

경량전철용 관절대차 현가요소의 민감도 해석

Sensitivity Analysis of Suspension Elements of an Articulated Bogie for Light Railway Vehicles

한형석* 허신* 하성도* 조동현**

Han, Hyung-Suk Hur, Shin Ha, Sung-Do Cho, Dong-Hyun

ABSTRACT

Sensitivity analysis of suspension elements of an articulated bogie for light railway vehicles is presented. The ride, stability and safety are used as dynamic performance index. Suspension elements of 10 and a conicity of wheel are used as design variables. To analyze sensitivity of design variables, the railway vehicle dynamics analysis program AGEM is used. The results shows that the secondary suspension elements have a strong effect on ride and the primary suspension elements have a moderate effect on ride. Conicity of wheel has a strong effect on the stability. The safety is not effected by all the design variables.

1. 서론

경량전철은 중소도시 또는 특정 구역에서 승객 운송을 담당하는 교통수단이다. 현재 세계적으로 약 500여개 도시에서 운행되고 있으나 국내에서는 운행되는 것은 없고 도입할 예정이다. 경량전철의 일반적 특징은 도심에서 운행하기 위하여 차량의 바닥 높이가 약 1M 이하로 낮고 곡률반경이 작은 노선에서 운행 가능하다는 것이다. 그러므로 현가시스템을 구성하는 대차의 구조는 일반 객차의 것과는 다른 구조를 가진다. 특히 경량전철용 대차는 일반대차와는 달리 관절기능을 가진다. 일반적으로 대차는 차량의 현가장치로 차량 안내, 동력 전달, 승객의 편안함 등을 확보하는 기능을 가진다. 이러한 성능 특성은 대차를 구성하는 현가요소 설계변수에 의하여 결정되게 된다. 그러므로 차량의 운행속도, 안전 및 승객의 편안함을 위하여 최적의 현가요소의 설계가 요구된다.

현재 국내에서는 경량전철이 없기 때문에 경량전철용 관절대차에 대한 연구가 부족하다. 한국기계연구원에서는 선행연구로 97년부터 경량전철용 대차시스템에 대한 핵심 기술을 연구하고 있다[1]. 차후 국내에서의 경량전철 운행 및 개발을 대비하여 대차의 현가요소 설계기술이 절실히 요구되기 때문이다.

본 논문에서는 대차 현가요소의 최적설계의 기초인 현가요소 설계변수가 차량의 동적 성능에 미치는 영향 분석이 이루어진다. 이를 위하여 3개의 성능지수가 이용되고 고려된 대차는 관절대차로 설계변수는 11개이다. 민감도 해석을 위하여 철도차량 동역학 해석 프로그램인 AGEM이 이용된

* 한국기계연구원, 정회원

** 아주대학교 대학원, 정회원

다. 본 논문의 결과는 경량전철용 관절대차의 현가 최적설계에 이용이 가능하다.

2. 성능지수

철도차량의 동적 성능과 경제성에 영향을 주는 요인에는 차량의 운행속도, 승차감 및 차륜/레일 상호작용력 등이 있다. 이러한 요인은 대차 축 현가 특성에 의하여 결정되므로 최적의 현가를 설계하는 것은 철도차량의 개발에 있어서 핵심이다. 일반적으로 전술한 대차의 동적 성능 평가 지수로 승차감(ride), 안정성(stability), 안전성(safety)이 이용된다.

2.1 승차감

승차감은 승객의 안락함의 척도로 주관적이다. 승차감에 영향을 주는 인자로 소음, 환경, 진동 등이 있으나 현가에서는 진동에 대하여만 다룬다. 대차는 레일의 불규칙으로 인한 진동을 흡수하여 승객으로 하여금 안락함을 느끼도록 해야한다. 승차감을 평가하기 위하여 여러 방법이 이용될 수 있으나 ISO 2631이 국제 규격으로 이용되고 있다. ISO 2631에서는 가속도에 대한 RMS가 이용되는데 사람이 느끼는 감도는 주파수에 따라 다르므로 ISO 2631에 정의된 주파수 성분필터를 거친 RMS가 이용된다. ISO 2631에서의 승차감 지수는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$a_w = \left[\sum_i (W_i a_i)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서,

a_w : frequency-weighted acceleration
 W_i : weighting factor
 a_i : RMS acceleration

식 (1)에서 이용되는 가중치 W_i 는 ISO 2631에서는 도표 1과 같이 제안하고 있다. 일반적으로 승차감은 1/3 Octave에서의 값을 이용한다. 본 논문에서는 수직 승차감에 한하며 ISO 2631에서 제시하는 승차감 지수 즉 식(1)과 도표 1를 이용한다.

