

果實包裝用 填充物の 適正두께 豫測과 果實의 許容山積높이 및 山積期間 豫測模型

Prediction Model of Allowable Pile Depth, Duration of Flesh Fruit and Optimum Thickness of Packaging Cushion

金 滿 秀*, 朴 鍾 民*
M. S. Kim J. M. Park

Summary

During the storage and transport of fruits in the bulk state, significant damage by dead load may occur. To reduce such damage, the prediction model of allowable pile depth, duration and optimum thickness of packaging cushion for fruits was developed in this study.

From the preliminary experiment and some assumptions, the derived equations were verified to be a good prediction of the above three parameters.

1. 緒 論

우리나라의 경우 果實의 收穫, 選別, 包裝 등의 工程은 주로 人力에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 공정중의 果實의 損傷 보다는 果實의 運送, 저장 및 箱子 單位의 山積時에 많은 損傷을 입는 것으로 알려져 있다.

運送, 貯藏 中の 果實의 주요 損傷原因으로는 溫度, 濕度, 氣體造成 및 外力 등이 있으나, 溫度, 濕度 및 氣體造成 등의 果實의 生理學的인 要因에는 最適條件이 있어, 大型貯藏庫나 外國으로의 果實輸出時 이들 要因을 충분히 고려하고 있다. 그러나 힘에 의한 果實損傷要因에는 最適條件이 없다는 것이 문제이다.

이러한 果實의 運送, 貯藏 및 山積 中에 果實이 받는 힘의 영향을 적게하려면 果實箱子에 가하여 지는 힘을 적게하는 것과 果實에 가하여 지는 힘의 영향을 적게하는 두 가지면이 있으며, 전자

는 輸送方法이나 果實箱子의 山積段數의 문제이고, 후자는 包裝方法 이나 填充物の 문제이다.

果實箱子의 山積높이와 山積期間 그리고 填充物の 두께와 직접 관련된 國內의 研究는 전무한 실정이나, 본 研究者를 비롯한 몇몇 研究者들에 의하여 果實 및 穀物의 物理的 特性에 대한 研究가 수행되어 왔다.^{25~28)}

우리나라와는 달리 外國의 경우는 果實의 收穫, 選別 및 包裝 등의 과정이 어느정도 機械化가 이루어져 이 과정중의 果實의 주요 損傷原因이 되는 衝擊要因에 의한 果實의 衝擊特性이 이 분야 研究의 대부분을 차지하여 왔으며,^{6, 9, 11, 15, 17, 19~22)} 이와 병행하여 이 과정중에 果實이 받는 衝擊 에너지를 흡수할 수 있는 쿠션에 대한 研究도 함께 수행되어 왔다.^{1, 3, 7, 10, 11, 13, 16, 18, 22)}

Fridley 등⁵⁾은 果實 및 야채 類의 취급과정에서 이들의 損傷을 감소 시키기 위한 수단으로 여러재질의 쿠션에 대한 적합성을 研究한 결과,

* 忠南大學校 農業機械工學科

히스테리시스가 큰 재질일 수록 낙하하는 果實의 運動에너지를 잘 흡수할 수 있어 損傷을 감소시킬 수 있었다고 하였다 Hammerle와 Mohsenin⁸⁾, Nelson과 Mohsenin¹⁶⁾ 그리고 Bitner 等¹⁾은 衝擊에 의한 쿠션의 효과를 설명하는 데, 에너지 발란스를 적용하였으며, 果實이 아무런 損傷을 받지 않고 견딜 수 있는 許容衝擊에너지를 기준으로 쿠션재료의 두께, 密度 및 形狀 등에 관하여 보고 하였다.

Clark³⁾는 果實의 落下時 最少衝擊力과 되튀김을 일으키는 쿠션의 여러 形狀에 대하여 研究하였으며, Horsfield 等¹⁰⁾은 果實이 衝擊荷重을 받을 때 果實内部에 발생하는 剪斷應力을 理論적으로 해석하기 위하여 두 개의 구가 衝突하는 경우에 대하여 Hertz의 接觸理論을 적용시켰으며, 果實이 衝擊으로 인한 損傷은 흡수된 에너지 보다는 큰 内部剪斷應力의 발생에 원인이 있다고 보고한 바 있다.

