

## 週期的 反復荷重을 받는 벼의 複素컴프라이언스

### Complex Compliance of Rough Rice Kernel under Cyclic Loading

金 滿 秀\*      羅 又 禎\*\*      朴 鍾 民\*  
M. S. Kim      W. J. La      J. M. Park

#### Summary

Viscoelastic characteristics of agricultural products may be determined through three basic tests ; stress relaxation, creep, and dynamic test.

Considering the changeability of living materials, dynamic test in which information is derived in a relatively short time appears to be highly desirable, in which either cyclic stress or cyclic strain is imposed and the remaining quantity (strain or stress) is measured.

The periodically varying stress will also result in periodically varying strain which in a viscoelastic material should theoretically be out of phase with the stress, because part of the energy subjected to sample is stored in the material as potential energy and part is dissipated as heat. This behavior results in a complex frequency-dependent compliance denoted by  $J(i\omega)$ .

The complex compliance and therefore the storage compliance, the loss compliance, the phase angle, and percent energy loss for the sample should be obtainable with a given static viscoelastic property of the material under static load.

The complex compliance of the rough rice kernel were computed from the Burger's model describing creep behavior of the material which were obtained in the previous study. Also, the effects of cyclic load and moisture content of grain on the dynamic viscoelastic behavior of the samples were analyzed.

The results obtained from this study were summarized as follows ;

1. The storage compliance of the rough rice kernel slightly decreased with the frequency applied but at above the frequency of 0.1 Hz it was nearly constant with the frequency, and the loss compliance of the sample very rapidly decreased with increase in the frequency on those frequency ranges.
2. It was shown that the storage compliance and the loss compliance of the sample increased with increase in grain moisture content. Effect of grain moisture content on the storage compliance of the sample was highly significant than effect of the frequency applied, but effect of the frequency on the loss compliance of the sample was more significant than effect of grain moisture content.
3. In low moisture content, the percent energy loss of Japonica-type rough rice was much higher than that of Indica-type rough rice, but, in high moisture content, vice versa.

---

\* 忠南大學校 農業機械工學科  
\*\* 慶尙大學校 農業機械工學科

## I. 緒 論

각종 農産物을 비롯하여 食品材料의 處理 및 加工技術이 발달함에 따라 이들 材料로 부터의 最終商品의 質을 높이고, 損失을 감소시키기 위해서는 이들 材料들에 대한 物理的 特性의 이해가 더 重要 要求되고 있다.

工業材料의 物性이 溫度와 매우 밀접한 관계가 있듯이, 穀物의 경우도 그들의 含水率에 따라 Hookean 舉動으로 부터 粘彈性 및 塑性的인 舉動으로의 다양한 特性을 나타 내고 있다.

보통 貯藏이나 加工段階에 있는 穀物等은 성질상 粘彈性 特性을 나타내고 있으므로, 이 단계의 穀物에 대한 物理的 特性을 이해하고 보다 正確히 定量的으로 나타내기 위해서는 粘彈性 理論에 대한 폭넓은 지식이 要求된다.<sup>3, 4, 5, 15, 18, 20, 22, 24, 25, 29, 33, 36-41)</sup>

農産物의 粘彈性 特性은 應力弛緩, 크리이프 또는 動的實驗을 통하여 잘 알수 있으나, 水分 및 溫度의 이동이 심한 變化性(changability) 있는 農産物의 경우는 비교적 짧은 시간에 많은 정보를 얻어내기 위해서는 動的實驗이 가장 바람직할 것이다.<sup>1, 5, 8-13, 15, 21, 26, 33, 35, 36)</sup>

이 動的實驗에서는 일정한 週期的 應力이나 變形이 正弦函數의(sinusoidal manner)으로 試片에 작용될 때, 그 起振力에 대응하는 變形이나 應力を 측정하는 것으로, 試片이 받은 에너지의 일부는 포텐셜에너지 형태로 貯藏되고, 일부는 熱로서 소모되기 때문에 起振力과는  $\pm \delta$ 만큼의 位相差가 생기게 된다.<sup>1, 5, 21, 24, 26, 33, 35, 36, 41)</sup> 따라서 起振力에 대응하는 應力 혹은 變形의 반응은 振動數에 의존하는 複素彈性率(complex modulus) 혹은 複素 컴프라이언스(complex compliance)로 잘 설명된다.

週期的인 反復荷重을 가하는 장치로서 주로 이용되고 있는 것이 振動機(vibrator)이며, 이때 試片이 받는 荷重과 變形의 電氣的인 신호를 오실로스코프로 받아 두 波형을 합성시킨 Lissajous 타원을 통하여 動的 粘彈性 特性(dynamic viscoelastic property)을 分析하는 방법이 주로 이용되고 있다.<sup>3, 14, 17, 18, 19, 24, 30, 31, 35)</sup>

Hamann<sup>7)</sup>은 사과속살을 원통모양으로 加工한 다음, 이것을 두 평판사이에 고정하고 振動機를 이용하여 50~365 Hz의 週期的인 荷重을 가하여 이때 試片이 받는 應力과 變形率을 직접 測定하여, 그 應力으로 부터 動的彈性率( $E_1$ )과 損失彈性率( $E_2$ )을 벡터 合成으로 구하였는 바, 振動數가 증가함에 따라 이들 係數들은 2次 函數의으로 각각 증가 또는 감소하였다고 하였다. 이는 試片의 두께가 직경에 비하여 작을 때는 試片 자체의 파동의 효과는 무시할 수 있다고 하였다.

Webb等<sup>35)</sup>도 Hamann<sup>17)</sup>이 제시한 방법을 이용하여 직경 2.5 cm, 길이 2.77 cm의 원통형 소시지 試片에 대하여 複素彈性係數, 에너지損失率(percent energy loss)등을 측정한 결과, 이들 사이에는 相關關係가 없었으며, 에너지損失率은 振動數 160 Hz 부근에서 최대값을 나타 내었다고 하였다. 또한 이들은 8개 항목에 대한 寬能實驗(panel test)을 실시한 결과, 이들 항목들과 動的 彈性率과의 相關關係 보다는 에너지損失率과 더 높은 相關關係가 있었다고 하였다.

