

완충포장의 기초이론(10)

이명훈/한국포장시스템연구소 소장·한국포장학회 총무이사

목 차

7. 유통과정에서의 충격 제품의 파손특성 및 완충설계

7.2 파손한계곡선의 설계

7.3 완충설계와 제품보호

7.2 파손한계곡선(Damage Boundary Curve)의 설계

특정제품에 대한 파손한계곡선을 작성하는 방법은 ASTM D3332-77 충격기록계를 사용하여 제품의 기계적 파손성을 측정하는 표준시험 방법에 자세히 설명되어 있다. DBC의 몇가지 중요 특성을 강조하기 위하여 작성과정을 간단히 설명하자면, 첫번째 단계는 우선 한계속도변화(Critical Velocity Change: ΔV_c)를 산출하는 것이다. 이를 위해서는 매우 짧은 시간동안(일반적으로 2milli초) 충격 펄스를 일으키는 충격기록계가 사용된다. 제품을 충격기록계의 테이블에 고정시키고 낙하높이를 점차 높이면서 제품이 손상을 받을때까지 낙하시킨다.

그림 7.11a에 나타나듯이 각각 낙하높이가 점(ΔV , Gm)으로 표현되어 있다.

제품에 손상을 일으키는 점에 동그라미로 표시한다. 한계속도 변화량 ΔV_c 는 파손을 일으키는 점의 바

로 앞의 점이 된다. 수직선은 ΔV_c 에 대하여 플롯한다.

두번째 단계는 충격기록계를 다시 프로그래밍하여 사다리꼴 파형인 저가속도를 발생시키는 것인데 충격을 받는 면은 주로 가스 피스톤을 사용하게 된다.

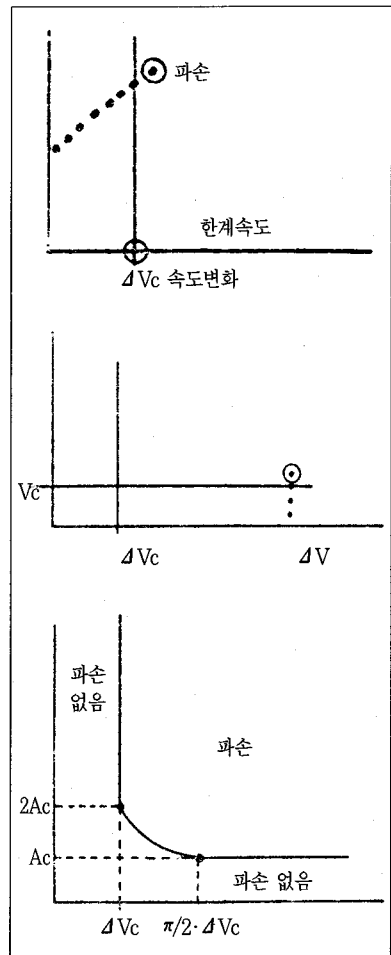
피스톤내에서 높은 가스압력은 비교적 높은 가속도치를 가진 짧은 사다리꼴 파형을 일으키는 반면 낮은 가스압력은 낮은 가속도치를 가진 긴 파형을 일으킨다.

충격기록계는 일정한 높이에서 가스 피스톤이 낙하되도록 셋팅되어야 한다.

낙하높이는 속도변화(Velocity Change)가 $\frac{\pi}{2} \Delta V_c$ 를 초과하는 범위내에서 선정함으로써 DBC의 우하면(右下面)을 이용할 수 있게 된다.

