

고속철도용 윤축의 정·동적파괴인성 평가

Static and Dynamic Fracture Toughness of Wheelset for High Speed Train

권석진*

Seok-Jin Kwon

Abstract

The safety evaluations of railway wheelsets make use of the static fracture toughness obtained in ingot materials. The static fracture toughness of wheelset materials has been extensively studied by experiments, but the dynamic fracture toughness with respect to wheelset materials has not been studied enough yet. It is necessary to evaluate the characteristics of the fracture mechanics depending on each location for a full-scale wheelset for high-speed trains, because the load state for each location of the wheelset while running is different the contact load between the wheel and rail, cyclic stress in the wheel plate, etc. This paper deals with the fracture toughness depend on load rates. The fracture toughness depending on load rate data shows that once the downward curve from quasi-static values was reached, subsequent values showed a slow increase with respect to the impact velocity. This means that dynamic fracture toughness should be considered in the design code of the wheelset material.

Keywords : High Speed Train(고속철도), Wheel(차륜), Axle(차축), Fracture Toughness(파괴인성)

1. 서론

최근 들어 고속주행중인 철도차량에 관한 충격하중 문제가 대두되고 있다. 일본 후쿠오카 터널에서의 시멘트 탈락에 의한 신칸센 차체지붕의 대파사고, 독일 ICE의 차륜 피로파괴 사고[1] 및 교량구조물의 파손으로 인한 새마을 차체지붕의 파손사고 등의 각종 파손사고에서 볼 수 있듯이 신뢰성을 높이기 위하여 철도차량 부품의 파괴역학적 특성을 평가하는 것은 승객의 안전성 확보관점에서 대단히 중요한 문제이다.

차륜과 차축의 파괴인성에 대한 연구는 그동안 많은 연구자들에 의하여 실시되어져 왔다. 平川 등은 차륜립부의 취성파괴에 대하여 선형파괴역학을 이용하여 균열진전 한계조건을 계산하였다[2,3]. 坂本 등은 탄소함유량에 따른 차륜재 파괴인성의 개선에 관하여 연구하였으며 담면제동시의 파괴인성치를 이용하여 차륜의 파괴조건을 계산하기도 하였다[4]. Akberg 등은 레일과의 구름접촉피로가 차륜의 파괴인성에 미치는 영향에 대한 연구를 하였으며, 차륜담면의 이방성을 고려하여 충격인성실험을 실시하였다[5,6].

Akama는 차륜의 파손사고가 동절기에 집중적으로 발생하며 이는 차륜담면의 파괴인성치와 관련이 있음을 보고하였다[7].

전술한 바와 같이 파괴인성치는 철도차량 안전성과 신뢰성평가에 대한 필수불가결의 기본적인 자료로서 활용되어지고 있으나, 지금까지의 차륜과 차축의 파괴인성에 대한 연구는 준정적 파괴인성에 대한 연구가 중심이었으며 원재료단계에서의 평가이었다. 윤축의 임계위치에서의 파괴인성에 대한 연구는 대단히 미흡한 실정이다. 철도차량의 경우 주행 중 이물질에 의한 충격하중을 받을 수 있기 때문에 이에 대한 파괴인성의 평가도 필요하며 따라서, 정적 파괴인성 뿐만 아니라 동적 파괴인성의 평가도 중요한 의미를 가진다.

본 연구에서는 일정기간 운행된 고속철도 차륜과 차축의 임계위치에서 직접 시험편을 채취하여 정적파괴인성과 동적 파괴인성에 대한 특성을 연구하였다.

