

## 저장기간에 따른 사과 과육의 기계적 특성 및 초음파 파라미터

### Mechanical Properties and Ultrasonic Parameters of the Apple Flesh while in Storage

김기복*	김만수**	정현모**	이상대**
정회원	정회원	정회원	정회원
K. B. Kim	M. S. Kim	H. M. Chung	S. D. Lee

#### ABSTRACT

The potential use of ultrasonic technique for firmness measurement of apples was evaluated. Mechanical properties (bioyield deformation, bioyield strength, rupture deformation, ultimate strength, and elastic modulus) and ultrasonic parameters (ultrasonic velocity, attenuation coefficient and the first peak frequency) of the apple flesh during the storage time were measured and analyzed. Ultrasonic parameters were determined from the measurement of ultrasonic wave transmission through the apple flesh specimen. Mechanical properties were obtained by universal testing machine. The bioyield strength, rupture strength, elastic modulus, ultrasonic velocity, and the first peak frequency of the apple flesh decreased with the storage time. The bioyield deformation, rupture deformation, and ultrasonic attenuation coefficient increased with the storage time. The correlation analysis between ultrasonic parameters and mechanical properties and the storage time was performed. The high correlations were found between the storage time and the ultrasonic parameters, and these relationships seem to be useful for determining the firmness of the apple flesh.

**Keywords** : Apple flesh, Storage time, Firmness, Mechanical property, Ultrasonic parameter.

#### 1. 서 론

과실은 재배기술, 재배환경 등의 영향으로 형상, 색택, 병충해로 인한 상해 정도가 다르게 나타나기 때문에 상품성이 매우 다양하게 결정된다. 또한 수확, 저장, 포장, 수송, 상·하차 등 유통과정에서 기계적 손상이 발생할 수 있으며 유통기간이 길어짐에 따라 호흡 및 증산작용 등과 같은 생리적 작용으로 인하여 부패와 변질이 발생할 수 있다. 이러한 유통과정 중에서 발생하는 과실의 품질저하는 상당한 수준에 이르고 있으나,

이에 대한 관심은 매우 낮은 실정이다.

과실의 품질에는 무게, 색택, 형상, 표면상태 등과 같은 외부 품질인자와 당도, 육질, 영양가, 보존성, 가공성, 내부 공동 및 결함 등의 내부 품질인자가 있다. 선진국에서는 외관 판정뿐만 아니라 내부 품질의 판정을 위해 근적외선, 핵자기공명, 영상처리, 초음파, X선 등을 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 가능해

This study was supported by the Agricultural R&D Promotion Center, Ministry of Agriculture and Forestry, Korea.

The article was submitted for publication in February 2003, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in June 2003.

The authors are Ki-Bok Kim, senior researcher, Smart Measurement Group, Center for Environment and Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea. Man-Soo Kim, professor, Hyun Mo Jung, researcher, and Sang-Dae Lee, researcher, Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea.

The corresponding author is Ki-Bok Kim, senior researcher, Smart Measurement Group, Center for Environment and Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, 305-340, Korea. Fax:+82-42-868-5639, E-mail:<kimkibok@kriss.re.kr>.

졌으며 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 오렌지 표면의 texture, 토마토의 표면 crack, husked sweet corn의 내부결함을 측정하기 위하여 초음파 송신용으로는 0.5 MHz의 협대역 초음파 트랜스듀서, 수신용으로는 1 MHz의 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 망고 과실의 수확 후 속도 변화에 따른 경도와 산도 등을 초음파 감쇠를 이용하여 측정이 가능함을 보였다. 국내에서는 장 등(1998)이 수박에서의 초음파 전파특성을 측정하기 위한 연구를 수행하였으며 김 등(2002)에 의해 초음파 투과를 이용하여 사과에서의 초음파 전파속도와 감쇠계수를 구하기 위한 기초연구가 수행되었다. Kim 등(2002)은 시료를 투과하여 수신되는 초음파 신호의 여러 가지 파라미터를 이용하여 사과, 배, 복숭아 등의 경도를 측정하기 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.

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.

