

〈논 문〉

설계변수 변화에 따른 KTX 가선계의 동적응답 해석

Dynamic Simulation of KTX Catenary System for Changing Design Parameters

김 정 수* · 박 성 훈**

Jung Soo Kim and Sung Hun Park

(2000년 10월 14일 접수 : 2001년 3월 23일 심사완료)

Key Words : Catenary(가선계), Finite Element Model(유한요소모델), Wave Propagation Velocity(파동전파속도), Frequency Response Function(주파수 응답함수)

ABSTRACT

In this study, dynamic characteristic of catenary system that supplies electrical power to KTX Korean high-speed trains are investigated. A simulation program based on 3-span and 6-span finite element models of the catenary is developed. The influences of the various design parameters on the dynamic responses of the catenary are determined. The main design parameters include tension on the contact and messenger wires and the stiffness of the droppers connecting the two wires. The vibrational responses are primarily determined by the reflections of the propagating wave, and the dropper stiffness is found to be the dominant factor that influences overall dynamic characteristics of the catenary.

1. 서 론

고속철도는 그 빠른 속도, 안정성, 편리함 등의 특징으로 인하여 차세대 운송기관으로 각광을 받고 있으며, 이에 따라 고속전철의 개발 선진국에서는 각국의 상황에 맞는 시스템을 개발하여 왔다. 열차의 고속화에 따라 가선은 균일하고 작은 컴플라이언스를 유지하고 장력은 크게 하는 방향으로 설계되고 있으며, 이의 개발배경으로는 수치모의해석이 유용한 방법이 되고 있다. 따라서, 국내에서도 수치모의 해석을 활용한 집전시스템의 동적 응답 특성의 분석이 진행되어 왔다.^(1, 2)

본 연구에서는 가선계의 동특성 파악에 초점을 맞추고 유한요소 모델에 기초한 가선계의 진동특성 해석 전용 프로그램을 개발하였다. 그리고, 이 프로그램을 이용하여 계의 동특성에 중요한 영향을 미칠 것이라 생각되는 전차선

과 조가선의 파라미터 변화에 따른 가선계의 응답을 파악하고자 한다. 여기서 사용한 가선계 모델의 장력, 드래퍼의 강성, 가선계의 경간수 등은 현재 시험운행중인 한국형 고속전철 KTX의 사양(Table 1)에 기초한 것이다.

2. 가선계의 유한요소 모델링

가선계의 유한요소 모델을 구성하는 주요 부분과 그에 대한 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 가능한 한 전차선의 기울기가 작아지도록 지지하는 역할을 한다. 이 두 선은 고주파 모드에 대한 타당성을 확보하기 위해 자체 강성을 갖고 장력을 받는 인장보로 모델링 한다. 유한요소 모델의 입력 파라미터 값들은 KTX의 사양을 사용하였다.⁽³⁾

드래퍼(Fig. 1의 ③)는 전차선과 조가선을 연결시키며, 전차선의 하중을 조가선에 전달하기 위해 설치되는 선밀도가 일정한 케이블로서 평형위치로부터 압축과 인장에 대해

* 정회원, 홍익대학교 기계공학과
E-mail : jungsoo@wow.hongik.ac.kr
Tel : (02)320-1471, Fax : (02)322-7003
** 홍익대학교 대학원 기계공학과

다른 성질을 갖는 비선형 요소이다. 그러나, 전차선의 자중에 의한 초기 인장 범위내의 미세 거동의 경우에 대해 드래퍼는 인장이 지배적이라 할 수 있다. 따라서, 가선계의 응답이 커서 선형성을 잃어 버리게되는 비선형 스프링(spring) 요소와 압축과 인장에 대해 동일한 성질을 갖는 선형 스프링의 경우를 모두 살펴보았다. 압축과 인장에 대한 판단은 매 연산 시간당 확인하여 스프링의 강성을 적용하도록 하였다. 그리고, 드래퍼의 질량은 반씩 나누어 전차선과 조가선에 집중 질량으로서 적용하였다.

곡선당김금구(steady arm, Fig. 1의 ④)는 전차선과 접촉하는 pantograph의 한 곳만 마모되는 것을 방지하기 위해 전차선에 편위를 주기 위한 것으로 전차선에 수직하중을 가하지 않으므로, 강성효과는 무시할 수 있고 질량만 갖는 집중 질량으로 하였다.

지지대(supporter, Fig. 1의 ⑤)는 조가선만을 지지하고 있는 인장 보(cantilever beam)로 간주할 수 있으며 가선계의 진동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 등가한 스프링-질량(spring-mass) 요소를 사용하였다. 강성계수는 지지대에서 조가선이 등가한 응답을 나타낼 수 있도록 계산하였다.

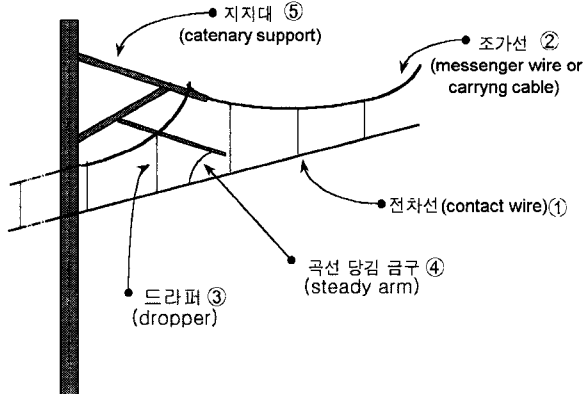


Fig. 1 Structure of catenary

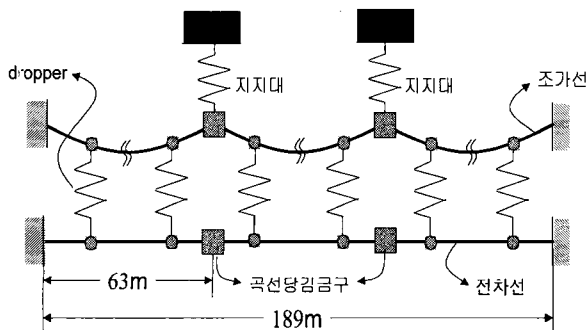


Fig. 2 3-span KTX catenary model

각 경간마다 9개의 드래퍼를 배치하여 3경간과 6경간을 갖는 가선계를 구성하고 '경계조건으로 양단을 고정 시켰다. 3경간 가선계의 유한요소 모델의 개략적인 배치는 Fig. 2에 나타나 있으며 6경간의 경우도 경간수를 제거하고는 동일한 구조를 갖고 있다.

