

적정 포장설계를 위한 과실의 유통 중 진동의 계측 및 분석

김기석 정현모 김기복 김만수

Vibration Measurement and Analysis During Fruits Distribution for Optimum Packaging Design

G. S. Kim H. M. Jung K. B. Kim M. S. Kim

Abstract

The freight vehicle is mostly used to transport the fruit. Shock and impact generated by the freight vehicle may give serious damage to fruits hence to reduce the fruits damage, the optimum packaging design during transportation by vehicle is required. In order to design the packaging system for fruit transportation optimally, the comprehension of characteristic for vibration and shock acting on vehicles under various road conditions and loading methods is required. This research was performed to analyze the shock characteristics, acceleration level and power spectral density (PSD) of the fruit transportation vehicles under several travel roads and positions. The vibration signal was measured and analyzed at the transportation vehicle operating on the road of three different surface conditions. The maximum acceleration was measured at the rear-end of the vehicle, and the acceleration in the direction of up-and-down (z-axis) was much greater than those in the directions of back-and-forth (x-axis) or right-and-left (y-axis). The peak acceleration in the direction of up-and-down (z-axis) at the vehicle driving on the expressway, the local road paved with concrete, and unpaved local road were 5.3621 G, 8.232 G, and 14.162 G respectively. PSD at 2.44 Hz showed maximum value at all road conditions. The maximum values of PSD on the expressway, a local road paved with concrete, and unpaved local road were 0.0075222 G²/Hz, 0.058655 G²/Hz, and 0.24598 G²/Hz respectively. The value of PSD decreased with an increase of the vibration frequency of the transportation vehicle. In most cases, the vibration frequency was below 20 Hz during transportation.

Keywords : Acceleration, Power spectral density (PSD), Random vibration, Shock, Transportation

1. 서론

과실류 및 청과물은 수확 후 소비자에게 전달되기 전까지 저장, 선별 및 수송의 과정 중에 유통환경의 변화에 따라 손상이 발생할 수 있다. 특히 수송과정 중 발생할 수 있는 다양한 진동 및 충격현상은 과실 및 과실포장화물이 갖는 자체의 공진주파수 구간에서 가장 큰 손상을 유발하므로 수송 과정

에서 제품의 손상을 최소화 시키는 방안이 강구되어야 한다.

일반적으로 수확된 농산물의 유통과정 중에 발생하는 기계적인 손상으로 인한 손실률은 약 30~40%에 이르는 것으로 알려져 있으며 이중 상당부분을 차지하고 있는 수확 후 수송 과정 중에 발생하는 기계적인 영향으로 인한 손상을 줄이는 것은 더욱 중요한 부분으로 인식되고 있다. 과실의 수송방법으로는 화물차량을 이용하는 것이 가장 일반적이며 화물차량

This study was conducted by the research fund supported by Ministry of Agriculture and Forest. The article was submitted for publication in September 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in October 2007. The authors are Ghi Seok Kim, Researcher, KSAM member, Man Soo Kim, Professor, KSAM member, Division of Bioresources Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea, Hyun Mo Jung, Professor, KSAM member, Dept. of Packaging Management, Kyongbuk College of Science, Waeguan, Korea, Ki Bok Kim, Senior Researcher, KSAM member, Division of Metrology for Quality Life, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea. Corresponding author: M. S. Kim, Professor, Division of Bioresources Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; Fax: +82-42-823-6246; E-mail: <mskim@cnu.ac.kr>.

에 의한 과실의 수송 중 손상을 유발하는 요인으로서는 온도, 습도와 같은 환경적인 요인과 차량과 도로상에서 유입되는 진동, 충격과 같은 물리적인 요인을 들 수 있다. 이들 요인들 중에서 수송용 화물차량에서 계측되는 진동 및 충격값들은 과실의 손상과 직접적으로 연관되어 있으며 적정 포장설계를 통한 제품의 손상을 줄이기 위해서는 수송경로, 도로 상태와 적재상태에 따른 차량에 작용하는 진동 및 충격량 및 그 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

Hinsch 등(1993)은 스프링 현가장치로 되어있는 대형화물차를 이용하여 체리, 복숭아, 배를 수송하는 과정 중에 발생하는 진동신호를 계측하여 PSD를 분석하였다. PSD는 3.5 Hz구간에서 가장 크게 나타났으며 9 Hz, 18 Hz, 25 Hz구간에서도 높게 나타났다고 하였다. PSD는 대형화물차 바닥의 뒷부분에서 가장 크게 나타났고 수직방향의 가속도에 비해 수평방향의 가속도는 작게 나타났다고 보고하였다. Vursavus와 özgülven(2004)는 일반 포장도로에서 트럭을 시속 50 km로 주행시키면서 진동을 계측한 결과 트럭바닥에서의 주파수 분포는 5~10 Hz구간이 전체의 35%, 10~15 Hz구간이 약 29%를 차지하였으며 수직가속도분포는 0.25~0.50 G의 구간이 전체의 약 41%, 0.5~0.75 G 구간이 약 26%로 나타났었다고 하였다. Singh 등(2006)은 수송차량의 현가장치에 따른 PSD를 측정하고 실험 주행하였던 도로 전체 평균은 스프링 현가장치에서 0.89 G_{rms} , 공기식 현가장치에서 0.5 G_{rms} 로 나타났으며 이를 근거로 하여 랜덤 진동실험방법을 제시하였다. 이상의 연구에서 분석한 바와 같이 수송 중 과실은 다양한 형태의 진동과 충격을 받게 되며 이러한 진동과 충격을 감소시키기 위해서는 적절한 포장재가 요구된다고 하겠다.

따라서 본 연구에서는 과실의 적정 포장설계 시 중요한 자료가 되는 수송차량의 진동특성을 분석하고 적정 포장설계를 위한 실험 자료를 구축하기 위하여 실제 과실의 수송차량에

대해 도로 상태와 트럭 내 화물적재부위에 따른 진동신호를 계측하여 과실의 수송 중 발생할 수 있는 진동의 유형과 그 크기를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료 및 장치

주행 중 차량의 진동신호를 계측하기 위한 실험장치의 개략도는 그림 1과 같고, 실제 실험에 사용된 장치를 그림 2에 나타내었다. 표 1과 표 2는 각각 실험에 사용한 가속도계(8774A50, kistler, USA)와 데이터 수집 및 저장장치(e-DAQ, SoMat, USA)의 제원을 나타내었다.

