



골판지의 골 형태별 완충성능 분석

1 서론

환경오염과 관련하여 환경친화적인 지류포장재 사용의 증가가 뚜렷하며, 특히 골판지는 포장용기의 재료로서 뿐만 아니라 포장완충재로서의 수요가 계속 늘어날 전망이다.

골판지는 골의 구조와 치수에 의존해 역학적 특성을 갖는 일종의 구조물(structure)이며, 골판지의 압축강도와 완충성을 향상시키기 위해서는 골원지 자체의 보강도 중요하지만 골 구조의 합리적 설계에 의한 이들 특성의 향상이 더 경제적이며, 근본적인 문제라 하겠다.

플라스틱 발포체의 여러 특성에 대한 객관적 자료의 확보가 이들 재료의 수요를 촉진하는데 중요한 한 원인이 되었는데, 지류포장재의 수요증가에 대응하고, 수요촉진을 위해서는 제반물성을 정밀분석한 후 객관적 자료화가 매우 시급하다.

최근 국내에서 골심지를 이중으로 성형한 이중골심판지(Dual-Layer medium corrugated fiberboard)의 개발은 기존의 골판지와 비교하여 어느 정도의 강도를 유지하면서 소요재료와 치수를 줄일 수 있어 자원절약, 물류합리화 및 물류비 절감 측면에서 큰 효과가 기대된다.

따라서 본 발표에서는 기존의 골판지(SW, DW 등)와 이중골심판지를 중심으로 골판지의 골형태에 따른 완충성과 복원성을 분석하므로써, 골판지의 완충성 향상을 위한 객관적 자료를 확보하고자 연구된 결과에 대하여 발표하고자 한다.

박종민
밀양산업대학교 교수

김만수
충남대학교 교수

신동소
서울대학교 명예교수

2. 실험설계와 측정시스템의 고찰

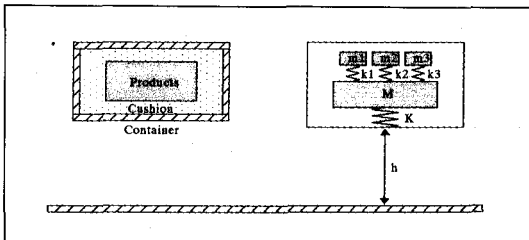
2-1. 측정시스템 고찰

[그림 1]의 제품 완충포장모형에서 보듯이 포장 화물이 갖는 위치에너지는 낙하하면서 운동에너지로 변환되며, 이 에너지는 전체 완충재에 충격흡수되는 변형에너지와 완충재를 통해 제품에 전달되는 에너지로 바뀌게 된다.

즉, 제품에 따라 fra-gility(허용 G-factor)가 다르며, 제품의 유통과정중에 발생하는 충격으로부터 제품의 허용가속도 이하로 완화시켜주는 것이 완충재의 역할이다.

따라서 제품의 완충포장설계를 위해서는 사용 완충재에 대한 완충성능분석과 객관적 자료화가

[그림 1] 제품의 완충포장 모형



[표 1] 충격시험기의 기본사양

구분	기본사양	비고
형태(충격방식)	자유낙하식	
자유낙하높이	20~100cm	
중추의 무게변화 범위	0.5~15kg(정적응력범위: 450~9,000Pa)	충격체의 직경:11.80cm(단면적:0.0109m ²)
중추의 낙하방법	전자식 제어	
분석가능항목	가속도-시간선도, 최대가속도-정적응력선도, 완충계구-동적응력선도, 완충계수-에너지선도, 완충계수-변위선도, 충격지속시간, 속도변화등	

요구된다.

일반적으로 완충재의 완충성 분석에는 응력-변위선도를 토대로 완충성을 검토하는 정적시험과, 낙하충격에 의해 발생하는 최대가속도-시간선도를 토대로 하는 동적시험이 있다.

동적시험은 정적시험에 비해 완충재의 사용상황에 가까운 조건으로 시험하기 때문에 실용성이 높은 결과가 얻어진다.

동적시험에 의해 얻어진 완충재의 가속도-시간선도로부터 최대가속도-정적응력선도와 동적완충계수-최대응력선도를 도출하여 이것으로부터 완충성을 분석하며, 이들 선도는 제품의 완충포장설계시 기준자료가 된다

동적시험에서 이들 2 선도를 얻기 위해서는 일정 무게의 중추를 누가적으로 자유낙하시킬 수 있는 기계적인 장치와 짧은시간(1~50ms)에 가속도 변화량을 고속측정 및 분석할 수 있는 계측시스템이 필요하다.

국내에 보급되어 있는 충격시험기는 대부분 외국산으로 고가이며, 일정 두께(2S.4mm) 이상의 시험편에 적합하다.

