

유통중 청과물의 진동 특성 연구 (I)  
- 실험적 해석에 의한 배의 진동특성 -

김만수 · 정현모<sup>1</sup> · 김기석 · 박정길

Vibration Characteristics of the Fruit and Vegetables during  
Transportation (I)  
- Vibration Characteristics of the Pear by Experimental Analysis -

Man-Soo Kim · Hyun-Mo Jung<sup>1</sup> · Ghi-Seok Kim · Chung-Gil Park

ABSTRACT

Fruit and vegetables are subjected to complex dynamic stresses in the transportation environment. During a long journey from the production area to markets, there is always some degree of vibration present. Vibration inputs are transmitted from the vehicle through the packaging to the fruit. Inside, these cause sustained bouncing of fruits against each other and container wall. These steady state vibration input may cause serious fruit injury, and this damage is particularly severe whenever the fruit inside the package is free to bounce, and is vibrated at its resonance frequency. The determination of the resonance frequencies of the fruit and vegetables may help the packaging designer to determine the proper packaging system providing adequate protection for the fruit, and to understand the complex interaction between the components of fruit when they relate to expected transportation vibration inputs.

Instrumentation and technologies are described for determining the vibration response characteristics

---

충남대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학

<sup>1</sup> 경북과학대학 포장과

---

of the fruits with frequency range 3 to 150 Hz. The computer program for controlling the vibration exciter and the function generator and for measuring the vibration response characteristics of the fruits was developed.

The resonance frequency of the pear ranged from 64.5 to 72.2 Hz and the amplitude at resonance was between 1.78 and 2.21 G-rms. The resonance frequency and amplitude at resonance decreased with the increase of the sample mass, and they were slightly affected by mechanical properties such as bioyield deformation and rupture deformation. Regression analysis was performed among the relatively high correlated parameters from the results of correlation coefficient analysis.

**key words** : Fruit and vegetables, Vibration response, Resonance frequency

## 서 론

유통시장 및 농산물 시장의 개방으로 우리나라의 유통여건은 급변하고 있으며, 소비자의 구매패턴은 고급화, 다양화되어 농산물의 품질과 안전성에 대한 소비자의 요구가 높아지고 있다. 특히, 농산물은 불균일하고, 가변성이 있으며, 더구나 가격에 비하여 부피가 크고 유통과정 중 본래의 특성이 지속적으로 변하는 것으로 공산품에 비하여 물류 측면에서 취급하기 어려운 점이 많다.

우리나라의 농산물 중 사과와 배를 비롯해 몇몇 과일류는 중요한 수출 전략 품목으로써, 안정된 농가소득의 작목으로 자리잡기 위해서는 유통질서의 정비와 수확 후 각종 처리기술 등의 개발이 필요하겠지만, 그 중에서도 특히, 농산물의 포장 분야는 수확 후 과일류의 처리 기술 중 시급히 해결되어야 할 과제이다. 청과물은 유통시에 매우 다양한 주파수의 진동을 받을 수 있고 만약 이 주파수가 그 청과물의 공진 주파수 범위에 있다면 청과물과 완충재의 상호관계를 이용하여 공진점을 피하도록 해야 할 것이다. 청과물 자체의 공진 주파수를 파악하는 것은 청과물의 포장설계와 유통과정 중에

발생될 수 있는 진동에 의한 과실의 손상 메커니즘을 이해하는데 매우 중요하다.

과실의 공진 주파수의 해석은 Abbott 등(1968)에 의해서 처음 발표가 되었다. 그들은 과실의 물리적인 접촉을 피하기 위해 픽업(pick-up) 로드를 이용하여 공진주파수를 계측하였으며, 과실의 탄성계수와 진동신호의 두 번째 공진 주파수간에 매우 높은 상관관계가 있다는 것을 보고하였다. 이러한 연구를 근거로 하여 강성계수(firmness index, stiffness coefficient)는 과실의 무게가 80g 또는 더 무거운 경우에 과실의 경도와 매우 밀접한 관련이 있다고 보고하였다. Finney(1970)는 사과를 수평 방향으로 진동 가진기(actuator)에 올려놓고 정현파 신호를 진동 가진기에 입력하여 진동실험(Finney's method)을 하였으며, 그 결과 과실의 탄성계수는 Abbott의 강성계수( $f_{2m}^2$ )와 매우 높은 상관관계가 있다고 보고하였다.

