

# Mat 苗의 크리이프 및 回復特性

## Creep and Recovery Properties of Mat-type Rice Seedlings

許潤根\*, 李喆基\*, 金滿秀\*  
Y. K. Huh, C. K. Yi, M. S. Kim

### Summary

The mechanical and rheological properties of agricultural materials which influence the machine design or handling are not completely understood.

Agricultural materials do not react in a purely elastic manner, and their responses when subjected to stress and strain appear a combination of elastic and viscous behavior.

Many researchers have studied the mechanical and rheological properties of the various agricultural materials, but those properties are available mostly for foreign varieties of agricultural products.

Rheological properties of rice seedlings become important to formulate the principles governing their mechanical behavior.

The objectives of this study were to experimentally determine the creep and recovery behavior of rice seedlings of one Japonica-type and one Indica x Japonica hybrid in the transplanting age.

The results of this study are summarized as follows;

1. The compression creep and recovery behavior of mat-type seedlings could be described by 4-element Burger's model.
2. The steady-state creep appeared at the stress larger than 0.8 MPa and the logarithmic creep appeared at the stress smaller than 0.8 MPa.
3. In the compression creep test of the rice seedlings, the instantaneous elastic modulus of Burger's model showed the range from 20 to 40 MPa. The higher value of absolute viscosity for the rice seedling explained that the rice seedlings were viscoelastic materials.
4. In the recovery test of the rice seedlings, there was a tendency that the higher permanent strain of all samples was observed under the smaller stress being appeared, and the larger permanent strain in Dongjin was observed than in Samkang.

### 1. 緒 論

70년대 후반기부터 水稻作의 一貫機械化體系 수립을 위해 移秧機를 비롯한 신기종 農業機械가 보급된 이래, 기계 이양면적이 확대되고 우리의 실정에 맞

는 作業機의 개발 및 보급에 대한 관심이 높아지고 있다. 그동안 機械作業에 있어서의 量的 및 質的인 향상을 기하기 위해서 농업기계 자체에 대한 研究, 開發에는 힘을 기울여 왔으나, 作業對象 作物에 대한 연구는 미흡하였다.

\*충남대학교 농과대학 농업기계공학과

국내에서 이루어진 이 분야에 대한 연구는 밀의 硬度測定, 穀物の 동마찰계수, 곡물의 物理的 特性에 관한 연구<sup>1)</sup>, 통일벼의 탈립에 관한 力學的 分析, 水稻의 剪斷抵抗에 관한 연구, 牧草 및 옥수수 줄기의 剪斷抵抗에 관한 연구 및 水稻의 도복에 관한 연구 등이 수행되었고, 최근에 수확시기에 있는 벼줄기의 粘彈性 特性<sup>2)</sup> 및 水稻의 力學的 및 리올러지 특성에 관한 연구<sup>3)</sup>가 발표되었으나, 水稻苗의 리올러지 특성에 관한 연구 결과는 보고된 바 없는 실정이다. 반면 외국에서는 작물이나 농산물의 力學的 特性에 관한 시험이 오래전부터 실시되었고, 리올러지 특성에 관한 연구는 일찌기 Zoerb등<sup>4)</sup>이 應力 弛緩試驗을 통하여 곡물의 리올러지 特性을 구명하였으며, Mohsenin등<sup>5,6)</sup> 많은 연구자에 의해 곡물, 과채류 및 목초 등의 리올러지 특성 연구가 이루어졌다.

이제는 우리의 농업도 작업 및 농산물의 품질향상을 위한 노력이 있어야 되고, 이를 위해서는 농작물의 物理的 및 力學的 特性의 구명이 요구되며, 역학적 특성의 완전한 파악을 위해서는 리올러지 特性의 연구가 요청되고 있다.

실제 물체의 學動은 항상 理想的인 물체와는 다소 다른 성질을 갖는데 특히 農作物에 있어서 그러하다.

