

벼의 리올러지 特性(II)⁺

— 穀粒의 壓縮크리이프 —

Rheological Properties of Rough Rice (II)

— Compressive Creep of Rough Rice Kernel —

金 滿 秀*, 金 聲 來*, 朴 鍾 民*

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

Summary

The compression creep behavior of grains when loaded depends not only on load but also on duration of load application. The most common methods of studying the load-time characteristics of agricultural products is by employing rheological models such as Burger's model. However it is sometimes not sufficient to describe the viscoelastic behavior of grains to be Burger's model. For this reason, this study was conducted to develop the rheological model which represented the creep compliance response of the rough rice kernel and was a function of initial stress applied and time.

The effects of the initial stress applied and the moisture content on the compression creep behavior of the rough rice kernel were analyzed.

The results were obtained from the study as follows:

1. Since the viscoelastic behavior of the rough rice kernel was nonlinear, the transient and steady state creep compliance was satisfactorily modelled as follows:

$$J(\sigma, t) = A\sigma^B [C + Dt - \exp(-Ft)]$$

But, for the every stress applied, the compression creep behavior of the samples tested can be well described by Burger's model respectively.

2. The creep compliance, the instantaneous elastic strain, the retarded elastic strain and the viscous strain of the sample tested generally increased in magnitude with increasing the applied initial stress and the moisture content used in the tests. At low moisture content, the creep compliance for the Japonica-type rough rice kernel was a little higher than those for Indica-type and at high moisture content, vice versa at high moisture content.
3. The retardation times of the samples had not an uniform tendency by the initial stress and the moisture content. The retardation times ranged from 0.66 to 6.76 seconds, and the creep progressed from transient to steady state at a relatively high rate.
4. The less viscous strain than the instantaneous elastic strain for the samples tested indicated that rough rice kernel behaved as a viscoelastic body characterized by elasticity than viscosity.

⁺ 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

1. 緒 論

農産物の 크리이프 實驗은 應力弛緩 實驗과 함께 農産物の 리올러지 特性을 研究하는데 중요한 實驗이 되며, 일정한 外力에 대한 變形과 時間과의 關係를 다루는 것으로서 이러한 農産物の 粘彈性 特性에 대한 자료들은 農産加工機械들의 特性向上, 加工 農産物の 品質向上 및 損傷을 最少化시켜 農産物の 質的, 量的 損失을 줄이는데 중요한 基礎資料가 된다. 특히 벼의 搗精工程에서 脫靜過程이나 精白過程에는 주로 壓縮力, 剪斷力 및 衝擊力이 작용하는데, 이 과정에서 玄米機 롤러의 간격 및 速度결정이나 精白室 内の 壓力調節을 위해서는 벼의 리올러지 特性이 매우 중요한 因子가 될 것이다.

Clevenger 等⁽⁵⁾은 사과 껍질에 대해서 荷重을 가하는 방향에 따라 引張 크리이프 實驗을 실시한 결과, 사과의 중심에 대하여 수직으로 荷重이 작용되었을 경우가 수평으로 작용되었을 경우보다 더 粘性的인 舉動을 나타냈으므로 사과의 껍질은 방향에 따라 同質이 아니라고 하였으며, 처음 16초 동안에 발생된 變形量의 約 60% 정도가 彈性的인 變形이었고, 荷重제거시 瞬間彈性變形量의 約 50% 정도만 彈性回復을 하는 것으로 보아 初期 瞬間彈性變形時에 塑性變形이 함께 일어나 永久變形으로 남는다고 하였다. 이는 또한 荷重載荷速度 5.33 및 21.34 mm/min로 引張力을 가할 때 발생하는 힘의 방향과 수평 및 수직방향으로의 變形率을 스크린에 50배로 확대 투사하여 Poisson's 比를 測定하였던 바, 이들의 比는 測定時間에 독립인 線型關係에 있었으며 대략 0.31~0.47 범위에 있었다고 하였다.

Chappell 等⁽⁴⁾은 사과속살을 圓筒모양으로 加工하여 初期應力 68~165kPa 범위의 4수준의 死荷重에 대하여 크리이프 實驗을 실시하여 Burger's 模型으로 나타낸 결과, 模型의 각 계수의 값들은 初期應力の 변화에 따라 많은 영향을 받고, 模型의 각 계수들은 初期應力과는 1次 函數의 關係에 있었으며, 이러한 결과로 미루어 보아 사과속살은 線型粘彈性體로 간주해서는 안된다고 하였다.

Rao 等⁽¹²⁾은 감자에 대하여 壓縮 크리이프 實驗을 수행하여 初期應力을 變形率로 나누어 彈性係數를 계산하였는데, 初期變形率 10%까지는 작용된 初期

應力에는 관계없이 단지 測定時間에만 관계되는 線型粘彈性的(linear viscoelastic)인 舉動을 나타내었다고 하였다.

Kojima⁽¹⁰⁾는 오이를 각 부위별로 圓筒型으로 加工하여 관위에 올려놓고 荷重載荷速度 10mm/min로 準靜的인 壓縮 크리이프 實驗을 실시하여 Burger's 模型으로 나타내었으며, 오이의 단위 길이당 臨界 크리이프 荷重은 3.9N 이었으며, 臨界 變形量은 2.29mm이었다고 하였다. 이는 또한 사과, 배, 복숭아에 대하여 收穫後 일정한 時間別로 壓縮 크리이프 特性을 보고한 바 있다.⁽⁹⁾

Ishibashi 等⁽⁸⁾은 토마토에 대하여 10mm/min의 荷重載荷速度로 壓縮 크리이프 實驗을 실시하여 Burger's 模型으로 나타내었는데, 익지 않은 토마토는 粘性係數가 커서 일정한 時間이 지난 후 荷重제거시 초기에 발생했던 瞬間彈性變形의 거의 모두가 回復되었다고 보고하였다.

