

벼의 리올러지 特性(I)⁺

— 穀粒의 應力弛緩 —

Rheological Properties of Rough Rice(I)

— Stress Relaxation of Rough Rice Kernel —

金 滿 秀*, 金 聲 來*, 朴 鍾 民*

M. S. Kim, S. R. Kim, J. M. Park

Summary

Grains display characteristics of both elastic bodies and viscous fluids when they are subjected to mechanical treatments in harvesting, handling, and processing. This viscoelastic behavior of grains when mechanically stressed must be fully understood to establish maximum machine efficiency and have a minimum degree of grain damage and the highest quality of the final product.

The studies were conducted to examine the effect of the moisture content, the loading rate and the initial deformation on the stress relaxation behavior of whole kernel of rough rice, and develop the rheological model to represent its stress relaxation behavior.

The following results were obtained from the study.

1. Moisture content had the greatest influence on the initial portion of the relaxation curve. With elapsing time the lower moisture content resulted in the lower residual stress for the Japonica-type rough rice and vice versa for the Indica-type rough rice. But within the ranges of moisture content tested, the degree of stress relaxation per unit strain on the Indica-type rough rice was a little higher than those on the Japonica-type rough rice.

2. The slower loading rate resulted in less initial stress. The decreasing trend of residual stress for all the samples tested with increasing loading rate was shown.

3. The higher initial deformation for all the samples resulted in less initial stress. The increasing of amount of stress relaxation per unit strain with increase of initial stress indicated that viscoelastic properties of rough rice depended not only upon duration of load applied but also initial stress applied. This means that rough rice is nonlinear viscoelastic material.

4. The compression stress relaxation properties of rough rice kernel can be described by a generalized Maxwell model representing by the Maxwell elements.

1. 緒 論

生物體나 食品에 一般 工業材料를 分析하는 力學의 法則들을 적용시켜 이들의 物理的 特性을 分析하려는 研究가 여러 研究者들에 의하여 시도되어

왔으며, 農産物의 경우 力學的 特性(mechanical properties) 만을 研究 對象으로 하다가 최근에는 農産物이 外力을 받았을 때 荷重, 變形 및 時間과의 關係를 다루는 리올러지 特性(rheological properties)에도 많은 관심을 가지게 되었다.

⁺ 本 研究는 産學協同財團의 研究費 支援(1989-1990)으로 遂行되었음.

* 忠南大學校 農科大學 農業機械工學科

이러한 農産物의 리올리지 特性을 究明하는 데는 應力弛緩實驗, 크라이프實驗 및 衝擊實驗 등이 있으며, 특히 벼에 대한 이러한 實驗의 결과들은 搗精機의 搗精收率 向上을 위한 精白室의 壓力調節 범위나 穀物 搬送裝置의 損傷粒 감소를 위한 設計條件 등 각종 農産機械의 設計 및 합리적인 作動條件을 설정하는 데 중요한 資料가 될 뿐 아니라, 搗精에 적합한 벼의 條件을 설정하는 데도 이용할 수 있을 것이다.

Husain 等¹⁴⁾은 含水率 13~24.5% (d. b.) 범위의 벼를 加工하지 않는 상태로 판위에 누여 놓고 荷重載下速度 0.5~20 mm/min 와 初期變形量 0.22~0.42mm 범위에서 벼의 荷重弛緩實驗을 실시한 결과 初期變形量이나 含水率 보다는 荷重載荷速度가 荷重弛緩에 미치는 영향이 컸다고 보고하였다.

Yamaguchi 등^{22,23)}은 含水率 10~35% (d.b.) 범위의 玄米를 길이, 폭 및 두께 방향으로 각각 圓筒모양으로 加工하여 여러 수준의 溫度에서 壓縮弛緩彈性係數 및 剪斷弛緩彈性係數를 측정하여 이들을 溫度, 含水率 및 時間의 함수로 나타내었으며, 荷重을 가하는 방향에 따라 이들 物理量에서는 뚜렷한 차이가 없었다고 하였다. 이들은 또한 荷重載荷速度 0.2 mm/min, 溫度 293°K에서 含水率 11% (d. b.)의 玄米는 初期變形率 1% 이내 또는 初期應力 19.62 MPa. 이하에서는 線型粘彈性體로서 舉動 한다고 하였다.

Prasad 等¹⁷⁾은 벼를 평판위에 안정한 상태로 누여 놓고 荷重載荷速度 0.5~11 mm/min 범위의 4 수준에 대하여 準靜的인 壓縮實驗을 실시하여 生物體 降伏點 및 最大壓縮強度 등을 測定하였는데, 이들 物理量들은 荷重載荷速度가 증가함에 따라 증가하였고, 含水率이 증가함에 따라서는 감소하는 경향이었다고 하였다.

Chattopadhyay 等³⁾은 玄米를 圓筒모양으로 加工하여 荷重載荷速度 0.127~2.450 mm/min 범위에서 荷重載荷速度가 증가할수록 破壞強度는 모든 含水率 수준 및 溫度수준에서 증가하였으며, 含水率 및 溫度가 증가함에 따라 감소하였다고 하였다.

그 밖의 벼, 玄米 이외에 이와 관련된 研究로서는, Zoreb 等²⁴⁾은 완두콩에 대하여 荷重弛緩實驗을 실시한 결과 含水率 보다는 荷重載荷速度가 荷重弛緩

에 미치는 영향이 컸다고 하였으며, 荷重載荷速度가 느린 경우에는 荷重載荷와 동시에 荷重弛緩이 일어나 결과적으로 荷重載荷速度가 빠른 경우보다 荷重弛緩이 더 느리게 일어난다고 보고하였다. Clevenger 等⁷⁾도 사과껍질에 대하여 引張應力弛緩實驗을 실시하여 Zoreb 等²⁴⁾과 같은 결과를 얻었다.

Silberstein 等²⁰⁾은 땅콩의 弛緩彈性係數를 구하기 위하여 Hertz의 原理를 적용하였으며, 溫度와 相對濕도를 변화시키면서 壓縮實驗을 실시한 후 溫度 및 含水率의 變動係數(Shift factor)를 고려한 땅콩의 弛緩彈性係數를 3 要素의 一般化 Maxwell 模型으로 나타내었다.

Chen 等⁵⁾은 사과를 圓筒모양으로 加工하여 25~150mm의 높이에서 낙하하여 衝擊을 가하는 순간의 速度에 상당하는 빠른 荷重載荷速度 42,000~102,000 mm/min 범위로 應力弛緩實驗을 실시하여 4 要素의 Maxwell 模型으로 나타내었는 바, 荷重載荷速度는 4번째의 Maxwell 要素의 應力弛緩時間, 즉 가장 짧은 應力弛緩時間인 τ_4 에 가장 큰 영향을 미치며, 대체로 荷重載荷速度가 증가함에 따라, 3, 4번째의 Maxwell 要素의 應力弛緩時間인 τ_3 및 τ_4 는 감소하였다고 하였으며, 應力弛緩 현상을 정확히 測定 하기 위해서는 荷重載荷速度는 빨라야 한다고 하였다.^{7,9,24)} De Baerdemaeker 等⁸⁾도 사과 속살이 대하여 圓筒으로 加工하여 25.4 mm/min의 荷重載荷速度로 應力弛緩 實驗을 실시한 결과를 一般化 Maxwell 模型으로 나타내었다.

