

KTX차량의 주행 안전성 해석

Analysis on Running Safety for KTX Vehicle

김재철[†] · 함영삼^{*}
Jae-Chul Kim · Young-Sam Ham

Abstract Lateral vibration at the tail of KTX train was found during the acceptance test. In order to settle the problem of lateral vibration, the wheel conicity was changed 1/40 to 1/20. However, we should evaluate the running safety of vehicle with 1/20 wheel conicity because modification of wheel conicity may cause the running performance to be worse and critical speed to reduce. In this paper, we calculate critical speed of KTX bogie as wheel conicity increase and analyze the running safety for KTX that has 20 car trainset formation using VAMPIRE. and compare with the test results of KHST to validate analysis results on high speed line. A analysis results show that critical speed of 0.3 wheel conicity is over 375km/h and curving performance of 1/20wheel conicity is better than 1/40. Also, we examine the running performance of KTX to check out possibility to increase speed of KTX on conventional line. A analysis results show that it is possible to increase up to 10% the speed of KTX on tangent line but KTX on a curved line should be operated with the speed of conventional train.

Keywords : Running Safety, High Speed Train, Wheel Conicity

요 지 KTX 인수시험 시 차량 후미부에서 횡진동이 발생하여, 차륜의 답면구배를 1/40에서 1/20로 변경하여 횡진동 문제를 해결하였다. 그러나 차륜의 답면구배를 변경하면 차량의 임계속도 및 주행 안전성에 영향을 미치기 때문에 1/20 차륜에 대한 주행 안전성에 대한 검토 요구된다. 본 논문에서는 VAMPIRE를 이용하여 KTX 1편성 20량을 모델화하여 주행 안전성 및 임계속도를 계산하였으며, 계산결과와 타당성을 검토하기 위해서 KHST차량의 시험결과와 비교하였다. 해석결과 차륜답면이 0.3인 경우 임계속도는 375km/h이상이었으며, 차륜의 답면구배가 1/20인 경우 1/40보다 곡선 추경성이 우수한 것을 알았다. 또한 기존선 주행 시 차량의 속도향상 가능성을 파악하기 위해서 계산한 결과 직선구간에는 10%속도 향상이 가능하지만, 곡선구간에는 기존차량의 속도와 동일하게 운행하는 것이 유리하다는 것을 알았다.

주 요 어 : 주행 안전성, 고속철도, 차륜 답면구배

1. 서 론

교통혁명으로 일컬어지는 고속철도(KTX)의 개통이 2004년 4월 1일부터 시작되면서 우리나라에서도 고속철도 시대가 열리게 되었다. 그러나 동절기 KTX 시험운행 중에 차량 속도가 약 140km/h이상의 속도영역에서 차량 후미부에서 기준치보다 커다란 이상진동이 발생하여, 차륜의 답면 구배를 1/40 (GV40)에서 1/20 (XP55)로 변경하여 차량의 후미부

횡진동을 해결하였다[1],[2]. KTX차량은 20량이 1편성으로 구성되어 있으며, 최고속도 300km/h로 주행할 수 있도록 프랑스의 TGV의 기술로 설계된 차량이다. 그러나 프랑스와는 여러 운행조건이 다르기 때문에 1998년부터 시험운행을 시작하여 개통하기 전까지 수많은 시험이 수행되어 차량의 안정성(Stability) 및 안전성(Safety)이 검토되었다. 그러나, 고속철도차량의 경우 차륜의 답면구배는 마모가 진행될수록 답면구배가 높아지고, 차량의 임계속도가 낮아지기 때문에 이에 대한 검토가 필요할 뿐만 아니라, 차륜 답면 구배 변경에 따른 차량의 주행 안전성에 대한 평가가 필요하다. 이러한 KTX차량에 대한 주행 안전성 평가는 김남포 등[3]이 차량을 5량으로 모델화하여 경부고속철도 기존선 구간(동대구-

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 철도시스템연구본부
E-mail : jckim@krti.re.kr
TEL : (031)460-5206 FAX : (031)460-5279
^{*} 정희원, 한국철도기술연구원, 철도시스템연구본부

부산)에 대해서 해석을 수행하였다. 그러나, 본 연구에서는 KTX의 전체차량 20량을 모델링해서 차륜의 답면구배 변화에 따른 주행성능을 해석하여 안전성을 검토하였으며, 또한 경부고속철도 기존선 구간(동대구-부산)에서 차륜의 답면구배를 1/20 (XP55)로 변화시켜서, 현재의 새마을호의 주행속도와 차량속도를 10% 향상시킨 경우에 대한 곡선구간과 직선구간에 대한 차량의 주행 안전성을 함께 검토하였다.