Rao等<sup>30, 31)</sup>은 감자에 대하여 Hamann<sup>8)</sup>과 유사한 實驗裝置를 이용하여 40~240 Hz의 振動數에 대하여 動的實驗을 실시한 결과, 振動數가 증가함에 따라 複素彈性係數( $E(i\omega)$ )는 증가하는 경향 이었으나, 振動數 100~120 Hz 범위에서는 매우 작은 값으로 測定 되었는 데, 이것은 機器共振(apparatus resonance) 현상 때문이라고 하였으며, 位相角(phase angle)은 振動數에 따라 일률적인 경향이 없었다고 하였다.

Chattopadhyay等<sup>34)</sup>은 12~29% (d.b.) 범위의 含水率 4 수준의 벼에 대하여 100~1000 Hz의 週期的인 反復荷重을 가하여 動的實驗을 실시하였는 바, 振動數가 증가할 수록 動的彈性率( $E_1$ )은 증가하였으나, 損失彈性率( $E_2$ )은 감소하였다고 하였으며, 含水率이 증가할 수록 이들 값들은 모두 감소하는 것으로 보고 하였다. 이는 動的 彈性率과 損失彈性率을 각각 含水率과 角振動數(angular frequency)를 因子로 하는 2次 多項式을 제시하였다.

Clark와 Rao<sup>14)</sup>는 복숭아 속살에 대하여 成熟度 別로 70~300 Hz의 振動數로 動的實驗을 실시한 결과, 複素彈性係數( $E(i\omega)$ )는 잘 익은 복숭아 일 수록 감소하는 반면, 振動數에 따라서는 증가하였다고 하였다. 이들은 이러한 動的實驗의 결과를 복숭아의 등속 정도를 定量化하는 데 응용하려고 시도한 바 있다.

Jasper와 Blanshard<sup>2)</sup>는 振動機를 이용하여 食料品(food stuffs)에 일정한 크기의 振動數와 振幅을 갖는 起振力을 가하여, 이때 試片의 動的特性을 慣性(inertia), 스프링 및 데시포르트가 병렬로 연결된 리올리지 模型으로 이를 설명하려 하였다.

Wen과 Mohsenin<sup>36)</sup>는 옥수수 角質試片에 反復 引張荷重을 가하는 기구로서 편심캠을 이용하였으며, 이 때 試片이 받는 應力과 變形率을 동시에 측정하여 그들의 비로서 引張複素彈性率을 계산했던 결과, 含水率이 증가함에 따라 대체로 감소하였으며, 含水率 10~17% (w.b.) 범위에서 급격히 감소하는 현상을 보였다고 하였다.

이상과 같이 試片에 起振力을 가하여 그 때 試片이 받는 應力과 變形率을 직접 측정하여 이를 분석하는 방법 이외에도, 農産物의 共振特性(resonance)을 이용하는 resonance method,<sup>7, 11, 12, 13, 21, 26)</sup> 試片 양쪽에 잇는 코일의 전기적인 임피던스의 변화를 측정하여 이로 부터 試片의 mechanical impedance를 계산하여 분석하는 transducer method<sup>22, 26)</sup>이 있다.

Finney와 Narris<sup>6)</sup>, Finney<sup>11, 12, 13)</sup>는 加工하지 않은 사과에 대하여 非破壞的인 방법으로 사과의 共振周波數(resonance frequency)를 측정하여, 이로 부터 사과의 스티프니스(stiffness) 지수, 즉  $f^2m$  ( $f$ =共振周波數,  $m$ =質量)을 계산한 후, 6개 항목의 寬能實驗의 결과와 相關關係를 분석한 결과, 이 지수는 收穫後 사과의 sensory firmness와는 매우 相關關係가 있었으나, 貯藏期間이 길어 질수록 이들 사이에는 相關關係가 없었다고 하였다. 이는 또  $f^2m$ 은 sensory firmness 보다는 Magness-Taylor pressure와 더 높은 相關關係를 나타 내었다고 하였다.

위의 대부분의 연구결과들은 試片에 일정한 週期로 反復的인 變形을 줄 경우 매 週期마다 應力の 振幅에는 변화가 없다는 가정이나, 사이클의 기진력하에서 수행된 研究 결과 들이다. 그러나 실제의 경우는 農産物은 粘彈性體 이기 때문에 매 週期 마다 應力の 振幅은 農産物의 特性에 따라 증가 혹은 감소하게 된다.

Sitkei<sup>33)</sup>는 사과속살에 대하여 처음 100 週期 동안 매 週期 마다 應力の 振幅을 測定하여, 이것을 週期的 회수를 因子로 하는 3項의 指數函數로 표시 하였으며, 매 週期 마다 應力の 振幅 감소율은 起振力(exciting source)인 變形率의 振幅에 큰 영향을 받는다고 하였다. 그는 이러한 현상을 사과속살의 softening 현상으로 설명하였다.

일정한 크기의 靜荷重 하에서의 農産物의 粘彈性 特性인 應力弛緩 이나 크리이프 舉動을 설명하는 力學的 模型에 적당한 解析的인 방법을 적용 하므로서 理論的으로 일정한 週期로 反復하는 起振力 하에서의 農産物의 動的 粘彈性 特性을 알아볼 수 있으며, 또한 일정한 週期的 反復荷重 하에서의 動的 粘彈性 特性으로 부터 應力弛緩 및 크리이프 特性과 같은 靜的 粘彈性

特性을 유추해 볼수 있다.<sup>3, 15, 17)</sup>

Chattopadhyay等<sup>3)</sup>은 벼에 대한 動的實驗의 결과로 부터 靜的 粘彈性 特性인 弛緩彈性係數를 짧은 時間 즉,  $t=1/\omega$ 에서 계산하였는 바, 弛緩彈性係數는 含水率이 감소함에 따라 또는 振動數가 증가함에 따라 증가하였다고 하였다. Hamann<sup>17)</sup>도 이들과 유사한 방법으로 사과속살의 弛緩彈性係數를 계산한 바 있다.

