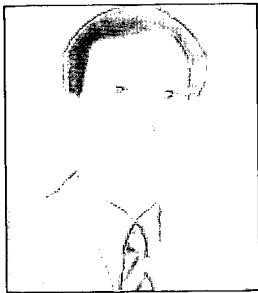




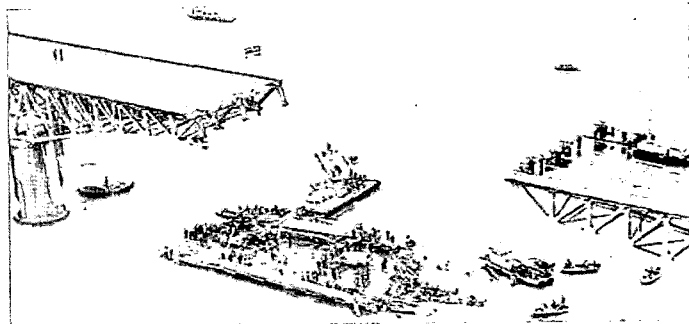
# 철도시설물의 피로손상과 대책

◎ 국내외 주요시설물 손상현황

## Collapse of sungsu Grand Bridge

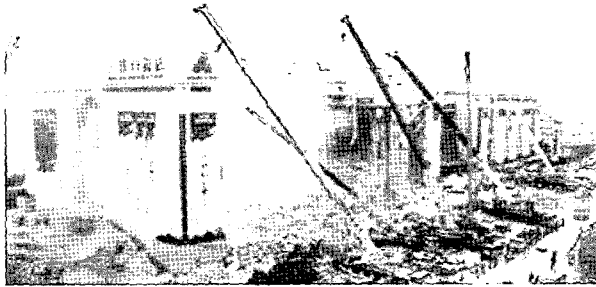


박용걸 | Park, Yong Gul  
서울산업대학교  
철도전문대학원 교수



- 사고발생일자 : Oct., 1994
- 사고위치 : Seoul Korea
- 공용년수 : 25 Yrs
- 붕괴원인
  - Defects in Weld Work
  - Fatigue crack on Pin Joint
- 피해수준 : 32 people died
- 교량제원 · Type : Gerber Truss With Pin Joint
  - Width : 4 Lanes Road(19.4m)
  - Total Length : 1160.8m
  - Max. Span Length : 120m
  - Loading Cap. : 32.4t/ lane

Collapse of Sampoong Department Store



- 사고발생일자 : June, 1995
- 사고위치 : Seoul Korea
- 공용년수 : 7 Yrs
- 대상구조물제원
  - Department Store
  - 9 Storied Bd.[4 Story u.g.]
  - 73,877m<sup>2</sup>
  - RC with Flat Slab

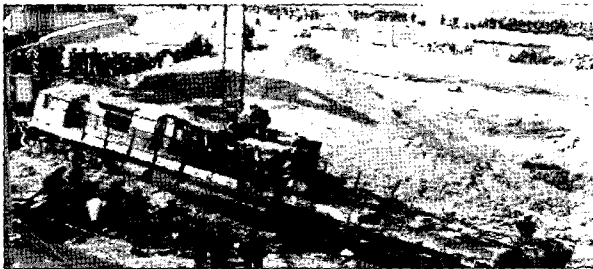


⇒ 승객 11명 사망 189명 부상



- 일본 효고현 아마가사키시 JR 탈선 사고
- ⇒ 년도 : 2005.
- ⇒ 사고 원인 : 과속운행, 탈선
- ⇒ 승객 50명 사망, 239명 부상

