

저장기간에 따른 사과 과육의 기계적 특성 및 초음파 파라미터 Mechanical Property and Ultrasonic Parameter Changes of the Apple Flesh during Storage

김기복* 김만수** 정현모** 이상대* 박정길**
정회원 정회원 정회원

K. B. Kim M. S. Kim H. M. Chung S. D. Lee J. K. Park

1. 서론

과실은 재배기술, 재배환경의 영향으로 형상, 색택, 병충해로 인한 상해 정도가 다르게 나타나기 때문에 상품성이 매우 다양하게 결정된다. 또한 수확, 저장, 포장, 수송, 상하차 등 유통과정에서 기계적 손상이 발생할 수 있으며 유통기간이 길어짐에 따라 호흡 및 증산작용 등과 같은 생리적 작용으로 인하여 부패 및 변질이 발생하며 이러한 유통과정 중에서 발생하는 과실의 품질저하가 상당한 수준에 이르고 있으나, 이에 대한 관심은 매우 낮은 실정이다. 또한, 대부분의 청과물은 수확 후 소비되기까지 장기간의 저장으로 품질 변화가 발생할 수도 있다.

과실의 이러한 특성을 고려하여 수확, 저장 및 유통과정 중에서 발생하는 충격력과 압축력 등과 같은 기계적 외력에 의한 손상을 줄이 위해서는 과실의 기계적 특성을 구명하고 이해하는 것이 매우 중요하다. 과실의 기계적 특성이 구명되면 수확, 선별, 포장, 가공과 관련된 기계장치 및 설비를 과실의 특성에 적합하게 설계·제작 할 수 있을 뿐만 아니라 기계 및 설비의 적정 작동 조건 등을 설정할 수 있게 되므로 기계적 외력에 의한 청과물의 손상을 줄이는데 크게 기여할 것이다.

이와 같이 과실의 기계적 특성은 매우 중요한 기초자료이나 품종에 따라 차이가 있을 뿐만 아니라 같은 품종에서도 개체에 따라 형상, 조직 등이 다르게 나타난다. 따라서 이들에 관한 자료는 매우 빈약하고 몇몇 문헌에 보고된 자료들도 동일한 과실에 대한 측정값들도 다른 경우가 많다. 외국의 경우는 청과물을 비롯하여 식품재료에 대하여 이 분야의 연구가 비교적 활발히 진행되고 있으나, 국내의 경우는 일부 연구자들에 의하여 사과 및 배에 대한 연구가 진행되어 왔으나 이들에 대한 기계적 특성에 관한 자료도 충분치 못하다.

과실의 품질에는 무게, 색택, 형상, 표면상태 등과 같은 외부 품질인자와 당도, 육질, 영양가, 보존성, 가공성, 내부 공동 및 결함 등의 내부 품질인자가 있다. 지금까지 청과물에 대한 품질판정은 주로 외부 품질인자를 중심으로 행해지고 있으며, 내부 품질인자의 경우 전체 중 일부를 표본 추출하여 당도, 산도, 경도, 결함(공동, 갈변현상)등을 파괴적인 방법으로 측정하고 있는 실정이다. 선진국에서는 외관 판정뿐만 아니라 내부 품질의 판정을 위해 근적외선, 핵자기공명, 영상처리, 초음파, X 선등을 이용하여 속도, 부패 정도 및 내부의 결함 정도를 판정할 수 있는 기술을 개발 중에 있거나 일부는 실용화에 접근하고 있다. 이러한 기술들은 계측, 센서, 전자 기술의 눈부신 발달로 가능해졌으며 이와 같은 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있으며 최근에는 초음파를 이용한 방법들이 많은 관심을 끌고 있다. 그러나 지금까지의 초음파 기술은 대부분 의료진단이나 산업설비 등에 대한 비파괴 검사용으로 주로 사용되고 있으며 농산물의 내부 품질평가에 적용하기 위한 연구는 매우 부족한 실정이다. 관련 연구들을 살펴보면 Sarkar와 Wolfe (1983)은

* 한국표준과학연구원 산업측정표준부 비파괴계측그룹

** 충남대학교 농업기계공학과

+ 본 연구는 2001년도 농림부 농림기술관리센터의 첨단기술개발과제의 지원으로 수행되었음.

