

# PSD 설치에 따른 도시철도차량의 Kinematic Envelope 영향 분석

## Kinematic Envelope Effect Analysis of the Urban Transit EMU According to PSD Installation

정종덕<sup>†</sup>      편장식\*      조희제\*\*      홍용기\*\*\*  
Chung, Jong-Duk      Pyun, Jang-Sik      Cho, Hui-Je      Hong, Yong-Ki

---

### ABSTRACT

Since PSD(Platform Screen Door) is set up at many subway stations, its design related to a safety becomes gradually important. Especially the interference check with a running railway vehicle is the most important of performance indices. This study proposes a dynamic analysis models for the railway vehicle and rail. Some design parameters are considered in the models to find a correlation to the performance.

---

#### 1. 서론

현재 도시철도 승강장에 PSD가 설치되고 있는데 이는 승객이 선로위로 떨어지는 사고를 미연에 방지하고 승강장 내로 차량이 진입 시 승객이 차량에 부딪히는 불상사 등을 막기 위한 구조물이다. 그러나 PSD 등과 같은 구조물이 승객의 안전을 위한 목적으로 설치가 되어졌지만 기존의 승강장에 PSD 등과 같은 구조물을 설치하는 경우 차량과 구조물 사이의 간섭이 일어날 수 있다. 이러한 간섭은 차량의 안전운행에 영향을 미칠 수 있으며, 승객안전에도 영향을 미칠 것이므로 이에 차량한계에 대한 검토가 요구되는 상황이다. 이에 기존 역사에 스크린 도어 등 안전과 관련된 구조물이 설치되고 차량운행에 필요한 구조물이 설치 될 경우 차량 운행에 안전성을 확보할 수 있는지 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 차량의 원활한 운영을 보장하기 위하여 다른 구조물 등과 간섭이 발생하지 않도록 차량한계를 설정하였으며, 이러한 차량한계를 결정하는데 큰 요인이 되는 Kinematic Envelope를 해석하기 위하여 여러 가지 인자들의 상관관계를 분석하고 이를 바탕으로 차량한계를 최적화시키는 해석방법을 제시하고자 한다.

도시철도차량의 동적 차량한계해석을 위해 상용 동역학 소프트웨어인 DAFUL을 이용해 차량한계 해석을 수행하며 차량한계 해석을 위한 도시철도차량 해석 모델을 개발하기 위해 그림 1에 정의된 흐름도에 따라 연구를 진행하였다.

---

†    정회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단 단장  
E-mail : jdchung@krri.re.kr  
TEL : (031)460-5513    FAX : (031)460-5749  
\*    비회원, 인하대학교 대학원(한국철도기술연구원),  
도시철도표준화연구단, 학연박사과정  
\*\*    비회원, 베투얼모션, 이사  
\*\*\*    회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단  
수석연구원

