

과실 경도측정을 위한 비접촉 초음파 변환기 연구

이상대 하태훈 김기복 김만수

Study on Non-contact Ultrasonic Transducer for Measurement of Fruit Firmness

S. Lee T. H. Ha K. B. Kim M. S. Kim

Abstract

This study was conducted to develop a non-contact ultrasonic transducer for measurement of fruit firmness. The center frequency of non-contact ultrasonic transducer was 500 kHz. As an active element of non-contact ultrasonic transducer, the 1-3 piezoelectric composite material was selected. That material has high piezoelectric properties such as electro-mechanical coupling factor, k_t and piezoelectric voltage constant, d_{33} and also that material has low acoustical impedance which enables to matching the acoustical impedances between piezoelectric material and air. As a front matching material between 1-3 piezoelectric composite material and air, various kinds of paper with different thickness were tested. To control the dead-zone of the fabricated non-contact ultrasonic transducer, the backing material composed of epoxy resin and tungsten powder were made and evaluated. The fabricated non-contact ultrasonic transducer for fruit showed that the center frequency, bandwidth and beamwidth were approximately 480 kHz, 30 % and 12 mm, respectively. It was concluded that non-contact measurement of apple firmness would be possible by using the fabricated non-contact ultrasonic transducer.

Keywords : Firmness, Fruit, Non-contact, Ultrasonic transducer

1. 서론

생활 패턴의 변화와 소득 수준의 향상으로 인해 과실류에 대한 소비자의 기호가 고급화되고 있으며 신선도를 추구하는 경향이 증가하고 있다. 이에 따라 과실의 품질을 객관적으로 판정할 수 있는 기술의 필요성이 커지고 있다.

과실의 품질 인자들 중에서 경도는 저장 및 유통과정에서 발생하는 부패, 변질 등과 밀접한 관계가 있으며 소비자의 구매 행위 시 가장 중요한 선택 기준이 되고 있다. 사과와 같은 경우 경도를 측정하기 위한 일반적인 방법으로 파괴적인 측정법인 Magness-Talyer(MT) 측정법이 이용되고 있다. 그러나 현재 까지 비파괴적으로 과실의 경도를 측정할 수 방법이 실용화된 사례는 거의 없다.

과실의 경도를 비파괴적으로 측정할 수 있는 기술 중에서 가장 주목받고 있는 기술은 초음파를 이용한 기술이다(Liljedahl and Abbott, 1994; Mizrach et al., 1997). Kim 등(2003, 2007, 2009)은 접촉식 초음파 변환기를 이용하여 과실의 경도를 비파괴적으로 측정할 수 있다고 보고하였으며 특히 과실을 절단하지 않고 경도를 측정할 수 있는 접촉식 초음파 변환기를 개발하였다(Kim et al., 2007). 접촉식 초음파 변환기를 이용한 과실의 경도측정 방법은 비교적 정확한 반면에 과실개체 별로 하나씩 접촉하여 초음파를 송수신하므로 측정 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 초음파 변환기가 과실에 직접 접촉할 때 손상이 발생할 수 있다. 또한 초음파 에너지 전달효율을 높이기 위해 물이나 초음파 젤과 같은 재료를 사용해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 비접촉으로

This study was conducted by the research fund supported by Rural Development Administration of Korea. The article was submitted for publication on 2010-04-12, reviewed on 2010-05-07, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2010-05-28. The authors are Sangdae Lee, Post-doctoral Research Scientist, KSAM member, Agricultural Research Service, USDA, Tae-Hoon Ha, Research Student, Dept. of Medical Physics, University of Science & Technology, Ki-Bok Kim, Principal Research Scientist, KSAM member, Center for Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, and Man-Soo Kim, Professor, Dept. Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University. Corresponding author: K. B. Kim, Principle Research Scientist, KSAM member, Center for Safety Measurement, Korea Research Institute of Standard and Science, Deajeon, 305-340, Korea; Fax: +82-42-868-5650; E-mail: <kimkibok@kriss.re.kr>.

과실의 경도를 측정할 수 있는 초음파 변환기를 제작하고자 하였다. 비접촉 초음파 기술은 초음파 변환기와 과실이 직접 접촉하지 않기 때문에 초음파를 송수신하는데 소요되는 시간이 짧고 과실이 손상될 위험이 없는 장점이 있다. 이러한 특징으로 인해 비접촉 초음파 기술은 기존에 연구되고 있는 당도 및 산도를 측정하기 위한 온라인 품질판정 시스템과의 연계도 가능하다. 그러나 현재까지 개발된 비접촉 초음파 변환기는 대부분 산업용이며 공기 중에서 감쇠가 심한 초음파의 특성으로 인해 제작이 어렵기 때문에 제작비용이 매우 고가이다. 이러한 산업용 비접촉 초음파 변환기를 과실의 경도측정 시스템에 직접 적용하는 것은 과실의 경도측정 시스템을 최적화하는데 있어 제한적인 요인으로 작용하며 높은 비용을 발생시킨다. 이에 따라 과실용 비접촉 초음파 변환기를 직접 설계·제작하여 과실용 경도측정 시스템을 개발하는 원천기술을 확보하고 전체 시스템의 제작비용을 절감하기 위한 노력이 요구된다.

