

< 논 문 >

가선계의 동특성에 관한 연구

A Study on Dynamic Characteristics of a Catenary System

김 정 수* · 최 병 두**

Jung-Soo Kim and Byung-Doo Choi

(1998년 10월 21일 접수 : 1999년 3월 8일 심사완료)

Key Words : Catenary(가선계), Pantograph(집전계), Linear Spring(선형 스프링), Nonlinear Spring(비선형 스프링), Mode(모드), Impulse Response(충격응답)

ABSTRACT

Dynamic characteristics of catenary that supplies electrical power to high-speed trains are investigated. A simple catenary is composed of the contact and messenger wires connected by droppers possessing bi-directional stiffness properties. For slender, repeating structures such as catenary, both the wave propagation and vibration properties need to be understood. The influence of parameters that determine catenary dynamics are investigated through numerical simulations involving finite element models. The effect of the tension and flexural rigidity of the contact wire is first investigated. The effects of dropper characteristics are then investigated. For linear droppers wave propagation as well as modal properties are determined. For large catenary motion, droppers can be modeled as bi-directional elements possessing low stiffness in compression and high stiffness in tension. For this case, impulse response is computed and compared with the cases of linear droppers. It is found that the catenary dynamics are primarily determined by contact wire tension and dropper properties, with large responses observed in 5~40 Hz frequency range. In particular, the dropper stiffness and spacing are found to have dominant influence on the response frequency and the wave transmission characteristics.

1. 서 론

가선계(catenary)는 전차에 동력을 공급하는 장치이다. 고속전철의 동력공급은 가선계로부터 열차에 부착된 집전계(pantograph)를 통하여 이루어진다.

이상적인 집전장치는 열차의 진동, 돌풍 등과 같은 외적 변수에 관계없이 열차의 집전계와 완벽한

접촉을 유지하여 안정된 전력공급이 이루어지도록 하여야 한다. 이러한 집전장치 기술은 고속전철의 속도한계와 운행 중 발생하는 사고의 주요원인 중 하나인 이선 현상을 크게 좌우하므로 고속전철 국산화를 위하여 필히 연구되어야 할 핵심 분야이다. 실제로 고속전철을 실용화하고 있는 나라들에서는 고속화에 따른 이선 현상의 증가를 경험한 바 있으므로 조만간 고속전철을 도입할 예정인 우리나라도 보류해야 할 기반 기술이라 생각된다. 이선 현상을 이해하기 위해서는 가선계의 정적 탄성특성보다는 운전조건에 따른 가선계의 최적설계 변수를 확정해야

* 정회원, 홍익대학교 공과대학 기계공학과

** 홍익대학교 대학원 기계공학과

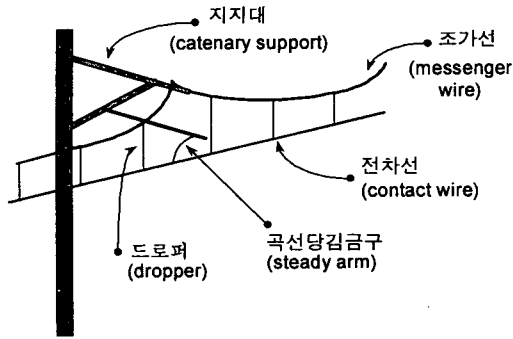


Fig. 1 Composition of catenary

하며 이를 위해서는 설계변수 변화에 따른 가선계의 진동특성에 대한 이해가 선행되어야만 한다. 가선계는 유한하나 단면적에 비하여 매우 길기 때문에 진동특성과 파동전파특성이 동시에 고려되어야만 한다. 가선계와 같이 가느다란 구조물을 단순현 혹은 인장보로 이상화 할 때 모드특성과 파동전파특성을 해석적으로 규명할 수 있다. 그러나 실제로 가선계는 두개의 인장력을 받는 케이블이 드로퍼로 연결되어 있으며, 여러 개의 부착물과 지지대가 첨가된 복합적인 구조물이다. Fig. 1에 가선계의 기본적인 구성요소를 도시하였다. 본 연구에서는 먼저 인장보 모델을 사용하여 인장력과 굽힘강도가 파동전파속도 및 모드특성에 미치는 영향을 해석적으로 규명한다. 그 다음 가선계의 실제 구조에 보다 근접하도록 드로퍼 및 지지대등의 불연속 요소를 포함하는 유한요소모델을 구성하고 수치해석을 통하여 진동특성과 파동전파특성을 계산한다. 이러한 결과의 비교를 통하여 가선계를 구성하는 여러 인자들이 동특성에 미치는 영향을 규명한다. 특히 드로퍼, 지지대등의 불연속 강성이 동특성에 미치는 변화를 집중적으로 규명하고자 한다.