金等<sup>11)</sup>은 含水率 12.5%~23% (w.b.)의 벼에 대하여 靜的 크리이프 實驗을 실시한 결과로 부터 動的粘彈性 特性인 複素彈性率, 動的彈性率 및 損失彈性率 等を 理論的으로 구하기 위한 理論式을 Burger's 模型과 複素彈性率의 理論으로 부터 유도하였으며, 벼의 動的粘彈性 特性은 振動數와 含水率의 변화에 많은 영향을 받았으며, 振動數  $10^{-3}$ ~ $10^3$  Hz의 범위에서 振動數가 증가할 수록 動的彈性率은 대체로 증가하였으나

損失彈性率은 감소하는 것으로 보고하였다. 또한 이들은 振動數 및 含水率에 관계 없이 動的 彈性率이 損失彈性率 보다 컸으며, 이들의 차이는 振動數가 증가할 수록 크게 나타 났다고 하였다.

이상에서 살펴본 바와같이 벼에 週期的인 應力이 작용할 때 나타나는 變形의 特性을 다룬 연구결과를 국내는 물론 외국의 경우도 없는 실정이다. 따라서 本 研究에서는 金等<sup>38-41)</sup>에 의하여 수행된 벼의 리올러지 特性에 대한 研究結果와 벼의 複素彈性率에 대한 연구결과를 토대로 벼의 動的 粘彈性 特性인 複素컴프라이언스를 究明하는 데 目的이 있으며, 그 구체적인 目的은 다음과 같다.

- 가. 靜的 粘彈性 特性으로부터 動的 粘彈性 特性인 複素컴프라이언스, 動的컴프라이언스, 損失컴프라이언스 및 에너지損失率을 나타 내는 각종 理論式을 유도하며,
- 나. 이 理論式으로부터 벼의 含水率 및 振動數의 變化가 이들의 動的 粘彈性 特性에 미치는 영향을 究明하고자 한다.

II. 理論的 考察

가. 複素컴프라이언스

(complex compliance)

起振力을 式(2-1)과 같은 일정한 週기로 反復되는 應力의 函數로 나타내면

$$\sigma(t) = \sigma \cdot \text{COS}(\omega t) \tag{2-1}$$

여기서,  $\sigma$ . = 起振力의 振幅, MPa.

$\omega$  = 起振力의 角振動數, rad/sec

起振力은 한 방향으로만 왕복운동 하므로 Euler 公式을 이용하여 式(2-1)을 전개한 후 實數部分만을 複素數 形式으로 바꾸면 다음과 같다.

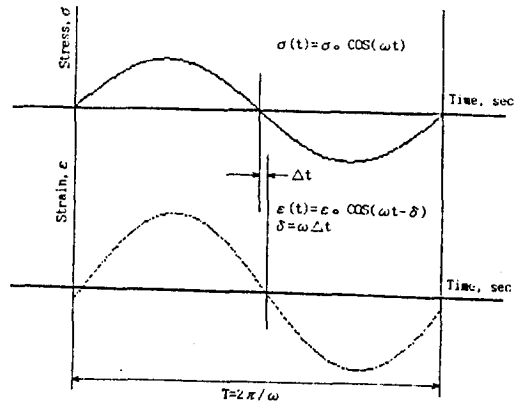


Fig. 2-1. Sample of sinusoidally varying stress and strain curves enlarged to show graphical method for estimation of shift time  $\Delta t$ .

$$\sigma(t) = \text{Re}[\sigma \cdot \exp(i\omega t)] = \sigma \cdot \exp(i\omega t) \tag{2-2}$$

여기서,  $i = \sqrt{-1}$

그림(2-1)에 나타난 것과 같이 週期的인 反復應力에 대하여 반응하는 物體의 變形率은 應力의 波형 보다  $\delta$ 만큼 뒤진 상태에서 起振力인 應力과 같은 振動數로 振動할 것이다.<sup>1, 5, 24, 33)</sup>

즉, 起振力에 반응하는 變形率의 變化는 다음과 같이 표시된다.

$$\epsilon(t) = \epsilon \cdot \text{COS}(\omega t - \delta) \tag{2-3}$$

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \epsilon \cdot \exp[i(\omega t - \delta)] \\ &= \epsilon \cdot \exp(-i\delta) \exp(i\omega t) = \epsilon^* \exp(i\omega t) \end{aligned} \tag{2-4}$$

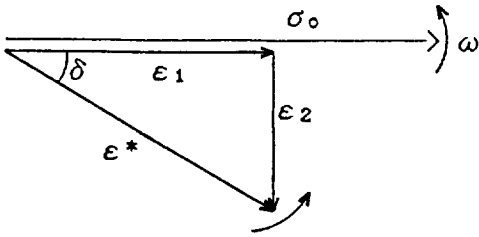
여기서,  $\epsilon$ . = 變形率의 振幅, mm/mm

$\omega$  = 變形率의 角振動數, rad/sec

$\delta$  = 位相角, rad

式(2-4)에서 보는 바와 같이 農産物 자체의 粘性的인 要素로 인한 内部摩擦 때문에 起振力에 비하여 位相이  $\delta$ 만큼 뒤진 상태에서 반응하는 變形率의 振幅은 複素數  $\epsilon^*$ 가 된다.

이들의 振幅 關係를 그림으로 나타 내면 다음과 같다.



式(2-4)에서  $\epsilon^*$ 는 位相角  $\delta$ 와 振幅  $\epsilon$ 를 모두 포함하기 때문에 이것을 複素變形率의 振幅(complex strain amplitude)이라 하며, 이것을 다시 Euler의 公式를 이용하여 전개하면 다음과 같이 된다

$$\epsilon^* = \epsilon \cdot \exp(-i\delta) = \epsilon \cdot (\cos \delta - i \sin \delta) \quad (2-5)$$

정의에 의하여 複素컴프라이언스(complex compliance)  $J(i\omega)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$J(i\omega) = \frac{\epsilon^*}{\sigma_0} = \frac{\epsilon}{\sigma_0} (\cos \delta - i \sin \delta) = J_1 - i J_2 = |J(i\omega)| \exp(-i\delta) \quad (2-6)$$

여기서,  $J_1$  = 動的컴프라이언스, mm/mm per MPa.

$J_2$  = 損失컴프라이언스, mm/mm per MPa.

