

◆ 특집 ◆ 철도의 고속화를 위한 차륜·궤도 인터페이스

고속철도용 차륜과 차축의 파괴역학적 특성

Fracture Mechanics Characteristics of Wheel and Axle For High Speed Train

권석진^{1,✉}, 서정원¹, 이동형¹, 함영삼¹

Seok Jin Kwon^{1,✉}, Jung Won Seo¹, Dong Hyung Lee¹ and Young Sam Ham¹

1 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 (Vehicle-Track research LAB., Korea Railroad Research Inst.)

✉ Corresponding author: sjkwon@krri.re.kr, Tel: 031-460-5249

Manuscript received: 2010.3.29 / Revised: 2010.6.18 / Accepted: 2010.6.29

Railway wheel and axle is the most critical components in railway system. A wheel and axle failure can cause a derailment with its attendant loss of life and property. The service conditions of railway vehicles have become severe in recent years due to a general increase in operating speeds. Therefore, more precise evaluate of wheelset strength and safety has been desired. Fracture mechanics characteristics such as dynamic fracture toughness, fatigue threshold and charpy impact energy with respect to the tread, plate, disc hole of wheel and the surface of press fitted axle are evaluated. This paper describes the difference of fracture toughness, fatigue crack growth and fatigue threshold at the locations of wheel and axle. The results show that the dynamic fracture toughness, K_{ID} , is obviously lower than static fracture toughness, K_{IC} and the fracture mechanics characteristics are difference to the location of wheel tread and hole.

Key Words: High Speed Train (고속철도), Wheel (차륜), Axle (차축), Fracture Toughness (파괴인성), Fatigue Crack Growth (피로균열진전)

기호설명

ν = Poisson constant [1]

ΔA_{pl} = Plastic energy [J]

Δa = crack extension [mm]

B = ligament [mm]

1. 서론

최근 철도차량의 고속화에 따라 철도차량의 중요부품이라 할 수 있는 차륜과 차축의 사용조건은 점점 가혹해지고 있다. 1998년에 발생하였던 독일 고속철도 ICE의 차륜 피로파괴에 따른 탈선사고로 100여명의 사상자를 낸 경우에서 알 수 있듯

이 고속 철도차량의 경우 한번 사고가 발생하면 대단히 큰 인명피해가 발생할 수 있기 때문에 이의 방지를 위하여 안전성 평가가 필수적이라 할 수 있다.¹⁻³

철도에 대한 안전성, 신뢰성 확보를 위하여 파손-안전 설계의 개념이 도입되고 있으나 안전성을 확보하기 위하여 철도차량용 윤축에 대한 파괴역학적 특성을 평가하는 것은 철도의 고속화 시대에 있어 대단히 중요한 문제이다.

본 연구에서 평가된 고속철도용 차륜은 Fig. 1과 같이 차륜답면 제동방식이 아닌 차륜-디스크제동방식이기 때문에 제륜자(brake shoe)에 의한 열균열이 발생하는 우려는 없지만 피로균열의 진전, 또는 파손에 대하여 파괴역학적 특성 평가를 실시

하는 것이 고속철도의 안전운행에 있어 중요하다.

최근, 철도차량용 차륜과 차축에 관한 연구가 많은 연구자에 의하여 다양하게 연구되고 있으며, 현재까지 차륜과 차축에 관한 파괴역학적 연구는 피로강도 평가나 레일과의 구름접촉피로(rolling contact fatigue)에 집중되어 있다.^{4,5} Zerbst⁶ 등은 철도 차륜에서의 파괴역학적 접근 방법에 대하여 보고한 바가 있으며 Akama⁷ 등은 차륜 림부(rim)를 대상으로 FEM 해석과 파괴인성치에 의한 한계균열 결합치수를 평가하였다. Hirakawa⁸ 등은 차륜의 츄성 파괴와 차축 압입부의 피로강도에 대하여 선형 파괴역학을 이용하여 균열진전 한계조건을 계산하였다.

