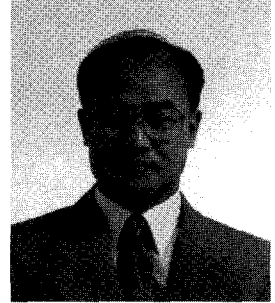


제지기술
강 의

紙類包裝 強度 研究

V. 골판지 포장 디자인



강 원 대 학 교 제 지 공 학 과 교 수
농학박사 원 종 명

목 차

I. 개설

1. 골판지 포장강도의 필요성
2. 골판지 원지강도와 골판지 포장강도와의 관계 개설
3. 골판지포장강도와 인자

(이상 제23호 게재)

II. 골판지 원지의 제강도

1. 평면 압축강도(Inplane compression strength)
2. Tensile stiffness

III. 골판지의 강도

1. 골판지 파열강도
2. 골판지 압축강도

(이상 제24호 게재)

IV. 골판지상자의 압축강도

1. 상자의 압축강도 시험(Box Compression Test)
2. 압축강도 시험기
3. 골판지 상자의 강도에 영향을 미치는 성질
4. Mckee의 방정식
5. BCT의 최적화

(이상 제26호 게재)

V. 골판지포장 디자인

1. 디자인 기준
2. 포장디자인의 3단계
3. Engineering material로서의 골판지
4. 유한 원소법 (Finite method, FEM)
5. 원지, 골판지 및 포장 성능과의 관계
6. 진동이 골판지 포장에 미치는 영향
7. 완충기능

VI. 맺 음 말

(이상 본호 게재)

V. 골판지포장 디자인

지금까지는 알기 쉽게 원지, 골판지 및 골판지 상자의 강도적 성질과 이들의 관계에 대하여 다루었다. 그러나 가장 경제적으로 용도에 따라 요구되는 성질을 제공하기 위해서는 포장 디자인 및 기타 사용할 때 발생할 수 있는 문제에

대한 검토와 이에 대한 조치 사항을 원지를 선택할 때 뿐만 아니라, 골판지 및 골판지 상자 제조시에도 반영시켜 주는 것이 매우 중요하다.

1. 디자인 기준

골판지 포장 디자인은 그림 34에서 보는 바와 같이 제품

과 물류 시스템에 의하여 좌우된다.

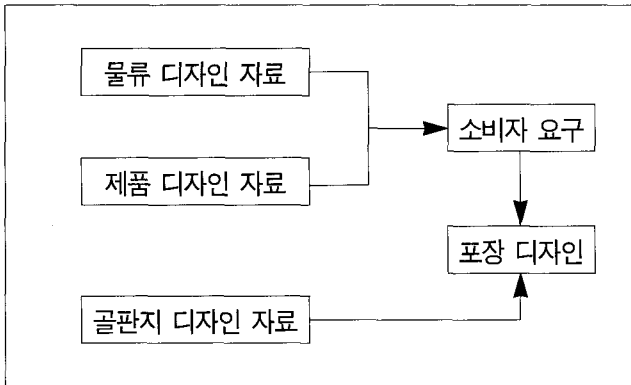


그림 34. 포장 디자인 모델

1) 제품 디자인 자료

가장 바람직한 제품 디자인은 제품에 관련된 자료를 포함시키는 것이며, 가능한 한 제품의 강도가 포함되어야 한다. 예를 들면 마이크로웨이브 오븐은 보통 골판지 상자로 포장되며, 오븐 그 자체가 어느 정도까지는 적재 하중에 견딜 수 있는 자립적능력을 지니고 있다. 따라서 포장 디자인시 이러한 사항을 고려하여 포장에 대한 요구도를 감소시켜 주어야 한다.

2) 물류 시스템에 대한 자료 (정적 및 동적 충격)

제품을 포장하여 저장 또는 운송하는 동안 정적 또는 동적인 충격을 받을 수 있다. 물류 시스템에서의 정적인 충격들은 포장 디자인에서 가장 많이 사용되고 있다. 이들은 재료의 선택 및 디자인에 결정적인 영향을 미칠 수 있다. 그동안 많은 연구팀에 의하여 정적인 하중, 골판지 원료 및 포장 디자인 사이의 관계에 대한 자료를 활용하기 위한 가장 좋은 방법을 개발하기 위하여 집중적인 연구가 진행되었고, 이들 실험실적인 연구 결과들은 다음 사항들을 결정하는 수단으로 사용되어 왔다.

