

◆특집◆ 바이오 계측

# 초음파를 이용한 과실의 비파괴 품질계측 시스템

김만수\*, 김기석\*, 정현모\*\*, 김기복\*\*\*

## Nondestructive Quality Measurement System of Fruits Using Ultrasonic

Man Soo Kim\*, Ghi Seok Kim\*, Hyun Mo Jung\*\* and Ki Bok Kim\*\*\*

**Key Words** : Hardness of fruit(과실의 경도), Bioyield strength(생물체 항복강도), Ultrasonic(초음파), Nondestructive quality measurement(비파괴 품질계측)

### 1. 서론

현재 해외 농산물의 급격한 수입증가, 국민 식생활 패턴의 변화 등에 따라 농산물의 소비 성향이 변하고 있으며, 종래의 생산량 증대 위주의 농업 기술에서 저비용 고품질화의 고도화된 첨단 농업기술의 개발이 절실히 요구되고 있다.

이에 따라 각종 농산물의 수확 후 처리 기술에 대한 관심과 요구도가 점차 증가하고 있는 실정이다. 특히 생활 패턴의 변화와 소득수준이 향상됨에 따라 과실류에 대한 소비자의 기호 성향은 고급화 및 신선도를 추구하는 경향이 증가하고 있으며 따라서 과실의 객관적 품질판정기술의 개발이 필요하다.

외부품질 인자들 중에서 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 구매 행위 시 가장 중요시하는 선택 기준 중의 하나이며 경도는 과실의 장기 저장성을 결정하는 주요한 품질인자이다.

Abbott(1995)등은 사과(Delicious와 Golden Delicious 품종)에 대한 음향공명시험법을 제안하였으며, Delicious품종에 있어서 음향측정은 생물체 항복점 보다는 경도에 더 가깝게 관련이 있다고 보고하였다. Cheng(1994)은 과실과 채소의 품질평가를 위해서 초음파 비파괴 품질계측 시스템을 개발하였으며 감자 내부공동의 존재여부를 알아보기 위해 250kHz의 초음파를 감자에 투과 시켜서 성공적으로 공동을 검출하였고, 내부에 공동을 가진 감자에 투과 시킨 초음파의 파형은 공동을 갖지 않은 감자의 그것과는 달랐다고 보고하였으며, 또한 투과되어진 초음파의 에너지량에 따라서도 공동을 가진 감자와 갖지 않은 감자를 구별해 낼 수 있었다고 보고하였다.

Mizrach(1997)는 망고의 껍질에 초음파 센서를 접촉하는 방법으로 망고의 초음파 감쇠를 측정하였고, 망고에 대해서 초음파 비파괴 실험뿐만 아니라 경도 계측을 위한 파괴적인 압축실험과 당도와 산도를 알아보기 위한 생리화학적 실험도 병행하였고, 주요한 생리화학적 지수들과 초음파

\* 충남대학교 생물자원공학부 생물산업기계전공

Tel. 042-821-6714, Fax. 042-823-6246

Email : mskim@cnu.ac.kr

\*\* 경북과학대학 패키징매니지먼트과

\*\*\* 한국표준과학연구원 삶의질표준부

파라미터들과의 관계를 알아보기 위해서 데이터들을 통계적으로 분석하였으며, 초음파 감쇠계측 실험의 결과들과 파괴적 압축 실험과 생리학적 실험의 결과들을 비교하였다. 초음파 감쇠, 경도값, 그리고 생리학적 지수들의 상관성을 보여주는 방정식을 개발하였다. 이 방정식에 의하면 망고의 초음파 감쇠를 비파괴 적으로 계측하면 당도, 산도를 알 수 있고 저장 중에 있는 망고의 연화 과정을 모니터링 할 수 있다고 보고하였다.

