

시뮬레이션에 의한 관절대차 현가요소 민감도 해석

한형석[#]

Simulation-based Sensitivity Analysis of Suspension Elements of an Articulated Bogie

Hyung Suk Han[#]

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 indices. 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 show 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.

Key Words : Sensitivity analysis (민감도 해석), Suspension element (현가요소), Light railway transit (경량전철), Articulated bogie (관절대차)

1. 서론

경량전철은 중소도시 또는 특정 구역에서 승객 운송을 담당하는 교통수단으로 현재 세계적으로 약 500 여개 도시에서 운행되고 있으나 국내에서는 운행되지 않고 있다. 경량전철의 일반적 특징은 도심에서 운행하기 위하여 차량의 바닥 높이가 약 1m 이하로 낮고 곡률반경이 작은 노선에서 운행 가능하다는 것이다.^{1,3} 그러므로 현가시스템을 구성하는 대차의 구조는 일반 객차의 것과는 다른 구조를 가진다. 특히 경량 전철용 대차는 일반 대차와는 달리 관절기능을 가진다. 일반적으로 대차는 차량의 현가장치로 차량 안내, 동력 전달, 승객의 편안함 등을 확보하는 기능을 가진다. 이

러한 기능은 대차를 구성하는 현가요소 설계변수에 의하여 결정되게 된다. 그러므로 차량의 운행 속도, 안전 및 승객의 편안함을 위하여 최적의 현가 요소의 설계가 요구된다.^{4,5} 현재 국내에서는 관절형 경량전철이 없기 때문에 관절대차의 최적 설계에 대한 연구가 없었다. 그러나 차후 국내에서의 경량전철 운행 및 개발을 대비하여 대차의 현가요소 설계기술에 대한 선행 연구가 요구된다.

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

^{1,3} 접수일: 2003 년 1 월 23 일; 게재승인일: 2003 년 5 월 2 일
[#] 교신저자: 한국기계연구원

Email: hshan@kimm.re.kr, Tel: (042) 868-7814

AGEM⁶ 이 이용된다. 본 논문의 결과는 경량 전철용 관절대차의 현가 최적설계에 이용이 가능하다.

2. 관절대차

일반적으로 대차는 현가 시스템으로 차체의 지지, 안내, 구동, 제동을 수행한다. 본 논문에서 소개하는 대차는 국내에 도입된 적이 아직 없는 경량 전철용(LRT: Light Railway Transit) 관절 대차이다. 관절대차는 운행 가능한 곡률 반경을 최소화하고 높이를 줄일 뿐만이 아니라 2 개의 차체를 연결하는 기능을 갖는다. Fig. 1 은 3 개의 관절대차로 구성된 경량전철 1 량을 보여주고 있다. 관절대차는 전통적인 대차와는 달리 다음과 같은 기능을 갖는 것이 특징이다.

- (1) 차량 지지
- (2) 직선, 곡선 궤도에서의 양호한 궤도 추종성으로 차량 안내
- (3) 궤도로부터 차체로의 제동력, 구동력 전달
- (4) 직선궤도, 곡선궤도, 나선 궤도에서의 동적 안정성 확보
- (5) 궤도불규칙에 의한 진동의 절연
- (6) 궤도, 차량 구성품의 마모 손상을 최소화하기 위한 차륜/궤도 힘 제어
- (7) 차체간 연결
- (8) 차체간 관절

특징 중에 특이 사항으로 차체간의 연결 및 관절이 가능하다는 것이다. Fig. 1 에서와 같이 선회링이 있어 차체와의 상대 회전이 가능하다.

이상과 같은 기능에 적합하도록 관절대차를 설계하기 위해서는 관절대차를 구성하는 현가요소의 최적 설계가 필요하다. 최적 설계를 위해서는 현가요소의 설계 민감도에 대한 이해가 선행되어야 한다. 그러나 관절대차는 국내에 없기 때문에 그러한 연구가 수행된 적이 없고 국외의 경우 발표를 하지 않고 있다.

