

과일 및 채소의 응력완화 직선화 모델

유명식 · 송우진* · 노영태* · 변유량*
다보식품연구소, *연세대학교 식품공학과

A Linearization Model of the Stress Relaxation Curves for Fruits and Vegetables

Myung-Shik Yoo, Woo-Jin Song*, Young-Ta Rho* and Yu-Ryang Pyun*

*Dabo Food Laboratory,
Department of Food Engineering, Yonsei University

Abstract

A generalized linearization model for stress relaxation curves of vegetative tissues was proposed as $[F_{(0)}t^n / \{F_{(0)} - F_{(t)}\}] = k_1 + k_2t$, taking into account internal structure changes under a constant strain. Where $F_{(0)}$ is the initial force, $F_{(t)}$ is the decaying force after time t , and k_1 , k_2 and n are constants. This model was well fit to stress relaxation curves of a variety of raw and processed fruits and vegetables.

Key words: stress relaxation, linearization, fruit, vegetable

서 론

과일 및 채소와 같은 식물의 세포조직은 점탄성을 가지며, 점탄성은 개개의 세포의 점탄성, 세포간 펙틴 결합층의 점성적인 흐름 및 세포간 공간을 통한 유체의 이동에 의해 나타난다^(1,2). 식물 세포조직의 대부분을 이루고 있는 유세포(parenchyma cell)는 얇은 세포막으로 둘러싸여 있고 내부에 세포액이 들어 있으며, 이들 세포는 펙틴으로 구성된 middle lamella에 의하여 결합되어 세포 집합체를 형성하고, 세포와 세포사이의 외부 공간에는 공기와 세포외액이 존재하며 품종에 따라 위치와 크기, 양 등이 다르다. 이들 각 요소들의 상호작용에 의해 식물조직의 기계적 성질, 강도, 구조 등이 결정된다.

과일이나 채소의 가식부 조직에 일정한 압축응력을 가하면 여러 가지 현상이 일어난다. 먼저 세포는 가해준 힘의 방향으로 압축 변형이 생기고 세포벽은 응력을 받으며 세포액은 비압축성이므로 세포 표면적은 팽창되고 팽압(turgor pressure)이 증가하게 된다. 압축응력이 가해진 상태에서 팽압에 의하여 세포액은 세포벽을 통해 빠져 나오며 펙틴의 가소성으로 인해 세포는 서서히 위치가 변하고 배향이 달라지며, middle lamella에 가해지는 응력이 펙틴 결합의 강도보다 크면 세포는 파괴되지 않은 채 세포간 결합이 끊어질 것이다. 세포간 공간의 공기는 압축응력에 거의 저항력을 미치지 못하

지만 압축응력이 가해지는 동안 세포가 재배합되는 공간을 제공해 주며, 세포외액은 압축에 의하여 세포 사이를 이동하며 점성저항을 미치게 될 것이다. 따라서 식물조직의 탄성은 주로 세포액의 비압축성과 세포벽의 탄성에 기인하며, 시간에 따라 변하는 구조적 특성은 세포액의 세포벽을 통한 이동속도를 지배하는 plasmalemma의 투과성, 세포벽의 가소성, 세포간 펙틴 결합의 가소성, 유리 세포외액의 이동에 대한 점성저항에 좌우된다고 할 수 있다⁽²⁾.

그러나 어느 크기 이상의 압축응력에서 식물조직은 failure가 일어나는데, 이는 세포벽의 파열 또는 세포간 결합의 파괴의 두 메카니즘에 의해 세포집합이 파괴되기 때문에 생긴다. 일반적으로 생과일이나 채소의 세포는 파열되는 경향이 있고, 가열 처리한 조직은 펙틴질의 열분해에 의하여 세포분리가 일어난다.

