

골판지를 이용한 완충 포장재의 물리적 특성에 관한 연구

최승진 · 신중민

미시간 주립대학교 포장학과

The Analysis of Cushioning Properties of Corrugated Cushion

Seung-Jin Choi, Joong-Min Shin

School of Packaging, Michigan State University

Abstract Cushioning systems, which are cushion material and its designed configuration, are important to protect fragile items since they act as buffers between the impact force and the fragile product. As cushioning materials, several plastic foams are commonly used in industry. However, the utilization of the plastic material has been causing a solid waste problem and pollution. Thus, as an alternative cushion material to the plastic foams, a corrugated cushion, which is considered environmentally friendly and cheap material, was put into drop tests and its impact shock attenuation was investigated. Flat and free drop data were recorded and compared to the dynamic shock of EPS cushion. In addition, the mathematical model of the shock attenuation of the corrugated cushion was developed. The result showed that the corrugated cushion gave an excellent protection for items that were subjected to the limited number of drops. There was no significant difference of the shock absorbing ability between the EPS and corrugated cushions. Energy density model of cushioning material successfully explained the mechanical behavior and fatigue of the corrugated cushions.

Key words Corrugated cushion, Maximum deceleration level, Energy density, Flat crush test, Fatigue

서 론

현대 물류 포장에 있어서 완충재 및 완충포장의 역할은 매우 중요하다. 완충포장은 물류과정 중 발생할 수 있는 크고 작은 물리적 충격으로부터의 완충 작용을 통하여 제품을 보호하는 역할을 하며 이에 따라 물류 과정 중 발생할 수 있는 제품의 손상 및 파생되는 경제적 손실을 방지할 수 있다. 특히 전자 상거래의 발달에 따라 많은 상품들이 택배 등의 물류 과정을 거치는 현대 사회에 있어서 완충포장의 역할은 점점 커지고 있는 것이 현실이다. 이에 따라 완충포장 설계에 대한 중요성 역시 커지고 있는데, 완충포장의 핵심을 이루고 있는 완충재에 대한 소재 개발 및 이에 대한 물리적인 특성에 관한 연구는 이러한 의미에서 매우 중요하다.

현재 완충재로 쓰이는 여러 물질들 중에 가장 널리 쓰이는 물질은 발포 폴리스티렌 (EPS)이다. 발포 폴리스티렌은

저렴한 가격에 중량이 가벼우며 중량에 비해 상대적으로 물리적 충격에 강한 특성을 가지고 있으며 수분에 강한 성질을 지니고 있다. 이에 따라 전자 제품, 가구 및 각종 소비재의 물류 과정에 있어서 완충 포장재로 널리 사용되고 있다(Maltenfort, 1988). 하지만, 부피가 크고 재 활용성이 매우 떨어지는 약점을 가지고 있어서 이에 대한 환경 친화적 대체 물질에 대한 관심 또한 높아지고 있는 것 또한 사실이다(Kirkpatrick과 Sek, 1997).

현재 개발되고 있는 환경 친화적인 완충 포장재의 하나로써 대두되고 있는 것이 골판지를 이용한 완충 포장재이다. 일반적인 포장재로서의 골판지는 이미 1950년대 초부터 사용되기 시작하였으며, 저렴한 가격 및 다양한 응용성으로 인하여 현재 세계적으로 가장 널리 사용되는 포장재 중 하나이다. 또한 골판지 포장재의 경우, 재활용이 쉽고 폐기되었을 경우에도 자연적 분해가 쉬운 대표적인 환경 친화 물질로 인식되고 있다. 최근에는 골판지 자체가 지니고 있는 완충성 및 비교적 강한 압축 강도(compression strength)를 이용하여 골판지를 이용한 완충재의 개발이 활발하게 이루어지고 있다 (Burgess와 Wenger, 1992).

이러한 골판지를 이용한 완충 포장재의 개발에 있어서 중

†Corresponding Author : Seung-Jin Choi
School of Packaging, 130 Packaging Building, East Lansing,
MI 48823, USA
E-mail : <choiseu6@msu.edu>

요한 요소인 골판지를 이용한 완충재에 대한 물리적 특성 및 완충 작용에 대한 연구는 그리 많지 않으며 이러한 연구들도 정압축 (static compression) 혹은 의사-동압축 (quasi-dynamic compression)에 대한 연구가 대부분을 이루고 있다 (Sek, 1997).