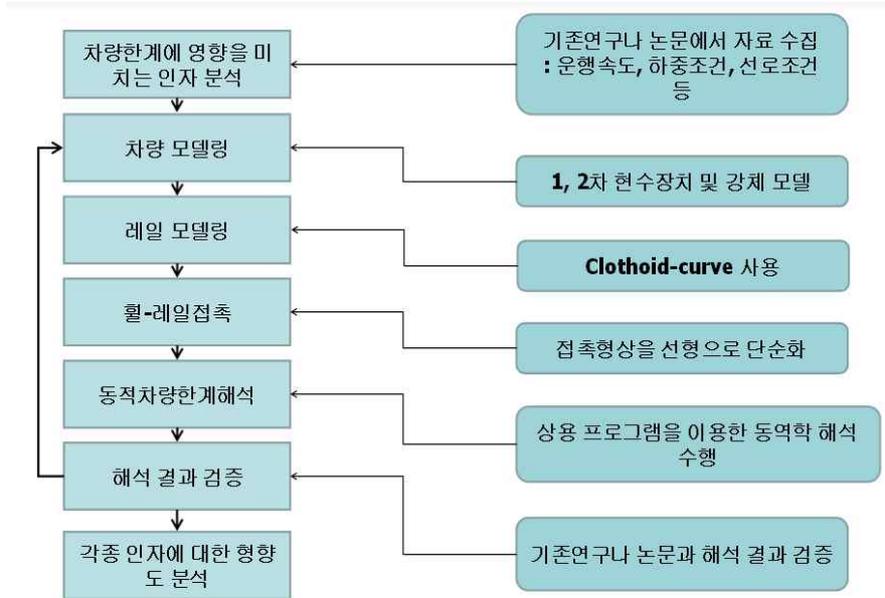


그림1. 동적 차량한계해석을 위한 연구 흐름도

## 2. 차량한계를 결정하는 요인분석

선로 주위에는 여러 가지 지상설비가 있는데 이러한 환경에서 도시철도차량의 안전운행을 유지하려면 차량의 크기에 어떠한 기준을 두어야 하는데 그 제한된 차량의 크기를 차량한계라 하며, 시설물의 한계를 정한 것을 건축한계라 한다. 여기서 차량한계는 운전 속도 및 선로 상황 등의 다양한 조건을 고려해야 정확하게 동적차량한계를 판정 할 수 있다. 그림 2는 도시철도차량 표준규격 고시에서 제시하고 있는 A, B 형의 차량한계를 나타낸 것이며 해석을 진행하는데 있어 강제 모델링을 개발하는 데 기준이 될 것이다.

차량한계를 결정하는 요인에는 여러 가지가 있는데 차량의 운행 속도, 선로의 종류, 선로의 조건, 도시철도 차량에 가해지는 승객 하중 등의 여러 가지 요인들이 차량한계를 결정하는 요인으로 작용하고 있다.

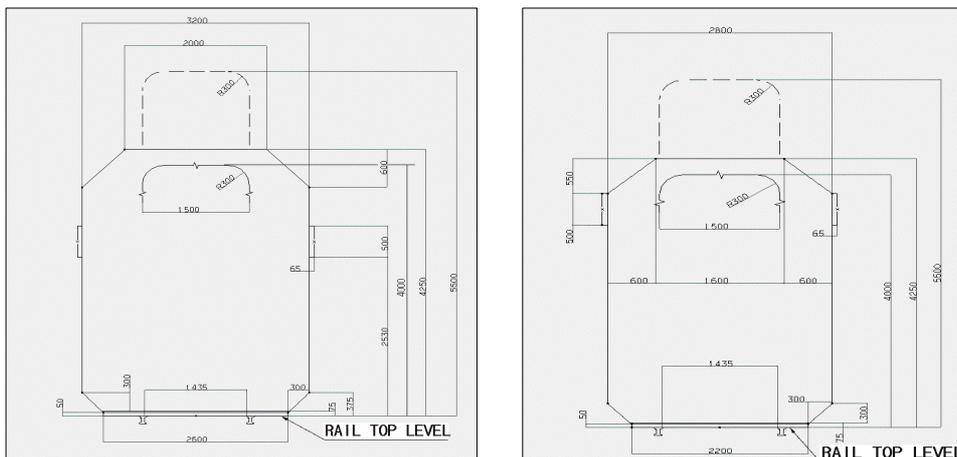


그림2. A형 차량한계도(왼쪽)와 B형 차량한계도(오른쪽)

## 2.1 캔트

도시철도차량이 곡선을 통과할 때는 곡선반경과 차량속도에 대하여 곡선 외측으로 향하여 초과원심력이 작용하여 주행안전성과 승객의 승차감에 악영향을 미친다. 차량이 곡선 부위에 진입을 할 때에 양쪽의 레일이 평평하게 위치하게 된다면 회전 관성에 의하여 탈선을 할 수도 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 곡선의 바깥 쪽 부분을 올려주게 되는데 이를 Cant라 한다. 이러한 Cant는 다음과 같은 식으로 정의가 된다.

$$C = 11.8 \frac{V^2}{R} - C_d$$

여기서,  $C$ 는 설정캔트(mm),  $V$ 는 열차속도(km/h),  $R$ 은 곡선반경(m),  $C_d$ 는 캔트부족(mm)이다.

## 2.2 슬랙

차량에는 고정된 차축간격이 있기 때문에 모든 차축이 곡선의 중심으로 향하는 것이 불가능하며, 이러한 이유로 곡선부에서는 궤간을 약간 넓혀 차량을 원활하게 주행시키고 있다. 확대궤간이라고도 불리는 슬랙은 반경 300m 이하의 곡선 내측에 두며, 확대궤간의 치수는 다음 같은 계산식에 의한 값 이하로 한다.

$$S = \frac{1250}{R} - S'$$

여기서,  $S$ 는 확대궤간(mm),  $R$ 는 곡선반경(m),  $S'$ 는 조정치(mm, 0~4mm)이다. 확대궤간의 최대치는 25mm를 초과해서는 안 된다.

