

## 접촉위치에 따른 도시철도 차륜 답면의 특성 변화

### Characteristics of Wheel Tread for Urban Train Based on Contact Positions

권석진\* · 노학락\*\* · 남윤수† · 서정원\* · 이동형\*

Seok-Jin Kwon · Hang-Nak Noh · Yoonsu Nam · Jung-Won Seo · Dong-Hyung Lee

**Abstract** The damaged wheel in railway vehicle would cause a poor ride comfort, a rise in the maintenance cost and even fracture of the wheel, which then leads to a tremendous social and economical cost. The defect initiation and crack propagation in wheel may result in the damage of the railway vehicle or derailment. Therefore, it is important to evaluate the characteristics of the wheel tread. In the present paper, the characteristics of wheel tread based on contact positions, running distance and brake pattern are evaluated. The result shows that the damaged wheel tread is remarkably depended on the contact positions between wheel and rail.

**Keywords** : Railway wheel tread, Damage evaluation, Contact, Replication test, Wheel wear

**요 지** 도시철도 차륜에서 손상된 차륜은 주행 중의 승차감 악화 및 보수비용의 증가로 이어질 수 있기 때문에 차륜답면 특성 변화에 대한 평가는 대단히 중요하다. 본 연구에서는 비파괴적 표면검사법을 이용하여 차륜답면의 손상 평가를 실시하였으며 접촉위치, 주행거리, 제동방식에 따라 차륜답면의 특성을 평가하였다. 그 결과 접촉위치에 따라 차륜답면이 현저히 다른 손상 특성을 나타남을 보여주고 있다.

**주요어** : 차륜답면, 손상평가, 접촉, 비파괴 표면조직검사, 차륜마모

## 1. 서론

도시 철도차량의 차륜은 빈번한 승객이동, 출퇴근 시간대의 혼잡도 및 곡선 선로의 주행으로 복잡한 하중상태에 놓여져 있다. 특히, 주행 장치의 핵심부품인 차륜의 특성변화는 승객의 안전성과 정비에 따른 경제성 측면에서 매우 중요한 역할을 지니고 있다. 도시철도 차량에서 손상된 차륜은 주행 중의 승차감악화 및 유지보수비용의 증가로 이어질 수 있기 때문에 차륜특성 변화에 대한 분석은 대단히 중요하다고 할 수 있다.

차륜에서의 피로균열발생과 그로부터 파생되는 균열성장은 레일과의 구름접촉피로(rolling contact fatigue)와 제동 마찰열에 의한 열응력(thermal stress)에 의하여 발생한다

[1]. Bernasconi[2]은 다축피로시험을 이용하여 구름접촉 피로하중을 받는 차륜의 피로평가에 대하여 보고하였으며 Ghidini[3]는 차륜재의 응력-변형률곡선을 이용하여 차륜재의 구름접촉피로와의 관계를 평가하는 새로운 식을 제안하였다. Walther[4]는 차륜재에 대하여 주기적인 변형거동과 미시조직과의 관계에 대하여 연구하였으며 주기적인 변형거동과 수명은 거의 영향을 미치지 않는다고 보고하였다. 또한, Grosse[5]는 중성자법을 이용하여 주행거리에 따라 차륜재의 잔류응력이 변화되고 있음을 보고하였다.

이와 같이 차륜재의 손상메커니즘에 대하여 많은 연구가 진행되고 있으나 철도차량 차륜은 레일과의 접촉에 의하여 여러 가지 복합적인 영향인자가 개입되어 손상이 발생되고 있으므로 이러한 영향인자를 고려한 손상평가 방법이 필요하다.

본 연구에서는 도시철도용 차륜을 대상으로 접촉위치, 주행거리 및 제동형식에 따른 차륜답면 특성변화를 비파괴적 표면조직검사법을 이용하여 평가하였다.

