

줄기 엽채소의 기계적 파지시 리올로지 특성

전현종 김상헌

Rheological Properties of Bundled Leaf Vegetables Held and Picked-up by Machine

H. J. Jun S. H. Kim

Abstract

This study was carried out as basic researches to develop the leaf vegetable harvester. This study was conducted to investigate physical and rheological properties of bundled leaf vegetables with stem (Chinese leek, Crown daisy and Chamnamul) as test materials held and picked-up by a machine. Stress-strain behavior, stress relaxation, and strain recovery for the bundled materials were analyzed using simple Maxwell model. Physical and rheological properties of the materials were investigated by measuring rupture load, deformation and stress experimentally. Also, strain recovery time when unloading was measured using super high speed camera. Recorded recovery time for stress-strain behavior was 0.026 s for Chinese leek with linear strain recovery, 0.046 s for Crown daisy and 0.05 s for Chamnamul with non-linear strain recovery. Furthermore, the strain recovery time for permanent deformation was 0.026 s, 0.046 s, and 0.05 s for Chinese Leek, Crown daisy and Chamnamul, respectively. Finally, strain recovery time and strain recovery ratio for the test materials were 0.17 s, 60.4% in Chinese leek, 0.12 s, 55.3% in Crown daisy, 0.15 s, 58.7% in Chamnamul. Here strain recovery time means that how fast the test materials are recovered from initial deformation and strain recovery ratio means how much the test materials are recovered from initial deformation. The above results show that the test materials can be held enough and moved by the belts.

Keywords : Leaf vegetables, Rheology, Stress, Strain, Relaxation, Recovery

1. 서론

줄기 엽채소의 줄기를 절단하여 기계적으로 파지하여 수확하는 메카니즘의 경우 작물의 리올로지(rheology)에 따라 파지하는 이송벨트의 재질 및 파지요인 등이 달라질 수 있다고 판단되었다. 따라서 실제 재배포장에서 밀식으로 점파된 줄기 엽채소는 일정크기의 직경을 갖는 다발로 되어있다. 이러한 다발로 된 줄기 엽채소를 한 쌍의 이송벨트로 파지할 경우 이송벨트에서 작물이 손상되지 않고 이송 중 이탈하지 않을 정도의 이송벨트 사이의 일정 간격과 이송벨트에 일정한 장력이 요구된다. 이와 같은 조건을 설정하기 위해 이송벨트에

의해 파지될 때 압축되는 줄기 엽채소에 대한 리올로지 특성을 고려할 필요가 있었다. 작물의 리올로지에 관한 연구는 다음과 같다.

Mohsenin(1986)은 응력변형거동(stress-strain behavior)을 응력-시간 및 응력-변형관계로 나타내었다.

$$\sigma = Ae^{(-E/\eta)t} + R\eta \text{ 또는 } \sigma = R\eta(1 - e^{(-E\sigma/R\eta)})$$

여기서 R 은 시간과 변형의 비이며, η 는 점성계수이다. 또한 초기 응력은 $t=0$ 에서 $\sigma=0$ 이므로 $A = -R\eta$, $\epsilon = Rt$ 의 관계가 성립된다고 하였다.

The article was submitted for publication in December 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in December 2007. The authors are Hyeong-Jong Jun, KSAM member, Research Engineer, National Institute of Agricultural Engineering (NIAE), and Sang-Hun Kim, KSAM member, Professor, Division of Agricultural Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea. Corresponding author: S. H. Kim, Professor, Biological Systems Eng. Major, Division of Agricultural Engineering, Kangwon National University, 192-1 Hyoja-Dong, Chuncheon-si, Gangwon-do, 200-701, Republic of Korea; Fax: +82-33-250-6492; E-mail: <shkim@kangwon.ac.kr>.

또한 가장 단순한 선형 점탄성모델은 탄성(스프링)과 점성(대쉬포트)물체가 일렬로 구성되는 Maxwell 모델이다. 단순 Maxwell 모델은 초기응력 σ_0 에서 t시간 후에 응력 $\sigma(t)$ 로 변할 때 일정 변형에서 적용된 응력은 다음 식과 같다.

$$\sigma(t) = \sigma_d \cdot \exp\left(-\frac{t}{\lambda_1}\right) + \sigma_e \quad \text{또는}$$

$$\sigma(t) = \epsilon_0 \left[E_1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\lambda_1}\right) + E_e \right]$$

여기서, $\sigma(t)$ = 임의 시간 t에서의 응력
 σ_d = 초기응력과 평형상태 응력의 차($\sigma_0 - \sigma_e$)
 ϵ_0 = 일정한 변형
 E_1 = 이상적인 탄성물체의 탄성계수
 E_e = 상대적인 평형상태의 탄성계수

그리고 $\lambda_1 \left(= \frac{\eta}{E_1} \right)$ 은 완화시간이다(Mohsenin, 1986; Telis-Romero 등, 2004).

