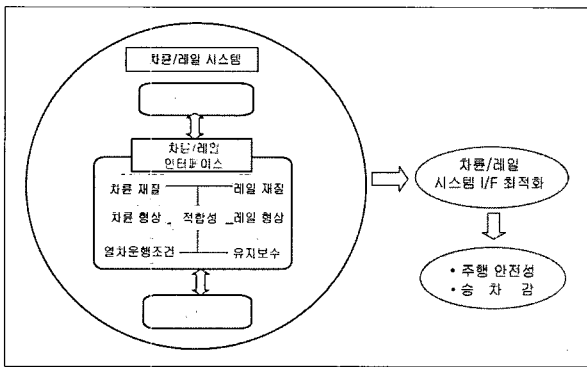


# 차륜/레일 시스템 인터페이스



이희성 | 서울산업대 철도전문대학원 교수

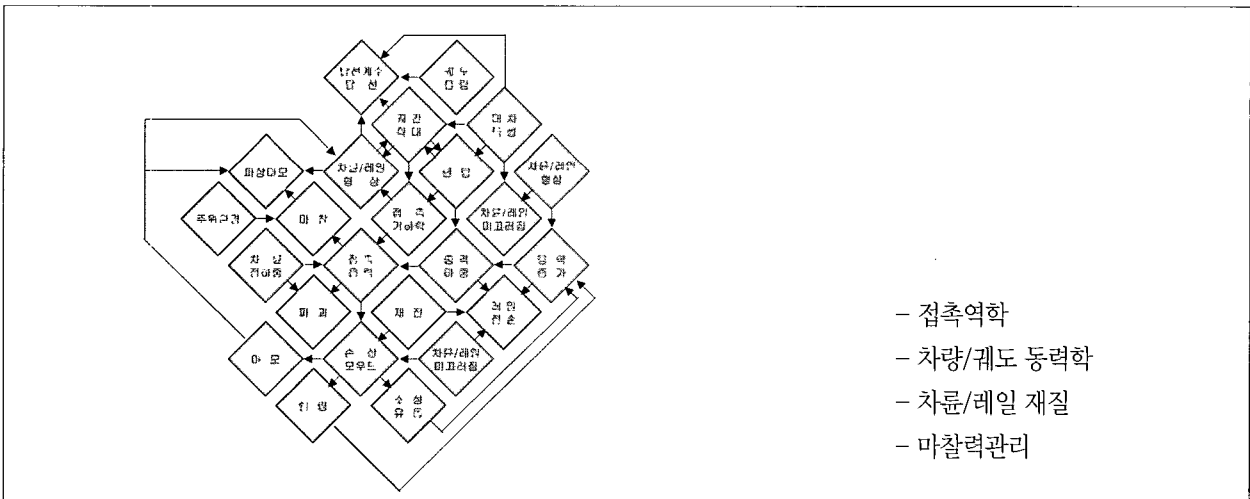
## 1. 차륜/레일 시스템 인터페이스 기술 개념



- 차륜/레일 인터페이스 문제를 해결하는 신속하고 단순한 방법은 없음.
- 차륜/레일 접촉면에서 발생하는 접촉압력을 제어하고 최소화하여야 함.
- 차륜/레일 인터페이스 최적화 방법은 차륜/레일이 접촉할 때 발생하는 여러가지 설계변수들간의 이점들만을 시스템 측면에서 극대화시키는 것임.
- OWRI는 60개 이상의 관련된 변수로 구성된 차륜/레일 시스템 구성요소들간의 상호작용 분석.

- 궤도관련 변수 : 침목, 체결구, 레일 재질 및 형상, 유지보수 및 운행방법,...
- 차량관련 변수 : 대차특성, 차륜 재질, 형상 및 삭정주기,...
- 운행관련 변수 : 축중, 속도, 제동조건, 운행환경, (... 예) 레일 삭정과 효과적인 운행

### ※차륜/레일 시스템 최적화관련 설계변수



- 접촉역학
- 차량/궤도 동역학
- 차륜/레일 재질
- 마찰력관리

## 2. 차륜/레일 I/F 최적화 연구

### 2.1 차륜/레일 인터페이스 최적화 방안

-차륜/레일 금속학적 구조  
(미세조직, 화학적 조성.....)

