국토교통부

보고서번호: ARAIB/R 2024-7

철 도 사 고 조 사 보 고 서

한국철도공사

충북선

도안 ~ 증평역 사이

화물열차

열차탈선

2023년 12월 10일(일) 10시 46분경

2024. 10. 14.

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. 사실정보 ····· 3
1.1 사고 경위 ····· 3
1.2 피해 사항 ····· 4
1.3 관계자 인적정보 및 업무수행사항 ····· 5
1.4 기록정보 ····· 9
1.5 차량정보 ····· 12
1.6 선로정보 ····· 18
1.7 신호·전기정보 ····· 22
1.8 기상정보 ····· 23

2. 분석 ····· 24
2.1 관계자 업무수행 사항 분석 ····· 24
2.2 차량분석 ····· 27
2.3 선로분석 ····· 29
2.4 신호분석 ····· 29
2.5 탈선분석 ····· 29
2.6 종합분석 ····· 30

3. 결론 ····· 31
3.1 조사결과 ····· 31
3.2 사고원인 ····· 33

4. 안전권고 ····· 34
4.1 한국철도공사에 대하여 ····· 34

[붙임] 사고차량 베어링 분석 보고서 ····· 35

한국철도공사 충북선 도안~증평역 사이 화물열차 탈선사고

○ 운영기관 : 한국철도공사

○ 운행노선 : 충북선

○ 발생장소 : 도안~증평역 사이 상선(조치원역 기점 38.957km 지점)

○ 사고열차 : 제3128 화물열차(제천조차장역 09:57[1] → 오봉역 13:25)

[편성 21량: 기관차 1 + 화차 20량(시멘트 적재), 탑승자: 2명]

○ 사고유형 : 열차탈선

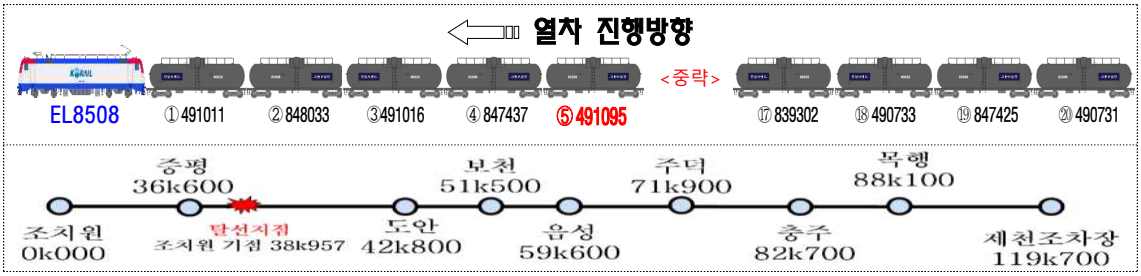
○ 발생일시 : 2023년 12월 10일(일) 10시 46분경

[그림1] 사고 현장 약도

1) 실제 열차 출발 시각은 예정 시각보다 17분 이른 09:40분 출발함

개요

2023년 12월 10일 10시 46분경 한국철도공사 제3128 화물열차(제천조차장역 09:57 → 오봉역 13:25, 편성 21량)가 시멘트 약 1,046톤을 싣고 충북선 도안역을 지나 증평역을 향해 38km/h로 운행하던 중, 조치원역 기점 38.957km 지점에서 기관차로부터 5번째 화차의 후부 대차 1위축(차량 기준 3위축) 차륜 2개가 좌측으로 탈선되었다.



[그림2] 사고 개요도

이 사고로 인명피해는 없었으나, 차량 및 선로 시설물 등이 파손되었으며, 일부 구간의 운행이 일시 중지되었다.

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

이번 한국철도공사 충북선 도안~증평역 사이에서 발생한 화물열차 탈선사고의 원인은 '차축베어링이 발열로 해당 부분의 차축이 절손되고 윤축이 유동되어 대차가 불안정해진 것'으로 결정하였다.

또한, 기여 요인은 ① 축상 엔드캡 내부 및 차축베어링 롤러 표면에 수분 유입으로 녹과 부식이 발생한 점, ② 사고차량에 대한 기본 정비 및 출발 검사 소홀로 차축베어링의 발열 여부를 사전에 발견하지 못한 점, ③ 화물열차 운행 중 차축 발열이 발생하여도 검지할 수 있는 설비가 없었던 점으로 결정하였다.

따라서 항공·철도사고조사위원회는 『항공·철도 사고조사에 관한 법률』 제26조에 따라 한국철도공사에 4건의 안전권고를 발행한다.

1. 사실정보

1.1 사고 경위

2023년 12월 10일 10시 39분경 한국철도공사(이하'공사'라 한다) 제3128 화물열차(제천조차장역 09:57 → 오봉역 13:25, 편성 21량, 탑승자 2명, 이하 '사고열차'라고 한다.)가 시멘트 약 1,046톤을 싣고 보천~도안역 사이 하구배(12.5‰) 구간 조치원역 기점(이하 '조기'라 한다.) 45.0km 부근을 타력운행 중 기관사는 열차의 속도가 상승되지 않아 제륜자 고착으로 의심하고 비상제동을 체결하여 정차하였다.

이후 기관사는 열차에 이상이 없다고 판단하고 재출발(10:43)하였고, 10:46경 사고열차는 도안역을 지나 증평역을 향해 38km/h 속도로 운행 중 곡선부(R600, 조기 38.957km 지점, 이하 '사고지점'이라 한다.)에서 기관차로부터 5번째 화차(이하 '사고차량'이라 한다.)의 후부 대차 1위축 차륜 2개가 좌측으로 탈선되어 건널목에 걸쳐 정차하였다.

10:50경 기관사는 건널목 개통을 위해 사고열차를 약 308m 이동 후 상용 및 비상 제동을 취급하여 최종 정차(조기 38.4km 부근)하였다.

사고차량의 사고 이틀 전부터 운행경로 및 검사 등의 일정은 다음과 같다.

2023년 12월 8일 18:17경 제천조차장역에서 벌크화차 20량(빈차, 사고차량 포함)은 기본정비를 받은 후 출발(18:26)하여 입석리역에 도착(19:53)하였다.

12월 9일 10:02경 입석리역에서 시멘트를 실은 벌크화차 20량(약 1,046톤)은 출발검사를 시행 후 출발하여 제천역을 경유, 제천조차장역에 도착(11:14)하였다.

사고 당일 12월 10일 09:20경 제천조차장역에서 전기기관차(8508호)에 벌크화차 20량을 연결하여 출발검사 시행 후 출발(09:40)하였다.

1.2. 피해 사항

1.2.1 인명피해

이번 사고로 인명피해는 없었다.

1.2.2 물적 피해

이 사고로 인하여 차량분야는 차축, 차륜 등 파손으로 12백만 원, 시설분야는 레일, 침목, 체결구가 파손되어 31백만 원 등 총 43백만 원의 피해가 발생하였다.

(단위: 백만 원)

구 분	물적 피해				
	계	궤도	차량	신호	건축・설비
피해금액	43	31	12	-	-

[표1] 물적피해 현황(공사 제공)

1.2.3 기타 피해

또한, 이 사고로 열차 8대(14~40분 지연)가 운행에 지장을 받았다.

1.3 관계자 인적정보 및 업무수행사항

1.3.1 기관사

기관사 ○○○(52세, 남, 이하 '기관사'라 한다.)는 1994년 11월 15일 철도청(현, 한국철도공사) 제천기관차승무사업소에 부기관사로 임용되어 2011년 4월 18일 기관사로 발령받아 사고 발생일까지 근무 중이었고, 디젤차량, 제1종 전기차량 운전면허를 취득·보유하고 있었다.

기관사는 2023년 12월 7일 11:55~23:23 근무, 12월 8일 17:10~익일 09:03까지 근무, 12월 10일(사고 당일)은 08시 12분에 출근하였으며, 승무적합성검사에서 적합한 것으로 판정받아 승무하였다.

기관사의 승무 경로는 제천역에서 단행기관차를 출고하여 제천조차장역에서 화차를 연결하여 오송역 경유 천안역까지 운행할 예정이었다.

기관사는 제천조차장역에서 수송원으로부터 화물열차 출발검사 결과가 양호하다는 통보를 받고 출발(09:40)하였고, "보천~도안역 사이의 하구배(12.5~8‰)이며 곡선(400R)인 구간을 무동력으로 운행할 때, 속도가 증가하지 않아 제동 불완해 확인을 위해 도안역에 정차하려 하였으나 열차가 80㎞/h 속도로 운행 중이라 정차하지 못하고, 다음 통과역인 증평역에 정차를 요청하여 로컬관제원(이하 '관제원'이라 한다.)으로부터 승인받았다."라고 진술하였다.

기관사는 증평역 도착 전 도안~증평역 사이 직선구간에서 "제륜자 고착 여부를 확인하고자 비상제동(1차)을 취급하여 정차(10:41)한 다음 다시 출발할 때 열차가 무리 없이 견인되어 제동 불완해가 아니라고 판단하였으며,

이후 우곡선(R600) 구간을 통과할 때 후부를 확인하던 부기관사가 '연기가 난다.'라며 정차하라고 외쳐 비상제동(2차)을 취급하여 정차하였다."라고

진술하였다.

기관사는 “사고열차의 기관차와 화차 2량이 용강 철도건널목을 막아 열차를 앞으로 이동시켜 건널목 통행이 가능하도록 조치한 다음, 열차의 5번째 화차 후부 대차 차륜 2개가 진행 방향 좌측으로 탈선된 것을 확인한 후 증평역 관제원에게 통보하였다.”라고 진술하였다.

1.3.2 부기관사

부기관사 ○○○(29세, 남, 이하 ‘부기관사’라 한다.)는 2022년 12월 28일 한국철도공사 제천기관차 승무사업소에 부기관사로 입사하여 사고 당일까지 근무 중이었으며, 제2종 전기차량 운전 면허를 보유하고 있었다.

부기관사는 12월 10일(사고 당일) 기관사와 같이 출근하였으며, 승무적합성 검사에서 적합한 것으로 판정받아 승무하였다.

부기관사는 “사고열차가 보천~도안역 사이의 하구배 구간을 운행 중, 기관사로부터 무동력 운전 중인데 속도가 잘 상승하지 않으며 평소보다 조금 다르다는 얘기를 들었다.”라고 진술하였다.

이후 열차 후부를 수시로 감시하던 중 “도안~증평역 사이 두 번째 우곡선 600R(조기 38.8㎞) 지점에서 열차 후부의 연기 발생을 확인하고 즉시 기관사에게 비상 정차하라고 외쳤다.”라고 진술하였다.

1.3.3 제천조차장 차량사업소 차량 관리원

제천조차장 차량사업소 기본정비팀은 일근 2명, 4조(각 3명) 2교대 등 총 14명이 근무하면서 기본정비[2]는 선임차량관리장, 차량 관리원 2명 등 총 3명이 담당하고 있었다.

2) 화차의 기본정비는 평일 주간(08:30~17:30)에 도착하는 화차에 대하여 시행하며, 제천조차장 차량사업소는 별도 지정한 교대근무 소속으로 야간 및 휴일에도 기본정비를 시행하고 있었다.

2023년 12월 8일 야간에는 선임차량관리장, 차량 관리원 4명(초과 근무 2명 포함) 등 5명이 근무하고 있었고, [그림3]과 같이 역사 CCTV 영상을 확인 한 결과, 차량 관리원 2명(음영 부분)이 화차 20량 기본정비를 감시자 배치 없이 적색등을 게출하고 랜턴만 휴대하고 18:11분에 시작하여 18:17분에 종료하였다.

기본정비 시작(18:11) 기본정비 종료(18:17)

[그림3] 제천조차장역 CCTV 영상

차량 관리원 ○○○(57세, 남, 이하 '차량 관리원 A'라 한다.)은 기관차에서부터 열차 진행방향 오른쪽으로 화차 10량을 점검하였고, 차량 관리원 ○○○(53세, 남, 이하 '차량 관리원 B'라 한다.)은 열차 진행방향 왼쪽으로 사고차량을 포함하여 점검하였다. 이들은 [그림4]와 같은 「화차 유지보수 매뉴얼」 부록 '화차 기본정비 체크리스트'를 활용한 점검 기록은 없었다.

화차 기본정비 CHECK LIST

▪ 차호 : ( )호 일시 : 년 월 일 점검자 : ( )

구분	점검항목	기준	점검(측정)결과
주행장치	축상발열, 윤활유 누유여부 및 차륜 외형 상태	누유 및 변색 확인(70℃, 90℃)	
	각종 스프링 및 마모판 외형 상태		
	대차 현수고리 그리스 도포 상태		
	축상 온도테이프 변색 및 부착 상태		
연결완충장치	연결완충장치 및 각 부품 체결 상태		
	연결기 연결 상태 및 수하 상태		
	샹크가이드 마모판 윤활 상태		
제동장치	제동장치 각부 외형상태 및 제륜자 마모 상태	45mm~10mm	
	제동계통 각부 공기누설 여부 (한, 기관차 연결 공기관통 시)		
	수용제동기 작동 상태		
	응하중변 감지봉 유간 상태		
	공기호스 및 담미커플링 상태		
	공기계통 수분 배출(한, 동절기)		
	탈선감지 밸브 취부 상태(한, 설치차량)		
	제동표시기 상태(한, E축 컨테이너 화차)		

[그림4] 화차 기본정비 체크리스트 발췌

선임차량관리장 ○○○(57세, 남, 이하 '선임장'이라 한다.)은 차량 관리원 A와 B가 18:25분경 3172열차에 대한 기본정비를 이상없이 완료하였다고 유선 통보를 받고 [그림5]와 같이 화차 20량의 주행장치, 연결완충장치, 제동장치, 차체 및 차내 설비 등 작업내역을 전산시스템(KOVIS)에 입력하였다.

편성차호	검종	오더	ACT	작업장	작업내역	확인	관리장	관리팀장	작업자1	작업자2	입고일
490527	ES(기본정비)	100006383534	****								2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0010	15020	주행장치						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0020		축상발멸, 윤활유 누유여부 및 차륜 외형상태	B					2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0030		각종스프링(공기스프링 장치 포함) 및 마모판 외형상태						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0040		대차 현수고리 그리스 윤활 상태 확인						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0050		축상 온도테이프 변색 및 부착 상태 확인						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0060	15020	연결완충장치						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0070		연결완충장치 및 각 부품체결상태 확인	A					2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0080		연결기 연결상태 및 수하상태						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0090		상크가이드 마모판 윤활 상태 확인						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0100	15020	제동장치						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0110		제동장치 각부 외형 상태 및 제륜자의 마모상태	A					2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0130		수용제동기 작동상태						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0140		응하중변 감지봉 유간상태						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0150		공기호스 및 담미커프링 상태						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0160		각종 레버 및 핀류 상태 확인						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0170		공기계통 수분 배출(한, 동절기)						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0180	15020	차체 및 차내설비						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0190		차체누수, 차체경사 여부						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0200		각종문비 및 발판 손잡이 상태						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0220		측, 상판 상태						2023-12-08
490527	ES(기본정비)	100006383534	0230		조차 외변캡 상태						2023-12-08

[그림5] 화차 1량 기본정비 작업내역 입력 내용 발췌

1.3.4 입석리역 수송원 A, B

입석리역 수송원 ○○○(54세, 남, 이하 '수송원 A'라 한다.)와 수송원 ○○○(49세, 남, 이하 '수송원 B'라 한다.)은 사고 전날(12.9 10:30경) 사고열차 조성을 위하여 유치된 벌크 화차 20량에 기관차를 연결한 후, 수송원 A는 기관차에서부터 열차 진행방향 왼쪽으로 전부 화차 10량을 검사하였고, 수송원 B는 열차 후부에서 진행방향 왼쪽으로 후부 화차 10량을 검사하였다.

