

## 완충포장의 기초이론 및 문제연습(1)

이명훈/한국포장시스템연구소 소장

### 목 차

#### <머리말>

1. 서론 : 유통중의 위험성
2. 가속도
  - 2-0. 기본개념
  - 2-1. 질량(Mass)
  - 2-2. 동작에 관한 기본 공식
  - 2-3. 포장에의 적용

#### <연습문제>

### <머리말>

근래 환경 문제가 부각되면서 완충 포장에 대한 중요성도 커지고 있다. 우리는 완충포장을 공부하면서 G factor, 동적 완충, 정적 완충, 완충 특성 곡선 등등 완충 포장 설계를 위한 많은 개념들을 듣게 되지만, 과연 이러한 개념들이 어떠한 배경에서 생겨났으며 왜 필요하고, 완충포장 설계에는 구체적으로 어떻게 적용되는지 잘 알지 못하는 상태에서 기계적으로 공식에 맞추어서 필요한 수치를 산출하는 경우가 많다.

근본을 이해하지 못하고 암기에 의하여 습득한 지식은 머리 속에 오래 머물지 못한다는 것은 상식적인 이야기이다. 낙하는 왜 일어나는지, 충격은 어떤 경로로 제품에 전달되는지 등등 완충포장을 공부하려면 가장 쉬운 부분부터 철저히 이해하는 것이 필요하다.

이 강좌는 한편의 훌륭한 교재를 주로 번역하고 연습문제를 보강한 내용으로 이루어져 있다.

주 교재인 "Fundamentals of

Packaging Dynamics"는 미시간 주립대학교(MSU) 포장학과 교수인 중국계의 Dr. Lee의 共著로서 「포장역학」 과목의 교재로 쓰이고 있다.

필자는 MSU에서 공부하던 시절에 Dr. Lee로부터 한글 번역에 대한 구두 허락을 얻었는데, 본 강좌는 주 교재의 번역 뿐만 아니라 매회 연습문제를 별도 수록하여 강좌 내용을 복습할 수 있도록 꾸몄다. 또한 기초이론에 대한 강좌가 마무리되면 완충포장 설계에 대한 실무 연습까지 범위를 넓힘으로써 완충포장에 대한 완벽한 이해를 돕고자 한다.

※ 원본에 충실하기 위하여 사용되는 단위는 우리에게 익숙한 mks(meter, kilogram, second) 대신에 fps(feet, pound, second)를 사용하였다.

본 강좌는 완충포장에 대한 가장 기초적인 설명으로부터 출발하여 구체적인 설계 기법에 이르기까지 차근차근 수준을 높여갈 것이므로 관심이 있는 독자들은 인내심을 가지고 꾸준히 숙독하기를 권하는 바이다.

### 1. 서론 : 유통중의 위험성

포장이인 지향하는 목표중의 하나는 저렴한 방법으로 제품을 파손시키지 않고 운송하여야 한다는 것이다. 위험 물질로부터 인명과 재산이 안전하게 보호되어야 하듯이 제품도 운송도중에 파손 위험성으로부터 벗어나야 할 것이다.

소비상품에 대해서 소매업자는 제품이 온전한 상태로 입수하여 쉽게 팔 수 있기를 기대한다.

따라서, 포장과 제품은 열악한 유통환경에도 견딜 수 있도록 설계되어야 할 것이다. 상품을 제조하는 측면에서 볼 때, 제품과 포장은 최종 소비자에게 도달하여 포장이 제거되고 이것이 다시 회수될 때까지 맞닥뜨릴 수 있는 모든 위험요소로부터 견딜 수 있어야 한다. 유통중의 위험요소는 매우 다양하다. 때문에 포장 제품이 처하게 될 상황을 정확하게 예견한다는 것은 거의 불가능하다.

예를 들어, 포장된 제품이 한 장소에서 다른 장소로 옮겨진다면 이 제품이 맞닥뜨릴 수 있는 여러 가지 경우를 [그림 1-1]에 나타내었다.

