

초음파 기술을 이용한 과실의 생물체 항복강도 측정 시스템 개발 Development of measurement system for bioyield strength of fruit using ultrasonic technology

김만수* 김기복** 정현모*** 김기석* 박정길* 이상대* 박성운*
정희원 정희원 정희원 정희원 정희원 정희원 정희원
M. S. Kim K. B. Kim H. M. Jung G. S. Kim J. G. Park S. D. Lee S. W. Park

1. 서론

현재 과실 품질의 비파괴 평가기술에는 근적외선과 같은 광기술이 주로 사용되어 왔었지만 탄성파를 이용한 초음파 기술이 개발됨에 따라 이 분야에서도 과실에 대한 비파괴 평가 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 사과, 배, 복숭아 등과 같은 과실에 대한 초음파를 이용한 물성 측정기술이 축적된다면 앞으로 여러 가지 과실류 및 농산물에 대한 경도를 비롯한 속도, 신선도와 같은 내부품질 판정에 관한 기술들이 개발될 수 있을 것이다.

초음파 기술을 이용한 과실 물성측정 시스템 개발의 핵심이 되는 과실의 기계적 특성 측정 장치, 과실의 기계적 특성, 초음파 파라미터를 이용한 물성측정 모델, 초음파 신호처리 기술, 과실 전용 초음파 트랜스듀서, 물성측정 시스템 구동 알고리즘 기술 등은 다른 농산물의 품질측정기술 개발에 활용될 수 있을 것이다. 또한 본 연구를 통하여 개발된 기술들은 현재까지 선진외국보다 앞서가는 기술로서 국제적인 경쟁력을 지니도록 연구역량을 집중하여 배양함으로써 국내의 농업공학기술을 한 단계 더 발전시키는 계기가 될 것이다.

본 연구에서는 초음파를 이용하여 과실의 생물체 항복강도를 측정할 수 있는 시스템을 개발하기 위한 연구로서 본 연구에 앞서 선행되었던 연구를 토대로 하여 과실의 생물체항복강도를 측정할 수 있는 시스템을 개발하고 평가하기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

초음파를 이용하여 과실의 물성을 측정하기 위한 시스템의 외형도는 그림 1과 같으며 내부 구성도는 그림 2와 같다. 초음파 발생장치로는 영국 CNS FARNELL사의 PUNDIT를 시스템 내부에 장착하여 사용하였다. PUNDIT는 다양한 주파수대의 초음파 트랜스듀서와 사용가능하고 측정대상을 통과하는 초음파펄스의 시간을 측정함으로써 측정대상에 대한 비파괴 검사 즉, 크랙이나 기공과 같은 존재의 유무를 검사하는데 널리 이용되고 있는 제품으로서 그 제원은 표 1과 같다.

* 충남대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 생물산업기계 전공

** 한국표준과학연구원 환경안전계측센터

*** 경북과학대학 포장학과

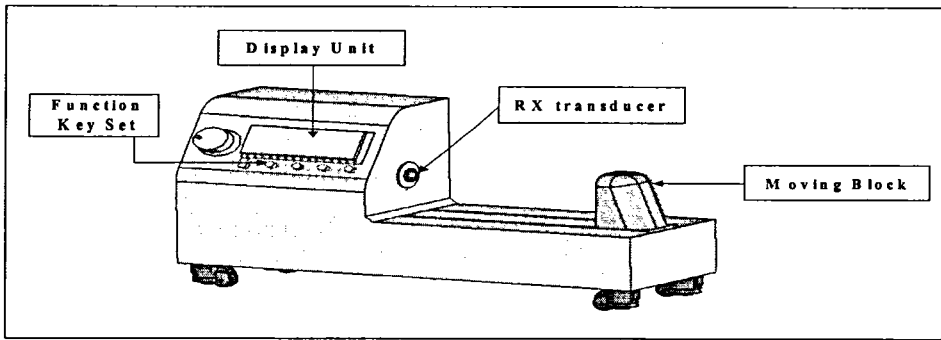


Fig. 1. General view of the measurement system for mechanical property of fruit.