3. 성능지수

철도차량의 동적 성능과 경제성에 영향을 주는 요인에는 차량의 운행속도, 승차감 및 차륜/레일 상호 작용력 등이 있다. 이러한 요인은 대차 즉 현가 특성에 의하여 결정되므로 최적의 현가를 설계하는 것은 철도차량의 개발에 있어서 핵심이

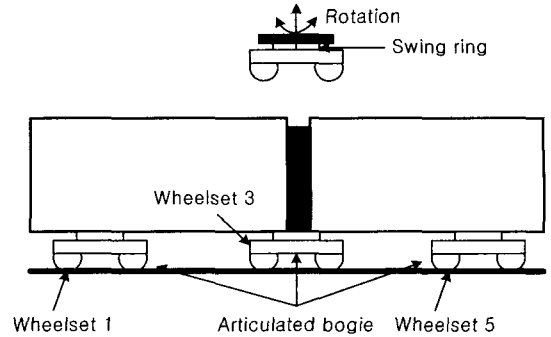


Fig. 1 LRT with articulated bogies

다. 일반적으로 전술한 대차의 동적 성능 평가 지수로 승차감, 안정성, 안전성이 이용된다.

3.1 승차감

승차감은 승객의 안락함의 척도로 주관적이다. 승차감에 영향을 주는 인자로 소음, 환경, 진동 등이 있으나 현가에서는 진동에 대해서만 다룬다. 대차는 레일의 불규칙으로 인한 진동을 흡수하여 승객으로 하여금 안락함을 느끼도록 해야 한다. 승차감을 평가하기 위하여 여러 방법이 이용될 수 있으나 ISO 2631 이 국제 규격으로 이용되고 있다. ISO 2631 에서는 가속도에 대한 RMS 가 이용되는데 사람이 느끼는 감도는 주파수에 따라 다르므로 ISO 2631 에 정의된 주파수 성분필터를 거친 RMS 가 이용된다. ISO 2631 에서의 승차감 지수는 식 (1)과 같이 정의된다.⁷

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

여기서,

a_w : frequency-weighted acceleration

W_i : weighting factor

a_i : RMS acceleration

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

여기서 승차감을 평가하기 위해서는 궤도의 불규칙도가 정의 되어야 한다. 본 연구에서는 경량전철의 운행 환경을 고려하여 FRA Class 3 을 적용하였다. FRA class 는 미국 FRA 에서 궤도 형상 실측에 의하여 궤도의 불규칙 정도 등급을 Class 1~Class 6 으로 구분하였다. Class 1 이 가장 불규칙도가 큰 궤도이다. 본 논문에서는 연구 차량이 운행할 궤도가 도심이기 때문에 곡률반경이 작은 것을 고려하여 Class 3 을 선정하였다. Class 3 은 차량 속도가 70 km 이하인 범위에 적용되는 경우가 많다. Table 2 는 FRA Class 3 의 궤도 불규칙도를 보여주고 있다.⁸

3.2 안정성

안정성은 차량의 운행 가능한 속도 즉 임계속도로 평가된다. 철도차량은 항상 임계속도를 가지는데 이는 차량의 형상이 경사져 있기 때문이다. 차량의 형상은 경사를 가지기 때문에 속도에 비례하여 횡진동이 발생하며 이 횡진동을 효과적으로 감쇠 시키지 못하면 횡방향 불안정을 일으켜 차량은 주행할 수 없게 된다. 차량의 속도에 따른 윤축의 횡방향 진동수, 감쇠의 변화는 일반적으로 Fig. 2 와 같은 경향을 갖는다. Fig. 2 에서와 같이 차량의 형상과 현가 요소의 특성치에 따라 감쇠가 음의 값을 갖는 차량 속도가 있다. 이 속도 이상에서는 감쇠가 이루어지지 않아 차량의 횡방향 진동이 발생하게 된다. 즉 더 이상 주행할 수 없게 된다. 이를 임계 속도라 하며 임계속도에서의 횡방향 불안정 현상을 헌팅(hunting)이라고도 하며 차량의 설계시 최고 운행속도보다 항상 높은 값을 가져야 한다. 일반적으로 헌팅에는 저 주파수인 차체헌팅, 고 주파수인 대차헌팅으로 구분하나 실제로는 연성 되어 나타난다. 차체헌팅은 저 주파수이기 때문에 차량의 운행속도 이하에 존재하며 현가장치에 의해 감쇠 되기 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 나타내기 시작하는 속도가 바로 임계 속도이고 이 속도 이상에서는 외란에 대하여 감쇠기능이 없어 불안정한 운동을 하게 된다. 또는 임계속도를 계산하기 위하여 시간영역에서 외란을 입력하여 외란에 의한 진동의 감쇠 특

Table 1 Weighting factors for ride evaluation

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

성으로 평가하기도 한다. 본 논문에서는 운동방정식에 대한 고유치해석으로 임계속도를 계산한다.

