

설계변수 변화에 대한 KTX 가선계의 응답 특성

박성훈* 김정수** 조용현*** 최강윤***

Vibrational Characteristics of KTX Catenary System for Changing Design Parameters

Park, Sung-Hun Kim, Jung-Soo Cho, Young-Hyeon Choe, Kang-Youn

ABSTRACT

Dynamic characteristics of catenary system for KTX Korean high-speed trains are investigated. A simulation program based on the finite element models of the catenary is developed. The influences of the various design parameters on the vibrational 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. 서론

열차의 고속화에 따라 가선은 균일하고 작은 콤플라이언스를 유지하고 장력은 크게하는 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 유한요소 모델에 기초한 가선계의 진동특성 해석 전용 프로그램을 개발하였다. 그리고, 이 프로그램을 이용하여 계의 동특성에 중요한 영향을 미칠 것이라 생각되는 전차선과 조가선의 파라미터 변화에 따른 가선계의 응답을 파악하고자 한다. 여기서 사용한 가선계 모델의 파라미터는 한국형 고속전철 KTX의 사양(Table. 1)에 기초한 것이다.

2. 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 다른 성질을 갖는 비선형 요소이다. 그러나, 전차선의 자중에 의한 초기 인장 범위내의 미세 거동의 경우에 대해 드러퍼는 인장이 지배적이라 할 수 있다. 따라서, 가선계의 응답이 커서 선형성을 잃어 버리게되는 경우를 제외하고 선형스프링으로 간주 할 수 있다. 그리고, 드로퍼의 질량은 반씩 나누어 전차선과 조가선에 집중 질량으로서 적용하였다.

* 홍익대학교 기계공학과 대학원, 정회원

** 홍익대학교 기계공학과 조교수, 정회원

*** 한국 철도기술연구원, 정회원

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, 강성 효과는 무시할 수 있고 질량만 갖는 집중 질량으로 하였다.

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

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

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

3. 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 모드해석에 기초를 두어 이루어 졌다. Figs. 3, 4는 압축과 인장 시 드래퍼의 강성이 같은 가선계 모델에 90m 충격 가진을 주고 같은점에서의 응답을 주파수 분석한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 변위에 있어서는 1.0 Hz성분이, 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 모드해석에 의하여 다음과 같은 결과에 토대를 둔 것이다.[5],[6]

전차선과 조가선의 경우 각각 단일 구조물일 경우 파속은 Eq. (2)에 의해 결정된다.

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

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

Eq. (2)에서 c는 파속, T는 장력, ρ 는 밀도, A는 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 평균 파속은 135 m/s로 증가하고 조가선의 평균 파속은 136 m/s로 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

Figs. 5, 6, 7은 충격가진 응답의 주요 주파수 성분들에 해당하는 조화가진 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 Eq. (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 조화가진을 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. Eqs. (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 판토히스트(Pantograph)와 전차선 사이의 이선틀에 있어서 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타나고 있다.[7]

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. 8은 드래퍼의 강성에 따른 파속의 변화를 나타낸 것으로 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 이동하는 것을 알 수 있었으며 실제로 주파수의 변화는 해당거리를 왕복하는데 소요되는 시간의 역수와 일치한다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 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 일치 되어 감을 알 수 있다.

Figs. 9,10은 드래퍼의 강성이 10 N/m로 전차선과 조가선의 연계성이 적을 때 가속도와 변위의 주파수 특성에 대하여 분석한 것이다. 드래퍼가 큰 강성을 갖는 모델과 비교하여 Fig. 9의 경우 주파수의 형태가 30 Hz부근까지 넓은 대역에 걸쳐 큰 응답을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 구체적으로 전차선은 전차선만의 고유한 파속을 갖고 조가선 역시 조가선만의 파속을 유지함에 따라 두 구조물의 진동 특성이 동시에 전차선에 반영된 예라 할 수 있겠다.

특히, Fig. 10을 보면 0.35 Hz 성분이 가장 큰 것으로 나타나고 있는데, 이는 Eq. (3)에 의하면 3번째 경간의 경계에서 즉 3-경간 가선계 모델의 끝부분에서 반사되어 오는파(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 금구의 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

Eq. (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.

Table. 2 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. 11은 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 135m/s의 파속이 나오고 있다. 그에 따라 전차선의 고유주파수 역시 시뮬레이션 결과 Table. 2와 같이 장력의 증가에 따라 파속과 같은 비율로 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. Figs. 12, 13, 14, 15를 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 가속도 및 변위 모두에서 볼 수 있다.

