

< 논문 >

비파괴적 표면조직검사법과 파괴역학 특성에 따른 고속철도용 차륜 답면의 손상 평가

권석진* · 이동형* · 서정원* · 권성태*
(2007년 1월 24일 접수, 2007년 5월 26일 심사완료)

Damage Evaluation of Wheel Tread for High Speed Train Using Replication and Fracture Mechanics Characteristics

Seok-Jin Kwon, Dong-Hyung Lee, Jung-Won Seo and Sung-Tae Kwon

Key Words: Wheel Tread(차륜답면), Replication(비파괴적 표면조직검사), Fracture Toughness(파괴인성), Fatigue Crack Growth Rate(피로균열 진전속도), Field Test(현차시험)

Abstract

The majority of catastrophic wheel failures are caused by surface opening fatigue cracks either in the wheel tread or wheel flange areas. The inclined cracks at railway wheel tread are initiated and the cracks are caused by wheel damage-spalling after 60,000 km running. Because the failed railway wheel is reprofiled before regular wheel reprofiling, the maintenance cost for the railway wheel is increased. Therefore, it is necessary to analyze the mechanism for initiation of crack. In the present paper, the combined effect on railway wheels of a periodically varying contact pressure and an intermittent thermal braking loading is investigated. To analyze damage cause for railway wheels, the measurements for replication of wheel surface and the effect of braking application in field test are carried out. The result shows that the damages in railway wheel tread are due to combination of thermal loading and ratcheting.

1. 서론

철도차량의 고속화에 따라 철도차량의 주행 장치인 차륜의 피로수명은 승객의 안전성 측면에서 매우 중요한 역할을 지니고 있다. 고속주행 중의 고장 또는 사고는 승객의 안전성에 치명적으로 피해를 줄 수 있기 때문에 이러한 고장을 방지하고 안전성을 강화하기 위한 재료적, 기계적 설계

대책기술들이 많이 연구되고 있다.⁽¹⁻³⁾

철도차량에서 손상된 차륜은 주행 중의 승차감 악화 및 보수비용의 증가로 이어질 수 있기 때문에 차륜손상에 대한 메커니즘의 이해와 분석은 대단히 중요하다고 할 수 있다. 차륜에서의 피로 균열발생과 그로부터 파생되는 균열성장은 레일과의 구름접촉피로(rolling contact fatigue)와 제동 마찰열에 의한 열응력에 의하여 발생한다.⁽⁴⁾

Ekberg⁽⁵⁾는 차륜내부에 존재하는 결함이 차륜의 표면손상에 많은 영향을 미친다고 보고하였으며 Ghidini⁽⁶⁾는 차륜재의 응력-변형률곡선을 이용하여 차륜재의 구름접촉피로와의 관계를 평가하는 새로운 식을 제안하였다. 또한, Walther⁽⁷⁾는 차륜재의 저주기 피로시험을 통하여 하중조건에 따라

† 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원
E-mail : sjkwon@krri.re.kr
TEL : (031)460-5249 FAX : (031)460-5279
* 한국철도기술연구원

차륜재의 소성변형거동이 다르게 됨을 보고하였다. 이와 같이 차륜재의 손상메커니즘에 대하여 많은 연구가 진행되고 있으나 철도차량 차륜은 레일과의 접촉에 의하여 여러 가지 복합적인 영향인자가 개입되어 손상이 발생되고 있으므로 각종 영향인자를 고려한 손상평가 방법이 필요하다. 또한, 차륜에 발생하는 손상으로 인하여 정기적인 차륜 삭정주기(削正週期)이전에 삭정 작업이 이루어지기 때문에 보수비용에 대한 경제적인 손실이 발생하고 있다.

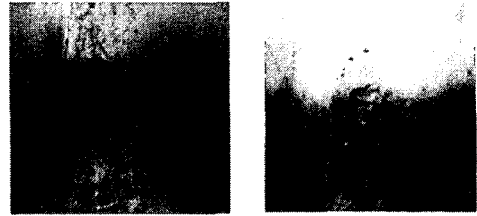
이에 따라 본 연구에서는 신조차륜과 손상차륜을 대상으로 기존의 손상 평가방법과 달리 비파괴적 표면조직검사법, 파괴역학적 특성과 현차 시험을 통하여 고속도용 차륜에서 발생하고 있는 손상의 원인을 평가하였다.