## 2.3 곡선반경

선로의 곡선반경은 선로의 구간 및 기능 등에 따라 각각 그 크기를 다르게 하되, 도표 1과 같이 「도시철도 건설규칙」 제10조와 같이 정하는 값 이상으로 가능한 한 크게 정하여야 한다.

도표 1. 도시철도 최소곡선반경

구 분		최소곡선반경 (m)	
		보통의 경우	부득이한 경우
본 선	역 외	300	250
	역 내	600	400
측 선		200	120
분기부대곡선		145	-

## 2.4 레일의 종류

레일 종류는 50kgN과 60kg에 대해 해석을 수행하며, 50kgN과 60kg 레일의 높이가 21mm 정도 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 도시철도에 적용할 경우 차량 운행시 높이 차이로 인하여 승강장과 차량사이의 높이가 달라져 승강장과 차량사이의 간격이 달라지는 현상이 발생하며, 이는 레일의 종류에 따라 차량한계에도 영향을 미칠 것으로 사료된다.

## 3. 동역학 강체 모델

동역학 해석 모델은 도시철도차량 1량에 대해 7개의 강체로 모델링되었으며, 휠셋과 대차프레임 사이에는 1차 현수장치로 연결되고 대차와 구조체는 2차 현수장치로 연결된다. 그림 3은 도시철도차량의 강체모델을 나타낸 것으로 차체의 형상은 차량한계를 기준으로 하여 모델링을 하였다.

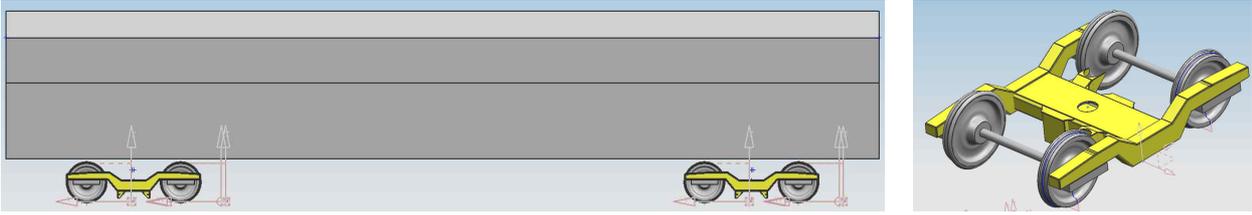


그림 3. 도시철도차량 강체 모델

### 3.1 휠-레일 접촉 메커니즘

휠과 레일 사이의 접촉은 DAFUL에서 제공하는 접촉 요소를 사용하여 그림 4와 같이 정의하였고, DAFUL의 접촉 요소는 접촉 상수와 감쇠 계수를 이용하여 침투량을 허용하는 컴플라이언스 방법을 사용하여 접촉력을 계산하며, 마찰은 쿨롱 마찰을 정의하도록 하였다. 또한 비선형적인 형상을 그대로 살려서 모델링을 하였고, 그림 5는 접촉력과 마찰력의 계산 방법을 나타낸 것이다.

