

유통중 청과물의 진동 특성 연구 (II)
-유한요소법을 이용한 청과물의 진동특성-

김만수 · 정현모¹ · 김기석 · 박정길

Vibration Characteristics of the Fruit and Vegetables during
Transportation (II)
-Vibration Characteristics of the Fruit and Vegetables using FEM-

Man-Soo Kim · Hyun-Mo Jung¹ · Ghi-Seok Kim · Chung-Gil Park

ABSTRACT

Finite element method(FEM) was used to obtain an approximate solution, since the mathematical formulations for the problem are complex and cannot be solved analytically. In this study, the fruit as well as the aluminum support on vibrator are discretized into small elements, and the approximate functions are used to describe the displacements in each element in terms of nodal values, and because of the complexity of the problem of viscoelastic materials such as the fruit and vegetables, it was necessary to validate the modeling approach before pear simulations were performed, and the finite element modeling approach was first validated by comparing the results obtained from simulation and experiment for the pear in the frequency range 3 to 150 Hz and acceleration level of 0.25 G-rms. Based on the relatively good agreement between simulated and measured frequencies for the pear, finite element models of tomato and oriental melon were created to study the vibration characteristics of the fruit and vegetables.

충남대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학과

¹ 경북과학대학 포장과

The resonance frequencies of the pear, tomato and oriental melon using FEM were 62.50, 39.45 and 62.73 Hz and the peak accelerations of them using FEM were 2.21, 1.38 and 1.98 G-rms.

key words : Fruit and vegetables, Vibration response, Finite element method

서 론

청과물은 수확과정중이나 수확 후에 각종 처리 공정 및 유통과정중의 진동에 의한 크고 작은 외력을 받음으로써 청과물에 변형이 생기고, 이러한 변형은 결과적으로 청과물에 손상을 유발시켜 품질저하의 한 요인이 된다. 청과물의 진동 및 경도에 대한 이론적 해석방법은 대부분 근사적인 추론 방법들이 주로 사용되고 있으며, 유한요소법(finite element method)에 의한 분석방법이 대부분을 차지하고 있다. 하지만 유한요소해석에 있어서의 청과물의 3차원 모델링의 어려움 때문에 초기 및 경계조건 설정의 많은 부분이 가정에 의한 것이기 때문에 많은 어려움이 있다.

Chen과 Baerdemaeker(1993)는 과실에 대하여 유한요소에 의한 진동해석과 경도와와의 관계를 분석하였던 결과 사과 및 파인애플 모델은 공진 주파수(resonance frequency)을 예측하는데 매우 근접하였고, 공진 주파수는 질량 그리고 강성계수 ($f_2^2 m^{2/3}$)는 과실의 탄성계수와 각각 매우 높은 상관관계를 보여, 과실의 경도 평가에 적용할 수 있다고 보고하였다. 또한 유한요소해석을 이용한 과실의 진동해석은 과실 물성의 정확한 측정이 매우 중요하다고 보고하였다. Chen 등(1996)은 멜론에 대하여 경도의 비파괴적 측정을 위하여 멜론의 유한요소 모델에 대하여 연구하였으며, 멜론의 기본물성, 경도, 정적 및 동적 탄성계수를 측정하였고, 멜론의 4층 선형 탄성 유한요소 모델을 작성하

였으며, 멜론의 공진 주파수와 질량을 이용한 강성계수 ($f_2^2 m$ 와 $f_2^2 m^{2/3}$)는 멜론의 경도를 추정할 수 있으며, 멜론의 밀병(watercore)에 의한 공진 주파수의 변화에 대하여 보고하였다.

Dewulf 등(1999)은 유한요소해석을 이용하여 배의 물성과 동적 거동과의 상관관계를 분석하였으며, 그 결과 유한요소해석에 의한 배의 공진 주파수는 평판의 압축실험에서의 탄성계수와 높은 상관관계가 있음을 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 정현파 스윕(sweep) 진동 실험을 통하여 얻어진 배의 진동특성의 자료를 가지고 유한요소해석의 신뢰성을 검증하여, 배 이외의 토마토 및 참외의 공시 청과물에 대한 진동특성에 유한요소법을 적용하고자 하였다.

재료 및 방법

가. 유한요소법을 이용한 청과물의 진동해석

(1) 청과물의 유한요소 모델링

일반적으로 유한요소해석을 위한 첫 번째 단계는 해석하고자 하는 물체의 기하학적 모델을 생성하는 것이다. 대부분의 청과물은 비선형(nonlinear), 비동질성(nonhomogeneous), 및 점탄성특성(viscoelastic property)을 가지고 있기 때문에 기하학적 모델을 생성하는 것은 매우 복잡한 작업이다.