오렌지 표면의 texture, 토마토의 표면 crack, husked sweet corn의 내부결함을 측정하기 위하여 초음파 송신용으로는 0.5MHz의 협대역 초음파 트랜스듀서, 수신용으로는 1MHz의 광대역 초음파 트랜스듀서를 사용하여 시료를 투과하여 나오는 초음파 신호의 감쇠를 측정하여 분석하였다. Mizrach 등(1989)은 50kHz의 초음파 주파수에서 투과법을 이용하여 몇 가지 과실과 채소에 대하여 두께에 따른 초음파 속도와 감쇠를 측정하였다. 또한 Mizrach 등(1997)은 망고과실의 수확후 속도 변화에 따른 경도와 산도 등을 초음파 감쇠를 이용하여 측정이 가능함을 보였다. 한편 국내에서는 장 등(1998)이 수박에서의 초음파 전파특성을 측정하기 위한 연구를 수행하였다. 또한 김 등(2002)에 의해 초음파 투과를 이용하여 사과와 초음파 속도와 감쇠계수를 구하기 위한 기초연구를 수행되었다. Kim 등(2002)이 시료를 투과하여 수신되는 초음파 신호의 여러 가지 파라미터를 이용하여 사과, 배, 복숭아 등의 경도를 측정하기 위한 모델을 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 그러나 지금까지의 연구결과를 살펴보면 국내의 주요 과실인 사과의 경우 외국의 관련 연구도 거의 미흡할 뿐만 아니라 국내의 경우도 본 연구자들 외에는 거의 미미한 실정이다.

한편, 과실의 경우 수확 후 소비되기까지 여러 가지 유통과정을 거치는 동안 많은 시간이 경과하게 된다. 따라서 주요 외부 품질인자로서 과실의 경도를 평가할 경우 수확 후 시간경과에 따른 경도의 변화를 구명해야 할 것으로 사료된다. 조와 황(1998)은 시간경과에 따른 과실의 신선도를 평가하기 위하여 여러 가지 물리화학적 인자를 탐색하고 분석한 결과 사과의 경우 수확 후 시간이 경과함에 따라서 세포 표면의 상대 거칠기가 증가함과 동시에 과육의 파괴력이 감소하여 두 인자 상호간에 유의한 상관관계가 있음을 보고하였다.

따라서 본 연구는 국내 주요 과실인 사과를 대상으로 하여 초음파를 이용하여 과실의 경도를 측정하기 위한 기초연구로서 사과 과육에 대하여 저장기간에 따른 기계적 특성과 초음파 투과 특성을 분석하기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

실험에 사용된 사과는 부사로서 경기도 화성군의 과수원내 동일한 과수나무에서 2002년 가을에 수확되었다. 사과의 경도를 비교적 빨리 변화시키기 위하여 온도 22℃, 상대습도 75%RH 조건의 실험실 환경에서 사과를 보관하였다. 3~4일 간격으로 임의로 6~8개를 선택하여 각 사과 개체에서 사과의 씨방과 과피를 제외한 과육에 대하여 직경 40mm, 두께 14~22mm의 시편을 만들었는데 하나의 사과에서 2개의 시편을 만들었다. 전체적으로 11개의 저장 기간별로 사과의 경도 변화가 자연스럽게 이루어지도록 하였다.

나. 기계적 특성 실험장치 및 실험방법

사과 과육의 기계적 특성 측정을 위하여 그림 1에서 보는 바와 같은 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 크로스헤드를 상하 수직으로 움직이기 위한 AC서보모터 및 LM가

