

## 궤도 결함에 기인한 국외의 철도사고 분석

### Analysis of Railroad Accidents due to Track Defects in Foreign Countries

임남형\* · 이우철\*\* · 최진유\*\*\*

Lim, Nam-Hyoung · Lee, Woo-Chul · Choi, Jin-Yu

#### Abstract

The railway system is worldwide recognized as a safe mean of transportation. However, railroad accidents and incidents continue to occur. Due to the nature of the railway system that consist of many mechanical parties, it is apparently difficult to eliminate probability of accidents and incidents completely. Therefore, through the analysis of railroad accidents and incidents, it is very important to trace the various factors affecting the accidents and incidents. In this study, we performed the analysis of railroad accidents due to track defects in foreign countries; United States of America, England, Canada, Australia. As a result of its investigation of the accidents, major risk factors are proposed in this study.

**key words** : Railroad Accidents, Risk Factors, Track Defects

#### 요 지

철도시스템은 전세계적으로 가장 안전한 교통수단으로 인식되고 있지만, 사고는 계속 발생되고 있다. 많은 하위부분으로 구성되어 있는 철도시스템의 특성상 사고위험을 완전히 방지하기는 어렵다. 철도사고는 다양한 원인이 복합적으로 작용하여 하나의 사건으로 표출되기 때문에 사고의 근원적 예방을 위해 사고사례의 사고모드를 분석하고, 사고모드에 영향을 미치는 인자들의 상관관계를 역 추적하는 시스템적인 접근은 매우 중요하다. 본 연구에서는 미국, 영국, 캐나다, 오스트레일리아의 국외사고사례분석을 수행하여 주요 위험인자를 도출하였다.

**핵심용어** : 철도사고, 위험인자, 궤도결함

#### 1. 서 론

철도시스템은 전 세계적으로 안전한 교통수단으로 인식되어왔다. 그러나 현재까지도 크고 작은 철도사고는 계속 발생되고 있다. 철도기술의 발전과 오랜 기간의 경험을 바탕으로 안전성 향상을 위한 노력은 계속되고 있지만 많은 부분시스템들의 집합체인 철도 특성상 완전한 사고방지는 어렵다고 할 수 있다.

철도산업은 일반적으로 공공성을 반영하기 때문에 사고의 발생을 최소화 하는 데 목표를 두고 있다. 이를 위해 보다 안전한 설계 및 시공을 위한 비용의 투자와 몇 단계의 안전 진단 및 점검으로 사고의 발생을 방지하고 있다. 하지만 철도사고사례를 살펴보면, 불과 몇 분전에는 이상증후가 보이지 않는 구간에서 갑작스러운 탈선사고가 발생하는 사례를 쉽게 찾아 볼 수 있다. 갑작스러운 탈선사고로 보이지만, 사례분석을 수행해 보면 사건발생 시점에서부터 일정기간 동안의 기

후, 도상작업, 체결력, 도상저항력 등의 궤도요인이 철도시스템에 반영되어 적은 확률일지라도 사고의 위험인자로 내재되고 있음을 알 수 있다. 이는 현재의 기술 및 진단체계만으로는 안전의 유무를 정확하게 판단하기에는 한계가 있으며, 궤도의 영향요인이 철도안전시스템에 보다 더 반영되어야 함을 의미한다. 즉, 사고의 근원적인 예방을 위해서는 시스템적인 접근방법이 이루어져야 한다. 철도사고는 다양한 원인이 복합적으로 작용하여 하나의 사건으로 표출되므로 사고사례의 사고모드를 분석하고, 사고모드에 영향을 미치는 인자들의 상관관계를 역 추적하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 철도사고사례의 사고모드의 분석을 통하여 사고발생에 영향을 주는 주요 위험 요인을 제시하고자 한다. 역사가 그 시대상을 반영하듯 사고사례는 사고발생 전후의 철도시스템의 상황을 잘 반영한다. 사고사례를 통계·분석하고, 이를 활용하여 철도시스템의 안전에 재 반영한다면 철도 운영의 투명성 확보 및 비약적으로 증가되고 있는 열차운행

\*정회원 · 충남대학교 토목·환경공학부 교수 (E-mail: nhrim@cnu.ac.kr)

\*\*충남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*정회원 · 한국철도기술연구원 선임연구원

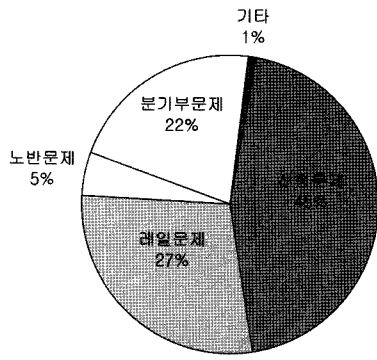


그림 1. 궤도 결합에 의한 탈선사고 원인 분석(미국, 1975-2006)

속도에 따른 철도시스템의 안전성 확보에 큰 기여를 할 수 있으리라 사료된다.