이와 같은 점탄성을 갖는 식물조직의 응력완화 곡선은 전통적으로 몇 개의 Maxwell 요소로 구성된 일반화된 Maxwell model을 이용하여 해석하였다. Finney 등⁽³⁾은 이 모델을 사용하여 감자조직을 모델화 하였고 Chen과 Fridley⁽⁴⁾는 농산물의 Maxwell 모델의 계수들을 구하는 방법을 제안하였다. Davis 등⁽⁵⁾은 감자의 비중과 감자의 종류 및 조리시간에 따른 감자조직의 일반화된 Maxwell model에서의 탄성계수와 점성계수를 구하여 비교하였다.

그러나 대부분의 식품은 비선형적인 점탄성 거동을 나타내므로 Maxwell model의 점탄성 계수값은 변형속도, 변형의 크기 등에 따라 변한다. 또한 Maxwell model은 연속체라는 가정에서 출발된 것이나 과일 및 채

Corresponding author: Yu-Ryang Pyun, Department of Food Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749

소류의 조직은 세포조직을 가진 불균질체이며 비연속체이다.

따라서 이러한 제한 조건 때문에 Peleg^{6, 9)}는 응력완화 곡선에 대한 다음과 같은 실험적 모델을 제안하였다.

$$Y(t) = \frac{F_{(0)} - F_{(t)}}{F_{(0)}} = \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (1)$$

여기에서 Y(t)는 decaying parameter, F₍₀₎는 초기의 힘, F_(t)는 시간 t에서의 힘이다. 식 (1)을 변형시키면

$$\frac{t}{Y(t)} = k_1 + k_2 t \quad (2)$$

시간 t에 대하여 t/Y(t)를 그리면 직선이 얻어지며, 1/k₁은 초기 완화속도, 1/k₂은 가상적 평형상태에서의 잔여 응력을 나타낸다.

과일, 채소와 같이 일정한 압축응력을 가한 후 변형을 유지하면서 응력완화 실험을 하는 과정 중에도 압축응력에 의하여 세포액이 유출되고 조직내 공기가 구속되면서 계속적으로 조직이 변화되는 시료인 경우에는 Peleg의 모델이 특히 응력완화 초기에 잘 맞지 않는 것을 발견하였다⁽¹⁰⁾.

따라서 본 연구에서는 Peleg의 모델을 수정한 모델을 제안하고, 이 모델이 여러 종류의 과채류의 생조직과 열절임, 당절임 및 가열한 조직의 응력완화 곡선을 직선화 시켜 해석하는데 유용하게 적용할 수 있는지를 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

시장에서 구입한 신선한 과일과 채소류를 5℃의 냉장실에 저장하면서 시료로 사용하였다. 시료는 비교적 당분이 많은 과일류 중 사과, 배, 단감, 전분이 많은 감자, 고구마, 그 밖의 채소류 중 오이, 무우, 양파, 마늘, 당근 등 3군으로 분류하여 외피와 속을 제외한 가식부분을 한변의 길이가 5 mm인 정육면체로 절단하여 사용하였다.

전처리

절단된 시료중 감자, 오이, 무우, 양파, 마늘, 당근을 각각 25배 정도의 5%(w/v%) 식염용액에 4시간 이상 완전히 담구어 염장하였으며 사과, 배, 감, 고구마는 각각 25배 정도의 5%(w/v%) 설탕용액에 4시간 이상 완전히 잠기도록 하여 당장하였다. Blanching은 100℃의 물속에서 5분 동안 가열한 후 30분간 방냉한 후 측정시료로 사용하였다.

응력완화 시험

Rheometer(type R-UDJ-DH3, Sun Scientific Co., Ltd., Japan)로 응력완화 실험을 하였다. 이 때 plunger는 직경 10 mm flat end 모양을 사용하였고 table speed는

