

# 틸팅차량용 차륜 성능 향상 방안 연구

## A Study on the Improvement of Quality for Tilting Train Wheel

허현무\*      서정원\*\*      권석진\*      권성태\*\*  
Hur, Hyun Moo   Seo, Jung Won   Kwon, Seok Jin   Kwon, Sung Tae

---

### ABSTRACT

The maximum speed of the conventional railway rolling-stock which is restrained to 150km/h will be increased to 200km/h with the development of korean tilting train. The improvement of quality for railway wheel which is closely connected with the safety of train is needed. On the one hand, the speed limit of the wheel standard for the conventional rolling-stock is 150km/h. Thus, a study on the safety of wheel structure, test items and criteria is needed to apply this standard to tilting train wheel.

This study is started to present the improvement scheme and to extend the speed limit for conventional wheel standard. For this, we studied the safety of wheel structure, wheel material tests and the criteria for wheel standard and show the results

---

## 1. 서론

150km/h급에 국한되고 있는 국내 기존선 철도차량의 최고속도는 한국형 틸팅차량의 개발로 200km/h급으로 향상될 예정이다. 이러한 신차 개발 계획과 더불어 차량의 안전과 직결된 핵심 요소인 차륜에 대한 성능 향상이 요구되고 있다. 한편 국내 기존철도용 차륜 규격은 적용범위가 150km/h급 이체차륜에 대하여 규정되고 있다. 따라서 현 차륜 규격을 틸팅차량용 차륜까지 확대 적용하기에는 차륜의 구조 안전도 검토, 시험항목 및 기준치에 대한 검토가 필요하다.

따라서 본 연구는 틸팅차량용 차륜에 대한 규격안 마련이 시급한 현 상황에서 기존 차륜 규격에 대한 속도 범위 향상과 개선안 마련을 목적으로 시작되었다. 이를 위하여 차륜에 대한 구조 안전도 해석, 차륜재 물성시험, 규격안 검토 연구를 수행하였다.

## 2. 구조 강도 해석

### 2.1 평가방법

현 국내 철도차륜 규격을 준용하고 있는 틸팅차량용 차륜의 구조안전도를 평가하기 위하여 차륜 plate 부의 강도를 평가하였다. 차륜의 강도평가방법은 UIC 510-5 "Technical approval of solid wheels"를 준용하였으며 평가에 필요한 물성치는 KS R 9221 "철도차량용 차륜"에 의하였다.[1,2] 차륜 강도평가에 적용하는 하중조건은 그림 1과 같이 차량이 주행중인 조건을 모사한 다음의 3가지 하중조건에 대하여 응력을 계산하여 두 가지 방법으로 평가한다. 첫 번째는 각각에서 계산된 하중의 등가응력(Mises stress)이

---

\* 허현무, 회원, 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부

E-mail : hmhur@krri.re.kr

TEL : (031)460-5245 FAX : (031)460-5289

\*\* 한국철도기술연구원 철도시험인증연구센터

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  $\Delta\sigma < 290 \text{ MPa}$

(하중조건)

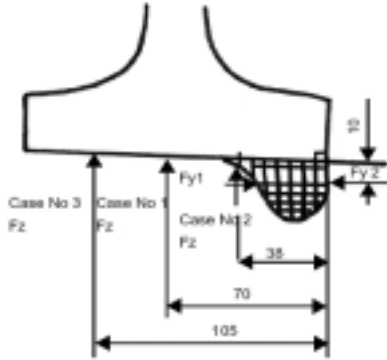


그림 1 하중 조건

Case 1 : 직선선로구간

$$Fz = -1.25 * Q * g$$

$$Fy = 0$$

Case 2 : 곡선구간

$$Fz = -1.25 * Q * g$$

$$Fy1 = 0.7 * Q * g$$

Case 3 : 분기구간

$$Fz = -1.25 * Q * g$$

$$Fy2 = -0.42 * Q * g$$

여기서, Q : mass of vehicle per wheel

g : acceleration due to gravity(  $\text{m/s}^2$ )

Fz : Vertical force(kN)

Fy : Transverse force(kN)

