

국내 유통 수박의 적정 포장설계를 위한 진동특성 분석

정현모[†] · 김만수* · 김기석* · 조병관* · 김대용**

경북과학대학 패키징매니지먼트과, 충남대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부*, 경북신기술포장연구센터**

Analysis for Vibration Characteristics of the Watermelon for Optimum Packaging Design in Domestic Distribution

Hyun Mo Jung[†], Man Soo Kim*, Ghi Seok Kim*, Byeong Kwan Cho* and Dae Yong Kim**

Dept. of Packaging Management, Kyoungbuk College of Science

**Division of Bioresources Engineering, College of Agriculture & Life Sciences, Chungnam National University*

***Gyeongbuk Packaging Research Center*

Abstract Shock and vibration inputs are transmitted from the transporting vehicle through the packaging to the fruit. The vibration causes sustained bouncing of fruits against each other and the container wall. The steady state vibration input may cause serous fruit injury, and the damage is particularly severe if the fruits are bounced at its resonance frequency. The determination of the resonance frequencies of the fruits and vegetables may help the packaging designer to determine the proper packaging system providing adequate protection for the fruits, and to understand the complex interaction between the components of the fruits when they relate to expected transportation vibration inputs. To analyze the vibration properties of the watermelon for optimum packaging design during transportation, sinusoidal sweep vibration tests were carried out. The resonance frequency of the watermelon ranged from 19 to 32 Hz and the amplitude at resonance was between 1.6 and 2.9 G. The resonance frequency and amplitude at resonance frequency band of the watermelon decreased with the increase of the sample mass. The multiple nonlinear regression equation for predicting the resonance frequency of the watermelon were developed using the independent variables such as mass, input acceleration and sphericity.

Key words Resonance frequency, Shock and vibration, Watermelon

서 론

유통시장 및 농산물 시장의 개방으로 우리나라의 유통여건은 급변하고 있으며, 소비자의 구매패턴은 고급화, 다양화 되어 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.

농산물 포장은 일반 공산품 포장과는 달리 독특한 특성을 가지고 있다. 우선 농산물은 수확 후 포장 후에도 살아 있는 생명체이기 때문에 기능성이 중요시 된다는 것이고,

가전제품과 같은 공산품의 경우 제품설계와 포장설계와의 상호 보완적인 관계가 있으나, 농산물의 경우는 있는 그대로의 상태에서 적정 포장을 해야 된다는 것이다. 따라서 농산물의 포장은 그 만큼 까다로운 문제이지만, 단지 부가가치가 낮다는 이유로 쉽게 처리되는 경우가 많았다. 그러나 농산물의 경우도 세계가 커다란 하나의 시장이 되면서 농산물의 포장도 품질과 함께 중요한 경쟁요소로 자리 잡고 있는 상황으로, 그 중요성은 날로 높아질 전망이다. 우리나라의 농산물 중 수박을 비롯해 몇몇 과채류는 중요한 수출 전략 품목으로써, 안정된 농가소득의 작목으로 자리 잡기 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. 특히 수박의 경우에는 산지에서 포장이 거의 이루어지지 않기 때문에 수확 후 최종 수요자에게 판매되는 유통과정 중에 5~6회의 적재 및 하역 작업으로 인한 유통

[†]Corresponding Author : Hyun Mo Jung

Dept. of Packaging Management, Kyoungbuk College of Science, 159, Bongsan-ri, Kisan-myeon, Chilgok-gun, Gyeongbuk, 718-851 Korea
E-mail : <babong2@dreamwiz.com>

비 증가와 산물형태의 적재로 인해 적재효율도 매우 낮은 결과를 초래하고 있는 실정이다.

이처럼 농산물은 유통 시에 매우 다양한 주파수의 진동을 받을 수 있고 만약 이 주파수가 그 농산물의 공진 주파수 범위에 있다면 농산물과 포장 완충재의 상호관계를 이용하여 공진점을 피하도록 적정 포장해야 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 et al.(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 80 g 또는 더 무거울 경우에 과실의 경도와 매우 밀접한 관련이 있다고 보고하였다. Finney(1970)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_2^3)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 진동이었고, 두 번째로 낮은 공진 주파수는 비틀림 형식의 진동이었고, 다시 정의된 강성계수($f_2^3 m^{2/3}$)는 예전의 강성계수($f_2^3 m$)보다 더욱 정확하게 과실의 경도를 예측할 수 있었다고 보고하였다.

