

# 진동피로에 의한 골판지 상자의 압축강도 저하율

## Decreasing Rate of Compression Strength for the Corrugated Fiberboard Container by Vibration Fatigue

김만수\*      정현모\*      박종민\*\*      박정길\*      김수일\*\*\*      박인식\*\*\*  
정회원      정회원      정회원  
M. S. Kim    H. M. Jung    J. M. Park    C. G. Park    S. I. Kim    I. S. Park

### 1. 서론

농산물 포장화물의 경우 농산물의 손상은 겉포장 상자의 파손에 의한 압상이 주요 원인이다. 따라서 농산물 상자의 경우 압축강도를 특히 중요시 여기고 있으며, 한국산업규격을 비롯해 각종 농산물 관련 규정에서는 압축강도에 의한 상자의 품질관리를 규정화하고 있다. 골판지 상자의 압축강도는 원단인 골판지의 구성 원자들(라이너, 골심지)의 품질과 이들의 구성 형태 및 상자의 외형 치수 비율에 따라 결정되므로, 원지의 링크라쉬(ring crush), 원단의 수직압축강도(edgewise compression strength)를 통해 상자의 압축강도를 관리하는 것이 보통이다. 또한 골판지 상자는 제작 후 유통 과정을 거치면서, 여러요인에 의해 압축강도가 현격하게 저하되는데, 이중 수분 흡수에 의한 강도저하와 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 개발되지 않는 한 골판지 상자의 이용은 날로 증가될 것으로 전망된다. 따라서 골판지 상자의 압축강도와 내구성 향상에 대한 다각적인 연구가 절실하다.

이러한 요구에 발 맞추어 현재 국내에서는 골판지에 대한 연구가 활발한 데, 그 내용을 살펴보면 여러 요인 즉, 온·습도 요인, 상자 치수비율 및 통기공 가공에 따른 압축강도 변화에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며, 최근에는 유한요소해석과 같은 공학적 기법에 의한 상자 압축강도의 최적화에 대한 연구도 수행되고 있다. 그러나 유통중의 진동에 의한 압축강도 열화에 대한 연구는 국내·외적으로 거의 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유통중의 운송에서 발생하는 가속도 수준에 대하여 진동시간 적재하중 및 입력주파수에 따른 골판지 상자의 압축강도 저하율을 분석하고자 한다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1 실험재료


본 실험에서는 진동에 의한 골판지 상자의 압축강도 저하율을 분석하기 위해서, 표 (1)와 같이 국내 농산물 포장용 골판지 상자에 많이 적용되는 원지 구성으로 골판지 상자를 제작하였다. 골판지 상자의 치수는 우리나라

---

\* 충남대학교 농업생명과학대학 농업공학부  
\*\* 밀양대학교 기계공학과  
\*\*\* 경북과학대학 포장학과

라의 농산물 표준출하규격에 의해 규정된 포장단위 15 kg의 배 포장용 골판지 상자의 치수이었으며, 실험전 상자를 온도 23±1 °C, 상대습도 50 %로 잘 조성된 대형 항온항습기 내에서 48시간 이상 충분히 평형 시킨 후 실험에 사용되었다(ASTM D642).

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

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

## 2.2 실험방법

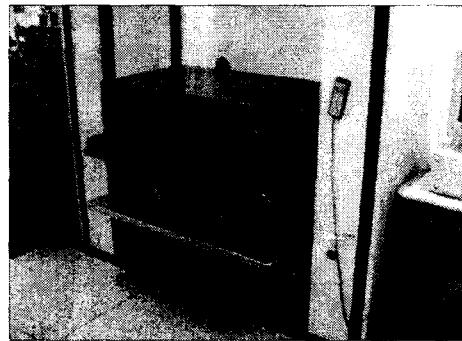
본 실험에서는 유통시간, 적재하중 및 입력주파수에 따른 진동에 의한 골판지 상자의 압축강도 저하율을 분석하기 위하여 그림 (2)에서 보는 바와 같이, 진동 테이블 위에 실험용 상자를 놓고, 그 위에 이보다 길이와 폭이 각각 4 cm 더 큰 상자에 평판과 일정무게의 하중판을 넣어, 사하중(dead load) 형태로 실험상자에 가한 상태에서 포장된 도로에서 트럭 본체의 가속도 수준(0.25, 0.5 및 1 G-rms)으로, 이 가속도 수준으로 유지하면서, 20, 45 및 70 Hz의 주파수 대역별로 일정시간 진동을 가한 후 바로 압축실험을 실시하였다. 압축실험은 ASTM D642를 참고하여, 하중재하속도를 12 mm/min로 하였다. 본 실험에서의 진동 및 압축실험은 5회의 반복 실험에서 최대값과 최소값을 제외한 나머지의 평균값으로 나타내었다.