특히 가속도와 하중 이외에 완충재가 흡수한 에



[표 2] 공시된 골판지의 원지배합 및 평량

구분	기호	골종류	원지배합	평량, g/m ²	비고
SW	SWA	A/F	SK180 + K180 + K180	646.2	↓
	SWB	B/F	KA180 + K180 + K180	603.3	
DW	DW1	AB/F	SK210 + B150 + K180 + B150 + K180	1011.0	↓
	DW2		SK180 + S120 + S120 + S120 + K180	832.8	
	DW3		KA210 + AS210 + S125 + AS250 + KA210	1226.0	
	DW4		SC240 + AS250 + AS180 + AS250 + KA240	1395.0	
이층 골심판지	DM	AA' /F	SK180 + K180 + K180 + K180	907.2	↓
	DMA	AA' + A/F	SK180 + K180 + K180 + K180 + K180 + K180	1373.4	↓
	DMB	AA' + B/F	SK180 + K180 + K180 + K180 + K180 + K180	1330.2	↓

주) A' : 이층골심판지의 저골심지로 A골과 피치는 같으나 골높이가 다른 수정된 A골

너지, 변형, 속도, 충격지속시간 등의 완충성과 관계되는 항목들에 대해서는 분석할 수 없게 되어 있는 것이 대부분이므로 그 사용에 있어 매우 제한적이라 하겠다

따라서 본 연구자는 골판지와 같은 박판재료로부터 두꺼운 재료까지 그 사용범위가 넓으며 재료의 완충성을 여러 측면에서 분석할 수 있는 범용충격시험기를 저가로 개발하여 현재 특허 출원중에 있다.

[표 1]에는 개발한 충격시험기의 기본사양을 나타내었다.

2-2. 실험변수, 범위 및 공시재료

골판지의 골형태별 완충성과 복원력을 분석하기 위해 공시된 골판지는 [표 2]에서 보는 바와 같이 SW 2종, DW 4종, 이층골심판지 등의 3종이다. 골판지의 골형태별 완충특성을 분석하는데 있어 중요한 변수로는 중추의 낙하높이 범위와 무게 변화 범위설정이므로, 본 연구에서는 다음과 같은

기준을 설정하여 이들을 결정하였다.

- ① 충분한 예비실험을 각 낙하높이별로 골판지의 최대 가속도(실제는 감가속도, transmitted peak acceleration)값을 나타내는 중추의 무게 수준을 포함
- ② 일반적으로 골판지상자에 포장되는 포장물의 무게(대략 5~30kgf) 고려
- ③ 골판지 상자의 취급시 인간공학적인 측면을 고려

2-3. 실험방법

실험전 골판지를 23℃-rh50%로 잘 조성된 항온항습기에 넣어 24시간 평형시킨 후 실험에 사용하였으며, 각 실험의 변수조합에서 다섯차례 반복 실험하였다.

낙하높이는 30, 60, 및 90cm의 수준으로 하였으며, 중추의 무게는 9~11 수준으로 누가적으로 변화시켰다.

3. 실험결과 및 분석

3-1. 골형태에 따른 최대가속도 -정적응력선도

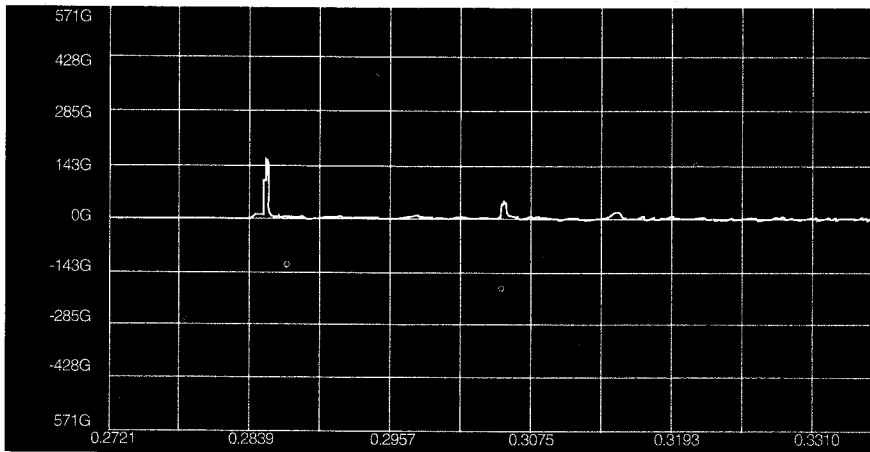
(그림 2)는 충격시험기에 의해 중추의 골판지가 접촉하는 짧은 순간에 가속도값을 고속샘플링하여 컴퓨터 모니터상에 디스플레이한 예를 하드카피한 그림이다. 그림속에 나타난 여러개의 충격파형중 주관심 파형은 첫 번째 파형이므로 개발한 분석 소프트웨어에 의해 그 파형을 확대한 것을 (그림 3)

에 도시하였다.