Ezaki 等⁽⁶⁾은 벼의 왕겨를 일정한 크기의 圓筒型 용기에 넣어 準靜的인 壓縮 크리이프 實驗을 실시한 결과 크리이프 컴프라이언스(creep compliance)와 時間과는 대수함수의 關係에 있었으며, 荷重을 載荷-除去하는 過程(loading-unloading process)을 계속 되풀이 함에 따라 크리이프 變形과 殘留應力은 증가하는 경향이었다고 하였다.

Chang 等⁽⁶⁾은 여러가지의 穀物먼지에 대하여 壓縮 크리이프 實驗을 실시하여 非線型 回歸分析법에 의하여 Burger's 模型의 각 계수의 값들을 추정하였는데, 含水率이 증가함에 따라 材料의 粘彈性的程度를 나타내는 E_r 및 η_r 는 뚜렷이 감소하였으며, 遲延時間 τ_{cr} 은 대략 3~10초 범위로 나타났고, 變形率의 速度가 분당 0.001mm/mm로 되는 데는 모든 穀物먼지에서 대략 10분 정도 소요되었다고 보고하였다.

Ashcroft 等⁽¹¹⁾은 飼料作物을 일정한 크기로 잘라 일정한 크기의 圓筒型 용기에 넣어 0.1379MPa의 應力을 가한 후 30분 동안 크리이프 舉動을 測定하여 Burger's 模型으로 나타내었는데, 含水率이 증가함에 따라 粘彈性的의 정도를 표시하는 σ_0/E_r 및 σ_0/η_r 는 모두 증가하였으나, 遲延時間 τ_{cr} 은 뚜렷한 경향이 없었다고 하였다. 이와 비슷한 實驗으로서 Graham 等⁽⁷⁾은 飼料作物에 衝擊荷重을 가하여 그

荷重에 대하여 일정한 時間동안 크리이프 舉動을 測定했던 결과, 크리이프 舉動은 단지 時間 뿐만 아니라 초기에 가한 荷重에도 영향을 받는 非線型 粘彈性 舉動(nonlinear viscoelastic behavior)을 나타내었다고 하였으며, 이러한 非線型 粘彈性 舉動을 설명하는 데는 線型要素인 스프링과 데시포르트의 조합으로만 구성된 Burger's 模型이 부적합하므로 Taylor 等⁽¹⁵⁾이 제시한 一般化 크리이프 컴프라이언스 模型을 약간 개조하여 설명하였다. 이는 크리이프 컴프라이언스는 초기에 가한 應力の 수준이 증가할 수록 全測定時間 내에서 감소하는 경향이었으며, 또한 含水率이 증가함에 따라 감소하였다고 보고하였다.

Reidy 等⁽¹³⁾은 冷凍乾燥된 쇠고기에 대하여 水分 活性도에 따라 크리이프 特性을 測定하여 Burger's 模型으로 나타내었는데, 水分 活性도가 증가함에 따라 η_r 를 제외한 모든 계수 즉, E_0 , E_r 및 η_v 는 감소하였다고 하였다.

許⁽¹⁸⁾는 벼 줄기에 대하여 20~40N의 死荷重(dead load)을 순간적으로 작용시켜 크리이프를 測定하였는 바, 初期應力이 2.0MPa. 이하의 경우는 대수적 크리이프, 2.0MPa. 이상에서는 正常狀態 크리이프 舉動을 나타내었는데 이는 Burger's 模型에서 粘性變形을 나타내는 σ_0/η_v 가 初期應力이 증가함에 따라 증가하였기 때문이라고 보고하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 外國에서는 靑果物을 중심으로 이 분야의 研究가 시작되어 초기에는 단순히 靑果物의 品種間이나 實驗變數에 따라 이들 特性들을 비교하는데 국한되었으나, 최근에는 정밀한 計測機들의 발달로 實驗의 대상작물들이 점점 확대되어 飼料作物 및 農業副產物, 肉類나 食品組織(texture)의 객관적인 평가에 까지도 이용되기에 이르렀다. 또한 대부분의 農產物 等은 應力-變形率의 비가 測定時間 뿐만 아니라 應力水準에도 영향을 받는 非線型 粘彈性體로서 舉動하게 되는 데^(3, 5, 11, 14, 15), 종전의 대부분의 研究들은 한 應力水準에 대하여 이들 農產物들을 線型 粘彈性體로서 간주하여 線型要素인 스프링과 데시포르트만으로 구성된 力學的 模型으로서 이들의 特性을 설명하려고 하였다^(1, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 13, 16, 18). 그러나 이러한 力學的 模型으로서는 한 應力水準에 대한 農產物의 대체적인 크리

이프 舉動을 설명할 수 있으나 初期應力의 변화에 따른 크리이프 舉動을 잘 설명할 수 없는 것이 문제이다.

따라서 本 研究에서는 加工하지 않은 벼를 평균 위에 안정한 상태로 누어 놓고 3水準의 初期荷重 및 2水準의 含水率別로 壓縮 크리이프 實驗을 수행하여 含水率 및 初期應力이 벼의 非線型 粘彈性 特性에 미치는 영향을 分析하여, 이러한 非線型 粘彈性 特性을 설명할 수 있는 數學的 模型을 開發하려고 한다.