2. 차륜 답면(踏面)의 손상 형태

레일과 구름 접촉하는 철도차량의 차륜표면을 차륜 답면(踏面)이라하며, 이러한 차륜 답면에서 구름접촉피로와 제동마찰열에 의한 결과로 차륜의 부분손실이나 결함이 발생한다. 이러한 결함의 발생 및 진전의 결과는 차량부품의 손상 또는 심지어 탈선을 일으킬 수 있다. 차륜의 손상형태는 다음 3가지로 크게 구분할 수 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

찰상(flat)은 제동력이 초과되면서 차륜이 레일 위를 활주한 결과 발생하는 손상이다. 차륜접촉면의 과열과 이후의 빠른 담금질과정으로 인해 접촉면의 피열라이트강이 매우 취성을 가지는 마르텐사이트로 변태된다. 작은 량의 찰상에도 피로결합의 발생 또는 타원형 차륜으로 변형될 수 있다. 활주상황의 차이에 따라 답면 일부가 원형 또는 타원형으로 평탄화 되거나 찰상이 반점형태로 연결되어 발생하며 파상 또는 띠상의 소성유동이 연속적으로 발생한다. 일반적으로 발견시에는 박리를 동반한다.

박리(shelling, spalling)는 구름접촉피로에 따라 답면의 일부 또는 차륜의 전 원주에 걸쳐 발생하는 표면결합 현상이며 높은 응력과 견인력이 차륜답면에 반복 축적되면서 작용하는 하중방향으로 얇은 표면층이 이동하는 것이다. 즉, 최대 전단응력이 표면내부에서 발생하고 이 전단응력에 의하여 표면 피로균열이 발생하게 되며 균열은 표면 직하에서 개시하여 표면으로 진전하게 된



(a) Ratchetting (b) Spalling

Fig. 1 Damages of wheel tread

다. 일단 균열이 발생하면 균열은 일련의 하중을 받으면서 진전하며 다른 인접균열과 합체되어 표면에서 박리 현상이 발생하게 된다. 박리는 일반적으로 찰상과 열균열 등의 손상을 기점으로 발생하는 것이 많다.

열균열(thermal crack)은 제륜자의 마찰에 의한 답면 및 플랜지에 균열이 발생하는 것이다. 열균열은 수많은 미세한 균열이 그물모양으로 발생하는 상태이며 축방향으로 비교적 길게 진전되는 상태의 균열이다. 레일과 접촉함에 따라 차륜원주에 걸쳐 플랜지부분에 발생하는 균열이 있다.

Fig. 1은 고속도용 차륜에서 발생하는 여러 가지 손상 형태를 나타낸 것이다. Fig. 1(a)는 소성변형에 의해 차륜 답면에 발생하는 미세균열을 보여주고 있으며, Fig. 1(b)는 제동에 의해 발생하는 차륜 답면의 박리를 보여주고 있다.

3. 실험 및 평가방법

고속도용 차륜의 손상에 대한 발생 메커니즘을 해석하기 위하여 비파괴적 표면조직검사법, 파괴역학적 특성과 제동영향에 대한 현차 시험을 실시하였다.

3.1 비파괴적 표면조직검사법(Replication test)

레일과의 접촉응력과 답면 제동에 의한 열응력으로 인하여 차륜답면은 여러 조직변화가 발생한다. 이러한 조직변화를 관찰하기 위해서는 직접 차륜답면에서 시편을 채취하여 전자현미경으로 관찰하는 것이 일반적이거나, 운행 중인 차륜에서 시편을 떼어내는 것은 극히 제한된 경우라 할 수 있다. 그래서 직접 시료를 채취하기 어려운 구조물의 조직변화를 관찰하고자 하는 경우, 금속조직을 다른 물질에 복제시켜 그 물질을 실험실에

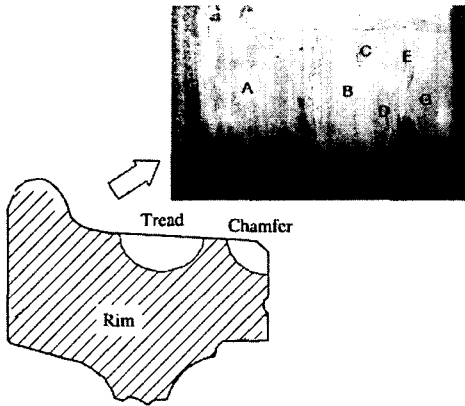


Fig. 2 Locations of replication test

서 간접적으로 관찰, 분석할 수 있는 비파괴적 표면조직검사법(Replication)에 의한 미세조직을 관찰하였다.