Mohsenin와 Gohlich¹³⁾, Sitkei^{20,21)}는 쿠션위를 自由落下하는 물체에 대하여 에너지 방정식과 Hertz의 接觸理論을 적용시켜 理論적으로 最大剪斷應力 및 衝擊時間等を 계산하였으며, 果實의 破壞要因이 最大剪斷應力에 있다고 가정하였을 때, 이에 미치는 인자들중 果實의 무게, 낙하높이 보다는 쿠션의 彈性係數와 果實의 직경이 더 큰 영향을 미친다고 하였다. 또한 Mohsenin와 Gohlich¹³⁾는 圖式的인 방법에 의하여 쿠션의 設計問題에 접근을 시도한 바, 適當한 쿠션을 設計하기 위해서는 먼저 해당 果實 및 쿠션재료의 物理的 特性이 먼저 究明되어야 한다고 하였다.

이 처럼 果實의 收穫 부터 選別, 包裝等の 諸般過程이 機械化가 이루어 지지 않은 우리나라의 여건을 고려해 볼때, 運送, 貯藏 및 山積中의 힘에 의한 果實의 損傷을 最少化 하기 위한 包裝材料나 果實箱子의 山積높이 및 山積期間 等の 研究가 무엇 보다는 시급한 것으로 思料된다.

따라서 本 研究은 果實의 輸送 및 山積時의 힘에 의한 果實의 損傷을 방지하기 위한 果實箱子의 許容山積높이와 山積期間, 그리고 果實包裝用 箱子內의 填充物의 두께 등을 결정할 수 있는 數學的 模型을 開發하는 데 그 目的이 있다.

2. 許容山積높이 및 山積期間 豫測理論

散物狀態의 果實이나 箱子에 包裝된 난개의 果實들은 그림 1에서와 같이 다른 果實 혹은 물체와 接觸한 상태로 힘을 받게 된다.

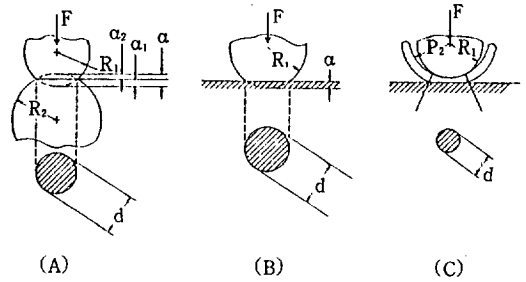


Fig. 1 Typical contact configuration of fruit packed.

- (A) Contact between two fruits,
- (B) Contact between fruit and container bottom,
- (C) Contact between fruit and try cup.

果實과 같은 粘彈性 物體의 接觸에서 생기는 變形을 알기 위해서는 우선 그림 1의 각 경우에 대하여 彈性球로 가정하고 接觸理論을 적용시켜야 한다.

가. 彈性球의 接觸 總變形量

靜的인 힘 F를 받으며 接觸하고 있는 두 彈性球 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.^{2, 4, 6, 11, 14, 16, 19, 20, 22, 24)}

$$F = \frac{4\alpha^{3/2}}{3\pi\lambda(K_1 + K_2)} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, α = 두 球의 接近係數 또는 總變形量, m
 λ = 接觸形態에 따른 形狀係數
 K = 재료의 物性값, $(1-\mu^2)/\pi E$, MPa^{-1}
 E = 彈性係數, MPa .
 μ = Poisson ratio, dimensionless

두 彈性球 사이에 형성되는 接觸面을 원으로 보면, 그 원의 직경 d는 다음과 같은 式으로 표시된다.

$$d^3 = \frac{6\pi F}{\lambda^2} (K_1 + K_2) \dots\dots\dots (2)$$

그림 1-(A)의 경우처럼 크기가 다른 두 彈性球가 接觸하고 있는 경우 形狀係數는, $\lambda = \{(R_1 + R_2)/R_1 R_2\}^{1/2}$ 이므로 式(2)는 다음과 같이 정리된다.

$$d^3 = \frac{6FR_1 R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \dots\dots (3)$$

두 彈性球의 크기와 재료의 物性이 같다면, 즉 $R=R_1=R_2$ 및 $K=K_1=K_2$ 가 되어 式은 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$d^3 = \frac{6FR(1 - \mu^2)}{E} \dots\dots\dots (4)$$

그림 1-(B)의 경우처럼 彈性球가 평면과 接觸하고 있는 경우는, $R_2 = \infty$ 이고 形狀係數는 $\lambda = (1/R_1)^{1/2}$ 이 되어 式(2)는 다음과 같이 정리된다.

