

가선계의 동특성 해석

A Study on the Dynamic Characteristics of Catenary

최병두* 김정수**
Choi, Byung-Doo Kim, Jung-Soo

ABSTRACT

In this study, dynamic characteristics of catenary that supplies electrical power to high-speed trains is investigated. A particular emphasis is placed on the effect of droppers on the dynamic response of the contact wire, a dropper is an element that connects the contact wire with the messenger wire so as to maintain near uniform compliance. Finite element model compressing 3 spans is constructed. For the linear model, droppers are modeled as linear springs with various stiffness values. Modal analysis is performed to obtain the natural frequencies and modes and the variation in the modal density distribution for changing stiffness values are noted. Impulse response is also obtained through computer simulation. In practice, dropper is a nonlinear element with low stiffness in compression and high stiffness in tension. Hence, dropper can be modeled as a nonlinear spring with bi-directional stiffness values. Impulse and harmonic responses are obtained for the nonlinear model through simulation. The responses are also compared with the linear cases.

1 서론

고속철도는 그 빠른 속력, 안정성, 편리함 등의 특징으로 인하여 차세대 운송기관으로 각광을 받고 있으며 현재 고속철도 사업의 초기단계인 우리 나라는 관련 기반 기술 확보에 주력하고 있다. 전철의 집전장치는 전주 위에 가설된 가선계(catenary)와 열차 위에 가설된 집전계(pantograph)로 이루어져 있으며 이상적인 집전성능을 위해서는 열차주행시 가선계와 집전계가 완벽한 접촉을 유지하여 안정된 전력공급이 이루어져야만 한다. 그러나 열차의 운행속도 상승은 가선계 동적변화의 폭을 증가시켜 가선계와 집전계의 단락(이선)을 발생시키며 이에 따른 아크, 전기적 충격과 마모로써 집전장치를 손상시킨다. 따라서 집전 시스템의 동특성을 파악하고 동적변화의 폭을 줄이려는 연구가 이미 외국에서는 진행되어 왔다.

본 연구에서는 고속전철의 집전 시스템중 가선계의 동특성 파악에 초점을 맞추고 유한요소 선형 모델을 구성하여 고유주파수 및 모드형상을 산출하였다. 그리고 동특성에 중요한 영향을 미칠 것이라 생각되는 dropper의 비선형성을 고려하기 위하여 전용 비선형 유한요소 모델을 구성하고 simulation을 통하여 가선계의 진동특성을 도출하고자 하였다.

* 홍익대학교 석사, 비회원

** 홍익대학교 교수, 정회원

2 가선계의 유한요소 모델링

가선계의 유한요소모델을 구성하는 주요부분에 대한 모델링은 다음과 같다.

전차선(contact wire, 그림 1의 ①)은 열차 위에 설치된 pantograph와 직접적인 접촉을 이루어 전기를 공급하는 부분이며 조가선(messenger wire, 그림 1의 ②)은 전주에 직접 현수되어 전차선을 지지하는 역할을 한다. 이들에게는 고주파 모드에 대한 타당성을 확보하기 위해 자체 강성을 갖고 있는 beam요소를 사용한다. 유한요소 모델의 입력 파라미터 값은 일본의 신간선을 참고 하였다.

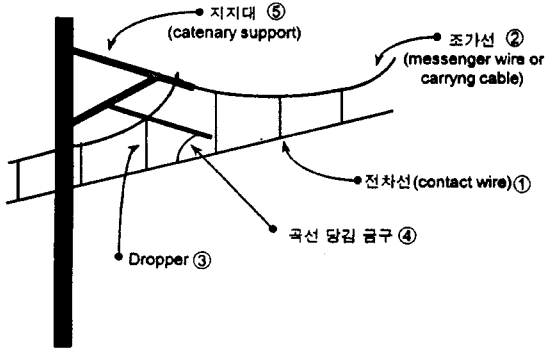


그림 1 단순 가선계의 구조

Dropper(그림 1의 ③)는 전차선과 조가선을 연결시키며 전차선의 하중을 조가선에 전달하기 위해 설치되는 일정한 질량을 갖는 cable로서 equilibrium position으로부터 압축과 인장에 대해 다른 성질을 갖는 비선형 요소이다. dropper의 강성이 가선계의 동특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 압축과 인장에 대하여 동일한 강성을 갖는 몇가지 선형 spring과 다른 강성을 갖는 비선형 spring으로 모델링하였다. 선형 dropper 강성은 비선형 dropper의 압축강성으로 사용되는 10 N/m, 인장강성으로 사용되는 100000 N/m, 그 중간정도에 해당하는 1000 N/m 그리고 비선형 dropper 강성은 그

실제 성질을 표현할 수 있도록 그 상태를 check하여 압축시는 10 N/m, 인장시는 100000 N/m의 강성계수를 할당하였다. 이를 위해 해석시 매 step마다 상태를 check하며 dropper에 적절한 강성을 할당하였다.

