

TGV-K 집전 시스템의 동특성 해석

박성훈* 김정수** 허신*** 경진호*** 송달호***

On Dynamic Characteristics of TGV-K Pantograph-Catenary System

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

ABSTRACT

Dynamic characteristics of pantograph-catenary system that supplies electrical power to high-speed trains are investigated. A simple catenary is composed of the contact and messenger wires connected by hangers possessing bi-directional stiffness properties. The influences of parameters that determine the contact properties of pantograph - catenary system are investigated through numerical simulations. For the catenary, a finite difference model composed of 10 spans is constructed. The contact and messenger wires are modeled as strings with respective tension and damping ratio values. The pantograph is modeled as a linear 3-degree-of-freedom system. It is found that the tension, number of hangers and damping ratios as well as the speed of the train significantly influence the contact forces and contact separation rate

1. 서론

고속철도는 그 빠른 속도, 안정성, 편리함 등의 특징으로 인하여 차세대 운송기관으로 각광을 받고 있으며, 현재 고속철도 사업의 초기 단계인 우리나라는 관련기술 확보에 주력하고 있다. 고속 전철의 집전 장치는 전주 위에 가설된 가선계(catenary)와 열차위에 가설된 집전계(pantograph)로 이루어져 있으며 이상적인 집전성능을 유지하기 위해서는 열차주행시 가선계와 집전계가 완벽한 접촉을 유지하여 안정된 전력 공급이 이루어져야만 한다. 그러나 열차의 운행속도 상승은 가선계 동적 변화의 폭을 증가시켜 가선계와 집전계의 단락(이선)을 발생시키며, 이에 따른 아크, 전기적 충격과 마모로써 집전 장치를 손상시킨다. 따라서, 집전 시스템의 동특성을 파악하고, 동적 변화의 폭을 줄이려는 연구가 이미 외국에서는 진행되어 왔다.

본 연구에서는 고속전철 집전 현상의 동특성 파악에 초점을 맞추고, 시간에 따른 전차선과 팬터그래프의 궤적, 전차선과 팬터그래프 사이의 접촉력을 구하였다. 이의 수행을 위하여 전차선과 조가선은 현(string)으로 모델화하고 행거 부는 비선형 모델로 모델링하여, explicit의 수치해석적 방법을 채택하여 시뮬레이션하였다.

* 홍익대학교 기계공학과, 정회원
** 홍익대학교 기계공학과 교수, 정회원
*** 기계연구원 신교통신기술 연구부, 정회원

2. 집전 시스템의 모델링

집전 시스템은 크게 가선계와 팬터그래프의 두 부분으로 나누어지며 주요 부분에 대한 모델링은 다음과 같다.

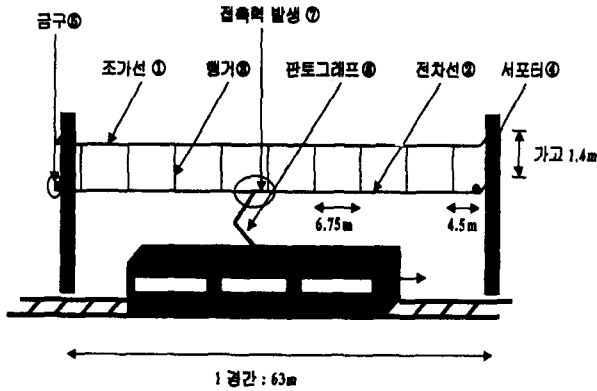


그림 (1)

가선(그림 1의 ②)은 전주에 현수되어 전차선을 지지하는 역할을 수행하며, 현(string)으로 모델링 되었다.

▷ 행거(hanger) : 행거(그림 1의 ③)는 전차선과 조가선을 연결시켜 전차선의 동적 하중을 조가선에 확산시키는 역할을 수행하는 cable로서 인장시 강체, 압축시 힘을 받지 않는 비선형 모델로 가정되었다. Hanger Force는 (그림 2)의 알고리즘으로 결정하게 된다,

▷ 지지대(supporter) : 지지대(그림 1의 ④)는 조가선만을 지지하는 역할을 수행하며, 전차선에 대하여는 어떠한 구속력도 가하지 못하는 것으로 가정되었다.