본 연구에서는 골판지를 이용하여 기본적인 완충 포장재를 설계하였으며 이러한 포장재의 물리적 특성 및 완충능력을 실제 완충 실험을 통하여 조사하였다. 또한 기존의 알려진 플라스틱 완충재의 기작 이론과 본 연구의 골판지 완충재의 결과를 비교하였으며 현재 가장 널리 사용되는 발포 폴리스티렌 완충재와 완충 능력을 비교함으로써 완충 포장재로서의 골판지의 사용 가능성을 모색하였다.

이 론

현재까지 골판지를 이용한 완충재에 대한 과학적 접근은 그리 많지 않다. 지금까지 사용되고 있는 골판지 완충재의 충격 흡수에 관한 수학적 모델은 골판지 자체의 Flat Crush Test (FCT) 혹은 Edge Crush Test (ECT) 등을 이용하여 골판지 완충재의 최대 감속도 치를 예측한 모형 정도가 대표적이다 (Shin, 2004). 이모형에 따르면 골판지 완충재에 의해 발생하는 최대 감속도 (maximum deceleration level) G 는 다음과 같다.

$$G = \frac{FCT}{S} \quad (1)$$

FCT = flat crush test에 의한 골판지의 압축강도 (kPa)

s = 완충재에 가해지는 정응력 (static stress: kPa)

이때 완충재에 가해지는 정응력 s 는 다음과 같다.

$$S = \frac{gW}{A} \quad (2)$$

g = 중력가속도 9.8 m/sec²

W = 제품의 질량 (Kg)

A = 완충재의 단면적 (m²)

위의 식은 골판지 자체가 지니고 있는 압축강도에 기반한 것으로, 식 (1)에 의하면 골판지 완충재에 의한 최대 감속도 치는 오직 골판지 자체의 압축 강도 및 제품의 하중에만 의존할 뿐 골판지 완충재의 두께와는 상관이 없다. 이 경우, 골판지 완충재의 bottom out 현상이 일어날 때 까지 완충재에 의한 최대 감속도 치는 일정하다.

이는 일반적인 완충재의 충격 흡수가 완충재의 두께와 밀접한 관계가 있다는 기존의 충격 흡수 이론과 대치되는 이론으로 이에 대한 검증이 필요한 상태이다.

또 다른 완충재의 충격흡수에 대한 이론은 Burgess (1994)에 의해 제시된 에너지 밀도 곡선 (energy density curve)을 통한 최대 감속도 치의 모사이다. 포장 내의 완충재의

역할은 외부로부터 물리적 충격이 가해질 시 이를 흡수함으로써 제품을 보호하는데 있다. 이러한 대부분의 경우 운동에너지의 형태로 외부로부터 전해진 물리적 충격은 완충재의 압축 과정을 통하여 에너지로 흡수된다. 이러한 과정을 Burgess (1994)는 에너지 밀도 곡선을 통하여 설명하였다. 이 이론에 따르면 W kg의 질량을 갖고 있는 물체가 h m의 높이에서 자유 낙하하여 완충재에 충돌할 경우 발생하는 동응력 (dynamic stress)은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$G \cdot s = A \cdot e^{\frac{Bsh}{t_c}} \quad (3)$$

G = 최대 감속도

A, B = 상수, 완충재의 고유치

t_c = 완충재의 두께 (m)

s = 물체가 완충재에 가하는 정응력 (Static stress: kPa)

이 경우, 완충재와 제품과의 충돌 시 발생하는 최대 감속도는 제품의 위치에너지와 정응력 그리고 완충재의 두께와 밀접한 관계가 있다.

Burgess (1994)는 실제로 상업적으로 사용되는 플라스틱 완충재인 ARCEL 512 발포 폴리에틸렌의 초기 충돌 완충곡선 (1st impact cushion curve)들을 식 (3)을 이용하여 성공적으로 예측한 바 있다.