본 연구는 과실의 경도를 비접촉으로 측정할 수 있는 초음파 변환기를 개발하기 위해 수행되었다. 이를 위하여 초음파 변환기를 구성하는 주요 구성요소인 압전재료, 전면정합층, 후면재의 제작조건을 구명한 다음 비접촉 초음파 변환기 시제품을 개발하고자 하였으며 사과에 대하여 적용하여 비접촉 경도측정 가능성을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

가. 비접촉 초음파 변환기 설계의 주요개념

초음파는 탄성파의 한 종류로서 초음파가 전파하여 대상체에 도달할 때 대상체의 반발계수에 따라 반사되는 초음파 에너지가 달라진다. 예를 들어 동일한 높이에서 낙하시킨 공은 바닥면의 경도에 따라 반발되어 튀어 오르는 높이가 달라지듯이 과실표면에서 반사되는 초음파 신호의 크기도 과실표면의 딱딱한 정도에 따라 달라진다. 따라서 대상체 표면에서 반사되는 초음파 신호의 특성을 분석하면 초음파 신호와 대상체의 기계적 특성과의 관계를 알 수 있다. 그러나 실제 과실의 선과 시스템에서는 과실의 크기가 일정하지 않으므로 과실과 초음파 변환기 사이의 거리가 달라지며 이에 따라 수신되는 초음파 신호의 크기도 불규칙하게 변화된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 과실과 초음파 변환기 사이에서 거리의 영향을 받지 않는 초음파 경도측정 파라미터를 고려해야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 과실에서 반사되는 첫 번째 반사 신호와 두 번째 반사 신호에 대한 초음파 파라미터를 이용하여 과실과 초음파 변환기 사이에서 거리에 상관없이 과실의 경도를 측정할 수 있는 거리보정백터를 고려하고자 하였다. 이를 위해서는 과실에서 반사되는 첫 번째 반사 신호와 두

번째 반사 신호를 수신할 수 있어야 하며 과실의 경도변화에 민감하게 반응할 수 있는 초음파 변환기의 중심 주파수로 500 kHz을 선정하였다. 보통 500 kHz 이상의 주파수에서는 공기 중에서 감쇠가 매우 심하여 두 번째 반사 신호를 수신하기 어려울 뿐만 아니라 500 kHz보다 낮은 주파수에서는 측정 감도가 떨어지므로 과실 경도측정용 비접촉 초음파 변환기는 중심 주파수가 500 kHz인 비접촉 초음파 변환기를 설계·제작하였다.

나. 비접촉 초음파 변환기의 구조

본 연구에서 개발하고자 하는 비접촉 초음파 변환기의 구조는 그림 1과 같다. 초음파 변환기는 전기적인 에너지를 기계적인 진동으로 변환하여 초음파를 발생시키고 동시에 외부에서 가해지는 기계적 진동을 전기적인 에너지로 변환할 수 있는 압전 소자, 공기층과 압전소자 사이의 음향 임피던스 차이를 줄여서 공기 중에서 초음파 송수신 효율을 증가시키기 위한 전면 정합층, 압전소자의 진동을 제한하여 초음파 변환기의 불감대(dead-zone)를 조절하는 후면재 그리고 변환기 케이스와 커넥터 등으로 구성된다.

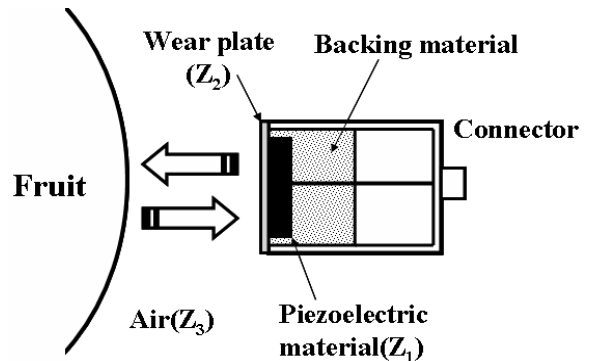


Fig. 1 The structure of non-contact ultrasonic transducer for fruit.

1) 압전재료 선정

공기는 밀도(1.2 kg/m³)와 음향 임피던스(0.0004 MRayL)가 매우 낮아 초음파 신호의 감쇠가 매우 크게 발생한다. 비접촉 초음파 변환기는 감쇠가 심한 공기층을 통과하여 초음파 신호를 송수신해야 하므로 에너지 변환 효율이 우수하고 높은 출력을 갖는 압전 소자가 요구된다. 이를 위해 송신 특성을 나타내는 압전변형상수(d)값과 에너지 변환 효율을 나타내는 Q값이 상대적으로 높은 압전재료를 선정하여 1-3 압전복합재료를 주문·제작하였다. 1-3 압전복합재료는 그림 2와 같이 벌크 상태의 압전소자를 일정한 간격으로 절단한 후 그 사이에 폴리머를 채워 제작하기 때문에 음향 임피던스가 약 13 MRayL 정도로서 일반 PZT 계열 압전소자(35 MRayL)에 비해 매우 낮은 음향 임피던스를 갖는다. 따라서 1-3 압전

소자는 일반 압전소자에 비해 공기층과 같이 음향 임피던스가 매우 낮은 매질과의 음향 임피던스 정합에 유리하다. 1-3 압전복합재료는 중심 주파수가 500 kHz이고 두께 약 3.2 mm, 지름 18 mm인 원형으로 제작하였다. 표 1은 일반 PZT와 제작된 1-3 압전복합재료의 주요 특성을 나타낸다.

