

# 도시철도 차량의 동적거동을 고려한 차량한계 해석

## Analysis of Vehicle Limit Considering the Dynamic Behavior for an Urban Train

박 찬 경† · 김 영 국\* · 배 대 성\*\*

C. K. Park, Y. G. Kim and D. S. Bae

(2002년 3월 22일 접수 : 2002년 4월 29일 심사완료)

**Key Words** : Vehicle Limit(차량한계), Construction Limit(건축한계), Kinematic Envelope(동적 차량거동 한계), Irregularity(불규칙도), Cant(캔트), Transition Curve(완화곡선), Suspension(현가장치)

### ABSTRACT

A railway vehicle should be satisfied with the safety criteria and ride comfort of passengers. A bogie of railway vehicle is composed of many suspension components, such as springs, dampers and etc., that have an influence on the dynamic behavior of the train with the wheel/rail profiles and track geometries. Therefore, it is necessary for engineers to check the interference between vehicle limit and construction limit with considering the vehicle's behavior, because when the vehicle is running on curved track, it should be have enough clearance from infrastructure for safety, specially in a subway system. This paper explains the effective method of analysis for vehicle limit considering the vehicle dynamic behavior and reviews the problem of vehicle limit for the Korean Standard Urban Train. The results show that the vehicle limit is over the construction limit when the Korean Standard Urban Train runs on the curved track with 180 m radius of curve.

### 1. 서 론

철도차량은 승객을 목적지까지 안전하고 편안하게 수송해야 한다. 특히 도시에서 운행되는 도시철도차량은 작은 곡률반경을 갖는 지하구간을 빈번히 운행하기 때문에 외부 시설물과의 간섭이 발생하게 되면 안전상의 문제를 발생시킬 수 있다. 대형 질량요소와 탄성요소(스프링, 댐퍼 등)로 구성된 철도차량은 현가장치의 특성과 궤도특성에 따라 동적거동이 발생하게 되며,<sup>(1,2)</sup> 이러한 거동은 차량과 외부 시설물의 간섭을 보다 쉽게 일어나도록 한다. 따라서, 이러한 동

적거동에 따른 차량한계는 Fig. 1과 같이 도시철도건설규칙<sup>(3)</sup>이나 국유철도건설규칙<sup>(4)</sup>에 강제규정으로 고시되어 안전성 확보에 노력하고 있다. 일반적으로 차량한계는 Fig. 2와 같이 궤도 불규칙, 휠 마모, 현가장치 특성에 의한 한계조건(kinematic envelope)과 선로의 곡선반경 및 캔트에 의한 한계조건(swept envelope)을 동시에 고려하여야 한다.<sup>(5)</sup>

운행중인 철도차량의 차량한계는 외부 시설물에 대한 한계인 건축한계를 초과하지 않는 범위에서 동적 안전성이 고려되어 설정되어야 한다. 도시철도차량에 적용되는 한계는 Fig. 1과 같이 구조물 한계, 건축한계 및 차량한계 등으로 구성되며, 구조물 한계는 건축 구조물의 한계를 나타내는 것으로 각종 구조물을 이 한계 내에서 건축해야 된다는 것이며, 건축한계는 구조물에 장착된 부착물(신호, 궤도 시설물 등)의 한계를 나타낸 것으로 철도차량 주행시의 거동은 이 한계이내에 있어야 한다. 또한, 차량한계는 정적인 상태

† 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원

E-mail : ckpark@krii.re.kr

Tel : (031)457-6088(531), Fax : (031) 455-4868

\* 정회원, 한국철도기술연구원

\*\* 한양대학교 정밀기계공학과

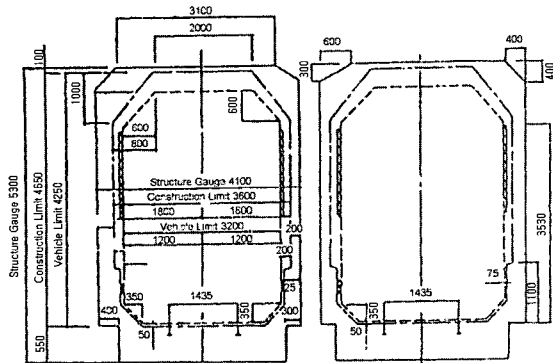


Fig. 1 Example of structure gauge, construction limit and vehicle limit for urban train<sup>(3)</sup>

