

포장완충재료의 완충특성 측정시스템 개발

Development of Measuring System for Cushioning Properties of Package Cushioning Materials

김만수* 정현모* 박종민** 이영희***
정회원 정회원 정회원 정회원

M. S. Kim H. M. Jung J. M. Park Y. H. Lee

1. 서론

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 포장폐기물 처리의 중요성이 새로이 인식되어, 포장완충재의 주종을 이루던 플라스틱계 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 필요이상의 강도로 설계, 유통되고 있어 과대포장이 심각한 수준에 달하고 있다. 유통과정중 제품을 적절히 보호하고 적정포장비로 물류합리화를 위해서는 제품의 완충 및 적정포장설계가 필요하며, 이를 위한 첫 번째 조건이 완충재 자체에 대한 특성의 평가와 이의 객관적 자료화이다.

일반적으로 KS규격에 의하면 포장용 완충재료의 완충성을 평가하는 방법으로 정적압축시험방법과 동적시험방법을 규정하고 있다. 하지만 실제 유통상황에 가까운 조건에서 포장재료의 완충성을 평가하는 방법으로는 동적시험방법을 규정하고 있다(ASTM, ISO, JIS). 그러나 이들 규정자체가 지류완충포장재와 같은 환경 친화적인 포장완충재의 완충성 시험에는 적합하지 않을 뿐만 아니라, 이들 규정에 따라 제작되어 현재 보급되어진 완충시험기들은 지류완충포장재보다는 플라스틱 완충재의 완충성 평가에 치중하고 있으며, 더구나 시험평가를 위한 계측기술의 발전 및 완충포장설계방법의 고도화에 따라 재료에 대한 다양한 완충특성의 요구에 대응할 수 없다.

따라서, 본 논문에서는 지류완충재와 같은 박판재료부터 플라스틱 발포체와 같은 후판재료까지 그 적용범위가 넓고, 다양한 재료의 완충성을 측정 및 분석할 수 있는 완충실험장치의 설계와 완충성의 계측 및 분석용 컴퓨터 프로그램을 개발하고자 하였다.

* 충남대학교 농과대학 농업기계공학과

** 밀양대학교 기계공학과

*** 농촌진흥청 농업기계화연구소

2. 동적완충성 시험과 측정시스템의 개요

포장용 완충재료의 동적완충시험법인 충격하중시험방법은 포장화물이 화물취급상의 높이에서 낙하할 때에 상응하는 속도로 질량이 가변할 수 있는 중추에 의해 완충재료를 압축해서 완충성능을 평가하는 것이다. 또한 기반의 평면상에 시험편을 놓고 하면이 평탄한 중추에 가속도계를 고정한 상태로 규정된 높이에서 1분 간격으로 연속 5회의 충격을 가하고 그 횟수에 대한 정점가속도(peak acceleration)를 측정하며, 중추의 질량증가는 그 실험조건에서 최대가속도-정적응력곡선의 최적점 부근을 포함한 곡선을 그릴 수 있도록 최소한 5수준 이상을 선택하여야 한다.

완충재의 특성을 잘 설명할 수 있고 제품의 완충포장설계시 가장 중요한 것은 최대가속도-정적응력선도와 완충계수-정적응력선도이다. 포장에 있어 완충재의 역할은 제품이 받는 충격을 제품의 허용가속도 이하로 제한하는 것으로, 최대가속도-정적응력선도의 최적점에서 그 완충재는 최고의 완충성을 발휘하고, 그 최적점이 우측으로 옮겨가는 재료일수록 중량물의 완충에, 위로 올라갈수록 허용가속도가 높은 제품의 완충에 적합한 재료가 된다.

완충계수는 재료의 완충효율을 포장설계에 응용하기 위해 연구된 계수로, 완충재의 단위체적당 흡수에너지와 동적응력의 비율로 정의되며, 재료의 완충효율을 그대로 계산하기 때문에 완충포장설계에서 매우 중요시된다. 완충계수-동적응력곡선에서 완충계수의 최적값이 대응하는 동적응력값이 결정됨에 따라 이 최적점을 완충포장설계에 적용할 경우 가장 경제적으로 설계할 수 있고, 완충계수의 최적치 부근이 완만할수록 적용응력 범위가 넓은 완충재료가 된다.