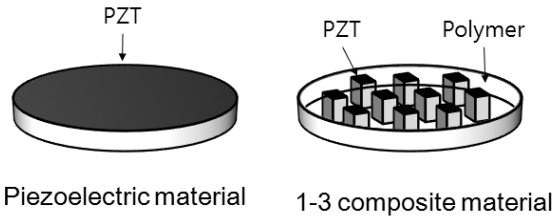


Fig. 2 The structure of general piezoelectric material and 1-3 composite material.

Table 1 Physical and electrical properties of PZT and 1-3 composite piezoelectric material

	1-3 composite	PZT
Thickness coupling coefficient (%), k_t	48	50
Piezoelectric strain constant, d_{33}	583	350
Piezoelectric voltage constant, g_{33}	19	24
Mechanical quality factor, Q_M	65	400
Acoustic impedance (MRayL), Z_a	13	31
Sound velocity (m/sec), V_s	3,200	4,062

2) 전면 정합층 설계 및 제작

압전 소자와 공기층 사이에 위치하는 전면 정합층은 초음파 에너지의 투과효율과 관계되며 재료의 음향 임피던스와 두께가 설계 변수가 된다. 특히, 공기와 같이 음향 임피던스가 낮은 매질을 초음파가 투과하기 위해서는 적절한 전면 정합층을 선정하는 것이 초음파 변환기의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 전면 정합층의 음향임피던스(Z_2)와 두께(L)는 다음 식에 의해 얻어진다(Kino, 1987).

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \tag{1}$$

$$L = \lambda/4 \tag{2}$$

where, Z_1 = Acoustic impedance of 1-3 composite piezoelectric material (13 MRayL)

Z_2 = Acoustic impedance of front matching layer

Z_3 = Acoustic impedance of air (0.0004 MRayL)

λ = Wavelength (m)

L = Thickness of front matching layer (m)

전면 정합층의 두께가 $\lambda/4$ 일 때 초음파 에너지의 투과계수와 반사계수는 다음과 같이 계산된다(Kinsler et al., 2000).

$$T = 1 - |R|^2 = 1 - [(Z_3 - Z_2)/(Z_3 + Z_2)]^2 \tag{3}$$

where, T = The power transmission coefficient

R = The power reflection coefficient

식 (1)에 의해 계산된 전면 정합층의 음향 임피던스는 약 0.072 MRayL이다. 전면 정합층으로 사용할 수 있는 재료 중에서 이와 유사한 값을 갖는 재료로 종이 재질의 전면 정합층을 선정하였다. 비접촉 초음파 변환기 제작에 사용된 종이 재질은 평량과 두께가 서로 다른 4 종류를 선정하여 초음파 속도를 측정하였다. 종이 재질의 초음파 투과속도는 5 MHz 초음파 변환기를 이용하여 초음파 투과법으로 측정한 결과 약 500 m/s로 나타났다. 표 2는 선정된 종이 재질의 평량과 두께, 음향 임피던스를 각각 나타낸다.

식 (3)에 의해 계산된 선정된 종이 재질과 공기 사이의 초음파 에너지 투과계수는 0.00491이다. 이것은 철(46 MRayL)과 물(1.5 MRayL) 사이에서 계산된 초음파 에너지 투과계수인 0.12232보다도 매우 낮은 값으로 공기 중에서 초음파의 전달 효율이 매우 낮을 것으로 판단된다.

Table 2 Basic weight and thickness of selected paper materials

Paper type	Basic weight (g/m ²)	Thickness (mm)	Impedance (MRayL)
A	115	0.18	0.319
B	135	0.20	0.337
C	170	0.25	0.340
D	280	0.40	0.350

3) 후면재 제작

후면재는 압전소자의 뒷부분에 위치하여 압전소자의 진동을 제한하는 damper 역할을 하며 분해능과 주파수 대역폭을 조절하는 작용을 한다. 또한 본 연구에서와 같이 하나의 초음파 변환기를 이용하여 초음파를 송신하고 수신 할 경우 초음파 변환기의 불감대에 따라 초음파 변환기와 대상체 사이의 최소 측정거리가 달라지므로 매우 중요한 제작조건이 된다. 이를 위해 본 연구에서는 선정된 압전소자의 압전특성을 고려하여 적절한 후면재 제작 조건을 찾고자 하였다. 이를 위해 에폭시와 입자 크기가 1 μ m인 텅스텐 분말을 배합하여 후면재를 제작하였다. 제작된 후면재에 대하여 초음파 투과속도와 밀도를 측정하여 음향 임피던스를 계산하였다. 표 3은 제작된 후면재의 속도와 밀도, 음향 임피던스를 각각 나타낸다.

