

果實의 粘彈性 特性(I)⁺

—應力弛緩舉動—

Viscoelastic Properties of Fruit Flesh(I)

— Stress Relaxation Behavior —

金滿秀*

朴鍾民*

崔東洙*

M. S. Kim

J. M. Park

D. S. Choi

Summary

Fruits are generally subjected to mechanical forces during harvesting, handling, and transportation that may cause damage in the form of bruises, punctures, and cracks. In order to prevent damage, and insure better quality fruits for consumers, it is very essential to study physical properties of these materials.

The studies were conducted to examine the effect of storage period, storage condition, and other factors, such as loading rate and initial strain, on the stress relaxation behavior of the fruit flesh, and develop nonlinear viscoelastic models to represent its stress relaxation behavior.

The following results were obtained from the study :

1. Since the viscoelastic behavior of the fruits flesh was nonlinear, the behavior was satisfactorily modelled as follows :

$$\delta(\epsilon, t) = \epsilon^A [B \exp(-Ct) + D \exp(-Ft) + G(-Ht)]$$

But, for the every strain applied, the stress relaxation behavior of the fruit flesh, such as apple and pear, could be well described by the Generalized Maxwell model, respectively.

2. The effect of loading rate on the stress relaxation behavior was remarkable. The higher loading rate resulted in the higher initial stress, and the faster stress relaxation.
3. The higher initial strain resulted in the higher initial stress, and stress relaxed at the large initial strain was also much higher than at the small initial strain.
4. Stress relaxation rate and quantity stored in the fruits at the low temperature storage were much higher than those at the normal temperature storage in the same storage period.

Also, in all fruits tested, the longer storage period was the more relaxation rate and quantity were shown. These trends in the normal temperature condition was the more significant than in the low temperature condition.

+ 本 研究는 1990년도 學術振興財團의 學術研究費 支援으로 遂行되었음.

* 忠南大學校 農業機械工學科

1. 緒論

果實類를 비롯하여 대부분의 農産物은 外力의 作用하에서 「힘-變形-時間」의 3차원 擧動을 나타내는 데, 農産物의 이러한 擧動을 粘彈性 特性이라 하며, 이 세 인자중 變形을 고정하고 「힘-時間」의 擧動을 研究하는 것을 荷重 弛緩이라 한다.

農産物의 이러한 擧動을 설명하는 데는, 이들 擧動과 力學的으로 相似인 스프링과 데시포르트의 線型要素로 구성된 力學的 模型들이 이용되고 있으나^{2-5, 8, 10-13}, 果實을 비롯하여 대부분의 農産物은 非線型粘彈性 特性을 나타 내므로^{2, 5-7, 9, 11, 13}, 線型要素로 만 구성된 力學的 模型에 의한 農産物의 粘彈性 擧動의 분석에는 한계가 있다.

따라서 Peleg⁹는 農産物의 非線型 粘彈性 特性을 설명하는 데, 스프링과 데시포르트등의 線型 要素에 體積彈性率(cubic elasticity)을 갖는 스프링과 쿨롱댐퍼(coulomb damper)등의 非線型 要素들을 조합시킨 力學的 模型을 이용한 바 있으며, Sharma와 Rafie¹¹, Mittal과 Mohsenin⁷은 이론적인 3중 積分模型으로서 사과속살의 非線型 粘彈性 特性을 설명하려고 하였다. 그러나 이 두 가지 경우 각각 3차 미분방정식과 3중 적분을 풀기 위해서는 많은 가정이 뒤따라야 하기 때문에 農産物의 特性을 정확히 나타 내기란 어려움이 있을 것으로 판단된다.

연구자에 따라서는 農産物을 線型粘彈性體로 보고한 경우도 있었는데, Rao등¹⁰은 감자를 대상으로 크리이프 실험을 통한 크리이프 컴프라이언스와 弛緩彈性係數를 계산하였는 바, 이 두 物理量은 初期變形率 10% 까지는 作用된 初期應力에는 관계 없이 단지 測定時間에만 관계되는 線型粘彈性的인 擧動을 나타 내었다고 하였다.

Chappell등²은 사과속살로부터 직경 23.81mm, 길이 25.4mm의 원통형 試片을 가공하여 初期應力 67.6 165.2kPa 범위의 4 수준의 死荷重에 대한 크리이프 實驗을 실시하여 Burger's 模型으로 나타 낸 결과, 模型의 각 계수들이 初期應力の

변화에 따라 직선적으로 변하는 것으로 보아 사과속살은 線型粘彈性體로 간주해서는 안된다고 하였으며, 이들은 또한 같은 應力水準 하에서 포와송비(Poisson's ratio)를 직접측정하여 初期應력과 時間을 인자로 하는 Poisson's 比의 수식을 제시하였다.

金등¹³은 버에 대한 크리이프 실험에서 初期應力水準의 증가에 따라 크리이프의 速度 및 量이 증가하는 것으로 보아, 버는 非線型 粘彈性 特性을 나타내었으며, 初期應력과 時間을 인자로 하는 非線型 粘彈性 模型을 발표한 바 있다.

이상의 연구자들 외에는 대부분이 그들이 대상으로 하였던 農産物에 대하여 線型 혹은 非線型 特性에 대한 특별한 언급 없이 단순한 線型 粘彈性的의 원리를 적용시킨 연구결과 들이었다.