## 2.2 해석 결과

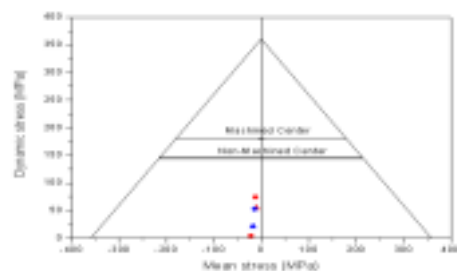
해석모델은 틸팅차량 객차용 차륜을 대상으로 하였다. 해석모델은 차륜 직경이 원형인 신조차륜, 직경이 교체한도에 도달하여 림부위가 얇아진 삭정한도차륜 두 가지로 구분하여 해석을 수행하였다.

표 1은 신조차륜 및 삭정한도차륜에 대하여 해석한 결과를 나타낸다.

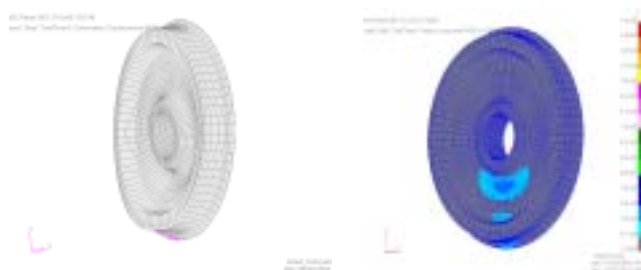
Case1 하중조건에서 등가응력의 최대치는 plate부 불연속부에서 발생하였으며 나머지 하중조건에서도 plate부 불연속부에서 최대응력이 발생하였다. 삭정한도차륜의 해석결과의 경우에도 변형 형상과 최대응력 발생위치는 동일하나 발생하는 최대응력은 상이하며 삭정한도차륜에 더 큰 응력이 발생함을 알 수 있다. 각각의 하중조건에서 발생하는 최대등가응력은 재료의 항복강도(500MPa)보다 작으므로 평가기준을 충족한다고 할 수 있다. 그림 2는 Case 1조건에서의 해석 결과를 나타낸다. 피로강도평가 결과는 그림 3과 같이 해석결과의 응력이 크게 발생한 노드의 값을 피로강도 기준선도에 나타내었다. 그림에서와 같이 피로강도 평가결과 기준치에 비하여 충분히 작은 값을 나타내고 있으므로 피로강도 조건을 충족하고 있다고 판단된다.

표 1 응력 해석 결과

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

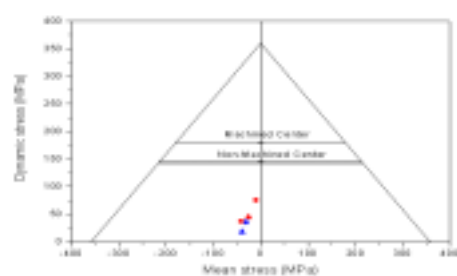


(a) new wheel



(a) displacement

(b) stress



(d) worn wheel

그림 2 Case 1 condition(new wheel)

그림 3 피로 해석 결과

### 3. 차륜재 물성 시험

차륜에 발생하는 손상은 마모, 접촉피로, 열균열 등으로 구분할 수 있으며 이러한 손상은 차륜의 재질 특성에 의한 영향이 크다고 알려져 있다. 국내에서 사용되는 차륜은 원산지가 국내 독점체제에서 중국, 이태리, 러시아, 체코 등 다변화 되었고 균일한 차륜 품질의 확보는 차륜의 유지관리 측면에서 중요하다. 수입되는 차륜의 경우 국내 차륜규격 조건에는 모두 충족하지만 사용 중 손상 발생시기 및 빈도의 차이를 나타내고 있다. 따라서 차륜재에 따른 기계적 특성을 분석하고 향후 차륜 규격 개선안 도출의 기초 데이터로 활용하고자 차륜시편을 대상으로 한 특성시험을 실시하였다. 시험대상 차륜재는 현 수입되는 2종의 기존철도용 차륜과 고속철도차륜으로 하였으며 국내규격뿐 만 아니라 해외 규격 및 연구 자료에서 제시하고 있는 시험항목에 대하여 표 2 차륜재 특성시험 종류 시험을 실시하였다.