4.3 경간당 드로퍼 개수에 따른 변화

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

Table. 3 Response for different dropper densities

No. of droppers/ span	Dropper spacing (m)	Standard deviation of contact wire displacement(mm) at 90m	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

Table. 3은 전차선 90 m지점에서 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 판토히크와의 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.

Fig. 16은 경간 당 드래퍼 수가 9에서 12로 증가한 모델의 FRF선도로 최대응답(드래퍼 간격에 의한 주파수)이 약 26.4 Hz로 이동 했음을 볼 수 있다. 이것은 이때의 인류 구간을 통과하는 평균 파속이 134.5 m/s 임을 감안할 때 Eq. (2)에 의한 26.9 Hz 와 거의 일치하는 결과이다.

4. 결론

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

거동 특성

가선계의 주요 주파수 성분은 변위에 있어서는 지지대 사이의 경간 길이에 기인한 1 Hz 성분이며 가속도에 있어서는 드래퍼 사이의 간격에 의한 10.5 Hz와 21.1 Hz의 성분이다.

드래퍼 강성의 영향

가선계는 전차선과 조가선이 드래퍼에 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 드래퍼의 강성이며, 드래퍼의 강성이 적을 경우 전차선과 조가선은 각각 서로 다른 구조물로 개개의 파속을 유지한다. 드래퍼의 강성이 강할수록 전차선과 조가선의 파속은 서로 근접하고, 경간, 드래퍼 경계의 파동 반사 특성에 의한 주파수 성분이 중요해진다.

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.

경간 당 드래퍼 수의 영향

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

<참고문헌>

- [1] 정대현, 최연선, 1991, "고속전철 Catenary / Pantograph계의 동적응답에 대한 수치해석", 대한기계학회 춘계학술대회논문집(1)
- [2] 이종곤, 1993 "전차선로의 특성과 설계", 한국 고속철도건설공단 전기시설본부 보고서
- [3] 김정수, 최병두, 1999 "가선계의 동특성에 관한 연구", 한국소음 진동학회지, 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, "TGV-K 가선계의 동적응답해석", 한국소음진동공학회 1998년도 추계학술대회논문집 pp.262~268
- [7] 박성훈, 김정수, 허신, 경진호, 송달호 "다양한외력에 대한 가선계 구조물의 진동특성 해석" 한국소음진동학회 1999년도 춘계학술대회논문집, pp. 448~454.
- [8] 허신, 경진호, 송달호, 박성훈, 김정수, "집전시스템의 동적수치 모의해석에 관한 연구" 한국철도학회 1999년도 춘계학술대회논문집, pp.151~ 157.

