

## 틸팅차량용 차륜의 구조 강도 및 동적 성능 해석

허현무<sup>#</sup>, 권성태<sup>\*</sup>, 서정원<sup>\*</sup>, 권석진<sup>\*\*</sup>

### Strength and Dynamic Performance Analysis for Tilting Train Wheel

Hyun Moo Hur<sup>#</sup>, Sung Tae Kwon<sup>\*</sup>, Jung Won Seo<sup>\*</sup> and Seok Jin Kwon<sup>\*\*</sup>

#### ABSTRACT

For the improvement of a conventional railway speed, tilting train(Tilting Train eXpress) is under the development aiming for a maximum speed 180km/h. Compared to the existing conventional rolling-stock, tilting train could take an advantage of speed improvement about 20~30% on curve sections due to the improvement of curving performance. However, this speed increasement creates a severe load at wheels, thus it is necessary to study the safety of wheel for tilting train preferentially. On the other hand, it is under consideration that the wheel for conventional railway rolling-stock at speeds of 150km/h will be applied to tilting train at speeds of 180km/h. In this paper, we have studied the strength of wheel structure, the geometrical contact characteristics, and the dynamic performance of wheel to evaluate the safety of wheel for tilting train.

**Key Words** : Tilting Train(틸팅열차), Wheel(차륜), Wheel Profile(답면형상), Dynamic Performance(동적 성능), Strength(강도), Equivalent Conicity(등가답면구배)

#### 1. 서론

고속철도 구간을 제외한 현 기존철도 구간에서의 최고 운행속도는 150km/h이다. 그러나 현재 개발 중에 있는 180km/h급 틸팅차량(TTX)의 운용에 따라 기존 철도 구간의 주행속도는 180km/h로 향상될 계획이다. 따라서 기존철도 구간의 최고속도 향상과 더불어 틸팅차량의 장점인 곡선구간에서의 주행속도 향상을 도모함으로써 기존철도의 운행시간 단축이 기대된다.

한편 차량과 궤도가 직접적으로 접촉하는 경

계영역인 차륜의 관점에서 보면 속도 향상에 따른 기존 차륜의 안전성 및 유지관리에 대한 검토가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존 150km/h급 철도차량용 차륜의 틸팅차량 확대 적용에 따른 적합성 평가를 목적으로 해석 연구를 수행하였다. 180km/h급으로 주행속도가 향상됨에 따른 차륜의 구조적 안전성을 평가하기 위하여 구조 강도 해석을 수행하였으며 직선 및 곡선구간 주행 시 차량 안정성 및 곡선 적용 성능을 평가하기 위하여 차륜답면형상에 대한 차량 동적 특성 해석을 수행하였다.

<sup>접수일</sup>: 2006년 7월 14일; <sup>게재승인일</sup>: 2006년 9월 25일

<sup>#</sup> 교신저자: 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부

E-mail hmhur@krii.re.kr Tel. (031) 460-5245

<sup>\*</sup> 한국철도기술연구원 철도시험인증연구센터

<sup>\*\*</sup> 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부

## 2. 구조 강도 해석

### 2.1 평가방법

현 국내 철도차륜 규격을 준용하고 있는 틸팅차량용 차륜의 구조안전도를 평가하기 위하여 차륜 plate부의 강도를 평가하였다. 차륜의 강도평가방법은 UIC 510-5 "Technical approval of solid wheels"를 준용하였으며 평가에 필요한 물성치는 KS R 9221 "철도차량용 차륜"에 의하였다.<sup>1,2</sup>

차륜 강도평가에 적용하는 하중조건은 Fig. 1과 같이 차량이 주행중인 조건을 모사한 다음의 3가지 경우에 의한다. 3가지 하중조건에 대하여 응력을 계산하여 두 가지 방법으로 평가한다. 첫 번째는 각각에서 계산된 하중의 등가응력(Mises stress)이 항복강도 이내이어야 한다. 두 번째 방법은 피로해석에 의한 것으로 각각의 하중에서 평균응력과 동응력을 구한 후 다음의 허용응력 기준을 충족하여야 한다.