3.3 안전성

차량의 안전성을 평가하기 위하여 탈선계수, 윤중 감소량, 횡압 등이 이용되는데 탈선계수가 중요한 평가 지수로 이용된다.⁴ 탈선계수는 차량에서 정의되는데 차량과 레일의 접촉점에 작용하는 하중의 수직방향 성분과 수평방향 즉 횡방향 성분의 비율(L/V)로 정의한다. 탈선계수 즉 L/V 값이 어느 한계 값을 넘으면 차량이 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 이용되었다. 탈선계수의 계산은 Fig. 3 과 같은 궤도 형상을 일정한 속도로 주행하는 차량의 정상상태에서의 차량 L/V 값을 취하여 이루어졌다.

Table 2 Analytical characterization of typical geometry variation

Process Track geometry	Model	parameter		Values of Parameter By track Class
		symbol	Unit	
Gage	$s(\phi) = A\phi_2^2 / (\phi^2 + \phi_1^2)(\phi^2 + \phi_2^2)$	A	$10^4 \text{ in.}_2/\text{cpf}$	1.6
		ϕ_1	10^3 cpf	8.9
		ϕ_2	10^2 cpf	7.1
Cross level	Same as gage	A	$10^4 \text{ in.}_2/\text{cpf}$	1.1
		ϕ_1	10^3 cpf	7.1
		ϕ_2	10^2 cpf	4.0
Profile	$s(\phi) = \frac{A\phi_2^2(\phi^2 + \phi_1^2)}{\phi^4(\phi^2 + \phi_2^2)}$	A	$10^4 \text{ in.}_2/\text{cpf}$	2.5
		ϕ_1	10^3 cpf	7.1
		ϕ_2	10^2 cpf	4.0
Alignment	Same as profile	A	$10^4 \text{ in.}_2/\text{cpf}$	1.6
		ϕ_1	10^3 cpf	10.0
		ϕ_2	10^2 cpf	5.6

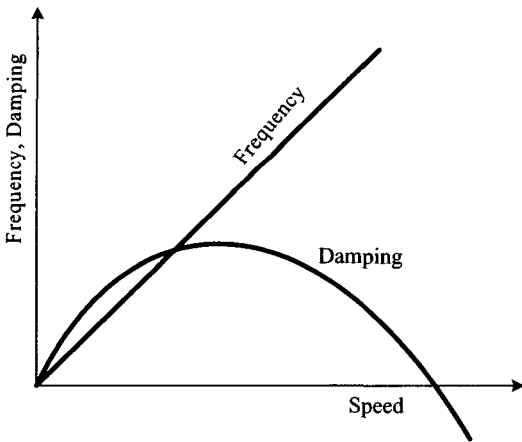


Fig. 2 Relationship between speed and damping

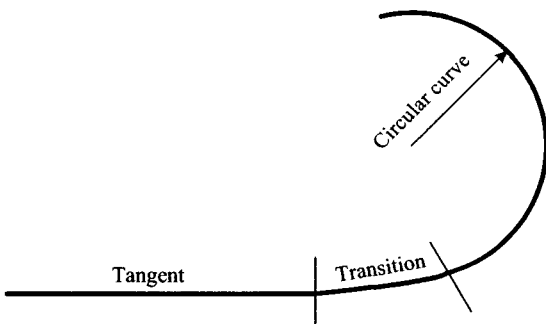


Fig. 3 Curved track profile

4. 민감도 해석

4.1 차량 및 대차 구조

본 연구에서 대상으로 하는 경량전철의 전체 차량 구조는 Fig. 1 과 같다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 1 단위 차량의 구조는 2 개의 차체와 3 개의 대차로 구성된다. 일반적인 객차는 2 개의 대차를 가지나 Fig. 1 과 같은 경량전철은 차체의 관절 및 연결을 위하여 중앙에 대차가 하나 더 놓이게 된다. Fig. 4 는 Fig. 1 의 차량에 이용되는 관절대차를 보여주고 있다. 관절대차의 가장 큰 특징은 대차와 차량, 차량과 차량을 연결하기 위하여 선회링을 이용한다는 것이다. 선회링은 효과적인 공간의 활용 뿐만이 아니라 하중을 분산시키는 특징을 가진다. 1 차 현가 요소로는 간단하면서도 6 방향 지지가 가능한 Chevron 스프링이 이용되고 2 차 현가 요소는 승차감에 유리한 공기 스프링이 이용된다. 또한 2 차 현가의 감쇠를 위하여 댐퍼가 이용된다. 볼스터와 대차 프레임을 연결하기 위하여 견인바가 이용되는데 견인바 끝단에는 고무(rubber)가 끼워져 있다. 차륜은 UIC50, 레일은 UIC/ERRI (D=760mm,d=630mm)가 이용된다. Table 3 은 질량 및 관성을 보여주고 있다. 현가요소 특성치는 Table 4 와 같이 모두 설계변수로 정의하였다.