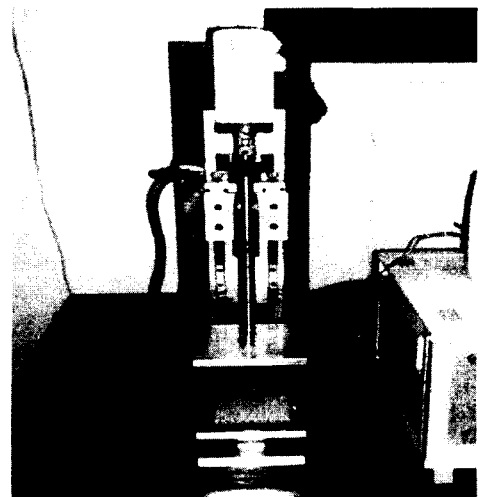


Fig. 1. Compression test apparatus for apple flesh specimen

이드와 볼 스crews(ball screw)조합, 시편에 가해지는 하중계측을 위한 하중 변환기(load cell)와 이들을 제어하고 계측하기 위한 컴퓨터로 구성하였다. 시료압축을 위한 크로스헤드의 하중재하 속도는 5mm/sec으로 일정하게 하였다(ASAE S368.3 MAR95). 계측된 사과 과육의 힘-변형곡선으로부터 시료의 생물체항복강도(bioyield strength), 생물체항복변형량(bioyield deformation), 극한강도(rupture strength), 극한변형량(rupture deformation), 탄성계수(secant elastic modulus) 등을 측정하였다(Kim, 2000, 김 등, 2002).

다. 초음파 투과 실험장치

과실의 초음파 파라미터를 측정하기 위한 실험 장치는 그림 2에서 보는바와 같다. 인가전압이 큰 tone-burst를 과실 시편에 투과시켜 반대쪽에서 초음파를 수신하는 방법을 적용하였다. 초음파 펄서/리시버는 RITEC Square Wave Pulser SP-801과 RITEC Broadband Receiver BR-640을 사용하였다. 사용된 송신용 초음파 트랜스듀서는 중심주파수는 0.5 MHz, 직경 32 mm인 접촉식 초음파 트랜스듀서(Krautkramer사, 독일)이며 수신 초음파 트랜스듀서는 중심주파수가 0.5 MHz, 직경 20 mm인 광대역 초음파 수신 특성을 나타내는 접촉식 초음파 트랜스듀서(Panametrics, 미국)를 사용하였다.

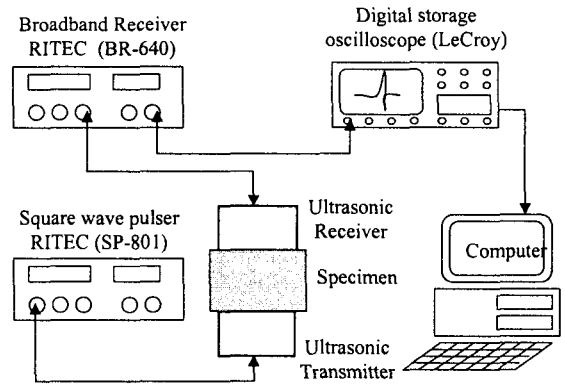


Fig. 2. Ultrasonic measurement setup.

시편에 대한 초음파 투과실험에서 시편 직경은 초음파 트랜스듀서의 직경(32 mm) 보다 충분히 크기 때문에 초음파가 시편의 표면 혹은 공기 중으로 전파하는 것을 방지할 수 있다. 초음파 투과실험이 끝난 시편은 UTM을 이용하여 생물체 항복강도와 탄성계수를 각각 측정하였다[8]. 시편과 초음파 트랜스듀서 사이의 음향임피던스 정합을 위한 매질은 사과 자체가 함유하고 있는 수분을 이용하였다. 즉, 송신 트랜스듀서 위에 사과 시편을 놓은 다음 시편 위에 수신 트랜스듀서를 접촉시켜 수신용 초음파 트랜스듀서의 무게가 시편에 걸리도록 함으로써 일정한 하중이 가해지도록 하였다. 시편을 투과하여 수신된 초음파 신호는 1 GHz의 sampling rate를 가지는 오실로스코프(LeCroy)와 컴퓨터를 이용하여 사과의 저장기간에 따른 초음파 투과속도, 감쇠계수, 주파수 등을 각각 분석하였다.