이와 같은 연구는 기존선(conventional line)에서 운행되고 있는 담면 제동식 차륜에서의 가혹한 제동조건에 의한 평가이며 운행조건이 다른 고속철도용 차륜과 차축에 대한 파괴역학적 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 고속철도용 차륜과 차축을 대상으로 안전성 평가를 위하여 임계위치에서 피로균열진전특성, 정동적 파괴인성 등의 파괴역학적 특성에 대하여 연구를 실시하였다.

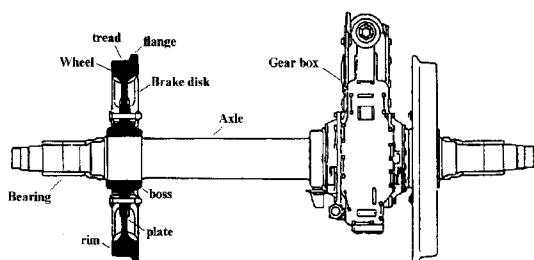


Fig. 1 Terminology of wheel and axle

2. 시험방법 및 절차

2.1 시험편

고속철도용 차륜재와 차축재의 파괴역학적 특성을 평가하기 위하여 실제 운용중인 차륜에서 레일과 접촉하는 부분인 담면부(tread), 피로하중을 지탱하는 판부(plate)와 제동 디스크가 부착되는 볼트 구멍부(hole)에서 시험편을 채취하였다. 차축에서는 차륜과의 압입부(press-fitted zone) 표면에서 시험편을 채취하여 실험을 실시하였다. 시편은 FEM 해석결과를 바탕으로 임계위치에서 채취하였으며 채취방향은 균열진전방향을 고려하여 채취하

였다.

Fig. 2 에 차륜과 차축에서 시험편을 채취한 위치를 나타낸다. 실험에 사용된 차륜과 차축 시험편의 기계적, 화학적 성질을 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다.

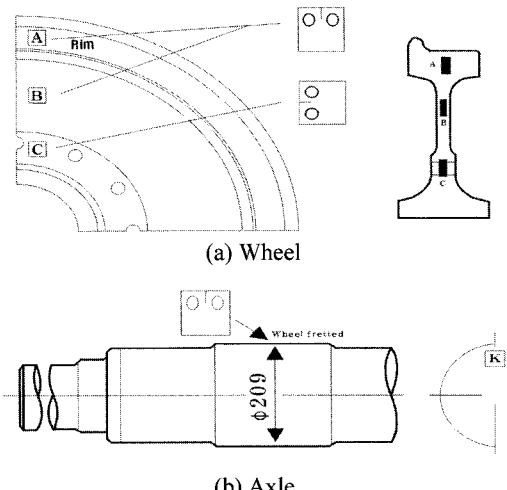


Fig. 2 Locations of specimen

Table 1 Chemical composition of wheel and axle

	C	Si	P	S	Mn
Wheel	0.70	0.30	< 0.045	< 0.045	0.80
Axle	0.41	0.27	0.010	0.006	0.78

Table 2 Mechanical properties of wheel and axle

	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)
Wheel	209	616	1067	16.2
Axle	204	383	648	32.0

2.2 피로균열진전속도

차륜과 차축의 임계위치에 따른 피로균열진전 속도와 하한계 응력확대계수는 ASTM E647 에 의하여 실험을 실시하였다.⁹ 피로균열진전속도와 응력확대계수범위의 관계를 고려한 Paris 식의 계수 C 와 m 을 구하기 위하여 피로균열진전시험시의 초기 응력확대계수 범위는 $22 \text{ MPa } \text{m}^{1/2}$ 부근으로 하였으며, 응력비 R 은 0.1 로 하였다. 주파수는 10 Hz 로 하였다.

2.3 충격인성

차륜과 차축의 사용온도 조건에 의한 충격인성(impact toughness)을 평가하기 위하여 ASTM 23에 근거하여 실험하였다.¹⁰ Charpy 충격인성시험을 실시하였으며 시험조건은 충격에너지 300 J, 충격속도 5.6 m/s로 실시하였다. 시험 후 휘성 파면율과 흡수에너지의 변화를 비교 평가하였다.

