

적정 포장설계를 위한 수출용 배의 공진특성

박종민¹ · 최동수² · 황성욱³ · 정현모^{4*}

¹부산대학교 바이오산업기계공학과

²국립농업과학원 농업공학부 수확후관리공학과

³계명대학교 화학공학과

⁴경북과학대학교 물류패키징과

Resonance Characteristics of the Pears for Exporting for Optimum Packaging Design

Jong Min Park¹, Dong Soo Choi², Sung Wook Hwang³, and Hyun Mo Jung^{4*}

¹Dept. of Bio-industrial Machinery Engineering, Pusan National University

²Postharvest Engineering Division, National Institute of Agricultural Sciences

³Dept. of Chemical Engineering, Keimyung University

⁴Dept. of Logistic Packaging, Kyongbuk Science College

Abstract Shock and 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 pears for exporting with frequency range from 10 to 200 Hz, sweep rate of 1 octave/min, sweep method of logarithmic up and down and acceleration levels of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 G considering the domestic transportation environment. The resonance frequency of the pears ranged from 49.04 to 87.16 Hz and the amplitude at resonance was between 0.96 and 4.02 G in test frequency band and acceleration level. The resonance frequency and amplitude at resonance frequency band of the pears decreased with the increase of the sample mass. The multiple nonlinear regression equations for predicting the resonance frequency of the pears were developed using the independent variables such as mass, input acceleration.

Keywords Resonance, Pear, Shock and vibration, Packaging design, Exporting

서 론

유통시장 및 농산물 시장의 개방으로 우리나라의 유통여건은 급변하고 있으며, 글로벌 소비자의 구매패턴은 고급화, 다양화되어 농산물의 품질과 안전성에 대한 소비자의 요구

가 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 해결되어야 할 과제이다. 농산물은 유통시에 매우 다양한 주파수

*Corresponding Author : Hyun Mo Jung
Dept. of Logistic Packaging, Kyongbuk Science College, 634 Jinsan-ro, Kisan-myeon, Chilgok-gun, Gyeongbuk 39913, South Korea
Tel : +82-54-979-9558
E-mail : hmjung@kbsc.ac.kr

의 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 발생할 수 있는 진동에 의한 과실의 손상 메카니즘을 이해하는데 매우 중요하다.

과채류의 공진 주파수의 해석은 Abbott 등¹⁾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 80 g 또는 더 무거운 경우에 과실의 경도와 매우 밀접한 관련이 있다고 보고하였다. Finney²⁾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.

Cooke³⁾은 과실의 전단탄성계수(shear modulus)를 비교적 적으로 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 진동이었던 하였고, 다시 정의된 강성계수($f_2^2m^{2/3}$)는 예전의 강성계수(f_2^2m)보다 더욱 정확하게 과실의 경도를 예측할 수 있었다고 보고하였다.

Yong과 Bilanski⁴⁾은 Finney의 방법을 이용하여 사과의 공진 모드에 대하여 다시 연구하였다. 그들은 사과의 적도 방향에 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 등⁵⁾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 수출용 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 스위프(sweep) 진동실험을 하여 배에 대한 공진주파수 모델링을 계측하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 공시재료

본 실험에 사용된 배는 Table 1과 같이 충남 천안 지역 과수원에서 재배된 신고 품종의 국내산 배로 수출용 포장 작업이 이루어지는 집하장에서 품질손상 평가를 통해 선별되었으며, 시험에 사용되기 전 2일 동안 저온저장($3 \pm 1^\circ\text{C}$, $85 \pm 5\% \text{rh}$) 되었다. 또한, 시험에 사용되기 전 실험실의 환경조건(25°C , $60\% \text{rh}$)에서 약 5시간 동안 적응을 시킨 후 시험에 사용하였다.

2. 실험장치

본 연구에서 수출용 배의 진동특성을 분석하기 위해 구성된 실험 장치는 Fig. 1 및 2에서 보는 바와 같이 미국의 ETS-solutions(ETS-100)사의 전자식 가진기(electro-magnetic exciter), 입력된 스위프율(sweep rate)로 일정 범위의 주파수를 제어하기 위한 컨트롤러, 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 제어하는 시스템이다.

