

도시철도 차량 차륜재의 다축 피로강도 평가

안중곤·유인동·권석진*·김호경^{***}

서울과학기술대학교 철도전문대학원 · *한국철도기술연구원 · **서울과학기술대학교 자동차공학과
(2011. 8. 1. 접수 / 2012. 4. 5. 채택)

Evaluation of Multiaxial Fatigue Strength of a Urban Railway Wheel Steel

Jong-Gon Ahn · In-Dong You · Seok-Jin Kwon* · Ho-Kyung Kim^{***}

Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology

*Korean Railroad Research Institute

**Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received August 1, 2011 / Accepted April 5, 2011)

Abstract : Uniaxial and biaxial torsional fatigue tests were conducted on the samples extracted from urban railway wheel steel. Ultimate and yield strengths of the steel were 1027.7 MPa and 626 MPa, respectively. The uniaxial fatigue limit was 422.5 MPa, corresponding 67% of the ultimate tensile strength. The ratio of τ_0/σ_0 was 0.63. Fatigue strength coefficient and exponent were 1319.5 MPa and 0.339, respectively. Maximum principal and equivalent strain were found to be adequate parameter to predict fatigue lifetime of the steel under multiaxial fatigue condition.

Key Words : railway wheel, fatigue strength, multiaxial fatigue, fatigue lifetime

1. 서론

최근 도시 지하철 철도 차량은 안전성, 정시성 및 대량 수송능력이 우수하여 수송수요가 증가하고 있으며, 열차운행 횟수의 증가와 차량의 고속화로 운행 조건이 상당히 가혹해짐에 따라 이에 대한 절대적인 안전성과 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 철도차량 부품 가운데 차륜은 차량 중량을 지지하고 레일과의 반복적인 구름접촉을 하며 이동하는 핵심 구조 부품으로서 열차의 주행 안전에 지대한 영향을 미친다. 철도차량 차륜 및 레일이 손상이 발생할 경우 승차감, 소음, 레일 손상, 주행안전성 감소 등의 원인이 된다.

차륜에 작용하는 하중은 차량 중량에 의한 수직압, 곡선 통과시의 횡압, 제동에 의한 열윤력, 차축과의 끼워 맞춤에 의한 응력, 신품 제작시 원주방향으로 발생하는 잔류응력 등이 있다. 차륜과 레일의 접촉 부는 아주 작은 면적으로 한정되어 상당히 큰 압력이 발생하게 되며, 반복적인 고하중을 받게 되는 차륜은 피로에 의해 파손될 위험성이 있다. 특히 차륜에 균열이 전파하여 일부분이 떨어지는 경우 그 부위

가 경미한 파손일지라도 레일, 현가장치, 베어링의 손상을 초래하며 균열이 심할 경우 탈선, 전복 등 안전사고와 직결되는 원인이 된다. 따라서 차륜의 건전성을 유지하며 기대수명 이상 사용으로 유지보수 비용을 줄이는 측면에서 반복적인 피로 환경 조건에서의 차륜 재료의 기계적 물성치를 파악하고, 차륜의 피로강도를 평가하는 것은 차량 운행의 안전성 측면에서 매우 중요하다.

차륜과 레일의 구름 접촉피로에 대한 연구는 주로 유한요소해석을 적용하여 차륜-레일의 구름접촉에 의한 피로수명을 평가하는 연구가 대부분이며 차륜의 피로강도를 평가한 연구는 제한적이다⁴⁾. 예를 들어 Bernasconi 등¹⁾은 차륜에서 채취한 일축과 이축 비틀림 피로시험편을 이용하여 Dan Van식을 적용하여 차륜의 다축피로강도를 평가하였다. 차륜의 설계 및 유지보수 차원에서 이식을 통하여 접촉피로에서의 차륜 담면 밑에서의 균열의 발생 수명을 예측하였다. Karlsson 등²⁾은 개발 중인 차륜재의 저주기 피로거동을 평가하여 단조공정과 오스테나이트 공정의 온도를 가능하면 낮추는 것이 피로강도 및 기계적 물성치 향상에 기여한다고 보고하였다. Okagata 등³⁾은 차륜재 판부(plate)의 피로강도와 안전계수와 설계하중에 대하여 평가하였다. 피로강도