2. 단순 가선의 진동해석

가선계의 동특성을 다루기 전에 먼저 단순 인장보의 동특성 해석결과를 요약하면 아래와 같다.
지배방정식 :

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

2.1 모드해석

Pinned-pinned 경계조건에서 고유주파수는 다음과 같다.

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A} \left(1 + \frac{TI^2}{n^2 \pi^2 EI} \right)}$$

여기서 l 은 길이, T 는 장력, ρ 는 밀도, A 는 단면적, EI 는 굽힘강도이다. 전차선을 기준으로 $l=60$ m, $T=19600$ N, $\rho=7820$ kg/m³, $A=107.46 \times 10^{-6}$ m², $EI=285.91$ Nm²으로 선정하였을 경우에 Table 1과 같은 고유주파수를 얻는다.

주파수대역에서 많은 고유주파수가 존재하므로 모드밀도를 Fig. 2에 도시하였다. 큰 장력과 작은 단면의 영향으로 상당히 높은 주파수 대역에서도 일정한 고유주파수 분포를 가지므로 보 (beam) 보다는 현 (string)에 가까운 경향을 보인다

2.2 파동전파 해석

현의 파동현상에서는 파동전속도를 포함하는 파동현상이 주파수에 의존하지 않는 비분산 (non-dispersive) 특성을 가진다. 실제로 파장의 길이가 단면보다 큰 저주파 응답성분은 현모델에 기초한 해석이 무방할 것이나 접촉부의 고주파 응답성분을 고려하려면 가

Table 1 Natural frequencies of tensioned beam

Mode	Natural frequency [Hz]
1 st	0.42
2 nd	0.85
3 rd	1.27
4 th	1.70
5 th	2.12
6 th	2.55
7 th	2.97
⋮	⋮

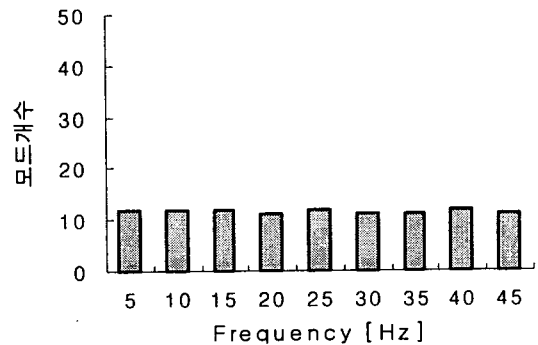


Fig. 2 Modal density of tensioned beam

선계를 인장보로서 간주하여 해석하는 것이 타당할 것이다.

지배방정식으로부터 k 를 파동수(wave number), ω 를 주파수라고 하면 ω 와 k 사이에는 다음과 같은 관계가 존재한다.

$$k_{1,2} = \pm \left\{ -\frac{T}{2EI} + \left[\left(\frac{T}{2EI} \right)^2 + \left(\frac{\rho A}{EI} \right) \omega^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}$$

전파속도 $c = \omega / k$ 이므로

$$c_{1,2} = \pm \left\{ \frac{T}{2\rho A} + \left[\left(\frac{T}{2\rho A} \right)^2 + \left(\frac{EI}{\rho A} \right) \omega^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}$$

여기서 T 는 장력, ρ 는 밀도, A 는 단면적, E 는 굽힘강도 이다.