제품은 우선 회사 내의 창고로 운반되는 과정에서 적재 및 하역 과정을 거치게 되며 곧이어 트럭에 실려 중간 집하장으로 운송된다. 이것은 다시 대형 트럭에 실려 다른 지역의 중간 집하장으로 이동되며 여기서 다시 소형트럭으로 최종 목적지까지 운반되게 된다. 아마 소형트럭으로 최종목적지까지 도달하는 데는 2~3번의 과정을 더 거칠 수도 있을 것이다.

이와 같이 비교적 단순한 유통 경로를 거치는 데에도 포장제품은 약

12~15회의 적재, 하역 과정을 겪게 되고 4~5대의 트럭 운송이 필요하게 된다. 유통과정이 좀더 복잡한 경우는 무려 46회의 적재, 하역 과정을 겪기도 하였으며 공장으로부터 보관창고를 거쳐 소비자에 이르기까지 철도, 트럭, 대형 트레일러, 선박 및 항공기 등이 동원되기도 한다.

포장제품이 유통과정을 통하여 동적하중(動的荷重)을 받게 되는 주요 요인은 다음과 같다.

1. 수동 하역 : 포장제품을 인력에 의하여 운반하거나 적재, 하역시 떨어뜨리거나 던지는 경우
2. 창고 하역 : 포크리프트, 콘베이어 등의 기계 하역 장비를 사용 할 때 받는 스트레스
3. 차량에 의한 충격 : 트럭, 화차, 선박, 항공기 등에 의한 운반시 출발, 정지 등에 의한 순간 충격
4. 차량에 의한 진동 : 도로나 철로 위를 달릴 때의 진동 혹은 엔진 작동에 의한 진동

위의 네 가지 여건은 포장제품에 진동과 충격을 주게 된다. 따라서 포장은 유통으로 인한 손상을 최소화하는 설계이어야 하며 제품 자체도

이러한 요인을 충분히 고려하여 설계되어야 할 것이다. 다음 장에 이러한 제반 요인을 좀더 자세하게 설명하고자 한다.

### 2. 가속도

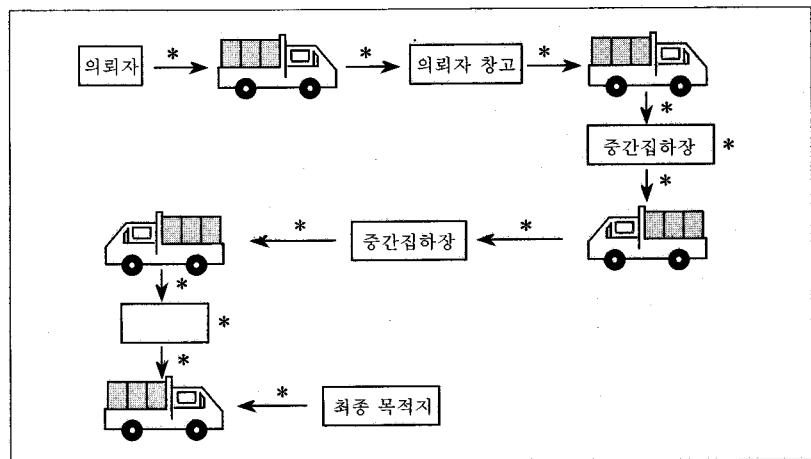
#### 2-0. 기본 개념

가속도의 개념은 유통 중 포장제품에 발생하는 동적하중을 이해하는 데 있어서 가장 중요한 요소이다. 가속도를 이해하기 위하여 공간, 시간, 동작에 대한 기본 법칙부터 설명하기로 한다.

