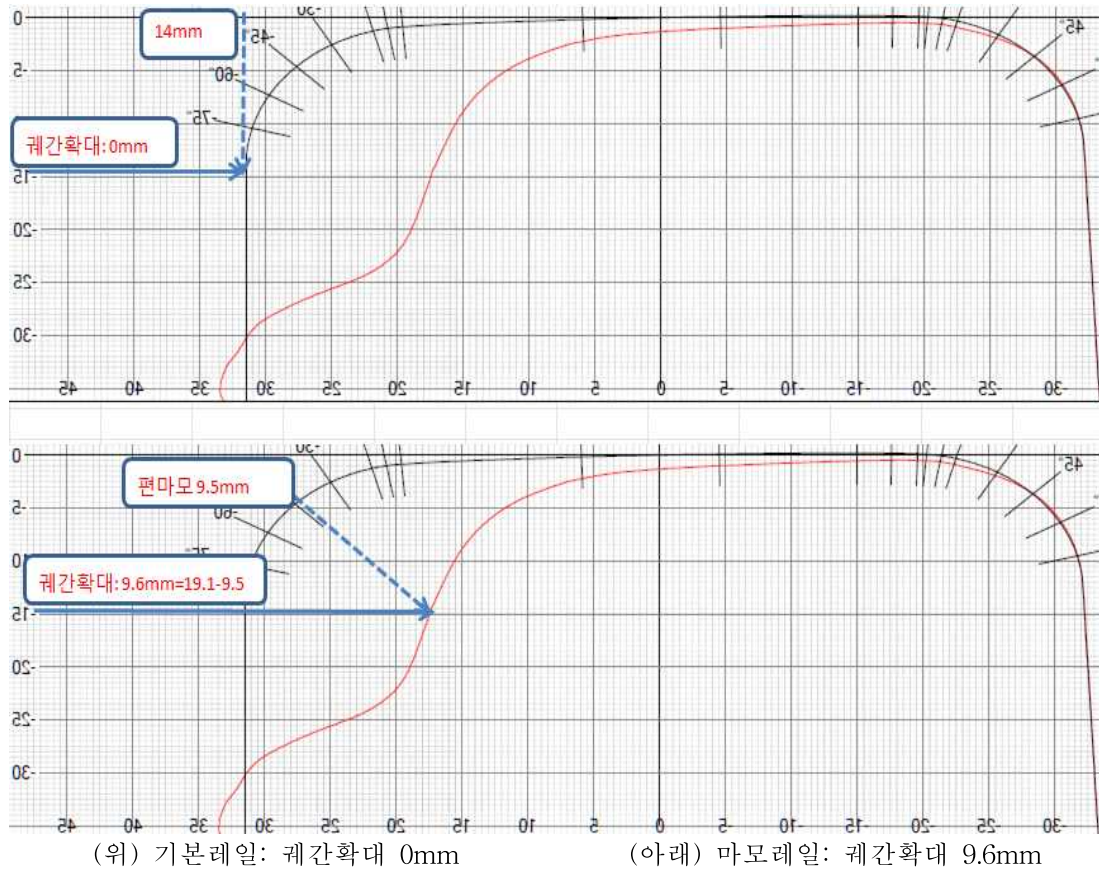


[그림10] 곡선구간에서의 공격각(attack angle) 및 타고 오름 탈선과정

서울교통공사 궤도처는 『선로정비규정』 제2조(정의)에 “궤간이란 레일의 윗면으로부터 14mm 아래지점에서 양쪽레일 안쪽간의 가장 짧은 거리를 말한다.” 라고 정하고 있음에도 불구하고 [표16]의 『선로정비규정』 제6조①항 단서조항 “다만, 궤간정비 시는 레일마모 상태를 감안하여 시행하여야 한다.”의 ‘레일마모 상태를 감안하여’를 ‘레일 편마모량을 차감하여(-)’로 임의 해석하고 [그림11]과 같이 궤간 측정값이 19.1mm임에도 편마모량 9.5mm를 차감하여 궤간이 9.6mm로 판단하고 정비기준 14mm를 초과하지 않은 것처럼

림 궤간측정이 부적정하게 이루어지고 있었다.

또한 사고구간은 콘크리트 궤도로 궤도 구조상 궤간변화가 미미하고 곡선 구간 궤간 확대량은 편마모 증가량에 비례하는 경향을 보인다.



[그림11] 궤간 측정과정(예)

<p>제 6 조(궤간의 정비) ① 궤간틀림의 정비치수는 다음 기준(괄호는 정적치수임)에 의하며 이때의 틀림은 곡선구간에서의 슬랙량을 감한 치수로 한다. 다만, 궤간정비 시는 레일 마모 상태를 감안하여 시행하여야 한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 정비기준 : 증 14mm(10mm) 감 4mm(2mm) 초과 시 2. 유지기준 : 증 14mm(10mm) 감 4mm(2mm) 이내 3. 시공기준(정비목표) : 증 6mm(4mm) 감 3mm(2mm) 이내 <p>② 궤간공차(궤도틀림 및 레일마모 고려)에 슬랙을 가한 치수는 30mm를 초과하지 못한다.</p>
--

[표16] 선로정비규정

2.2.1.2 면틀림 검측결과

[그림12]와 같이 면틀림은 『선로정비규정』의 정비기준 $\pm 15\text{mm}$ 를 초과한 구간은 없었고 2호차 탈선위치에서는 좌측 레일 면틀림은 -3mm 에서 $+2\text{mm}$ 로 반전하고 우측 레일 면틀림은 -1mm 에서 $+2\text{mm}$ 로 반전하고 있으나 좌·우 면틀림량이 미미하여 열차탈선에는 영향을 미치지 않은 것으로 분석되었다.



