

택배용 포장시스템이 적용된 과실의 공진특성

정현모^{1,*} · 김수일²

¹경북과학대학교 디지털컨텐츠디자인과

²김수일포장개발연구소

Resonance Characteristics of Fruits in Packaging System for Parcel Delivery Service

Hyun Mo Jung^{1,*} and Su Il Kim²

¹Dept. of Digital Contents Design, Kyongbuk Science College, Chilgok, Gyeongbuk, 718-851, Korea

²Kim Su Il Packaging Development Institute, Choenan, Chungnam, 331-961, Korea

Abstract Fruit and vegetables are subjected to complex dynamic stresses in the transportation environment. During a long journey from the production area to customers using parcel delivery service, 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 of the fruits with frequency range 3 to 150 Hz. The resonance frequency of the pear ranged from 53 to 102 Hz and the amplitude at resonance was between 1.08 and 2.48 G. 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.

Keywords Pear, Vibration, Resonance frequency, Shock, Impact, Parcel delivery service

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 유통과정중 본래의 특성이

지속적으로 변하는 것으로 공산품에 비하여 물류 측면에서 취급하기 어려운 점이 많다. 우리나라의 농산물 중 사과와 배를 비롯해 몇몇 과실류는 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 처리기술 중 시급히 해결되어야할 과제이다. 과실은 유통시에 매우 다양한 주파수의 진동을 받을 수 있고 만약 이 주파수가 그 과실의 공진 주파수 범위에 있다면 과실과 완충재의 상호관계를 이용하여 공진점을 피하도록 해야할 것이다. 완충포장된 과실 자체의 공진 주파수를 파악하는 것은 과실의 적정 포장설계와 유통과정 중에 발생될 수 있는 진

*Corresponding Author : Hyun Mo Jung
Department of Visual Design, Kyongbuk Science College, Chilgok
718-851, Korea
Tel:+82-54-979-9558, Fax:+82-54-972-9558
E-mail : hmjung@kbsc.ac.kr

동에 의한 과실의 손상 메커니즘을 이해하는데 매우 중요하다.

과실의 공진 주파수의 해석은 Abbott 등¹⁾에 의해서 처음 발표가 되었다. 그들은 과실의 물리적인 접촉을 피하기 위해 픽업(pick-up) 로드를 이용하여 공진주파수를 측정하였으며, 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 80 g 또는 더 무거울 경우에 과실의 경도와 매우 밀접한 관련이 있다고 보고하였다. Finney⁶⁾는 사과를 수평방향으로 진동 가진기(actuator)에 올려놓고 정현파 신호를 진동 가진기에 입력하여 진동실험(Finney's method)을 하였으며, 그 결과 과실의 탄성계수는 Abbott의 강성계수(f_2^2m)와 매우 높은 상관관계가 있다고 보고하였다.

Cooke⁵⁾은 과실의 전단탄성계수(shear modulus)를 비파괴적으로 측정하기 위해 손상되지 않은 과실에 대한 공진 주파수를 연구하였으며, 그 결과 Abbott와 Finney의 방법에 의해 측정된 가장 낮은 공진 주파수는 회전타원체 형식의 진동이었고, 두 번째로 낮은 공진 주파수는 비틀림 형식의 진동이었던 것으로 하였으며, 다시 정의된 강성계수($f_2^2m^{2/3}$)는 예전의 강성계수(f_2^2m)보다 더욱 정확하게 과실의 경도를 예측할 수 있었다고 보고하였다. Yong과 Bilanski¹¹⁾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.

Yamanoto 등¹⁰⁾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 과실 포장 설계 시 중요한 자료가 되는 택배용 완충포장된 과실의 공진 주파수, 정점가속도 등의 진동특성을 분석하기 위하여 실험적 방법으로 배를 공시하여 정현파 스위프(sweep) 진동실험을 수행하였으며, 때 시료마다 UTM(universal testing machine)으로 기계적 특성을



Fig. 1. Sample for parcel delivery service of pears used in sweep vibration tests.

