

Bulk modulus를 이용한 농산물의 비파괴적 물성측정

김지현 · 김병용 · 박종신*

경희대학교 식품가공학과, 서울대학교 천연섬유학과*

Non-destructive Rheological Properties of Agricultural Product by Using Bulk Modulus

Ji-Hyun Kim, Byung-Yong Kim and Jong-Shin Park*

Department of Food Science and Technology, Kyung Hee University

*Department of Natural Fiber Science, Seoul National University

Abstract

Rheological properties of potato such as bulk modulus and failure stress were measured to determine the structure changes during storage and analyzed by creep theory to show the feasibility of the non-destructive rheological measurement upon the agricultural product. Complex film (PE:Nylon=1:1) package, having a relatively lower permeability than paper package, showed a greater volume change, faster loss of bulk modulus and failure stress during storage, and faster change in viscoelastic constants obtained by mathematical 4 element model, compared to control and paper package. Biodegradable package made of pulp and starch showed the same influence as paper package upon the changes in failure stress and moisture content and weight loss of potato during storage, indicating the potential usage of biodegradable package upon agricultural products. Also, non-destructive rheological measurements such as volume change, bulk modulus, viscoelastic constants could predict the texture change of potato during storage.

Key words: potato, bulk modulus, failure stress, packages

서 론

대부분의 농업생산물은 수확, 손질, 처리하는 동안에 쉽게 기계적인 손상을 입게 되며 그와 같은 기계적인 손상으로 인해 서로 다른 조직감(textural quality)이 나타나게 된다. 따라서 최상의 조직감을 유지하기 위해서는 최소한의 손상을 일으키는 효과적인 공정과정을 설립하여야 하며, 저장 중에는 최상의 품질을 갖도록 저장조건을 충분히 이해해야 하며, 변화하는 품질을 정확하게 감지할 수 있는 측정방법을 설립하여야 한다. 현재까지 사과(Hamann, 1969) 감자(Finney와 Hall, 1971; Hamann과 Diehl, 1978; 유명식 등, 1992), 멜론(Diehl 등, 1979) 고구마(Rao 등, 1976), 옥수수(Wen과 Mohsenin, 1970) 등을 이용하여 그 처리과정이나 품질을 측정하는 동안 일어나는 기계적인 변화에 대한 연구는 많았다. 그러나 천연상태로 convex

body를 갖고 있는 많은 농업생산물들의 물성변화를 응력(stress)과 변형(strain) 또는 modulus값과 같은 물리적 상수값으로 측정하는 경우는 드물었다. 복숭아의 성숙도를 파장에 따른 absolute modulus로서 나타낸 Clark와 Rao(1978)는 그 값들이 복숭아의 "hardness"와 "moist-dry mouth-feel"과 높은 상관관계가 있음을 밝혀냈다. 또한, Diehl 등 (1979)은 사과, 감자, 멜론과 같은 과실류의 기계적인 성질을 torsion test를 통하여 failure stress와 failure strain으로서 설명하였다. 그러나 그 측정방법들에 있어서 과육을 실린더나 텀벨모양으로 성형하고 torque를 가하여 absolute modulus나 failure stress-strain profile를 구하였다. 이는 주사현미경에서 나타났듯이, 과육 내의 cell 조직의 파손이 관찰되고 시료의 규격이나 연한 육질일 경우 문제점을 내포하고 있다. Morrow와 Mohsenin (1966)은 hydrostatic compression을 사용하여 사과의 집탄성 성질을 계산할 수 있는 방법을 제시하였고, Hertz (1970)는 여러 모양의 과일류의 stress-strain 관계를 원형 본래 과육간의 contact stress로 설명하였다.

Corresponding author: Byung-Yong Kim, Department of Food Science and Technology, Kyung Hee University, Yong-In, Kyonggi-do 449-701, Korea

따라서 본 연구에서는 감자를 농산물의 모델재료로 삼아 유체 압축기를 이용하여 비 파괴적인 방법으로 감자의 bulk modulus를 측정하여 creep 이론에 적용하여 감자조직의 물성변화를 측정하였으며 궁극적으로 이를 저장기간과 포장재질에 따른 내부조직변화의 index로서 사용하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

본 연구에서 사용된 감자는 수원의 재래시장에서 구입하였으며 포장재질로는 종이포장과 복합 필름(PE:나일론=1:1) 포장재질을 사용하였으며, 추후 생분해성 포장재질로서 제조할 포장재질의 경우는 pulp(쌍용제지)와 옥수수 전분(삼양 제넥스)을 혼합, 압축, 성형하여 사용하여(김지현 등, 1997) 그 성질을 일부 비교하여 보았다.

