

임의진동에 의한 과실의 진동특성

Vibration characteristics of the fruits by the random vibration

김 만 수* 김 기 복** 정 현 모*** 김 기 석* 박 정 길* 이 상 대* 박 성 운*
정희원 정희원 정희원 정희원 정희원 정희원 정희원
M. S. Kim K. B. Kim H. M. Jung G. S. Kim J. G. Park S. D. Lee S. W. Park

1. 서론

수확된 과실이 최상의 품질을 유지하여 소비자의 욕구와 품질기준을 만족시키기 위해서는 저장, 선별 및 유통과정 중에 손상이 발생되지 않도록 주의하여 다루어져야 하는데 과실은 수확 후 소비자에 도달하기전의 과정 중에 다양한 주파수의 진동에 노출될 수 있으며 만일 과실에 가해지는 가진주파수 대역이 과실 자체의 공진주파수대역과 일치되는 구간이 빈번히 발생한다면 과실의 손상을 피할 수 없게 된다.

일반적으로 수확된 과실이나 청과물이 생산지에서 소비자사이의 유통과정에서 발생하는 기계적인 손상으로 인한 손실률이 약 30~40%에 이르는 것으로 알려져 있으며 만약 이러한 손상이 유통과정중에 발생된다면 경제적 손실은 매우 클 것으로 생각된다. 따라서 전 세계적으로 볼 때 농산물과 과실류의 수확 후 유통과정에 발생하는 기계적인 영향으로 인한 손상을 줄이는 것은 큰 관심사로 부각되고 있으며 또한 유통과정에서 기계화가 도입되고 유통경로의 중요성이 부각됨으로써 과실의 기계적인 손상문제는 더욱 중요한 부분으로 인식되고 있다.

외국에서는 유통 중인 과실에 대한 기계적인 손상을 정량화 시킬 수 있는 수학적 모델이 개발되었으며 이 모델은 과실의 생물학적, 기계적 요인과 포장상자의 기하학적인 특성 및 유통과정 중에 발생될 수 있는 기계적인 진동, 충격을 고려한 것이다. 수송환경에 대해서는 국내외적으로 많은 연구가 수행되었으나 이것들은 주로 국방산업 및 자동차, 항공산업과 같은 공산품을 대상으로 하는 것이며 과실류, 농산물의 수송 중 손상을 목적으로 연구된 바는 아직 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실제 유통경로에서 운행 중인 수송차량에서 발생될 수 있는 진동신호는 임의진동일 것으로 가정하여 과실류의 진동응답특성을 분석하였다. 사과와 배에 대한 임의진동 실험(random vibration signal test)을 수행하였으며, 매 시료마다 과실의 기본물성을 측정하여 진동특성과의 상관관계를 분석하였다.

* 충남대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 생물산업기계 전공
** 한국표준과학연구원 환경안전계측센터
*** 경북과학대학 포장학과

2. 재료 및 방법

본 실험에 사용된 과실은 배(신고)와 사과(후지)를 선택하였으며, 2005년 10월에 일반농가에서 수확된 후 시험에 사용되기 전까지 약 2개월 정도 저온저장($0\pm 1^{\circ}\text{C}$, $85\pm 5\%$ rh) 되었다. 시료들의 기본적인 물성들은 표 1과 같으며, 시험에 사용되기 전 실험실의 환경조건(15°C , 75% rh)에서 약 4시간 동안 적응을 시킨 후 시험에 사용하였다.

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

	Date of harvest	Volume (10^{-4} m^3)	Mass (kg)	True density (kg/m^3)
Pear (Niitaka)	2005. 10	6.722	0.66	978.26
Apple(Fuji)	2005. 10	3.619	0.30	830.75

과실의 진동특성을 측정하기 위해 구성된 실험장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 전자식 가진기, 입력된 스위프율(sweep rate)로 일정 범위의 주파수를 제어하기 위한 컨트롤러, 제어신호를 증폭시켜주는 증폭기, 진동 신호를 계측하기 위한 가속도 센서와 8채널 A/D보드가 내장된 컴퓨터로 구성되었으며 본 연구에 사용된 진동실험기는 피드백을 통해 일정한 가속도 수준을 유지해주는 시스템으로 각 가속도 수준별 입력전압을 조절하여 진동변위를 자동 제어하는 시스템이다.