측정하여 진동특성과의 상관관계를 분석하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료

본 실험에 사용된 과실은 신고 품종의 국내산 배이었으며, 1차 실험용 시료는 2013년 10월에 일반농가에서 수확된 후 시험에 사용되기 전까지 약 2개월 정도 CA저장 컨테이너에 저온저장(0±1°C, 85±5% rh)되었으며, 2차 실험용 시료는 약 3개월 같은 조건으로 저장되었다. 시료들의 기본적인 물성들은 Table 1과 같으며, 시험에 사용되기 전 실험실의 환경조건(15°C, 75% rh)에서 약 4시간 동안 적응을 시킨 후 시험에 사용하였다. 또한, 포장시스템은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 포장단위(무게)인 5 kg를 기준으로 한 배 택배용 포장샘플이었다. 골판지는 이중양면골판지(SK210/K180/K180/K180/K180)를 사용하였으며, 택배용으로 개발된 과실용 8개구 PP 재질의 난좌(tray cup)가 사용되었고 택배용 배의 진동 및 충격을 측정하기 위하여 EPS재질의 망(net)구조 완충재를 바닥에 적용하였다.

2. 실험장치

본 연구에서 택배용 포장시스템이 적용된 배의 진동특성

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

	Date of harvest	Storage period (Mon.)	Volume (10 ⁻⁴ m ³)	Mass (kg)	True density (kg/m ³)
Pear (Niitaka)	2013. 10	2	5.1371 (1.0148)	0.5124 (0.0918)	989.15 (64.07)
		3	5.0791 (0.9851)	0.4917 (0.0854)	981.31 (61.24)

*() standard deviation.

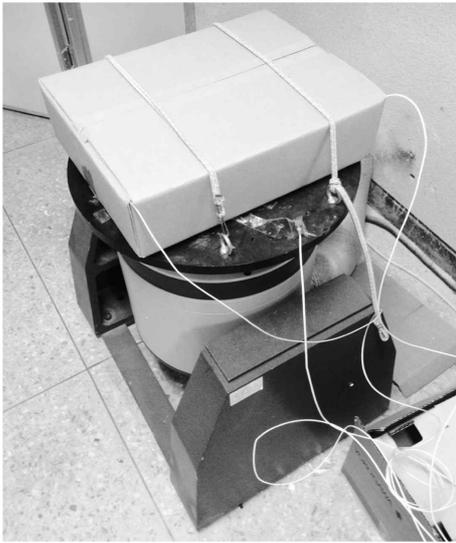


Fig. 2. Sweep vibration test apparatus for the pear.

을 측정하기 위해 구성된 실험 장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 미국의 ETS-solutions(ETS-150)사의 전자기 가진기(electro-magnetic exciter)이며, 입력된 스위프율(sweep rate)로 일정 범위의 주파수를 제어하기 위한 콘트롤러, 상자 내 배의 진동 신호를 계측하기 위한 가속도 센서와 8채널 A/D보드가 내장된 컴퓨터로 구성되었다. 본 연구에 사용된 진동 실험기는 피드백을 통해 일정한 가속도 수준을 유지해주는 시스템으로 입력 가속도 수준별 입력전압을 조절하여 진동 변위를 자동 제어하는 시스템이다.

또한 진동시험에 사용되는 가속도 센서는 아주 경량이고, 유연한 케이블을 가지고 있는 1축의 압전형 가속도 센서(50 G)를 사용하였으며, 가속도 센서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 포장상자 내 2개의 배 및 진동판에 각각 부착하였으며, 한 상자 내 2개씩 3번의 진동실험을 하였으며, 총 5상자(40개)에 대하여 실험을 실시하였다. 여기서, 가진기의 가진력이 5 kg이므로, 가진기의 아마츄어(moving element, 150 g), 진동판, 배 및 가속도 센서의 총 무게가 이 범위를 벗어나지 않도록 하였다.

3. 실험방법

배에 대한 진동실험시 주파수 범위는 3~150 Hz, 가속도 수준은 트럭 등의 운송수단에서 발생하는 0.5 G (Peleg and Hinga⁹; O'Brien et al.⁸), 스위프율은 1 octave/min로 대수적인 정현파 스위프 진동실험을 수행하여 공진 주파수와 정점 가속도(peak acceleration)를 분석하였다(ASTM D3580³). 진동실험 직후에 Fig. 3과 같이 매 시료마다 배의 기계적 특성을 계측하기 위하여 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하였다. 가속도 센서가 부착되었던 부근에서 원기둥 형태



Fig. 3. Universal compression tester for fruits.

