보고서 번호
ARAIB / R 12-1

부산교통공사 1호선 범내골역 전동열차 화재('11.10.31.)

철 도 사 고 조 사 보 고 서

2012. 2. 29.

항공 · 철도사고조사위원회

국토해양부

이 조사보고서는 ‘항공·철도사고조사에 관한 법률’ 제25조에 의하여 작성되었다.

동 법률 제1조에서 철도사고 조사는 독립적이고 공정한 조사를 통하여 사고 원인을 정확하게 규명함으로써 철도사고의 예방과 안전 확보에 이바지하도록 규정하고 있다.

또한 제30조에는 사고조사는 민·형사상 책임과 관련된 사법절차, 행정절차 또는 행정쟁송절차와 분리·수행되어야 하고,

제32조에는 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 아니하도록 규정하고 있다.

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

차 례

제목 ····· 1
개요 ····· 1

1. 사실정보 ····· 2

1.1 사고경위 ····· 2

1.2 피해사항 ····· 3
1.2.1 인명피해 ····· 3
1.2.2 물적피해 ····· 3

1.3 전동차 손상상태 ····· 4
1.3.1 회로차단기함 ····· 4
1.3.2 회로차단기 ····· 5
1.3.3 고속도차단기 HB1 등 ····· 7
1.3.4 주 퓨즈 ····· 8
1.3.5 팬터그래프 ····· 8
1.3.6 견인전동기 ····· 9

1.4 인적정보 ····· 10
1.4.1 기관사 ····· 10
1.4.2 종합관제소 관제사 ····· 10
1.4.3 범내골역 역장 ····· 10

1.5 운전취급상황 ····· 11
1.5.1 기관사 ····· 11
1.5.2 종합관제소 관제사 ····· 11
1.5.3 범내골역 역장 ····· 12

1.6 선로시설 정보 ····· 12
1.6.1 노선 및 운영현황 ····· 12
1.6.2 전차선 전원공급 및 신호 정보 ····· 13

1.7 전동차 정보 ····· 14

1.7.1 전동차 제원 ····· 14

1.7.2 주회로장치 작동시스템 ····· 15
1.7.2.1 제동 시 작동시스템 ····· 15
1.7.2.2 회로차단기의 작동조건과 플러스측에 가압되는 전압의 관계 ····· 17
1.7.2.3 주회로의 과전류 보호회로 작동정보 ····· 17

1.7.3 회로차단기함의 구조 ····· 17

1.7.4 회로차단기 정보 ····· 18
1.7.4.1 회로차단기 사양 ····· 18
1.7.4.2 회로차단기 구조 ····· 18
1.7.4.3 주회로 전류를 차단하는 구조 ····· 19

1.7.5 주 퓨즈 정보 ····· 20
1.7.5.1 주 퓨즈 사양 ····· 20
1.7.5.2 주 퓨즈 특성 ····· 21

1.7.6 견인전동기 정보 ····· 22

1.7.7 손상 물품에 대한 검사 및 시험 ····· 22
1.7.7.1 회로차단기함과 회로차단기 LB1 및 LB2 ····· 22
1.7.7.2 주 퓨즈 ····· 22
1.7.7.3 팬터그래프 ····· 23
1.7.7.4 견인전동기 ····· 23

1.7.8 주회로 보호장치 작동상황 조사 ····· 24
1.7.8.1 주 퓨즈 작동상황 ····· 24
1.7.8.2 주회로장치를 보호하는 계전기 작동상황 ····· 24
1.7.8.3 고속도차단기 작동상황 ····· 24

1.8 사고열차의 운행정보기록 ····· 24

1.9 전동차의 정기검수에 관한 정보 ····· 27
1.9.1 회로차단기함 및 회로차단기 검사 ····· 28

1.9.2 주 퓨즈 검사 ····· 29
1.9.3 견인전동기 검사 ····· 29

1.10 유사 사고사례 ····· 29

1.11 기타 ····· 31
1.11.1 기상정보 ····· 31

2. 분석 ····· 32

2.1 전차선 정전에 대한 분석 ····· 32

2.2 회로차단기함 상태와 회로차단기 작동상황 등에 대한 분석 ····· 32
2.2.1 회로차단기함 구조 ····· 32
2.2.2 회로차단기의 배선연결 상태 ····· 32
2.2.3 고속차단기 HB1의 작동 ····· 33
2.2.4 회로차단기의 접점상태와 작동 ····· 33
2.2.5 회로차단기 LB1의 아크취소 작동 ····· 33

2.3 주 퓨즈에 대한 분석 ····· 34

2.4 견인전동기의 플래시오버 발생상황 분석 ····· 35
2.4.1 견인전동기의 플래시오버 현상 ····· 35
2.4.2 사고전동차의 견인전동기에 대한 분석 ····· 35

2.5 화재진압 조치에 대한 분석 ····· 36
2.5.1 기관사 ····· 36
2.5.2 종합관세소 관제사 ····· 36
2.5.3 범내골역 역장 ····· 36

3. 결론 ····· 37

3.1 조사결과 ····· 37
3.2 원인 ····· 38

4. 안전권고 ····· 39

부산교통공사 1호선 범내골역 전동열차 화재사고(‘11.10.31)

○ 운영기관 : 부산교통공사
○ 운행노선 : 1호선 신평역～노포역
○ 발생장소 : 범내골역 구내
○ 사고열차 : 제2198호 전동열차(8량 편성)
○ 사고유형 : 열차화재
○ 사고일시 : 2011. 10. 31(월) 15:48경

개 요

2011년 10월 31일(월) 15시 48분경, 신평역을 떠나 노포역으로 향하던 부산도시철도 1호선 제2198호 전동열차(신평15:18→노포16:20, 이하 “사고열차” 라 한다)가 범내골역에 정차하여 승객을 하차시키던 중 4호차의 지붕과 하부에서 화재가 발생하여 역 직원과 승객들이 소화기로 화재를 진압하였으며, 16시 4분경 사고열차는 노포차량사업소로 회송 조치되었다. 이 사고로 인명피해는 발생하지 않았으나, 4호차의 주 퓨즈, 회로차단기 등이 소손(燒損)되었다.

이 화재사고는 사고열차의 견인전동기에서 절연저하 등으로 플래시오버(1)가 발생하여 주회로에 과전류가 흘러 회로차단기(LB1)가 작동할 때, 절연내력이 약화(오랜기간 사용 등)된 상태에서 아크가 소멸되지 않고 크게 확산되어 회로차단기함 내부의 각종 분진, 도료, 합성수지 등이 타면서 전동차 하부에서 연기와 불꽃이 발생하였다. 그리고 회로차단기에서 아크가 크게 확산될 때, 주 퓨즈가 허용전류 과다로 폭발하면서 아크열과 복사열에 의해 지붕코팅과 분진 등이 타면서 연기와 불꽃이 발생하였다.

항공・철도사고조사위원회는 사고조사 결과에 따라 부산교통공사에 8건의 안전권고를 발행한다.

(1) 플래시오버(Flashover) : 직류전동기에서 정류자편(整流子片) 사이가 양극에서 음극으로 이행되는 도중에 차차로 단락되어 최종적으로는 양극과 음극사이가 아크로 완전히 단락되는 현상

1. 사실정보

1.1 사고경위

2011년 10월 31일(월) 15시 48분경, 사고열차가 신평역을 떠나 노포역으로 향하던 중 범내골역 정차지점 약 300m 전방에서 폭발음 및 충격과 함께 4호차에 주회로 과전류 보호회로(2)가 작동하면서 남포역~양정역 구간의 전차선이 정전되고 사고열차는 타력으로 범내골역까지 운행하였다.

범내골역에 정차하여 승객을 하차시키던 중, 역의 CCTV를 감시하던 공익요원과 기관사가 4호차의 지붕과 하부에서 화재가 발생한 것을 발견하고 범내골역 역장이 소방서에 신고하였으며, 역장과 공익요원이 출동하여 승객들과 함께 소화기로 화재를 완전히 진압하였다.

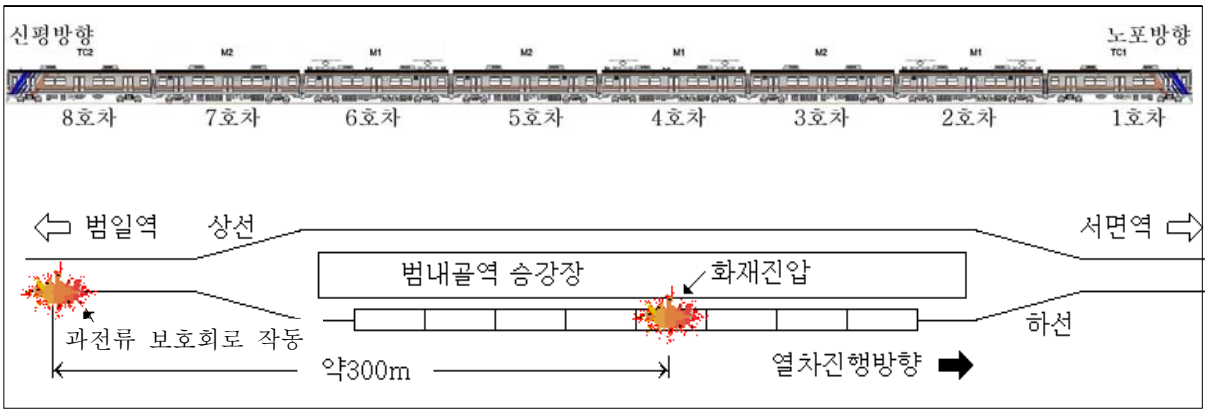
관제소에서는 전차선이 정전된 상황에서 기관사로부터 전동차에 화재가 발생하였다는 보고를 받고, 사고열차에 대해 팬터그래프를 내리고 화재진압을 할 것과 범내골역에 여객을 안내하여 대피시킬 것을 지시하였다. 그리고 정전구간(남포역~양정역간)을 운행하는 전동열차에 대해서는 가장 가까운 역에 정차하여 팬터그래프를 내리고 대기 할 것과 1호선 전구간을 운행하는 전동열차에 대해서는 운행을 중지시킨 후, 전역에 열차운행중지에 대한 안내방송을 할 것을 지시하였다.

이후 사고열차로부터 화재진압 완료와 4호차 팬터그래프 부동조치(팬터그래프 상승관련 차단기 및 콕 차단) 완료보고를 받고, 정전구간의 급전과 함께 해당 구간의 전 열차에 팬터그래프 상승지시를 한 후, 16시 04분경 전 열차에 대해 정상운행 지시를 함으로써 모든 구간의 열차운행이 정상화되었으며, 사고열차는 전차선에 급전이 된 후 범내골역을 출발하여 무정차로 노포차량사업소로 회송 조치하였다.

[그림 1]은 사고열차가 과전류 보호회로가 작동하고 나서 범내골역에 정차한 상황이다.

---

(2) 과전류 보호회로(過電流 保護回路, over current protection circuit) : 견인전동기를 구동하는 전기회로에 과전류가 흐를 때 회로를 차단하여 기기를 보호하기 위한 회로.



[그림 1] 범내골역 정차상황

1.2 피해사항

1.2.1 인명피해

이 사고로 인명피해는 발생하지 않았다.