곡선당김금구(steady arm, 그림 1의 ④)는 전차선과 접촉하는 pantograph의 한 곳만 마모되는 것을 방지하기 위해 전차선에 편위를 주기위한 것으로 전차선에 수직하중을 가하지 않으므로 강성 효과는 무시할 수 있고 질량만 갖는 lumped mass로 하였다.

지지대(그림 1의 ⑤)는 조가선만을 지지하고 있는 cantilever beam으로 간주할 수 있으며 가선계의 진동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 등가한 spring - mass 요소를 사용하였다. 강성계수는 지지점에서 조가선이 등가한 응답을 나타낼 수 있도록 계산하였다.

지금까지 설명한 요소들을 조합하여 가선계의 해석을 위한 유한요소 모델을 구성하였다. 각 경간마다 12개의 dropper를 배치하여 총 3 경간의 가선계를 구성하고 경계조건으로 양단을 고정시켰다. 가선계의 유한요소 모델의 개략적인 배치는 그림 2에 나타나 있다.

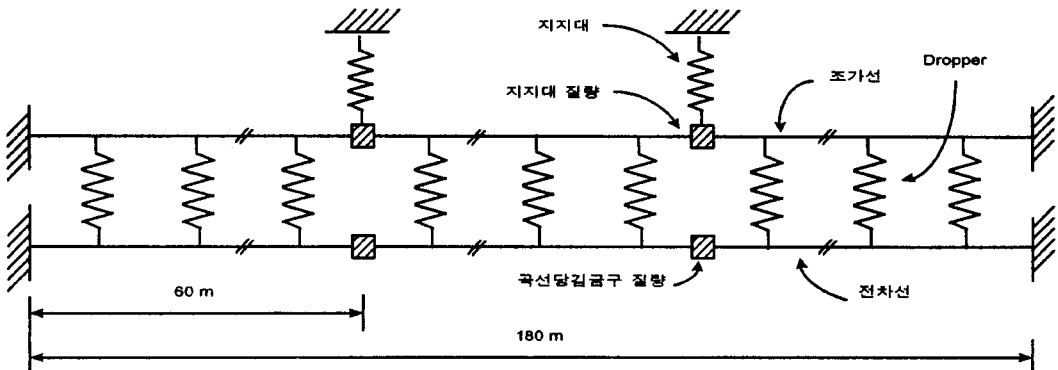


그림 2 가선계의 유한요소 모델

3 선형 모델의 자유진동

비선형 요소를 가진 대부분의 system은 일반화시키기 어려운 특성들을 갖고 있어 막연히 현상만 나열하는데 그치지 쉽다. 이러한 경우에 어떤 비교대상을 기준으로 관찰하고 현상을 분석하는 것이 도움이 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 비교대상으로 dropper강성이 압축과 인장에 대하여 일정한 선형 모델을 택하였고 자유진동해석을 수행하였다.

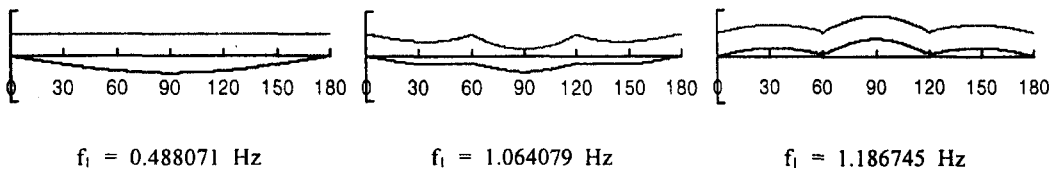
선형화된 모델중 dropper강성이 10 N/m (이하 선형모델 1 이라 한다), 1000 N/m (이하 선형 모델 2 라 한다), 100000 N/m (이하 선형 모델 3 이라 한다)인 경우에 대하여 모드해석을 수행하였다.