지금까지 설명한 요소들을 조합하여 가선계의 해석을 위한 유한요소 모델을 구성하고 다음과 같은 가선계의 동적 평형 방정식을 얻을 수 있다.

$$[M]\{u(t)\} + [C]\{u(t)\} + [K]\{u(t)\} = F(t) \quad (1)$$

행렬들이 모두 symmetric and banded 특성을 가지므로 메모리 사용과 시간의 효율성을 높이기 위하여 압축시켰고 풀이 과정에서는 Wilson- θ 적분법을 사용하였다.⁽⁴⁾

3. 가선계의 거동특성

KTX 가선계의 사양(Table 1)을 시뮬레이션해서 가선계의 거동을 분석해 보았다. 사용된 전차선의 감쇠비는 5%이고 조가선의 감쇠비는 1%이다. 가선계 구조물의 성분 중 거동에 큰 영향을 미칠 것이라 예상되는 드래퍼 간격과 경간 간격에 중점을 두어 시뮬레이션 결과를 분석해 보았다. 이러한 분석은 참고문헌 (3)에 기술된 가선계의 모드 해석에 기초를 두어 이루어 졌다. Fig. 3, 4는 압축과 인장시 드래퍼의 강성이 같은 가선계 모델에 90 m 충격 가선을 주고 같은점에서의 응답을 주파수 분석한 것이다.

Table 1 KTX catenary specifications

	Contact wire	Messenger wire
T	20000 N	14000 N
E	1.18×10^{11} Pa	1.10×10^{11} Pa
ρ	8.893×10^3 kg/m ³	9.238×10^3 kg/m ³
A	0.000150 m ²	0.00006549 m ²

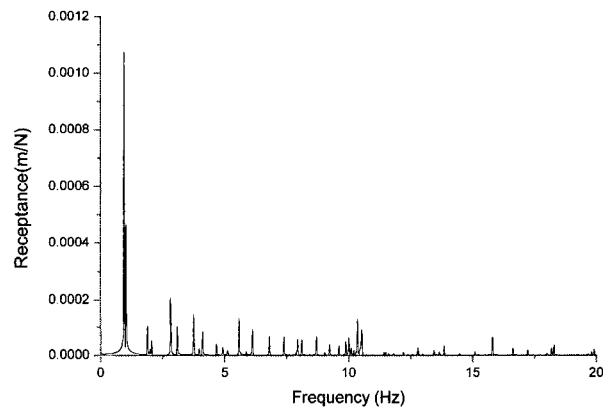


Fig. 3 Displacement FRF-linear dropper model

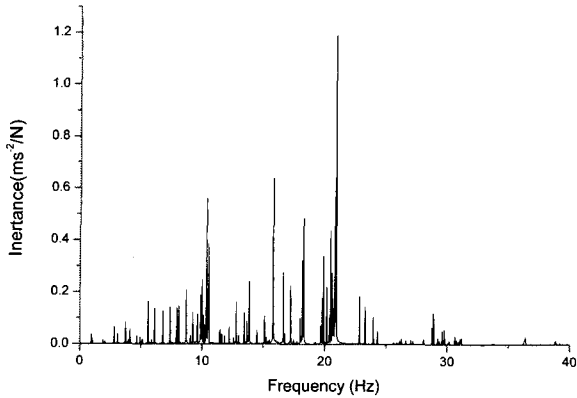


Fig. 4 Acceleration FRF-linear dropper model

그림에서 알 수 있듯이 변위에 있어서는 1.0 Hz 성분, 가속도에 있어서는 10.5 Hz, 21.0 Hz 성분이 두드러지게 나타나고 있는데 이 성분들은 각각 경간과 드래퍼 간격에 의하여 발생하는 것이라 판단된다. 이는 구조물의 파속과 모드 해석에 의하여 다음과 같은 결과에 토대를 둔 것이다.^(5,6) 전차선과 조가선의 경우 각각 단일 구조물일 경우 파속은 식 (2)에 의해 결정된다.

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

식 (2)에서 c 는 파속, T 는 장력, ρ 는 밀도, A 는 단면적, ω 는 해당 주파수를 의미한다. 이 식에 의하여 계산된 파속은 50 Hz 이하의 저주파 영역에서 단일 전차선의 경우 122.4 m/s~122.9 m/s, 조가선의 경우 152.12 m/s~152.98 m/s로 계산된다. 그러나 전차선과 조가선이 유기적으로 연결된 전체 가선계 구조물의 파속은 시뮬레이션 결과 크게 변화함을 알 수 있었다. 전차선과 조가선이 드래퍼에 의해 상호 연계되어 있기 때문에 시뮬레이션 결과 전차선의 평