자동차를 운전하려면 우선 좌석에 앉아야 하는데 이때는 시동을 켜지 않으므로 속도는 0이 된다. 키를 돌려 엔진을 구동시키고 사이드 브레이크를 풀면서 기어를 넣게 된다. 엑셀레이터 페달을 밟으면 차가 움직이게 되고 점차 속도가 올라간다. 원하는 만큼의 속도, 예를 들어 시속 35마일에 이르게 되면 속도를 그대로 유지하기 위하여 엑셀레이터를 늦추게 된다.

정지신호를 보면 브레이크를 밟아

(그림 1-1) 단순유통시스템(\*표시는 잠재적인 위험성을 나타낸다.)



완전히 정지할 때까지 속도를 늦추게 된다. 위에 든 예에는 여러 가지 개념이 들어 있는데 그것들은 다음과 같다.

속력(Speed) : 움직이는 물체가 단위 시간당 이동한 거리를 말한다. 위의 자동차는 한 시간에 35마일을 이동하였다. 따라서 이 속력으로 2시간 운행하게 된다면 70마일을 운행하게 된다.

(2시간×35마일/시간)

속도(Velocity) : 어떤 물체의 속력과 방향을 모두 합축하는 개념이다. 즉 위의 예를 들면 자동차가 서쪽 방향으로 시간당 35마일의 속도로 이동한다고 말할 수 있다. 즉 벡터량을 포함하는 개념이다. [그림 2-1]에서 보듯이 두 자동차는 같은 속력(speed)을 가졌으나 다른 속도(Velocity)를 나타내고 있다.

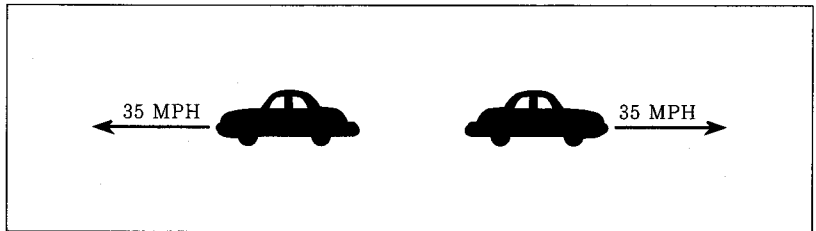
가속도(Acceleration) : 자동차는 가속 페달을 밟으면서 0에서부터 35마일의 속도로 변하게 되는데 가속도는 시간에 대한 속도의 변화율로서 정의된다. 위의 예에서 만일 0에서 35마일까지 속도가 변하는데 1분이 걸렸다고 한다면

$$\begin{aligned} \text{가속도} &= \frac{\text{속도 변화}}{\text{시간 변화}} \\ &= \frac{35\text{mph} - 0\text{mph}}{\frac{1}{60} \text{ 시간}} \\ &= 2,100 \text{ 마일/시간}^2 \end{aligned}$$

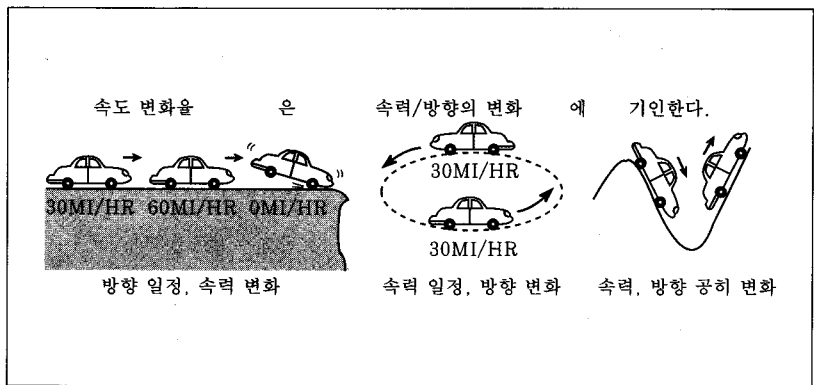
(1분을 시간단위로 환산함으로써 단위가 틀리지 않아 계산이 용이하게 된다.)

