Mat-苗의 리올러지 特性
Rheological Properties of Mat-type Seedlings

李 喆 基* 許 潤 根**
C. K. Yi,* Y. K. Huh**

Summary

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

Various researchers have studied the mechanical and rheological properties of the many agricultural materials, but those properties are available mostly 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 stress relaxation properties of rice seedlings such as three Japonica-type and one Indica x Japonica hybrid in the transplanting age.

The results of this study are summarized as follows;

1. The stress relaxation behavior could be described by the generalized Maxwell model.
2. The phenomenon of stress relaxation happened abruptly just after loading and this phenomenon weakened with the loading time lapsed.
3. With increase of the initial stress, the stress relaxation intensity and residual stress increased, while the relaxation time was constant with increased, while the relaxation time was constant with increase of the level of initial stress.
4. With increase of loading rate, the stress relaxation intensity increased, while the relaxation time and residual stress decreased.

1. 緖 論

70년대 후반기부터 水稻作의 一貫機械化體系 수립을 위해 移秧機를 비롯한 신기종 농업기계가 보급된 이래 機械移秧面積이 확대되고, 우리의 실정에 맞는 작업기의 개발 및 보급에 대한 관심이 높아지고 있다. 그동안 機械作業에 있어서의 量的 및 質的인 향상을 기하기 위해서 농업기계자체에 대한 연구, 개발에 힘을 기울였으나 對象作物에 대한 연구는 미흡하였다.

국내에서 이루어진 이 분야에 대한 연구는 밀의 硬度測定, 穀物의 동마찰계수, 곡물의 物理的 特性에 관한 연구[10], 통일벼 탈립에 관한 力學的 分析, 水稻의 剪斷抵抗에 관한 연구, 牧草 및 옥수수 줄기

*忠南大學校 大學院 農業機械工學科
**忠南大學校 農科大學 農業機械工學科

의 전단저항에 관한 연구 및 水稻의 도복에 관한 연구 등이 수행되었고, 최근 수확시기에 있는 벼줄기의 粘彈性 特性[11] 및 水稻의 力學的 및 리올러지 특성에 관한 연구[12]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 特性에 관한 연구는 일찌기 Zoerb 등[9]이 應力 弛緩試驗을 통하여 곡물의 리올러지 特性을 究明하였으며, Mohsenin 등[4,5] 많은 연구자에 의해 곡물, 과채류 및 목초 등의 리올러지 特性의 硏究가 이루어졌다.

이제는 우리의 농업을 작업 및 농산물의 품질향상을 위한 노력이 진행되고, 이를 위해서는 농작물의 물리적 및 力學的 特性의 구명이 필요하며, 이의 완전한 파악을 위해서는 리올러지 特性의 구명이 요구되는 바, 이는 또한 作物學者에게도 필요한 자료가 된다.

농작물의 역학적 특성은 시간의 함수이므로 그의 彈性 및 粘性的 性質을 결정하기 위해서는 시간의 효과를 고려한 리올지적 방법을 이용하여 구성하게 된다.

본 연구에서는 이앙시기의 Mat-苗에 대한 力學的 特性을 완전히 파악하기 위하여 苗에 대한 應力弛緩 特性實驗을 통하여 實驗値와 數學的 模型에 의한 豫測結果를 比較, 分析하여 그 類似性을 증명하고, 리올러지 특성을 구명하고자 한다.

2. 文獻概要

실제 물체의 거동은 항상 理想的인 물체와는 다소 다른 성질을 갖는데 특히 농작물에 있어서도 그러하다.

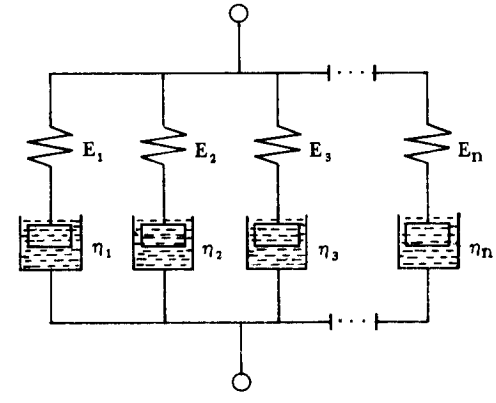
荷重을 받는 상태에서의 작물의 力學的 特性인 應力-變形의 관계는 變形速度에 영향을 받는다. 따라서 작물의 應力-變形 관계는 應力, 變形 및 時間의 세 요인에 의한 3차원 거동으로 정확히 파악될 수 있다.