2.4 정동적 파괴인성

정적 파괴인성시험(static fracture toughness, K_{IC})은 ASTM E399에 따라 시험하였으며, 동적 파괴인성시험은 ISO14556 와 ASTM E1820을 기초로 평가하였다.¹¹⁻¹³ 동적 파괴인성(dynamic fracture toughness, K_{ID})시험은 동적 충격하증시험기(dynatup 9250HV, Instron 사)를 이용하여 실온에서 충격속도 1~8 m/s로 실시하였으며 3 점 굽힘 시험편을 사용하였다.



Fig. 3 Dynamic fracture toughness tester

3. 시험결과 및 고찰

3.1 위치에 따른 피로균열 진전특성

차륜재의 담면부, 판부와 구멍부 위치에 따른 피로균열진전속도와 하한계 응력확대계수(ΔK_{th})를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 차륜재는 임계위치에 따른 피로균열진전속도의 차이는 현저하게 나타나지 않았지만 하한계 응력확대계수는 구멍부(hole)가 제일 낮은 것으로 나타났다.

차륜시편에서 담면부에서 가장 느린 피로균열진전속도가 얻어졌으며, 구멍부에서는 가장 빠른 피로균열진전속도가 얻어졌다. 이는 구멍부에서 균열이 발생할 경우 차륜 담면부와 판부에 비하여 빠르게 진전할 수 있는 것을 의미한다.

또한, 차륜재 시편에 관하여 담면에서 구멍부에 걸쳐 하한계 응력확대계수범위의 명확한 저하가 관찰되었다.

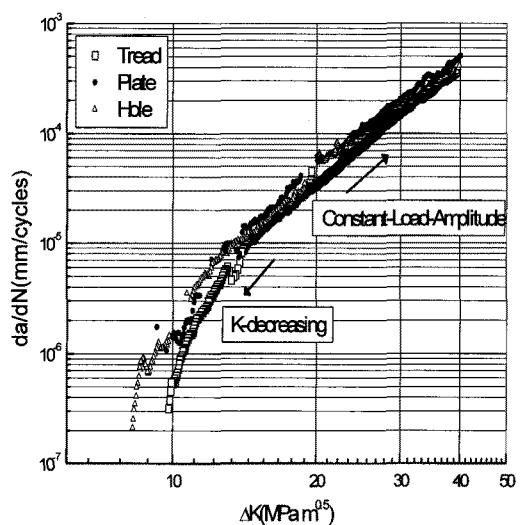


Fig. 4 Fatigue crack growth rate of wheel

Fig. 4 와 Table 3에서 보여준 것처럼 차륜재의 경우 임계위치에 따라 피로균열진전특성과 하한계 응력확대계수의 값이 다르게 분포하고 있음을 알 수 있다.

차축 시편에서는 Fig. 5에서 보여준 나타난 바와 같이 대단히 작은 피로균열진전속도를 나타냈으며, 하한계 응력확대계수범위는 약 20% 저하하였다.

Table 3에 피로균열진전 시험의 결과를 나타낸다. 피로균열진전속도에서의 paris 지수 계수 C와 m의 양자에는 대개 직선의 관계가 있음을 알 수 있다.

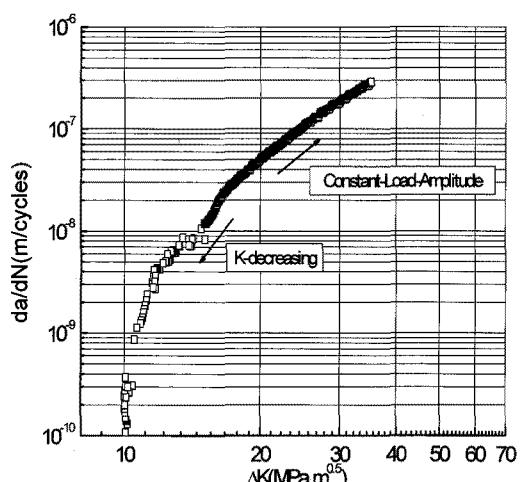


Fig. 5 Fatigue crack growth rate of axle

Table 3 Results of fatigue tests

Material	m [1]	C (mm/cycle)	K _{th} (MPa·m ^{0.5})
Wheel	Tread	3.64	6.66 × 10 ⁻¹⁰
	Plate	3.35	2.42 × 10 ⁻⁹
	Hole	3.18	3.91 × 10 ⁻⁹
Axle	Surface	3.50	2.29 × 10 ⁻⁹