## 2.3 실험장치

본 연구에서는 일정한 가속도 수준(0.25, 0.5 및 1 G-rms)의 진동실험을 위해 그림 (1)의 (a)에서 보는 바와 같이, 유압식 진동 가진기(vibration exciter, 700 kgf, 300 Hz)를 이용하였다. 또한 그림 (1)의 (b)는 진동실험 후 같은 시료 상자에 대해 압축실험하는 광경을 나타내며, 사용된 상자 압축 시험기(DAEYOUNG)의 용량은 5 ton 이었다.



(a) Vibration test



(b) Compression test

Fig. 1. Vibration and compression test apparatus for corrugated fiberboard container.

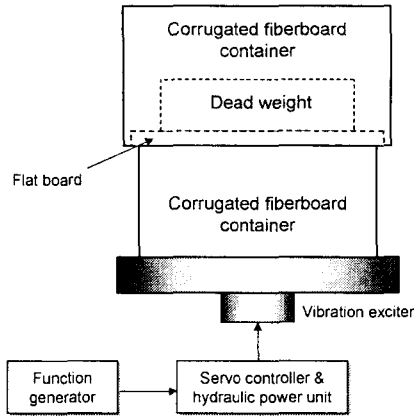


Fig. 2. Schematic diagram of the vibration test system.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 진동피로와 압축강도의 관계

골판지 상자에 가해진 적재하중, 진동 주파수 및 진동시간에 대한 골판지 상자의 압축강도의 변화를 분석하기 위한 진동과 압축실험을 하였다. 그림 (3)는 진동 실험전의 골판지 상자의 힘-변형 선도를 보여주고 있는데, 이 경우의 상자 압축강도(평균, 769.20 kg, Kellicutt식에 의한 추정값 695 kg)를 기준으로 적재하중, 진동 주파수, 진동시간 및 가속도 수준(G-rms)에 따른 골판지 상자의 압축강도 저하율을 표 (2)에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 적재하중과 진동시간에 따라서 골판지 상자의 압축강도 저하가 발생하게 되며, 입력주파수에 따른 압축강도의 변화는 진동 변위가 심한 저주파수 대역에서 고주파수 대역보다 더 뚜렷함을 알 수 있다. 또한 입력 가속도 수준이 높을수록 압축강도의 저하율이 증가하였는데, 이것은 과일 포장화물의 운송 중에 낮은 주파수 대역은 낮고, 가속도 수준이 높을 때는 큰 진동 변위가 발생하여 골판지 상자의 압축강도 저하율이 더 크게 나타나 장기간 유통시의 압축강도 저하는 골판지 상자의 붕괴를 초래해 결국 포장된 과실의 손상으로 연결됨을 의미한다.

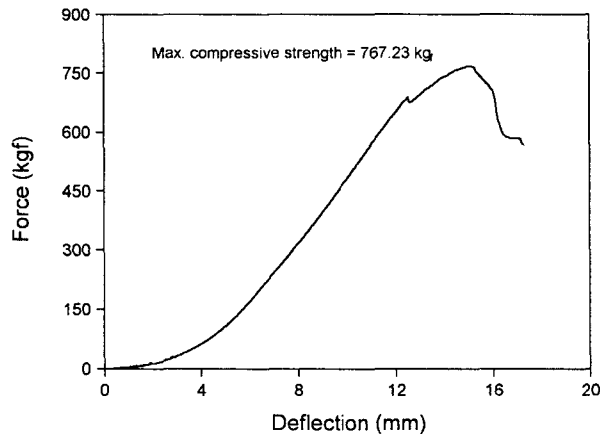


Fig. 3. Force - deflection characteristics of corrugated fiberboard container.