청과물의 솔리드 모델(solid model) 생성과정은 청과물의 절단면을 고려했을 때 중심축에 대하여

모든 단면이 일정하고 축대칭으로 가정하여 모델링하였다. 즉, 청과물의 1/4단면을 2차원 상에 모델링하고 중심선을 기준으로 회전(revolution)하여 3차원의 솔리드 모델을 생성하였다.

유한요소해석을 위해서 먼저 해석하고자 하는 영역을 절점으로 연결되어 있는 수개의 요소(element)의 결합체로 이상화(idealized)시키고, 이러한 이상화 과정에 있어 여러 종류의 유한요소(finite element)들이 있지만 청과물에 대한 해석 시에는 특성상 8개의 절점각을 가지는 3차원 고체 요소(8-node brick element)를 이용하였다. 이 요소의 특징은 3차원 공간상에 8개의 절점들이 하나의 요소(element)를 이루며, 또한 이 요소는 각 절점에서 X, Y, Z축 방향의 병진운동을 위한 3개의 자유도를 가지게 된다.

청과물의 요소(element) 생성 과정은 반으로 절단된 청과물의 반쪽면을 모는 종이(graph paper)에 올려놓고 물체의 테두리를 그린 후, 반쪽 테두리의 치수를 IntuitiveFEM(2000)에 기입하여 반쪽면(seed surface)에 대한 2차원 평면요소를 생성하고, 이를 다시 중심 축을 중심으로 회전시켜 3차원 유한요소 모델을 생성하였으며, 분석에 이용되었던 청과물의 모델들을 그림 (2)에 나타내었다. 그림에서는 시료 고정장치를 배에서만 나타내었지만 실제 유한요소해석시에는 모든 청과물에도 배에서와 똑같은 시료 고정장치를 포함시켜 분석하였다.

(2) 해석방법

본 연구에서는 청과물을 축대칭(axisymmetric) 물체로 간주하였으며, 청과물의 형태는 한 개의 변수 모델(one-parameter model)로 묘사하였다. 또한 유한요소해석시 과실을 등방성(isotropic) 탄성체로 가정하였다. 유한요소해석 결과의 신뢰성은 해석 재료의 물성값을 얼마나 실제의 값에 가깝게

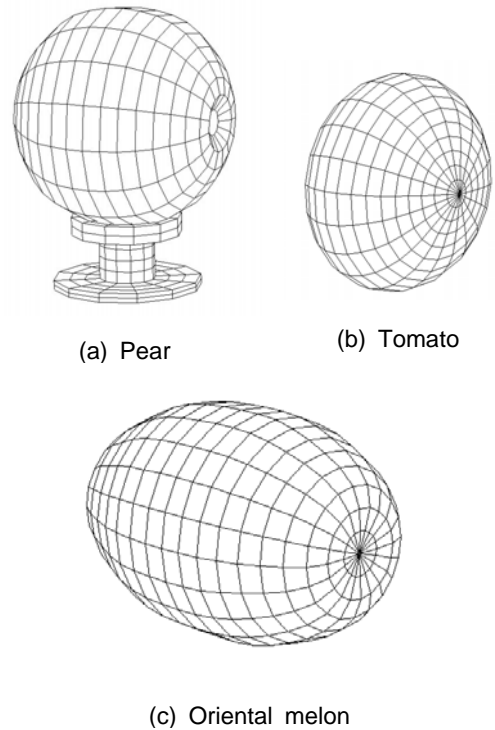


Fig. 2. Three dimensional modeling of the fruit and vegetables for FEM.

입력시키느냐에 따라 좌우된다. 청과물의 경우와 같이 유한요소 구조해석의 문제에서는 재료의 물성값으로 탄성계수와 포외송비가 적용된다. 그러나 청과물과 같이 점탄성 성질이 강한 물체의 탄성계수와 포외송비를 일정한 값으로 적용하는데서 오는 오차를 어느 정도 감수해야할 문제이다.

본 연구에서 적용한 청과물의 물성값은 표 (2)에서 보는 바와 같다. 여기서, 체적, 질량 및 밀도는 실측값이며 탄성계수도 실측된 값으로 ASAE Standards에서 제시하고 있는 평판 압축에 의하여 계측된 응력-변형률 곡선에서 구한 파괴점 시컨트 모듈러스(secant modulus)이었다(Jung, 1999). 포외송비는 배의 경우 문헌(Chappell and Hamann, 1968)에 의한 값이었고 다른 청과물의 경우는 탄

성계수 계산식으로부터 추정된 값이었다.