* To whom correspondence should be addressed.
kimhk@seoultech.ac.kr

평가를 통하여 판부의 안전계수가 2.4 이상임을 보고하였다. 최근 Wagner 등⁴⁾은 차륜재의 107 사이클 이상의 초고주기(very high cycle) 영역에서 피로변형 거동을 미세조직학적 측면에서 연구하였다. 수명의 5%에서는 전위의 밀도가 증가하면서 주기연화(cyclic softening)현상에서 주기경화(cycle hardening)로 바뀌면서 전위가 벽을 구성하고 있으며 지속적으로 전위가 증가하여 수명의 85%에서는 전위가 cell 형태로 구성하고 있는 것으로 관찰된다고 보고하였다.

철도 차륜의 경우 차륜-레일간 접촉하중으로 다축응력이 발생하며 국부적인 소성변형이 일어난다. 그러나 지하철 차륜의 피로강도에 대한 연구는 거의 일축하중에 대한 연구가 대부분이다. 구름접촉에 의한 차륜의 피로손상을 예측하기 위하여 다축응력 상태에서의 피로수명 평가가 요구되며 이를 위하여 차륜재에 대한 다축응력에서의 피로강도 평가가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 도시철도에서 운영하고 있는 차량의 차륜재에서 일축 시험편과 이축 비틀림 시험편을 차륜 담면부에서 채취하여 피로 및 인장 시험을 수행하였다. 이를 통하여 다축응력상태에서의 피로수명을 평가하는데 필요한 재료 물성치인 피로 한도 등을 평가하였다. 또한 철도 차륜재의 다축응력상태에서의 피로수명을 예측하는 적절한 매개변수를 검토하였다. 최종적으로 차륜의 설계제작 및 유지보수를 위한 기본 자료로 제시하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 차륜은 도시철도 차량에 사용되는 차륜으로 이 재료의 화학 성분은 Table 1에 나타내었다. 일축 인장 및 이축 비틀림 피로시험편의

Table 1. Chemical composition of railway wheel steel (wt.%)

C	Mn	Si	P	S	Cu	Fe
0.6	0.72	0.28	0.009	0.006	0.02	Rem.

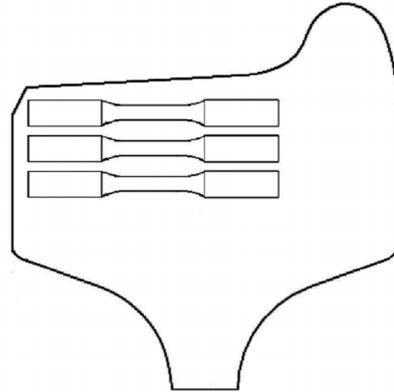


Fig. 1. Position and orientation of specimens extracted from wheel.

채취 위치 및 방향은 Fig. 1과 같이 차륜의 담면부에서 채취하였다. 담면에서의 깊이 방향으로 경도 시험을 통하여 깊이 50 mm까지 경도가 106.5 HRB로 거의 일정하다는 결과를 얻었다. 따라서 담면부의 시험편 채취는 깊이 50 mm 까지를 사용하였다. 일축 및 이축 비틀림 피로 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2와 같다. 정적 인장 시험편은 일축 피로 시험편과 동일한 시험편을 사용하였다.

