

이삭 벨 때 벼의 리올러지 特性에 關한 研究⁺

Studies on Rheological Properties of Rice Plants at the Booting Stage

許 潤 根*, 李 相 祐*

Y. K. Huh, S. W. Lee

Summary

Rice plants are subjected to various forces such as natural force of wind and mechanical force of cultivating machines.

Rheological behavior of the rice stem can be expressed in terms of three variables : stress, relaxation and time.

The objectives of this study are to examine stress relaxation, creep and recovery characteristics on the rice stem in case of axial and radial loading. Stress relaxation with time was studied on three levels of loading rate and on four levels of applied stress.

The results were summarized as follows :

1. The hysteresis losses of the rice stem distinctly observed at the radial compression in comparison with axial compression. The hysteresis loss implied that the stem to absorbed energy without being deformed beyond the yield point.
2. A generalized Maxwell model consisting of three elements gave a good description of the relaxation behavior of the rice stem. Rate of loading was more significant on the observed relaxation behavior within the short relaxation time, but there were little influences of rate of loading on the relaxation time.
3. The stress relaxation intensity and the residual stress increased in magnitude as the applied stress increased, but the relaxation time was little affected by the applied stress.
4. The coefficients of the stress relaxation model showed much differences in the radial compression and the axial compression, especially the higher relaxation stress of the third element was observed in the radial compression.
5. The behaviors of rice stem in creep and recovery test also might be represented by a four element Burger's model. But the coefficients of the creep model were different from those of the recovery model.
6. The steady-state phenomena of creep appeared at the stress larger than 20 MPa in Samkang and 1.8 MPa in Whajin.
7. The elastic modulus of the stem showed the range from 40 to 60 MPa. It could be considered, as a result, the rice stems had viscoelastic properties.

⁺ 본 연구는 1989년도 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행되었음.

* 충남대학교 농과대학 농업기계공학과

1. 緒 論

현재 우리나라의 벼 재배는 農業機械化 施策에 힘입어 全作業 시스템의 機械化가 이룩되어, 이제는 作業의 質的인 向上을 위한 기계의 開發 및 改良 등의 노력을 기울이고 있다. 作業機械의 개량에 관한 研究는 作物의 物性에 관한 전반적인 지식과 工學的인 기술이 복합적으로 이용되고 있다.

일정한 크기 이상의 外力이 작용할 때 作物의 力學的 反應은 内部的인 破壞가 크게 일어나지 않고 固體에 의한 彈性變形과 液體에 의한 粘性變形이 複合的으로 일어나는 粘彈性變形 特性을 나타낸다.

대부분의 作物은 外力의 작용시간과 그 변형에 있어서 점진적인 변형을 나타내는데, 짧은 시간에는 彈性變形을 보이고 긴시간 동안의 변형은 탄성변형이 감소하고 액체의 특성인 粘性變形을 보인다. 外力에 대한 물체의 變形이나 流動이 시간의 함수로 표시되는 粘彈性 變形의 模型은 荷重-變形-時間을 변수로 하는 3次元的인 反應을 나타낸다.

식물체의 고체성분이 갖는 彈性的 性質은 생육조건에 따라 다르고, 體液은 非뉴튼적으로 작용하는 액체이므로 外力에 대한 作物의 粘彈性 反應을 이론적으로 명확히 究明하는 것은 불가능하다. 이론적인 방법으로 유용한 결과를 얻기 어렵고 作物의 力學的 特性의 분석에는 가정을 설명하고 주어진 조건에서만 의미가 있으므로 實驗的인 方法에 의한다.

Hooke의 彈性理論 및 Newton의 粘性理論을 이용하여 粘彈性理論을 公式化 할 수 있다. 이

방법의 하나가 彈性 및 粘性要素를 결합하여 粘彈性變形과 유사하게 반응하는 力學的 模型 (mechanical model)으로 나타내는 것이다.

역학적 모형은 Ferry 및 Mohsenin³⁾등이 제시하였으며, 作物의 세포벽 및 세포액은 탄성요소인 스프링과 점성요소인 dashpot에 해당한다. Zoerb등⁴⁾은 농산물의 이완반응을 나타내기 위해 필요한 Maxwell 요소의 수를 결정하였다.

Chang과 Martin¹⁾은 Mohsenin 등이 정의한 Burger 모형을 사용하여 곡물먼지의 크리이프 특성을 분석하였고, Yamaguchi등⁵⁾은 쌀의 집단성 특성에 관한 연구를 하였다.

許 등^{7,8)}은 수도 및 Mat 苗의 리올러지 특성을 분석 보고하였다.

본 研究의 目的은 생활활동이 활발하여 줄기의 무게가 증대되는 이삭배는 시기(booting stage)에 벼줄기의 荷重 履歷現象을 측정하고, 軸方向 荷重 및 半徑方向 하중의 작용으로 일어나는 應力弛緩 特性과 압축하중에 의한 크리이프 및 回復特性을 분석, 力學的 模型을 결정함으로써 리올러지 특성을 究明하는데 있다.

2. 材料 및 方法

가. 實驗材料

實驗에 사용된 재료는 표 1과 같이 장려품종인 一般系 화진과 多收系 삼강으로서 충청남도 농촌 진흥원 포장에서 標準栽培法으로 재배한 벼를 사용하였다. 벼는 이삭배는 시기에 줄기 하단을 예취하여 수분변화를 줄이기 위해 플라스틱 용기에 넣어 운반하였다.

