고무차륜 경량전철 국산화 대차의 주행안정성 향상을 위한 동특성 해석

Dynamic Analysis for Improvement of Running Stability of Rubber Tired AGT Localization Bogie

엄 범 규*·이 희 성†

Beom Gyu Eom and Hi Sung Lee

(2011년 11월 24일 접수 ; 2012년 3월 14일 심사완료)

Key Words : Rubber Tired AGT Localization Bogie(고무차륜 경량전철 국산화 대차), Running Stability(주행안정성), Suspension(현가장치), Ride Comfort(승차감)

ABSTRACT

The LRT(light rail transit) system, which has medium transport capacity between subway and bus is an advanced transportation system. It has many benefits like cheap construction and operational cost down through driverless and flexible route planning. The rubber tired AGT(K-AGT) is a kind of LRT, which has rubber wheels and side guides. The side guides has many advantages, but brings vibration and noise problems from the friction between the guide rail and the wheels. This is the major source for the of passengers' discomfort. The purpose of this paper is to analyze dynamic characteristics and running stability of the rubber tired AGT localization bogie if the AGT's speed is increased from 70 km/h to 80 km/h. The current design parameters of bogie suspension, as it is designed, was examined to satisfy the comfort index of the railway vehicle in performance test.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

국내 도시철도 기술은 초기에는 외국 기술을 도입하여 기술 발전을 이어 왔고 주요 도시의 도시철도 확충 및 신설에 따라 차량 시스템과 부품 설계 및 제작/운영 기술이 축적되어 왔다. 경량전철의 경우에는 하남, 의정부, 김해를 비롯해 여러 지자체에서 상용화하려는 시도에 비해 국내의 제반 기술은 도입 수준이다. 특히, 경량전철의 경우 진동이나 소

음 등 다양한 특성이 설계 기준에 부합되는지 여부를 설계 시 반드시 확인하여야 하고, 이러한 설계 자료를 확보하기 위해서는 경량전철의 동적 거동 해석이 요구되고 있다.

고무차륜 경량전철(K-AGT)은 주행 노면과는 고무차륜에 의해 지지되고 철제 차량에 비해 상대적으로 저속 주행하므로 비교적으로 안전하다고 볼 수 있으나, 안내면이 차량의 측면부에 건설되어 있기 때문에 차량이 고속으로 곡선부를 진입하거나, 선로 마모나 불규칙도 등으로 인한 위험이 발생할 수 있다. 또한, 속도 향상에 따른 승객이 느끼는 승차감은 차량의 여러 현가장치들의 특성과 선로의 조건에 의해 결정되기 때문에 이에 대한 연구를 수행하고, 이를 활용하여 승차감 향상에 적용하여야 한다⁽¹⁾.

† 교신저자; 정회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원
E-mail : hslee@seoultech.ac.kr
Tel : (02)970-6877, Fax : (02)971-6877

* 정회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량
시스템공학과

이 연구에서는 현재 국내 경전철 차량업체에서 개발된 고무차륜 경량전철 국산화 대차(Fig. 1(a) 3D 해석모델 참고)의 주행안정성 향상을 위한 동특성 해석을 수행하고자 한다. 현재 고무차륜 경량전철 대차의 최대 운행속도는 70 km/h이고, 향후 80 km/h의 최대 운행속도로 노선에 적용할 목적으로 이에 성능시험에서 요구하는 차량의 승차감 지수를 만족하기 위하여, 기설계 변경되어 있는 대차 현가장치의 계수를 검토하여야 한다.

이를 위해, 먼저 고무차륜 경량전철 국산화 대차의 특성을 분석하고, 해석 모델을 개발하였다. 이를 이용하여 최대 운행속도 향상에 따른 주행안정성 해석을 수행하였고, 해석결과를 통한 변경되어 있는 대차 현가장치의 계수를 해석적으로 검토하였다. 참고로 주행안정성 해석은 동역학 상용 해석프로그램인 MSC. ADAMS 기반의 ADAMS/View⁽²⁾을 사용하였다.

2. 고무차륜 경량전철 국산화 대차⁽¹⁾

2.1 개요

고무차륜 경량전철 차량은 콘크리트로 포장된 궤도상을 궤도측면 양측에 설치된 안내레조에 의해 유도되어 주행된다.