[그림6]과 같이 수송원의 출발검사 체크리스트를 확인 한 결과 연결기 고저차, 축상온도 테이프 변색 등의 항목이 있었으며 이상이 없는 것으로 기록되어 있었다.

열차번호	출발 시간	현 차 (량)	수제동기 완해상태	연결기 고저차	해치쇄정 (송기관캡 등)	문비쇄정 (유개차) (무개차)	축상온도 테이프 변색	안전설비 훼손, 용접부 균열, 볼트 절손이완	공기압력 시험계(5kg/㎠)	뒤표지 게시	이상여부 (제동시험 등)
R3172	19:54	20	○	○	○		○	○	○	○	없음
3142	19:42	20	○	○	○		○	○	○	○	없음
3120	07:38	20	○	○	○		○	○	○	○	없음
3244	09:34	20	○	○	○		○	○	○	○	○
6234	10:51	20	○	○	○		○	○	○	○	○

[그림6] 입석리역 출발검사(12.9) 체크리스트 발췌

1.3.5 제천조차장역 수송원 C, D

제천조차장역 수송원 ○○○(29세, 남, 이하 '수송원 C'라 한다.)와 수송원 ○○○(49세, 남, 이하 '수송원 D'라 한다.)은 사고 당일(12.10 9:20경) 사고열차 조성을 위하여 유치된 벌크 화차 20량(사고 전일 도착)에 기관차를 연결한 후, 수송원 C는 기관차에서부터 열차 진행방향 오른쪽으로 전부 화차 10량을 검사하였고, 수송원 D는 열차 후부에서 열차 진행방향 오른쪽으로 화차 10량을 검사하였다.

[그림7]과 같이 수송원의 출발검사 체크리스트를 확인 한 결과 연결기 고저차, 축상온도 테이프 변색 등의 항목이 있었으며 이상이 없는 것으로 기록되어 있었다.

열차번호	출발 시간	현 차 (량)	수제동기 완해상태	연결기 고저차	해치쇄정 (송기관캡 등)	축상온도 테이프 변색	안전설비 훼손, 용접부 균열, 볼트 절손이완	공기압력 시험계(5kg/㎠)	뒤표지 게시	이상여부 (제동시험 등)
3128	09:38	20	○	○	○	○	○	○	○	○
3129	09:39	20	○	○	○	○	○	○	○	○

[그림7] 제천조차장역 출발검사(12.10) 체크리스트 발췌

1.4 기록정보

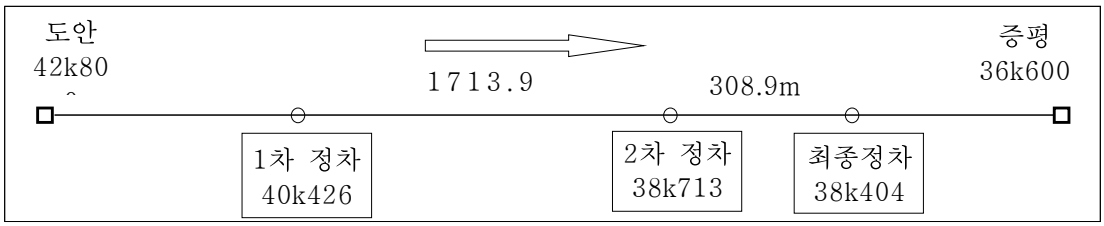
1.4.1 열차 운행기록

[그림8]과 같이 사고열차는 도안~증평역 사이에서 제한속도 80km/h 이내인 55km/h로 운행하다가 기관사가 1차 비상제동을 취급(10:41:27)하여 정지(조기 40k426)하였다.

다시 출발(10:43:13)하여 38㎞/h 속도에서 후부 연기를 확인하고 2차 비상제동을 취급(10:46:44)하여 정지(조기 38k713)하였고, 이동거리는 1,713.9m였다.

기관사는 건널목 개통을 위해 다시 출발(10:48:11)하여 12㎞/h 속도에서 3차 비상제동을 취급(10:50:05)하여 308.9m를 이동 후 최종 정지(조기 38k404)하였다.

구분	시간	제한속도 (km/h)	운행속도 (km/h)	운전 취급	비 고
①	10:41:27	80	55	1차 비상제동 체결	제륜자 고착 여부 확인
②	10:43:13	80	0	1차 재출발	
③	10:46:43	80	38	2차 비상제동 체결	후부 연기 발생 확인 후
④	10:48:11	80	0	2차 재출발	
⑤	10:50:05	80	12	3차 비상제동 체결	용강 건널목 개통 후



[그림8] 사고열차 운행기록

1.4.2 무선 통화기록

기관사와 증평역 관제원간 열차무선 통화기록은 [표1]과 같다.

시 간	기관사	증평역 관제원
10:40	철도 증평 3128 이상! 우리 부본선 좀 잡아주세요. 후부 완해 불량차가 있는 것 같아서요.	3128 증평! 왜 그러시는데요? 알았습니다. 그럼, 기외 정차로 오세요.
10:42		3128 상부본선입니다.
10:47	철도 증평 3128 이상! 일곱 번째 화차에 지금 연기가 나고 그러는데요, 뒤에 차오는 거 없지요?	예, 3128 증평! 예, 지금 차오는 거 없어요.

	우리 여기 잠깐 보고 갈게요.	예, 그러세요.
10:55	3128 이상!	3128 증평! 지금 들어오고 있나요?
10:56	3128은 정차해서 확인하고 있습니다. 잠시만요.	3128 증평!
10:57	증평 3128 이상! 여기 다섯 번째 화차가 탈선했네요. 예.	3128은 여기 들어와서 보세요. 거기 건널목도 있고 그래요. 예 3128 증평! 탈선했다고요.

[표1] 열차 무선 녹취록

1.4.3 CCTV 영상

사고열차는 사고 전일(2023.12.9) 입석리역에서 출발 후 [그림9] ①과 같이 제천역 통과(11:04) 시 불꽃과 연기가 최초로 확인되었고, 사고 당일(2023.12.10) 제천조차장역에서 출발(09:40) 후 ②, ③, ④와 같이 달천역(10:14), 주덕역(10:18), 음성 SP(10:22) 통과 시 불꽃이 확인되었다.

① 제천역 통과(12.9 11:04): 불꽃과 연기 확인

② 달천역 통과(12.10 10:14): 불꽃 확인

③ 주덕역 통과(12.10 10:18): 불꽃 확인

③ 음성 SP 통과(12.10 10:22): 불꽃 확인

[그림9] 각 역 감시용 CCTV 영상

1.5 차량 정보

1.5.1 사고열차 조성

사고열차는 21량 편성이고, 전기기관차 8508호와 벌크 화차 20량이며 조성은 [표2]와 같다.

No	차량번호	차종	화물적재	차중률	차장률	비고
	8508	전기기관차	-	-	-	
1	491011	벌크 화차	시멘트	1.70	0.90	
2	848033	벌크 화차	시멘트	1.60	0.90	
3	491016	벌크 화차	시멘트	1.60	0.90	
4	847437	벌크 화차	시멘트	1.60	0.90	
5	**491095**	벌크 화차	시멘트	1.70	0.90	**사고차량**
~	~					
20	490731	벌크 화차	시멘트	1.70	0.90	

[표2] 사고열차의 조성

1.5.2 사고차량의 주요 제원

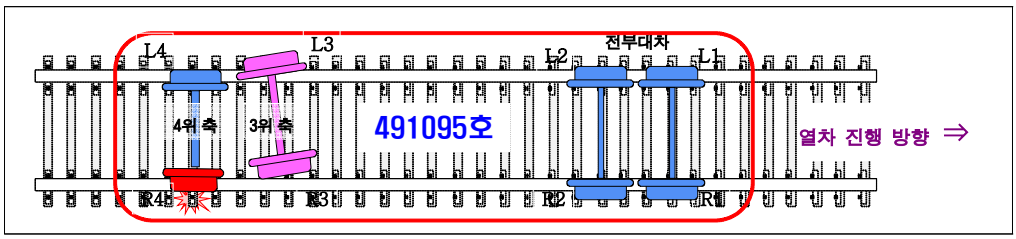
사고차량의 주요 제원은 [표3]과 같다.

구 분	제 원	구 분	제 원
제 작	㈜태양중공업(2004.2.)	내용연수	30년
차량길이	13,160 ㎜	자중	22.1 ton
차량폭	3,100 ㎜	하중	52.0 ton
차량높이	3,850 ㎜	대차종류	용접대차
고정축거	1,800 ㎜	차축	RCT-D축
최고속도	120 ㎞/h	제동장치	KRF-3, 양압식

[표3] 사고차량의 주요 제원

1.5.3 사고차량 상태 조사

[그림10, 11]과 같이 사고차량은 후부 대차 4위축 오른쪽 축 저널부가 절손되어 떨어져 나가, 대차가 틀어지면서 3위축이 선로 좌측으로 탈선되었다.



[그림10] 사고현장 차량탈선 상태

탈선현장 차량 상태

탈선대차 모습(L3)

사고축상(R4) 측면

사고축상(R4) 전면

[그림11] 탈선 차량 상태

[그림12]와 같이 사고열차가 운행한 보천~도안역 사이(조기 48.900㎞) 선로변에서 탈락된 차축의 축상 하우징과 스프링이 발견되었고, 음성~보천역 사이(조기 54.510㎞)에서 절손된 저널부와 엔드캡이 발견되었다.

축 저널부의 엔드캡 볼트는 3개 모두 머리 부분이 절손되어 떨어져 나갔고, 볼트 몸체가 축에 박혀있는 상태였다.

탈락된 축상하우징

탈락된 축상스프링

탈락된 축 저널부

탈락된 엔드캡

[그림12] 탈락된 축상하우징, 스프링, 저널부, 엔드캡

사고 직후 차륜 규격을 측정한 결과, [표4]와 같이 「철도차량기술기준」에 적합한 것으로 확인되었다.

구 분		차륜 내측거리	차륜 직경	플랜지 높이	플랜지 두께	비고
기술기준		1,352~1356mm	860~776mm	25~35mm	34~23mm	
3위	좌	1,353	844	27	30	
	우		840	26	33	
4위	좌	1,355	850	26	32	
	우		852	27	32	절손차축

[표4] 사고차량 후부대차 차륜 측정 결과

사고대차의 3개 축상 엔드캡을 분해하여 확인한 결과 3위축(좌, 우)은 이상이 없었으나 사고축상 상대 L4의 엔드캡 안쪽 면에 부식이 있었고, 고정볼트 2개 나사산에 부식이 확인되었다.

3위축 R3, L3 엔드캡과 볼트

4위축 L4 엔드캡 내부, 볼트

[그림13] 3·4위축 엔드캡, 볼트 상태

1.5.4 사고차량 정비기준 및 이력

공사의 차량 정비 사규, 매뉴얼은 [표5]과 같고, 사고차량은 [표6]과 같이 사규와 매뉴얼에 따라 정비가 이뤄진 것으로 확인되었다.

구 분	유지보수 관련 근거
사규	철도차량유지보수세칙: 정비 주기 객화차유지보수기준: 정비 항목
매뉴얼	화차 유지보수 매뉴얼 기본정비 - (FC-1-2400-HQ-T-1) 화차 차축베어링 정비 매뉴얼 - (FC-1-U7200-HQ-T-7)

[표5] 공사의 차량 정비 사규

정비종류		정비 주기	정비 이력			축상 관련 항목
			시행일	주행거리(㎞)	시행소속	
기본정비 ES		1,600km 이내	23.12.08.	647,482	제천조차장 차량	축상 발열 등 상태, 윤활유 누유 여부 등
경정비	LI-6	40,000km 또는 1년 이내	23.06.12.	625,243	제천조차장 차량	축상 엔드캡 및 이완 방지 상태
	GI-1	80,000km 또는 2년 이내	22.10.02.	589,034	제천조차장 차량	

중정비 GI-2	160,000km 또는 4년 이내	21.03.15 ~03.23.	516,982	대전단 (제천)	차축베어링 누유 및 이상음 확인, 축 방향 유간 측정
	800,000km 또는 8년 이내	예정 (24.11)	-	-	차축베어링 분해정비
사고당일(5.14) 최종 주행거리			647,597		

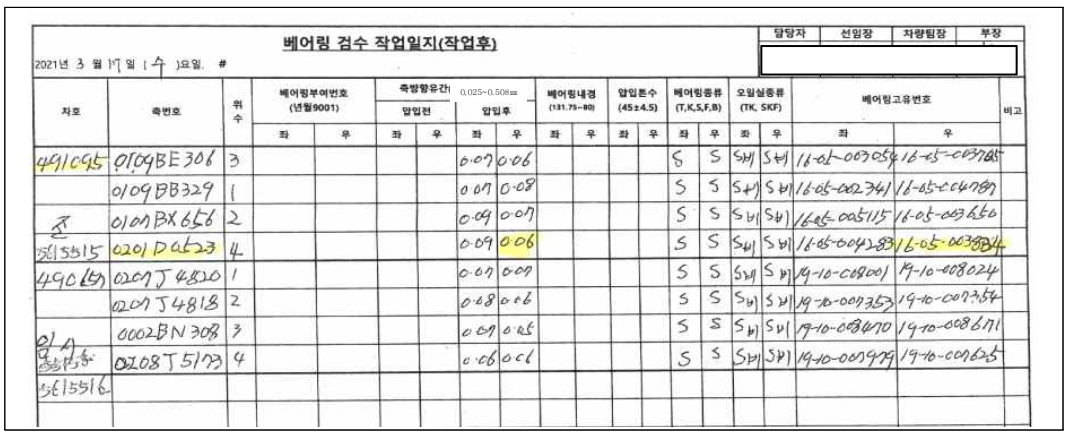
[표6] 사고차량의 주요 정비 이력

사고차량의 차축베어링의 제원은 [표7]과 같다.

