

## 유통 중 진동충격에 의한 배 포장 완충재의 동적 변위 추정

정현모 · 박인식 · 김만수\*

경북과학대학 포장과, \*충남대학교 농업생명과학대학 생물산업기계전공

### Estimation for Dynamic Deformation of the Cushioning Materials of Packaging for the Pears by Shock and Vibration During Transportation

Hyun-Mo Jung, In-Sig Park and Man-Soo Kim\*

*Department of Packaging, Kyongbuk College of Science*

*\*Bio-industrial Machinery Engineering, College of Agriculture & Life Sciences, Chungnam National University*

#### ABSTRACT

During handling unitized products, they are subjected to a variety environmental hazards. Shock and vibration hazards are generally considered the most damaging of the environmental hazards on a product, and it may encounter while passing through the distribution environment. A major cause of shock damage to products is drops during manual handling. The increasing use of unitization on pallets has been resulted in a reduction in the manual handling of products and with it a reduction in the shock hazards. This has caused and increasing interest in research focused on vibration caused damage. the use of pallets as a base for unitizing loads, aids in the mechanical handling, transportation and storage of products. Besides aiding in the handling, transportation and storage of products, a pallet also acts on and interface between the packaged goods and the distribution environment. The determination of the impact deformation of the cushioning materials such as tray cup (polymeric foam) and corrugated fiberboard pad must be carried out to design 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. In this study, the theoretical analysis of impact deformation for cushioning materials by dynamic vibration. The impact deformations of SW and DW corrugated fiberboard pad in acceleration amplitudes of 0.25 G-rms and 0.5 G-rms that were usually generated in transport vehicles during distribution environments were very small compare with the thickness of corrugated fiberboard pad. The maximum of vibration acceleration level of tray cup by vibration impact was about 3.2 G-rms. The theoretical allowable acceleration (G-factor) of the pear was 0.7102 G-rms, and the maximum dynamic deformation estimated within G-factor was about 1 mm.

Keywords : Cushioning materials, Corrugated fiberboard pad, G-factor, Tray cup, Shock and vibration

---

\*Corresponding Author : Hyun-Mo Jung, Dept. of Packaging, Kyongbuk College of Science.  
San 159, Bongsan-Ri, Kisan-Myeon, Chilgok-Gun, Gyeongbuk, 718-851 Korea  
E-mail : <babong2@hanmir.com>

#### 서론

일반적으로 과실의 경우, 포장화물(packaged freight)은 과실, 완충재 및 겹포장 상자로 구성되

며, 속포장(내포장)하지 않는 것이 식품 포장이나 다른 포장과 구별된다. 그러나 과실 개개를 보호하기 위한 날포장(단위포장)은 중요시되며, 사용되는 완충재가 이 기능을 한다.

과실 포장에 사용되는 겉포장 상자는 제품 취급의 편리성을 도모할 뿐만 아니라, 물류 과정 중에 제품의 보호와 상품에 대한 정보를 제공하는 포장 역할의 주체가 된다. 또한 완충재는 포장물에 전달되는 충격과 진동 등의 외력 완화와 응력 분산, 포장물의 표면보호, 상호간의 접촉방지 및 이동방지의 기능을 수행한다. 종전까지는 골판지 상자에 의한 포장화물 단위로 취급되는 경우가 대부분 이었는데, 농산물의 물류합리화와 물류비 절감 문제가 본격 대두되면서, 파렛트를 활용한 단위화물 적재 시스템(ULS) 즉, 파렛트 화물(palletized freight) 상태로 취급되는 경우가 점차 확대되고 있고, 정부에서도 이를 적극 지원하고 있다.

따라서 포장화물이 유통중 진동, 압축 및 충격 등의 물리적 환경과 온도 및 습도 등의 환경요인에 노출되었을 때, 이들의 거동과 특성의 변화를 분석하는 것은 매우 중요한 일이며, 현재까지 이러한 연구는 국내·외적으로 극히 빈약한 형편이었다. 따라서, 본 연구에서는 골판지 상자에 의한 배 포장화물에 대하여, 유통 중 과실 포장화물이 진동충격을 받을 경우, 트레이컵(tray cup) 및 골판지 패드(corrugated fiberboard pad) 포장완충재의 동적 변위를 추정하고자 한다.

