

# 크리이프에 의한 과실 포장입자의 층적 내구성 분석<sup>+</sup>

## Stacking Durability Analysis of Fruit Packaging Boxes by Creep

박종민\* 권순홍\* 권순구\* 김만수\*\*  
정희원 정희원 정희원 정희원  
J. M. Park S. H. Kwon S. G. Kwon M. S. Kim

### ABSTRACT

Allowable stacking duration of the corrugated fiberboard boxes being widely used for packaging fruits and vegetables was analyzed by the creep behavior and the cumulative load correction factor for the boxes.

The stacking boxes were assumed to be stored at a nearly constant temperature and relative humidity condition. When the stacking duration was short period, the stacking height determined by two methods showed a little difference between them, but almost no difference was shown as the stacking duration was longer. Allowable stacking duration was rapidly decreased with the increase of static load applied on the stacking boxes, and allowable stacking duration of Box A was estimated the longer than that of Box B. A model of allowable stacking duration for the corrugated fiberboard box was developed as a function of the stacking load and the ambient relative humidity.

**주요 용어(Key Words)** : 골판지 상자(Corrugated Fiberboard Box), 허용층적하중(Allowable Stacking Load), 허용층적기간(Allowable Stacking Lifetime), 크리이프 거동(Creep Behavior), 누적하중수정계수(Cumulative Load Correction Factor)

### 1. 서론

과실 包裝箱子の 취급에는 팔릿트를 이용 유닛 로드화(unit load) 한다음 포크리프트가 이용되고 있다. 이와같이 팔릿트화(palletization)는 包裝의 標準化에 의한 包裝費의 절감, 하역작업의 機械化에 의한 시간노력의 절감 및 수확후 여러 처리단계에서 損傷을 감소시킬 수 있어 여러 측면에서 상당한 효과를 기대할 수 있다.

저온다습한 저장고 내에서 팔릿트 위에 層積된 농산물 골판지箱子들은 일정한 크기의 靜荷重을 장기간 받게되며, 이 경우 저층의 골판지箱

子는 피로로 인한 크리이프 변형을 일으키며, 그 변형이 장시간 계속될 경우 전체 골판지箱子의 붕괴 또는 부분적인 상자의 壓傷으로 包裝物은 상당한 크기의 荷重을 받게되어 결국 損傷을 입게된다. 여기서 포장상자의 크리이프률과 정도는 층적높이와 온·습도에 가장 큰 영향을 받겠지만, 이 외에도 골판지箱子의 팔릿트 패턴, 箱子제작시 인쇄압과 하역 및 충격시의 끌의 찌그러짐등에 영향을 받는다(Kellicutt,1963 ; Peleg, 1985 ; Monaghan과 Marcondes, 1992).

層積된 과실 포장상자가 찌그러짐이나 붕괴없이 지지할 수 있는 最大層積荷重과 層積期間을

+ 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비(04-G-0036)에 의하여 연구되었음

\* 밀양산업대학교 농업기계학과

\*\* 충남대학교 농업기계공학과

결정하는 것은 경제적인 측면 뿐만아니라 低溫貯藏庫 공간의 효율적 이용에도 매우 중요한 것이다. 골판지상자의 層積期間과 層積荷重 사이의 관계는 Kellicutt와 Landt(1951)에 의해 처음으로 연구되었으며, 그후 Moody와 Skidmore (1966), Koning와 Stern(1977), Leake(1988) 및 Thielert(1986)등에 의해 箱子の 最大壓縮強度에 대한 層積荷重의 비율은 시간의 대수값과 선형 관계가 있음이 보고된 바 있다.

Thielert(1986)는 골판지시편에 대한 垂直壓縮強度(ECS, edgewise compressive strength)와 압축속도의 관계로부터 골판지시편의 層積荷重과 層積期間의 관계를 구명하려고 하였으며, 이는 箱子の 압축속도가 증가함에 따라 골판지시편의 壓縮強度는 증가하였는데, 이 현상은 압축속도가 작을수록 골판지시편이 크리이프의 영향을 받기 때문인 것으로 설명하였고, 골판지시편의 垂直壓縮強도와 압축속도의 대수값과는 선형관계가 있는 것으로 보고하였다.