이러한 시간의 효과는 完全彈性體가 아닌 물체, 流動을 나타내는 물체 또는 점물체 등에 있어서 중요한 변형요인이 된다[9].

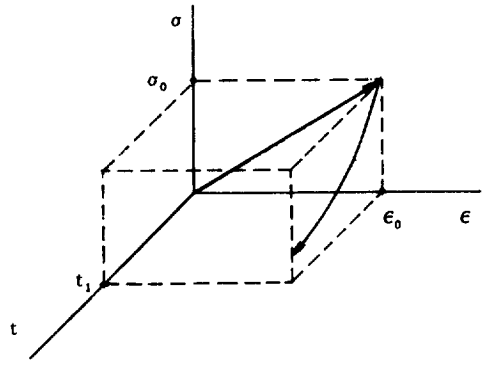
3차원 거동에 대한 역학적인 모형은 Ferry 및 Mohsenin[3] 등에 의해 제안되었으며, 彈性을 나타내는 스프링과 粘性을 나타내는 dashpot를 적절히 결합하여 실제작물의 粘彈性 特性과 유사한 특성을 나타내는데 편리하다. 이들의 결합하는 방식에 따라 여러가지 모형이 있으며, 스프링과 dashpot을 직렬 결합한 Maxwell모형과 병렬 결합한 Kelvin 모형이 그 대표적인 모형이다.

一定荷重 작용시 작물의 應力弛緩特性을 나타내는데 이용되는 모형은 단일 Maxwell 요소를 n개 병렬 결합한 一般化 Maxwell 모형이다.

이 모형에서의 應力은 각 Maxwell 요소에 나누



(a)



(b)

Fig. 1. Generalized Maxwell model (a) and the stress – strain – time behavior (b).

어 지지되기 때문에 全應力은 각 요소에서 지지되는 應力의 合과 같고, 應力弛緩 方程式은 단일 Maxwell 模型의 應力弛緩 方程式을 n개 결합한 형태로 구성된다. 즉,

$$\sigma(t)=\sum_{i=1}^{n}\sigma_i e^{-t/\tau_i} \quad \cdots\cdots(1)$$

이 된다. 여기서 τ_i는 η_i/E_i로서 應力弛緩時間을 나타내며, 작용응력이 初期應力의 1/e인 37% 정도로 감소되는데 걸리는 시간 즉, 시간 t가 τ일때 $\sigma(\tau)=\sigma_0 e^{-\tau/\tau}=\sigma_0/e$로서 應力弛緩試驗에서 가장 중요한 변수가 된다.

Zoerb와 Hall[9]은 와두콩의 응력이완시험에서 圖解法인 連續殘差法에 의해 분석한 결과 2개의 항으로 이루어진 一般化 Maxwell 모형에 의해 와두콩의 弛緩特性을 예측할 수 있었으며, 變形速度가 함수율 또는 변형량보다 應力弛緩速度에 더 큰 영향을 준다고 보고하였다.

Moustafa 등[6,7]은 準靜的인 압축응력 및 굽힘응력을 사용할 때 밀줄기에 대한 粘彈性模型을 제시했으며, 2개의 Maxwell 요소를 병렬조합한 모형이 밀줄기의 應力弛緩과 좋은 근사치를 주었다고 보고하였다.

Chang과 Martin[2]은 grain dust에 대한 리올러지 특성을 연구하였고, Singh 등[8]은 水稻苗의 응력이완시험에서 3요소 一般化 Maxwell 모형에 의해서 묘의 이완특성을 나타낼 수 있었으며, 數値解法에 의해 6개의 계수를 결정하였다.

許[11,12]는 收穫時期에 있는 벼줄기의 리올러지 特性硏究에서 모형의 각 계수를 결정하기 위해 數値解法을 이용하였고, 그 결과 3요소로 구성된 일반화 Maxwell 모형에 의해 벼줄기의 應力弛緩 特性을 예측할 수 있었다.

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 88年 4月 18日에 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으로는 東津, 秋晴 및 蠶津벼와 多收系 品種으로는 三剛벼를 사용하였으며, 파종후 45일된 3葉의 苗를 試料로 채취하여 含水率 變化를 최소화하기 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

實驗에 이용한 각 試料에 있어서 斷面積의 영향을 제거하기 위해서는 作用荷重을 應力으로 표시하는 것이 바람직하다. 그러므로 실험전에 각 苗줄기의 아랫부분을 길이 10 mm로 하여 軸方向에 垂直으로 切斷, 각각의 斷面積을 계산하였다. 이때 줄기의 斷面은 橢圓形으로 가정하여 버어니어 캘리퍼스를 이용하여 長徑 및 短徑을 측정하여 단면적을 산출하고, 이 단면적과 동일한 면적을 갖는 원의 지름으로서 묘줄기의 지름을 나타냈다. 이때 全 단면적은 同質로 가정하였다.

