

# 집전계의 동특성 Simulation에 관한 연구

## Simulation of Catenary-Pantograph Dynamics

김정수\*, 박성훈\*, 허신\*\*, 경진호\*\*, 송달호\*\*

J.S.Kim, S.H.Park, S.Hur, J.H.Kyung, D.H.Song

### ABSTRACT

Results of the dynamic simulation on KTX catenary and catenary-pantograph interface are presented. Simulation programs based on finite element and finite difference models of the catenary are developed, while the pantograph is modeled as a linear 3-degree-of-freedom system. The catenary motion dynamics are primarily determined by the transmission and reflection of the propagating disturbance wave at the hanger and span boundaries. On the other hand, the catenary-pantograph contact characteristics are primarily influenced by the movement of the pantograph across the hanger and span boundaries, the amount of damping present in the contact wire, and the resonant frequencies of the pantograph.

### 1. 서론

고속전철의 개발 선진국은 각국의 상황에 맞는 고유의 가선계를 개발하였고 그 가선계에 적합한 판토티그래프를 최적화 하여왔다. 열차의 고속화에 따라 가선은 균일하고 작은 콤플라이언스(compliance)를 유지하고 장력은 크게하는 방향으로 설계되었다. 판토티그래프는 집전부의-경량화, 공기저항 및 소음의 최소화, 집전 전류용량의 증대를 통해서 한 대의 판토티그래프로 운행이 가능토록 하므로써 집전성능을 향상시키고 있다.

이러한 기술개발의 배경에는 가선/판토티그래프 시스템에 대한 수치 모의 해석 및 성능시험이 큰 역할을 하여 왔다. 특히, 실험이 용이하지 않는 가선/판토티그래프 시스템의 특성을 감안 할 때, 수치 모의 해석은 가선-판토티그래프 시스템의 동적 거동에 영향을 주는 많은 성능변수에 대한 분석 및 최적화에 경제적이고 유용한 방법이 되고 있다.[1, 2, 3]

본 논문에서는 두 개의 전용해석 프로그램을 사용하여 가선계와 가선/판토티그래프 접촉부의 거동특성에 대한 수치 모의 해석을 수행한 결과를 설명하고자 한다. 첫 번째 프로그램은 전차선 및 조가선을 인장보로 간주하고 유한 요소법을 사용하여 가선계의 동특성 파악에 초점을 맞추어서 가선계의 설계 파라미터들이 미치는 영향을 살펴 보았다. 두 번째 해석 프로그램은 전차선 및 조가선을 유한개의 집중 질량을 갖는 현으로, 판토티그래프는 3자유도를 갖

\* 홍익대학교 기계공학과, 정회원  
\*\* 기계연구원 신교통기술 연구부, 정회원

는 선형 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 모델링하여 유한 차분법에 기초한 접촉부의 수치해석을 수행하도록 구성하였다. 위의 두 해석 프로그램을 이용하여 가선계 거동에 대한 이해를 기반으로 전차선/조가선의 장력 및 내부감쇠, 행거특성, 열차의 속도 등 주요 변수들이 집전 성능에 미치는 영향을 종합적으로 규명하고자 한다. 프로그램 수행 시 입력 파라미터는 한국형 고속 전철인 KTX 사양에 기초하였다.

## 2. 가선계 및 가선계/판토크레프의 수학적 모델

### 2.1 가선계의 유한요소 모델링

가선계의 유한요소 모델을 구성하는 주요 부분과 그에대한 유한요소 모델링은 다음과 같다. 전차선(contact wire, Fig. 1의 ①)은 열차 위의 pantograph(집전계)와 직접적인 접촉을 하여 전기를 공급하는 부분이고, 조가선(messenger wire, Fig. 1의 ②)은 전주에 직접 현수되어 가능한한 전차선의 기울기가 작아지도록 지지하는 역할을 한다. 이 두 선은 자체 강성을 갖고 장력을 받는 인장보로 모델링 한다. 행거(Fig. 1의 ③)는 전차선과 조가선을 연결시키며, 전차선의 하중을 조가선에 전달하기 위해 설치되는 선밀도가 일정한 cable로서 평행위치로부터

압축과 인장에 대해 다른 성질을 갖는 비선형 요소이다. 곡선당김금구(Fig. 1의 ④)는 전차선에 수직하중을 가하지 않으므로 집중질량으로 하였고 지지대(supporter Fig. 1의 ⑤)는 등가한 스프링-질량계로 모델링 하였다.[4]

지금까지 설명한 요소들을 조합하여 가선계의 해석을 위한 유한 요소 모델을 구성하여 모델을 구성하였다. 각 경간마다 9개의 행거를 배치하여 3경간과 6경간을 갖는 가선계를 구성하고 경계조건으로 양단을 고정 시켰다. 가선계의 유한요소 모델의 개략적인 배치는 Fig. 2에 나타나 있다.