2.2 안정성

안정성은 차량의 운행가능한 속도 즉 임계속도로 평가된다. 궤도차량은 항상 임계속도를 가지는데 이는 차륜의 형상이 경사이기 때문이다. 차륜의 형상은 경사를 가지기 때문에 속도에 비례하여 횡진동이 발생하며 이 횡진동을 효과적으로 감쇠시키지 못하여 횡방향 불안정을 일으켜 차량은 주행할 수 없게 된다. 이 임계속도에서의 횡방향 불안정 현상을 헌팅(hunting)이라고도 하며 차량의 설계시 최고운행속도보다 항상 높은 값을 가져야 한다. 일반적으로 헌팅에는 저주파수인 차체 헌팅, 고주파수인 대차헌팅으로 구분하나 실제로는 연성되어 나타난다. 차체 헌팅은 저주파수이기 때문에 차량의 운행속도 이하에 존재하며 현가장치에 의해 감쇠되기 때문에 임계속도에는 영향을 미치지 못한다. 그러나 대차헌팅은 차량의 임계속도에 직접적인 영향을 준다. 임계속도를 구하는 방법은 선형 운동방정식을 정의한 후 속도에 따른 고유치를 계산하여 구한다. 즉 고유치의 실수부 값이 양의 값을 띠기 시작하는 속도가 바로 임계속도이고 이 속도이상에서는 외란에 대하여 감쇠기능이 없어 불안정한 운동을 하게 된다. 또는 임계속도를 계산하기 위하여 시간영역에서 외란을 입력하여 외란에 의한 진동의 감쇠 특성으로 평가하기도 한다. 본 논문에서는

운동방정식에 대한 고유치해석으로 임계속도를 계산한다.

도표 1 승차감 지수 계산을 위한 가중치

Frequency f (Hz)	W _i (z-axis)	
	factor ×1000	dB
1	482	-6.33
1.25	484	-6.29
1.6	494	-6.12
2	531	-5.49
2.5	631	-4.01
3.15	804	-1.90
4	967	-0.29
5	1039	0.33
6.3	1054	0.46
8	1036	0.31
10	988	-0.10
12.5	902	-0.89
16	768	-2.28
20	636	-3.93
25	513	-5.80
31.5	405	-7.86
40	314	-10.05
50	246	-12.19

2.3 안전성

차량의 안전성을 평가하기 위하여 탈선계수, 윤증 감소량, 횡압 등이 이용되는데 탈선계수가 중요한 평가 지수로 이용된다. 탈선계수는 차륜에서 정의되는데 차륜과 레일의 접촉점에 작용하는 하중의 수직방향 성분과 수평방향 즉 횡방향 성분의 비율(L/V)로 정의한다. 탈선계수 즉 L/V 값이 어느 한계 값을 넘으면 차륜이 레일을 타고 올라가 탈선을 일으키게 된다. 탈선의 기준으로 0.8 이 이용되기도 한다. 그러므로 주어진 곡률반경에 대한 안전한 운행을 평가하기 위하여 탈선계수를 예측할 필요가 있다. 본 논문에서는 탈선계수를 안전성의 척도로 이용한다. 탈선계수의 계산은 일정한 곡률반경 궤도에서, 일정한 속도로 주행하는 차량의 정상상태에서의 차륜의 L/V 값을 취하여 이루어진다.

3. 민감도 해석

3.1 차량 및 대차 구조

본 연구에서 대상으로 하는 경량전철의 전체차량 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서 보는바와 같이 1단위 차량의 구조는 2개의 차체와 3개의 대차로 구성된다. 일반적인 객차는 2개의 대차를 가지나 그림 1과 같은 경량전철은 차체의 관절 및 연결을 위하여 중앙에 대차가 하나 더 놓이게 된다.