시험편의 종류는 표 2와 같이 KS R 9221 규정에서 규정하고 있는 인장시험, 샤르피 충격시험, 경도시험 3종에 대하여 실시하였고, prEN 13262규격에서 제시하고 있는 파괴인성시험을 실시하였다. 이 중 차륜재질의 저온 특성을 알아보기 위하여 샤르피 충격시험에 대하여는 -20℃에서 시험을 하였고, 파괴인성시험에 대하여는 -40℃에서 시험을 실시하였다. 또한 일반적인 차륜규격에는 규정되어 있지는 않지만 기계적 성질 시험의 하나로 저주기 피로시험과 균열진전 시험을 실시하였다.

Ref.	No.	시험종류	채취위치	채취방향	온도조건
	1	저주기 피로	TC	Az	R.T
KS R 9221	2	인장시험	TF,TC,TR	Az	R.T
	3	샤르피 충격	TF,TC,TR	L	-20, +20
	4	경도	표면, 단면	-	R.T
prEN 13262	5	파괴인성 시험	TC	L, R	-40, R.T
	6	피로균열 진전	TC	L, R	R.T

-채취위치 TF(답면 플랜지 방향), TC(답면 중앙부), TR(답면 플랜지 반대 방향)  
-채취방향 Az(원주방향), L(축방향), R(반경방향)

그림 4~그림8, 표3~표6은 각 시험항목별 시험데이터를 나타내며 이에 대한 분석결과는 표 7과 같다.

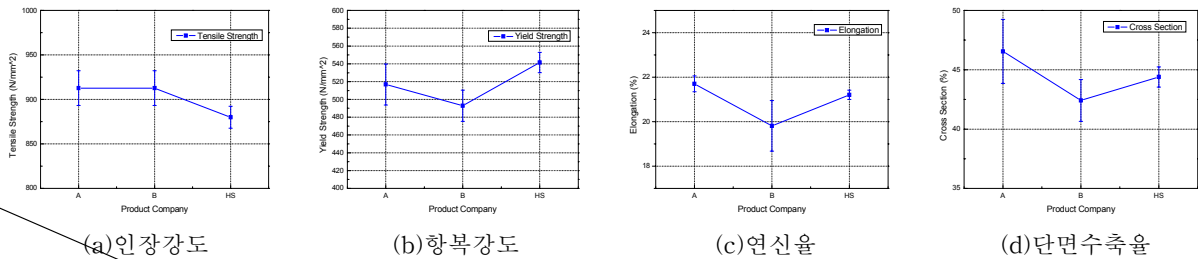


그림 4 인장시험 결과(TC방향)

표 3 경도시험 결과

종류	깊이(mm)		위치(mm)								
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	
A사	20	256	263	263	257	253	246	241	237	235	224
	70	271	260	257	253	246	249	241			
	125	269	265	259	256	256	246				
B사	30	252	255	253	250	248	246	246	246	244	239
	70	252	255	249	250	253	252	252	245	239	
	125	234	250	253	253	252	248	241	239		
고속 철도 차륜	20	255	253	244	240	236	232	228	222		
	70	260	253	248	242	239	239	236			
	125	259	253	246	242	241	231				

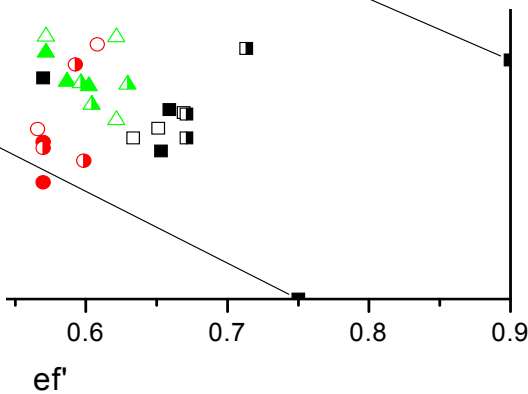
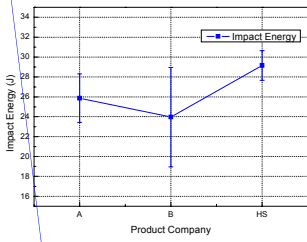
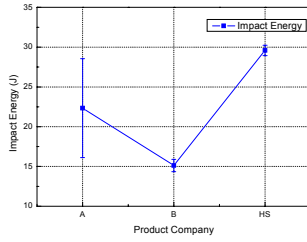