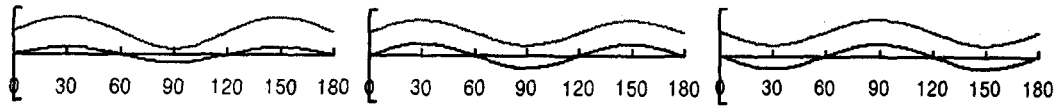
3.1 고유주파수 및 모드 형상

선형 모델 1의 해석 결과중 선정된 일부 모드에 대해 고유주파수와 모드형상을 그림 3-(a)에 도시하였다. 모드형상을 보면 전차선의 운동이 두드러진 모드와 조가선만의 운동이 두드러진 모드, 혹은 양쪽의 운동이 모두 두드러진 모드로 구분할 수 있다. 2 Hz 이상의 대역에서는 전차선과 조가선의 모드형상이 서로 독립적으로 보이는데 dropper의 강성이 매우 작으므로 전차선과 조가선의 운동이 약하게 연관되어 있기 때문으로 여겨진다. 특히 조가선과 전차선 각각에 높은 장력이 작용하고 있으므로 dropper에 의한 모드연관 효과가 상대적으로 미세할 것이다. 조가선이 직접적으로 지지되어 있는 지지대 부근에서는 미세한 응답변위를 나타내는데 지지대의 높은 강성에 기인하는 것으로 여겨진다. 선형 모델2의 해석 결과를 그림 3-(b)에 도시하였다. 선형 모델 1과 비교할 때 강한 dropper의 강성으로 인해 전차선과 조가선의 모드 연관이 많아졌다. 하지만 20 Hz이상의 모드 이후부터 전차선과 조가선의 모드 연관이 약해져 고주파 모드에서는 모드가 분리되고 있음을 알 수 있다. 선형 모델 3의 해석 결과를 그림 3-(c)에 도시하였다. 모든 경우에 대하여 전차선과 조가선의 모드가 연관되어 있다. 실제로 가선계 운동 성분의 대부분인 40 Hz범위의 모든 모드에서 전차선과 조가선의 모드가 연관되어 있다.

3.2 모드 분포

그림 4에 선형 모델 1의 모드 분포 도시하였는데 고유 주파수에 대하여 일정한 양상을 보인다. 모드 간격이 전체적으로 균일하게 유지되는데 이는 전차선과 조가선을 beam으로 모델링 하였지만 자체 강성이 작고 높은 장력을 받으며 전차선과 조가선이 약하게 연관되어 있어 단순 현의 경향을 보이는 것으로 판단된다. 그리고 선형 모델 2의 결과도 커진 dropper강성에도 불구하고 선형 모델 1과 같은 경향을 나타낸다. 선형 모델 3의 모드 분포를 보면 이전의 모델들과 비교할 때 모드 분포가 규칙적으로 변하고 15 Hz, 30 Hz 그리고 45 Hz 부근의 밀도가 월등하게 높아 단순 현과 다른 복합적 구조물의 특성을 표현한다.

