

포장재료의 완충성 측정시스템 설계

박종민 · 권순구 · 엄순형* · 김만수**
밀양산업대학교 기계공학과, *경북대학교 농공학과

Design of Measuring System of Cushioning Performance for Packaging Materials

Jong-Min Park, Soon-Goo Kwon, Sun-Hyoung Eam* and Man-Soo Kim**

Department of Mechanical Engineering, Miryang National University

*Department of Agricultural Engineering, Kyungpook National University

**Department of Agricultural Machinery Engineering, Chungnam National University

Abstract

The most important thing for cushion packaging design of products is the physical properties of the cushioning materials. For the cushioning performance analysis, the dynamic cushioning test, which is based on the real situations, is generally employed. This study was carried out to develop a low cost multi-purpose impact tester which can test a wide range of materials from thin to thick packaging materials, and can also analyze the shock-absorbing characteristics of materials in various aspects. The designed tester was verified by the differential analysis between measured dynamic stress and calculated dynamic stress and by the analysis of the results obtained from the existing tester. According to the aforementioned tests, results were relatively coincided with each other.

Key words: cushioning properties, cushion curve, dynamic cushioning tester, cushion packaging design

서 론

유통과정중 제품을 적절히 보호하고 적정포장비로 물류합리화를 위해서는 제품의 완충 및 적정포장설계가 필요하며, 이를 위한 첫번째 조건이 완충재 자체에 대한 특성의 평가와 이의 객관적 자료화이다.

일반적으로 포장재료의 완충성 평가방법에는 정적 및 동적시험방법이 있는데, 정적시험방법은 재료를 일정한 속도로 압축하여 얻은 압축응력-변형률선도를 토대로, 그리고 동적시험방법은 낙하 또는 전자식 충격체에 의해 가해지는 가속도를 측정함으로써 완충성을 각각 분석하는 방법이다. 동적시험방법은 정적시험방법에 비해 완충재의 사용상황에 가까운 조건으로 시험하기 때문에 실용성이 높은 결과가 얻어지므로, ASTM (ASTM D1596: ASTM D4168), ISO (ISO 4651), JIS (JIS Z0235) 등의 규정에서도 재료의 완충성 평가방법으로 이방법을 규정하고 있다.

그러나 이들 규정자체가 주로 플라스틱계 완충재에 맞추어져 있고, 또한 이들규정에 따라 제작되어 현재 보급되어 있는 완충시험기들은, 최근 환경친화적인 포장완충재로 그 사용량이 증가하고 있는 지류완충포장재(골판지, 판지 및 펄프볼드 등)의 완충성 시험에는 적합하지 않고, 더구나 시험평가를 위한 계측기술의 발전과 완충포장설계방법의 고도화에 따라 재료에 대한 다양한 완충특성의 자료가 요구되는데, 이에 충분히 대응할 수 없는 실정이다(豊田寛, 1998).

따라서 본 연구의 목적은 지류완충포장재와 같은 박판재료로부터 후판재료까지 그 적용범위가 넓고, 다양한 측면에서 재료의 완충성을 측정 및 분석할 수 있는 동적완충시험기의 개발을 위한 기초연구로 재료의 완충성 시험법과 시작기를 설계하는 것이다.

동적 완충성 시험과 측정시스템의 개요

시험방법

포장재료의 동적완충시험법인 충격하중시험방법은 포장화물이 화물취급상의 높이에서 낙하할때에 상당

Corresponding author: Jong-Min Park, Department of Mechanical Engineering, Miryang National University, 1025-1 Neidong, Miryang-si, Kyungnam, 627-702, Korea

하는 속도로 질량이 가변할 수 있는 중추(drop-weight)의 낙하에 의해 완충재료를 압축하여 완충성능을 평가하는 것이다.

시험방법은 Fig. 1에서 보는 바와같이 기반(supported mass)의 평면상에 시험편을 놓고, 포장내용품에 상당하는 하중에 평탄한 중추에 가속도계를 고정한 상태로 규정된 높이에서 자유낙하시켜 가속도와 시험편의 동적변위량을 동시에 측정한다(ASTM D1596: Ciosek와 Patterson, 1971; KS A1029: JIS Z0235).