- 가공면  $\Delta\sigma < 360 \text{ MPa}$
- 비가공면  $\Delta\sigma < 290 \text{ MPa}$

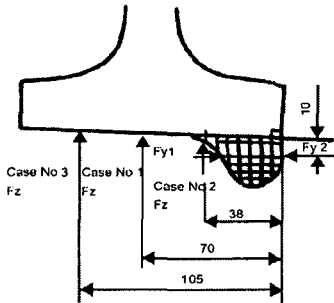


Fig. 1 Force condition

(하중조건)

- Case 1 : 직선선로구간  
 $F_z = -1.25 * Q * g$   
 $F_y = 0$
- Case 2 : 곡선구간  
 $F_z = -1.25 * Q * g$   
 $F_{y1} = 0.7 * Q * g$
- Case 3 : 분기구간  
 $F_z = -1.25 * Q * g$

$$F_{y2} = -0.42 * Q * g$$

where, Q : mass of vehicle per wheel

g : acceleration due to gravity(m/s<sup>2</sup>)

Fz : Vertical force(kN)

Fy : Transverse force(kN)

### 2.2 해석모델

해석모델은 틸팅차량 객차용 차륜을 대상으로 하였다. 객차용 차륜의 경우에는 일반적으로 국내에서 사용하는 형상을 가지고 있으며 해석대상 및 모델은 Fig. 2와 같다. 해석모델은 차륜 직경이 원형인 신조차륜, 직경이 교체한도에 도달하여 림부위가 얇아진 삭정한도차륜 두 가지로 구분하여 해석을 수행하였다.

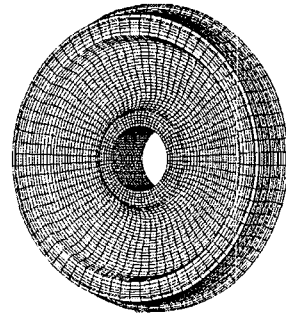


Fig. 2 FEM model for new wheel

### 2.3 해석결과

Fig. 3 ~ Fig. 5는 신조차륜에 대하여 해석한 결과를 나타내며 Fig. 6 ~ Fig. 8은 삭정한도차륜에 대하여 해석한 결과를 나타낸다. Fig. 3(a)는 Case1 하중, 직선구간에서의 하중조건에서 변형된 모습을 나타내고 있으며 Fig. 3(b)는 이때의 등가응력을 나타내고 있다. 등가응력의 최대치는 Plate부 불연속부에서 발생하였다. 나머지 하중조건에 대하여는 Fig. 4 ~ Fig. 5와 같이 plate부 불연속부에서 최대응력이 발생하였다. Fig. 6 ~ Fig. 8의 삭정한도차륜의 해석결과와 비교하여, 변형 형상과 최대응력 발생위치는 동일하나 발생하는 최대응력은 상이함을 알 수 있다.

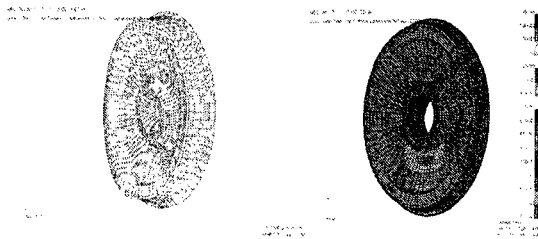
Table 1은 두 가지 차륜에 대한 최대발생응력을 나타낸 것으로 삭정한도차륜에 더 큰 응력이 발생함을 알 수 있다. 각각의 하중조건에서 발생하는 최대등가응력은 재질의 항복강도(500MPa)보

다 작으므로 평가기준을 충족한다고 할 수 있다.