† 책임저자, 정회원, 강원대학교, 교수

E-mail : nys@kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6376 FAX : (033)257-4190

\* 한국철도기술연구원

\*\* 서울특별시도시철도공사

## 2. 도시철도 차륜 답면(踏面)의 손상 형태

도시철도차량의 차륜답면 손상형태는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 여러 종류가 있으며 그에 대한 특성은 다음과 같다[6,7]. 차륜에 작용하는 제동력이 차륜과 레일사이의 접촉력을 초과하는 경우, 차륜이 활주하는 답면이 국부적으로 평평하게 되어 찰상(flat)이 발생한다. 따라서 찰상의 크기는 운중, 속도 레일면의 형상 및 건조, 습윤 상황 등에 의해 좌우되며, 찰상이 발생한 차륜이 20km/h 이상의 속도로 주행하면 찰상위치에서 차륜은 레일면에서 떨어져 계속적으로 레일과 부딪히면서 충격력을 받게 된다. 이 충격력은 차체, 차축, 축베어링, 레일 등에 대하여 악영향을 미치게 되고 승차감을 악화시키며 소음도 증가시킨다[8].

박리(shelling)는 답면에 발생한 열균열 또는 열경화 균열이 주행 중의 응력에 따라 진전하여 인접한 균열에 겹쳐진 부분이 탈락 또는 분리되는 손상이다. 열경화에서 박리에 도달하는 과정은 열경화층 대부분의 중앙에 처음 작은 균열이 발생하는 경우가 많다. 이 균열은 열경화층의 깊이와 동등하거나 보다 약간 깊게 진행된다. 그러나 주행 중의 전동하중에 따라 반복 응력을 받게 되면 균열은 길이방향으로 경사지게 진전하여 깊이 수  $\mu\text{m}$ 에 도달한다.

차륜 바깥쪽 원주부는 제륜자의 마찰에 따라서 가열되거나 팽창되지만 가열되지 않는 내부의 냉각부분에 의해 억제되기 때문에 소성변형이 일어나게 된다. 이 상태에서 차륜의 답면이 상온에서 냉각되면 가열된 부분에 인장 잔류응력이 발생하여 이 가열냉각의 과정이 계속적으로 반복되면 열균열(thermal crack)이 발생하게 된다. 또한, 표면에 발생한 마르텐사이트 조직의 열변질층은 균열감수성이 높기

때문에 답면에 크고 작은 균열이 발생하는 것이 많다. 이러한 열경화에 의하여 미세한 균열이 발생한다. 주행과 동반하는 높은 응력의 발생에 의해 경화층 내부로 진전하여 박리로 진전한다[6,7].

답면 제륜자를 사용하는 차륜답면에 발생하는 이상마모로서는 그 발생 형태에 의하여 오목마모(concave wear)와 그루빙(grooving)이 있다. 전자는 차륜답면 중앙부가 오목형상으로 크게 마모되는 경우이며 후자는 답면의 제륜자와 접촉하는 끝단부에 부분적으로 오목형상의 마모가 발생하는 경우를 말한다. 그루빙의 원인에 대해서는 제륜자의 경도, 배합재료의 편차, 또는 차륜과 레일의 마모분 등의 경한 물질이 합성제륜자의 마찰면을 갇아먹는 등의 원인들이 복잡하게 결합되어 발생한다. 오목마모는 합성제륜자재가 차륜재에 대하여 공격성이 크기 때문에 발생하기 쉽다[6,7].

차륜림부가 이상가열을 받는 경우 인장 잔류응력이 발생한 답면의 열균열을 기점으로 갑자기 취성파괴(brittle fracture)가 발생한다. 이상 가열의 원인으로서로는 가혹한 억제제동, 제동력의 과다 및 빈번하게 반복되는 가혹한 정차제동을 고려할 수 있다. 과열된 차륜 림부는 그 열팽창이 관부에 의해 억제되기 때문에 림부가 과열된 상태로 과열층이 회복된 다음 상온상태에서는 림부의 잔류응력이 인장으로 반전되는 경우가 있다[6,7].

## 3. 실험 방법 및 절차

### 3.1 실험조건

도시철도 차량의 차륜답면 특성 변화를 평가하기 위해 Table 1과 같이 주행거리가 다른 차륜을 대상으로 연구를 실시하였으며, 제동방식이 다른 구동차(motor car)와 부수차(trailer car)를 구분하여 차륜답면의 접촉특성 변화를 분석하였다. 그리고, 레일과의 접촉위치를 고려하여 차륜답면의 4~5곳 영역에 대하여 분석을 실시하였다.