(직경 17.6 mm, 길이 20 mm)의 시편을 채취하였으며, 각 시편에 대하여 하중재하속도(loading rate) 5 mm/min로 압축실험을 수행하였다(ASAE S368.3⁴, Jung⁷).

결과 및 고찰

1. 택배용 포장상자내 배의 공진 주파수와 기계적 특성

Fig. 4는 가진기의 진동판 및 택배용 포장상자내 배에 가속도 센서를 장착하여, 주파수 3 Hz에서 150 Hz까지 대수적으로 업-스윕(upsweep)시켰을 때, 입력주파수에 대한 입력전압의 보정식에 의해 가진기 및 배의 가속도 값을 측정된 결과로서, 가진기 진동판의 제어신호(control signal)는 실험 주파수의 전 영역에서 0.5 G로 잘 유지되고 있음을 알 수 있었다.

또한, Fig. 4에서 택배용 원충포장시스템 내 배를 같은 조건으로 구동하였을 때 시료에 부착된 가속도 센서로부터 감지되는 응답신호(response signal)를 나타낸 것으로, 공진점이 뚜렷이 나타나는 것으로 보아, 구성된 진동실험장치로부터 배의 진동 특성의 구명이 가능한 것으로 판단되었다. 본 실험에서 배의 시료는 질량 0.47 kg에서 0.69 kg까지 약간의 차이가 있도록 선택하였으나, 전체적으로는 시료크기의 범위가 넓지 못하여 각 시료간에는 차이는 크지 않았다. 실험은 저장기간 2개월과 3개월의 시료로 나누어 수행하였으며, 이때 사용되었던 배 시료의 저장기간이 다르기는 하였으나, 배의 품종과 저장조건이 거의 같기 때문에 두 시료 샘플의 진동특성과 기계적 특성의 일반적인 경향을 파악하는데는 무리가 없을 것으로 판단되었다. 즉, 저장기간이 짧아 배 조직의 연화가 상대적으로 작게 진전되었을 것으로 기대했던 1차 실험에서의 공진주파수 및 정점가속도는 각각 53~102 Hz (69±16 Hz), 1.08~2.48 G (1.82±0.36 G)으로서 2차 실험에서의 값들은 53~79 Hz (67±10 Hz), 1.64~2.31 G (1.79±0.29

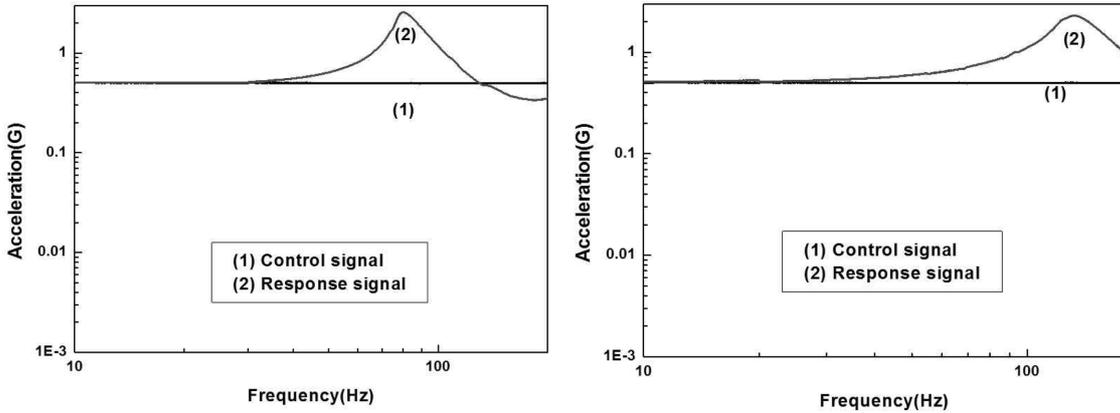


Fig. 4. Acceleration gains for vibration exciter and the pear.

G)이었다. 결과적으로 1차 샘플이 2차 샘플보다 공진주파수와 정점가속도에서 평균적으로 약 2 Hz, 0.03 G 크게 계측되었으나 통계적인 유의성($p > 0.05$)은 없었다. 또한, 국내외 유통과정중 수송수단에서 발생하는 주파수 대역중 과실의 손상과 관련이 밀접한 주파수 대역은 40 Hz 이하(Jung, 2003)이므로, 본 실험에서 계측된 택배용 완충포장시스템 내 배의 공진주파수 대역을 고려하였을 때, 본 실험에서 사용된 택배용 배 완충포장시스템은 택배용으로 충분한 가능성이 있는 것으로 판단되었다.