[그림12] 면틀림 분석 그래프

2.2.1.3 줄틀림 검측결과

[그림13]과 같이 줄틀림은 『선로정비규정』의 정비기준($\pm 15\text{mm}$)을 초과한 구간은 없었고 1호차 위치에서는 좌·우 레일 줄틀림이 -2mm 에서 $+7\text{mm}$ 로 반전하고 2호차 탈선위치에서는 $+5\text{mm}$ 에서 -3mm 로 반전하며 열차 진행 방향으로 4개의 파형반전이 있어 차량주행의 사행동(17)을 일으켰으나 좌·우 줄틀림량이 적어 열차탈선에 영향은 미미한 것으로 분석되었다.



[그림13] 줄틀림 분석그래프

17) 사행동(蛇行動) : 원추 형태의 단면이 있는 차륜이 레일 위를 달릴 때 철도차량에 좌우로 생기는 진동

2.2.1.4 평면성 틀림 검측결과

[그림14]와 같이 평면성 틀림(Twist)은 『선로정비규정』의 정비기준(±15mm)을 초과한 구간은 없었고 1호차와 2호차 사이 위치에서는 -5mm에서 +2mm로 반전하며 3호차 위치에서는 +9mm 정도의 틀림이 있었으나 이 틀림이 열차의 탈선에 미친 영향은 미미한 것으로 분석되었다.



[그림14] 평면성 틀림 분석그래프

2.2.2 레일정비

2.2.2.1. 레일 직마모 및 편마모

2019년 1/4분기 궤도 검측차 측정결과 [그림15]와 같이 레일의 직마모는 『선로정비규정』의 마모한도13mm를 초과한 구간은 없었고 차량하중에 의한 곡선 내측(최고 -5.5mm)이 외측(최고 -2mm) 보다 더 많이 마모되었으나 이 마모가 열차탈선에는 영향을 미치지 않은 것으로 분석되었다.



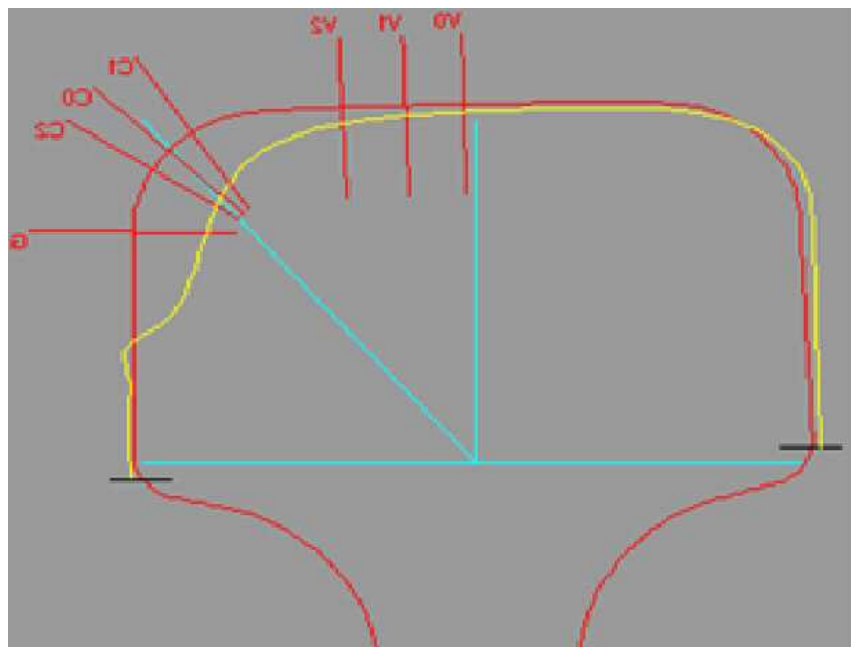
[그림15] 레일 직마모 분석그래프

또한 [그림16]과 같이 편마모는 『선로정비규정』의 마모한도 15mm를 초과한 구간은 없었고 차량 운행시 원심력 작용으로 곡선 외측(최고 -9.4mm)이 내측(최고 -2.1mm) 보다 더 많이 마모된 것이 확인되었다.



[그림16] 레일 편마모 분석그래프

[그림17]과 같이 탈선위치에서 레일 편마모(C0)는 6.5mm(인력 측정값 8mm)로 『선로정비규정』의 마모한도(15mm)를 초과하지 않았으나 레일 단면의 게이지 코너부 접촉각이 완만하고 연직 아래 방향으로 마모 깊이는 약 25mm로 주행차륜의 플랜지와 2점 접촉이 발생되어 타고 오를 수 있는 가능성이 증대되도록 마모된 것이 확인되었다.