또한 시험편에 중추를 낙하시켜 완충특성의 측정이 곤란한 현장발포완충재료(Foam-in place cushioning materials)나 필포몰드 및 골판지 시트 등을 구브려 완충구조를한 포장재의 완충성 시험에는 포장물, 포장재 및 가속도계를 일체시킨 포장모형(test block)을 만들어 포장화물낙하시험기나 제품의 충격강도를 측정하는 충격시험장치에 의해 자유낙하 상단의 속도를 주어 가속도를 측정한다(ASTM D4168).

시험장치의 기반위에 놓인 시험편의 전체 상면에 시험기의 가이드축에 의해 수직으로 자유낙하하는 중추로 하중을 가하며, 중추가 충돌하는 속도는 60 cm에서의 자유낙하속도를 기준으로 하고 있지만, 완충포장설계시 광범위한 높이에 대한 자료가 필요하므로, 적어도 30~100 cm의 범위에서 다양한 간격으로 시험하여야 하고, 시험편의 두께도 여러수준 변화시켜야 한다.

시험은 동일 낙하높이에서 1분 간격으로 연속 5회의 충격을 가하고, 그 각각의 횟수에 대한 정점가속도(peak acceleration)와 동적변위를 측정하며, 중추의 질량증가는 그 실험조건에서 최대가속도-정적응력선도의 최적점 부근을 포함한 곡선을 그릴 수 있도록 최소한 5 수준 이상을 선택하여야 한다(ASTM D1596: KS A1029: JIS Z0238).

블록상의 시험편 및 시트상의 시험편은 겹쳐서 기반상에 접착테이프를 이용하여 가볍게 고정하며, 이

방법의 적용이 곤란한 세편상 또는 입상의 시험편은 측면에 3mm정도의 구멍이 다수 나있는 압축상자(1.150×W150×H150 mm 이상의 틀)에 넣어 시험한다(ASTM D4168).

3개 이상의 시험편에 대하여 최초 1회재의 평균, 2~5회재까지의 평균치 또는 필요에 따라서 임의의 횟수의 조합에 의한 평균치로 나타낸다.

계측 및 분석

포장재료의 완충성을 분석하기 위해서는 가속도, 동적변위 및 동적응력등이 동시에 측정되어야 하는데, 일반적으로 가속도와 동적변위 만을 측정하므로서 이로부터 동적응력, 에너지 등을 계산하는 방법이 적용된다(Kawazi, 1969; Takahashi, 1969; 豊田寛, 1998).

포장재료의 완충성시험에 적용할 수 있는 가속도센서에는 스트레인 게이지형과 압전형이 있는데, 스트레인 게이지형은 측정범위가 500G이하, 측정주파수 범위는 0~2,000 Hz 정도이며, 긴 케이블을 사용하여도 압출력 손실이나 잡음의 간섭을 크게받지 않는 특성이 있다. 한편, 압전형 가속도센서는 측정범위가 스트레인게이지형 보다 넓고, 측정주파수 범위는 증폭기의 조합에 따라 다르지만 보통 1~6,000 Hz 정도이며, 일반적으로 1 Hz 이하의 저역에서 감쇄하기 때문에 연질완충재의 시험시에는 충격파형(shock pulse)이 찌그러지는 경우가 있다. 그러나 소형이면서 강성이 있는것이 특징이다.

또한 증폭기에는 로패스 필터를 설치하여 목적의 가속도 파형에 중첩한 노이즈와 중추 자체의 고유진동수를 제거하여야 하므로, 재료에 따라 최소한의 충격작용시간(shock duration)을 조사하여 이를 기준으로 적정차단주파수의 로패스필터를 선정하여야 한다.

중추가 일정한 거리를 낙하하여 시험편과 충돌하는 동안의 중추의 이동량, 즉 동적변위의 측정에는 자왜효과, 정전용량 또는 레이저 등의 비접촉 방법이 적용

