바이오시스템공학 (*J. of Biosystems Eng.*)
Vol. 32, No. 4, pp. 269~275 (2007)

과실 비파괴평가용 초음파 변환기 개발

김기복 이상대 김만수

Development of Ultrasonic Transducer for Nondestructive Evaluation of Whole Fruit

K. B. Kim S. D. Lee M. S. Kim

Abstract

In this study, ultrasonic transducers for non-destructive contact measurement of whole fruits were developed. The design parameters for ultrasonic transducer such as acoustical impedance of fruits, kinds of piezoelectric materials, ultrasonic wave frequency, and transducer diameter were investigated. In order to match the acoustical impedance between piezoelectric material and fruit, various materials were fabricated and evaluated. Also to control the sensitivity and bandwidth of the ultrasonic transducer, various backing materials were fabricated and evaluated. Especially, the wear plate of the ultrasonic transducer was designed and fabricated considering the curvature of fruit. The central frequencies of two developed ultrasonic transducers were about 100 kHz and 200 kHz, respectively. With the developed ultrasonic transducers, non-destructive evaluation of the fruit will be possible.

Keywords : Ultrasonic transducer, Contact measurement, Whole fruit, Acoustical impedance matching, Nondestructive evaluation

1. 서 론

최근 농산물의 각종 품질을 비파괴적으로 측정할 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다. 여러 농산물 중에서 과실의 경도는 그 중요성에도 불구하고 비파괴적으로 측정할 수 있는 기술이 개발되어 있지 않다. 비파괴 측정기술에는 가시광과 근적외선을 이용한 분광분석법, 마이크로파를 이용한 토모그래피 기술, 핵자기 공명기술, 음향가진법, 초음파 기술 등이 있다. 이들 기술들은 각각 서로 다른특징을 가지고 있으며 이에 따라 적용대상이나 품질 평가인자 등이 서로 다르다. 여러 가지 비파괴측정 기술 중 초음파 기술은 의학 분야뿐만 아니라 식품 및 농산물의 내부 품질측정 등에 다양하게 응용될 수 있다. 특히, 초음파는 다른 비파괴 측정방법에서는 효과적으로 제공할 수 없는 경도 및 공동 등과 같은 내부 결함 판정에 매우 효과적인 기술이다.

농산물의 경우 적용 가능한 초음파 주파수는 1 MHz 이하의 주파수가 적당한 것으로 보고 되고 있다(Mizrach et al., 1989; Liljedahl 와 Abbott, 1994; Mizrach et al., 1997; Kim et al., 2003). 기존의 농산물에 초음파 기술를 적용한 연구는 과실에 적합한 초음파 변환기가 아닌 산업이나 공업용의 비파괴 초음파 변환기를 이용하였으며 이에 따라 초음파 변환기의 구조에 적합한 크기로 시료를 절단하여 측정하여야 한다. 망고와 같은 일부 시료에 대해서는 절단하지 않고 망고 과피에 초음파 변환기를 접촉하여 반대쪽에서 투과하는 신호를 측정한 사례가 있다(Mizrach et al., 1997). 일반적으로 초음파 변환기는 압전소자를 이용하여 제작된다. 이때 압전소

The article was submitted for publication in July 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in August 2007. The authors are Ki-Bok Kim, Principal Research Scientist, Safety Metrology Group, Division of Metrology for Quality Life, Korea Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, Korea, Sang-Dae Lee, Graduated Student, and Man-Soo Kim, Professor, Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea. Corresponding author: K. B. Kim, Principal Research Scientist, Safety Metrology Group, Division of Metrology for Quality Life, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, 305-340, Korea; E-mail: <kimkibok@kriss.re.kr>.

자 전면에 대상물체와 접촉하여 압전소자를 보호해주는 마모판을 부착하게 되는데 이러한 마모판의 음향학적 특성이 초음파 변환기의 송·수신 효율에 큰 영향을 미치게 된다. 마모판의 역할은 압전소자의 보호뿐만 아니라 압전소자와 대상 매질사이에서 발생하는 음향 임피던스 불일치를 완화시켜 압전소자에서 발생되어 매질에 입사된 초음파가 음향 임피던스 차이로 인한 초음파 반사를 줄여주는 역할을 하게 된다. 이로 인해 일반 공업용 초음파 변환기를 과실에 그대로 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

