

果實의 리올리지 線型化 模型

Linearized Rheological Models of Fruits

朴鍾民* 金滿秀**
J. M. Park M. S. Kim

SUMMARY

The stress relaxation and creep characteristics of fruits have usually been fit to an exponential expression based on a generalized Maxwell model and Burger's model. It is known that two to three terms in the expansion of those models are necessary to obtain a satisfactory fit to the rheological characteristics of fruits. Since four to six constants appear in the models, it is very difficult to determine their physical meaning according to the experimental conditions and levels.

Therefore in order to ease the comparison of data, this study was conducted to develop the linearized rheological model of the fruit from the previous studies of stress relaxation and creep characteristics of fruits. Stress relaxation and creep characteristics were able to normalize and presented in the linear form of $t/S(t) = K_1 + K_2 t$ and $t/C(t) = K_1' + K_2' t$, respectively. It was possible to compare the effects of experimental conditions and levels much easier from the linearized models developed in this study than from the generalized Maxwell model and Burger's model.

1. 緒論

農産物은 外力이 작용할 때 힘-變形-時間의 3차원 舉動을 나타낸다. 이러한 舉動을 설명하는 데는 이들 현상과 力學的으로 相似인 스프링과 대시포트의 線型要素로 구성된 力學的 模型들이 이용되고 있다.¹⁻¹³⁾

그러나 農産物의 粘彈性 舉動을 나타내는 力學的 模型에는 많은 요소들이 있어 실험조건 및 변수에 따라 추정되는 상수값들이 어떤 일률적인 경향을 나타내지 않는 경우가 흔히 있다. 이러한 경우에는 農産物의 리올리지 特性을 定性的

혹은 定量的인 분석이 곤란하다. 특히 이런 현상은 일반화 Maxwell 模型이나 일반화 Kelvin 模型과 같이 지수항이 많은 模型에서 자주 나타난다.^{7,8,9,13)}

農産物의 外力에 대한 物理的 현상을 數學的 模型으로 표현하는 데는 가능한한 상수값들이 적어야 하고, 그 상수값들이 物理的인 의미가 있어야 하며, 실험조건 및 수준에 따라 민감하여야 한다. 또한 이러한 數學的 模型은 가능한한 간단하여야 가장 이상적인 模型이라 할수 있을 것이다.

* 密陽産業大學校 農業機械學科
** 忠南大學校 農業機械工學科

따라서 이 연구에서는 果實의 應力弛緩 및 크리이프 模型을 지수항이 없는 간단한 線型的인 模型으로 나타내고자 하며, 또한 이 線型化된 模型을 金동^{5,12}, 朴¹³의 연구결과에 적용함으로써 果實의 應力弛緩 및 크리이프 舉動을 分析하려는 것이다.

2. 리올러지 模型의 線型化 理論

가. 應力弛緩의 線型化 模型

應力弛緩模型을 지수항이 없는 간단한 線型的인 수식으로 나타내기 위하여 다음과 같은 弛緩變數(relaxation parameter) S(t)를 정의한다.

$$S(t) = \frac{\sigma_0 - \sigma(t)}{\sigma_0} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

S(t) = 弛緩變數

σ_0 = 初期應力, MPa

$\sigma(t)$ = 初期應力 載荷後 t초 후의 殘留應力, MPa

그림 1에 弛緩變數 S(t)와 시간과의 관계를 도시한 바와같이 분수함수의 형태를 나타내고 있으므로, 이들의 관계를 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$S(t) = \frac{t}{K_1 + K_2 t} \dots\dots\dots (2)$$

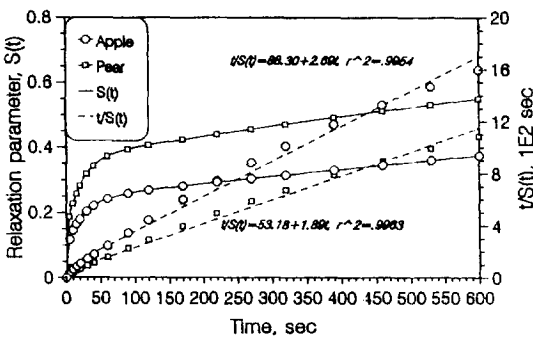


Fig. 1. Stress relaxation curves and their linearization.