또한 여러 연구자들은 골판지시편의 垂直壓縮強度를 팰리트 상에 층적된 골판지箱子の 層積特性의 한 지수로 나타내려고 하였으며, 일반적으로 골판지시편의 垂直壓縮強도가 클수록 箱子の 層積特性은 더 우수한 것으로 보고하였다.

Levans(1977)를 비롯한 여러 연구자들은 표준 상태에서 골판지箱子の 最大壓縮強度에 안전계수를 곱하여 골판지箱子の 層積荷重을 결정하였는데, 이들이 적용하였던 안전계수 0.2~0.5범위이었다. 그러나 이에 대하여 Thielert(1986)는 골판지箱子の 層積強度는 層積期間의 함수이기 때문에 箱子の 最大壓縮強度로부터의 層積荷重의 결정에는 다소 어려움이 있는 것으로 지적한 바 있다.

본 연구의 목적은 박동(1994,1995)에 의해 선행된 연구결과를 바탕으로 골판지箱子の 크리이프 舉動과 累積荷重修正係數(cumulative load correction factor)를 이용한 골판지箱子の 許容層積荷重과 許容層積期間 등의 層積耐久性을 분석하는 것이다.

## 2. 골판지箱子の 層積耐久性에 대한 이론

### 가. 크리이프 舉動을 통한 분석

여러 연구자들에 따르면 層積된 골판지箱子の 壓縮強度低下는 箱子が 받는 靜荷重의 크기, 層積期間 및 저장실의 대기조건에 따라 주로 좌우된다.

팰리트 상에 層積된 골판지箱子の 붕괴나 包裝物의 損傷은 주로 箱子の 크리이프 변형으로 인한 箱子の 壓傷에 기인되고, 또한 골판지箱子の 크리이프 변형은 箱子の 強度低下要因들의 종합된 결과로 나타나기 때문에 저장고의 대기조건, 靜荷重의 크기 및 層積期間에 따른 골판지箱子の 크리이프 舉動이 정확히 측정된다면 이를 통하여 골판지箱子の 許容層積荷重과 許容層積期間이 분석될 수 있을것이다.

박(1993)에 따르면 非線型 粘彈性 舉動을 하는 물체의 크리이프 舉動은 다음과 같은 모형으로 잘 표현될 수 있다고 하였다.

$$D(S_0, t) = AS_0^B [C + Dt - \exp(-Et)] \quad (1)$$

여기서,

$D(S_0, t)$  = 靜荷重의 크기와 시간에 따른 골판지箱子の 처짐량, mm

$S_0$  = 靜荷重, N

$t$  = 靜荷重 재하순간부터의 시간, hr

$A, B, C, D, E$  = 모형의 상수값

이 모형에서  $S_0$ 는 箱子에 가하여 지는 靜荷重이므로 팰리트 상의 최하단 箱子에 걸리는 靜荷重이 계산되면, 이 靜荷重과 시간에 따른 箱子の 크리이프 처짐량이 그 대기조건에 대한 箱子の 最大처짐량 또는 臨界처짐량과 같게되는 시간이 그 靜荷重에 대한 許容層積期間이 되며, 또한 임의의 層積期間에 대하여 계산되는 靜荷重의 크기가 許容層積荷重이 된다.

이와같이 골판지箱子の 粘彈性 舉動을 통한 골판지箱子の 許容層積荷重과 許容層積期間의 예측의 정확도는 저장고의 대기조건, 靜荷重의

크기에 따른 골판지箱子の 크리이프 거동과 대기조건에 따른 골판지箱子の 最大처짐량 또는 臨界처짐량등이 얼마나 정확히 측정되느냐에 따라 좌우된다.

