

농산물 포장용 지류완충재의 새로운 완충곡선 구현을 통한 완충성능 평가

정현모*

경북과학대학교 시각디자인과

Cushioning Efficiency Evaluation by using the New Determination of Cushioning Curve in Cushioning Packaging Material Design for Agricultural Products

Hyun Mo Jung*

Department of Visual Design, Kyongbuk Science College, Chilgok, Gyeongbuk, 718-851, Korea

Abstract From the time the product is manufactured until it is carried and ultimately used, the product is subjected to some form of handling and transportations. During this process, the product can be subjected to many potential hazards. One of them is the damage caused by shocks. In order to design a product-package system to protect the product, the peak acceleration or G force to the product that causes damage needs to be determined. When a corrugated fiberboard box loaded with products is dropped onto the ground, part of the energy acquired due to the action of the gravitational acceleration during the free fall is dissipated in the product and the package in various ways. The shock absorbing characteristics of the packaging cushion materials are presented as a family of cushion curves in which curves showing peak accelerations during impacts for a range of static loads are shown for several drop heights. The new method for determining the shock absorbing characteristics of cushioning materials for protective packaging has been described and demonstrated. It has been shown that cushion curves can be produced by combining the static compression and impact characteristics of the material. The dynamic factor was determined by the iterative least mean squares (ILMS) optimization technique in which the discrepancies between peak acceleration data predicted from the theoretical model and obtained from the impact tests are minimized. The approach enabled an efficient determination of cushion curves from a small number of experimental impact data.

Keywords Cushion curve, Shock absorbing characteristics, Corrugated fiberboard

서 론

포장이란 유통단계에서 제품이 파손되거나 손상되지 않도록 보호하는 수단이며 원가절감과 생산성 향상을 통한 상품성의 제고는 물론 부가가치 증대 및 매출신장에도 큰 영향을 미친다. 더욱이 포장재료의 재활용, 환경친화성 신소재 개발 등에 따른 포장의 중요성에 대한 인식의 전환이 요구된다. 최근 환경보호 문제가 전 세계적으로 확대되면서 포

장폐기물 처리의 중요성이 새로이 인식되어, 포장완충재의 주종을 이루던 플라스틱계(EPS, EPU, EPE) 재료의 사용이 환경오염과 관련하여 엄격히 규제됨에 따라 환경친화력이 우수한 지류완충재의 사용이 증가하고 있으며, 농산물의 직거래가 활발해지고 생산자 실명제를 도입한 결과 농산물 포장용 골판지 상자의 기능이 운반용에서 판매용으로 전환되고 있으며 화려한 디자인과 필요 이상의 강도로 설계, 유통되고 있어 과대포장이 심각한 수준에 달하고 있다. 유통과정 중 제품을 적절히 보호하고 적정포장비로 물류합리화를 위해서는 제품의 완충 및 적정포장설계가 필요하며, 이를 위한 첫 번째 조건이 완충재 자체에 대한 특성의 평가와 이의 객관적 자료화이다. 포장에 있어 완충재의 역할은 제품의 유통과정 중에 발생하는 충격과 진동을 완화시켜 제품을 보호

*Corresponding Author : Hyun Mo Jung
Department of Visual Design, Kyongbuk Science College, 634,
Jisan-Ro, Kisan-myeon, Chilgok-gun, Gyeongbuk 718-851, Korea
Tel : +82-54-979-9558, Fax : +82-54-972-9558
E-mail : hmjung@kbsc.ac.kr

하고 적정 포장비로 유통 합리화에 기여한다. 즉, 포장할 제품의 특성 및 물류환경에 따라 포장설계를 할 때 완충재의 선택 및 사용량 결정은 완충재 자체의 특성에 의존한다.