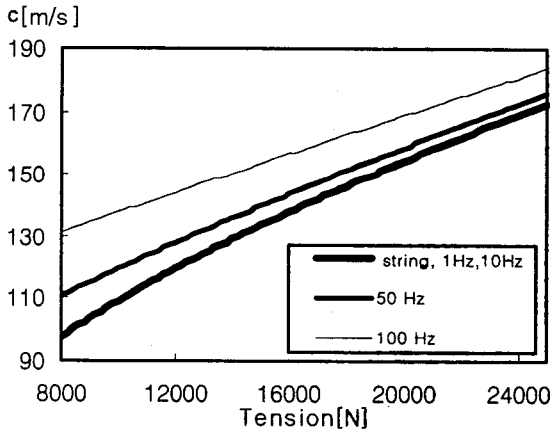


Fig. 3 Wave propagation speed vs. tension

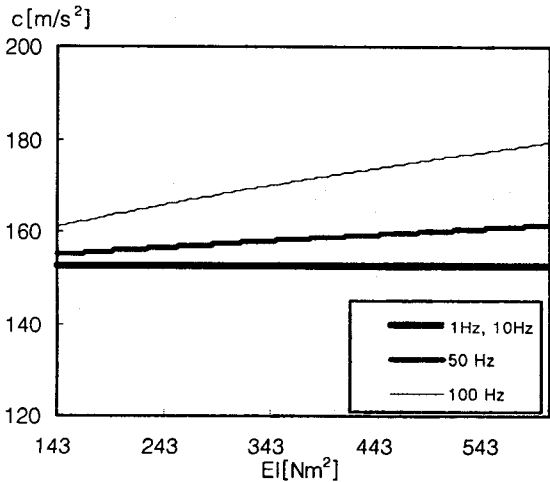


Fig. 4 Wave propagation speed vs. stiffness (EI)

위 식은 파동전파속도를 장력 T 및 굽힘강도 EI 의 함수로 나타낸 것이다. 파동 주파수 ω 에 따라 변하는 분산(dispersive) 특성을 잘 보여준다. Fig. 3은 굽힘강도 $EI = 285.91 \text{ Nm}^2$ 일 때 파동전파속도와 장력사이의 함수 관계를 도시하고 있다. 주어진 장력에 대하여 보의 전파속도는 모든 주파수 대역에서 현의 경우보다 증가된 결과를 보여준다. 그러나 저주파 영역에서 실제 차이는 미세하여 현과 보 모델이 등가함을 알 수 있다. 그림에서도 1 Hz와 10 Hz 성분의 경우 현과 보는 거의 같은 결과를 나타낸다. 또한 장력이 증가함에 따라서 보의 굽힘강도 (EI)항의 영향이 상대적으로 감소하므로 보 모델과 현이 근접하고 있음을 나타낸다. Fig. 4는 장력 $T = 19600 \text{ N}$ 일 때 파동전파속도와 굽힘강도 (EI)의 함수관계를 도시하고 있다. 현(string)과 대비하여 보(beam)는 자체 강성을 가지므로 굽힘강도 (EI)의 증가는 파동전파속도의 증가를 유발한다. 저주파 성분에서는 미약한 반면 고주파성분으로 갈수록 전파속도는 높은 민감도를 보인다. 따라서 장력과 굽힘강도의 상대적인 크기에 비례하여 인장보의 동특성은 현과 보의 특성을 동시에 가진다. 실제로 가선계의 경우 고주파 성분을 제외하고는 장력이 압도적인 영향을 갖는다.

3. 가선계의 유한요소 모델링

복합적인 구조물인 가선계를 구성하고 있는 요소들을 실제에 근접하게 모델링하였다. 전차선 및 조가선은 가선에 전파되는 파동의 길이와 가선의 단면 길이의 상대적 비에 의해 현(string) 또는 보(beam) 모델로 가정할 수 있으며 여기서는 전철이 고속화할수록 전차선-집전계 접촉부 응답의 고주파 성분이 중요해진다는 외국의 실험결과에 비추어 전차선 및 조가선 모델링에 보 요소를 사용한다. 드로퍼는 일종의 cable로서 전차선과 조가선을 연결하고 있으므로 상당한 인장력을 받고 있다. 따라서 작은 변위 (small motion) 가정시 항상 인장력을 받고있게 되므로 드로퍼의 인장방향의 큰 강성을 갖는 선형 스프링(spring) 혹은 강체(rigid)로 가정할 수 있으나 큰 변위에 대해서는 압축방향으로 유연하고 인장방향에 대해 큰 강성을 갖는 비선형 특성을 갖는다. 따라서 이 특성을 표현할 수 있도록 몇 가지 다른 특성을 갖는 가선계들을 함께 구성하였다. 아래에 가선계들의 특징과 그 적용 용도를 기술하였다.