감자조직의 기계적 물성 측정

서로 다른 포장재질에 저장한 감자를 유체 압축기(Fig. 1)에 넣고 일정한 수압을 가하여 압축에 따라 변하는 부피변화를 시간에 따라 측정하였다. 즉, 초기 시료의 부피를 측정하고, 유체 압축기에 부착된 water column의 단위높이를 부피변화로 환산한 calibration constant를 구하였다. 다시 일정한 수압(0.16 kPa)을 시료를 넣지 않은 압축기에 가하여 10분 동안 물기둥의 높이변화를 찾아내어 correction factor를 구하고, 같은 방법으로 시료를 압축기에 넣어 30분 동안 가해진 압력에 따라 변하는 조직의 부피변화 및 bulk modulus를 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$K = \frac{EA}{\Delta V/V_0}$$

여기서 K=bulk modulus, F=force, A=area, ΔV=시료의 감소된 용적량, V₀=시료의 초기 용적량을 나타낸다. 위와 같이 시간에 따라 구해진 bulk modulus의 변화값을 이용하여 Kelvin model과 Maxwell model이 혼용된 4 element model에 적용하여 점성성분과 탄성성분의 변화를 알아보았다(Mohsenin, 1970).

감자의 점탄성을 분석하기 위해서 4 element model(Fig. 2)을 적용하였으며 그 관계식은 다음과 같다.

$$\epsilon = \epsilon_A + \epsilon_B + \epsilon_C \tag{1}$$

$$\sigma = \sigma_A = \sigma_B = \sigma_C \tag{2}$$

여기서 σ는 stress, ε는 strain이며 여기서 각 변형이 일

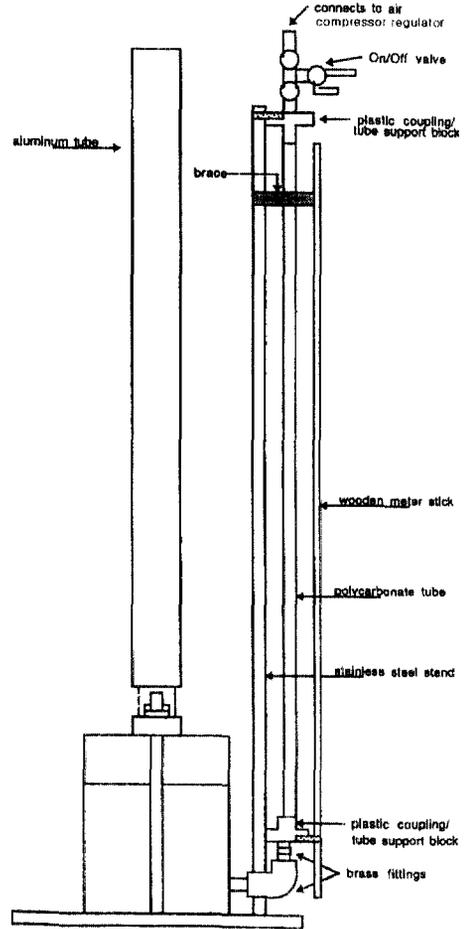


Fig. 1. Low-pressure hydrostatic compression apparatus.