식(2)를 t/S(t)에 대하여 정리하면 식(3)의 직선식을 얻을 수 있다.

$$\frac{t}{S(t)} = K_1 + K_2 t, t > 0 \dots\dots\dots (3)$$

식(1)과 (2)로부터 $\sigma(t)$ 에 관하여 정리한 후 극한값을 구하면 다음과 같다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_0 \left[1 - \frac{t}{K_1 + K_2 t} \right] = \sigma_0 \left[1 - \frac{1}{K_2} \right] \dots\dots\dots (4)$$

즉, 식(4)로부터 $1/K_2$ 은 0~1 사이의 값을 가지며 만약, $1/K_2 = 0$ 이면 초기에 載荷된 應力이 전혀 弛緩되지 않은 경우를 나타내고 (ideal elastic solid), $1/K_2 = 1$ 이면 초기에 載荷된 應力이 결국 모두 消滅되는 경우를 나타낸다(ideal liquid), 또한 $0 < 1/K_2 < 1$ 이면 초기에 載荷된 應力の 일부가 긴시간이 지나도 물체내부에 殘留應力으로 존재하는 것을 나타낸다(viscoelastic materials).

따라서 식(3)의 線型化 模型에서 기울기 K_2 는 應力弛緩되는 量을 나타내며, 또한 식(2)를 시간에 대하여 1次 微分하고 $t=0$ 을 대입한 값, $1/K_1$ 은 초기의 應力弛緩速度를 나타낸다.

$$\left[\frac{d S(t)}{dt} \right]_{t=0} = \frac{1}{K_1} \dots\dots\dots (5)$$

따라서 果實의 應力弛緩舉動을 식(3)의 單純 回歸模型으로 回歸分析 함으로서 추정되는 상수 값인 K_1 및 K_2 를 통하여 그 特性을 잘 설명할 수 있다.

또한, 農産物의 固體的인 性質(solidity)의 정도를 나타내는 값인 漸近彈性係數(asymptotic modulus)는 식(4)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$E_A = \frac{\sigma_A}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \left(1 - \frac{1}{K_2} \right) \dots\dots\dots (6)$$

여기서, $\sigma_A = t \rightarrow \infty$ 에서의 試片의 殘留應力(漸近應力), MPa

나. 크리이프의 線型化 模型

크리이프 變數(creep parameter)로서 C(t)를 다음과 같이 정의하므로써, 應力弛緩의 線型化에서와 같은 방법으로 크리이프 擧動 역시 線型的인 模型으로 나타낼 수 있다.

$$C(t) = \frac{L_0 - L(t)}{L_0} \dots\dots\dots (7)$$

여기서,

C(t) = 크리이프 變數

L₀ = 試片의 원래길이, mm

L(t) = 荷重載荷 후 시간 t에서의 試片의 길이, mm

크리이프 變數 C(t)와 시간과의 관계도 역시 그림 2에 도시한 바와같이 分數函數의 형태를 나타내고 있다.

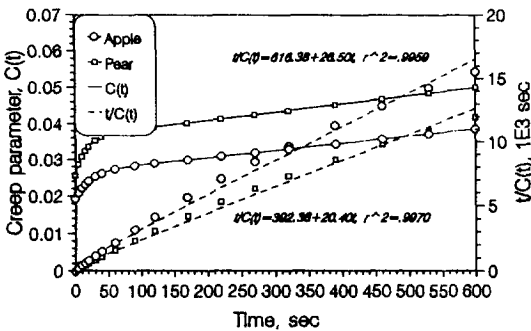


Fig. 2. Creep curves and their linearization.

$$C(t) = \frac{t}{K_1' + K_2' t}, t > 0 \dots\dots\dots (8)$$

식(8)을 직선의 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{t}{C(t)} = K_1' + K_2' t \dots\dots\dots (9)$$

여기서, 식(7)과 (8)로부터 L(t)에 관하여 정리한 후 극한값을 구하면 다음과 같다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} L(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} L_0 \left[1 - \frac{t}{K_1' + K_2' t} \right] = L_0 \left[1 - \frac{1}{K_2'} \right] \dots\dots\dots (10)$$

즉, 식(10)에서 1/K₂'은 0~1 사이의 값을 가지며, 만약 1/K₂'=0이면 初期應力에 대한 試片의

크리이프가 없는 경우를 나타내고 (ideal elastic solid), 1/K₂'=1이면 初期應力에 대한 試片의 크리이프가 계속됨을 나타낸다 (viscoelastic liquid), 또한 0<1/K₂'<1이면 初期應力에 대한 試片의 크리이프가 일정한 값에 수렴하는 경우를 나타낸다 (viscoelastic materials).