1.2.2 물적피해

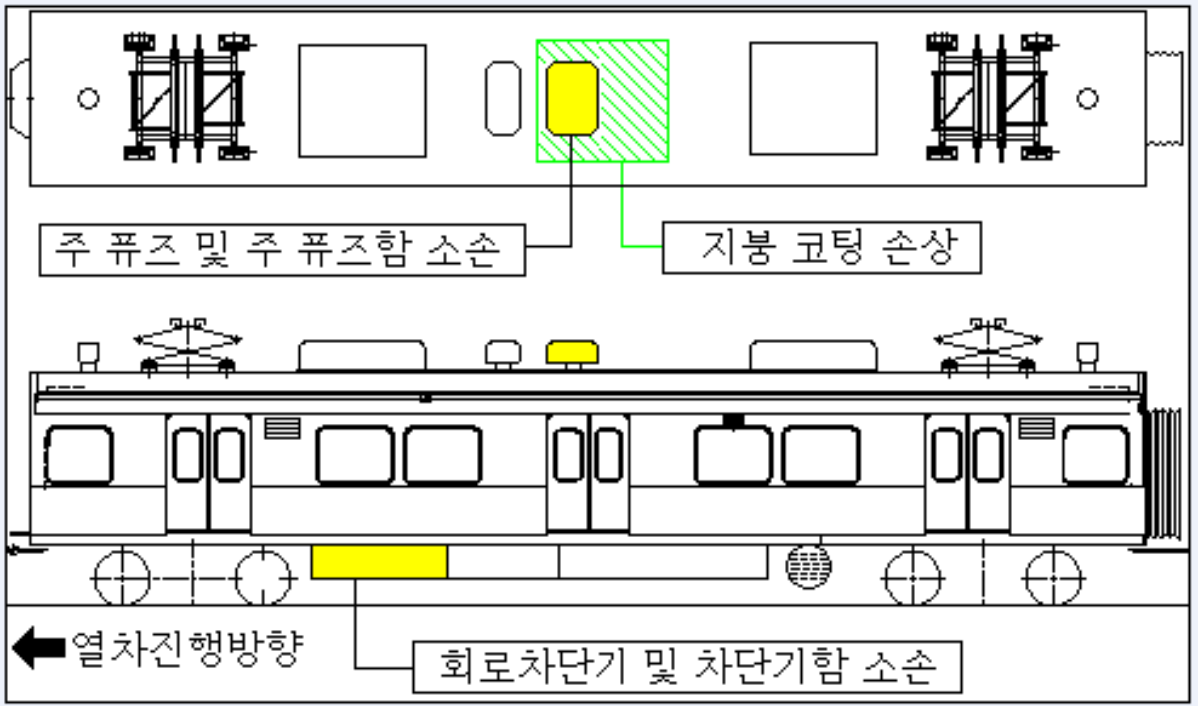
이 사고의 물적피해는 전동차에서 발생하였으며, 피해금액은 [표 1]과 같이 약 13,900,000원이 발생되었다.

피 해 내 용	규 격	수량	피해금액(원)
주 퓨즈 용손	직류 1,500V 500A	3개	6,000,000
주 퓨즈 함 소손	주 퓨즈용	1개	1,000,000
아크슈트 소손	회로차단기용	2개	2,600,000
회로차단기 커버 소손	회로차단기용	1개	1,500,000
회로차단기(LB1,2) 손상	UP-2931N	2개	2,000,000
지붕절연코팅 손상	-	10㎡	800,000
견인전동기의 경미한 플래시오버	직류 750V 165㎾	2개	-
		계	13,900,000

[표 1] 전동차 피해금액

1.3 전동차 손상상태

전동차의 손상은 4호차에 집중되어 있었으며, 손상된 장치의 위치는 [그림 2]와 같다. 그리고 4호차의 견인제어장치(쵸퍼장치)에 의해 제어되는 5호차의 견인전동기 2대에서 경미한 플래시오버가 발견되었다.

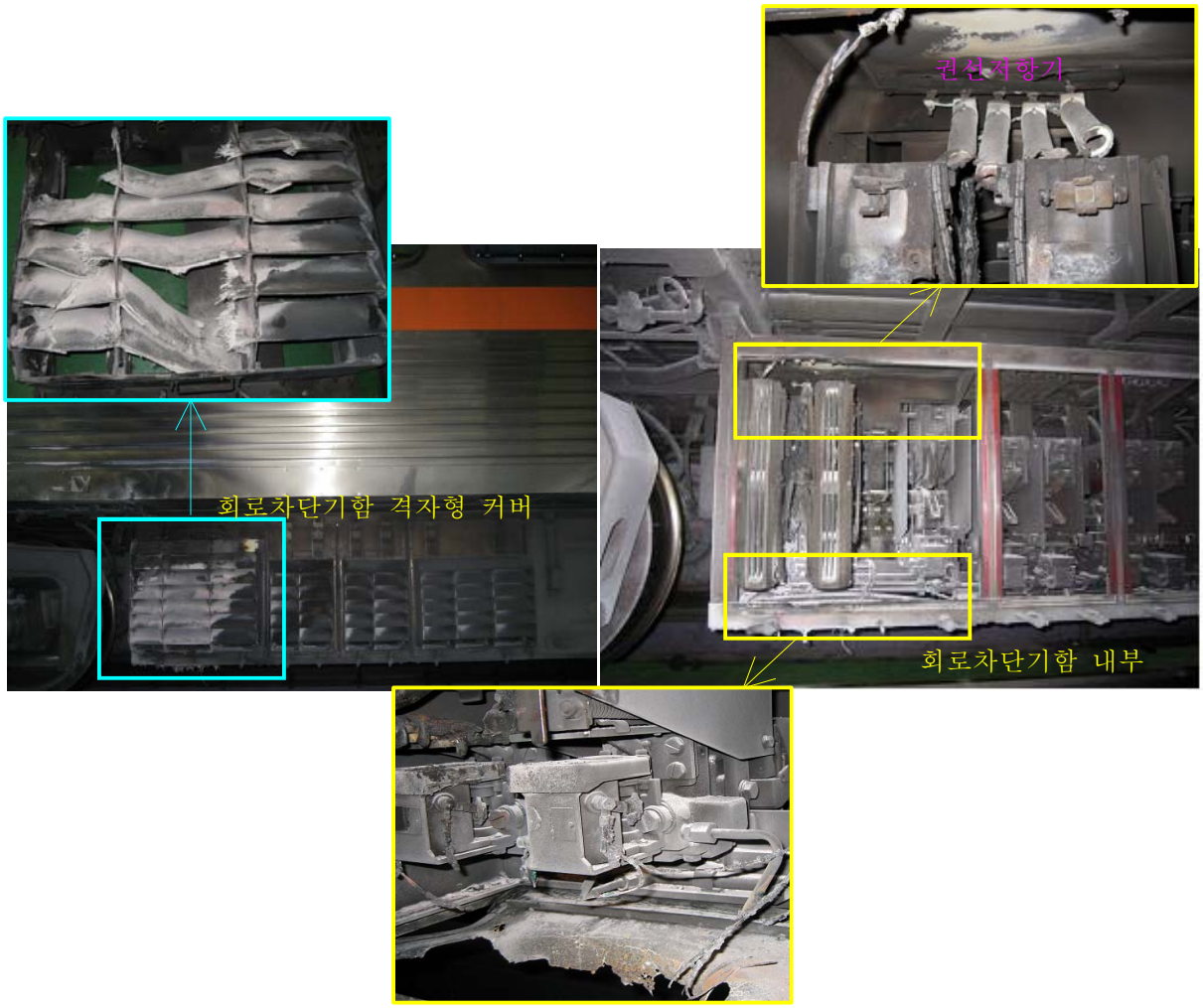


[그림 2] 4호 전동차의 손상부품 위치도

1.3.1 회로차단기함

[그림 3]과 같이 회로차단기함의 격자형 커버가 부분적으로 소손되어 있었고, 회로차단기함 내부는 회로차단기 LB1 및 LB2 주변이 전체적으로 그을려 있었으며, LB1 측면과 하부에 아크에 의한 구멍이 뚫려 있었다. 그리고 상부의 권선저항기가 손상되었고, 저압회로의 일부 배선이 단선되거나 용융(3)되어 있었다.

(3) 용융(熔融, melting) : 고체상태의 물질이 에너지를 흡수하여 액체로의 상태변화가 일어나는 것, 즉 '녹음'을 의미하며, 융해(融解)라고도 한다.



[그림 3] 회로차단기함 손상상태

1.3.2 회로차단기

회로차단기함 내부에 설치되어 있는 회로차단기 LB1 및 LB2의 주요 손상상태는 [그림 4]와 같다.

[그림 4] 회로차단기 LB1 및 LB2 손상상태

회로차단기함 내부에서 가장 손상이 심한 LB1의 손상상태는 다음과 같다.

(1) 전체적으로 그을려 있었으며, 상부접촉부 플러스단자가 연결되는 아크취소코일(4)의 끝부분이 차단기함과의 아크에 의해 일부가 용융되었으며, 아크 혼(5)에 고정되는 절연물이 소손되었다.

(4) 아크취소코일(Arc blow out coil) : 직류차단기에서 접점을 차단할 때 발생하는 아크를 단시간에 소멸시켜 회로를 완전히 차단하도록 플레밍의 왼손법칙을 이용하여 아크를 바깥쪽으로 불어 날리기 위한 자계(磁界)를 발생시켜 주는 코일

(5) 아크 혼(Arcing horn) : 차단기에서 접점을 차단할 때 발생하는 아크의 길이를 늘려 아크가 쉽게 소멸되도록 하기 위한 것으로서 접점의 선단부로부터 이것을 따라 바깥쪽으로 아크가 늘어지도록 설치한 금속구조물

(2) 아크슈트[6]가 심하게 소손되고, 측부의 자철판[7]이 녹아 회로차단기의 코어와 완전히 용착되어 있었다.

(3) 팬터그래프 측으로부터의 배선 압착단자 및 취부 볼트 등에 용융흔적 등의 이상은 보이지 않았다.

(4) 전자밸브에 이르는 제어배선의 피복이 소손되고 단선되어 있었다.

(5) 주 접점 접촉면에 용융흔적 등의 이상은 보이지 않았으며, 아크접점의 통전 접촉면에는 통상의 아크흔적만 있었다.

(6) 회로차단기함에 고정하는 상부 볼트 2개 중 1개가 탈락되었다.

LB1에 비해 손상이 적었던 LB2의 손상상태는 다음과 같다.

(1) 전체적으로 그을려 있었으며, 주 접점 접촉면에 용융흔적 등의 이상은 보이지 않았으며, 아크접점의 통전 접촉면에는 통상의 아크흔적만 있었다.

(2) 아크슈트가 심하게 소손되어 있었다.

(3) 주회로 배선의 압착단자 및 취부 볼트 등에 용융흔적 등의 이상은 보이지 않았다.

(4) 전자밸브에 이르는 제어배선의 피복이 소손되고 단선되어 있었다.

1.3.3 고속도차단기 HB1 등

회로차단기 LB2 옆에 설치되어 있는 고속도차단기[8]는 전체적으로 연기에 의한 그을음이 있었지만 그 외에 이상은 없었고, 차단(trip) 작동상태로 되어 있었다.

---

(6) 아크슈트(Arc chute) : 차단기의 접점이 작동할 때 발생되는 아크를 봉쇄하여 다른 부분에 손상을 주는 것을 방지할 목적으로 차단기에 설치하는 내열성의 절연격벽(絶緣隔壁)이다.

(7) 자철판(磁鐵板) : 차단기에서 접점을 차단할 때 발생하는 아크를 소멸시킬 때 아크취소코일에서 발생하는 자기장을 강화하고 아크를 바깥쪽으로 유도할 수 있도록 아크 혼 주위에 설치한 철판

(8) 고속도차단기(高速度遮斷器, High speed circurt breaker) : 직류 전기회로에 사고전류가 흐를 때 차단기 자체에서 이 전류를 검출하여 아주 빠른 속도로 회로를 끊어주는 장치

1.3.4 주 퓨즈

[그림 5]와 같이 병렬로 연결된 주 퓨즈 3개 중 1개는 폭발에 의해 내부의 소호사(9)가 뿜어져 나온 상태였으며, 나머지 2개는 아크화염에 의해 소손되어 있었다.