또한 진동시험에 사용되는 가속도 센서는 아주 경량이고,

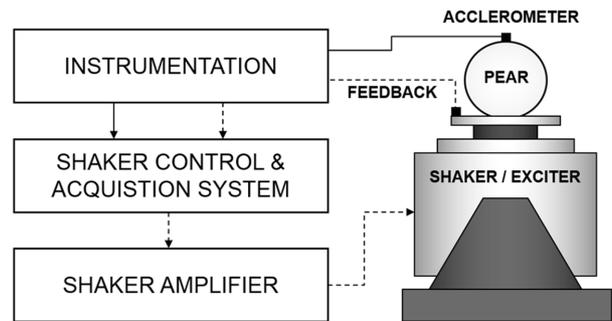


Fig. 1. Schematic diagram of the sweep vibration test apparatus for the pears.

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 (Niitaka)	2019. 10	6.3432 (1.1026)	0.7241 (0.0532)	10.9585 (0.6524)	95.79 (1.61)

*() : standard deviation

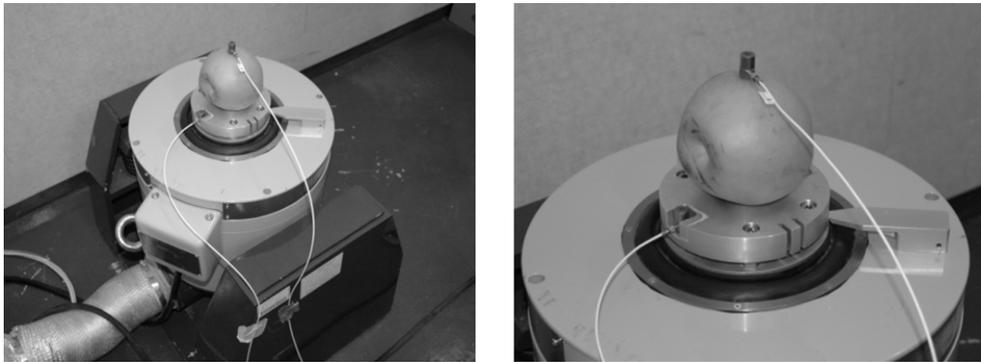


Fig. 2. General view of the sweep vibration test using the electro-magnetic vibration exciter.

유연한 케이블을 가지고 있는 1축의 압전형 가속도 센서(50 G)를 사용하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 하나의 가속도 센서는 피드백을 위해서 시료 고정장치에 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(Jung⁶).

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

3. 실험방법

공시된 배에 대한 진동실험시 주파수 범위는 10~200 Hz, 가속도 수준은 유통경로에 따라 트럭 등의 운송수단에서 발

생되는 범위를 고려하여 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 및 1 G(Peleg와 Hinga⁷, O'Brien 등⁸)별 수준을 적용하였으며, 스위프(sweep rate)은 1 octave/min로 대수적인 정현파 스위프 진동실험을 수행하여 공진 주파수를 분석하였다(ASTM D3580⁹). 또한 정현파 스위프는 낮은 주파수에서 높은 주파수로 1회(up-sweep), 높은 주파수에서 낮은 주파수로 1회(down-sweep) 실험을 하여 주파수의 영향에 대해서도 분석하였고 수출용 배의 무게에 따른 공진주파수의 영향을 분석하였다. 본 연구에서의 공진주파수 및 최대가속도 계측을 위해 진동실험에 적용된 배의 극점(4개)에서 계측하여 평균값을 구하였다.

