

## 랜덤 진동에 의한 포장화물 및 포장된 사과와 사과박의 진동특성

김기석 정현모 김기복 김만수

### Vibration Characteristics of Packaged Freight and Packaged Apples by Random Vibration Input

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

#### Abstract

Shock and vibration inputs are transmitted from the transporting vehicle through the packaging box to the fruit. The vibration causes sustained bouncing of fruits against each other and the container wall. The steady state vibration input may cause serious 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 design the proper packaging system providing adequate protection of the fruits from external impact or shock. In this study, to analyze the vibration properties of the apples for optimum packaging design during transportation, the random vibration tests were carried out. From the results of random vibration test, the resonance frequency and power spectral density (PSD) of the packaged freight of apples in the test were in the range of 82 to 97 Hz and 0.0013 to 0.0021  $G^2/Hz$  respectively and the resonance frequency and PSD of the packaged apples were in the range of 13 to 71 Hz and 0.0143 to 0.0923  $G^2/Hz$  respectively.

**Keywords** : Resonance frequency, Power spectral density (PSD), Random vibration, Packaged freight, Apples

## 1. 서론

농산물과 과실에 대한 소비자의 구매 패턴은 갈수록 고급화되고 있으며 품질이 우수하고 안전한 농산물 및 과실을 구매하려는 소비자의 요구를 충족시키기 위해서는 합리적이고 실질적인 수확 후 품질관리기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 농산물 특히 청과물은 수송 중에 수확 시의 본래 품질과 생리적, 물리적 특성이 빠른 속도로 변하기 때문에 일반 공산품에 비하여 품질의 관리에 많은 어려움이 있다. 뿐만 아니라 향후 농산물 시장의 개방으로 인해 외국 농산물과 경쟁하여야 하고 외국산 농산물과 국내산 농산물을 구별하기 위

해서는 무엇보다도 국내산 농산물에 대한 철저한 품질관리가 이루어져야 할 것이다. 따라서 농산물의 품질을 판정할 수 있는 기술도 반드시 선진국 못지않은 기술로 발전되어야 할 것이다. 과실의 경우 수확 후 선별, 포장, 저장 및 수송 등의 유통과정을 거치는 동안 진동 및 충격에 의한 외력을 받을 수 있는 경우가 다른 농산물에 비하여 상대적으로 많을 뿐만 아니라 과실의 조직도 매우 연약하여 손상을 입기가 쉽다. 이와 같이 과실이 받은 크고 작은 손상은 유통과정이 길어짐에 따라 곧바로 변질되고 부패하여 생산자에게 큰 경제적인 손실을 가져다주게 된다. 유통과정 중에 과실이 받는 기계적 손상은 주로 진동과 충격에 의한 요인이나 최근에 와서 과실의 유통

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, and 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>.

통체계가 기계화됨에 따라 충격에 의한 손상은 점차 감소되고 주로 진동에 의한 손상이 대부분을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다. 과실이 유통과정 중에 받는 진동에 의한 손상을 줄이기 위해서는 과실 자체의 진동특성과 기계적 특성 등이 철저히 구명되어야 할 것이다.

Hinsch 등(1993)은 스프링 현가장치로 되어있는 대형화물차를 이용하여 체리, 복숭아, 배를 수송하는 과정 중에 발생하는 진동신호를 계측하여 PSD(power spectral density)를 분석하였다. PSD는 3.5 Hz 구간에서 가장 크게 나타났으며 9 Hz, 18 Hz, 25 Hz 구간에서도 높게 나타났다고 하였다. PSD는 대형화물차 바닥의 뒷부분에서 가장 크게 나타났고 수직방향의 가속도에 비해 수평방향의 가속도는 작게 계측되었다고 보고하였다.

Peleg와 Hinga(1986)는 수송 중 과실의 진동손상을 추정하기 위한 모의실험을 수행하였다. 이를 위하여 도로의 상태 및 해상수송의 경우 발생하는 정점가속도를 측정한 결과, 도로의 노면상태가 매우 불균일한 도로에서는 2.2 G<sub>rms</sub>, 아스팔트로 잘 포장된 도로에서는 0.5 G<sub>rms</sub>, 해상에서는 0.2 G<sub>rms</sub>로 계측되었다고 보고하였다.

Singh 등(2006)은 수송차량의 현가장치에 따른 PSD를 측정하는 결과 실험 주행하였던 도로 전체 평균은 스프링 현가장치에서 0.89 G<sub>rms</sub>, 에어 현가장치에서 0.5 G<sub>rms</sub>로 나타난 것으로 보고하였으며 이를 근거로 하여 랜덤 진동실험방법을 제시하였다.

이처럼 농산물은 유통 시에 매우 다양한 주파수를 가지는 랜덤한 진동을 받게 되며 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 메커니즘을 이해하는데 매우 중요하다.

따라서 본 연구는 유통을 위한 과실의 적정 포장설계 시 중요한 자료가 되는 진동특성을 분석하고 과실의 수송에 적합한 적정 완충포장재 설계에 필요한 랜덤진동특성을 구명하기

위하여 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 공시재료

실험에 사용된 과실은 후지사과로서, 2006년 10월경에 일 반농가에서 수확한 후 약 10일 정도 저온저장(3±1℃, 85±5% R.H.)하였다. 시료들의 기본적인 물성들은 표 1과 같으며, 진동시험을 수행하기 전에 실험실 환경조건(15℃, 75% R.H.)에 약 5시간 동안 적응을 시킨 후 시험에 사용하였다.

사과 포장용 골판지 상자는 표 2에서 보는바와 같이 국내에서 보편적으로 사용되고 있는 이중양면 골판지(double wall corrugated fiberboard) 상자로서 포장중량이 5 kgf인 상자의 경우는 BE골로서 사용된 골심지는 S120 원지를 두 겹으로 합지한 강화 골심지이며, 포장중량이 15 kgf인 상자의 경우는 AB골로 원지배합은 중하수준이었다. 상자의 형식은 KS A 1003에서 규정하고 있으며 포장중량 5 kgf인 상자의 경우는 0435의 접는형(folder type)의 개방형 상자이었고, 포장중량 15 kgf의 경우는 0201의 RSC형 상자이었다. 습기에 의한 상자의 강도저하를 방지하기 위하여 외부 전면에 방수 코팅이 되어 있으며 포장중량 15 kgf상자의 경우는 포장된 포장화물의 통기역할을 하는 손잡이 구멍이 있는 골판지 상자이었다. 내부완충재는 PE 트레이캡과 골판지 패드가 사용되었다.