적절한 낙하높이가 정해지면 손상받지 않은 제품을 다시 충격기록계의 테이블에 고정시키고 낙하시험을 계속한다. 낙하는 가스 피스톤의 압력을 점점 높임으로써 속도변화는

(그림7.11) 파손 영역곡선의 작성



(표7.3) 시험 데이터

△Vc에 대한 시험			Ac에 대한 시험		
낙하No.	높이	결과	낙하No.	가스압	결과
1	2inch	파손없음	7	50Psi	파손없음
2	3inch	파손없음	8	100Psi	파손없음
3	4inch	파손없음	9	150Psi	파손없음
4	5inch	파손없음	10	200Psi	파손없음
5	6inch	파손없음	11	250Psi	파손없음
6	7inch	파손발생	12	300Psi	파손없음
			13	350Psi	파손발생

고정되어 있는 반면 가속도치는 점차 증가한다(펄스 지속시간은 낙하할 때마다 점차 감소한다).

△Vc, Gm은 그림 7.11b 와 같이 플롯된다. 파손지점 바로 앞의 가속도 지점을 한계가속도(critical acceleration) Ac라고 하며 X축 방향으로 도식한다.

DBC를 작성하는 마지막 단계는 왼쪽 하단의 각진 코너를 곡선으로 연결시키는 것이다.

그림 7.11C에 나타난 것처럼 △Vc, 2Ac 지점과 $\frac{\pi}{2}\Delta Vc, Ac$ 를 연결시킨다.

(표7.4) 충격 기록계 보정치

2ms half-Sine Programmers

낙하높이	ΔV	g's
2"	55in/sec	160
3"	72in/sec	215
4"	83in/sec	260
5"	91in/sec	305
6"	97in/sec	340
7"	107in/sec	370
8"	114in/sec	400
9"	121in/sec	430
10"	128in/sec	455
11"	135in/sec	480
12"	141in/sec	515
13"	147in/sec	540
14"	153in/sec	560
15"	159in/sec	580
16"	164in/sec	605
17"	169in/sec	620
18"	174in/sec	
19"	179in/sec	
20"	184in/sec	

Gas Programmer

낙하높이	ΔV	Gas Pressure	g's
3"	80in/sec	50psi	9
6"	110in/sec	100psi	18
12"	140in/sec	150psi	27
18"	170in/sec	200psi	36
24"	200in/sec	250psi	45
30"	230in/sec	300psi	54
36"	260in/sec	350psi	63
42"	290in/sec	400psi	72
		450psi	81
		500psi	90
		550psi	99
		600psi	108
		650psi	117
		700psi	126
		750psi	135

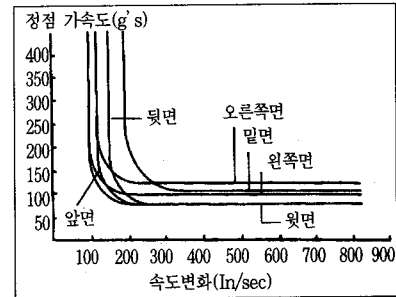
이 세가지 단계를 거쳐 작성된 DBC는 제품의 한쪽 방향에 대한 것이므로 전체적인 파손특성을 알려면 그림 7.12와 같이 여러개의 DBC를 작성하여야 한다.

실례를 들면, 표 7.3에 있는 DBC 시험 데이터는 표 7.4의 충격기록계 보정치를 이용하여 그림 7.13과 같이 DBC를 작성할 수 있다.

7.3 완충설계와 제품보호

상업적으로 이용되고 있는 완충재는 보통 그림 7.15와 같이 완충곡선을

(그림7.12) 제품 부위별 DBC



을 만들 수 있다.

그림에서 x축을 정적하중, y축을 최대가속도(혹은 감속도)로 놓고 완충재 두께별로 완충 특성을 플롯한다. 정적하중은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{정적하중} = \frac{\text{제품무게}}{\text{완충면적}}$$

이 곡선들은 다양한 낙하높이와 1회 낙하 혹은 수회 낙하에 대하여 여러가지로 작성할 수 있다. 여러번 낙하시험 자료가 필요한 이유는 많은 완충재들이 충격시마다 완충성능이 줄어들어 결국에는 완전히 완충력을 잃어버릴 수 있기 때문이다.

