

초음파 기술을 이용한 과실의 물성 측정 시스템  
개발

Development of Measurement System for  
Mechanical Property of Fruit using Ultrasonic  
Technology

연구기관  
충남대학교  
한양대학교  
한국표준과학연구원

농 립 부

초음파 기술을 이용한 과실의 물성측정 시스템  
개발

Development of Measurement System for Mechanical  
Property of Fruit using Ultrasonic Technology

연구기관  
충남대학교  
한양대학교  
한국표준과학연구원

농 립 부

# 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “초음파 기술을 이용한 과실의 물성측정 시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2005 년 1 월 일

주관연구기관명 : 충 남 대 학 교  
총괄연구책임자 : 김 만 수  
세부연구책임자 : 김 만 수  
연 구 원 : 정 현 모  
연 구 원 : 김 기 석  
연 구 원 : 박 정 길  
연 구 원 : 이 상 대  
연 구 원 : 박 성 운  
협동연구기관명 : 한 양 대 학 교  
협동연구책임자 : 장 경 영  
위탁연구기관명 : 한국표준과학연구원  
위탁연구책임자 : 김 기 복

# 요 약 문

## I. 제 목

초음파 기술을 이용한 과실의 물성 측정 시스템 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

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.

생활 패턴의 변화와 소득수준이 향상됨에 따라 과실류에 대한 소비자의 기호 성향은 고급화 및 신선도를 추구하는 경향이 증가하고 있으며 따라서 과실의 객관적 품질판정기술의 개발이 필요하다.

과실의 품질을 판정을 위한 초음파 기술의 적용상 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 점이다. 또한, 초음파는 진파 매질의 구조와 탄성 성질에 민감하기 때문에 다른 방법에서 제공할 수 없는 내부조직의 물성 (탄성계수, 점성특성, 생물체 항복강도 등)의 정보를 제공할 수 있다.

선별, 포장, 저장 및 유통기간에 중요한 품질인자 및 손상방지를 위한 중요한 인자인 과실의 경도를 비파괴적으로 측정할 수 있는 기술이 개발된다면 생산 과실의 전수검사가 가능하여 농가소득에 크게 기여할 것이다.

## III. 연구개발 내용 및 범위

본 과제의 연구개발 목표인 “초음파 기술을 이용한 과실의 물성측정 시스템 개발”을 달성하기 위하여 다음과 같은 3개의 세부과제를 구성하였다.

**[과실의 초음파 특성 및 기계적 특성 구명 : 충남대학교]**

1. 과실의 기계적 특성 측정 장치
  - 가. 과실의 힘-변형 특성
  - 나. 과실 기계적 특성측정 장치 제작
  
2. 과실 과육의 초음파 특성 측정
  - 가. 과실 과육의 초음파 파라미터 측정 장치 제작
  - 나. 저장기간에 따른 과실 과육의 초음파 파라미터 분석
  
3. 과실의 기계적 특성과 초음파 파라미터간의 상관관계 분석
  - 가. 개발된 전용 초음파 센서를 이용한 과실의 초음파 측정 장치 제작
  - 나. 과실의 초음파 파라미터와 기계적 특성간의 상관관계 해석
  
4. 초음파 파라미터를 이용한 과실 경도측정 모델 개발
  - 가. 다중선형회귀 분석법을 이용한 과실 경도측정 모델
  - 나. 주성분 회귀분석법을 이용한 과실 경도측정 모델
  - 다. 인공신경망을 이용한 과실 경도측정 모델

**[과실의 물성 측정용 초음파 시스템 및 주변장치 개발 : 한양대학교]**

1. 과실에 적합한 초음파 탐상법 비교분석
  
2. 초음파 파라미터를 도출하기 위한 신호처리 알고리즘 개발
  
3. 과실 물성 측정용 초음파 시스템 개발 및 평가
  - 가. 초음파 탐상 시스템 제작
  - 나. 구동 소프트웨어 개발

**[과실의 물성 측정용 초음파 센서개발 및 평가 : 한국표준과학연구원]**

1. 과실 전용 초음파 트랜스듀서의 구성품 연구
2. 과실 전용 초음파 트랜스듀서 최적설계
  - 가. 압전재료와 과실 사이의 음향임피던스 정합
  - 나. 감도 조절을 위한 후면재 설계
3. 과실 전용 초음파 트랜스듀서 제작 및 평가

#### IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

##### [과실의 초음파 특성 및 기계적 특성 구명 : 충남대학교]

1. 과실의 기계적 특성 측정 장치
  - 가. 과실의 기계적 특성을 측정하기 위한 시료로서 사과, 배, 복숭아에 대한 기본적인 물성 값들을 조사하였다.
  - 나. 과실의 기계적 특성을 측정할 수 있는 만능물성시험기에 대하여 고찰하였으며 ASAE standard를 기준으로 하여 과실 종류에 따른 인텐터를 검토하였다.
  - 다. 과실의 힘-변형 곡선으로부터 생물체 항복강도, 탄성계수, 극한강도 등과 같은 기계적 특성 값들을 측정하였다.
2. 과실 과육의 초음파 특성 측정
  - 가. 대표적인 과실인 사과, 배, 복숭아를 일정한 형상의 시편으로 제작하여 상용 초음파 트랜스듀서를 이용한 투과실험과 UTM을 이용한 기계적 특성 측정실험을 수행한 후 초음파 파라미터와 기계적 특성사이의 상관관계를 분석하였다.
  - 나. 사과, 복숭아의 경우 상관계수는 상대적으로 높게 나타났으며 배는 내부조직의 특성으로 인해 상관계수가 약간 낮게 나타났다.
  - 다. 과실의 저장기간과 조직 상태가 초음파 파라미터와 어떠한 관계가 있는지를 알기위해 사과를 대상으로 저장기간에 따른 초음파 파라미터와 기계적 특성 변화를 측정하였다.
  - 라. 저장기간이 길어질수록 힘-변형 곡선의 파괴점이 감소하고 변형이 증가하는

것으로 나타났으며 수신되는 초음파 신호의 감쇠가 커지고 신호패턴이 크게 달라지는 것으로 나타났다.

마. 사과와 저장초기 초음파 속도는 평균 222m/s 정도이었으나 저장말기에는 평균 175 m/sec로 감소하였다. 초음파 속도는 탄성계수의 함수이므로 저장기간이 증가함에 따라 사과와 탄성계수가 감소하기 때문에 사과와 초음파 투과속도도 감소하였다.

바. 초음파 파라미터와 기계적 특성 사이의 상관관계를 분석한 결과 초음파 파라미터를 이용하여 과실의 속도 예측이 가능한 것으로 판단된다.

### 3. 과실의 기계적 특성과 초음파 파라미터간의 상관관계 분석

가. 과실을 절단하지 않은 상태에서 UTM으로 기계적 특성을 측정된 결과 사과와 과피점 및 탄성계수는 상온 저장기간에 따라 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

나. 사과와 기계적 특성과 초음파 파라미터들 간의 상관분석을 수행한 결과 투과시간, 투과속도, 음향임피던스, 최대·최소진폭, 첫 번째 및 두 번째 감쇠계수 등 총 7개의 초음파 파라미터들이 기계적 특성과 비교적 높은 상관계수를 나타내었다.

### 4. 초음파 파라미터를 이용한 과실 정도측정 모델 개발

가. 과실의 기계적 특성과 상관관계가 높았던 투과속도, 최대진폭 및 최대진폭에서의 감쇠계수를 이용하여 사과와 과피점 및 탄성계수를 예측할 수 있는 다중회귀모델을 개발하여 평가한 결과 사과와 경우 결정계수가 0.9986, 배의 경우 0.6485, 복숭아의 경우 0.9844의 상관관계를 나타내었다.

나. 과실에 대한 초음파 파라미터를 이용하여 주성분 분석을 실시한 결과 대체적으로 전체 4개의 주성분만으로도 생물체 항복강도의 설명이 가능한 것으로 분석되었으며, 이들 주성분들을 이용하여 생물체 항복강도를 예측할 수 있는 회귀모델을 개발하고 평가한 결과 사과와 경우 결정계수가 0.6532, 배의 경우 0.8343, 복숭아의 경우 0.9999로 나타났다.

다. 인공신경망을 이용하여 과실의 정도를 예측할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 인공신경망은 입력층, 은닉층, 출력층이 한 개씩인 간단한 구조로 구현되었다. 은닉층의 개수를 최적화하여 구현한 신경망을 이용하여 실측값과 예

측값 사이의 상관관계를 분석한 결과 사과, 배, 복숭아의 경우 각각 0.7269, 0.6875, 0.9991의 상관계수를 나타내었다.

라. 실제 개발된 초음파를 이용한 과실 물성 측정 장치의 과실 경도판정 알고리즘은 비교적 간단하게 구현할 수 있는 다중회귀 모형을 적용하였다.

### [과실의 물성 측정용 초음파 시스템 및 주변장치 개발 : 한양대학교]

#### 1. 과실에 적합한 초음파 탐상법 비교분석

가. 과실의 물성을 비파괴적으로 측정하는 방법으로 투과법, 공중반사법, 수중반사법을 적용하여 성능을 비교분석하였다. 실험 결과 낮은 투과성능만 극복된다면 투과법이 과실의 내부 물성을 측정하는데 최적의 방법으로 판단되었다.

#### 2. 초음파 파라미터를 도출하기 위한 신호처리 알고리즘 개발

가. 과실을 투과한 초음파 신호를 분석하기 위하여 피크전압 검출, 투과시간, 투과속도, 주파수 특성, 스펙트럼 밀도 등과 같은 초음파 파라미터를 구현하기 위한 알고리즘을 개발하였다.

#### 3. 과실 물성 측정용 초음파 시스템 개발 및 평가

가. 개발된 과실 물성측정 시스템은 초음파 발생장치, 과실전용 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.

나. 개발된 장치의 주요부로서 각 하드웨어 부를 작동하기 위하여 electronic control unit(ECU)를 제작하였다. 제작된 ECU는 접촉압력 측정용 로드 셀과 신호처리회로, 초음파 발생장치, On/Off 회로, 서보모터 및 구동회로 등을 제어할 수 있다.

다. 개발된 장치의 시스템 운용 프로그램은 LABVIEW 소프트웨어로 구현하였으며 과실을 투과하여 수신되는 초음파 신호를 저장한 다음 이 신호는 MATLAB으로 구현된 신호처리 알고리즘에 의해 초음파 파라미터가 계산된다. 이때 MATLAB 프로그램은 개발된 운용프로그램에 연동되어 실행된다.

라. 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.

마. 개발된 장치의 성능을 평가하기 위하여 과실 시료에 대하여 적용한 결과 비교적 정확한 경도측정이 가능한 것으로 나타났으며 본 연구에서 개발된 초음파를 이용한 과실물성 측정 시스템을 이용하여 과실의 경도를 UTM을 이용하지 않고 정확하게 측정할 수 있을 것으로 분석되었다.

바. 개발된 초음파 물성 측정 시스템은 선과장·영농조합 등에 이용할 수 있으며 선별·저장상태 모니터링 및 유통과정에서의 품질관리 등에 활용가능 할 것으로 판단된다.

### [과실의 물성 측정용 초음파 센서개발 및 평가 : 한국표준과학연구원]

#### 1. 과실 전용 초음파 트랜스듀서의 구성품 연구

가. 초음파 트랜스듀서를 구성하는 압전재료, 전면정합층, 후면재 등에 대하여 고찰하였다.

나. 과실에 적합한 압전재료로서 압전특성들을 비교분석하여 PZT 세라믹 압전재료와 PVDF 압전필름을 선정하였다.

#### 2. 과실 전용 초음파 트랜스듀서 최적설계

가. 전면 정합층의 음향임피던스는 0.16~0.3 MRayL로 계산되었으며 전면정합층 재료로서 아크릴, 테프론, 실리콘 러버와 텅스텐 분말입자의 조합을 고려하였다.

나. 후면재는 텅스텐 파우더와 실리콘 카바이드, 에폭시를 배합하여 제작하였다.

다. 초음파 트랜스듀서 제작을 위해 선정된 전면정합층, 압전소자, 후면재의 물성값을 이용하여 초음파 빔, 음장, 파형을 모델링하고 실제 결과와 비교하였다.

#### 3. 과실 전용 초음파 트랜스듀서 제작 및 평가

가. 100 kHz의 중심주파수를 갖는 초음파 트랜스듀서의 제작조건으로서는 PZT 세라믹 압전재료를 이용하여 전면정합층은 테프론, 후면재는 에폭시 : 실리콘 분말(150 $\mu$ m) : 텅스텐 분말(1 $\mu$ m) = 1 : 2 : 1인 경우 가장 양호한 트랜스듀서

성능을 나타내었다.

- 나. 200 kHz의 중심주파수를 갖는 초음파 트랜스듀서의 제작조건으로서는 100 kHz 트랜스듀서 제작조건에서 후면재의 제작조건이 에폭시 : 텅스텐 분말( $1\mu\text{m}$ ) = 1 : 2 일 때가 가장 양호한 트랜스듀서 성능을 나타내었다.
- 더. 직경 5mm, 두께  $100\mu\text{m}$ 의 PVDF 압전 필름센서를 제작하여 과실의 음파에 대한 응답신호를 분석한 결과 비교적 낮은 주파수대역의 신호에 민감하게 반응하여 과실 물성측정 센서로서의 가능성을 보여주었다.

# SUMMARY

## I. Title

Development of Measurement System for Mechanical Property of Fruit using Ultrasonic Technology

## II. Objective and Significance

Recently, in Korea, there has been an increased interest in the packing facility to develop an automated, precise, and an accurate instrument for grading fruits. Since fruits are living and biological materials, their composition, moisture content and texture vary continuously after harvesting as well as in the course of storage. The hardness (mechanical properties) of fruit is an essential factor affecting the physical property related to storage, processing, and quality control. Ultrasonic technique is very useful for nondestructive measurement of the mechanical properties of materials. In the past few decades, a tremendous amount of research has been performed in the field of ultrasonic nondestructive testing and evaluation of material. Despite the wide uses of ultrasonic techniques in industry and medical areas, very little has been done to employ this technique for testing of fresh food products, especially for fruits and vegetables.

The ultimate goal of this project is to develop an measurement system for mechanical property (firmness or bioyield strength) of fruit using ultrasonic technology. To achieve this goal efficiently, the research subject was divided into three sub-subjects, namely, "Characterization of mechanical and ultrasonic properties of fruit (Chungnam National University)", "Development of ultrasonic measurement system for mechanical property of fruit (Hanyang University)" and "Development of ultrasonic transducer for fruit (Korea Research Institute of Standards and Science)".

## III. Research Contents and Scope

Main research contents of each sub-subject by research Institution are as follows.

**[Characterization of mechanical and ultrasonic properties of fruit (Chungnam National University)]**

1. Apparatus for measurement of mechanical property of fruit
  - 1) Characteristics of force-deformation of fruit
  - 2) Fabrication of apparatus for measurement curve of mechanical property
2. Measurement of ultrasonic parameter of fruit flesh
  - 1) Fabrication of apparatus for ultrasonic measurement of fruit flesh
  - 2) Analysis of ultrasonic parameter of fruit flesh according to storage time
3. Correlation analysis between mechanical property and ultrasonic parameter of whole fruit
  - 1) Fabrication of ultrasonic measurement system for whole fruit using developed ultrasonic transducer for fruit
  - 2) Correlation analysis between mechanical property and ultrasonic parameter
4. Development of estimation model for mechanical property of whole fruit using ultrasonic parameters
  - 1) Multiple linear regression model
  - 2) Principal component regression model
  - 3) Artificial neural network

**[Development of ultrasonic measurement system for mechanical property of fruit (Hanyang University)]**

1. Comparison of ultrasonic inspection method for fruit
2. Development of signal processing algorithm for ultrasonic parameters
3. Development and evaluation of ultrasonic measurement system for mechanical property of fruit

- 1) Development of ultrasonic measurement system
- 2) Development of operating software

**[Development of ultrasonic transducer for fruit (Korea Research Institute of Standards and Science)]**

1. Components of ultrasonic transducer for fruit
2. Optima design of ultrasonic transducer for fruit
  - 1) Acoustical matching between piezoelectric material and fruit
  - 2) Design of back-acoustic material to control the sensitivity
3. Fabrication and evaluation of ultrasonic transducer for whole fruit

**IV. Results and Suggestions to the Practical Applications**

**[Characterization of mechanical and ultrasonic properties of fruit (Chungnam National University)]**

1. Apparatus for measurement of mechanical property of fruit
  - 1) The basic properties of apple, pear and peach such as weight, size and density to measure the mechanical property were surveyed.
  - 2) Based on the ASAE standard, the specifications of universal testing machine (UTM) to measure the mechanical property of fruit various indenter for fruit were considered.
2. Measurement of ultrasonic parameter of fruit flesh
  - 1) Ultrasonic transmission method was applied to measure the ultrasonic parameters of uniform sliced fruit samples such as apple, pear and peach. After ultrasonic measurement, the mechanical properties were measured by using UTM. The correlation between mechanical properties and ultrasonic parameters were analyzed.
  - 2) The coefficient of correlation at apple and peach were relatively higher than pear. It was for the reason that the texture of pear had a little different internal property from the other fruits.

- 3) Ultrasonic parameters and mechanical properties of apple were measured and analyzed to know the relation ship between ultrasonic parameters and storage time.
  - 4) The rupture point at force–deformation curve decreased and deformation increased as storage time increased. Also, the attenuation increased and the waveform was changed according to storage time.
  - 5) The average ultrasonic velocity of apple at initial stage of storage was about 222 m/s and the average one at last stage of storage was reduced to 175 m/s. Elastic modulus decreased with storage time increased. Since ultrasonic velocity of material is a function of elastic modulus, ultrasonic velocity of apple decreased according to storage time.
  - 6) From the correlation analysis between ultrasonic parameter and mechanical property of fruit, it is possible to estimate the firmness using ultrasonic parameter.
3. Correlation analysis between mechanical property and ultrasonic parameter of whole fruit
    - 1) The rupture point and elastic modulus of non–sliced apple (whole fruit) according to storage time at room temperature rapidly decreased.
    - 2) Among ultrasonic parameters of apple, time of flight, propagation velocity, 7 parameters such as acoustic impedance, maximum and minimum amplitude, and 1st and 2nd attenuation coefficients were found high correlated to mechanical properties.
  4. Development of estimation model for mechanical property of whole fruit using ultrasonic parameters
    - 1) The multiple linear regression (MLR) models for estimating the elastic modulus of fruit (apple, pear and peach) were developed using time of flight, maximum and minimum amplitude and attenuation coefficient. The coefficient of determinations of MLR models for apple, pear and peach were 0.9986, 0.6485 and 0.9844, respectively.
    - 2) To reduce the multicollinearity among ultrasonic parameters and extract the significant ultrasonic parameters, the principal component analysis was performed. The bioyield strength of fruit could be

accounted for by the first to the fourth principal components. The principal component regression (PCR) models for estimating the bioyield strength of fruit were developed and evaluated. The coefficient of determination of PCR models for apple, pear and peach were 0.6532, 0.8343, and 0.9999, respectively.

- 3) Artificial neural network (ANN) were developed to estimate the firmness of fruit. The developed ANN consisted of 3 layers having input, hidden and output layers and the optimal node number of hidden layer was obtained. The coefficient of correlations between measured values (hardness) and predicted values by ANN were found 0.7269 for apple, 0.6875 for pear, and 0.9991 for peach, respectively.
- 4) Finally, the MLR model showing best results was selected and applied to ultrasonic measurement system for measurement of mechanical property of fruit.

#### **[Development of ultrasonic measurement system for mechanical property of fruit (Hanyang University)]**

1. Comparison of ultrasonic inspection method for fruit

As nondestructive evaluation of mechanical property of fruit using ultrasonic technique, transmission method and reflection method in air and water were evaluated. The transmission method was found better method than other two methods for evaluating the mechanical property of fruit on condition that transmissibility is enhanced.

2. Development of signal processing algorithm for ultrasonic parameters

Algorithm for ultrasonic parameters such as peak amplitude, time of flight, propagation velocity, frequency characteristics, and spectrum density were developed to analyze the transmitted ultrasonic wave through fruit.

3. Development and evaluation of ultrasonic measurement system for mechanical property of fruit

- 1) The developed ultrasonic measurement system for mechanical property of fruit consisted of ultrasonic pulser, ultrasonic transducer for whole fruit, moving block which drives the ultrasonic transducer and controls

the contact pressure between ultrasonic transducer and fruit surface, sample thickness measuring unit, high speed A/D board, fruit lift table and computer.

- 2) As a main part of the developed system, the electronic control unit (ECU) to operate all hardware unit was constructed. The ECU can control the load cell and its driving circuit for measuring the contact pressure between ultrasonic transducer and fruit surface, ultrasonic pulser, on/off circuit, and thervo-motor and its driving circuit.
- 3) The operating software for developed system was developed using LABVIEW software. After the transmitted ultrasonic wave through fruit was acquired and stored in the memory of the computer, in order to obtain the ultrasonic parameter from that signal, the MATLAB program linked to the operating software was performed. Finally the bioyield strength of fruit could be calculated by the multiple linear regression equation built in the developed system.
- 4) From the performance test of the developed ultrasonic measurement system for mechanical property of fruit, the firmness of fruit could be measured without universal testing machine.
- 5) The developed ultrasonic system for mechanical property of fruit will be applied to the packing facilities and useful for monitoring the storage condition and sorting of fruit.

#### **[Development of ultrasonic transducer for fruit (Korea Research Institute of Standards and Science)]**

##### 1. Components of ultrasonic transducer for fruit

Several parameters should be considered when designing and fabricating an ultrasonic transducer. Among design parameters, the characteristic of ultrasound are mainly dependent on the kind of piezoelectric materials. Four kinds of piezo ceramics having different piezoelectric properties were selected. Based on the longitudinal vibration mode of the piezo-material, as operating frequencies, 100 kHz and 200 kHz were chosen. Also, the piezo-film sensor which called PVDF was considered.

##### 2. Optimal designs of ultrasonic transducer for fruit

- 1) The optimal acoustic impedance of wear plate between piezoelectric material and fruit was determined. From the result of preliminary experiment, the acoustic impedance of the fruit was found to be 0.16 to 0.3 MRayl. The calculated acoustic impedance of wear plate between piezoelectric material and fruit was 2.19 to 3.24 MRayl.
  - 2) As wear plate materials, Teflon, acrylic, and the mixture of silicon rubber and tungsten powder were used. Considering the curved surface of fruit, the wear plate was fabricated with acoustic lens having the curvature of 60 mm.
  - 3) The backing material is in place to get as much energy out of the transducer as possible. Optimal impedance matching of the backing material is achieved by sizing the matching layer so that its thickness is one quarter of the wavelength. Various backing materials such as the tungsten powder and epoxy, silicon carbide and epoxy resin, and tungsten powder, silicon carbide and epoxy resin were evaluated.
3. Fabrication and evaluation of ultrasonic transducer for whole fruit
- 1) In order to evaluate the fabricated ultrasonic transducer at various design conditions, ultrasonic transmission method was used. The fruit was placed between two fabricated transducers and the transmitted signals through fruit were analyzed. Among the wear plates materials, Teflon was found to be the best choice. The backing material showing best sensitivity was mixture of tungsten powder (1  $\mu\text{m}$ ), silicon carbide (150  $\mu\text{m}$ ) and epoxy resin of which ratio is 1 : 2 : 1. The ultrasonic transducers for fruit were successfully developed and will be useful for evaluating the internal quality of fruit non-destructively.
  - 2) As a thin film sensor for fruit, the PVDF piezo-film sensor of which diameter and thickness are 5 mm and 100  $\mu\text{m}$  was developed. The developed PVDF sensor could be used to evaluate the internal quality of fruit by impulse response.

# CONTENTS

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	20
section 1. Necessity of the Project .....	20
section 2. Objective and Scope of the Project .....	23
<b>Chapter 2 The state of the Art</b> .....	24
<b>Chapter 3 The substance and Results of the Project</b> .....	27
section 1. Development of compression test of the apparatus for Measuring the mechanical property of fruit .....	27
1. Materials and Method .....	27
2. Mechanical properties of fruit .....	29
3. Conclusion .....	32
section 2. Preliminary experiment .....	33
1. Comparison of ultrasonic measurement technique .....	33
2. Ultrasonic properties of fruit flash .....	56
3. Ultrasonic properties of apple due to storage time .....	66
4. Conclusions .....	73
section 3. Development of ultrasonic transducer for whole fruit .....	75
1. Piezoelectricity .....	75
2. Brief theory for ultrasonic transducer .....	85
3. Design and analysis .....	101
4. Fabrication of ultrasonic transducer .....	114
5. Ultrasonic transducer with piezo-film .....	131
6. Conclusions .....	141
section 4. Measurement of ultrasonic parameter and mechanical property of fruit .....	143

1. Mechanical properties of fruit according to storage time ..	143
2. Ultrasonic parameters of fruit according to storage time ..	150
3. Development of prediction model for mechanical property of fruit .....	163
4. Conclusion .....	190
section 5. Measurement system for mechanical property of fruit using ultrasonic technology .....	192
1. Construction of the ultrasonic measurement system .....	192
2. Development of operating software .....	202
3. Results of performance test .....	206
4. Conclusions .....	209
<b>Chapter 4 Achievement of Results and Technical Contributions .....</b>	<b>211</b>
section 1. Achievement of result .....	211
section 2. Technical contributions .....	212
<b>Chapter 5 Plans for Utilization of results .....</b>	<b>213</b>
<b>Chapter 6 Collection of Overseas Science and Technology Information during Research Process .....</b>	<b>214</b>
<b>Chapter 7. References .....</b>	<b>215</b>

# 목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 .....	20
제 1 절 연구개발 필요성 .....	20
제 2 절 연구개발 목표 및 내용 .....	23
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	24
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 .....	27
제 1 절 과실의 기계적 특성 측정 시스템 개발 .....	27
1. 재료 및 방법 .....	27
2. 과실의 기계적 특성 .....	29
3. 요약 및 결론 .....	32
제 2 절 과실 측정용 초음파 시스템 개발을 위한 기초 실험 .....	33
1. 초음파 탐상 비교 분석 .....	33
2. 고실 과육의 초음파 특성 실험 .....	56
3. 저장기간에 따른 사과 과육의 초음파 투과 특성실험 .....	66
4. 요약 및 결론 .....	73
제 3 절 과실용 초음파 트랜스듀서 개발 .....	75
1. 압전이론 .....	75
2. 초음파 트랜스듀서 설계이론 .....	85
3. 초음파 트랜스듀서 설계 및 해석 .....	101
4. 초음파 트랜스듀서를 이용한 과실의 투과 실험 .....	114
5. 박막형 초음파 트랜스듀서 개발 .....	131
6. 요약 및 결론 .....	141
제 4 절 과실 기계적 특성과 초음파 파라미터 .....	143
1. 저장기간에 따른 과실의 기계적 특성 .....	143
2. 저장기간에 따른 과실의 초음파 파라미터 .....	150

3. 과실의 물성 예측 모델 개발 .....	163
4. 요약 및 결론 .....	190
<b>제 5 절 초음파를 이용한 과실 물성측정 시스템 개발 .....</b>	<b>192</b>
1. 초음파 탐상 시스템 구성 .....	192
2. 시스템 운용 소프트웨어 개발 .....	202
3. 시스템 성능 시험결과 .....	206
4. 요약 및 결론 .....	209
<b>제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 .....</b>	<b>211</b>
제 1 절 연구개발 목표 달성도 .....	211
제 2 절 대외기여도 .....	212
<b>제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....</b>	<b>213</b>
<b>제 6 장 연구개발과정에서의 수집한 해외과학기술정보 .....</b>	<b>214</b>
<b>제 7 장 참고문헌 .....</b>	<b>215</b>

# 제 1 장 연구개발과제의 개요

## 제 1 절 연구개발 필요성

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 보고 되고 있을 뿐만 아니라 소비자의 구매행위시 가장 중요시하는 선택 기준 중의 하나이며 경도는 과실의 장기 저장성을 결정하는 주요한 품질인자이다.

실제 사과와 같은 경우 저장 후 상온 유통 기간에 따른 과실의 경도 및 감모율 변화는 유통기간이 길어질수록 경도는 감소함과 동시에 감모율은 증가하는 것으로 보고 되고 있다. (그림 1-1 및 1-2, 자료 : 농촌진흥청 농업기술정보)

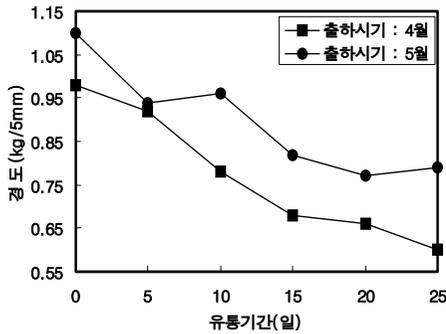


Fig.1-1 사과의 유통기간에 따른 경도변화.

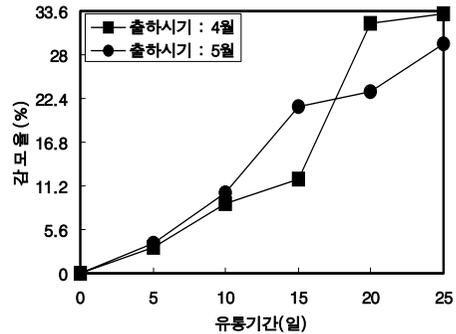


Fig.1-2 사과의 유통기간에 따른 감모율 변화.

이러한 이유로는 사과의 저장 및 유통과정 중 수분 및 펙틴화합물이 감소되어 과실의 경도가 낮아져서 분질화가 진행되기 때문이며 특히, 복숭아는 다른 과실에 비하여 저장성과 경도가 낮으므로 선별, 포장, 운반 시에 많은 손상이 발생된다.

경도의 측정방법은 개체의 UTM에 의한 압축실험을 통해 강도를 측정하는 것이 일반적이거나 이 방법은 시간이 소요되고 측정 개체가 파괴되는 문제 때문에 전수조사가 필요한 생산 현장 및 가공공장에서는 이러한 방법을 사용할 수 없는 것이 문제이다. 사과의 경우 미국에서는 아직도 품질 평가기준으로 경도를 측정하고 있으며 일반적인 방법으로 껍질을 벗긴 사과의 표면에 직경 11.1 mm의 프로브를 접촉한 다음 외력을 가하여 프로브가 깊이 7.9 mm에 도달할 때까지 최대의 힘을 측정하는 마그네스-테일러(Magness-Tayler, MT) 측정 방법이 이용되고 있을 뿐 비파괴적으로 경도를 측정하는 방법은 실용화 된 것이 거의 없는 실정이다.

과실의 경도 판정을 위한 초음파 기술의 적용상 장점은 비교적 간단하게 측정 시스템을 구성할 수 있으며 검사 대상 및 검사자에 대한 위험 요소가 전혀 없다는 점 외에도 초음파의 검출 결과를 실시간으로 알 수 있기 때문에 자동화가 용이하다는 점이다. 또한, 초음파는 전파 매질의 구조와 탄성 성질에 민감하기 때문에 다른 방법에서 제공할 수 없는 내부조직의 물성 (탄성계수, 점성특성, 생물체 항복강도 등)의 정보를 제공할 수 있다.

현재 농축산 분야에서 초음파 기술은 주로 육류의 육질 평가에 응용되고 있으며, 과실에의 적용은 기초 연구단계에 머물러 있다. 이것은 육류의 경우 기존의 의료진단용 기술을 그대로 적용할 수 있어 그 응용이 비교적 쉽기 때문이다. 이에 반해 과실의 경우 초음파의 전파특성이 육질과는 매우 다르므로 이에 대한 별도의 연구가 필요하다고 할 수 있다.

따라서 선별, 포장, 저장 및 유통기간에 중요한 품질인자 및 손상방지를 위한 중요한 인자인 과실의 경도를 비파괴적으로 측정할 수 있는 기술이 개발된다면 생산 과실의 전수검사가 가능하여 농가소득에 크게 기여할 것이다. 또한 과실류의 저장 및 유통 전의 품질검사를 위한 선과 시스템의 개발 보급 측면에서 속도 및 신선도와 관계가 있는 경도 측정장치의 개발은 기존의 연구되고 있는 당도 및 산도를 온라인으로 판정할 수 있는 선과 시스템과의 연계성을 고려해볼 때 선과된 과실에 대한 신뢰도를 향상시킬 뿐만 아니라 과실에 대한 종합적이고 객관적인 품질 판정에 도움이 될 것이며 국내 기술의 수출도 가능할 것이다.

## 제 2 절 연구개발 목표 및 내용

본 과제의 연구개발 최종목표로서 “초음파 기술을 이용한 과실의 비파괴 물성측정 시스템 개발”로 설정하였으며 이러한 목표를 달성하기 위하여 다음과 같은 3개의 세부과제를 구성하였다.

- [과실의 초음파 특성 및 기계적 특성 구명] 과제에서는 초음파 기술을 적용하기 위한 기초연구를 수행한 다음 얻어지는 각종 기계적 특성들과 초음파 전파특성들을 활용하여 여러 가지 물성과 초음파 파라미터들 간의 상관관계를 해석하여 과실의 물성을 측정할 수 있는 모델을 개발한다. 이를 위하여 다변량 통계해석과 신경회로망 기법을 도입한다. 또한 과실에 적합한 초음파 트랜스듀서를 개발하는데 필요한 과실의 초음파 특성 같은 설계인자를 제시한다.

- [과실의 물성 측정용 초음파 시스템 및 주변장치 개발] 과제에서는 실제의 초음파 물성 측정 장치를 개발하기 위하여 적절한 초음파 탐상 방법을 선정한 다음 컴퓨터 내장형 전용 초음파 송수신장치를 구성하고 초음파 트랜스듀서와 시편의 접촉 압력을 안정화하기 위한 자동조절장치를 설계 제작한다. 물성 측정에 유의한 초음파 파라미터를 도출하기 위한 신호처리 알고리즘을 개발한 후 제 1세부과제에서 개발된 물성 측정 모델을 도입하고 PC 통합 운용 소프트웨어를 개발하여 최종적으로 과실 물성 측정 시제품을 완성하고 그 성능을 평가한다.

- [과실의 물성 측정용 초음파 센서개발 및 평가] 과제에서는 과실에 적합한 초음파 트랜스듀서를 개발하기 위하여 압전변환해석을 위한 시뮬레이션 모델을 적용하고 평가한 후 과실의 종류, 형상 등에 적합한 곡면 형상을 가지는 PZT 압전 트랜스듀서 및 고분자 박막(PVDF) 초음파 물성 측정용 트랜스듀서를 개발하고 평가한다.

최종적으로 연구개발 목표시스템은 다음과 같은 특성을 가진다.

- 과실에 따른 여러 물성 값들을 측정하기 위한 모델 개발 및 적용
- 물성 값에 따른 초음파 파라미터 도출을 위한 신호처리 알고리즘
- 과실의 크기, 형상, 종류 등을 감안한 초음파 트랜스듀서
- 과실의 경도를 측정할 수 있는 초음파 시스템

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

최근 전자산업의 발달로 첨단기술의 농업적 응용에 필요한 각종 센서가 개발되고 있어 이를 이용한 농산물의 각종 품질을 비파괴적으로 측정할 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 과실의 여러 물성 인자는 그 중요성에도 불구하고 비파괴적으로 측정할 수 있는 기술이 개발되고 있지 않고 있다. 레이저 분광법의 경우 표면의 광 산란현상을 이용하여 경도를 비교적 정확하게 측정할 수 있으나 아직까지는 시스템의 가격이 고가이며 사용에 많은 제약이 따르며 근적외선 분광분석법을 이용한 경도 측정은 현재까지 그 정확도가 매우 낮게 나타나고 있다. 광학적인 방법 또는 과육의 세포표면 분석 방법 등을 이용하여 물성 등을 간접적으로 측정하기 위한 연구가 수행된 바 있으나 실용화된 사례는 없는 것으로 분석되었다.

국내의 경우 본 연구자에 의해 각종 과실의 기계적 특성과 같은 기초 물성 구명 연구가 이미 수행되어 연구역량이 축적되어 있는 상태이며 20 kHz의 초음파를 이용하여 수박의 공동을 검출하기 위한 연구를 수행한 바 있으며 무, 감자, 당근, 사과에 대한 초음파 전파특성을 측정하고 분석하여 탄성계수와 상관계수를 도출한 연구를 수행한 바 있다. 그 외 대학 연구실 수준에서 연구된 내용으로서 주로 콘크리트 탐상용 저주파 (50 kHz 이하)의 주파수 대역을 가지는 초음파 센서를 이용하여 몇몇 과실에 적용하고자 하는 연구가 시도되었으나 센서 사용주파수 및 압전재료의 특성상 센서의 크기가 상대적으로 크기 때문에 과실의 표면 및 내부를 충분히 탐상하기에는 불리한 구조를 가지고 있다.

지금까지 국내에서의 일부 초음파 기술 적용관련 연구들은 현재까지 국내의 주요 과실 전반에 대한 검토가 부족할 뿐만 아니라 초음파 특성 파라미터와 실제의 품질 측정값과의 비교·분석할 수 있는 단계에는 아직 이르지 못하고 있으며 따라서 다양한 측정 파라미터의 개발과 기술의 개발이 필요하고 현장적용이 가능하기 위해서는 대상 시료의 자동 두께 측정, 초음파 프로브의 접촉압력 자동 제어장치, 물성 값 측정 알고리즘 등을 포함하는 자동화된 종합적인 측정 시스템의 개발이 필요하다고 할 수 있다.

선진 외국에서는 이미 농산물에 대한 여러 가지 비파괴 평가기술들을 적용하기 위한 연구를 수행하고 있으며 주로 가시광 및 근적외선을 이용한 투과법 및 반사법, 마이크로파를 이용한 토모그래피 기술, 핵자기 공명기술, 음향가진법, 초음파 기술 등을 적용하고 있음. 이들 기술들은 서로 다른 특징을 가지며 이에 따라 적용 대상이나 품질 평가인자 등이 서로 다르다. 특히, 초음파는 초음파 외 다른 적용 기술에서는 효과적으로 제공할 수 없는 경도 및 공동 등과 같은 내부 결함의 판정에

매우 효과적인 기술로 알려져 있으며 농산물에 대한 연구를 수행한 결과 측정에 가능한 초음파 주파수는 1 MHz 이하의 주파수가 적당한 것으로 보고되고 있다. 초음파 기술의 농축산물에 대한 적용은 현재 육류의 육질 판정에 많이 이용되고 있으며 과실에 대해서는 주로 기초연구로서 수행되고 있는데 이것은 과실의 경우 그 조직이 육류와 매우 다르기 때문에 초음파의 전파특성도 매우 상이하여 기존의 의료용 초음파 진단 기술을 그대로 적용할 수 없으며 과실은 육류와 달리 그 종류가 매우 다양하여 개개의 과실에 대한 초음파 전파 특성이 구명되어야 하기 때문이다.

외국의 주요 연구 관련사례는 다음과 같다. Abbott(1995)등은 사과(Delicious와 Golden Delicious 품종)에 대한 음향공명시험법을 제안하였으며, Delicious 품종에 있어서 음향측정은 생물체 항복점 보다는 경도에 더 가깝게 관련이 있다고 보고하였다.

Finney와 Norris(1967)는 사과, 배, 복숭아의 탄성에 대하여 비파괴적으로 음향 실험을 실시하였으며 속도와 탄성계수(Young's modulus)와의 관계는 높은 상관계수가 있으며, 수확 후 2주 동안의 탄성계수는 하루에 3%씩 변화된다고 보고하였다.

Cheng(1994)은 과실과 채소의 품질평가를 위해서 초음파 비파괴 품질측정 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.

Garret and Furry(1972)등은 사과의 탄성계수(Young's modulus), 밀도 및 푸아송비(Poisson's ratio) 등을 측정하기 위해 여러 가지 음파의 전파속도를 이용하였다고 보고하였다.

Clark(1975)는 수박에 음파를 투과시켜 음의 감쇠 정도와 수박의 경도와 높은 상관관계가 있음을 실험적으로 보였다.

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 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.

Mizrach(1989)등은 또한 사과, 감자, 오이 등의 청과물에 직경 20 mm, 길이 10~20 mm에서 5 mm간격으로 시편을 채취한 후 50 kHz의 초음파를 투과 시켜 전파속도와 감쇠 정도를 측정된 결과, 사과에 있어 초음파 전파속도는 감자보다 느렸는데 그 이유는 사과 조직 내에 기체 공간이 크기 때문인 것으로 판단하였으며, 감자의 조직은 섬유질이 거의 없고 세포 공간 내부의 기체 공간이 단 2% 밖에 되지 않기 때문이라고 하였다. 또한 이들은 잘 익은 아보카도(Avocado)와 익지 않은 아보카도(Avocado)에 대하여 초음파 투과 실험을 한 결과 익지 않은 것이 익은 것에 비하여 상대적으로 음속이 낮았으며, 이 결과로 볼 때 음속을 이용하여 아보카도의 수확 시기를 판단할 수 있을 것이라고 보고하였다.

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.

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 사과의 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. 그러나 국내의 주요 과실인 사과의 경우 외국의 관련 연구도 거의 미흡할 뿐만 아니라 국내의 경우도 본 연구자들 외에는 거의 미미한 실정이다.

### 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

#### 제 1 절 과실의 기계적 특성 시스템 개발

##### 1. 재료 및 방법

###### 가. 실험재료

공시 재료로는 사과와 배의 경우 산사와 후지 품종이, 배의 경우 신고 품종이, 복숭아의 경우 중백 품종으로 일반농가에서 재배·구입한 국내산 과실이었다. 사과의 산사 품종의 경우 상온의 실험실 (온도 : 15℃, RH 65%)에서 저장하면서 3일 간격으로 1회에 15개의 시료를 임의로 추출하여 사용하였고, 사과의 후지 품종과 배의 신고 품종의 경우 농가의 저온저장고(온도 : 2℃, RH 85%)에 저장하면서 10일 간격으로 각 과실 당 1회에 5개씩 시료를 임의 추출하여 사용하였으며 복숭아의 경우 농가에서 갓 수확한 과실을 상온의 실험실 (온도: 18℃, RH 65%)에서 저장하면서 1일 간격으로 1회에 9개의 시료를 임의로 추출하여 사용하였다. 각 과실에 대한 기본 물성은 다음에 제시된 표에서와 같다.

Table 1-1. Physical properties of the fruit used in this study

		SD (days)	Dia. ( $\times 10^{-2}$ m)	Mass ( $\times 10^{-2}$ kg)	Volume ( $\times 10^{-4}$ m <sup>3</sup> )	Density (kg/m <sup>3</sup> )
apple	Sansa	30	7.08 ~ 8.80	18.71 ~ 25.84	2.2870 ~ 3.2005	687.7127 ~ 962.0704
	Fuji	60 ~ 160	7.39 ~ 7.93	20.59 ~ 22.22	2.4520 ~ 2.6142	839.6467 ~ 859.1964
pear		60 ~ 120	8.91 ~ 10.28	36.75 ~ 54.36	3.7641 ~ 5.5167	841.4041 ~ 1008.5686
peach		2 ~ 10	6.79 ~ 8.01	19.71 ~ 24.57	2.0590 ~ 2.5313	853.8160 ~ 998.7521

\* Note : SD = Storage days (day), Dia. = Diameter of the fruit (m)

나. 실험장치 및 방법

과실의 물리적 파라미터를 얻기 위해 초음파 투과실험을 한 지점에 대하여 절단하여 시편(사과, 배의 씨방부위제외)을 제작하거나 원형(복숭아) 그대로를 실험에 사용하였다. 이때 압축 실험에 쓰인 장비는 김(2000)이 제작하여 사용하였던 UTM 장비를 이용하여 압축실험을 하였으며, 이때의 하중재하속도(loading rate)는 5 mm/min이었다.

압축실험 시 사과의 산사 품종의 경우 그림에서와 같이 ASAE standard에서 제시하고 있는 곡면을 가진 인텐터(intenter)를 이용하였고, 또한 사과의 후지 품종과 배의 경우에는 그림에서 보여지는바와 같이 ASAE standard에서 제시하고 있는 평판(plate)을 이용하였다. 그리고 복숭아의 경우 그림에서 보여지는바와 같이 과실의 원형(whole fruit)을 그대로 평판(plate)을 이용하여 압축실험을 시행하였다. 파괴점은 힘-변형곡선에 나타나는 파괴점으로 하였으며 탄성계수는 파괴점의 50 % 지점을 기준으로 한 시컨트 모듈러스(secant modulus)를 적용하였다.

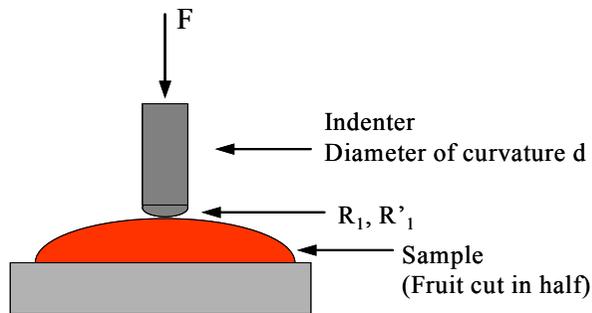


Fig. 1-1. Single intenter contact for mechanical properties of apple.

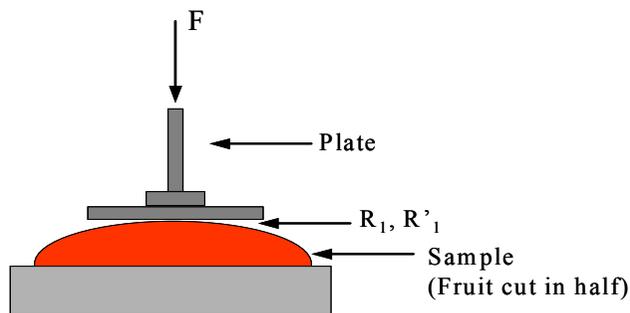


Fig. 1-2. Single plate contact for mechanical properties of apple and pear.

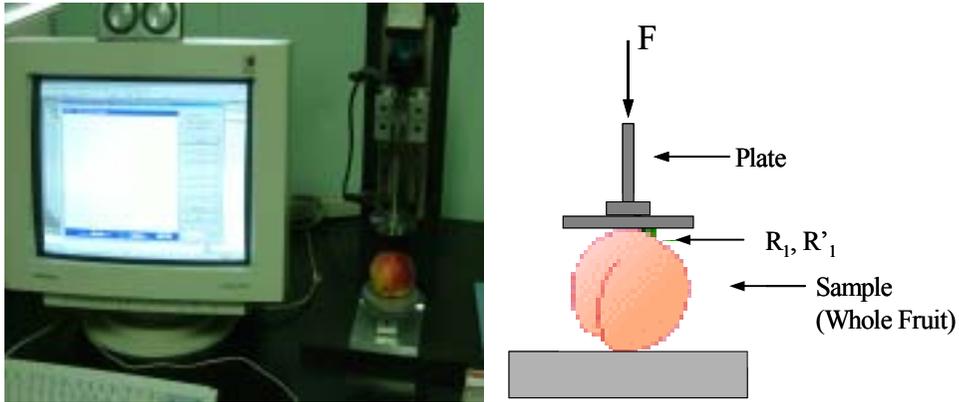


Fig. 1-3. Single plate contact for mechanical properties of peach.

## 2. 과실의 기계적 특성

### 가. 힘-변형곡선

모든 물체는 하중을 받으면 변형(deformation)이 생긴다. 그림의 힘-변형곡선(force-deformation curve)에서 보는바와 같이 LL점까지를 비례한계라고 하며, 이점에서 가한 하중을 제거하면, 그 물체는 원래의 형태로 되돌아간다. Y점을 항복점(yield point)이라 하고, R점을 파괴점(rupture point)이라고 한다.

그러나 그림에서 보는바와 같이 청과물은 일반 공업재료와는 달리 하중과 변형간의 관계가 직선적인 경우보다는 곡선적인 경우가 대부분으로 비례한계가 짧거나 거의 없는 경우가 많다. 따라서 청과물에는 작은 하중에도 영구변형이 일어나서 하중을 제거하더라도 원형으로 되돌아오지 않는다.

이와 같이 청과물의 힘-변형 곡선이 초기에는 곡선으로 나타나고 하중제거 시에도 원형으로 복원되지 않고 영구변형이 생기는 원인은 주로 청과물 내부의 수분과 공극 및 조직이 점탄성을 갖는데 기인하는 것으로 알려져 있다.

힘-변형곡선 상에는 대체로 3개의 특이점이 생기는데 그림에서 보는 바와 같이 PI로 표시되는 변곡점과 생물체항복점(bioyield point; BP)과 파괴점(rupture point; RP)이다. 생물체항복점이란 하중-변형곡선 상에서 하중의 증가는 없으면서도 변형이 계속 일어나는 점을 말하며, 그 크기는 이점에서의 하중(N)으로 나타내고 여기서부터 생물체의 세포조직의 파괴가 시작되기 시작하는 점이고, 이때의 하중(N)으로 그 크기를 나타낸다. 또한 힘-변형곡선의 시작점에서 생물체항복점 및 파괴점까지의 수평거리를 각각 생물체항복변형량(bioyield deformation; BD) 및 극한변형량(rupture deformation; RD)이라고 정의한다.

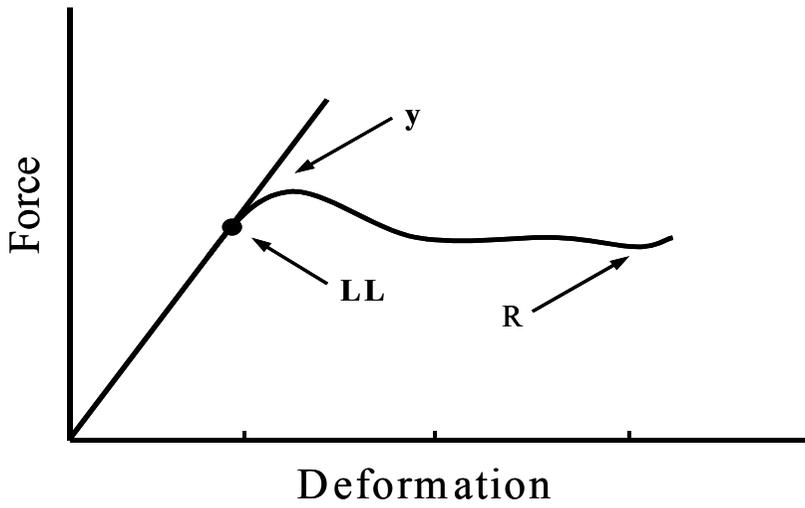


Fig. 1-4. Force-deformation curve for industrial materials.

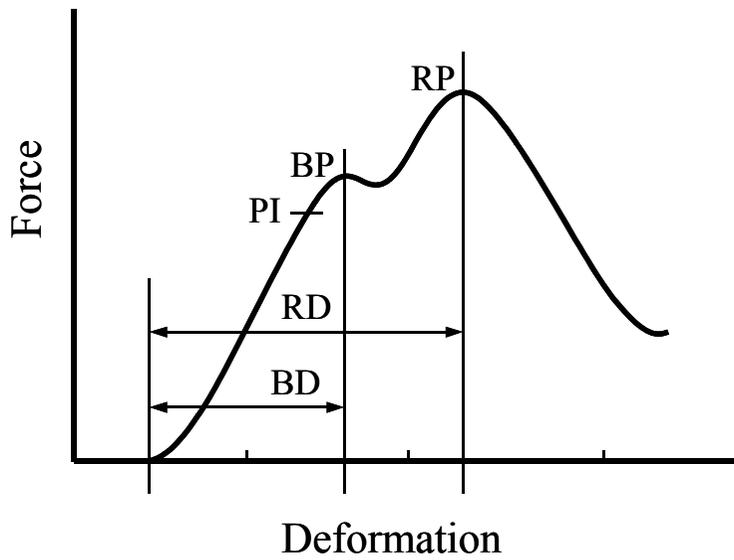


Fig. 1-5. Force-deformation curve for biomaterials.