따라서 식(9)의 線型화된 크리이프模型의 기울기 K₂'는 크리이프되는 量을 나타내며, 또한 식(8)을 1차 미분하여 t=0을 대입한값, 1/K₂'은 荷重載荷直 後의 크리이프速度를 나타내게 된다.

$$\left[\frac{d C(t)}{dt} \right]_{t=0} = \frac{1}{K_1'} \dots\dots\dots (11)$$

따라서 果實의 크리이프 擧動을 식(9)의 單純 回歸模型으로 回歸分析하므로써 추정되는 상수 값인 K₁' 및 K₂'를 통하여 크리이프 擧動은 잘 설명할 수 있다. 또한 應力弛緩에서와 같이 漸近 크리이프 彈性係數(asymptotic creep modulus)는 다음 식으로 정의된다.

$$E_A' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_A} \dots\dots\dots (12)$$

여기서, σ₀=初期應力(일정), MPa

ε_A=漸近變形率, mm/mm

3. 結果 및 考察

가. 果實의 應力弛緩 特性

金동^{5,12)}, 朴¹³⁾은 우리나라의 후지사과와 신고배를 대상으로 이들 果實의 저장조건 및 저장기간 별로 應力弛緩 實驗을 실시한바 있다. 표 1에는 이들이 제시하였던 일반화 Maxwell 模型의 상수값과 이들의 연구결과를 본 연구에서 고찰한 線型化 應力弛緩 模型으로 回歸分析한 결과를 함께 나타내었다.

이들은 荷重載荷速度가 증가할 수록 初期應力이 많이 載荷되었으며, 應力弛緩되는 量 뿐만 아니라 應力弛緩速度도 빠른 것으로 보고하였다. 이와같은 결과는 표 1의 線型화된 應力弛緩模型의 계수값 비교에서도 잘 증명되었는 바, 즉 應

Table 1. Parameters of the generalized Maxwell model and the linearized stress relaxation model for the fruits flesh according to the loading rate

Apple

L.R. mm/min	I.S. mm/mm	$\sigma(t) = \epsilon_0 [E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) + E_e]$						$t/S(t) = K_1 + K_2 t, S(t) = [\sigma_0 - \sigma(t)]/\sigma_0$				
		E_1 MPa	E_2 MPa	τ_1 sec	τ_2 sec	E_e MPa	r^2	K_1	K_2	σ_A MPa	E_A MPa	r^2
10	0.025	0.788	0.894	4.620	143.493	4.236	0.991	96.498	3.349	0.104	4.158	0.998
	0.050	0.698	0.791	4.609	144.092	3.738	0.991	96.498	3.349	0.184	3.672	0.998
	0.075	0.649	0.735	4.626	144.322	3.476	0.991	96.498	3.349	0.256	3.414	0.998
25	0.025	1.226	1.296	9.016	369.834	3.736	0.992	88.297	2.689	0.099	3.967	0.995
	0.050	1.066	1.124	9.068	371.718	3.243	0.992	88.297	2.689	0.172	3.445	0.995
	0.075	0.981	1.034	9.053	369.904	2.988	0.992	88.297	2.689	0.238	3.172	0.995
40	0.025	1.375	1.446	8.995	365.917	3.662	0.992	81.544	2.485	0.098	3.912	0.996
	0.050	1.175	1.237	9.043	367.195	3.128	0.992	81.544	2.485	0.167	3.344	0.996
	0.075	1.074	1.133	9.044	371.193	2.847	0.992	81.544	2.485	0.229	3.051	0.996