3. 포장재 완충재료시험장치의 제작

가. 시스템의 기본구성요소

시험기는 크게 기계장치부, 계측제어부, 분석소프트웨어의 3부분으로 구성되어 있고, 기계장치부는 본체프레임, 낙하체(중추+가속도계+충격평판), 기반, 낙하체 리프팅요소로 구성되며, 계측제어부는 솔레노이드 밸브(solenoid valve), 에어실린더(air cylinder) 및 모타제어, 가속도 측정요소로 구성되고, 분석소프트웨어는 가속도의 연속측정으로 다양한 완충특성을 동시에 분석할 수 있도록 작성하여 지류완충재와 같은 박판재료부터 플라스틱 발포체와 같은 후판재료까지 완충성을 측정할 수 있도록 제작하였다.

나. 기계장치부제원

본 실험장치의 충격방식은 자유낙하방식이며, 유효낙하높이는 0~150cm, 중추의 무게변화범위는 1~60kg, 중추의 낙하방법은 솔레노이드 밸브(solenoid valve)에 의한 에어실린더를 제어하여 중추가 자유낙하 할 수 있도록 실험장치를 구성하였다. 또한 낙하체의 충격에너지가 시험편에 충분히 전달되도록 하기 위해서 시험기 기반의 무게와 기반을 받치는 콘크리트 베이스의 무게를 합쳐 낙하체 최대무게의 50배 이상이 되도록 설계하였다.

Table 1. Specifications of designed dynamic cushioning tester

Type	free-falling type
Max. specimen size	(L)160×(W)160×(T)3~100mm (max. specimen size 0.0256m ²)
Weight of drop-weight	1~60kg
Drop height	1~1500mm
Measuring elements	acceleration velocity, displacement (via integration versus time)
Supported mass	50 times the max. mass of the drop-weight
Measurement and Analysis	acceleration, peak acceleration, velocity, dynamic deflection, static stress, dynamic stress, cushion factor, shock duration, restitution coeff., strain energy, dynamic max. strain

[Note] ASTM D1596 : (L)101.6×(W)101.6

다. 계측제어부제원

계측제어부에서는 가속도 계측을 위해서 소형이면서 강성이 있는 압전형(piezoelectric) 가속도센서인 JSN-0012(10000G, charge sensitivity 1.0pC/G, voltage sensitivity 2.22mV/G)를 사용하였으며, 신호계측을 위하여 가속도계와 일체형이며 최대 60dB까지 증폭이 가능한 Charge Amplifier(CAM67-1)와 분해능 12bit의 PCL사의 A/D converter, 최대무게 200kg까지 제어가능한 AC motor, 최대출력압력이 1MPa인 에어실린더(air cylinder)를 사용하였다.

그리고 가속도계의 출력신호에 포함되는 노이즈를 제거하기 위하여 Charge Amplifier(CAM67-1)에 내장된 로패스필터(lowpass filter)에 의한 하드웨어적인 방법과 소프트웨어에 의한 디지털 필터링방법(Gaussian Type filtering)을 함께 적용하였다.

Table 2. Specification of cushioning test apparatus and measuring system

Items	Specification	Remarks
Accelerometer	10000G, 2.22mV/G	JSN-0012
Charge Amplifier	20dB, 40dB, 60dB	CAM67-1
A/D converter	12bit	PCL
AC motor	0.1 ~ 7.5kw	FR-E520
Air Cylinder	1MPa	KCC AF 40B-S25
Solenoid valve	170 ~ 230V	SYM SV-210
Air Compressor	8kg/cal, 2HP	JD 20-30
Micro computer	RAM 128MB	Pentium II -350MHz

본 실험장치는 에어실린더와 AC motor에 의해 낙하체(중추+충격평판+가속도계)의 낙하 높이까지 이동되며, 프로그램의 명령에 의해 그림2의 에어실린더가 작동하면서 LM가이드에 의해 중추가 수직 자유낙하하고, 그림3에서와 같이 충격평판에 고정된 가속도계에 의해서 가속도가 계측되어 컴퓨터에 의해 저장 및 분석되는 시스템이다.