▷ 곡선당김금구(steady arm) : 곡선당김금구(그림 1의 ⑤)는 전차선과 접촉하는 팬터그래프의 스펀이 한쪽만 마모되는 것을 방지하기 위하여 전차선에 편위를 주는 부분으로 전차선에 수직하중을 가하지 않으므로 강성효과는 무시할 수 있고 질량만 갖는 lumped mass로 가정하였다.

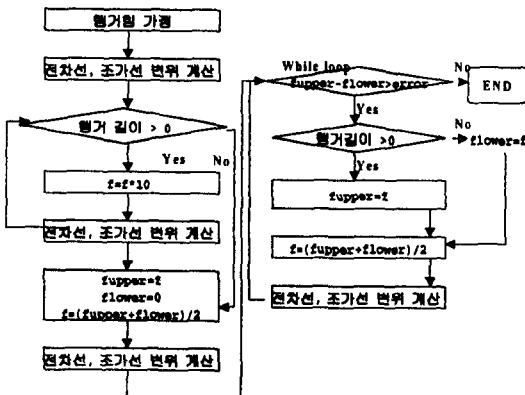


그림 (2) 행거힘 결정 알고리즘

- 집전 시스템의 모델링

▷ 전차선(contact wire) : 전차선(그림 1의 ①)은 열차 위에 설치된 팬터그래프와 직접적인 접촉을 이루어 전기를 공급하는 부분이며, 탄성이 큰 경간 중앙에서도 팬터그래프의 상승량(압상량)이 가능한 한 일정하도록 일정한 세그(sag ; span length/2000)를 주고 있다. 현(string)으로 모델링 되었다.

▷ 조가선(messenger wire) : 조

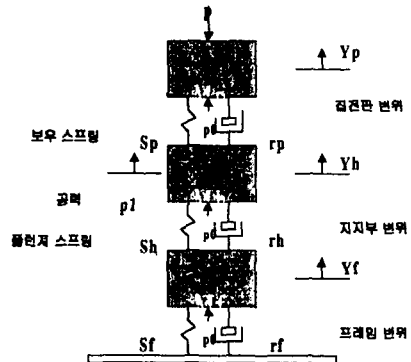


그림 (3) 팬터그래프 3자유도 등가모델

▷ 팬터그래프(pantograph) : 팬터그래프(그림 1의 ⑥)는 전차선으로부터 열차에 전력을 공급해주는 역할을 수행하며, 정적 평형위치를 중심으로 질량과 강성, 감쇠를 갖는 3자유도(그림 (3), panto head, head supporter, panto frame) 동가모델로 모델링되었다. 팬터 그래프는 정적 압상력과 속도의 제곱에 비례하는 양력을 받고 있어 전차선과 원활한 접촉을 도모하도록 설계되어 있으며, 팬터그래프와 전차선의 접촉력은 trial-error방법을 채택하여 팬터그래프의 변위가 전차선의 변위보다 클 경우 접촉력을 증가시키며 일정 error조건을 만족시키도록 하였다.

지금까지 설명한 요소들의 프로그램 수행 시 입력 파라미터는 아래와 같다.

- ▷ 전차선 => 장력 : 20000 N 선밀도 : 1.334 kg/m
- ▷ 조가선 => 장력 : 14000 N 선밀도 : 0.605 kg/m
- ▷ 판토헤드 => 질량 : 8.1 kg 댐핑 : 6.0 N-s/m 스프링 계수 : 9000 N/m
- ▷ 헤드서포터 => 질량 : 8.0 kg 댐핑 : 0.0 N-s/m 스프링 계수 : 1500 N/m
- ▷ 판토프레임 => 질량 : 23.1 kg 댐핑 : 140.0 N-s/m 스프링 계수 : 9000 N/m
- ▷ 인류구간 => 10개의 경간으로 구성되어 있고, 모든 프로그램의 수행은 이를 바탕으로 하였다.

3. 설계 파라미터의 변화에 따른 집전 시스템의 응답

고속 전철의 이상적인 집전성능을 위해서는 열차 주행시 전차선과 팬터그래프가 완벽한 접촉을 유지하여 안정된 전력공급이 유지되어야만 한다. 이 장에서는 이러한 집전 성능에 영향을 미치는 설계변수들 중에서 중요한 영향을 미치고 있는 전차선과 조가선의 감쇠계수의 변화, 행거 개수의 변화, 장력의 변화에 따른 집전 시스템의 응답특성을 각 속도에 따라 시뮬레이션 해보았다.