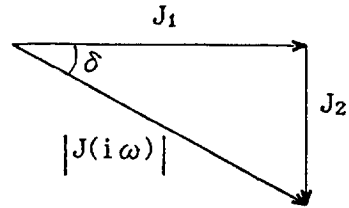
$\delta$  =  $J_1$ 과  $J_2$  사이의 位相角, rad

式(2-6)에서 實數部分  $J_1$ 은 起振力인 應力과 같은 位相에 있으면서 材料의 彈性的인 性質에 관련되므로 이것을 動的컴프라이언스(storage compliance)라 하고, 虛數部分  $J_2$ 는 起振力の 位相과 수직방향에 있으면서 材料의 internal damping, 粘性的인 性質에 관련되므로 이를 損失컴프라이언스(loss compliance)라 한다.

複素컴프라이언스의 크기(absolute complex compliance)는 式(2-6)으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$|J(i\omega)| = \sqrt{J_1^2 + J_2^2} = \epsilon / \sigma_0 \quad (2-7)$$

式(2-6)을 벡터 다이어그램으로 표시하면 다음과 같다.



$$\text{즉, } \tan \delta = J_2 / J_1 = \epsilon_2 / \epsilon_1 \quad (2-8)$$

動的컴프라이언스와 損失컴프라이언스는 다음과 같이 각각 계산된다.

$$J_1 = |J(i\omega)| \cos \delta = |J(i\omega)| (1 + \tan^2 \delta)^{-1/2} \quad (2-9)$$

$$J_2 = |J(i\omega)| \sin \delta = |J(i\omega)| \tan \delta (1 + \tan^2 \delta)^{-1/2} \quad (2-10)$$

또한 한 週期 동안에 材料에 貯藏된 에너지를  $E_s$ , 損失된 에너지의 量을  $E_L$ 이라 할때, 振動吸收係數(mechanical loss)는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$K \tan \delta = \frac{E_L}{E_s} \quad (2-11)$$

여기서  $K$ 는 cycle의 수에 의존하는 비례상수이며, 이것을 1로 가정하면 에너지 損失率(percent energy loss)은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{E_L}{E_L + E_s} \times 100(\%) = \frac{\tan \delta}{1 + \tan^2 \delta} \times 100(\%) \quad (2-12)$$

#### 나. 靜的크리이프 理論으로 부터 動的粘彈性 理論展開

金等<sup>41)</sup>은 週期的으로 변화하는 變形率이 起振力으로 작용하였을 때, 그 起振力에 반응하는 應力の 변화와의 關係로 부터 複素彈性率을 다음의 式으로 나타낸 바 있다.

$$E(i\omega) = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \frac{(\cos\delta + i \sin\delta)}{\exp(i\delta)} = |E(i\omega)| \quad (2-13)$$

式(2-6)과 (2-13)으로 부터 複素彈性率과 複素컴프라이언스 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$E(i\omega) \cdot J(i\omega) = 1 \quad (2-14)$$

金等<sup>41)</sup>은 벼에 대한 複素彈性率을 Burger's 模型으로 부터 다음의 式으로 유도한 바 있다.

$$E(i\omega) = \frac{[p_1 q_1 \omega^2 - q_2 \omega^2 (1 - p_2 \omega^2)] + i [p_1 q_2 \omega^3 + q_1 \omega (1 - p_2 \omega^2)]}{p_1^2 \omega^2 + (1 - p_2 \omega^2)^2} \quad (2-15)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } p_1 &= (\eta_1/R_1) + (\eta_1/R_2) + (\eta_2/R_2) \\ p_2 &= (\eta_1 \eta_2)/(R_1 R_2) \\ q_1 &= \eta_1 \\ q_2 &= (\eta_1 \eta_2)/R_2 \end{aligned}$$

式(2-14)과 (2-15)로 부터 벼의 複素컴프라이언스는 다음과 같이 유도된다.

$$J(i\omega) = \frac{[p_2 q_2 \omega^3 - \omega(q_2 - p_1 q_1)] + i [\omega^2(p_2 q_1 - p_1 q_2) - q_1]}{q_2^2 \omega^3 + q_1^2 \omega} \quad (2-16)$$

式(2-16)과 (2-6)을 비교함으로써 Burger's 模型의 動的컴프라이언스  $J_1$ 과 損失컴프라이언스  $J_2$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J_1 = \frac{p_2 q_2 \omega^2 (g_2 - p_1 g_1)}{q_2^2 \omega^2 + q_1^2} \quad (2-17)$$

$$J_2 = \frac{\omega^2 (p_2 q_1 - p_1 q_2) - q_1}{q_2^2 \omega^3 + q_1^2 \omega} \quad (2-18)$$

또한, 위의 두 式 즉, 式(2-17)과 (2-18)을 이용하여 式(2-8)로 부터 Burger's 模型의 位相角  $\delta$ 를 결정할 수 있다.

### III. 結果 및 考察

가. 含水率 및 振動數가 動的컴프라이언스에 미치는 影響

벼의 리올러지 특성을 구명한 바있는 金等<sup>38, 40)</sup>은 우리나라의 주요 벼 품종인 一般系(아끼바레, 대청) 및 多收系(삼강, 원풍)벼 각각 2品種에 대하여 含水率 12.5~25% (w.b.) 범위의 벼의 生物體 降伏強度 이하의 應力을 瞬間的으로 가하여 靜的 크리이프 實驗을 실시한 결과를 非線型回歸分析法에 의하여 表(3-1)에서 보는 바와같이 Burger's 模型으로 나타내었다.

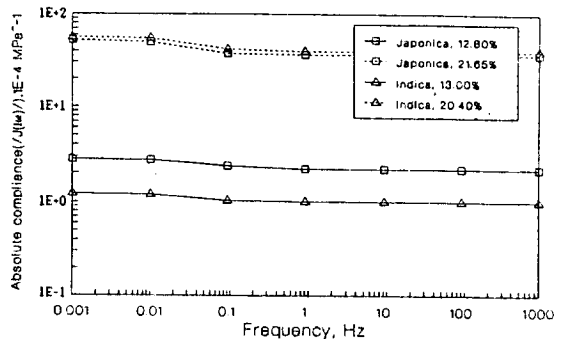


Fig. 3-1. Effect of frequency and moisture content on the storage compliance of rough rice kernel.

