

21. Passive Nonlinearities in Acoustics

John Pierce

21.1 Introduction

- 바이올린과 플루트와 같은 전통악기가 지속음(sustained tone)을 내는 것이 **비선형성** (nonlinearity)
 - 거의 발진의 하모닉 모드(harmonic mode of oscillation)를 가지고 있음
 - 자극을 준 후 방치하면 지속적으로 감소하는 진폭을 가짐
 - 비선형 프로세스에 활이나 호흡이 지속적으로 에너지를 더해서 지속음을 생성
- 이 장에서는 전체시스템에 에너지를 다시 가하지 않는 비선형적 프로세스에 관해 고찰
 - 현을 뜯음, 공을 때림, 심벌즈를 부딪침

21.2 A Few Examples

- Neville H. Fletcher and Thomas D. Rossing(1991)
 - tam-tam(공과 비슷한 중국 악기) 을 친 후 최초 0.4초까지 여러 주파수대역에서의 음량의 고조와 쇠퇴
 - 162Hz 대역은 쇠퇴하는 반면 다른 대역들은 고조
 - tam-tam을 때릴 때 곧바로 자극된 저주파 모드에서 음량이 나중에 커진 높은 주파수 대역 모드로 이동

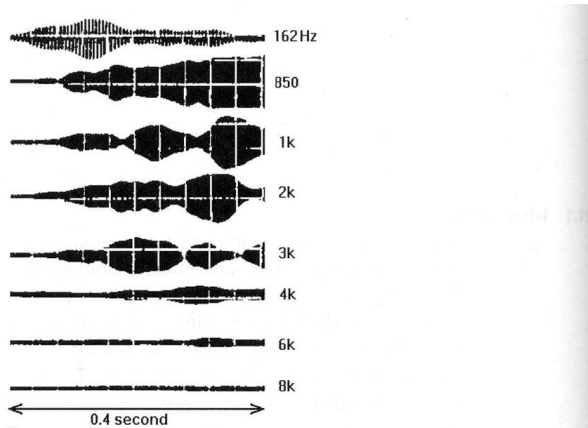


Figure 21.1 Buildup and decay in various frequency bands for a tam-tam during the first 0.4 seconds. (From Fletcher and Rossing, 1991.)

- 심벌의 스펙트럼: 때린 직후, 50ms 후, 1초 후, 2초 후
 - 50ms 후: 저 주파수 대역의 에너지가 약 5kHz의 주파수 대역으로 이동
 - 그 후 5kHz 대역에서 절정을 이루고, 2초 후 고주파수 대역에서 소멸

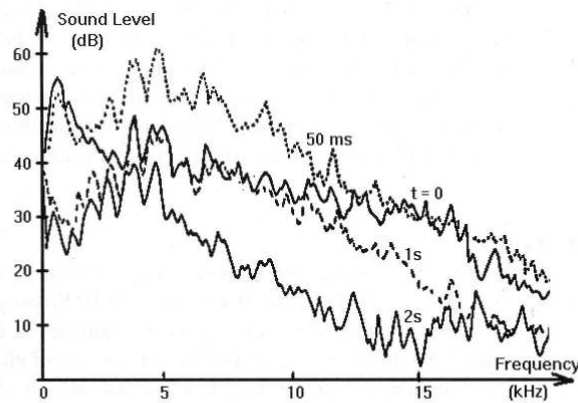


Figure 21.2 Spectra of cymbals immediately after striking ($t = 0$) and 50 ms, 1 s, and 2s later. Note the buildup of higher frequencies at 50 ms and later, and the eventual decay of higher frequencies. (From Fletcher and Rossing, 1991.)

- 시타르 (Sitar, 인도의 현악기)
 - 구부러진 브리지가 현을 회전시키고 슬라이딩 시켜 음량과 음정 모듈레이션을 모두 생성
- 현을 튕긴 후 고주파수 대역을 자극하는 실험 시스템
 - 단단한 받침대 R과 탄력재로 만든 받침대 S 사이에 걸쳐진 현
 - 현을 위, 아래 어느 쪽으로 움직여도 탄성 있는 받침은 안쪽으로 움직임
 - 현이 주파수 f 로 진동하면 현은 주파수 $2f$ 로 위, 아래로 진동하여 배음 생성
 - 이 시스템은 K.A. Legge와 Neville Fletcher가 1984년에 개발한 것과 비슷

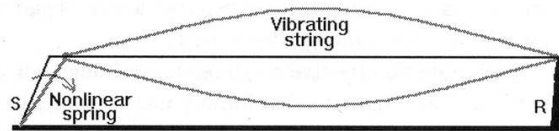


Figure 21.3 A string is supported at one end by an inclined springy flap that moves in the same direction (inward) whether we push the string up or down. If the string oscillates at a frequency f , the spring will move up and down with a frequency $2f$, and the harmonics build up.