Table 3 Ultrasonic velocity, density, and acoustic impedance of backing materials

	Velocity (m/sec)	Density (kg/m ³)	Impedance (MRayL)
Epoxy (Araldite)	2620	1140	3.0
Epoxy:Tungsten = 1:2	1361	2782	3.8
Epoxy:Tungsten = 1:4	1286	4322	5.5

다. 비접촉 초음파 변환기 성능평가

제작된 비접촉 초음파 변환기를 이용하여 초음파 송수신 실험을 수행하기 위해 그림 3과 같은 초음파 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치는 고출력 초음파 펄서/리시버(JSR ultrasonics Inc., USA), 디지털 오실로스코프(LeCory Inc., USA)와 3 방향으로 거리 조절이 가능한 3축 linear stage로 구성하였다.

실제 실험 대상인 과실과 유사한 조건에서 개발된 비접촉 초음파 변환기의 특성을 분석하기 위해 SUS 304로 제작된 지름 100 mm의 반구를 이용하였다(ISO, 1999). 먼저 주어진 반구 시험편에서 반사되는 최대 초음파 신호에 대하여 시간 영역에서의 신호크기, 주파수 영역에서의 중심주파수, 대역폭을 측정하여 분석하였다. 그다음 제작된 비접촉 초음파 센서의 빔폭을 측정하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 우선, 반구의 중심과 비접촉 초음파 변환기의 중심을 일치시키고 3축 linear stage의 x축과 y축을 조절하여 반구에서 반사되는 초음파 신호의 최대점을 찾은 후 x축 방향으로 비접촉 초음파 변환기를 1 mm씩 이동하며 반사 신호의 크기를 측정하였다. 비접촉 초음파 변환기와 반구 사이의 거리는 비접촉 초음파 변환기의 불감대와 비접촉 초음파 경도측정 시스템의 초음파 실험 거리를 고려하여 70 mm로 선정하였다.

마지막으로 제작된 비접촉 변환기를 이용하여 과실의 경도 측정 가능성을 분석하였으며 이를 위하여 시중에 유통되는 사과(후지) 시료에 대하여 상온에서 저장하면서 저장기간에 따른 사과의 무게변화, 비접촉 초음파 신호의 크기를 측정하여 분석하였다. 실험방법은 항상 같은 위치의 사과 표면에서 초음파 반사 신호를 송수신할 수 있도록 받침대에 사과를 고정시킨다. 그 다음 그림 3과 같은 초음파 실험 장치를 이용하

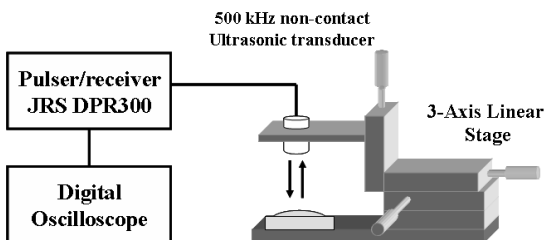


Fig. 3 Ultrasonic experimental measurement setup.

여 사과와 초음파 변환기 사이의 거리를 일정하게 고정하여 초음파 반사 신호를 측정하고 첫 번째 반사 신호의 최대 전압을 측정하였다. 초음파 반사 실험이 끝나면 받침대와 함께 사과의 무게를 측정하여 사과의 무게 변화를 측정하였다. 실험재료는 산사 품종의 사과 3개를 이용하였으며 상온에서 저장하면서 3일 간격으로 8회 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 제작된 1-3 압전복합재료의 공진특성

제작된 1-3 압전복합재료의 공진특성을 측정하기 위해 4194A 임피던스 분석기(Agilent Inc., USA)를 이용하였다. 그림 4는 제작된 1-3 압전복합재료를 나타내며 그림 5는 측정된 임피던스 스펙트럼을 나타낸다. 그림 5의 임피던스 스펙트럼에서 제작된 1-3 압전복합재료의 공진주파수는 480 kHz이고 반공진주파수는 610 kHz로 나타나 설계 주파수인 500 kHz에 근접하였다.

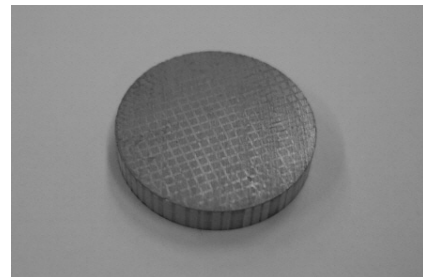


Fig. 4 The 1-3 composite material for 500 kHz.

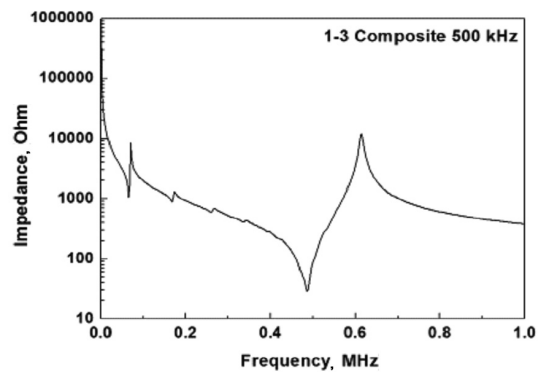


Fig. 5 Measured impedance the 1-3 composite material for 500 kHz.