위의 表의 Burger's 模型의 상수값들을 이용하여 式(2-17)로 부터 振動數의 變化에 따른 動的컴프라이언스(storage compliance)를 계산한 결과를 그림(3-1)에 圖示하였다.

Table 3-1. Coefficients of Burger's model for rough rice kernel at the initial stress of 18 MPa.

Types	M.C. (% w.b.)	Coefficients of Burger's model					r <sup>2</sup>
		R <sub>1</sub> , MPa.	R <sub>2</sub> , MPa.	τ <sub>r</sub>	η <sub>1</sub> , MPa · S	η <sub>2</sub> , MPa · S	
Japonica	12.80	4510.52	18231.92	2.58	11145004.00	46974.53	0.99
	21.65	276.88	632.39	6.06	356639.78	3830.28	0.99
Indica	13.00	9946.49	48882.07	4.60	27156206.00	224740.21	0.99
	20.40	252.63	609.85	4.36	305236.06	2659.94	0.99

그림에서 보는 바와 같이 벼의 動的컴프라이언스(storage compliance)는 振動數가 約 0.1Hz 까지는 약간 감소하는 경향이였으나, 그 이상의 振動數에서는 거의 일정한 값으로 나타났다. 이는 收穫後 벼의 搗精過程이나 輸送 中에 벼에 작용하는 振動數가 約 20Hz 이상이 됨으로 이러한 外力의 條件하에서는 벼의 動的컴프라이언스의 變化가 거의 없다는 것을 의미한다. 그러나 같은 振動數에서도 含水率이 動的컴프라이언스에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 나타났다.

含水率이 낮을 수록 動的컴프라이언스는 작게 나타났는데, 이는 振動數가 크고, 含水率이 낮을 수록 벼는 매 週期當 벼가 받은 에너지로 인하여 變形된 變形量중 상당 부분이 彈性變形을 하므로 쉽게 회복될 수 있다는 것을 의미하므로 벼가 彈性的인 舉動을 한다는 것을 알 수 있다.<sup>2)</sup> 이와 같이 벼의 舉動이 含水率과 振動數, 즉 時間因子에 많은 영향을 받는다는 것은 벼에 대한 靜的實驗의 결과에서도 잘 나타나있다.<sup>4, 16, 20, 29, 38~41)</sup>

Husain等<sup>20)</sup>, Yamaguchi等<sup>37)</sup>, 金等<sup>29)</sup>은 準靜的인 荷重載荷速度가 증가함에 따라 또는 含水率이 감소함에 따라 應力弛緩의 速度가 빠른 것으로 보고하였고, Prasad와 Gupta<sup>20)</sup>, Chattopadhyay等<sup>41)</sup>, 金等<sup>39)</sup>은 含水率이 낮을수록, 荷重載荷速度가 증가할 수록 벼의 生物體降伏點 및 破壞強度가 증가하는 것으로 보고한 바 있다. 한편 Fridley等<sup>16)</sup>은 果實의 荷重-變形의 特性曲線이 荷重載荷速度가 증가할 수록 또는 變形量이 적을수록 彈性的理論에 입각한 理論的인 荷重-變形曲線에 근접하여 벼는 彈性的으로 舉動한다고 하였다.

含水率이 낮을 때는 本研究의 振動數 범위인  $10^{-3} \sim 10^3$ Hz에서 一般系 벼가 約  $2.8 \times 10^{-4} \sim 2.2 \times 10^{-4}$ , 多收系 벼가 約  $1.2 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-4}$  mm/mm per MPa로 多收系가 一般系 벼에 비하여 더 彈性的인 性質을 나타내었으나, 含水率이 높을 때는 一般系 벼가 約  $5.2 \times 10^{-3} \sim 3.6 \times 10^{-3}$ , 多收系 벼가 約  $5.6 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}$ 으로 그 반대현상이었으며, 두 系統間의 차이는 매우 적었다. 이처럼 벼의 두 系統 사이에 含水率이 높고 낮음에 따라 서로 반대현상으로 나타난 것은 벼

의 組織 成分의 차이가 主要原因인 것으로 思料된다.

일반적으로 振動數의 變化 보다는 含水率의 變化가 動的컴프라이언스에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

나. 含水率 및 振動數가 損失컴프라이언스에 미치는 影響

그림(3-2)에는 週期的인 起振力에 대한 物體가 받는 단위 應力當의 變形量중 회복되지 않는 永久變形의 정도를 표시하는 損失컴프라이언스(loss compliance)를 含水率 및 振動數의 變化에 따라 圖示하였으며, 그림(3-3)에는 벼의 處理加工過程에서 예상되는 振動數의 범위인 20~790Hz에 대하여 損失컴프라이언스의 變化를 상세히 나타내었다.

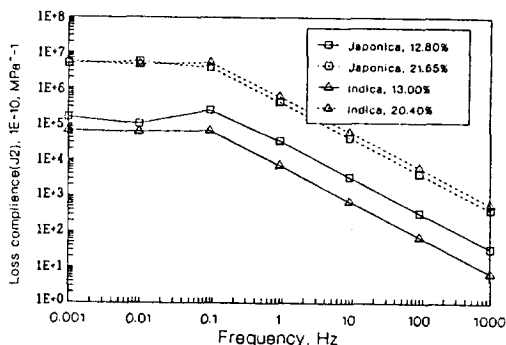


Fig. 3-2. Effect of frequency and moisture content on the loss compliance of rough rice kernel.