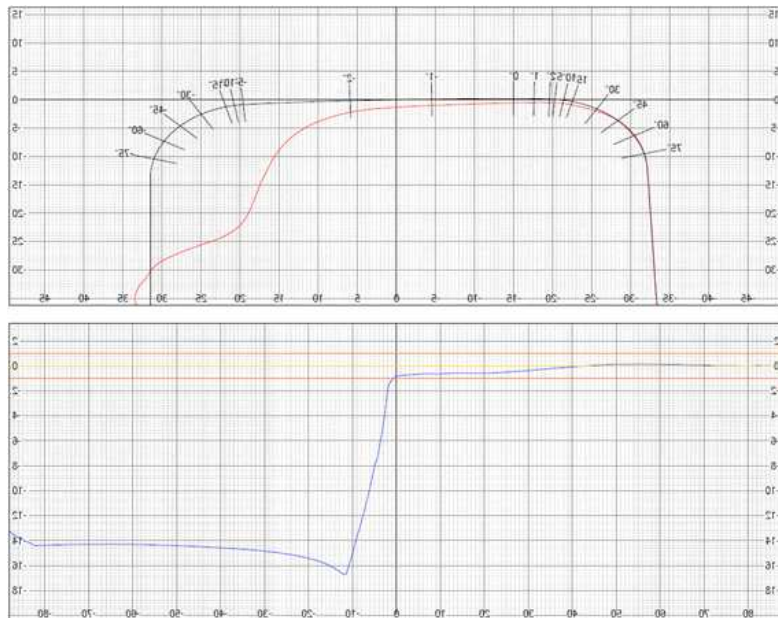
[그림17] 탈선위치(3k575) 우측(바깥)레일 마모형상

레일 마모가 심한 원곡선 구간(탈선 약 75m 전, 3k650)의 궤도검측차 측정 결과(2019. 2. 26. / 7mm, 2019. 11. 24. / 8mm)는 『선로정비규정』의 마모 한도(15mm)를 초과하지 않았으나 사고이후 서울교통공사에서는 열차 안전운행을 위해 곡선 내측레일에 탈선방지가드레일을 설치(2019. 12. 30.)하였다.

이 구간에 대해 항공철도사고조사위원회 조사관과 서울교통공사 궤도차직원이 합동으로 레일 형상측정기로 레일 형상을 정밀 측정(2020. 2. 21)한 결과 [그림18]과 같이 편마모는 16.8mm로 마모한도(15mm)를 1.8mm 초과한 것을 확인하였고 『선로정비규정』 제18조(레일의 마모한도 및 수명)에 따라 레일교환 시기가 지난 것으로 조사되었다.

이렇게 궤도검측차와 레일형상측정기 측정값이 약 8~9mm 차이가 발생함에 따라 곡선부 마모가 심한 레일의 경우에는 정확한 측정값을 얻기 위해 궤도검측차 측정 외 레일형상측정기를 이용한 병행 측정이 요구된다.

또한 『선로정비규정』 제18조(레일의 마모한도 및 수명)에 레일 직마모 및 편마모에 대한 한도 및 수명기준은 정하고 있으나 레일 두부 연직 아래방향 마모, 측마모 및 레일 형상변화에 대한 기준은 정하지 않고 있어 세밀한 레일 관리가 이루어지지 않는 것으로 분석되었다.



[그림18] 레일형상 측정기 편마모 분석 그래프(3k650)

2.2.2.2 레일 보수작업

개통 이후 2018년 12월말까지 사고구간의 누적 통과톤수는 409,527,823톤으로 레일수명 기준 10억톤 대비 약 41%로 누적 통과톤수 기준에 따른 교환 주기는 도래하지 않았다.

사고구간의 레일은 2003년 10월에 곡선 내·외측레일 바뀌놓기를 시행하였고(당시 외측레일 최대 마모량 13.5mm, 평균 마모량 11.5mm) 2009년 6월에 곡선 외측레일을 교환 후 사고 당시까지 약 9년 9개월 사용 중이었으며 『선로정비규정』 제17조(레일의 바뀌놓기 및 돌려놓기)에 '레일마모와 진행 형태'에 대한 정량적 기준을 정하지 않아 레일 바뀌놓기 또는 돌려놓기가 기준 없이 이루어져 기준 마련이 필요한 것으로 분석되었다.

또한 『선로정비규정』에 따라 '누적 통과톤수 5천만톤마다 0.1mm이상 연마 또는 밀링작업'을 개통 이후 2018년 말까지 약 8.2회 시행했어야 하나 2018년 8월에 레일연마작업을 단 1회 시행하여 레일 마모관리가 부적정하게 이루어져 열차의 탈선에 영향을 미친 것으로 분석되었다.

2.2.2.3 도보 순회점검

사고구간의 레일에 마모와 훼손이 있는데도 불구하고 도보 순회점검 검사표 결과에는 레일상태 "A(정상), 특이사항 없음"으로 기록·보고하여 도보 순회점검이 형식적으로 이루어지고 있었다. 그러나 이것이 열차 탈선사고의 직접적인 원인으로 작용하지는 않았다.