강체 드로퍼 가선계 : 높은 강성을 갖는 드로퍼를

Table 2 Finite element modeling

가선계 구성 요소	유한요소 모델링
1 전차선 및 조가선	Tensioned beam
2 드로퍼	Spring
3 지지대	Spring - lumped mass
4 곡선당김금구	Lumped mass

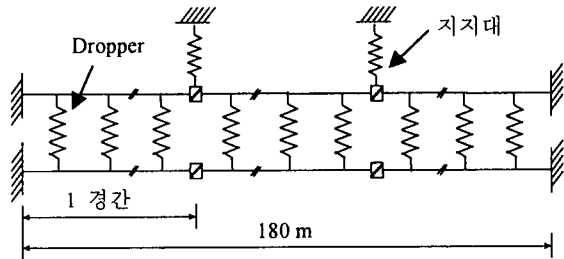


Fig. 5 Finite element model of catenary

갖는 가선계로 일반적인 small motion 경우를 표현한다. 10^5 N/m의 강성계수를 사용하였다. 가선계의 운동에 대하여 거의 강체의 효과를 가지므로 여기서는 간단히 강체 드로퍼라고 부르기로 한다.

비선형 드로퍼 가선계 : 평형상태를 중심으로 압축시는 매우 작은 강성을 인장시는 강체강성을 갖는 가선계로 큰 변위(large motion)를 갖게 되는 경우에 적용된다. 압축시 10 N/m, 인장시 10^5 N/m의 강성계수를 사용하였다.

낮은 강성 드로퍼 가선계와 중간 강성 드로퍼 가선계 : 비선형 드로퍼의 낮은 강성(10 N/m)만을 갖는 선형 가선계와 그와 강체의 중간정도에 해당하는 중간 강성(10^3 N/m) 드로퍼 선형 가선계를 함께 구성하였다. 이 경우들은 실제 가선계에서는 존재하지 않으나 드로퍼 강성이 가선계 진동에 미치는 민감도를 규명하기 위하여 이 값들을 사용하였다.

이 외에도 연결고리의 강성 및 질량효과, 곡선당김금구와 지지대의 강성 및 관성효과 등의 설계인자를 실제와 근접하게 모델링하였다. 가선계의 주요 설계변수와 유한요소 모델의 개략적인 배치는 Table 2 및 Fig. 5에 나타나 있다. 총 3 구간의 가선계를 구성하였으며 각 구간마다 12개의 dropper를 배치하고 경계조건으로 양단을 고정 시켰다. 전차선의 변수값들은 단순가선의 경우와 등가하며, dropper의 질량은 무시하였고, 지지대의 강성은 10^6 N/m, 질량은 0.5 kg, 곡선당김금구의 질량은 0.05 kg이다.

4. 강체 드로퍼를 갖는 가선계의 진동해석

4.1 모드해석

강체 드로퍼를 갖는 가선계와 드로퍼강성을 변화시킨 선형 가선계들에 대하여 모드해석을 수행하였다. 가선계와 같이 가늘고 긴 부재들은 작은 간격으로 많은 고유주파수가 존재하므로 주파수 대역에서의 모드밀도를 도시하였다. Fig. 6의 강체 드로퍼 가선계를 보면 Fig. 7의 중간 강성 드로퍼 가선계 및 Fig. 8의 낮은 강성 드로퍼 가선계의 현과 유사한 균일한 모드밀도 분포 결과에 비해 15 Hz, 30 Hz, 45 Hz 부근 등에서 월등히 높은 모드밀도를 보인다. 강체 드로퍼 가선계의 대표적인 모드형상을 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 아래선은 전차선의 모