(a) 3D model

(b) Actual photos of bogie

Fig. 1 Rubber tired AGT localization bogie

고무차륜 경량전철 국산화 대차는 차량의 견인전 동기로부터 견인력을 주행노면에 전달하는 동력대차(이하 “동대차”라 한다.)와 동대차에 의해 추종되는 중동대차(이하 “중대차”라 한다.) 2종류로 구분된다. 1량의 차량에는 동대차와 중대차 각각 1대씩 취부되어 있다. 대차의 형식은 1축 대차 방식으로 차체와 대차프레임(선회프레임) 사이에 원형의 선회 베어링이 취부되어 선회프레임 아래의 대차 전체가 회전하며, 궤도의 안내레일을 따라 4개의 안내륜에 의해 차량이 조향된다. 또한 고무타이어가 장착된 경량전철은 작은 곡선 반경에서도 차량의 곡선통과가 용이하며, 고무차륜을 적용해 스프링 하부 질량을 최소화하여 승차감 향상을 도모하였다.

고무차륜 경량전철 국산화 대차는 동작 특성과 안정성, 승차감이 우수한 1축 보기 방식의 대차를 적용하였으며 대차 실제 외형사진은 Fig. 1(b)와 같다.

2.2 대차의 주요 특징

(1) 대차의 경량화 및 공기스프링 설계

고무차륜 경량전철 국산화 대차는 경량화 설계를 하는데 있어 주변 부속장치를 생략함으로써 대차를 경량화 하였으며, 공기스프링 취부 높이를 높여 롤링 효과를 향상시켰다. 또한, 공기스프링의 채용함으로써 승객이 느끼는 승차감을 향상시켰다.

(2) 스프링 하부 질량(unsprung mass)의 최소화

철도차량에 있어서 스프링 하부 질량은 대차의 1차 현가장치 밑에 취부된 구성품의 질량이며 윤축의 중량을 의미한다. 스프링 하부 질량은 차량의 승차감에 영향을 주는 큰 요소로 작용하며, 스프링 하부 질량이 크면 차량이 주행하면 불규칙도에 의하여 가진 시 충격에너지가 커서 1차 현가장치 및 2차 현가장치를 통하여 차체에 전달되는 진동이 크게 된다. 따라서 고무차륜 경량전철 국산화 대차는 승차감 향상 및 선로 보호를 위하여 가능한 스프링 하부 질량을 최소화 하였다.

(3) 고무타이어 차륜(저소음 및 저진동) 채용

도심내의 주변 환경 및 승객에게 쾌적성을 제공하기 위하여 철도차량 운행 시 발생하는 차량의 외부소음 및 내부소음을 가능한 저감하였으며, 진동을 저감하기 위해 고무차륜 경량전철 국산화 대차는

철체차륜 및 레일로 구성된 복잡한 궤도 대신에 고무타이어 차륜 및 간단한 콘크리트 주행로를 채용하여 철체차륜에서 발생하는 전동소음/진동원을 제거 및 최소화 하였다.

(4) 마모부위의 최소화

철도차량이 주행할 때 대차내 모든 부위에서 마모

Table 1 Properties and specifications of rubber tired AGT localization bogie

Divisions			Properties and specifications
Form			Rubber tired single axle bogie type
Guidance way			Side lateral riding
Main components			- Wheelset/driving wheel - Guidance device, - Rotating bogie frame - Guidance bogie frame - Parallel link/Rotating device - Suspension assembly - Rotating device, etc
Main a i n - S p e c i f i c a t i o n s	Tread		1,700 mm
	Wheel base		5,300 mm
	Driving wheel radius	Empty	2750 kg : 445 mm
		Full -loaded	4500 kg : 432 mm
	Distance between centers-air spring		980 mm
	Guidance rail space		2,900 mm
	Bogie height		929 mm (center height of driving wheel : 445 mm)
	Bogie mass		3,500 kg(1 car + 2 bogie)
	Braking system		Disk braking system
	Driving system		Right angle-Cardan jointed driving
Driving wheel		E315/ E70 R20 KRA04	

Table 2 Operational requirements

Divisions	Operational requirements
Guidance gage	2,900 mm
Steering angle of bogie	5.7°
Minimum curve radius	Main line : more than 40 m Side line : more than 30 m
Maximum driving speed	60 km/h (performance maximum : 70 km/h)
Maximum acceleration	3.5 km/h/s
Maximum deceleration	4.5 km/h/s
Air brake	Regenerative braking-fail
Temperature	-25 ℃ ~ 40 ℃
Road surface	Concrete

현상 및 마찰음을 발생한다. 이에 따라 소음저감방안의 일환으로서 대차내 마모부위를 최소화하는 설계를 하였으며, 특히 일반 대차와는 달리 고무차륜 경량전철 국산화 대차 내에는 제동장치(디스크/캘리퍼)외에 마모부위는 없도록 하였다.