- 물류 과정에서 포장된 제품이 받게될 정적인 하중
- 선택된 포장 디자인에 필요한 BCT

이러한 방법으로 물류 전과정에 걸쳐서 일어날 수 있는 위험에 대처할 수 있다. 포장 디자인에 BCT를 적용할 경우 다음과 같이 상자의 성능에 영향을 미칠 수 있는 다른 인자에 대한 검토도 이루어져야 한다.

- 하중의 균일 여부

- 상자의 면이 블록하게 나오게 하는 내용물(제품)로 채워졌는지
 - 장기간 쌓아둘 것인지
 - 물류 과정에서 진동 및 충격이 수반되는지
 - 기후가 표준 시험 조건에서 얼마나 벗어나는지 등
- 동적인 충격 위험은 포장 디자인을 할때 실용을 위한 계산하는일 등의 가장 복잡하다. 이와 관련된 전문적인 기술에 대한 축적은 최근에 이루어지기 시작했다. 또한 다른 포장 디자인은 상자의 BCT에 다르게 영향을 미칠 수 있으며, 특히 상자 면의 구조가 매우 중요하다.

2 포장 디자인의 3단계

소비자가 원하는 품질을 만족시켜 줄 수 있는 골판지 포장 디자인을 위해서는 포장 성능에 관련지을 수 있도록 포장 사양에 물류 과정에서 발생할 수 있는 충격 및 하중을 포함시키는 것이 매우 중요하다. 그 외에 운반, 포장 해체 장치 및 기타 정보들과들이 포함되어야 한다.

골판지의 구성 및 포장 디자인은 용도에 따라 요구되는 압축강도가 결정된 후 선택될 수 있다. 또한 원료의 사용을 최소화하기 위하여 디자이너의 지식이나 창조성이 사용될 수 있다. 만약 물류 관련 자료를 확보하지 못하였을 경우 포장을 디자인할 때, 그림 35와 같이 전통적인 방식인 수직적인 사고 방법을 적용할 수 밖에 없다. 특히 옛날 자료나 경험만 사용하고, 새로운 정보를 적용하지 않을 경우 당연히 현실에 뒤떨어지게 된다.

효율적으로 포장을 디자인하기 위해서는 물류 관련 자료뿐만 아니라 기타 포장 관련 자료를 축적하는 것이 매우 중요하다. 즉 포장시 요구되는 성질을 만족시켜줄 수 있는 디자인을 하기 위해서는 과학적인 자료를 적극 활용하여야 한다. 소비자에 의하여 요구되는 사항은 다음과 같이 크게 3가지로 나누어질 수 있다.

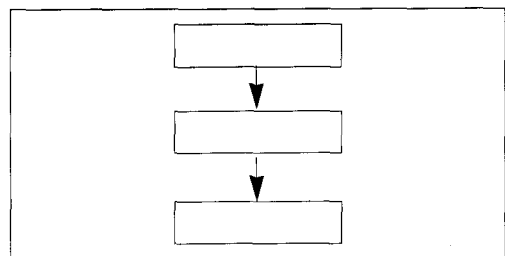


그림 35 전통적인 포장 디자인

- 포장 성능
- 디자인
- 원료

포장 성능은 원료와 디자인의 선택에 의하여 결정된다. 따라서 포장 디자인의 첫 번째 단계는 물류 시스템이 골판지 포장을 운반하는데 필요한 하중을 계산하는 것이다. 두 번째 단계는 사용할 포장의 디자인의 종류를 결정하는 것이며, 원료의 조합이 마지막 단계이다.

3. Engineering material로서의 골판지

골판지 원지 및 골판지는 공정보다 골판지 상자의 성능에 큰 영향을 미치는 원료이기 때문에 구조 물질로 고려되지 않는다. 그러나 골판지 디자인을 위하여 오늘날 사용하고 있는 표준 공정과 달리 골판지 상자의 디자인 작업에 표준 공학의 원리를 적용할 수 있어야 한다. 포장 디자인 작업시 공학의 원리를 적용하는데 대한 거림은 원지의 구조적 특성이 금속과 같은 원자재에 의해서보다는 환경 조건, 하중 속도와 같은 인자들에 의하여 훨씬 빨리 영향을 받는 것과 관계가 있다. 심지어는 금속의 경우에도 기후의 영향을 받아 저온에서 보다 잘 파괴되거나 균열이 생기고, 고온에서 크립(creep)이 많이 발생된다.