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(아기바레, 대청)과 多收系 벼 2品種(삼강, 원풍)으로 收穫 時期에 있는 벼를 포장에서 직접 손으로 收穫하여 2.8mm 체를 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, 穀粒에 순간적으로 死荷重을 가할 때 荷重載荷 막대의 흔들림을 방지하기 위하여 막대에 길이 방향으로 두 곳의 키이웨이(key way)를 만들었으며, 막대와 프레임이 만나는 지점에는 銅으로 부싱을 제작설치 함으로써 荷重載荷 막대를 정확히 안내하도록 하였다. 또한 LVDT의 설치방향에 따라 나타나는 誤差를 감소시키기 위하여 荷重載荷 막대에 설치한 경사진 블록에 의하여 LVDT가 작동되어 死荷重(dead load)에 대한 穀粒의 壓縮變形量이 測定되도록 하였다. 實驗室內的 氣溫과 相對濕度는 各급적 15℃와 45%내외로 유지되도록 하였다.

本 實驗에 사용된 주요 計測機들은 金 等⁽¹⁷⁾에 의한 벼의 生物體 降伏強度와 極限強度에 관한 研究에서와 같다.

含水率 범위는 12~23% (w, b) 범위 내에서 2수준을 택하였고, 初期荷重의 범위는 金 等⁽¹⁷⁾의 研究 결과인 含水率 13~25% (w. b.) 범위에서의 벼의 生物體 降伏點 20~80N 범위 이하에서 含水率

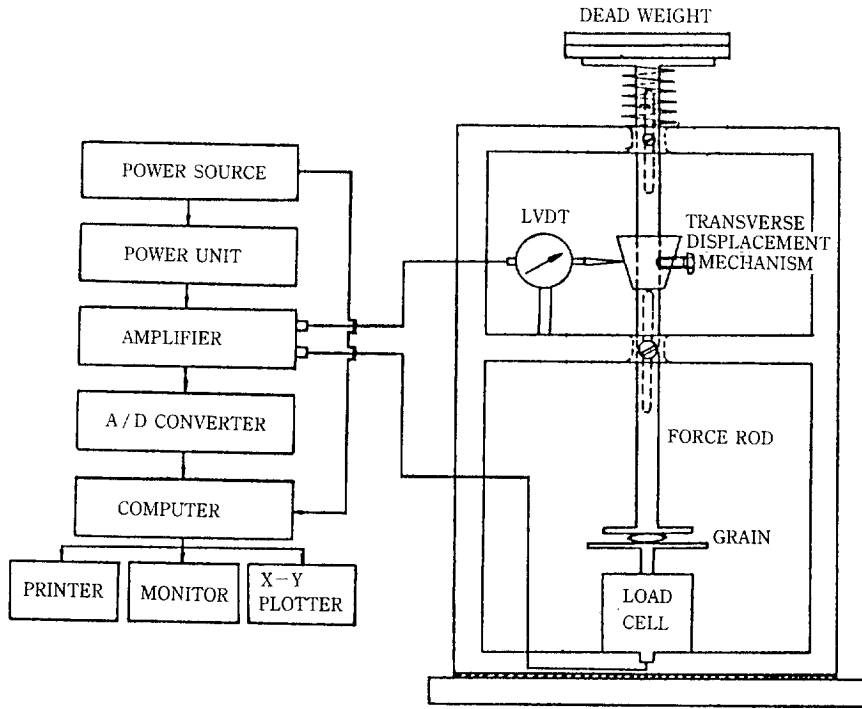


Fig. 1. Schematic and block diagram of compressive creep test apparatus.

낮은 경우($13 \pm 0.5\%$)와 높은 경우 ($21 \pm 1\%$)로 구분하여 각각 39.24, 58.86 및 78.48N과 19.62, 29.43, 39.24N으로 3水準씩 태하였다. 반복 穀粒數는 각 變數의 조합에서 15~20粒으로 하였다.

料의 內的, 外的 조건에 따라 각 단계에 도달하는 時間은 각기 다를 것이다. 특히 크리이프 破壞가 일어나는 제 3단계는 農産物에 따라 다르지만 상당한

3. 結果 및 考察

가. 非線型 크리이프 模型

일정한 크기의 外力을 받고 있는 物體의 크리이프 현상은 그림 2와 같이 3단계로 나누어 볼 수 있는데, 즉 첫 단계의 크리이프 舉動은 荷重載荷와 동시 瞬間彈性變形이 발생되고 점차 變形率의 速度가 감소되는 非正常 狀態 크리이프(transient creep), 제2단계에서는 變形率의 速度가 거의 일정한 正常 狀態 크리이프(steady-state creep)가 일어나며, 마지막 단계인 3단계에서는 變形率의 速度가 갑자기 증가되어 결국 크리이프 破壞에 도달하게 된다⁽¹⁾.
¹⁴⁾ 이와 같은 크리이프의 각 단계는 단지 測定時間에 관계되어 나타나며, 材料의 物理的 特性이나 材

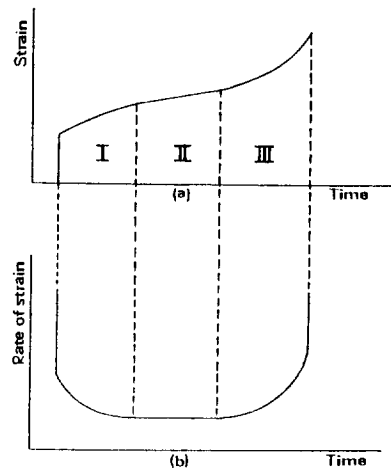


Fig. 2. Creep behavior : (a) stages of creep, (b) creep rate.

時間이 지난 후에야 나타날 것으로 생각되며, 農産物의 收穫 後 여러가지 物理的 處理過程에서는 비교적 짧은 時間 동안 荷重을 받기 때문에 크리이프 破壞로 인한 農産物의 損失은 없을 것으로 생각된다. 따라서 많은 研究者들은 크리이프의 제 2단계 까지를 研究대상으로 하고 있다 (1,2,3,5-13,16,18).

