

週期的 反復荷重을 받는 벼의 複素彈性率

Complex Modulus of Rough Rice Kernel under Cyclic Loading

金 滿 秀* 朴 鍾 民*

M. S. Kim J. M. Park

Summary

When grains is subjected to oscillating load, the dynamic viscoelastic behavior of the material will be describe the complex modulus of the material. The complex modulus and therefore the storage modulus, the loss modulus, and the phase angle for the sample should be obtainable with a given static viscoelastic property of the material under static load.

The complex relaxation moduli 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 analized.

The storage modulus of the rough rice kernel slightly increased with the frequency applied but at above the frequency of 0.1 Hz it was nearly constant with the frequency, and the loss modulus of the sample very rapidly decreased with increase in the frequency on those frequency ranges.

It was shown that the storage modulus and the loss modulus of the sample increased with decrease in grain moisture content. Effect of grain moisture content on the storage modulus of the sample was highly significant than effect of the frequency applied, but effect of the frequency on the loss modulus of the sample was more significant than effect of grain moisture content.

1. 緒 論

農産物이 外力을 받았을 때의 舉動을 量的으로 표시하는 것은 農産物の 取扱時 損傷 防止와 農産機械의 設計時 중요한 의미를 갖게 된다. 벼를 비롯하여 대부분의 農産物은 外力에 대하여 粘彈性 特性을 나타 내는 데, 이러한 農産物の 粘彈性 特性을 定量的으로 표현 하는 데는 이들 農産物이 外力을 받았을 때의 現象과 類似한 力學的 模型들이 이용되고 있다.

農産物の 壓縮實驗時 荷重을 載荷하는 방법으로는 準靜的(quasi-static) 荷重載荷 방법이 주로

이용되고 있으나, 이 방법은 荷重載荷速度에 한계가 있으며, 장시간의 實驗을 요하므로 農産物 자체의 生物學的 또는 生理學的 변화나 주위의 여건이 實驗에 많은 變數로 작용하여 實驗結果의 信賴性에 많은 問題點을 준다.

따라서 實驗時間을 短縮하며, 특히 農産物の 粘彈性 特性에서 가장 중요한 時間因子인 荷重載荷速度를 넓은 범위 까지 임의로 조절할 수 있으면서 時間의 효과를 보다 명확하게 알아볼 수 있는 實驗方法이 일정한 週기로 反復荷重을 가하는 動的 實驗方法인 것이다.^{1, 4, 6, 19)}

週期的인 反復荷重을 가하는 장치로서 주로

* 忠南大學校 農業機械工學科

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 파형을 합성시킨 Lissajous 타원을 통하여 動的 粘彈性 特性(dynamic viscoelastic property)을 分析하는 방법이 주로 이용되고 있다.^{2, 5, 8, 9, 16)}

Hamann⁸⁾은 사과속살을 원통모양으로 가공한 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로부터 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의 數의 으로 각각 증가 또는 감소하였다고 하였다. 그는 試片의 두께가 직경에 비하여 작을 때는 試片 자체의 파동의 효과는 무시할 수 있다고 하였다.

Rao等¹⁶⁾은 감자에 대하여 Hamann⁸⁾과 유사한 實驗裝置를 이용하여 40~240Hz의 振動數에 대하여 動的實驗을 실시한 결과, 振動數가 증가함에 따라 複素彈性係數의 크기($|E(i\omega)|$)는 증가하는 경향이었으나, 振動數 100~120Hz 범위에서는 매우 작은 값으로 測定되었는 데, 이것은 機器共振(apparatus resonance) 때문 이라고 하였으며, 位相角(phase angle)은 振動數에 따라 일률적인 경향이 없었다고 하였다.

Chattopadhyay等²⁾은 12~29% (d.b.) 범위의 含水率 4수준의 벼에 대하여 100~1000Hz의 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 Rao⁵⁾는 복숭아 속살에 대하여 成熟度別로 70~300Hz의 振動數로 動的實驗을 실시한 결과, 複素彈性係數($E(i\omega)$)는 잘 익은 복숭아 일수록 감소하였으나, 振動數에 따라 증가하였다

고 하였다. 이들은 이러한 動的實驗의 결과를 복숭아의 등속 정도를 定量化하는 데 응용하려고 시도 하였다.

