

한국형 고속전철의 기존선 주행 진동가속도 특성 분석 - 곡선 통과속도 중심으로

Analysis of the Acceleration Characteristics on the Conventional line for
for Korean High Speed Train- in a point of passing speed on the curve

박찬경* · 김영국** · 김석원** · 목진용**

C. K. Park, Y. G. Kim, S. W. Kim and J.Y. Mok

Key Words : Railway Dynamics(철도차량 동역학), Limited Speed(제한속도), Korean High Speed Train(한국형 고속전
철차량), Conventional Line(기존선), Radius of Curve(곡선반경), Cant Deficiency(부족칸트)

ABSTRACT

Korean High Speed Train(KHST) has been tested on the high speed test line in Osung site, since it was developed through the G7 Project Plan in 2002. It was also tested on the conventional line such as KyongBu and Honam Line to know the possibility of increasing the limited speed for the high speed trains. This paper introduces the method to improve the speed on the conventional line with body lateral acceleration among the several considered issues and explains the parameters related to those analysis, such as the cant deficiency, the radius of curve, speed and etc. When a train pass on the curved track, the lateral accelerations of body are divided into the quasi-static and the maximum accelerations according to the UIC 518 which is the international specification for testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour, especially for safety and ride comfort. This paper shows that it is safe and comfort from the results of test when KHST runs on the conventional line with the curves and proposes that the limited speed of conventional curved line could be changed to a little higher speed if the analyses of other fields are completed.

1. 서 론

한국형 고속전철은 선도기술개발 사업의 일환으로 2002년에 개발을 완료하여 현재 고속신선의 시험선에 서 주행시험 중에 있다. 또한 경부고속철도 운행이 고속선과 기존선을 병행 운행할 계획에 따라 한국형 고속전철 차량도 이에 대비 기존선에서 시운전 시험을 수행한바 있다⁽¹⁾. 본 논문은 한국형 고속철도차량에 대한 동역학 분야의 시험 장비구성⁽²⁾을 통하여 기존선 구간에서 고속전철 차량 주행 시 동적 거동에 대한 가속도 계측을 실시하였다. 계측된 가속도 값은 기존선에서 고속전철 차량의 곡선 통과 가능속도를 추정하는데 사용할 수 있으며, 본 논문은 동적 거동

관점에서 한국형 고속전철이 국내 경부 및 호남선을 주행한 경우에 대하여 고찰하였다.

고속전철 시운전시험에 대한 동적 거동특성에 관한 연구는 그동안 많은 논문으로 발표된바 있다⁽³⁻⁵⁾. 그러나 이러한 논문들은 대부분 고속신선에서 주행한 경우에 대하여 시험과 이론해석을 수행한 결과 고찰이었으며 고속전철이 기존선 주행한 경우는 거의 이루어지지 않았다. 또한 기존선 곡선 주행속도와 관련한 논문은 2003년 철도학회 논문집에 유영화등이 텀링차량에 대하여 이론적으로 속도 향상 정도를 고찰한 바 있다⁽⁶⁾. 본 논문은 현재 기존선 곡선부의 속도 제한과 관련한 규정인 국유철도 건설규칙에서 제안된 내용⁽⁷⁾을 차량 주행 관점에서 이해하고 지금까지 기존철도에서 적용한 곡선부 제한속도를 초과하여 주행한 경우 시험적으로 계측된 가속도값의 특성을 고찰하여 속도향상 가능성에 대한 분석을 시도하고자 한다.

* 정회원, 책임저자, 한국철도기술연구원

E-mail : ckpark@krri.re.kr

Tel : (031)460-5613, Fax : (031)460-5649

** 한국철도기술연구원

2. 기존선에서의 곡선부 통과 속도 이해

2000년 8월에 철도청에서는 기존선에 대한 건설 및 유지보수 수행 시 제한되고 있는 각종 규정들을 국유 철도 건설규칙에 담아 공표한 바 있다. 이러한 규정은 철도 건설에 수반되는 여러 조항들을 포함하고 있으며 이중 곡선부 통과 시 통과속도를 Table 1.과 같이 제한하고 있다.