일반적으로 KS규격에 의하면 포장용 완충재료의 완충성을 평가하는 방법으로 정적압축시험방법과 동적시험방법을 규정하고 있다. 하지만 실제 유통상황에 가까운 조건에서 포장재료의 완충성을 평가하는 방법으로는 동적시험방법(ASTM, ISO, JIS)을 규정하고 있으며, 또한 완충재의 충격흡수특성은 다양한 낙하높이와 재료의 두께에 대한 최대가속도-정적응력선도 및 완충계수-동적응력선도에서 잘 분석될 수 있다. 하지만 완충곡선을 구현하기 위해서는 정적응력 및 낙하높이를 변화시켜 충격이 가한 후의 가속도-시간곡선에서 최대가속도만을 계측하여 완충곡선을 구현하게 되며, 이에 따르는 데이터의 양도 많아지게 되고, 실험시간도 길어진다.

박종민 등(1998)은 양면골판지 2종, 이중양면골판지 4종 및 삼중양면골판지 1종을 공시하여 골판지를 중심으로 3수준의 상대습도 및 낙하높이에 따른 골판지의 완충곡선을 구현하기 위한 실험을 실시하였으며, 그 결과 상대습도가 낮을수록 높은 가속도를 나타냈지만 낙하높이가 낮은 경우에는 반대로 낮은 가속도를 나타내었다고 보고하였다.

Sek 등(1997)은 골판지와 같은 비선형 재료에 대한 정적 또는 준동적 압축실험에서의 골판지의 압축특성과 충격상태에서의 거동에 대한 관계를 연구하였으며, 소위 동적계수(dynamic factor)를 제시하였다. 또한, 단 한 개의 동적계수로도 골판지의 완충곡선을 구현하는데 충분하다고 제시하였으나, 이 연구의 경우에는 준동적 압축실험에 대한 데이터가 필요하고 이에 따라 동적 압축실험장치가 필요하므로, 실험에 대한 접근이 어렵다.

따라서 본 연구에서는 동적계수를 다시 해석하여 지류완

충재에서 청과물의 포장에 이용되고 있는 골판지의 완충곡선 구현에 대한 새로운 알고리즘을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 공시재료

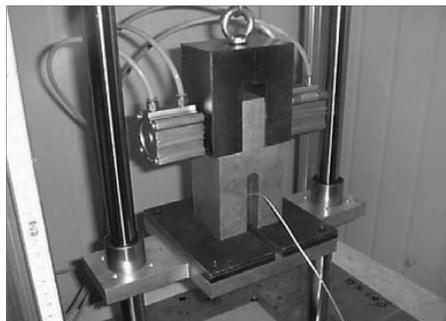
본 연구에서는 포장완충재의 완충곡선을 구현하기 위하여 과실 및 야채류 등의 포장에 주로 사용되는 지류완충재인 골판지(corrugated fiberboard)이며, Table 1에 나타난 것과 같이 양면골판지(single wall corrugated fiberboard) 및 이중양면골판지(double wall corrugated fiberboard) 각 1종이었다. 압축실험을 위하여 100×100 (mm)의 시편을 채취하였고 완충실험을 위하여 200×200 (mm)의 시편을 채취하였다. 모든 시편은 ASTM에서 규정하고 있는 대기조건(15°C, 75% RH) 실험실의 환경조건 (15°C, 75% RH)에서 약 4시간 동안 실험실 환경에 적응시킨 후 실험을 하였다.

