완충포장의 기초이론(7)

이명훈/한국포장시스템연구소 소장

목 ● 차

6.기계적인 충격

6-0.개요

유통과정중에는 포장화물을 떨어뜨리거나 던지거나 발로 차는 등 여러가지 부적절한 취급을 할 수가 있다. 구체적으로는 컨베이어나 포크리프트에서 바닥으로 떨어지던가 수송용기에 의한 충격, 즉 트럭의 출발 및 정지, 도로상의 움푹 팬 구멍위나 철길, 교차로를 지날때 혹은 회차의 연결 동작 등에서 기계적 충격이 일어난다. 이러한 경우 포장화물은 바닥이나 트럭적재면, 파렛트 혹은 다른 포장화물들과 충돌하게 되며 이 충격은 양쪽 물체에 기계적인 충격을 일으키게 된다.

물리학적으로 이야기하지면 기계적 충격이란 물체의 위치, 속도 혹은 가속도가 갑작스럽게 변할때 일어난다고 말할 수 있다. 이 충격은 또한 가속도의 급속한 증가에 이어 매우 단 시간내에 급속한 감소를 가져오는 특징이 있다. 대부분의 충격이 시간 대 가속도를 그래프로 나타내보면 그림 6.1a와 같이 매우 단순하다. 이것을 그림 6.1b와 같이 곡선으로 나타내 보면 이해하기 쉬울 것이다.

일반적으로 포장화물에 가해지는 충격치는 20ms(0.02초)동안 지속되고 약 150g의 크기 혹은 '높이'를 가진다. 기계적 충격은 가해진 무게와 지속된 시간의 곱이라고 여겨진다. 만약 독자가 200g의 충격을 받았다면 독자는 순간적으로 45,000 파운드의 무게가 나가는 것처럼 느껴질 것이다. 이것은 신체의 근육과 신경시스템에 의해 어느정도 충격을 흡수하기 때문에 크게 느껴지지 않겠지만 만약 이러한 충격이 좀더 계속된다면 독자에게 매우 나쁜 결과를 가져다 줄 수도 있을 것이다. 포장화물에 주는 충격은 크던 작던간에 파손의 원인이 될 수 있다.

6.1 자유 낙하 화물

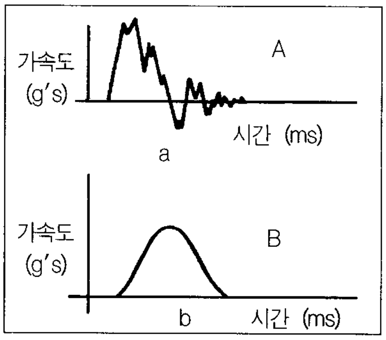
이 연재를 처음 시작할 때 자유낙하 물체에 대해서 2.4장에 언급하였다. 공식 2.6과 2.7로 충격속도 V_I에 대해서 나타내었다.

$$t=\sqrt{\frac{2h}{g}} \qquad 2.6$$

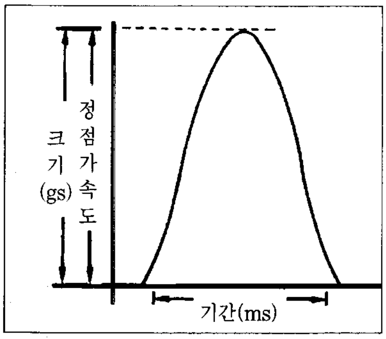
$$V_I=\sqrt{2gh} \qquad 2.7$$

그림 6.3은 낙하에 대하여 나타내었는데, 경험상으로 작은 물체가 큰 물체 즉 바닥면에 부딪치게 되면 되튕기게 된다. 되튕기는 정도는 서로 부딪치는 두 물체의 특성에 따라 다르다. 콩을 가득담은 자루가 콘크리트 바닥에 떨어진다면 결코 되튕기지 않을 것이나 럭비공이라면 떨어진 부위 근처로 다시 되튕기게 될 것이다. 마찬가지로 포장화물은 자체의 특성이나 부딪치는 표면의 특성에 따라 많이 되튕기거나 적게 되튕기는 것이 결정된다. 복원계수(coefficient of restitution) e는 충격속도의 함수로서 되튕김속도를 나타낼때 사용된다.