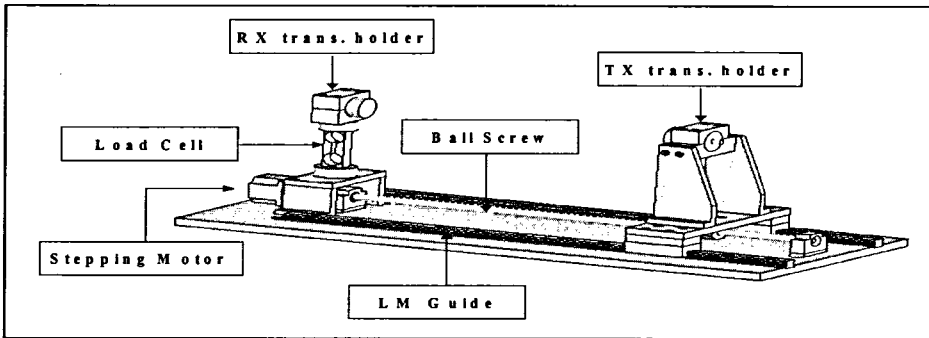


Fig. 2. Main measuring and moving parts of the measurement system for mechanical property of fruit.

Table 1. Specification of the ultrasonic pulser

TRANSIT TIME MEASUREMENT	
Range(μ s)	0.1 ~ 9999
Resolution(μ s)	0.1
TRANSMITTER	
Energising Pulse	Nominal 1.2 kV or 500 V 1.5 μ s switch selected
OUTPUT	
Analogue Pulse	Pulse width equal to transmit time available from BNC socket on rear panel.
POWER SUPPLY	
Battery	Internal rechargeable Ni-Cd battery.
Mains	105/125, 210/250 V ac 50/60 Hz
ENVIRONMENTAL	
Dimensions	186 × 130 × 186 mm
Weight	3 kg

과실용 초음파 트랜스듀서는 본 연구에서 개발한 100 kHz PZT 센서를 사용하였다. 트랜스듀서에 사용된 압전재료는 세라믹 계열의 압전재료(PZT계열)를 선정하였으며 100 kHz의 공진 주파수를 가지도록 지름 40 mm, 두께 20 mm로 선정하였고, 측정대상인 과실에 최적

의 조건을 갖기 위해 서로 다른 압전특성을 가지는 재료를 선정 및 실험하여 최적의 센서를 개발한 것이다. 과실과 송수신용 초음파 트랜스듀서간의 자동계측을 위한 moving block은 AC servo motor와 직결되어 구동되는 볼 스크류에 의해 위치가 제어될 수 있도록 설계되어 시스템 내부에 장착한 컨트롤러에 의해 위치가 자동 제어되며, 측정하고자 하는 과실의 크기에 상관없이 트랜스듀서의 적용이 가능하고 moving block의 상단에는 TX 트랜스듀서가 장착되도록 설계되어있다. 시스템에 적용한 제원은 아래의 표 2와 같다.

Table 2. Specification of driving part of moving block

Servo Motor	
Capacity(W)	100
Power Supply Voltage	200VAC
Serial Encoder	13-bit incremental type
Design Revision Order	Standard
Shaft end Specifications	Straight, no key
Brake, Oil Seal Specifications	No brake, no oil seal
Servodriver	
Usage Temperature	0 ℃ ~ 55 ℃
Speed Control Range	1 : 5000
Repeatability	±2 %
Reference Input Voltage	±6 VDC
Position Control Bias Setting	0 ~ 450 r/min.
Reference Input Pulse	Line driver type(+5 V)
Position Signal Output	Phase A, Phase B, Phase C(Line driver)
Communication Interface	RS-422 A port for PC

과실의 초음파 투과실험 시 투과되는 초음파는 트랜스듀서와 과실간의 접촉정도, 즉 압력 또는 힘에 따라 초음파 투과정도가 달라질 수 있으며 이는 투과신호의 정보에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 실험 시 각각의 샘플에 작용되는 접촉 힘 또는 압력은 일정한 것이어야 한다. 과실에 주어지는 접촉 힘 또는 압력이 다르면 각각의 경우의 출력신호도 달라지기 때문에 이 시스템에서는 그림 3과 같이 RX(signal received) transducer holding unit의 아랫부분에 load cell을 설치하여 과실과 접촉되는 트랜스듀서간의 접촉 힘을 계측할 수 있도록 설계하여 과실에 무리한 접촉힘이 가해지는 것을 방지하는 한편 과실과 초음파센서 간에 일정한 접촉압력이 작용되도록 하였으며 load cell에서 출력되는 임의의 전압값은 PUNDIT 초음파발생 신호의 트리거 신호로서 사용되도록 설계하였다. 뿐만 아니라 서보모터에 설치된 엔코더를 이용하여 송수신용 초음파 트랜스듀서의 이동거리를 계측하여 과실의 두께를 측정할 수 있도록 고안하였다. 또한, 과실을 투과한 초음파신호는 터미널 블록과 NI5052(NI inc., USA)통해 수신된 후 컴퓨터 시스템을 통해 데이터획득 및 신호처리작업을 수행할 수 있도록 구성하였다. 표 3은 NI5052의 제원을 나타낸다.