표면복제시 연마의 초기엔 산화피막을 연삭한 후 점차 미세한 연마지를 사용하여 연마하였으며, 최종 연마시에는 6 μm와 1 μm의 다이아몬드 연마제를 사용하였다. 부식액으로는 2% Nital을 이용하여 부식시킨 후 셀룰로우스 아세테이트 필름을 사용하여 미세조직을 복제하였다. 최적조건을 얻기 위하여 각 부위에서 부식 수준을 달리하여 Light, Medium, Heavy 등 3종의 비파괴적 표면조직검사를 얻었다. 비파괴적 표면조직검사는 대비를 좋게 하기 위하여 금으로 진공 스퍼터 코팅한 후, 실험실에서 광학 현미경으로 X100 ~ X500배의 배율로 관찰하였다. 비파괴 조직검사 대상 차륜은 주행 중인 차륜과 현차시험에 사용된 차륜에 대하여 분석하였다. Fig. 2는 차륜 답면에서의 비파괴적 표면조직검사를 위한 채취 위치를 나타낸 것이다.

3.2 경도시험(Hardness test)

경도시험은 이동식 경도기(Microdur II)를 사용하였으며, 경도 측정은 Fig. 2에서 비파괴적 표면조직검사를 채취한 위치의 경면(1 μm)에서 실시하였다. 비커스 경도(Hv)를 측정하기 위하여 검사부위마다 10회 이상 측정하였다.

3.3 인장시험(Tensile test)

손상 차륜과 신조 차륜에 대하여 차륜 답면에서 시편을 채취하여 인장시험을 실시하였다. Fig. 3에 보여준 바와 같이 레일과 차륜답면의 접촉위

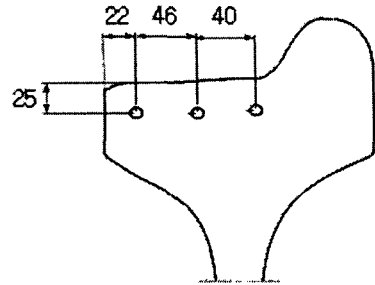


Fig. 3 Locations of tensile test

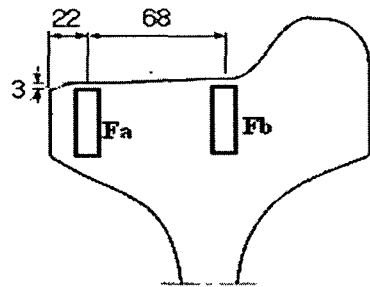


Fig. 4 Locations of K_{IC} test

치에 따라 차륜답면의 플랜지부, 답면중양부, 차륜답면 립부의 3가지 영역으로 구분하여 각각의 위치에서 3개씩 시편을 채취하였다. 각각의 위치는 Fig. 2에서 보여준 비손상 영역, 소성변형 영역, 백색층 영역을 고려한 것이다.

3.4 파괴인성(Fracture toughness)

차륜답면에 대한 균열저항성을 평가하기 위하여 파괴인성시험을 실시하였다. 차륜답면 접촉위치(Fa, Fb위치)에 따라 Fig. 4와 같이 동일한 위치에서 3개씩 시편을 채취하였다. 시편의 채취방향은 차륜의 이방성을 고려하여 차륜답면에 대하여 평행(Ha)방향과 수직방향(Va)의 2가지 방향에서 채취하였다. 파괴인성시험은 ASTM E399규격에 의하여 시험을 실시하였다.⁽¹¹⁾

3.5 피로균열진전(Fatigue crack growth rate)

차륜답면에 대한 균열발생 진전속도를 평가하기 위하여 피로균열진전시험을 실시하였다. 답면 접촉위치(Fa, Fb위치)에 따라 Fig. 4와 같이 동일한 위치에서 3개씩 시편을 채취하였다. 시편의 채취방향은 차륜의 이방성을 고려하여 답면에 평행(Ha)방향과 수직방향(Va)의 2가지 방향에서 채취하였다. 피로균열진전시험은 ASTM E647규격에

