국토교통부

보고서번호: ARAIB/ R13 - 07

철 도 사 고 조 사 보 고 서

부산교통공사
1호선
대티역구내 (신평기점 6.450㎞지점)
제1161전동열차
열차화재사고
2012.08.27.(월) 14:03경

2013. 12. 31.

항공・철도사고조사위원회

이 조사보고서는 「항공·철도사고조사에 관한 법률」제2조에 의거 사고조사가 이루어졌으며, 제25조에 따라 작성되었다.

같은 법률 제1조에서 「철도사고 조사는 독립적이고 공정한 조사를 통하여 사고 원인을 정확하게 규명함으로써 철도사고의 예방과 안전 확보에 이바지함」을 목적으로 하고 있다.

또한, 제30조에 따라 사고조사는 민·형사상 책임과 관련된 사법절차, 행정처분절차 또는 행정쟁송절차와 분리·수행되어야 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(Content)

제목(Title) ····· 1
개요(Synopsis) ····· 1

1. 사실정보(Factual Information) ····· 3
1.1. 사고경위 ····· 3

1.2. 피해상황 ····· 5
1.2.1 인적피해 ····· 5
1.2.2 물적피해 ····· 6

1.3. 인적정보 ····· 6
1.3.1 사고전동차 기관사 ····· 6
1.3.2 종합관제소 관제사 ····· 6
1.3.2.1 운행관제부장 ····· 6
1.3.2.2 운행관제담당 ····· 7
1.3.2.3 운행관제사 A ····· 7
1.3.2.4 운행관제사 B ····· 8
1.3.2.5 운행관제사 C ····· 8
1.3.2.6 기술부장 ····· 9
1.3.2.7 전력관제사 A ····· 9
1.3.2.8 전력관제사 B ····· 9
1.3.2.9 전력관제사 C ····· 10
1.3.3. 대티역 역무근무자 ····· 10
1.3.3.1 부역장 ····· 10
1.3.3.2 역무원 A ····· 10
1.3.3.3 역무원 B ····· 11

1.4. 현장정보 ····· 11
1.4.1 사고전동차 아크 - 화재 흔적 ····· 11
1.4.1.1 고압케이블 및 제어전선 소손 ····· 13
1.4.1.2 지붕 철판 천공 ····· 14
1.4.1.3 팬터그래프 및 지지애자 소손 ····· 14
1.4.1.4 팬터그래프 공기관 소손 ····· 15
1.4.1.5 차량지붕 도막재 소손 ····· 16
1.4.1.6 주퓨즈 및 보조퓨즈 ····· 16
1.4.1.7 차량(1호차 - 2호차) 연결주름막 소손 ····· 17
1.4.1.8 객차천정 내장판 및 객실의자 손상 ····· 17
1.4.2 전차선 흔적들 ····· 18
1.4.2.1 서대신~대티역 사이 전차선 아크 흔적 ····· 18
1.4.2.2 대티역 승강장 전차선 끊어짐 ····· 19
1.4.3 승강장의 벽면 화재흔적 ····· 20
1.4.4 서대신~대티역 사이 선로에서 발견된 전동차 부품 흔적 ····· 21

1.5. 운전・관제・역무정보 ····· 21
1.5.1 기관사 운전업무 ····· 21
1.5.2 운행관제사 업무 ····· 23
1.5.3 전력관제사 업무 ····· 25
1.5.4 대티역 역무관련 업무 ····· 26
1.5.4.1 대티역사 구조 ····· 26
1.5.4.2 대티역 역무원 업무 ····· 27

1.6. 차량정보 ····· 28
1.6.1 전동차 일반제원 ····· 28
1.6.2 사고전동차 편성 이력 ····· 29
1.6.3 전동차 검수규정 ····· 29
1.6.4 사고전동차 검수사항 ····· 30
1.6.5 사고전동차 주・보조회로 계전기 동작상황 ····· 31

1.7. 시설・궤도정보 ····· 31
1.7.1 부산 1호선 선로궤도 ····· 31
1.7.2 선로유지보수 ····· 32

1.8. 전기・신호정보 ····· 33
1.8.1 전차선 설비 ····· 33
1.8.2 부산1호선 급전시스템 ····· 34
1.8.3 남포변전소 직류 접지계전기 기능해제 ····· 37
1.8.4 사고구간(대티S/S～남포S/S) 전차선 급전・정전상황 ····· 37
1.8.5 전차선설비유지보수 ····· 40
1.8.6 신호제어 설비(부산 1호선) ····· 42

1.9. 각종 기록정보 ····· 43
1.9.1 사고전동차 열차운행 기록 ····· 42
1.9.2 서대신 및 대티역 CCTV동영상 기록 ····· 45
1.9.3 변전소(대티, 남포)급전・단전 기록 ····· 45

1.10 기상정보 ····· 46

2. 분석(Analysis) ····· 47
2.1 사고 이벤트(열차운행, CCTV, 급단전)기록 발생시간 분석 ····· 47
2.2 제1차 아크 발생상황 분석 ····· 49
2.3 제2차 아크 발생상황 분석 ····· 50
2.4 제3차 아크 발생상황 분석 ····· 50
2.5 사고전동차 아크 - 화재 흔적 분석 ····· 51
2.6 주퓨즈 및 보조퓨즈 작동상태 분석 ····· 51
2.7 서대신~대티역 터널 내에서 발견된 부품 관련성 분석 ····· 52
2.8 기관사의 운전업무 적정성 분석 ····· 52
2.9 운행관제업무의 적정성 분석 ····· 53
2.10 전력관제업무의 적정성 분석 ····· 53

2.11 대티역 역무업무 적정성 분석 ····· 54
2.12 사고전동차 편성, 차량검수사항 적정성 분석 ····· 55
2.13 변전소 급전・단전시스템의 적정성 분석 ····· 55
2.14 전차선 단선 상황 분석 ····· 56
2.15 2호차 화재잔해 물질성분 분석 ····· 57
2.15.1 천공부분 고압케이블 고정볼트 성분 분석 ····· 57
2.15.2 천공부분 제어전선 성분 분석 ····· 57
2.15.3 화재지붕 도막재 성분 분석 ····· 58
2.16 고압케이블(WL2-150㎟×1) 전기적 시험 ····· 59
2.17 고압케이블 절연열화 시험 ····· 60
2.18 케이블 절연파괴 및 아크발생 종합분석 ····· 61

3. 결론(Conclusion) ····· 62
3.1. 조사결과(Finding) ····· 62
3.1.1 사고전동차 아크-화재상황 조사결과 ····· 62
3.1.2 운전·관제·역무분야 조사결과 ····· 62
3.1.3 차량설비 조사결과 ····· 64
3.1.4 선로 궤도시설 조사결과 ····· 65
3.1.5 전기·신호설비 조사결과 ····· 65

3.2. 사고원인(Cause) ····· 66
3.2.1 사고 원인은 ····· 66
3.2.2 기여 요인 ····· 66

4. 안전권고(Safety Recommendation) ····· 67
4.1 부산교통공사에 대하여 ····· 67
4.2 전체 전동차 운영기관에 대하여 ····· 67

부산교통공사 1호선 대티역구내 전동열차 화재사고

○ 운영기관 : 부산교통공사

○ 운행노선 : 1호선 (노포동역～신평역)

○ 발생장소 : 대티역구내 (신평기점 6.450㎞지점)

○ 사고열차 : 제1161 전동열차 (31편성, 8량)

○ 사고유형 : 전동열차 화재사고

○ 발생일시 : 2012년 08월 27일(월)14:03경

개 요 (Synopsis)

2012년 8월 27일(월) 14시 00분경, 부산교통공사 1호선 제1161호 전동열차(노포동역→신평역, 8량)가 서대신역에서 대티역 방향으로 운행하던 중 앞에서 7번째 전동차(2호차) 지붕에서 아크(1차)가 발생하였다.

전차선에 전기를 공급하던 변전소는 전기공급이 자동으로 일부 중단되었다가 재급전되었고, 전동차는 타력으로 운행되어 대티역승강장에 도착하여 승객들이 내리고 있던 14시 03분경, 2호차 지붕에서 다시 제2차 및 제3차 아크가 발생되었다.

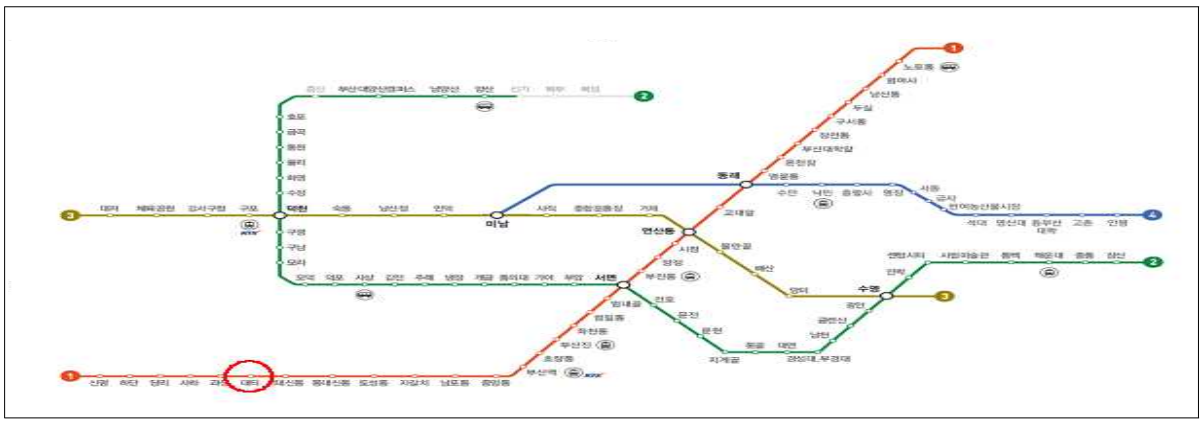
승객들은 승강장에서 대피하는 중 아크에 의한 불빛과 매연이 지하 승강장 주변에 급속히 확산되었고, 연기를 흡입한 일부 승객들이 병원진료를 받았다.

한편, 기관사는 서대신~대티역 사이 운행 중 아크 발생사실을 관제센터에 보고하였고 대티역에서 아크가 다시 발생되자 관제센터에 상황을 급보하고 팬터그래프를 내린 후 대피하였다가 사고복구 후 사고전동차를 기지에 입고하였다.

대티역 직원들(3명)은 근무 중 CCTV를 보고 승강장에서 화재발생된 것을 인지하고 관계처 통보(관제센터, 119소방) 및 여객 대피안내 등 비상조치를 하였다.

종합관제소에서는 이 구간의 열차운행을 일시 중단시키고, 119 소방대원들에 의해 화재 진화되고 사고현장 복구 후 전동열차 운행을 재개하였다.

부산1호선 노선 및 사고 발생된 대티역 위치는 [그림1]과 같다.



[그림1] 부산교통공사 1호선 지하철 노선도

항공·철도사고조사위원회는 '항공·철도사고조사에 관한 법률' 제2조 및 제18조에 따라 사고조사를 실시하여 사고원인이 다음과 같이 발생된 것으로 결정한다.

사고의 원인은, 사고전동차 2호차 지붕 후부 팬터그래프에 접속된 고압케이블(WL2 150㎟×1C)의 절연피복이 전차선전압을 견디지 못하고 절연파괴 되면서 아크가 발생된 것으로 추정된다.

사고의 기여요인은 사고전동차 2호차 후부 고압케이블(WL2 150㎟×1C)이 피복 편심이 심한 상태에서 전선관에 삽입되면서 미세한 손상이 동반되었고, 운행하면서 가혹한 기후환경(눈, 비, 안개, 팬터그래프 이물질 등)에서 수분 및 불순물이 절연체에 침투되어 절연열화(絶緣劣化)가 진행되어 절연파괴에 이른 것. 등 7건이며

이 사고에 대한 안전권고를 부산교통공사에 4건, 전체 전동차 운영기관에 대하여 1건을 발행한다.

1. 사실정보

1.1 사고 경위

2012년 8월 27일 14:00경, 부산 1호선 제1161호 전동열차(노포⇒신평, 31편성, 8량. 이하 '사고전동차'라 함)가 자동 운전모드로 서대신역에서 출발(13:59:55)하여 대티역으로 운행하던 중, 8량의 7번째 차량지붕('2호차'라 함) 후부 팬터그래프 부근에서 [그림2]와 같이 아크(14:00:27, "1차 아크"라 함)가 발생되어 약 3초 후 소멸되었다.

아크시작(14:00:27)	아크진행	아크 소멸 중(14:00:29)

[그림2] 사고전동차 제1차 아크발생

이 구간(서대신~대티 사이)의 전차선에 전기를 공급하던 전철변전소(대티-남포)[1] 중 대티변전소에서는 사고전동차에서 1차 아크 발생되는 즉시 전기공급이 차단되었고, 남포변전소에서는 전기공급이 지속되다가 약 10초 후 차단되었다.

기관사는 열차자동운전시스템(ATC/ATO)[2]에 의해 운행되던 사고전동차의 전차선 전압이 떨어지고(1,650V⇒700V) 속도가 75㎞/h에서 45㎞/h로 감소되는 것을 인지하였으며, 부하운전이 정지되어 타력으로 운행하였다.

1) **전철변전소(대티-남포)**: 서대신~대티역 구간의 전동차 전기공급은 대티 및 남포 전철변전소에서 직류 1,500V를 양단에서 공급하고 있으며, 전기공급을 중단하여야 할 경우 양단의 변전소 전기공급이 중단되어야 한다.

2) **열차자동운전시스템**(ATC/ATO: Automatic train control system/ Automatic train operation system), 자동열차제어시스템 및 자동열차운전시스템이 포함된 것으로, 기관사가 운전실의 자동운전 버튼을 누르면 열차는 신호조건에 따라 자동으로 출발 및 속도 가감하면서 운행하고 정차역에서 출입문이 자동으로 개폐되고 승객이 승하차하게 된다.

타력운행 중, 기관사는 객실 승객으로부터 “열차에 불이 났다”는 인터폰을 받고 승객들에게 정차할 때까지 기다려달라고 차내 방송하면서 운행을 계속하였다.

사고전동차가 대티역승강장에 도착해 승객들이 내리고 있을 때, 2호차 지붕에서 다시 아크(14:04:05~04:22, “제2차 아크”라 함)가 [그림3]과 같이 발생하여 주황색계통의 대단히 밝은 빛과 불똥이 약 19초 동안 발생되어 차체 지붕과 승강장 주변선로에 떨어졌다. 이어서 세 번째 아크(14:04:24~04:25, “제3차 아크”라 함)가 약 2초 동안 발생된 후 아크는 더 이상 발생하지 않았다.

제2차 아크 (14:04:05～04:22)

제3차 아크 (14:04:24～04:25)

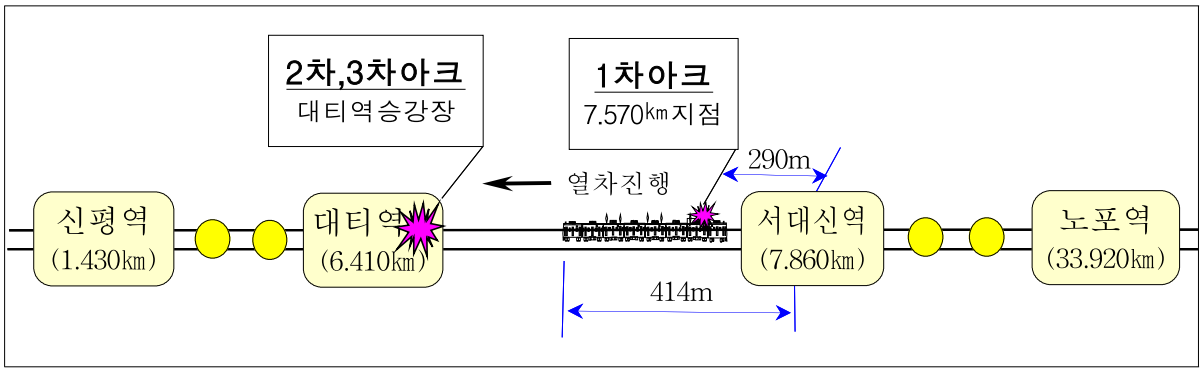
[그림3] 제2차 및 제3차 아크 발생상황

사고전동차 승객들은 승강장 계단을 통해 올라가 역사 바깥으로 대피하였고, 2호차 지붕은 불꽃화재(14:11:49경)로 확산되었으며, 119소방대원들이 출동(14:12:28경)하여 화재가 진화(14:13:35경)되었다.

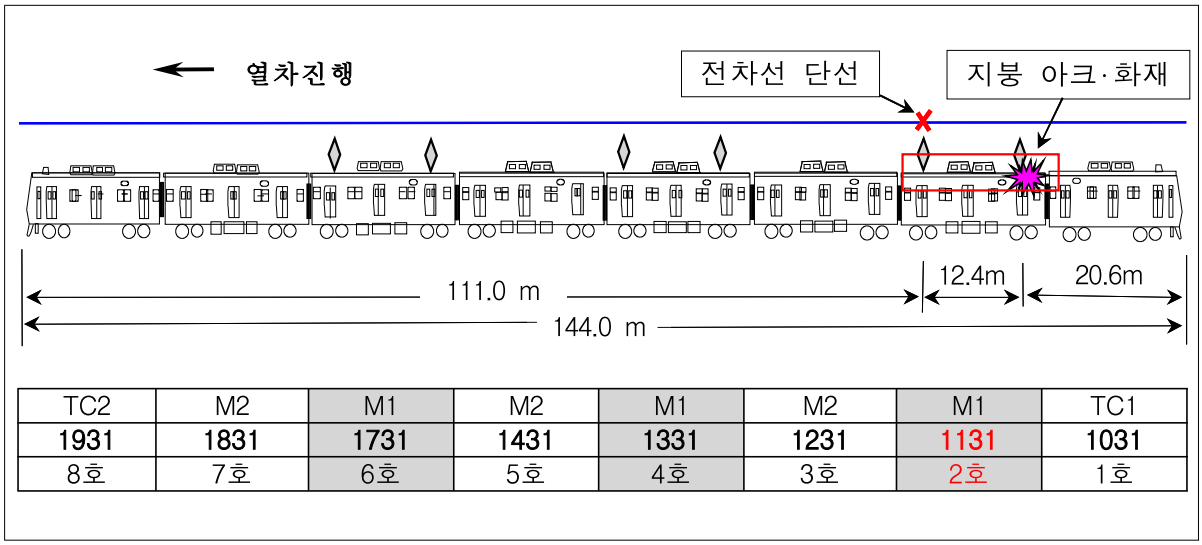
이 아크 화재로 인해 사고전동차의 2호차 지붕은 심하게 그을렸고, 2호차 앞쪽 팬터그래프와 접촉되었던 전차선이 끊어져, 끊어진 전차선의 앞쪽은 3호차 지붕에서 승강장으로 늘어지고 뒤쪽은 2호차 팬터그래프에 걸쳐 있었다.

화재가 진화된 이후, 끊어진 전차선이 복구(14:55경)되고 사고전동차는 16:27경, 신평차량기지로 회송된 후 전 구간 전동열차 운행이 재개되었다.

제 1차 아크와 2차·3차 아크 발생 위치는 [그림4] 및 [그림5]와 같다.



[그림4] 제1차 및 제2-3차 아크발생 위치



[그림5] 사고전동차 아크발생(화재) 및 전차선 단선 상황

1.2 피해사항

1.2.1 인적 피해

대티역 전동차 화재현장에서 연기를 흡입한 승객들 중 입원환자 4명, 경상자 57명이 부산 동아대병원 등 10개 병원에 분산 이송되어 응급조치 및 치료를 받았다.

1.2.2 물적 피해

전동차 피해는 2호차(1131호)지붕의 화재로 인해 팬터그래프가 2조 소손, 고압케

이블 (WL2 150㎟ 및 WL2 38㎟) 소손, 고압회로 퓨즈함(MF) 소손, 차량 연결주름막 1조 소손, 객실 형광등 2개부 및 화재감지기 1개 소손, 객실의 천정 구멍 생성으로 객실 내장재 파손 등이 있었고

대티역 상행 승강장의 벽면 LGP판넬 마감재(약 12m × 4m)가 그을음으로 인해 훼손되었고, 상행 전차선(GT 170㎟)이 3.7m 끊어졌고, 대티변전소의 화재감지용 하론가스가 방출되는 등 물적 피해가 발생되었다.

1.3 인적 정보

1.3.1 사고열차 기관사

기관사 ○○○(42세, 남)은 1995년 12월 4일 부산교통공사에 입사하여 1996년 1월 15일 노포승무관리소 차장으로 임용되었고, 부산교통공사 교육원에서 기관사 양성과정(1997.12.15.~1998.05.02.)을 이수하였고, 1998년 12월 26일 기관사로 임용되어 노포승무사업소에서 사고 일까지 근무하고 있었다.

철도안전법에 따라 교통안전공단에서 발급하는 철도차량운전면허(2종)을 2006년 7월 26일 발급받았으며, 기관사 적성검사에 2회(1995.10.12, 2006.12.14.)합격하였다.

최근 3개월 동안 노포승무사업소장이 실시한 직무교육, 안전운행, 지적확인환호응답, 위기관리교육 등을 받았고, 업무 중 상벌사항은 없었다.

1.3.2 종합관제소 관제사

1.3.2.1 운행관제부장

운행관제부장 ○○○(54세, 남)은 1988년 7월 1일 부산교통공사에 입사하여 노포승무관리소 기관사로 임용되었고,

2003년 7월 1일 종합관제소에 발령을 받아 근무 중 관제사 보수교육을 받았으며 사고 일까지 운행관제부장으로 근무하였다.