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.

Yamanoto et al.(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 유통을 위한 수박의 적정 포장설계 시 중요한 자료가 되는 수박의 공진 주파수 및 정점가속도를 모델링하기 위하여 실험적 방법으로 수박을 공시하였으며, 수박에 대한 적정 완충포장을 위한 데이터를 구축하기 위하여 공시된 수박에 대해 가변주파수 정현파 진동 실험을 통한 수박의 진동특성을 구명하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 공시재료

본 실험에 사용된 수박은 Table 1에서 보는바와 같이 경북 성주 지방의 비닐하우스에서 재배된 금촌 품종의 국내산 수박이었으며, 2006년 8월에 일반농가에서 수확된 후 시험에 사용되기 전까지 저온저장($3 \pm 1^\circ\text{C}$, $85 \pm 5\%$ rh)되었다. 시험에 사용되기 전 실험실의 환경조건(25°C , 60% rh)에서 약 24시간 동안 적응을 시킨 후 시험에 사용하였다.

2. 실험장치

본 연구에서 수박의 진동특성을 측정하기 위해 구성된 실험 장치는 Fig. 1 및 2에서 보는 바와 같이 전자식 가진기(ETS-100, ETS-Solution, USA), 입력된 스위프율(sweep rate)로 일정 범위의 주파수를 제어하기 위한 콘트롤러, 수박의 진동 신호를 계측하기 위한 가속도 센서와 8채널 고속 A/D보드가 내장된 컴퓨터로 구성되었다. 본 연구에 사용된 진동 실험기는 피드백을 통해 일정한 가속도 수준을 유지해주는 시스템으로 각 가속도 수준별 입력전압을 조절하여 진동 변위를 자동 제어하는 시스템이다.

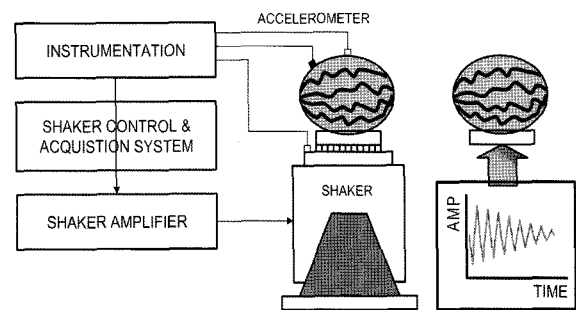


Fig. 1. Schematic diagram of the sweep vibration test apparatus for the Watermelon.

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

	Date of harvest	Volume (cm ³)	Mass (g)	True density (g/cm ³)	Sphericity (%)
Watermelon (Kumchon)	2006. 8	7492.82 (2106.24)	6913.75 (1807.03)	0.9443 (0.0692)	88.03 (5.94)

*denotes standard deviation

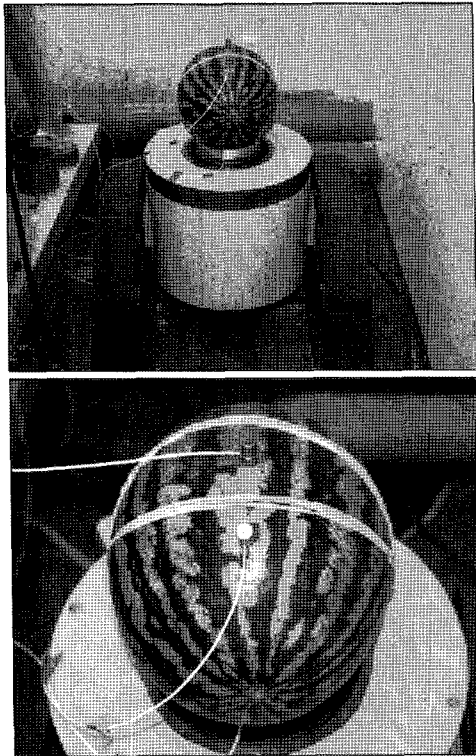


Fig. 2. General view of the sweep vibration test using the electro-magnetic vibration exciter.

