한국농업기계학회 2006 하계 학술대회 논문집 11(2):161-168

모의 수송환경에서의 배 공진주파수 모델링

Modeling for Resonance Frequency of the Pears at Simulated Transportation Environment

정현모* 김만수** 박종민*** 김기복**** 김기석** 박정길** 김동진** 김대용* 박은주*
H. M. Jung M. S. Kim J. M. Park K. B. Kim G. S. Kim J. K. Park D. J. Kim D. Y. Kim E. J. Park

1. 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 유통 과정중 본래의 특성이 지속적으로 변하는 것으로 공산품에 비하여 물류 측면에서 취급하기 어려운 점이 많다.

우리나라의 농산물 중 배를 비롯해 몇몇 과채류는 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 해결되어야할 과제이다.

농산물은 유통시에 매우 다양한 주파수의 진동을 받을 수 있고 만약 이 주파수가 그 농산물의 공진 주파수 범위에 있다면 농산물과 완충재의 상호관계를 이용하여 공진점을 피하도록 해야 할 것이다. 농산물 자체의 공진 주파수를 파악하는 것은 농산물의 포장설계와 유통과정 중에 발생될 수 있는 진동에 의한 과실의 손상 메카니즘을 이해하는데 매우 중요하다.

과채류의 공진 주파수의 해석는 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.

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 진동이었고, 두 번째로 낮은 공진 주파수는 비틀림 형식의 진동이었다고 하였다. 또한, Yong과 Bilanski(1979)은 Finney의 방법을 이용하여 사과의 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.

Yamamoto 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 모

* 경북과학대학 패키징매니지먼트과
** 충남대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부
*** 부산대학교 생명자원과학대학 바이오시스템공학부
**** 한국표준과학연구원 삶의질표준부 안전그룹

델식을 개발하였다.

따라서 본 연구에서는 배의 포장 설계 시 중요한 자료가 되는 유통중의 공진 주파수 진동특성을 분석하고 적정 완충포장을 위한 기초 데이터를 구축하기 위하여 실험적 방법으로 배를 공시하여 유통환경에서의 정현파 스윕 진동실험을 하여 배에 대한 공진주파수 모델링을 구하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

본 실험에 사용된 배는 표 1과 같이 경북 성주 지방의 과수원에서 재배된 신고 품종의 국내산 배이었으며, 2005년 10월에 일반농가에서 수확된 후 시험에 사용되기 전까지 저온저장(3±1℃, 85±5% rh) 되었다. 시험에 사용되기 전 실험실의 환경조건(25 ℃, 60% rh)에서 약 6시간 동안 적응을 시킨 후 실험에 사용하였다.

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

	Date of harvest	Volume (10^{-4} m^3)	Mass (kg)	True density (10^{-2} kg/m^3)	Sphericity (%)
Pear (Nittaka)	2005. 10	6.5301 (1.0132)	0.7145 (0.0514)	10.9416 (0.6417)	95.89 (1.71)

나. 실험장치

본 연구에서 배의 진동특성을 분석하기 위해 구성된 실험 장치는 그림 1 및 2에서 보는 바와 같이 미국의 ETS-solutions(ETS-100)사의 전자식 가진기(electro-magnetic exciter), 입력된 스윕율(sweep rate)로 일정 범위의 주파수를 제어하기 위한 콘트롤러, 배의 진동 신호를 계측하기 위한 가속도 센서와 8채널 고속 A/D보드가 내장된 컴퓨터로 구성되었다. 본 연구에 사용된 진동기는 피드백(feedback)을 통해 일정한 가속도 수준을 유지해주는 시스템으로 각 가속도 수준별 입력전압을 조절하여 진동 변위를 자동 제어하도록 프로그램 하였다.