### 재료 및 방법

#### 1. 이론적 고찰

골판지 상자안의 과실을 완전한 탄성구로 가정하게 되면 접촉상태의 두 탄성구에 정적하중  $F$ 에 대하여 Hertz의 법칙을 적용할 수 있다. Timoshenko와 Goodier(1951)의 분석에 의하면 정적하중  $F$ 를 받으면 접촉하고 있는 두 탄성구 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

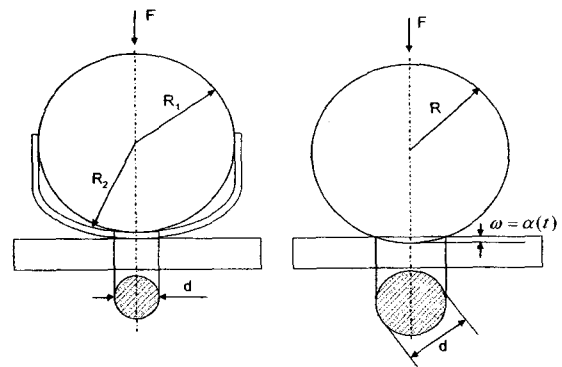
$$F = \frac{4a^{3/2}}{3\pi\lambda(\delta_1 + \delta_2)} \quad (1)$$

여기서,  $F$ =두 구에 작용하는 하중 (N),  
 $a$ =두 탄성구의 총변형량 (m),  
 $\lambda$ =형상계수 ( $m^{-1/2}$ )

여기서,  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 은 식 (2)와 같이 표현되는 두 탄성구 각각의 재료 물성이다.

$$\delta = \frac{1-\mu^2}{\pi E} \quad (2)$$

여기서,  $E$ 는 재료의 탄성계수,  $\mu$ 는 재료의 포와송비(Poisson's ratio)를 나타낸다. 그림 (1)은 골판지 상자내에서 과실-완충재 시스템의 기하학적 구성을 나타내고 있다. 그림 1의 (a)는 과실이 트레이컵(tray cup)에 놓여 있을 때를, 그리고 (b)는 과실이 완충 패드(pad) 또는 상자바닥과 같은 평판과 접촉해 있는 기하학적 구성을 보여주고 있다. 여기서,  $\lambda$ 는 두 물체의 접촉을 묘사하는 형상계수로 Fig. 1의 (a)와 (b)의 경우 각각 식 (3)과 (4)로 표현된다.



(a) Contact between fruit and tray cup  
 (b) Contact between fruit and cushion pad or container bottom

Fig. 1. Typical configuration of contact damage in produce packs

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2}} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{R}} \quad R_1 = R, \quad R_2 = \infty \quad (4)$$

두 탄성구가 힘  $F$ 를 받으며 접촉하고 있을 때, 형성되는 접촉면의 직경은 식 (5)로 표현된다 (Mohsemin, 1970; Holt와 Schoorl, 1977).

$$d^3 = \frac{6\pi F}{\lambda^2} (\delta_2 + \delta_1) \quad (5)$$

만일, 과실이 Fig. 1의 (b)와 같이 평판과 접촉해 있다면, 이때의 접촉면의 직경은 식 (4)와 (5)로부터 식 (6)와 같이 된다. 또한, 여기서 과실에 비해 평판의 탄성계수가 매우 크다면 ( $E_2 \gg E_1$ ),  $\delta_2 \approx 0$ ,  $E_1 = E$ ,  $\mu_1 = \mu$ 가 되므로 식 (6)은 식 (7)와 같이 정리된다.

$$d^3 = 6FR_1 \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \quad (6)$$

$$d^3 = \frac{6FR}{E} (1-\mu^2) \quad (7)$$

또한 과실이 트레이컵과 접촉하고 있을 때의 접촉원의 직경은 다음과 같다.

$$d^3 = \frac{6FR_1R_2}{R_2-R_1} \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \quad (8)$$

여기서,  $E_1$ 과  $E_2$ 는 각각 과실과 트레이컵의 탄성계수, 그리고  $\mu_1$ 과  $\mu_2$ 는 각각 과실과 트레이컵의 포와송비를 의미한다. 식 (1) 및 식 (5)에 대해서 총변형량  $a$ 와 접촉원의 직경  $d$ 와의 관계를 다음과 같이 정리된다.