3.2 정적 파괴인성의 차이

차륜재의 정적 파괴인성치는 Fig. 6에 나타낸 것처럼 담면부에서 가장 높은 파괴인성치를 나타냈으며 차륜 판부에서 디스크 구멍부로 향할수록 약간 감소한다. 이와 같이 차륜에서 다른 부분에 비하여 차륜 담면부의 정적 파괴인성치가 높은 것은 차륜 담면부의 열처리와 주행시 레일과의 접촉에 의한 가공경화의 영향으로 판단된다.

$$J = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + J_{pl} \quad (1)$$

$$J_{pl} = \frac{\eta}{b} \cdot \frac{\Delta A_{pl}}{B_N} \cdot (1 - \gamma \cdot \frac{\Delta a}{b}) \quad (2)$$

$$\eta = 2 + 0.522 \frac{b}{W} \quad (3)$$

$$\gamma = 1 + 0.76 \frac{b}{W} \quad (4)$$

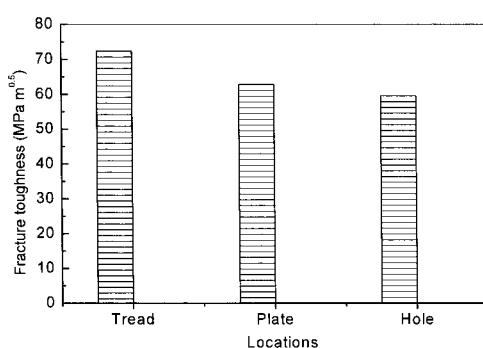


Fig. 6 Static fracture toughness of wheel

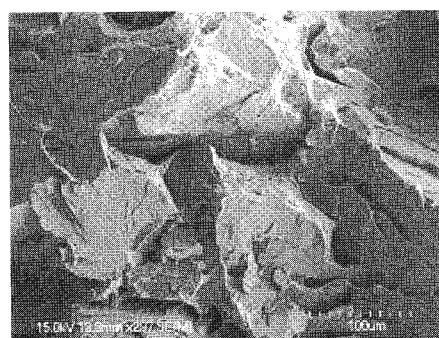
차축재의 정적 파괴인성치는 식(1)~(4)를 이용하여 J_{0.2}로 구하였다. Fig. 7(b)의 SEM 사진에서 나타낸 바와 같이 연성재의 특징인 덤플페인이 관찰

되고 있으며 316.2 kN/m로서 높은 파괴인성을 유지하고 있다.

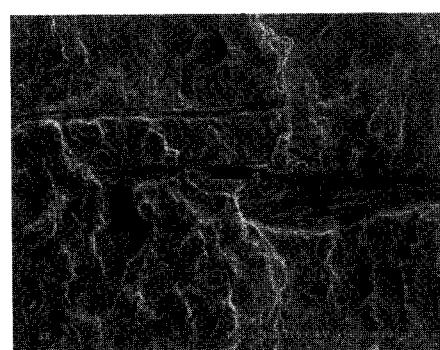
Fig. 7(a)의 SEM 관찰사진에서 볼 수 있듯이 차륜재는 취성적인 특성을 나타내는 벽개파면 및 리버페인이 관찰되었다.

차륜재의 경우 위치에 따라 정적 파괴인성치의 변화가 있음을 알 수 있었으며 제일 취약부분은 디스크 구멍부임을 알 수 있었다. 정적 파괴인성치의 경우 차륜의 파괴역학적 한계조건 계산에 이용되고 있으나 차륜답면부, 차륜판부와 구멍부에서의 정적 파괴인성치가 각각 다르므로 실험에 의해 구해진 값을 각각의 임계위치에 따라 파손한계조건을 계산하여야 한다.

고속철도용 차축의 정적 파괴인성에 대하여 M.Akama는 54 kN/m로 보고하였다.¹⁴ 이것은 본 연구에서처럼 실제 운용중인 차축에서 직접 채취하여 실험한 값이 아닌 원재료단계에서의 평가된 값이라 생각되며, 이렇게 평가된 정적 파괴인성치는 차축의 한계조건 계산에 사용될 경우 과대평가 될 수 있다.