## 2. 탈선관련 사고모드 분석

### 2.1 미국

미국에서 발생하는 탈선관련 사고모드를 분석하기 위하여 1975년부터 2006년까지 발생한 모든 탈선사고(총 103,104건)의 원인을 조사하였다. 탈선사고의 원인을 크게 5가지(인적오류, 신호, 차량, 궤도, 기타)로 구분하여 분석하면 궤도의 결합으로 인한 열차 탈선사고는 전체 103,104건 중 50,658건으로 약 50%정도를 차지하고 있다. 인적오류로 인한 탈선사고 및 차량 자체의 결합으로 인한 탈선사고는 각각 21,716건과 19,527건으로 전체의 21%, 19%를 차지하고 있다.

궤도 결합 요인을 세부 분석하면 크게 5가지(선형문제, 레일문제, 분기부 문제, 노반문제, 기타)로 구분된다.(그림 1) 선형문제로 인한 탈선사고는 50,658건 중 22,717건으로 약 45%를 차지하고 있으며 레일 자체의 결합으로 인한 탈선사고는 약 27%를 차지하고 있다. 또한 분기부의 결합으로 인한 탈선사고는 약 22%를 차지하고 있으며 노반 자체의 결합으로 인한 탈선사고는 약 5%를 차지하고 있다.

선형문제로 인한 열차 탈선사고의 세부 요인을 분석하면 크게 7가지 요인(수평틀림, 레일두부단차, 도상자갈, 캔트, 줄틀림, 궤간확대, 기타)으로 구분된다.(그림 2) 선형문제 중에서 궤간확대, 수평틀림, 줄틀림에 의한 탈선이 약 93%정도를 차지하고 있다. 줄틀림에 의한 탈선사고 중에서 순수한 장대레일의 장출에 의한 탈선사고는 약 65%를 차지하고 있다. 궤도기술의 발전에 따라 장대레일의 장출 사고는 1990년대 들어서 감소하는 추세에 있으나 매년 약 40건 정도의 장출에

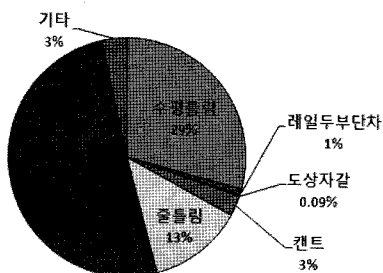


그림 2. 선형문제에 의한 탈선사고 원인 분석(미국, 1975-2006)

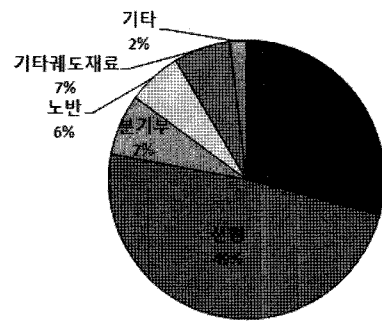


그림 3. 궤도문제에 의한 탈선사고 원인 분석(캐나다, 1990-2005)

의한 탈선사고가 발생되고 있으며 열차가 탈선되지 않는 사고들을 모두 고려한다면 상당수의 장출 사고가 발생되고 있다.

### 2.2 캐나다

캐나다에서 발생한 탈선관련 사고모드를 분석하기 위하여 1990년부터 2006년까지 발생한 탈선사고(총 8,463건) 중에서 주 본선(Main Track)에서 탈선사고가 발생하여 그 원인이 규명된 2,343건(1990-2005년)을 분석하였다. 탈선 주요인 크게 3가지(궤도, 차량, 기타)로 분류하면 궤도문제에 기인한 탈선사고는 총 2,343건 중 903건으로 약 39%를 차지하고 있으며 차량 자체의 결합에 의한 탈선사고는 약 36%를 차지하고 있다.