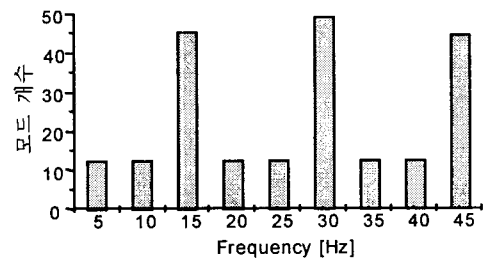


Fig. 6 Modal density of rigid-dropper catenary

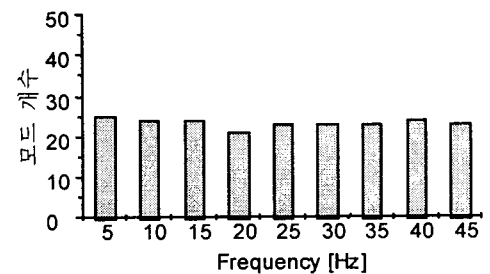


Fig. 7 Modal density of middle-stiffness-dropper catenary

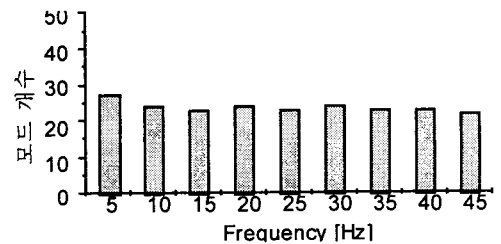


Fig. 8 Modal density of low-stiffness-dropper catenary

드형상을 나타내고 위의 선은 조가선의 형상을 나타낸다. Fig. 9에서는 전차선과 조가선의 운동이 강하게 연관되고 각 경간들이 독립적인 형태의 모드형상을 갖는다. 이에 비하여 Fig. 10, 11에 도시된 드로퍼강성이 적을 때의 모드형상은 두 가선의 운동이 매우 약하게 연관되어 있다는 것을 보여준다.

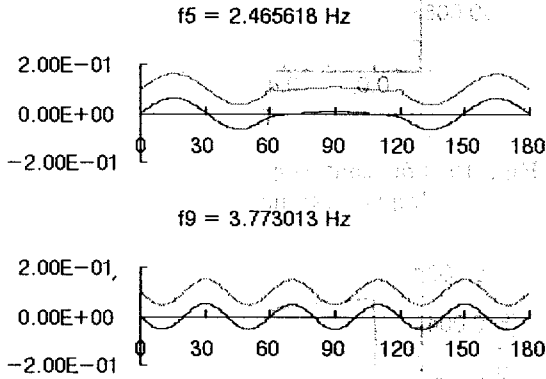


Fig. 9 Mode shapes of rigid-dropper catenary

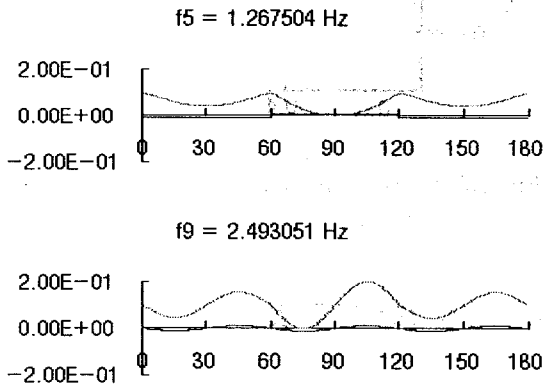


Fig. 10 Mode shapes of middle-stiffness-dropper catenary

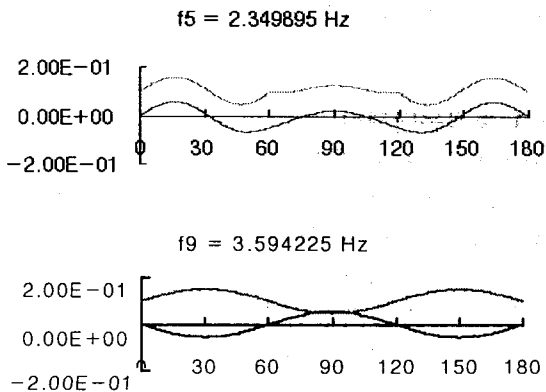


Fig. 11 Mode shapes of low-stiffness-dropper catenary

4.2 충격응답해석

집전계의 가선을 이상화하여 충격력(impulse force)으로 90 m지점(가선계의 중간)에서 전차선을 아래에서 위로 300 N의 크기로 가진하고 가진부 위 응답(point response)을 충분한 시간(10초)이 경과한 후 주파수 분석하여 도시하였다. 강제 dropper 가선계의 결과를 요약하면 첫째, 가진경간