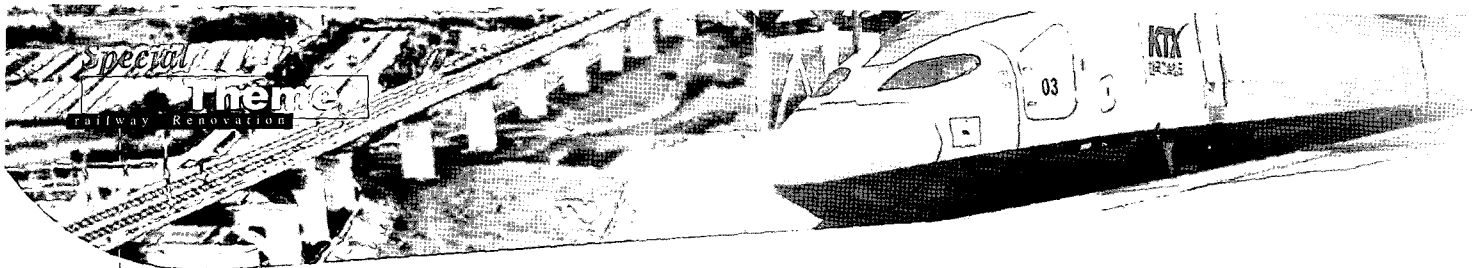
철도시설물의 손상사례



- 경부선 물금~구포역 열차전복사고
- ⇒ 년도 : 1993.
- ⇒ 사고원인 : 전력케이블 매설을 위한 굴착공사 중 노반 함몰로 인한 열차 전복.
- ⇒ 승객 78명 사망 200여명 부상
- 미국 LA에서 발생한 열차충돌사고
- ⇒ 년도 : 2005.
- ⇒ 사고원인 : 충돌, 탈선

◎ 철도구조물 및 궤도의 피로손상

- 구조물 또는 부재의 열화 및 손상 종류
  - 취성파괴 : 균열의 급격한 불안정 성장에 의한 파괴
  - 연성파괴 : 균열의 완만한 불안정 성장에 의한 파괴
  - 피로파괴 : 균열의 안정[Sub-Critical] 성장에 의한 파괴
- 피로파괴의 정의
  - 정적강도 보다 상당히 작은 외력이 지속적으로 반복 작용하는 것에 의한 균열이 발생하고 진전하는 현상
  - 피로균열 초기 단계에서 적절한 대책을 강구하면 충분히 안전성 확보가 가능함
- 피로에 영향을 미치는 인자
  - 반복응력의 변동범위와 반복회수 : 응력범위와 피로

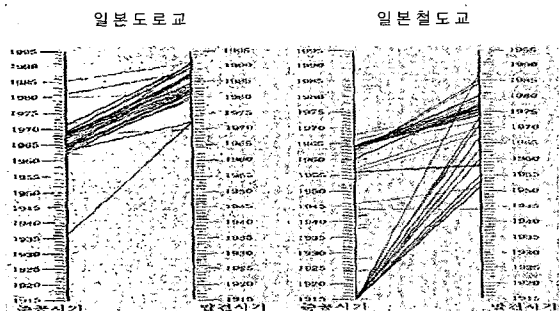


수명의 관계는 직선관계

- 구조물이나 이음부의 형상 : 구조상세의 여러 이음형상에 대해 피로시험 데이터에 기초한 피로설계 기준 강도가 설정되어 있음
- 용접결합, 잔류응력 : 강재의 피로강도는 모재의 인장강도가 증가함에 따라 증가하나, 용접이음부의 피로강도는 사용강재의 정적강도와 거의 무관함

### ◎ 철도구조물 및 궤도의 피로손상 시기

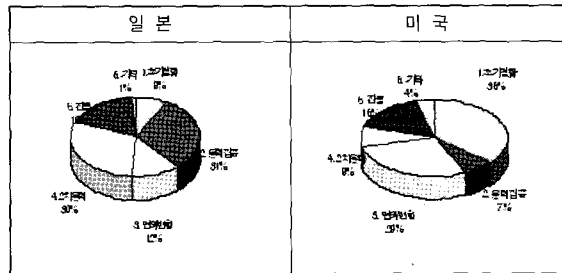
#### ■ 일본의 도로 및 철도시설물[교량]에 대한 피로손상 발견시기



- ▷ 철도구조물(교량)의 경우 도로구조물(교량)에 비해 피로손상이 발생하여 발견되기까지의 소요시간이 상당히 오래 걸리는 특징을 보인다.
- 1950년 이후 간헐적으로 발견된 피로손상은 1915년 이전에 가설된 교량의 장기간 공용에 의한 결과로 보고되고 있다.
- 1970년대에 집중적으로 발견된 피로손상은 주로 1964년경에 준공된 동해도 신간선 강교량에서 발견된 피로균열이 대부분을 차지한다.[대략 6~8년 후 발견]