### 나. 실험장치

본 연구에서 사과와 랜덤 진동 입력에 따른 특성을 계측하기 위해 구성된 실험 장치는 그림 1 및 2에서 보는 바와 같이 전자식 가진기(ETS-150, ETS-Solution, USA), 입력된 스위프율(sweep rate)로 일정 범위의 주파수를 제어하기 위한 컨트롤러, 포장화물 및 포장된 사과와 진동 신호를 계측하기 위한 가속도 센서(KISTLER, 100 G, 8702B100, USA)와 고속 A/D 보드가 내장된 컴퓨터로 구성되었다. 본 연구에 사용된 진동 실험기는 피드백을 통해 일정한 가속도 수준을 유지해주는

Table 1 Harvesting date and physical characteristics of the fruits used in tests

Cultivar	Date of harvest	Volume (10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> )	Mass (kg)	True density (kg/m <sup>3</sup> )
Apple (Fuji)	2006. 10	3.619	0.30	830.75

Table 2 Type and physical properties of the packaged freight tested

Type	Flute	Paper combination	Dimension (L×W×D, mm)	Packaging Weight (kgf)
Single-layer	BE/F	KA <sup>210</sup> /(S <sup>120</sup> +S <sup>120</sup> )/S <sup>120</sup> /(S <sup>120</sup> +S <sup>120</sup> )/KA <sup>210</sup>	520×350×130	5.0
Double-layer	AB/F	KA <sup>210</sup> /S <sup>120</sup> /S <sup>120</sup> /S <sup>120</sup> /KA <sup>210</sup>	520×350×250	15