Cooke(1972)은 과실의 전단탄성계수(shear modulus)를 비파괴적으로 계측하기 위해 손상되지 않은 과실에 대한 공진 주파수를 연구하였으며, 그 결과 Abbott와 Finney의 방법에 의해 계측된 가장 낮은 공진 주파수는 회전타원체 형식의 진동이

었고, 두 번째로 낮은 공진 주파수는 비틀림 형식의 진동이었다고 하였으며, 다시 정의된 강성계수 ( $f_2^2 m^{2/3}$ )는 예전의 강성계수 ( $f_2^2 m$ )보다 더욱 정확하게 과실의 경도를 예측할 수 있었다고 보고하였다. Yong과 Bilanski(1979)은 Finney의 방법을 이용하여 사과와 공진 모드에 대하여 다시 연구하였다. 그들은 사과의 적도방향에 부착된 가속도계를 이용하여 수평 및 수직방향의 진동에 대한 공진 주파수를 분석하였으며, 첫 번째 공진 주파수에서는 수평방향의 진동이 발생되지 않았으며, 두 번째 공진 주파수에서 발생하였다고 보고하였다.

Yamanoto 등(1980)은 음향 임펄스(acoustic impulse) 방법이 적용된 동질의 탄성구 모델을 이용하여 사과의 공진 주파수를 연구하여 공진 주파수로부터 전단탄성계수(shear modulus)를 예측할 수 있는 모델식을 개발하였으며, Finney 방법을 이용하여 사과에 대한 탄성계수(Young's modulus)와 공진 주파수와 관계를 연구하였으며, 그 결과 탄성계수와 Cooke의 경도지수와 높은 상관관계가 있다고 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 청과물 포장 설계 시 중요한 자료가 되는 청과물의 공진 주파수, 정점가속도 등의 진동특성을 분석하기 위하여 실험적 방법으로 배를 공시하여 정현파 스윙 진동실험을 수행하였으며, 매 시료마다 UTM(universal testing machine)으로 기계적 특성을 측정하여 진동특성과의 상관관계를 분석하였다.

## 재료 및 방법

### 가. 공시재료

본 실험에 사용된 과실은 신고 품종의 국내산 배이었으며, 1998년 10월에 일반농가에서 수확된

후 시험에 사용되기 전까지 약 5개월 정도 저온저장( $0\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $85\pm 5\%$  rh) 되었다. 시료들의 기본적인 물성들은 표 (1)과 같으며, 시험에 사용되기 전 실험실의 환경조건( $15^\circ\text{C}$ ,  $75\%$  rh)에서 약 4시간 동안 적응을 시킨 후 시험에 사용하였다.

Table 1. Harvesting date and physical characteristics of the pear used in sweep vibration tests

	Date of harvest	Volume ( $10^{-4} \text{ m}^3$ )	Mass (kg)	True density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Pear (Niitaka)	1998. 10	5.1444 (1.0028)*	0.5073 (0.0936)	990.16 (64.17)

\*( ) standard deviation

### 나. 실험장치

본 연구에서 배의 진동특성을 측정하기 위해 구성된 실험장치는 그림 (1)에서 보는 바와 같이 IMV사의 전자식 가진기(PET-05-05A), 가진기와 컴퓨터 및 함수발생기(HP-33120A)와의 인터페이스를 통해 정해진 스윙율(sweep rate)로 일정 범위의 주파수를 제어하기 위한 HP-IB(Hewlett-Packard Interface Bus) 통신, 입력받은 주파수에 상응하는 진폭으로 진동을 주기 위한 오실레이터와 앰프(Oscillator & Amplifier), 배의 진동에 따른 가속도 계측과 진동가진기와 앰프와의 피드백신호(feedback signal)를 위한 각각의 압전형 가속도 센서 및 샘플링율(sampling rate) 500 MHz의 디지털 오실로스코프(Oscilloscope)로 구성되었다. 이 시스템에서는 가속도 센서의 진동 응답신호를 저대역 필터(low-pass filter)가 장착된 앰프(amplifier)를 통하여 오실로스코프에 출력하도록 하였고, 오실로스코프와 컴퓨터와의 RS-232C 통신을 이용하여 매초 진동응답신호의 진폭을 측정하여 컴퓨터에 출력한 후에 그 데이터를 저장하도록 하였다.