이상의 研究 結果들은 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 가정하에서 수행된 研究 결과 들이다. 그러나 실제 의 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.

Sitkei¹⁹⁾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로하는 3項의 指數函數로 표시하였으며, 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 현상은 사과속살의 softening 현상 때문인 것으로 설명하였다.

靜荷重 하에서의 農産物의 粘彈性 特性인 應力弛緩 및 크리이프 特性들은 이들의 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 荷重 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.^{2, 6, 8)}

Chattopadhyay等²⁾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. Hamann⁸⁾도 이들과 유사한 방법으로 사과속살의 弛緩彈性係數를 계산한 바 있다.

따라서 本 研究에서는 金等^{21, 22, 23)}에 의하여 수행된 벼의 리올리지 特性에 대한 研究結果로부터 벼의 動的 粘彈性 特性을 究明하는 데 目的이 있으며, 그 구체적인 目的은 다음과 같다.

가. 靜的 粘彈性 特性으로 부터 動的 粘彈性 特性을 나타 내는 理論式을 유도하여,

나. 이 理論式으로 부터 벼의 含水率 變化가

動的 粘彈性 特性에 미치는 영향을 究明하며,

다. 振動數의 變化가 動的 粘彈性 特性에 미치는 영향을 究明하는 데 있다.

II. 理論的 考察

物體에 一定한 크기의 振幅을 가진 起振力 (exciting source)이 一定한 週期로 작용 한다면 物體 자체의 固有振動數(natural frequency)에 의한 過渡振動(transient vibration)과 起振力에 의한 定常狀態 振動(steady-state vibration)이 복합적으로 일어난다. 그러나 物體 속에 작은 減衰(damping)要素가 있더라도 過渡振動은 곧 사라지고 物體는 起振力이 계속되는 한 定常狀態 振動을 하게 된다.

起振力으로 式(2-1)과 같은 一定한 週期로 反復되는 變形率의 函數로 주어지면,

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \cos(\omega t) \dots\dots\dots (2-1)$$

여기서, ϵ_0 = 起振力의 振幅 mm/mm

ω = 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 實數部分만을 複素數 形式으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\epsilon(t) = \text{Re} [\epsilon_0 \exp(i\omega t)] \rightarrow \epsilon_0 \exp(i\omega t) \dots\dots\dots (2-2)$$

여기서, $i = \sqrt{-1}$

그림(2-1)에 나타낸 것과 같이 週期的인 反復變形率에 대하여 반응하는 物體의 應力은 變形率의 파형 보다 δ 만큼 앞선 상태에서 起振力인 變形率과 같은 振動數로 振動할 것이다.

즉, 起振力에 반응하는 應力의 變化는 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \dots\dots\dots (2-3)$$

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_0 \exp[i(\omega t + \delta)] \\ &= [\sigma_0 \exp(i\delta)] \exp(i\omega t) \\ &= \sigma^* \exp(i\omega t) \dots\dots\dots (2-4) \end{aligned}$$

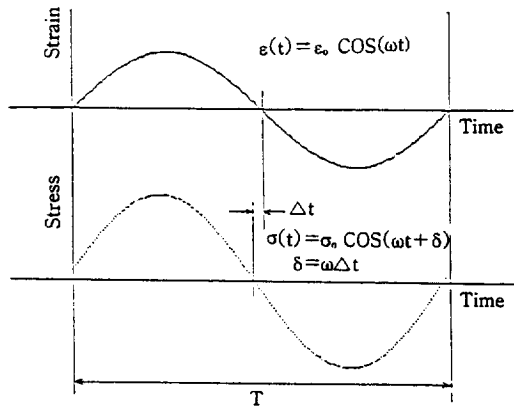


Fig 2-1. Oscillating stress σ , strain ϵ , and phase angle δ (shift time Δt)