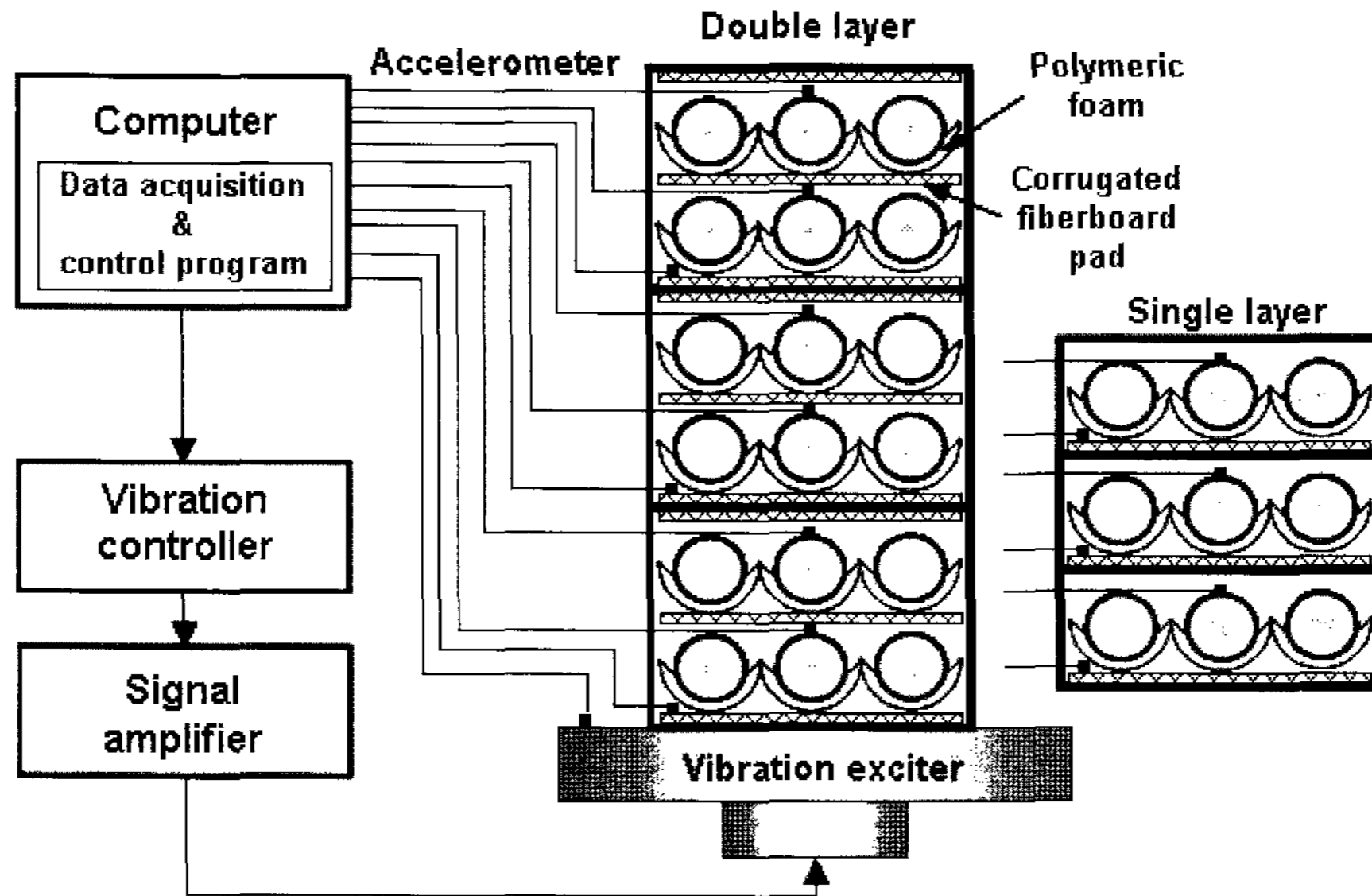
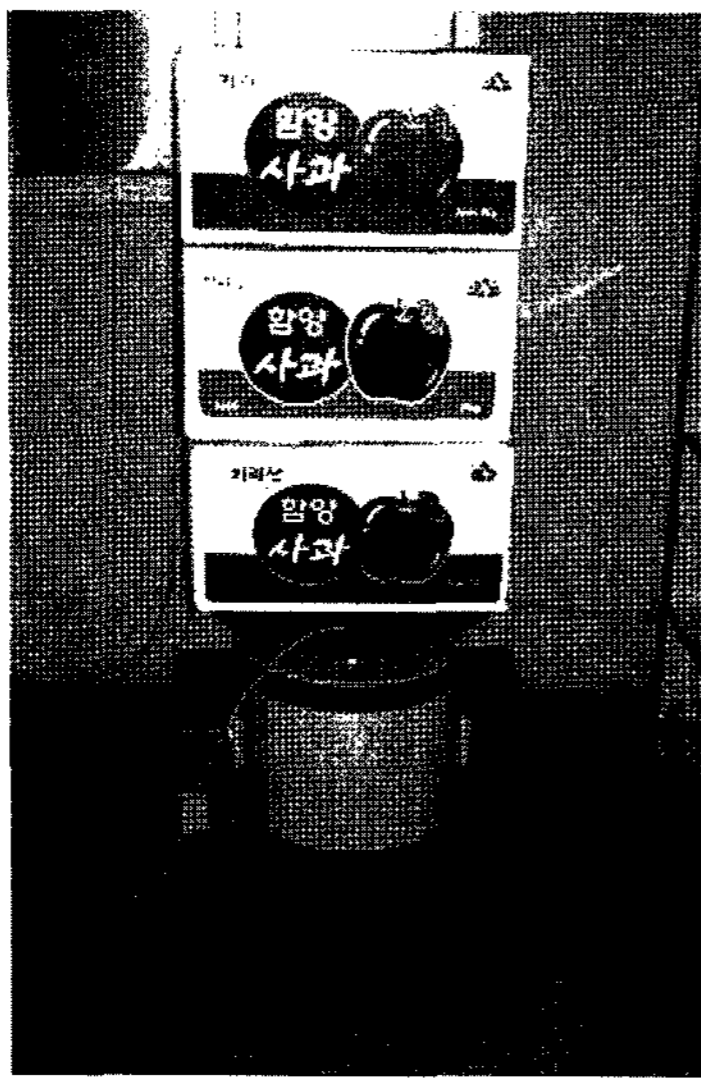
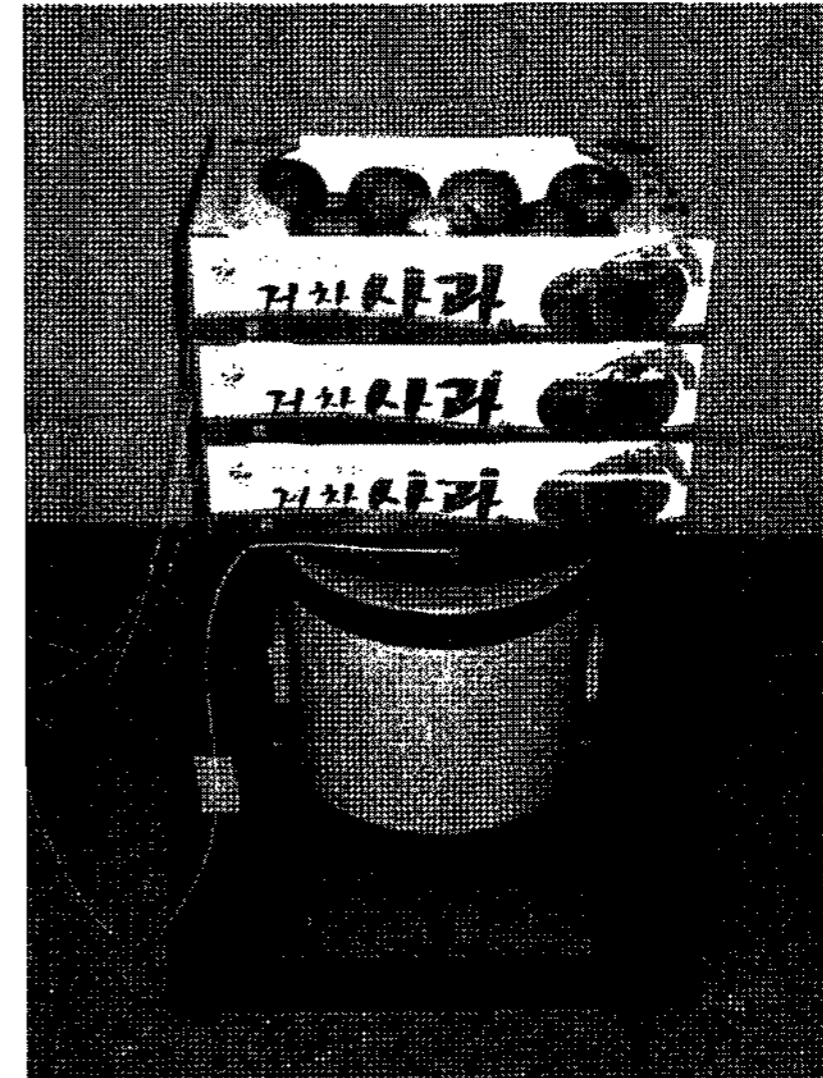


Fig. 1 Schematic diagram of the vibration test apparatus for fruit packaged freight with apples.



(a) Double layer



(b) Single layer

Fig. 2 Photos of vibration test for fruit packaged freight with apples.

시스템으로 각 가속도 수준별 입력전압을 조절하여 진동 변위를 자동 제어하는 시스템이다.