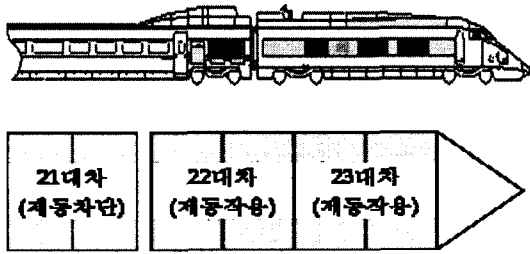


Fig. 5 Field test condition

의하여 시험을 실시하였다.⁽¹²⁾

3.6 현차시험(Field test)

제동이 차륜의 손상에 미치는 영향을 분석하기 위하여 제동통(brake cylinder)을 제거하여 현차시험을 실시하였다. Fig. 5와 같이 현차 시험의 신뢰성을 위하여 2개 대차(bogie)의 제동통을 제거하였으며 제동이 작용하는 전후대차와의 비교분석도 실시하였다. 운행 중의 차륜담면의 손상현황은 1년간 조사하였다.

4. 실험결과 및 고찰

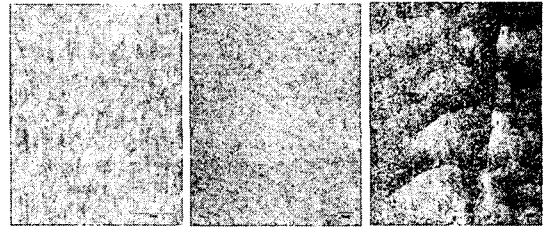
4.1 비파괴적 표면조직검사

4.1.1 주행 차륜담면

비파괴적 표면조직검사는 손상이 발생한 차륜과 현차시험 차륜을 대상으로 실시하였다.

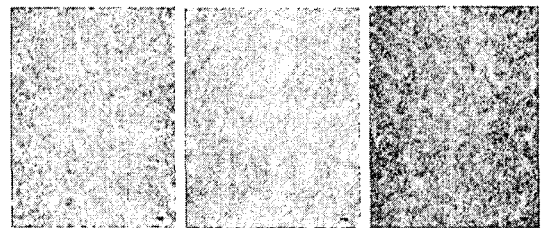
Fig. 6에 비파괴적 표면조직검사법에 의한 차륜담면의 표면조직 검사결과를 보여주고 있다. Fig. 2에 보여준 바와 같이 비손상 영역(A,G), 소성변형 영역(B), 백색층 영역(C,D,E,F)으로 구분하여 조직검사 결과를 나타낸다.

Fig. 6(a)에 보여준 바와 같이 비손상 영역(A,G)에서는 망상형 페라이트(ferrite)와 담금질(quenching) 온도가 약간 높아 약간 조대한 마르텐사이트(martensite)로 변태가 되어 있는 기지조직으로 구성되어 있다. 소성변형 영역(B)은 차륜과 레일의 전단응력에 의해 소성변형이 발생한 영역이다. Fig. 6(b)에서 볼 수 있는 것처럼 미시조직이 응력작용 방향으로 변형되어 있으며 비손상영역의 조직과는 다른 조직을 보여주고 있다. 또한, 전단응력에 의해 발생한 균열은 응력 방향에 45도 방향으로 발생하고 있었다.



(a) No damage (b) Plastic deformation (c) White layer

Fig. 6 Micro-structures for damaged wheel



(a) A-area (b) C-area (c) G-area

Fig. 7 Micro-structures for brake application

백색층 영역(C, D, E, F)은 미끄러짐 현상에 의한 마찰열이 국부적으로 온도가 녹는점(melting point) 영역까지 상승한 후 급랭되어 발생하는 것으로 표면에만 국부적으로 발생한다. Fig. 6(c)와 같이 열응력에 의하여 균열이 발생하고 있는 것을 볼 수 있다.

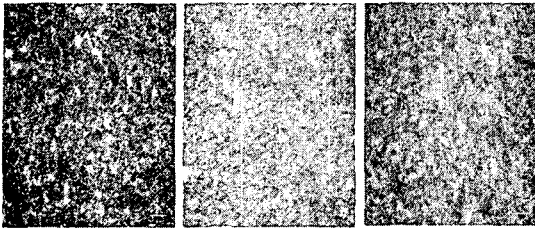
4.1.2 현차시험 차륜담면

후술하는 4.4절에서 언급한 것처럼 제동 작용에 의한 차륜담면의 손상메커니즘을 해석하기 위하여 제동 작용시와 제동 차단시의 현차시험의 차륜에 대하여 Fig. 7 ~ Fig. 8과 같이 비파괴 표면 조직검사를 실시하였다.