Mohsenin(1986)에 의하면 완화시간의 물리적인 의미는 원래 응력 값의 1/e 배 또는 36.8% 까지 감소될 때 소요되는 시간이며, 일정한 변형(ϵ)에서 Maxwell 요소는 완화시간(λ)에 의해 결정된 비율에 따라 지수적으로 응력을 감소시킨다고 하였다.

Kim 등(1990)은 벼 4품종을 공시하여 하중재하속도 0.664 mm/min 및 1.673 mm/min의 2수준, 함수율 13~25%(w.b.) 범위의 2수준과 생물체항복점에서의 변형량 이내인 0.08 mm 와 0.15 mm의 두 수준의 초기변형량에 대하여 각 변수의 조합에서 벼의 응력이완을 실험하여 벼는 비선형 점탄성체이며, 응력이완 거동은 3요소의 일반화 Maxwell 모델으로 충분히 나타낼 수 있다고 하였다.

Kim 등(1990)은 함수율 12~23%(w.b.) 범위의 벼 4품종에 대하여 함수율별로 벼의 생물체 항복점 이내에서의 초기하중별로 압축 크리이프 실험을 통해 벼가 비선형 점탄성체라고 하였다.

Huh 등(1991)은 이삭 패는 시기의 벼줄기의 리올로지 특성을 결정하기 위하여 축방향 및 반경방향의 압축하중을 받는 삼강벼 및 화진벼의 응력이완 반응을 일반화 Maxwell 모델로 나타내었고, Burger 모델을 이용하여 축방향에 의한 크리이프 및 회복특성을 구명한 결과 벼 줄기는 탄성변형이 지배적인 점탄성재료라고 하였다.

Kim 등(1992)은 사과 및 배에 대하여 과 기간별로 응력이완 실험을 한 결과 과실의 점탄성거동은 비선형이었다고 하였다.

Park 등(1994)은 사과와 배에 대해 응력이완 및 크리이프 특성에 대한 실험결과를 가지고 응력이완 및 크리이프거동의 선형화 모델을 개발하였다. 이들 선형화 모델과 일반화 맥스

웰 모델 및 Burger's 모델을 각각 비교분석하였다.

Telis-Romero 등(2004)은 어떤 과일 및 채소의 리올로지(rheology) 측정요소(parameter)는 재료의 조직특성을 이해하는데 유용하며 많은 음식재료들은 작은 변형에 대해 선형점탄성(linear viscoelasticity) 과 같이 거동하는 것으로 가정될 수 있다고 하였다.

이상의 연구 배경을 고려하여 본 연구에서는 줄기 엽채소 수확작업기 개발을 위해 줄기를 절단하여 수확하는 엽채소(부추, 썩갓, 참나물)를 대상으로 형태별로 모형화하였고, 각 대상작물의 물성과 기계수확을 위해 줄기 엽채소를 이송벨트로 파지할 때 이송벨트에 의해 작물에 일어나는 리올로지 특성을 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

1) 줄기 엽채소 다발의 물성

실험재료의 물성측정은 Jun 등(2005)이 부추를 대상으로 물성을 실험한 방법과 동일한 방법을 사용하여 부추, 썩갓, 참나물을 대상으로 측정하였고, 품종별로 부추는 그린벨트 부추, 썩갓은 흥농 중엽종 썩갓, 참나물은 농우참나물을 사용하였다. 또한 실험재료의 양은 점과중 후 주간 200 mm 내에서 생산되는 수확량인 부추 0.15 kgf, 썩갓 0.14 kgf, 참나물 0.15 kgf를 기준으로 하였다.

위의 실험재료는 포장에서 채배된 상태와 같은 다발 형상을 유지하기 위해 줄기 부분과 잎 부분에 장력 0.7 N의 고무밴드로 고정하였다. 실험재료의 직경은 그림 1에서와 같이 작물의 형상별로 큰 직경을 측정하기 위해 Type A는 a 위치에 Type B는 c 위치에서 측정하였고 각각의 위치에서 실험재료의 최대직경은 부추 45 mm, 썩갓 55 mm, 참나물 58 mm 이었고 표 1은 실험재료의 형상과 측정위치를 나타낸 것이다.

Table 1 Characteristics of non-head leafy green vegetables used as test materials

Materials	Plant height (mm)	Diameter of stem (mm)	Length of stem (mm)	Diameter of test materials (mm)		
				a	b	c
Chinese leek	380	2.5~4	20~40	45	43	35
Crown daisy	250	2~3	50~80	36	46	55
Chamnamul	350	5~8	150~250	42	50	58

또한 표 1에서 실험재료의 줄기 아래부위 직경(a)과 줄기 위부위인 직경(c)의 비(c/a)는 부추 0.7, 썩갓 1.5, 참나물 1.4

로 크게 2가지로 모형화 하여 부추를 A형, 썩갯, 참나물은 B형으로 구분하였다.

실험재료의 물성을 측정하기 위해 하중을 가하는 Probe는 두께 6 mm, 단면크기 100 mm × 100 mm의 철판이며, 실험재료는 부추 0.15 kgf, 썩갯 0.14 kgf, 참나물 0.15 kgf으로 5반복으로 실험하였다. 물성측정 철판 Probe의 위치는 줄기 엽채소를 손으로 잡고 지면과 같이 줄기를 절단하여 수확할 경우 손이 작물을 잡는 위치를 이송벨트가 작물을 파지하는 위치로 가정하여 그림 1의 a와 c사이를 측정 구간으로 설정하였다.