베어링 형식	23124CC/C3VA350
정격하중	(C) 449000N
반경 유간(Radial Clearance)	120~160㎛
반경 방향흔들림(Raceway Radial Runout)	Max 25㎛
폭 변화(Width Variation)	Max 25㎛
중량	7.80kg
제작사 : SKF(스웨덴) RCT NFL[3] - 중국 베이징에서 생산되었음	
제작년월	2016.5(차량 장착: 2016.11.11)
베어링 번호	16-05-003834

[표7] 사고차량의 차축베어링 제원

차축베어링은 신품이 장착(2016.11)되었고, [그림14]와 같이 중정비 시 베어링 회전시험, 축방향 유간 측정 등을 시행하여 이상없음을 확인하였다.



베어링 검수 작업일지(작업후)

담당자	선임장	차량팀장	부장

2021년 3 월 17 일 (수)요일. #

차호	축번호	위수	베어링부여번호 (년월9001)		축방향유간 0.025~0.508㎜ 압입전		압입후		베어링내경 (131.75~80)		압입톤수 (45±4.5)		베어링종류 (T,K,S,F,B)		오일실종류 (TK, SKF)		베어링고유번호		비고
			좌	우	좌	우	좌	우	좌	우	좌	우	좌	우	좌	우	좌	우	
491095	0109BE306	3					0.07	0.06					S	S	SH	SH	16-05-003054	16-05-003785	
	0109BB329	1					0.07	0.08					S	S	SH	SH	16-05-002741	16-05-004789	
조	0101BX656	2					0.09	0.07					S	S	SH	SH	16-05-005115	16-05-003656	
551515	0201DA523	4					0.09	0.06					S	S	SH	SH	16-05-004388	16-05-003834	
490657	0207J4820	1					0.07	0.09					S	S	SH	SH	19-10-008001	19-10-008024	
	0207J4818	2					0.08	0.06					S	S	SH	SH	19-10-007353	19-10-007354	
인사	0002BN308	3					0.09	0.05					S	S	SH	SH	19-10-008470	19-10-008671	
정비부장	0208J5173	4					0.06	0.06					S	S	SH	SH	19-10-007979	19-10-007625	
551516																			

[그림14] 차축베어링 중정비(GI-2) 정비일지

3) RCT NFL : Rotating end **C**ap and Tapered roller bearing **N**o Field **L**ubrication의 약어로 정상 운행 중 그리스 재급유가 필요하지 않은 테이퍼 롤러 베어링

차축베어링 분해 정비는 주행거리 80만㎞ 또는 8년(중정비 2회차) 중 먼저 도달되는 것을 적용하며 시기(2024년 11월 예정)는 도래하지 않았다.

사고 이후 사고대차의 베어링 그리스 양을 측정한 결과, R3(375g), L3(380g), L4(385g) 3개 베어링 모두 기준[4](360±30)g 이내였다. (R4: 파손)

1.5.5 사고 베어링 구입

한국철도공사는 사고 베어링을 2016년 5월에 경쟁입찰 방식으로 Beijing Nankou SKF Railway Bearings Co에서 'AAR[5]-23'인증 제품을 구입하여 사고 차량에 장착(2016. 11)하였다.

화차 차축 베어링은 해외 업체 TIMKEN(미국), SKF(스웨덴)에서 전량 수입하고 있다.

1.5.6 사고차량의 화물 적재 상태

[표8]과 같이 사고차량(491095)의 중량을 확인 한 결과, 사고 전(0.25톤 부족)과 사고 후(0.08톤 초과)의 차이가 있으나 이를 과적으로 판단하기는 어려웠다.

구 분	최대 하중	자중	계중			중량 확인
			총 중량	화물	과부족	
사고 전(12.9)	52	22.1	73.85	51.75	- 0.25	입석리역(검량부)
사고 후(12.19)	52	22.1	74.18	52.08	+ 0.08	대전조차장역(실측)

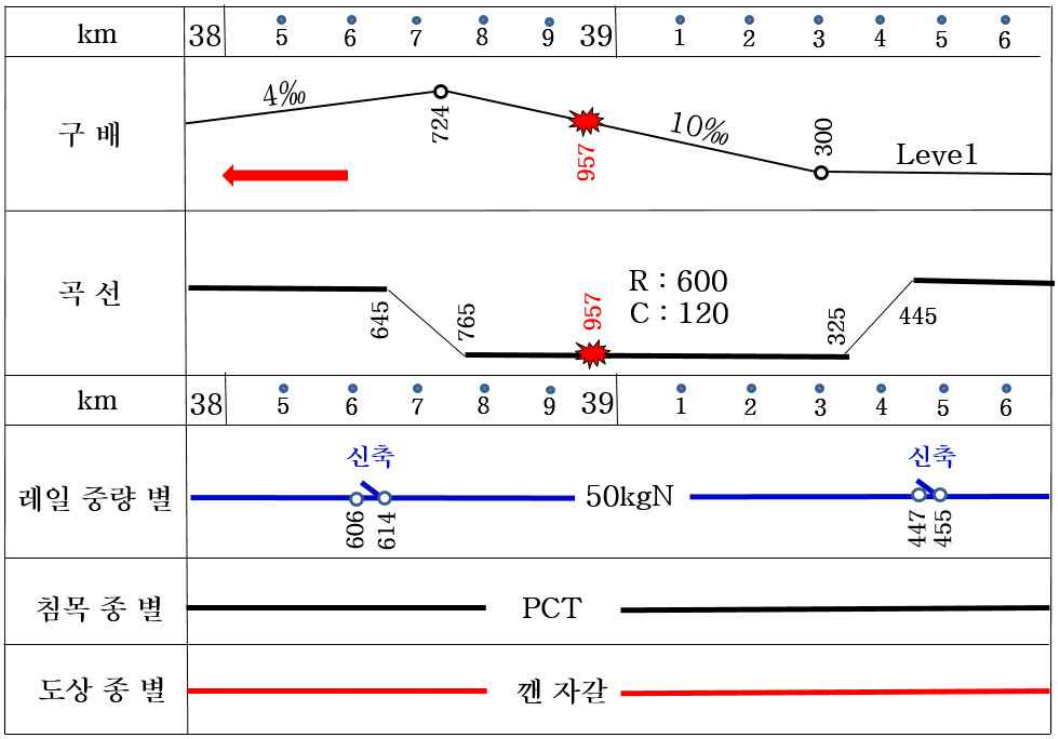
[표8] 사고차량 계중 결과(단위: 톤)

4) 화차 차축베어링 정비 매뉴얼(한국철도공사 FC-1-U7200-HQ-T-7 2021.05.03.)
5) 미국철도협회(Association of American Railroads)의 약어로 AAR 규격 요구사항은 하중조건, 부품 호환과 온도, 부하 조건, 수명계산을 포함하고 있음.

1.6 선로 정보

1.6.1 현장 정보

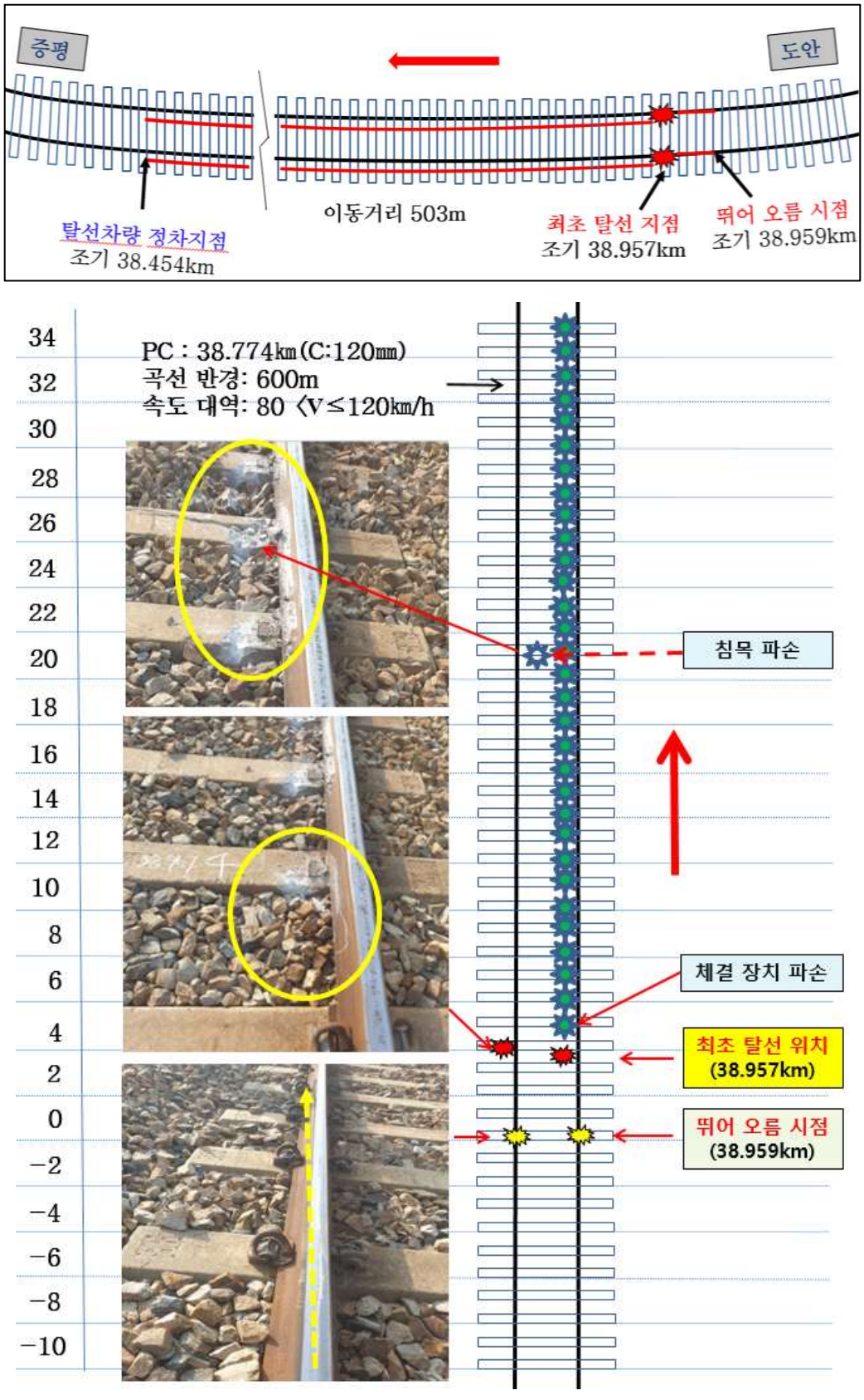
사고지점은 [그림15]에서 보듯이 종단선형은 10‰의 오르막 기울기이고 평면선형은 원곡선(R:600) 구간이며 궤도구조는 50kgN 장대레일, 콘크리트침목, 도상자갈 등으로 설치되어 있었다.



[그림15] 탈선현장 선로일람 약도

1.6.2 탈선 흔적

[그림16]과 같이 차륜이 레일에 뛰어올라 탄 흔적(조기 38.959㎞)과 약 2m 이동하다가 우측 침목에 타격 흔적(조기 38.957㎞)을 남겼고, 이후 사고 열차 정차 지점(조기 38.454㎞)까지 503m에 걸쳐 타격 흔적을 남겼다.



[그림16] 탈선사고 현장 현황

1.6.3 선로유지관리

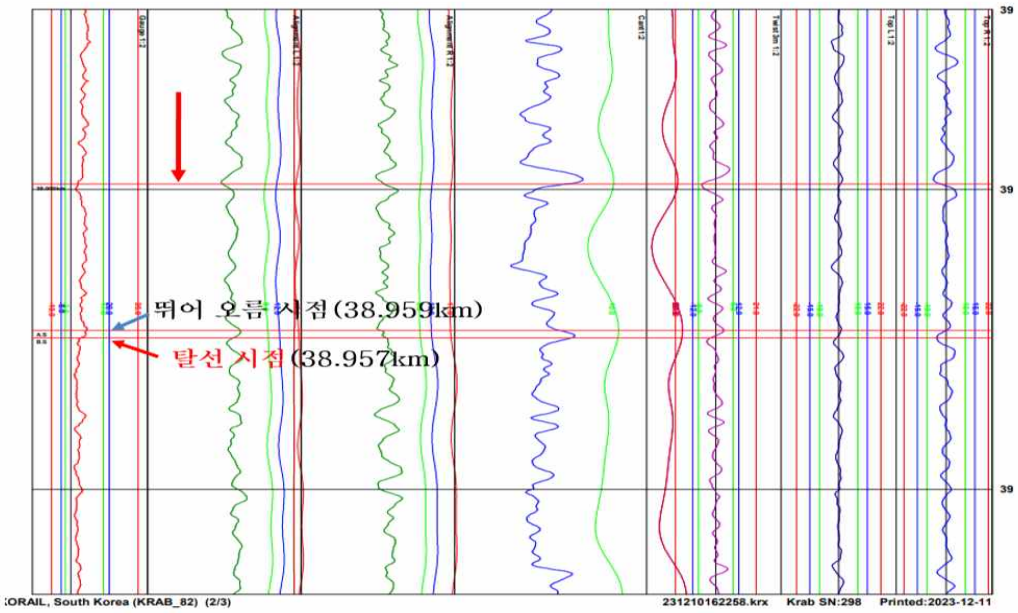
1.6.3.1 선로 점검

공사는 「선로유지관리지침」(국가철도공단, 2023.5.10. 개정, 이하 '지침'이라 한다.)에 따라 선로의 정비와 보수·점검을 시행하고 있으며, 사고 구간 선로에 대한 점검 종류 및 결과는 [표9]와 같다.

관련 조항	점검 종류	주기	점검 실적	검검 결과
제170조 (궤도검측차 점검)	궤도틀림	분기 1회	2023년도 : 3회 (2.9, 4.18, 9.5)	특이사항 없음
제172조 (선로점검차 점검)	레일표면상태, 침목, 체결구, 선로순회	월 1회	2023년도 : 16회 (1.9, 1.13, 2.10, 3.17, 4.5, 4.7, 5.3, 5.9, 6.7, 7.11, 7.14, 8.22, 9.12, 10.23, 11.17, 11.27)	특이사항 없음
제199조 (일상순회점검)	도보순회	주 1회	2023.11.1.~12.10 : 8회 (11.6, 11.14, 11.15, 11.16, 11.20, 11.27, 11.28, 12.6)	특이사항 없음

[표9] 선로점검 종류 및 결과

사고 이후(2023.12.11) 사고지점에 대하여 선형검측기 측정 결과, [그림17]과 같이 선로의 궤간, 방향, 수평, 뒤틀림, 고저 등이 관리기준 이내였다.