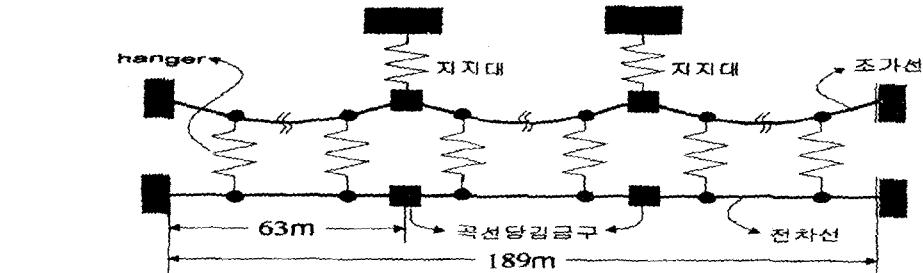


Fig. 2 3 span KTX catenary model

### 2.2 유한차분법을 이용한 가선계/판토크레프의 모델링

Fig. 3은 가선의 한 구간으로서 가선의 양단은 지지 기둥에 의해서, 조가선은 고정되어 있고 전차선은 가동 브라킷의 곡선당김장치에 의해서 현수되어 있다. 전차선과 조가선은 각각 유한개의 집중질량으로 이루어진 현(string)으로 모델링 되고 일정한 장력이 작용하고 있다. 판토크래프(pantograph)는 전차선으로부터 열차에 전력을 공급하는 역할을 수행하며, 질량과 강성을 갖는 3자유도(panto head( $M_p$ ), head supporter( $M_h$ ), panto frame( $M_f$ ))선형 등가 모델로 모델링 하였다.[6]

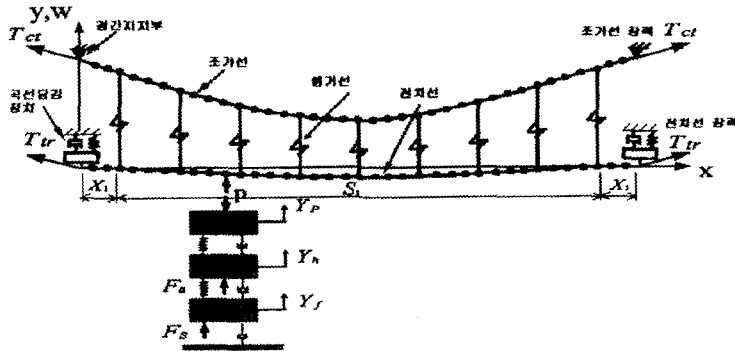


Fig. 3 단순 가선계 및 판토크래프의 구조 및 제원

### 3. 가선계의 진동 특성

가선계의 유한요소 모델에 기초한 수치해석을 통하여 가선계의 진동특성과 설계변수에 따른 가선계 응답의 변화를 살펴 보기로 한다. 가선계의 모델에 충격 가진을 주었을 때의 전차선 응답을 주파수 분석하여 Fig. 4와 5에 도시하였다. 전차선과 조가선의 경우 각각 단일 구조물일 경우 파속은 Eq.(1)에 의해 결정된다.

$$c = \sqrt{\frac{T}{2\rho A} + \left[ \left( \frac{T}{2\rho A} \right)^2 + \left( \frac{EI}{\rho A} \omega^2 \right)^2 \right]^{1/2}} \quad \text{Eq. (1)}$$

	Contact wire	Messenger wire
T	20000 N	14000 N
E	$1.18 \times 10^{11}$ Pa	$1.10 \times 10^{11}$ Pa
$\rho$	$8.893 \times 10^4$ kg/m <sup>3</sup>	$9.238 \times 10^4$ kg/m <sup>3</sup>
A	0.000150 m <sup>2</sup>	0.00006549 m <sup>2</sup>