(a) wheel



(b) axle

Fig. 7 SEM observations of wheel and axle

3.3 변형속도에 의한 동적 파괴인성

Fig. 8~Fig. 9에서 나타난 바와 같이 파괴인성의 충격속도 의존성에는 공통된 경향을 나타내고 있다. 낮은 충격속도에 있어서 파괴인성치는 저하하고 그 후에 일정한 양으로 근소하게 증가하는 것이다. 정적 파괴인성치와 동적 파괴인성치의 차이가 가장 작은 것은 차륜재의 판부이다. 차륜판부는 가장 차이가 작은 파괴인성치를 가지고 있으므로 연성재료와 비교하여 변형속도 감수성이 작은 것을 의미한다. 예를 들면, 차륜재의 판부에서는 $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 의 차이밖에 없는 데, 차축재에서는 $200 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 의 차이가 나타난다. 파괴인성의 충격 속도 의존성에 관한 공통의 경향은 정적 파괴인성에서 급격하게 감소한 충격속도의 증가와 더불어 약간 증가한다. 취성적 재료에 있어서 파괴인성의 변형속도의존성은 낮음을 알 수 있다.

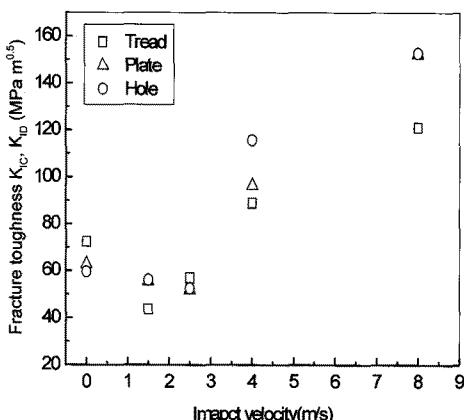


Fig. 8 Dynamic fracture toughness of wheel

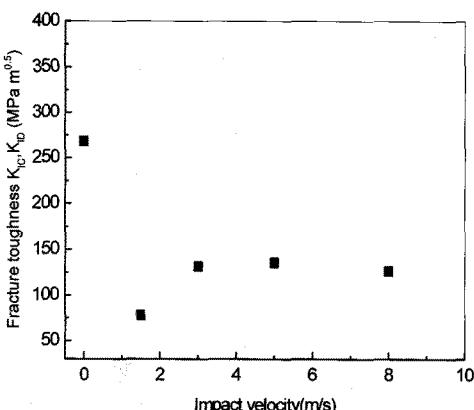


Fig. 9 Dynamic fracture toughness of axle

Fig. 9에 변형속도에 따른 차축재의 파괴인성을 나타낸다. 차축재에서도 정적 파괴인성치가 동적 파괴인성치보다 낮은 값을 가지고 있으며 차륜재와 달리 변형속도에 따른 파괴인성의 변화가 일정한 값을 유지하는 것을 볼 수 있다.

윤축재에서의 동적 파괴인성이 증가하는 이유는 균열선단에서의 단열효과에 의한 인성치의 증가라고 생각된다. 이것은 온도가 증가하면 파괴인성치가 높아지는 결과와 같다. 그러나 임계위치에 따라 정적 파괴인성치가 다르게 나타났던 것과 비교하여 동적 파괴인성치에서 위치의 차이에 따른 변화는 정적 파괴인성치에 비하여 확연하게 구별되지 않는다. 파괴인성의 충격속도의존성에 관한 공통의 경향은 정적파괴인성에서 급격하게 감소한 후, 충격속도의 증가와 더불어 약간 증가한다. 취성적 재료에 있어서 파괴인성의 변형속도의존성은 낮음을 알 수 있다.

3.4 온도변화에 의한 충격인성

Fig. 10~Fig. 13에 차륜재와 차축재의 온도변화에 따른 충격인성치를 보여준다. 차륜재는 50°C 이상에서 약간의 인성증가가 나타나며, 사용온도 범위내에 있어서 취성적 재료이다.