2. KTX차량 모델 및 타당성 검토

2.1 차량 모델 및 차륜의 답면형상

본 연구에서는 철도차량 동특성 해석을 위한 상용소프트웨어인 VAMPIRE (Vehicle dynamics Modelling Package In a Railway Environment)를 이용하여 해석을 수행하였으며, KTX 차량의 편성에 대한 모델은 Fig. 1과 같이 P(동력차)+MT(동력객차)+16T(객차)+MT(동력객차)+P(동력차)20량으로 구성되었으며, 대차는 동력차(P)용 동력대차(PMB, Power Motor Bogie) 4대, 동력객차(MT)용 동력대차(MTB, Motorized Tailer Bogie) 전후 2대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차(ATB, Articulated Trailer Bogie) 17대로 구성되어 있다.

철도차량의 모델링 가운데 가장 중요한 부분은 차량의 대차의 현가장치로서 구성요소의 물성치는 Alstom사에서 제공된 자료를 이용하였다[1].

Fig. 2는 GV40과 XP55차륜에 대한 답면형상을 나타내고 있다.

2.2 차량 안전성 평가기준 및 해석구간

철도차량의 안전성 평가는 차량의 탈선과 관련된 탈선계수, 윤중감소, 차량이 궤도에 주는 영향에 대한 계산 및 측정에 이용되고 있다. 탈선에 대한 안전도는 Table 1과 같이 허용기준을 초과한다고 해서 반드시 탈선이 일어난다고는 볼 수 없

고, 탈선의 가능성이 존재하여 주행안전성을 보장할 수 없다는 의미를 내포하고 있다. 따라서 주행안전성을 확고하게 보장하기 위해서는 그 기준을 강화하여 적용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 국내에서 적용하고 있는 탈선계수와 윤중감

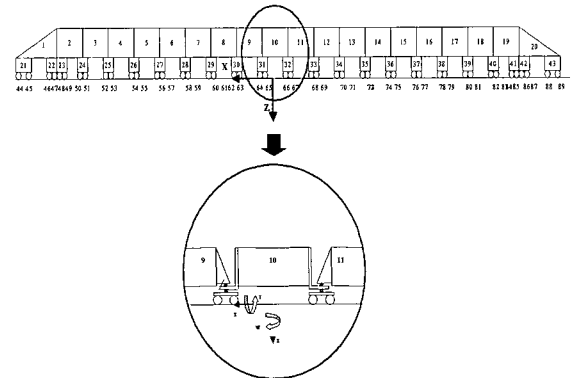


Fig. 1. Analysis model of KTX vehicle

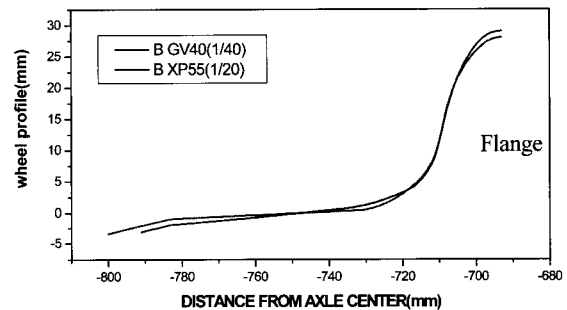


Fig. 2. Wheel profile of GV40 and XP55

Table 2. Analysis section

	Position (km)	Distance(km)	Radius
High speed Line	106.3~122.3	16.0	7000
Conventional Line	363.4~374.9	11.5	600,700
	415.0~405.8	9.2	800,900 1000