3-1 속도변화에 따른 집전 시스템의 반응

우선 기본적으로 전차의 속도 변화에 따른 집전 시스템의 응답을 관찰하기 위하여 다른 설계 파라미터의 변화 없이 속도를 200km/h, 250km/h, 300km/h의 속도로 시뮬레이션해 보았다. 그림 (4)와 그림 (5)는 팬터그래프가 인류구간 중 4번째 경간을 지날때의 접촉력의 변화를 50Hz로 필터링한 결과를 그린 것으로 행거 부분에서 강성 및 질량의 증가로 인하여

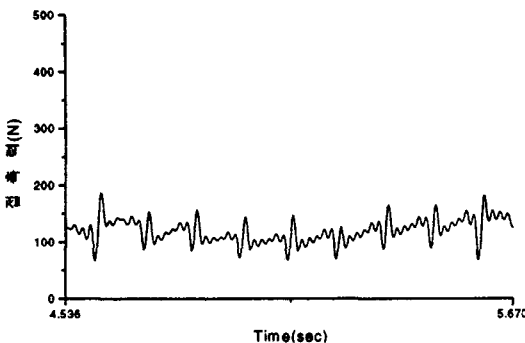


그림 (4) 속도 = 200 km/h

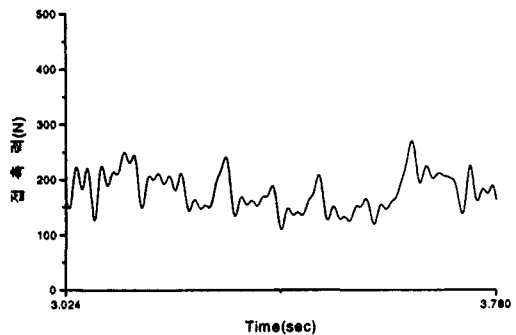


그림 (5) 속도 = 300 km/h

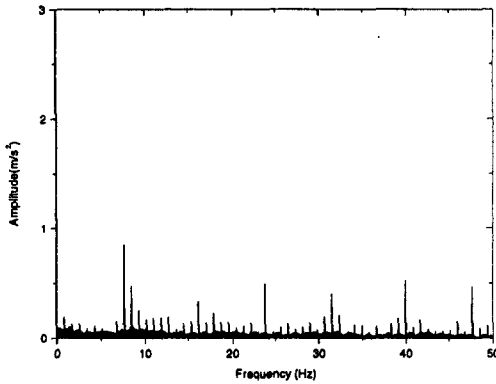


그림 (6) 속도 = 200 km/h
판토타헤드의 가속도 주파수 선도

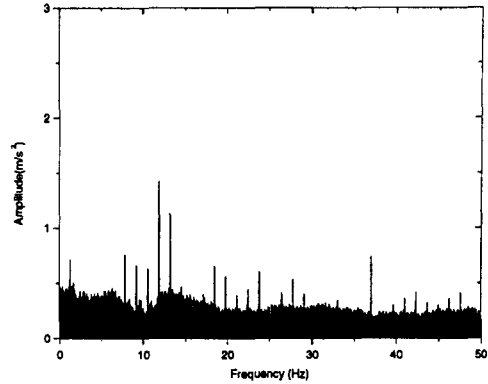


그림 (7) 속도 = 300 km/h
판토타헤드의 가속도 주파수 선도

접촉력이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 (6)과 그림 (7)은 경간을 통과할 때, 이 구간내에서 판토타헤드의 가속도를 FFT를 사용하여 주파수 분석한 것으로 속도가 증가할수록 고주파 성분이 두드러지게 나타나고있다. 그림 (6)에서 가장 큰 peak인 7.7Hz 성분은 판토타헤드의 고유진동수이고, 8.2Hz 성분은 그림 (6)에서 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 그림 (7)의 12.3Hz로 이동하게된다. 또한 경간 길이(63m)에 대한 주파수 성분은 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.

이 현상 외에도 속도의 증가와 더불어 접촉력 증가의 현상을 볼 수 있는데 이는 펜터그래프가 속도의 제곱에 비례하는 공기에 의한 양력을 받고있기 때문이며 가속도 주파수 선도에서 amplitude가 증가하는 이유도 펜터그래프의 압상력 상승에 기인한 것이다.