어나는 가설을 세우면

$$\sigma_A = E_1 \cdot \epsilon_A \text{ (초기 instantaneous deformation에 상응)} \tag{3}$$

$$\sigma_B = E_2 \cdot \epsilon_B + \eta_2 \cdot \dot{\epsilon}_B \text{ (retarded elastic deformation에 상응)} \tag{4}$$

$$\sigma_C = \eta_3 \cdot \dot{\epsilon}_C \text{ (Newtonian flow에 상응)하는 식이 설정된다.} \tag{5}$$

식 (1)에 식 (2-5)를 대입하고, σ_n는 일정하고, ε_A와 ε_C는 Maxwell creep에 의한, ε_B는 Kelvin creep에 의한 변형이라는 creep 조건을 대입하면 다음의 식 (6)이 된다.

$$\epsilon(t) = \sigma_0/E_1 \cdot (1 - e^{-t/\tau_{01}}) + \sigma_0/\eta_2 \cdot t + \sigma_0/E_3 \tag{6}$$

여기서 τ₀₁=η₂/E₁이며 total strain의 63%에 도달될때 까지의 시간을 말한다.

식 6에서 E₁은 초기 elastic response에 의한 질량에서

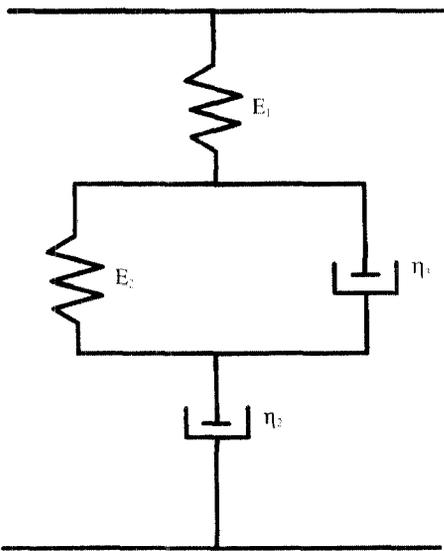


Fig. 2. Schematic diagram of 4-element model.

구하며 최종 기울기로 부터 η_2 값을 구한다. 측정된 총 반응에서 Maxwell effect를 뺀 data를 재 구성하여 나타내고, 그 접근선으로 부터 E_2 를 구하며, retardation time (τ_m)에서 η_1 를 구하였다.

파손강도(failure stress)의 측정

여러 저장조건이나 포장재질에 따라 변화하는 식품의 파손강도를 측정하기 위해 rheometer (Sun Co., Model CR-200D)를 사용하였다. 일정한 실린더모양의 sample (높이 2 cm, 반지름 0.82 cm)을 10 kg load cell에 부착시키고 200 mm/min cross head speed를 이용하여 10% strain으로 압축시켜 실온에서 파손강도를 측정하였다.

수분함량의 변화% 및 weight loss의 측정

여러 포장재질에 따라 저장된 식품의 수분함량변화%를 측정하기 위해 시료감자의 부위를 불규칙적으로 절단하여 건조기(Dae Sung Scientific Co.)에 넣어 100°C에서 24시간 동안 건조시킨 후 수분함량의 변화를 측정하고 감자의 무게를 저장전과 저장이 진행된 후 측정하여 weight loss를 알아보았다(Gosselin과 Mondy, 1989).

결과 및 고찰

감자조직의 기계적 물성 변화

실온(25°C)에서 포장재질에 따라(포장재 없는 무포

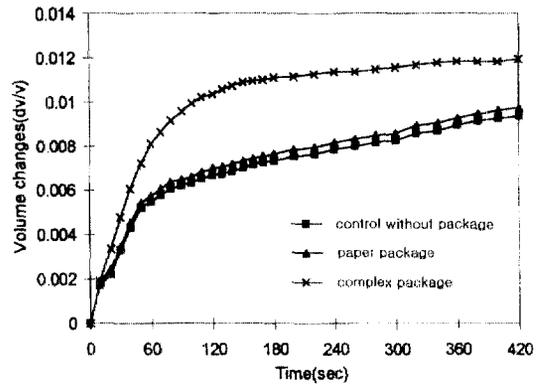


Fig. 3. Volume changes in potatoes packaged in mesh, paper and complex film.