초음파 투과속도는 시편을 투과하여 수신되는 초음파의 TOF(time of flight)를 측정하여 다음 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$v_t = \frac{d_s}{TOF} \quad (1)$$

여기서, v_t 는 초음파의 시편 투과속도(m/sec), d_s 는 시편의 두께 (mm), TOF 는 초음파 투과시간(μ s)

초음파 신호의 감쇠는 시편에 입사되는 초음파 신호의 최대 진폭과 시편을 투과하여 수신되는 초음파 신호의 최대 진폭의 차이로서 다음 식(2)로부터 계산하였다.

$$A = \alpha \cdot d_s = 20 \cdot \log \left(\frac{V_i}{V_o} \right) \quad (2)$$

여기서, A 는 감쇠량(dB), α 는 감쇠계수, V_i 는 시편에 입사되는 초음파 신호의 최대 진폭(V), V_o 는 시편

을 투과하여 나오는 초음파 신호의 최대 진폭(V)을 각각 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

가. 사과 과육의 힘-변형 곡선

그림 1의 기계적특성 측정장치로 사과 과육의 압축시험을 한 결과 그림 3과 같은 힘-변형 곡선을 얻을 수 있다. 이 힘-변형곡선으로부터 과실의 기계적특성 즉, 생물체항복변형량, 극한변형량, 생물체항복강도 및 극한강도, 탄성계수 등을 구하였다. 한편 생물체항복점이 뚜렷하게 나타나지 않는 경우 파괴점의 절반을 생물체항복점으로 하였다(Abbott 등, 1994, 정 1999). 그림에서 보는바와 같이 저장 초기에는 청과물의 전형적인 힘-변형곡선을 나타내고 있으며 저장기간이 길어질수록 파괴점이 감소함과 동시에 변형은 증가하고 있음을 보여주고 있다. 특히, 저장 후기의 임의시점에서 파괴점 즉, 극한강도와 극한 변형량이 급격하게 변하는 것으로 나타났다.

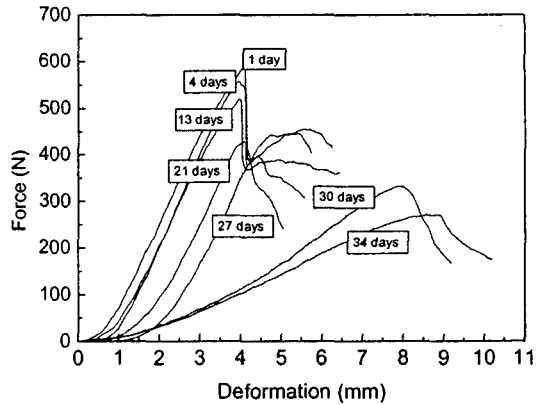


Fig. 3. Force-deformation curve changes of apple flesh with the storage time (day)

나. 저장기간에 따른 과육의 기계적 특성

저장기간에 따른 사과 과육의 기계적 특성은 그림 4~그림 6에서 보는바와 같다. 시료의 생물체항복강도와 극한강도는 그림 4에서 보는바와 같이 저장기간이 증가함에 따라 완만한 감소 경향을 보이다가 임의의 시점에서 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 저장기간에 따른 생물체항복변형량과 극한변형량은 일정기간까지는 그림 5에서 보는바와 같이 거의 변화가 없으나 생물체항복강도와 극한강도가 급격하게 감소하는 시점에서 변형량이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

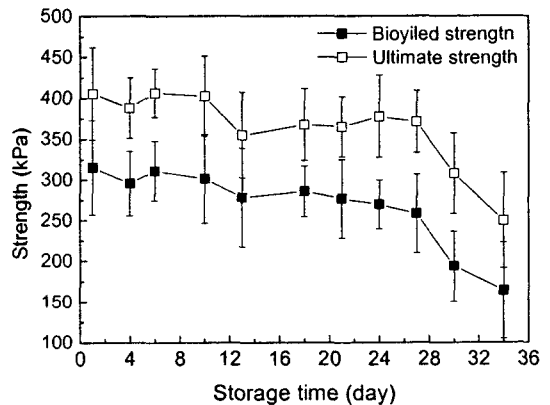


Fig. 4. Variations in bioyield and rupture strengths of apple flesh with the storage time. Error bars represent \pm one standard deviation.

한편, 저장기간에 따른 사과 과육의 탄성계수는 그림 6에서 보는바와 같이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상 조와 황(1998)의 결과와 비교적 일치하고 있으며 저장기간이 길어짐에 따라 과육 내 세포벽 성분의 수용화에 따른 세포벽 조직의 이완 현상으로 파괴점(rupture point)의 감소와 변형량이 증가하기 때문이다.