대부분의 農産物 等은 크리이프 擧動이 단지 測定時間 뿐만 아니라 초기에 작용시킨 應力水準에도 영향을 받는 非線型 粘彈性體로서 擧動하게 되므로 線型 粘彈性體의 擧動을 잘 설명할 수 있었던 Burger's 模型으로는 이를 잘 설명할 수 없을 것이다. 그러나 非線型 粘彈性을 나타내는 農産物에서도 應力の 각 水準別로는 線型 粘彈性으로 간주할 수 있기 때문에 어느 한 應力水準에 대한 크리이프 擧動은 Burger's 模型으로 잘 설명될 수 있을 것이다.

그림 3은 Burger's 模型을 나타낸 것으로 이 模型에서 初期應力 σ_0 가 瞬間적으로 작용되었을 때 스프링에 의한 (A) 瞬間彈性變形이 일어나고, 그 다음은 Kelvin 要素(B)에 의한 遲延彈性變形과 데시포트(C)에 의한 粘性變形이 복합적으로 일어나게 된다. 따라서 임의의 時間 t 에서의 總變形率은 다음 式과 같이 표시될 수 있을 것이다.

$$\varepsilon = \varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C \dots\dots\dots (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_r} [1 - \exp(-t/\tau_r)] + \frac{\sigma_0 t}{\eta_v} \quad (2)$$

여기서, $\varepsilon(t)$: 일정한 時間 t 後의 總變形率,
mm/mm

σ_0 : 初期應力, MPa.

E_0 : 瞬間彈性係數, MPa.

E_r : 遲延彈性係數, MPa.

τ_r : 遲延時間(η_r/E_r), sec

η_r, η_v : 粘性係數, MPa · S

農産物은 형상 자체가 매우 불균일 하기 때문에 같은 荷重이 작용했다라도 穀粒이 받는 應力은 각기 다르므로 이들을 직접 비교한다는 것은 곤란하다. 이런 경우 크리이프를 初期應力 σ_0 로 나눈 단위 應力當의 크리이프 즉, 크리이프 컴프라이언스(creep compliance)로 나타내면 初期應力에 영향을 받지 않고 직접 비교할 수 있게 된다(6,7,11,14,18).

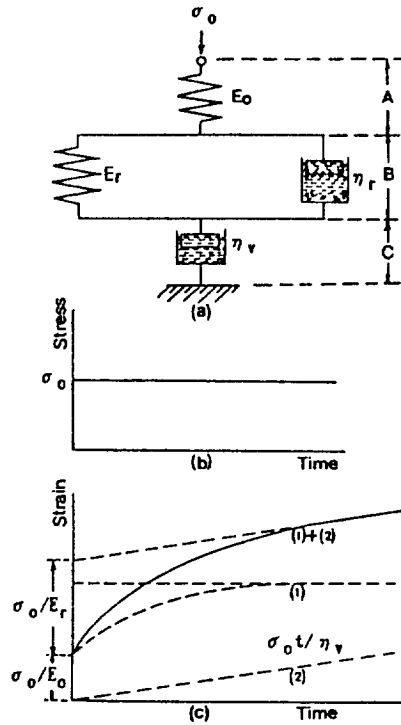


Fig. 3. Burger's model (a), step function stress history (b), and characteristic creep as a function of time after initial stress (c).

따라서 크리이프 컴프라이언스는 式(2)로부터 다음과 같이 표시된다.

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \dots\dots\dots (3)$$

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_r} [1 - \exp(-t/\tau_r)] + \frac{t}{\eta_v} \dots\dots (4)$$

크리이프 실험의 자료로부터 Burger's 模型의 각 상수의 값들을 추정하기 위해서는 式(4)를 式(5)의 형태로 변환시켜 C_1, C_2, C_3 , 및 C_4 를 非線型 回歸分析法에 의하여 결정한 다음, 이들 값으로부터 각각 E_0, E_r, τ_r 및 η_v 의 값들을 계산할 수 있다. 接觸面積의 計算 式은 Hertz의 理論式과 彈性係數의 정의로부터 유도하여 사용하였다(10,13,16).

$$J(t) = C_1 + C_2 + [1 - \exp(-C_3 t)] + C_4 t \dots\dots\dots (5)$$

크리이프 實驗을 통하여 얻은 資料로부터 Burger's 模型과 6要素 一般化 Kelvin 模型으로 구분하

여 각 계수들을 구하였으나 一般化 Kelvin 模型의 경우 決定係數(r^2)의 값은 약간 증가하였지만 式이 복잡하여 Burger's 模型으로 應力의 각 수준에 대한 크리이프 舉動을 충분히 나타낼 수 있었으므로 表 1에서는 Burger's 模型의 각 계수들의 값을 표시 하였다.

非線型 粘彈性 舉動을 하는 農産物의 크리이프 舉動을 나타낼 수 있는 數學的 模型은 몇몇 研究者 들에 의하여 研究되었으나 非正常 狀態 크리이프 (transient creep)와 定常狀態 크리이프(steady-state creep)를 잘 나타내는 Taylor 等⁽⁴⁾이 제시한 一般化 크리이프 컴프라이언스 模型(generalized

creep compliance model)에 기본을 두고 있다.

$$J(\sigma, t) = f(\sigma) \left[(A_0 + A_1 t + A_2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-A_3 t)) \right] \dots \dots \dots (6)$$

여기서, $J(\sigma, t)$: 크리이프 컴프라이언스,
mm/mm per MPa.
 $f(\sigma)$: 材料에 작용하는 應力의 函數, MPa.
 A_0, A_1, A_2, A_3 : 模型의 상수값

만약 $f(\sigma) = A\sigma^B$ 이고, $n=1$ 인 경우 式(6)은 다음과 같이 간단히 된다.