[그림17] 사고지점 선형검측 결과

사고지점(앞, 뒤 150cm) 레일 형상을 측정한 결과, [표10]과 같이 직마모는 최대 2.25mm이었고 편마모는 최대 2.98mm로 정비기준 이내였다.

위치	측점	측정결과				레일 종별	비고
		좌측레일		우측레일			
정비기준	–	13㎜ (직마모)	15㎜ (편마모)	13㎜ (직마모)	15㎜ (편마모)	–	제17조 (레일교환기준)
최초 탈선 흔적 지점 (38.959㎞)	-150cm	1.93mm	0.86mm	0.1mm	2.49mm	50kgN	
	-100cm	2.12mm	0.53mm	0.61mm	2.77mm		
	-50cm	2.25mm	0.52mm	0.48mm	2.53mm		
	0	2.14mm	0.48mm	0.48mm	2.68mm		
	50cm	2.06mm	0.46mm	0.28mm	2.66mm		
	100cm	2.0mm	0.4mm	0.26mm	2.87mm		
	150cm	1.84mm	0.69mm	0.35mm	2.98mm		

[표10] 레일 형상 측정 결과(2023. 12. 28)

1.6.3.2 선로유지보수

사고구간의 2023년도 선로 유지보수 작업은 [표11]과 같이 시행되었다.

작업 위치(km)	작업 내용	작업 시행일
증평-도안(상하) 37.600~38.800	궤도정정	2023-01-31
내수-도안(상하) 32.800~42.200	제표작업	2023-03-09
증평-도안(상하) 38.500~39.600	면 맞춤	2023-03-21
증평-도안(상하) 38.600~40.000	면 맞춤	2023-04-28
증평-도안(상) 37.200~42.000	도상 자갈보충	2023-05-21
증평-도안(상) 38.500~39.000	궤도정정	2023-10-11
증평-도안(상) 38.000~39.500	면 맞춤	2023-10-24
증평-도안(상) 38.000~39.500	면 맞춤	2023-10-24
증평-도안(상) 38.800~39.400	궤도정정	2023-10-31
증평-도안(상) 38.700~39.400	궤도정정	2023-11-07
증평-도안(상) 38.700~39.400	면 맞춤	2023-11-10

[표11] 2023년도 선로 유지보수 실적

1.7 신호·전기정보

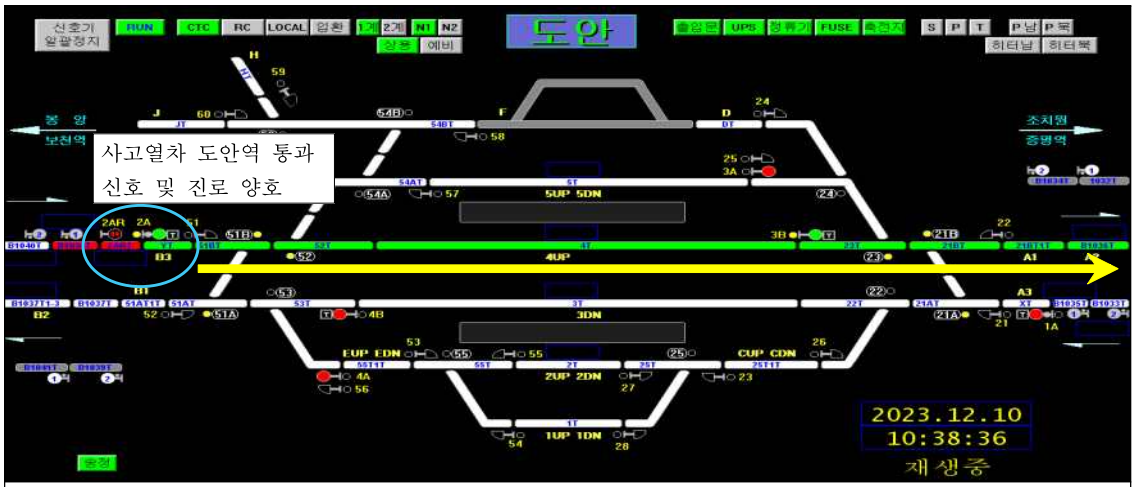
1.7.1 신호정보

사고구간의 신호설비는 [표12]와 같이 구성되어 있었다.

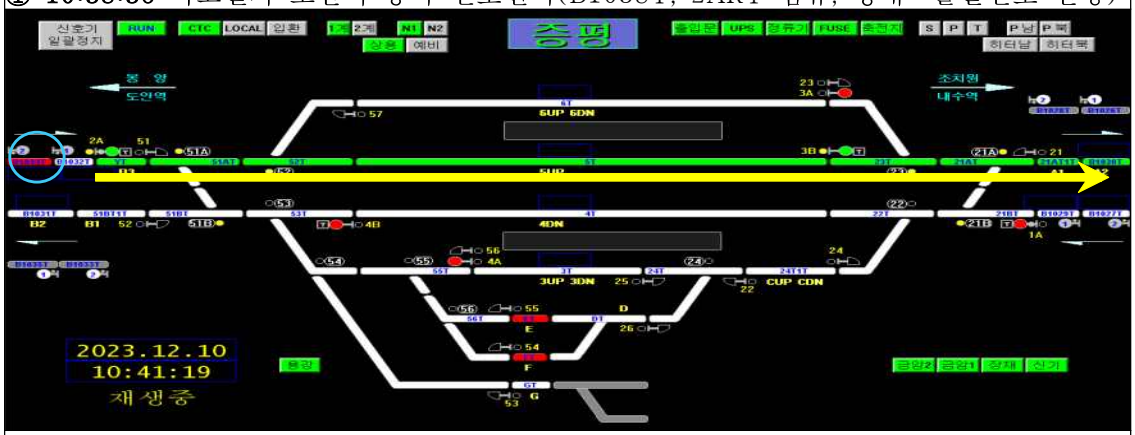
구분	궤도회로장치	선로전환기	연동장치	열차 제어장치
설비방식	AF 궤도회로	NS, NS-AM	전자식	열차자동정지장치(ATS)
설치연도	2004~2021년	2003~2021년	2014년	2002~2018년

[표12] 사고 구간 신호설비 현황

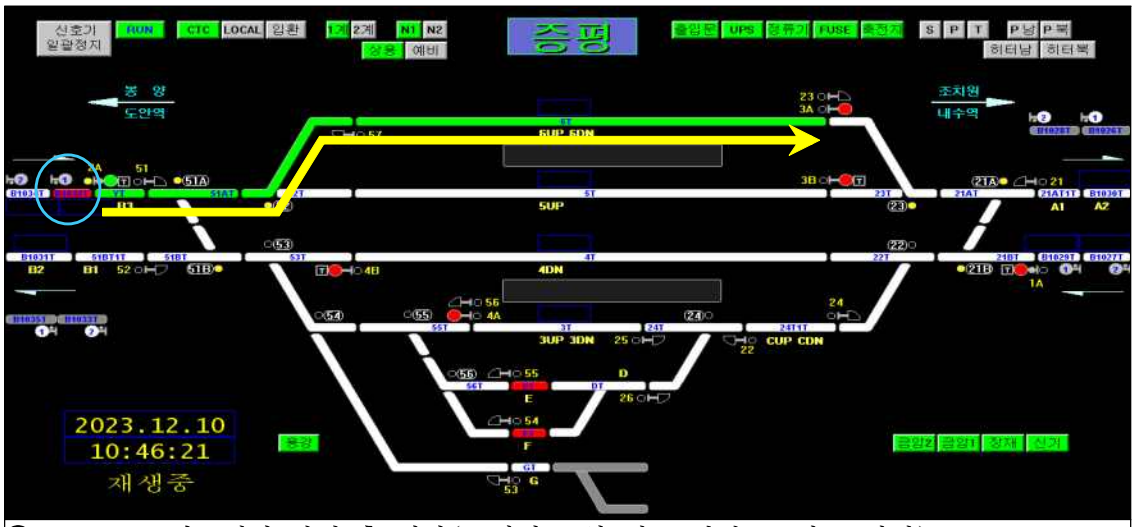
[그림18] ①~④의 도안·증평역 전자연동장치 기록에서 보듯이 사고열차가 도안~증평역 사이를 운행할 때 신호와 진로는 양호하였다.



① 10:38:36 사고열차 도안역 통과 신호현시(B1038T, 2ART 점유, 장내·출발신호 진행)



② 10:41:19 사고열차 증평역 통과 신호 양호(B1034T 점유, 장내·출발신호 진행)



③ 10:46:21 사고열차 탈선 후 정차(증평역 도착 신호 변경 : 5번→6번선)

[그림18] 전자연동장치 기록 화면(도안・증평역)

1.7.2 전차선 정보

사고 구간은 복선 전철구간으로 전차선은 단상 교류 25,000V로 설치·운용되고 있었으며, 사고와 관련된 이벤트 기록은 없는 것으로 확인되었다.

1.8 기상정보

기상청 자료에 의하면 2023년 12월 10일(일) 10:45경 충북 증평군의 기온은 11.5℃, 풍속은 0.0㎧, 습도는 87.0%였고 날씨는 맑았다.

2. 분석

2.1 관계자 업무수행 사항 분석

2.1.1 기관사

기관사가 도안~증평역 사이에서 제륜자 고착 분리를 위해 비상제동(1차)으로 열차를 임의로 정차시킨 것은 공사의 「운전취급규정」 제31조(열차의 정차)에 정한 관제사 승인 없이 정차하여 관계 규정을 준수하지 않았다.

> **제31조(열차의 정차)** ① **열차는 정거장 밖에서 정차할 수 없다. 다만, 다음 각 호의 경우는 예외**로 한다.
> 1. 취약구간의 운전취급 등 특히 지정한 경우
> 2. 정지신호의 현시 있는 경우
> 3. 사고발생 또는 사고발생의 우려 있는 경우
> 4. 선로장애 또는 선로장애 우려로 이의 긴급처리를 위한 시설 관계 직원이 현장에 출장할 경우
> 5. 열차운전과 직접적 관계가 있는 철도차량 및 시설물의 긴급수리를 위한 보수자가 현장에 타고 내릴 경우
> 6. 위급한 부상자의 긴급수송 및 치료를 위해 의료요원이 현지에 출장할 경우
> 7. 공사 직원 및 그 가족의 신병으로 이를 긴급 수송하거나 치료하기 위하여 의료요원이 타고 내릴 경우
> 8. **그 밖에 부득이한 사유가 있는 경우**
> ③ **제1항제4호부터 제8호까지는 관제사의 승인에 따라 열차를 임시로 정차시킬 수 있다.**

[표13] 한국철도공사 「운전취급규정」 제31조 발췌

또한 사고차량에서 연기가 나는 것을 발견하고 비상제동(2차)으로 정차한 뒤 일부 차량이 철도 건널목을 막아 기관사가 자동차·보행자 등의 통행 불편을 고려하여 사고열차를 이동시켜 궤도 시설물 등을 추가 파손시켰다.

2.1.2 부기관사

부기관사는 사고열차 운행 구간 중 「운전작업내규」 제27조에 정한 열차 후부 감시 구간이 7곳[6] 있었으나 기관차(8500호대)가 밀폐형이고 후사경이 없는 구조여서 열차 후부 확인이 어려웠던 것으로 분석되었다. 탈선 후 차량의 연기 발생을 발견하고 기관사에게 통보한 것은 업무를 적정하게 수행하였다.

6) 제천조차장-봉양, 공전-삼탄, 동량-목행, 목행-충주, 달천-주덕, 음성-보천, 도안-증평

2.1.3 차량 관리원

차량 관리원 A와 B가 화차 20량에 대한 기본정비를 6분에 시행한 점은 공사에서 제시하는 기본정비 소요시간 120분(2인, 화차 20량 기준)에 매우 부족하였다.

차량 관리원 A와 B는 '화차 기본정비 체크리스트'를 활용하지 않았고, 랜턴만 휴대하고 점검망치 없이 전·후부 화차 각 10량을 각 1인이 나누어 정비를 시행한 것은 공사의 「화차 유지보수 매뉴얼」 6.1 기본정비 요령을 준수하지 않고 형식적으로 기본정비를 수행한 것으로 분석되었다.

6.1 기본정비 요령
○ 열차 도착 후 2인이 한 조가 되어 **좌우에서 동시**에 기본정비를 시행한다.
- 좌우 2인이 정비 속도, 보행속도 등 상호 보조를 맞추어 이동하며 정비 시행
○ 차량 각부 점검은 장치별 안전한 자세로 점검 망치를 이용하여 시행한다.

[표14] 「화차 유지보수 매뉴얼 - 기본 정비(ES)」 시행 요령 발췌

선임장이 작업내역을 전산입력한 점은 조차장차량사업소 「업무분장」 중 차량 관리원의 업무를 대신해 수행한 것이며, 차량 관리원의 기본정비가 형식적으로 수행된 점은 선임장의 관리 감독업무가 부적절한 것으로 분석되었다.

2.1.4 수송원

수송원 A와 B는 역에서 사고열차의 출발검사를 시행하면서 진행방향 좌측 부분만 점검하였고, 수송원 C와 D는 우측 부분만 점검한 점은 공사의 「화물열차 출발검사 매뉴얼(개정 2011.3.)」 Ⅳ 출발검사 시행 요령 '2. 2인이 동시에 각 차량의 좌, 우측 상태 점검'을 준수하지 않은 것으로 분석되었다.

Ⅳ 출발검사 시행 요령
2. 2인이 동시에 각 차량의 **좌, 우측 상태**를 점검하고, 최 후부차 도착 시 후부 표시등을 설치하고, 제동관 관통상태 및 압력을 확인한다.

[표15] 「화물열차 출발검사 매뉴얼」 Ⅳ 출발검사 시행 요령 발췌

사고차량이 사고 전날 제천역 통과 시 차축에 불꽃이 발생하였음에도 수송원 C가 사고 당일 제천조차장역에서 사고차량 출발검사 과정에 축상온도 테이프 변색 등 차축 발열에 따른 이상 현상을 발견하지 못한 점은 출발검사가 부적절하게 시행된 것으로 분석되었다.

2.1.5 열차 감시의 적정성

[표16]과 같이 열차감시 업무에 대하여 공사「운전취급규정」 37조와 제38조에 정하고 있다.

제37조(열차의 감시) ① 열차가 정거장에 도착·출발 또는 통과할 때와 운행 중인 열차의 감시는 다음 각 호에 따른다.
1. 동력차 승무원
가. 견인력 저하 등 차량이상을 감지하거나 연락받은 경우
나. 열차운행 시 무선전화기 수신에 주의할 것
다. 지역본부장이 지정한 구간에서 열차의 뒤를 확인할 것
라. 정거장을 출발하거나 통과할 경우 열차의 뒤를 확인하여 열차의 상태와 역장 또는 열차승무원의 동작에 주의할 것.
다만, 정거장 통과 시 뒤를 확인하기 어려운 운전실 구조는 생략할 수 있음

제38조(영상감시설비에 의한 열차의 감시) ① 열차감시 지정역의 역장은 조작반 취급, 열차무선교신 등 운전취급에 지장 없는 범위에서 영상감시장비를 활용하여 열차가 정거장에 진입 또는 진출할 때 주행장치 등의 이상 유무 감시
② 영상감시설비에 의한 열차감시 지정역은 별표 25와 같다.