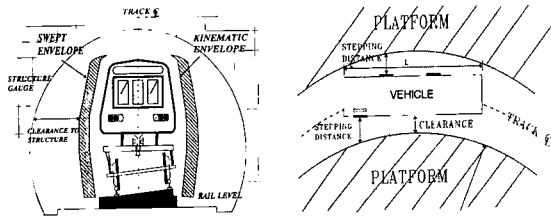


Fig. 2 Kinematic and swept envelope<sup>(5)</sup>

에서 차량제작을 위한 한계를 나타낸 것으로 철도차량 제작 시에 외곽선도는 이 한계를 고려하여야 한다. 따라서, 철도차량의 외형크기는 차량한계 내에서 설계되어야 하고, 차량한계는 동적거동을 고려하여 건축한계 이내에 존재하도록 고려되어야 한다. 그러나, 실제로 국내 도시철도차량의 경우 외국의 차량한계 규정을 모방하여 국내 차량한계 선도로 사용하고 있어 정적인 상태에서 차량 외형만 차량한계를 만족하도록 설계가 이뤄질 뿐 동적인 상태에서의 건축한계 만족여부는 아직 이론적으로 검토하지 못하고 있다.

본 연구에서는 궤도의 불규칙도와 다양한 선로 조건을 실제 궤도조건과 거의 동일하게 모사하여, 도시철도차량을 운행할 때에 차량의 동적거동에 의해 발생할 수 있는 외부 시설물과의 간섭을 체계적인 방법으로 분석하고 표준전동차<sup>(6)</sup>에 적용하여 검토하였다.

## 2. 모델링

### 2.1 차량 모델링

본 연구에서 사용한 도시철도차량은 건설교통부에서 추진하고 있는 도시철도 표준차량을 이용하였

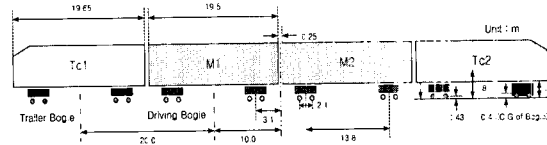


Fig. 3 Urban train configuration

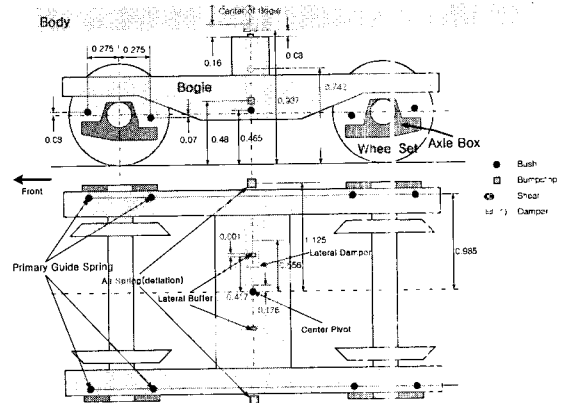


Fig. 4 Drawing of bogie model

Table 1 Mass properties

Masses	Weight (Mg)	Moment of Inertia (Mg · m <sup>2</sup> )			
		I <sub>xx</sub>	I <sub>yy</sub>	I <sub>zz</sub>	
Body	M1/M2	20.2/18.53	30/27	360/320	310/270
	Tc1/Tc2	19.81/19.57	28/27	340/330	300/290
Bogie	DrBo	3.8	1.45	1.46	2.81
	TrBo	2.5	1.0	1.0	2.0
Wheel set	DrW	1.6	1.1	0.01	1.1
	TrW	1.4	1.0	0.01	1.0

다.<sup>(6,7)</sup> 해석을 위한 도시철도차량 모델은 Fig. 3과 같이 4량 1모듈인 Tc1(일반객차)+M1(동력객차)+M2(동력객차)+Tc2(일반객차)로 구성된다. 차체를 지지하는 대차는 동력대차와 일반대차로 구분되며 동력대차는 M차량에, 일반대차는 Tc차량에 장착된다.

현가장치는 동력대차와 일반대차가 동일한 구조를 갖고 있으며, Fig. 4와 같이 휠셋과 대차를 연결하는 1차 현가장치는 액슬박스의 전후에 장착된 가이드 스프링이 장착되어 있고, 대차와 차체를 연결하는 2차 현가장치는 에어스프링, 좌우방향 댐퍼, 버퍼 및 센터 피봇 등으로 구성된다. Table 1 및 Table 2는 질량요소와 현가요소에 대한 특성치를 나타낸 것이며, Fig. 5는 해석에 사용된 VAMPIRE S/W<sup>(5)</sup>를 이용하여 구성한 도시철도차량의 최종 해석 모델이다.