나. 후면재 제작 조건에 따른 비접촉 초음파 변환기의 수신 특성 분석

비접촉 초음파 변환기는 초음파 신호의 감쇠를 최소화하고 불감대를 최대한 줄이기 위해 표 3에서와 같이 3가지 조건의 후면재를 이용하여 비접촉 초음파 변환기를 제작한 다음 그

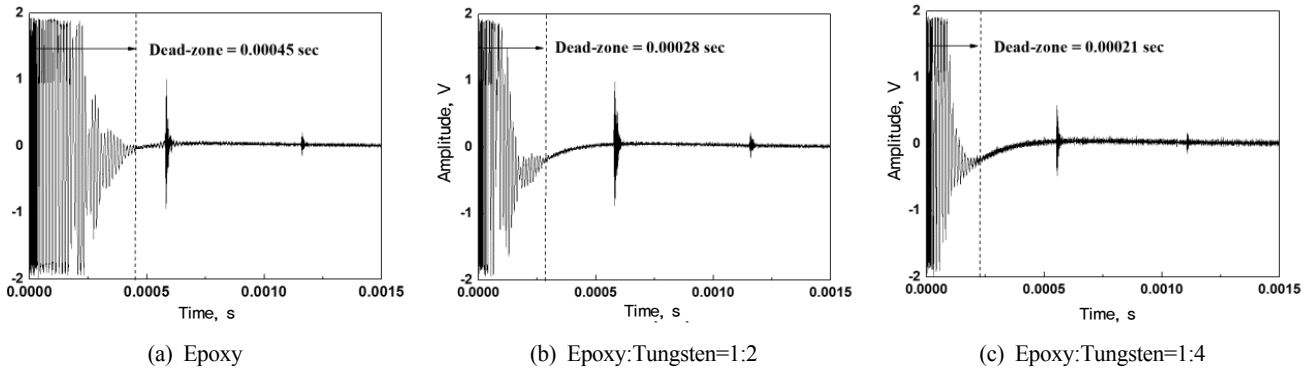


Fig. 6 Comparison of ultrasonic signals through air among various backing materials.

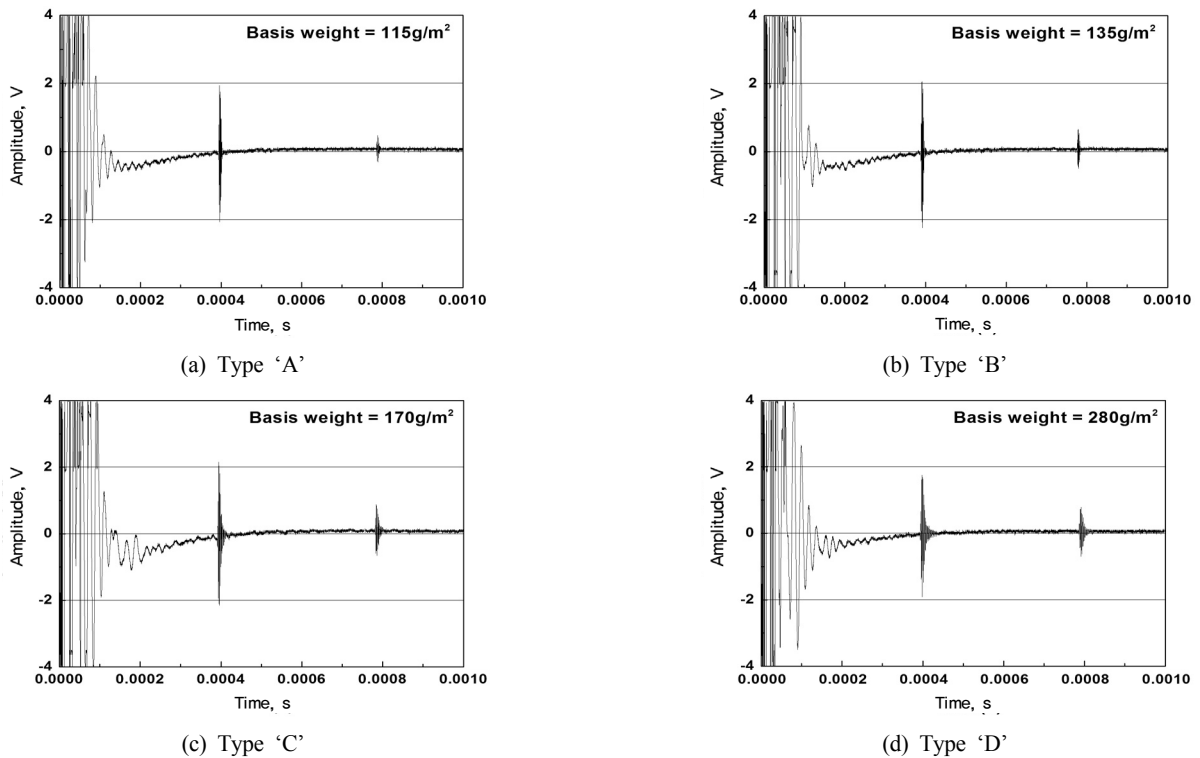


Fig. 7 Comparison of ultrasonic signals through air among various front matching layer.