최근 3개월 동안 종합관제소의 하절기 특별안전교육, 3/4분기 사고사례교육, 철도종사자 안전교육, 2/4분기 운행관제설비 장애복구훈련, 철도종사자 안전교육, 3/4분기 운행장애(차량고장)사고사례 및 예방대책교육, 지적확인환호응답 훈련, 비상대응매뉴얼에 의한 열차추돌 실무훈련, 철도종사자 안전교육 등을 받았다. 업무 중 상벌사항은 없었다.

1.3.2.2 운행관제담당

운행관제 담당과장 ○○○(51세, 남)은 1991년 1월 15일 부산교통공사에 입사하여 1호선 장전동역 역무원으로 임용되었고,

2006년 3월 1일 종합관제소 관제사 발령을 받았고, 관제사 보수교육 받았으며, 사고 일까지 운행관제과장으로 근무하고 있었다. 업무 중 상벌사항은 없었다.

최근 3개월 동안 종합관제소장이 실시한 하절기 특별안전교육, 3/4분기 사고사례교육, 철도종사자 안전교육, 2/4분기 운행관제설비 장애복구 훈련, 철도종사자 안전교육, 3/4분기 운행장애(차량고장) 사고사례 및 예방대책교육, 지적확인환호응답 훈련, 비상대응매뉴얼에 의한 열차추돌실무훈련 및 철도종사자 안전교육을 받았다.

1.3.2.3 운행관제사 A

관제사 A(52세, 남)은 1992년 12월 16일 부산교통공사에 입사하여 노포승무관리소 기관사로 임용되었고,

한국철도공사 인재개발원에서 적성검사 합격하고 운전업무종사자 교육을 받은 후, 2009년 3월 30일 종합관제소 발령을 받아 실무수습교육을 이수하고, 운행관제사 발령받았고, 사고 일까지 관제사로 근무하고 있으며, 업무 중 상벌사항은 없었다.

최근 3개월 동안 종합관제소장이 실시한 하절기 특별안전교육, 3/4분기 사고사례교육, 철도종사자 안전교육, 2/4분기 운행관제설비 장애복구 훈련, 철도종사자 안전교육, 3/4분기 운행장애(차량고장) 사고사례 및 예방대책교육, 지적확인환호응답,

비상대응매뉴얼에 의한 열차추돌 실무훈련 및 철도종사자 안전교육을 받았다.

1.3.2.4 운행관제사 B

관제사 B(44세, 남)은 1995년 12월 4일 부산교통공사에 입사하여 노포차량사업소 검수원으로 임용되었고,

한국철도공사 인재개발원에서 적성검사 합격하고 관제사 신규교육을 받은 후, 2011년 8월 1일 종합관제소 발령을 받아 실무수습교육을 이수하고, 운행관제사 발령받아, 사고 일까지 근무하고 있다.

관제사는 최근 3개월 동안 종합관제소장이 실시한 하절기 특별안전교육, 3/4분기 사고사례교육, 철도종사자 안전교육, 2/4분기 운행관제설비 장애복구 훈련, 철도종사자 안전교육, 3/4분기 운행장애(차량고장) 사고사례 및 예방대책교육, 지적확인환호응답, 비상대응매뉴얼에 의한 열차추돌 실무훈련 및 철도종사자 안전교육을 받았다. 업무 중 상벌사항은 없었다.

1.3.2.5 운행관제사 C

관제사 C(52세, 남)은 1990년 8월 1일 부산교통공사에 입사하여 노포승무관리소 기관사로 임용되었고,

한국철도공사 인재개발원에서 적성검사 합격하고 관제사 운전업무종사자교육을 받은 후, 2012년 7월 2일 종합관제소 발령을 받아 실무수습교육을 이수하고, 운행관제사 발령받아, 사고 일까지 근무하고 있다.

관제사는 최근 3개월 동안 종합관제소장이 실시한 하절기 특별안전교육, 3/4분기 사고사례교육, 철도종사자 안전교육, 2/4분기 운행관제설비 장애복구 훈련, 철도종사자 안전교육, 3/4분기 운행장애(차량고장) 사고사례 및 예방대책교육, 지적확인환호응답, 비상대응매뉴얼에 의한 열차추돌 실무훈련 및 철도종사자 안전교육을 받았다. 업무 중 상벌사항은 없었다.

1.3.2.6 기술부장

기술부장 ○○○(57세, 남)은 1988년 7월 1일 부산교통공사 입사 임용되었고, 2006년 1월 1일 전기사업소에서 근무하여, 2007년 8월 6일 2급사원으로 승진하여 2011년 8월 1일부터 종합관제소 기술부장으로 발령을 받아 기술분야(전력, 신호, 통신, 설비관제 등) 관제업무 총괄책임자로 일근하고 있다.

국가기술자격증으로 전기기사 자격증이 있으며, 직무관련 교육은 없었다. 상벌사항으로 사장표창(2012.12.31)을 받은 바 있으며, 물만골 전동열차 충돌탈선사고 관련으로 직위해제(2012.11.23)를 받았다.

1.3.2.7 전력관제사 A

전력관제사 A(45세, 남)는 1992년 8월 1일 부산교통공사에 입사하면서 전기사무소에서 근무하기 시작하였고, 2010년 7월 5일 전기4급으로 승진하면서 종합관제소에 발령을 받아 전력관제사 업무를 담당하고 있다.

국가기술자격으로 전기공사산업기사 자격증이 있으며, 업무관련교육은 비상대응교육, 사고사례교육, 철도종사자교육을 받은 바 있다. 사장표창을 두 번('01.07.13, '09.03.02)받았고 벌은 없었다.

1.3.2.8 전력관제사 B

전력관제사 B(42세, 남)는 1997년 9월 11일 부산교통공사에 입사, 전기사무소에서 근무하기 시작하였고, 2002년 11월 25일 종합관제소에 발령을 받아 전력관제사 업무를 담당하고 있으며, 2010년 7월 5일 전기5급으로 승진하였다.

국가기술자격으로 전기기사 2급, 전기공사기사 2급, 철도교통안전관리자 자격증이 있으며, 업무관련 교육은 비상대응교육, 사고사례교육, 철도종사자교육을 받았으며 상벌사항으로 사장표창('08.12.31)을 받은 바 있으며 견책('04.3.16)을 1회 받았다.

1.3.2.9 전력관제사 C

전력관제사 C(31세, 남)는 2010년 5월 17일 부산교통공사에 입사, 전기사무소에서 근무하기 시작하였고, 2012년 6월 1일 전기8급으로 승진하여 2012년 7월 2일 종합관제소에 발령을 받아 전력관제사 업무를 담당하고 있다.

국가기술자격으로 전기기사, 전기공사기사, 정보처리기사, 무선설비기사, 워드프로세서 1급의 자격증이 있으며, 업무관련 교육은 비상대응교육, 사고사례교육, 철도종사자교육을 받았다. 상벌사항은 없었다.

1.3.3 대티역 역무근무자

1.3.3.1 부역장

부역장 ○○○(58세, 남)은 1990년 2월 9일 부산교통공사에 입사하여 역무원으로 근무하였고, 승무관리소에서 차장으로도 근무하였다.

2012년 7월 2일 대티역에 부역장 발령을 받아 사고 일까지 근무하고 있었으며, 업무관련교육은 부산교통공사교육원 안전교육 관리감독자반 교육을 받은 바 있으며 매월 철도안전 및 안전보건교육을 받았다. 업무관련 상벌사항은 없었다.

1.3.3.2 역무원 A

역무원 A(50세, 남)는 1997년 12월 22일 부산교통공사에 입사, 승무관리소 차장으로 근무하였고, 못골역 역무원을 거쳐 2012년 1월 5일 대티역 역무원으로 발령받아 사고 일까지 근무하고 있다.

역무원 A는 역장이 실시한 화재대비 교육훈련을 받았고 매월 철도안전 및 안전보건교육을 받았다. 업무관련 상벌사항은 없었다.

1.3.3.3 역무원 B

역무원 B(47세, 남)는 2002년 1월 2일 부산교통공사에 입사, 역무원으로 근무하여

2012년 6월 15일 대티역 역무원으로 발령받아 사고 일까지 근무하고 있다.

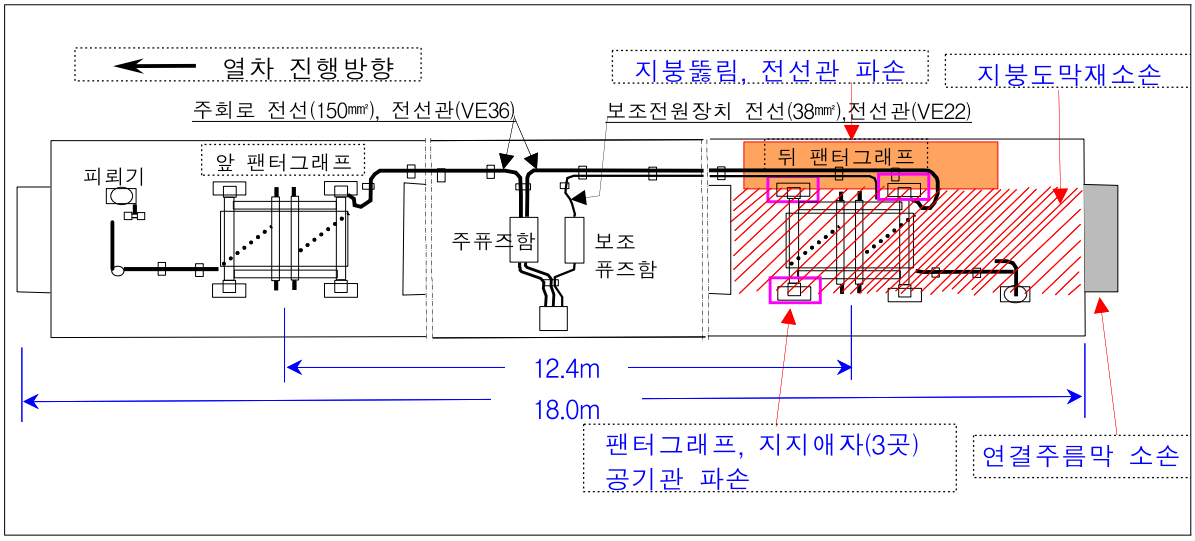
역무원 B는 역장이 실시한 화재대비 교육훈련(2011.9.15, 2012.03.15)을 받았고 매월 철도안전 및 안전보건교육을 받고 있었다. 업무 중 상벌사항은 없었다.

1.4. 현장 정보

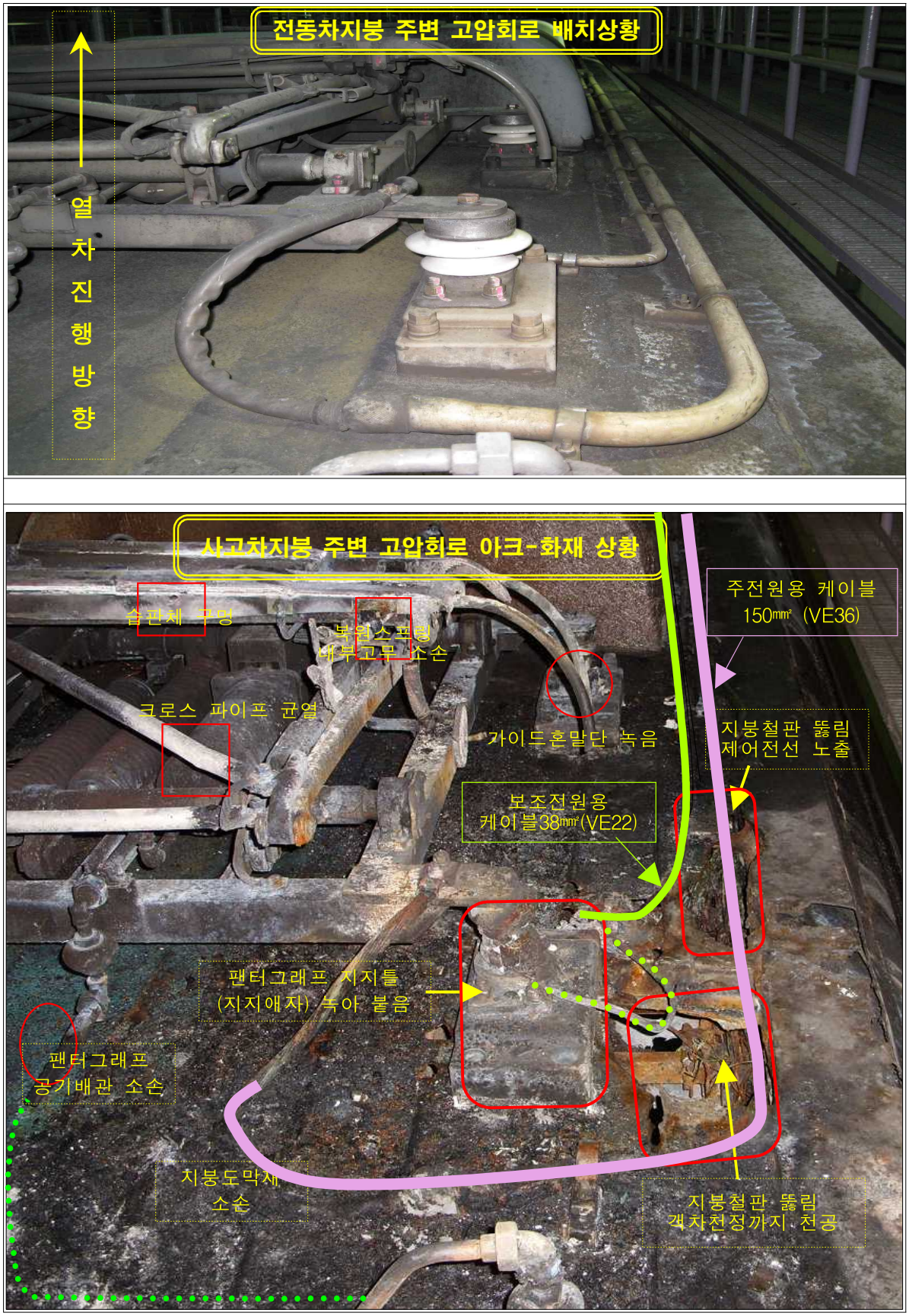
1.4.1. 사고전동차 아크·화재 흔적

사고전동차 아크·화재는 2호차 지붕의 후부 팬터그래프 고압케이블 주변에 집중하여 그 흔적이 발견되었고, 1호차와 2호차 연결주름막이 화재로 소손되었다.

2호차 지붕의 주회로용 고압케이블(150㎟×1, 38㎟×1)루트에 철판이 뚫려(약 100mm이상- 2개소) 객차 천정으로 관통되면서 내장재가 녹아 객차 바닥에 떨어졌다. 2호차 지붕 아크·화재상황은 [그림6] 및 [그림7]과 같다.



[그림6] 전동차 2호차 지붕 아크·화재 상황



[그림7] 사고전동차 2호차 지붕 아크-화재 후 상황

1.4.1.1 고압케이블 및 제어전선 소손

사고전동차 2호차의 앞·뒤 팬터그래프는 고압케이블(150㎟×1, 38㎟×1)을 통해 지붕 중앙 MF박스에 각각 거친 후 차량 내부 고압회로에 접속된다.

2호차(1131호) 팬터그래프에 접속된 주전원용 고압케이블(150㎟×1, VE36수용) 및 보조전원용 고압케이블(38㎟×1, VE22수용)이 부분적으로 녹아 없어지거나 소손되었고, 남아 있는 전선관은 표면이 열에 의해 갈라지거나 훼손되었다.

고압케이블이 설치된 루트와 동일 선의 차체에 각종 제어전선들이 수용되었고, 아크가 발생될 때 함께 녹아 끊어지거나 훼손되었으며, 케이블 루트 및 소손상태는 [그림8] 및 [그림9]와 같다.

[그림8] 팬터그래프 주변 고압케이블 루트 및 소손상태

[그림9] 고압케이블 루트 및 소손상태

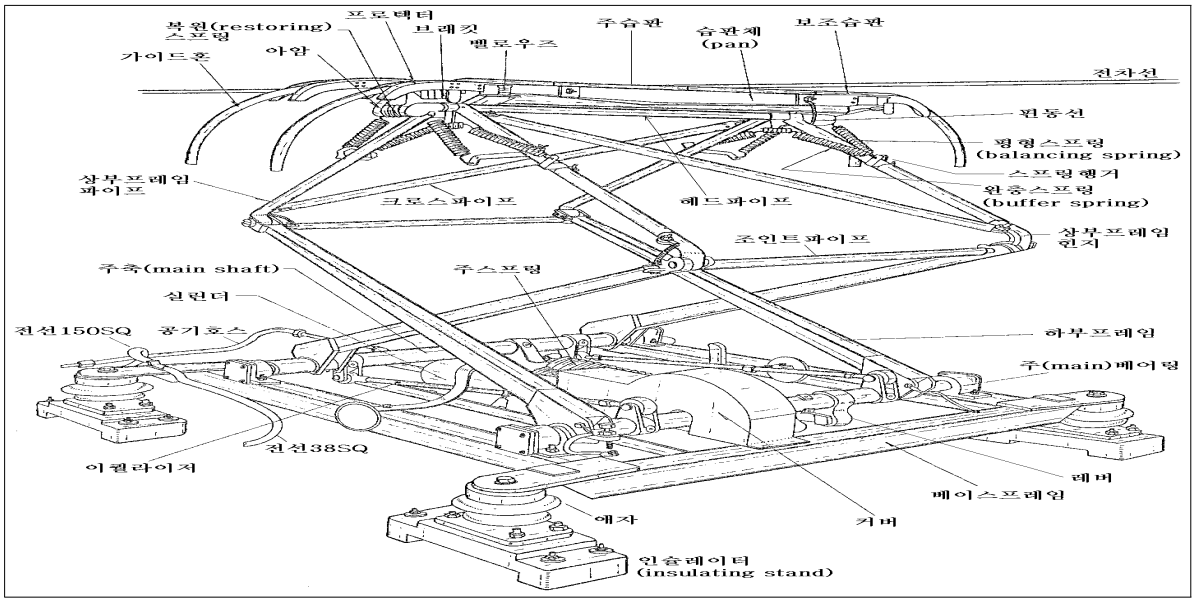
1.4.1.2. 지붕 철판 천공

2호차 지붕 후부 팬터그래프와 고압케이블 루트의 차체(STS 304, 1.2mm두께)가 약 100mm 이상 크기 2개소가 [그림10]과 같이 천공되어 객차 천정까지 뚫렸다. 천공된 위치는 2호차 지붕 고압케이블 루트에 위치하고 있다.

[그림10] 지붕 철판 천공 상태

1.4.1.3 팬터그래프 및 지지애자 소손

팬터그래프의 상세형상은 [그림11]과 같으며, 습판체, 크로스 파이프, 복원스프링, 가이드 혼 등이 아크에 의해 손상되었다.



[그림11] 팬터그래프 형상

팬터그래프를 지붕에 지지한 지지애자(Insulator) 4개 중 3개가 [그림12]와 같이 녹아 붙거나 파손되었고, 고압케이블과 근접된 지지애자가 가장 심하게 녹았다.

지지애자는 자기제(磁器製)로 극동도기(주)에서 제작하여 현대정공(주)에 납품되었고, 1997.02.28. (사)철도차량기술검정단에서 제작감독검사 및 시험합격 인증을 받았다.

[그림12] 팬터그래프 지지애자 소손 상태

1.4.1.4. 팬터그래프 공기관 소손

차량내부에서 지붕의 팬터그래프를 상승시키는 실린더 공기배관이 [그림13]과 같이 소손되었다. 공기배관은 절연스탠드 위에 클램프로 고정되어 있다.

[그림13] 공기관 배관 소손 상태

1.4.1.5. 차량지붕 도막재 소손

2호차 지붕 표면은 스테인리스강판 위에 난연성의 폴리우레탄 수지제 도막재로 약 3㎜정도 코팅되어 경질의 고무 칩으로 미끄럼 방지처리가 되어 있는데, 지붕의 화재로 인해 도막재가 인화되어 재로 덥힌 상태였다.

1.4.1.6. 주퓨즈 및 보조퓨즈

주퓨즈는 지붕에 설치되어 전기적으로 전동차 팬터그래프와 차내 고압회로 사이 주회로에 정격전류 이상 과전류가 흐르면 내부소자(element)가 끊어져 2차 측의 기기를 보호하는 장치이다.

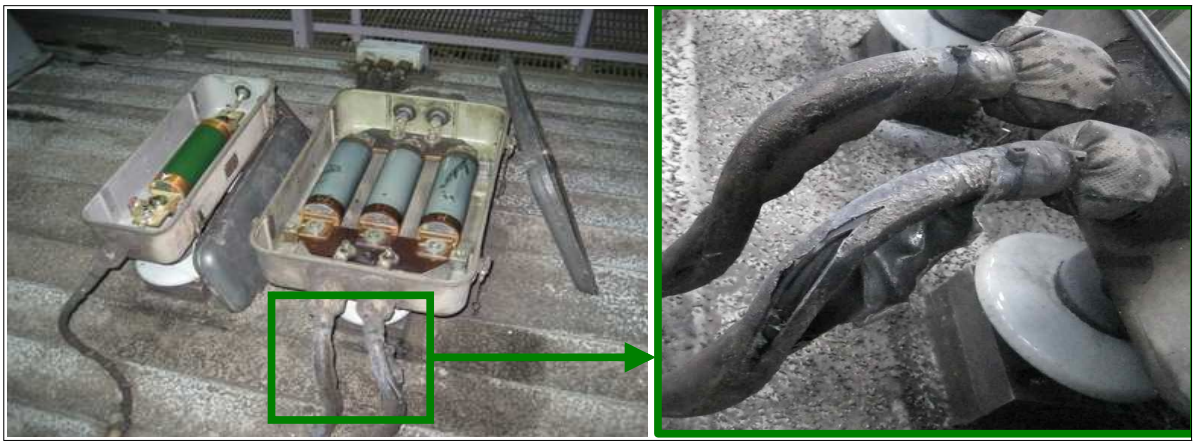
내부소자(element) 저항 값이 [표1]과 같이 428~429μΩ으로 측정되어 전기적으로 용단되지 않았으나 주퓨즈 외통 3개가 변색되었고, 고압케이블이 퓨즈함 측으로 인입되는 곡선의 비닐튜브가 [그림14]와 같이 훼손되었다.