(5) 기초 제동 장치

고무차륜 경량전철 국산화 대차의 기초제동장치 조립은 차축에 취부되며, 디스크, 캘리퍼, 패드 및 실린더 등으로 구성된다. 기초제동장치는 유·공압 변환 실린더를 사용하여 유압으로 캘리퍼를 작동시켜 제동 작용을 한다. 차체의 제동 파이프로부터 공기가 실린더에 유입되면 실린더에서는 공기압을 유압으로 변환하여 캘리퍼를 작동시키며 기초제동장치는 유압식이므로 공기압 실린더에서 필요로 하는 자동 간극장치를 적용하지 않게 하였다.

2.3 대차의 주요 제원

(1) 대차 제원 및 사양

고무차륜 경량전철 국산화 대차의 제원 및 사양은 Table 1과 같다.

(2) 사용 환경

고무차륜 경량전철 국산화 대차의 사용환경은 Table 2와 같다.

3. 주행안정성 해석

3.1 해석모델

(1) 설계도면

이 연구에서는 고무차륜 경량전철 국산화 대차의 주행안정성 향상을 위한 동특성 해석을 위하여 다음과 같은 설계도면 및 3D 해석 모델(Fig. 1(a) 참고)을 사용하였다. 또한, Fig. 2는 국내 경전철 차량업체에서 제공받은 설계 2D 도면으로서 고무차륜 경량전철 국산화 대차의 동대차 조립, 현가장치의 주요 구성 및 치수를 나타내고 있으며 동역학 상용 해석프로그램인 ADAMS/View 내에서의 해석모델을 개발하는데 있어 관련 자료를 참고하였다.

(2) 차량시스템 모델링

고무차륜 경량전철 대차의 주행안정성 향상을 위

한 동특성 해석을 위하여 차량시스템 모델링 연구를 하는데 있어 시험결과와 해석결과를 비교하여 신뢰성이 입증된 해석모델 자료를 획득하여 모델링 작업에 참고하였다. 참고문헌⁽³⁾에서 사용된 해석모델은 이 연구에서 사용되는 고무차륜 경량전철 국산화 대차의 이전 모델(이하 “변경전”라 한다.)로서, 현 모델과는 현가장치 구성이 다른 점이 있긴 하나, 차량시스템 모델링 연구에 있어 충분히 신뢰성 있는 자료라고 판단되어 사용하였다.

차량시스템 모델링 연구하는데 있어, 먼저 해석모델은 해석의 효율성을 높이기 위해 동적 거동을 하는 부분만을 중점으로 하여 해당프로그램 내에서 3D 해석 모델을 개발하였다.

먼저, Pro-E 3D 설계프로그램을 이용하여 모든 부품이 상세하게 구현된 모델에서 주행에 영향을 미치는 부품만을 남기는 작업을 진행하였다. 이 과정에서, 대차를 제어하는데 필요한 전기 부품과 오일 배관 및 상세 볼트 및 너트 등이 제거하였고,

현가장치와 타이어 등은 ADAMS/View 해석프로그램 상에서 구현해야하므로 Pro-E 3D 파일에서 제거되었다. 다음으로 간략화 된 모델을 해석프로그램에서 import 할 수 있도록 Pro-E 3D 모델 파일을 재차 igs 파일로 바꾸는 작업을 진행하였다. 마지막으로 상기의 해당 모델에서 차체, 현가장치, 타이어 등을 추가 모델링하였다.

개발된 차량시스템 해석모델은 크게 차체, 대차프레임(안내, 선회), 차축, 현가장치, 안내륜, 레일 총 6가지로 나뉘질 수 있다. Fig. 3은 import된 대차모델에서 차체와 각종 현가장치와 타이어 등을 모두 구현한 고무차륜 경량전철 차량의 해석모델이며 관련 각 부품들의 제원값은 참고문헌⁽¹⁾에서의 자료를 사용하였다.