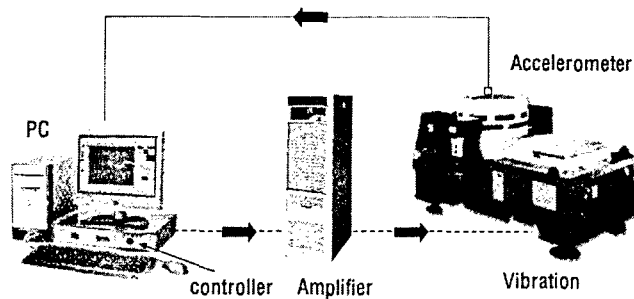


Fig. 1. Schematic diagram of the vibration test apparatus for fruits.

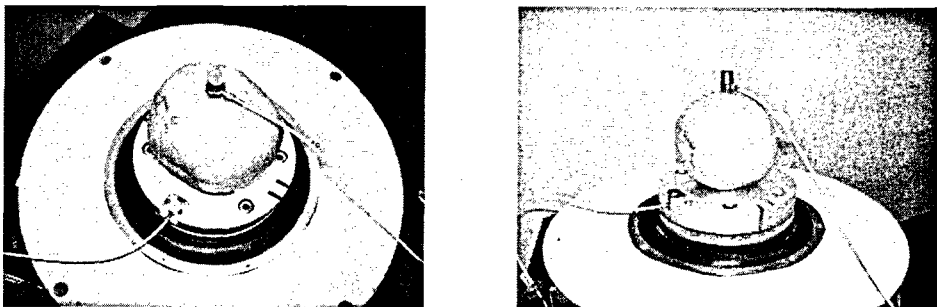


Fig. 2. General view of the vibration test using the electro-magnetic vibration exciter.

또한 진동시험에 사용되는 가속도 센서는 아주 경량이고, 유연한 케이블을 가지고 있는 1축의 압전형 가속도 센서(1000 G)를 사용하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 하나의 가속도 센서는 피드백을 위해서 시료고정장치에 부착하였으며, 또 다른 가속도 센서는 과실의 진동특성을 계측하기 위하여 과실의 위쪽 중앙에 부착하여 진동에 따른 가속도를 계측하였다. 시료고정장치는 시료를 가진기의 테이블 위에 견고히 고정시키기 위해 충분한 강도와 강성이 있어야 하고, 테이블과 시료고정장치 사이의 상대운동이 없어야 하며, 가능한 한 그 무게가 가벼워야한다. 따라서 본 실험에서는 그림 3에서 보는 바와 같이 알루미늄으로 무게가 800g이 되도록 제작하였다. 여기서, 가진기의 가진력이 100 kgf이므로, 가진기의 아마츄어, 시료고정장치, 과실 및 가속도 센서의 총 무게가 이 범위를 벗어나지 않도록 하였다.

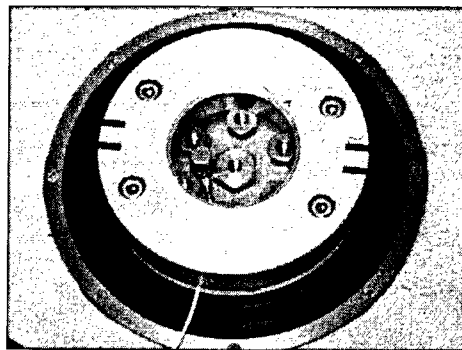


Fig. 3. Specimen-mounting device for vibration test of fruits.