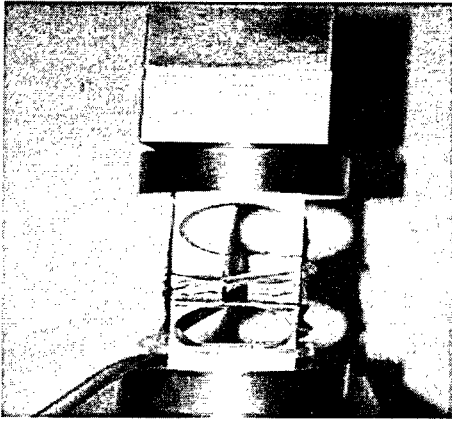


Fig. 3. Load cell mounted on the RX transducer.

Table 3. Specification of NI5052 digitizer

ACQUISITION SYSTEM	
Resolution	8 bits
Bandwidth	15 MHz
Number of channels	2
Maximum sample rate	1 GHz repetitive, 20 MS/s single shot
Onboard sample memory	663,000 samples
Max waveform buffer	663,000 samples
vertical ranges	± 50 mV to ± 5 V
TIMEBASE SYSTEM	
sample rate range	20 MS/s to 1kS/s with 20,000 intermediate rate
Interpolator resolution	1 ns
Frequency	≤ 20 MHz with a 50% duty cycle

3. 결과 및 고찰

3.1 시스템 제어용 소프트웨어 개발

초음파 물성측정 장치를 현장에 적용하기 위해서는 시스템내부의 모든 주변장치는 최대한 간단하게 구동 및 제어되어야 한다. 본 장치에서는 Electric Control Unit를 장치에서 탈부착이 가능하도록 설계, 제작하여 장치의 하드웨어적인 구동 및 제어기능을 구현하도록 하였으며 향후 유지보수 문제에 쉽게 대응할 수 있도록 설계, 제작하였다. ECU는 자동운전모드와 수동운전모드의 두 가지 방식으로 구동될 수 있으며 이 두 가지 운전모드에 대한 장치제어용 프로그램을 개발하여 ECU내의 CPU board내의 메모리에 기록하였다. 자동운전모드에서는 ECU전면의 Auto키를 누르는 동시에 모든 기능이 순차적으로 작동되게 하였다.

시스템에서는 시료두께를 자동으로 측정할 수 있고 서보모터를 이용하여 트랜스듀서의 전진과 후진운전을 구현하였으며, 과실과 transducer사이에 작용되는 접촉 힘을 자동으로 조절 및 제어할 수 있도록 프로그램 하였고, PUNDIT의 출력신호를 자동 또는 수동으로 조작할 수 있도록 하여 다양한 과실에 대한 적용이 가능하도록 제어용 프로그램을 개발하였다. 과실을 투과한 초음파 투과신호의 data acquisition을 위해 National Instrument 사의 터미널 블록과 DAQ Card(NI 6062E)를 이용하였으며 portable 컴퓨터로 전송되는 초음파 투과신호를 텍스트파일로 저장하기 위해서 National Instrument사의 Labview 6.1 프로그램을 기반으로 하는 data acquisition 프로그램을 개발하였다.

3.2 과실의 초음파 물성 측정 및 해석용 소프트웨어 개발

PUNDIT를 통해 출력되는 과실의 초음파 물성신호를 계측한 후 wavelet처리, FFT와 spectral density값을 계산하는 신호처리과정을 수행하였으며 과실을 투과한 초음파 출력신호와 과실경도 간의 상관관계를 통해 얻어진 다중회귀식을 이용하여 과실경도 값을 구할 수 있도록 Matlab(ver. 6.5)를 이용하여 프로그램 하였으며 아울러 사용자 인터페이스와 분석알

고리즘을 구현하였다. 그림 4는 과실의 경도를 분석하는 프로그램의 GUI 메인화면이며 그림 5는 과실의 경도분석 프로그램의 flowchart이다.