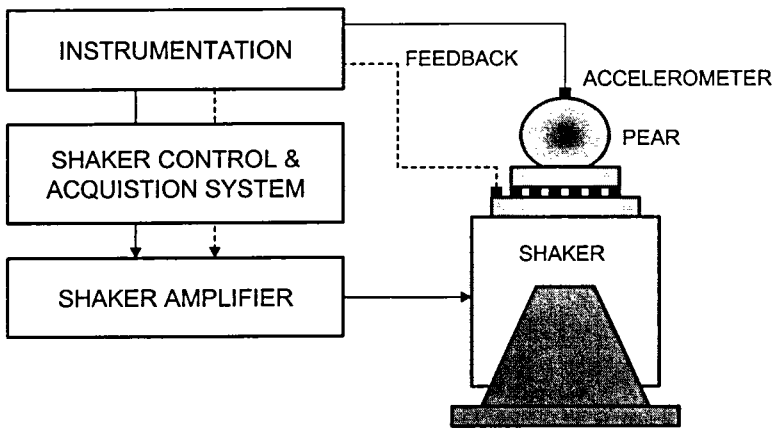


Fig. 1 Schematic diagram of the sweep vibration test apparatus for the pears.

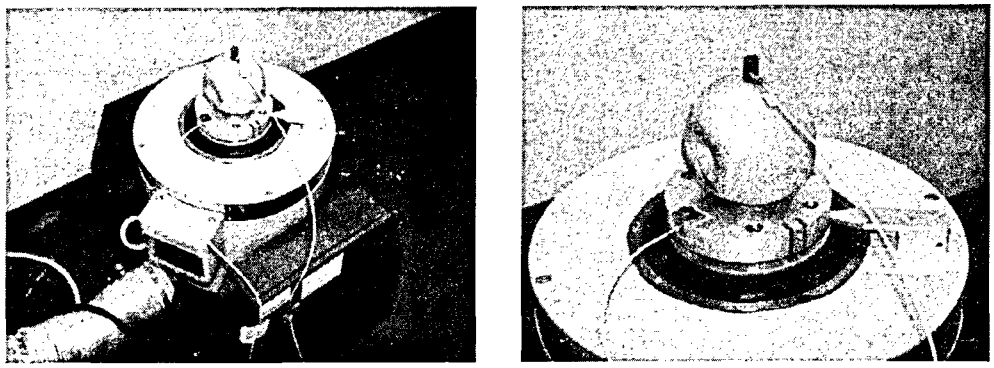


Fig. 2 General view of the sweep vibration test using the electro-magnetic vibration exciter.

또한 진동시험에 사용되는 가속도 센서는 아주 경량이고, 유연한 케이블을 가지고 있는 1축의 압전형 가속도 센서(1000 G)를 사용하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 하나의 가속도 센서는 피드백을 위해서 시료 고정장치(jig)에 부착하였으며, 배의 진동특성을 계측하기 위하여 위쪽 중앙 부위에 가속도 센서를 부착하여 진동에 따른 가속도를 계측하였다. 또한 배의 상대적인 변위를 억제하기 위해 양면 테이프를 적용하여 고정하였다(Jung, 2000).

시료 고정장치는 시료를 가진기의 테이블 위에 견고히 고정시키기 위해 충분한 강도와 강성이 있어야 하고, 테이블과 시료 고정장치 사이의 상대운동이 없어야 하고 가능한 한 그 무게가 가벼워야한다. 따라서 본 실험에서는 시료 고정장치를 알루미늄으로 무게가 2000 g이 되도록 제작하여 적용하였다. 여기서, 가진기의 가진력이 100 kg_f이므로, 가진기의 아마츄어, 시료고정장치, 배 및 가속도 센서의 총 무게와 입력 가속도가 이 범위를 벗어나지 않도록 하였다.