(3) 현가장치 모델링

고무차륜 경량전철 국산화 대차의 현가장치의 구성은 Fig. 4와 같다. 현가장치 내 강성효과로서는 안내프레임과 레일 사이의 완충장치인 타이어(K1), 안내프레임과 선회프레임 사이에서 상하 운동을 완충시켜주는 공기스프링(K2), 횡가속도나 원심가속도에 의하여 차체/대차의 횡방향 변위를 제한하는 좌우

(a) Driving bogie assembly

(b) Suspension assembly

Fig. 2 Design drawing(2D-model)

Fig. 3 Analysis model of rubber tired AGT localization bogie(ADAMS/View model)

Fig. 4 Compositions of bogie suspension

스트퍼(K3), 좌우 완충장치(K4)로서 총 4가지로 구성되어 있다. 또한 감쇠효과로서는 상하 운동의 급격한 변위의 변화를 막아주는 상하댐퍼(C1), 곡선 주행시 공기스프링을 통하여 차체로 전달되는 좌우 방향 진동가속도를 감쇠하는 좌우댐퍼(C2), 선회프 레임과 차체 사이에서 차체에 대한 대차의 과도한 회전을 막아주는 요잉댐퍼(C3)로서 총 3가지로 구성되어 있다.

추가로 현가장치 모델링 시 대차에서 동적 거동을 하는 부품들의 상호간 거동 자유도를 설정하기 위해 해석프로그램 내에서 조인트 방법을 사용하였다. 각각의 부품들을 각각의 local marker 선택 방법을 사용하여 상호간에 자유도를 구속하게 하였으며 실제 고무차량 경량전철 국산화 대차의 거동과 유사하게 구현하였다. 또한, 현가장치 모델링 시 사용되었던 각 방향의 현가장치 물성치 값은 Table 3과 같다.

(4) 레일 모델링

레일 3D 모델링 연구는 실제 주행시험에서의 사용되는 곡선반경 R480m인 구간을 적용하였으며 해석모델은 Fig. 5와 같다. 측방안내방식 경전철의 특성상 옆면에 가이드 레일을 구성하기 위하여 “ㄷ”자 형태를 반시계 방향으로 90도 회전시킨 형상을 하고 있다. 또한 개발한 레일 모델에 고무차륜 경량전철 국산화 대차가 놓인 형상은 Fig. 6과 같으며 레일과 주행륜(타이어), 안내륜간의 접촉 상태를 확인할 수 있다.

Table 3 Suspension properties

Divisions			Properties(K, C)	Remarks
Tire	Empty		1.163 kN/mm	K1
	Full-loaded		1.234 kN/mm	
Air spring	Vertical	Static	123 N/mm	K2
		Dynamic	312 N/mm	
	Lateral	Static	147.5 N/mm	
		Dynamic	172.5 N/mm	
Lateral stopper			847.7 N/mm	K3
Lateral buffer			1274 N/mm	K4
Vertical damper			10 kN/m/s	C1
Lateral damper			20 kN/m/s	C2
Yawing damper			39.kKN/m/s	C3

3.2 해석조건

해석에 앞서 차량 및 레일 조건은 Table 4와 같다. 차량조건의 경우 승객이 모두 탑승하였다는 가정하에서의 만차시의 조건으로, 레일조건의 경우 상기 레일모델링에서 언급된 곡선반경 R480m 구간으로 하여 해석조건을 선정하였다.

현재 고무차륜 경량전철 대차의 최대 운행속도는 70 km/h이고, 향후 80 km/h의 최대운행속도로 노선에 적용할 목적이므로 이 연구에서는 고무차륜 경량전철 국산화 대차의 운행속도를 50 km/h에서 80 km/h까지 향상시켜 주행안정성 향상을 위한 동특성 해석을 수행하였다. 관련된 해석조건은 Table 5와 같다.