-차륜/레일강의 강도, 연성,파괴인성

-경도 및 파괴인성

- 접촉응력, 접촉기하학, 차륜/레일 접촉면의 크리피지

마찰력관리

차륜/레일 재질

차륜/궤도 동역학

-차륜접면은 정적력과 제동력 확보를 위해서 0.2~0.35의 마찰계수 유지

-차륜 플랜지 및 레일 게이지면의 마찰계수는 0.3~0.6정도 이지만 윤활제를 사용하여 0.15이하로 감소가능

곡선 추종성 최적화, 승차감 및 주행안전성을 크게 향상시킨 대처 및 차량설계

※ 차륜/레일 인터페이스 최적화 방안

- 4가지 분야에 대한 연구는 각각의 부품의 수명을 늘리고 운행효율을 증가시킴
- 이들을 조합하면 시스템의 건전성과 안전성을 개선할 수 있음

### 2.2 차륜/레일 시스템 I/F에서 발생 가능한 문제 분류

| 분류체계 | 세부내용            | 핵심문제/요구사항                    |   |
|------|-----------------|------------------------------|---|
| 1    | 시설물 모니터링        | 궤도 틀림 평가                     | 요구하는 궤도 틀림 및 표면상태를 확인하기 위한 검측   |
| 2    | 손상 매커니즘         | 차륜 찰상의 원인                    | 차륜 찰상의 원인에 대한 심도 깊은 연구  |
| 3    | 손상 매커니즘         | 게이지 코너 크랙킹(GCC)              | GCC가 발생하는 이유에 대한 공학적 분석   |
| 4    | 손상 매커니즘         | 모래 및 레일 손상                   | 모래사용에 따른 레일 손상 정도 평가  |
| 5    | 유지 보수 방법        | 손상문제를 억제/제어/방지하기 위한 각종 결함 관리 | 사전예방 유지보수 방식으로 변경하여 각종 내부결함을 효과적으로 관리, 선로 차단 가능성을 최소화   |
| 6    | 유지 보수 방법        | 차륜/레일 마모                     | 레일 재작성 주기 및 지속적인 필요성 여부?  |
| 7    | 모델링 요구 조건       | 차륜/레일 I/F 모델링                | 불안정한 모델링의 결과는?<br>현재의 모델링이 실제 레일/차륜 조건의 반영 여부?  |
| 8    | 기준              | 탈선                           | Q/Y(탈선계수)?  |
| 9    | 시스템 거동 예측       | 기준선에 신조차량 투입에 따른 영향          | 신조차량 투입에 따른 기준선로 손상 정도는?  |
| 10   | 시스템 거동 예측       | 축중                           | 향후, 고속중 차량의 투입에 따른 기존 궤도시스템에 미치는 영향은?   |
| 11   | 시스템 거동 예측       | 피로 및 마모                      | 레일의 손상문제 예측을 위한 마모율 성장 모델과 피로성장 모델의 개발 및 적용<br>위의 2가지 모델의 균형의 의미 및 효과는?                                     |
| 12   | 차륜/레일/형상 요건     | 레일 두부 연마                     | 각각의 선로조건(직선 및 곡선구간, 완곡곡선 시작점...)에 따른 최적 차륜/레일 형상은?<br>차륜/레일 마모가 어떻게 발생하며, 마모된 형상이 어떻게 상호작용하는가에 대한 보다 이해가 필요 |
| 13   | 차륜/레일 접촉면 조건 관리 | 차륜/레일 점착                     | 차륜/레일 I/F에서 점착성능 최적화  |

### □ 기존선 구간 KTX 차륜 과대마모

기존선 구간에서의 KS60레일과 KTX 차륜과의 비적합성 및 기존선구간의 R600m 이하 곡선반경 주행에서 차륜 과대마모가 발생.

▶ 해결방안은 기존선 레일두부 형상 변경(KS60K) 및 윤활이 필수적임.

### □ 파상마모(corrugation, undulation, etc)

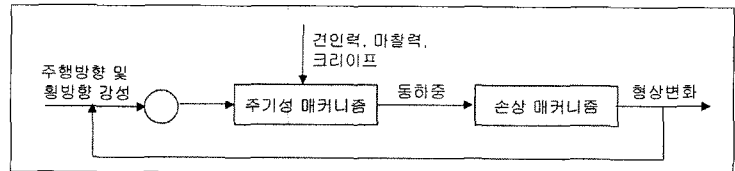
파상마모는 차륜/레일간의 높은 동하중에 의해 레일/차륜 주행면에 주기적인 형태의 손상이 발생하는 현상으로 궤도 구성품과 도상의 손상 및 파손, 소음 발생(단과장 파상결합의 경우).

- 실제 철도운영 현장에서 다뤄지고 분석하여야 하는 매우 중요한 문제이나 국내 철도의 경우 레일연마를 통한 사후관리 수준
- 선진외국의 경우 파상결합 최소화에 의한 레일 수명연장, 소음저감 등의 문제들을 차륜/레일 I/F 최적화 관점에서 연구 수행하여 왔음.