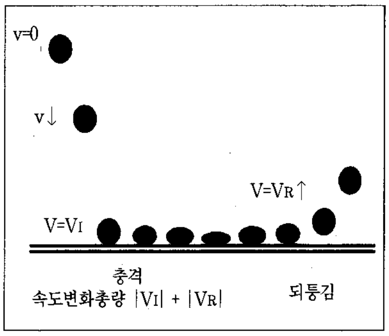
〔그림6. 1〕 기계적인 충격



〔그림6. 2〕 기계적 충격을 나타내는 인자



〔그림6. 3〕 낙하하는 포장화물



$V_R = eV_I$ 6.1

e는 0과 1 사이의 값을 가지며 0.3에서 0.5 사이가 일반적이다.

e가 1보다 크다는 것은 되튕김 속도가 충격속도보다 크다는 뜻이며 포장화물이 떨어진 지점보다 더 높이 튕겨 올랐다는 뜻이 된다.

속도변화(Velocity Change) 총량 $\triangle V$는 되튕김 속도와 부딪치는 속도 즉 충격 속도의 절대치의 합이 된다.

$\triangle V = |V_I| + |V_I|$ 6.2

e와 V_I를 알고 있으므로

$\triangle V = (1+e)V_I (1+e)\sqrt{2gh}$ 6.3

또한 $0 \le e \le 1$ 이므로

$\sqrt{2gh} \le \triangle V \le 2\sqrt{2gh}$

6.4식으로부터 충격시의 속도변화를 어느정도 추정할 수 있다.

속도변화량은 그림 6.4에서 가르키는 부분의 면적량과 동일하다.

포장화물의 파손은 기계적 충격과 관련하여 다음의 3가지 요소와 관련이 있다. 즉 정점가속도, 지속기간, 속도변화량 이 3요소중 2가지 요소를 알게되면 나머지 한 요소도 추정할 수 있다.

6.2 기계적 충격에 관한 이론

Mindlin은 2차대전중 레이다 튜브의 수송포장 시스템을 단순화시켰다. 그림 6.5에서처럼 제품과 포장 시스템은 4가지 요소 즉 외부포장용기, 완충재, 제품, 가장 민감한 부분 등으로 나눌 수 있다.

가장 민감한 부분이라는 것은 제품내부에서 가장 파손되기 쉬운 부분(예를 들면 레이다 튜브의 휠라멘트 부분)을 말하며 기계적 충격에 의해 가장 쉽게 파손되는 부위라고 할 수 있다.

이 모델을 그림 6.6에서와 같이 수학적으로 단순도식해 볼 수도 있다.

이것은 제품이 충격에 의해 파손될 수 있음을 보여주고 있는데 이 그림에서

M_2: 제품의 무게

M_1: 민감요소의 무게 혹은 CE

M_3: 외부포장용기의 무게

K_1: 민감요소를 나타내는 스프링 무게추 시스템의 선형스프링 산수

K_2: 완충시스템의 선형스프링 상수

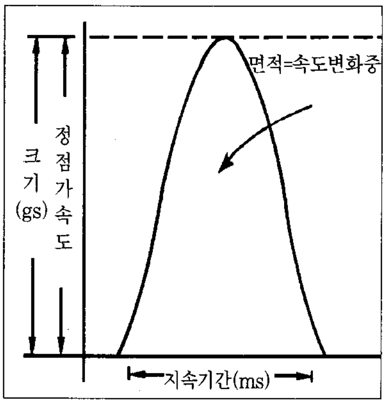
좀더 단순하게 나타내기 위해서 외부포장용기의 무게는 무시하고 아무런 스프링 역할을 하지 않는다고 가정한다. 또한 완충재는 무게를 무시하며 충격을 받고서 영구 변형하지는 않는다고 가정한다. 제품-포장시스템은 완벽하게 단단한 바닥으로부터 충격을 받는다고 가정하며 $M_1 \ll M_2$라고 하자. 즉 민감부분의 질량은 제품의 질량과 비교할때 무시할 수 있는 정도라고 하자.