따라서 본 연구에서는 果實의 非線型 粘彈性 特性을 구명하여, 그 擧動을 예측할 수 있는 非線型 粘彈性 模型을 개발하고자 하며, 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 1) 果實의 貯藏條件 및 期間 別로 應力弛緩 實驗을 통한 線型 및 非線型 粘彈性 模型을 개발 하며,
- 2) 또한, 이들 인자들이 果實의 粘彈性 特性에 미치는 영향을 究明 하고,
- 3) 荷重載荷速度가 果實의 應力弛緩 特性에 미치는 영향을 究明하는 데 본 研究의 목적이 있다.

2. 材料 및 方法

가. 實驗材料

본 研究에 사용된 供試果實은 우리나라의 대표적인 果實인 사과(Fuji)와 배(Niitaka)이며, 이들 果實들은 忠南大學校 農科大學 부속 과수원에서 試驗栽培된 것으로, 收穫時期 및 收穫 당시의 주요 기본적인 物性값을 표 1에 표시하였다.

Table 1. Agronomic data and physical characteristics of the fruits used in stress relaxation test.

Fruits	Cultivar	Date of		Volume (m ³)	Weight (kgf)	Grade*
		full bloom	harvest			
Apple	Fuji	1991. 5. 1	1991. 11. 7	3.129×10 ⁻⁴	0.2625	56
Pear	Niitaka	1991. 4. 23	1991. 10. 1	3.830×10 ⁻⁴	0.3801	38

Note :

* : No.of fruits per 15 kgf(with standard corrugated shipping box)¹⁵⁾

收穫 직후의 果實들을 서늘한 곳에서 4시간 이상 안정을 취한 다음, 3±1℃의 低溫室(rh, 85±5%)과 15±1℃의 常溫室(rh, 45±5%)에 나누어 각각 貯藏하였다.

實驗은 收穫 직후와 貯藏 후 10일 간격으로 실시하였으며, 매 회 實驗을 실시하기 전 8시간 이상 室溫에 방치하여 果實의 溫度를 室溫과 平衡에 이르게 하였고, 實驗室의 溫度와 相對濕度는 가급적 17℃와 50%를 유지하도록 하였다.

應力弛緩 실험시 사용된 試片은 金동¹¹⁾의 연구결과를 토대로 가장 약한 부위인 果實의 중심축에 수직한 방향으로 시편채취기(cork borer)를 이용하여 채취한 다음, 껍질을 포함하여 약 2mm를 잘라 낸 후, 직경 17.6mm, 길이 20mm(L/D=1.

14)의 圓筒形 試片(cylindrical specimen)을 만들어 사용 하였다.

試片의 壓縮時 과대한 水分損失을 막기 위하여 0.05mm의 얇은 비닐로 試片을 코팅한 후 實驗을 수행 하였다.

나. 實驗裝置 및 方法

위의 研究를 수행하기 위한 應力弛緩 實驗裝置는 그림 1에서와 같이 試片을 일정 變形量까지 壓縮한 뒤 그 變形을 유지하기 위한 機械的인 장치부와 그 장치로부터 果實試片이 받는 힘과 變形을 일정시간 계속적으로 測定하기 위한 計測裝置部로 구성된다.

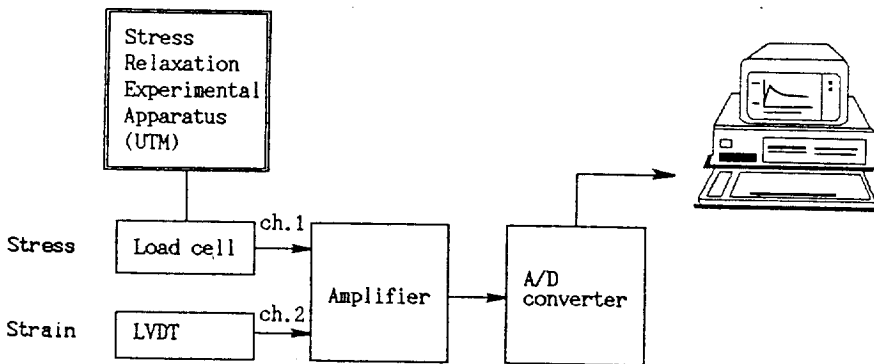


Fig. 1. Block diagram of stress relaxation test apparatus.

DATA를 얻기 위한 計測用 컴퓨터 프로그램은 약간의 機械語와 Quick-basic V5.0을 사용하였으며, 일단 컴퓨터의 하드디스크에 저장된 DATA를 분석 처리하여 본 研究에서 필요로 하는 정보를 얻기 위한 事後管理 프로그램을 개발하였다.

일정한 荷重載荷速度로 試片에 荷重을 가하는 장치로는 기존의 萬能材料試驗機(UTM)를 이용하였고, 이로부터 DATA를 얻기 위해 특별히 설치한 주요 計測器와 그 사양은 金등¹⁴⁾에 의한 「果實의 힘-變形 特性에 관한 研究」에서와 같으며, 荷重載荷速度는 ASAE standards S368.1¹⁾의 20~30mm/min 범위를 기준으로, 粘彈性 물체의 時間因子를 보다 더 세밀히 分析하기 위하여 이 보다 크고 작은 범위에서 10, 25 및 40mm/min의 3 수준의 荷重載荷速度를 택 하였다. 변수의 각 수준에서 10반복 하였다.

