

# 악천후에 대한 고무차륜 AGT 경량전철의 안전 운행속도

김연수\*, 박성혁, 백남욱(한국철도기술연구원)

## Speed Limitations of the Rubber-Tired AGT Light Rail Vehicle for Inclement Weather

Y. S. Kim(KRRI), S. H. Park(KRRI) and N. U. Baeg(KRRI)

### ABSTRACT

Dynamic model of the rubber-tired AGT light rail vehicle, various load and boundary conditions between vehicle and infrastructures(running track, guidance rail) were defined to analyze vehicular dynamic behaviors occurred by inclement weather(strong wind and earthquake). The dynamic analysis were performed by using a commercialized software RecurDyn, whose results for the magnitudes of wind and earthquake showed the resultant forces and accelerations between car body and bogie, or bogie guidance frame and infrastructures in the various track conditions(straight or curved tracks) and train velocities. Based on these results, speed limitation of the vehicle were proposed to ensure system stability and passengers safety.

**Key Words** : Rubber-tired AGT(고무차륜형식 AGT), Light rail transit(경량전철), Speed limitation(속도제한), Inclement weather(악천후)

### 1. 서론

경량전철시스템은 버스와 지하철의 중간규모 수송능력(시간·방향당 5,000~30,000명)을 가지며, 무인운전으로 운행되는 첨단 도시철도이다. 우리나라의 경우 무인운전 운영에 대한 경험이 부족하고, 더구나 경량전철은 현재 기술개발 과정에 있으므로 차량의 운행 중에 발생하는 지진, 강풍과 같은 악천후에 대한 운행계획을 철저히 수립해야 한다.

현재 국내에서 개발중인 고무차륜 AGT 시스템과 유사한 무인운전 경량전철을 운영 중인 일본, 영국, 프랑스 등에서는 시스템과 승객의 안전성 확보를 위해 고유의 안전운영규정을 제정하여 운용하고 있으며, 정기적으로 이를 개정함으로써 새로운 기술개발 추이를 반영하고 있다.<sup>(1-4)</sup> 국내에서는 경량전철시스템 기술개발사업의 일환으로 개발 중인 고무차륜 AGT 시스템 특성을 반영하여 안전운영규정을 작성하였다. 이렇게 작성된 안전운영규정에서는 시스템의 안전성 확보를 위해 필요한 운영조각과 각 담당자의 역할, 운전방식(무인운전, 수동운전)에 따른 사

고 발생 시의 시스템 운영방안, 사고 및 자연재해 발생시 연락, 조사, 보고, 복구체계, 예상되는 위험항목에 따른 대처요령 등을 제시하였다.<sup>(5,6)</sup> 이러한 안전운영규정에서는 강풍, 지진 등 악천후(자연재해)가 발생할 경우 승객의 안전을 위해 차량의 운행속도를 제한하거나, 운행조건에 따라 운행중단을 해야하는 경우를 규정해야 한다.

본 논문에서는 차량과 구조물(인프라) 사이의 다양한 하중조건과 경계조건을 정의한 후 강풍과 지진의 정도에 따라 차량의 동적 거동을 해석하고, 이러한 결과와 경량전철의 운행패턴 등을 종합적으로 고려하여 강풍과 지진에 대한 차량의 안전 운행속도를 제안하였다.

### 2. 해석 모델링

#### 2.1 차량 모델링

동특성 해석을 위한 고무차륜 AGT 차량의 모델링은 차량의 개발결과를 반영하였으며, 크게 차체, 부수대차(trailing bogie), 동력대차(powering bogie)로

구성된다. 또한 대차는 대차와 차체의 상대운동을 위한 선회프레임(steering frame), 주행궤도에 설치되는 안내레일과 접촉하는 안내프레임(guidance frame), 액슬 등의 강체들로 구성된다.<sup>(7-8)</sup>