여기서,

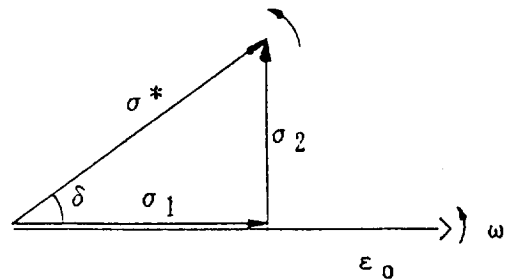
σ_0 = 應力의 振幅, MPa.

ω = 應力의 角振動數, rad/sec

δ = 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 δ 만큼 앞선 상태에서 반응하는 應力의 振幅은 複素數 σ^* 가 된다.

이들의 振幅 關係를 그림으로 나타 내면 다음과 같다.



式(2-4)에서 σ^* 는 位相角 δ 와 振幅 σ_0 를 모두 포함하기 때문에 이것을 複素應力의 振幅 (complex stress amplitude) 이라 하며, 이것을 다시 Euler의 公式을 이용하여 전개하면 다음과 같이 된다

$$\sigma^* = \sigma_0 \exp(i\delta) = \sigma_0(\cos\delta + i \sin\delta) \dots\dots\dots (2-5)$$

정의에 의하여 複素彈性率(complex modulus) $E(i\omega)$ 는 다음과 같다.

$$E(i\omega) = \frac{\sigma^*}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} (\cos\delta + i \sin\delta) = E_1 + i E_2$$

$$= |E(i\omega)| \exp(i\delta)$$

..... (2-6)

여기서,

E_1 = 動的彈性率, MPa.

E_2 = 損失彈性率, MPa.

δ = E_1 과 E_2 사이의 位相角, rad

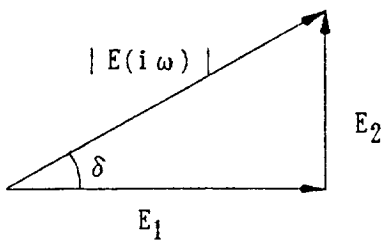
式(2-6)에서 實數部分 E_1 은 起振力인 變形率과 같은 位相에 있으며, 이것을 動的彈性率(storage modulus)이라 하고, 虛數部分 E_2 는 起振力の 位相과 수직방향에 있으며 이것을 損失彈性率(loss modulus) 이라한다.

複素彈性率의 크기(absolute modulus)는 式(2-6)으로 부터 다음과 같이 계산된다.

$$|E(i\omega)| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \sigma_0 / \epsilon_0$$

..... (2-7)

式(2-6)을 벡터 다이어그램으로 표시하면 다음과 같다.



즉, $TAN \delta = E_2/E_1 = \sigma_1 / \sigma_1$ (2-8)

動的彈性率과 損失彈性率은 다음과 같이 각각 계산된다.

$$E_1 = |E(i\omega)| \cos\delta$$

$$= |E(i\omega)| (1 + \tan^2 \delta)^{-1/2}$$

..... (2-9)

$$E_2 = |E(i\omega)| \sin\delta$$

$$= |E(i\omega)| \tan(1 + \tan^2 \delta)^{-1/2}$$

..... (2-10)

III. 靜的粘彈性 特性으로 부터 動的粘彈性 特性的 理論 展開

物體의 靜的粘彈性 特性은 다음과 같은 Burger's 模型으로 잘 설명될 수 있으며, 이 模型의 構造式은 式(3-1)과 같다.^{1, 4, 6, 13, 19)}