Fig. 5 Rail model (ADAMS/View model)

Fig. 6 Contact of rail, driving wheel(tire) and guidance rail

Table 4 Conditions of vehicle and rail

Divisions			Conditions	Remarks
V e h i c l e	Weight		14,400 kg	Full loaded (car-body)
	Center of gravity (X, Y, Z)		2.6063 m, -0.0234 m, 1.661 m	
	Moment of inertia	I _{xx}	20,600 kg·m ²	
		I _{yy}	100,500 kg·m ²	
		I _{zz}	100,500 kg·m ²	
	Formed		1 car	Figs. 5~6
	Rail	Curve radius	R480 m	

3.3 해석결과

이 연구에서는 속도향상에 따라 성능시험에서 요구하는 승차감 지수 만족여부 및 결과를 확인하였으며 시설계되어 있는 대차 현가장치의 계수를 해석적으로 검토하였다. 해석결과는 각 속도별로 차체와 전위 대차에서의 좌우/상하방향 가속도의 RMS값을 비교하여 정리하였으며, 고무차륜 경량전철 국산화 대차는 측방안내방식의 특성 측면의 진동이 매우 발생하기 때문에 해당 해석결과 항목 중 전위 대차의 좌우/상하방향 가속도 값을 중점으로 보고자, 해당 결과를 그래프로 나타내었다.

일반적으로 승차감 평가 방법으로는 Max값이나 RMS(root mean square) 값을 사용한 평가방법이 많이 사용되고 있다. 그 중 RMS값을 사용하는 방법은 실험을 통해 발생하는 데이터가 불규칙하게 발생하기 때문에 통계처리를 통한 데이터의 해석방법으로서 많은 곳에서 사용 되고 있는 방법이다. 이 연구에서도 가속도의 평가 방법으로 RMS값을 사용하였으며, 측정된 값의 판단을 위해 UIC code 518⁽⁴⁾를 참고하였으며 해당기준 내에서 단순측정법 기준을 사용하였다. 승차감 평가 기준은 Table 6과 같으며 RMS값을 구하는 공식은 식 (1)과 같다. Table내 Y-axle는 좌우(lateral)방향, Z-axle은 상하(vertical)방향을 의미한다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m v_n^2}{m}} \quad (1)$$

고무차륜 경량전철 국산화 대차의 운행속도를 50 km/h ~ 80 km/h까지 향상시켜 동특성 해석을 수행하였으며 동특성해석 결과를 나타내고 있다.

각 속도별로 차체와 전위 대차에서의 좌우/상하

방향 가속도 RMS값을 비교를 하여 Table 7과 Fig. 7과 같이 정리하였다.

각 운행속도에서의 해당 해석결과 항목 중 상에서 언급한 거와 같이 전위 대차의 좌우/상하방향 가속도 해석결과를 그래프로 나타내었으며 Fig. 8과 같다.

또한, 개선된 고무차륜 경량전철 국산화 대차의 최대 운행속도를 70 km/h → 80 km/h로 속도향상의 가능 여부를 확인하기 위하여 변경 후 대차의 동특성 해석결과와 변경전의 대차의 측정결과 비교를 하였으며 Fig. 9와 같다. 참고로 변경 후 대차의 시험

Table 7 Analysis results - RMS(unit : m/s²)

Divisions		Running speed			
		50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h
Carbody	Lateral acceleration	0.171	0.185	0.201	0.211
	Vertical acceleration	0.472	0.521	0.545	0.605
Front bogie	Lateral acceleration	0.322	0.345	0.389	0.412
	Vertical acceleration	0.525	0.545	0.625	0.721

(a) Carbody

(b) Front bogie

Fig. 7 Analysis results(comparison)

Table 5 Analysis conditions of running speed

Divisions	Conditions			
Running speed	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h

Table 6 Ride comfort standard - RMS(unit : m/s²)

	Y-axle acceleration	Z-axle acceleration
Ride comfort standard - RMS	Less than 0.5	Less than 0.75

결과와 해석결과를 비교하여 대차의 속도향상의 가능여부를 판단하여야 하나, 현재 변경 후 대차, 즉 고무차륜 경량전철 국산화 대차는 제작 중에 있어, 시험 및 시험결과 확인이 불가능한 상황이다. 이 연구에서는 고무차륜 경량전철 국산화 대차의 속도향상의 가능성 여부를 해석적으로 분석 및 판단함으로서 대차의 설계 및 제작시 반영하기 위한 목적이므로 변경 전 대차의 시험결과와 변경 후의 해석결과를 비교를 하여 여부를 살펴보았다.

Fig. 8 Analysis results of front bogie acceleration

Fig. 9 Comparison of front bogie lateral acceleration (unit : m/s²)

해석결과를 살펴보면, 대차를 80 km/h로 속도향상을 시켜도 승차감 평가 기준치(0.5 m/s^2) 내에 있는 걸 확인하였으며 개선된 현가장치의 영향으로 인하여 변경전의 대차보다 속도향상에 유리하다고 볼 수 있었다.