하중을 받는 상태에서의 작물의 力學的 特性인 應力-變形의 관계는 변형속도에 영향을 받는다. 따라서 작물의 응력-변형관계는 應力, 變形 및 時間의 세 요인에 의해 정확히 파악될 수 있다.

농작물의 力學的 特性은 시간 의존적이므로 그의 彈性 및 粘性的 性質을 결정하기 위해서는 시간의 효과를 고려한 리올러지적 방법을 이용하여 측정하게 된다.

Mohsenin등<sup>4,5)</sup>은 模型에 의해서 실제 農産物의 크리이프 특성과 유사한 정성적 모형을 제시하였다.

Chang과 Martin<sup>7)</sup>은 非線型 回歸分析法를 이용하여 분석한 결과 4 요소 Burger 모형에 의해 grain dust의 크리이프 특성을 예측할 수 있었다.

Ashcroft등<sup>8)</sup>은 절단목초의 크리이프 특성 연구에서 Burger 모형을 이용하였고, 지연시간은 함수율과 시편의 절단길이와는 무관하였다고 보고하였다.

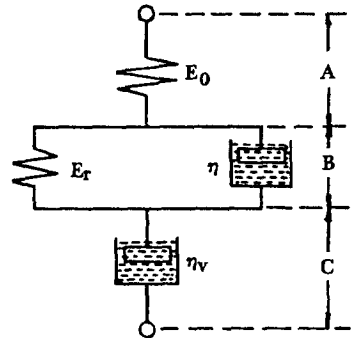
許<sup>9,10)</sup>는 收穫시기에 있는 벼줄기의 리올러지 특성 연구에서 Burger 모형을 적용한 壓縮 크리이프 시험

결과 이 模型에 의해 벼줄기의 特性을 충분히 예측할 수 있었으며, 모형의 계수는 수치해법을 이용하여 결정하였다.

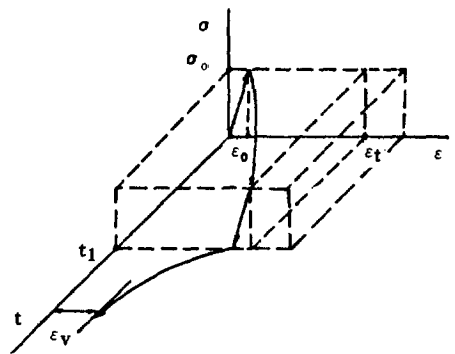
따라서 본 연구에서는 機械移秧時期에 있는 mat-苗의 크리이프 및 回復特性을 구명하고자 다수계 품종 삼강과 일반계 품종 동진 2개의 품종을 시험 대상으로 應力水準에 따른 크리이프 및 回復特性을 실시하여 수학적으로 模型化하고 실험치와 모형에 의한 豫測值를 비교, 분석코자 한다.

## 2. 理論的 考察

農作物의 크리이프 및 回復特性을 나타내는 模型으로는 스프링, Kelvin 요소 및 dashpot를 직렬 결합한 4要素 Burger 模型이 이용된다.



(a)



(b)

Fig. 1. Burger's model showing the stress-strain-time behavior.

이 模型에 瞬間應力  $\sigma_0$ 를 계속 가하면 스프링에 의한 瞬間彈性變形 ( $\epsilon_0$ )이 일어난 후 시간에 의존하

는 두 가지의 크리이프 과정이 중첩되어 나타나는데, 첫째성분은 시간에 따라 크리이프 속도가 감소하는 過渡的 크리이프 ( $\epsilon_k$ )이고, 둘째성분은 일정한 크리이프 속도인 粘性的 크리이프 ( $\epsilon_v$ )이다. 또한 일정시간 경과후 작용응력  $\sigma_0$ 를 제거하면 瞬間彈性變形은 순간적으로 回復되고, 시간의 경과에 따라 Kelvin 요소에 의한 변형 ( $\epsilon_k$ )은 서서히 回復되는 반면 粘性要素에 의한 변형 ( $\epsilon_v$ )은 회복되지 않고 영구변형으로 남게 된다. 이 과정을 도식적으로 나타내면 다음 그림 2와 같다.