2. 실험 및 평가방법

2.1 시험편의 채취위치

고속철도용 차륜과 차축재의 파괴인성을 평가하기 위하여 주행이력 90만km의 동력차용 차륜에서 레일과 접촉부

* 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원

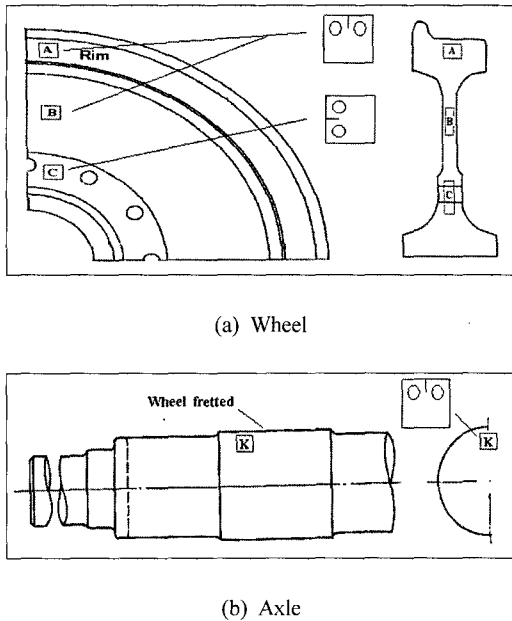


Fig. 1. Location and orientation of test specimens

분인 차륜담면부(tread), 피로하중을 지탱하는 차륜판부(plate)와 제동디스크가 부착되는 볼트구멍부(hole)에서 시험편을 Fig. 1(a)와 같이 채취하였다. 시험편 채취방향은 각각의 입계위치에 대하여 균열진전방향을 고려하여 채취하였다. 시험편은 FEM해석을 기반으로 취약위치를 결정하여 채취하였다[8].

또한, 차축에서는 차륜이 압입되는 차축의 표면과 차축 중앙부에서 시험편을 채취하여 실험을 실시하였다. 차축압입부의 채취위치의 경우 압입부식피로균열이 발생하는 차축단부에서 3mm 떨어진 위치에서 시험편을 채취하였다. 고속철도용 차륜과 차축에서 시험편을 채취한 위치와 방향을 Fig. 1에 나타낸다.

본 연구에서 실험에 사용된 차륜과 차축재 시험편의 기계적 성질과 화학적 성분을 Table 1과 Table 2에 나타내었다

2.2 시험조건과 시험편, 시험장치

정적 파괴인성(K_{IC} , J_{IC})은 ASTM E399와 ASTM813에 따라 데이터 편차를 고려하여 각각의 위치에서 Fig. 2와 같이 CT시험편을 사용하여 시험하였다[9,10]. 정적파괴인성의 부하속도는 0.005mm/sec로 하였다. 동적 파괴인성(K_{ID})은 ISO 14556와 ASTM E1820-99a을 기초로 평가하였다[11,12]. 동적 파괴인성 시험편은 Fig. 3과 같이 예균열(pre-crack)을 삽입한 3점굽힘 시험편을 사용하였다. 동적 파괴인성(K_{ID})시험은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 낙하식

Table 1. Chemical composition of wheel and axle

comp mat'l	C	Si	P	S	Mn
wheel	0.70	0.30	<0.045	<0.045	0.8
axle	0.41	0.27	0.010	0.006	0.78

Table 2. Mechanical properties of wheel and axle

pro. mat'l	Young's Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
wheel	209	1067	616	16.2
axle	204	648	383	32.0

Dynatup 9250HV 충격하중 시험기를 이용하여 실온에서 충격속도 1~8m/s로 설정하여 시험을 실시하여 평가하였다. 최대하중은 낙하식 텡(tup)이 시험편에 부가될 때 로드셀로 검출되며 스트레인게이지에서 변형시간변화를 측정할 수 있다. 파괴인성 시험시의 예균열조건은 $a/W = 0.5$ 로 하였으며 응력확대계수는 $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 이다.