$$d^3 = 6FR_1 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

만약, 평판의 彈性係數가 彈性球의 彈性係數에 비하여 매우 크다면 ($E_2 \gg E_1$), $K_2 = 0$ 가 되어 式은 다음과 같이 된다.

$$d^3 = 6FR_1 \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} \dots\dots\dots (6)$$

그림 1-(C)의 경우처럼 彈性球가 球座(spherical seat)와 接觸하고 있을 경우는 R이 음의 값이 되어 形狀係數는 $\lambda = \{(R_2 - R_1)/R_1 R_2\}^{1/2}$ 로 된다. 따라서 式(2)는 다음과 같이 정리된다.

$$d^3 = \frac{6FR_1 R_2}{R_2 - R_1} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \dots\dots\dots (7)$$

두 彈性球의 接近係數 α 는 式(1)과 (2)로부터 다음의 式으로 정리된다.

$$\alpha = \frac{\lambda^2 d^2}{4} \dots\dots\dots (8)$$

그림 1의 각 경우에 대한 接近係數 α 는 式(9), (10) 및 (11)로 각각 정리된다.

(A)의 경우

$$\alpha = \frac{(R_1 + R_2)d^2}{4R_1 R_2}, R_1 = R_2 \text{라면, } \alpha = \frac{d^2}{2R} \dots\dots\dots (9)$$

(B)의 경우

$$\alpha = \frac{d^2}{4R_1} \dots\dots\dots (10)$$

(C)의 경우

$$\alpha = \frac{(R_2 - R_1)d^2}{4R_2 R_1} \dots\dots\dots (11)$$

또한, 두 彈性球 사이의 接近係數 α 는 彈性球 각각의 變形의 합이 되고, 彈性球 각각의 變形量은 재료의 物性값 K에 비례하므로 두 彈性球의 接近係數 α_1 과 α_2 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{(1 - \mu_1^2)E_2}{(1 - \mu_2^2)E_1} \dots\dots\dots (13)$$

그림 1의 각 경우의 接近係數, 즉 總變形量은 式(14)~(18)로 각각 정리된다.

(A)의 경우는

$$\alpha_1 = \frac{K_1 \alpha}{K_1 + K_2} = 1.77K_1 \sqrt[3]{\frac{(R_1 + R_2)F^2}{R_1 R_2 (K_1 + K_2)}}$$

$$\alpha_2 = \frac{K_2 \alpha}{K_1 + K_2} = 1.77K_2 \sqrt[3]{\frac{(R_1 + R_2)F^2}{R_1 R_2 (K_1 + K_2)}}$$

\dots\dots\dots (14)

만약, 두 彈性球의 크기와 재료의 物性이 같다면 接近係數는 $\alpha/2 = \alpha_1 = \alpha_2$ 가 되므로 式(14)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\alpha}{2} = \alpha_1 = \alpha_2 = 1.77 K^{2/3} \sqrt[3]{\frac{F^2}{R}} \dots\dots\dots (15)$$

(B)의 경우는

$$\alpha_1 = 1.77K_1 \sqrt[3]{\frac{F^2}{R_1(K_1 + K_2)}}$$

$$\alpha_2 = 1.77K_2 \sqrt[3]{\frac{F^2}{R_1(K_1 + K_2)}}$$

\dots\dots\dots (16)

만약 평판의 彈性係數가 彈性球에 비하여 매우 크다면 ($E_2 \gg E_1$), $K_2 = 0$ 이 되어 모든 變形은 彈性球에서만 일어난다고 가정할 수 있으므로 式(16)은 式(17)로 정리된다.

$$\alpha = \alpha_1 = 1.77 K_1^{2/3} \sqrt[3]{\frac{F^2}{R_1}}, \quad \alpha_2 = 0 \dots (17)$$

(C)의 경우는

$$\alpha_1 = 1.77K_1 \sqrt[3]{\frac{(R_2 - R_1)F^2}{R_1 R_2 (K_1 + K_2)}}$$

$$\alpha_2 = 1.77K_2 \sqrt[3]{\frac{(R_2 - R_1)F^2}{R_1 R_2 (K_1 + K_2)}}$$

\dots\dots\dots (18)

나. 果實의 接觸 總變形量

사과, 배 등의 果實은 形狀이 球과 매우 흡사하기 때문에 그들의 體積과 같은 球의 等價直徑으로 이들 果實들의 形狀을 나타 내어도 될 것이다.