다. 실험방법

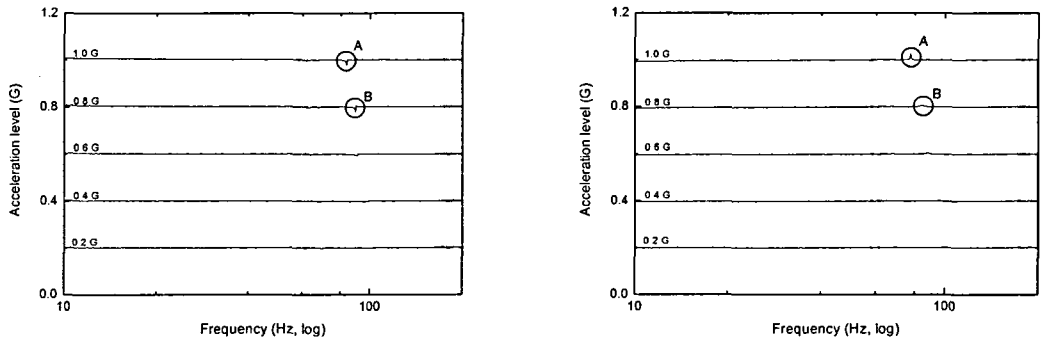
공시된 배에 대한 진동실험시 주파수 범위는 10~200 Hz, 가속도 수준은 유통경로에 따라 트럭 등의 운송수단에서 발생되는 범위를 고려하여 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 및 1.0 G(Peleg and Hinga, 1986; O'Brien et al., 1965)별 수준을 적용하였으며, 스윕율(sweep rate)은 1 octave/min로 대수적인 정현파 스윕 진동실험을 수행하여 공진 주파수를 분석하였다(ASTM D3580). 또한 정현파 스윕은 낮은 주파수에서 높은 주파수로 1회(up-sweep), 높은 주파수에서 낮은 주파수로 1회(down-sweep) 실험을 하여 주파수의 영향에 대해서도 분석하였다. 또한 진동실험은 배의 극점(4개)에서 계측하여 평균값을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 배의 진동 특성

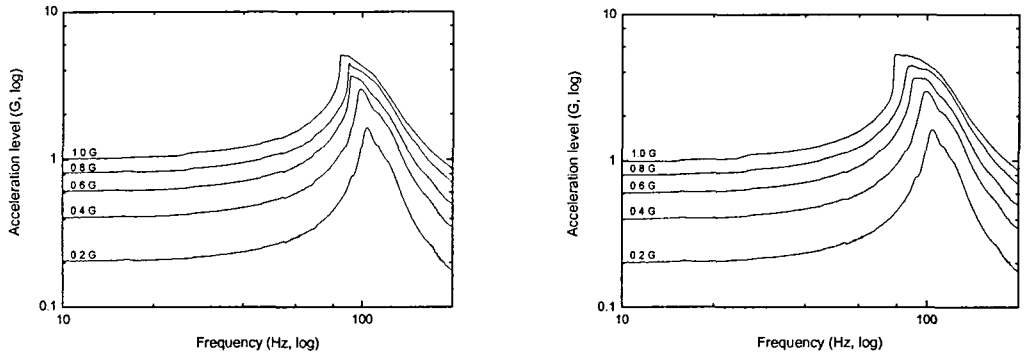
배의 적정 포장설계를 위한 첫 번째 단계로써 유통중 발생되는 진동에 의한 배의 특성을 분석하기 위하여 진동 시스템을 구축하고 정현파 스윕 실험을 통해 배의 진동 특성을 계측 및 분석하였다. 그림 3은 배에 진동을 주기 위해서 각 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 및 1.0 G별 입력가속도에 대한 진동 가진기에 부착된 센서로부터 계측된 가속도이며, 배의 진동 실험시 같이 계측된 가진기의 가속도이다. 그림에서 알 수 있듯이 10~200 Hz 실험 주파수내에서 일정하게 유지됨을 알 수가 있었다. 또한 그림 3의 (a)와