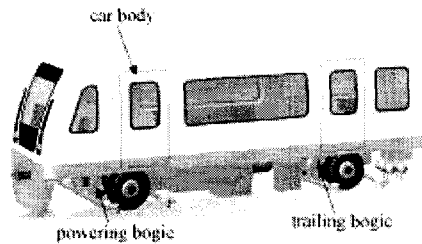


Fig. 1 Rubber-tired AGT light rail vehicle for dynamic analysis

### 2.1.1 차체

Fig. 2와 차체의 모델을 보여주며, Table 1은 동특성 해석을 위한 차체의 만차 및 공차상태에서의 차체에 대한 질량, 관성모멘트 등을 보여준다.



Fig. 2 Modeling of car body for dynamic analysis

Table 1 Mass and moment of inertia for car body

	Full loaded	Tared
Mass ( kg )	14,400	8,400
Rolling $I_{xx}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	20,600	12,000
Pitching $I_{yy}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	100,500	58,300
Yawing $I_{zz}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	100,500	58,300

### 2.1.2 대차

전동기와 연결되어 차량을 추진, 안내, 지지하는 동력대차와 차체를 지지하여 안내기능만을 수행하는 부수대차를 각각 모델링하였다. 따라서 감속기(액슬 박스)는 동력대차에만 설치된다. Fig. 3은 대차의 상세설계 결과를 반영한 모델링을 보여주며, Table 2는 대차 구성요소의 질량과 관성모멘트를 나타낸다.



Fig. 3 Modeling of bogie for dynamic analysis

Table 2 Mass and moment of inertia for bogie

Components	Mass(kg) & moment of inertia(kg·m <sup>2</sup> )	Trailing bogie	Powering bogie
Steering frame	Mass	235	235
	Rolling $I_{xx}$	43.2	43.2
	Pitching $I_{yy}$	35.5	35.5
	Yawing $I_{zz}$	63.5	63.5
Guidance frame	Mass	250	250
	Rolling $I_{xx}$	340	340
	Pitching $I_{yy}$	1050	1050
	Yawing $I_{zz}$	465	465
Axle & gear box	Mass	642	882
	Rolling $I_{xx}$	79.8	140
	Pitching $I_{yy}$	8	14
	Yawing $I_{zz}$	79.8	140
Tire	Mass	145	145
	Pitching $I_{yy}$	10	10
	Diameter	940mm	940mm
guide wheel	Mass	4.16	4.16
	Yawing $I_{zz}$	0.02	0.02
	Diameter	200mm	200mm

### 2.1.3 강체 사이의 연결 요소

대차는 차체와 상대 회전운동을 통해 차량을 안내 조향하므로 회전조인트(revolute joint)로 연결하고, 선회 프레임과 안내 프레임 사이에는 수직방향과 횡방향의 과도한 상대속도를 방지하기 위해 수직댐퍼와 횡방향 댐퍼를 사용하였다. 차체와 선회프레임 사이의 회전운동(yawing)은 댐퍼와 스프링 요소를 사용하였다. 4개의 안내륜과 안내 프레임, 타이어와 액슬 사이는 각각 회전조인트로 연결되며, 액슬과 선회프레임 사이의 과도한 좌우 방향 변위를 방지하기 위해 스톱퍼(stopper)와 버퍼(buffer)를 설치하였다. 사용된 스프링과 댐퍼특성은 Table 3과 같다.

Table 3 Coefficients of springs and dampers for bogie

	Stiffness ( N/m )	Damping (Ns/m)	Action body	Base body
Vertical damper	0	7,840	Steering frame	Guidance frame
Lateral damper	0	19,600	Steering frame	Guidance frame
Yaw damper	0	14,670	Carbody	Steering frame
Yaw spring	5,900	0	Carbody	Steering frame

선회프레임과 액슬 사이의 상대변위를 방지하는 공기스프링, 액슬의 추진력을 선회프레임에 전달하는 역할을 하는 8개의 부싱, 그리고 주행면과 타이어 접촉력 특성은 Table 4와 같다.