2.3 차량분석

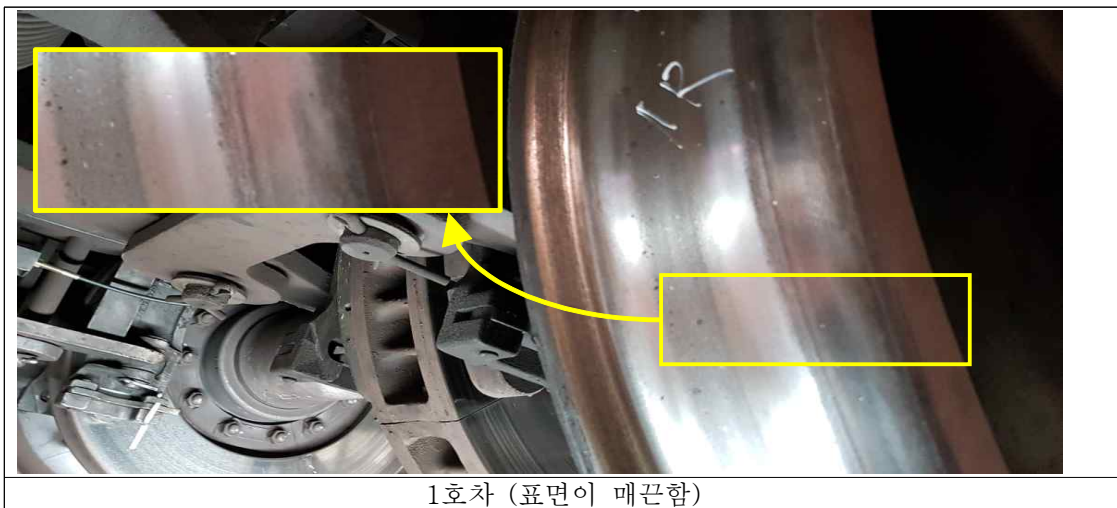
2.3.1 전동차 검수업무 적정성 분석

전동차의 검수이력을 조사한 결과, 사고에 영향을 줄만한 문제는 발견되지 않았으나 탈선차량에 설치되었던 1차 스프링과 2차 스프링은 차량 제작연도인 1996년에 최초 설치된 이후 사고 당일까지 계속 사용되고 있었다.

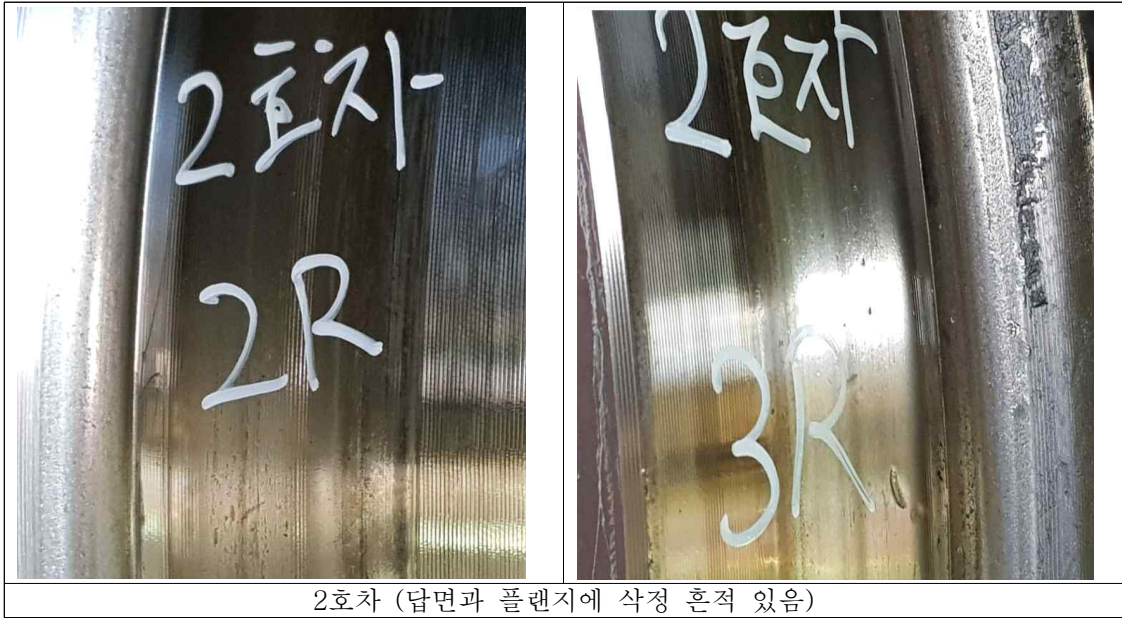
1차 스프링¹⁸⁾ 강성을 측정된 결과 모두 설계치보다 약 2배 증가한 것이 확인되었으나 서울교통공사 『전동차검사시행예규』에 1차 스프링 강성에 대한 검사항목 및 기준값이 없어 1차 스프링 강성은 관리되지 않았고, 결국 강성 증가는 차량 복원력을 저하시키고 윤중 감소율을 증가시켜 탈선에 영향을 미친 것으로 분석되었다.

2.3.2 차륜 거칠기 관리현황

사고열차의 2호, 3호, 4호차의 차륜은 사고 직전(2019.3.8.~3.13.)에 삭정하였고 사고 이후 조사한 차륜 표면은 [그림19]와 같고 탈선된 2호차의 차륜 표면에는 삭정 흔적이 남아 있었고 이 흔적으로 인해 차륜과 레일간의 마찰계수는 증가하여 탈선에 영향을 미친 것으로 분석되었다.