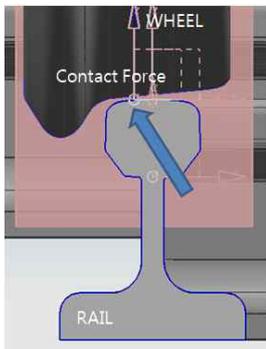


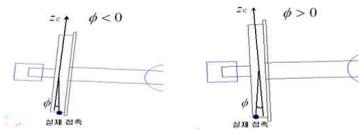
그림 4. 휠-레일 접촉 메커니즘

#### • contact normal force

$$f_e = k \cdot \delta$$

$$f_d^* = -2 \cdot \sqrt{m_w \times k} \cdot \xi \cdot \dot{\delta}$$

$$f_n = \text{Max} (0, f_e + f_d)$$



#### • friction force

$$f_{long} = -\text{sign}(d_c^*(long)) \cdot \mu_1 \cdot |f_n|$$

$$f_{lat} = -\text{sign}(d_c^*(lat)) \cdot \mu_2 \cdot |f_n|$$

$$f = \sqrt{f_{l0}^2 + f_{la}^2} \quad \max f = \mu_c \cdot |f_n|$$

$$f_{l0} = \frac{f_{l0}}{f} \max f \quad f_{la} = \frac{f_{la}}{f} \max f$$

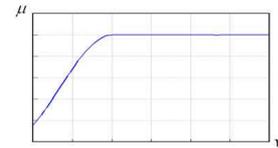


그림 5. 접촉력과 마찰력 계산 방법

### 3.2 선로 모델

선로 모델은 차량 한계 해석에 있어 매우 중요한 부분을 차지하며, 일반적으로 선로는 곡률반경과 완화곡선, 그리고 캔트와 같은 인자들로 설계되어진다. 선로의 해석 모델은 그림 6과 같이 clothoid curve 식을 이용해 완화곡선과 곡률 반경을 구현하였으며, 캔트는 생성된 좌우 선로의 수직 방향 값을 변경하고, 슬래그는 곡선 부위의 안쪽 선로만 곡면 안쪽으로 더 벌려주어 직선구간, 완화구간, 곡선구간이 있으며, 캔트와 슬래그가 적용된 선로를 모델링하였다. 레일은 KS R9106 규격에 나와 있는 50kgN과 60kg 두 가지 레일로 모델링하였다.

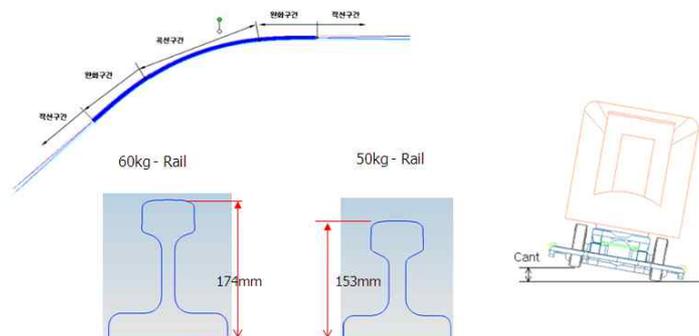


그림 6. 선로 모델링

#### 4. 차량의 동적거동 해석

차량은 속도가 높아지고 중량이 늘어나면 동적거동이 커지는 현상을 볼 수가 있는데 본 논문에서는 속도에 따른 동적거동, 레일이 50kgN과 60kg을 적용할 때, 도시철도차량 표준규격에 나와 있는 차량의 종류(A, B Type)에 따른 동적거동, 차량의 편성 방법에 따른 동적거동을 분석한다. 그림 7은 해석결과에 대한 동적거동의 측정점을 나타낸 것이다.

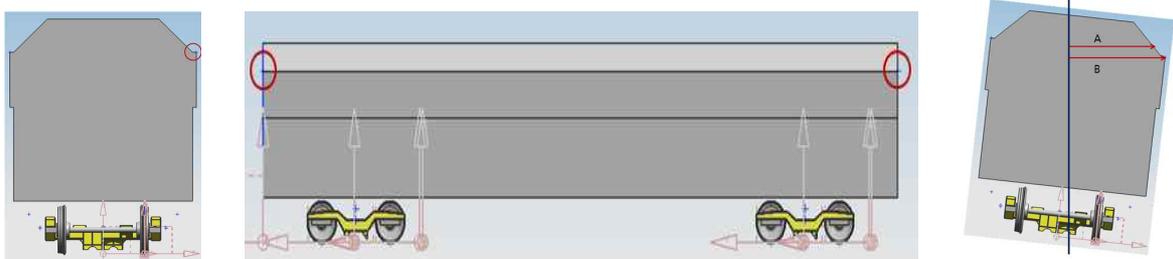


그림 7. 동적거동의 측정점

차량속도에 따른 해석을 하는 경우, 차량의 승강장 운행 속도는 곡률반경이 400m인 승강장을 통과하는 경우 최고 속도를 45km/h로 제한하고 있다. 그래서 차량속도에 따른 동적거동을 분석하기 위하여 승강장을 진입하는 차량이 45km/h의 속도로 무정차하고 역을 지나쳐가는 경우와 제동을 걸어 승강장에 정차하는 경우에 대해 해석한다.