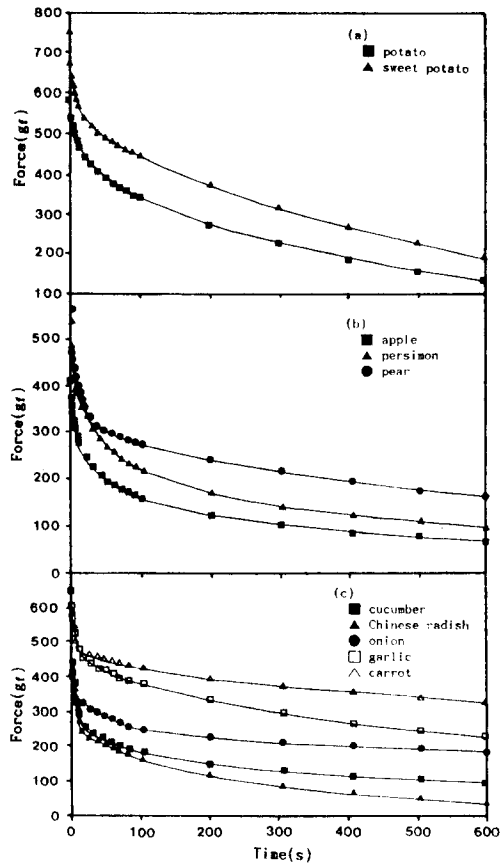


Fig. 1. Stress relaxation curves of fresh fruits and vegetables

100 mm/min로 하였다. 응력완화는 생시료의 경우에는 500 g, 염장, 당장 및 가열 처리시료의 경우에는 300 g으로 일정한 초기힘을 설정하고 측정하였으며 이 때 변형율은 50% 이내였으며 10분간 힘의 변화를 기록하였다.

결과 및 고찰

과일 및 채소의 응력완화 곡선

점탄성 거동을 나타내는 과일과 채소의 응력완화 현상을 분석하기 위하여 신선한 과일과 채소의 가식부 조직의 응력완화 곡선을 Fig.1에 나타내었다. 공통적으로 초기에 응력완화 속도가 빠른 것은 본 실험에서는 비교적 변형을 주었기 때문에 변형단계에서 failure가 일어나고 응력완화 초기 단계에 수분 및 공기가 빠져나오는 등 내부구조의 변화가 일어나기 때문인 것으로 생각된다. 특히 시료는 입방체로 절단한 것이므로 이와 같은 현상이 급속히 일어난 것으로 판단된다. Fig.1(a)에서 감자와 고구마는 비교적 단단하고 치밀한 조직을 가지고 있으며, 감자의 경우 세포간 공기의 부피는 약 1%⁽¹⁰⁾이므로 다른

Table 1. The time required for the stress to decay to 1/e times its original value for various samples

Raw sample	$t_{\sigma_0/e}$ (s)	Processed sample	$t_{\sigma_0/e}$ (s)
Potato	476	Salted cucumber	0.5
Sweet potato	400	radish	0.8
Apple	122	onion	0.5
Persimon	181	garlic	1.2
Pear	600	Sugard apple	5.0
Cucumber	60	pear	0.7
Chinese radish	90	persimon	—
Onion	500	Blanched apple	0.4
Garlic	—	potato	2.5
Carrot	—	garlic	0.7

시료에 비하여 응력완화가 완만하여 초기응력이 1/e만큼 감소하는데 소요되는 시간($t_{\sigma_0/e}$)이 400~476s였으며 (Table 1), 10분 경과 후에도 응력완화가 지속적으로 일어났다. Fig. 1(b)에서 사과와 배의 경우 공기가 차지하는 공간은 20~25%로서 다소 거칠고 spongy와 같은 조직⁽¹¹⁾을 가지고 있어 감자보다 응력완화가 빨리 진행되어 $t_{\sigma_0/e}$ 는 122s였다. 배의 응력완화 곡선이 사과나 감보다 완만한 것은 배는 단단한 석세포(stone cell)의 조직을 갖고 있기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 1(c)에서 조직이 비교적 단단하고 치밀한 당근이나 마늘은 다른 시료에 비해 응력완화가 느려 측정시간 범위에서 $t_{\sigma_0/e}$ 를 구할 수 없었으며, 세포가 커 조직이 거칠고 연한 오이, 양파는 조직내 수분과 공기가 거의 응력완화 초기단계에 다 빠져나가고, 조직 또한 파괴되므로 초기 100초 동안에 급격히 응력이 감소되고, 그 이후는 서서히 완화되었다.