### 3.2 비파괴 표면조직검사(Replication test)

레일과의 접촉응력과 답면 제동에 의한 열응력으로 인하

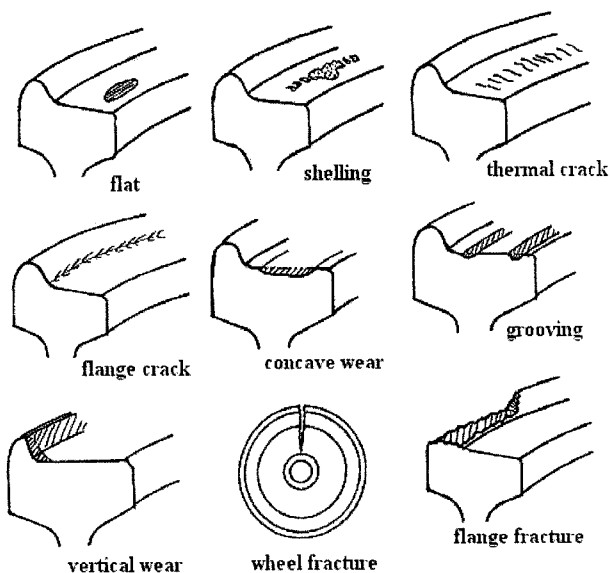


Fig. 1. Types of wheel damages in urban train

Table 1. Conditions of test wheel

| Car type    | Brake type | Replication location | Running distance (km) |
|-------------|------------|----------------------|-----------------------|
| Motor car   | Tread      | A, B, C, D, E        | 47,000                |
|             |            |                      | 78,000                |
|             |            |                      | 116,000               |
| Trailer Car | Disc       | A, B, C, D           | 160,000               |
|             |            |                      | 227,000               |

여 차륜담면은 여러 조직변화가 발생한다. 이러한 조직변화를 관찰하기 위해서는 직접 차륜담면에서 시편을 채취하여 전자현미경으로 관찰하는 것이 일반적이나, 운행 중인 차륜에서 시편을 떼어내는 것은 극히 제한된 경우라 할 수 있다. 따라서 직접 시료를 채취하기 어려운 구조물의 조직변화를 관찰하고자 하는 경우, 금속조직을 다른 물질에 복제시켜 그 물질을 실험실에서 간접적으로 관찰, 분석할 수 있는 비파괴 표면조직검사(Replication test)[9]에 의한 미세조직을 관찰하였다.

Fig. 2에 레플리카 방법을 위한 차륜담면에서의 채취 위치를 보여주고 있다. 구동차와 부수차를 구분하여 채취위치 개소를 달리하여 관찰하였다. 본 연구에서 나타낸 이하의 조직사진의 크기(scale)는 100 $\mu$ m이다.

표면 복제시 연마의 초기엔 산화피막을 연삭한 후 점차 미세한 연마지를 사용하여 연마하였으며, 최종 연마시에는 6 $\mu$ m와 1 $\mu$ m의 다이아몬드 연마제를 사용하였다. 부식액으로는 2% Nital을 이용하여 부식시킨 후 셀룰로오스 아세테이트 필름을 사용하여 미세조직을 복제하였다. 최적조건을 얻기 위하여 각 부위에서 부식 수준을 달리하여 Light, Medium, Heavy 등 3종의 표면조직을 얻었다.

비파괴적 표면조직검사는 대비를 좋게 하기 위하여 금으로 진공 스퍼터 코팅한 후, 실험실에서 광학 현미경으로 100~500배의 배율로 관찰하였다. 비파괴 조직검사 대상 차륜은 일정 주행거리를 가진 차륜에 대하여 분석하였다.

비파괴적 표면조직검사의 필름 분석시 광학현미경은 올림퍼스 CCD ProgRes C10을 사용하였고 이미지 분석 프로그램은 iSolution을 사용하였다.