[별표 25]	선 명	대상역
	충북선	오근장, 증평, **주덕, 충주, 삼탄**

[표16] 공사 「운전취급규정(개정 2021.12.22.)」 제37조, 제38조 발췌

사고 이후 사고열차의 기관차 구조를 조사한 결과, 운전실은 밀폐형이고 후부 감시용 후사경이 설치되어 있지 않아서 운행 중에 승무원이 열차의 후부 차량상태를 감시하기가 어려웠던 것으로 분석되었다.

또한 삼탄, 충주, 주덕역이 영상감시설비에 의한 열차감시 지정역이지만 역 근무자가 조작반 취급, 열차무선 교신 등 운전취급과 병행하면서 열차 주행장치 이상 유무를 감시하는 것은 적정하지 않은 것으로 분석되었다.

2.2 차량분석

2.2.1 차량 정비 상태

사고차량은 2004년 2월 제작되어 사고 당시 약 20년간 운행 중이었고, 공사의 「철도차량 유지보수세칙」에 따른 기본정비, 경정비, 중정비 등의 정비 주기는 준수하고 있었다.

사고대차 중 L4 측의 엔드캡 안쪽 면과 고정볼트 나사산의 부식은 사전에 수분 유입이 원인으로 분석되었다.

사고 베어링(R4)은 신품으로 장착(2016.11)되어 647,597km 운행 중이었고, 분해 정비(800,000km 또는 8년 이내) 시기(24.11. 예정)가 도래하지 않았으며 사고 당시 절손된 차축 저널부에 용착되었다.

2.2.2 사고 베어링 분석(요약)

2.2.2.1 외관검사 및 파단면 분석

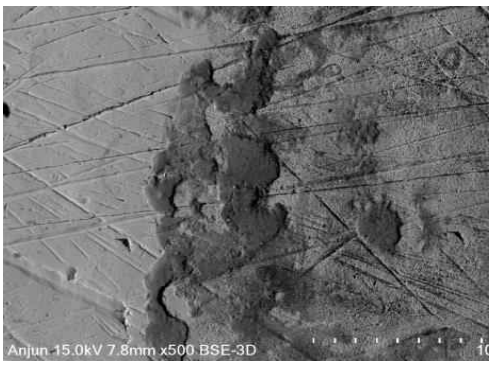
사고 베어링과 같은 시기에 도입된 상대측 베어링(L4)의 차축 저널부 축 및 엔드캡 단면에 녹이 발생한 것이 확인(①,②)되었고, ③, ④를 정밀 검사 결과 베어링 롤러와 롤러 내 표면에는 녹과 부식, 미세크랙이 확인되었다.

① L4 저널부 축 단면

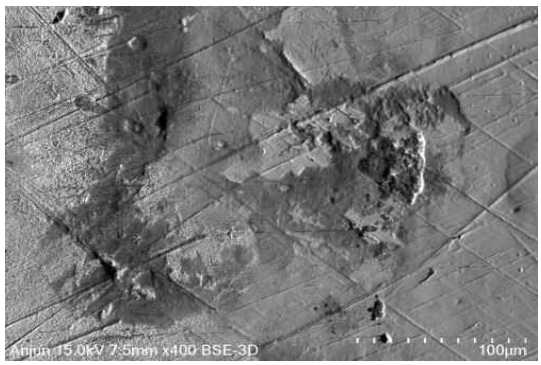
② L4 엔드캡 내면

③ 베어링 롤러 원형 부식

④ 베어링 롤러 선형 부식



⑤ 원형 부식-그림③ 500배



⑥ 선형 부식-그림④ 400배

[그림19] L4 차축 저널부 녹 및 베어링 롤러 표면의 부식

2.2.2.2 기계적성질 및 화학성분 분석

L4의 베어링 외륜 내표면, 내륜 외표면, 롤러 외표면의 표면경도 값은 EN12080 규격(HRC 57~66) 이내였다.

구 분	시험기준	위치별 측정 경도값		
		외륜 내표면	내륜 외표면	롤러 외표면
규격(EN12080)	HRC	57~66	57~66	57~66
L4	HRC	60	60	61

[표17] L4 베어링 표면경도값

L4의 베어링 각 시료의 성분은 EN12080 규격의 표면경화강과 유사하였다.

구 분 \ 성 분		C	Si	Mn	P	S	Cr
[기 준] EN12080 ISO683-17	19MnCr5	0.17~0.22	0.40	1.10~1.40	0.025	0.015	1.00~1.30
	20MnNiCrMo3-2	0.17~0.23	0.40	0.60~0.95	0.025	0.015	0.35~0.70
롤러	L4 (심부)	0.224	0.271	1.32	0.013	0.008	0.602
베어링 외륜 내표면	L4 (심부)	0.223	0.298	1.28	0.014	0.012	0.341

[표18] L4 베어링 시료의 화학성분 분석 결과 발췌

그리스는 구조적 특성에서 변질이 없으며, Fe 함량은 0.08% 이하로 시험 규격(EPA METHOD 3051A:2007) 0.5~1% 이하이고, 수분은 0.1% 미만(0.046~0.072)으로 검출되어 함수량 시험 규격(ISO 3733) 0.2% 이하로 규격 이내였다.

사고 베어링 및 비교 베어링에 대한 세부 분석 결과는 **[붙임]**과 같다.

2.3 선로 분석

사고구간 선로에 대한 점검, 정비 등 유지보수는 지침에 따라 관리 및 시행되고 있었고 특이 사항은 없는 것으로 분석되었다.

2.4 신호분석

사고열차가 도안~증평역 사이를 운행하다가 탈선으로 정차할 때까지 신호와 진로는 양호한 상태였다.

2.5 탈선분석

① 사고차량은 사고 전전날(12.8) 제천조차장역에서 기본정비를 시행하고 입석리역으로 운행하였고, 사고 전날(12.9) 입석리역에서 출발검사 시행 후 출발(10:02)하여 축상에서 불꽃이 발생된 상태로 제천역을 통과(11:04)하여 제천조차장역에 도착(11:14)하였다.

② 사고차량은 사고 당일(12.10) 제천조차장역에서 사고열차 기관차에 5번째 연결되어 출발검사 시행(09:20) 후 출발(09:40)하여 달천역(10:14), 주덕역(10:18), 음성 SP(10:22) 통과 시 축상에서 불꽃이 발생 된 상태로 운행 중, 10:46경 도안~증평역 사이 사고지점에서 38km/h 속도로 운행하다가 후부 대차 4위 차축 오른쪽(R4) 베어링의 발열로 차축이 절손되어 윤축이 유동되고 대차가 불안정해지면서 3위 차축 차륜 2개가 선로 좌측으로 탈선되었다.

③ 사고 베어링은 신품으로 장착되어 운행(283,744km 또는 7년 1개월) 중 분해 정비 주기(800,000km 또는 8년 이내) 도래 전에 정상적으로 회전하지 못하고 저널부에서 발열・용착되어 차축을 절손시켰다.

④ 비교 베어링 분석 결과, 롤러 표면에 형성된 검은 녹과 부식 물질은 산화물로 추정되며, 대부분 미세 크랙이 발달하여 베어링이 고속으로 회전 구름 마찰시 응력집중과 온도상승의 기점이 되어 베어링의 기능과 차축 저널을

녹아내리게 하여 파단된 것으로 분석되었다. 따라서 사고 베어링은 비교 베어링과 유사한 형태로 진행된 것으로 판단되었다.

2.6 종합분석

사고차량의 후부 대차 앞차축이 도안~증평역 사이 탈선한 원인은 비교 베어링 분석 결과에 따르면 뒤차축(우측) 신품 베어링이 분해 정비 시기 도래 전에 부식 및 미세크랙이 발달하여 원활히 회전하지 못하고 저널부에서 발열·용착되어 차축을 절손시켜 대차가 불안정해졌기 때문으로 분석되었다.

또한 화차의 기본정비와 출발검사 시 축상 발열 여부 점검이 제대로 이뤄지지 않았고, 운전취급규정 및 내규에 열차 감시에 대해 정하고 있으나 사고차량 축상에서 불꽃이 발생된 상태로 계속 운행되었고 이를 발견하지 못하고 사고가 발생했으므로 열차 사고 예방을 위해 보다 효과적인 열차 감시 방안 및 설비를 구축할 필요가 있는 것으로 분석되었다.

사고열차는 최초 탈선 후 일부 차량이 철도 건널목에 정차되어 기관사가 자동차·보행자 등의 통행 불편을 고려하여 사고열차를 이동시켜 궤도 시설물 등이 추가 파손되었다.

3. 결론

3.1 조사결과

3.1.1 2023년 12월 10일 10시 46분경 사고열차는 충북선 도안역을 지나 증평역을 향해 38㎞/h 속도로 운행하던 중, 조치원역 기점 38.957㎞ 지점에서 5번째 화물차량의 후부 대차 1위축 차륜 2개가 진행방향 좌측으로 탈선되었다. 이후 기관사가 건널목 개통을 위해 약 308m 이동 후 상용제동 및 비상제동을 취급하여 최종 정차하였다.

3.1.2 사고차량의 후부 대차 앞차축이 도안~증평역 사이 탈선한 원인은 비교 베어링 분석 결과에 따르면 뒤차축(우측) 신품 베어링이 분해 정비 시기 도래 전에 부식 및 미세크랙이 발달하여 원활히 회전하지 못하고 저널부에서 발열·용착되어 차축이 절손되어 대차가 불안정해졌기 때문으로 분석되었다.

3.1.3 기관사는 관제 승인 없이 제륜자 고착 분리를 위해 비상제동(1차)으로 열차를 정차시켜 관계 규정을 준수하지 않았고, 탈선 후 건널목 개통을 위해 사고열차를 이동시켜 궤도 시설물 등을 추가 파손시켰다.

3.1.4 사고차량은 사고 전날(12.9) 11시 04경 제천역 통과 시 R4 축상 부분에서 불꽃이 CCTV에 최초로 확인되었고, 사고 당일(12.10)에는 달천역(10:14), 주덕역(10:18), 음성 SP(10:22) 통과 시 R4 축상 부분에서 불꽃이 CCTV에 확인되었다.

3.1.5 차량 관리원의 기본정비 시간 부족 및 「화차 유지보수 매뉴얼」 미준수와 선임장의 관리 감독업무 부적절 등 화차 기본정비가 형식적으로 수행되고 있는 것으로 분석되었다.

3.1.6 입석리역 수송원은 사고열차에 대한 출발검사를 시행하면서 진행방향 좌측 부분만 점검하였고, 제천조차장역 수송원은 우측 부분만 점검하여

공사의 「화물열차 출발검사 매뉴얼」을 준수하지 않았다.

3.1.7 제천조차장역 수송원 C는 사고 당일 출발검사 과정에 전날 차축 발열 현상이 있었음에도 이를 발견하지 못한 점은 업무수행이 미흡하였다.

3.1.8 사고 베어링은 2016년 5월에 SKF(사)에서 제작되어 미국철도협회의 표준규격(AAR) 인증 제품으로 그해 11월에 차량에 장착되었고, 분해 정비(800,000km 또는 8년 이내) 시기(24.11. 예정)는 도래하지 않았으며 사고 당시 절손된 차축 저널부에 용착되었다.

3.1.9 사고 베어링 분석 결과, 표면경화강이었으며 경도 및 화학성분은 유럽 표준 베어링강 규격(EN 12080)에 적합하였다.

3.1.10 사고대차의 베어링 그리스 양을 측정한 결과, R3(375g), L3(380g), L4(385g) 3개 베어링 모두 기준(360±30)g 이내였다.(R4: 파손으로 제외)

3.1.11 사고대차 중 L4 측의 엔드캡 안쪽 면과 고정볼트 나사산의 부식은 수분 유입이 원인으로 분석되었다.

3.1.12 이번 사고와 관련된 인적 분야(기관사, 차량관리원, 수송원)의 업무수행 규정 등이 수립되어 있으나, 이를 준수하지 않는 것이 일상화되어 있는 것으로 분석되었다.

3.2 사고원인

이번 한국철도공사 충북선 도안~증평역 사이에서 발생한 화물열차 탈선사고의 원인은 '차축베어링이 발열로 해당 부분의 차축이 절손되고 윤축이 유동되어 대차가 불안정해진 것'으로 결정하였다.

또한, 기여 요인은 ① 축상 엔드캡 내부 및 차축베어링 롤러 표면에 수분 유입으로 녹과 부식이 발생한 점, ② 사고차량에 대한 기본 정비 및 출발 검사 소홀로 차축베어링의 발열 여부를 사전에 발견하지 못한 점, ③ 화물열차 운행 중 차축 발열이 발생하여도 검지할 수 있는 설비가 없었던 점으로 결정하였다.

따라서 항공·철도사고조사위원회는 사고조사 결과에 따라 한국철도공사에 4건의 안전권고를 발행한다.

4. 안전권고

항공·철도사고조사위원회는『항공·철도사고조사에 관한 법률』제26조에 따라 이번 사고와 관련하여 2023년 12월 28일 한국철도공사에 '① 화차의 정비를 철저히 시행하고, 운행 전·중·후 차축 발열 여부 확인·점검을 보다 강화할 것 ② 기관사의 운전 취급(특히, 사고발생 시 취급)이 적정하게 이뤄지도록 교육을 강화할 것'으로 긴급 권고[7]한 바 있으며, 이번 조사 결과에 따라 다음과 같이 추가로 권고한다.

4.1 한국철도공사에 대하여

4.1.1 화차 차축베어링 품질확보 및 정비 방법 등에 대한 신뢰성 분석을 시행하여 개선 방안을 마련할 것

4.1.2 화차의 기본 정비 및 출발 검사가 적정하게 시행되도록 교육을 강화하고 종사자 관리를 엄격하게 할 것

4.1.3 열차 운행 중 축상 발열 여부를 확인할 수 있는 시스템 구축 및 열차 운행 상태 모니터링 강화 방안을 조속히 추진할 것

4.1.4 기관사, 차량관리원, 수송원 등 철도종사자가 업무수행 규정 등을 정확하게 준수하도록 조직의 안전 문화 향상을 위한 프로그램을 철저히 이행할 것

7) 위원회 권고에 따라 한국철도공사는 화차 정비 강화, 주요역(제천조차장, 영천역) 도중검사, 도착열차에 대해 적외선 온도 측정기로 차축 발열 체크, 화물열차 운행상태 직접 감시(33개역), 출발검사 역량강화, 열차감시 중 이상 발견 시 안전조치 매뉴얼 특별교육 등을 시행('24. 1. ~ 2.)하였다.