Table 1. Criteria and evaluation terms on running safety

Items	Allowable limit		
Derailment Coefficient Q/P	1. $Q/P \leq 0.04 \times T$ (T: Time) 2. $Q/P \leq 1.0$ (Probability of Accumulated Number = 0.1%)	Japan	· T < 0.05 sec : jumping over · T ≥ 0.05 sec : running over
	$Q/P = 0.8 \sim 1.1$ (Q : Lateral force P : Vertical force)	Korea	· 30Hz Filtering · $Q/P \leq 1.1$ (Probability of Accumulated Number = 0.1%)
Wheel Unloading Ratio(%)	$dP/P \leq 80\%$ (Probability of Accumulated number : 0.1%)	Japan Korea	· 30Hz Low Pass Filtering
Lateral Force	$Q \leq 28.45 + 0.3P(kN)$	Japan	· 30Hz Low Pass Filtering
	$Q = F(10 + 2P/3)$ (F : Safety Factor)	England	· Average value every 2m distance · Prudhomme Limit(F=1)

소울에 대한 허용기준치를 적용하였고, 횡압의 경우에는 일본과 영국의 기준이 혼용되고 있기 때문에 두 가지 기준치를 적용하였다.

KTX차량의 수치해석을 하기 위해서는 입력조건으로 궤도에 대한 데이터가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 Table 2와 같이 경부고속철도 시험선 구간과 기존선 구간에서 궤도 검측차로 측정된 실제 데이터를 이용하였다.

2.3 KTX차량 모델의 타당성 검토

우선, KTX 차량에 대한 해석결과와 타당성을 검증하기 위해서 현재 개발되어 시험 중에 있는 한국형 고속철도(KHST) 차량에 대해서 경부고속철도 시험선 구간에서 측정한 탈선계수와 운중감소율의 결과를 비교 검토하였다. Fig. 3은 KTX 차량이 경부고속철도 시험선 106.3km~122.3km의 구간을 225km/h의 속도로 주행 시 해석한 결과이고, Fig. 4는 KHST 차량이 경부고속철도 시험선 구간을 220km/h의 속도로 주행 시 시험한 결과이다. 위의 결과는 전두부 동력차의 첫 번째 차축에

대한 결과로서 해석구간과 측정구간이 정확히 동일한 구간이 아니기 때문에 두 결과가 정량적으로 일치하지는 않지만, 대체적으로 측정결과와 해석결과가 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서 KTX차량의 주행 안전성 및 곡선 추종성 검토를 위한 KTX차량 모델이 타당성이 있는 것으로 판단된다.

3. KTX차량의 주행 안전성 해석결과

3.1 KTX차량의 임계속도 해석

레일 위를 주행하는 철도 차량은 차륜의 답면구배에 의해서 차량의 좌우진동을 동반하는 사행동(Hunting)현상이 발생하며, 어느 속도 이상으로 주행할 경우에는 사행동이 급격히 증가하여 차량이 불안정하게 된다. 이때의 속도를 임계속도라 하며, 이 임계속도는 차량의 주행 안전성의 척도가 되기 때문에 차량 설계시 차량의 최고속도가 임계속도를 초과하지 않도록 한다. KTX차량의 답면구배에 따른 임계속도는 프랑