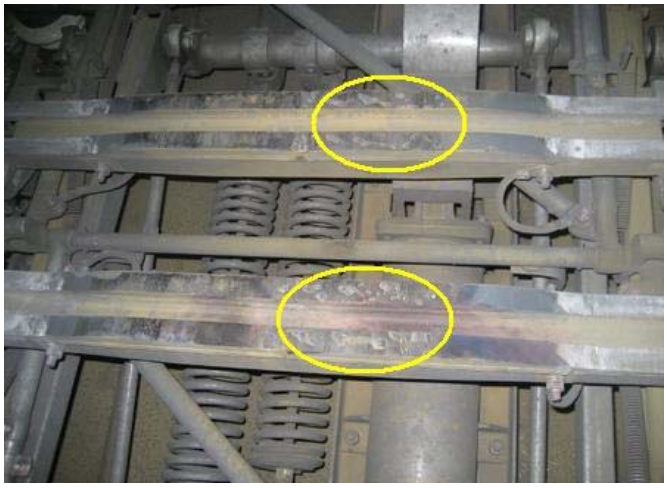
주 퓨즈함은 배선 인입부분의 고무부시와 배선 피복이 손상되었으며, 주 퓨즈의 폭발에 의한 구멍이 퓨즈의 길이 방향으로 2군데 뚫려 있었다. 그리고 주 퓨즈함 주변의 지붕코팅이 화염에 의해 손상되어 있었다.

[그림 5] 주 퓨즈함 등 손상상태

1.3.5 팬터그래프

[그림 6]과 같이 4호차 팬터그래프의 습판에 경미한 아크흔적이 있었다.

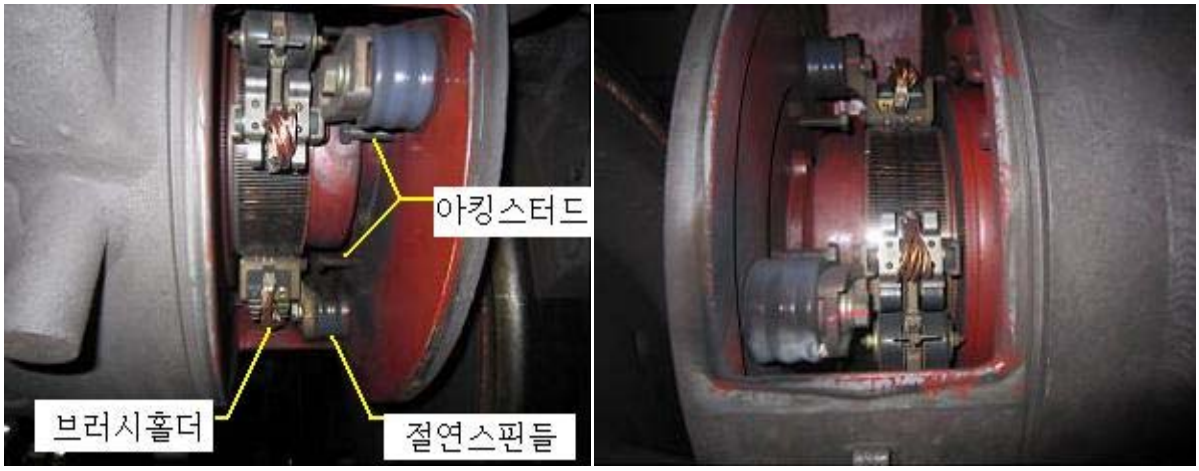
(9) 소호사(消弧砂, Extinguishing sand) : 전력용 퓨즈에 큰 전류가 흘러 내부의 소자(element)가 끊어질 때 발생하는 아크열을 신속하게 흡수·냉각하여 소멸시키기 위해 퓨즈 통 안에 충전(充塡)하는 규사



[그림 6] 팬터그래프 습판의 경미한 아크흔적

1.3.6 견인전동기

[그림 7]과 같이 5호차의 3·4위측 견인전동기의 절연스핀들(10) 부위가 그을려 있었으며, 브러시홀더와 아킹스터드(11) 사이에 플래시오버 전압을 해소하기 위한 방전 아크흔적이 있었고, 정류자면은 깨끗하였다.



[그림 7] 견인전동기 손상상태

(10) 절연스핀들(Brush holder insulator) : 견인전동기의 브러시홀더를 지지하는 절연물

(11) 아킹스터드(Arcing stud) : 직류전동기에서 플래시오버 발생 초기 정류 불꽃에 의한 아크가 극간 단락으로 발전하기 전에 대지로 아크를 불어 날리기 위해 브러시홀더 가까이에 설치한 전극

1.4 인적정보

1.4.1 기관사

사고열차 기관사 김○○(남, 49세)는 철도청 부산기관차승무사업소에 임용되어 1983년 5월부터 1995년 6월(약12년)까지 부기관사 및 기관사로 근무하였고, 2007년 5월 23일 경력사원으로 부산교통공단에 채용되어 운전실무수습을 마친 후 노포승무사업소 운영팀에 배치되었으며, 상 또는 벌을 받은 사실은 없었다.

기관사의 출근 전 행적과 사고당일 출근한 후의 승무적합성 기록 등을 확인한 결과 승무사업에 지장을 줄 만한 특이 사항은 없었다.

1.4.2 종합관제소 관제사

관제사 박○○(남, 49세)는 1993년 7월 9일 부산교통공단에 입사하여 2007년 12월 2일까지 운수분야에서 근무하였고, 2007년 12월 3일 종합관제소 관제사로 임용되어 사고일 현재까지 근무하고 있었으며, 상 또는 벌을 받은 사실은 없었다.

관제사는 장애발생 전일 2011년 10월 30일 18시에 퇴근하여 집에서 휴식을 취하였고, 2011년 10월 31일 9시에 출근하여 전 근무자로부터 업무를 인계받아 사고발생 시까지 근무하였으며, 음주 또는 금지된 약물을 복용하지 않았다고 진술하였다.

1.4.3 범내골역 역장

범내골역장 권○○(남, 52세)는 1988년 7월 1일 부산교통공단에 입사하였고, 2011년 8월 1일 범내골역 역장으로 임용되어 사고일 현재까지 근무하고 있었으며, 상 또는 벌을 받은 사실은 없었다.

역장은 사고발생 전일인 2011년 10월 30일 18시에 퇴근하여 집에서 휴식을 취하였고, 2011년 10월 31일 9시에 출근하여 전 근무자로부터 업무를 인계받아 사고발생 시까지 근무하였으며, 음주 또는 금지된 약물을 복용하지 않았다고 진술하였다.

1.5 운전취급상황

1.5.1 기관사

사고당시 기관사는 사고열차를 자동(AUTO) 운전모드[12]로 운전하고 있었으며, 범내골역을 향해 72km/h 속도로 운전하던 중, 범내골역 약 300m 전방에서 폭발음과 충격이 발생하면서 4호차 과전류 및 과전압 보호회로(CH-OCAR, CH-OVAR) 작동되고 전차선이 정전되어 기관사는 사고열차를 범내골역까지 타력으로 운행하여 15시 50분경에 정차하였다.

정차 후 출입문을 개방하여 승객들은 승강장으로 대피시키고, 관제사에게 현장 상황을 보고하였으며, 역장, 공익요원과 함께 4호차 하부 및 상부의 화재 발생부분을 소화하였다. 이후 사고열차의 추진제어회로를 차단(UCOS취급)하고 4호차의 팬터그래프를 철사 등으로 결박조치하고 대기하다가 급전이 이루어진 후 관제사의 지시를 받고 16시 4분경 사고차량을 운전하여 노포차량소로 회송하였다.

1.5.2 종합관제사 관제사

관제사는 2011년 10월 31일 9시 00분부터 사고가 발생할 때까지 관제실에서 관제업무를 수행하였다. 15시 48분경 사고열차가 범내골역에 접근하였을 열차운행 상황판에 점등된 등황색 단전표시등을 보고 전차선 단전사실을 알았으며, 3초 후 고압회로 차단기가 자동으로 투입되었으나, 다시 단전된 상황에서 기관사로부터 전동차에 화재가 발생하였다는 보고를 받았다.

관제사는 사고열차에 대해 팬터그래프를 내리고 화재진압을 할 것과 범내골역에 여객을 안내하여 대피시킬 것을 지시하였다. 그리고 정전구간(남포역～양정역간)을 운행하는 전동열차에 대해서는 가장 가까운 역에 정차하여 팬터그래프를

(12) 운전모드 : 다음의 4가지 가 있다.
- AUTO모드 : 승무원이 출발스위치를 누르면 주행 및 정지가 자동으로 이루어진다.
- MCS모드 : 출발 및 정지는 수동운전이며, 주행중에는 ATC신호에 의해 운전이 제어된다.
- YARD모드 : 출발 및 정지는 수동운전이며, 속도는 25km/h 또는 그 이하이다.
- FMC모드 : ATC 속도코드가 없는 수동운전이다.

내리고 대기 할 것과 1호선 전구간을 운행하는 전동열차에 대해서는 운행을 중지시킨 후, 전역에 열차운행중지에 대한 안내방송을 할 것을 지시하였다.

이후 사고열차로부터 화재진압 완료와 4호차 팬터그래프 부동조치(팬터그래프 상승관련 차단기 및 콕 차단) 완료보고를 받고, 정전구간의 급전과 함께 해당 구간의 전 열차에 팬터그래프 상승지시를 한 후, 16시 04분경 전 열차에 대해 정상운행 지시를 함으로써 모든 구간의 열차운행이 정상화되었다.

1.5.3 범내골역 역장

15시 48분경 범내골역장은 CCTV 감시 중 승강장으로 진입하는 사고열차에서 연기가 발생하는 것을 인지하고 119에 신고한 후, 공익요원과 함께 현장으로 출동하였고, 전동열차가 정차한 후, 승강장으로 하차하는 승객들을 안전하게 대피시켰으며, 기관사 등과 함께 소화작업을 하고 배기설비를 가동하였다.

1.6 철도시설 정보

1.6.1 노선 및 운영현황

부산교통공사에서 운영 중인 부산도시철도 1호선은 1985년에 개통되어 신평역에서 노포역을 잇는 영업 거리 32.5㎞인 노선으로서 혼잡시간대에는 4분, 주간의 비혼잡시간대에는 6분 간격으로 열차를 운행하고 있다. 시·종착역 운행시간은 62분이 소요되며, 1일 운행횟수 및 운행편성 수는 [표 2]와 같다.

운행횟수(DIA)		평 일	364회
		토요일	344회
		휴 일	328회
열차운행 편성 수	혼잡시간대	평 일	34개
		토요일	28개
		휴 일	28개
	비혼잡시간대	평 일	23개
		토요일	23개
		휴 일	23개

[표 2] 1일 운행횟수 및 운행편성 수

1.6.2 전차선 전원공급 및 신호 정보

부산시 1호선의 전차선 전원은 직류 1,500V 방식으로 공급된다.

사고열차가 위치해 있던 범내골역 구내의 전차선 전력은 범내골 변전소와 그 양단의 변전소인 남포 및 양정 변전소에서 병렬로 급전되고 있다.

이 변전소들은 전력용 사이리스터를 사용하여 교류를 직류로 변환하며, 회생전력을 다시 교류로 변환할 수 있는 기능을 가진 컨버터설비를 갖추고 있지만, 전차선의 전압과 전류를 상시 기록하는 시스템은 갖추고 있지 않다. 그리고 급전구간별로 별도의 급전용 직류고속도차단기(13)는 설치되어 있지 않으며, 이상 발생 시 컨버터를 제어함으로써 직류급전구간의 전력을 단전시키는 방식으로 되어 있다.

사고발생 당시의 보호장치 작동, 정전 및 급전에 대한 전기관제의 이벤트기록은 [표 3]과 같으며, 기록에 사고전류의 크기는 나타나지 않았다.

발생시간	내용	비고
15:49:44	남포~범내골 상·하선 전차선 자동차단(trip) 발생	
15:49:47	남포~범내골 상·하선 전차선 자동급전	
15:49:50	남포~범내골 상·하선 전차선 자동차단 재발생	
	범내골~양정 하선 전차선 자동차단 발생	
15:49:54	범내골~양정 상선 전차선 자동차단 발생	
16:02:45	범내골~양정 상·하선 전차선 계통변경급전	범내골~양정 구간 13분간 정전
16:03:07	남포~범내골 상·하선 전차선 계통변경급전	남포~범내골 구간 14분간 정전
16:04경	전 열차 정상운전(고장차량 회송운전)	

[표 3] 전기관제 이벤트기록

(13) 직류고속도차단기(直流高速度遮斷器, DC high speed circurt breaker) : 직류 전기회로에 사고전류가 흐를 때 차단기 자체에서 이 전류를 검출하여 아주 빠른 속도로 회로를 끊어주는 장치

그리고 전차선에서 특이사항이 발견되지 않았으며, 사고열차 운행구간의 진로 및 신호현시에 문제점은 없었다.