Table 2 Suspension characteristics

Suspensions	Stiffness(MN/m)			Damping (MN sec/m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Guide spring	2.46	2.46	0.49	0.008	0.008	0.002
Air spring	0.147	0.167	0.460	0.0	0.0	0.016
Lateral damper	0.0	0.0	0.0	0.0	0.096	0.0
Pivot center	11.27	0.2	0.0	0.04	0.0	0.0
Hook joint	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lateral nuffer	38.0	35.0	25.0	15.0	5.0	0.0(mm)
	49.0	29.4	8.3	2.0	0.0	0.0(kN)

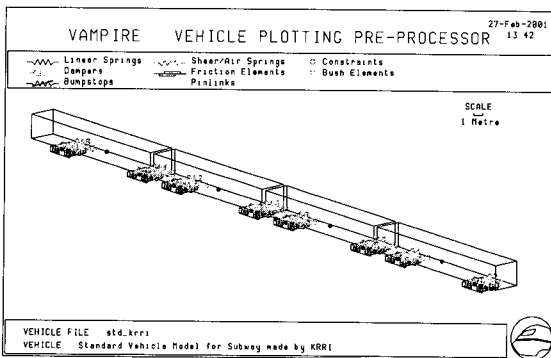


Fig. 5 VAMPIRE vehicle model

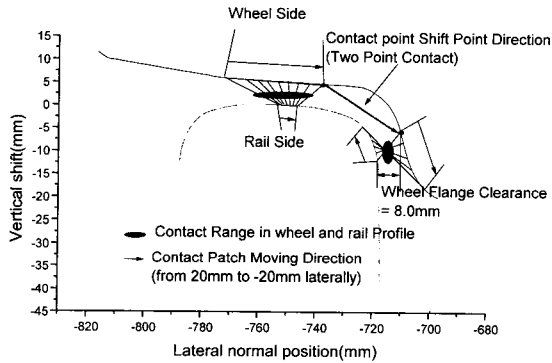


Fig. 6 Wheel/rail contact model

Table 3 Characteristics of curved track

Curvature (m)	Length of curve(m)	Cant (mm)	Length of transition curve (m)	Vehicle speed (km/h)
180	200	105	37	40
270	200	132	64	55
300	200	142	75	60
350	200	142	81	65
400	200	146	89	70
450	200	148	97	75
500	200	151	106	80

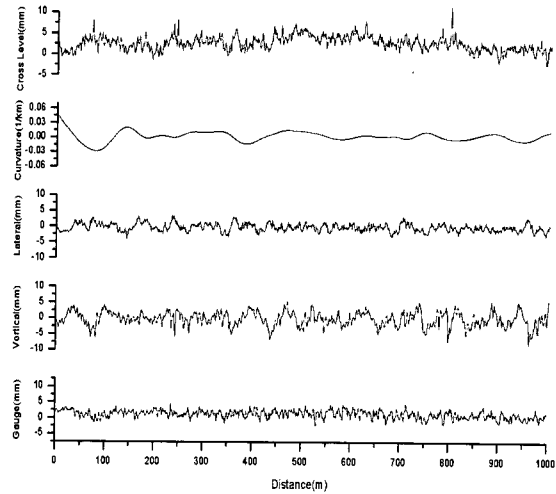


Fig. 7 Characteristics of track irregularity

## 2.2 휠/레일 접촉 모델링

철도차량의 동적 거동 분석을 위해서는 휠과 레일의 접촉 특성이 중요하다. 본 연구에서는 표준전동차의 휠을 직접 측정하여 휠 형상을 모델링 하였으며 레일은 현재 국내에 부설되어 있는 레일을 이용하여 모델링하였고 그 결과는 Fig. 6과 같다.