염장, 당장 및 데치기 처리를 한 시료들의 응력완화 곡선을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)에서 염장한 오이, 무우, 양파의 응력완화 곡선은 거의 비슷한 경향을 보여 수 초 사이에 순간적으로 대부분의 응력이 완화되고 60초 후에는 잔류응력이 0에 접근하였다. 당장 후의 응력완화 현상은 Fig. 2(b)에 나타내었는데 시료간에 약간의 차이를 보였으며 사과, 감에 비해 상대적으로 배의 응력완화가 초기에 거의 완료되었다. 염장이나 당장을 하면 삼투압 현상에 의해 세포액이 유출되면서 팽압이 없어져 세포막은 수축되고 세포의 수축에 따라 대부분의 공기도 구축된다. 따라서 조직은 탄성을 상당히 잃어 버리게 된다. 그리고 가열처리 후의 응력완화 현상은 Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 조직이 치밀한 감자는 다른 시료에 비해 비교적 완만하였으나 전체적인 경향은 염장이나 당장한 시료와 비슷하였다. 가열하면 세포는 팽압을 잃어버리고 세포액과 공기가 유실되며, 펙틴의 열분해로 조직이 연화된다.

생시료와 가공처리한 시료의 응력완화 곡선을 전반적으로 비교하여 보면 생시료인 경우 $t_{\sigma_0/e}$ 가 60~600s 범위이고 10분이 경과할 때까지 지속적으로 응력완화 현상이 일어났다. 그러나 염장이나 당장 그리고 가열처리한

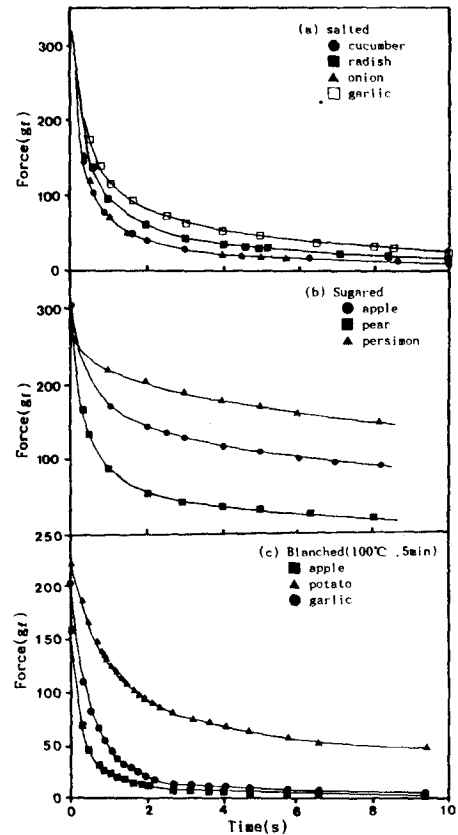


Fig. 2. Stress relaxation curves of processed fruits and vegetables

시료들은 세포액의 유실, 공기구축, 펙틴의 열분해 등에 의한 구조적 변화로 탄성을 거의 잃어버려 $t_{\sigma_0/e}$ 는 0.4~5s로 매우 짧고 1분이 후부터는 거의 일정한 응력값을 유지하였으며 잔류응력이 매우 작거나 전혀 없었다.

Peleg의 직선화 모델에 의한 응력완화 곡선의 해석

Peleg⁽⁶⁾는 agar gel(5%), 사과, cheddar cheese, 감자, 배, 빵, 소세지의 응력완화 곡선을 측정하여 식 (1)과 같이 normalization 시키고 식 (2)의 직선화 모델이 이들 시료에 대해 잘 적용되는 것으로 보고하였다.

그러나 전술한 것과 같이 과일이나 채소의 생시료인 경우에는 약 100초 동안에 급격히 응력이 감소되는데, 이는 응력완화 측정 중에 내부의 비가역적인 구조 변화에 기인된 것으로 추정된다. Peleg는 응력완화 초기에 대해 상세한 측정과 분석을 하지 않고 8분 동안의 응력완화 자료를 이용하여 직선화 모델에 적용하였다. 따라서 응력완화 곡선의 직선화 모델로서 Peleg가 제안한 실험식이 식물조직에 일반적으로 응용이 가능한가를 파악하기 위하여 여러 가지 생시료 및 처리시료를 식 (2)에 따라 plot하였다.