배의 진동 및 충격에 의한 물리적 손상과 관련하여 생물체 항복점은 중요한 의미를 갖는데 배의 경우, Fig. 5와 같이 힘-변형 곡선(Force-Deformation curve)상에서 배의 생물체항복점을 도출하였으며, 1차 실험에서 배의 생물체항복점은 47.21~68.38 N (57.16 ± 8.52 N)이었으나, 2차 실험에서는

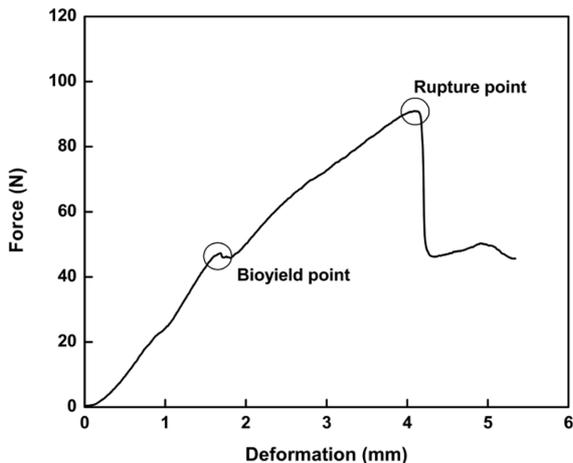


Fig. 5. Force - deformation curve of an apple by compression test.

43.72~64.70 N (49.84 ± 7.46 N)로써, 1차 실험에 적용된 배 샘플이 경도측면에서 평균값을 고려하였을 때 약 8 N의 차이를 보였으며, 통계적으로 유의성($p < 0.05$)이 있었다. 또한, 배의 탄성계수는 1차 실험에서 1138.63~1342.75 kPa이었으며, 2차 실험에서는 1092.59~1281.32 kPa로 계측되었다. 분석된 생물체 항복변형량 및 극한 변형량도 1차 실험에서는 각각 1.92~5.54 mm, 2.68~7.45 mm이었으나, 2차 실험에서는 각각 1.35~2.28 mm, 1.87~4.29 mm로써, 1차 실험에서의 값들이 다소 크게 나타났으며, 두 샘플간 차이에 대한 통계적 유의성($p < 0.05$)이 있었다. 이러한 결과는 생물체항복점의 차이에서 기인한 것으로 판단되었으며, Finney(1970)와 Abbott(1994) 등 여러 연구자들이 보고하였던 바와 같이, 연한 조직을 가진 과실 경우 공진 진동수는 단단한 과실에서 보다 낮은 진동수대에서 발생한다고 보고한 내용들과 잘 일치하는 경향이었고, 또한 연한조직의 과실에서는 생물체 항복점, 파괴점, 생물체 항복변형량 및 극한 변형량이 매우 작다는 사실과도 잘 일치되었다.

2. 배의 기본물성, 기계적 특성 및 진동특성들간의 관계

택배용 골판지 포장상자내 배의 진동특성-기본물성-기계적 특성간의 상호 관계를 분석하기 위하여 1차 및 2차 모든 샘플의 결과치로 Datafit (Version 9.1, OAKDALE Engineering, Oakdale, USA)을 이용한 상관 관계를 분석하여 Table 2에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이, 상자내 배의 공진 진동수는 변위진폭(DA)과 매우 높은 상관관계(-0.8398)가 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 택배용 완충포장시스템 내 배의 공진 진동수의 변화를 고려해보

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.

면 실험 주파수 3~150 Hz 범위 내에서 배의 질량과 체적에 따라 공진 진동수와 정점가속도 모두 감소하였으나, 공진 진동수보다 정점가속도의 감소 경향이 더 뚜렷하였다. 즉, 질량이 클수록 수송환경의 주파수대역과 일치할 수 있는 확률이 크다는 것을 의미한다. 이와 같이 질량에 따라 이 두 진동특성이 모두 감소하는 현상은 Finney⁶⁾가 과실의 공진주파수는 질량과 상관 관계가 높다는 연구 결과와도 매우 유사하였다.