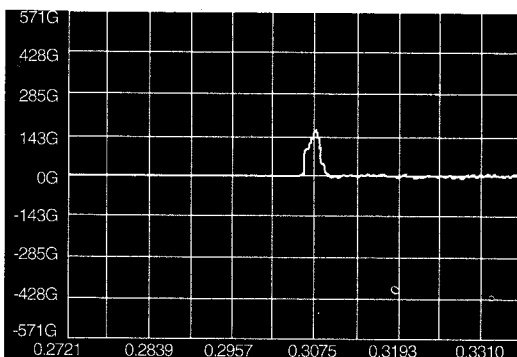
충격파형의 면적인 속도변화, 정점가속도의 크기, 그리고 충격지속시간 등이 재료의 완충성을 특성짓는 중요한 인자들이다. 정점가속도를 기준으로 우측이 찌그러진 형상을 하는 (그림 3)의 (A)파형은 일반골판지(SW, DW)의 충격파형으로 주로 관찰되었으며, 반면 종모양을 하는 (A)파형은 이 충골심판지의 충격파형으로 관찰되었다.

가속도-시간의 raw-data로 부터 개발한 분석 소프트웨어에 의해 정적응력의 변화에 따른 최대가

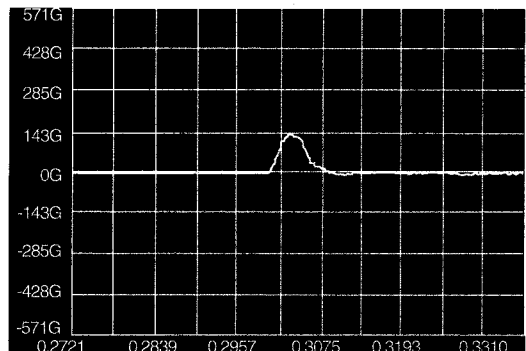
(그림 2) 가속도-시간의 raw data 및 필터링 결과



(그림 3) 충격파형의 형태



(A)



(B)



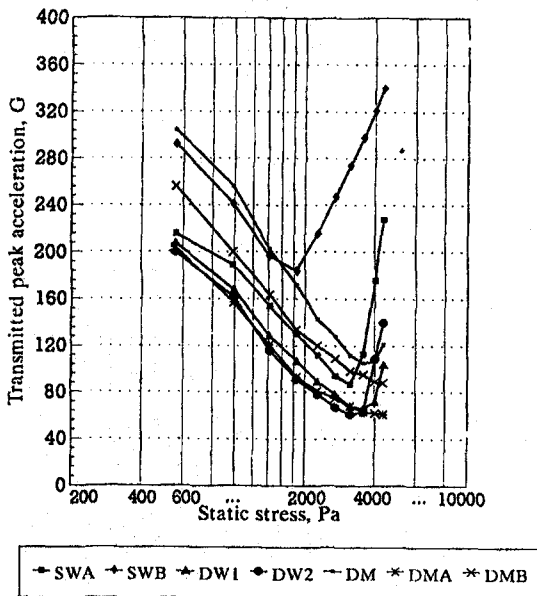
속도를 분석한 결과를 (그림 4)~(그림 6)에 나타내었다.

완충제품의 fragility(허용가속도, G-factor) 이하로 제품이 받는 충격을 제한하는 역할을 하며, 최대가속도-정적응력선에서 가속도의 최소치값을 나타내는 변곡점에서 그 완충재는 최고의 완충성을 발휘하고, 그 변곡점이 우측으로 옮겨가는 완충재일 수록 중량물의 포장에, 위로 올라가는 재료일 수록 fragility가 높은 제품의 완충에 적합한 재료이다.

(그림 4)~(그림 6)에서 보는 바와 같이 공시된 골판지중 변곡점의 위치가 DMA, DMB→DM→DW→SW 순서로 오른쪽에 위치하는 것으로 나타났고, DMA, DM→DW→DM→SW 순서로 그 변곡점이 아래에 위치하는 것으로 나타났다. 따

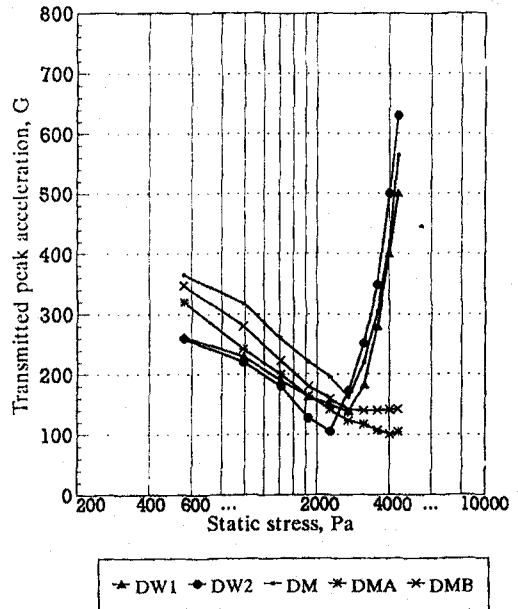
(그림 4) 최대가속도-시간선도

(낙하높이 30cm, 23℃-rh50%)