ASTM D3580에 따르면 상하수직 진동실험을 통해 포장되어있지 않은 제품과 이 제품의 부품에 대한 공진주파수와 이때의 정점가속도를 결정하기 위해서 두 가지 실험방법을 이용할 수 있으며 이중 한 가지는 sinusoidal vibration을 이용하는 것이며 다른 한 가지는 random vibration 신호를 이용하는 것으로서 sinusoidal vibration진동실험의 경우 주파수 범위는 3~100Hz, 가속도 수준은 0.25~0.5g, 스윙율은 0.5~1octave/min로 대수적인 정현파 스윙 진동실험을 수행하여 공진 주파수를 분석하며 random vibration진동신호를 이용하는 경우 ASTM D 4728에서 명시하는 표 2와 같은 PSD test profiles을 적용하여 수송환경에 대한 스펙트럼을 적용한다. 그림 4는 표 2의 데이터를 이용하여 PSD profile을 도식화한 것이다. Random vibration진동신호를 적용할 경우 실험의 초기값은 full level보다 최소 6dB 낮은 값으로 시작하여 한 단계씩 증가될 수 있도록 설정하며 full test level에 도달하면 3분정도 진동실험을 수행한다. 또한 최소 실험주파수범위는 3~100Hz, 스펙트럼의 진폭값은 최소 0.25g rms이 되도록 하고 실험주파수구간에 대해 PSD값의 변화폭은 30dB이하를 유지하도록 한다. 그림 2에서와 같이 가속도 센서는 과실의 위쪽 가운데에 부착한다.

Table 2. PSD profile of the expected transportation environment.

- Truck(ASTM D 4728)

Frequency(Hz)	Level(g^2/Hz)
1	0.00005
4	0.01
16	0.01
40	0.001
80	0.001
200	0.00001
Overall Level (g rms)	0.52g rms

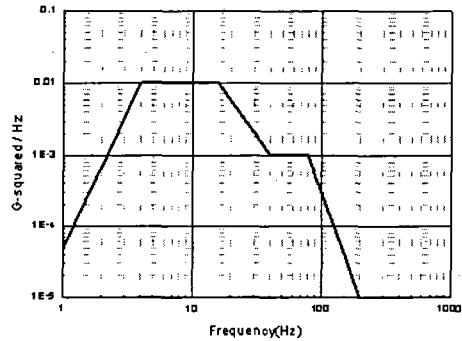
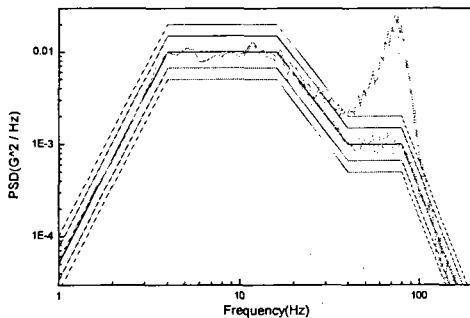


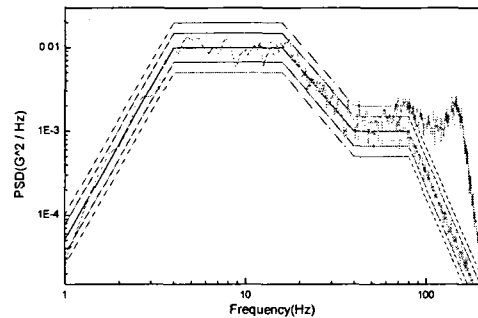
Fig. 4. Commercial Transport Vibration Test Profile(Truck).

3. 결과 및 고찰

3.1 임의 진동신호에 대한 과실의 공진주파수와 PSD



(a) pear



(b) apple

Fig. 5. PSD value of the fruits for random vibration signal excitation.

그림 5의 (a)와 (b)는 각각 가속도 센서를 부착한 배, 사과 시료를 진동테이블에 설치하여 같은 조건으로 구동하였을 때 과실시료에 부착된 가속도 센서로부터 감지되는 가속도 변화를 PSD값으로 나타낸 것으로, 공진점이 뚜렷이 나타나는 것으로 보아, 구성된 진동실험장치로부터 과실의 진동 특성을 구명하는 것이 가능한 것으로 판단되었다. 각각의 과실시료에 대해 측정된 PSD값과 공진주파수는 표 3과 같다. 배의 공진주파수와 PSD값은 각각 73~121.75Hz, 0.001175~0.056692 g^2/Hz 에 분포하고 사과의 공진주파수와 이때의 PSD값은 120~198.5Hz, 0.000438~0.00789 g^2/Hz 에 분포됨을 알 수 있다. 대체로 배의 공진주파수는 약 90Hz, 사과의 공진주파수는 약 160Hz로 사과의 공진주파수가 배의 값보다 약 1.8배 높은 것으로 나타났다.