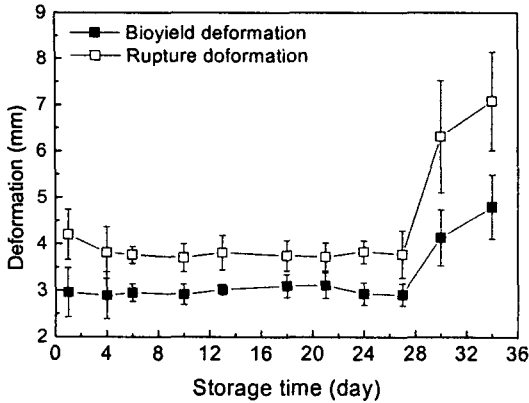


Fig. 5. Variations in bioyield and rupture deformations of apple flesh with the storage time. Error bars represent \pm one standard deviation.

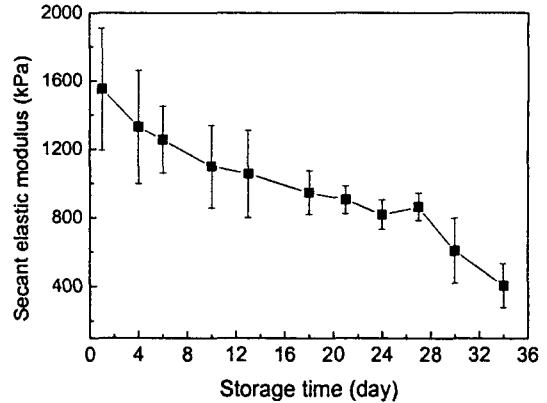


Fig. 6. Variation in secant elastic modulus of apple flesh with the storage time. Error bars represent \pm one standard deviation.

다. 저장기간에 따른 초음파 신호특성

저장기간에 따라 사과 과육을 투과하여 수신되는 초음파 신호의 파형은 그림 7에서 보는바와 같다. 저장기간이 길어질수록 수신되는 초음파 신호의 감쇠가 크게 나타나고 있으며 전반적으로 저장초기의 깨끗한 파형이 저장말기로 갈수록 신호 패턴이 크게 달라짐을 알 수 있다. 이러한 특성을 파악한 다음 저장기간에 따른 초음파 속도와 감쇠계수를 분석한 결과 그림 8 및 그림 9에서 보는바와 같다. 그림 8에서 저장기간이 증가함에 따라 초음파 속도는 대체적으로 감소하는 것으로 나타났다. 저장 초기의 초음파 속도는 평균값이 222.35 m/sec, 표준편차가 14.58 m/sec 정도이었으며 저장 말기에는 약 평균 175 m/sec, 표준편차 14.17 m/sec로 나타났다. 이것은 그림 6에서 나타난 바와 같이 저장기간이 증가함에 따라 탄성계수가 감소하게 되고 따라서 초음파 속도는 탄성계수의 함수이므로 저장기간이 증가함에 따라 초음파 속도는 감소하게 된다.

또한, 그림 9에서 보는바와 같이 초음파 감쇠계수는 일부 데이터를 제외하고는 저장기간에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 저장기간이 증가함에 따라 사과 과육 내부의 세포벽 붕괴와 세포벽 조직의 이완현상으로 인하여 탄성계수가 감소하게 되고 이에 따라 사과 과육의 sponge 현상으로 인하여 시편 내부에서 탄성파 에너지가 내부에서 많이 흡수되어 감쇠가 크게 발생하는 것으로 사료된다.

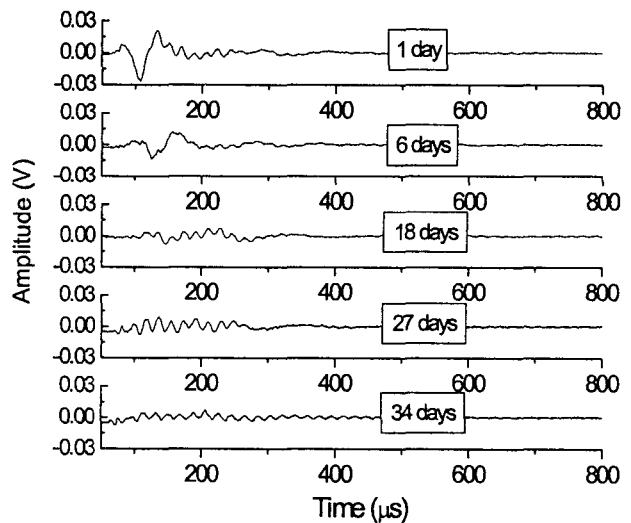


Fig. 7. Ultrasonic transmitted signals from apple flesh with the storage time.