물성측정은 물성측정시험기(TA-HD Texture Analyzer, Stable Micro System, UK)를 이용하여 ASAE Standard(2002)에서 채소의 물성시험에 권장하는 하중 재하속도(loading rate) 30 mm/min 로 직경의 80%까지 압축하여 응력-변형관계를 분석하였다. 그림 2는 실험재료의 물성측정방법을 나타낸 것이며 그림 3은 물성측정장치이다.

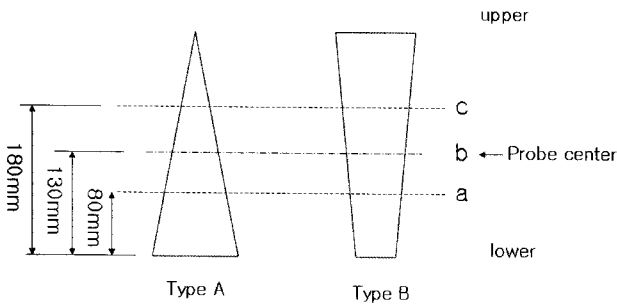


Fig. 1 The measuring points of diameters of test materials.

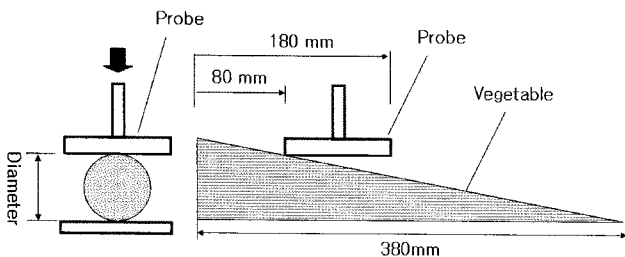


Fig. 2 Schematic diagram for measurement of physical properties of test materials.

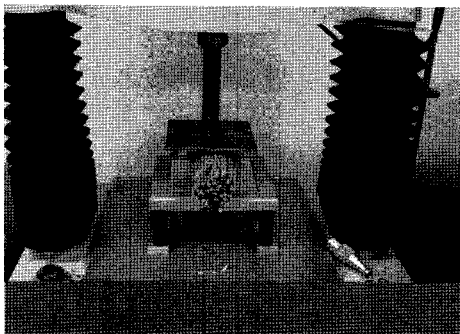


Fig. 3 Measuring device for physical properties of materials.

2) 줄기 엽채소 다발의 리올로지(rheology) 특성

줄기 엽채소의 리올로지(rheology) 특성 분석은 재배양식 중 현장적용성이 높은 점과로 재배한 작물을 대상으로 하였다. 줄기 엽채소는 대부분 조직이 연약하여 적은 힘을 받을 때 손상되기 쉽고 변형이 되기 쉬운 특성을 갖고 있어 점탄성 물질로 간주하였으며 리올로지에 대한 이론모델로는 그림 4와 같은 Maxwell 모델을 사용하였다. 여기서 E_1 은 이상적인 탄성계수, η 점성계수, σ 응력이다.

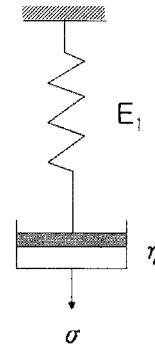


Fig. 4 Diagram of Maxwell model representation.

실험재료의 리올로지 특성을 구명하기 위한 실험은 물성시험에서와 같이 실험재료로 부추 0.15 kgf, 썩갯 0.14 kgf, 참나물 0.15 kgf을 각각 10세트씩 준비하여 위의 그림 3과 같은 물성측정기를 이용하여 시험하였다. 물성측정기의 하중 재하속도(Loading rate)를 설정하기 위해 그림 5에서와 같이 실제 포장에서 수확작업기의 최저작업속도를 0.1 m/s로 가정하여 이송벨트의 이송속도를 0.1m/s로 가정하였다. 또한 작물의 모형 A형인 부추가 B형 작물보다 이송벨트로 파지시 쉽게 이탈하는 형상이고 이송벨트의 구조상 실험재료 부추가 처음 이송벨트에 유입되어 파지상태에서 1초 동안 100 mm 거리를 이동하는 동안 가장 이탈이 쉬운 구조이다. 또한 위의 부추에 대한 물성시험결과 실험재료 부추의 직경이 45 mm일 때 손상이 일어나지 않는 변형량 20 mm를 압축하였을 경우 재료는 이송벨트의 양쪽에서 같은 양만큼 줄어들므로 1초 동안 양쪽에서 각각 10 mm씩 줄어들어 이송벨트에 의한 실험재료의 압축속도는 0.01 m/s가 되며 이 압축속도가 물성측정기에서 하중 재하속도로 설정되었다. 또한 물성측정기의 재하하중은 실험재료의 물성측정실험 결과에서 실험재료가 파괴되지 않는 하중인 90 N을 재하하중으로 설정하였다.