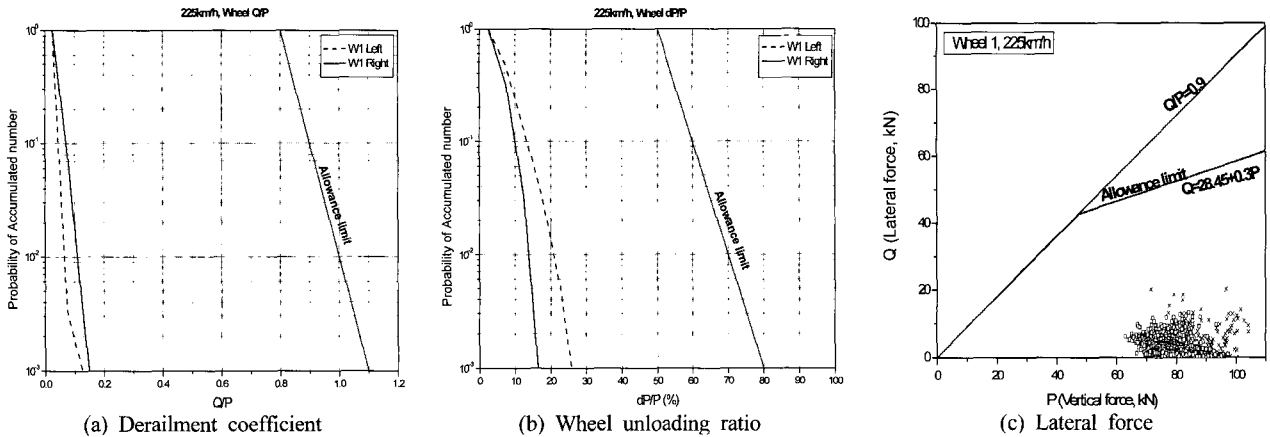


Fig. 3. Calculation results for KTX (1/40, 225km/h)

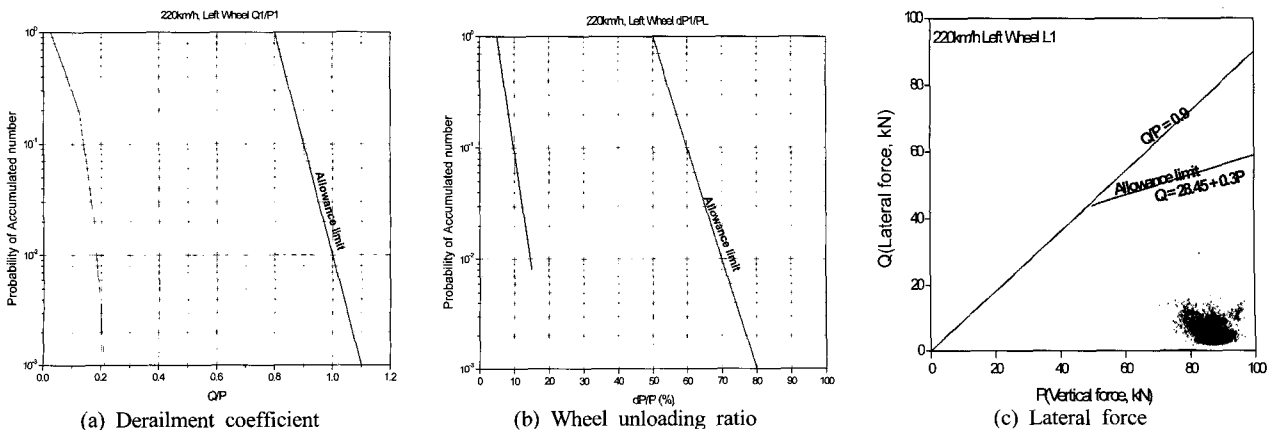


Fig. 4. Experimental results for KHST (1/40, 220km/h)

스에서 차륜의 답면구배 변화에 따라 Table 3과 같이 제시하였다. 이 결과로부터 GV40(답면구배:1/40)차륜과 XP55(답면구배:1/20)차륜에 대한 임계속도는 400km/h 이상으로 현탕 현상에 의한 주행 안정성은 충분히 확보된 것을 알 수 있다. 그러나, 차량의 주행거리가 많아질수록 차륜의 답면구배는 높아져, 어느 답면구배에 도달하면 차륜을 최초의 답면구배로 삭정한다. 이러한 삭정주기를 결정하는 요인 가운데 차륜의 답면구배는 커다란 영향을 미치기 때문에 차륜 답면구배 증가에 대한 검토가 필요하다.

KTX차량에 대해서 프랑스에서는 차륜의 답면구배가 0.3까지 증가하여도 차량의 임계속도는 350km/h 이하로 낮아지지 않기 때문에 차량의 주행 안전성을 보장하고 있다. 그러나, 실제 이러한 차륜의 답면구배에 대한 검토가 국내에서는 수