3. 結果 및 考察

가. 果實의 應力弛緩 模型

果實은 매우 작은 軟組織 細胞(parenchyma cell)들로 구성되어 있으며, 이 細胞들의 細胞壁(cell wall)은 일반적으로 彈性舉動을, 細胞液과 果實 전체 體積의 상당부분을 차지하는 공극은 粘性舉動을 나타내기 때문에 彈性要素인 스프링과 粘性要素인 데시포트로 구성된 力學的 模型으로 이들 農産物의 舉動을 설명할 수 있는 것이다.^{5,11,12)}

일반적으로 農産物의 應力弛緩 舉動은 다음의 그림 2와 같은 일반화 Maxwell 模型으로 잘 설명될 수 있다.^{2,4,5,8,10,12,13)}

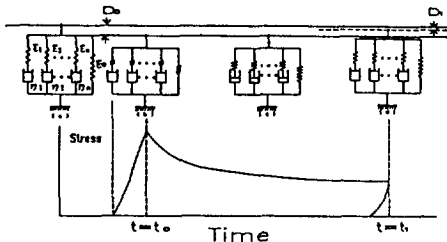


Fig. 2. Stress relaxation curve of the generalized Maxwell model according to time.

일정한 荷重載荷速度로 一般化 Maxwell 模型을 D_0 만큼 壓縮하였을 때, 模型이 받은 應力은 그림 2의 (b)에서와 같이 먼저 n 개의 스프링에 貯藏되며, 이 貯藏된 應力은 그 變形이 계속 유지될 때, n 개의 데시포트에 의해 消散된다. 이 消散되는 應力에 의하여 試片의 溫度는 상승됨과 동시에 永久變形이 생기게 된다.

따라서 시간 $t=t_1$ 에서 荷重載荷時와 같은 速度로 그 變形量을 회복 시킬 때 $D_0 - D_1$ 만큼만 回復되고 D_1 만큼이 永久變形으로 남게된다. 一般化 Maxwell 模型속에 平衡彈性係數 E_0 는 農産物에 따라서는 彈性係數가 매우 높아 초기에 가한 應力의 대부분이 스프링 要素에 貯藏된 채 데시포트에 의해 消散되는 율이 적은 것을 표시해 주는 요소로서, 模型속에 이 요소의 존재 유무는 극단적인 가정에 의하는 수밖에 없다. 즉, 粘彈性 固體(viscoelastic solid)로 가정될 수 있는 물체에서는 이 요소가 필수 적이며, 粘彈性 液體(viscoelastic liquid)로서 가정될 물체에서는 필요 없는 요소이다.

본 研究의 供試果實인 사과나 배의 경우는 粘性係數가 매우 작아 장기고정하중 하에서는 초기에 받은 應力의 대부분이 데시포트에 의해 소산되어 없어질 것으로 예상되나, 본 研究에서는 應力弛緩 실험시간인 10분 동안의 應力弛緩 舉動을 잘 표현하기 위하여 一般化 Maxwell 模型에서 平衡彈性係數 E_0 를 가지는 스프링 要素를 고려하였다.

만약 시간 $t=t_0$ 에서 試片이 받은 初期變形量 D_0 가 일정하게 유지된다면, 이 때 試片이 받은 應力은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \dots + \sigma_n + E_0 \epsilon_0 \quad (1)$$

n 번째 Maxwell 要素의 應力은 $\sigma_n(t) = \epsilon_0 E_n \exp(-t/\tau_n)$ 으로 표시 되므로, 荷重載荷 후 임의의 시간 t 에 있어서의 應力弛緩 $\sigma(t)$ 는 다음과 같이 표시 된다.

$$\sigma(t) = \epsilon_0 [E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) + E_3 \exp(-t/\tau_3) + \dots + E_n \exp(-t/\tau_n) + E_0] \quad (2)$$

여기서,

ϵ_0 : $t=t_0$ 에서의 初期變形率, mm/mm

τ_n : n번째 Maxwell 要素에서의 弛緩時間,
sec

E_n : n번째 Maxwell 要素에서의 減衰彈性係
數, MPa.

E_e : 平衡彈性係數, MPa.

식 (2)의 一般化 Maxwell 模型은 Maxwell 要
素가 많을 수록 실제의 현상에 더 접근하겠지만

수식이 복잡하여 이용에 불편이 따르므로, 수식
은 간단하면서도 擧動을 정확히 나타낼 수 있는
模型을 선정하는 것이 바람직할 것이다.

應力弛緩 實驗을 통하여 얻은 자료로부터 식
(2)의 각 계수들은 非線型 回歸分析法에 의하여
추정 되었으며, 추정된 이들 계수값들을 표 2와
3에 표시 하였다.

Table 2. Parameters of the generalized Maxwell model for the apple flesh at the loading rate of 25mm/min.