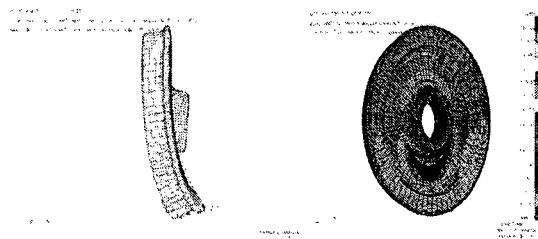
피로강도평가 결과는 Fig. 9 ~ Fig. 10과 같이 해석결과의 응력이 크게 발생한 노드의 값을 피로강도 기준선도에 나타내었다. 그림에서와 같이 피로강도 평가결과 기준치에 비하여 충분히 작은 값을 나타내고 있으므로 피로강도 조건을 충족하고 있다고 판단된다.

Table 1 Results of Mises stress analysis

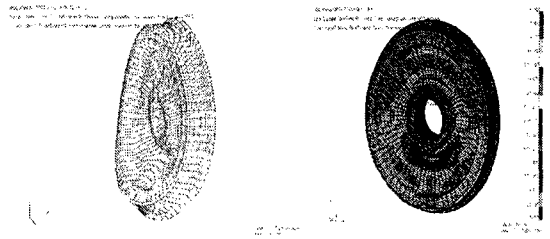
Force condition	new wheel		worn wheel	
	stress (MPa)	position	stress (MPa)	position
Case 1	23.5	Plate	31.2	Plate
Case 2	83.0	Plate	84.1	Plate
Case 3	66.5	Plate	71.4	Plate



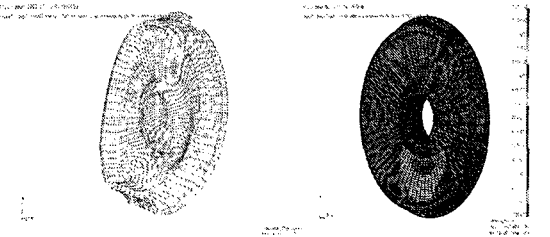
(a) displacement (b) stress  
Fig. 3 Case 1 condition(new wheel)



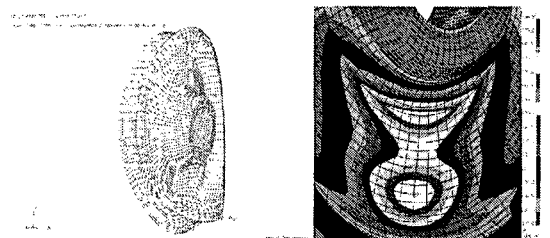
(a) displacement (b) stress  
Fig. 4 Case 2 condition(new wheel)



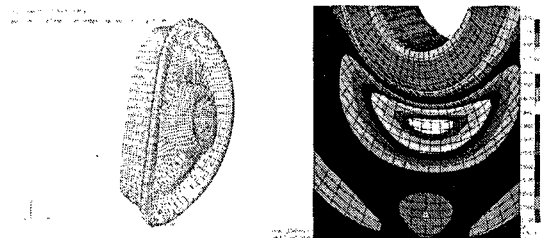
(a) displacement (b) stress  
Fig. 5 Case 3 condition(new wheel)



(a) displacement (b) stress  
Fig. 6 Case 1 condition(worn wheel)



(a) displacement (b) stress  
Fig. 7 Case 2 condition(worn wheel)



(a) displacement (b) stress  
Fig. 8 Case 3 condition(worn wheel)