실험에 사용된 과실 수송차량은 그림 3에서 보는바와 같이 최대 적재량이 1톤인 트럭으로 화물 적재공간의 앞, 중간 및 뒷부분에 3축의 가속도계를 부착하여 주행 중에 발생하는 진동을 계측하였으며, 실험에 사용된 차량은 판-스프링(Leaf-spring)방식의 후륜 현가장치를 장착하였고 트럭의 제원은 표 3에서와 같다.

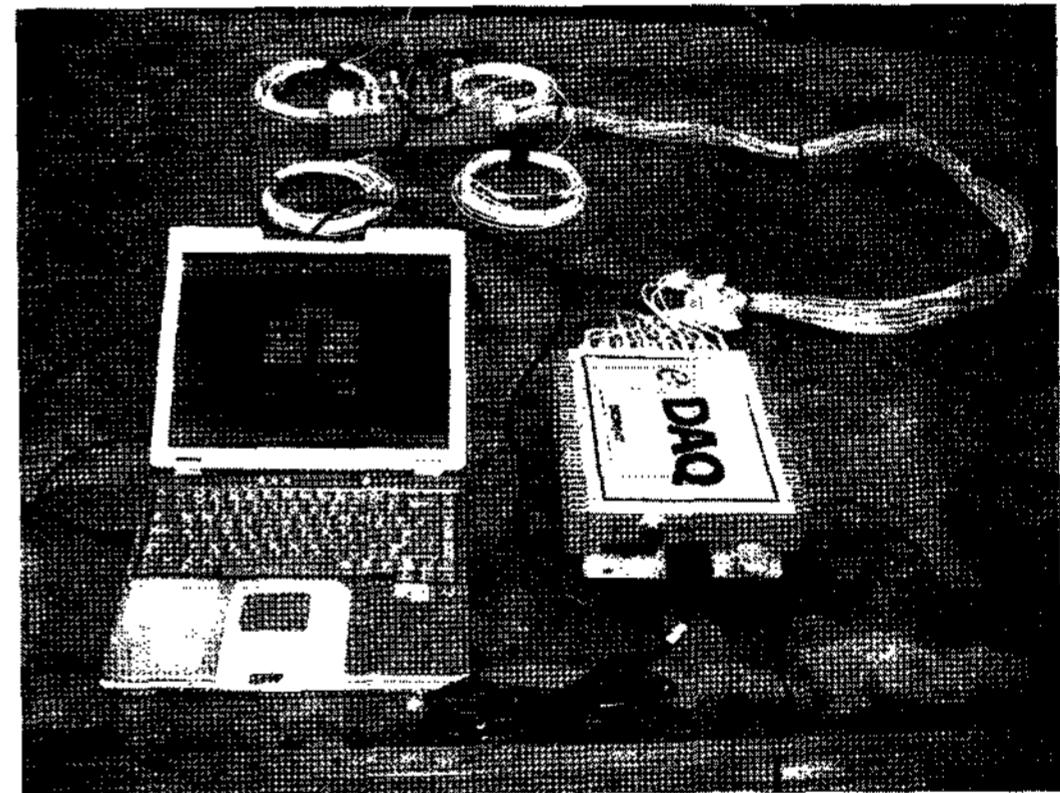


Fig. 2 Vibration measurement and recording apparatus.