물성측정기에 의한 실험재료의 압축과정에서 응력의 계산은 실험재료를 점탄성 물체로 가정하여 수평방향의 변형은 없고 수직변형만 일어나는 것으로 가정하였다. 또한 실험재료를 원형으로 가정하였고 응력계산을 단순화시키기 위해 초

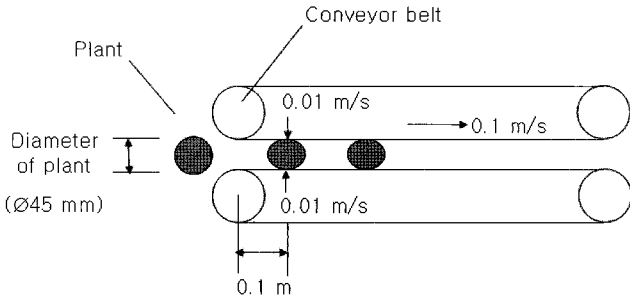


Fig. 5 Schematic diagram for the deformation of diameter of the plant (Chinese leek) bundled between conveyor belts.

기에서부터 힘이 실험재료의 직경과 같은 폭으로 작용한다고 가정하였다. 실험재료에 작용하는 응력 계산을 위해 응력을 받는 면적은 실험재료의 직경과 실험재료가 프로브(probe)에 접촉한 길이를 곱하여 접촉면적으로 가정하였다.

실험재료의 시간에 따른 응력-변형의 결과는 Maxwell 모델을 이용하여 응력변형거동(stress-strain behavior)과 응력이완(stress relaxation) 특성의 파라미터를 결정하는데 이용되었다. 또한 위와 같은 실험재료의 변형과 시간과의 관계를 실험적으로 해석하기 위하여 그림 6에서와 같이 Amitec사의 Digital Force Gauge(DFIS10, USA)에 크기 100 mm × 100 mm, 두께 6 mm 철판을 부착하여 재료에 손상을 주지 않는 하중 90 N을 손으로 눌러 하중을 가한 상태에서 즉시 하중을 제거함과 동시에 IDT사의 초고속카메라(XS-4, USA)로 재료의 변형회복량을 1/500초의 속도로 촬영하여 Motion plus 5.5 프로그램으로 시간에 따른 실험재료의 변형회복률을 분석하였다.

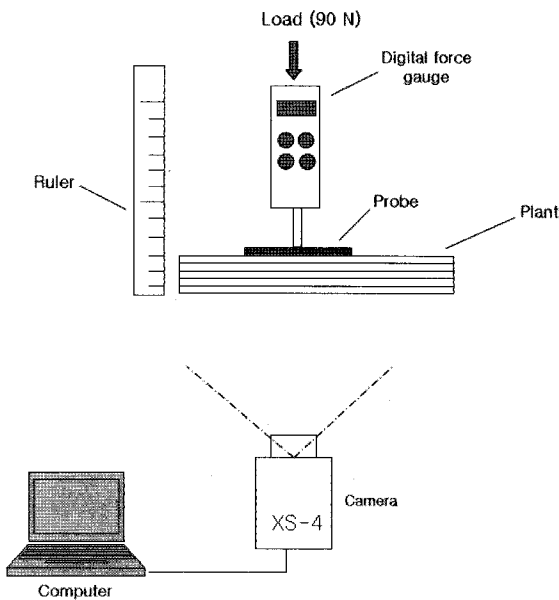


Fig. 6 measurement of strain-time for test materials when unloading.

3. 결과 및 고찰

1) 줄기 엽채소 다발의 물성

줄기 엽채소의 리올로지 특성을 파악하기 위해 실험재료인 부추, 쪽갓, 참나물의 물성을 측정된 결과 표 2와 같은 파괴하중과 응력이 나타났다. 그림 7은 부추의 파괴시점의 힘과 변형량을 나타낸 것으로 변형이 증가할수록 압축하중(force)이 지속적으로 증가하였다. 그림 8에서와 같이 실험재료는 일정한 응력 이상에서 응력과 변형이 일정하게 변화하지 않는 점을 찾을 수 있었으며 이 점에서 재료의 손상이 발견되어 이 때를 파괴응력(rupture stress)으로 규정하였다. 따라서 부추는 압축에 의한 파괴하중은 92.4 N의 하중이 가해질 때이며 이 때의 변형률은 0.51 응력은 20.5 kPa이었고, 쪽갓은 91.2 N에서 파괴되었고 변형률 0.64일 때 응력 91.2 kPa, 참나물은 91.9 N에서 파괴되었고 변형률 0.62일 때 18.4 kPa이었다.