Table 1. Table of the limited speed on the conventional line with the curves

Radius of curve(m)	Limited Speed(Km/h)	Real speed on conventional line(Km/h)
400	70	85
800	120	120
1000	150	140
1200	200	150

Table 1.에서는 건설 규칙에 의한 제한속도와 실제 기존선에서의 속도제한을 함께 표시하였으며 다소 차이를 보이는 것은 건설규칙은 궤도 부설규정이며 엄밀하게는 차량 주행속도를 제한하는 규정은 아니기 때문에 실제 기존선 곡선부의 제한속도는 다른 여러 상황을 고려하여 설정되어 있는 것으로 판단된다.

일반적으로 Fig. 1과 같이 곡선부를 철도차량이 통과하는 경우 바람과 같은 외력조건인 F_w 를 무시하고 차체에 작용하는 전체 작용력 F_T 가 힘 평형 방정식으로부터 0가 되는 경우 주행속도에 따른 원심력과 중력으로부터 곡선반경과 통과속도의 함수관계를 식(1)과 같이 규명할 수 있다.

$$V = \sqrt{\frac{G \cdot C \cdot R}{g}} = \sqrt{\frac{G \cdot (C_m + C_d) \cdot R}{g}} \quad (1)$$

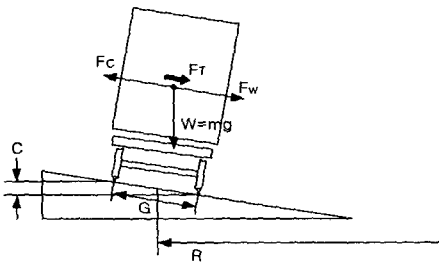


Fig. 1 Schematic diagram for force equilibrium of the vehicle body on the curve

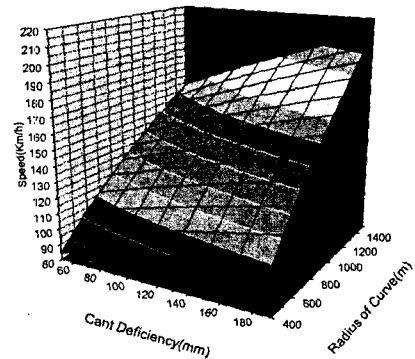
여기서 V 는 차량속도, G 는 휠과 레일 접촉점간의 거리, C 는 캔트, R 은 곡선반경, g 는 중력가속도이다. 캔트 C 는 실제 궤도 부설할 때 최대 부설캔트 제한에 의하여 실제 부설할 수 있는 최대캔트 C_m 과 부족캔트 C_d 의 합으로 정의 될 수 있으며, 식(1)은 곡선부에서 주행중인 차량이 받고 있는 힘의 평형 상태를 유지한다고 가정한 조건으로서 균형캔트 상태라고도 한다.

식(1)에서 G 와 g 는 상수이고 R 과 C_m 또한 기 부설되어 있기 때문에 상수로 취급하면 결국 곡선부 통과 속도는 식(2)와 같이 캔트 부족량 C_d 의 함수가 됨을 알 수 있다.

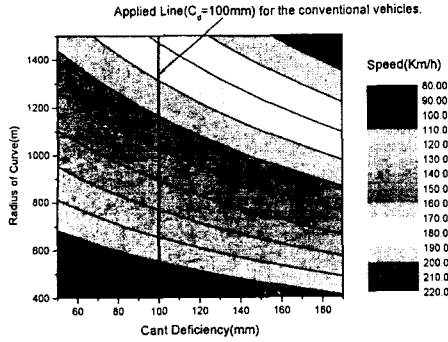
$$V = f(C_d) \quad (2)$$

여기서 C_d 의 물리적 특성은 차량의 주행특성에 관계되며 외부 작용력이 없다고 가정하면 캔트에 따라 발생하는 초과 원심력과 같은 특성을 갖게 된다. 이러한 초과 원심력은 보통 주행중의 정상 횡 가속도로 표현되기도 하며 차량의 주행속도와 현가계의 동적 특성에 따라 나타나게 된다. 따라서 C_d 의 의미는 주행중의 차량 동적 거동 특성과 그 의미가 같으며 실제로 승차감 기준 및 차량 주행안전성을 가속도 성분으로 규정하고 있어 이를 통하여 C_d 값을 결정할 수 있다.

