

# 側方向荷重에 의한 벼줄기의 力學的特性에 관한 연구( I )

—이완거동 분석—

## Study on the Mechanical Properties of the Rice Plants

### Subjected to Radial Load.

—Analysis of Relaxation Behavior—

許潤根\*

Y. K. HUH

### Summary

During all mechanical processes rice plants are subjected to various forces such as natural load of wind and mechanical load of agricultural machines. A force is always accompanied by deformation, which must be either sufficiently great for pressing or sufficiently slight in order to avoid damage.

The mechanical behavior of the rice plants is determined by three variables : force, deformation and time. And they must be studied using rheological methods to determine their viscoelastic properties.

This study is conducted to experimentally determine the mechanical and rheological properties of the rice stalks subjected to radial load. The force relaxation tests are performed under constant deformation, during which the reduction of forces over time is measured. The mechanical models were developed from the obtained data.

The results were as follows :

1. The relaxation behavior of a rice stalk in radial compression may be described by a generalized Maxwell model consisting of 3 Maxwell elements in parallel.
2. Relaxation intensity always decreased with increased time of relaxation.
3. The rate of deformation has a significant effect on the relaxation behavior, having increasing pattern with an increase in rate of deformation.
4. The relaxation intensity and residual deformation increased with increased initial load.
5. The relaxation of the intermediate portion of stalk was bigger than that of the upper and lower portions.

---

+ 이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대육성) 과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

\* 충남대학교 농과대학 농업기계공학과

## 1. 서론

우리나라의 벼 재배는 전작업의 기계화가 실현되는 단계에 있어 작업의 질적인 향상을 위한 기계의 개발 및 개량이 요구되고 있다. 벼 재배와 관련된 작업기계의 개량은 작물의 물성에 관한 완전한 지식을 바탕으로 한 공학적인 기술개발 측면에서 고려되어야 하며, 작물을 작업 대상으로 하는 농기계의 연구개발에는 작물과 기계의 관계를 규명하는 것이 우선되어야 할 것이다.

작업도중 받는 하중으로 작물내부의 파괴가 크게 일어나지 않는 범위내에서 일정수준 이상의 외력이 작용할때 작물의 力學的 舉動은 고형 물질에 의한 탄성변형과 체액에 의한 점성변형이 복합적으로 일어나는 粘彈性變形을 나타낸다.

외력을 받는 대부분의 작물은 그 변형에 있어서 시간에 따라 점진적인 변형을 나타내는데 초기에는 탄성변형을 보이고, 시간이 경과하면서 탄성변형이 감소하고 액체의 특성이 강한 점탄성변형을 보인다. 외력에 대한 물체의 변형이나 유동이 시간의 함수로 표시되는 점탄성변형의 모델은 하중-변형-시간을 변수로 하는 三次元的인 舉動을 나타낸다.

식물체의 고체성분이 갖는 彈性的性質은 재배 조건에 따라 다르고 체액은 비뉴튼적으로 작용하는 액체이므로 외력에 대한 작물의 粘彈性特性을 이론적으로 명확히 구명하는 것은 불가능하다. 따라서 이론적인 방법으로 유용한 지식을 얻기 위한 작물의 力學的 特性의 분석은 주어진 가정하에서 의미를 갖게 되므로 점탄성특성의 파악은 주로 실험적인 방법에 의한다.

Hooke의 탄성이론 및 Newton의 점성이론을 이용하여 粘彈性理論을 공식화 할수 있다. 이 방법의 하나가 탄성 및 점성요소를 결합하여 점탄성변형과 유사하게 반응하는 역학적모형으로 나타내는 것이다.

역학적 모형은 Ferry 및 Mohsenin<sup>2)</sup> 등이 제시하였으며 작물의 세포벽 및 세포액은 탄성요소인 스프링과 점성요소인 데시포트(dashpot)에

해당한다.

Zoerb등<sup>6)</sup>은 농산물의 이완반응을 나타내기 위해 필요한 Maxwell 요소의 수를 결정하였다.