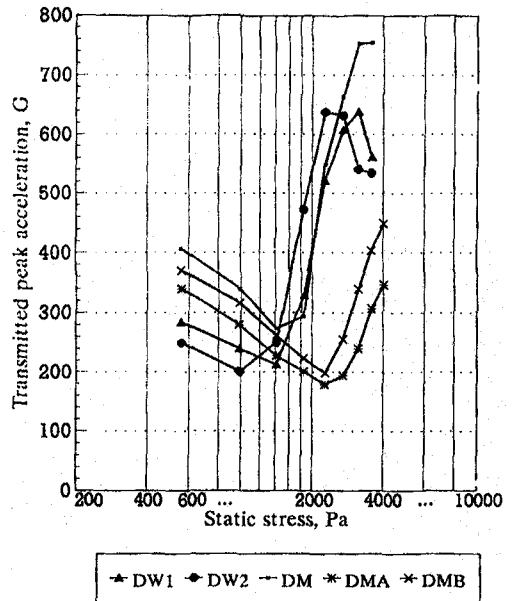
(그림 5) 최대가속도-시간선도

(낙하높이 60cm, 23℃-rh50%)



(그림 6) 최대가속도-시간선도

(낙하높이 90cm, 23℃-rh50%)



라서 이충골심판지는 SW와 DW에 비해 보다 무게가 무겁고 fragility가 낮은 제품의 완충에 적합한 것으로 나타났다.

공시된 모든 골판지에서 낙하높이가 증가함에 따라 그 변곡점의 가속도값을 증가하면서 좌측으로 이동하는 경향이였다.

3-2. 골형태에 따른 동적완충계수-최대응력선도

완충재의 단위두께당 흡수에너지와 제품에 전달되는 힘 즉, 완충재료에 가하는 하중과의 비를 완충효율이라 하며, 완충효율이 높은 재료는 동일 조건에서 재료가 가장 최소로 사용되는 것이다. 완충효율을 포장업계에 응용하기 위해 연구된 계수

가 완충계수이다. 완충계수는 완충재의 단위 체적당 흡수에너지와 응력의 비율로 재료의 완충효율을 그대로 계산하기 때문에 완충포장설계에서 가장 중요시 된다.

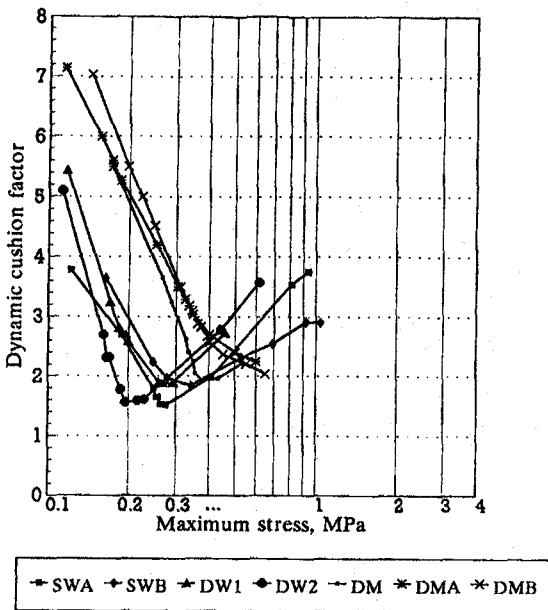
동적 시험에 의한 완충계수(C)는 뉴우톤의 운동법칙과 에너지 균형식으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$W(H+Dm) = ATe^{-e} = \frac{W(H+Dm)}{AT} \quad (1)$$

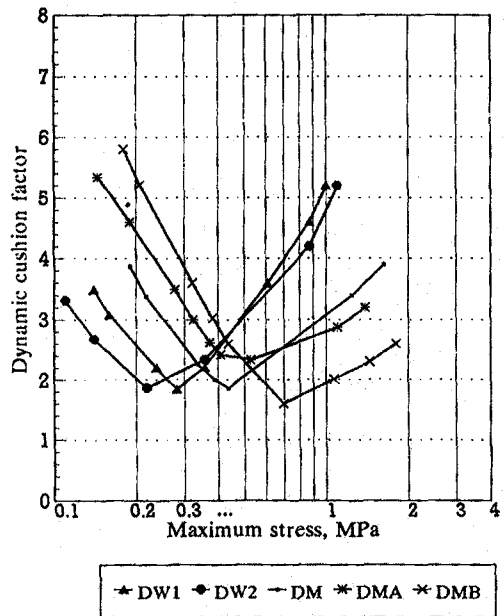
$$\sigma_m = \frac{W}{A} (Gm+1), Pa \quad (2)$$

$$C = \frac{\sigma_m}{e} = \frac{T}{H+Dm} (Gm+1) = \frac{Gm}{H} T \quad (3)$$

(그림 7) 동적완충계수-최대응력선도 (낙하높이 30cm, 23℃-rh50%)