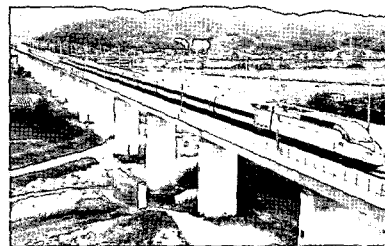
### ◎ 철도구조물 및 궤도의 피로손상

- 피로손상의 원인 : 용접결합, 응력집중, 면외변형, 2차 응력, 진동, 구름접촉피로 등



피로손상은 주로 제작상의 결함 및 설계에서 고려하지 못한 원인 등에 의해 발생하며, 설계의 대상이 되는 일차응력에 의한 피로손상은 현재까지 보고된바 없다. 이러한 일차응력에 의한 피로는 철도시설물 전체의 파괴를 유발하는 위험성이 높은 손상으로 설계당시 엄격하게 고려하여 반영하게끔 각국의 설계기준에서 규정하고 있다.

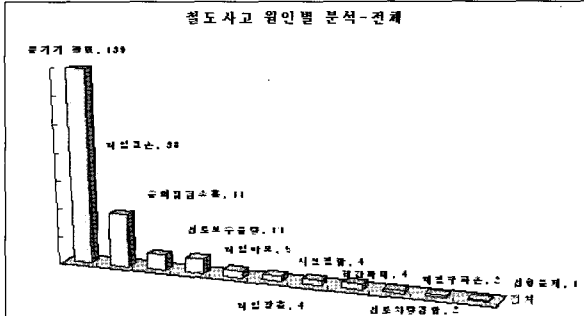
철도 레일의 경우 차륜과의 접촉점의 위치변화에 따라 기하학적인 변형뿐만 아니라 반복적인 차륜과의 접촉에 따라 레일강 자체의 재료적인 탄소성 거동을 하게 되어 면외변형을 일으킨다. 궤도의 경우 피로손상의 주원인 중 하나는 궤도의 탄성력[체결구 스프링계수]이다. 궤도의 탄성력이 적절하지 못할 경우 궤도구성품의 피로저항력이 저감되어 동일한 하중상태에서도 큰 피로응력을 받게 된다. 이렇듯 철도에서의 피로손상의 주원인 중 거의 대부분이 철도 궤도에서 항상 존재하는 문제요소이나 현 궤도설계 및 운영에서는 일차응력만을 고려하거나 피로에 대한 손상을 전혀 고려하지 않는 실정이므로 장기적인 안정성 및 피로손상의 위험성이 클 것으로 예상된다.



### ◎ 철도시설물의 손상현황 및 대책

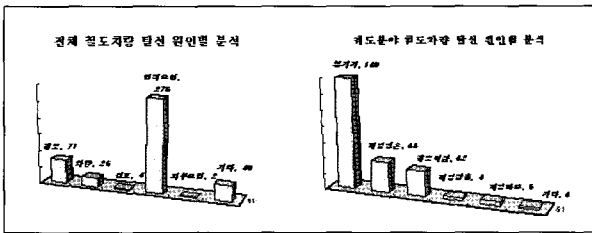
#### ■ 철도사고 원인별 분석

철도공사의 유지보수통계자료에 따르면 전체 철도사고 원인 중 철도시설물 및 궤도의 비중이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.



■ 국내 철도 차량 탈선 원인 - 전체, 궤도분야

전체 철도 차량의 탈선의 원인은 인적요인이 가장 큰 비중을 차지하며 그 외의 원인 중 2순위는 궤도분야이다. 궤도분야는 적절한 유지보수 및 점검으로 사전에 충분히 예방할 수 있는 부분이므로 이에대한 적절한 대책 및 분석이 필요하다. 또한 궤도분야의 탈선원인 중 큰 비중을 차지하는 것은 분기기, 레일 등의 강구조 부재이다.