Table.1 가선계 사양

Eq. 1에서  $c$ 는 파속,  $T$ 는 장력  $\rho$ 는 밀도,  $A$ 는 단면적,  $\omega$ 는 해당 주파수를 의미한다. 가선계의 주요 사양은 Table. 1에 나타나 있다. 이식에 의하여 계산된 파속은 50Hz 이하의 저주파 영역에서 전차선의 경우 122.4m/s~122.9 m/s, 조가선의 경우 152.12m/s~152.98m/s로 계

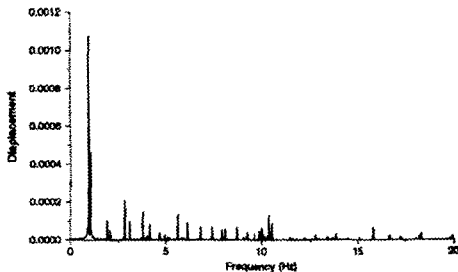


Fig. 4 displacement FRF

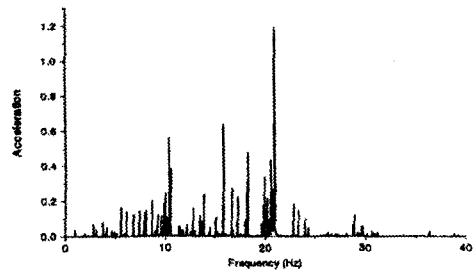


Fig. 5 acceleration FRF

산 된다. 그러나 전체 가선계 구조물의 파속은 시뮬레이션 결과 크게 변화함을 알 수 있었다. 전차선과 조가선이 드래피에 의해 상호 연계되어 있기 때문에 시뮬레이션 결과 전차선의 평균 파속은 136m/s로 증가하고 조가선의 평균 파속은 136m/s로 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 전차선 파속이 135m/s 일 때 특정 구간을 한번 왕복하는데 소요되는 시간의 역수로 계산된 주파수 성분은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f = \frac{\gamma c}{2\pi} = \frac{\frac{2\pi}{\lambda} c}{2\pi} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l} \quad \text{Eq. (2)}$$

f : natural frequency    l : length    λ : wave length    γ : wave number

Eq.(2)에 경간의 길이를 대입하면 1.0 Hz성분을, 행거의 간격을 대입하면 10.5Hz와 21.0Hz (배수성분에 해당)를 얻을 수 있다. 이와 같은 결론을 확인시키기 위하여 1.0Hz, 10.5Hz, 21.0Hz의 조화가진을 해주고 전차선의 응답을 구하였다. Fig. 6는 1.0Hz의 조화가진 시 응답이 경간을 경계로하여 상하운동을 보이고 있고, Fig. 7은 21.0Hz 가진 시 응답이 행거를 경계로 거동함을 알 수 있다. Fig. 6의 수직선은 경간을, Fig. 7의 수직선은 행거를 의미한다.

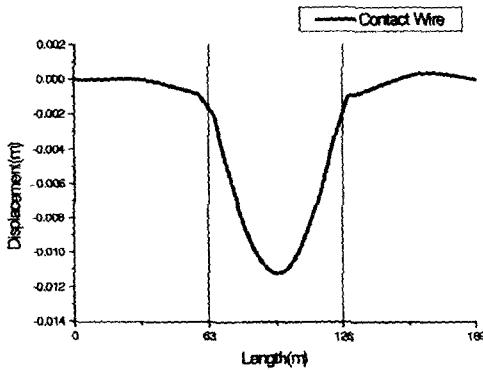


Fig. 6 1Hz harmonic excitation

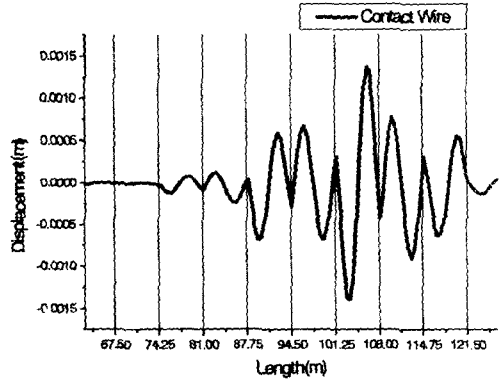


Fig. 7 21Hz harmonic excitation

가선계 모델의 주요 파라미터인 행거의 강성 및 간격, 장력을 변화시켜, 가선계의 충격 응답을 구하는 시뮬레이션을 수행하였다.

