

◆ 특집 ◆ 철도차량의 주행안전성 평가 기법

## 철도차량 차륜의 기계적 특성 및 잔류응력평가

### Evaluation of Mechanical Characteristic and Residual Stress for Railway Wheel

서정원<sup>1,✉</sup>, 권석진<sup>2</sup>, 이동형<sup>2</sup>, 전홍규<sup>1</sup>, 박찬경<sup>1</sup>  
Jung Won Seo<sup>1,✉</sup>, Suk Jin Kwon<sup>2</sup>, Dong Hyeong Lee<sup>2</sup>, Hong Kyu Jun<sup>1</sup>, and Chan Kyeong Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 시험인증안전센터 (Testing and Certification Center, Korea Railroad Research Institute)

<sup>2</sup> 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-Speed Railway Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)

✉ Corresponding author: jwseo@krrri.re.kr, Tel: +82-31-460-5210

Manuscript received: 2014.7.4 / Revised: 2014.8.13 / Accepted: 2014.8.20

*Railway wheels and axles are the most critical parts of the railway rolling stock. The wheel carry axle loads and guide the vehicles on the track. Therefore, the contact surface of wheel are subjected to wear and fatigue process. The wheel damage can be divided into three types; wear, contact fatigue failure and thermal crack due to braking. Therefore, in the contact surface between the wheel and the rail, the materials are heat treated to have a specific hardness. The manufacturing quality of the wheel have a considerable influence on the formation of tread wear and damage. Also, the residual stress on wheel is formed during the manufacturing process is one of the main sources of the damage. In this paper, the mechanical characteristic and the residual stress according to wheel material have been evaluated by applying finite element analysis and conducting mechanical tests.*

Key Words: Railway Wheel (철도차량차륜), Residual Stress (잔류응력), Finite Element Method (유한요소법)

#### 기호설명

$K_{IC}, K_Q$  = Fracture toughness(Mode I)

$\sigma_{ys}$  = Yield strength

EN = Europäische Norm(European Standard)

$\Delta K_{th}$  = Fatigue Crack growth threshold

#### 1. 서론

최근 철도차량의 고속화에 따라 철도차량의 중요부품이라 할 수 있는 차륜과 차축의 사용조건은

점점 가혹해지고 있다. 철도차량의 경우 한번 사고가 발생하면 대단히 큰 인명피해가 발생할 수 있기 때문에 이의 방지를 위하여 신뢰성평가가 필수적이라 할 수 있다. 차륜은 레일과의 구름접촉하중과 제동에 의한 열 하중을 받고 있다. 구름접촉하중에 의해서는 접촉면에 마모와 접촉피로손상이 필연적으로 발생하고, 열 하중에 의해서 열 균열이 발생한다.<sup>1-3</sup> 이러한 손상을 저감시키는 방법은 차륜의 접촉면 형상 최적화, 유지보수 및 새로운 재료 개발 등 이 있다. 국내외에서는 차륜에 사용하는 재료 및 기계적 성질에 대해

여 표준규격으로 정하여 사용하고 있으나 사용재료, 시험방법 및 시험 기준값 등이 다르게 규정되어 있다.<sup>4,5</sup>

차륜의 기계적 성질은 차륜 접촉면의 손상에 영향을 미치는 요소이다. 일반적으로 접촉면의 경도가 높으면 마모가 감소하나, 접촉피로손상이 증가하는 경향이 있다. 따라서, 차륜은 제조 시 접촉면에 열처리를 수행하여 경도를 높이고, 압축잔류응력을 형성시켜서 손상을 감소시키고 있다.<sup>6-8</sup> 또한 열 하중에 의한 균열생성 및 진전은 재료의 파괴인성에 따라서 달라진다.

본 논문에서는 국내에서 사용하고 있는 차륜의 종류에 따른 기계적 성질 및 잔류응력 특성을 조사하고 적용 타당성을 평가하였다.