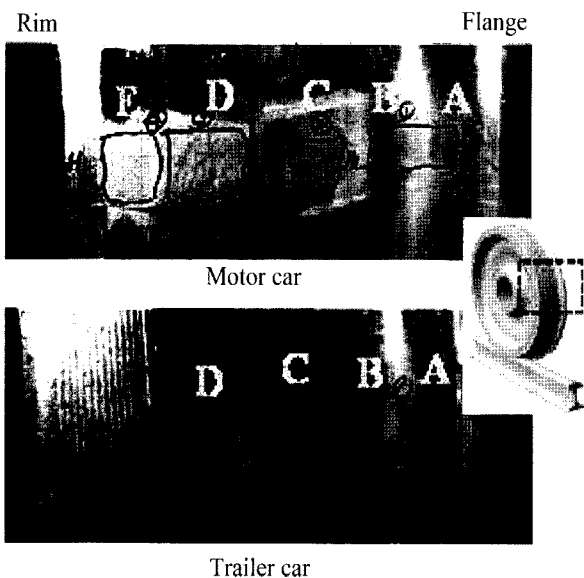


Fig. 2. Locations of replication test

### 3.3 경도시험(Hardness test)

경도시험은 이동식 경도기(MicrodurII)를 사용하였으며, 경도 측정 위치는 Fig. 2에서 비파괴적 표면조직검사를 채취한 위치의 경면(1 $\mu$ m)에서 실시하였다. 비커스 경도(Hv)를 측정하기 위하여 검사부위마다 10회 이상 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 접촉위치에 따른 차륜담면 조직특성 변화

구동차와 부수차의 차륜담면에 대하여 접촉위치, 주행거리와 제동방식에 따라 실험결과를 고찰하였다. Fig. 3은 구동차(227,000km 주행)의 차륜에서 레일과의 접촉위치에 따른 비파괴 표면조직검사의 결과를 보여주고 있다. 차륜담면에서 레일과의 접촉위치에 따라 조직변화의 양상이 다르게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

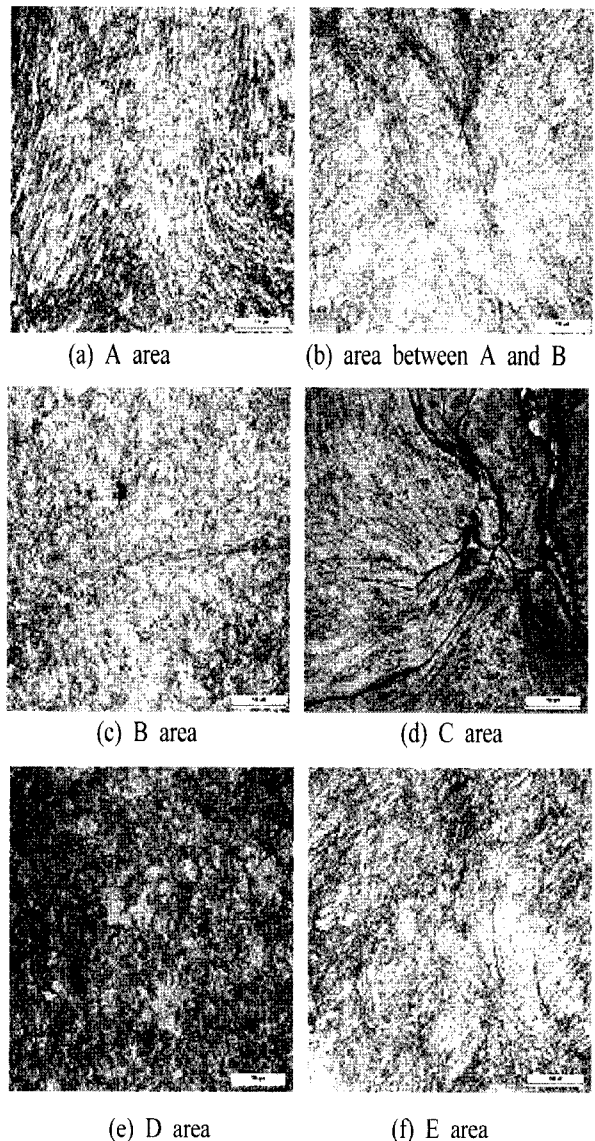


Fig. 3. Microstructures in wheel contact position

Fig. 3(b)와 Fig. 3(d)에서 보여준 바와 같이 A와 B사이의 영역 즉, 플랜지와 차륜담면이 이어지는 곡선부분(flange neck)과 C영역에서 손상이 많이 발생하고 있으며, 주로 열균열과 박리에 의한 손상이 발생하고 있다.

Fig. 3의 A~C의 영역은 도시철도 차륜이 가장 많이 레일과 접촉하는 부분이며 이 영역에서 레일과의 구름접촉피로 손상과 담면제륜자에 의한 열응력에 의한 손상이 많이 발생하고 있는 것으로 판단된다. 또한, Fig. 3(f)에서 볼 수 있듯이 E의 영역에서도 소성변형에 의한 경사 균열(차륜 담면에 경사지게 발생한 균열[10])이 발생하고 있다.