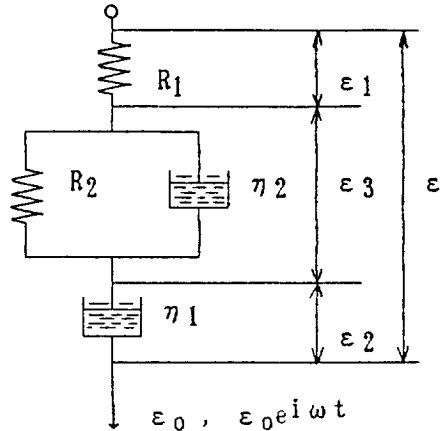


Fig 3-1. Burger's model

$$\sigma + p_1\dot{\sigma} + p_2\ddot{\sigma} = q_1\dot{\epsilon} + q_2\ddot{\epsilon}$$

..... (3-1)

여기서,

$$p_1 = (\eta_1/R_1) + (\eta_1/R_2) + (\eta_2/R_2)$$

$$p_2 = (\eta_1 \eta_2) / (R_1 R_2)$$

$$q_1 = \eta_1$$

$$q_2 = (\eta_1 \eta_2) / R_2$$

그림(3.1)의 Burger's 模型의 크리이프 舉動을 나타 내는 대수방정식은 式(3-2)의 初期條件을 이용하여 式(3-1)의 2계 微分方程式을 풀면 구할 수 있다.

$$t=0 \text{일때, } \epsilon = \epsilon_1 = \sigma_0 / R_1, \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$$

$$t=0 \text{일때, } \dot{\epsilon} = (\sigma_0/\eta_1) + (\sigma_0/\eta_2)$$

..... (3-2)

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{R_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{R_2} [1 - \exp(-R_2 t / \eta_2)]$$

..... (3-3)

Burger's 模型에 일정한 크기의 振幅을 가진 反復荷重이 작용 한다면, 式(2-2) 및 (2-4)로부터 다음과 같은 式(3-4)가 유도된다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma^* \exp(i\omega t) \\ \dot{\sigma} &= i\omega \sigma^* \exp(i\omega t) \\ \ddot{\sigma} &= -\omega^2 \sigma^* \exp(i\omega t) \\ \varepsilon &= \varepsilon_0 \exp(i\omega t) \\ \dot{\varepsilon} &= i\omega \varepsilon_0 \exp(i\omega t) \\ \ddot{\varepsilon} &= -\omega^2 \varepsilon_0 \exp(i\omega t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

式(3-4)를 式(3-1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma^*(1 + p_1 i \omega - p_2 \omega^2) = \varepsilon_0(q_1 i \omega - q_2 \omega^2) \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

$$\begin{aligned} E(i\omega) &= \frac{\sigma^*}{\varepsilon_0} \\ &= \frac{[p_1 q_1 \omega^2 - q_2 \omega^2(1 - p_2 \omega^2)] + i[p_1 q_2 \omega^3 + q_1 \omega(1 - p_2 \omega^2)]}{p_1^2 \omega^2 + (1 - p_2 \omega^2)^2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

式(3-6)과 (2-16)을 비교 함으로서 Burger's 模型의 動的彈性率 E_1 과 損失彈性率 E_2 를 각각 구할 수 있다.

$$E_1 = \frac{p_1 q_1 \omega^2 + q_2 \omega^2(1 - p_2 \omega^2)}{p_1^2 \omega^2 + (1 - p_2 \omega^2)^2} \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

$$E_2 = \frac{p_1 q_1 \omega^3 + q_1 \omega(1 - p_2 \omega^2)}{p_1^2 \omega^2 + (1 - p_2 \omega^2)^2} \quad \dots\dots\dots (3-8)$$

또한, 위의 두 式 즉, 式(3-7) 및 (3-8)을 이용하여 式(2-8)로부터 Burger's 模型의 位相角 δ 를 결정할 수 있다.

IV. 結果 및 考察

가. 含水率 및 振動數가 動的彈性率에 미치는 影響

우리나라의 主要 벼 品種인 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 다음 表에서 보는 바와같이 Burger's 模型으로 나타내었다.

表 4-1.의 Burger's 模型의 상수값들을 이용하여 式(3-7)로부터 振動數의 變化에 따른 動的彈性率(storage modulus)을 계산한 결과를 그림(4-1)에 圖示하였다.