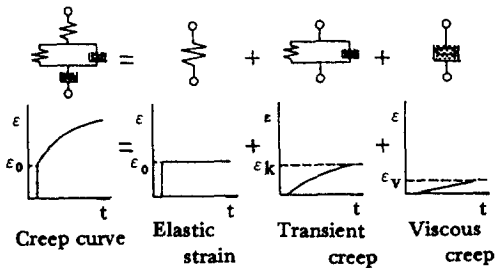


Fig. 2. The superposition of two separate creep processes.

일정응력을 받는 물체의 크리이프 특성 시험에서 一般解는 다음의 방정식이 된다.

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_r} \cdot [1 - e^{-t/\tau_k}] + \frac{\sigma_0}{\eta_v} \cdot t \dots \dots \dots (1)$$

여기서,  $\tau_k = \eta/E_r$ 는 지연시간이다.

시간  $t=t_1$ 일 때 응력  $\sigma_0$ 가 제거되면 변형의 彈性부분은 瞬間적으로 소멸되고 크리이프 변형은 시간에 따라 減少하여  $\sigma_0 \cdot t_1/\eta_v$  값에 漸近線을 이룬다. 변형의 감소는 식 (1)에서 시간  $t=t_1$ 일 때 응력  $\sigma$ 가 첨가되는 중첩의 원리에 의하여 계산된다.

따라서 시간이  $t > t_1$ 인 동안의 回復은

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_r} \cdot [1 - e^{-t/\tau_k}] + \frac{\sigma_0}{\eta_v} \cdot t_1 \dots \dots \dots (2)$$

이 되며, 그림 2는 4 요소 Burger 模型의 크리이프 및 回復學動을 나타낸다.

농작물의 크리이프 특성을 비교 분석하기 위해서는 응력에 대한 變形率의 比인 크리이프 컴플라이언스 [ $\epsilon(t)/\sigma_0$ ]를 예측하여 분석하는 것이 바람직하며, 식 (1)로부터 다음의 컴플라이언스 식을 얻을 수 있다.

$$D(t) = D_1 + D_2 \cdot [1 - e^{-t/\tau_k}] + D_3 \cdot t \dots \dots \dots (3)$$

여기서  $D_1 = 1/E_0$ 는 初期 컴플라이언스,

$D_2 = 1/E_r$ 는 遲延 컴플라이언스,

$D_3 = 1/\tau_k$ ,  $D_4 = 1/\eta_v$ 이다.

### 3. 材料 및 方法

#### 가. 實驗材料

본 實驗에 사용된 供試材料는 표 1과 같고, 忠淸南道 農村振興院에서 1988년 4월 18일에 플라스틱 育苗床에 播種하여 標準栽培法에 의해 보온 못자리에서 育苗된 苗로서 一般系 品種 東津벼와 多收系 品種으로는 三剛벼를 사용하였으며, 파종후 45일 된 3葉의 苗를 試料로 채취하여 含水率變化를 最小화하기 위해 플라스틱 용기에 보관한 다음 苗줄기의 아랫부분을 壓縮 및 리올러지 特性의 實驗材料로 사용하였다.

#### 나. 實驗裝置 및 方法

각 試料에 있어서 斷面積의 영향을 제거하기 위해서는 작용하중을 應力로 표시하는 것이 바람직하다. 그러므로 실험전에 각 苗줄기의 아랫부분을 길이 10mm로 절단하여 각각의 斷面積을 계산하였다. 이때 줄기의 단면형상은 橢圓形 斷面으로 가정하여 버어니어 캘리퍼스를 이용하여 長徑 및 短徑을 측정하였으며, 이 단면적과 동일한 면적을 갖는 원의 지름으로서 묘줄기의 지름을 나타냈다. 이때 전 단면적은 同質로 가정하였다.