하지만, 이러한 모델은 플라스틱 완충재와 같이 비교적 균일한 구조를 갖고 있고 물질 자체의 탄성이 큰 플라스틱 완충재의 모사를 통해 검증된 모형으로써 이러한 모형이 여러 층의 골로 구성되어 복잡한 3차원 구조를 형성하고 있는, 또한 소성 물질로서 쉽게 변형이 되는 골판지 소재 완충재에도 적용이 될 수 있는지는 아직 검증된 바 없다.

이 연구에서는 기존의 두 가지 이론, 즉 FCT를 이용한 골판지 소재 완충재의 충격흡수 모형과 플라스틱 완충재에 적용되는 에너지 밀도 곡선 모형을 골판지를 이용한 완충재에 적용하여 두 모형을 비교하고 이에 따른 골판지 완충재의 물리적인 특성을 예측하고자 하였다.

골판지 완충재의 피로현상

골판지는 반복적인 하중이 가해지는 경우 쉽게 피로 현상이 일어나는 단점을 지니고 있다. 여러 장의 골판지를 접착하여 제조된 골판지 완충재의 경우도 이러한 반복 하중에 따른 피로현상이 나타나는 것은 충분히 예측될 수 있으며, 반복적으로 골판지 소재 완충재에 가해지는 하중은 결국 완충재 자체의 bottom out 현상을 초래하여 완충재로서의 기능을 상실하는 현상을 초래할 것으로 예측된다. 이 경우 골판지 소재 완충재가 완충재로서의 기능을 발휘할 수 있는 최대 유효 낙하 수를 예측하는 것은 대단히 중요하다. 본 연구에서는 이러한 피로현상에 대한 모형을 수립하여 골판지 소재 완충재의 최대 유효 낙하 (maximum effective

drops)를 예측하고자 하였다.

기존의 FCT를 이용한 골판지 소재 완충재의 충격흡수 모형에서는 이러한 골판지 완충재의 피로현상에 의한 최대 유효 낙하 N_{max} 를 다음의 식으로 표시하였다 (Shin 2004).

$$N_{max} = \frac{t_c}{d} \tag{4}$$

d = 동적 변형 (dynamic deflection) (m)

t_c = 완충재의 두께 (m)

좀 더 발전된 형태의 누적 피로에 따른 골판지 소재 완충재의 손상은 일반적인 연성물질의 피로 현상 이론을 바탕으로 설명될 수 있다 (Burgess, 1996). 앞서 밝힌 바와 같이, 골판지는 라이너 및 골심지로 이루어진 구조물로서 하중이 가해질 경우 매우 복잡한 과정의 압축과정을 보인다 (Sek, 1997). 이 연구에서는 복잡한 3차원 구조를 갖는 골판지를 단순화하여 일반적인 균일 구조의 소성 물질로 가정하였으며, 이러한 가정 하에서 피로 현상을 설명하여 보고자 하였다.

이 경우, 일정한 하중 하에 놓인 골판지는 압축과정 중 골판지의 탄성한계를 지나 영구 변형이 형성된다. FCT로 대표되는 골판지의 압축 강도 실험 시, 골판지의 압축강도 점에 도달할 때까지 골판지의 단위 부피당 가해지는 에너지 즉 에너지 밀도는 다음의 식으로 표시될 수 있다.

$$E = \int_0^{\delta_s} \frac{F(\delta)}{A} \frac{d\delta}{t} = shape \cdot FCT \frac{\delta_s}{t} \tag{5}$$

E = 골판지의 압축강도 점에 도달하기 까지 골판지에 가해진 에너지 밀도 (kJ/m^3)

F = 골판지의 압축-변형 곡선에서 변형에 따른 하중 (N)

A = 골판지의 단면적 (m^2)

t = 골판지의 두께 (m)

$shape$ = 골판지의 압축 시의 응력-변형 곡선의 shape factor

δ_s = 골판지의 압축강도 점에서의 하중에 따른 골판지의 변형 (m)

FCT = 골판지의 압축 강도 (kPa)

마찬가지로 충격 흡수 실험 시에 골판지 완충소재에 가해지는 하중 역시 완충재의 탄성 한계를 넘어 완충재에 동적 변형 (dynamic deflection) δ_s 을 유발하며 이 때 각각의 반복 하중에 의해 완충재에 단위부피당 가해지는 에너지는 다음의 식으로 표시될 수 있다.