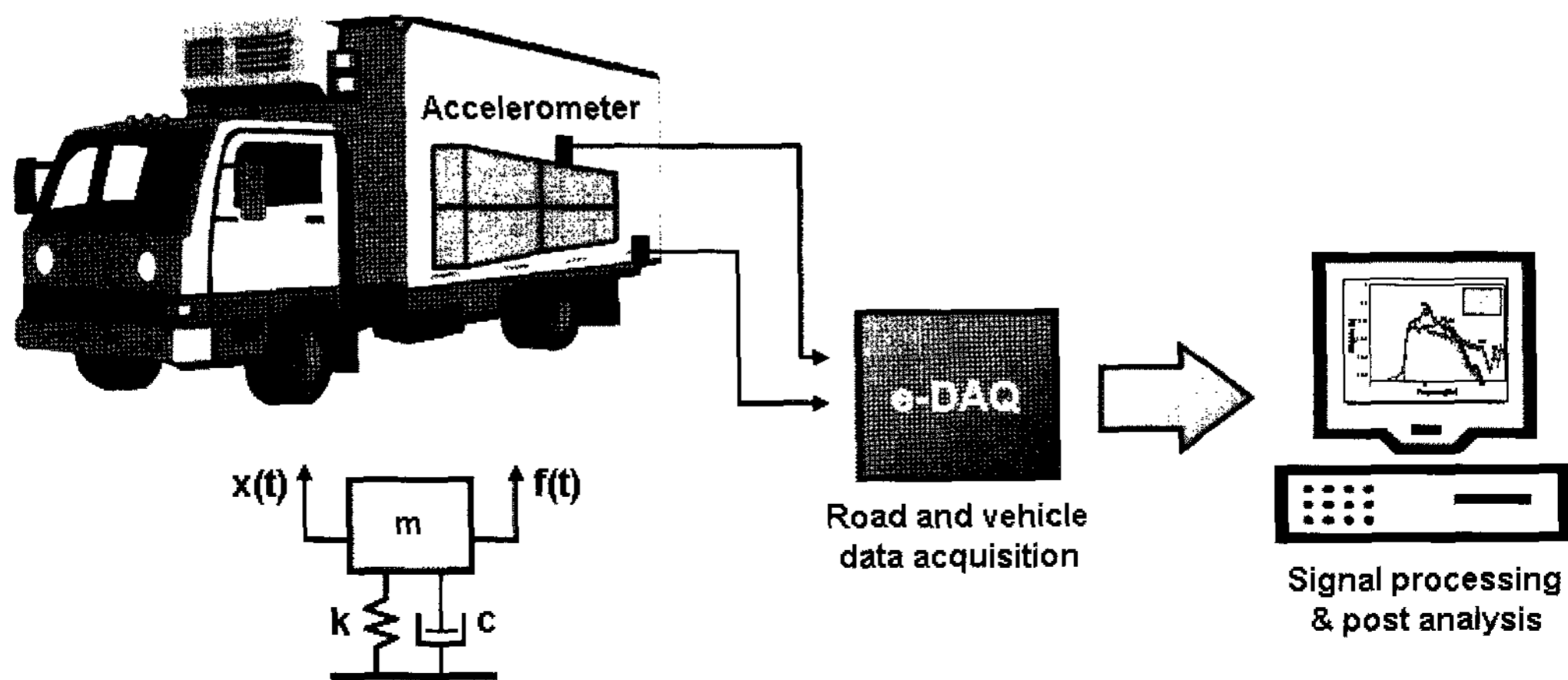


Fig. 1 Schematic diagram of the vibration measurement and analysis.

Table 1 Specifications of the accelerometer

Item	Specifications
Range	~1,000 G
Frequency range	5~4,000 Hz
Sensitivity	-50.0 pC/g
Non-linearity	±1% FSO
Shock	5,000 G
Mass	44.5 gf
Mounting	stud/wax

Table 2 Specifications of the e-DAQ apparatus

Item	Specifications
Analog input	16 ch
Input operating	10~60 volt
Operating temp.	-20~65°C
Digital I/O	10 ch
Sampling rate	~1,000 ch
Frequency measurement	~50 kHz
Resolution	20 ns

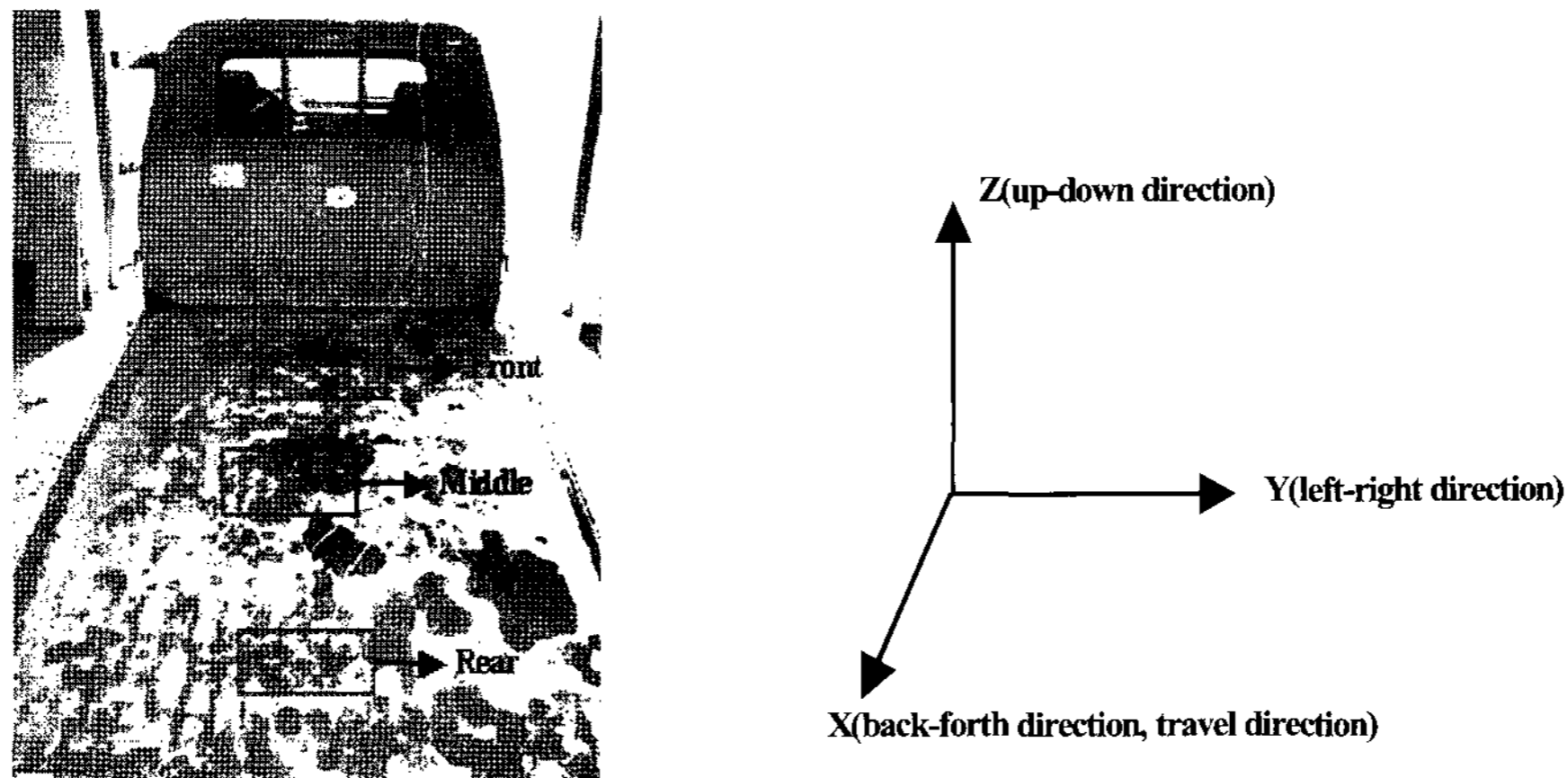


Fig. 3 Position of accelerometers on the truck bed and their measuring directions.