3-2 감쇠 계수의 변화에 따른 집전 시스템의 응답

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

프로그램을 수행하여 FFT를 통하여 분석한 가속도의 주파수 선도 및 선도 및 접촉력은 그림 (8) ~ (11)에 나타나있다. 그림 (8)과 그림 (9)에서 접촉력은 경간 중앙에서 감소하다가 지지대 부근에서 증가함을 알 수 있는데, 이는 지지대에서 질량과 강성이 증가하기 때문이라 생각된다. (그림8)과 (그림9)은 감쇠계수의 증가에 따라 동적 변위의 폭이 20Hz 이상에서 확연하게 감소함을 알 수 있으며 고주파 영역일수록 감쇠의 영향이 큰 것으로 관찰된다.

감쇠의 크기에 따른 접촉력과 이선률의 결과치는 표 (1)에 정리되어 있다. 감쇠계수의 증가에 따라 전차선과 펜터그래프의 이선률은 감소하고, 접촉력은 증가하는 결과를 보였다.

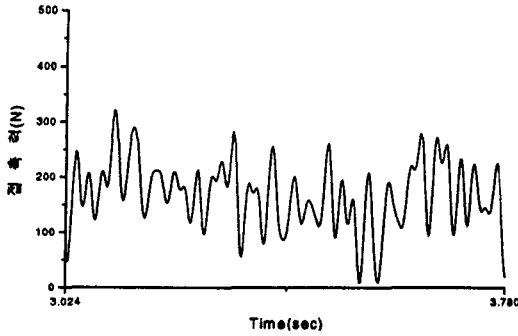


그림 (8) 속도=300 km/h
전차선 $\zeta=0.000005$ 조가선 $\zeta=0.00001$

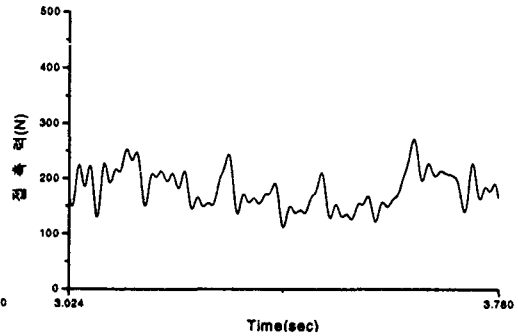


그림 (9) 속도 = 300 km/h
전차선 $\zeta=0.05$ 조가선 $\zeta=0.01$

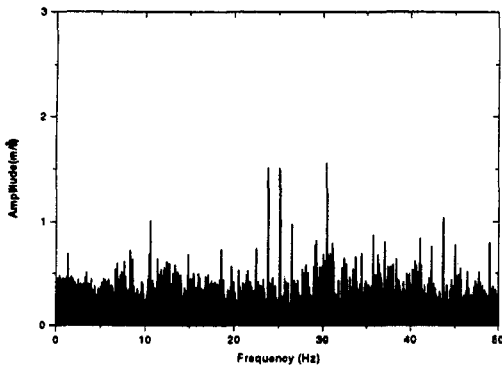


그림 (10) 판토히드의 가속도 주파수 선도
전차선 $\zeta=0.000005$ 조가선 $\zeta=0.00001$

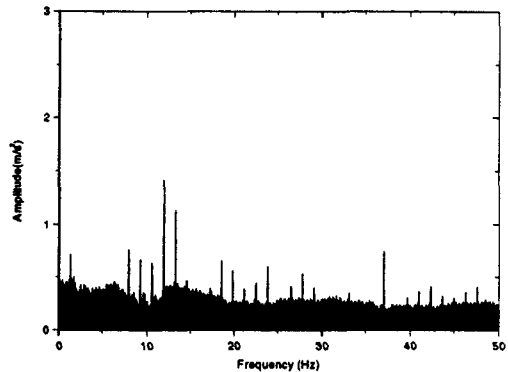


그림 (11) 판토히드의 가속도 주파수 선도
전차선 $\zeta=0.05$ 조가선 $\zeta=0.01$

표 (1) 감쇄계수에 따른 접촉력과 이선률

전차선(ζ)	조가선(ζ)	접촉력(N)	이선률(%)
0.000005	0.000001	172.9447751	19.6382
0.000020	0.000004	171.6707213	19.3763
0.000500	0.000100	166.7490597	11.6877
0.002000	0.000400	168.0922399	6.4985
0.005000	0.001000	176.1740538	4.6894
0.010000	0.002000	188.8868127	2.0947
0.020000	0.004000	188.6110695	2.2139
0.030000	0.006000	185.4202114	1.2855
0.040000	0.008000	184.5263540	0.7142
0.050000	0.010000	183.5484440	0.7346
0.060000	0.012000	180.5486152	0.6031
0.070000	0.014000	178.6978216	0.3071