배의 기계적 특성 중 생물체 항복 변형량 및 극한 변형량과 택배용 완충포장시스템 내 배의 공진 주파수와와의 관계를 고려해보면 이들 상호간에 상관 관계는 비록 낮았지만 대체로 배의 공진주파수와 정점가속도 모두 배의 생물체 항복 변형량과 극한 변형량에 따라 증가하는 경향이였다. 이것은 배의 경도가 크게 되면 낮은 주파수 대역보다는 높은 주파수 대역에서 반응하게 된다는 것을 의미하며, 이들 외의 기계적 특성과는 상관 관계가 매우 낮았다. 이와 같이 상관 관계가 낮은 이유는 실험 주파수대를 150 Hz로 제한한 데 오는 이유도 컸을 것으로 판단되어, 만일 주파수대를 훨씬 더 높인다면 이들 사이에 상관 관계가 높아, 이럴 경우는 배에 대한 진동 특성으로부터 배의 기계적 특성도 추정해 볼 수 있을 것으로 판단되었다. 본 실험을 통해 구명된 배의 공진 주파수 범위는 53~102 Hz, 정점가속도의 범위는 1.08~2.48G이었다.

결 론

본 연구에서는 택배용 완충포장시스템내 배의 공진 주파수 및 정점가속도 등의 진동특성을 분석하기 위하여 실험적 방법을 적용하였다. 그 결과, 공시된 택배용 포장시스템 내

배의 공진 주파수는 약 53~102 Hz 범위이었으며, 정점가속도는 약 1.08~2.48G 범위이었다. 공시된 배의 공진 주파수 및 정점 가속도는 배의 질량과 체적이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 배의 공진 주파수 및 정점 가속도와 기계적 특성들 간에는 생물체항복변형량(BD) 및 극한변형량(RD)을 제외하고는 상관관계가 매우 낮은 것으로 분석되었다. 본 실험의 목적은 택배용 완충포장시스템내 배의 공진 주파수를 구명하는 것으로 이 결과는 택배용 배의 운송 차량의 입력주파수와 배의 공진 주파수가 일치되어 공진으로 급격하게 가속도가 증가되는 것을 방지함으로써 충격에 의한 손상을 줄이는데 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 고부가가치식품기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(112107-3).

참고문헌

1. Abbott, A. J., Bachman, G. S., Childers, R. F., Fitzgerald, J. V. and Matusik, F. J. 1968. Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables. *Food Technology* 22:635~646.
2. Abbott, J. A. and Liljedahl, L. A. 1994. Relationship of sonic resonant frequency to compression tests and Magness-Talor firmness of apples during refrigerated storage. *Transactions of the ASABE* 37(4): 1211~1215.
3. ASTM D3580. 2012. Standard Test methods for vibration (vertical linear motion) test of products. American Society

- for Testing Materials.
4. ASABE S368.3 DEC99. 2002. Compression test of food materials of convex shape. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
 5. Cooke, J. R. 1972. An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. Transactions of the ASABE 15(6): 1075~1080.
 6. Finney Jr., E. E. 1970. Mechanical resonance within Red Delicious apples and its relation to fruit texture. Transactions of the ASABE 23(1): 177~180.
 7. Jung, H. M. 2003. Vibration Behavior of the Fruits and Vegetables Packaged Freight and Durability of Corrugated Fiberboard Container. Chungnam National University Doctor Thesis.
 8. O'Brien, M., Gentry, J. P. and Gibson, R. C. 1965. Vibrating characteristics of fruits as related to in-transit injury. Transactions of the ASABE 8(2): 241~243.
 9. Peleg, K. and Hinga, S. 1986. Simulation of vibration damage in produce transportation. Transactions of the ASABE 29(2): 633~641.
 10. Yamamoto, H., Twamoto, M. and Haginuma, S. 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 Bilanski, W. K. 1979. Modes of vibration of spheroids at the first and second resonant frequencies. Transactions of the ASABE 22(6): 1463~1466.
 12. 정현모. 1999. 청과물의 기계적 특성. 충남대학교 석사학위논문.
- 투고: 2015.07.20 / 심사완료: 2015.11.02 / 게재확정: 2015.12.10