#### 나. 생물체항복강도 및 극한강도

생물체 항복강도(bioyield strength)는 생물체 항복점에서의 하중을 그 시료의 초기 접촉면적으로 나눈 값으로 정의되며 극한강도(ultimate strength)는 파괴점에서의 하중을 초기 접촉면적으로 나눈 값으로 정의된다. 하중재하속도가 빨라짐에 따라 생물체항복강도, 극한강도 및 변형량은 약간씩 증가한다.

#### 다. 탄성계수

어떤 재료의 강성(rigidity)을 나타내는 척도로서 탄성계수(apparent elastic modulus)가 주로 사용되고 있다. 일반적으로 재료의 탄성계수는 응력-변형률곡선(stress-strain curve)의 기울기로 정의되나 대부분의 농산물은 응력-변형률곡선이 직선이 아니므로 그림에서 보는 바와 같이 3가지 탄성계수를 정의하고 있다.

초기 탄젠트 모듈러스(initial tangent modulus)는 농산물의 응력-변형률곡선에서 원점에서의 접선기울기이며, 시컨트 모듈러스(secant modulus)는 응력-변형률곡선상의 임의의 점과 원점을 연결하는 직선의 기울기이며, 탄젠트 모듈러스(tangent modulus)는 응력-변형률곡선상의 임의의 점에서의 접선의 기울기를 그 농산물의 탄성계수로 정의한다.

이와 같이 청과물의 탄성계수는 어느 탄성계수를 적용하느냐에 따라 같은 시편의 탄성계수와 할지라도 그 값이 매우 다르다. 따라서 청과물의 탄성계수를 측정할 때는 어느 탄성계수를 적용하였는가를 분명히 밝혀야 하고 시컨트 모듈러스 및 탄젠트 모듈러스를 적용한 경우에는 적용한 점의 위치를 분명히 밝혀야 할 것이다.

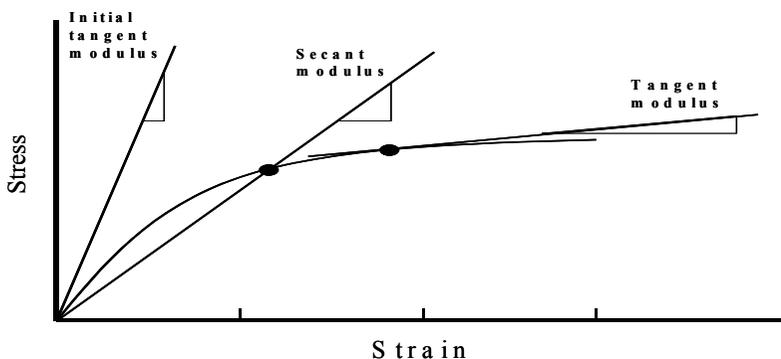


Fig. 1-6. Stress-strain curve for elastic modulus of biomaterials.

### 3. 요약 및 결론

- 과실의 기계적 특성을 측정하기 위해 사용된 재료는 사과, 배, 복숭아이며 사과는 상온의 실험실에서 저장하며 3일 간격으로 1회에 15개씩 실험한 것과 농가의 저온 저장 창고에서 저장하며 10일 간격으로 1회 5개씩 실험한 것 두 종류이고 배는 농가의 저온저장 창고에서 저장하며 10일 간격으로 1회 5회씩 실험하였다. 복숭아는 상온의 실험실에서 저장하며 1일 간격으로 1회 9개씩 실험하였다.
- 과실의 기계적 특성을 측정하기 위해 사과, 배, 복숭아에 대하여 질량, 체적, 밀도 등과 같은 기본 물성을 측정하였다.
- 과실의 기계적 특성을 측정하기 위한 만능 실험기는 하중재하속도 5 mm/min 이고 인텐터는 ASAE standard에서 제시하는 곡면 인텐터와 평판 인텐터를 사용하였으며 탄성계수는 파괴점의 50% 지점을 기준으로 secant modulus를 이용하여 계산하였다.
- 청과물의 힘-변형 곡선으로부터 변곡점, 생물체항복점, 파괴점, 생물체항복변형량, 극한변형량, 생물체항복강도, 극한강도, 탄성계수를 측정하였다.

## 제 2 절 과실 측정용 초음파 시스템 개발을 위한 기초 실험

### 1. 초음파 탐상 방법 비교 분석

#### 가. 경도 측정을 위한 초음파 파라미터

초음파는 그 진동 모드에 따라서 여러 종류가 존재하고 이들의 전파 속도는 모드에 따라 다르다. 또한, 탄성파가 매질 내부를 전파하는 동안 매질의 특성에 따라서 탄성파의 전파속도, 진폭이나 파형이 달라진다. 이렇게 매질의 특성을 반영하는 초음파 파라미터의 대표적인 것이 전파속도, 음향임피던스, 감쇠계수이다.

#### 1) 초음파의 전파속도

이상적인 유체는 전단변형이 없기 때문에 그 안에서는 종파(longitudinal wave) 모드의 탄성파만 존재하지만, 고체의 경우에는 전단변형으로 인하여 종파 및 횡파(transverse wave) 모드의 탄성파가 존재한다.

이상적인 무한한 탄성 등방 고체에서의 파동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2G)\nabla\nabla \cdot u - G\nabla \times \nabla \times u \quad (2-1)$$

여기서,  $\rho$  = 매질의 밀도 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\lambda$  = Lamé's constant (Pa),  $G$  = shear modulus(Pa)

이 방정식은  $\nabla \times u = 0$ 인 경우와  $\nabla \cdot u = 0$ 인 두 가지 경우로 각각 나눌 수 있다.  $\nabla \times u = 0$ 인 경우에는 전단 변형이 전혀 없이 단지 체적 변화만 있게 되는데 이 경우의 파동은 종파이고, 식(2-1)은 식(2-2)과 같이 된다.

$$\nabla^2 u = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2-2)$$

여기서  $c_p$ 는 종파의 속도로서 다음과 같다.

$$c_p^2 = \frac{\lambda + 2G}{\rho} = \frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (2-3)$$

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (2-4)$$

여기서, E는 매질의 탄성계수(Young's modulus),  $\mu$ 는 푸아송비(Poisson's ratio)이다.

반면,  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ 인 경우에는 체적 변화는 없고 단지 전단 변형만 있게 되는데 이 경우의 파동이 횡파이고 식(2-1)은 다음 식(2-7)과 같이 된다.

$$\nabla^2 \mathbf{u} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (2-5)$$

여기서 는 횡파의 속도로서 다음과 같다.

$$c_s^2 = \frac{G}{\rho} \quad (2-6)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (2-7)$$

따라서 재료의 밀도 , 종파속도  $c_p$ , 횡파 속도  $c_s$ 을 측정하면 식(2-3), (2-7)으로부터 재료의 물성 값 E, G 등을 결정할 수 있다.

종파 및 횡파에서의 파의 진행 방향과 입자의 운동 방향의 모식도를 그림 2-1에서 나타내고 있다. 종파의 경우는 입자의 운동방향과 파의 진행방향은 동일하며, 횡파의 경우는 입자의 운동방향과 파의 진행방향이 수직이다.

## 2) 음향임피던스

음향 임피던스는 음파가 전파하는 매질의 물성을 나타내는 물리량으로서 식 (2-8)과 같이 정의된다.

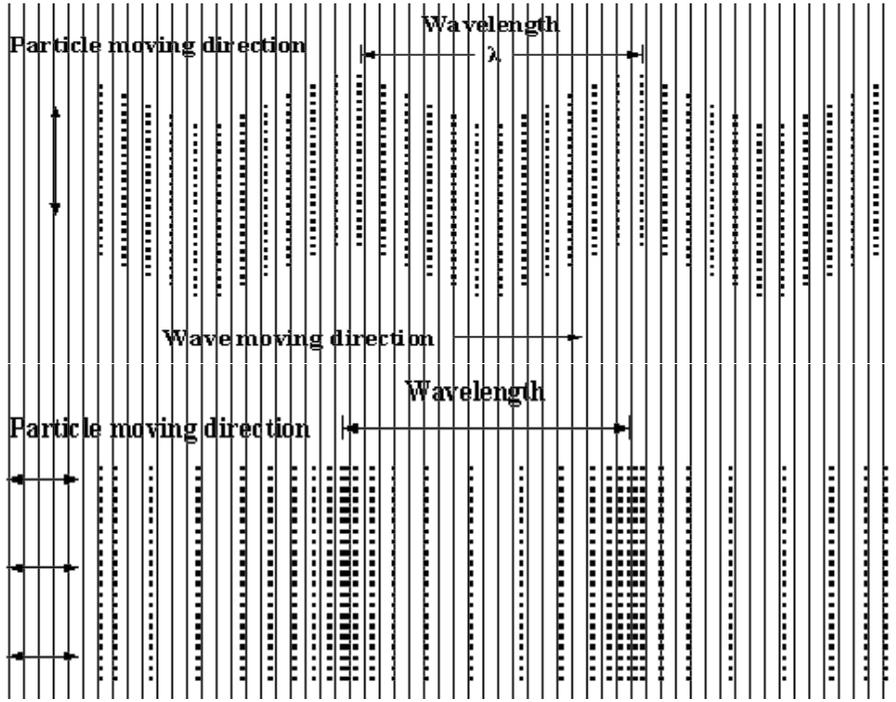


Fig. 2-1. Principle of moving direction of shear wave(upper) and longitudinal wave(lower).

$$Z = -\frac{T}{v} \quad (2-8)$$

여기서  $T$ 는 응력,  $v$ 는 입자속도 인데, 전파속도와는 다음의 관계를 갖는다.

$$Z = \rho C \quad (2-9)$$

따라서 음향임피던스도 전파속도와 마찬가지로 매질의 탄성계수와 직접적인 관련을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그리고 임피던스는 다음과 같은 차원을 갖는다.

$$\frac{\text{pressure}}{\text{velocity}} = \frac{N/m^2}{m/s} = \frac{N}{m^3/s} = \frac{kg}{m^2s} \quad (2-10)$$

일반적으로 음파가 전파하는 도중에 다른 매질에 부딪히면 반사와 굴절 현상이 발생하게 되는데, 이때 매질이 다르다는 것은 음향 임피던스가 다르다는 것을 의미한다.

또한, 음향임피던스의 차이가 크면 클수록 반사가 강하게 일어난다. 따라서 초음파 신호를 보내어 반사되는 세기를 측정하면 음향임피던스의 차이를 알 수 있고, 이로부터 반사 매질의 기계적 물성을 평가할 수 있다.

### 3) 초음파의 감쇠

일반적으로 고체에 전파되는 음파의 감쇠(attenuation)는 산란(scattering)과 흡수(absorption)로 인하여 일어나는데, 산란은 고체의 비 균질성 때문이며, 흡수는 마찰 등으로 음향에너지(sound energy)가 열에너지(thermal energy)로 변환되기 때문이다. 이와 같이 재료에 따른 초음파의 감쇠특성은 재료의 내부 조직의 특성과 밀접한 관련을 갖는다.

초음파의 감쇠는 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉,  $A_0$ 의 초기진폭을 갖는 초음파가 두께가  $d$ 인 재료를 투과한 후의 음파의 진폭은 다음 식(2-11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_d = A_0 \text{Exp}(-\alpha \times d) \quad (2-11)$$

여기서,  $A_d$  = 두께가  $d$ 인 재료를 투과한 음파의 진폭, mV

$A_0$  = 송신자로부터 내보내지는 음파의 진폭, mV

$\alpha$  = 감쇠계수, dB/m

$d$  = 재료의 두께, m

식(2-11)의 양변에 자연대수를 취하고 정리하면 다음과 같이 nepers(Np)를 정의할 수 있다.

$$\alpha \times d = \ln \left( \frac{A_0}{A_d} \right) \quad (2-12)$$

식(2-12)은 다시 다음과 같은 decibel(dB)의 정의와 1 nepers(Np)의 정의로부터

$$dB = 10 \log \left( \frac{A_d}{A_0} \right) \quad (2-13)$$

$$1N_p = 8.6859 \quad (2-14)$$

다음 식(2-15)과 같이 decibel의 식으로 나타낼 수 있다.

$$a \times d = \log \left[ \left( \frac{A_0}{A_d} \right) / \log(e) \right] \times 8.6859 = 20 \log \left( \frac{A_0}{A_d} \right) \quad (2-15)$$

따라서 송수신 신호의 진폭을 측정하고 그 변화율의 데시벨값과 시편의 두께 간의 직선 회귀식을 구하면 그 기울기가 감쇠계수 (dB/m)가 된다.

#### 나. 초음파 파라미터 측정 방식별 특성분석

##### 1) 초음파 파라미터별 측정방식

본 연구에서는 과실의 경도와 관계있는 초음파 파라미터로 진파속도와 음향 임피던스를 선정하고, 이들을 측정하기 위한 방법으로 표 2-1의 두 가지 방식을 검토하였다.

Table 2-1. Ultrasonic measurement method

Ultrasonic parameter	Method of transmitted and receiving
Propagation velocity	transmission
Reflection coefficient (impedance)	Reflection (in air and water)

먼저 전파속도는 초음파가 매질 내부를 전파한 시간을 측정하고 이를 전파거리로 나누어 구하는 것이 일반적이다. 이를 전파시간법 또는 TOF (Time-Of-Flight)법 이라고 한다. 이것은 투과법과 반사법이 모두 가능한데, 투과법에서는 그림 2-2의 a)에서와 같이 투과시간을 측정하고 이를 투과거리로 나누어 전파속도를 구한다. 이에 반해 반사법에서는 그림2-2의 b)에서와 같이 반사파가 되돌아와 수신되는 시간을 측정하고 이를 왕복거리로 나누어 전파속도를 구하는 방식이다.

본 연구에서는 투과법을 이용하기로 하였다. 반사법은 망고와 같이 내부에 확실한 반사체(씨)가 있어 투과보다는 반사가 유리한 경우에 이용될 수 있는데, 본 연구에서 검토대상으로 하는 사과와 과육부의 경계가 분명하지 않아서 씨방에서의 반사 신호를 획득하기 어렵고, 따라서 반사법보다는 투과법이 더 유리하리라고 예상되기 때문이다. 단, 이 경우 얻어지는 전파속도는 과피(껍질), 과육, 씨를 모두 투과한 초음파의 평균적인 정보이기 때문에 사과 전체의 전반적인 경도 (또는 탄성계수)를 반영할 것으로 예상된다.

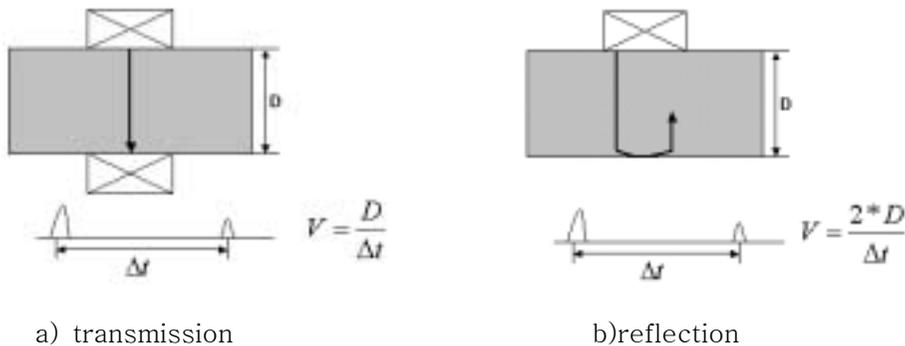


Fig. 2-2. Measurement principle of ultrasonic propagation velocity.

한편 과피(껍질)의 경도는 피하 과육부의 경도를 어느 정도 반영할 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 시험적으로 과피의 경도를 측정하여 보기로 하였다. 다만 과피는 씨방과 마찬가지로 과육부와와의 경계가 명확하지 않으면서 더욱이 그 두께가 매우 얇아서 앞에서와 같이 과피 내부에서의 반사파를 얻어 전파속도를 측정하는 방식은 적용할 수 없다. 이에 본 연구에서는 과피 표면에서의 반사계수를 구하여 보기로 하였다. 이를 위해서는 반사법을 적용해야 하는데 여기서는 공중반사법과 수중반사법에 대해서 검토하였다.

## 2) 투과법 적용의 특징 분석

### 가) 투과법의 기본 시스템 구축

그림 2-3에서와 같이 초음파 송수신 장치로 RAM5000(RITEC Inc., USA)이 사용되었고 50 kHz PZT 초음파 센서, 초음파의 음압을 모아주는 음향혼, 또한 자동으로 시스템을 작동시키기 위해 공압을 사용하였다. 이 시스템을 사과에 적용해 사과 내부를 투과한 신호를 획득하여 사과 내부의 전파속도 측정을 시도하였다.

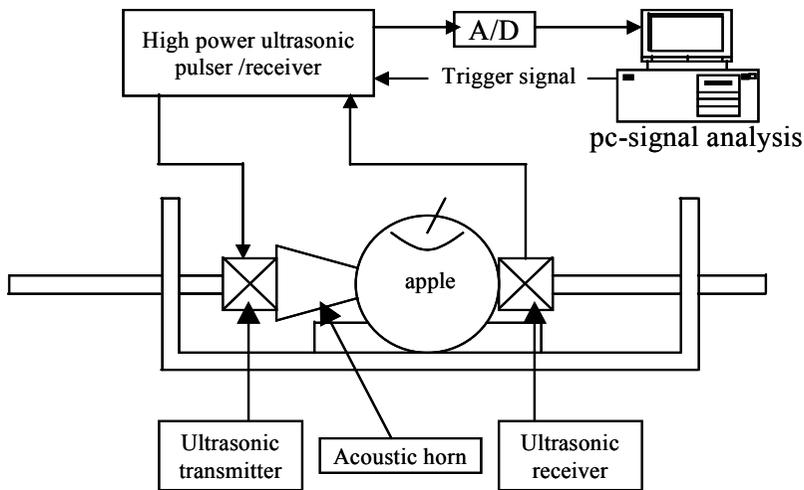


Fig. 2-3. Ultrasonic transmission measurement system.

### 나) 초음파 투과신호의 특징

상기 시스템을 이용 사과의 투과파 신호를 획득한 결과 그림 2-4와 같은 신호를 획득하였다. 이를 통해 초음파가 사과를 투과한 시간을 측정하면 사과 내부의 초음파 속도측정이 가능하다. 하지만, 위의 시스템을 이용해 사과의 전파속도를 측정하던 중 초음파의 미약한 투과성 확보를 위해 송신 출력을 높일 경우 음향혼에서의 공중파 누설이 심각해 질 수 있음 확인할 수 있었다.

공중파 누설은 그림 2-4와 같이 장치를 구성하여 음향혼 주위의 공중파 누설 경로를 차단한 신호(그림 2-6)와 차단하지 않은 신호(그림 2-4)의 비교를 통해서 확인할 수 있다. 따라서 투과법 적용시 이런 누설 효과를 억제하기 위한 대책이 필요함을 알 수 있다.

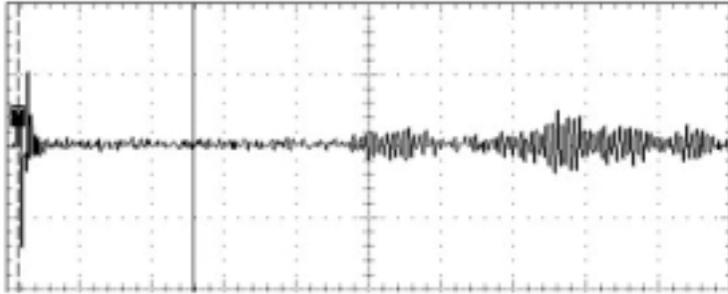


Fig. 2-4. Ultrasonic transmitted signal through apple.

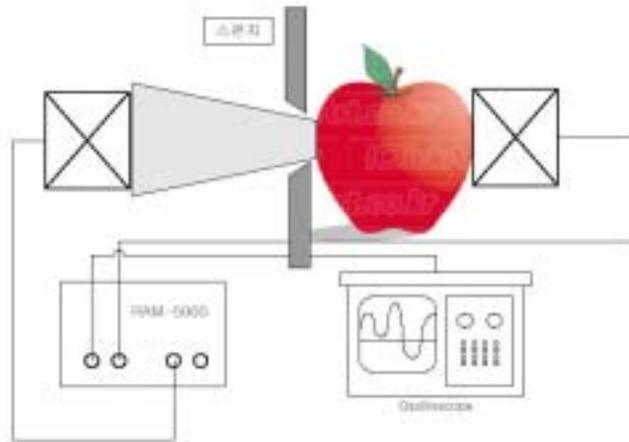


Fig. 2-5. Experiment for cutting-off the signal through air.

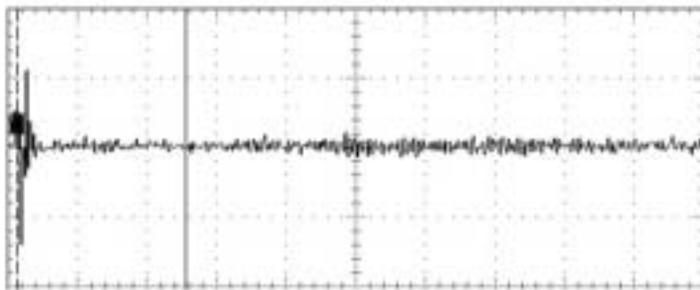


Fig. 2-6. Obtained ultrasonic signal at the signal through air cut-off .

#### 다) 공중과 누설 저감 대책

여기서는 음향혼 재질, 형상에 따른 공중과 누설 정도를 시험하였다. 그림 2-7~2-9는 아크릴과 스틸로 만들어진 서로 다른 길이와 출구직경을 갖는 음향혼에 대하여 공중과 누설 정도를 측정하는 것이다. 우선 같은 형상에서 스틸의 경우 공중과 누설이 현저히 낮음을 확인할 수 있었고, 형상에서는 큰 차이를 확인할 수 없었다. 따라서 아크릴은 가공이 용이하지만 음향혼의 재질로는 아크릴 보다는 스틸이 유리하다고 할 수 있다.

#### 라) Slice 시편에 대한 투과 속도 측정

사과 샘플 과육부분의 일반적인 물성을 검토하기 위하여, slice로 자른 사과와 초음파 투과 속도를 측정하여 보았다. 그림 2-10은 두께 10~11 mm 정도로 자른 사과를 투과한 신호 파형이다. 투과시간으로부터 사과 내부의 전파 속도는 대개 200~220m/s 정도가 됨을 확인할 수 있다. 이는 Mizrach(1997) 등이 측정한 결과와 유사하다. 따라서 구성한 기본 시스템은 유효한 것으로 사료된다.

#### 마) 투과법 적용의 문제점

앞에서 검토한 바와 같이 공중 누설과를 억제하기 위해서는 음향혼의 재질을 스틸로 하고 공중 전파 경로를 차단하는 것이 필요하다. 그런데 이렇게 하여 공중 누설과를 제거하더라도 현 단계에서 사과에 대한 초음파의 투과성은 매우 미약한 실정이다. 따라서 투과법을 적용하기 위해서는 투과성을 크게 향상시킬 필요가 있다. 이는 트랜스듀서와 매질과의 임피던스 매칭을 최적화하고, 트랜스듀서 (음향혼을 사용할 경우 음향혼)와 검사체와의 접촉면을 가능한 크게 하는 등의 방법으로 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

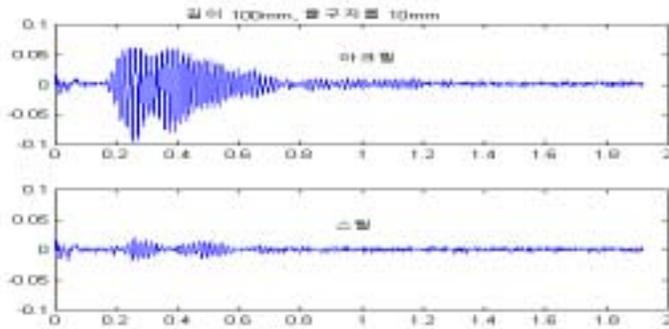


Fig. 2-7. Leakage comparison of air through signal at acoustical horn with 100 mm of length and 10 mm of existing diameter.

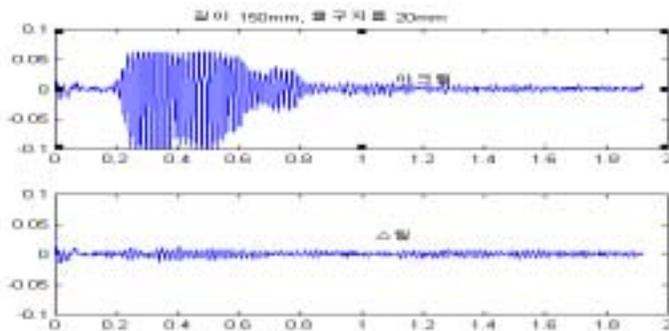


Fig. 2-8. Leakage comparison of air through signal at acoustical horn with 150 mm of length and 20 mm of existing diameter.

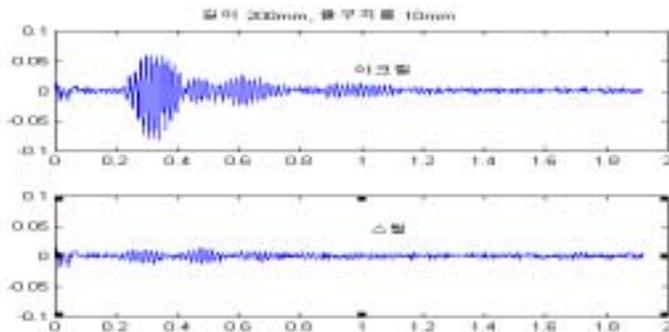


Fig. 2-9. Leakage comparison of air through signal at acoustical horn with 200 mm of length and 10 mm of existing diameter.

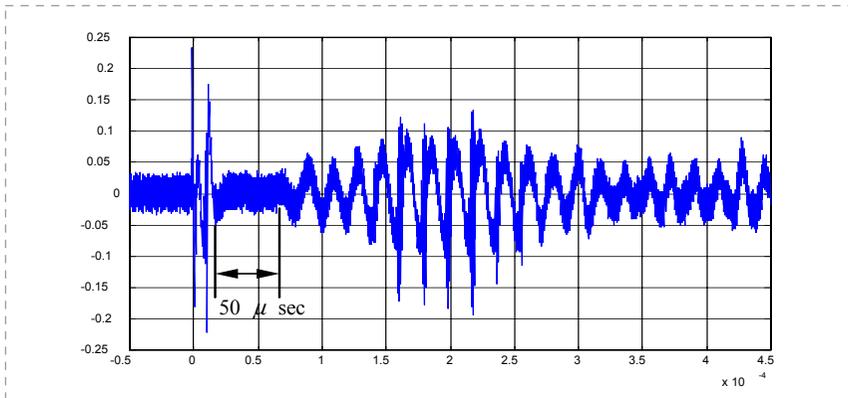


Fig. 2-10. Ultrasonic transmitted signal through sliced apple specimen.

### 3) 공중 반사법 적용의 특징 분석

과거 수박, 무, 감자등에 대한 연구에서는 청과물에 초음파를 투과시켜 그 신호를 분석하여 물성 평가에의 응용이 효과적으로 이루어졌지만, 사과와 같은 경우 초음파의 투과성이 너무 약해 물성 평가에 활용되기 어려움을 실험을 통해 확인하였다. 이에 대한 대안으로 반사법을 적용하는 방안에 대해서 살펴보았다.

반사법을 적용할 때 경도 측정에 활용될 수 있는 초음파 파라미터는 전파 속도, 에너지 반사율 등을 생각할 수 있다. 다만 전파속도는 내부 반사 에코를 얻어야 하는데 사과는 망고에서와 같은 단단한 반사체(씨)가 없고 또한 씨방에서 약간의 반사가 있다 하더라도 초음파의 투과성이 미약하기 때문에 반사신호의 강도는 매우 떨어질 것이다. 따라서 본 연구에서는 샘플의 과피 부분에서의 에너지 반사율만을 측정하였다. 에너지 반사율은 과피 부분 외 과육부분의 음향 임피던스를 반영하는 것이며 전파속도와 동일한 물성을 반영한다.

한편, 반사법은 입사 매질의 종류에 따라 공중반사법과 수중반사법으로 구분할 수 있으며 본 연구에서는 두 가지 방식 모두를 시험하였다.

#### 가) 공중반사법의 기본 시스템 구축

반사법을 적용함에 있어서는, 공기 중에서 air-coupled 용량형 초음파 센서를 사용하여 경도 차이가 확연한 몇 개의 사과에 대해 반사 신호의 크기를 비교하는 실험을 수행하였다. 그림 2-11은 실험을 위한 장치의 구성을 나타내며,

Ram-5000을 이용, 초음파를 발생시키면 Air-coupled 용량형 초음파 센서가 초음파를 송신하여 사과를 맞고 반사한 신호를 수신한 후 이를 분석하는 것이다. 이를 위해 일정거리, 일정각도로 초음파를 송수신할 수 있는 음향혼을 제작하여 이용하였다.

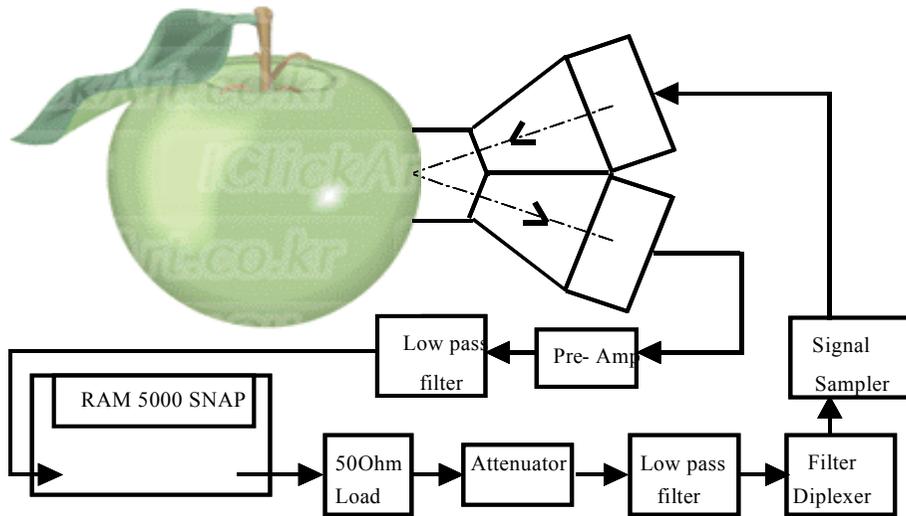


Fig. 2-11. Reflection method in air by air-coupled capacitive ultrasonic transducer.

#### 나) 공중 반사신호의 특징

상기 시스템을 이용하여 아주 단단한 사과, 중간 정도의 사과, 무른 사과에 대해 실험을 수행하여 각 사과마다 두개의 지점에서 받은 신호의  $V_{rms}$  값을 그림 2-12에서 비교하여 나타내었다. 그림 2-12의 결과를 통해 물성의 차이에 따라  $V_{rms}$ 가 작음을 확인할 수는 있으나 공중 반사법은 물성차이가 극심한 경우에도 반사 신호의 크기의 차이가 미약함을 알 수 있었다. 이 같은 결과는 본질적으로 공기와 사과의 음향임피던스 차가 너무 커서 사과의 경도 차이에 따른 음향 임피던스의 변화를 반영하지 못하기 때문으로 사료된다.

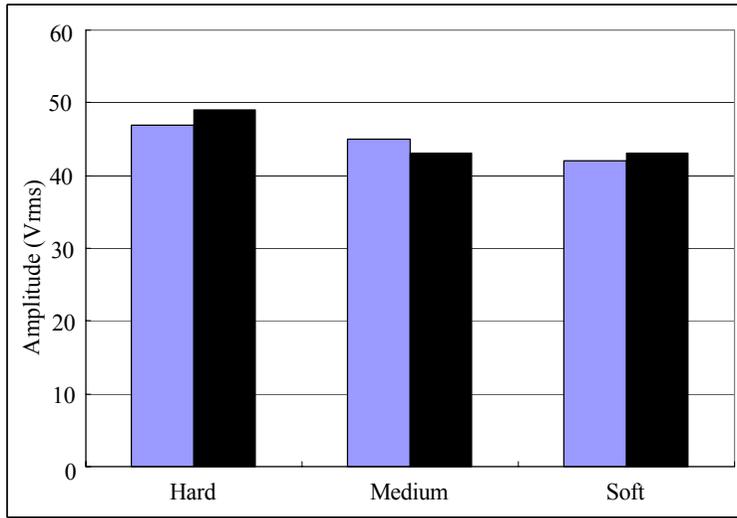


Fig. 2-12. Comparison of signal-amplitude at various hardness of apple(in air).

다) 수중 반사법 도입의 필요성

반사법을 적용하여 사과와 물의 물성 변화에 따른 에너지 반사율을 민감하게 측정하기 위해서는 수중 반사법이 공중 반사법보다 유리함을 음파의 에너지 반사 원리를 통해 다음과 같이 살펴보았다. 그림 2-13과 같이 서로 다른 두 매질의 경계면에 음파가 입사될 때, 입사된 파는 투과되거나 반사된다. 이때 경계면에서의 반사파 에너지를 입사파 에너지에 대한 비율로 나타내면 식(2-16)과 같다.

$$R = \frac{(z_1 - z_2)^2}{(z_1 + z_2)^2} \quad (2-16)$$

여기서  $z_1, z_2$ 는 각각 매질1, 2의 음향 임피던스로 일반적으로 밀도와 매질내부에서의 전파속도의 곱으로 정의된다. 전파속도는 매질의 탄성계수, 경도등과 깊은 상관성을 갖는 파라미터이므로 에너지 반사율 측정을 통해 사과의 탄성계수, 경도를 추정하거나, 음향 임피던스 자체와 사과의 속도 등 과 상관관계를 분석하는 방법을 생각할 수 있다. 그런데 앞서와 같이 공중 초음파를 이용한 경우, 단단함이 크게 다른 샘플에서 조차 반사 신호의 크기가 크지 않았다. 이렇게 사과의 물성 차이에 따른 반사 신호 크기 차이가 적은 것은 식(2-16)을 이용해

설명할 수 있다.

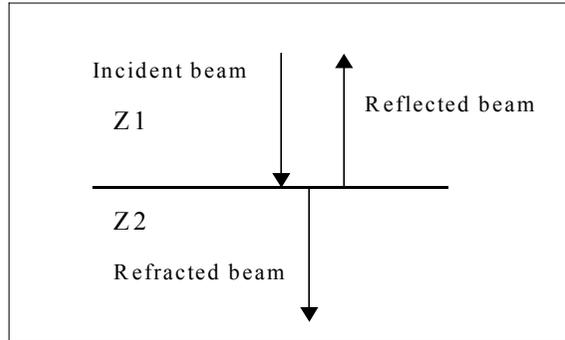


Fig. 2-13. Concept of acoustic reflection.

그림 2-14는 매질1의 음향 임피던스가 고정되어 있고 매질 2의 음향 임피던스가 변함에 따라 음파의 에너지 반사율이 어떻게 변하는 가를 식(2-16)을 이용해 도시 한 것이다. 그림 2-15를 살펴보면, 매질 2의 음향 임피던스( $z_2$ )가 매질 1의 음향 임피던스( $z_1$ )에서 멀어질 때, 그 임피던스 차이에 따른 에너지 반사율의 차이가 미소함을 알 수 있다. 이에 반해  $z_2$ 가  $z_1$ 의 부근에서 변할 때 반사율(R)은 크게 변할 수 있다. 사과와 평균밀도는  $0.8\text{g/cm}^3$  정도 이고, 기존에 알려진 사과 내부에서 음속은 대략  $100\sim 200\text{m/s}$  정도라고 보았을 때, 사과의 음향 임피던스는 대략  $0.8 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^4 \text{ g/cm}^2\text{sec}$  정도로 예상할 수 있다. 공기, 물의 음향 임피던스는 각각  $40 \text{ g/cm}^2\text{sec}$ ,  $1.48 \times 10^5 \text{ g/cm}^2\text{sec}$  정도이다. 따라서 매질1을 공기로 한 공중 초음파의 경우 사과의 임피던스와 공기의 임피던스 차이가 커서 반사 신호의 차이가 미미할 수밖에 없었던 것으로 사료된다. 그림 2-15는 이렇게 대략적으로 예상되는 사과의 음향 임피던스 구간(점선 내부)에 대해 매질1을 공기와 물로 할 경우 에너지 반사율을 도시한 것이다. 그림 2-15의 점선 내부의 구간에서 (a)의 경우 에너지 반사율은 거의 변함이 없고, (b)의 경우 에너지 반사율의 변화가 상대적으로 훨씬 커짐을 알 수 있다.

여기서 한 가지 언급할 점은 그림 2-15의 (b)를 보면 예상된 사과의 음향 임피던스가 입사측 매질, 물의 음향 임피던스 보다 낮기 때문에, 음향 임피던스가 증가할수록 에너지 반사율은 낮아지는 경향을 가질 것으로 예측되지만, 실제 수침 탐상을 적용하여 실험을 해본 결과는 그 반대의 양상을 보인다는 것이다. 이것은 사과의 껍질에 의한 영향 때문으로 사료되는데, 이 부분에 대해서는 향후 추가적인 검토가 필요하다. 그러나 민감도 관점에서 물이 공기보다는 입사측 매질로 더 적합하다는 사실에는 변함이 없다.

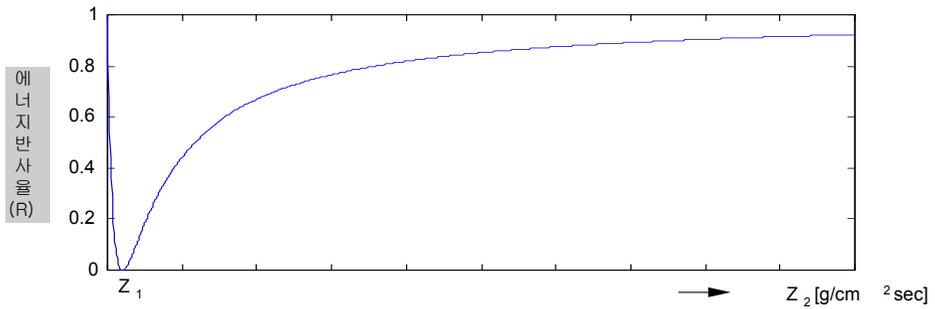


Fig. 2-14. Change of reflection energy according to acoustic impedance of material 2 when the acoustic impedance of material is fixed.

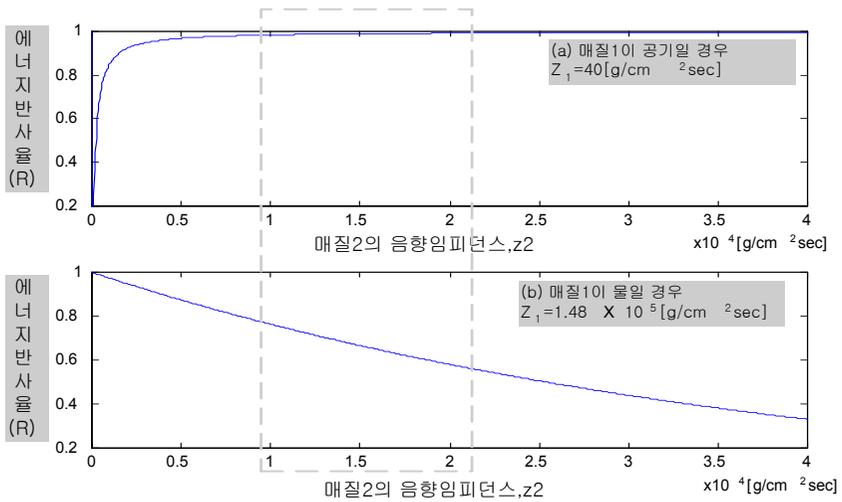


Fig. 2-15. Comparison of change of reflection energy according to acoustic impedance of material 1 when the kinds of materials are air and water respectively.

#### 4) 수중 반사법 적용의 특징 분석

##### 가) 수중 반사법 적용을 위한 기본시스템의 구성

그림 2-16에 보이는 바와 같이 5 MHz 초음파 센서를 사용하여, 수조 속에 사과를 수침시키고 수조 밖에서 Pulsar-Receiver를 사용하여 초음파 신호를 송수신하였다. 반사면이 초음파 입사 방향에 수직인 평면이 아니기 때문에, 수신 신호는 센서의 위치에 따라 크게 변한다. 따라서 서로 다른 샘플에 대해 같은 조건으로 실험을 수행하기 위해서는 초음파 센서를 일정한 거리에 있는, 입사 방향에 수직인 면에서 움직여가면서 최대 신호가 나오는 지점을 찾아야 한다. 또 저주파 초음파의 경우 초음파 송신 신호와 수신 신호의 명확한 구분을 위해 충분한 전과거리(delay line)를 확보할 필요가 있다.

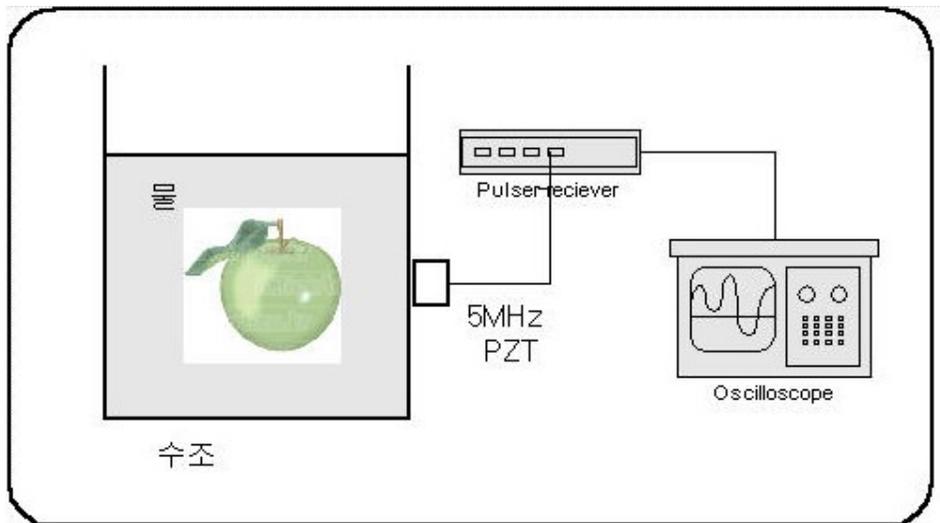


Fig. 2-16. Test apparatus for reflection method in water.

##### 나) 수중 반사 신호의 특징

이러한 기초적인 수중반사 실험을 통해 사과의 음향 임피던스 차이에 따른 반사 신호의 차이를 확인하기는 힘들었다. 그 이유는 반사가 일어나는 곡면이 개체마다, 같은 개체라도 부위에 따라 그 형상, 특히 곡률이 달랐고 이러한 영향이 반사 신호의 크기에 큰 영향을 미쳤기 때문이다. 그림 2-17은 동일한 사과에서

비교적 평평한(곡률이 낮은) 부분에서 반사된 신호와 볼록하게 볼거져 나온(곡률이 높은) 부분에서 반사된 신호를 비교한 것이다. 이러한 곡률에 의한 영향은 초음파 신호를 집속시킴을 통해서 상당 부분 줄여줄 수 있을 것으로 사료된다. 이상의 기초적인 실험을 통해 사과의 음향 임피던스 측정용 수중측정 시스템 설계에 기본적으로 필요한 조건은 최대 신호 발생 지점을 찾기 위한 scanning이 필요하고, 송신 신호와 수신 신호를 분리하기 위한 delay line 확보가 필요하며 곡률 영향을 최소화할 수 있는 집속형 수중 탐촉자의 필요성 등이라고 할 수 있다.

#### 다) 수중 집속 초음파의 적용

반사법에서는 저주파 초음파 센서에 대한 필요가 투과법 만큼 절실하지는 않을 것으로 판단되나, 향후 사용 주파수 선정에 관한 판단의 근거를 마련하는 등 여러 가지 이유로 해서 일단 50 kHz, 100 kHz PZT 타입 센서에 맞는 음향 렌즈를 설계하여 수중반사법에의 적용을 시도해 보았다. 음향렌즈는 식(2-17)을 이용하여, 그림 2-18과 같은 제원으로 설계하였다.

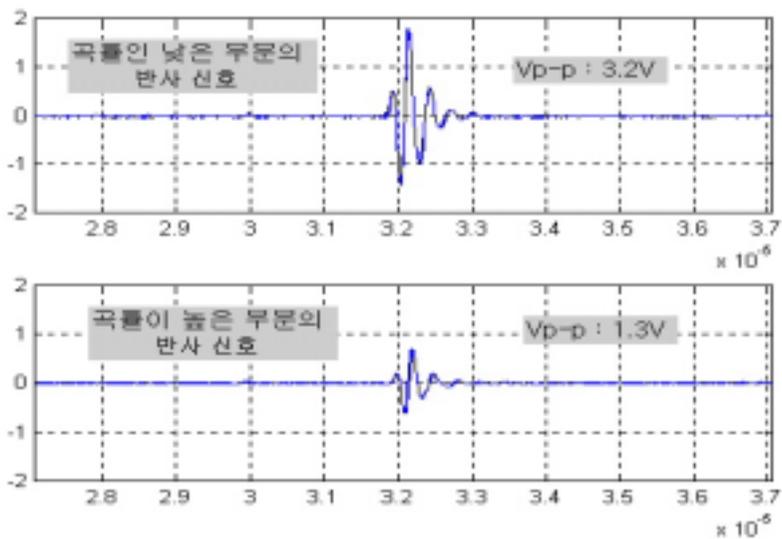


Fig. 2-17. Reflection signal due to curvature of reflection surface by non-focusing ultrasonic transducer.

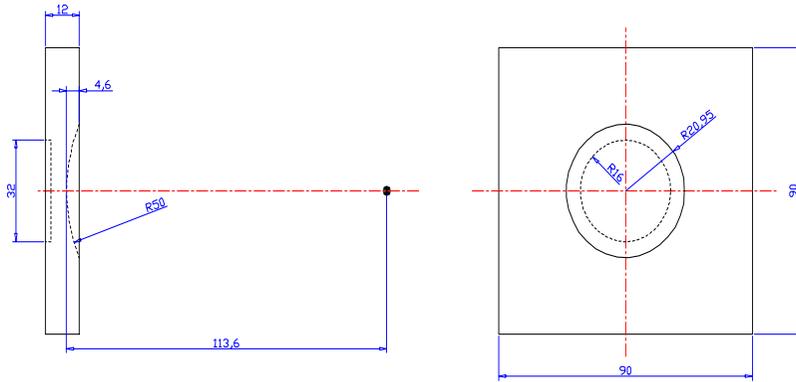


Fig. 2-18. Design specification of acoustical horn for ultrasonic focusing.

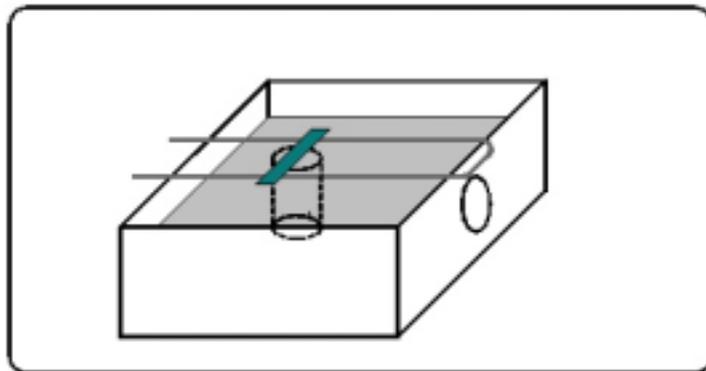


Fig. 2-19. Experiment for ultrasonic focusing effect.

$$f = r / (1 - V_w / V_l) = r / 0.44 \quad (\text{in Acrylite}) \quad (2-17)$$

여기서,  $f$  : 초점거리(113.6 mm),  $r$  : 곡률반경(50 mm)  $V_w$  : 물에서의 음속  
 $V_l$  : 렌즈 내에서의 음속을 나타낸다.

그림 2-19와 같이 설계된 음향렌즈는 아크릴로 제작된 수조의 한쪽 벽면에 가공되었다. 여기에 PZT 타입 센서를 부착하고, 그 앞에 수침시킨 원통형의 반사체를 이동시켜 설계된 지점에서 초음파 집속이 이루어지는지의 여부를 확인하였다. 그림 2-20은 센서에서 먼 지점에서부터 가까운 지점으로 반사체를 움직여 가면서 반사 신호를 포착한 것이다.

그림을 보면 알 수 있듯이 초점거리가 설계의도(113 mm전후)와는 먼 지점(180 mm전후)에 생기며, 그 효과도 미미한 것으로 나타났다. 이는 주파수 분산성(저주파수 일수록 굴절효과 저하), 음향렌즈의 가공 불량(곡률반경 증가, 렌즈면 요철) 등이 주원인으로 사료된다.

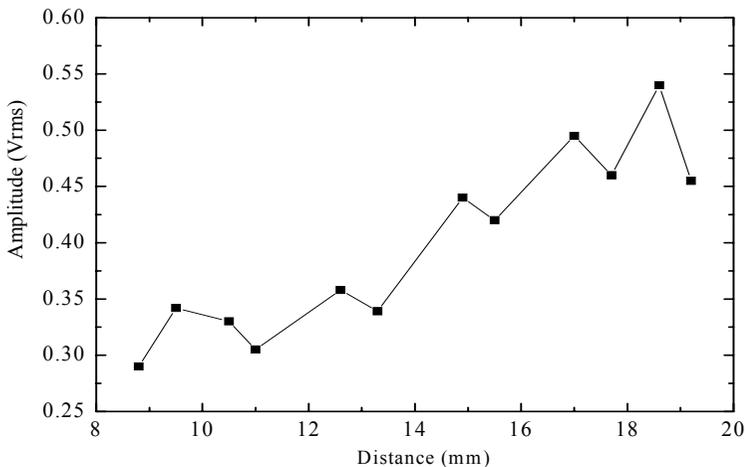


Fig. 2-20. Reflection signal of focused ultrasonic wave according to the distance.

라) 수중 집속 초음파에 의한 C-스캔 이미지 분석

수중 반사법 실험을 통해 확인한 기본적인 구비조건을 만족시킬 수 있는 상용 초음파 C-scan Image System(상용 집속형 센서 사용)을 적절히 이용해 사과의 음향 임피던스를 측정하기 위해 더 고려되어야 할 사항을 알아보았다. 이 C-scan Image System은 수조의 깊이가 알아 사과를 불가피하게 잘라서 실험을 수행하여야 했다. 우선 수중 반사법 실험과 유사하게 반사 신호의 곡률에 의한 영향을 조사해보았다. 그림 2-21은 그 결과를 나타낸다. 초음파 집속에 의해 상대적으로 곡률의 영향이 크게 줄어들긴 하였으나, 완전히 곡률 영향을 없애기는 어려울 것으로 사료된다.

그림 2-22는 아주 단단한 사과에서 초음파 C-scan 영상을 얻은 것이다. 최대 신호가 발생하는 지점에서 측정한 rms값은 324.9 mV 이었다. 그림 2-23은 비교적 무른 사과에 얻은 초음파 C-scan 영상이다. 그림 2-23에서는 반사 신호 강도가 현저히 낮아짐을 확인할 수 있다. 그림 2-23의 최대 신호 발생 지점의 rms값은 92.6 mV이었다.

그림 2-24는 두 결과를 비교한 것으로 공중반사법에서보다 신호크기에 큰 차이가 나타남을 알 수 있으며 앞에서 예측한 바와 같이 수중반사법의 적용이 보다 유리함을 확인할 수 있다. 단, 결과의 신뢰도를 확보하기 위해서는 많은 샘플에 대한 시험이 수반되어야 할 것으로 사료된다.