특성을 비교하였다. 비접촉 초음파 변환기의 불감대는 그림 6의 시간 축에서 0 ~ 0.00045 초까지 나타나는 초음파 신호를 나타낸다. 불감대가 넓으면 대상체와 초음파 변환기 사이의 거리가 가까울 경우 반사되는 초음파 신호가 불감대 영역에 겹쳐서 나타나기 때문에 수신되는 초음파 신호의 정확한 분석이 어렵다. 반면에 후면재 제작조건을 조절하여 불감대를 감소시키면 수신되는 초음파 신호의 크기도 함께 감소하므로 최적화된 후면재를 선정하는 것이 매우 중요하다. 그림 6은 표 2의 'C' 타입의 전면 정합층 재료를 이용하고 후면재의 음향 임피던스를 변화시키면서 수신되는 초음파 신호를 분석한 결과를 나타낸다. 음향 임피던스가 3 MRayL인 에폭시를 이용하여 제작된 비접촉 초음파 변환기의 불감대가 가장 넓게 나타났으며 에폭시와 텅스텐 분말을 1:2로 배합한

후면재(3.8 MRayL)와 1:4로 배합한 후면재(5.5 MRayL)로 제작된 비접촉 초음파 변환기의 불감대는 거의 비슷하게 나타났다. 그러나 수신된 초음파 신호의 크기는 에폭시와 텅스텐 분말의 배합비율이 1:2일 때 수신되는 초음파 신호의 크기가 더 크게 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 비접촉 초음파 변환기의 후면재 제작조건으로 에폭시와 텅스텐 분말의 배합비율이 1:2인 후면재를 선정하였다.

다. 전면 정합층 재질에 따른 비접촉 초음파 변환기의 수신 특성 분석

그림 7는 표 3에서 선정된 4종류의 전면 정합층 재료를 이용하여 제작된 비접촉 초음파 변환기의 실험결과를 나타낸

다. 실험 결과 ‘C’ 타입의 종이 재질로 제작된 비접촉 초음파 변환기의 첫 번째 반사 신호와 두 번째 반사 신호가 다른 3 종류의 종이 재질에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 표 4는 ‘D’ 타입 종이로 제작된 비접촉 초음파 변환기의 수신 신호를 기준으로 다른 초음파 변환기의 수신 신호를 비교한 값을 나타낸다. 표 4에서 ‘C’ 타입 종이로 제작된 비접촉 초음파 변환기에서 수신된 초음파 신호는 ‘D’ 타입 종이로 제작된 초음파 변환기의 초음파 신호에 비해 약 1.47 dB 크게 나타났다. 이것은 종이 재질로 제작된 전면 정합층의 최적 두께인 0.25 mm와 같은 두께인 ‘C’ 타입 종이에서 초음파 에너지의 투과계수가 최대가 되기 때문이다. 최종적으로 500 kHz 비접촉 초음파 변환기는 ‘C’ 타입의 종이 재질 전면 정합층으로 제작하고 에폭시와 텅스텐 분말을 1:2로 배합한 후면재를 이용하여 제작하였다.

Table 4 Comparison of peak amplitude among various front matching layers

Paper type	A	B	C	D
Peak amplitude (V)	1.93	2.10	2.25	1.90
Relative amplitude (db)	0.14	0.87	1.47	0



Fig. 8 Fabricated 500 kHz non-contact ultrasonic transducer.

라. 개발된 비접촉 초음파 변환기의 주파수 특성과 음장분석

그림 8은 최종적으로 완성된 500 kHz 비접촉 초음파 변환기를 나타낸다. 그림 9는 제작된 500 kHz 비접촉 초음파 변환기의 첫 번째 반사 신호에 대한 주파수 분석 결과를 나타내며 중심 주파수는 약 480 kHz이로 나타나 임피던스 측정에 의한 전기적인 공진주파수와 거의 일치하였다. 한편, 6 dB 감쇠법에 의해 측정된 주파수 대역폭은 150 kHz로 중심 주파수의 약 30 % 수준으로 나타나 협대역 주파수 특성을 나타내었다.

그림 10(a)는 제작된 500 kHz 비접촉 초음파 변환기와 그림 3의 실험 장치를 이용하여 측정된 초음파 빔폭을 나타내고 그림 10(b)은 Multi-gaussian beam 모델을 이용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다(Huang et al., 2005). 초음파 변환기의 빔폭은 6 dB 감쇠법에 의해 측정되었으며 시뮬레이션 결과와 실제 실험결과가 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다. 비접촉 초음파와 경도측정 시스템을 고려하여 과실과 비접촉 초음파 변환기 사이의 거리를 70 mm로 설정할 경우 본 연구에서 제작된 초음파 변환기의 빔폭은 약 12 mm로 측정되었다.