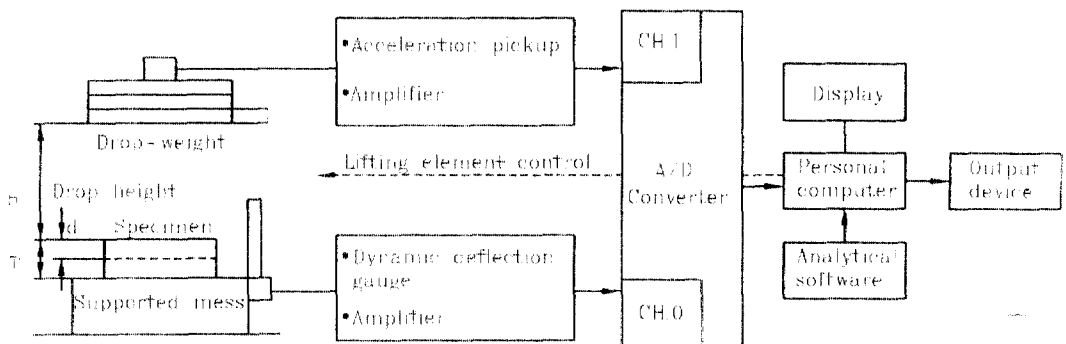


Fig. 1. Test method for dynamic cushioning properties.

된다.

가속도와 변위와의 관계 (동적응력-동적변형도선도)를 분석하려면 가속도 파형과의 위상차를 제거하기 위하여 가속도계측과 동일한 주파수의 로패스필터를 이용하는 것이 바람직하다.

완충특성 분석시스템과 시험기를 일체로한, 즉, 증폭기, A/D변환기, 분석소프트웨어를 일체화시켜 3방향 가속도의 합성, 변위해석, 충격스펙트럼등 다기능의 시스템을 이용하는 것이 효과적이나 때로는 A/D변환보드를 컴퓨터에 증설하여 엑셀과 같은 연산기능이 있는 소프트웨어에 매크로프로그램을 만들어서 가속도나 동적변위신호를 처리하므로써 필요한 표나 선도를 만드는 방법도 적용할 수 있다.

완충특성 선도

재료의 완충특성을 잘 설명할 수 있고 제품의 완충포장설계시 가장중요시 되는 것이 최대가속도-정적응력선도 및 완충계수-동적응력선도이다.

포장설계에 있어 완충재의 역할은 제품이 받는 충격을 제품의 허용가속도 (fragility, G-factor) 이하로 제한하는 것으로, 최대가속도-정적응력선도의 최적점에서 그 완충재는 최고의 완충성을 발휘하고, 그 최적점이 우측에 위치하는 재료일수록 중량물의 완충에, 또한 왼쪽으로 위치하는 재료일수록 fragility가 높은 제품의 완충에 적합한 재료가 된다.

재료의 최대가속도-정적응력선도에서 가속도축을 포장제품의 허용가속도로 그리고 정적응력축을 포장제품의 무게 W를 완충재료의 유효접촉면적 A로 나눈 수치로 대응시키면, 이로부터 한 제품의 완충에 필요한 소요재료의 면적 A와 두께 T를 구할 수 있다.

완충계수는 재료의 완충효율을 포장설계에 응용하기 위해 연구된 계수로, 완충재의 단위 체적당 흡수에너지와 동적응력의 비율로 정의되며, 재료의 완충효율이 그대로 계산되기 때문에 완충포장설계에서 매우 중요시 된다.

완충계수-동적응력선도에서 완충계수의 최적값에 대응하는 동적응력값이 결정됨에 따라 이 최적점을 완충포장설계에 적용할 경우 가장 경제적인 완충을 할 수 있고, 완충계수의 최적치 부근이 원단할수록 적용응력 범위가 넓은 재료가 된다.

동적완충시험기의 설계와 성능시험

시험기의 기본사양 결정

현재의 완충시험기들의 가장 큰 단점은 박판재료에

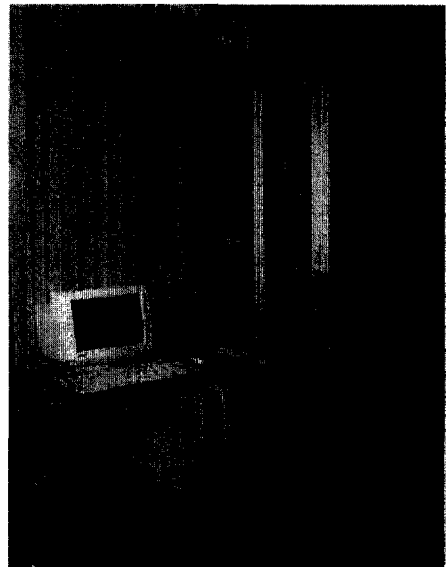


Fig. 2. Designed dynamic cushioning tester.