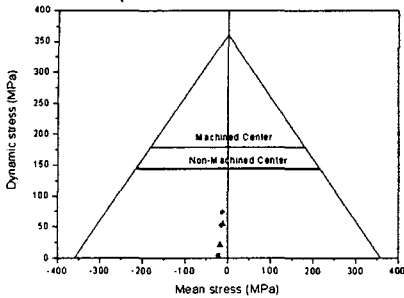


Fig. 9 Evaluation of fatigue strength for new wheel

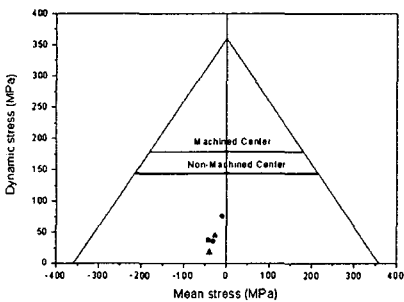


Fig. 10 Evaluation of fatigue strength for worn wheel

### 3. 동적특성 해석

#### 3.1 차륜담면형상 기하학적 특성

차륜의 동적특성은 레일과 접촉하는 차륜의 담면형상의 기하학적 특성에 좌우된다. 틸팅차량 차륜의 담면형상은 Fig. 11과 같이 국내 여객차량에 적용되고 있는 KNR20h 담면형상이 적용되고 있으며 최근 틸팅차량의 운용조건에 부합하게 개발된 TTX-W1 담면형상이 제안되고 있다. 따라서 본 절에서는 향후 틸팅차량용 차륜에 적용될 2가지 담면형상에 대하여 동적 특성을 분석하고자 한다.

틸팅차량용 담면형상의 기하학적 특성을 분석하고자 레일과의 접촉점 분포 해석을 수행하였고 차륜구름반경차(rolling radius difference), 접촉각차(contact angle difference), 접촉면적(contact area), 등가담면구배(equivalent conicity)와 같은 기하학적 인자에 대한 해석을 실시하였다. 해석조건은 레일두부가 마모가 안된 원형상태의 50kgN, 60kg레일에 대하여 차륜내면거리 1,356mm, 궤간 1,435mm, 레일경좌 1/40으로 가정하여 해석하였다.<sup>3</sup>

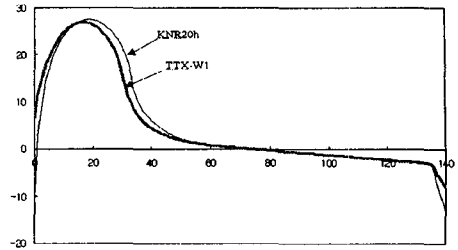
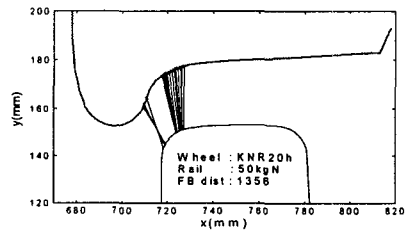


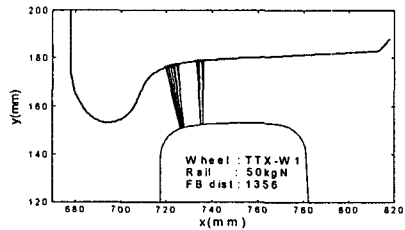
Fig. 11 Wheel profiles for tilting train

Table 2 Geometric characteristics of profiles

profile	flange thickness (mm)	flange height (mm)	qR	flange angle (deg)	equivalent conicity	
					50kgN	60kg
KNR20h	35.4	27.6	10.1	71.5	0.61	0.55
TTX-W1	32.7	27.0	9.68	68.5	0.29	0.25



(a) KNR20h Wheel - 50kgN Rail



(b) TTX-W1 Wheel - 50kgN Rail

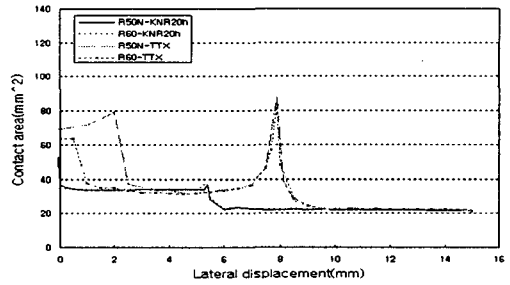
Fig. 12 Contact patches of profiles

Table 2는 담면형상의 치수 및 등가담면구배 해석 결과를 정리한 표이다. 두 담면의 치수는 차량 안전기준에 의거한 기준치를 모두 충족하고 있으며 TTX-W1담면의 경우 플랜지두께가 KNR20h담면에 비하여 작아져서 차륜 원형삭정시 삭정량 저감 효과가 기대된다.<sup>4</sup> 등가담면구배는 KNR20h담면에 비하여 TTX-W1담면이 현저히 작은 값으로 해석되며 모두 50kgN, 60kg 레일에 대하여 0.3이하의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 12의 접촉