18) 이론적으로 1차 스프링 강성 변화가 2차 스프링 강성 변화에 비하여 윤중 감소율에 미치는 영향이 크다.



[그림19] 사고 열차의 차륜표면 상태비교

이론적으로 건조한 상태에서 차륜과 레일 사이의 마찰계수는 0.3정도이나 삭정 직후에는 0.5까지 올라가는 것으로 알려져 있다.

서울교통공사는 사고 이전에 차륜 삭정 시 차량기지별로 차륜 플랜지 거칠기를 별도로 관리하고 있지 않았으나 사고 이후에는 모든 차량기지에서 차륜이 압입되는 차축 저어널 평균 거칠기 기준인 1.6 μ m(마이크로미터) 이하로 관리하기 시작했다.

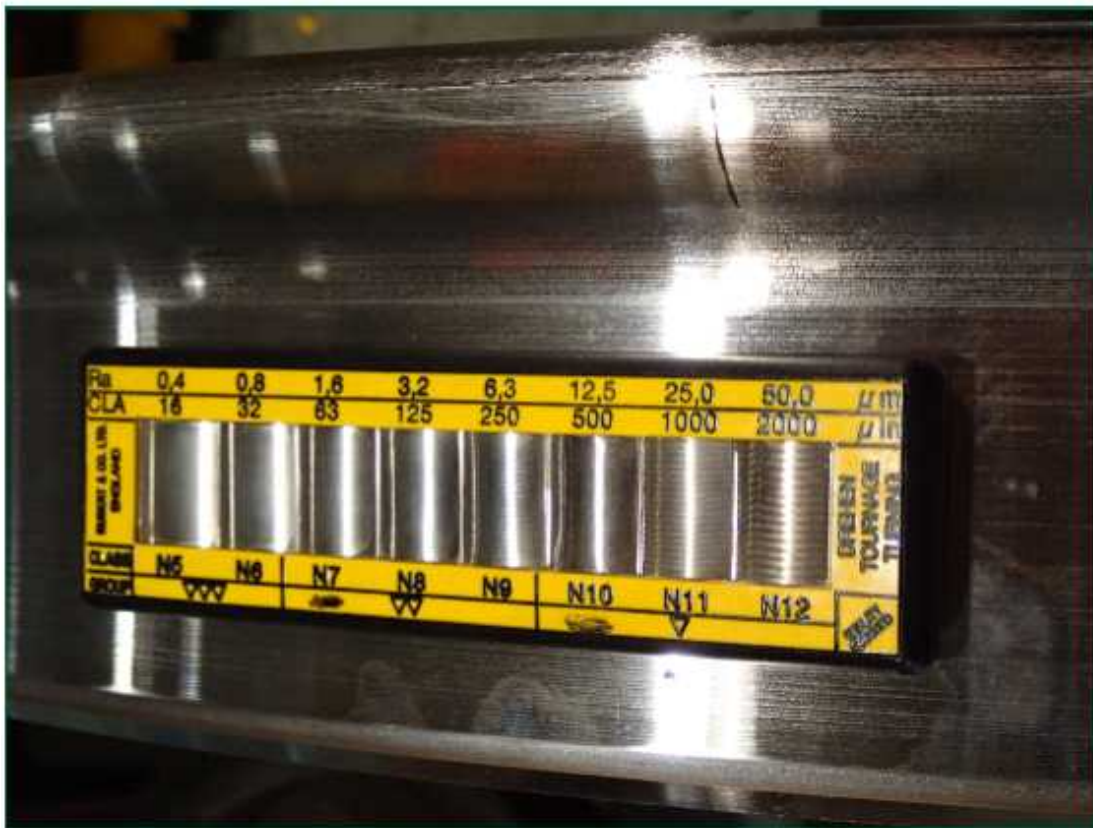
사고 이후 삭정되는 차륜 플랜지 표면상태는 [그림20]과 같다. 그러나 차륜 플랜지 거칠기(1.6 μ m)를 직접 측정하지는 않고 전삭기의 공구대 이송속도를 조절¹⁹⁾하는 방법으로 관리하고 있었다.

해외의 경우에는 삭정 후 차륜 플랜지 상태를 [그림21]과 같은 거칠기 샘플 게이지와 비교하여 삭정 후 차륜 플랜지 거칠기를 확인하고 있으나 서울교통공사에서는 이러한 절차가 없어 거칠기에 대한 정밀측정 관리는 되고 있지 않는 것으로 확인되었다.

19) 차륜의 절삭속도가 일정할 때 공구대 이송속도가 작을수록 차륜의 표면 거칠기가 양호함



[그림20] 사고 이후 손상된 차륜 표면상태



[그림21] 표면 거칠기 샘플 게이지와 비교한 손상 후 차륜 표면 상태 (RAIB Rail Accident Report 07/2014, Locomotive derailment at Ordsall Lane Junction, Salford, 23 January 2013)

2.3.3 차륜치수 및 축상높이 측정결과 분석

사고열차의 차륜직경, 플랜지두께, 플랜지높이, 차륜 내면간 거리 및 축상높이는 [표11]과 [표12]와 같이 『전동차 검사시행예규』 기준치 이내였다. 여기서 사고로 차륜 내측면이 손상된 7217호의 첫 번째 차축과 네 번째 차축은 평가에서 제외하였다.