(그림 8) 동적완충계수-최대응력선도 (낙하높이 60cm, 23℃-rh50%)





식(1)~(3)에서 W 는 중추의 무게(N), H 는 낙하높이(m), D_m 은 완충재의 최대변위(m), A 는 낙하체의 단면적(m^2), T 는 완충재의 두께(m), e 는 완충재의 단위체적당 흡수에너지(J/m^3), σ_m 은 동적 최대응력(Pa)을 나타낸다.

완충계수 최대응력선도에서 완충계수의 최적치에 대응하는 최대응력값이 결정됨에 따라 많은 여러 재료의 완충계수-최대응력선도 중에서 최대응력치가 적합한 재료가 선택될 때 가장 경제적인 완충을 할 수 있고 완충계수의 최소치 부분이 완만할수록 넓은 범위의 응력에 사용할 수 있다. 낙하 높이별로 골판지의 동적완충계수 최대응력선도를 나타낸 [그림 7]~[그림 9]에서 보는 바와 같이 대체로 이층골심판지(DM, DMA, DMB)가 DW나 SW에 비하여 완충계수의 최소치 부근이

완만하고 낙하높이가 증가함에 따라 작아지는 경향을 나타내었다.

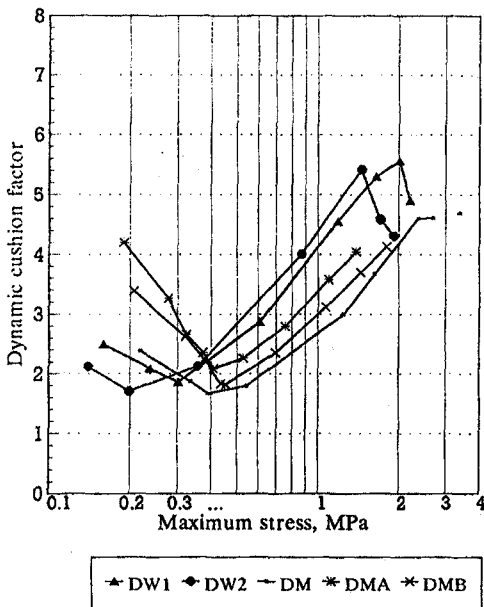
3-3. 골판지의 적층에 따른 완충성

골판지는 몇겹으로 적층시킨 형태 및 두께에 따라 다양한 완충성을 나타내게 되며 골판지의 골을 적층시킨 골판지 완충재들이 현재 사용되고 있다(honey cushion, corrupad 등).

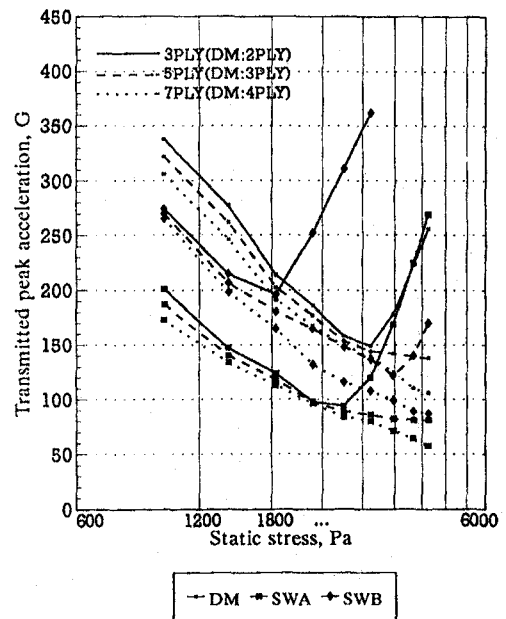
[그림 10]은 본 연구에서 공시한 골판지 중 양면골판지(SWA, SWB)는 3겹, 5겹, 7겹으로 그리고 이층골심판지(DM)는 2겹, 3겹, 4겹으로 적층시켰을 때 낙하 높이별 최대 가속도-정적응력선도를 나타낸 그림이다.