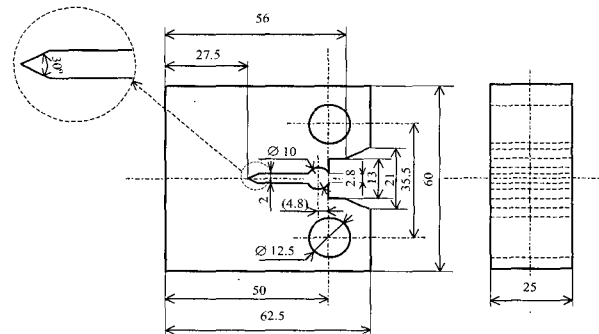


Fig. 2. CT specimen for Static fracture toughness

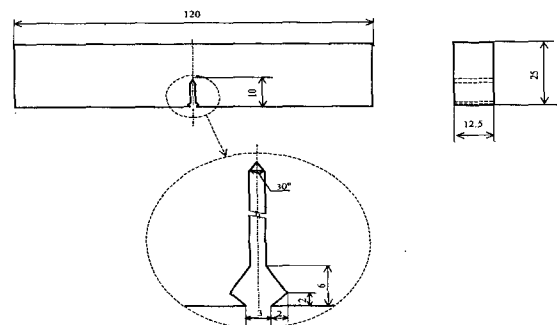


Fig. 3. 3PB specimen for Dynamic fracture toughness

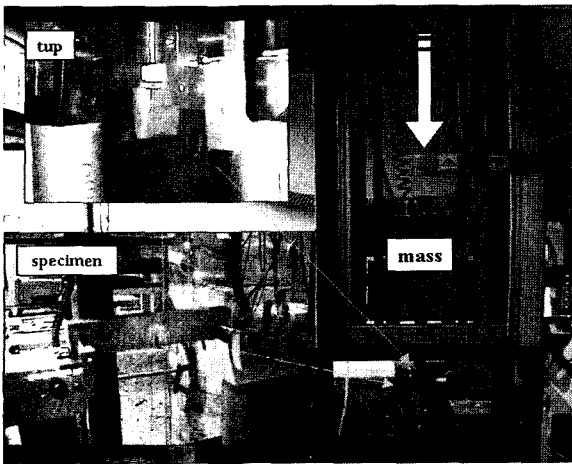


Fig. 4. Tester for Dynamic fracture toughness

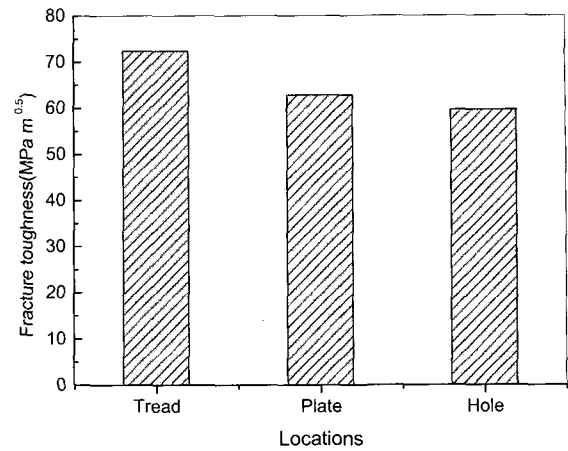


Fig. 5. Static fracture toughness of wheel

3. 시험절차 및 결과 고찰

3.1 위치에 따른 정적파괴인성의 변화

정적·동적 파괴인성시험과 더불어 파괴인성치를 산출하였다. 차륜재와 차축재는 재료조직의 차이가 있기 때문에 파괴인성값을 ASTM규격에 따라 상이하게 평가하여야 한다. 그래서 차륜재의 정적 파괴인성치는 ASTM399에 따라 95% offset 하중을 PQ로 평가하였으며, 차축재는 실온에서 연성영역이기 때문에 ASTM813에 따라 식 (1)~(2)을 이용하여 $J_{0.2}$ 로 구하였다.