현차시험의 제동 작용차륜에서 조직검사 결과, Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 C영역의 조직은 소성변형에 의해 응력이 작용하는 방향으로 조직이 변형되어 있는 것을 볼 수 있었다.

또한, 제동차단 차륜의 경우 Fig. 8에 나타난 비파괴 표면조직검사 결과, Fig. 7에서와 같이 제동작용 차륜과는 달리 전반적으로 차륜담면 표면은 그다지 손상되지 않은 조직을 보여주고 있다.

Fig. 6-8의 결과를 고찰해 볼 때 제동작용은 차륜담면 손상에 가장 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다. 또한, 비파괴적 표면조직검사법에 의해 차륜담면의 손상평가를 실시할 수 있음을 알 수 있었다.



(a) A-area (b) C-area (c) G-area

Fig. 8 Micro-structures for brake cut-off

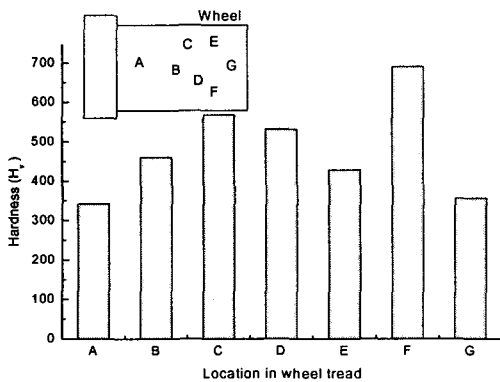


Fig. 9 Hardness in damaged wheel

4.2 경도 및 인장시험

4.2.1 경도시험

Fig. 9는 손상 차륜담면에서의 경도분포를 보여주고 있다. 비손상 영역(A,G)의 경도 수치는 340~350 Hv를 나타내고 있으며 손상영역(B~F)에서는 점점 경도수치가 상승하고 있음을 알 수 있다. 이것은 앞서 비파괴적 표면조직검사시 분포하는 조직영역과 일치하는 경도 수치를 나타내었다. Fig. 6에서 살펴보면 F영역(백색층부)에서 경도치가 가장 높게 나타나고 있다. 비손상 영역의 경도수치와 비교하여 2배 가까이 높은 수치를 나타내고 있다. 경도 수치가 아주 높으면 충격에 약하기 때문에 그 부위에 균열이 발생할 수 있으며 표면이 박리될 수도 있다. 이러한 현상은 Fig. 1에서 보여준 바와 같이 손상 차륜담면에서 발생하고 있다.

4.2.2 인장시험

Fig. 7에 손상된 차륜과 신조 차륜의 인장강도

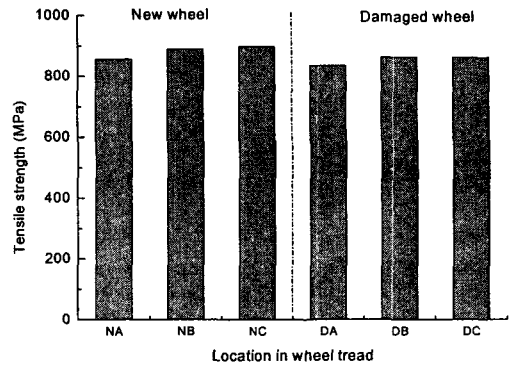


Fig. 10 Tensile strength in wheel tread

를 나타낸다. 신제와 손상제 담면부에서 채취 위치에 따른 인장강도는 그다지 차이가 없으므로 나타났으며 신제 담면부의 인장강도보다는 손상제 담면부의 인장강도가 약간 감소하는 수치를 나타내었다. 이것은 고속도용 차륜에 있어 주행 거리에 따른 실온에서의 인장강도는 그다지 변화되지 않음을 보여주고 있으며 차륜은 제동마찰열과 레일과의 구름접촉온도의 영향하에 있기 때문에 향후의 연구에서 이러한 온도 환경하에서의 인장강도 변화를 평가할 필요가 있다.

고속도용 차륜에 대해서 철도용품 표준규격에서는 인장강도의 요구치를 820 MPa 이상으로 하고 있다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 이러한 규격치에는 손상제와 신제차륜의 시험치는 모두 만족하고 있지만 고속주행에 따른 차륜담면의 손상은 계속적으로 발생하고 있다. 따라서 차륜에 대한 품질 평가척도로서 인장강도는 참고치로서만 이용할 수 있다고 생각되며 차륜손상 평가방법으로서 다른 평가방법이 필요하다.