$$a = \frac{\lambda^2 d^2}{4} \quad (9)$$

이상과 같은 방법으로 접촉원의 직경이 구해지면 이로부터 접촉에 의한 변형량 즉, 멩의 깊이를 예측할 수 있다(Holt와 Schoorl, 1980). 접촉하는 두 물체의 총변형량  $a$ 는 각 물체 각각의 변형의 합이고, 각각의 변형량( $w_1, w_2$ )은 재료의 물성값  $\delta$ 에 비례하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w_1 + w_2 = a \quad (10)$$

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{E_2(1-\mu^2)}{E_1(1-\mu^2)} \quad (11)$$

식 (10)와 (11)로부터 접촉하는 두 물체 각각의 변형량은 다음과 같이 표현된다.

$$w_1 = \frac{\delta_1 a}{\delta_1 + \delta_2}, \quad w_2 = \frac{\delta_2 a}{\delta_1 + \delta_2} \quad (12)$$

과실이 트레이컵과 접촉하고 있을 때 과실과 트레이컵 각각의 변형량은 식 (1)와 (3)으로부터 다음과 같이 각각 정리된다.

$$w_1 = 1.77\delta_1 \sqrt[3]{\frac{(R_2-R_1)F^2}{R_1R_2(\delta_1+\delta_2)}} \quad (13)$$

$$w_2 = 1.77\delta_2 \sqrt[3]{\frac{(R_2-R_1)F^2}{R_1R_2(\delta_1+\delta_2)}} \quad (14)$$

또한 과실이 평판과 접촉하고 있는 경우의 과실과 평판 각각의 변형량은 식 (1)와 (3)으로부터 다음과 같이 각각 정리된다.

$$w_1 = 1.77\delta_1 \sqrt[3]{\frac{F^2}{R_1(\delta_1+\delta_2)}} \quad (15)$$

$$w_2 = 1.77\delta_2 \sqrt[3]{\frac{F^2}{R_1(\delta_1+\delta_2)}} \quad (16)$$

여기에서, 골판지 상자안에 과실에 대한 완충재로 골판지 완충패드를 삽입하였을 경우에는 과실에 멩이 생기지 않도록 보호하는 기능을 하게 된다. 따라서, 과실에는 변형이 생기지 않을 경우 ( $w_1 = 0$ ) 유통 중 골판지 상자의 진동에 의한 충격력으로 인한 골판지 완충패드 및 트레이컵의 변형량을 추정해 볼 수 있으며, 이들 재료의 완충 성능을 발휘할 수 있는 최대 충격력이 얼마인지의 추정이 가능하다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 유통 중 탄성계수 1527 kPa, 질량 0.65 kg인 배에 가해지는 진동충격력에 의한

골판지 패드와 트레이컵의 동적 충격에 대한 변형량을 위의 이론식을 적용하여 추정하였다.

여기에서 적용된 골판지는 배 포장 및 완충재로 사용되고 있으며, 원지구성이 SK210/K180/ SK210인 A골(A flute)의 양면골판지(SW, single wall corrugated fiberboard)와 원지구성이 SK210/ K180/K180인 AB골(AB flute)의 이중양면골판지(DW, double wall corrugated fiberboard)이었다. 공시된 골판지의 탄성계수는 온도 및 상대습도에 따른 시편의 압축실험에 의한 시컨트 모듈러스 값을 본 실험의 탄성계수로 적용하였다. 포와송비는 배와 골판지 각각 0.234(Chappell et al., 1968)와 0.2(Pikey, 1994; Part et al., 1999)를 적용하였다. 또한 트레이컵 재료의 탄성계수는 골판지와 같이 압축실험에 의한 시컨트 모듈러스(Jung, 1999) 값인 149.01 kPa을 적용하였고, 포와송비는 0.2로 가정하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 환경변화에 따른 완충재의 탄성계수

Table 1은 유통 중 환경변화에 따른 공시된 완충재의 탄성계수를 보여주고 있다. 양면골판지 및 이중양면골판지의 경우에는 지류완충재로 환경변화에 매우 민감하였다.