과실의 물성측정에 적용하기 위한 초음파 변환기는 과육을 절단한 시편이 아닌 씨방을 포함한 온전한 과실에 적합해야 한다. 따라서 본 연구는 과실을 절단하지 않고 비파괴 평가가 가능한 초음파 변환기를 개발하기 위해 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 압전소자

기존의 과실 시편에 대한 초음파 투과 실험 및 연구 결과를 분석한 결과 사과, 배, 복숭아의 경우 과실 시편 내에 입사된 초음파의 감쇠계수의 범위가 0.58~1.61 dB/mm로서 일반적인 공업용 재료 보다 매우 큰 감쇠특성을 나타내며 초음파 속도가 195~232 m/s 범위로서 공기에서의 초음파 속도보다 낮게 나타났다. 또한 과실 시편을 투과하여 수신되는 초음파 신호의 중심 주파수는 대체적으로 100 kHz 이하인 것으로 나타났다. 이와 같이 초음파의 감쇠가 심하게 나타나는 과실의 특성을 고려하여 본 연구에서는 초음파 발생특성을 나타내는 d_{33} 값과 초음파 수신특성을 나타내는 g_{33} 값이 큰 PZT 계열의 압전소자를 표 1과 같이 선정하였다.

Table 1 Piezo-electrical properties of piezo-electric material

Physical & Electrical property	PZT			
	K-1	K-2	P-1	P-2
Thickness coupling coefficient (%), k_t	48	52	52	47
Piezoelectric strain constant, d_{33}	220	700	190	600
Piezoelectric 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/s), c	4360	4615	4200	3940

나. 초음파 변환기 설계

과실용 초음파 변환기의 개발에는 초음파 주파수, 파형, 그리고 전파 방향에 따른 초음파 에너지의 형태를 고려해야 한다. 따라서 제작하고자 하는 과실용 초음파 변환기는 그림 1과 같이 과실의 물리적인 특성에 적합한 구조를 갖도록 하였으며 두께 진동모드의 빔 집속형 종파용 초음파 변환기를 설계하였다. 이 때 제작하고자하는 초음파 변환기의 첫 번째 공진주파수(f_r)는 압전소자의 두께와 초음파 속도의 함수로서 다음과 같이 계산된다.

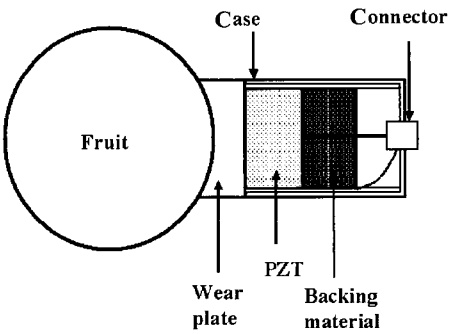


Fig. 1 Structure of focusing type ultrasonic transducer for fruits.

$$f_r = \frac{c}{2t} \tag{1}$$

여기서, c = 압전소자의 초음파 속도(m/s),
t = 압전소자의 두께(m).

본 연구에서는 100 kHz 및 200 kHz의 공진 주파수를 갖는 2종류의 초음파 변환기를 제작하였다.

과실과 직접 접촉하는 마모판(wear plate)은 압전소자를 보호하고 압전소자와 시험 대상체인 과실 사이의 음향 임피던스를 매칭시키기 위해 사용된다. 따라서 시험 대상체를 투과하는 초음파 에너지가 최대가 되기 위해서는 식 (2)와 같이 마모판의 음향 임피던스(Z_2)가 압전소자의 음향 임피던스(Z_1)와 시험 대상체의 음향 임피던스(Z_3)의 기하 평균이 되어야 한다(Kino, 1987). 이때, 마모판의 두께는 마모판을 투과하는 초음파 파장의 1/4 배가 되어야 한다.