4.3 파괴역학적 특성

4.3.1 파괴인성

Fig. 11은 차륜담면부의 파괴인성치 시험결과를 나타낸 것이다. Fig. 11에서 보면 채취방향에 따른 파괴인성치의 차이가 나타나고 있으며 손상제 차륜의 경우, 림부쪽(Fa)의 Va방향에서의 파괴인성은 플랜지쪽(Fb)의 파괴인성보다 현저하게 낮게 나타나고 있다. 이러한 수치는 균열이 발생 진전할 경우 플랜지쪽보다 림부쪽이 더 취성파손에 취약할 수 있음을 나타낸다. 또한, 유럽규격인

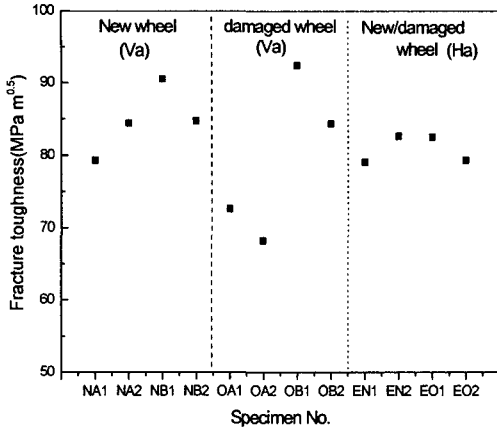


Fig. 11 Fracture toughness

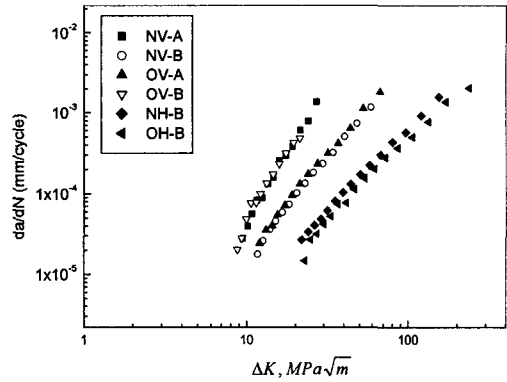


Fig. 14 Fatigue crack growth rate

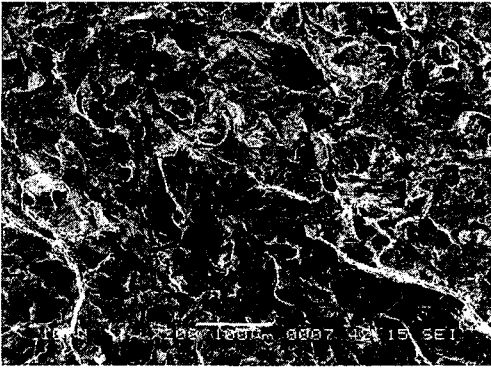


Fig. 12 Fracture surface of damaged wheel

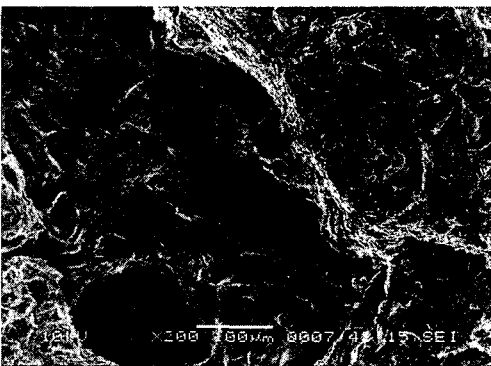


Fig. 13 Fracture surface of new wheel

을 Fig. 11에서 볼 수 있다. 그러나, 취성파손에 대한 안전성 확보를 위하여 파괴인성치의 값이 보다 높은 값을 가져할 것으로 생각된다.

파괴인성 시험 후 시편파면을 Fig. 12와 Fig. 13 같이 SEM(JEOL 5206)에 의한 조직 관찰을 실시하였다.

Fig. 12에서 손상 차륜의 경우 리버(river)패턴과 같은 취성적인 특성을 나타내고 있으나 신조차륜의 경우, Fig. 13과 같이 림플(ripple)과 같은 연성파면이 보이고 있다. 이러한 파면에서 알 수 있듯이 차륜은 고속도용 차륜재로서 마모특성 및 충격특성을 고려하여 연성의 성질을 초기에 많이 가지고 있으나 반복적인 담면 제동에 의한 열응력과 담면경화에 의하여 차륜담면이 취성으로 천이된 것이라 볼 수 있다.