[붙임]

사고 차량 베어링 분석보고서

국 토 교 통 부
항공 · 철도사고조사위원회

분석 결과 요약

1. 분석 개요

본 건은 한국철도공사 충북선 도안~증평역 사이 화물열차 탈선사고 관련 베어링 파손품에 대해 파단면 검사, 미세조직 및 성분 분석, 그리스 수분 및 철분 유입 분석을 수행함.

한국철도공사 충북선 도안~증평역 사이 화물열차 탈선사고 주요 파손품

2. 분석 내용 및 결과

분석내용	분석 결과
① 외관검사 및 파단면 분석	○ 외관검사 결과 R4 내륜 및 롤러 조립부, 오일 씰 등은 소실되었으며 외륜과 씰 마모링이 축 저널부가 원추형이 될 때까지 밀어올려 축상부 위쪽에 용착된 것이 확인됨. 축저널 단면의 엔드캡 볼트 구멍 막힘은 볼트 헤드가 고온에서 잘려나간 것으로 추정됨. ○ 베어링 롤러 표면의 녹과 부식 물질은 SEM-EDX 분석 결과 모재 성분인 Fe, Mn, Si, Cr, C와 그리스에서 유입되는 P, Ca, K, O 등 원소들로서 이루어진 산화물로서 판단되며, 산소의 피크 강도가 모재인 Fe보다도 매우 높게 나타남.
② 기계적 성질 및 미세조직 검사 등	○ R4의 외륜내표면 경도는 HRC 49로 EN12080 경도 규격(HRC 57~66)보다 현저히 낮았으며, 내륜, 롤러는 소실되어 경도측정을 하지 못하였으며, 비교시료인 L4의 표면경도값은 외륜 내표면, 내륜 외표면, 롤러 외표면 각각 HRC 60, 60, 61으로 EN12080 경도규격인 HRC 57~66에 적합하였다. ○ R4 시료의 조직은 결정립 크기가 대부분 1~10μm로 매우 미세하게 나타나는데, Maretensite의 특정방위 관계면인 쌍정들의 크기이고, 쌍정이 합쳐진 그룹 결정립 Packet Size는 50μm~100μm정도이고 전형적인 Tempered Maretensite 조직인 솔바이트(Sorbite) 조직과 유사한 것으로 시료는 매우 연화된 것으로 판단됨.
③ 화학성분 분석	○ L4 시료의 성분분석 결과, 롤러, 외륜은 각각 0.224C-0.271Si-1.32Mn-0.0134P-0.008S-0.0269Cu-0.325Ni-0.602CR-0.156Mo와 0.223C-0.298Si-1.28Mn-0.0137P-0.012S-0.0344Cu-0.341Ni-0.580CR-0.1153Mo이며 R4의 내륜과 롤러는 소실되어 분석하지 않았고, R4의 외륜의 분석 결과는 0.205C-0.276Si-1.31Mn-0.0137P-0.007S-0.0105Cu-0.353Ni-0.595Cr-0.148Mo이다. L4 및 R4 베어링 외륜의 화학성분 값은 큰 차이가 없었다. 각 시료의 외표면의 탄소성분 함량은 0.95~1.1%로 평균 1.0%로 분석되었다. ○ 그리스는 구조적 특성에서 변질이 없으며, Fe 함량은 0.08% 이하로 시험 규격(EPA METHOD 3051A:2007) 0.5%~1% 이하이고, 수분은 0.1% 미만(0.046~0.072)으로 검출되어 함수량 시험 규격(ISO 3733) 0.2% 이하였다.

3. 요약

○ 롤러 표면에 형성된 검은 녹과 부식 물질은 산화물로 추정되며, 대부분 미세 크랙이 발달하여 베어링이 고속으로 회전 구름 마찰시 응력집중과 온도상승의 기점이 되어 베어링의 기능과 차축 저널을 녹아내리게 하여 파단된 것으로 판단함

○ R4의 외륜내표면 경도는 HRC 49로 EN12080 경도 규격(HRC 57~66)보다 현저히 낮았으며, 내륜, 롤러는 소실되어 경도 측정을 하지 못하였으며, 비교 시료인 L4의 외륜 내표면, 내륜 외표면, 롤러 외표면의 표면경도 값(HRC)은 EN12080 경도 규격(HRC 57~66) 이내였다.

○ L4의 각 시료의 성분분석 결과는 EN12080 규격의 표면경화강 기준에 적합하였다.

【목 차】

1. 분석 개요 ····· 1

2. 파단면 분석 ····· 2

2.1. 외관검사 ····· 2

2.2. 주사전자현미경(SEM) 검사 ····· 6

3. 미세조직시험 ····· 9

3.1. 베어링 외륜의 미세조직 EBSD-SEM 측정 ····· 9

4. 시료 분석 ····· 10

4.1. 경도 측정 ····· 10

4.2. 성분 분석 ····· 11

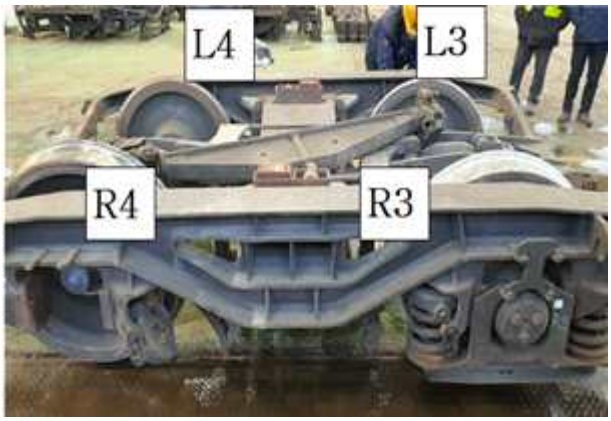
4.3. 그리스 분석 ····· 12

5. 분석 결과 ····· 13

6. 분석 장비 ····· 15

1. 분석 개요

본 건은 '23.12.10. 한국철도공사 충북선 도안~증평역 사이 화물열차 탈선사고 발생으로 확인 결과 [그림1]과 같이 R4 차축과 베어링이 심한 마찰열로 차축이 녹아 절손되었고, 축상 하우징과 차축의 소손이 확인되어 베어링 관련 파손품에 대한 파단면 및 성분 분석, 베어링 외륜 및 롤러 표면 검사, 베어링 그리스 수분 및 철분 분석 등을 수행함.



(가) 탈선 대차 각부 명칭

(나) 차축이 녹아내려 탈선한 R4바퀴

(다) 축이 녹아 떨어져 나온 R4축상

(라) 축 과열로 녹아내린 R4축 단면

[그림1] 탈선 화차 대차부, 축상 및 차축 파단부

분석 의뢰된 시료는 [그림2] (가)와 같고, R4 축 저널부와 엔드캡 및 볼트와 L4 베어링(SKF사)부임. (나)는 L4 베어링부의 롤러, (다)는 R4 베어링부의 엔드 캡과 볼트, (라)는 L4 내륜의 롤러 접촉면, (마)는 R4의 외륜에서 채취한 시료, (바)는 소손된 R4를 제외한 L4, R3 및 L3 베어링부에서 채취한 그리스임.

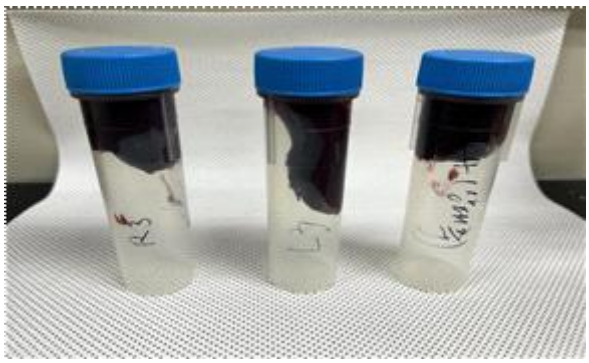
(가) R4 축저널 과 L4 베어링부

(나) L4 베어링부의 롤러

(다) R4 베어링 엔드캡 및 고정 볼트

(라) L4 내륜 롤러 접촉면

(마) R4 베어링부의 소손된 외륜



(바) 베어링부의 채취 그리스 3종

[그림2] 분석 부품(베어링, 축, 볼트 부품 및 그리스)

2. 파단면 분석

2.1 외관 검사

[그림3]은 R4 차축부에 대한 외관검사 부품이다. (가)는 축상부로 내륜 및 롤러 조립부, 오일씰은 완전 소실되었고, 외륜과 씰 마모링이 축상부 위쪽에 용착된 것이 확인됨. (나)는 축 저널부로 고온 마찰로 원추형으로 변했고, (다)는 외측 축 저널부로 회전마찰시 가장 높게 고온이 형성된 곳에서 절단된 것으로 추정됨.

(라)는 엔드캡 고정 차축의 단면부로 볼트 구멍이 막혀있는 것은 볼트 헤드가 고온에서 잘려나간 것으로 추정됨.

(가) R4 축상부

(나) R4축 저널부

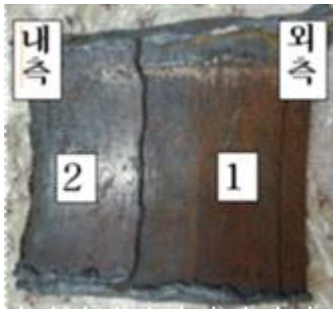
(다) R4 차축 저널부

(라) R4 캡 고정 차축 단면부

[그림3] R4 축상부와 베어링 외륜, 차축 및 볼트 체결부

[그림4]는 R4 베어링부 검사를 위한 소재 채취 과정이다. (가)는 용착되어있는 베어링부를 산소토치로 해체하였고, (나)는 얻어진 시료 중 심하게 용착된 내측과 열영향만을 받은 외측으로 하였고, (다)의 1번 시료는 외륜부이며, 2번 시료는 외륜에 압착된 씰마모링 소재임. (라)의 ○위치에서 기계적성질 평가를 위한 시료를 채취하였으며, (마)는 종단면, (바)는 횡단면임.

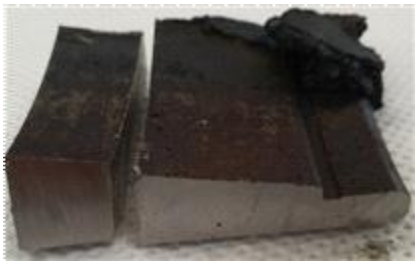
(가) 산소토치를 이용한 R4 축상부 해체



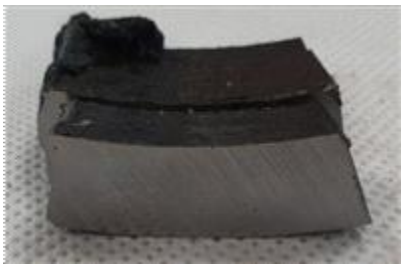
(나) 해체하여 채취한 시료

(다) 1번 외륜에 용착된 2번 씰 마모링

(라) 1번 외륜의 외측에서(O) 시료채취



(마) (라)에서 채취된 외륜의 종단면



(바) (라)에서 채취된 외륜의 횡단면

[그림4] R4 베어링 용착부의 해체 작업 및 시료 채취

[그림5]는 R4의 상대 차축인 L4 차축의 저널부, 엔드캡 및 베어링부를 나타냄. (가), (나) 및 (다)는 저널부 축 단면과 엔드 캡 단면으로 빨간 녹이 발생한 것이 확인됨. (라)는 롤러 조립부 및 외륜으로 흠집이나 결함은 발견되지 않았고, 롤러의 부드러운 회전 등 외관상 특이점은 없었으나, (마) 및 (바)에서와 같이 롤러 및 롤러 접촉 내 표면에는 녹(Rust)과 부식(Corrosion)[8]이 확인되었음.

8) Rust and Corrosion : 녹과 부식이 롤러 또는 레이스웨이 링위에 롤러 피치 크기 형태로 나타나는 것으로 부적당한 윤활이나 씰링 부족으로 부식 매체가 흡입되었을 때 발생함.

(가) L4 저널부 축 단면

(나) L4 엔드 캡

(다) L4 엔드 캡 내면과 볼트

(라) L4 베어링부

(마) 롤러 표면의 녹과 부식

(바) 내륜 롤러 접촉면 위의 녹과 부식

[그림5] L4 베어링부의 외관검사

[그림6]의 (가) 및 (나)의 롤러 표면의 녹과 부식은 베어링부의 씰링 부족이나 관리 부족에 의해 부식 매체인 가스나 습기가 혼입되었을 때 발생하므로 베어링의 탈부착(Removal and Mounting), 세척(Cleaning), 교환(Replacement) 등 작업 준수사항과 윤활재의 수분 모니터링 등을 엄격하게 통제해야 함.

베어링의 내부에 불충분한 윤활 공급, 수분 침투, 고속의 운전 및 고온 등 열악한 윤활 조건에 의해 마찰과 마멸에 의한 부스러기(Abrasive Wear Contamination) 유입 등은 롤러와 접촉 부재 표면에 산화물 또는 탄화물이 생성되어 달라붙는 소부(燒付) 현상인 히트 스트리크(Heat Streak[9]), 덴팅(Denting[10]), 스머징(Smearing[11])등은 한번 형성되면 계속 성장하는 특징이 있어 검사 및 관리 부족은 베어링 파괴의 주된 요인이 됨.