### 3.1 장력의 증가에 따른 변화

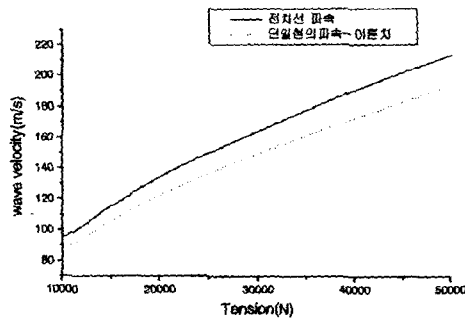


Fig. 8 wave velocity vs tension

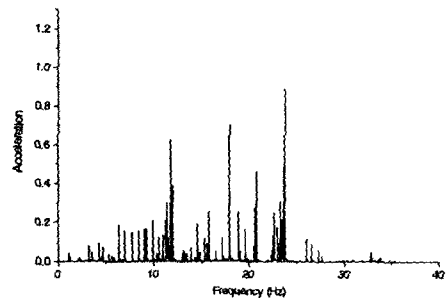


Fig. 9 acceleration FRF-tension 26000N/18200N

장력의 변화는 가선계 구조물의 파속의 변화를 의미하며 주파수 전 대역에 걸쳐서 고유 주파수를 변화 시킨다. 가선계 구조물의 장력의 증가에 의한 파동 전파 속도의 증가는 개개의 선 경우와 같이 50Hz 이하의 저주파 영역에서  $\sqrt{T}$ 에 비례하는 결과를 얻을 수 있었고 (Fig. 8), 그에 비례하는 고유주파수의 변화를 볼 수 있었다. 또한 Fig. 5와 비교한 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 장력이 증가할 경우 동적 변화량의 폭이 감소하고 있음을 알 수 있었다.

### 3.2 행거 강성 및 간격에 따른 변화

행거의 강성은 가선계의 전반적인 진동 특성에 지대한 영향을 미친다. 행거의 강성이 작을 경우 전차선과 조가선은 각각 서로 다른 구조물로 개개의 파속을 유지하며 (Fig. 10) 서로 다른 진동특성을 유지하여 행거 간격에 의한 주파수나 경간 성분이 미미하게 나타나고, 경계조건에 의하여 반사되어 나오는 파로 인한 진동이 지배적이 되는 결과를 보인다. (Fig. 11)

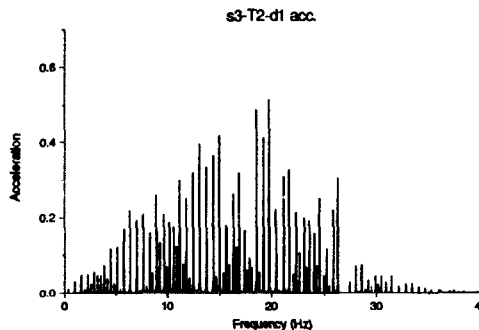
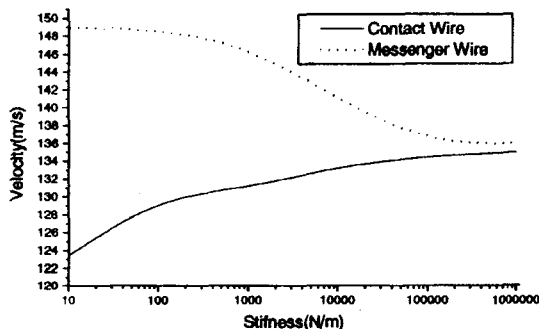


Fig. 10 Wave Velocity for Dropper Stiffness-linear model Fig. 11 acceleration FRF-dropper stiffness 10N(linear)

행거의 강성이 강할수록 전차선과 조가의

파속은 서로 근접하고, 경간 및 행거 경계에서 파동 반사 특성에 의한 주파수가 발생한다.