시료는 倒伏의 가능성이 높은 줄기의 하부 4

Table 1. Agronomic data of rice plants.

Data	Japonica-type	Indica Japonica
	Whajin	Samkang
Seeding date	89. May. 18	89. May. 20
Booting stage	Aug. 3 - Aug. 13	Jul. 31 - Aug. 9
Plant length, mm	930	873
Cross-sectional area, mm ²	24.2	27.5
Moisture content, % (w.b.)	80.3	79.5

절간을 택하여 軸方向 荷重을 載荷하는 실험에 서는 길이 25mm의 圓柱形 試片을 사용하였다.

나. 實驗裝置 및 方法

1) 應力弛緩試驗

응력이완 시험은 재료시험기를 사용하여 降伏 強度 이하의 漸加荷重을 軸方向 및 半徑方向으로 가한후 變形量을 측정하고 변형을 일정하게 유지시킨 상태에서 300초 동안의 시간에 따른 弛緩曲線을 X-Y 기록기에 그렸다.

하중수준 및 재하속도가 응력이완에 미치는 영향을 파악하기 위하여 荷重水準은 15N, 30N, 50N, 70N으로 하였고, 載荷速度는 1 mm/min, 4 mm/min, 20mm/min로 하였다.

순간적인 응력에 의해 일어난 Maxwell 模型의 變形率을 일정하게 유지하는데 필요한 응력은 시간의 흐름에 따라 감소하여 應力弛緩 反應을 낳는다. 作物의 응력이완 반응은 多數의 Maxwell 要素를 병렬로 연결한 一般化 Maxwell 模型으로 나타내는데, 이 力學的模型의 응력이완 방정식은 n개의 指數項을 갖는다. ^{1,3,7)}

$$\sigma(t) = \sigma_1 \text{Exp}(-t/\tau_1) + \sigma_2 \text{Exp}(-t/\tau_2) + \dots + \sigma_n \text{Exp}(-t/\tau_n) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 $\sigma_i = \epsilon \cdot E_i$ 및 $\alpha_i = 1/\tau_i$ 은 Maxwell 要素의 初期應力 및 弛緩時間의 逆數이고 非線型 回歸 分析法로 결정하였다. 변형율은 초기하중으로 일어나는 일정한 값이므로 시간과 응력의 값이 주어지면 i번째 Maxwell 요소의 彈性係數 E_i 및 係數 α_i 를 결정할 수 있다.

2) 크리이프 및 回復試驗

크리이프 試驗은 30N, 40N, 및 50N의 하중을 순간적으로 載荷하여 600초 동안의 變形量을 측정하여 크리이프를 구하였고, 回復試驗은 300초 동안 크리이프 변형을 측정하고 하중을 제거한 후 다시 300초 동안의 回復量을 측정하였다.

Mohsenin³⁾이 제시한 Burger模型의 크리이프 거동을 나타내는 式은 :

$$\epsilon(t) = \sigma_0/E_0 + \sigma_0/E_i [\text{Exp}(-t/\tau_i)] + \sigma_0/\eta \dots \dots (2)$$

이다.

作用應力의 영향을 받지 않고 크리이프 反應을 分析하기 위해서 위 式을 단위힘에 의한 변형량인 크리이프 컴플라이언스(creep compliance)^{7,8)}로 표시하면 式(3)과 같다.

$$D(t) = C_1 + C_2 [1 - \text{Exp}(-C_3 t)] + C_4 t \dots \dots \dots (3)$$

여기서, C_1 은 스프링의 瞬間彈性 컴플라이언스 $D_0 = 1/E_0$ 이고, C_2 는 Kelvin 要素의 遲延彈性 컴플라이언스 $D_r = 1/E_r$ 이고, C_3 는 Kelvin 要素의 遲延時間의 逆數이며, C_4 는 dashpot의 粘性係數의 逆數이다.

回復變形時 Burger模型의 반응을 나타내는 式은

$$D(t) = C_1 - C_2 [1 - \text{Exp}(-C_3 t)] - C_4 t \dots \dots \dots (4)$$

이다.

크리이프 試驗에서 材料의 단면적에 대한 一定應力 σ_0 는 미리 결정되므로 數直解法으로 구한 係數 C_1, C_2, C_3 , 및 C_4 로부터 E_0, E_i, τ_i 및 η_v 를 구하였다.

3. 結果 및 考察

가. 응력이완

1) 履歷損失

그림 1에서 보는 바와 같이 재료내의 공극의 존재 및 표면의 약한 세포등에 의하여 발생되는

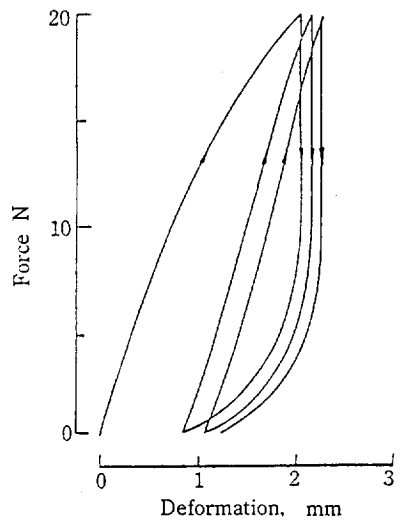


Fig. 1. Hysteresis curves of rice stem.