3-3 행거 개수의 변화에 따른 집전 시스템의 응답

행거 수의 증가는 전차선의 compliance를 균일하게 하고, 전차선의 자중과 강성을 증가시키는 결과를 발생시키므로 그에 따른 집전 시스템의 응답 특성을 변화시키며, 주요한 설계 변수가 될 수 있다. 프로그램의 실행은 경간당 9개, 11개, 13개로 수행하였으며, 그에 따른

응답특성을 팬터그래프와 전차선의 접촉력과 이선률의 측면에서 살펴보았다. 그림 (12)는 경간당 행거수가 13개인모델의 4번째 경간에서의 시간에 따른 접촉력 변화를 나타내는 선도

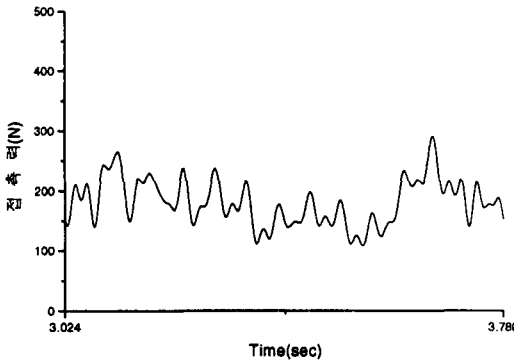


그림 (12) 속도=300 km/h 행거수 :13개

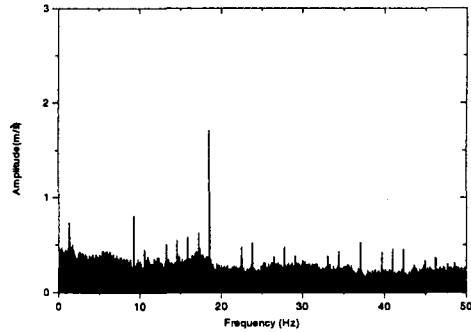


그림 (13) 행거 개수 : 13개
판토히드의 가속도 주파수 선도

이다. 경간당 9개 행거를 갖는 가선계와 비교하여 peak의 수도 13개로 증가하는 것을 알 수 있다. 경간당 9개의 행거를 갖는 가선계와 비교하여 행거 수를 13개로하여 나온 결과치는 행거 사이의 간격이 6.75m에서 4.5m로 감소함에 따라 행거 간격에 의해 발생하는 주파수(18.5Hz)가 고주파 영역으로 이동하였음을 보여주고 있다. 또한 파동전파속도(122.34m/s)에 의한 행거간격의 주파수 역시 9.1Hz에서 13.6Hz로 이동함을 알 수 있다. 그러나 20Hz이상의 주파수에서는 동적 변위의 폭이 행거 9개의 모델보다 감소함을 알 수 있다.

(표 2) 행거수에 따른 가선계의 응답

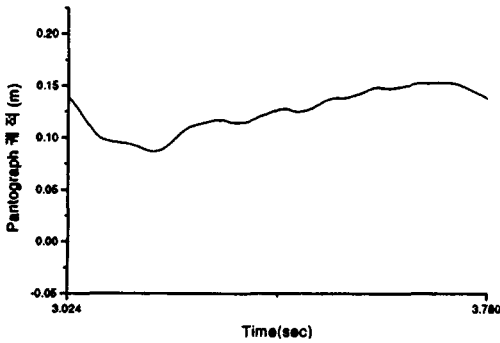
열차속도	접촉력(N)			이선률(%)		
	9개	11개	13개	9개	11개	13개
200 km/h	121.7915448	122.3163594	122.3664240	0.0136	0.0068	0.0000
250 km/h	148.7772444	150.2596960	152.1570218	0.1329	0.0415	0.0249
300 km/h	182.4435670	182.7967044	183.5866238	0.7244	0.7244	0.6530

(표 2)를 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 이루어지고 있음을 의미하는 것이다. 행거수의 증가는 이선의 측면에서 볼 때 유리하지만, 경제적인 측면을 고려하여 최적의 행거 수를 결정하여야만 할 것이다.