청과물의 경도는 개체를 만능시험기로 압축하여 측정하는 것이 일반적이거나 이 방법은 시간이 소요되고 측정 개체가 파괴되기 때문에 전수조사가 필요한 생산 현장 및 가공공장에서는 이러한 방법을 사용할 수 없다. 그러나 초음파 기술을 이용할 경우 비교적 간단하게 경도가 측정 가능하다.

따라서 본 연구는 국내 주요 과실인 사과를 대상으로 하여 초음파를 이용하여 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% 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 만들었으며 하나의 사과에서 2개의 시편을 만들었다. 전체적으로 저장기간을 11단계로 하여 사과의 경도 변화가 자연스럽게 이루어지도록 하였다.

### 나. 초음파 투과 실험장치

과실의 초음파 파라미터를 측정하기 위한 실험장치는 그림 1에서 보는 바와 같다. 인가전압이 큰 tone-burst를 과실 시편에 투과시켜 반대쪽에서 초음파를 수신하는 초음파 투과시험법을 적용하였다. 초음파 펄서/리시버는 고출력 초음파 송수신이 가능한 RITEC Square Wave Pulser SP-801과 RITEC Broadband Receiver BR-640을 사용하였다. 송신용 초음파 트랜스듀서는 중심주파수 0.5MHz, 직경 32mm인 접촉식 초음파 트랜스듀서(Krautkramer사, 독일)를 사용하였으며 수신 초음파 트랜스듀서는 중심주파수 0.5MHz, 직경 20mm인 광대역 초음파 수신 특성을 나타내는 접촉식 초음파 트랜스듀서(Panametrics사, 미국)를 사용하였다.

시편에 대한 초음파 투과실험에서 시편의 직경은 초음파 트랜스듀서의 직경(32mm) 보다 충분히 크기 때문에 초음파가 시편의 표면 혹은 공기 층으로 전파하는 것을 방지할 수 있다. 초음파 투과실험이 끝난 시편은 그림 1의 측정장치를 이용하여 시편의 기계적 특성을 측정하였다. 초음파 투과시험 시 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 신호를 1GHz의 sampling rate를 가지는 오실로스코프(LeCroy사, 미국)에 저장한 후 초음파 투과속도, 감쇠계수, 주파수 등을 각각 분석하였다.

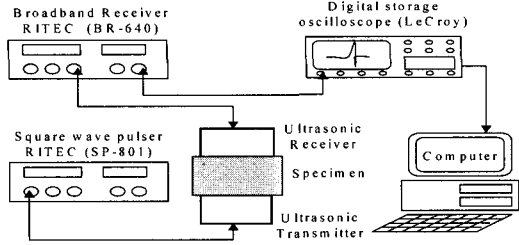


Fig. 1 Ultrasonic measurement setup.

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

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

여기서,  $v_t$ 는 초음파의 시편 투과속도(m/sec),  $d_s$ 는 시편의 두께 (m),  $TOF$ 는 초음파 투과시간(s)을 각각 나타낸다.

초음파 신호의 감쇠는 시편에 입사되는 초음파 신호의 최대 진폭과 시편을 투과하여 수신되는 초음파 신호의 최대 진폭의 차이로서 다음 식(2)를 이용하여 계산하였다(Thurston, 1990).

$$\alpha = \frac{1}{d_s} \cdot 20 \cdot \log\left(\frac{V_o}{V_i}\right) \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $\alpha$ 는 감쇠계수(dB/mm),  $V_i$ 는 시편에 입사되는 초음파 신호의 최대진폭,  $V_o$ 는 시편을 투과하여 나오는 초음파 신호의 최대진폭을 각각 나타낸다.

다. 기계적 특성 실험장치 및 실험방법

사과 과육의 기계적 특성을 측정하기 위하여 그림 2에서 보는 바와 같은 실험장치를 이용하였다(Kim, 2000). 실험장치는 크로스헤드를 상하 수직으로 움직이기 위한 AC서보 모터 및 LM가이드와 볼 스크류(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, 1999). 계측된 사과 과육의 힘 - 변형곡선으로부터 시료의 생물체항복강도(bioyield strength), 생물체항복변형량(bioyield deformation), 극한강도(ultimate strength), 파괴변형량(rupture deformation), 탄성계수(secant elastic modulus) 등을 측정하였다(Kim, 2000).