Table 3 Specifications of the truck used in vibration measurement

Truck dimension (mm)			Truck bed (mm)			Engine			Max. capacity (kgf)
Length	Width	Height	Length	Width	Height	Displacement (CC)	Max. power (ps)	Max. torque (kgf·m)	
4,795	1,740	1,965	2,785	1,630	355	2,497	123	25	1,000

나. 실험방법

주행 중인 차량에서 발생하는 진동의 계측은 아스팔트 고속도로, 농가에서 흔히 볼 수 있는 콘크리트 포장도로와 비포장도로인 흙길의 3가지 도로를 대상으로 세 번씩 반복하여 수행되었다. 한편 고속도로 구간은 경부고속도로의 경우 경북 왜관과 대전, 서울과 대전의 2구간으로 선정하였으며 중부고속도로의 경우 대전과 서울, 호남고속도로의 경우 대전과

비룡구간으로 각각 설정하였다. 계측작업은 가속도 값의 감소와 노이즈 혼입을 방지하기 위한 충분한 주파수 응답을 고려하여 주행이 시작되는 순간부터 정지하는 순간의 모든 신호에 대해 500 Hz의 샘플링율(sampling rate)로 실시간 계측하였으며 각각의 주행도로에 대한 도로상태, 주행거리, 주행 속도 및 주행시간은 표 4에서와 같다.

Table 4 Travel distance, speed, and time on the tested roads, and its conditions

Type	Condition	Route	Distance (km)	Speed (km/hr)	Travel time (s)
Expressway I	Paved with asphalt	Kyungbu expressway (Kyungbuk Waeguan~Daejeon)	130	90	6000
Expressway II	Paved with asphalt	Kyungbu expressway (Daejeon~Seoul)	155	90	8400
Expressway III	Paved with asphalt	Jungbu expressway(Daejeon~Seoul)	160	90	7800
Expressway IV	Paved with asphalt	Honam Expressway (Daejeon Yusung IC~Daejeon Biryong IC)	40	80	1800
Local Road I	Paved with concrete	Nonsan local road	10	40	900
Local Road II	Unpaved	Kangkyung local road	5	20	900

3. 결과 및 고찰

가. 수송 차량의 적재함 위치별 진동특성

가속도계는 주행 차량 적재함의 앞, 중간 및 뒷부분에 설치하여 적재함의 위치별 진동신호를 측정하였다. 적재함의 앞, 중간 및 뒷부분에서 측정된 상하방향의 진동신호 가속도의 최대, 최소 및 G_{rms} 는 표 5에서와 같다.

표 5에서와 같이 차량 적재함의 앞, 중간 및 뒷부분에 부착한 가속도계에서 측정된 가속도는 고속도로의 경우 가속도계의 부착위치에 상관없이 유사한 값을 보이고 있으나 콘크리트 도로와 비포장도로의 경우에는 적재함의 앞, 중간에 비해 뒷부분에서 측정된 가속도가 상대적으로 매우 큰 값을 나타내었으며, 이는 Hinsch 등(1993)의 연구결과와도 유사한 것이었다.

따라서 농산물 및 과일류의 모의 수송환경 진동실험에 이용되는 PSD 프로파일은 차량 적재함의 뒷부분에서 측정된 가속도신호를 기준으로 하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

나. 주행도로별 가속도 수준과 PSD

각각의 실험 도로에 대해 차량 적재함 뒷부분에서 측정된

3축 방향의 가속도에 대한 최대값, 최소값 및 G_{rms} 값은 표 6에 나타내었다. 표 6에서 보는 바와 같이 차량에서 측정된 진동신호는 진동방향에 따라 큰 차이를 보였다. 차량이 진행되는 전후방향(x축)과 좌우방향(y축)에서의 가속도는 서로 유사한 값을 보이고 있으나 상하방향(z축)에서 측정된 가속도는 고속도로의 경우 최대 5.3621 G, 시멘트 도로의 경우 최대 8.2321 G, 비포장 흙길의 경우는 14.1621 G로서 전후, 좌우의 가속도보다 최소 4.8배에서 최대 8.5배의 차이를 나타내었다.

주행 중 측정된 진동신호를 분석하기 위해서는 잡음이 제거된 PSD(Power Spectral Density)가 널리 이용된다. 일정한 주파수 구간에서 PSD는 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$PSD = (1/BW) \sum (RMSg_i^2) / N \quad (1)$$

여기서, PSD: Power Spectral Density(G^2/Hz)

BW: 신호의 대역폭(Hz)

$RMSg_i^2$: 임의의 순간의 가속도의 실효값(G^2)

N: 측정된 데이터의 수

본 연구에서는 동일한 주행도로와 주행속도로써 3회 반복, 측정된 진동신호에 대해 식 (1)의 PSD를 계산하여 진동의 작용방향에 대한 측정 도로별 PSD 프로파일을 작성하였으며

Table 5 The maximum, minimum, and G_{rms} at various road types and measuring positions

Acceleration	Expressway I			Expressway II			Expressway III		
	Front	Middle	Rear	Front	Middle	Rear	Front	Middle	Rear
Max. (G)	3.8061	4.0766	4.6219	2.6935	4.8008	3.3605	3.0134	4.9685	4.7589
Min. (G)	-3.7186	-5.7892	-4.2165	-2.9547	-4.6717	-3.5596	-2.8635	-4.4529	-3.8747
rms (G)	0.2956	0.3208	0.2871	0.2610	0.2731	0.2293	0.2597	0.2947	0.2738
Acceleration	Expressway IV			Local road I (concrete)			Local road II (unpaved)		
	Front	Middle	Rear	Front	Middle	Rear	Front	Middle	Rear
Max. (G)	4.2286	5.5632	5.3621	3.5963	5.4451	8.2321	6.0786	8.3731	14.1621
Min. (G)	-5.0371	-4.9987	-3.9923	-3.2462	-4.9925	-6.6098	-8.7122	-6.2576	-7.9435
rms (G)	0.3596	0.3810	0.3346	0.3356	0.4427	0.4666	0.7148	0.9922	1.0568