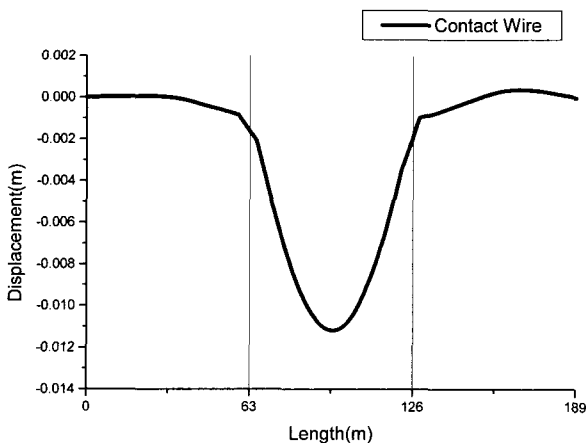


Fig. 5 1 Hz harmonic excitation

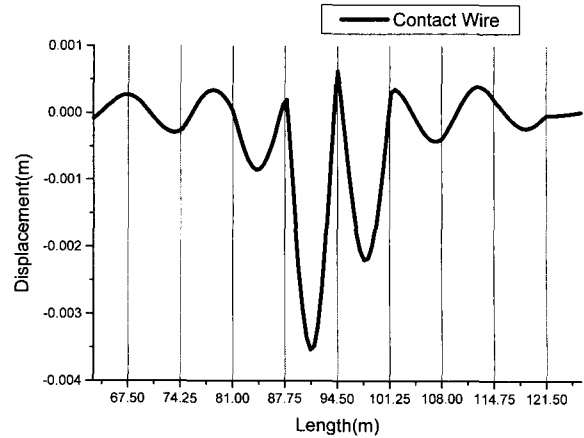


Fig. 6 10.5 Hz harmonic excitation

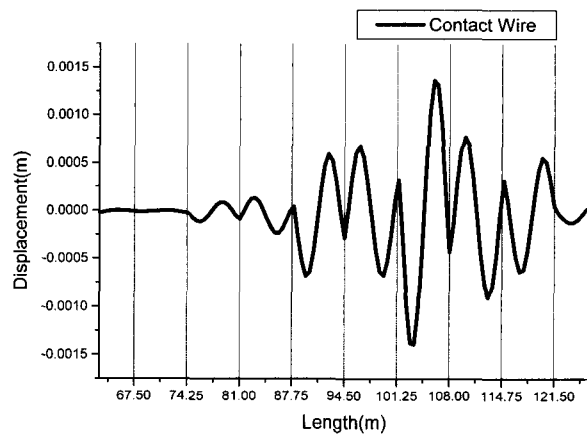


Fig. 7 21 Hz harmonic excitation

균 파속은 135 m/s로 증가하고 조가선의 평균 파속은 136 m/s로 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 5~7은 충격가진 응답의 주요 주파수 성분들에 해당하는 조화가진을 해 주었을 때의 응답을 도시한 것이다. 가진은 90 m 지점에서 상하 5 mm로 시간의 함수로 조화가진 해 주었으며 수신점은 같다.

Fig. 5는 1 Hz로 가진 해 주었을 때의 응답으로 경간 (Fig. 5의 수직선)을 경계로 상하 방향으로 응답을 보이고 있으며, 135 m/s의 전차선 파속을 사용하여 식 (3)을 계산할 때 경간을 한번 왕복하는데 소요되는 시간의 역수로 계산된 경간 성분의 고유 주파수는 1.07 Hz가 된다. 따라서 이 주파수 성분은 경간 간격에 의한 성분임을 알 수 있었다.

$$f = \frac{\gamma c}{2\pi} = \frac{\frac{2\pi}{\lambda} c}{2\pi} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l} \quad (3)$$

f : Natural frequency l : Length λ : Wave length
 γ : Wave number

Fig. 6, 7은 각각 10.5 Hz와 21 Hz로 90 m지점에서 조화 가진을 하며 5초 후의 응답을 2번째 경간에서 살펴본 것이다. 그림에서 수직선은 드래퍼의 위치를 표시하는 것으로 두 그림 모두 드래퍼를 경계로 하는 응답을 보이고 있는 것을 볼 수 있다. 식 (2), (3)에 의한 계산결과와 비교할 때 10.1 Hz와 20.2 Hz에 해당하는 성분으로 계산치와 실제 시뮬레이션 결과는 약 5% 이내에서 일치함을 알 수 있다. 드래퍼의 파동 반사 작용에 의하여 발생하는 이 주파수는 KTX의 열차 운행 시뮬레이션 시 판토크래프 (pantograph)와 전차선 사이의 이선률에 있어서 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타나고 있다.⁽⁷⁾

Fig. 8, 9는 드래퍼의 강성이 인장(10^5 N/m)과 압축 시 (10 N/m) 서로 다른 강성을 갖는 비선형 모델을 90 m지점에서 충격 가진한 결과를 주파수 분석한 것으로 선형에 비하여 응답의 크기는 작고 150 Hz 이상의 넓은 주파수 영역에 걸쳐 고르게 응답이 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 비선형 모델은 가선계의 거동이 일정 한계를 벗어나는 경우에 해당하는 것이다. 실제로 가선계의 정적 구조에서 드래퍼는 초기에 전차선의 자중으로 인한 약 90 N 정도의 인장력을 받고 있다.⁽⁸⁾ 이 범위 내에서의 시뮬레이션 상의 드래퍼의 좌굴은 인장의 범위 내에 있으므로 드래퍼의 인장 시와 같은 강성을 유지하게되나 이와 같은 범위를 초과하게 되면 선형성을 잃어버리게 된다. 드래퍼의 비선형성은 이처럼 일정 한계 이상의 가선계의 동적 응답에서 찾아 볼 수 있다.