도시철도용 차륜과 고속철도용 차륜 담면의 손상에 대하여 비교하면 고속철도용 차륜에서는 차륜담면의 림부쪽과 담면 중앙쪽에서 박리와 열균열이 많이 발생하고 있다[10]. 도시철도용 차륜에서는 플랜지 영역(Fig. 2의 A~B 영역)에서 손상이 많이 발생하고 있고, 플랜지의 영역 근처에서 손

상이 많이 발생하고 있음을 Fig. 3으로부터 확인할 수 있다. 특히, 도시철도의 경우 500R 이상의 곡선 선로비율이 26%이며 이러한 곡선 선로비율이 차륜손상에 영향을 미치는 것이라 판단된다. 따라서, 곡선 선로 주행시 차륜과 레일의 경계영역에 대한 별도의 관리가 필요하다.

#### 4.2 주행거리에 따른 차륜담면 조직특성 변화

주행거리에 따른 차륜담면의 조직특성 변화는 Fig. 2의 비파괴 표면조직검사의 채취 위치 중 손상이 많이 발생하는 B의 영역에 대하여 평가하였다. 신차륜의 경우 Fig. 4(a)와 같이 부위에 관계없이 망상의 페라이트(ferrite, 흰색)와 퍼얼라이트(pearlite, 검은색) 조직을 보이는 일반적인 탄소강의 형상을 나타내고 있다. 그러나, Fig. 4(b)~Fig. 4(f)에 나타낸 바와 같이 주행거리가 증가함에 따라 축 방향으로 차륜담면의 조직이 변형되는 경향을 보여주고 있다. Fig. 4(a)

