

고무차륜 AGT 경량전철 차량의 주행특성 해석

김연수*(한국철도기술연구원), 백남욱(한국철도기술연구원), 임태건(한국철도기술연구원)

Running characteristics of rubber-tired AGT light rail vehicle

Y. S. Kim(KRRI), N. U. Baeg(KRRI), T. K. Lim(KRRI)

ABSTRACT

Dynamic model of the Korea standardized rubber-tired AGT light rail vehicle, and boundary conditions between vehicle and infrastructures (running track, guidance rail) were defined to analyze vehicular vibration behaviors occurred at the worst condition for straight running track. Using the commercialized software RecurDyn, resultant forces and vibration accelerations of car body and bogies were analyzed. Based on the Korea performance test criteria for urban transit, vertical and lateral vibration of car body were calculated and evaluated as wearing condition of guide wheels. And resultant forces between bogie guidance frame and guide rail in straight running track were analyzed. As the results, the Korea standardized rubber-tired AGT light rail vehicle satisfied the performance criteria and design requirement.

Key Words : Rubber-Tired AGT(고무차륜 AGT), Light Rail Vehicle(경량전철 차량), Running Characteristics(주행특성), Vibration Analysis(진동해석)

1. 서 론

경량전철 시스템은 버스와 지하철의 중간규모 수송능력(시간·방향당 5,000~30,000 명)을 가지며, 무인운전으로 운행되는 첨단 도시철도 시스템이다. 기존의 전동차(지하철)에 비해 건설비 및 운영비가 저렴하고, 버스나 승용차와 같은 도로교통수단에 비해 정시성, 신속성, 환경친화성이 우수한 장점을 가지고 있다. 따라서 선진국에서는 1970 년대부터 경량전철 개발을 시작하여, 현재는 매우 다양한 시스템이 운영 중에 있으며, 국내에서는 하남, 김해, 의정부, 용인, 부산 등에서 건설을 추진 중에 있다.

다양한 경량전철시스템 중 고무차륜 AGT 시스템은 기존의 철도차량과는 달리 가감속 성능, 등판 성능, 주행 중 소음 저감을 위해 고무타이어를 주행륜으로 사용한다. 기존 철도차량의 경우 원추형 차륜이 철계레일을 따라 차량을 조향하고, 안내한다. 반면, 고무차륜 AGT 차량은 고무타이어가 도로와 유사한 주행궤도면을 주행하고, 대차의 안내프레임에 설치된 안내륜이 주행궤도 측벽에 설치되는 안내레일을 따라 주행하면서 차량의 안내 및 조향을 수행한다. 따라서 주행궤도와 안내레일의 설치

조건에 따른 차량의 진동특성이 승객의 승차감과 시스템 전체의 성능에 큰 영향을 미치게 된다.(1-4)

본 논문에서는 개발 중인 한국형 표준 고무차륜 AGT 경량전철 차량에 대해 주행궤도와 안내레일의 설치공차 조건에 따라 주행 중에 발생하는 진동특성과 안내륜에 작용하는 힘을 해석하였다. 또한 도시철도법 시행령 제 25 에 규정된 도시철도 차량 성능시험기준에 관한 규정에 따라 차량의 수직 및 횡방향의 진동특성을 정량화하고, 개발된 차량시스템이 관련 규정을 만족한다는 것을 증명하였다.

2. 동적 모델링

2.1 차량의 모델링

동특성 해석을 위한 고무차륜 AGT 차량의 모델링은 차량의 개발 목표사양을 적용하였으며, 모델은 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 구성되며, 차량의 주행운동은 동력대차에 의해 수행된다.(2-4)

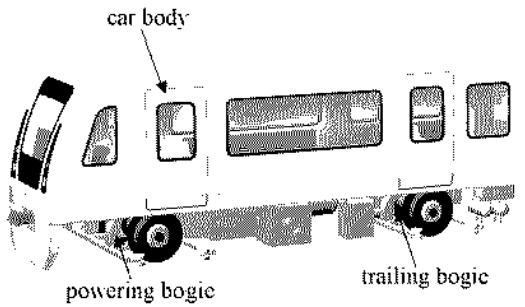


Fig. 1 Rubber-tired AGT light rail vehicle for dynamic analysis

2.1.1 차체

Fig. 2 는 본 연구에서 사용된 차체 모델을 보여주며, Table 1 은 차체의 만차 및 공차상태에서의 질량, 관성모멘트 등을 보여준다.