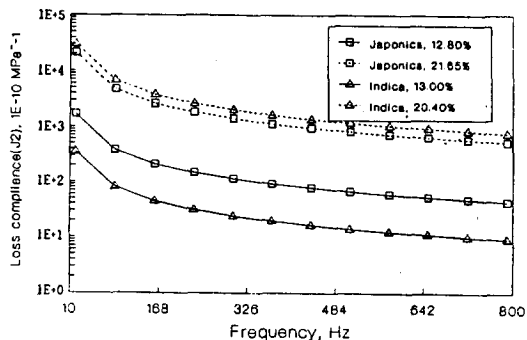


Fig. 3-3. Effect of frequency and moisture content on the loss compliance of rough rice kernel at the frequency range from 10Hz to 790Hz

그림(3-2) 및 (3-3)에서 보는 바와같이 벼의 損失컴프라이언스는 낮은 振動數에서는 약간 감소하다 증가하였으나, 振動數 0.1Hz 이상에서는 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 또한 含水率이 낮을때는 一般系 벼가 多收系 벼에 비하여 컸으며, 含水率이 높을때는 多收系 벼가 더 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 含水率의 變化보다는 振動數의 變化가 損失컴프라이언스에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 이 그림에서도 역시 벼는 含水率이 낮을수록, 振動數가 클수록 벼는 彈性的인 舉動을 한다는 것을 알 수 있다.

대체로 本研究의 振動數 범위에서 含水率에 관계없이 動的컴프라이언스가 損失컴프라이언스에 비하여 작았으며, 이들의 차이는 振動數가 증가할 수록 크게 나타났다. 이것으로 미루어 보아 벼는 粘性的인 性質보다는 彈性的인 性質이 큰 粘彈性體라는 것을 알 수 있다.<sup>10,11</sup>

그림(3-4)에는 含水率 및 振動數에 따른 複素컴프라이언스(complex compliance)의 크기를 圖示하였다. 振動數가 증가함에 따라 대체로 감소하는 경향이었으며, 含水率이 낮을 때는 一般系 벼가, 含水率이 높을때는 多收系 벼가 다소의 큰 값을 나타내었다. 振動數의 變化 보다는 含水率의 變化가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이 複素컴프라이언스의 크기는 振動數 0.1 Hz 이하에서는 動的컴프라이언스( $J_1$ )에 비하여 약간 큰 값이었으나, 그 이상의 振動數에서는 거의 같은 크기로 나타났는데, 이러한 현상은 動的컴프라이언스는 0.1Hz 이상에서 거의 變化가 없는 반면, 位相角이 큰 쪽으로 감소하므로 損失컴프라이언스가 급격히 줄어들기 때문이다. 따라서 動的컴프라이언스와 複素컴프라이언스가 거의 같은 값으로 나타났다.

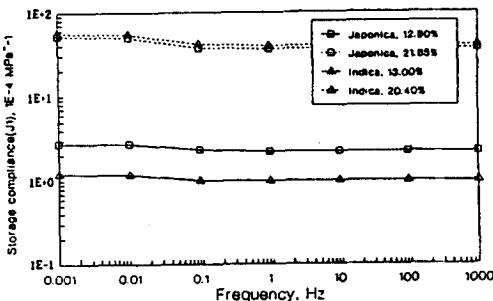


Fig. 3-4. Effect of frequency and moisture content on the absolute complex compliance of rough rice kernel.

다. 含水率 및 振動數가 位相角 및 에너지損失率에 미치는 影響

만약 物體가 完全彈性體라면 起振力에 대응하는 變形率의 變化도 起振力과 같은 位相을 똑같이 따를 것이다. 그러나 農産物은 얼마간의 水分을 가지고 있기 때문에 이것으로 인한 内部摩擦力, 物體 内部의 작은 空隙 및 이들 組織속에 존재하는 不均一한 物質때문에 起振力에 의한 slip 및 dislocation 현상이 일어나 起振力과는  $\delta$  만큼의 차이를 두고 起振力과 같은 週기로 變化한다.

그림(3-5)에는 앞 절의 式(2-8), (2-17) 및 (2-18)로 부터 振動數 및 含水率의 變化에 따른 位相角  $\delta$ 를 圖示하였다.

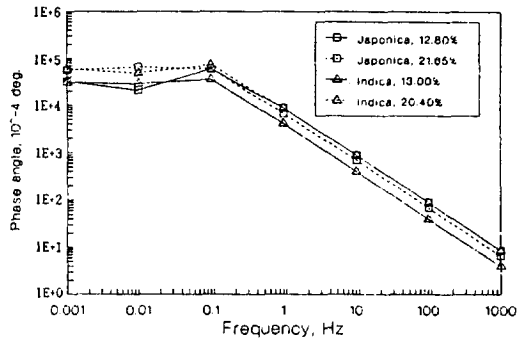


Fig. 3-5. Effect of frequency and moisture content on the phase angle of rough rice kernel.

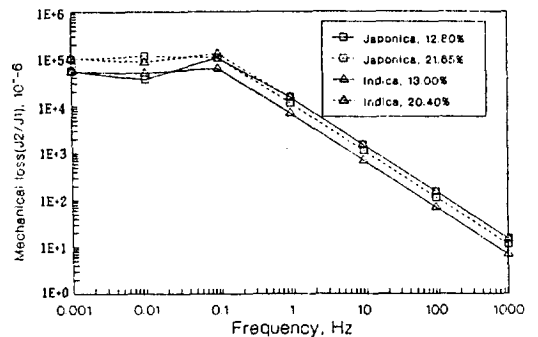


Fig. 3-6. Effect of frequency and moisture content on the mechanical loss of rough rice kernel.



位相角  $\delta$ 는 振動數가 증가할 수록 대체로 감소하는 경향이있으며, 작은 振動數의 범위에서는 含水率이 높을수록 약간 크게 나타났으나, 振動數 0.1Hz 이상에서는 一般系 벼의 경우는 含水率이 낮은 경우가, 多收系 벼에서는 含水率이 높은 경우가 각각 더 크게 나타났다. 대체로 含水率보다는 振動數의 變化가 位相角에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

그림(3-6)에서 보는 바와같이 振動吸收係數 (mechanical loss or mechanical damping) 즉,  $TAN \delta$ 는 物體의 減衰容量(damping capacity)을 표시하는 값으로 振動數가 클 수록 작은 값으로 계산 되었는데, 이는 振動數가 클 수록 週期的인 要素로 인하여 熱 등으로 轉換되는 에너지가 작기 때문인 것으로 思料된다.

含水率 및 振動數의 變化에 따른 벼가 받은 에너지중 벼의 彈性的인 요소에 貯藏되는 에너지 量과 熱로써 소모되는 에너지의 관계는 式(2-12)의 에너지損失率의 式으로 부터 보다 더 정확히 알수 있다.