이 가속도는 꽤 큰 것처럼 보인다. 사실 만일 한시간 내내 이 수준의 가속도를 유지하게 된다면 2,100mph의 속도(대략 소리의 3배 속도)로 운행하게 될 것이다. 다만 1분 동안만

(그림 2-1) 같은 속력, 다른 속도



(그림 2-2) 가속도



이 가속도가 적용되었으며 최종속도 35mph는 속도 한계점으로 미리 설정되었던 것일 뿐이다.

어떤 물체의 가속도는 시간에 대한 속도의 변화율을 나타내며 이 변화는 물체의 속력이나 진행방향 혹은 두 가지 모두에 기인한다.

### 2-1. 질량(Mass)

가속도의 개념을 좀 더 깊이 이해하기 위하여 다음의 개념들을 알아보고자 한다. 질량(mass)이란 어떤 물체를 형성하는 물질의 양을 나타내는 척도인데 중력장의 영향하에 있을 때에는 무게(Weight)로 표현된다.

이 개념을 좀 더 구체적으로 이해하기 위해서 어떤 물체가 지표면에 낙하하였을 경우를 살펴보기로 하자.

[표 2-1]은 어떤 물체가 지표면에 1초 동안 자유 낙하하는 과정을 나타낸 것이다.(여기에서 공기 저항의 영

향은 무시하였다.)

물체가 낙하하면서 순간속도\*는 증가하는데 점차 비거리가 커진다.

최초의 0.2초까지 물체는 7.7인치 를 낙하하였는데 그 다음의 0.2초 동안에는 23.2인치를 움직였다.

(\* 순간속도란 물체가 운동하는 도중의 어떤 한 순간의 속도를 말한다. 만약 이 물체가 등속도로 움직인다면 순간속도는 평균속도와 같아질 것이다.)

이렇게 계속 증가하는 속도는 가속도 때문인데 이는 물체의 질량과 지구의 질량 사이에 서로 끌어 당기는 현상에 기인한다.

두 질량 사이에 서로 끌어 당기는 것은 물체에 작용하는 힘으로 표현된다. 또한 이 힘은 물체를 놓았을 때 아래 방향으로 끌어 당기는 힘이라고 말할 수 있다. 지구의 질량에 기인하는 이 힘은 항상 존재하기 때문에 어

편 물체이든간에 지구의 중심을 향해 서 떨어지려고 하는 속성을 지니고 있으며 측정이 가능하고 바로 이 측정치가 물체의 무게라고 정의된다.

Newton의 제2운동 법칙에서 어떤 물체가 가지는 힘은 다음 식과 같이 질량과 가속도의 곱으로서 정의된다.

$$F=ma$$

대부분의 포장작업이 이루어지는 지표면 근처에는 중력장(重力場)이 거의 일정하므로 모든 물체는 같은 중력의 끌어 당기는 힘을 받게 된다. 결과적으로 지구에 의해 물체에 가해지는 아래 방향의 힘은 스프링 저울로 측정할 수 있다. 이 힘은 바로 물체의 무게를 말하며 무게=질량×중력가속도로 나타낼 수 있다.

중력가속도는 일반적인 "g"로 표시하고, 실험적으로 측정된 바에 의하면

$$g=32.2\text{ft}/\text{sec}^2$$

$$g=386.4\text{in}/\text{sec}^2$$

$$g=9.8\text{m}/\text{sec}^2\text{으로 표현된다.}$$

"g" 값은 지구의 어느 장소에서나 거의 변화가 없기 때문에 물체를 지구상의 어느 곳에서 측정하든간에 무

게는 일정하다.

무게는 지구 중력에 의한 끌어 당김의 결과이므로 만약 물체를 달의 표면에서 측정한다면 달이 지구보다 훨씬 적으므로 중력 가속도도 그만큼 적어져서 무게를 측정하면 지구에서 보다 1/6 정도에 불과하다.