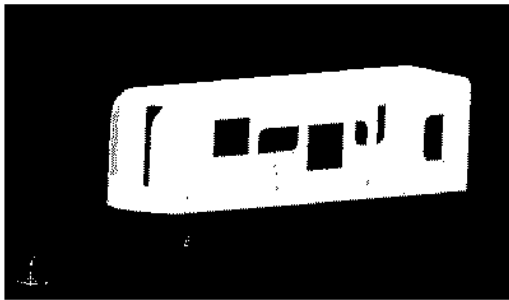


Fig. 2 Modeling of car body for dynamic analysis

Table 1 Mass and moment of inertia for car body

	Maximum load	Tare
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

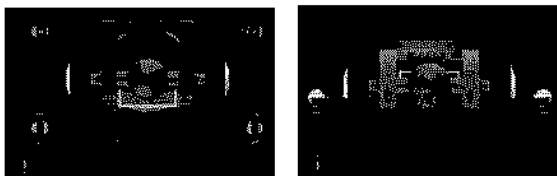


Fig. 3 Modeling of bogie for dynamic analysis

2.1.2 대차

전동기와 연결되어 차량을 추진, 안내, 지지하는 동력대차와 차체를 지지하여 안내기능만을 수행하는 부수대차를 각각 모델링하였다. 따라서 감속기(엑셀박스)는 동력대차에만 설치된다. Fig. 3 은 대차

의 상세설계 결과를 반영한 모델링을 보여주며, Table 2 는 대차 구성요소의 질량과 관성모멘트를 나타낸다.

Table 2 Mass and moment of inertia for bogie

	Mass(kg) & moment of inertia($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	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	200	200

2.1.3 감체사이의 연결요소

대차는 차체와 상대 회전운동을 통해 차량을 안내 조향하므로 회전조인트(revolute joint)로 연결하고, 선회프레임과 안내 프레임 사이에는 수직방향과 횡방향의 과도한 상대속도를 방지하기 위해 수직댐퍼와 횡방향 댐퍼를 사용하였다. 차체와 선회프레임 사이의 회전운동(yawing)은 댐퍼와 스프링 요소를 사용하였다. 4 개의 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 3 과 같다.

Table 3 Coefficients of springs and damper 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	Car body	Steering frame
Yaw spring	5,900	0	Car body	Steering frame

선회프레임과 액슬 사이의 상대변위를 방지하는 공기스프링, 액슬의 추진력을 선회프레임에 전달하

는 역할을 하는 8 개의 부싱, 그리고 주행면과 타이어 접촉력 특성은 Table 4 와 같다.

Table 4 Coefficients of air spring, bushing, tire

	Stiffness (N/m, N/rad)			
	X, Y, Z	R _X	R _Y	R _Z
Air spring	156,000	0	0	0
Bushing	10,792,000	3,820	1,570	3,820
Tire Force	Vertical : 1,143,700 lateral : 450,000	Zero slip 0.4		

2.2 주행궤도의 모델링

주행궤도의 모델링은 크게 주행면과 안내레일의 모델로 분류되며, 각각은 개발 목표사양의 최대의 시공공차로 모델링되었다. Table 5 와 Fig. 4 는 이들의 허용 시공공차와 완성된 모델을 보여준다.(1)

Table 5 Allowable tolerances of guidance rails and running surface in the rubber-tired AGT light rail system

Items	Tolerances
Distance between guidance rails	2,900mm+10mm
Running surface irregularity	3mm/3,000mm

