

# 모의 수송 환경에서의 청과물 골판지 상자의 진동 피로에 따른 내구성

김만수 정현모 김기복

## Durability of Corrugated Fiberboard Container for Fruit and Vegetables by Vibration Fatigue at Simulated Transportation Environment

M. S. Kim H. M. Jung K. B. Kim

### Abstract

The compression strength of corrugated fiberboard container for packaging the agricultural products rapidly decreases because of various environmental conditions during distribution of unitized products. Among various environmental conditions, the main factors affecting the compression strength of corrugated fiberboard are absorption of moisture, long-term accumulative load, and fatigue caused by shock and vibration. An estimated rate of damage for fruit during distribution is about from 30 to 40 percent owing to the shock and vibration. This study was carried out to characterize the durability of corrugated fiberboard container for packaging the fruit and vegetables under simulated transportation environment. The vibration test system was constructed to simulate the land transportation using truck. After the package with corrugated fiberboard container was vibrated by vibration test system at various experimental conditions, the compression test for the package was performed. The compression strength of corrugated fiberboard container decreased with loading weight and vibrating time. The multiple nonlinear regression equation for predicting the decreasing rate of compression strength of corrugated fiberboard containers were developed using four independent variables such as input acceleration level, input frequency, loading weight and vibrating time. The influence of loading weight on the decreasing rate of corrugated fiberboard container was larger than other variables.

**Keywords :** Compression strength, Corrugated fiberboard container, Shock and vibration

## 1. 서론

농산물 포장화물의 경우 농산물의 손상은 겉포장 상자의 파손에 의한 압상이 주요 원인이다. 따라서 농산물 상자의 경우 압축강도를 특히 중요시하고 있으며, 한국산업규격(KS)을 비롯해 각종 농산물 관련 규정에서는 압축강도에 의한 상자의 품질관리를 규정화하고 있다. 골판지(corrugated fiberboard container) 상자의 압축강도는 원단인 골판지의 구성 원지들(라이너, 골심지)의 품질과 이들의 구성 형태 및 상자의 외형 치수 비율에 따라 결정되므로, 원지의 링크라쉬(ring crush),

원단의 수직압축강도(edgewise compression strength, ECS)를 통해 상자의 압축강도를 관리하는 것이 보통이다.

골판지 상자는 제작 후 유통 과정을 거치면서, 여러 요인에 의해 압축강도가 현격하게 저하되는데, 이중 수분 흡수에 의한 강도 저하와 장기 누적하중, 진동 및 충격 등의 피로로 인한 강도 저하가 가장 크다. 여러 산업 분야에서 골판지 상자의 견고성 문제는 물품의 내수 및 수출시 제품에 대한 신뢰성 확보와 기업의 이미지 제고와 직결되는 중요한 사항이다. 특히, 세계 각국의 농산물 시장이 개방됨에 따라 우리나라 농산물의 수출도 확대될 전망이고, 또한 마땅한 대체재가 개발

This article was submitted for publication in August 2004, reviewed and approved for publication by editorial board of KSAM in March 2005. The authors are Man Soo Kim, KSAM member, Professor, Division of Bioresource Engineering, Chungnam National University, Hyun Mo Jung, KSAM member, Full-time Lecturer, Dept. of Packaging, Kyongbuk College and Science, Ki Bok Kim, KSAM member, Senior Researcher, Human Life Measurement Group, Center for Environment and Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science. The Corresponding author is M. S. Kim, Professor, Division of Bioresource Engineering, Chungnam National University, 305-764, Korea; E-mail : <mskim@cnu.ac.kr>

되지 않는 한 골판지 상자의 이용은 날로 증가될 것으로 전망된다. 따라서 골판지 상자의 압축강도와 내구성 향상에 대한 다각적인 연구가 절실하다. 일반적으로 생산자와 소비자 사이의 유통단계에서 진동에 의한 기계적 손상으로 과실의 손실률이 약 30~40% 정도로 추정되고 있다.