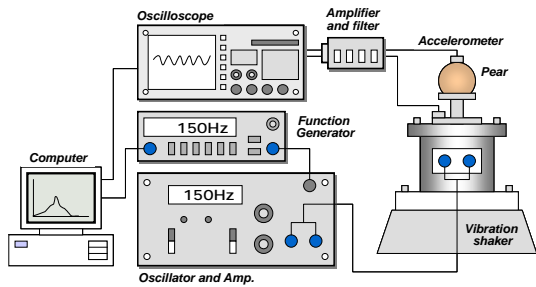


Fig. 1. Schematic diagram of the sweep vibration test apparatus for the pear.

시료 고정장치(specimen-mounting device)는 시료를 가진기의 테이블 위에 견고히 고정시키기 위해 충분한 강도와 강성이 있어야 하고, 테이블과 시료 고정장치 사이의 상대운동이 없어야 하며, 가능한 한 그 무게가 가벼워야 한다. 따라서 본 실험에서는 알루미늄으로 무게가 152g이 되도록 제작하였다.

또한 진동시험에 사용되는 가속도 센서는 아주 경량이고, 유연한 케이블을 가지고 있는 1축의 압전형 가속도 센서(20G)를 사용하였으며, 가속도 센서는 배와 시료 고정장치에 각각 부착하였다. 여기서, 가진기의 가진력이 5kg이므로, 가진기의 아마추어(moving element, 150g), 시료 고정장치, 배 및 가속도 센서의 총 무게가 이 범위를 벗어나지 않도록 하였다. 배의 진동 실험장치의 제어와 계측을 위한 컴퓨터 프로그램은 비주얼 베이직(Microsoft, Ver. 6.0)으로 작성되었으며, 이 프로그램은 함수발생기를 제어하는 프로그램과 가속도 센서에서 입력되는 가속도값을 계측·저장하는 프로그램으로 구성하였다.

#### 다. 실험방법

배에 대한 진동실험시 주파수 범위는 3~150 Hz, 가속도 수준은 트럭 등의 운송수단에서 발생

되는 0.25G(Peleg and Hinga, 1986; O'Brien et al., 1965), 스위프율은 1octave/min로 대수적인 정현파 스위프 진동실험을 수행하여 공진 주파수와 정점 가속도(peak acceleration)를 분석하였다(ASTM D3580). 진동실험 직후에 매 시료마다 배의 기계적 특성을 계측하기 위하여 UTM을 이용하였다. 가속도 센서가 부착되었던 부근에서 원기둥 형태(직경 17.6mm, 길이 20mm)의 시편을 채취하였으며, 각 시편에 대하여 하중재하속도(loading rate) 5mm/min로 압축실험을 수행하였다(ASAE S368.3, Jung, 1999).

## 결과 및 고찰

### 가. 배의 공진 주파수와 기계적 특성

그림 (2)의 (a)는 가진기에 배 시료가 없는 상태에서 시료고정장치와 가속도 센서만을 장착하여, 주파수 3Hz에서 150Hz까지 대수적으로 업-스윕(upswep) 시켰을 때, 입력주파수에 대한 입력전압의 보정식에 의해 가진기의 가속도 값을 측정된 결과로서 실험 주파수의 전 영역에서 0.25 G-rms로 잘 유지되었다.

또한, 그림 (2)의 (b)는 이 시스템에 가속도 센서가 부착된 배 시료를 올려놓고 같은 조건으로 구동하였을 때 시료에 부착된 가속도 센서로부터 감지되는 가속도 변화를 나타낸 것으로, 공진점이 뚜렷이 나타나는 것으로 보아, 구성된 진동실험장치로부터 배의 진동 특성의 구명이 가능한 것으로 판단되었다. 본 실험에서 배의 시료는 질량 0.35 kg에서 0.69 kg까지 약간의 차이가 있도록 선택하였으나, 전체적으로는 시료크기의 범위가 넓지 못하여 각 시료간에는 차이가 거의 없었다. 실험은 1, 2차로 나누어 수행하였으며, 이때 사용되었던