S.D. days	S.C.	I.S. mm/mm	$\sigma(t) = \epsilon_0 [E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) + E_e]$					r^2
			E_1 MPa.	E_2 MPa.	τ_1 sec	τ_2 sec	E_e MPa.	
0	-	0.0250	1.2256	1.2956	9.0156	369.8339	3.7364	0.9916
		0.0500	1.0657	1.1241	9.0677	371.7179	3.2433	0.9916
		0.0750	0.9808	1.0339	9.0532	369.9044	2.9878	0.9916
10	NTS	0.0250	1.3159	1.3802	8.9840	364.7995	3.2334	0.9916
		0.0500	1.1655	1.2197	9.0205	364.4369	2.8593	0.9916
		0.0750	1.0846	1.1341	8.9708	362.7298	2.6635	0.9917
	LTS	0.0250	1.2303	1.2763	8.8745	354.2611	3.5558	0.9915
		0.0500	1.0812	1.1259	8.9318	358.5663	3.1179	0.9914
		0.0750	1.0024	1.0399	8.9176	355.6129	2.8948	0.9917
20	NTS	0.0250	1.3864	1.8402	9.1424	437.0302	2.3611	0.9931
		0.0500	1.2496	1.6575	9.1383	434.7978	2.1347	0.9930
		0.0750	1.1759	1.5576	9.1519	433.4961	2.0134	0.9930
	LTS	0.0250	1.2495	1.2930	8.9128	355.1343	3.3034	0.9916
		0.0500	1.1097	1.1533	8.9344	356.8992	2.9369	0.9916
		0.0750	1.0378	1.0747	8.9156	355.6788	2.7457	0.9915
30	NTS	0.0250	1.5154	1.5984	9.0000	377.5068	1.9567	0.9925
		0.0500	1.4005	1.4817	8.9658	377.7956	1.8075	0.9924
		0.0750	1.3389	1.4145	8.9670	377.0737	1.7281	0.9925
	LTS	0.0250	1.2650	1.2932	8.8280	345.4115	3.0598	0.9916
		0.0500	1.1385	1.1676	8.8992	349.5499	2.7510	0.9916
		0.0750	1.0710	1.0953	8.8453	346.6124	2.5920	0.9915

Note :

S.D. : Storage Days, S.C. : Storage Conditions, I.S. : Initial Strain, mm/mm, - : Initial state, LTS
: Low Temperature Storage, NTS : Normal Temperature Storage

Table 3. Parameters of the generalized Maxwell model for the pear flesh at the loading rate of 25mm/min.

S.D. days	S.C.	I.S. mm/mm	$\sigma(t) = \epsilon_0 [E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) + E_c]$					r ²
			E ₁ MPa.	E ₂ MPa.	τ_1 sec	τ_2 sec	E _c MPa.	
0	-	0.0250	1.2973	1.1752	8.2604	334.5216	1.7872	0.9907
		0.0500	1.1087	1.0055	8.3089	335.8123	1.5254	0.9908
		0.0750	1.0122	0.9197	8.3379	339.2958	1.3878	0.9908
10	NTS	0.0250	1.3330	1.1858	8.1782	316.8465	1.4765	0.9908
		0.0500	1.1645	1.0360	8.1429	317.4195	1.2883	0.9909
		0.0750	1.0744	0.9558	8.1642	316.7886	1.1909	0.9908
	LTS	0.0250	1.3236	1.1925	8.2596	329.2407	1.6197	0.9911
		0.0500	1.1408	1.0274	8.2826	331.6877	1.3885	0.9908
		0.0750	1.0425	0.9389	8.2634	329.2757	1.2739	0.9909
20	NTS	0.0250	1.3728	1.1823	7.6857	274.2587	0.8066	0.9909
		0.0500	1.2869	1.1022	7.9202	282.5658	0.7400	0.9915
		0.0750	1.2337	1.0568	7.8950	282.0299	0.7106	0.9915
	LTS	0.0250	1.3834	1.2282	8.1515	315.4545	1.2384	0.9911
		0.0500	1.2099	1.0690	8.1982	315.3993	1.0823	0.9912
		0.0750	1.1157	0.9855	8.1192	311.4114	1.0045	0.9917
30	NTS	0.0250	1.3759	1.1868	7.2825	216.3230	0.2496	0.9936
		0.0500	1.3491	1.1642	7.2905	217.3951	0.2433	0.9935
		0.0750	1.3349	1.1508	7.3167	218.3098	0.2392	0.9936
	LTS	0.0250	1.4163	1.4319	7.8641	336.0211	0.6714	0.9935
		0.0500	1.2735	1.2879	7.8848	336.7251	0.6032	0.9934
		0.0750	1.1982	1.2138	7.8941	339.8417	0.5622	0.9935

果實의 應力弛緩 擧動은 단순히 時間 뿐 만 아니라 초기에 가한 應力에도 영향을 받는 非線型 粘彈性 特性을 나타내므로, 이상에서 언급된 이론과 결과들은 특정한 조건 하에서의 果實의 線型粘彈性 特性을 이해하는 데는 매우 유용하나, 時間과 初期變形量의 변화에 따른 果實의 전반적인 粘彈性 擧動을 이해하는 데는 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 사과 및 배에 대한 應力弛緩 實驗의 結果를 식 (3)과 같은 非線型 粘彈性 模型으로 나타 내었으며, 非線型 回歸分析 法에 의하여 추정된 그 계수값들을 표 4에 표시 하였다.

$$\sigma(\epsilon, t) = \epsilon^A [B \exp(-Ct) + D \exp(-Ft) + G \exp(-Ht)] \quad (3)$$

Table 4. Coefficients of nonlinear stress relaxation model for the fruits flesh according to the storage days and conditions at the loading rate of 25mm/min.