식(2)의 함수관계를 알기 쉽게 V , C_d 및 R 의 관계식을 이용하여 도식적으로 표현하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며 C_d 의 증가로 부설된 곡선반경에서 주행속도를 향상시킬 수 있는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 2 Graph of relations between C_d , V and R
(a) 3D Surface plot. (b) 3D Contour map.

앞에서 언급되었듯이 C_d 는 차량의 승차감과 안전성을 표현하는 변수로서 현재는 100mm를 기준으로 설정되어 있으며, C_d 값의 증가로 제한속도를 향상시킬 수 있는 가능한 수준은 20mm 증가 시켰을 때 10Km/h 이하의 속도 수준으로서 차량의 종류에 따라 승차감과 안전성이 확보되는 일정 수준 범위로 제한될 수 있으며 무한정 크게 할 수는 없을 것이다.

3 계측시스템 구성 및 시운전 시험 개요

한국형 고속전철 차량의 시운전 시험 시 차량의 동적 특성을 계측하기 위하여 Fig. 3과 같이 가속도계를 열차의 차체와 대차 및 액셀박스에 장착하였다.

차체에는 Kistler사의 저주파용 Charge type 가속도계를 총 13개 장착하였으며 대차와 차축 액셀박스에 Kistler사의 큰 영역의 가속도 계측이 가능한 ICP type 가속도계를 총 74개를 장착하였다.

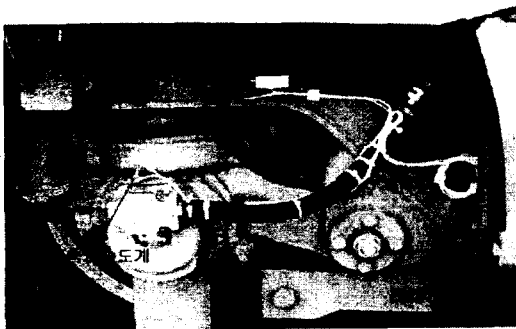
데이터 계측 및 저장은 Fig. 4와 같이 계측의 유연성이 높은 NI(National Instrument)사의 PXI 장비를 기반으로 구성하였으며, 사용된 프로그램은 Fig. 5와 같이 LabView 6i를 기반으로 자체 개발하여 사용하였다.

구성된 장비는 계측 효율성을 증대하기 위하여 7량 시제차량의 전,후 동력객차와 중간 객차에 장착하여 분산된 가속도계 장착지점으로부터 근접 계측토록 하여 노이즈를 최소화하도록 하였다.

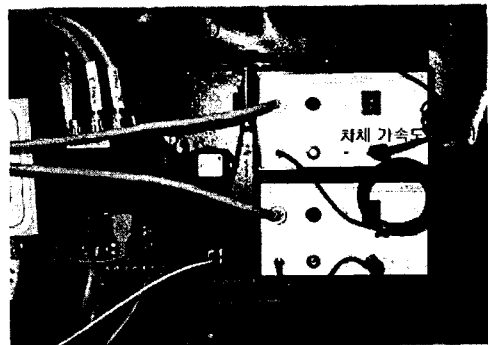
시운전 시험은 Fig. 6과 같이 기존선인 경부선과 호남선에서 실시하였으며 경부선은 동대구-부산간에서, 호남선은 서대전-목포 구간에서 실시하였다.

Accelerometers on the car bodies		2		3		3		3		2	
Bogie Number		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Accelerometers on the axle boxes	Left	FW: 2 RW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2	FW: 2
	Right	FW: 2 RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2	RW: 2
Accelerometers on the bogie frames	Left	F: 3		F: 3		F: 3		F: 3			F: 3
	Right	R: 3		R: 3		R: 3		R: 3			R: 3

FW : Front Wheel, RW : Rear Wheel, F : Front, R : Rear



a. Accelerometers on the Axle Boxes and Bogie Frames



b. Accelerometers on the Car Bodies

Fig. 3 Locations of the accelerometers mounted on the test train.

총 시험구간 거리는 경부선의 경우 117.2Km이고 호남선은 246.9Km 이다. 주행속도는 곡선부의 속도향상 가능성을 살펴보기 위하여 현행 제한속도보다 높은 속도대역에서 시험상황에 따라 다양하게 설정하여 주행하였다.