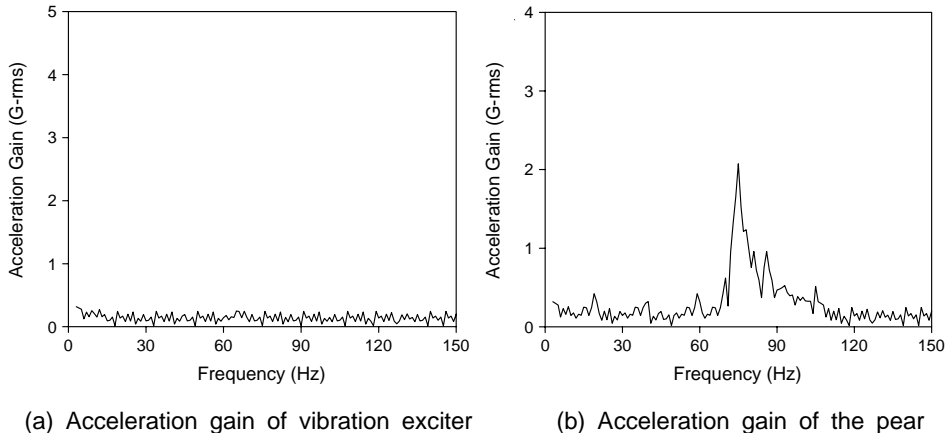


Fig. 2. Acceleration gains of vibration exciter and the pear.

배의 시료가 서로 다르기는 하였으나, 배의 품종과 저장조건이 거의 같기 때문에 두 시료간에 진동특성과 기계적 특성의 일반적인 경향을 파악하는데는 무리가 없을 것으로 판단되었다. 즉, 저장기간이 짧아 배 조직의 연화가 상대적으로 작게 진전되었을 것으로 기대했던 1차 실험에서의 공진진동, 정점가속도는 각각 53~102Hz, 1.08~2.47G-rms으로서 2차 실험에서의 값들 64~72Hz, 1.78~2.21G-rms 보다 약간 큰 값이었으나 큰 차이가 없었다.

배의 물리적 손상과 관련하여 생물체 항복점은 중요한 의미를 갖는데 배의 경우, 힘-변형 곡선상에 분명히 나타나지 않는 경우가 많았는데, 이 경우는 곡선상의 변곡점(point of inflection)을 찾아 이점을 배의 생물체 항복점으로 간주하였다. 분석된 생물체 항복변형량 및 극한 변형량도 1차 실험에서는 각각 1.920~5.545mm, 2.683~7.450mm이었으나, 2차 실험에서는 각각 1.350~2.280mm, 1.870~4.290mm로써, 1차 실험에서의 값들이 다소 크게 나타났다. 이러한 현상은 Finney(1970)와 Abbott(1994) 등 여러 연구자들이 보고하였던 바

와 같이, 연한조직을 가진 과실 경우 공진 진동수는 단단한 과실에서보다 낮은 진동수대에서 발생한다고 보고한 내용들과 잘 일치하는 경향이었고, 또한 연한조직의 과실에서는 생물체 항복점, 파괴점, 생물체 항복변형량 및 극한 변형량이 매우 작다는 사실과도 잘 일치되었다.

#### 나. 배의 기본물성, 기계적 특성 및 진동특성들 간의 관계

배의 진동특성-기본물성-기계적 특성간의 상호 관계를 분석하기 위하여 이들에 대한 상관 관계를 분석하여 표 (2)에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이, 배의 공진 진동수는 변위진폭(DA)과 매우 높은 상관관계(-0.8398) 있음을 알 수 있었으며, 정점가속도와도 비교적 높은 상관관계(0.6349)를 나타내었다. 또한 공진주파수는 배의 질량, 체적, 생물체 항복변형량 및 극한 변형량과도 비교적 높은 상관관계를 나타내었다.