$$E_i = \int_0^{\delta_i} \frac{F(\delta)}{A} \frac{d\delta}{t_i} = shape_i \cdot \frac{G_i s \delta_i}{t_i} \tag{6}$$

E_i = 각각의 반복 하중에 의해 골판지에 가해진 에너지 밀도 분획 (J/m^3)

F = 골판지의 압축-변형 곡선에서 각각의 변형에 따른 하중 (N)

s = 제품의 정응력 (kPa)

t_i = 각각의 반복 하중 실험시 완충재의 두께 (m)

$shape$ = 반복 하중에 의한 골판지의 압축 시의 응력-변형 곡선의 shape factor

δ_i = 각각의 반복 하중에 따른 골판지의 동적 변형 (m)

이렇게 반복적으로 가해져서 부분적 변형을 유발한 에너지는 각각의 에너지 밀도 분획으로 남고 이 같은 과정이 반복되어 누적된 에너지가 골판지의 압축 강도 점의 에너지 밀도를 넘어서면 이때에 bottom out 현상이 발생하는 것으로 가정하였다. 또한 각각의 충돌 시 완충재에 가해지는 힘에 의한 변형이 비슷한 형태의 응력-변형 곡선을 따른다고 가정할 때에 각각의 하중에 의한 응력-변형 곡선의 shape factor들은 같아진다. 실제로 Sek (1997)은 의사-동압축 하에서의 골판지 완충재에 가해지는 응력-변형 곡선은 응력이 가해지는 속도에 상관없이 거의 비슷한 형태를 보인다는 보고를 한 바 있다. 또한 전체 두께에 비해서 동적 변형이 상대적으로 작기 때문에, 각각의 충돌시의 $G_i s$ 값 및 δ_i 가 비슷하다고 가정하면 N_{max} 는 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

$$N_{max} = \frac{E}{E_i} = \frac{FCT \delta_s t_c}{G s \delta_i t} \tag{7}$$

E = 골판지의 압축강도 점에 도달하기 까지 골판지에 가해진 에너지 밀도 (J/m^3)

E_i = 각각의 반복 하중에 의해 골판지에 가해진 에너지 밀도 분획 (J/m^3)

FCT = 골판지의 압축 강도 (kPa)

δ_s = FCT 시험 시 골판지의 압축강도 점에서의 하중에 따른 골판지의 변형 (m)

δ_i = 각각의 반복 하중에 따른 골판지의 동적 변형 (m)

G = 완충재의 완충실험 시의 G 값

s = 완충재에 가해지는 정응력 (kPa)

t = FCT 시험 시 골판지의 두께 (m)

t_c = 완충재의 두께 (m)

본 연구에서는 반복하중에 의한 골판지 소재 완충재의 피로현상을 실험하여 실제의 최대 유효 낙하 N_{max} 를 구하였으며 이를 식(4)와 식(7)을 이용한 예측치와 비교하여 두 가지의 모형을 평가하였다.

실험 재료 및 방법

이 실험에서 사용된 골판지 소재 완충재의 경우, 5.6 mm

(0.22 in) 두께의 골판지를 이용하여 각각의 실험 목적에 맞게 3장에서 7장까지 접착하여 사용하였다. 사용된 골판지의 경우 모두 50% RH, 23°C의 조건에서 24시간 이상 전처리하였다. 사용된 골판지는 TAPPI T808 om-97의 방법으로 Flat Crush Test를 하여 압축강도를 측정하였다 (ASTM, 1999a). 이때 측정된 FCT 값은 171.0 kPa (24.8 psi)이었으며, 이때의 변형은 0.64 mm (0.025 in)이었다.

완충재의 충격 흡수 능력 및 반복 하중에 의한 완충재의 피로 실험에서 최대 감속도 G의 측정은 ASTM D1596-97의 실험 방법을 기준으로 수행하였다 (ASTM, 1999b). Drop tester (MODEL 23, Lansmont, USA)를 사용하여 실험을 수행하였으며, 이때에 기록된 최대 감속도 G는 분석 소프트웨어(Test Partner, Lansmont, USA)를 사용하여 분석하였다. 기록된 각각의 충격은 125Hz의 필터를 통하여 분석되었다.