Storage periods (days)	Storage conditions	$\sigma(\epsilon,t) = \epsilon^A [B \exp(-Ct) + D \exp(-Ft) + G \exp(-Ht)]$							r^2
		A	B	C	D	F	G	H	
0	-	0.7963	0.2881	0.5223	0.4316	0.0390	2.2590	0.0003	0.9998
10	NTS	0.8227	0.3407	0.5274	0.5112	0.0394	2.2643	0.0004	0.9999
	LTS	0.8133	0.3130	0.5062	0.4596	0.0384	2.2999	0.0003	0.9999
20	NTS	0.8518	0.3783	0.6566	0.6005	0.0420	2.2947	0.0006	0.9998
	LTS	0.8317	0.3395	0.5084	0.4983	0.0386	2.3348	0.0004	0.9999
30	NTS	0.8874	0.4725	0.5781	0.7404	0.0434	2.1802	0.0007	0.9997
	LTS	0.8490	0.3669	0.5099	0.5386	0.0387	2.3457	0.0004	0.9999

Pear

Storage periods (days)	Storage conditions	$\sigma(\epsilon,t) = \epsilon^A [B \exp(-Ct) + D \exp(-Ft) + G \exp(-Ht)]$							r^2
		A	B	C	D	F	G	H	
0	-	0.7734	0.2722	0.7209	0.4123	0.0447	1.1859	0.0006	0.9998
10	NTS	0.8040	0.3167	0.7120	0.4735	0.0446	1.1761	0.0007	0.9997
	LTS	0.7818	0.2868	0.7229	0.4343	0.0448	1.1541	0.0006	0.9998
20	NTS	0.8967	0.4592	0.7368	0.6894	0.0465	1.1851	0.0010	0.9994
	LTS	0.8041	0.3249	0.7300	0.4920	0.0455	1.0802	0.0008	0.9997
30	NTS	0.9720	0.5914	0.8130	0.9044	0.0521	1.0790	0.0024	0.9983
	LTS	0.8470	0.3691	0.8470	0.5786	0.0525	1.0834	0.0013	0.9994

나. 荷重載荷速度가 果實의 應力弛緩 特性에 미치는 影響

일반적으로 荷重載荷速度는 果實의 應力弛緩 特性에 미치는 影響이 큰 것으로 여러 연구자들에 의해 보고되고 있다.^{2,3,8,9,10,12,13)}

收穫직 후의 사과 및 배에 대하여 荷重載荷速度 10, 25 및 40mm/min의 3 수준의 荷重載荷速度로 應力弛緩 實驗의 결과를 그림 3과 4에 각각 도시하였으며, 이들에 대한 一般化 Maxwell 模型과 非線型粘彈性 模型의 각 계수의 값을 표 5와 6에 각각 표시하였다.

* 표

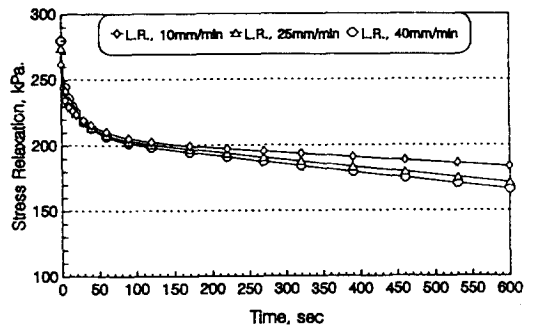


Fig. 3. Effects of the loading rate on the stress relaxation behavior of the apple flesh at the initial strain of 0.050 mm/mm.

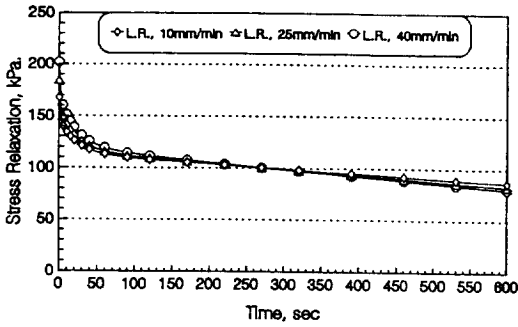


Fig. 4. Effects of the loading rate on the stress relaxation behavior of the pear flesh at the initial strain of 0.050 mm/mm.

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 나타 났다. 이와같은 결과는 표 5에서 初期變形量에 관계 없이 荷重載荷速度가 증가함에 따라 대체로 弛緩時間인 τ_1 및 τ_2 가 감소하는 현상으로 부터 잘 알 수 있다. τ_1 보다는 τ_2 에 미치는 영향이 큰 것으로 나타 났으며, 이것은 그림 3과 4에서도 잘 알 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 應力弛緩의 速度의 차가 더 큰 것으로 보아서도 잘 알 수 있다. 이와같은

Table 5. Parameters of the generalized Maxwell model for the fruits flesh according to the loading rates.

Apple

L. R. mm/min	I. S. mm/mm	$\sigma(t) = \epsilon_0 [E_1 \exp(-t/\tau_1) + E_2 \exp(-t/\tau_2) + E_3]$					r^2
		E_1 MPa.	E_2 MPa.	τ_1 sec	τ_2 sec	E_3 MPa.	
10	0.0250	0.7883	0.8941	4.6197	143.4931	4.2356	0.9905
	0.0500	0.6982	0.7909	4.6094	144.0920	3.7380	0.9905
	0.0750	0.6492	0.7347	4.6263	144.3223	3.4757	0.9905
25	0.0250	1.2256	1.2956	9.0156	369.8339	3.7364	0.9916
	0.0500	1.0657	1.1241	9.0677	371.7179	3.2433	0.9916
	0.0750	0.9808	1.0339	9.0532	369.9044	2.9878	0.9916
40	0.0250	1.3754	1.4455	8.9952	365.9174	3.6615	0.9916
	0.0500	1.1749	1.2366	9.0425	367.1948	3.1281	0.9916
	0.0750	1.0736	1.1331	9.0442	371.1927	2.8474	0.9916

Pear

10	0.0250	1.0258	0.9426	8.4142	352.5905	1.8583	0.9907
	0.0500	0.8861	0.8213	8.3570	352.8691	1.6075	0.9907
	0.0750	0.8147	0.7541	8.3881	352.8299	1.4791	0.9907
25	0.0250	1.2973	1.1752	8.2604	334.5216	1.7872	0.9907
	0.0500	1.1087	1.0055	8.3089	335.8123	1.5254	0.9908
	0.0750	1.0122	0.9197	8.3379	339.2958	1.3878	0.9908
40	0.0250	1.5988	1.4262	8.2678	321.2416	1.7549	0.9911
	0.0500	1.3337	1.1888	8.2352	321.4597	1.4626	0.9910
	0.0750	1.2003	1.0712	8.3018	325.7455	1.3088	0.9909

경향은 Chen등³⁾의 사과에 대한 應力弛緩의 실험결과 와도 잘 일치하였다.