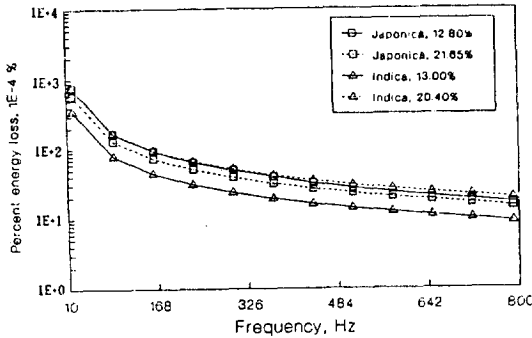


Fig. 3-7. Effect of frequency and moisture content on the percent energy loss of rough rice kernel.

그림(3-7)에서 보는 바와 같이 含水率이 낮은 경우는 一般系 벼가 多收系 벼에 비하여 에너지損失率이 더 컸으며, 含水率이 높은 경우는 그 반대현상으로 나타났으며, 一般系 벼에서는 含水率이 낮을수록 多收系 벼에서는 含水率이

높을수록 각각 더 크게 나타났다. 이와같은 결과는 그림(3-8)의 起振力과 이에 대응하는 變化率의 變化에서도 잘 알수 있다.

理論上으로 벼가 完全彈性體라면 두 과정은 振幅만을 달리 하면서 같은 位相에서 變化할 것이다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 벼 자체의

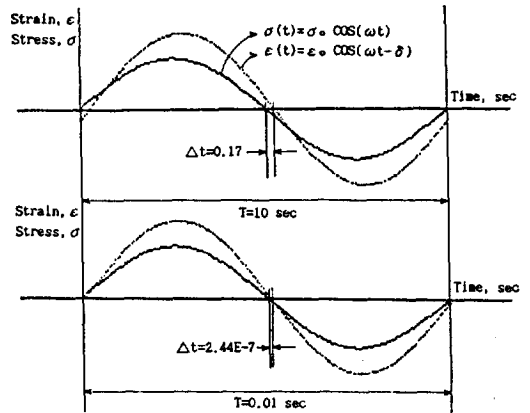


Fig. 3-8. Oscillating stress  $\sigma$ , strain  $\epsilon$  and phase angle  $\sigma$  of Japonica type rough rice at moisture content, 12.80% (w. b.).

粘性的인 要素로 인하여 變形率은 起振力인 應力에 대하여  $\delta$ 만큼 뒤진 상태에서 變化하게 된다.

그림(3-8)에서 나타낸 바와 같이 振動數가 0.1Hz와 100Hz일 때 變動時間(shift time)이 각각 0.17 및  $2.44 \times 10^{-7}$ 초로 變形率이 應力에 비하여 이 만큼 뒤진 상태에서 變化하는 것으로 나타났다.

#### IV. 結 論

벼에 대한 靜的인 크라이프實驗의 결과를 토대로 벼의 動的粘彈性 特性인 複素컴프라이언스, 動的컴프라이언스, 損失컴프라이언스 및 에너지損失率에 대하여 理論的으로 分析한 結果를 要約하면 다음과 같다.

- 가. 本 研究에서 展開한 理論式으로 벼의 靜的 크리이프 特性으로 부터 動的粘彈性 特性的 分析이 가능하였다.
- 나. 벼의 動的粘彈性 特性은 起振力の 振動數와 含水率의 變化에 많은 影響을 받았으며, 本 研究의 振動數 범위인  $10^{-3} \sim 10^3 \text{Hz}$ 에서 振動數가 증가할 수록 動的컴프라이언스 및 損失컴프라이언스 모두 감소하는 것으로 나타났다. 또한 位相角은 振動數에 따라 감소 하므로 振動數 0.1Hz이상에서는 複素컴프라이언스와 動的컴프라이언스가 거의 같은 크기로 나타났다.
- 다. 含水率이 증가할 수록 動的컴프라이언스 및 損失컴프라이언스 모두 증가하는 것으로 나타났다으며, 含水率이 낮은 경우는 一般系 벼에서, 含水率이 높을 때는 多收系 벼에서 動的컴프라이언스가 각각 더 크게 나타났다. 그리고 두 系統의 벼에서 含水率에 따른 損失컴프라이언스는 含水率이 낮은 경우는 一般系 벼에서, 含水率이 높은 경우는 多收系 벼에서 각각 더 크게 나타났다.
- 라. 일반적으로 振動數의 變化보다는 含水率의 變化가 動的컴프라이언스에 미치는 영향이 컸으며, 損失컴프라이언스에서는 振動數의 영향이 含水率의 영향 보다 큰 것으로 나타났다.
- 마. 振動數 및 含水率에 관계없이 動的컴프라이언스가 損失컴프라이언스 보다 작았으며, 이들의 차이는 振動數가 증가할 수록 더 크게 나타났다. 이것으로 미루어 보아 벼는 粘性的인 性質보다는 彈性的인 性質이 큰 粘彈性體라는 것을 알수 있다.
- 바. 에너지損失率은 含水率이 낮은 경우는 一般系 벼가 多收系 벼에 비하여 컸으며, 含水率 이 높은 경우는 그 반대현상으로 나타났다.