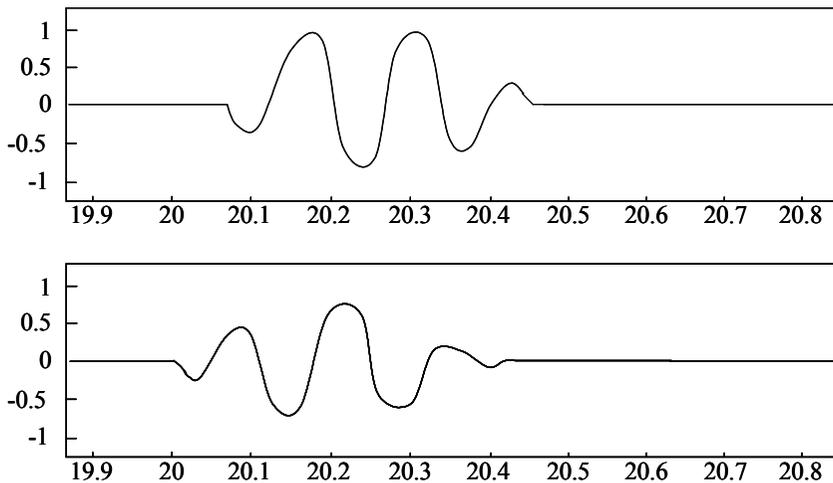


Fig. 2-21. The curvature of reflection surface effect on reflected signal.

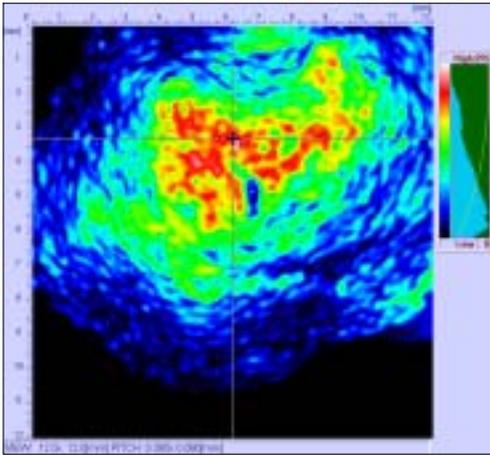


Fig. 2-22. Ultrasonic C-scan image of hard apple.

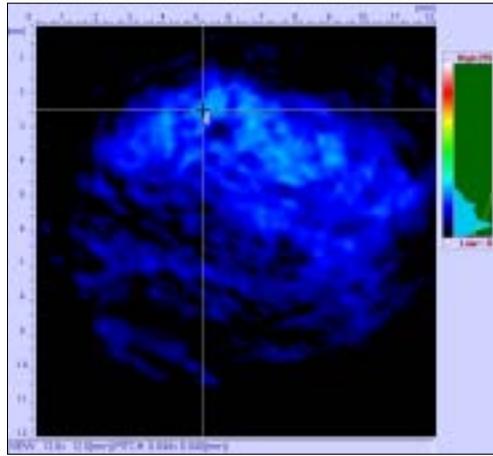


Fig. 2-23. Ultrasonic C-scan image of hard apple.

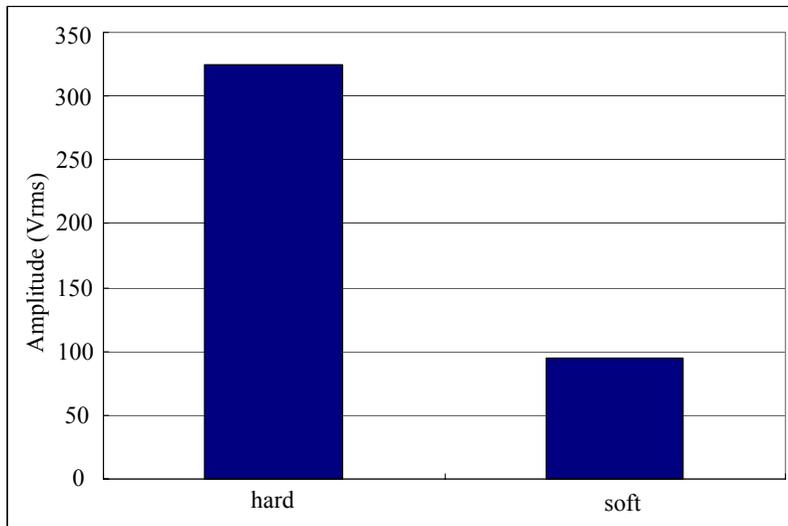


Fig. 2-24. Comparison of signal-amplitude between hard and soft apples.

마) 수중 반사법 적용의 문제점

수중반사법은 공중반사법에 비해 물성 변화를 민감하게 측정할 수 있는 점이 기대되나 표면형상의 영향이 존재하고 이를 억제하기 위해서는 집속탐촉자를 이

용하는 것이 필요하다. 그러나 이 경우 측정 결과는 국부적인 물성에 의존하게 되는 문제가 있다.

#### 5) 초음파 파라미터 측정 방식별 특징 비교 분석 결과

청과물의 물성을 초음파를 이용하여 비파괴적으로 평가하기 위하여 초음파 전파속도와 음향임피던스를 측정 파라미터로 선정하고 이를 측정하기 위한 계측 방식으로 투과법, 공중반사법, 수중반사법을 적용하여 각각의 성능을 시험하고 비교 분석하였다. 그 결과를 표 2-2에 정리하여 나타내었다.

공중반사법의 경우 장치 구성 측면에서 현장적용성이 우수할 것으로 예상되나 청과물 물성 변화에 대한 측정파라미터의 민감도가 떨어지는 것으로 나타났다. 수중반사법은 공중반사법에 비해 물성 변화를 민감하게 측정할 수 있는 점이 기대되나 표면형상의 영향이 존재하고 이를 억제하기 위해서는 접촉탐촉자를 이용하는 것이 필요하다. 그러나 이 경우 측정 결과는 국부적인 물성에 의존하게 되며, 따라서 샘플의 평균적인 물성정보를 얻기 위해서는 3차원적인 스캔 등의 장치 구성이 매우 복잡하게 되어 현장 적용이 매우 어려울 것으로 예상된다.

투과법의 경우 표면형상의 영향이 적은 장점이 있는 반면 투과성이 미약하여 분석이 가능한 투과신호의 획득이 곤란하다는 문제가 있었다. 그러나 이런 미약한 투과성만 극복된다면, 투과법에 의한 전파속도 측정이 표면 형상 영향도 없고, 민감도도 높으며, 샘플 내부의 평균적인 영역의 물성을 측정할 수 있는 최적의 탐상법이 될 것으로 예상할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 수중반사법의 적용가능성을 제시할 수는 있으나 더 이상 추가적인 검토는 하지 않고, 사과에서의 초음파 투과성을 향상시켜 투과법을 적용하는 방법에 집중하였다.

Table 2-2. Comparison of ultrasonic measurement methods

	Parameter	Merit	Weakness
Transmission	propagation velocity	-Small effect surface shape -Good sensitive property	-Difficult to detain transmission -Need to contact with uniform pressure
Reflection (in water)	Ration of energy reflection (acoustic impedance)	-Non-contact -Good sensitive	-2D scan using focusing transducer is required to reduce the effect of surface shape -Represent only local area property
Reflection (in air)	Ration of energy reflection (acoustic impedance)	-Non-contact -Simple apparatus	-Effect of surface shape is large -less sensitive

## 2. 과실 과육의 초음파 특성 실험

본 실험은 과실 시편을 투과한 초음파 파라미터와 압축실험을 통해 얻어진 과실의 기계적 특성 사이의 상관관계를 분석하였다. 초음파 파라미터는 투과법을 이용하여 TOF(time of flight), 초음파 속도, 감쇠계수, 피크 주파수를 측정하였고 기계적 특성은 본 과제에서 개발된 UTM(김 등, 2000)을 이용하여 측정하였다.

### 가. 재료 및 방법

그림 2-25는 초음파 투과실험을 하기 위한 실험장치의 개략도를 나타내고 있으며 그림 2-26은 실제 초음파 투과 실험 사진이다. 초음파 펄서/리시버는 Square Wave Pulsar (SP-801 RITEC Inc., USA)와 Broadband Receiver (BR-640 RITEC Inc., USA)를 사용하였다. 초음파 트랜스듀서는 중심주파수가 0.5 MHz, 직경 20 mm인 접촉식 초음파 트랜스듀서(Panametrics Inc., USA)를 사용하여 송수신하였다. 시편을 투과하여 수신된 초음파는 1 GHz의 sampling rate를 가지는 오실로스코프(LeCroy Inc., USA)를 이용하여 수신하였다.

실험에 사용된 시료는 저장된 부사로서 시중에서 구입하였다. 균일한 실린더 형상의 사과 시편을 만들기 위하여 직경 40 mm의 샘플 채취기를 이용하였다. 사과 씨방 부분과 과피를 제외한 과육에 대하여 8~26 mm의 두께로 시편을 제작하였다. 여기서, 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 생물체항복강도(bioyield strength)와 탄성계수 값들을 측정하였다.

### 나. 결과 및 분석

#### 1) 초음파 파라미터 해석

과실 시편을 투과한 신호는 그림 2-27에서 보는 바와 같이 잡음이 많이 포함되어 정확한 TOF와 피크 주파수의 측정이 어렵다. 정확한 TOF와 피크 주파수의 측정을 위해 수신된 초음파 신호를 신호 처리한 후 측정하였다. 그림 2-28은 시편의 두께에 따른 TOF의 변화를 나타낸다. 과실 시편을 투과한 TOF는 과실 시편의 두께에 변화에 따라 선형적으로 변화하고 있다. 그림 2-29는 과실 시편의 두께에 따른 초음파 감쇠계수를 나타내고 있으며 두께가 증가함에 따라 감쇠계수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 2-30은 과실 시편을 투과한 신호의 주파수

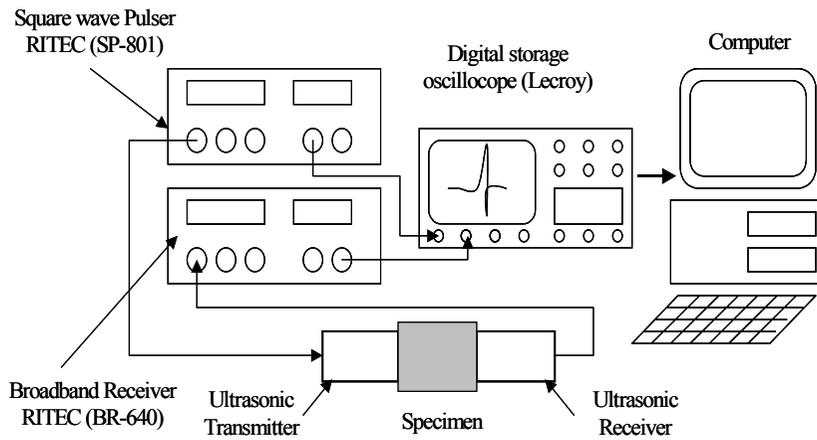


Fig. 2-25. Schematic diagram of ultrasonic measurement system.

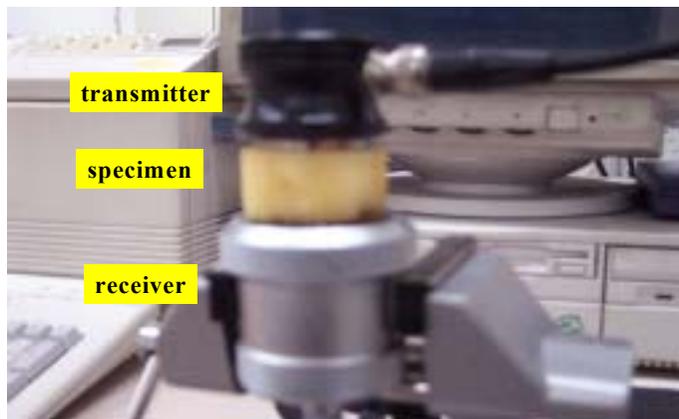


Fig. 2-26. Specimen, ultrasonic transmitter and receiver.

스펙트럼을 나타내고 있다. 과일 시편을 투과한 신호는 대부분 100 kHz 미만의 저주파수 성분임을 알 수 있다.

표 2-3은 각 과실에 따른 감쇠계수, 투과 속도, 피크 주파수를 나타낸다. 초음파 투과 속도는 사과가 232.44 m/sec, 배가 255.2 m/sec, 복숭아가 195.4 m/sec이고 각 과실의 감쇠계수는 사과가 1.61 dB/mm, 배가 1.15 dB/mm, 복숭아가 0.58 dB/mm이며 피크 주파수는 사과가 22.18 kHz, 배가 28.12 kHz, 복숭아가 13.7 kHz로 측정되었다.

Table 2-3. Ultrasonic attenuation and wave velocity of the fruits

Material	Attenuation (dB/mm)	Velocity (m/sec)	Peak frequency (kHz)
Apple	1.61	232.44 (13.19)	22.18 (3.38)
Pear	1.15	255.20 (21.59)	28.12 (11.79)
Peach	0.58	195.40 (22.80)	13.70 (1.44)

\*() notes standard deviation

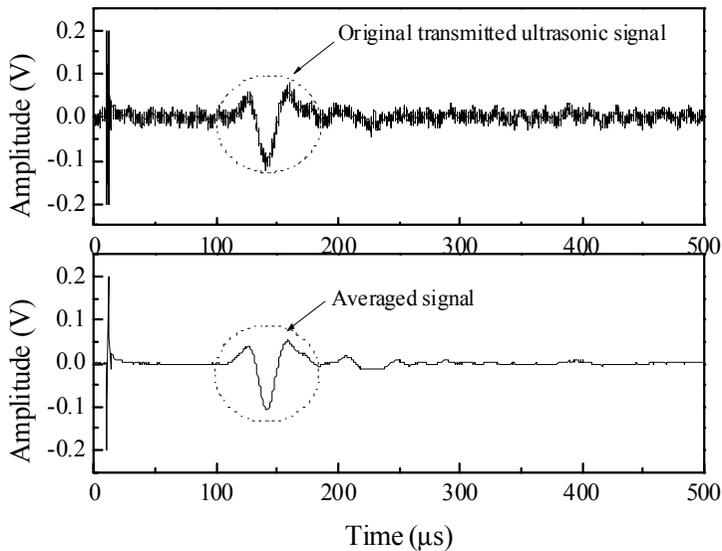


Fig. 2-27. Transmitted ultrasonic signal through the apple specimen and its averaged signal.

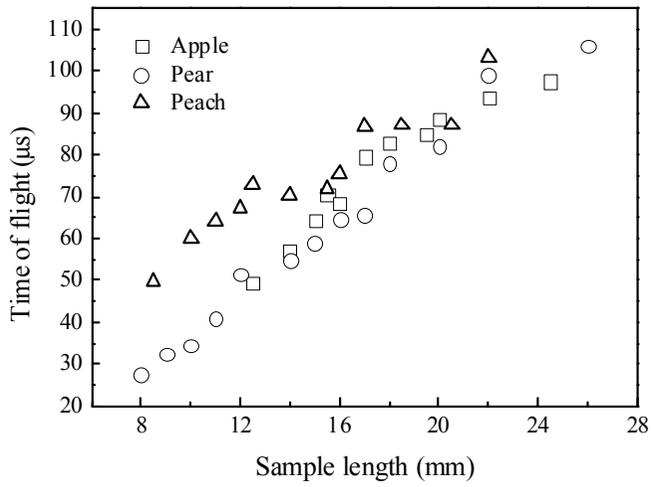


Fig. 2-28. Time of flight versus the sample length.

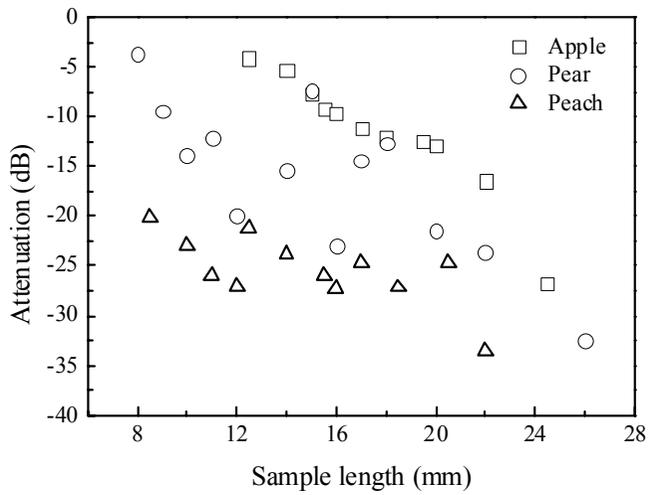


Fig. 2-29. Ultrasonic wave attenuations through the fruit specimens at different sample length.

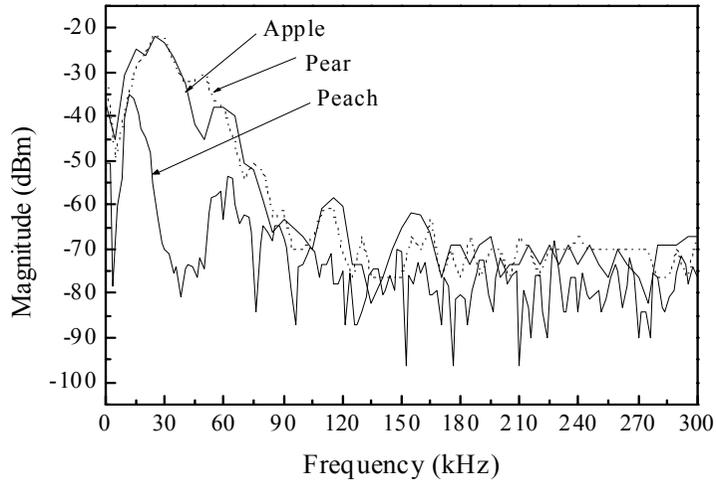


Fig. 2-30. Frequency Fourier spectra of transmitted ultrasonic signals through the fruit specimens with 22 [mm] sample length.

## 2) 초음파 파라미터와 기계적 특성 사이의 상관관계

초음파 파라미터와 과일 시편의 기계적 특성 사이의 상관관계를 분석하였다. 그림 2-31은 각 과일에 대한 기계적 특성 중 생물체항복강도(bioyield strength)와 탄성계수를 TOF에 대해 분석하였고 그림 2-32는 감쇠계수에 대해 분석하였으며 그림 2-33은 피크 주파수에 대해 분석하였다. TOF와 감쇠계수는 과일 시편의 기계적 특성에 대해 상관관계가 있는 것으로 나타났으나 피크 주파수는 상관관계가 낮게 나타났다. 그러나 초음파 파라미터를 이용하여 과일의 생물체항복강도나 탄성계수를 예측하는 것은 가능할 것으로 판단된다.

초음파 파라미터를 이용하여 생물체항복강도와 탄성계수를 예측하기 위한 회귀모델은 다음과 같다.

$$B = a_0 + a_1 TOF + a_2 A + a_3 F_1 \quad (2-1)$$

$$E = a_0 + a_1 TOF + a_2 A + a_3 F_1 \quad (2-2)$$

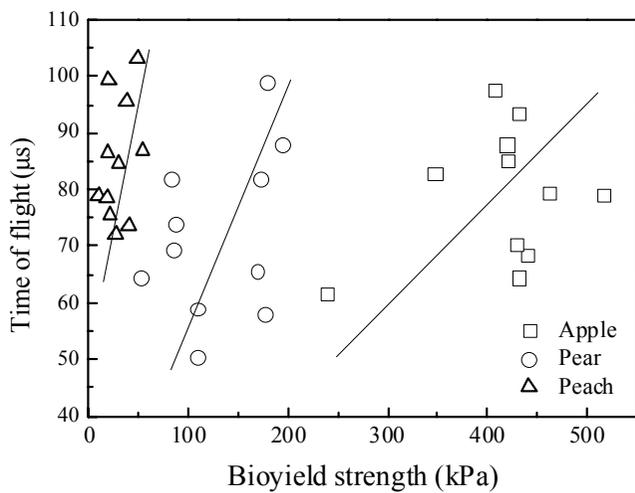
여기서, B는 생물체항복강도(kPa), E는 탄성계수(kPa), A는 감쇠계수(dB/mm)이고  $F_1$ 은 피크 주파수(kHz)이며,  $a_0, a_1, a_2, a_3$ 은 상수이다.

표 2-4는 회귀분석 결과를 요약하여 나타낸다. 회귀 모델의 결정 계수( $R^2$ )는 배를 제외하고 모두 0.5 이상이다. 회귀분석 결과로부터 과실의 기계적 특성을 초음파 파라미터를 통해 예측 가능한 것으로 나타났다. 그림 2-34는 각 과실에 대해 실제 측정된 생물체항복강도와 예측된 생물체항복강도 사이의 상관관계를 나타낸다. 그림 2-35는 각 과실에 대해 실제 측정된 탄성계수와 예측된 탄성계수 사이의 상관관계를 나타낸다. 배의 상관관계가 특히 낮게 나타나는 것은 각 개체간의 불균일성과 실험 과정 중 배 시편의 급격한 상태 변화가 원인인 것으로 판단된다. 과실의 저장기간과 조직 상태가 초음파 파라미터와 어떠한 관계가 있는지를 알기 위한 연구가 필요한 것으로 나타났다.

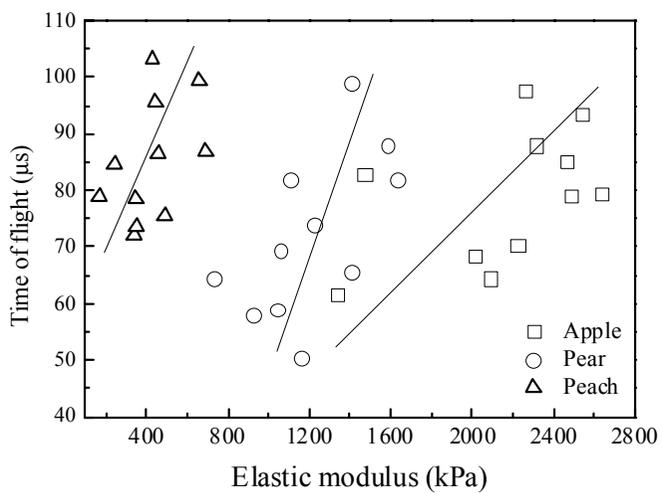
Table 2-4. Regression analysis for mechanical properties as a function of time of flight, attenuation, and peak frequency

Model	Fruit	Regression coefficient				$R^2$	RMSE
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$		
$B = a_0 + a_1 TOF + a_2 A + a_3 F_1$	Apple	623.04	-0.03	10.81	-3.48	0.627	51.28
	Pear	85.42	1.72	4.43	-0.20	0.532	40.97
	Peach	86.11	0.20	0.81	-3.74	0.294	14.20
$E = a_0 + a_1 TOF + a_2 A + a_3 F_1$	Apple	2330.86	11.10	39.94	-27.54	0.499	356.54
	Pear	419.62	13.33	16.83	-5.35	0.742	169.03
	Peach	541.93	5.056	15.37	-11.22	0.456	138.49

\* $R^2$  and RMSE note coefficient of determination and root mean square error, respectively

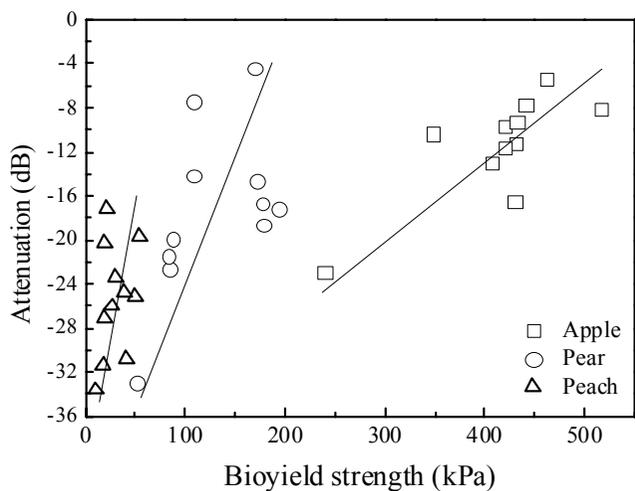


(a)

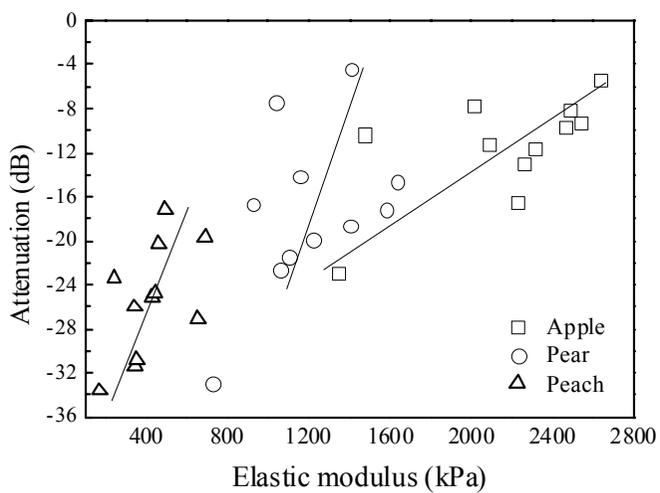


(b)

Fig. 2-31. Plot of time of flight versus mechanical properties of the fruit spectrum (a) bioyield strength, and (b) elastic modulus.

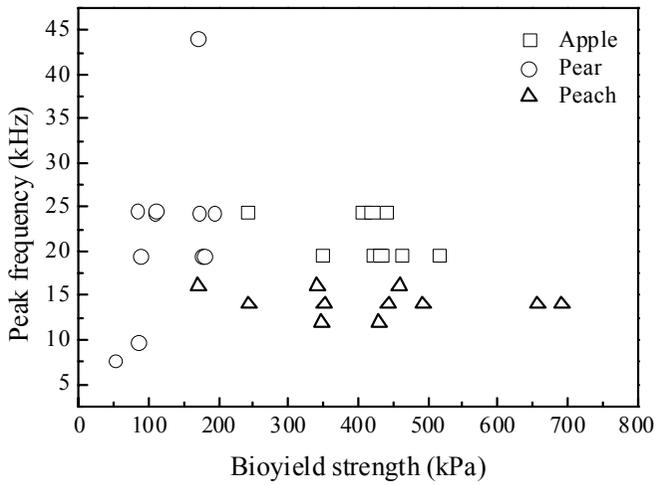


(a)

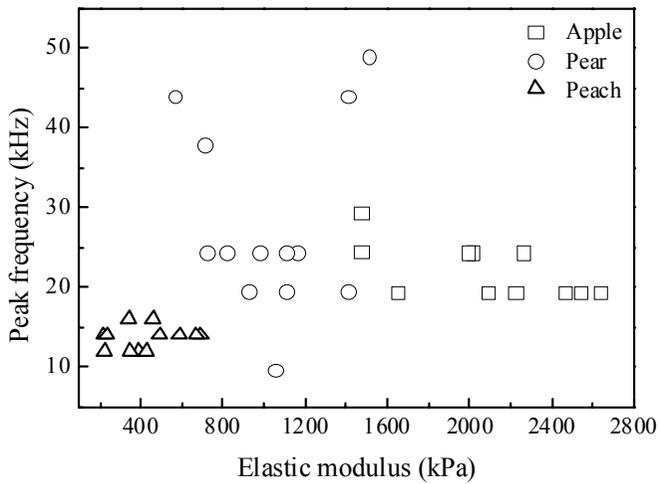


(b)

Fig. 2-32. Plot of time of flight versus mechanical properties of the fruit spectrum (a) bioyield strength, and (b) elastic modulus



(a)



(b)

Fig. 2-33. Plot of time of flight versus mechanical properties of the fruit spectrum (a) bioyield strength, and (b) elastic modulus

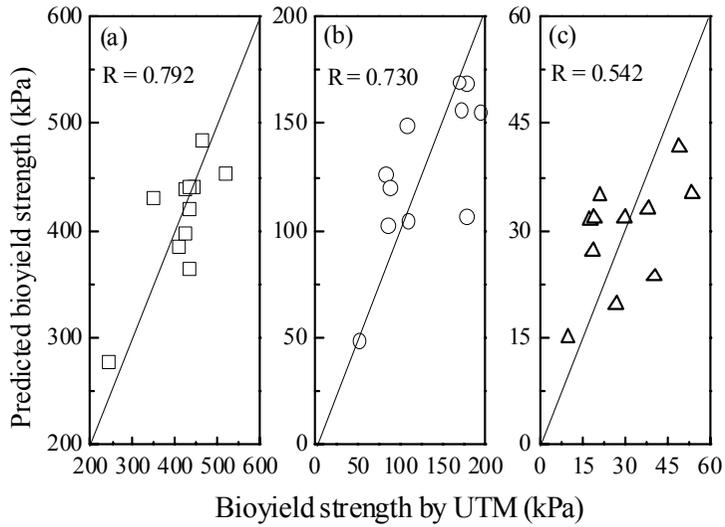


Fig. 2-34. Relationships between actual values, and predicted values of bioyield strength of (a)apple, (b)pear, and (c)peach

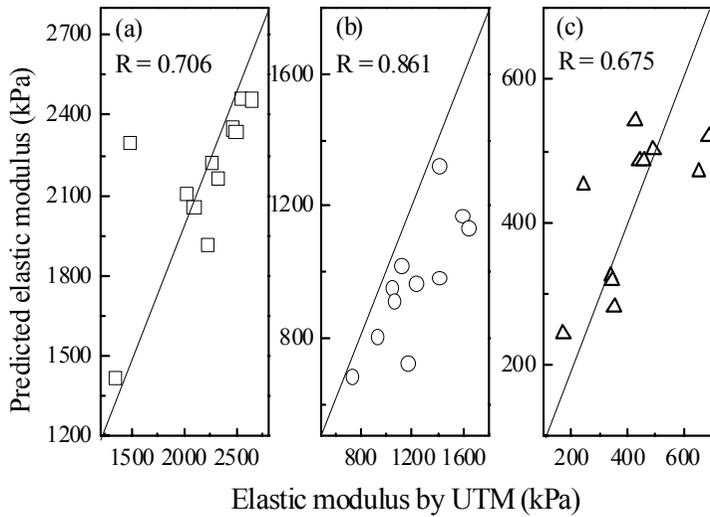


Fig. 2-35. Relationships between actual values, and predicted values of elastic modulus of (a)apple, (b)pear, and (c)peach

### 3. 저장기간에 따른 사과 과육의 초음파 투과 특성실험

본 실험은 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.

#### 가. 재료 및 방법

##### 1) 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 40 mm, 두께 14~22 mm의 시편을 만들었는데 하나의 사과에서 2개의 시편을 만들었다. 전체적으로 11개의 저장 기간별로 사과의 경도 변화가 자연스럽게 이루어지도록 하였다.

##### 2) 기계적 특성 실험장치 및 실험방법

사과 과육의 기계적 특성 측정은 본 연구에서 제작된 UTM을 이용하여 측정하였다. 시료압축을 위한 크로스헤드의 하중재하 속도는 5 mm/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.

##### 3) 초음파 투과 실험장치

과실의 초음파 파라미터를 측정하기 위한 실험장치는 그림 2-37에서 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.

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. 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 사과



Fig. 2-36. Compression test apparatus for apple flesh specimen.

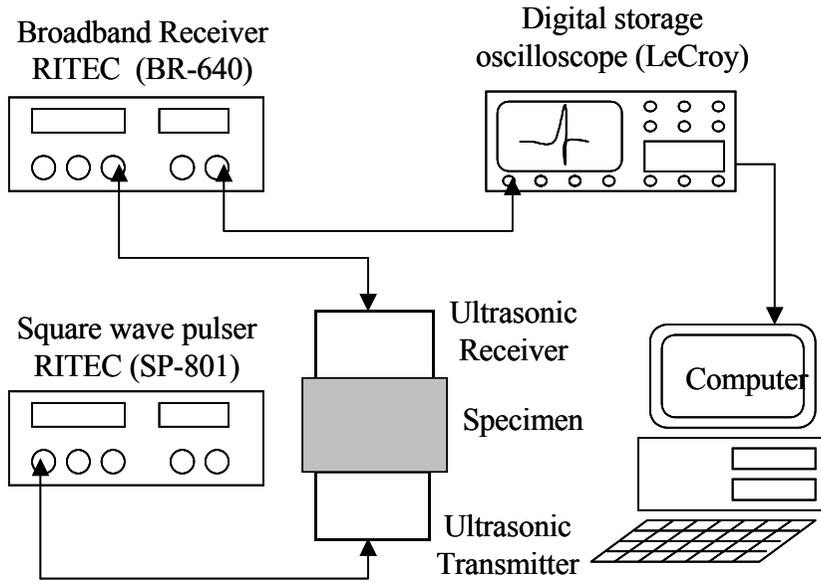


Fig. 2-37. Ultrasonic measurement setup.

파 투과속도, 감쇠계수, 주파수 등을 각각 분석하였다.

초음파 투과속도는 시편을 투과하여 수신되는 초음파의 TOF(time of flight)를 측정하여 다음 식(3-1)을 이용하여 계산하였다.

$$v_t = \frac{d_s}{TOF} \quad (3-11)$$

여기서,  $v_t$  는 초음파의 시편 투과속도(m/sec),  $d_s$  는 시편의 두께 (mm),  $TOF$  는 초음파 투과시간( $\mu$ s)이다.

초음파 신호의 감쇠는 시편에 입사되는 초음파 신호의 최대 진폭과 시편을 투과하여 수신되는 초음파 신호의 최대 진폭의 차이로서 다음 식(3-2)로부터 계산하였다.

$$A = \alpha \cdot d_s = 20 \cdot \log\left(\frac{V_i}{V_o}\right) \quad (3-2)$$

여기서,  $A$ 는 감쇠량(dB),  $\alpha$ 는 감쇠계수,  $V_i$  는 시편에 입사되는 초음파 신호의 최대 진폭(V),  $V_o$  는 시편을 투과하여 나오는 초음파 신호의 최대 진폭(V)을 각

각 나타낸다.

## 가. 결과 및 고찰

### 1) 사과 과육의 힘-변형 곡선

그림 2-36의 기계적특성 측정장치로 사과 과육의 압축시험을 한 결과 그림 2-38과 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 극한변형량이 급격하게 변하는 것으로 나타났다.

### 2) 저장기간에 따른 과육의 기계적 특성

저장기간에 따른 사과 과육의 기계적 특성은 그림 2-39~그림 2-40에서 보는바와 같다. 시료의 생물체항복강도와 극한강도는 그림 2-39에서 보는바와 같이 저장기간이 증가함에 따라 완만한 감소 경향을 보이다가 임의 시점에서 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 저장기간에 따른 생물체항복변형량과 극한변형량은 일정기간까지는 그림 2-40에서 보는바와 같이 거의 변화가 없으나 생물체항복강도와 극한강도가 급격하게 감소하는 시점에서 변형량이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

한편, 저장기간에 따른 사과 과육의 탄성계수는 그림 2-41에서 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.

### 3) 저장기간에 따른 초음파 신호특성

저장기간에 따라 사과 과육을 투과하여 수신되는 초음파 신호의 파형은 그림 2-42에서 보는바와 같다. 저장기간이 길어질수록 수신되는 초음파 신호의 감쇠가

크게 나타나고 있으며 전반적으로 저장초기의 깨끗한 과형이 저장말기로 갈수록 신호 패턴이 크게 달라짐을 알 수 있다. 이러한 특성을 파악한 다음 저장기간에 따른 초음파 속도와 감쇠계수를 분석한 결과 그림 2-43 및 그림 2-44에서 보는 바와 같다. 그림 2-43에서 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 2-41에서 나타난 바와 같이 저장기간이 증가함에 따라 탄성계수가 감소하게 되고 따라서 초음파 속도는 탄성계수의 함수이므로 저장기간이 증가함에 따라 초음파 속도는 감소하게 된다.

또한, 그림 2-44에서 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 탄성과 에너지가 내부에서 많이 흡수되어 감쇠가 크게 발생하는 것으로 사료된다.

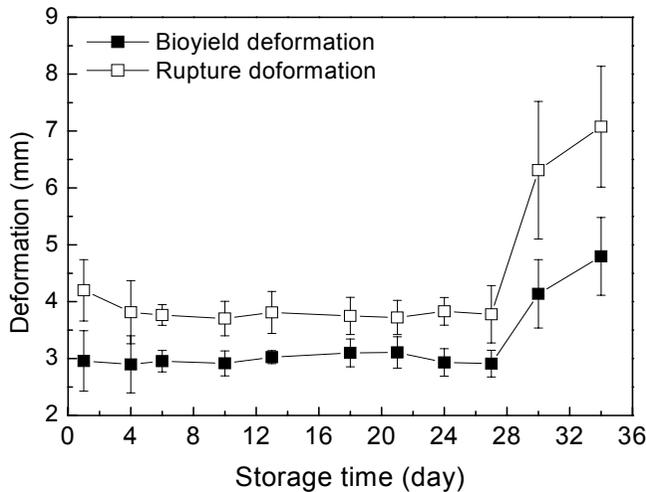


Fig. 2-40. Variations in bioyield and rupture deformations of apple flesh with the storage time. Error bars represent  $\pm$  one standard deviation.

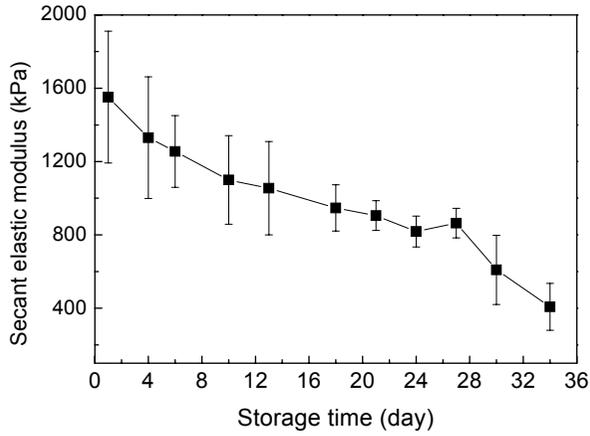


Fig. 2-41. Variation in secant elastic modulus of apple flesh with the storage time. Error bars represent  $\pm$  one standard deviation.

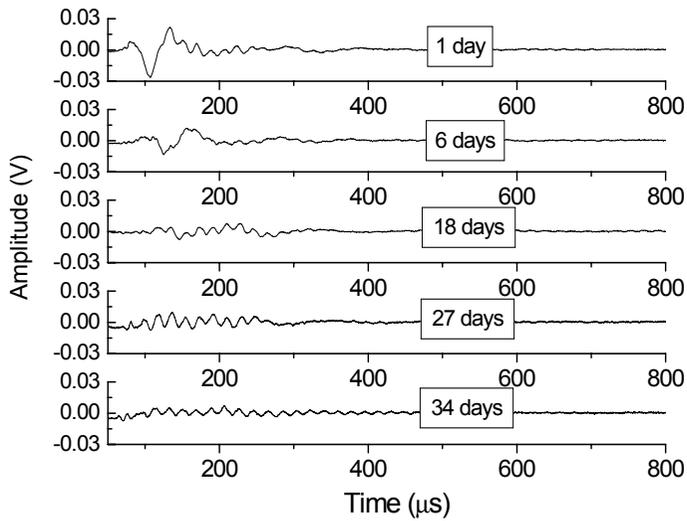


Fig. 2-42. Ultrasonic transmitted signals from apple flesh with the storage time.

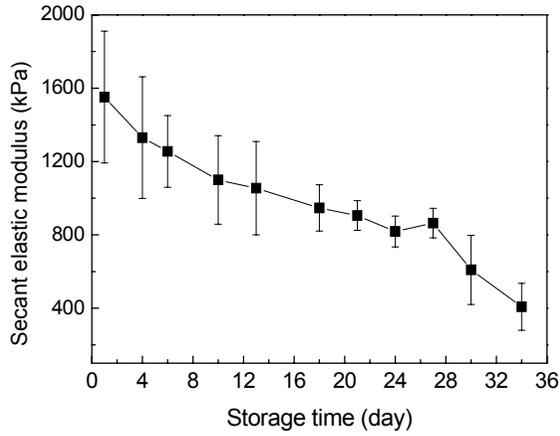


Fig. 2-43. Variation in secant elastic modulus of apple flesh with the storage time. Error bars represent  $\pm$  one standard deviation.

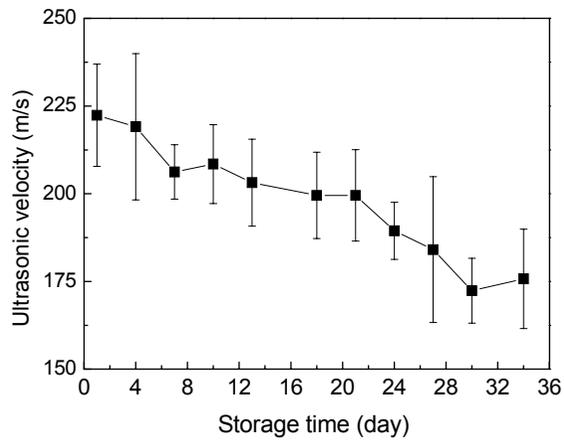


Fig. 2-44. Variation in ultrasonic velocity of apple flesh with the storage time. Error bars represent  $\pm$  one standard deviation.

#### 4) 초음파 파라미터와 기계적 특성과의 관계

지금까지의 결과를 토대로 하여 사과와 저장기간에 따른 기계적 특성과 초음파 파라미터의 관계를 정량적으로 나타내기 위하여 표 2-6에서 보는바와 같이 상관 분석을 실시하였다. 기계적 특성의 경우 생물체항복강도, 극한강도, 탄성계수가 저장기간과 강한 상관관계를 나타내었다. 표 2-6의 결과로부터 따라서 사과의 저장기간 즉, 수확 후 속도 변화를 초음파 파라미터를 이용하여 예측이 가능할 것으로 판단된다.

Table 2-5. 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 실험에서는 과실용 초음파 트랜스듀서 제작을 위해 필요한 여러 가지 예비 실험을 실시하고 그 결과를 분석하였다.

-과실의 물성을 비파괴적으로 측정하는 방법으로 투과법, 공중반사법, 수중반사법을 적용하여 성능을 비교 분석하였다. 실험 결과 낮은 투과성능만 극복한다면 투과법이 과실의 내부 물성을 측정하는데 최적의 방법으로 판단된다.

-우리나라의 대표적인 과실인 사과, 배, 복숭아를 일정한 형상의 시편으로 제작하여 상용초음파 트랜스듀서를 이용한 투과실험과 UTM을 이용한 기계적 실험을 실시한 후 초음파 파라미터와 기계적 특성 사이의 상관관계를 분석하였다.

-사과, 복숭아의 상관계수는 상대적으로 높게 나타났으며 배는 내부 조직 특성으로 인해 상관계수가 사과, 복숭아에 비해 약간 낮게 나타났다.

-과실의 저장기간과 조직 상태가 초음파 파라미터와 어떠한 관계가 있는지를 알기 위해 사과를 대상으로 저장기간에 따른 초음파 파라미터와 기계적 특성 변

화를 측정하였다.

-저장기간이 길어질수록 힘-변형곡선의 파괴점이 감소하고 변형이 증가하는 것으로 나타났으며 수신되는 초음파 신호의 감쇠가 커지고 신호 패턴이 크게 달라졌다.

-저장 초기의 초음파 속도는 평균 222.35 m/sec이었으나 저장 말기에는 평균 175 m/sec로 감소하였다. 초음파 속도는 탄성계수의 함수이므로 저장기간이 증가함에 따라 사과 탄성계수가 감소하기 때문에 사과의 초음파 투과 속도도 감소하였다.

-초음파 파라미터와 기계적 특성 사이의 상관관계를 분석한 결과 초음파 파라미터를 이용하여 과실의 속도 예측이 가능한 것으로 판단된다.

### 제 3 절 과실용 초음파 트랜스듀서 개발

#### 1. 압전이론

##### 가. 압전소자

물체에 기계적 응력이 작용 할 때, 물체 표면에 전위차가 발생하는 현상을“정 압전효과”라 하고 전기장 하에서 물체가 변형되는 현상을“역압전효과”라 한다. 전자는 초음파 트랜스듀서의 수신 작용, 후자는 송신 작용에 이용된다. 이러한 특성을 갖는 재료를 압전소자라하고 압전소자의 압전 특성을 나타내는 상수를 압전상수라한다.

압전소자에서 응력( $T$ ), 변형률( $S$ ), 변위전하밀도( $D$ ), 그리고 전기장( $E$ )은 각각 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$D = eS + \epsilon^S E \quad (3-1)$$

$$T = c^E S - eE \quad (3-2)$$

여기서,  $e$ 는 변형률이 존재할 때 발생하는 분극 정도를 나타내는 압전 상수이다.  $\epsilon^S$ 는 변형률이 일정할 때의 유전율이며  $c^E$ 는 전기장이 일정할 때의 강성도이다.

압전재의 전기적 성질들과 기계적 성질들 사이의 관계를 “압전구성관계 (piezoelectric constitutive relation)”라 한다.

$T = T(S, E), D = D(S, E)$ 을 Taylor 전개하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$T(S, E) = c^E S + e^S E \quad (3-3)$$

$$D(S, E) = e^E S + \epsilon^S E \quad (3-4)$$

여기서,  $c^E = (\partial T / \partial S)_E, e^S = (\partial T / \partial E)_S, e^E = (\partial D / \partial S)_E, \epsilon^S = (\partial D / \partial E)_S$  이다.

압전 응력상수  $e$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$e = -\frac{T}{E^S} = -\frac{\text{developed stress}}{\text{applied electric field}} \quad [N/Vm] \quad (3-5)$$

$$e = \frac{D}{S^E} = \frac{\text{developed electric displacement}}{\text{applied strain}} \quad [c/m^2] \quad (3-6)$$

변형률과 변위전하밀도는 전기장과 응력의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$S(E, T) = d^T E + s^E T \quad (3-7)$$

$$D(E, T) = \epsilon^T E + d^E T \quad (3-8)$$

여기서,  $d^T = (\partial S / \partial E)_T$ ,  $s^E = (\partial S / \partial T)_E$ ,  $\epsilon^T = (\partial D / \partial E)_T$ ,  $d^E = (\partial D / \partial T)_E$ 이다.

압전 변형상수  $d$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$d = \frac{D}{T^E} = \frac{\text{developed electrode displacement}}{\text{applied mechanical stress}} \quad [C/N] \quad (3-9)$$

$$d = \frac{S}{E^E} = \frac{\text{developed strain}}{\text{applied electric field}} \quad [m/V] \quad (3-10)$$

응력과 전기장은 변위전하밀도와 변형률의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$T(D, S) = h^S D + c^D S \quad (3-11)$$

$$E(D, S) = \beta^S D + h^D S \quad (3-12)$$

여기서,  $h^S = (\partial T / \partial D)_S$ ,  $c^D = (\partial T / \partial S)_D$ ,  $h^D = (\partial E / \partial S)_D$ ,  $\beta^S = (\partial E / \partial D)_S$ 이다.

압전 응력상수  $h$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$h = -\frac{T}{D^S} = -\frac{\text{developed stress}}{\text{applied electric displacement}} \quad [N/C] \quad (3-13)$$

$$h = \frac{E}{S^D} = \frac{\text{developed electric field}}{\text{applied strain}} \quad [V/m] \quad (3-14)$$

전기장과 변형률은 변위전하밀도와 응력의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$E(D, T) = \beta^T D + g^D T \quad (3-15)$$

$$S(D, T) = g^T D + s^D T \quad (3-16)$$

여기서,  $\beta^T = (\partial E / \partial D)_T$ ,  $g^D = (\partial E / \partial T)_D$ ,  $s^D = (\partial S / \partial T)_D$ ,  $g^T = (\partial S / \partial D)_T$ 이다. 압전 출력상수  $g$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$g = -\frac{E}{T^D} = -\frac{\text{developed electric field}}{\text{applied mechanical stress}} \quad [Vm/N] \quad (3-17)$$

$$g = \frac{S}{D^T} = \frac{\text{developed strain}}{\text{applied electric displacement}} \quad [m^2/C] \quad (3-18)$$

압전구성관계식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} T &= c^E S - e_t E & S &= d_t E + s^E T \\ D &= e S + \epsilon^S E & D &= \epsilon^T E + d T \\ \\ T &= c^D S - h_t D & E &= \beta^T D - g T \\ E &= \beta^S D - h S & S &= g_t D + s^D T \end{aligned} \quad (3-19)$$

여기서,  $d_t$ ,  $e_t$ ,  $h_t$ ,  $g_t$  는 각각  $d$ ,  $e$ ,  $h$ ,  $g$  의 변환이고 위 첨자 E는 일정한 전기장 (short circuit), S는 일정한 변형률(clamped state), D는 일정한 변위전하밀도 (open circuit), T는 일정한 응력 상태(free state)를 나타낸다.

압전재의 압전 특성을 나타내는 상수로는 역학적 에너지와 전기적 에너지의 상호 변환 효율을 나타내는 유효 전기-기계 결합상수( $k_t$ ), 압전 구성 관계식에서 나타나는 압전 변형상수( $d$ ), 압전 전압상수( $g$ ) 그리고 mechanical quality factor  $Q_m$ 이 있다. 유효 전기-기계 결합상수는 클수록 우수하다. 압전 변형상수  $d$ 가 큰 것은 초음파 발생특성이 우수함을 나타내며 압전 전압상수  $g$ 가 큰 것은 초음파 수신특성이 우수함을 나타낸다. 또한, mechanical quality factor  $Q_m$  값이 큰 것은 주파수 대역폭이 좁음을 나타낸다.

나. 압전 변환기의 해석적 표현

압전소자는 전기적 에너지와 기계적 에너지가 서로 변환되는 일종의 변환기 (transducer)이다. 이러한 변환과정은 그림 3-1을 통해 설명할 수 있다. 설명된 압전 효과에서 그림 3-1의 (a)와 같이 역학적 힘에 따라 유발되는 전위차는 각각의 입자속도와 전류에 의존하며 이들과의 관계는 그림 3-1의 (b)와 같이 임피던스 행렬(Z-행렬)을 이용하여 이들 사이의 상호 결합관계를 나타낼 수 있다.

파동방정식의 일반해를 이용하면 입자 속도를 구할 수 있다.

$$v = jw\{M' \sin(xz) + N' \cos(xz)\} \quad (3-20)$$

여기서,  $v$ 는 압전소자 내에서 입자속도,  $w$ 는 주파수,  $M' = M + N$ ,  $N' = M - N$ 이다.

압전소자의 양쪽 경계면에서의 입자속도는 다음과 같이 표현된다.

$$v_1 = v(0) = jwN' \quad (3-21)$$

$$v_2 = -v(l) = -jwM' \sin(xl) - v_1 \cos(xl) \quad (3-22)$$

위 식으로부터 미지수  $M'$ ,  $N'$ 이 다음과 같이 결정된다.

$$N' = \frac{v_1}{jw} \quad (3-23)$$

$$M' = -\frac{1}{jw} (v_2 \csc 2\theta + v_1 \cot 2\theta) \quad (3-24)$$

여기서,  $\theta = xl/2$ 이다.