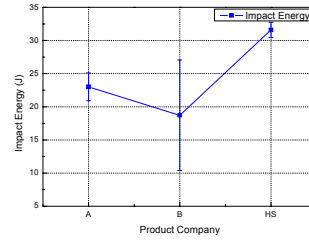
그림 5 접촉피로 저항성 평가



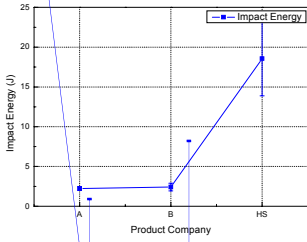
(a)TC(상온)



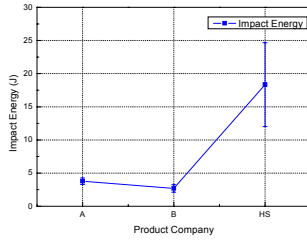
(b)TR(상온)



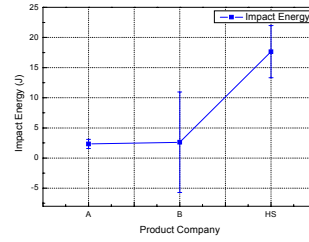
(c)TF(상온)



(a)TC(저온)

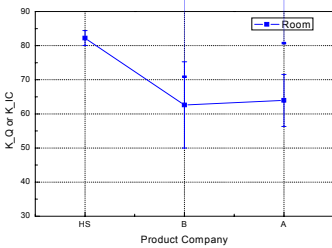


(b)TR(저온)



(c)TF(저온)

그림 6 충격시험 결과



(a)TC 방향

표 4 기존철도용 차륜에 대한 화학성분 분석결과

구분	C	Mn	Si	P	S	Cu
A사	0.606	0.72	0.37	0.006	-	0.02
B사	0.668	0.66	0.33	0.015	0.002	-
기준(KS)	0.67이하	0.6-0.9	0.15이상	0.045이하	0.045이하	0.35이하

표 5 고속철도용 차륜에 대한 화학성분 분석결과

성분	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni
함유량	0.52	0.34	0.72	0.012	0.008	0.25	0.10	0.03	0.10	-	0.38
기준 (NF)	0.52 이하	0.40 이하	0.80 이하	0.035 이하	0.035 이하	0.30 이하	0.30 이하	0.08 이하	0.30 이하	0.05 이하	0.50 이하

(b)TR 방향

그림 7 파괴인성 시험결과

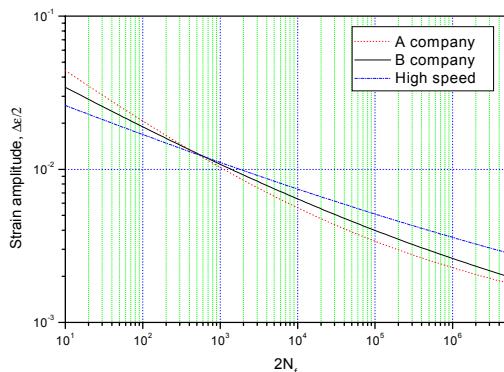


그림 8 저주기 피로시험결과

표 6 균열진전 시험결과

Type	Specimen No.	C	m
A사	FC6R1	3E-9	3.1999
	FC6R2	4E-9	3.1261
	FC6L1	9E-9	2.9702
	FC6L2	5E-9	3.1373
B사	FI6R3	3E-9	3.2609
	FI6R5	8E-9	2.8751
	FI6L3	5E-9	3.038
	FI6L4	2E-9	2.6704
고속철도 차륜	FK6R1	4E-9	3.1705
	FK6R2	4E-9	3.1361
	FK6L1	4E-9	3.1238
	FK6L2	4E-9	3.1313