Table 3. Resonance frequency and PSD value of the fruits.

No.	Pear		Apple	
	Resonance Freq.(Hz)	PSD Level (g^2/Hz)	Resonance Freq.(Hz)	PSD Level (g^2/Hz)
1	80.5	0.0291	153.5	0.002037
2	74.5	0.0567	177.5	0.000837
3	89.75	0.0254	120.0	0.003828
4	88.75	0.0154	146.5	0.001220
5	104.25	0.0126	137.5	0.001827
6	100.25	0.0194	149.5	0.001595
7	101.75	0.0012	180.5	0.002431
8	79.25	0.0416	190.5	0.000694
9	90.5	0.0225	180.0	0.007893
10	121.75	0.0069	198.5	0.000455

No.	Pear		Apple	
	Resonance Freq.(Hz)	PSD Level (g^2/Hz)	Resonance Freq.(Hz)	PSD Level (g^2/Hz)
11	92.5	0.0241	147.5	0.002927
12	102.0	0.0128	141.25	0.001160
13	77.5	0.0288	168.5	0.001541
14	108.5	0.0112	173.5	0.000438
15	80.5	0.0280	135.25	0.002623
16	80.5	0.0277	167.25	0.001031
17	76.0	0.0261	160.75	0.001472
18	102.5	0.0107	124.5	0.004200
19	83.5	0.0173	132.5	0.003256
20	73.0	0.0258	123.0	0.001972
Avg	90.3875	0.022165	155.4	0.00217185

3.2 과실의 기본물성과 진동특성들간의 관계

배의 기본물성과 진동특성간의 상호 관계를 분석하기 위하여 이들에 대한 상관관계를 분석하여 표 4에 나타내었다. 표 4에서 같이, 배의 공진주파수와 PSD값은 대체로 기본물성 모두와 비교적 높은 상관관계를 나타내었으며 그 중에서 배의 공진주파수는 직경과 상관관계가 높고 PSD값은 평균직경, 높이와 높은 상관관계를 나타내었다. 또한 배의 진동특성인 PSD값과 공진주파수는 가장 높은 상관관계를 나타냈다. 표 5는 사과와 기본물성과 진동특성간의 상관관계를 분석한 것으로서 사과의 공진주파수 역시 기본물성 모두와 비교적 높은 상관관계를 나타내었으며 그 중에서 사과의 질량, 체적, 평균직경과 높이와의 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 사과의 경우도 진동특성인 PSD값과 공진주파수는 높은 상관관계를 보인다.

Table 4. Correlation coefficients of the selected parameters for vibration test of the pear.

	MA	VO	AD	HE	RF	PP
MA	1.0000					
VO	0.9640	1.0000				
AD	0.4104	0.4483	1.0000			
HE	0.5001	0.5399	0.0246	1.0000		
RF	0.8129	0.6386	0.8215	0.7583	1.0000	
PP	0.7757	0.8063	0.8663	0.8692	0.9439	1.0000

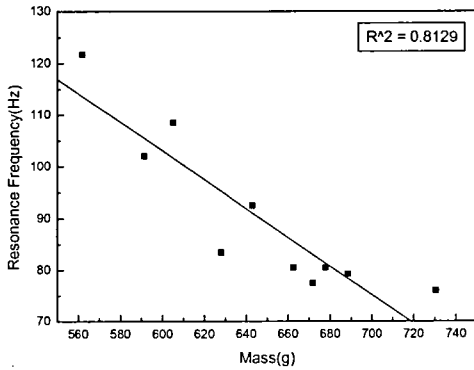
Table 5. Correlation coefficients of the selected parameters for vibration test of the apple.