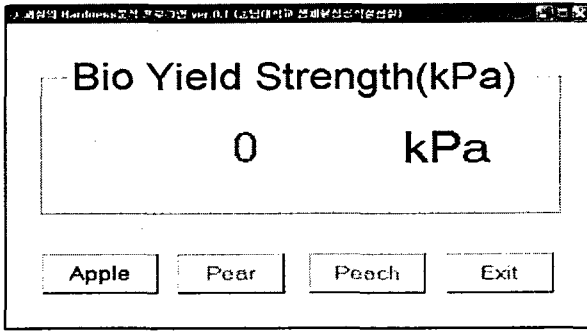


Fig. 4. Graphic user interface of program (ver.0.1) for analyzing the hardness of fruit.

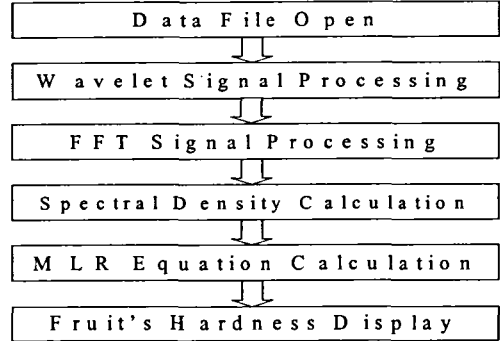


Fig. 5. Flowchart of program (ver.0.1) for analyzing the hardness of fruit.

측정과실의 내부를 투과한 초음파신호의 특성을 구명하고자 시간-주파수 분석방법을 활용하였으며 이러한 시도는 다양한 분야에서 매우 유용한 신호처리기법으로 이미 알려져 있는 Wavelet 변환과 STFT(Short Time Fourier Transform)방법을 본 시스템의 해석용 프로그램에 동시에 적용하였다. STFT기법을 적용한 시료 투과파의 분석에서는 시료를 투과한 주파수 성분과 공중을 통해 전달된 성분이 뚜렷이 구별되는 주파수 천이현상을 확인할 수 있었고, 과실을 통과한 초음파 성분을 명확히 구별할 수 있었다. Wavelet 변환의 경우에는 기저 Wavelet과 자체변환 특성상 관심 주파수성분 외에 주변 성분들과도 높은 상관성을 보이므로 주파수 천이와 같은 현상이 다소 복잡한 모습을 보이기 때문에 과실시료의 투과파 분석에는 STFT 기법이 보다 유리한 시간-주파수 분석법이라는 결론에 도달하였고, 이를 기초로 신호분석 알고리즘을 개발하였다.

3.3 초음파 파라미터와 생물체 항복강도와의 상관성 검증

사과의 생물체 항복강도를 추정하기 위한 초음파 파라미터들로는 상관계수가 비교적 높았던(약 0.5이상) 최대진폭, 감쇠계수(최대진폭) 최대·최소진폭의 차, spectrum density 등 13개의 파라미터를 들 수 있다. 어떤 모형이든 간에 적용 변수가 적으면서도 정확히 추정할 수 있는 모형이 좋은 모형이므로 여기서는 13개중 상관계수가 비교적 높았던 8개의 파라미터로 모형을 개발하여 보았다. 8개의 초음파 파라미터를 변수로 하는 사과의 생물체 항복강도를 추정하였던 결과 얻어진 다중선형 회귀식을 표 4에 나타내었으며 예측결과를 그림 6에 도시하였다.

Table 4. Multiple linear regression equation for bioyield strength of the apple as a function of ultrasonic parameters.

	BS = a×A1+b×A2+c×A3+d×A4+e×A5+f×A6+g×A7+h×A8+i									R ²
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	
Coefficient	338.0096	0.72265	-1.4495	5.6004	-4.8574	10.0684	-87.3583	-345.5222	88.4342	0.9986

* NOTE : BS = Bioyield Strength (kPa), A1 = Max. amplitude(V), A2 = Spectrum density(AA11, 1000 Hz), A3 = Spectrum density(AA11, 2000 Hz), A4 = Spectrum density(AA11, 3000 Hz), A5 = Spectrum density(DD10, 6000 Hz), A6 = Spectrum density(DD10, 9000 Hz), A7 = Spectrum density(DD10, 12000 Hz), A8 = Spectrum density(DD10, 15000 Hz)