2.3.4 사고열차의 정지윤증비²⁰⁾ 계산결과 분석

사고열차 중 1호차, 2호차 및 4호차에 대하여 윤증을 측정하여 정지윤증비를 계산한 결과, [표15]와 같이 각 차축의 정지윤증비는 -28.8%~+19.9%이었으며 대부분의 차축이 『철도차량 기술기준』(국토교통부 고시 제2016-102호, 2016년 3월 8일 개정, 이하 “철도차량 기술기준”이라 한다.) 5.3.1(중량측정시험)의 평가기준²¹⁾(±5%)을 초과하고 있었다.

그러나 탈선한 2호차(M1)의 정지윤증비는 사고 후 측정된 것이기 때문에 사고 당시의 정지윤증비가 어느 정도였는지는 확인할 수 없었다.

또한 측정결과를 살펴보면 각 차량마다 대각선 방향으로 윤증의 차이가 있는 것을 알 수 있고 이는 측정 당시의 2차 공기스프링 상태에 따라 발생할 가능성이 있으므로 각 차량 단위로 좌·우 차륜의 전체 윤증을 합산해 보았다.

합산결과는 약 2.0%로서 철도차량 기술기준 5.3.1(중량측정시험)의 동일차량에서의 좌·우 윤증 합 편차기준인 ±5% 벗어나지 않아 전체 차량의 좌·우 윤증 분포는 비교적 균일한 것으로 확인되었다.

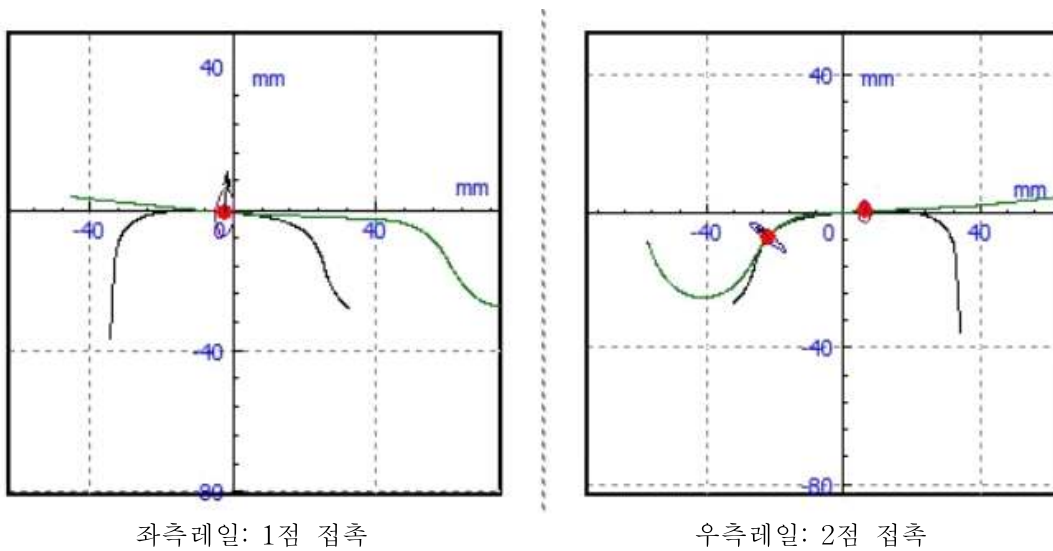
2.3.5 차륜/레일 접촉형상

20) 정지윤증비 : 공차상태에서 측정한 각 차축의 한쪽 차륜의 하중과 동일 차축의 좌우측 차륜하중의 평균치와의 편차

21) 공차중량 상태에서 각 차축의 한쪽 차륜하중은 동일차축의 좌우측 차륜하중 평균치와 편차가 ±5% 이내

탈선해석프로그램(UM)으로 탈선차량이 타고 오른 지점에서 우측 차륜과 레일의 접촉형상을 분석한 결과 [그림22]와 같이 2점 접촉이 발생하였다.

2점 접촉은 차륜의 구름반경(rolling radius) 차이를 발생시켜 곡선 추종성을 저하시키고, 차륜과 레일의 마모를 증가시켜 열차의 탈선에 영향을 미친 것으로 분석되었다.



[그림22] 차륜/레일 접촉형상

2.4 신호·전기분석

사고열차는 수락산역에서 정상적인 신호현시와 진로가 구성된 상태에서 운행하였고 사고발생 전 신호·전기 관련 이벤트 기록이 없어 이번 탈선사고에 영향을 미치지 않은 것으로 분석되었다.

2.5 종합분석

사고열차는 수락산역에서 수동운전모드로 출발하여 R301 좌 곡선 종점부 완화곡선 구간을 42.5km/h의 속도로 운행 중 장암역 기점 3k575m 지점에서 외측 레일과 2호차 1대차 차륜이 레일을 타고 올라 탈선한 뒤 약 400m를 지나서 정차하였다.

궤간 검측결과 곡선구간 및 타고 오른 지점에서 궤간이 기준을 초과하여 대차 회전량이 커져 공격각이 증가하며 횡압(Q)증가에 따른 탈선계수(Q/P)가 증가하여 사고열차의 차륜 플랜지가 레일을 타고 올라 탈선하였다.