Table 1. Parameters of Burger's model [Eq(2)] for rough rice kernel.

Variety	M.C.* % (w. b.)	I.S.* (MPa.)	Parameters of Burger's model				r^2
			E_0 , MPa.	E_r , MPa.	τ_{ret}	η_v , MPa · S	
Akibare	13.10	44.9337	590.5880	1596.2992	2.5795	821270.4375	0.9550
		36.6118	694.6910	3893.2646	2.8582	1190581.500	0.9468
		34.8110	1153.1213	9828.0996	1.0848	4181180.50000	0.9623
	21.30	18.9431	201.2924	529.9904	6.7551	322441.1563	0.9710
		18.1815	313.2781	678.8785	5.7277	403400.2118	0.9757
		17.6392	645.5943	1178.9951	5.9899	650842.6250	0.9739
Daecheong	12.50	43.6664	656.9070	2283.7053	3.1867	2014097.3750	0.9816
		36.1138	691.1913	7034.1743	1.5685	10872965.0000	0.9486
		32.1089	1066.3719	10046.8008	0.6560	13222013.0000	0.9620
	22.00	19.3116	242.7929	591.941	6.7188	332133.3750	0.9656
		18.0954	348.0840	697.3059	5.5497	381241.8750	0.9663
		14.0614	381.5188	1137.0980	5.5441	503503.2819	0.9787
Samkang	13.80	44.8322	486.9993	1900.3872	6.0771	986089.1250	0.9629
		41.9797	687.9484	235.1091	7.2408	1337763.5000	0.9773
		36.4297	1035.3251	5947.9043	1.8302	2071174.8750	0.9574
	20.50	20.0349	189.0310	617.4645	5.5151	294002.9699	0.9727
		19.0984	281.0425	591.6073	4.1226	260347.7344	0.9650
		18.7796	579.8839	1004.9401	3.6566	593290.8125	0.9598
Wonpung	12.20	46.4893	544.8979	3091.7856	2.5399	2077992.3750	0.9487
		42.3799	761.8633	4884.8911	3.5643	4025012.2500	0.9808
		35.2779	983.8751	12719.6816	0.8607	11817919.0000	0.9163
	20.30	20.8887	237.3034	573.0327	3.1999	302578.9688	0.9670
		17.3639	239.7914	573.5703	4.9204	316808.6250	0.9723
		15.0964	338.1820	759.3828	5.0782	387801.7188	0.9634

*M.C. = Moisture Content, I.S. = Initial Stress

Table 2. Coefficients of creep compliance model as a function of time and initial stress

Variety	Moisture content, % (w. b.)	Range of applied stress, MPa	$J(\sigma, t) = A\sigma^B [C + Dt - \exp(-Ft)]$					r^2
			A	B	C	D	F	
Akibare	13.10	34.8~44.9	7.4440×10^{-9}	2.9243	4.6033	2.2385×10^{-3}	0.4037	0.9633
	21.30	17.6~18.9	1.4859×10^{-19}	12.6333	3.4126	1.6781×10^{-3}	0.1576	0.9632
Daechong	12.50	32.1~43.7	4.4163×10^{-7}	1.7407	6.3085	1.0363×10^{-3}	0.3785	0.9633
	22.00	14.0~19.3	2.0681×10^{-5}	1.4680	3.3633	1.8812×10^{-3}	0.1654	0.9644
Japonica	12.80	33.4~44.2	6.4918×10^{-8}	2.3132	5.2628	1.7250×10^{-3}	0.3881	0.9633
	21.65	15.6~19.2	9.4114×10^{-6}	1.7728	3.2841	1.7733×10^{-3}	0.1651	0.9633
Samkang	13.80	36.4~44.8	1.5016×10^{-10}	3.9559	4.9368	1.9603×10^{-3}	0.1618	0.9634
	20.50	18.8~20.0	5.7506×10^{-17}	10.3900	3.6535	2.0140×10^{-3}	0.2106	0.9632
Wonpung	12.20	35.3~46.5	1.4148×10^{-8}	2.5750	7.5187	1.3793×10^{-3}	0.3615	0.9634
	20.30	15.1~20.9	1.2179×10^{-4}	0.8936	3.3745	1.9001×10^{-3}	0.2423	0.9633
Indica	13.00	35.8~45.6	2.1513×10^{-9}	3.1691	5.9153	1.8009×10^{-3}	0.2175	0.9634
	20.40	16.2~20.4	7.1916×10^{-5}	1.0818	3.4140	1.9980×10^{-3}	0.2293	0.9633

*M.C.=Moisture Content, I.S.=Initial Stress

$$J(\sigma, t) = A\sigma^B [(C + Dt - \exp(-Ft))] \dots\dots\dots (7)$$

無限級數의 項이 많을수록 더욱 더 실제의 현상에 접근하겠으나 式이 복잡해지므로 하나의 項만 택하였고, 모든 粘彈性體의 크리이프 컴프라이언스는 時間에 따라 증가하는 경향이므로 A_2 의 값은 “-1”로 하였다.

表 2에는 含水率 12~23% (w. b.) 범위내에서 含水率이 낮은 경우($13 \pm 0.5\%$)와 높은 경우($21 \pm 1\%$)에 대하여 初期應力과 時間을 因子로 하는 式(7)의 크리이프 컴프라이언스의 數學的 模型의 各 계수들을 非線型 回歸分析法에 의하여 추정된 값들을 표시하였다.