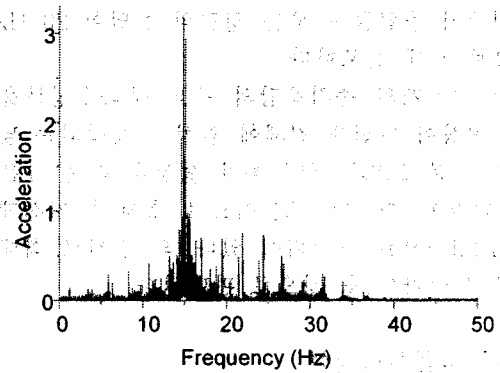


Fig. 12 Frequency response of rigid-dropper catenary

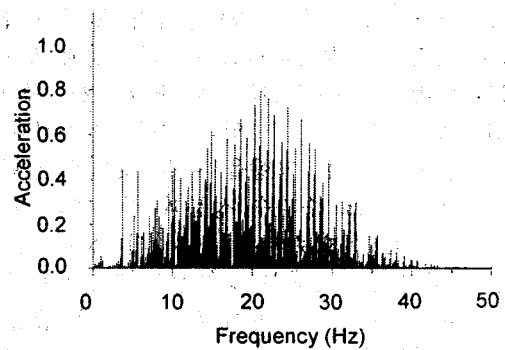


Fig. 13 Frequency response of middle-stiffness-dropper catenary

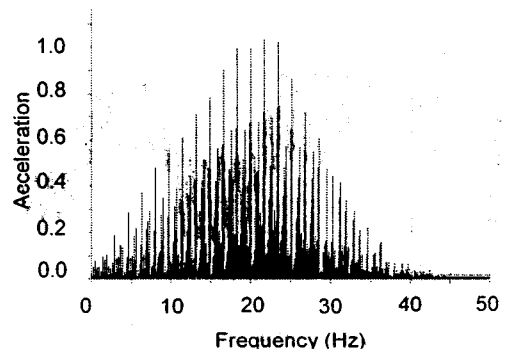


Fig. 14 Frequency response of low-stiffness-dropper catenary

(가운데 경간)만 큰 진동응답을 나타내며 둘째, Fig. 12에 도시된 대로 15 Hz 부근으로 응답이 집중되어 있다. 첫째 결과의 이유로는 조가선 지지대와 강체에 가까운 dropper의 진동절연 효과에 의하여 다른 경간으로의 진동에너지 전파를 막기 때문이라 할 수 있으며 둘째 결과는 15 Hz 부근의 모드밀도가 월등히 높았음을 연관지어 생각할 수 있겠다. 이에 반해 Fig. 13, 14의 약한 dropper 강성을 갖는 가선계의 응답들은 모든 경간의 응답이 20 Hz를 중심으로 넓게 산포한다.

각 가선계의 충격응답의 주요 주파수성분을 보면 모드형상이 가선계 전체에 걸쳐서 형성되는 낮은 주파수 부분 보다는 국부적인 형상을 갖는 높은 주파수 대역이 주응답 부분이므로 실제의 가선계(보통 9~12경간으로 구성되어 있다.)의 결과로 확대 해석함에 무리가 없을 것으로 판단된다.

4.3 파동전파해석

가진지점의 과도응답인 Fig. 15를 보면 파동전파시 드로퍼와 지지대의 강성 및 질량 효과 등의 불연속 경계로 인하여 수많은 파동반사가 일어나는 것을 알 수 있다. Fig. 15의 과도응답의 주기는 실제로 드로퍼 간격을 파동전파속도로 나눈 것과 일치하며 이때의 주파수는 15 Hz가 되어 Fig. 12의 주파수분석 결과와 연관 지을 수 있다. 이는 전차선과 집전계의 접촉에 지대한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 즉, 가선계의 주요 주파수 성분과 집전계의 주요 고유주파수 성분(실제로 3개 존재)의 상호작용은(예를 들어 공진 등) 접촉부 동특성을 결정짓는 주요인자라고 판단된다. 이와 반대로 드로퍼의 강성이 낮아지면서 파동반사 효과 또한 낮아진다. Fig. 16, 17을 보면 Fig. 13, 14에서도 나타난 대로 과도응답 또한 여러 주파수 성분을 포함하는 것을 알 수 있다.