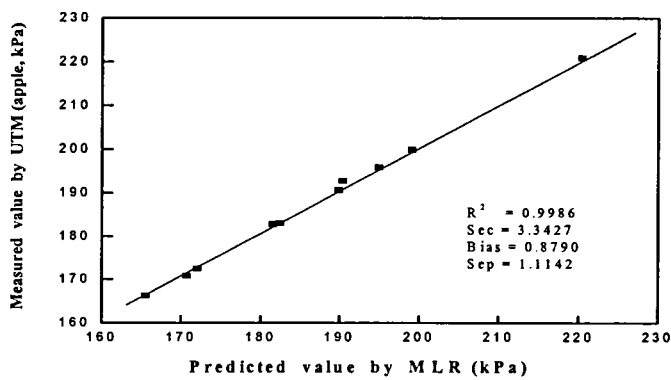


Fig. 6. Prediction of the bioyield strength for apple by multiple linear regression.

3.4 초음파 물성측정 장치의 작동

초음파 물성측정 장치의 data acquisition 작동 모습은 그림 7과 같으며, 그림 8은 과실의 생물체 항복강도분석 프로그램의 출력화면을 보여주고 있다.

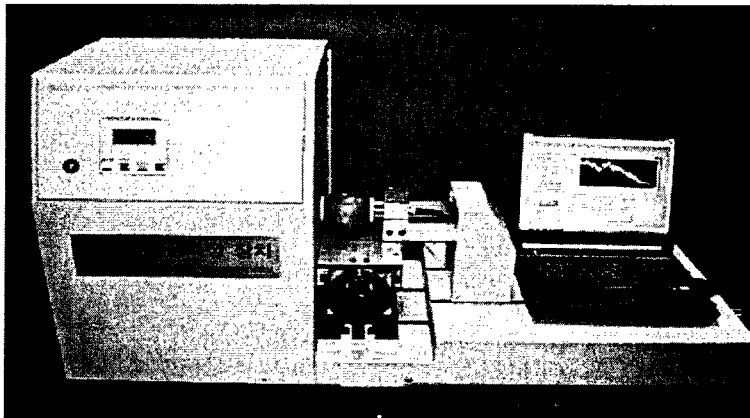


Fig. 7. Performing data acquisition of measurement system for bioyield strength of fruit.

