

과실의 초음파 파라미터 측정을 위한 기초연구

A Basic Study on Measurement of Ultrasonic Parameters of Fruits

김기복*	안봉영*	정현모**	김만수**
정회원		정회원	정회원
K. B. Kim	B. Ahn	H. M. Chung	M. S. Kim

1. 서론

생활 패턴의 변화와 소득수준이 향상됨에 따라 과실류에 대한 소비자의 기호 성향은 고급화 및 신선도를 추구하는 경향이 증가하고 있으며 따라서 과실의 비파괴 품질판정기술의 개발이 요구되고 있다. 과실에 대한 여러 외부품질 인자중 과실의 경도는 일차적으로 기계적 특성으로 이해되어 가공기계의 설계 시 이송장치 등과 같이 과실과 직접 접촉하는 부분들에 대한 세부적인 설계에 필요한 기초 물성일 뿐만 아니라 포장재 등을 설계하는 필요한 중요한 인자로 사용되고 있다. 또한 경도는 저장 및 유통과정 중에 발생하는 부패 등에도 관련하여 이미 외국에서는 많은 연구가 진행 중에 있으며 특히 속도 등과 같은 품질변화와 관계가 있는 것으로 보고되고 있을 뿐만 아니라 소비자의 구매행위시 가장 중요시하는 선택 기준 중의 하나이며 과실의 장기 저장성을 결정하는 주요한 품질 인자라고 할 수 있다.

이러한 경도의 측정방법은 과실 개체의 UTM에 의한 압축실험을 통해 강도를 측정하는 것이 일반적이나 이 방법은 시간이 소요되고 측정 개체가 파괴되는 문제 때문에 전수조사가 필요한 생산 현장 및 가공공장에서는 이러한 방법을 사용할 수 없는 것이 문제이다. 과실의 경도 판정을 위한 초음파 기술의 장점은 비교적 간단하게 측정 시스템을 구성할 수 있으며 검사 대상체 및 검사자에 대한 위험 요소가 전혀 없다는 점 외에도 초음파의 검출 결과를 실시간으로 알 수 있기 때문에 자동화가 용이하다는 점을 들 수 있다.

또한, 초음파는 전파 매질의 구조, 조성, 기계적 특성 등에 민감하기 때문에 다른 비파괴 측정 방법으로 측정이 어려운 내부조직의 물성(탄성계수, 점성특성, 생물체 항복강도 등)에 대한 정보를 제공할 수 있다. 현재 농축산 분야에서 초음파 기술은 주로 축산물의 육질 평가에 응용되고 있으며, 과실에 대한 적용은 기초 연구단계에 머물러 있는 실정이다. 이것은 육류의 경우 육질의 구조와 음향임피던스가 인체와 비슷하기 때문에 기존의 의료 진단용 초음파 기술을 그대로 적용할 수 있기 때문에 그 응용이 비교적 쉽지만 과실의 경우 크기와 모양이 다양할 뿐만 아니라 내부의 씨방, 파피, 조직의 불 균일성 등으로 초음파 기술을 적용하는데 많은 어려움이 있다. 여러 연구자들에 의해 음파 및 초음파를 이용한 농산물의 품질 측정 연구 결과가 발표되어 왔다 [Robinson, 1976, Yamamoto 등, 1980, Sarkar와 Wolfe, 1983, Mizrach 등, 1989].

* 한국표준과학연구원 산업측정표준부 비파괴계측그룹

** 충남대학교 농업기계공학과

+ 본 연구는 2001년도 농림부 농림기술관리센터의 첨단기술개발과제의 지원으로 수행되었음.