## 2.3 궤도 모델링

도시철도차량의 동적거동은 궤도의 선형조건과 불규칙도에 의해 영향을 받고 있으므로 이에 대한 모델링이 중요하다. 레일의 선형조건은 서울 지하철 노선 정보를 이용하여 실제 노선의 선형과 궤도 부설조건을 Table 3과 같이 모델링 하였으며, 레일불규칙은 측정된 레일불규칙을 사용해야 하지만 실측데이터가 없기 때문에 VAMPIRE S/W에서 제공하는 표준 2급 선로조건인 레일불규칙을 이용하여 Fig. 7과 같이 모델링 하였다. 철도차량의 동적거동은 레일의 선형조건과 불규칙에 의한 영향을 동시에 고려하여 해석되어야 하기 때문에 이들을 중첩하여 입력조건으로 사용하였다.

## 3. 이론해석 및 결과

### 3.1 모델 안정성 분석

먼저, 해석에 사용된 도시철도차량 모델에 대해 안정성 분석을 실시하여 이 차량이 해석을 위한 주행영역에서 동적으로 안정한지를 판단하였다. 레일에 대한

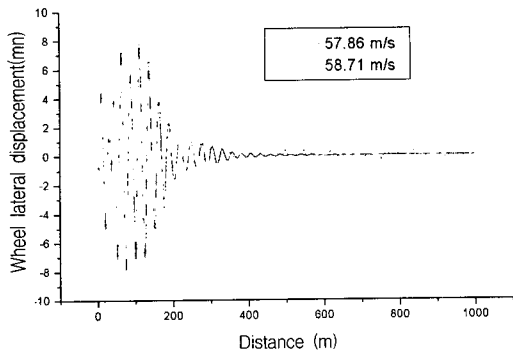


Fig. 8 Stability analysis result

휠의 좌우 상대변위를 계산하여 초기 가진에 의한 수렴성으로 안정성을 판단하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

약 208 km/h의 차량속도에서는 초기 진폭이 안정화되고 있어 표준전동차의 설계최고속도가 120 km/h 임을 감안하면 이 모델이 충분한 안정성을 갖고 있는 것으로 판단되기 때문에 본 연구의 해석 조건인 80 km/h의 속도대역에서도 신뢰성을 갖고 있는 것으로 판단되었다.

### 3.2 차량한계 계산위치 설정

Fig. 9는 해석 차량의 평면도를 나타낸 것이며, A~I는 각 차체에 대한 양 끝단과 중심의 단면을 나타낸 것이다. Fig. 10은 Fig. 9의 해석 단면상에서 제한되는 각 한계를 나타낸 것이며, a~f는 동적거동에 의해 건축한계와 간섭이 일어날 수 있는 차량한계상의 점으로 실제 해석에 사용되어야 할 계산점을 나타낸 것이다. 따라서, 계산에 사용되어야 할 총 계산점은 A~I까지의 9개 단면에 대해 a~f까지의 6개점이므로 모두 54개가 되어 많은 소요시간과 인력이 요구된다. 모든 경우를 해석해야 할 필요가 있는지를 판단하기 위해 각 차체의 중심 단면(B, D, F, H) a점에 대해 상하 및 좌우방향의 변위를 계산하여 비교하였으며 그 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 각 단면의 a점의 변위는 위치차이에 의한 위상만 바뀌었을 뿐 동일한 수준의 변위를 나타내고 있기 때문에 B단면에 대한 검토만으로도 충분하다고 판단할 수 있다. 또한, 동일한 방법으로 차체의 양 끝단에 대해서도 검토해 본 결과도 중심단면의 검토결과와 동일하기 때문에 일반객차(Tc1)의 3개 단면(A, B, C)에 대해서만 평가를 수행해도 문제점이 없을 것으로 판단하였다.