Rouillard와 Sek(2000)은 골판지 상자의 공진 주파수(resonance frequency)를 측정하기 위하여 유압식 서보 가진기(hydraulic servo actuator)를 이용하여 정현파 스위프(sweep) 진동시험을 하였으며, 그 결과 약 14.5 Hz에서 공진 현상이 발생하였고, 일정한 하중이 가해졌을 때 공진주파수에서 0.7 G의 가속도 수준의 정현파 일정 진동시험(sinusoidal dwell test)을 하여 약 20분이 지난 후에 골판지 상자의 파손이 발생하였다고 보고하였다. Timothy와 Marshall(1999)은 유통 과정 중 발생하는 진동과 포장물의 파렛트 설계에 대한 기초 자료를 얻기 위하여 3~50 Hz의 주파수 대역에서 펄리트 화물에 대한 정현파 스위프 진동 실험을 하였으며, 그 결과, 펄리트 적재판의 두께, 받침판의 간격, 형태 및 정적 하중은 파렛트의 공진 주파수에 영향을 미친다고 보고하였다.

McKee 등(1963)은 골판지 상자가 충격되었을 때 그 상자가 받는 하중의 약 64%는 상자의 네 수직 모서리 부분에서 지지되고, 나머지 36%는 상자의 측면 판넬(panel)에서 지지되므로, 골판지의 ECS(edgewise compression strength)와 휨강성이 상자의 압축강도를 결정하는 주요인이 된다고 보고하였다. ECS법은 골판지 시편의 압축강도로부터 상자의 압축강도를 계산할 수 있고, 또한 상자의 크기에 영향을 받지 않고 상자의 압축강도를 계산할 수 있는 방법으로서 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어왔다(Gartaganis, 1975; Koning, 1975; Leake, 1988; McKEE et al, 1963).

이러한 요구에 발 맞추어 현재 국내에서는 골판지에 대한 연구가 활발한 데, 그 내용을 살펴보면, 여러 요인 즉, 운송도 요인, 상자 치수 비율 및 통기공 가공에 따른 압축강도 변화에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며, 최근에는 유한요소 해석과 같은 공학적 기법에 의한 상자 압축강도의 최적화에 대한 연구(박 등, 2002)도 수행되고 있다. 그러나 유통 중의 진동에 의한 압축강도 열화에 대한 연구는 국외에서는 다수 연구자들에 의해 연구가 수행되고 있지만, 국내의 경우에는 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유통 중의 운송에

서 발생하는 가속도 수준에 대하여 진동 시간, 적재 하중 및 입력주파수에 따른 청과물 골판지 상자의 내구성에 대하여 고찰하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 실험 재료

본 실험에서는 진동에 의한 골판지 상자의 압축강도를 분석하기 위해서, Table 1과 같이 국내 농산물 포장용 골판지 상자에 많이 사용되는 원지 구성으로 골판지 상자를 제작하였다. 골판지 상자의 치수는 우리 나라의 농산물 표준출하규격에 의해 규정된 포장단위 15 kgf의 배 포장용 골판지 상자의 치수이었으며, 실험전 상자를 온도 23±1℃, 상대습도 50%로 잘 조성된 대형 항온항습기 내에서 48시간 이상 충분히 평형시킨 후 실험에 사용하였다(ASTM D685).

### 나. 실험 장치 및 방법

유통 시간, 적재 하중 및 입력 주파수에 따른 진동에 의한 골판지 상자의 압축강도를 분석하기 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이, 진동 테이블 위에 실험용 상자를 놓고, 그 위에 이 보