Table 6 The maximum, minimum, and G_{rms} according to the vibration directions

Acceleration	Expressway I			Expressway II			Expressway III		
	X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis
Max. (G)	0.8847	2.4277	4.6219	0.6901	2.3560	3.3605	1.2299	2.3548	4.7589
Min. (G)	-2.5951	-3.7394	-4.2165	-1.0038	-1.9940	-3.5596	-2.5995	-3.8042	-3.8747
rms (G)	0.0932	0.1660	0.2871	0.0673	0.1045	0.2293	0.0794	0.1301	0.2738
Acceleration	Expressway IV			Local road I			Local road II		
	X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis
Max. (G)	1.1099	0.7299	5.3621	0.8046	0.7455	8.2321	1.6708	2.9911	14.1621
Min. (G)	-2.9467	-2.6496	-3.9923	-3.0558	-2.7214	-6.6098	-2.9281	-3.7927	-7.9435
rms (G)	0.1001	0.0967	0.3346	0.3893	0.3493	0.5614	0.3993	0.3681	1.0537

작성된 PSD 프로파일은 그림 4와 그림 5에서와 같다. 그림 4는 고속도로 I, II, III에서 계측한 결과이며 그림 5는 고속도로 IV와 콘크리트 포장 및 흙길에서 계측한 결과이다. 그림

4와 그림 5에서의 PSD의 최대값과 이때의 주파수 대역은 각각 표 7에 나타내었다.