구 분	퓨즈 외통 표시 저항값(μΩ)	측정값(μΩ)
주 퓨즈	446	428
	447	428
	442	429
보조퓨즈	1,132	1,148

[표1] 주퓨즈 및 보조퓨즈 내부소자 저항 측정값

퓨즈의 정기검수는 월상검수 및 중간·전반검수 시에 고정된 단자 부품들의 이완여부 확인 및 절연체 표면을 청소하도록 되어 있으며, 중간검수 이상의 검수에서는 퓨즈 양단의 도통 상태를 점검하면서 퓨즈 내부 소자의 저항을 측정하여 퓨즈 외통(카트리지)에 표시된 저항 값과 10% 이상 차이가 나면 사용할 수 없도록 규정하고 있다.

전동차의 퓨즈들은 2011년 중간검수 시 측정저항 값이 기준치 이내이었으며, 이상 발견되지 않았다.



[그림14] 주퓨즈함 전선보호 비닐튜브 소손상태

1.4.1.7. 차량(1호차-2호차) 연결주름막 소손

사고전동차 2호차와 1호차 객차를 연결하는 연결 주름막이 화재로 모두 소손되었다. 연결주름막은 스테인리스 프레임과 난연성의 졸타포린[3](Sol tarpaulin, 두께0.7mm) 재질로 제조되었다. 연결 주름막의 화재상황은 [그림15]와 같다.

[그림15] 1호차 ~ 2호차 연결 주름막 소손 상태

1.4.1.8. 객차천정 내장판 및 객실의자 손상

2호차 객실 천정의 내장판이 지붕과 관통되었으며, 구멍 주변의 내장판이 그을려 있었고, 천정의 형광등 2개가 손상되었다.

3) 졸타포린(Sol tarpaulin) : 휘장감은 나일론 기포를 기본으로 하고 그 위에 염화비닐수지 및 난연재로 코팅한 재료

객실의자는 천정에서 떨어진 용융이물질에 의해 시트가 훼손되었다. 내장판 및 객실의자의 훼손상태는 [그림16]과 같다.

[그림16] 내장판 및 객실의자 훼손상태

내장판은 불연성 알루미늄재질로 앞면이 세라믹으로 코팅되었으며, 뒷면은 보강재와 단열재를 부착하였고, 단열재는 불연재의 유리섬유를 알루미늄 시트지에 싸서 부착하였다.

1.4.2 전차선 흔적들

1.4.2.1 서대신~대티역 사이 전차선 아크 흔적

사고발생 당일 야간(2012.8.28. 01:00~04:00)에 서대신～대티역까지 전차선 합동점검팀(총 12명: 안전실 2, 전기기계설비팀 3, 부산진전기분소 4, 노포차량사업소 2)이 구성되어 전기모터카로 특별점검을 실시하였다.

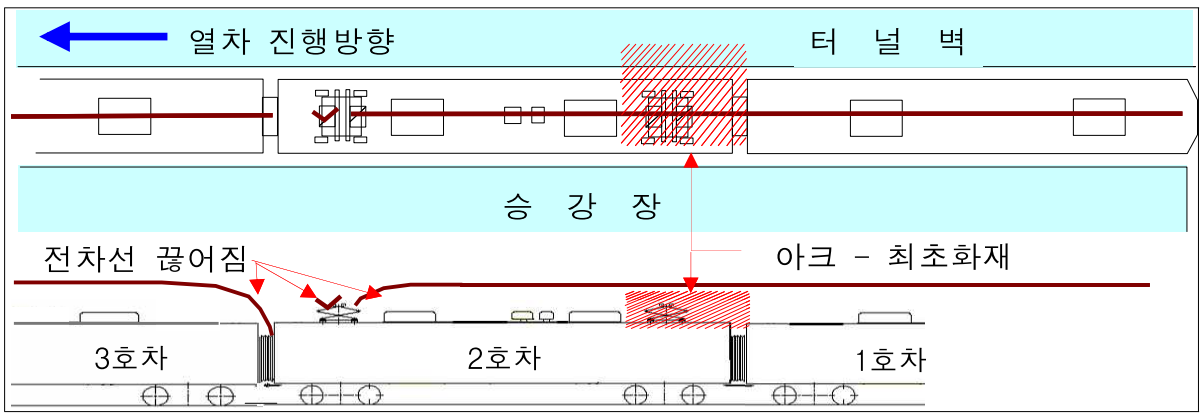
점검팀의 확인결과, 서대신역 중심(기점 7㎞860)으로부터 대티역 방향으로 약 290m 떨어진 지점(기점 7㎞570지점)부터 81m구간에 걸쳐 연속적으로 아크흔적이 있었다. 아크흔적은 주로 팬터그래프와 습동(濕動)되는 전차선 접촉면과 측면, 그리고 보조조가선과 급전조가선에 총 8개소였으며 [그림17] 및 [그림18]과 같다.

[그림17] 아크흔적(대티125호, 7Km570)

[그림18] 120~121호, 7.524㎞ 및 104~105호, 7.489㎞ 아크흔적

1.4.2.2 대티역 승강장 전차선 끊어짐

사고전동차의 2호차 앞쪽 팬터그래프와 접촉된 지점의 전차선이 끊어져, 앞쪽은 3호차에서 승강장으로, 뒤쪽은 팬터그래프에 각각 늘어지고 가운데 토막(ㄱ자)은 팬터그래프 프레임에 걸쳐 있었다. [그림19] 내지 [그림21]과 같다



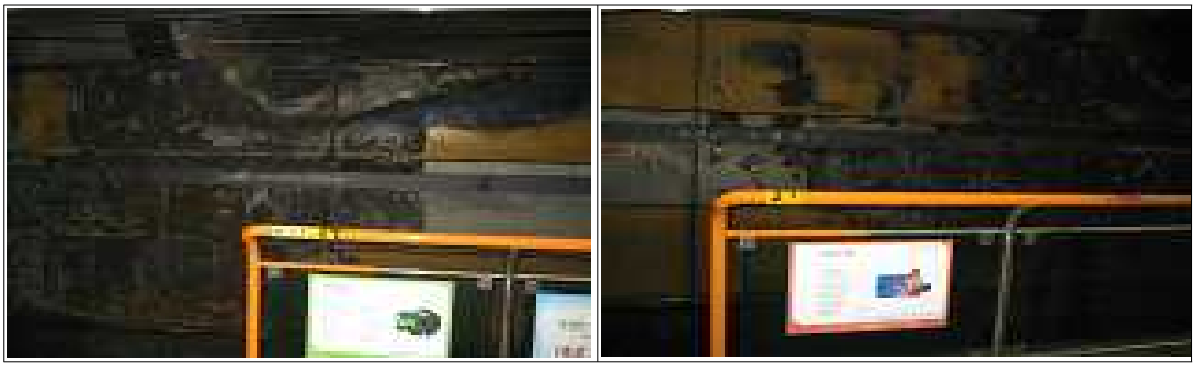
[그림19] 사고전동차 아크-화재 및 전차선 단선 상황

[그림20] 전차선 끊어진 전동차 지붕상황(앞쪽에서 승강장, 뒤쪽)

[그림21] 끊어진 전차선 모양

1.4.3. 승강장 벽면 화재흔적

사고전동차 2호차가 대티역승강장에 위치된 벽면과 천정은 화재로 인한 그을음이 심했다. 승강장의 LGP판넬벽면 화재흔적(길이12m×높이4m)으로 [그림22]와 같이 훼손되었고, 아크로 인해 용융된 금속물질이 승강장에 떨어졌다.



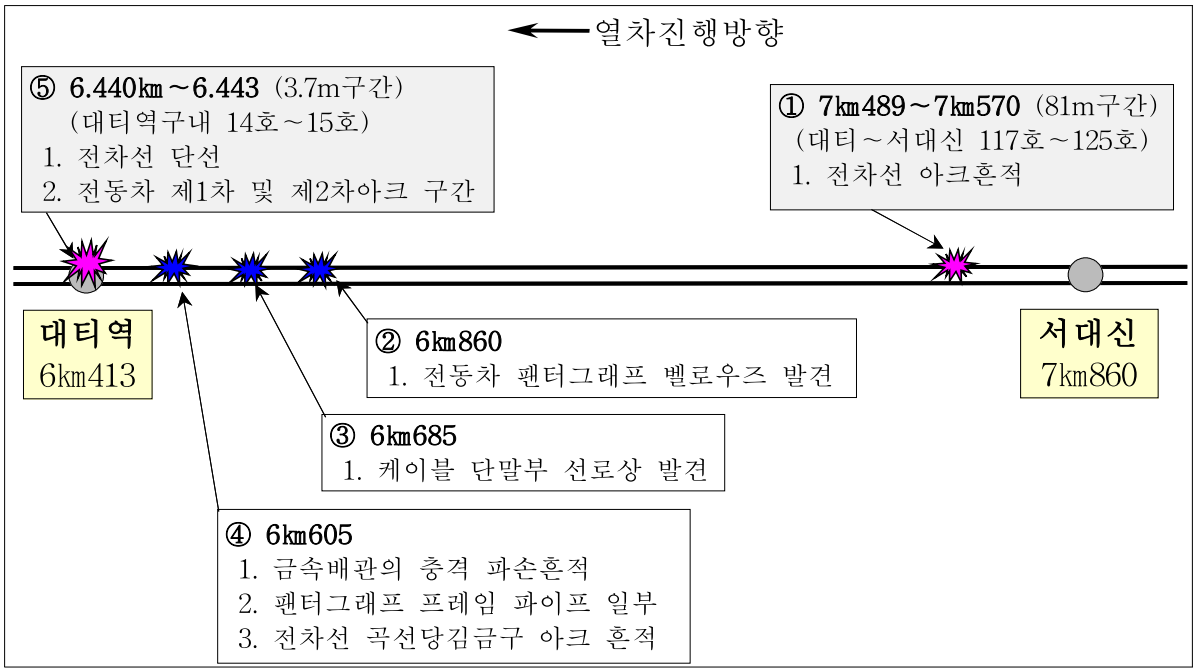
[그림22] 상선 승강장 벽면 화재 손상 흔적 (길이12m × 높이4m)

1.4.4 서대신~대티역 사이 선로에서 발견된 전동차 부품 흔적

서대신~대티역 사이 터널에서 발생된 1차 아크와 관련된 흔적이나 전동차 부품들이 떨어져 있는지 조사하여 [그림23]과 같이 부품 및 흔적들이 발견되었다.

서대신역에서 대티역방향 상선 약 290m지점 ①지점(신평기점7㎞489~7㎞570) 전차선로에서 약 81m에 걸쳐 8개소에서 아크 흔적이 발견되었고

②지점(6㎞860지점) 선로바닥에서 팬터그래프 벨로우즈를, ③지점(6㎞685지점) 선로바닥에서 케이블 단말부를, ④지점(6㎞605지점) 선로 옆에서 금속배관이 파손된 흔적과 팬터그래프 프레임 일부가 발견되고, 전차선 곡선당김금구에 아크 흔적이 발견되었다.



[그림23] 서대신~대티역 간 발견된 전동차 부품들

1.5 운전・관제・역무정보

1.5.1 기관사 운전업무

기관사 ○○○는 8월 27일 06:46경, 출근하여 출무 서명 및 출무점호에서 적합 판정을 받고 노포차량사업소 유치선에서 사고전동차를 인수해 기능시험을 마친 후, 노포역에서 제1043호 전동열차(노포07:46:00→신평08:48:00), 이어서 제2070호 전동열차(신평08:56:30→노포09:58:30)로 왕복하고 휴게실에서 약 2시간 휴식하였다.

기관사는 두 번째 사업인 사고전동차를 노포역(13:09:00)에서 정시에 출발하여 신평역(14:11:00)에 도착될 예정으로 서대신역까지 정시 운전하여 이상이 없었다.

14:00경, 기관사는 서대신역에서 사고전동차를 자동운전 모드에서 출발버튼을 작동하여 출발(13:59:55)하여 속도코드 75에서 71㎞/h 속도에 달한 때(14:00:27경) 2·4·6호차 저전압계전기(LVR) 및 3·5·7호차 저전압 보조계전기(LVRAR)가 동시 Off 작동된 것을 알게 되었다.

기관사는 이때 대티역 승강장이 직선상으로 보이는 상황에서 사고전동차의 아크섬광이 발생된 것을 감지하였고, 전동차 출력은 감소(71㎞/h ⇒ 45㎞/h)하여 전압계가 1,650볼트에서 약 700볼트로 떨어진 것을 알았다.

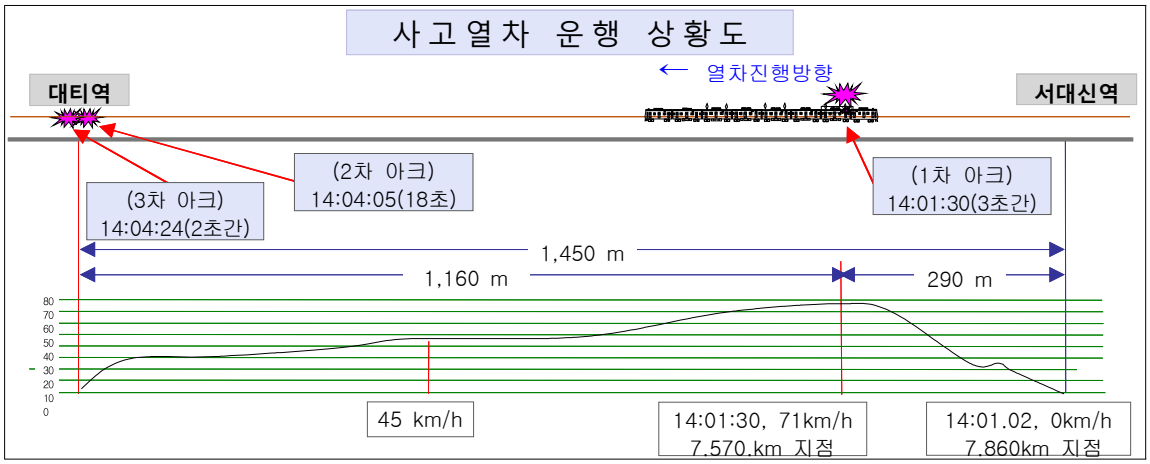
잠시 후, 객실 내 인터폰으로 남자 승객으로부터 “열차에서 불이 났다”고 신고가 들어왔고, 차내방송을 실시하면서 전동차는 타력으로 운행이 계속되었다.

사고전동차가 대티역 승강장에서 출입문이 개방되고 승객들이 내릴 때, 운전실 AUX램프와 FAULT램프가 점등되었다.

기관사는 이때 전동차에서 화재발생된 것을 알았고 종합관제소에 무선전화로 보고하고, 객실 안내방송을 시도하였으나 아니 되어, 승객들을 대피시키기 위하여 승강장으로 나가 소리치면서 2호차까지 뛰어갔고 이때 역무원이 소화기로 분사하는 것도 보았으나 진압이 불가하였다.

다시 객차로 들어가 앞쪽으로 이동하면서 잔류승객이 없는 것을 확인하고 대합실로 이동하였다가, 화재 진화된 후 운전실로 복귀하고 대기하다가, 16:06경 사고전동열차를 기동(3UNIT)하여 자력으로 대티역을 출발하여 신평차량기지 검수고(V2번선)에 16:27경 입고하였다.

[그림24]는 사고전동차의 운전 상황 및 운행중 발생상황 표이다.



[그림24] 사고전동차 운전 상황도

1.5.2 운행관제사 업무

13:48경, 운행관제사 B는 무선전화로 전체 전동열차 기관사에게 '태풍 볼라벤' 태풍주의보가 13시부로 부산지방에 발령되고 16시부로 태풍경보로 격상예정이니 지상구간 운행 시에는 전도주시 잘 해주시고 시설물장애나 운전에 이상 징후가 있을 시 즉시 관제소에 연락하라고 지시하였다.

14:01경, 운행관제사 B는 서대신~대티역 사이 운행 중이던 사고전동차 기관사로부터 "전차선에서 저 스파크 튀면서...지금 여기...지금 다시 올라왔거든요..지금 다시 올라왔습니다."라는 무선전화를 받고, "1161 몇 편성입니까?" "31 편성입니다", "예 알겠습니다. 일단 알겠습니다. 지금 복구됐지요?"라고 응답하였다. (이때 관제실 열차운행상황판에 정전 표시됨)

시청역에 정차중인 제1171열차 기관사가 "1171. 39편성인데 시청역인데..지금 뭡니까 전차선이 단전돼 갔고"라는 무선전화 호출에 "네 정전됐습니다."고 운행관제사 A가 받았다.

14:02경, 운행관제사 C는 전력관제로부터 남포~범내골 사이 편단급전 중이라는 통보를 받았다.

14:02~03경, 운행관제사는 관제실 무선전화에서 “전철범일.. 전철범일... 전철범일..”이라고 기관사의 호출이 있었으나 응답이 없었고, 다시“전철범일”라는 호출에 운행관제사 B는 “네 몇 열차입니까?....자 최근역에 범내골, 양정,..범내골, 동래 최근 역에 정차하세요.”라고 다수 기관사에게 지시를 하였다.

14:03경, 운행관제사 B는 기관사가 무선전화로 “전철범일”을 수차례 호출하자 “몇 열차 몇 열차 네 말씀하세요.”라고 응답하였고, 다시 기관사가 “전철범일, 1161, 31입니다 여기 화재 발생했습니다.“라는 다급한 보고를 듣고 ”대티역 화재발생“이라고 모든 관제사가 들리게 큰소리로 외쳤다. 이때 CCTV 대티역화면에서 연기 발생되는 것을 확인할 수 있었다.

14:03~05경, 운행관제사 C는 전체 전동열차 기관사에게 무선전화로 대티역 화재발생을 비상 통보하였고, 기관사로부터 팬터그래프 하강한다는 요청이 있어 승인하고, 대티역 하선에 들어온 제2170 전동열차 기관사에게 승객들을 하차시켜 대피 지시 및 전체 전동열차 기관사들에게 별도지시 있을 때까지 대기하도록 통보하였다.

14:06경, 운행관제사 A는 전체 전동열차 기관사에게 대티역화재 내용을 재 통보하고 대티역 상·하선에 정차열차의 승객이 대피하도록 조치 및 지시하였다. 운행관제사 C는 전체 전동열차 기관사에게 대티역화재로 인하여 최근 역에 정차・대기할 것을 지시하고, 토성~동대 간 정차한 제1163열차에도 대기 지시하였다.

14:07경~, 운행관제사 C는 대티~남포 간 운행하는 전동열차 기관사에게 승객을 하차시키고 팬터그래프를 하강하도록 지시하고, 상황을 정리하였다.

14:13~16경, 운행관제사 B는 대티역 하선 제2170열차 기관사와 대티역 역무원으로부터 승객들이 모두 대피되었다고 확인하였다.

14:35~45경, 대티역 현장에 출동한 직원으로부터 대티역 상선 전차선이 끊어졌다는 통보를 받았고, 노포~중앙역 사이 구간운전을 위하여 중앙역에 체결된 키볼트를 해제하고, 중앙~노포역 사이 구간 운전하도록 조치하였다.

15:53~55경, 대티역의 단선된 전차선이 복구되었고, 이어서 사고전동차를 차량기지로 회송을 위한 차량검수원의 차량 확인을 마치고, 대티~남포 간 전차선 전기공급을 전력관제사에게 요청하고, 정차 중인 5대의 전동열차 기동을 지시하였다.

16:06경, 사고전동차의 팬터그래프 임시결박 등 조치한 후 서행으로 신평차량기지로 입고하였다. 이어서 노포~중앙역까지 일부구간 운전을 해제하고 1호선 전체 구간의 정상운행을 재개한 후, 사고 상황종료를 관계처에 전송하였다.

1.5.3 전력관제사 업무

전력관제사는 종합관제소 기술부장의 하부에 3조 2교대 근무체계로, 1호선 2명, 2호선 2명, 3호선에 2명이 근무하고 있었다.

14:00경, 1호선 전력관제 상황판에 장애가 표출되었고, 전력관제사 A가 그 상황을 발견하여 지적확인하였고, 나머지 전력관제사는 환호 응답하고 장애내용이 사고로 판단되어 2호선 전력관제사 을이 총괄하여 관제・대응하였다.

14:01~02경, 대티~남포 간 및 범내골~동래 간 전차선 정전상태가 발생되어 운행관제에 통보하면서 이 구간 운행 중인 전동차 기관사들에게 선로이상 유무를 확인하도록 요청하였고, 신평전기분소 및 동래변전분소에 장애상황 통보 및 현장점검을 요청하였다.

14:03~05경, 전력관제사 B는 운행관제과장으로부터 대티역 승강장에서 전동차화재 발생된 것을 통보받고, 전기분야 각 부서에 문자로 상황을 전송하였고, 범내골~양정 및 양정~동래 구간의 전차선에 급전하고 신평전기분소에 통보하여 대티변전소 점검을 요청하였다.