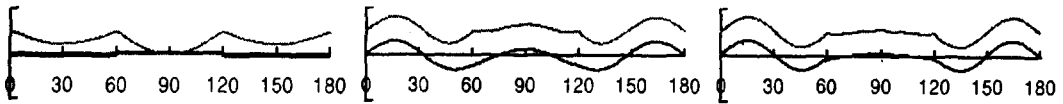




$f_2 = 1.252762 \text{ Hz}$

$f_3 = 1.257223 \text{ Hz}$

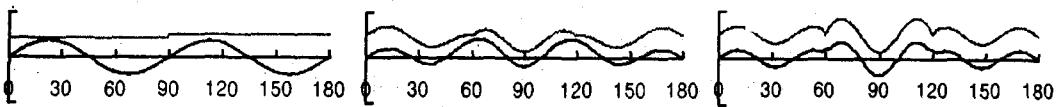
$f_3 = 1.258230 \text{ Hz}$



$f_5 = 1.267504 \text{ Hz}$

$f_5 = 2.349895 \text{ Hz}$

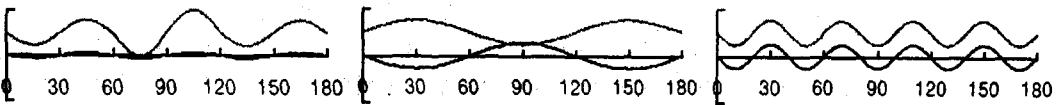
$f_5 = 2.465618 \text{ Hz}$



$f_7 = 1.715876 \text{ Hz}$

$f_7 = 3.110655 \text{ Hz}$

$f_7 = 3.562370 \text{ Hz}$



$f_9 = 2.493051 \text{ Hz}$

$f_9 = 3.594225 \text{ Hz}$

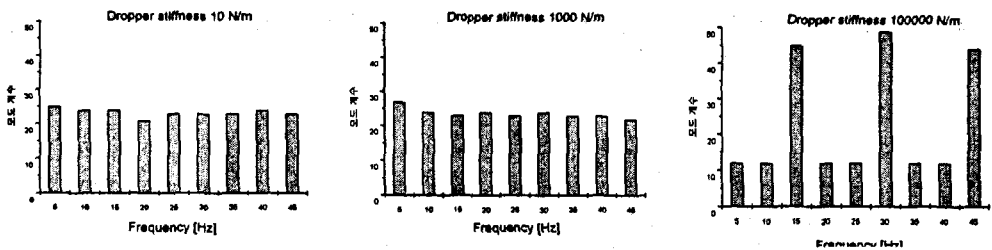
$f_9 = 3.773013 \text{ Hz}$

(a) 선형 모델 1의 모드

(b) 선형 모델 2의 모드

(c) 선형 모델 3의 모드

그림 3 선형 모델들의 모드 해석 결과



선형모델 1의 모드 분포

선형모델 2의 모드 분포

선형모델 3의 모드 분포

그림 4 선형 모델들의 모드 분포

4 선형 및 비선형 가선계 모델의 진동응답 해석

4.1 Impulse 가진에 대한 steady state 응답 해석

Impulse 가진에 대한 진동응답이 정상상태(steady-state)에 도달한 후의 시간 응답을 구하였고 FFT를 사용하여 주파수 분포를 구하였다. 각 선형 및 비선형 모델의 주파수 분포를 그림 5 ~ 8에 도시하였다. 계산지점은 전차선의 30 m 지점과 90 m 지점이다. 조가선 응답은 약한 dropper 강성모델의 경우 매우 미세하고 강한 dropper 강성에는 전차선과 거의 같은 응답을 나타내므로 생략하였다.

선형 모델 1의 가속도 응답을 주파수 대역에서 볼 때 20 Hz를 중심으로 고루 분포되어 있다. 선형 모델 2의 경우 모델 1에 비해 dropper의 강성을 100배 증가시켰음에도 주파수 분포는 큰 차이가 없이 비슷한 경향을 갖는다. 선형 모델 3의 30 m 지점은 미세한 크기의 성분을 가지며 대부분의 응답은 가진점이 위치한 90 m 지점의 15 Hz 부근에 밀집되어있다. 이전의 자유진동 해석에서 15 Hz 부근에 모드밀도가 월등히 높음을 보인 결과와 연관지어 생각할 수 있다. 비선형 모델의 결과를 보면 우선 응답 크기를 비교할 때 선형 모델에 비해 절반이하로 작다. 그리고 15 Hz와 30 Hz 부근 성분이 가장 큰데 역시 선형 모델 3의 자유진동해석에서의 모드밀도 결과와 연관지을 수 있겠다. 그리고 모든 선형 모델의 경우 40 Hz 이상 성분은 전무한데 반하여 비선형의 경우 무시할 수 없는 성분이 40 Hz 이상에서도 존재한다. 또한 가진력의 크기변화에 대한 영향을 산출하였는데 가진력의 크기변화에 대해 응답 주파수 분포에서는 차이가 없다. 그리고 2배의 가진력 크기에 대해 2배의 가속도 크기를 보여 가진력과 가속도의 크기가 정비례한다.