결과 및 고찰

1. 배의 진동 특성

Fig. 3은 진동 가진기에 부착된 센서로부터 계측된 가속도 수준으로 그림에서 알 수 있듯이 10~200 Hz 실험주파수 내에서 일정하게 유지됨을 알 수가 있었다. 또한 Fig. 3에 표시된 A와 B에서 보는 바와 같이 0.8 및 1.0 G의 상대적으로 높은 가속도 수준에서는 배가 받는 진동가속도가 크

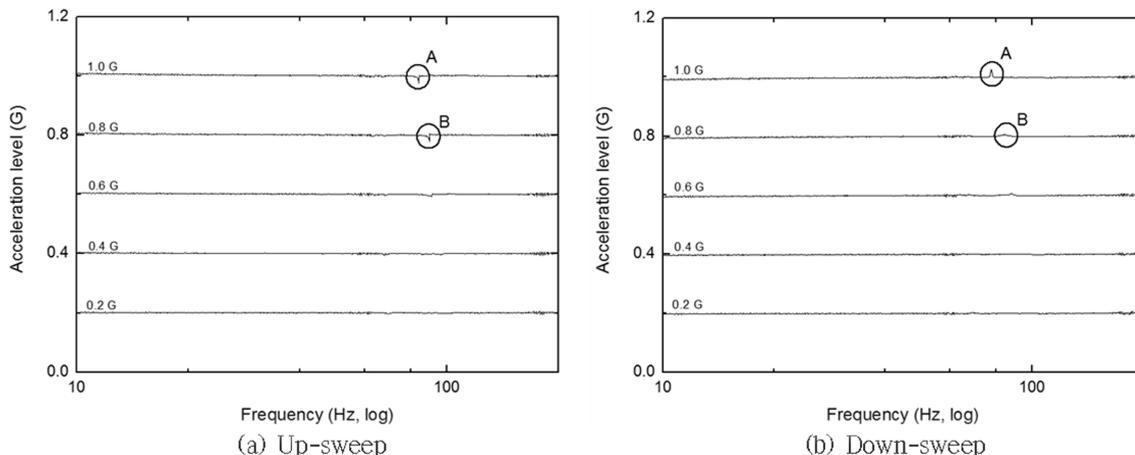


Fig. 3. Acceleration control level of vibration exciter by input acceleration.

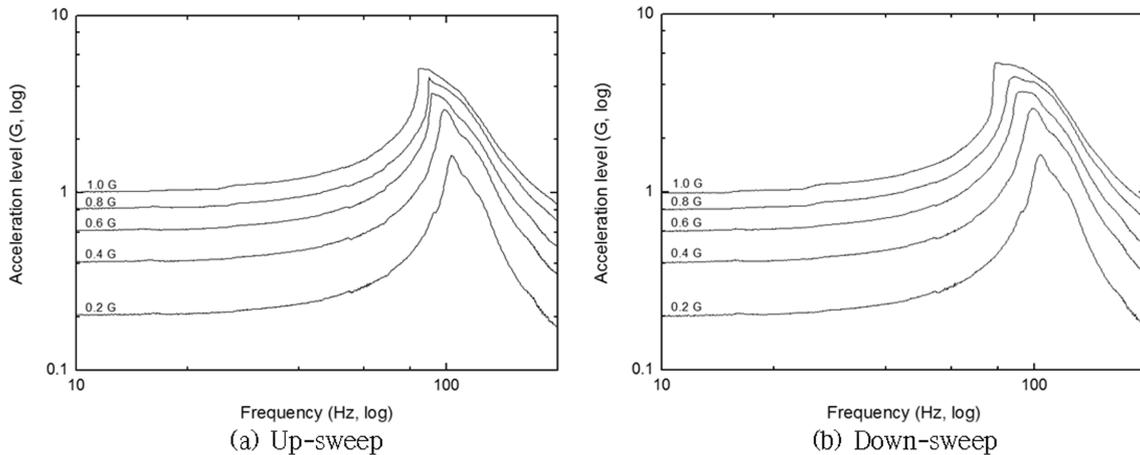


Fig. 4. Acceleration level of the pears according to input acceleration.

기 때문에 공진이 발생하는 주파수 대역에서 가진기에 약간의 충격파형이 발생하였다. 이것은 배가 공진 주파수내 진동을 받게 되면 가진기와 충격에 의해 생기는 것으로 판단되며, 이것이 유통 중 발생하는 배의 손상 원인이 되므로 수출용 배의 공진주파수를 고려한 완충포장 설계의 기초자료로 활용될 수 있다.