궤도문제에 기인한 탈선사고를 세부 분석하면 크게 6가지 요인(레일, 선형, 분기부, 노반, 기타 궤도재료, 기타)으로 구분된다.(그림 3) 선형문제에 기인한 탈선사고는 903건 중 441건으로 약 49%를 차지하고 있으며 레일 자체의 결합으로 인한 탈선사고는 약 29%를 차지하고 있다. 또한 분기부에서의 문제로 인한 탈선사고는 약 7% 정도를 차지하고 있다.

### 2.3 영국

영국에서 발생한 탈선관련 사고모드를 분석하기 위하여 2001년부터 2005년까지 발생한 탈선사고(총 328건)의 원인을 조사하였다. 탈선사고의 원인으로는 크게 3가지(인적오류, 기술적 결합, 기타)로 분류되는데 기술적 결합에 의한 탈선사고는 총 328건 중 148건으로 약 45%를 차지하고 있으며 인

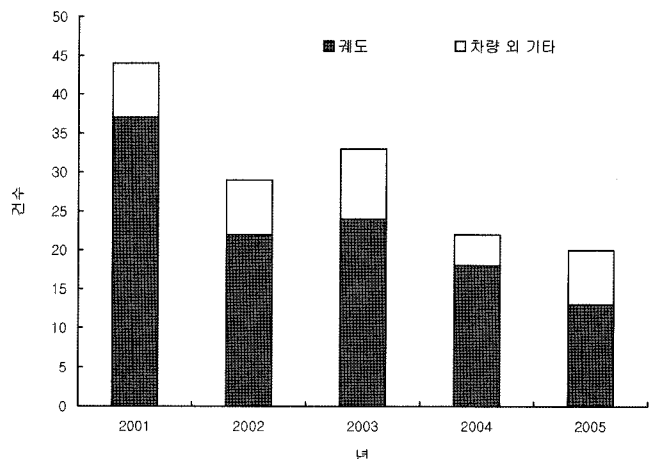


그림 4. 기술적 결합에 따른 사고건수 추이(영국, 2001-2005)

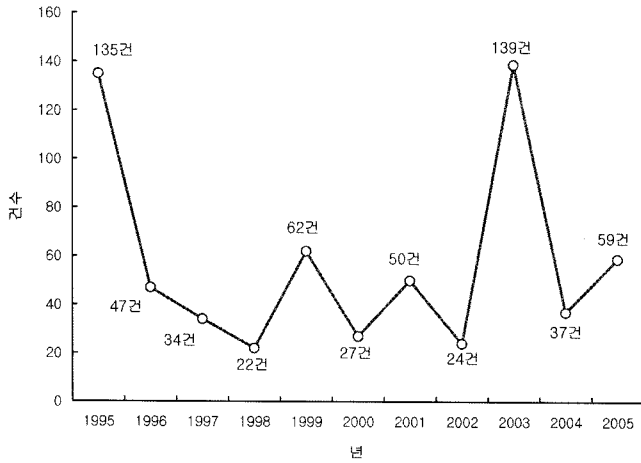


그림 5. 장대레일 장출사고 건수 추이(영국, 1995-2005)

적오류에 의한 탈선사고는 총 328건 중 117건으로 약 36%를 차지하고 있다.

기술적 결함에 의한 탈선사고의 원인을 분류하면 크게 2가지(궤도결함, 차량 자체 결함 외 기타)로 분류된다.(그림 4) 궤도 결함에 의한 탈선사고는 148건 중 114건으로 약 77%를 차지하고 있으며 차량 결함 및 기타 원인에 의한 탈선사고는 148건 중 34건으로 약 23%를 차지하고 있다.

또한 영국에서 1995년부터 2005년까지 발생한 장대레일 장출 건수는 그림 5와 같다. 1996년부터 장출 건수가 현저하게 감소하고 있음을 알 수 있으나 2003년에 139건으로 급상승하였다. 그 이유는 2003년 영국에 폭염 현상이 발생되었기 때문으로 판단된다.

### 3. 궤도결함에 기인한 철도사고 사례 분석

궤도 결함에 기인한 철도사고의 원인을 분류하면 크게 4가지(분기부 구조상 결함, 레일파단, 체결구 결함, 궤도틀림)로 분류된다. 본 논문에서는 미국, 호주, 그리고 영국에서 발생한 궤도틀림과 체결구 결함에 의한 철도사고 중에서 근래에 발생한 대표적인 사고사례를 분석한다.