배 시료 전체를 대상으로 배의 질량과 체적에 따른 공진 진동수의 변화를 각각 그림 (3)의 (a)와 (b)에, 그리고 정점 가속도의 변화를 각각 그림

Table 2. Correlation coefficients of selected parameters for vibration test of the pear

	MA	VO	DE	SC	G-rms	RF	BP	BD	RP	RD	E	DA
MA	1.0000											
VO	0.9662	1.0000										
DE	0.9584	0.9978	1.0000									
SC	0.0035	-0.0050	0.0085	1.0000								
G-rms	-0.9442	-0.9238	-0.9158	0.0131	1.0000							
RF	-0.6245	-0.6021	-0.5722	0.0656	0.6394	1.0000						
BP	-0.2514	-0.3096	-0.3039	-0.3047	0.2480	0.1766	1.0000					
BD	-0.6667	-0.6676	-0.6598	-0.1401	0.6025	0.4585	0.6187	1.0000				
RP	-0.1791	-0.2535	-0.2485	0.0652	0.1520	0.1035	0.7283	0.4084	1.0000			
RD	-0.6748	-0.7021	-0.6934	0.0217	0.6927	0.5228	0.3243	0.7597	0.1789	1.0000		
E	0.1561	0.1256	0.1397	0.0427	0.0903	0.0674	0.1620	-0.3386	0.0784	-0.2620	1.0000	
DA	0.1534	0.1440	0.1107	-0.0449	-0.1360	-0.8398	-0.0568	-0.1711	-0.0275	-0.2055	0.0506	1.0000

\*Note : MA = Mass of the pear, VO = Volume of the pear, DE = Equilibrium diameter, SC = Sugar content, RF = Resonance frequency, BP = Bioyield point, BD = Bioyield deformation, RP = Rupture point, RD = Rupture deformation, E = Apparent elastic modulus, DA = Displacement amplitude

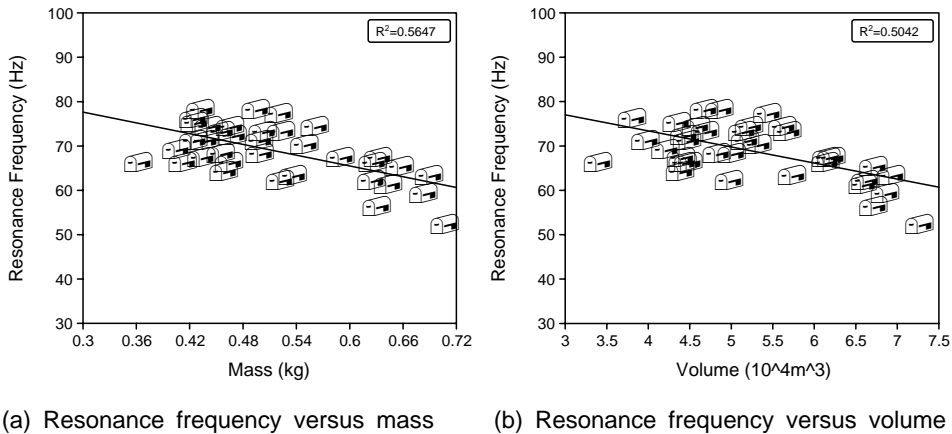


Fig. 3. Resonance frequency versus mass and volume of the pear.

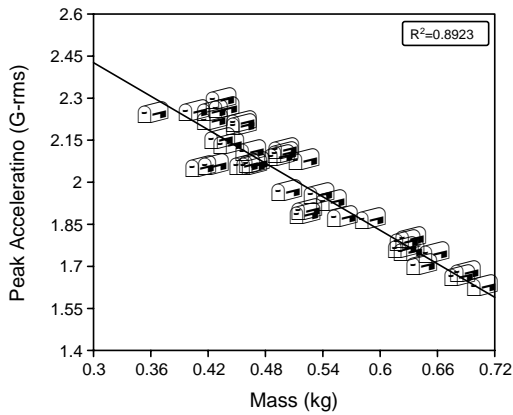
(4)의 (a)와 (b)에 나타내었다. 그림들에서 보는 바와 같이, 실험 주파수 3~150 Hz 범위내에서 배의 질량과 체적에 따라 공진 진동수와 정점가속도 모두 감소하였으나, 공진 진동수 보다 정점가속도의 감소 경향이 더 뚜렷하였다. 이와 같이 질량에 따라 이 두 진동특성이 모두 감소하는 현상은

Finney(1970)가 과일의 공진주파수는 질량과 상관관계가 높다는 연구 결과와도 매우 유사하였다.