경간당 드래퍼 수 (개)	전차선 변위 표준편차(mm) 90m지점
6	10.311
9	9.961
12	9.919

Table. 2 드래퍼 수에 따른 변화

또한 행거는 전차선의 동적 하중을 조가선으로 확산시키는 역할을 수행하며, 이러한 동적 하중의 확산은 행거의 수가 많을수록 유리하다는 것을 알게 된다. 행거의 수가 증가할수록 전차선의 동적 변화량은 감소하고 (Table.2) compliance가 균일해지는 결과를 가져왔고, 행거 사이

간격의 감소로 해당 주파수가 비례하여 증가하게 된다.[5]

### 4. 가선계/판토타그래프의 집전 성능

유한차분법에 기초한 가선계/판토타그래프의 수치해석 프로그램을 이용하여 접촉부의 운동을 시뮬레이션 하였다. 접촉부에서는 열차의 운행 속도, 판토타그래프의 고유주파수, 3절에서 언급한 가선계의 고유 특성이 맞물려 집전 성능이 결정되게 된다. 열차의 속도, 가선계에 걸리는 장력 및 감쇠계수, 행거수의 변화가 접촉부의 운동에 미치는 주요 인자로 파악되었다.

#### 4.1 속도 변화에 따른 집전시스템의 반응

전차의 속력 변화에 따른 집전 시스템의 응답을 관찰하기 위하여 속도를 200km/h, 250km/h, 300km/h의 속도로 시뮬레이션해 보았다. Fig. 11과 Fig. 12는 팬티그래프가 인류 구간 중 4번째 경간을 지날때의 접촉력의 변화를 50Hz로 필터링한 결과를 그린 것으로 행거 부분에서 강성 및 질량의 증가로 인하여 접촉력이 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig 14 과 Fig. 15는 경간을 통과할 때, 이 구간내에서 판토헤드의 가속도를 FFT를 사용하여 주파수 분석한 것으로 속도가 증가할수록 고주파 성분이 두드러지게 나타나고있다.

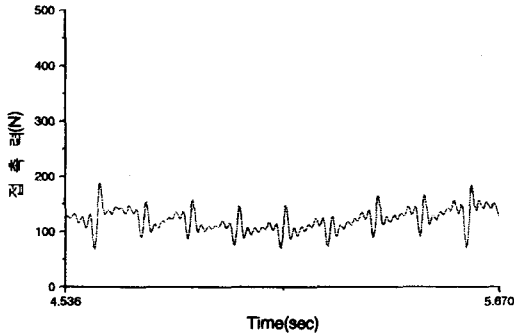


Fig. 12 Velocity = 200 km/h

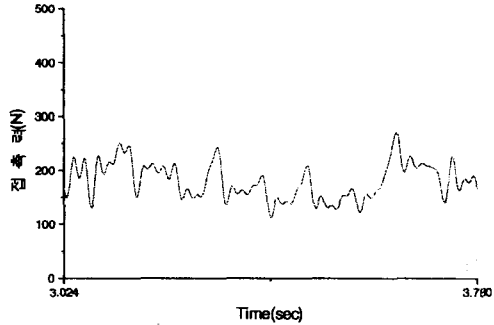


Fig. 13 velocity = 300 km/h

Fig. 14에서 7.7Hz 성분은 판토헤드의 고유진동수이고, 8.2Hz 성분은 행거 간격(6.75 m)에 의하여 발생하는 주파수이며, 이는 행거 간격을 열차의 주행속도로 나눈 수의 역수로 구한다. 행거 간격에 의하여 발생하는 주파수는 열차 속도의 증가에 따라 Fig. 15의 12.3Hz로 이동하게된다. 또한 경간길이(63m)에 대한 주파수 성분 즉 경간 길이를 열차의 주행 속도로 나눈 시간의 역수는 200 km/h의 속도에서 0.9Hz로 나타나고, 300km/h에서는 1.3Hz 옮겨짐을 알 수 있다. 또한 이선률 역시 상당히 큰 폭(0.0130 % → 0.7346%)으로 증가하는 현상이 나타나는데 이는 속도가 증가함에 따라 동적 변위의 폭이 증가하기 때문이라 생각된다.