허<sup>7,8,9)</sup>는 수도 및 매트료의 레올로지 특성을 분석 보고하였다.

본 연구의 목적은 側方向荷重 작용시 비줄기의 弛緩舉動을 측정, 분석하고, 이에 대한 역학적모형을 결정하므로써 레올로지 특성을 구명하여 농작물의 물성에 관한 보다 정확한 기초자료를 얻는데 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 2-1. 실험재료

실험에 사용된 재료는 장려품종인 일반계 화진벼로서 본대학 실험 포장에서 재배한 벼를 사용하였다. 벼는 수확시기에 줄기하단을 예취하여 수분변화를 줄이기 위해 플라스틱 용기에 넣어 운반하여 실험에 대비하였다.

비줄기는 작업과정을 통하여 반경방향의 측방향하중을 받는 경우가 많고, 이에 의한 도복 가능성이 높은 줄기의 하부와 중앙부 및 곡립이 연결되는 상부에서 길이 10cm 정도로 절단하여 실험재료로 하였다. 실험재료는 함수율 71%(w. b.) 내외 수준의 줄기를 사용 하였다.

### 2-2. 실험장치 및 방법

측방향으로 작용하는 하중에 대한 이완실험은 만능재료시험기와 별도의 하중변환기, A/D변환기 및 컴퓨터를 사용하여 실시하였으며, 일정수준에 이르기까지 항복강도 이하의 漸加荷重을 측방향으로 가한 후 시간의 측정과 함께 변형량을 측정하였다. 측정은 길이 5cm의 정4각형 가압관을 재료시험기의 크로스헤드와 엔빌에 부착하여 그사이에 시료를 놓고 측방향으로 압력을 가하여 실시하였으며, 이완하중은 단위길이당 하중(N/cm)으로 나타내었다.

변형량을 일정하게 유지시킨 상태에서 시간에

따른 이완거동을 측정하기 위하여 하중변환기와 amplifier를 통하여 측정된 자료는 A/D변환기를 사용하여 컴퓨터의 기록장치에 입력시키고 동시에 모니터상에 출력되도록 하였다.

하중의 순간적인 작용에 의해 일어난 Maxwell모형의 변형을 일정하게 유지하는데 필요한 하중은 시간의 흐름에 따라 감소하여 이완된다. 작용물의 이완 반응은 다수의 Maxwell요소를 병렬로 연결한 一般化 Maxwell모형으로 나타내는데 이 역학적모형의 이완 방정식은 (1)식과 같은 n개의 指數項으로 구성된다.<sup>1,3,7)</sup>

$$F(t) = F_1 \text{Exp}(-t/\tau_1) + F_2 \text{Exp}(-t/\tau_2) + \dots + F_n \text{Exp}(-t/\tau_n) \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $F_1, F_2, \dots, F_n$ 은 각 Maxwell요소의 초기하중이며,  $t$ 는 경과 시간,  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  각요소의 이완시간이다.

컴퓨터에 의한 일반화 Maxwell요소의 이완시간에 따른 하중이완은 다음의 식을 이용한 非線型 回歸分析法를 사용하여 분석하였다.

$$F(t) = A \text{Exp}(-B * t) + C \text{Exp}(-D * t) + F \text{Exp}(-G * t) \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $A = F_1, B = 1/\tau_1, C = F_2, D = 1/\tau_2, F = F_3, G = 1/\tau_3$ 이다.

시간과 작용하중의 값이 주어지면 i번째 Maxwell요소의 탄성계수 E, 및 계수를 구할 수 있다.

작물 및 농산물에 측방향 하중이 작용할때의 이완거동은 벼줄기와 벼의 경우처럼 같이 불균일한 단면에 작용하는 응력으로 나타내는 것에 비하여 단위하중의 개념인 본당하중으로 표시함이 바람직하므로 이완거동은 荷重弛緩으로 분석하여 표시하였다. 따라서 이완하중은 줄기의 단위길이당 하중으로 표시하였으며, 단위시간에 일어나는 이완하중의 크기인 弛緩強度를 분석하여 함께 제시하였다.