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

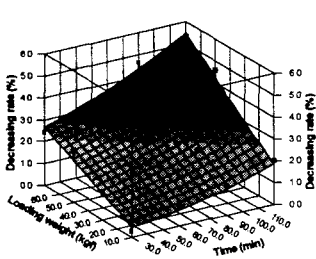
Input frequency (Hz)	Vibration time (min)	Acceleration level (G-rms)											
		0.25				0.5				1			
		Loading weight (kg)											
		10	30	50	70	10	30	50	70	10	30	50	70
20	30	0.28	1.16	2.38	2.48	0.75	1.75	3.25	5.25	0.98	2.66	4.19	6.87
	60	0.82	1.45	2.46	3.31	1.25	2.50	4.75	7.00	1.93	3.48	5.84	8.45
	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

### 3.2 진동피로에 의한 압축강도 저하율의 모형화

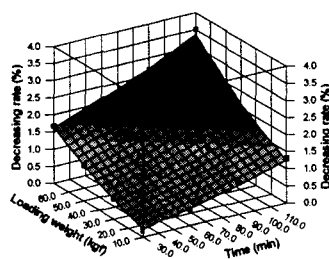
운송중 골판지 상자의 압축강도 저하율을 예측하기 위하여 입력 가속도 수준(0.25, 0.5 및 1 G-rms)에 따른 입력 진동수(F), 진동시간(T) 및 적재하중(W) 3개의 독립변수를 가지는 다중회귀 모델을 표 (3)와 같이 개발하였다.

표에서 보는 바와 같이 가속도 수준별로 개발된 다중회귀 모델 각각의 결정계수는 가속도 수준이 작은 것에서 큰 순서로 0.9475, 0.9707, 0.9479로 나타났으며 이들에 대한 분산분석을 실시 하였는 바, 모든 모델에 있어 고도의 유의성이 인정되었다. 또한 입력주파수(F), 적재하중(W) 및 진동시간(T)과 골판지 상자의 압축강도 저하율과의 상관 관계 분석에서는, 가속도 수준이 0.25 G-rms 일 때는 적재하중(0.6837)이 진동시간(0.4924)에 비하여 상관관계가 높았고, 입력주파수(-0.4243)는 낮은 가속도 수준에서는 상관 관계가 낮았다.

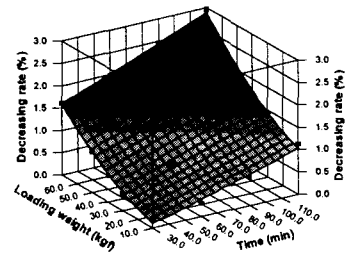
한편, 가속도 수준이 0.5 G-rms 일 때는 적재하중(0.5831)이 진동시간(0.4481)에 비하여, 입력주파수(-0.5130)는 진동시간에 비하여 각각 높은 상관 관계를 보였으며, 가속도 수준이 1 G-rms 일 때도 이와 비슷하게 적재하중(0.6141)이 진동시간(0.4283)에 비하여, 입력주파수(-0.4714)는 진동시간에 비하여 각각 높은 상관 관계를 보였다.