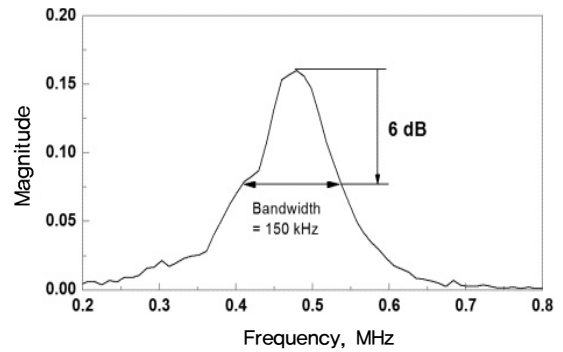
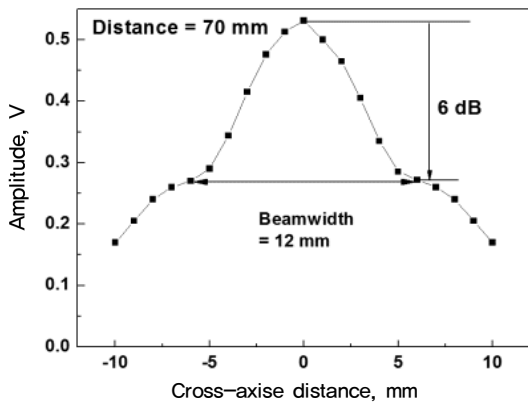
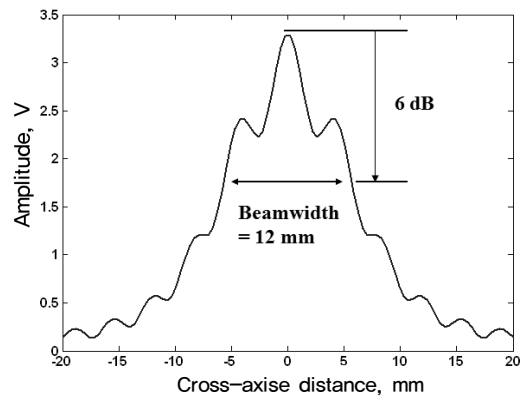


Fig. 9 Fast fourier transform analysis result.



(a) Experiment result



(b) Simulation result

Fig. 10 Comparison of beam diameters by experiment and simulation results.

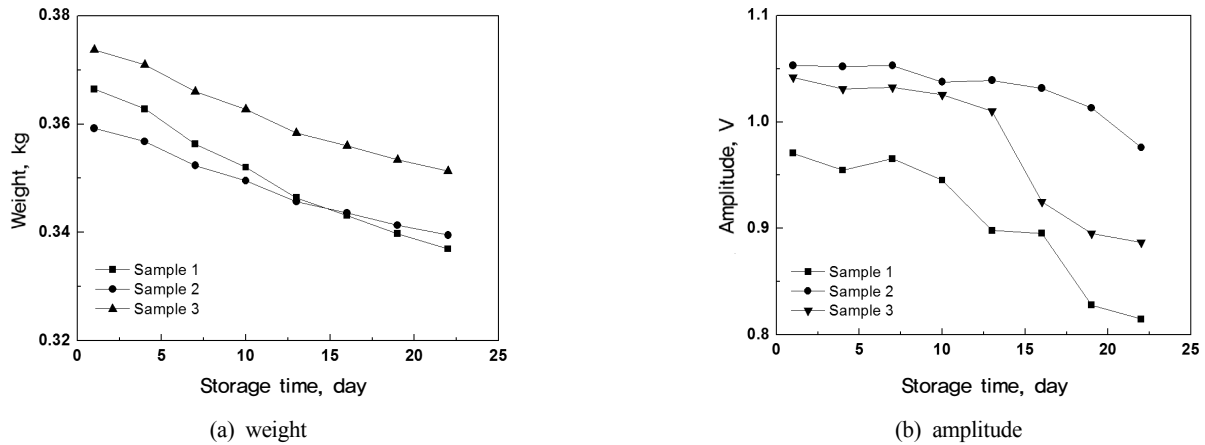


Fig. 11 Changes of weight and ultrasonic peak amplitude according to the storage time of apples.

마. 개발된 비접촉 초음파 변환기를 이용한 과실의 경도 측정 가능성 평가

제작된 500 kHz 비접촉 초음파 변환기를 사과시료에 적용하여 경도측정 가능성을 분석하였다. 사과는 저장기간이 증가하면서 사과 내부에서 가수분해나 산소 호흡 등과 같은 생물학적 반응이 증가하게 되고 이에 따라 사과의 수분과 섬유질 등이 에틸렌 가스 등과 같은 성분으로 변화되면서 사과의 밀도가 감소하고 경도가 약해진다. 즉, 사과의 무게가 감소함에 따라 경도도 감소하게 될 뿐만 아니라(De Belie et al., 1999, Herotog et al., 2004, Tu et al., 2000). 또한 사과의 저장기간에 따라 탄성계수와 항복강도가 감소하는 경향을 나타내었다(Kim et al., 2003, 2009). 따라서 본 연구에서 개발된 500 kHz 비접촉 초음파 변환기를 이용하여 사과의 저장기간에 따른 초음파 반사 신호와 사과의 무게 변화를 측정하고 분석하여 경도 측정 가능성을 검토하였다.