Fig. 10~Fig. 12에서 차륜재의 연성-취성 천이온도는 담면부에서 120°C , 판부에서 80°C , 구멍부에서 145°C 이었다.

Ax-1 재는 가장 높은 인성을 나타내었다. Fig. 13에 차축재의 -40°C 이하의 취성영역에서 100°C 이상의 연성영역까지 천이거동을 나타낸다. 100°C 이상에서는 이미 연성파면율이 100 %이었다. 또한, 연성-취성 천이온도는 32°C 이었다.

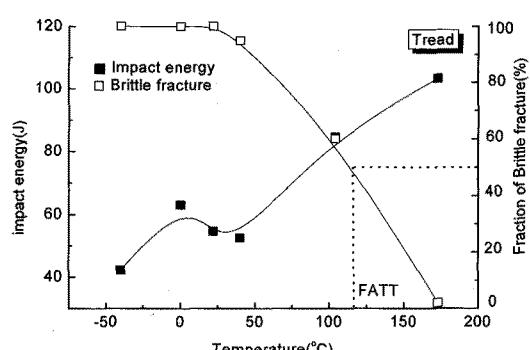


Fig. 10 Notch toughness of wheel tread

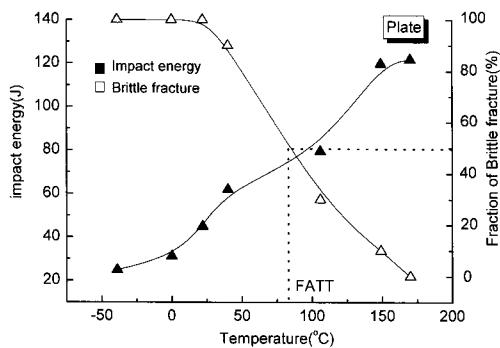


Fig. 11 Notch toughness of wheel plate

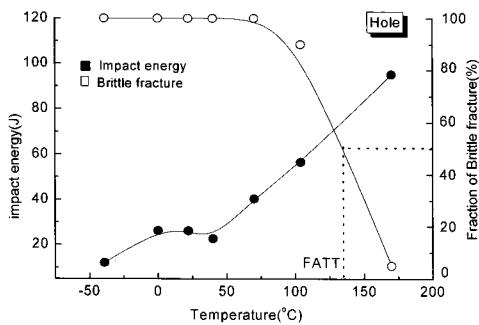


Fig. 12 Notch toughness of wheel hole

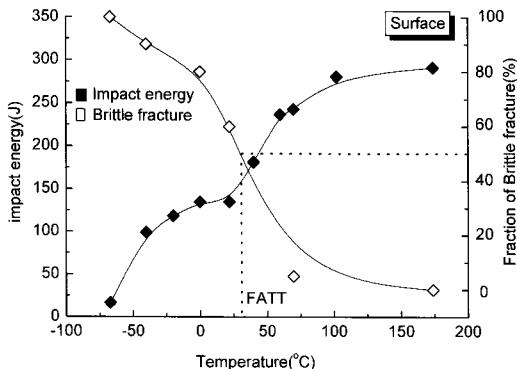


Fig. 13 Notch toughness of axle

Fig. 14는 차륜과 차축재의 취성천이온도(FATT, Fracture Appearance Transition Temperature)를 나타낸 것이다. FATT 가 높을수록 취성을 가지게 되고 반대로 낮을수록 연성으로 천이되는 것을 나타낸다.

일반적으로 재료의 FATT 는 -20°C ~ 50°C 에서 사용되지만, 고속철도용 윤축재의 FATT 는 이러한 범위를 상회하는 것으로 나타나고 있으며 이러한 상황은 차륜재가 취성적인 특성을 나타내고

있으며 사용온도에 대하여 취약성을 내포하는 것을 의미한다.