(1) 사후관리 보다는 사전예방

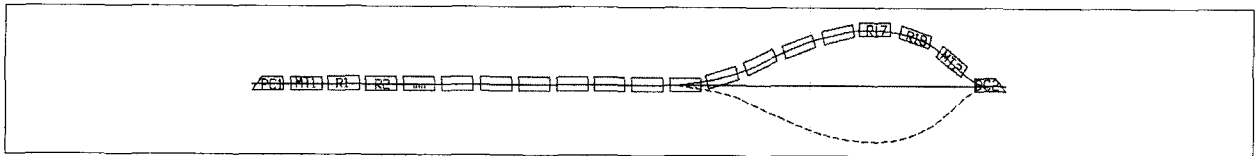
(2) 특히 선선구간의 경우는 파상결합의 초기 발생을 감소시킬 수 있는 지침이나 기준의 정립을 통한 유지보수비용 절감

- 파상마모 생성 매커니즘

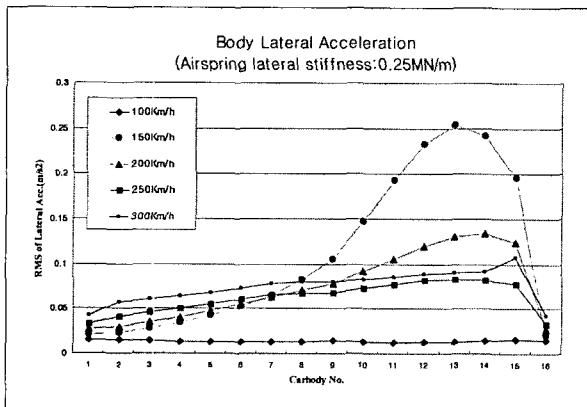


### □ KTX 흔들림 현상

KTX 열차의 흔들림은 각 차량의 진동모우드에 대하여 관절형 구조로 연결된 편성열차의 장대편성 진동모우드는 일정 진폭 이상의 저주파수의 횡-하심 롤링-요잉 진동 발생