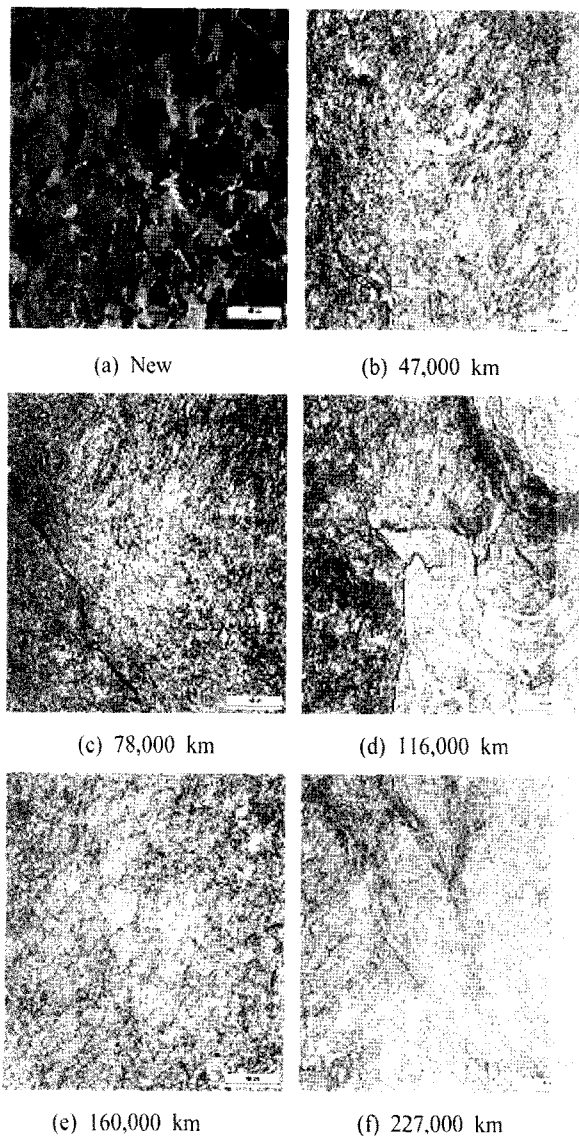


Fig. 4. Microstructures of wheel tread for motor car

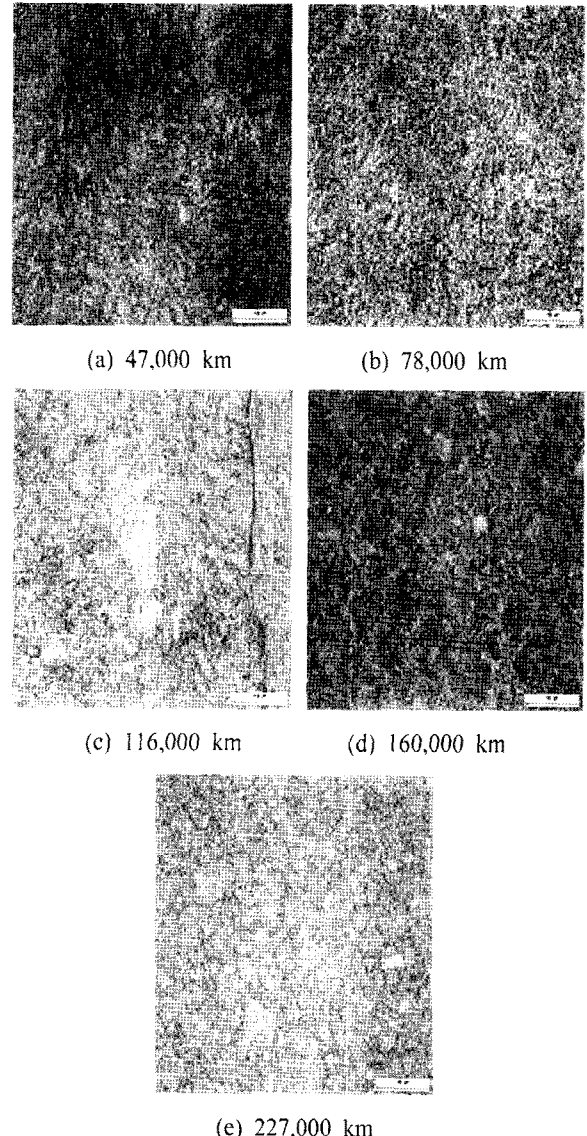


Fig. 5. Microstructures of wheel tread for Trailer car

와 Fig. 4(b)에서 보여준 바와 같이 초기의 차륜담면 조직은 일정기간 주행 후 조밀화 되면서 변형된 형태로 나타나고 있다. 또한, Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)와 같이 발생한 균열은 주행거리가 증가함에 따라 인접한 균열과 합체되어 박리를 동반한다. Fig. 4(d)에서 나타난 박리가 Fig. 4(e)에서 일정 주행거리 후 없어진 현상은 차륜 손상에 따른 담면삭정의 이유에 기인한다. Fig. 5는 부수차 차륜담면의 조직 관찰 사진을 나타낸 것이다. 구동차의 차륜담면 조직과 유사하게 주행거리에 따라 조직이 변형되는 경향을 보여주고 있으나, 구동차의 차륜담면과 달리 디스크 제동방식의 부수차 차륜담면에서는 미세균열이 발생하고 있으나 박리는 관찰되지 않았다. 또한, 부수차의 차륜담면 조직은 주행거리에 따라 그다지 차이가 발생하지 않았으며 이것은 차륜-제륜자의 마찰에 의한 열응력 영향이 미치지 않기 때문인 것으로 판단된다. 신재 차륜의 조직사진은 제동방식에 무관하게 같다. Fig. 4와 Fig. 5에서 알 수 있듯이 구동차와 부수차의 차륜에 대한 손상비율이 분명하다. 이에 따라 구동차와 부수차에서 제동방식에 따라 차륜재를 선택하여 도시철도를 운영해야 할 것으로 판단된다.