Finney 等⁹⁾은 감자를 대상으로 荷重載荷速度 25.4~508 mm/min의 범위의 여러 수준에 대하여 應力弛緩實驗을 실시한 결과 정확한 應力弛緩 현상을 測定하기 위해서는 가능한한 짧은 時間에 필요한 應力까지 가하여야 하며, 荷重載荷速度는 荷重載荷 후 5초이내에 應力弛緩에 가장 큰 영향을 미친다고 하였다. 이는 또 應力弛緩 時間은 材料과 받은 初期應力을 얼마나 빨리 消散시키느냐를 나타내는 척도이며, 應力을 빨리 消散시키는 材料가 같은 荷重을 받을 시 物理的 損傷을 덜 입는다고 하였다. Rao 等¹⁸⁾도 감자에 대하여 弛緩彈性係數를 測定하였는데, 初期變形率 10% 이내에서는 초기의 應力水準에 영향을 받지않는 線型粘彈性的인 舉動을 나타 내었다고 하였다.

Herum 等¹³⁾은 콩을 加工하지 않은 상태로 여러 溫度 수준 및 含水率 수준에서 荷重載荷實驗을 실시한 결과를 Hertz의 式을 이용하여 弛緩彈性係數를 계산한 다음, 이를 2 要素의 一般化 Maxwell 模型으로 나타내었다. 이는 또 溫度 32.2°C, 含水率 16.5% (d.b.)에서의 實驗值를 기준으로 각각 溫度變動係數(temperature shift factor) 및 含水率變動係數(moisture shift factor)를 계산하여 溫度-含水率-時間이 弛緩彈性係數에 미치는 영향을 종합적으로 究明하였는 바, 弛緩彈性係數와 콩을 破碎하는 데 필요한 에너지와는 비례관계에 있고, 콩을 破碎하는 速度가 일정할 때 含水率 1%가 에너지에 미치는 영향은 9°C의 溫度變化의 영향에 상당한다고 하였다.

Gyasi 等¹⁴⁾은 감귤의 속살 및 껍질을 일정한 모양으로 加工하여 100 mm/min의 荷重載荷速度로 應力弛緩實驗을 실시하였는 데, 試料에 壓縮荷重을 가할 때 그 힘의 방향과 수직 방향으로 試料가 變形되는 것을 억제하였을 때가 억제하지 않았을 때보다 應力弛緩의 초기에는 비슷한 경향을 보이다가 時間이 지남에 따라 서서히 進行되었다고 하였다.

Hammerle 等¹²⁾도 옥수수 穀粒을 얇은 판으로 만들어 引張應力弛緩 實驗을 실시하여 溫度와 含水率의 變動係數를 인자로 하는 弛緩彈性係數를 제시하였으며, 이 계수를 乾燥過程 中の stress crack 形成을 分析하는 데 가장 중요한 인자로 보고한 바있다.

Mohsenin 等¹⁶⁾은 飼料作物에 대하여 실시한 應力弛緩實驗의 결과와 飼料作物의 wafering 시 필요한 에너지와의 관계를 研究하였으며, 一般化 Maxwell 模型의 각 항에서 단위 應力弛緩時間 당의 應力(σ_n/τ_n)을 應力弛緩 초기의 弛緩 速度를 표시하는 데 사용하였다.

Chang 等²⁾은 여러가지 穀物の 먼지에 대하여 應力弛緩實驗을 실시하였는 데, 應力弛緩이 분당 0.2 KPa로 될 때까지 소요되는 時間은 대략 15분 정도였으며, 應力弛緩時間은 일정한 變形率을 유지하는데 혹은 壓縮된 이후 材料가 받은 應力을 消散시키는 척도로서 壓縮成形(pelleting)과 같은 壓縮過程에서 필요한 時間을 결정해 주며, 減碎彈性係數 E_1 , E_2 및 E_3 는 壓縮時는 機械에 필요한 壓力과 體

積을 예측하는 데 이용될 수 있다고 하였다.

이상의 研究 결과들은 外國에서 수행된 것들이고, 國內의 研究 결과들을 살펴보면, 高等²⁵⁾은 벼와 玄米에 대하여 準靜인 壓縮實驗을 수행하여 含水率, 彈性係數, 生物體降伏點, 最大壓縮強度 및 變形量에 미치는 영향을 分析하여 이들 物理量들을 含水率을 因子로 하는 回歸方程式을 유도한 바 있다.

金 等²⁶⁾은 含水率 13~25% (w.b.) 범위의 벼에 대하여 荷重載荷速度 1.25 mm/min \pm 50% 범위의 두 수준에 대하여 벼의 生物體降伏強度, 極限強度 및 生物體降伏點 등을 測定한 결과, 含水率이 증가함에 따라 이들 物理量들은 대체로 감소하는 경향이었고, 生物體降伏點에서의 變形量은 約 0.18~0.26 mm 범위로 보고한 바 있다.

許²⁷⁾는 벼 줄기의 리올러지 特性에 관한 研究에서 荷重載荷速度에 따라 應力弛緩速度는 증가하였으며, 殘留應力은 감소하는 것으로 보고하였다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 外國에서는 일찍부터 여러 農産物을 대상으로 비교적 많은 研究 결과들이 보고되어 왔으나, 國內外를 막론하고 벼에 관한 研究는 아주 미약한 실정이다. 더구나 農産物은 形像 자체가 불균일하여 接觸面積의 계산이 어려운 관계로 穀物을 圓筒모양으로 加工^{3,5,7,8,11,18,22,23)}하거나 판위에 가장 안정한 상태로 堆어놓고^{9,13,14,17,24,25)} 荷重載荷實驗을 실시한 것이 대부분인데, 試料를 加工한 實驗方法으로는 穀物の 應力弛緩 特性을 정확히 알아본다는 것은 힘든 일이다.

따라서 本 研究에서는 穀粒을 加工하지 않은 원래의 평판위에 堆어놓고 時間에 따라 穀粒이 받은 荷重에 대한 應力弛緩實驗을 수행하였으며, 本 研究의 目的은 含水率, 荷重載荷速度 및 初期形量이 벼의 應力弛緩 舉動에 미치는 영향을 究明하며, 벼의 品種別 및 系統別로 각 變數들의 조합에서 應力弛緩模型을 開發하는 데 있다.