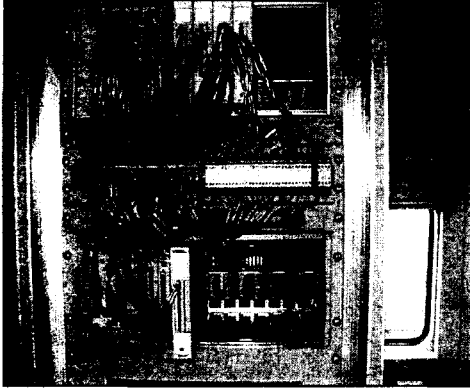


Fig. 5 Data Acquisition system (based NI PXI system)

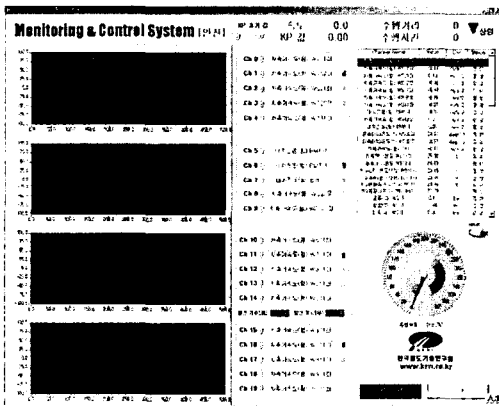


Fig. 5 Data Acquisition Program (based LabView 6i)

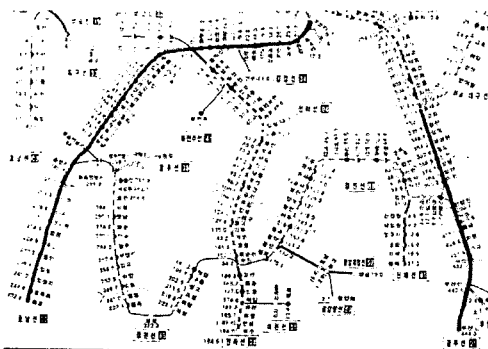


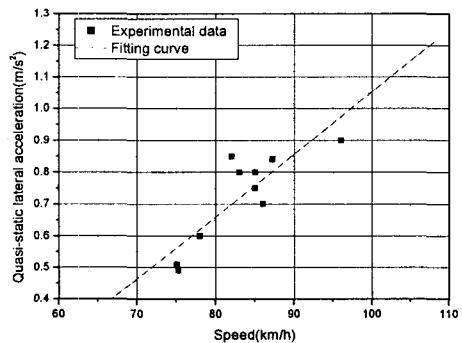
Fig. 6 Schematic diagram of the conventional Line

4. 시험결과 분석

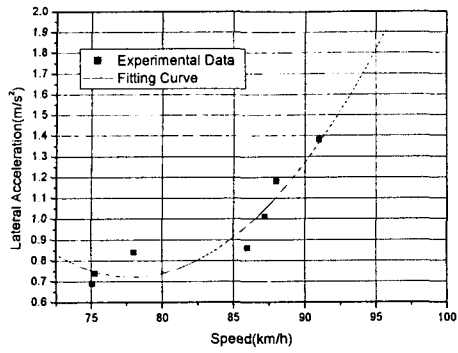
한국형 고속전철의 기존선 주행시험은 2003년 12월에 이루어졌으며, 고속전철 전체 시험 중 본 논문에서는 차체 가속도 계측 결과를 이용하여 곡선부 통과시에 차체 횡가속도에 중점을 두고 분석하였다. 계측은 200Hz Lowpass Filter를 적용하여 데이터를 저장하였으며, 1kHz로 sampling을 하였다.

분석을 위하여 참조된 규격은 국제적으로 철도차량의 동적거동에 관한 안전성과 궤도피로 및 승차감과 관련한 내용으로 이루어진 UIC 518을 사용하였다(8). 본 연구는 UIC 518의 여러 평가항목 중 Simplified method(acceleration measurements)를 사용하여 Safety 와 Running Behaviour 항목의 차체 횡가속도와 관련된 항목만을 적용하였다. 따라서 본 논문에서 제시된 내용은 전체 고속철도차량의 안전성을 판단하는 내용이 아니며 극히 일부분에서 관련된 사항만을 참조하였다. UIC 518에 의하면 차체 횡가속도의 안전성은 6Hz Low pass Filter를 적용하고 통계적 처리를 통하여 2.8%이하이면 안전성이 확보되며 정상 횡가속도의 경우 1.5%이하이면 동적거동이 양호한 것으로 판단하고 있다.