초기하중은 재하속도의 변화가 가능한 만능재료시험기의 재하장치를 이용하여 재하하였으며, 하중증가 및 재하속도가 이완에 미치는 영향을 파악하기 위하여 작용하중을 증가하여 실험하였

고, 재하속도는 예비실험을 통하여 1mm/min, 1.5mm/min, 5mm/min, 25 mm/min의 4개 수준으로 설정하여 실험하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 재하속도에 따른 이완거동

벼줄기에 하중이 작용하면 변형되기 시작하므로 재하속도가 느릴경우 재하도중 일어난 應力弛緩은 소멸되어 측정되지 않는다. 그러나 재료에 충격을 주지 않으면서 실제 일어나는 응력이완을 측정할 수 있을 정도로 순간적으로 재하할 수 있는 방법은 없다.

재하속도를 각각 1.0mm/min, 5.0mm/min 및 25.0mm/min로 변화시켰을 때 이완거동은 그림1 및 표1과 같다. 그림에서 보는바와 같이 재하속도가 느릴 수록 재하직후 일어나는 초기이완이 작았는데, 이러한 결과는 재하속도가 느릴 수록 재하 과정중 발생한 이완의 크기가 증가하기 때문이다.

측방향하중의 작용시 이완거동은 3요소 일반화 Maxwell모형으로 나타내어 분석할 수 있었으며, 일정한 하중수준에 이르는 재하속도에 따라 이완하중을 예측하기 위한 일반화 Maxwell모형의 係數들은 표 1(A)와 같다. 재하속도의 증가에 따라 첫째 요소의 이완하중  $F_1$ 은 감소한 반면 그외의 요소에서는 증가하는 경향 이었다. 재하속도가 높은 경우 재하직후 일어나는 셋째 요소의 이완하중  $F_3$ 는 둘째 要素의 이완하중  $F_2$ 보다 큰 것으로 나타났다.

3개 요소의 弛緩時間  $\tau_1, \tau_2$  및  $\tau_3$ 는 재하속도가 증가할수록 감소하는 결과를 보인 반면, 이완하중은 셋째 요소의 값  $F_3$ 만이 재하속도가 증가할수록 증가하였다.

이완시간은 첫째요소에서 매우 길었고, 셋째 요소에서는 매우 짧은 것으로 나타났다.

재하직후 일어나는 셋째요소 이완시간  $\tau_3$ 는 4초 이하로 나타났고, 이 시간내에 일어나는 응력이완은 재하응력의 15~30% 수준이었으며,

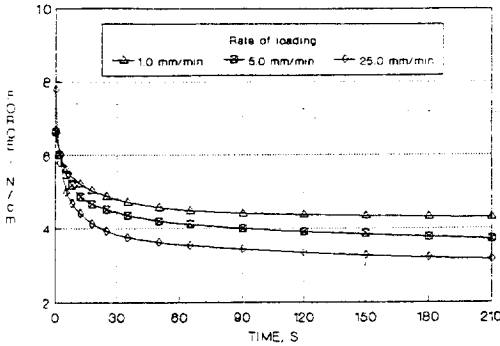


Fig. 1. Relaxation behavior under higher level of radial compression for lower portion of stalks as related to rate of loading.

여기에 중복되어 나타나는 둘째 요소의 이완시간  $\tau_2$ 는 13~24초 이었고, 여기서 일어나는 응력 이완은 10~19% 수준 이었다.

첫째 요소의 이완응력은 48~67% 수준의 큰 값이었고, 이때의 이완시간이 크게 나타난것은 粘性流動의 영향이 작음을 의미한다.

단위시간에 대한 이완된 하중의 크기인 弛緩

強度는 재하속도의 증가에 따라 변화였는데, 재하속도에 따른 이완강도 및 잔유하중은 표 1(B)와 같다.

이완강도는 하중재하초기에 매우 큰값 이었고, 30초후에는 작은 값을 보여 이완의 대부분은 재하초기에 일어나는 것으로 나타났다.