2. 材料 및 方法

가. 實驗材料

本 實驗의 供試穀物로는 一般系 벼 2品種(아끼

바레, 대칭) 과 多收系 벼 2品種(삼강, 원풍)으로 收穫 時期에 있는 벼를 포장에서 직접 손으로 收穫하여 2.8 mm 체에 통과한 穀粒을 本 實驗의 實驗材料로 사용하였다.

나. 實驗裝置 및 方法

本 實驗의 實驗裝置의 개략도는 그림 1과 같으며, 원하는 荷重載荷速度를 얻기 위하여 Vickers 硬度計를 약간 개조하여 變速 모타와 2대의 減速機를 연결시켜 cross head의 速度를 조절하였고, cross

head의 상승에 의하여 穀粒이 일정한 수준으로 變形 되었을 때 V/S motor control box에 의하여 cross head를 멈추게 하고 穀粒이 받는 荷重은 時間에 따라 load cell로 감지되어 amplifier를 거쳐 나오는 analog signal을 A/D convertor에 의하여 digital signal로 전환하여 computer의 hard disk와 모니터상으로 동시에 入出力될 수 있도록 하였다. 實驗室內의 氣溫과 相對濕度는 가급적 15℃와 45% 내외로 유지되도록 하였다.

本 實驗에 사용된 주요 計測機들의 諸元은 表 1과 같다.

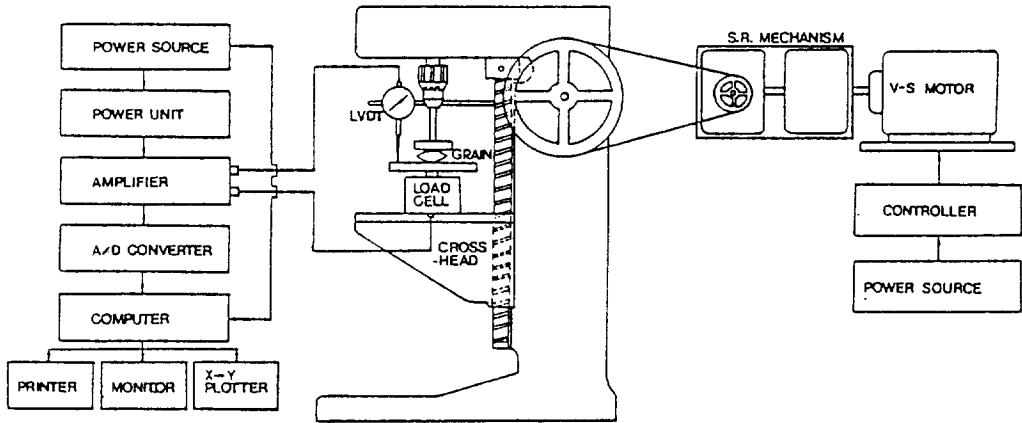


Fig. 1. Schematic and block diagram of compression test apparatus.

Table 1. Specification of compression test apparatus and measuring instruments.

Item	Specification	Remarks
Computer	32 bit, CPU 2MB memory (65 MB Hard disk)	Model, 386
A/D convertor	16 channels	PCL-712
Amplifier	6 channels, 2 V excitaion	Kyowa, CO-50ET
Load cell	200 kg capacity	Kyowa, LU-200KE

含水率 범위는 13~25% (w.b.) 범위 내에서 2수준을 택하였고, 荷重載荷速度(loading rate)는 ASAE Standard S368.1¹⁰⁾에 근거하여 1.25 mm/min ± 50% 범위에서 0.664와 1.673 mm/min 두 수준으

로 하였다. 그리고 初期變形量은 벼의 生物體降伏點에서의 變形量²⁶⁾ 보다 작은 범위내에서 0.08 mm 와 0.15 mm 두 수준으로 하였으며, 반복 穀粒數는 각 變數의 조합에서 15~20 粒으로 하였다.

3. 結果 및 考察

가. 應力弛緩 模型

穀粒의 粘彈性 舉動을 理論的으로 精確히 究明하기란 불가능하므로 이들 현상과 力學的으로 유사한 模型과 實驗을 통하여 그 현상을 分析하는 方法이 사용되고 있는데, 대부분의 研究 結果들이 그림 2의 (a)와 같이 maxwell 要素를 2개^{13,24)} 3개^{2a, 14,16, 20,22,27)} 혹은 4개^{5,9)}로 병렬 연결시킨 一般化 Maxwell 模型으로서 應力弛緩 현상을 나타내고 있다.

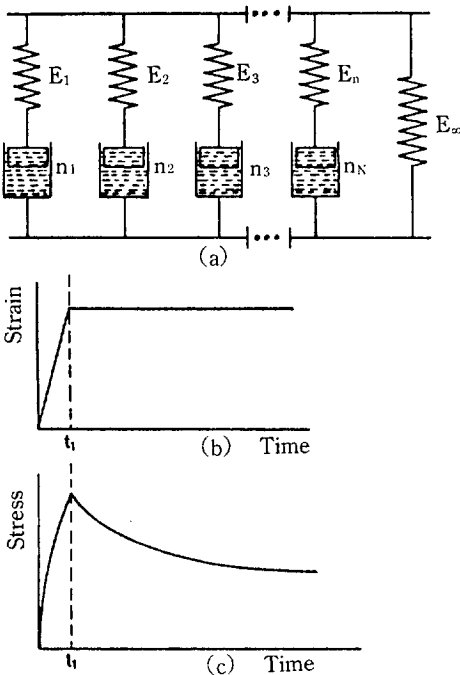


Fig. 2. Generalized Maxwell model consisting of n Maxwell elements in parallel (a), ramp-step-strain loading function (b), and characteristic stress relaxation as a function of time after initial strain (c).

만약 $t=t_1$ 에서 穀粒이 받은 變形率 ϵ_0 가 일정하게 유지된다면, 이 模型의 應力은 式(1)과 같이 표시되며,

$$\sigma = \sigma_\infty + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \dots + \sigma_n \dots \dots \dots (1)$$

n번째 Maxwell 要素의 應力은 $\sigma_n = \epsilon_0 E_n \exp(-t/$

$\tau_n)$ 과 같이 표시되므로, 임의의 時間에 있어서 應力弛緩 式 $\sigma(t)$ 는 式(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma(t) = \epsilon_0 [E_\infty + E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) + E_3 \exp(-t/\tau_3) + \dots + E_n \exp(-t/\tau_n)] \dots \dots \dots (2)$$

- 여기서, ϵ_0 : 時間 $t=t_1$ 에서의 初期變形率
- τ_n : n 번째 Maxwell 要素에서의 應力弛緩時間, sec
- E_n : n 번째 Maxwell 要素에서의 減衰 彈性係數, MPa.
- E_∞ : 時間 $t=\infty$ 에서 平衡彈性係數, MPa.
- σ_∞ : 時間 $t=\infty$ 에서의 平衡應力, MPa.