(b)의 A, B에서 보는 바와 같이 0.8 및 1.0 G의 높은 가속도 수준에서는 배가 받는 진동 가속도가 크기 때문에 배의 공진이 발생하는 주파수 대역에서 가진기에 약간의 충격파형이 발생하였다. 이것은 배가 공진 주파수내 진동을 받게 되면 가진기와의 충돌에 의해 생기는 것으로 판단되며, 이것이 유통 중 발생하는 배의 손상 원인이 된다. 그림 4는 배의 가속도별 진동반응을 나타내고 있으며, 그림 4의 (a)는 낮은 주파수에서 높은 주파수로의 스윕(up-sweep)에 의한 배의 가속도이며, (b)는 높은 주파수에서 낮은 주파수로의 스윕(down-sweep)에 의한 배의 가속도이다. 본 실험 주파수 및 가속도 내에서는 한 개의 공진점이 발생하였다. 그림 4의 (a)의 경우에는 농산물의 적재차량이 출발하여 운행속도를 증가함에 따라 발생될 수 있는 경우를 나타내며, (b)의 경우에는 고속으로 운행중이던 적재차량이 운행속도를 줄이면서 발생될 수 있는 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 배는 질량이 작아 양쪽의 경우에 거의 유사한 경향을 보였다. 하지만 수박처럼 질량이 큰 청과물은 두 경우에 있어 큰 차이를 보이게 된다(Jung, 2005).



(a) Up sweep (b) Down sweep

Fig. 3 Acceleration control level of vibration exciter according to input acceleration.



(a) Up sweep (b) Down sweep

Fig. 4 Acceleration level of the pears according to input acceleration.

표 2는 진동 가진기의 입력 가속도에 따른 배의 공진 주파수를 나타내고 있다. 모의 수송환경에서 배의 공진 주파수는 진동의 입력 가속도가 클수록 감소하는 경향을 보였다. 즉 농산물이 수확 후 유통되는 경로에 따라 공진이 발생되는 주파수도 변한다는 것을 의미한다. 이것은 농산물의 완충포장시 수확 후 유통환경에 대한 조사가 이루어져야만 적정 포장설계가 가능한 것으로 판단된다.

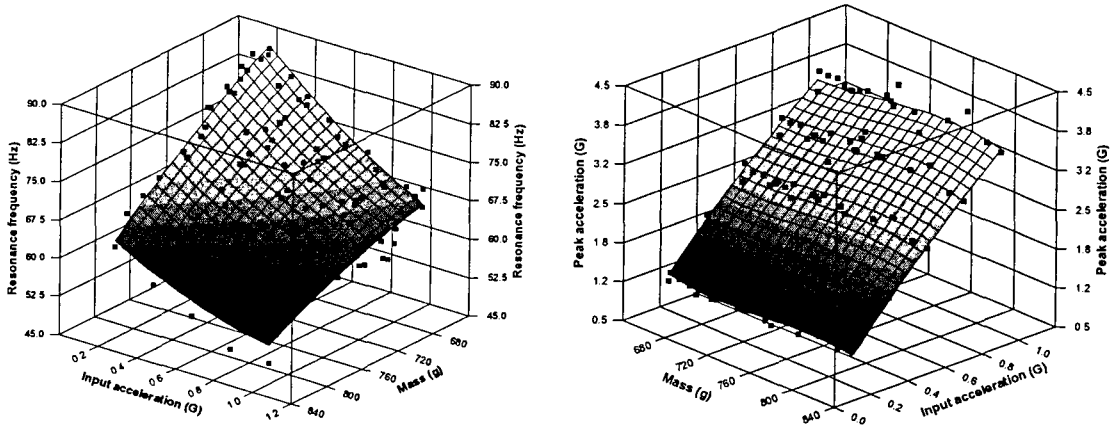
Table 2 Resonance frequency of the pears according to input acceleration

	Resonance Frequency (Hz)				
	0.2 G	0.4 G	0.6 G	0.8 G	1.0 G
Maximum	87.16	84.92	78.87	74.75	70.27
Minimum	62.78	57.64	53.67	49.51	49.04
Average	79.05	73.68	68.67	63.64	59.45
Standard Deviation	6.90	6.98	5.95	5.74	5.38