4.2 동적 모델링

Fig. 1 의 차량 및 Fig. 4 의 대차를 모델링하기 위하여 철도차량 전용 해석 프로그램인 AGEM⁶ 을 이용한다. 전체차량을 구성하기 위하여 14 개의 강

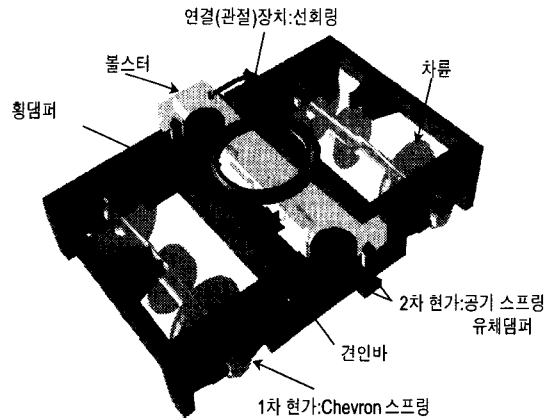


Fig. 4 Articulated bogie

Table 3 Mass properties

Parts	Mass (kg)	Moment of inertia (kgm ²)		
		I _{xx}	I _{yy}	I _{zz}
Car body	23010	46000	345000	276000
Front, rear bogie	3575	1500	1700	3100
Center bogie	1509	700	800	1200
Bolster	700	300	50	500
Wheelset	800	400	100	400

Table 4 Design variables (suspension elements)

설계변수	초기 값	변동 값
1 차 현가 종강성(N/m)	10000000	12000000
1 차 현가 횡강성(N/m)	3485000	4182000
1 차 현가 수직강성(N/m)	1743000	2091600
1 차 현가 종감쇠(Ns/m)	1000	1200
1 차 현가 횡감쇠 (Ns/m)	2000	2400
1 차 현가 수직감쇠(Ns/m)	3600	4320
2 차 현가 수직강성(N/m)	310000 (전,후방대차)	372000
	324000 (중앙대차)	388000
2 차 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)	60000000 (종방향)	72000000
	1000000 (횡방향)	1200000
답면경사	0.1	0.12

체가 이용된다. Chevron 스프링인 1 차 현가는 AGEM 의 "Point element"를 이용하였으며 2 차현가의 감쇠는 "Directed element"를 이용하였다. 2 차현가의 강성, 견인바의 고무는 "Point element"을 이용하여 모델하였다. 선회링은 "Point element"를 조합하여 모델하였다. 선회링은 1 방향 회전만 가능하

므로 요소를 5 개 조합하여 모델하였다. 철도차량 동역학에서 핵심인 차륜/레일 접촉력은 FASTSIM⁹ 을 이용한다.

FASTSIM 은 Kalker¹⁰ 의 3 차원 접촉력 계산 알고리즘 DUVORAL 을 간략화 한 것으로 계산시간이 짧다는 장점을 가진다. 그러면서도 DUVORAL 과의 오차는 최대 10%미만으로 알려져 있다.

승차감 해석을 위하여는 궤도의 불규칙도가 필요하므로 미국 FRA 의 Class 3 를 이용하였고 주행속도는 40km/h 로 하였다. 가속도 측정위치는 차체의 C.G 로 하였다. 안전성 해석을 위하여는 궤도의 형상이 필요하다. 궤도는 Fig. 5 와 같이 직선 구간, 완화구간, 일정곡률구간으로 구성된다. 완화구간은 스파이럴(spiral) 형상을 가지며 거리는 20m 이고 일정 곡률 반경의 값은 170m 이다. 곡선 궤도에서의 차량의 속도는 20km/h 로 일정하다.