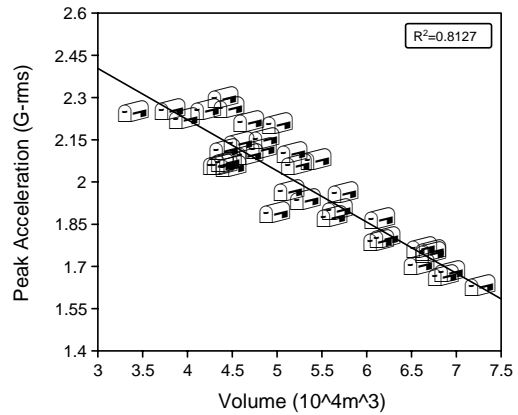
배의 기계적 특성중 생물체 항복 변형량 및 극한 변형량과 배의 공진 주파수와의 관계를 그림 (5)의 (a)와 (b)에, 그리고 정점가속도와의 관계를 그림 (6)의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. 이들

상호간에 상관 관계는 비록 낮았지만 대체로 배의 공진주파수와 정점가속도 모두 배의 생물체 항복 변형량과 극한 변형량에 따라 증가하는 경향이었으며, 이들 외의 기계적 특성과는 상관 관계가 매우 낮았다.

이와 같이 상관 관계가 낮은 이유는 실험 주파수대를 150 Hz로 제한 한데 오는 이유도 있을 것으로 판단되어, 만일 주파수대를 훨씬더 높인다면 이들 사이에 상관 관계가 높아, 이럴 경우는 배에 대한 진동 특성으로부터 배의 기계적 특성도 추정해 볼 수 있을 것으로 판단되었다.

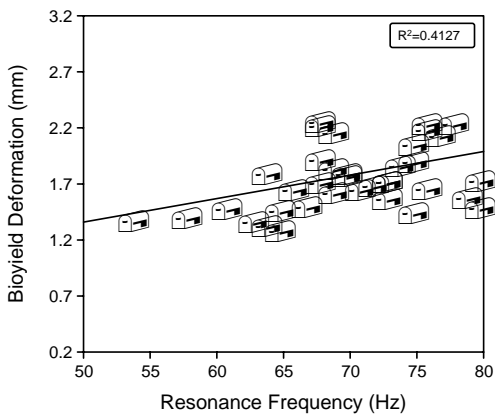


(a) Peak acceleration versus mass

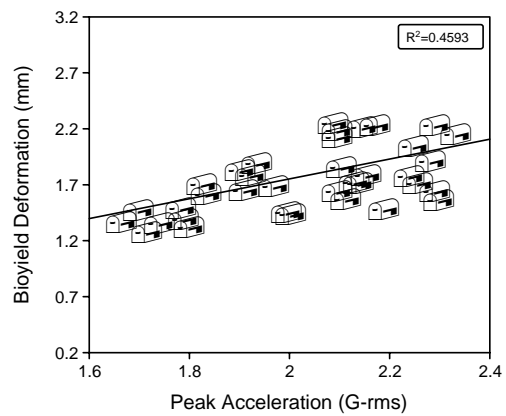


(b) Peak acceleration versus volume

Fig. 4. Peak acceleration (G-rms) versus mass and volume of the pear.

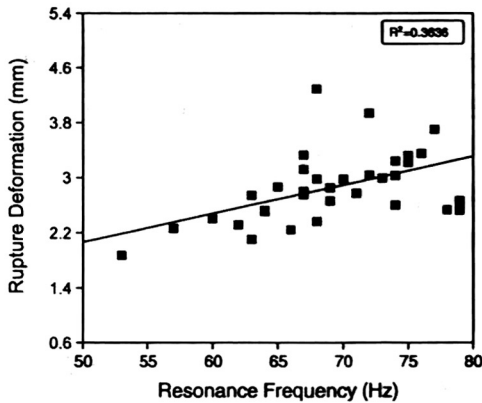


(a) BD versus resonance frequency

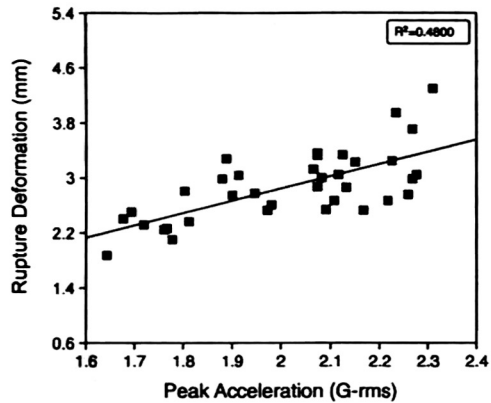


(b) BD versus peak acceleration

Fig. 5. Bioyield deformation versus resonance frequency and peak acceleration of pears.