비선형의 경우도 선형 모델의 경우처럼 변위에 있어서 1.0 Hz, 가속도에 있어서 10.0 Hz 성분이 큰 것을 뚜렷이 확인할 수 있으나, 선형모델과 비교하여 넓은 주파수 대역에 걸쳐 응답이 분포하게 되는데, 압상 형태의 초기 충격 가전은 약한 드래퍼 강성으로 인해 이웃 경간으로의 파의 전파를 수월하게 만들고, 지지대 부근에서 반사된 파는 역상이 되어 드래퍼의 인장을 유발하여 드래퍼의 큰 강성

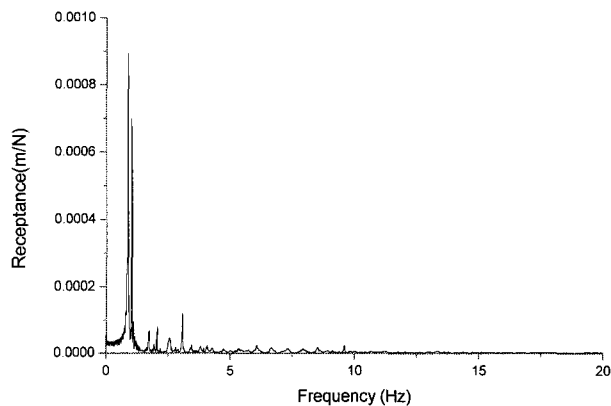


Fig. 8 Displacement FRF-nonlinear model

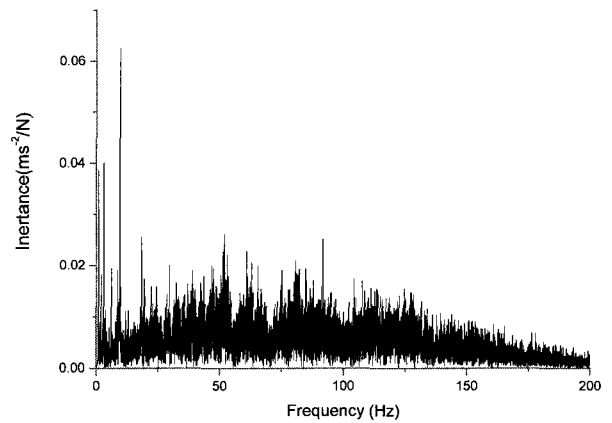


Fig. 9 Acceleration FRF-nonlinear model

으로 파가 전파되지 못하고 반사되어 되돌아가지 못하기 때문이라 생각된다. 이러한 비선형 영역은 열차주행 시 판토크래프의 큰 압상력으로 인하여 가선계의 거동 시뮬레이션에서도 상당 부분 발생하고 있는 것으로 나타나고 있다. 자세한 설명은 참고문헌 (7)에서 찾을 수 있다.

4. 설계변수 변화에 따른 가선계의 응답해석

각 설계변수들이 응답에 미치는 영향을 알아보기 위하여 주요 설계변수 값들인 장력, 드로퍼 강성, 경간당 드로퍼 개수 등을 변화시켜, 전차선 90 m지점을 충격가진하는 시뮬레이션을 수행하였다. 여기에서 나온 결과는 몇 개의 지점에서의 변위 및 가속도의 시간에 따른 변화값이고, 이것을 이용해 주파수 대역에서 응답을 구하였다. 궁극적인 목적은 가선계 구조물의 변화에 따른 구조물의 동적 응답의 특성을 이해하여 KTX의 최적의 운행 환경을 찾는 데 있다.

4.1 드래퍼의 강성에 따른 변화

이 절에서는 설계 변수중 중요한 변수인 드래퍼강성의 변화에 따른 동적 응답을 살펴 보았다. 이를 위해 드래퍼 강성에 따른 전차선, 조가선의 파속의 변화를 살펴 보았고 이것을 통하여 전차선과 조가선 두 요소의 상관 관계를 살펴 보았다.

3절에서 전차선과 조가선의 파속은 개개의 구조물 때와 드래퍼로 연결되어 있을 때 서로 다를 수 있었다. Fig. 10, 11은 드래퍼의 강성에 따른 파속의 변화를 나타낸 것으로 선형, 비선형 모두에 대하여 드래퍼의 강성이 증가함에 따라 전차선의 파속은 증가하고 조가선의 파속은 감소함을 알 수 있는데, 이는 두 개 구조물의 연계 정도에 의한 것이라 고려된다. 주파수 분석시 전차선 파속의 증가에 따라 전차선의 고유 주파수 역시 고주파 쪽으로 이동하

는 것을 알 수 있었으며 그에 따른 주파수의 변화는 Table 2와 같다. 실제로 주파수의 변화는 해당거리를 왕복하는 데 소요되는 시간의 역수와 일치한다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 선형 드래퍼 모델의 경우 전차선과 조가선이 각각의 파속을 유지하는 것이 아니고, 드래퍼 강성의 증가에 따라 하나의 파속으로 수렴하여 감을 알 수 있다. 즉, 드래퍼의 강성이 작을 경우는 서로 연관성이 적어 각각의 파동특성이 유지되나 강한 강성으로 연계되어 있을 경우는 조가선과 전차선의 진동특성이 유사하게