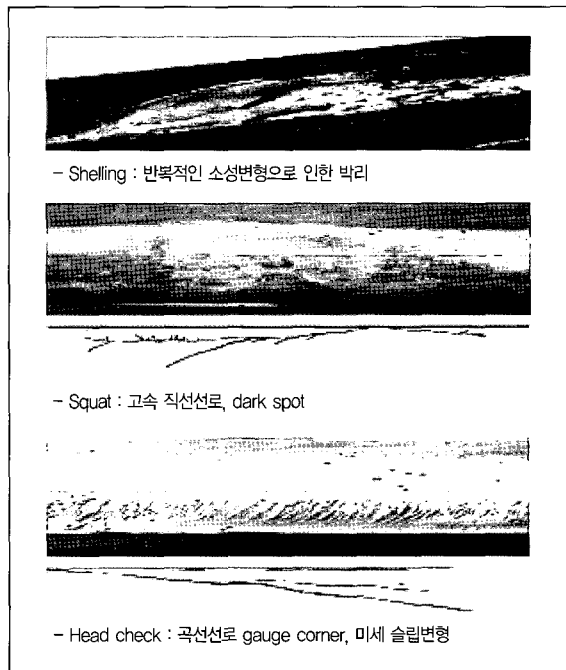
◎ 철도시설물의 손상현황 및 원인

■ 궤도부재별 특성과 손상 원인

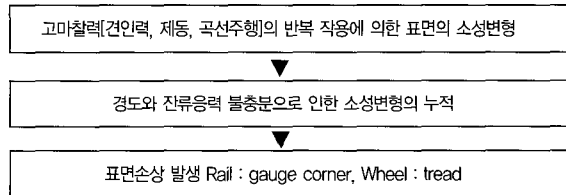
1. 레일 : 열차의 차륜하중을 1차적으로 받는 궤도부재
  - 레일 표면의 이상마모에 의해 진동, 소음이 발생하게 되며 요철 및 마모에 따른 레일의 피로손상과 이에따른 수명저하가 발생하므로 지속적인 레일 연마가 필요하다.
2. 체결구 및 레일(방진)패드 : 레일을 결속하고 하중전달을 완화시키는 궤도부재
  - 체결구에 전달되는 하중에 의해 피로 누적(피로한도가 큰 체결구 채택필요)

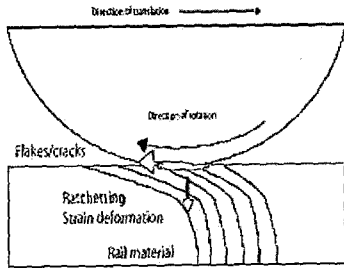
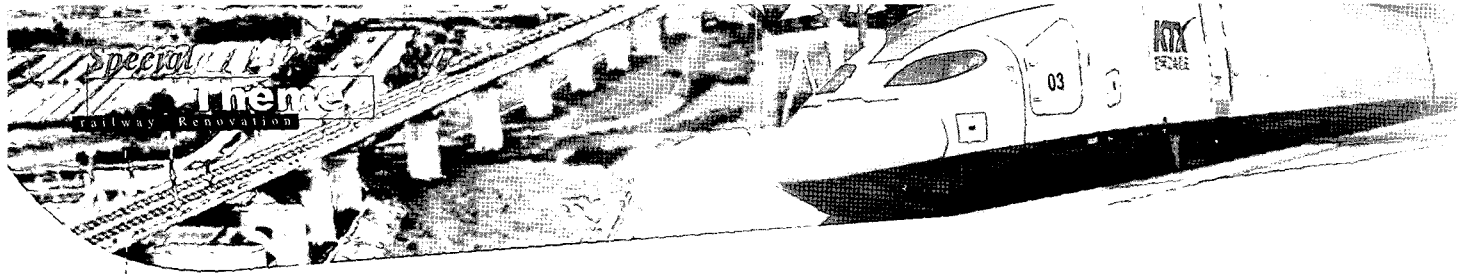
- 체결구의 방진, 절연에 필요한 탄성재의 내구성 확보
  - 적정궤도탄성계수를 만족하는 탄성력 유지필요
3. 침목 : 체결구를 통해 전달되는 하중을 받는 궤도부재
    - 적절한 강도유지 필요(체결구의 1차 진동저감이 부족할 경우 크랙 발생)
    - 필요 시 침목 하부 방진필요
  4. 도상 : 크게 자갈과 콘크리트도상으로 구분
    - 침목의 하중을 노반으로 전달
  5. 노반 : 궤도진동 흡수, 전달
    - 연약지반일 경우 진동절연이 안됨[지반강화 필요]

