과실용 초음파 센서 개발에 관한 연구+

Study on Development of Ultrasonic Transducer for Fruit

김기복* 김만수** 이상대** 윤동진*
정회원 정회원
K.B.Kim M.S.Kim S.D.Lee D.J.Yoon

1. 서론

최근 전자산업의 발달로 첨단기술의 농업적 응용에 필요한 각종 센서가 개발되고 있어 이를 이용한 농산물의 각종 품질을 비파괴적으로 측정할 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다. 여러 농산물 중 과실의 경도와 같은 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 낮다. 광학적인 방법 또는 과육의 세포표면 분석 방법 등을 이용하여 물성 등을 간접적으로 측정하기 위한 연구가 수행된 바 있으나 실용화된 사례는 거의 없는 실정이다.

선진 외국에서는 이미 농산물에 대한 여러 가지 비파괴 평가기술들을 적용하기 위한 연구를 수행하고 있으며 주로 가시광과 근적외선을 이용한 분광분석법, 마이크로파를 이용한 토모그래피 기술, 핵자기 공명기술, 음향가진법, 초음파 기술 등을 적용하고 있다. 이들 기술들은 각각 서로 다른 특징을 가지며 이에 따라 적용대상이나 품질 평가인자 등이 서로 다르다. 이들 기술 중 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 측정 가능한 초음파 주파수는 1 MHz 이하의 주파수가 적당한 것으로 보고되고 있다(Liljedahl 와 Abbott, 1994, Mizrach, et. al., 1987, Mizrach, et. al., 1997). 지금까지의 초음파 응용 연구는 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. 초음파 기술은 상대적으로 육류의 육질 판정에 많이 이용되고 있으며 과실에 대해서는 주로 기초연구로서 수행되고 있는데 이것은 과실의 경우 그 조직이 육류와 매우 다르기 때문에 초음파의 전파특성도 매

+ 이 연구는 2001년도 농림부의 첨단기술개발과제 지원에 의해 수행되었습니다.
* 한국표준과학연구원 환경·안전계측센터
** 충남대학교 농업생명과학대학 농업기계공학과

우 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.

과실에 대한 초음파 기술은 과육시편의 측정이 아닌 시방을 포함한 온전한 과실에 대하여 측정하는 것이 바람직하다. 그러나 현재까지 과실의 시방을 포함한 온전한 과실을 투과하여 송신할 수 있는 초음파 센서의 개발은 거의 전무한 실정이다. 본 연구진은 그동안의 특수한 분야에 사용될 수 있는 비파괴 검사용 초음파 센서의 개발 경험(김 등, 2002, 김 등 2003)을 활용하여 과실을 절단하지 않고 직접 접촉하여 투과할 수 있는 송수신용 초음파 센서를 개발하기 위하여 수행하였다. 이를 위하여 과실에 적합한 압전재료를 선택하였으며 과실 면과 직접 접촉하는 센서의 전면 접촉부를 곡면으로 설계하였으며 적절한 음향임피던스 정합조건을 만족하는 재료를 개발하였다.

2. 초음파 탐촉자 설계 및 제작

초음파 센서는 초음파를 생성하고 감지하는 장치로서 전기에너지를 초음파 에너지로 변환시킴과 동시에 수신된 초음파 에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치이다. 과실용 초음파 센서의 개발에는 초음파 주파수, 파형, 그리고 전파방향과 관련하여 초음파 에너지의 형태를 고려해야 한다. 현재 과실 물성측정을 위한 전용 초음파 센서가 상용으로 개발되어 있지 않은 실정이므로 본 연구에서는 측정하고자 하는 과실의 물리적인 특성에 적합한 센서 구조로서 압전소자의 두께 진동모드의 빔 집속형 종파용 초음파를 고려하였다. 초음파 센서는 압전재료, backing, acoustic impedance matching layer 또는 wear plate, wedge, 접합 층, matching network로 구성된다. 감도, 주파수 스펙트럼 등과 같은 초음파 센서의 성능은 각각의 구성요소의 재질, 크기, 접합의 상태에 의존한다. 그림 1은 본 연구에서 설계·제작한 센서의 개략도를 나타낸다.