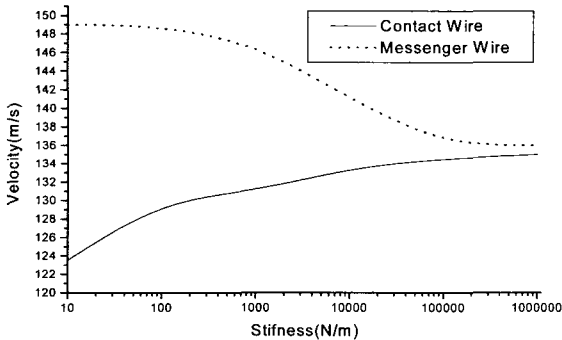


Fig. 10 Wave velocity vs dropper stiffness-linear model

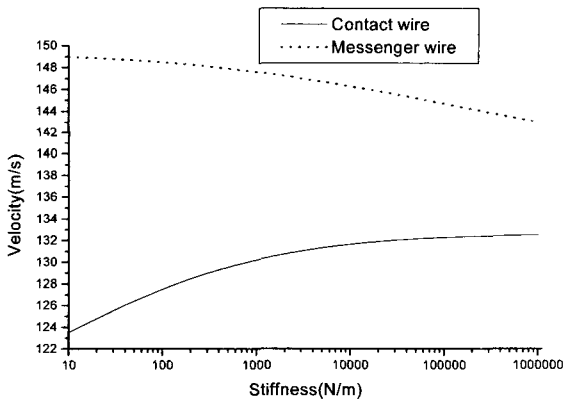


Fig. 11 Wave velocity vs dropper stiffness-nonlinear model

Table 2 Frequency for different dropper stiffnesses

Dropper stiffness (N/m)	Frequency by span length(Hz)		Frequency by dropper space(Hz) 1st/2nd	
	Linear model	Nonlinear model	Linear model	Nonlinear model
10	0.98	0.98	9.4 / 18.8	9.4/18.8
100	1.01	1.01	9.7 / 19.1	9.5/19.1
1000	1.04	1.03	9.8 / 19.5	9.5/19.1
10000	1.06	1.04	10 / 20.3	9.5/19.2
100000	1.07	1.05	10.4 / 20.9	9.6/19.4
1000000	1.07	1.05	10.5 / 21.1	9.6/19.6

일치되어 감을 알 수 있다.

Fig. 11은 압축 시 10 N/m의 일정한 강성을 갖게 하고 인장 시의 강성을 늘려가며 전차선과 조가선의 파속의 변화를 살펴 본 것이다.

선형 모델에 비하여 전차선과 조가선 상호간의 연계성은 상당히 줄어들고 구조물로서의 하나의 파속은 유지하지 못하는 것으로 나타났다. Fig. 8, 9를 상기할 때 전차선의 응답은 비선형성으로 인한 에너지의 분산효과와 함께 조가선의 응답특성이 함께 유지되기 때문에 넓은 주파수 대역에서 응답을 보이고 있는 것으로 생각된다.

Fig. 12, 13은 선형모델에서 드래퍼의 강성이 10 N/m로 전차선과 조가선의 연계성이 적을 때 가속도와 변위의 주파수 특성에 대하여 분석한 것이다. 드래퍼가 큰 강성을 갖는 선형 모델과 비교하여 Fig. 12의 경우 주파수의 형태가 30 Hz 부근까지 넓은 대역에 걸쳐 큰 응답을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 구체적으로 전차선은 전차선 만의 고유한 파속을 갖고 조가선 역시 조가선 만의 파속을 유지함에 따라 두 구조물의 진동 특성이 동시에 전차선에 반영된 예라 할 수 있겠다.

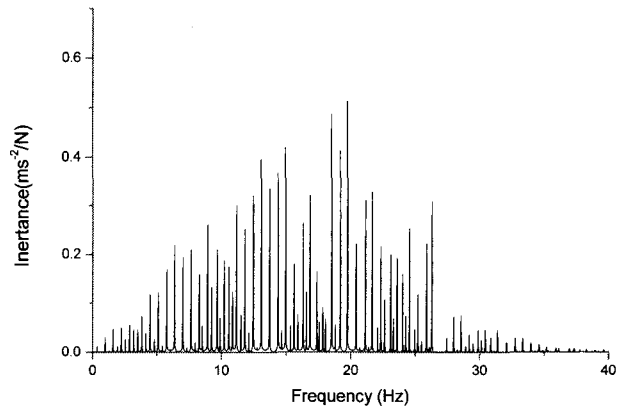


Fig. 12 Acceleration FRF-dropper stiffness 10 N/m

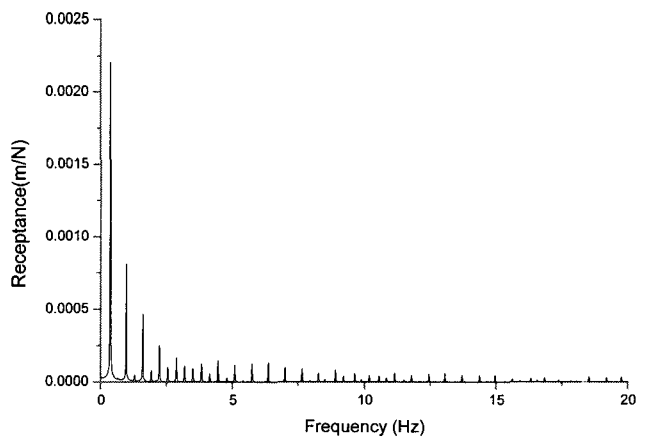


Fig. 13 Displacement FRF-dropper stiffness 10 N/m

특히, Fig. 13을 보면 0.35 Hz 성분이 가장 큰 것으로 나타나고 있는데, 이는 식 (3)에 의하면 3번째 경간의 경계에서 즉 3-경간 가선계 모델의 끝부분에서 반사되어 오는 파(wave velocity = 123.5 m/s)로 경간 간격에 의한 성분(0.97 Hz)보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 실제로 경간 지지대(supporter)는 조가선에 있어서는 상하 방향의 운동을 구속하는 경계조건으로 작용하지만 전차선은 상하 방향으로는 굵기의 질량 외에 어떠한 구속도 작용하지 못하기 때문에 드라퍼의 강성이 작을 경우는 전차선과 조가선의 연계성이 적어 전차선에 있어서는 지지대에서의 반사파가 발생하는 비율이 줄어들기 때문이라 생각된다.