果實은 彈性및 粘性의 성질이 時間에 관계되어 복합적으로 나타나는 粘彈性 物體인 바,^{5, 11, 15, 20)} 彈性球에 대하여 유도된 式들을 果實에 적용시키기 위해서는 粘彈性 物體의 特性을 나타 내는 因子들 즉, 時間 變化에 따른 Poisson ratio나 弛緩彈性係數(relaxation modulus) 등의 인자들이 위의 式들에 포함되어야 할 것이다. 그러나 Poisson ratio는 그 變化 범위가 크지 않기 때문에 일정한 값으로 취급할 수 있을 것이다.^{14, 20)}

따라서 果實의 物性값 $K(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$K(t) = \frac{1 - \mu^2}{\pi E(t)} \dots\dots\dots (19)$$

여기서, $E(t)$ = 靜荷重 하에서의 果實의 弛緩 彈性係數, MPa.

μ = Poisson ratio, 生物體의 경우 0.25~0.49
일정 變形率과 靜荷重에 대한 弛緩彈性係數는 應力弛緩實驗과 크리이프實驗을 통하여 각각 구할 수 있으므로, 일정한 靜荷重에 대한 임의의 時間 t 에서의 果實의 彈性係數 즉, 弛緩 彈性係數는 다음 式으로 표시된다.^{14, 20)}

$$E|_t = \frac{\sigma_0}{\epsilon|_t} \rightarrow E(t) = \frac{\sigma_0}{\epsilon(t)} \dots\dots\dots (20)$$

크리이프 컴프라이언스 즉, 時間과 應力の 變化에 따른 단위 應力當의 變形率 $J(\sigma, t)$ 는 다음 式과 같이 표시될 수 있다.^{8, 12, 23, 27)}

$$J(\sigma, t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{E(t)}$$

$$= A\sigma^B [C + Dt - F \exp(-Gt)] \dots\dots\dots (21)$$

여기서, $A \sim G$ = 非線型粘彈性 模型의 상수값
 σ = 應力, MPa.

따라서 果實의 物性값 $K(t)$ 는 다음 式과 같이 정리된다.

$$K(t) = \frac{1 - \mu^2}{\pi} [A\sigma^B \{C + Dt - F \exp(-Gt)\}] \dots\dots\dots (22)$$

果實이 일정한 크기의 靜荷重을 받을 경우 接觸面積의 直徑 이나 總變形量은 時間에 따라 증가할 것이다.

만약 果實이 그림 1의 각 경우 처럼 接觸하고 있다면, 그 時의 變形量 등은 다음 式들과 같이 표시될 수 있을 것이다.

(A)의 경우는

$$\frac{\alpha(t)}{2} = \alpha_1(t) = \alpha_2(t) = 1.77K(t)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{F^2}{R}} \dots\dots\dots (23)$$

(B)의 경우는

$$\alpha_1(t) = 1.77K_1(t) \sqrt[3]{\frac{F^2}{R_1\{K_1(t) + K_2\}}}$$

$$\alpha_2(t) = 1.77K_2 \sqrt[3]{\frac{F^2}{R_1\{K_1(t) + K_2\}}}$$

..... (24)

만약, 평판의 彈性係數가 彈性球에 비하여 매우 크다면 ($E_2 \gg E_1$), $K_2 = 0$ 이 되어 모든 變形은 彈性球에서만 일어난다고 가정할 수 있으므로 式(24)로부터 다음 式과 같이 표시된다.

$$\alpha(t) - \alpha_1(t) = 1.77K_1(t) \sqrt[3]{\frac{F^2}{R_1}}, \alpha_2 = 0 \text{ (25)}$$

果實이 (C)의 경우 처럼 卵子板이나 발포폴리에틸레망²⁹⁾에 包裝된 상태로 荷重을 받는다면 그 때의 變形量은 式(18)로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha_1(t) = 1.77K_1(t) \sqrt[3]{\frac{(R_2 - R_1)F^2}{R_1R_2\{K_1(t) + K_2\}}}$$

$$\alpha_2(t) = 1.77K_2(t) \sqrt[3]{\frac{(R_2 - R_1)F^2}{R_1R_2\{K_1(t) + K_2\}}}$$

..... (26)

다. 産業狀態의 果實의 許容山積높이 및 山積期間

일정한 크기의 bulk bin내에서 果實이 $L \times W \times H$ (가로 \times 세로 \times 높이)만큼 山積되고 있고, 果實의 產物密度를 D_b ($MPa \cdot s^2/m^2$), 果實의 等價半徑을 R_c (m)라 하고, 果實의 山積높이가 폭과 길이에 비하여 작다면 bin의 벽면과 果實과의 마찰은 작으므로 bin의 깊이에 따른 벽면의 수직 압력분포와 bin의 바닥에서의 압력분포는 무시할 수 있다.