주) C, m의 값은  $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$ 의 상수를 나타냄

표 7 차륜재 특성시험 결과

구분	시험 결과
화학성분	기준에 충족하나 시료간 편차가 큼
인장시험	항복강도가 기존철도용 객화차 차륜의 경우에는 충족하지 못함
충격시험	상온 충격시험시 기준 충족, 저온충격시험시 고속철도 차륜의 17~18J 이고 객화차 차륜의 경우에는 2~3J로써 차이가 크게 발생
경도시험	차륜 삭정에 따른 직경감소에 따라 경도 저하, 삭정한도까지 균일한 경도 기준 제시 필요
파괴인성시험	고속철도 차륜은 기준치 충족하며 상온과 저온에서 높음, 기존철도용 객화차 차륜의 경우 규격을 충족시키지 못함(BS EN 13262 : 평균이 80Mpa√m 이상, 하나의 값이 70pa√m 이하면 않됨)
균열진전 시험	고속철도 차륜이 객화차 차륜보다 상대적으로 수명이 길게 나타남.

4. 차륜규격 성능 향상 방안 검토

틸팅차량용 차륜의 품질 향상 방안을 검토를 위하여 내외 차륜관련 규격을 조사 분석하였다. 국내외 차륜 규격에 언급되어 있는 차륜의 화학적 성분 및 기계적 성질 등의 규격 기준치에 대하여 유럽과 북미 규격을 중심으로 비교 분석하였다. 표 8에 국내외 차륜규격의 품질기준 시험항목을 비교한 것이다. 일반적으로 화학적 성분, 인장강도, 경도, 충격인성에 대한 기준 값들이 국내외 규격에 모두 제정되어 있지만, prEN의 차륜 규격에서는 피로강도, 저온 충격인성, 잔류응력 검사, 파괴인성 등의 기준 값들이 추가되어 있음을 볼 수 있다. 특히 차륜답면(tread)과 판부(web)의 피로강도와 파괴인성, 저온 충격인성의 파괴역학적 특성 등에 대하여 국외에서는 규격에 포함시키려는 경향이 있다. 이것은 답면제동, 레일접촉, 고하중, 고속화 등의 영향으로 차륜의 사용조건이 가혹화되어 가면서 손상이 계속적으로 발생하고 있기 때문에 차륜 설계 및 품질기준에 대한 강화의 필요성이 대두되고 있다.

표 8 국내외 차륜규격 구성항목 비교

항목 \ 규격	화학적 성분	인장 강도	피로 강도	경도	충격인성 상온/저온	초음파 검사	기타
AAR M107/208	○	○	×	○	×/×	○	
BS 5892	○	○	×	○	○/×	○	
NF F01-133	○	○	×	○	○/×	○	
prEN 13262	○	○	○	○	○/○	○	파괴인성, 잔류응력
JIS E5402	○	○	×	○	○/×	○	잔류응력
KS	○	○	×	○	○/×	○	
UIC 812-3	○	○	×	○	○/×	○	파괴인성, 잔류응력

한편 국내의 차륜은 국외에서 수입된 차륜을 대부분 사용하고 있다. 국내 차륜 규격은 150km/h 이하의 기존철도용 차륜을 대상으로 하고 있으며 화학적 성분, 기계적 특성 등에 한정된 비교적 최소항목에 대한 요구조건을 명시하고 있다. 그러나 현장에서 적용되고 있는 차륜재는 국내 차륜 규격 기준치를 충족하지만 철도 현장에서는 차륜답면 박리와 같은 많은 손상이 발생하여 영업차량의 가용성 저하와 유지보수비용의 증가로 이어지고 있다. 따라서 현 개발 중인 틸팅차량용 차륜의 안전성 및 유지관리성 측면에서 기존 차륜 규격보다는 개선된 고속차량에 적합한 차륜규격으로 관리되어야 할 필요가 있다고 판단된다. 현 국내에서 적용중인 차륜규격의 주요 문제점을 정리하면 다음과 같은 점을 들 수 있다.