Table 1. Agronomic data of rice seedlings.

Agronomic data	In. x Ja. hybrid* Japonica-type	
	Samkang	Dongjin
Plant length, mm	190	260
No. of leaves	3	3
Equivalent stem dia., mm	2.3	2.2
Cross-section area, mm <sup>2</sup>	4.2	3.8
Moisture content, % (w.b.)	81.0	80.0

In. x Ja. hybrid\*: Indica x Japonica hybrid

또한 모줄기의 흡수율 측정은 항온건조기를 이용 105℃에서 24시간 동안 건조한 후 무게를 계량하여 濕量基準으로 표시하였다.

본 실험은 그림 3과 같은 測定裝置를 제작하여 실시하였으며, 2N 및 3N의 死荷重을 순간적으로 작용시켜 600초 동안의 변형량을 dial gauge로부터 읽어 시간에 따른 변형율의 변화, 즉, 크리이프 特性을 측정하였다.

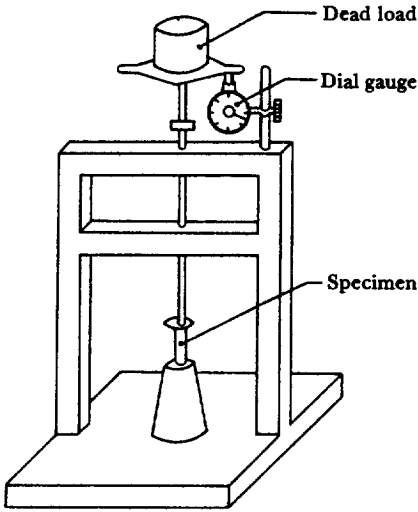


Fig. 3. Creep and recovery testing apparatus.

크리이프 特性에 대한 컴플라이언스 식은 4 요소 Burger 模型을 정의하게 되며, 이때 Burger 모형의 계수  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  및  $D_4$ 는 컴퓨터에 의한 回歸分析法에 의해 결정하였다.

또한 시료가 일정량 변형된 후 하중을 제거하여 탄성회복, 지연탄성회복 및 영구변형 등을 측정하여 回復特性을 조사하였다.

#### 4. 結果 및 考察

##### 가. 應力水準에 따른 크리이프 特性

作用應力の 크기에 따른 묘의 크리이프 特性을 나타내는 4要素 Burger 模型의 각 계수들은 표 2와 같으며, 三剛과 東津의 크리이프 컴플라이언스는 그림 4 및 5와 같다.

作用應力이 큰 0.81MPa의 경우 定常狀態 크리이프 현상을 나타냈으나 이보다 작은 應力이 작용한 나머지 경우에 對數的 크리이프 현상을 보였는데 이러한 결과는 粘性要素의 粘性係數가 작은데 기인되는 것으로 판단된다.

크리이프 컴플라이언스를 나타내는 리올러지 방정식 (3)에서  $D_1$ 은 순간탄성 컴플라이언스로서  $1/E_0$ 이며, 표 2-A에 나타난 시험 결과 약  $24 \text{ KPa}^{-1} \sim 47 \text{ KPa}^{-1}$  사이의 값이었다. 이 값은 묘의 탄성적인 특성을 나타낸다.  $D_2$ 는 지연탄성 컴플라이언스  $1/E_r$ 로서 대수적 크리이프 변형에서  $23 \text{ KPa}^{-1} \sim 30 \text{ KPa}^{-1}$  정도이었으며 점성계수  $\eta$ 에 의해 시간에 의존하는 粘彈性的 성질을 나타낸다.  $D_3$ 는 지연 시간의 역수  $1/\tau_k$ 로서 탄성적인 변형에서 점성적인 변형으로 변화해가는 동안 크리이프 曲線의 形상을 결정해주며, 지연시간은 표 2-B와 같이 20~30초 정도이었다.  $D_4$ 는 粘性係數  $\eta_v$ 에 반비례하며 시험결과 약  $1.2 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-5} (\text{MPa} \cdot \text{s})^{-1}$ 의 값을 보여 정상상태에 도달한 크리이프 曲線의 기울기가 매우 완만함을 나타냈다.