대체적으로 荷重載荷速度가 증가함에 따라 減衰彈性係數 E₁ 및 E₂는 증가하는 경향 이었으나, 平衡彈性係數 E_∞는 감소하는 경향 이었다. 또한 표 6에서 보는 바와같이 非線型 粘彈性 模型의 계수에서는 사과, 배 모두에서 荷重載荷速度가 증가함에 따라 계수 A와 G는 감소하였으나, 그 이외의 계수에서는 모두 증가하는 것으로 나타 났다.

荷重載荷速度의 증가와 함께 많은 양의 應力이 載荷되어 應力弛緩이 빠르게 일어나는 것은, 荷重載荷速度가 빠를 수록 荷重載荷와 동시에 應力弛緩되는 양이 적기 때문이며, 따라서 應力弛緩 速度도 빠른 것으로 판단된다.

대체로 배에 비하여 사과의 경우가 같은 조건 하에서 載荷되는 應力の 量이 매우 컷으나, 應力弛緩 量과 速度는 더 느린 것으로 나타 났다.

Table 6. Coefficients of nonlinear stress relaxation model for the fruits flesh according to the loading rates.

Fruits	Loading rate (mm/min)	$\sigma(\epsilon, t) = \epsilon^A [B \exp(-Ct) + D \exp(-Ft) + G \exp(-Ht)]$							r ²
		A	B	C	D	F	G	H	
Apple	10	0.8204	0.2979	0.4951	0.3640	0.0240	2.3951	0.0002	0.9999
	25	0.7963	0.2881	0.5223	0.4316	0.0390	2.2590	0.0003	0.9999
	40	0.7736	0.2961	0.5246	0.4453	0.0393	2.0988	0.0004	0.9999
Pear	10	0.7933	0.2313	0.7156	0.3493	0.0443	1.2253	0.0005	0.9998
	25	0.7734	0.2722	0.7209	0.4123	0.0447	1.1859	0.0006	0.9998
	40	0.7369	0.2928	0.7259	0.4458	0.0450	1.0988	0.0007	0.9998

다. 初期變形量이 果實의 應力弛緩 特性에 미치는 影響

果實의 應力弛緩 實驗시에는 果實에 가하는 初期變形量은 果實의 降伏變形量 이하에서 결정 되어야 한다. 그러나 果實의 降伏變形量은 果實의 종류, 貯藏條件 및 期間 또는 荷重載荷速度 등의 여러 변수에 따라 다르므로, 실험대상 果實에 대하여 일률적인 初期變形量을 결정한다는 것은 매우 어려운 일이다.

따라서 본 연구에서는 金등¹⁾의 연구결과인 「果實의 힘-變形 特性에 관한 研究」를 토대로 사과와 배에 貯藏條件과 期間에 관계 없이 일률적인 初期變形을 주기 위하여 이들 果實의 生物體 降伏變形量 이하에서 안전한 값인 0.025, 0.050 및 0.075mm/mm의 세 수준의 初期變形率을 선택하였다. 이 값들은 收穫 직후 사과의 降伏變形量의 87.7%, 58.5% 및 29.2%에 해당되는 값이며, 배의 경우는 86.2%, 57.5% 와 28.7%에 해당 되는 값이다.

이와 같은 방법으로 初期變形量을 결정한 후 收穫 직후의 사과 및 배에 대하여 각각의 初期變形量에 따른 應力弛緩 實驗을 실시한 결과를 그림 5와 6에 각각 도시 하였으며, 이들 자료를 一般化 Maxwell 模型으로 回歸分析한 결과를 표 4-4에 표시하였다. 또한 이들 자료를 가지고 荷重載荷速度에 따른 果實의 非線型 粘彈性 模型의 각 계수 값들을 추정하였으며, 그 결과를 표 6에 나타 내었다.

도시한 그림에서 보는 바와같이 初期變形量이 증가할 수록 더 많은 應力이 재하되어 應力弛緩 量은 컷으나, 應力弛緩速度는 사과의 경우는 荷重載荷 후 약 150초까지는 初期變形量에 따른 應力弛緩速度의 차가 뚜렷하였으나, 그 이상의 시간에서는 뚜렷한 경향이 없었다. 그러나 배에서는 사과의 경우와는 반대로 荷重載荷 후 약 150초 뒤 부터는 初期變形量에 따른 應力弛緩速度의 차가 뚜렷한 것으로 나타났다.

그러나 표 5에서 보는 바와같이 初期變形量에

다른 一般化 Maxwell 模型의 상수값 비교에서는 사과 및 배 모두에서 弛緩時間인 τ_1 및 τ_2 를 제외하고는 모두 감소하는 경향이었다.