#### 4.3 제동방식에 따른 차륜담면 조직특성 변화

220,000km 주행 후 제동방식에 따른 차륜담면의 특성변

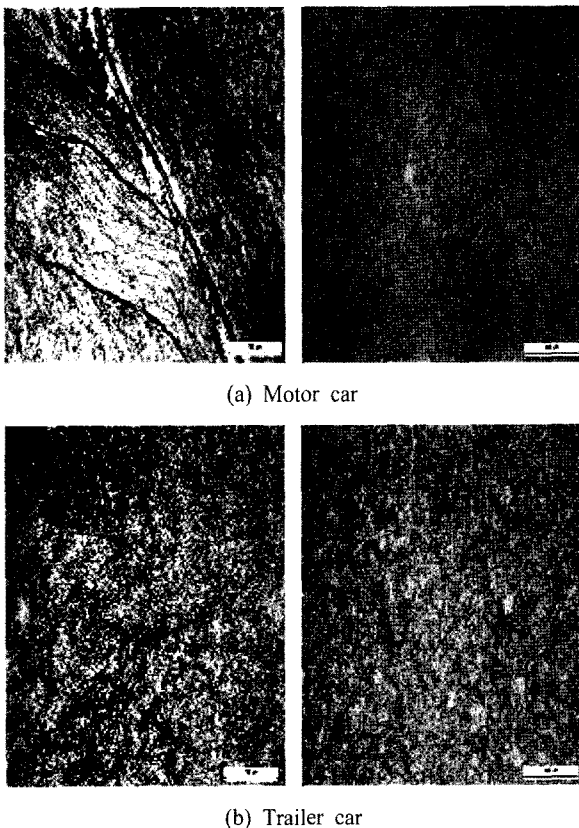


Fig. 6. Microstructures of wheel tread by brake type

화를 Fig. 6에서 보여준다. 제동방식에 따른 차륜담면의 특성을 분석한 결과 디스크 제동방식인 부수차보다 담면제동 방식인 구동차의 차륜에서 손상이 더 많이 발생하고 있었다. 특히, 담면제동 방식인 구동차의 차륜에서 주행거리가 증가함에 따라 발생한 균열도 계속적으로 진전되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이 부수차의 차륜담면과 비교하여 구동차의 차륜담면에서 균열의 발생이 뚜렷이 보인다. 이러한 차이의 원인은 구동차에 작용되는 담면제륜자와 차륜사이의 열응력 영향에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 6에서 보여준 바와 같이 구동차의 차륜 담면에서는 균열합체에 따른 박리 현상을 볼 수 있으나 부수차의 차륜에서는 상대적으로 미세한 균열만 관찰되었다. 림(rim)부쪽의 미세한 균열은 레일과 접촉에 의한 소성변형으로 발생하는 것이며 이러한 미세균열의 방향은 최대 전단응력 방향과 일치함을 보여주고 있다. 또한, 실제 도시철도 차륜 플랜지와 담면이 교차되는 폭선부분(flange neck)에서 그루빙(grooving) 및 직립 마모가 발생되고 있으며 이는 담면 제륜자의 열응력과 레일과의 접촉응력에 의해 이루지는 것으로 판단된다.

#### 4.4 차륜담면에서의 경도 변화

Fig. 7은 227,000km 주행거리의 구동차에서 접촉위치에 따른 차륜 담면에서의 경도특성 변화를 나타낸다. 손상이 많이 발생하는 A와 B영역의 경도치는 420~480Hv를 나타내고 있으며 D영역에서는 570~600Hv의 경도치의 분포를 나타내고 있다. D영역은 C영역에 비하여 2배 정도 높게 경도차이가 나타나고 있으며, 손상이 발생하는 영역에서 경도치가 높게 나타나고 있다. Fig. 8은 제동방식에 따른 차륜담면에서의 경도 변화를 나타낸 것이다. 구동차의 차륜