殘留變形 또는 塑性은 재하 및 하중제거를 반복할 경우 감소하여 나타났다.

재료에 半徑方向으로 압축하중을 작용시켜 첫 번째 재하 및 하중제거로서 얻어진 곡선은 탄성 변형에 대한 하중의 크기, 즉 彈性係數를 나타낸다. 20N의 하중을 재하시 곡선의 기울기는 1회 시에 비하여 2회 및 3회때에 크게 나타나 재료의 소성에 의한 加工硬化 現象을 보였지만 탄성계수는 변하지 않았다. 벼줄기에서는 일부의 塑性變形으로 인하여 폐쇄 고리를 만들지 못하고 彈塑性 履歷(elasto-plastic hysteresis) 反應을 보였다. 재하 및 하중제거 과정에서 일부의 에너지 損失로 재하시 일(work)과 하중제거시 일의 차이, 즉 履歷損失이 일어났다.

2) 載荷速度에 따른 應力弛緩

재료에 하중을 가함과 동시에 變形이 발생되므로 載荷速度가 느릴경우 재하도중의 應力弛緩部分은 측정되지 않는다. 그러나 재료에 충격을 주지 않으면서 실제 일어나는 應력이완을 측정할 수 있을 정도로 瞬間的으로 재하할 수 있는 방법은 없다. 따라서 載荷速度를 각각 1 mm/min, 4 mm/min, 20 mm/min로 재하시 應력이완

반응은 그림 2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 재하속도가 느릴수록 載荷直後 일어나는 初期弛緩이 작았는데, 이러한 결과는 재하속도가 느릴수록 재하과정에 발생한 이완의 크기가 증가하기 때문이다.

一定應力 水準에 이르는 載荷速度에 따라 弛緩反應을 예측하기 위한 一般化 Maxwell 模型의 變數들은 표 3과 같다. 3개 요소의 弛緩時間 τ_1 , τ_2 및 τ_3 는 재하속도가 증가할수록 감소하는 결과를 보인 반면, 이완능력은 둘째 및 셋째 요소의

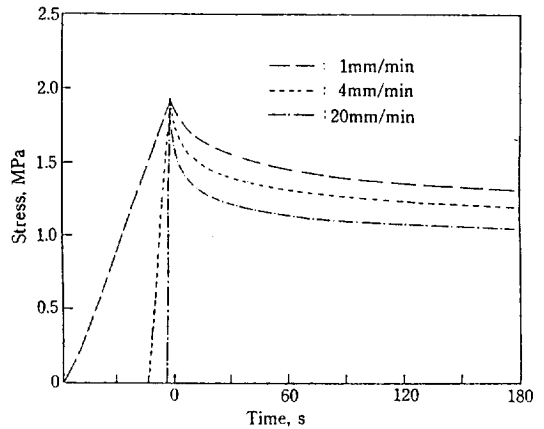


Fig. 2. Effects of rate of loading on stress relaxation for Samkang rice stem.

Table 2. Parameters of generalized Maxwell model as related to rate of loading for Samkang.

Rate of loading mm/min	σ_1		τ_1 s	σ_2		τ_2 s	σ_3		τ_3 s
	kPa	%		kPa	%		kPa	%	
1	1295	70	1430	353	19	31.0	210	11	3.5
4	1261	68	1259	361	19	29.3	235	13	2.3
20	1214	65	1189	366	20	20.8	279	15	1.8

Table 3. Relaxation intensity and residual stress after given time of generalized Maxwell model as related to rate of loading for Samkang.

Rate of loading mm/min	Relaxation intensity kPa/s			Residual stress %	
	$\sigma_1\tau_1$	$\sigma_2\tau_2$	$\sigma_3\tau_3$	5s	30s
1	09.1	11.4	60	88	75
4	1.00	12.3	103	85	73
20	1.02	17.6	154	81	68

값 σ_2 및 σ_3 만이 재하속도가 증가할수록 증가하였다.

載荷直後 일어나는 셋째요소의 弛緩時間 τ_3 는 4초 이하로 나타났고, 이 시간내에 일어나는 응력이완은 載荷應力の 10~15% 수준이었으며, 여기에 重複되어 나타나는 둘째 요소의 이완시간 τ_2 는 20~31초였고, 이때 일어나는 응력이완은 20% 수준이었다. 첫째 요소의 이완응력은 65~70% 수준의 큰 값이었고, 이완시간이 크게 나타난 것은 粘性流動의 영향이 적음을 의미한다. 또한 載荷速度에 따른 應力弛緩強度(relaxation intensity) 및 殘留應力은 표 4와 같다.

單位時間에 대한 응력이완의 크기인 弛緩強度는 재하속도 증가에 따라 증가하였는데, 셋째 요소에서 매우 큰 값으로 나타난 것은 이완시간이 불과 몇 초에 이르기 때문이다. 셋째 및 둘째 요소의 이완이 끝나는 시간인 5초 및 30초 후의 잔류응력은 載荷速度 증가에 따라 減少하였다.