그림 6.7에서 포장제품이 높이 h만큼 들어 올려지면 떨어뜨린다. A에서 위치에너지(Potential Energy)는 다음과 같이 표현된다.

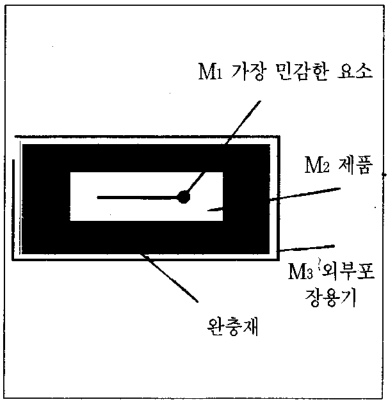
$PE = M_2gh = W_2H$ 6.5

여기에서 M_2g는 제품의 무게로서 W_2로 표현할 수 있다. C지점에서 외

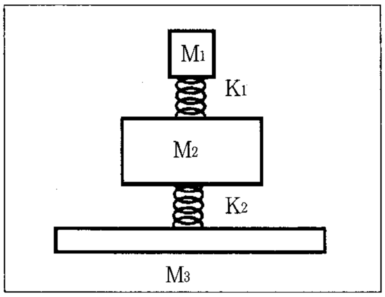
〔그림6. 4〕 충격요소간의 상관관계



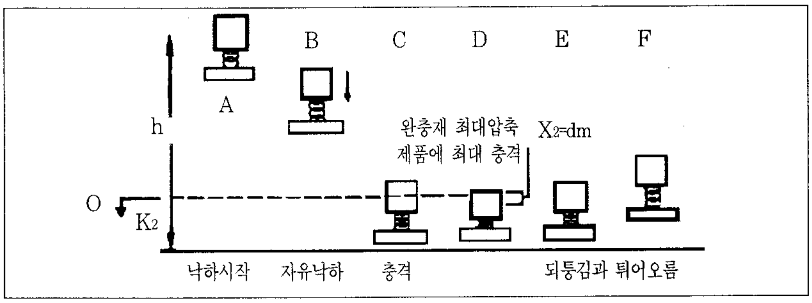
〔그림6. 5〕 일반적인 제품 포장시스템



〔그림6.6〕 그림 6.5를 단순화한 스프링-무게추 모델



〔그림 6.7〕 제품-포장시스템의 충격



부포장용기는 부딪치는 바닥표면에 닿게 된다.

이 지점에서 제품이 완충재에 압박을 가하기 전에 참조선을 설정해 놓음으로서 완충재의 아래방향 변위 X_2를 잴 수 있다.

C 지점에서 시스템의 운동에너지는 다음과 같다

$KE = 1/2M_2V_1^2$ 6.6

여기에서 충격속도는 공식 2.7

($V_1=\sqrt{2gh}$)에 나타나 있으므로 이를 대입하면

$KE=1/2M_2(2gh)_2=M_2gh=W_2h$ 6.7

따라서 이 지점에서의 운동에너지는 이시스템의 초기 위치에너지와 같다. 포장용기가 바닥에 떨어져 닿은 직후 완충재는 이 운동에너지를 흡수한다. 이때 선형 완충재에 의하여 흡수된 에너지의 양은 다음과 같다.

$E=1/2K_2X_2^2$ 6.8

여기에서 X_2는 완충재에 둘러 싸여있는 제품의 아래방향 변위를 나타낸다.

D지점에서 완충재는 시스템의 운동에너지를 전부 흡수하게되고 제품의 아랫방향 속도는 0에 접근하게 된다. 이점에서 완충재는 최대 변형(dm)을 나타내게 되는데

최대 압축 $dm=X_2$의 최대치가 된다.