공학적인 방법을 사용하는데 대한 거리낌은 결국 실험실적인 성능 평가를 선호하게 하였다. 그 결과 골판지 및 골판지 상자의 물리적, 기계적 성질을 정확하게 측정하고 평가할 수 있는 방법이 많이 개발되지 못한 상황에 이르게 되었다.

골판지의 구조적 성능에 영향을 미치는 4가지 공학적 특성은 다음과 같다.

- 사용된 원지와 섬유 배향
- flute의 높이
- flute의 수와 flute top 사이의 간격
- 접착강도

1) 원지

골판지 제조에 사용되는 원지는 강도적 성질 측면에서 이방성을 지닌다. 초지 공정에서 섬유가 주로 기계 방향으로 배열되기 때문에 강도적 성질의 방향성에 영향을 미친다. 따라서 골판지 제조용 원지는 3개의 주요 면 또는 방향성을

나타낸다.

2) 골판지

골판지도 그림 36과 같이 역시 원지와 마찬가지로 이방성을 지닌다. 라이너는 bending stiffness를 제공해주며, 골심지는 shear stiffness를 제공해준다. 골판지 구조의 파괴 저항은 원료, flute의 높이 및 접착선 사이의 거리와 접착강도에 의하여 좌우된다. 골판지의 평량이 높으면 높을수록 부분적인 파괴의 가능성이 낮아지게 된다.

flute의 높이, flute의 수 및 접착강도는 골판지의 bending stiffness에 다소 영향을 미친다. 일반적으로 만약 구조가 손상되지 않았을 경우 상자에서 파괴 현상의 개시는 상자 면의 오목한 부분(상자의 안쪽 또는 바깥쪽)에서 라이너의 압축파괴에 의하여 일어난다.

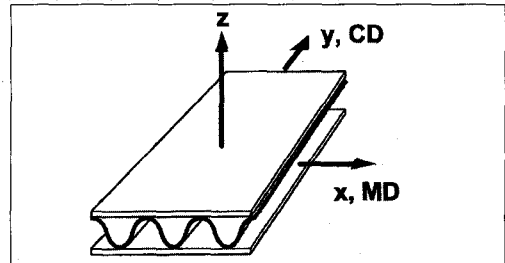


그림 36 골판지 구조와 구성 면

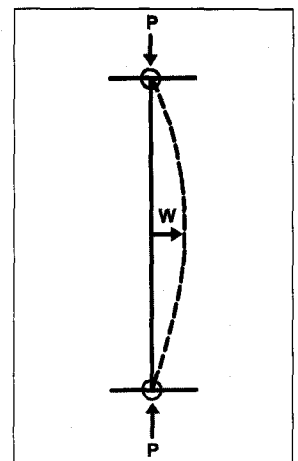
3) 상자 면

골판지 상자의 면이 파괴되기 전에 버클링이 일어나는 현상이 보고된 바 있다. 이것은 상자가 더 이상 하중에 견디지 못하는 것이 아니라 하중에 견디는 능력이 감소된다는 것을 의미한다. 그림 37은 골판지 상자의 버클링 현상을 나타낸 것이다.

골판지 상자가 붕괴될 때 일어날 수 있는 버클링 현상은 다음과 같이 3가지로 분류될 수 있다(그림 38).

- 불안정성 버클링
- 중립성 버클링
- 안정성 버클링

각 변형은 또한 이상적인 거동과 표준 거동으로 나누어 질 수 있다. 이상적인 거동은 구조에서의 버클링 현상이 완벽할 때 일어나는 변형으로



버클링이 일어나기 전에는 파괴가 일어나지 않는다. 이러한 거동은 매우 드물게 나타나며, 대부분의 경우 구조적인 결함을 지니고 있다.

안정성 버클링은 버클링 하중에 도달한 후 골판지 상자가 하중을 받게되는 구조를 지니고 있음을 의미한다. 불안정성 버클링은 버클링 하중에 가까워질 때 구조가 붕괴되는 것을 의미한다. 중립성 버클링은 안정성 버클링과 불안정성 버클링 사이에서 일어난다. Hahn의 연구 결과에 의하면 골판지의 면은 보통 안정성 버클링에 의하여 파괴된다. 이것은 골판지의 면이 버클링이 일어난 후 하중을 받음을 의미한다. 이것이 가장 바람직한 골판지 상자의 디자인이라고 할 수 있다.