실험을 통한 골판지箱子の 許容層積期間과 許容層積荷重을 결정하기에는 많은 시간이 소요되고, 또한 실험상의 어려움이 있으므로 비교적 간단하고 짧은 시간내에 수행되어 지는 골판지箱子の 크리이프 실험으로부터 골판지箱子の 許容層積期間과 許容層積荷重을 결정하는 방법이 주로 이용되고 있다.

#### 나. 累積荷重修正係數에 의한 분석

저장고에 層積된 골판지箱子の 壓縮強度劣化에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 層積期間과 저온다습한 대기조건에 따른 골판지箱子の 피로이다.

표준상태에서의 箱子の 最大壓縮強度에 대한 임의의 靜荷重의 비와 이 靜荷重에 의한 크리이프 도달 기간과의 관계로부터 분석되는 層積期間 증대에 따른 荷重修正係數를  $Y(t)$ 라 하고, 또한 표준상태에서의 箱子の 最大壓縮強度에 대한 임의의 대기조건에서의 最大壓縮強度와의 비로부터 분석되는 대기조건에 따른 荷重修正係數를  $S(MC, rh, T)$ 라 하였을 때, 層積된 최하단의 골판지箱子が 받는 荷重,  $x = (n-1)W_{gt}$ 에 대한 골판지箱子の 累積 總荷重은 다음과 같이 계산된다.

$$W = \frac{x \cdot f}{Y(t) \cdot S(MC, rh, T)} = \frac{(n-1) \cdot W_{gt} \cdot f}{Y(t) \cdot (MC, rh, T)} \quad (2)$$

여기서,

$W$  = 累積 總荷重, N

$W_{gt}$  = 단위 포장상자의 총무게, N

$Y(t)$  = 총적기간에 따른 荷重修正係數, 무차원

$S(MC, rh, T)$  = 대기조건에 따른 荷重修正係數, 무차원

$f$  = 기타 상자의 불일치, 저장고내의 온·습도 변화에서 오는 荷重修正係數, 무차원

따라서 累積荷重修正係數(cumulative load correction factor, CF)는 다음과 같이 표현된다

$$CF = \frac{W}{(n-1) W_{gt}} = \frac{f}{Y(t) \cdot S(MC, rh, T)} \quad (3)$$

累積荷重修正係數 CF가 구해지면, 골판지箱子の 許容層積段數는 다음과 같이 계산된다.

$$CF \cdot x \leq (MCF)_x \rightarrow n \leq \frac{(MCF)_x}{CF \cdot W_{gt}} + 1 \quad (4)$$

여기서,  $(MCF)_x$  = 표준상태(23° - rh50%)에서의 箱子の 最大壓縮強度, N

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 골판지箱子の 크리이프舉動에 따른 許容層積期間

대부분 물체들의 크리이프 舉動은 3단계로 나누어 지는데, 제 1단계는 처짐율의 속도가 점차 감소하는 과도상태 크리이프(transient creep), 2 단계는 처짐율의 속도가 거의 일정한 정상상태 크리이프(steady state creep), 그리고 처짐율의 속도가 갑자기 증가하여 크리이프 파괴(creep failure)에 도달되는 제 3단계로 나누어 진다 (Moody와 Skidmore, 1966; Koning와 Stern, 1977; Peleg, 1985; Mohsenin, 1980).

크리이프의 제 3단계인 크리이프 파괴까지는 상당한 시간이 요구되므로 여기서는 일정한 靜荷重에 대한 크리이프 양이 그 조건에서의 箱子の 最大처짐량 또는 臨界처짐량과 같게 되는 시간을 層積期間으로 생각할 수 있다.

여기서 골판지箱子の 臨界처짐량은 과실과 같은 생명체의 경우에는 生物體 降伏點(bioyield point)에 해당되는 값으로, 생물체의 경우는 세포의 초기파괴와 손상발생의 척도가 되어 매우 중요한 의미를 갖게 되나, 골판지箱子和 같은 무생물의 취급에는 이 의미가 없으므로 臨界처짐량 대신에 最大壓縮처짐량을 기준으로 하여도

무방할 것으로 판단된다.