장, 종이, 복합필름포장) 저장한 감자들을 압축기기를 이용하여 측정된 감자조직의 부피 변화 및 bulk modulus (K) 변화는 Fig. 3과 4에 나타내었다. 시료에 일정한 수압을 가하는 유체 압축기를 이용한 감자조직의 물성변화 측정은 절단이나 파손없이 기계적인 물성을 측정할 수 있는 잇점이 있다(Morrow와 Mohsenin, 1966). 무 포장과 종이 포장에 저장한 감자의 경우 초기에는 60초가 경과 후 0.6%의 부피변화가 급격히 일어나고 그 후 420초까지 0.9%의 완만한 부피변화를 나타냈다. 복합필름에 포장했던 감자의 경우 초기 120초까지 1%로 급격히 변하고 그 후 1.2%의 완만한 변화를 보여주었다(Fig. 3). 또한, 감자의 bulk modulus의 경우, 무포장과 종이포장에 비해 복합필름 포장은 초기의 더 심한 변화(높은 slope)와 더 낮은 평형 bulk modulus값을 보여주어(Fig. 4), 복합 필름 포장이 종이나 무 포장에 비해 더 큰 부피변화와 bulk modulus 변화를 일으킴을 알 수 있었다. Bulk modulus는 압축에 저항하는 시료의 능력이나 volumetric stiffness로 표현

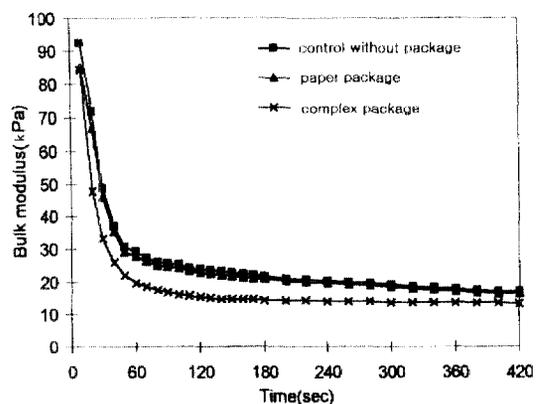


Fig. 4. Changes in bulk modulus (K) of potatoes packed in mesh, paper and complex film.

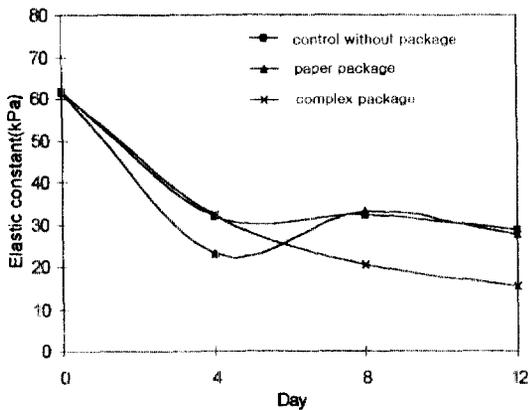


Fig. 5. Changes in elastic constants of potatoes packed in mesh, paper and complex film.

되어지는데(Mohsenin, 1970) 감자를 실온에서 저장하는 동안, 부피의 변화에서와 마찬가지로, 무 포장과 종이 포장과 같이 호흡이 충분히 일어날 경우 그 변화량은 유사한 결과를 나타내며 종이에 비해 상대적으로 매우 낮은 투과성을 보이는 복합 필름 포장의 경우, 시료의 저항능력이 다른 포장재에 포장한 시료보다 떨어짐을 보여 주었다.

포장재질에 따라 구하여진 bulk modulus 값을 이용하여 4 element 요소에 적용하고 계산한 탄성상수와 점성상수의 변화 값은 Fig. 5와 6에 나타내었다. 탄성상수의 변화를 살펴보면(Fig. 5) 무 포장의 감자는 초기 61.5 kPa에서 4일째에는 32.06 kPa로 감소하다가 저장기간이 증가하면서 28.9 kPa로 그 값이 일정하게 유지되었으며 종이로 포장한 감자의 경우에도 초기 61.5 kPa에서 4일째에 23.4 kPa로 빠른 감소를 보인 후 지장이 진행되면서 33.04~27.5 kPa로 거의 일정하게 유지되었다. 반면, 복합필름으로 포장한 감자의 경우에는 초기 61.5 kPa에서 최종일 15.5 kPa로 지속적으로 급격한 감소를 보여주었다. 이와같은 탄성성분의 급격한 감소에 따라 조직의 탄력(elasticity)감소를 일으키며 궁극적으로 감자의 강도에도 영향을 미치리라 사료된다. 여러 포장재질에 따라 저장한 감자의 성분변화를 조사한 Gosselin과 Mondy는 복합 필름에 저장한 감자의 경우 미생물의 생성에 의한 물성의 파손이 가장 크다고 보고하였다.