**Table 1. Elastic modulus of single wall and double wall corrugated fiberboard**

Temp. (°C)	Relative humidity (%)	Elastic modulus (kPa)	
		SW	DW
3	30	152.84	240.85
	60	141.09	231.56
	90	115.14	198.25
13	30	156.76	245.96
	60	143.99	238.34
	90	113.25	201.61
23	30	159.24	251.21
	60	146.30	242.92
	90	128.87	210.25

온도변화에 따른 완충재의 탄성계수 변화는 크지 않았지만 상대습도에 따른 완충재의 탄성계수 변화는 매우 크게 나타났으며, 특히 상대습도 90%에서의 탄성계수 저하가 뚜렷하게 나타났다. 이렇게 측정된 데이터를 이용하여 식(17) 및 (18)에서 보는바와 같이 공시된 양면골판지 및 이중양면골판지의 탄성계수에 대한 비선형 회귀식을 구하였으며, Fig. 2는 각 완충재의 온도와 상대습도에 따른 탄성계수의 반응표면을 보여주고 있다.

$$E_{SW} = 153.6865 - 0.2485T + 0.0258T^2 + 0.1948rh - 6.7889 \times 10^{-3}rh^2, r^2 = 0.9745$$

$$E_{DW} = 221.8132 + 0.4225T + 5.3666 \times 10^{-3}T^2 + 1.0118rh - 1.4354 \times 10^{-2}rh^2, r^2 = 0.9983$$

여기서,

$E_{SW}$  = 양면골판지(A)의 탄성계수(kPa),

$E_{DW}$  = 이중양면골판지(AB)의 탄성계수(kPa)

$T$  = 주위 공기의 온도(°C)

$rh$  = 주위 공기의 상대습도(%)

#### 2. 진동충격력에 의한 완충재의 동적 변형량

Fig. 3~5는 국내산 배의 포장 완충재로 사용되는 A골의 양면골판지와 AB골의 이중양면골판지 패드에 대해서 식 (13)~(16)의 동적 하중 F를 추정하기 위하여 배의 질량과 진동 가속도 수준의 곱으로 추정된 동적 변형량을 나타내었다.

공시된 두 종류의 골판지 패드의 경우, 저온·다습한 조건일수록 진동 충격에 의한 골판지의 변형량은 증가하는 경향을 보였으며, A골의 양면골판지의 두께(5.661 mm)에 대한 변형량을 기준으로 하였을 때, 진동가속도는 최대 10 G-rms 안쪽이었으며, AB골의 이중양면골판지의 두께(8.802 mm)에 대한 변형량을 기준으로 하였을 때 진동가속도 수준은 매우 높은 값을 나타내었다.

일반적으로 유통 중 포장된 일반도로에서 발생할 수 있는 가속도 수준은 1 G-rms 이하이므로, 위의 그림에서 알 수 있듯이 골판지 패드의 동적

충격에 대한 변형량이 매우 작다는 것을 알 수 있다.

하지만 높은 상대습도에서 장기간의 낮은 진동 충격력을 받게 되면 골판지 패드의 완충재로써의 기능을 상실하게 되고 과실에 손상을 입히는 결과를 초래하게 된다. 또한 이 추정은 포장되어 유통되는 배의 손상 변위가 발생하지 않는다고 가정하에서 추정된 골판지의 변형량이며, 10 G-rms의 가속도 수준에서 유통되는 경우에는 배의 손상 변위가 매우 심할 것이다.

Fig. 6은 진동 가속도 수준에 대한 트레이컵 재료의 충격 변형량을 나타내고 있다. 트레이컵의 두께(2 mm)를 기준으로 하였을 때, 진동 가속도

수준은 최대 3.2 G-rms이었으며, 일반적으로 트레이컵의 경우, 완충재로써의 기능과 과실들간의 충돌에 의한 손상을 방지하기 위하여 사용되고 있으며, 골판지 패드와 비교하면 두께가 얇기 때문에 작은 충격력에 대해서는 높은 완충성을 나타내지만, 높은 충격력의 경우에는 모든 충격력을 흡수하지 못하고 배로 전달되어 배의 손상을 초래하게 된다.