■ 구름접촉피로에 의한 레일손상 종류



■ 구름접촉피로 손상 매커니즘[Surface crack]

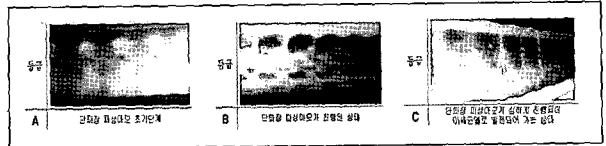




■ 레일의 손상 종류와 평가

단파장 파상마모(Short Corrugation)

- 레일길이 방향으로 표면에 짧게(3~8cm) 물결모양의 파형이 나타나는 현상

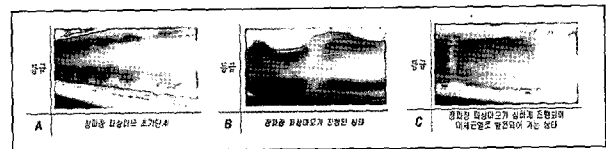


■ 구름접촉피로 손상과 탈선

구름접촉피로(RCF) 발생 ⇒ 곡선 선로주행, gage corner, outer rail(high rail)

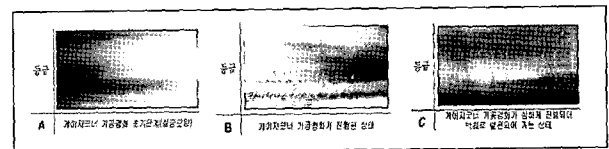
장파장 파상마모(Long Corrugation)

- 레일길이 방향으로 길게(8cm 이상) 물결모양의 파형이 나타나는 현상



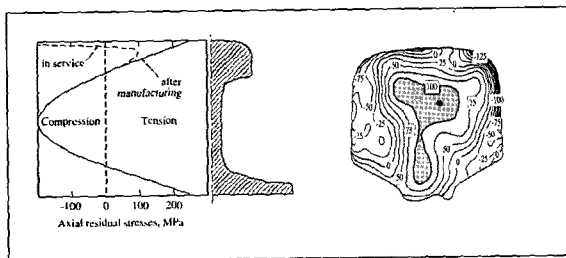
게이지 코너부 경화(Gauge corner Shelling)

- 차륜의 반복충격하중으로 게이지 코너(외측레일)부분이 경화되어 조개껍질 모양으로 실금이 발생하며 심화될 경우 바리로 발전되는 현상으로 승강장 인접곡선의 시 작과 끝지점에서 주로 발생



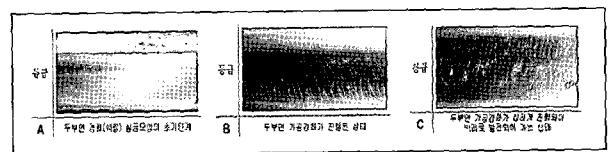
■ 레일의 잔류응력 분포

연행되어 작용하는 철도 차량하중은 레일에 반복적인 교변응력을 발생시키며 이에따라 레일의 두부-복부-플랜지는 각각 고유의 응력을 받게 된다. 특히 레일두부에는 제작당시 내재된 인장응력이 사용상태에서는 순간적인 압축응력이 작용하게 되며 공용상태에서는 이와 같은 응력변화 상황이 반복되게 된다. 따라서 이러한 반복 피로하중에 의한 지속적인 잔류응력에 의해 레일의 피로손상이 유발될 가능성이 있다.