3) 초기응력 수준에 따른 응력이완

벼 줄기에 軸方向力을 가할 때 初期應力の 크기에 따른 응력이완 반응은 그림 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 初期應力の 증가에 따라 응력이완은 크게 일어났는데 그 차이는 다수계인 삼강에 비하여 一般系인 화진에서 크게 나타났다. 그결과 외력의 작용에 대하여 組織이 損傷될 가능성은 화진이 큰 것으로 인정된다.

삼강 및 화진벼의 初期應力の 크기에 따른 應

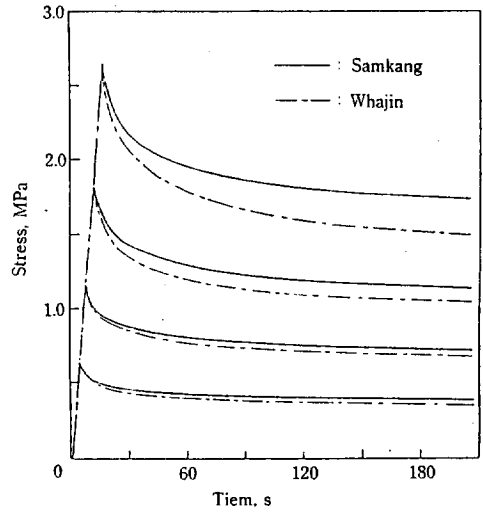


Fig. 3. Effects of initial stress levels on stress relaxation for Samkang and Whajin.

力弛緩反應을 豫測하기 위한 一般化 Maxwell 模型의 係數들은 표 5 및 6과 같다. 表에서 초기응력의 크기가 증가할때 세요소의 弛緩應力도 모두 증가하였다. 初期應力の 감소시 첫째요소의 應力弛緩時間 τ_1 은 감소하였으나, 둘째 및 셋째 요소의 이완시간 τ_2 및 τ_3 는 대체로 증가하는 경향을 보였다. 삼강벼와 달리 화진벼에서 초기응력이 2640 kPa일 경우 이완시간이 작게 나타난 것은 彈性限界를 초과하는 응력의 작용으로 인하여 재하도중 재하와 동시에 발생한 응력이완에 기인한다.

Table 4. Parameters of generalized Maxwell model as related to initial applied stress.

Variety	Initial stress kPa	σ_1		τ_1 s	σ_2		τ_2 s	σ_3		τ_3 s
		kPa	%		kPa	%		kPa	%	
Samkang	607	387	64	2003	113	19	20.0	105	17	1.4
	1070	725	68	1455	191	18	22.7	154	17	2.1
	1596	1070	67	1259	303	19	24.0	222	14	2.3
	2746	1977	72	1106	489	18	25.1	278	10	2.5
Whajin	645	450	70	2675	112	17	20.5	83	13	1.8
	1115	693	62	1865	262	23	20.1	149	13	1.9
	1910	1172	61	1271	445	23	20.5	293	13	2.0
	2640	1740	66	1088	645	24	23.6	254	10	1.7

Table 5. Relaxation intensity and residual stress of generalized Maxwell model as related to initial applied stress.

Variety	Initial stress kPa	Relaxation intensity kPa/s			Residual stress %	
		σ_1/τ_1	σ_2/τ_2	σ_3/τ_3	5s	30s
	Samkang	607	0.19	5.6	75	71
	1070	0.50	8.4	73	83	71
	1596	0.85	12.6	96	84	71
	2746	1.16	19.5	111	88	75
Whajin	645	0.17	5.5	46	84	73
	1115	0.37	13.0	78	82	67
	1910	0.92	21.7	146	81	65
	2640	1.60	27.3	149	86	71

세 요소의 應力 弛緩強度는 초기응력의 크기가 증가함에 따라 크게 증가하였는데 화진에서 더 큰 증가를 나타낸 것 과 세 요소의 弛緩時間이 화진에서 작은 값을 보인 것은 일반적 화진에서 荷重에 민감하게 반응하여 損傷을 더 받을 수 있음을 의미한다.

또한 각 요소의 이완강도는 셋째 요소에서 가장 큰 값이었으며, 初期應力의 수준에 따른 응력 이완 강도 및 5초, 30초후의 殘留應力은 표 6 및 8과 같다.

둘째 및 셋째 요소의 이완시간이 경과한 후 잔류응력은 각 요소의 이완응력 백분율에 따라 영향을 받으므로 일정한 傾向을 보이지 않았으나, 초기응력이 큰 경우 짧은 동안의 응력이완이 작기 때문에 잔류응력은 크게 나타났다.

4) 半徑 方向力에 의한 應力弛緩

벼 줄기는 栽培過程을 통하여 半徑方向 압축력을 받는 경우가 많기 때문에 半徑方向으로 작용하는 하중에 대한 이완반응을 측정 한 결과는 그림 6 및 7과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 응력이완은 4mm/min의 재하속도에 비해 20mm/min에서 크게 일어났는데 그 차이는 화진벼에서 크게 나타났으며, 또한 弛緩曲線은 軸方向力의 作用時와 달리 불연속선이 되어, 階段形狀으로 나타났다. 이러

한 결과는 纖維質에 의한 조직의 方向性에 기인하는 것으로 판단된다.