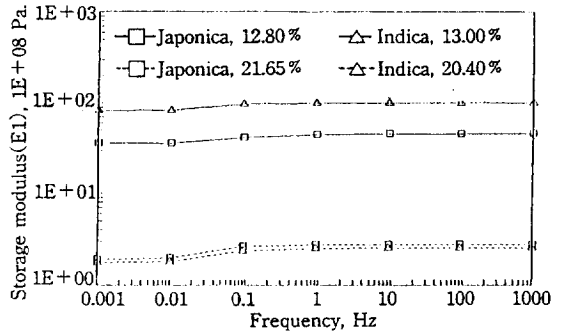


Fig 4-1. Effect of frequency and moisture content on the storage modulus of rough rice kernel.

Table 4-1. 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 ²
		R ₁ , Mpa	R ₂ , Mpa.	τ _r	η ₁ , Mpa. S	η ₂ , 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 動的彈性率 (storage modulus)은 振動數가 約 10Hz 까지는 대체로 증가하는 경향이었으나 그 이상의 振動數에서는 거의 일정한 값으로 나타 났다. 이는 收穫 후 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 動的彈性率의 變化가 거의 없다는 것을 의미한다. 그러나 같은 振動數에서도 含水率이 動的彈性率에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 나타 났다.

含水率이 낮을 수록 動的彈性率은 크게 나타 났는데, 이는 振動數가 크고, 含水率이 낮을 수록 벼는 매 週期當 벼가 받은 에너지를 벼의 彈性的인 要素에 貯藏할 수 있는 능력이 크다는 것을 의미 하므로, 彈性的인 舉動을 한다는 것을 알 수 있다.²⁾ 이와같이 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 나타 나 있다.^{3, 7, 10, 15, 20~23)}

Husain¹⁰⁾, Yamaguchi²⁰⁾, 金等²²⁾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 Gupta¹⁵⁾, Chattopadhyay³⁾, 金等²¹⁾은 含水率이 낮을 수록, 荷重載荷速度가 증가할 수록 벼의 生物體降伏點 및 破壞強度가 증가하는 것으로 보고 한바 있다. 한편 Fridley⁷⁾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 적을 수록 彈性理論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 $3.6 \times 10^9 \sim 4.5$

10^9 Pa., 多收系 벼가 約 $8.2 \times 10^9 \sim 9.9 \times 10^9$ 으로 多收系가 一般系 벼에 비하여 더 彈性的인 性質을 나타 내었으나, 含水率이 높을 때는 一般系 벼가 約 $1.9 \times 10^8 \sim 2.7 \times 10^8$ Pa., 多收系 벼가 約 $1.8 \times 10^8 \sim 2.5 \times 10^8$ Pa.로 그 반대현상 이었으며, 두 系統間의 차이는 매우 적었다. 이 처럼 벼의 두 系統 사이에 含水率이 높고 낮음에 따라 서로 반대현상으로 나타 난 것은 벼의 組織成

分の 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 動的彈性率에 미치는 영향이 큰 것으로 나타 났다.

나. 含水率 및 振動數가 損失彈性率에 미치는 影響

그림(4-2)에는 週期的인 起振力에 대한 物體가 받는 에너지중 材料의 粘性的인 要素로 인하여 熱 등의 다른 에너지로 전환되는 정도를 표시하는 損失彈性率(loss modulus)을 含水率 및 振動數의 變化에 따라 圖示 하였으며, 그림(4-3)에는 벼의 處理加工過程에서 예상되는 振動數의 범위인 20~790Hz에 대하여 損失彈性率의 變化를 상세히 나타 내었다.

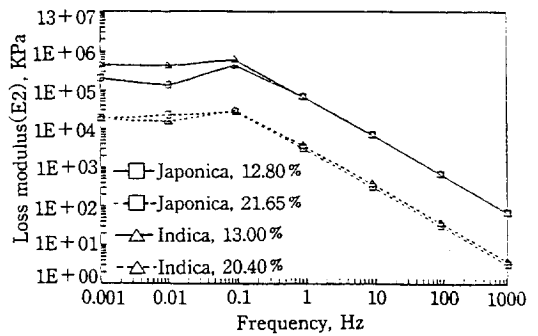


Fig 4-2. Effect of frequency and moisture content on the loss modulus of rough rice kernel.