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \tag{2}$$

과실의 음향 임피던스는 0.16~0.3 MRayl 범위를 갖는 것으로 나타났으며(Kim et al., 2003), 표 1에서 선정된 압전소자의 음향 임피던스와 과실의 음향 임피던스를 바탕으로 식 (2)를 이용하여 필요한 마모판의 음향 임피던스를 계산한 결과 2.19~3.24 MRayl 범위로 계산되었다. 이러한 범위의 음향 임피던스를 가지는 재료로서 테프론, 아크릴 그리고 실리콘 고무에 텅스텐 입자를 배합하여 제작한 재료를 선정하여 각각의 특성을 비교하였다. 표 2는 본 연구에서 선정된 마모

Table 2 Sound velocity, density and acoustical impedances of wear plate materials

Wear plate material	Sound velocity (m/s)	Density (kg/m^3)	Acoustical Impedance (MRayl)
Silicon rubber : Tungsten powder = 1 : 2.5	795	3930	3.13
Acrylic resin	1180	2670	3.15
Teflon	2200	1350	3.00

판 재료에 대한 초음파 속도와 밀도, 음향 임피던스를 측정한 결과를 나타낸다. 마모판의 두께는 설계 주파수가 100 kHz 일 때 파장의 1/4 배를 고려하여 약 4.3 mm로 제작하였으며 설계 주파수 200 kHz에서는 약 2.1 mm로 제작하였다. 또한 과실과 접촉하는 마모판은 과실과의 접촉 면적을 최대한로 하기 위해 과실의 곡률을 고려하여 곡률 반경을 약 60 mm로 제작하였다.

후면재는 압전소자에 의해 발생되어 압전소자의 뒤로 진행하는 초음파를 산란 및 흡수하고 초음파의 진동 폭을 줄여주는 역할을 한다. 따라서 후면재가 없는 경우에는 펄스의 폭이 넓어져 결과적으로는 좁은 폭의 주파수 성분을 지니는 공진형 특성을 나타내고, 후면재를 적용할 경우에는 펄스의 폭이 좁아져 광대역 특성을 나타내는 초음파를 발생하게 된다. 표 3은 입자크기가 1 μm, 100 μm, 150 μm, 250 μm인 텅스텐 입자와 150 μm 크기의 실리콘 입자를 다양한 무게 비의 에폭시와 배합하여 제작한 후면재의 초음파 속도, 밀도, 음향 임피던스를 측정한 결과를 나타낸다.

다. KLM 모델을 이용한 초음파 변환기 시뮬레이션

초음파 변환기의 최적 설계 값들을 찾기 위해 KLM 모델과 전송선로 이론을 이용하여 전면정합층, 후면재의 조건들을 바꾸어 가면서 초음파 변환기의 응답신호를 분석하였다. 박판형 압전소자의 전기-기계 결합 효과를 해석하기 위해 개발된 KLM 모델은 그림 2와 같이 표현된다(Krimholz et al., 1970). KLM 모델에서는 압전소자의 음향부분을 전송선로로 가정함으로써 압전소자와 마모판S이 직렬로 연결된 경우에도 물리적 해석이 쉽다는 장점이 있다. 시뮬레이션을 위하여 개발된 프로그램은 정합층이 하나인 KLM 모델을 이용하여 초음파 변환기를 회로망 형태로 구성한 후 왕복전달함수로 표현하여 초음파 변환기의 임펄스 응답을 얻는다. 이러한 시뮬레이션 과정을 통해 초음파 변환기 제작에 필요한 최적 설계변수와 응답 신호 예측이 가능하다.

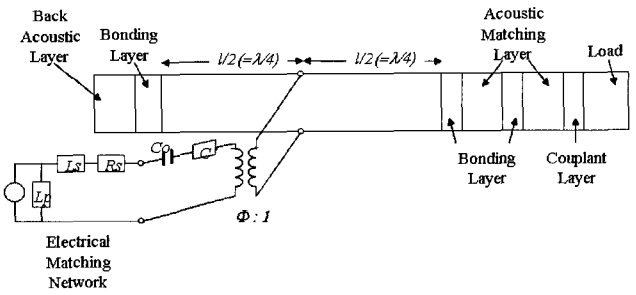


Fig. 2 Transmission line model of piezoelectric transducer in thickness vibration mode based on KLM model.

KLM 모델을 이용한 시뮬레이션 프로그램은 MATLAB software vor. 6.0(The MathWorks Inc., USA)을 이용하여 개발하였으며 초음파 변환기 제작을 위해 선정된 재료가 등방성 재료일 때 압전소자와 전면 정합층, 후면재에 대한 설계 조건을 적용하여 실제 초음파 변환기를 제작하지 않고도 최적에 가까운 초음파 변환기 제작 조건을 찾을 수 있도록 하였다.