먼저 대표적인 생시료에 대해 도시한 Fig. 3을 살펴보면 응력완화 초기에 직선에서 벗어났으며, 그 정도는 시료에 따라 차이가 있었다. 전술한 바와 같이 세포가 작고 세포간 공기 함량이 약 1%로 치밀한 조직을 가지고 있어 응력에 의한 내부 조직의 변화가 비교적 완만히 일어날 것으로 생각되는 감자가 가장 크게 벗어났으며 다음은 다소 거칠은 구조를 가지고 있으며 공기 함량이 20~25%인 사과이고, 세포가 약하며 좁이 많아 압축변형에 의해 급속히 세포액이 유출되는 오이는 응력완화의 초기 짧은 구간을 제외하고는 직선관계가 잘 성립되었다.

한편 가공처리한 시료의 응력완화 곡선의 직선화 경향을 Fig. 4에서 살펴보면 엽질임한 오이, 무우, 양파, 당장한 배, 가열 처리한 사과, 마늘 등 대부분의 시료는

직선관계가 잘 성립하였다.

생시료의 경우 응력완화 초기에 직선에서 많이 벗어나는 것은 시료에 따라 차이는 있으나 압축응력에 의한 세포의 파열, 세포액 및 세포외액의 유출, 세포간 공기의 구축 등의 내부변화가 응력완화 측정을 위한 變形단계에서 뿐만 아니라 응력완화 측정 중 특히 초기단계에 급격히 계속 진행되기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 열질임, 가열처리한 시료는 가공처리 과정 중에 이미 팽압의 유실, 세포의 수축 등에 의한 내부변화가 일어난 상태의 시료이므로 응력완화 측정 중에 이러한 세포구조의 변화는 크지 않을 것으로 판단된다. 실제 강제적인 변형인 경우 손상되지 않은 생조직이 변형에 의해 세포막의 파괴, 조직내 공기와 세포액의 구축 및 이에 따른 middle lamella의 파괴가 일어났다는 사실은 여러 연구자들에 의해 관찰되었다⁽¹²⁾.

대부분 처리한 시료들은 거의 직선관계가 성립하는데 비해, 당장한 감과 사과의 경우 직선에서 조금씩 벗어난 것은 당장에 의하여 시료 조직 내의 수분, 공기 등의 구축, turgor pressure의 소실이 부분적으로 일어나고 응력완화 실험 중에 더욱 진행되었기 때문이며, 열처리한 감자의 경우는 조직이 견고하여 가열에 의해서도 조직 변화가 적었기 때문인 것으로 추측된다.

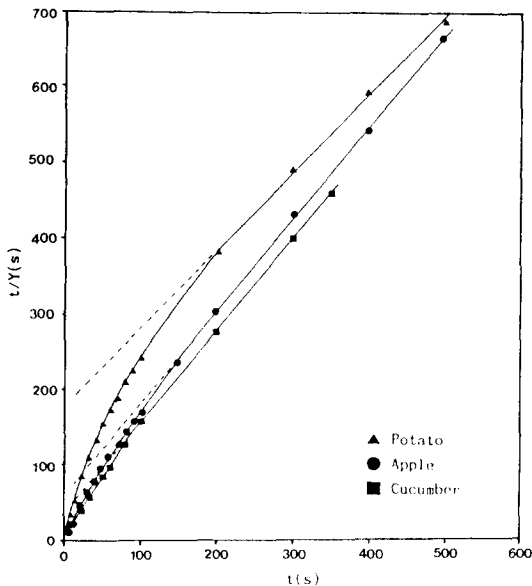


Fig. 3. Linearized relaxation curves of fresh fruit and vegetable fleshes by Peleg's model

수정된 직선화 모델에 의한 응력완화 곡선의 해석

식물조직의 응력완화에 대한 실험적 모델로서 Peleg가 제안한 식 (1)은 응력이 가해지고 있는 동안 내부구조가 파괴되는 시료에는 앞에서 기술한 것과 같이 적용할 수 없었다. 따라서 식 (1)을 다음식과 같이 수정하였다.