## 2. 기계적 특성평가

### 2.1 재료 및 시험종류

국내에서는 한국산업규격에 따른 차륜재료(SSW)를 주로 사용하고 있으나, 현재는 국제규격의 차륜재료(R7)를 일부 사용하고 있다. 각각의 규정에서 규정한 시험종류 및 평가기준이 다르게 적용되어 있다. Table 1은 시험에 사용한 재료의 종류와 화학성분을 나타내고 있다. SSW의 화학성분은 C, Si, Mn 등 5가지 원소로 규정하고 있지만, R7은 5가지 원소 이외에 Cr, Cu, Mo 등의 특수원소가 포함되어있고 특수원소의 사용량에 따라서 기계적 성질이 변화한다.

### 2.2 시험결과

#### 2.2.1 파괴인성시험

파괴인성시험은 차륜의 균열에 대한 저항성을 평가하는 것으로 국내규격에서는 규정하고 있지 않다. 파괴인성시험은 차륜의 접촉면을 제동으로 이용하는 차륜에서 적용되는 시험항목이다.

ASTM E339에 따라서 변위제어를 통한 파괴인성시험을 수행하였다. 파괴 인성시험편의 노치선단에는 상온에서 피로하중을 작용시켜 a/W=0.5인 지점까지 피로 예비균열을 삽입하였다. 시험편에 1mm/min의 속도로 인장하중을 작용하여 하중-변위 선도를 획득하였으며, 획득한 선도를 이용하여 P<sub>Q</sub>를 구하고, 이를 이용하여 K<sub>Q</sub>를 구하였다. 구한 K<sub>Q</sub>값이 아래의 조건식을 만족하게 되면 K<sub>Q</sub>를 K<sub>IC</sub>로 결정하였다. Fig. 1은 시험편 형상을 나타내고 있으며, 시험편 개수는 각각 3개를 이용하였다.

Table 1 Chemical composition

Type	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	Cr+Mo+Ni
SSW	0.67	0.33	0.66	0.015	0.002					
R7	0.52	0.34	0.72	0.012	0.008	0.25	0.10	0.03	0.1	0.38

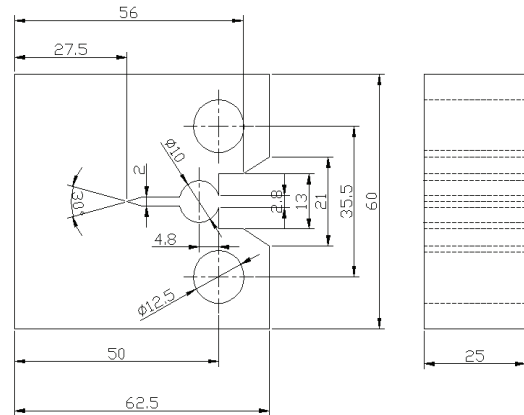


Fig. 1 Specimen configuration for fracture toughness test

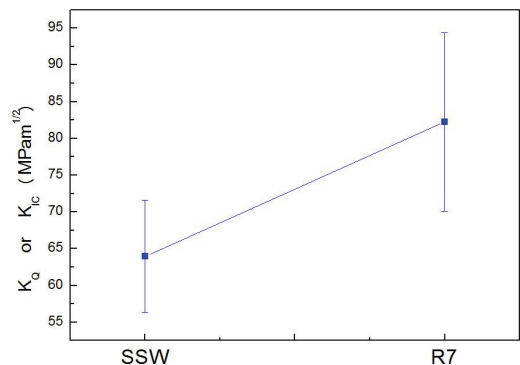


Fig. 2 Fracture toughness test results

$$K_Q = \frac{P_Q}{BW^{1/2}} f(a/w) \tag{1}$$

$$a, B \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2, \quad W \geq 5.0 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2 \tag{2}$$

여기서, P<sub>Q</sub>는 하중-변위 선도에서 직선부위 기울기의 95%가 되는 직선과 만나는 하중을 의미하며, B는 시험편의 두께, W는 시험편의 폭, a는 균열길이, σ<sub>ys</sub>는 항복강도를 의미한다.

Fig. 2는 재료에 따른 파괴인성시험 결과를 나타내고 있다. EN 규격에서는 답면제동을 사용하는

차륜의 경우에 파괴인성치에 대한 기준이 설정되었 으며 시험기준은 시험결과의 평균이 80MPa√m 이상, 하나의 값이 70MPa√m 이하면 안 되는 것으로 규정되어있다. 시험결과 R7의 경우에는 이 기준에 만족하고 있지만, SSW의 경우에는 만족하지 못한다.