초음파가 전파하는 매질에서의 초음파 파라미터는 파의 전달속도와 감쇠계수를 의미한다. 임의의 매질에 대한 초음파 속도와 감쇠계수를 측정함으로써 종탄성계수, 전단탄성계수, 밀도, 포와송비 등과 같은 기계적 성질을 알 수 있다. 이러한 초음파 파라미터의 측정 방법은 크게 초음파 펄스 반사법, 투과법, 공진법으로 나누어지는데 초음파 펄스 반사법이 투과법보다 정확도가 높은 방법이다[Thurston, 1990]. 농산물의 경우 내부에서 탄성파가 진행할 때 감쇠가 매우 크기 때문에 펄스 반사법 보다 투과법을 적용한 연구가 대부분이다[Abbot 등, 1968a, Finney와 Norris, 1968b, Garret와 Furry, 1972, Mizrach 등, 1989]. 초음파 주파수도 대부분 수 백 kHz 정도로서 고주파로 갈수록 초음파의 감쇠가 매우 크기 때문에 효과적인 초음파의 전달이 어렵게 된다.

투과법을 이용한 기존의 과실에 대한 초음파 실험장치로서는 대체적으로 초기 인가전압이 매우 큰 저주파의 단 펄스를 인가하는 콘크리트 탐상용 장치를 많이 사용하여 왔다. 이러한 장치의 문제점으로서, 주파수가 낮은 피크 값이 큰 단 펄스를 인가하기 때문에 감쇠가 크게 발생하는 매질 내에서 초음파 에너지가 충분히 전달되지 못하며 주파수가 낮기 때문에 (약 50 kHz 전후) 파장이 길어져 상대적으로 길이가 짧은 과실 시편의 초음파 속도를 측정하기 위해서는 별도의 delay line이 필요하게 되며 이러한 점이 초음파 속도 측정오차의 원인 된다. 초음파의 도달시간과 시편의 두께로부터 초음파 속도를 구할 수 있는데 일반적으로 도달시간은 μ second 단위로 측정되기 때문에 측정값의 오차가 초음파 속도에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 또한, 시편을 투과하여 전파되는 초음파의 도달시간(전파시간)만이 단순 측정되기 때문에 매질 내 여러 가지 기계적 특성에 따른 초음파의 파형 변화 및 주파수 특성을 분석할 수 없다는 단점이 있다. 그 외, 초음파 트랜스듀서의 직경이 과실보다 매우 크기 때문에 과실과 접촉하지 못한 부분에서는 초음파가 과실을 투과하지 않고 공기 중으로 바로 수신 트랜스듀서에 전달되기 때문에 정확한 초음파의 전파시간을 측정할 수 없게 된다.

따라서, 본 연구에서는 투과법을 이용한 초음파 실험에서 측정값의 정확도에 영향을 미칠 수 있는 delay line을 사용하지 않으면서 고주파수의 초음파 트랜스듀서의 적용이 가능한 초음파 측정장치를 구성한 다음 과실 시편에서의 초음파 전파속도와 감쇠계수와 같은 초음파 파라미터를 측정 및 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

과실의 초음파 파라미터를 측정하기 위한 실험장치는 그림 1 및 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 사용하였으며 진폭이 3 V인 1 MHz의 펄스를 0.5 kHz의 repetition rate로 송신 초음파 트랜스듀서에 인가하였다. 사용된 초음파 트랜스듀서는 송신자의 경우 중심주파수는 1 MHz, 직경 32 mm인 접촉식 초음파 트랜스듀서(Krautkramer사, 독일)이며 수신 초음파 트랜스듀서는 중심주파수가 0.5 MHz, 직경 20 mm인 접촉식 초음파 트랜스듀서(Panametrics, 미국)를 사용하였다. 시편과 초음파 트랜스듀서 사이의 음향임피던스 정합을 위하여 커플런트를 도포하였다. 시편을 투과하여 수신된 초음파는 1 GHz의 sampling rate를 가지는 오실로스코프(LeCroy)에서 display 된 다음 데이터 분석용 컴퓨터에 저장된다.

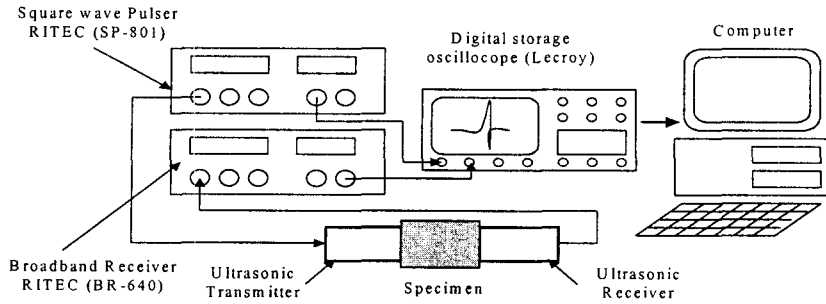


Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic measurement system.