국내에서는 이(1996)는 초음파를 이용하여 청과물의 비파괴적인 내부품질 판정을 위한 자료를 얻기 위하여 청과물의 초음파 전파특성에 대한 연구를 수행하였으며, 실험 변수들인 밀도, 초음파 전파속도, UTM에 의한 탄성계수, 스펙트럼 분석의 피크 주파수 및 매그니튜드 등에 대한 상호 상관관계를 분석하였고, 이들 간에 상관계수가 높은 것들에 대하여 회귀방정식을 유도하였다. 또한 청과물을 투과한 초음파의 주파수 분석결과 청과물의 밀도 차이에 따른 피크주파수 및 크기의 차이는 뚜렷하게 나타났다고 보고하였다.

장 등(1998)이 수박에서의 초음파 전파특성을 측정하기 위한 연구를 수행하였으며 김 등(2002)에 의해 초음파 투과를 이용하여 사과, 배, 복숭아 등의 초음파 속도와 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 모델을 개발하기 위한 연구를 수행하였다.

따라서, 본 연구에서는 과실의 경도를 비파괴적으로 계측할 수 있는 초음파 물성 측정 장치를 개발하기 위하여 컴퓨터 내장형 전용 초음파 송수신장치를 구성하고 초음파 트랜스듀서와 시편의 접촉 압력을 안정화하기 위한 자동조절장치를 설계 제작하였으며 물성 측정에 유의한 초음파 파라미터를 도출하기 위한 신호처리 알고리즘을 개발한 후 개발된 물성 측정 모델을 도입하고 PC 통합 운용 소프트웨어를 개발하여 최종적으로 과실 물성 측정 시스템을 개발하고 그 성능을 평가하였다.

## 2. 시스템의 구성

### 2.1 시스템의 개요

초음파를 이용하여 과실의 물성을 측정하기 위한 시스템의 외형도는 Fig. 1과 같으며 내부 구성도는 Fig. 2와 같다. 초음파 발생장치로는 CNS FARNELL사의 PUNDIT를 시스템의 내부에 장착하였고 과실용 초음파 트랜스듀서는 100 kHz PZT 센서를 사용하였으며 과실과 송수신용 초음파 트랜스듀서간의 자동계측을 위한 moving block의 이송운동은 AC서보모터를 구동원으로 이용하였다. AC서보모터는 시스템의 내부에 장착한 컨트롤러에 의해 위치가 자동 제어된다. 또한 moving block에 설치한 송신용 초음파 트랜스듀서(TX)의 접촉부가 과실에 접촉되면 수신용 초음파 트랜스듀서(RX)의 하단에 설치된 하중센서를 이용하여 트랜스듀서와 과실간의 접촉 힘을 계측하고 사전에 설정한 접촉 힘의 임계값이 포함되는 순간, 정해진 시간동안 초음파 송수신을 개시하여 초음파 신호를 계측할 수 있도록 설계되어있다. 뿐만 아니라 서보모터에 설치된 엔코더를 이용하여 송신용 초음파 트랜스듀서의 이동거리를 계측하여 과실의 두께를 측정할 수 있도록 고안하였다. 또한, 과실을 투과한 초음파 신호는 컴퓨터 내장형 DAQ를 통해 데이터를 획득하고 신호처리 작업을 수행할 수 있도록 구성하였다. Table 1은 시스템에 이용된 DAQ의 제원을 나타낸다.

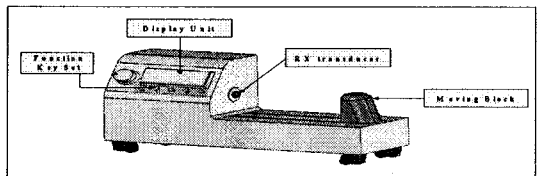


Fig. 1 Sketch of measurement system for mechanical property of fruit

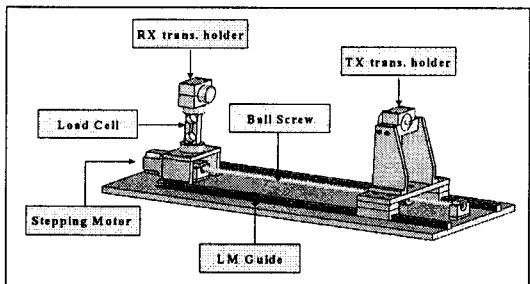


Fig. 2 Composition of measurement system for mechanical property of fruit

Table 1 Specification of NI5052 digitizer

item	specifications
resolution	8 bits
bandwidth	15 MHz
number of channels	2
max. sample rate	1 GHz repetitive, 20 MS/s single shot
max. waveform buffer	663,000 samples
vertical ranges	±50 mV to ±5 V
interpolator resolution	1 ns
frequency	≤20 MHz with a 50% duty cycle