는 적용할 수 없고, 그 분석항목이 매우 제한적인 점이다. 따라서 본 연구를 통하여 박판재료로부터 후판 재료까지 그 적용범위가 넓고, 재료의 완충성을 다각적으로 분석할 수 있도록 데이터의 측정부터 분석 및 출력까지 전 시스템을 일체화시켜 설계한 시험기를

Table 1. Specifications of designed dynamic cushioning tester

(A) Tester	
Type	Free-falling type
Max. specimen size ¹⁾	(L)160×(W)160×(T)3~100 mm (max. specimen area 0.0256 m ²)
Weight of drop-weight	1.5~80 kg(static stress: 570~30,600 Pa)
Drop height	200~1,500 mm
Measuring elements	acceleration, dynamic deflection
Supported mass	50 times the max. mass of the drop-weight
[NOTE] 1)ASTM D1596: (L)101.6×(W)101.6 mm	
(B) Analytical software	
Operating system	Windows 97
	① acceleration-dynamic deflection-time curve
	② max. acceleration-static stress curve
	③ dynamic max. strain-static stress curve
Measurement & analysis	④ dynamic stress-dynamic max. strain
	⑤ cushion factor-dynamic stress curve
	⑥ shock duration
	⑦ restitution coefficient
	⑧ cushion factor-energy curve
	⑨ cushion factor-dynamic max. strain curve

Table 2. Basic numerical algorithm

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

Fig. 2에 나타내었다. 또한 이 시험기의 주요사양은 Table 1에 그리고 각종 특성의 계산에 적용한 수치알고리즘을 Table 2에 각각 나타내었다.

설계한 시험기는 크게 기계적인 장치부, 계측 및 제어부, 분석시스템의 3부분으로 구성되었다. 기계적인 장치부는 본체프레임, 낙하체(중추+가속도센서+충격평판, 중추의 누가장치), 기반, 낙하체 리프팅요소(Hand-held control)로, 계측 및 제어부는 전자석 및 모터제어, 가속도 및 동적변위 측정요소로 구성되고, 분석 소프트웨어는 Fig. 3의 흐름도에서 보는 바와같이 가속도 및 동적변위의 측정으로부터 Table 1-(B)와 같이 다양한 완충특성을 동시에 분석할 수 있도록 작성하였다.

설계제작한 시험기에 의해 한 시험조건에서 시험편에 1회의 충격을 가하였을 때 Fig. 4와 같이 가속도-시간 및 동적변위-시간선도가 컴퓨터 모니터상에 실시간으로 출력되고, 여기서 정점가속도와 최대변위량만이 미리지정된 data file의 한 섹터에 기록되며, 계획한 중추의 무게변화수준과 시험반복수 만큼의 시험이 반복되면 1개의 data file이 완성된다. 시험종료후 이 data file로부터 여러 완충특성과 각종 선도들이 그래픽되고 동시에 출력이 가능하도록 하였다.

시험방법과 시험기의 기본사양을 결정하는데 있어 ASTM (ASTM D1596), ISO (ISO 4651) 및 JIS (JIS Z 0235) 규정의 주요항목들과 부합되도록 하였고, 사용한 가속도센서는 PCB사(미국)의 압전형 가속도센서인 350A04 (5,000G, voltage sensitivity 1.07 mV/G)를, signal conditioning으로는 이 가속도센서와 일체형인 같은사의 chage amp인 480E09를 사용하였다. 또한 동적변위 센서로는 자장효과를 이용한 비접촉식 선형변

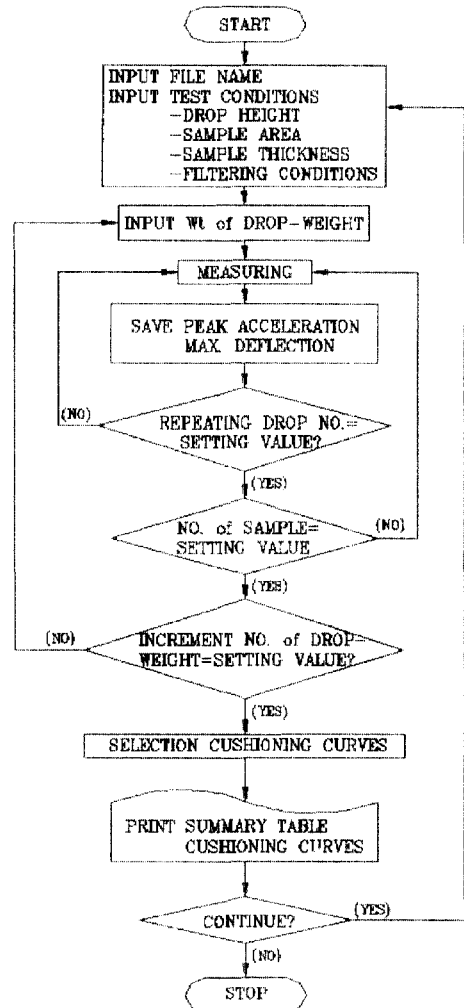


Fig. 3. Functional block diagram of cushioning properties analytical software.