Pear

10	0.025	1.026	0.943	8.414	352.591	1.858	0.991	61.221	2.081	0.050	2.011	0.996
	0.050	0.886	0.821	8.357	352.869	1.608	0.991	61.221	2.081	0.087	1.742	0.996
	0.075	0.815	0.754	8.388	352.830	1.479	0.991	61.221	2.081	0.120	1.602	0.996
25	0.025	1.297	1.175	8.260	334.522	1.787	0.991	53.185	1.830	0.049	1.956	0.996
	0.050	1.109	1.006	8.309	335.812	1.525	0.991	53.185	1.830	0.084	1.672	0.996
	0.075	1.012	0.920	8.338	339.296	1.388	0.991	53.185	1.830	0.114	1.525	0.996
40	0.025	1.599	1.426	8.268	321.242	1.755	0.991	47.892	1.667	0.049	1.940	0.997
	0.050	1.334	1.189	8.235	321.460	1.463	0.991	47.892	1.667	0.081	1.617	0.997
	0.075	1.200	1.071	8.302	325.746	1.309	0.991	47.892	1.667	0.109	1.453	0.997

Note : L.R. : loading rate, I.S. : initial strain

力弛緩되는 量을 나타내는 $1/K_2$ 의 값과 초기의 應力弛緩速度를 표시하는 $1/K_1$ 의 값 모두 荷重 載荷速度에 따라 증가하는 것으로 보아서도 잘 알 수 있다.

표 1에서 일반화 Maxwell 模型의 平衡彈性係數 E_e 와 線型化된 應力弛緩模型의 漸近彈性係數 E_A 는 果實의 固體의 性質(solidity)을 나타내는 값으로 서로 物理的으로 같은 의미를 갖는다.

이들 두 값들은 모두 荷重載荷速度에 따라 감소하는 경향이였으며, 표 2의 통계적 검증에서와 같이 거의 같은 크기로 나타났다.

線型化된 應力弛緩 模型의 계수 비교에서, 배의 경우가 荷重載荷速度 및 初期變形量에 관계 없이 $1/K_1$ 과 $1/K_2$ 의 값이 모두 사과에 비하여 컸으며, 漸近彈性係數는 더 작은 것으로 나타났다. 이러한 사실로 부터 배에 비하여 사과의 경우가

Table 2. The results of statistical analysis for difference between E_e in the generalized Maxwell model and E_A in the linearized stress relaxation model

Fruits	Hypothesis H_0	Mean of di's D	S. D. S_D/\sqrt{N}	ABS $t = D/(S_D/\sqrt{N})$	Comparison $ta/2$	Significant Difference*
Apple	$\mu_D = 0 (H_1 \neq 0)$	0.120	0.059	2.024	2.145	NO
Pear	$\mu_D = 0 (H_1 \neq 0)$	0.149	0.072	2.068	2.145	NO

Note : $\mu_D = \mu_A - \mu_e$, μ_A = mean of E_A , μ_e = mean of E_e , * = 5% significant level

같은 조건하에서 載荷되는 應力の 量이 매우 컸으나, 應力弛緩量과 速度는 더 느리다는 것을 알 수 있다.

표 3은 果實의 저장조건 및 저장기간에 따른 應力弛緩의 실험결과를 線型化 應力弛緩模型으로 回歸分析한 결과이다. 표에서 보는 바와같이 初期變形量이 증가할수록 상대적으로 많은 應力이 載荷되어, 긴 시간이 지난후의 殘留應力(漸近應力)도 크나, 初期變形量에 따른 應力弛緩量의 定性的인 비교가 가능한 漸近彈性係數에서는 이와 반대현상으로 나타났다. 이와같은 현상의 物理的인 의미는 果實에 상대적으로 큰 應力이 가하여지면 파괴가 쉽게 일어날 수 있다는 상식적인 결과를 漸近彈性係數(E_A)로 부터 확인할 수 있다는 것이다.