	MA	VO	AD	HE	RF	PA
MA	1.0000					
VO	0.9912	1.0000				
AD	0.9390	0.9366	1.0000			
HE	0.8225	0.8544	0.8259	1.0000		
RF	0.9067	0.9245	0.8869	0.8695	1.0000	
PA	0.7962	0.6255	0.6777	0.6790	0.8815	1.0000

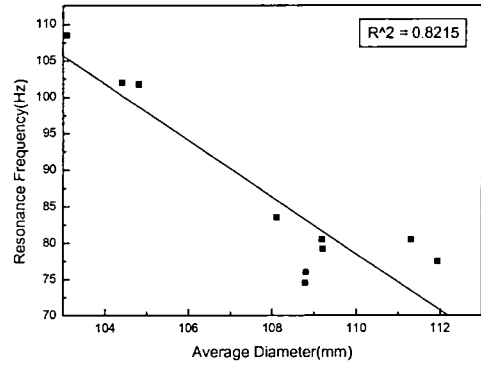
*Note : MA = Mass of the pear, VO = Volume of the pear, AD = Average diameter, HE = Height of the pear, RF = Resonance frequency, PP = PSD of the pear

*Note : MA = Mass of the apple, VO = Volume of the apple, AD = Average diameter, HE = Height of the apple, RF = Resonance frequency, PA = PSD of the apple

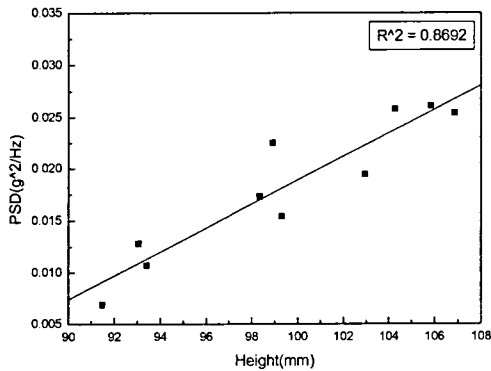
배를 대상으로 질량, 평균직경과 높이에 대한 공진주파수와 PSD의 변화를 각각 그림 6에 사과
 의 질량, 체적 및 평균직경에 따른 공진주파수와 PSD 변화를 그림 7에 나타내었다. 그림 6과
 7에서 보는 바와 같이, 임의진동신호에 대한 과실의 질량, 체적, 높이와 평균직경이 증가함에
 따라 공진주파수는 감소하였으나 PSD값은 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이와 같이 질량과
 체적이 증가함에 따라 과실의 공진주파수가 감소하는 현상은 Finney(1970)가 과실의 공진주파
 수는 질량과 상관관계가 높다는 연구 결과와도 매우 유사하였다.