2. 실험장치

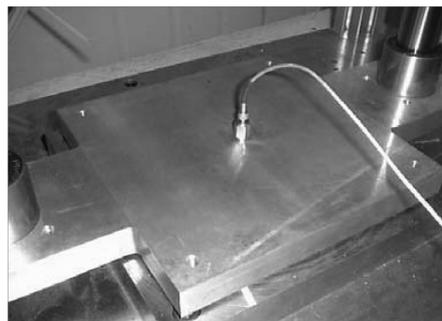
본 실험에서는 골판지(corrugated fiberboard)의 정적 압축특성을 계측하기 위하여 최소 1 mm/min의 하중재하속도로 주행할 수 있는 UTM(universal testing machine)을 이용하여 계측하였으며, 완충특성을 분석하기 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 자체 제작된 완충시험기(cushion tester)를 이용하여 계측하였다. 본 실험에서 사용된 완충시험기의 계측 제어부에서는 가속도 계측을 위해서 소형이면서 강성이 있는 1000 G 용량의 압전형 가속도 센서를 사용하였으며, 신호계측을 위하여 가속도계와 일체형이며 최대 60 dB까지 증폭이 가능한 앰프와 분해능 12 bit의 A/D 컨버터, 최대무게 200 kg까지 제어가능한 AC 모터, 최대출력압력이 1 MPa인

Table 1. Paper composition and physical dimension of the corrugated fiberboard tested

Types	Flute-type	Sample	Paper composition	Illustration
Single wall	A/F	SW1	SK210/K180/SK210	
Double wall	AB/F	DW1	SK210/K180/K180/K180/K180	



(a) Air cylinder



(b) Accelerometer fixed in impact plate

Fig. 1. Self-made cushion tester.

에어실린더를 사용하였다. 그리고 가속도계의 출력신호에 포함되는 노이즈를 제거하기 위하여 앰프에 내장된 로패스 필터(low-pass filter)에 의한 하드웨어적인 방법과 소프트웨어에 의한 디지털 가우시안 필터링(digital gaussian filtering)을 적용하였다.

완충시험기는 에어실린더와 AC 모터에 의해 낙하체(중추+충격평판+가속도계)의 낙하높이까지 이동되며, 프로그램의 명령에 의해 Fig. 1(a)의 에어실린더가 작동하면서 LM가이드에 의해 중추가 수직 자유낙하하고, Fig. 1(b)에서와 같이 충격평판에 고정된 가속도계에 의해서 가속도가 계측되어 컴퓨터에 의해 저장 및 분석되는 시스템이다.

3. 실험방법

일반적으로, 정적응력(σ_0)은 질량(m), 중력가속도(g) 및 접촉면적(A)에 의해서 식 (1)에서 보는 바와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_0 = \frac{mg}{A} \tag{1}$$

완충실험에서 충격중의 변위에서 완충재에서 발생하는 순간적인 저항력은 정적실험에서의 같은 변위라 할지라도 다르며, 충격중의 이 힘은 두 가지의 요소로 구분할 수 있다. 그 하나는 정적압축중의 같은 변위에서 발생하는 힘(F_s)이며, 다른 하나는 동적 영향에 의해서 발생하는 충격의 속도에서 발생하는 힘(F_d)이다. 따라서, 충격중의 전체 저항력은 식 (2)에서 보는 바와 같이 질량(m)과 가속도(\ddot{x})로 발생하는 힘과 같다.

$$m\ddot{x} - [F_s(x) + F_d(x, \dot{x})] = 0 \tag{2}$$

식 (1)을 질량에 대하여 정의하여 식 (2)에 대입한 후에

접촉면적으로 나누어주면, 식 (3)과 같은 식이 된다.

$$\frac{\sigma_0}{g}\ddot{x} - [\sigma_s(x) + \sigma_d(x, \dot{x})] = 0 \tag{3}$$

여기서, 괄호 안은 충격중의 단위면적당 전체저항력(dynamic stress)을 나타내며, 정적압축 중에 발생하는 정적응력(σ_s)을 밖으로 내 놓으면 식 (4)와 같은 식이 된다.