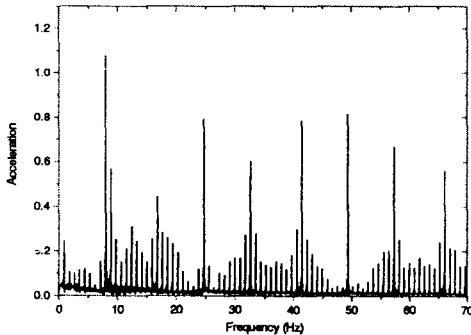


Fig. 14 velocity = 200 km/s  
판토헤드의 가속도 주파수 선도

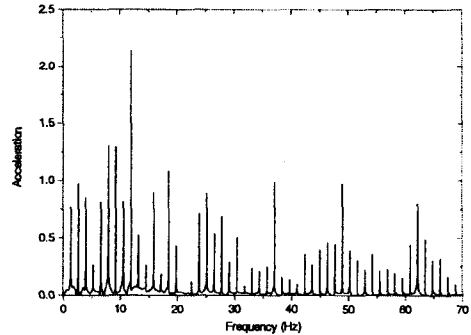


Fig. 15 velocity = 300 km/h  
판토헤드의 가속도 주파수 선도

## 4.2 장력의 증가에 따른 집전시스템의 응답

현(string)모델에서 장력의 증가는 파동전파속도의 증가를 초래하고 이는 상대적으로 고주파성분의 증가와 균일한 compliance를 발생할 것으로 예상되어 그에 따른 집전 시스템의 응답을 보고자 전차선과 조가선의 장력을 증가시키며 시뮬레이션 해 보았다. 가선계 장력의 증가는 팬터그래프 궤적과 가속도의 변화량의 폭을 줄이게 된다. 장력의 증가는 가선계 강성의 증가로 인하여 전차선과 팬터그래프의 동적 변화량의 폭을 감소시킴으로서 이선들의 감소현상을 보이고 있으며, 접촉력에 있어서는 이선들의 감소로 증가하는 양상을 보이고 있다고 있다.[5]

## 4.3 행거수 변화에 따른 집전시스템의 응답

행거수의 증가는 전차선의 compliance를 균일하게 하고, 전차선의 자중과 강성을 증가시키는 결과를 발생시키므로 그에 따른 집전 시스템의 응답 특성을 변화시키며, 주요한 설계변

속도 km/h	접촉력(N)			이선률(%)		
	9개	11개	13개	9개	11개	13개
200	121	122	122	0.013	0.007	0.000
250	148	150	152	0.133	0.041	0.025
300	190	190	191	0.734	0.724	0.653

Table. 3 행거수에 따른 가선계의 응답

수가 될 수 있다. 9개의 행거를 갖는 가선계와 비교하여 행거 수를 13개로하여 나온 결과치는 행거 사이의 간격이 6.75m에서 4.5m로 감소함에 따라 행거 간격에 의해 발생하는 주파수가 고주파 영역으로 이동하였음을 보여주고 있다. 또한 행거 경계에서 반사하는 파동전파속도(135.0m/s)에 의한 주파수 역시 10.5Hz에서 11.8Hz로 이동함을 알 수 있다.[4] Table. 3을 보면 행거수의 증가에 따라 접촉력은 증가하고 이선률은 감소함을 알 수 있다. 이는 행거수의 증가에 따라 가선계의 강성과 질량에 의한 관성력이 전체적으로 증가하게 되고 그에 따라 전차선의 동적 거동의 폭이 감소하여 팬터그래프와 전차선의 접촉이 원활하게 이루어 지고있음을 의미하는 것이다. 행거수의 증가는 이선의 측면에서 볼 때 유리하지만, 경제적인 측면을 고려하여 최적의 행거 수를 결정하여야만 할 것이다.

## 4.4 감쇠계수의 변화에 따른 가선 시스템의 응답

전차선 및 조가선의 내부감쇠는 에너지의 소산을 발생시켜 동적 변위의 폭을 감소시키므로 가선계의 동적 응답의 폭을 감소시키는 현상을 볼 수 있었다.