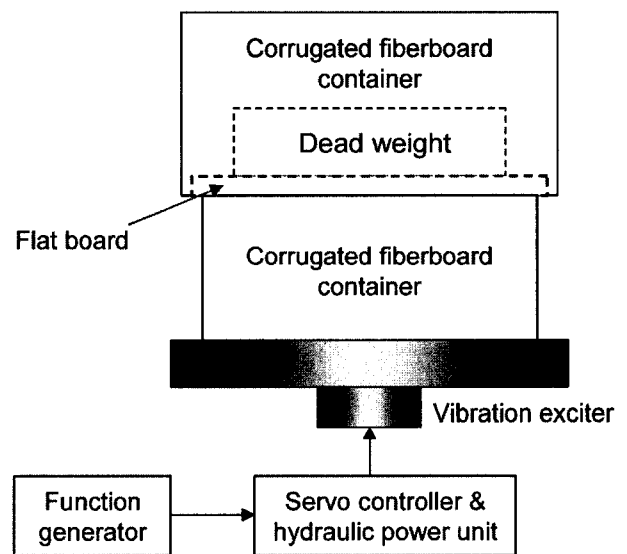

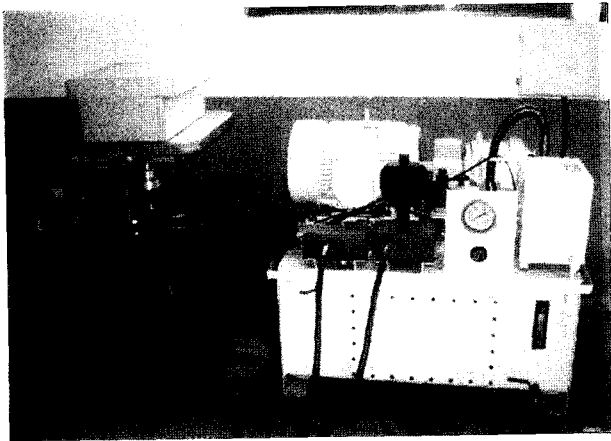


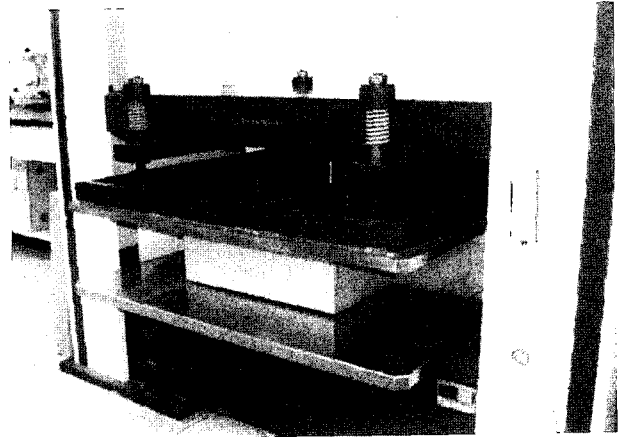
Fig. 1 Schematic diagram of the vibration test system.

Table 1 Type and physical properties of corrugated fiberboard container tested.

Type	Flute	Symbol	Paper combination	Dimension (L×W×D, mm)	Remark
RSC (0201)	AB/F	DW1	KA180/K180/K180/K180/K180	550×366×280	



(a) Vibration test



(b) Compression test

Fig. 2 Vibration and compression test apparatus for corrugated fiberboard container.

다 길이와 폭이 더 큰 상자에 평판과 일정 무게의 하중판을 넣어, 사하중(dead load) 형태로 실험상자에 수직 하중을 가하였다. 이 상태에서 포장된 도로에서 트럭 본체의 가속도 수준인 0.25, 0.5, 1 G-rms의 3가지 가속도 수준에서 20, 45, 70 Hz의 3가지 주파수 대역별로 일정시간 진동을 가한 후 바로 압축실험을 실시하였다. 진동실험시에 실험용 상자와 무게를 가하는 상자가 분리되지 않도록 고정하였다. 압축실험은 ASTM D642에 따라 하중 재하속도를 12.7 mm/min로 하였다. 진동 및 압축실험은 5회 반복하였으며, 측정 결과는 최대값과 최소값을 제외한 나머지의 평균값으로 나타내었다.

본 연구에서는 일정한 가속도 수준의 진동실험을 위해 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이, 유압식 진동 가진기(Engineering-Korea HVT-2, 700 kgf, 300 Hz)를 이용하였다. Fig. 2(b)는 진동실험 후 같은 시료 상자에 대한 압축 실험의 모습을 나타낸 것이며, 사용된 상자 압축 시험기(DAEYOUNG)의 용량은 5 ton이었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 골판지 상자의 진동 피로와 압축강도 관계