#### 3.1 궤도틀림

##### 3.1.1 분기부 장대레일 좌굴(장출)

2006. 06. 26일 미국 Amtrak P05871-26 열차가 Louisiana주 Arcola 근처의 주 본선 궤도에 부설된 분기부의 장대레일에 그림 6과 같은 좌굴이 발생되어 급정차하는 사고가 발생되었다.(National Transportation Safety Board, 2006)

[사고 발생 전 궤도상태]

약 38m의 분기기가 사고 발생 약 2개월전에 현장에 부설되었으며 주 본선 레일과 분기선 레일 모두 장대레일화 하였다. 분기기 설치 당시, 레일 온도가 설정온도 이하였으므로 응력해방(De-Stressing) 작업과 같은 재설정 작업이 수행되어야 했으나 분기기 설치 당시에는 수행하지 않았다. 분기기 설치가 완료되고 좌굴사고 발생 전에 2차례(5월)의 줄틀림이 발생되어 선형을 보수하고 분기부 장대레일의 재설정 작업을

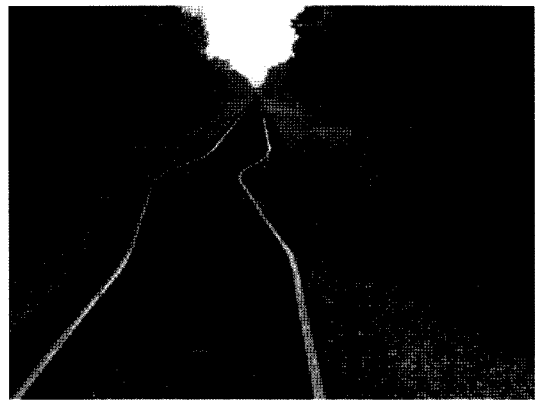


그림 6. 분기부 장대레일 좌굴(미국, 2006-06-26)

시행하였다.

[주 원인]

분기부 장대레일 재설정 작업 상 문제가 발생되어 온도 상승에 의한 과도한 레일 축력이 발생하였다. 또한 줄틀림 발생에 의한 선형을 보수하고 충분한 도상 횡저항력을 확보 못한 것이 주 원인이 되었다.

##### 3.1.2 직선부 장대레일 좌굴(장출)

2002. 07. 29일 미국 워싱턴 시 외곽 10마일 지점에서 Amtrak 급행열차가 곡선부를 통과 후, 직선 궤도에서 좌굴 현상이 목격되어 급제동을 하였으나 객차 13량 중 11량이 탈선되는 사고가 발생되었다.(그림 7) (National Transportation Safety Board, 2002)

[사고 발생 전 궤도상태]

사고 발생 4일 전에 사고 구간의 궤도에 면틀림이 발생되어 Tamping 기계와 Ballast Regulator를 동원하여 양로작업을 시행하고 자갈도상을 인력 다짐하였다. 또한 도상 자갈의 안정화를 위해 속도제한을 실시하였다.

[주 원인]

도상 자갈의 불충분한 다짐으로 인하여 충분한 도상 횡저항력을 확보하지 못하였다.

##### 3.1.3 곡선부 레일의 과도한 줄틀림-1

2003. 11. 28일 호주 2PW4-N 화물열차가 Western Victoria



그림 7. 열차 탈선(미국, 2002-07-29)

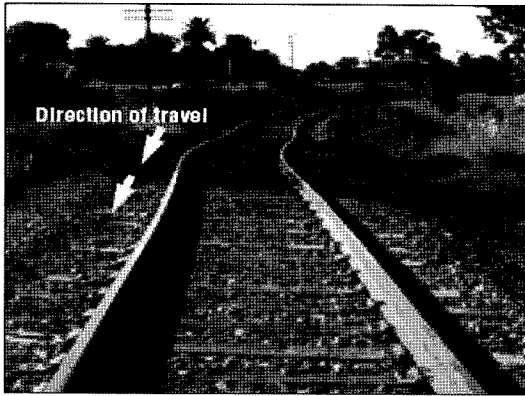


그림 8. 줄뜸림 (호주, 2003-11-28)

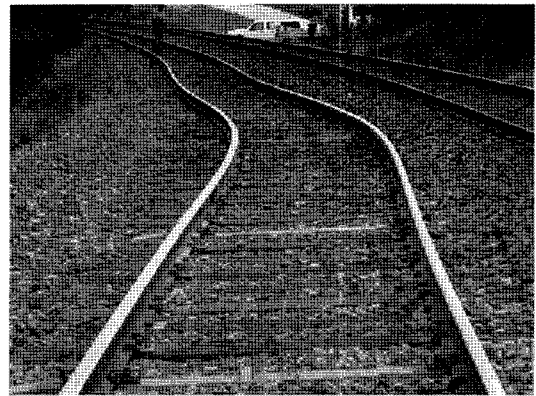


그림 10. 줄뜸림 (호주, 2002-11-19)

Ararat 근방에서 그림 8과 같은 과도한 줄뜸림이 발생되어 화차 2량이 탈선되는 사고가 발생되었다.(Australian Transport Safety Bureau, 2003)

[사고 발생 전 궤도상태]

사고 발생 8일전, 곡선구간에서 캔트 부족과 궤도 평면성 틀림이 보고되어 궤도 작업(Tamping)을 시행하였다.