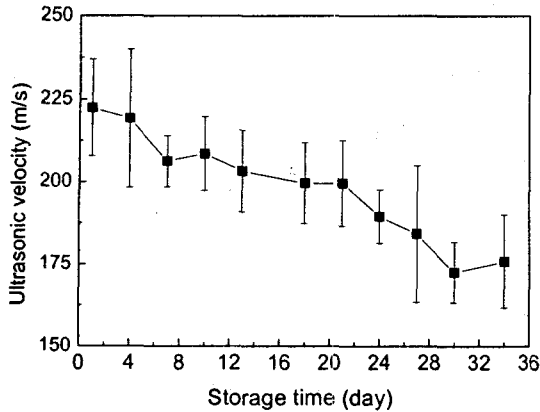


Fig. 8. Variation in ultrasonic velocity of apple flesh with the storage time. Error bars represent \pm one standard deviation.

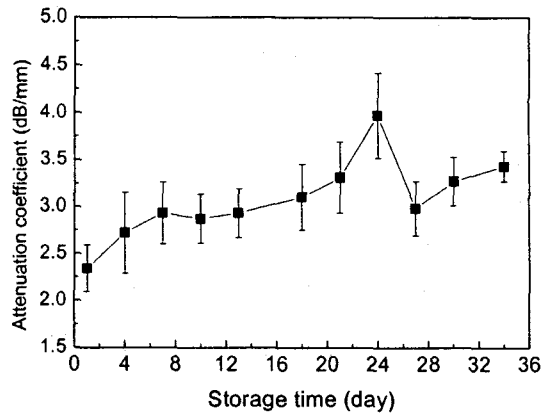


Fig. 9. Variation in attenuation coefficient of apple flesh with the storage time. Error bars represent \pm one standard deviation.

라. 초음파 파라미터와 기계적 특성과의 관계

지금까지의 결과를 토대로 하여 사과와 저장기간에 따른 기계적 특성과 초음파 파라미터의 관계를 정량적으로 나타내기 위하여 표 1에서 보는바와 같이 상관분석을 실시하였다. 기계적 특성의 경우 생물체항복강도, 극한강도, 탄성계수가 저장기간과 강한 상관관계를 나타내었다. 표 1의 결과로부터 따라서 사과의 저장기간 즉, 수확 후 속도 변화를 초음파 파라미터를 이용하여 예측이 가능할 것으로 판단된다.

Table 1. Correlation coefficients of mechanical properties and ultrasonic parameters of apple flesh with the storage time.

Item	Mechanical property					Ultrasonic parameter	
	Bioyield deformation (mm)	Rupture deformation (mm)	Bioyield strength (kPa)	Rupture strength (kPa)	Elastic modulus (kPa)	Ultrasonic velocity (m/sec)	Attenuation coefficient (dB/mm)
Correlation coefficient	0.6814	-0.6222	-0.8711	-0.7976	-0.9703	-0.9653	0.7429

4. 요약 및 결론

본 연구는 국내 주요 과실인 사과를 대상으로 하여 초음파를 이용하여 과실의 경도를 측정하기 위한 기초연구로서 사과 과육에 대하여 저장기간에 따른 기계적 특성과 초음파 투과 특성을 분석하였다. 두께 범위 14~22mm, 직경 40mm의 사과 과육 시편에 대하여 초음파 투과시험을 수행한 후 UTM을 이용하여 시편의 기계적 특성을 측정하였다. 계측된 사과 과육의 힘-변형곡선으로부터 시료의 생물체항복강도(bioyield strength), 생물체항복변형량(bioyield deformation), 극한강도(rupture strength), 극한변형량(rupture deformation), 탄성계수(secant elastic modulus) 등을 분석한 결과 사과의 저장기간이 증가함에 따라 생물체항복강도, 극한강도, 탄성계수는 감소하는 경향을 나타내었으며 생물체항복변형량, 극한변형량은 증가하였다. 또한 저장기간에 따른 초음파 속도는 저장초기의 222.35 m/sec에서 저장말기의 175 m/sec로 감소하