14:06경, 전력관제 상황판에 대티변전소 FIRE ALARM이 작동되어, 남포변전소를 점검하던 부산진전기분소 직원에게 대티변전소에 출동하도록 요청하였다.

14:17~19경, 설비관제사로부터 대티변전소의 하론가스가 방출되었다는 내용을 통보받았다.

14:38경, 전기기계설비팀장으로부터 대티승강장 상선의 전차선이 단선되었다는 내용을 접수받았고, 이런 내용을 관계처(1호선 및 2호선 전체 전기분소)에 통보하고 비상출동을 요청하였다.

14:45경, 전력관제사 A는 신평전기분소(○○○)로부터 전차선 비상복구 요원이 출동 투입되었다는 통보를 받았다.

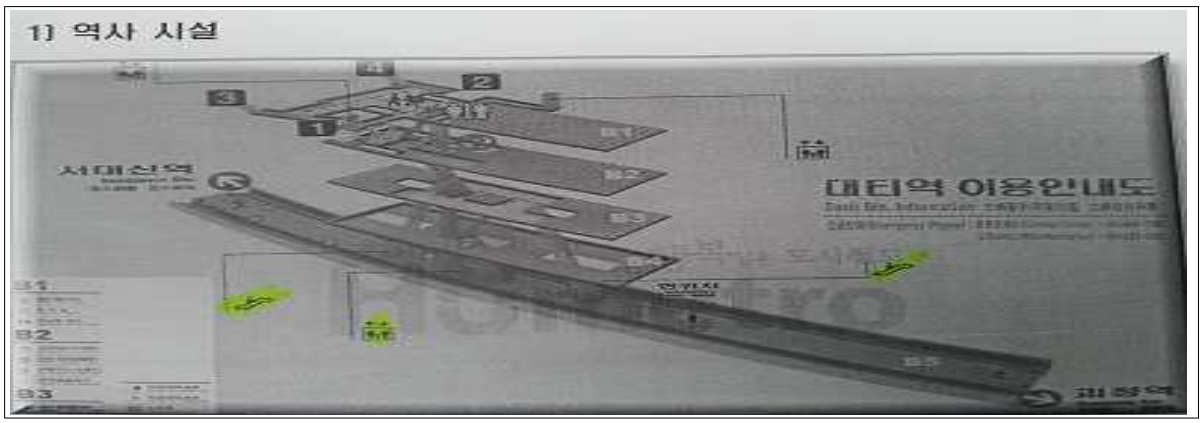
15:03경, 대티역 전차선복구 작업책임자를 통보받았고, 통신관제사에게 복구현장 비상전화설치를 요청하여 15:33경 개통하였다.

15:53~58경, 전력관제사 A, B, C는 대티 승강장 사고현장에서 전차선 복구완료 통보를 받았고, 운행관제사로부터 대티~남포 구간 전차선 급전을 요청받은 후, 대티~남포 사이 전차선에 전기 공급하는 대티와 남포변전소의 원격 조작을 하여 전구간 전차선에 급전이 완료되었다. 문자메세지를 관계처에 전송하였다.

1.5.4 대티역 역무업무

1.5.4.1 대티역사 구조

대티역사는 부산 사하구 괴정동 316번지 위치되어 [그림25]와 같이 지하 5층 구조로 건축되어 있다. 지하1층(B1)에 물탱크실 등, 지하2층(B2)에 역무실 등(고객지원센터), 지하3층(B3)에 전기실 등, 지하4층(B4)에 환기실 등, 지하5층(B5)의 중앙에 승강장이 있고 양쪽에 상행(신평쪽)과 하행선(노포쪽)이 곡선으로 이어져 있다.



[그림25] 대티역사 시설구조

대티역사 구조는 [그림25]와 같이 지하2층 대합실(B2)과 지하5층 승강장(B5) 사이에는 에스컬레이터가 승강장 양옆으로 각 2대씩 설치되었고 일반계단은 없으며, 장애인 엘리베이터 1대 및 피난계단 1개소가 설치되었고, 지하 5층 승강장에는 분말소화기와 방독면 등 화재 비상용구가 준비되어 있었다.

대티역사에서 외부 지상도로와 연결되는 출입구는 총 4개소(ENT1...ENT4)이며 지하2층 대합실(B2)과 연결되는 계단이 각각 설치되었다.

1.5.4.2 대티역 역무원 업무

14:03분경, 부역장 ○○○는 역무원 A와 대티역 고객센터에 근무 중 CCTV모니터에서 연기 나는 화면을 보고 화재발생을 알게 되어 비상상황으로 돌입하였고, 부역장 ○○○는 119 및 112 신고하고, 승객들이 대피하도록 역사 자동 안내방송을 실시한 후, 화재현장으로 내려가는 중 B3 층에서 자동방송이 들렸다.

14:06~07경, 고객서비스센터에 다시 올라와 112 및 119에 전화로 화재 위치를 안내한 후, 운영사업소와 역장 등 관계기관에 보고할 때 역무원 조○○가 화재상황이 심하다고 하여 B2층 GATE입구에 안전띠를 설치하여 화재현장 출입을 금하였다.

역무원 A는 14:03경, 화재발생 직후, 역무실에 있는 CO2 소화기를 휴대하고 계단으로 지하3층 승강장으로 이동 중 '펑'하는 폭발소리를 들었고, 승강장에 도착하자마자 가지고 간 CO2소화기와 승강장에 보관되어 있던 분말소화기로 2호객차 ~ 1호 객차 연결부 화재발생 부분에 방사하였으나 역부족이었고

매연이 아주 심해 호흡이 곤란하여 E/L옆에 비치된 방독면을 착용하고 사고전동차 객실로 들어가 잔류승객이 없는지 수차례 확인하였고, 반대편 하선 승강장의 2170열차도 확인하려는데 조명이 꺼진 채로 문이 닫혀있어 이상이 없는 것으로 보고 역무실로 이동하였다.

14:13~14:35경, 역무실에서 운전사령, 부산시 도시철도계 상황보고, 소방대원 진입 등을 안내하고, 경찰연락, 비상제연 작동을 하고, 14:36경 역무원 B와 함께 동아대병원에서 간단한 응급치료를 받고 대티역에 복귀하여 근무하였다.

역무원 B는 13:40경부터 태풍 볼라벤 북상에 대비하여 대합실(B3)에 모래주머니로 배수역류방지 작업 중(14:03경), 냄새가 나고 연기가 발생된 것을 감지하고 역 고객센터(B2)로 뛰어가니, 부역장과 역무원A가 승강장 화재라고 소리치며 소화기를 들고 나간 것을 보며 화재경보기가 작동하여 경고방송과 사이렌이 울렸다.

즉시 119신고 및 제연설비를 가동시키고, 마침 지하2층 중앙계단에서 올라오는 승객들을 GATE와 비상출입문을 열어 대피 유도하였다.

14:09경, 기관사가 지하2층 계단으로 5~6명의 사람들과 올라오면서 "역무원님 피하십시오. 유독가스가 너무 심합니다. 승객들은 다 올라온 것 같습니다."고 하여, 고객센터에 있던 부역장에게 피하라는 말을 급히 전하고, 대피하던 노인 승객 2분을 부축하여 지하 1층 대합실까지 올라갔다.

지하1층에서 다른 노인을 업고 올라온 청년이 힘들어 하여 교대로 노인을 업고 청소용역 아주머니의 도움으로 지상에 대피시키고, 다시 지하 1층～2층을 오가며 승객대피를 유도할 때 역무원 A의 행방이 불분명하여 119대원에게 수색 요청하였고, 그 후 역무원 A를 데리고 동아대병원으로 동행하여 응급처치를 받고 역으로 돌아와 업무를 계속하였다.

1.6 차량 정보

1.6.1 전동차 일반제원

부산 1호선 전동차는 자동운전(ATC/ATO-1인 승무)으로 운행하는 시스템으로, 1개 전동열차는 8량으로 구성되고 1량의 차체 길이는 17.5m, 폭 2.75m로 수도권 전동차(길이 20m, 폭 3.12m) 보다 작으며, 지붕높이는 3.67m, 전동차 1면에 출입문은 3개, 차체는 스테인리스 재질로 되어 있다.

전동열차는 8량 중 2호, 4호, 6호차 지붕에 팬터그래프, 피뢰기, 주・보조 퓨즈함 등 지붕고압회로 및 냉방장치, 기타설비가 있다.

전동차 전기방식은 직류1,500V, 가속도 3.6km/h/s, 감속도 상용제동 시 3.6km/h/s, 비상제동 시 4.5km/h/s이다. 최대속도는 80km/h까지 운행이 가능하다. 견인전동기는 직류 직권전동기로 출력 165kw, 직류전압 750V, 회전수 1,700rpm이다. 주제어장치는 쵸퍼(Chopper)방식이며, 보조전원장치는 GTO소자를 사용한 정지형 인버터방식이다. 1호선에 360량의 전동차가 보유되어 있다.

1.6.2 사고전동차 편성

사고전동차는 1988년 2월 28일 구 현대정공(주)에서 제작·납품되어 6량 편성으로 운영하던 중, [표2]와 같이 1997년 8월 5일부터 8량으로 증차 편성하면서 동력차 6량(1131~1831)을 신차로 추가하고 제어차 2량(1031호, 1931호)은 계속 사용되었다.

구분	TC2	M2	M1	M2	M1	M2	M1	TC1	비 고
차량번호	1931	1831	1731	1431	1331	1231	1131	1031	
호차	8호	7호	6호	5호	4호	3호	2호	1호	
제작년도	1988년	1997년 8월						1988년	

[표2] 사고전동차(31편성)의 상세 편성 이력

1.6.3 전동차 검수규정

부산교통공사 전동차검수규정(제정 2006.1.1 규정35호, 개정2012.4,27. 규정334호)에는 차량정기검수를 일상, 월상, 중간, 전반검수로 구분하고 있으며,

같은 규정 제19조 및 20조에는 전기장치에 대하여 6개월 이상 사용하지 않았을 경우에는 절연저항시험을, 중간검수 또는 전반검수 시에는 절연저항시험과 절연내력시험을, 중요한 전기장치를 개조 또는 수선하였을 경우에는 절연저항 시험과 절연내력시험을 시행하도록 되었다.

검수항목으로 주회로 및 제어회로 기기장치의 팬터그래프, 주단로기 스위치함 등 39개 검수항목을 명시하고 있으나, 전동차 지붕 고압케이블 절연피복의 상태를 점검하는 검수항목은 없었다.

1.6.4 사고전동차 정기검수

부산교통공사는 사고전동차(1131호)의 검수는 검수규정 주기에 따라, [표3]과 같이 시행되었으며, 중간검수 후 176,433㎞ 운행되고, 월상검수 후 5,796㎞ 운행된 상태에서 사고가 발생하였다.

검수종별	검수주기	검수시행일자
일상검수	3일 이내	2012.08.24.
월상검수	3개월 이내	2012.08.09.
중간검수	2년 이내 또는 주행거리 30만km 이내	2011.01.20.
전반검수	4년 이내 또는 주행거리 60만km 이내	2008.11.21.

[표3] 2호 전동차의 정기검수 현황

일상검수기록을 확인한 결과, 노포차량사업소에서 (실내 및 옥상공정) 절연애자 상태 등 51개 작업, 차체 대차 제동 등 상하기기 공정에 대해 33개 작업, 운전실 최종 점검 등 11개 작업을 실시하여 검수결과는 OK로 기록되었다.

월상검수(2012.08.09)기록은, 노포차량사업소에서 실시되었고 운전실 및 객실설비 공정에 64개 작업, 상하기기에 대한 공정으로 ATC/ATO 출력계전기함 상태 등 53개 작업, 제동 및 대차 공정으로 차륜상태 및 치수 측정 등 32개 작업, 옥상기기 및 주전동기 공정에 팬터그래프 그리스 주입 등 31개 작업이 실시되었다. 검수결과는 OK로 기록되었다.

중간검수(2011.01.04~01.20)기록은, 검수용역팀에서 검수를 실시하여 팬터그래프・리액터・송풍기를 검수하였고, 앞・뒤 팬터그래프 주습판 1위, 2위, 보조습판 1위, 2위를 각각 교환하고, 앞·뒤 팬터그래프의 베어링을 각각 4개씩 교환하였다.

또한, 팬터그래프 압상력은 6Kg, 상승시간은 12초(기준10~14초), 하강 시간은 5초(기준 4~6초)로 기록되었고, 그 외 송풍기 등 3개 품목에 대해 점검 및 수선한 것으로 기록되었으나, 전동차 지붕에 설치된 고압케이블의 포설상태나 정밀점검을 실시한 기록은 없었다.

1.6.5 사고전동차 주·보조회로 보호계전기 동작상황

주회로에는 전차선전압이 직류900V 미만인 것을 검지하여 고압회로(견인전동기회로)를 차단시키도록 하는 저전압계전기(LVR: Low Voltage Relay)가 설치되어 있으며, 운행기록계 자료를 확인한 결과 이 계전기가 수차례 작동하였다.

이 계전기가 작동될 경우 회로차단기가 전부 개방되어 고압회로에 흐르는 전류를 차내로 흐르지 못하도록 차단하고 있으며, 보조전원장치에는 주회로와 마찬가지로 전차선전압이 직류900V 미만인 것을 검지하여 보조전원장치의 고압회로를 차단시키도록 하는 저전압 보조계전기(LVRAR: Low Voltage Auxiliary Relay)가 설치되어 있는데 운행기록계를 확인한 결과 이 계전기도 수차례 작동하였다.

이 계전기는 보조전원장치의 고압회로에 설치된 SIV무전압계전기(SIVNVR: Static Inverter No Voltage Relay, 저전압계전기 동일형식)에 연동되어 작동한다.

1.7 시설·궤도 정보

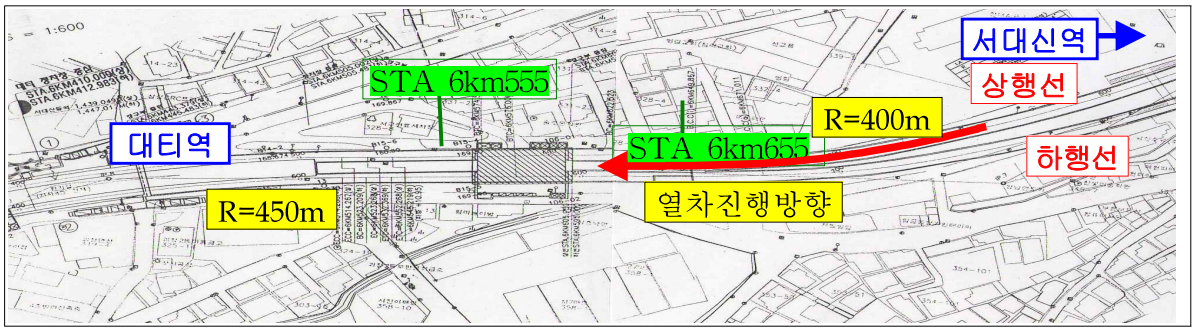
1.7.1 부산 1호선 선로

부산1호선은 노포동~신평역까지 약 32.5㎞노선거리에 34개 역이 건설되어 있으며, 1단계로 노포동~범내골(16.2㎞)간 1985년 7월 19일 개통, 2단계로 범내골~중앙동(5.4㎞)간 1987년 5월 15일, 3단계로 중앙동~서대신(4.5㎞)간 1990년 2월 28일, 4단계로 서대신~신평기지(6.4㎞)간 1994년 6월 23일 개통되었다. 1호선의 건설현황은 [그림26]과 같다.

[그림26] 부산1호선 단계별 건설현황

사고구간인 서대신~대티역 구간은 4단계로 건설 개통된 구간으로서, 선로는 자갈도상, 목침목 및 곡선반경 R=450m구간으로 [그림27] 및 [그림28]과 같다.

1호선의 지상 및 터널구간, 역 승강장 등 전체의 궤도는 자갈도상으로 50kgN 보통레일이 부설되어 있고, 터널 구조물 높이는 레일에서 천정까지 단선터널이 5,026mm로, 복선터널 5,650mm로 되어 있다.



[그림27] 사고발생구간 선로 개략도

[그림28] 사고발생 현장 선로상태

1.7.2 선로 유지보수

사고구간의 선로보수는 신평궤도분소에서 담당하고 있으며, 2012. 8. 1.이후 선로 선형, 체결구, 지장물 등 이상 유무 점검결과 이상이 없었다.

사고구간의 보선장비 및 궤도검측차에 의한 사고 이전 4개월 작업내용은 [표4]와 같이 시행되었고, 궤도틀림 등 이상이 없었다.

연번	일 자	운용장비	작업구간	비 고
1	04월 21일	멀티플 타이탬퍼	6km770~6km970	
2	04월 23일	멀티플 타이탬퍼	6km550~6km750	
3	06월 06일	멀티플 타이탬퍼	7km562~7km742	
4	06월 15일	궤도검측차	0km890~7km770	

[표4] 사고발생구간 보선장비 보수작업 내용

사고구간의 침목 점검결과(사고 전 6개월), [표5]와 같이 이상이 없었다.

선별	구 간	연장 (m)	보통침목 (신축,분기침목)		PC침목(정)		이음매침목(정)	
			부설	훼손	부설	파손	부설	훼손
상선	대티~서대신 6km320~7km770	1,450	815	0	1,610	0	18	0

[표5] 침목 점검 내용

사고구간의 자갈을 사고 전 6개월 기간 점검한 결과, [표6]과 같이 자갈단면이 20%미만 부족 구간이 395m으로 자갈 보충을 16㎥ 실시되었다.

분소	선별	구간	위 치		연장	단면부족		토사혼입		비고
			시작	종점	(m)	20%미만	20%이상	30%미만	30%이상	
신평	상선	대티~서대신	6km565	6km960	395	395	-	-	-	도상보충 (16㎥)

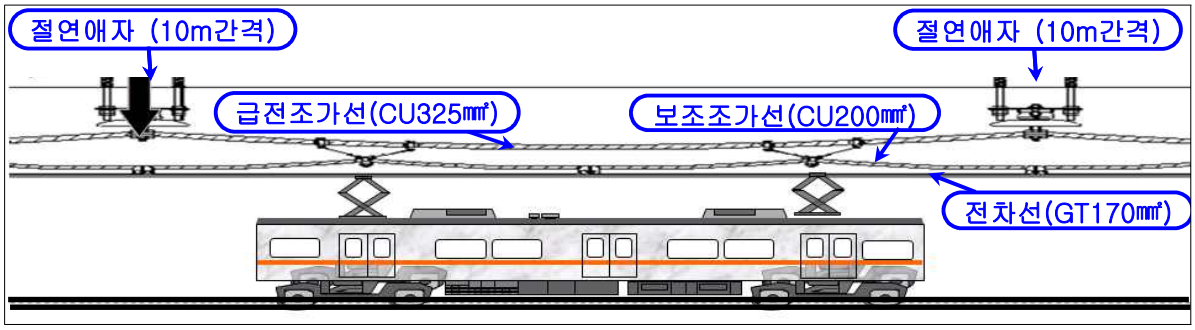
[표6] 자갈 점검 내용

1.8 전기·신호 정보

1.8.1 전차선 설비

부산1호선 전차선설비는 지상에 헤비심플카테나리(Heavy Simple Catenary)방식으로, 차량기지에는 심플카테나리(Simple Catenary)방식으로, 지하 터널구간에는 복합카테나리(Compound Catenary)방식으로 설치되었다.

이 방식은 [그림29]와 같이 터널 천정에 10m간격으로 급전조가선(Cu325㎟)을 절연애자로 지지하고 V-Dropper로 보조조가선(Cu200㎟)을 5m 간격으로 지지한 다음 Composite Ear로 전차선(GT170㎟)을 5m 마다 설치하여 설비가 복잡하다.



[그림29] 부산1호선 터널 전차선 COMPOUND CATENARY 구성도

1.8.2 부산1호선 급전시스템

부산1호선의 급전시스템은 한전 변전소(1호선: 노포-범내골-충무-신평)에서 교류 154㎸를 수전하여 22.9㎸로 변환하여 8개소의 2차 변전소(신평-대티-남포-범내골-양정-동래-두실-노포)에 공급한다.

2차 변전소(22.9㎸)는 사이리스터 더블 콘버터가 3대씩 설치되어 2대는 상시 운전하고 1대는 예비로 대기하고 있으며, 콘버터에서 급·단전 기능을 포함하고 직류 1,650V로 변환하여 전차선에 공급하며, [표7]은 1호선 ~ 3호선의 콘버터 설비 현황이다

구 분		1호선	2호선	3호선	비 고
더블 콘버터 (54대)	콘버터 출력용량	9.9MW	4MW	3.2MW	인버터 기능 내장
	인버터 출력용량	2.64MW 5.12MW	2MW	3.2MW	
	수 량	- 3대*6개소 - 2대*2개소	-2대*10개소	-2대*6개소	
싱글 콘버터 (16대)	콘버터 출력용량	9.9MW	4MW	3.2MW	
	수 량	-	- 2대* 5개소 - 1대* 1개소)	- 1대*5개소	
콘버터 출력전압		DC 1,650V	DC 1,650V	DC 1,650V	
부하측 차단기		단로기	고속도차단기	고속도차단기	
급전변전소(24개소)		8	10	6	

[표7] 부산 1호선 ~ 3호선 콘버터 설비 현황

[표7]과 같이 부산 2, 3호선 및 일반적인 지하철 DC 1,500볼트 방식에서는 전차선로 측에 지락사고(地絡事故) 등 이상이 발생될 때 회로를 선택 차단하는 직류고속차단기가 설치되어 있다.