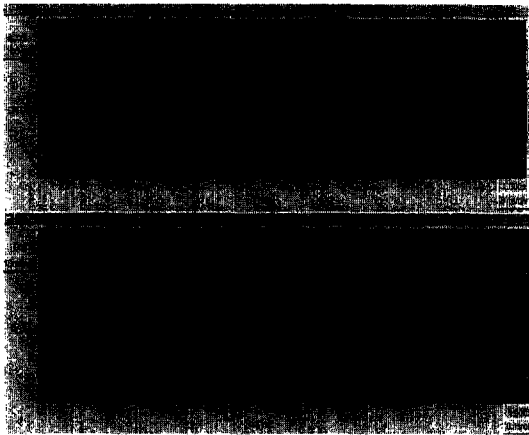


Fig. 4. Acceleration-time and dynamic deflection-time curves displayed on CRT.

위계인 DATA Instruments사(미국)의 HS 1000을 사용하였다. 그리고 가속도 및 변위 센서의 출력신호에 포함되는 잡음을 제거하기 위하여 로패스필터에 의한 하드웨어적인 방법과 소프트웨어에 의한 디지털 필터링방법(Gaussian type filtering)을 함께 적용하였다.

중추의 자유낙하 및 리프팅을 위한 lock system으로는 12 V의 D/A변환신호로 작동되는 solenoid system을 적용하였다. 특히, 낙하체의 충격에너지가 시험편에 충분히 전달되도록 하기 위해서는 기반 자체가 충분한 강성이 있어야 하므로, 여기서는 시험기 기반의 무게와 기반을 받치는 콘크리트 베이스의 무게를 합쳐 낙하체 최대무게의 50배 이상이 되도록 설계하였다(ASTM D1596: KS A1029: JIS Z0235).

시험기의 성능시험

설계된 동적완충시험기의 성능시험에는 2가지 방법이 적용되었다. 하나는 본 시험기에서와 같이 가속도 값으로부터 계산된 동적응력값과 하중변환계에 의해 실측한 값간의 차이를 분석하는 것이고, 다른 하나는 동일한 시험조건에 대하여 기존의 시험기와 설계된 시험기 간에 시험결과에 대한 비교분석이다.

가속도로 부터 동적응력의 계산은 중추가 시험편을 최대 압축한 순간에 운동 제 2법칙을 적용하므로써 다음과 같이 계산된다.

$$F_t = (G_m + 1) W \cdot N \rightarrow \sigma_m = \frac{F_t}{A} = \frac{W}{A} (G_m + 1), \text{ Pa} \quad (1)$$

즉, Eq. (1)에 의해 계산된 동적응력값과 시험기의 기반위에 하중변환계를 설치하고 그 위에 시험편을 가볍게 고정한 상태로 동일조건으로 실측한 값간에는 Fig.

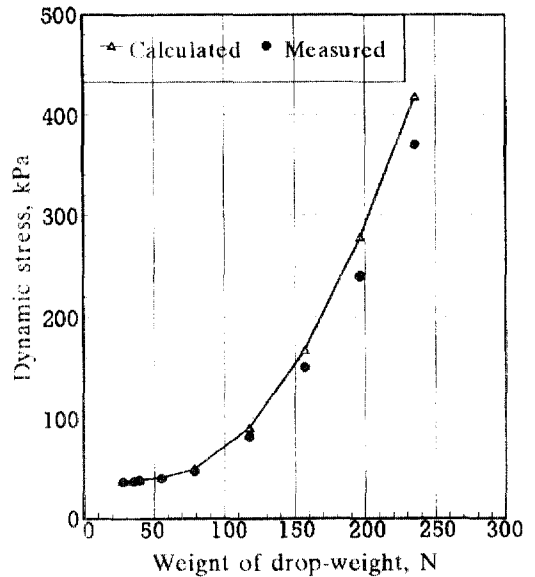


Fig. 5. Relationships between calculated dynamic stress and measured dynamic stress by force transducer (specimen, EPU; density, 0.034 g/cm³; drop height, 75 cm).