다. 실험방법

본 랜덤 진동실험의 경우는 ASTM D4728을 참조하였으며 그림 3은 ASTM D4728에 명시되어있는 주파수별 PSD 파일을 도식화한 것이다. 랜덤 진동실험의 경우 초기 입력값은 전체 수준보다 최소 6 dB 낮은 값으로 시작하여 입력값이 단계씩 증가될 수 있도록 설정하였으며, 실험주파수범위는 10~200 Hz, 스펙트럼의 진폭값은 최소 0.25  $G_{rms}$ 가 되도록 하였고, 실험 주파수구간에 대해 PSD값의 변화폭은 30 dB이

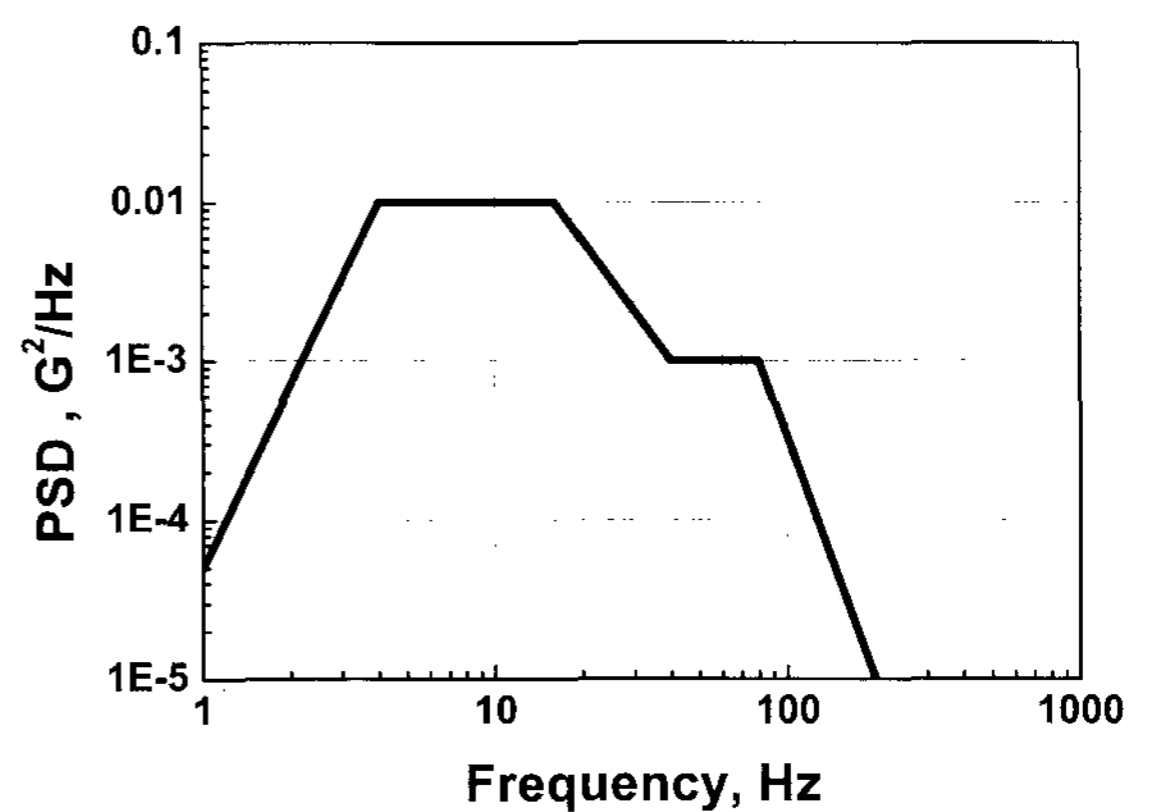
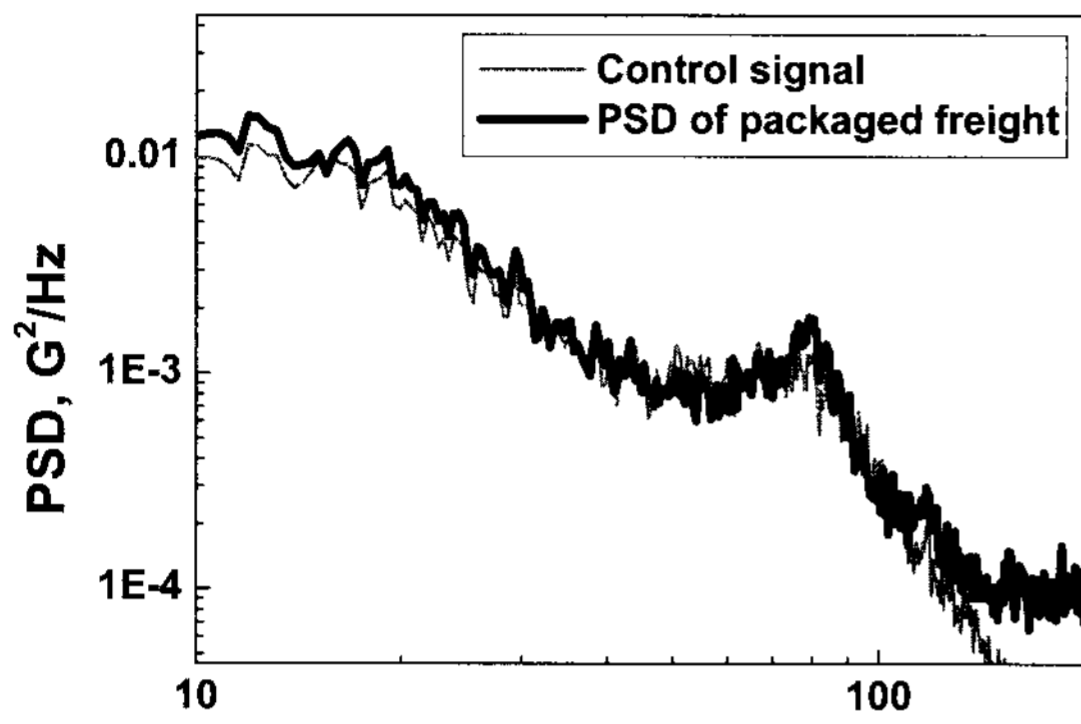


Fig. 3 PSD curve of the ASTM D4728.