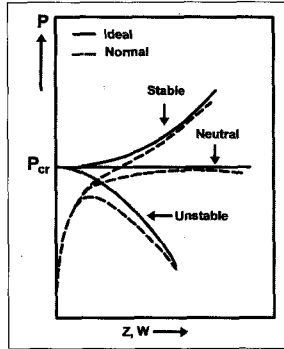


그림 38 골판지상자면에 서 발생할 수 있는 3가지 버클링 현상

4. 유한 원소법(Finite element method, FEM)

소비자는 저렴하면서도 성능이 우수한 포장을 원한다. 이것은 그러한 디자인을 만들 수 있는 도구를 개선하기 위해 꾸준한 연구 개발이 필요하다는 것을 의미한다. 비록 McKee 방정식이 장기간 동안 수행된 실험 자료를 근거로 확립되어 왔지만 물류 시스템의 변화는 포장에 대한 요구를 변화시켰다. 따라서 이러한 변화를 만족시키기 위해서 시행 오차에 의해서 보다는 다른 인자들에 근거하여 골판지 포장의 크기를 정하고 최적화 할 수 있는 모델을 개발하는 것이 중요하다.

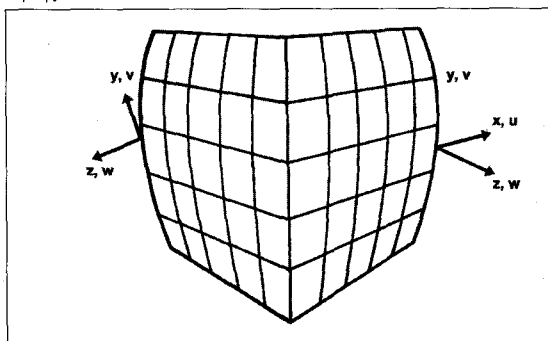


그림 39 유한 원소법 (FEM) 모델

유한 원소법은 인장, 굴곡, 전단 및 구조 디자인에서의 편차를 계산하기 위한 수학적 방법으로 그림 39에서 보는

바와 같이 포장이 인장, 굴곡 등에 의하여 파괴되는 구조임에 근거를 둔 것이다. 따라서 이 방법은 압축 하중 하에서 포장을 분석하는 것이 바람직하다. 유한 원소법을 원료의 성능 자료와 조합시킬 경우 포장 디자인을 최적화 할 수 있는 수단을 제공해 줄뿐만 아니라 논리적인 개념에 의한 포장 디자인 개발 가능성을 증가시켜 준다. 그러나 실제로는 유한 원소법과 같은 기술을 골판지 포장의 디자인에 적용할 수 있도록 할 수 있는 보다 기초적인 기술이 요구된다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 인장, 굴곡 및 전단 하중 하에서 일어나는 골판지의 구조적 성질에 대한 보다 많은 정보가 필요하다. 또한 압축 하중 하에서 골판지 포장의 붕괴 현상에 대한 보다 많은 정보도 필요하다. 골판지 포장 디자인에 공학적인 방법을 통하여 적용할 수 있는 충분한 자료가 확보될 때까지는 항상 시행착오를 반복하게 될 것이다.

최근 들어서 압축하중 하에서 상자 면에서의 버클링과 파괴가 어떻게 일어나는지에 대하여 이해를 하기 시작했고, 결국 이들 자료를 RSCs의 정적인 압축 하중을 계산하고 연구하기 위해 FEM 모델에 적용을 할 수 있게 될 것이다. 그러나 RSCs는 골판지 포장에서 그 중요성이 감소 중에 있으며, 오히려 diecut 포장이 보다 많이 사용되고 있다. 어떤 종류의 골판지 포장 디자인이든간에 압축 하중에 대한 연구를 하기 위해서는 FEM 모델을 구축하는 것이 매우 중요하다. 이러한 작업이 이루어질 경우 모든 동적인 힘과 이들의 디자인에 대한 영향에 대한 연구가 필요할 것이다. 이것이 가능해질 때까지 실제적인 현장 시험과 실험실적인 실험이 계속 중요하다.