4. 현가장치 안정성 최적화 해석

이번 장에서는 앞서 설명한 고무차륜 경량전철 국산화 대차의 설계 과정 중 현가장치 최적화 특성치를 확인하기 위하여 최적화 기법을 사용한 현가장치 안정성 해석을 수행하고 해석적으로 현가장치 최적화 설계안을 도출해 보고자 한다.

이 현가장치 안정성 최적화 해석에서는 현존하는 최적화 해석 방법 중 단순한 RMS기법을 이용한 차량의 승차감 표시 및 현가장치를 통한 RMS value 최적화를 수행하였다.

4.1 해석조건

해석을 쉽게 하기 위하여 차체/전위 대차의 좌우/상하방향 가속도중 상기에서 평가된 전위 대차 좌우 방향 가속도 성분만을 고려하였다. 설계 변수는 1, 2차 현가장치의 강성 및 댐퍼 특성값으로 설정하였으며, 기존 대비 $\pm 10\%$ 의 이내에서 수행하였다. 최적화 기법은 ADAMS/View내 ADAMS/Insight^(5,6) 해석프로그램을 사용하여 각 변수에 대한 영향도 및 최적화값을 찾는 방법을 사용하였다.

강성의 경우 차량 설계 초기 단계에서 차량의 고유진동수 목표값에 의해 설정이 되므로 일반적으로는 최적화를 위한 변수의 폭이 제한적이다. 특히 차체의 고유진동수는 인체가 받을 수 있는 한계가 있으므로 설정에 있어서 매우 제한적인 면이 있다. 또한, 일반적으로는 스프링 강성의 경우, 비선형 스프링을 사용하여 초기 설계 위치와 각각의 하중 조건에 따라 강성을 바꾸어 가면 설정을 변경한다.

이 연구에서는 인체의 특성을 고려하지 않으며, 대차의 좌우 가속도 성분의 RMS 크기로 평가를 하였으며 승객 및 승차 하중에 대한 조건을 고려하지 않았다. 또한, 현재 개발된 고무차륜 경량전철 대차의 최대 운행속도는 70 km/h이고, 향후 80 km/h의 최대운행속도로 노선에 적용할 수 있는 대차 개발이 필요하므로 주행속도를 80 km/h로 하여 그에 따

른 현가장치의 최적화값을 찾고자 하였다.

최적화를 위해서는 우선적으로 최적화 하고자 하는 시스템의 응답 또는 목적함수 정의가 필요하다. 이 현가장치 안정성 최적화 해석에서는 상기에서 언급한 바와 같이 전위 대차의 좌우방향 가속도 성분에 대한 RMS값을 목적함수로 정의하였다. 아래의 Fig. 10은 ADAMS/View에서 최적화 해석을 위해 정의한 목적함수를 보여준다.

다음으로는 최적화를 위한 설계 변수 정의가 필요하다. 이 해석에서는 전위 대차의 좌우방향 가속도에 대한 영향도가 가장 크게 작용할 것으로 판단되는 1차 현가장치의 좌우 완충장치의 강성과 2차 현가장치의 요잉댐퍼의 감쇠력을 설계 변수로 지정하였으며, 각각의 경우 초기 대비 $\pm 10\%$ 이내에서 영향도 분석 및 최적화를 수행하였다.

마지막으로 설계 변수 최적화를 위한 기법 선택 과정이 필요하다. 이 연구에서는 DOE response surface 기법을 사용하여 사용하였다. 이유는 변수의 개수가 크게 많지 않으며, full factorial 구동에 있어서도 어려움이 없을 것으로 판단하였다. 변수가 많거나 다양한 경우에는 full factorial 구동 시 상당한 오랜 시간 소요가 예상되므로 그런 경우에는 Monte Carlo 기법 등 다른 최적화 알고리즘 사용이 필요하다.