**2.2.2 충격시험**

차륜은 레일위로 주행 중에 레일의 요철에 의 해서 충격하중을 견디어야 하며, 특히 겨울철에는 기온이 하강하므로 이에 대한 평가가 중요하다. 국내규격에서는 충격시험에 대하여는 상온에서 시험한 결과를 규정하고 있지만, EN 규격<sup>5</sup>에는 -20℃에서 저온시험을 규정하고 있다. 충격시험은 KS B 0809의 U-노치 및 V-노치 시험편을 이용하였고 시험 방법은 KS B 0810에 따라서 수행하였다. Fig. 3은 충격시험 결과를 나타내고 있으며, SSW와 R7 모두 상온에서는 20J 이상으로 평가되었지만, 저온 시험은 -20℃에서 실시하였으며, SSW재질은 2 - 3J으로 크게 떨어지고 있다. 그러나 R7의 경우에는 저온에서도 17 - 18J 로써 높은 수준을 유지하고 있고 기준에 만족하고 있다. R7의 경우에는 특수합금을 첨가하여 기계적 성능을 향상 시켜 저온에서도 충격시험결과가 SSW보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

**2.2.3 균열진전시험**

균열진전시험은 차륜에 균열 발생 시 균열진전 속도를 평가하는 것으로 국내의 규격에서는 규정하고 있지 않지만, 차륜의 안전성 평가에 중요한 요소이므로 시험을 실시하였다. ASTM E647에 따라서 하중제어를 통한 피로균열진전 시험을 수행하였으며, 시험편 형상은 Fig. 4와 같다. 피로균열진전 시험편의 노치 선단에는 상온에서 피로하중을 작용시켜 a/W=0.5인 지점까지 피로 예비균열을 삽입한 후, R=0.1의 하중비를 적용하여 하중-하중선 변위를 측정하여 컴플라이언스의 변화로부터 균열 길이를 구하여 a-N선도를 산출하였다. 또한 아래의 식을 이용하여 da/dN-ΔK curve를 구하고 Paris 상수 C와 지수 m값을 구하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+a)}{B\sqrt{W}(1-a)^{3/2}} f(a/w) \quad (3)$$

여기서, ΔP: 최대하중 - 최소하중, B: 시험편 두께, a: 균열길이, W: 시험편 폭, α: a/W

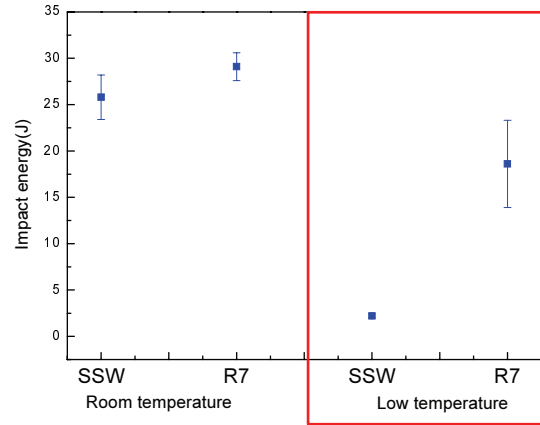


Fig. 3 Impact test results

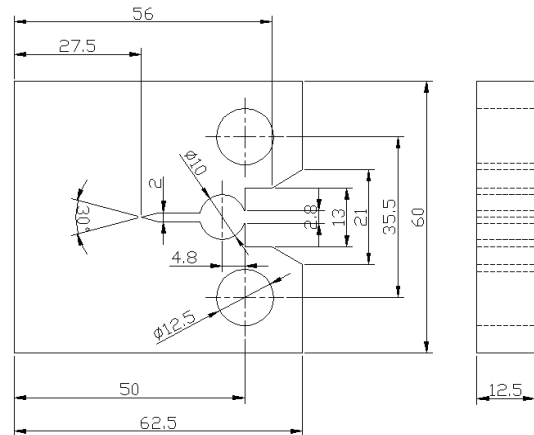


Fig. 4 Specimen configuration for crack growth rate test

Table 2 Crack growth rate test results

Type	Specimen No.	C	m	Remark
SSW	1	3E-9	3.1999	R
	2	4E-9	3.1261	R
	3	9E-9	2.9702	L
	4	5E-9	3.1373	L
R7	1	3E-9	3.1705	R
	2	3E-9	3.1361	R
	3	3E-9	3.1238	L
	4	3E-9	3.1313	L