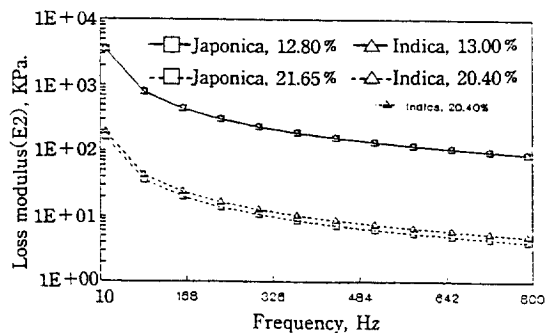


Fig 4-3. Effect of frequency and moisture content on the loss modulus of rough rice kernel at the frequency range from 10Hz to 790Hz.

그림(4-2) 및 (4-3)에서 보는 바와같이 벼의 損失彈性係數는 낮은 振動數에서는 약간 감소하다 증가하였으나, 振動數 0.1Hz 이상에서는 급격히 감소하는 것으로 나타 났으며, 벼의 두 系統間의 차이는 뚜렷하지 않았다. 含水率의 變化 보다는 振動數의 變化가 損失彈性率에 미치는 영향이 큰 것으로 나타 났다. 이 그림에서도 역시 벼는 含水率이 낮을 수록, 振動數가 클 수록 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 관계 없이 動的彈性率 이 損失彈性率 보다 컸으며,²⁸⁾ 이들의 차이는 振動數가 증가할 수록 크게 나타 났다. 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.²³⁾

그림(4-4)에는 含水率 및 振動數에 따른 複素彈性係數(complex modulus)의 크기를 도시한 그림이다. 振動數가 증가함에 따라 대체로 증가하는 경향이었으며,^{5, 16)} 含水率이 낮을 때는 一般系 벼가, 含水率이 높을 때는 多收系 벼가 다소의 큰 값을 나타 내었다. 振動數의 變化 보다는 含水率의 變化가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타 났다. 이 複素彈性係數의 크기는 振動數 10Hz 이하에서는 動的彈性率(E_1)에 비하여 큰 값이었으나, 그 이상의 振動數에서는 거의 같은 크기로 나타 났는데, 이러한 현상은 動的彈性率은 10Hz 이상에서 거의 變化가 없는 반면, 損失彈性率은 급격히 감소 하므로 位相角이 큰 쪽으로 감소한 때문이다.

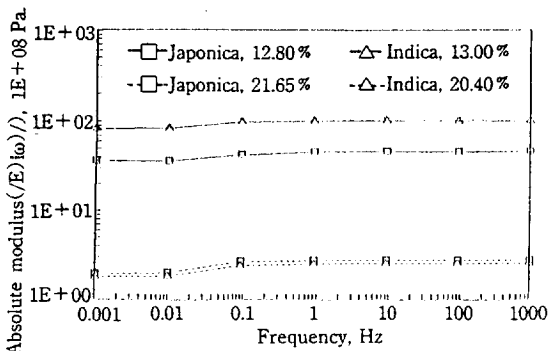


Fig 4-4. Effect of frequency and moisture content on the absolute modulus of rough rice kernel.

다. 含水率 및 振動數가 位相角에 미치는 影響

만약 物體가 完全彈性體 라면 起振力에 대응하는 應力의 變化도 起振力과 같은 位相을 똑같이 따를 것이다. 그러나 農産物은 다소의 水分을 含有하고 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 δ 만큼의 차이를 두고 起振力과 같은 週期로 變化하게 된다.

그림(4-5)에는 앞 절의 式(2-8), (3-7) 및 (3-8)로 부터 振動數 및 含水率의 變化에 따른 位相角 δ 를 圖示한 그림이다.