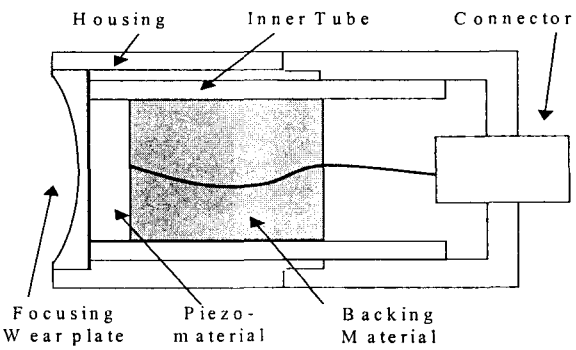

Fig. 1. Design of focusing type ultrasonic transducer for fruits.

가. 압전재료

기존의 과실 시편에 대한 초음파 투과 실험 및 연구를 분석한 결과 사과, 배, 복숭아의 경우 과실 시편 내에서 입사된 초음파의 감쇠계수의 범위가 0.58~1.61 dB/mm 범위로서 일반적인 공업용 재료 보다 매우 큰 감쇠특성을 나타내고 있을 뿐만 아니라 초음파 속도 범위도 195~232 m/sec로서 공기중의 초음파 속도보다 낮게 나타나고 있다(Kim et. al., 2002a). 또한 과실 시편을 투과하여 수신되는 초음파 신호의 중심 주파수는 대체적으로 100 kHz 이하인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 초음파 센서 제작용 압전재료로서는 초음파의 송수신 특성이 양호한 저주파 초음파 센서를 고려하여 표 1에서 보는 바와 같은 물성을 가지는 세라믹 계열의 압전재료를 선정하였으며 압전재료의 압전구성방정식을 구성하는 d 값 및 g 값을 고려하여 선정하였다. 여기서 d 값이 큰 재료는 초음파의 발생특성이 우수함을 의미하고 g 값이 큰 재료는 초음파의 수신특성이 우수함을 나타낸다.

한편, 초음파 센서의 주파수는 두께진동모드를 이용하여 100 kHz 부근의 공진주파수를 가지도록 설계하였으며 대략 직경 40 mm, 두께 20 mm로 하였다.

Table 1. Physical property of piezo-electric ceramic.

Physical & electrical property	K-1	K-2	P-1	P-2
Thickness coupling coefficient (%), k_t	48	52	52	47
Piezoelectric strain constant ($\times 10^{-12}$ m/V), d_{33}	220	700	190	600
Piezoelectric voltage constant ($\times 10^{-12}$ mV/N), g_{33}	46	19.8	54	18
Mechanical Q, 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. 과실 접촉을 위한 초음파 센서 접촉부 곡면설계

초음파 센서가 과실 표면에 직접 접촉하게 될 접촉부는 일종의 wear plate로서 초음파 투과효율에 관계되어 음향임피던스와 두께가 제작 변수이며 마찰이나 충격에 대한 내성을 나타내는 견고성이 중요한 제작 변수이다. 그러나 본 연구에서는 센서가 과실에 집적 접촉할 뿐만 아니라 센서 접촉부분이 과실과 완전히 접촉되어야 초음파 누설을 최소화할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 초음파 센서 전면부의 재질은 실리콘 rubber(다우코닝사, 미국)를 이용하여 제작하였다. 적절한 전면부의 음향임피던스(Z_2)와 두께(L)은 센서와 과실의 사이에

서 음파의 완전투과 조건과 (1/4) 파장(λ)조건을 이용하여 결정하였으며 다음과 같다.

$$Z_2=\sqrt{Z_1Z_3} \quad \text{----------(1)}$$

$$L=\frac{\lambda}{4} \quad \text{----------(2)}$$

여기서, 과실의 음향임피던스 Z_3은 0.16~0.3 MRayL, 압전재료의 음향임피던스 Z_1은 Table 1에서 보는바와 같다.