[주 원인]

8일전에 시행한 Tamping 작업 후, 충분한 도상 횡저항력이 확보되지 못했으며 충분한 도상 횡저항력이 확보되지 않은 상태에서 열차 속도를 제한하지 않았다.

### 3.1.4 곡선부 레일의 과도한 줄뜸림-2

2002. 11. 07일 호주 4Y2 화물열차가 Harden North-Yass Junction 구간 곡선부에서 그림 9와 같은 궤도 줄뜸림으로 인하여 차량 1대가 탈선되는 사고가 발생하였다.(The Office of Rail Safety Investigation, 2002)

[사고 발생 전 궤도상태]

사고발생 1달 전, 대기온도가 0도에서 2.5도인 추운밤에 궤도 선형 작업이 있었으며 레일의 설정온도보다 매우 낮은 온도로 인해 원래 선형으로부터 곡선 반경 중심 쪽으로 약 300mm의 이동이 발생하였다.

[주 원인]

궤도 작업으로 인한 레일 중립온도가 약 5도 정도 감소 된 것으로 평가되었으나 이에 따른 장대레일 재설정 작업을 시행

하지 않았으며 궤도 작업으로 인한 도상 횡저항력이 감소된 상태에서 열차 하중에 의한 과도한 줄뜸림이 발생되었다.

### 3.1.5 곡선부 레일의 과도한 줄뜸림-3

2002. 11. 19일 호주 G9821 화물열차가 Goulburn-Parkes 구간에서 그림 10과 같은 궤도 줄뜸림으로 인하여 화차 5량이 모두 탈선되는 사고가 발생되었다.(The Office of Rail Safety Investigation, 2002)

[사고 발생 전 궤도상태]

동일 개소에서 1994. 1. 26일, 1998. 1. 23일에도 대기온도 34도의 기온에 줄뜸림이 발생되었던 취약개소이며 또한 2002. 10. 15일 궤도 선형 작업이 시행되었다.

[주 원인]

줄뜸림이 자주 발생되었던 취약 개소에 대한 추적 관리가 미흡하였으며 궤도 작업에 의한 충분한 도상 횡저항력을 확보하지 못하였다.

### 3.1.6 평면성 틀림(Twist)

2006. 01. 31일 영국 7090 화물차가 North London Cricklewood 곡선구간을 지나던 중 심각한 궤도의 평면성 틀림으로 인하여 그림 11과 같이 화차 2량이 탈선되는 사고가 발생되었다.(Rail Accident Investigation Branch, 2006)

[사고 발생 전 궤도상태]

10년 전부터 곡선부 안쪽레일의 하단에 위치한 노반 성토

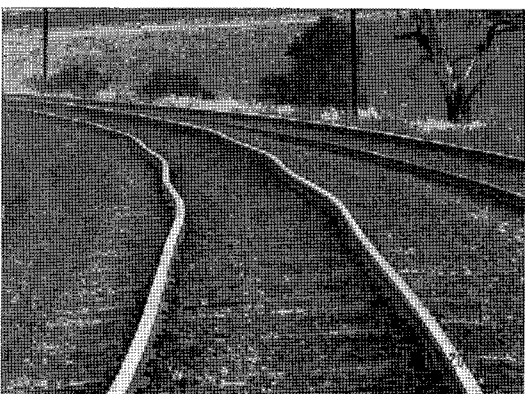


그림 9. 줄뜸림 (호주, 2002-11-07)



그림 11. 평면성 틀림에 의한 탈선(영국, 2006-01-31)

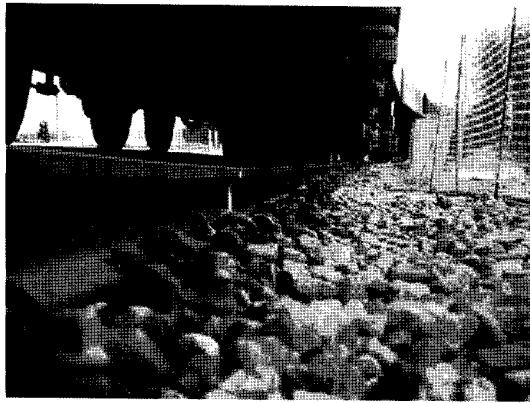


그림 12. 평면성 틀림(영국, 2006-01-31)

체(Embankment)의 일부분에 이동(Slip) 현상이 지속적으로 발생하였으며 이로 인해 곡선부 안쪽 레일이 침하되면서 곡선부의 캔트가 과대해지는 현상이 발생되었다.