이러한 결과를 근거로 실제 청과물의 포장설계시 중요한 요소인 완충재의 선정 및 완충재의 적정 두께를 예측함으로써 청과물의 과대포장을 방지하고 청과물의 과소포장으로 인한 손상을 최소화할 수 있을 것이다. 또한 유통중 배의 손상을

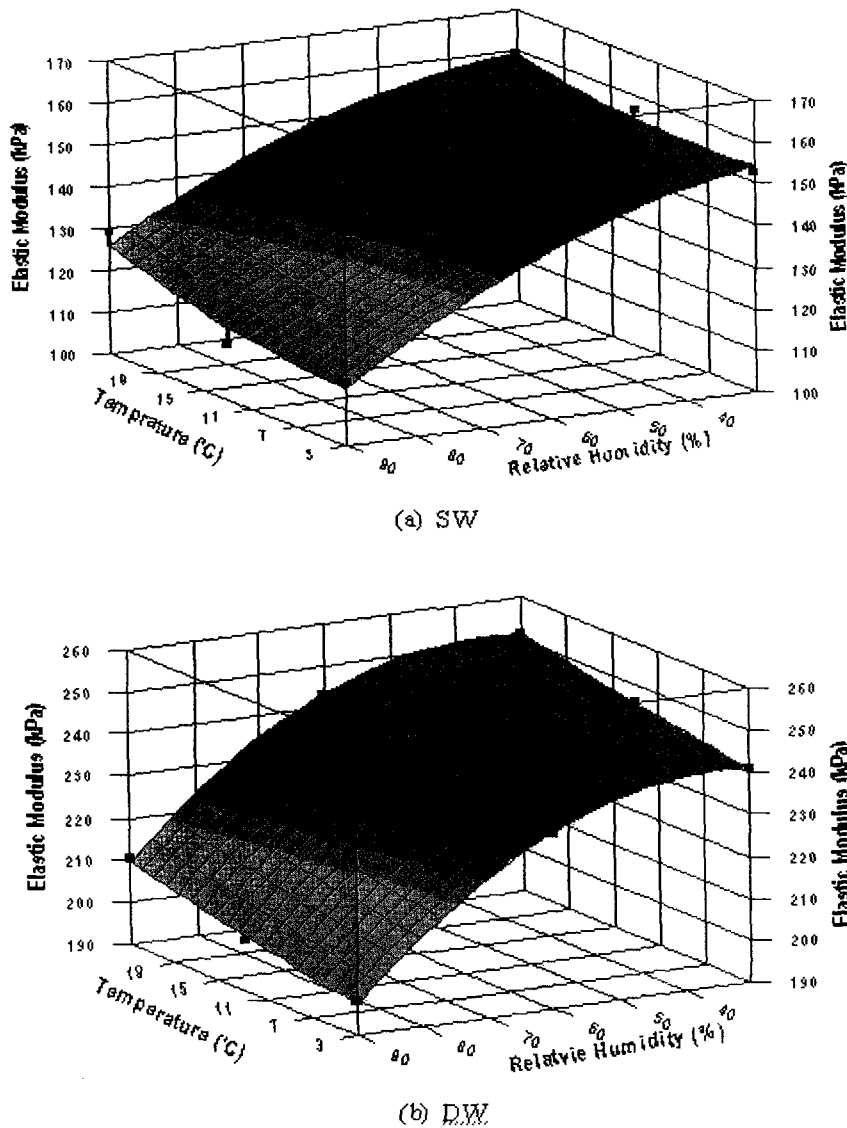
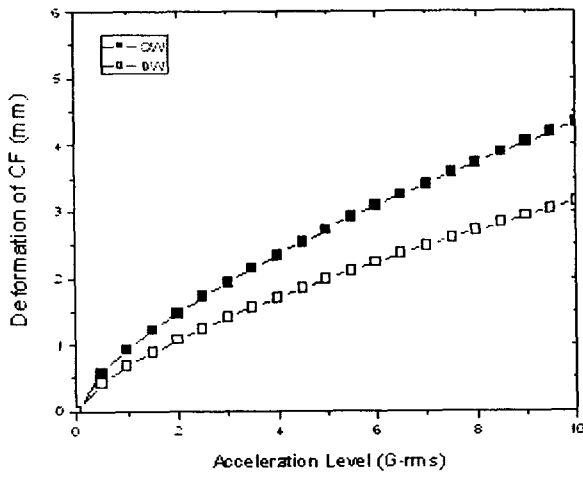
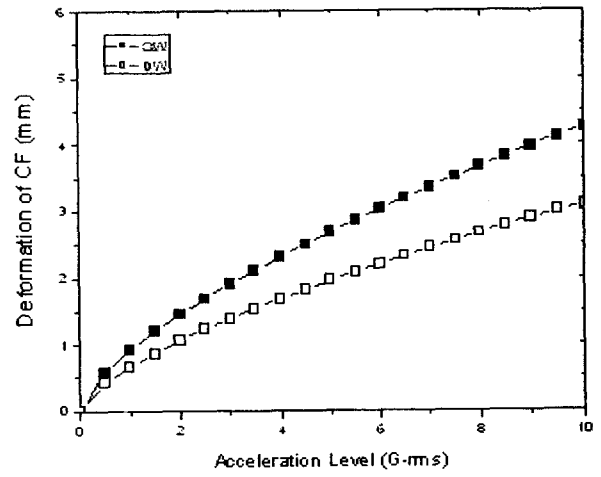


