

한국형 고속철도의 전용선과 기존선의 차륜 마모 특성 연구  
**The study on wheel wear analysis  
in UIC60 and KS50N of Korea High Speed Railway**

김연정\*                      최정흠\*\*                      한동철\*\*\*                      김영국\*\*\*\*  
Kim, Youn\_Jung      Choi. Jeong Heum      Han. Dong-Chul      Kim. Young\_Gukk

---

ABSTRACT

characteristic of wear between wheel and rail is important factor of judgement to maintenance. KHST is optimized on an exclusive rail, UIC60. but also KHST is running on the variety existing line as well as KS50N, KS60 et.c. Rail profile of KS50N is dissimilar to UIC60. So we can predict that characteristic of wear is embodied also different. In this paper, we deduced the force and point of contact position between wheel and rail through multi-dynamics analysis and predicted wear of wheel and rail through contact problem analysis. we used simplified theory of kallker on contact problem, and Predicted the wear phenomenon of wheel using archard wear equation about each condition

---

1. 서 론

한국형 고속철도(KHST)는 전용선(UIC60)뿐만 아니라 기존선의 다양한 레일(KS50N, KS60)의 다양한 레일을 운행하는 만큼 차륜과 레일의 마모의 형태가 다르게 나타날 것이라 생각된다. 차륜과 레일의 접촉과 마모 문제는 차량의 유지 보수, 정비, 안정성, 승차감 등에 미치는 주요 인자로서 고속전철 차량의 동적 특성에 대한 명확한 이해를 바탕으로 바퀴 및 레일의 보수 및 교체 시기를 예측할 필요가 있다.

본 연구에서는 동력차, 동력객차, 객차의 3량으로 구성된 한국형 고속철도 차량의 동적거동을 해석하고, 차륜 마모를 예측하였다. 다물체 동역학 해석을 통해 차륜과 레일 사이의 작용력과 접촉점등을 도출하고 접촉 문제 해석을 통해 마모를 예측하였다. 접촉 문제는 Kallker의 simplified theory사용하였고, Archard wear equation을 이용하여 차륜의 마모현상을 예측하였다.

---

\* 서울대학교 기계항공공학부 석사과정, 정회원

\*\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 선임연구원 정회원

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부 교수 정회원

\*\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

## 2. 동적거동해석

### 2.1 차량모델

한국형 고속전철(HSR350x)의 동력차 동력객차 객차의 3량을 대상으로 동적거동 해석을 수행하였다. 해석 모델은 레일과 차륜(wheelset) 대차(bogie frame) 와 차체로 구성되며 차륜과 대차사이 는 1차 현가장치로 대차와 차체를 사이는 2차 현가장치로 연결되어 있다.

레일을 따라 주행하는 철도차량에 있어서 레일과 차륜의 상호 작용에 의한 힘은 대차로부터 차체에 전달되는 힘의 수준을 결정하는 기본이 된다. 그러므로 차륜과 레일의 형상 및 주행 궤도는 차량의 동역학적 거동에 중요한 영향을 끼치게 된다. 본 연구에서는 실제 한국형 고속전철에 사용 된 차륜의 형상을 적용하였으며, 전용선은 UIC60, 기존선은 KS50N을 사용하였다.

### 2.2 주행조건

각 곡선의 거리는 철도청의 기준운전선도를 기초하여 작성하였고 주행 속도는 참고자료1을 기초로 하여 적용하였다. 캔트(cant)량은 국유철도건설규칙에서 제시한 수식( $11.8 \cdot (v^2/R) - c'$ , v:주행속도(km/h) R:반경(m),  $c'$ :조정치0)을 기준으로 적용하였다. 레일의 불규칙도(irregularity)는 없다고 가정 하여 해석을 수행하였다. 곡선의 회전 방향을 오른쪽 차륜이 안쪽을 향한다.

## 3. 마모해석

차륜과 레일 사이에서 발생하는 마모현상은 차량 주행에 따른 동적 효과에 기인한 것으로 매우 복잡한 메커니즘을 가지고 있으나, 일반적으로 미끄럼 마모(응착/연삭 마모) 표면 피로와 충격 등에 의한 마모가 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 미끄럼 마모현상을 기준으로 차륜과 레일의 접촉면에서의 마모량을 예측하였다. 차륜과 레일 사이에 미끄럼 마모에 주된 영향을 미치는 연삭과 응착에 대한 해석을 통하여 접촉면에서 발생하는 마모량을 예측 할 것이다.