이층골심판지 양면골판지(SWA, SWB)에 비하여 각 정적응력 수준에서 1~3겹 적음에도 불구하고

[그림 9] 동적완충계수-최대응력선도
(낙하높이 90cm, 23°C-rh50%)



[그림 10] 골판지의 적층에 따른 가속도-정적응력선도
(낙하높이 90cm, 30°C-rh50%)



하고 가속도의 최소치는 SWA→DM→SWB 순서로 작게 나타난다. 최소치값에서의 정적응력치는 DM→SWA→SWB 순서로 큰 것으로 나타났다. 따라서 이는 동일한 무게와 fragility를 갖는 제품을 완충하는데 더 작은 수로 적충한 DM 골판지로 효율성 있게 완충할 수 있어, 그만큼의 소요재료를 절감할 수 있고 포장치수를 줄일 수 있다.

3-4. 골형태에 따른 골복원성

골판지는 골이 형태와 원지의 물성에 따라 압축강도와 완충성이 달라지므로 외력에 대하여 골복원성의 정도가 골판지의 레질리언스(resilience)를 결정하게 된다.

일반적으로 완충재의 충격과형은 [그림 3]에서 보는 바와 같이 가속도의 피크치를 중심으로 loading쪽과 unloading쪽의 면적차이 즉, 충돌속도와 반발속도 차가 없을 수록 탄성성이 있으며, 골복원성 또한 우수한 것으로 된다.

골판지의 골복원성은 또한 [그림 11]과 같이 골판지의 평면을 일정한 하중재속도로 일정량 변

형시킨 뒤, 같은 속도로 하중을 제거하는 loading-unloading 과정에서의 에너지 관계로부터 더 잘 분석될 수 있다.

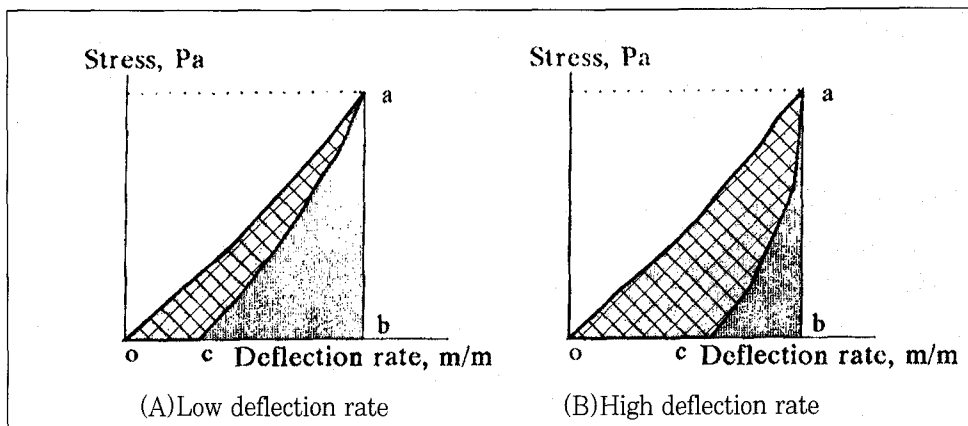
[그림 11]에서 면적 oab는 loading 시의 완충재에 가해지는 에너지(loading energy)이고, 면적 abc는 unloading 시의 회복되는 에너지(unloading energy)를 나타낸다.

골판지는 가해지는 변형이 클수록 loading-unloading 사이클은 (B)와 같은 형태 즉, 회복되는 에너지 수준이 작게 되며, 골판지의 골복원성과 탄성이 우수할수록 (A)와 같은 형태를 나타내게 된다.

따라서 loading-unloading 사이클에서 면적 oab와 폐구간의 면적의 oac의 비율(hysteresis loss)로 부터 골판지의 골복원성 정도를 분석할 수 있다.

공시한 각 골판지에 하중재하속도 12.7mm/min로 골판지 각 두께의 50% 및 70%를 loading 및 unloading 시켰을 때의 결과를 [그림 11]의 (A)와 (B)에 각각 나타내었다.

[그림 11] 응력-변형률선도



공시한 골판지 중 loading 에너지는 DMB, DMA→DW4, DW3, DM→SWA, SWB→DW1, DW2순서로 나타났고, 골복4원성의 정도를 나타내는 히스테리시스는 SWA, SWB→DW1, DW2→DW3, DW4→DM→DMA, DMB순서로 나타나, 같은 조건하에서 골복원력은 DMA, DMB→DM→FW3, DW4→DW3, DW2→SWA, SWB순서로 양호한 것으로 나타났다. 이층골심판지와 DW 사이의 골복원력의 차이는 변형이 클수록 더 큰 차이를 나타내었다.

[표 3]과 [그림 13]에는 골판지의 골복원성과 골판지의 평량, 골평량과의 관계를 분석한 것을 나타내었는 바, 골판지의 골복원성은 골판지의 평량, 골평량과의 관계보다는 골의 구조적인 형태와 더 깊은 관련성이 있는 것으로 분석되어, 앞으로 이층골심판지의 완충재로서의 사용이 주목된다.