식(1), (2)의 설계조건에서 필요한 전면 접촉부의 음향임피던스 범위는 2.19~3.24 MRaL, 두께는 본 연구의 설계주파수인 100 kHz에서 약 4.3 mm로 계산되었다.
한편, 접촉부는 과실 표면의 굴곡을 감안하여 일정한 곡률을 가지는 구조이어야 한다. 시중에 유통되고 있는 다양한 크기의 사과를 구입하여 곡률계를 이용하여 측정한 결과 곡률의 범위가 57~62 mm로 나타나 중간 정도의 값인 60 mm를 선택하여 센서 접촉부의 곡면을 설계하였다. 또한 설계에서 나타난 전면 접촉부의 음향임피던스를 구하기 위하여 silicon rubber와 텅스텐 입자를 적절한 배합비율로 배합하여 사용하였다.

다. backing 재료 제작

초음파 센서에서 발생된 초음파 신호의 진동주기는 분해능과 관계되며 주파수 밴드폭은 감도와 사용 주파수 범위와 관계된다. Backing은 압전소자의 뒷 부분에 위치하여 압전소자의 진동을 제한하는 damper 역할을 하여 분해능을 높이고 주파수 대역폭을 넓히는 작용을 한다. 따라서 효과적인 damper로써의 역할을 위해서 backing의 음향임피던스를 압전소자의 임피던스와 거의 같도록 하여 backing에로의 음파의 완전 투과가 되도록 하거나 용도에 따라서 주파수 대역폭을 고려하여 backing의 음향임피던스를 조절하여야 한다. 따라서 본 연구에서 선정된 압전재료의 음향임피던스를 고려하여 적절한 backing 재료의 제작 조건을 찾고자 하였다. 즉, 센서 내에서 반사되는 초음파 신호를 효과적으로 분산시키기 위하여 1~50μ의 입자 크기를 가지는 텅스텐 분말과 에폭시 접합제를 적절히 배합하여 후면재를 제작하여 밀도와 초음파 속도를 각각 측정하여 적절한 후면재 배합 비율을 찾고자 하였다. backing 재료로서 Epoxy resin Araldite (미국)를 경화제와 4:1의 비율로 혼합한 것과 Uralite 3148을 경화제와 5:2로 배합한 각각에 대하여 텅스텐 분말의 비율을 증가시키면서 잘 혼합하여 Araldite를 사용한 것은 90℃에서 3시간 동안 가열 경화하였으며, Uralite를 사용한 것은 상온에서 24시간 경화시켰다. 비교시험이 용이하도록 cutting과 lapping을 통하여 두께를 10 mm로 통일하여 초음파 속도와 밀도를 각각 측정하여 음향임피던스를 계산하였으며 그 결과는 표 2에서 보는바와 같다.

Table 2. Characteristics of backing specimens manufactured with several conditions.

Sample	Ratio (epoxy:tungsten)	Density (g/㎤)	Velocity (m/s)	Acoustic Impedance (Mega RayL)	Attenuation Coefficient (1/m)
A-1	1 : 0	1.15	2836.1	3.3	8
A-2	1 : 1	1.71	2394.9	4.1	179.1
A-3	1 : 2	2.59	1562.2	4.1	1344.7
A-4	1 : 3	3.57	1704.6	6.1	705
A-5	1 : 4	4.18	1720.8	7.2	147.3
A-6	1 : 5	5.05	1690.1	8.5	414.3
A-7	1 : 6	2.7	1727.1	9.8	348
U-1	1 : 0	1.01	1582.9	1.6	1311.8
U-2	1 : 1	1.98	866.5	1.7	3932.9
U-3	1 : 2	2.53	719.2	1.8	4015.6
U-4	1 : 3	3.2	815.9	2.6	4061.5
U-5	1 : 4	3.99	886.7	3.5	3566.9
U-6	1 : 5	4.56	929.2	4.2	2505.6
U-7	1 : 6	5.22	949.7	5	2639.5