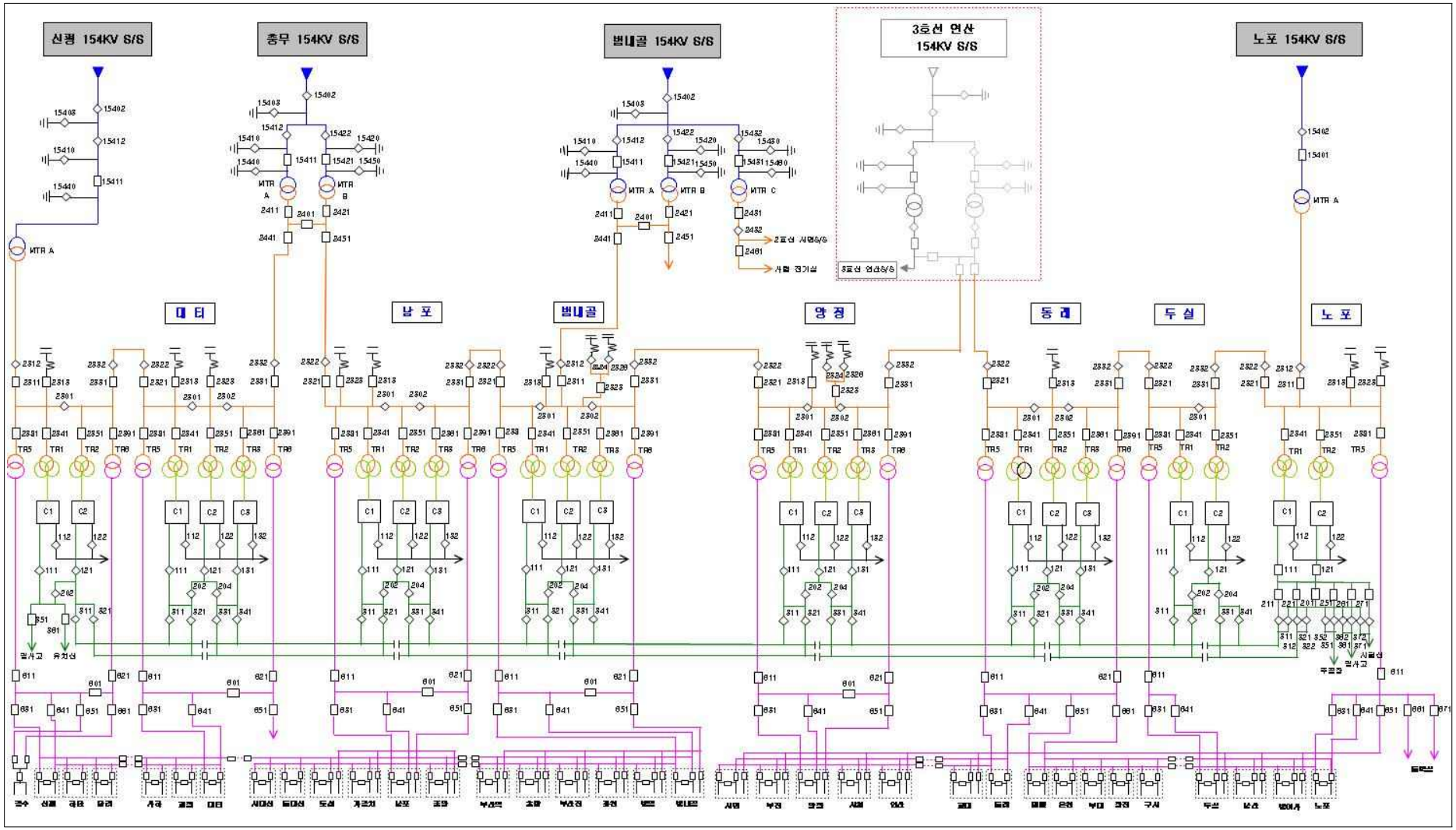
[표8]의 ①~③에 해당되는 어느 하나의 장애가 발생할 경우, 콘버터 기능이 자동 차단(RETARD)되어 전기 공급을 중단하고 → 3초 경과된 후 자동 투입(ADVANCE) → 장애지속 시 선로장애(LINE FAULT)로 진전되어 전기 공급이 차단(RETARD)되도록 조정・운영되었으며,

사고 이후(2012.9.3) 3초 경과된 후 자동 투입 기능은 해제하였다.

구분	인디케이션	콘버터 투입・차단 조건	콘버터 재투입 설정
①	F▼I>	- 콘버터 사이리스터 브리지회로에 순시 과전류 14.5kA 이상일 때 작동하여 경보 현시	ㅇ ①~③3가지 중 하나의 장애 발생시 해당 콘버터 자동 차단(RETARD)→3초 후 자동 투입(ADVANCE) → 장애 지속 시 선로장애(LINE FAULT)로 진전되어 콘버터 자동 차단(RETARD)상태 유지됨 ※ 사고이후(2012.9.3) -자동 재투입(ADVANCE)기능 해제
②	DC R<	- 전차선 및 DC계통사고로 기준전압이 1.1kV 이하이고 전류 300A이상일 때 작동하여 경보현시	
③	TRACK UVR	- 변전소 및 본선구간에 UVR작동시(311~341 UVR "C"타깃동작)경보현시	
④	▼U<	- 주전원 부족전압(2×3상 900V), 세팅치 70%이하(13ms)전압이 되면 경보 현시	콘버터 RET/OFF→RESTART
⑤	DC-CB I>	- DC-CB의 과전류(4KA이상), 주전원 전압부족 시 현시	콘버터RET/OFF→RESTART S.M
⑥	DC-GROUND	- 접지 계전기를 통해 레일과 대지 사이 전위차가 150V이상, 1초 이상 지속될 경우 작동	콘버터 RET/OFF

[표8] 부산1호선 변전소 콘버터 투입・차단 보호기능 조건

부산1호선의 변전소 전력공급계통도(전 구간)는 [그림30]과 같다.



[그림30] 부산1호선 변전소 전력공급 계통도(전 구간)

1.8.3 남포변전소 직류 접지계전기 기능해제

2012. 8. 6(월) 20:00경, 범내골변전소 변압기 1대(TR-1)가 소손되어 남포~범내골변전소 사이 8개역(남포-중앙-부산-초량-부산진-좌천-범일-범내골)에 대한 전차선 전기 공급이 남포변전소 측 편단급전 상황이 발생되었다.

부산교통공사는 남포변전소～범내골변전소 사이 급전구간(6.7㎞)이 다른 구간(2.6~6.05㎞)보다 길고 출퇴근시간대(R.H)의 전동차 운행증가에 따른 불안정한 정전에 대비하기 위하여

범내골변전소에는 예비변압기(TR-2)를 가동하고 평상시 무인 운전하던 변전소 근무자를 상주시켰고, 남포변전소에는 2012년 8월 8일(수) 16:42경부터 직류 접지계전기[4] 기능을 해제하여 8월 27일 사고발생 시 그대로 유지되었고, 2012년 8월 28일 범내골변전소의 변압기(TR-1)수리가 완료되어 원상되었다.

1.8.4 사고구간(대티S/S～남포S/S) 전차선 급전·정전 상황

(대티~남포변전소 간)

사고 발생된 최초로 대티변전소(C3) 측의 단전(Off, 14:00:54)으로 편단 급전상태를 유지하다가 약 10초 후 남포변전소(C1) 단전(Off, 14:01:04)으로 1차 정전이 14:01:04부터 14:01:12까지 8초 간 유지되다가 대티변전소 급전(On)으로 편단급전 상태에서 12초 후 남포변전소 급전(C1)으로 양단급전이 2분 5초 동안 되었다.

---

4) 직류접지계전기 :

○ 이 접지계전기(GR:DC GROUND RELAY)는 레일 및 대지전위 이상 감지용으로 일종의 과전압 계전기로서 레일과 대지 사이 전위차가 150(V) 이상 1 초 이상 지속될 때 작동되며 해당 변전소의 운용중인 모든 콘버터(정류기)를 OFF시키도록 조정되었다. 레일과 대지 사이의 전위차가 발생되는 주요원인은 전차선로(급전선·조가선·전차선) "+전원"측의 혼촉 및 지락사고, 낙뢰(이상전압) 등으로 인한 전차선 지지애자 파손 등이 있다. 지락사고의 장애파급은 장시간 열차운행 중단으로 이어진다.

○ 범내골변전소～남포변전소 구간의 전차선로는 6.335㎞로 다른 구간에 비해 가장 긴 상황이며, 범내골변전소 또는 남포변전소의 정류기 고장으로 이 구산 전차선에 편단급전 상황이 발생할 경우 전력부하가 집중하는 출퇴근 시간대에는 레일전위가 접지계전기 설정값(150V)이상으로 상승할 가능성이 높다. 범내골～남포 구간의 출퇴근 시간대에 전차선 정전사고를 방지하기 위하여 소손된 변압기를 원상복구 완료시까지 비상 운영함.

대티변전소(C3) 단전(Off, 14:03:29) 및 급전(On, 14:03:44)이 1회 발생하고, 남포변전소(C1)의 단전(Off, 14:03:48)된 상태에서 대티변전소(C3) 단전(Off)으로 2차 정전이 14:03:50부터 14:04:08까지 18초간 지속되었고

남포변전소(C1) 1초(14:04:08~09) 간 급·단전(On, Off) 순간적으로 발생되었고, 3차 정전이 14:04:09부터 15:56:38까지 1시간 52분 29초 간 되었다가, 남포변전소 급전(On, 15:56:38) 및 대티변전소의 급전(On, 15:57:33)으로 급전이 지속되었다.

(남포~범내골변전소 간)

범내골변전소 측의 단전(Off) 및 급전(On)이 1회 있었으나, 남포변전소의 급·단전이 이루어지지 않아 전기 공급은 지속되어 이 구간 정전은 없었다.

(범내골~양정변전소 간)

범내골변전소 및 양정변전소의 콘버터 단전(Off, 14:00:54)이 거의 동시(0.5초)에 작동되었고, 단전상태(14:00:54~04:57)가 4분 3초 간 지속되다가 범내골변전소의 편단급전(On, 14:04:57)에 이어 양정변전소 급전(On, 14:07:11)이 지속되었다.

(양정~동래변전소 간)

양정변전소의 단전(Off, 14:00:54) 2초 후 동래변전소 단전되어(Off, 14:00:56) 이 구간 단전상태(14:00:56~14:05:30)가 4분 36초 간 지속되었고 양정변전소 편단급전(On, 14:05:30) 및 양정변전소의 급전(On, 14:07:36)으로 양단이 급전이 되었다.

(동래~두실변전소 간)

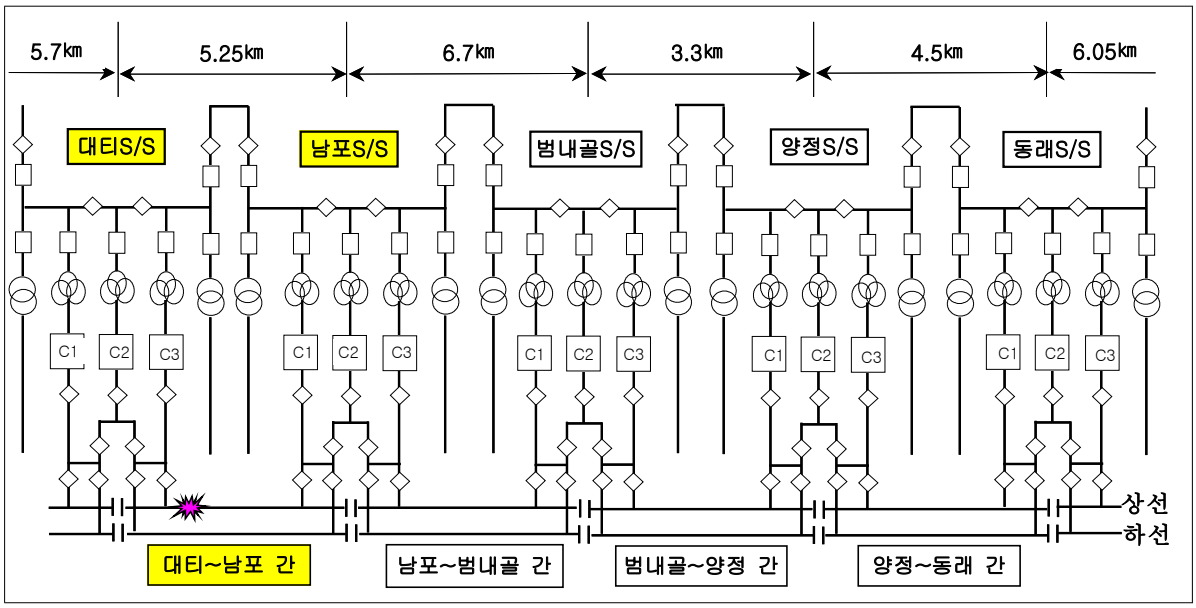
동래변전소 단전(Off, 14:00:56) 및 급전(On, 14:05:59)이 되었으나, 두실변전소 측의 급전상태가 지속되어 이 구간의 단전은 없었다.

이번 사고로 변전소 구간별 급・단전사항은 [표9] 및 [그림31]과 같다.

변전소 구간별	시 간	급·단전사항	변전소 작동기기	비고
대티~남포	14:00:54~01:04 (10초)	남포 편단급전	대티 C3 RET. (Off)	<대티SS> F▼I>, ▼U< DC-R< <남포SS> ▼U<, DC-R< DC-CB I> DC-GROUND
	14:01:04~01:12 (8초)	정전	남포 C1 RET. (Off)	
	14:01:12~01:24 (12초)	대티 편단급전	대티 C3 ADV. (On)	
	14:01:24~03:29 (2분5초)	양단급전	남포 C1 ADV. (On)	
	14:03:29~03:48 (19초)	남포 편단급전	대티 C3 RET. (Off)	
	14:03:48~03:48 (0.5초)	양단급전	대티 C3 ADV. (On)	
	14:03:48~03:50 (2초)	대티 편단급전	남포 C1 RET. (Off)	
	14:03:50~04:08 (18초)	정전	대티 C3 RET. (Off)	
	14:04:08~04:09 (1초)	남포 편단급전	남포 C1 ADV. (On)	
	14:04:09~15:56:38 (1시간52분29초)	정전	남포 C1 RET. (Off)	
	15:56:38~57:33 (55초)	남포 편단급전	남포 C1 ADV. (On)	
	15:57:33~이후계속	양단급전(종료)	대티 C3 ADV. (On)	
남포~범내골	14:00:54~06:50 (5분56초)	남포 편단급전	범내골 C2 RET.(Off)	<범내골SS> DC-GROUND
	14:06:50~이후계속	양단급전(종료)	범내골 C2 ADV.(On)	
범내골~양정	14:00:54~00:54 (0.5초)	양정 편단급전	범내골 C3 RET.(Off)	<범내골SS> DC-GROUND <양정SS> DC-GROUND
	14:00:54~04:57 (4분 3초)	정전	양정 C1 RET. (Off)	
	14:04:57~07:11 (2분14초)	범내골편단급전	범내골 C3 ADV.(On)	
	14:07:11~이후계속	양단급전(종료)	양정 C1 ADV. (On)	
양정~동래	14:00:54~00:56 (2초)	동래 편단급전	양정 C3 RET. (Off)	<양정SS> DC-GROUND <동래SS> DC-GROUND
	14:00:56~05:30 (4분36초)	정전	동래 C1 RET. (Off)	
	14:05:30~07:36 (21분6초)	양정 편단급전	양정 C3 ADV. (On)	
	14:07:36~이후계속	양단급전(종료)	동래 C1 ADV. (On)	
동래~두실	14:00:56~05:59 (5분 3초)	두실 편단급전	동래 C3 RET. (Off)	<동래SS> DC-GROUND
	14:05:59~이후계속	양단급전(종료)	동래 C3 ADV. (On)	

[표9] 변전소구간별 급전 및 단전내용 (SOE기준)

※ SOE (Sequense of Event) : 변전소 기기작동 내용이 발생순서에 따라 기록



[그림31] 부산1호선 대티SS~동래SS 간 전력공급 계통도(단선결선)

1.8.5 전차선설비 유지보수

부산교통공사 '전력시설보수 및 책임한계 규정(개정'12.4.27)에는 전차선 높이가 터널구간 레일면상 4,400㎜이상, 지상구간 4,400~5,150㎜로, 전차선 편위가 지상구간에 200㎜ 지하구간에 250㎜를 기준으로 하고 있다.

전차선 점검 기준은 매일 1회 순회점검을, 장력장치 점검 등 9개 항목을 격일로, 조가선 소손여부 점검 등을 3개월 주기로, 조가선 인류상태 점검 등을 6개월 주기로, 높이·편위 측정 및 활성부 이격거리 측정은 1년 주기로 규정하고 있다.

구간 전주번호	전차선 높이 (레일면상 4,400㎜이상)		좌우 편위(250㎜이내)				비고
			2011년		2012년		
대티역구내			좌	우	좌	우	
10호	4,470	4,480		130		110	
11호	4,460	4,460	50		50		
12호	4,450	4,460	60		60		
13호	4,460	4,460		150		150	
14호	4,450	4,450	80		60		2-3차 아크단선 (14～15호)
15호	4,450	4,450	100		90		
16호	4,450	4,450		100		100	
17호	4,440	4,440	130		120		
18호	4,440	4,440	100		90		
대티~서대신							
115호	4,500	4,500		60		60	
116호	4,490	4,490		40		50	
117호	4,470	4,470		30		30	1차 아크 117～125호
118호	4,460	4,460		50		40	
119호	4,450	4,450		90		90	
120호	4,460	4,460		100		100	
121호	4,470	4,470		100		100	
122호	4,480	4,480		110		110	
123호	4,490	4,480		120		120	
124호	4,480	4,480		120		120	
125호	4,480	4,470		80		80	
126호	4,470	4,470		20		30	
127호	4,480	4,480	50		50		

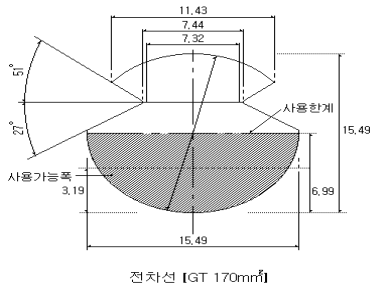
[표10] 사고구간(대티~서대신) 전차선 측정표(높이, 편위)

구간/지점	전동차높이 (레일면상)	전차선높이 mm		이격거리 mm		전차선편위 mm		전차선구배	
1호선 전구간	4150	최고	5080	최고	930	최고	220	최고	0.003
	4150	최저	4400	최저	250	최저	0	최저	0

[표11] 부산1호선 전차선 활선부 이격거리(전 구간 최고-최저)

서대신~대티역 사이 전차선 높이·편위 측정(2011.11.24～11.26)결과, 전차선높이가 터널구간 4,400㎜이상, 지상구간 4,400~5,150㎜범위였고, 전차선 편위는 지하구간 250㎜ 이내로 기준치를 벗어나지 않았고, 전차선구배 및 활선부 이격거리 측정결과, 최고 930㎜, 최저 250㎜로 기록되었다. [표10] 및 [표11]과 같다.

전차선 마모한계는 정해진 지점에서 주기별로 [그림32]와 같이 측정 관리하며, 사고구간인 대티~서대신역 사이 측정결과(2011.10.29), 대티 24호주의 전차선직경 13.96㎜, 마모량 1.53㎜로 잔존 직경이 5.46㎜로 충분하게 남아 있었다.



(전차선 규격 : GT 170㎟)

마모한계 = 전차선 직경 - 사용한계 직경 = 6.99 ㎜

= 15.49㎜ - 8.5 ㎜ = 6.99 ㎜

※ 전차선의 잔존직경은 8.5㎜ 때까지 사용가능

[그림32] 부산 1호선 전차선(GT170㎟) 마모한계

그 외 대티 27호 등 8개소에도 측정결과 마모량은 미미한 상태로 잔존직경은 [표12]와 같이 충분했다.