式(2)는 일정한 變形率에 해당되는 應力弛緩을 나타내는 式으로서 實驗조건이 같지 않은 상태나 品種間的 應力弛緩 현상을 좀더 定量的으로 比較하는 데는 어려움이 있다. 이런 경우 初期變形率 ϵ_0 를 제거시킨 式(4)와 같이 단위 變形率 당의 應力弛緩 즉, 弛緩彈性係數(relaxation modulus)로 표시하면 편리하다.

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0} \dots \dots \dots (3)$$

$$E(t) = E_\infty + E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) + E_3 \exp(-t/\tau_3) + \dots + E_n \exp(-t/\tau_n) \dots \dots (4)$$

時間이 무한히 지난 후 초기에 받은 應力이 완전히 소멸되지 않는다면 그림 2의 (a)에서 보는 바와 같이 彈性係數 E_∞ 를 갖는 스프링 要素를 다른 Maxwell 要素들과 같이 병렬로 연결시켜 주어야 한다. 그러나 農産物에 따라서는 무한한 時間이 지난 후 初期應力이 완전히 소멸되지 않는 경우가 많으며^{2, 13)} 벼와 같이 비교적 단단한 穀物에서는 초기에 받은 應力이 거의 소멸되는 것으로 보고되어 있다^{14, 22,23)}.

一般化 Maxwell 模型은 穀粒이 荷重을 받았을 때 穀粒의 應力弛緩 舉動을 定性的(qualitatively)으로 나타내 주며, Maxwell 要素의 수가 많을수록 실제의 현상에 가깝지만 이용에 불편이 따르므로 수식

은 간단하면서 舉動을 정확히 나타내 줄 수 있는
 模型을 선정하는 것이 바람직할 것이다.

應力弛緩實驗을 통하여 얻은 弛緩曲線으로 부터
 應力弛緩函數의 각 계수를 결정하는 데는 주로 連

續殘差法이 이용되었으며^{9,16,24)}, Chen 等^{4,5)}, Cleve-
 nger 等⁷⁾ 이들 外에도^{8,17)} 여러 研究者들이 각기 나
 름대로의 解析의인 방법으로 각 계수들을 구하였
 다. 그러나 현재는 computer의 발달로 computer 프

Table 2. Parameter values of generalized Maxwell model for rough rice kernel.

Variety	M.C.* % (w.b.)	L.R.* (mm/min)	I.D.* (mm)	Decay Modulus(MPa.)			Relaxation time(sec)			I.S.* (mm/mm)	r ²
				E ₁	E ₂	E ₃	τ ₁	τ ₂	τ ₃		
Akibare	14.0	0.664	0.08	363.1751	86.5282	115.1243	3372.3452	56.0918	3.7795	0.0351	0.9995
			0.15	220.6422	48.2552	70.0866	2981.6172	49.0820	3.6865	0.0658	0.9997
		1.673	0.08	421.3082	101.2492	147.0929	3089.7522	58.3351	3.9351	0.0354	0.9996
			0.15	198.9119	44.9975	77.9347	2467.6404	45.9797	3.5207	0.0663	0.9998
	21.0	0.664	0.08	216.0206	45.3620	54.9250	3850.2708	49.0093	3.5664	0.0341	0.9997
			0.15	95.0465	21.3329	26.6874	5604.9805	55.3996	3.9522	0.0639	0.9993
		1.673	0.08	221.4205	45.1934	65.2287	3176.9910	57.6877	4.2166	0.0341	0.9998
			0.15	103.3258	23.4801	35.7691	3441.0662	53.0785	3.7817	0.0342	0.9996
Daecheong	14.4	0.664	0.08	392.1768	91.2016	124.1189	2795.2688	53.0785	3.7817	0.0342	0.9996
			0.15	199.5666	46.5689	65.3283	2940.1414	52.7373	3.9087	0.0642	0.9996
		1.673	0.08	422.2018	96.9353	134.0358	2852.3218	54.7425	4.2493	0.0343	0.9997
			0.15	203.2750	46.7091	70.1736	2912.1458	51.7853	4.0707	0.0642	0.9997
	23.4	0.664	0.08	156.3534	34.5220	35.2956	3890.7314	56.5675	4.0775	0.0331	0.9996
			0.15	75.6488	17.3677	18.8493	4268.7686	62.6048	4.4115	0.0613	0.9996
		1.673	0.08	168.9685	35.6474	44.8850	3888.4507	65.3584	4.6515	0.0332	0.9994
			0.15	81.3423	17.7892	22.4792	4120.2002	61.7038	4.4771	0.0618	0.9996
Samkang	13.6	0.664	0.08	634.6804	131.5702	190.6854	4318.5771	51.7337	3.8029	0.0387	0.9995
			0.15	317.4564	65.9252	97.3628	4153.2158	49.8731	3.6601	0.0715	0.9996
		1.673	0.08	666.1710	134.1770	210.0751	4292.9888	50.1815	3.8067	0.0386	0.9996
			0.15	384.9394	73.5285	126.0109	4532.2417	50.2273	3.6135	0.0717	0.9995
	24.1	0.664	0.08	192.8091	48.7362	60.3859	3519.3259	69.2429	4.0719	0.0365	0.9993
			0.15	101.7076	26.1571	32.8787	3382.5559	54.8734	3.9668	0.0692	0.9996
		1.673	0.08	211.5779	51.9007	71.7772	3259.0276	55.1822	4.1448	0.0365	0.9995
			0.15	102.4611	26.5902	39.9361	3297.0178	52.2809	3.8682	0.0684	0.9995
Wonpung	13.1	0.664	0.08	416.0249	83.6476	120.1560	3287.3589	52.9940	3.6962	0.0371	0.9996
			0.15	202.9850	42.1486	63.8820	3290.3697	53.1454	3.6162	0.0696	0.9995
		1.673	0.08	462.3515	96.68702	149.2639	3439.8052	55.9585	3.8495	0.0371	0.9996
			0.15	205.3819	43.0489	68.7066	3316.2017	50.4986	3.9311	0.0693	0.9995
	18.0	0.664	0.08	224.6821	58.0222	75.7685	2416.4131	53.8608	3.7221	0.0362	0.9997
			0.15	120.2540	31.1487	41.8783	2569.1709	50.4990	0.0674	0.0674	0.9997
		1.673	0.08	228.6330	62.0712	89.8270	2532.7610	57.2227	4.0601	0.0361	0.9997
			0.15	114.0235	30.2080	43.0550	2695.5752	53.1210	4.0076	0.0672	0.9997

*M.C. = Moisture Content, L.R. = Loading Rate, I.D. = Initial Deformation, I.S. = Initial Strain

로그그래프에 의한 非線型 回歸分析法로 각 要素의 계수들을 결정하고 있다^{2,11,19,20,27}.