라. 초음파 투과시험 장치

각각의 제작 조건에 따른 초음파 변환기의 성능을 평가하기 위해 초음파를 과실에 투과시켜 반대쪽에서 수신하는 초음파 투과 시험법을 적용하였다. 초음파 투과 시험을 위하여 적용된 초음파 송수신용 장비는 RITEC Inc.(USA)의 고출력 초음파 송신용 장비(SP-801)와 광대역 초음파 수신장비(BR-640)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 초음파 변환기 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션을 위해 사용된 실험 대상체는 지름 50 mm, 길

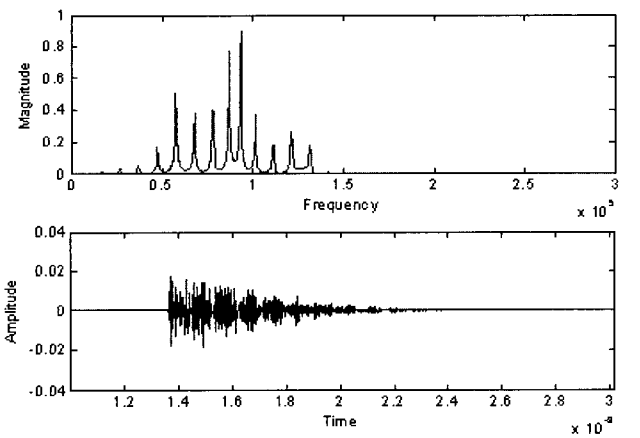
Table 3 Sound velocity, density and acoustical impedance of backing materials

Backing materials		Sound velocity (m/s)	Density (kg/m^3)	Acoustical impedance (MRayl)
Epoxy: Tungsten powder (100 ㎛)	1 : 2	1710	2395	4.0
	1 : 6	1286	4838	6.2
Epoxy: Tungsten powder (250 ㎛)	1 : 13	1050	9072	9.5
Epoxy: Silicon carbide (150 ㎛)	1 : 3	2049	2037	4.17
Epoxy: Silicon carbide (150 ㎛) : Tungsten powder (1 ㎛)	1 : 2 : 1	2081	2106	4.38

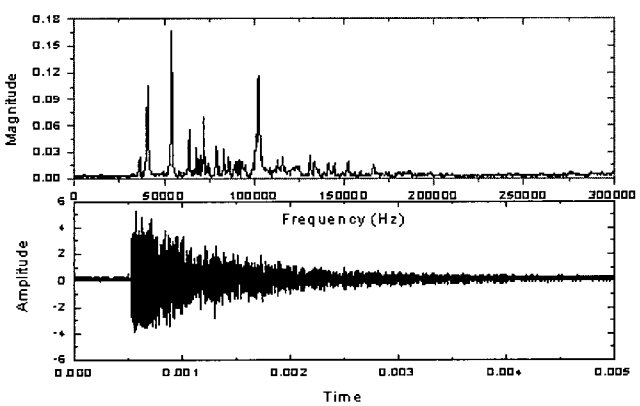
이 63 mm의 알루미늄 봉을 사용하였으며 실험 방법은 투과법을 사용하였다. 투과 대상을 과실로 하지 않고 금속을 사용한 것은 투과 대상의 물리적 성질 중 음향 임피던스와 투과 속도만을 이용하는 KLM 모델에서는 과실의 점탄성, 비선형 특성을 나타낼 수 없으므로 잘 알려진 금속인 알루미늄을 투과 대상으로 선정하였다.

실험 방법은 표 2에서 선정된 3가지 마모판 재료를 이용하여 제작된 초음파 변환기의 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 비교하였다. 제작된 초음파 변환기의 압전소자와 후면재는 K-2 압전소자와 4 MRayL 후면재를 사용하였다.

그림 3은 테프론 마모판을 사용한 초음파 변환기의 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 나타낸다. 그림 3에서 초음파 변환기의 응답 신호는 임펄스 전압의 차이로 응답 신호의 크기가 시뮬레이션 결과와 다르게 나타나고 있으나 주파수 성분은 비슷한 결과를 나타내고 있다. 그림 4는 아크릴 마모판을 사용한 초음파 변환기의 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 나타낸다. 아크릴은 테프론과 거의 같은 음향 임피던스