2.2 초음파 발생장치

이 시스템에 사용된 초음파 발생장치는 Fig. 3과 같은 PUNDIT(CNS FARNELL corp., U.K)를 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 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of the ultrasonic pulser

items	specifications
range	0.1 ~ 9999 μs
resolution	0.1 μs
energizing pulse	nominal 1.2 kV or 500 V, 1.5 μs switch selected
mains power	105/125, 210/250 VAC 50~60 Hz
dimensions	186 × 130 × 186 mm
weight	3 kg

2.3 초음파 트랜스듀서

초음파 트랜스듀서는 한국표준과학연구원에서 개발한 초음파 트랜스듀서로서 트랜스듀서에

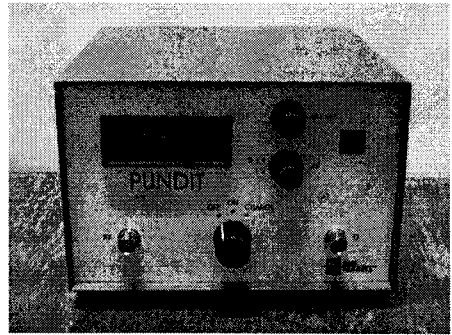


Fig. 3 Ultrasonic pulser(PUNDIT)

사용된 압전재료는 PZT 세라믹 계열의 압전재료를 이용하였고 전면정합층은 테프론, 후면재는 에폭시 : 실리콘 분말(150μm) : 텅스텐 분말(1μm)을 1 : 2 : 1 비율로서 제작된 중심주파수가 100 kHz 인 트랜스듀서이다. 지름은 40 mm, 두께는 20 mm로 선정하였고, 측정대상인 과실에 최적의 조건을 갖기 위해 서로 다른 압전 특성을 가지는 재료를 선정 및 실험하여 최적의 센서를 개발한 것이다.

과실용 초음파 트랜스듀서는 과실과의 접촉면을 최대한 크게 하기위해 접촉면이 곡률로 제작되었으며 이 곡률로 인해 초음파 빔이 집중되어 초음파 송·수신 효율이 향상되도록 하였다. 이러한 초음파 트랜스듀서의 구조가 초음파 발생에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 초음파 음장 해석 시뮬레이션을 실시하였다. 곡률 구조를 갖는 초음파 트랜스듀서의 빔 프로파일을 시뮬레이션하기 위해 O'neil 모델을 적용하였으며, 초음파 트랜스듀서의 음장을 분석하기 위해 Gaussian beam 모델을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 초음파 트랜스듀서의 중심 주파수 100 kHz, 압전소자의 직경 40 mm, 초점 거리 60 mm, 과실에서 초음파 전파 속도 200 m/sec의 조건에서 실시하였다.

Fig. 4는 초음파 빔 프로파일 해석 결과이며 접촉면의 곡률로 인해 초음파 빔이 20~60 mm 사이에 집중되었다. Fig. 5는 초음파 빔의 음장 해석 결과이며 초음파 빔의 집중으로 인해 약 40 mm 부근에서 음압이 증폭되는 것을 볼 수 있다. 일반 과실의 직경이 약 70~100 mm인 것을 고려하면 초음파가 충분히 과실을 투과하여 전달될 것으로 판단된다.