(a) 0.25 G-rms, 20 Hz



(b) 0.25 G-rms, 45 Hz



(c) 0.25 G-rms, 70 Hz

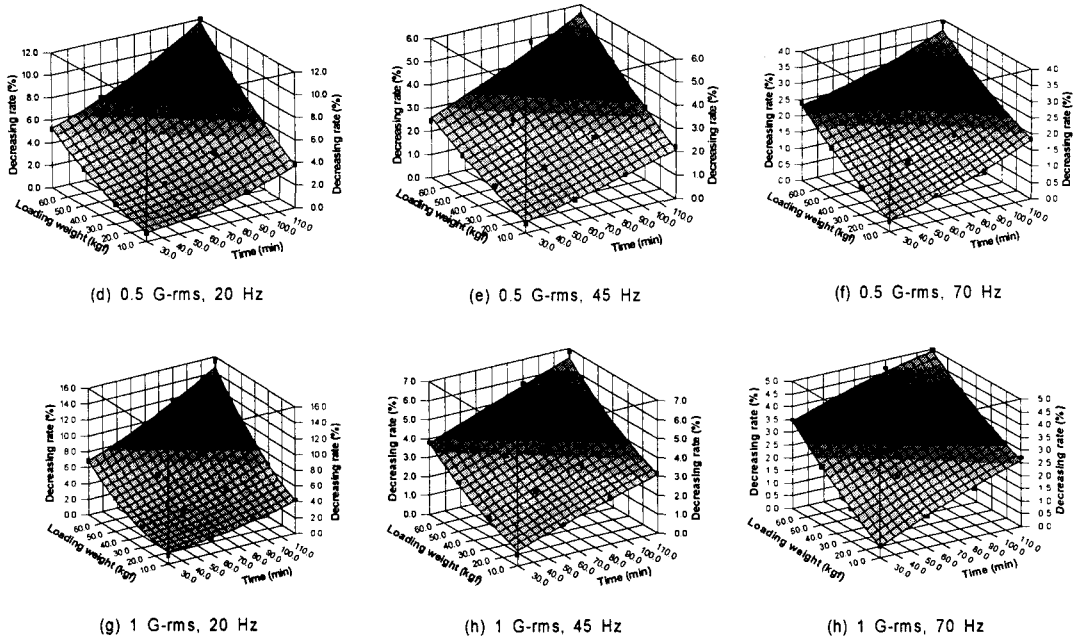


Fig. 4. Response surface of decreasing rate of compression strength in the corrugated fiberboard container according to acceleration level and input frequency.

그림 (4)에는 압축강도 저하율의 반응표면을 입력가속도와 진동수별로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 다른 조건이 같을 때 압축강도 저하율은 낮은 진동수에서가 높은 진동수에서보다 크게 나타났다. 또한 입력가속도가 클수록 압축강도 저하율도 큰 것으로 나타났다.

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
<i>a</i>	-0.01431	-0.02237	-0.01948
<i>b</i>	0.008936	0.009805	0.008585
<i>c</i>	0.01889	0.019809	0.019963
<i>d</i>	-0.37142	0.362989	0.61716
$R^2$	0.9475	0.9707	0.9479

입력 가속도(AL), 입력 주파수(F), 적재하중(W) 및 진동시간(T)을 포함한 4개의 독립변수를 가지는 골판지 포장상자의 압축강도 저하율에 대한 다중회귀 모델을 개발하였으며, 그 결과를 표 (4)에 표시하였다. 표에서 보는 바와 같이 결정계수는 0.9198로서 3개의 독립변수에 의한 모델에서보다 약간 낮은 값을 보였으나 표 (4)의 모델에 대한 분산분석 결과, 이 모델은 고도의 유의성이 인정되었다. 또한 4개의 독립변수들과 상자 압축강도 저하율과의 상관관계 분석에서는 독립변수들 중에서 적재하중(0.5366)이 제일 높았고, 그 다음으로는 입력주파수(-0.4172), 진동시간(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 판단되었다.

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	0.87830001	0.050231121	17.4851762	0.0	0.9198
b	-0.019611837	0.000929534	-21.09857151	0.0	
c	0.008976969	0.000511012	17.56704755	0.0	
d	0.019751452	0.00086322	22.88112372	0.0	
e	-0.254633827	0.084901881	-2.999154138	0.00321	

#### 4. 결론

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

1. 입력주파수에 따른 골판지 상자의 압축강도의 저하는 진동 변위가 심한 낮은 진동수 대역에서가 높은 진동수 대역에서보다 더 크게 나타났다. 또한, 골판지 상자의 압축강도 저하율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 적재하중이었다.
2. 진동피로에 의한 골판지 상자의 압축강도 저하에 대하여 입력 가속도 수준(0.25, 0.5 및 1 G-rms)에 따른 입력주파수(F), 진동시간(T) 및 적재하중(W) 3개의 독립변수를 가지는 다중회귀 모델을 다음과 같은 식으로 개발하였다.

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

3. 진동피로에 의한 골판지 상자의 압축강도 저하에 대하여 입력 가속도(AL), 입력 주파수(F), 적재하중(W) 및 진동시간(T)을 포함한 4개의 독립변수를 가지는 다중회귀 모델을 다음과 같은 식으로 개발하였다.

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

#### 참고문헌

1. ASTM standard D999. Standard methods for vibration testing of shipping containers.
2. ASTM standard D3580. Standard Test methods for vibration (vertical linear motion) test of products.
3. Peleg, K. 1986. Simulation of vibration damage in produce transportation. Trans. of the ASAE 29(2) : 633-641.
4. 한국공업규격표준협회. KS A1017. 포장 화물의 진동 시험 방법
5. 한국공업규격표준협회. KS A1026. 포장 화물의 평가 시험 방법 통칙.
6. 한국공업규격표준협회. KS A1030. 포장화물 및 용기의 정적압축시험방법.
7. 한국공업규격표준협회. KS A1532. 과실류 포장용 골판지 상자.