本 研究에서는 벼의 穀粒이 받은 初期應力이 800 초 후 約 50% 정도 소멸되는 것으로 보아 무한한 時間이 경과 후 완전히 소멸되는 것으로 가정하고, 式 (4)로부터 스프링 要素를 제거한 式(5)와 같은 3 要素 Maxwell 模型으로서 벼의 단위 變形率 당의 應力弛緩 舉動을 나타내었으며, 각 要素의 계수들은 computer에 의한 非線型 回歸分析法로 결정하였다.

接觸面積의 計算 式은 Hertz의 理論 式과 彈性係數의 정의로부터 유도하여 사용 하였다^{15,21,26}.

$$E(t) = E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) + E_3 \exp(-t/\tau_3) \dots \dots \dots (5)$$

實驗을 통하여 얻은 벼의 應力弛緩 資料로부터 3 要素의 Maxwell 模型과 4 要素의 Maxwell 模型으로 구분하여 각 계수들을 구하였으나 4 要素 Maxwell 模型의 경우 決定係數(r^2)는 약간 증가하였지만 式이 복잡하고 3 要素의 Maxwell 模型으로도 벼의 應力弛緩 舉動을 충분히 나타낼 수 있었으므로 表 2에는 3 要素 Maxwell 模型의 각 계수들의 값을 표시하였다.

나. 含水率이 應力弛緩 舉動에 미치는 影響

穀粒을 일정한 모양으로 加工하게 되면 基本物性이 변할 염려가 있으므로 가능한 한 원상태로 實驗에 사용하는 것이 바람직한 것이다. 그러나 農産物은 形像 자체가 불균일하여 일정한 斷面積을 얻을 수 없으므로 接觸面積을 계산하여 斷面積으로 사용하여야 한다. 따라서 本 研究에서는 穀粒을 전혀 加工하지 않은 상태로 판위에 누어 놓고 일정한 變形量까지 壓縮시킨 뒤, 그 變形量을 유지하는 데 필요한 荷重을 時間에 따라 測定하고 그 점에서의 接觸面積으로 나누어 應力으로 표시하였다.

일반적으로 生物體는 外力에 대하여 生物體 자체의 內的要因은 물론 外的要因에 따라 舉動이 크게 변화하는 데, 內的要因 중 含水率의 영향이 가장 크므로 많은 研究者들은 含水率과 穀物의 物理的 特性과의 관계에 대하여 주로 研究를 하였다^{3,13,14,16,17,22~26}.

含水率 변화에 따른 벼의 각 品種別 단위 變形率 당의 應力弛緩 현상을 그림 3, 4 및 5에 나타 내었다.

벼의 모든 品種에서 應力弛緩은 荷重載荷 후 수 초 사이에 급격히 일어나며, 時間이 경과함에 따라 차츰 줄어들음을 알 수 있고, 대체로 含水率 約 13.5% (w.b.) 일때 벼가 받은 初期應力の 約 50%가 弛緩되는 데는 約 800초 정도 소요됨을 알 수 있다.

벼 4 品種에서 含水率이 모두 동일하지 않기 때

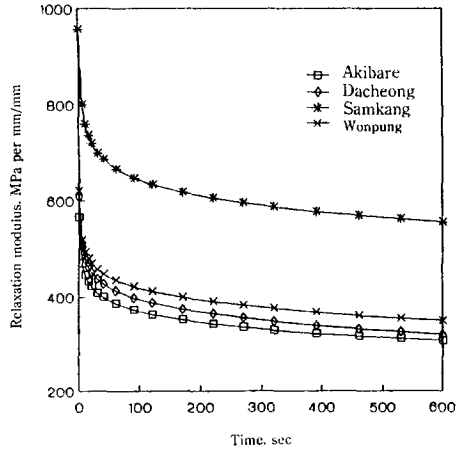


Fig. 3. Relaxation modulus curves for rice kernel at 0.664 mm/min loading rate, at 0.08 mm initial deformation, and at low level of moisture content.

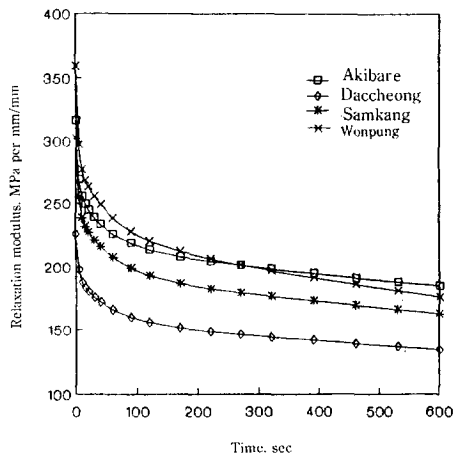


Fig. 4. Relaxation modulus curves for rice kernel at 0.664 mm/min loading rate, at 0.08 mm initial deformation, and at high level of moisture content.

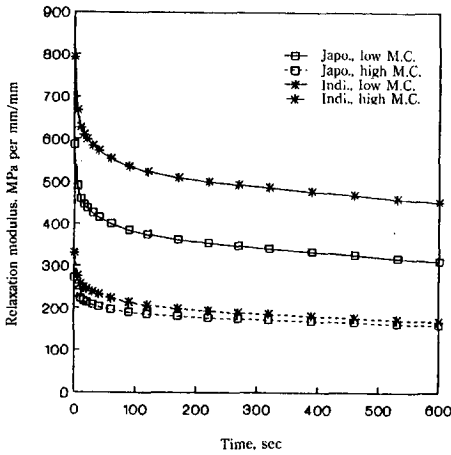


Fig. 5. Effect of moisture content on relaxation modulus behavior of rough rice kernel at 0.664 mm/min loading rate and 0.08 mm initial deformation.

문에 이들을 직접 비교할 수는 없지만 비교적 비슷한 습수율의品種끼리 비교하였을 때 그림 3, 4 및 5에서 보는 바와 같이 습수율이 높고 낮음에 관계없이 多收系 벼가 一般系 벼에 비하여 本研究의 全時間대에서 단위 變形率 당의 應力弛緩量이 더 컸으며, 일정한 時間 후의 殘留應力은 表 3에서 보는 바와 같이 습수율이 낮은 경우는 多收系 벼가 一般系 벼에 비하여 더 컸으나, 습수율이 높은 경우는 一般系 벼가 多收系 벼보다 더 컸다. 이와같은 현상은 두 系統의 벼에 같은 變形率로 變形 시켰다 하더라도 작용하는 初期應力이 多收系 벼가 一般系 벼에 비하여 월등히 컸기 때문으로 思料된다.