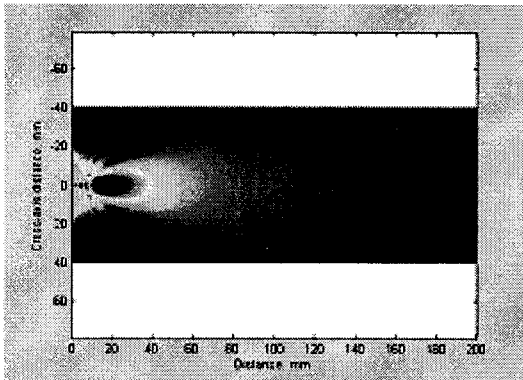


Fig. 4 Ultrasonic beam profile of 100 kHz transducer

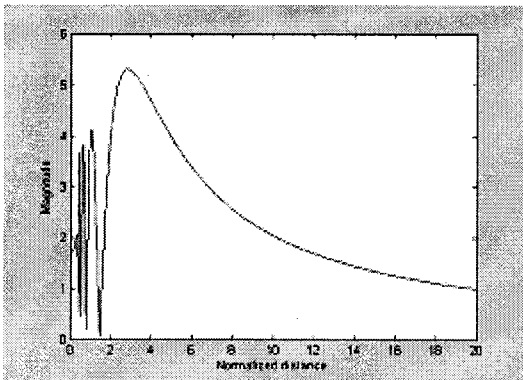


Fig. 5 Ultrasonic pressure profile of 100 kHz transducer

**2.4 Moving block**

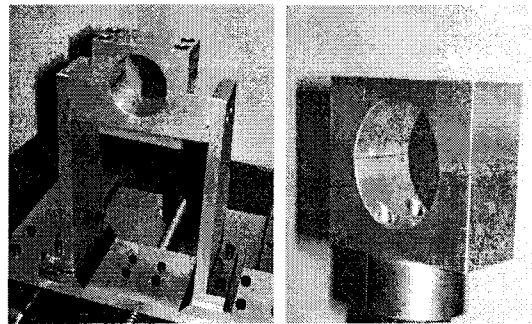
Moving Block은 AC 서보모터와 직결되어 구동되는 볼스크류에 의해 위치가 제어될 수 있도록 설계되어 측정하고자 하는 과실의 크기에 상관없이 트랜스듀서의 적용이 가능하고 moving block의 상단에는 수신부 초음파 트랜스듀서가 장착되어있다. AC 서보모터와 모터드라이브의 제원은 Table 3과 같다.

**2.5 Transducer holding unit**

송신 및 수신용 초음파 트랜스듀서와 과실 사이의 정렬이 나쁜 경우, 계측되는 투과과성분의 크기가 확연히 달라질 수 있기 때문에 이에 대한 보완으로 Fig. 6에서와 같이 초음파 트랜스듀서의 외곽 직경과 동일한 원형홀더방식의

Table 3 Specifications of moving block

items		specifications
servo motor	capacity	100 w
	power supply	200 VAC
	serial encoder	13-bit incremental
	brake, oil seal	no brake, no oil seal
servo driver	usage temperature	0 °C ~ 55 °C
	speed control range	1 : 5000
	repeatability	±2 %
	position control bias	0 ~ 450 r/min.
	reference input pulse	Line driver type (+5 V)
	position signal output	Phase A, Phase B, Phase C(Line driver)
interface		RS-422



(a) TX transducer holding unit (b) RX transducer holding unit

Fig. 6 Transducer holding unit

transducer holding unit를 적용하여 원형 센서를 정확히 클램핑할 수 있도록 설계, 제작하였다.

**2.6 트랜스듀서와 과실간의 접촉 힘 제어유닛**

과실의 초음파 투과 실험 시 투과되는 초음파는 트랜스듀서와 과실간의 접촉정도, 즉 압력 또는 힘에 따라 초음파 신호의 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 Fig. 7과 같이 수신용 초음파 트랜스듀서의 아랫부분에 로드셀을 설치하여 과실과 접촉되는 트랜스듀서간의 접촉 힘을 계측할 수 있도록 설계하여 과실에 무리한 접촉 힘이 가해지는 것을 방지하는 한편 과실과 초음파 센서 간에 일정한 접촉압력이 작용되도록 하였으며 로드셀에서 출력되는 임의의 전압값은 PUNDIT 초음파 발생신호의 트리거 신호로서 사용되도록 설계하였다.