레일의 종류에 따른 해석을 하는 경우, 현재 설치되어있는 선로는 60kg 레일로 교체할 경우 50kgN과 60kg의 높이가 21mm 정도 차이가 나고, 또한 두부의 형상에 있어서 약간의 차이가 있어 도시철도차량의 동적거동에 있어서 차이가 날 것으로 예상된다.

차량의 종류에 따른 해석을 하는 경우, 도시철도차량은 A 타입의 대형차와 B 타입의 중형차로 분류가 되어 있어 차량의 크기에 따른 해석을 진행한다.

차량 편성방법에 따른 해석을 하는 경우, 도시철도차량은 TC, T, M car 등으로 나누어지는데 각각의 차량 별로 중량에서 차이가 나므로 동적거동에 영향을 미치므로 차량편성에 따른 동적거동을 분석한다.

도표 2. 차량속도에 따른 해석 조건

구분	Case 1-1	Case 1-2
운행조건	45km/h -> 0 km/h	45 km/h -> 45 km/h
레일	60kg	60kg
차량 Type	A type	A type
편성	T-M	T-M

도표 3. 레일 종류에 따른 해석 조건

구분	Case 2-1	Case 2-2
운행조건	45km/h	45 km/h
레일	60kg	50kg
차량 Type	A type	A type
편성	T-M	T-M

도표 4. 차량 Type에 따른 해석 조건

구분	Case 3-1	Case 3-2
운행조건	45 km/h	45 km/h
레일	60kg	60kg
차량 Type	A type	B type
편성	T-M	T-M

도표 5. 차량편성에 따른 해석 조건

구분	Case 4-1	Case 4-2	Case 4-3
운행조건	45 km/h	45 km/h	45 km/h
레일	60kg	60kg	60kg
차량 Type	A type	A type	A type
편성	T-M	M-M	T-T

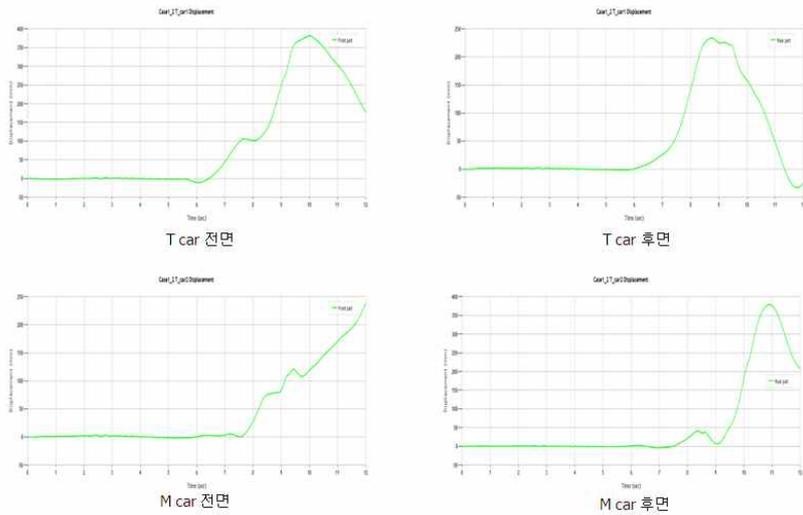


그림 8. 동적거동의 해석결과

## 5. 결론

도시철도차량의 동적거동에 영향을 미치는 여러 가지 인자들에 대해 동적차량한계를 해석을 진행하고 있으며, 그 결과를 분석하여 각각의 인자에 따른 영향도 분석을 하였다. 기존의 연구 결과와 비슷한 패턴을 갖는 결과를 얻을 수 있었으며, 이는 본 연구에서 진행한 시뮬레이션의 결과 값이 신뢰할 만한 결과라고 판단할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 기존의 연구 결과를 입증하는 것 외에 해석을 진행하면서 동적차량한계에 영향을 끼칠 수 있는 인자를 선별하여 진행을 하였고 그러한 인자들이 차량의 동적거동에 영향을 끼치는 것을 확인 할 수가 있었다.

## 참고문헌

1. 한국철도기술연구원, “도시철도차량 표준화 유지발전연구 3차년도 중간보고서”
2. DAFUL 3.1 Manual
3. 도시철도차량 표준규격