4. 결론 및 제언

골판지의 골의 형태 및 원지특성에 따라 압축강도와 완충성을 달리하는 한 구조물이므로, 설비에 큰 투자없이 골의 형태를 바꿈으로써 압축강도와 완충성이 향상된다면 현재보다 포장에 따른 원가절감과 물류경비를 줄일 수 있어, 이는 매우 주목받는 일이라 하겠다.

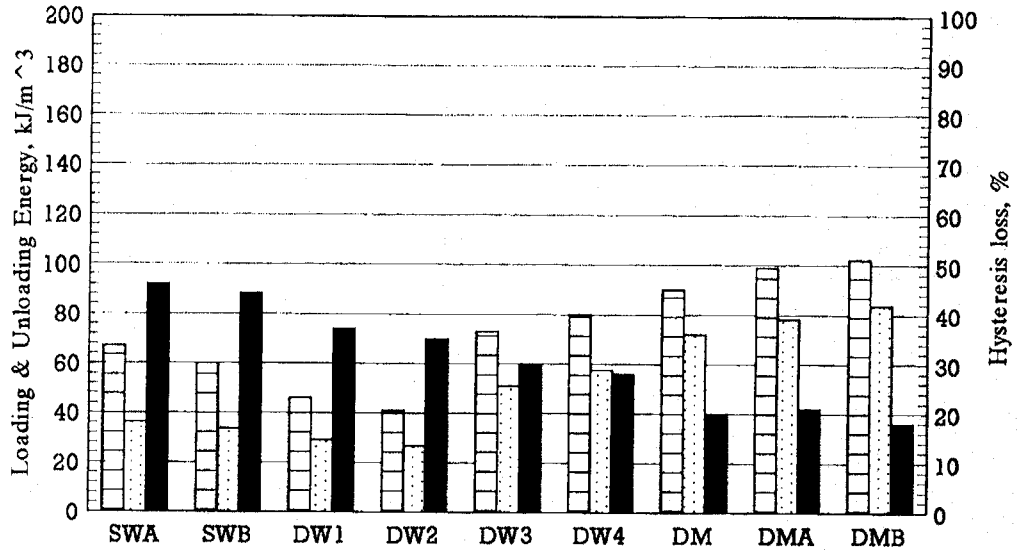
본 연구에서는 골심지를 이중으로 성형한 이층골심판지를 중심으로 기존의 양면골판지와 이중양면골판지에 대하여 동적완충성과 복원성을 비교분석하였다. 그 연구결과와 이층골심판지가 앞으로 보다 더 경쟁력을 갖기위해 기본적으로 더 분석되어야 할 물성에 대하여 요약하면 다음과 같다.