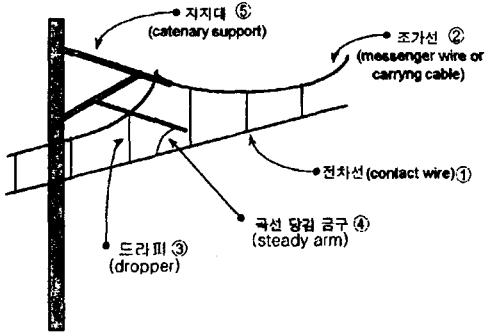


Fig. 1 Structure of catenary

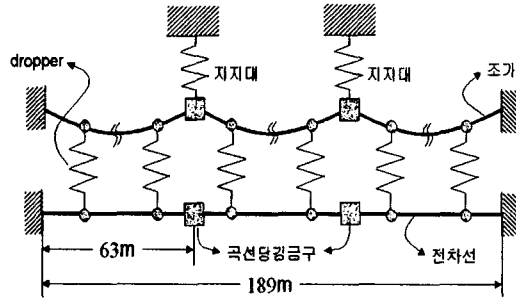


Fig. 2 3-span KTX catenary model

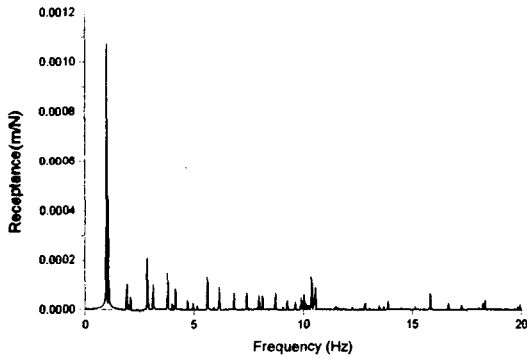


Fig. 3 Displacement FRF - linear dropper model

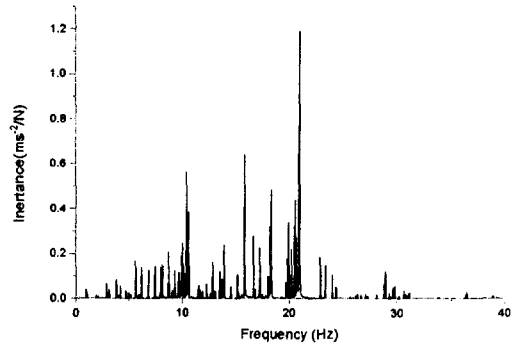


Fig. 4 Acceleration FRF - linear dropper model

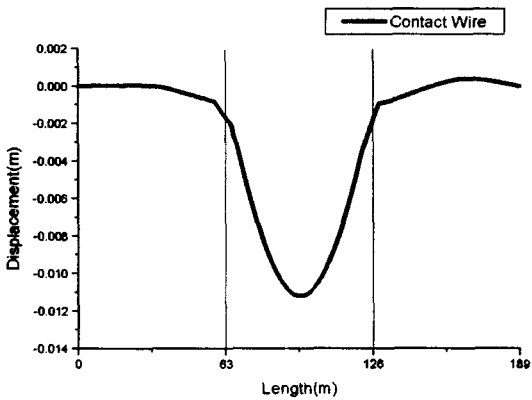


Fig. 5 1 Hz harmonic excitation

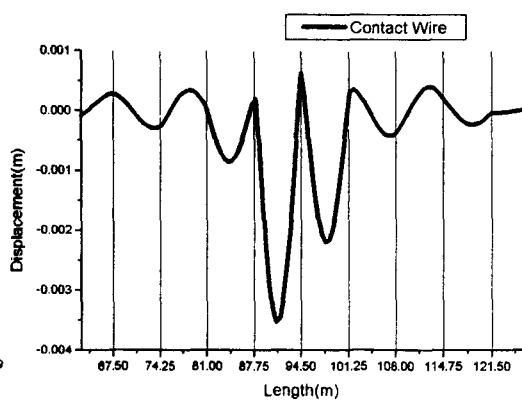


Fig. 6 10.5 Hz harmonic excitation

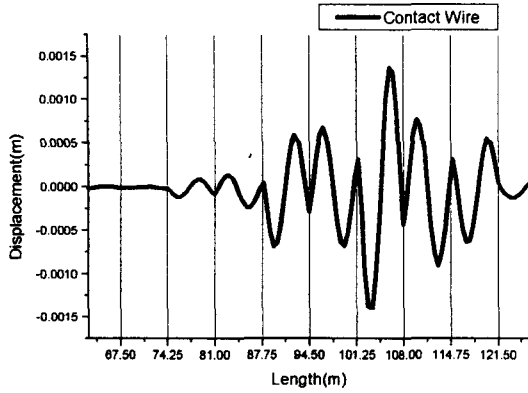


Fig. 7 21 Hz harmonic excitation

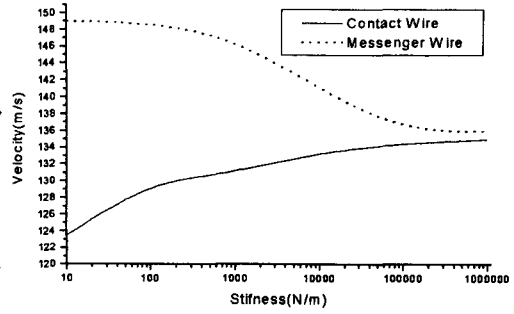


Fig. 8 Wave velocity vs dropper stiffness-linear model

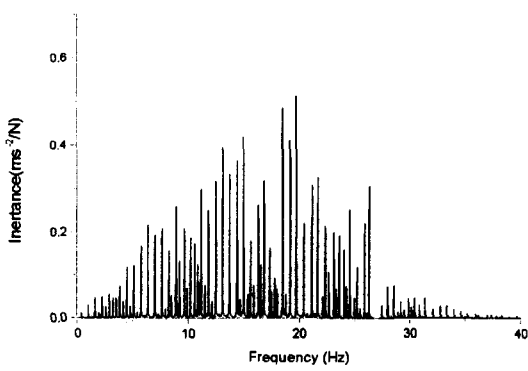