半徑方向 荷重을 20mm/min의 속도로 載荷시 삼강 및 화진벼의 응력이완 반응은 3요소 一般化

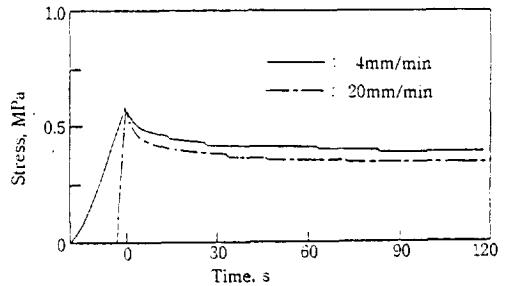


Fig. 4. Stress relaxation curves of Samkang subjected to radial loading.

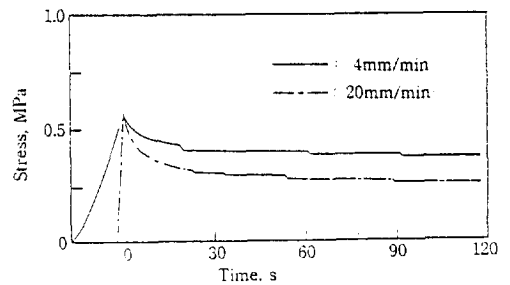


Fig. 5. Stress relaxation curves of Whajin subjected to radial loading.

Maxwell 模型으로 나타내어 分析할 수 있었으며, 모형의 係數들은 표 6과 같다. 첫째 요소의 이완응력 σ_1 은 軸方向 荷重에 의한 경우에 비하

여 작게 나타난 반면 재하직후 일어나는 셋째 요소의 이완응력 σ_3 은 둘째 要素의 이완응력 σ_2 보다 큰 것으로 나타났다.

Table 6. Stress relaxation properties of rice stems subjected to radial loading

Variety	Initial stress kPa	σ_1		τ_1 s	σ_2		τ_2 s	σ_3		τ_3 s
		kPa	%		kPa	%		kPa	%	
Samkang	574	372	65	2737	86	15	23.4	116	20	1.7
	776	420	54	2448	145	19	13.7	210	27	1.4
	995	556	56	1978	180	18	11.2	259	26	1.2
Whajin	671	384	57	1912	92	14	15.8	195	29	2.0
	1136	649	57	1864	209	18	13.6	278	25	1.4
	1500	878	59	1776	228	15	11.7	394	26	1.1

Table 7. Relaxation intensity and residual stress of rice stems subjected to radial loading.

Variety	Initial stress kPa	Relaxation intensity kPa/s			Residual stress %	
		σ_1/τ_1	σ_2/τ_2	σ_3/τ_3	5s	30s
	574	0.14	3.7	68.2	78	68
Samkang	776	0.17	10.6	150.4	68	56
	995	0.28	16.1	215.8	68	56
	671	0.20	5.8	97.5	69	58
Whajin	1136	0.35	15.4	198.6	70	58
	1500	0.49	19.5	357.3	69	59

반경방향 하중에 의한 응력이완은 初期應力의 크기가 증가함에 따라 증가하였으며 弛緩時間은 초기응력의 증가에 따라 감소하였다.

특히 셋째 요소의 이완응력은 軸方向力 작용 시에는 매우 작은 수준이었으나, 반경방향력의 작용시 이완응력은 初期應力의 20~30%에 달하는 큰 수준이었다. 이 경우 弛緩時間은 2초 이하의 값을 보였다.

반경방향 응력을 받는 경우의 應力弛緩 強度 및 5초, 30초 후의 잔류응력은 표 7과 같다. 세 요소중 셋째 요소의 이완강도가 매우 큰 값을 보여 2초 이내에 이완되는 應力이 매우 큰 값이었으나, 나머지 두 요소의 이완강도는 작은 값이었다. 따라서 5초 및 30초동안 이완으로 소멸되고 남아있는 잔류응력은 작은 수준을 유지하였다.

Table 8. Parameters of model for Samkang subjected to axial and radial loading.

Loading type	Initial stress kPa	σ_1		τ_1 s	σ_2		τ_2 s	σ_3		τ_3 s
		kPa	%		kPa	%		kPa	%	
Axial	913	609	67	1705	189	21	18.3	115	13	1.6
Radial	911	592	65	2339	141	16	11.2	177	19	1.3

Table 9. Relaxation intensity and residual stress of Samkang subjected to axial and radial loading.

Loading type	Initial stress kPa	Relaxation intensity kPa/s			Residual stress %	
		σ_1/τ_1	σ_2/τ_2	σ_3/τ_3	5s	30s
Axial	913	0.36	10.3	71.3	83	70
Radial	911	0.25	12.6	136.2	75	65

表 8 및 9는 삼강비에 4mm/min의 재하속도로 軸方向 및 半徑方向 荷重을 작용시켰을 경우 模型의 係數들을 비교한 결과이다. 표 8에서 보는 바와 같이 축방향 하중에 의한 세 요소의 弛緩應力은 첫째 要素의 값이 가장 크고, 셋째 要素에서 13%의 가장 작은 값이었으나 반경방향 하중에 의한 弛緩特性은 셋째요소의 이완응력이 19%수준에 이르고, 둘째요소에서 가장 작은 값을 보여 반경방향 하중 작용시 응력이완은 재하 직후 매우 크게 일어나는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 표 9에서 보는 바와 같이 셋째요소의 應力弛緩強度는 半徑方向의 경우 매우 큰 값으로 나타나고, 재하직후 짧은 순간에 이완이 완료되는 셋째요소와 둘째요소의 이완이 완료된 후의 殘留應力이 작게 나타난 것으로도 설명된다. 결론적으로 벼 줄기에 半徑方向 荷重이 작용하면 오랫동안 저항하지 못하고 쉽게 파괴되어 損傷을 받을 가능성이 큰 것으로 判斷된다.