Table 3. Critical speed of KTX for GV40 and XP55

Wheel Conicity	Critical Speed (km/h)
GV40 (1/40)	450
XP55 (1/20)	430

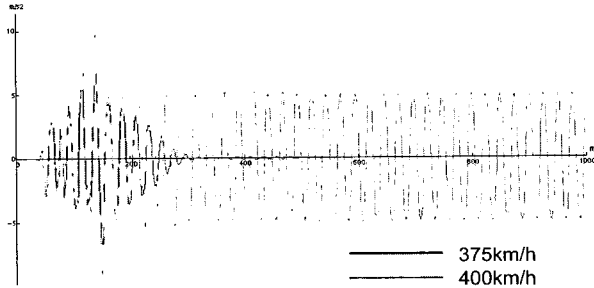


Fig. 5. Calculation results for lateral displacement of 1st articulated trailer bogie (Conicity:0.3)

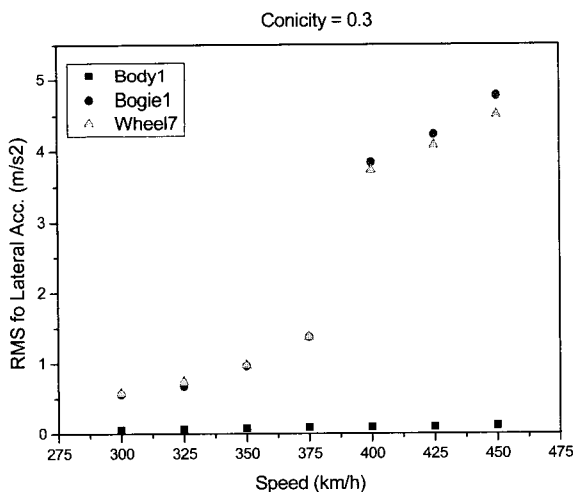


Fig. 6. Calculation results for lateral acceleration of body, bogie and wheelset

행되지 않았기 때문에 본 연구에서는 차륜의 답면구배가 0.3인 경우에 대해서 임계속도를 계산하여, 프랑스가 제시한 임계속도를 평가 분석하였다. Fig. 5는 차량의 현탕현상이 발생하는 임계속도를 파악하기 위해서 차량이 375km/h와 400km/h의 속도로 주행 시 첫 번째 관절대차에 대한 윤축의 횡 방향 변위의 해석결과이다. 이 결과로부터 차량의 속도가 375km/h에서는 횡 방향 진동이 발생하다가 다시 안정화되는 것을 확인할 수 있고, 차량의 속도가 400km/h에서는 횡 방향 진동이 계속해서 나타나는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 6은 차량 속도별 차체, 대차 및 차축에 대한 횡 방향 진동 가속도의 해석결과로서 400km/h의 속도영역에서부터 횡 방향 가속도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 차륜의 답면구

Table 5. Speed limit on conventional line

Radius	Speed Limit (km/h)	10% Speed up (km/h)
600R	110	120
700R	115	125
800R	125	140
900R	130	145
1000R	135	155
-	140	155

배가 0.3인 경우의 임계속도는 약 375km/h이상인 것을 알 수 있다.

3.2 차륜 답면구배 변화에 따른 KTX 후미 횡 진동 해석

개통 전 동절기에 KTX 시운전 중에 차량의 속도가 150km/h 이상의 속도영역에서 후미부 차량에서 좌우방향의 횡진동이 크게 발생하면서 기준치(0.183m/s)를 초과하였다.

횡진동의 발생조건은 동절기 직선구간에서 약 150km/h~200km/h의 속도영역에서 20량 가운데 14~17번째 차량에서 가장 크게 발생하며, 0.5Hz~0.7Hz사이의 주파수 영역에서 진동하는 현상을 보였다. 이러한 후미부 횡진동 문제를 해결하기 위해서 KTX차량의 차륜의 답면구배를 1/40 (GV40)에서 1/20 (XP55)로 변경하였다.