1.7 전동차 정보

1.7.1 전동차 제원

전동차는 구 현대정공(주)에서 제작되어 1986년에 도입되었으며, 1997년 6량에서 8량으로 증차하여 조성할 당시 운전실이 있는 제어차인 Tc차(1・8호차)는 그대로 사용하였으나 중간의 동력차인 M1차 및 M2차(2~7호차)는 전량을 1997년도에 제작한 차량으로 조성하였다. 2호차, 4호차 및 6호차에 팬터그래프와 주・보조 퓨즈함, 회로차단기함 등이 설치되어 있으며, 전동차의 제원은 [표 4]와 같다.

구 분		내 용							
차 종		통근형 직류전동차(1인 승무)							
최고속도		80 ㎞/h							
표정속도		31.5 ㎞/h							
차량조성		Tc1	M1	M2	M1	M2	M1	M2	Tc2
		1호차	2호차	3호차	4호차	5호차	6호차	7호차	8호차
차체 크기	길 이	18,000 ㎜							
	폭	2,750 ㎜							
	높 이	3,670 ㎜							
	냉방장치까지 높이	4,150 ㎜							
출 입 문 수		6개(편측 3개소)							
차 체 재 질		스테인리스강							
정원	선두차	113명(좌석 48명, 입석 65명)							
	중간차	124명(좌석 56명, 입석 68명)							
차중	Tc차	24.5 ton							
	M1차	35.2 ton							
	M2차	33.5 ton							
추진제어방식		전기자 초퍼제어							
보조전원장치		Static Inverter							
제 동 방 식		전기(회생) 및 공기제동병용							
차상신호방식		ATC/ATO 차내신호방식							
열차정보 감시장치		모니터(Monitor)							
견인전동기		직류직권전동기 직류 750V 165㎾							

[표 4] 전동차 제원

1.7.2 주회로장치 작동시스템

1.7.2.1 제동 시 작동시스템

사고열차가 전기(회생)제동 중에 견인전동기의 플래시오버가 발생하였고 과전류 보호회로가 작동하였다. 이를 [그림 8]에서 나타낸 제동 중의 주회로 구성도로 다음과 같이 개략적으로 설명한다.

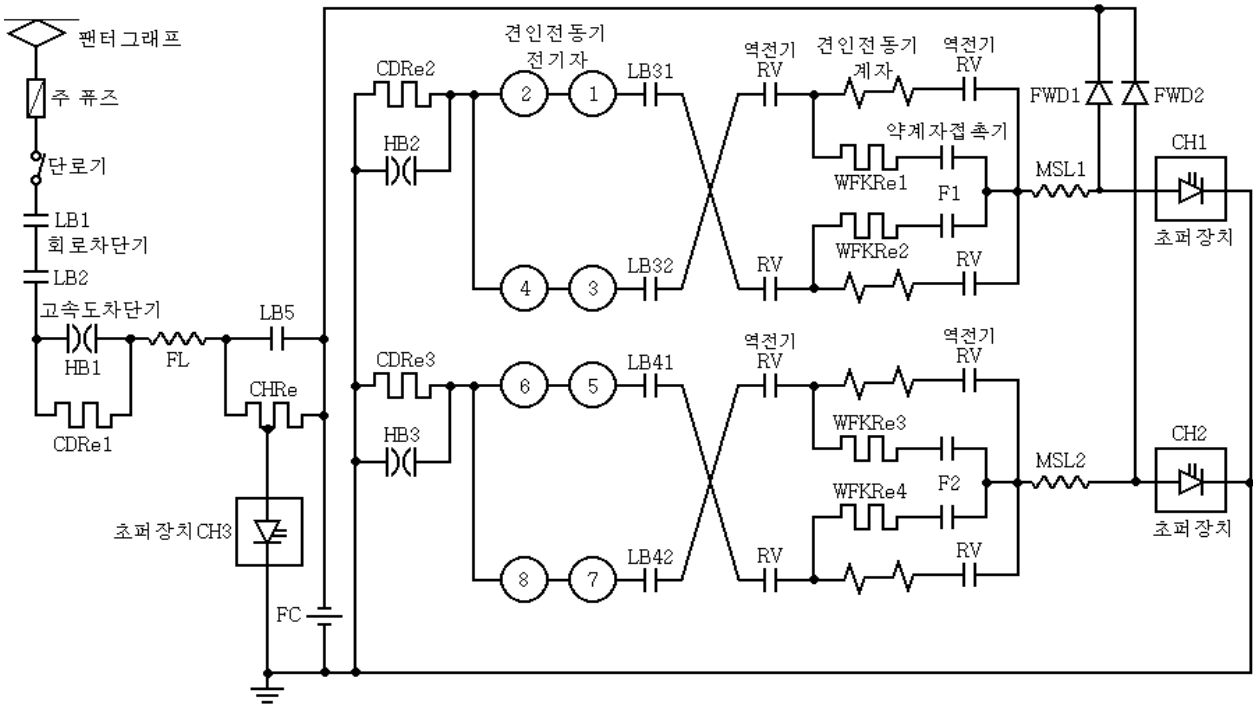
(1) 기관사가 운전대의 주간제어기를 제동위치로 하거나 자동운전 중 제동요구 신호가 지령되면 주회로 장치의 접점은 제동모드로 전환되고, 약계자 접촉기(F1, F2)가 닫히며, 단위 접촉기(LB31, LB32, LB41, LB42)와 주회로 차단기(LB1, LB2, LB5)가 순서대로 닫힌다.

(2) 제동 중에는 전동기가 발전기로서 작용하게 되는데 쵸퍼장치의 on/off에 의해 주회로에 발생되는 전압을 전차선전압보다 높도록 제어하며, 이 때 발생된 회생전력을 전차선으로 공급하여 역행 중인 다른 전동차의 동력으로 사용하거나 변전소로 반환된다.

(3) 전동차의 속도가 감소하여 주회로에 흐르는 전류가 60A 이하로 되면 회로차단기는 전부 차단되고 공기제동으로 전환한다.

(4) 위에서 제동회로 구성 초기에 LB가 닫히고 3초 이내에 회생전류가 흐르지 않았을 경우 모든 회로차단기가 개방되고 공기제동이 작용한다.

그리고 회로차단기 LB1 및 LB2는 항상 동시에 작동하고, 고속도차단기가 작동한 이후에 작동하도록 순서가 구성되어 있다.



[그림 8] 제동 시의 주회로 구성 개략도

1.7.2.2 회로차단기의 작동조건과 플러스측에 가압되는 전압의 관계

위 [그림 8]의 주회로 개략도에 나타난 것처럼 LB1의 플러스 측(단자 접속부, 아크취소코일, 상부 아크 혼과 접점)은 회로차단기의 작동조건에 관계없이 항상 전차선전압으로 가압되어 있으며, LB2의 플러스 측은 LB1이 닫혀있을 때에만 전차선전압으로 가압된다.

1.7.2.3 주회로의 과전류 보호회로 작동정보

고속도차단기와 회로차단기를 모두 차단시키며, 차량측면의 고장표시등 및 운전실의 고장(FAULT)등과 과전류 표시등(14)이 점등하고 모니터화면의 고장정보에는 CH-OCR(과전류 보호회로)로 표시된다. 주회로의 과전류 보호회로를 작동시키는 방식은 다음과 같다.

(1) 견인전동기 회로의 전류센서에서 1,000A 이상인 것을 검지하여 쵸퍼제어장치에서 보호회로 작동신호를 출력

(2) 고속도차단기 HB1에서 주회로 전류가 2,000A 이상인 것을 검지하거나 HB2 또는 HB3에서 각각 1,700A 이상인 것을 검지하였을 때 차단기가 차단

(3) 제동 중 과전압 사이리스터장치가 작동하였을 때 고속도차단기 HB2 및 HB3의 차단 전자변(Trip Solenoid)이 작동

(4) 리액터 송풍기(15) 모터용 전자접촉기(BLK)가 off되었을 때, 차단기가 차단

1.7.3 회로차단기함의 구조

회로차단기함에는 회로차단기(LB1, LB2, LB5), 단위접촉기(LB31, LB32, LB41, LB42), 고속도차단기(HB1, HB2, HB3) 및 약계자접촉기(F1, F2)가 설치되어 있으며, 함은 4개의 장착볼트로 차체에 고정된다.

(14) 과전류 표시등(OCLP, Over current indicator lamp) : 주회로에 과전류가 흘러 보호회로가 작동되었을 때 점등하는 표시램프

(15) 리액터 송풍기(Reactor blower) : 주회로에 설치된 리액터장치에 발생하는 열을 냉각시키기 위한 송풍기

1.7.4 회로차단기 정보

1.7.4.1 회로차단기 사양

회로차단기는 일본 미쯔비시(Mitsubishi)전기(주) 제품으로 1997년에 제조되었으며, 형식은 전자밸브 작동식(UP-293IN), 정격전압은 직류 1,500V이고 정격전류는 900A이다.

1.7.4.2 회로차단기 구조

회로차단기 LB1 및 LB2는 회로차단기함 내부에 설치되고, 주회로 전류의「차단」과「투입」에 사용된다. 특히 큰 전류를 차단할 때에는 차단기의 접점 사이에 아크가 발생하기 때문에 회로차단기는 아크를 불어 끄기 위하여 아래와 같은 구조로 되어 있으며, 절연부의 절연재료로서는 베이클라이트가 사용되고 있다.

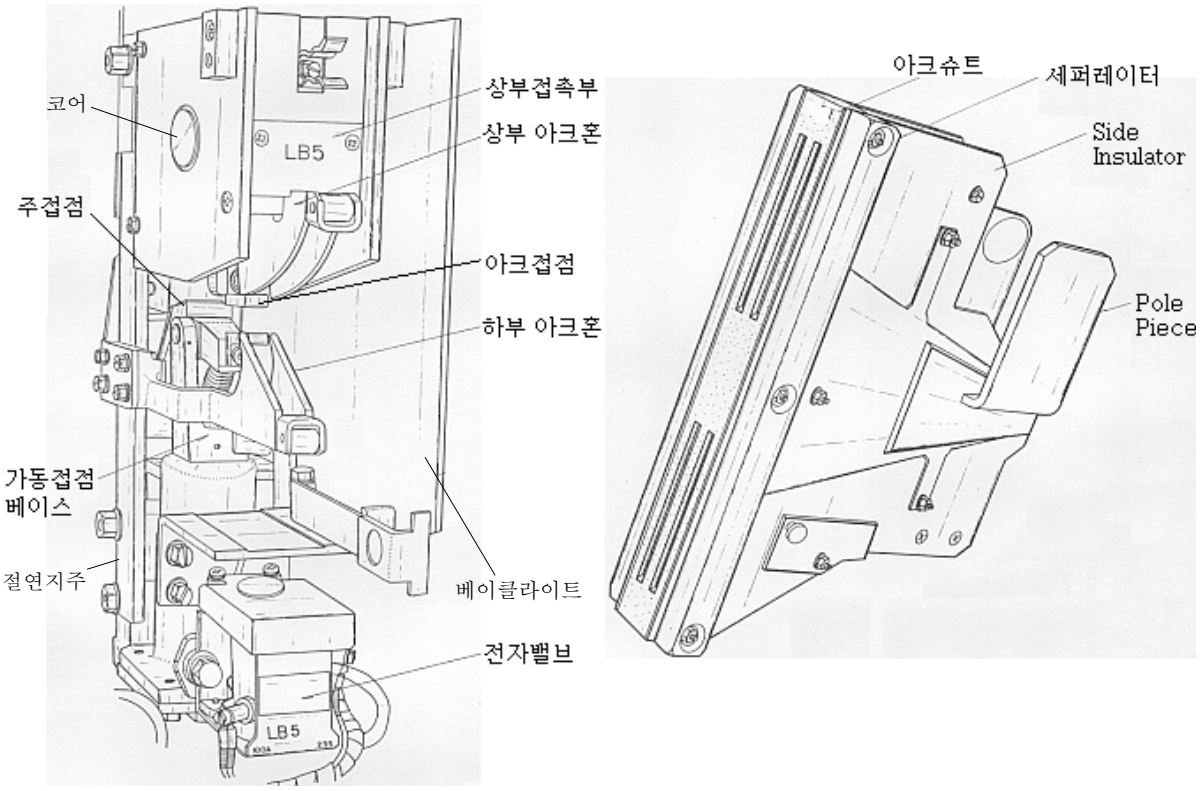
차단기는 크게 상부 접촉부와 하부 접촉부로 나누어지며, 상부 접촉부에는 상부 아크 혼, 아크취소코일과 코어(철심) 등으로 구성되고, 상부 아크 혼에는 주 접점(상) 및 아크접점(상)이 고정되며, 아크취소코일의 한쪽에는 플러스 측(여기에서는 전차선 측을 플러스 측으로 하고 레일 측을 마이너스 측이라 한다)으로부터의 배선이 접속된다.