$$\frac{\sigma_0}{g}\ddot{x} - \left[1 + \frac{\sigma_d(x, \dot{x})}{\sigma_s(x)} \right] \sigma_s(x) = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\sigma_0}{g}\ddot{x} - c(x, \dot{x})\sigma_s(x) = 0 \tag{5}$$

$$c(x, \dot{x}) = 1 + \frac{\sigma_d(x, \dot{x})}{\sigma_s(x)} \tag{6}$$

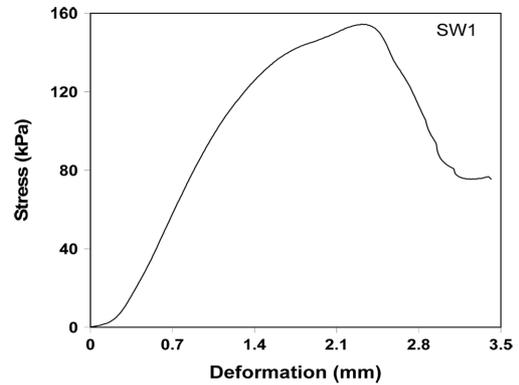


Fig. 2. A typical static compression behavior for the single wall corrugated fiberboard.

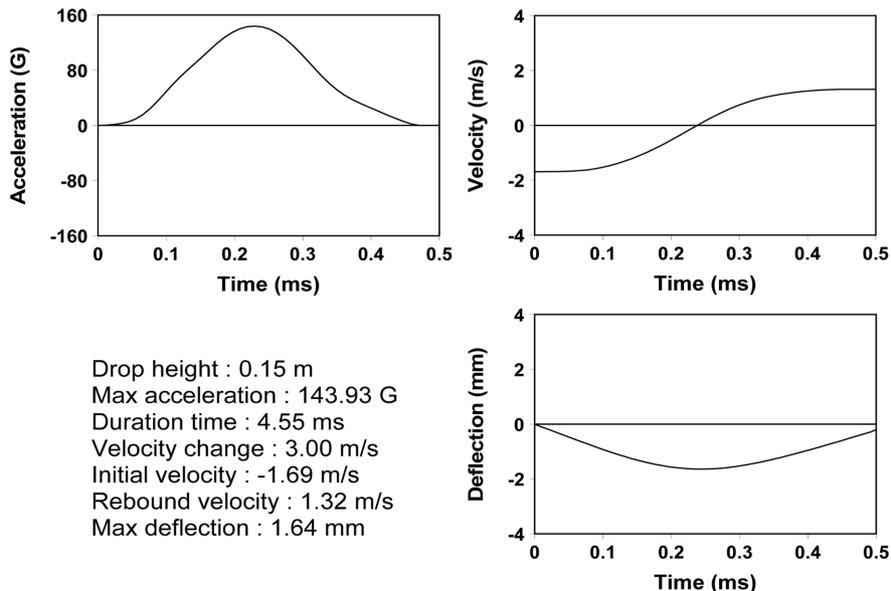


Fig. 3. Acceleration, velocity and deflection in an impact for the single wall corrugated fiberboard.

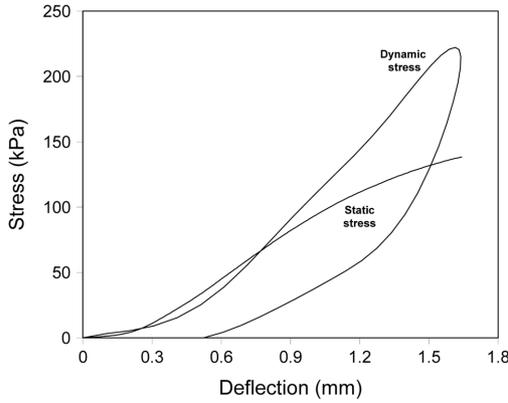


Fig. 4. Dynamic and static stress behaviors for the single wall corrugated fiberboard.

또한, 식 (5)에서 알 수 있듯이 충격에 대한 동적효과는 Sek 등(1996)에 의해 제시되었던 동적계수(dynamic factor, c)의 함수로 설명되어질 수 있다.