4.2 장력에 따른 변화

식 (2)에 의하면 인장보의 파속은 50 Hz이하의 저주파 영역에선 $\frac{EI}{\rho A} \times \omega^2$ 항이 $(\frac{T}{2\rho A})^2$ 항의 값의 2.7%미만이므로 50 Hz이하의 영역에서의 보의 파속은 장력T의 증가에 따라 \sqrt{T} 에 비례하여 증가하게 된다. 장력의 증가는 가선계 구조물의 파속을 증가시키고, 그에 따른 동적 응답의 변화를 가져오므로 장력에 따른 파속의 증가 비율을 구하여 보았다.

Fig. 14는 전차선을 단일현으로 간주할 때의 장력에 따른 파속과 드라퍼로 서로 연계되어 있는 실제 구조물에서 전차선의 파속을 비교한 것이다. 점선은 단일 현의 파속으로 이론식에 의하여 \sqrt{T} 에 비례하는 곡선으로 나타나고 있고, 수치적으로 계산된 가선계 구조물 내의 전차선의 파속 역시 저주파 영역에서 \sqrt{T} 에 비례하는 곡선으로 나타나고 있다. 실제로 전차선 장력이 10000 N일 때의 파속은 95 m/s이고 20000 N일 때에 \sqrt{T} 배의 1%오차를 갖는 135 m/s의 파속이 나오고 있다. 그에 따라 전차선의 고유주파수 역시 시뮬레이션 결과 Table 3과 같이 장력의 증가에 따라 파속과 같은 비율로 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 15~18을 보면 장력의 증가에 따라 어떠한 특정 주파수만 증가하는 것이 아니라, 경간 성분을 포함한

전 대역에 걸쳐 일정 비율($\propto\sqrt{T}$)로 증가하고 있는 것을 파속도 및 변위 모두에서 볼 수 있다.

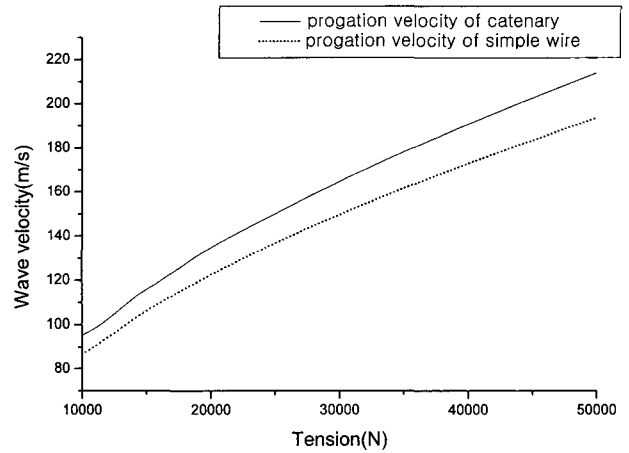


Fig. 14 Wave velocity vs tension

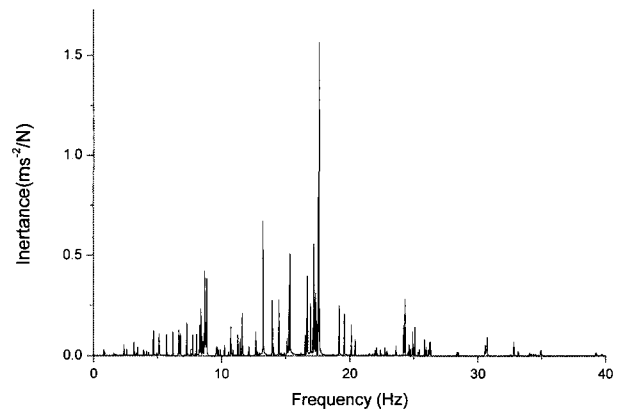


Fig. 15 Acceleration FRF-tension 14000N/9800N

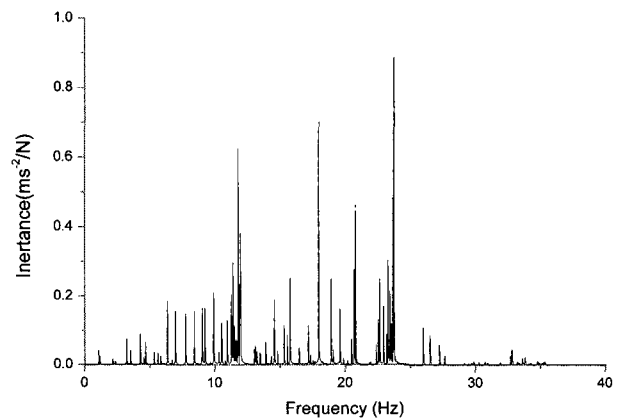


Fig. 16 Acceleration FRF-tension 26000N/18200N

Table 3 Wave velocity vs tension

Tension in wires contact/messenger	Simulated propagation velocity (m/s)	Propagation velocity of simple wire (m/s)	Natural frequency due to dropper spacing (Hz)
10000/7000	95	86.58	14.2
14000/9800	112.5	102.44	17.3
18000/12600	127.3	116.16	19
20000/14000	135	122.44	20.8
26000/18200	154	139.4	23.6