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

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

$$\eta = 2 + 0.522 \frac{b}{W}, \gamma = 1 + 0.76 \frac{b}{W} \quad (2)$$

여기에서, ν = 포아송비, ΔA_{pl} = 소성에너지(J), Δa = 균열진전량(mm), b = 리가먼트(mm) 이다

Fig. 5에 나타난 것처럼 차륜재는 답면부(踏面部)에 있어서도 가장 높은 파괴인성치를 나타내며, 판부(板部)와 구멍부(孔部)로 향할수록 감소되는 값을 나타낸다. 차륜재의 정적파괴인성 시험시 구멍부에서는 팝인(pop-in)현상이 관찰되었으며 시험완료 후 파면은 파세트(facet)가 관찰되었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 디스크볼트 체결부위에서 파괴인성치가 다른 위치에서 비하여 낮은 값을 나타낸다. 이것은 차륜에서 이 부분이 제일 취약부임을 알 수 있다.

시험편 파면을 SEM조직사진으로 관찰한 결과 Fig. 6과 같이 취성재료에서 나타나는 벽개파면 및 리버패턴이 관찰

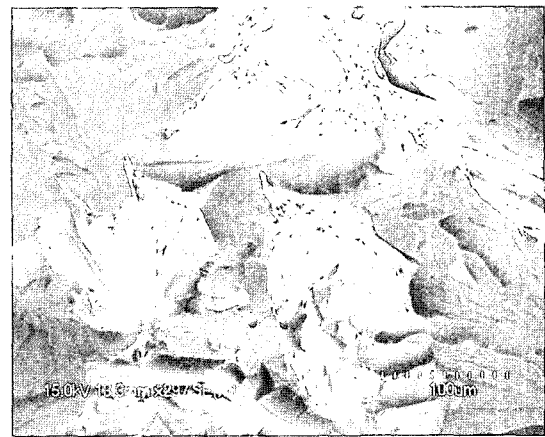


Fig. 6. Microstructure of wheel material

되었다. 차륜재의 경우 위치에 따라 정적 파괴인성치의 변화가 있음을 알 수 있었다. 이렇게 변화된 값을 나타내는 이유는 차륜답면의 경우 열처리를 실시하기 때문이라고 생각된다. 또한, 정적 파괴인성치의 경우 차륜답면의 파괴역학적 한계조건 계산에 이용되고 있으나 차륜판면부, 차륜판부와 구멍부에서의 정적 파괴인성치가 각각 다르므로 시험에 의해 구해진 값을 각각의 임계위치에 따라 파손한계조건을 계산하여야 한다.

차축의 정적파괴인성은 차륜재와 달리 J_{IC} 로 평가하였으며 Fig. 7에 나타난 바와 같이 316.2 kN/m로서 상당히 높은 인성을 유지하고 있다. SEM사진에서도 연성재료의 특성인 딥플래튼이 Fig. 8에서와 같이 관찰되었다. 고속철도용 차축의 정적파괴인성에 대하여 Akama는 54 kN/m 로 보고하였다[7]. 이것은 본 연구에서처럼 실제 운용중인 차축에서 직접 채취하여 시험한 값이 아닌 원재료단계에서의 평가된 값

이라 생각되며, 이렇게 평가된 정적 파괴인성치는 차축 잔류응력에 따른 한계조건 계산에 사용될 경우 과대평가 될 수 있다.

3.2 변형속도에 의한 동적파괴인성의 변화

정적파괴인성 실험법과 달리 동적파괴인성 실험법은 규격화되어 있지 않기 때문에 동적현상을 관찰할 수 있는 응력파를 고려하여야 한다. 이러한 충격에너지는 최대하중 에너지의 3배 이상 크기 때문에 하중신호의 관성효과를 피하기 위하여 3τ 후의 하중을 최대하중으로 적용하며 τ 는 식 (5)에 의해서 결정하였다. 동적 파괴인성치는 다음 식 (3)~(5)에 의하여 평가하였다.