마모 예측을 위해 필요한 parameter들은 차량 동적 거동 해석 결과로부터 longitudinal, lateral, spin creepage, creep coefficient, 접촉 면적 및 압력을 구하였다. 이러한 parameter들 을 바탕으로 미끄럼 마모의 두가지 주요 발생 메카니즘인 응착과 연삭 마모량을 정량적으로 잘 설명한 Archard wear equation을 이용하여 차륜과 레일의 접촉부에서의 마모깊이 및 마모량을 계산 하였다. 또한 마모 발생 위치에서 마모량 계산을 통하여 차륜과 레일의 표면 profile의 변화를 예측 할 수 있다.

### 3.1 점착 과 슬립

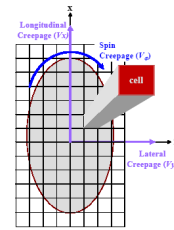
kalker의 simplified theory을 이용해 차륜과 레일의 접촉면과 위치에 작용하는 하중과 traction 에 대한 정보를 얻었다. 마모예측을 위해 그림 1과 같은 타원형의 접촉면을 동일한 크기의 격자 로 이산화 하였다. 접촉해석을 통하여 접촉의 leading edge에서 뒤쪽까지 연속적으로 각 격자 에서의 traction, 압력, 슬립은 계산한다. 각 cell에서 결정된 힘은 미끄럼과 구름 운동의 정의에 따 라 각 요소에 작용하는 전단력이 수평 작용력 보다 작은 경우 접촉 영역에서 점착 현상이 발생하게 되며, 마찰력과 전단력이 동일한 크기를 가지게 될 때 미끄럼 운동이 발생하게 됨을 판단 의 근 거로 점착/슬립 영역인지 판별되며, 미끄럼 영역에서 슬립의 크기와 방향이 결정된다.

simplified theory의 기본 가정  
 · 접촉면적의 각 요소에 작용하는 전단력

$$\tau_x = \left( \frac{v_x}{L_x} - \frac{v_\varphi}{L_\varphi} y \right) \times (x - a(y))$$

$$\tau_y = \frac{v_y}{L_y} (x - a(y)) + \frac{\varphi (x^2 - a(y)^2)}{2L_\varphi}$$

$$a(y) = a \sqrt{1 - (y/b)^2}$$



<그림1>

### 3.2 마모해석

각 요소에서의 미끄럼 속도는

$$\bar{v}_{slip} = V_{vehicle} \left[ \begin{matrix} v_x - v_\varphi y \\ v_y + v_\varphi x \end{matrix} \right] - \frac{\partial \bar{u}(x,y)}{\partial x}$$

로 정의된다.

여기서 재료의 탄성변형을 고려하지 않으므로 주어진 미끄럼 속도 계산식에서 상대 재료의 탄성 변형에 의한 상대 속도 항에 해당하는 마지막 항은 0으로 간주 할 수 있다.

각 요소별 미끄럼 속도를 이용하여 각 요소의 미끄럼 거리를 계산하면

$$S = \frac{|v_{max}| \Delta x}{V_{vehicle}}$$

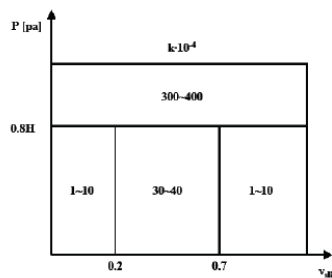
가 된다.