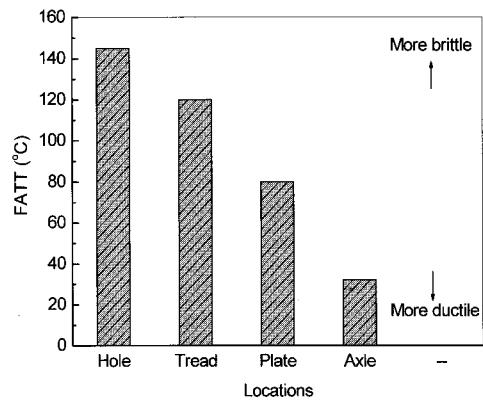


Fig. 14 FATT of wheel and axle

4. 결론

고속철도용 차륜과 차축의 파괴역학적 안전성을 평가하기 위하여 파괴인성, 파로균열전속도, 온도 의존성 충격인성 등의 파괴역학적인 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 차륜재에서는 낮은 파괴인성치와 하한계 응력확대계수범위를 가지는 디스크 구멍부에 대하여 균열전속도가 빠르며 판부와 구멍부에서는 약 17% 감소한다. 차륜 담면부에서는 다른 부분에 비하여 높은 파괴인성치를 가지며 균열전속도도 낮다. 즉, 담면부에서 균열발생시 초기에는 빠르게 진전되지만 판부쪽으로 진행될수록 균열진전은 빠르게 진행된다. 반면, 차축재는 실온에서도 비교적 인성이 높은 특성을 나타내었다.

2) 파괴인성의 충격속도 의존성에 관한 공통적인 경향은 정적 파괴인성에서 급격하게 감소된 후, 충격속도의 증가와 더불어 약간 증가한다. 이러한 결과에서 한행지 운행조건에서의 파괴한계조건 검토시에 있어 동적 파괴인성치를 설계인자로서 고려해야 할 것으로 생각된다.

3) 고속철도용 차륜재의 FATT 는 담면부에서 120°C , 판부에서 80°C , 구멍부에서 145°C , 차축재는 32°C 로서 차륜디스크 형태의 고속철도용 차륜에서의 취약부위는 담면부와 제동디스크가 취부되는 볼트 구멍부이며 이 부분에 대하여 분리하여 정기 검사 기준 설정 및 안전성 평가를 실시할 필요가 있다.

참고문헌

3, pp. 75-80, 1995.

1. Kubota, M. and Hirakawa, K., "The effect of rubber contact on the fretting fatigue strength of railway wheel tire," *Tribology International*, Vol. 42, No. 9, pp. 1389-1398, 2009.
2. Esslinger, V., Kieselbach, R., Koller, R. and Weisse, B., "The railway accident of Eschede - technical background," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, No. 4, pp. 515-535, 2004.
3. Ham, Y. S., Lee, D. H., Kwon, S. J., You, W. H. and Oh, T. Y., "Continuous measurement of interaction forces between wheel and rail," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 35-39, 2009.
4. Ekberg, A., "Rolling contact fatigue of railway wheels -a parametric study," *Wear*, Vol. 211, No. 2, pp. 280-288, 1997.
5. Ekberg, A. and Sotkovski, P., "Anisotropy and rolling contact fatigue of railway wheels," *Journal of Fatigue*, Vol. 23, No. 1, pp. 29-43, 2001.
6. Zerbst, U., Madler, K. and Hintze, H., "Fracture mechanics in railway applications -an overview," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, No. 2, pp. 163-194, 2005.
7. Akama, M., "A study on the critical crack sizes that cause wheel fracture," *World Congress Railway Research*, 2001.
8. Hirakawa, K., Tokimasa, K. and Sakamoto, H., "Fracture mechanics approach to the strength of wheelsts," *Sumitomo Metal*, Vol. 32, No. 3, pp. 349-358, 1980.
9. ASTM E647-00, "Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates," 2000.
10. ASTM E23-00, "Standard method for Notched bar impact testing of metallic materials," 2000.
11. ASTM E399, "Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic materials," 1997
12. ASTM E1820-99a, "Standard test method for measurement of fracture toughness," 1999.
13. ISO 14556, "Steel-Charpy V-notch pendulum impact test-Instrumented test method," 1999.
14. Akama, M. and Ishizuka, H., "Reliability analysis of Shinkansen vehicle axle using probabilistic fracture mechanics," *JSME International Journal*, Vol. 38, No.