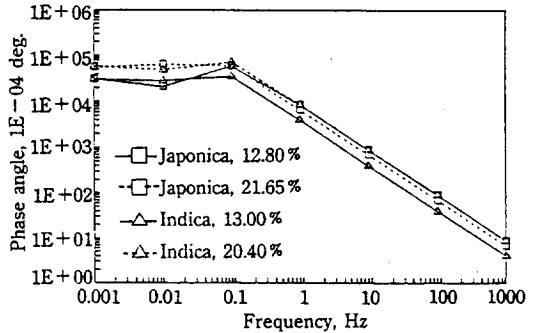


Fig 4-5. Effect of frequency and moisture content on the phase angle of rough rice kernel.

位相角 δ 는 振動數가 증가할 수록 대체로 감소하는 경향이었으며, 작은 振動數의 범위에서는 含水率이 높을 수록 약간 크게 나타 났으나, 振動數 0.1Hz 이상에서는 含水率 이나 벼의 系統間에 뚜렷한 경향이 없었다. 含水率 보다는 振動數의 變化가 位相角에 미치는 영향이 큰 것으로 나타 났다.

그림(4-6)에서 보는 바와같이 振動吸收係數 (mechanical loss) 즉, $TAN \delta$ 는 物體의 減衰容量 (damping capacity)을 표시하는 값으로 振動數가 클 수록 작은 값으로 계산되었는데, 이는 振動數가 클 수록 週期的인 反復荷重의 매 週期當 物體의 彈性的인 要素에 貯藏되는 에너지 보다는 粘性的인 要素로 인하여 熱 등으로 轉換되

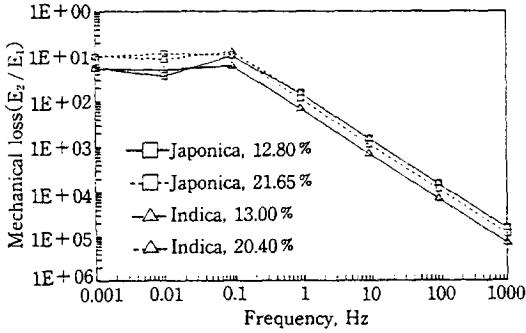


Fig 4-6. Effect of frequency and moisture content on the mechanical loss of rough rice kernel.

는 에너지가 작기 때문인 것으로 思料된다. 이와 같은 결과는 그림(4-7)의 起振力과 이에 대응하는 應力의 變化에서도 잘 알 수 있다.

理論上으로 벼가 完全彈性體 라면 두 過程은 振幅만을 달리 하면서 같은 位相에서 變化할 것이다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 벼 자체의 粘性的인 要素로 인하여 應力은 起振力인 變形率에 대하여 δ 만큼 앞선 상태에서 變化하게 된다. 그림(4-7)에서 보는 바와 같이 振動數가 0.1 Hz와 100Hz일 때 變動時間(shift time)이 각각 0.17 및 2.44×10^{-7} 초로 應力이 變形率 보다 이 만큼 앞서 變化하는 것으로 나타 났다.

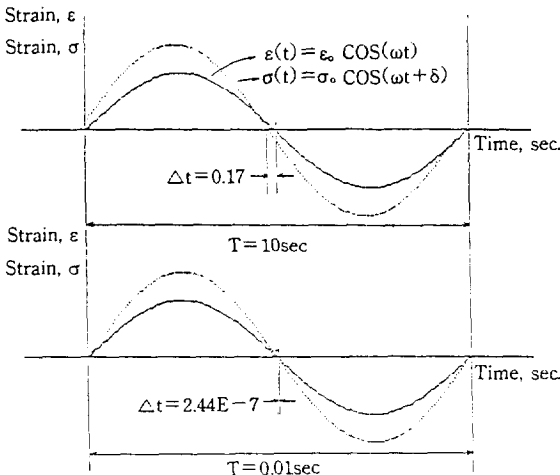


Fig 4-7. Oscillating stress σ , strain ϵ and phase angle δ of Japonica type rough rice at moisture content, 12.80% (w. b.).

