

# 진동충격력에 의한 완충재의 변위

## Deformation of the Cushioning Materials by Vibration Impact

김만수\*      정현모\*      박종민\*\*      박정길\*      김수일\*\*\*      박인식\*\*\*  
정회원      정회원      정회원  
M. S. Kim    H. M. Jung    J. M. Park    C. G. Park    S. I. Kim    I. S. Park

### 1. 서론

과실 포장화물(packaged freight)은 과실, 완충재 및 겉포장 상자로 구성되며, 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, 팰릿트를 활용한 단위화물 적재 시스템(ULS) 즉, 팰릿트 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.

본 연구에서는 골판지 상자에 의한 배 포장화물에 대하여, 유통중 포장화물이 진동을 받을 경우, 진동 충격하에서 완충재(골판지 패드, 트레이립)의 변위를 분석하려고 한다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1 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.

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

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

\* 충남대학교 농업생명과학대학 농업공학부

\*\* 밀양대학교 기계공학과

\*\*\* 경북과학대학 포장학과

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

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

여기서,  $E$ 는 재료의 탄성계수,  $\mu$ 는 재료의 포와송비(Poisson's ratio)를 나타낸다. 그림 (1)은 골판지 상자내에서 과일-완충재 시스템의 기하학적 구성을 나타내고 있다. 그림 (1)의 (a)은 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 그림 (1)의 (a)와 (b)의 경우 각각 식 (3)과 (4)로 표현된다.

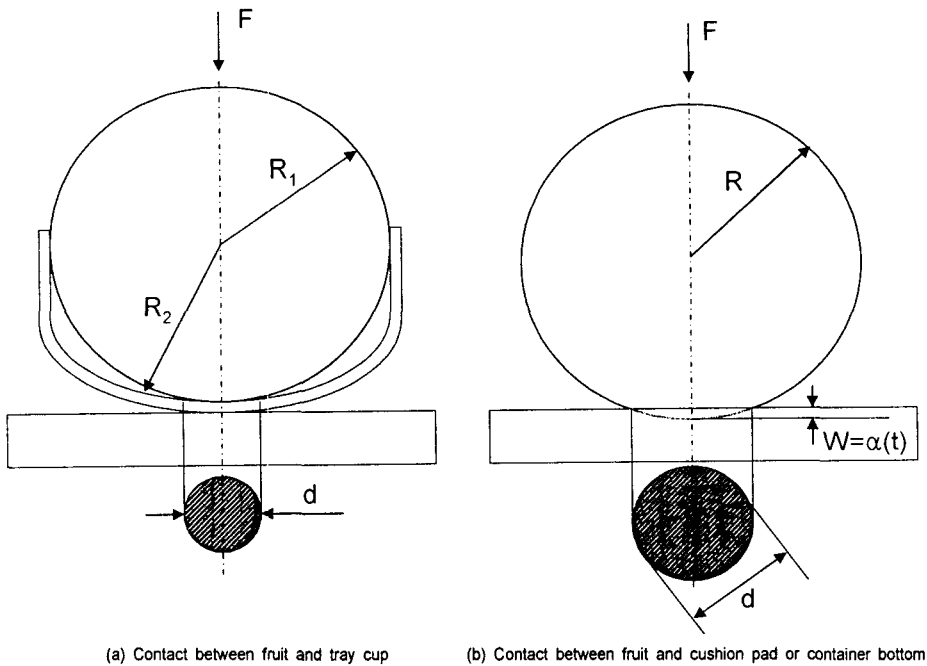


Fig. 1. Typical configuration of contact damage in produce packs.

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

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

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

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

만일, 과실이 그림 (1)의 (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( $E_2 \gg E_1$ ),  $\delta_2 \cong 0$ ,  $E_1 = E$ ,  $\mu_1 = \mu$ 가 되므로 식 (6)는 식 (7)와 같이 정리된다.

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

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

또한 과실이 트레이컵과 접촉하고 있을 때의 접촉원의 직경은 다음과 같다.

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

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

$$\alpha = \frac{\lambda^2 d^2}{4} \quad \text{----- (9)}$$

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

$$w_1 + w_2 = \alpha \quad \text{----- (10)}$$

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

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

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

과실이 트레이컵과 접촉하고 있을 때 과실과 트레이컵 각각의 변형량은 식 (3-14)와 (3-16)으로부터 다음과 같이 각각 정리된다.