[주 원인]

성토체의 부분적 이동 현상으로 인해 캔트가 과대해지는 현상 외에 그림 12와 같은 궤도의 평면성 틀림이 발생되었으나 캔트량 보수 작업을 하면서 평면성 틀림을 간과한 것이 주원인이 되었다.

### 3.1.7 평면 교차로와 도상 저항력

2005. 01. 30일 호주 열차 6SP5가 Booraan 근처의 평면 교차로(Road Level Crossing)에 접근하면서 그림 13과 같은 탈선 사고가 발생되었다.(Australian Transport Safety Bureau, 2005)

[사고 발생 전 궤도상태]

하 구배(Descending Grade)가 존재하는 직선 궤도구간에 설치된 평면 교차로 부근 약 20m 구간에서 사고 발생 8일 전에 미미한 줄틀림을 보정하고 도상 인력다짐작업이 시행되었다.

[주 원인]

사고 발생 8일전에 시행된 보수작업으로 인해 충분한 도상 저항력이 확보되지 못하였으며 탈선이 발생된 구간의 도상 자갈 단면(Ballast Profile)의 어깨 폭이 충분하지 못하였다. 또한 선로에 하 구배와 평면 교차로(레일의 종방향 변위를



그림 13. 열차 탈선(호주, 2005-01-30)

구속하는 조건으로 판단됨)가 존재하여, 주행하는 열차의 제동하중에 의한 장기간에 걸친 궤도 복진현상이 발생되어 큰 압축력이 작용하고 있었던 것으로 판단된다. 이러한 조건에서 레일은도의 상승과 주행하는 열차의 횡하중에 의해 그림 14와 같은 궤도의 과대한 횡방향 이동이 발생되었다.

## 3.2 체결구 결함

### 3.2.1 레일앵커 및 레일교체

2004. 04. 06일 미국 Amtrak No. 58 열차가 Mississippi 주 Flora 근처에서 두개 교량 사이의 제방에 위치한 토노반 구간에서 그림 15와 같이 탈선하는 사고가 발생되었다.(National Transportation Safety Board, 2004)

[사고 발생 전 궤도상태]

단선궤도구간으로 사고구간 양쪽으로 하 구배와 상 구배가 존재하고 있으며 토노반 구간에서는 장대레일과 목침목이 부설되었으며 레일 체결장치로는 스파이크와 레일 앵커가 사용되었다. 인접한 교량 구간에서는 장대레일과 목침목이 부설되었으며 레일 체결장치로는 e-clip 사용되었다.

현장 조사에 의하면 교량 사이의 토노반 구간에서는 레일 앵커의 체결이 효과적이지 못하여 장대레일 복진이 발생할

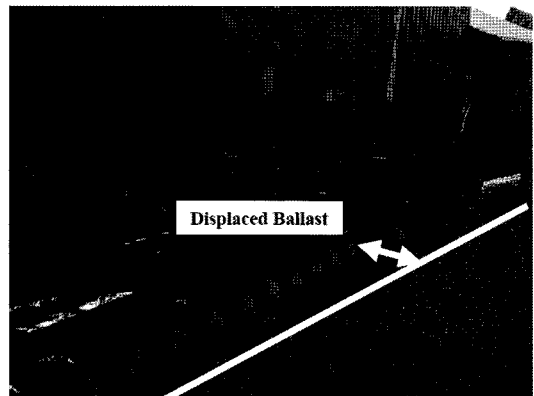


그림 14. 궤도의 횡 이동(호주, 2005-01-30)



그림 15. 열차 탈선(미국, 2004-04-06)

가능성이 높으며 교량 구간에서는 복진에 대한 저항이 매우 효과적이라고 판단되었다.