골판지 상자에 가해진 적재하중, 진동 주파수 및 진동시간에 대한 골판지 상자의 압축강도의 변화를 분석하기 위하여 진동과 압축실험을 병행하였다. Fig. 3은 진동 실험전의 골판지 상자의 힘-변형 선도를 나타낸 것이다. 압축강도는 힘-변형 선도에서 최대하중으로 하였다(ASTM D642). 진동에 노출되지 않은 골판지 상자의 압축강도(평균, 769.20 kgf)를 기준으로 하여 적재 하중, 진동 주파수, 진동 시간 및 가속도 수준(G-rms)에 따른 골판지 상자의 압축강도 저하율을 Table 2

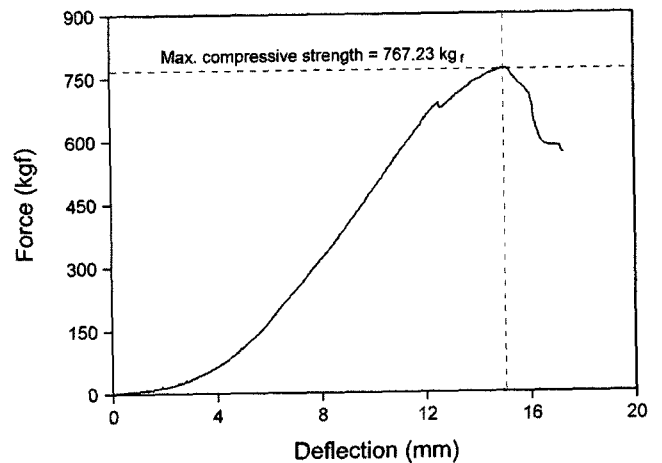


Fig. 3 Force - deflection curve of corrugated fiberboard container.

에 나타내었다. Table 2에서와 같이 적재 하중과 진동 시간에 따라서 골판지 상자의 압축강도가 저하되었으며, 입력 주파수에 따른 압축강도의 변화는 고주파수 대역보다 진동 변위가 심한 저주파수 대역에서 현저히 나타났다.

입력 가속도 수준이 높을수록 압축강도의 저하율이 증가하였는데, 이것은 과일 포장화물의 운송 중에 발생하는 주파수 대역은 낮고, 가속도 수준이 높을 때는 큰 진동 변위가 발생하여 골판지 상자의 압축강도 저하율이 더 크게 되어 장기간 유통시의 압축강도 저하는 골판지 상자의 붕괴를 초래해 결국 포장된 과일의 손상으로 연결됨을 의미한다.

#### 나. 골판지 상자의 진동 피로에 의한 압축강도 저하의 모형화

운송중 골판지 상자의 압축강도 저하율(DR)을 예측하기 위하여 입력 가속도 수준(0.25, 0.5 및 1 G-rms)에 따라 입력

**Table 2** Decreasing rate (%) of compression strength of corrugated fiberboard containers by the vibration.

Input frequency (Hz)	Vibration time (min)	Acceleration level (G-rms)											
		0.25				0.5				1			
		Loading weight (kg)											
		10	30	50	70	10	30	50	70	10	30	50	70
20	30	0.28	1.16	2.38	2.48	0.75	1.75	3.25	5.25	0.98	2.66	4.19	6.87
	60	0.82	1.45	2.46	3.31	1.25	2.50	4.75	7.00	1.93	3.48	5.84	8.45
	90	1.34	2.16	3.18	4.62	2.25	4.25	6.00	9.00	3.14	4.79	7.23	11.78
	120	2.01	2.58	4.60	5.35	3.75	5.75	8.50	12.00	4.25	6.58	9.35	15.45
45	30	0.19	0.62	1.04	1.68	0.41	1.23	1.76	2.45	0.62	1.62	2.58	3.76
	60	0.42	0.96	1.58	2.01	0.92	1.48	2.76	3.42	1.57	2.49	3.46	4.45
	90	0.93	1.42	1.94	2.65	1.45	2.28	3.19	4.82	2.45	3.31	3.98	5.74
	120	1.32	1.63	2.48	3.51	2.23	3.10	4.28	5.56	3.18	3.85	4.86	6.76
70	30	0.16	0.36	0.89	1.59	0.32	0.84	1.54	2.38	0.46	1.25	2.29	3.47
	60	0.29	0.74	1.45	1.98	0.76	1.27	1.96	2.58	1.21	2.14	3.16	3.87
	90	0.62	1.22	1.62	2.45	1.19	1.83	2.40	2.92	1.87	2.85	3.42	4.65
	120	1.12	1.40	1.98	2.97	1.86	2.29	2.71	3.92	2.69	3.17	3.97	4.98

주파수(F), 진동 시간(T), 적재 하중(W)을 독립변수로 한 다중회귀 모델을 DataFit(Ver. 7.1) 상용 프로그램을 이용하여 Table 3에서와 같이 개발하였다.