3. 개발된 탐촉자를 이용한 과실 투과 실험

가. 초음파 투과시험 장치장치

개발된 초음파 센서를 이용한 과실 투과실험 장치는 그림 2에서 보는바와 같다(Kim. et. al., 2002c). 인가전압이 큰 tone-burst를 과실 시편에 투과시켜 반대쪽에서 초음파를 수신하는 초음파 투과시험법을 적용하였다. 초음파 펄서/리시버는 고출력 초음파 송수신이 가능한 RITEC Square Wave Pulser SP-801과 RITEC Broadband Receiver BR-640을 사용하였다.

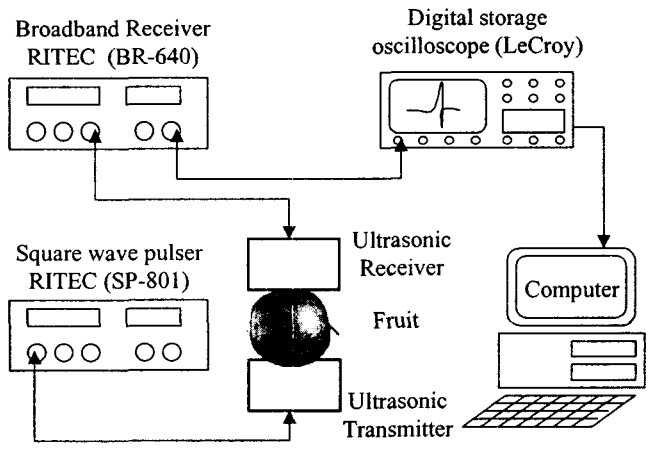

Fig. 2. Ultrasonic measurement system

Fig. 3. Fabricated ultrasonic transducers and apple

나. 초음파 투과 신호분석

초음파 신호의 투과를 확인하기 위하여 사과 내 초음파의 투과길이가 서로 다른 시료를 대상으로 초음파 투과시험을 수행하였다. 그림 4는 사과 시료를 투과하여 수신되는 신호를 나타내는 것으로서 그림 4(a)는 시방을 포함한 사과 내 초음파의 투과길이가 100 mm일 때이며 그림 4(b)는 초음파의 투과길이가 60 mm일 때의 결과를 나타낸다. 그림에서 투과길이가 상대적으로 짧은 경우 최초로 수신되는 신호(그림 4(b)의 "A")는 메인 방 신호와 겹쳐서 나타나고 있으며 그림 4(b)와 같이 투과길이가 길어짐에 따라 수신 센서에 최초로 수신되는 신호(그림4(a)의 "A")는 상대적으로 투과길이가 60 mm 일 때 보다 늦게 수신되는 것으로 나타났다. 여기서 각각의 수신신호는 그림4(a)의 경우 약 0.5 ms, 그림4(b)의 경우 0.35ms 정도로 측정되었는데 사과에서의 초음파 속도를 약 200 m/s로 가정할 경우 초음파 수신시간과 대체적으로 잘 들어맞는 것으로 분석되었다. 또한 투과 길이가 늘어남에 따라 수신신호 파형의 크기도 감소하였는데 계산결과 약 9.5 dB 정도로 신호 크기가 감소하는 것으로 나타났으며 주파수 분석 결과 대체적으로 100 kHz이하의 주파수 성분을 많이 나타내는 것으로 분석되었다. 한편 그림에서 "B"로 표시되는 비교적 크게 수신되는 신호는 분석결과 사과표면을 따라 전파하는 초음파 신호인 것으로 분석되었다.