表 2에서 제시한 크리이프 컴프라이언스의 回歸 式들은 작용한 應力の 범위내에서 유용하게 이용될 수 있으나, 應力の 상한점보다 큰 應力에 대하여서는 生物體 降伏強度를 초과하는 경우가 있기 때문에 이 回歸式들은 이용될 수 없을 것으로 思料된다.

나. 含水率이 크리이프 擧動에 미치는 影響

크리이프 實驗時 初期荷重은 穀物の 生物體 降伏點 이하에서 결정되어야 하며, 또한 含水率에 따라

벼의 生物體 降伏點은 다르므로 여러 含水率 수준에 대하여 같은 荷重을 載荷시켜 크리이프를 비교한다는 것은 매우 어려운 일이다.^(12,7,11,13,14) 따라서 本研究에서는 含水率 12~23% (w. b.) 범위에서의 生物體 降伏點보다 작은 初期應力 18MPa에 대하여 含水率 변화에 따른 단위 應力당의 크리이프 特性을 究明하였는데, 그 결과를 도시한 그림 4를 살펴 보면, 含水率이 증가함에 따라 全 測定時間대에서 크리이프가 더욱 크게 일어 났음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 그림 4의 초기 크리이프 擧動을 더욱 자세히 관찰하기 위하여 荷重載荷 後 40초가 지만을 확대 도시한 그림 5와 表 3의 各 계수들의 비교에서도 잘 나타났는 바, 荷重載荷 직후 瞬間의 으로 발생되는 彈性變形 $C_1(1/E_0)$ 의 값은 含水率이 증가함에 따라 증가하였으며, 또한 粘彈性의 程度 (degree of viscoelasticity)를 표시하는 $C_2(1/E_c)$ 및 $C_4(1/\eta_v)$ 모두 含水率이 증가함에 따라 증가하였다. 이는 含水率이 높은 경우가 낮은 경우에 비하여 더 많은 非定常 狀態 크리이프가 일어나 크리이프 擧動의 기울기를 더욱 급하게 하며 定常狀態 크리이프에 도달되어서도 더 급한 기울기로 變形된다는 것을 의미한다. 이는 즉, 임의의 時間에 있어서 含水率이 높은 경우가 永久變形이 더 많이 일어나 荷

重 除去時에도 回復되지 않는 變形이 많다는 것을 의미한다. $C_3(1/\tau_{ret})$ 는 단위 응력당 總 遲延彈性變形率인 $1/E_r$ 의 63%에 도달하는 데 걸리는 時間인 τ_{ret} 의 역수로서 含水率이 증가함에 따라 뚜렷한 차이를 나타내지 않았는데, 이는 벼는 非定常 狀態 크리이프로부터 定常狀態 크리이프로 전환되는 時間은 含水率에 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다.

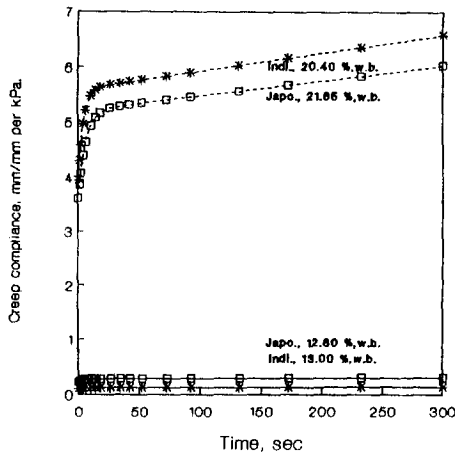


Fig. 4. Effect of moisture content on creep compliance for rough rice kernel at the initial stress of 18 MPa.

表 1에서 보는 바와 같이 遲延時間 τ_{ret} 는 대체로 0.66~6.76 범위로 許⁽¹⁸⁾의 벼줄기에 대한 研究에서 10~30 초, Chang 等⁽²⁾의 穀物먼지에 대한 研究에서 3~10초로 이보다 모두 작은 값으로 나타났는데 이로부터 벼는 짧은 時間 內에 定常狀態 크리이프에 도달한다는 것을 알 수 있으며, 또한 C_2 의 값이 이들이 대상으로 했던 作物에서 보다 매우 작은 값으로 나타난 것을 보아 벼는 粘彈性的인 성질이 작다

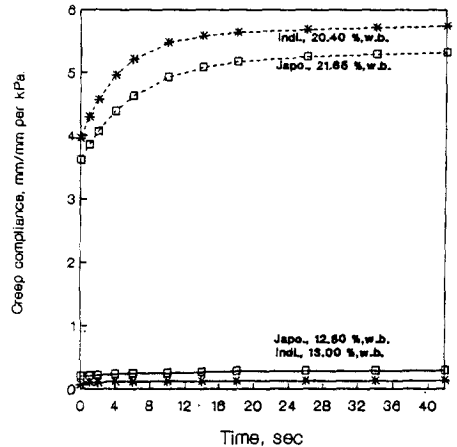


Fig. 5. Effect of moisture content on transient creep compliance for rough rice kernel at the initial stress of 18 MPa.

Table 3. Coefficients of Burger's model [Eq(4)] for rough rice kernel at the initial stress of 18 MPa.

Variety	M.C.* % (w. b.)	Parameters of Burger's model				r ²
		E ₀ , MPa.	E _r , MPa.	τ_{ret}	η_v , MPa · S	
Japonica	12.80	4510.5161	18231.9160	2.5765	11145004.0000	0.9998
	21.65	276.8771	632.3930	6.0568	356639.7813	0.9988
Indica	13.00	9946.4883	48882.0703	4.5976	27156206.0000	0.9998
	20.40	252.6252	609.8545	4.3616	305236.0625	0.9997

는 것을 알 수 있다. 粘性變形을 나타내는 C_4 또한 이들의 研究 결과보다 매우 작은 값으로 보아 定常狀態 크리이프에 도달한 이후에도 이들이 실험대상으로 했던 作物보다 더욱 완만히 크리이프가 진행되어 永久變形이 서서히 일어남을 알 수 있다. 이로부터 벼는 粘性的인 要素보다는 彈性的인 要素가

강한 粘彈性體라는 것을 알 수 있다.