- 답면 손상 발생 빈도가 높으며 차륜재 수입원별 품질 불균일
- 규격 기준치의 상한치와 하한치의 범위가 넓다
- 현 규격 시험항목만으로는 고품질의 차륜 관리가 어려움
- 각 시험항목에 대한 데이터의 편차가 큼
- 차륜재의 조직학적 결함에 대한 규격 미비

즉, 차륜재의 기계적 성질 중 인장강도는 차륜 종류에 따라 835MPa~1130MPa의 범위에 있다. 현행 KS규격에서는 차륜종류별 인장강도의 요구치가 중첩되고 있으며 규격치의 범위가 넓어 하한기준치의 상향조정이 필요하다. 또한, 국외의 차륜규격과 비교하여 차륜의 성능 향상측면에서 추가적인 품질 규격의 항목이 필요하다. 전 절의 충격시험 결과에서와 같이 저온에 대한 충격인성 및 차륜의 취성적 파괴와 손상을 방지하기 위한 파괴인성의 항목들에 대한 추가적인 규격화가 필요하다. 특히 사계절의 온도변화가 있는 국내의 철도차량 운행조건을 고려할 때 온도변화에 대한 충격인성의 규격화는 고려되

어야 된다고 판단된다. 답면제동식 차륜의 경우에도 열응력에 의한 차륜손상을 방지하기 위하여 유럽 규격과 같이 잔류응력에 대한 검토도 필요할 것으로 판단된다.

따라서 국내의 규격 분석과 현재 국내 철도차량에 사용 중인 차륜재의 시편시험 결과를 바탕으로 틸팅차량용 차륜의 품질 향상 방안에 대하여 검토하였고 그 기본 방안은 다음과 같다.

- 기존 규격치의 하한치 보다 상한치에서 품질관리 필요
- 저온 특성에 대한 규격 기준 도입(저온 샤르피 충격인성 추가)
- 파괴인성치의 추가
- 차륜 답면(tread) 및 판부(web)에 대한 피로특성 품질 강화
- 잔류응력 검사 검토

## 5. 결론

틸팅차량용 차륜에 대한 성능 향상을 위하여 차륜에 대한 구조 안전도 해석, 차륜재 물성시험, 규격안 검토 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- UIC 510-5 Technical approval of solid wheels에 의거 틸팅차량 동력차, 객차용 차륜에 대한 구조강도 해석 결과 평가조건 충족하고 있음을 알 수 있다.
- 국내 운용 차륜재에 대한 물성시험 결과 기준치는 충족하고 있으나 각 시험 항목별 데이터에 편차가 큼을 확인할 수 있었으며 해외 규격에 포함된 일부 시험항목에 대해서는 기준치에 미흡함을 알 수 있었다.
- 틸팅차량용 차륜에 대한 성능 향상을 위해선 규격 시험항목 및 기준치에 대한 보완이 필요하며 특히 저온 충격, 피로특성에 대한 규격안 개선이 필요하다고 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. "Railway applications - wheelsets and bogies - wheels - product requirement", British Standard, BS EN 13262:2004
4. "Railway rolling stock materials, part 3. specification for monobloc wheels for traction and trailing stock", BS 5892 Part 3 : 1992
5. "Railway rolling stock materials, part 4. specification for forged and rolled tyres", BS 5892 Part 4 : 1992
6. "Steel-Determination of content of nonmetallic inclusions - Micrographic method using standard diagrams", International Standard ISO 4967, 1998
7. "Railway rolling stock-Solid wheels-Quality requirements", NF F 01-133, 1992
8. "Wheels, Cast Carbon Steel", AAR M-204-84, 1985
9. "Wheels, Wrought Carbon Steel", AAR M-107-84, 1985
10. "Technical approval of solid wheels", UIC Code 510-5, 2003
11. A. Ghidini, S. Centini, "Mechanical comparison between North American and European Materials for railway wrought solid wheels in terms of RCF Resistance", 14th international wheelset congress, 2004
12. F. Cochetoux, Y. Flament, "Towards wheels calculation and validation in multiaxial fatigue", 14th international wheelset congress, 2004
13. T. Gerlach, A. Hovels, " Fatigue strength verification of wheels for high-speed trains acc. to the european UIC Leaflet 510-5 in consideration of the Centrifugal-Forces and other influence parameters", 14th international wheelset congress, 2004
14. Y. Okagata, "The fatigue design method of high - speed railway wheel",14th international wheelset congress, 2004