(3) 경계 및 하중조건

본 연구에서는 초기조건으로 x 방향의 자유도를 모두 구속하였으며, 청과물과 시료고정장치와의 접촉문제는 두 물체간의 마찰계수를 1로 가정해

완전히 접촉하여 그 곳에서의 상대운동은 없는 것으로 하였다. 정현파 스윙 진동실험을 시뮬레이션(simulation)하기 위해서는 일정한 가속도 수준을 유지하기 위한 각 주파수에 따른 입력 진폭(amplitude)이 계산되어야 한다. 유한요소해석에서 동적거동(dynamic behavior)에 대한 입력은 시간

Table 2. Physical properties of the fruit and vegetables for FEM

Fruit and vegetable	Volume (10^{-4} m^3)	Mass (kg)	True density (kg/m^3)	Apparent elastic modulus (kPa)	Poisson's ratio
Pear	5.1444	0.5073	990.16	1532.75	0.234
Tomato	0.9213	0.1359	1067.53	894.22	0.352
Oriental Melon	3.8354	0.4124	1045.99	1921.61	0.285

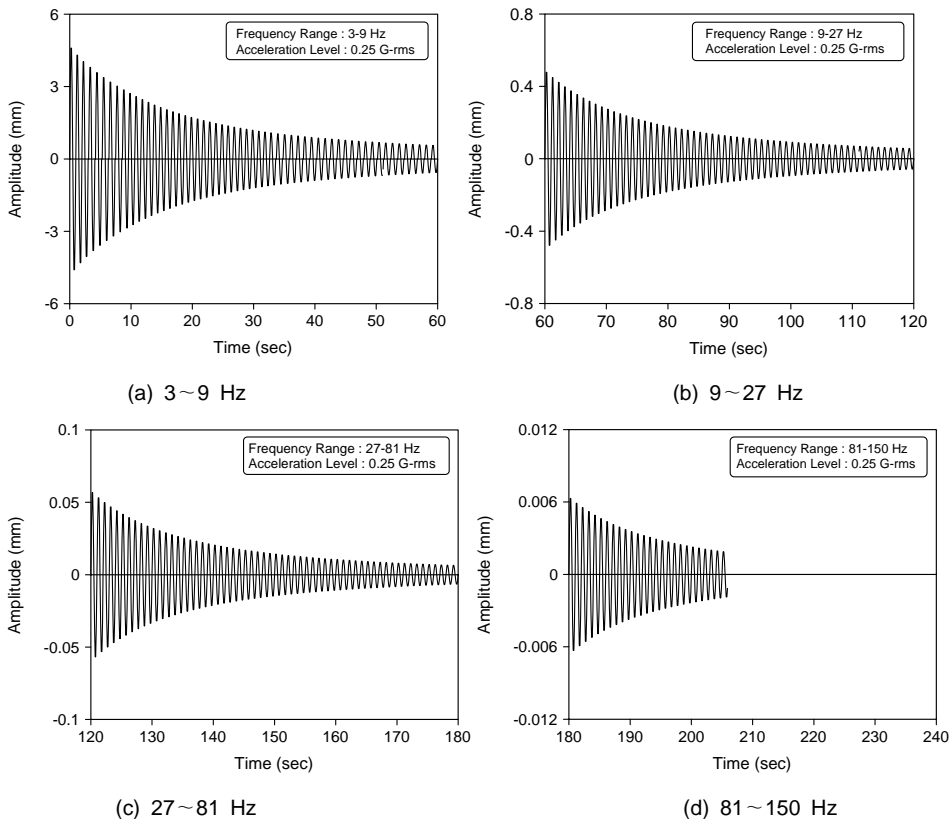


Fig. 3. Input amplitudes in the frequency range from 3 to 150 Hz for finite element analysis of the pear.

간격에 따른 진폭의 크기로 나타낼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 0.25G-rms의 일정한 가속도 진동수준을 유지하며, 시간 간격대 별로 입력 진폭의 크기를 계산하여 유한요소해석에 적용하였다. 그림 (3)은 청과물의 유한요소해석에서 0.25G-rms 가속도 수준을 유지하기 위한 각 진동수 대역별 입력 진폭을 나타낸 것이다.