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

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

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

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

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

여기에서, 골판지 상자안에 과실에 대한 완충재로 골판지 완충패드를 삽입하였을 경우에는 과실에 멍이 생기지 않도록 보호하는 기능을 하게된다. 따라서, 과실에는 변형이 생기지 않을 경우( $w_1 = 0$ ) 유통 중 골판지 상자의 진동에 의한 충격력으로 인한 골판지 완충패드 및 트레이컵(polymeric foam)의 변형량을 추정해 볼 수 있으며, 이들 재료의 완충성능을 발휘할 수 있는 최대 충격력이 얼마인지의 추정이 가능하다.

## 2.2 실험방법

본 연구에서는 유통 중 탄성계수 1527 kPa, 질량 0.65 kg인 배에 가해지는 진동충격력에 의한 골판지 패드와 트레이컵(tray cup)의 충격 변형량을 위의 이론식을 적용하여 추정하였다. 여기에서 적용된 골판지의 탄성계수는 온도 및 상대습도에 따른 시편의 압축실험에 의한 시컨트 모듈러스 값을 적용하였으며, 포와송비는 배와 골판지 각각 0.234(Chappell et al., 1968)와 0.2(Pikey, 1994)를 적용하였다. 또한 트레이컵 재료의 탄성계수는 골판지와 같이 압축실험에 의한 시컨트 모듈러스 값인 149.01 kPa을 적용하였고, 포와송비는 0.2로 가정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 진동충격력에 의한 완충재의 변위

그림 (2)~(4)에는 양면 골판지와 이중양면 골판지 패드의 유통 중 진동가속도 수준에 대한 골판지의 추정된 변형량을 나타내었다. 두 종류의 골판지 패드의 경우, 저온·다습한 조건일수록 진동충격에 의한 골판지의 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.

일반적으로 유통 중 포장된 일반도로에서 발생될 수 있는 가속도 수준은 0.25~0.5 G-rms이므로, 골판지 패드의 충격 변형량이 매우 작다는 것을 알 수 있다. 하지만 높은 상대습도에서 장기간의 낮은 진동 충격력을 받게 되더라도 골판지 패드의 완충재로서의 기능을 상실하게 되고 과실에 손상을 입히는 결과를 초래하게 된다. 또한 이 추정은 포장되어 유통되는 배의 손상변위가 발생하지 않는다고 가정하에서 추정된 골판지의 변형량이며, 10 G-rms의 가속도 수준에서 유통되는 경우에는 과실의 손상 변위가 매우 심할 것이다.

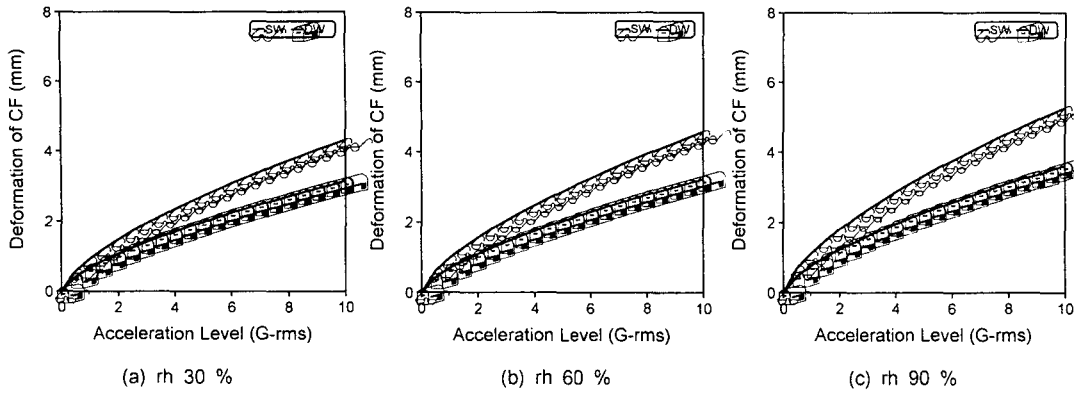


Fig. 2. Deformation of the corrugated fiberboard pad by vibration impact at the temperature, 3 °C.