피로 시험은 상온의 대기 중에서 일축 하중 및 이축 비틀림 피로 시험기를 사용하여 응력비 $R=1$ 로 수행하였다. 인장 시험 및 일축 피로시험의 경우 Instron사의 10톤 용량의 시험기(Model # 8502)를 사용하여 15Hz로 수행하였으며 2축 비틀림 시험의 경우 JT TOHSI 사의 비틀림 시험기를 사용하여 수행하였다. 피로 한도에 해당되는 무한 수명 (N)은

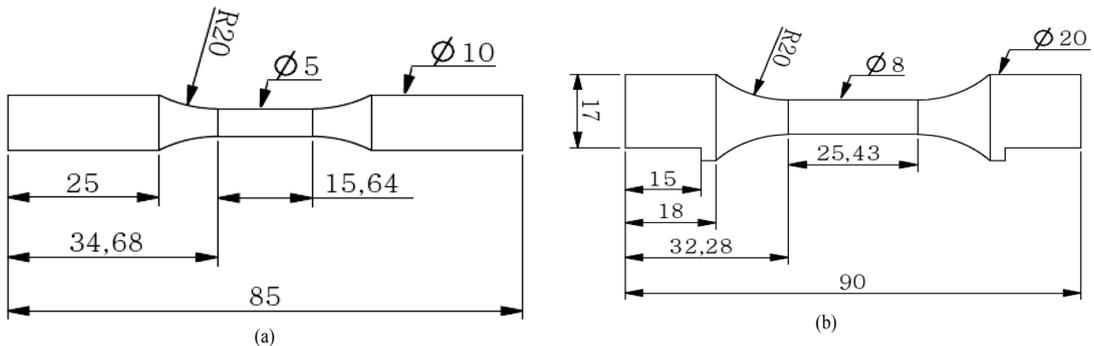


Fig. 2. Specimen configuration for (a) uniaxial and (b) torsional fatigue specimens.

10⁶ 사이클 이상으로 정의하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 인장 실험

차륜의 담면에서 채취한 시험편을 이용하여 인장 시험을 수행하였다. Fig. 3은 공학적 응력과 진응력 대비 공학적 변형률과 진변형률로 작성한 선도이다. 공학적 응력과 변형률 선도를 통하여 최대 인장강도 및 항복강도는 각각 1027.7 MPa, 626.7 MPa이며 연신율은 40.4%로 나타났다. 또한 진응력과 진변형률 선도를 통하여 최대강도는 1319.5 MPa, 연신율은 33.9%로 나타났다. Table 2에 차륜재의 기계적 성질을 요약하였다. 허현무 등⁵⁾은 국내에 수입된 철도 차륜의 담면부에 대한 인장강도 및 연신율의 경우 836 MPa ~ 919 MPa, 18% ~ 23%로 보고하였다. 권석진 등⁶⁾은 고속철도용 차륜재의 인장 및 항복강도는 1067 MPa, 616 MPa이며 연신율은 16.2%로 보고하였다. 본 연구에서 실험한 도시철도 차륜의 경우 인장 및 항복강도 측면에서 고속차륜재와 유사하며 연신율은 약 2.5배 우수한 것으로 나타났다.

3.2. 피로 강도

Fig. 4는 일축 및 이축 비틀림 피로실험에 대한

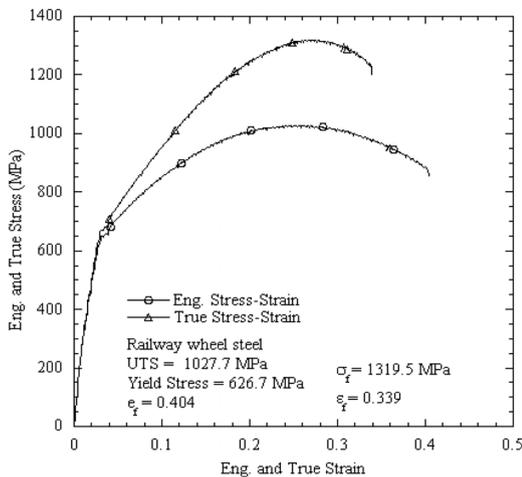


Fig. 3. Engineering and true stress-strain curves of railway wheel steel.