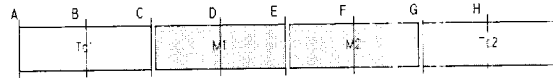


Fig. 9 Top view of urban train

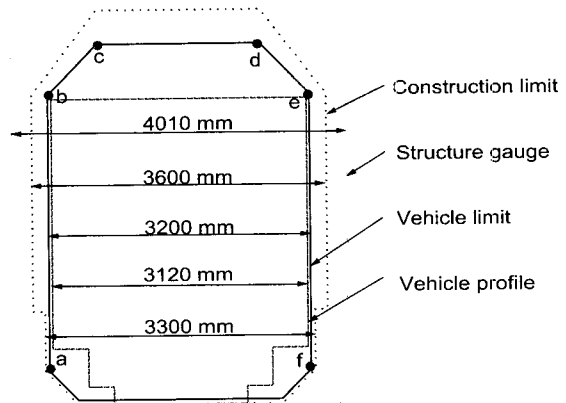


Fig. 10 Clearance between each limits for urban train

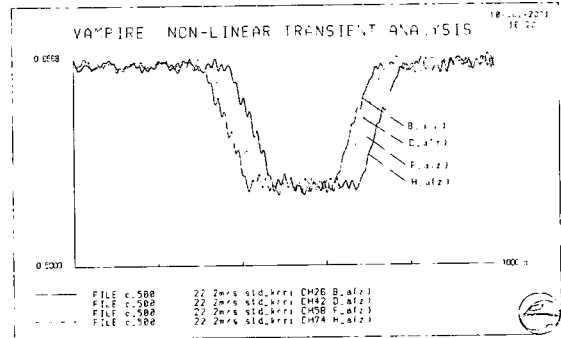


Fig. 11 Vertical displacement at a point of each section

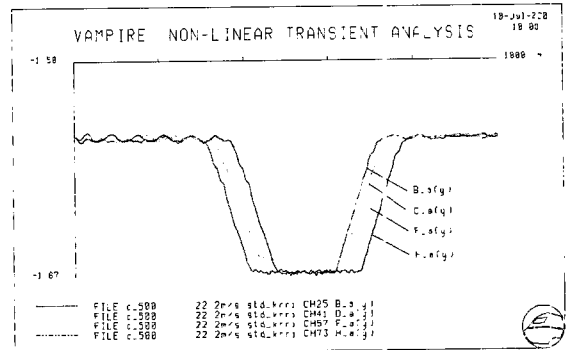


Fig. 12 Lateral displacement at a point of each section

### 3.3 이론해석 결과 및 분석

본 연구에서는 이론해석을 차량상태에 따라 모든 현가장치가 완전한 정상상태와 에어스프링이 파손되었을 경우로 구분하여 7종류의 궤도 곡선 형태에 따라 수행하였다. 우선 Fig. 10으로부터 구조물의 설정된 한계에 대한 정적 여유간격을 살펴보았다.

표준전동차의 차량 외곽선도는 차량한계와 40 mm의 최소간격을 갖고 있으며 이는 차량제작 시에 이미 이 한계를 고려한 것으로 판단된다. 또한, 차량한계는 건축한계와 차량 하단부(a,f point)에서 50 mm, 차량상단부(b,c,d,e point)에서 200 mm의 여유간격을 갖고 있으며, 이는 차량이 직선 주행 중에 이 간격 내에서 움직여야 한다는 것을 의미한다. 구조물 한계는 정적인 상태에서 건축한계와 250 mm의 간격을 갖고 있다. 또한 철도차량이 곡선부를 주행할 때의 건축한계는 곡선반경에 따라 좌우 쪽을 확대하도록 되어 있으며, 도시철도의 경우는  $25000/R$  (mm)만큼 좌우 방향으로 확대하도록 규정되어 있다.

각 선로조건 및 주행조건에서 차량한계상의 a~f점에 대해 Fig. 13과 같이 초기 정적상태를 기준으로 한 좌우 ( $D_y$ ) 및 상하 ( $D_z$ ) 방향의 동적변위를 계산하고, 이를 절대변위 ( $D = \sqrt{D_y^2 + D_z^2}$ )로 환산하여 이 값이 곡선주행 시 확대량이 고려된 건축한계 이내에 있는지에 따라 간섭여부를 판단하도록 하였다. 이는 실제 거동보다 크게 계산되어 평가될 수 있지만 안전 여유치를 고려한 가능성 있는 최대 변위의 의미를 갖고 있다. 또한 Fig. 14에서 보듯이 곡선부에서는 열차 진행방향에 따라 de와 dc에 의해 좌우 어느 한쪽만이 건축한계에 가까워지기 때문에 실제로 평가에 사용될 수 있는 계산점은 A, C단면에서는 a~c점, B단면에서는 d~f점 또는, A, C단면에서는 d~f점, B단면에서는 a~c점이 된다. 본 연구에서는 계산점을 A, C단면의 경우는 a~c점, B단면의 경우는 d~f점을 사용하였다.