마찬가지로 우주공간에서는 작용하는 질량이 없으므로 물체의 무게는 0이 된다.

지구상에 존재하는 모든 물체는 일정한 아래 방향의 힘을 받게 되는데 이 힘은 일정한 무게로 나타나며 일정한 가속도나 지구 질량에 의한 끌어 당김에 기인하는 것이다. 이러한 힘은 "1 g" (1지)로 표현된다.

만약 중력가속도가 열 배로 증가한다면 모든 물체는 10 g의 힘을 받게 되는데 이는 물체가 실제 무게보다 10 배 정도 무겁게 느껴진다는 것을 의미한다.

10 g의 가속도하에서는 100kg 체중을 가진 사람이 1,000kg으로 계측된다. 사실 10 g이라는 식의 표현은 가속도의 증가로 인해 물체의 무게가 몇 배로 커지는가 하는 것을 표현하는 수단을 의미한다.

가속도의 증가는 중력가속도가 변하기 때문에 일어나는 것이 아니고

물체가 갑작스럽게 움직이므로써 일어나게 된다.

포장에서는 이러한 변화가 진동, 충격 혹은 파손 등에 의해 일어난다. 다음 몇 가지 예를 들어 이러한 개념을 좀더 명확히 하고자 한다.

0에서부터 시속 60 마일까지 가속하는데 5초 밖에 안 걸리는 높은 마력의 스포츠카가 있다고 하자. 운전자는 과연 어느 정도의 수평방향 가속도를 받게 될 것인가? 5초 동안 가속도가 일정하다고 가정하면

$$\begin{aligned} \text{가속도} &= \frac{60\text{mph}-0\text{mph}}{5\text{ sec}} \\ &= 12\text{miles}/\text{hr. sec.} \\ &= \frac{12\text{miles}}{\text{hr. sec.}} \times \frac{5280\text{ft}}{\text{mile}} \times \frac{1\text{ hr}}{3600\text{sec.}} \\ &= 17.6\text{ ft}/\text{sec}^2 \end{aligned}$$

이것을 g값으로 나타내면

$$\frac{17.6\text{ ft}/\text{sec}^2}{32.2\text{ ft}/\text{sec}^2 \cdot g} = 0.55\text{ g}$$

운전자는 5초 동안에 대략 0.5 g의 힘을 체험하였다. 즉 만약 운전자의 체중이 100kg이라면 그는 50kg의 무게가 수평방향으로 좌석쪽으로 전달되는 것같이 느꼈을 것이다.

또다른 예를 들자면, 앞의 스포츠카가 40 mph의 속도로 전진중을 들이받았다고 가정하고 0.2초 동안 40mph에서 0mph로 속도가 변하였다면 앞의 예에서와 같은 방식으로 계산하면 가속도는

$$a = \frac{0\text{ mile}/\text{hr}-40\text{ miles}/\text{hr}}{0.2\text{ sec}}$$

$$= -294\text{ ft}/\text{sec}^2$$

-기호는 감속을 의미하는데 감속도를 g값으로 나타내면

$$a = \frac{294\text{ ft}/\text{sec}^2}{32.2\text{ ft}/\text{sec}^2 \cdot g} = 9.1\text{ g}$$

이 경우 100kg 체중의 운전자는 0.2초 동안 9.1배(910kg)의 힘이 운전대나 앞 유리창을 통하여 그에

[표 2-1] 자유 낙하 물체

시간(초)	(1/1000초)	낙하거리	속도
0	0	0 in	0 in/sec 아래 방향
0.1	100	1.9	7.7in } 38.6
0.2	200	7.7	
0.3	300	17.4	23.2 in } 115.9
0.4	400	30.9	
0.5	500	48.3	193.2
0.6	600	69.6	231.8
0.7	700	94.7	270.5
0.8	800	123.6	309.1
0.9	900	156.5	347.8
1.0	1000	193.2	386.4

게 밀려올 것이기 때문에 앞의 예보다 훨씬 위험한 상황에 처하게 될 것이다.