이렇게 구한 항들을 Archard wear equation에 대입하여 각 cell별 마모량을 구하며, 접촉면적 전체에 대하여 cell당 마모량을 진행방향에 대해 적분하면 1회 회전 시 마모량을 얻는다.

$$\Delta z = K \frac{S P}{H}$$

K: wear coefficient map , S: 요소별 미끄럼 거리

P : 접촉부에서의 압력 , H: 재료의 경도



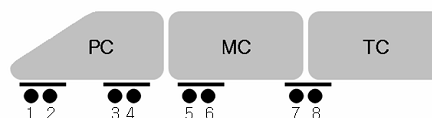
마모계수 K는 외부 환경과 운행 조건에 따라 크게 영향을 받으므로 lab test와 field measurement를 통하여 현실적으로 값의 범위가 결정되고 조정되어야 하지만, 한국형 고속철도 차량의 경우 시험 운행기간과 구간이 한정되어 있으므로 유사한 재료로 수행되었던 선행연구 자료를 이용하였다. (wheel ; UIC900A, rail:UIC 60)

1회전마다 마모량에 구간별 거리로 곱해주고, 진행방향으로 각 cell의 마모량을 합해주면 1회 왕복하였을 때의 총 마모량이 계산된다.

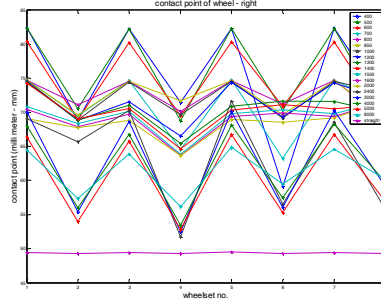
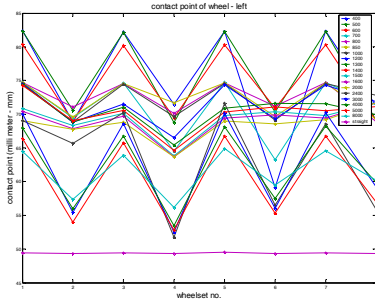
## 4. 해석결과

### 4.1. 접촉점 및 최대 마모량

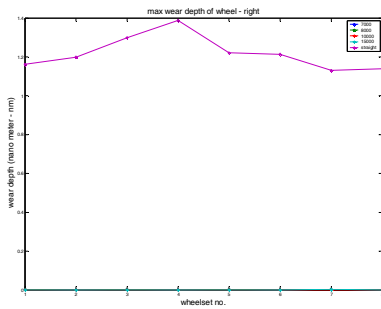
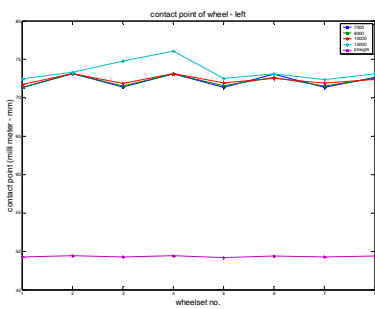
각 차량의 번호는 다음과 같이 정해졌음



# 1. 접촉점



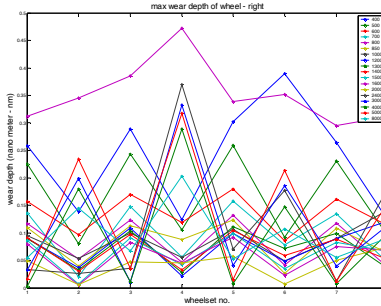
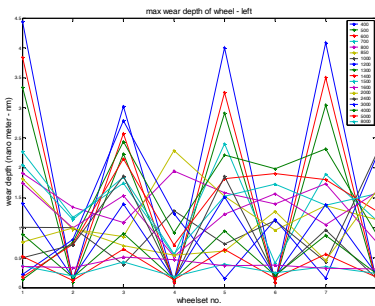
left [KS50N] right



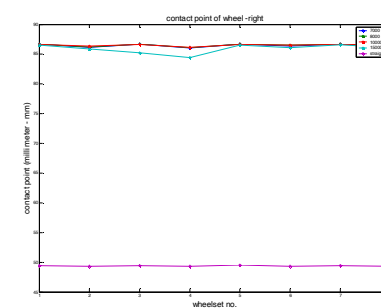
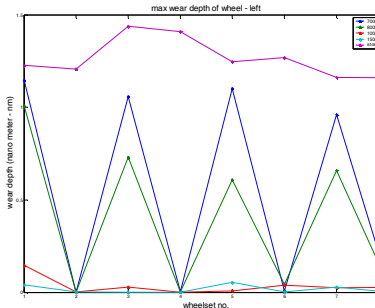
left [UIC 60]