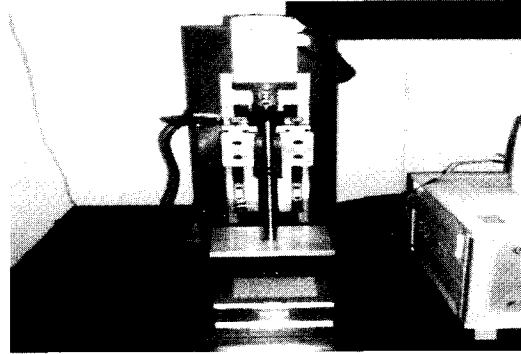


Fig. 2 Compression test apparatus for apple flesh specimen.

3. 결과 및 고찰

가. 저장기간에 따른 사과 과육의 힘 - 변형 곡선

그림 2의 기계적 특성 측정장치로 사과 과육에 대하여 압축시험을 한 결과는 그림 3과 같다. 이 힘 - 변형곡선으로부터 과실의 기계적 특성 즉, 생물체항복변형량, 파괴변형량, 생물체항복강도, 극한강도, 탄성계수 등을 구하였다. 이때 힘 - 변형 곡선으로부터 생물체항복점이 뚜렷하게 나타나지 않는 경우 파괴점의 절반을 생물체항복점으로 하였다. 그림에서 보는바와 같이 저장 초기에는 청과물의 전형적인 힘 - 변형곡선을 나타내고 있으며 저장기간이 길어질수록 생물체 항복강도가 떨어짐과 동시에 변형량은 증가하고 있음을 보여주고 있다. 특히, 저장 후기의 임의시점에서 극한강도와 파괴변형량이 급격하게 변하는 것으로 나타났다.

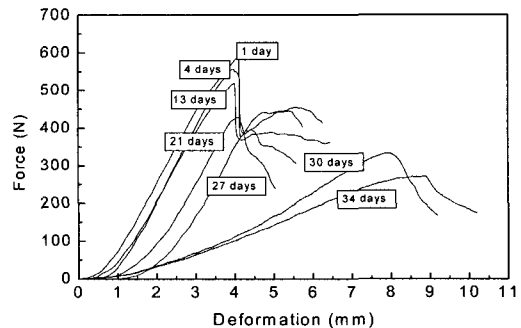


Fig. 3 Force-deformation curve changes of apple fleshes with the storage time (day).

나. 저장기간에 따른 사과 과육의 기계적 특성 및 상관분석

저장기간에 따른 사과 과육의 기계적 특성은 그림 4와 그림 5에 나타낸 바와 같으며 각각의 저장단계에서 과육 시편들에 대한 측정값의 평균과 표준편차를 나타내었다. 시료의 생물체항복강도와 극한강도는 그림 4에서 보는바와 같이 저장기간이 증가함에 따라 완만한 감소 경향을 보이다가 임의 시점에서 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 저장기간에 따른 생물체항복변형량과 극한변형량은 일정기간까지는 그림 4에서 보는바와 같이 거의 변화가 없으나 생물체항복강도와 극한강도가 급격하게 감소하는 시점에서 변형량이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

한편, 저장기간에 따른 사과 과육의 탄성계수는 그림 5에서 보는바와 같이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 조와 황(1998)의 결과와 비교적 일치하고 있으며 이들 연구자들이 지적한 바와 같이 저장기간이 길어짐에 따라 과육 내 세포벽 성분의 수용화에 따른 세포벽 조직의 이완현상으로 파괴점(rupture point)의

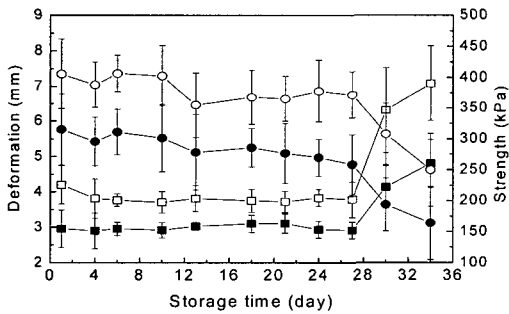


Fig. 4 Variations in bioyield and rupture strengths and bioyield and rupture deformations of the apple flesh with the storage time. Error bars represent  $\pm$  one standard deviation. ■: bioyield deformation, □: rupture deformation, ●: bioyield strength, and ○: ultimate strength.