$$K = \frac{P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3)$$

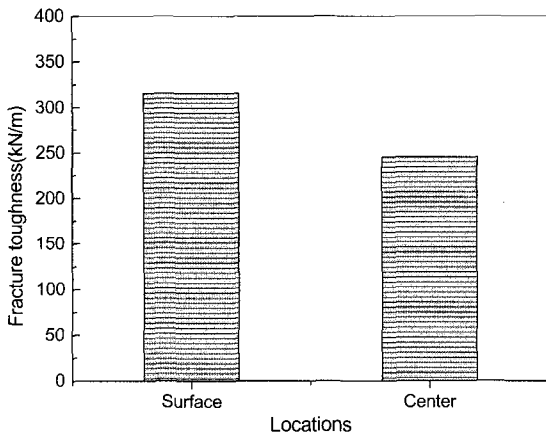


Fig. 7. Static fracture toughness of axle



Fig. 8. Microstructure of axle material

$$f(a_i/W) = \frac{3 \times \sqrt{(a_i/W)} \times 1.99 - (a_i/W) \times (1 - a_i/W)}{2 \times (1 + 2a_i/W) \times (1 - a_i/W)^{1.5}} \times \frac{2.15 - 3.93 \times (a_i/W) + 2.7 \times (a_i/W)^2}{2 \times (1 + 2a_i/W) \times (1 - a_i/W)^{1.5}} \quad (4)$$

$$\tau = 3.36 \times \left(\frac{W}{S_0}\right) \times \sqrt{E \times B \times C_s} \quad (5)$$

여기에서, B=시편두께, Cs=시편 컴플라이언스, E= 탄성계수, So=시편에서 음향속도이다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 파괴인성의 충격속도의존성에는 공통된 경향을 나타내었다. 즉, 낮은 충격속도에 있어서 파괴인성치는 저하하고 그 후에 일정한 량으로 근소하게 증가하는 것이다. Fig. 9은 차륜재의 충격속도에 대한 파괴인성을 나타낸 것이다. 동적 파괴인성은 1~4 m/s의 낮은 충격속도에서 파괴인성치가 정적 파괴인성치보다 작은 값을 나타내었다가 그 이상의 충격속도에서는 갑자기 증가하는 현상을 나타내고 있으며, 정적 파괴인성이 동적 파괴인성보다 낮은 값을 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한, 정적 파괴인성치와 동적 파괴인성치의 차이가 가장 작은 것은 차륜재의 판부이다. 이 부분은 가장 작은 파괴인성치를 가지고 있으면서 연성재료와 비교하여 취성재료는 변형속도 감수성이 작은 것을 의미한다. 예를 들면, 이 차륜재의 판부에서는 10 MPa·m^{0.5}의 차이밖에 없는 데, 차축재에서는 200 MPa·m^{0.5}의 차이가 나타난다. Fig. 10~Fig. 11은 충격속도 1.5m/s에서 차륜재의 위치에 따른 하중과 에너지를 나타낸 것이다.

Fig. 12에 변형속도에 따른 차륜재의 파괴인성을 나타낸다. 차축재에서도 정적 파괴인성치가 동적 파괴인성치보다 낮은 값을 가지고 있으며 차륜재와 달리 변형속도에 따른 파괴인성의 변화가 일정한 값을 유지하는 것을 볼 수 있다. Fig. 13~Fig. 14는 충격속도 85m/s에서 차축재의 표면과

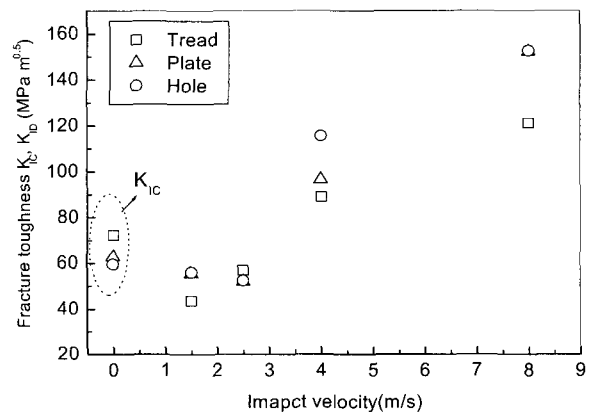


Fig. 9. Dynamic fracture toughness of wheel

중앙부의 하중과 에너지를 나타낸 것이다.