\* R : Radial direction, L : Axle direction

균열진전 시험은 차륜에서 균열이 발생 후 균열진전속도에 관한 물성치로써 균열진전에 대한 저항성을 나타낸다. Fig. 5는 시험결과를 그래프로 나타낸 것으로, 이를 정리하면 Table 2와 같다. 시

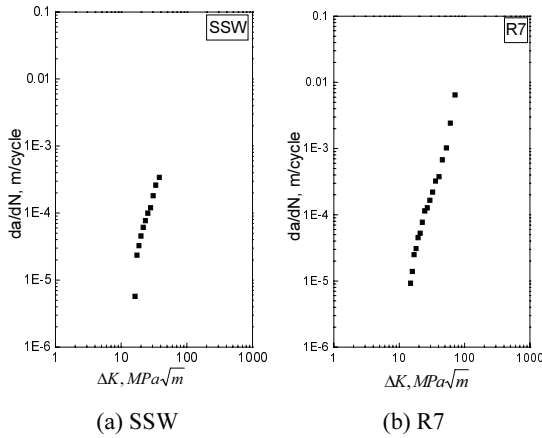


Fig. 5 Crack growth rate test results

힘결과 기울기  $m$ 이 클 수록 진전속도가 빠르며,  $C$  값이 클 수록 진전속도가 빠른 것을 나타낸다. 시험 결과 R7의 진전속도가 SSW보다 느린 것으로 나타났다.

2.2.4 하한계 균열진전시험

일반적으로 구조물은 제조과정 중에 개재물 등 결함의 잠재 가능성이 크고, 사용 중에 외적환경에 의해 결함이 존재하게 된다. 이러한 결함들로부터 피로균열이 성장하지 않는 재료의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 시험은 ASTM E647 시험규격에 따라 수행하였다. 피로균열진전 시험편의 노치 선단에는 상온에서 피로하중을 작용시켜  $a/W=0.5$ 인 지점까지 피로 예비균열을 삽입한 후, 주파수 20Hz,  $R=0.1$ 의 하중비를 적용하여 하중제어 방식으로 시험을 수행하였다. 균열길이는 100배 줌 CCTV Camera를 이용하여 측정하였고, 0.1mm 당 반복수를 측정하여  $a-N$  선도를 산출하였다. 또한 식(3)을 이용하여  $da/dN-\Delta K$  선도를 획득하였고,  $da/dN$ 이  $10^{-7}mm/cycle$  이하 일 때의 값을 하한계 응력확대계수로 결정하였다. Fig. 6는 시험결과를 그래프로 나타낸 것으로, 이를 정리하면 Table 3과 같다. 피로균열 하한계 값은 재료의 종류 및 채취 방향에 상관없이 모두 유사한 값으로 나타났다.

3. 잔류응력 특성평가 및 실험방법

철도차량 차륜은 차륜/레일 접촉면에서의 마모를 줄이기 위해 표면에서의 경도를 높이며 이를 위해 열처리를 실시한다. 이러한 열처리 과정에서

Table 3 Crack growth threshold

Type	Specimen No.	$\Delta K_{th}$	Remark
SSW	1, 2	10.41, 10.92	R
	3, 4	10.84, 10.94	L
R7	1, 2	11.65, 10.93	R
	3, 4	9.84, 9.11	L