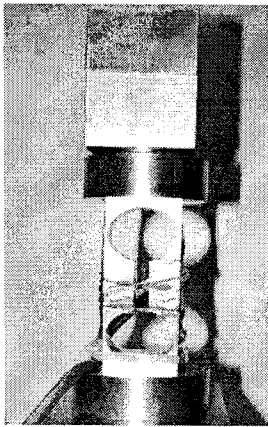


Fig. 7 Load cell mounted on the signal received transducer

### 2.7 Electric control unit(ECU)

ECU는 로드셀 신호 증폭출력, 초음파 발생장치인 PUNDIT의 시동과 정지 및 서보모터를 구동하는 역할을 수행하며 자동운전과 수동운전모드로 작동이 가능하도록 제작되었다. 자동운전 시 ECU내에 장착된 서보모터 컨트롤러는 moving block을 구동시키며 이때 moving block의 이송 거리정보는 서보모터의 엔코더를 이용하여 컴퓨터로 전송되며 송신부 초음파 트랜스듀서가 과실과 접촉하면 수신부 초음파 트랜스듀서의 하단에 설치한 로드셀에 힘이 감지되고 정해진 힘이 계측되면 moving block의 운동을 정지시킨 후 PUNDIT를 작동시켜 초음파를 3초간 발생시킨 후 다시 원래의 상태로 돌아가게 된다. 이때 수신부 초음파 트랜스듀서를 통해 입력된 초음파신호는 컴퓨터로 입력되어 신호처리과정을 거쳐 과실의 품질을 판정하도록 한다. 수동운전 모드 시 moving block의 전진 및 후진운동은 시스템의 전면면에 부착된

버튼을 이용하여 조절할 수 있으며 moving block을 전진하여 수신부 초음파 트랜스듀서가 과실에 닿게 되면 이후의 과정은 자동운전과 동일하게 수행된다. ECU의 신호흐름 계통도는 Fig. 8, ECU의 회로도도는 Fig. 9, ECU의 실물사진은 Fig. 10과 같다.

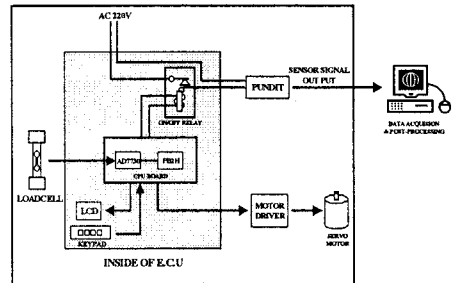


Fig. 8 Signal flow diagram of measurement system for mechanical property of fruit

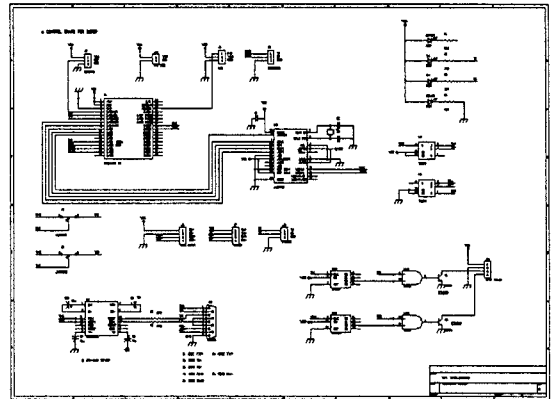


Fig. 9 Circuit diagram of ECU CPU board

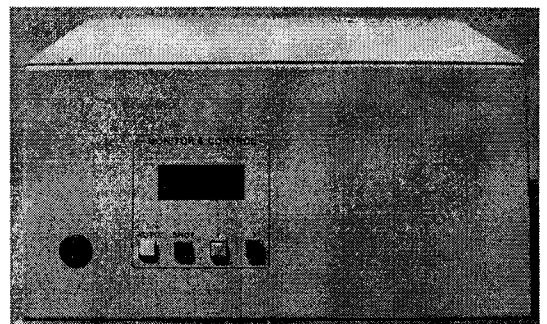


Fig. 10 Photo of electrical control unit(ECU)