5. 원지, 골판지 및 포장 성능과의 관계

골판지가 어떻게 구성 요소로부터 포장에 관련된 성능을 얻게 되는지를 이해하기 위해서는 골판지가 어떻게 ECT와 bending stiffness를 얻게 되는지를 이해하는 것이 중요하다. ECT는 다음과 같은 기본 방정식으로 표시될 수 있다.

$$ECT = k_2 \times [(2 \times P_L) + (\alpha \times P_F)]$$

k_2 : 상수

P_L : 라이너의 압축강도

P_F : flute의 압축강도

α : flute의 take-up factor

골판지 bending stiffness의 계산과 측정은 보다 어렵다. 따라서 bending stiffness 시험이 배제된 상기의 단순화된 방정식이 많이 사용되고 있다. 이러한 단순화 작업은 사용된 라이너와 flute를 평가하고자 할 때 사용되고 있으며, 특히 flute과 라이너 사이의 평량 분포를 측정하고자 할 때 사용된다. flute은 골판지를 제조, 가공 및 이용하는 동안 가능한 한 손상되지 않은 구조를 유지하도록 해주는 기능을 지니고 있다. flute의 상태가 유지되는 동안 골판지의 bending stiffness는 대략적으로 라이너의 tensile stiffness와 비례관계를 나타내어 준다. 이들의 관계는 다음의 단순화된 식으로 표현될 수 있다.

$$S = 0.5(D_L \times T^2)$$

D_L : 라이너의 tensile stiffness (EL × tL)

E_L : 라이너의 탄성계수

t_L : 라이너의 두께

T : 골판지의 두께

다음의 계산 예는 라이너와 flute 사이의 평량 분포의 변화가 미치는 영향을 보여준다. 크라프트 라이너와 반화학펄프 C flute을 이용하여 총 평량이 510g/m², 두께 4.0 mm, take-up factor 1.43인 single wall 골판지를 flute의 평량 비율을 달리하여 표 8과 같은 조건으로 제조하였다.

표 8 골판지 제조 조건

특 성	Flute 비율	
	저	고
라이너, g/m ² (%)	175(31)	112(69)
Flute, g/m ² (%)	125(51)	182(49)

상기 골판지 제조 조건은 비슷한 평량을 지니며, 양면에 사용된 라이너의 평량이 같도록 조절하였다. 생산 측면에서 다른 재료의 평량 변화는 다소 크기는 하지만 골판지 flute 비율의 변화는 총 평량의 단지 20%에 불과하다. 상기와 같이 제조된 골판지에 대하여 SCT(short span compression test)법을 사용한 결과 반화학펄프 flute이 19.5 kNm/kg, 크라프트 라이너는 17.5 kNm/kg의 SCT 지수 값이 얻어졌으며, 표 8의 조건으로 제조된 골판지에 대한 결과는 표 9와 같다.

표 9 Flute 비율을 달리한 골판지의 특성

특 성	Flute의 비율	
	저	고
라이너 압축지수	17.5	17.5
라이너 압축강도, PL	3.06	2.19
Flute 압축지수	19.5	19.5
Flute 압축강도, Pf	2.18	3.55
골판지 ECT*	6.56	6.71

$$* ECT = 0.71 [(2 \times PL) + (1.43 \times Pf)]$$

지수 k_2 는 Jönson 등에 의하여 1984년 TAPPI Corrugated Board Conference에서 발표된 값을 적용하였다. 이들 계산 결과 ECT는 flute이 높은 평량을 지닐 때 다소 높은 값이 얻어졌으며, 약 2%가 증가되었다. bending stiffness의 경우에는 tensile stiffness 5.0 kNm/kg일 때 표 10과 같이 flute 비율의 변화에 의해 큰 차이를 나타내었다.

표 10 Flute 비율을 달리한 골판지의 bending stiffness

특 성	Flute의 비율	
	저	고
라이너 인장지수, kNm/kg (MD×CD)	17.5	17.5
라이너 tensile stiffness, kN/m (DL)	875	625
골판지 bending stiffness, Nm*	7.0	5.0

$$* S = 0.5 \cdot 4^2 \times D_L \times 10^{-6}$$

McKee의 방정식을 사용하면 BCT를 계산할 수 있는데, 길이 400mm, 폭 300mm, 둘레 1,400mm 인 골판지 상자의 BCT 강도는 표 11과 같다. flute의 비율이 낮을 경우에 BCT 강도가 다소 높게 나와 약 6%의 차이를 나타내었다.