(1) 에어스프링이 정상인 경우 주행 거동해석

차량의 2차 현가장치인 에어스프링이 정상적으로 작동되는 경우, Fig. 15의 곡선반경 180 m 주행 시 A단면 a측정점에서의 변위계산 예와 같이 측정점의 거동을 좌우(Fig. 15 c) 및 상하(Fig. 15 b)방향에 대하여 해석하고 이를 절대변위로 환산하여 곡선에 따른 건축한계 변화량과 비교(Fig. 15 a)하였다.

종합적으로 Fig. 15에서와 같이 각 곡선별로 주행 동특성 해석을 하고 절대변위를 이용하여 각 차량 한계상의 계산점에서 건축한계와 간섭되는지 여부를 판단하여 보면 Table 4와 같다.

Table 4의 결과에서 보듯이 간섭현상은 곡선반경 180 m에서만 나타나고 있으며 이러한 간섭이 발생하는 부위를 자세히 살펴보면 Fig. 16에서와 같이 곡선부에서 직선부로 변환되는 완화곡선 상에서 발생됨을 알 수 있다. 이는 Fig. 14와 같이 곡선부에서 A, C 단

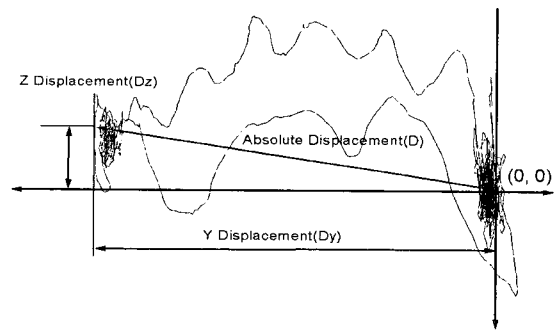


Fig. 13 Definition of absolute displacement

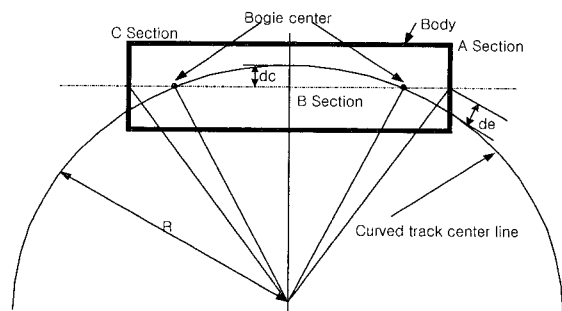


Fig. 14 Swept envelope on curved track

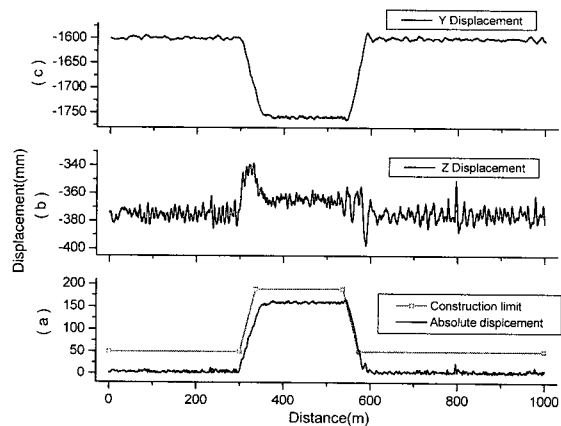


Fig. 15 Displacement of a\_point on A\_section

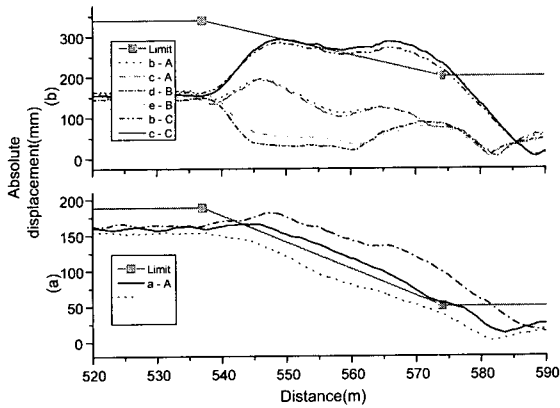


Fig. 16 Construction limit and absolute displacement at points of each section(R=180 m)

Table 4 Possibility of interference between vehicle and construction limit

Radius of curve	Condition of air spring	Possibility of interference								
		A section			B section			C section		
		a	b	c	d	e	f	a	b	c
180 m	Normal	Yes			No					Yes
	Deflation (front and rear)	Yes			No			Yes	No	
	Deflation (front)				No				Yes	
	Deflation (rear)	Yes			No			Yes	No	
270 m ~500 m	Normal				No					
	Deflation (front and rear)				No					
	Deflation (front)				No					
	Deflation (rear)				No					