감소와 변형량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

저장기간과 기계적 특성과의 상관관계를 분석한 결과는 표 1에서 보는바와 같다. 생물체항복강도, 파괴강도, 탄성계수는 저장기간과 강한 상관관계를 나타내었으며 특히 저장기간과 탄성계수사이에는 매우 강한 음의 상관관계를 나타내고 있는데 외국의 유사한 사례와 비교한 결과 Mizrach 등(1997)은 망고의 경도와 저장기간 사이에 결정계수 0.98의 선형관계를 보고한 바 있다.

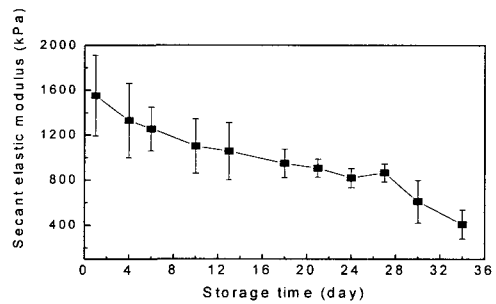


Fig. 5 Variations in secant elastic modulus of apple flesh with the storage time. Error bars represent  $\pm$  one standard deviation.

다. 저장기간에 따른 사과 과육의 초음파 신호특성 분석

(1) 초음파 전달속도와 감쇠계수

저장기간에 따른 초음파 전달속도와 감쇠계수의 변화는 그림 6과 그림 7에서 보는바와 같다. 각 저장단계에서의 평균과 표준편차를 나타내었다. 저장 초기의 초음파 속도는 평균값이 222.35 m/sec, 표준편차가 14.58m/sec 정도이었으며 저장 말기에는 평균값이 175.0m/sec, 표준편차가 14.17m/sec로서 저장기간이 증가함에 따라 초음파 속도는 대체적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 그림 5에서 나타난 바와 같이 저장기간이 증가함에 따라 탄성계수가 감소하게 되고, 탄성계수의 함수인 초음파 전달속도가 감소하기 때문이다.

Table 1 Result of correlation analysis between the storage time and mechanical property of the apple flesh specimen

Item	Mechanical property				
	Bioyield deformation(mm)	Rupture deformation(mm)	Bioyield strength(kPa)	Ultimate strength(kPa)	Elastic modulus (kPa)
Correlation coefficient	0.6814	-0.6222	-0.8711	-0.7976	-0.9703

또한, 그림 6에 나타낸바와 같이 초음파 감쇠계수는 저장후기의 일부 데이터를 제외하고는 저장기간에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 저장기간이 증가함에 따라 사과 과육 내부의 세포벽 붕괴와 세포벽 조직의 이완현상으로 인하여 탄성계수가 감소하게 되고, 이에 따라 사과 과육의 스펀지 현상으로 인하여 시편 내부에서 탄성파 에너지가 많이 흡수되어 감쇠가 크게 발생하는 것으로 사료된다. 특히, 대체적으로 저장기간에 따라 감쇠계수가 증가하다가 임의 시점(28일)에서 감쇠계수가 크게 낮아졌지만 이 시점부터 저장기간에 따라 감쇠계수가 다시 증가하는 현상이 나타났는데 현재 이러한 현상의 원인을 분석하기 위한 보완연구를 수행하고 있는 중이다.

(2) 주파수 특성

사과 과육을 투과하여 수신되는 초음파 신호의 파형에 대하여 주파수 특성을 분석한 결과, 그림 7에서 보는바와 같이 저장기간에 따른 제 1 피크 주파수가 대체적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 저장초기의 주파수는 평균이 15.86 kHz, 표준편차가 3.90 kHz를 나타내는 데 반해 저장말기에는 평균이 7.85 kHz, 표준편차가 1.89 kHz로서 주파수 변화 폭이 비교적 크게 나타났다. 이는 매우 흥미 있는 결과로서 사과 과육 내부를 투과하는 초음파 신호의 주파수와 파장의 관계로부터 설명이 가능할 것으로 사료된다.