參 考 文 獻

1. Barnes, H. A., J. F. Hutton, and K. Walters. 1989. An Introduction to Rheology. Elsevier Science Publishers B. V. 37-54
2. Bourne, M. C. 1969. Two Kinds of Firmness in Apples. Food Technol. 23 : 59-65
3. Chattopadhyay, P. K., D. D. Hamann, and J. R. Hammerle. 1978. Dynamic Stiffness of Rice Grain. Trans. of the ASAE 21(3) : 786-789
4. Chattopadhyay, P. K., J. R. Hammerle, and D. D. Hamann. 1979. Time, Temperature, and Moisture Effects on the Failure Strength of Rice. Cereal Foods World 24(10) : 514-516
5. Christensen, R. M. 1982. Theory of Viscoelasticity. Academic Press.
6. Diener, R. G., F. H. Buelow and G. E. Mase. 1968. Viscoelastic Analysis of the Behavior and Properties of Cherry Bark and Wood under Static and Dynamic Loading. Trans. of the ASAE 11(3) : 323-330
7. Drake. B. 1962. Automatic Recording of Vibrational Properties of Foodstuffs. J. of Food Science 27 : 182-188
8. Finney, E. E. and K. H. Narris. 1968. Instrumentation for Investigating Dynamic Mechanical Properties of Fruits and Vegetables. Trans. of the ASAE 11(1) : 94-97
9. Finney, E. E. 1969. To Define Texture in Fruits and Vegetables. Agr. Eng. 50 : 462-470
10. Finney, E. E. 1969a. Objective Measurements for Texture in Foods. J. of Text. Studies 1 : 19-26
11. Finney, E. E. 1970. Mechanical Resonance within Red Delicious Apples and Its Relation to Fruit Texture. Trans. of the ASAE 13 (1) : 177-180
12. Finney, E. E. 1971. Dynamic Elastic Properties and Sensory Quality of Apple Fruit. J. of Texture Studies 2 : 62-74
13. Finney, E. E. 1972. Vibration Techniques for Testing Fruit Firmness. J. of Texture Studies 3 : 263-283

14. Clark, R. C. and V. N. M. Rao. 1978. Dynamic Testing of Flesh Peach Texture. *Trans. of the ASAE* 21(3) : 777-781
15. Findley, W. N., J. S. Lai, and K. Onaran. 1976. Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials. North-Holland Publishing Company. 50-130
16. Fridley, R. B., R. A. Bradley, J. W. Rumsey, and P. A. Adrian. 1968. Some Aspects of Elastic Behavior of Selected Fruit. *Trans. of the ASAE* 11(1) : 46-49
17. Hamann, D. D. 1969. Dynamic Mechanical Properties of Apple Fruit Flesh. *Trans. of the ASAE* 12(2) : 170-174
18. Hamann, D. D., L. J. Kushman, and W. E. Ballinger. 1973. Sorting Blueberries for Quality by Vibration. *J. of Amer. Soc. Hort. Sci.* 98(6) : 572-576
19. Hamann, D. D. and K. C. Diehl. 1978. Equation for the Dynamic Complex Uniaxial Compression Modulus of Spheroidal Shaped Foods. *Trans. of the ASAE* 21(5) : 1009 - 1014
20. Husain, A., K. K. Agrawal, T. P. Ojha, and N. G. Bhole. 1971. Viscoelastic Behavior of Soybeans due to Temperature and Moisture Content. *Trans. of the ASAE* 22(5) : 1219-1224
21. Jasper, R. F. and J. M. Blanshard. 1973. A Simple Instrument for the Measurement of the Dynamic Elastic Properties of Foodstuffs. *J. of Texture Studies* 4 : 269-277
22. Lee, F. F. and R. P. Rohrbach. 1983. Firmness Modeling and Rapid Relaxation Modulus Determination in Blue Berries. *Trans. of the ASAE* 26(6) : 1654-1660, 1664
23. McLaughlin, N. B. and R. E. Pitt. 1984. Failure Characteristics of Apple Tissue under Cyclic Loading. *Trans. of the ASAE* 27(2) : 311-320
24. Mohsenin, N. N. 1970. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Science Publishers, N. Y. : 88-277
25. Montejano-Gaitan, J. G., D. D. Hamann, and F. G. Giesbrecht. 1982. Vibration Sorting of Simulated Small Fruit. *Trans. of the ASAE* 25(6) : 1785-1791
26. Morrow, C. T. and N. N. Mohsenin. 1968. Dynamic Viscoelastic Characterization of Solid Food Materials. *J. of Food Science* 33 : 646-651
27. O'Brien, M. and R. B. Fridley. 1970. Measurement of Vibrations Related to Harvesting and Handling of Fruits and Vegetables. *Trans. of the ASAE* 13(4) : 870-873
28. Peleg, K. 1984. A Mathematical Model of Produce Damage Mechanisms. *Trans. of the ASAE* 27(1) : 287-293
29. Prasad, S. and C. P. Gupta. 1973. Behavior of Paddy Grains under Quasi Static Compressive Loading. *Trans. of the ASAE* 16(2) : 328-330
30. Rao, V. N. M., D. D. Hamann, and A. E. Purcell. 1976. Dynamic Structural Properties of Sweet Potato. *Trans. of the ASAE* 19(4) : 771-774
31. Rao, V. N. M., J. R. Hammerle and D. D. Hamann. 1974. Uniaxial Modulus of Sweet Potato Flesh using Various Types of Loading. *Trans. of the ASAE* 17(5) : 956-959
32. Rohrbach, R. P. and S. W. Glass. 1980. Driving Point Mechanical Impedance of Blue Berries. *Trans. of the ASAE* 23(2) : 298-302
33. Sitkei, Gy. 1986. *Mechanics of Agricultural Materials*. Elsevier Science Publishers : 114-143
34. Szczesniak, A. S. and Bourne, M. C. 1970. Sensory Evaluation of Food Firmness. *J. of Texture Studies* 1 : 52-60

35. Webb, N. B., V. N. M. Rao, G. V. Civile and D. D. Hamann. 1975. Texture Evaluation of Frankfurters by Dynamic Testing. J. of Texture Studies 6 : 329-342
36. Wen, P. R. and N. N. Mohsenin. 1970. Measurement of Dynamic Viscoelastic Properties of Corn Horny Endosperm. J. of Materials, JMLSA 5(4) : 856-867
37. Yamaguchi, S. et al. 1981. Basic Study on the Viscoelastic Properties of the Rice Kernal. J. of JSAM 43(1) : 83-88
38. 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 5(2) : 99-109
39. 金滿秀, 金聲來, 朴鍾民. 1990. 벼의 리올로지 특성(Ⅰ)-穀粒의 應力弛緩 -. 韓國農業機械學會誌 15(3) : 207-218
40. 金滿秀, 金聲來, 朴鍾民. 1990. 벼의 리올로지 특성(Ⅱ)-穀粒의 壓縮 크리이프 -. 韓國農業機械學會誌 15(3) : 219-229
41. 金滿秀, 朴鍾民. 1991. 週期的 反復荷重을 받는 벼의 複素彈性率. 韓國農業機械學會誌 16(3) : 263-271