결과 및 고찰

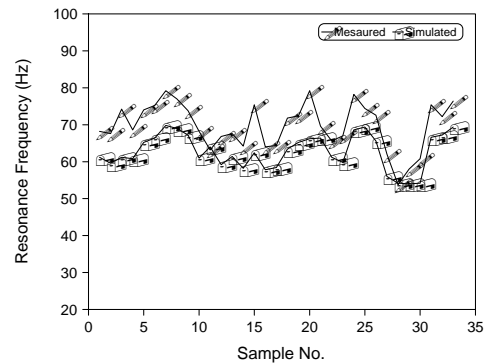
가. 배의 진동실험에 의한 유한요소법의 검증

크기가 다양한 33개의 배 시료에 대한 유한요소 해석을 통해 분석된 배의 공진 진동수와 정점가속도 값과 실측된 값을 그림 (4-a) 및 (4-b)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 공진 진동수의 경우 유한요소법에 의한 값이 실측치보다 평균 7.2 Hz 작았고, 정점 가속도에서는 실측값보다 평균 0.2649G-rms 큰 것으로 분석되었으며, 두 값은 매우 유사한 경향으로 변하고 있음을 알 수 있었다.

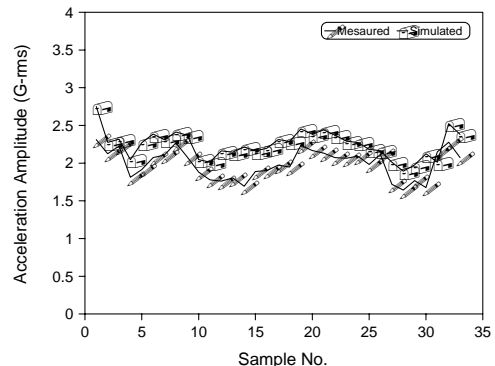
또한, 표 (3)에는 유한요소법으로 분석된 공진 진동수가 실측된 값과 얼마나 잘 일치하는가를 보기 위하여 실측치에 대한 회귀식을 구하고 그 회귀식에 대한 분산분석 결과를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 유한요소법에 의한 시뮬레이션 값과 실측치간에는 유의수준 1%인 고도의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 다른 청과물의 진동특성도 유한요소법에 의한 시뮬레이션으로 충분히 분석할 수 있을 것으로 판단되었다.

그림 (5)에는 33개의 시료중 밀도와 탄성계수를 비교적 크게 달리하는 2종류의 시료에 대한 유한요소 해석의 결과를 그래프로 나타내었다. 여기서, 진동가속도는 0.25G-rms로 일정하므로 입력주파수에 따라 변화하는 진폭이 가해질 때의 반응이다. 그림

(5)에서 알 수 있듯이, 진동수 범위 3~150Hz 사이에 뚜렷한 1개의 공진점이 존재하였고, 약 100~120Hz에서 약간 높은 진폭의 진동수가 존재하는 듯하였으나 무시할 수 있을 것으로 판단되었다.



(a) Resonance Frequency



(b) Acceleration Amplitude

Fig. 4. Vibration response characteristics of the pear measured and simulated.

Table 3. Analysis of variance for the regression model of resonance frequency in 0.25 G-rms

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob(F)
Regression	1	988.41	988.41	113.46**	0.00
Error	31	270.06	8.71		
Total	32	1258.47			

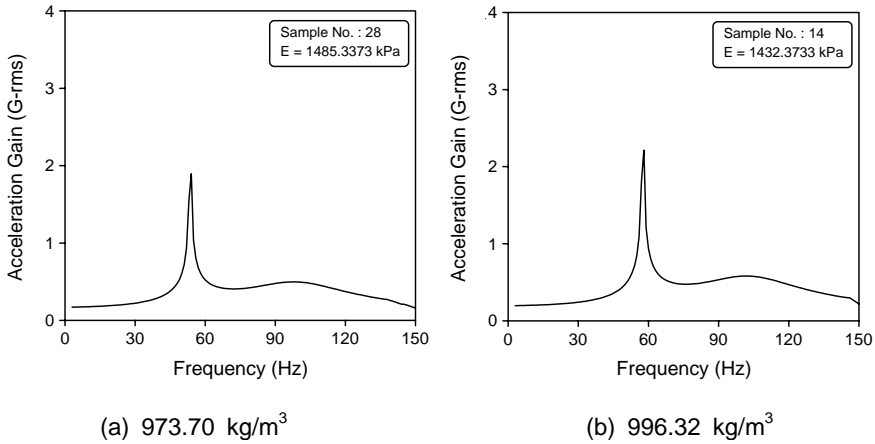


Fig. 5. Vibration response characteristics for the pear by using finite element method.