4.3 설계변수

Fig. 4 의 관절대차를 구성하는 현가요소 설계변수는 10 개로 정의할 수 있고 안정성에 중요한 인자는 차륜의 답면 경사가 추가된다. 답면경사(conicity)는 차륜의 형상의 기울기다. 결과적으로 11 개의 설계 변수가 Table 4 와 같이 정의된다. 각 설계변수의 성능지수에 대한 영향을 파악하기 위하여 Table 4 와 같이 초기 값에 20%의 변동 값을 추가하여 해석을 수행하였다. 즉 민감도를 해석하기 위하여 초기 설계 값에 대한 결과와 각 설계변수를 변화시켰을 때의 결과를 비교하게 된다.

4.4 해석 결과

4.4.1 승차감 결과

초기 모델에 대한 가속도 응답에 대한 평가기준을 이용한 지수는 Table 5 와 같다. 결과에서 보듯이 승차감에 가장 영향을 주는 현가요소 설계변수는 2 차 현가의 감쇠와 강성이다. 2 차 현가는 1-2Hz 의 주파수 특성을 가지도록 설계되기 때문에 승차감에 가장 큰 영향을 준다. 다음으로는 1 차 현가의 수직강성, 수직 감쇠 및 견인바의 영향이 큰 것을 볼 수 있다. 특히 견인바도 승차감에 어느 정도 영향을 주는 것에 대하여 주목할 만 하다. 결과적으로 승차감 설계를 위하여는 우선 2 차 현가요소 설계변수를 선정하고 만족하지 못할 때 1 차 및 견인바의 값을 조정해야 함을 알 수 있다.

Table 5 Results

설계변수	승차감		안정성 (임계 속도)	안전성 (L/V)
	RMS 가속도 (ISO-2631)	($A_{rms0} - A_{rms}$)/ A_{rms0}		
1 차 현가 종강성	2.66E-01	5.9E-06	67	0.4428
1 차 현가 횡강성	2.66E-01	2.3E-05	68	0.4416
1 차 현가 수직강성	2.64E-01	7.4E-03	66	0.4425
1 차 현가 종감쇠	2.66E-01	1.1E-07	66	0.4425
1 차 현가 횡감쇠	2.66E-01	1.1E-07	66	0.4425
1 차 현가 수직감쇠	2.64E-01	8.6E-03	66	0.4425
2 차 현가 수직강성	2.80E-01	-5.3E-02	66	0.4425
2 차 현가 수직감쇠	2.85E-01	-7.2E-02	66	0.4425
횡댐퍼	2.66E-01	2.7E-05	66	0.4425
전인바 러버 강성	2.67E-01	-3.2E-03	66	0.4425
답면경사			60	

4.4.2 안정성 결과

초기 설계에 대한 안정성 결과는 Fig. 5 에서와 같이 Mode 1 이 66km/h 에서 음의 감쇠를 나타내기 시작한다. 이와 같이 모드 중 음의 감쇠를 갖기 시작하는 속도가 임계속도라 하며 안정성의 척도로 이용된다. 일반적으로 각 모드에 대한 모드형상을 분석하여 각 모드의 의미를 분석한다. 그러나 AGEM 은 각 모드 형상을 그래픽으로 제공하지 않아 각 모드의 의미를 설명하지 못한다. 안정성에 대한 설계변수의 민감도 결과는 Table 5 와 같다. Table 5 에서 보듯이 차륜의 답면 경사의 영향이 가장 크고 다음으로 1 차 현가의 횡, 종강성이 영향을 주는 것을 알 수 있다. 답면 경사의 값이 클수록 주행속도에 대한 차륜의 기구적 횡진동 주파수가 증가하기 때문에 영향이 크다. 그러므로 안정성 설계를 위하여는 1 차적으로 차륜의 답면 경사, 2 차적으로는 1 차 현가의 횡, 종 강성을 합리적으로 설계해야 함을 알 수 있다.

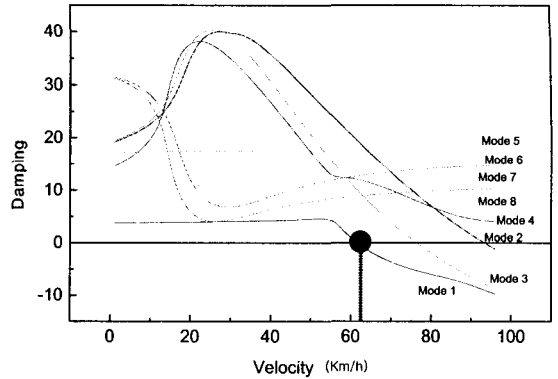


Fig. 5 Stability response

4.4.3 안전성 결과

초기 설계에 대한 탈선 계수는 Fig. 6 과 같은 결과를 보였다. Fig. 6 에서 wheelset 1~ wheelset 5 의 위치는 Fig. 1 에 나타나 있다. 안전성 평가 지수인 탈선계수 L/V 에 대한 설계변수의 영향은 Table 5 와 같다. Table 5 에서 보듯이 1 차 현가의 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 때문으로 사료된다. 그러므로 선회링을 이용하는 대차는 곡선에서의 추종성이 좋은 것을 알 수 있다.