Fig. 2는 UTM(Universal Testing Machine)의 5 mm/min의 하중재하속도의 압축실험에 의한 양면골판지의 응력-변형 곡선(stress-deformation curve)이며, Fig. 3은 자체 제작된 완충시험기(cushion tester)를 이용한 양면골판지의 가속도, 속도, 변위에 대한 곡선이다.

Fig. 4는 압축실험 및 충격실험에 의해 계측된 데이터를 이용하여 최대변위(max deflection, 1.64 mm) 내에서의 정적 및 동적응력에 대하여 도시하였다.

또한 포장완충재료의 완충곡선을 구현하기 위해서는 충격 실험에 의해 도시되었던 가속도-시간 곡선 상에서 최대가속도만을 계측해야 하므로 전체적인 곡선의 데이터는 필요하지 않다. 따라서, 본 실험에서는 최대가속도를 추정하는 알고리즘을 개발하였다. Sek 등(1997)은 골판지의 경우에는 동적응력의 추정에 대하여 동적계수에 대한 상수를 적용하였으며, 식 (7)과 같다.

$$\sigma(x, \dot{x}) \approx c\sigma_s(x) \tag{7}$$

만약 동적계수가 계측되었다면, 충격중의 최대가속도는 동적계수에 의해서 동적효과에 대한 압축실험 데이터로부터 추정되어질 수 있으며, 식 (8)-(10)에서처럼 변형에너지는 낙하하는 중추의 운동에너지를 흡수하는데 필요한 시편의 최대 변위를 추정하기 위해서 적용되어진다. 충격중의 저항력에 대응하는 일에 관련된 에너지는 식(8)과 같다.

Energy of deformation = (8)

$$\int_0^{x_{max}} F(x, \dot{x})dx = A \int_0^{x_{max}} \sigma(x, \dot{x})dx$$

낙하높이 h 에서 낙하하는 물체의 위치에너지는 $mgh = \sigma_0 Ah$ 와 같으며, 식 (8)을 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_0^{x_{max}} \sigma(x, \dot{x})dx = \sigma_0 h \tag{9}$$

식 (9)에 동적계수를 적용하면 식 (10)과 같으며, 충격 중의 최대변위 x_{max} 을 추정할 수 있다.

$$\int_0^{x_{max}} c\sigma_s(x)dx \approx \sigma_0 h \tag{10}$$

또한, 충격 중의 최대가속도는 압축응력이 최대인 변위에서 발생하게 되므로 식 (11)과 같이 계측되어진다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{max} &= \frac{\max(F) \in x < 0, x_{max} >}{m} \\ &= \frac{\max(c\sigma_s) \in x < 0, x_{max} >}{m} g \end{aligned} \tag{11}$$

최대가속도는 식 (12) 및 (13)과 같이 실험에 의한 충격데이터에 의한 동적계수(c_i)의 범위 i , 낙하높이의 범위 k , 정적하중의 범위 j 에 대하여 추정되어진다.

$$\int_0^{x_{max}^{(j,k)}} c_i \sigma_s(x)dx \approx \sigma_{0,j} h_k \tag{12}$$

$$\ddot{x}_{max}^{(j,k)} = \frac{\max(c_i \sigma_s) \in x < 0, x_{max}^{(j,k)} >}{\sigma_{0,j}} g \tag{13}$$

평균계급(S_j)은 최대가속도를 예측하기 위하여 동적계수의 모든 범위 내에서 식 (14)와 같이 계산되어진다.