4.3.2 피로균열진전

Fig. 14에 차륜담면부의 피로균열진전 특성을 나타낸다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 기울기가 완만한 시험결과는 상대적으로 균열진전속도가 느린 것이라 할 수 있다.

수직방향 채취위치의 경우 신재는 $C=3 \times 10^{-8}$, $m=2.2$ 이며 손상재는 $C=3 \times 10^{-8}$, $m=2.12$ 이다. 수평방향 채취위치에서 신재는 $C=3 \times 10^{-8}$, $m=2.64$ 이며 손상재는 $C=3 \times 10^{-9}$, $m=4.06$ 이다.

차륜담면에서의 피로균열진전특성은 담면표면에서의 균열진전속도보다 담면 내부로 균열진행속도가 더 빠르게 진행되며 담면 표면에서의 균열진전속도는 신재와 손상재에서 큰 차이를 나타내지 않았다.

EN13262에 차륜담면부의 파괴인성치가 80 $MPa\sqrt{m}$ 이상인 것으로 규격화되어 있다.⁽¹³⁾ 담면과 수평방향(Ha)에서 신재와 손상재 차륜의 차이는 확연하게 나타나지 않았지만 고속철도용 차륜재의 파괴인성 시험결과는 이 기준을 만족하고 있는 것

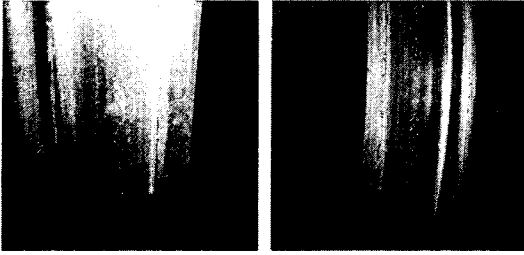


Fig. 15 Brake cut off in field test

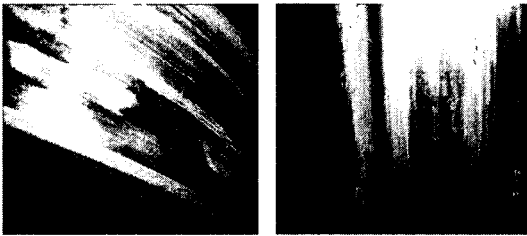


Fig. 16 Brake application in field test

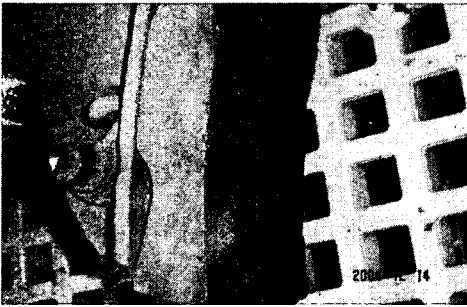


Fig. 17 Thermal crack in brake block

4.4 제동작용에 의한 현차시험

제동작용 영향에 따른 현차시험 결과는 제동차단과 작용시의 차륜담면 손상상태를 분석하였다.

Fig. 15에 나타낸 바와 같이 현차시험 결과, 제동차단 차륜의 경우 찰상에 의한 손상이나 박리현상은 나타나지 않았다. 살사나 그 밖의 개재물에 의한 담면표면의 손상이 나타나고 있었으며 차륜담면에서 소성변형에 의한 미세균열이 나타나고 있었다. 이러한 미세균열은 주로 높은 견인력에 의하여 차륜담면에 발생하며 또한, 곡선부레일 주행시 발생하기도 한다.

Fig. 16에서 보여준 바와 같이 제동작용 차륜의 경우 살사나 그 밖의 개재물에 의한 담면표면의

손상이 나타나고 있었으며 찰상에 의한 열반점(hot spot)의 흔적이 여러 곳에 분포하고 있었다. 또한, 열반점에 의한 손상이나 박리현상이 발생하고 있었다. 특히 담면제동식 차륜에서는 제륜자 외곽부의 열영향으로 발생하는 경우가 많다.

Fig. 17에서와 같이 상대재인 제륜자(brake block)의 마찰면을 관찰한 결과, 제륜자의 마찰면에서도 균열이 발생하고 있었다. 제륜자 마찰면의 균열발생은 제동마찰열이 효과적으로 발산되지 않을 경우에 발생하기도 한다.