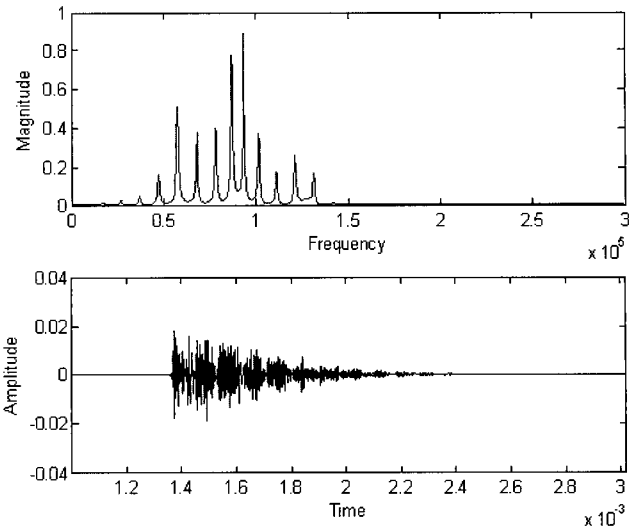


(a) The result of KLM model

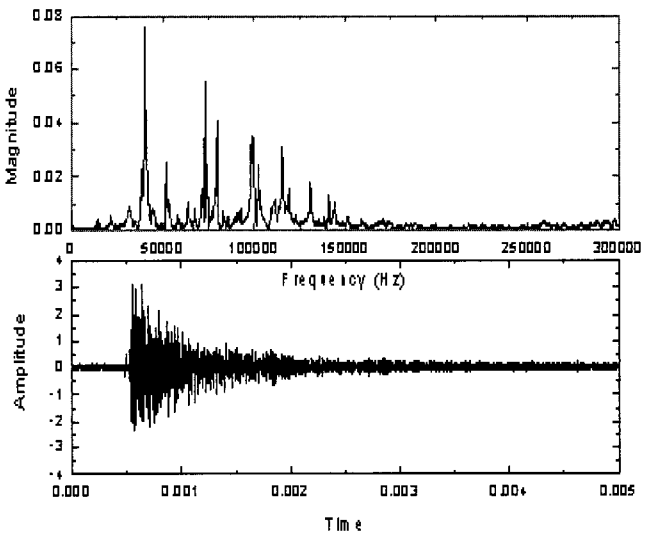


(b) The result of the experiment

Fig. 3 Impulse response and its frequency spectrum of ultrasonic transducer with teflon wear plate.



(a) The result of KLM model

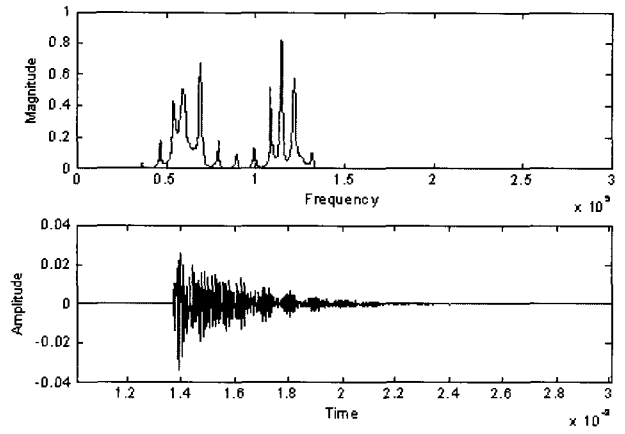


(b) The result of the experiment

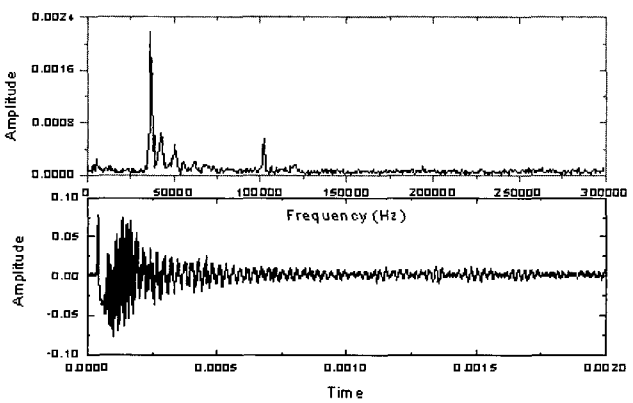
Fig. 4 Impulse response and its frequency spectrum of ultrasonic transducer with acrylic wear plate.

값을 갖고 있으나 테프론 보다 밀도가 낮아 초음파 응답 신호가 작게 나타났다. 이러한 결과는 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과에서 동일하게 나타나고 있다.