변위전하밀도는 시간에 대한 조화 함수이므로 변위전류밀도는  $J_D = \partial D / \partial t = jwD$  이고 전류는  $I_3 = J_D A = jwDA$ 과 같이 표현된다. 여기서,  $A$ 는  $z$ 축에 수직한 압전판의 면적( $w\tau$ )이다. 변위전하밀도  $D$ 는 전류의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

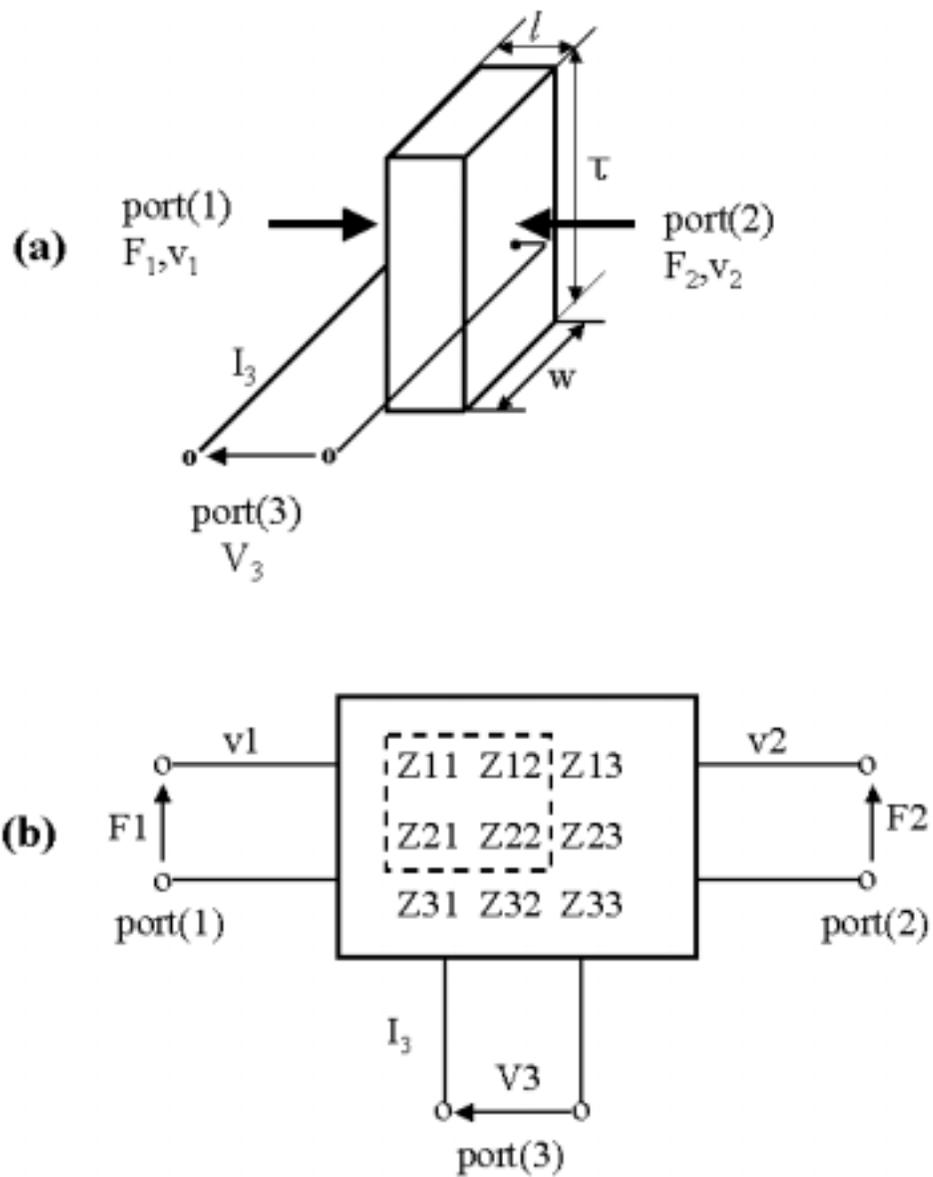


Fig. 3-1. (a) Piezoelectric thin-disk transducer and  
 (b) Electric equivalent of acoustic port and electric port.

$$D = \frac{I_3}{j\omega A} \quad (3-25)$$

경계면에서의 두 힘은 압전판 표면의 응력과 관련되며 다음과 같다.

$$F_1 = -AT(0) \quad (3-26)$$

$$F_2 = -AT(l) \quad (3-27)$$

식(3-35)을 변위속도에 대한 식으로 바꾼 후, 식(3-20)과 식(3-25)을 이용하면 위의 두 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$F_1 = -c^D AM'x + \frac{hI_3}{j\omega} \quad (3-28)$$

$$F_2 = -c^D Ax(M'\cos 2\theta - N'\sin 2\theta) \quad (3-29)$$

여기서,  $h$ 는 전달상수(transmitting constant)이다.

식(3-23)과 식(3-24)을 식(3-28)과 식(3-29)에 대입 한 후,  $c^D x/w = c^D/v_L^D = \rho_m v_L^D \equiv Z_0$ 라는 관계를 이용하면, 이 두 힘을 경계면에서의 속도와 전류의 함수로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_1 = -j\{Z_0'(v_1 \cot 2\theta + v_2 \csc 2\theta) + \frac{h}{w} I_3\} \quad (3-30)$$

$$F_2 = -j\{Z_0'(v_1 \csc 2\theta + v_2 \cot 2\theta) + \frac{h}{w} I_3\} \quad (3-31)$$

여기서,  $Z_0' = AZ_0$ 이고  $Z_0$ 은 특성 임피던스이다.

압전판 양면의 전위차는 판 내부의 전기장을 적분하여 얻을 수 있다.

$$V_3 = \int_0^t E dz \quad (3-32)$$

식(3-32), (3-25)와 변형이 없을 때 압전판의 전기용량  $C_0 = \epsilon^S A/l$  을 이용하여 전위차를 경계면에서의 전류와 입자속도의 함수로서 표현할 수 있다.

$$V_3 = -j \left\{ \frac{h}{w} (v_1 + v_2) + \frac{1}{wC_0} I_3 \right\} \quad (3-33)$$

식(3-30), (3-31), (3-33)을 통합하면 하나의 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_1^- \\ F_2^- \\ V_3^- \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z_0' \cot 2\theta & Z_0' \csc 2\theta & \frac{h}{w} \\ Z_0' \csc 2\theta & Z_0' \cot 2\theta & \frac{h}{w} \\ \frac{h}{w} & \frac{h}{w} & \frac{1}{wC_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^- \\ v_2^- \\ I_3^- \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

이것은 임피던스 행렬의 해석적 표현이며 이 행렬을 이용하여 박판형 압전변환기의 전기-기계 결합효과에 대한 해석이 가능하다.

#### 다. KLM model

KLM 모델은 Krimholz, Leedom, Matthei에 의해 제안되었다(Krimholtz 1970, Leedom 1971). 이 모델은 압전판의 음향 부분을 전송선로로 고려하였다. 전기 용량이  $C_0$ 인 축전기와 직렬 인덕턴스  $X'$ 으로 구성된 전기 부분을 권선비가  $\Phi$ 인 변압기를 통해 전송선로 중앙에 연결하였다. 그림 3-2는 KLM 등가 회로를 나타낸다.

$V_3 = I_3 = 0$  일 때, KLM 등가 회로는 전송선로만 남는다. 전송선로의 임피던스 행렬은 식(3-34)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z_0' \cot(\theta) & Z_0' \csc(\theta) \\ Z_0' \csc(\theta) & Z_0' \cot(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

여기서,  $z = \pm l/2$  이므로  $\theta = xz = \pm xl/2$  이다.

$v_2 = I_3 = 0$  일 때, 전송선로 중앙에서의 힘( $F_c$ )과 좌우 전송선로를 통해 중앙에 도달한 입자의 속도( $v_c^L, v_c^R$ )는 다음 행렬식에 의해 표현된다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = -jZ_0' \begin{bmatrix} \cot(\theta) & \csc(\theta) \\ \csc(\theta) & \cot(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_c^L \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

$$\begin{bmatrix} F_2 \\ F_c \end{bmatrix} = -jZ_0' \begin{bmatrix} \cot(\theta) & \csc(\theta) \\ \csc(\theta) & \cot(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ v_c^R \end{bmatrix} \quad (3-37)$$

이것을 전개하면 다음과 같이 된다.

$$F_c = -jZ_0' v_1 \csc(\theta) - jZ_0' v_c^L \cot(\theta) \quad (3-38)$$

$$F_2 = -jZ_0' v_c^R \csc(\theta) \quad (3-39)$$

변압기의 전기 부분 코일에는 전류가 없고  $V_3$ 의 전위차만 존재하므로 전송선로 중앙에서 입자 속도( $v_c^R + v_c^L$ )는 '0'이고 힘은  $F_c = \Phi V_3$ 로 주어진다.  $c_c^R = -c_c^L$  이므로 식(3-39)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$v_c^L = \frac{F_2 \sin(\theta)}{jZ_0'} \quad (3-40)$$

변압기의 권선비( $\Phi$ )는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} F_c &= -jZ_0' v_1 \csc(\theta) - jZ_0' v_c^L \cot(\theta) \\ &= -jZ_0' v_1 \csc(\theta) - jZ_0' \cot(\theta) \frac{F_2 \sin(\theta)}{jZ_0'} \\ &= -jZ_0' v_1 \csc(\theta) - F_2 \sin(\theta) \cot(\theta) \end{aligned}$$

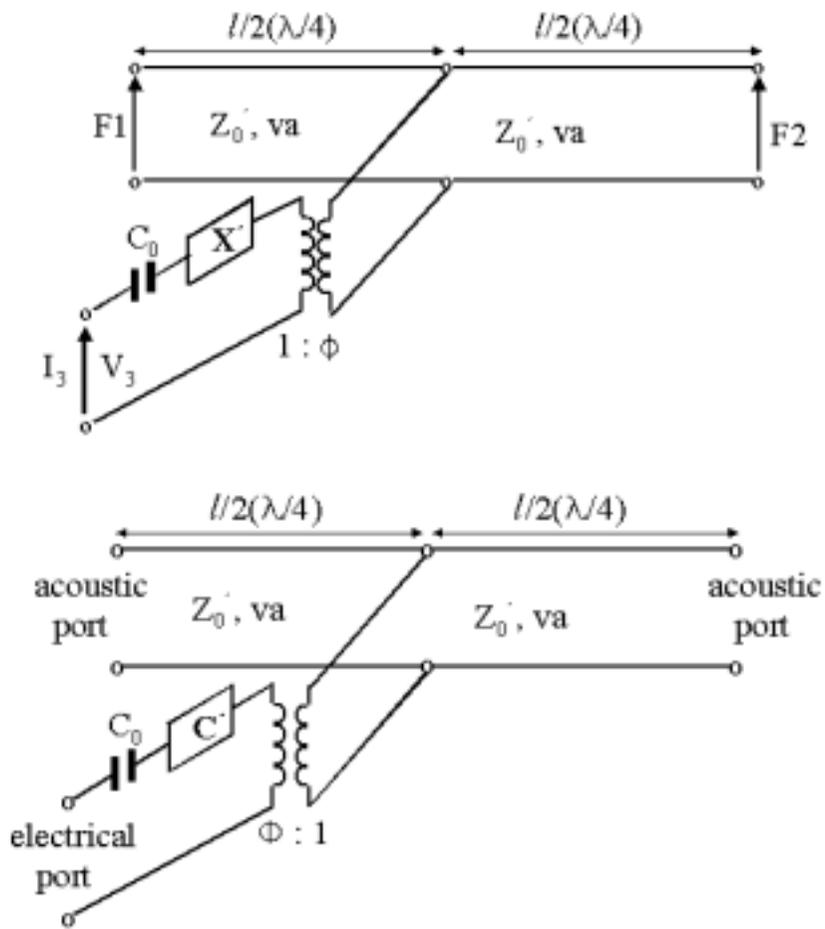


Fig. 3-2. KLM equivalent circuit.

$$= -jZ_0'v_1 \csc(\theta) - F_2 \cos(\theta) \quad (3-41)$$

여기서,  $F_c = \Phi V_3$ 이므로

$$\Phi V_3 = -jZ_0'v_1 \csc(\theta) - F_2 \cos(\theta) \quad (3-42)$$

$$\frac{\Phi V_3}{v_1} = -jZ_0' \csc(\theta) - \frac{F_2 \cos(\theta)}{v_1} \quad (3-43)$$

여기서,  $\frac{V_3}{v_1} = \frac{h}{jw} = z_{31}$ ,  $\frac{F_2}{v_1} = -jZ_0' \csc(2\theta)$ 의 관계를 이용하면

$$\begin{aligned} \frac{\Phi h}{jw} &= -jZ_0' \csc(\theta) + jZ_0' \csc(2\theta) \cos(\theta) \\ &= -jZ_0' \left[ \csc(\theta) - \frac{1}{2 \sin(\theta)} \right] \\ &= -jZ_0' \frac{\csc(\theta)}{2} \end{aligned} \quad (3-44)$$

따라서 변압기의 권선비는 다음과 같이 정리된다.

$$\Phi = \frac{wZ_0'}{2h} \csc(\theta) \quad (3-45)$$

$v_1 = v_2 = 0$  일 때, 전송선로의 임피던스는  $-jZ_0' \cot(\theta)$ 가 된다. 변압기 전기 부분의 실효임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{V_3}{I_3} = \frac{1}{jwC_0} + jX_1 - j \frac{Z_0' \cot(\theta)}{2\Phi^2} \quad (3-46)$$

직렬 리액턴스  $X'$ 는 식(3-45)에 식(3-44)을 대입하고  $V_3/I_3 = 1/jwC_0 = z_{33}$ 을 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X' = \frac{h^2}{w^2 Z_0'} \sin(2\theta) \quad (3-47)$$

KLM model은 Mason model의 T-형 전기회로 대신에 전송선로를 사용하기 때문에 압전판과 임피던스 변환층들이 직렬로 연결된 경우에도 물리적 해석이 쉬운 장점이 있다.

$$\Phi = k_t \sqrt{\frac{\pi}{w_0 C_0 Z_c}} \text{sinc}(w/2w_0) \quad (3-48)$$

$$C' = -\frac{C_0}{k_t^2 \text{sinc}(w/w_0)} \quad (3-49)$$

여기서,  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$ ,  $\theta = \pi w/2w_0$ 이다.

## 2. 초음파 트랜스듀서 설계이론

초음파 트랜스듀서의 설계에 있어서 우선적으로 고려해야하는 사항은 주파수 대역폭, 감도, 임펄스 응답 등이 있다. 압전 세라믹 재료는 보통 높은 음향임피던스(20~35 MRayL)를 갖는다. 그러나 부하의 음향임피던스가 낮은 경우(사과의 음향임피던스 약 0.3 MRayL), 부하로의 에너지투과율이 작아지고 압전판 내부 울림이 커져 좁은 주파수 대역폭을 갖게 된다. 이를 보완하기 위해 압전재 앞에 음향임피던스 정합층을 사용한다. 대역폭을 넓히기 위해 압전재의 음향임피던스와 비슷한 음향임피던스를 갖는 후면재를 사용하기도 하지만 전면부하 쪽으로의 에너지투과율이 줄어드는 단점이 있다. 전압원에서 트랜스듀서로의 에너지 전달 효율을 높이기 위해 전기적 정합도 고려된다. 이 장에서는 초음파 트랜스듀서의 최적 설계를 위한 음향임피던스 정합층과 후면재의 선정, 전기적 정합, 그리고 수치계산 방법에 대해 고찰하였다.

### 가. 압전소자의 선정

압전소자는 초음파 트랜스듀서의 성능을 좌우하는 중요한 요소이다. 초음파 트랜스듀서의 특성은 사용되는 압전소자의 특성에 의해 결정되며 이러한 압전소자의 특성을 나타내는 변수들로는 압전상수, 유전상수, 공진주파수, 공명상수,  $Q_m$ ,

두께, 면적 등이 있다.

## 나. 음향임피던스 정합

### 1) 반사 및 투과 이론을 이용한 음향임피던스 정합

압전 소자에서 발생된 음향 에너지가 부하로 전달되는 양은 압전소자와 부하 사이의 음향임피던스 차이가 커지면 작아진다. 이 때 압전소자와 부하 사이에 정합층을 넣어 음향 임피던스의 불일치를 개선하고 초음파 에너지의 투과성을 증가시킬 수 있다. 이론적으로 정합층은 임의의 수만큼 사용할 수 있지만 실제로는 압전소자와 부하의 임피던스에 의해 1개 또는 2개를 사용한다.

그림 3-3은 압전소자에서 발생된 음파가 정합층을 거쳐 부하로 전달되는 과정을 보여준다. 매질(I)에서 입사파와 반사파의 음압은 다음과 같다.

$$p_i = P_i e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (3-50)$$

$$p_r = P_r e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (3-51)$$

여기서,  $\omega$  = 주파수,  $k = \omega/v_L^D$  이며  $p_i$ 는 입사파의 음압,  $p_r$ 는 반사파의 음압,  $P_i$ 는 입사파의 최대 음압,  $P_r$ 는 반사파의 최대 음압이다.

매질(II)에서 +x 방향과 -x 방향으로 진행하는 음압은 다음과 같다.

$$p_a = A e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (3-52)$$

$$p_b = B e^{j(\omega t + k_2 x)} \quad (3-53)$$

매질(III)에서 투과파의 음압은 다음과 같다.

$$p_t = P_t e^{j(\omega t - k_3 x)} \quad (3-54)$$

각 음파의 입자속도는 음향임피던스의 정의에 의해 구해진다.

$$v_{\pm} = \pm \frac{p}{Z} \quad (3-55)$$

여기서,  $\pm$ 는  $+x$  방향과  $-x$  방향으로 진행하는 음파를 나타낸다.

두 경계면에서 음압과 입자속도는 연속이어야 한다는 경계조건을 이용하여 에너지 반사 계수와 에너지 투과 계수를 구할 수 있다.

$x = 0$  일 때,

$$\frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} = \frac{Z_2}{Z_1} \frac{(A + B)}{(A - B)} \quad (3-56)$$

$x = L$  일 때,

$$\frac{Ae^{-jk_2L} + Be^{jk_2L}}{Ae^{-jk_2L} - Be^{jk_2L}} = \frac{Z_3}{Z_2} \quad (3-57)$$

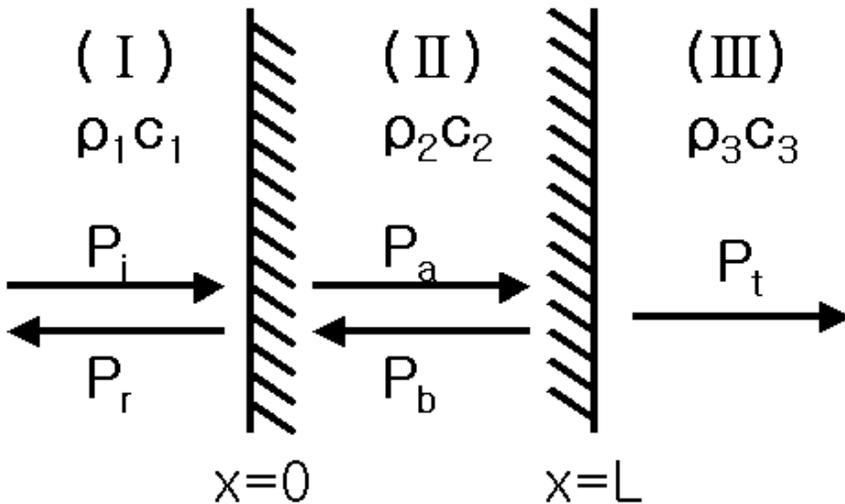


Fig. 3-3. The transmission and reflection of an incident wave on the interface.

위의 두식을 대수학적으로 정리하면 반사율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 R = \frac{P_r}{P_i} &= \frac{(1 - \frac{Z_1}{Z_3})\cos(k_2L) + j(\frac{Z_2}{Z_3} - \frac{Z_1}{Z_2})\sin(k_2L)}{(1 + \frac{Z_1}{Z_3})\cos(k_2L) + j(\frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_2})\sin(k_2L)} \\
 &= \frac{(1 - \frac{Z_1}{Z_3}) + j(\frac{Z_2}{Z_3} - \frac{Z_1}{Z_2})\tan(k_2L)}{(1 + \frac{Z_1}{Z_3}) + j(\frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_2})\tan(k_2L)} \quad (3-58)
 \end{aligned}$$

투과 강도(the intensity transmission coefficient)

$$T_I = \frac{I_t}{I_i} = \frac{Z_1}{Z_2} |T|^2 \quad (3-59)$$

반사강도(the intensity reflection coefficient)는 다음과 같다.

$$R_I = \frac{I_r}{I_i} = |R|^2 \quad (3-60)$$

에너지투과계수(the power transmission coefficient)는 다음과 같다.

$$T_\pi = \frac{A_t}{A_i} T_I = \frac{A_t}{A_i} \frac{Z_1}{Z_2} |T|^2 \quad (3-61)$$

여기서,  $A_i$ 는 입사경계면,  $A_t$ 는 투과경계면이다.

에너지반사계수(the power reflection coefficient)

$$R_\pi = R_I = |R|^2 \quad (3-62)$$

$A_i = A_t$  일 때,

$$\begin{aligned}
T_\pi &= T_I \\
&= 1 - |R|^2 \\
&= \frac{4}{2 + \left(\frac{Z_3}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_3}\right)\cos^2(k_2L) + \left(\frac{Z_2^2}{Z_1Z_3} + \frac{Z_1Z_3}{Z_2^2}\right)\sin^2(k_2L)} \quad (3-63)
\end{aligned}$$

매질(II)의 두께가 매우 얇은 경우( $\sin(k_2L) \ll 1$ ,  $\cos(k_2L) \approx 1$ ), 에너지 투과계수는 정합층이 없는 경우와 같아진다.

$$T \approx \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_3)^2} \quad (3-64)$$

초음파 트랜스듀서 제작 시에 압전재와 전·후면재의 정합층은 그 두께를 충분히 얇게 하면 무시할 수 있게 되며 그 임계 두께는 파장의 1/200로 알려져 있다. 매질(II)의 두께가 반 파장( $\pi$ )의 정수배( $k_2L = n\pi$ )인 경우에도 매질(II)이 없는 경우와 같아진다.

매질(II)의 두께가 1/4 파장의 정수 배인 경우( $k_2L = (2n - 1)\pi/2$ ), 에너지투과계수는 다음과 같이 표현된다.

$$T = \frac{4Z_1Z_3}{\left(Z_2 + \frac{Z_1Z_3}{Z_2}\right)^2} \quad (3-65)$$

여기서,  $Z_2 = \sqrt{Z_1Z_3}$ 이면  $T = 1$ 이 된다. 이것은 압전재의 임피던스와 부하 임피던스의 기하 평균 임피던스를 갖는 1/4 파장 두께의 정합층을 사용하면 이론적으로 음향에너지의 완전한 전달이 가능해진다는 의미이다. 위의 논의는 압전판의 기본 공진 주파수에서만 적용된다.

## 2) 전송선로 이론을 이용한 음향임피던스 정합

지금부터 후면재, 압전재, 부하, 임피던스 정합층의 임피던스를 각각  $Z_b, Z_c, Z_t, Z_i$  로 표시한다.  $v_i$ 와  $t_i$ 는 각 정합층의 종파속도와 두께를 의미

한다.

하나의 정합층을 사용하는 경우, 압전재와 정합층의 경계에서 부하쪽을 바라본 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{in} = Z_1 \frac{Z_t + jZ_1 \tan(\theta_1)}{Z_1 + jZ_t \tan(\theta_1)} \quad (3-66)$$

여기서,  $\theta_i = t_i w / v_i$

압전재의 기본 공진주파수에서 정합층의 두께가 1/4 파장( $\theta_1 = \pi/2$ )이면 정합층의 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_1 = \sqrt{Z_c Z_t} \quad (3-67)$$

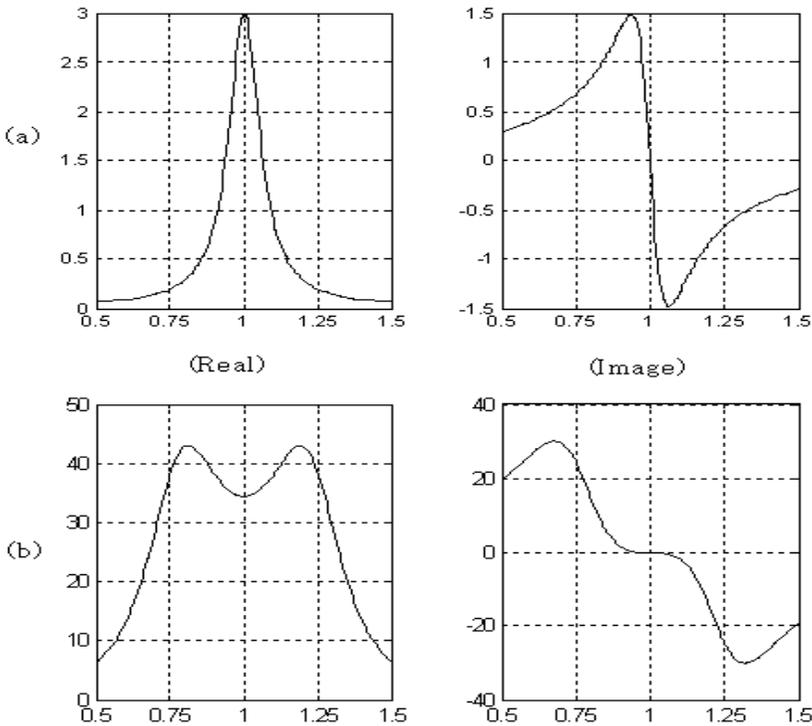


Fig. 3-4. (a) Input impedance of a single wear plate  
(b) Input impedance of a double wear plate.

여기서,  $Z_{t1} = Z_c$

두개의 정합층을 사용하는 경우, 압전재와 정합층의 경계에서 부하쪽을 바라본 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{t2} = Z_2 \frac{[Z_1 \frac{Z_t + jZ_1 \tan(\theta_1)}{Z_1 + jZ_t \tan(\theta_1)}] + jZ_2 \tan(\theta_2)}{Z_2 + j[Z_1 \frac{Z_t + jZ_1 \tan(\theta_1)}{Z_1 + jZ_t \tan(\theta_1)}] \tan(\theta_2)} \quad (3-68)$$

정합층의 두께가 모두 1/4 파장이면  $Z_{t2}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{t2} = Z_t \frac{Z_2^2}{Z_1^2} \quad (3-69)$$

식(3-69)에 두 정합층의 임피던스 변환율이 같다( $Z_2/Z_c = Z_t/Z_1$ )는 조건을 주면 각 정합층의 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_1 = Z_c^{\frac{1}{4}} Z_t^{\frac{3}{4}} \quad (3-70)$$

$$Z_2 = Z_c^{\frac{3}{4}} Z_t^{\frac{1}{4}} \quad (3-71)$$

그림 (3-4)은 정합층이 하나인 경우와 정합층이 두개인 경우에 대해 압전판 전면에 대한 임피던스  $Z_{t1}$ 과  $Z_{t2}$ 을 주파수 함수로 나타낸 것이다. 정합층이 두 개인 경우가 완전한 정합을 이루는 주파수 범위가 더 넓게 나타난다.

KLM model에서는 압전소자의 반을 하나의 정합층으로 간주한다. 압전소자 전면에 적용되는 정합층의 임피던스는 압전소자 자체를 하나의 정합층으로 고려하여 결정해야 한다. 그래서 정합층을 하나 적용할 경우에는 압전소자 자체가 2번 정합층이 된다. 압전소자 중앙에서의 입력 임피던스  $Z_{if}$ 과 정합층의 임피던스  $Z_1$ 은 식(3-70)과 (3-71)에서  $Z_2$ 과  $Z_c$ 을  $Z_c$ 과  $Z_{if}$ 로 대체하여 구할 수 있다.

$$Z_1 = Z_c^{\frac{1}{3}} Z_t^{\frac{2}{3}} \quad (3-72)$$

$$Z_{if} = \frac{Z_c^{\frac{4}{3}}}{Z_t^{\frac{1}{3}}} \quad (3-73)$$

압전판 전면에서의 부하 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_f = \frac{Z_1^2}{Z_t} = \frac{Z_c^{\frac{2}{3}}}{Z_t^{\frac{1}{3}}} \quad (3-74)$$

이와 비슷한 방법으로 압전판 전면에 두 개 이상의 정합층을 갖는 경우에 대해서도 임피던스를 구할 수 있다. 두 개까지 전면 정합층을 사용한 경우에 대해 임피던스 공식을 표 3-1에 나타내었다.

Table. 3-1. Impedance of the wear plate by KLM model

	$Z_{if}$	$Z_3$	$Z_2$	$Z_1$	$Z_f$
Matching layer #0	$\frac{Z_c^2}{Z_t}$			$Z_c$	$Z_t$
Matching layer #1	$\frac{Z_c^{\frac{4}{3}}}{Z_t^{\frac{1}{3}}}$		$Z_c$	$Z_t^{\frac{2}{3}} Z_c^{\frac{1}{3}}$	$Z_c^{\frac{2}{3}} Z_t^{\frac{1}{3}}$
Matching layer #2	$\frac{Z_c^{\frac{8}{7}}}{Z_t^{\frac{1}{7}}}$	$Z_c$	$Z_t^{\frac{3}{7}} Z_t^{\frac{4}{7}}$	$Z_t^{\frac{6}{7}} Z_c^{\frac{1}{7}}$	$Z_c^{\frac{6}{7}} Z_t^{\frac{1}{7}}$

다) 후면재 임피던스와 직렬 인덕턴스의 선정

KLM 등가회로에서 전기 에너지와 음향 에너지의 효율적인 변환을 위해서는 음향 부분과 전기 부분의  $Q$ -factor를 일치시키는 것이 중요하다. 우선 음향 부분의  $Q$ -factor ( $Q_a$ )에 대한 근사식을 구하고자 한다.

압전소자의 전면과 후면의 임피던스는 각각  $Z_f$ 과  $Z_b$ 이라 한다. 전송선로의 중앙에서 전면 임피던스와 후면 임피던스를 바라본 임피던스는 다음과 같이 표현

된다.

$$Z_{if,ib} = Z_c \frac{Z_{f,b} + jZ_c \tan(\theta)}{Z_c + jZ_{f,b} \tan(\theta)} \quad (3-75)$$

여기서,  $\theta = \pi w/2w_0$ 이다.

전송선로 중앙에서의 입력 임피던스( $Z_{in}$ )는  $Z_{if}$ 와  $Z_{ib}$ 의 병렬 합으로 표현된다.

$$Z_{in} = \frac{Z_{ib}Z_{if}}{Z_{ib} + Z_{if}} \quad (3-76)$$

부하가 없는 경우( $Z_{f,b} = 0$ ), 식(3-75)은  $Z_{if,ib} = jZ_c \tan(\theta)$ 과 같이 되고 식(3-76)의 입력 임피던스는 리액턴스 성분만 남는다.

$$X_{in} = \frac{Z_c}{2} \tan(\theta) \quad (3-77)$$

전면과 후면 임피던스가 순수 저항인 경우, 공진주파수( $w = w_0$ )에서 식(3-75)은  $Z_{if,ib} = Z_c^2/Z_{f,b}$ 과 같이 되고 식(3-76)의 입력 임피던스는 저항 성분만 남는다.

$$R_{in} = \frac{Z_c^2}{Z_b + Z_f} \quad (3-78)$$

공진 주파수 외에는 저항 성분과 리액턴스 성분이 함께 존재하며 주파수에 따라 그 값이 변화하므로 KLM등가회로에서 음향 부분의  $Q$ -factor에 대한 정확한 해석적 표현을 얻기는 어렵다. 그림 (3-5)은  $Z_c$ 와  $Z_f$  값이 일정할 때,  $Z_b$  값들에 대한 저항 성분과 리액턴스 성분의 변화를 주파수 함수로 보여준다.

식(3-76)로부터  $Q_a$ 에 대한 다른 근사식을 얻을 수 있다. 식(3-76)의 가정과  $X_{in}^{(0)}(w = w_0) \approx 2Z_c Q_a/\pi$ 으로 유도되는 과정을 이용하면,  $w = w_1$ 에서 리

액턴스 성분은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$X_{in}(w = w_1) \approx \frac{\pi Z_c}{4Q_a} \frac{2Z_c^2 - Z_f^2 - Z_b^2}{(Z_f + Z_b)^2} \quad (3-79)$$

이 때, 주파수 대역폭  $\Delta w$  내에서 입력 임피던스  $Z_{in}$ 의 저항 성분은 주파수에 무관한 식(3-78)로 근사된다. 주파수가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 리액턴스 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$X_{in} \approx -\frac{X_{in}(w = w_1)}{\Delta w/2} (w - w_0) = -\pi \Omega \frac{Z_c}{2} \frac{2Z_c^2 - Z_f^2 - Z_b^2}{(Z_f + Z_b)^2} \quad (3-80)$$

여기서,  $\Omega = (w - w_0)/w_0$

$$Q_a = w_0/\Delta w$$

$$w_1 = w_0 - \Delta w/2$$

$R_{in}^{(0)} = X_{in}(w_1)$ 이라는 조건으로부터  $Q_a$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_a \approx \frac{\pi}{4} \frac{2Z_c^2 - Z_f^2 - Z_b^2}{Z_c(Z_b + Z_f)} \quad (3-81)$$

다음은 전기 부분의  $Q$ -factor( $Q_e$ )에 대한 근사식을 구하고자 한다. 음향 부분의 입력 임피던스  $Z_{in}$ 에 기인한 변압기의 운동 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_m = \Phi^2 Z_{in} \quad (3-82)$$

식(3-73), (3-78), (3-80)를 식(3-82)에 대입하면, 운동 임피던스의 저항 성분과 리액턴스 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$R_m \approx \frac{4k_t^2}{\pi w_0 C_0} \frac{Z_c}{Z_f + Z_b} \left(\frac{w_0}{w}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi w}{2w_0}\right) \quad (3-83)$$

$$X_m \approx \Omega \frac{2k_t^2}{w_0 C_0} \frac{2Z_c^2 - Z_f^2 - Z_c^2}{(Z_f + Z_b)^2} \quad (3-84)$$

공진 주파수( $w = w_0$ )에서 운동저항은 다음과 같이 표현되고 운동리액턴스 성분은 사라진다.

$$R_m(w = w_0) = \frac{4k_t^2}{\pi w_0 C_0} \frac{Z_c}{(Z_f + Z_b)} \quad (3-85)$$

KLM 등가회로에서 전기 부분의 공진 주파수를  $w_0$ 에 위치시키기 위해  $w_0 L = 1/w_0 C_0$ 을 만족하는 직렬 인덕터스  $L$ 을 부가한다. 이 직렬 인덕터를 포함한 전기 부분의 전체 리액턴스는 다음과 같이 표현된다.

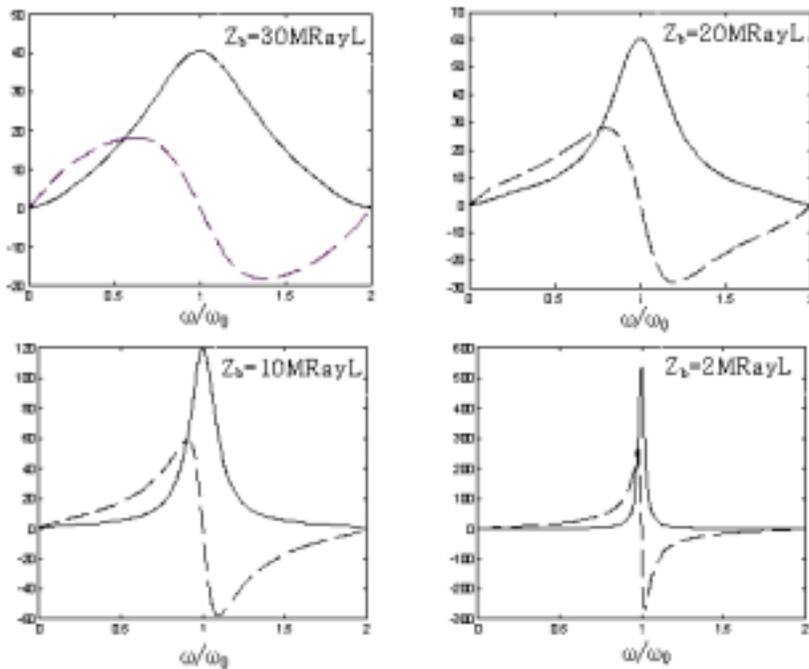


Fig. 3-5. Changes of input resistance(-) and reactance(--)  
spectrums by impedance of backing materials.

$$X_e \approx \frac{\Omega}{w_0 C_0} \left[ 2 - k_t^2 - 2k_t^2 \frac{(2Z_c^2 - Z_f^2 - Z_b^2)}{(Z_f + Z_b)^2} \right] \quad (3-86)$$

식(3-86)에서 첫 번째 항은  $jwL + 1/jwC_0$ 을  $w_0$ 에서 Taylor 전개하여 1차 근사 해를 취해 얻은 것이고 두 번째 항은  $1/jwC'$ 을  $w_0$ 에서 Taylor 전개하여 1차 근사 해를 취해 얻은 것이다. 세 번째 항은 식(3-84)의 변압기 운동리액턴스이다.

RLC회로의  $Q$  값은  $Q_e = w_0 L/R_m = 1/w_0 C_0 R_m$ 로 근사되므로 식(3-85)을 이 식에 대입하면 압전소자의 전기부분  $Q_e$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_e \approx \frac{\pi}{4k_t^2} \frac{Z_f + Z_b}{Z_c} \quad (3-87)$$

식(3-81)과 (3-87)를 전기 에너지와 음향 에너지의 최적 변환 조건( $Q_a = Q_e$ )에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$Z_f + Z_b = k_t \sqrt{2Z_c^2 - Z_f^2 - Z_b^2} \quad (3-88)$$

식(3-88)은  $Q_a$ 가  $\tan(\pi/4Q_a) \approx \pi/4Q_a$ 을 만족할 만큼 크다는 가정 하에서 얻어진 것이다. 압전 소자의 음향 특성과 압전 소자 전면에서의 임피던스가 주어지면, 후면재의 최적 임피던스에 대한 근사 값이 식(3-88)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$Z_b = \frac{-Z_f + \sqrt{Z_f^2 + (1 + k_t^2)[k_t^2(2Z_c^2 - Z_f^2) - Z_f^2]}}{1 + k_t^2} \quad (3-89)$$

라) 등가회로망을 이용한 최적 설계

초음파 트랜스듀서의 정량적인 설계는 전달함수를 이용한 수치 해석적 방법에

의해 이루어진다. 전달함수는 단위진폭을 갖는 델타함수 형태의 임펄스를 가할 때, 초음파 트랜스듀서의 응답 특성을 말하며 정합층의 수에 따라 달라진다. 정합층이 하나인 경우에 대해 KLM model에 따라 초음파 트랜스듀서를 회로망으로 표현하면 그림 (3-6)과 같이 표현된다.

입력 전압( $V_{in}$ )과 전류( $I_{in}$ )에 대해 출력 전압( $V_{out}$ )과 전류( $I_{out}$ )의 관계는 전달행렬로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{out}^{(i)} \\ I_{out}^{(i)} \end{bmatrix} = N_i \begin{bmatrix} V_{in}^{(i)} \\ I_{in}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (3-90)$$

$$\begin{bmatrix} V_{out}^{(i)} \\ V_{out}^{(i)}/Z_{out}^{(i)} \end{bmatrix} = N_i \begin{bmatrix} V_{in}^{(i+)} + V_{in}^{(i-)} \\ (V_{in}^{(i+)} - V_{in}^{(i-)})/Z_{in}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (3-91)$$

여기서,  $N_i = \begin{bmatrix} n_{11}^{(i)} & n_{12}^{(i)} \\ n_{21}^{(i)} & n_{22}^{(i)} \end{bmatrix}$ ,  $V_{in}^{(i)} = V_{in}^{(i+)} + V_{in}^{(i-)}$

$$I_{in}^{(i)} = (I_{in}^{(i+)} - I_{in}^{(i-)})/Z_{in}^{(i)}, \quad Z_{out}^{(i)} = V_{out}^{(i)}/I_{out}^{(i)}$$

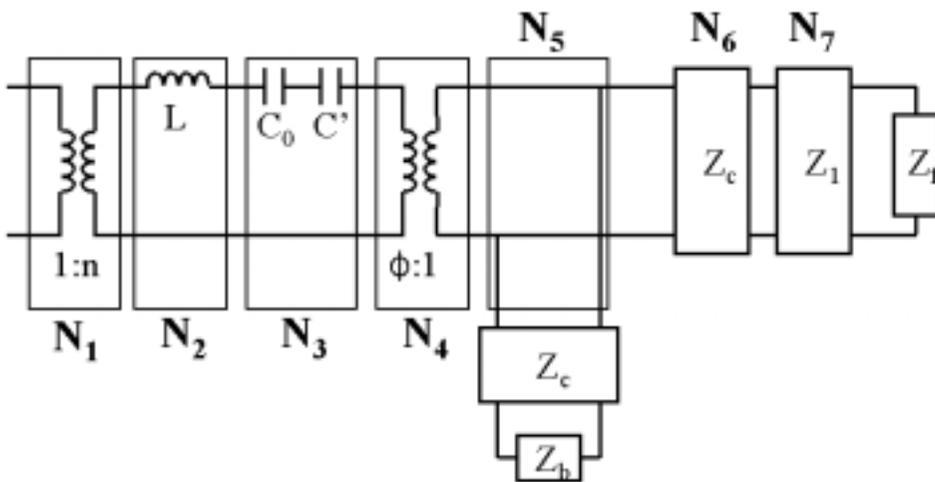


Fig. 3-6. The equivalent circuit of an electrical matching transducer.

입력 전압에 대한 출력 전압의 비로 정의되는 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$H_i(w) = \frac{2Z_{out}^{(i)}}{-n_{21}^{(i)} Z_{in}^{(i)} Z_{out}^{(i)} + n_{11}^{(i)} Z_{in}^{(i)} + n_{22}^{(i)} Z_{out}^{(i)} - n_{12}^{(i)}} \quad (3-92)$$

에너지보존법칙에 의해  $N_i$ 은 단위행렬이 된다.

$$n_{11}^{(i)} n_{22}^{(i)} - n_{12}^{(i)} n_{21}^{(i)} = 1 \quad (3-93)$$

시스템 전체의 전달행렬은 각 회로망에 대한 전달행렬들의 곱으로 표현된다.

$$N = N_7 \times N_6 \times N_5 \times N_4 \times N_3 \times N_2 \times N_1 \quad (3-94)$$

각 전달행렬들에 대한 정확한 표현 식들은 다음과 같이 구해진다. 전압원과 초음파 트랜스듀서의 전기적 정합을 위한 변압기의 입출력 전압과 전류 사이에는  $V_{out}^{(1)}/V_{in}^{(1)} = I_{in}^{(1)}/I_{out}^{(1)} = n$ (권선비)의 관계가 성립하므로  $N_1$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$N_1 = \begin{bmatrix} n & 0 \\ 0 & \frac{1}{n} \end{bmatrix} \quad (3-95)$$

직렬 임피던스  $Z_{in}$ 만으로 구성된 회로망의 입출력 전류와 전압은  $I_{out}^{(i)} = I_{in}^{(i)}$ 와  $V_{out}^{(i)} = V_{in}^{(i)} - Z_i I_{in}^{(i)}$ 의 관계가 성립한다. 직렬 인덕턴스  $L$ 만을 포함한  $N_2$  전달행렬과 두개의 축전지를 포함하는  $N_3$  전달행렬은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$N_2 = \begin{bmatrix} 1 & -j\omega L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-96)$$

$$N_3 = \begin{bmatrix} 1 & j\left(\frac{1}{\omega C_0} + \frac{1}{\omega C'}\right) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-97)$$

전기 신호를 음향 신호로 변환하는 변압기의 입출력 전압과 전류 사이에는  $V_{out}^{(4)}/V_{in}^{(i)} = I_{in}^{(i)}/I_{out}^{(i)} = 1/\Phi$ 의 관계가 성립하므로  $N_4$  전달행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$N_4 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Phi} & 0 \\ 0 & \Phi \end{bmatrix} \quad (3-98)$$

초음파 트랜스듀서의 전기 부분 전달행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$N_e = N_4 \times N_3 \times N_2 \quad (3-99)$$

5번 회로망은 식(3-75)으로 주어지는  $Z_{ib}$ 만 병렬로 연결되어 있다. 여기서, 입출력 전압과 전류는  $V_{out}^{(5)} = V_{out}^{(5)}$ 와  $I_{out}^{(5)} = -V_{in}^{(5)}/Z_i + I_{in}^{(5)}$ 의 관계가 성립하므로  $N_5$  전달행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$N_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{Z_{ib}} & 1 \end{bmatrix} \quad (3-100)$$

6번과 7번 회로망은 각각  $Z_c$ 와  $Z_1$ 의 임피던스를 갖는 전송선로이다.

$$N_6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -jZ_c \sin(\theta) \\ -j\frac{1}{Z_c} \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3-101)$$

$$N_7 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -jZ_1 \sin(\theta_1) \\ -j\frac{1}{Z_1} \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (3-102)$$

여기서,  $\theta_1 = t_1 w / v_1$ 이다.

초음파 트랜스듀서의 음향 부분 전달행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$N_a = N_7 \times N_6 \times N_5 \quad (3-103)$$

초음파 트랜스듀서 전체의 전달행렬과 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$N_t = N_a \times N_e \quad (3-104)$$

$$H_t(w) = \frac{2Z_t}{-n_{21}^t Z_e Z_t + n_{11}^t Z_e + n_{22}^t Z_t - n_{12}^t} \quad (3-105)$$

여기서,  $n_{ij}^t =$  전달행렬  $N_t$ 의 요소

$Z_t =$  전면부하 음향임피던스

$Z_e =$  전기 부분 임피던스

전면부하로 방출된 음파가 100% 반사되어 트랜스듀서의 전기 부분으로 되돌아올 때, 적용되는 왕복전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$H_r(w) = \frac{4Z_e Z_t}{(-n_{21}^t Z_e Z_t + n_{11}^t Z_e + n_{22}^t Z_e - n_{12}^t)^2} \quad (3-106)$$

위와 같은 트랜스듀서 설계 변수들을 이용하여 왕복전달함수를 계산하고 이 왕복전달함수를 역푸리에 변환하면 트랜스듀서 설계 변수들에 따른 트랜스듀서의 임펄스 응답을 얻을 수 있다. 이러한 시뮬레이션 과정을 통해 초음파 트랜스듀서 제작에 필요한 최적 설계변수와 응답 신호를 예측 할 수 있다.

### 3. 초음파 트랜스듀서 설계 및 해석

#### 가. 압전재료

예비실험결과 과실 시편에 대한 초음파 투과 실험 결과를 보면 과실의 과육 시편에 입사된 초음파 감쇠계수의 범위가 0.58~1.61 dB/mm로 일반 공업용 재료보다 감쇠가 매우 크며 초음파 속도의 범위도 170~230 m/sec로 공기 중의 초음파 속도보다 낮게 나타났다. 또한, 과실을 투과하여 수신된 초음파 신호의 중심 주파수는 100 kHz 미만으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 초음파 송수신 특성이 양호한 저주파 초음파 트랜스듀서 제작을 고려하여 표 (3-2)에서와 같이 세라믹 계열의 압전소자(PZT)를 선정하였다. 선정된 압전소자는 송신 특성을 나타내는 압전변형상수  $d_{33}$ 값과 수신 특성을 나타내는 압전전압상수  $g_{33}$ 값이 큰 재료를 선정하였다. 초음파 트랜스듀서의 주파수는 두께 공진 모드로 100 kHz의 중심주파수를 갖도록 지름 40 mm, 두께 20 mm로 설계하였다.

Table 3-2. Physical and electrical properties of piezo-electric ceramic

Physical & Electrical property	Piezoelectric material (PZT)			
	K-1	K-2	P-1	P-2
Coupling coefficient (%), $k_t$	48	52	52	47
Strain constant, $d_{33}$	220	700	190	600
Voltage constant, $g_{33}$	46	19.8	54	18
Mechanical Quality factor, $Q_M$	200	30	1000	65
Frequency constant (kHz-m), $N_t$	2180	2032	2100	1970
Acoustic impedance (MRayl), $Z_a$	34	35	32	31
Sound velocity (m/sec), $V_s$	4360	4615	4200	3940

#### 나. 전면 정합층

전면 정합층은 초음파 트랜스듀서가 과실과 직접 접촉하게 되는 부분으로 일종의 마모판이다. 이 부분은 초음파 투과효율에 관계되어 음향임피던스와 두께가 제작 변수가 된다. 본 연구에서는 과실과 트랜스듀서의 접촉을 최대로 하여 초음파의 누설이 최소가 되도록 설계하였다.

예비실험결과 과육 시편에 대한 초음파 투과 실험 결과 과실의 음향임피던스는 0.16~0.3 MRayL 범위였으며, 압전소자의 음향임피던스는 표 (3-2)에서 보는 바와 같다. 전면 정합층의 음향임피던스와 두께는 다음 식에 의해 계산된다.

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (3-107)$$

$$L = \frac{\lambda}{4} \quad (3-108)$$

여기서,  $Z_1$  = 압전소자의 음향임피던스

$Z_2$  = 전면 정합층의 음향임피던스

$Z_3$  = 과실의 음향임피던스

$\lambda$  = 파장

$L$  = 전면 정합층의 두께

식(3-107)과 (3-108)를 계산하면, 이론적인 전면 정합층의 음향임피던스는 2.19~3.24 MRayL이고 두께는 설계 주파수 100 kHz에서 표 (3-3)와 같이 계산되었다.

전면 정합층의 재료는 전면 정합층이 과실과 접촉할 때 과실에 상처를 주지 않고 원하는 음향임피던스를 얻기 위해 실리콘 러버에 텅스텐 분말을 배합하여 제작한 것과 이론적인 전면 정합층의 음향임피던스값과 비슷한 값을 갖는 아크릴(3.15 MRayL)과 테프론(3 MRayL)을 선정하였다. 표 (3-4)는 아크릴과 테프론의 물성을 나타낸 것이고 표 (3-5)는 실리콘 러버와 텅스텐 분말의 배합 비율에 따른 음향임피던스 값을 나타낸다. 표 (3-6)는 표 (3-4)와 (3-5)의 결과를 이용하여 정합층 설계이론에 따른 초음파 에너지 투과 효율을 계산한 결과이다.

전면 정합층과 과실이 접촉하는 부분은 과실 표면의 굴곡을 감안하여 설계되어야 함으로 다양한 크기의 과실을 구입하여 곡률계로 곡률을 측정하고 결과 곡률 범위가 57~62로 나타나 중간 값인 60 mm를 전면 정합층의 곡률로 설계하였다. 전면 정합층의 곡률은 초음파 집속 효과가 있으므로 초음파가 과실을 투과하는 투과 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

그림 (3-7)은 실리콘 러버와 텅스텐 분말을 배합하여 곡률 구조를 갖는 전면 정합층을 제작하기 위한 성형 틀을 나타낸다. 그림 (3-8)은 성형 틀을 이용하여 제작한 실리콘 러버와 텅스텐 분말 전면 정합층이고 그림 (3-9)는 계산된 음향임피던스 값에 따라 선정된 테프론과 아크릴로 제작한 전면 정합층이다.

Table 3-3. Thickness of wear plate materials

	Silicon+Tungsten	Acrylic	Teflon
Wear plate(mm)	6.98	11.58	8.38

Table 3-4. Acoustic impedance of acryl and teflon

	Velocity (m/s)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Impedance (MRayl)
Acrylic	1180	2670	3.15
Teflon	2200	1350	3

Table 3-5. Acoustic impedance of the ratio of silicon rubber and tungsten powder(100  $\mu$ m)

Silicon : Tungsten(100 $\mu$ )	Velocity(m/s)	Density(kg/m <sup>3</sup> )	Acoustical Impedance(MRayl)
1 : 0	925	1260	1.165
1 : 0.5	870	1790	1.56
1 : 1	833	2292	1.91
1 : 2	813	3183	2.59
1 : 2.5	795	3930	3.13

Table 3-6. The power transmission ratio of wear plate materials

	Silicon	Silicon + Tungsten	Acrylic	Teflon
Acoustic impedance (MRayl)	1.165	3.13	3.15	3
The power transmission ratio (%)	40.54	99.88	99.92	99.4



Fig. 3-7. Photo of zig with curvature for wear plate.



Fig. 3-8. Photo of fabricated wear plates with silicon rubber and tungsten powder.



Fig. 3-9. Photo of fabricated wear plates with acrylic and Teflon.

다. 후면재 제작

초음파 트랜스듀서에서 발생하는 초음파 신호의 진동 주기는 분해능과 관계있으며 주파수 대역폭은 감도와 사용 주파수 범위에 관계된다. 후면재는 압전소자의 뒷부분에 위치하여 압전소자의 진동을 제한하는 damper 역할을 하며 분해능을 높이고 주파수 대역폭을 넓히는 작용을 한다. 후면재의 음향임피던스는 압전소자의 음향임피던스와 거의 같도록 하여 후면재로 음파가 완전 투과되도록 하거나 용도에 따라 후면재의 음향임피던스를 조절해야 한다. 본 연구에서는 선정된 압전소자의 음향임피던스를 고려하여 적절한 후면재의 제작 조건을 찾고자 하였다. 1~250  $\mu\text{m}$ 의 입자 크기를 가지는 텅스텐 분말과 150  $\mu\text{m}$ 의 입자 크기를 가지는 실리콘 카바이드에 에폭시 접합제를 적절한 비율로 배합하여 시편을 만든 후 각각의 배합 비율에 따른 음향임피던스를 계산하여 가장 적절한 후면재의 배합 비율을 찾고자 하였다. 표 (3-7)는 각각의 조건에 따라 제작된 후면재의 초음파 속도, 밀도, 음향임피던스를 나타낸다.