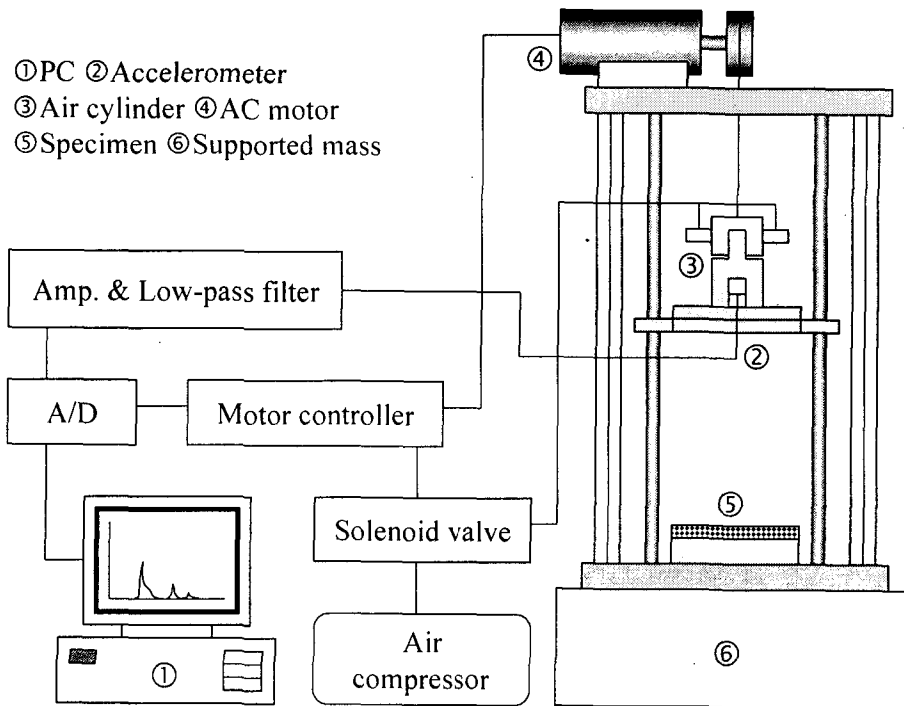


Fig. 1 Designed dynamic cushioning tester.

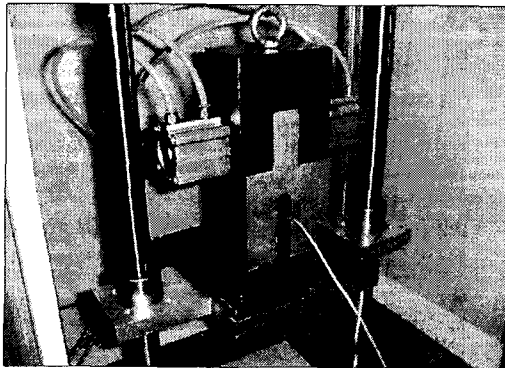


Fig. 2 Air cylinder

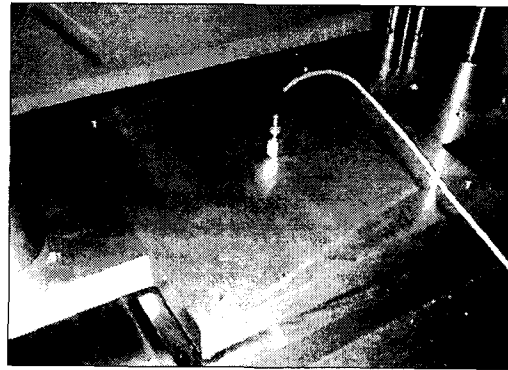


Fig. 3 Accelerometer fixed in impact plate.