Table 1. Agronomic data of rice seedlings.

Agronomic data	In. x Ja. hybrid*	Japonica-type		
	Samkang	Chuchung	Seomjin	Dongjin
Plant length, mm	190	244	260	260
No. of leaves	3	3	3	3
Equivalent stem dia., mm	2.3	2.4	2.0	2.2
Cross-section area, mm^2	4.2	4.4	3.1	3.8
Moisture content, % (w.b.)	81.0	77.0	75.8	80.0

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

또한 苗줄기의 含水率 測定은 항온건조기를 이용하여 105℃에서 24시간 동안 乾燥한 후 무게를 계량하여 濕量基準으로 표시하였다.

苗에 대한 應力弛緩實驗은 壓縮特性 實驗에서와 같은 材料試驗機를 사용하여 하중을 가한 후 변형량을 일정하게 유지시켜 定數로 하고 荷重-時間을 변수로 하는 曲線을 X-Y記錄器에 그렸다.

載荷方法은 載荷速度 1.5, 5.0 및 15.0 mm/min의 漸加荷重으로 가한 후 弛緩實驗을 수행하였다.

弛緩實驗은 苗의 彈性限界를 측정한 후 그 한계내에서 一定荷重에 도달한 후 變形을 정지시켜 일정한 變形量으로 유지시킨 후 약 180초 동안 시간에 따른 苗의 荷重弛緩曲線을 그린 후 이를 기초로 하여 應力弛緩曲線으로 변환하였다.

應力弛緩 試驗은 응력감소시간이 측정되는 동안 계단함수로서 가해진 一定 變形量 하에서 실시되므로 이때 變形量은 재료에 갑작스런 변화를 준다. 그러나 일정 변형량에 이르기 전에 일어난 응력이완은 측정되지 않으며, 실제에 있어서 이완시간이 짧은 때에는 하중을 순간적으로 작용시키는 것은 곤란하다. 이와같은 粘彈性 특성은 荷重-變形-時間을 변수로 하는 3차원 거동으로서 이의 예측은 실험적인 방법으로 역학적 모형을 이용한다.

모형을 이용하여 작물의 弛緩特性을 예측하기 위해서는 몇 개의 Maxwell 요소가 필요한데, 이때 적절한 요소의 수와 弛緩方程式의 각 係數의 결정은 정확성이 높은 非線型 回歸分析法에 의하였다.

즉 이 방법으로 (1)식에서 각 요소의 응력 $\sigma_1, \sigma_2, \cdots\cdots \sigma_n$ 및 이완시간 $\tau_1, \tau_2, \cdots\cdots \tau_n$을 결정하였다.

4. 結果 및 考察

가. 初期 應力水準에 따른 弛緩特性

묘줄기의 응력이완 예측에 필요한 Maxwell 요소의 수는 3개였고, 실측치와 모형에 의한 예측치를 비교한 결과는 표2에서 보는 바와 같이 거의 일치하였으며, 3요소 일반화 Maxwell 모형의 계수들은 표3과 같다.

彈性限界 이내의 應力을 載荷速度 1.5 mm/min로 가했을때 初期 應力水準에 따른 각 품종의 應力弛緩 特性은 그림2와 같다.

Table 2. Experimental and predicted values of the stress relaxation for Samkang rice seedling

Time s	Experimental values kPa	Predicted values kPa	Absolute difference kPa
0	640	639	1
1	509	511	2
2	444	443	1
3	406	405	1
5	368	367	1
7	342	344	2
10	321	321	0
15	294	293	1
20	271	272	1
30	244	244	0
50	220	218	2
80	202	203	1
130	187	189	2
180	179	177	2