그림 2는 그림 1의 차량에 이용되는 관절대차를 보여주고 있다. 관절대차의 가장 큰 특징은 대차와 차량, 차량과 차량을 연결하기 위하여 선회링을 이용한다는 것이다. 선회링은 효과적인 공

간의 활용뿐만이 아니라 하중을 분산시키는 특징을 가진다. 1차현가 요소로는 간단하면서도 6방향 지지가 가능한 Chevron 스프링이 이용되고 2차 현가요소는 승차감에 유리한 공기 스프링이 이용된다. 또한 2차 현가의 감쇠를 위하여 댐퍼가 이용된다. 볼스터와 대차 프레임을 연결하기 위하여 견인바가 이용되는데 견인바 끝단에는 러버(rubber)가 끼워져 있다. 차륜은 UIC50, 레일은 UIC/ERRI(D=760mm, d=630mm)가 이용된다.



그림 1 경량전철

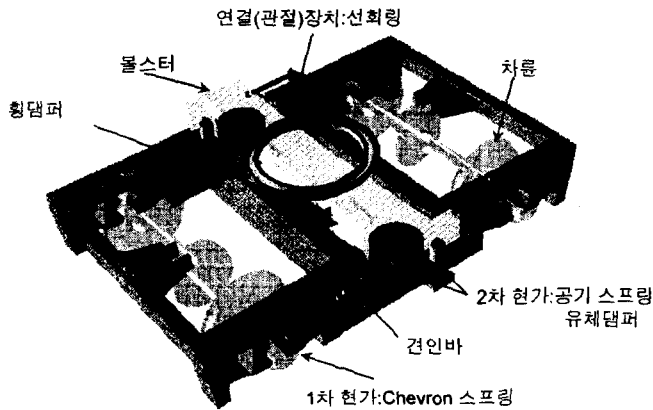


그림 2 경량전철용 관절대차

3.2 AGEM을 이용한 동적 모델링

그림 1의 차량 및 그림 2의 대차를 모델하기 위하여 철도차량 전용 해석 프로그램인 AGEM을 이용한다. 전체차량을 구성하기 위하여 14개의 강체가 이용된다. Chevron 스프링인 1차 현가는 AGEM[2]의 "Point element"를 이용하였으며 2차현가의 감쇠는 "Directed element"를 이용하였다. 2차현가의 강성, 견인바의 러버는 "Point element"를 이용하여 모델하였다. 선회링은 "Point element"를 조합하여 모델하였다. 선회링은 1방향 회전만 가능하므로 요소를 5개 조합하여 모델하였다. 철도차량 동력학에서 핵심인 차륜/레일 접촉력은 FASTSIM[3]을 이용한다. FASTSIM은 Kalker의 3차원 접촉력 계산 알고리즘 DUVORAL을 간략화 한 것으로 계산시간이 짧다는 장점을 가진다. 그러면서도 DUVORAL과의 오차는 최대 10%미만으로 알려져 있다[4].

승차감해석을 위하여는 궤도의 불규칙도가 필요하므로 미국 FRA의 Class 2를 이용하였고 주행 속도는 40km/h로 하였다. 가속도 측정위치는 차체의 C.G.로 하였다. 안전성 해석을 위하여는 궤

도의 형상이 필요하다. 궤도는 그림 3과 같이 직선구간, 완화구간, 일정곡률구간으로 구성된다. 완화구간은 spiral 형상을 가지며 거리는 20m이고 일정곡률반경의 값은 170m이다. 차량의 속도는 20km/h로 일정하다