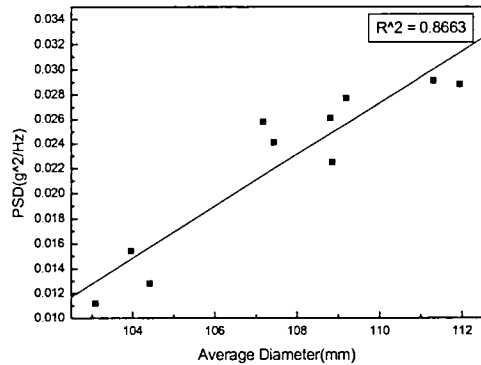
(a) Resonance frequency versus mass



(b) Resonance frequency verse average diameter

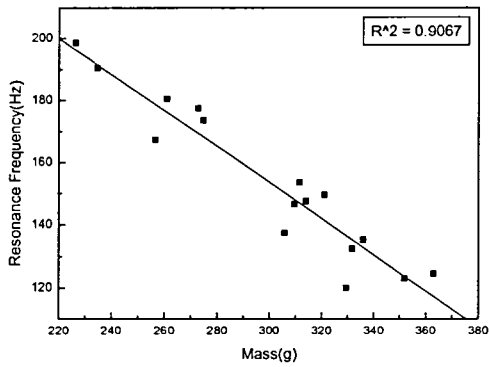


(c) PSD versus height

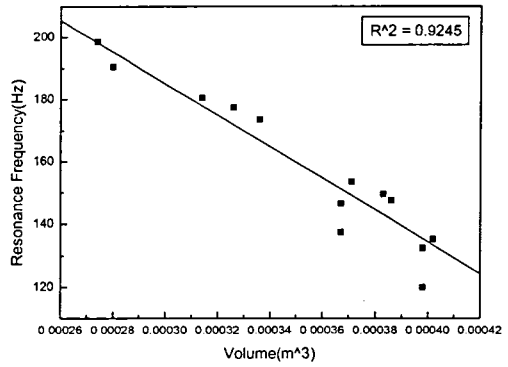


(d) PSD verse average diameter

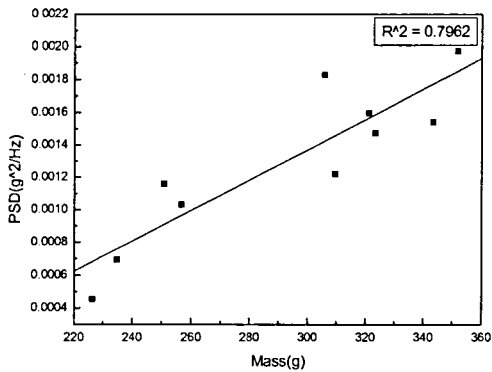
Fig. 6. Resonance frequency and PSD versus properties of the pear.



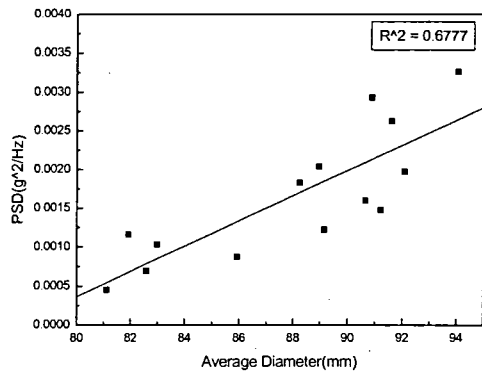
(a) Resonance frequency versus mass



(b) Resonance frequency verse volume



(c) PSD versus mass



(d) PSD verse average diameter

Fig. 7. Resonance frequency and PSD versus properties of the apple.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 유통 중인 과실에 대한 손상분석 및 과실류의 포장설계시 중요한 자료가 되는 과실의 공진주파수와 PSD값 등의 진동특성을 분석하기 위하여 배와 사과를 공시하여 임의진동 실험을 수행하였던 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 공시된 배의 공진 주파수는 73~121.75 Hz범위이었으며, PSD값은 $0.001175 \sim 0.056692 g^2/Hz$ 범위이었고 사과의 공진주파수는 120~198.5 Hz이었으며 PSD값은 $0.000438 \sim 0.00789 g^2/Hz$ 에 범위이었다.

2. 공시된 배와 사과와 공진주파수는 질량, 체적, 높이와 평균직경이 증가함에 따라 감소하였으며 PSD값은 질량, 체적, 높이와 평균직경이 증가함에 따라 증가하는 것으로 분석하였다.
3. 공시된 배와 사과와 진동응답특성인 공진주파수와 PSD값사이의 상관관계는 높은 것으로 분석되었다.

5. 참고문헌

1. 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.
2. Abbott, J. A. and L. A. Liljedahl. 1994. Relationship of sonic resonant frequency to compression tests and Magness-Talyor firmness of apples during refrigerated storage. *Transaction of the ASAE* 37(4):1211 ~ 1215.
3. ASTM D3580. Standard Test methods for vibration (vertical linear motion) test of products.
4. ASTM D4728. Standard Test methods for Random vibration testing of Shipping Containers.
5. ASAE S368.3 DEC99. Compression test of food materials of convex shape.
6. Cooke, J. R. 1972. An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. *Transaction of the ASAE* 15(6):1075 ~ 1080.
7. Finney Jr., E. E. 1970. Mechanical resonance within Red Delicious apples and its relation to fruit texture. *Transaction of the ASAE* 23(1):177 ~ 180.
8. 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.
9. Peleg, K. and S. Hinga. 1986. Simulation of vibration damage in produce transportation. *Transactions of the ASAE* 29(2):633-641.
10. 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.
11. Yong, Y. C. and W. K. Bilanski. 1979. Modes of vibration of spheroids at the first and second resonant frequencies. *Transaction of the ASAE* 22(6):1463 ~ 1466.
12. 정현모. 1999. 청과물의 기계적 특성. 충남대학교 석사학위 논문.
13. 한국포장기술편람. 2003. 한국포장학회.