그림 5는 실리콘 러버와 텅스텐 입자를 배합하여 제작한 마모판으로 제작된 초음파 변환기의 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 나타낸다. 그림 5(a)에서 보는바와 같이 시뮬레이션 결과는 우수한 수신 특성을 나타내고 있다. 그러나 실리콘 러버와 텅스텐 입자를 배합하여 제작한 마모판은 선정된 다른 재료와 비슷한 음향 임피던스를 갖고 밀도도 높으나 마모판 내부에서 텅스텐 입자가 초음파를 산란 및 흡수하는 비등방성 재료이기 때문에 실제 실험 결과에서는 초음파 수신 신호가 매우 미약하게 나타났다. 따라서 실리콘 러버와 텅스



(a) The result of KLM model



(b) The result of the experiment

Fig. 5 Impulse response and its frequency spectrum of ultrasonic transducer with silicon rubber/tungsten powder wear plate.

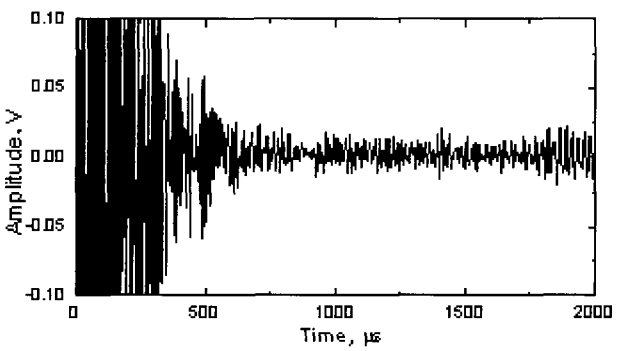
텐 입자를 배합하여 제작한 마모판은 초음파 변환기 제작 재료로는 부적합한 것으로 나타났다.

나. 설계 조건에 따른 초음파 변환기 성능평가

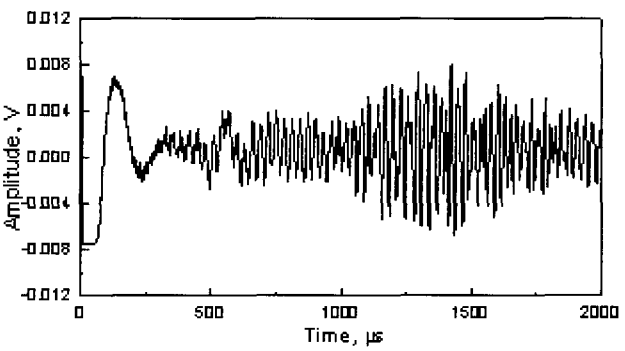
실리콘 러버와 텅스텐 입자를 배합하여 제작한 마모판은 시뮬레이션 검증 과정에서 초음파 변환기 제작에는 부적합한 것으로 나타나 제외하였다. 따라서 아크릴 마모판과 표 1의 4가지 압전소자를 이용하여 초음파 변환기를 제작하였으며 후면재는 에폭시만을 사용하였다. 각각의 초음파 변환기를 이용하여 사과에 대한 투과 실험을 수행하였다.

투과 실험 결과 K-2 압전소자와 P-2 압전소자를 송수신 초음파 변환기로 사용하는 것이 우수한 수신 특성을 나타내었다. 그림 6(a)는 K-2 압전소자와 아크릴 마모판으로 제작된 초음파 변환기의 실험 결과로 후면재의 음향 임피던스가 낮아서 초음파 가진 신호가 크게 나타나고 있다. 시험에 사용된 사과는 직경이 약 100 mm인 후지사과로서 사과를 투과한 초음파 신호가 약 500 μs 부근에서 미약하게 수신되었다. 사과를 투과하여 수신된 초음파 신호가 초음파 가진 신호에 중첩되어 투과 신호를 구분하기가 어려우므로 적절한 후면재의 선택이 필요한 것으로 나타났다.