그림 (3-10)은 과실용 초음파 트랜스듀서의 전체적인 개략도를 보여주고 있다.

Table 3-7. Acoustic impedance of various backing materials

Epoxy : Hardener : Tungsten (100 $\mu$ )	Velocity (m/s)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Impedance (MRayl)
4 : 1 : 25	1612	3722	6
4 : 1 : 30	1286	4838	6.2
1 : 1 : 12	1389	5300	7.36
Epoxy : Hardener : Tungsten (250 $\mu$ )	Velocity (m/s)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Impedance (MRayl)
4 : 1 : 65	1050	9072	9.5
Epoxy : Hardener : Tungsten (150 $\mu$ )	Velocity (m/s)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Impedance (MRayl)
4 : 1 : 3	925.9	1592	1.47
4 : 1 : 15	2049	2037	4.17
Epoxy : Silicon (150 $\mu$ ) : Tungsten (1 $\mu$ )	Velocity (m/s)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Impedance (MRayl)
1 : 1 : 1	2033	2123	4.21
1 : 2 : 1	2081	2106	4.38

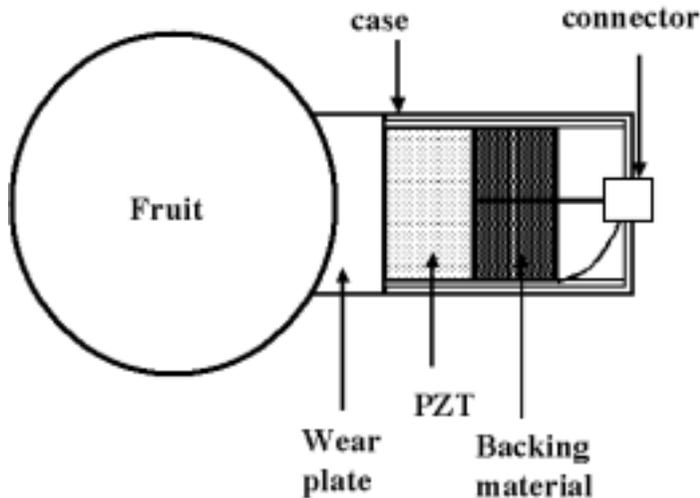


Fig. 3-10. Structure of the ultrasonic transducer.

라. 100 kHz 초음파 트랜스듀서 시뮬레이션 및 해석

1) 초음파 빔과 음장 해석

과실용 초음파 트랜스듀서는 과실과의 접촉면을 최대한 크게 하기위해 접촉면을 곡률로 제작하였으며 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 시뮬레이션(Matlab program)을 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.

그림 (3-11)은 초음파 beam profile 해석 결과이며 접촉면의 곡률로 인해 초음파 빔이 20~60 mm 사이에 집중되었다. 그림 (3-12)은 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.

## 2) KLM 모델을 이용한 투과 실험 시뮬레이션

KLM 모델을 이용하여 초음파 트랜스듀서의 최적 설계 값들을 찾기 위해 시뮬레이션 프로그램(Matlab program)을 작성하였다. 앞 장에서 선정된 압전소자, 전면 정합층, 후면재에 따른 초음파 응답 특성을 분석하고 실제 실험 결과와 비교하였다.

시뮬레이션 방법은 제작된 초음파 트랜스듀서를 이용하여 지름 50 mm, 길이 63 mm 알루미늄 봉을 투과하는 방법으로 하였으며 각각의 초음파 트랜스듀서 제작 조건에 따라 얻어지는 응답 신호를 비교하였다. 투과 대상을 과실로 하지 않고 금속을 사용한 것은 음향 임피던스와 투과 속도만을 이용하는 KLM 모델에서는 과실의 점탄성, 비선형 특성을 나타낼 수 없으므로 잘 알려진 금속인 알루미늄을 투과 대상으로 사용하였다.

압전소자에 따른 응답 신호의 차이를 비교하기 위해 앞에서 선정된 4가지 압전소자와 이론적으로 계산된 전면 정합층의 음향 임피던스(약 3 MRayl) 값과 후면재의 음향 임피던스(약 16 MRayl) 값을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 그러나 선정된 4가지 압전소자는 KLM 모델에서 사용되는 변수인 유효 전기-기계 결합인자, 음향 임피던스, 초음파 속도가 비슷하고 중심 주파수가 낮아 시뮬레이션을 통해서 그 차이가 비교되지 않았다.

후면재의 음향 임피던스에 따른 응답 신호의 차이를 비교하기 위해 압전소자와 전면 정합층은 동일하게 사용하고 이론적으로 계산된 후면재의 음향 임피던스(약 16 MRayl) 값과 에폭시의 음향 임피던스(2.74 MRayl) 값을 이용해 시뮬레이션 하였다. 이 때 압전소자는 K-2, 전면 정합층은 테프론을 사용하는 조건으로 하였다. 그림 (3-13)과 (3-14)를 보면 이론적으로 계산된 음향 임피던스 값을 사용한 시뮬레이션 결과가 에폭시의 음향 임피던스 값을 사용한 시뮬레이션 결과보다 파형이나 주파수 스펙트럼이 더 작게 나타났다. 이것은 압전소자의 뒤에 위치하는 후면재의 임피던스에 따라 압전소자의 진동이 영향을 받기 때문이다.

전면 정합층의 영향을 비교하기 위해 테프론, 아크릴 그리고 실리콘 러버와 텅스텐 분말로 제작된 전면 정합층을 이용하여 시뮬레이션하고 같은 조건으로 제작된 초음파 트랜스듀서를 이용하여 실제 투과 실험을 한 결과와 비교하였다. 이 때 사용된 압전소자는 K-2이고 후면재의 음향 임피던스는 약 3 MRayl로 에폭시와 텅스텐 분말(150 $\mu$ m)의 비율을 1 : 3으로 제작하였다. 투과 실험은 예비실험에서 사용된 장비를 그대로 사용하였으며 제작된 초음파 트랜스듀서를 이용하여 지름 50 mm, 길이 63 mm의 알루미늄 봉을 투과하는 방법으로 하였다.

그림 (3-15), (3-17), (3-19)은 테프론, 아크릴, 실리콘 러버와 텅스텐 분말 정합층에 대해 시뮬레이션한 주파수 응답 신호이고 그림 (3-16), (3-18), (3-20)은 각

각의 전면 정합층으로 제작된 초음파 트랜스듀서를 이용하여 직접 실험한 결과이다. 각 전면 정합층에 대한 시뮬레이션 결과를 보면 약 100 kHz 부근에서 주파수 성분이 크게 나타나고 있으며 특히 실리콘 러버와 텅스텐 분말을 정합층으로 한 시뮬레이션에서는 100 kHz 부근에서 뿐만 아니라 약 50 kHz 부근에서도 주파수 성분이 크게 나타나고 있다. 이것은 실제 투과 실험을 실시한 결과에서도 유사한 결과를 나타내고 있으며 실제 실험에서는 실리콘 러버와 텅스텐 분말을 이용한 정합층이 테프론이나 아크릴을 정합층으로 하는 경우보다 수신된 신호가 매우 작은 것을 알 수 있다. 실리콘 러버와 텅스텐 분말을 이용한 정합층은 실리콘 러버에 텅스텐 분말을 배합하여 제작한 것으로 조직이 균일하지 않아 내부에서의 감쇠가 심하고 투과 속도가 낮아 테프론이나 아크릴에 비해 전달되는 초음파 에너지가 작기 때문이다.

실제 투과실험을 실시한 결과를 보면 설계 중심주파수인 100 kHz 부근보다 더 낮은 약 50 kHz 부근에서 주파수 성분이 더 크게 나타나고 있다. 압전소자에서 완전히 모드 분리가 되어 종파만을 발생하기 위해서는 압전소자의 지름이 두께보다 3 배 이상되어야한다. 따라서 선정된 압전소자를 이용하여 중심주파수 100 kHz인 종파모드 초음파를 발생시키기 위해서는 두께가 약 20 mm이고 지름이 60 mm 이상이 되어야한다. 그러나 이러한 이론적인 수치로 초음파 트랜스듀서를 제작하면 실험 대상인 과실의 크기(70~100 mm)에 비해 초음파 트랜스듀서의 크기가 상당히 크게 되고 이로 인해 초음파 트랜스듀서에서 발생된 초음파 신호가 과실의 중심을 투과하는 신호와 과실 표면을 따라 전달되는 신호가 함께 수신될 위험이 있다. 또한 초음파 트랜스듀서의 크기가 너무 크면 그 무게와 크기로 인해 실제 적용에는 많은 한계가 있을 것으로 생각된다. 이러한 이유로 압전소자의 지름대 두께 비를 약 2:1로 제작하였으며 이로 인해 종파와 횡파의 모드 분리가 정확히 이루어지지 않아 나타난 현상으로 판단된다.

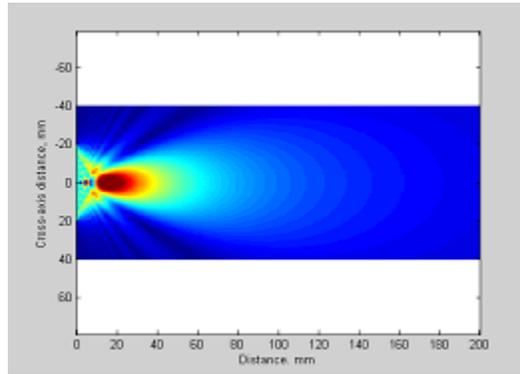


Fig. 3-11. Ultrasonic beam profile of 100 kHz transducer.

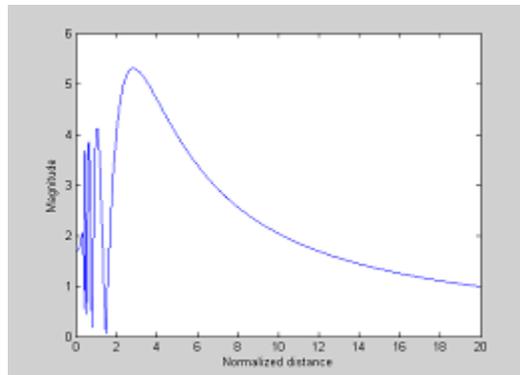


Fig. 3-12. Ultrasonic pressure profile of 100 kHz transducer.

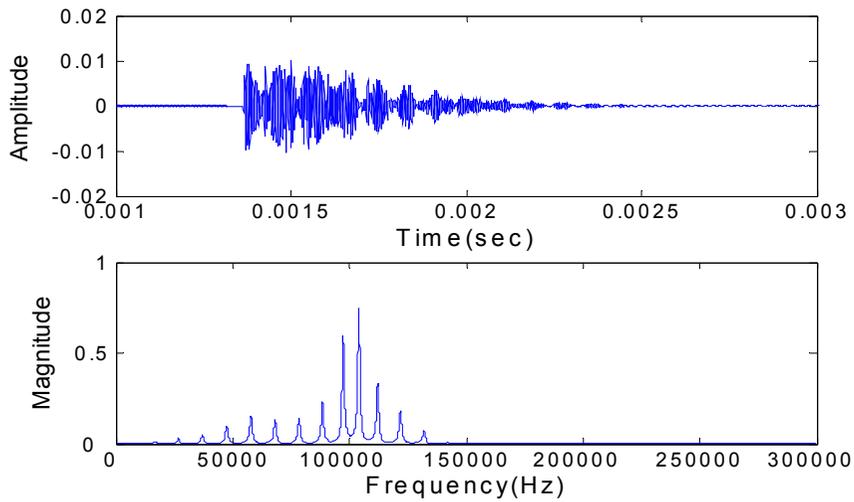


Fig. 3-13. The simulation results of ultrasonic transducer with 16 MRayL of backing impedance.

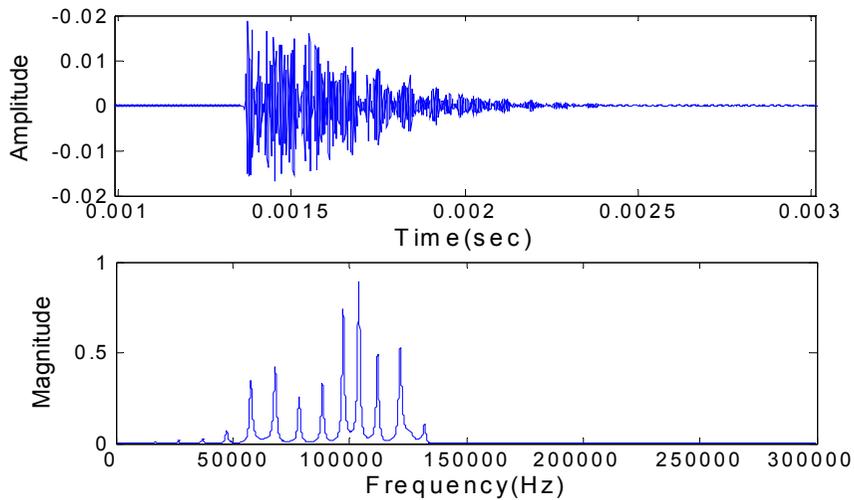


Fig. 3-14. The simulation results of ultrasonic transducer with 2.74 MRayL of backing impedance.

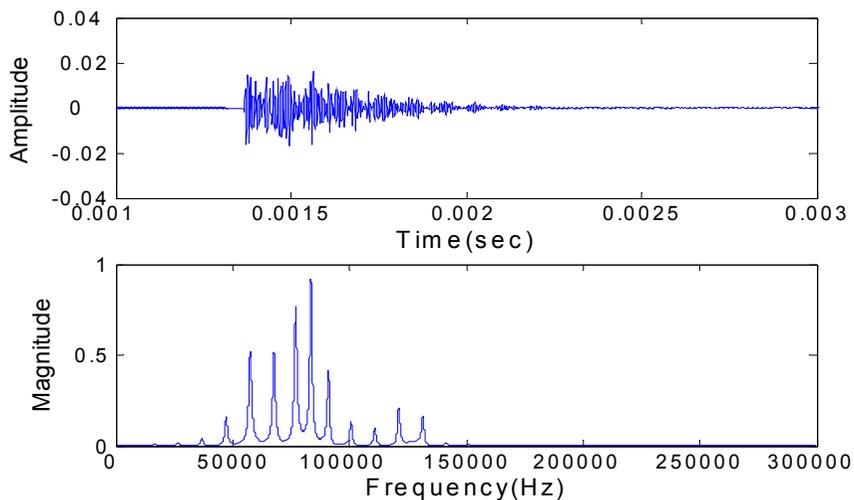


Fig. 3-15. The simulation results of ultrasonic transducer with Teflon wear plate.

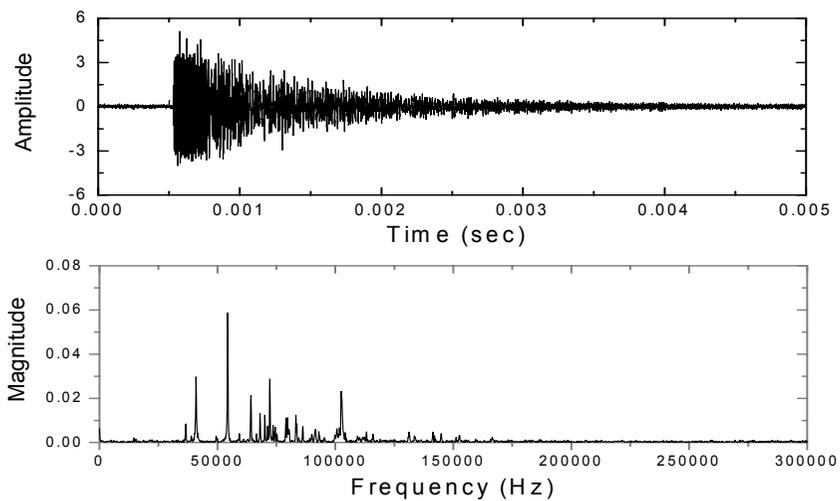


Fig. 3-16. Experimental results by fabricated ultrasoni transducer with Teflon wear plate.

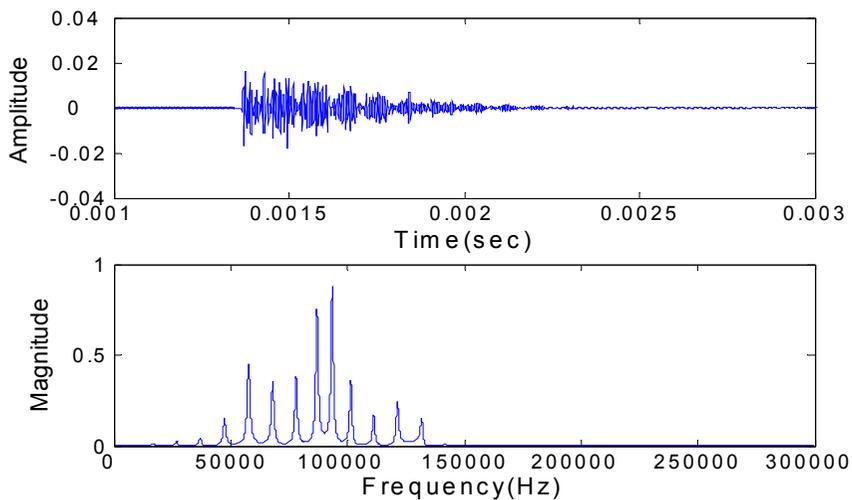


Fig. 3-17. The simulation results of ultrasonic transducer with acrylic wear plate.

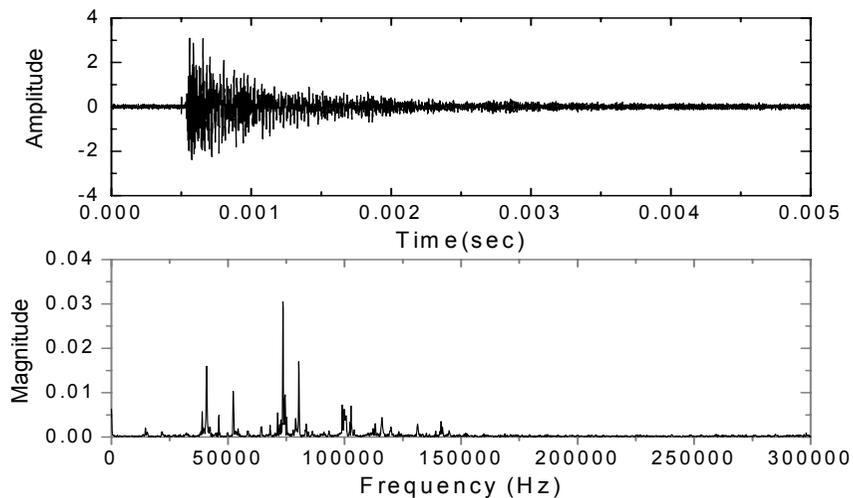


Fig. 3-18. Experimental results by fabricated transducer with acrylic wear plate.

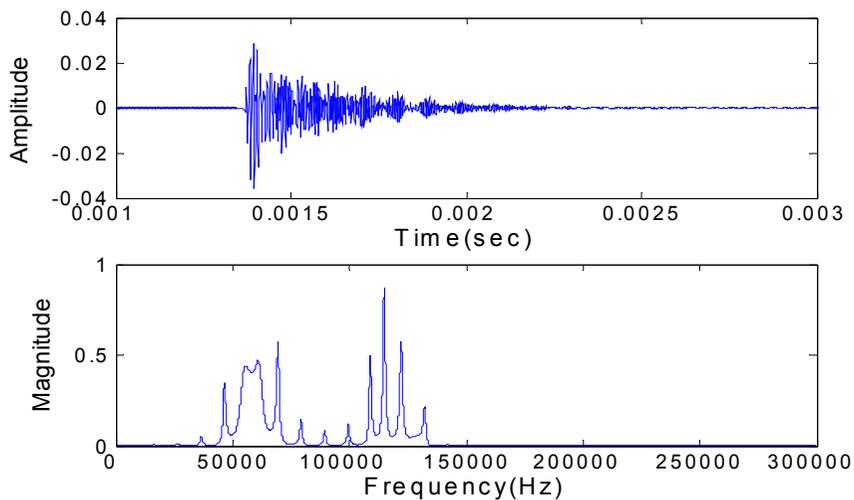


Fig. 3-19. The simulation results of ultrasonic transducer with silicon rubber/tungsten powder wear plate.

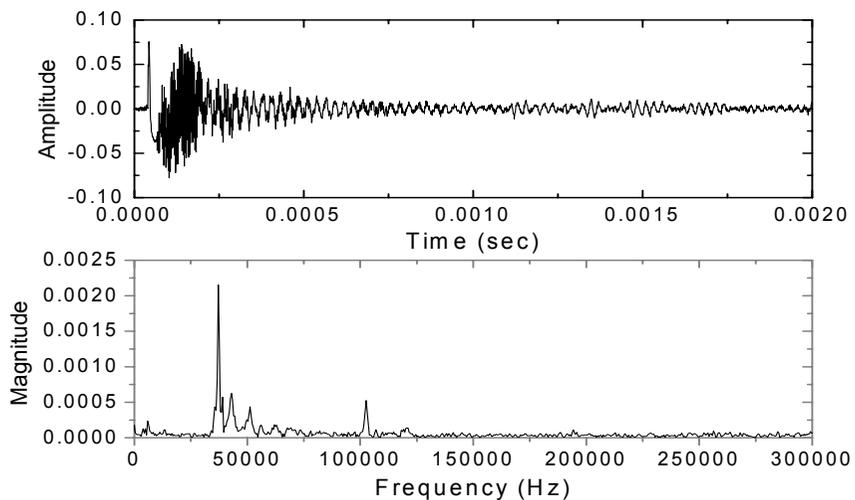


Fig. 3-20. Experimental results by fabricated ultrasonic transducer with silicon rubber/tungsten powder wear plate.

#### 4. 초음파 트랜스듀서를 이용한 과실의 투과 실험

본 실험은 6장에서 시뮬레이션을 통해 분석된 트랜스듀서의 설계조건에 따라 초음파 송·수신 트랜스듀서를 제작한 다음 실험을 통해 송·수신 특성이 가장 좋은 압전소자를 선정하고 이에 적합한 전면 정합층과 후면재를 선정하여 최적의 초음파 트랜스듀서를 제작하는 것이다.

초음파 실험 장치는 이전의 예비 실험에서 사용된 실험 장비와 제작된 과실용 초음파 트랜스듀서가 사용되었다.

##### 가. 실리콘 러버와 텅스텐 분말로 제작된 전면 정합층을 이용한 초음파 트랜스듀서

설계조건에 의해 선정된 4가지 압전소자를 이용하여 실리콘 러버와 텅스텐 분말(실리콘 러버 : 텅스텐 분말 = 1 : 2.5)로 제작된 전면 정합층을 사용하고 에폭시만으로 후면재를 한 4개의 트랜스듀서를 제작하여 실험에 사용하였다. 그림 (3-22)와 (3-23)은 초음파 트랜스듀서 제작 과정에서 후면재를 사용하기 전과 사용한 후의 모습이고 그림 (3-21)은 제작된 초음파 트랜스듀서를 이용하여 사과의 초음파 투과 실험을 하는 모습이다.

제작된 4개의 트랜스듀서들 중에서 압전소자 K-2, P-2로 제작된 초음파 트랜스듀서를 송신자로 하고 K-1과 P-1로 제작된 초음파 트랜스듀서를 수신자로 하여 사과에 대한 초음파 투과 실험을 실시하였다. 그림 (3-24)는 K-2를 송신자로 하고 K-1과 P-1을 수신자로 하여 투과 실험을 한 결과이고, 그림 (3-25)는 P-2를 송신자로 하고 K-1과 P-1을 수신자로 하여 투과 실험을 한 결과이다. K-1과 P-1을 수신자로 하여 실험한 결과 수신 특성이 좋지 않은 것으로 나타나 수신자를 K-2와 P-2로 바꾸어 투과 실험을 실시하였다. 그림 (3-26)은 K-2를 송신자로 하고 P-2를 수신자로 하여 투과 실험을 실시한 결과이고, 그림 (3-27)은 P-2를 송신자로 하고 K-2를 수신자로 하여 투과 실험을 실시한 결과이다. 실험 결과 K-2와 P-2 압전소자를 이용하여 제작한 초음파 트랜스듀서가 K-1과 P-1을 이용하여 제작한 초음파 트랜스듀서보다 수신특성이 우수한 것으로 나타났다. 4개의 압전소자 중에서 상대적으로 송·수신 특성이 나쁜 K-1과 P-1을 트랜스듀서 제작에서 제외하였다.

그림 (3-24)~(3-27)에서 사과를 투과한 신호는 송신자의 메인방 안에 포함되어 수신된 신호를 구분하기 어려운 것으로 나타났다. 메인 방 신호와 수신된 신호를 구분하고 수신 감도를 향상시키기 위해 전면 정합층과 후면재의 제작 조건을 바꾸어 트랜스듀서를 설계·제작해야 할 것으로 나타났다.



Fig. 3-21. Photo of apple and fabricated ultrasonic transducers.

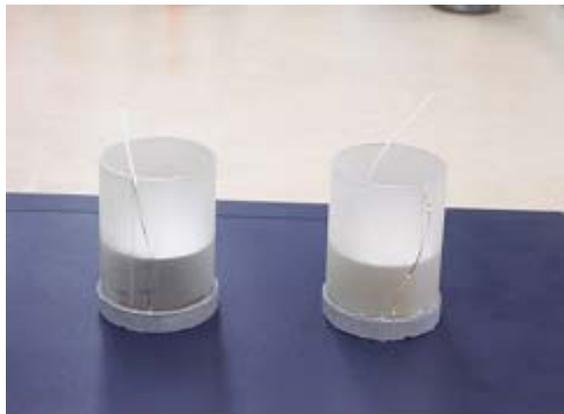


Fig. 3-22. Before backing with epoxy.



Fig. 3-23. After backing with epoxy.

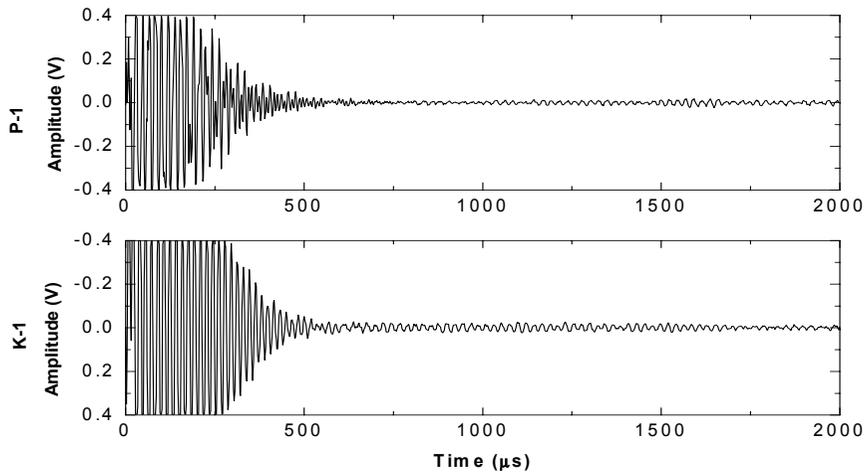


Fig. 3-24. Transmitted ultrasonic signal through the apple by K-2 transmitted ultrasonic transducer and K-1, P-1 received ultrasonic transducers.

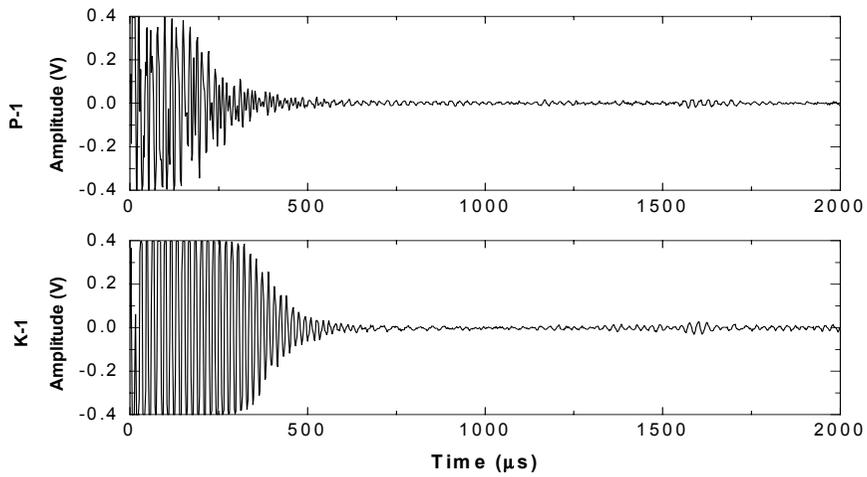


Fig. 3-25. Transmitted ultrasonic signal through the apple by P-2 transmitted ultrasonic transducer and K-1, P-1 received ultrasonic transducers.

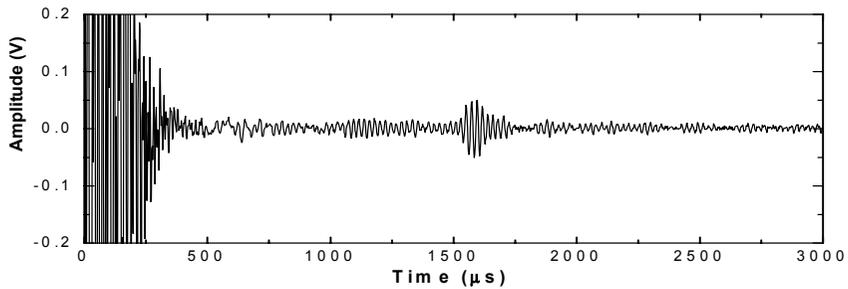


Fig. 3-26. Transmitted ultrasonic signal through the apple by K-2 transmitted ultrasonic transducer and P-2 received ultrasonic transducer.

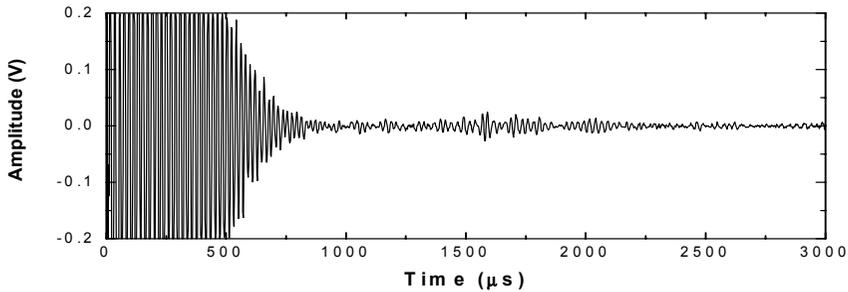


Fig. 3-27. Transmitted ultrasonic signal through the apple by P-2 transmitted ultrasonic transducer and K-2 received ultrasonic transducer.

나. 아크릴로 제작된 전면 정합층을 이용한 초음파 트랜스듀서

압전소자 K-2와 P-2에 아크릴 전면 정합층을 하고 후면재는 제작하지 않은 상태에서 송신자와 수신자를 바꾸어가며 투과 실험을 실시하였다. 그림 (3-28)은 K-2를 송신자로 하고 P-2를 수신자로 하여 투과 실험을 실시한 결과이고, 그림 (3-29)는 P-2를 송신자로 하고 K-2를 수신자로 하여 투과 실험을 실시한 결과이다. 아크릴을 전면 정합층으로 사용하는 것이 실리콘 러버와 텅스텐 분말 전면 정합층보다 수신 감도가 더 우수하게 나타났다. 그 이유는 실리콘 러버와 텅스텐 분말을 배합하여 제작한 전면 정합층은 비등방성 재료이므로 정합층 내에서 산란과 흡수가 많이 발생하여 전달되는 초음파 에너지와 수신되는 초음파 에너지가 적기 때문인 것으로 판단된다.

그림 (3-28)과 그림 (3-29)를 보면 메인 방 신호 안에 수신 신호가 포함되어 수신된 신호가 잘 구분되지 않고 있다. 이러한 메인 방 신호를 감소시키기 위해 아크릴 전면 정합층에 에폭시 : 텅스텐 분말( $250\mu\text{m}$ ) = 1 : 13인 후면재를 사용하여 제작한 초음파 트랜스듀서를 이용하여 투과 실험을 실시하였다. 그림 (3-30)은 초음파 트랜스듀서 제작 과정 중에서 케이스를 하기전의 모습이고, 그림 (3-31)은 아크릴 전면 정합층으로 제작된 초음파 트랜스듀서의 모습이다. 그림 (3-32)와 그림 (3-33)은 제작된 초음파 트랜스듀서를 이용하여 투과 실험을 한 결과이다. 후면재를 사용한 결과 메인 방 신호가 크게 감소하였고 감도도 향상되어 사과를 투과한 신호가 약  $500\mu\text{s}$  근처에서 나타남을 알 수가 있다. 실험

에 사용된 사과 두께가 약 10 cm이므로 TOF(time of flight)가 약  $500 \mu\text{s}$ 이면 초음파 속도는 약 200 m/sec로 계산된다. 이 결과는 예비실험에서 사과 과육에 대한 초음파 속도 측정값과 유사한 값을 갖는 것으로서 수신된 신호가 사과를 투과한 신호임을 증명해 주는 것이다.

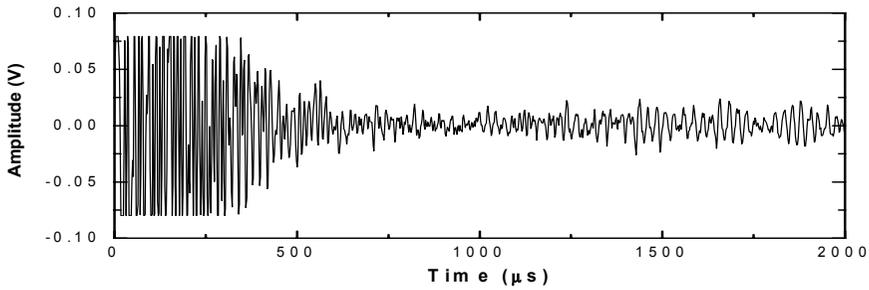


Fig. 3-28. Transmitted ultrasonic signal through the apple by K-2 transmitted ultrasonic transducer and P-2 received ultrasonic transducer.

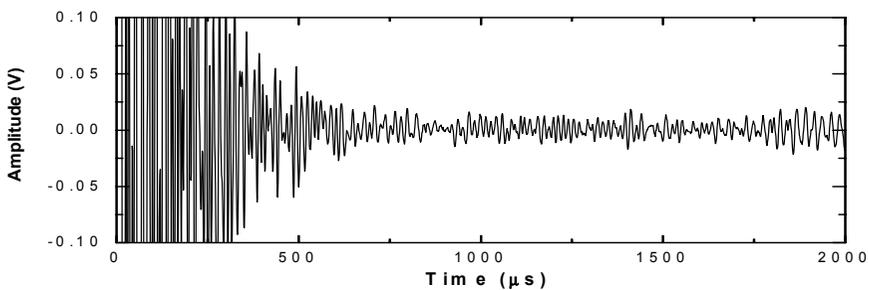


Fig. 3-29. Transmitted ultrasonic signal through the apple by P-2 transmitted ultrasonic transducer and K-2 received ultrasonic transducer.

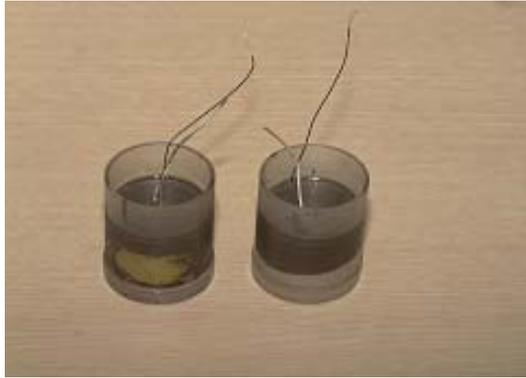


Fig. 3-30. Fabricated ultrasonic transducers without casing.



Fig. 3-31. Fabricated ultrasonic transducers with acrylic wear plate.

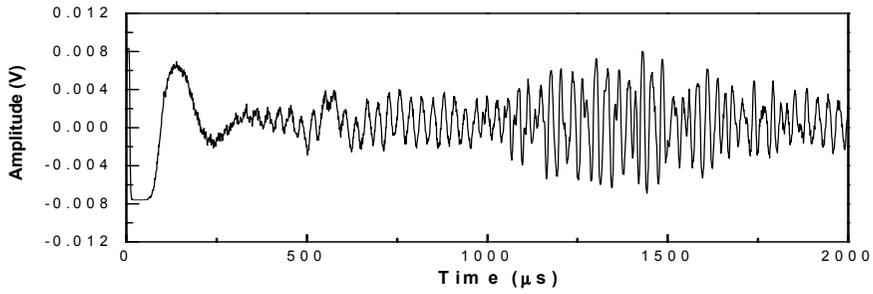


Fig. 3-32. Transmitted ultrasonic signal through the apple by K-2 transmitted ultrasonic transducer and P-2 received ultrasonic transducer.

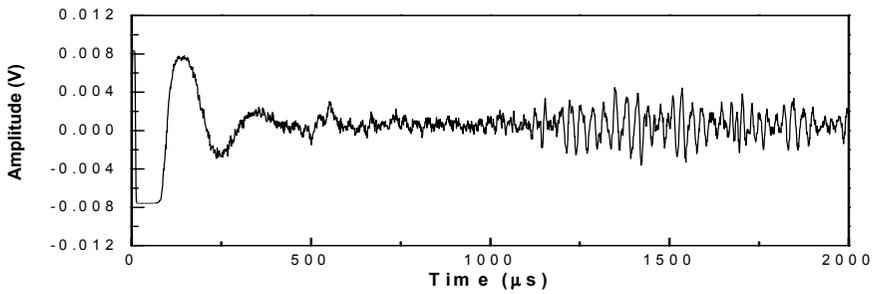


Fig. 3-33. Transmitted ultrasonic signal through the apple by P-2 transmitted ultrasonic transducer and K-2 received ultrasonic transducer.

다. 테프론으로 제작된 전면 정합층을 이용한 초음파 트랜스듀서

전면 정합층을 테프론으로 제작하고 수신 신호의 감도를 향상시키기 위해 후면재 재료를 에폭시 : 실리콘 카바이드( $150\ \mu\text{m}$ ) : 텅스텐 분말( $1\ \mu\text{m}$ ) = 1 : 2 : 1로 제작한 초음파 트랜스듀서를 이용하여 투과 실험을 실시하였다. 그림 (3-34)는 위 제작 조건에 의해 제작된 초음파 트랜스듀서이다. 그림 (3-35)는 K-2 초음파 트랜스듀서를 송신자로 하고 P-2를 수신자로 하여 투과 실험을 실시한 결과이고 그림 (3-36)은 P-2 초음파 트랜스듀서를 송신자로 하고 K-2 초음파 트랜스듀서를 수신자로 하여 투과 실험을 한 결과이다.

실험 결과 아크릴 전면 정합층을 사용하여 제작한 초음파 트랜스듀서를 이용하여 사과를 투과한 신호의 크기는 약  $0.004(\text{V})$ 였던 것에 비해 테프론 전면 정합층을 사용하여 제작한 초음파 트랜스듀서를 이용하여 사과를 투과한 신호의 크기는 약  $0.01(\text{V})$ 로 투과 신호의 크기가 약 28dB 정도 향상되었다. 이렇게 투과 신호의 감도가 크게 향상된 것은 아크릴과 테프론의 물리적 특성의 차이와 후면재 제작 조건의 변화로 인해 제작된 초음파 트랜스듀서의 송·수신 특성이 향상된 것이 원인인 것으로 분석된다.



Fig. 3-34. Photo of fabricated ultrasonic transducers with Teflon wear plate.

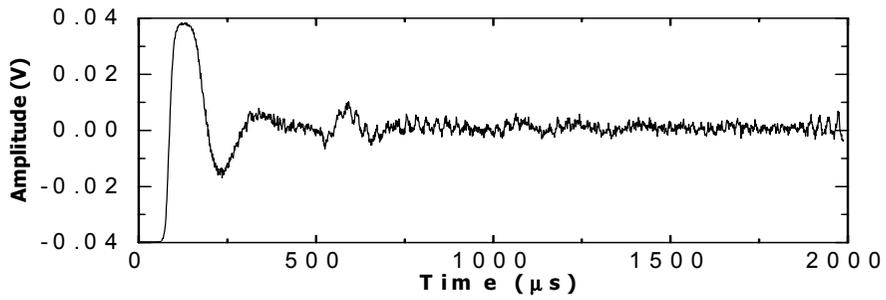


Fig. 3-35. Transmitted ultrasonic signal through the apple by K-2 transmitted ultrasonic transducer and P-2 received ultrasonic transducer.

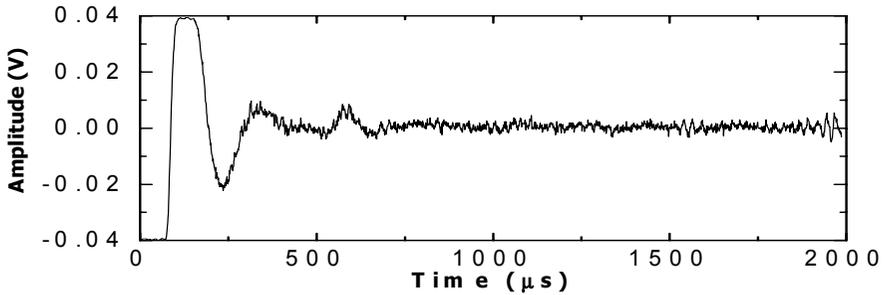


Fig. 3-36. Transmitted ultrasonic signal through the apple by P-2 transmitted ultrasonic transducer and K-2 received ultrasonic transducer

#### 라. 최적 전면 정합층 선정

전면 정합층 재료로 선정된 실리콘 러버와 텅스텐 분말, 아크릴, 테프론 중에서 초음파 송·수신 감도가 가장 우수한 재료를 선정하기 위해 압전소자를 P-2로 선정하고 후면재 조건을 같게 하여 3개의 초음파 트랜스듀서를 제작한 후 각각 초음파 투과 실험을 실시하였다. 그림 (3-37)은 테프론 전면 정합층을 이용하여 제작한 초음파 트랜스듀서를 송·수신 초음파 트랜스듀서로 사용하여 투과 실험을 실시한 결과이다. 그림 (3-38)은 아크릴 전면 정합층을 이용하여 제작한 초음파 트랜스듀서를 이용하여 투과 실험을 실시한 결과이다. 그림 (3-39)는 실리콘 러버와 텅스텐 분말 전면 정합층을 이용하여 제작한 초음파 트랜스듀서를 이용하여 투과 실험을 실시한 결과이다.

투과 실험 결과 테프론을 전면 정합층으로 사용한 초음파 트랜스듀서의 투과 신호 크기는 0.08 V, 아크릴을 전면 정합층으로 사용한 초음파 트랜스듀서의 투과 신호 크기는 0.05 V이고 실리콘 러버와 텅스텐 분말을 전면 정합층으로 사용한 초음파 트랜스듀서의 투과 신호 크기는 0.03 V로 나타났다. 선정된 3가지 전면 정합층 재료의 음향 임피던스 값은 서로 비슷하지만 투과 실험 결과 초음파 송·수신 감도는 테프론이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이 후 최종적으로 제작될 초음파 트랜스듀서의 전면 정합층은 테프론을 사용하였다.

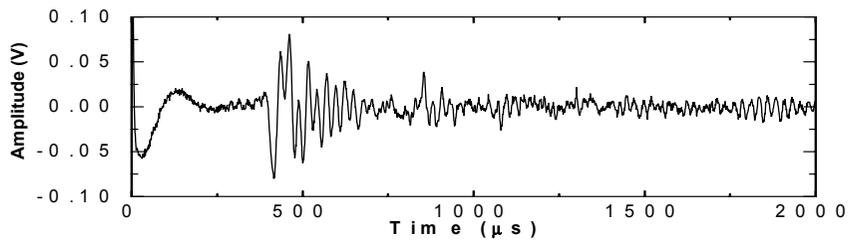


Fig. 3-37. Transmitted ultrasonic signal through the apple by P-2 ultrasonic transducer with Teflon wear plate.

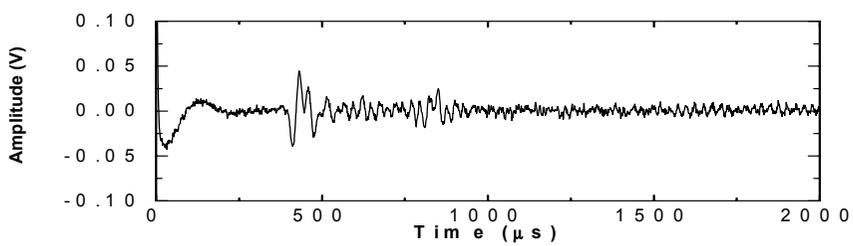


Fig. 3-38. Transmitted ultrasonic signal through the apple by P-2 ultrasonic transducer with Acrylic wear plate.

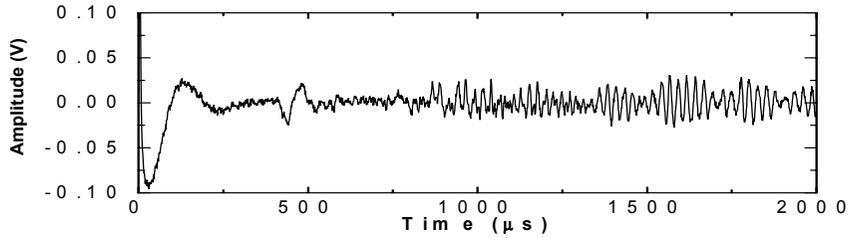


Fig. 3-39. Transmitted ultrasonic signal through the apple by P-2 ultrasonic transducer with Silicon rubber/Tungsten powder wear plate.

#### 마. 최적 과실용 초음파 트랜스듀서 제작

압전소자 K-2와 P-2 두 가지 중에서 송·수신 감도가 더 좋은 압전소자를 선정하기 위해 전면 정합층을 테프론으로 하고 후면재 제작 조건을 같게 하여 2개의 초음파 트랜스듀서를 제작하였다. 그림 (3-40)은 압전소자 P-2로 제작된 초음파 트랜스듀서를 송·수신 초음파 트랜스듀서로 이용하여 투과 실험을 실시한 결과이고 그림 (3-41)은 압전소자 K-2로 제작된 초음파 트랜스듀서를 송·수신 초음파 트랜스듀서로 이용하여 투과 실험을 실시한 결과이다. 압전소자 K-2로 제작된 초음파 트랜스듀서를 이용하여 투과 실험을 한 결과가 압전소자 P-2로 제작한 초음파 트랜스듀서를 이용하여 투과 실험을 한 결과보다 더 우수하게 나타났다.

최종적으로 제작된 과실용 초음파 트랜스듀서는 전면 정합층은 테프론, 압전소자는 K-2, 후면재는 에폭시 : 실리콘 분말( $150 \mu\text{m}$ ) : 텅스텐 분말( $1 \mu\text{m}$ ) = 1 : 2 : 1의 비율로 제작하는 것이 최적 설계 조건인 것으로 나타났다.

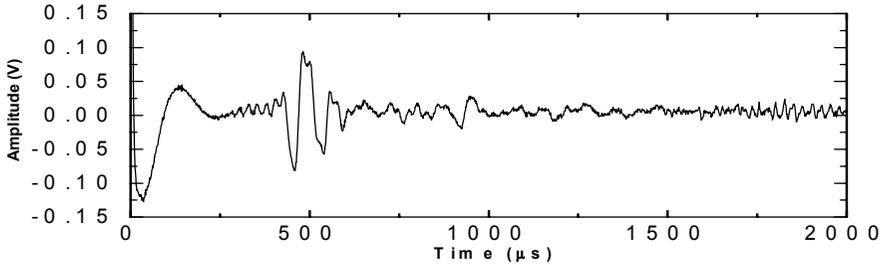


Fig. 3-40. Transmitted ultrasonic signal through the apple by P-2 of fabricated ultrasonic transducers with Teflon wear plate.

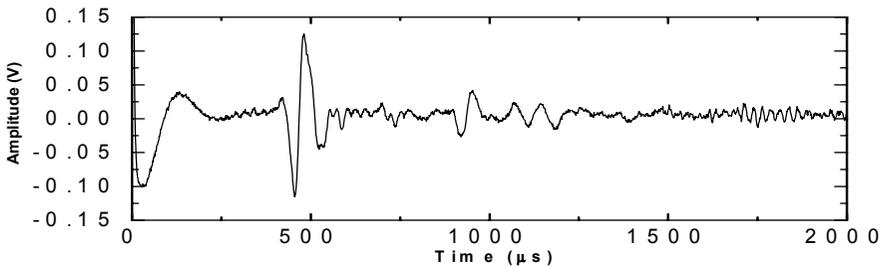


Fig. 3-41. Transmitted ultrasonic signal through the apple by K-2 of fabricated ultrasonic transducers with Teflon wear plate.

바. 200 kHz 과실용 초음파 트랜스듀서

초음파 트랜스듀서의 성능을 향상시키고 크기를 줄이기 위해 중심주파수 200 kHz인 초음파 트랜스듀서를 제작하였다. 제작된 200 kHz 초음파 트랜스듀서의 압전소자는 K-2, 전면 전합층은 테프론을 이용하여 제작하였으며 중심 주파수가 200 kHz이므로 후면재의 조건을 바꾸어 최적 송·수신 조건을 찾았다.

200 kHz 초음파 트랜스듀서를 제작하기 전에 제작 조건의 변화에 따른 초음파 트랜스듀서의 특성 변화를 파악하기 위해 시뮬레이션을 실시하였다. 초음파 빔과 음장에 대한 시뮬레이션은 중심 주파수 200 kHz, 압전소자의 직경 20 mm, 초점 거리 60 mm, 과실에서 초음파 전파 속도 200 m/sec에서 실시하였다. 그림 (3-42)는 중심 주파수 200 kHz에서 초음파 beam profile을 나타내며, 그림 (3-43)은 초음파 음장을 나타낸다. 그림 (3-42)과 (3-43)을 보면 압전소자의 직경이 감소하고 전면 정합층의 호의 깊이가 감소하여 초음파 빔의 근거리 음장이 증가하고 음압의 크기가 감소한 것을 볼 수 있다.

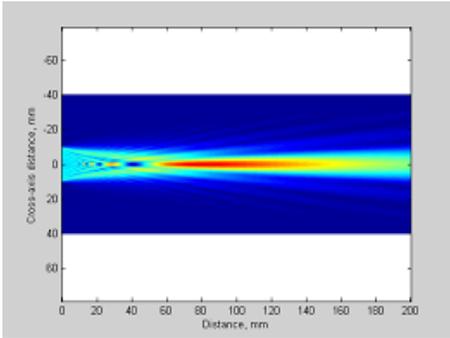


Fig. 3-42. Calculated ultrasonic beam profile of 200 kHz transducer.

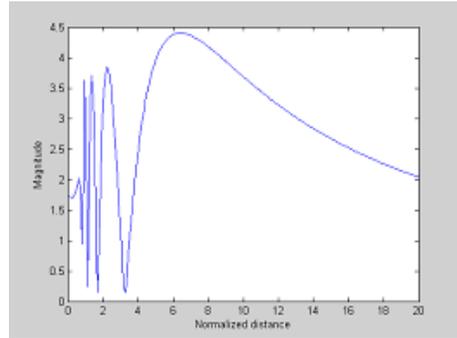


Fig. 3-43. Calculated ultrasonic pressure profile of 200 kHz transducer.