점 분포 해석 선도에서 살펴보면 KNR20h답면은 (a)에서와 같이 차륜과 레일의 접촉점 분포가 차륜 플랜지부 및 레일헤이지코너부에 분포함을 알 수 있다. 이는 Fig. 13(a)의 구름반경차 선도의 기울기를 크게 함으로서 이에서 산출된 등가답면구배를 증가시키는 경향을 보이게 한다.

반면, TTX-W1면은 KNR20h답면의 접촉점 분포와 달리 Fig. 12(b)와 같이 차륜답면부와 레일두부 부분에서 분포함을 알 수 있다. 이는 Fig. 13(a)의 구름반경차 기울기를 완만하게 하여 등가답면구배를 작게 하는 경향을 보이며, 또한 (b)의 접촉각차의 기울기도 저하시켜 곡선 주행 시 완만한 곡선 추종을 가능하게 한다. 또한 (c)의 접촉면적 측면에서 보면 차륜플랜지 접촉영역에서 KNR20h답면에 비하여 접촉면적을 증가시킴으로서 차륜접촉부에 가해지는 응력 집중 현상을 저하시키는 효과를 기대할 수 있다.

Fig. 14는 차륜내면거리 변화에 따른 등가답면구배 특성을 해석한 선도이다. KNR20h답면이 차륜내면거리 변화에 대하여 등가답면구배가 급격히 변화함에 비하여 TTX-W1답면은 완만하고 안정된 특성을 보이고 있다. 이는 고속차량의 등가답면구배 관리측면에서 매우 안정적이라 할 수 있으며 윤축 유지보수측면에서도 효율적이라 사료된다.



(c) Contact area

Fig. 13 Contact characteristics of profiles

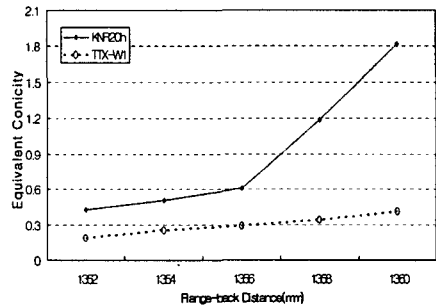
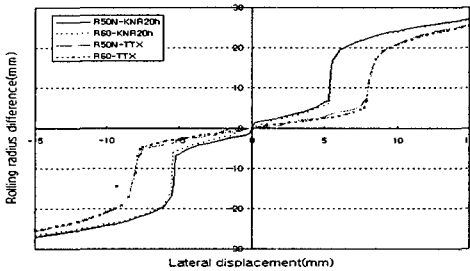
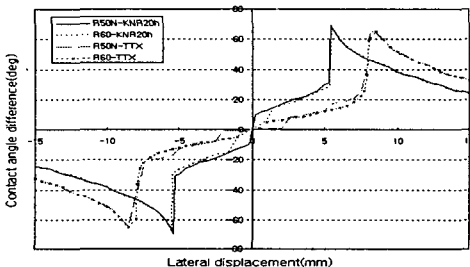


Fig. 14 Equivalent conicity according to flange-back distance



(a) Rolling radius difference



(b) Contact angle difference

### 3.2 차륜답면형상 동적 특성

틸팅차량용 차륜에 대한 주행안정성, 곡선주행 성능 및 탈선안전도, 승차감과 같은 동적 성능을 분석하고자 동적 특성 해석을 수행하였다. 해석은 철도차량 전용 동특성해석 S/W인 영국 AEAT사의 VAMPIRE를 활용하였다. 차량 모델은 틸팅차량 M-car를 대상으로 모델링하였으며 궤도는 직선 및 곡률 400m의 곡선구간을 대상으로 모델링 하였다.<sup>5,6</sup>