또한 진동시험에 사용되는 가속도 센서는 아주 경량이고, 유연한 케이블을 가지고 있는 1축의 압전형 가속도 센서(KISTLER, 100 G)를 사용하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 하나의 가속도 센서는 피드백을 위해서 진동 가진기에 부착하였으며, 수박의 계측 부위별 진동특성을 계측하기 위하여 위쪽 중앙과 측면 부위에 부착하여 진동에 따른 가속도를 계측하였다. 또한 수박의 상대적인 진동 변위를 억제하기 위해 강성의 고무줄을 이용하여 고정하였다. 또한 유통경로에 대한 진동가속도를 계측하기 위하여 데이터 수집 및 저장장치(Somat, e-DAQ)를 사용하였다.

3. 실험방법

본 연구에서는 유통 중 수박이 받을 수 있는 진동 충격력을 계측하여 유통경로별 진동 가속도 및 주파수 분포를 분석하기 위하여 농산물 운송수단인 트럭에 가속도 센서를 앞, 중간 및 뒤 부분에 부착하고 유통경로(비포장 도로, 포장 도로)에 따른 3축의 진동 충격력을 계측(500 Hz)하여 수박의 완충포장에 대한 가속도 및 주파수 기준을 설정하고자 하였다.

수박에 대한 진동실험시 주파수 범위는 10~200 Hz, 가속도 수준은 유통경로에 따라 트럭 등의 운송수단에서 발생하는 범위를 고려하여 0.25 G, 0.5 G, 0.75 G 및 1.0 G (Peleg and Hinga, 1986; O'Brien et al., 1965)별 수준을

적용하였으며, 스위프율(sweep rate)은 1 octave/min로 대수적인 가변주파수정현과 진동실험을 수행하여 공진 주파수를 분석하였다(ASTM D3580). 또한 수박에 대해 가속도 센서의 위치에 따른 공진 주파수의 영향을 분석하기 위하여 Fig. 1 및 2에서 보는 바와 같이 가속도 센서를 수박 시료의 위쪽 가운데 및 측면 부위에 부착하여 진동실험을 하였으며, 수박의 진동 충격력이 농산물 운송수단에 미치는 충격력을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 국내 농산물 유통경로의 진동특성

본 연구에서는 농산물 수송 차량의 적재함 위치에 따른 3축의 진동가속도를 계측하였다. 그 결과, 적재함 뒤쪽 부분의 수직방향의 진동가속도가 제일 크게 계측되었으며, Fig. 3은 유통경로(비포장 및 포장도로)에 대한 농산물 수송차량(1톤 트럭) 뒤쪽 부분의 수직 진동신호이며, 도로포장의 여부에 따라 진동가속도가 약 2.5배의 차이를 보였다.

또한, 계측된 유통경로별 진동가속도가 어떤 주파수 분포를 나타내는지를 분석하기 위하여 OSA(octave spectrum analysis) 디지털 필터링 기법을 적용하였으며, 그 결과를