실험결과 瞬間彈性係數  $E_0$ 는 약 20~40 MPa 정도로 나타났으며, 지연탄성계수  $E_r$ 은 30~40 MPa 정도로 나타나  $E_r$ 과  $E_0$ 가 서로 큰 차이를 보이지 않았기 때문에 반응초기에 일어나게 되는 過渡的 크리이프는 큰 것으로 나타났다. 또한 모형에서 Kelvin 要素에 해당하는  $E_r$ 의 값이 상대적으로 작은 것은 모줄기에서의 粘彈性이 큰 값을 갖기 때문이다.

遲延時間은 약 20~35초로 비교적 작게 나타났으며, 이는 크리이프가 짧은 시간내에 定常狀態 크리이프로 변화함을 의미한다.  $D_4$ 의 값이 작게 나타난 것은 粘性係數  $\eta_v$ 가 크기 때문에 정상상태의 점성크리이프가 작게 나타남에 기인하며, 이는 모줄기가 점성이 작고 탄성이 비교적 큰 粘彈性體임을 의미한다.

##### 나. 品種에 따른 크리이프 및 回復特性

一般系의 東津과 多收系의 三剛에 대한 크리이프 특성을 측정한 결과는 그림 6 및 7과 같다. 그림 6과 표 2-A에서 보는 바와 같이 순간탄성 컴플라이언스와 지연탄성 컴플라이언스는 다수계인 三剛에서

Table 2-A. Creep compliance of Burger's model for rice seedlings.

Variety	Applied stress $\times 10^{-3}$ MPa	Coefficients				Creep type
		$D_1 \times 10^{-2}$ MPa $^{-1}$	$D_2 \times 10^{-2}$ MPa $^{-1}$	$D_3 \times 10^{-2}$ S $^{-1}$	$D_4 \times 10^{-5}$ (MPa $\cdot$ s) $^{-1}$	
Samkang	546	4.71	2.33	3.31	1.21	Logarithmic
	618	3.67	2.87	3.98	2.24	Logarithmic
	811	4.40	3.34	5.13	3.39	Steady-state
Dongjin	537	4.30	2.30	5.03	2.12	Logarithmic
	611	3.01	2.78	3.51	1.63	Logarithmic
	688	2.38	3.00	2.84	1.35	Logarithmic

Table 2-B. Parameters of Burger's model for rice seedlings.

Variety	Applied stress $\times 10^{-3}$ MPa	Parameters of Burger's model				Creep type
		$E_0$ MPa	$E_r$ MPa	$\tau_k$ s	$\eta_v$ MPa $\cdot$ s	
Samkang	546	21.23	42.98	30.2	97383	Logarithmic
	618	27.27	34.90	25.1	44734	Logarithmic
	811	22.73	29.97	19.5	29483	Steady-state
Dongjin	537	23.28	43.35	19.9	49306	Logarithmic
	611	33.26	35.93	28.5	41256	Logarithmic
	688	42.11	33.36	35.2	74206	Logarithmic

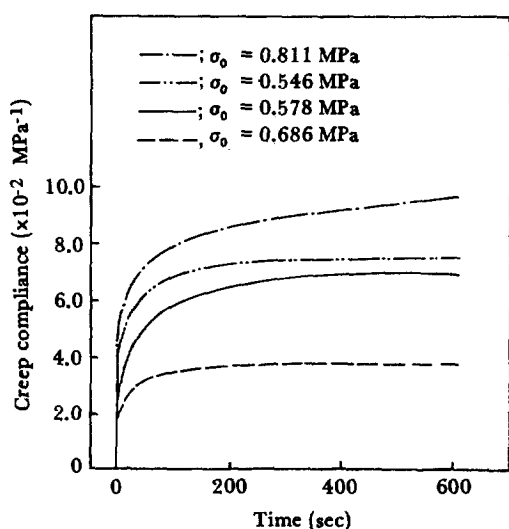


Fig. 4. Creep compliance curves for Samkang rice seedling.