Table 4 Coefficients of air spring, bushing, tire

	Stiffness ( N/m , N/rad )			
	X, Y, Z	R <sub>X</sub>	R <sub>Y</sub>	R <sub>Z</sub>
Air spring	156,000	0	0	0
Bushing	10,792,000	3,820	1,570	3,820
Tire Force	vertical 1143700 lateral 450000	zero slip 0.4		

## 2.2 주행궤도 모델링

고무차륜 AGT의 선로는 주행노면과 안내레일로 구성되며, 직선구간, 완화구간, 곡선구간으로 모델링된다. 해석에 사용된 선로 조건에는 곡선반경별 선로길이, 완화곡선 길이, 캔트량이 정의된다.<sup>(8,9)</sup>

## 3. 동특성 해석

### 3.1 해석조건

해석 대상인 고무차륜 AGT 경량전철 차량의 최고 운행속도는 60km/h이므로 강풍이나 지진 발생시 차량의 안전운행속도를 규정하기 위해 다양한 차량속도와 이들 조건을 이용하여 차량의 동적 거동을 해석하였다.

#### 3.1.1 강풍 해석조건

풍속에 따라 차량의 측면에 의해 동압 (Dynamic pressure)이 작용하는 것으로 가정했으며, 풍향은 차량의 측면 방향이 위험상황으로 정의했다. Fig. 4는 이들의 관계를 보여준다.

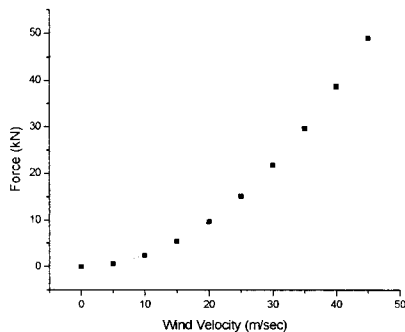


Fig. 4 Resultant forces v.s. wind velocities

#### 3.1.2 지진 해석조건

관측된 지진의 가속도 파형에 전체 차량(2량 1편성)의 질량을 곱하여 지진력을 산출한 후 안내레일

과 주행면을 통해 차량에 적용하였다. Fig. 5는 해석에 사용된 지진의 파형을 일부를 보여준다.

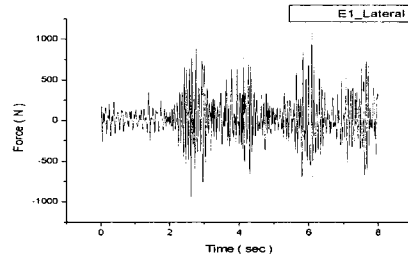


Fig. 5 Resultant forces of earthquakes

## 3.2 해석결과

강풍과 지진의 크기, 차량속도, 선로의 곡선반경 등의 변화에 따른 차량의 동특성을 해석하였다.

### 3.2.1 강풍 해석결과

강풍의 크기에 따라 차체와 대차의 연결부위, 안내레일과 안내륜 사이에서 파생되는 힘과 가속도의 크기를 해석하였다. Fig. 6과 7은 이들 조건에 대한 해석결과를 보여준다.

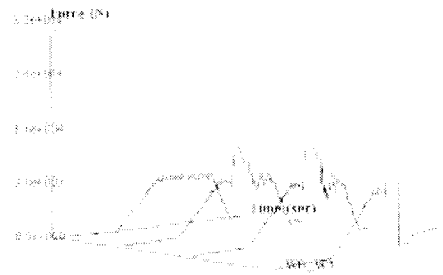


Fig. 6(a) Contact forces between guide wheel and rail at curve radius 60m, vehicle velocity 30km/h as changing wind velocities(0~50m/s)