21.3 Passive Nonlinearities

- 공, 현, 관과 같은 시스템의 비선형성은 반드시 수동 비선형성
 - 처음 때리거나 뜯은 후에 에너지 공급자가 없음
 - 수동 비선형성은 스펙트럼의 변화는 가능하나, 프로그램이 만들어내는 발진의 전체 에너지의 변화는 불가능

- 하나의 축전기(capacitor)와 유도자(inductor)로 구성된 비선형 전자 회로의 발진
 - 양의전압(positive voltage)과 음의전압(negative voltage)의 축전량이 같을 때
 - : 정형파 발진
 - 음의 전압이 양의 전압에 비하여 축전량이 1/4일 때
 - : 음의 전압의 주파수가 2배, 주기가 1/2
 - 지속적 에너지에서 음의전압의 최대값은 양의전압의 최대값의 2배

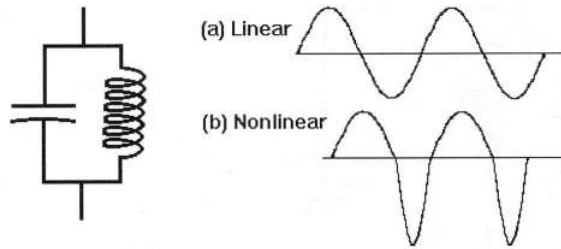


Figure 21.4 Oscillations (right) of the capacitor–inductor circuit shown at the left. If the capacitance is equal for positive and negative voltages, the oscillation will be sinusoidal (a). If the capacitance for negative voltages is 1/4 that for positive voltages, the oscillation will be as shown in (b). The energy stored for the peak positive voltage is the same as the energy stored for the peak negative voltage.

- 선형 시스템의 여러 모드간의 에너지가 이동하는 회로
 - 비선형 축전기가 선형 시스템의 모드의 전체 전압에 더해져 선형 시스템간의 에너지가 이동

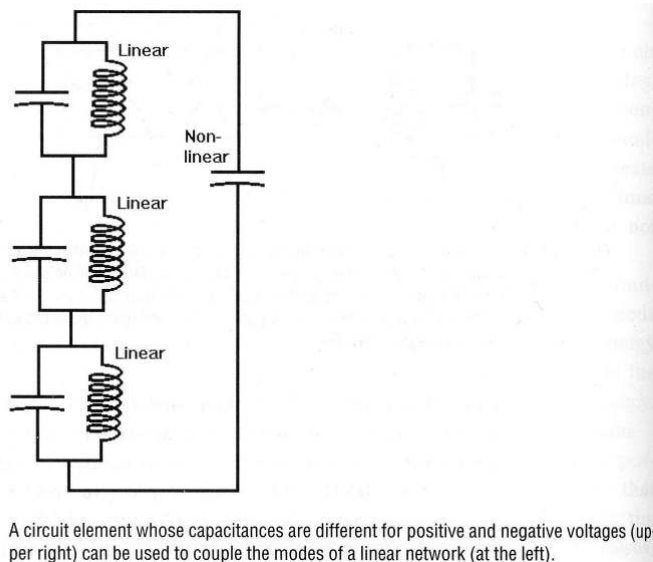


Figure 21.5 A circuit element whose capacitances are different for positive and negative voltages (upper right) can be used to couple the modes of a linear network (at the left).

21.4 Digital Simulation of Passive Nonlinearities

- Xavier Rodet의 비선형 시스템을 시뮬레이션에 관한 논문(1993)
 - 컴퓨터 사운드 생성 프로그램에서 비선형성의 가치가 인정되었음에도 시뮬레이션의 비선형성을 가하는 대개의 방법에서 시스템의 에너지가 변화

- John Pierce와 Scott van Duyne(1997)
 - 양과 음의 음량이 다른 값을 가지는 민감한 요소가 있는 시스템을 디자인
 - 한 비선형 스프링에서 다른 비선형 스프링으로 옮기기 위해서는 다른 힘의 크기가 필요
 - 이런 요소를 가지고 있는 시스템의 전체적인 발전은 시간에 따라 다른 스펙트럼과 파형을 갖지만, 시스템의 본질은 에너지를 유지
 - 상대적으로 시간에 따른 작은 변화는 생동감과 실제 음향 시스템과 같은 음악적 질을 제공, 시간에 따른 큰 변화는 공과 심벌 같은 고도의 비선형 시스템을 설계

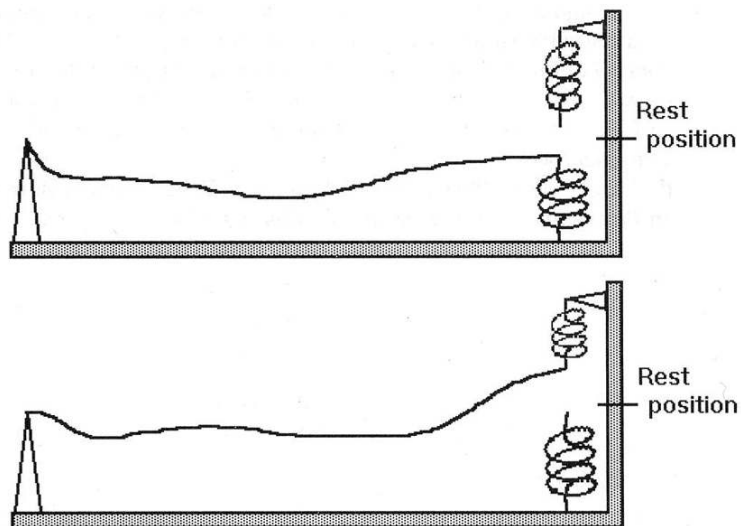


Figure 21.6 A vibrating string coupled to a nonlinear spring.

21.5 Summary

- 현존하는 선형적 모델에 수동 비선형성을 가하는 것에 대한 포괄적인 효과와 가치는 조사되지 않음