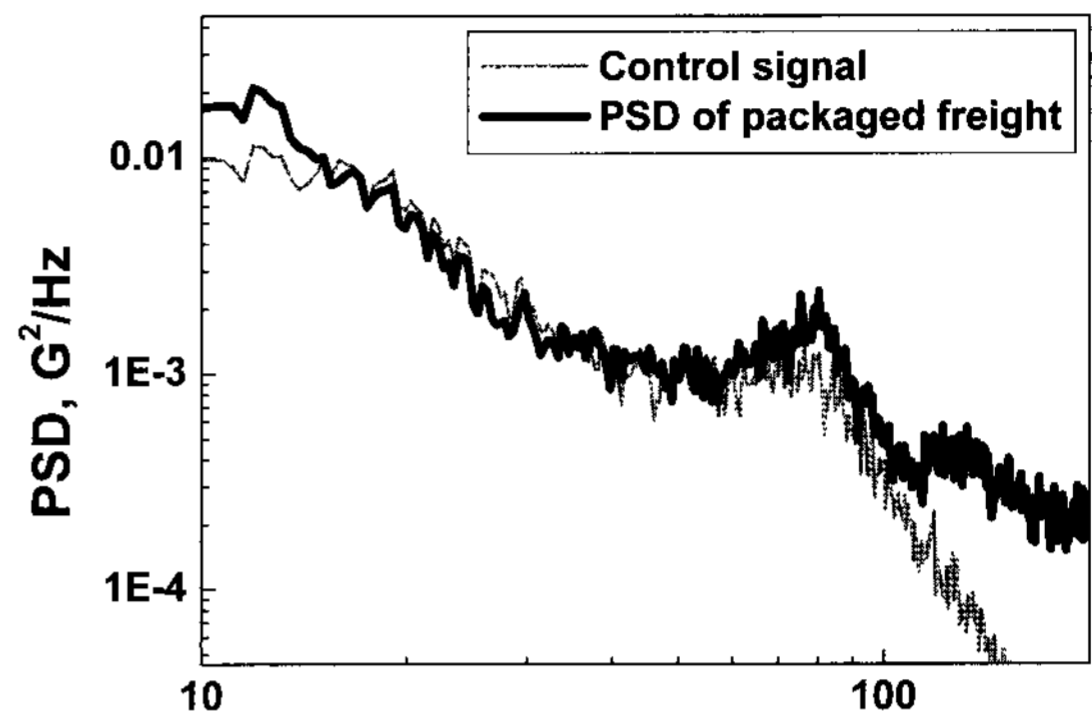
하를 유지하도록 하였다. 사과상자는 각각 포장중량이 5 kgf 인 단층(single-layer)형과 포장중량이 15 kgf인 복층(double-layer)형을 3단으로 적재하여 3회 반복 실험하였으며 포장화물 및 포장된 사과의 진동 신호를 계측하기 위해 가속도 센서를 포장화물의 바닥면과 사과의 상단에 일체형으로 부착하였다.

### 3. 결과 및 고찰

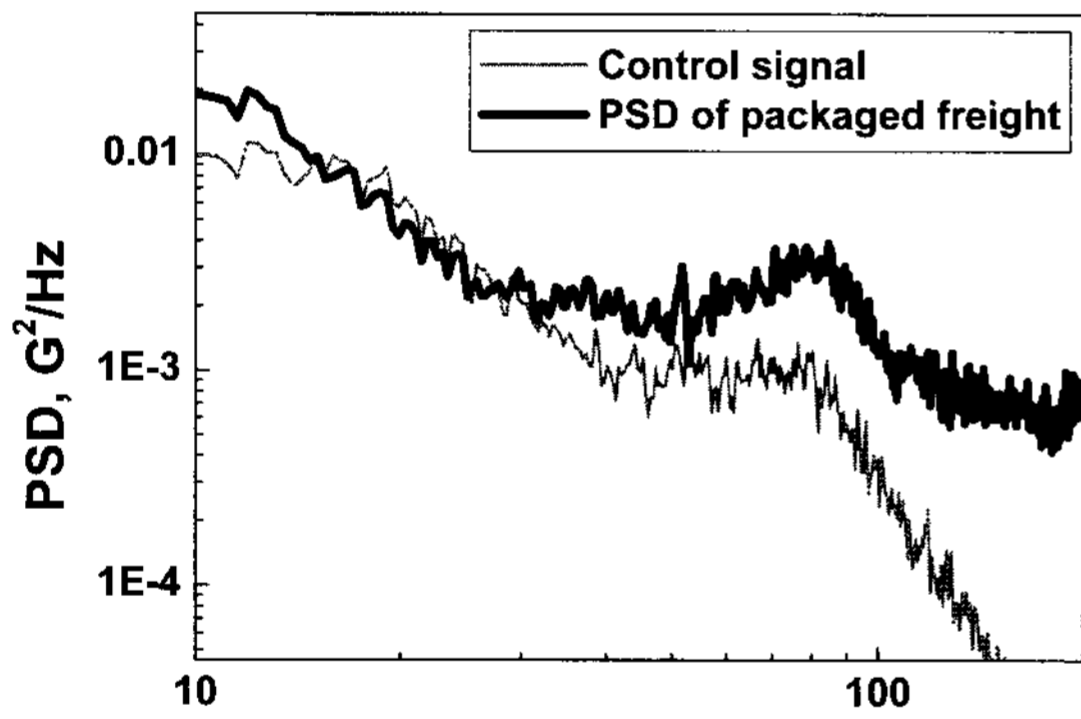
가. 랜덤 진동에서 사과 포장화물의 적재단수별 진동거동  
사과의 단층, 오픈형 골판지 포장화물에 대한 랜덤 진동실험 결과를 그림 4와 표 3에 나타내었다. 랜덤진동을 가한 사