그림 5와 6에서 보면 알 수 있듯이 果實의 應力弛緩 舉動은 단지 測定時間 뿐 아니라 初期變形量에도 상당한 영향을 받는 非線型 粘彈性 舉動을 나타 내었으며, 果實의 이러한 특성은 그림 7과 8에서 나타낸 바와 같이 時間과 初期變形率을 변수로 하는 반응표면을 통하여도 그 특성을 잘 알 수 있다.

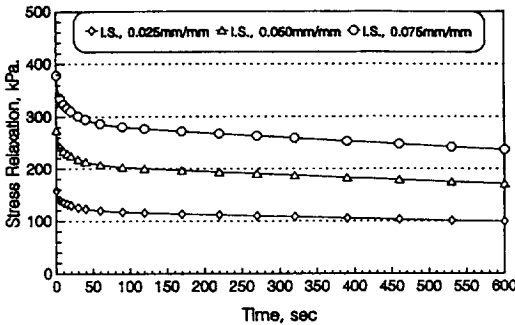


Fig. 5. Effects of the initial strain on the stress relaxation behavior of the apple flesh at the loading rates of 25 mm/min.

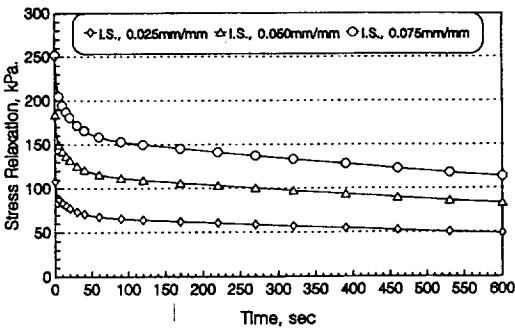


Fig. 6. Effects of the initial strain on the stress relaxation behavior of the pear flesh at the loading rates of 25 mm/min.

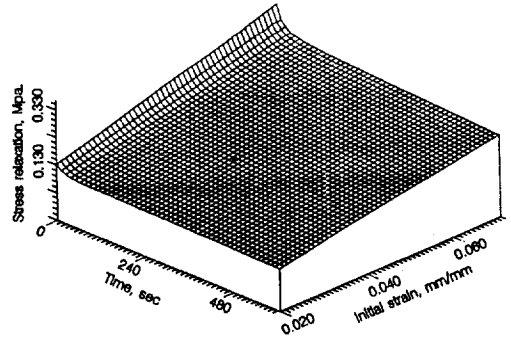


Fig. 7. Response surface of the stress relaxation for the apple flesh as a function of time and initial strain.

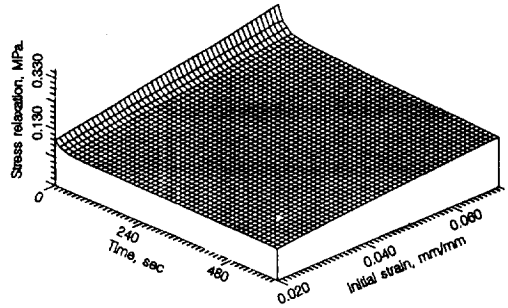


Fig. 8. Response surface of the stress relaxation for the pear flesh as a function of time and initial strain.

대체로 果實의 收穫 직후에는 배에 비하여 사과의 應力弛緩 量과 速度가 적은 것으로 나타났으며, 사과와 배는 貯藏條件 및 貯藏期間에 따라 軟化되는 현상이 매우 다르기 때문에 貯藏期間과 貯藏條件에 따른 이들 두 果實의 應力弛緩 特性은 이들 果實들의 品質管理에 매우 중요한 기초자료가 될 수 있을 것이다.

라. 貯藏條件 및 貯藏期間이 果實의 應力弛緩 特性에 미치는 影響

果實은 收穫 후에도 呼吸과 蒸散作用을 계속 하기 때문에 貯藏條件과 貯藏期間이 果實의 物

理的特性에 미치는 영향은 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 이들 인자들이 果實의 應力弛緩特性에 미치는 영향을 검토하기 위하여 앞에서 언급한 바와 같이 收穫된 果實을 $3 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 低溫室과 $15 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 常溫室에 나누어 각각 貯藏하여 10 일 간격으로 應力弛緩 實驗을 실시 하였다.

貯藏條件 및 期間에 따른 사과와 배의 應力弛緩 실험의 결과를 그림 9와 10에 각각 도시 하였다.

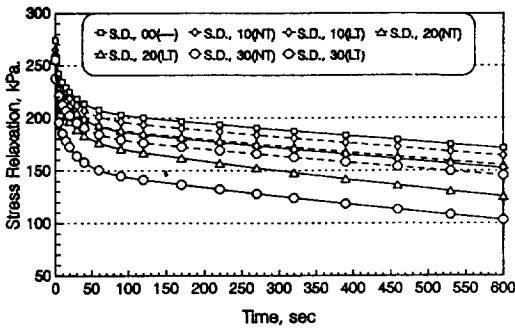


Fig. 9. Effect of the storage condition and the storage period on the stress relaxation behavior of the apple flesh at the loading rate of 25 mm/min and the initial strain of 0.05mm/mm.

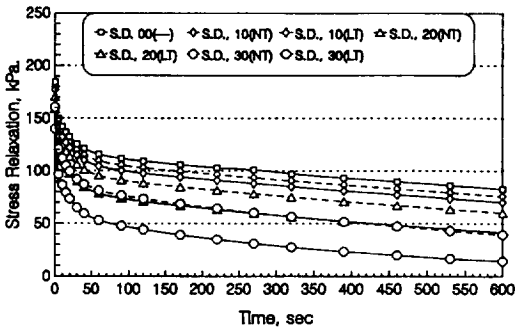


Fig.10. Effect of the storage condition and the storage period on the stress relaxation behavior of the pear flesh at the loading rate of 25mm/min and the initial strain of 0.05mm/mm.