또한 產物狀態의 果實 사이의 接觸은 그림 2에서 보는 바와 같이 果實의 배열상태에 따라 여러가지를 생각해 볼 수 있으나, (A)와 같이 상하의 果實이 한 점에서 接觸하는 경우와 두 점 이상의 점에서 接觸하는 (B)와 (C)의 경우로

나누어 볼 수 있을 것이다.

여기서 (A)의 경우는 같은 조건하에서 (B)나 (C)의 경우 보다 變形이 더 클 것이므로 (A)의 경우만을 고려하면 될 것이다.

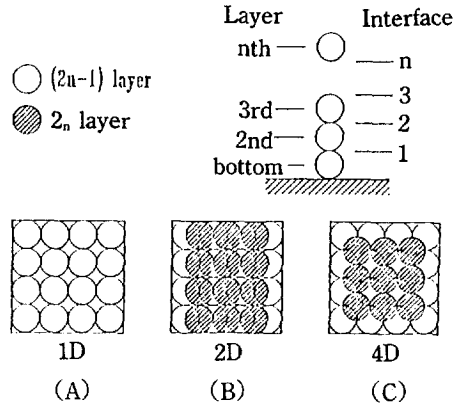


Fig. 2 Packing arrangements.

Bin 바닥의 彈性係數가 E_2 이고, 材料의 物性 값이 K_2 인 평판 이라면, 이 평판과 接觸해 있는 果實의 時間에 따른 變形量 $\alpha(t)$ 는 난 개의 果實이 받는 힘 $F = 4gH(R_c)^2 D_b$ 와 式(24)로부터 다음 式으로 정리된다.

$$\alpha_1(t) = 20.4390K_1(t) \sqrt[3]{\frac{H^2(R_c)^3(D_b)^2}{K_1(t) + K_2}} \text{ (27)}$$

바닥의 彈性係數가 果實에 비하여 매우 크다면 모든 變形은 果實에서만 일어난다고 가정할 수 있으므로, 이 때 果實의 時間에 따른 變形量 $\alpha_1(t)$ 는 式(25)로부터 다음의 式으로 표시된다.

$$\alpha_1(t) = 20.4390K_1(t)^{2/3} \sqrt[3]{H^2(R_c)^3(D_b)^2} \text{ (28)}$$

바닥으로부터 n 층에 있는 果實 끼리의 接觸으로 인한 變形量은 式(23)으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha_1(t) = \alpha_2(t) = 20.4390 K(t)^{2/3} \sqrt[3]{(H - 2nR_c)^2 (R_c)^3 (D_b)^2} \text{ (29)}$$

填充物 없이 產物狀態로 山積된 果實의 자중으로 인한 損傷은 바닥과 접한 果實에서나 바닥 근처의 저층에서 果實 끼리의 接觸으로 인하여

발생될 가능성이 가장 크므로, 그 곳에서의 果實 이 받는 힘을 기준으로 果實의 許容山積높이 및 山積期間 등이 豫測되어야 할 것이며, 果實의 生物體降伏點 및 그 점에서의 變形量이 이들을 豫測하는 데 기준이 될 것이다.

彈性係數가 E_2 인 평면바닥과 接觸해 있는 果實을 기준으로 이들의 값을 예측하여 보면, 일정한 時間이 경과한 후 果實의 總變形量이 生物體降伏點에서의 變形량과 같아 지는 時間이 許容山積期間이 된다.

즉, 生物體降伏點에서의 變形量을 D_{bp} 라 하면, $\alpha_1(t) = D_{bp}$ 가 되는 時間에서의 果實의 物性값은 式(27)로 부터 다음과 같이 표시된다.

$$M^3\{K_1(t)\}^3 - D_{bp}^3\{K_1(t)\} - D_{bp}^3K_2 = 0 \dots\dots\dots (30)$$

여기서, $M = 20.4390 \sqrt[3]{H^2(R_c)^3(D_b)^2}$

數值解法으로 式(30)으로 부터 $K_1(t)$ 를 추정 한 다음, 이 추정된 값을 이용하여 다음의 式으로 부터 時間 t 를 역시 數值解法으로 추정하면 그 값이 許容山積期間이 된다.