2004년 1월 29일에 한쪽 레일이 손상되어 약 4m 가량의 레일을 절단하고 새로운 레일로 교체시, 레일의 온도가 설정 온도보다 낮아 레일 가열법 또는 레일 인장법과 같은 재설정 작업을 시행하여야 하나 시행하지 않고 이음매판을 사용하여 교체 레일을 기존 레일에 연결하였다.

2004년 3월 6일에 레일 교체구간에서 궤간확대와 수평틀림이 발생되어 궤도 선형을 보수하고 침목을 교체하였으며 3월 6일에서 3월 24일까지 도상 저항력의 확보를 위해 열차속도를 제한하였다.

[주 원인]

레일 복진을 방지하기 위한 레일 앵커의 체결이 효과적이지 못하였으며 선로 선형상의 특이점(하 구배와 상 구배 존재)으로 인해 그림 16과 같은 레일 복진현상이 발생되었다.

레일을 교체하면서 설정온도보다 낮은 온도에서의 부설 그

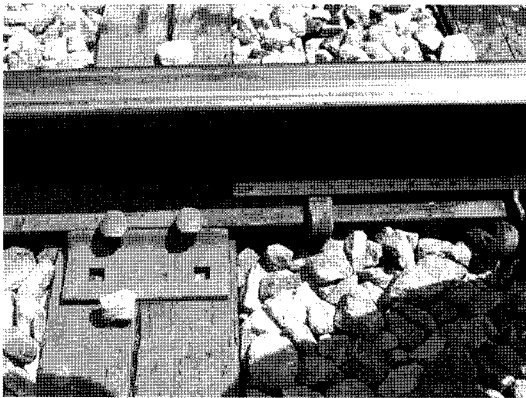


그림 16. 장대레일 복진(미국, 2004-04-06)

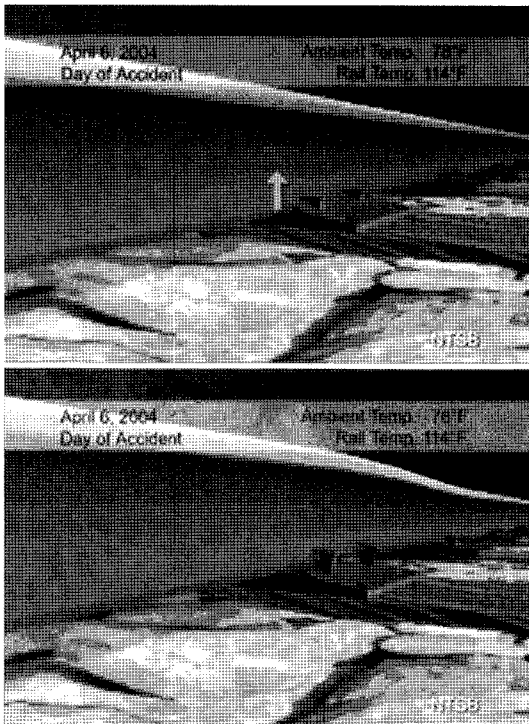


그림 17. 궤간 확대(미국, 2004-04-06)

리고 선형 보수작업 후의 열차 속도 제한으로 인한 제동하중에 의해 레일이 교체된 구간에 과대한 압축력이 축적되었다. 이러한 과대한 압축력에 의해 그림 17과 같이 레일이 상향으로 들리면서 횡방향으로 이동하여 궤간이 확대되었다. 이러한 현상은 도상 횡저항력은 충분하나, 목침목에 의한 스파이크의 체결이 양호하지 못하여 발생된 것으로 판단된다.

### 3.2.2 체결력 손실

2005. 04. 03일 미국 Amtrak No. 27 열차가 Columbia 강 근처 선로에서 그림 18과 같이 탈선하는 사고가 발생되었다. (National Transportation Safety Board, 2005)

[사고 발생 전 궤도상태]

열차가 탈선된 부분은 곡선구간이며 장대레일과 PC 침목이 부설되었다. 2005년 3월 23일부터 탈선사고 2일전인 4월1일까지 4차례의 궤도상태가 악화됐다는 보고가 있었으며 현장 조사를 벌였으나 특이점은 발견하지 못하였다.