DBC에서 제품의 파손성에 관한 자료는 유통중 제품 보호를 위한 완충설계시 완충곡선의 파손성을 이는데 유용하게 쓰인다. 실례를 들자면,

50 1b 중량의 정육면체 제품이 한번의 길이가 12인치이었다. 제품의 파손영역 곡선은 그림 7.14과 같으며 유통중 최대 낙하가능 높이는 30 inch로 예상된다.

또한 유통중 적어도 한번 이상의 최대높이 낙하가 예상된다. 제품은 Ethafoam 220PE 완충재로 설계하고자 한다. 6면이 모두 같은 수치의 파손성을 가지고 있다고 가정하고 제품의 한계속도 변화는 100in/sec이고 한계 가속도는 60g's라고 한다.

첫번째 단계는 과연 이 제품이 완충을 필요로 하는가를 조사하는 것이다.

이를 위하여 30inch 낙하높이에서 가능한 최대 속도변화를 산출하고 이것(ΔV)을 ΔVc와 비교해 본다.

$$\begin{aligned} \Delta V (30'') &= 2\sqrt{2gh} = 2\sqrt{2 \times 386.4 \text{ Fn/sec}^2 \times 30''} \\ &= 304''/\text{sec}. \\ 304''/\text{sec} > \Delta Vc = 100''/\text{sec} \end{aligned}$$

30인치 낙하시 속도 변화량이 한계속도 변화량보다 크기 때문에 이 제품은 완충을 필요로 한다. 만약에 산출한 속도 변화량이 한계속도 변화량보다 작다면 완충할 필요가 없다.

다음 단계는 Ethafoam 220 완충재의 적정 두께를 선택하는 것이다. 그림 7.15(30inch 낙하높이, 2~5회 낙하)에 나타난 완충곡선을 이용, 60g's의 한계 가속도치에서는 1.1 PSI 정적 하중에서 2inch 두께 PE가 최대 가속도치를 나타낸다. 이것은 12in×12in의 면적하에서 정적응력이 1.1 lb/in²일때 충분한 완충성능을 가짐을 의미한다. 즉,

$$1.1 \text{ lb/in}^2 = \frac{50 \text{ lb}}{\text{완충면적}}$$

$$\text{완충면적} = \frac{50 \text{ lb}}{1.1 \text{ lb/in}^2} = 45.5 \text{ in}^2$$

따라서 제품의 각면은 2인치 두께 패드로 면적 45.5in²를 가진 완충포장이 적절하다. 종합적으로는

2in×6.74in×6.74in가 적당할 것이다.

한면에 집중적으로 완충재를 사용하는 오류를 피하기 위하여 대개 완충면적은 (1.33×두께)²보다 커야

한다.

PE완충재는 비선형(non-linear)이지만 최대 변형과 충격 지속시간을 다음의 식에 의하여 산출한다.

$$dm = \frac{2h}{Gm} = \frac{2 \times 30\text{in}}{60} = 1.0 \text{ inch}$$

$$K_2 = \frac{W_2 G m^2}{2h} = \frac{50 \text{ lb} \times 60^2}{2 \times 30\text{in}} = 3000 \text{ lb/in}$$

$$\tau = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{k^2 g^2}{w^2}}} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{3001\text{lb/인치} \times 386.4\text{인치/sec}^2}{501\text{lb}}}} = 0.02\text{초(혹은 20밀리초)}$$

포장제품의 무게, 부피, 표면적에 따라 완충설계를 하는 것도 중요하다.