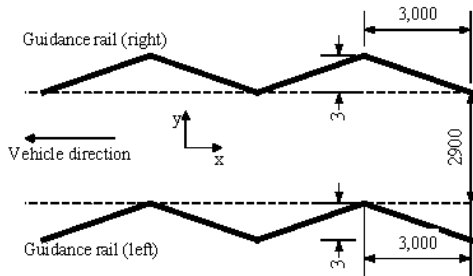


Fig. 4(a) Maximum tolerances of guidance rails

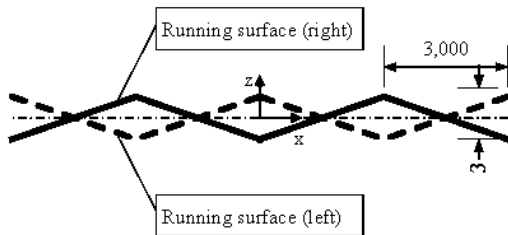


Fig. 4(b) Maximum tolerances of running surface

3. 주행특성 해석

3.1 해석조건

Fig. 4 와 같은 노선조건의 100m 주행궤도를 따라 차량의 주행속도를 변화시키면서 동특성 해석을

수행하였다. 또한 안내륜의 직경변화(초기 직경 200mm, 최대 마모 직경인 194mm)에 따라 공차중량 12ton 조건으로 동특성 해석을 수행하였다. 실제로는 2 량 1 편성을 기본편성으로 4 량편성, 6 량편성이 운행되지만, 신속하고 원활한 해석을 위해서 1 량 만을 모델링하여 해석하였다

3.2 해석결과

도시철도 차량 성능시험 기준에 따라 부수대차와 동력대차 중심 상의 차체바닥에서의 수직방향과 수평방향 진동가속도를 차량의 주행속도에 따라 해석하였다.

Fig. 5 는 안내륜의 직경이 초기 정상상태일 때 차량속도를 변화시키면서 부수대차 중심선상의 차체 수평방향 진동가속도를 해석한 결과를 보여준다. 속도가 증가할수록 진동가속도가 커지는 것을 알 수 있다.

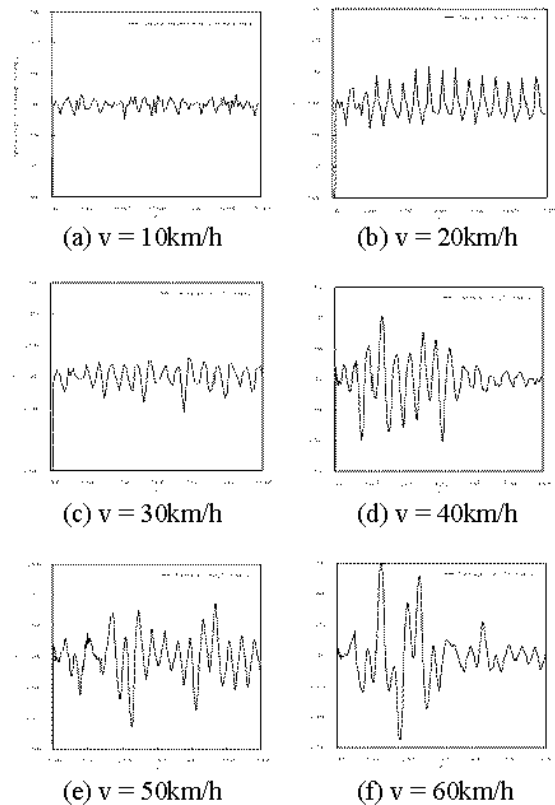


Fig. 5 Lateral vibration acceleration on trailer bogie in case of initial guidance wheel

동일한 방법으로 안내륜의 직경이 초기 조건일 때 부수대차, 동력대차 중심선상의 차체 바닥에서 수직방향 진동가속도, 안내륜의 직경이 최대 마모 조건 일 때 부수대차, 동력대차 중심선상의 차체 바닥에서 수직방향 및 수평방향 진동가속도를 해석

하였다. 이를 이용하여 각 속도별로 진동가속도의 최대진폭을 구한 후 중력가속도를 나눠서 도시철도 차량성능시험 기준에서 제시한 진동가속도 평가기준과 비교하였다.

Fig. 6 은 부수대차 중심선 상의 차체바닥에서 수평방향과 수직방향의 진동가속도를 평가한 결과이다. 차량이 직선선로를 주행하는 경우 차체의 진동에 대한 안내륜 마모의 영향은 거의 없었다. 또한 개발된 차량의 횡방향 진동특성은 양호 또는 우수였지만, 수직방향의 진동특성은 보통수준으로 분석되었다.