Table 2. Mechanical properties of the railway wheel steel.

UTS (MPa)	YS (MPa)	Elong. (%)	σ_f (MPa)	ϵ_f (%)	σ_e (MPa)	τ_e (MPa)
1027.7	626.7	40.4	1319.5	33.9	422.5	265.0

최대주응력진폭(maximum principal stress amplitude)과 수명과의 관계를 나타낸 그래프이다. 그래프를 통하여 일축 및 이축 비틀림 피로 한도는 각각 422.5 MPa, 265.0 MPa로 나타났다. 일축 피로실험의 피로한도는 인장강도 대비 67%로 통상적인 철강의 인장강도 대비 피로한도의 비가 약 50%인 점을 고려하면 비교적 피로한도가 높은 편으로 판단된다. 본 실험재의 경우 이축 비틀림 피로한도 대비 일축 피로한도의 비 τ_e/σ_e 는 0.63으로 이 값은 통상적인 연성재의 값인 0.6과 거의 동일하였다. 통상적으로 취성재의 경우 τ_e/σ_e 의 비가 0.8 정도 혹은 이상인 것으로 알려져 있다¹⁾. Bernasconi 등¹⁾은 일부 연성의 차륜재의 경우 τ_e/σ_e 비가 0.9 이상으로 보고하였으며 이는 차륜에 존재하는 CaS와 MnS와 같은 개재물의 영향으로 분석하였다. 본 차륜재의 담면부가 인장강도가 높으면서도 τ_e/σ_e 비가 0.63이며 파단 연신율이 40.4%의 결과를 토대로 차륜 담면에서의 CaS와 MnS와 같은 개재물이 많이 존재하지 않음을 암시한다. 또한 일축 시험편의 경우 동일한 최대주응력 상태에서 이축 비틀림 시험편보다 피로수명이 길다는 것을 알 수 있다.

구름접촉에 의한 차륜의 균열 발생 손상을 예측하는 식으로 탄성 shakedown에 해당하는 고주기 피로에 의한 손상 조건에서 일반적으로 다음 식(1)과 같은 Dan Van식⁷⁾을 적용한다.

$$|\tau_a(t) \pm \alpha_{DV} \sigma_h(t)| \leq \tau_e \quad (1)$$

여기서 $\tau_e(t)$ 는 최대전단응력진폭, $\sigma_h(t)$ 는 정수항력, α_{DV} 는 재료상수, τ_e 는 전단피로한도이다. 따라서

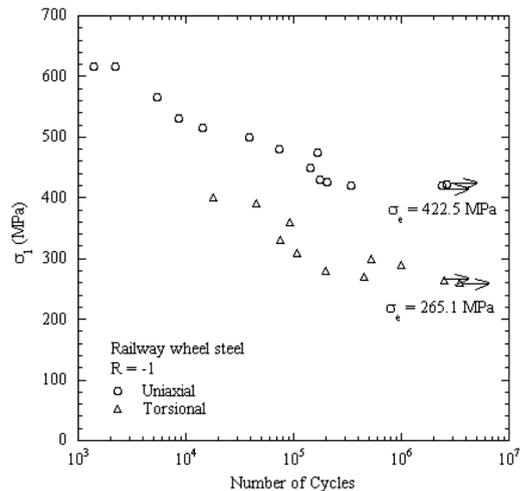


Fig. 4. Stress amplitude against number of cycles for uniaxial and biaxial torsional fatigue tests.

전단응력진폭과 정수압의 합이 재료의 피로한도보다 크면 피로가 누적되어 피로손상이 발생한다. 이때 Dan Van의 재료상수 α_{DV} 는 이축 전단 및 일축 하중상태에서의 피로한도 비와 관계하는 중요한 재료상수로 식(2)와 같이 정의된다.

$$\alpha_{DV} = 3 \left(\frac{\tau_e}{\sigma_e} - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

본 재료의 경우

$$\alpha_{DV} = \frac{3\tau_e}{\sigma_e} - \frac{3}{2} = \frac{3 \times 265}{422.5} - 1.5 = 0.38 \text{로 결}$$

정되었다. 철도 차륜에 대한 일부 연구에서 $\alpha = 0.99 - 0.94$ 로 보고⁷⁾된 바 있다.