Fig. 7은 KTX차량의 공기스프링의 횡 방향 강성이 0.2MN/m인 경우 GV40차륜과 XP55차륜에 대해서 속도변화에 따른 차호별 횡 방향의 가속도에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 이 결과로부터 XP55차륜의 경우에는 횡 진동이 발생하지 않지만, GV40차륜의 경우에는 횡 진동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 이 결과로부터 100km/h의 속도에서는 안정한 값

Table 4. Calculation results for KTX in high speed line (300km/h)

Items	GV40				XP55				M : Motor car P : Passenger car
	Straight		Curve		Straight		Curve		
	M	P	M	P	M	P	M	P	
Derailment Coefficient	0.03	0.04	0.26	0.43	0.04	0.04	0.06	0.15	· 30Hz low pass filtering · Maximum Value
Wheel unloading ratio [%]	26.8	34.4	25.7	38.6	26.1	34.4	27.1	30.3	· 30Hz low pass filtering · Maximum Value
Lateral force [kN]	1.8	2.2	28.8	24.6	2.4	2.6	2.9	11.3	· Average value every 2m distance

을 나타내지만 차량속도가 150km/h로 증가하면 횡 방향 진동의 크기가 증가하여 불안정해지고 다시 속도가 250km/h이상으로 증가하면 기준치 이하로 안정화되는 것을 알 수 있다.

3.3 차륜 담면구배 변화에 따른 KTX차량의 주행 안전성 해석

Table 4는 GV40차륜과 XP55차륜에 대한 탈선계수, 윤중 감소율, 횡압에 대한 해석결과이다. 전체적으로 탈선계수, 윤중 감소율 및 횡압 등 모든 항목이 기준치보다 상당히 낮은 것을 확인할 수 있다. 그러나 이 해석결과에서 동력차에 비해서 객차의 결과가 대체적으로 큰 값을 나타내고 있으며, 특히 GV40차륜이 XP55차륜보다 탈선계수와 횡압에 대한 값이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 Table 4에서와 같이 XP55차륜의 경우에는 직선구간과 곡선구간에 대한 결과가 거의 유사하지만, GV40차륜의 경우에는 직선구간보다 곡선구간의 결과가 크게 나타나고 있다. 따라서, 고속선에 대한 KTX차량의 주행 안전성 및 곡선 추종성은 매우 우수한 것으로 판단할 수 있으며, GV40차륜보다 XP55차륜이 곡선 추종성 측면에서 유리한 것을 알 수 있다.

3.4 경부 기존선에 대한 해석결과

대구~부산간의 기존선 구간은 선형화 작업이 600R이상으로 완료된 상태이기 때문에 수치해석은 600R구간, 800R구간 및 직선구간을 선정하여 수행하였다. 기존선의 수치해석을 위해서 사용된 KTX 차량은 16량 편성모델을 사용하였으며, 해석차량은 고속선과 동일하게 전두부 동력차와 첫 번째 객차를 대상으로 하였다. 그리고 기존선의 주행속도 조건은 현행 새마을호 운전속도와 기존속도 대비 10%를 향상시켰을 경우에 대해서 주행안전성을 분석하였다. Table 5는 기존선에 대한 주행속도 조건에 사용한 곡선별 통과속도이다.

Table 6은 기존선 구간에 대한 주행 안전성 해석결과를 나

타내고 있다. 해석결과에 적용한 기준값은 탈선계수와 윤중 감소율의 경우 1/1000확률에서의 최대값으로 1.1과 80%를 허용 한도로 설정하였다. 곡선반경 600R구간에서 기존속도로 주행하는 경우에는 모든 기준치를 만족하고 있지만, 10% 속도향상 시에는 객차의 경우 윤중 감소율이 허용 기준치 80%를 초과하고 있다. 그러나, 곡선반경 800R구간과 직선구간에서는 기존속도와 10% 향상된 속도에서 모두 기준치를

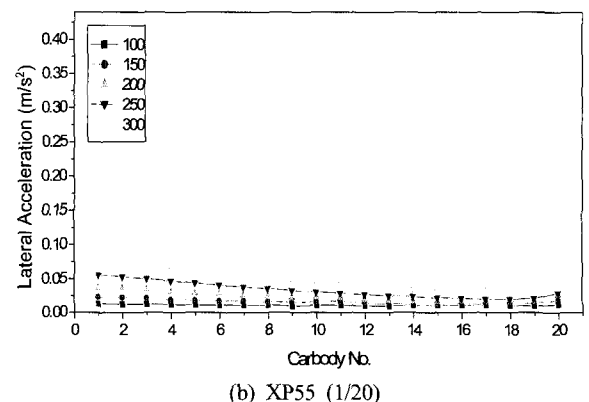
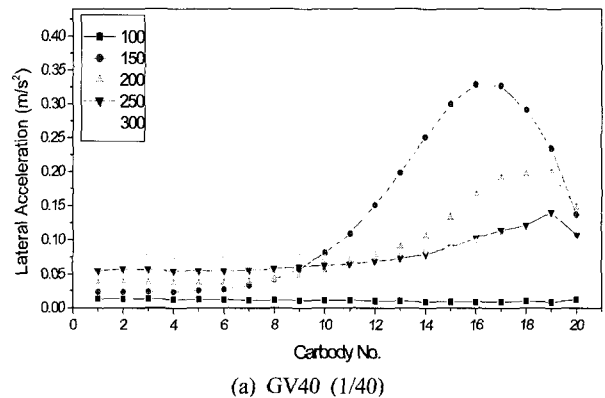