Mohsenin 等¹⁶⁾, 許²⁷⁾는 Maxwell 模型의 各要素에서의 單位 應力弛緩 時間當 減衰應力, 즉 σ_n/τ_n 의 값을 應力弛緩 強度(stress relaxation intensity)로 표시 하였는데, 이 값은 初期應力이 같을 경우 應力弛緩 舉動의 빠르고 느린 정도를 나타내는 수치로서 이 값이 크면 應力弛緩이 빨리 일어난다. 그러나 本研究에서와 같이 初期應力이 같지 않을 경우는 이 값으로서 應力弛緩 速度를 비교할 수 없고 단지 일정한 時間에서의 弛緩되는 應力의 量만을 의미하게 된다. 여기서는 단위 變形率量 應力弛緩 強度인 E_1/τ_1 , E_2/τ_2 및 E_3/τ_3 는 습수율의 높고 낮음에 관계없이 多收系 벼가 一般系 벼에 비하여 컸으며, 특히 應力弛緩 초기의 應力弛緩 強度를 표

시하는 E_3/τ_3 의 차이가 가장 컸다. 이러한 경향은 그림 3, 4 및 5에서도 잘 나타나 있다.

一般系 벼의 경우 습수율이 낮은 경우가 높은 경우보다 應力弛緩이 더 빨리 진행되나, 多收系 벼에서는 오히려 습수율이 높은 경우가 낮은 경우에 비하여 應力弛緩이 더 빨리 진행되었다. 이와같은 결과는 表 3의 殘留應力에 대한 비교에서도 잘 나타났는데, 600초 후의 初期應力에 대한 殘留應力 비율이 一般系 벼의 경우 습수율이 낮은 경우 약 51.7~53.8%, 습수율이 높은 경우는 약 53.4~59.3%, 多收系 벼의 경우 습수율이 낮을 때 약 53.9~57.7%, 습수율이 높을 때 약 47.4~53.8%로 서로 반대 현상으로 나타났다. 그러나 벼의 두 系統 모두에서 습수율이 낮은 경우가 높은 경우에 비하여 단위 變形率 당의 應力弛緩 量은 全時間대에서 컸다.

일반적으로 초기에 받은 應力을 빨리 消散시키는 材料가 같은 外力에 대하여 物理的 損傷을 덜 입는 것으로 알려져 있다. 벼가 주로 加工 處理되는 낮은 습수율의 경우를 비교하면 一般系 벼가 多收系 벼에 비하여 초기에 받은 應力을 더 빨리 消散시켜 같은 外力에 대하여 物理的 損傷을 덜 입을 것으로 思料된다.

다. 荷重載荷速度가 應力弛緩 舉動에 미치는 影響

여러 研究者들에 의하여 荷重載荷速度는 應力弛緩에 가장 큰 影響을 미치는 것으로 보고되고 있으며, 荷重載荷速度가 느릴 경우 荷重載荷時 많은 時間이 소요되므로 荷重載荷와 동시에 應力弛緩이 일어나 정확한 應力弛緩 현상을 파악할 수 없으므로 荷重載荷速度는 가능한 한 빨라야 한다고 하였다.^{5,7,9,14,24)}

벼의 두 系統에 있어서 습수율이 높은 경우와 낮은 경우의 荷重載荷速度에 따른 단위 變形率 당의 應力弛緩을 그림 6과 7에 각각 나타내었다.

그림 6 및 7에서 보는 바와 같이 같은 試料와 비슷한 습수율 수준에서도 荷重載荷速度에 따라 初期應力의 차이가 나타나는 것은 荷重載荷速度가 느릴 경우 應力弛緩이 동시에 일어나 더 적은 初期應力이 載荷되어 荷重載荷 직후 應力弛緩速度도 더 느

Table 3. Residual stress after given time loading and relaxation intensity per unit strain.

Variety	M.C.* % (w.b.)	L.R.* (mm/min)	I.D.* (mm)	R.S.* after given time			R.I.* per unit strain		
				5 sec.	100 sec.	600 sec.	E ₁ /τ ₁	E ₂ /τ ₂	E ₃ /τ ₃
Akibare	14.0	0.664	0.08	83.6	65.0	53.8	0.1077	1.5427	30.4601
			0.15	83.2	64.8	53.2	0.740	0.9832	19.0014
		1.673	0.08	82.3	63.7	51.8	0.1164	1.7248	37.3797
			0.15	80.1	60.9	48.5	0.0806	0.9786	22.1161
	21.0	0.664	0.08	85.4	68.4	58.4	0.0561	0.9256	15.4007
			0.15	85.3	67.7	59.7	0.0170	0.3851	6.7525
		1.673	0.08	85.1	67.1	55.2	0.0697	0.7817	15.4695
			0.15	82.7	63.9	53.4	0.0300	0.4410	9.1357
Daechyeong	14.4	0.664	0.08	83.6	64.6	52.1	0.1403	1.7182	32.8209
			0.15	83.4	64.2	52.2	0.0679	0.8830	16.7136
		1.673	0.08	84.4	64.8	52.4	0.1480	1.7708	31.5430
			0.15	83.0	63.5	51.7	0.0698	0.9020	17.2387
	23.4	0.664	0.08	87.6	70.0	59.3	0.0402	0.6103	8.6562
			0.15	87.3	69.2	58.8	0.0177	0.2774	4.2728
		1.673	0.08	87.0	69.1	58.0	0.0435	0.5454	9.64865
			0.15	86.3	68.2	57.8	0.0197	0.2883	5.0209
Samkang	13.6	0.664	0.08	84.1	66.8	57.7	0.1470	2.5432	50.1421
			0.15	83.4	66.1	57.0	0.0764	1.3219	26.6011
		1.673	0.08	83.5	66.2	57.3	0.1552	2.6738	55.1856
			0.15	81.4	64.1	55.7	0.0849	1.4639	34.8723
	24.1	0.664	0.08	84.5	65.1	53.8	0.548	0.8090	14.8299
			0.15	82.9	64.1	53.0	0.0301	0.4767	8.2885
		1.673	0.08	83.6	63.7	52.5	0.0647	0.9405	17.3174
			0.15	81.3	61.1	50.5	0.0311	0.5086	10.3242
Wongpung	13.1	0.664	0.08	84.3	67.2	55.9	0.1266	1.5784	32.5080
			0.15	83.2	65.8	54.7	0.0617	0.7931	17.6655
		1.673	0.08	83.4	56.7	54.8	0.1344	1.7278	38.7749
			0.15	83.1	64.6	53.9	0.0619	0.8723	17.4777
	18.0	0.664	0.08	82.8	62.7	48.9	0.0930	1.0773	20.3564
			0.15	82.2	62.1	49.3	0.0468	0.6168	1.1451
		1.673	0.08	81.8	60.6	47.4	0.0903	1.0847	22.1243
			0.15	82.1	61.1	48.7	0.0423	0.5687	10.7433

*M.C.=Moisture Content, L.R.=Loading Rate, I.D.=Initial Deformation, R.S.=Residual Stress, R.I.=Relaxation Intensity

리기 때문인 것으로 판단된다.