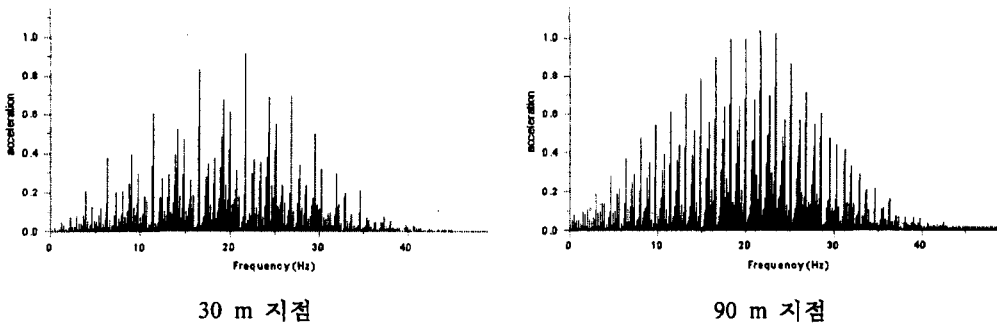


그림 5 선형 모델 1의 주파수 응답

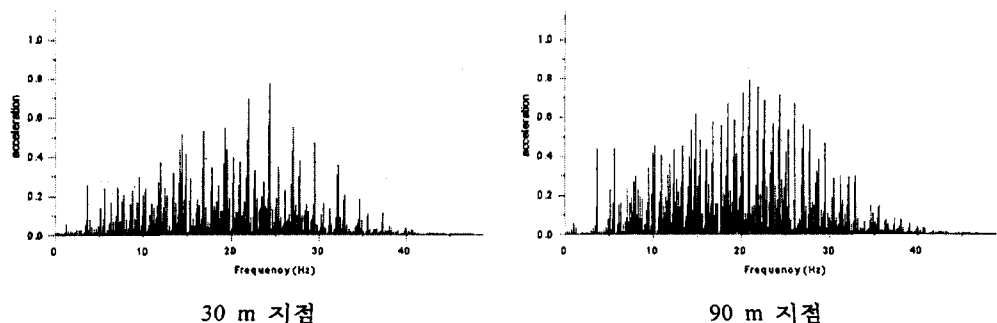
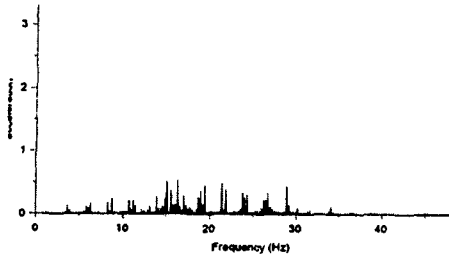
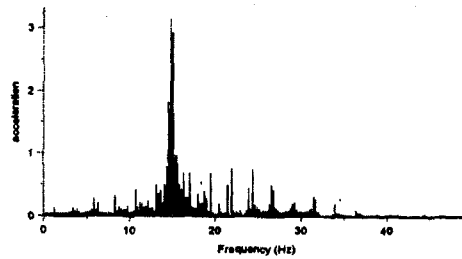


그림 6 선형 모델 2의 주파수 응답

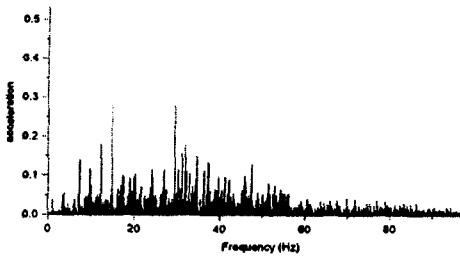


30 m 지점

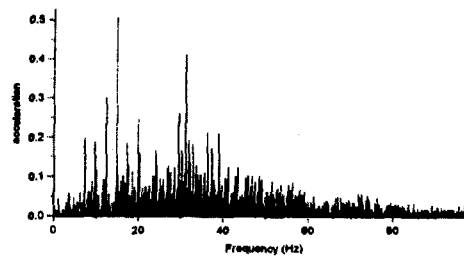


90 m 지점

그림 7 선형 모델 3의 주파수 응답



30 m 지점



90 m 지점

그림 8 비선형 모델의 주파수 응답

4.2 Harmonic 가진에 대한 비선형 모델의 응답

1 Hz 부터 80 Hz 사이의 harmonic 가진에 대한 응답을 산출하고 그 응답특성에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 10 Hz 이하 : 미세한 크기로 주파수 광대역에서 응답을 보인다.
- 10 Hz ~ 20 Hz : 3배수 근처의 대역에서 superharmonic 응답성분이 나타나며 특히 15 Hz 가진의 경우에 3배수 성분에 집중되어 크게 나타난다.
- 20 Hz 이상 : 가진 성분 위주의 응답을 보인다.

그림 9에 그 몇 예를 도시하였다.