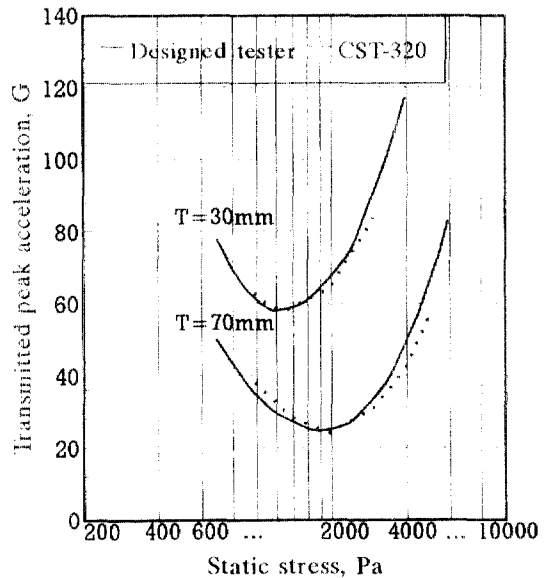


Fig. 6. Relationships between acceleration-static stress curves by designed dynamic cushioning tester and CST-320, respectively (specimen, EPU; density, 0.034 g/cm³; drop height, 75 cm).

5에 나타낸 바와같이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 발포폴리우레탄(밀도 0.034 g/cm³) 완충재에 대하여 낙하높이 75cm, 시험편의 두께 2수준에 대하여 본 연구에서 설계한 완충시험기와 현재 상용화

되어 있는 YOSHIDA SEIKI사(일본)의 CST-320 시험기로 동일조건으로 각각 시험한 결과이다. 두 시험기로 부터 측정된 최대가속도-정적응력선도도 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었다.

요 약

제품의 포장에 있어 완충재의 역할은 제품의 유통과정중에 발생하는 충격과 진동을 완화시켜 제품을 보호하고 적정포장비용을 유통합리화에 기여한다. 즉, 포장할 제품의 특성 및 물류환경에 따라 포장설계를 할 때 완충재의 선택 및 사용량 결정은 완충재 자체의 특성에 의존한다.

현재 보급되어있는 완충시험기들은 비교적 얇은 재료에 대한 시험을 할 수 없고, 그 분석항목도 매우 제한적 이므로, 본 연구에서는 박판재료로부터 후판재료까지 그 적용범위가 넓고, 재료의 완충성을 다각적으로 분석할 수 있도록 테이타의 측정부터 분석 및 출력까지 전 시스템을 일체화시킨 동적완충시험기를 설계하였다.

설계된 동적완충시험기의 성능시험에는 가속도 측정에 의해 계산된 동적응력 값과 실측에 의한 동적응력 값간의 차이분석과 동일조건에 대한 설계한 시험

기와 기존의 시험기에 의한 시험결과와의 분석 등의 방법을 적용하였는데, 두 경우 모두에서 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었다.

문 헌

- KS A1030. 포장용 완충재료의 정적 압축시험방법
- KS A1220. 포장용 발포 폴리우레탄 완충재
- KS A1029. 포장용 완충재료의 동적압축시험방법
- JIS Z0235. 包装用緩衝材料の評價試験方法
- 豊田寛. 1998. 包装用緩衝材料の緩衝特性試験と計測. CARTON BOX, 1: 156-611
- ASTM D1596. Standard test method for dynamic shock cushioning characteristics of packaging material
- ASTM D4168. Transmitted shock characteristics of foam-in-place cushioning materials
- Ciosek, B. M. and D. Patterson, Jr. 1971. Impact test for cushioning. *Modern Packaging*, Oct.: 1-4
- Hanton, J. F. 1984. Handbook of packaging engineering. McGraw-Hill. New York
- ISO 4651. Cellular rubbers and plastics-determination of dynamic cushioning performance Kawazi, Y. 1969. Cushioning factors estimated by displacement. *JPI*, 7(3): 23-26
- MIL-HDBK-304. Package cushioning design
- Takahashi, T. 1969. Evaluation of cushioning characteristics of package cushioning materials by means of simultaneous measurement of deceleration-displacement and its appliance. *JPI*, 7(5): 42-48