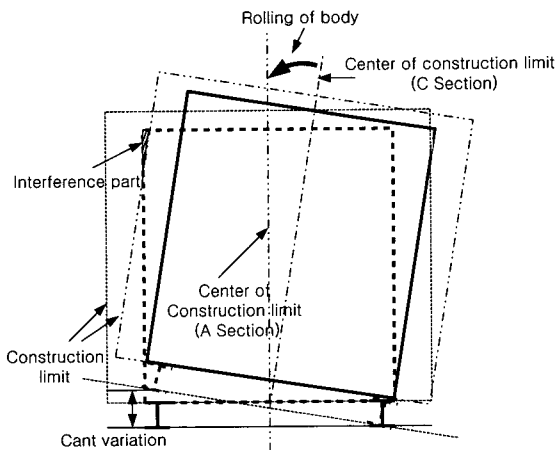


Fig. 17 Influence of body rolling according to cant variation on interference between vehicle and construction limit

면이 대차 중심간 거리보다 차체 길이가 더 길어 이미 중심선으로부터 곡선 바깥부위로 편심되어 근접되어 있으며 여기에 Fig. 17과 같이 직선부로 친이되는 구간에서 캔트 차에 의한 차체 롤링이 증가되어 나타나는 것으로 판단된다.

(2) 에어스프링 파손된 경우 주행 시 거동해석

공기스프링 파손시의 모델은 Fig. 18과 같이 차체와 대차간에 에어스프링의 보조 고무스프링에 의해 접촉하게 되므로 상하방향은 비선형 접촉 강성으로 좌우, 전후방향은 마찰력으로 모델링을 수행하였다. 또한, 에어스프링 파손의 경우를 일반객차(Tc1)의 전/후 대차 모두 파손된 경우, 전대차 만 파손된 경우 및 후대차 만 파손된 경우로 분류하여 해석하였다. 좌/우 공기스프링중에 한쪽만이 파손된 경우는 구조적으로 레벨링 밸브에 의해 좌우 높이를 일정하도록 자동 조절하기 때문에 한쪽의 공기스프링만이 파손되어도 좌우 공기스프링의 기능을 수행할 수 없으므로 본 해석에서 좌우스프링 중 한쪽 파손 시에 대한 영향은 고려하지 않았다.

각 주행곡선행 시 에어스프링 파손의 경우별로 구분하여 에어스프링의 정상조건과 동일하게 동적 거동 해석을 수행하였으며 그 결과는 Table 4와 같다. 정상조건과 마찬가지로 선로의 곡선반경이 180 m일 때 간섭가능성이 나타나고 있으며, 에어스프링의 파손조건에 따라 다소 차이를 보이고 있다.

이는 공기스프링이 파손되는 대차에서 마찰력에 의한 수평방향의 동적강성이 공기스프링이 정상상태일 때보다 크게되어 거동에 제한을 받기 때문에 오히려 파손되는 부위에서 동적거동이 적게 나타나므로 간섭가능성이 줄어들게 되는 것으로 판단된다. 각 경우에 대해서 살펴보면 전/후 대차 공기스프링이 모두 파손된 경우에 Table 4에서 볼 수 있듯이 정상상태에서는 간섭 가능성이 일어났던 C단면 b, c점이 건축한계를 초과하지 않았다. 전, 후 대차중 어느 한쪽 대차의 공기스프링이 파손된 경우에 파손위치가 반대쪽인 단면에 대한 계산점의 절대변위가 공기스프링이 파손되지 않은 경우의 동일한 위치의 계산점보다 증가함을 볼 수 있는데, 그 이유는 공기스프링이 파손되지 않은 쪽의 동적강성이 파손된 경우에 비해 상대적으로 작기 때문이다. 이는 전 대차 공기스프링이 파손된 경우에서 C단면의 a, b, c점은 건축한계와의 간섭이 발