는 것으로 나타났다. 반면 초음파 감쇠계수는 저장기간에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. ASAE. 1999. ASAE Standards, S368.3 MAR99
2. Chappell, T. W., and D. D. Hamann, 1968. Poisson's ratio and young's modulus for apple flesh under compressive loading, Transactions of the ASAE, 15(3): 608~612.
3. Fridley, R. B., and P. A. Adrian, 1966. Mechanical properties of peaches, pears, apricots, and apples", Transactions of the ASAE, 9(1): 135-138.
4. Fridley, R. B., R. A. Bradley, and P. A. Adrian. 1966. Some aspects of elastic behavior of selected fruits, Transactions of the ASAE, 15(1): 46-49.
5. Galili, N., A. Mizrach and G. Rosenhouse. 1993. Ultrasonic testing of whole fruit for nondestructive quality evaluation. ASAE Paper No. 93-6026. St. Joseph, Mich.:ASAE.
6. Kim, M. S. 2000. Mechanical properties of the apple flesh according to the specimen size, Agricultural & Biosystem Engineering 1(1): 43-48.
7. Kim, K. B., M. S. Kim, H. M. Jung, and B. Ahn. 2002. Mechanical property of fruit by ultrasonic parameters. Proceeding of International Symposium on Automation and mechatronics of Agricultural and Bioproduction system, Chiayi, Taiwan, Vol 1:119-129.
8. Mizrach, A., N. Galili and G. Rosenhouse. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. Transactions of the ASAE 32(6):2053-2058.
9. Mizrach, A., N. Galili, G. Rowenhouse and D. C. Teitel. 1991. Acoustical, mechannical and quality parameters of winter grown melon tissue. Transactions of the ASAE 34(5):2135-2138.
10. Mizrach, A., N. Galili, S. Gan-mor, U. Flitsanov and I.Prigozin. 1996. Models of ultrasonic parameters to assess avocado properties and shelf life. J. Agric. Eng. Res. 65(4):261-267.
11. Mizrach, A., U. Flitsanov, and Y. Fuchs, 1997. An ultrasonic nondestructive method for measuring maturity of mango fruit. Transactions of the ASAE 40(4):1107-1111.
12. 김기복, 김만수, 정현모, 안봉영, 2002. 초음파 파라미터를 이용한 과실의 기계적 특성 예측모델. 비파괴 검사학회지 추계학술대회 논문집, 57-62.
13. 김기복, 안봉영, 정현모, 김만수, 2002. 과실의 초음파 파라미터 측정을 위한 기초연구, 한국농업기계학회 하계학술대회 논문집. 7(2):382-387.
14. 김만수, 박종민, 최동수. "과실의 힘-변형 특성". 한국농업기계학회지. 17(2), pp. 156-170, (1992)
15. 김만수, 서륜, 김기복, 정현모. 2002. 초음파를 이용한 사과와 감의 경도측정(II)-사과의 탄성계수 및 생물체 항복강도 예측모델 개발-. 한국농업기계학회 동계학술대회 논문집. 7(1): 471-478.
16. 김만수, 정현모, 김기복, 2002. 과실의 기계적 특성 측정, 비파괴검사학회 하계워크샵 논문집, 188-195.
17. 박종민, "과실의 점탄성 특성과 그 응용", 충남대학교 박사학위논문, (1993)
18. 장경영, 김만수, 조한근. 1998. 수박에서의 초음파 전파 특성에 관한 실험적 연구. 한국농업기계학회지 23(6):615-620.
19. 정현모, "청과물의 기계적 특성에 관한 연구", 충남대학교 석사학위논문, (1999)
20. 조용진, 황재관. 1990. 사과 및 토마토의 신선도 평가를 위한 물리화학적 인자 탐색, 한국농업기계학회지. 23(5):473-480.