$$Y(t) = \frac{t^n}{k_1 + k_2 t} \tag{3}$$

$$\frac{t^n}{Y(t)} = k_1 + k_2 t \tag{4}$$

시료의 응력완화 data 중 대표적인 사과를 선택하여

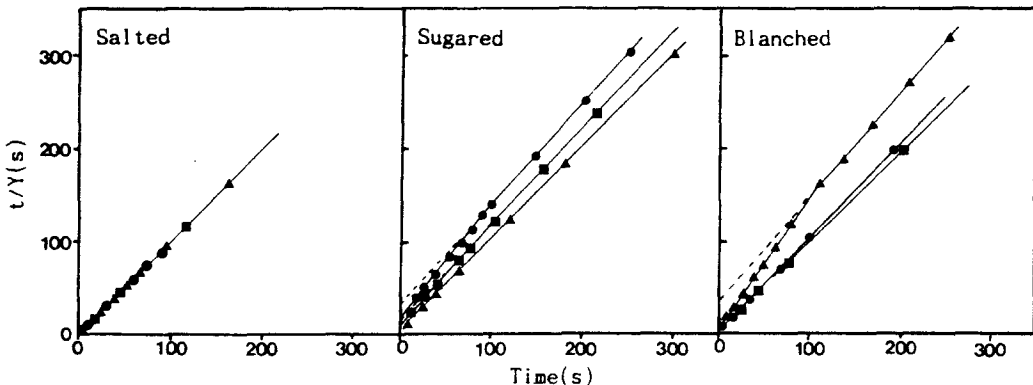


Fig. 4. Linearized relaxation curves of processed fruits and vegetables by Peleg's model

■: Cucumber, ■: Apple, ■: Apple, ▲: Chinese radish, ▲: Pear, ▲: Potato, ●: Onion, ●: Perisimon, ●: Garlic

가장 직선식이 잘 이루어 지도록 상관계수가 가장 큰 n값을 선정하여 t^n/Y vs t 를 직선화한 그림을 Fig.5에 나타내었다. 식 (4)의 수정된 직선화 모델을 신선한 사과 뿐만 아니라 당장 및 가열한 사과조직에도 잘 적용되었다. n값은 생시료에서 가장 컸으며, 가열 처리된 시료는 거의 1에 가까워졌다. 이와 같은 경향은 식 (2)의 Peleg 모델에서 손상되지 않은 생시료인 경우 직선에서 많이 벗어나고 가열 처리한 시료는 직선에 가깝게 되는 경향과 비교하여 볼 때 n는 식 (2)의 곡선화 정도를 반영하는 동시에 간접적으로는 각 처리에 의하여 변화되는 식물 조직 내부의 구조특성과 연관이 있을 것으로 생각되었다.

Fig.6에서 보는 바와 같이 오이, 무우, 감자, 고구마의 생시료 뿐만 아니라 가공한 시료에도 식 (4)는 직선관계가 잘 성립되었으며, 그림으로 나타내지는 않았으나 오이, 마늘, 당근, 감, 배 등 모든 생시료 및 가공시료에 대해서도 잘 적용되었다. 또한 염장 및 당장이나 가열 처리된 시료는 거의 n이 1에 근접하였다.

이상에서 볼 때, n값은 응력완화 초기단계에 조직의

변화 정도를 나타내는 값으로 과일 및 채소류의 종류 뿐만 아니라 변형 단계의 time scale 및 초기 응력의 크기에 의존될 것으로 생각되었다. Table 2에 나타난 각 시료의 n값을 살펴보면 생시료인 경우 감자, 고구마, 당근, 마늘과 같이 조직이 치밀하고 세포액과 공기함량이 적어 외부응력에 의해 쉽게 세포액과 공기가 유출되지 않으므로 응력완화 속도가 느린 시료인 경우 n값이 크다. 그러나 오이, 양파, 사과 등과 같이 세포가 크고 약하며 세포액과 공기함량이 비교적 많아 변형단계 또는 응력완화 초기에 쉽게 세포액과 공기가 유출되는 시료인 경우는 n값이 작다. 따라서 n값은 조직구조의 intactness와 관계가 있고, 응력완화 측정 중 외부응력에 의하여 조직구조의 변화를 일으킬 수 있는 잠재조직의 크기를 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 n을 구조 거동 지수(structure behavior index)로 정의하였다.