나. 크리이프 및 회복 특성

1) 응력수준에 따른 크리이프

컴퓨터에 의한 非線型 回歸分析에 의하여 벼 줄기의 크리이프 및 回復反應을 分析한 결과 각각 4要素 Burger 模型으로 modeling 할 수 있었다. 여기서 실험조건을 제거한 상태에서 크리이프 및 回復特性을 나타내고자 크리이프 컴플라이언스를 구하였다.

그림 6 및 7은 삼강 및 화진비의 軸方向 荷重에 대한 크리이프 變形曲線을 나타낸다. 作用應力의 增加에 따라 크리이프 컴플라이언스는 증가하는 경향이었는데 삼강에서 作用應력이 2 MPa를 초과했을 때 係數 C_1 로 측정되는 dash-

pot의 粘性係數가 감소하는 粘性 크리이프가 증가하여 定常狀態 크리이프 反應을 나타냈고, 作用應力 2MPa 이하에서는 점성계수가 크므로 粘性 크리이프가 작은 代數的 크리이프 反應이 나타났다. 화진에서는 作用應力 1.8MPa 정도 이상일때 定常狀態 크리이프 反應을 보여 삼강보다 損傷받을 가능성이 큰 것으로 判斷된다.

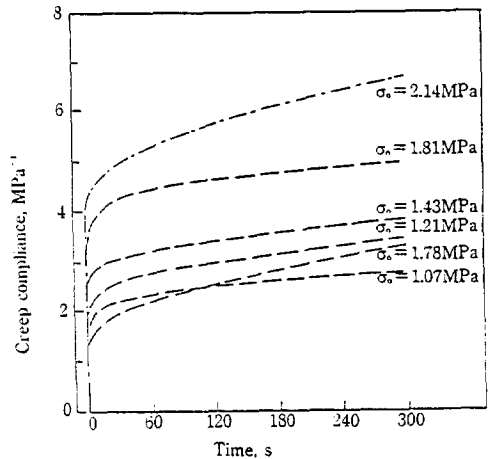


Fig. 6 Creep curves of Samkang under axial compression.

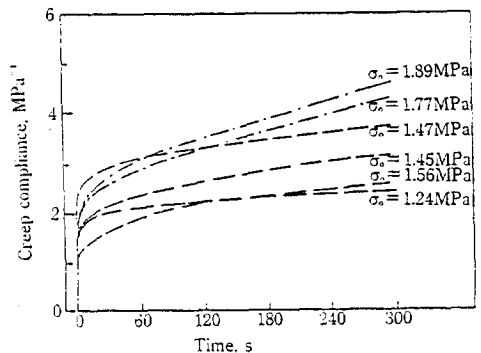


Fig. 7 Creep curves of Whajin under axial compression.

삼강 및 화진벼의 弛緩反應 豫測에 사용된 Burger 模型의 係數와 變數들은 표10 및 11과 같다. 표에서 작용응력의 증가에 따라 계수 C_2 는 감소하였고 나머지 계수들은 증가하는 경향이있

으며, 이에 따라 Burger 모형의 변수들중 瞬間 彈性계수 E_0 , 遲延彈性係數 E_r 및 粘性係數 η_v 는 작용응력 증가와 함께 증가하였고, Kelvin 요소의 遲延時間 τ_k 는 감소하는 것으로 나타났다.

Table 10. Coefficients of Burger's model for rice stems.

Variety	Applied stress MPa	Coefficients			
		$C_1 \cdot 10^{-2}$	$C_2 \cdot 10^{-3}$	$C_3 \cdot 10^{-2}$	$C_4 \cdot 10^{-5}$
Samkang	0.844	2.45	7.43	2.09	1.03
	1.390	1.87	5.28	3.22	1.51
	1.861	1.58	4.78	6.93	2.45
Whajin	1.212	2.12	6.45	2.77	1.86
	1.560	1.98	5.54	5.21	2.34
	1.805	1.88	5.07	7.96	10.98

Table 11. Parameters of Burger's model for rice stems

Variety	Applied stress MPa	Parameters				
		E_0	E_r	τ_k	η_v	
		MPa	MPa	s	MPa	s
Samkang	0.844	40.9	134.6	47.9	97	100
	1.390	53.5	189.4	31.1	66	200
	1.861	63.3	209.2	14.4	40	800
Whajin	1.212	47.1	155.0	36.1	53	700
	1.568	50.5	180.5	19.2	42	700
	1.805	53.1	197.2	12.6	91	10

표 11에 의하면 탄성계수 및 지연탄성계수는 一般系 화진에 비하여 다수계 삼강에서 큰 값을 갖기 때문에 Burger 모형의 스프링의 反應에 해당하는 순간탄성과 모형의 Kelvin 要素에서 지연시간동안 漸進的으로 나타나는 지연탄성은 약간 큰 값으로 나타났다. Burger 模型의 粘性 크리이프의 역수인 점성계수가 삼강에서 크게 나타난 것은 粘性 變形이 작게 일어났음을 의미한다.