주행안정성 분석을 위하여 차량 주행시 횡방향 외란을 가하여 차량의 거동상태를 분석하는 비선형 과도응답해석인 임계속도 해석을 수행하였다. 곡선 주행성능 및 탈선안전도 해석은 곡선반경 400m의 급곡선을 115km/h 속도로 통과할 때를 가정하여 곡선주행성능관련 인자인 횡압, 탈선안전도관련 인자인 윤중감소율 및 탈선계수를 해석하였다. 또한 승차감 분석을 위하여 직선평탄구간을 최고속도 180km/h로 주행할 때를 가정하여 차체 좌우 및 상하방향의 승차감을 해석하였다.

Table 3은 동특성 해석결과를 정리한 표이다.

두 답면형상 모두 임계속도는 210km/h이상으로서 목표치 200km/h를 상회하여 틸팅차량 적용시 사행동(hunting)에 대한 안정성에 대한 문제는 없을 것으로 기대된다. 탈선안전도관련 인자인 윤중감소율, 탈선계수는 모두 허용한도에 비하여 충분한 낮은 수치를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 승차감은 TTX-W1답면 적용시 KNR20h답면에 비하여 약 1dB 정도 증가하기는 하나 미미한 수준으로 철도차량의 승차감평가관점에서는 유사한 수준이라 할 수 있으며 100~102dB이내의 낮은 수치를 보이고 있다고 할 수 있다. 그러나 곡선 주행 시 차륜에 발생하는 횡압은 Fig. 15와 같이 KNR20h답면이 27.3~29kN임에 비하여 TTX-W1답면은 23.8~24.9kN으로 약 14% 저감함을 알 수 있다.

따라서 동적 특성 측면에서 보면 TTX-W1답면은 KNR20h답면에 비하여 유사한 수준을 유지한 채, 곡선주행시 발생하는 횡압은 저감하는 특성을 보여 곡선주행 성능및 마모 저감 측면에서는 우수할 것으로 기대된다.

Table 3 Results of dynamic analysis

wheel /rail	critical speed (km/h)	lateral force (kN)	wheel unloading (%)	derailment coefficient	ride(dB)	
					lateral	vertical
KNR20h /50kgN	288	27.3	36.7	0.28	100.4	102.2
KNR20h /60kg	288	29.0	37.1	0.30	100.0	102.2
TTX-W1 /50kgN	216	23.8	36.9	0.25	101.4	102.1
TTX-W1 /60kg	216	24.9	37.0	0.26	100.7	102.1
criteria	above 200		below 80%	below 1.1		

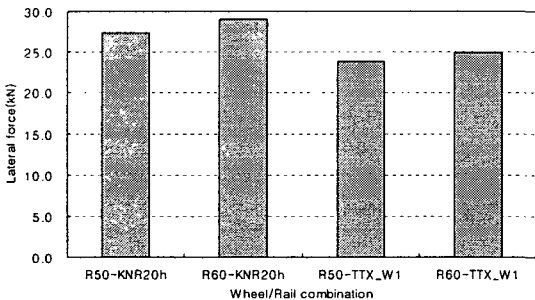


Fig. 15 Lateral force analysis results of wheel profile for tilting train

#### 4. 차륜 접촉응력 특성

차륜과 레일 접촉시 차륜답면에 따른 작용하는 응력분포 특성을 분석하고자 접촉응력분포 해석을 수행하였다. 차륜, 레일에 대한 유한요소해석 모델 구성은 Fig. 16과 같이 차륜답면과 50kgN 레일 두 부형상을 원형상태로 가정하여 2차원으로 모델링하였다. 차륜과 레일이 접촉하는 접촉점 위치 및 접촉점에 작용하는 하중은 동역학해석을 통하여 직선구간과 곡률반경 400m의 곡선구간 주행 시를 모사하여 해석한 값을 입력으로 하였다.<sup>7,8</sup>

Fig. 17 및 Fig.18은 KNR20h답면및 TTX-W1답면에 대하여 직선 및 곡선구간 주행 시를 모사하여 차륜/레일 접촉점에 대한 응력 해석을 수행한 그림이다. (a)는 KNR20h답면의 응력분포를 나타내며 (b)는 TTX-W1답면의 응력분포를 나타낸다.