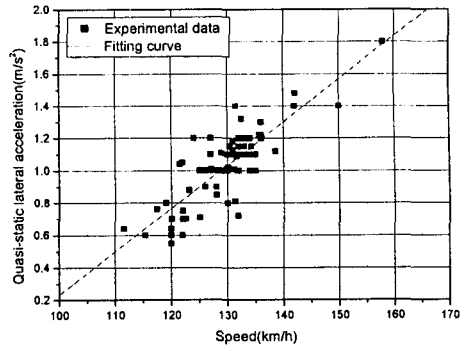
본 연구에서는 이를 적용하여 일련의 전체 주행 시험 계측 결과를 분석하여 차체 횡가속도를 곡선별로 분류하고 최대값과 정상 횡가속도로 나누어 속도대별 가속도 크기를 정리하였다. 기존선의 곡선현황은 매우 다양한 곡선반경으로 이루어져 있어 곡선반경 400m, 600m, 800m, 1000m에 국한하여 분석하였으며 고속전철이 통과한 속도에 대하여 Fig. 7 ~10과 같이 정상 횡가속도 및 최대 횡가속도에 대하여 그래프로 각각 작성하였고 Curve Fitting을 통하여 속도대별 가속도 크기 변화의 경향을 살펴볼 수 있도록 하였다.



(a)

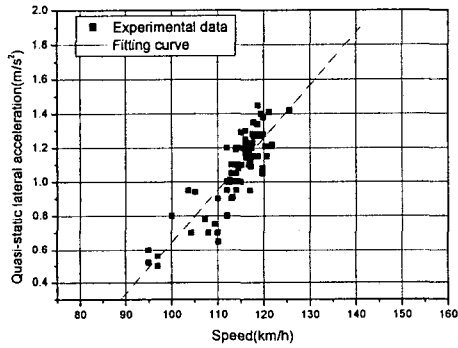


(b)

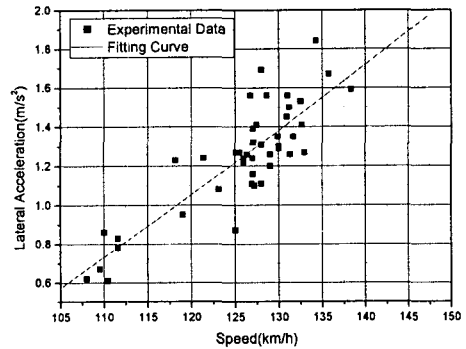


(a)

Fig. 7 Graph of the lateral acceleration of the body vs. speed on the curve with $R=400$. (a) Quasi-static lateral acceleration. (b) maximum lateral acceleration.

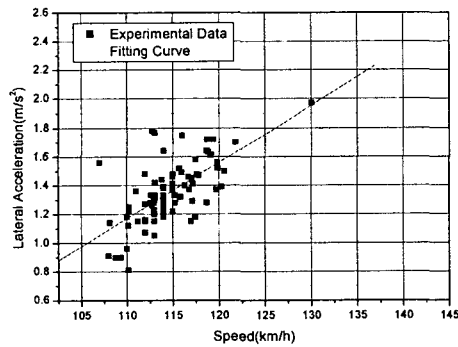


(a)

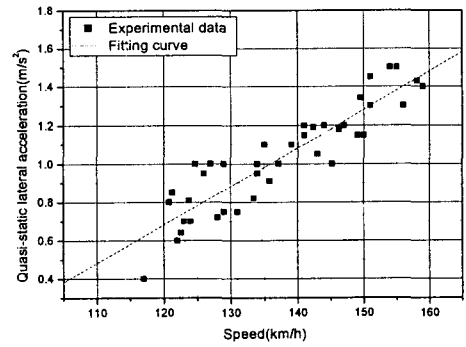


(b)

Fig. 9 Graph of the lateral acceleration of the body vs. speed on the curve with $R=800$. (a) Quasi-static lateral acceleration. (b) maximum lateral acceleration.