대체로 本研究의 含水率 범위인 13~25% (w.b.) 범위 내에서 荷重載荷速度가 빠를수록 단위 變形率 당의 應力弛緩量이 컸으며, 또한 表 3에서 보는 바와 같이 일정한 時間 후의 殘留應力도 더 적어

應力弛緩 速度도 더 빠르다는 것을 알 수 있다.

단위 變形率 당의 應力弛緩 強度를 표시하는 E₁/τ₁, E₂/τ₂ 및 E₃/τ₃ 모두 荷重載荷 速度가 빠를수록 증가하였으며, 특히 應力弛緩 초기의 舉動과 전체적인 應力弛緩 舉動에 큰 영향을 미치는 E₃/τ₃

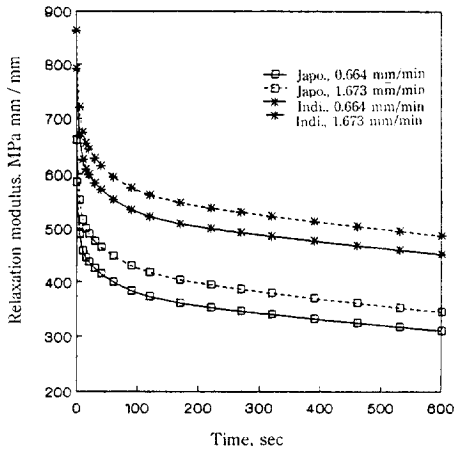


Fig. 6. Effect of loading rate on relaxation modulus behavior of rough rice kernel at 0.08 mm initial deformation and low level of moisture content.

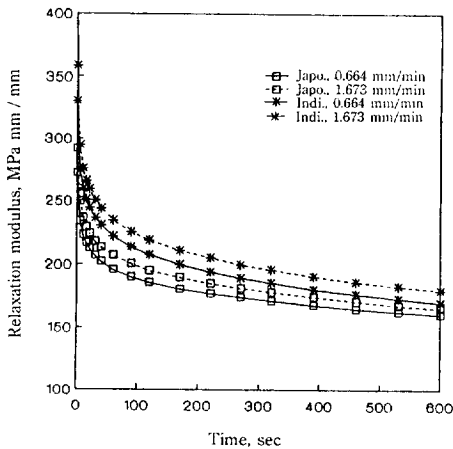


Fig. 7. Effect of loading rate on relaxation modulus behavior of rough rice kernel at 0.08 mm initial deformation and high level of moisture content.

의 값에서 가장 큰 차이를 나타내었다. 대체로 습수율 13~25% (w.b.) 범위내에서 荷重載荷速度 0.664 mm/min 일때 E_3/τ_3 의 값이 一般系 벼가 약 32.8~8.7, 多收系 벼가 약 50.1~14.8, 荷重載荷速度 1.673 mm/min 일때 一般系 벼가 약 37.4~9.6, 多收系 벼가 약 55.2~17.3으로 나타났다.

라. 初期變形量이 應力弛緩 舉動에 미치는 影響

穀粒의 應力弛緩 實驗時에는 일정한 變形量까지 壓縮한뒤 그 變形量을 유지하는 데 필요로 하는 荷重을 時間에 따라 測定해야 하는 데, 이때 初期變形量은 生物體 降伏點에서의 變形量 이하에서 결정되어야 한다. 本 研究에서는 金等²⁶⁾의 研究 결과인 含水率 13~25% (w.b.) 범위에서 벼의 生物體 降伏點에서의 變形量인 0.18~0.26 mm 범위 보다 작은 0.08 mm와 0.15 mm 두 수준을 택하였다.

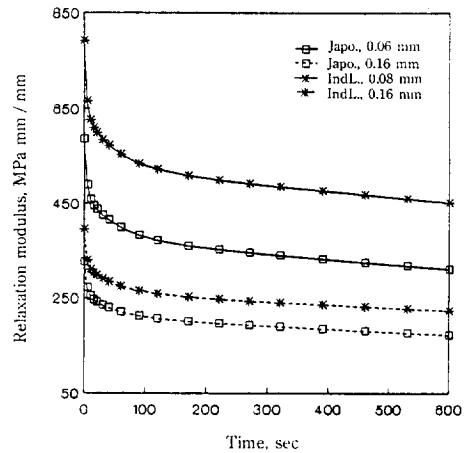


Fig. 8. Effect of initial deformation on relaxation modulus behavior of rough rice kernel at 0.664 mm/min loading rate and low level of moisture content.

습수율이 낮은 경우와 높은 경우에 있어서의 初期變形量의 變化에 따른 단위 變形率 당의 應力弛緩의 舉動을 그림 8 및 9에 각각 나타내었다.

대부분의 農産物은 應力 작용시 應力-變形率의 比가 단지 時間 뿐만 아니라 초기에 가한 應力 수준에도 영향을 받는다 비線型 粘彈性體 (nonlinear viscoelastic materials)로서 舉動하는데, 이러한 農産物의 非線型 粘彈性 舉動은 應力弛緩 實驗 및 크리이프 實驗을 통하여 잘 알아볼 수 있다. 그러나 형상자체가 不均一한 農産物의 경우는 應力弛緩 實驗時 초기의 變形量을 증가시키더라도 반드시 初期變形量에 상당하는 應力은 증가하지 않기 때문에 應力弛緩 實驗을 통하여 農産物의 非線型 粘彈性

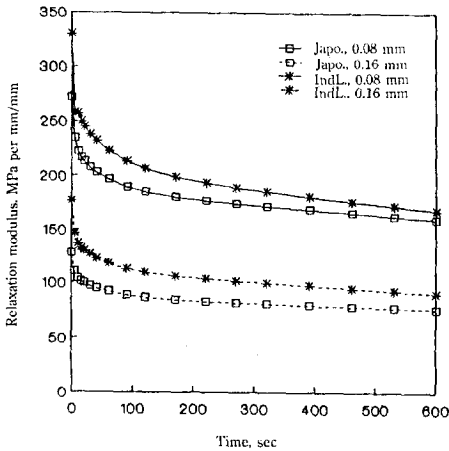


Fig. 9. Effect of initial deformation on relaxation modulus behavior of rough rice Kernel at 0.664 mm/min loading rate and high level of moisture content.

특성을 이해한다는 것은 매우 어려운 일이다. 벼와 같은 납적한 모양의穀物에서는 初期變形量を 증가 시킴에 따라 형성되는 接觸面積의 크기는 급격히 증가하기 때문에 작용되는 應力은 初期變形量の 증가에 따라 감소하는 것이다.