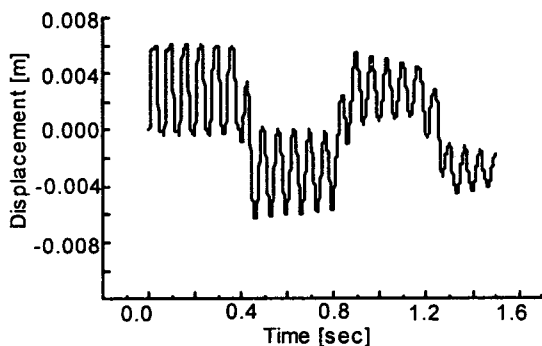


Fig. 15 Transient response of rigid-dropper catenary

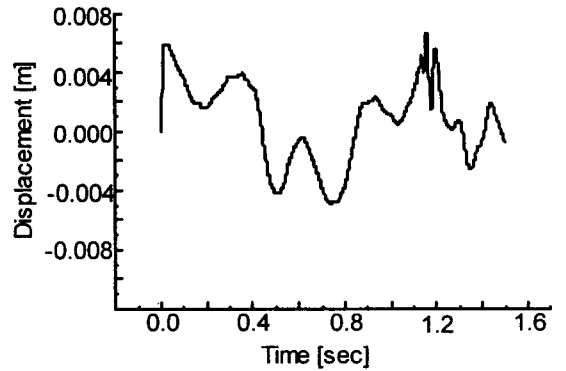


Fig. 16 Transient response of middle-stiffness-dropper catenary

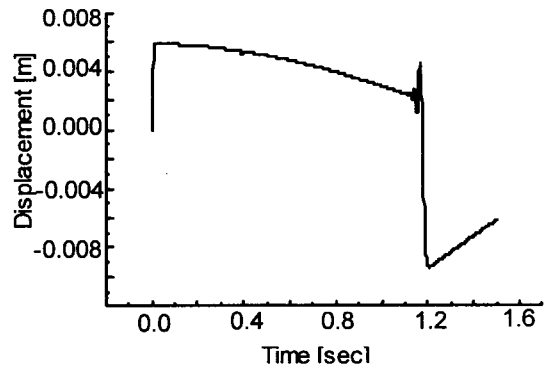


Fig. 17 Transient response of low-stiffness-dropper catenary

5. 비선형 드로퍼를 갖는 가선계의 진동해석

비선형 드로퍼는 압축시 약하고 인장시 강한 bi-directional 강성을 갖는 요소로 모델링 하였다. 이 모델은 가선계의 거동이 일정한계를 벗어나는 큰 운동(large motion)시에 드로퍼 특성을 잘 표현한다.

5.1 충격응답해석

비선형 드로퍼 가선계의 가진부위 응답의 주파수 성분을 Fig. 18에 도시하였다. 가진경간과 인접경간에 15 Hz와 30 Hz 부근을 중심으로 넓은 주파수 범위에서 응답이 산포되며 선형 가선계들의 결과에서는 미미한 40 Hz이상의 응답도 무시할 수 없는 크기로 존재하는 것을 알 수 있다. 또한 가진위치의 응답이 선형에 비해 매우 작아진다. 이는 진동에너지의 다른 경간으로의 분산효과가 높는데 기인한다.