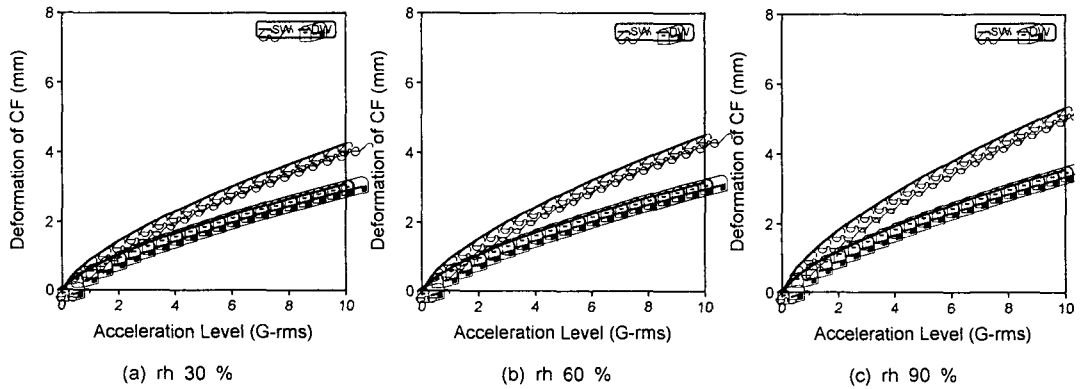


Fig. 3. Deformation of the corrugated fiberboard pad by vibration impact at the temperature, 13 °C.

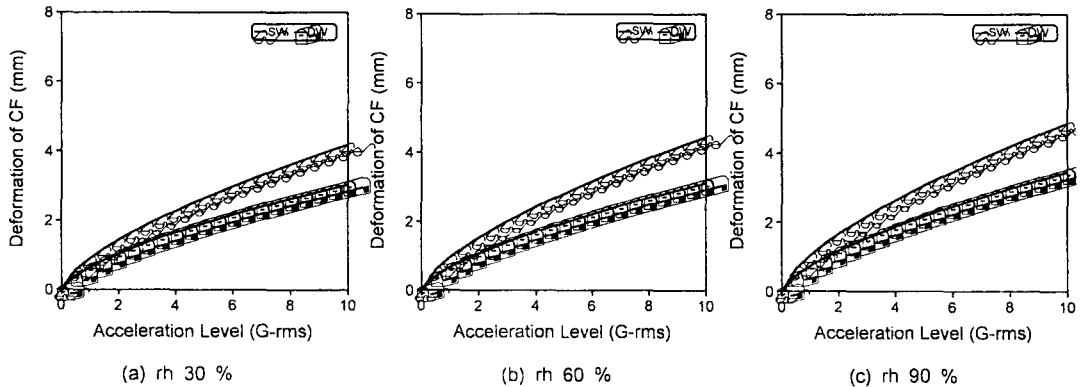


Fig. 4. Deformation of the corrugated fiberboard pad by vibration impact at the temperature, 23 °C.

그림 (5)는 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, 완충재 로써의 기능과 과실들간의 충돌에 의한 손상을 방지하기 위하여 사용되고 있으며, 골판지 패드와 비교하면 두

께가 얇기 때문에 작은 충격력에 대해서는 높은 완충성을 나타내지만, 높은 충격력의 경우에는 모든 충격력을 흡수하지 못하고 배로 전달되어 배의 손상을 초래하게 된다.

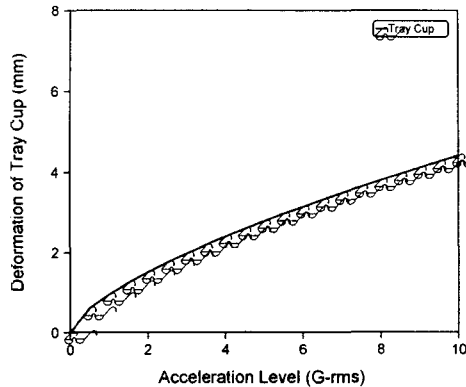


Fig. 5. Deformation of tray cup by vibration impact.

#### 4. 결론

유통 중 운송시에 발생될 수 있는 진동 가속도 수준(0.25~0.5 G-rms)에 대한 배 골판지 상자의 완충재로 이용되고 있는 골판지 패드와 트레이컵의 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, 이 중앙면골판지의 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.

#### 참고문헌

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. Mohsenin, N. N. 1970. *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach.
5. Pilkey, W. D. 1994. *Stress, strain and structure matrices*. John Wiley & Sons, Inc.
6. Timoshenko, S. and Goodier, J. N. 1951. *Theory of elasticity*. McGraw Hill, New York.
7. 한국표준협회. KS A1026. 포장 화물의 평가 시험 방법 통칙.