Fig. 9 Acceleration FRF-dropper stiffness 10N/m

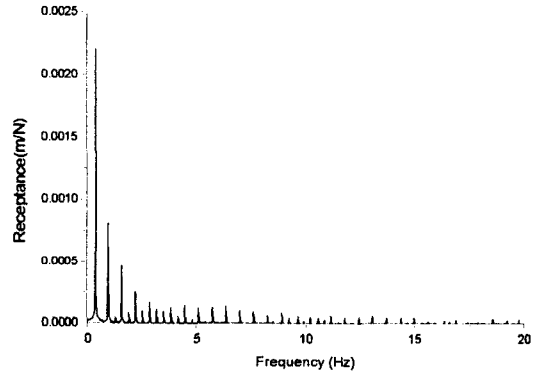


Fig. 10 Displacement FRF-dropper stiffness 10N/m

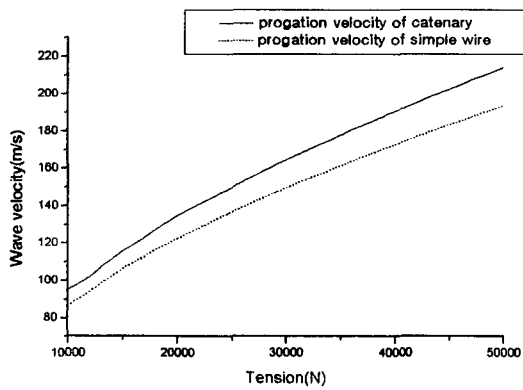


Fig.11 Wave velocity vs tension

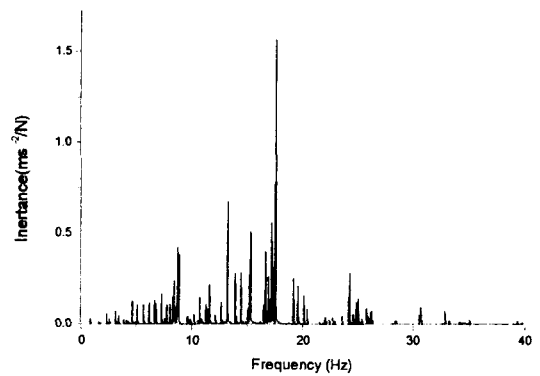


Fig. 12 Acceleration FRF-tension 14000N/9800N

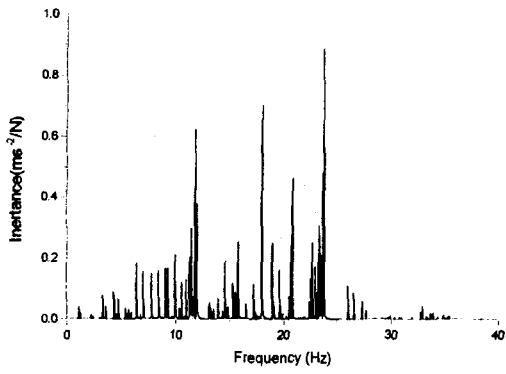


Fig.13 Acceleration FRF-tension 26000N/18200N

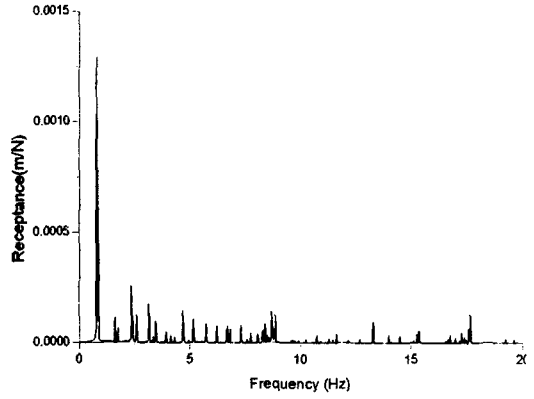


Fig. 14 Displacement FRF - tension 14000N/9800N

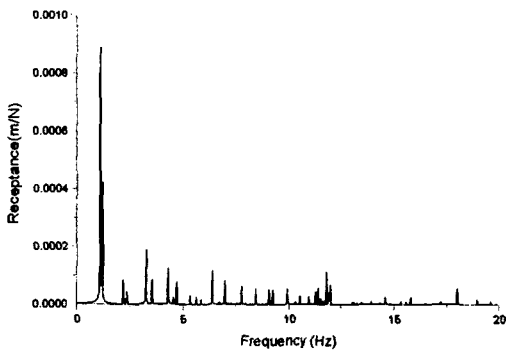


Fig. 15 Displacement FRF-tension 26000N/18200N

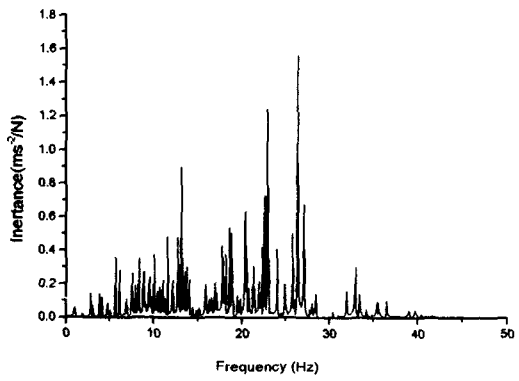


Fig. 16 Acceleration FRF-dropper number 12