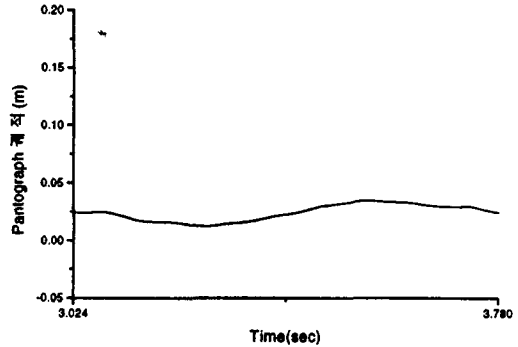
3-4 장력의 변화에 따른 집전 시스템의 응답

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. 응답은 인류구간 중 네 번째 경간에서 팬터그래프의 궤적변화와 판토히드의 가속도 주파수 선도를 비교

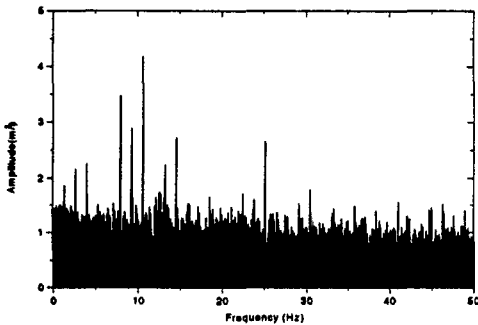
분석하였다. 그림 (14)와 그림 (15)는 장력 외의 입력 파라미터를 같게하여 장력변화만의 응답을 펜터그래프 궤적의 변화로 살펴본 것이다. 그림을 통해 가선계 장력의 증가는 펜터그래프 궤적의 변화량의 폭을 줄이고 있음을 알 수 있다. 그림 (16)과 그림 (17)의 판토크드 가속도 주파수 선도를 통해서도 응답의 변화량이 장력의 증가와 함께 감소하고 있음을 알 수 있다.



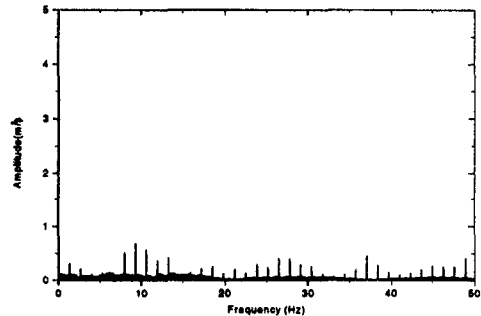
(그림 14) 전차선 장력 : 10000 N
조가선 장력 : 7000 N



(그림 15) 전차선 장력 : 40000 N
조가선 장력 : 20000 N



(그림 16) 전차선 장력 : 10000 N
조가선 장력 : 7000 N



(그림 17) 전차선 장력 : 40000 N
조가선 장력 : 20000 N

이를 접촉력의 변화와 이선의 관점에서 살펴본 결과는 아래 (표 3)과 같다.

표에서 알 수 있듯이 장력의 증가는 가선계 강성의 증가로 인하여 전차선과 펜터그래프의 동적 변화량의 폭을 감소시킴으로서 이선률의 감소현상과 보이고 있으며, 접촉력에 있어서

(표 3) 장력의 변화에 따른 접촉력, 이선률의 변화

전차선 장력(N)	조가선 장력(N)	접촉력(N)	이선률(%)
10000N	7000	132.3530456	18.6716
16000N	10000	167.7605857	2.9895
20000N	14000	182.5799816	0.7244
22000N	16000	182.1347737	0.7946
40000N	20000	188.4070281	0.7357

는 이선률의 감소로 증가하는 양상을 보이고 있다.