9) Heat Streak : 윤활유막의 파단으로 롤러와 베어링 부재가 소착되어 표면을 심하게 침식하는 현상
10) Denting : 마모 부스러기가 롤러 나 베어링부 표면에 침투하는 현상
11) Smearing : 표면에 액상이나 두꺼운 물질이 표면을 덮으며 퍼지는 현상

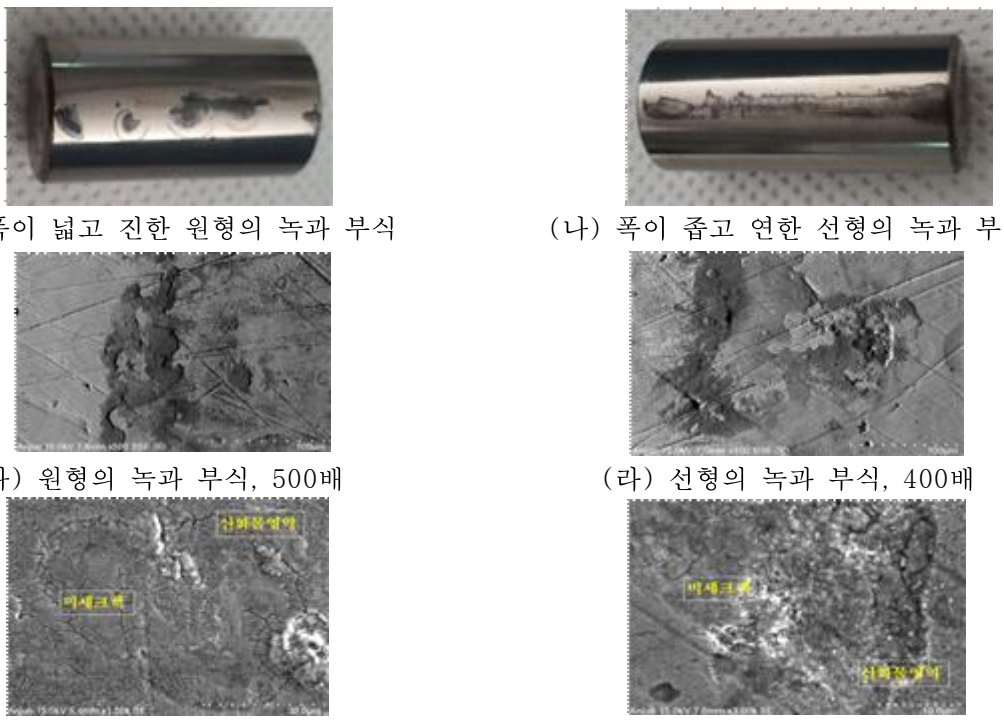
(가) 폭이 넓고 진한 원형의 녹과 부식 (나) 폭이 좁고 연한 선형의 녹과 부식

[그림6] L4의 테이퍼 롤러 표면의 녹과 부식

2.2 주사전자현미경(SEM) 검사

2.2.1 베어링 롤러와 외륜의 SEM 검사

[그림7]은 L4 베어링부 롤러 표면 (가) 및 (나)를 SEM으로 정밀검사한 결과를 나타냄. (다) 및 (라)와 같이 원형 및 선형의 검은 녹과 부식 물질은 SEM 조직상에서는 거의 유사한 산화물로 추정되며, 이것들을 1000배 이상 확대하면 (마) 및 (바)와 같이 많은 미세 크랙이 발달한 것이 확인됨.



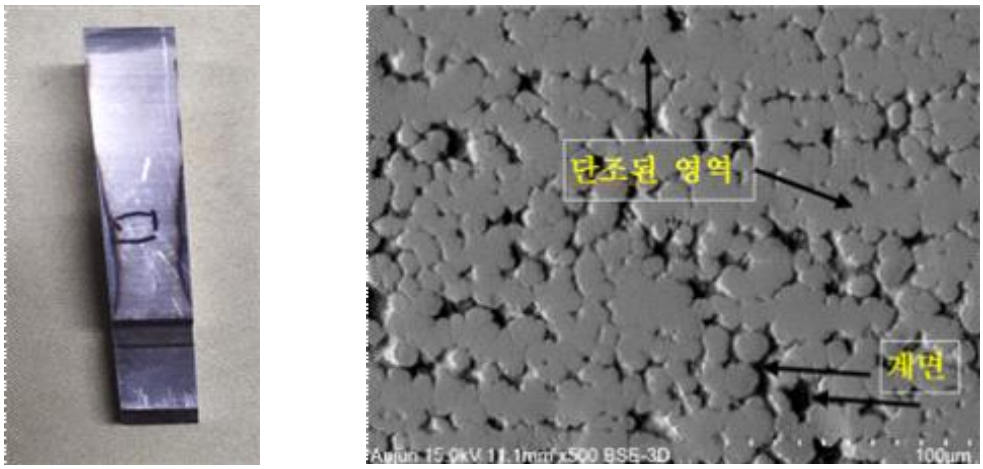
(가) 폭이 넓고 진한 원형의 녹과 부식 (나) 폭이 좁고 연한 선형의 녹과 부식

(다) 원형의 녹과 부식, 500배 (라) 선형의 녹과 부식, 400배

(마) 원형의 녹과 부식, 1500배 (바) 선형의 녹과 부식, 3000배

[그림7] L4 테이퍼 롤러 표면의 녹과 부식의 SEM조직

[그림8]에 L4 베어링부 외륜의 내표면을 SEM으로 정밀 검사한 결과 (가) 및 (나)의 표면은 단조된 형태의 조직을 나타내며, 하얗게 보이는 변형 영역 사이에 계면들이 검게 나타나 있음.



(가) L4 베어링 외륜 내 표면과 전체 SEM 조직(500X)

[그림8] L4 외륜 내 표면의 SEM 조직

2.2.2 베어링의 EDX-SEM 원소 분석

2.2.2.1 베어링 롤러 표면

[그림9]는 L4 베어링부의 롤러 표면 모재와 녹과 부식 물질을 EDX[12]-SEM 원소 분석 결과를 나타냄.

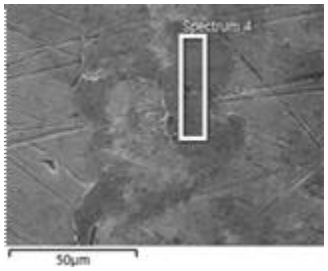
(가)는 Spectrum4로 표시된 녹과 부식 영역을 분석한 것으로 모재에서 발생한 금속(Fe, Mn, Si, Cr, C 함유)과 그리스에서 유입 생성된 것으로 추정되는 P, Ca, K, O 등이 검출되었고, 산소(O)의 피크 강도가 모재인 Fe보다도 매우 높게 나타난 것이 특징이며, 앞에서 언급된 원소들의 혼합 산화물 즉 녹으로 판단됨.

(나)는 산화물에 인접한 녹과 부식이 없는 모재 영역을 원소 분석한 Spectrum5 영역에서 모재 금속 성분인 Fe, Mn, Cr, Si, C 만이 검출되어 순수한 모재 성분과 일치하

12) EDX(Energy Dispersive X-ray) : 물질에 X-ray를 조사하면 원소 고유의 에너지가 검출되어 원소 분석에 이용

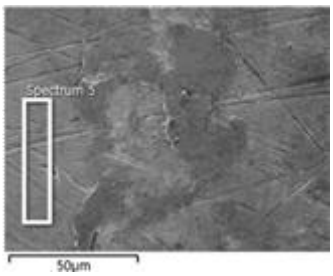
였음.

(다)는 모재 표면에 얇은 막이 형성된 Spectrum6 영역에서 모재 금속 성분인 Fe, Mn, Cr, Si, C 과 더불어 Mo, O가 검출되어 부식에 의한 얇은 산화막으로 판단되며, Spectrum4의 녹과는 차이가 있음.



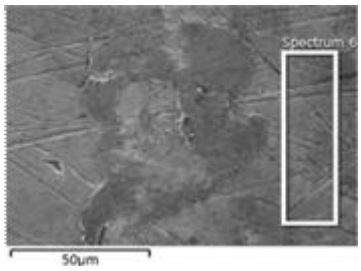
Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%
C	K series	3.91	0.03913	9.32
O	K series	71.70	0.24529	29.19
Si	K series	0.53	0.00423	0.44
P	K series	0.39	0.00220	0.25
Cl	K series	0.14	0.00126	0.10
K	K series	0.49	0.00418	0.31
Ca	K series	0.25	0.00226	0.16
Cr	K series	0.36	0.00356	0.23
Mn	K series	1.60	0.01598	1.29
Fe	K series	74.14	0.74135	58.75
Total				100.00

(가) L4 롤러 표면의 녹과 부식



Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%
C	K series	2.20	0.02197	5.95
Si	K series	0.47	0.00371	0.39
Cr	K series	1.20	0.01200	0.68
Mn	K series	2.05	0.02045	1.46
Fe	K series	130.80	1.30801	91.53
Total				100.00

(나) L4의 롤러 표면 모재



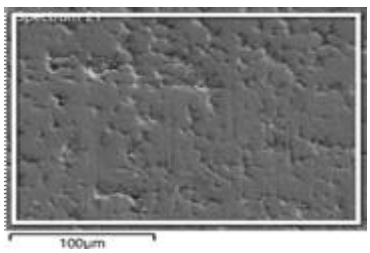
Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%
C	K series	6.25	0.06249	13.75
O	K series	16.97	0.05710	6.76
Si	K series	0.38	0.00299	0.27
Cr	K series	1.81	0.01805	0.96
Mn	K series	1.67	0.01671	1.11
Fe	K series	117.95	1.17909	76.81
Mo	L series	0.44	0.00437	0.35
Total				100.00

(다) L4의 롤러 표면 녹과 부식

[그림9] EDX-SEM 결과

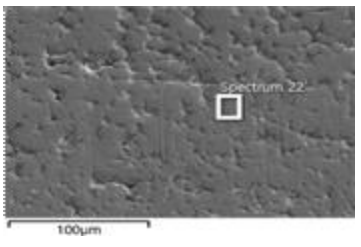
2.2.2.2 베어링 외륜 내 표면

[그림10]은 L4 베어링부 외륜내표면을 EDX-SEM 원소분석 결과를 나타냄.



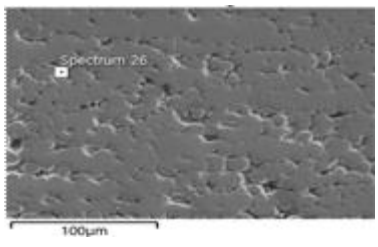
Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%
C	K series	2.29	0.02293	6.36
O	K series	9.76	0.03285	4.02
Si	K series	0.50	0.00398	0.43
Cr	K series	0.85	0.00855	0.51
Mn	K series	1.78	0.01780	1.34
Fe	K series	118.02	1.18021	87.34
Total				100.00

(가) L4 외륜 내 표면



Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%
C	K series	1.92	0.01916	5.60
Si	K series	0.38	0.00298	0.33
Cr	K series	1.17	0.01175	0.71
Mn	K series	1.64	0.01644	1.26
Fe	K series	122.37	1.22366	92.10
Total				100.00

(나) L4 외륜의 단조된 내 표면



Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%
C	K series	5.60	0.05603	14.47
O	K series	19.11	0.06431	9.02
Al	K series	0.42	0.00304	0.39
Si	K series	2.49	0.01977	2.03
Ca	K series	0.40	0.00356	0.25
Cr	K series	1.60	0.01595	1.00
Mn	K series	3.51	0.03534	2.70
Fe	K series	92.31	0.92313	69.83
Mo	L series	0.34	0.00342	0.31
Total				100.00

(다) L4 외륜 내 표면 계면

[그림10] 외륜 내표면의 EDX-SEM 결과

(가)는 Spectrum21로 표시된 넓은 전체영역을 분석한 것으로 모재에서 발생한 금속(Fe, Mn, Si, Cr, C 함유)이 주를 이루고, 강도는 약하지만 산소(O)가 검출되었음.

(나)는 Spectrum22로 단조 변형된 영역만을 분석한 것으로 모재에서 발생한 금속인 Fe, Mn, Si, Cr, C 만이 검출되었음.

(다)는 계면을 좁게 검사한 Spectrum26 영역으로 [그림9] (가)의 녹과 부식 영역을 분석한 결과와 유사한 것으로 모재에서 발생한 금속(Fe, Mn, Si, Cr, Mo, Al, C 함유)과 그리스에서 유입 생성된 것으로 추정되는 Ca, O 등이 검출되었고, 산소(O)의 피크 강도가 모재인 Fe보다도 높게 나타난 것이 특징이며, 앞에서 언급된 원소들의 혼합 산화물로 판단됨.

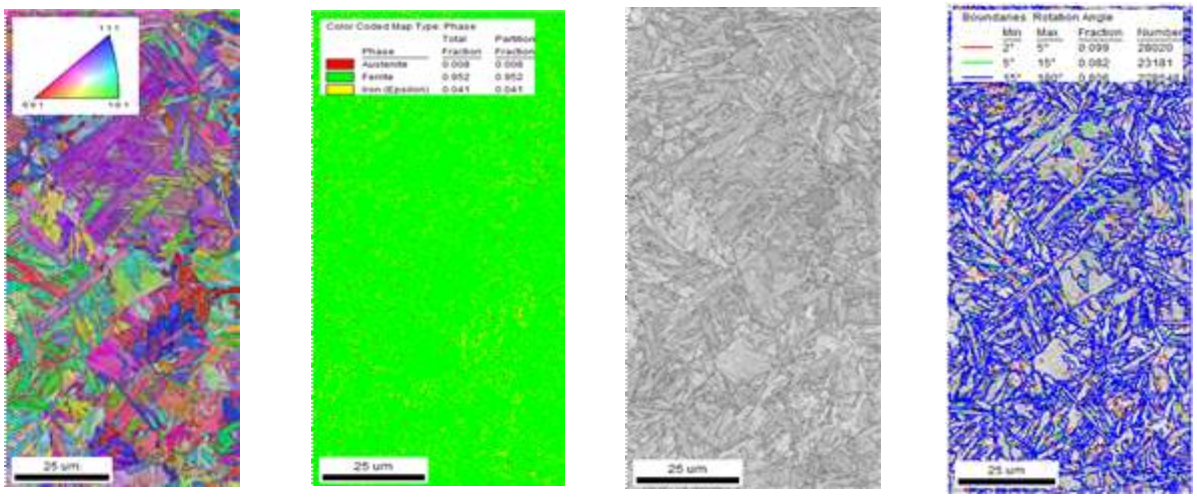
3. 미세조직시험

3.1 베어링 외륜의 미세조직 EBSD[13]-SEM 측정

[그림11]은 R4 베어링 외륜 시료의 조직으로 결정립 크기는 대부분 1~10μm로 매우 미세하게 나타나는데, Maretensite의 특정방위관계면(Habit Plane[14])의 쌍정들의 크기이고, 쌍정이 합쳐진 그룹 결정립 Packet[15] size는 50μm~100μm정도이며 전형적인 Tempered Maretensite 조직인 솔바이트(Sorbite[16]) 조직과 유사한 것으로 판단됨. 결정방위는 ND단면을 보면 Euler Color에서 적색과 연녹색의 혼합 Plate 침상조직이 주를 이루고 있음.

13) EBSD(Electron Back Scattering Diffraction) : 기쿠치 패턴을 이용한 미세조직과 결정방위를 측정함
14) Habit plane : Maretensite조직은 Lath 또는 Plate 형태의 작은 쌍정이 특정의 결정 방위를 갖고 나타남
15) Packet : 구 Austenite 입자내에 Maretensite 변태 후 같은 Habit Plane을 갖는 Lath 또는 Plate 쌍정 그룹
16) Sorbite 조직 : 고온 템퍼링으로 Cementite 입자가 α Matrix에 성장한 Tempered Maretensite조직

(a) 수직 단면 (b) 압연 단면 (c) 이미지 선명도 (d) 결정립각도



(e) 결정립 크기 (f) 역극점도

[그림11] EBSD-SEM에 의한 R4 베어링 외륜 단면의 미세조직 및 결정방위

4. 시료 분석

4.1. 경도 측정

측정된 경도값은 [표1]과 같으며, 사고시료인 R4의 외륜내표면 경도는, 열화로 인한 금속 조직의 변화로 연화되어, EN12080 경도규격인 HRC 57~66 기준보다 현저히 낮은 HRC 49로 측정되었고, 내륜과 롤러는 열화로 시료가 소실되어 경도를 측정하지 못함.