Table 3에서 보는 바와 같이 가속도 수준별로 개발된 다중회귀 모델 각각의 결정계수는 가속도 수준이 낮은 것에서 높은 순서로 0.9475, 0.9707, 0.9479로 나타났으며 이들에 대한 분산분석을 실시한 결과, 모든 모델에서 고도의 유의성이 인정되었다. 또한, 입력 주파수, 적재 하중 및 진동 시간과 골판지 상자의 압축강도 저하율과의 상관관계 분석에서는, 가속도 수준이 0.25 G-rms 일 때는 적재 하중(0.6837)이 진동 시간(0.4924)에 비하여 상관관계가 높았고, 입력 주파수(-0.4243)는 낮은 가속도 수준에서는 상관 관계가 낮게 나타났다.

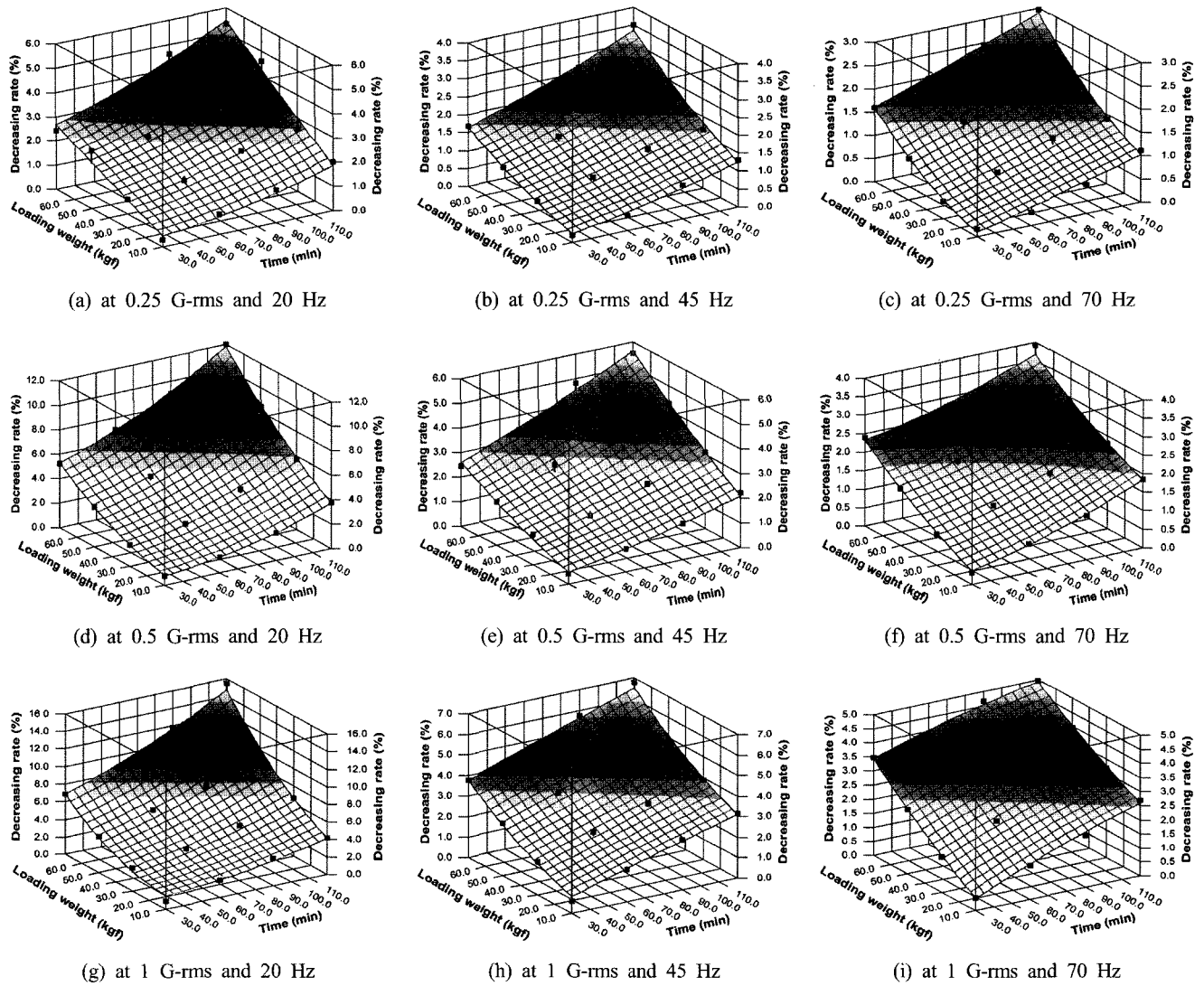
가속도 수준이 0.5 G-rms 일 때는 적재하중(0.5831)이 진동시간(0.4481)에 비하여, 입력주파수(-0.5130)는 진동시간에 비하여 각각 압축강도 저하율과 높은 상관 관계를 보였다.