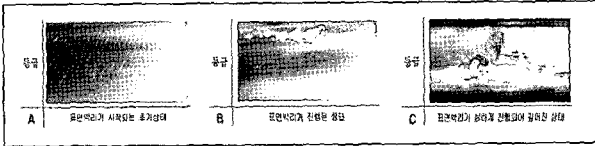
표면경화(Surface Shelling)

- 차륜의 반복충격하중으로 레일의 두부면이 경화되어 조개껍질 모양으로 실금이 발생하며 심화될 경우 바리나 엔진화손으로 발전되는 현상



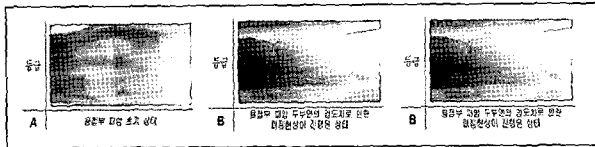
**두부면 박리(Surface Flaking)**

- 쉐링(기공경화층)과 기존 재질의 경계부가 분리되어 떨어져지는 현상



**용접부 패임(Welding Batter)**

- 용접부의 재질 경도차로 인하여 마모량이 달리 나타나며 심화될 경우 높이의 단차까지 나타나며 퍼지는 현상



**엔진화손(Engine Burning)**

- 열차속도의 가감속 구간에서 차륜과 레일의 압력에 의해 쪽이 묻어나는 현상으로 열손이라고도 하며 내부균열로 진행되는 현상

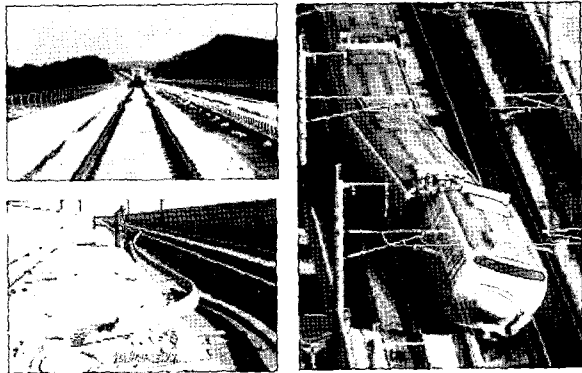


**■ 레일의 좌굴과 탈선**

교량상 자갈도상궤도에 부설된 장대레일은 하절기 온도상승에 따라 교량과 레일간의 상호작용에 따른 과다축력발생으로 좌굴위험성을 내재하고 있으며 충분한 좌굴저항력을 확보하지 못하면 레일강의 허용좌굴응력을 초과하여 장대레일은 좌굴 및 파단 될 수 있다. 또한 이러한 장대레일의 좌굴은 열차의 탈선을 유발할 수 있다. 따라서 교량상에 장대레일을 부설하기 위해서는 대상교량의 특성(경간장, 지점배치, 거더강성, 하부구조 특성 등)을 고려하여 궤도와의 상호작용력을 파악하는 좌굴안정성 검토를 수행하여 충분한 도상 횡저항력을 확보하는 지 여

부를 면밀히 검토하여야 한다.

이러한 장대레일의 좌굴을 방지하기 위해서는 적절한 위치에 레일 신축이음매를 부설하거나 중방향 활동체결구를 사용한 중방향 저항력 저감에 따른 축방향 응력 해소 및 콘크리트 도상화 등으로 충분한 도상 횡저항력을 확보하여 좌굴발생을 최소화 할 수 있다.



**1. 체결구 및 레일(방진)패드 손상현황 및 원인**

체결구 및 레일패드의 손상은 궤도의 적정 탄성력의 상실을 유발하며 이는 침목상면에 가해지는 충격을 증가시켜 침목의 부담력을 가중시킴에 따라 침목 및 도상의 내구성을 저하시킨다.

절연재 파손	솔더부 파손
레일패드 열화	체결구 파손 및 체결구 틀림

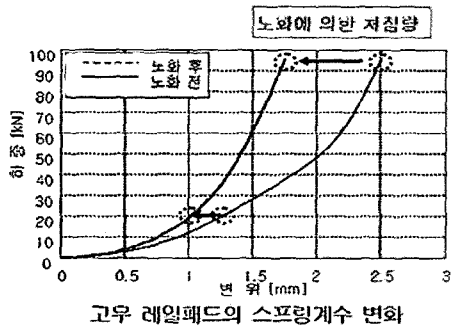
**■ 레일패드의 손상 메커니즘**

레일패드는 현장설치 직후부터 내부적 요인(차량하중, 운행속도, 운행회수 등)과 외부적 요인(기온, 습도, 태양



열) 등 여러 복합작용에 의해 노후가 시작된다.