표 3과 그림 3, 4 및 5에서 보는 바와같이 應力弛緩되는 정도를 표시하는 $1/K_2$ 의 값과 荷重 載荷 後 초기의 應力弛緩速度를 나타내는 $1/K_1$ 모두 常溫貯藏하였던 果實이 低溫貯藏된 果實에 비하여 크게 나타났으며, 그 차이는 貯藏期間이 길어 질 수록 더욱 뚜렷하였고, 배의 경우가 사과에 비하여 두 값 모두 크게 나타났다. 또한 果實의 固體的인 性質을 나타내는 漸近彈性係數는 사과의 경우가 배 보다 월등히 크게 나타났으며, 두 貯藏條件에서 貯藏期間에 따른 그 감소율은 사과에 비하여 배의 경우가 더 크게 나타났다. 이와같은 결과는 金 등^{5,12)}, 朴¹³⁾이 보고한 果實의 應力弛緩特性과 잘 부합되었다.

Table 3. Parameters of the linearized stress relaxation model for the fruit flesh at the loading rate of 25mm/min

Apple

S. P. days	S. C.	I. S. mm/mm	$t/S(t) = K_1 + K_2t, S(t) = [\sigma_0 - \sigma(t)]/\sigma_0$				r^2
			K_1	K_2	σ_A, MPa	E_A, MPa	
0	—	0.025	88.297	2.689	0.099	3.967	0.995
		0.050	88.297	2.689	0.172	3.445	0.995
		0.075	88.297	2.689	0.238	3.172	0.995
10	NT	0.025	77.523	2.376	0.087	3.472	0.996
		0.050	77.523	2.376	0.154	3.070	0.996
		0.075	77.523	2.376	0.214	2.857	0.996
	LT	0.025	84.412	2.596	0.094	3.763	0.996
		0.050	84.412	2.596	0.165	3.305	0.996
		0.075	84.412	2.596	0.230	3.064	0.996
20	NT	0.025	75.779	1.983	0.070	2.804	0.994
		0.050	75.779	1.983	0.127	2.530	0.994
		0.075	75.779	1.983	0.179	2.382	0.994
	LT	0.025	80.171	2.472	0.088	3.515	0.996
		0.050	80.170	2.472	0.156	3.128	0.996
		0.075	80.171	2.472	0.219	2.921	0.996
30	NT	0.025	58.311	1.780	0.056	2.253	0.996
		0.050	58.311	1.780	0.104	2.084	0.996
		0.075	58.311	1.780	0.149	1.991	0.996
	LT	0.025	75.755	2.344	0.081	3.254	0.996
		0.050	75.755	2.344	0.147	2.930	0.996
		0.075	75.755	2.344	0.207	2.756	0.996

Pear

0	—	0.025	53.185	1.830	0.049	1.956	0.996
		0.050	53.185	1.830	0.084	1.672	0.996
		0.075	53.185	1.830	0.114	1.525	0.996
10	NT	0.025	47.863	1.670	0.041	1.625	0.997
		0.050	47.863	1.670	0.071	1.419	0.997
		0.075	47.863	1.670	0.098	1.310	0.997
	LT	0.025	50.372	1.740	0.045	1.784	0.996
		0.050	50.362	1.740	0.077	1.534	0.996
		0.075	50.372	1.740	0.105	1.404	0.996
20	NT	0.025	37.654	1.356	0.022	0.898	0.997
		0.050	37.654	1.356	0.042	0.836	0.997
		0.075	37.654	1.356	0.060	0.801	0.997
	LT	0.025	44.295	1.553	0.035	1.391	0.997
		0.050	44.295	1.553	0.061	1.214	0.997
		0.075	44.295	1.553	0.084	1.122	0.997
30	NT	0.025	29.465	1.104	0.007	0.270	0.998
		0.050	29.465	1.104	0.013	0.265	0.998
		0.075	29.465	1.104	0.020	0.262	0.998
	LT	0.025	41.763	1.327	0.022	0.880	0.996
		0.050	41.763	1.327	0.040	0.792	0.996
		0.075	41.763	1.327	0.056	0.744	0.996

Note ; S. P. : storage period, S. C. : storage conditions, I. S. : initial strain,
 mm/mm, — : initial state, LT : low temperature [$3 \pm 1^\circ\text{C}$, rh $85 \pm 5\%$],
 NT : normal temperature($15 \pm 1^\circ\text{C}$, rh $45 \pm 5\%$)