라. 계측 및 분석 소프트웨어

개발된 계측 및 분석 컴퓨터 프로그램은 Visual Basic 6.0에 의해 작성되었으며, 재료의 완충성을 다각적으로 분석할 수 있도록 데이터의 측정부터 분석 및 출력까지 전 시스템을 일체화시켜 프로그램화하였다. 그림4는 계측 및 분석 소프트웨어의 흐름도이다.

그림5의 (a)는 시험장치의 기반 위에 놓인 시험편의 전체 상면에 중추로 충격을 가하였을 때 컴퓨터 모니터상에 출력된 가속도-시간곡선이다. 이 곡선상에서 첫 번째 피크 파형만을

확대하여 최대가속도와 표3의 기본식을 적용하여 속도, 동적변위, 정적응력, 동적응력, 변형 에너지, 완충계수 및 동적최대변형량 등을 계측 분석하였다. 계측된 결과값을 데이터파일로 입력값, 설정값을 함께 저장할 수 있도록 작성하였으며, 속도-시간곡선 및 동적변위-시간곡선 등을 출력하도록 작성하였다.

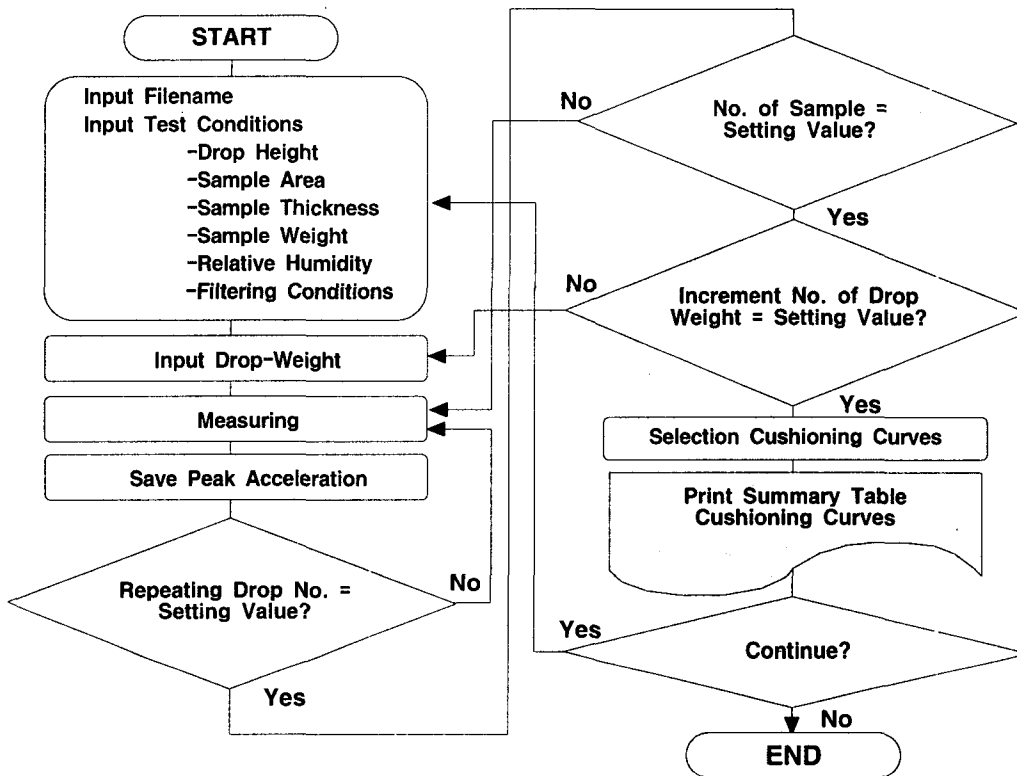


Fig. 4 Flow chart of the developed program for controlling the system and analyzing the data.