차량 적재함의 뒷부분에 설치한 3축 가속도계를 이용하여

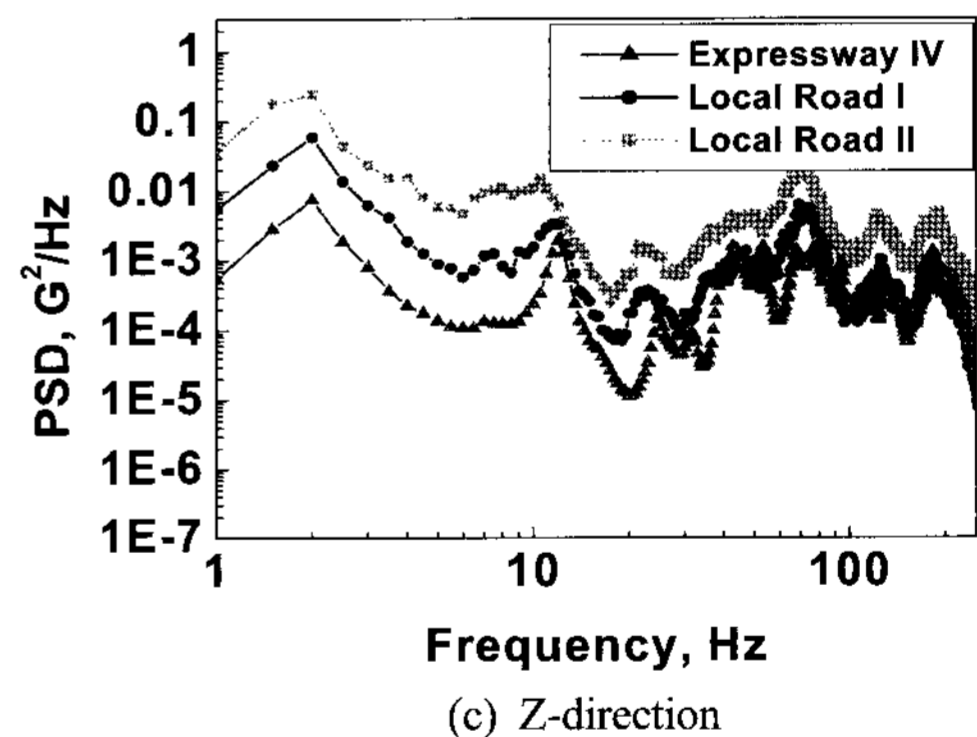
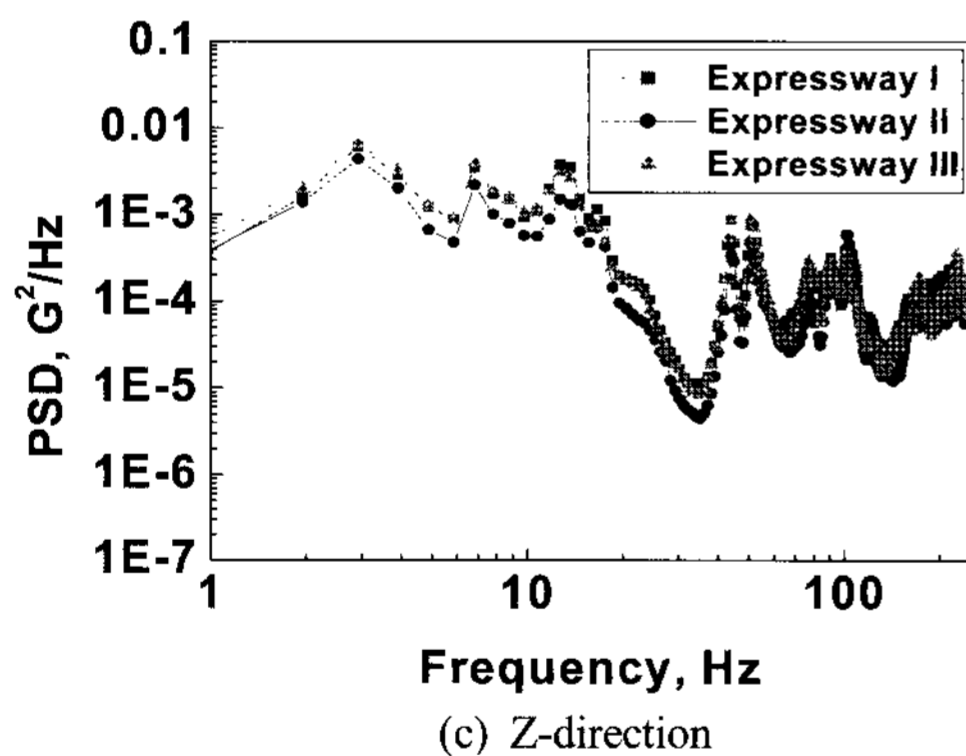
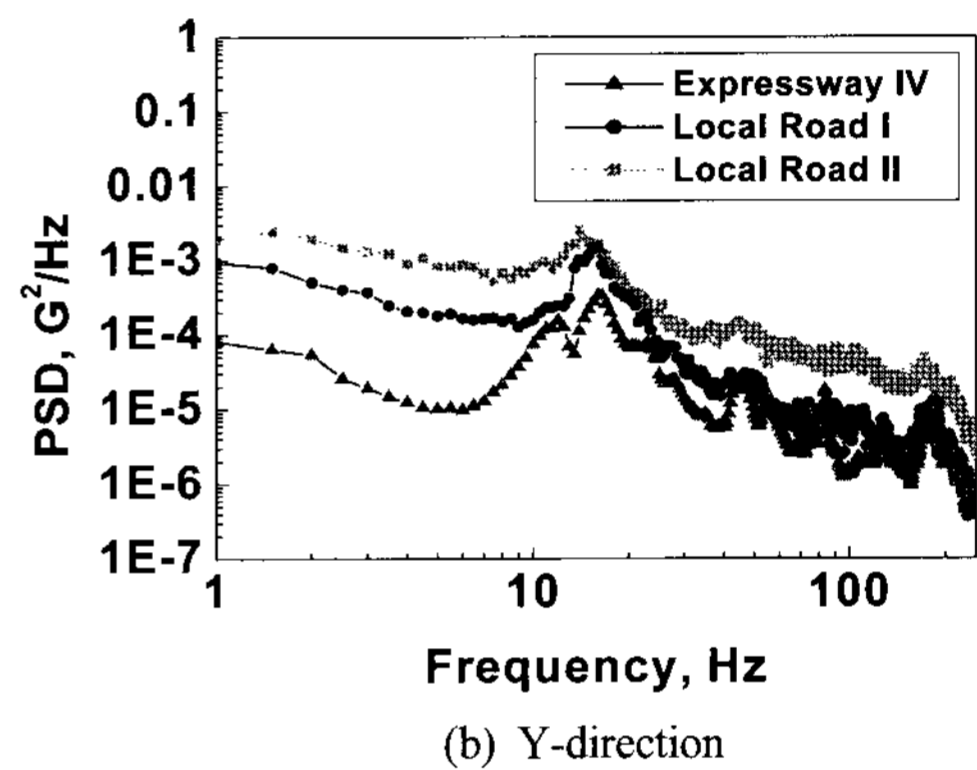
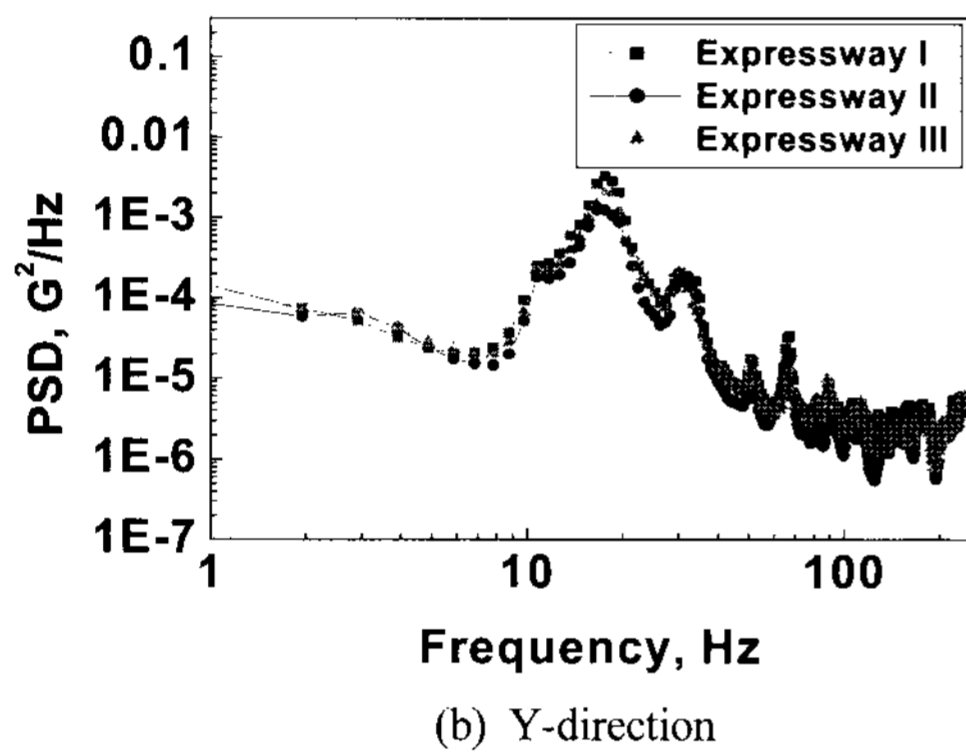
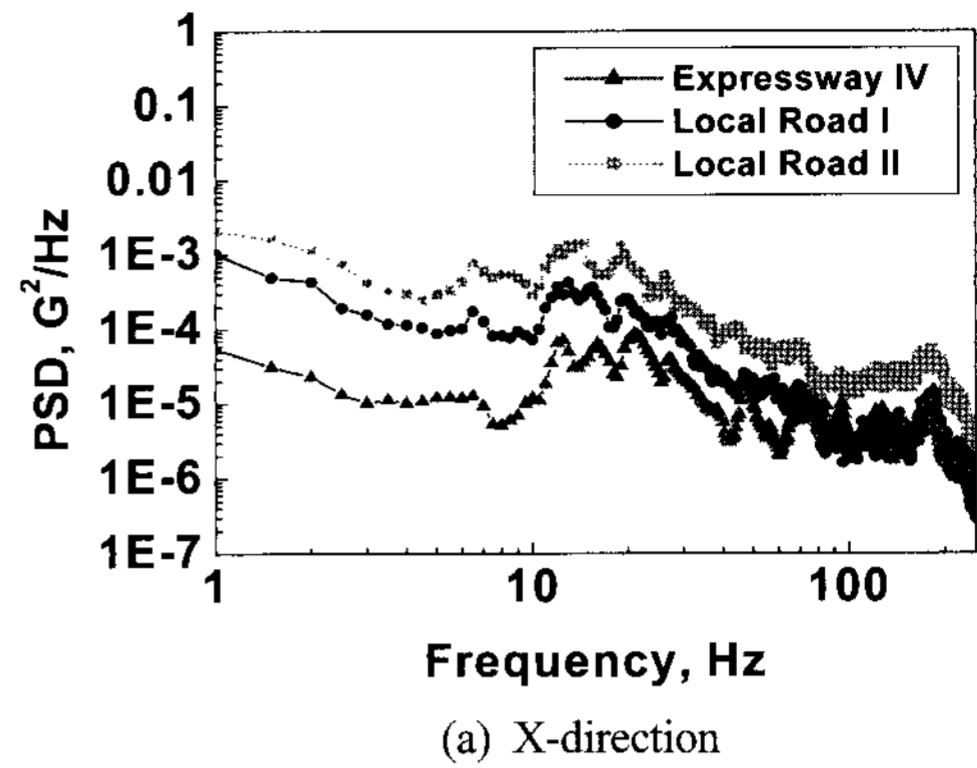
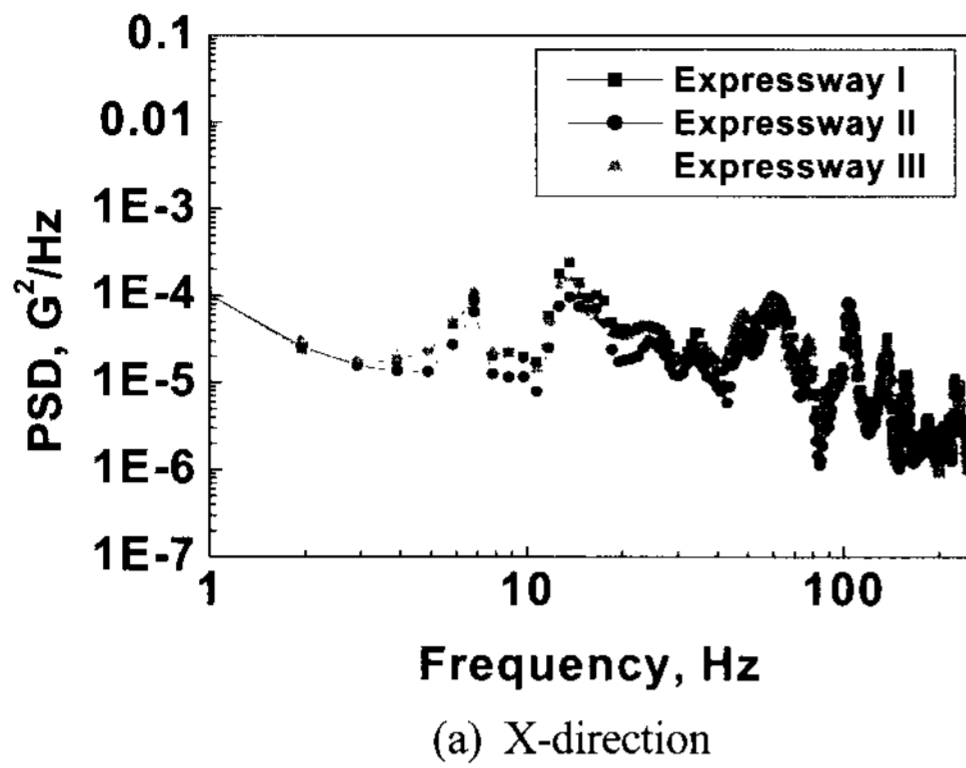