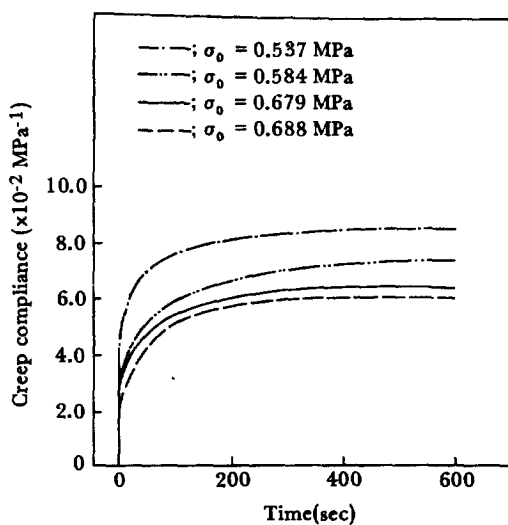


Fig. 5. Creep compliance curves for Dongjin rice seedling.

약간 크게 나타났으며, 일반계인 東津에서는 약간 작게 나타났다. 또한 지연시간은 품종간에 뚜렷한 차이가 없는 20~35초를 나타냈으며, 苗의 粘性流動을 나타내는 점성계수  $\eta$ 는 두 품종에서 모두 큰 값을 나타내어 점성변형이 작은 현상을 보였다.

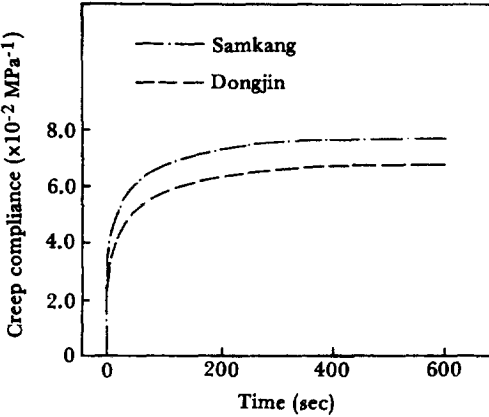


Fig. 6. Compression creep behavior for Samkang and Dongjin varieties. (initial load = 3.0N)

일정시간 경과후 하중제거시의 回復特性을 나타내는 각 계수는 표 3과 같다. 이 계수들은 앞에서 크리이프 특성의 예측에 이용된 모형을 그대로 적용하여 회복특성을 예측한 값들이다.

표에서 보는 바와 같이 初期變形率에 대한 360초 후의 영구변형은 작용하중이 작을수록 또는 초기변형율이 큰 경우 크게 나타났으며, 일반계인 東津이 다수계인 三剛보다 영구변형이 큰 것으로 나타났다. 따라서 東津이 三剛보다 점성이 더 큰 粘彈性體라고 판단된다.

Table 3. Recovery properties of rice seedlings.

Variety	Applied stress $\times 10^{-3}$ MPa	Initial strain $\times 10^{-2}$	Coefficients				Permanent strain after 360 s.	
			$D_1$ $\times 10^{-2}$	$D_2$ $\times 10^{-2}$	$D_3$	$D_4$ $\times 10^{-5}$	$\times 10^{-2}$	%
Samkang	494	1.96	3.95	-1.22	0.23	-1.00	1.09	50.23
	437	2.17	4.95	-1.93	0.26	-1.47	1.17	59.85
Dongjin	539	2.66	4.93	-1.52	0.30	-0.57	1.72	65.04
	516	3.23	6.25	-1.69	0.30	-0.49	1.73	70.06