골판지상자의 最大壓縮처짐량(박등,1994)을 기준으로 대기조건과 층적하중에 따른 식 (1)로부터 추정한 골판지상자의 許容層積期間을 그림 1에 나타내었다.

그림에서 Box A와 Box B는 현재 국내에서 사과와 배상자로 보편적으로 이용되는 것이며, 이들 상자의 주요제원과 물성값은 박등(1995)에 의하여 수행되었던 연구에서와 같다.

두 상자 모두에서 許容層積期間은 靜荷重이 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향이었으며, 대기조건에 따른 許容層積期間의 차이는 정하중의 증가에 따라 감소하였다. 대체로 동일한 조건에서 Box A의 許容層積期間이 Box B에 비하여 크게 추정되었다.

박등(1994)에 의하면 온·습도에 따른 골판지상자의 변형특성인 壓縮처짐율이 습도에 따라서는 뚜렷한 경향을 보였지만 온도의 변화 폭이 0°C에서 상온 부근의 온도 범위에서는 뚜렷한 경향이 없는 것으로 나타났으며, 크리이프 거동도 이와 유사한 변형특성으로 나타났다고 보고한 바 있다. 따라서 골판지상자의 許容層積期間은 크리이프 擧動을 기본으로 하여 추정되었기 때문에 온도를 제외한 상대습도와 層積荷重만을 주요인자로 하는 許容層積期間의 예측모형을 다음과 같은 개발하였다.

(Box A의 경우)

$$t = -5304.68 + 695.65 \ln(S_0) + \frac{532849.19}{rh + S_0},$$

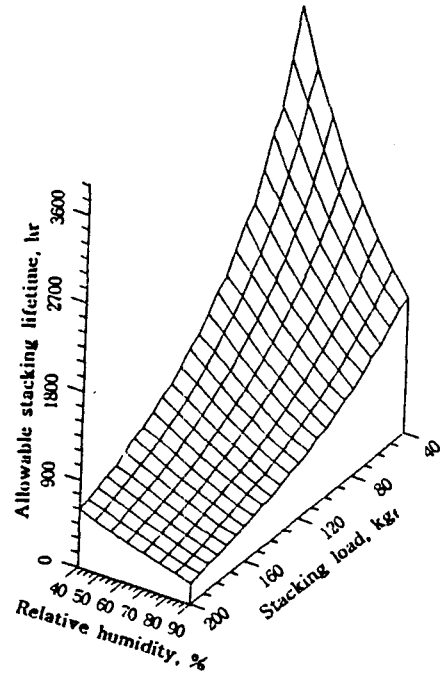
$$r^2 = 0.9644 \quad (5)$$

(Box B의 경우)

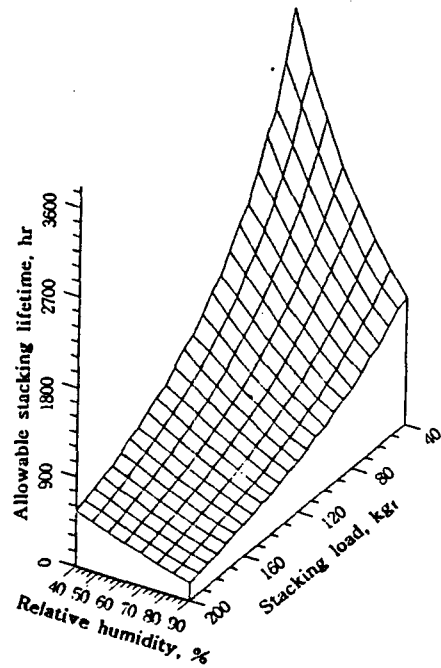
$$t = -5489.81 + 725.42 \ln(S_0) + \frac{529502.69}{rh + S_0},$$

$$r^2 = 0.9610 \quad (6)$$

여기서, t = 層積期間, hr,  
rh = 相對濕度, %



< Box A >



< Box B >

Fig. 1. Response surface of allowable stacking lifetime of boxes as a function of relative humidity and stacking load.