그림 6(b)은 아크릴 마모판과 음향 임피던스 값이 9.5 MRayl (에폭시 : 텅스텐(250 μm) = 1 : 13)인 후면재를 사용하여 제작한 초음파 변환기의 실험 결과를 나타낸다. 이 때 송신 초음파 변환기는 K-2 압전소자, 수신 초음파 변환기는 P-2 압전소자를 이용하여 제작된 초음파 변환기를 사용하였다. 그림 6(b)는 음향 임피던스 값이 매우 큰 후면재를 적용한 결과로서 초음파 가진 신호를 크게 감소시킬 수 있었으며 이에 따라 사과를 투과한 초음파 신호를 약 500 μs 부근에서 확실하게 확인할 수 있다. 따라서 사과의 직경이 약 100 mm이므로 사과를 투과하여 수신되는 초음파 신호의 속도는 약 200 m/s로 계산되어 사과과육에 대한 초음파 속도의 측정값인 기존의 연구결과(Kim et al., 2003)와 거의 비슷하게 나타났다.



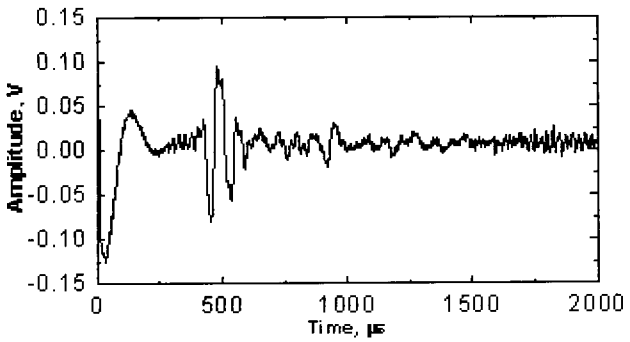
(a) Epoxy backing



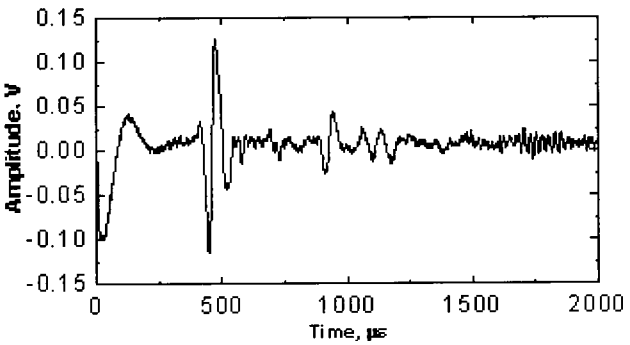
(b) Epoxy : tungsten powder = 1 : 13 backing

Fig. 6 Transmitted ultrasonic signal through the apple by fabricated ultrasonic transducer with acrylic wear plate.

그림 7은 테프론 마모판과 에폭시 : 실리콘(150 μm) : 텅스텐(1 μm) = 1 : 2 : 1의 비율로 제작한 후면재로 제작된 초음파 변환기를 이용하여 사과에 대한 투과 실험을 수행한 결과로서 초음파 수신 신호의 감도가 크게 향상되었다. 그림 7(a)는 P-2 압전소자로 제작된 초음파 변환기를 송수신용으로 사



(a) P-2 piezoelectric material



(b) K-2 piezoelectric material

Fig. 7 Transmitted ultrasonic signal through the apple by the fabricated ultrasonic transducer with teflon wear plate.

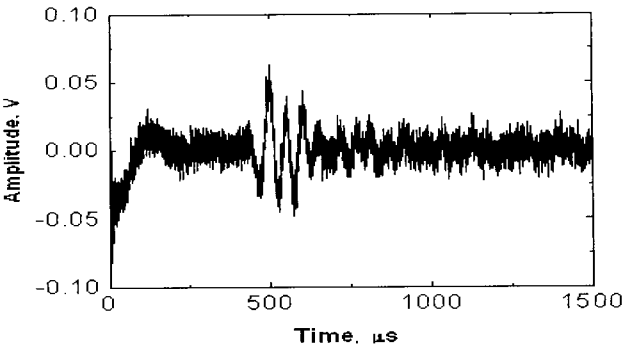


Fig. 8 Transmitted ultrasonic signal through the apple by 200 kHz of fabricated ultrasonic transducer.

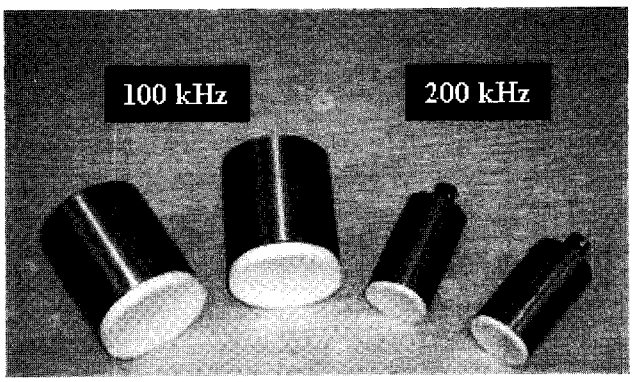


Fig. 9 The 100 kHz and 200 kHz fabricated ultrasonic transducers for fruit.