Table 2 Initial rupture load and stress-strain of test materials

Materials	Diameter (mm)	Rupture load (N)	Rupture stress (kPa)	Strain (m/m)
Chinese leek	45	92.4	20.5	0.51
Crown daisy	55	91.2	19.8	0.64
Chamnamul	58	91.9	18.4	0.62

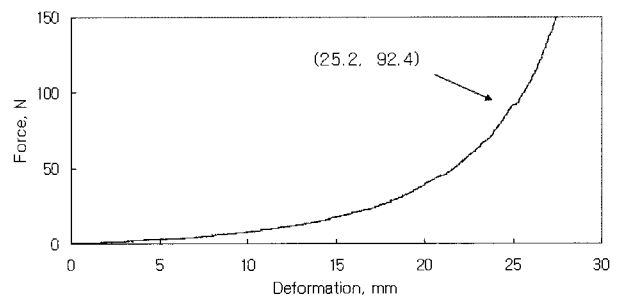


Fig. 7 Force-deformation curve of Chinese leek at the rupture point.

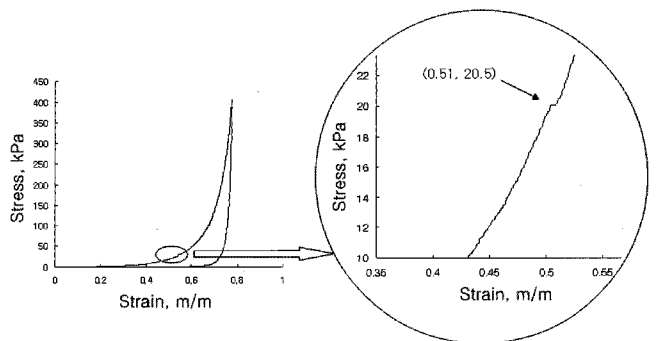


Fig. 8 Stress-strain relationship of Chinese leek at the rupture point.

Table 3 Permanent deformation of materials at the load of 90N

Materials	Diameter (mm)	Load (N)	Deformation (mm)	Deformation rate (%)	Permanent deformation (mm)	Permanent strain (%)
Chinese leek	45	90	23.7	52	9.5	21
Crown daisy	55	90	26.7	48.5	11.6	21
Chamnamul	58	90	34.7	60	15	26

또한 실험재료에 90 N의 힘이 재하된 후 영구변형율은 표 3에서와 같이 부추의 경우 21%, 쑥갓 21%, 참나물 26%의 영구변형이 일어나는 것으로 나타났다.

2) 줄기 압착소 다발의 리올로지(Rheology) 특성

(1) 응력변형거동(Stress strain behavior)

실험재료의 응력-변형거동은 작물에 파괴하중 이하인 90 N을 재하하여 실험하였다. 실험결과 응력변형거동이 지수적으로 증가하는 특성이 있으며 이러한 현상은 Maxwell 모델로 해석될 수 있다. 실험재료의 압축구간에서 응력-변형거동에 대한 실험값은 지수증가 모델 $y=y_0+a \cdot e^b$ 형태로 표시되어 실험재료의 응력-변형거동에 대한 지수증가모델과 Maxwell 모델의 비교를 통하여 파라미터가 결정된다. 여기서 a, b 는 파라미터이고 변수 y 는 응력, 변수 x 는 변형이다.

Mohsenin(1986)에 의하면 임의 변형에 대한 응력-변형거동을 식 (1)로 나타내었다.

$$\sigma(\epsilon) = R\eta(1 - e^{(-E\epsilon/R\eta)}) \tag{1}$$

여기서, R : 시간과 변형의 비, s^{-1}
 η : 점성계수, $kPa \cdot s$

실험결과는 지수증가모델로 분석되었고, 결정계수 R^2 의 값이 0.99 이상이었다.

또한 실험결과로부터 유도된 지수증가 모델을 식 (1)와 비교하여 각각의 파라미터 값을 구하여 평균한 결과는 표 4와 같고 표 4의 값을 식 (1)에 대입하여 실험재료의 압축시 응력-변형관계를 그림 9에 나타내었다. 이와 같은 결과는 Mohsenin (1986)에 의해 발표된 채소의 응력-변형측정 결과와 유사한 결과를 나타냈다.

Table 4 Parameters of stress-strain behavior model for test materials

Items	E (kPa)	η (kPa·s)	R (s^{-1})
Chinese leek	2.352±0.940	-1.337±0.609	0.221
Crown daisy	0.729±0.308	-0.339±0.164	0.183
Chamnamul	0.437±0.203	-0.30±0.164	0.173

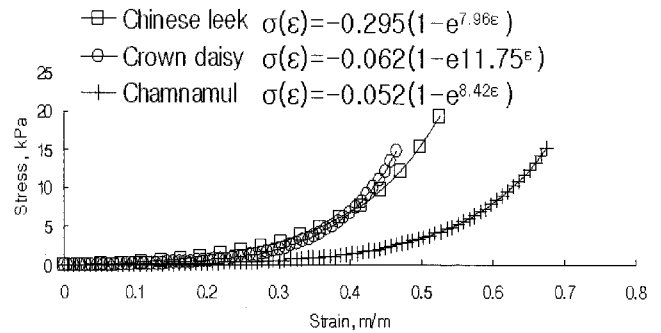


Fig. 9 Stress-Strain relationships of test materials by the equation of model.