첫째요소의 이완강도는 재하속도의 증가에 따라 대체로 감소하였고, 다른 요소들의 이완강도는 재하속도가 증가함에 따라 증가 하였다. 이완강도의 크기는 첫째요소에서의 값이 작은 값 이었고, 셋째요소에서는 매우 큰 값으로 나타났다.

이완강도가 셋째요소에서 큰값으로 나타난것은 셋째요소에서의 이완시간이 매우 짧은데 기인한다.

셋째 및 둘째 要素의 이완이 거의 완료되는 시간인 5초 및 90초 후의 잔유하중은 재하속도 증가에 따라 감소하였다. 5초후의 잔유하중은 81~84% 이었고, 계속 소산되면서 90초후의 잔유하중은 44~66% 수준 이었다.

Table 1(A). Parameters of generalized Maxwell model as related to rate of loading for lower portion of stalks under higher level of radial compression.

Rate of loading mm/min	Initial load N	F <sub>1</sub>		$\tau_1$ s	F <sub>2</sub>		$\tau_2$ s	F <sub>3</sub>		$\tau_3$ s
		N	%		N	%		N	%	
1.0	6.680	4.454	67	5853	1.259	19	23.6	0.970	15	2.7
5.0	6.690	4.281	64	1399	1.067	16	21.8	1.407	21	3.3
25.0	7.793	3.763	48	1021	1.711	10	13.1	2.316	30	1.4

Table 1(B). Relaxation intensity and residual stress after given time of generalized Maxwell model as related to rate of loading for lower portion.

Rate of loading mm/min	Relaxation intensity N/s			Residual stress %	
	F <sub>1</sub> / $\tau_1 \times 10^{-4}$	F <sub>2</sub> / $\tau_2 \times 10^{-2}$	F <sub>3</sub> / $\tau_3$	5s	90
1.0	7.61	5.33	0.36	84	66
5.0	3.06	4.89	0.43	65	62
25.0	3.68	13.06	1.65	81	44

載荷速度의 변화에 따른 벼줄기 하부의 이완 거동은 그림2와 같다. 그림에서 보는바와 같이 이완거동은 재하속도에 큰 영향을 받았는데, 재하속도가 증가 할 수록 이완이 크게 일어났으나

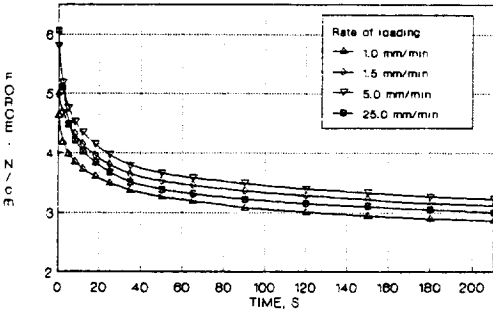


Fig. 2 Relaxation behavior under medium level of radial compression as related to rate of loading for lower portion.

이완시간 및 잔유 하중은 작은 것으로 나타났다.

이러한 결과는 재하속도가 느린 경우 재하과정 도중에 발생하는 이완하중의 증가로 인한 것이다. 따라서 재하속도 증가에 따라 弛緩強度는 증가하였고, 殘留應力은 감소하였다. 재하속도에 따른 이완거동을 나타내는 모형의 係數들은 표2와 같다.

재하속도의 증가에 따라 이완시간이 긴 첫째 요소에서의 이완하중(F1)의 비율이 감소하였고, 이완시간이 짧은 둘째 및 셋째 요소에서의 이완하중 비율이 증가하였다. 또한, 재하속도가 빠른 경우 재하직후 일어나는 셋째 요소의 이완하중 F<sub>3</sub>는 둘째 要素의 이완하중 F<sub>2</sub>보다 큰 것으로 나타났다.

이완시간은 첫째 요소에서 매우 길었고, 셋째 요소에서는 매우 짧은 것으로 나타났다.