Fig. 4 PSD profiles of the different expressways.

Fig. 5 PSD profiles of the different roads.

Table 7 PSD values at different measuring positions on the truck

Acceleration	Expressway I			Expressway II			Expressway III		
	Back-forth	Left-right	Up-down	Back-forth	Left-right	Up-down	Back-forth	Left-right	Up-down
PSD(G ² /Hz)	0.0002393	0.003266	0.006077	0.00009689	0.001254	0.004347	0.0001545	0.002004	0.006496
Freq.(Hz)	13.670	17.578	2.930	13.670	16.602	2.930	13.670	17.578	2.930
Acceleration	Expressway IV			Local road I			Local road II		
	Back-forth	Left-right	Up-down	Back-forth	Left-right	Up-down	Back-forth	Left-right	Up-down
PSD(G ² /Hz)	0.00008814	0.0003429	0.007522	0.0004196	0.001487	0.05866	0.001392	0.002489	0.2459
Freq.(Hz)	20.996	16.113	2.441	13.184	16.113	2.441	19.043	14.16	2.441

Table 8 Range of vibrational frequency and PSD on the various testing roads

Expressway I		Expressway II		Expressway III	
Frequency (Hz)	PSD (G^2/Hz)	Frequency (Hz)	PSD (G^2/Hz)	Frequency (Hz)	PSD (G^2/Hz)
1~22	0.0065	1~22	0.0045	1~22	0.00065
41~56	0.000903	41~56	0.000903	41~56	0.000903
73~110	0.000323	73~110	0.000588	73~110	0.000352
153~237	0.000239	153~237	0.00024	153~237	0.000357
Expressway IV		Local road I (Concrete)		Local road II (Unpaved)	
Frequency (Hz)	PSD (G^2/Hz)	Frequency (Hz)	PSD (G^2/Hz)	Frequency (Hz)	PSD (G^2/Hz)
1~13	0.00752	1~13	0.0587	1~13	0.246
39~86	0.00166	39~86	0.0063	39~86	0.0232
110~198	0.00132	110~198	0.000837	110~198	0.00442