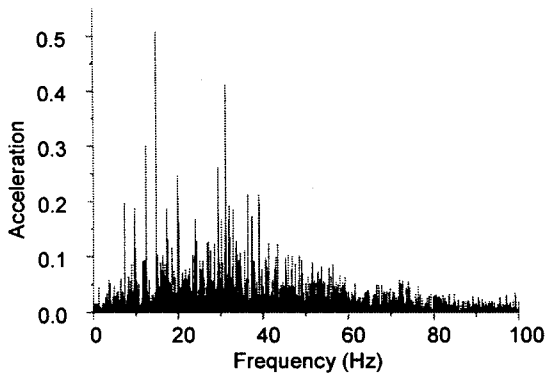


Fig. 18 Frequency response of nonlinear dropper catenary

5.1 파동전파해석

가선계를 가진다고 그 응답을 관찰하면 가진시 전차선에 발생한 압상형태의 파동은 드로퍼의 약한 초기강성으로 인해 인접경간으로 잘 전파되고 인접경간의 경계에서 반사시 역상이된 반사파는 강한 드로퍼강성과 지지대로 인해 많은 양의 에너지가 가진경간으로 되돌아 가지 못하고 다시 반사하는 형상이 되었다. 즉 각 경간의 전차선과 조가선이 골고루 진동 에너지를 나눠 갖게 되어 가진 위치에서의 응답은 이전의 가선계들에 비해 절반이하의 크기를 보이는 것을 알 수 있었다. 즉, 선형의 경우에 비하여 파동에너지가 짧은 시간에 분산되는 결과를 얻을 수 있었다.

6. 결 론

고속전철의 집전시스템인 가선계에 대한 이해를 위하여 가선계의 동특성을 연구하였다. 단순 가선에 대한 이론해석과 함께 가선계에서 일어날 수 있는 일반적인 작은 변위(small motion)진동을 표현하는 강체 드로퍼의 가선계와 돌풍이나 전차의 비정상적인 거동에 의해 발생할 수 있는 큰 운동(large motion)시 가선계의 거동을 표현할 수 있는 비선형 드로퍼의 가선계를 유한요소 모델로 구성하였다. 또한 가선계의 중요한 요소인 dropper의 영향을 살펴보고자 드로퍼의 강성을 변화시킨 가선계들을 구성하여 해석결과를 비교하므로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

진동특성

일반적인 가선계 운동에서는 15 Hz, 30 Hz, 45 Hz 등에서 높은 모드밀도를 갖고 있으며 실제 가진시켜보면 이중 15 Hz 부근의 응답성분이 월등히 크

게 나타난다. 이는 드로퍼의 반사작용에 의한 진동 성분이다. 따라서 드로퍼의 간격은 진동의 주파수 성분을 결정짓는 주요인자가 된다. 또한 드로퍼의 진동 차단효과에 의하여 가진경간의 응답이 크고 인접경간으로의 진동전달은 잘 되지 않는다.

운동이 커져 가선계가 비선형적 특성을 갖게 되면 응답주파수가 15 Hz와 함께 30 Hz 성분을 중심으로 산포되게 되며 40 Hz이상의 성분도 무시할 수 없게 된다. 즉, 공간과 주파수 영역 모두에서 응답이 분산되는 특징을 갖는다.

파동전파특성

전차선과 조가선을 연결하는 드로퍼의 강성의 크기는 외부 가진에너지의 이웃 경간으로의 전파여부를 결정하며 드로퍼에 의한 파동반사에도 결정적인 역할을 한다. 즉, 가선계의 드로퍼의 강성이 높을수록 옆 경간으로의 에너지 전파를 방해하며 드로퍼에 의한 파동반사도 증가시킨다. 이러한 드로퍼 강성의 비선형성은 파동전파 특성에도 지대한 영향을 미친다.

참 고 문 헌

- (1) 김양한 외, 1992, "임의의 경계조건을 갖는 가선계의 파동 현상에 대한 고찰," 대한기계학회 논문집, 제 16 권, 제 11 호, pp. 2059~2071.
- (2) 정대현, 최연선, 1991, "고속전철 Catenary / Pantograph계의 동적 응답에 대한 수치해석," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(I), pp. 127~130.
- (3) 이종근, 1993, "전차선로의 특성과 설계," 한국고속철도건설공단 전기시설본부, pp. 587~605.
- (4) Katsushi Manabe, Tackeo Morikawa, 1981, "Study on Vibrational Phenomena of Power Collecting System with Distributed Parameter Model," Quarterly Reports, Vol. 22, No. 2, pp. 63~69.
- (5) Takashi Ouchi, Kenji Horiki, Hikoshiro Furukawa, 1973, "Performance Tests of Heavy Simple Catenary System," Quarterly Reports, Vol. 14, No. 2, pp. 88~89.
- (6) Katusushi Manabe, 1989, "High-Speed Contact Performance of a Catenary-Pantograph System," JSME International Journal, Series III, 32, No. 2, pp. 200~205.