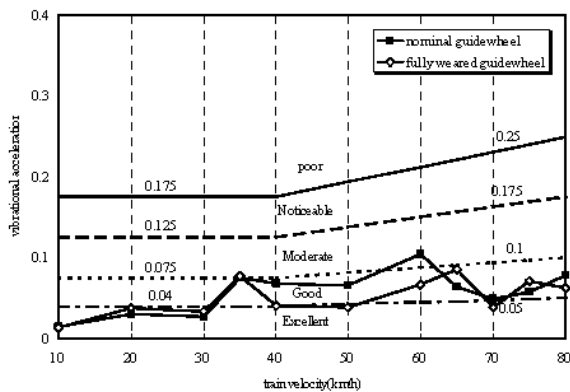


Fig. 6(a) Vibration Evaluation criteria for car body lateral direction on trailer bogie

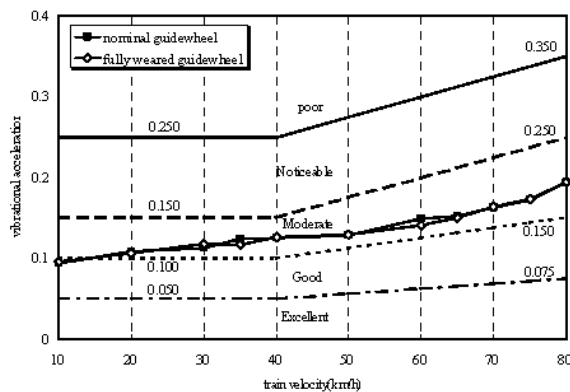
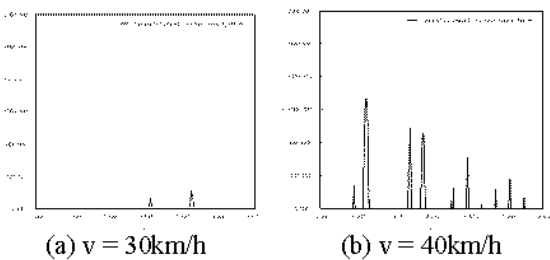
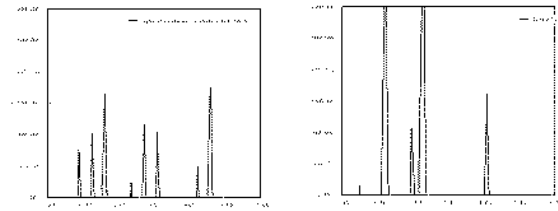


Fig. 6(b) Vibration Evaluation criteria for car body vertical direction on trailer bogie



(a) v = 30km/h

(b) v = 40km/h



(c) v = 50km/h

(d) v = 60km/h

Fig. 7 Resultant forces between guidance wheel and guidance rail in case of initial guidance wheel

주행 중에 안내륜과 안내레일 사이의 작용력을 해석하였다. 속도의 증가에 따라 차량의 진동이 증대되면 이러한 작용력도 크게 증가하였다. 반면 안내륜이 마모되면 작용력은 감소하는 경향을 보였다. Fig. 7 은 안내륜이 정상상태일 때 안내륜과 안내레일 사이의 작용을 해석한 결과이다.

4. 결 론

개발 중인 한국형 표준 고무차륜 AGT 경량전철 차량에 대해 주행제도와 안내레일의 최대 설치공차 조건에 따라 주행 중에 발생하는 차체의 횡방향과 수직방향의 진동특성을 해석한 결과 도시철도 차량 성능시험기준을 모두 만족하였다. 또한 안내륜과 안내레일 사이에 작용하는 힘은 속도에 따라 증가하였고, 안내륜이 마모될수록 감소하였다. 이들은 또한 주행제도의 설계자료로 활용 가능하다.

후 기

건설교통부의 지원으로 한국철도기술연구원이 총괄 주관하는 경량전철시스템 기술개발사업으로 수행되었음을 알려드립니다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원, "경량전철시스템 기술개발사업 5 차년도 결과보고서(분야:종합시스템 엔지니어링)," 2003.
2. 우진산전, "경량전철시스템 기술개발사업 4 차년도 결과보고서(분야: 차량시스템)," 2002.
3. 김연수, 박성혁, 백남욱, "악천후에 대한 고무차륜 AGT 경량전철의 안전 운행속도," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 2003.
4. 김연수, 윤성철, 백남욱, "노선특성에 따른 고무차륜 AGT 경량전철의 제한속도," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 2004.