$$K_1(t) = \frac{1-\mu^2}{\pi}$$

$$[A\sigma^B\{C+Dt-F \exp(-Gt)\}] \dots\dots\dots (31)$$

바닥의 彈性係數가 果實에 비하여 매우 큰 경우는 그 평판과 接觸한 果實이 $\alpha_1(t) = D_{bp}$ 이 되는 時間에서의 果實의 物性값 $K_1(t)$ 는 式(28)로 부터 다음과 같이 계산된다.

$$K_1(t) = \left\{ \frac{D_{bp}}{M} \right\}^{3/2} \dots\dots\dots (32)$$

果實 끼리의 接觸으로 인한 變形은 式(29)로 부터 $n=1$ 인 곳에서 가장 크므로, 그 곳에서 $\alpha_1(t) = D_{bp}$ 가 되는 時間에서의 果實의 物性값 $K_1(t)$ 는 式(29)로 부터 계산된다.

$$K_1(t) = 0.0108 \sqrt{\frac{(D_{bp})^2}{(H-2R_c)^2(R_c)^3(D_b)^2}} \dots\dots\dots (33)$$

式(32) 및 (33)의 $K_1(t)$ 에 대하여 豫測되는 時

間, 즉 許容山積期間도 式(31)을 이용하여 각각 豫測될 수 있을 것이다.

일정한 山積期間에 대한 許容山積높이는 式(31)로 부터 역으로 果實의 物性값 $K_1(t)$ 를 계산한 다음, 이 값을 이용하여 式(30), (32) 및 (33)으로 부터 각각의 경우에 대하여 許容山積높이가 豫測될 수 있을 것이다.

3. 包裝填充物の 適正두께 豫測理論

山積된 果實의 損傷은 填充物の 역할로서 감소 시킬 수 있으며, 填充物の 設計時는 技術의인 측면뿐 만아니라 經濟的인 측면에서도 함께 검토되어야 한다. 따라서 本 研究에서 유도된 數學的 模型으로 부터 果實의 山積높이에 따라 저층의 果實이 받게되는 힘을 기준으로 填充物の 材質 및 두께를 결정할 수 있을 것이다.

바닥과 접한 果實을 기준으로 填充物の 두께 및 材質을 豫測하여 보면, 만약 果實에 비하여 바닥의 彈性係數가 매우 작다면 ($E_1 \gg E_2$), 接觸으로 인한 果實의 變形은 전혀없고 전부 바닥에서만 일어난다고 가정하면, 이 경우의 填充物の 두께(T_0)는 式(24)로 부터 다음과 같이 유도될 수 있을 것이다.

$$\alpha_1(t) = 0$$

$$T_0 = \alpha_2(t) = 20.4390 K_2^{2/3} \sqrt[3]{H^2(R_c)^3(D_b)^2}$$

$$= MK_2^{2/3} \dots\dots\dots (34)$$

또한 果實이 卵子板 이나 tray cup에 싸여서 荷重을 받는 다면, 그 때의 이들 填充物の 두께는 式(26)으로 부터 유도된 다음과 같은 式으로 豫測할 수 있을 것이다.

$$\alpha_1(t) = 0$$

$$T_0 = \alpha_2(t) = K_2^{2/3} M \sqrt[3]{\frac{R_2 - R_c}{R_2}} \dots\dots\dots (35)$$

式(34)와 (35)는 각 경우의 填充物の 두께를 豫測할 수 있는 式들인 데, 여기서 填充物の 物性값 K_2 를 알면 適正 填充物の 두께를 결정할 수 있을 것이고, 填充物の 두께를 T_0 로 하려고 한

다면 填充物의 材料는 K_2 의 物性值를 가지는 材料라야 할 것이다.

4. 豫測模型의 檢定

가. 許容山積높이 및 山積期間 豫測模型 檢定

本 研究에서 誘導된 果實의 許容山積높이 및 山積期間과 填充物의 두께 豫測을 위한 數學的 模型을 檢定 하기 위하여, 1990年 10月 初에 收穫된 사과를(후지) 3個月 동안 3°C의 低溫 貯藏後 크리이프 實驗을 실시하여 非線型 回歸分析 法에 의하여 非線型粘彈性 模型을 다음과 같이 구하였다.

$$J(\sigma, t) = 34.2290\sigma^{3.4058} [0.4642 + 5.8282 \times 10^{-5}t - 0.0705 \exp(-0.0675t)] \quad (r^2 = 0.9633) \dots\dots\dots (36)$$

바닥과 접한 果實을 기준으로 果實의 許容山積期間을 豫測하여 보면 다음의 그림(3)과 같다.