right

# 2 최대 마모량



left [KS50N] right



left [UIC 60] right

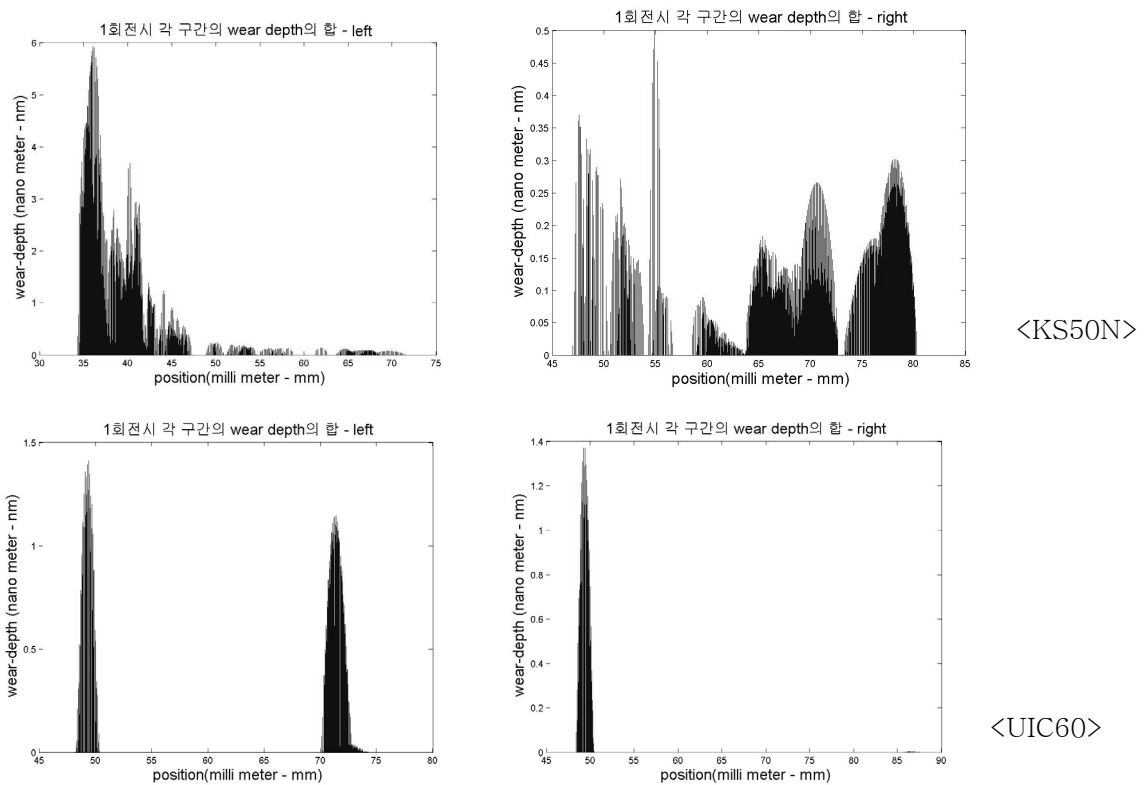
bogie가 곡선의 형상에 맞게 휘어질 수 없기 때문에 각 bogie마다 앞 뒤 차륜의 접촉점과 마모량의 차이가 일정하게 나타난다. 곡선반경의 커질수록 마모량은 점차적으로 줄어들고(반경400m, left 1st wheel : 4.4387nm / 반경 8000m, left 1st wheel : 0.3598nm), 접촉점의 위치는 점차 직선일 때의 접촉점인(49.2927mm)로 근접해 간다.

왼쪽 차륜이 오른쪽보다 마모량이 10배 이상 더 큰 것을 확인할 수 있는데(반경 400m left 마모량 : 4.4387 nm 오른쪽 : 0.25848nm), 이것은 원심력으로 인해 회전반경의 중심에서 멀어지는 쪽으로 힘이 작용하기 때문에 왼쪽 차륜의 마모량이 더 크게 나타나는 것으로 생각된다.

UIC60과 KS50N은 wheel과 접촉하는 두부의 형상은 유사하므로 직선 구간을 기준으로 봤을 때 접촉점이 거의 동일한 위치(49.2927mm)에서 나타남을 확인할 수 있었다.