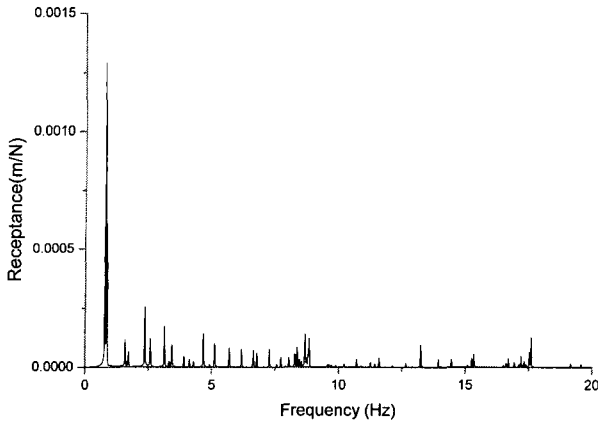


Fig. 17 Displacement FRF-tension 14000N/9800N

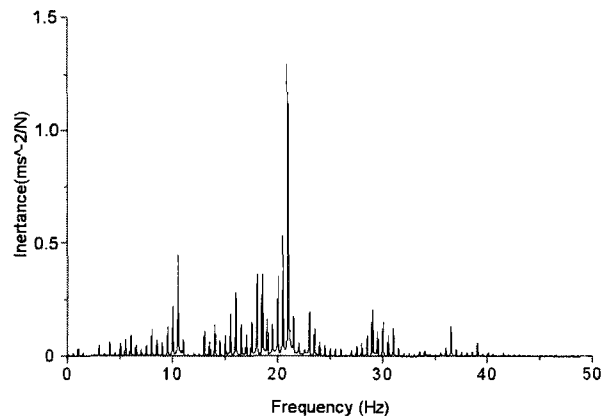


Fig. 19 Acceleration FRF for 6-span model

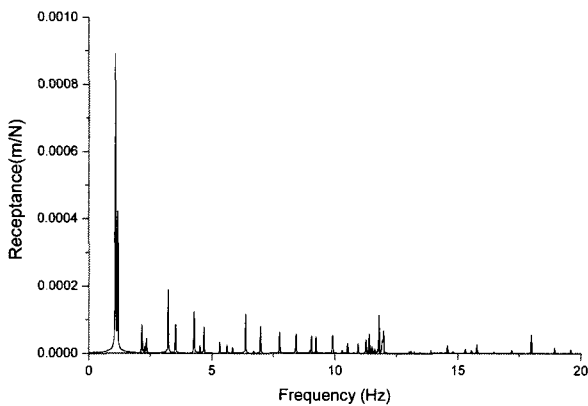


Fig. 18 Displacement FRF-tension 26000N/18200N

4.3 경간수에 따른 변화

경간수의 변화에 따른 결과의 변화를 보고자 하는 이유는 원래 한 인류구간이 10~11 경간인데 반해 지금의 프로그램에서 만든 모델은 3경간과 6경간이기 때문에 원래의 인류구간에서의 결과와 많은 차이가 있을까 우려되어 비교해 보려는 것이다. Fig. 12, 13에 나타난대로 드래퍼 강성이 10 N/m일 때는 진동이 주로 구조물 양쪽 끝의 경계조건에 기인하므로(주파수 성분은 파속이 인류구간을 왕복하는데 소요되는 시간의 역수)이 경우에 한에서 경간수가 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 드래퍼의 강성이 커짐에 따라 경간 지지대와 드래퍼 경계가 진동특성을 결정짓는 주요인자이므로 드래퍼 강성이 10000 N/m이상의 경우에는 경간수에 커다란 영향을 받지 않는 것으로 나타나고 있다. KTX가선계의 강성은 10^5 N/m이므로 경간의 영향은 무시할 수 있다. 실제로 전차선과 판토타그래프의 접촉에 있어서도 둘 사이의 접촉력이나 이선률에 있어서 인류구간의 경계에 의한 성분보다는 한 경간 내에 존재하는 구조물 구성요소 하나 하나에 의한 주파수에 영향을 받고 있는 것으로 나타나고 있다.⁽¹⁾ Fig. 19는 Fig. 4와 동일한

조건에서 6경간 모델을 사용하여 결과를 얻은 것이다. 두 모델 모두에서 주요 주파수 성분이 드래퍼의 간격에 기인한 것을 알 수 있다. 따라서 인류구간의 길이를 원래에 비해 짧게 잡았지만 주요 결론은 실제 가선계와 큰 차이를 보이지 않을 것으로 판단된다.

4.4 경간당 드래퍼 개수에 따른 변화

4.1절에서 드래퍼의 강성에 따른 가선계의 응답을 살펴 보았다. 앞에서의 결과에 의하면 전차선의 변위의 변화량은 드래퍼의 강성에 의하여 커다란 영향을 받고 있는 것으로 나타나고 있다. 이는 전차선의 동적 하중이 드래퍼에 의하여 조가선으로 분산되고 있다는 것을 보여주는 예이다. 드래퍼 수의 변화는 이러한 조가선과의 연계에 영향을 주어 동적 응답의 변화를 가져올 것이라 상정하고 드래퍼 간격의 변화에 따른 응답을 살펴보았다.

Table 4는 전차선 90m지점에서 300 N의 충격가진 후의 응답을 살펴 본 것으로 드래퍼 수의 증가에 따라 전차선의 동적 변화량이 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 드래퍼 수의 증가에 따라 전차선의 탄성이 균일해 진다는 것을 의미하며 결과적으로 실제 판토타그래프와의 접촉에 있어 좀 더 안정적인 반응을 보이는 결과를 가져온다.⁽⁷⁾

또한, 드래퍼 간격에 의하여 발생하는 주파수의 변화를 살펴볼 때 경간당 드래퍼 수가 증가함에 따라 해당 주파수 역시 증가하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 드래퍼 사이의 간격이 감소하는 비율과 일치한다.