### 2.8 시스템 운영 프로그램

과실 비파괴 품질계측시스템의 운영 프로그램은 시스템의 동작을 제어하고 초음파투과신호를 계측하기 위한 제어 및 계측 프로그램과 계측된 데이터를 이용하여 초음파 투과신호를 분석하고 과실의 경도를 추정하는 물성분석 프로그램으로 구성되어 있다.

제어 및 계측 프로그램은 PICBASIC(compile corp., KOREA)과 LabView 6.1(NI corp., U.S.A)을 기반으로 제작되어 초음파 트랜스듀서를 구동하고 과실과 초음파 트랜스듀서간에 맞는 접촉 힘을 계측하여 모터의 동작과 초음파발생장치의 신호출력을 ON/OFF 제어할 수 있다. 시스템의 구동을 위한 제어용 프로그램은 ECU장치의 메모리에 저장되며 제어를 위한 프로그램의 신호도는 Fig. 11과 같다. 또한 과실을 투과한 초음파 신호는 고속 DAQ를 이용하여 계측, 저장되며 Fig. 12는 초음파 신호의 계측과 저장을 위해 개발된 프로그램의 메인화면이다. 저장된 초음파 신호는 Matlab(ver. 6.5)을 이용하여 제작된 물성분석 프로그램을 이용하여 FFT와 PSD의 신호처리과정을 통해 초음파 투과신호의 특성을 분석한 후 과실 경도와의 상관관계를 통해 얻어진 다중회귀식을 적용하여 과실의 경도를 추정한다.

Fig. 13은 과실경도 추정 프로그램의 메인화면이며 Fig. 14는 과실경도 추정 프로그램의 신호도를 보여주고 있다.