Table 3-8. Acoustic impedance of backing materials

Epoxy : Tungsten ( $1\mu\text{m}$ )	Velocity (m/s)	Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Impedance (MRayl)
1 : 2	1276.9	3041.3	3.88
1 : 3	1247.3	3126	3.9
1 : 4	1272.8	3216	4.1

제작될 200 kHz 초음파 트랜스듀서의 주파수 특성을 파악하기 위해 KLM 모델을 이용해 100 kHz 초음파 트랜스듀서를 제작 할 때와 같은 방법으로 알루미늄 봉에 대한 투과 시뮬레이션을 실시하였다. 그림 (3-44)는 압전소자는 K-2, 전면 정합층 테프론, 후면재의 음향 임피던스 4 MRayl으로 하고 지름 50 mm, 두께 63 mm의 알루미늄 봉을 투과하는 시뮬레이션 한 결과이고 그림 (3-45)는 시뮬레이션과 같은 조건을 이용하여 제작된 초음파 트랜스듀서를 이용하여 실제 투과 실험을 한 결과이다. 200 kHz 초음파 트랜스듀서에 사용된 압전소자는 지름이 20 mm로 종파와 횡파의 모드 분리가 완전히 이루어지지 않았으나 최적 지름인 30 mm와 많은 차이가 나지 않고 중심주파수도 높아져 시뮬레이션과 실제 실험 결과가 유사한 결과를 갖는 것으로 나타났다.

표 (3-8)은 에폭시와 텅스텐 분말의 배합 비율에 따른 음향임피던스 값이다. 표 (3-8)의 후면재 조건에 따라 압전재료와 전면 정합층이 동일한 3개의 200 kHz 초음파 트랜스듀서를 제작하였다. 그림 (3-46)은 3가지 후면재 조건에 의해 제작된 초음파 트랜스듀서를 이용한 투과 실험 결과이다. 실험 결과 각 수신 신호의

크기는 큰 차이가 없었으나 그 중에서 에폭시 : 텅스텐 분말 = 1 : 2인 후면재를 이용한 초음파 트랜스듀서의 수신 감도가 더 우수하였다. 200 kHz 초음파 트랜스듀서의 최적 설계 조건은 압전소자는 K-2, 전면 정합층은 테프론, 후면재는 에폭시 : 텅스텐 분말 = 1 : 2 인 것으로 나타났다.

그림 (3-47)은 최종적으로 제작된 100 kHz, 200 kHz 과실용 초음파 트랜스듀서를 나타낸다.

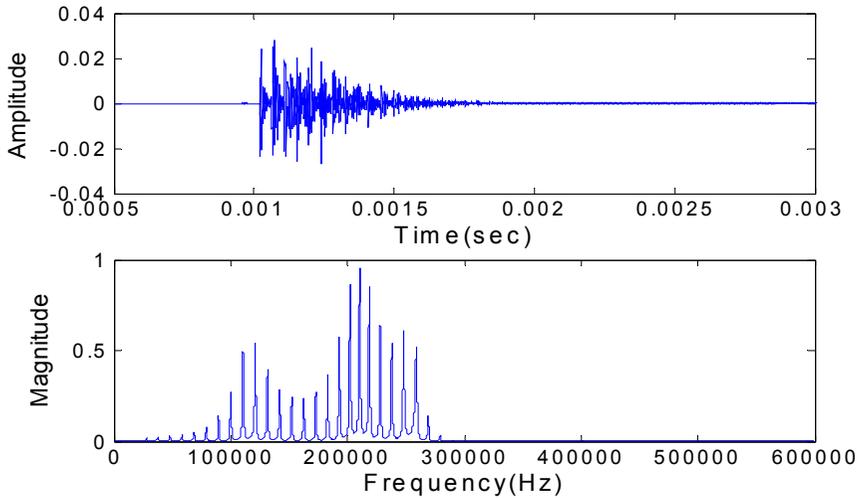


Fig. 3-44. The simulation results of 200 kHz ultrasonic transducer.

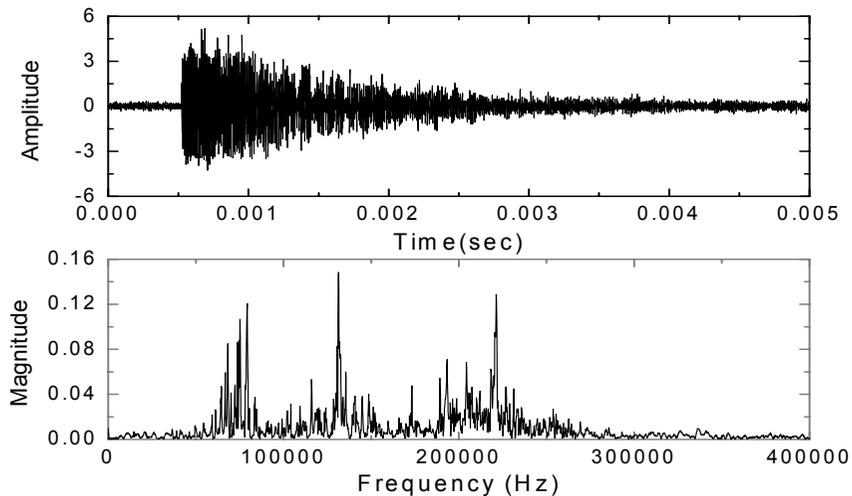
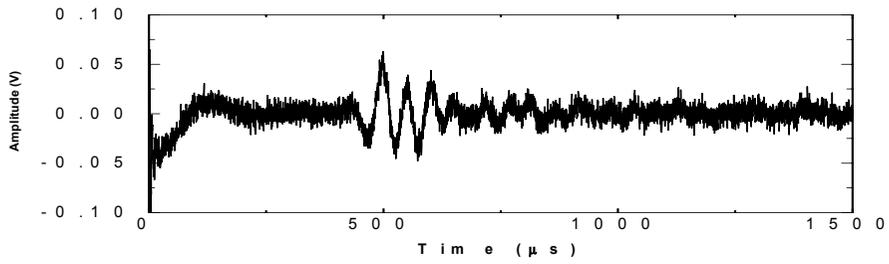
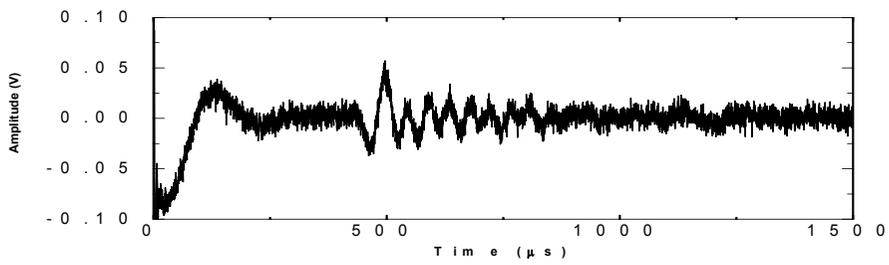


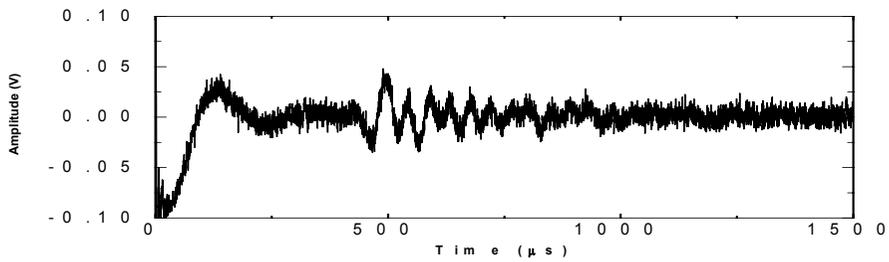
Fig. 3-45. Experimental results by fabricated 200 kHz ultrasonic transducer.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3-46. Ultrasonic signals received by 200 kHz transducer for fruit under various conditions of backing materials. the ratios of epoxy to tungsten power are (a) 1 : 2, (b) 1 : 3, (c) 1 : 4.



Fig. 3-47. 100 kHz and 200 kHz of the fabricated ultrasonic transducers.

## 5. 박막형 초음파 트랜스듀서 개발

### 가. 재료 및 방법

#### 1) PVDF 필름센서 제작

PVDF(polyvinylidene flouride)는 1969년 Kawai에 의해 압전성과 초전성이 발견된 이후 센서로 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. PVDF는  $(-CH_2-CF_2-)$ 를 반복단위로 하는 선상고분자로서 기계적·화학적 성질이 우수하고 분자쇄 내에 존재하는 강한 C-F 쌍극자기에 의해 고분자 재료 중 가장 큰 유전율을 나타내어 콘덴서 재료로 실용화되고 있다. 또한 가공성이 좋고 충격 등으로 잘 파손되지 않으며 유전율이 작고 가벼울 뿐만 아니라 절연성, 내전압성이 커서 고전압의 입력에 잘 견딜 수 있다. 또한 PVDF는 그 재질이 매우 유연하며, 가볍고, 질긴 재료로서 기존 세라믹 계열의 압전 재료에 비해 음향 임피던스가 상대적으로 낮기 때문에 액체나 생체 조직 등과 같은 물질에서 더 유리한 장점이 있다. 특히 과실과 같이 음향 임피던스가 낮은 매질에 적용할 때 압전체와 매질사이의 음향 임피던스를 보다 효과적으로 정합 할 수 있기 때문에 센서와 매질사이의 임피던스 불일치에 따른 음파 검출의 손실을 줄일 수 있다는 장점이 있으며 Q 값이 낮기 때문에 짧은 펄스의 송수신이 가능하여 광대역 주파수 특성을 얻을 수 있다. 또한 재료의 특성상 세라믹 계열의 압전재료에 비해 flexible 하므로 사용 용도에 따라 여러 가지 변형된 형상의 센서를 제작할 수 있다.

그림 (3-48)은 박막형 탄성과 검출센서 연구에 사용된 고분자 압전센서 두께는 PVDF의 경우 110  $\mu\text{m}$ , P(VDF-TrFE)의 경우 100 $\mu\text{m}$ 로 하였으며 직경은 각각 3, 6, 12 mm로 제작하였다. 센서에서 감지하는 신호를 검출하기 위한 전극연결은 먼저 센서의 전극 부에 직경 1.5 mm의 구멍을 뚫은 다음 리벳과 신호 선을 결선하였다. 그 구조는 Fig. 3-49에서 보는바와 같다. 리벳에 연결된 황동 전극에 전기적 노이즈를 방지하기 위하여 이중으로 절연된 동축케이블을 납땜하여 BNC 커넥터와 연결하였다.

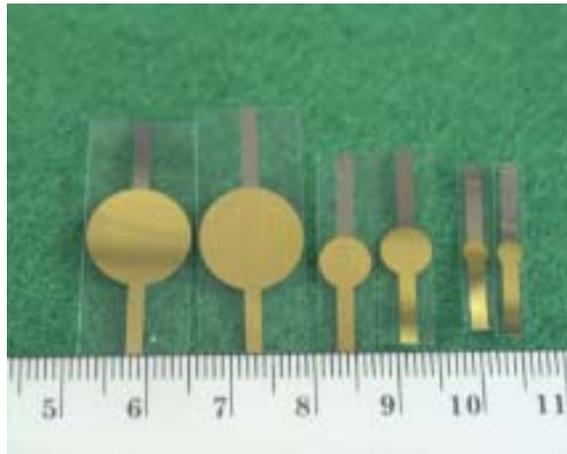


Fig. 3-48. Photo of PVDF (thickness: 110  $\mu\text{m}$ , diameter: 3, 6, and 12 mm).

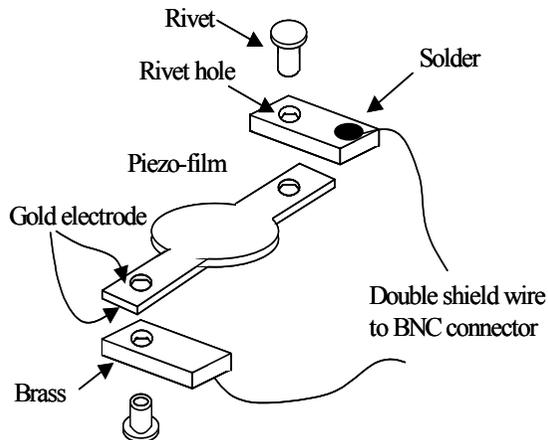


Fig.3-49. Construction of a piezo-polymer sensor's wire harness.

## 2) 실험 장치 및 음향 파라미터

실험에 사용된 사과를 부사로 온도 20℃, 상대습도 75% 조건의 실험실에서 보관하였다. 실험은 3일 간격으로 실시하였다. 사과에 기계적 충격을 주기 위해 그림 (3-50)과 같은 실험 장치를 제작하였으며 타격을 위한 지름 8mm의 아크릴 봉으로 제작하여 사과 타격부분의 손상을 최소화하였다. 항상 동일한 기계적 충격을 가하기 위해 아크릴 봉을 90°각도에서 타격을 가하도록 하였다. 사과 타격 부위에 기계적 충격으로 발생된 신호를 수신하기 위해 제작된 PVDF 센서를 부착하였으며 수신된 신호는 1GHz의 sampling rate를 가지는 오실로스코프(LeCroy)와 컴퓨터를 이용하여 저장 기간에 따른 수신되는 사과의 음파신호를 분석하였다.

사과에 대한 기계적 충격에 의한 응답신호를 분석하기 위하여 음향 파라미터를 고찰하기 위하여 그림 (3-51)에서 보는 바와 같은 음향파라미터를 이용하였다. 그림 (3-51)은 일반적인 음향 충격응답 파형을 나타내는 것으로서 문턱값( $V_t$ ) 이상으로 파형이 지속되는 시간( $\tau_s$ )을 ED(event duration), 이 시간 내에서 문턱값을 가로지르는 회수를 RC(ringdown count), 파형의 최대값을 PA(peak amplitude), 처음 문턱값을 넘는 순간부터 PA까지 걸리는 시간을 RT(rise time,  $\tau_r$ )이라고 정의하였다. 또한 센서에 의해 획득된 응답파형에 대한 주파수 분석을 실시하여 분석하였다.

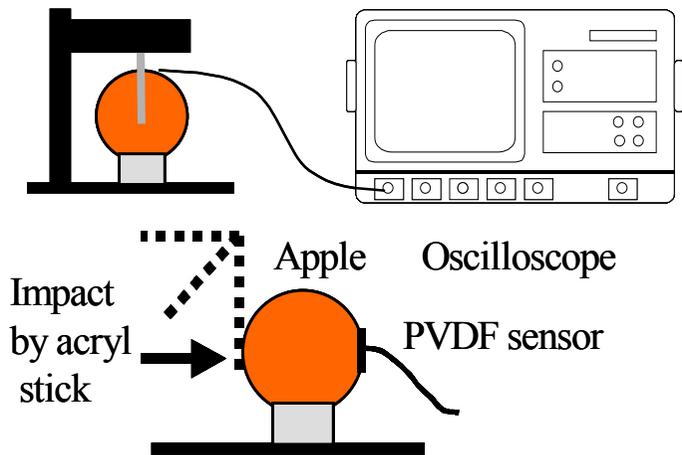


Fig. 3-50. Mechanical impulse device.

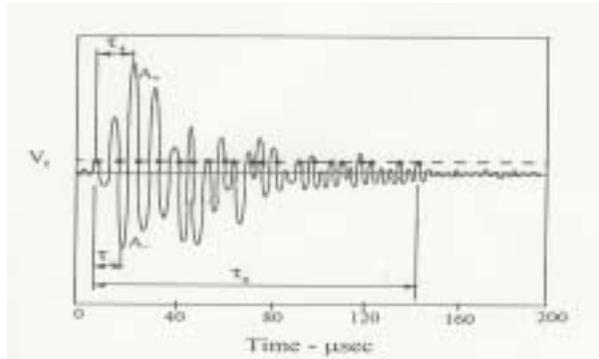


Fig. 3-51. Acoustic parameter of response waveform.

## 나. 결과 및 고찰

### 1) 저장 기간에 따른 센서 응답 파형 분석

그림 (3-52)~(3-54)은 실험에 사용된 3개 사과의 저장기간에 따른 센서 응답파형의 변화를 나타낸 것으로서 저장 기간에 따라 응답 신호의 감쇠가 크게 나타나고 있으며 최대 진폭값도 감소하는 것으로 나타났다. 응답신호를 주파수 분석한 결과 저장 초기에 최대 magnitude를 가지는 피크 주파수( $f_{m1}$ )가 대략 1kHz 부근에서 나타났으나 저장기간이 증가함에 따라 magnitude가 감소할 뿐만 아니라 피크 주파수가 상대적으로 저주파수 쪽으로 천이하는 것으로 나타났다. 마찬가지로 2번째 magnitude를 가지는 피크 주파수( $f_{m2}$ )와 3번째 magnitude를 가지는 피크 주파수( $f_{m3}$ )도 유사한 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 저장기간에 따른 사과과육의 초음파 파라미터의 변화를 구명한 연구 (김기복 등, 2003)에 의해 발표된 연구결과와 매우 비슷한 결과를 나타낸다.

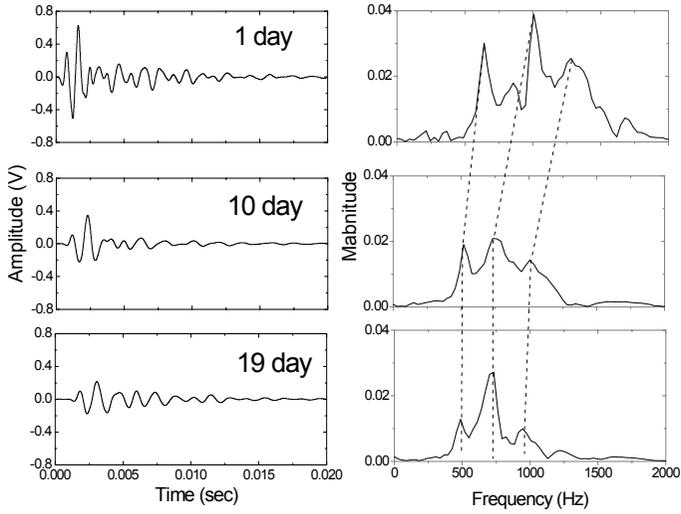


Fig. 3-52. Acoustic response signal and its frequency spectrum of sample No. 1 with the storage time.

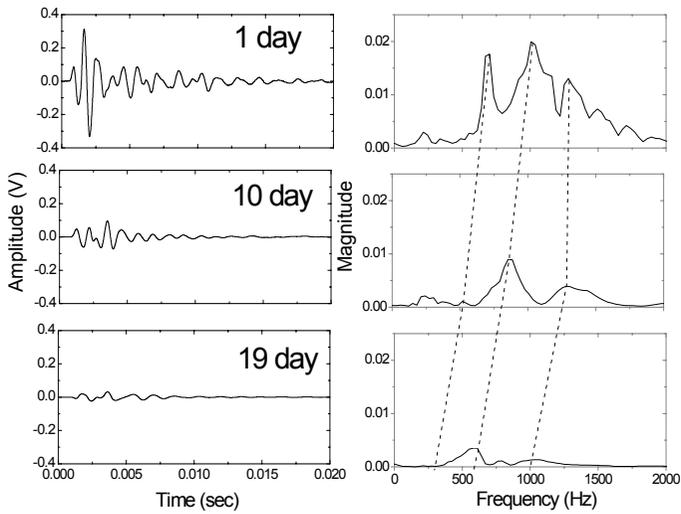


Fig. 3-53. Acoustic response signal and its frequency spectrum of sample No. 2 with the storage time.

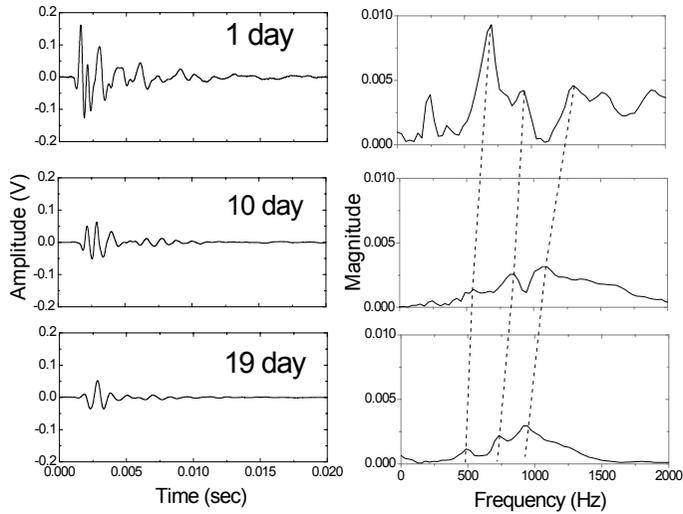


Fig. 3-54. Acoustic response signal and its frequency spectrum of sample No. 3 with the storage time.

## 2) 저장 기간에 따른 음향 파라미터 분석

사과의 저장기간에 따른 음향파라미터를 분석한 결과는 그림 (3-55)에서 보는바와 같다. 응답신호의 최대 피크까지의 상승시간을 나타내는 rise time(RT) 파라미터의 경우 사과 개체별로 차이가 있지만 대체적으로 저장기간이 증가함에 따라 RT도 증가하는 것으로 나타났다. 반면 ringdown count(RC), energy(EN), event duration(ED), peak amplitude(PA), spectral density(SD)는 저장기간에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서의 음향 파라미터는 대체적으로 저장기간에 따라 매우 강한 상관관계를 나타내는 것으로 분석되었다. 이러한 결과로부터 기계적 충격에 따른 음향 반응을 검출하여 정도와 같은 저장기간에 따른 사과의 물성변화를 측정가능 할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서 분석된 음향 파라미터를 이용하여 저장기간을 예측할 수 있는 다음 식 (3-109)와 같은 예측모델을 가정한 다음 중회귀 분석한 결과 표 3-9에서 보는바와 같다.

$$ST = a_0RT + a_1RC + a_2EN + a_3ED + a_4PA + a_5 \quad (3-109)$$

여기서,  $ST$  = 저장기간(day)

$a_0 \sim a_5$  = 회귀모델의 계수

모델 식(3-109)에 포함되는 독립변수는 응답파형의 시간 파라미터만을 고려하였다. 표 3-9의 결과는 각 사과 시료에서 기계적 충격에 따른 응답파형의 음향 파라미터를 이용하여 사과의 저장기간이 예측 가능한 것으로 분석되었다

Table 3-9. Multiple regression analysis for storage time of apple using acoustical parameters.

Sample No.	Model	Regression coefficients						$R^2$
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	
1	Eqn. (1)	4145.64	4628.33	295.516	-3.973	-0.269	8.475	0.9956
2		601.32	-87615.57	572.72	78.308	-0.537	5.122	0.9721
3		-136.73	-71534.44	1239.208	16.466	-1.244	11.648	0.9856

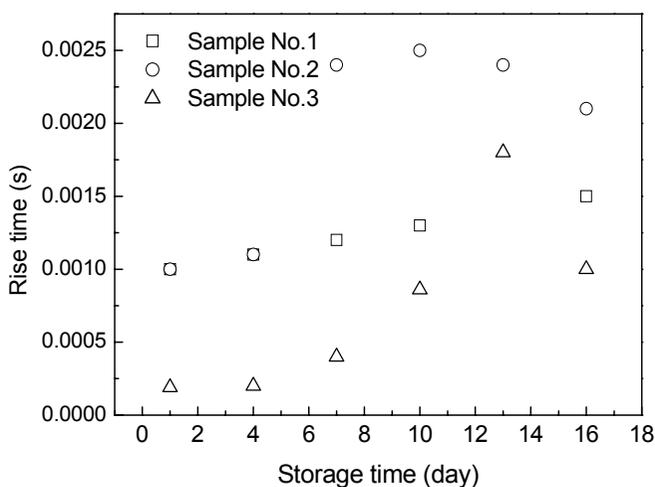


Fig. 3-55. Relationships between storage time and rise time.

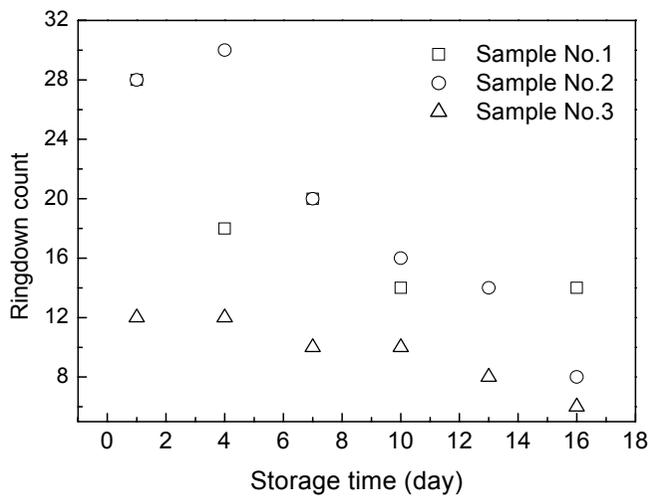


Fig. 3-56. Relationships between storage time and ringdown count.

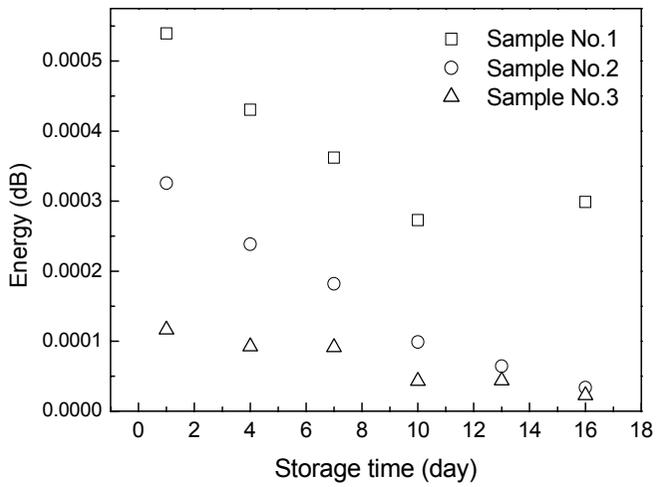


Fig. 3-57. Relationships between storage time and energy.

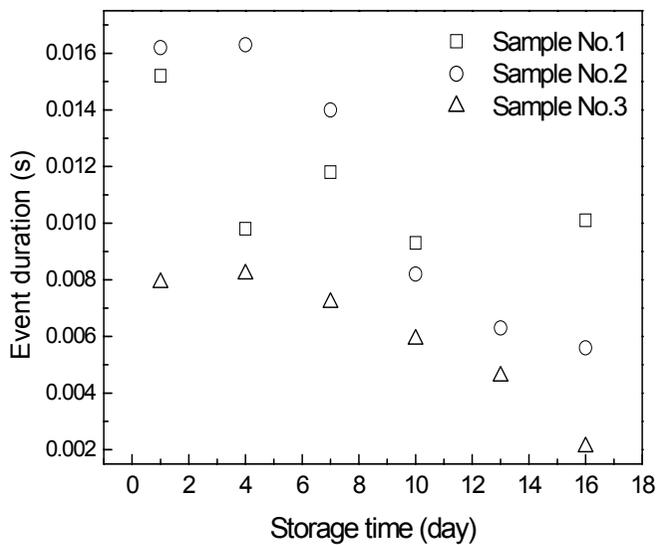


Fig. 3-58. Relationships between storage time and event duration.

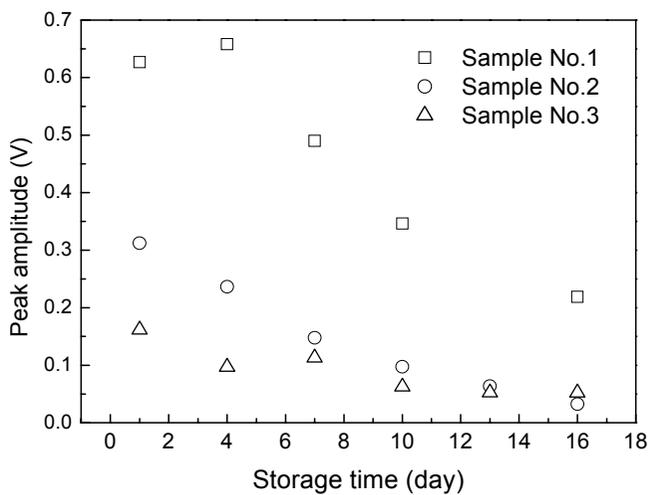


Fig. 3-59. Relationships between storage time and peak amplitude.

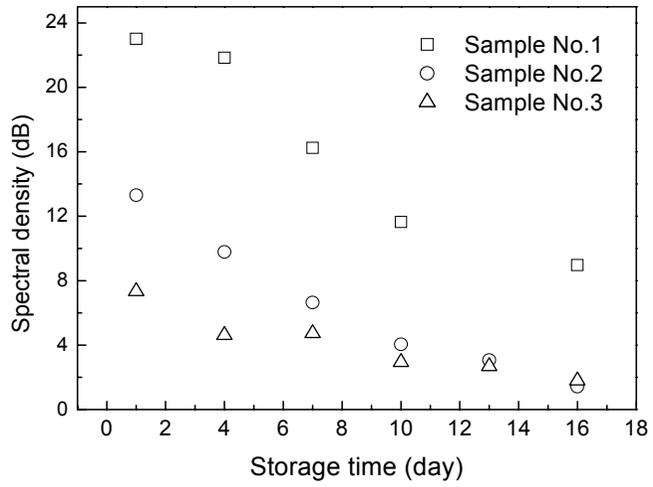


Fig. 3-60. Relationships between storage time and spectral density.

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 초음파 트랜스듀서 제작 이론에 따라 압전소자(PZT)를 이용하여 100 kHz, 200 kHz 초음파 트랜스듀서를 개발하였으며 PVDF를 이용하여 박막형 초음파 센서를 제작하여 평가하였다.

-이전의 실험에서 얻은 과실에 대한 물성을 이용하여 초음파 트랜스듀서 제작에 필요한 전면 정합층, 압전소자, 후면재의 음향임피던스를 이론적으로 계산하고 이론값에 적합한 재료를 선정하였다.

-전면 정합층의 음향 임피던스는 0.16~0.3 MRayL로 계산되었으며 선정된 재료는 아크릴, 테프론, 실리콘 러버와 텅스텐 파우더 조합이다.

-압전 소자는 초음파 발생 특성과 수신 특성이 우수한 재료로 K-1, K-2, P-1, P-2의 4가지 재료가 선정되었다.

-후면재는 텅스텐 파우더와 실리콘 카바이드, 에폭시를 배합하여 제작하였다.

-초음파 트랜스듀서 제작을 위해 선정된 전면 정합층, 압전소자, 후면재의 물성 값을 이용하여 초음파 빔, 음장, 파형을 모델링하고 실제 측정치와 비교하였다.

-실험 결과 100 kHz 초음파 트랜스듀서의 최적 설계 조건은 다음과 같다

- 전면 정합층 : 테프론
- 압전소자 : K-1
- 후면재 : 에폭시 : 실리콘 분말(150  $\mu\text{m}$ ) : 텅스텐 분말(1  $\mu\text{m}$ ) = 1 : 2 : 1

-제작된 100 kHz의 성능 향상과 소형화를 위해 200 kHz 초음파 트랜스듀서를 제작하였으며 최적 제작 조건은 다음과 같다.

- 전면 정합층 : 테프론
- 압전소자 : K-1
- 후면재 : 에폭시 : 텅스텐 분말(1  $\mu\text{m}$ ) = 1 : 2

-PVDF 센서를 이용하여 과실의 충격에 대한 응답신호 분석 결과 저장 초기에 최대 크기를 갖는 피크 주파수가 약 1kHz 부근에서 나타났으나 저장 기간에 증

가함에 따라 피크 주파수가 저주파수 쪽으로 이동하고 최대 크기가 감소하는 것으로 나타났으며 두 번째와 세 번째 크기를 갖는 피크 주파수에서도 비슷한 결과가 나타났다.

## 4절 과실의 기계적 특성과 초음파 파라미터

### 1. 저장기간에 따른 과실의 기계적 특성

#### 가. 사과와 산사 품종의 기계적 특성

산사 품종 사과의 기계적 특성을 측정된 결과 그림(4-1)에서 보는 바와 같이 저장기간에 따라서 파괴점(rupture point)이 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 3일간의 짧은 차이지만 상온에서 저장했기 때문에 경도의 저하가 매우 심하게 나타남을 알 수가 있었다. 또한, 사과의 힘-변형곡선에서 알 수 있듯이 과실에 있어서 중요한 생물체 항복점은 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 생물체 항복점의 추정 근거가 되며 곡선의 기울기의 변화가 발생하는 변곡점도 나타나지 않았다. 이것은 ASAE standard에서 제시하고 있는 곡면을 가진 인텐터(Spherical indenter)로 압축실험을 하는 경우 미세한 파괴가 시작되는 생물체 항복점을 측정하기에는 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

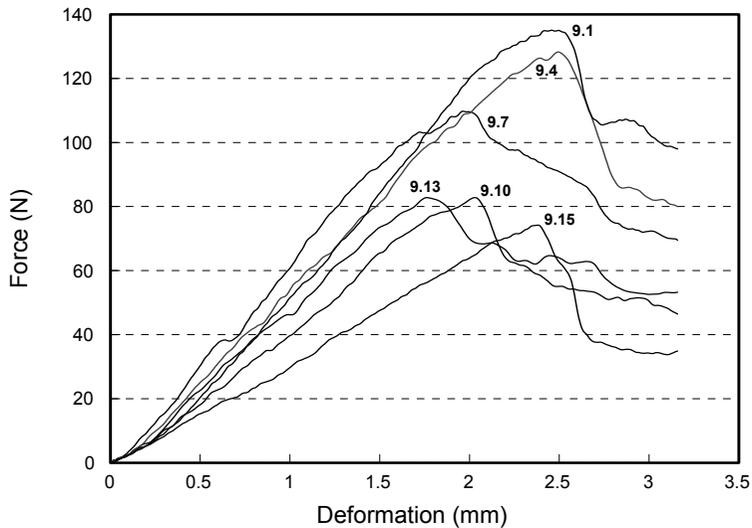


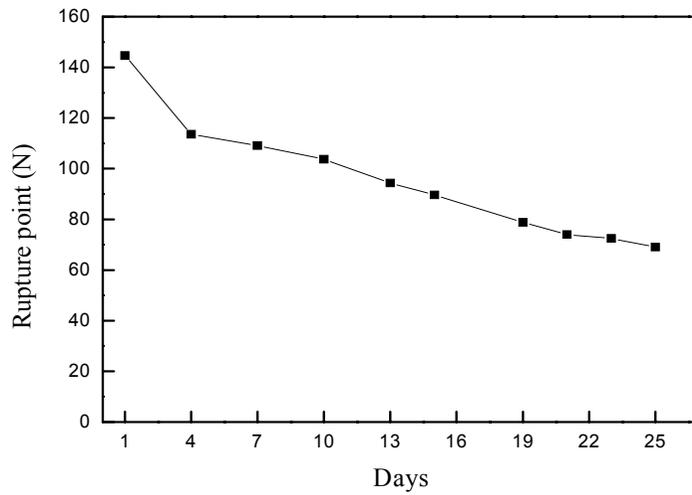
Fig. 4-1. Force-Deformation curves of apple(Sansa) according to the storage days.

표(4-1)과 그림(4-2)를 통해 저장기간에 따른 사과와 파괴점 및 탄성계수의 측정결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 파괴점이나 탄성계수 모두 저장기간에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 상온에 저장하는 경우 즉 온도가 높고 상대습도가 낮은 조건에서 저장하는 경우 기계적 특성은 비교적 빠르게 변함을 알 수 있었다.

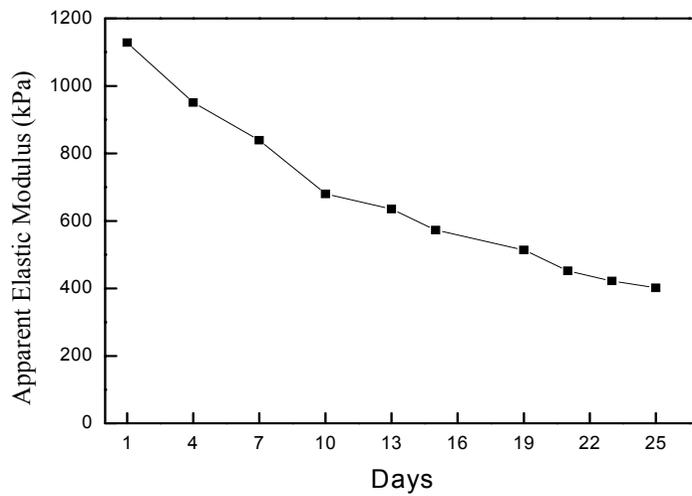
Table 4-1. Rupture point and elastic modulus of apple(Sansa cultivar) according to storage days.

Storage day (day)		Rupture point (N)	Elastic modulus (kPa)
1	Avg.	144.66	1128.34
	S. D.	31.63	209.66
4	Avg.	113.54	950.37
	S. D.	21.64	186.67
7	Avg.	109.09	839.28
	S. D.	24.38	215.86
10	Avg.	103.73	679.77
	S. D.	21.48	186.25
13	Avg.	94.36	635.06
	S. D.	18.58	128.16
15	Avg.	89.59	572.31
	S. D.	16.50	125.91
19	Avg.	78.85	513.42
	S. D.	22.37	198.84
21	Avg.	74.01	452.20
	S. D.	20.44	160.53
23	Avg.	72.48	422.14
	S. D.	26.31	185.80
25	Avg.	69.03	401.70
	S. D.	18.15	171.32

\* Note : Avg. = average, S.D. = standard deviation



(a) Rupture point



(b) Elastic modulus

Fig. 4-2. Trend of the rupture point and the elastic modulus of apple(Sansa cultivar) according to the storage days.

이러한 자료는 결과적으로 상온 유통 시에 얼마나 빨리 품질의 저하를 가져오는가를 판단할 수 있는 자료이기 때문이다.

저장초기에 비하여 저장 25일 후에는 파괴점은 약 34%, 탄성계수는 약 36%로 감소한 것으로 볼 때 상온 저장의 경우에는 매우 급격하게 사과 기계적 특성이 변하고 있음을 알 수 있었다.

저장일수를 변수로 하는 파괴점과 탄성계수의 회귀식은 각각 다음과 같다.

$$RP = -0.0067d^3 + 0.3403d^2 - 7.5244d + 147.3588 \quad (r^2 = 0.9719) \text{-----(4-1)}$$

$$E = -0.0353d^3 + 2.3441d^2 - 68.5091d + 1194.5293 \quad (r^2 = 0.9963) \text{-----(4-2)}$$

여기서, RP = Rupture Point(N)

E = Elastic modulus(kPa)

d = Storage day(day)

#### 나. 사과의 후지 품종의 기계적 특성

표(4-2) 및 그림(4-3)에는 저장기간에 따른 사과의 생물체 항복강도의 측정결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 생물체 항복강도가 저장기간에 따라 불규칙적으로 나타난 것은 농가의 저온저장고에 시료를 저장하는 동안 온도와 상대습도가 일정하게 유지되지 않았기 때문에 발생한 결과로 사료된다.

Table 4-2. Bioyield strength of apple(Fuji cultivar) according to the storage days.

Storage day (days)	Bioyield strength (kPa)
60	181.505
70	172.018
80	182.422
90	170.712
100	189.843
110	165.509
120	194.917
130	199.058
140	220.356
150	190.365
160	174.323

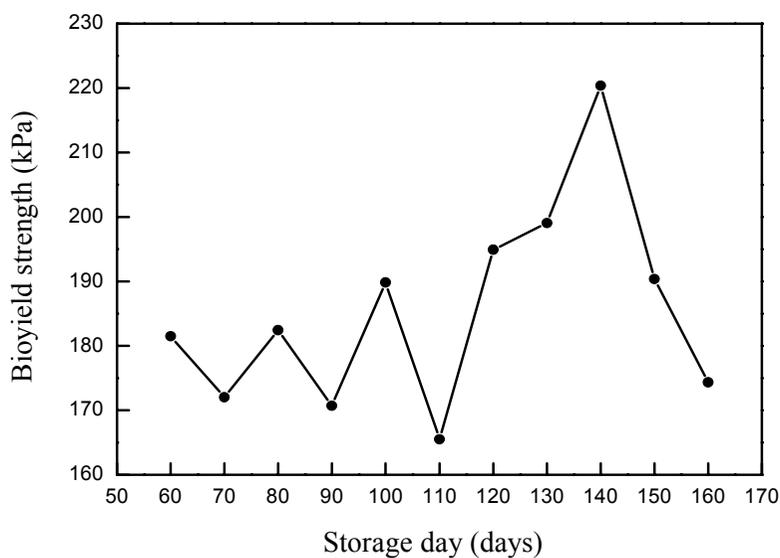


Fig. 4-3. Bioyield strength of apple(Fuji cultivar) according to the storage days.

다. 배 신고 품종의 기계적 특성

표(4-3) 및 그림(4-4)에는 저장기간에 따른 배의 생물체 항복강도의 측정결과를 나타내었다. 그림(4-4)에서 보는 바와 같이 사과와 유사하게 생물체 항복강도가 저장기간에 따라 불규칙적으로 나타난 것은 농가의 저온저장고에 시료를 저장하는 동안 온도와 상대습도가 일정하게 유지되지 않았기 때문에 발생한 결과로 사료된다.

Table 4-3. Bioyield strength of pear(Niitaka cultivar) according to the storage days.

Storage day (days)	Bioyield strength (kPa)
60	144.350
70	138.855
80	126.766
90	171.824
100	157.555
110	137.293
120	155.832

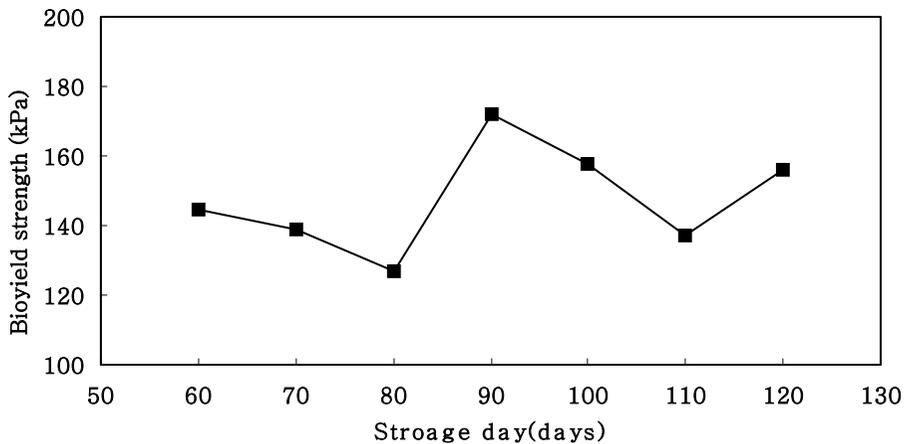


Fig. 4-4. Trend of the bioyield strength of pear(Niitaka cultivar) according to the storage days.

라. 복숭아의 기계적 특성

표(4-4) 및 그림(4-5)에는 저장기간에 따른 복숭아의 생물체 항복강도의 측정 결과를 나타내었다. 그림(4-5)에서 보는 바와 같이 생물체 항복강도가 저장기간에 따라 대체적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 4-4. Bioyield strength of peach(Jungbak cultivar) according to the storage days.

Storage day (days)	Bioyield strength (kPa)
3	276.824
4	178.991
5	144.390
6	182.630
8	149.681
10	114.906
12	137.668

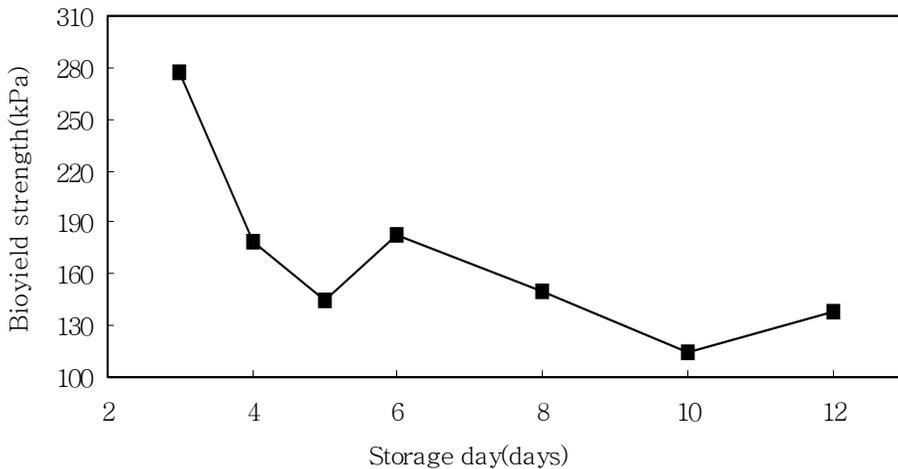
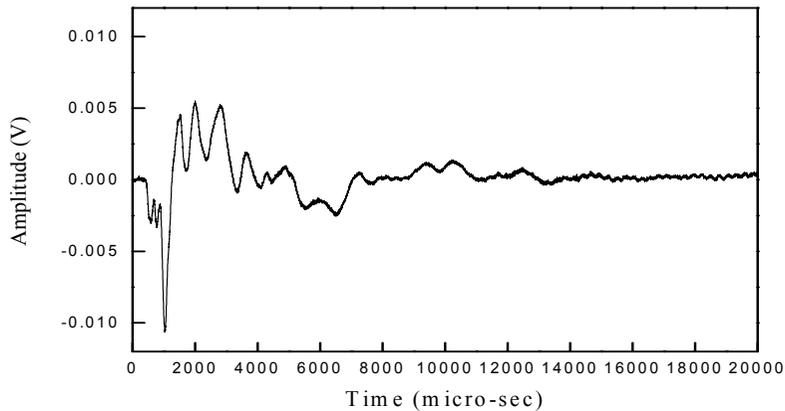


Fig. 4-5. Trend of the bioyield strength of peach(Jungbak cultivar) according to the storage days.

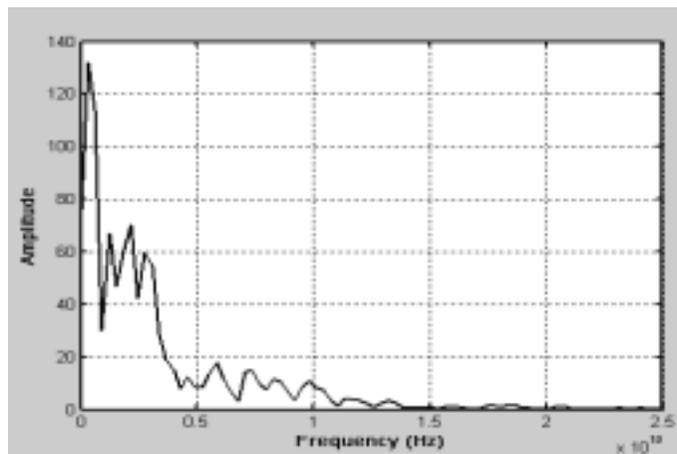
## 2. 저장기간에 따른 과실의 초음파 파라미터

### 가. 저장기간에 따른 사과 품종별 초음파 진파 특성

저장 기간에 따라 매 시료마다 그림(4-6)에서와 같은 초음파 투과를 계측하여 나타내었으며 표(4-5), (4-6)에는 산사 품종의 13가지 초음파 파라미터들을 분석하여 그 평균값과 표준편차를 나타내었다.



(a) time domain



(b) frequency domain

Fig. 4-6. A typical transmitted ultrasonic signal from the apple sample.

Table 4-5. Ultrasonic parameters of apple(Sansa cultivar) according to the storage days.

Sd (Days)	TF ( $\mu$ s)	TV (m/s)	AI ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )	Max. a (V)	Min. a (V)	Ac max. a (dB)	Ac min. a (dB)	Ac max. a/T (dB/m)	
1	Avg.	435	187.595	-	0.00618	-0.01095	-98.4378	-93.4054	-1211.8465
	S. D.	280	10.152	-	0.00148	0.00235	2.3191	2.0292	53.5515
4	Avg.	479	168.488	-	0.00488	-0.00833	-100.4106	-95.7092	-1251.7861
	S. D.	400	12.595	-	0.00100	0.00142	1.8955	1.6364	37.2691
7	Avg.	504	157.267	129820.06	0.00374	-0.00415	-102.8476	-102.0069	-1306.9964
	S. D.	490	12.651	12079.41	0.00103	0.00113	2.5383	2.7962	44.3365
10	Avg.	575	137.567	114155.00	0.00276	-0.00272	-106.0382	-106.4871	-1365.7054
	S. D.	820	18.714	15530.93	0.00112	0.00112	4.2363	5.0079	75.2123
13	Avg.	614	132.140	108962.31	0.00290	-0.00254	-105.1570	-106.4573	-1324.4896
	S. D.	920	18.848	16341.29	0.00092	0.00097	2.7951	3.1719	58.6714
15	Avg.	631	127.655	105288.23	0.00247	-0.00234	-106.5991	-107.7121	-1347.6841
	S. D.	850	17.597	14012.19	0.00080	0.00160	2.9728	4.0979	46.4673
19	Avg.	652	122.485	100595.69	0.00195	-0.00160	-108.3334	-110.3603	-1366.4786
	S. D.	580	10.240	8909.96	0.00037	0.00051	1.7433	2.9634	48.8081
21	Avg.	814	98.252	81165.24	0.00145	-0.00113	-110.9787	-113.1142	-1417.9412
	S. D.	132	14.205	12263.12	0.00033	0.00023	2.0635	1.6791	40.9562
23	Avg.	813	98.518	80281.11	0.00149	-0.00121	-110.8579	-112.6417	-1427.1523
	S. D.	138	18.942	15915.35	0.00041	0.00033	2.5377	2.3528	53.6295
25	Avg.	681	114.597	93922.22	0.00133	-0.00158	-114.2040	-110.4872	-1504.6750
	S. D.	116	19.060	15800.80	0.00091	0.01053	9.3222	3.0017	118.5347

\* Note : Sd = storage day(days), TF = time of flight( $\mu$ s)

TV = transmitted velocity(m/s), AI = acoustics impedance( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ),

Max. a = maximum amplitude(V), Min. a = minimum amplitude(V),

Ac max. a = attenuation coefficient at maximum amplitude(dB),

Ac min. a = attenuation coefficient at minimum amplitude(dB),

Ac max. a/T = Ac max. a/Thickness(dB/m), Avg. = average,

S.D. = standard deviation

Table 4-6. Ultrasonic parameters of apple(Sansa cultivar) according to the storage days(continued).

Sd (Days)	Ac min. a/T (dB/m)	1 peak (Hz)	2 peak (Hz)	3 peak (Hz)	4 peak (Hz)	
1	Avg.	-1149.92576	229.7086	395.7594	581.6103	904.5374
	S. D.	50.46392	171.3992	227.1763	360.7740	760.2602
4	Avg.	-1193.26598	350.1259	281.3593	576.3444	908.2852
	S. D.	37.49828	184.7312	178.5438	414.8790	454.6260
7	Avg.	-1296.16527	233.0597	427.4097	487.6696	1032.1817
	S. D.	41.94374	144.4618	230.3719	392.5791	726.5408
10	Avg.	-1371.59490	281.3215	303.7378	549.2715	667.5547
	S. D.	84.52099	162.0851	1921.9448	350.6071	613.8816
13	Avg.	-1340.90704	348.8130	343.5223	583.7507	833.3832
	S. D.	62.96068	149.3215	276.2090	368.7827	787.0195
15	Avg.	-1362.20023	406.0863	433.8311	507.6205	1189.9097
	S. D.	67.84538	690.5793	310.2683	387.0735	1146.6965
19	Avg.	-1391.80388	1280.7091	766.0545	1109.9318	1167.2136
	S. D.	53.38448	1530.5779	1121.3472	1311.7948	1335.0121
21	Avg.	-1445.35370	1665.7818	1194.2227	1030.3000	1443.2545
	S. D.	43.12038	1655.2583	1510.7860	1246.3603	1450.4601
23	Avg.	-1450.75686	1180.8200	1482.2133	1296.1533	1304.3267
	S. D.	69.71798	1613.9849	1568.3409	1575.2948	1504.7552
25	Avg.	-1456.43271	871.0698	779.5964	844.8801	2067.6623
	S. D.	54.94191	1394.9179	1364.4823	1168.9065	1636.6379

\* Note : Sd = storage day(days), Avg. = average, S.D. = standard deviation,  
 Ac min. a/T = Attenuation coefficient in min. amp./Thickness(dB/m),  
 1 peak = First peak frequency(Hz), 2 peak = Second peak frequency(Hz),  
 3 peak = Third peak frequency(Hz), 4 peak = Fourth peak frequency(Hz),

여기에는 파라미터들 간에 상호 연관이 있어 독립적이지 못한 파라미터들도 포함되어있다. 따라서 초음파 파라미터로 사과와 기계적 특성을 추정하는 데는 상관관계가 높은 파라미터를 선정하여야 할 것이다. 대체로 초음파 파라미터들은 저장기간에 따라 감소하거나 증가하는 일률적인 경향을 나타내고 있으나 주파수

영역(frequency domain)에서의 피크 주파수들은 저장기간에 따라 증가하거나 감소하는 일률적인 경향이 잘 나타나지 않음을 알 수 있었다.