2.2 공시재료 및 실험방법

실험에 사용된 시료는 저장된 부사로서 시중에서 구입하였다. 균일한 실린더 형상의 사과 시편을 만들기 위하여 직경 40 mm의 샘플 채취기를 이용하였다. 사과의 씨방 부분과 과피를 제외한 과육에 대하여 8~26mm의 두께로 시편을 제작하였다. 여기서, 시편 직경은 초음파 트랜스듀서의 직경(32 mm) 보다 충분히 크기 때문에 초음파가 시편의 표면 혹은 공기 층으로 전파하는 것을 방지할 수 있다. 초음파 투과실험이 끝난 시편은 UTM(김 등, 2002)을 이용하여 bioyield point(BP), bioyield deformation(BD), bioyield strength(BS), rupture point(RP), rupture deformation(RD), rupture strength(RS), apparent modulus elasticity(AME 생물체항복점(bioyield point, BP) 등과 같은 기계적 특성 값들을 측정하였다.

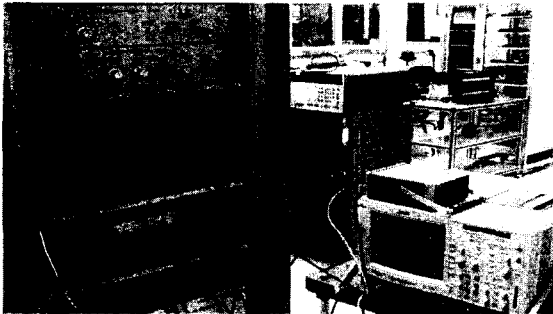


Fig. 2. High power ultrasonic pulser/ receiver and digital storage oscilloscope.

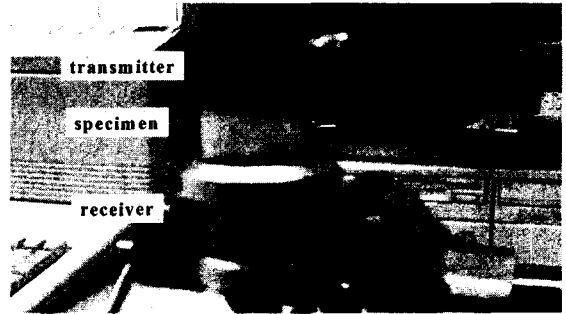


Fig. 3. Specimen, ultrasonic transmitter and receiver.

3. 결과 및 고찰

3.1 과실의 기계적 특성

UTM을 이용하여 사과 시편에 준 정적 압축하중을 가하여 얻은 힘-변형곡선으로부터 과실의 기계적 특성을 측정하였다. 두께가 서로 다른 18개 시편에 대하여 측정한 각각의 기계적 특성 값들에 대한 평균값을 구한 결과는 표 1에서 보는바와 같다. 본 연구에서는 저장상태가 동일한 시료 군에 대하여 측정한 결과로서 추후 저장기간을 다르게 하면서 초음파 파라미터와 기계적 특성들간의 상관관계를 분석할 예정이다.

Table 1. Mechanical properties of the apple specimen.