점성상수의 변화를 살펴보면(Fig. 6), 무 포장과 종이로 포장한 감자의 경우 초기 0.07 kPa·sec에서 저장 후 각각 0.1과 0.09 kPa·sec로 감소하면서 거의 유사한 변화량을 보였으나 복합 필름 포장의 경우에는 초기 0.07 kPa·sec에서 저장 후에도 0.06 kPa·sec를 나타내어 큰 변화 없이 점성성분이 유지되었다.

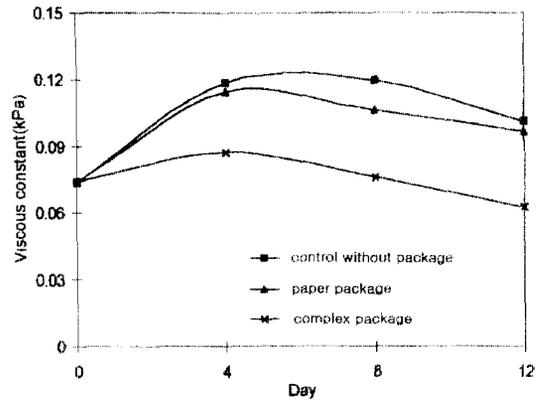


Fig. 6. Changes in viscous constants of potatoes packed in mesh, paper and complex film.

파손강도(failure stress)의 변화

상온(25°C)에서 무 포장, 종이포장 및 생분해성포장에 저장한 감자를 4일마다 꺼내어 시료에 10%의 변형율을 가하여 구한 파손강도는 Table 1에 나타내었다. 초기의 파손강도는 6.54 kg를 나타내었고 저장기간이 경과함에 따라 포장재질에 상관없이 일반적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 무 포장과 종이포장 및 생분해성 포장재질에 저장한 감자의 경우에는 저장기간이 증가하면서 각각 4.9 kg, 4.87 kg 및 4.64 kg로 거의 유사한 변화를 보여주었으나 복합 필름으로 포장한 감자의 경우에는 3.5 kg로 급격한 변화를 보여주었다. 따라서, 종이 혹은 생분해성 재질보다 상대적으로 공기 투과성이 매우 낮은 복합 필름에 있어서는 부피변화나 bulk modulus 뿐만 아니라 조직의 강도에도 큰 변화를 일으킴을 알 수 있었고 이는 감자와 같은 농산물의 호흡작용과 밀접한 관계가 있는 것으로 여겨진다(이승구, 1995; Shewfelt, 1990) 이(1995)는 감자와 같은 농산물은 수확한 후나 저장과정 중에서도 계속 호흡을 하고 통기가 충분하지 않은 상태에서 저장하

Table 1. Changes in failure stress of potatoes packed in mesh, paper or biodegradable film during 12 days

(unit: kg)				
day	Control (without package)	Paper package	Complex film	Biodegradable film
0	6.54	6.54	6.54	6.54
4	(0.48)	(0.48)	(0.48)	(0.48)
8	5.58	6.525	5.58	5.80
12	(0.51)	(0.36)	(0.72)	(0.42)
	5.69	5.93	5.68	5.44
	(0.43)	(0.37)	(0.35)	(0.41)
	4.9	4.87	3.5	4.64
	(0.3)	(0.35)	(0.2)	(0.4)

*The value in parenthesis is the standard deviation.

Table 2. Changes in moisture content % of potatoes stored in mesh, paper or biodegradable film during 12 days
(unit: %)

day	Control (without package)	Paper package	Biodegradable film
0	86.51 (0.01)	86.51 (0.01)	86.51 (0.01)
4	84.02 (0.04)	85.77 (0.02)	85.0 (0.03)
8	83.12 (0.02)	84.85 (0.02)	84.12 (0.03)
12	82.84 (0.01)	83.10 (0.01)	83.0 (0.01)

*The value in parenthesis is the standard deviation.