나. 유한요소해석에 의한 토마토 및 참외의 진동 특성

유한요소해석에 의한 사과, 토마토 및 참외의 공진 진동수와 정점 가속도의 분석결과를 앞에서 분석하였던 배와 같이 표 (4)에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 배와 참외의 공진 진동수는 약 63Hz로 매우 유사하였으며, 토마토는 약 40Hz로 가장 낮은 값을 보였다. 또한 정점 가속도의 경우도 크기의 순위는 공진 진동수와 유사하였으며, 그 범위는 1.38~2.26G-rms이었다. 이와 같이 청과

Table 4. Resonance frequency and peak acceleration of the fruit and vegetables by FEM

Fruit and vegetable	Resonant Frequency (Hz)	Peak Acceleration (G-rms)
Pear	62.50	2.21
Tomato	39.45	1.38
Oriental Melon	62.73	1.98

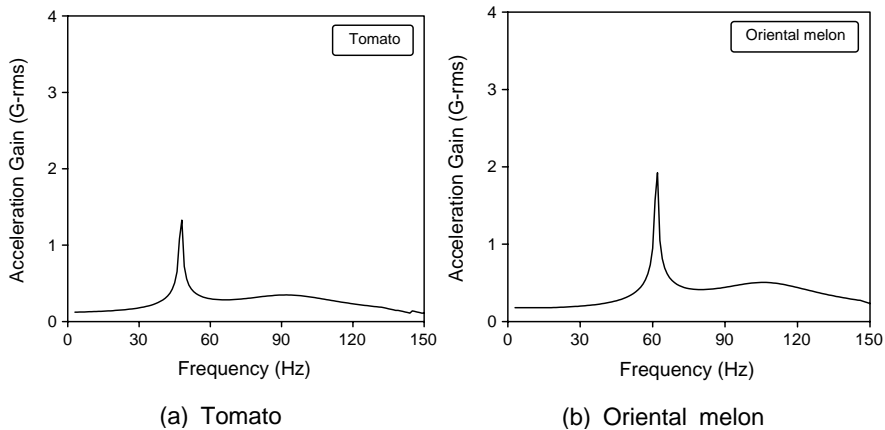


Fig. 6. Vibration response characteristics for the fruit and vegetables by using finite element method.

물에 따라 진동 특성치들이 차이가 있는 것은 질량, 체적, 탄성계수 및 포와송비의 차이에서 오는 것으로 판단되었다.

그림 (6)에는 토마토 및 참외의 진동응답특성을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 청과물마다 하나의 공진 진동수가 뚜렷하게 나타나고 그 이후에 약간 높은 진폭의 진동수가 형성됨을 알 수 있었으며 이러한 경향은 배에서도 나타났던 현상으로 역시 무시할 수 있을 것으로 판단되었다.

결 론

본 연구에서는 진동실험을 통하여 얻어진 배의 진동특성의 자료를 가지고 유한요소해석의 신뢰성을 검증하여 토마토 및 참외의 공시 청과물에 대한 진동특성에 유한요소법을 적용하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

1. 유한요소법으로 청과물의 진동특성을 분석하기 위하여 배의 진동실험을 통하여 그 방법을 검증한 결과 유한요소법과 실험치간에는 통계적인 유의차가 없는 것으로 분석되었다.

2. 유한요소법을 이용한 배, 토마토 및 참외의 공진 주파수는 각각 62.50, 39.45 및 62.73Hz이었으며, 정점 가속도는 각각 2.21, 1.38 및 1.98G-rms이었다.

3. 유한요소법에 의한 청과물의 공진 주파수는 뚜렷하게 나타났으며, 그 이후에 약간 높은 진폭의 진동수가 형성되었으나 무시할 수 있을 것으로 판단되었다.

인용문헌

1. 정현모, 1999. 청과물의 기계적 특성에 관한 연구. 충남대학교 석사학위논문.
2. Chappell, T. W. and D. D. Hamann, 1968. Poisson's ratio and Young's modulus for apple flesh under compressive loading. Transactions of the ASAE 11(3):608~610, 612.
3. Chen, H. and J. G. De Baerdemaeker, 1993. Modal analysis of the dynamic behavior of pineapples and its relation to fruit firmness. Transactions of the ASAE 36(5):1439~1444.
4. Chen, H., J. G. De Baerdemaeker and V. Bellon, 1996. Finite element study of the melon for nondestructive sensing of firmness. Transactions of the ASAE 39(3):1057~1065.
5. Dewulf, J. Waldeck, G. Burgess and S. P. Singh, 1999. Finite element modeling of transient responses of apples to impulse excitation. Transactions of the ASAE 40(5):1395~1406.