전 차 선 마 모 측 정 표(대티~서대신 상선)

측 정 일	위치 : 대티 24호			위치 : 대티 27호			위치 : 대티 40호			위치 : 대티 69호		
	측정치	사용잔량	마모량	측정치	사용잔량	마모량	측정치	사용잔량	마모량	측정치	사용잔량	마모량
07.11.30	13.97	5.47	1.52	13.87	5.37	1.62	15.01	6.51	0.48	14.54	6.04	0.95
08.11.02	13.96	5.46	1.53	13.86	5.36	1.63	14.97	6.47	0.52	14.53	6.03	0.96
09.11.10	13.96	5.46	1.53	13.85	5.35	1.64	14.97	6.47	0.52	14.52	6.02	0.97
10.11.30	13.96	5.46	1.53	13.85	5.35	1.64	14.97	6.47	0.52	14.51	6.01	0.98
10.10.29	13.95	5.45	1.54	13.84	5.34	1.65	14.96	6.46	0.53	14.51	6.01	0.98
11.10.29	13.96	5.46	1.53	13.85	5.35	1.64	14.97	6.47	0.52	14.50	6.00	0.99

측 정 일	위치 : 대티 114호			위치: 대티143~144호								
	측정치	사용잔량	마모량	측정치	사용잔량	마모량						
07.11.30	14.63	6.13	0.86	14.39	5.89	1.10						
08.11.02	14.62	6.12	0.87	14.38	5.88	1.11						
09.11.10	14.63	6.13	0.86	14.38	5.88	1.11						
10.11.30	14.62	6.12	0.87	14.38	5.88	1.11						
10.10.29	14.62	6.12	0.87	14.37	5.87	1.12						
11.10.29	14.61	6.11	0.88	14.38	5.88	1.11						

측 정 일	위치:서대신20호 (신평관내)			위치: 서대신 29호			위치:서대신64호~ 64-1호			위치: 동대신 69호		
	측정치	사용잔량	마모량	측정치	사용잔량	마모량	측정치	사용잔량	마모량	측정치	사용잔량	마모량
06.05.31	14.67	6.17	0.82	14.63	6.13	0.86	14.51	6.01	0.98	14.24	5.74	1.25
06.11.19	14.66	6.16	0.83	14.63	6.13	0.86	14.51	6.01	0.98	14.24	5.74	1.25
07.07.07	14.66	6.16	0.83	14.63	6.13	0.86	14.51	6.01	0.98	14.21	5.71	1.28
07.12.08	14.66	6.16	0.83	14.62	6.12	0.87	14.51	6.01	0.98	14.21	5.71	1.28
08.06.29	14.66	6.16	0.83	14.56	6.06	0.93	14.51	6.01	0.98	14.21	5.71	1.28
08.11.08	14.66	6.16	0.83	14.56	6.06	0.93	14.51	6.01	0.98	14.21	5.71	1.28
09.11.21	14.66	6.16	0.83	14.56	6.06	0.93	14.51	6.01	0.98	14.21	5.71	1.28
10.07.26	14.63	6.13	0.86	14.56	6.06	0.93	14.51	6.01	0.98	14.20	5.70	1.29
10.10.17	14.63	6.13	0.86	14.55	6.05	0.94	14.51	6.01	0.98	14.20	5.70	1.29
11.11.04	14.63	6.13	0.86	14.55	6.05	0.94	14.51	6.01	0.98	14.20	5.70	1.29

[표12] 전차선 마모 측정표 (대티~서대신 간 상선)

1.8.6 신호제어설비(부산1호선)

부산1호선의 신호방식은 열차자동제어(ATC: Automatic Train Control) 및 열차자동운전(ATO: Automatic Train Operation)방식이 설치 운영되고 있다.

신호설비는 크게 사령설비, 신호기기설비, 현장(선로변)설비로 구성되며, 신호정보 전달체계는 사령실에서 열차운전명령을 하면 신호통제기기실, 현장신호기기실의 연동장치 등 각종설비를 통하여 열차운행조건이 전동차의 차상설비에 전달된다.

반대로 선로에서 열차조건의 각종 정보는 역순으로 사령설비에 전달되며, 관제센터 열차운행표시반(LDP)에 표시되어 운용자가 집중 관리·통제하게 된다.

1.9 각종 기록정보

1.9.1 사고전동차 열차운행기록

사고전동차의 열차운행정보기록은 [표13]과 같이 주요사항을 발췌하였으며, 기록된 시각은 표준시각보다 약 26초 늦었다.

시 각	사고전동차(열차) 상황
13:59:51	(서대신역) 출입문 닫힘
13:59:55	(서대신역) 열차 출발(AUTO모드), 속도코드 25
14:00:05	(서대신~대티역) 속도코드 75, PWM 역행 85%, 열차속도 23Km/h
14:00:27	(서대신~대티역) 2·4·6호차 LVR 동작, 3·5·7호차 SIV정지 및 LB5차단, 속도코드 75, 열차속도 71㎞/h, EC 0V 하강, 이후 3호차는 계속 0V유지 ※ 제1차 아크 (주회로장치 보호동작 없음)
14:00:34	(서대신~대티역) 전차선 전압 없음
14:00:36	(서대신~대티역) 6호차 LVR 복귀, 열차속도 69.5㎞/h
14:00:37	(서대신~대티역) 7호차 SIV가동(출력전압 108~117V)
14:00:38	(서대신~대티역) 6호차 LVR 재동작, 7호차 AC220V 공급,열차속도 68㎞/h
14:00:39	(서대신~대티역) 7호차 AC220V 공급중단, DIR off 이후 역행불가 ➪ 타력운행, 속도코드 75, 열차속도 68㎞/h
14:00:52	(서대신~대티역) 2·4·6호차 LVR 복귀, 5·7호차 LVRAR on 열차속도 55.5㎞/h
14:00:54	(서대신~대티역) 5·7호차 SIV가동, AC220V 현시, 열차속도 56.5Km/h, 3호차는 SIV출력 없음.
14:00:56	(서대신~대티역) 5·7호차 AC220V 공급개시
14:01:15	(서대신~대티역) PG1 수신, 정위치 정차지점 370m 이전
14:01:40	기관사 수동제동 취급 4,6호차 LB투입(2호차 LB미투입, AUTO모드)
14:02:09	(대티역) 열차속도 15.5㎞/h, 정위치 정차지점 38m 이전
14:02:14	(대티역) 열차속도 12.5㎞/h, 정위치 정차지점 20m 이전
14:02:21	(대티역) 열차속도 8.0㎞/h, 정위치 정차지점 2m 이전
14:02:26	(대티역) 전동차 정차, DER(동쪽출입문 열림 계전기) 동작
14:03:02	(대티역) 5·7호차 SIV정지, AC220V 공급중단 ※ 제2차 아크
14:03:04 ~03:23	(대티역) 2·4·6호차 LVR 동작, 이후 14:03:23까지 4·6호차 LVR 복귀·동작 반복
14:04:28	(대티역) 비상제동 체결
14:04:47	(대티역) 주간제어기 핸들 Locking

[표13] 사고전동차 운행기록 분석표

1.9.2 서대신 및 대티역 CCTV동영상 기록

서대신역 및 대티역 승강장에 설치된 CCTV동영상 내용은 [표14]와 같다.

시각	CCTV 동영상 내용	기 사
14:00:54	서대신역 출입문 닫음	서대신역 승강장 CCTV 촬영
14:00:56	서대신역 승강장 출발	- " -
14:01:30 ~01:32 (3초간)	(서대신~대티역 간) 사고전동차 운행 중 **제1차 아크**	- " - **제1차 아크**
14:02:47	사고전동차 선두차량 대티역승강장 진입시작	대티역 승강장 CCTV-U7 촬영
14:03:11~	2호차 연기발생하면서 승강장 진입 전동차 출입문 고장표시등 점등상태 진입	- " -
14:03:29	대티역 승강장(상행) 도착	- " -
14:03:31	전동차 출입문 열림 (2호차 승객하차 없고, 1호차 및 3호차에서만 승객 다수 하차)	- " -
14:04:05 ~04:23 (18초간)	**제2차 아크** **불꽃연기**발생(사고전동차 대티역승강장)	**제2차 아크**
	승객 1명 소화기 들고 2호차 내부진입, 화재진화시도(계속)	- " -
14:04:24 ~04:25 (2초간)	**제3차 아크** (사고전동차 대티역승강장 좌측)	**제3차 아크섬광**
14:11:49 ~	**불꽃화재 발화**	**불꽃 화재 발생**
14:12:02	승강장에 불명의 사람(2명)이 화재현장 목격	
14:12:28	소방대원(2명) 화재현장 승강장 출현	
14:13:08 ~13:35	소방대원(2명) 소화작업 및 화재진화	

[표14] CCTV동영상 시간대별 상황

1.9.3 변전소(대티~남포) 급전·단전 기록

사고당시 부산1호선 대티~동래변전소의 급전·단전사항 기록은 GPS표준시간 기록으로 1/1,000초 단위로 세분되어 있으며 [표15]와 같다.

시간	SOE EVENT 내용	비 고
14:00:53.875	**대티 C3 RET-OFF**	**제1차 아크(최초) 발생**
14:00:54.337	범내골 C3 RET-OFF	
14:00:54.338	범내골 C2 RET-OFF	
14:00:54.359	범내골 DC GROUND (NORMAL)	
14:00:54.610	양정 C1 RET-OFF	
14:00:54.616	양정 C3 RET-OFF	
14:00:54.640	양정 DC GROUND (NORMAL)	
14:00:54.685	범내골~양정(상,하) 전차선 단전	
14:00:54.852	**남포 DC GROUND (NORMAL)**	
14:00:55.575	범내골 DC GROUND (NORMAL)	
14:00:56.078	동래 C1 RET-OFF	
14:00:56.113	동래 C3 RET-OFF	
14:01:04.863	대티~남포(상,하) 전차선 단전	
14:01:04.923	**남포 C1 RET-OFF / S.M**	
14:01:07.489	양정~동래(상,하) 전차선 단전	
14:01:12.334	**대티 C3 ON-ADV**	**RESTART(자동투입)**
14:01:17.555	대티~남포(상,하) 전차선 급전	
14:01:24.685	**남포 C1 ON-ADV**	**RESTART(자동투입)**
14:03:24.600	범내골 C3 CB2361 ON	(사령 조작 투입)
14:03:29.262	범내골 DC GROUND 동작 (NORMAL)	
14:03:29.601	**대티 C3 RET-OFF**	**제2차 아크 발생**
14:03:29.686	양정 DC GROUND 동작 (NORMAL)	제2차 아크
14:03.29.720	**남포 DC GROUND 동작 (NORMAL)**	제2차 아크
14:03.33.882	**남포 DC GROUND 동작 (NORMAL)**	제2차 아크
14:03:36.105	**남포 DC GROUND 동작 (NORMAL)**	제2차 아크
14:03:39.995	범내골 DC GROUND 동작 (NORMAL)	제2차 아크
14:03:43.930	범내골 DC GROUND 동작 (NORMAL)	제2차 아크
14:03:48.114	**대티 C3 ON-ADV**	**RESTART(자동투입)** **제3차 아크 발생**
14:03:48:657	대티~남포 전차선 정전	
14:03:48.718	**남포 C1 RET-OFF**	
14:03:50.858	대티 C3 RET-LINE FAULT	
14:03:50.886	**대티 C3 RET-OFF**	
14:04:08.741	**남포 C1 ON-ADV**	**RESTART(자동투입)**
14:04:09.268	남포 C1 RET-LINE FAULT	
14:04:09.321	**남포 C1 RET-OFF**	
14:04:44.673	범내골 C3 ON-ADV	(사령 조작 투입)
14:04:57.935	범내골 C3 ADV	
14:05:03.122	범내골~양정(상,하) 전차선 급전	
14:05:15.382	양정 C3 ON-ADV	(사령 조작 투입)
14:05:35.103	양정~동래(상,하) 전차선 급전	
14:05:49.561	동래 C3 ON-ADV	(사령 조작 투입)
14:05:59.745	대티 FIRE 동작	
14:06:38.135	범내골 C2 ON-ADV	(사령 조작 투입)
14:07:00.890	양정 C1 ON-ADV	(사령 조작 투입)

[표15] 대티~동래변전소 간 급전·단전사항 (주요발췌)

1.10 기상정보

사고 당시(2012.08.27.14:00경), 부산지방에는 태풍(볼라벤)의 북상으로 13시에 태풍주의보가 발령된 상태였으나 기록된 풍속은 4.8m/sec 정도이며, 16시에 태풍경보가 발령될 예정이었다.

기상대의 부산지역 기상기록은 기온 30.5℃, 습도57%, 강수량은 없었고, 풍속은 4.8m/s 로시정은 양호한 것으로 기록되었다. [표16]과 같다.

구분	기온(℃)	습도(%)	강수량(㎜)	풍속(m/s)	시정상태	관측일시
부산지역	30.5	57	0	4.8	양호	2012.08.27. 14:00

[표16] 기상청 부산지역 상세 관측자료 요약

2. 분석(Analysis)

2.1 사고관련 이벤트(열차운행, CCTV, 급단전)기록 발생시간 분석

사고전동차운행기록, 사고현장 CCTV기록, 변전소 급전·단전기록이 상호 관련된 것으로서 이벤트별 표시 시각의 오차로 인해 표준시간대(전력관제기록)로 동기화하였다.

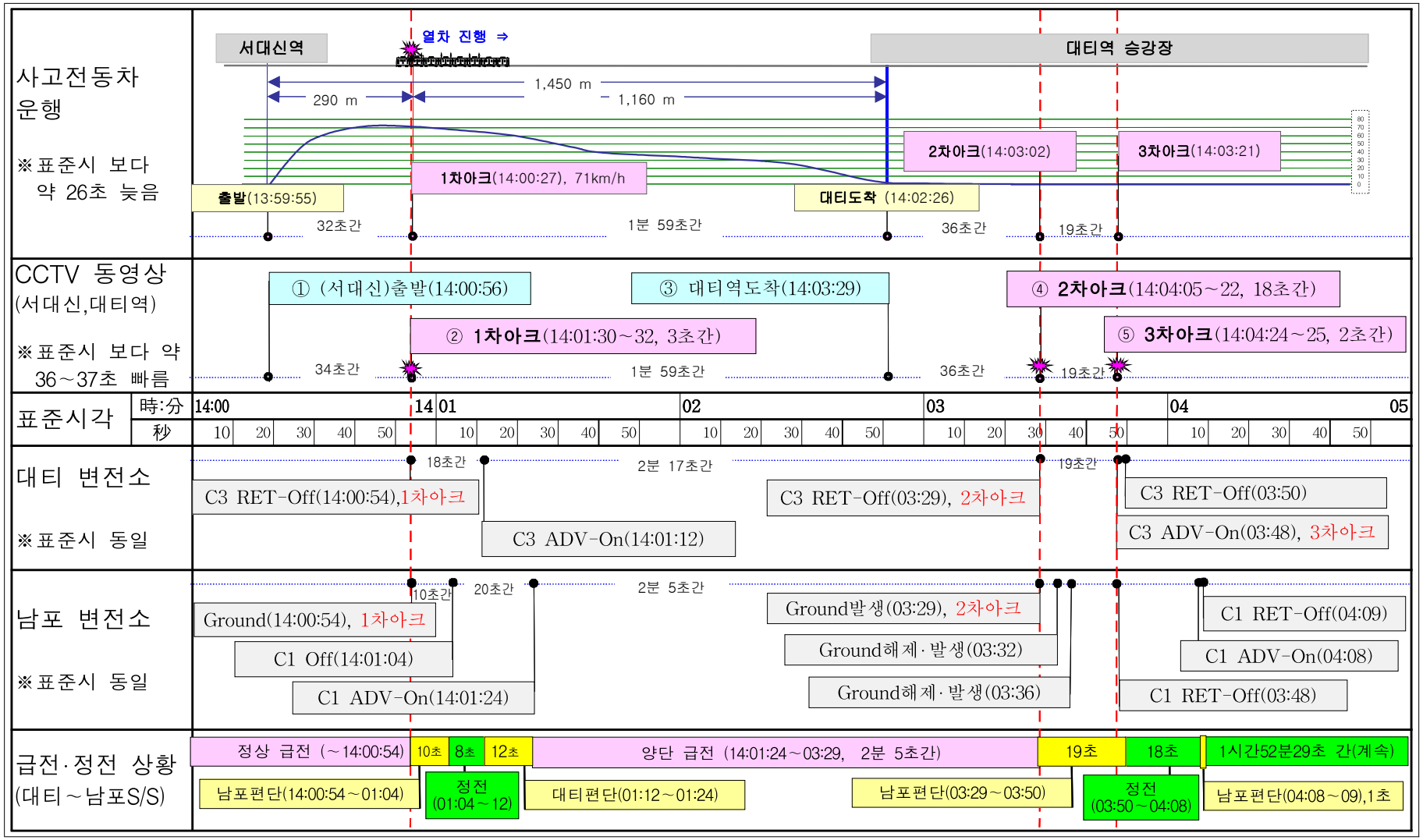
사고전동차 운행기록에는 서대신역 출발(13:59:55), 제1차 아크발생(14:00:27), 대티역 도착(14:02:26), 제2차 아크발생(14:03:02) 및 제3차 아크발생(14:03:21) 시각이 기준시간(전력관제기록)보다 약 26초 늦게 나타나고,

CCTV기록에는 사고전동차 서대신 출발(14:00:56), 제1차 아크(14:01:30), 대티역 도착(14:03:29), 제2차 아크(14:04:05) 및 제3차 아크(14:04:24) 순서로 발생되었으며 기준 시보다 약 36~37초 빠르게 나타났다.

사고전동차가 서대신역을 출발(14:00:22)부터 제1차 아크(14:00:54)까지 시간차는 34초로 간격이 있으나 운행기록의 32초 간격으로 동기화하였고, 제1차 아크 발생부터 대티역도착(14:02:53)까지 시간차는 1분 59초, 대티역 도착부터 2차 아크(14:03:29)까지 시간차는 36초, 2차 아크부터 3차 아크(14:03:48)까지 시간차는 19초 간격이다. 이 시간들을 GPS기준으로 동기화하면 이벤트기록은 일치되는 것으로 분석된다. [표17] 및 [그림33]과 같이 정리되었다.

주요이벤트	동기화시간	열차운행기록	대티역 CCTV기록	대티변전소	남포변전소
서대신 출발	14:00:22	13:59:55	14:00:56		
(시간간격)	32초	32초	34초		
제1차 아크	14:00:54	14:00:27	14:01:30	14:00:54	14:00:54
(시간간격)	1분 59초	1분 59초	1분 59초		
대티역 도착	14:02:53	14:02:26	14:03:29	(2분 35초)	(2분 35초)
(시간간격)	36초	36초	36초		
제2차 아크	14:03:29	14:03:02	14:04:05	14:03:29	14:03:29
(시간간격)	19초	19초	19초	19초	
제3차 아크	14:03:48	14:03:21	14:04:24	14:03:48	
(시간간격)	7분 25초		7분 25초		
불꽃화재	14:11:13		14:11:49 ~13:35		

[표17] 사고 주요 이벤트 표준시간 동기화



[그림33] 사고 이벤트별 시간대 비교 (표준시간 동기화)

2.2 제1차 아크 발생 상황 분석

사고전동차의 열차운행기록에는 서대신역 출발(13:59:55) 후 속도가 점점 상승되어 약 32초 경과된 14:00:27경, 속도 71㎞/h일 때 아크(14:00:27~29, 3초간) 발생되었으며, 출발 후 역행(力行)을 계속하여 전력 소요량이 거의 최대일 때 아크 발생된 것으로 분석된다.

변전소 급·단전기록에는 대티변전소는 아크발생 즉시 콘버터 작동(C3-Off, 14:00:54경)되어 전차선 전기공급이 즉시 차단되었으나, 남포변전소에서는 10초 후 차단(14:01:04)되었고, 서대신~대티역 사이 전차선에는 남포변전소의 편단급전으로 아크 발생 후 10초 동안 전기공급이 지속되었다.

제1차 아크 시 사고전동차는 2·4·6호차 저전압계전기(LVR) 및 3·5·7호차 보조전원장치(SIV)가 작동되고 주회로의 회로차단기(LB5)가 동시 차단되었는데, 이는 전차선전기가 편단급전으로 인한 900V이하 저전압으로 사고전동차의 저전압계전기 및 보조전원장치 등이 작동(Off)된 것으로 분석된다.

제1차 아크 발생 10초 후(14:01:04경), 남포변전소 콘버터가 작동(C1-Off)되어 이 구간의 전차선 전기공급이 차단되었고 사고전동차는 역행(力行) POWER가 없어져 속도 관성에 의해 타력으로 전환(14:00:39경)되어 운행되었고, 이때 열차속도는 68㎞/h였다.

그리고 사고전동차의 출입문연동계전기(DIR: Door Interlock Relay)가 작동되었는데(14:00:39경), 이는 제1차 아크 발생으로 2호차 지붕 철판이 천공될 때 차체내부의 제어전선들이 녹아 회로를 손상시킨데 따른 것으로 분석된다.

아크 발생 이벤트 작동순서는 ① 사고전동차 아크발생 ⇒ ② 변전소 콘버터 급·단전 작동 ⇒ ③ 서대신~대티역 사이 전차선 전기공급 중단(편단급전·정전) ⇒ ④ 사고전동차의 전기계통 보호장치 작동 또는 그 영향이 나타났다. 사고이벤트는 ①~④의 순서로 발생되지만 표시시간은 거의 같은 시간대로 본다.

2.3 제2차 아크 발생 상황 분석

사고전동차가 대티역 승강장에서 승객들이 대피하던 14:03:29경, 제2차 아크가 2호차 지붕에서 발생됨에 따라 사고전동차 5·7호차 보조전원장치(SIV) 정지 및 2·4·6호차 저전압계전기(LVR) 작동 등이 있었다.

이와 동일 시간, 대티변전소의 콘버터가 작동(C3-Off, 14:03:29)되어 전기공급이 다시 차단되었고, 남포변전소에서는 전차선 측 접지(DC Ground)로 3회 반복적으로 작동(C1-Off-On 14:03:29~14:03:36)되면서 전차선전기는 다시 편단 급전되었다.

위와 같이 사고전동차 보조전원장치 등 기기가 작동되고, 대티 및 남포변전소의 콘버터가 각각 전원 차단·공급은 아크에 의해 발생된 과전류 유입을 차단하는 등 기기보호 기능을 위해 자동으로 작동된 것으로

아크 제1차 및 제2차 상황을 볼 때, 사고전동차에서 보조전원장치 각종계전기 작동이 1차와 2차 아크 때의 보호 작동 패턴이 동일하고, 대티 및 남포변전소의 컨버터 작동 패턴도 1차와 2차 아크 때 동일한 것으로 분석된다.

제1차 아크의 규모는 제2차 아크 지속 시간과 크기는 다르지만, 사고전동차 지붕에서 같은 유형으로 발생된 아크, 즉 절연파괴로 인한 아크로 분석되었다.

2차 및 3차 아크가 발생 지속되면서 주변의 금속물질을 녹여 지붕철판 구멍이 나고 팬터그래프 지지애자를 녹이고 화재로 연결된 것으로 분석되었다.