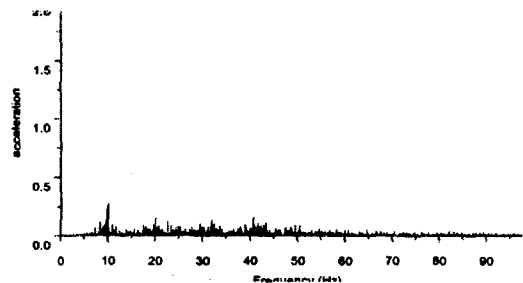


그림 9-(a) 10 Hz 가진 결과

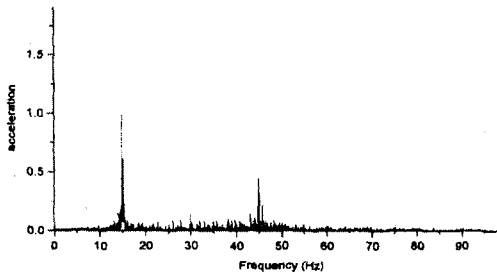


그림 9-(b) 15 Hz 가진 결과

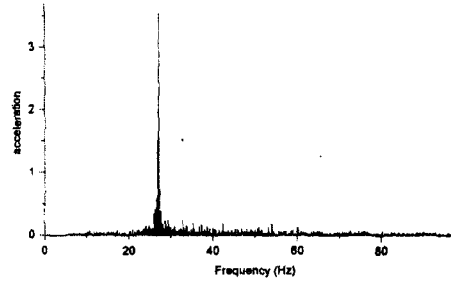


그림 9-(c) 27 Hz 가진 결과

5 결론

가선계를 유한요소 모델로 구성하여 simulation을 수행하고 그 결과를 분석하므로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

선형 가선계 모델

(1) 자유진동 특성

• Dropper에 의한 전차선과 조가선의 모드 연관 효과

Dropper 강성이 10 N/m인 모델의 모드 해석 결과 3 Hz 이하의 저주파 모드를 제외하고 그 이상의 고유주파수를 갖는 모드에서는 dropper에 의한 모드 연관 효과가 거의 없다.

Dropper 강성이 1000 N/m인 모델은 20 Hz 이상의 고유주파수를 갖는 모드에서 모드 연관 효과가 작다.

Dropper 강성이 100000 N/m인 모델은 모든 모드가 연관되어 있다.

• 모드 분포

Dropper 강성이 10, 1000 N/m인 모델은 모드 밀도가 균일하다.

Dropper 강성이 100000 N/m인 모델에서는 고유주파수 15, 30, 45 Hz 부근 모드의 밀도가 높다.

(2) Impulse 가진 진동응답 특성

Dropper 강성이 10, 1000 N/m인 모델은 20 Hz를 중심으로 큰 응답을 보이고 40 Hz이상의 응답은 미미하다.

Dropper 강성이 100000 N/m인 모델은 가진 지점의 경간만 15 Hz 부근에서 큰 응답을 보이며 나머지 경간에서의 응답은 모든 주파수대역에서 미미하다.

비선형 가선계 모델

(1) Impulse 가진 진동응답 특성

선형 가선계와 비교할 때 전체적으로 응답성분 크기가 작아지나 40 Hz 이상의 주파수 대역에서는 무시할 수 없는 크기의 성분이 존재한다.

주파수 분석 결과 15 Hz와 30 Hz 부근에서 가장 큰 응답을 나타낸다.

가진력의 크기변화에 대해 응답 주파수 분포에서는 차이가 없으며 2배의 가진력 크기에 대해 2배의 가속도 크기를 보여 가진력과 가속도의 크기가 정비례한다.

(2) Harmonic 가진 진동응답 특성

10 Hz 이하의 가진에 대하여 미세한 크기로 주파수 광대역에서 응답을 보인다.

10 Hz ~ 20 Hz사이의 가진에 대하여 3배수 근처의 대역에서 superharmonic 응답성분이 나타나며 특히 15 Hz 가진의 경우에 3배수 성분에 집중되어 크게 나타난다.

20 Hz 이상의 가진에 대하여 가진 성분 위주의 응답을 보인다.

참고 문헌

- [1] 김길상 외, "전차선과 팬터그래프 사이 동역학 시뮬레이션 프로그램 개발 연구"
- [2] 김양한 외(1992), "임의의 경계조건을 갖는 가선계의 파동 현상에 대한 고찰", 대한기계학회 논문집 제16권 제11호, pp. 2059~2071.
- [3] 정대현, 최연선(1991), "고속전철 Catenary/Pantograph계의 동적 응답에 대한 수치해석", 대한기계학회 춘계학술대회는문집(I), pp. 127~130
- [4] 이종곤(1993), "전차선로의 특성과 설계", 한국고속철도건설공단 전기시설본부
- [5] Karl F. Graff(1975), "Wave Motion in Elastic Solids", Oxford University Press