$S_0$  = 層積荷重, N

여기서, 골판지박자의 許容層積段數 ( $n$ )는 層積期間과 상대습도에 따른 層積荷重을 수치해법으로 구한뒤 다음과 같이 계산된다.

$$n = \frac{S_0}{W_{st} + 1} \quad (7)$$

크리이프 擧動에 의한 골판지박자의 許容層積期間과 層積荷重 계산에 대한 예를 들면, 상대습도가 90%인 저온창고내에서 15kg 包裝박자를 6단으로 層積할 경우, 펠리트위의 최하단 박자에 걸리는 靜荷重은  $x = (n - 1)W_{st} = (6 - 1)15 = 75$  kg가 되므로, 이 靜荷重에 대한 層積期間은 식 (5)와 (6)으로부터 Box A는 928.17hr, Box B는 851.29hr로 각각 추정된다. 또한 역으로 85%의 상대습도에서 15kg 包裝박자를 40일 정도 안전하게 層積하고자할 경우 許容層積段數는 許容層積荷重이 Box A는 81.21kg, Box B는 74.24kg로 되어 식 (7)로부터 각각 6단과 5단이 된다.

나. 累積荷重修正係數에 의한 골판지상자의 許容層積段數

層積期間 증대에 따른 골판지박자의 荷重修正係數  $Y(t)$ 는 표준상태에서의 상자의 最大壓縮強度에 대한 靜荷重의 비와 이 靜荷重에 의한 크리이프파괴 까지의 시간으로부터 분석되는 데, 여기서는 크리이프파괴 까지의 시간은 앞에서와 같은 방법으로 식 (1)로부터 추정하였으며, 그 결과를 그림 2에 도시하였다(박동, 1994, 1995). 또한 대기조건에 따른 골판지박자의 荷重修正係數는 온·습도의 평형조건에 따른 골판지상자의 最大壓縮強度의 경험식(박동, 1994)으로부터 다음의 식 (8)과 같이 계산된다. 여기서 대기조건에 따른 荷重修正係數  $S(MC, rh, T)$ 는 골판지의 함수율, 상대습도 및 온도에 따라 변하지만, 상대습도 및 온도에 따라 골판지의 함수율이 결정되므로 본 연구에서는 골판지의 함수율만을 고려하였다.

$$S(MC, rh, T) = S(MC) = \frac{(MCF)_x}{(MCF)_{sc}} \quad (8)$$

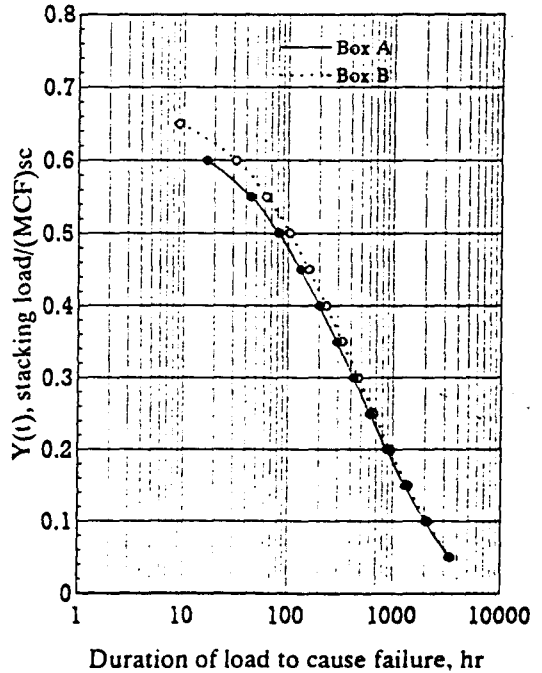
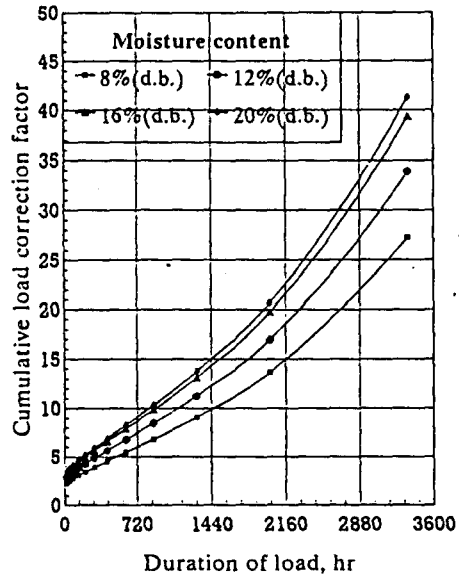