4.2 해석결과

최적화 해석 수행 결과는 Figs. 11~15와 같다. 최적한 해석결과는 해당 프로그램 내에서 Fig. 11과 같으며 각 설계 변수들간의 상관관계를 보기 쉽게 확인하기 위하여 Fig. 12와 같이 그래프로 다시 정리하였다. 설계변수 값들의 상관관계를 살펴보면, Tie_01은 좌우 완충장치의 강성값을 나타내며, Tie_02는

요잉댐퍼의 감쇠력값을 나타낸다. 최적화 해석결과를 살펴보면 각 설계 변수에 따른 영향도를 백분율로 보여준다. 강성값의 영향이 감쇠력 대비 약간 크게 나타났으며, 약 8.79 %로 나타났다. 그리고 강성 및 감쇠력 모두 (+)값으로 변수가 커질수록 목적함수 또한 커지는 것을 의미한다. 즉 강성이나 감쇠력값이 커질수록 전위 대차의 좌우방향 가속도 성분이 증가한다는 것을 의미한다. 승차감 개선을 위해서는 차량의 가속도 성분 감소가 필요하므로 강성이나 감쇠력값의 저감이 필요하다. 상기의 결과로부터 좌우 완충장치의 강성값과 요잉댐퍼의 감쇠력값을 상호 고려하여 크기를 작게하는 것이 가속도 성분 최적화에 유리할 것으로 판단된다.

또한, 각 설계변수 설정에 따른 9가지 해석조건에 대한 해석결과는 해당프로그램 내에서 Fig. 13과 같으며 각 해석조건에 대한 결과값들을 보기 쉽게 확인하기 위하여 Table 8과 같이 정리하였다. Trail_1~9에 따른 조합 표에 대한 내부에서 결정된 case값을

Fig. 11 Optimization analysis results(ADAMS/insight)

Fig. 10 Definition of purpose function(front bogie lateral acceleration)

Fig. 12 Optimization analysis results(correlation)

나타내고 있으며, 해석결과를 살펴보면 좌우 완충장치
의 강성값(Tie_01)은 630.63 N/mm, 요잉댐퍼의
감쇠력값(Tie_02)은 38.808 kN/m/s일 때, 대차 좌우
방향 가속도값이 다른 조건보다 최소값을 갖으며
해당표에서 굵은 글씨로 구별하여 나타내었다. 이에
대한 결과는 차후 대차 현가장치 설계 시 반영되어
야 할 것으로 판단된다. 참고로, 이 고무차륜 경량
전철 국산화 대차의 경우 상기에서 설명된 거와 같
이 좌우 완충장치의 강성값은 1274 N/mm 이다. 주
행안정성 해석을 위하여 해석모델 개발 시 좌우 완
충장치의 설계값을 4개의 포인트로 모델링하였고
스프링 및 부싱요소의 비선형요소를 고려하여 1포
인트당 강성값을 2개의 요소로 나눠 637 N/mm 상
태로 해석을 진행하였다. 그리하여 하단의 결과와

Fig. 13 Optimization analysis results - design parameter(ADAMS/insight)

Table 8 Optimization analysis results - design parameter

Case			Analysis results
NO.	Tie_01	Tie_02	
Trial_1	630.63	38.808	1841.21
Trial_2	630.63	39.2	2420.74
Trial_3	630.63	39.592	2406.42
Trial_4	637	38.808	2420.07
Trial_5	637	39.2	2387.62
Trial_6	637	39.592	2421.7
Trial_7	643.37	38.808	2421.18
Trial_8	643.37	39.2	2433.55
Trial_9	643.37	39.592	2464.19

(a) Lateral

(b) Vertical

Fig. 14 Optimization analysis results of carbody acceleration(unit : m/s²)

(a) Lateral

(b) Vertical

Fig. 15 Optimization analysis results of front bogie acceleration(unit : m/s²)

Table 9 Optimization analysis results of suspension stability

Divisions		Optimization analysis results
		Purpose function : Front bogie lateral acceleration
Car body	Lateral acceleration	6.7 % improvement
	Vertical acceleration	2.2 % improvement
Front bogie	Lateral acceleration	7.2 % improvement
	Vertical acceleration	3.5 % improvement

►Remarks

- Stiffness of lateral buffer : 1261.26 N/mm
- Damping of yawing damper : 38.808 kN/m/s

같이 630.63 N/mm 강성값은 4개 포인트 기준 경우, 현가장치 최적화 해석결과에 따른 좌우 완충장치의 강성값은 $630.63 \times 2 = 1261.26$ N/mm이다.