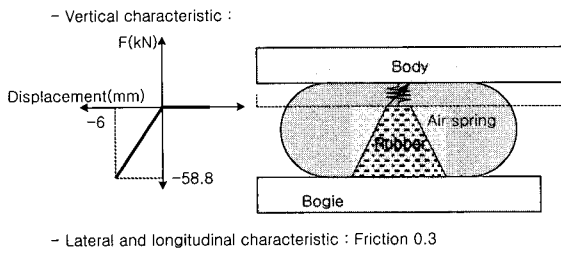


Fig. 18 Deflation modeling of air spring

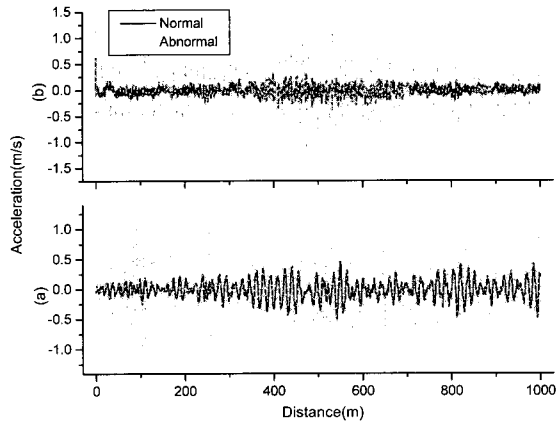


Fig. 19 Acceleration of body(Tc1) in the normal and deflation conditions for air spring

생하지만, A단면 a점은 간섭현상이 없어지며, 후 대차 파손의 경우 C단면의 b, c점에서 건축한계와 간섭현상이 발생하지 않는 것으로 알 수 있었다.

대차의 공기스프링 파손은 정상상태 주행 시에 비해 수평방향의 동적강성을 증가시켜 건축한계와의 간섭현상을 오히려 줄이는 효과를 갖게 되나, 이러한 공기스프링의 파손에 따른 비 선형적 강성증가는 가속도를 증가시키게 되므로 승객의 승차감에 나쁜 영향을 주게 된다. Fig. 19는 전/후 대차의 공기스프링이 정상적인 경우와 파손된 경우에 대해 차체 내에서 진동가속도를 계산한 결과로 대차의 공기스프링이 파손된 경우가 정상적인 경우에 비해 수직(Fig. 19 a) 및 수평방향(Fig. 19 b)에 대한 진동가속도가 훨씬 큼을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 도시철도차량의 차량한계를 동적거

동 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 표준전동차의 설계사양에 제시된 차량한계는 건축한계와 정적인 상태에서 최소 50 mm, 최대 200 mm의 여유간격을 갖고 있으며, 곡률반경 270 m미만인 곡선주행 시 건축한계와 간섭이 일어날 수 있다. 이는 대차간 거리에 의한 차체 끝단의 편기량과 완화곡선에서의 캔트량 변화에 따른 차체 롤링 영향이 지배적인 것을 알 수 있다.

(2) 공기스프링 파손시의 건축한계와의 간섭현상은 정상상태 주행 시와 거의 유사하게 나타나고 있으나 전/후 대차의 공기스프링 파손여부에 따라 그 현상은 약간의 차이를 갖고 있을 수 있다. 또한, 공기스프링의 파손이 건축한계와의 간섭문제에 있어서는 오히려 긍정적인 효과를 주지만, 승차감에는 부정적인 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

(3) 본 연구는 실제 주행상태를 실제와 가장 유사하게 모델링하여 도시철도차량에 대한 차량한계 분석을 체계적인 방법으로 수행 제시하였고, 표준 전동차에 대한 위험요소를 제시하였다.

(4) 이상에서 분석한 내용은 이론해석에 의한 결과이며 표준 전동차량이 곡선부를 주행할 때 발생할 수 있다고 판단되는 건축한계와의 간섭현상은 시운전 시험으로 확인되어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 김영국 등, 2001, "바람이 고속전철의 동적 안정성에 미치는 영향 분석", 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권 제 8 호, pp. 349~356.
- (2) Law, E. H. and Cooperrider, N. K., 1974, "A Survey of Railway Vehicle Dynamics Research", T. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, June, pp. 132~146
- (3) 건설교통부, 1994, 도시철도건설규칙, 제 19 조 (건축한계).
- (4) 철도청, 2000, 국유철도건설규칙, 제 13 조(건축한계).
- (5) AEA Technology 1998, Vampire Users Manual.
- (6) 건설교통부, 1997, 표준전동차 기본설계.
- (7) 한국철도기술연구원, 1999, 표준전동차 도면.