면 호흡작용에 의해 산소는 소비되고 탄산가스는 증가하여 공기조성에 변화를 일으켜 호흡속도에 많은 영향을 미칠 뿐만 아니라, 탄산가스 농도가 너무 높으면 작물에 장애를 일으킨다고 보고하였다. Myer (1989)도 곡물이나 야채를 포장함에 있어서 가스 투과도 및 화학적 반응을 가장 중요한 관점으로서 보았으며, 농산물의 호흡조절을 위해 가스 투과도가 높은 포장재질을 사용하며 내부에는 가스 및 수분 흡착제의 사용도 제시하였다(Bedrosian and Schiffmann, 1983).

본 실험에서 나타났듯이 감자와 같은 농산물의 경우 투과도가 극히 높은 종이재질이나 종이재질과 유사한 생분해성 포장재질을 포장재로 이용할 경우 조직에 미치는 효과가 유사함을 나타내었다. 또한, 앞에서 측정된 감자의 부피변화(Fig. 3)와 bulk modulus 변화(Fig. 4) 및 점탄성 성분들의 변화(Fig. 5, 6)와 같은 비파괴적 측정을 통해서 나타난 감자의 조직변화는 감자의 파손강도와 같은 파괴적검사의 결과를 예측할 수 있음이 나타났다.

수분함량의 변화% 및 weight loss의 변화

PE가 접착된 복합필름은 감자와 같은 농산물을 저장하기에 부적합한 것으로 나타났기에 품질변화의 지표로 사용되는 수분함량 및 weight loss의 변화에서는 복합필름을 뺀 무 포장, 종이포장, 및 생분해성포장재질을 사용하였고, 12일 동안 상온에서 저장한 감자의 수분함량 변화 및 weight loss 결과는 Table 3과 4에 나타내었다. 대부분의 곡물이나 과일에서 가장 중요한 화

Table 3. Changes in weight loss of potatoes stored in mesh, paper or biodegradable film during 12 days
(unit: %)

day	control (without package)	paper package	biodegradable package
0	0	0	0
4	1.61	1.56	1.38
8	3.06	2.80	2.45
12	4.57	2.99	3.01

학적 성분요소는 수분함량으로서 일반적으로 65~95%를 차지한다(USDA, 1984). 초기 수분함량은 86.51%이던 것이 저장이 진행된 후에는 무 포장 82.84%, 생분해성포장 83.0%, 종이포장의 경우는 83.10%로서 감소함을 나타내어 사용한 포장재질에 따라 수분함량의 변화량은 크게 영향을 받지 않았다. 일반적으로 포장재질은 조직감의 손실을 최소화하기 위하여 사용되며 신선한 농산물의 저장성을 증대시키기 위해서는 조직내의 수분 손실을 늦추는 것이 바람직하다(Shewfelt, 1989). 또한 농산물의 호흡속도를 줄이기 위해서도 최적 가스의 투과도가 유지되어야 할 것이다(Shewfelt, 1986). Gosselin과 Mondy (1989)는 포장재질의 수분 투과도가 측정된 감자 무게 변화와도 유사한 관계를 나타냄을 보여주었다. 저장시 감자조직의 weight loss의 경우는 무 포장의 경우 12일 저장 후 4.57%가 일어났으며 종이포장의 경우는 2.99%, 생분해성 포장재질은 3.01%의 감소를 나타내어 무 포장의 경우가 가장 무게손실이 컸으나 큰 유의차는 보여주지 못했다. 따라서, 감자와 같은 농산물의 경우 투과도가 극히 높은 종이재질이나 종이재질과 유사한 생분해성 포장재질을 포장재로 이용할 경우 조직에 미치는 효과가 유사함을 나타내었다.