도시한 그림에서 보는 바와같이 貯藏期間에 관계없이 常溫貯藏되었던 사과, 배 모두에서 저온 貯藏된 果實에 비하여 載荷되는 初期應力은 컸으나, 應力弛緩되는 量과 速度는 더 작은 것으로 나타났으며, 사과 보다는 배에서 이들 현상이 더 뚜렷하였다.

또한 두 果實 모두에서 貯藏期間이 길어질수록 두 貯藏條件 모두에서 應力弛緩量 및 弛緩速度가 더 컸으며, 低溫貯藏 보다는 常溫貯藏된 果實에서 더 큰 것으로 나타났는데, 이는 常溫에서 貯藏된 果實에서 보다 더 軟化速度가 빠르기 때문인 것으로 사료된다. 대체적으로 같은 조건 하에서 배에서 應力弛緩되는 量과 率이 큰 것으로 나타났다.

4. 結 論

본 研究의 供試果實인 사과 및 배에 대하여 貯藏條件과 期間別로 應力弛緩實驗을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 어느 한 應力에 대한 果實의 應力弛緩特性은 線型粘彈性으로 다룰수 있으므로, 여기서는 3要素의 一般化 Maxwell 模型으로 果實의 應力弛緩 舉動을 충분히 나타낼 수 있었으며, 初期變形量과 時間에 따른 應力弛緩實驗의 결과, 果實의 粘彈性 舉動은 非線型이었으므로, 다음과 같은 果實의 非線型 粘彈性 模型을 개발하였다.

$$\sigma(\epsilon, t) = \epsilon^n [B \exp(-Ct) + D \exp(-Ft) + G(-Ht)]$$

- 2) 荷重載荷速度가 果實의 應力弛緩 舉動에 미치는 영향은 매우 컸으며, 荷重載荷速度가 클 수록 더 많은 初期應力이 재하되고, 應力弛緩도 더 빠르게 진행되었다.
- 3) 初期變形量이 클 수록 더 많은 應力이 재하되었으며, 應力弛緩되는 量도 증가하였고, 사과의 경우는 荷重載荷後 약 150초까지는 初期變形量에 따른 應力弛緩의 속도차가 증가 하였으며, 그 이상의 시간에서는 뚜렷한 경향이 없었다. 배의 경우는 이와는

반대 현상으로 荷重載荷 후 약 150초 후부터는 初期變形量에 따라 應力弛緩의 속도차가 증가하는 것으로 나타났다.

- 4) 貯藏期間에 관계 없이 低溫貯藏 되었던 果實에서 常溫貯藏된 果實에 비하여 같은 조건하에서 재하된 初期應力은 컷으나, 應力弛緩되는 量과 弛緩速度는 더 작은 것으로 나타났다. 또한 본 연구의 果實 모두에서 貯藏期間이 길어질 수록 두 貯藏條件 모두에서 應力弛緩 量 및 弛緩速度가 더 컷으며 低溫貯藏된 果實 보다는 常溫貯藏된 果實에서 더 큰 것으로 나타났다.

參 考 文 獻

1. ASAE Year Book. 1983. ASAE Standard S 368.1 : 332-335
2. Chappell, T. W. and D. D. Hamann. 1968. Poisson's ratio and Young modulus for apple flush under compressive loading. Trans. of the ASAE 15(6) : 608-610
3. Chen, P. and S. Chen. 1986. Stress relaxation functions of apples under high loading rates. Trans. of the ASAE 29(6) : 1754-1759
4. Christensen, R. M. 1982. Theory of viscoelasticity. Academic Press.
5. Findley, W. N., J. S. Lai, and K. Onaran. 1976. Creep and relaxation of non-linear viscoelastic materials. North-Holland publishing company. N. Y.
6. Graham, V. A. and W. K. Bilanski. 1984. Non-linear viscoelastic behavior during forage wafering. Trans. of the ASAE 27(6) : 1661-1665
7. Mittal, J. P. and N. N. Mohsenin. 1987. Rheological characterization of apple cortex. Journal of Texture Studies 18(1) : 65-93.
8. Mohsenin, N. N. 1980. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach science publishers, N. Y.
9. Peleg, K. 1983. A rheological models of non-linear viscoelastic solids. J. of Rheology 27(5) : 411-431
10. Rao, V. N. M., J. R. Hammerle, and D. D. Hamann. 1974. Uniaxial modulus of sweet potato flesh using various types of loading. Trans. of the ASAE 17(5) : 956-959
11. Sharma, M. G. and S. S. Rafie. 1983. Rheological constitutive relations for the apple cortex. J. of Rheology 27(6) : 637-657
12. Sitkei, Gy. 1986. Mechanics of agricultural materials. Elsevier Science Publishers. 114-283
13. 金滿秀, 金聲來, 朴鍾民. 1990. 벼의 리올러지 특성(II) - 穀粒의 壓縮크리이프 - 韓國農業機械學會誌 15(3) : 219-229
14. 金滿秀, 朴鍾民, 崔東洙. 1992. 果實의 힘-變形 特性. 韓國農業機械學會誌 17(2) : 156-170
15. 農産物 標準出荷規格執. 1990. 農協協同組合 中央會.