### 2-2. 동작에 관한 기본 공식

[그림 2-3]과 같이 일정한 가속도를 가진 공간상의 한 물체는 특정시간  $t$ 에서 평균가속도는  $a$ 가 된다. 만약 최초시간  $t_i$ 에서 물체를 측정하기 시작( $t_i=0$ 으로 설정)하고 이 때의 최초 속도를  $V_i$ 라고 하면 일정 시간 후(최종 시간  $t_f$ 로 설정) 물체의 위치와 속도를 추정할 수 있을 것이다.

[그림 2-4]는 물체의 속도와 시간 사이의 상관관계를 나타낸 것이다.

이것을 수식으로 표현하면

$$a = \frac{\text{속도의 변화}}{\text{시간의 변화}} = \frac{V_f - V_i}{t_f - t_i}$$

$$t_i = 0 \text{이므로 } a = \frac{V_f - V_i}{t_f}$$

$$at_f = V_f - V_i; V_f = V_i + at_f \quad (2 \cdot 1)$$

$a$ 가 일정하고 시간에 따른 속도 변화가 균일하다면 평균속도는

$$V = \frac{V_i + V_f}{2} \quad (2 \cdot 2)$$

만약  $t_i=0$ 에서 물체의 위치가  $X_i$ 에 있다면 시간  $t_f$ 에서 이 물체의 위치는  $X_f$ 라고 할 수 있다.

$$t_i \rightarrow t_f$$

$$X_i \rightarrow X_f$$

최종 위치  $X_f$ 는 최초 위치에다 평균속도와 경과시간의 곱을 합한 값이 된다.

$$X_f = X_i + V(t_f - t_i) = X_i + Vt_f = X_i + 1/2(V_i + V_f)t_f \quad (2 \cdot 3)$$

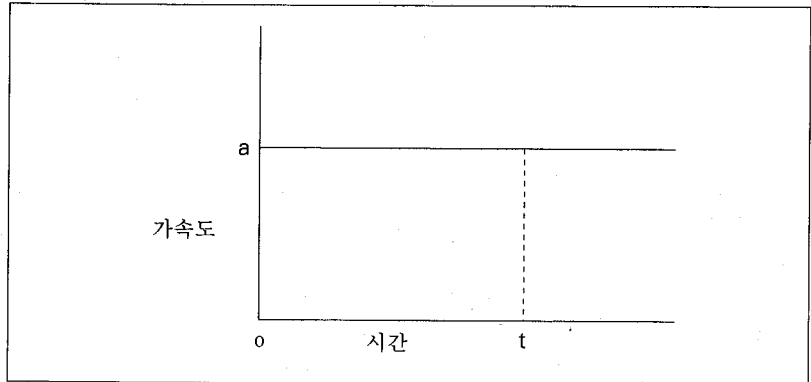
공식(2·1)을 (2·3)에 대입하면

$$\begin{aligned} X_f &= X_i + 1/2(V_i + V_i + at_f)t_f \\ &= X_i + 1/2(2V_i + at_f)t_f \\ &= X_i + V_it_f + 1/2at_f^2 \end{aligned}$$