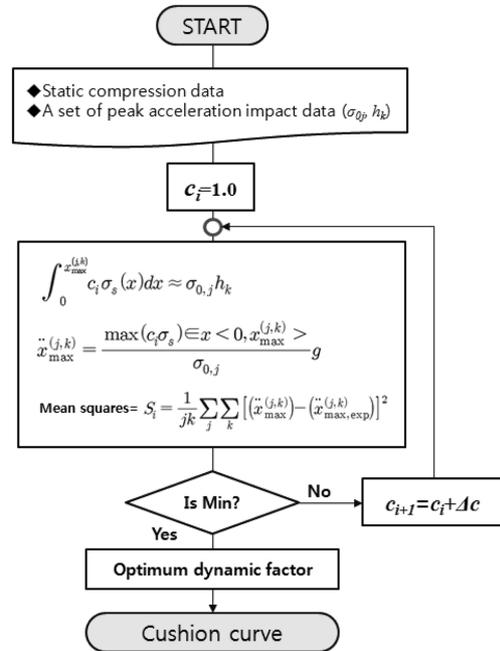


Fig. 5. Algorithm for the Iterative Least Mean Squares optimization of the dynamic factor.

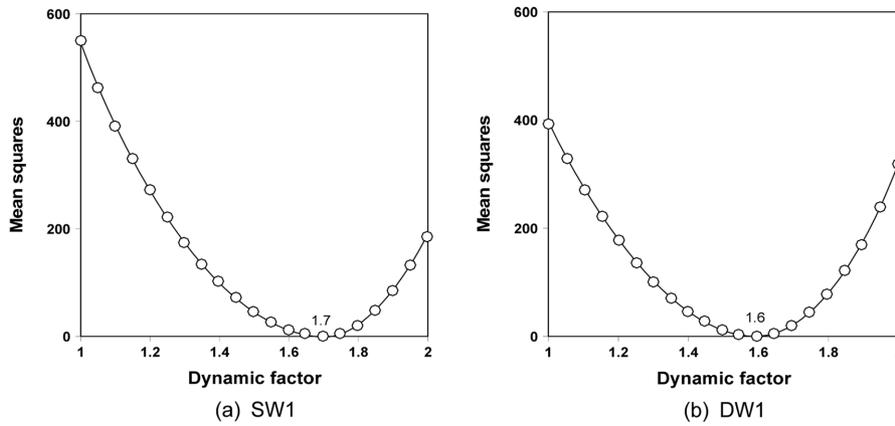


Fig. 6. Dynamic factor using the developed algorithm.

$$S_i = \frac{1}{jk} \sum_j \sum_k [(x_{max}^{(j,k)}) - (x_{max,exp}^{(j,k)})]^2 \tag{14}$$

또한, 최소평균제곱(Least Mean Squares)을 나타내는 값을 동적계수의 적정값으로 추정하게 되며, 이에 대한 알고리즘을 Fig. 5에 나타내었다.

결과 및 고찰

Fig. 6은 양면골판지(SW1)와 이중양면골판지(DW1)에 대한 동적계수 추정을 위한 방법을 도시하였으며, 양면골판지의 경우에는 1.7의 동적계수가 계측되었으며, 이중양면골판지는 1.6의 동적계수가 계측되었다. 이것은 이중양면골판지가 양면골판지보다 충격에 의한 동적 영향을 작게 받는다는 것을 의미한다.

또한, Fig. 5와 같이 제시된 알고리즘을 검증하기 위하여 일정한 응력 범위 내에서 완충곡선을 구현하기 위한 기존의 방법대로 골판지(SW1, DW1)에 대한 완충실험을 하였으며, 제시된 알고리즘에 의한 완충곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 기존의 방법의 경우에는 일정한 높이에서 11번 이상 정적응력 범위 내에서 충격실험을 해야 한다. 그러나 Fig. 5의 제시된

알고리즘을 적용하면 한 번의 압축실험 및 완충실험을 통하여 계측된 동적계수를 이용하여 완충곡선을 구현할 수 있다.

Table 2 및 3에서 보는 바와 같이 완충실험에 의한 결과 값과 알고리즘을 적용한 결과 값에 대한 회귀분석의 분산분석을 하였던 결과 유의수준 5%에서 매우 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 알고리즘에 방법으로도 충분히 완충곡선 구현이 가능할 것으로 판단되었다.