Table 2. Parameters of generalized Maxwell model under medium loading level as related to rate of loading for lower portion.

Rate of loading mm/min	Initial load N	F <sub>1</sub>		τ <sub>1</sub> s	F <sub>2</sub>		τ <sub>2</sub> s	F <sub>3</sub>		τ <sub>3</sub> s
		N	%		N	%		N	%	
1.0	4.636	3.292	71	2208	0.742	16	23.9	0.603	13	2.1
1.5	4.981	3.338	67	1228	0.896	18	15.1	0.747	15	2.0
5.0	5.789	3.503	61	2164	1.368	24	25.0	0.923	16	2.5
25.0	6.079	3.140	52	2249	1.323	22	29.5	1.601	26	2.5

### 3-2. 초기하중 증가에 따른 이완거동

1.5mm/min의 하중재하속도에서 초기작용하중 증가에 따른 벼줄기 중부의 이완거동은 그림 3과 같다. 그림에서 보는바와 같이 재하하중의 크기가 증가할 수록 이완하중의 크기가 증가하였으며, 잔유하중의 크기도 증가하였다. 다만 재하속도가 높은 25.0mm/min의 경우 이완시간은 작용하중의 증가에 따라 減少하는 결과를 보였다. 이러한 결과는 재하하중의 크기가 증가 할 수록 점성변형이 크게 일어나는 것으로 판단된다.

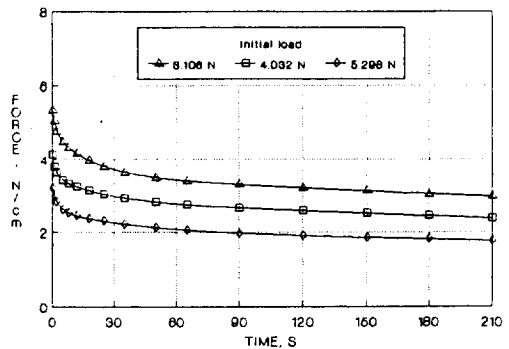


Fig. 3 Relaxation behavior under loading rate of 1.5 mm/min for intermediate portion of stalks as related to levels of initial load.

하중의 크기에 따른 비줄기 중부의 이완거동을 나타내는 모형의 係數들은 표 3과 같다. 하중의 크기가 증가 할수록 이완하중은 증가한 반면, 이완시간은 하중증가와 함께 감소하였다.

이완시간은 하중의 크기에 관계없이 첫재요소

에서 매우 길었고, 셋재요소에서는 매우 짧은 것으로 나타났다.

弛緩時間이 작용하중 증가에 따라 감소한 값을 보인것은 하중에 민감하게 반응하여 짧은 시간에 損傷받을수 있음을 의미한다.

Table 3. Parameters of generalized Maxwell model under loading rate of 1.5mm/min as related to levels of initial load.

Portion	Initial load N	F <sub>1</sub>		τ <sub>1</sub> s	F <sub>2</sub>		τ <sub>2</sub> s	F <sub>3</sub>		τ <sub>3</sub> s
		N	%		N	%		N	%	
Interme- diate	3.106	2.026	65	1586	0.559	18	40.3	0.519	17	3.0
	4.032	2.875	71	1091	0.673	17	22.4	0.483	12	1.7
	5.298	3.559	67	1188	1.208	25	18.7	0.531	10	1.4

壓縮荷重의 작용에 의한 이완변형은 줄기하부에서 가장 작게 일어났고, 중앙부에서 가장 크게 일어나 중앙부의 저항력이 가장 작은 것으로 나타났다.