그림 18. 열차 탈선(미국, 2005-04-03)

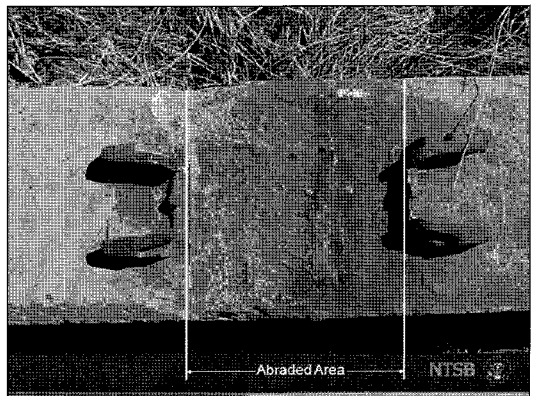
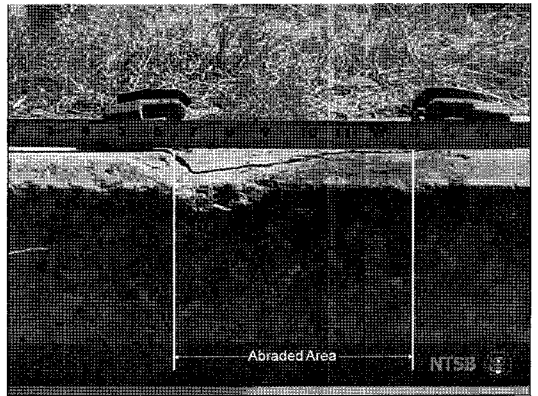


그림 19. 침목 표면 마모 및 파손(미국, 2005-04-03)

[주 원인]

PC 침목위에 레일이 놓이는 부분의 콘크리트 표면이 마모 및 파손되어 체결장치의 체결력이 손실된 것이 주 원인이 되었다.(그림 19) 손실된 체결력과 침목 표면의 마모 및 파손에 의해 곡선부 외측 레일이 곡선부 외측방향으로의 경좌현상이 발생되었으며 이로 인해 궤간이 확대되어 열차가 탈선되었다.

#### 4. 결 론

여러 가지 궤도관련 사고모드를 분석한 결과를 근거로 다음과 같은 궤도사고의 위험 요인이 도출되었다.

- (1) 궤도작업에 의한 위험 요인
  - 궤도 작업 후에 발생하는 도상 저항력의 저감 현상
  - 궤도 작업 후 실시되는 주행 열차의 속도 규제 조건
  - 줄트림이 다수 보고된 취약개소의 궤도 상태의 지속적인 추적관리
  - 궤도작업이 수행된 구간의 안정성 확보 여부에 관한 추적
- (2) 레일 설정온도변화에 의한 위험 요인
  - 궤도작업 등에 의해 발생할 수 있는 레일 설정 온도의 변화
  - 장대레일 재설정 작업의 절차와 관리
  - 예상치 못한 대기온도 상승으로 인한 레일온도 급상승 현상
- (3) 궤도의 품질에 의한 위험 요인
  - 침목의 부분적 파손으로 인한 체결력 감소
  - 체결구 문제에 의한 장대레일 복진 현상
  - 취약개소에서 열차의 제동으로 인해 레일의 압 축력 축적 현상

- 직선부 및 곡선부 궤도의 줄트림과 평면성 트림
- 곡선 궤도에서 노반 성토체의 부분적 이동 현상
- 도상 자갈의 충분한 어깨 폭 및 높이 미확보

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통기술연구개발사업의 일환으로 진행되고 있는 “미래철도기술개발사업”의 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

Australian Transport Safety Bureau (2003) *Derailement of Pacific National Tracin 2PW4-N*. Rail Safety Investigation Report No. 2003/005.

Australian Transport Safety Bureau, (2005) *Derailement of Pacific National Train 6MP4 and 6SP5*. Rail Safety Investigation Report No. 2005/002.

National Transportation Safety Board (2002) *NTSB/RAB-04/05*.

National Transportation Safety Board (2004) *Derailement of Amtrak Train NO. 58 NTSB/RAR-05/02*.

National Transportation Safety Board (2005) *NTSB/RAB-06/03*.

National Transportation Safety Board (2006) *NTSB/RAB-06/08*.

The Office of Rail Safety Investigation (2002a) *Pacific national train 4YN2 derailed due to misalignment*. Rail Safety Investigation Report-Rocky Ponds.

The Office of Rail Safety Investigation (2002b) *Pacific National Train G9821 derailed due to Misalignment*. Rail Safety Investigation Report-Yass Junction.

Rail Accident Investigation Branch (2006) *Derailement of a Freight Train at Cricklewood Curve*. Rail Accident Report 02/2007.

- ◎ 논문접수일 : 2007년 10월 02일
- ◎ 심사의뢰일 : 2007년 10월 04일
- ◎ 심사완료일 : 2007년 11월 02일