한편, 염장, 당장 및 가열 처리한 시료의 경우 대부분 n이 1에 가까운 값이다. 당장 처리 후에도 n이 1에서 약간 벗어난 감이나 사과 같은 시료는 당장에 의해 내부 구조 변화가 완전히 일어나지 않았으므로 응력완화 단계에 손상되어질 수 있는 잠재조직이 남아있음을 나타내는 것으로 생각할 수 있다.

n=1인 경우에는 처리에 의해 내부구조의 변화가 완료된 것으로 해석할 수 있다. 따라서 어떤 처리 후의 구조손상도 n_i (degree of structure failure)는 식 (5)와 같이 정의될 수 있다.

$$n_i = \frac{n_i - n_1}{n_1 - 1} \tag{5}$$

여기서 n_1 는 처리하지 않은 생시료의 n값, n_i 는 어떤 처리 후의 n값을 의미한다.

Table 2에 염장, 당장, 가열 처리후 n_i 값을 나타내었다. 전술한 바와 같이 처리한 시료일지라도 외부응력에 의하여 응력완화 측정 중 내부 구조변화가 일어나는 시료일수록 n_i 가 1보다 작았으며, 가공 중에 조직구조가

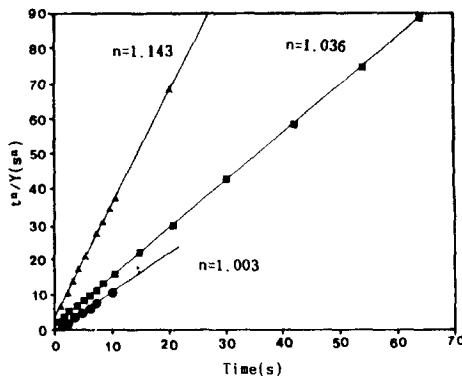


Fig. 5. Linearized stress relaxation curves of apple flesh by proposed model

▲; fresh, ■; sugared, ●; blanched

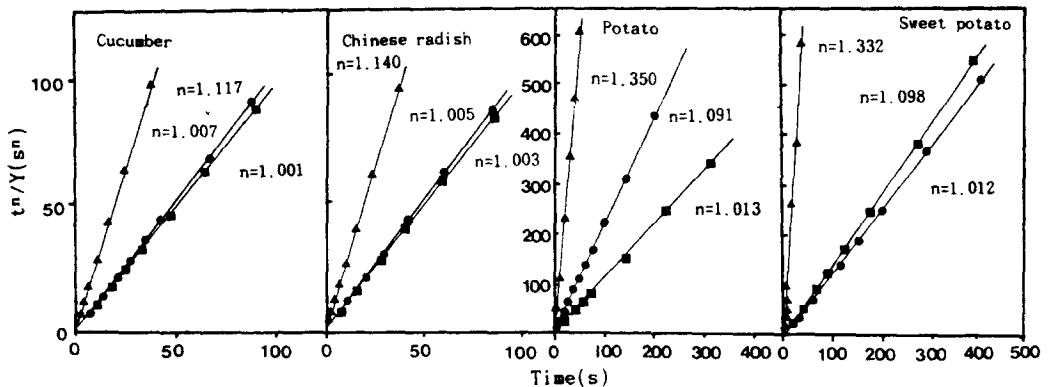


Fig. 6. Linearized stress relaxation curves of fruit and vegetable by proposed model

▲; fresh, ■; salted, ●; blanched

Table 2. Structure behavior index(n) and degree of structure failure(n_f) in proposed linearization model for the stress relaxation curves of vegetative tissues