하부 접촉부에는 실린더 본체와 가동피스톤 조립체, 실린더 본체에 볼트로 고정되어 세워져 있는 2개의 절연지주(16), 하부 아크 혼, 마이너스 측으로부터의 배선 등을 접속하는 단자대, 캠 스위치 및 전자밸브 등으로 구성되어 있다. 가동피스톤 조립체에는 주 접점(하), 아크접점(하), 스프링 등이 조립되고, 전자밸브의 작동에 의해 압축공기를 급・배기시켜 피스톤이 상하로 가동한다.

회로차단기가 함 내에 고정된 후 회로차단기에는 아크슈트가 조립되어 아크를 한쪽방향(정면)으로 유도, 냉각시키도록 한다.

(16) 절연지주(絶緣支柱) : 회로차단기의 상부접촉 구조물을 지지해주는 부품

[그림 9]는 회로차단기와 아크슈트 개략도이다.



[그림 9] 회로차단기와 아크슈트 개략도

회로차단기의 절연물인 베이클라이트는 페놀계 열경화성 합성수지(유기화합물)로서 화학적으로 안정되어 있기 때문에 전기절연재료로 이용되어 왔지만 표면이 아크와 같은 고온에 노출되면 탄화하여 도전성으로 되기 쉽고, 내아크성과 내트래킹성(17)이 좋지 않으며 습도에 약하다고 전기재료에 관한 문헌에서 기술하고 있다.

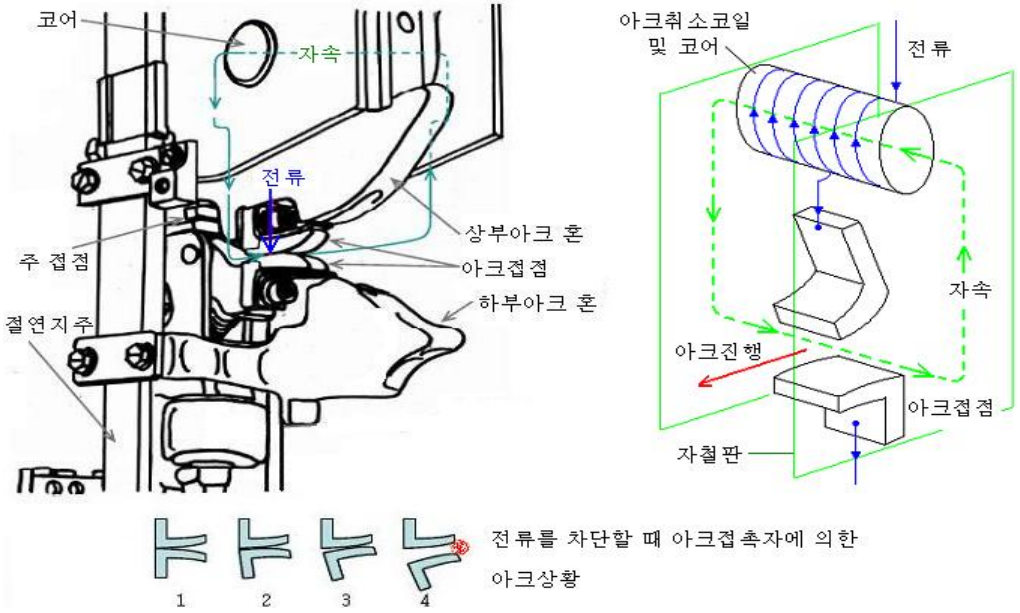
1.7.4.3 주회로 전류를 차단하는 구조

회로차단기는 전자밸브에 제어전원이 가압되면 5㎏/㎠로 조정된 제어(압축) 공기가 실린더에 공급되며, 피스톤에 의해 가동부가 밀어 올려져 주 접점이 닫히는 구조로 되어 있다. 제어전원의 공급이 끊어지면 실린더 내의 제어공기가 배기되어 피스톤은 가동부의 자중에 의해 순간적으로 아래쪽으로 밀려 내려온다. 이렇게 하여 주 접점에 흐르고 있던 주회로 전류는 아크접점으로부터 아크 혼에 아크로

(17) 내트래킹성(Tracking resistivity) : 접점이 떨어진다든지 하여 생기는 아크가 유기질의 절연재료의 표면에 닿으면 열 때문에 탄소를 유리(遊離)하여 표면에 도전성의 통로가 생긴다. 이것을 트래킹이라 하며, 절연파괴의 원인이 되는데 그 생성이 곤란한 정도를 나타내는 것이 내트레킹성이다.

되어 유도되고, 아크취소코일에 의해 발생하는 자계로써 아크를 당겨 늘이면서 소멸시키는 구조로 되어 있다.

접점이 떨어질 때 발생하는 아크는 [그림 10]과 같은 원리로 소호(18)되며, 투입될 때는 아크접점이 주 접점보다 먼저 접촉하고, 개방될 때에는 아크접점이 나중에 떨어져 주 접점을 보호한다. 아크취소코일의 중심에 있는 코어에 생긴 자속(19)은 아크슈트에 조립된 자철(磁鐵)판에 의해 상하 아크접점 사이에 직교하도록 유도되는데 발생된 자력선으로 인해 생기는 힘(플레밍의 왼손법칙)에 의해 아크는 아크접점으로부터 아크 혼을 따라 불려나와 냉각되어 아크슈트 속에서 완전히 소멸된다.



[그림 10] 회로차단기의 아크소호원리

1.7.5 주 퓨즈 정보

1.7.5.1 주 퓨즈 사양

주 퓨즈는 일본 미쯔비시(Mitsubishi)전기(주) 제품으로 1996년에 제조되었으며, 형식은 한류형(FB-S738B-155B), 정격전압은 직류 1,500V이고 정격전류는 1,500A (500×3개)이다.

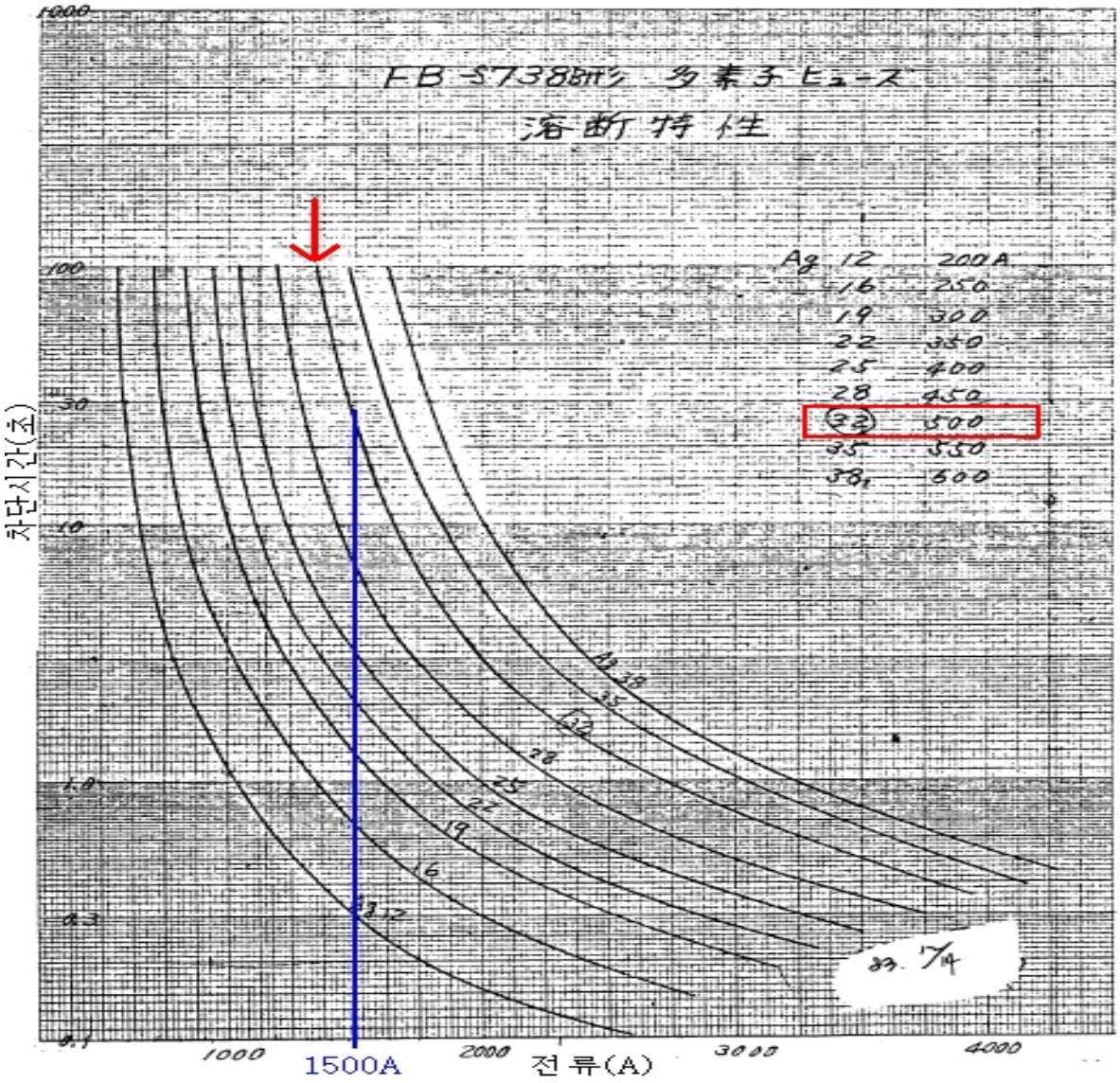
(18) 소호(消弧, Arc extinguishing) : 아크 방전을 소멸시키는 것

(19) 자속(磁束, Magnetic flux) : 자기 마당에 있는 공간에서 어떤 면적을 지나가는 자기력선의 총수에 비례하여 이것의 밀도와 수직인 면의 넓이를 곱한 양, 단위는 웨버(Wb)

1.7.5.2 주 퓨즈 특성

전동차에 사용된 고압한류퓨즈(20)는 원통형 용기에 소호제와 함께 32줄의 가용선(21)과 소호사가 봉입되어 있는 다소자(多素子) 퓨즈이며, 500A의 퓨즈 3개를 병렬로 사용하여 1,500A의 용량을 가지고 있다.

퓨즈의 용단특성은 [그림 11]에 나타낸 것과 같이, 1,500A의 전류가 흐를 경우에 약 30초의 시간이 경과한 후 용단된다.