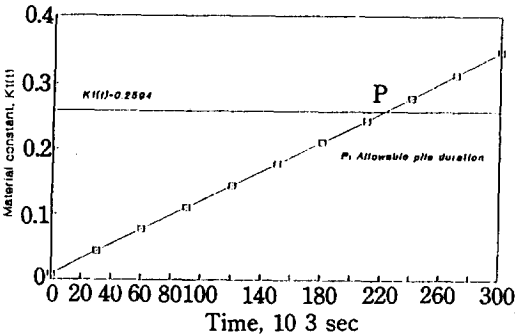


Fig. 3 Predicted allowable pile duration for the apple fruit at the bottom layer. (Dbp=2.0 × 10⁻³ m, R_c=0.0421 m, D_b=360 × 10⁻⁶ MPa s²/m², μ₂=0.30, E₂=1 MPa, σ=0.16 MPa, H=1.2 m)

즉, 式(30)으로 부터 추정된 $K_1(t)=0.2594$ 와 式(31)의 우측 항이 만나는 점 P에서의 時間이 許容山積期間이 되며, 그 값은 약 61 時間이 된다.

한편, 위와 같은 조건하에서 사과를 3일 동안 安全하게 山積 시키려할 때 豫測되는 許容山積높이는, 式(31)로 부터 $K_1(t)=0.4950$ 이므로, 이 값을 式(30)에 대입하여 산적높이 H에 대한 식으로 정리하면 式(37)과 같다.

$$H^2 = 0.3833 + \frac{0.2246}{E_2} \dots\dots\dots (37)$$

즉, 바닥의 彈性係數가 1MPa 이라면 豫測되는 許容山積높이는 0.7797 m가 된다.

나. 填充物의 두께 豫測模型 檢定

위와 같은 조건하에서 바닥과 접한 果實이 받는 힘을 기준으로, 이 힘에 의한 果實의 變形을 없을 때, 바닥의 填充物의 適正 材質 및 두께를 變數로 하는 式으로 표시하면 다음과 같다.

$$T_0 = \frac{2.1533 \times 10^{-3}}{K_2^{2/3}} \dots\dots\dots (38)$$

바닥의 填充物의 彈性係數가 작을 수록 豫測되는 填充物의 두께는 커질 것이며, 예를들어 填充物의 彈性係數가 0.1 MPa 일 때 豫測되는 填充物의 適正 두께는 9.9947×10^{-3} m가 된다.

5. 結 論

本 研究에서는 우리나라에서 果實의 收穫後 主要 損傷原因이 되는 輸送, 貯藏 및 山積時의 壓縮荷重에 대한 果實의 損傷을 방지하기 위한 果實의 許容山積높이 및 山積期間, 그리고 果實包裝用 箱子和 填充物의 適正 두께 및 材質을 결정하는 데 필요한 여러 가지의 數學的 模型을 散物狀態로 山積된 果實에 대하여 유도하였으며, 간단한 實驗과 가정하에서 이들 數學的 模型들을 검정해본 결과 그 妥當性이 충분히 인정되었다.

本 研究에서 誘導된 數學的 模型들에서 보는 바와 같이 果實의 山積높이, 期間 및 填充物의 두께 등을 精確하게 豫測하기 위하여는 果實의 粘彈性 特性이 무엇 보다도 精確히 究明되어야

하며, 또한 果實 包裝用 골판지箱子 및 既存의 각종 填充物에 대한 物性研究도 동시에 수행되어야 할 것으로 思料된다.