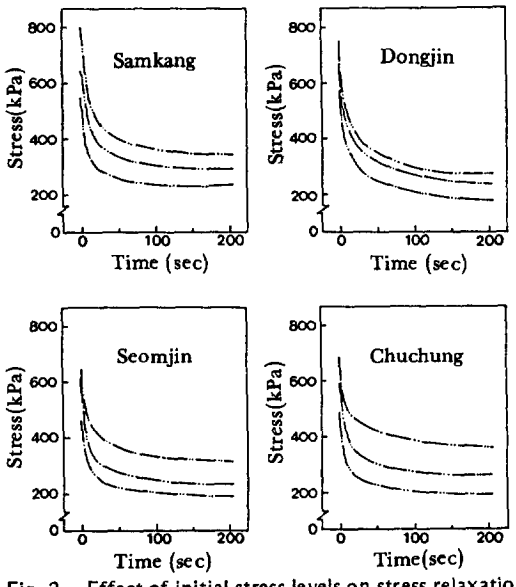


Fig. 2. Effect of initial stress levels on stress relaxation for rice seedlings at the rate of loading 1.5 mm/min.

그림에서 보는 바와 같이 작용응력의 크기가 증가함에 따라 잔유응력은 증가하는 경향이었으며, 이러한 현상은 각 품종에서 모두 유사하게 나타났다.

三剛벼의 載荷速度별 및 載荷應力水準에 따라 예측된 一般化 Maxwell 模型의 계수들에 있어서 작용응력 수준에 따른 弛緩擧動은 뚜렷한 경향이 나타나지 않았고, 재하직후 1~2초 사이에 발생하는 初期弛緩時間(τ_3)의 應力弛緩은 큰 값으로 나타났는 바 이러한 현상은 그림 2의 應力弛緩 그림에서 보듯이 제하직후 급격한 응력감소가 이를 잘 증명하고 있으며, 이렇게 묘의 순간적인 이완량이 큰 것은 세번째 Maxwell 요소의 彈性係數 E_3가 粘性 η_3에 비해 작다는 것을 보여준다. 이어서 다음에 일어나는 이완은 모형의 둘째요소로서 弛緩時間 τ_2는 10~20초 정도였으며, 이동안의 弛緩應力 σ_2는 셋째요소의 弛緩應力 σ_3와 비슷한 수준이었다. 그러나 첫째요소의 弛緩時間 τ_1은 매우 큰 값으로 나타났고 이 긴시간 동안 弛緩應力 σ_1은 σ_2 및 σ_3 보다 큰 값을 보였다.

應力水準에 따른 一般化 Maxwell 모형의 弛緩強度 및 殘留應力을 예측한 값들은 표 4와 같다. 표에서 보는 바와 같이 각 요소의 弛緩時間에 대한 弛緩應力의 比인 弛緩強度 σ_i/τ_i는 셋째요소에서 매우 큰 값을 보였고 첫째요소의 弛緩強度는 매우 작은 값으로 나타났다.

또한 응력이 가해진 후 60초 경과시 약 50~70%의 응력이 弛緩되므로 殘留應力은 약 50~30%로서 초기응력이 클수록 큰 값이었으며, 苗의 應力弛緩特性은 비교적 낮은 剛性을 갖는 것으로 나타나 收穫時期의 벼줄기는 殘留應力이 약 60~70%이며, 높은 剛性을 갖는다고 한 許[12]의 연구결과와는 대조적인 것으로 판단된다.

나. 載荷速度에 따른 弛緩特性

載荷速度를 1.5, 5.0, 15.0 mm/min의 3수준으로

Table 3. Parameters of generalized Maxwell model as related to initial stress for Samkang rice seedlings.

Rate of loading mm/min	Initial stress kPa	σ_1 kPa	%	τ_1 s	σ_2 kPa	%	τ_2 s	σ_3 kPa	%	τ_3 s
	545	271	49.7	934	96	17.6	17.8	179	32.8	1.14
1.5	640	294	45.9	3323	180	28.1	22.9	166	25.9	0.91
	805	397	49.3	1322	241	29.9	19.0	167	20.7	1.32
	537	182	33.9	798	109	48.8	9.2	94	17.5	1.03
5.0	636	212	33.3	1003	184	28.9	14.2	235	36.9	1.52
	726	299	41.2	791	189	26.0	15.1	237	32.6	1.01
	565	163	28.8	574	145	25.7	8.7	257	45.5	0.46
15.0	677	315	46.5	932	181	26.7	13.9	179	26.4	1.21
	702	324	46.2	1294	184	26.2	9.1	195	27.8	1.93

Table 4. Relaxation intensity and residual stress of generalized Maxwell model as related to initial stress for Samkang rice seedlings.