\* R : Radial direction, L : Axle direction

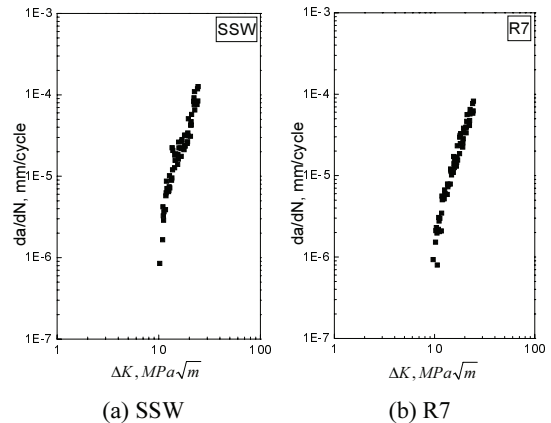


Fig. 6 Crack growth threshold test results

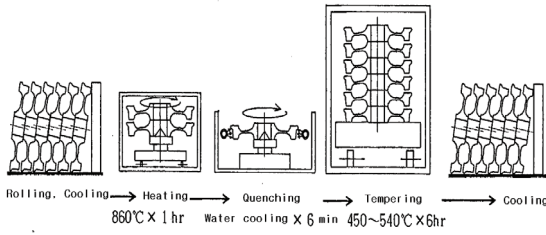
접촉면에 압축잔류응력이 발생하여 접촉면 손상을 억제하는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 제조시 열처리에 의해 발생하는 잔류응력을 유한요소 해석과 실험을 통하여 평가하였다. 잔류응력 측정에는 작은 구멍을 내어 잔류응력을 국부적으로 이완시키는 방법인 천공법(hole drilling method)<sup>9,10</sup> 및 X-ray 장비<sup>11</sup>를 사용하여 측정하였다.

3.1 열처리조건

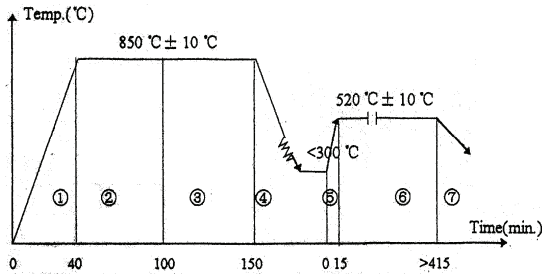
국내외의 일반적인 철도차량 차륜의 제조과정은 Fig. 7과 같다. 열처리는 차륜의 접촉면에 실시하며 압연 후 공냉을 실시하고 차륜접촉면에 수냉을 실시한 후 다시 뜨임 처리의 순서로 진행된다.

3.2 유한요소해석 모델 및 물성치

국내외의 일반해석대상으로는 현재 국내에서 사용하는 객화차용(SSW)차륜과 고속철도차륜(R7)을 선정하였으며, 해석모델 및 하중의 대칭성을 고려하여 축대칭 모델을 사용하였다. Fig. 8에는 해석에 사용된 모델을 나타내었다. 그림에서와 같이 SSW 차륜의 직경은 860mm이고 R7은 920mm로써 상호 직경과 단면형상이 다르게 구성되어 있다.

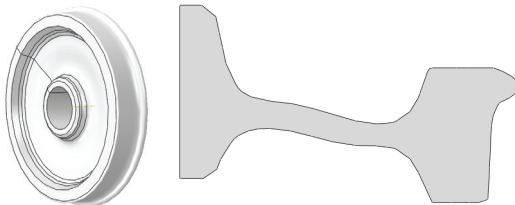


(a) Heat treatment process

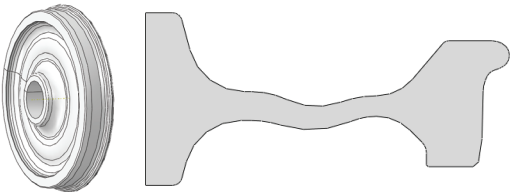


(b) Temperature variation

Fig. 7 Manufacturing process of wheel<sup>12</sup>



(a) SSW



(b) R7

Fig. 8 Analysis model

본 논문에서는 열전달 해석을 수행한 후 이를 바탕으로 열응력 해석을 수행하였다. 열처리 과정은 대류조건을 사용하여 가열, 냉각, 뜨임, 냉각 순으로 적용하였다. 해석에 사용된 물성치는 Table 4와 같으며 탄소성해석 조건으로는 완전소성조건을 적용하였다.