표 3는 입력 가속도에 따른 배의 공진 주파수 대역에서의 최대 가속도를 나타내고 있다. 배의 최대 가속도는 입력 가속도에 비해 실험 가속도 수준내에서 3~5배의 가속도를 나타내었다. 이것은 배가 완충이 되어 있지 않은 상태이므로 가진기의 입력 가속도를 상쇄시키지 못하고 증폭시키는 역할을 하게 되며, 유통 중 진동에 의한 손상을 입게되는 요인이 된다.

Table 3 Peak acceleration in the resonance frequency of the pears according to input acceleration

	Peak Acceleration (G)				
	0.2 G	0.4 G	0.6 G	0.8 G	1.0 G
Maximum	1.16	1.94	2.68	3.34	4.02
Minimum	0.96	1.64	2.24	2.67	2.96
Average	1.05	1.80	2.46	3.06	3.60
Standard Deviation	0.05	0.08	0.10	0.15	0.23



(a) resonance frequency (b) peak acceleration

Fig. 5 Response surface of resonance frequency and peak acceleration for the pears by input acceleration and mass.

나. 배의 공진주파수 및 피크가속도 모델링

배의 적정 포장설계를 위한 공진 주파수와 최대 가속도에 대한 모델링 식을 구하기 위하여 데이터 회귀 분석용 프로그램인 Datafit(Ver. 7.1)를 이용하였으며, 도출된 모델링 식들중에 결정계수(R^2)가 제일 큰 모델링 식을 선택하였다. 또한 배의 물성 및 진동 특성간의 상관관계를 분석하였으며, Jung(2000)이 제시하였던 바와 같이 배의 질량과 공진 주파수, 배의 질량과 최대가속도와의 상관관계가 매우 높게 나타났다. 그림 5는 각각 배의 질량, 입력가속도에 따른 배의 공진 주파수 및 최대 가속도의 반응표면을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 배의 질량이 클수록 공진 주파수는 감소하는 경향을 보였으며, 유통중 진동 입력 가속도의 수준이 커질수록 배의 공진 주파수도 감소하는 경향을 보였다. 하지만 배의 공진 주파수 대역에서의 최대가속도는 반대의 경향을 보였다.

Table 4 Coefficients of multiple regression model for resonance frequency of the pears

Variables	$RF=a+b/M+c\times IA+d/M^2+e\times IA^2+f\times IA/M$				Coefficient of multiple determination (R^2)
	Coefficients	Standard error	t-ratio	Prob(t)	
a	-235.3122201	66.53437176	-3.536701616	0.0007	0.9019
b	383191.0732	95499.19468	4.012505807	0.00014	
c	30.40087972	22.15942246	1.371916609	0.17423	
d	-110081170.1	34370400.72	-3.202789836	0.00201	
e	5.1900625	7.801320386	0.6652800094	0.50794	
f	-43007.53232	14716.76025	-2.922350545	0.00461	

Table 5 Analysis of variance of multiple regression model for resonance frequency of the pears

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob(F)
Regression	5	4956.899877	991.3799754	127.2605937	0
Error	74	576.471601	7.79015677		
Total	79	5533.371478			

Table 6 Coefficients of multiple regression model for peak acceleration in RF band of the pears

Variables	$PA=a+b/M+c\times IA+d/M^2+e\times IA^2+f\times IA/M$				Coefficient of multiple determination (R^2)
	Coefficients	Standard error	t-ratio	Prob(t)	
a	-3.205887602	2.405191226	-1.332903417	0.18665	0.9835
b	4670.314642	3452.258119	1.352828925	0.18023	
c	5.642722701	0.801054358	7.044119596	0.0	
d	-1576736.734	1242476.393	-1.269027519	0.20841	
e	-0.95709375	0.2820146466	-3.393773201	0.00111	
f	-952.5405874	532.0050626	-1.790472788	0.07747	