Fig. 7에서 기존의 방법과 알고리즘에 의한 완충곡선의 차이가 일부 발생하는 것은 같은 골판지에서 채취한 시편이라 할지라도 골판지는 골(flute)의 형상, 높이, 두께 및 개수에 의해 영향을 받기 때문에 같은 완충특성 나타나지 않았고 기존의 방식의 경우에는 완충곡선을 구현하기 위한 한 포인트의 계측을 위해서는 5번의 반복에 의한 평균값을 적용하였고, 알고리즘에 의한 완충곡선의 구현의 경우에는 단 한번의 충격실험에 의하여 완충곡선을 구현하였기 때문에 차이가 발생하였다.

요 약

본 실험에서는 청과물의 포장 완충재로 사용되고 있는 골판지의 압축 및 충격특성을 이용하여 완충곡선(peak accel-

Table 2. Analysis of variance for the regression model of cushioning curve in SW1

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob (F)
Regression	9	20870.28	2318.92	1.58	0.55
Error	1	1470.62	1470.62		
Total	10	22340.90			

Table 3. Analysis of variance for the regression model of cushioning curve in DW1

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob (F)
Regression	8	19064.61	2383.07	378.72	0.04
Error	1	6.29	6.29		
Total	9	19070.90			

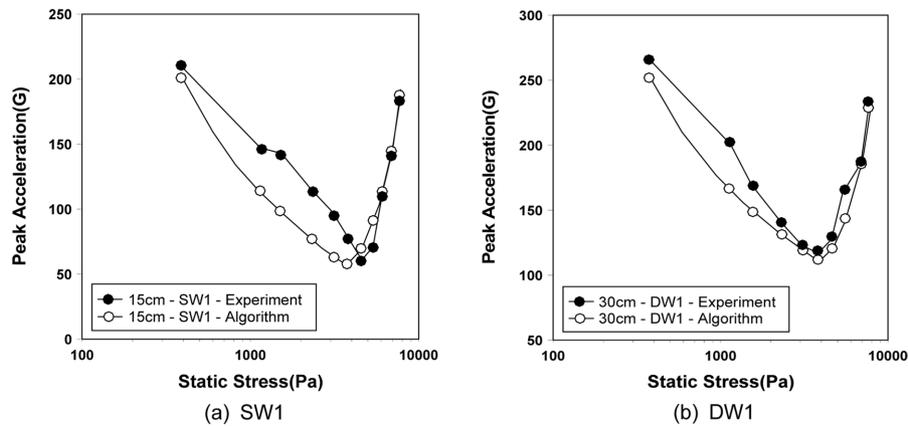


Fig. 7. Peak acceleration-static stress curve of the corrugated fiberboard.

eration - static stress curve)을 구현하기 위한 알고리즘을 제시하였다. 본 연구에서 알 수 있듯이 한 개의 동적계수로도 완충곡선을 구현할 수 있음을 알 수가 있었으며, 기존의 완충곡선의 구현시 정적응력 범위 내에서의 실험횟수를 현저하게 줄일 수 있음을 알 수가 있었다. 또한, 골판지 완충재료외에 플라스틱 발포체 완충재료에도 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 박종민, 김만수. 1998. 포장재료의 완충특성 분석-골판지를 중심으로. 한국식품공학회지 2(2): 129-136.
2. 박종민, 권순구, 엄순형, 김만수. 1998. 포장재료의 완충성 측정시스템 설계. 한국식품공학회지 2(2): 123-128.
3. 한국표준협회. KS A1030. 포장용 완충재료의 정적압축시험 방법.
4. 한국표준협회. KS A1029. 포장용 완충재료의 동적압축시험 방법.
5. ASTM standard D1596. Standard test method for dynamic shock cushioning characteristics of packaging material.
6. Sek, M., J. Kirkpatrick. 1997. Prediction of cushioning properties of corrugated fiberboard from static and quasi-dynamic compression data. Packaging Technology Sciences 10: 87-94.