열을 받지 않은 비교 시료 L4의 외륜내표면, 내륜외표면, 롤러외표면의 표면경도 값은 HRC 60, 60, 61로 측정되어 EN12080 경도 규격 범위 HRC 57~66 기준 이내였다.

구 분	시험기준	위치별 측정 경도값		
		외륜 내표면	내륜 외표면	롤러 외표면
규격(EN12080)	HRC	57~66	57~66	57~66
R4	HRC	49	측정 불가	측정 불가
L4	HRC	60	60	61

[표1] R4 및 L4 베어링 표면경도값

4.2. 성분 분석

[그림12]은 R4 및 L4 시료의 자동발광분광 분석 측정위치를 나타내며, 화학성분 분석값은 [표2]와 같다.

R4의 시료는 외륜을 제외하고 소손으로 시료가 확보되지 않아, 분석이 불가하였으며, L4 내륜은 외륜과 동일한 재료이므로 별도로 분석하지 않았다.

각 시료의 심부에 대한 분석값을 검토한 결과, 탄소 함량이 0.22% 정도로 EN12080 및 ISO683-17 규격 중의 Case Hardening Bearing Steel(표면 경화강)인 19MnCr5와 20MnNiCrMo3-2와 유사하였다.

또한 시료들의 구동접촉 표면에 대하여 성분분석 결과, 접촉표면의 각각 탄소함량이 약 1.00%로 분석되어, Through Hardening Bearing Steel인 100CrMnSi4-4 의 성분함량과 유사하였다. 각 표면에 대하여 경도측정 결과, EN12080의 경도 기준인 HRC 57~66을 만족하는 HRC 60~61로 측정되었다. 따라서 Case Hardened Bearing Steel에 침탄경화열처리를 한 소재로 확인된다.

[R4 외륜 횡단면]

[L4 롤러]

[L4 외륜 종단면]

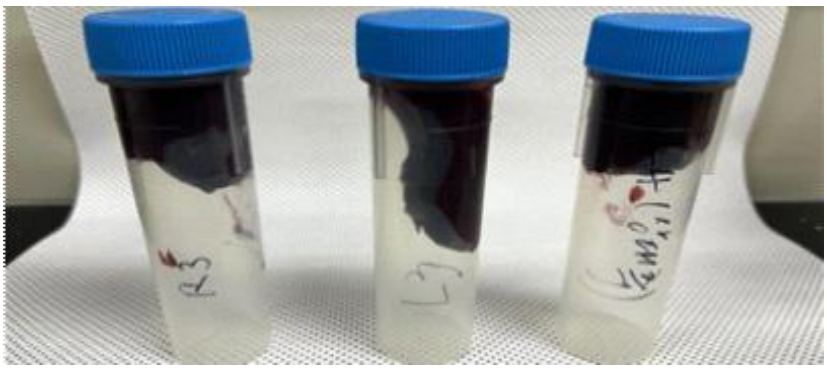
[그림12] 차축베어링(R4, L4) 자동발광분광 분석 측정위치

구분 \ 성분		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
기준 EN12080 ISO683-17	100CrMnSi4-4	0.93~1.05	0.45~0.75	0.90~1.20	0.025	0.015	0.90~1.20	0.10	-
	19MnCr5	0.17~0.22	0.40	1.10~1.40	0.025	0.015	1.00~1.30	-	-
	20MnNiCrMo3-2	0.17~0.23	0.40	0.60~0.95	0.025	0.015	0.35~0.70	0.15~0.25	0.40~0.70
롤러	R4 (심부)	-	-	-	-	-	-	-	-
	L4 (심부)	0.224	0.271	1.32	0.013	0.008	0.602	0.156	0.325
베어링 외륜 내표면	R4 (심부)	0.205	0.276	1.31	0.014	0.007	0.595	0.148	0.353
	L4 (심부)	0.223	0.298	1.28	0.014	0.012	0.341	0.115	0.580
베어링 내륜 외표면	R4 (심부)	-	-	-	-	-	-	-	-
	L4 (심부)	-	-	-	-	-	-	-	-
각 시료 공통 표면성분 분석값(평균)		1.00	0.290	1.34	0.0108	0.0203	0.608	0.127	0.196

[표2] 롤러베어링 조립체 시료의 심부에 대한 화학성분 분석 결과

4.3. 그리스 분석

과열로 소실된 R4를 제외한 그리스 시료는 [그림13]과 같다.



[그림13] 그리스 시료 3종

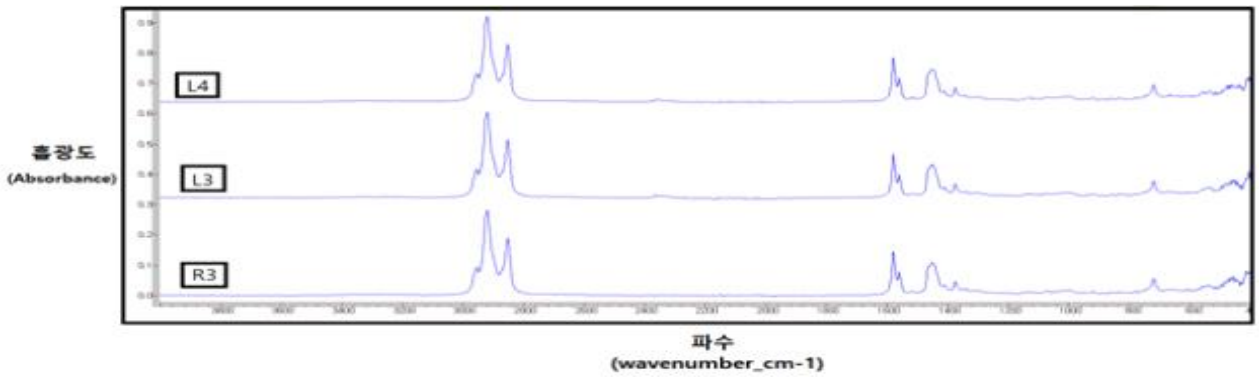
사용중인 그리스 (Used Grease) 중의 Fe 함량은 AAR M942나 EN12081에는 기준이 제시되지 않아 적용이 불가하고, KORAIL의 철도용품 공사규격서 전기동차 차축베어링 시험규격(KRCS B538 01:2018)을 적용하여, 유도결합플라즈마 분광기[17]로 분석한 결과는 [표3]와 같고, 그리스내 Fe 함량은 0.08% 이하로 시험 규격0.5% 미만 (C,D구역), 1% 미만(A,B구역)인 기준을 만족한다.

Fe함량		R3		L3		L4	
		C,D	A,B	C,D	A,B	C,D	A,B
기준	AAR M942	–	–	–	–	–	–
	EN12081	–	–	–	–	–	–
	KRCS B538 01	0.5 미만	1.0 미만	0.5 미만	1.0 미만	0.5 미만	1.0 미만
분석결과 (%)		0.06		0.05		0.08	

[표3] 유도결합플라즈마 분광기 Fe 성분분석 결과

그리스 시료 3종(L3, R3, L4)에 대해 적외선분광기(FT-IR)[18]를 사용하여 구조 분석 결과는 [그림14]와 같고, 스펙트럼의 주요 피크와 흡광도 패턴이 일치하기 때문에 베어링에서 채취한 그리스는 동일한 제품으로 추정됨.

17) 용액으로 만든 시료를 플라스마 광원에 분사시켜 발산되는 빛의 파장대별 세기를 측정하여 함유 원소의 종류 및 함유량을 분석하는 장비.
18) 시료에 빛을 조사하여 흡수하는 에너지를 스펙트럼으로 나타내는 분석 장비, 유기 시료의 구조를 바탕으로 성분을 분석함.



[그림14] 적외선 분광기 구조분석 결과

사용중인 그리스의 수분함량 기준은 AARM942에서는 0.1% 이하로, EN12081에서는 0.2% 이하로, KORAIL 철도용품 공사규격서 전기동차 차축베어링 시험규격(KRCS B538 01:2018) 에서는 0.2% 이하로 제시되어 있다.

그리스를 수분함량측정기로 측정한 결과는 [표4]와 같고, 베어링내 그리스의 수분함량을 AAR942, EN12081, KRCS B538 01의 시험방법 (ISO 3733)에 따라 분석한 결과 수분은 0.042~0.72%로 기준치 이내였다.

구 분		R3	L3	L4
시료사진				
기준치	AAR M942	0.1% 이하	0.1% 이하	0.1% 이하
	EN12081	0.2% 이하	0.2% 이하	0.2% 이하
	KRCS B538 01	0.2% 이하	0.2% 이하	0.2% 이하
측정결과 (%)		0.071	0.045	0.042

[표4] 수분 측정 결과

5. 분석 결과

○ 녹아내린 R4 차축부에 대한 외관검사 결과, 내륜 및 롤러 조립부와 오일씰은 완전히 소실되었으며 외륜과 씰 마모링이 원추형 축 저널부가 밀어올려 축상부 위쪽에 용착된 것이 확인됨. 축저널 단면의 엔드캡 볼트 구멍 막힘은 볼트 헤드가 고온에서 잘려나간 것으로 추정됨.

○ L4 베어링부의 롤러표면을 SEM 검사 결과, 롤러 표면에 나타난 검은 녹과 부식물질은 산화물 또는 석출물로 추정되며, 1000배 확대상에서 대부분 미세 크랙이 발달한 것이 확인되었고, 롤러 표면의 산화물과 탄화물은 베어링이 고속으로 회전 구름마찰시 응력집중과 온도상승을 유인하여 베어링 기능이 상실되고, 차축을 녹아내리게 하여 파단되는 것으로 판단함.

○ 검은 녹과 부식 물질을 EDX-SEM 분석 결과, 모재에서 발생한 금속(Fe, Mn, Si, Cr, C 함유)과 그리스에서 유입 생성된 것으로 추정되는 P, Ca, K, O 등이 검출되었고, 산소(O)의 피크 강도가 모재인 Fe보다도 매우 높게 나타난 것이 특징이며, 앞에서 언급된 원소들의 혼합 산화물로 판단됨.

○ 사고 시료인 R4의 외륜내표면 경도는, 열화로 인한 금속 조직의 변화로 연화되어, EN12080 경도규격인 HRC HRC 57~66 기준보다 현저히 낮은 HRC 49로 측정되었다. 내륜과 롤러는 열화로 시료 소실되어 경도를 측정하지 못하였다. 열을 받지 않은 비교 시료 L4의 외륜내표면, 내륜외표면, 롤러외표면시료의 표면경도값은 HRC 60, 60, 61로 측정되어 EN12080 경도 규격 범위(HRC 57~66) 이내였다.

○ L4 및 R4 베어링부의 화학성분 분석 결과, L4 롤러는 0.224C-0.271Si-1.32Mn-0.0134P-0.008S-0.0269Cu-0.325Ni-0.602Cr-0.156Mo로 분석되었고, 외륜은 0.223C-0.298Si-1.28Mn-0.0137P-0.012S-0.0344Cu-0.341Ni-0.580Cr-0.1153Mo로 분석되었음. R4 롤러는 소실되어 분석하지 못하였고, 외륜은 0.205C-0.276Si-1.31Mn-0.0137P-0.007S-0.0105Cu-0.353Ni-0.595Cr-0.148Mo로 분석되었다.

L4 및 R4 베어링의 화학성분은 큰 차이가 없었다.

L4 외륜, 내륜, 롤러 각각의 소재는 심부는 탄소함량이 0,22%, 표면부 탄소함량은 1.0% 정도로 분석되어, 화차용 Tapered Roller Bearing에 널리 사용되는 Case Hardening Bearing Steel 인 19MnCr5와 20MnNiCrMo3-2와 유사한 강종의 소재에 침탄열처리를 한 것으로 추정된다.

○ 베어링 부품의 강도와 경도에 영향을 미치는 결정립 크기는 열영향을 받은 외륜 R4 시료의 조직은 결정립 크기는 대부분 1~10μm로 매우 미세하게 나타나는데, Maretensite 의 Habit Plane의 쌍정들의 크기이고, 쌍정이 합쳐진 그룹 결정립 Packet Size는 50μm~100μm정도이고 전형적인 Tempered Maretensite 조직인 솔바이트(Sorbite) 조직과 유사한 것으로 R4 시료는 매우 연화된 것으로 판단됨.

○ 소실된 R4를 제외한 각 차축 부 그리스 분석 결과, 구조적 특성에서 변질이 없으며, 철(Fe)을 포함한 금속 성분이 그리스에 유입되지 않은 것으로 판단된다.

그리스내 Fe 함량은 0.08% 이하로 시험 규격(EPA METHOD 3051A:2007) 0.5%~1% 이하이고, 수분은 0.1% 미만(0.046~0.072)으로 검출되어 수분함량 시험 규격(ISO 3733) 0.2% 이하를 만족하였다.

6. 분석 장비

파단면 분석을 위해 JEOL사의 주사전자현미경(SEM) JSM-6380 모델, SERON AIS2300C을 이용하였고, 경도 측정에는 Struers Micro/Macro Hardness Tester, Rockwell Hardness Tester, 성분 분석에는 자동발광분광 분석기를 이용함. 또한 윤활 그리스의 분석을 위해 유도결합플라즈마분광분석기(ICP-OES), 적외선분광기(FT-IR), 수분측정기를 이용함.

<table>
<tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>SERON AIS2300C
(Scanning Electron Microscope)</td><td>자동발광분광 분석기</td><td colspan="2">경도시험기</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td><td>VICKERS</td><td>ROCKWELL</td></tr>
<tr><td>1. Resolution : 3.0nm(30kv), 15nm(1kV)
2. Accelerating Voltage : 0.5Kv ~ 30Kv
3. Magnification : X5~X200,000</td><td>발광분광 분석법에 의하여 고체금속 및 합금의 화학성분을 분석하는 장비로서 PDA(Pulse Distribution Analysis method) 광전측광 방식의 고성능 분석기기로 정성, 정량 분석을 신속하게 할 수 있다.</td><td>시험법: HV1</td><td>시험법: HRC</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>유도결합플라즈마분광기
(ICP-OES)</td><td>적외선분광기(FT-IR)</td><td colspan="2">수분측정기</td></tr>
<tr><td>제조사 Agilent / USA
모델명 715 ICP-OES</td><td>제조사 Agilent / USA
모델명 660-IR</td><td colspan="2">제조사 Metrohm / Switzerland
모델명 917 coulometer</td></tr>
</table>

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,

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: 044-201-5425

E-mail: back3790@korea.kr