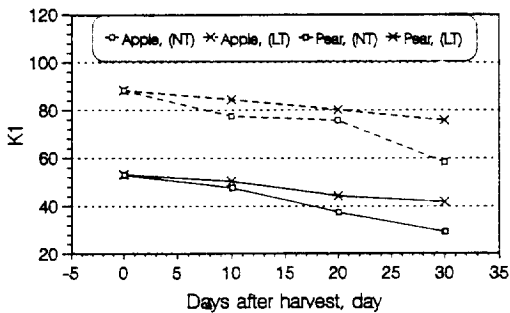


Fig. 3. Effect of the storage condition and the storage period on the K_1 of linearized stress relaxation model for the fruit flesh at the loading rate of 25mm/min and the initial strain of 0.050mm/mm.

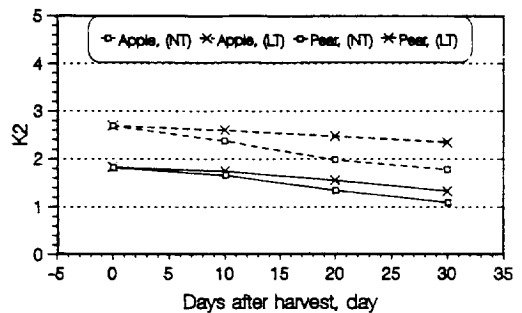


Fig. 4. Effect of the storage condition and the storage period on the K_2 of linearized stress relaxation model for the fruit flesh at the loading rate of 25mm/min and the initial strain of 0.050mm/mm.

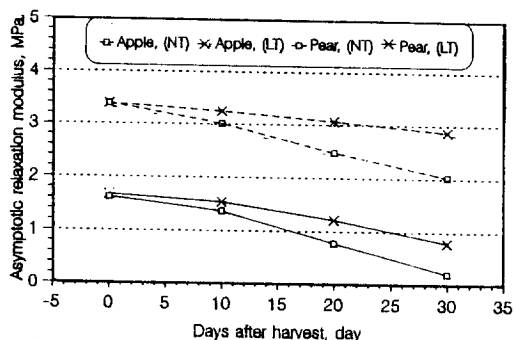


Fig. 5. Effect of the storage condition and the storage period on the asymptotic relaxation model(EA) of linearized stress relaxation model for the fruit flesh at the loading rate of 25mm/min and the initial strain of 0.050mm/mm.

나. 果實의 크리이프 特性

표 4에는 저장조건과 저장기간에 따른 크리이프 실험결과를 본 연구의 선형화된 크리이프 모델으로 회귀분석한 결과를 나타내었다.

선형화된 크리이프 모델의 계수값에서 크리이프되는 량을 표시하는 $1/K_2'$, 초기의 크리이프속도를 표시하는 $1/K_1'$ 의 값 모두 初期應力에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 初期應力이 클 수록 더 큰 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. 즉, 임의의 시간에 있어서 初期應力이 큰 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.

Table 4. Parameters of the linearized creep models for the fruit flesh

Apple

Storage period days	S. C.	Initial stress MPa	$t/C(t) = K_1' + K_2't, C(t) = [L_0 - L(t)]/L_0$				r^2
			K_1'	K_2'	ϵ_A	E_A', MPa	
0	—	0.040	1579.947	67.933	0.015	2.738	0.996
		0.121	616.375	26.502	0.038	3.204	0.996
		0.202	397.891	17.108	0.059	3.447	0.996
10	NT	0.040	942.374	48.434	0.021	1.952	0.997
		0.121	420.603	21.617	0.046	2.614	0.997
		0.202	289.048	14.856	0.067	2.994	0.997
	LT	0.040	1130.092	55.925	0.018	2.254	0.997
		0.121	464.136	22.969	0.044	2.777	0.997
		0.202	306.865	15.186	0.066	3.060	0.997
20	NT	0.040	620.453	37.192	0.027	1.499	0.998
		0.121	291.757	17.489	0.057	2.114	0.998
		0.202	205.426	12.314	0.081	2.481	0.998
	LT	0.040	824.728	46.528	0.022	1.875	0.997
		0.121	350.841	19.793	0.051	2.393	0.997
		0.202	235.783	13.302	0.075	2.680	0.997
30	NT	0.040	485.683	29.271	0.034	1.180	0.998
		0.121	240.311	15.336	0.065	1.854	0.998
		0.202	177.926	11.355	0.088	2.288	0.998
	LT	0.040	665.398	39.258	0.026	1.582	0.998
		0.121	311.417	18.374	0.054	2.221	0.998
		0.202	218.788	12.908	0.078	2.601	0.998