(2) 응력 이완 (Stress relaxation)

실험재료의 응력이완 특성 구명은 Maxwell 모델을 적용하여 해석하였다.

Maxwell 모델에서는 초기 변형상태에서 하중이 제거되면 응력은 지수적으로 감소하는 특성이 있다(Mohsenin, 1986).

실험재료의 응력이완에 대한 실험값도 지수감소형 모델인 $y=y_0+a \cdot e^{-bt}$ 형태로 표시될 수 있으므로 실험재료의 응력이완 모델적인 지수감소형 모델과 Maxwell 모델의 비교를 통하여 각각의 파라미터를 결정하였다. 여기서 y_0, a, b 를 Maxwell 모델 식(2)과 비교하면 파라미터는 $y_0 = \epsilon_0 E_e$, $a = \epsilon_0 E_1$, $b = \frac{1}{\lambda_1}$ 이고, 또한 $\lambda_1 = \frac{\eta}{E_1}$ 인 관계로부터 점성계수 (η)를 구하였다.

$$\sigma(t) = \epsilon_0 \left[E_1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\lambda_1}\right) + E_e \right] \tag{2}$$

여기서, $\sigma(t)$ = 시간에 따른 잔류응력, kPa

ϵ_0 = $t=t_0$ 에서의 초기 변형률, m/m

E_1 = Maxwell 요소에서의 감쇄탄성계수, kPa

E_e = 평형탄성계수, kPa

λ_1 = Maxwell 요소에서의 이완시간, s

실험결과는 지수감소모델로 분석되었고 결정계수 R^2 의 값이 0.99 이상이었다.

또한 실험결과로부터 유도된 지수감소모델을 식 (2)와 비

Table 5 Parameters of stress relaxation model for test materials

Materials	ϵ_0 (m/m)	E_1 (kPa)	E_c (kPa)	λ_1 (s)	η (kPa·s)
Chinese leek	0.534±0.039	41.421±3.06	0.431±0.066	0.186±0.006	7.72±0.624
Crown daisy	0.488±0.064	42.32±6.182	0.59±0.055	0.146±0.007	6.158±0.895
Chamnamul	0.618±0.084	30.20±5.441	0.447±0.082	0.175±0.017	5.238±0.671

교하여 각각의 파라미터 값을 구하여 평균한 결과는 표 5와 같고 표 5의 값을 식 (2)에 대입하여 정리하면 임의 시간에 대한 실험재료의 응력이완 관계는 그림 10과 같다.

여기서 응력이완 모델식 $\sigma(t)$ 는 응력감소가 일어나는 임의 시간 t 에서의 응력이며, λ_1 은 초기응력이 1/e배 또는 36.8%까지 감소되는 시간을 나타낸 것이다(Mohsenin,1986).

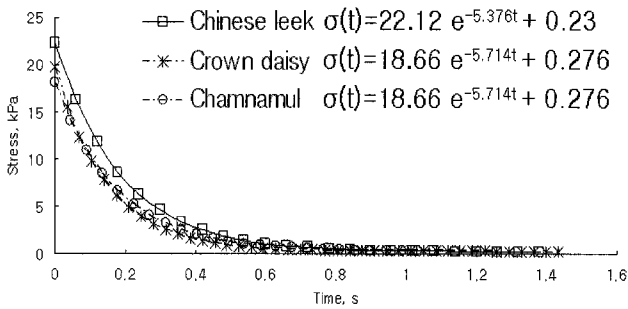


Fig. 10 Stress-Time relationships of test materials by the equation of stress relaxation model.

(3) 영상에 의한 변형회복해석

실험재료의 변형회복을 실험적으로 측정하기 위해 실험재료에 90 N의 하중을 가하고 이때 압축 프로브(probe)의 변위를 0으로 설정하여 순간적으로 하중을 해제시켜 실험재료의 시간에 따른 변형회복량을 초고속카메라로 촬영한 영상을 Motion plus 5.5 해석 프로그램을 이용하여 해석하였다. 영상에 나타난 실험재료의 변형회복량 및 회복시간을 측정한 결과 그림 11에서와 같이 부추의 경우 변형 0.56에서 변형이 회복되는 시간은 0.04초로 직선적인 감소특성을 보였다. 이것은

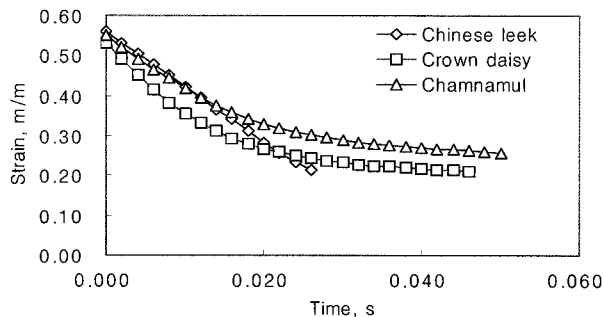


Fig. 11 Strain-time relationship of test materials(at the load of 90 N).