골판지 완충재의 충격 흡수 능력 실험 시 사용된 압반(platen)의 무게는 각각 5.9 Kg, 9.1 Kg, 14.5 Kg이었으며, 이때 각 골판지 완충재의 단면적은 20.3 cm × 12.7 cm (8 in × 5 in)이었다. 이에 따른 각각의 정응력은 2.24 kPa (0.325 psi), 3.45 kPa (0.5 psi), 5.52 kPa (0.8 psi)이었다.

골판지 완충재의 피로실험 시 사용된 압반의 무게는 각각 5.9 Kg, 14.5 Kg, 23.2 Kg이었으며, 이때 각 골판지 완충재의 단면적은 20.3 cm × 20.3 cm (8 in × 8 in)이었다. 이에 따른 각각의 정응력은 1.38 kPa (0.2 psi), 3.45 kPa (0.5 psi), 5.52 kPa (0.8 psi)이었다.

결과 및 고찰

1. 골판지 완충재의 충격흡수 능력

3장에서 7장의 골판지를 사용하여 다양한 두께의 골판지 완충재를 제조하였으며 이를 0.46 m (18 in)의 높이에서 다양한 무게의 압반을 낙하시켜 각각의 충격 흡수 능력을 측정하였다. 이때에 사용된 각각의 압반에 상응하는 정응력에 대한 두께 별 최대 감속도 G를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Shock transmission value according to the thickness of the corrugated cushion (drop height = 0.46 m).

Thickness of the cushion (mm)	Shock transmission level, G		
	Static Stress (kPa)		
	2.24	3.45	5.52
16.8	48.6	79.1	136.6
22.4	42.5	50.7	127.9
27.9	41.1	47.8	54.3
33.5	37.0	44.3	34.8
39.1	38.2	48.3	33.3

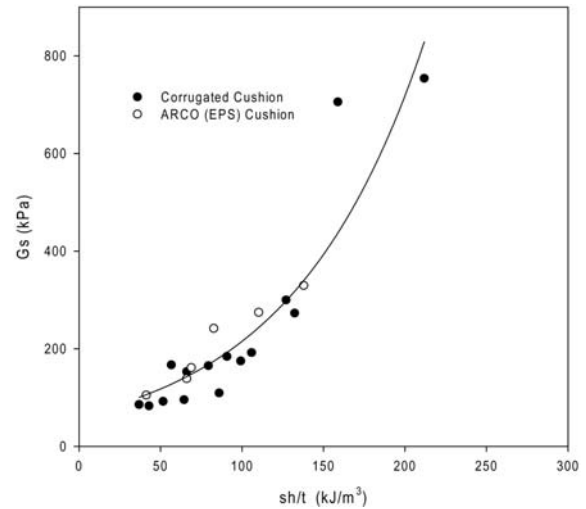


Fig. 1. Energy density (sh/t) vs dynamic stress (Gs) curve of the corrugated board cushion and plastic cushion (ARCO).

Table 1에서 보는 바와 같이 골판지 소재 완충재에 의해 발생하는 최대 감속도는 완충재의 두께에 영향을 받는 것으로 나타났다. FCT를 이용한 골판지 소재 완충재의 충격 흡수 모형에 따르면 골판지 완충재에 의한 최대 감속도 G는 오직 골판지 자체의 압축 강도 및 제품의 하중에만 의존할 뿐 골판지 완충재의 두께와는 상관이 없다. 이러한 현상은 식 (1)에서 제시된 FCT를 이용한 골판지 소재 완충재의 충격 흡수 모형과는 매우 다른 결과이다.

위의 결과를 에너지 밀도 모형을 이용하여 분석하였다. 이를 위하여 Table 1의 결과 중 각각의 낙하 실험치를 식 (3)의 에너지 밀도 (sh/t) 대 동응력 (dynamic stress: Gs)의 그림으로 나타내었으며, 일반 플라스틱 완충재인 ARCO사의 발포 폴리스티렌 완충재(EPS)의 실험 결과와 비교하였다 (Shin, 2004).

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 에너지 밀도를 이용한 수학적 모델은 골판지 소재 완충재의 충격 흡수 현상 역시 잘 설명하고 있음을 알 수 있다. 식(3)을 이용한 비선형 회귀 분석을 통하여 얻은 상수 A와 B는 각각 64.49 및 0.0121이었으며 r^2 값은 0.8502였다. 또한 플라스틱 완충재의 실험 결과와 비교해 볼 때 이들 값은 비슷한 분포를 보였으며, 이는 골판지 소재 완충재의 충격 완화 능력이 일반 플라스틱 완충재에 비하여 거의 차이가 없다는 것을 입증해주는 결과이기도 하다.