Fig. 4는 스위프(sweep) 주파수내에서의 배의 공진주파수를 나타낸 것이며, Fig. 4의 (a)는 낮은 주파수(10 Hz)에서 높은 주파수(200 Hz)로 스위프(up-sweep)된 공진 결과이며, (b)는 높은 주파수(200 Hz)에서 낮은 주파수(10 Hz)로 스위프(down-sweep)된 공진 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 스위프간 공진주파수 결과 값은 모든 가속도 수준에서 평균적으로 약 5 Hz의 차이가 발생했으며, up-sweep의 공진주파수 대역이 크게 나타났다. 또한, up-sweep 및 down-sweep 시험 모두에서 입력 가속도 수준이 클수록 수출용 배의 공진주파수 대역은 감소하는 경향을 보였다. 계측된 배의 공진주파수

대역에서의 최대가속도 수준은 up-sweep 및 down-sweep 시험 모두 유사한 결과 값을 나타내었다.

Table 2는 진동 가진기의 입력 가속도에 따른 배의 공진 주파수를 나타내고 있다. 모의 수송환경에서 배의 공진 주파수는 진동의 입력 가속도가 클수록 감소하는 경향을 보였으며, 이 결과는 Jung⁶⁾이 제시하였던 연구결과와 같았다. 즉 청과물이 유통되는 경로에 따라 배의 공진이 발생하는 주파수도 변한다는 것을 의미한다. 이것은 청과물 완충포장 시 유통환경에 대한 조사가 이루어져야만 적정 포장설계가 가능한 것으로 판단된다.

Table 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 입게

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
Maximum	87.16	84.92	78.87	74.75
Minimum	62.78	57.64	53.67	49.51
Average	79.05	73.68	68.67	63.64
Standard Deviation	6.90	6.98	5.95	5.74

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
Maximum	1.16	1.94	2.68	3.34
Minimum	0.96	1.64	2.24	2.67
Average	1.05	1.80	2.46	3.06
Standard Deviation	0.05	0.08	0.10	0.15

되는 주요인이 된다.

2. 배의 공진주파수 및 최대가속도 예측모델

수출용 배에 대한 공진주파수 및 최대가속도를 예측하기 위하여 입력가속도(IA) 수준 및 질량(M) 2개의 독립변수를 가지는 다중회귀 모델을 개발하였으며, 그 결과와 각 모델에 대한 분산분석 결과를 Table 4-7에 함께 나타내었다. 표들에서 보는 바와 같이 수출용 배의 모든 가속도 수준에서 개발된 공진주파수 예측 다중회귀 모델의 결정계수(R²)는 0.9013이었고 공진주파수 대역에서의 발생하는 최대가속도 예측 다중회귀 모델의 결정계수(R²)는 0.9821로 나타났다. 일반적으로 결정계수는 실험값과 모델에 의한 예측값과의 적합도를 평가하는 척도로 사용되고 있다. 개발된 2개의 다중회귀 모델에 대한 분산분석을 실시하였으며, 개발된 모델에 있어 고도의 유의성이 인정되었다. 또한, 본 연구에

서는 기존 배의 물성인 생물체항복강도(bioyield strength)에 따른 공진주파수 및 최대가속도의 영향을 분석하고자 하였으나, 기존 Jung⁶⁾이 제안하였던 배의 생물체항복강도, 공진주파수 및 최대가속도간에는 상관관계가 높지 않았다는 결과를 토대로 수출용 배의 질량 및 수송경로의 가속도 수준으로 예측이 가능한 모델식을 개발하였다.

Fig. 5에는 입력가속도 및 배의 질량에 따른 공진주파수 및 최대가속도의 반응표면을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 다른 조건이 같을 때 배의 질량이 증가할수록 공진주파수는 반대로 감소하는 경향을 보였으며, 입력가속도 수준도 증가할수록 배의 공진주파수는 감소하는 경향을 보였다. 이는 Jung⁶⁾이 제안했던 결과와 일치하였다. 또한, 배의 공진주파수 대역에서의 최대가속도는 입력 가속도 수준에 따라 큰 차이를 보였으며, 질량에 따른 배의 공진주파수 대역에서의 최대가속도의 변화는 크지 않았다.