또한 탈선 약 75m전(3k650) 곡선구간의 레일 편마모량이 16.8mm로 마모 한도(15mm)를 1.8mm초과하고 있었고 타고 오른 지점의 외측 레일은 차륜의 플랜지와 2점 접촉이 발생되어 타고 오를 수 있도록 마모되었다.

타고 오른 지점에서 우측 차륜과 레일은 2점 접촉이 발생하여 차륜의 구름반경(rolling radius) 차이를 발생시키고 곡선 추종성을 저하시켜 열차의 탈선에 영향을 미쳤다.

사고 이전에는 차륜삭정 시 차륜 플랜지 거칠기를 별도로 관리하지 않았고 탈선된 2호차의 차륜표면은 삭정 직후 거칠기가 불량하여 차륜과 레일간의 마찰계수를 0.3에서 약 0.5로 증가시켜 열차의 탈선에 영향을 미쳤다.

또한 1호차, 2호차 및 4호차 차륜의 정지윤증비는 -28.8%~+19.9%로 대부분의 차축이 『철도차량 기술기준』의 완성차에 대한 시험기준인 $\pm 5\%$ 를 초과하고 있었으나 각 차량마다 좌·우 차륜의 전체 윤증을 합산해 본 결과 전체 좌·우 차륜의 윤증비는 약 2.0%로서 전체 차량의 좌·우 윤증 분포는 비교적 균일한 것으로 확인되었다.

3. 결론(Conclusions)

3.1 조사결과(Findings)

- 3.1.1 사고열차 기관사는 관제지시에 따라 수동운전모드로 속도코드 65 상태에서 최고속도 46km/h 이하로 제한속도를 준수하는 등 적정하게 운전업무를 수행하였다.
- 3.1.2 사고열차 기관사는 탈선 이후 차량의 고장 이벤트·경보가 없어 탈선을 즉시 인지하지는 못하고 탈선 후 약 400m를 지나서 정차하였다.
- 3.1.3 관제사는 사고발생 전 사고열차와 앞 열차의 간격이 좁아지고 도봉산역 회차열차 등을 고려하여 관련 규정에 따라 사고열차에 대해 간격조정을 위한 수동운전을 지시하였고 기관사로부터 열차탈선을 보고받고 열차 운행통제 및 사고 상황전파 등 관제업무를 적정하게 수행하였다.
- 3.1.4 사고구간의 궤도 궤간은 최고 19.1mm로 『선로정비규정』 정비기준 14mm를 5.1mm초과하고 있었으며 2호차 탈선위치에서는 정비기준을 0.1mm 초과하고 있었다. 이렇게 곡선부에서 궤간이 확대되어 대차 회전량이 커져 공격각이 증가하며 횡압(Q)증가에 따른 탈선계수(Q/P)가 증가하여 차륜 플랜지가 레일을 타고 올라 탈선된 것으로 조사되었다.
- 3.1.5 서울교통공사 궤도처는 『선로정비규정』 제2조(정의)에 “궤간이란 레일의 윗면으로부터 14mm 아래지점에서 양쪽레일 안쪽간의 가장 짧은 거리를 말한다.” 라고 정하여 궤간을 측정하도록 하고 있음에도 불구하고 『선로정비규정』 제6조①항 단서조항 “다만, 궤간정비 시는 레일마모 상태를 감안하여 시행하여야 한다.”의 ‘레일마모 상태를 감안하여’를 ‘레일 편마모량을 차감하여(-)’로 임의 해석하고 궤간이 19.1mm인 구간의 편마모량 9.5mm를 차감하여 궤간이 9.6mm로 판단하고 궤간이 정비기준 14mm를 초과하도록 관리하여 탈선 사고의 원인을 제공하였다.

- 3.1.6 탈선위치의 레일은 편마모가 8mm로 『선로정비규정』의 마모한도(15mm)를 초과하지 않았으나 레일단면의 게이시 코너부 접촉각이 완만하고 연직 아래 방향으로 마모깊이는 약 25mm로 주행차륜의 플랜지와 2점 접촉이 발생되어 타고 오를 수 있도록 마모된 것이 확인되었다.
- 3.1.7 사고구간의 왼쪽선부(탈선 약 75m전, 3k650)의 궤도검측차 편마모 측정(2019.11.24.)값은 8mm로 『선로정비규정』의 마모한도(15mm)를 초과하지 않았으나 사고 이후 서울교통공사에서는 열차 안전운행을 위해 곡선 내측 레일에 탈선방지가드레일을 설치(2019. 12. 30.)하였다. 이 구간에 대해 항공철도사고조사위원회 조사관과 서울교통공사 궤도차 직원들이 합동으로 레일형상측정기로 정밀측정(2020. 2.21.)한 결과 편마모량이 16.8mm로 마모한도를 1.8mm 초과하였고 레일이 주행차륜의 플랜지와 2점 접촉이 더욱 쉽게 발생되도록 마모된 것을 확인하였다.
- 3.1.8 위와 같이 궤도검측차와 레일형상측정기 측정값이 오차가 발생함에 따라 곡선부 마모가 심한 레일 경우에는 정확한 레일마모 측정값을 얻기 위해 궤도검측차 외 레일형상측정기를 이용한 병행 측정이 요구된다.
- 3.1.9 『선로정비규정』 제18조(레일의 마모한도 및 수명)에 레일 직마모 및 편마모에 대한 한도 및 수명기준은 정하고 있으나 레일 두부 연직 아래방향 마모, 측마모 및 레일 형상변화에 대한 기준은 정하지 않아 세밀한 레일 관리가 이루어지지 않는 것으로 조사되었다.
- 3.1.10 사고구간의 레일은 2003년 10월에 곡선 내·외측레일 바꿔놓기를 시행하였고(당시 외측레일 최대 마모량 13.5mm, 평균 마모량 11.5mm) 2009년 6월에 곡선 외측레일을 교환 후 사고 당시까지 약 9년 9개월 사용 중이었으며 『선로정비규정』 제17조(레일의 바꿔놓기 및 돌려놓기)에 레일마모와 진행 형태에 대한 정량적 기준을 정하지 않아 레일 바꿔놓기 또는 돌려놓기가 기준없이 이루어져 기준마련이 필요한 것으로