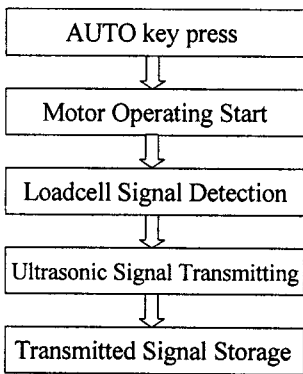


Fig. 11 Flowchart of the program for control and signal measurement

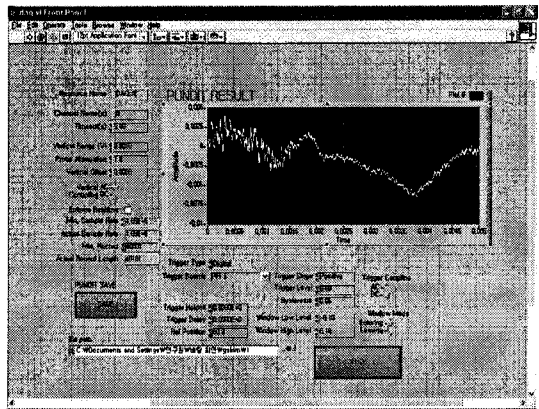


Fig. 12 Main display of the program for signal measurement and storage



Fig. 13 Main display of the fruit firmness estimation program

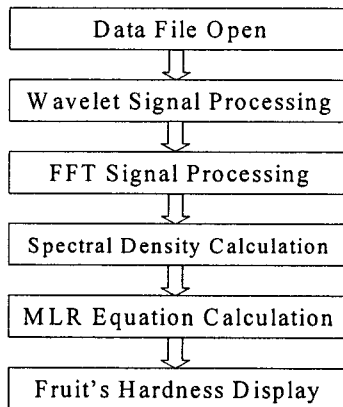


Fig. 14 Flowchart of the fruit firmness estimation program

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 초음파 전파속도와 탄성계수와의 상관성 검증

개발된 시스템 및 측정기법의 유효성을 확인하기 위해 다수의 사과 샘플에 대해 초음파를 이용한 전파속도 측정과 만능재료시험기(UTM)를 이용한 탄성계수 측정 실험을 수행하여 이들을 비교하였다. 실험에서는 60개의 샘플을 준비하여 상온에 보관하면서 3일마다 10개씩 발채하여 시험하였다. 먼저 초음파 시험을 실시 후, UTM을 이용한 파괴 실험이 수행되었다. Fig. 15는 그 결과를 보여준다.

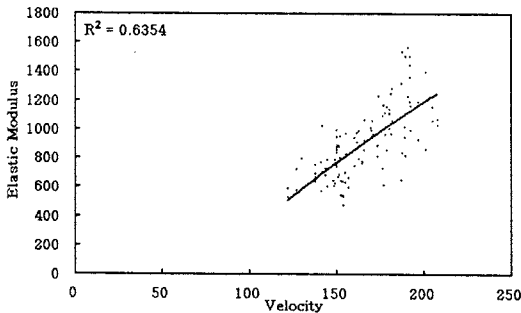


Fig. 15 Performance test result by three point thresholding method

그림에서 확인할 수 있듯이 과일 내부 음속과 탄성계수는 분명한 상관관계를 보여주고 있으며 선형 회귀 분석 결과, 과일 내부 음속을  $V_s$ , 탄성계수를  $E$ 라 할 때 회귀식은 다음과 같다.

$$E = 3.387 \times V_s^{2.6028}$$

또한, Three Point Thresholding 기법을 이용함으로써 잡음에도 강한 측정 결과를 보였다.

#### 3.2 초음파 물성측정시스템의 작동

과실의 비파괴 물성측정 장치가 초음파신호를 계측, 저장하는 작동 모습은 Fig. 16과 같으며 초음파 신호를 분석하여 과실의 경도를 추정하는 프로그램의 작동은 Fig. 17과 같다.

### 4. 결론

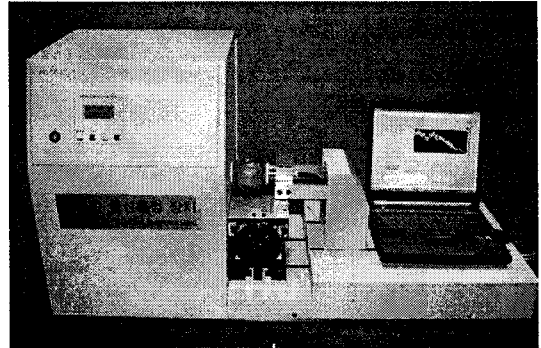


Fig. 16 Operation of the fruit firmness measurement system using by ultrasonic

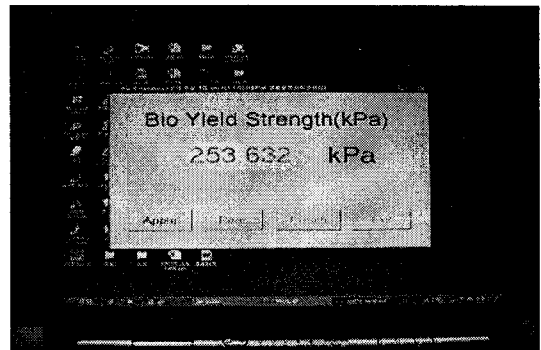


Fig. 17 Operation of the fruit firmness estimation program

본 연구에서는 과실의 기계적 특성, 초음파 파라미터, 과실 경도추정 모델식과 과실용 초음파 트랜스듀서를 이용하여 과실의 경도를 비파괴적으로 추정할 수 있는 장치를 개발하였다. 이를 위하여 초음파 송수신 시스템을 구성하고 서보모터를 이용하여 초음파 트랜스듀서의 구동을 제어하였으며 과실과 초음파 트랜스듀서간의 접촉 힘을 안정화하기 위해 로드셀을 이용한 접촉 힘 제어 장치를 설계하고 PICBASIC을 이용하여 제어프로그램을 개발하였다. 또한 과실의 초음파 신호를 획득하여 처리할 수 있도록 고속 DAQ를 컴퓨터에 장착하고 LabView를 이용하여 초음파 투과신호를 계측, 저장할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 계측된 초음파 투과신호를 신호처리하고 과실 경도 추정 모델식을 적용하여 과실의 경도를 추정할 수 있는 프로그램은