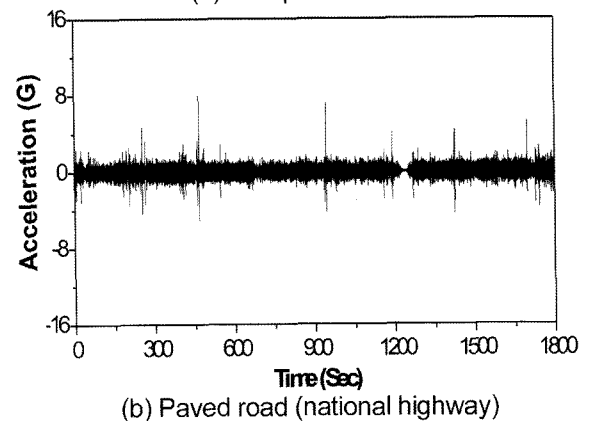
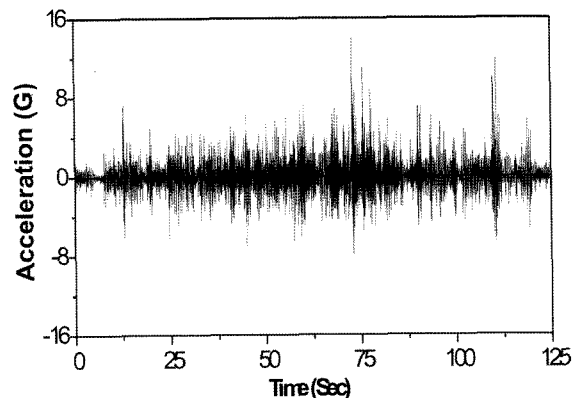


Fig. 3. Vibration acceleration level be measured according to the transportation road.

Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 유통경로의 주파수 분포는 20~40 Hz 및 120~140 Hz 대역이었다. 농산물의 유통 중 손상과 관련된 주파수는 저주파수 대역이므로 수박의 포장설계시 피해야 할 주파수 대역은 20~40 Hz 이다. 만약 농산물의 공진주파수가 유통경로의 주파수 분포 범위내에 존재한다면 농산물은 공진에 의한 충격가속도를 받게 되고, 결과적으로 농산물의 품질저하를 가져오게 되므로 농산물에 대한 완충포장이 이루어져야 한다.

2. 모의 수송환경에서의 수박의 진동특성 모델링

Fig. 5는 0.25, 0.5, 0.75 및 1.0 G의 각 입력 가속도 수준에 따른 수박시료의 중앙 위쪽부분(1), 측면부분(2) 및 가진기(3)의 가변주파수 정현파 진동실험에 대한 진동 응답 신호이며, 가진기의 제어 가속도는 실험 주파수내에서 각 가속도별로 일정하게 유지됨을 알 수가 있었다. 또한 각 가속도 수준별 수박의 공진 주파수는 약 19~32 Hz 범위 내에서 발생하였고 수박의 계측 위치별 공진 주파수의 차이는 없어 수박의 어느 곳에서도 공진 주파수는 같다는 것을

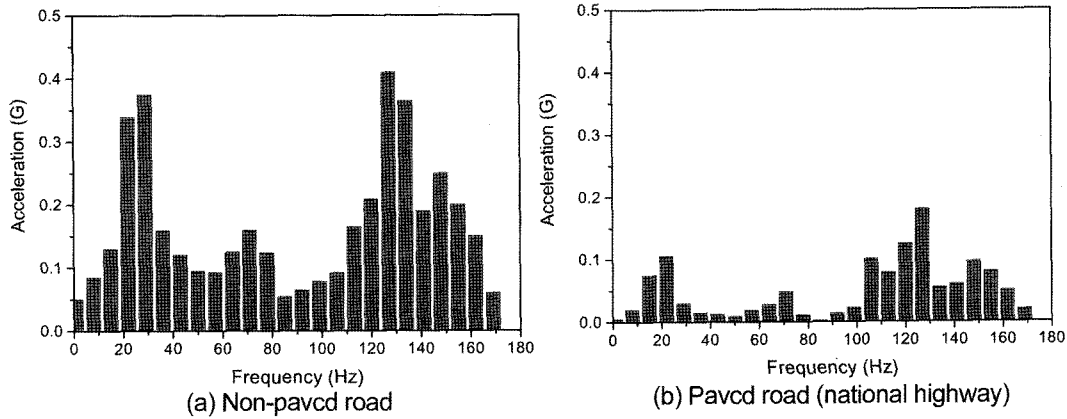


Fig. 4. Octave spectrum analysis of the transportation road using digital signal processing.