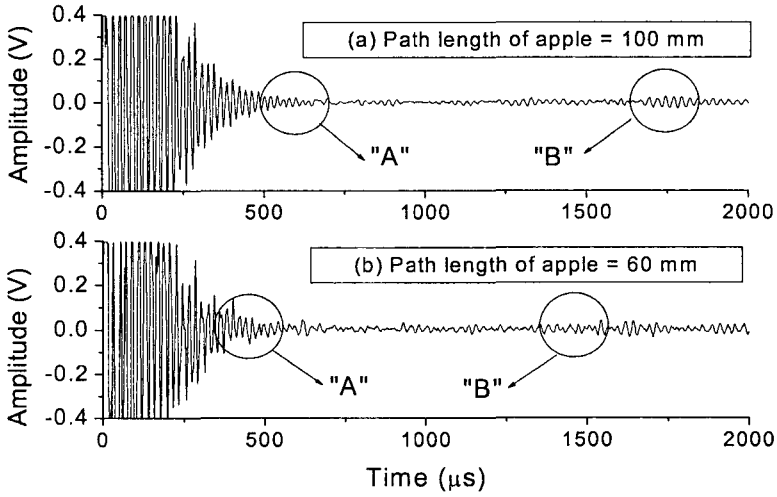

Fig. 4. Transmitted ultrasonic signal through the apple by fabricated ultrasonic transducers

4. 요약 및 결론

본 연구는 과실물성 측정에 적합한 초음파 센서를 개발하기 위하여 수행되었다. 이를 위

하여 과실 내부를 효율적으로 투과하여 수신할 수 있는 압전재료를 선정하였다. 초음파 센서와 과실이 접촉하는 부분의 센서 전면재를 제작하기 위하여 초음파의 완전투과조건을 이용하여 적절한 곡률과 음향임피던스를 가지는 재료를 개발하였다. 초음파 센서의 후방에서 산란하는 초음파 신호를 효과적으로 흡수하고 분산시키기 위한 backing 재료를 개발하였다. 제작된 초음파 센서를 이용하여 초음파 투과길이가 서로 다른 사과시료에 대하여 송수신 실험을 수행한 결과 과실을 절단하지 않고 초음파의 송수신이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 투과길이가 짧을 경우 최초 수신신호는 송신 센서의 메인 방 신호에 겹쳐서 나타나 초음파 수신센서의 성능을 개선해야 할 것으로 판단된다. 또한 전체적으로 감도를 향상시키기 위한 센서 제작조건에 대한 연구가 수행되어야 하며 사과표면을 따라 전파하는 신호를 분리하여 수신할 수 있는 방법을 개발해야 할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 김기복, 김병극, 이승석. 2002. PVDF 및 P(VDF-TrFE)를 이용한 고주파수 수침용 초음파 탐촉자 개발 및 평가. 한국비파괴검사학회지 22(1):1-8.
2. 김기복, 김병극, 이승석, 윤남원. 2003. 고온 접촉식 탐상용 초음파 탐촉자 개발 및 평가. 한국비파괴검사학회지 23(1):14-20.
3. Kim, K. B., M. S. Kim, H. M. Jung, and B. Ahn. 2002a. Mechanical property of fruit by ultrasonic parameters. Proceeding of International Symposium on Automation and Mechatronics of Agricultural and Bioproduction System, Chiayi, Taiwan, Vol 1:119-129.
4. Kim, K. B., M. S. Kim, H. M. Jung, and B. Ahn. 2002b. Prediction model for mechanical property of fruit using ultrasonic parameters. Proceedings of the KSNT Autumn Conference 57-62.
5. Kim, K. B., B. Ahn, H. M. Jung, M. S. Kim. 2002c. A basic study on measurement of ultrasonic parameters of fruits. Proceedings of the KSAM 2002 Summer Conference 7(2):382-387.
6. Kim, M. S., L. Seo, K. B. Kim, and H. M. Jung. 2002d. Measurement of firmness in apples using ultrasonic techniques (II) - Development of the prediction model for apparent elastic modulus and bioyield strength of the apples -. Proceedings of the KSAM 2002 Winter Conference 7(1):471-478.
7. 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.
8. 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.
9. 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.