3.3. 다축피로강도 매개변수 분석

수명예측을 위해 다축응력상태에서의 피로수명을 예측하는 매개변수로 최대주응력(maximum principal stress), 등가응력(equivalent stress), 최대주변형률(maximum principal strain), 등가변형률(equivalent strain)에 대하여 평가하였다. 이미 언급한 바와 같이 Fig. 4의 최대주응력 진폭을 적용하여 일축 및 이축 비틀림 피로 실험에 대한 파단수명을 표시한 그래프의 결과 서로 각기 다른 응력상태에서의 피로수명을 상호 일치시키지 못함을 알 수 있다. 즉 최대주응력이 일축 및 이축 응력상태에서의 피로수명을 예측하는 매개변수로 적절하지 못함을 알 수 있다.

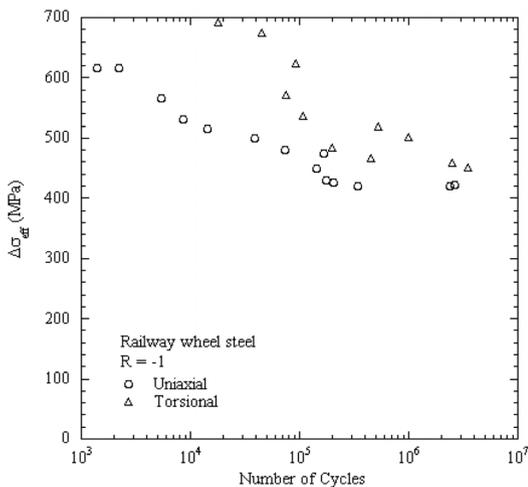


Fig. 5. Von Mises equivalent stress amplitude against number of cycles for uniaxial and biaxial torsional fatigue tests.

일반적으로 피로수명을 예측하는 응력 매개변수 중에 하나로 von Mises 등가응력 σ_e 을 적용하고 있다. 비틀림 이축응력의 경우 $\sigma_e = \sqrt{3}\tau$, 일축 응력의 경우 $\sigma_e = \sigma_1$ 로 결정된다. Fig. 5는 von Mises 등가응력진폭에 대한 일축 및 이축 비틀림 피로 실험에 대한 파단수명을 표시한 그래프이다. Fig. 5의 결과를 보면 등가응력도 최대주응력과 마찬가지로 도시철도 차륜재에 대하여 서로 각기 다른 응력상태인 일축 및 이축응력상태에서의 피로수명을 예측하는 매개변수로 적절하지 못함을 알 수 있다.

이미 언급한 바와 같이 최대주변형률도 다축응력 상태에서의 피로수명 예측에 적용하는 매개변수의 하나이다. 일축 및 이축 비틀림 피로 실험에서의 최대주변형률을 결정하기 위하여 일정하중에서의 응력진폭을 변형률로 환산이 필요하다. 일축 응력 피로 실험의 경우 응력진폭의 범위가 380 MPa ~ 565 MPa의 범위에서 수행되었다. 이 범위는 본 재료의 항복응력인 626.7 MPa을 고려할 경우 모두 탄성영역에 해당한다. 이축 비틀림 응력의 경우도 응력진폭의 범위가 260 MPa ~ 400 MPa의 범위에서 수행되었다. 전단항복강도는 인장항복강도의 50%이상으로 알려져 있으나 정확한 실험을 통하여 결정이 가능하다. 본 연구에서는 일축과 이축에서의 피로한도비(=0.627)를 적용하여 전단항복강도를 인장항복강도의 0.627로 가정할 경우 394.8 MPa로 거의 모든 비틀림 응력진폭 조건이 거의 탄성영역에 해당한다. 따라서 일축 시험의 경우