**Table 3** Coefficients of multiple regression model for the decreasing rate of compression strength in acceleration level.

Variables	$DR = \exp(a \times F + b \times T + c \times W + d)$		
	0.25 G-rms	0.5 G-rms	1 G-rms
a	-0.01431	-0.02237	-0.01948
b	0.00893	0.00981	0.00859
c	0.01889	0.01981	0.01996
d	-0.37142	0.36299	0.61716
$R^2$	0.9475	0.9707	0.9479

으며, 가속도 수준이 1 G-rms 일 때도 이와 비슷하게 적재 하중(0.6141)이 진동 시간(0.4283)에 비하여, 입력 주파수(-0.4714)는 진동 시간에 비하여 각각 압축강도 저하율과 높은 상관 관계를 나타내었다. Fig. 4에는 압축강도 저하율의 반응 표면을 입력 가속도와 진동수에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 다른 조건이 같을 때 압축강도 저하율은 낮은 주파수일 때가 높은 주파수일 때보다 크게 나타났다. 또한 입력 가속도가 클수록 압축강도 저하율도 큰 것으로 나타났다.

입력 가속도(AL), 입력 주파수(F), 적재 하중(W) 및 진동 시간(T)을 독립변수로 하고 골판지 포장상자의 압축강도 저하율(DR)을 종속변수로 한 다중회귀 모델을 개발하였으며, 그 결과를 Table 4에 표시하였다. 표에서 보는 바와 같이 독립변수를 4개로 하였을 때의 결정계수는 0.9198로서 3개의 독립변수에 의한 모델에서보다 약간 낮은 값을 보였으나 Table 5의 모델에 대한 분산분석 결과에서 보는 바와 같이 이 모델은 고도의 유의성이 인정되었다. 국내 유통시간을 고려했을 때 4개의 독립변수들과 골판지 상자 압축강도 저하율과의 상관관계 분석에서는 독립변수들 중에서 적재 하중(0.5366)이 제일 높았고, 그 다음으로는 입력 주파수(-0.4172), 진동 시간(0.3903) 및 입력 가속도 수준순이었다. 입력 가속도의 상관계수가 작게 나온 이유는 가속도 수준별 차이가 작았으며, 가속도 수준의 범위를 확대할 경우에는 입력 가속도와 상관계수도 크게 나타날 것으로 판단되었으며, 만약 진동 시간을 충분히 길게 하였다면 압축강도 저하율과 진동 시간과의 상관관계가 제일 클 것으로 판단되었다.



**Fig. 4** Response surfaces of decreasing rate of compression strength in the corrugated fiberboard container at various acceleration levels and input frequencies.