Rate of loading mm/min	Initial stress kPa	σ_1/τ_1	σ_2/τ_2	σ_3/τ_3	Residual stress after 60s. kPa	%
	545	0.290	5.378	157.222	257	47.16
1.5	640	0.088	7.834	151.611	302	47.19
	805	0.300	12.696	220.329	390	48.45
	537	0.229	28.569	96.704	169	31.47
5.0	636	0.212	12.965	154.736	202	31.76
	726	0.379	12.564	234.713	281	38.71
	565	0.284	16.635	561.144	147	26.01
15.0	677	0.338	13.022	148.111	298	44.02
	702	0.250	20.092	375.867	310	44.16

640 kPa까지 축방향으로 압축시킬때 묘의 응력이완 특성은 그림 3 과 같다.

이때 재하속도가 증가함에 따라 應力弛緩은 크게 일어났는데 재하속도가 느린 경우 재하에 많은 시간이 소요되므로 載荷中 응력이완이 함께 일어남에 기인하는 것으로 인정된다.

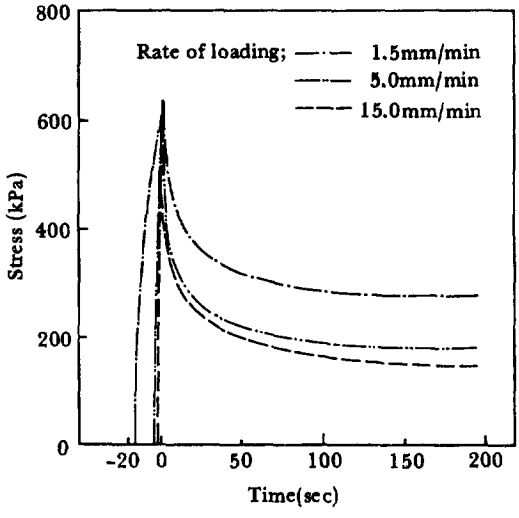


Fig. 3. Effect of rate of loading on stress relaxation for Samkang rice seedling.

載荷速度에 따른 각 供試品種의 이완특성은 그림 4와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 품종간의 이완특성은 대체로 큰 차이를 보이지 않았으나 多収系인 三剛의 應力弛緩이 다른 一般系 品種보다 약간 큰 값을 보였다.

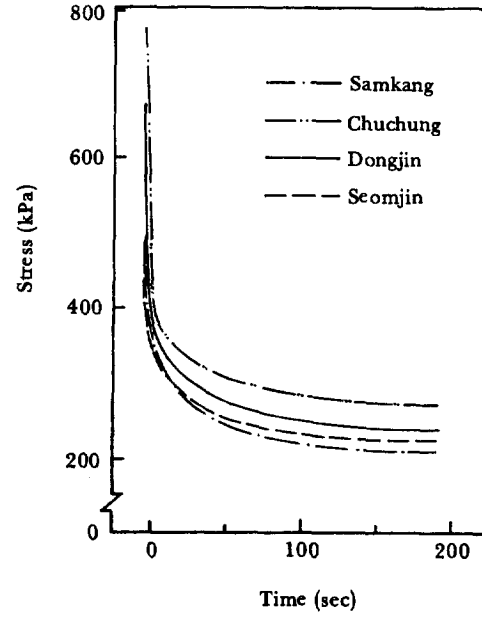


Fig. 4. Stress relaxation curves for rice seedlings at the rate of loading 15.0 mm/min.

표 5는 弛緩特性의 예측에 이용된 模型에서 應力弛緩強度와 5초, 30초 및 60초 후의 잔유응력을 나타낸 것으로서 각 요소에서의 弛緩強度는 載荷速度

Table 5. Relaxation intensity and residual stress of generalized Maxwell model as related to rate of loading for rice seedlings.

Variety	Rate of loading mm/mjn	σ_1/τ_1	σ_2/τ_2	σ_3/τ_3	Residual stress after given time		
					5s, %	30s, %	60s, %
Samkang	1.5	0.088	7.8	151.6	68.8	53.1	47.2
	5.0	0.286	11.6	163.0	57.0	38.1	33.0
	15.0	0.293	17.2	368.3	55.0	39.8	37.2
Dongjin	1.5	0.531	13.5	156.8	68.4	50.5	45.6
	5.0	0.348	10.7	321.5	62.8	47.9	43.2
	15.0	0.358	11.5	596.5	50.0	38.9	36.4
Seomjin	1.5	0.263	9.3	149.7	66.3	51.3	47.1
	5.0	0.344	14.9	228.8	62.4	47.2	43.5
	15.0	0.335	11.3	494.1	47.0	36.7	34.6
Chuchung	1.5	0.299	10.1	130.6	68.2	54.4	51.2
	5.0	0.488	16.5	231.0	63.7	44.7	43.2
	15.0	0.271	12.3	496.2	52.1	41.4	39.4

가 증가함에 따라 대체로 증가하였고 셋째요소에서 가장 크게 나타났다.