이러한 레일패드(탄성재)의 노후는 전체적인 궤도의 변위를 저감시키며 적절한 탄성범위 내에서 발생하는 적정 변위가 확보되지 못한 상태에서의 궤도구성품은 점차 부담력이 가중되고 피로저항력이 한도를 초과할 우려가 있어 레일패드 이외의 각각의 구성품의 수명을 단축시킬 수 있다.



레일패드의 손상은 크게 다음과 같은 두가지 경우로 나타난다.

#### 1) 레일패드의 두께 감소

레일패드의 두께 감소로 초기 체결 당시의 완전 밀착상태에서 감소된 두께만큼의 체결력이 감소된다. 이에 따라 궤도의 종방향 저항력이 감소되고 궤도안정성에 직접적인 문제를 야기시킬 수 있다.

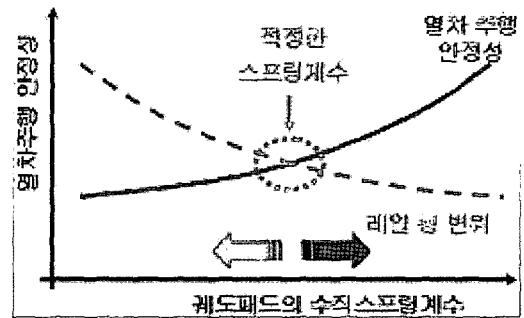
#### 2) 레일패드의 탄성계수 증가

레일패드의 두께가 감소되면서 기존의 패드탄성은 소실되게 되며 이에따라 레일패드는 딱딱해지게 된다. 적절한 수준의 탄성력을 확보하지 못한 레일패드는 침목의 진동 및 내구성을 저하시키며 궤도 변위 저감으로 인해 각각의 궤도구성품은 더욱 많은 부담력을 받게 됨으로써 수명 및 유지보수 주기가 단축되며 주행안정성에 악영향을 미치게 된다. 또한 소음증가와 인접건물의 진동유발 및 2차 교체음을 발생시키게 된다.

#### ■ 레일패드의 탄성계수와 궤도손상

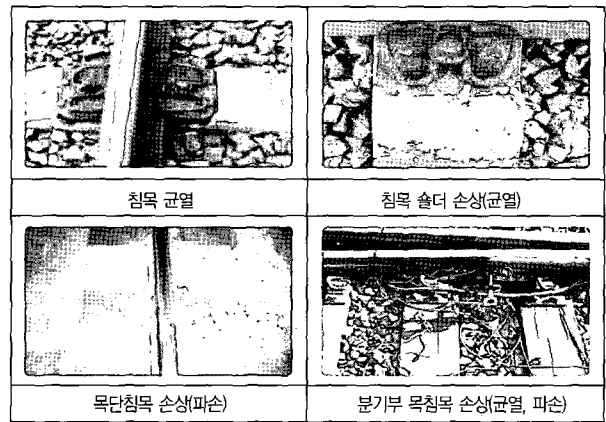
- 레일(방진)패드의 적정 탄성계수는 열차하중의 분산과 윤증변동의 저감 및 레일의 파상마모와 편마모 등의

철도시설물의 피로손상을 저감시킴으로써 궤도구성품의 수명 연장과 열차의 주행안정성 확보를 가능하게 한다.



## 2. 침목의 손상현황 및 원인

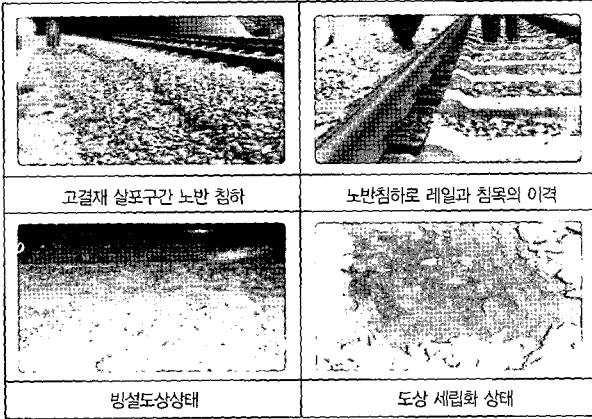
체결구 및 레일패드의 손상으로 궤도의 탄성을 상실하여 레일의 마모가 증가하고 침목상면에 가해지는 충격이 증가함에 따른 응력증가로 침목의 내구성을 저하시킨다.