표 11. Flute의 비율을 달리한 골판지 상자의 BCT 강도

특 성	Flute의 비율	
	저	고
골판지 ECT, kN/m	6.56	6.71
골판지 bending stiffness, Nm(S)	7.0	5.0
상자 둘레, m(Z)	1.4	1.4
BCT, N*	2,760	2,580

* BCT = ECT^{0.75} × S^{0.25} × 1.4^{0.5}

6. 진동이 골판지 포장에 미치는 영향

골판지 포장을 수송할 경우 주로 수직 진동을 받게 된다. 이러한 진동은 운반 차량 및 포장의 표면에 전달되며, 골판지 포장이 탄성을 지니고 있기 때문에 포장 자체의 하중에 의하여 포장의 스프링 시스템을 통하여 증폭될 수 있다. 결국 그 결과 얻어지는 거동은 매우 복잡한 형태를 나타내게 된다. 보고된 연구 결과에 의하면 이와 같은 증폭이 포장의 dead weight로 구성된 하중을 발생시킬 수 있으며, 만약 이 하중(dead weight)이 이론적인 강도의 70%를 초과할 경우 상자의 파괴가 일어나게 된다.

미국 미시간 주립대학 및 임산물 연구소에서 연구한 결과에 의하면 ;

- 모서리가 포장의 견고성에 가장 큰 기여를 하며,
- 포장의 운반시 일어나는 자연 진동의 주파수는 매우 좁은 범위내(10-15 cps)에 들며,
- 포장을 위로 적재한 수가 증가할수록 자연 진동의 주파수가 감소되고,
- 자연 진동 주파수는 포장이 위로 쌓여진 수(n)의 제곱근에 비례하여 감소된다.

적재된 골판지 포장에 있어서 자연 진동의 주파수는 가끔 운반 차량에서 관찰되는 범위에 들기도 한다. 따라서 가속을 증폭시킬 수 있는 진동 조건이 발생될 수 있다. 이러한 증폭은 쉽게 일어나며, 증폭이 8을 능가하여 1이상의 수직상향 가속을 야기시킬 수 있다. 이 경우 튀는 현상이 일어나 가속이 2-4g가 될 수 있다. 실제로 이것은 정적인 하중의 2-4배에 해당되는 동적인 하중을 의미한다. 다양한 진동

조건하에서 골판지 포장이 견딜 수 있는 하중이 그림 40에 도시되었다. 결론적으로 골판지 포장을 디자인할 때 진동 및 적재 중량을 견딜 수 있는 하중이 평가되어야 하며, 가능한 한 포장에 대하여 요구되는 최대의 하중에 견딜 수 있도록 원료 및 디자인을 선택하는 것이 바람직하다.

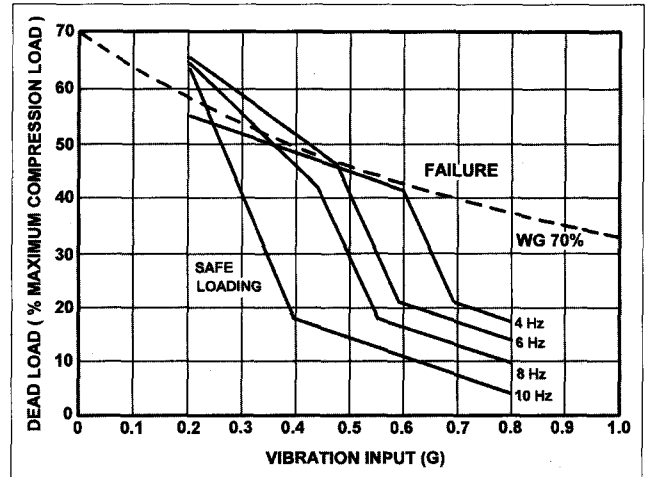


그림 40 골판지포장이 견딜 수 있는 진동 조건

7. 완충기능

골판지 포장에 있어서 충격의 흡수는 상품을 보호하기 위한 매우 중요한 성질의 하나이다. 이러한 충격 에너지의 흡수는 골판지 자체의 붕괴 또는 변형을 통하여 일어난다. 결국 골판지 포장은 충격 에너지를 흡수하는 능력을 지니면서도 충분한 구조적 강도도 지녀야 하는 양면성을 지니게 된다.