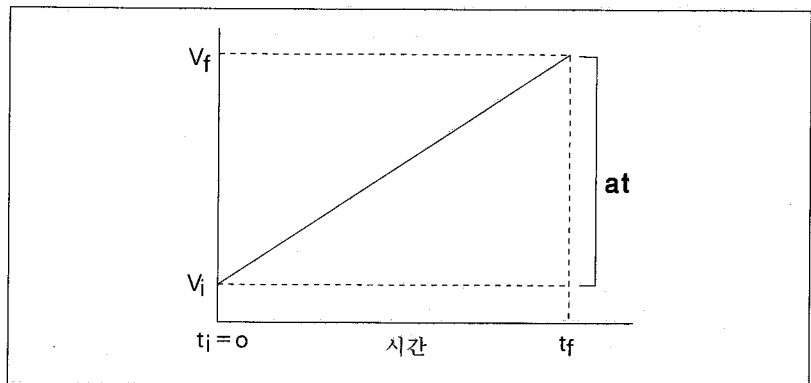
경과 시간  $t = t_f - t_i = t_f$ 이므로

$$X_f = X_i + V_it + 1/2at^2 \quad (2 \cdot 4)$$

[그림2-3] 일정 가속도



[그림2-4] 일정가속도에 의한 속도



공식(2·1)과 (2·4)에 의하여 일정한 가속도하에서 어떤 물체의 일정 시간 경과 후의 위치나 속도 추정이 가능하다.

지구의 중력이 일정하므로  $a=g$ 라고 한다면 위의 공식에  $a$  대신  $g$ 를 대입할 수 있다.

만약 높은 건물에서 구슬을 떨어뜨린다면 3초 후에 구슬의 위치와 속도는 어떻게 될까?

이 문제에서는 구슬을 떨어뜨리는 건물 옥상의 위치를 0 지점으로 놓고 시작시간  $t_i=0$ 으로 설정한다. 또한 구슬이 떨어지기 직전의 속도  $V_i$  역시 0이 된다. 3초 후에 구슬이 건물 옥상으로부터 어느 정도 낙하하였는지를 계산하려면 공식 (2·4)에서

$$\begin{aligned} X_f &= X_i + V_it + 1/2at^2 \\ X_f &= 0 + 0 \times 3\text{sec} + (1/2) \\ &\quad (32.2\text{ft/sec}^2) (3\text{sec})^2 \\ &= 144.9 \text{ ft} \end{aligned}$$

즉 구슬은 낙하한지 3초 후에 144.9 ft 만큼 떨어졌다. 이 때의 속도를 구하려면 공식(2·1)에서

$$V_f = V_i + at = 0 + gt = (32.2 \text{ ft/sec}^2) \times (3 \text{ sec}) = 96.6 \text{ ft/sec (아래방향)} \text{이 된다.}$$

### 2-3. 포장에의 적용

앞에서 정리한 내용을 포장화물이 바닥에 떨어졌을 경우에 대입하여 계산해 볼 수도 있을 것이다. 포장화물의 낙하시 충격 속도는 포장과 화물의 손상에 밀접한 관련이 있다.

낙하 높이와 같이 쉽게 알 수 있는 인자로부터 충격 속도를 구하려면 공식 (2·4)에서

$$X_f = X_i + V_i + 1/2 gt^2$$

여기에서 초기속도는 0이니까

$$X_f = X_i + 1/2 gt^2$$

낙하높이는 최종 위치와 초기위치의 차이를 말하므로

$$h = X_f - X_i = 1/2 gt^2$$

$$\text{즉 } t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (2 \cdot 5)$$

여기에서 t는 낙하높이 h에서 포장화물이 낙하하는데 걸린 시간이다.