### 3.3 유한요소해석결과

Fig. 9는 열전달 해석결과로써, 차륜의 접촉면에서의 시간에 대한 온도변화를 보여주고 있다. 그

Table 4 Material properties for F.E. analysis

Temperature (°C)	E (GPa)	Poisson's ratio (ν)	Coefficient of thermal expansion ( $\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ )	Yield strength (MPa)
24	213	0.295	1.0	490
230	201	0.307	1.15	424
358	193	0.314	1.24	366
452	172	0.320	1.30	291
567	102	0.326	1.37	132
704	50	0.334	1.30	39
900	43	0.345	1.40	11

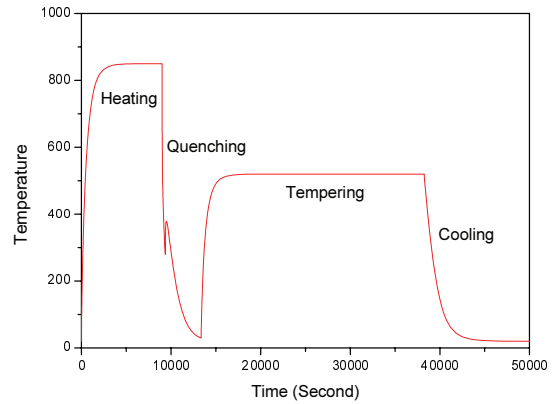
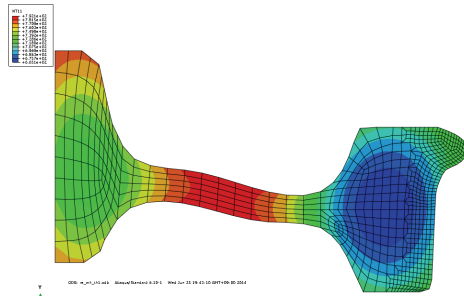


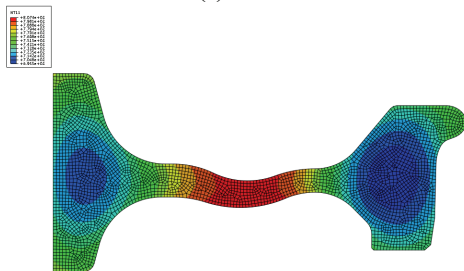
Fig. 9 Temperature change at contact surface during heat treatment analysis

림에서와 같이 시간에 따른 온도변화는 Fig. 7의 제조 시 온도조건 변화와 잘 일치하고 있다. Fig. 10은 열처리 조건에서 950초시에 차륜 단면의 온도분포를 나타내고 있다. 이때 950초는 차륜에 전체적으로 열을 가하는 과정의 마지막 시간으로써 이 때의 온도분포가 잔류응력 분포에 영향을 줄 것으로 판단되어 이를 비교하였다. 비교결과 두 가지 종류의 차륜 모두 유사한 온도분포를 나타내고 있다. 열처리조건에서 950초는 차륜전체에 온도가 일정하게 분포되지 않는고 두께가 얇은 차륜의 웹(Web)부분에서는 온도가 800°C까지 증가하였지만, 차륜의 두부에서는 660°C로써 온도차이를 보이고 있다.

Fig. 11은 열 응력 해석결과로써 원주방향 응력 분포를 나타내고 있다. 해석결과는 열처리 과정이 모두 종료된 상태이기 때문에 현재의 응력이 잔류 응력으로 존재하게 된다. 두 종류의 차륜 모두 유사한 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 차륜의 접

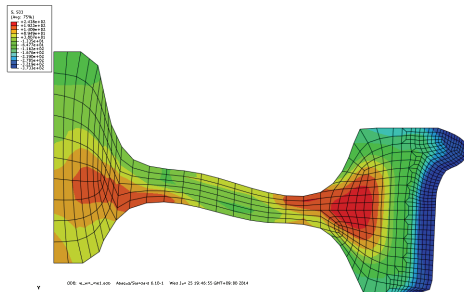


(a) SSW

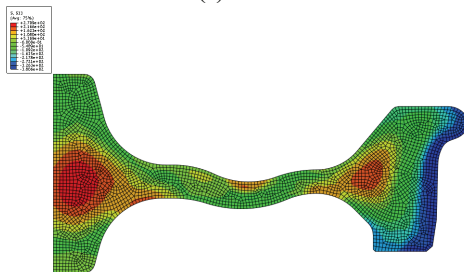


(b) R7

Fig. 10 Temperature distribution at 950 second



(a) SSW



(b) R7

Fig. 11 Thermal stress analysis results

측면에서는 압축잔류응력이 발생하였고, 차륜의 두부 내부에서는 인장잔류응력이 발생하고 있다. 인장잔류응력은 두 가지 차륜의 웹 부위에서는 상호 다르게 발생하고 있다.