Matlab을 이용하여 개발하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 개발된 과실 물성측정 시스템은 초음파 발생장치, 과실전용 초음파 트랜스듀서, 초음파 트랜스듀서를 구동하고 일정한 접촉 힘을 유지하기 위한 moving block 및 구동용 AC 서보모터 시스템, 과실 두께 측정부, 고속 DAQ, 과실 리프트 테이블, 전용 컴퓨터로 구성되었다.

2. 개발된 장치의 주요부로서 각 하드웨어 부를 작동하기 위하여 electronic control unit (ECU)를 제작하였으며 제작된 ECU는 접촉 힘 측정용 로드셀과 신호처리 회로, 초음파 발생장치 On/Off회로, 서보모터 및 구동회로로 구성되어있다.

3. 개발된 장치의 시스템 제어프로그램은 PICBASIC으로 개발되었고 계측 및 저장을 위한 프로그램은 Labview로 구현하였으며 초음파 투과 신호에 대한 신호처리 및 과실경도 추정 모델식의 적용은 Matlab으로 구현하였다.

4. 개발된 신호처리 알고리즘에 의해 수신 초음파 신호의 피크값, TOF, 주파수 분석, wavelet 분석에 의한 spectrum density 등이 계산된 후 최종적으로 과실 경도측정 다중회귀 모델식에 입력되어 과실의 경도가 계산된다.

### 참고문헌

1. Abbot, J. A., Bachman, G. S., Childers, N. F., Fitzgerald, J. V. and Matuski, F. J., "Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables," Food Technology, Vol. 22, No. 5, pp. 101-112, 1968.
2. Abbott, J. A. and Liljedahl, L. A., "Relationship of sonic resonant frequency to compression tests and Magness-Taylor firmness of apples during refrigerated storage," Transactions of the ASAE, Vol. 37, No. 4, pp. 1211-1215, 1994.
3. Bruswitz, G. H. and Bartsch, J. A., "Impact parameters related to post harvest bruising of apples," Transaction of the ASAE, Vol. 32, No. 3, pp. 962-965, 1989.
4. Finney, E., Ben-Gera, I. and Massie, D., "An Objective Evaluation of Changes in Firmness of Ripening Bananas using a Sonic Technique," Journal of Food Science, Vol. 32, No. 6, pp. 642-646, 1968.
5. Finney, E. E. and Norris, K. H., "Determination of moisture in corn kernels by near-infrared transmittance measurements," Transactions of the ASAE, Vol. 21, No. 30, pp. 581-584, 1978.
6. Kim, I. H., Jung, G. H., Jhang, K. Y., Seo, R. and Kim, M. S., "Ultrasonic Inspection of Internal Defects of Potatoes," Journal of KSPE, Vol. 20, No. 3, pp. 82-88, 2003.
7. Kino, G. S. "Acoustic waves-Devices, imaging & analog signal processing," Prentice-Hall (Englewood Cliffs, New Jersey), 1987.
8. Liljedahl, L. A. and Abbott, J. A., "Changes in sonic resonance of 'Delicious' and 'Golden Delicious' apples undergoing accelerated ripening," Transaction of the ASAE, Vol. 37, No. 3, pp. 907-912, 1994.
9. Park, B., "Ultrasonic Technology for Nondestructive Food Quality Evaluation," Proc. Int. Symp. Quality Evaluation of Agricultural Products and Foods Using NDE, pp.112-134, 1996.