Fig. 2. Load correction factor according to stacking lifetime.



< Box A >

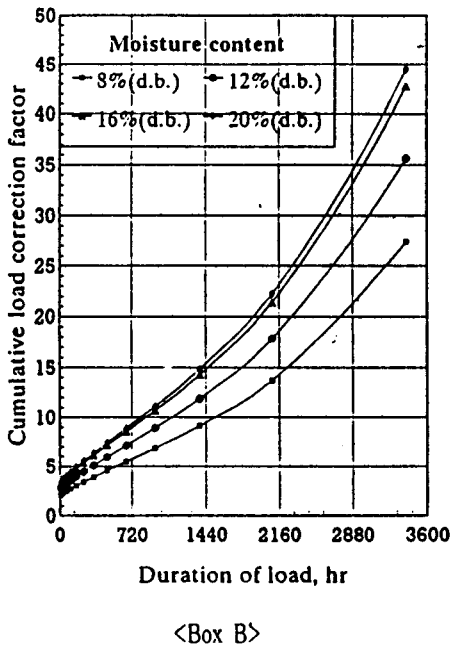


Fig. 3. Cumulative load correction factor according to stacking lifetime in various moisture content of boxes.

여기서,  $(MCF)_s$  = 표준상태(23°-rh 50%)에서의 箱子の 最大壓縮強度, N  
 $(MCF)_x$  = 임의의 대기조건에서의 最大壓縮強度, N

골판지箱子の 層積상태의 불균일, 저장고내의 온·습도의 변화에서오는 荷重修正係數  $f$ 는 여러 가지의 문헌을 통하여 조사하였을때 대체로 1.3으로 추정되었으며, 이 값을 적용하여 위의 두 修正係數로부터 식 (3)에 의해 계산된 累積荷重修正係數  $CF$ 를 그림 3에 나타내었다.

累積荷重修正係數를 이용하여 이들을 추정하여 보면, 대기조건 3°C-rh 90%에서 Box A와 Box B의 함수율은 박등(1994)에 의한 골판지의 평형함수율 모형으로부터 대략 20%(d.b.)가 되며, 40일간 안전하게 層積하고자 할때 3累積荷重修正係數가 그림 3에서 Box A가 11.2, Box B가 10.3이 되므로, 식(4)로부터 Box A가 6단 Box B가 5단으로 각각 계산된다. 또한 역으로 3°C-rh 90%의 대기조건에서 6단으로 안전하게 층적하고자 할 경우 許容層積期間은 식 (4)로부터 Box A와 Box B의 累積荷重修正係數가 각각 9와 8로 계산되어 그림 3으로부터 각각 720hr과 576hr으로 추정된다.