부추의 경우 영구변형(Permanent deformation) 직전까지 변형구간에서는 거의 선형적으로 변형회복이 일어났으며, 쑥갓과 참나물은 비선형적으로 회복되는 것으로 나타났다. 실험재료가 영구변형까지 회복되는 시간은 부추 0.026초, 쑥갓 0.046초, 참나물 0.05초로 순간적으로 회복되는 것으로 나타났다. 그림 12는 초고속카메라를 이용하여 부추의 변형-시간 관계를 분석하는 장면이다.

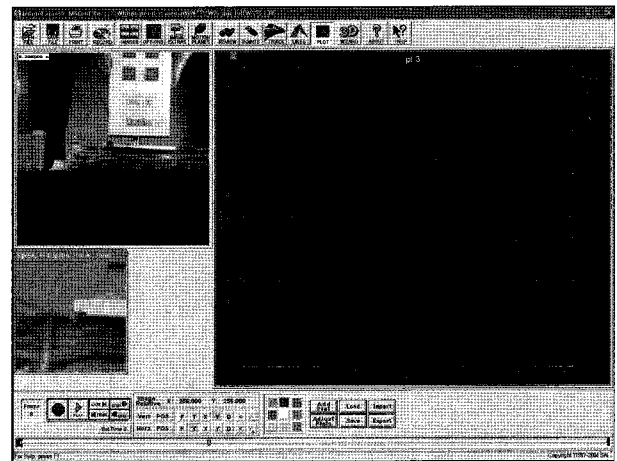


Fig. 12 View of strain-time relationship for Chinese leek.

실험재료의 변형-시간 관계는 일정시간 경과 후 선형변형을 나타내는 것으로 판단하였다. 그러므로 선형점탄성 재료의 응력과 변형관계는 $\epsilon(t) = \sigma(t) / E_1 + C$ (상수)인 관계가 성립된다. 각 실험재료 부추, 쑥갓, 참나물에 대한 시간에 따른 변형 $\epsilon(t)$ 는 표 5의 E_1 값을 그림 10의 응력이완 관계식에 대입하여 실험재료의 변형회복 모델식을 구하였고, 여기서 실험재료의 고유의 영구변형(Permanent deformation)은 일정한 값이므로 상수(C_1, C_2, C_3)로 표시하여 구하였다. 표 6은 실험재료의 응력이완에 따른 변형회복 모델식이며 시간에 따른 변형회복량을 산출할 수 있다.

Table 6 Equations for strain-time in stress relaxation model of test materials

Materials	Equations
Chinese leek	$\epsilon(t) = (22.12e^{-5.376t}) / 41.421 + C_1$
Crown daisy	$\epsilon(t) = (20.65e^{-6.85t}) / 42.32 + C_2$
Chamnamul	$\epsilon(t) = (18.66e^{-5.714t}) / 30.2 + C_3$

Table 7 Strain and strain recovery ratio of test materials according to the time

Time (s)	Strain (m/m) : $\epsilon(t)$			Strain recovery ratio (%)		
	Chinese leek	Crown daisy	Chamnamul	Chinese leek	Crown daisy	Chamnamul
0	0.53	0.47	0.63	0.0	0.0	0.0
0.04	0.43	0.37	0.49	18.9	21.3	22.2
0.08	0.35	0.28	0.39	34.0	40.4	38.1
0.12	0.28	0.21	0.31	47.2	55.3	50.8
0.15	0.24	-	0.26	54.7	-	58.7
0.17	0.21	-	-	60.4	-	-

따라서 실험재료가 영구변형까지 응력이 이완될 때 표 6의 변형 모델식으로부터 구한 초기변형 $\epsilon(0)$ 과 초기변형으로부터 회복된 변형 $\epsilon(t)$ 과의 관계를 식 (3)과 같이 변형회복율 (strain recovery ratio, R)로 표 7에 나타내었다. 그림 13은 표 7로부터 실험재료의 물성측정시험에서 나타난 영구변형을 제외한 시간에 따른 변형회복 관계를 나타낸 것이다.

$$R = \{[\epsilon(0) - \epsilon(t)] / \epsilon(0)\} \times 100 \quad (3)$$

여기서, R = 변형회복율(strain recovery ratio), %

$\epsilon(t)$ = 초기변형에서 t 시간 후 회복된 변형, m/m

$\epsilon(0)$ = 변형 모델식에 의한 초기변형, m/m

따라서 부추, 쑥갓, 참나물을 선형 점탄성 변형으로 가정하여 영구변형까지 변형회복 모델식으로 산출한 변형회복시간 및 변형회복율(strain recovery ratio)은 각각 부추 0.17초, 60.4%, 쑥갓 0.12, 55.3%, 참나물 0.15초 58.7%이었다. 그림 14는 실험재료의 시간에 대한 변형회복율이다.