(a) RD versus resonance frequency



(b) RD versus peak acceleration

Fig. 6. Rupture deformation versus resonance frequency and peak acceleration of pears.

본 실험을 통해 구명된 배의 공진 주파수 범위는 64.5~72.2Hz, 정점가속도의 범위는 1.78~2.21 G-rms이었다. 따라서 운전중의 트럭과 화차 본체에서 감지되는 진동수가 각각 50~100Hz, 50~70 Hz 임(한국포장기술편람, 2003)을 고려할 때 배의 공진 진동수는 이 진동수 내에 있기 때문에 때에 따라서는 높은 공진 현상이 발생할 우려도 있다.

### 적 요

본 연구에서는 청과물 포장설계시 중요한 자료가 되는 청과물의 공진 주파수 및 정점가속도 등의 진동특성을 분석하기 위하여 실험적 방법을 적용하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 청과물의 진동특성을 분석할 수 있는 실험장치를 구성하였으며, 장치의 제어와 계측을 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

2. 공시된 배의 공진 주파수는 약 64.5~72.2Hz 범위이었으며, 정점가속도는 약 1.78~2.21G-rms

범위이었다.

3. 공시된 배의 공진 주파수 및 정점 가속도는 배의 질량과 체적이 증가함에 따라 감소하는 것으로 판단되었다.

4. 배의 공진 주파수 및 정점 가속도와 기계적 특성들간에는 생물체항복변형량(BD) 및 극한변형량(RD)을 제외하고는 상관관계가 매우 낮은 것으로 분석되었다.

5. 본 실험의 목적은 과실의 공진 주파수를 구명하는 것으로 이 결과는 배의 운송 시 차량의 입력 주파수와 배의 공진 주파수가 일치되어 공진으로 급격하게 가속도가 증가되는 것을 방지함으로써 충격에 의한 손상을 줄이는데 활용될 수 있을 것이다.

### 인용문헌

1. 정현모. 1999. 청과물의 기계적 특성. 충남대학교 석사학위 논문.
2. 정현모. 2003. 청과물 포장화물의 진동거동과 골판



- 지 상자의 내구성. 충남대학교 박사학위 논문.
3. 한국포장기술편람. 2003. 한국포장학회.
  4. Abbott A. J., G. S. Bachman, R. F. Childers, J. V. Fitzgerald and F. J. Matusik. 1968. Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables. *Food Technology* 22:635~646.
  5. Abbott, J. A. and L. A. Liljedahl. 1994. Relationship of sonic resonant frequency to compression tests and Magness-Taylor firmness of apples during refrigerated storage. *Transactions of the ASAE* 37(4):1211~1215.
  6. ASTM D3580. Standard Test methods for vibration (vertical linear motion) test of products.
  7. ASAE S368.3 DEC99. Compression test of food materials of convex shape.
  8. Cooke, J. R. 1972. An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. *Transactions of the ASAE* 15(6):1075~1080.
  9. Finney Jr., E. E. 1970. Mechanical resonance within Red Delicious apples and its relation to fruit texture. *Transactions of the ASAE* 23(1):177~180.
  10. O'Brien, M., J. P. Gentry, and R. C. Gibson. 1965. Vibrating characteristics of fruits as related to in-transit injury. *Transactions of the ASAE* 8(2): 241-243.
  11. Peleg, K. and S. Hinga. 1986. Simulation of vibration damage in produce transportation. *Transactions of the ASAE* 29(2):633-641.
  12. Yamamoto, H., M. Twamoto and S. Haginuma. 1980. Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluation of apples and watermelons. *Journal of Texture Study* 11(2):117~136.
  13. Yong, Y. C. and W. K. Bilanski. 1979. Modes of vibration of spheroids at the first and second resonant frequencies. *Transactions of the ASAE* 22(6):1463~1466.