[그림 11] 퓨즈 용단특성도

(20) 고압한류퓨즈(高壓限流퓨즈, High voltage current limiting fuse) : 지정된 한계전류 범위 안의 전류에 의해 녹아서 끊어질 때 높은 아크 전압을 발생시키고, 이것으로 전류의 증가를 억제하여 작동지속 시간을 짧게 하도록 한 퓨즈 중에서 높은 전압의 것

(21) 가용선(可溶) : 큰 전류가 흐를 때 녹아서 끊어지도록 되어 있는 선(element)을 말한다.

1.7.6 견인전동기 정보

견인전동기는 전차선으로부터 공급받은 전력을 동력원으로 하여 전동차를 움직이게 하는 것으로서, 부산시 1호선 전동차에 사용되는 견인전동기는 1997년 현대중공업(주)에서 제작한 대차 탑재형의 자기통풍식 직류직권전동기이다. 정격은 다음과 같다.

- ㅇ 형식 : 직류 직권전동기(계자권선과 전기자권선이 직렬접속)
- ㅇ 연속정격 : 출력 165kw, 전압 직류 750V, 전류 245A, 속도 1700rev/min
- ㅇ 절연등급 : H종
- ㅇ 공기냉각 : 자기통풍(自己通風)식
- ㅇ 중량 : 870㎏
- ㅇ 회전자직경 : 330㎜
- ㅇ 정류자외경 : 250㎜
- ㅇ 저항(115℃환산) : 회전자권선 0.0527옴, 보극권선 0.0269옴, 직권계자권선 0.0719옴
- ㅇ 브러시 : 분할형 8개 사용, MS-5A
- ㅇ 베어링 : Drive End(부하측) - 원통형 롤러 베어링 NU315 C4 P6
  Opposite Drive End(반부하측) - 깊은홈 볼 베어링 6312 C4 P6

1.7.7 손상 물품에 대한 검사 및 시험

1.7.7.1 회로차단기함과 회로차단기 LB1 및 LB2

회로차단기함 내부와 내부에 장착된 기기들은 전체적으로 그을리고 아크에 의해 용융된 곳이 있어 도전부와 차단기함 사이의 절연을 정상적으로 측정하는 것은 불가능하였다.

1.7.7.2 주 퓨즈

주 퓨즈 3개 모두 소손되어 내부 소자(element)의 저항이나 퓨즈자체의 절연저항을 측정할 수 없었다.

1.7.7.3 팬터그래프

팬터그래프의 압상력을 측정한 결과 부산교통공사가 정하고 있는 검사기준(6.0㎏)을 만족하는 것으로 확인되었다.

1.7.7.4 견인전동기

경미한 플래시오버 발생흔적이 있는 5호차의 견인전동기에 대해 플래시오버 발생과 관련된 주요치수 측정 및 분해조사를 실시하였으며, 결과는 [표 5]와 같다.

주요 검사항목	기준	5호차 3위 (97TWDH-264)	5호차 4위 (97TWDH-276)
절연저항시험	1000V메거로 5MΩ이상	∞	∞
정류자			
진원도	0.05㎜ 이하	0.015	0.020
단마모	0.3㎜이하	0.1㎜	0.1㎜
홈 깊이	0.5㎜이상	1㎜	1㎜
모따기	C0.3 이상	양호	양호
면의 상태, 손상유무		양호	양호
브러시홀더			
정류자면과의 간격	2.2~3.0㎜	2.2㎜	2.2㎜
스프링압력	2.1±0.2㎏		
카본브러시			
결손 유무		양호	양호
습동면 상태		양호	양호

[표 5] 견인전동기 주요항목 검사결과

1.7.8 주회로 보호장치 작동상황 조사

1.7.8.1 주 퓨즈 작동상황

4호 전동차 지붕의 팬터그래프와 주회로장치 사이에 통전용량 500A인 퓨즈 3개가 병렬로 연결되어 있었으나, 사고당시 손상되어 정상적인 보호작동을 하지 않은 것으로 판단된다.

1.7.8.2 주회로장치를 보호하는 계전기 작동상황

견인전동기 회로의 전류센서에서 1,000A 이상인 것을 검지하여 쵸퍼제어장치에서 보호회로 작동신호를 출력하였을 경우와 고속도차단기가 차단되었을 경우에 작동하는 과전류계전기(OCAR)가 설치되어 있는데 자료를 확인한 결과 이 계전기는 정상적으로 작동하였다.

그리고 이 계전기가 작동하였을 경우는 고속도차단기를 개방하여 전류를 줄인 후 LB1 및 LB2를 개방하여 전류를 차단하는 구조로 되어 있으며, 운전실에 설치되어 있는 리셋스위치(22)를 취급하지 않으면 복귀하지 않는 구조로 되어 있다.

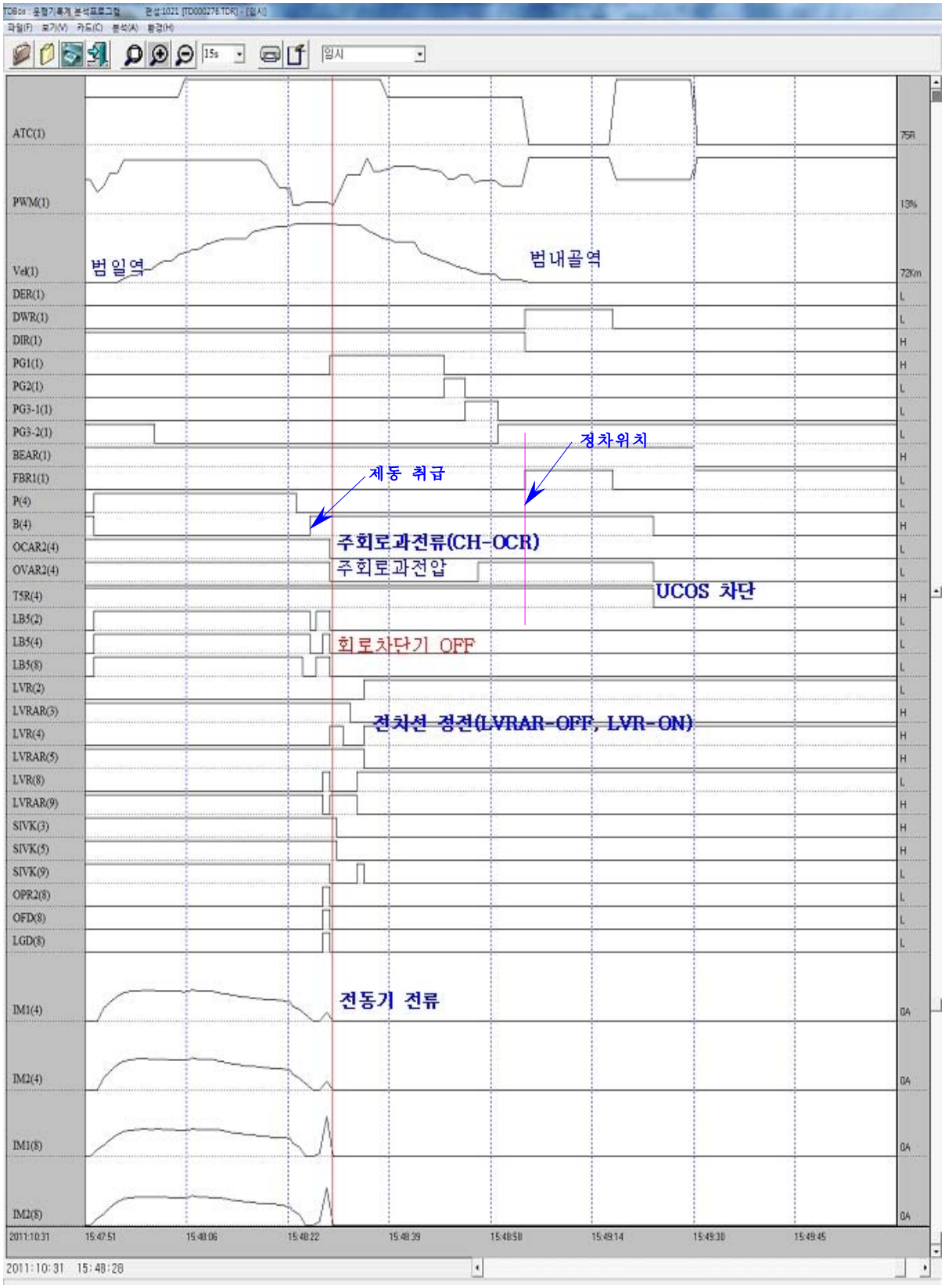
1.7.8.3 고속도차단기 작동상황

고속도차단기 HB1은 주회로 전류가 2,000A 이상인 것을 검지하였을 때 차단되는데, 사고당시에 HB1이 차단된 상태로 정상적으로 작동하였던 것으로 판단된다.

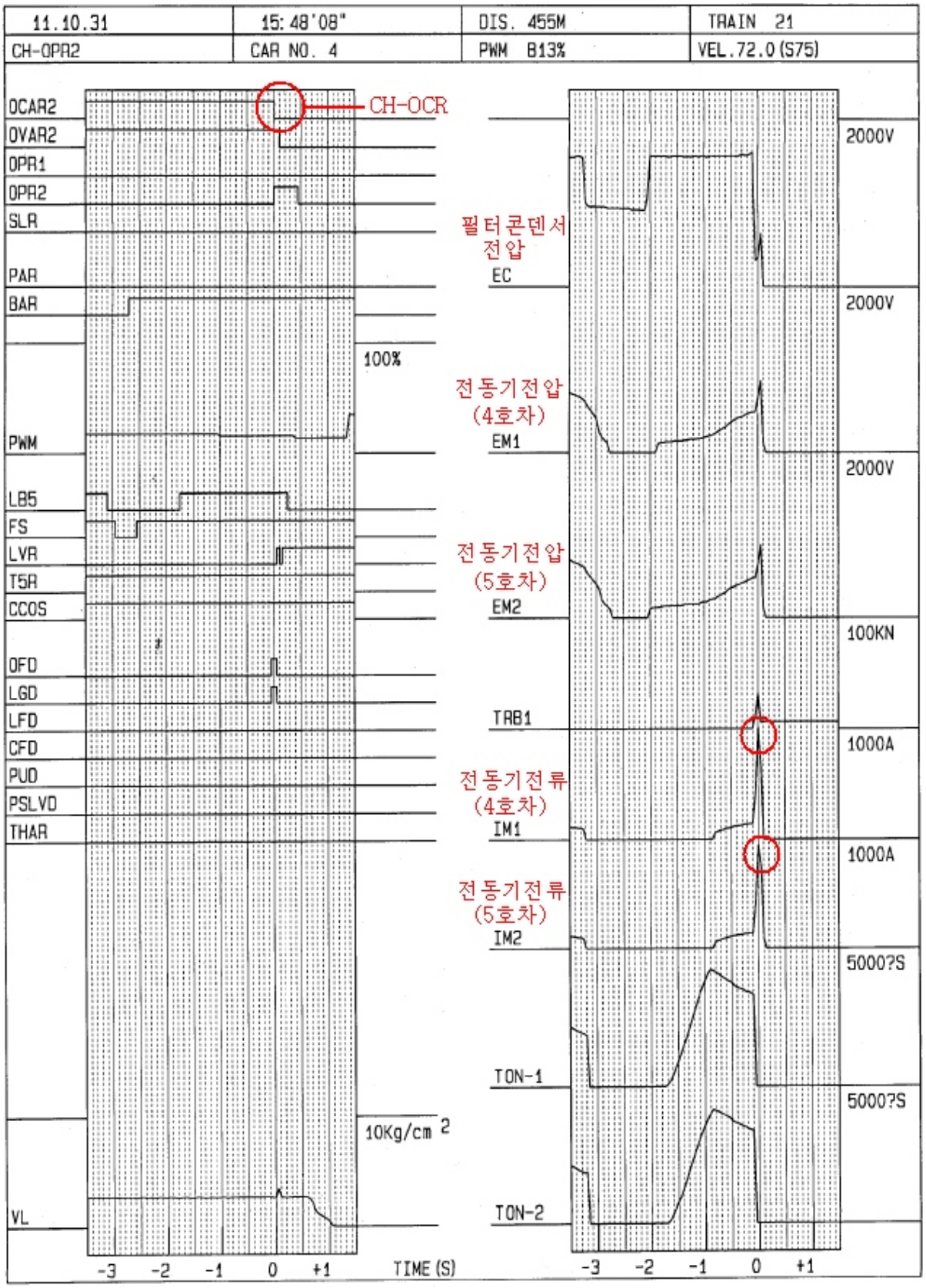
1.8 사고열차의 운행정보기록

사고열차의 운행정보기록은 [그림 12] 및 [그림 13]과 같으며, 상황별 발췌결과는 [표 6]과 같다. 운행기록계장치와 모니터장치의 시각설정에는 20초의 차이가 있었고, 시간대별로 운전상황기록이 잘 나타나 있는 운행기록계의 시각을 기준으로 하였다.