Pear

0	—	0.040	924.300	48.054	0.021	1.937	0.997
		0.121	392.379	20.400	0.049	2.466	0.997
		0.202	263.442	13.696	0.073	2.760	0.997
10	NT	0.040	703.583	39.510	0.025	1.592	0.997
		0.121	331.175	18.597	0.054	2.248	0.997
		0.202	233.288	13.101	0.076	2.640	0.997
	LT	0.040	729.366	43.589	0.023	1.757	0.998
		0.121	332.765	19.887	0.050	2.404	0.998
		0.202	231.031	13.807	0.072	2.782	0.998
20	NT	0.040	574.863	33.239	0.030	1.340	0.998
		0.121	292.442	16.909	0.059	2.044	0.998
		0.202	213.579	12.349	0.081	2.488	0.998
	LT	0.040	680.775	38.782	0.026	1.563	0.997
		0.121	326.945	18.625	0.054	2.252	0.997
		0.202	232.472	13.243	0.076	2.669	0.997
30	NT	0.040	461.203	27.990	0.036	1.128	0.998
		0.121	247.272	15.007	0.067	1.814	0.998
		0.202	185.053	11.231	0.089	2.263	0.998
	LT	0.040	573.435	34.260	0.029	1.381	0.998
		0.121	289.512	17.297	0.058	2.091	0.998
		0.202	210.696	12.588	0.079	2.537	0.998

Note ; S. C. : storage conditions, — : initial state, LT : low temperature
 (3±1°C, rh 85±5% %, NT : normal temperature(15±1°C, rh45±5%)

線型化된 크리이프 모델의 계수값인 $1/K_1'$, $1/K_2'$ 모두 배가 사과에 비하여 더 큰것으로부터, 사과에 비하여 배의 경우가 크리이프되는 량 및 速度가 빠르다는 것을 알수있다.

金 등^{5,12)}은 低溫 및 常溫貯藏된 果實 모두에서 貯藏期間이 증가할 수록 같은 初期應力에 대한 瞬間彈性變形率이 크고, 크리이프 速度가 빠르게 나타났으며, 이러한 경향은 常溫貯藏된 果實이 低溫貯藏된 果實에서 보다 뚜렷하게 나타났다고 하였는바, 이러한 결과들은 그림 6과 7의 線型化된 크리이프模型의 계수값에서도 잘 나타났다. 즉 크리이프되는 量을 표시하는 $1/K_2'$ 와 초기의 크리이프 速度를 표시하는 $1/K_1'$ 의 값 모두 貯藏期間에 따라 증가하였으며, 常溫貯藏된 果實에서 그 증가율이 컸다. 이로부터 收穫後 果實의 軟化速度는 溫度에 따라 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

貯藏期間에 따라 배의 크리이프되는 量과 速度가 사과에 비하여 컸으며, 이는 低溫貯藏된 果實 보다는 常溫貯藏된 果實에서 더 뚜렷하게 나타났다.

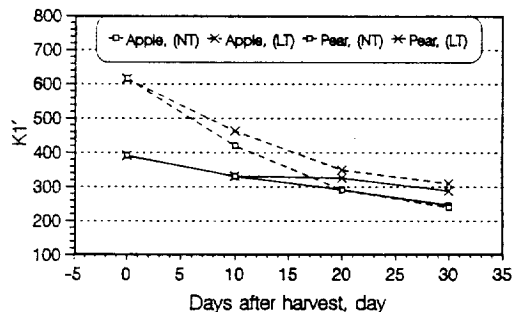


Fig. 6. Effect of the storage condition and the storage period on the K_1' of linearized creep model for the fruit flesh at the initial stress of 0.1202MPa.