Fig. 7. Lateral acceleration of KTX with GV40 and XP55 at 150km/h (0.2MN/m)

Table 6. Calculation results for KTX in conventional line (XP55)

Items	Curve								Straight				M : Motor car P : Passenger car
	600R				800R				140km/h		155km/h		
	110km/h		120km/h		115km/h		125km/h		M	P	M	P	
	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	
Derailment Coefficient	0.67	0.87	0.58	0.88	0.53	0.73	0.55	0.74	0.29	0.26	0.34	0.26	· 30Hz low pass filter · Maximum Value <1.1
Wheel unloading ratio [%]	62.5	65.9	64.3	83.4	45.6	67	65.8	71.1	30.3	33.7	34.0	35.8	· 30Hz low pass filter · Maximum Value : 80%
Lateral force [kN]	42.1	53.5	44.6	54.4	32.5	38.2	36.2	42.2	22.0	18.8	24.6	18.2	· Average value every 2m distance

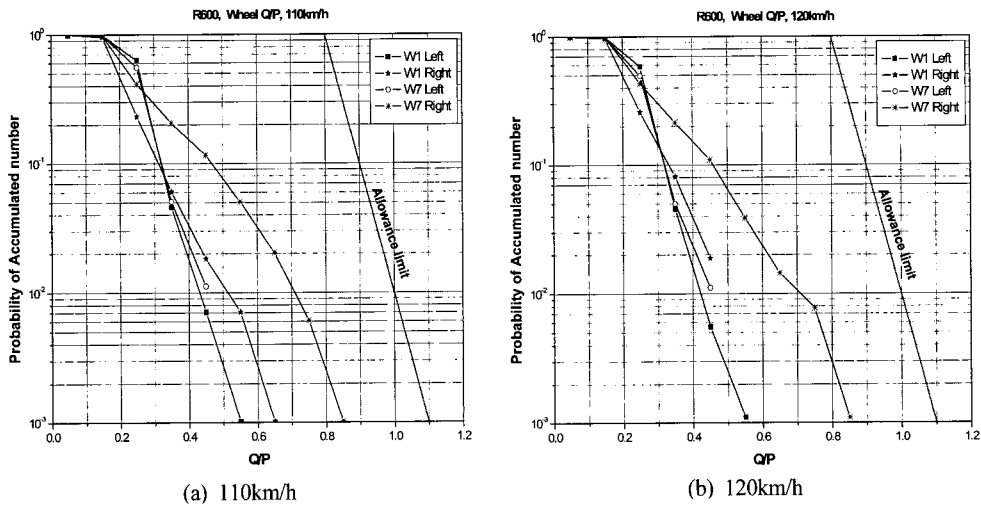


Fig. 8. Derailment coefficient in curves (600R)