용한 실험 결과를 나타내고 그림 7(b)는 K-2 압전소자로 제작된 초음파 변환기를 송수신용으로 사용한 실험 결과이다. 다른 제작 조건이 동일한 경우, P-2 압전소자로 제작된 초음파 변환기의 응답 신호크기는 약 0.08 V이고 K-2 압전소자로 제작된 초음파 변환기의 응답신호크기는 약 0.13 V로 K-2 압전소자의 수신 감도가 더 우수한 것으로 나타났다.

지금까지의 100 kHz 초음파 변환기의 최적 제작 조건을 토대로 하여 중심 주파수가 200 kHz인 초음파 변환기를 제작하였다. 200 kHz 초음파 변환기의 압전소자는 직경이 20 mm, 두께가 10 mm로서 100 kHz 초음파 변환기 크기를 작게 제작할 수 있다. 이때 마모판은 테프론으로 하였으며 후면재의 제작조건은 에폭시와 텅스텐 분말을 1 : 2로 배합하여 제작하였다. 그림 8은 200 kHz 변환기를 이용한 사과 투과 신호를 나타낸다. 그림 8에서 투과 신호의 수신 감도는 그림 7(a)의 100 kHz 변환기 보다 낮게 나타났으나 초음파 측정 주파수 대역이 넓어지는 장점이 있으므로 앞으로 많은 활용이 기대된다. 그림 9는 본 연구에서 최종적으로 개발된 100 kHz와 200 kHz 초음파 변환기들을 나타낸다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 과실의 비파괴 평가에 적합한 초음파 변환기를 제작하기 위하여 수행되었다. 최적 초음파 변환기 제작 조건을 검토하기 위해 KLM 모델을 적용하였다. 송수신 효율이 우수한 최적의 초음파 변환기를 개발하기 위해 4가지 압전소자와 3가지 종류의 마모판을 적용하여 비교하였다. 또한 최적의 수신 감도를 갖는 후면재 조건을 찾기 위해 다양한 조건의 배합 비율을 적용하여 초음파 변환기를 제작한 후 사과에 대한 초음파 투과시험을 수행하여 특성을 평가하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 과실에 적합한 초음파 변환기의 마모판으로서는 곡률을 가지는 형태로 가공한 테프론이 우수한 초음파 수신 특성을 나타내었다.
2. 100 kHz의 중심주파수를 가지는 초음파 변환기에서의 최적 설계 조건은 압전소자 K-2, 테프론 마모판, 후면재는 에폭시 : 실리콘 카바이드(150 μm) : 텅스텐(1 μm)의 배합배율이 1 : 2 : 1인 경우로 나타났다.

3. 최적 설계 조건으로 제작된 초음파 변환기를 이용하여 사과에 대한 투과 실험을 한 결과 사과를 투과한 초음파 신호를 확인할 수 있었으며 사과를 투과한 초음파의 속도가 약 200 m/s로 계산되어 기존의 사과 과육에 대한 실험 결과와 일치하였다.

4. 100 kHz 초음파 변환기의 최적 제작조건을 200 kHz 초음파 변환기 제작에 적용한 결과 수신 감도는 100 kHz 변환기 보다 감소하였으나 초음파 변환기의 측정 주파수 대역이 넓어져 추후 초음파를 이용한 과실의 비파괴 평가에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 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. J. of KSAM 28(3):239-244.
2. Kino, G. S. 1987. Acoustic waves-Devices, imaging & analog signal processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
3. 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.
4. Mizrach, A., N. Galili and G. Rosenhouse. 1989. Determination of fruit and vegetable properties by ultrasonic excitation. Trans. of the ASAE 32(6):2053-2058.
5. Mizrach, A., U. Flitsanov and Y. Fuchs. 1997. An ultrasonic nondestructive method for measuring maturity of mango fruit. Trans. of the ASAE 40(4):1107-1111.
6. Krimholz, R., D. Leedom and G. Matthaei. 1970. New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers. Electronics Letters 6:398-399.