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}, \text{ 이축 비틀림 시험의 경우 } \epsilon_1 = \frac{\gamma}{2} \text{으로 결}$$

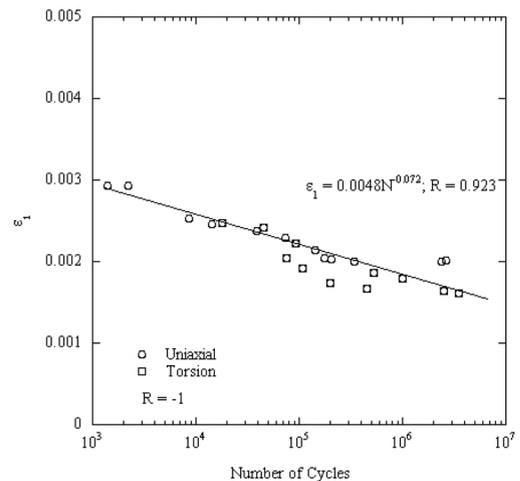


Fig. 6. Principal strain amplitude against number of cycles for uniaxial and biaxial torsional fatigue tests.

정하였다. Fig. 6은 최대주변형률을 매개변수로 일축 및 이축 비틀림 피로수명을 도시한 그래프이다. Fig. 6을 통하여 최대주변형률이 상관계수 $R = 0.923$ 의 신뢰성을 가지며 일축 및 이축 피로수명을 예측하는 매개변수로 적절함을 알 수 있다.

또 다른 변형률 매개변수인 등가 변형률은 다축 응력 상태에서의 피로수명 예측에 적용하는 매개변수의 하나이다. 일축 및 이축 비틀림 피로 실험에서의 등가 변형률을 결정하기 위하여 일축 시험의 경우 $\epsilon_e = \frac{\sigma_1}{E}$, 이축 비틀림 시험의 경우 $\epsilon_1 = -\epsilon_3 = \frac{\gamma}{2}$, $\epsilon_2 = 0$, $\epsilon_e = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$ 으로 결정하였다.

Fig. 7은 등가 변형률을 매개변수로 일축 및 이축 비틀림 피로수명을 도시한 그래프이다. Fig. 7을 통하여 등가 변형률이 최대주응력이나 상관계수 $R = 0.891$ 의 신뢰성을 가지며 등가 응력에 비하여 수명을 예측하는 매개변수로 적절함을 알 수

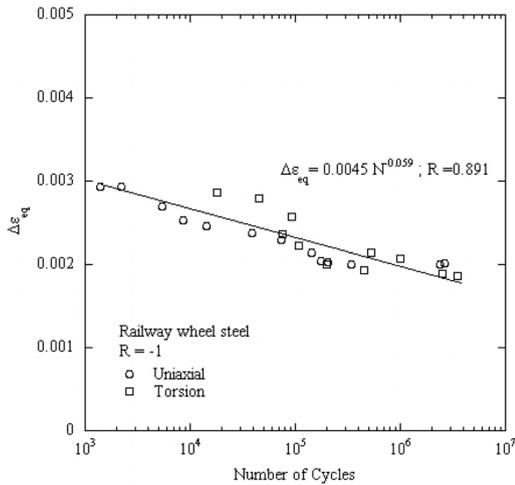


Fig. 7. Equivalent strain amplitude against number of cycles for uniaxial and biaxial torsional fatigue tests.

Table 3. Stress and strain parameters for the uniaxial tension and torsion specimens.