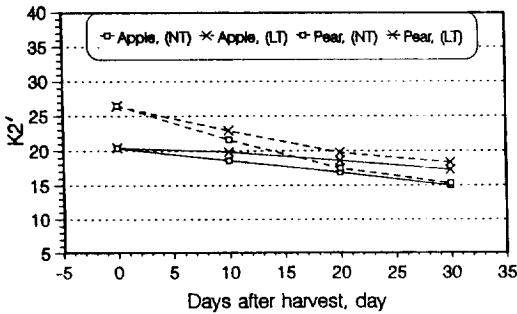


Fig. 7. Effect of the storage condition and the storage period on the K_2' of linearized creep model for the fruit flesh at the initial stress of 0.1202MPa.

4. 結論

사과의 배를 실험재료로한 應力弛緩 및 크리이프 特性에 대한 실험결과를 가지고 응력이완 및 크리이프 擧動의 線型化 模型을 개발하였다. 이들 線型化 模型과 일반화 Maxwell 模型 및 Burger's 模型을 각각 비교분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 果實의 應力弛緩 및 크리이프 擧動에 대한 線型化 模型을 개발하였다.

2) 應力弛緩 擧動의 경우, 일반화 Maxwell 模型에서는 각 요소의 인자들(E_1, E_2, τ_1, τ_2)이 荷重載荷速度에 따라 증감의 경향이 일률적으로 나타나지 않았으나, 線型化 模型에서는 荷重載荷速度에 따라 應力弛緩速度($1/K_1$) 및 應力弛緩量($1/K_2$)이 일률적으로 증가하는 경향이 뚜렷하였다.

3) 果實의 固體的 性質을 나타내는 일반화 Maxwell 模型의 平衡彈性係數(E_s)와 線型化 模型의 漸近彈性係數(E_∞)는 5%의 통계적 유의수준에서 서로 차이가 없는 것으로 나타났다.

4) 크리이프 擧動의 경우, 初期應力에 따라 크리이프速度($1/K_1'$) 및 크리이프되는 量($1/K_2'$)

은 증가하였고, 이들 값은 저장기간에 따라서도 일률적으로 증가되었으며, 이러한 증가는 상온저장된 果實에서 더 크게 나타났다.

參考文獻

1. Baerdemaeker, J. G. D. and L. J. Segerlind. 1976. Determination of the viscoelastic properties of apple flesh. Trans. of the ASAE 17 (2) : 346-348, 353.
2. Chen, P. and S. Chen. 1986. Stress relaxation functions of apples under high loading rates. Trans. of the ASAE 29(6) : 1754-1759.
3. Chu, C. F. and M. Peleg. 1985. The compressive behavior of solid food specimens with small height to diameter ratios. J. of Texture Studies 16(4) : 451-464.
4. Holt, J. E. and D. Schoorl. 1984. Mechanical properties and texture of stored apples. J. of Texture Studies 15(4) : 377-394.
5. Kim, M. S. and J. M. Park. 1993. Compressive creep behavior of fruits. International Conference for Agri. Mach. & Process Engg. Oct. 19-22, 1993, Seoul, Korea : 1329-1339
6. Mohsenin, N. N. 1980. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach science publishers, N. Y.
7. Peleg, M. 1979. Characterization of the stress relaxation curves of solid food. J. of Food Sci. 44(1) : 277-281.
8. Peleg, M. 1984. Application of nonlinear phenomenological rheological models to solid food materials. J. of Texture Studies 15 (1) : 1-22.
9. Peleg, M. 1979. A model for creep and early failure. Materials Science and Engineering 40 : 197-205.

10. Shama, F. and P. Sherman. 1973. Stress relaxation during force-compression studies on foods with the instron universal testing machine and its implications. J. of Texture Studies 4 : 353-362.
11. Sitkei, Gy. 1986. Mechanics of agricultural materials. Elsevier Science Publishers. : 114-283.
12. 金滿秀, 朴鍾民, 崔東洙. 1992. 果實의 粘彈性 特性(I)-應力弛緩 舉動. 韓國農業機械學會誌 17(3) : 260-271.
13. 朴鍾民. 1993. 果實의 粘彈性 特性과 그 應用. 忠南大 博士學位論文