충격속도를 구하기 위해서는 공식 (2·1)에서

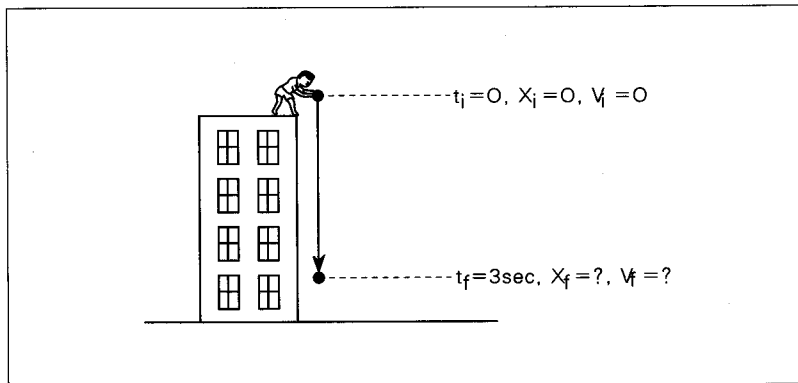
충격속도=최종속도

$$V_f = V_i + gt$$

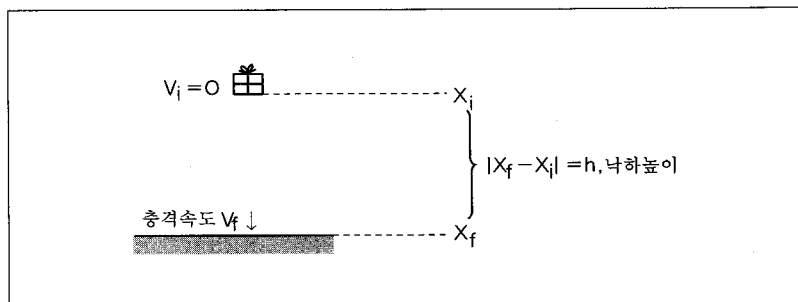
여기에서  $V_i = 0$ 이므로  $V_f = gt$

$$t = \frac{V_f}{g}$$

(그림2-5) 물체의 낙하



(그림 2-6) 일정한 높이에서의 낙하



공식 (2·5)에서

$$V_f = g \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{2gh}$$

충격속도를  $V_f$ 라고 하면

$$V_f = \sqrt{2gh} \quad (2 \cdot 6)$$

만약 포장화물이 4ft의 적재 높이에서 떨어질 경우 충격속도는 어떻게 될까?

$$\begin{aligned} V_f &= \sqrt{2gh} \\ &= \sqrt{2 \times 32.2 \text{ ft/sec}^2 \cdot 4 \text{ ft}} \\ &= 16 \text{ ft/sec (11 mph)} \end{aligned}$$

낙하하는데 걸린 시간을 계산하려면

$$\begin{aligned} t &= \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \text{ ft}}{32.2 \text{ ft/sec}^2}} \\ &= 0.5 \text{ sec (500 milliseconds)} \end{aligned}$$

만약 포장화물이 콘크리트 바닥에 0.003초 동안 16 ft/sec의 속도로부

터 0으로 변하였다면 충격 가속도는 어느 정도 될까?

$$\begin{aligned} \text{가속도} &= \frac{16 \text{ ft/sec} - 0}{0.003 \text{ sec}} = 5.333 \text{ ft/sec}^2 \text{ 후} \\ &\text{은 } \frac{5.333 \text{ ft/sec}^2}{32.2 \text{ ft/sec}^2 \text{ g}} = 166\text{g} \end{aligned}$$

즉 166g의 충격이 포장화물에 가해진다.

<연습문제>

1. 어떤 물체가 지표면에 자유 낙하할 때 1초, 5초, 10초 후에 각각의 위치와 속도를 산출하시오.

(답, 32.2 ft/sec, 16.1 ft; 161.0 ft/sec, 402.5 ft; 322.0 ft/sec, 1610 ft)

2. 물체의 낙하시 다음 각각의 속도에 이르렀을 때까지 낙하한 거리를 산출하시오.

낙하속도 : 24ft/sec, 55ft/sec, 100ft/sec, 200ft/sec

(답, 8.94 ft, 46.97 ft, 155.28 ft, 621.12 ft)

3. 포장화물이 4.5 ft 높이에서 낙하하였을 때 바닥에 닿을 때까지 몇 초가 걸렸는가? 또한 낙하 충격속도를 in/sec 단위로 산출하시오.

(답, 0.53 sec, 204 in/sec)

※ 구체적인 문제풀이를 원하시는 분은 편집실(☎780-9782)로 연락하시기 바랍니다.