2.4 제3차 아크 발생 상황 분석

3차 아크(14:03:48～03:50)발생 상황은, 대티변전소 콘버터가 투입(C3-On,14:03:48)되었다가 차단(C3-Off 14:03:50)될 때까지 2초간 비교적 약한 아크로서, 제1차 및 제2차 아크로 이미 케이블 절연체가 손상된 상태에서 비교적 아크는 미미한 것으로 분석되었다.

2.5 사고전동차 지붕 아크-화재 흔적들 분석

2호차 지붕에는 후부 팬터그래프와 가까운 1,500V 고압케이블 루트에서 제1차 아크 발생 시 철판이 뚫렸으며, 동일 지점에서 아크가 반복되면서 구멍이 100㎜ 이상 확장되었고, 아크는 대단히 밝은 빛과 금속을 녹이는 고온이 발생되었다.

고압케이블(150㎟× 1C, 38㎟× 1C) 전선관 표면은 갈라지거나 훼손되었으며 아크열이 전도되어 표면이 손상된 것으로 분석된다.

제어전선 손상은 지붕철판 사이로 고압케이블 루트와 동일란 루트로서 철판이 아크로 천공될 때 함께 녹은 것으로서, 출입문연동계전기(DIR: Door Interlock Relay)가 작동 중지된(off) 시점이 제1차 아크발생 후 손상된 기록을 보면 제1차 아크 시 제어전선이 손상된 것으로 분석된다.

팬터그래프는 서대신역에서 출발할 때 모두 올린 상태로 출발하였으나, 대티역 승강장에 진입할 때 2호차 후부 팬터그래프가 내려진 상태로 진입된 것은 1차 아크로 인해 후부 팬터그래프 압상용 공기배관 소손에 따른 것으로 분석된다.

대티역에서 반복된 아크로 인해 지지애자 및 크로스 파이프, 복원 스프링, 가이드 혼 등이 지속적인 아크로 불똥이 튀고 고온의 열전도에 의해 물질이 녹거나 훼손되었고, 2호차 지붕에 도포된 도막제와 1호차 및 2호차 간 연결 주름막은 지붕철판이 고온으로 달궈져 불꽃화재로 발전되면서 연결 주름막까지 화재가 옮겨진 것으로 분석된다.

2.6 주퓨즈 및 보조퓨즈 작동상태 분석

사고전동차 2호차의 주휴즈는 통전용량 500A-3개(병렬)로 연결되어 있으며 내부소자(element)가 끊어지지는 않았다. 퓨즈의 기능은 사고전류 또는 대전류가 흐를 때 용단되어 2차 측 기기들을 보호하기 위한 것으로서

사고 이후 주퓨즈 및 보조퓨즈 내부소자(element) 저항 값이 428~429μΩ로 측정되고 전기적으로 용단되지 않은 것으로 보아 퓨즈 2차 측에는 아크의 원인과 관련이 없는 것으로 확인되었다.

또한 차량 내부의 고압기기들이 손상이 없었던 점을 보면, 아크 시 발생된 사고전류가 차량의 내부로 유입되지 않았던 것으로 확인되며

주퓨즈함 1차 측의 고압케이블 비닐튜브 훼손과 주퓨즈 원통이 변색된 것을 본다면 아크로 인해 수백℃ 이상의 고열이 케이블을 통해 전도되어 열에 의한 훼손 및 변색된 것으로 추정되며, 퓨즈 기능에는 문제가 없었던 것으로 분석된다.]

2.7 서대신~대티역 터널 선로에서 발견된 부품관련 분석

서대신~대티역 사이 터널에서 발견된 팬터그래프 벨로우즈, 케이블 단말부, 팬터그래프 프레임 등 3개소에서 발견된 부품들은 사고전동차의 부품은 아니며 이번 아크사고와 관련이 없는 것으로 분석되었다.

2.8 기관사 운전업무 적정성 분석

사고전동차는 자동 운전모드로 운전되어 기관사는 운전실의 출발버튼을 작동하면 열차가 출발하여 다음 정차역승강장 위치에 자동으로 정지된다.

기관사는 사고전동차가 제1차 아크 발생된 후 전동차 출력이 감소되어 타력으로 대티역 승강장까지 운전하였고, 객차 승객으로부터 인터폰으로 화재가 났다는 신고가 있어 차내 방송 실시 및 운행관제에 열차무선전화 보고 등 조치도 취하였다.

기관사는 대티역 승강장에서 아크 및 화재상황이 발생되어 운행관제에 여러 번 호출 및 지시를 받아 실행하였고, 잔류승객이 없는지도 확인하며 대피하였다.

화재 진압된 후에 사고전동차를 차량기지로 이동하는 등 운전업무를 성실하게 실행한 것으로 분석되었다.

2.9 운행관제 업무 적정성 분석

운행관제사는 1호선 3명과 운행관제부장, 관제과장 총 5명이 근무하던 13:48경, 운행관제사는 사고당일 13:00에 부산지방에 태풍주의보가 발령되고, 16:00부로 태풍경보로 격상될 예정 상황을 전체 열차 기관사에게 통보하여 안전 운행하도록 한 것은 적절하였으나

14:01경, 서대신~대티역 사이 기관사로부터 "전차선에서 스파크 튀면서... 지금 다시 올라왔습니다." 라고 최초 상황보고를 받으면서 "일단 알겠습니다. 지금 복구됐지요." 라고 대답하고 별도지시나 조치는 하지 않았다.

운행관제사는 전력관제사로부터 남포~범내골 사이 전차선 편단급전 중이라는 통보받았고, 관제실 열차운행상황판에 정전표시가 있었으나, 이 구간에 운행되는 기관사들에게 최근 역에 정차하라는 무선전화 지시에만 집중하였고

기관사로부터 제2차 아크-화재 상황을 보고하기 위한 무선전화 호출을 여러 번 받은 후 '화재발생'을 알게 되어 이미 사고는 확대된 상황이었다.

운행관제사가 기관사의 제1차 아크 상황 보고를 받는 즉시 '대티역에 도착 즉시 팬터그래프 하강하고 확인하도록 하는 조치나 지시'가 있었다면 제2차 아크 사고 이후의 사고를 방지할 수 있었을 것으로 분석된다.

그러나, 사고이후 인명피해를 줄이기 위하여 사고전동차 승객 및 하행 전동차 승객대피 및 기관사에게 비상조치하고 대피하도록 지시하는 등 사고 이후 관제업무는 적절했던 것으로 분석되었다.

2.10 전력관제 업무 적정성 분석

전력관제사는 기술부장 하부(전력・기계설비・신호・통신)에 조직되어, 사고당일 C조가 근무하던 중, 1호선 전력관제 상황판에 사고이벤트가 처음 표출되면서 사고복구가 완료될 때까지 2호선을 담당하는 전력관제사 B가 총괄하여 대처하였다.

전력관제 업무는 평소 전차선에 전기를 이상 없이 공급하여 전동차가 운행하는데 지장 없도록 하는데 있고, 전차선로 장애나 이례사항 발생 시 상황을 신속 정확하게 판단하여 사고원인을 제거하므로 피해를 최소화하는 업무도 중요하며, 전문지식과 경험, 판단력 등을 두루 갖추어 전력관제업무를 하여야 한다.

사고전동차가 서대신~대티역 사이에서 제1차 아크발생 즉시 고장전류의 유입으로 거의 전 변전소 컨버터에 설정된 대로 자동 작동(Off 및 On)되어 전차선의 편단급전 또는 정전 시간대가 구간별로 달랐다.

전력관제는 사고전동차의 제1차 아크 발생에 대한 정보 전달이 없는 상황에서 구간별 전차선전기 공급을 위해 범내골, 양정, 동래변전소 콘버터 원격조작을 실시하여 전차선 전기 공급을 실시하였으며

전력관제는 서대신~대티 사이 운행 중인 사고전동차에서 발생된 제1차 아크를 제대로 파악하지 못하는 상황이었으나, 제2차 아크가 발생된 약 2분 35초 동안 시스템에 의한 구간별 급·단전이 자동으로 이루어졌고, 운행관제의 통보 및 상호 정보협조가 제대로 이루어지지 않았던 것으로 분석되었고

남포변전소에 직류 접지계전기 기능해제(2012.8.8)로 인해 이 구간의 지락(地絡)사고 발생 시 변전소의 보호 차단이 늦어진다는 것을 신속히 판단하지 못한 것으로 분석되었다.

2.11 대티역 역무업무 적정성 분석

대티역은 총 9명이 3조 2교대 근무체제로 사고당시 3명의 직원이 근무하고 있었다. 사고당일 역무실에 2명, 1명은 대합실에서 태풍대비 모래주머니를 설치하고 있었다.

대티역사는 지하 5층에 승강장이 있으며, 승객들은 지하 2층 대합실에서 지하 5층 승강장까지 2대의 에스컬레이터를 통해 이동하게 되며, 장애인용 엘리베이터와 피난계단이 1개소 설치되었으나, 일반승객은 이용하지 않는다.

사고당시 대티역 직원들은 역 고객센터의 CCTV로 사고발생을 인지한 즉시 확인하고 119신고 및 관계처 보고, 그리고 비상제연설비 작동, 소화기를 들고 화재현장으로 출동 등 분담하여 행동하였으나 화재진압을 하기에는 역부족이었다.

대티역 직원들은 승객들을 안전하고 신속하게 역사 바깥으로 유도하기 위해 비상출입문을 개방하였고, 노인을 업고 대피하는 청년을 교대하여 노인을 대피하도록 하는 등 근무인원은 적었으나 직원들의 대응은 최선을 다해 신속하게 대응하여 중상자 발생이 없이 인적피해가 비교적 적었던 것으로 분석되었다.

2.12 사고전동차 편성 및 검수사항 적정성 분석

사고전동차는 1988년 2월 28일 구 현대정공(주)에서 제작된 6량으로 운영하던 중, 1997년 8월 5일부터 8량으로 증차하면서 동력차 6량(1131~1831)을 추가하고 제어차 2량(1031호, 1931호)은 계속 사용되고 있었다.

부산교통공사 전동차검수규정(제정 2006.1.1 규정35호, 개정2012.4,27. 규정334호)에는 차량의 정기검수를 일상검수 및 월상, 중간, 전반검수로 구분하고 있으며

동 규정에는 팬터그래프, 주단로기 스위치함 등 전기회로 관련 39개 항목에 대해 구체적으로 명시하고 있으나 케이블의 절연피복 상태를 점검하는 항목은 없었으며, 주기적으로 시행된 월상검수(2012.08.09) 및 중간검수(2011.01.20)에서도 지붕고압 케이블의 절연체 정밀점검 기록이나 특이사항은 없었으며, 지붕 고압케이블의 절연체는 전동차 제작 후 정밀점검은 없었던 것으로 분석된다.

2.13 변전소 급전·단전시스템의 적정성 분석

일반적으로 지하철의 변전소는 전차선로에 고전압 대전류의 전동열차 이동 부하전류가 수시로 변동되는 선로로서, 전동차 또는 전차선로 측 지락(地絡) 등 원인에 의한 고장발생 시 변전소의 고속도 차단기에서 자동 차단하여 과전류·과전압을 차단하여 2차 사고를 방지하고 있다.

부산1호선 변전소는 급·단전 기능이 포함된 사이리스터 콘버터가 설치되어 있으며, 고속도 차단기는 설치되지 않았다. 이 사이리스터 콘버터 시스템은 [표18] ①~③에 해당되는 세 가지 사항 중 어느 하나에 해당되는 장애가 발생할 경우

콘버터 기능이 자동 차단(RETARD)되어 전기 공급을 중단하고 → 3초 경과된 후 자동 투입(ADVANCE) → 장애지속 시 선로장애(LINE FAULT)로 진전되어 전기 공급이 차단(RETARD)되도록 조정 및 운영되다가 사고 이후(2012.9.3) 자동재투입 기능은 해제하였다.

사고당시, 사고전동차에서 아크발생이 시작되자 대티변전소의 콘버터 작동은 즉시 자동 차단(RETARD)되었다가 약 19~20초(14:00:54~01:12, 14:03:29~03:48) 후 재투입(ADVANCE)되었고, 남포변전소의 콘버터는 즉시 작동하지 못하고 10초 후 자동 차단(RETARD)되었다가 약 12초 후 자동 투입(ADVANCE)되었다.

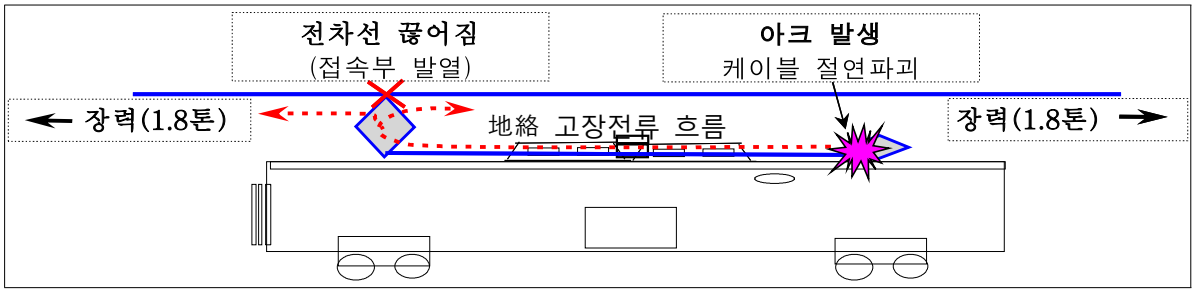
이는 2012년 8월 8일(수) 16:42경부터 남포변전소의 접지계전기 기능을 해제한 것으로 인해, 제1차 아크가 발생될 때 기능이 제대로 작동되지 못하고, 이 구간 전차선에 남포변전소의 전기를 편단급전으로 공급하는 결과가 되었다.

이와 같이 변전소 마다 콘버터의 자동 차단(RETARD) 및 투입(ADVANCE) 기능 시간조정이 각각 다르게 나타났으며, 결과적으로 전차선로의 지락(地絡)사고에 대응하여 전기를 즉시 차단하는 기능을 제대로 하지 못한 것으로 분석되었다.

2.14 전차선 단선 상황 분석

전차선이 단선된 위치는 [그림34]와 같이 2호차 앞쪽 팬터그래프와 접촉된 부분이며, 사고전동차가 서대신~대티역 사이 제1차 아크 당시 2호차 뒤쪽 팬터그래프는 공기관 소손(燒損)으로 내려진 상태로 대티역에 진입하여 2호차는 앞쪽 팬터그래프만 올린 상태에서

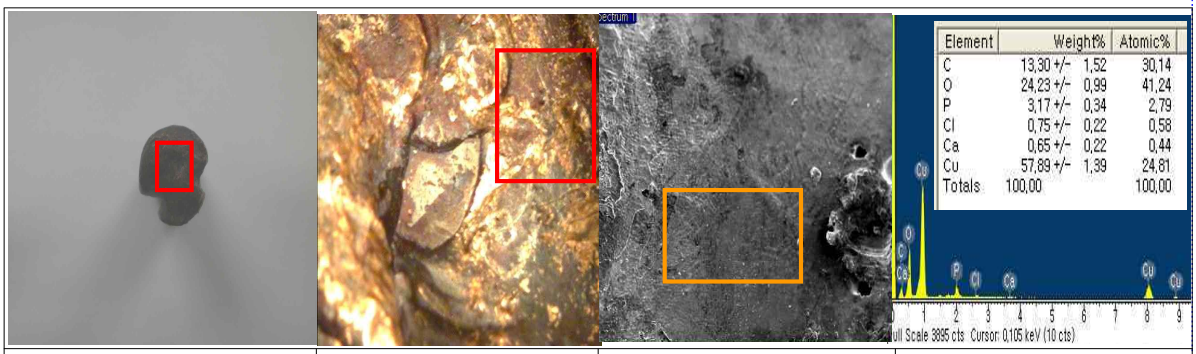
제2차 아크발생으로 약 4,000A 이상으로 추정되는 지락(地絡) 고장전류가 변전소로 유입되면서 팬터그래프와 접촉된 전차선이 불완전 접촉 발열(發熱)로 연화(軟化)된 상태에서 양단의 장력(1.8톤)에 의해 쉽게 단선된 것으로 분석되었다.



[그림34] 대티역 전차선 단선 상황도

◇ 전차선 단선부분에 대한 물질성분 분석결과 ◇

위원회 분석실에서 실체현미경 관찰결과, 강제적 절단 및 피로 흔적은 없었으며 용융흔적(동재질용융점 약1084℃)이 관찰됨. 전차선 성분은 Cu이며 채취된 시료는 P, Ca, Cl이 추가로 검출되어 아크당시 주변 물질과 용융 혼합된 것으로 분석.



a) 전차선 용단부	b) 실체현미경사진	c) 성분분석 영역	d) 성분분석결과

[그림35] 전차선 단선부분의 물질성분 분석결과

2.15 2호차 화재잔해 물질성분 분석

2.15.1 천공부분 고압케이블 고정 볼트 성분분석

천공부분의 고압케이블 전선관 고정볼트의 성분분석결과, 실체현미경 관찰로 약 1400℃이상 Fe계열 용융 현상이 관찰되었으며, 고정 볼트 원재료 성분은 Fe, Cr, Ni, Mn이며, 화재현장 시료의 성분분석 결과 추가로 Si, P, Ca, Cu가 검출되었으며, 아크 발생 당시 주변의 물질들이 용융되어 혼합된 것으로 분석되었다.

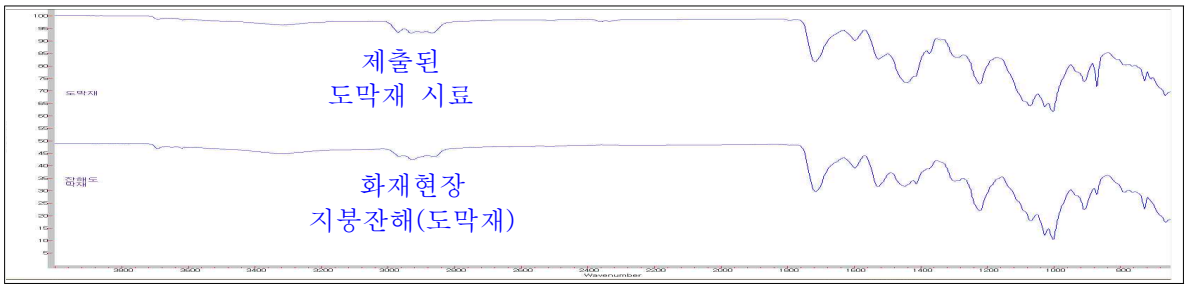
2.15.2 천공부분 제어전선 성분분석

천공부분의 제어전선 분석 결과, 전선의 물질성분은 Cu이며 전선 피복성분은 Mg, Cl, Ca, P 등이다. 화재현장 시료 성분분석 결과, 동일한 성분들이 검출되었

으며 외부 피복과 내부 전선이 아크발생 시 약 400℃~900℃에서 용융이 진행된 것으로 분석되었다.

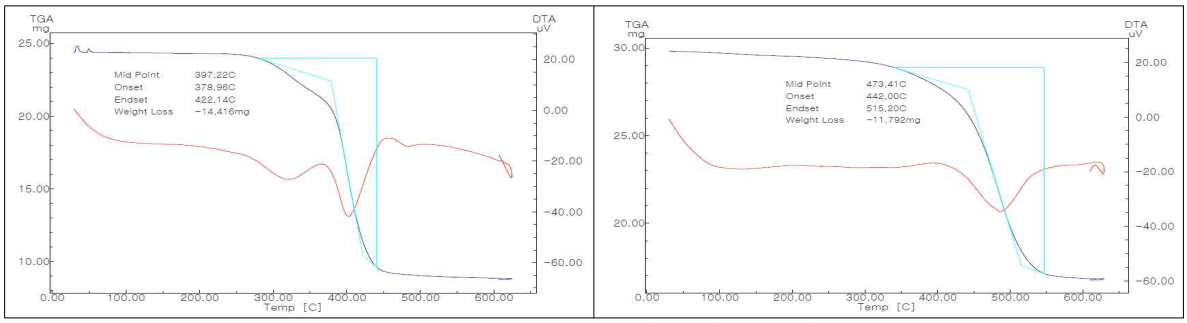
2.15.3 화재지붕 도막재 성분분석

도막재(시료) 성분분석 결과, 앞면은 C, O, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, Fe, Cu가, 뒷면은 C, O, Al, Si, P, Cl, Ca, Ti, Fe, Cu가 검출되었고, 2호차 화재현장 잔해 성분분석 결과, C, O, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ca, Ti, Cu가 검출되었으며, 화재현장 잔해를 적외선 분광(FT-IR) 비교분석 결과, [그림36]과 같이 동일재질로 분석되었다.