本 研究에서는 初期變形量を 0.08 mm에서 0.15 mm로 증가 시킴에 따라 작용되는 應力은 감소하였다. 작용하는 初期應力이 증가함에 따라 含水率의 높고 낮음에 관계 없이 단위 變形率 당의 應力弛緩이 全 時間대에서 더욱 크게 弛緩되었으며 특히, 應力弛緩 초기에 더욱 급하게 弛緩되었다. 이와 같은 결과는 表 3에서도 잘 나타났는데, 단위 變形率 당의 應力弛緩 強度를 표시하는 E_1/τ_1 , E_2/τ_2 및 E_3/τ_3 모두 初期應力이 증가함에 따라 증가하였으며, 특히 應力弛緩 初期의 弛緩強度를 표시하는 E_3/τ_3 에서 가장 큰 차이가 있었다. 이러한 결과로부터 벼의 應力弛緩 舉動은 단지 時間 뿐만 아니라 초기에 작용한 應力의 수준에도 영향을 받는 非線型 粘彈性體라는 것을 알 수 있다. 그러나 農産物의 非線型 粘彈性 舉動은 크리이프 實驗을 통하여 더 잘 설명될 수 있을 것이다^{10,22,23)}.

5. 結 論

벼 4 品種을 供試하여 荷重載荷速度 0.664 mm/

min 및 1.673 mm/min의 2 수준, 含水率 13~25% (w.b.) 범위의 2수준과 生物體降伏點에서의 變形量 이내인 0.08 mm와 0.15 mm의 두 수준의 初期變形量에 대하여 각 變數의 조합에서 벼의 應力弛緩 實驗한 결과를 要約하면 다음과 같다.

가. 含水率의 變化가 荷重載荷 후 應力弛緩 초기에 미치는 影響은 뚜렷하였으며, 時間이 경과함에 따라 一般系 벼에서는 含水率이 낮은 경우보다 應力弛緩이 더 빨리 진행되나, 多收系 벼에서는 오히려 含水率이 높은 경우가 낮은 경우가 높은 경우보다 應力弛緩이 더 빨리 진행되는 것으로 나타났다. 그러나 含水率 13~25% (w.b.) 범위에서 多收系 벼가 一般系 벼에 비하여 단위 變形率 당의 應力弛緩량은 더 크게 나타났다.

나. 荷重載荷速度가 느릴수록 더 적은 初期應力이 載荷되었으며, 應力弛緩의 速度도 더 완만하게 나타났다. 벼의 두 系統 모두에서 荷重載荷速度가 증가함에 따라 殘留應力은 감소하는 경향이였다.

다. 初期變形量を 증가함에 따라 더 적은 初期應力이 載荷되었으며, 初期應力이 증가함에 따라 단위 變形率 당의 應力弛緩량은 크게 나타났다. 따라서 벼의 粘彈性 舉動은 단지 時間 뿐만 아니라 초기에 작용한 應力의 수준에도 영향을 받는 非線型 粘彈性體라는 것을 알 수 있다.

라. 벼의 應力弛緩 舉動은 3 要素의 一般化 Maxwell 模型으로 충분히 나타낼 수 있었으며, 그 係數들을 非線型 回歸分析法으로 구하였다.

參 考 文 獻

1. ASAE Year Book. 1983. ASAE Standard S368.1 : 332~335.
2. Chang, C.S. and C.R. Martin. 1983. Rheological properties of grain dust. Trans. of the ASAE 26(4) : 1249~1256.

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. Chen, P. and R.B. Fridley. 1972. Analytical method for determining viscoelastic constants of agricultural materials. *Trans. of the ASAE* 15 (6) : 1103~1106.
5. Chen, P. and S. Chen. 1986. Stress relaxation functions of apples under high loading rates. *Trans of the ASAE* 29(6) : 1754~1759.
6. Christensen, R.M. 1982. *Theory of viscoelasticity*. Academic Press.
7. Clevenger, J.T. and D.D. Hamann. 1986. The Behavior of apple skin under tensile loading. *Trans. of the ASAE* 11(1) : 34~37.
8. De Baerdemaeker, J.G. and L.J. Segerlind. 1976. Determination of the viscoelastic properties of apple flesh. *Trans. of the ASAE* 37(2) : 346~348, 353.
9. Finney, E.E., C.W. Hall and G.E. Mase. 1964. Theory of linear viscoelasticity applied to the potato. *J. Agri. Engg. Res.* 9(4) : 307~312.
10. Graham, V.A. and W.K. Bilanski. 1984. Non-linear viscoelastic behavior during forage waferring. *Trans. of the ASAE* 27(6) : 1661~1665.
11. Gyasi, S., R.B. Fridley and P. Chen. 1981. Elastic and viscoelastic Poisson's ratio determination for selected citrus fruits. *Trans of the ASAE* 24(3) : 747~750.
12. Hammerle, J.R. and N.N. Mohsenin. 1970. Tensile relaxation modulus of corn horney endosperm as a function of time, temperature and moisture content. *Trans. of the ASAE* 13(3) : 372~375.
13. Herum, F.L., J.K. Mensah, H.J. Barre and K. Majidzadeh. 1949 Viscoelastic behavior of soybeans due to temperature and moisture content. *Trans. of the ASAE* 22(5) : 1219~1224.
14. Husain, A., K.K. Agrawal, T.P. Ojha and N.G. Bhole. 1971. Viscoelastic behavior of rough rice. *Trans of the ASAE* 14(2) : 313~318.
15. Mohsenin, N.N. 1970. *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach science publishers, N.Y.
16. Mohsenin, N. and J.K. Barre. 1976. Stress relaxation and energy requirements in compaction of unconsolidated materials. *J. of Agri Engg. Res.* 21(2) : 193~205.
17. Prasad, S. and C.P. Gupta. 1973. Behavior of paddy grains under quasistatic compressive loading. *Trans of the ASAE* 16(2) : 328~330.
18. 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.
19. Rudra, R.P. 1987. A Curve-fitting program to stress relaxation data. *Can. Agri. Engg.* 29(2) : 209~211.
20. Silbertstein, D.A. and V.N.M. Rao. 1977. Mechanical properties of peanuts at various temperature and relative humidities. *Tuans of the ASAE* 20(3) : 746~748.
21. Sitkei, Gy. 1986. *Mechanics of agricultural materials*. Elsevier Science Publishers. 114~283.
22. Yamaguchi, S. et al. 1981. Basic study on the viscoelastic properties of the rice kernal. *J. of JSAM* 43(1) : 83~88.
23. Yamaguchi, S. et al. 1981. On relaxation modulus of rice Endosperm. *J. of JSAM* 43(2) : 239~245.
24. Zoerb, G.C. and C.W. Hall. 1960. Some mechanical and rheological properties of grain. *J. of Agr. Eng. Research* 5(1) : 83~93.
25. 高學均, 盧祥夏, 鄭琮薰. 1988. 벼의 物理的 및 熱的 特性에 關한 研究. *韓國農業機械學會誌* 9 (1) : 34~45.
26. 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.
27. 許潤根. 1987. 水稻의 力學的 및 리올러지 特性에 關한 研究. 忠北大 博士學位論文.