참 고 문 헌

1. Bittner, D. R., H. B. Manback, and N. N. Mohsenin. 1967. A method of evaluating cushioning materials used in mechanical harvesting and handling of fruits and vegetables. *Trans. of the ASAE* 10(6) : 711-714
2. Christensen, R. M. 1982. *Theory of viscoelasticity*. Academic Press.
3. Clark, R. L. 1970. The development of low impact fruit catching surfaces. *Trans. of the ASAE* 14(4) : 608-611
4. Findley, W. N., J. S. Lai and K. Onaran. 1976. Creep and relaxation of non-linear viscoelastic materials. North-Holland publishing company. N. Y.
5. Fridley, R. B., R. A. Bradley, J. W. Rumsey and P. A. Adrian. 1968. Some aspects of elastic behavior of selected fruits. *Trans. of the ASAE* 11(1) : 46-49
6. Genge, R. A., W. K. Bilanski and D. R. Menzies. 1978. Test methods and performance of some fruit catching surfaces. *Trans. of the ASAE* 21(1) : 249-252
7. Graham, V. A. and W. K. Bilanski. 1984. Non-linear viscoelastic behavior during forage wafering. *Trans. of the ASAE* 27(6) : 1661-1665
8. Hammerle, J. R. and N. N. Mohsenin. 1966. Some dynamic aspects of fruit impacting hard and soft materials. *Trans. of the ASAE* 9(2) : 484-488
9. Hemmat A., P. Chen and W. J. Chancellor. 1980. Determining proper thickness of cushioning materials for fruit catching frames. *Trnas. of the ASAE* 23(3) : 558-561, 567
10. Horsfield, B. C., R. B. Fridley and L. L. Clappool, 1972. Application of theory of elasticity to the design of fruit harvesting and handling equipment for minimum Bruising. *Trans. of the ASAE* 15(4) : 746-750
11. Kennish, W. J. and J. M. Henderson. 1978. Formulation of models for cushion materials for impact applications. *Trans. of the ASAE* 21(4) : 793-796
12. Mahmoud, M. H. and A. G. Bishare. 1976. Using finite elements to analyze silo pressure. *Agri. Engng.* 12-15
13. Mohsenin, N. N. and H. G. Gohlich. 1962. Techniques for determination of mechanical properties of fruits and vegetables as related to desige and development of harvesting and processing machinery. *J. of agricultural engineering Research* 7(4) : 300-315
14. Mohsenin, N. N. 1980. *Physical properties of plant and animal materials*. Gorden and Breach science publishers, N. Y.
15. Mohsenin, N. N., V. K. Jindal and A. N. Manor. 1978. Mechanics of impact of a falling fruit on a cushioned surface. *Trans. of the ASAE* 21(2) : 594-600
16. Nelson, C. W. and N. N. Mohsenin. 1968. Maximum allowable static and dynamic loads and effect of temperature for mechanical injury in apple. *J. of Agr. Eng. Research* 13(4) : 305-317
17. Peleg, K. 1981. Package product interaction in corrugated containers for flesh produce. *Trans. of the ASAE* 24(4) : 794-800
18. Peleg, K. 1984. A mathematical model of produce damage mechanism. *Trans. of the ASAE* 27(1) : 287-293
19. Rider, R. C., R. B. Fridley and M. O'Brien. 1973. Elastic behavior of a pseudo-fruit for determining bruise damage to fruit during mechanized handling. *Trans. of the ASAE*

- 16(2) : 241-244
20. Sitkei, Gy. 1986. Mechanics of agricultural materials. Elsevier Science Publishers. 114 - 283
21. Sitkei, Gy. and I. Bajsz and I. Nagy. 1979. Reducing of apple fruit damage using cushioning materials. Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, Tomus 89 : 353-362
22. Siyami, S., G. K. Brown, G. J. Burgess, J. B. Gerrish, B. R. Tennes, C. L. Burton and R. H. Zapp. 1988. Apple impact bruise prediction models. Trans. of the ASAE 31(4) : 1038-1046
23. Taylor, R. L., K. S. Pister and G. L. Goudreaux. 1970. Thermomechanical analysis of viscoelastic solids. International Journal of Numerical methods in engineering, Vol. 2.
24. Timoshenko, S. P. and J. N. Goodier. 1951. Theory of elasticity. McGraw Hill, New York. p. 475-489
25. 金滿秀, 金聲來, 朴鍾民, 明炳洙. 1990. 벼의 生物體 降伏強度 및 極限強度. 韓國農業機械學會誌 15(2) : 99-109
26. 金滿秀, 金聲來, 朴鍾民. 1990. 벼의 리올리지 特性(i) - 穀粒의 應力弛緩. 韓國農業機械學會誌 15(3) : 207-218
27. 金滿秀, 金聲來, 朴鍾民. 1990. 벼의 리올리지 特性(ii) - 穀粒의 壓縮 크리이프. 韓國農業機械學會誌 15(3) : 219-229
28. 洪志亨. 1988. 青果物의 壓縮 및 衝擊特性 實驗에 關한 研究. 서울大學校 碩士學位論文.
29. 農產物 標準出荷規格執. 1990. 農協協同組合 中央會.