4.5 검토

4.4 절의 결과를 종합하면 현가요소의 최적설계 방향을 알 수 있다. Table 6 에서와 같이 각 설계변수의 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 1 차 현가의 종횡강성이 영향을 주는 것을 알 수 있다. 안전성에는 전체적으로 영향을 크게 주는 변수가 없고 미약하지만 1 차 현가의 종횡강성이 영향을 준다. 이 설계변수의 안정성에도 영향을 준다. 그러므로 안정성과 안전성의 설계는 동시에 이루어져야 함을 알 수 있다. Table 6 의 결과는 현가요소의 최적설계에 이용될 수 있다.

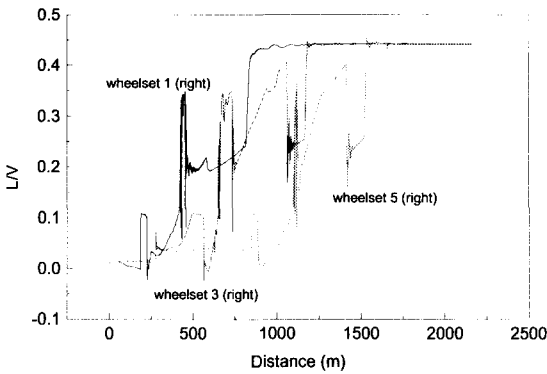


Fig. 6 Safety response

Table 6 Sensitivity of suspension elements

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

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

5. 결론

경량전철용 관절대차의 현가요소가 동적 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 이용하여 수행하였다. 연구 결과 승차감에 큰 영향을 주는 설계변수는 2 차 현가의 수직 강성, 감쇠였고 다음으로 1 차현가의 수직 강성, 감쇠였다. 이 설계 변수들은 안정성과 안전성에는 영향이 미세하므로 4 개의 설계변수 중심으로 승차감 설계를 수행할 수 있음을 알 수 있었다. 안정성에는 차륜의 답면 경사의 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 일반적으로 차륜의 답면 경사를 크게 하면 안정성에는 부정적인 요인

으로 작용하나 안전성 측면에서는 긍정적 요인이 된다. 안정성 다음으로 영향을 주는 설계변수는 1 차 현가의 종, 횡 강성이었다. 안전성에는 설계변수가 전체적으로 작은 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 이는 선회령을 이용하는 대차는 곡선주행시 대차가 궤도를 잘 추종하기 때문으로 사료된다. 이상의 결과는 경량전철용 관절대차의 현가요소 최적설계의 방향이 된다.

참고문헌

- Muller, G., "Recent Trends in Low-Floor Trams Throughout the World," *Revue Generale des Chemins de Fer*, pp. 5-16, 1997.
- Song, D. H., "Study on the Core Technologies of the Articulated Bogie for the Light Rail Transit(I)," Korea Institute of Machinery & Materials, 1997.
- Song, D. H., "Study on the Core Technologies of the Articulated Bogie for the Light Rail Transit(II)," Korea Institute of Machinery & Materials, 1997.
- Fisette, P., Samin, J. C., "Lateral Dynamics of a Light Railway Vehicle with Independent Wheels," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 20, Issue Suppl., pp. 157-171, 1991.
- Suda, Y., Kujioka, T. and Iguch, M., "Dynamic Stability and Curving Performance of Railway Vehciles," *Nippon Kikai Gakkai Ronbushu*, Vol. 52, Issue 474, pp. 738-745, 1986.
- AGEM User's Manual, Queen's University, Canada.
- International Organisation for Standardisation, ISO 2631-1:1997, Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration, Part 1, General Requirement, ISO, Switzerland, 1997.
- Garg, V. K. and Dukkipati, R. V., *Dynamics of Railway Vehicle Systems*, Academic Press, 1984.
- Kalker, J. J., "A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 11, pp. 1-12, 1982.
- Clement, F., "Dynamic Curving Simulation of Forced-Steering Rail Vehicles," Ph.D Thesis, Queen's University, Canada, 1984.