대체로 含水率인 낮은 경우는 一般系 벼가 多收系 벼에 인하여 단위 應力당의 크리이프가 全測定 時間대에서 크게 일어났으며, 含水率이 높은 경우는 반대현상으로 나타났다. 이러한 결과는 表 3에서도 잘 나타났는데, 含水率이 낮은 경우 E₀, E_r 및

n. 모두 一般系 벼가 多收系 벼보다 작았으나, 含水率이 높은 경우는 多收系 벼가 모두 큰 값으로 나타났다.

다. 初期應力 크리이프 舉動에 미치는 影響

크리이프 試驗時에 穀粒에 가하는 瞬間荷重은 穀粒의 生物體 降伏點 이하에서 선택되어야 한다. 穀粒의 含水率과 生物體 降伏點과는 이미 알려진 바와 같이 2차 函數¹⁷⁾의 관계가 있기 때문에 서로 다른 含水率을 가지고 있는 穀粒에 대하여 일률적인 荷重을 載荷 한다는 것은 매우 힘든 일이라 하겠다. 따라서 本 研究에서는 金等¹⁷⁾의 研究 結果를 토대로 하여 含水率이 높은 경우와 낮은 경우로 구분하여 각각에 대하여 3 수준의 瞬間荷重에 대하여 크리이프 實驗을 수행하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 한 수준의 應力에 대한 크리이프 舉動은 Burger's 模型으로 잘 설명할 수 있으나 應力의 변화에 따른 벼 낱알의 크리이프 舉動은 時間 뿐만 아니라 작용시킨 應力水準에도 영향을 받는 非線型 粘彈性體로서의 舉動하기 때문에 線型要素로만 이루어진 Burger's 模型으로는 벼와 같은 非線型 粘彈性體의 크리이프 舉動을 설명할 수 없다. 따라서 本 研究에서는 여러 수준의 應力에 대한 크리이프 實驗의 結果를 가지고 應力과 時間의 函數인식 (7)로 나타내었으며 이들 관계를 그림 8에도 도시하였다.

여러 수준의 應力에 대한 크리이프 實驗 結果 대략 15초 이내에서 非定常 狀態 크리이프에서 定常 狀態 크리이프로 전환되었으므로 초기의 크리이프 舉動을 정확히 나타내기 위하여 그림 6 및 7에는 18

초까지의 크리이프 舉動만 도시하였다.

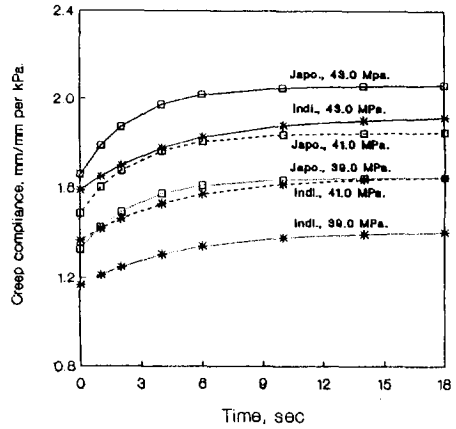


Fig. 6. Effect of initial stress on creep compliance of rough rice kernel at low moisture content.

表 4와 그림 6 및 7에서 보는 바와 같이 含水率에 관계없이 初期應力이 증가함에 따라 단위 應力당의 瞬間彈性 變形率 및 遲延彈性 變形率은 증가 하였으나, 非定常 狀態 크리이프(transient creep)에서 定常狀態 크리이프 (steady state creep)로 전환되는 時間은 일정하지 않았다. 그러나 定常狀態 크리이프에 도달한 후에는 初期應力의 영향이 적어 크리이프 컴프라이언스의 기울기는 비슷하게 나타났다. 이와 같은 結果는 表 4의 Burger's 模型의 각 계수에서도 잘 나타났는데, 벼의 두 系統 모두에서 初期應力이 증가함에 따라 E_0 및 E_r 은 감소하였지만, η_v 는 증가하였다. 그러나 遲延時間 τ_{ret} 는 일률적

Tabel. 4. Coefficients of Burger's model [Eq(4)] for rough rice kernel at high moisture content.

Variety	I.S. MPa.	Coefficients of Burger's model				r^2
		E_0 , MPa.	E_r , MPa.	τ_{ret}	η_v , MPa · S	
Japonica	18	276.8771	632.3830	6.0568	356639.7813	0.9988
	17	306.4008	699.8517	6.0567	393669.7813	0.9999
	16	341.1679	779.2615	6.0571	439426.3438	0.9999
Indica	18	252.6252	609.8545	4.3616	305236.0625	0.9997
	17	268.7429	648.7537	4.3609	324684.0938	0.9995
	16	286.9595	692.7192	4.3612	346694.8125	0.9997

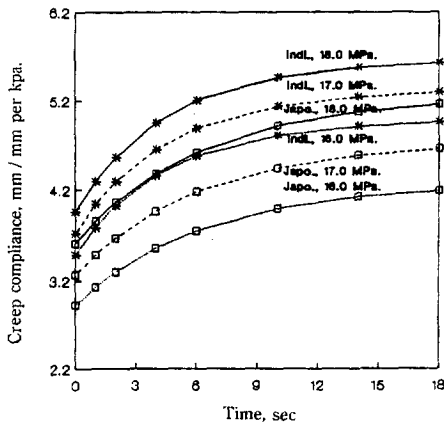


Fig. 7. Effect of initial stress on creep compliance of rough rice kernel at high moisture content.