요 약

저장동안 각 감자의 bulk modulus와 파손강도를 측정하였고 감자와 같은 농산물에 대한 비파괴적인 점탄성의 적용을 위해 수학적인 creep model을 포장재질에 다양성을 주어 비교하였다. 종이 포장이나 무 포장의 경우보다 상대적으로 gas의 투과도가 낮은 복합 필름 포장을 사용한 경우, 감자조직의 더 큰 부피변화를 보여 주었고, bulk modulus값과 파손강도 값에 있어서도 빠른 저하를 보여준다. 수학적인 4요소 model에 적용하고 구하여진 점탄성의 값을 볼 때에도 무 포장과 종이포장의 경우 유사한 변화값을 보였으며 복합 필름 포장의 경우 급격한 저하를 보였다. 유사한 결과를 보인 무 포장과 종이포장의 경우와 제조한 생분해성 포장재질이 감자의 저장시 수분함량변화 및 감자의 weight loss를 비교해 본 결과는 무 포장의 경우 가장 큰 변화가 나타났으나 종이 포장과 생분해성 포장재질과 큰 유의차는 보여주지 않았다. 따라서, 감자와 같은 농산물의 경우 투과도가 극히 높은 종이재질이나 생분해성 포장재질을 포장재로 이용할 경우 감자의 포장 및 저장시 조직에 미치는 효과가 유사함을 나타내었다. 또한, 앞에서 측정된 감자의 부피변화

와 bulk modulus 변화 및 점탄성 성분들의 변화와 같은 비 파괴적 측정을 통해서 나타난 감자의 조직변화는 감자의 파손강도와 같은 파괴적 검사의 결과를 예측할 수 있음이 나타났다.

감사의 글

본 연구는 농림수산특정 연구과제의 연구비지원으로 수행된 연구의 일부입니다.

문 헌

- 김지현, 김병용, 박종신. 1997. 생분해성 포장재질이 달걀의 품질에 미치는 영향연구. 한국농화학회지, **40**: 525.
- 유명식, 송우진, 노영태, 변유량. 1992. 과일 및 채소의 응력 완화 식선화 모델. 한국식품과학회지. **24(3)**: 226.
- 이승구. 1995. 과실. 채소의 수확 후 생리. 식품기술 **8(1)**: 16.
- Bedrosian, K. and R.F. Schiffmann, R.F. 1983. Controlled Atmosphere Produce Package. U.S. patent 4,423,0802.
- Clark, R.C. and Rao, V.N.M. 1978. Dynamic testings of fresh peach texture. *Trans. of the ASAE*. 777.
- Diehl, K.C., D.D. Hamann, and J.K. Whitfield. 1979. Structural failure in selected raw fruits and vegetables. *J. Texture Studies*, **10**: 371.
- Finney, E.E. and C.W. Hall. 1971. Elastic properties of potatoes. *Trans. ASAE*, **10**: 4.
- Gosselin, B. and N.I. Mondy. 1989. Effect of packaging materials on the chemical composition of potatoes. *J. Food Sci.*, **54**: 629.
- Hamann, D.D. 1969. Dynamic mechanical properties of apple fruit flesh. *Trans. ASAE*, **12**: 170.
- Hamann, D.D. and K.C. Diehl. 1978. Equation for the dynamic complex uniaxial compression modulus of spheroidal shaped foods. *Trans. ASAE*. **21**: 1009.
- Hertz, H. 1970. Contact stresses between bodies in compression. In "Physical properties of plant and animal materials". ed) N. N. Mohsenin. Gordon and Breach Science Pub. NY. 348-382
- Mohsenin, N.N. 1970. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Volume I. Gordon and Breach Science Publishers. N.Y.
- Morrow, C.T. and N.N. Mohsenin. 1966. Consideration of selected agricultural products as viscoelastic materials. *J. Pennsylvania Agric. Exp. Station*. Feb., 686.
- Myer, R.A. 1989. Packaging considerations for minimally processed fruits and vegetables. *Food Technol. Feb.*, 129.
- Rao, V.N.M., D.D. Hamann, and A.E. Purcell. 1976. Dynamic structural properties of sweet potato. *Trans. ASAE*, **19**: 771.
- Shewfelt, R.L. 1990. Quality of fruits and vegetables. *Food Technol. June*, 99.
- Shewfelt, R.L. 1986. Postharvest Treatment for extending the shelf-life of fruits and vegetables. *Food Technol.* **40**: 70.
- USDA. 1984. Composition of Foods: Vegetables and Vegetable Products. Agricultural handbook 8-11. U.S. Dept. of Agriculture Washington, D.C.
- Wen, P.R. and N.N. Mohsenin. 1970. Measurement of dynamic viscoelastic properties of corn honey endosperm. *J. Materials*, **5**: 856.