※ 속도별 횡진동 RMS값 분포 형태



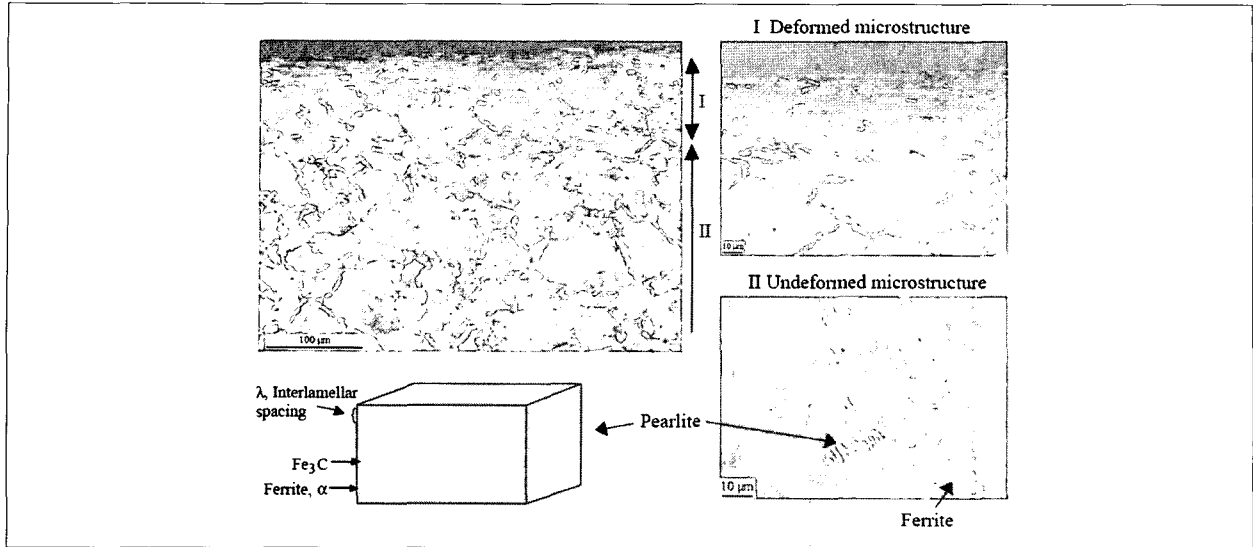
### 3. 마모와 피로

- 차륜/레일 인터페이스에서 차륜/레일 접촉 표면사이의 상호작용은 2개의 손상 매커니즘, 피로와 마모를 발생시킴
  - 마모는 금속조각을 생성시키고 레일형상을 변화시킴
  - 피로는 심각한 파손에 이르는 크랙을 생성하거나, 레일 두부 표면에서 큰 조각이 떨어지는 현상인 셸링으로 발전함
- 피로와 마모 매커니즘 사이의 상호작용은 차륜과 레일의 손상에 영향을 미치므로, 상호작용에 의한 손상을 최소화하기 위하여,
  - 2가지 손상 매커니즘(피로와 마모)의 제어 및 관리
  - 피로와 마모 매커니즘 사이의 균형 유지
- ※ 레일 표면의 마모율과 피로크랙의 개시 및 성장율이 균형을 이루게 되면, 피로크랙이 개시되어 성장하기 전에 마모되어 제거되므로, 레일 파손의 위험을 방지할 수 있음
- 각각의 매커니즘간의 균형을 유지하기 위하여 각각의 매커니즘이 언제 크게 작용하는지에 대한 예측이 매우 중요함.
- 레일 수명 예측은 다양한 분야의 검토가 요구되나, 특히 가장 중요한 것은 피로크랙 형성 초기단계에서 레일강의 미세조직의 역할임.
  - 마이크로 또는 나노 스케일에서 미세조직의 불균일성에 대한 정확한 분석 및 평가는 피로크랙이 개시되는 위치를 보다 정확히 예측할 수 있음.
  - 계재물 함유량, 표면조도와 같은 요인들의 영향도 고려하여야 함.
  - 기 결정된 특성 이외에 레일강의 종류별(예 : 화학적 조성, 열처리, ...) 영향도 고려되어야 함.

※차륜/레일 I/F 관련된 핵심사항(Critical issues) 및 대책

| 구분    | 핵심사항   | 대 책  |
|-------|--|--|
| 마모    | 차륜/레일 표면에서 금속부스러기(debris) 생성에 따른 차륜/레일 형상을 변화시킴  | - 차륜/레일 형상의 적합성 개선<br>- 조향차축(self-active or intelligent) 적용<br>- 곡선구간에서의 슬랙 적용<br>- 적절한 수준의 윤활<br>- 차륜/레일에 내마모강 적용   |
| 피로 결함 | 심각한 파손(catastrophic failure)에 이르게 하는 크랙을 생성하거나, 커다란 금속조각이 레일 표면으로부터 이탈하는 셸링, 스폴링, ... 등과 같은 파괴현상을 진행시킴 | - 차륜/레일 접촉 조건을 개선하여 접촉응력 감소<br>- 레일 패드 특성을 개선하여 동하중에 의한 충격 감소<br>- 레일강의 피로 강도 개선<br>- 손상율에 대한 지속적인 모니터링을 통한 유지보수방법 개선<br>- 레일표면 결함(셸링, 파상결함, ...)의 성장을 방지하기 위한 레일연마나 차륜삭정의 적기 시행 |

## ※차륜/레일 I/F 시스템에서 레일 등급의 중요성



- 레일강의 미세조직은 약간의 페라이트 성분을 가진 펄라이트 조직임.
- 망간강의 경우는 예외적으로 Mn성분의 함유량을 높여서 미세조직을 오스테나이트로 변화시켜 기계적 강도를 변화시킨 것임
- 전형적인 레일강의 미세구조는 위의 그림과 같음
  - 변형되지 않은 미세구조는 페라이트와 펄라이트로 구성됨(펄라이트는 페라이트와 세멘타이트( $Fe_3C$ )의 층상구조임)
  - 미세구조에서 펄라이트의 양이 많을수록 층상간의 간격( $\lambda$ )이 좁을수록 인장강도가 크게 됨.
  - 레일강의 인장강도가 내마모성에 가장 영향을 많이 주는 요소임.
  - 레일두부면을 열차가 통과하면 레일강 두부 표면에 변형이 발생하고, 이는 레일강의 미세조직, 기계적 강도, 내마모성, 내피로성을 변화시킴.

## 4. 결론 및 제언

- 차륜/레일 I/F 문제들은 주로 운영기관 및 시설기관의 현장 경험에서 얻어지는 실용적 문제들을 도출하여 해결하는 것으로 전체적인 연구방향을 설정하여야 함.
- 운영기관, 시설기관, 제작사, 연구소들이 참가하여 관련 차륜/레일 인터페이스문제를 체계적 해결, 개선 및 관리하는 협의체계를 구축하여야 함.