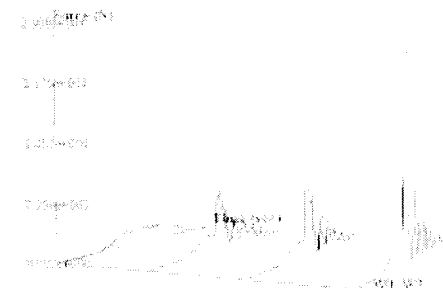


Fig. 6(b) Contact forces between guide wheel and rail at curve radius 100m, vehicle velocity 36km/h as changing wind velocities(0~50m/s)



Fig. 7(a) Accelerations of C.G. at straight track, vehicle velocity 30km/h as changing wind velocities (0~50m/s)



Fig. 7(b) Accelerations of C.G. at straight track, vehicle velocity 40km/h as changing wind velocities (0~50m/s)

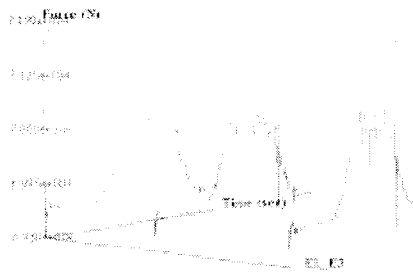


Fig. 8(a) Resultant forces between bogie and car body at curve radius 60m, vehicle velocity 36km/h as changing earthquake mode

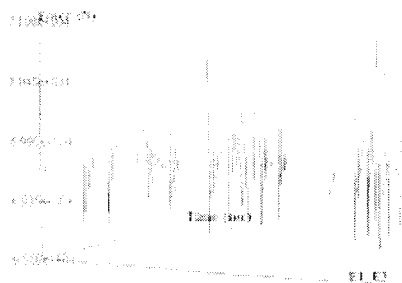


Fig. 8(b) Resultant forces between bogie and car body at curve radius 100m, vehicle velocity 36km/h as changing earthquake mode

### 3.2.2 지진 해석결과

다양한 지진의 파형에 따라 차체와 대차의 연결부위, 공기 스프링에서 파생되는 힘의 크기를 해석하였다. Fig. 8은 지진의 크기에 따라 대차와 차체의 연결부위에 파생되는 힘의 크기는 해석한 결과이다.

## 4. 결론

고무차륜 AGT 경량전철에 대해 강풍과 지진에 대한 차량 동특성 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 풍속이 20~25m/s인 경우 차량에 비상정지를 예고한다. 25m/s 이상인 경우 역에서 정차 중인 열차는 출발을 억제시키고, 운행 중인 열차는 30km/h 이하로 다음 역까지 운행한 후 출발을 억제시킨다.

2) 진도 4(지진 가속도가 0.8m/s<sup>2</sup> 이상)이상인 경우 전체 차량을 비상 정지시킨다.

## 후기

건설교통부의 지원으로 한국철도기술연구원이 주관하는 경량전철 기술개발사업으로 수행되었으며, (주)우진산전 관계자에게 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Chris Edwards, "Railway Safety Cases," Safety and Reliability of Software Systems 20th CSR Workshop, pp 317-322. 1999.
2. David D., "Rail Safety," Reliability Engineering and System Safety, pp 291-297, 2001.
3. London Underground Limited, "Railway Safety Case," 2001.
4. 日本東京臨海新交通, "運轉取扱心得," 1995.
5. 한국철도기술연구원, "경량전철시스템 기술개발사업 3차년도 결과보고서(분야 : 종합시스템엔지니어링)," 2001.
6. 한국철도기술연구원, "경량전철시스템 기술개발사업 4차년도 결과보고서(분야:종합시스템엔지니어링)," 2002.
7. 우진산전, "경량전철시스템 기술개발사업 3차년도 결과보고서(분야 : 차량시스템)," 2001.
8. 우진산전, "경량전철시스템 기술개발사업 4차년도 결과보고서(분야 : 차량시스템)," 2002.
9. 한국철도기술연구원, "경량전철 토목구조물 설계 기준에 관한 연구," 2002.