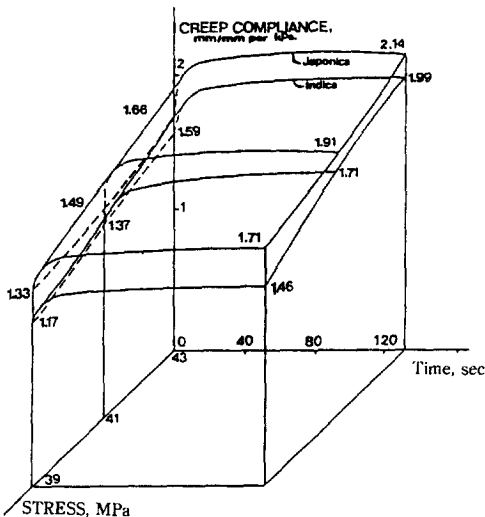


Fig. 8. Response surface of creep compliance for rough rice kernel as a function of time and initial stress at low moisture content.

인 경향이 없었다. 또한 그림 8에서 보는 바와같이 초기應力이 증가함에 따라 크리이프 컴프라이언스도 증가하였으며, 含水率이 낮은 경우 一般系 벼알의 크리이프 컴프라이언스는 多收系 벼에서 보다 약간 크게 나타났으나 含水率이 높은 경우는 그 반대이었다.

5. 結 論

含水率 12~23% (w. b.) 범위의 벼 4品種에 대한

여 含水率別로 벼의 生物體 降伏點 이내에서의 初期荷重別로 壓縮 크리이프 實驗을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

가) 벼의 크리이프 舉動은 時間 뿐만 아니라 초기에 작용시킨 應力의 수준에도 영향을 받는 非線型 粘彈性體로서, 應力의 變化에 따른 크리이프 컴프라이언스는 다음과 같은 數學的 模型으로 잘 설명될 수 있었다.

$$J(\sigma, t) = A\sigma^B [C + Dt - \exp(-Ft)]$$

그러나, 한 應力 水準에 대한 크리이프 舉動은 Burger's 模型으로 잘 설명할 수 있었다.

나) 初期應力 및 含水率이 증가함에 따라 크리이프 컴프라이언스, 瞬間彈性 變形率, 遲延彈性 變形率 및 粘性變形率은 증가하였다. 대체로 含水率이 낮은 경우는 一般系 벼가 多水系 벼에 비하여 크리이프 컴프라이언스가 크게 나타났으나, 含水率이 높은 경우 多水系 벼가 一般系 벼에 비하여 크게 나타났다.

다) 리올로지 模型들의 遲延時間은 初期應力이나 含水率에 따라 일률적인 경향을 나타내지 않았다. 벼의 遲延時間 τ_{ret} 은 0.66~6.76초 범위로 非常狀態 크리이프에서 定常狀態 크리이프로 전환이 매우 빨랐다.

라) 벼의 粘性變形率은 瞬間彈性 變形率보다 매우 작은 값으로 나타났던 바, 벼는 粘性的인 特性보다 彈性的인 特性이 강한 粘彈性體라는 것을 알 수 있었다.

參 考 文 獻

1. Ashcroft, D.H. and W.L. Kjelgaard. 1972. Compression creep properties of reduced forage. Trans. of the ASAE 15(4) : 609~612.
2. Chang, C.S and C.R. Martin. 1983. Rheological properties of grain dust. Trans. of the ASAE 26 (4) : 1249~1256.
3. Chappell, T.W. and D.D. Hamann. 1968. Poisson's ratio and Young modulus for apple flush under compressive loading. Trans. of the ASAE 15(6) : 608~610.

4. Christensen, R.M. 1982. Theory of viscoelasticity. Academic Press.
5. Clevenger, J.T. and D.D. Hamann. 1968. The behavior of apple skin under tensile loading. Trans. of the ASAE 11(1) : 34~37.
6. Ezaki, H. and T. Satake. 1983. Research on the compressive forming characteristics of rice husk. J. of JSAM 45(1) : 123~128.
7. Graham, V.A. and W.K. Bilanski. 1984. Non-linear viscoelastic behavior during forage waferring. Trans. of the ASAE 27(6) : 1661~1665.
8. Ishibashi, S. and T. Kojima. 1970. Studies on mechanical properties of agricultural products (II) — on mechanical strength of the Tomato during growing, ripening and storage. J. of JSAM 32(1) : 59~64.
9. Kojima, T. 1975. Study on the physical properties of horticultural products (I) — on the shape and mechanical properties of cucumber. J. of JSAM 36(4) : 549~554.
10. Kojima, T. and S. Ishibashi. 1970. Studies on mechanical properties of agricultural products (Part III) — on strength change of Apples, Pears and Peaches after harvest. J. of JSAM 32(2) : 145~149.
11. Mohsenin, N.N. 1970. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers, N.Y.
12. 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.
13. Reidy, G.A. and D.R. Heldman. 1972. Rheological properties of freeze dried beef in the dry and intermediate moisture range. Trans. of the ASAE 15(1) : 146~149.
14. Sitkei, Gy. 1986. Mechanics of agricultural materials. Elsevier Science Publishers. 114~283.
15. 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.
16. Zoerb, G.C. and C.W. Hall, 1960. Some mechanical and rheological properties of grain. J. of Agr. Eng. Research 5(1) : 83~93.
17. 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.
18. 許潤根, 1989, 水稻의 力學的 및 리올러지 特性에 관한 研究, 忠北大 博士學位論文.