일반적으로 초음파와 같은 탄성파가 매질 내에서 전파될 때 매질 내 입자의 운동에 의해 전파하게 되며, 이때 입자와 입자사이의 간격이 전파되는 탄성파의 파장에 영향을 미치게 된다. 즉, 전술한 바와 같이 저장기간이 증가함에 따라 과육 내부의 세포벽 붕괴와 이완현상으로 인하여 탄성파의 전달 매개체인 입자간 간격이 증가함에 따라 상대적으로 파장이 짧고 주파수가 높은 초음파 성분은 길어진 입자와 입자사이에서 산란되거나 감쇠되는 반면, 상대적으로 파장이 길고 주파수가 낮은 초음파만 통과하게 된다. 이러한 주파수 변화특성은 Liljedahl과 Abbott (1994)의 연구결과에서도 살펴볼 수 있는데 이들은 Delicious와 Golden delicious 사과

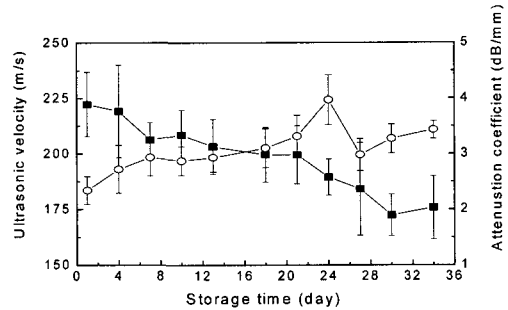


Fig. 6 Variations in ultrasonic velocity and attenuation coefficient of the apple flesh with the storage time. Error bars represent  $\pm$  one standard deviation. ■: ultrasonic velocity, and ○: attenuation coefficient.

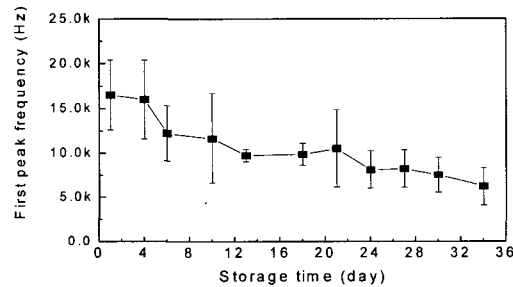


Fig. 7 Variations in first peak frequency of apple flesh with the storage time. Error bars represent  $\pm$  one standard deviation.

품종에 대하여 음파의 공진주파수 변화를 고찰한 결과 속도가 진행될수록 즉, 저장기간이 증가함에 따라 공진 주파수가 감소하는 것으로 보고하였다. 이들은 이러한 이유로써 속도가 진행되는 동안 세포사이의 결합력이 약해지고, 세포벽의 강도가 감소하여 전체적으로 경도와 탄성계수가 감소하기 때문인 것으로 고찰한 바 있다.

(3) 저장기간과 초음파 파라미터와의 관계

사과의 저장기간에 따른 초음파 파라미터의 관계를 정량적으로 나타내기 위하여 표 2에서 보는바와 같이 상관분석을 실시하였다. 초음파 속도, 감쇠계수, 제 1 피크 주파수 모두 상관계수가 0.7 이상으로 저장기간

Table 2 Result of correlation analysis between the storage time and ultrasonic parameters of the apple flesh specimen.

Item	Ultrasonic parameter		
	Ultrasonic velocity (m/sec)	Attenuation coefficient(dB/mm)	First peak frequency (kHz)
Correlation coefficient	-0.9653	0.7429	-0.9338

과 상관관계가 높은 것으로 나타났으며, 특히 초음파 속도는 상관계수 -0.9653의 강한 상관관계를 나타내었다. 이러한 결과는 표 1에서 분석된 바와 같이 저장기간과 탄성계수와와의 관계를 고려함으로써 충분히 설명이 가능할 것으로 판단된다. 반면, 초음파 감쇠계수의 경우 상대적으로 상관관계가 낮은 것으로 분석되었다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 국내 주요 과실인 사과와 감의 경도를 초음파를 이용하여 측정하기 위한 기초연구로 수행되었다. 각 저장단계 별로 각 사과 개체에서 두께 14~22mm, 직경 40mm의 크기를 가지는 2개의 과육 시편을 제작한 다음 0.5MHz의 중심주파수를 가지는 초음파 트랜스듀서, 고출력 초음파 송수신장치를 이용하여 초음파 투과시험을 수행하여 시편을 투과하여 나오는 초음파 신호의 속도, 진폭, 주파수 등과 같은 초음파 파라미터를 분석하였다. 또한 초음파 투과시험이 끝난 과육 시편에 대하여 만능시험기를 이용하여 기계적 특성을 측정하였다.