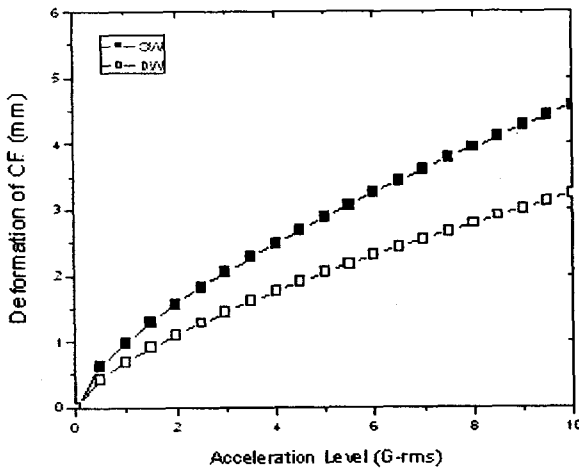
Fig. 2. Response surface of elastic modulus as a function of temperature and relative humidity



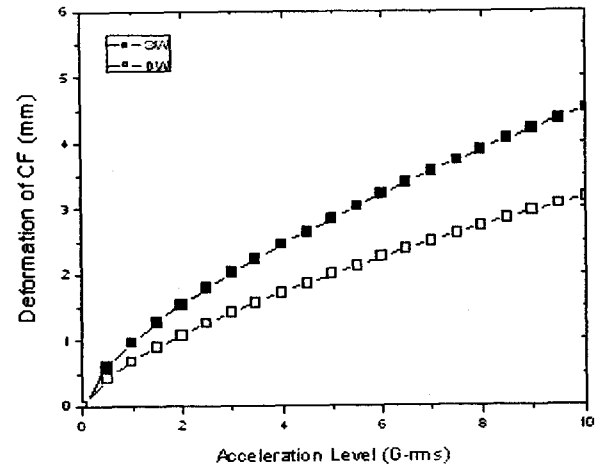
(a) RH 30%



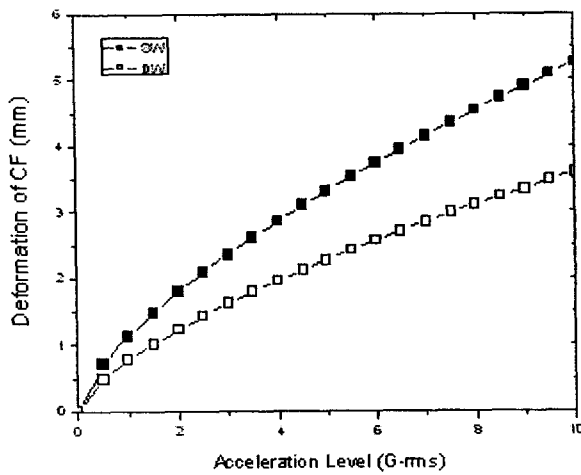
(a) RH 30%



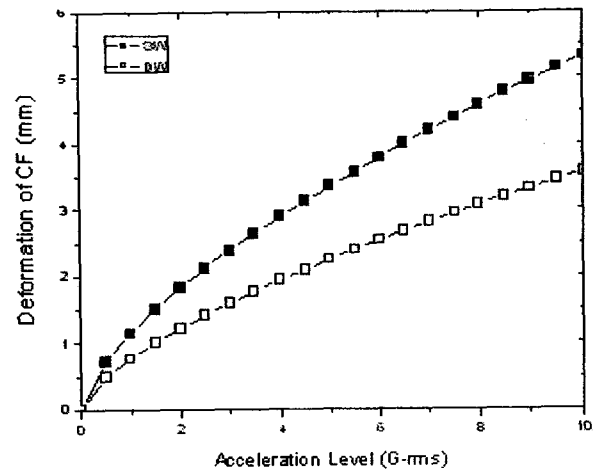
(b) RH 60%



(b) RH 60%



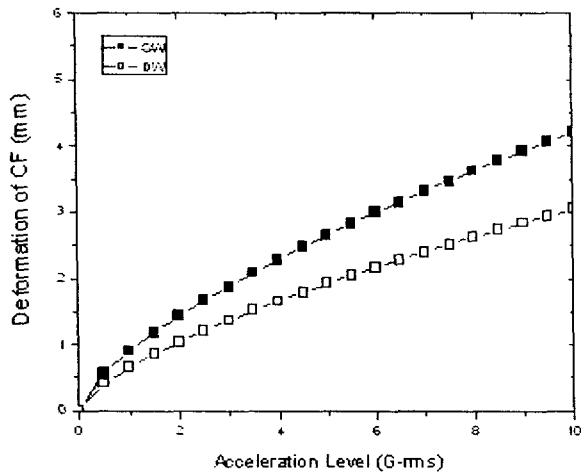
(c) RH 90%



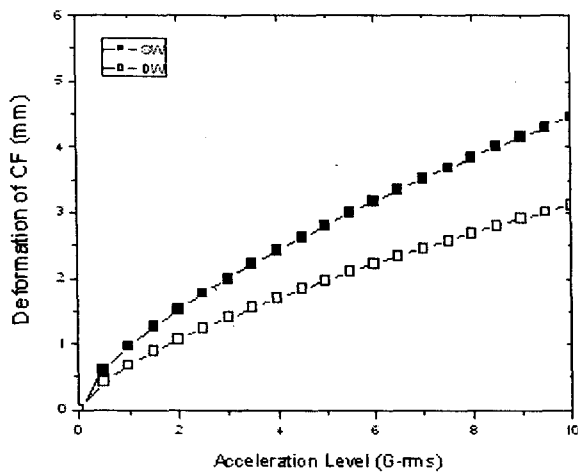
(c) RH 90%

Fig. 3. Deformation of the corrugated fiber-board pad by vibration impact at the temperature, 3°C

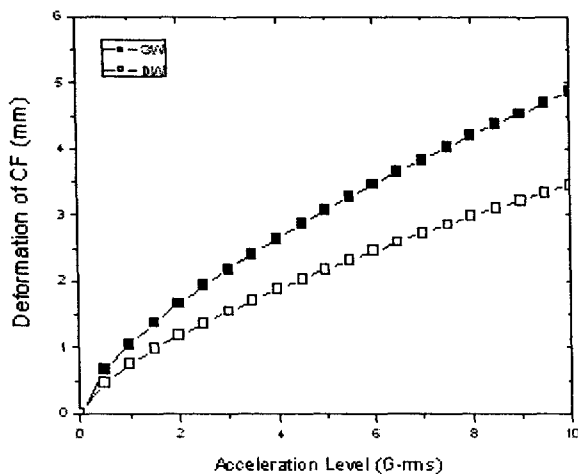
Fig. 4. Deformation of the corrugated fiber-board pad by vibration impact at the temperature, 13°C



(a)  $t$  30%



(b)  $t$  60%



(c)  $t$  90%

Fig. 5. Deformation of the corrugated fiber-board pad by vibration impact at the temperature, 23°C

고려할 경우, 배에 손상이 가지 않는 진동 충격 가속도(G-factor)를 예측할 수 있다면 실제 배의 손상이 가지 않는 범위의 완충설계를 할 수가 있다.

이러한 결과를 기준으로 실제 배의 완충포장 설계 시 경제성을 고려한다면 A골의 양면골판지 및 AB골의 이중양면골판지를 완충재로 사용하는 것보다는 두께가 얇은 E골(E flute) 및 F골(F flute)의 양면골판지를 완충재로 사용하는 것이 실제 유통 중에 발생될 수 있는 진동 가속도 수준(1 G-rms 이하)을 기준으로 하였을 경우 좋다는 것을 알 수가 있었다.