이렇게 윤축재에서의 동적 파괴인성이 증가하는 이유는 균열선단에서의 단일효과에 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.

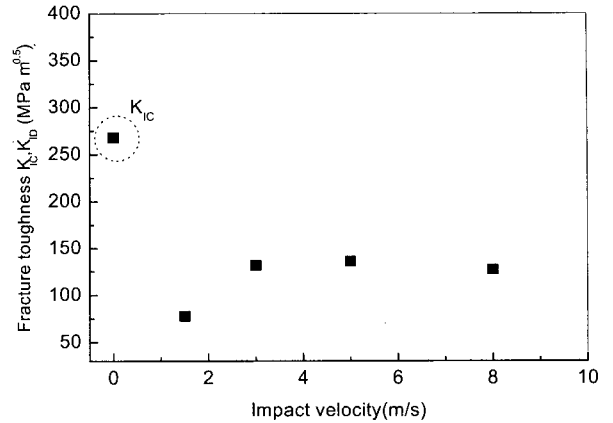


Fig. 12. Dynamic fracture toughness of Axle

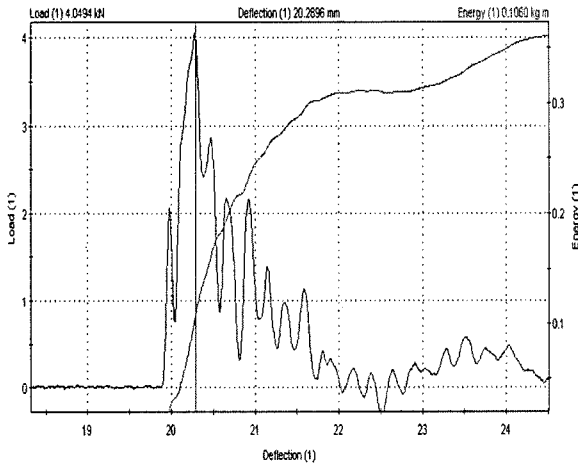


Fig. 10. Impact energy of wheel tread at 1.5m/s

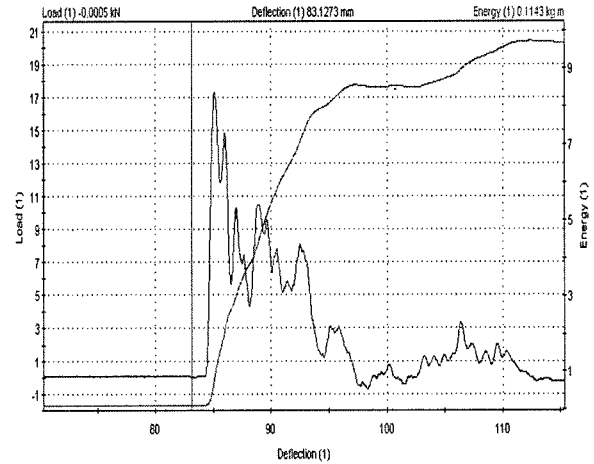


Fig. 13. Impact energy of axle surface at 8m/s

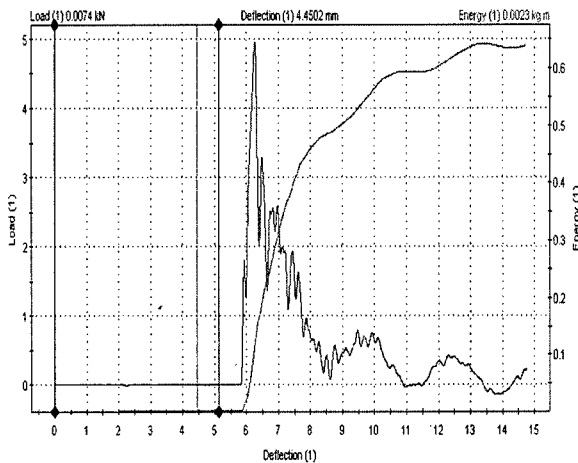


Fig. 11. Impact energy of wheel plate at 1.5m/s

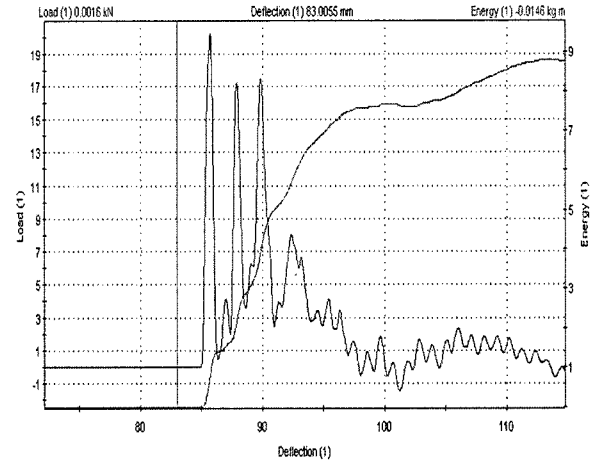


Fig. 14. Impact energy of axle center at 8m/s

4. 결론

고속철도용 차륜과 차축의 파괴역학적 안전성을 평가하기 위하여 정적·동적 파괴인성을 차륜과 차축의 입계위치에서 시험편을 채취하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 위치에 따른 정적 파괴인성의 차이가 나타난다. 차륜재의 경우 담면부에서 가장 높은 정적 파괴인성치를 나타내며 구멍부에서 가장 낮은 파괴인성치를 나타내었다. 차축재의 경우 실온에서도 비교적 인성이 높은 재료이며 차축중앙부와 비교하여 표면부가 높은 파괴인성을 가지고 있었다.
- (2) 파괴인성의 충격속도 의존성에 관한 공통적인 경향은 정적 파괴인성에서 급격하게 감소된 후, 충격속도의 증가와 더불어 약간 증가하며, 취성적 재료에 있어서 파괴인성의 변형속도 의존성은 낮다.
- (3) 윤축재는 정적 파괴인성치에 비해 동적 파괴인성치가 낮은 값을 가지고 있으며 특히, 한랭지 운행조건에서의 파괴한계조건 검토시에 있어 동적 파괴인성치를 설계인자로서 고려해야 할 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. BILD am Sonntag, 7 Juni, 1998