1) 동적실험으로부터 얻어진 최대가속도- 정적응력선도로부터 골판지의 완충성을 분석한 결과,

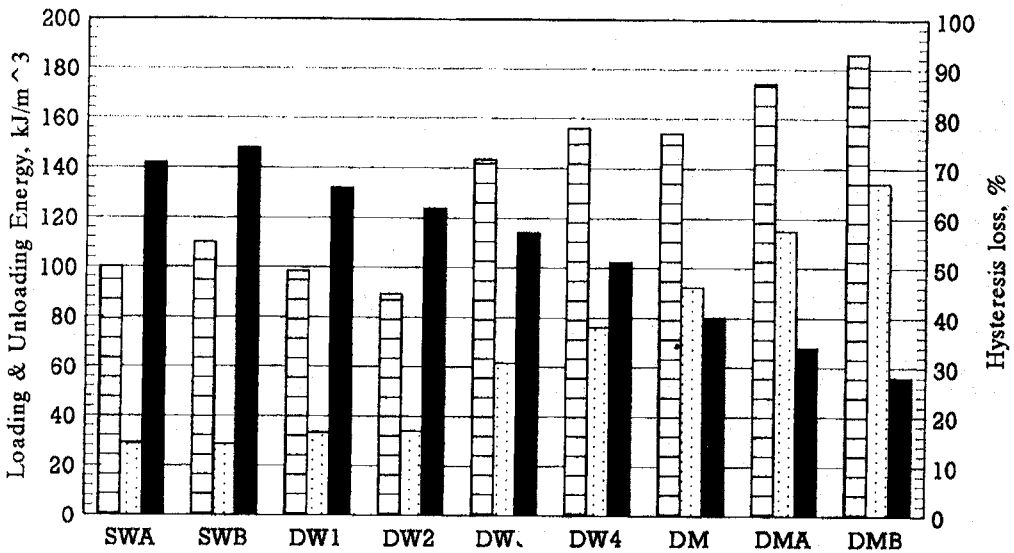
[표 3] 골판지의 평량, 골평량과 골복원성의 관계

구 분	명 칭	골판지평량	골평량	골평량의 차지비율	변형 50%			변형 70%		
					Loading E	Unloading E	히스테리시스	Loading E	Unloading E	히스테리시스
SW	SWA	646.2	286.2	44.3	67.1	36.2	46	100.0	29.0	71
	SWB	603.0	243.0	40.3	60.2	33.6	44	110.0	28.6	74
DW	DW1	1011.0	441.0	43.6	46.4	29.0	37	98.4	33.5	66
	DW2	832.8	352.8	42.4	41.2	26.7	35	89.4	34.0	62
	DW3	1226.0	681.0	55.5	73.2	51.1	30	143.4	61.7	57
	DW4	1395.0	735.0	52.7	80.1	57.6	28	156.1	76.1	51
이층 골심판지	DM	907.2	547.2	60.3	90.0	72.0	20	154.2	92.4	40
	DMA	1373.4	833.4	60.7	99.3	78.2	21	174.1	114.8	34
	DMB	1330.2	790.2	59.4	102.0	83.6	18	186.0	133.9	28

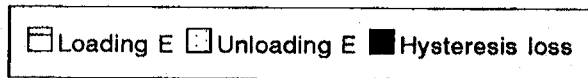
(그림 12) 골판지의 골형태별 에너지 관계



Corrugated fiberboard
(A) Deflection rate, 0.5m/m



Corrugated fiberboard



(B) Deflection rate, 0.7m/m

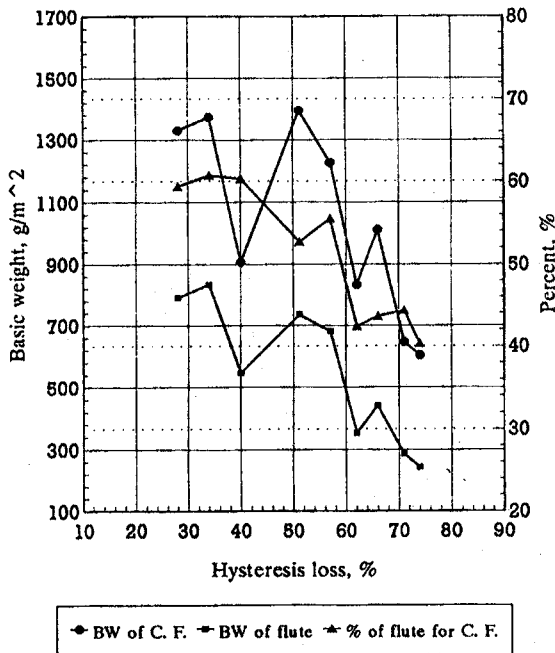


이층골심판지가 SW나 DW 골판지에 비하여 큰 응력수준에서 완충성이 양호한 것으로 나타나, 이는 보다 중량물의 완충에 적합한 것으로 사료된다.

2) 같은 조건하에서 이층골심판지(DM, DMA, DMB)가 DW, SW에 비하여 약 20~60% 정도 복원력이 우수하였으며, 변형이 증가될수록 복원력의 차이는 더 큰것으로 나타났다. 그러나 반복되는 하중하에서 골 복원력과 resiliance에 대한 철저한 분석이 요구된다.

3) 골판지의 골복원력은 골판지의 평량과 골평량 보다는 골의 형태와 더 큰 관계가 있는 것으로 분석되었고, 또한 몇 겹으로 적층한 골판지에 대한 완충성 비교에서도 이층골심판지가 우수한 것으로 나타나 이층골심판지를 적층한 골판지를 포장완충재로 상용할 경우, 현재보다 사용되는 포장재양과

(그림 13) 골판지의 평량, 골평량과 골복원성의 관계



포장치수를 줄일 수 있어 포장비용의 절감과 물류 합리화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 골판지가 우수한 압축강도와 완충성을 동시에 갖는 어려운 일이지만, 이층골심판지의 경우는 기존의 골판지에 비하여 평면압축강도, 완충성 및 골복원력이 향상되었으나, 골판지 상자의 압축강도와 가장 관계가 깊은 수직압축강도(ECS)에서는 골판지의 단면적이 감소하는 만큼의 벤딩현상이 있을 것으로 판단되어 휨강도에 대한 이층골심판지의 휨강성(bending stiffness)에 대해 철저히 분석한 후 그 대책이 요구된다.

5) 이층골심판지상자에는 기존의 골판지상자의 이론압축강도 계산식을 적용할 수 없으므로 이층골심판지상자의 압축강도 계산식의 개발 보급할 필요성이 제기된다.

6) 골판지의 품질향상과 품질규격화를 위해서는 회사 자체적으로 골판지의 완충성을 평가할 수 있는 인력과 기초시험장비를 갖추어야 할 것이다. [K]

원고모집

월간 포장계는
 포장산업과 관련한
 원고를 모집합니다.
 포장인들의 육고는
 포장산업 발전을
 담당합니다.

- 편집실