1) 산사 품종의 기계적 특성과 초음파 특성과의 상관관계

저장기간에 따른 사과와의 기계적 특성과 초음파 특성과의 상관관계를 표(4-7)에 나타내었으며 이들 간의 상관관계가 0.5이상으로 비교적 높은 값들을 음영으로 표시하였다. 여기서 기계적 특성 값들은 표(4-1)에 나타낸 값들로 이들은 매 시료에 대하여 초음파 실험 직후에 동일한 시료에서 얻어진 자료들이다. 사과와의 기계적 특성과 초음파 특성간의 상관관계가 큰 것은 시간영역에서의 투과시간, 투과속도, 진폭(최대진폭, 최소진폭), 감쇠계수 및 음향임피던스(속도×밀도) 등이었다.

Table 4-7. Correlation coefficient between ultrasonic properties and mechanical properties of apple.

	Rupture point (N)	Elastic modulus (kPa)
Time of flight (s)	-0.4966	-0.6173
Transmitted velocity (m/s)	0.5066	0.6748
Acoustics impedance	0.5317	0.6832
Max. amplitude (V)	0.5966	0.7037
Min. amplitude (V)	-0.4835	-0.5793
Attenuation coefficient in max. amp.	0.5223	0.5754
Attenuation coefficient in min. amp.	0.5138	0.6293
Attenuation coefficient in max. amp./Thickness	0.3136	0.4821
Attenuation coefficient in min. amp./Thickness	0.2814	0.5095
First peak frequency	-0.2131	-0.2161
Second peak frequency	-0.1014	-0.1153
Third peak frequency	-0.1214	-0.1559
Fourth peak frequency	-0.0999	-0.1138

또한, 주파수 영역에서의 사과와 초음파 파라미터들은 사과와 파괴점 및 탄성계수와의 상관관계가 매우 낮았다. 따라서 사과와 기계적 특성을 추정하기 위한 초음파 파라미터들로는 표(4-7)에서 보는바와 같이 상관관계가 비교적 높았던(약 0.5이상) 투과시간, 투과속도, 음향임피던스, 최대·최소진폭, 감쇠계수 1, 2 등 7개의 파라미터를 들 수 있다. 어떤 모형이든 간에 적용 변수가 적으면서도 정확히 추정할 수 있는 모형이 좋은 모형이므로 여기서도 서로 연관이 있거나 이용에 불편을 줄 수 있는 파라미터인 투과시간과 음향임피던스를 제외한 5개의 파라미터로 모형을 개발하여 보았다. 여기서, 모형개발을 위하여 사용한 통계프로그램은 DataFit 7.1(Oakdale Engineering, USA) 이었다. 5개의 초음파 파라미터로 사과의 탄성계수와 파괴점을 추정한 결과 5개의 파라미터를 변수로 하는 다중 선형 회귀식의 경우 결정계수( $R^2$ )의 값이 각각 0.7132 및 0.5679로 다른 형태의 모형보다 높은 결정계수 값을 나타내었다. 좀더 간단한 모형을 개발하기 위하여 변수의 수를 3개 즉, 투과속도, 최대진폭 및 최대진폭에서의 감쇠계수만 가지고 모형을 만들었을 때도 다중 선형 회귀식이 적합한 것으로 나타났으며 결정계수의 값도 변수 5개일 때와 별 차이가 없는 0.7089와 0.5635이었고 모형의 각 계수는 표(4-8) 및 (4-9)에 각각 나타내었다.

Table 4-8. Multiple liner regression equation for rupture point of the apple as a function of ultrasonic parameters.

Variables	$RP = a \times V + b \times A_1 + c \times A_2 + d$			Coefficient of determination ( $R^2$ )
	Coefficients	Standard error	t-ratio	
<i>a</i>	0.1707	0.0851	2.0052	0.5635
<i>b</i>	10588.2376	2231.8438	4.7442	
<i>c</i>	-0.0256	0.5001	-0.0511	
<i>d</i>	38.5179	56.9086	0.3758	

\* NOTE : RP = Rupture point (N),

V = Transmitted velocity (m/s),

A1 = Max. amplitude(V),

A2 = Attenuation coefficient in max. amplitude (dB)

Table 4-9. Multiple liner regression equation for elastic modulus of the apple as a function of ultrasonic parameters.

Variables	$E = a \times V + b \times A_1 + c \times A_2 + d$			Coefficient of determination (R <sup>2</sup> )
	Coefficients	Standard error	t-ratio	
<i>a</i>	3.3322	0.6318	5.2743	0.7089
<i>b</i>	76734.3351	16566.4495	4.6319	
<i>c</i>	1.4117	3.7120	0.3803	
<i>d</i>	144.6006	422.4194	0.3423	

\* NOTE : E = Apparent elastic modulus (kPa),  
 V = Transmitted velocity (m/s),  
 A1 = Max. amplitude(V),  
 A2 = Attenuation coefficient in max. amplitude (dB)

2) 후지 품종의 기계적 특성과 초음파 특성과의 상관관계

표(4-10)에는 본 실험에서 측정된 저장기간에 따른 과실시료의 시간영역 및 일부 주파수 영역에서의 초음파 특성의 평균값을 나타내고 있다. 표(4-10)에 나타난 초음파 파라미터들은 실험에 의해 얻어지는 15개의 초음파 파라미터들 중 파라미터 상호에 서로 독립적이며, 사과와의 기계적 특성과 상관관계가 비교적 높았던 인자들이다.

Table 4-10. Ultrasonic parameters of the apple sample according to the storage days.

SD (days)	V (m/s)	Max. (V)	Coeff. (dB)	Gap (V)	Spectrum density										
					AA11			DD11				DD10			
					1000 (Hz)	2000 (Hz)	3000 (Hz)	2000 (Hz)	4000 (Hz)	6000 (Hz)	8000 (Hz)	6000 (Hz)	9000 (Hz)	12000 (Hz)	15000 (Hz)
60	226.245	0.013	-91.687	0.041	264.0	48.49	20.32	0.320	23.63	5.641	0.552	3.418	5.031	1.074	0.248
70	221.252	0.015	-90.495	0.039	161.0	55.26	25.70	0.873	28.46	12.59	1.118	3.733	5.095	0.605	0.238
80	223.121	0.016	-89.769	0.041	193.2	52.15	30.77	0.636	26.62	8.689	0.954	8.085	3.639	0.720	0.239
90	214.965	0.008	-96.042	0.023	120.2	13.64	4.395	0.033	2.945	1.364	0.220	0.742	0.325	0.067	0.019
100	227.050	0.039	-90.189	0.058	180.1	24.41	5.928	0.201	11.27	2.934	0.278	1.142	1.344	0.264	0.067
110	235.033	0.016	-90.132	0.039	259.1	38.41	11.50	0.504	17.79	2.671	0.405	4.335	2.094	0.865	0.141
120	247.849	0.016	-89.931	0.042	302.6	52.43	14.15	0.41	16.43	4.368	0.559	2.609	2.509	1.132	0.101
130	238.320	0.014	-91.383	0.039	235.5	40.17	12.19	0.643	22.05	5.450	0.875	2.618	1.699	0.387	0.131
140	233.479	0.013	-92.136	0.032	236.1	34.27	7.939	0.307	10.43	2.344	0.395	2.218	1.405	0.164	0.079
150	221.182	0.012	-92.542	0.033	208.0	35.31	10.99	0.166	8.972	2.073	0.336	2.690	1.372	0.349	0.091

\* NOTE :

SD = Storage day (day), V = Transmitted velocity (m/s), Max. = Max. amplitude (V),  
 Coeff. = Attenuation coefficient at max. amplitude (dB),  
 Gap = A gap of max. amplitude and min. amplitude (V),  
 AA11 = 11th low frequency component of wavelet decositions,  
 DD11 = 11th high frequency component of wavelet decositions,  
 DD10 = 10th high frequency component of wavelet decositions,

가) 후지 품종의 생물체 항복강도와 초음파 특성과의 상관관계

표(4-11)에는 사과의 생물체 항복강도와 초음파 파라미터들 간의 상관계수를 분석하여 이 값이 비교적 높았던 것들을 나타내었다. 표(4-10)에서 spectrum density의 AA11, DD11 및 DD10등은 각각 wavelet 변환에서 저주파수 성분과 고주파수 성분을 나타내는 것이다. 표에서 보는 바와 같이 생물체 항복강도와 본 연구에서 고려한 초음파 파라미터들 간의 상관계수는 비교적 높게 나타났으나, 초음파 투과속도와 spectrum density의 DD11(8000 Hz)에서는 상관계수가 매우 낮게 나타났다.

Table 4-11. Correction coefficient among bioyield strength of the apple (Fuji) and spectrum densities at various frequencies.

		Bioyield Strength (kPa)
V (m/s)		0.3133
Max. (V)		0.7738
Coeff. (dB)		0.5312
Gap (V)		0.6600
Spectrum Density	AA11 1000 Hz	0.8941
	AA11 2000 Hz	0.9997
	AA11 3000 Hz	0.7895
	DD11 2000 Hz	0.6887
	DD11 4000 Hz	0.6137
	DD11 6000 Hz	0.5057
	DD11 8000 Hz	0.4800
	DD10 6000 Hz	0.9949
	DD10 9000 Hz	0.9301
	DD10 12000Hz	0.9894
DD10 15000Hz	0.9453	

\* NOTE : V = Transmitted velocity (m/s),

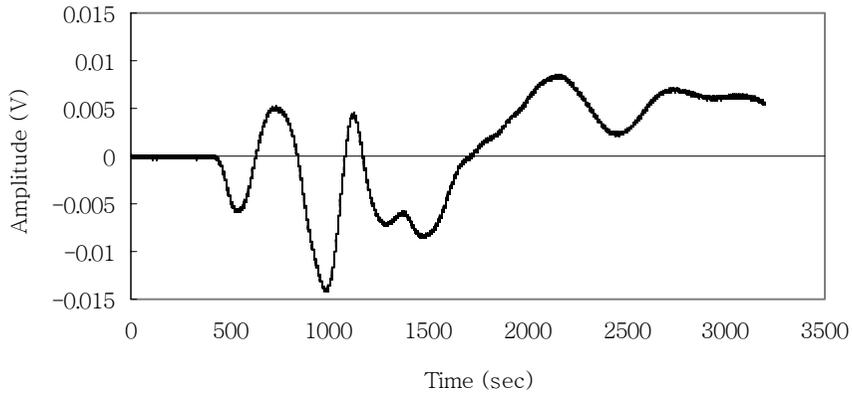
Max. = Max. amplitude (V),

Coeff. = Attenuation coefficient in max. amplitude (dB),

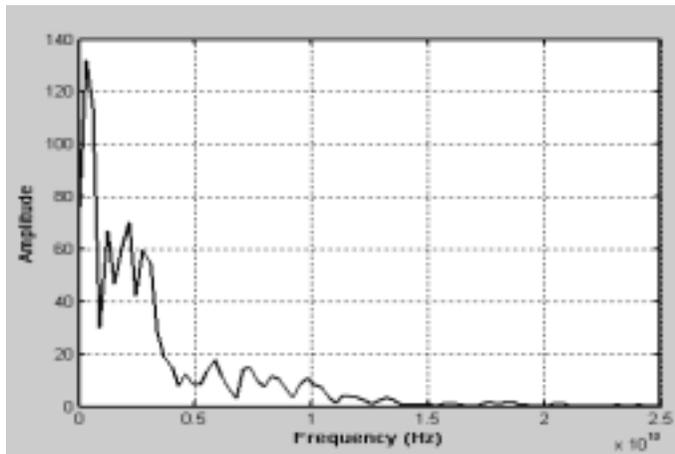
Gap = A gap of max. amplitude and min. amplitude (V)

#### 나. 저장기간에 따른 배의 초음파 진파 특성

저장 기간에 따라 배 시료마다 그림(4-7)에서와 같은 초음파 투과를 측정할 수 있었다. 실험에 의해 얻어진 초음파 파라미터로 배의 기계적 특성을 추정하는 데는 상관관계가 높은 파라미터를 선정하여야 할 것이다. 대체로 초음파 파라미터들은 저장기간에 따라 감소하거나 증가하는 일률적인 경향을 나타내고 있으나 주파수 영역(frequency domain)에서의 피크 주파수들은 저장기간에 따라 증가하거나 감소하는 일률적인 경향이 잘 나타나지 않음을 알 수 있었다.



(a) time domain



(b) frequency domain

Fig. 4-7. A typical transmitted ultrasonic signal from the pear sample.

1) 배의 기계적 특성과 초음파 특성과의 상관관계

표(4-12)는 본 실험에서 계측된 저장기간에 따른 과실시료의 시간영역 및 일부 주파수 영역에서의 초음파 특성의 평균값을 나타내고 있다. 표(4-12)에 나타낸 초음파 파라미터들은 실험에 의해 얻어지는 15개의 초음파 파라미터들 중 파라미터 상호 서로 독립적이며, 배의 기계적 특성과 상관관계가 비교적 높았던 인자들이다.

Table 4-12. Ultrasonic parameters of the pear sample according to the storage days.

SD (days)	V (m/s)	Max. (V)	Coeff. (dB)	Gap (V)	Spectrum density										
					AA12			DD12				DD11			
					1000 (Hz)	2000 (Hz)	3000 (Hz)	2000 (Hz)	4000 (Hz)	6000 (Hz)	8000 (Hz)	6000 (Hz)	9000 (Hz)	12000 (Hz)	15000 (Hz)
60	194.566	0.007	-97.192	0.019	78.61	6.59	0.30	4.75	4.23	0.0003	0.013	9.26	0.279	0.0003	0.011
70	199.990	0.009	-95.555	0.024	105.9	17.60	0.38	6.34	29.2	0.0004	0.068	8.48	0.273	0.0005	0.011
80	191.997	0.008	-96.497	0.017	67.09	5.92	0.29	3.07	7.65	0.0008	0.020	4.69	0.144	0.0001	0.005
90	182.433	0.004	-102.515	0.011	11.13	0.76	0.04	3.38	4.91	0.0002	0.013	2.01	0.061	0.00004	0.003
100	188.526	0.004	-101.938	0.010	24.68	2.71	0.04	1.38	1.73	0.0003	0.005	4.40	0.177	0.00005	0.006
110	188.413	0.010	-94.459	0.020	72.67	12.02	0.24	10.8	20.1	0.0012	0.054	7.31	0.347	0.00005	0.010
120	192.965	0.007	-97.301	0.017	43.56	4.84	0.25	6.98	6.64	0.0005	0.020	10.1	0.345	0.0002	0.013

\* NOTE : SD = Storage day (day),

V = Transmitted velocity (m/s),

Max. = Max. amplitude (V),

Coeff. = Attenuation coefficient in max. amplitude (dB),

Gap = A gap of max. amplitude and min. amplitude (V)

## 2) 배의 생물체 항복강도와 초음파 특성과의 상관관계

표(4-13)에는 배의 생물체 항복강도와 초음파 파라미터들 간의 상관계수를 분석하여 이 값이 비교적 높았던 것들을 나타내었다. 표에서 spectrum density의 AA12, DD12 및 DD11등은 각각 wavelet 변환에서 저주파수 성분과 고주파수 성분을 나타내는 것이다. 표(4-13)에서 보는 바와 같이 생물체 항복강도와 본 연구에서 고려한 초음파 파라미터들 간의 상관계수는 비교적 높게 나타났으나, 초음파 투과속도와 spectrum density의 AA12(3000 Hz)에서는 상관계수가 매우 낮게 나타났다.

Table 4-13. Correction coefficient among bioyield strength of the pear and spectrum densities at various frequencies.

		Bioyield Strength (kPa)
V (m/s)		0.7045
Max. (V)		0.9911
Coeff. (dB)		0.9485
Gap (V)		0.7283
Spectrum Density	AA12 1000 Hz	0.9829
	AA12 2000 Hz	0.6371
	AA12 3000 Hz	0.4939
	DD12 2000 Hz	0.9942
	DD12 4000 Hz	0.9624
	DD12 6000 Hz	0.9613
	DD12 8000 Hz	0.9867
	DD11 6000 Hz	0.9995
	DD11 9000 Hz	0.9246
	DD11 12000Hz	0.9999
DD11 15000Hz	0.9999	

\* Note : V = Transmitted velocity (m/s),

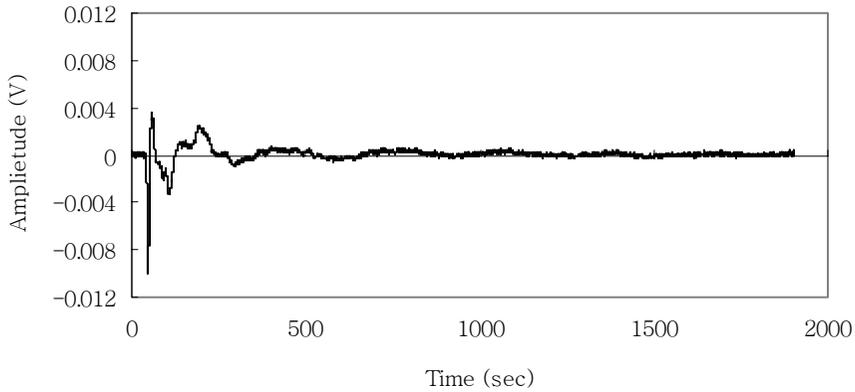
Max. = Max. amplitude (V),

Coeff. = Attenuation coefficient in max. amplitude (dB),

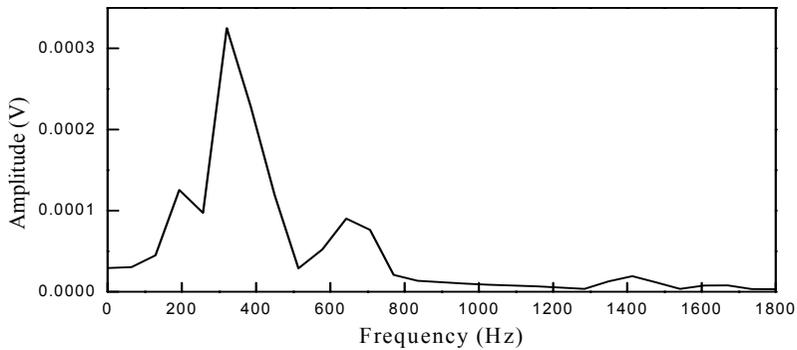
Gap = A gap of max. amplitude and min. amplitude (V)

#### 다. 저장기간에 따른 복숭아의 초음파 전파 특성

저장 기간에 따라 매 시료마다 그림(4-8)에서와 같은 초음파 투과를 계측할 수 있었다. 실험에 의해 얻어진 초음파 파라미터로 복숭아의 기계적 특성을 추정하는 데는 상관관계가 높은 파라미터를 선정하여야 할 것이다. 대체로 초음파 파라미터들은 저장기간에 따라 감소하거나 증가하는 일률적인 경향을 나타내고 있으나 주파수 영역(frequency domain)에서의 피크 주파수들은 저장기간에 따라 증가하거나 감소하는 일률적인 경향이 잘 나타나지 않음을 알 수 있었다.



(a) time domain



(b) frequency domain

Fig. 4-8. A typical transmitted ultrasonic signal from the peach sample.

1) 복숭아의 기계적 특성과 초음파 특성과의 상관관계

표(4-14)는 본 실험에서 계측된 저장기간에 따른 과실시료의 시간영역 및 일부 주파수 영역에서의 초음파 특성의 평균값을 나타내고 있다. 표(4-14)에 나타낸 초음파 파라미터들은 실험에 의해 얻어지는 15개의 초음파 파라미터들 중 파라미터 상호 서로 독립적이며, 배의 기계적 특성과 상관관계가 비교적 높았던 인자들이다.

Table 4-14. Ultrasonic parameters of the peach sample according to the storage days.

S D (days)	V (m/s)	Min. (V)	Coeff. (dB)	Gap (V)	Spectrum density						
					AA11	DD11			DD10		
					100 (Hz)	1500 (Hz)	2000 (Hz)	2500 (Hz)	3000 (Hz)	4000 (Hz)	5000 (Hz)
3	184.011	-0.009	-94.79	0.0125	5.4848	0.0066	0.0087	0.0022	0.0180	0.0169	0.0179
4	184.329	-0.005	-100.4	0.0069	3.7843	0.0126	0.0060	0.0018	0.0090	0.0083	0.0085
5	188.214	-0.004	-102.3	0.0056	3.0617	0.0049	0.0029	0.0010	0.0042	0.0027	0.0027
6	168.378	-0.003	-104.1	0.0046	2.2327	0.0044	0.0027	0.0009	0.0042	0.0032	0.0032
8	218.966	-0.003	-104.0	0.0052	1.8264	0.0019	0.0051	0.0014	0.0032	0.0029	0.0030
10	219.577	-0.003	-104.8	0.0044	2.0063	0.0033	0.0032	0.0010	0.0065	0.0020	0.0020
12	161.376	-0.002	-106.6	0.0035	4.3973	0.0029	0.0027	0.0011	0.0028	0.0012	0.0012

\* NOTE : SD = Storage day (day),

V = Transmitted velocity (m/s),

Max. = Max. amplitude (V),

Coeff. = Attenuation coefficient in max. amplitude (dB),

Gap = A gap of max. amplitude and min. amplitude (V)

## 2) 복숭아의 생물체 항복강도와 초음파 특성과의 상관관계

표(4-15)에는 복숭아의 생물체 항복강도와 초음파 파라미터들 간의 상관계수를 분석하여 이 값이 비교적 높았던 것들을 나타내었다. 표(4-15)에서 spectrum density의 AA11, DD11 및 DD10등은 각각 wavelet 변환에서 저주파수 성분과 고주파수 성분을 나타내는 것이다. 복숭아의 경우에는 표에서 보는 바와 같이 생물체 항복강도와 본 연구에서 고려한 초음파 파라미터들 간의 상관계수가 비교적 높게 나타났다.

Table 4-15. Correction coefficient among bioyield strength of the peach and spectrum densities at various frequencies.

		Bioyield Strength (kPa)
V (m/s)		0.7544
Min. (V)		0.9635
Coeff. (dB)		0.9507
Gap (V)		0.9611
Spectrum Density	AA11 100 Hz	0.9863
	DD11 1500 Hz	0.9970
	DD11 2000 Hz	0.9648
	DD11 2500 Hz	0.9978
	DD10 3000 Hz	0.9677
	DD10 4000 Hz	0.9634
	DD10 5000 Hz	0.9736

\* NOTE : V = Transmitted velocity (m/s),  
 Max. = Max. amplitude (V),  
 Coeff. = Attenuation coefficient in max. amplitude (dB),  
 Gap = A gap of max. amplitude and min. amplitude (V)

### 3. 과실의 물성 예측 모델 개발

#### 가. 다중회귀분석

##### 1) 사과와 생물체 항복강도 회귀식

사과의 생물체 항복강도를 추정하기 위한 초음파 파라미터들로는 표(4-16)에서 보는바와 같이 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 파라미터(최대진폭, 감쇠계수, 최대·최소진폭

의 차, spectrum density [AA11, DD11, DD10])를 변수로 하는 사과의 생물체 항복강도를 추정하였던 결과 얻어진 다중선형 회귀식을 표(4-16)에 나타내었다.

Table 4-16. 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 <sup>2</sup>
	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, 2000 Hz), A3 = Spectrum density(AA11, 3000 Hz),  
 A4 = Spectrum density(DD11, 6000 Hz), A5 = Spectrum density(DD11, 8000 Hz),  
 A6 = Spectrum density(DD10, 6000 Hz), A7 = Spectrum density(DD10, 9000 Hz),  
 A8 = Spectrum density(DD10, 12000 Hz), A9 = Spectrum density(DD10, 15000 Hz)

## 2) 배의 생물체 항복강도 회귀식

배의 생물체 항복강도를 추정하기 위한 초음파 파라미터들로는 표(4-17)에서 보는바와 같이 상관계수가 비교적 높았던(약 0.5이상) 최대진폭, 감쇠계수(최대진폭) 최대·최소진폭의 차, spectrum density등 13개의 파라미터를 들 수 있다. 13개의 파라미터 중 상관계수가 비교적 높았던 5개의 파라미터로 모형을 개발하여 보았다. 5개의 초음파 파라미터(최대진폭, 감쇠계수, 최대·최소진폭의 차, spectrum density [AA12, DD12, DD11])를 변수로 하는 배의 생물체 항복강도를 추정하여 얻어진 결과 다중선형 회귀식을 표(4-17)에 나타내었다.

Table 4-17. Multiple linear regression equation for bioyield strength of the pear as a function of ultrasonic parameters.

	BS = a×A1+ b×A2+ c×A3+ d×A4+ e×A5+ f						R <sup>2</sup>
	a	b	c	d	e	f	
Coefficient	-10055.267	-5.2225	2.9328	7658.9599	6048.5511	186.3582	0.9864

\* NOTE : BS = Bioyield Strength (kPa), A1 = Max. amplitude(V),  
 A2 = Spectrum density(AA12, 2000 Hz), A3 = Spectrum density(DD12, 4000 Hz),  
 A4 = Spectrum density(DD12, 6000 Hz), A5 = Spectrum density(DD11, 15000 Hz),

### 3) 복숭아의 생물체 항복강도 회귀식

복숭아의 생물체 항복강도를 추정하기 위한 초음파 파라미터들로는 표(4-18)에서 보는바와 같이 상관계수가 비교적 높았던(약 0.5이상) 최대진폭, 감쇠계수(최대진폭) 최대·최소진폭의 차, spectrum density등 13개의 파라미터를 들 수 있다. 13개의 파라미터 중 상관계수가 비교적 높았던 5개의 파라미터로 모형을 개발하여 보았다. 5개의 초음파 파라미터(최대진폭, 감쇠계수, 최대·최소진폭의 차, spectrum density [AA11, DD11, DD10])를 변수로 하는 사과의 생물체 항복강도를 추정할 수 있는 다중선형 회귀식을 표(4-18)에 나타내었다.

Table 4-18. Multiple linear regression equation for bioyield strength of the peach as a function of ultrasonic parameters.

	BS = a×A1+ b×A2+ c×A3+ d×A4+ e×A5+ f						R <sup>2</sup>
	a	b	c	d	e	f	
Coefficient	10081.5409	-0.5289	-85232.026	-10030.8751	28960.9236	241.562	0.9844

\* NOTE : BS = Bioyield Strength (kPa), A1 = Min. amplitude(V),  
 A2 = Spectrum density(AA11, 100 Hz), A3 = Spectrum density(DD11, 2500 Hz),  
 A4 = Spectrum density(DD10, 3000 Hz), A5 = Spectrum density(DD10, 4000 Hz)

나. 주성분분석 회귀 모형 개발

1) 사과

다중 공선성 문제를 고려하지 않을 경우 통계적 결과가 매우 불안정하게 된다. 이러한 분류 및 판별분석에서 유의한 특정변수들을 선정하기 위하여 여러 가지 특정값 선택방법들이 적용되고 있으며, 본 연구에서 분석하고자 하는 초음파 파라미터(TOF, 음향임피던스, 최대피크 값, 감쇠계수, spectrum density 등)의 수가 19개로서 그 수가 비교적 작기 때문에 각 초음파 파라미터들 간의 상관분석을 통하여 적절한 파라미터를 선택하고자 하였다.

즉, 상관계수의 절대값이 1에 가까울수록 두 변수 사이의 상호 의존성이 매우 높으며, 공선성이 존재함을 의미한다. 지금까지의 사과에 대한 초음파 파라미터들 간의 상관관계를 표(4-19)에서처럼 분석한 결과를 근거로 상관계수가 0.92이상의 매우 강한 상관관계를 나타내는 투과시간, 투과속도, 최소피크 값, spectrum density 등의 일부를 제외하고 선별하여 10개의 초음파 파라미터들을 특정변수로 선택하였다.

선택된 10개의 초음파 파라미터인 음향임피던스, 최대피크, 최대피크의 감쇠계수, 최소피크의 감쇠계수, 최대·최소피크의 차, spectrum density 중 AA11 1000-2000 Hz, DD11 8000 Hz, DD10 6000-12000 Hz 등을 가지고 주성분 분석을 실시하였다. 이에 사용한 프로그램은 Matlab 6.5 (Matwoks Ins., USA)이었다.

그 결과를 분석한 결과는 표(4-10)에 정리되어 있으며, 전체 10개의 주성분에서 첫 번째에서 네 번째에 이르는 주성분이 전체 데이터 변이의 99%이상을 차지하는 것으로 나타났다. 즉 제 1 주성분에서 제 4 주성분만으로도 과실의 생물체 항복강도를 예측 설명할 수 있는 모델을 만들 수 있음을 의미한다. 따라서 고유벡터와 초음파 파라미터를 이용하여 아래와 같이 제 1 ~ 4 주성분을 각각 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 PC1 = & 0.3822 \times AI + 0.1746 \times Max. + 0.4220 \times AC1 + 0.4240 \times AC2 + 0.2795 \times GAP \\
 & + 0.3017 \times A(1000) + 0.3058 \times A(2000) + 0.2183 \times D1(8000) + 0.3273 \times D0(6000) \\
 & + 0.2194 \times D0(12000) \dots \dots \dots (4-3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 PC2 = & -0.2009 \times AI - 0.2470 \times Max. - 0.3027 \times AC1 - 0.3154 \times AC2 - 0.1175 \times GAP \\
 & + 0.0757 \times A(1000) + 0.3804 \times A(2000) + 0.3270 \times D1(8000) + 0.2003 \times D0(6000) \\
 & + 0.6296 \times D0(12000) \dots \dots \dots (4-4)
 \end{aligned}$$



최종적으로 4개의 주성분을 가지고 생물체 항복강도를 추정할 수 있는 모형을 개발하여 보았다. 4개의 주성분을 변수로 하는 사과 생물체 항복강도를 주성분 분석하여 정규화하여 추정하였던 결과 다중선형 회귀식을 표(4-21)에 나타내었다.

Table 4-21. Multiple regression equation of bioyield strength of the apple as a function of principal component

	Y = a×PC1+ b×PC2+ c×PC3+ d×PC4					R <sup>2</sup>
	a	b	c	d	e	
Coefficient	-0.04866	-0.10429	0.04303	6.5632×10 <sup>-4</sup>	51.13991	0.6532

\* NOTE : Y = Principal component of bioyield strength (normalized)

PC1 = 1st principal component, PC2 = 2nd principal component,

PC3 = 3rd principal component, PC4 = 4th principal component

## 2) 배

본 연구에서 분석하고자 하는 초음파 파라미터(TOF, 음향임피던스, 최대피크 값, 감쇠계수, spectrum density 등)의 수가 19개로서 그 수가 비교적 작기 때문에 각 초음파 파라미터들 간의 상관분석을 통하여 적절한 파라미터를 선택하고자 하였다.

즉, 상관계수의 절대값이 1에 가까울수록 두 변수 사이의 상호 의존성이 매우 높으며, 공선성이 존재함을 의미한다. 배에 대한 초음파 파라미터들 간의 상관관계를 분석한 결과를 표(4-22)에 나타내었으며, 그 결과를 근거로 상관계수가 0.9 이상의 매우 강한 상관관계를 나타내는 투과속도, 최대피크 값, 최소피크 값, 최대피크의 감쇠계수, 최소피크의 감쇠계수, 최대·최소피크 값의 차, spectrum density 등의 일부를 제외하고 선별하여 7개의 초음파 파라미터들을 특정변수로 선택하였다.

선택된 7개의 초음파 파라미터(투과시간, 음향임피던스, spectrum density 중 AA12 3000 Hz, DD12 2000·6000·8000 Hz, DD11 6000 Hz 등)를 가지고 주성분 분석을 실시하였다. 이에 사용한 프로그램은 Matlab 6.5 이었다.

표(4-23)에서 보여지는바와 같이 배에서의 결과 값도 사과의 경우와 마찬가지로

로 전체 7개의 주성분에서 첫 번째에서 네 번째에 이르는 주성분이 전체 데이터 변이의 99% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 고유벡터와 초음파 파라미터를 이용하여 아래와 같이 제 1 ~ 4 주성분을 각각 나타낼 수 있었다.

$$PC1 = 0.50386 \times TOF + 0.50815 \times AI + 0.35259 \times A(3000) + 0.29238 \times D1(2000) \\ + 0.25939 \times D1(6000) + 0.25106 \times D1(8000) + 0.38444 \times D0(6000) \quad \dots \dots (4-7)$$

$$PC2 = 0.49695 \times TOF + 0.39588 \times AI - 0.33178 \times A(3000) - 0.35712 \times D1(2000) \\ - 0.17379 \times D1(6000) - 0.56155 \times D1(8000) - 0.11471 \times D0(6000) \quad \dots \dots (4-8)$$

$$PC3 = 0.13854 \times TOF - 0.00515 \times AI - 0.48442 \times A(3000) + 0.29338 \times D1(2000) \\ + 0.65453 \times D1(6000) + 0.11166 \times D1(8000) - 0.46815 \times D0(6000) \quad \dots \dots (4-9)$$

$$PC4 = -0.20528 \times TOF - 0.17011 \times AI - 0.05824 \times A(3000) + 0.28051 \times D1(2000) \\ + 0.36146 \times D1(6000) - 0.66450 \times D1(8000) + 0.52405 \times D0(6000) \quad \dots \dots (4-10)$$

\* NOTE : TOF = time of fly (s), AI = Acoustic impedance (kg/m<sup>2</sup>s),

A(3000) = Spectrum density(AA12, 3000 Hz),

D1(2000) = Spectrum density(DD12, 2000 Hz),

D1(6000) = Spectrum density(DD12, 6000 Hz),

D1(8000) = Spectrum density(DD12, 8000 Hz),

D0(6000) = Spectrum density(DD11, 6000 Hz)

4개의 주성분을 가지고 생물체 항복강도를 추정할 수 있는 모형을 개발하여 보았다. 4개의 주성분을 변수로 하는 배의 생물체 항복강도를 주성분 분석하여 정규화하여 추정하였던 결과 다중선형 회귀식을 표(4-24)에 나타내었다.

Table 4-24. Multiple regression equation of bioyield strength of the pear as a function of principal component.

	Y = a×PC1+ b×PC2+ c×PC3+ d×PC4					R <sup>2</sup>
	a	b	c	d	e	
Sample	-84.8328	206.0954	124.2569	222.4455	15.8567	0.8343

\* NOTE : Y = Principal component of bioyield strength (normalized)

PC1 = 1st principal component, PC2 = 2nd principal component,

PC3 = 3rd principal component, PC4 = 4th principal component

### 3) 복숭아

다중 공선성 문제를 고려하지 않을 경우 통계적 결과가 매우 불안정하게 되기 때문에 분류 및 판별분석에 있어서 유의한 특정변수들을 선정하기 위한 여러 선택방법들이 적용되고 있으며, 본 연구에서 분석하고자 하는 복숭아의 초음파 파라미터의 수가 15개로서 비교적 작기 때문에 각 초음파 파라미터들 간의 상관분석을 통하여 적절한 파라미터를 선택하고자 하였다.

복숭아에 대한 초음파 파라미터들 간의 상관관계 분석결과를 표(4-25)에서 보여주고 있으며, 그 결과를 근거로 상관계수가 0.9이상의 매우 강한 상관관계를 나타내는 투과시간, 투과속도, 최대피크 값, 최소피크 값, 최대·최소피크 값의 차, spectrum density 등의 일부를 제외하고 선별하여 7개의 초음파 파라미터들을 특정변수로 선택하였다.

선택된 7개의 초음파 파라미터(음향임피던스, 최대피크의 감쇠계수, 최소피크의 감쇠계수, spectrum density 중 AA11 100 Hz, DD11 1500·2500 Hz, DD10 3000 Hz 등)를 가지고 주성분 분석을 실시하였다.

그 결과는 표(4-26)에서 보여지는바와 같으며, 복숭아의 경우도 다른 두 종류의 과실과 마찬가지로 전체 7개의 주성분에서 첫 번째에서 네 번째에 이르는 주성분이 전체 데이터 변이의 99%이상을 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 고

유벡터와 초음파 파라미터를 이용하여 제 1 ~ 4 주성분을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$PC1= 0.37433 \times AI + 0.54094 \times AC1 + 0.54127 \times AC2 + 0.23542 \times A(100) + 0.21854 \times D1(1500) + 0.33453 \times D1(2500) + 0.24330 \times D0(3000) \dots (4-11)$$

$$PC2= -0.62321 \times AI - 0.06819 \times AC1 - 0.08979 \times AC2 - 0.13274 \times A(100) + 0.36844 \times D1(1500) + 0.44163 \times D1(2500) + 0.50049 \times D0(3000) \dots (4-12)$$

$$PC3= -0.10100 \times AI - 0.10789 \times AC1 - 0.07474 \times AC2 + 0.68698 \times A(100) - 0.50227 \times D1(1500) - 0.10174 \times D1(2500) + 0.48786 \times D0(3000) \dots (4-13)$$

$$PC4= 0.28417 \times AI - 0.31600 \times AC1 - 0.32165 \times AC2 + 0.50882 \times A(100) + 0.66974 \times D1(1500) - 0.01622 \times D1(2500) - 0.09068 \times D0(3000) \dots (4-14)$$

\* NOTE : AI = Acoustic impedance (kg/m<sup>2</sup>s),

AC1 = Attenuation coefficient in max. amplitude (dB),

AC2 = Attenuation coefficient in min. amplitude (dB),

A(100) = Spectrum density(AA11, 100 Hz),

D1(1500)= Spectrum density(DD11, 1500 Hz),

D1(2500) =Spectrum density(DD11, 2500 Hz),

D0(3000) = Spectrum density(DD10, 3000 Hz)

상기 4개의 주성분을 가지고 생물체 항복강도를 추정할 수 있는 모형을 개발하여 보았다. 4개의 주성분을 변수로 하는 사과와 생물체 항복강도를 주성분 분석하여 정규화하여 추정한 결과 표(4-27)에서 보는 바와 같다.

Table 4-27. Multiple linear regression equation of bioyield strength of the peach as a function of principal component.

	Y = a×PC1+b×PC2+ c×PC3+ d×PC4+ e					R <sup>2</sup>
	a	b	c	d	e	
Sample	0.07142	-1.1678	-0.7017	0.6142	-0.0037	0.9999

\* NOTE : Y = Principal component of bioyield strength (normalized)  
 PC1 = 1st principal component, PC2 = 2nd principal component,  
 PC3 = 3rd principal component, PC4 = 4th principal component

#### 다. 인공신경망

초음파 파라미터를 분석하기 위한 인공신경망의 구성은 학습 회수 및 속도, 수렴속도, 출력결과 등을 고려하여 은닉층이 하나인 구조로 하였으며, 또한 입력층의 입력패턴으로서 주성분 분석에서 선택되었던 10개의 초음파 파라미터를 이용하였고, 은닉층의 노드수는 표(4-28)에서 보여지는 바와 같이 2~16개까지 2단계의 간격으로 노드의 수를 증가시키면서 진행하였으며, 각각의 경우에 대해 다수의 실험을 반복하면서 최적의 값을 찾기 위한 분석을 하였다. 학습 수행시 오차의 목표값은 1E-6, 학습율은 0.1, 모멘텀은 0.95로 하였으며 학습회수는 오차의 목표값 이하가 될 때까지로 하였다. 본 연구에서 구성된 인공 신경망은 그림(4-9)에서 보는 바와 같은 구조이며 입력층에서 은닉층까지의 전달함수는 tangent sigmoid 함수를, 은닉층에서 출력층까지의 전달함수는 pure linear 함수를 사용하였다. 학습수행 결과 노드수가 16개일 때 신경회로망에 의해 예측된 생물체 항복강도와 측정값 사이의 상관계수가 가장 높게 나타났다..

Table 4-28. Correlation analysis between measured bio yield strength of apple and predicted one by ANN at several numbers of node in the hidden layer.

No. of node	2	4	6	8	10	12	14	16
Coefficient of correlation	0.4129	0.2919	0.5323	0.7070	0.6625	0.7277	0.7398	0.8734

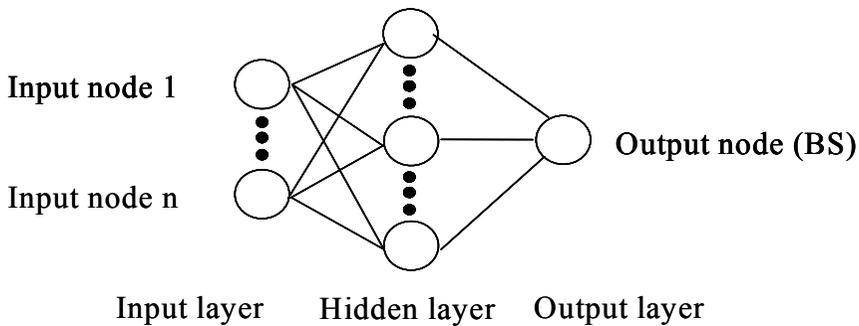


Fig. 4-9. Artificial neural network.

배의 항복강도를 예측하기 위한 인공신경망을 개발하기 위하여 사과와 동일한 조건의 신경망 구조를 적용하여 은닉층의 노드수를 증가시키면서 신경망을 학습시킨 후 항복강도의 측정값과 예측값 사이의 상관분석을 실시한 결과 표(4-29)에서 보는바와 같다.

총 7개의 초음파 파라미터를 이용하였으며 은닉층의 개수를 1~15개까지 2개씩 증가시키면서 학습한 결과를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 대체적으로 노드수가 9이상일 경우 상관계수가 0.85 이상을 나타내었다.

Table 4-29. Correlation analysis between measured bio yield strength of pear and predicted one by ANN at several numbers of node in the hidden layer.

No. of node	1	3	5	7	9	11	13	15
Coefficient of correlation	0.7440	0.7657	0.3926	0.8464	0.9834	0.8934	0.9841	0.9981

Table 4-30. Correlation analysis between measured bio yield strength of peach and predicted one by ANN at several numbers of node in the hidden layer.

No. of node	1	3	5	7	9	11	13	15
Coefficient of correlation	0.9127	0.9392	0.9559	0.9319	0.9512	0.9807	0.9747	0.9996

복숭아의 경우도 다른 두 과실과 마찬가지로 총 10개의 초음파 파라미터를 이용하여 조건이 동일한 인공신경망을 구현하였다. 마찬가지로 최적노드수를 찾기 위하여 노드수를 1~15개까지 증가시키면서 인공신경망을 학습시킨 후 실제 초음파 파라미터의 신경망에 입력하여 항복강도를 예측하였다. 표(4-30)은 그 결과로서 신경망의 노드수 증가에 따른 실측값과 예측값 사이의 상관계수는 대체적으로 전체 노드수에서 상관관계가 0.9이상을 나타내었다.

개발된 각각의 생물체 항복강도 예측모형을 비교한 결과는 표(4-31)~(4-33)과 그림(4-9)~(4-14)에서 보는 바와 같다. 사과와 배의 경우 생물체 항복값에 대한 예측값과 실측값 사이의 결정계수는 다중회귀 모형이 0.9986으로 가장 양호한 결과를 나타내었다. 배의 경우는 주성분 분석모형에서 비교적 정확한 예측이 가능한 것으로 나타났다. 한편 복숭아의 경우는 대체적으로 모든 모형에서 결정계수가 0.98이상인 것으로 분석되었다. 따라서 이들 결과를 종합해 볼 때 추후 개발된 과실 물성측정 시스템의 경도평가 모형은 다중회귀 모형과 신경망 알고리즘을 이용하는 것이 좋은 것으로 생각된다. 본 연구에서는 보다 구현이 쉽고 알고리즘이 간단한 다중회귀 모형을 적용하여 과실 경도측정 시스템을 구현하고자 하였다. 한편 표(4-34)~(4-36)은 각 모형에 대한 분산분석 결과를 나타낸다.

Table 4-31. Comparison results of bioyield strength of apple among measured, multiple linear regression, principal component analysis and artificial neural network.

A time	Measured	MLR	PCA	ANN
1	181.505	182.771	180.720	177.738
2	172.018	172.507	178.394	166.442
3	182.422	183.054	180.014	182.293
4	170.712	170.792	176.308	183.375
5	189.843	190.614	185.275	195.043
6	165.509	166.323	186.178	170.067
7	194.917	195.886	193.848	182.507
8	199.058	199.886	188.104	202.073
9	220.356	220.898	220.360	210.455
10	190.365	192.763	177.539	196.746
$r^2$	-	0.9986	0.6532	0.7629

\* Note : Measured = Bioyield strength (kPa)

MLR = Multiple linear regression,

PCA = Principal component analysis,

ANN = Artificial neural network,

$r^2$  = Coefficient of determination

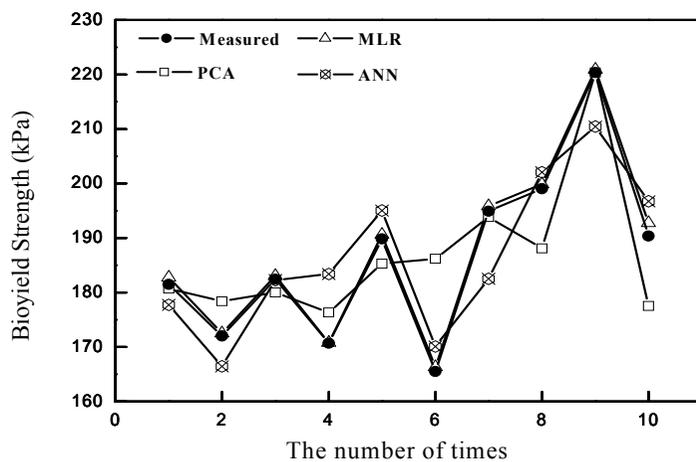
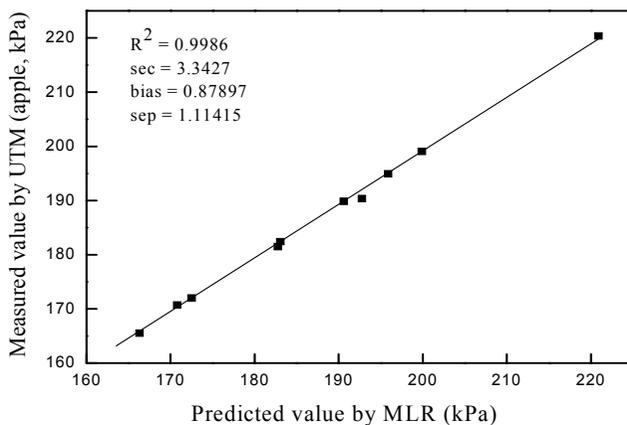


Fig. 4-9. Comparison result of bioyield strength of apple among measured, multiple linear regression, principal component analysis and artificial neural network.



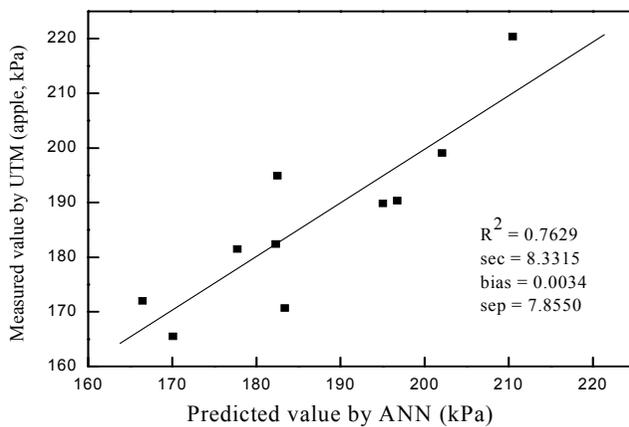
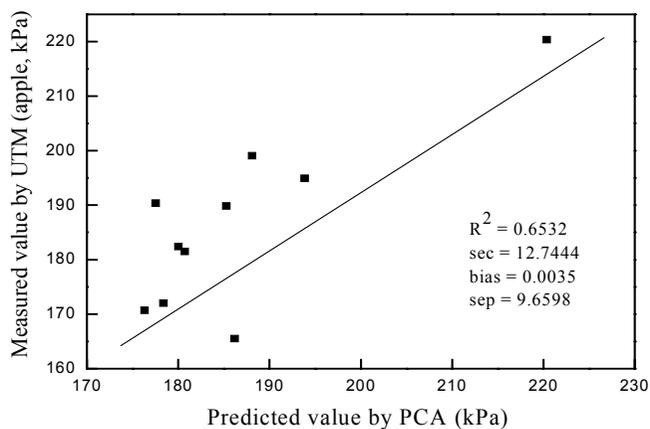


Fig. 4-10. Calibration and prediction to bioyield strength of apple by multiple linear regression, principle component analysis and artificial neural network.

Table 4-32. Comparison results of bioyield strength of pear among measured, multiple linear regression, principal component analysis and artificial neural network.

A time	Measured	MLR	PCA	ANN
1	144.350	163.247	148.681	167.246
2	138.855	158.641	128.685	157.809
3	126.766	140.456	135.746	137.908
4	171.824	173.527	169.226	175.528
5	157.555	170.357	153.915	168.939
6	137.293	157.736	139.600	159.545
7	155.832	188.540	156.614	185.511
$r^2$	-	0.6485	0.8343	0.6875

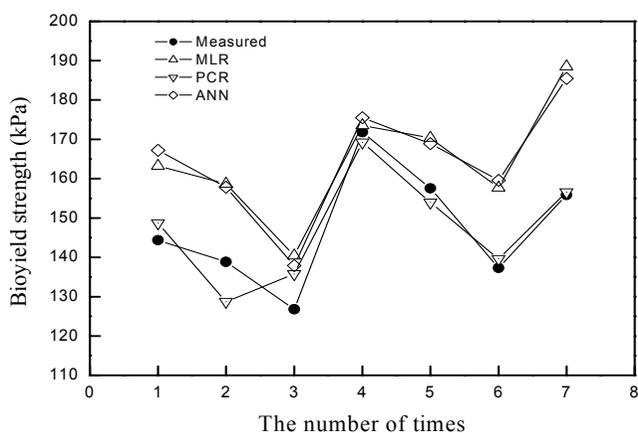
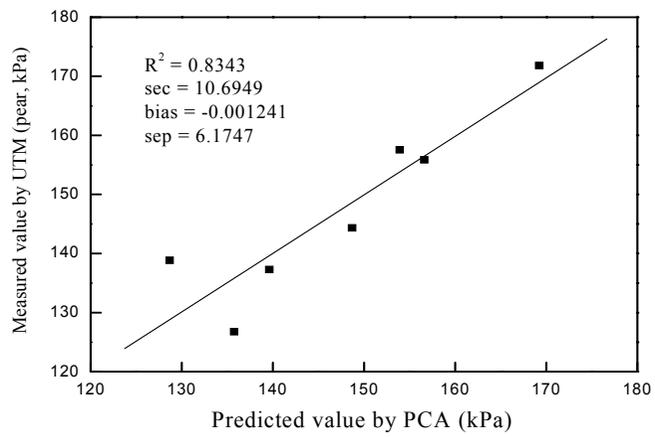
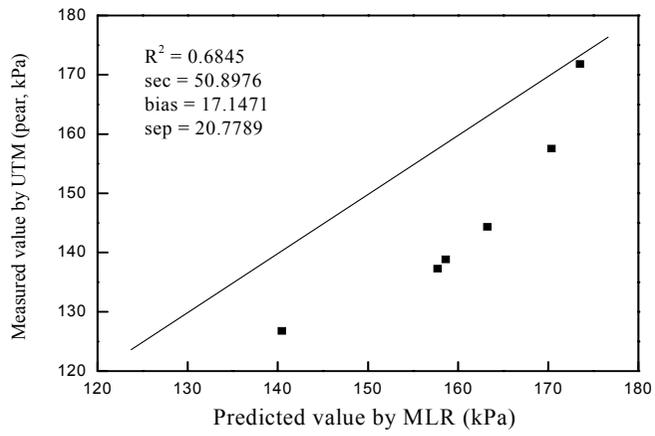


Fig. 4-11. Comparison result of bioyield strength of pear among measured, multiple linear regression, principal component analysis and artificial neural network.