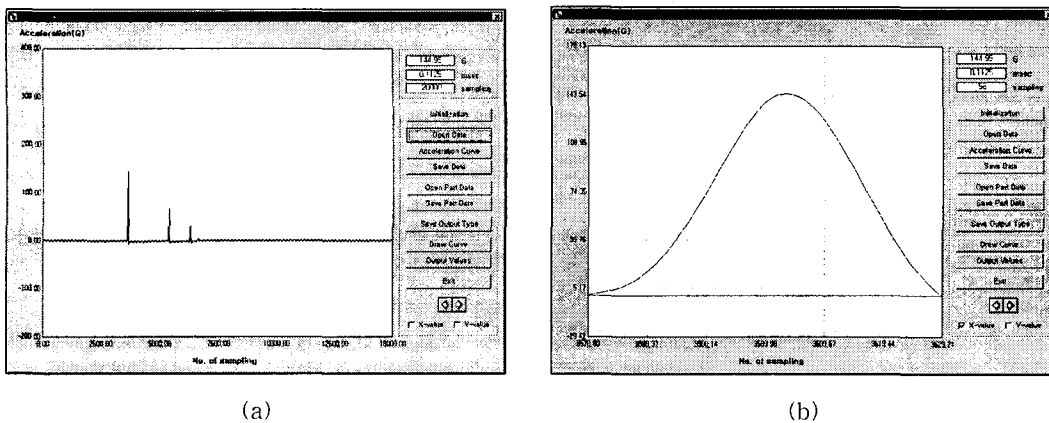


Fig. 5 Main window for controlling the measuring system and processing the data.

Table 3. Basic equations pertinent to the cushioning properties

Items	Numerical algorithm	Unit	Remarks
Velocity	$v = v_0 + g \int_0^t G dt \quad (v_0 = 2\sqrt{2gH})$	m/s	v=velocity change after contact G _m =peak acceleration D _m =dynamic max. deflection of specimen
Dynamic stress	$\sigma_m = \frac{W}{A} (G_m + 1)$	Pa	
Restitution coefficient	$e = \left(\int_{t_1}^{t_2} G g dt \right) / \left(\int_0^{t_1} G g dt \right)$	-	t=elapsed time after contact t ₁ =time at dynamic max. deflection t ₂ =time at separated instant between drop weight and specimen
Static stress	$\sigma_{st} = \frac{W}{A} = \frac{mg}{A}$	Pa	A=specimen area W=Wt of drop weight H=drop height T=thickness of specimen
Cushion factor	$C = \frac{(G_m + 1)}{H + D_m} T$	-	
Energy	$E = \frac{W(H + D_m)}{AT}$	J/m ³	
Dynamic max. strain	$\epsilon_m = \frac{D_m}{T}$	-	

4. 결론

제품의 포장에 있어 완충재의 역할은 제품의 유통과정중에 발생하는 충격과 진동을 완화시켜 제품을 보호하고 적정포장비로 유통합리화에 기여한다. 즉, 포장할 제품의 특성 및 물류환경에 따라 완충포장설계를 할 때 완충재의 선택 및 사용량 결정은 철저히 완충재 자체의 특성에 좌우된다. 따라서, 포장완충재료의 완충성을 측정할 수 있는 동적완충실험장치와 완충성의 계측 및 분석용 컴퓨터 프로그램을 개발하기 위하여 박판재료부터 후판재료까지 그 적용범위가 넓고, 재료의 완충성을 다각적으로 분석할 수 있도록 데이터의 측정부터 분석 및 출력까지 전 시스템을 일체화시켜 개발하였다.

5. 참고문헌

1. ASTM standard D1596. Standard test method for dynamic shock cushioning characteristics of packaging material.
2. Hanlon, F. Jo. 1984. Handbook of packaging engineering. MGH.
3. Leake, C. H. 1988. Measuring corrugated box performance. Tappi Journal Oct.:71-75.
4. MIL-HDBK-304. Package cushioning design.
5. Marcondes, J. A. et al. 1990. Application of high-speed motion analysis to measure shock in cushioned drops. Packing technology and Science 3:51-55.
6. Marcondes, J, A. 1992. Cushioning properties of corrugated fiberboard and the effects of moisture content. Trans. of the ASAE 35(6):1949-1953.
7. 한국표준협회. KS A1030. 포장용 완충재료의 정적 압축시험방법.
8. 한국표준협회. KS A1029. 포장용 완충재료의 동적 압축시험방법.