(22) 리셋스위치(Reset switch) : 과전류 보호회로가 작동했을 때 장치를 초기상태로 되돌려 원상복구시키는 역할을 하는 스위치



[그림 12] 열차운행정보기록1(운행기록계 자료)



[그림 13] 열차운행정보기록2(모니터장치 자료)

시 각	전동차(열차) 상황	비 고
15:47:52	하선 범일역 출발	운전모드AUTO
15:48:22	제동 취급	
15:48:27	6호차 가선접지(LGD)검출, 필터콘덴서 저전압, 7호차 가선저전압 검지	속도 72㎞/h
15:48:28	4호차 주회로 과전류 보호회로(CH-OCR) 및 과전압 보호회로(CH-OVR) 작동, 필터콘덴서 저전압 검지 7호차 보조전원장치(SIV) 정지	거리 475m 속도 72㎞/h
15:48:29	3·5호차 보조전원장치 정지	
15:48:30	4호차 필터콘덴서 저전압 복귀	
15:48:33	전차선 정전	
15:48:34	4호차 필터콘덴서 저전압 검지	
15:48:56	4호차 과전압 보호회로(CH-OVR) 복귀	리셋실시
15:49:04	범내골역 하선 승강장 도착, 출입문 개방	
15:49:24	4호차 유니트 차단스위치(UCOS) 취급 및 팬터그래프 전자밸브용 차단기(PANVN) 차단	
16:01:51	2호차, 6호차 팬터그래프 상승	
16:04:25	범내골역 출발	운전모드 FMC

[표 6] 전동차 운행기록 발췌

1.9 전동차의 정기검수에 관한 정보

전동차의 최근 정기검수는 [표 7]과 같이 실시되었으며, 중간검수 후 152,214㎞, 월상검수 후 17,181㎞를 주행한 상태였다.

정기검수 종별(검수주기)	검수일자
일상검수 (3일 이내)	2011.10.29
월상검수 (3개월 이내)	2011.09.05
중간검수 (2년 이내 또는 주행거리 30만km 이내)	2010.05.18
전반검수 (4년 이내 또는 주행거리 60만km 이내)	2008.03.19

[표 7] 정기검수 종류 및 검수주기

1.9.1 회로차단기함 및 회로차단기 검사

중간검수에서 회로차단기함과 회로차단기에 대한 검사는 부산교통공사가 정한 「1호선 전동차 검사기준(예규)」에 의해 실시되고 있으며, 2010년도에 실시한 이 차량의 중간검수에서 이상이 없었다.

회로차단기함과 회로차단기에 사용되는 절연물에 대한 검사항목은 「균열 및 손상유무 검사」,「오염여부검사 및 공기청소」이었으며, 중간검수 및 전반검수시마다 회로차단기에 대한 분해검사를 한 후 시험기로 시험을 하도록 되어 있었다. 그리고 회로차단기의 청소에 대해서는 회로차단기를 함으로부터 분리하여 분해한 후 압축공기와 마른 헝겊 등으로 아크 슈트와 분해부품 등에 대한 청소가 이루어지고 있었다.

회로차단기함과 회로차단기에 대한 절연시험(23)은 부산교통공사가 정한 「1호선 전동차 검사기준(예규)」에 의해 아래와 같은 기준으로 실시되고 있었으며, 중간검수 당시 절연에 이상이 없었다.

(1) 절연저항계의 마이너스 측을 금속부에, 플러스 측은 도전부에 대고 측정하여 다음과 같은 값 이상일 것을 요구하고 있다.

- ㅇ 고압회로 : 1MΩ 이상
- ㅇ 저압회로 : 0.1MΩ 이상

(2) 또한,「전동차 검수규정」에 따라 필요한 경우 절연내력시험(24)을 하도록 되어 있다.

(23) 절연시험(絶緣試驗, Insulation test) : 전기 절연재료의 절연내력이나 전기설비의 절연상태를 검사하기 위하여 실시하는 시험

(24) 절연내력시험(絶緣耐力試驗, Dielectric strength test) : 절연물이 어느 정도의 전압에 견딜 수 있는지를 확인하는 시험. 어떤 전압을 가한 다음에 전압을 점점 증가시켜 실제로 파괴하는 전압을 구하는 절연파괴시험과 어떤 일정한 전압을 규정한 시간 동안 가하여 이상이 있는지를 확인하는 내전압시험의 2종류가 있다.

1.9.2 주 퓨즈 검사

주 퓨즈에 대해서는 월상검수 및 중간·전반검수 시 고정된 단자 부품들의 이완 여부 확인 및 절연체 표면을 청소하도록 되어 있고, 중간검수 이상의 검수에서는 퓨즈 양단의 도통 상태를 점검하면서 퓨즈카트리지의 저항을 측정하여 퓨즈 카트리지에 기재된 저항 값과 10% 이상 차이가 나면 사용할 수 없도록 규정하고 있다.

사고당시 소손된 퓨즈들은 2010년 중간검수 시 측정한 저항 값이 기준치 이내였고 특별한 이상은 발견되지 않았다.

1.9.3 견인전동기 검사

견인전동기는 중간검수 및 전반검수시마다 분해검사를 하고 있었고, 월상검수 시에는 공기청소 후 브러시, 정류자면의 이상유무 등을 검사하며, 일상검수 시에는 플래시오버 발생흔적유무 검사와 커버 밀착상태 점검 등의 외관검사가 이루어지고 있었다.

검수기록을 확인한 결과, 사고 이전에 시행된 중간검수에서는 분해검사와 함께 정류자면의 삭정, 정류자 편간 홈파기·모따기 등이 이루어졌으며, 각 부분의 치수와 절연저항 측정에서 특별한 이상은 발견되지 않았다. 그리고 2011년 9월 5일의 월상검수와 2011년 10월 29일에 시행된 일상검수에서 플래시오버 흔적 등의 특별한 이상은 없었다.

또한, 주회로의 절연저항 측정시험과 자동컴퓨터시험에서의 주회로 절연측정에서 이상은 발견되지 않았다.

1.10 유사 사고사례

국내에서 가장 최근에 발생한 회로차단기 등 소손사례는 다음과 같다.

(1) 서울메트로

○ 사고개요 : 2009년 12월 12일(토) 05:34분경 서울메트로 2호선 전동차(제2022열차 제14편성)가 건대입구역을 출발하여 운행 중 전차선 정전 및 역행불능으로 후속열차로 구원 조치

○ 사고원인 : 쵸퍼제어 전동차로서 장기사용에 따른 회로차단기의 절연내력 저하로 회로차단기에 대전류가 유입되어 절연파괴가 발생된 것으로 추정

○ 개선대책 : 회로차단기 및 회로차단기함 개조, 견인전동기 절연보강 및 리드선[25] 교체

(2) 한국철도공사

○ 사고개요 : 2005년 2월 22일 07:21경 의정부발 인천행 1호선 전동차(제49열차 제42편성)가 서울역에서 출발할 때 3번째 전동차(1342호)에 고장으로 인한 화재발생(객실배전반)으로 열차운행에 1시간 33분 동안 지장 초래

○ 조사내용 : 사고당시 건설교통부 교통국과 한국철도공사에서 조사

- 사고의 원인이 되었던 견인전동기는 1989년에 제작되어 이 사고가 발생할 당시 16년을 경과하여 사용함에 따라 권선의 절연열화에 의해서 절연파괴가 발생(견인전동기는 기동시마다 권선에 충격을 받기 때문에 전동기 사용연한에 따라 전기적 절연성능이 열화)

- 3호차 고속도차단기의 절연이 파괴되고, 주회로차단기(L3)가 소손되면서 고압단자에서 저압회로로 아크가 발생(저온의 날씨와 적설의 영향으로 차단기함 내부에 습기가 많은 상태에서 견인전동기의 고장으로 고속도차단기의 차단작동 전 단자의 고전압이 순간적으로 상승하여 아크 발생)

- 고전압이 객실배전반으로 유입되어 배전반에 화재 발생(고속도차단기가 차단원리에 따라 차단될 때 아크 발생 시 배선과 함이 접지되면서 주회로 사고전류가 저압회로로 유입)

(25) 리드선(Lead wire) : 전기단자와 단자 사이를 이어주는 전선

○ 개선대책

- 견인전동기의 성능확보 및 개량

- 고속도차단기의 성능확보 및 개량대책 수립

- 주요 노후전장품에 대한 정밀진단 및 시험방안 마련

1.11 기타

1.11.1 기상정보

기상청 자료에 따르면, 사고발생 당시 부산시 부산진구는 평균기온 약17℃, 최고기온 21.7℃, 최저기온 12.5℃, 평균운량 3.3의 맑은 날씨로서 열차운행에 지장이 없었던 것으로 조사되었다.

2. 분석

2.1 전차선 정전에 대한 분석

사고열차의 운행정보기록에 따르면 사고열차가 범내골역 진입을 앞두고 15시 48분 28초에 4호차 전동차의 주회로 과전류 보호회로 및 과전압 보호회로가 작동되었고, 5초 후인 15시 48분 33초에 전차선이 정전된 것을 나타내고 있어, 전차선의 정전은 전차선과 레일 사이에서 회로를 구성해 주는 전동차 내부에서 먼저 단락이 되어 발생한 것으로 분석되었다.

2.2 회로차단기함 상태와 회로차단기 작동상황 등에 대한 분석

2.2.1 회로차단기함 구조

사고전동차의 회로차단기함은 LB1 및 LB2 부근의 격자커버가 소손되고 LB1에 가까운 함의 측면과 하부에 구멍이 뚫려 있었으며, 함 내부 전체가 그을려 있었고, LB1의 아크취소기구가 심하게 손상된 점 등으로 볼 때 회로차단기 LB1이 차단될 때 발생한 큰 아크 방전에 의한 열이 화재의 시작점이 된 것으로 추정된다.

회로차단기함은 각 회로차단기와 고속도차단기의 차단작동에서 발생하는 아크의 냉각과 가스방출을 위하여 개방형 구조로 되어 있다. 따라서 전기장치에 영향을 미칠 수 있는 도전성 분진이 외부로부터 유입되기 쉬운 상태로서 사고전동차의 회로차단기함과 회로차단기에도 분진이 부착되어 있었을 가능성이 크며, 이 분진들이 절연내력을 떨어뜨리는 원인으로 작용하였을 것으로 추정한다.

그리고 고속도차단기와 회로차단기가 1개의 함 내부에 함께 설치되어 있어 이상과전류를 차단할 때 상호 영향을 주었을 것으로 추정한다.

2.2.2 회로차단기의 배선연결 상태

앞서의 1.3.2항에서 기술한 것처럼 손상이 심하였던 LB1에 대해서는 503선의 압착단자 및 고정 볼트에 용융흔적 등이 없었고, 그 외의 회로차단기나 고속도

차단기에 있어서도 이상이 없었던 것으로 볼 때, 각 회로차단기의 배선 고정 볼트의 이완에 의한 발열 등으로 인한 사고요인은 없었던 것으로 판단한다.