상기의 해석결과를 바탕으로 한 전위 대차 좌우방향 최적화 해석의 전후 결과에 대한 그래프는 Figs. 14~15와 같다. 빨간색 실선은 초기 모델이며, 파란색 점선은 개선결과를 나타낸다. 차체 좌우방향의 가속도의 경우, Fig. 14와 같이 RMS값 비교 시 약 6.7 % 정도 개선이, 차체 상하방향의 가속도의 경우, RMS값 비교 시 약 2.2 % 정도 개선이 이루어진 결과를 확인하였다.

전위 대차 좌우방향의 가속도의 경우, Fig. 15와 같이 RMS값 비교 시 약 7.2 % 정도 개선이, 전위 대차 상하방향의 가속도의 경우, RMS값 비교 시 약 3.5 % 정도 개선이 이루어진 결과를 확인하였다.

현가장치 안정성 최적화 해석에 따른 결과를 Table 9와 정리하여 나타내었다. 해석결과에 따른 설계변수인 좌우 완충장치의 강성을 1261.26 N/mm로, 요잉댐퍼 감쇠력을 38.808 kN/m/s 하였을 때 목적함수 : 전위 대차 좌우방향 가속도의 경우 차체 좌우방향 가속도 6.7 %, 차체 상하방향 가속도 2.2 %, 대차 좌우방향 가속도 7.2 %, 대차 상하방향 가속도 3.5 % 향상되었다.

5. 결 론

이 연구에서는 현재 국내 경전철 차량업체에서 개발된 고무차륜 경량전철 대차의 주행안정성 향상을 위한 동특성 해석을 수행하였다. 현 고무차륜 경

량전철의 대차의 최대 운행속도는 70 km/h이고, 향후 80 km/h의 최대운행속도로 노선에 적용할 경우 운행 가능성 및 승차감 지수의 만족 여부를 해석적으로 검토하였다.

이 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 고무차륜 경량전철 대차 특성 분석을 통하여 동특성 해석에 필요한 개선된 고무차륜 경량전철 대차의 3D 모델을 개발하였다.

(2) 개발된 3D 모델을 이용하여 속도향상에 따른 고무차륜 경량전철 대차의 동특성 해석을 수행하였고, 최대 운행속도 가능 여부를 판단하였다.

(3) 개선된 고무차륜 경량전철 대차는 운행속도 80 km/h로 주행하여도 승차감 평가 지수 내에 있어 속도향상의 가능성을 확인할 수 있었다. 이는 일반적인 차량 운행속도는 50~70 km/h이므로 주행안정성(50~80 km/h) 해석 결과로 볼 때 초기 설계된 현가장치 특성값은 안정하다고 판단된다.

(4) 변경 전/후의 시험결과 및 해석결과와의 비교를 통하여 개선된 대차 현가장치의 계수의 안정성 여부를 판단하였다.

(5) 또한, 최대 운행속도 80 km/h에서 대차 현가장치 계수 변화에 따른 해석을 수행하여 현가장치의 최적화 계수값을 도출하였으며, 그에 따른 고무차륜 경량전철 국산화 대차에 미치는 영향도를 살펴보았다.

(6) 상기의 결과들은 현재 제작 중에 있는 고무차륜 경량전철 국산화 대차의 속도향상 가능성 여부를 해석적으로 도출한 결과로서, 추후 대차의 시험환경이 구축되어 시험이 가능할 때, 차량의 중량 조건이나, 주행환경 조건을 고려하여 다양한 실차시험과 전산해석의 추가 비교연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

(1) Korea Metro Institute, 2011, An Analysis of Dynamic Characteristics for Running Safety Improvement of the Rubber Tired AGT Localization Bogie, Seoul National University of Science & Technology.

(2) ADAMS/View User Documentation.

(3) Jane, Y., 2010, Study on Dynamic Characteristics for Rubber-tired LRT, Sungkyunkwan University.

(4) UIC code 518, 2003, Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of Their Dynamic Behaviour-safety-track Fatigue-ride Quality.

(5) ADAMS/Insight User Documentation.

(6) Lee, Y. Y. and Lee, H. S., 2009, A Study on the Optimization of Suspension Characteristics for

Improving Running Safety of Railway Vehicle, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 12, No. 6, pp. 585~591.

(7) Son, M. S., Eom, B. G. and Lee, H. S., 2011, The Derailment Safety Estimation of DMT Freight for Real Track Condition, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 7, pp. 637~642.