Parameters		Uniaxial	Torsion
Stress parameter	σ_1	$\frac{P}{A}$	$\tau = \frac{16T}{\pi d^3}$
	σ_{eff}	σ_1	$\sqrt{3} \tau$
Strain parameter	ϵ_1	$\frac{\sigma_1}{E}$	$\frac{\tau}{2G}$
	ϵ_{eff}	$\frac{\sigma_1}{E}$	$\frac{\tau}{\sqrt{3} G}$

있다. 최종적으로 Fig. 6, Fig. 7을 통하여 최대주응력이나 등가응력에 비하여 최대주변형률과 등가변형률이 일축 및 이축 피로시험의 수명을 예측하는 매개변수로 적절한 것으로 나타났다. 일축 및 이축 피로시험의 수명을 예측하는 매개변수의 계산을 Table 3에 요약하였다.

3.4. 피로파단면 분석

Fig. 8 (a), (b)는 고주기 피로수명에 해당하는 파단면으로 각각 일축 및 이축 비틀림 피로시험 후의 파단면 사진이다. 고주기 및 저주기 파면을 관찰한 결과 발생 지점 부근에서의 CaS와 MnS와 같은 개재물은 거의 관찰이 되지 않았다. 이와 같은 사실은 본 차륜재의 전형적인 τ_c/σ_c 비가 0.6에 근접한 0.63으로 CaS와 MnS와 같은 개재물이 많이 존재하지 않는다는 사실을 다시 한번 입증하고 있다.

피로균열 발생 지점에서의 중앙의 사진은 전체 사진이며 좌측의 사진은 급작스러운 파괴가 발생한 지점에서의 파면이며 우측은 피로균열이 발생한 지점에서의 전형적인 파단면 사진이다. Fig. 8(a) 사진의 경우 일축($\Delta\sigma/2 = 421$ MPa, $N_f = 342412$ cycles)에서의 파단면 사진으로 중앙의 사진을 통하여 파단면이 축하중 각도와 거의 수직으로 파단되었으며 거시적으로 매우 평탄하며 중앙 사진의 4시 반 각도 지점에서 피로균열이 발생하여 최종적으로 균

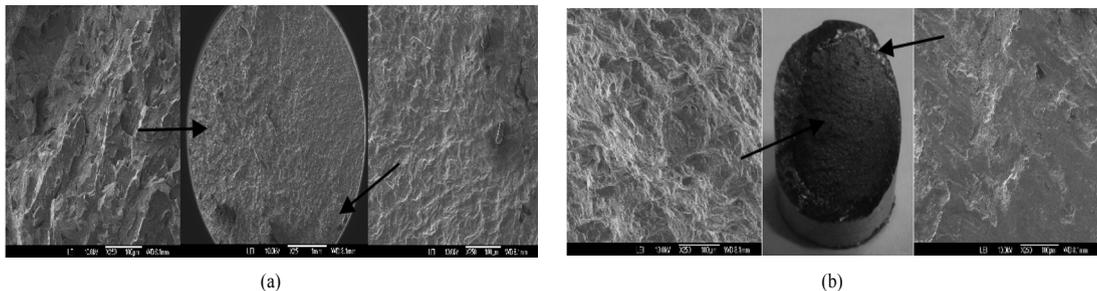


Fig. 8. Fatigue fracture surfaces of (a) uniaxial test at $\Delta\sigma/2 = 421$ MPa and (b) torsion test at $\Delta\tau/2 = 300$ MPa.

열이 전파된 면적이 전체면적으로 약 40%정도에서 급작스러운 파단으로 이루어졌다고 판단된다. 급작스러운 파단이 발생한 지점에서의 전형적인 파단면은 강도가 높은 합금에서 볼 수 있는 벽개 파면을 나타내고 있다. 균열이 발생한 지점에서의 파면은 균열이 거시적으로 방사상으로 물결(wave) 모양으로 진행되었음을 알 수 있다.