BP (N)	BD (mm)	BS (kPa)	RP (N)	RD (mm)	RS (kPa)	AME (kPa)
187.8	1.71	141.80	329.20	3.21	261.97	1770.68

Note : BP=bioyield point, BD=bioyield deformation, BS=bioyield strength, RP=rupture point, RD=rupture deformation, RS=rupture strength, AME=apparent modulus elasticity

3.2 시료 두께에 따른 수신 초음파의 파형 분석

동일한 개체의 사과에서 얻어진 두께가 서로 다른 2개의 시편에 대한 투과된 초음파 신호를 비교하였다. 일반적으로 시편의 두께가 증가할수록 초음파 감쇠가 증가하기 때문에 본 연구에서의 시편에서도 시편의 두께가 증가함에 따라 수신 신호의 피크 값이 감소할 것으로 예상되었으나 그림 4에서 보는바와 같이 대체적으로 3가지 유형의 파형 변화를 나타내었다. 그림 4(a)는 두께가 증가함에 따라 피크가 감소하는 경우, 그림 4(b)는 두께가 증가함에 따라 피크가 오히려 증가하는 경우, 그림 4(c)는 피크 값의 변화가 거의 없는 경우를 각각 나타낸다. 이러한 결과는 사과의 조직의 비선형 거동 특성 즉, 사과의 과육 조성이 heterogeneous함과 동시에 비등방성 특성을 나타내는 것으로서 초음파 전파 실험시 단순한 피크 값의 크기 검출만으로는 사과 내부의 조직 등과 같은 비선형 거동을 설명하기가 매우 곤란할 것으로 사료된다.

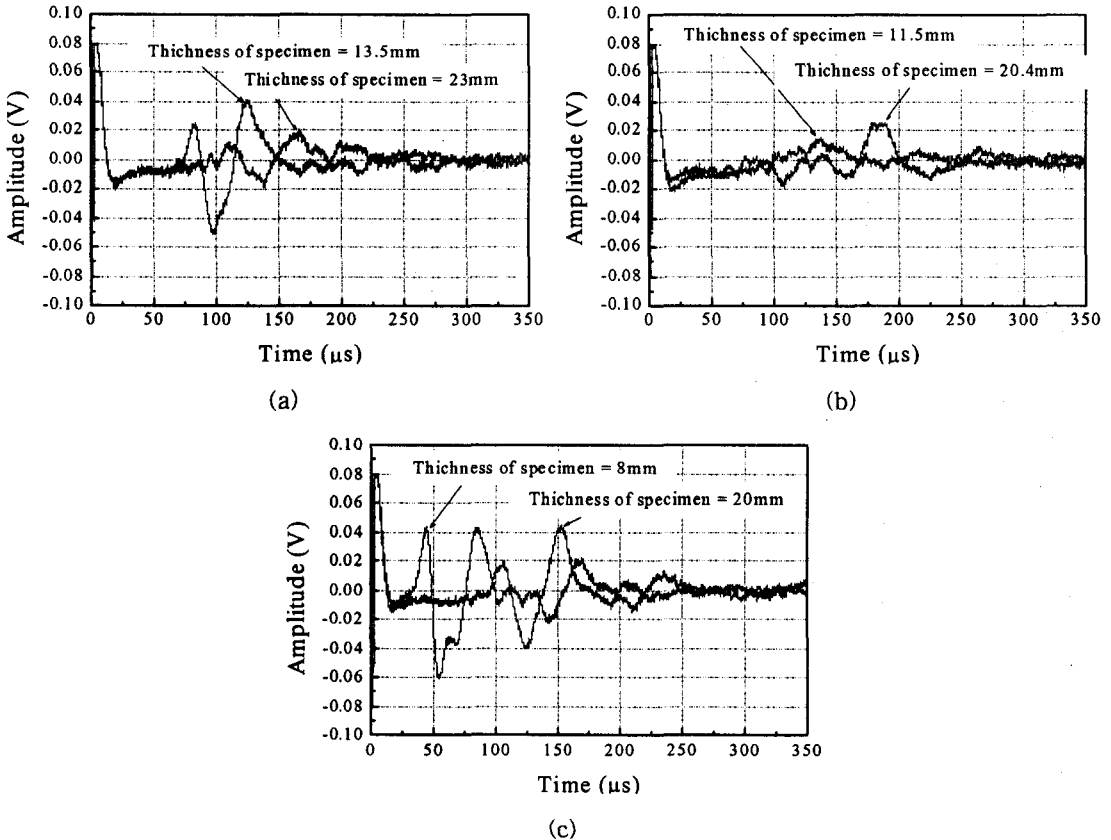


Fig. 4. Changes of waveform of transmitted ultrasonic signals through the specimens due to its thickness.(a): case I, (b): case II and (c): case III.