이상과 같이 제동시의 차륜담면 손상에 미치는 현차시험 결과를 검토한 결과 소성변형에 의해 발생한 미세균열과 제동시 효과적인 열발산이 이루어지고 있지 못한 상태에서 차륜 담면이 손상되고 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

고속도용 차륜담면 손상에 미치는 영향을 비파괴적 표면조직검사, 파괴역학 특성과 현차 시험을 통하여 여러 인자를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 비파괴적 표면조직검사법을 이용한 평가 결과 고속도용 차륜손상 영역은 비손상 영역, 소성변형 영역과 백색층 영역으로 세가지 영역으로 구분되어지며 비손상영역의 조직과는 달리 백색층 영역에서는 진단응력에 의해 응력 방향에 45도 방향으로 균열이 발생하고 있었다. 이러한 영향으로 주행 중 차륜담면에서 박리가 발생하고 있다.

(2) 운행 중인 고속도용 차륜담면의 손상 평가시, 국내 차륜 품질규격에서 요구하고 있는 인장시험에 의한 평가는 차륜손상 평가시 적합하지 않으며 비파괴적인 표면조직검사법(replication)이 효과적이다.

(3) 손상재 차륜의 경우, 립부쪽(Fa)의 Va방향에서의 파괴인성은 플랜지쪽(Fb)의 파괴인성보다 20% 낮게 나타나고 있다. 이러한 수치는 균열이 발생 진전할 경우 플랜지쪽보다 립부쪽이 더 취약파손에 취약할 수 있음을 나타낸다.

(4) 차륜담면에서 발생하는 박리 손상은 제륜자에 의한 제동시의 열응력이 주요 요인으로 판단된다. 특히, 제동에 의해 발생한 열반점이 존재하는 영역의 경도치는 다른 비손상 영역과 비교

하여 2배 이상 높게 나타나고 있으며 이 부분에서 차륜손상이 많이 발생하고 있다.

(5) 고속도용 차륜 담면에서 발생하는 손상은 미세균열과 박리로 나타나며 미세균열의 발생 원인은 견인력에 의한 소성변형에 따라 발생한 균열이며 박리의 발생원인은 제동시 제륜자에 의한 마찰열의 영향이다.

참고문헌

- (1) Zerbst, U., Madler, K. and Hintze, H., 2005, "Fracture Mechanics in Railway Applications," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, pp. 163~194.
- (2) Hirakawa, K., 1980, "Strength Evaluation of Railway Wheel," *Sumitomo metal*, Vol. 32, No. 3, pp. 349~358(in Japanese).
- (3) Seo, J.W., Hur, H.M., Choi, J.B. and Kim, Y.J., 2005, "Effects of Metal Removal and Traction Force on Contact Fatigue Life," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 29, No. 10, pp. 1384~1391.
- (4) Seo, J.W., Goo, B.C., Choi, J.B. and Kim, Y.J., 2004, "A Study on the Contact Fatigue Life Evaluation for Railway Wheels Considering Residual Stress Variation," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 28, No. 9, pp. 1391~1398.
- (5) Ekberg, A., 1997, "Rolling Contact Fatigue of Railway Wheels -A Parametric Study," *Wear*, Vol. 211, pp. 280~288.
- (6) Ghidini, A. and Cantini, S., 2004, "Mechanical Comparison Between North American and European Materials for Wrought Solid Wheels in Terms of RCF Resistance," *14th Wheelset Congress*.
- (7) Walther, F. and Eifler, D., 2004, "Local Cyclic Deformation Behavior and Microstructure of Railway Wheel Materials," *Materials Science Engineering*, A387-389, pp. 481~485.
- (8) Ekberg, A. and Sotkovski, P., 2001, "Anisotropy and Rolling Contact Fatigue of Railway Wheels," *Journal of fatigue*, Vol. 23, pp. 29~43.
- (9) Kumakai, N., Hasekawa, K. and Kawaguchi, A., 1991, "Mechanism of Flat Generation and Skid Of Wheel," *RTRI report*, Vol. 5, No. 7, p. 33(in Japanese).
- (10) Ghidini, A., Cantini, S. and Roberti, R., 2003, "Mechanical Behavior of Materials for Railways Solid Wheels: A Simplified Criterion to Estimate and Compare RCF Resistance," *6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*.
- (11) ASTM E399, 1997, Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.
- (12) ASTM E647, 1995, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.
- (13) BS EN13262, 2004, Railway Applications- Wheelsets and Bogies-Wheels -Product Requirement.