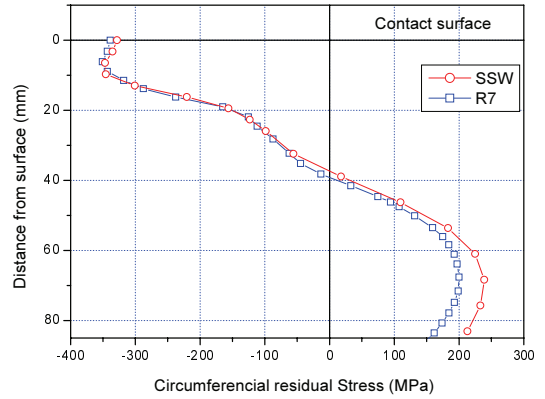


Fig. 12 Residual stress distribution according to depth

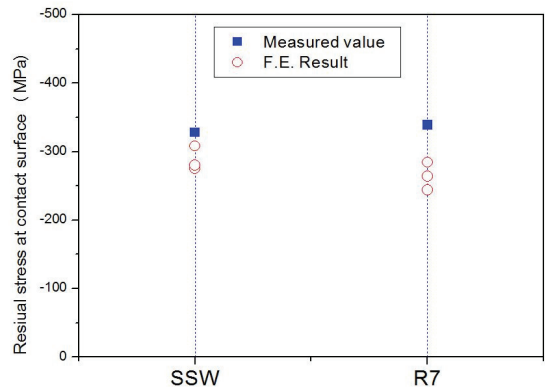


Fig. 13 Comparison of residual stress at the surface between by F.E. analysis and experiment

### 3.4 잔류응력 해석 및 실험결과 고찰

차륜은 차량을 지지하여 주행하는 중요한 부품이므로 강도가 중요하다. 강도에 영향을 미치는 인자중에 하나가 제조시 발생하는 잔류응력이다. Fig. 12는 잔류응력 해석결과로써 차륜 접촉면 중앙에서의 깊이 방향에 따른 잔류응력의 변화를 나타낸 것이다. 두 가지 종류의 차륜의 잔류응력 분포는 유사하게 발생하였다. 잔류응력은 표면에서 대략 -300MPa로 나타났으며 내부로 가까이 갈수록 인장잔류응력으로 변화하는 경향을 나타내었다. 이때 압축에서 인장으로 변화하는 위치의 깊이는 38mm 부근이다. Fig. 13은 해석결과의 검증을 위하여 접촉표면의 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력 측정결과는 표면에서 -280 ~ -310 MPa로 나타나 해석결과와 유사하였다. EN 규격에서는 잔류응력에 대한 기준으로 접촉표면에서 -80 ~ -150 MPa로 규



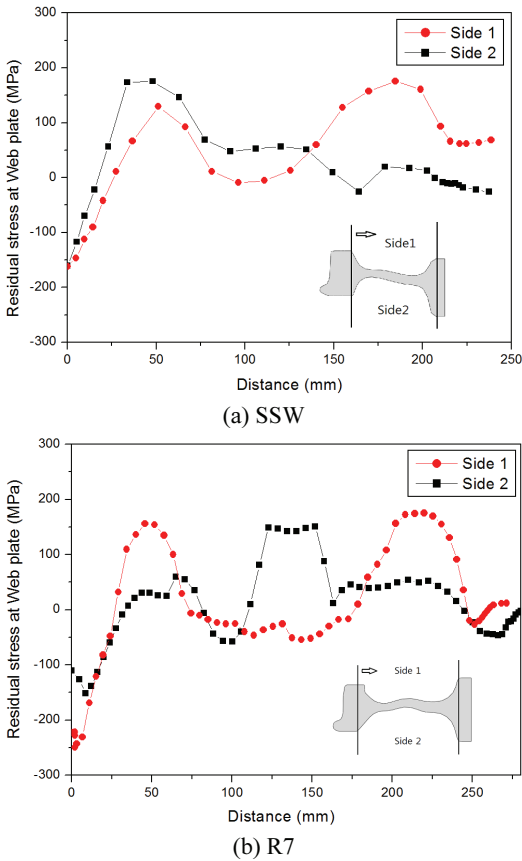


Fig. 14 Comparison of residual stress at the web surface

정하고 있다. 해석과 시험결과로부터 적용소재 및 열처리 조건 변경 등을 통하여 기준에 맞게 제작하거나, 하한치 기준(-150MPa) 변경에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