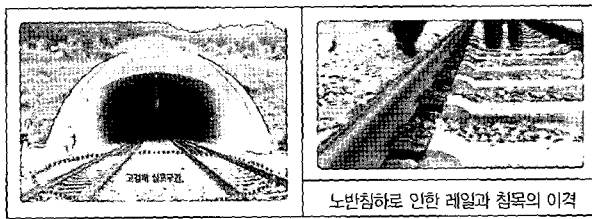
## 3. 도상 및 노반의 손상현황 및 원인

현행 터널-노반등의 접속부와 같은 노반강성(탄성)천이 구간에 대하여 도상강성 차이에 따른 궤도침하 차이를 일정하게 유지하기 위해 도상고결제를 살포하는 추세이다. 그러나 이러한 고결제(도상안정제) 공법은 상부노반이 고결되어 자갈과 침목이 일체화된 상태에서 노반의 침하가 발생하여 레일과 침목이 이격현상이 발생하게 되는 등의 문제점을 내

포하고 있다. 따라서 도상과 노반의 손상 취약개소인 접속구간에 대한 적절한 대책수립이 필요하다.

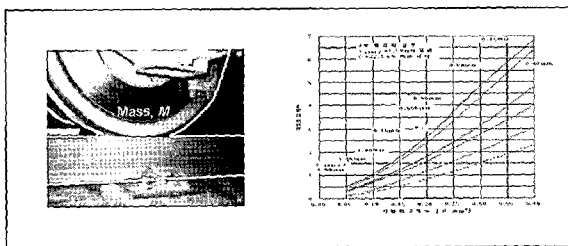


■ 도상 및 노반 손상 취약개소 현황



◎ 철도시설물 손상의 대책

1. 적정 궤도탄성계수 제시

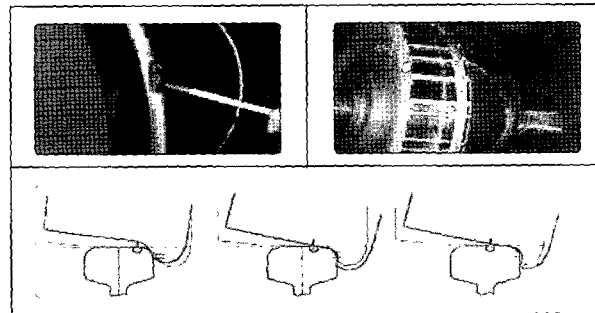


철도시설물의 손상을 최소화하기 위해서는 일차적인 하중전달매개체인 궤도에 작용하는 열차하중의 영향을 저감하기 위한 노력이 수반되어야 한다. 궤도에 작용하는 궤도부담력 및 열차하중의 동적영향을 저감시키기 위해서는 전체 궤도의 탄성계수를 적절히 조절하는 것이 중요

하다. 적절한 궤도의 탄성계수는 열차의 동적 하중 영향 감소와 레일 지지부 하중의 분산을 유도하여 적절한 레일 처짐을 발생시킨다. 이러한 궤도의 저탄성으로 운동의 변화가 감소하여 우수한 승차감이 확보되며 차륜과 궤도의 손상은 저감될 수 있다. 또한 이로 인해 궤도의 성능이 장기간 확보되고 유지보수의 비용도 저감된다.

2. 레일과 차륜의 Interface 조정

차륜의 손상은 곧바로 레일의 손상을 유발하는 중요한 요인이므로 지속적인 합리적인 레일연마와 더불어 차륜연삭 작업의 적정시기 조절이 요구된다.



3. 레일 연마 및 재료적 성질 변화 추이 분석

- 레일연마를 통해 소음 및 진동을 저감시킬 수 있으며 단순한 레일연마 뿐만 아니라 레일의 재료적 성질 변화 추이를 분석하여 레일의 재료적 탄소성변화 및 이에 따른 내구강도 저하를 파악하는 것도 중요하다.



- 가공경화층 및 레일 내구강도 변화 분석