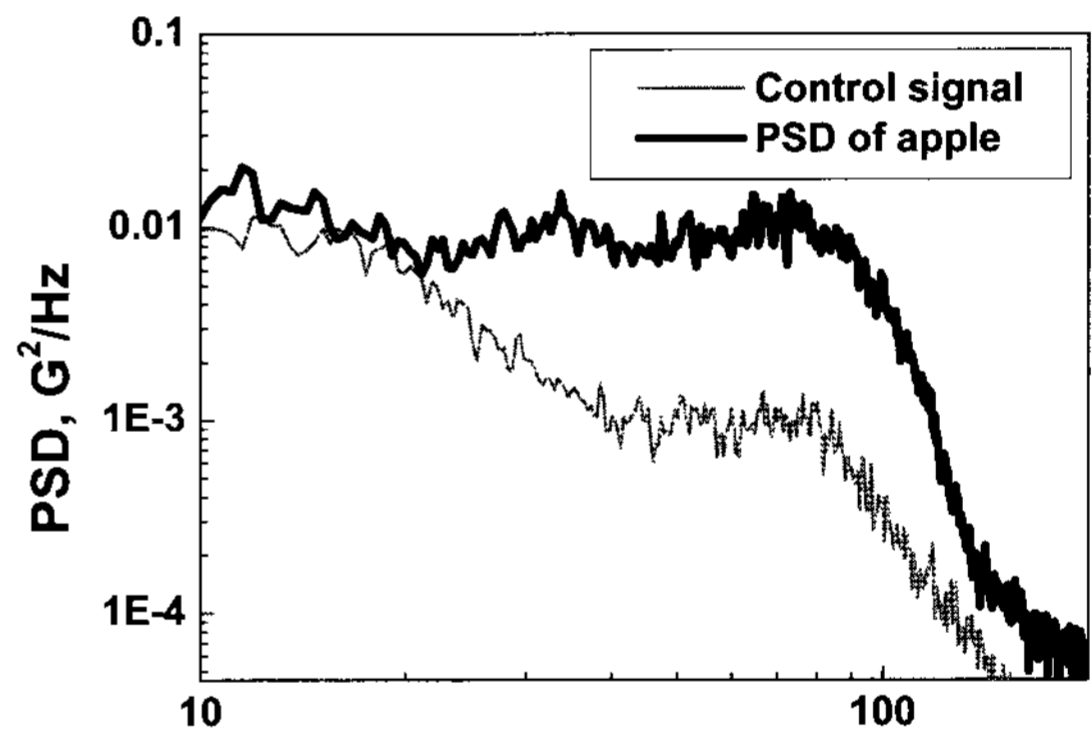
(a) 1<sup>st</sup> stack (box)



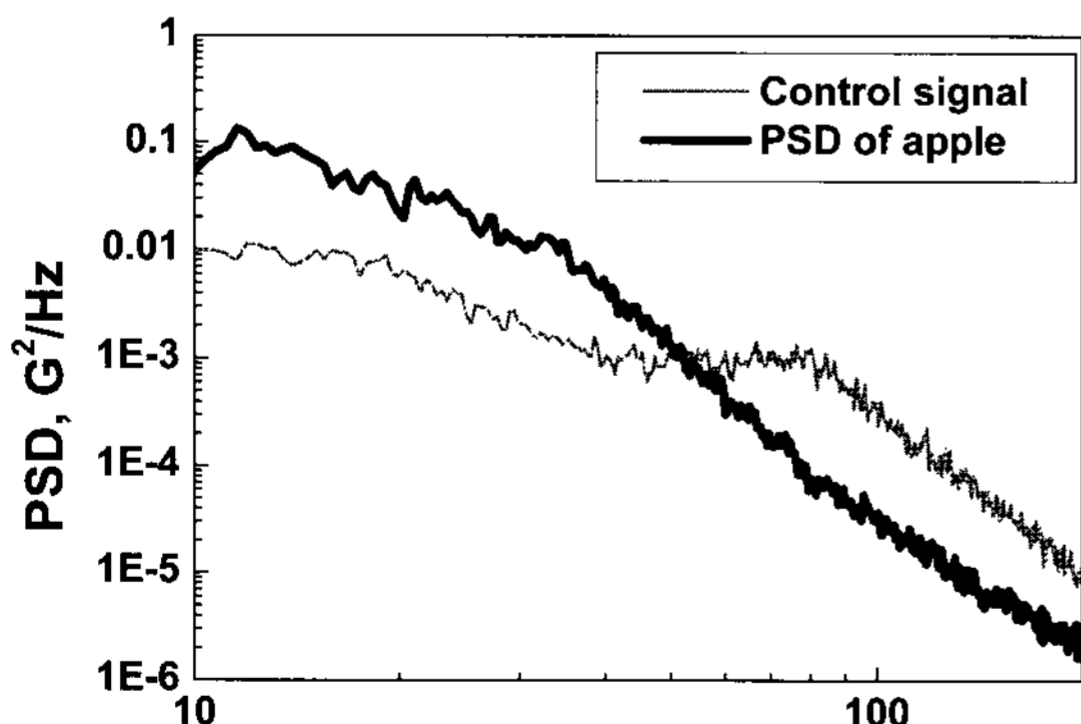
(b) 2<sup>nd</sup> stack (box)