2. K HIRAKAWA, M KUBOTA, On the fatigue design method for high-speed railway axles, Proc Instn Mech Engrs, vol.215, pp.73-82, 2001
3. 平川賢治, 時政勝行, 鐵道車輛用輪軸の強度評價, 住友金屬, 32-3, pp.349-358, 1980
4. H. Sakamoto, K. Toyama, K. Hirakawa, Fracture toughness of medium carbon steel for railroad wheel, Material science engineering, Vol.285, pp.288-292, 2000
5. A. Ekberg, Rolling contact fatigue of railway wheels - a parametric study, Wear, 211, pp.280-288, 1997
6. Anders Ekberg, Peter Sotkovski, Anisotropy and rolling contact fatigue of railway wheels, Journal of fatigue 23, pp.29-43, 2001
7. Makoto Akama, A study on the critical crack sizes that cause wheel fracture. *World Congress Railway Research* 2001.10
8. L. Ramanathan, R.K.Kumar, Thermo-mechanical finite element analysis of a rail wheel, *International journal of mechanical sciences*, Vol.41, pp.487-505, 1999
9. ASTM E399, Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic materials, 1997
10. ASTM E813, Standard test method for JIC, a measure of fracture toughness, 1989
11. ASTM E1820-99a: Standard test method for measurement of fracture toughness, 1999
12. ASTM E24.03.03. Proposed standard method of test for instrumented impact testing of precracked charpy-specimens of metallic materials