사과의 저장기간이 증가함에 따라 생물체항복강도, 극한강도, 탄성계수는 감소하는 경향을 나타내었으며 생물체항복변형량, 극한변형량은 증가하였다. 또한 저장기간에 따른 초음파 속도는 저장초기의 222.35m/sec에서 저장말기의 175.0m/sec로 감소하였으며 초음파 감쇠계수는 저장기간에 따라 증가하였다.

주파수 분석결과 저장기간이 증가할수록 즉, 속도가 진행됨에 따라 초음파의 제 1 피크 주파수는 감소하는 것으로 나타났다. 사과의 저장기간과 기계적 특성간의 상관관계를 분석한 결과 탄성계수, 생물체 항복강도, 극한강도가 각각 상관계수 0.7이상의 강한 상관관계를 나타내었다. 또한 사과의 저장기간과 초음파 파라미터 간의 상관관계를 분석한 결과, 초음파 속도, 감쇠계수, 제 1 피크 주파수 모두 상관계수가 0.7이상을 나타내어 사과의 저장기간 혹은 수확 후 속도 변화를 초음파 파라미터를 이용하여 예측이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구는 사과의 시편을 제작하여 초음파 투과시험을 수행하였으므로 추후 시편이 아닌 완전 과실에 대하여 초음파를 이용한 비파괴적인 측정방법이 개발되어야 할 것으로 생각된다. 이를 위해서는 사과 전체 시료를 투과할 수 있는 초음파 트랜스듀서가 우선적으로 개발되어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. ASAE. 1999. ASAE Standards. S368.3 MAR99.

2. Cho, Y. J. and J. K. Hwang. 1998. Physicochemical factors for evaluating freshness of apple and tomato. *J of the KSAM* 23(5): 473-480.

3. Jhang, K. Y., M. S. Kim and H. K. Cho. 1998. An experiment study on the propagation characteristics of ultrasonic wave in watermelon. *J. of the KSAM* 23(6): 615-620.

4. Kim, M. S. 2000. Mechanical properties of the apple flesh according to the specimen size. *Agricultural & Biosystem Engineering* 1(1): 43-48.

5. 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.*

6. Kim, K. B., M. S. Kim, H. M. Jung and B. Ahn. 2002. Prediction model for mechanical property of fruit using ultrasonic parameters. *Proceedings of the KSNT Autumn Conference* 57-62.

7. Kim, K. B., B. Ahn, H. M. Jung and M. S. Kim. 2002. A basic study on measurement of ultrasonic parameters of fruits. *Proceedings of the KSAM 2002 Summer Conference* 7(2): 382-387.

8. Kim, M. S., L. Seo, K. B. Kim, and H. M. Jung. 2002. Measurement of firmness in apples using ultrasonic techniques (II) - Development of the prediction model for apparent elastic modulus and bioyield strength of the apples-. *Proceedings of the KSAM 2002 Winter Conference* 7(1): 471-478.

9. Liljedahl, L. A., and J. A. Abbott. 1994. Changes in sonic resonance of 'Delicious' and 'Golden Delicious' apples undergoing accelerated ripening. *Trans. of the ASAE* 37(3): 907-912.

10. Mizrach, A., N. Galili and G. Rosenhouse. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. *Trans. of the ASAE* 32(6): 2053-2058.

11. Mizrach, A., U. Flitsanov and Y. Fuchs. 1997. An ultrasonic nondestructive method for measuring maturity of mango fruit. *Trans. of the ASAE* 40(4): 1107-1111.

12. Sarkar, N. and R. R. Wolfe. 1983. Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. *Trans. of the ASAE* 26(2):624-629.

13. Thurston, R. N. 1990. *Ultrasonic Measurement Methods. Physical Acoustics Vol. XIX, Academic Press, Inc.*