특히 作用應力 增加시 화진벼의 粘性係數가 크게 감소한 것은 하중 작용시 일어나는 크리이프의 대부분을 粘性流動이 차지하는 결과를 낳았다.

이삭별 때 벼 줄기의 彈性係數 E_0 는 약 40~60 MPa 수준으로서 收穫時期의 60~80 MPa에 비하여 약간 작았으며 ⁷⁾ 지연탄성계수는 수확시기에 비하여 더욱 작게 나타난 것은 粘彈性이 작은 재료이기 때문이다.

遲延時間 τ_k 는 탄성변형에서 점탄성 변형으로 옮겨가는 동안 크리이프 曲線의 형태를 결정하며 측정결과 10~50초 정도의 작은 값이었는데 이는 過度的 크리이프에서 짧은 시간내에 定常狀態 크리이프로 변함을 의미한다.

점성요소s의 변형에 반비례하는 粘性係數 η_v 는 정상상태에 도달한 크리이프 곡선의 기울기를 결정하는 요소로서 정상상태의 粘性크리이프가

매우 작게 나타난 것은 점성계수가 크게 나타난 데 기인한다.

결론적으로 이삭벨 때 벼 줄기의 力學의 特性은 彈性이 비교적 크고 粘性이 작은 粘彈性 材料임을 확인할 수 있었다.

2) 회복 특성

벼 줄기에 軸方向 荷重을 載荷 및 荷重除去 시키면 그림 8 및 9와 같은 크리이프 및 回復曲線을 나타내며 이러한 變形特性은 Burger 模型으로 나타낼 수 있었다.

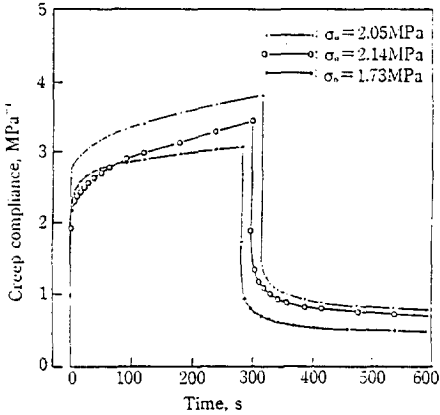


Fig. 8 Creep and recovery curves for Samkang subjected to axial loading.

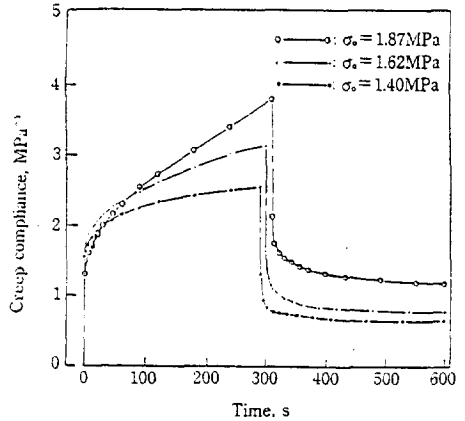


Fig. 9. Creep and recovery curves for Whajin subjected to axial loading.

Table 12. Coefficients of Burger's model for creep recovery behavior.

Variety	Property	Applied stress kPa	Coefficients			
			C ₁ 10 ⁻²	C ₂ 10 ⁻³	C ₃ 10 ⁻²	C ₄ 10 ⁻⁵
Samkang	creep	2037	1.68	6.42	3.50	1.81
	recovery	2016	1.21	5.04	5.41	0.37
Whajin	creep	1463	1.55	6.61	4.46	2.53
	recovery	1450	1.33	4.17	5.62	0.4

Creep compliance : $D(t) = C_1 + C_2[1 - \text{Exp}(-C_3 \cdot t)] + C_4 \cdot t$

Recovery : $D(t) = C_1 - C_2[1 - \text{Exp}(-C_3 \cdot t)] - C_4 \cdot t$

Table 13. Parameters of Burger's model for Creep and recovery behavior.

Variety	Property	Applied stress kPa	Parameters			
			E ₀ MPa	E _r MPa	τ _k s	η _v MPa s
Samkang	creep	2037	59.5	155	28.6	55 200
	recovery	2016	82.6	198	18.5	268 100
Whajin	creep	1463	64.5	151	22.4	39 500
	recovery	1450	75.2	240	17.8	227 000

크리이프 및 回復過程에 대한 Burger 모형의 係數들은 서로 다른 값을 보였다. 표 12에서 載荷時에 크리이프 회복 과정의 彈性係數, 지연탄성계수 및 점성계수는 재하시에 비하여 감소하였고, 遲延時間은 약간 증가하였다. 따라서 응력이 작용할 때 크리이프 변형은 하중 제거후 모두 回復되지 못하고 변형의 일부는 殘留變形으로 남게 되었다.

作用應력이 약 2MPa일 때 삼각의 회복시 탄성계수는 크리이프 과정의 값보다 40% 증가하였고, 지연탄성은 27% 증가하였다.

한편 지연시간은 65% 수준으로 감소하였고 점성계수는 약 5배 증가하였으며, 화진에서도 이와 유사한 결과를 나타내어 재하시 크리이프 변형에 비하여 회복 변형시 리올리지 特性은 彈性이 증가하고 粘性이 감소하는 것으로 확인되었다.