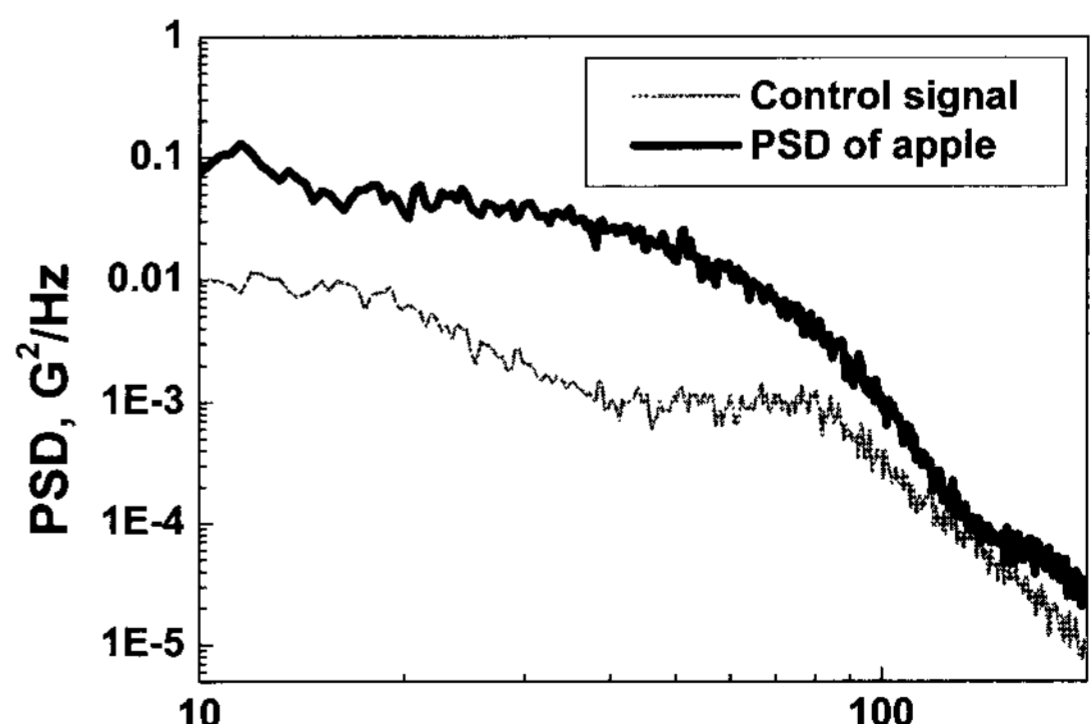
(c) 3<sup>rd</sup> stack (box)



(d) 1<sup>st</sup> stack (apple)



(e) 2<sup>nd</sup> stack (apple)



(f) 3<sup>rd</sup> stack (apple)

Fig. 4 PSD curve of the packaged freight and apples in the vertically stacked packaged freight with packaging weight of 5 kgf according to the number of stack by the random vibration test.

**Table 3** Resonance frequencies and PSDs of the packaged freight for the apples in the vertically stacked packaged freight with packaging weight of 5 kgf by ASTM random vibration test

Item	Resonance frequency (Hz)	Peak PSD (G <sup>2</sup> /Hz)
1 <sup>st</sup> stack	82.652	0.001251
2 <sup>nd</sup> stack	81.857	0.001709
3 <sup>rd</sup> stack	96.957	0.002134

과 포장용 골판지 포장화물에서 계측된 공진주파수는 가변주파수 정현파진동을 가한 사과 포장용 골판지 포장화물에서 계측된 공진주파수(김, 2007)와 유사하게 80~90 Hz 대역에서 공진이 발생하였다. 일반적으로 공산품의 공진주파수를 검출, 분석하기 위해서는 200 Hz 이상의 넓은 주파수대역의 신호를 가할 필요가 있으나 농산물 또는 과실의 경우는 수송 중에 가해지는 진동신호가 200 Hz 이하이며 따라서 농산물 또는 과실의 공진주파수를 분석하기 위해 진동을 가할 경우, 가변주파수 정현파 진동을 적용하거나 랜덤 진동을 가하는 것에 큰 차이가 없는 것으로 판단되었다.

그림 4의 (d), (e), (f) 및 표 4에서 보는 바와 같이 단층이며, 오픈형의 포장화물 내 포장과실인 사과에 대한 랜덤 진동 응답은 포장화물 1단에 적재된 포장사과는 공진주파수가 70 Hz 부근에 분포되어 김(2007)이 제시하였던 가변주파수 정현파 진동실험의 경우 20 Hz이하에서 공진주파수가 발생되었던 것과 다른 양상을 나타내었으나 2단 및 3단에 적재된 사과는 낮은 주파수 대역(10~40 Hz)에서 공진이 발생되어 가변주파수 정현파 진동실험과 유사한 결과를 나타내었다. 그러나 포장화물 3단 적재 중 2단 및 3단의 경우 저주파대역에서 PSD값이 높게 나타났다. 이러한 현상은 사과상자가 개방형 상자이었기 때문인 것으로 판단되며 따라서 유통 중에 개방형 과실상자의 경우 진동충격을 더 받을 수 있으므로 이에 대한 완충방법이 강구되어야 할 것으로 사료되었다.

**나. 랜덤 진동에서 단층 및 복층으로 포장된 사과의 적재단수별 진동거동**

포장중량 5 kgf인 사과 포장화물에 대해 단층으로 포장된 포장화물내의 사과에 대한 진동실험 결과, 표 4에서 보는 바와 같이 사과의 경우는 10~70 Hz의 넓은 주파수대역으로 분포되었다. 날개의 사과에 대해 랜덤진동신호를 이용한 공진주파수는 150 Hz부근인 것으로 알려져 있으며(김, 2007) 위의 실험결과는 날개의 사과 공진주파수 대역인 150 Hz부근과는 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 골판지 상자 자체와 포장상자 내의 완충재의 완충효과에 의한 것으로 판단되었다.

랜덤 진동실험에 의한 복층으로 포장된 포장화물 내 사과의 공진주파수 및 정점 PSD를 표 5 및 그림 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 랜덤 진동실험에 의한 사과 포장과실의 공진주파수 대역에서의 PSD는 복층으로 포장된 1단 적재 포장화물 내 2층 사과에서 가장 크게 계측되었으며, 적재단수가 올라갈수록 공진주파수 대역에서의 PSD는 감소하는 경향이였다. 또한 개방형 상자를 사용하여 단층으로 포장한 사과의 경우에는 복층으로 포장된 포장화물 내 사과에 비해 1단의 적재단수에서는 PSD에 큰 차이는 없었으나 2단과 3단의 경우 공진주파수 대역에서의 PSD가 크게 계측되었다. 이는 단층으로 포장된 사과상자가 개방형 상자이었기 때문에 진동 입력에 따라 진동충격을 더 많이 받은 것으로 판단되었다.