첫번째 Maxwell 요소에서의 弛緩強度는 아주 작은 반면에 셋째요소의 弛緩強度는 매우 큰 값을 보였는 바 이러한 경향은 載荷速度가 빠를수록 뚜렷하였다. 또한 載荷速度의 증가에 따른 殘留應力은 감소현상을 보였다.

5. 結 論

荷重이 작용할 때 農作物은 시간에 따라 점진적인 변형을 하게 되며, 초기의 짧은 시간에서는 固體의 특성인 彈性特性을 보이다가 오랜 시간 후에는 彈性이 감소되면서 液體의 特性인 粘性特性을 나타낸다.

따라서 오랜 시간 동안의 전체적인 특성은 시간의 함수로서 彈性 및 粘性特性의 결합으로 나타나 이러한 리올러지 特性의 硏究 및 解析에는 리올러지 模型이 이용된다. 그러므로 본 연구에서는 상려품종인 一般系3 품종과 多收系1 품종에 대하여 이앙시기에 있어서의 苗줄기에 대한 應力弛緩特性을 측정하여 苗의 리올러지 特性을 究明하였다.

이들 試驗의 結果를 요약하면 다음과 같다.

1. 苗줄기의 應力弛緩 特性은 3要素 一般化 Maxwell 模型을 사용하여 충분히 예측할 수 있었다.
2. 應力弛緩은 재하직후 급격히 일어났고, 이러한 현상은 시간에 따라 크게 둔화되었다.
3. 初期應力의 수준이 증가함에 따라 應力弛緩速度 및 殘留應力은 증가하는 경향이었으나, 弛緩時間은 대체로 일정한 수준으로 나타났다.
4. 載荷速度의 증가에 따라 應力弛緩速度는 증가하는 반면, 弛緩時間 및 殘留應力은 감소하는 경향이었다.

參 考 文 獻

1. ASAE Standard S358.1, Agri. Eng. Yearbook. 1983. Moisture measurement -Forages.
2. Chang, C.S. and C.R. Martin. 1983. Rheo-

logical properties of grain dust. Trans. of the ASAE 26(4): 1249-1256.

3. Mohsenin, N.N. 1970. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers, N.Y.
4. 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.
5. Mohsenin, N.N. and J. Zaske. 1976. Stress relaxation and energy requirements in compaction of unconsolidated materials. J. of Agri. Eng. Res. 21(2): 193-205.
6. Moustafa, S.M.A., B.A. Stout and W.A. Bradley. 1967. Theoretical modeling of the wheat plant. Trans. of the ASAE 10(6): 799-804.
7. Moustafa, S.M.A., B.A. Stout and W.A. Bradley. 1968. Elastic and inelastic stability of a biological structure. J. of Agri. Eng. Res. 13(1): 64-82.
8. Singh, K.N., R.E. Garrett and P. Chen. 1973. Physical and viscoelastic properties of rice seedlings. Trans. of the ASAE 16(3): 528-532.
9. Zoerb, G.C. and C.W. Hall. 1960. Some mechanical and rheological properties of grains. J. of Agri. Eng. Res. 5(1): 83-93.
10. 金滿秀, 高學均. 1981. 穀物의 物理的 特性에 關한 硏究. 農業機械學會誌 6(1) : 73-82.
11. 許潤根. 1986. 벼줄기의 粘彈性 特性에 關한 硏究. 忠南大 農業技術 硏究報告 13(2) : 255-265.
12. 許潤根, 車均度. 1987. 水稻의 力學的 및 리올러지 特性에 關한 硏究. 忠南大 農業技術 硏究報告 14(1) : 98-133.

학 회 광 고

한국농업기계학회의 재정 자립과 학술발전을 위한 기금을 모금하오니 적극적으로 호응하여 주시기 바랍니다.

on-line 계좌번호 :

국민은행 수원지점 203-01-0463-136

농협중앙회 서둔동지점 125-01-054226

납입금액 : 제한없음

기 금 납 입 현 황

납입자	납 입 금 액	용 도
정태훈	1,000,000원	기금 확대
이승규	300,000원	〃
정창주	1,000,000원	학회상 기금마련
김창수	300,000원	기금 확대