저장기간에 따른 사과의 무게는 그림 11(a)에서 보는바와 같이 일정하게 감소하였으며 초음파 반사 신호는 그림 11(b)와 같이 저장기간 9일 후부터 급격히 감소하기 시작하였다. 사과의 무게와 달리 초음파 반사 신호의 감소가 늦게 나타나는 것은 사과 과육의 변화가 외부까지 전달되어 사과의 과피를 변화시키기까지 시간이 지연되는 것으로 판단된다. 본 실험을 통해 비접촉 초음파 기술을 이용하여 사과의 경도 변화를 측정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 추후 사과시료의 개수와 저장기간을 늘려가면서 비접촉 초음파 신호와 사과의 경도변화 사이의 상관관계를 구명하기 위한 연구를 수행하여 비접촉 초음파 센서를 이용한 과실의 경도측정 가능성을 검증할 계획이다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 과실의 경도를 비접촉으로 측정할 수 있는 비접

촉 초음파 변환기를 개발하기 위해 수행되었다. 이를 위해 감쇠가 심한 공기층에서 초음파를 효율적으로 송수신할 수 있도록 1-3 압전복합재료와 종이 재질의 전면 정합층 재료를 선정하여 500 kHz 비접촉 초음파 변환기를 제작하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 과실에서 반사되는 첫 번째 반사 신호와 두 번째 반사 신호를 수신하고 최적 감도를 얻기 위해 비접촉 초음파 변환기의 중심 주파수를 500 kHz로 선정하였다.
- (2) 압전소자는 송신 특성을 나타내는 d값과 에너지 변환 효율을 나타내는 Q값이 큰 PZT를 선정하여 음향 임피던스 정합이 유리한 1-3 압전복합재료를 제작하였다.
- (3) 전면 정합층으로 4종류의 종이 재질과 3 종류의 후면재 조건을 선정하여 500 kHz 비접촉 초음파 변환기를 제작할 결과 평량 170 g/m², 두께 0.25 mm의 종이 재질과 에폭시와 텅스텐 분말의 비율이 1:2인 후면재로 제작할 때 가장 우수한 초음파 수신특성을 나타내었다.
- (4) 제작된 500 kHz 비접촉 초음파 변환기의 중심 주파수는 약 480 kHz이고 주파수 대역폭은 약 30 %이며 실제 초음파 실험 거리인 70 mm에서 비접촉 초음파 변환기의 빔폭은 12 mm로 측정되었다.
- (5) 사과의 저장기간에 따른 사과의 무게 변화와 사과에서 반사된 초음파 신호의 변화를 측정하는 실험을 통해 비접촉 초음파 기술을 이용한 사과의 경도 측정이 가능한 것으로 분석되었으며 추후 연구를 통하여 검증할 예정이다.

참고 문헌

1. De Belie, N., K. Tu, P. Jancsok and J. De Baerdemaeker. 1999. Preliminary study on the influence of turgor pressure

- on body reflectance of red laser light as a ripeness indicator for apple. *Postharvest Biology and Technology* 16:279-284.
2. Hertog, M. L., R. Ben-Arie, E. Roth and B. M. Nicolai. 2004. Humidity and temperature effects on invasive and non-invasive firmness measures. *Postharvest Biology and Technology* 33: 79-91.
 3. Huang, R. J., L. W. Schmerr and A. Sedov. 2005. Research in *Nondestructive Evaluation* 16(4):143-174.
 4. ISO. 1999. 12715: Ultrasonic Non-destructive Testing - Reference Blocks and Test Procedures for the Characterization of Contact Search Unit Beam Profiles. ISO, Geneva, Switzerland.
 5. Kim, K. B., M. S. Kim, H. M. Chung and S. D. Lee. 2003. Mechanical properties and ultrasonic parameters of the apple flesh while in storage. *Journal of Korea Society for Agricultural Machinery* 28(3):239-244. (In Korea)
 6. Kim, K. B., S. Lee and M. S. Kim. 2007. Development of ultrasonic transducer for nondestructive evaluation of whole fruit. *Journal of Biosystems Engineering* 32(4):269-275. (In Korea)
 7. Kim, K. B., S. Lee, M. S. Kim and B. K. Cho. 2009. Determination of apple firmness by nondestructive ultrasonic measurement. *Postharvest Biology and Technology* 52:44-48.
 8. Kino, G. S. 1987. *Acoustic Waves-Devices, Imaging & Analog Signal Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
 9. Kinsler, L. E., A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders. 2000. *Fundamentals of Acoustics*. New York, Wiley, USA.
 10. Liljedahl, L. A. and J. A. Abbott. 1994. Changes in sonic resonance of 'Delicious' and 'Golden Delicious' apples undergoing accelerated ripening. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 37(3):907-912.
 11. Mizrach, A., U. Flitsanov and Y. Fuchs. 1997. An ultrasonic nondestructive method for measuring maturity of mango fruit. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 40(4):1107-1111.
 12. Tu, K., B. Nicolai and J. De Baerdemaeker. 2000. Effects of relative humidity on apple quality under simulated shelf temperature storage. *Scientia Horticulturae* 85:217-229.