Table 4는 답면형상에 대한 응력분포 해석을 수행하여 차륜, 레일 접촉부에 작용하는 최대 등가응력을 나타낸다. 해석결과, 직선선로 주행 시 차륜에 작용하는 응력은 KNR20h답면이 1,070MPa, TTX-W1답면이 880 MPa로 약 18% 저감하는 경향을 보이고 있다. 곡선선로 주행 시에는 KNR20h답면이 1,450 MPa, TTX-W1답면이 1,270MPa로 약 12% 저감하는 경향을 보이고 있다. 이는 Fig. 13(c)의 접촉면적 해석결과에서와 같이 직선구간 주행 시 윤축 횡변위 위치인 '0'에서의 접촉면적을 보면 KNR20h답면에 비하여 TTX-W1답면의 접촉면적이 큼을 알 수 있다. 또한 곡선구간 주행 시 윤축 횡변위 위치인 7mm영역에서도 같은 경향을 나타내고 있다. 그러므로 TTX-W1답면의 접촉면적이 KNR20h답면에 비하여 전영역에서 증가함에 따라 접촉점에 작용하는 최대응력값도 작게 발생한다고 판단된다. 한편, 레일측면에서 보면 레일에 작용하는 최대응력도 차륜 응력과 같이 직선 및 곡선구간에 대하여 유사한 경향을 보이고 있다.

이는 차륜및 레일에 작용하는 접촉응력을 저감시킴으로서 차륜및 레일에 발생할 수 있는 손상을 저감시키는 데 효율적이라고 할 수 있다. 따라서 TTX-W1답면의 동적 특성 해석결과에서와 같이 접촉응력 해석결과도 KNR20h답면에 비하여 우수하다고 할 수 있으며, 곡선주행속도 향상에 따른 차륜 부담력 저감을 목표로 개발한 틸팅차량용 답면형상 개발 개념에도 부합한 결과라 판단된다.

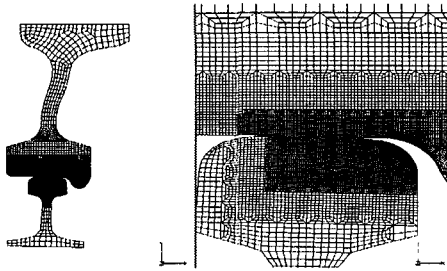
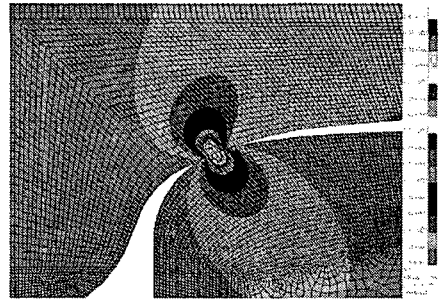


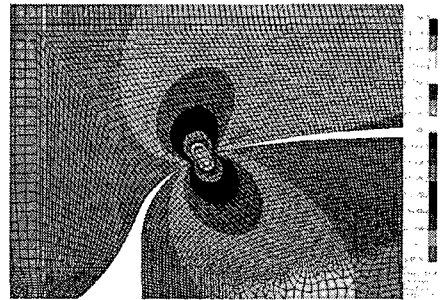
Fig. 16 FEM model of wheel and rail

Table 4 Results of stress analysis(MPa)

profile	wheel		rail	
	straight	curve	straight	curve
KNR20h	1,070	1,450	1,070	1,380
TTX_W1	880	1,270	772	1,130