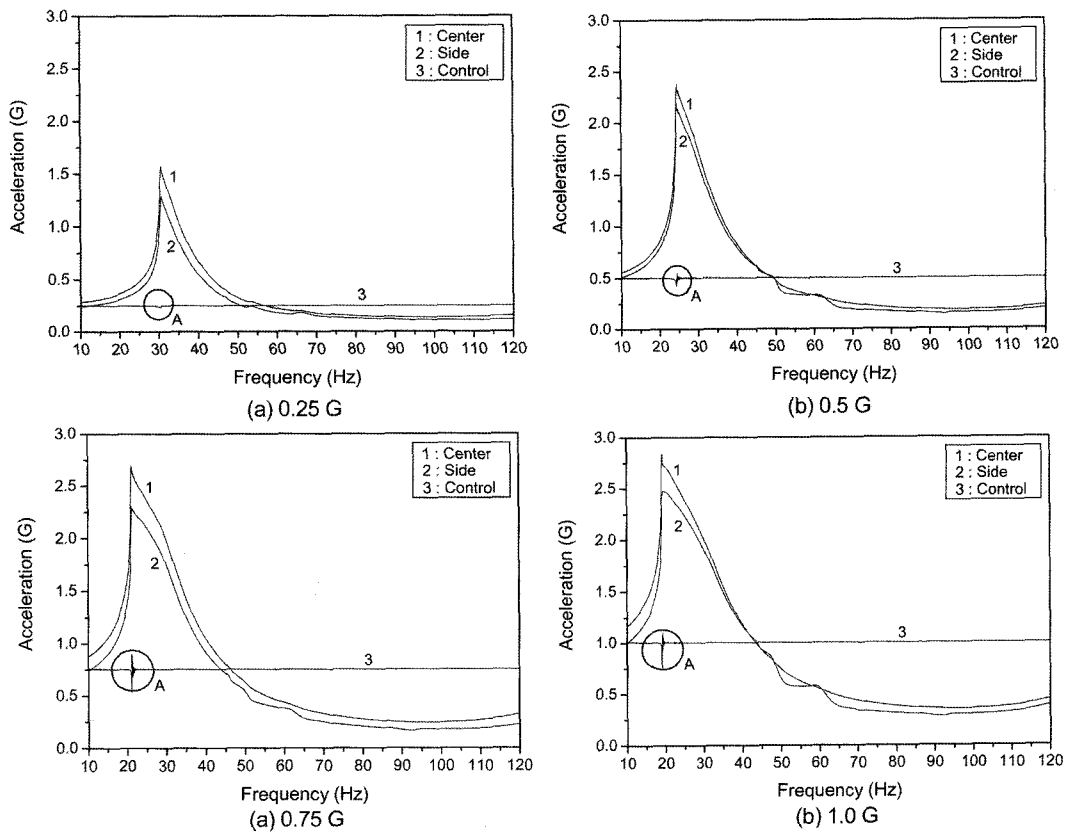


Fig. 5. Acceleration level of the watermelon by sweep vibration tests.

알 수 있었으며, 수박의 공진 주파수 대역에서의 정점 가속도에만 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 가속도 센서의 수직 정도에 따른 차이에 의해 발생하는 것으로 판단되었다. 또한 수박의 경우에는 공진이 생기는 주파수 대역에서 급격한 가속도의 변화가 생기면서 가진기에 충격을 가하게 되어 Fig. 5의 (A)와 같은 충격파형들이 계측되었으며, 가진기에 가한 최대 충격 가속도는 0.3 G로 수박의 질량이 클수록 충격력도 증가하였다. 이 결과는 수박이 운송 중에 공진 주파수 대역의 진동을 받게 되면 수송 차량에 충격을 가하게 되고 만약 다량의 수박에 대한 충격을 받게 된다면 수송 차량의 전복도 가능하게 된다. 또한, 수박의 공진주파수 대역이 유통경로의 주파수 대역과 일치하므로 수송 중 수박이 공진주파수 진동에 의한 높은 충격력을 받게 됨을 의미한다.