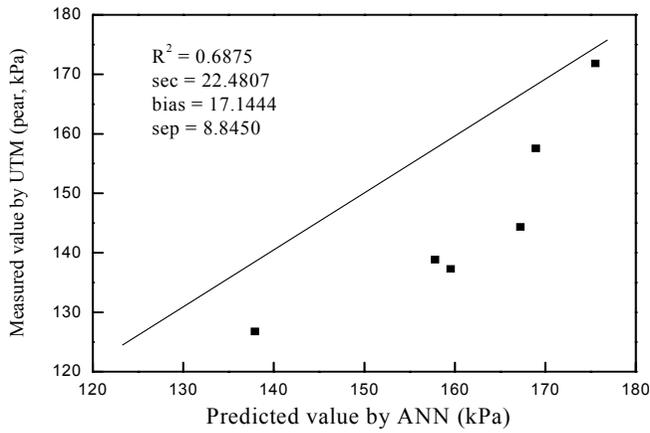


Fig. 4-12. Calibration and prediction to bioyield strength of pear by multiple linear regression, principle component analysis and artificial neural network.

Table 4-33. Comparison results of bioyield strength of peach measured, multiple linear regression, principal component analysis and artificial neural network.

A time	Measured	MLR	PCA	ANN
1	276.824	272.453	276.824	277.056
2	178.991	188.938	178.990	180.517
3	144.390	152.548	144.391	145.161
4	182.630	181.584	182.630	179.427
5	149.681	142.623	149.682	150.458
6	114.906	114.346	114.905	114.101
7	137.668	132.597	137.667	138.352
$r^2$	-	0.9844	0.9999	0.9991

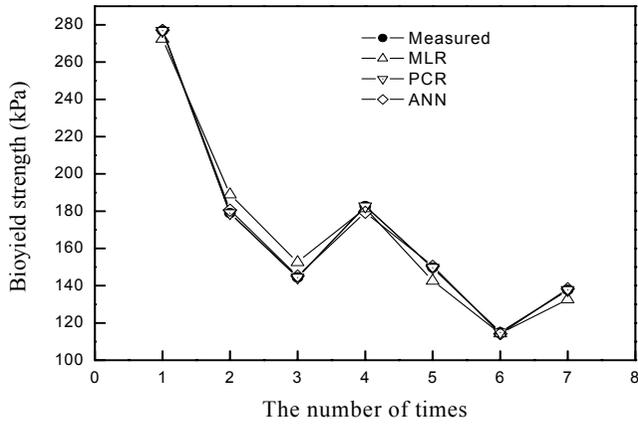
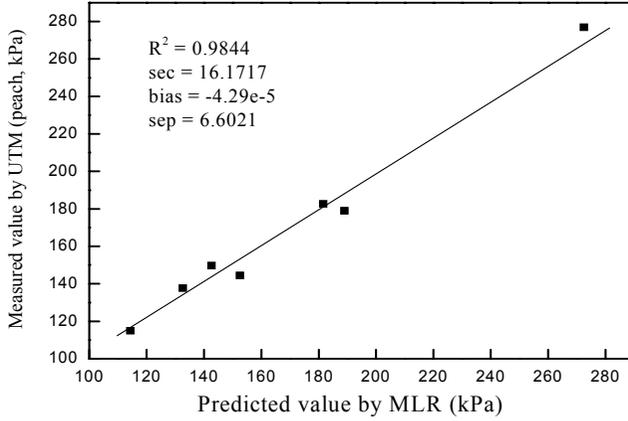


Fig. 4-13. Comparison result of bioyield strength of peach among measured, multiple linear regression, principal component analysis and artificial neural network.



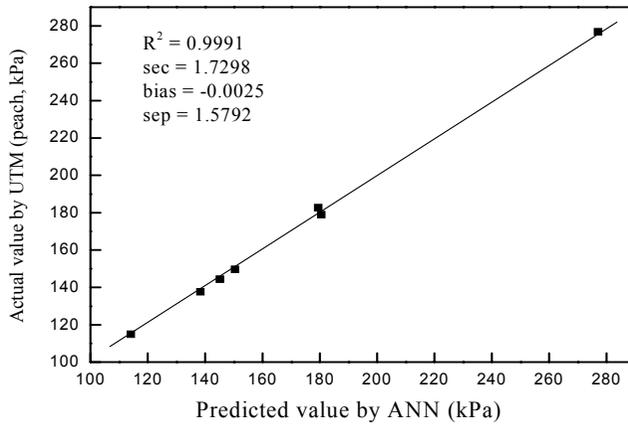
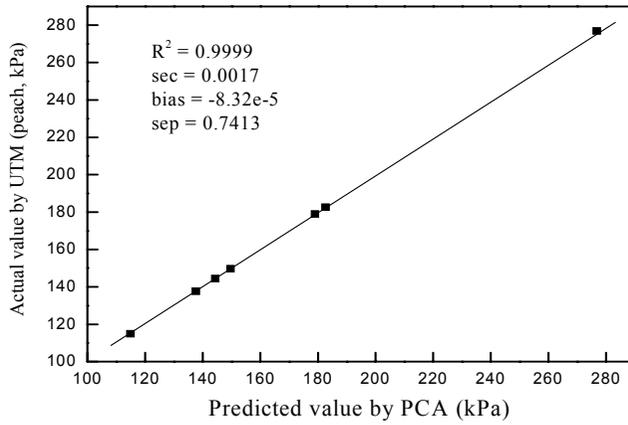


Fig. 4-14. Calibration and prediction to bioyield strength of peach by multiple linear regression, principle component analysis and artificial neural network.

Table 4-34. Analysis of variance for the regression model of multiple linear regression, principal component regression and artificial neural network (apple).

Multiple linear regression	Source	DF	Sum of Squares	Mean square	F Ratio	Prob(F)
	Regression	1	2338.4582	2338.4582	5610.5115**	0
	Error	8	3.3344	0.4168		
	Total	9	2341.7926			
Principal component regression	Source	DF	Sum of Squares	Mean square	F Ratio	Prob(F)
	Regression	1	1529.6961	1529.6961	15.06911*	0.00466
	Error	8	812.0965	101.51206		
	Total	9	2341.7926			
Artificial neural network	Source	DF	Sum of Squares	Mean square	F Ratio	Prob(F)
	Regression	1	1786.4818	1786.4818	25.73667*	0.00096
	Error	8	555.3108	69.4139		
	Total	9	2341.7926			

Table 4-35. Analysis of variance for the regression model of multiple linear regression, principal component regression and artificial neural network (pear).

Multiple linear regression	Source	DF	Sum of Squares	Mean square	F Ratio	Prob(F)
	Regression	1	895.5965	895.5965	9.226757*	0.02883
	Error	5	485.3257	97.06515		
	Total	6	1380.9223			
Principal component regression	Source	DF	Sum of Squares	Mean square	F Ratio	Prob(F)
	Regression	1	1152.1598	1152.1598	25.18244**	0.00404
	Error	5	228.7625	45.7525		
	Total	6	1380.9223			
Artificial neural network	Source	DF	Sum of Squares	Mean square	F Ratio	Prob(F)
	Regression	1	949.4122	949.4122	11.00104*	0.02108
	Error	5	431.5101	86.3020		
	Total	6	1380.9223			

Table 4-36. Analysis of variance for the regression model of multiple linear regression, principal component regression and artificial neural network (peach).

Multiple linear regression	Source	DF	Sum of Squares	Mean square	F Ratio	Prob(F)
	Regression	1	16536.2256	16536.2256	316.1501**	$1 \times 10^{-5}$
	Error	5	261.5249	52.3050		
	Total	6	16797.7505			
Principal component regression	Source	DF	Sum of Squares	Mean square	F Ratio	Prob(F)
	Regression	1	16797.7505	16797.7505	$1.468 \times 10^{10}$ *	0
	Error	5	$5.719 \times 10^{-6}$	$1.144 \times 10^{-6}$		
	Total	6	16797.7505			
Artificial neural network	Source	DF	Sum of Squares	Mean square	F Ratio	Prob(F)
	Regression	1	16782.7901	16782.7901	5609.0564**	0
	Error	5	14.9604	2.9921		
	Total	6	16797.7505			

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 초음파 파라미터를 이용하여 비파괴적으로 과실의 기계적 특성을 예측하기 위한 모델을 개발하기 위하여 수행되었다. 과실을 상온 및 저온 저장하면서 저장기간에 따라 UTM에 의한 사과와 과피점, 탄성계수 및 생물체 항복강도 등을 측정·분석하였다. 동일한 시료에 대하여 초음파 투과실험을 수행하여 초음파 파라미터와 과실의 기계적 특성들과의 상관관계를 분석하고 초음파 파라미터를 이용하여 생물체 항복강도를 예측할 수 있는 다중회귀 모형, 주성분 회귀 모형, 인공 신경망을 개발하였다.

주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 사과의 과피점 및 탄성계수는 상온 저장기간에 따라 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.
- 사과의 기계적 특성과 초음파 파라미터들간의 상관분석을 수행한 결과 투과시간, 투과속도, 음향임피던스, 최대·최소진폭, 제1 및 제2 감쇠계수 등 총 7개의 초음파 파라미터들이 기계적 특성과 비교적 높은 상관계수를 나타내었

다.

-과실의 기계적 특성과 상관관계가 높았던 투과속도, 최대진폭 및 최대진폭에서의 감쇠계수를 이용 사과, 배의 파괴점 및 탄성계수를 예측할 수 있는 다중회귀 모델을 개발하였고 평가한 결과 사과, 배의 경우 결정계수가 0.9986, 배의 경우 0.6485, 복숭아의 경우 0.9844의 상관관계를 나타내었다.

-과실에 대한 초음파 파라미터를 이용하여 주성분 분석을 실시한 결과 대체적으로 전체 4개의 주성분만으로도 생물체 항복강도의 설명이 가능한 것으로 분석되었으며, 이들 주성분들을 이용하여 생물체 항복강도를 예측할 수 있는 회귀모델을 개발하고 평가한 결과 사과, 배의 경우 결정계수가 0.6532, 배의 경우 0.8343, 복숭아의 경우 0.9999로 나타났다.

-인공신경망을 이용하여 과실의 경도를 예측할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 인공신경망은 입력층, 은닉층, 출력층이 한 개씩인 간단한 구조로 구현하였다. 은닉층의 개수를 최적화하여 구현한 신경망을 이용하여 실측값과 예측값 사이의 상관관계를 분석한 결과 사과, 배, 복숭아 각각 0.7629, 0.6875, 0.9991등의 상관관계를 나타내었다.

-실제 개발된 초음파를 이용한 과실 물성측정 장치의 과실 경도판정 알고리즘은 비교적 간단하게 구현할 수 있는 다중회귀 모형을 적용하였다.

## 제 5 절 초음파를 이용한 과실 물성측정 시스템 개발

### 1. 초음파 탐상 시스템 구성

#### 가. 장치의 개요

초음파를 이용하여 과실의 물성을 측정하기 위한 시스템의 외형도는 그림 5-1과 같으며 내부 구성도는 그림 5-2와 같다. 초음파 발생장치로는 CNS FARNELL사의 PUNDIT를 시스템의 내부에 장착하여 사용하였고 과실용 초음파 트랜스듀서는 본 연구에서 개발한 100 kHz PZT 센서를 사용하였으며 과실과 송수신용 초음파 트랜스듀서간의 자동계측을 위한 moving block의 이동운동은 AC 서보모터를 구동원으로 이용하였다. AC서보모터는 시스템의 내부에 장착한 컨트롤러에 의해 위치가 자동 제어된다. 또한 moving block에 설치한 송신용 초음파 트랜스듀서(TX)의 접합부가 과실에 접촉되면 수신용 초음파 트랜스듀서(RX)의 하단에 설치된 로드셀신호를 이용하여 트랜스듀서와 과실간의 접촉 힘을 계측하고 사전에 설정한 접촉 힘의 임계값이 포착되는 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 터미널 블록과 NI5052(NI inc., USA)통해 수신된 후 컴퓨터 시스템을 통해 데이터 획득 및 신호처리 작업을 수행할 수 있도록 구성하였다. 표 5-1은 NI5052의 제원을 나타낸다.

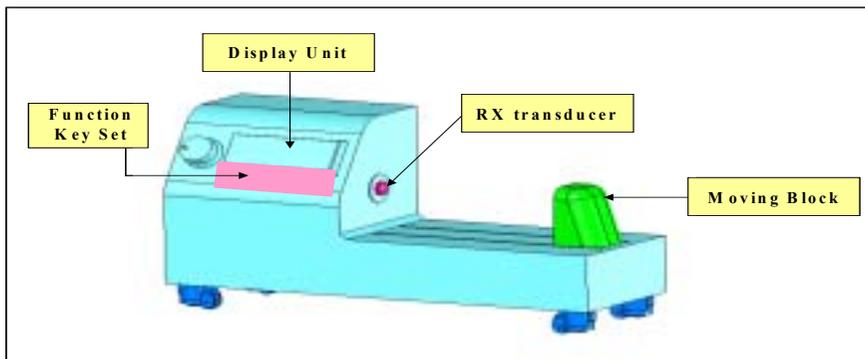


Fig. 5-1. Sketch of measurement system for mechanical property of fruit.

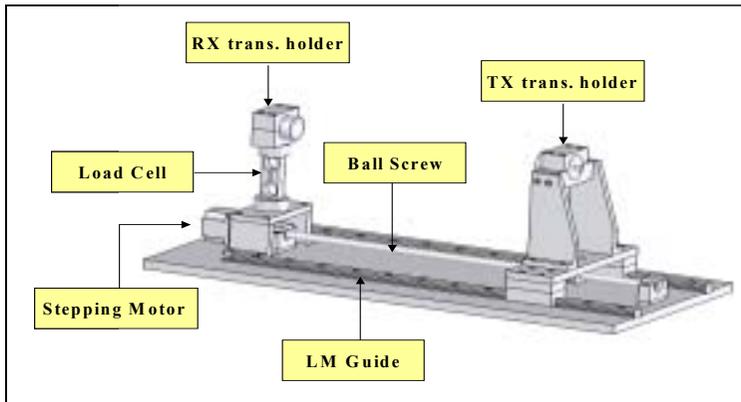


Fig. 5-2. Composition of measurement system for mechanical property of fruit.

Table 5-1. Specification of NI5052 digitizer

<b>ACQUISITION SYSTEM</b>	
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
<b>TIMEBASE SYSTEM</b>	
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

나. 초음파 발생장치

이 시스템에 사용된 초음파 발생장치는 그림 5-3과 같은 영국 CNS FARNELL사의 PUNDIT를 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 5-2와 같다.

Table 5-2. Specification of the ultrasonic pulser

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



Fig. 5-3. Ultrasonic pulser(PUNDIT).

#### 다. 초음파 트랜스듀서

초음파 물성측정장치에 사용되는 초음파 트랜스듀서는 본 연구에서 개발한 초음파 트랜스듀서를 이용하였다. 트랜스듀서에 사용된 압전 재료는 세라믹 계열의 압전 재료(PZT계열)를 선정하였으며 100 kHz의 공진 주파수를 가지도록 지름 40 mm, 두께 20 mm로 선정하였고, 측정대상인 과실에 최적의 조건을 갖기 위해서로 다른 압전 특성을 가지는 재료를 선정 및 실험하여 최적의 센서를 개발한 것이다.

#### 라. Moving Block

Moving Block은 AC servo motor와 직결되어 구동되는 볼스크류에 의해 위치가 제어될 수 있도록 설계되어 측정하고자 하는 과실의 크기에 상관없이 트랜스듀서의 적용이 가능하고 moving block의 상단에는 TX 트랜스듀서가 장착되도록 설계되어있다. 시스템에 적용한 AC서보모터와 모터드라이브, 그리고 LM가이드의 제원은 아래의 표 5-3과 같다.

Table 5-3. Specification of driving part of moving block

<b>Servo Motor</b>	
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
<b>Servodriver</b>	
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

#### 마. Transducer Holding Unit

초기 시작품의 Transducer Holding Unit은 사면에 배치된 나사를 조여서 고정하는 방식으로 원형인 센서를 확실히 잡아주지 못하는 단점을 가지고 있으며 송수신 센서와 과실 사이의 정렬이 나쁜 경우, 계측되는 투과과 성분의 크기가 확연히 달라질 수 있기 때문에 이에 대한 보완으로 그림 5-4에서와 같이 트랜스듀서의 외곽 직경과 동일한 원형의 홀더로 변경함으로써 원형의 센서를 정확히 클램핑할 수 있도록 설계, 제작하였다.



(a) TX transducer holding unit



(b) RX transducer holding unit

Fig. 5-4. Transducer holding unit.

바. 과실 리프트 테이블

송신용 초음파 트랜스듀서와 수신용 초음파 트랜스듀서 사이에 과실을 고정하여 실험을 수행할 때, 과실이 양방향에서 서로 밀어주는 트랜스듀서 간의 접촉 힘에 의해서만 지지될 경우 과실에 무리한 힘이 가해질 수 있으며 이로 인해 과실의 손상을 초래할 수 있으므로 안정적으로 과실을 지지할 수 있도록 높낮이 조절이 가능한 과실 리프트테이블을 설계, 제작하였으며 리프트테이블의 최대 운동거리는 160 mm이고 실물은 그림 5-5와 같다.



Fig. 5-5. Lift table for fruit.

사. 트랜스듀서와 피검사체와의 접촉 힘 제어 unit

과실의 초음파 투과 실험 시 투과되는 초음파는 트랜스듀서와 과실간의 접촉 정도, 즉 압력 또는 힘에 따라 초음파 투과정도가 달라질 수 있으며 이는 투과 신호의 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 아래 그림 5-6과 같이 RX(signal received) transducer holding unit의 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 전압 값은 PUNDIT 초음파 발생신호의 트리거 신호로서 사용되도록 설계하였다.



Fig. 5-6. Load cell mounted on the RX transducer.

#### 아. 외부 유입 진동잡음 저감 대책

과실의 경도를 초음파로 비파괴적으로 평가하기 위해서는 센서로부터 입사되어 과실을 투과해서 나오는 초음파 신호의 크기가 클수록 유리하다. 큰 투과 성분을 얻기 위해 접촉식 센서를 이용해야 하는 제한점으로 인해 초음파 센서와 과실 사이의 임피던스 매칭을 향상시키고, 공중파 성분의 개입을 억제하기 위한 연구가 비중 있게 다루어졌으나 이와 같은 대책에도 불구하고 투과된 신호의 시간-주파수 분석을 통해 알 수 없는 주파수 성분의 개입을 확인할 수 있었다. 결과적으로 이는 물성 측정용 센서가 설치되어지는 측정 시스템의 진동성분으로 송수신 센서 모두에 일부 영향을 준다는 사실을 알 수 있었으며 시작품의 구조적 진동요소가 과실에 대한 초음파 성분에 혼입되는 것을 차단하기 위해 그림 5-7에 보이는 것과 같은 흡·방진용 패드를 송수신 초음파 센서에 채용하였다.

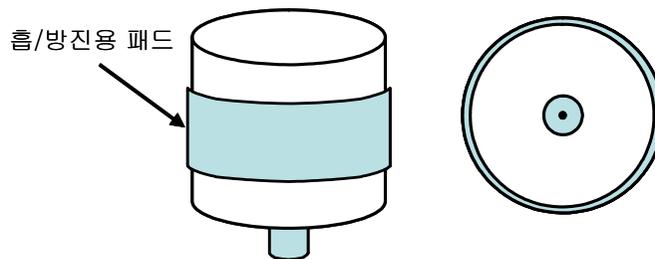


Fig. 5-7. Protect against vibration of transducer.

#### 자. Electrical control unit(ECU)

ECU의 기능은 크게 나누어 ① 로드셀 signal I/O 및 amplifying ② 초음파 발생장치(PUNDIT) ON/OFF ③ 서보모터 및 모터드라이버 구동으로 분류되며 전체 시스템은 자동운전모드 및 수동운전모드로 작동이 가능하고 모든 기능은 시스템 내부에 설치한 ECU를 통해 제어된다. 자동운전과 수동운전모드의 작동과정은 각각 아래의 설명과 같으며 시스템내의 신호흐름 계통도는 그림 5-8과 ECU 컨트롤러의 회로도는 그림 5-9 그리고 ECU의 실물사진은 그림 5-10과 같다.

- 자동운전 모드 : 자동운전 모드 선택 시 ECU내에 장착된 서보모터 컨트롤러는 moving block을 구동시키며 이때 moving block의 이송 거리정보는 서보모터의 엔코더를 이용하여 다시 서보모터 컨트롤러와 메인 컴퓨터로 전송되며 TX transducer의 접합부가 측정과실에 닿게 되면 RX transducer의 하단에 설

치한 로드셀에 외부의 힘이 감지되고 로드셀 signal은 ECU내의 signal amplifier에서 신호 증폭된 후 PUNDIT를 ON시켜서 3초간 초음파를 발생시킨 후 다시 OFF상태로 돌아가게 된다. 이때 RX transducer를 통해 입력된 신호는 메인컴퓨터의 post-processing module로 입력되도록 되어있다.

- 수동운전 모드 : 수동운전 모드 선택 시 moving block의 전진 및 후진운동은 시스템의 전면에 부착된 버튼을 이용할 수 있도록 되어있고 moving block의 후진운동으로 인해 TX transducer가 측정과실에 당게 되면 이후의 post-processing까지는 자동운전 모드와 동일한 과정으로 수행된다.

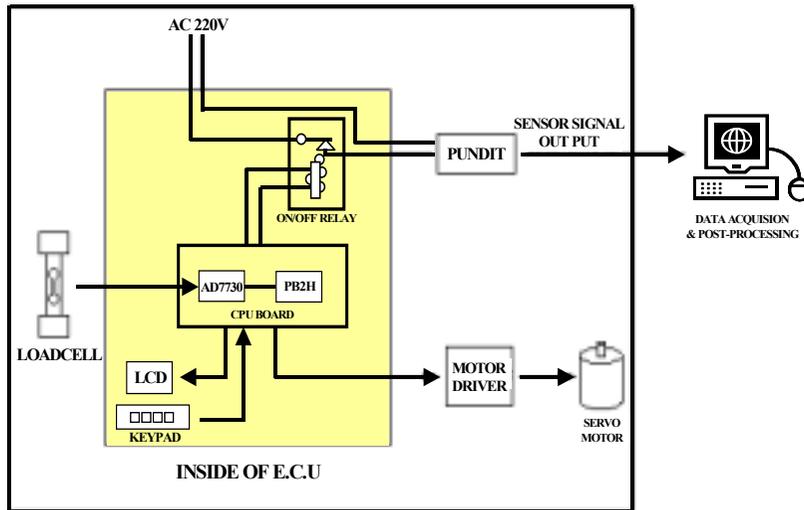


Fig. 5-8. Signal flow diagram of measurement system for mechanical property of fruit.

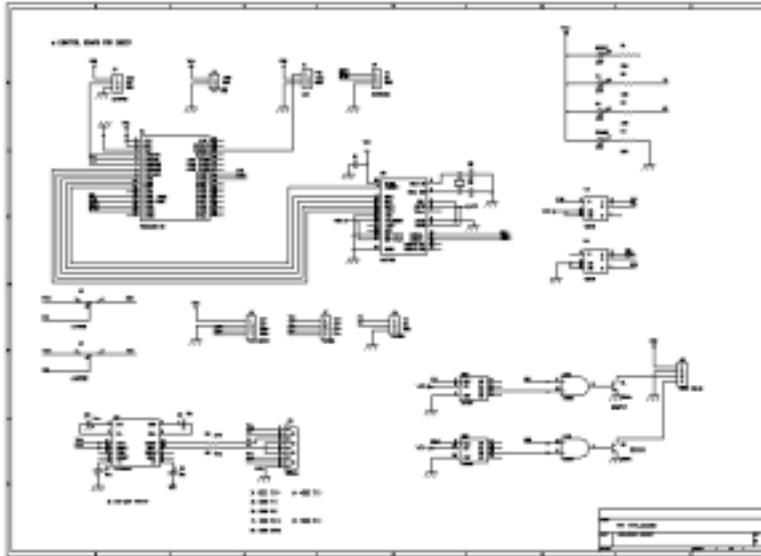


Fig. 5-9. Circuit diagram of ECU CPU board.



Fig. 6-10. Photo of electrical control unit(ECU).

2. 시스템 운용 소프트웨어 개발

### 가. 시스템 제어용 소프트웨어 개발

초음파 물성 측정 장치를 현장에 적용하기 위해서는 시스템 내부의 모든 주변 장치는 최대한 간단하게 구동 및 제어되어야 한다. 본 장치에서는 Electric Control Unit를 장치에서 탈,부착이 가능하도록 설계, 제작하여 장치의 하드웨어적인 구동 및 제어기능을 구현하도록 하였으며 향후 유지보수문제에 쉽게 대응할 수 있도록 설계, 제작하였다. ECU는 자동운전모드와 수동운전모드의 두 가지 방식으로 구동될 수 있으며 이 두 가지 운전모드에 대한 장치 제어용 프로그램을 개발하여 ECU내의 CPU board내의 메모리에 기록하였다. 자동운전 모드에서는 ECU전면의 Auto키를 누르는 동시에 모든 기능이 순차적으로 작동되며 프로그램의 flowchart는 그림 5-11과 같으며 자동운전모드 선택 시 LCD상의 출력순서는 그림 5-12와 같다.

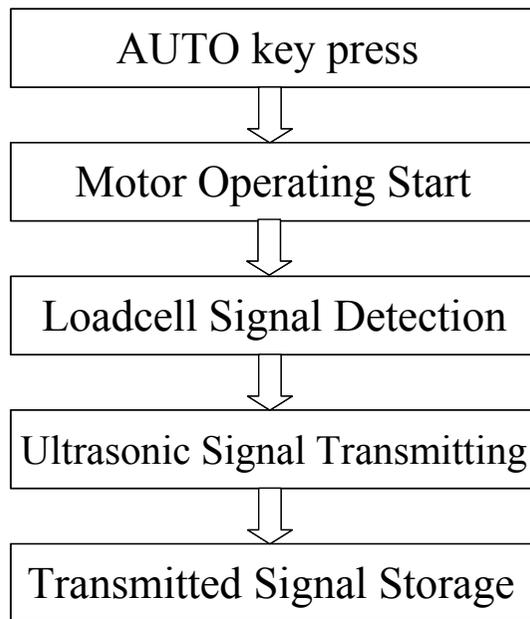


Fig. 5-11. Flowchart of automatic operation mode.

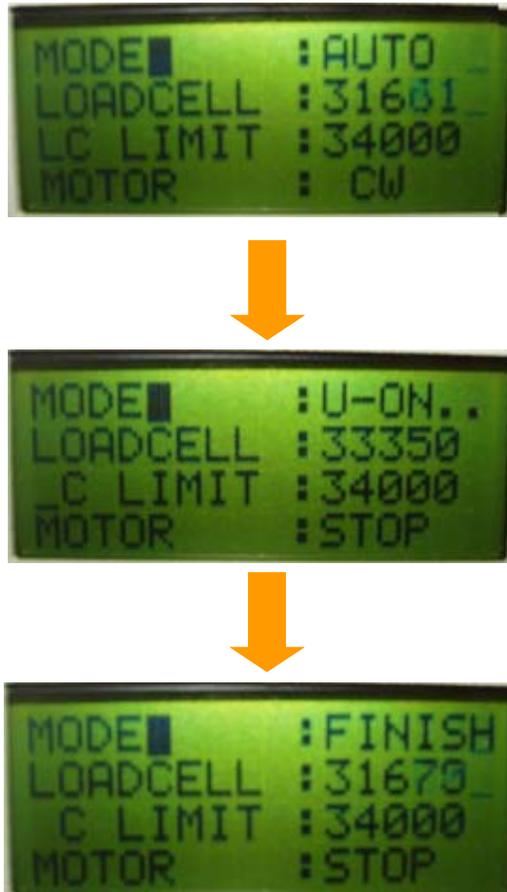


Fig. 5-12. Display at automatic operation mode

본 시스템에서는 시료 두께를 자동으로 측정할 수 있고 서보모터를 이용하여 트랜스듀서의 전진과 후진운전을 구현하였으며 과실과 transducer 사이에 작용되는 접촉 힘을 자동으로 조절 및 제어할 수 있도록 프로그램하였고 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 Instrument사의 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 개발하였으며 그림 5-13은 data acquisition 프로그램의 메인화면이다.

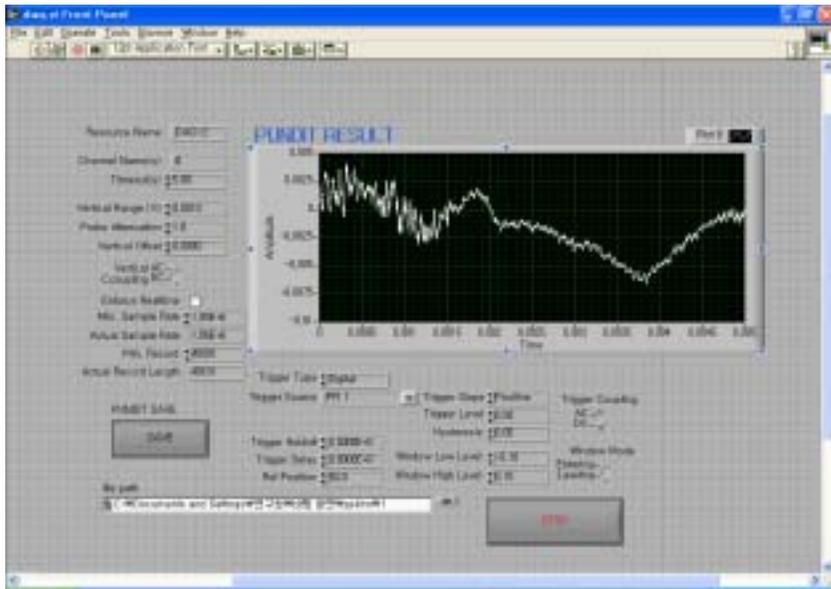


Fig. 5-13. Main display of data acquisition.

#### 나. 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 과실 경도 간의 상관관계를 통해 얻어진 다중회귀식을 이용하여 과실 경도 값을 구할 수 있도록 Matlab(ver. 6.5)를 이용하여 프로그램하였으며 아울러 사용자 인터페이스와 분석알고리즘을 구현하였다. 그림 5-14는 과실의 경도를 분석하는 프로그램의 GUI 메인화면이며 그림 5-15는 과실의 경도 분석 프로그램의 flowchart이다.



Fig. 5-14. Graphic user interface of program (ver.0.1) for analyzing the hardness of fruit.

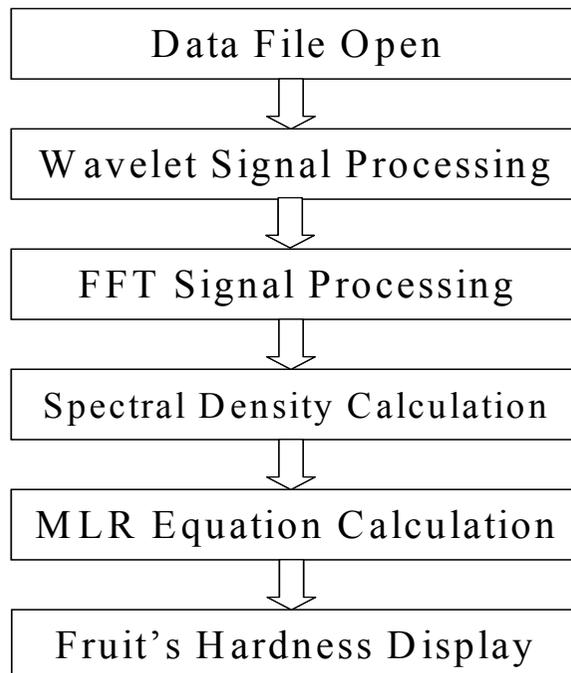
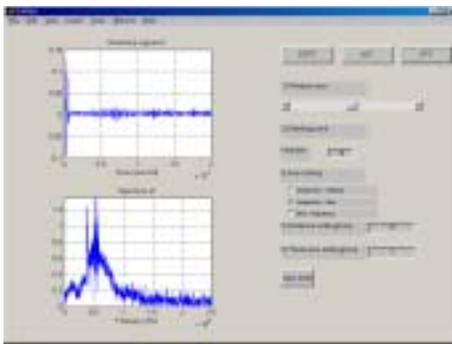
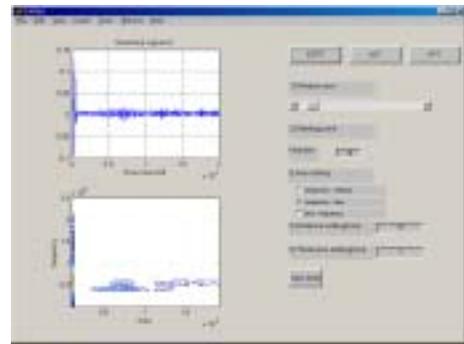


Fig. 5-15. Flowchart of program (ver.0.1) for analyzing the hardness of fruit.

측정과실의 내부를 투과한 초음파신호의 특성을 구명하고자 시간-주파수 분석방법을 활용하였으며 이러한 시도는 다양한 분야에서 매우 유용한 신호처리 기법으로 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 자체 변환 특성상 관심 주파수 성분 외에 주변 성분들과도 높은 상관성을 보이므로 주파수 천이와 같은 현상이 다소 복잡한 모습을 보이기 때문에 과실 시료의 투과파 분석에는 STFT 기법이 보다 유리한 시간-주파수 분석법이라는 결론에 도달하였고, 이를 기초로 신호분석 알고리즘을 개발하였다. 그림 5-16은 2004년 9월에 수확한 사과에 대해 FFT방법과 STFT방법을 적용한 결과를 보여준다.



(a) Result of FFT



(b) Result of STFT

Fig. 5-16. Result of analyzed ultrasonic signal through apple.

### 3. 시스템 성능 시험결과

#### 가. 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 발취하여 시험하였다. 먼저 초음파 시험을 실

시 후, UTM을 이용한 파괴 실험이 수행되었다. 그림 5-17은 그 결과를 보여준다.

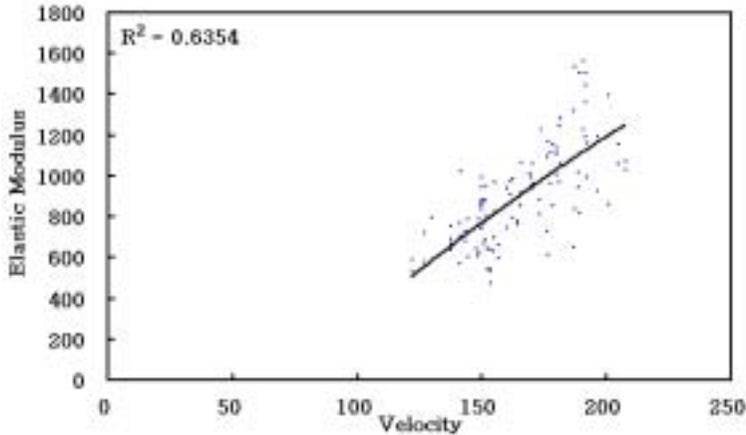


Fig. 5-17. Performance test result by three point thresholding method.

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

$$E = 3.387 * V_s^{2.6028}$$

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

#### 나. 초음파 물성측정 장치의 작동

초음파 물성측정 장치의 data acquisition 작동 모습은 그림 5-18과 같으며 과실 경도분석 작동 모습은 그림 5-19(a),(b)와 같다. 그림 5-20은 과실 경도분석 프로그램의 출력화면을 보여주고 있다.

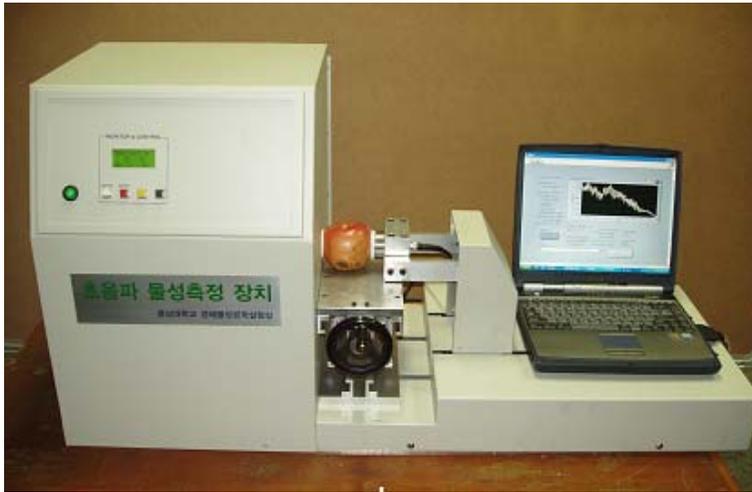
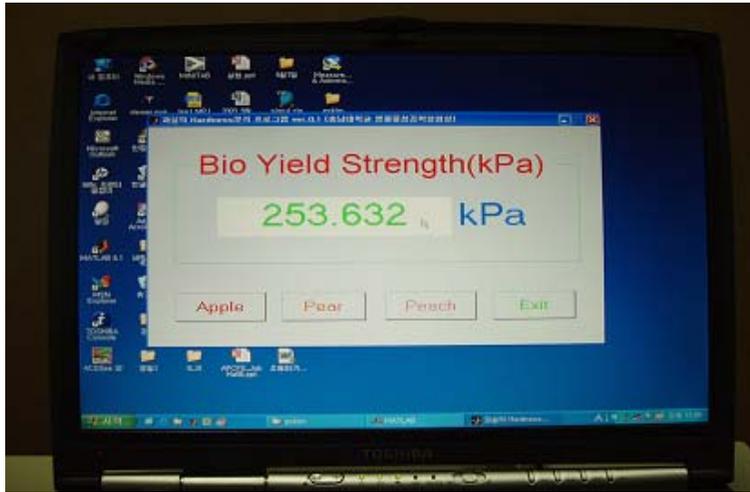


Fig. 5-18. Performing data acquisition of measurement system for mechanical property of fruit.



(a) Photo of analyzing the firmness of fruit.



(b) Display of firmness

Fig.5-19. Operation of measurement system for mechanical property of fruit.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지금까지 연구된 과실의 기계적 특성과 초음파 파라미터, 과실 경도측정 모형, 과실용 초음파 트랜스듀서를 이용하여 과실류의 경도를 비파괴적으로 측정할 수 있는 장치가 개발되었다. 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 경도를 측정하기 위한 초음파 파라미터를 계산하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 전체적으로 시스템 구동은 Labview 소프트웨어로 구현하였으며 주요 신호처리 알고리즘은 Matlab 소프트웨어와 연동하여 과실의 경도를 측정하기 위한 시스템을 구성하였다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

-개발된 과실 물성측정 시스템은 초음파 발생장치, 과실전용 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.

- 개발된 장치의 주요부로서 각 하드웨어 부를 작동하기 위하여 electronic control unit (ECU)를 제작하였다. 제작된 ECU는 접촉압력 측정용 로드셀과 신호처리 회로, 초음파 발생장치 On/Off회로, 서보모터 및 구동회로 등을 제어할 수 있다.
- 개발된 장치의 시스템 운용 프로그램은 Labview 소프트웨어로 구현하였으며 과실을 투과하여 수신되는 초음파 신호를 저장한 다음 이 신호는 Matlab으로 구현된 신호처리 알고리즘에 의해 초음파 파라미터가 계산된다. 이때 Matlab 프로그램은 개발된 운용프로그램에 연동되어 실행된다.
- 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.
- 개발된 장치의 성능을 평가하기 위하여 과실 시료에 대하여 적용한 결과 비교적 정확한 경도측정이 가능한 것으로 나타났으며 본 연구에서 개발된 초음파를 이용한 과실물성 측정 시스템을 이용하여 과실의 경도를 비파괴적으로 측정할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 제 1 절 연구개발 목표 달성도

과실의 기계적 특성을 측정하기 위한 전용 물성측정 장치를 개발하여 사과, 배, 복숭아에 대하여 저장기간에 따른 생물체항복강도, 탄성계수와 같은 기계적 특성에 대한 자료를 제시하였다. 과실의 기계적 특성을 구명하기 위하여 여러 가지 하중재하도구를 제작하여 시료의 형태 및 하중재하도구에 따른 차이점을 비교하였으며 과실 시편 특성에 따른 적절한 하중재하도구를 제시하였다.

과실을 절단하지 않고 송수신이 가능한 과실전용 초음파 트랜스듀서를 개발하였으며 개발된 초음파 트랜스듀서는 100 kHz 및 200 kHz 2 종류로서 과실의 곡률에 적합한 구조로 설계되었다. 또한 과실 곡률에 따라 센서 형상의 변형이 가능한 박막형 센서를 개발하고 평가하였다. 본 과제를 통해 개발된 과실 전용 초음파 트랜스듀서 기술은 향후 다른 농산물 등에도 활용할 수 있다.

개발된 초음파 트랜스듀서를 이용하여 사과, 배, 복숭아에 대한 초음파 투과실험을 실시하였으며 측정된 초음파 파라미터를 이용하여 과실의 기계적 특성을 예측할 수 있는 중회귀모델, 주성분모델, 신경망 모델을 개발하였다.

과실에 따른 각 모델들의 결정계수를 비교하였던 결과 어느 한 모델이 전체 공시 과실의 경도를 추정하는데 가장 적합한 것으로 분석되지는 않았지만 대체로 다중회귀 모델이 다른 모델보다 대부분의 과실에서 결정계수가 높았었고, 분석 및 이용에도 편리함이 있어 모든 과실에 다중회귀 모델을 적용하여 경도를 추정하는 시스템을 개발하였다.

초음파를 이용한 과실 물성측정 시스템을 개발하고 평가하였다. 전용 초음파 송수신 장치를 구성하고 센서와 시편의 접촉안정화 장치, 시스템 구동 장치를 제작하였으며 개발된 경도예측모델과 연동하여 과실을 투과한 초음파 신호를 분석하여 파라미터로부터 과실의 경도를 측정할 수 있는 시스템이다. 이를 위하여 시스템 운용 소프트웨어와 초음파 파라미터 추출을 위한 신호처리 알고리즘을 개발하였다.

이상으로 본 과제에서 수행된 세부과제별 연구목표가 충분하게 달성되었다고 할 수 있다.

## 제 2 절 대외기여도

본 연구를 통하여 개발된 기술은 국내 연구 논문으로 발표되기도 하였으며 특히 대만, 일본, 미국 등에서 개최하는 국제학회에 본 연구에서 개발된 기술을 발표하였다. 현재 과실 품질의 비파괴 평가기술에는 근적외선과 같은 광기술이 주로 사용되고 있는데 탄성파를 이용한 초음파 기술이 개발됨에 따라 이 분야의 관련기술 개발에 기여할 것으로 판단된다. 사과, 배, 복숭아 등에 대한 초음파를 이용한 물성 측정 기술이 축적되어 앞으로 다른 과실류 및 농산물에 대한 경도 측정 장치의 개발이 가능하게 될 것이다. 또한 초음파를 이용한 물성 측정기술은 속도, 신선도와 같은 내부품질 판정에 관한 연구로 확대할 수 있으며 대학 및 연구기관의 연구기능 활성화에 크게 도움이 될 수 있다. 또한 농산물에 적합한 초음파 트랜스듀서 개발 기술은 다른 과실 및 청과물에 적용이 가능할 것이다.

NIR, NMR, 마이크로파 등 다른 농산물 품질 평가 수단과 연계하여 상호 보완적인 역할을 수행함으로써 매우 정확하고 신뢰성이 높은 농산물 품질 평가가 가능해질 것이다. 초음파를 이용한 과실의 물성 측정 기술이 확보됨으로써, 외국의 농업 선진국보다 앞선 기술로 선도할 발판을 마련하였다고 할 수 있다.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

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 기술은 다른 농산물의 품질측정기술 개발에 활용될 수 있다. 또한 본 연구를 통하여 개발된 기술들은 현재까지 선진외국보다 앞서가는 기술로서 초음파를 이용한 과실 물성측정 분야의 선도기술이 될 수 있다. 과실을 절단하지 않고 내부를 투과할 수 있는 초음파 트랜스듀서는 본 과제를 통해 개발된 기술로서 초음파 감쇠가 극심한 과실을 대상으로 개발되었다는 점에서 향후 초음파를 이용한 과실 물성 평가분야에서 국제적인 경쟁력을 확보한 기술이라고 할 수 있다. 따라서 초음파 트랜스듀서 뿐만 아니라 물성 측정 시스템 관련기술들을 향후 계속 발전시켜 국제적인 경쟁력을 지니도록 연구역량을 집중하여 배양함으로써 동 분야의 세계적인 선두주자로 발돋움하여 국가적인 구심점 역할을 할 계획이며 국내의 농업공학기술을 한 단계 더 발전시키는 계기가 되도록 할 것이다. 즉 지금까지 농산물에 적합한 초음파 트랜스듀서가 개발되지 못해 한계를 보여 온 초음파를 이용한 농산물 품질측정 관련 기술 분야에 활용되어 앞으로 이 분야의 연구개발이 활성화되어 국내의 농산물 비파괴 평가분야에 많은 도움을 줄 것이다.

우선적으로는 개발된 초음파 기술을 과실 선과장이나 영농조합 등에 활용하여 과실 경도 측정 장치로 보급할 수 있으며 이에 따라 과실의 선별, 저장상태 모니터링, 유통과정에서의 품질관리 등에 활용되어 보다 엄격한 품질관리가 가능함에 따라 고품질 농산물의 생산에 기여할 것이다. 또한 개발된 시작품은 대학이나 연구소 등에 활용되어 과실 비파괴 품질검사 기술개발에 적극 활용될 수 있을 것이다.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구과제 수행시 기술적으로 가장 어려웠던 부분은 과실에 적합한 초음파 트랜스듀서를 개발하는 것이었다. 기존에 많이 사용되는 초음파 트랜스듀서용 압전재료는 PZT 계열의 세라믹 압전재료로서 다공질이면서 씨방이 존재하는 과실 과육을 투과하는 데는 다소 어려움이 있었다. 이러한 PZT는 일반 공업용 초음파 트랜스듀서에는 적합하지만 초음파의 감쇠가 극심하게 나타나는 과실의 경우에는 효율과 감도가 현저하게 저하되는 특성이 있다. 따라서 압전특성이 PZT 보다 뛰어난 새로운 압전재료가 필요하게 되었다. 최근 선진 외국을 중심으로 새로운 압전재료가 개발되고 있는데 기존의 PZT 보다 압전특성이 뛰어나고 효율이 높은 PMN-PT 단결정이 바로 그것이다.

일반적으로 PZT의 경우 여러 가지 각 구성성분을 적당히 바꾸거나 다른 재료를 소량 첨가하여 여러 가지 특성을 가지는 압전재료를 만들 수 있지만 그 특성이 제한적이다. 새로이 연구되고 있는 PMN-PT 압전 단결정은 납 마그네슘 니오베이트-납 티타네이트 ( $\text{Pb}(\text{Mg} \cdot \text{Nb})\text{O}_3$ )로서 PZT 보다 제조 단가가 비싸고 수율이 낮다는 단점이 있지만 기존의 PZT 세라믹스보다 전기-음향 변환효율을 나타내는 전기기계결합계수가 약 20% 송수신 성능을 나타내는 압전계수가 약 2배 이상의 성능을 나타내어 향후 이러한 PMN-PT 압전 단결정을 이용하여 과실 전용 초음파 트랜스듀서를 개발할 경우 크기를 작게 할 수 있으며 성능이 보다 향상된 과실 비파괴 초음파 물성측정 시스템을 구현하는데 도움이 될 것으로 생각된다.

## 제 7 장 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. Abbott, J. A., A. E. Watada and D. R. Massie. 1976. Effe-gi, Magness-Taylor and Instron fruit pressure testing device for apples, peaches, and nectarines. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 101(6): 698-700.
3. Abbott, J. A. and L. A. Liljedahl. 1994. Relationship of sonic resonant frequency to compression tests and Magness-Taylor firmness of apples during refrigerated storage. *Transactions of the ASAE* 37(4):1211-1215.
4. 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
5. 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
6. Finney, E. 1967, "Dynamic Elastic Properties of Some Fruits During Growth and Development", *J. Agric. Eng. Res.*, 14(4), pp. 249-255
7. Finney, E., I. Ben-Gera and D. Massie, 1968, "An Objective Evaluation of Changes in Firmness of Ripening Bananas using a Sonic Technique", *J. Food Science*, 32(6), pp. 642-646
8. Finney, E. E. 1972. Vibration techniques for testing fruit firmness. *J. Texture Studies* 3:262-283
9. Finney, E. E. and K. H. Norris. 1978. Determination of moisture in corn kernels by near-infrared transmittance measurements. *Transactions of the ASAE* 21(30):581-584.
10. Javanoud, C. 1988, "Applications of Ultrasound to Food Systems", *Ultrasonics*, 26, pp. 117-123
11. Kawai, K. 1969. The piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride), *Journal of Applied Physics*, 8:975-976
12. Krimholtz, R., Leedom, D., and Matthaei, G., "New equivalent Circuits for Elementary Piezoelectric Transducers." *Electronics, Letters* 6, 398-399 (June 1970)
13. Kino, G. S. 1987. *Acoustic waves-Devices, imaging & analog signal processing*,

Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

14. 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.
15. Kim, K. B., S. D. Lee, and M. S. Kim. 2003b. Ultrasonic probe design and fabrication for contact measurement of fruit. *Asia-Pacific Conference on Non-destructive Testing, Korea*. 233.
16. 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)
17. 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
18. 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.
19. Lerch, T. P., L. W. Schmerr and A. Sedov. 1996. Characterization of spherically focused transducers using an ultrasonic measurement of model approach. *Res. Nondestr. Eval* 8:1-21
20. Mizrach, A., N. Galili, G. Rosenhouse, 1989, "Determination of Fruit and Vegetable Properties by Ultrasonic Excitation", *Trans. ASAE* Vol.32 (6), pp. 2053-2058
21. Mizrach, A., N. Galili, G. Rosenhouse, 1994, "Method and Apparatus of Ultrasonically Determining of Quality Parameters of Fresh Products", US Patent No. 5589209
22. Mizrach, A., N. Galili, S. Ganmor, U. Flitsanov and I. Prigozin, 1996, "Models of Ultrasonic Parameters to Assess Avocado Properties and Shelf life", *J. Agric. Eng. Res.*, 65(4), pp. 261-267
23. 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

24. Shmulevich, I., N. Galili. and D. Rosenfeld. 1996. Detection of fruit firmness by frequency analysis. Trans. of the ASAE 39(3):1047-1055
25. Upchurch, B., E. Furguson and G. Miles, 1985, "Spectral Analysis of Acoustical Signal for Damage Detection", ASAE Paper No. 85-6014
26. 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 evaluation of apples and watermelons. J. of Texture Studies 11:117-136
27. 김기복, 김만수, 정현모, 이상대. 2003. 저장기간에 따른 사과 과육의 기계적 특성 및 초음파 파라미터. 한국농업기계학회지 28(3):239-244
28. 김기복, 윤동진, 권재화, 이영섭, 2004. 부착형 고분자 압전센서를 이용한 탄성과 검출 연구, 한국비파괴검사학회지, 24(3):268-274
29. 김만수, 최동수, 이영희, 조영길. 1998. 수박의 음향특성에 관한 연구. 한국농업기계학회지 23(1):57-66
30. 최완규, 이강진, 최규홍, 2004. 다중음향신호 검출에 의한 수박의 내부품질 예측, 한국농업기계학회 동계학술발표 논문집 Vol. 9, No. 1:472-475