표 1에는 크리이프거동과 累積荷重修正係數에 의한 방법으로 대기조건과 層積期間에 따른 골판지箱子の 許容層積段數를 추정한 결과를 나타내었다. 표에서 보는 바와같이 層積期間이 짧을때는 두 방법간의 추정되는 許容層積段數 사이에 다소의 차이가 있었으나, 層積期間이 길어질 경우 두 방법간의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

골판지箱子の 許容層積期間과 許容層積荷重의 결정에는 여러가지 요인이 있겠으나, 본 연구에서는 일정한 靜荷重을 받으며, 골판지箱子が 층적되어 있는 곳의 온도 및 상대습도의 변화가 크지않고 일정한 조건으로 장기간 층적되어 있는 경우로 한정하여, 許容層積荷重과 許容層積期間을 골판지상자의 크리이프거동과 累積荷重修正係數를 이용하여 분석하였다.

Table 1. Allowable stacking layers of the corrugated fiberboard boxes according to relative humidity and stacking lifetime calculated by creep method and cumulative load correction method

Boxes	GW <sup>1)</sup>	rh, 50%			rh, 70%			rh, 90%		
		Box A	15kg	15(11)	10(8)	8(6)	12(9)	8(7)	6(5)	10(7)
Box B	15kg	14(11)	9(7)	7(6)	11(8)	7(6)	5(5)	9(7)	5(5)	3(4)

Note, 1) : gross weight(dealing unit), ( ) : calculated allowable stacking layers by cumulative load correction factor

이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 層積期間이 짧을 때는 두 방법간의 차이가 다소 있었으나, 層積期間이 길어 질수록 두 방법간의 차이가 없었다. Box A와 Box B 모두에서 許容層積期間은 靜荷重이 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향이 있었으며, 대체로 Box A의 許容層積期間이 Box B에 비하여 크게 추정되었다.

2) 저장고의 상대습도와 層積荷重에 따른 골판지箱子の 許容層積期間의 豫測模型을 다음과 같은 형태로 개발하였다.

$$t = a + bln(S_0) + \frac{c}{rh + S_0}$$

### 인용문헌

1. 朴鍾民. 1993. 과실의 점탄성 특성과 그 응용. 충남대 박사학위논문
2. 朴鍾民 외 3. 1994. 農産物 包裝용 골판지상자의 層積耐久性의 분석과 향상에 관한 연구(I) - 수분흡습특성과 압축강도열화. 한국농업기계학회지 19(4) : 358-368.
3. 朴鍾民 외 2. 1995. 골판지의 정적완충특성과 골판지상자의 크리이프 거동. 한국농업기계학회지 20(4) : 323-332.
4. Kellicutt, K. Q. 1963. Effect of contents and load bearing surface on compressive strength and stacking life of corrugated containers. Tappi 46(1) : 151A-154A.
5. ——— and E. F. Landt. 1951. Safe stack life of corrugated boxes. Fiber Containers(Sept.) : 1-5.

6. Koning, J. W. and R. K. Stern. 1977. Long-term creep in corrugated fiberboard containers. Tappi 60(12) : 128-131.
7. Leake, C. H. 1988. Measuring corrugated box performance. Tappi Journal Oct. : 71-75.
8. Levans, U. I. 1975. The effect of warehouse mishandling and stacking patterns on the compression strength of corrugated boxes. Tappi 58(8) : 108-111.
9. Levans, U. I. 1977. The effect of ambient relative humidity on the moisture content of palletized corrugated boxes. Tappi 60(4) : 79-82.
10. Mohsenin, N. N. 1980. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach science publishers, N. Y.
11. Moody, R. C., K. E. Skidmor. 1966. How dead load downward creep influence corrugated box design. Package Engineering, Aug. 75-81.
12. Monaghan, J. and J. Marcondes. 1992. Overhang and pallet gap effects on the performance of corrugated fiberboard boxes. Trans. of the ASAE 35(6) : 1945-1947.
13. Peleg, K. 1985. Produce handling packaging and distribution. Westport : AVI Publishing.
14. Thielert, R. 1986. Edgewise compression resistance and static load- lifetime relationship of corrugated board sample. Tappi J.(January) : 77-81.