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	0.9013
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	0.9821
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			

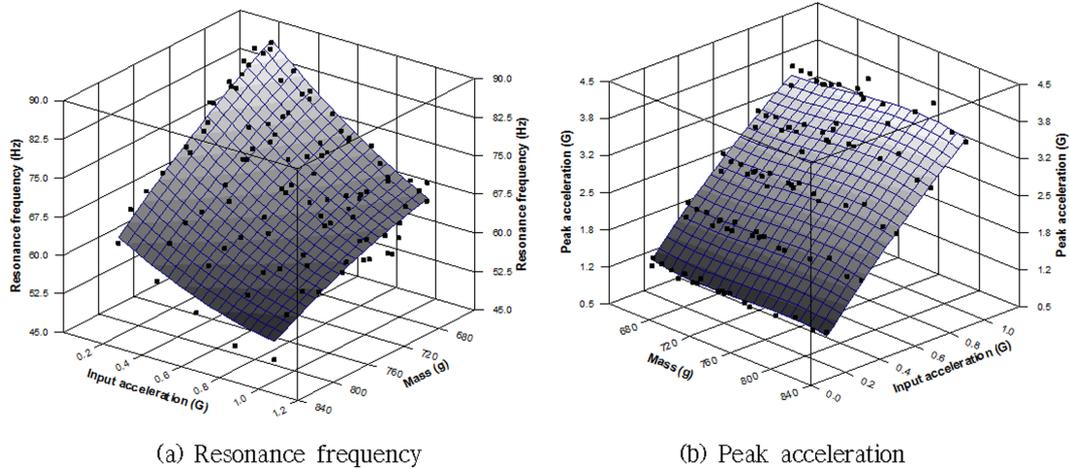


Fig. 5. Response surface of resonance frequency and peak acceleration according to input acceleration and mass of the pears.

결론

본 연구에서는 수출용 배의 적정 완충포장 설계의 기초 자료를 구축하기 위하여 ASTM의 시험규격에서 공시된 공진 진동시험을 통해 배의 공진주파수 및 공진주파수 대역에서의 최대가속도 계측하였다. 그 결과, 모의 수송환경의 주파수 대역(10~200 Hz)에서 배의 공진주파수는 진동의 입력가속도가 클수록 감소하는 경향을 보였다. 즉, 수출용 배가 수송되는 경로에 따라 공진이 발생하는 주파수도 변한다는 것을 알 수 있었으며, 배의 질량(M)과 입력가속도(IA)를 포함한 2개의 독립변수를 가지는 배의 공진주파수 및 공진주파수 대역에서 발생하는 최대가속도에 대한 다중회귀 모델(공진주파수: $R^2=0.9013$, 최대가속도: $R^2=0.9821$)을 개발하였다. 개발된 배의 공진주파수 및 최대가속도 모델을 이용하여 유통환경에 따른 배의 적정 포장을 위한 완충설계에 적용할 수 있으며, 이를 통해 손상을 최소화 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업에 의하여 이루어졌으며, 지원에 감사드립니다(과제번호:PJ013527).

참고문헌

- 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.
- 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.
- Cooke, J. R. 1972. An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. *Transaction of the ASAE* 15(6): 1075-1080.
- Yong, Y. C. and Bilanski, W. K. 1979. Modes of vibration of spheroids at the first and second resonant frequencies. *Transaction of the ASAE* 22(6): 1463-1466.
- 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.
- 정현모. 2003. 청과물 포장화물의 진동거동과 골판지 상자의 내구성. 충남대학교 박사학위 논문.
- Peleg, K. and Hinga, S. 1986. Simulation of vibration damage in produce transportation. *Transactions of the ASAE* 29(2): 633-641.
- O'Brien, M., Gentry, J. P. and Gibson, R. C. 1965. Vibrating characteristics of fruits as related to in-transit injury. *Transactions of the ASAE* 8(2): 241-243.
- ASTM D3580. Standard Test methods for vibration (vertical linear motion) test of products.

투고: 2019.12.16 / 심사완료: 2019.12.21 / 게재확정: 2019.12.24