2.2.3 고속도차단기 HB1의 작동

앞서 [그림 13]의 열차운행정보기록에서 각 그룹별로 견인전동기회로의 전류가 순간적으로는 그래프에서 표현할 수 있는 한도인 1,000A 이상 상승한 것으로 나와 있다. 따라서, 당시 전체 견인전동기회로의 전류는 2,000A 이상이었던 것으로 추정되고, 고속도차단기 HB1의 차단설정치인 2,000A를 초과하였기 때문에 고속도 차단기가 정상적으로 차단작동을 한 것으로 판단한다.

2.2.4 회로차단기의 접점상태와 작동

LB1 및 LB2의 주 접점이나 아크접점의 통전 접촉면에 용융흔적 등의 이상은 보이지 않았고 회로차단기가 차단상태를 유지하고 있었던 점에서 아크접점이 떨어지기 시작한 차단 초기에는 아크가 크게 확산되지 않았고 가동부의 작동도 이상이 없었던 것으로 판단한다.

2.2.5 회로차단기 LB1의 아크취소 작동

LB1의 아크슈트 자철판이 아크취소 코일 내부의 코어에 용착되어 있었고, 상부 아크 혼 일부가 용융되어 소실되었으며, LB1쪽의 회로차단기함 측면과 아래쪽으로 아크에 의한 구멍이 생겼다. 그리고 LB2쪽에는 LB1쪽 절연판의 열로 인한 손상이 발생하였다. 또한, 앞서의 1.6.2.1항에서 기술한대로 LB1과 LB2는 고속도차단기보다 항상 늦게 작동하도록 순서가 설정되어 있다.

이러한 점들을 종합하여 분석하면, 고속도차단기가 차단될 때 발생한 아크에 의해 회로차단기 함 내부의 공기가 이온화(26)되었고, 이것이 공간 절연을 저하 시켰으며, 이러한 분위기에서 전력공급원(전차선) 쪽에 가장 가까운 LB1의 접점이 떨어지며 아크를 취소시키는 과정에 대전류의 아크취소가 정상적으로 이루어지지 않고 아크가 확산되면서 이 열에 의해 함 내의 각종 분진, 도료, 합성수지 등이

(26) 이온화(Ionization) : 전기적으로 중성의 분자 또는 원자에서 전자를 잃거나 얻는 전자 이동이 일어나 전하를 띠게 되는 반응

타면서 연기와 불꽃이 발생되었으며, 아크가 함의 하부와 측부에 큰 충격을 주어 구멍이 뚫린 것으로 추정한다.

2.3 주 퓨즈에 대한 분석

퓨즈 함 내부에서 3개의 퓨즈 중 1개가 폭발하여 내부의 소호사가 뿜어져 나온 상태였고, 나머지 2개의 외통이 심하게 소손되어 있었으며, 함에 접속되는 전선의 고무부시와 방수재 등이 열에 의해 손상된 상태였으므로 폭발한 퓨즈의 아크 열이 화재의 시작점이 되었던 것으로 추정한다.

일본후지전기 지침(2011.1.031)「고압 기중 부하개폐기용 퓨즈의 보수점검과 갱신 권장」에 따르면, 전동차용 고압한류퓨즈는 장기간 사용으로 퓨즈 내부 소자(27)가 열화(劣化)되면 용단이 정상적으로 이루어지지 않고 차단불능이 되어 폭발사고를 일으키는 경우가 있다고 기술하고 있다. 즉, 퓨즈에 반복하여 흐르는 전류에 의한 내부소자의 온도상승으로 금속조직이 변화하거나 가열・냉각의 반복에 따라 내부소자도 신축이 반복됨으로써 피로열화에 의해 기계적으로 파단되고, 사용상황과 내부소자의 상태에 따라서는 비정상적인 용단을 일으켜 폭발로 이어지는 것이다.

일본 전동차(후쿠오카시지하철, 동경지하철 등)의 경우, 퓨즈의 저항값을 측정하여 명판의 표기값보다 10% 이상 증가하면 교체하도록 하고 있다.

사고전동차의 퓨즈는 1996년에 제작된 후 1997년부터 사용되어 사고일 현재 14년을 경과하였으며, 부산교통공사의 「1호선 전동차 검사기준」에 따르면 퓨즈의 저항을 측정했을 때 퓨즈에 기재되어 있는 저항값에서 10%범위 이내의 오차를 보이면 양호하다고 규정하고 있고, 2010년 중간검수 시 이 기준을 만족한 것으로 조사되었다. 그러나 내부소자의 단선이나 열화 진행정도를 확인할 수는 없었을 것으로 판단한다.

(27) 소자(素子, Element) : 큰 전류가 흐를 때 끊어지도록 퓨즈 안에 들어 있는 가용선(可鎔線)을 말하며, 순도 99.9%의 은(Ag)선으로 만들어진다.

2.4 견인전동기의 플래시오버 발생상황 분석

2.4.1 견인전동기의 플래시오버 현상

견인전동기에서 정류자편 사이가 양극에서 음극으로 이어지면서 차차로 단락되어 최종적으로는 극간 단락에 이르는 현상으로서 그 대부분은 과대한 정류 불꽃이 기점(起點)이 되어 불꽃에 의한 아크 지속시간이 증가하고 정류자 편간 단락으로 이어진다. 또 플래시오버는 직류전동기 특유의 것으로서 발생 원인이 복잡하고 다양하다.

2.4.2 사고전동차의 견인전동기에 대한 분석

플래시오버가 발생한 5호차의 견인전동기는 단자전압이 750V로서 비교적 높은 편이지만 플래시오버 발생당시 전동기에 설치된 아킹스터드로 발생된 아크를 방전시켜 정류자면에 큰 손상을 입지 않은 것으로 확인되었다.

사고전동차의 견인전동기는 2010년 5월 18일 중간검수를 시행할 때 정류자면을 삭정하고 정류자 편간 홈파기와 모따기 등을 하여 기준치 이내로 가공하였고, 2011년 9월 5일의 월상검수에서도 분진을 압축공기로 청소하고 정류자면과 브러시 상태 등을 검사한 것으로 조사되었다.

이번 조사에서 플래시오버가 발생한 견인전동기에 대해 조립된 상태에서 정류자와 브러시 등의 각종 치수를 측정하고 검사한 후 분해하여 플래시오버의 원인이 될 수 있는 항목에 대해 조사하였지만 절연저항이 양호하였고, 기계적으로 정류악화의 원인이라고 할 수 있는 이상은 발견되지 않았다. 그러나 정류자 편간의 이상전압 발생 및 외부로부터의 이상 전압 유입 등 전기적 요인에 대해서는 각종 운행기록 자료를 가지고는 확인할 수 없었다.

그리고 견인전동기의 사용기간 동안 코일 함침[28]과 열화된 리드선의 교체 등은 한 번도 시행된 일이 없어, 이러한 사항이 견인전동기의 절연저하에 영향을 미쳤을 것으로 추정한다.

---

(28) 코일 함침(Coil 含浸) : 전동기 등의 권선(코일)에 대한 절연성능을 높이기 위해 절연바니시에 담그거나 절연바니시를 침투하게 하여 수분이나 이물질이 스며드는 것을 막는 일

2.5 화재진압 조치에 대한 분석

2.5.1 기관사

기관사가 사고전동차의 과전류 보호회로 작동과 전차선 정전상태를 확인하고 타력으로 범내골역까지 운행하여 승객을 하차시키면서 감시모니터로 화재상황을 인지하였으며, 이를 관제사에게 보고한 후 지시에 따라 조치하였던 과정은 적절하였던 것으로 판단된다.

2.5.2 종합관제소 관제사

사고당시 전차선 정전구간의 열차에 대해 가장 가까운 역까지 운행하고 승객에게 안내방송을 하게 한 점, 정전구간에 위치한 열차의 팬터그래프 하강지시 후 이상유무를 보고하게 한 점, 사고열차 기관사로부터 상황보고를 받고 사고열차에 대한 팬터그래프 부동지시 후 운행하도록 한 점 등 대응조치와 열차 운전정리는 적절하였던 것으로 판단된다.

2.5.3 범내골역 역장

사고당시 CCTV감시에 의한 화재상황 인지 및 소방서 신고, 공익요원과 함께 출동하여 승객을 신속히 대피시키고 소방관이 출동하기 전에 분말소화기를 사용하여 화재를 초기에 진압한 과정은 적절하였다고 판단된다.

3. 결론

3.1 조사결과

분석내용을 요약한 결과는 다음과 같다.

(1) 전차선의 정전은 전차선과 레일 사이에서 회로를 구성해 주는 전동차 내부에서 먼저 단락이 되어 발생하였다.

(2) 화재는 고속도차단기 HB1이 차단될 때 발생한 아크에 의해 회로차단기 함 내부의 공기가 이온화되어 이것이 공간 절연을 저하시켰고, 이어서 회로차단기 LB1이 차단될 때 발생한 큰 아크 방전에 의한 열이 분진, 도료 합성수지 등을 태우면서 발생한 것으로 추정한다.

(3) 각 회로차단기의 배선 고정 볼트가 이완되어 발열된 흔적은 없었다.

(4) 고속도차단기 HB1은 정상적으로 차단작용을 하였고, 회로차단기 LB1 및 LB2는 아크접점이 떨어지기 시작한 차단 초기에 아크가 크게 확산되지 않았고, 가동부의 작동에도 이상이 없었다.

(5) 주 퓨즈는 장기간 사용으로 퓨즈 내부의 소자가 열화되어 폭발한 것으로 추정한다.

(6) 견인전동기가 1997년 이후 사용기간 동안 코일 함침과 리드선의 교체 등을 한 번도 시행되지 않아 이로 인해 절연저하에 영향을 미쳤을 것으로 추정한다.

3.2 사고원인

이 화재사고는 사고전동차의 견인전동기에서 절연저하 등으로 플래시오버가 발생하여 주회로에 과전류가 흘러 회로차단기(LB1)가 작동할 때, 절연내력이 약화(오랜기간 사용 등)된 상태에서 아크가 소멸되지 않고 크게 확산되어 회로차단기 함 내부의 각종 분진, 도료, 합성수지 등이 타면서 전동차 하부에서 연기와 불꽃이 발생하였다.

그리고 회로차단기에서 아크가 크게 확산될 때, 주 퓨즈가 허용전류 과다로 폭발하면서 아크열과 복사열에 의해 지붕코팅과 분진 등이 타면서 연기와 불꽃이 발생하였다.

4. 안전권고

항공·철도사고조사위원회는 2011년 10월 31일 범내골역에서 발생한 열차화재 사고에 대하여 부산교통공사에 다음과 같이 권고한다.

1. 회로차단기 및 회로차단기함에 대하여

가. 회로차단기를 분해하여 검사하는 중간·전반검수 시에 회로차단기와 고속도 차단기에 대한 절연내력시험을 실시

나. 장기간 사용으로 인하여 절연내력이 떨어진 차단기는 교체하고 회로차단기 함의 절연내력을 높이는 방안을 수립하여 시행

다. 같은 공간에 수납되어 있는 고속도차단기와 회로차단기는 과전류를 차단할 때 상호 영향을 미칠 수 있으므로 시스템적으로 분리하여 설치하는 방안을 수립하여 시행

2. 주 퓨즈의 저항을 측정한 후 기록을 관리하여 저항치의 변화를 지속적으로 관찰하고, 열화가 진행되었다고 판단되는 경우 즉시 교체

3. 견인전동기에 대하여

가. 장기사용으로 절연이 저하할 가능성이 있는 코일에 대해 절연보강과 리드선을 교체하는 방안을 수립하여 시행

나. 플래시오버의 가장 큰 원인 중 하나인 정류자면과 브러시는 검사기준을 보완하여 관리

4. 견인전동기, 회로차단기 및 주 퓨즈의 사용 내구년한 및 교체주기에 대한 기준 마련

5. 전동차 쵸퍼제어시스템이 주요 부품의 단종 등으로 안전 및 성능확보가 어려운 경우 대체품을 개발하거나 또는 시스템을 개량하는 계획을 수립하여 시행