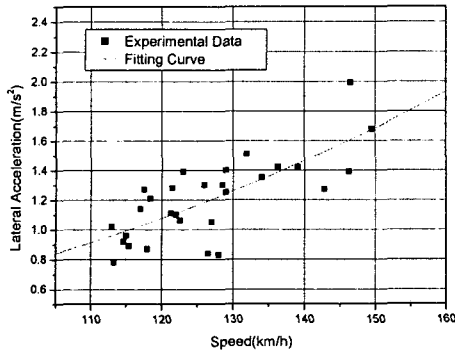


(b)



(a)

Fig. 8 Graph of the lateral acceleration of the body vs. speed on the curve with $R=600$. (a) Quasi-static lateral acceleration. (b) maximum lateral acceleration.



(b)

Fig. 10 Graph of the lateral acceleration of the body vs. speed on the curve with R=1000. (a) Quasi-static lateral acceleration. (b) maximum lateral acceleration.

Fig. 7~10에서 제시된 곡선별 차체 정상 횡가속도 나 최대 횡 가속도 모두 UIC 518의 규정제한 가속도 크기를 넘지 않고 있어 차체 횡 가속도 기준만을 고려할 때 안전한 수준을 보장하고 있으며 또한 승차감도 확보되는 것으로 판단될 수 있다.

그러나 상기 시험수준은 Table 1.속도를 초과하여 시험한 결과를 포함하고 있어 속도향상에 대한 가능성을 갖고 있다. 실제로 정상 횡 가속도 기준 400R을 제외한 곡선부에서 1.2 % 수준에서 안전성 및 승차감을 유지하고 있으며, 한국형 고속전철의 경우 기존선 주행에 대한 속도제한이 기존의 속도제한과 달리 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

따라서 이에 대한 제한 속도는 Table 2.와 같이 적용 가능할 것으로 판단된다.

Table 2. 의 제안된 속도제한을 캔트 부족량으로 환산하면 400R의 경우 145mm이고 600, 800, 1000의 경우는 180mm 수준임을 알 수 있다.

Table 2. Table of the proposed speed on the conventional line with the curves for KHST

Radius of curve(m)	Real speed on conventional line(Km/h)	Proposed limited speed(Km/h)
400	85	95
600	110	117
800	120	136
1000	140	146

4. 결론

이상의 결과는 차체 횡 가속도에 국한하여 고속전철의 기존선주행시 속도향상에 대한 연구를 수행하였으므로 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 한국형 고속전철에 대한 기존선 주행 시 차체 횡가속도 계측을 통하여 안전성과 승차감이 기존선의 제한속도 이상에서도 확보되는 것으로 판단되며 향후 한국형 고속전철의 기존선 운행시에 사용할 수 있는 제한속도를 제시하였다.
- 2) 본 연구는 차체 횡가속도를 기준으로 수행하였기 때문에 기타 기존선에서 고려되어야 할 추가 수행 연구로 확인되어야 하며 이를 통하여 최종적인 결론을 얻을 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 고속철도 기술개발 사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) 한국철도기술연구원, 한국형 고속차량(G7)을 활용한 경부·호남 기존선 속도향상 검증, 2004. 1., 철도청.
- (2) 박찬경 외 2인, 한국형 고속전철의 주행진동 특성 분석, 2003. 5. 한국소음진동공학회 2003년 춘계학술대회 논문집, pp555~560.
- (3) 박찬경 외 3인, 1998, Vampire를 이용한 경부고속철도 차량의 동적 안정성 해석, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp510 - 516
- (4) 박찬경 외 3인, 2002, 반응표면 모델을 이용한 한국형 고속전철 현가장치의 효율적인 최적설계, 한국소음진동공학회논문집 제 12권 제6호, pp461-468
- (5) 김영국 외 3인, 2001, 바람이 고속전철의 동적 안전성에 미치는 영향 분석, 한국소음진동공학회논문집 제 11권 제 8호, pp349-456
- (6) 유영화 외 2인, 기존선의 선형조건을 고려한 틸팅차량의 허용속도 평가, 2003.12, 한국철도학회논문집, pp246~251.
- (7) 철도청, 국유철도건설규칙, 2000.8.