2. 반복 하중에 의한 골판지 소재 완충재의 피로현상

상기된 바와 같이, 골판지는 연성이 강하며 반복되는 하중에 의해 쉽게 피로현상이 오는 단점을 지니고 있다. 본 연구에서는 반복 하중에 의한 골판지 소재 완충재의 피로 현상을 실험을 통하여 확인하였으며 이를 Table 2에 나타

Table 2. Shock transmission level G according to the repeated drops on the corrugated cushion (drop height = 0.46 m).

Static Stress (kPa)	Shock transmission level, G				
	Number of drop				
	1st drop	2nd drop	3rd drop	4th drop	5th drop
1.38	43.1	49.8	59.0	142.2	173.8
3.45	40.9	51.3	162.9	204.2	238.8
5.52	39.5	101.7	170.0	-	-

Table 3. The change of thickness of the corrugated cushion according to the repeated drops (drop height = 0.46 m).

Static Stress (kPa)	Thickness of the cushion (mm)				
	Number of drop				
	Before Test	1st drop	2nd drop	3rd drop	4th drop
1.38	16.8	15.5	13.7	13.2	12.4
3.45	33.5	32.3	29.5	27.2	24.1
5.52	33.5	29.7	24.9	23.4	-

Table 4. Prediction of maximum effective drop: comparison of FCT model and energy density model.

static stress (kPa)	Average G_i	Average dynamic deflection δ_i (mm)	t_c (mm)	Experimental N_{max}	Simulation N_{max}	
					Eq(4)	Eq (7)
1.38	50.6 ¹	1.2 ¹	16.8	3	14.1	3.95
3.45	46.1 ²	2.0 ²	33.5	2	16.5	2.03
5.52	39.5 ³	3.8 ³	33.5	1	8.8	0.79

¹⁾The average value of first three drops.

²⁾The average value of first two drops.

³⁾The value of first drop.

내었다.

1.38 kPa (0.2 psi)의 정응력을 가진 압반을 이용하여 반복적으로 완충재에 하중을 가할 경우 4회 째 낙하에서부터는 급격히 최대 감속도 값이 증가하는 bottom out 현상을 나타내었다. 좀 더 큰 하중이 가해진 3.45 kPa (0.5 psi)와 5.52 kPa (0.8 psi)의 반복 하중 실험에서는 각각 3회 째, 2회째 반복 실험부터 bottom out 현상을 보였다. 또한 각각의 반복 하중 실험에서 완충재의 동적 변형(dynamic deflection)이 관찰되었으며 이러한 반복 하중 실험 시 동적 변형에 의한 두께 감소를 Table 3에 나타내었다.

이러한 반복 하중에 의한 동적 변형 현상은 위의 가설에서의 제시한 가소성 물질의 소성 변형의 가정과 상통하는 것으로, 이 경우 물류 과정 도중 발생할 수 있는 bottom out 현상을 방지하기 위한 골판지 소재 완충재의 최대 유효 낙하 N_{max} 를 산출해 내는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 N_{max} 를 계산해 내기 위한 수학적 모형을 제시하였으며 이를 식 (4)과 식 (7)에 정리하였다. 이 두 식을 이용한 예측치를 실험을 통하여 얻은 최대 유효 낙하 수와 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다. 완충재를 제조하는데 사용된 골판지의 경우, 두께 t 는 5.6 mm이었으며, FCT 값은 170 kPa, 압축강도 점에서의 하중에 따른 골판지의 변형 d_s 은 0.64 mm

이었다.