**Table 4** Coefficients of multiple regression model for decreasing rate of compression strength by vibration.

Variables	$DR = \exp(a \times AL + b \times F + c \times T + d \times W + e)$				Coefficient of multiple determination ( $R^2$ )
	Coefficients	Standard error	t-ratio	Prob (t)	
a	0.87830	0.05023	17.48518	0.0	0.9198
b	-0.01961	0.00093	-21.09857	0.0	
c	0.00898	0.00051	17.56705	0.0	
d	0.01975	0.00086	22.88112	0.0	
e	-0.25463	0.08490	-2.99915	0.00321	

\*Note : AL=Input acceleration (G-rms)

**Table 5** Analysis of variance of multiple regression model for decreasing rate of compression strength by vibration.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob (F)
Regression	4	766.8787021	191.7196755	398.5315**	0.00
Error	139	66.8680729	0.481065273		
Total	143	833.746775			

이상의 상관관계 분석결과를 볼 때 골판지 상자의 압축강도 저하율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 적재하중으로 판단되었다. 따라서, 파렛트 화물의 운송 중에 저층 화물의 겹포장상자는 상층부의 적재하중을 받은 상태에서 진동피로를 받을 경우 압축강도의 저하가 크게 발생하여 이에 따른 상자의 붕괴로 말미암아 포장품의 손상과 함께 전체 파렛트(pallet) 화물의 안정성에도 영향을 주게 될 것으로 판단된다. 이러한 결과를 응용하여 유통 중 농산물 골판지 포장화물에 대한 적정 층적 단수를 추정하고, 골판지 상자의 적정 포장설계를 통한 농산물의 손상을 최소화할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

유통 중 운송시에 발생될 수 있는 가속도 수준에 대하여 진동시간, 적재무게 및 입력주파수에 따른 골판지 포장상자의 압축강도 저하율을 분석하기 위하여 골판지 상자에 대하여 진동실험 및 압축실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같았다.

- (1) 입력주파수에 따른 골판지 상자의 압축강도의 저하는 진동 변위가 심한 낮은 주파수 대역일 때 높은 주파수 대역일 때 보다 더 크게 나타났다.
- (2) 진동피로에 의한 골판지 상자의 압축강도 저하율에 대하여 입력 가속도 수준(0.25, 0.5 및 1 G-rms)에 따른 입력 주파수(F), 진동시간(T) 및 적재하중(W) 3개의 독립변수를 가지는 다중회귀 모델을 다음과 같은 식으로 개발하였으며 결정계수는 0.947로 나타났다.

$$DR = \exp(a \times F + b \times T + c \times W + d)$$

- (3) 진동피로에 의한 골판지 상자의 압축강도 저하율에 대하여 입력 가속도(AL), 입력 주파수(F), 적재하중(W) 및 진동시간(T)을 포함한 4개의 독립변수를 가지는 다중회귀

모델을 다음과 같은 식으로 개발하였으며 결정계수는 0.919로 나타났다.

$$DR = \exp(a \times AL + b \times F + c \times T + d \times W + e)$$

- (4) 골판지 상자의 압축강도 저하율에 영향을 미치는 입력 진동수, 진동시간 및 적재하중에 대한 상관관계 분석을 하였던 결과, 적재하중이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

#### 참고 문헌

1. ASTM Standard D642. Standard methods for determining compressive resistance of shipping containers, components, and unit loads.
2. ASTM Standard D685. Practice for conditioning paper and paper products for testing.
3. Gartaganis, P. A. 1975. Strength properties of corrugated containers. Tappi 58(11):102-108.
4. Koning, J. W. and R. K. Stern. 1977. Long-term creep in corrugated fiberboard containers. Tappi 60(12):128-131.
5. Leake, C. H. 1988. Measuring corrugated box performance. Tappi Journal Oct.:71-75.
6. McKEE, R. C., J. W. Gander and J. R. Wachuta. 1963. Compression strength formula for corrugated boxes. Paperboard Packaging (Aug.):144-159.
7. Park, J. M. and S. G. Kwon. Finite element analysis of a ventilating box structure. Journal of the KSAM 27(6):557-564. (In Korean)
8. Rouillard, V. and M. A. Sek. 2000. Monitoring and simulating non-stationary vibrations for package optimization. Packaging Technology Sciences 13:149-156.
9. Timothy, G. W. and S. W. Marshall. 1999. The effect of pallet connection stiffness, deck stiffness and static load level on the resonant response of pallet decks to vibration frequencies occurring in the distribution environment. Packaging Technology and Science 12:47-55.