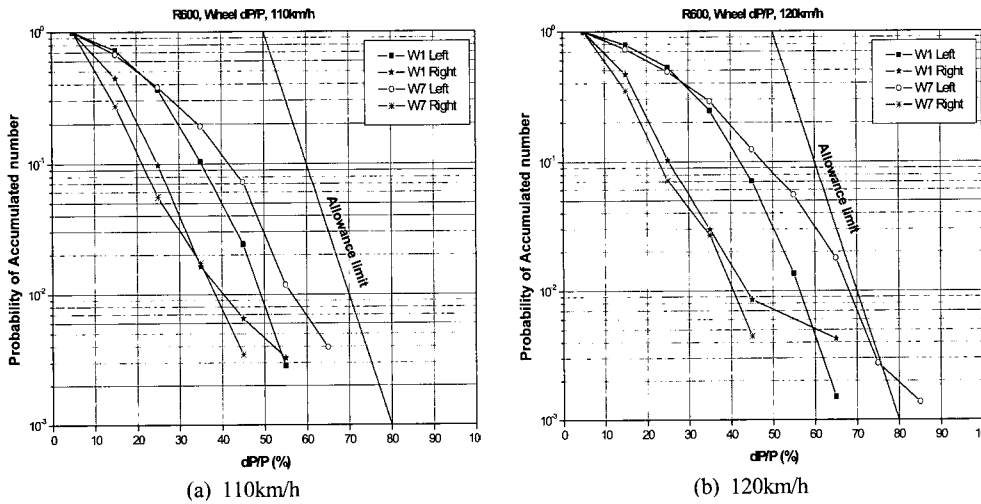


Fig. 9. Wheel unloading Ratio in curves (600R)

만족하고 있다. Table 6의 결과에서 600R구간에 대한 10% 속도향상 시 객차에 대한 운중 감소를 초과치는 600R구간의

최대값을 평가한 것으로서 이러한 초과치는 발생한 빈도에 따라 그 안전성을 검토할 필요가 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 기존선 구간에 대한 탈선계수와 운중 감소율을 나타내고 있다. 이 결과와 같이 빈도누적확률로 통계적인 방법을 사용하여 주행 안전성을 판별하면 탈선계수는 600R구간에서 10%속도향상 시에도 안전영역에 있다. 그러나 운중감소는 10% 속도향상 시 한계치를 약간 초과하거나 근접한 것을 알 수 있다. 따라서, KTX차량이 대구~부산간 기존선을 이용하는 경우 곡선반경 600R 구간에서는 새마을호 기준속도로 운행하는 것이 바람직하며, 곡선반경 800R이상의 곡선구간과 직선구간에서는 10% 향상된 속도로 운행이 가능하다. 그러나 차량의 안전성 측면을 고려하면 곡선반경 800R이상의 곡선구간에서도 기존의 속도로 주행하는 것이 안전하며, 궤도틀림 시급보수 기준치를 강화한다면 직선구간에서는 차량 속도를 10% 향상시켜도 커다란 무리가 없을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) KTX차량의 모델을 검증하기 위해서 경부고속선에서 KHST의 측정 결과와 KTX차량의 해석결과를 비교 검토하였다. 시험구간과 측정구간이 정확히 동일하지 않기 때문에 정량적으로 일치하지는 않지만, 대체적으로 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있었다.

- (2) KTX의 주행 안정성 해석결과 차량의 답면구배가 0.3인 경우 임계속도는 375km/h이상으로 계산되었다.
- (3) KTX의 탈선 안전성 및 곡선 추종성을 해석한 결과 경부고속선에서는 GV40차륜과 XP55차륜 모두 우수하다는 것으로 나타났다. 그러나, 곡선구간에서 GV40차륜의 횡압이 XP55차륜보다 약간 크게 나타나는 것으로 볼 때, 곡선의 추종성은 1/20 (XP55)차륜이 1/40 (GV40)차륜보다 좋은 것으로 판단된다.
- (4) 또한 경부 기존선에서 직선구간의 경우 새마을호의 기준 속도보다 10%향상된 속도로 주행이 가능하지만, 곡선구간(600R, 800R)의 경우에는 차량의 안전성 측면을 고려하여 새마을호의 기준속도로 주행하는 것이 바람직하다고 판단된다.

참고 문헌

1. 김재철(2003), "고속철도 차량 주행특성 연구", 한국철도기술연구원 보고서.
 2. 강부병, 김영우, 왕영용(2003), "KTX 차량 후미진동 해석(I)", 한국철도학회 논문집, 제6권, 제2호, 한국철도학회, pp.122-128.
 3. 김남포(1996), "대구~부산간 기존선 이용 고속철도차량의 주행속도 향상에 관한 연구", 한국철도기술연구원 보고서.
- (2007년 6월 5일 논문접수, 2007년 9월 13일 심사완료)