V. 結 論

벼의 리올리지 特性에 대한 研究 結果를 토대로 벼의 動的粘彈性 特性에 관하여 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 靜的粘彈性 特性으로부터 動的粘彈性 特性의 分析이 가능하였다.

나. 벼의 動的粘彈性 特性은 起振力의 振動數와 含水率의 變化에 많은 影響을 받았으며, 本 研究의 振動數 범위인 $10^{-3} \sim 10^3$ Hz에서 振動數가 증가할 수록 動的彈性率은 대체로 증가 하였으나, 損失彈性率은 감소하는 것으로 나타 났다. 또한 位相角은 振動數에 따라 감소 하므로 振動數 10Hz 이상에서는 複素彈性係數와 動的彈性率은 거의 같은 크기로 나타 났다.

다. 含水率이 낮을 수록 動的彈性率 및 損失彈性率 모두 증가하는 것으로 나타 났으며, 含水率이 낮을 경우는 多收系 벼에서, 含水率이 높을 때는 一般系 벼에서 動的彈性率에 각각 더 크게 나타 났다. 그러나 두 系統의 벼에서 含水率에 따른 損失彈性率의 차이는 뚜렷하지 않았다.

라. 일반적으로 振動數의 變化 보다는 含水率의 變化가 動的彈性率에 미치는 影響이 컸으며, 損失彈性率에서는 振動數의 影響이 含水率의 影響 보다 큰 것으로 나타 났다.

마. 振動數 및 含水率에 관계 없이 動的彈性率에 損失彈性率 보다 컸으며, 이들의 차이는 振動數가 증가할 수록 크게 나타 났다. 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.

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. Chattopadhyay, P. K., D. D. Hamann, and J. R. Hammerle. 1978. Dynamic stiffness of rice grain. Trans. of the ASAE 21(3): 786~789

3. 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
4. Christensen, R. M. 1982. *Theory of viscoelasticity*. Academic Press.
5. Clark, R. C. and V. N. M. Rao. 1978. Dynamic testing of flesh peach Texture. *Trans. of the ASAE* 21(3) : 777~781
6. Findley, W. N., J. S. Lai, and K. Onaran. 1976. *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*. North-Holland Publishing Company. 50~130
7. 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
8. Hamann, D. D. 1969. Dynamic mechanical properties of apple fruit flesh. *Trans. of the ASAE* 12(2) : 170~174
9. 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
10. 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
11. 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
12. McLaughlin, N. B. and R. E. Pitt. 1984. Failure characteristics of apple tissue under cyclic loading. *Trans. of the ASAE* 27(2) : 311~320
13. Mohsenin, N. N. 1970. *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Science Publishers, N. Y. : 88~277
14. Peleg, K. 1984. A mathematical model of produce damage mechanisms. *Trans. of the ASAE* 27(1) : 287~293
15. Prasad, S. and C. P. Gupta. 1973. Behavior of paddy grains under quasi static compressive loading. *Trans. of the ASAE* 16(2) : 328~330
16. 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
17. 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
18. Rohrbach, R. P. and S. W. Glass III. 1980. Driving point mechanical impedance of blue berries. *Trans. of the ASAE* 23(2) : 298~302
19. Sitkei, Gy. 1986. *Mechanics of agricultural materials*. Elsevier Science Publishers : 114~143
20. Yamaguchi, S. et al. 1981. Basic study on the viscoelastic properties of the rice kernel. *J. of JSAM* 43(1) : 83~88
21. 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
22. 金滿秀, 金聲來, 朴鍾民. 1990. 벼의 리올로지 特性(Ⅰ) - 穀粒의 應力弛緩 -. *韓國農業機械學會誌* 15(3) : 207~218
23. 金滿秀, 金聲來, 朴鍾民. 1990. 벼의 리올로지 特性(Ⅱ) - 穀粒의 壓縮 크리이프 -. *韓國農業機械學會誌* 15(3) : 219~229