(a) KNR20h/50kgN

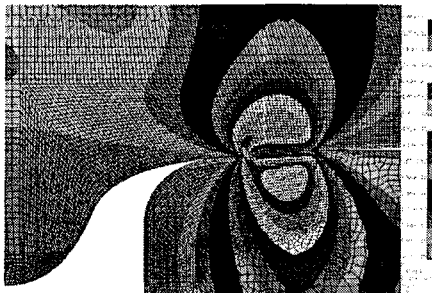


(b) TTX-W1/50kgN

Fig. 18 Stress analysis results at contact condition for curve section



(a) KNR20h/50kgN



(b) TTX-W1/50kgN

Fig. 17 Stress analysis results at contact condition for straight section

### 5. 결론

현재 개발 중인 180km/h급 틸팅차량용 차륜에 대한 구조 강도 및 동적 성능에 대한 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 틸팅차량용 차륜의 구조안전도 검토를 위하여 UIC 510-5 Technical approval of solid wheels에 의거 구조강도 해석을 수행하였다. 등가응력해석 및 피로강도 평가 결과, 허용기준치 이내로 평가기준을 충족하고 있다고 사료된다.
2. 틸팅차량용 답면형상의 기하학적 특성은 KNR 20h답면에 비하여 TTX-W1답면이 차륜구름반경차의 기울기를 작게 하여 등가답면구배를 저하시키고 접촉면적을 증가시켜 차량 안정성 및 유지보수성 측면에서 양호한 기하학적 특성을 보인다.
3. 동적 특성 측면에서 보면 틸팅차량용 차륜답면은 틸팅차량 설계속도 조건에 부합한 임계속도 특성을 보이고 있다. TTX-W1답면은 KNR20h답면에 비하여 탈선안전도, 승차감과 같은 동

적성능은 동등한 수준을 유지하고 있으며 곡선 주행 시 발생하는 횡압은 저감하는 특성을 보여 곡선주행 빈도가 높고 곡선주행속도 향상을 기하는 틸팅차량 운용조건에 양호한 답면형상 이라고 판단된다.

507-512, 2003.

4. 차륜접촉응력 해석결과, TTX-WI답면이 직선및 곡선구간 모두 KNR20h답면에 비하여 저감된 응력분포 특성을 보여 곡선주행속도 향상에 따른 차륜 부담력 저감을 목표로 개발한 틸팅차량용 답면형상 개발 개념에 부합한 결과를 보이고 있다.

따라서 본 연구결과를 참고로 하여 시제차량의 성능 시험평가 과정에서 틸팅차량용 차륜의 동적 특성 검증을 위한 시험, 답면형상 적용에 따른 마모 특성 분석과 같은 실험적 연구가 지속적으로 수행될 것으로 기대하며 향후 영업운용 예정인 한국형 틸팅열차의 안전 확보에 기여할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. "UIC 510-5 Technical approval of solid wheels," UIC, pp. 1-16, 2003.
2. "KS R 9221 Wheels for Railway Rolling Stock," KSA, pp. 4-5, 2005.
3. Hobbs, A. E. W., "Calculation of Equivalent Conicities for the S1002 Wheel Profile on UIC60 Rails," ERRI Report DT54/E, pp. 1-11, 1975.
4. "Regulation for Safety Criteria of Railway Rolling-stock," Ministry of construction & Transportation, pp. 33-34, 2005.
5. Vijay, K. G. and Rao, V. D., "Dynamics of Railway Vehicle Systems," Academic Press, pp. 58-134, 1984.
6. AEA Technology Rail, "VAMPIRE User Manual, Section C," pp.7-10, 2003.
7. Kim, E. S. and Hur, H. M., "Contact Stress Analysis on the Variation of Wheel Profile," Proceedings of Korean Society for Railway, pp. 663-667, 2003.
8. Ham, Y. S., Oh, T. Y. and Paik, Y. N., "Evaluation of running safety and measuring wheel/rail force for korean high speed railway vehicle," KSPE 2003 Spring Annual Meeting, pp.