Table 4 Response for different dropper densities

No. of droppers/span	Dropper spacing(m)	Standard deviation of contact wire displacement(mm) at 90 m	Frequency (Hz)
6	9	10.311	7.4/14.9
9	6.75	9.961	10.5/21.1
12	5.0	9.919	13.2/26.4

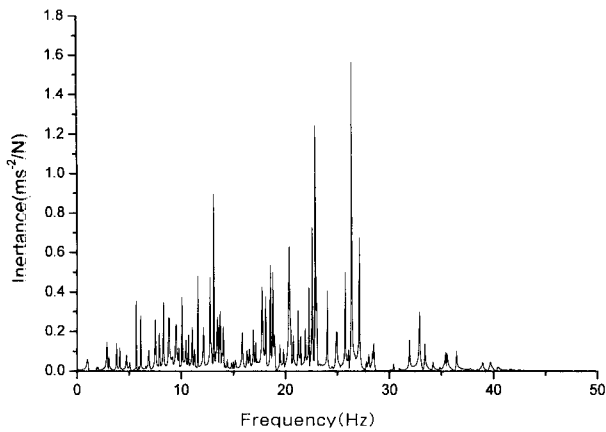


Fig. 20 Acceleration FRF-dropper number 12

Fig. 20은 경간 당 드라퍼 수가 9에서 12로 증가한 모델의 FRF선도로 최대응답(드라퍼 간격에 의한 주파수)이 약 26.4 Hz로 이동했음을 볼 수 있다. 이것은 이때의 인류 구간을 통과하는 평균 파속이 134.5 m/s 임을 감안할 때 식 (2)에 의한 26.9 Hz와 거의 일치하는 결과이다.

5. 결 론

고속전철 가선계의 시뮬레이션을 통해 선형 및 비선형 모델의 거동 특성과 여러 설계 변수의 변화에 따른 동 특성 변화를 살펴보았다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

5.1 거동 특성

가선계의 주요 주파수 성분은 변위에 있어서는 지지대 사이의 경간 길이에 기인한 1 Hz 성분이며 가속도에 있어서는 드라퍼 사이의 간격에 의한 10.5 Hz와 21.1 Hz의 성분이다. 1 Hz 성분은 전차선의 파동이 드라퍼에 의해 조가선으로 전파되고, 이 파는 다시 지지대의 강한 강성으로 인해 반사되어 발생하는 것이다. 10.5 Hz와 21 Hz 성분은 드라퍼의 파동 반사 작용에 의한 것으로 식 (3)과 조화 가진 응답을 통해 확인할 수 있었다.

5.2 드라퍼 강성의 영향

가선계는 전차선과 조가선이 드라퍼에 의하여 연결되어 하나의 계를 이루고 있는 구조이다. 즉, 가선계의 전체적인 진동 특성은 조가선과 전차선의 종합된 응답의 결과이다. 전차선과 조가선이 하나의 진동 특성을 유지하도록 하는데 가장 큰 영향을 미치는 것은 드라퍼의 강성이며, 드라퍼의 강성이 적을 경우 전차선과 조가선은 각각 서로 다른 구조물로 개개의 파속을 유지하며 서로 다른 진동 특성을 유지하기 드라퍼 간격에 의한 주파수나 경간 성분이 미미하게 나타나고, 경계조건에 의하여 반사되어 나오는 파로 인한

진동이 지배적이 되는 결과를 보인다. 드라퍼의 강성이 강할수록 전차선과 조가선의 파속은 서로 근접하고, 경간, 드라퍼 경계의 파동 반사 특성에 의한 주파수 성분이 중요해진다.

5.3 장력의 영향

장력의 변화는 가선계 구조물의 파속의 변화를 의미하며 이에 따라 주파수 전 대역에 걸친 고유 주파수의 변화를 발생시킨다. 가선계 구조물의 장력의 증가에 의한 파동 전파 속도의 증가는 50 Hz 이하의 저주파 영역에서 단일 현의 경우와 같이 \sqrt{T} 에 비례하는 결과를 얻을 수 있었고 그에 비례하는 고유 주파수의 변화를 볼 수 있었다. 또한 장력이 증가할수록 변위와 가속도의 동적 변화량의 폭이 감소하고 있음을 알 수 있었다.

5.4 경간 당 드라퍼 수의 영향

드라퍼는 전차선의 동적 하중을 조가선으로 분산시키는 역할을 수행하며, 이러한 동적 하중의 분산은 드라퍼의 수가 많을수록 유리하다는 것을 알 수 있었다. 드라퍼의 수가 증가할수록 전차선의 동적 변화량은 감소하고 탄성이 균일해지는 결과를 가져왔고, 드라퍼 사이 간격의 감소로 해당 응답 주파수가 비례하여 증가하게 된다.

참 고 문 헌

- (1) 정대현, 최연선, 1991, "고속전철 Catenary/Pantograph계의 동적응답에 대한 수치해석", 대한기계학회 춘계 학술대회논문집(1).
- (2) 이종근, 1993, "전차선로의 특성과 설계", 한국 고속철도건설공단 전기시설본부 보고서.
- (3) 김정수, 최병두, 1999, "가선계의 동특성에 관한 연구", 한국소음진동학회지, 제 9권 제 2호, pp. 312~323.
- (4) Klaus-Jürgen Bathe, 1982, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall.
- (5) Maurice Petyt, 1990, "Introduction to Finite Element Vibration Analysis", Cambridge University Press.
- (6) 김정수, 안성태, 1998, "TGV-K 가선계의 동적응답 해석", 한국소음진동공학회 추계 학술대회논문집 pp. 262 ~ 268.
- (7) 박성훈, 김정수, 허신, 경진호, 송달호, 1999, "다양한외력에 대한 가선계 구조물의 진동특성 해석", 한국소음진동학회 춘계 학술대회논문집, pp. 448~454.
- (8) 허신, 경진호, 송달호, 박성훈, 김정수, 1999, "집전 시스템의 동적수치 모의해석에 관한 연구" 한국철도학회 춘계 학술대회논문집, pp. 151~157.