Sample	Fresh		Salted		Sugared		Blanched	
	n _i	n _f	n _f	n _f	n _f	n _f	n _f	n _f
Apple	1.143			1.036	0.748	1.003	0.979	
Pear	1.191			1.004	0.979	1.008	0.958	
Persimon	1.163			1.072	0.558	1.040	0.755	
Potato	1.350	1.013	0.963			1.091	0.740	
Sweet potato	1.332	1.098	0.705			1.012	0.964	
Cucumber	1.117	1.001	0.991			1.007	0.940	
Radish	1.140	1.003	0.979			1.005	0.964	
Onion	1.170	1.002	0.988			1.000	1.000	
Garlic	1.261	1.020	0.923			1.006	0.977	
Carrot	1.295	1.043	0.854			1.019	0.936	

거의 손상된 시료일수록 1에 접근하였다. 이와 같이 n은 과일이나 채소류의 가공조리시에 처리정도를 나타낼 수 있는 하나의 리올로지 특성 data로 활용될 수 있으리라 추측되나, 이점에 대해서 앞으로 더욱 연구검토 되어야 할 것이다.

요 약

식물조직의 응력완화 측정 중에 압축응력에 의하여 조직의 내부구조가 변화되는 것을 고려하여 응력완화 곡선을 직선화할 수 있는 일반화 된 실험적 모델 $[F_{(t)}t^n / (F_{(0)} - F_{(t)}) = k_1 + k_2t]$ 을 제안하였다. 여기서 $F_{(0)}$ 는 초기 응력, $F_{(t)}$ 는 t시간 후의 잔여응력, k_1 , k_2 와 n은 상수이다. 이 모델은 오이, 감, 사과, 감자, 고구마, 당근 등의 신선한 과일 및 채소류의 응력완화 곡선의 직선화 모델로서 매우 잘 적용되었을 뿐만 아니라 염절임, 당장 및 열처리한 채소류 조직에도 잘 적용되었다. 이 모델로부터 구조 거동지수로 정의한 n값은 생시료인 경우 1.14~1.35 범위로 응력완화 동안에 조직변동이 큰 시료일수록 큰 값을

나타내었고 처리된 시료일 경우 1에 가까워졌다.

문 헌

1. Mohsenin, N.N.: Physical properties of plant and animal materials, Gordon and Breach Science Publishers, Vol. 1, New York (1970)
2. Pitt, R.E.: Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue, *Trans. of the ASAE*, **25**, 1776(1982)
3. Finney, E.E., Hall, C.W. and Mase, G.E.: Theory of linear viscoelasticity applied to the potato, *J. Agric. Eng. Res.*, **9**, 307(1964)
4. Chen, P. and Fridley, R.B.: Analytical method for determining viscoelastic constants of agricultural materials, *Trans. of the ASAE*, **15**, 1103(1972)
5. Davis, D.C., McMahan, P.F. and Leung, H.K.: Rheological modeling of cooked potatoes, *Trans. of the ASAE*, **26**, 630(1983)
6. Peleg, M.: Characterization of the stress relaxation curves of solid foods, *J. Food Sci*, **44**, 277(1979)
7. Peleg, M. and Pollak, N.: The problem of equilibrium conditions in stress relaxation analysis of solid food, *J. Texture Studies*, **12**, 1(1982)
8. Peleg, M.: Linearization of relaxation and creep curves of solid biological materials, *J. Rheology*, **24**, 451 (1980)
9. Peleg, M.: Comparison between various correction factors in the calculation of creep compliance, *J. Texture Studies*, **16**, 119(1985)
10. 유명식: 가공중 배추조직의 텍스처 변화와 리올로지 모델. 연세대학교 박사학위 논문 (1989)
11. Aguilera, J.M. and Stanley, D.W.: Microstructural principles of food processing and engineering, Elsevier Apple. Sci, London, 1990
12. Stadelmann, E.J.: Evaluation of turgidity, plasmolysis, and deplasmolysis of plant cells, In *Methods in cell physiology*, Vol. II Prescott, D.M.(ed), Academic Press, New York, p. 143(1966)

(1992년 2월 17일 접수)