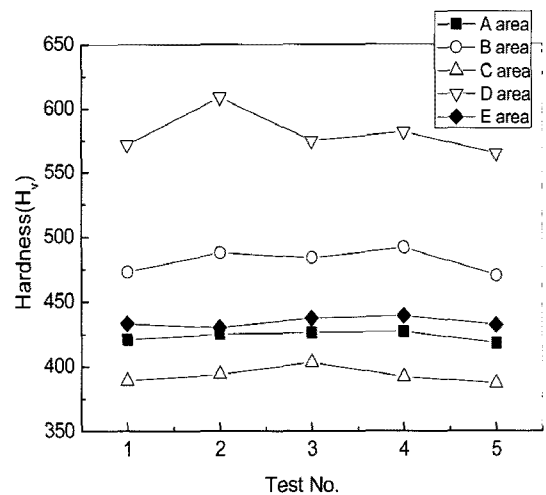


Fig. 7. Hardness in contact position of wheel

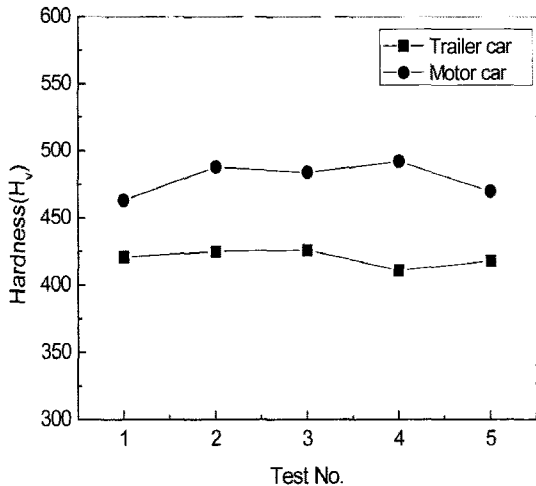


Fig. 8. Hardness in wheel tread by brake type

답면 경도가 부수차에 비하여 약 1.5배정도 높은 값을 보이고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 손상이 많이 발생하는 차륜답면의 경도와 상대적으로 손상이 적은 차륜답면의 경도차이 약 2배정도의 차이가 나타난다. 이것은 차륜답면의 조직이 구름접촉피로 영향하에 마르텐사이트로 천이되면서 차륜답면이 경화되고 있음을 의미한다[11].

### 5. 결론

접촉위치에 따라 도시철도 차륜답면에서 발생하는 손상을 평가하기 위하여 비파괴 표면조직검사법을 이용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 차륜답면은 레일과의 접촉위치에 따라 손상 정도가 판이하게 나타나며 주요 손상영역은 플랜지와 차륜답면이 교차되는 영역과 답면 중앙부이다. 도시철도 차륜은 고속철도의 손상영역과 다른 분포를 나타내며 이것은 레일과의 접촉위치에 영향을 받는 것으로 판단된다.
- (2) 주행거리에 따라 구동차와 부수차 차륜의 답면 조직형태가 다르게 나타나며 주행거리가 증가함에 따라 구동차 차륜의 경우 차륜답면 손상 정도가 구분되어 나타나지만 부수차 차륜의 경우에는 현저하게 구분되지는

않았다.

- (3) 제동방식에 따라 차륜답면의 손상이 명확히 다르게 관찰되고 있으며 도시철도차량에서 차륜의 적용시 제동방식에 따라 차륜의 종류(wheel class)에 대한 선택적인 도입이 필요하다.
- (4) 차륜답면에서의 경도변화는 접촉위치와 제동방식에 따라 약 2배의 차이를 나타내고 있으며 손상이 많이 발생하는 영역에서 경도가 높게 나타나고 있다.

### 참고 문헌

1. Zerbst, U., Madler, K., Hintze, H.(2005), "Fracture mechanics in railway applications", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, pp. 163-194.
2. A. Bernasconi, P. Davoli, M. Filippini, S. Foletti (2005), "An integrated approach to rolling contact sub-surface fatigue assessment of railway wheels", *Wear*, Vol. 258, No. 7-8, pp. 973-980.
3. Ghidini, A, Cantini, S (2004), "Mechanical comparison between north america and european materials for wrought solid wheels in terms of RCF resistance", 14th wheelset congress.
4. F. Walther, D. Eifler (2004), "Local cyclic deformation behavior and microstructure of railway wheel materials", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 387-389, No. 15, pp. 481-485.
5. M. Grosse, P. Ottlinger (2006), "Strain measurements at railway wheels, *Materials Science and Engineering*": A, Vol.437, No.1, pp. 88-92
6. 木川武彦(1991), "鐵道車輪のフラットの生成ならびに剝離に関する研究", RTRI report, Vol. 5, No.7, p. 33.
7. Ekberg, A, Sotkovski, P (2001), "Anisotropy and rolling contact fatigue of railway wheels", *Journal of fatigue*, Vol. 23, pp. 29-43.
8. 김재철(2008), "차륜/레일 접촉에 의한 소음과 저감기술", *한국철도학회지*, Vol.11, No.3.
9. ASTM E1351-01(2006), "Standard practice for production and evaluation of field metallographic replicas".
10. 권석진, 이동형, 서정원, 권성태(2007), "비파괴 표면조직검사법과 파괴역학 특성에 따른 고속철도용 차륜답면의 손상평가", *대한기계학회 논문집 A권*, 제31권, 제7호, pp.756-763
11. Sergey M. Zakharov, Irina G Goryacheva (2005), "Rolling contact fatigue defects in freight car wheels", *Wear*, Vol. 258, No. 7-8, pp. 1142-1147.

접수일(2008년 2월 10일), 수정일(2008년 4월 30일),  
게재확정일(2008년 5월 8일)