또한 트레이컵 완충재의 경우에도 두께를 50% 까지 감소하여도 유통 중에는 배에 손상을 주지 않을 것이라는 이론적 해석이 가능하게 된다. 이처럼 청과물의 포장설계 시 중요한 요소인 완충재의 선정 및 완충재의 적정 두께를 예측함으로써 청과물의 과대포장을 방지하고 청과물의 과소포장으로 인한 손상을 최소화할 수 있을 것이다.

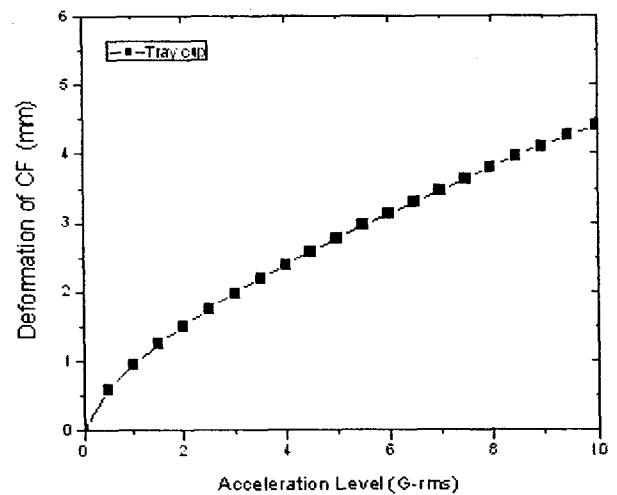


Fig. 6. Deformation of tray cup by vibration impact.

### 결론

유통 중 운송 시에 발생될 수 있는 진동 가속도 수준(0.25~0.5 G-rms)에 대한 배 골판지 상자의 완충재로 이용되고 있는 트레이컵과 골판지 패드의 동적 변형량을 추정해 보았으며, 그 결론은 다음과 같다.

1. 저온·다습한 조건일수록 진동충격에 의한 골판지 완충패드의 변형량은 증가하는 경향을 보였으며, 양면골판지의 두께(5.661 mm)에 대한 변형량을 기준으로 하였을 때, 진동가속도는 최대 10 G-rms 안쪽이었으며, 이중양면골판지의 두께(8.802 mm)에 대한 변형량을 기준으로 하였을 때 진동가속도는 매우 높은 값을 나타내었다.
2. 트레이컵의 두께(2 mm)를 기준으로 하였을 때, 진동 가속도 수준은 최대 3.2 G-rms이었으며, 골판지 완충패드와 비교하면 두께가 얇기 때문에 작은 충격력에 대해서는 높은 완충성을 나타내지만, 높은 충격력의 경우에는 모든 충격력을 흡수하지 못하고 배로 전달되어 배의 손상을 초래하게 될 것이다.
3. 청과물의 완충 포장설계 시 중요한 요소인 완충재의 선정 및 완충재의 적정 두께를 예측함으로써 청과물의 과대포장을 방지하고 청과물의 과소 포장으로 인한 손상을 최소화할 수 있을 것이다.
6. Mohsenin, N. N. 1970. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach.
7. Park, J. M. and S. G. Kwon. 1999. Finite element analysis of the ventilating box structure. Journal of the KSAM 27(6): 557~564. (In Korean)
8. Pilkey, W. D. 1994. Stress, strain and structure matrices. John Wiley & Sons, Inc.
9. Timoshenko, S. and Goodier, J. N. 1951. Theory of elasticity. McGraw Hill, New York.

## 참 고 문 헌

1. Chappell, T. W. and D. D. Hamann. 1968. Poisson's ratio and Young's modulus for apple flesh under compressive loading. Trans. of the ASAE 11(3): 608~610, 612.
2. Holt, J. E. and Schoorl, D. 1977. Bruising and energy dissipation in apples. Journal of Texture Studies 7: 421~432.
3. Holt, J. E. and Schoorl, D. 1980. Prediction of bruising in impacted multilayered apple packs. Trans. of the ASAE 24(1): 242~247.
4. Jung, H. M. 1999. Mechanical properties of selected fruits and vegetables. M.S. thesis. Chungnam National University. (In Korean)
5. Kim, M. S., H. M. Jung, R. Seo, I. K. Park and Y. S. Hwang. 2001. Estimation of allowable drop height for oriental pears by impact tests. Journal of the KSAM 26(5): 461~468. (In Korean)