초기 하중의 재하속도를 달리하여 1.5mm/

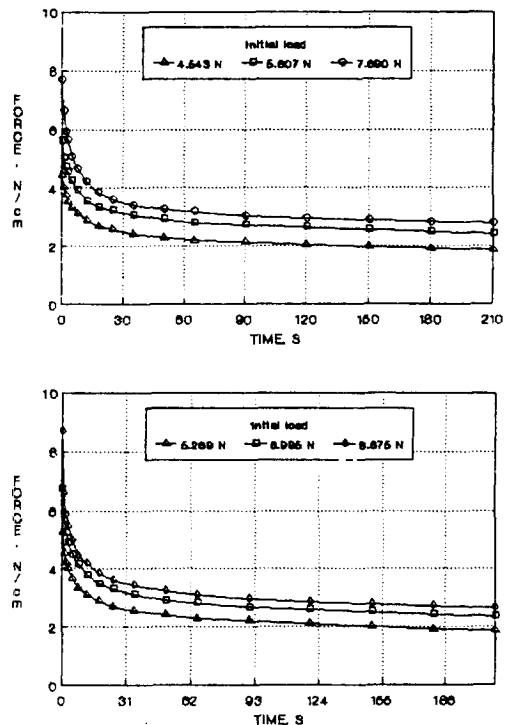
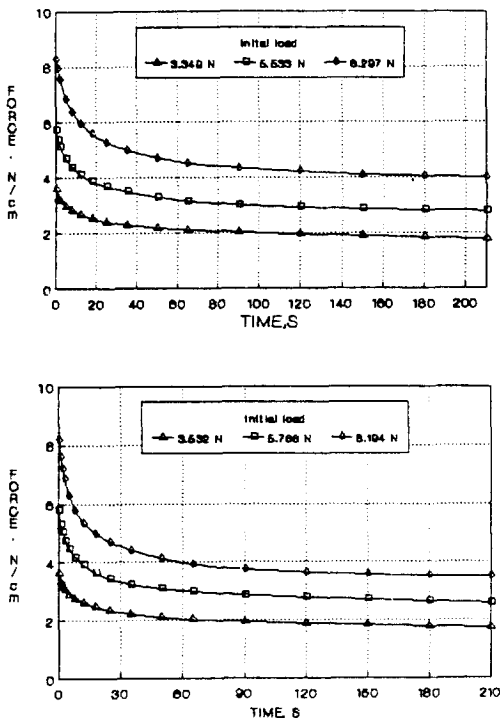


Fig. 4 Relaxation behavior under radial compression for upper portion of stalks as related to levels of initial load.

rate of loading(A) : 1.0 mm/min

(B) : 1.5 mm/min

(C) : 5.0 mm/min

(D) : 25.0 mm/min

min, 5.0mm/min 및 25.0mm/min로 작용시켰을 때 초기 하중의 크기에 따른 벼줄기 상부의 이완거동은 그림 4(A), (B), (C), (D)와 같다. 그림에서 보는바와 같이 이완은 재하속도의 증가에 따라 증가하였으며, 하중 증가에 따른 영향은 작게 나타났다. 잔유 하중의 크기도 하중 증가에 따라 증가하였다. 이러한 결과는 줄기 중부의 결과와 유사한 것이다.

초기하중의 크기에 따른 이완거동을 나타내는 모형의 係數들은 표 4와 같다.

재하하중의 크기가 증가 할수록 첫째 요소에서의 이완하중  $F_1$ 의 비율은 감소하였으며, 셋째 요소의 이완  $F_3$ 의 비율은 하중증가와 함께 증가하였다. 5.0mm/min의 재하속도일때 둘째 要素의 이완하중  $F_2$ 는 셋째 요소의 값에 비교하여 다소 작은 것으로 나타났다.

Table 4. Parameters of generalized Maxwell model under various rate of loading as related to levels of initial load for upper portion of stalks.