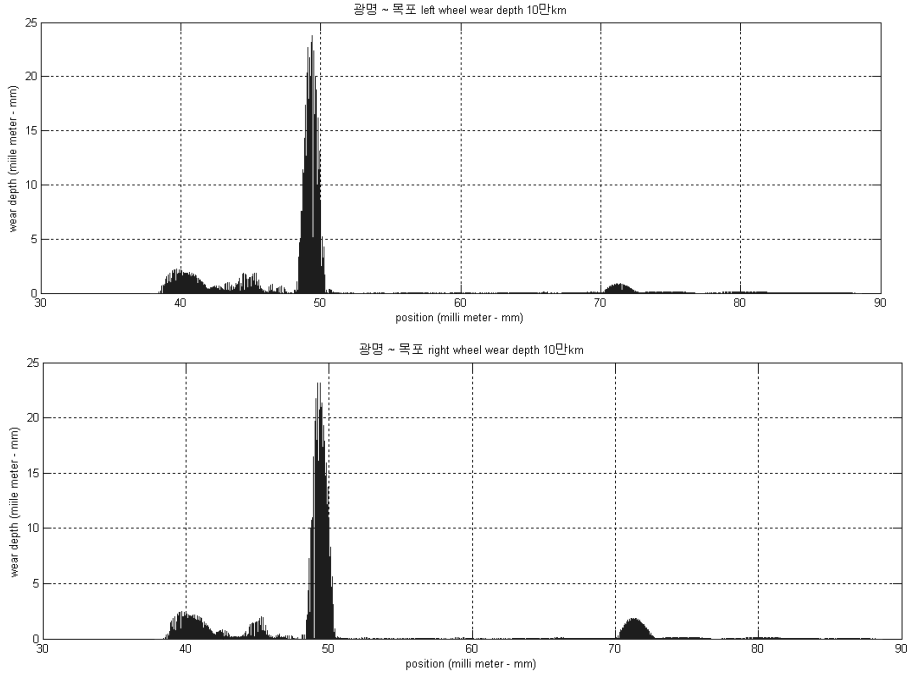
KS50N의 600m 이하 곡선반경은 다른 구간이 비해 높은 마모량이 나타나므로 이 구간은 윤활이나 프로파일의 형상 변환 등이 필요한 것으로 생각된다.

#### 4.2 각 구간별로 1회전 시 마모량 합산 그래프



기존선의 곡선구간의 마모는 38~45mm, 60~80mm에서 발생된다. 전용선 곡선구간의 마모는 70~73mm에서 발생한다. 기존선, 전용선 직선구간은 모두 48~50mm에서 마모가 발생한다. 곡선 구간에서 오른쪽 차륜의 마모량을 왼쪽차량에 비해 상대적으로 매우 적음을 확인할 수 있다.

### 4.3 10만 km 주행 시 마모정도



실제 선로는 왼쪽과 오른쪽으로 균등하게 곡선화 되어 있으므로 최종적인 마모량은 좌,우가 비슷하게 나타난다. 모든 곡선구간의 길이 합보다 직선구간의 길이가 2배정도 많으므로 직선구간의 마모량이 좀 더 깊게 나타남을 볼 수 있다. 하지만 이것은 불규칙도가 없는 경우로 실제 도로환경과는 다를 것이다. 불규칙도(irregularity)에 의해 각 부분에 집중되어 있던 마모량이 주변으로 확산되어 마모량이 넓은 범위로 분포 되고 마모량의 크기는 줄어들 것이라 예상된다.

### 5. 감사의 글

본 연구는 철도기술연구원 고속철도기술개발사업으로 지원된 “고속전철 차량 레일간 상호작용 현상 Interface 연구” 과제의 연구결과 일부입니다.

### 6. 참고문헌

1. 고속철도기술개발 통합 및 총괄, 건설교통부, p.부록 5-48 2004.10.
2. J.J.Kalker , ' Rolling contact Phenomena : Linear Elasticity' , Applied Mathematical Analysis Reports, p.34-48, 2000.
3. 이지하, 레일과 차륜의 마모에 대한 기하학적 검토, 2000년도 추계 학술대회 논문집, 철도학회, p442~449
4. 최정흠, 유한요소 해석을 이용한 한국형 고속철도 차량의 차륜마모 예측, 2005년도 춘계 학술대회논문집, 철도학회
5. 국유철도건설규칙개정, 2000.8