Table 7 Analysis of variance of multiple regression model for peak acceleration in RF band of the pears

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob(F)
Regression	5	44.97635226	8.995270453	883.6106204	0
Error	74	0.7533295754	0.0101801294		
Total	79	45.72968184			

배의 질량(M), 입력 가속도(IA)를 포함한 2개의 독립변수를 가지는 배의 공진주파수(RF)에 대한 다중회귀 모델을 개발하였으며, 그 결과를 표 4에 표시하였다. 표에서 보는 바와 같이 결정계수는 0.9019이었으며, 표 5의 개발된 배 공진주파수 모델에 대한 분산분석 결과에서 보는 바와 같이 이 모델은 고도의 유의성이 인정되었다.

배의 질량(M), 입력 가속도(IA)를 포함한 2개의 독립변수를 가지는 배의 공진 주파수 대역에서 최대 가속도(PA)에 대한 다중회귀 모델을 개발하였으며, 그 결과를 표 6에 표시하였다. 표에서 보는 바와 같이 결정계수는 0.9835로 배의 공진 주파수 모델의 결정계수보다 높게 나타났다. 표 6의 개발된 배 공진 주파수 대역에서의 최대 가속도 모델에 대한 분산분석 결과에서 보는 바와 같이 이 모델은 고도의 유의성이 인정되었다. 이와 같이 개발된 배의 공진 주파수 및 최대 가속도 모델을 이용하여 유통환경에 따른 배의 적정 포장설계를 통해 손상을 최소화 할 수 있을 것이다.

4. 결론

농산물 물류 화물의 유통 중 발생될 수 있는 가속도 수준에 대하여 배의 진동 특성을 분석하기 위하여 진동 시스템을 구축하고 정현파 스윕 실험을 통해 배의 진동 특성을 계측 및 분석하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

1. 모의 수송환경에서 배의 공진 주파수는 진동의 입력 가속도가 클수록 감소하는 경향을 보였으며, 이것은 청과물이 유통되는 경로에 따라 배의 공진이 발생되는 주파수도 변한다는 것을 의미한다

2. 배의 질량(M), 입력 가속도(IA)를 포함한 2개의 독립변수를 가지는 배의 공진주파수(RF)에 대한 다중회귀 모델 $(RF=a+b/M+c\times IA+d/M^2+e\times IA^2+f\times IA/M)$을 개발하였다.

3. 배의 질량(M), 입력 가속도(IA)를 포함한 2개의 독립변수를 가지는 배의 공진 주파수 대역에서의 최대가속도(PA)에 대한 다중회귀 모델$(PA=a+b/M+c\times IA+d/M^2+e\times IA^2+f\times IA/M)$을 개발하였다.

4. 개발된 배의 공진 주파수 및 최대 가속도 모델을 이용하여 유통환경에 따른 배의 적정 포장시 완충설계에 적용할 수 있으며 이를 통해 손상을 최소화 할 수 있을 것이다.

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. ASTM D3580. Standard Test methods for vibration (vertical linear motion) test of products.
3. Cooke, J. R. 1972. An interpretation of the resonant behaivor of intact fruits and vegetables. Transaction of the ASAE 15(6):1075～1080.
4. 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.

5. Jung, H. M., M. S. Kim, K. B. Kim, G. S. Kim and J. G. Park. 2005. Vibration Characteristics of the Watermelon at Simulated Transportation Environment. Proceedings of the KSAM 2005 Summer Conference 10(2):158～164. (In Korean)
6. Kim, M. S., H. M. Jung, I. K. Park and J. M. Park. 2000. Vibration properties of pears. Proceedings of ICAME 2000 (3):533～542.
7. 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.
8. Peleg, K. and S. Hinga. 1986. Simulation of vibration damage in produce transportation. Transactions of the ASAE 29(2):633-641.
9. 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.