가속도를 계측한 결과, 상하방향(z축)으로 가해지는 진동에서 가장 큰 PSD값이 나타났으며, 최대 PSD에서의 주파수 대역은 고속도로, 콘크리트 도로 및 비포장 도로 모두에서 동일한 주파수 대역인 2.44 Hz에서 나타났다. 또한 0.1~20 Hz의 주파수구간에서 z축 방향으로의 진동에 대한 PSD가 크게 형성되는 것으로 나타났다. 주행도로별 진동특성을 살펴보면, 0.1~20 Hz의 주파수 구간 중 비포장 흙길에서 계측된 가속도의 최대값은 14.162 G, PSD는 0.24598 G^2/Hz 이었으며, 콘크리트 도로에서 가속도의 최대값은 8.232 G, PSD는 0.058655 G^2/Hz 이었고, 고속도로의 경우 가속도의 최대값은 5.3621 G, PSD는 0.007522 G^2/Hz 인 것으로 분석되어 비포장 흙길에서 계측된 PSD가 고속도로와 콘크리트 포장도로에서 계측된 PSD보다 훨씬 더 크게 나타났다. 또한 모든 수송 도로에서 가속도의 최대값은 20 Hz이하의 주파수대역에서 나타나므로 유통 중 과실의 손상을 줄이기 위해서는 과실의 공진주파수 대역이 20 Hz이하에서 발생되지 않도록 완충 포장해야 할 것이다.

계측된 진동신호로부터 생성된 PSD 프로파일을 볼 때, 최대 PSD는 z방향의 경우 주로 2~5 Hz 구간의 주파수 대역에서 발생되고 주파수가 증가할수록 PSD는 감소하며 이는 주행차량의 속도, 도로의 상태 및 트럭의 종류에 따라 PSD의 분포가 변한다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 이미 외국의 연구결과들(Hinsch 등, 1993; Jarimopas와 Singh, 2005)들에서 잘 알려져 있는 사실이다. 또한 주행도로별 z축에 대해 PSD가 비교적 높았던 주파수 대역 및 그때의 PSD를 표 8에 나타내었다. 이 주파수 대역은 유통 중에 많이 발생하는 진동 주파수 범위이므로 포장과실의 공진주파수 대역이 유통 중 이 주파수 범위에서 발생하지 않도록 완충포장을 해야 한다.

4. 결론

본 연구는 수송 중인 과실에서 발생하는 손상을 방지하고 과실류의 적정 포장설계에 중요한 자료가 될 수 있는 과실 수송 차량에서 발생하는 진동을 계측, 분석하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 진동계측 시스템을 구축하고 고속도로, 콘크리트 포장도로, 비포장도로에서의 진동을 각각 계측하여 가속도 특성을 분석하였으며 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 과실 수송차량 적재함의 앞, 중간 및 뒷부분에 가속도계를 설치하여 고속도로, 콘크리트 포장도로 및 비포장도로에서의 진동신호를 계측한 결과 고속도로에서는 가속도계의 부착위치에 따라 진폭의 차이가 미미하였으나 콘크리트 포장도로와 비포장도로에서는 가속도계의 부착위치에 따라 계측되는 진폭의 차이가 크게 나타났으며, 수송차량의 뒷부분에서 진동 가속도가 가장 크게 계측되었다.
- (2) 진동 방향에 따른 진동특성을 분석하기 위해 실험차량 적재함의 뒷부분에 3축 가속도계를 부착하여 진동을 계측한 결과 상하방향(z축)의 진동이 전후(x축), 좌우(y축)에 비해 훨씬 큰 값을 갖는 것으로 나타났으며 도로에 따라서는 비포장도로에서 계측된 값이 가장 크고 콘크리트 포장도로, 아스팔트 고속도로의 순서로 나타났다.
- (3) 주행차량의 상하방향(z축)으로 입력되는 진동의 정점가속도는 고속도로의 경우 5.3621 G, 콘크리트 포장도로에서는 8.232 G로 나타났으며 비포장도로에서는 14.162 G로 나타났다. 고속도로, 콘크리트 포장도로, 비포장도로에서의 PSD를 분석한 결과 2.44 Hz의 동일한 주파수 대역에서 모두 최대값을 가지며 고속도로의 경우 최

대 PSD는 $0.0075222 \text{ G}^2/\text{Hz}$, 콘크리트 포장도로에서는 $0.058655 \text{ G}^2/\text{Hz}$ 이었고 비포장도로에서는 $0.24598 \text{ G}^2/\text{Hz}$ 로 각각 분석되었다.

- (4) 모든 실험도로에서 PSD가 크게 나타나는 주파수 대역은 1~20 Hz이었고 주파수가 높아질수록 PSD는 감소하였으며 도로주행에서 발생하는 진동 주파수는 대부분 20 Hz 이하의 저주파수 대역에서 나타났다.

참고문헌

1. Chesson, J. H. and M. O'Brien. 1971. Analysis of mechanical vibration of fruit during transportation. *Trans. of the ASAE* 14(2):222-224.
2. Hinsch, R. T., D. C. Slaughter, W. L. Craig and J. F. Thompson. 1993. Vibration of fresh fruits and vegetables during refrigerated truck transport. *Transactions of ASAE* 36(4):1039-1042.
3. Jarimopas, B., S. P. Singh and W. Saengnil. 2005. Measurement and analysis of truck transport vibration levels and damage to packaged tangerines during transit. *Packaging Technology and Science* 18:179-188.
4. Kubilay VURSAVUS, Faruk özgüven. 2004. Determination the effects of vibration parameters and packaging method on mechanical damage in golden delicious apples. *Turk Journal of Agriculture* 28:311-320.
5. Singh, S. P. and J. Marcondes. 1992. Vibration levels in commercial truck shipments as a function of suspension and payload. *Journal of Testing and Evaluation* 20(6):466-469.
6. Singh, S. P., J. R. Antle and G. Burgess. 1992. Comparison between lateral, longitudinal, and vertical vibration levels in commercial truck shipments. *Packaging Technology and Science* 5(2):71-75.
7. Slaughter, D. C., R. T. Hinsch and J. F. Thompson. 1993. Assessment of vibration injury to Bartlett pears. *Transactions of ASAE* 36(14):1043-1047.