3.3 시편 두께에 따른 초음파 도달시간 및 감쇠특성

시편 두께가 일정할 경우 수신용 초음파 트랜스듀서에 도달되는 초음파의 시간을 측정함으로써 매질에서의 초음파 속도를 알 수 있다. 또한 송신용 초음파 트랜스듀서에 인가되는 메인 방의 피크 값과 수신되는 신호의 피크 값의 비를 이용하여 시편에서의 감쇠계수를 얻을 수 있다. 한편, 초음파 투과법을 이용한 도달시간 측정은 초음파 측정장치의 특성 즉, receiver의 감도 및 증폭비, trigger level 등과 같은 장치의 특성에 크게 좌우되며 이에 따라 계산되는 초음파 속도에 크게 영향을 끼치게 된다[Thurston, 1990]. 따라서 본 연구에서는 초음파의 도달시간과 시편의 두께를 이용하여 초음파 속도를 계산하는 것보다는 시편 두께의 증가에 따른 도달시간과 피크 값이 나타날 때의 시간을 고찰하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 시편의 두께가 증가함에 따라 도달시간 및 피크 값에서의 시간은 거의 선형적으로 증가하였으며 시편 두께에 따른 초음파의 감쇠 경향도 그림 6에서 보는바와 같이 거의 직선적으로 감소하였다.

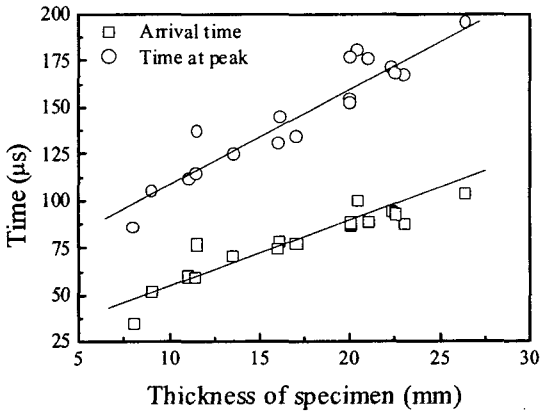


Fig. 5. Arrival time and time at peak amplitude versus the thickness of apple specimen.

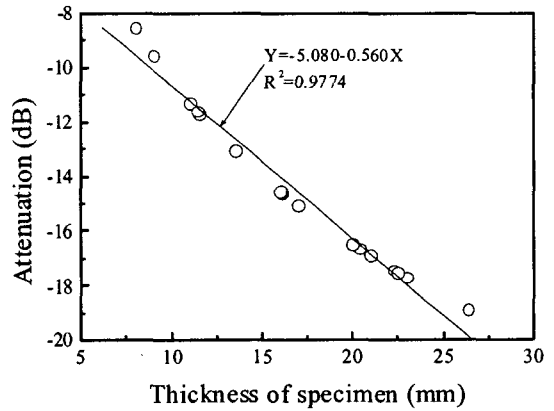


Fig. 6. Relationship between attenuation and the thickness of apple specimen.

3.4 수신 초음파의 주파수 특성 고찰

시편을 투과하여 수신되는 초음파의 주파수 특성을 고찰하기 위하여 FFT 분석을 실시하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 본 연구에서 사용된 사과 시편에 대한 주파수 특성은 12~25 kHz인 것으로 나타났다. 본 연구에서, 송신 초음파 트랜스듀서에 인가하는 주파수가 1 MHz이며 이러한 신호가 사과 시편을 전파하여 투과될 때 고주파 성분이 모두 소멸되고 수십 kHz 정도의 저주파 신호가 주로 전달되는 것으로 분석되었다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 사과 시편의 초음파 공진 주파수의 범위는 약 20 kHz 전후 인 것으로 사료된다.