Fig. 14는 차륜의 웹 부위 잔류응력 해석결과이다. 웹 부위의 잔류응력 분포는 두 가지 차륜에서 다르게 발생하였다. 이는 웹의 형상에 따라서 잔류응력분포가 달라지기 때문이다. 잔류응력은 웹 부위에 따라서 인장잔류응력에 압축잔류응력으로 다양하게 변화하고 있으나, 최대 인장잔류응력은 약 +200MPa이 발생하였다.

**4. 결론**

국내에서 사용하고 있는 차륜의 종류에 따른 기계적 성질 및 잔류응력 특성을 평가하였으며 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 철도차량 차륜 재질의 파괴인성시험 결과 재질

- 의 종류에 따라서 차이가 크게 발생하였고 R7은 평균이 80MPa√m 이상으로 평가되었다.
- 2) 충격시험 결과 상온에서는 재질의 종류에 따라서 유사한 값을 나타내고 있으나, 저온시험에서는 차이를 발생하고 있으며, R7에서는 17J 이상으로 평가되었다.
- 3) 차륜의 종류에 따라서 잔류응력을 평가한 결과 접촉면에서는 압축잔류응력이 발생하였고 차륜의 종류에 상관없이 유사한 값을 나타내었다.
- 4) 접촉면의 압축 잔류응력의 크기는 약 -300MPa로 평가되었으며, 웹 부위에서는 인장잔류응력이 약 200MPa이 발생하였다.

**후 기**

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 과제인 “차량궤도환경분야 철도용품 인증을 위한 실내현장 시험규격 정비 및 인증체계 개선방안 연구” 과제의 일부로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

**REFERENCES**

1. Cannon, D. F. and Pradier, H., “Rail Rolling Contact Fatigue Research by the European Rail Research Insitutie,” *Wear*, Vol. 191, No. 1, pp. 1-13, 1996.
2. Bijak-Żochowski, M. and Marek, P., “Residual Stress in Some Elasto-Plastic Problems of Rolling Contact with Friction,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 39, No. 1, pp. 15-32, 1997.
3. Kulkarni, S., Hahn, G., Rubin, C., and Bhargava, V., “Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Repeated Three-Dimensional, Elliptical Rolling Contact with Rail Wheel Properties,” *Journal of Tribology*, Vol. 113, No. 3, pp. 434-441, 1991.
4. KS R 9221, “Wheels for Railway Rolling Stock,” 2008.
5. EN 13262, “Railway Applications - Wheelsets and Bogies - Wheels - Product Requirements,” 2011.
6. Gordon, J. and Perlman, A., “Estimation of Residual Stresses in Railroad Commuter Car Wheels Following Manufacture,” *Proc. of the ASME on International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, Vol. 15, 1998.
7. Kim, K. J. and Choi, K. J., “A Study on Counterme-

- asure of Damage of Railway Wheel,” Railway Technology Report, Vol. 27, No. 2, pp 233-263, 1993.
8. Kwon, S. J., Seo, J. W., Lee, D. H., and Ham, Y. S., “Evaluation of Residual Stress for Thermal Damage of Railway Wheel Tread,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 5, pp. 537-647, 2011.
  9. Joo, J. W. and Park, C. K., “Determination of Non-Uniform Residual Stress by the Hole Drilling Method,” Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers: A, Vol. 22, No. 2, pp. 268-277, 1998.
  10. Kim, C., Suk, C. S., and Yang, W. H., “Influence of the Hole Eccentricity in Residual Stresses Measurement by the Hole-Drilling Method,” Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers: A, Vol. 24, No. 8, pp. 2059-2064, 2000.
  11. Hyun, J. S., Yoo, K. B., and Choi, H. S., “The Characteristics of Residual Stresses in the Welded Joint of P92 Steel for Fossil Power Plant by the X-Ray Diffraction,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 7, pp. 116-123, 2008.
  12. Noda, T., “Safety of Wheels and Axles for Railway Vehicles and Engineering Ethics,” Forum, Vol. 7, No. 7, pp. 9-16, 2002.