**Table 4** Resonance frequencies and PSDs of apples in the vertically stacked packaged freight with 5 kgf of packaging weight by ASTM random vibration test

Item	Resonance frequency (Hz)	Peak PSD (G <sup>2</sup> /Hz)
1 <sup>st</sup> stack	71.1281	0.014288
2 <sup>nd</sup> stack	12.7156	0.092263
3 <sup>rd</sup> stack	38.9417	0.030327

**Table 5** Resonance frequencies and PSDs of the apples in the vertically stacked packaged freight with packaging weight of 15 kgf by ASTM random vibration tests

Item	Resonance frequency (Hz)		Peak PSD (G <sup>2</sup> /Hz)	
	1 <sup>st</sup> layer	2 <sup>nd</sup> layer	1 <sup>st</sup> layer	2 <sup>nd</sup> layer
1 <sup>st</sup> stack	101.25	46.00	0.008399	0.038608
2 <sup>nd</sup> stack	67.75	40.25	0.018742	0.005186
3 <sup>rd</sup> stack	45.75	40.75	0.018957	0.006644



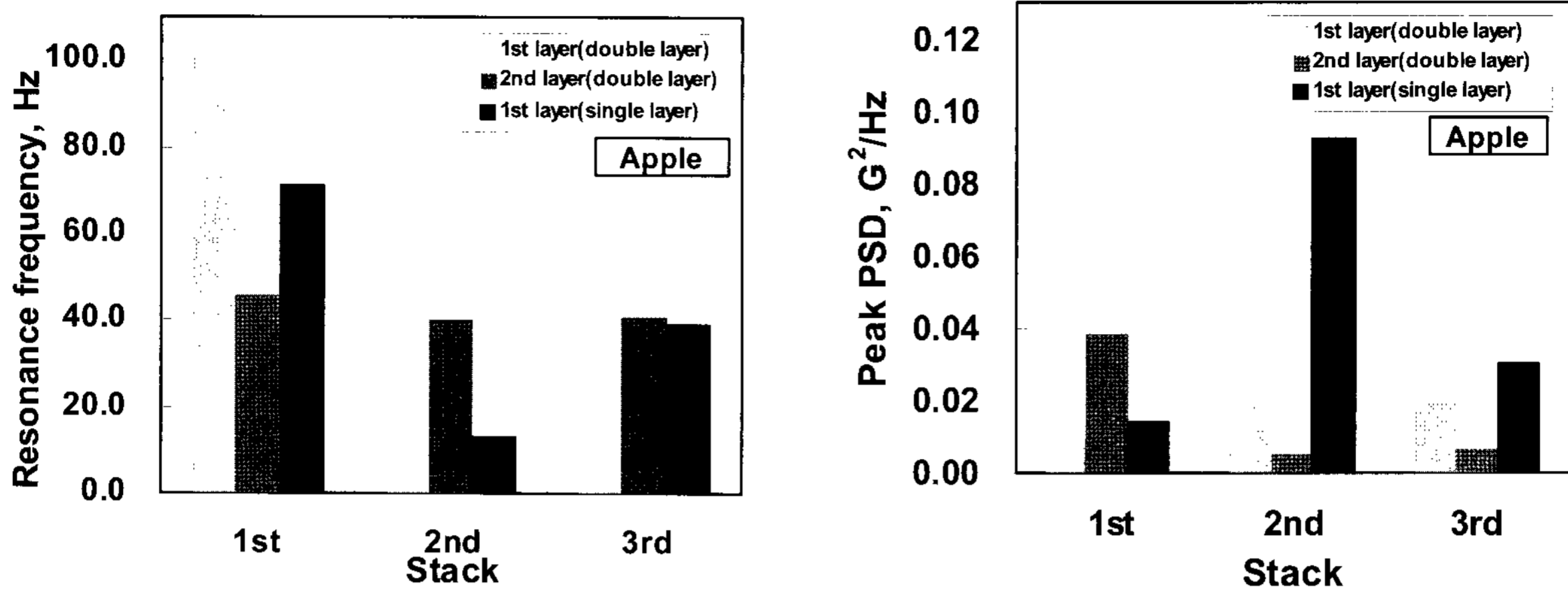


Fig. 5 Resonance frequencies and peak PSDs of the apples in the vertically stacked packaged freight

#### 4. 결론

본 연구에서는 농산물의 포장설계 시 중요한 변수가 되는 랜덤 진동 입력에 의한 포장화물과 포장된 사과와 공진 주파수 및 PSD의 진동특성을 분석하기 위하여 랜덤 진동실험을 적용하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 랜덤 진동실험에 의한 사과 포장화물의 공진주파수는 82~97 Hz범위, PSD는 0.0013~0.0021 G<sup>2</sup>/Hz 범위로 나타났으며 포장된 사과와 공진주파수는 13~71 Hz 범위, PSD는 0.0143~0.0923 G<sup>2</sup>/Hz 범위로 각각 나타났다.
- (2) 랜덤 진동실험에 의한 포장과실의 공진주파수 대역에서의 PSD는 복층으로 포장된 1단 적재 포장화물 내 1층 사과에서 가장 크게 측정되었으며, 적재단수가 올라갈수록 공진주파수 대역에서의 PSD는 감소하는 경향을 나타내었다.
- (3) 개방형 상자를 사용하여 단층으로 포장한 사과와 경우에는 복층으로 포장된 포장화물 내 사과에 비해 1단의 적재단수에서는 PSD에 큰 차이는 없었으나 적재단수가 올라갈수록 공진주파수 대역에서의 PSD가 급격히 증가하는 경향을 나타내었다.

#### 참고문헌

1. ASTM D4728. Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers.
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. Kim, G. S. 2007. Vibration Behavior of the Fruits and the Packaged Freight and their Quality Changes at Simulated Transportation Environment. Chungnam National University Doctor Thesis.
4. Peleg, K. and S. Hinga. 1986. Simulation of vibration damage in produce transportation. Transactions of the ASAE 29(2): 633-641.
5. Singh, J., S. P. Singh and E. Joneson. 2006. Measurement and analysis of US truck vibration for Leafspring and air ride suspensions, and development of tests to simulate these conditions. Packaging Technology and Science (in press). DOI:10.1002/pts.732.
6. 한국공업규격표준협회. 수송 포장 화물과 단위 화물의 수직 랜덤진동 시험 방법. KS A ISO 13355.