Fig.16와 Fig. 17은 감쇠계수의 증가에 따라 동적 변위의 폭이 20Hz 이상에서 확연하게 감

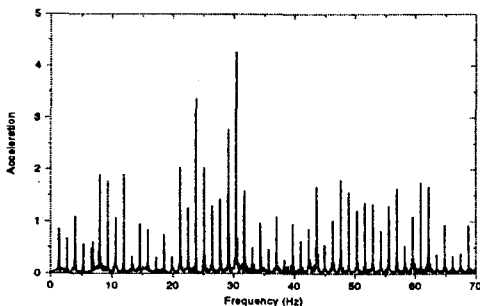


Fig. 16 판토타헤드의 가속도 주파수 선도  
전차선  $\xi = 0.000005$  조가선  $\xi = 0.000001$

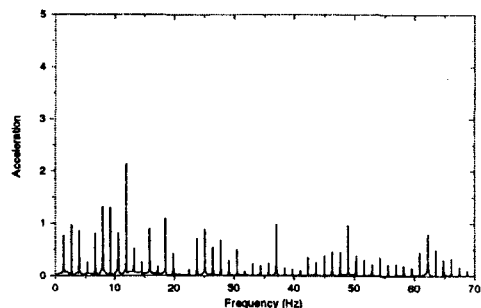


Fig. 17 판토타헤드의 가속도 주파수 선도  
전차선  $\xi = 0.05$  조가선  $\xi = 0.01$

소함을 알 수 있으며 고주파 영역일수록 감쇠의 영향이 큰 것으로 관찰된다. 전체적으로 peak의 크기는 감쇠계수의 증가에 따라 감소하며 고르게 분포되는 것을 볼 수 있었다. 파동이 경간에서 반사하는 1.07Hz 성분은 판토그래프의 속도에 의한 1.3Hz 성분에 비하여 미미하고 접촉력이나 이선률은 가선계의 고유 특성과 함께 판토그래프의 속력에 크게 의존하는 것을 알 수 있었다. 감쇠계수의 증가에 따라 전차선과 판토그래프의 이선률은 감소하고, 접촉력은 증가하는 성향을 보였다.

## 5. 결론

전용해석프로그램들을 개발하고 수치모의해석을 통하여 가선계와 가선/판토그래프 접촉부의 동특성을 살펴보았다. 집전시스템을 구성하는 주요인자인 전차선/조가선의 장력 및 내부감쇠, 행거특성, 열차의 속도 등이 동특성에 미치는 영향을 수치적으로 도출하였다. 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

### · 가선계 거동

가선계 진동의 주요성분은 파동이 경간과 행거의 경계에서 반사되면서 소요되는 시간과 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 경간 및 행거 사이의 거리, 장력변화에 의한 파속변화 등은 이에 상응하는 진동성분의 변화를 유발한다. 또한 전차선과 조가선을 연결하는 행거의 강성 증가는 전차선 및 조가선의 파속을 균일화시키고, 두 선 사이의 연계를 강화하므로 가선계의 진동 특성에 지대한 영향을 미친다.

### · 가선/판토그래프 접촉부 거동

가선계의 고유 특성과 판토그래프의 고유 주파수 및 운행 속도가 맞물려서 집전 특성을 결정한다. 열차의 운행속도증가는 접촉부의 동적 변위의 폭을 증가시키고 이선률을 대폭 증가시킨다. 실제로 접촉력과 이선률은 가선계의 고유 특성과 함께 판토그래프의 속도에 크게 의존한다. 가선계의 내부감쇠가 증가할수록 20Hz 이상의 진동성분이 급격히 감소되며 장력 증가, 행거수의 증가등과 함께 이선률을 감소시킨다.

## <參考文獻>

- [1] 정대현, 최연선(1991), "고속전철 Catenary / Pantograph계의 동적응답에 대한 수치해석", 대한기계학회 춘계학술대회논문집(1)
- [2] 이종곤, "전차선로의 특성과 설계", 한국 고속철도건설공단 전기시설본부, 1993
- [3] 김정수, 최병두(1999), "가선계의 동특성에 관한 연구", 한국소음진동학회지, 제 9권 제 2호. pp.312~323
- [4] 김정수, 안성태, "TGV-K 가선계의 동적응답해석", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집 p.262~268
- [5] 박성훈, 김정수, 허신, 경진호, 송달호 "다양한 외력에 대한 가선계 구조물의 진동특성 해석" 한국소음진동학회 1999년도 춘계학술대회논문집, pp.448~454.
- [6] 허신, 경진호, 송달호, 박성훈, 김정수, "집전시스템의 동적 수치모의해석에 관한 연구" 한국철도학회 1999년도 춘계학술대회논문집, pp. 151~157.