수박의 공진주파수는 Table 2와 같이 입력되는 가속도의 크기가 클수록 작아지고 실험에 의한 결과 수박의 질량

(-0.7527)과 매우 큰 상관관계가 있음을 알 수 있었고 구형률(0.2458)과는 상관관계가 낮았다. 이 결과는 김 등(2000)이 배의 공진주파수는 질량과 매우 높은 상관관계가 있었다는 보고와 일치하였다. 수박의 질량이 클수록 공진주파수는 작아지는 경향을 보였으며, 0.5 G 이하에서 수박의 피크 가속도의 변화가 매우 심하게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Table 3 및 4와 같이 수박의 질량(M)을 이용하여 유통 중 입력 가속도(IA) 수준에 따른 수박의 공진주파수(RF) 및 피크가속도(PA)를 추정하는 다중회귀모델을 개발하였으며, Fig. 6은 공진주파수와 정점가속도의 반응표면을 나타내었다.

본 실험을 통해 구명된 수박의 공진 주파수는 수박의 적정 포장설계를 위한 중요한 데이터이며, 운전 중의 트럭과 화차 본체에서 감지되는 진동 주파수를 고려할 때 수박의 공진주파수가 이 주파수내에 존재하게 되며, 현재 관행으로 이루어지고 있는 산물형태의 적재로 유통이 이루어진다면 수

Table 2. Resonance frequency and peak acceleration of the watermelon by sweep vibration tests

Mass (g)	Sphericity (%)	Acceleration (G)	Resonance Frequency (Hz)	Peak Acceleration (G)
6913 (1807.03*)	88.03 (5.94*)	0.25	31.66 (3.19*)	1.62 (0.64*)
		0.50	26.03 (3.33*)	2.43 (0.96*)
		0.75	22.42 (3.45*)	2.69 (0.82*)
		1.00	19.85 (3.29*)	2.87 (0.83*)

*denote standard deviation

Table 3. Coefficients of multiple regression model for resonance frequency of the watermelon

Variables	$RF(IA, M) = a + b \times IA + c \times IA^2 + d \times IA^3 + e \times \log(M) + f \times \log(M)^2 + g \times \log(M)^3 + h \times \log(M)^4$				R ²
	Coefficients	Standard error	t-ratio	Prob(t)	
a	-239292.39470	2344892.88600	-0.10204	0.91957	0.9645
b	-30.66583	18.08014	-1.69610	0.10280	
c	45.82001	31.95069	1.43408	0.16445	
d	-28.86667	16.97261	-1.70077	0.10191	
e	108644.95240	1058967.68100	0.10259	0.91914	
f	-18485.05743	179290.44460	-0.10310	0.91874	
g	1397.25503	13487.53476	0.10359	0.91835	
h	-39.59531	380.38456	-0.10409	0.91796	

Table 4. Coefficients of multiple regression model for peak acceleration of the watermelon

Variables	$RF(IA, M) = a + b/IA + c/IA^2 + d/IA^3 - e \times \log(M) + f \times \log(M)^2 + g \times \log(M)^3 + h \times \log(M)^4 + i \times \log(M)^5$				R ²
	Coefficients	Standard error	t-ratio	Prob(t)	
a	1255484.18900	8209.90525	152.92310	0.0	0.9911
b	-3.29273	0.54770	-6.01190	0.0	
c	1.39531	0.27158	5.13772	0.00003	
d	-0.19512	0.03882	-5.02539	0.00004	
e	-708372.42100	12597.92687	-56.22926	0.0	
f	159852.68300	3418.99218	46.75432	0.0	
g	-18034.10574	389.24650	-46.33080	0.0	
h	1017.15254	18.79001	54.13263	0.0	
i	-22.94483	0.20981	-109.35615	0.0	