Fig. 8(b) 사진의 경우 이축 비틀림 시험($\Delta\tau/2 = 300$ MPa, $N_f = 523615$ cycles)에서의 파단면 사진으로 중앙의 사진을 통하여 파단면이 축하중 각도와 약 40°C정도의 경사를 따라 파단되었으며 일축 시험편과 달리 원통시험편의 외곽에서 균열이 발생하여 중앙부에서 최종 파단되었음을 알 수 있다. 그러나 피로균열이 전파된 파면의 경우 우측 사진에서 보듯이 비틀림 피로시에 서로 접촉을 하고 있는 파면들 사이의 마찰로 파면이 뭉개져 있음을 알 수 있다. 피로균열이 원통 외곽에서 발생하여 특히 중앙 사진의 10시 방향에서 균열이 다른 외곽에서의 균열보다 중앙으로 약간 더욱 침투한 상황에서 최종적으로 균열이 전파된 면적이 전체면적으로 약 30% 정도에서 급작스러운 파단으로 이루어졌다고 판단된다. 급작스러운 파단이 발생한 지점에서의 전형적인 파단면은 거시적으로 일축 시험편의 파면에 비하여 벽개 파면과 부분적으로 찢어짐 파면들이 관찰되는 연성 파면이 혼합된 것으로 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구는 도시철도에서 운영하고 있는 차량의 차륜재에서 일축 시험편과 이축 비틀림 시험편을 피로 및 인장 시험을 수행하였다. 이를 통하여 다축응력상태에서의 피로수명을 평가하는데 필요한 재료 물성치를 평가하였다. 실험 결과는 다음과 같다.

1. 인장실험 결과 최대 인장강도 및 항복강도는 각각 1027.7 MPa, 626.7 MPa이며 연신율은 40.4%로 나타나 인장 및 항복강도 측면에서 고속 차륜재와 유사하며 연신율은 약 2.5배 우수한 것으로 나타났다.
2. 일축 피로 한도는 422.5 MPa로 인장강도 대비 67%로 나타났으며 이축 비틀림 피로한도 대비 일축 피로한도의 비 τ_u/σ_u 는 0.63으로 통상적인 연성재에 해당하는 값인 0.6에 근접한다.

3. 다축응력상태에서의 피로수명을 예측하는 매개변수로 최대주응력이나 등가응력에 비하여 최대주변형률과 등가변형률이 일축 및 이축 피로시험의 수명을 예측하는 매개변수로 적절한 것으로 나타났다.

후 기: 이 논문은 안중근이 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량시스템학과 박사과정 중에 연구한 논문입니다.

참고문헌

- 1) Bernasconi A., Filippini M., Foletti S. and Vaudo D., "Multi-axial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 28, No. 5-6, pp. 663~672, 2006.
- 2) Ahlström J. and Karlsson B., "Modified railway wheel steels: Production and evaluation of mechanical properties with 140emphasi on low-cycle fatigue behavior," *Met. Mat. Trans. A*, Vol 40, No.7, pp.1557~1567, 2009.
- 3) Okagata Y., Kiriyaama K., and Kato T., "Fatigue strength evaluation of the Japanese railway wheel," *Fatigue Frac. Eng. Mat. Struc.* Vol. 30, No. 4, 356~371, 2007.
- 4) Wagner V., Starke P., Kerscher E. and Eifler D., "Cyclic deformation behaviour of railway wheel steels in the very high cycle fatigue (VHCF) regime," *Int. J. of Fatigue* Vol. 33, pp.69~74, 2011.
- 5) 허현무, 권성태, "철도차량용 차륜재 물성시험 분석 연구," 한국철도학회 학술대회논문집, pp.153~157, 2004.
- 6) 권석진, 서정원, 이동형, 함영삼, "고속철도용 차륜과 차축의 파괴역학적 특성," 한국정밀학회지, 제27권, 제8호, pp.28~34, 2010.
- 7) Dan Van K., Griveau B. and Message O., "On a new multi-axial fatigue limit criterion: Theory and application," in *Biaxial and Multi-axial Fatigue*, European Group on Fracture, EGF Publication 3, Mechanical Engineering Publications, London, pp.479~496, 1989.
- 8) Bannantine J.A., Comer J.J. and Handrock J.L., "Fundamentals of metal fatigue analysis," Prentice Hall Inc. 1990.