[그림36] 도막재 시료 및 화재지붕 잔해(도막재) 적외선 분광(FT-IR)시험

도막재(시료)의 열분석시험[5]결과 [그림37]과 같으며 질량변화 시작점(발화점)은 277℃, 질량손실(소화점)은 422℃로 나타났으며, 화재잔해의 질량변화 시작점(발화점)은 349℃로, 질량손실(소화점)은 515℃로 나타났고



[그림37] (좌)도막재 시료, (우) 화재잔해 열 분석결과

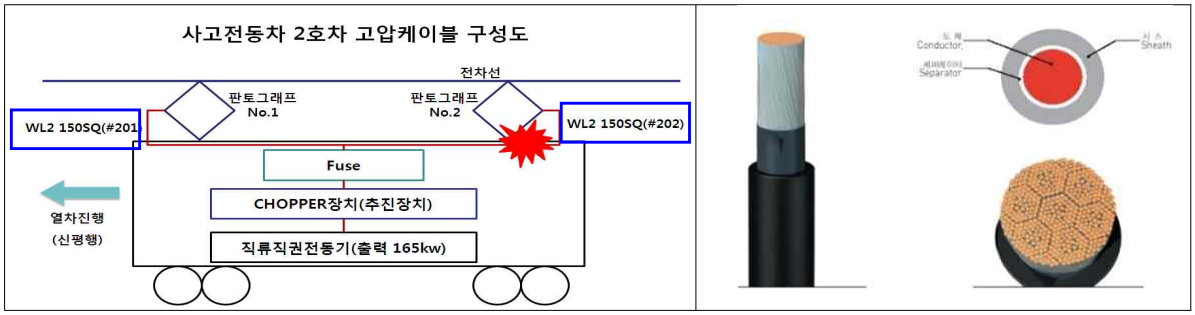
화재당시 2호차 지붕은 약 277℃에서 도막재가 발화되어 불꽃 화재로 발화되어 422℃정도에서 연소가 종료된 것으로 분석되었다.

---

5) **열분석시험** : 시료에 온도변화 프로그램을 가하여 시료의 질량변화를 시간이나 온도의 함수로써 측정하며, 재료의 질량손실은 증발이나 가스 상 산물을 생성하는 화학반응에 의해 발생은 상온 25℃에서 시작하여 분당 5℃상승한다. 질량변화의 시작점(발화점)과 질량손실 종료점을 알아낸다.

2.16 케이블(WL2-150㎟) 전기적(KSC 3004) 시험

사고전동차 2호차의 손상이 적은 고압케이블(WL2 150㎟- 2점)에 대하여 제작 당시 규격시험(KSC 3004)을 [그림38]과 같이 퓨즈함을 중심으로 앞쪽 케이블은 시료#201로, 뒤쪽 케이블을 시료#202로 하여 ○○전선(주)에서 실시하였다.



[그림38] 사고전동차 2호차 고압케이블(WL2 150㎟) 구성 및 케이블 단면

시험결과, [표18]과 같이 시료#201은 케이블 절연체가 갈라지고 손상이 있어 전기적시험은 불가했고, 피복 특성인 인장강도, 신장율, 난연성시험 등은 기준치에 이상 없었으나, 피복절연 편심시료 3개 중 1개 편심율이 20%이상으로 심하게 나타났고

시험 종류	단위	규격 기준	시험 결과		비고
			시료 #201호	시료 #202호	
1. 구조 (절연체 편심율)		시료 ① 시료 ② 시료 ③	3.44~4.32(20.37%) 3.60~4.33(3.89%) 4.03~4.15(2.89%)	2.93~4.80(38.96%) 3.94~4.11(4.14%) 4.09~4.14(1.21%)	결함
2. 전기적 시험					
①내전압시험	kV/분	7.0kV/1분간 견딜것	(절연체 파괴상태) 시험불가	견딤	
②절연 저항	MΩ-km	20℃ 50 이상	- " -	137	
③표면누설저항	MΩ	7,000 이상	- " -	515	
3. 피복 특성					
①상온 인장강도	kgf/㎟	1.0 이상	2.0	1.8	
②신장율	%	350 이상	559	571	
③난연성		5초 내 자연소멸	1초	1초	

[표18] 고압케이블(WL2 150㎟ - 2점) 시험결과

시료#202는 케이블의 절연피복이 갈라진 것은 없었으며, 전기적시험인 표면누설저항이 기준치 이하로 나타나고, 피복 특성인 인장강도, 신장율, 난연성 등은 기준치에 이상 없었으나, 피복절연 편심시료 3개 중 1개 편심율이 38% 이상으로 심하게 나타났으며, 시료#201 및 시료#202에서 모두 절연피복의 편심결함이 있는 것으로 확인되었다.

2.17. 고압케이블 절연열화시험

절연열화에 의한 케이블 절연파괴인지 확인하기 위하여 사고전동차(2호차)와 동일조건(제작년도, 운행거리)의 6호차 고압케이블(150㎟ 및 38㎟)의 절연열화시험[6]을 2012.11.19(월) 노포차량사업소에서 실시하였으며

1. 절연저항 측정					
선 번호	규격	시험전압		측정값	결과
501(1위 팬터그래프 - 주퓨즈)	WL2-150㎟	1,000V		865GΩ	양호
501(1위 팬터그래프 - 보조퓨즈)	WL2-38㎟	1,000V		4,000GΩ	양호
501(2위 팬터그래프 - 주퓨즈)	WL2-150㎟	1,000V		865GΩ	양호
2. 절연내력 측정					
선 번호	규격	시험전압			결과
501(1위 팬터그래프 - 주퓨즈)	WL2-150㎟	AC5,000V			양호
501(1위 팬터그래프 - 보조퓨즈)	WL2-38㎟	AC4,500V			양호
501(2위 팬터그래프 - 주퓨즈)	WL2-150㎟	AC5,000V			양호
3. 직류 누설전류 측정					
선 번호	규격	시험전압	누설전류	성극지수	결과
501(1위 팬터그래프 - 주퓨즈)	WL2-150㎟	DC5,000V	0 ㎂	1.81	양호
501(1위 팬터그래프- 보조퓨즈)	WL2-38㎟	DC5,000V	0 ㎂	2.79	양호
501(2위 팬터그래프 - 주퓨즈)	WL2-150㎟	DC5,000V	0 ㎂	1.81	양호
4. 절연저항 측정					
선 번호	규격	시험전압		측정값	결과
501(팬터그래프 - 주퓨즈)	WL2-150㎟	1,000V		2.659TΩ	양호
501(팬터그래프 - 보조퓨즈)	WL2-38㎟	1,000V		2.375YΩ	양호
5. 절연내력 측정					
선 번호	규격	시험전압			결과
501(팬터그래프 - 주퓨즈)	WL2-150㎟	AC5,000V			양호
501(팬터그래프 - 보조퓨즈)	WL2-38㎟	AC4,500V			양호
6. 직류 누설전류 측정					
선 번호	규격	시험전압	누설전류	성극지수	결과
501(팬터그래프 - 주퓨즈)	WL2-150㎟	DC5,000V	0 ㎂	1.65	양호
501(팬터그래프 - 보조퓨즈)	WL2-38㎟	DC5,000V	0 ㎂	2.35	양호

[표19] 절연열화시험 결과(2012. 11. 19. 15:00)

시험결과는 [표19]와 같이 절연저항, 절연내력, 내전압, 직류누설전류, 성극지수가 양호한 것으로 나타나, 전체 고압케이블의 절연열화는 아닌 것으로 확인되었다.

6) 절연열화시험 : 시험항목 및 용어에 대한 설명은 다음과 같다.
① 절연저항 : 절연체에 전압을 가했을 때 절연체가 나타내는 전기저항
② 절연내력 : 절연체에 가해진 전압이 어느 한도를 넘으면 갑자기 대전류가 흘러 절연이 파괴되는데 이때 전압의 한계 값을 이르는 용어
③ 직류누설전류 : 절연물의 내부 또는 표면을 통해서 흐르는 미소 전류
④ 성극지수 : 절연물이 열화(劣化)되면 누설전류값이 증가하는데 전압 인가시간(측정시간)에 따라 누설전류가 얼마나 증가하는지를 나타낸 정량적 데이터

2.18. 케이블 절연파괴 및 아크 발생 종합분석

아크가 2호차 지붕 고압케이블에서 1차 및 2, 3차에 걸쳐 동일한 지점에서 반복하여 발생된 아크 유형 등을 종합할 때, 고정된 고압케이블의 절연체가 파괴되면서 발생된 아크로서, 사고전동차 외부의 이물질 개입은 없었던 것으로 분석되었다.

사고전동차 제작(1997년)시, [그림39]와 같이 고압케이블이 절연피복의 편심이 있는 상태에서 전선관의 곡선부에 삽입되면서 피복이 손상될 가능성이 적지 않았으며

[그림39] 케이블 피복 편심결함 및 전선관 곡선부 설치·수용

사고전동차가 1호선에 운행된 15년 동안 지붕에 설치된 고압케이블이 지상구간에 운행되면서 비, 안개, 눈 등과 동·하절기 기후환경의 악조건에 노출되어 전선관 안에 침투된 수분으로 인해 절연열화(絶緣劣化)가 진행된 것으로 보이며

지하 터널구간 운행 시 팬터그래프와 전차선이 접촉될 때 발생된 도전성(導電性) 미세물질(微細物質) 등 이물질이 침투되어 절연열화(絶緣劣化)가 촉진되다가 사고당시 마침내 절연파괴로 인한 아크가 발생된 것으로 추정할 수 있으며

불꽃화재는 대티역에서 제2차 및 제3차 아크 발생되면서 철판을 녹일 수 있는 고온(약 1,400℃)의 아크열로 인해 지붕 철판온도가 도막재의 발화점(약 277℃) 이상으로 올라가 불꽃화재가 발생된 것으로 분석되었다.

또한, 해외 사례연구결과[7]에는 절연 열화요인과 열화형태는 여러 가지 요인이 중첩·복합적으로 작용되어 진행되는 것으로 보고되고 있으며, 일반 케이블의 수명이 약 30년으로 볼 때 악조건의 가혹한 환경에서의 케이블 수명은 15년 정도로 보고 있다.

7) **케이블수명과 보수관리** : 일본 전기설비학회지 2006년 9월 발행분 인용
열화형태의 대표적으로 '수트리 열화, 차폐(遮蔽)동테이프 파단(破斷), 열(熱) 열열화(熱劣化)' 등이며, 특히 외부로부터 수분이 침투하여 수년 내지 10년 이상 기간 동안에 열화가 발생되는 것으로 보고되었다

3. 결론(Conclusion)

3.1. 조사결과(Finding)

3.1.1 사고전동차 아크 - 화재 상황 조사결과

3.1.1.1 2012년 8월 27일 14:00경, 사고전동차가 자동 운전으로 서대신역을 출발하여 약 32초 경과된 속도 약 71㎞/h일 때, 2호차 지붕 후부 팬터그래프 부근에 설치된 고압케이블에서 제1차 아크(14:00:54)가 약 3초 동안 발생되었다.

3.1.1.2 전차선 전기를 공급하던 대티변전소는 즉시 전기공급이 중단되었으나 남포변전소에서는 약 10초 후 차단되었고, 사고전동차는 부하운전이 정지되어 타력으로 운행되었다

3.1.1.3 사고전동차는 타력으로 대티역에 도착하여 승객들이 내릴 때, 2호차 지붕에서 제2차 및 제3차 아크(14:03:29～03:50)가 발생되면서 주황색계통의 대단히 밝은 빛과 불똥이 차체 지붕과 승강장 주변에 떨어졌다.

3.1.1.4 승객들은 승강장 계단을 통해 역사 바깥으로 대피하였고, 2호차 지붕은 불꽃화재(14:11:49경)로 진전되어 3호차 연결 주름막까지 확산되었고 119소방대원들에 의해 화재가 진화(14:13:35경)되었다.

3.1.1.5 사고당일 부산지방에는 태풍(볼라벤)의 북상으로 13시경 태풍주의보가 발령되었으나, 실제 풍속은 4.8m/s로 기록되었고, 강수량 0, 습도 57%로서, 이 사고가 기상과는 관련이 없었다.

3.1.2 운전・관제・역무분야 조사결과

3.1.2.1 기관사는 사고전동차가 서대신~대티역 사이 운행 중 제1차 아크 발생 사실을 운행관제사에게 무선전화로 보고하였고, 대티역 승강장에 도착한 후 2차~3차 아크 상황을 무선전화로 여러 번 호출 후 보고하였고, 팬터그래프를 내리고 대피하였다가 복구가 완료된 후 사고전동차를 기지로 회송하였다.

3.1.2.2 운행관제사는 서대신~대티역 사이에서 기관사로부터 제1차 아크가 발생 상황을 "전차선에서 스파크 튀었는데 방금 복귀되었다"는 무선전화 보고 받았으나, 일단 알겠다하고 지시나 조치를 하지 않았다.

직후, 전차선 단전구간의 전동열차를 최근 역에 정차하라는 지시만 집중하던 중 기관사로부터 여러 번 호출한 무선전화로 제2차 아크 발생 사실을 알게 되었고 모든 관제사가 들리게 소리쳐 화재발생을 알렸다.

운행관제사는 제1차 아크발생 사실을 최초로 접수한 즉시 기관사에게 대티역에 도착하여 팬터그래프 하강하고 확인하도록 조치하거나, 전력관제사와 신속한 정보교환이 있었다면 제2차 아크 화재사고를 방지할 수도 있었다.

3.1.2.3 전력관제는 제1차 아크발생시 전체 변전소의 시스템이 자동으로 급·단전(Off-On)되어 구간별 전차선의 급전 및 정전상태가 다르게 된 상황에서 범내골, 양정, 동래변전소를 원격 조작하여 단전구간을 최소화하는 노력이 있었으나

사고전동차의 제1차 아크 상황에서 남포변전소 접지계전기 기능의 해제(2012.8.8)로 장애 구간이 드러나지 않은 상태였지만, 남포변전소의 접지계전기 기능 해제 영향을 감안하지 못하고 제1차 아크부터 제2차 아크 발생된 약 2분 35초 동안 장애내용을 제대로 파악하지 못하였다.

사고 발생 시 제2차 사고나 사고확산을 방지하기 위해 관제부서 상호간의 신속한 협조가 필요하나 운행관제 및 전력관제 간의 상호협조가 제대로 이루어지지 않았다.

3.1.2.4 대티역 역무직원은 3명이 근무 중, CCTV로 화재 발생을 인지하고 즉시 관계처 보고 및 승객들을 신속하게 안내하는 등, 사고에 대응하는 적절한 업무를 하였다.

3.1.3 차량설비 조사 결과

3.1.3.1 사고전동차의 2호차 지붕에 설치된 고압케이블(150㎟, 38㎟)이 1차, 2차, 3차 아크로 인한 손상 및 지붕철판이 천공(약 100mm이상 2개소)되었고, 근접된 팬터그래프 지지애자, 공기배관, 지붕 도막재, 2호 - 3호차의 연결 주름막 등 2호차 지붕이 아크 및 화재로 소손(燒損)되었다.

3.1.3.2 사고전동차 지붕의 고압 주퓨즈 및 보조퓨즈는 전기적으로 용단되지 않았으며, 차내 고압회로는 사고와 관계가 없었다.

3.1.3.3 사고전동차는 1988년부터 6량 편성으로 운영하다가 1997년부터 8량 편성하기 위해 동력차 신조(新造) 6량(1131~1831)을 추가 편성 운용하였으며, 차량검수규정은 일상, 월상, 중간, 전반검수로 구분하여 주기적인 검사를 실시하고 있었으나 지붕 고압케이블의 절연피복 정밀점검 항목은 없었으며, 정기검수에서도 고압케이블 절연체 점검은 실시되지 않았다.

3.1.3.4 사고전동차 지붕은 난연성의 폴리우레탄수지 도막재(약 3mm)가 코팅된 경질의 고무 칩으로 미끄럼 방지처리가 되어 있었으며, 아크 당시 2호차 지붕 아크열에 의해 지붕철판이 가열(약 1400℃이상)되어 도막재의 발화점(약 277℃)에서 불꽃화재가 발생된 것으로 분석되었다.

3.1.3.5 고압케이블의 절연열화에 의한 절연파괴인지를 시험하기 위하여 6호차 고압케이블(150㎟ 및 38㎟)의 절연열화시험을 부산교통공사 노포차량사업소에서 실시한 결과, 전체 고압케이블의 절연열화에 의한 절연파괴는 아닌 것으로 조사되었다.

3.1.3.6 사고전동차 2호차 고압케이블(WL2 150㎟) 제작 당시의 규격(KSC3004)으로 시험한 결과, 앞 팬터그래프 쪽(시료 #201)의 절연피복 편심구조가 3개의 시료 중 1개의 편심율이 20% 이상이었고, 뒤 팬터그래프 쪽(시료#202)은 절연피복 편심구조가 3개 시료 중 1개의 편심율이 38% 이상으로 심하게 나타났으며, 고압케이블 절연피복의 편심결함이 있는 것으로 나타났다.

3.1.4 선로・궤도시설 조사 결과

3.1.4.1 부산1호선은 터널높이 및 차량높이가 인천1호선 보다 150㎜ 높지만 서울1호선 보다 350㎜ 낮은 중전철(中電鐵) 규모로 단면적이 비교적 협소한 공간으로, 궤도선로는 지상 및 터널구간 모두 자갈도상으로 건설되었다.

3.1.4.2 제1차 아크 발생된 서대신~대티역 구간의 선로에 떨어진 전동차 부품들(팬터그래프 벨로우즈 및 프레임, 케이블 단말부 등)이 발견되었으나, 사고전동차의 부품은 아니었으며, 사고와는 관련이 없는 것으로 확인되었다.

3.1.5 전기・신호설비 조사 결과

3.1.5.1 서대신역에서 대티역방향 290m지점에서부터 약 81m 구간의 전차선에 사고전동차가 운행하면서 1차 아크 발생된 흔적이 연이어 8개소에서 발견되었다.

3.1.5.2 대티역 승강장에서 제2차 및 제3차 아크발생시 약 4,000A 이상으로 추정되는 지락(地絡) 고장전류에 의해 2호차 앞쪽 팬터그래프와 접촉된 전차선이 발열(發熱)로 연화(軟化)되면서 양단의 전차선 장력(1.8톤)에 의해 끊어졌다.

3.1.5.3 부산1호선 직류 전철변전소는 2.6 ~ 6.7㎞ 간격의 8개소에 설치된 사이리스터 콘버터 정류장치가 급・단전기능을 포함하고 있다. 대티변전소는 사고전동차의 1차 아크 발생 즉시 전기 공급이 차단(Off)되었다가 약 19~20초 후 재공급되었고, 남포변전소는 10초가 경과된 후 차단(Off)되었다가 12초 후 재공급되었다. 변전소의 선로 Feeder 측에 직류 고속도 차단기가 설치되지 않아 선로 측 장애에 대한 급・단전이 즉시 이루어지지 않았다.

3.1.5.4 남포변전소의 접지계전기 기능해제(2012.8.8)로 인해 제1차 아크발생시 지락(地絡)에 의해 즉시 차단(Off)되지 못하고 보호 차단시스템이 제대로 작동되지 못한 결과가 되었다.

3.2. 사고 원인(cause)

3.2.1 **사고의 원인은,** 사고전동차 2호차 지붕 후부 팬터그래프에 접속된 고압케이블(WL2 150㎟×1C)의 절연피복이 전차선전압을 견디지 못하고 절연파괴 되면서 아크가 발생된 것으로 추정된다.

3.2.2 기여 요인

3.2.2.1 사고전동차 2호차 후부 고압케이블(WL2 150㎟×1C)이 피복편심이 심한 상태에서 전선관에 삽입되면서 미세한 손상이 동반되었고, 운행하면서 가혹한 기후환경(눈, 비, 안개, 팬터그래프 이물질 등)에서 수분 및 불순물이 절연체에 침투되어 절연열화(絶緣劣化)가 진행되어 절연파괴에 이른 것.

3.2.2.2 전동차검수규정에 고압케이블 절연피복의 점검기준이 없었고, 설치 후 15년 동안 지붕의 고압케이블 절연체 상태 등 검수를 하지 않은 것.

3.2.2.3 변전소의 콘버터(정류기)시스템이 전차선로 측 지락사고(地絡事故) 발생 시 해당선로를 즉시 선택 차단하는 급·단전(On~Off)의 보호협조 기능이 제대로 이루어지지 않고 다른 변전소에도 영향을 미친 것.

3.2.2.4 범내골변전소 변압기고장(8월 6일)에 대한 임시조치를 남포변전소의 직류접지계전기 기능을 해제하고(8월 8일) 사고발생 시까지 지속한 것

3.2.2.5 운행관제사가 기관사로부터 아크 발생 최초보고를 무선전화로 받은 상황에서 적절한 지시나 조치를 하지 않은 것

3.2.2.6 운행관제사가 기관사로부터 아크 발생 최초보고를 받고 다른 운행관제사와 전력관제사에게 신속한 통보 및 정보를 공유하지 않은 것

3.2.2.7 전력관제사가 1차 아크 발생부터 2차 아크 발생까지 2분 35초 동안 사고구간을 신속히 파악하지 못한 것

4. 안전권고(Safety Recommendation)

4.1 부산 교통공사에 대하여

4.1.1 전동차검수규정에 지붕 고압케이블에 대한 절연피복 상태 점검기준을 자체적으로 마련하되, 고압케이블이 설치된 환경조건을 고려한 예측수명으로 사용연수를 정하고 이를 시행.

4.1.2 전철변전소의 콘버터(정류장치) 또는 보호차단설비의 각종 계전기가 전차선로측 지락(地絡)고장 시 보호차단이 즉시 이루어지도록 시스템 조정 및 개선.

4.1.3 직류 전철변전소의 전차선로 측에 고속도차단기를 설치하여 각 부하선로(Feeder)의 고장발생 시 즉시 급·단전이 이루어지도록 시설을 개선.

4.1.4 종합관제소의 관제사는 기관사의 무선전화 보고에 대한 즉시 응답 및 안전조치, 이례사항 정보공유, 사고방지를 위한 관제사(운행관제사, 전력관제사 등) 상호 간 협조체계가 원활히 되도록 업무체계 개선방안을 마련하고, 이를 시행.

4.2 전체 전동차 운영기관에 대하여

4.2.1 전동차검수규정에 지붕 고압케이블에 대한 절연피복 상태 점검기준을 자체적으로 마련하되, 고압케이블이 설치된 환경조건을 고려한 예측수명으로 사용연수를 정하고 이를 시행.