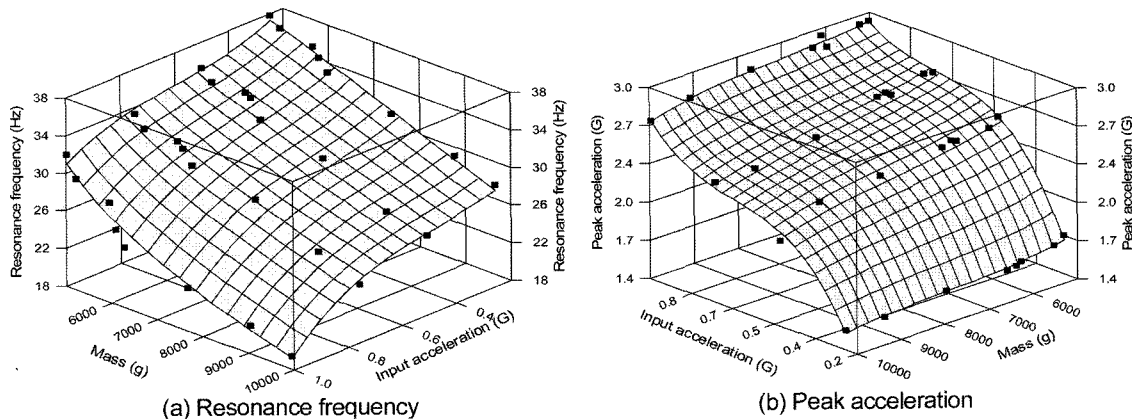


Fig. 6. Response surface for the non-linear modeling developed.

박의 높은 공진현상에 의해 차량의 전복 및 손상에 의한 품질저하도 가능하게 된다.

또한 수박의 적정 완충포장설계를 위한 유통 중에 발생 되는 공진 주파수가 수송 중 주파수 대역과 일치하지 않도록 완충재 선정 및 두께 등을 예측하는데 필요한 기초 자료이다.

4. 결 론

본 연구에서는 농산물의 포장설계 시 중요한 변수가 되는 수박의 공진 주파수 및 정점 가속도 등의 진동특성을 분석하기 위하여 가변주파수 정현파 진동실험을 적용하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 농산물 유통경로별 주파수 대역은 20~40 Hz 및 120~140 Hz이었으며, 농산물의 손상과 관련된 저주파수 대역에서의 진동 가속도를 받지 않도록 완충 포장설계가 이루어져야 한다.
2. 공시된 수박의 가변 정현파 진동실험에 의한 공진 주파수는 약 29~31 Hz 범위이었고 정점가속도는 약 1~3 G 범위이었으며, 입력가속도 수준에 따라 공진주파수 대역에서 최대 3배의 충격을 받게 된다.
3. 유통 중 수박의 입력 가속도 수준(IA) 및 질량(M)에 따른 공진주파수(RF) 및 정점가속도(PA)를 예측할 수 있는 다중회귀모델을 개발하였다.
4. 수박의 공진 주파수 대역에서 가속도의 급격한 변화에 의해 수박이 진동 가진기에 충격을 가하게 된다. 즉 유통 중 수송 차량에 충격을 가하게 되는 것으로 만약 다량의 수박에 의해 수송 차량이 공진 진동을 받게 된다면 수송 차량의 전복도 가능하게 되므로 수박에 대한 완충포장이 필요하다.
5. 본 실험의 목적은 수박의 공진 주파수를 구명하는 것으로 이 결과는 수박의 운송 시 차량의 입력주파수와 수박의 공진 주파수가 일치되어 공진으로 급격하게 가

속도가 증가되는 것을 방지함으로써 충격에 의한 손상을 줄이는데 활용될 수 있을 것이다.

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. *Transaction of the ASAE* 37(4): 1211~1215.
3. ASTM D3580. Standard Test methods for vibration (vertical linear motion) test of products.
4. ASAE S368.3 DEC99. Compression test of food materials of convex shape.
5. Cooke, J.R. 1972. An interpretation of the resonant behavior of intact fruits and vegetables. *Transaction of the ASAE* 15(6): 1075~1080.
6. 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.
7. 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.
8. Peleg, K. and Hinga, S. 1986. Simulation of vibration damage in produce transportation. *Transactions of the ASAE* 29(2): 633-641.
9. 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.
10. 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.
11. 김만수, 정현모, 서륜. 2000. 배의 진동특성. 한국농업기계학회 동계학술대회 논문집: 240~247.