따라서 식 6.7은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$Emax=1/2K_2dm^2$ 6.9

완충재에 의해 흡수된 최대에너지량이 충격시 시스템의 운동에너지와 같으므로 식 6.7와 6.9는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$KE = W_2h = Emax = 1/2K_2d^2m$

$W_2h= 1/2K_2d^2m$ 6.10

식 6.10을 최대압축에 대하여 다시 정리하면

$$dm=\sqrt{\frac{2W_2h}{K_2}} \quad 6.11$$

선형완충재상의 제품에 대한 정적 변형은

$$\delta\, st=\sqrt{\frac{W_2}{K_2}}$$

라고 정의한바 있다. 따라서 식 6.11은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$dm=\sqrt{2h\delta\, st}$ 6.12

제품에 의해 완충재에 가해진 힘에 저항하는 최대 반발력 Pmax는 $X_2=dm$일때 일어나게 된다.

$$Pmax = K_2X_2 = K_2dm$$

$$= K_2\sqrt{\frac{2W_2h}{K_2}}$$

$Pmax=\sqrt{2K_2W_2h}$ 6.13

제품에 적용되는 최대가속도(혹은 감속도)Gm은 다음과 같이 정리된다.

$$Gm=\frac{Pmax}{W_2} \quad 6.14$$

$$Gm=\sqrt{\frac{2K_2W_2h}{W_2}}$$

$$Gm=\sqrt{\frac{2K_2h}{W_2}} \quad 6.15$$

여기에서 Gm은 원칙적으로 단위가 없으나 g(지) 단위로 이해하면 된다.

$\delta\, st=\frac{W_2}{K_2}$ 이므로

$Gm=\sqrt{\frac{2h}{\delta\, st}}$ 가 된다 6.16

식 6.15와 6.16을 보면 Gm은 낙하높이의 제곱근에 비례함을 알 수 있다.

즉 $Gm \propto \sqrt{h}$

이는 낙하높이를 두배로 하여도 충격의 크기는 두배가 되지 않는다는 의미이며 $\sqrt{2}$ (약1.4)배 정도 증가하게 된다.

식 6.15를 K_2에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$K_2 = \frac{W_2G^2m}{2h} \quad 6.17$$

식 6.11을 다시 정리하면

$$K_2 = \frac{2W_2h}{dm^2} \text{ 가 된다.} \quad 6.18$$

식 6.11에 $\sqrt{\frac{2h}{2h}}$를 곱하면

$$1 \times dm = \sqrt{\frac{2W_2h}{K_2}} \times \sqrt{\frac{2h}{2h}}$$

$$dm = \sqrt{\frac{2W_2h2h}{K_22h}} = 2h\sqrt{\frac{W_2}{2K_2h}}$$

$$dm = \frac{2h}{\sqrt{\frac{2K_2h}{W_2}}}$$

$$\therefore dm = \frac{2h}{Gm} \quad 6.19$$

따라서 최대 압축력은 최대 가속도와 낙하높이의 함수로 표현할 수 있다. 다음 몇가지 예는 이 식이 어떻게 사용되는가를 보여준다.

문제풀이) 최대가속도시 82 lb의 하중과 62g의 압출력을 가진 제품이 11ft 높이에서 낙하했을 때 완충재의 dm과 K_2를 구하시오

풀이)

W_2=82lb, h=11ft=132 in, Gm=62

$$dm = \frac{2h}{Gm} = \frac{2 \times 132in}{62}$$

$$= 4.26in$$

식 6.17에서

$$K_2 = \frac{W_2Gm^2}{2h} = \frac{82lb(62)}{2 \times 132in}$$

$$=1194lb/in$$

82 lb의 완충포장제품의 K_2는 1194 lb/in가 되고 11ft에서 떨어질 경우 62g의 충격을 받게되며 완충재는 4.26인치가 눌려지게 된다. 따라서 이러한 충격을 제대로 흡수하기 위해서는 이 완충재는 최소한 4.26인치 이상의 두께로 설계하여야 한다.