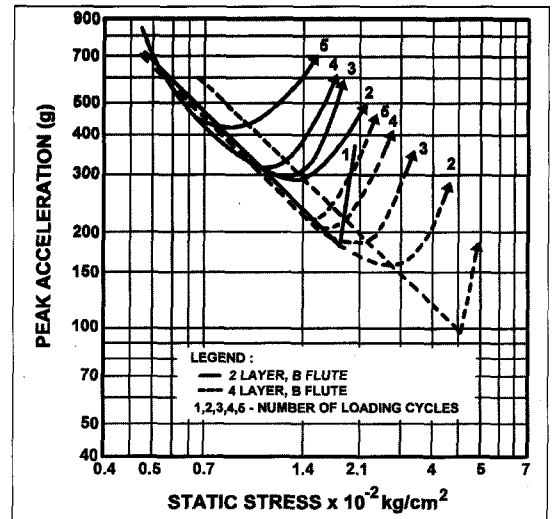


그림 41. 골판지 패드의 반복 하중 특성

그림 41은 2층 및 4층 골판지 패드에 B flute을 적용한 경우 충격(45 cm의 높이에서 낙하시켰을때)에 대한 하중 특성을 나타낸 것이다. 골판지 포장의 경우 패드와 포장의 충격 완화 효과가 동시에 일어나며, 그 충격 완화성은 다음과 같은 인자로 설명될 수 있으며, C와 중량의 관계는 그림 42의 완충 성능으로 표시된다.

- 완충 지수, C
- 단위 부피당 에너지 흡수 능력

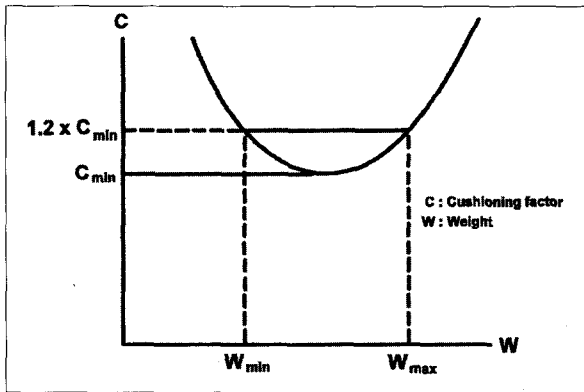


그림 42 완충 재료의 성능.

만약 C factor가 2-3 사이에 해당하면 그 재료는 완충 효과가 좋은 것으로 평가되며, 표 12에서 보는 바와 같이 1보다 낮은 값을 지니는 경우는 보기 힘들다. 일정 수준의 완충 효과를 얻는데 필요한 두께는 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$T = (C \times h) / G$$

- T : 두께
- C : 완충지수
- h : 낙하 높이, m
- G : 제품의 견고성

V. 맺음말

지금까지 3회에 걸쳐 골판지 포장 강도에 대하여 알아보았다. 이미 잘 알려져 있는 바와 같이 과거와는 달리 무역 및 상거래에 있어서 포장이 차지하는 비중이 매우 높아졌다. 이러한 추세는 포장의 단순히 상품을 보호하고, 저장 및 운반의 편의성에 대한 기여의 범주를 넘어, 상품의 가치를 어필하고, 물류 시스템을 합리화하고, 구매 욕구를 높이는 등 그 기능이 매우 다양화됨에 따라 포장의 디자인에 대한 관심도 크게 고조된 상태이다.

그러나 그 중요성에도 불구하고 아직까지는 고유의 포장 분야와 디자인 분야의 긴밀한 협조가 이루어지지 못하고 있어서 디자인을 강조하다 보면 포장 고유의 기능을 제대로 발휘하지 못하고, 견고성만을 고집할 경우 포장의 기능에 제한을 받는다. 특히 골판지 포장은 생산 가격이 저렴할 뿐만 아니라 환경 친화형 재료이면서 우수한 강도와 완충 효과를 지니는 포장 재료로 평가되고 있다. 이러한 특성을 극대화하고 상품 가치를 높이기 위해서는 골판지 포장을 구성하는 원료의 특성을 충분히 이해하고, 이들을 어떻게 조합하고 디자인하여 골판지 및 상자를 제조하여야 되는지에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

표 12 골판지 및 기타 재료의 완충성

재 료	C _{min} x 1.2	단위 부피당 에너지 흡수	
		최소 - 최대	kJ/m ³
PE bubble(air cap)	4.1 - 5.2	10 - 30	70 - 95
Loose PS	4.0 - 4.4	20 - 30	70 - 110
골판지	1.8 - 3.6	30 - 170	60 - 300
PS sheet(밀도 15 kg/m ³)	3.8 - 2.8	80 - 130	140 - 270

C factor는 사용 가능한 가장 얇은 완충 재료에 대한 값임