로 조사되었다.

3.1.11 '누적 통과톤수 5천만톤마다 0.1mm이상 연마 또는 밀링작업'을 시행해야 하는 『선로정비규정』에 따라 개통 이후 2018년 말까지 약 8.2회 시행했어야 하나 2018년 8월에 레일연마작업을 단 1회 시행하여 레일마모관리가 부적정하게 이루어져 열차의 탈선에 영향을 미친 것으로 조사되었다.

3.1.12 사고구간의 레일에 마모와 훼손이 있는데도 불구하고 순회점검 검사표 결과에는 레일상태 "A(정상), 특이사항 없음"으로 기록·보고하여 선로 도보순회 점검이 형식적으로 이루어지고 있었다. 그러나 이것이 열차 탈선사고의 직접적인 원인으로 작용하지는 않았다.

3.1.13 탈선차량에 설치되었던 1차 스프링과 2차 스프링은 1996년에 최초 설치된 이후 사고 일까지 스프링 강성변화에 대한 유지관리 기준없이 사용되었고 사고 이후 1차 스프링 강성 측정결과 모두 설계치보다 약 2배 증가된 상태로서 유지보수 기준마련이 필요한 것으로 조사되었다.

3.1.14 사고열차의 2, 3, 4호차의 차륜은 사고 직전(2019.3.8.~3.13.)에 삭정하였고 탈선된 2호차의 차륜 플랜지 표면에는 삭정 흔적이 남아 있었으며 이 흔적으로 인해 차륜과 레일간의 마찰계수가 건조 상태의 마찰계수보다 증가되어 탈선에 영향을 미친 것으로 조사되었다.

3.1.15 사고 이전에는 서울교통공사에서 차륜삭정 시 차량기지별로 차륜 플랜지 거칠기를 별도로 관리하고 있지 않았고 사고 이후 모든 차량기지 에서 전삭기 공구대 이송속도를 조절하는 방법으로 차륜 압입부위인 차축 저어널 평균 거칠기 수준인 1.6 μ m 정도로 육안관리를 시작했으나 측정치 관리가 부정확하여 측정방법 개선이 필요한 것으로 조사되었다.

3.1.16 사고열차의 차륜직경, 플랜지두께, 플랜지높이, 차륜 내면간 거리 및

측상높이는 『전동차 검사시행예규』 기준치 이내였다.

3.1.17 사고열차의 1호차와 2호차의 차륜 총 16개 정지윤증비를 계산한 결과 각 차축의 정지윤증비는 -28.8%~+19.9%이었다. 그러나 차량 전체 좌·우 차륜을 합산한 윤증비는 『철도차량 기술기준』 5.3.1(중량측정시험) 동일차량에서의 좌·우 윤증 합 편차기준인 $\pm 5\%$ 이내인 약 2.0%로서 대부분 차량의 좌·우 윤증 분포는 비교적 균일한 것으로 확인되었다.

3.1.18 차륜과 레일의 접촉형상을 분석한 결과 탈선차량이 타고 오른 지점에서 우측 차륜과 외측 레일은 2점 접촉이 발생하였다. 2점 접촉은 차륜의 구름반경(rolling radius) 차이를 발생시켜 곡선 추종성을 저하시키고, 차륜과 레일의 마모를 증가시키며 열차의 탈선에 영향을 미쳤다.

3.1.19 사고열차는 신호현시와 진로는 정상적으로 구성된 상태에서 운행하였고 사고 발생 전 신호·전기 관련 이벤트 기록은 없었다.

3.1.20 결론적으로 사고열차가 R301 좌 곡선부에서 완화곡선 종점부로 운행 중 외측 레일의 편마모로 2점 접촉에 의한 차륜의 구름반경 차이가 발생하였고 궤간이 확대되어 대차 회전량이 커져 공격각이 증가하며 횡압(Q)증가에 따른 탈선계수(Q/P)가 증가하여 삭정 직후 마찰계수가 증가된 차륜 플랜지가 레일을 타고 올라 탈선하였다.

4. 사고원인 및 안전권고

이 사고조사와 관련된 원인 및 안전권고는 아직 확정되지 않았다.

5. 향후 계획

- 관계인 의견청취 : 2020년 4월
- 위원회 심의 및 공표 : 2020년 4~5월

※ 이 보고서는 중간보고서이므로 우리 위원회 최종보고서 공표시 그 내용이 달라질 수 있습니다.

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: araib@korea.kr