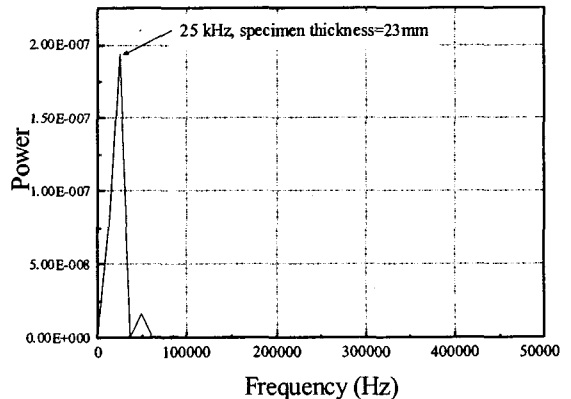


Fig. 7. Frequency spectrum of transmitted ultrasonic signal through the apple specimen.

4. 요약 및 결론

본 연구는 초음파 투과법으로 과실의 초음파 파라미터를 측정하기 위한 기초연구로 수행되었다. 고풍력 펄서/리시버, 1 MHz의 고주파용 초음파 트랜스듀서를 이용하여 시편을 투과하여 수신되는 초음파의 도달시간, 감쇠, 주파수 특성을 고찰하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 제안된 고풍력 펄서/리시버 초음파 측정 시스템은 tone-burst 파를 이용하므로 출력이 큰 초음파 신호를 연속적으로 시편을 투과시킬 수 있으며 별도의 delay line이 필요 없이 과실에 대한 초음파 측정 실험이 가능하였다. 또한 본 연구에서는 1 MHz의 고주파수 초음파 신호를 시편에 인가함으로써 추후 과실의 종류에 따른 주파수 특성의 고찰이 가능할 것으로 기대된다.
2. 과실 시편을 투과하여 수신되는 초음파를 분석한 결과 시편의 두께가 증가할 경우 초음파의 도달시간은 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었으며 파의 감쇠는 선형적으로 감소하였다.
3. 동일한 사과에서 시편의 두께를 서로 다르게 하여 측정한 결과 시편의 두께가 증가하더라도 수신되는 신호의 파형과 크기는 일정한 경향을 나타내지 않아 사과 시편의 조성과 불 균일성에 의한 비선형 거동을 나타내는 것으로 분석되었다.
4. 보다 정확한 과실에 대한 초음파 속도를 측정하기 위해서는 본 연구에서 제안된 고풍력 펄서/리시버를 활용한 펄스 반사법을 적용해야 할 것으로 사료되며 추후 보완 연구를 수행할 예정이다.

5. 참고문헌

1. Abbot, J. A., N. F. Childers, G. S. Bachman, J. V. Fitzgerald and F. J. Matusik. 1968a. Acoustic vibration for detecting texture quality of apples. Proc. of Amer. Soc. Hort. Sci. 93: 725.
2. Finney, E. E. and K. H. Norris. 1968b. Instrumentation for investigating dynamic mechanical property of fruits and vegetables. Trans. of the ASAE 11(2): 94-97.
3. Garrett, R. E. and R. B. Furry. 1972. Velocity of sonic pulses in apples. Trans. of the ASAE 32(3): 953-957.
4. Robinson, B. E. 1976. An evaluation of acoustical decay time as a measure of watermelon maturity. M.S. thesis, University of Georgia, Athens.
5. Yamamoto, H., M. Iwamoto and S. Haginuma. 1980. Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluations of apples and watermelons. J. Texture Stud. 11:117-136.
6. Sarkar, N, and R. R. Wolfe. 1983. Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. Trans. of the ASAE 26(2): 624-629.
7. Mizrach, A, N. Galili, and G. Rosenhouse. 1989. Determination of vegetable properties by ultrasonic excitation. Trans. of the ASAE 32(6): 2053-2958.
8. Thurston, R. N. 1990. Ultrasonic Measurement Methods. Physical Acoustics Vol.XIX, Academic Press, Inc.
9. 김만수, 서륜, 김기복, 정현모. 2002. 초음파를 이용한 사과의 경도측정(II)-사과의 탄성계수 및 생물체 항복강도 예측모델 개발-. 한국농업기계학회지 2002년 동계학술대회 논문집. 7(1): 471-478.