4. 結 論

본 研究은 이삭벨 때 時期의 비의 리올리지 特性을 결정하기 위하여 軸方向 및 半徑方向의 압축하중을 받는 삼각 및 화진의 應力弛緩 반응을 一般化 Maxwell 模型으로 나타내었고, Burger 模型을 이용하여 軸方向에 의한 크리이프 및 回復 特性을 구명코자 하였다.

시험결과를 要約하면 다음과 같다.

1. 비 줄기의 半徑方向으로 하중을 가하여 壓縮試驗을 실시한 결과 뚜렷한 履歷損失 現象이 나타났다.

2. 壓縮荷重을 받는 비 줄기의 弛緩反應은 3 要素 Maxwell 模型을 이용하여 만족하게 나타낼 수 있었으며, 응력이완은 재하속도에 큰 영향을 받았으나 弛緩時間은 상대적으로 큰 영향을 받지 않았다. 따라서 재하속도 증가에 따라 應力弛緩 強度는 증가하였고 이완시간 및 殘留應力은 감소하였다.

3. 作用應力の 增加에 따라 응력이완 강도 및 잔류응력은 증가하였으나, 이완시간은 큰 영향을 받지 않았으며, 오직 첫째 要素의 弛緩時間은 감소하였다. 축방향 하중의 작용시와 半徑方向

荷重을 작용시의 應力弛緩 模型의 係數들은 큰 차이를 나타냈는데, 특히 반경방향의 하중 작용시 셋째요소s의 弛緩應力은 매우 큰 값을 나타냈다.

4. 비 줄기에 壓縮應力이 작용할 때 삼각비의 경우 작용응력 2.0MPa 이상에서 定常狀態 크리이프가 일어났으나, 화진비에서는 이보다 약간 작은 작용응력에서 일어나 外力를 받았을 때 화진비가 損傷을 받을 가능성이 더 큰 것으로 사료된다.

5. 작용응력의 증가에 따라 Burger 模型의 彈性係數 및 遲延彈性係數는 약간 증가하였으나, 遲延時間 및 粘性係數는 크게 감소하였다. 또한 비 줄기의 크리이프 特性을 나타내는 순간 탄성계수는 약 40~60MPa이었으며, 점성계수는 매우 커 비 줄기는 점성변형에 비하여 彈性變形이 지배적인 粘彈性材料라고 판단된다.

6. 회복과정의 彈性係數, 지연탄성계수 및 粘性係數는 크리이프 과정에 비하여 감소하였으나, 지연시간은 약간 증가하였으며 크리이프 변형의 일부는 하중 제거후에도 殘留變形으로 남는 것으로 나타났다.

LIST OF SYMBOLS

- C_i = coefficient of burger's model
- $D = 1/E$ = instantaneous elastic compliance, MPa^{-1}
- $D_o = 1/E_o$ = retarded elastic compliance, MPa^{-1}
- $D_r = 1/E_r$ = retarded elastic compliance of Kelvin element, MPa^{-1}
- $D(t) = \epsilon(t)/\sigma_o$ = creep compliance function, MPa^{-1}
- E = axial elastic modulus, MPa
- E_o = instantaneous elastic modulus of Burger's model, MPa
- E_r = retarded elastic modulus of Kelvin element, MPa
- $E(t) = \sigma(t)/\epsilon_o$ = compressive relaxation modulus dashpot
- t = time, s

$\alpha_i = 1/i =$ parameter of the i -th Maxwell element,
 s^{-1}
 $\epsilon_0 =$ initial strain for relaxation
 $\epsilon(t) =$ strain at time t
 $\eta_v =$ viscosity of the free dashpot of the Burger's
 model, $MPa \cdot s$
 $\sigma =$ nominal stress, MPa
 $\sigma_i =$ initial stress of the i -th Maxwell element,
 MPa
 $\sigma_s =$ constant stress of Burger's model, MPa .
 $\sigma(t) =$ stress at time t , MPa .
 $\tau_i =$ relaxation time of the i -th Maxwell element,
 s
 $\tau_k =$ retardation time of the Kelvin element, s

參 考 文 獻

1. Chang, C.S. and C.R. Martin. 1983. Rheological properties of grain dust. Trans. of the ASAE 26(4) : 1249-1256.
2. Mohsenin, N. and J.Zaske. 1976. Stress relaxation and energy requirements in compaction of unconsolidated materials J. of Agri. Eng. Res. 21(2) : 193-205.
3. Morrow, C.T. and N.N. Mohsenin. 1966. Consideration of selected agricultural products as viscoelastic materials. Trans. of the ASAE 31(5) : 686-698.
4. Pitt, R.E. 1982. Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue. Trans. of the ASAE 25(6) : 1776-1784.
5. Yamaguchi, S., S. Yamazawa and K. Wakabayashi. 1981. On relaxation modulus of rice endosperm. JASM 43(2) : 239-245.
6. Zoerb, G.C., and C.W. Hall 1960. Some mechanical properties of grains. J. of Agri. Eng. Res. 5(1) : 83-93.
7. 許潤根, 車均度, 1987. 水稻의 力學的 및 리올리지 特性에 관한 研究. 충남대 농기술연구보고 14(1) : 98-133.
8. 許潤根, 李喆基, 金滿秀, 1989. Mat 苗의 크리이프 및 回復特性. 한국농업기계학회지 14(3) : 181-187.