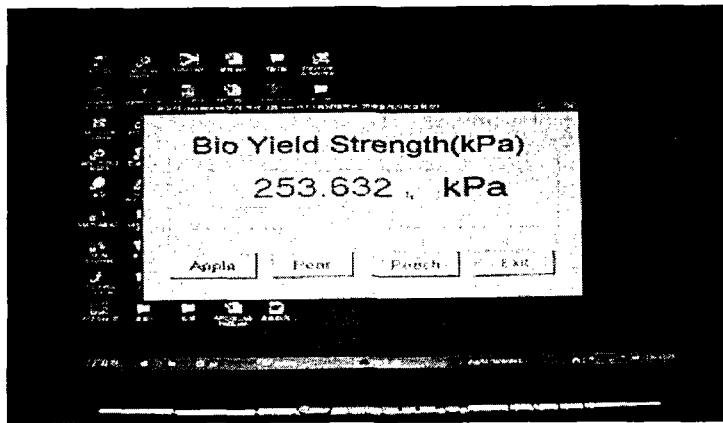


Fig. 8. Display of analysing program for bioyield strength of fruit.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지금까지 연구된 과실의 기계적 특성과 초음파 파라미터, 과실의 생물체 항복강도 측정 모형, 과실용 초음파 트랜스듀서를 이용하여 과실의 생물체 항복강도를 비파괴적으로 측정할 수 있는 장치를 개발하였다. 이를 위하여 초음파 송수신 시스템을 구성하고 과실과 접촉하는 초음파 트랜스듀서의 압력을 안정화하기 위한 장치로서 서보모터로 구동되어 접촉압력을 제어하는 장치를 구현하였다. 또한 과실의 초음파 신호를 획득하여 처리할 수 있도록 고속 A/D 보드를 개인용 컴퓨터에 장착하여 운용 프로그램을 구현하였으며 과실의 생물체 항복강도를 측정하기 위한 초음파 파라미터를 계산하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 전체적으로 시스템 구동은 Labview 소프트웨어로 구현하였으며 주요 신호처리 알고리즘은 Matlab 소프트웨어와 연동하여 과실의 생물체 항복강도를 측정하기 위한 시스템을 구성하였으며 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 개발된 과실 물성 측정 시스템은 초음파 발생장치, 과실 전용 초음파 트랜스듀서, 초음파 트랜스듀서를 구동하고 일정한 접촉압력을 유지하기 위한 moving block 및 구동용 AC 서보모터 시스템, 과실 두께 측정부, 고속 A/D 보드, 과실 리프트 테이블, 전용 컴퓨터로 구성되었다.
2. 개발된 장치의 주요부로서 각 하드웨어 부를 작동하기 위하여 electronic control unit (ECU)를 제작하였다. 제작된 ECU는 접촉압력 측정용 로드셀과 신호처리 회로, 초음파 발생장치 On/Off 회로, 서보모터 및 구동회로 등을 제어할 수 있었다.
3. 개발된 장치의 시스템 운용 프로그램은 Labview 소프트웨어로 구현하였으며 과실을 투과하여 수신되는 초음파 신호를 저장한 다음 이 신호는 Matlab으로 구현된 신호처리 알고리즘에 의해 초음파 파라미터가 계산되었다. 이때 Matlab 프로그램은 개발된 운용 프로그램에 연동되어 실행되게 하였다.

4. 개발된 신호처리 알고리즘에 의해 수신 초음파 신호의 피크값, TOF, 주파수 분석, wavelet 분석에 의한 spectrum density 등이 계산된 후 최종적으로 과실의 생물체 항복강도측정을 위한 다중회귀모델 식에 입력되어 생물체 항복강도가 측정되게 하였다.
5. 개발된 장치의 성능을 평가하기 위하여 과실 시료에 대하여 적용한 결과 비교적 정확한 생물체 항복강도측정이 가능한 것으로 나타났으며 연구에서 개발된 초음파를 이용한 과실 물성측정 시스템을 이용하여 과실의 생물체 항복강도를 비파괴적으로 측정할 수 있을 것으로 판단되었다.

5. 참고문헌

1. Abbot, J. A., G. S. Bachman, N. F. Childers, J. V. Fitzgerald and F. J. Matuski, 1968. Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables. Food echnology 22(5):101-112
2. Armstrong, P. R., G. K. Brown and G. K. Brown. 1990. Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples for firmness determination. Transactions of the ASAE 33(4):1353-1359
3. Brusewitz, G. H., and J. A. Bartsch. 1989. Impact parameters related to post harvest bruising of apples. Trans. of the ASAE 32(3):962-965
4. Finney, E. E. 1972. Vibration techniques for testing fruit firmness. J. Texture Studies 3:262-283
5. Kim, K. B., M. S. Kim, H. M. Chung, and S. D. Lee. 2003a. Mechanical properties and ultrasonic parameters of the apple flesh while in storage. J. of KSAM 28(3):239-244.
6. Kim, K. B., S. D. Lee, and M. S. Kim. 2003b. Ultrasonic probe desig nand fabrication for contact measurement of fruit. Asia-Pacific Conference on Non-destructive Testing, Korea. 233.
7. Leedom, D., Krimholtz, R., and Matthaei, G., "Equivalent Circuits for transducers Having Arbitrary Even-or-Odd-symmetry Piezoelectric Excitation." IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, SU-18, 128-141(July 1971)
8. Park, B. 1996, "Ultrasonic Technology for Nondestructive Food Quality Evaluation", Proc. Int. Symp. Quality Evaluation of Agricultural Products and Foods Using NDE, pp.112-134
9. 김기복, 김만수, 정현모, 이상대. 2003. 저장기간에 따른 사과 과육의 기계적 특성 및 초음파 파라미터. 한국농업기계학회지 28(3):239-244
10. 박정길. 2005. "초음파 파라미터를 이용한 사과의 경도 추정", 충남대학교 석사학위논문.
11. 박종민. 1993. "과실의 점탄성 특성과 그 응용", 충남대학교 박사학위논문.
12. 서륜. 2002. "초음파를 이용한 사과의 경도 측정", 충남대 석사학위논문.
13. 이상대. 2005. "과실 비파괴 검사용 초음파 트랜스듀서 개발", 충남대학교 석사학위논문.
14. 정현모. 1999. "청과물의 기계적 특성에 관한 연구", 충남대 석사학위논문.