6개 완충재의 총 무게는 Ethafoam 220의 밀도가 2.2 lb/ft³ 이므로

$$6 \times \frac{2\text{in} \times 45.5\text{in}^2}{1728\text{in}^3/\text{ft}^3} = 0.316 \text{ ft}^3$$

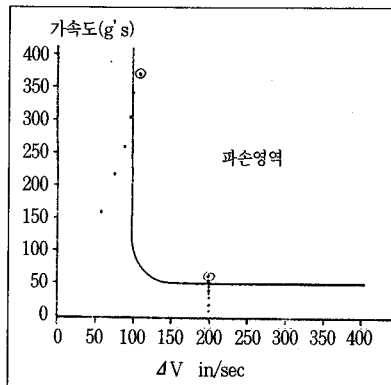
$$(0.316\text{ft}^3) \times (2.2 \text{ lb/ft}^3) = 0.695 \text{ lbs}$$

2인치 두께의 완충재가 제품의 6면에 붙으므로 필요한 상자의 내치수는 16in×16in×16in가 된다.

따라서 각 면의 면적은 16×16=256in² 최소 골판지 사용면적은 6면×256in²=1536in²이 된다.

이 상자의 부피는 16in×16in×16in=4096in³(2.37ft³)이 된다.

(그림 7.13) 표 7.3과 7.4에 의한 DBC



골판지의 무게를 무시하면 이 포장제품의 밀도는

$$\frac{50 \text{ lb} + 0.695 \text{ lb}}{4096\text{in}^3}$$

$$= 19.2 \text{ in}^2 \text{ (충격 흡수를 위한 최소면적 } 15.9 \text{ in}^2 \text{보다 크다)}$$

만약 예제에서 2in 두께 대신 3in 두께의 Ethafoam을 사용하였다면 정적하중은 2.6PSI가 된다.

따라서 완충 면적은,

$$\frac{50 \text{ lb}}{2.6 \text{ psi}}$$

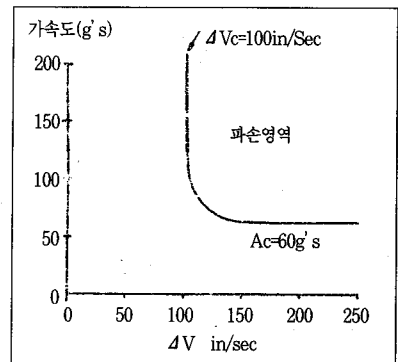
$$= 0.0124 \text{ lb/in}^3$$

(혹은 21.4 lb/ft³)이 된다.

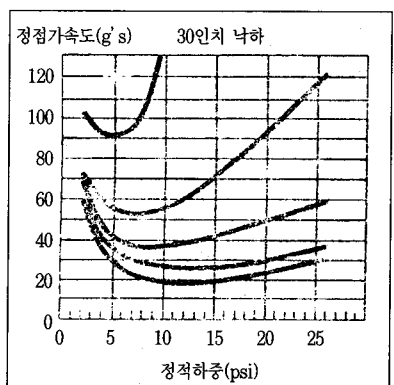
3in 완충재의 총무게는

$$6 \times \frac{39\text{n} \times 19.2\text{in}^2}{1728\text{in}^3/\text{ft}^3} \times 2.2 \text{ lb/ft}^3 = 0.440 \text{ lb}$$