Table 4에서 보는 바와 같이 식(7)의 경우가 식(4)의 경우보다 정확하게 최대 유효 낙하 수를 예측하였다. 위의 두 식 모두 반복되는 충격이 완충재에 부분 손상을 주고 이들이 축적되어 최종적인 완충재의 bottom out 현상을 일으키는 것으로 가정한다는 점에서는 공통점이 있다. 하지만, FCT 모형에 근거하여 완충재의 두께에 상관없이 한번 낙하시 일정한 동적 변형이 있다고 가정하고 최대 유효 낙하 수를 단순히 동적 변형을 완충재의 두께로 나눈 식 (4) 보다는 에너지 밀도 모형에 근거하여, 반복하중이 발생할 경우에 각각의 하중에 의해 단위부피당 가해지는 에너지가 축적되어서 전체적인 완충재의 bottom out을 가져온다고 가정한 식 (7)의 경우가 좀 더 정확하게 골판지 소재 완충재의 피로현상을 설명했다고 볼 수 있다.

결론

골판지를 소재로 한 완충재의 개발을 모색하기 위한 기초인 골판지 완충재의 충격흡수 및 피로현상에 대한 물리적 특성을 연구하였고, 이에 따른 수학적 모형을 제시하였다. 본 연구에서 사용된 골판지 소재 완충재의 경우 플라스

틱 완충재와 비교해 비슷한 충격완화 능력을 보였으며, 골판지 소재 완충재와 제품의 충돌시 발생하는 최대 감속도치 G 는 다음의 식에 의해 결정된다.

$$G = \frac{64.49}{s} e^{0.0121 \frac{sh}{t_c}} \quad (9)$$

또한 본 연구에서 사용된 골판지 소재 완충재는 반복하중에 의한 피로현상을 겪으며 이때의 최대 유효 낙하 N_{max} 는 다음의 식으로 표시될 수 있다.

$$N_{max} = \frac{19.43t_c}{Gs\delta_i} \quad (10)$$

식(9)를 식(10)에 대입할 경우, 완충재의 두께 (t_c), 제품의 완충재에 대한 정응력 (s), 낙하 높이(h) 및 이에 따른 동적 변형 (δ_i)을 알면 완충재의 G 값 및 N_{max} 값을 예측할 수 있다.

물론 위의 식은 종이라는 소재 자체가 가진 비균일성 및 골판지를 형성하는 복잡한 3차원 구조를 고려하지 않은 단순화된 식이며, 이에 따라 골판지 소재 완충재의 모든 물리적 현상을 설명하기에는 한계를 지닌다. 하지만 본 연구에서 입증된 바와 같이 이러한 접근 방법은 골판지 소재 완충재의 기작을 설명하는데 기초적인 이론을 제시할 수 있다. 이러한 수학적 모형은 앞으로의 다양한 형태의 골판지 소재 완충재의 개발 시, 소요되는 시간 및 비용을 절약하는데 큰 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. ASTM. (1999a). Flat Crush Test of Corrugated Board (Flexible Beam Method). In ASTM (Eds.): *Selected ASTM Standards on Packaging*, 5th ed (pp455-458). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
2. ASTM. (1999b). Dynamic Shock Cushioning Characteristics of Packaging Materials. In ASTM (Eds.): *Selected ASTM Standards on Packaging*, 5th ed (pp77-80). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
3. Burgess, G., Wenger, E. (1992). Performance of Corrugated Board as a Cushioning Material. In: *Proceedings of the Consortium of Distribution Packaging*. Michigan State University, East Lansing, MI, USA.
4. Burgess, G. (1994). Generation of Cushion Curves from One Shock Pulse. *Packaging Technology and Science*, 7(4), 169-174.
5. Burgess, G. (1996). Effects of Fatigue on Fragility Testing and the Damage Boundary Curve. *Journal of Testing and Evaluation*, 24(6), 419-426.
6. Kirkpatrick, J., Sek, M. (1997). Replacement of Polymeric Cushioning with Corrugated Fiberboard-Case Study, In: *Proceedings of the 10th IAPRI World Conference on Packaging-Packaging Beyond 2000*. Center for Packaging, Transportation and Storage, Melbourne, Australia.
7. Maltenfort, G. G. (1988). *Corrugated Shipping Containers: An Engineering Approach*. Jelmar Publishing Co., Plainview, NY, USA.
8. Sek, M. (1997) Prediction of the Cushioning Properties of Corrugated Fibreboard from Static and Quasi-dynamic Compression Data. *Packaging Technology and Science*, 10(2), 87-94.
9. Shin, J. (2004). Corrugated Cushion vs EPS: A Comparison of Cushion Properties. Masters Thesis. Michigan State University, East Lansing, MI, USA.