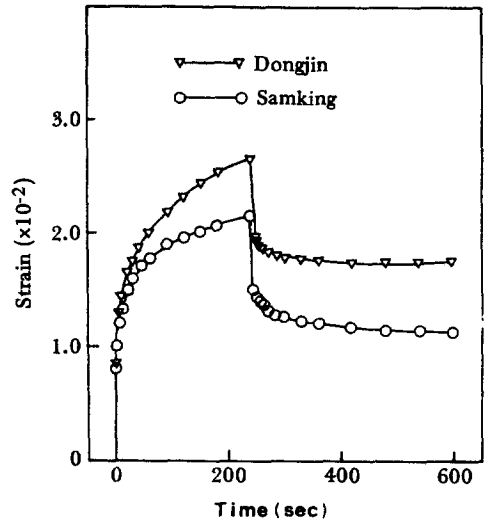


Fig. 7. Creep and recovery curves for Samkang and Dongjin varieties. (initial load = 2.0 N)

## 5. 結 論

본 연구에서는 이앙시기에 있는 장려품종 一般系 동진과 多收系 삼강에 대하여 苗출기에 대한 응력 수준별 크리이프 및 回復特性을 측정하여 苗의 리올러지 特性을 究明하였다. 또한 작물의 크리이프 특성을 비교 분석하기 쉽도록 하기 위해 응력에 대한 변형율의 비인 크리이프 컴플라이언스를 구하였다.

이들 試驗의 結果를 요약하면 다음과 같다.

1. 苗출기의 壓縮 크리이프 및 回復特性은 4要素 Burger 모형을 사용하여 예측할 수 있었다.
2. 作用應力이 0.8MPa 이상일 때는 定常狀態 크

리이프현상이 일어났으며, 그 이하의 應力에서는 對數的 크리이프현상이 일어났다.

3. 苗줄기의 압축 크리이프 시험결과 瞬間彈性係數는 약 20~40 MPa의 범위이었고, 粘性係數( $\eta_v$ )는 큰 값을 보였기 때문에 苗줄기는 점성변형이 비교적 작으며, 탄성변형이 큰 粘彈性體라고 판단된다.
4. 회복 시험결과 永久變形은 작용하중이 작을수록 크게 나타났으며, 일반계인 東津이 다수계인 三剛보다 永久變形이 큰 것으로 나타나 東津이 三剛보다 점성이 큰 粘彈性體로 판단된다.

### 參 考 文 獻

1. ASAE Standard S358.1, Agri. Eng. Yearbook. 1983. Moisture measurement-Forages.
2. Ashcroft, D.A. and W.L. Kjeigaard. 1972. Compression creep properties of reduced forage. Trans. of the ASAE 15(4): 609-612.
3. Chang, C.S. and C.R. Martin. 1983. Rheological properties of grain dust. Trans. of the ASAE 26(4): 1249-1256.
4. Mohsenin, N.N. 1970. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers, N.Y.
5. Mohsenin, N.N., H.E. Cooper and L.D. Tukey. 1963. Engineering approach to evaluating textural factors in fruits and vegetables. Trans. of the ASAE 6(2): 85-92.
6. Mohsenin, N.N. and J. Zaske. 1976. Stress relaxation and energy requirements in compaction of unconsolidated material. J. of Agri. Eng. Res. 21(2): 193-205.
7. Zoerb, G.C. and C.W. Hall. 1960. Some mechanical and rheological properties of grains. J. of Agri. Eng. Res. 5(1):83-93.
8. 金滿秀, 高學均. 1981. 穀物の 物理的 特性에 關한 研究. 農業機械學會誌 6(1): 73-82.
9. 許潤根, 車均度. 1987. 水稻의 力學的 및 리올러지 特性에 關한 研究. 忠南大 農業技術 研究報告 14(1): 98-133.
10. 許潤根. 1986. 벼줄기의 粘彈性 特性에 關한 研究. 忠南大 農業技術 研究報告 13(2): 255-265.