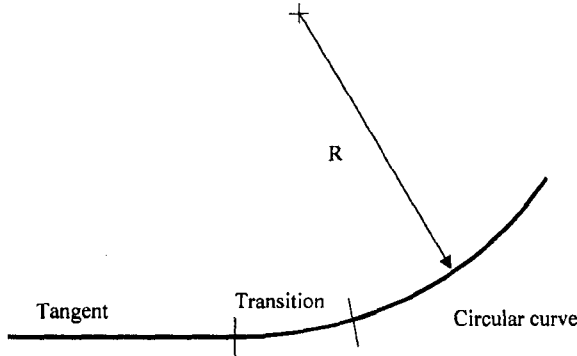


그림 3 궤도 형상

3.2 설계변수

그림 2의 관절대차를 구성하는 현가요소 설계변수는 10개로 정의할 수 있고 안정성에 중요한 인자는 차륜의 답면경사가 추가된다. 결과적으로 11개의 설계변수가 도표 2와 같이 정의된다. 각 설계변수의 성능지수에 대한 영향을 파악하기 위하여 도표 2와 같이 초기 값에 20%의 변동 값을 추가하여 해석을 수행하였다. 즉 민감도를 해석하기 위하여 초기 설계 값에 대한 결과와 각 설계 변수를 변화시켰을 때의 결과를 비교하게 된다.

3 해석 결과

(가) 승차감 결과

도표 2의 설계변수 값에 대한 승차감을 해석한 결과는 도표 3과 같다. 결과에서 보듯이 승차감에 가장 영향을 주는 현가요소 설계변수는 2차현가의 감쇠와 강성이다. 2차현가는 1-2Hz의 주파수 특성을 가지도록 설계되기 때문에 승차감에 가장 큰 영향을 준다. 다음으로는 1차 현가의 수직강성, 수직 감쇠 및 견인바의 영향이 큰 것을 볼 수 있다. 특히 견인바도 승차감에 어느정도 영향을 주는 것에 대하여 주목할 만 하다. 결과적으로 승차감 설계를 위하여는 우선 2차 현가요소 설계변수를 선정하고 만족하지 못할 때 1차 및 견인바의 값을 조정해야 함을 알 수 있다.

(나) 안정성 결과

안정성에 대한 설계변수의 민감도 결과는 도표 3과 같다. 초기 값에서의 임계속도는 66m/s이다. 도표에서 보듯이 차륜의 답면경사의 영향이 가장 크고 다음으로 1차 현가의 횡, 종강성이 영향을 줄 수 있다. 답면경사의 값이 클 수록 주행속도에 대한 차륜의 기구적 횡진동 주파수가 증가하기 때문에 영향이 크다. 그러므로 안정성 설계를 위하여는 1차적으로 차륜의 답면경사, 2차적으로는 1차 현가의 횡, 종 강성을 합리적으로 설계해야 함을 알 수 있다.

(다) 안전성 결과

안전성 평가 지수인 탈선계수 L/V 에 대한 설계변수의 영향은 도표 3과 같다. 도표에서 보듯이

1차현가의 종, 횡 감쇠만이 미약한 영향을 주고 나머지는 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다. 본 대상 관절대차는 일반대차와는 다르게 대차가 차체에 선회링으로 연결되어 자유회전이 가능하기 때문에 사료된다. 그러므로 선회링을 이용하는 대차는 곡선에서의 추종성이 좋은 것을 알 수 있다.

3.4 검토

3.3절의 결과를 종합하면 현가요소의 최적설계 방향을 알 수 있다. 도표 4에서와 같이 각 설계 변수의 영향을 상대적으로 평가하여 S(strong effect), M(moderate effect), W(weak effect)으로 표시하였다. 승차감 설계에 큰 영향을 주는 설계변수는 안정성과 안전성에 영향을 주지 못하기 때문에 승차감 설계는 독립적으로 수행할 수 있음을 알 수 있다. 안정성에 영향을 크게 주는 변수는 차륜의 답면경사이다. 다음으로 1차 현가의 종횡강성이 영향을 주는 것을 알 수 있다. 안전성에는 전체적으로 영향을 크게 주는 변수가 없고 미약하나마 1차 현가의 종횡강성이 영향을 준다. 이 설계변수의 안정성에도 영향을 준다. 그러므로 안정성과 안전성의 설계는 동시에 이루어져야 함을 알 수 있다. 도표 4의 결과는 현가요소의 최적설계에 이용될 수 있다.