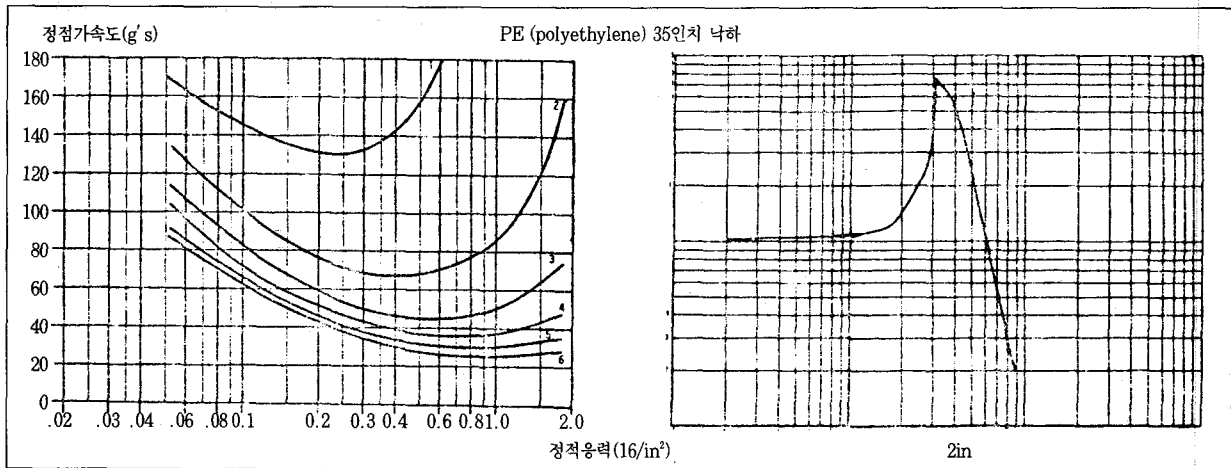
(그림 7.14) DBC 작성예



(그림 7.15) Dow에타폼 220에 대한 완충곡선



(그림 7.16) PE의 완충 및 전달성 곡선



제품 6면에 3in두께의 완충재를 대었을 경우 상자의 최소 부피는,

$$18in \times 18in \times 18in = 5.832in^3 (=3.38ft^3) \text{이며}$$

플판지 최소 사용면적은,

$$6 \times 324in^2 = 1944in^2 \text{이다.}$$

포장제품의 밀도는,

$$\frac{50 \text{ lb} + 0.440 \text{ lb}}{5832 \text{ in}^3}$$

$$= 0.0086 \text{ lb/in}^3 (=15.0 \text{ lb/ft}^3) \text{이다.}$$

이상의 결과를 요약하면, 2in 대신 3in 두께 완충재를 택하였을 경우

1. 상자의 면적은 $1536in^2$ 에서 $1944in^2$ 으로 27% 증가

2. 상자의 부피는 $2.37ft^3$ 에서 $3.38ft^3$ 으로 43% 증가

3. 포장밀도는 21.4 lb/ft^3 에서 15 lb/ft^3 으로 30% 감소

위의 모든 요소들은 포장비 및 수송비, 적재 하역비와 밀접한 관계가 있는 만큼 유통시의 경제성 측면에서는 가급적 완충재의 두께가 얇은 것이 좋다.

7.4 완충과 진동

다음의 예는 포장완충 설계시 진동문제를 어떻게 고려해야 하는가를 보여주는 것이다.

한변의 길이가 5in이며 무게가 24lb인 정육면체 제품이 있다고 하자. 한계속도는 $200in/sec$ 이고 한계 가속도는 $95g's$ 이다. 최대 낙하높이가 36in일때 완충곡선은 그림 7.16a와 같다(이 그림은 Mil. Handbook의 포장완충설계, Mil-HDBK-3043에서 인용한 것임). 최대속도 변화량은,

$$\begin{aligned} \Delta V &= 2\sqrt{2 \times 386.4''/sec^2 \cdot 36''} \\ &= 344''/sec \end{aligned}$$

이 제품은 완충이 필요하다. 7.16a의 완충곡선에서 $95g's$ 의 한계 가속도에서는 정적하중 1.2psi를 가진 2in 두께의 완충재가 필요하다.

따라서 완충면적은,

$$\text{완충면적} = \frac{24 \text{ lb}}{1.2 \text{ lb/in}^2} = 20in^2$$

제품의 각 면에 $2in \times 4in \times 5in$ 의 완충재가 덧붙여지면 될 것이지만 제품과 완충재의 진동 특성을 사전에 조사하여야 할 것이다.

그림 7.17b는 1.2psi 정적하중에 2in 두께의 완충재의 유전성(transmissibility 혹은 magnification)을 나타낸다.

30Hz에서 최대 유전성을 보이며 25Hz와 40Hz사이에서는 2.0 이상이다. 따라서 완충포장 설계시 강제주파수가 25HZ와 45HZ 사이에 존재한다면 파손방지를 위하여 진동시험을 해보아야 할 것이다. [K]