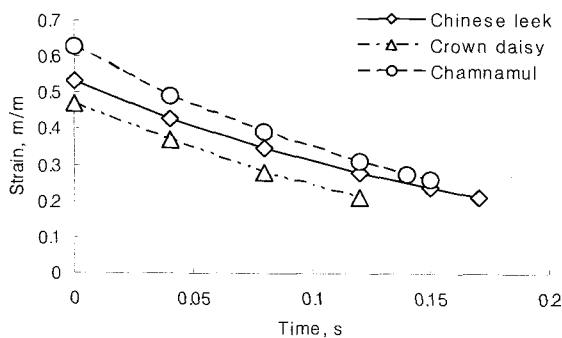


Fig. 13 Strain-time for the test materials in stress relaxation by the load of 90 N.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 줄기를 절단하여 수확하는 엽채소(부추, 쑥갓, 참나물)를 기계적으로 수확하기 위해 실제 포장에서와 같은 양과 형태로 각각의 실험재료를 묶음형태의 다발로 만들

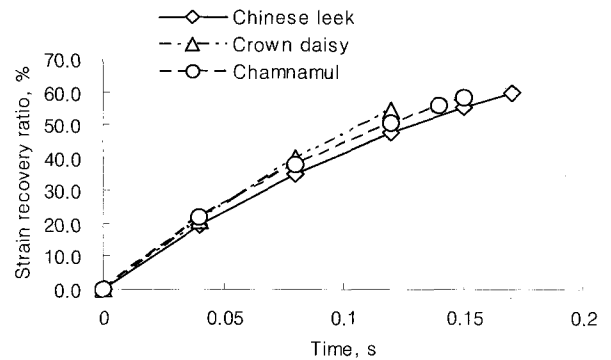


Fig. 14 Strain recovery ratio of test materials according to time.

어 실험재료의 물성과 기계적으로 파괴할 경우 작물에 나타나는 리올로지 특성을 이론 및 실험적으로 구명하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 실험재료의 파괴하중에 따른 변형 및 응력은 부추의 경우 파괴하중 92.4 N, 변형 0.51, 응력 20.5 kPa이었고, 쑥갓 91.2 N, 변형 0.64, 응력 91.2 kPa, 참나물 91.9 N, 변형 0.62, 응력 18.4 kPa이었다.
- (2) 실험재료의 응력변형거동, 응력이완 및 응력이완에 따른 변형 모델식을 설정하여 작물의 변형을 및 변형회복율을 산정하였다. 또한 초고속카메라를 사용하여 실험재료의 변형회복 시간을 측정된 결과 부추는 영구변형을 제외한 변형구간에서는 거의 선형적으로 변형회복이 일어났으며 쑥갓과 참나물은 비선형적으로 변형회복이 일어났다. 또한 영구변형까지 복원되는 시간은 부추 0.026초, 쑥갓 0.046초, 참나물 0.05초로 순간적으로 변형이 회복되는 것으로 나타났다.
- (3) 부추, 쑥갓, 참나물 다발을 선형점탄성 변형으로 가정하여 영구변형까지의 변형회복 모델식으로 산출한 변형회복시간 및 변형회복율은 부추 0.17초, 60.4%, 쑥갓 0.12, 55.3%, 참나물 0.15초 58.7%이었다.
- (4) 부추, 쑥갓, 참나물 다발은 점탄성체이며 응력변형거동 및 응력이완 특성을 단순 Maxwell 모형으로 나타낼 수

있었다.

- (5) 줄기 엽채소를 기계적으로 파지하여 수확하는 메카니즘에서 줄기 엽채소의 리올로지 특성은 파지 이송벨트의 간격을 결정하는 인자가 되는 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 2002. ASAE Standards 2002. 49th Edition. pp. 592-599.
2. Huh, Y. K. and S. W. Lee. 1991. Studies on rheological properties of rice plants at the booting stage. J. of KSAM 16(1): 37-48. (In Korean)
3. Park, J. M. and M. S. Kim. 1994. Linearized rheological models of fruits. J. of KSAM 16(1):138-147. (In Korean)
4. Jun, H. J., S. H. Kim, J. T. Hong and Y. Choi. 2005. Cutting and conveying characteristics for development of Chinese leek harvester. J. of Biosystems Eng. 30(4):220-228. (In Korean)
5. Jun, H. J. 2006. Development of a stem-cutting type harvester for non-head leafy green vegetables. Ph.D. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, Korea. (In Korean)
6. Kim, M. S., S. R. Kim and J. M. Park. 1990a. Rheological properties of rough rice (I) -Stress relaxation of rough rice kernel-. J. of KSAM 15(3):207-218. (In Korean)
7. Kim, M. S., S. R. Kim and J. M. Park. 1990b. Rheological properties of rough rice (II) -Compressive creep of rough rice kernel-. J. of KSAM 15(3):219-229. (In Korean)
8. Kim, M. S., J. M. Park and D. S. Choi. 1992. Viscoelastic properties of fruit flesh (II) -Stress relaxation behavior-. J. of KSAM 17(3):260-271. (In Korean)
9. Mohsenin, N. 1986. Physical Properties of Plant and Animal Materials, 2thed. pp. 151-187.
10. Telis-Romero, J., A. L. Gabas and P. J. A. Sobral. 2004. OSMO-convective drying of Mango cubes in fluidized bed and tray dryer. Drying 2004-Proceeding of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) San Paulo, Brazil 22-25 August 2004, Vol. C, pp. 1868-1875.