도표 2 설계변수의 초기치 및 변동치

설계변수	초기 값	변동 값
1차 현가 종강성 (N/m)	10000000	12000000
1차 현가 횡강성 (N/m)	3485000	4182000
1차 현가 수직강성(N/m)	1743000	2091600
1차 종감쇠 (Ns/m)	1000	1200
1차 현가 횡감쇠 (Ns/m)	2000	2400
1차 현가 수직감쇠 (Ns/m)	3600	4320
2차 현가 수직강성 (N/m)	31000(전, 후방대차)	372000
	324000(중앙대차)	388000
2차 현가 수직감쇠 (Ns/m)	29500(전, 후방 대차)	35400
	31000(중앙대차)	37200
횡댐퍼 (Ns/m)	25000(전, 후방대차)	30000
	26000(중앙대차)	31200
견인바 러버 강성 (N/m)	6000000(종방향)	7200000
	1000000(횡방향)	1200000
답면경사	0.1	0.12

도표 3 해석 결과

설계변수	승차감		안정성 (입계속도)	안전성 (L/V)
	RMS 가속도 (ISO-2631)	$(A_{rms0} - A_{rms})/A_{rms0}$		
1차 현가 종강성	2.663646E-01	5.929893E-06	67	0.4428
1차 현가 횡강성	2.663601E-01	2.304826E-05	68	0.4416
1차 현가 수직강성	2.643839E-01	7.442127E-03	66	0.4425
1차 종감쇠	2.663662E-01	1.118848E-07	66	0.4425
1차 현가 횡감쇠	2.663662E-01	1.118848E-07	66	0.4425
1차 현가 수직감쇠	2.640752E-01	8.601142E-03	66	0.4425
2차 현가 수직강성	2.806572E-01	-5.365166E-02	66	0.4425
2차 현가 수직감쇠	2.856492E-01	-7.239269E-02	66	0.4425
횡댐퍼	2.663588E-01	2.774742E-05	66	0.4425
견인바 러버 강성	2.672218E-01	-3.211988E-03	66	0.4425
답면경사			60	

도표 4 설계변수의 민감도

설계변수	승차감	안정성	안전성
1차 현가 종강성	W	M	M
1차 현가 횡강성	W	M	M
1차 현가 수직강성	M	W	W
1차 종감쇠	W	W	W
1차 현가 횡감쇠	W	W	W
1차 현가 수직감쇠	M	W	W
2차 현가 수직강성	S	W	W
2차 현가 수직감쇠	S	W	W
횡댐퍼	W	W	W
견인바 러버 강성	M	W	W
답면경사		S	

S: strong effect, M: moderate effect, W: weak effect

4. 결론

경량전철용 관절대차의 현가요소가 동적 성능에 미치는 영향을 해석 프로그램을 이용하여 수행하였다. 연구 결과 승차감에 큰 영향을 주는 설계변수는 2차 현가의 수직 강성, 감쇠이었고 다음으로 1차현가의 수직 강성, 감쇠였다. 이 설계변수들은 안정성과 안전성에는 영향이 미세함으로 4개의 설계변수 중심으로 승차감 설계를 수행할 수 있음을 알 수 있었다. 안정성에는 차륜의 답면경사의 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 일반적으로 차륜의 답면경사를 크게하면 안정성에는 부정적인 요인으로 작용하나 안전성 측면에서는 긍정적 요인이 된다. 안정성에 다음으로 영향을 주는 설계변수는 1차현가의 종, 횡강성이었다. 안전성에는 설계변수가 전체적으로 작은 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 이는 선회링을 이용하는 대차는 곡선주행시 대차가 궤도를 잘 추종하기 때문으로 사료된다. 이상의 결과는 경량전철용 관절대차의 현가요소 최적설계의 방향이 된다.

참고문헌

1. 송달호 외 (1997), "경전철용 관절대차 핵심기술 연구(1)", 한국기계연구원.
2. AGEM User's Manual, Queen's University, Canada.
3. J. J. Kalker (1982), "A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact," Vehicle System Dynamics, Vol.11, p.1-12.
4. F. Clement (1984), "Dynamic Curving Simulation of Forced-Steering Rail Vehicles," Ph.D Thesis, Queen's University, Canada.