3-5 가선계의 진동특성

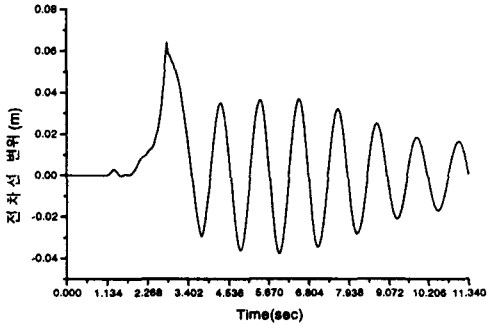


그림 (18) 시간에 따른 전차선 변위

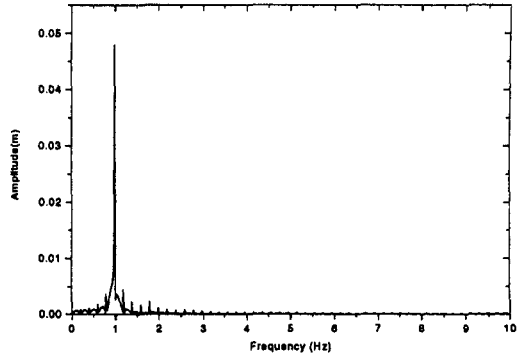


그림 (19) 전차선 변위의 주파수 분석

가선계의 고유특성을 알아보기 위하여 열차가 200km/h의 속도로 지나갈 때 전차선 155.7m의 거리에서 응답을 본 것이 그림 (18)과 그림 (19)이다. 그림 (19)는 팬터그래프가 관찰 지점을 지나가고 난 후 steady state(3.402sec 후)부분을 주파수 분석한 것이며 주파수는 0.95Hz 부근에서 가장 큰 peak이 나타나고 있다. 이는 파동전파속도에 의한 경간길이(63m)의 성분이라 생각된다. 실제로 열차의 속도를 달리하여도, 그와 무관하게 0.95Hz부근에서 큰 응답이 나타나고 있다.

4. 결론

집전시스템을 explicit 유한차분 모델로 구성하였다. 집전계의 동 특성 중 접촉력과 이선률에 초점을 맞추어서 주요 설계변수의 변화에 따른 응답 특성을 구하였다.

(1) 속도 변화에 따른 응답

열차속도가 증가함에 따라 팬터그래프와 전차선 사이의 접촉력 및 이선률은 증가하며 접촉력에서의 주파수 성분이 고주파 쪽으로 이동하는 결과가 나왔다. 이선률의 증가는 동적 변위가 함께 증가하기 때문이라 생각되고, 접촉력의 증가는 양력의 증가에 의한 것이다. 또한 행거 부위에서는 강성의 증가로 접촉력이 증가하는 결과가 나왔다.

(2) 감쇠 계수의 변화에 따른 응답

감쇠계수의 증가에 따라 동적 변위의 폭이 20Hz 이상에서 확연하게 감소함을 알 수 있으며 고주파 영역일수록 감쇠의 영향이 큰 것으로 나타났다. 감쇠계수의 증가에 따른 동적 변위 폭의 감소는 전차선과 팬터그래프의 이선률을 감소시키고, 접촉력은 증가시켰다.

(3) 행거수의 변화에 따른 응답

행거수의 증가에 따라 가선계의 compliance가 균일해지고, 강성과 질량에 의한 관성력이 전체적으로 증가하게되어 전차선의 동적 거동의 폭이 감소하여 팬터그래프와 전차선의 접촉

이 원활하게 이루어지는 결과가 나왔다. 또한 행거간격이 감소함에 따라 그로 인한 주파수는 고주파로 이동함을 알 수 있었다.

(4) 조가선, 전차선의 장력 변화에 따른 응답

장력이 증가함에 따라 접촉력은 증가하고, 이선률은 감소하는 결과가 나왔다. 이는 장력의 증가로 전차선의 동적 변량이 감소하기 때문이다.

참고문헌

- [1] 최연선 외(1991), “ 고속전철 Catenary/Pantograph계의 동특성 해석” 성대논문집 제42집 No.1 pp. 377-390
- [2] 김양한 외(1992), “임의의 경계조건을 갖는 가선계의 파동 현상에 대한 고찰“, 대한 기계학회 논문집 제 16권 제 11호, pp. 2059-2071
- [3] Tetsue Shimomae 외(1977), “A Study of Pantograph for High Speed Running” Quarterly Reports of RTRI, Vol. 18 No.4 pp.163-167
- [4] Katsushi Manabe(1992), “Catenary-Pantograph System Dynamics of Speedup of Shinkansen” Quarterly Reports of RTRI, Vol. 33. No.1 pp. 36-49