Loading rate mm/min	Initial load N	$F_1$		$\tau_1$ s	$F_2$		$\tau_2$ s	$F_3$		$\tau_3$ s
		N	%		N	%		N	%	
1.0	3.490	2.246	64	872	0.935	27	16.9	0.309	9	1.7
	5.533	3.254	59	1027	1.321	24	43.2	0.941	17	3.1
	8.297	4.599	55	1404	2.034	25	25.1	1.665	20	4.8
1.5	3.532	2.118	60	1035	0.936	27	20.7	0.477	14	2.4
	5.766	3.189	55	1951	1.635	28	15.2	0.942	16	4.3
	8.194	3.649	45	4775	2.316	28	14.3	2.234	27	7.7
5.0	4.543	2.378	52	838	0.846	19	1.1	1.319	29	14.5
	5.607	2.747	49	829	1.177	21	1.0	1.682	30	10.1
	7.690	3.364	44	1065	1.803	23	1.4	2.521	33	12.1
25.0	5.269	2.436	46	1011	1.259	24	1.7	1.573	30	15.6
	6.995	3.234	46	606	1.511	22	0.8	2.245	32	9.5
	8.679	3.361	39	799	2.766	32	0.9	2.551	29	11.3

이 경우 이완시간은 첫째요소에서 매우 길었고, 둘째 요소에서 매우 짧은 것으로 나타났다. 이완시간은 하중의 크기에 관계없이 첫째 요소에서 매우 길었고, 셋째 요소에서는 매우 짧은 것으로 나타났다.

25.0mm/min의 재하속도일 때 둘째 要素의 이완하중  $F_2$ 는 셋째 요소의 값과 비슷한 것으로 나타났다.

결론적으로 수확시기의 벼줄기는 점성변형과 탄성변형이 지배하는 粘彈性 材料임을 확인할 수 있었다. 따라서, 벼줄기에 側方向荷重이 작용하면 오랫동안 저항하지 못하고 쉽게 파괴되어 손상받을 가능성이 큰 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

재배 및 수확과정에서 기계로부터 받는 벼줄기의 역학적특성의 구명은 농업기계의 작업성능과 관련된 작물의 손상방지등 품질유지를 위하여, 농업기계의 작업조건 설정에 관한 자료가 될 수 있다.

본 연구는 수확시기에 측방향의 압축하중을 받는 벼줄기의 弛緩學動特性을 구명하기 위하여 이완실험장치를 이용한 컴퓨터 측정장치를 구성, 일반화 Maxwell모형에 의해 弛緩學動을 측정 분석하였다.

분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 측방향 압축하중을 받는 벼줄기의 弛緩學 動은 3요소 Maxwell 모형에 의해 예측 할 수 있었다.
2. 이완강도는 하중재하초기에 매우 큰값 이었고, 30초 후에는 작은 값을 보여 이완의 대부분은 재하초기에 일어나는 것으로 나타났다.
3. 이완거동은 재하속도에 큰 영향을 받았는데, 재하속도가 증가 할수록 이완이 크게 일어났으나 재하속도 증가시 이완시간은 감소하였다. 따라서 재하속도 증가에 따라 이완강도는 증가하였고, 殘留應力은 감소 하였다.
4. 작용하중의 증가에 따라 이완하중 및 이완 시간은 대체로 증가하였다. 다만 재하속도가 높은 25.0mm /min의 경우 이완시간은 작용하중의 증가에 따라 減少하는 결과를 보였다.
5. 압축하중의 작용에 의한 줄기 부위에 따른 이완변형은 줄기하부에서 가장 작게 일어났고, 중앙부에서 가장 크게 일어나 중앙부의 저항력이 가장 작은 것으로 나타났다.
6. 수확시기의 벼줄기는 점성변형과 彈性變形이 지배하는 粘彈性 材料임을 확인할 수 있었다. 따라서, 벼줄기에 側方向 荷重이 작용하면 오랫동안 저항하지 못하고 쉽게 파괴되어 손상받을 가능성이 큰 것으로 판단 된다.

- logical 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. J. of Food Science. 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. 허윤근 1987. 수도의 역학적 및 리올러지 특성에 관한 연구. 박사학위 논문.
8. 허윤근, 이철기 1989. Mat- 苗의 리올러지 특성. 한국농업기계학회지 8(1) : 8-15.
9. 허윤근 1991. 이삭발매 벼의 리올러지특성에 관한 연구. 한국 농업기계학회지 16(1) : 37-48.

### 참고문헌

1. Chang, C.S. and C.R. Martin. 1983. Rheo-