

과실용 비접촉 초음파 센서 개발을 위한 연구⁺

Study on Development of Non-contact Ultrasonic Transducer for Fruit

김기복*	이상대*	김만수**	박정길**	김기석**
정희원	정희원	정희원	정희원	정희원
K. B. Kim	S. D. Lee	M. S. Kim	J. K. Park	G. S. Kim

1. 서론

생활 패턴의 변화와 소득 수준의 향상으로 인해 과실류에 대한 소비자의 기호 성향이 고급화 되고 신선도를 추구하는 경향이 증가하고 있다. 이에 따라 과실의 객관적인 품질판정기술 개발의 필요성이 커지고 있는 실정이다.

과실의 품질 인자들 중에서 경도는 저장 및 유통과정에서 발생하는 부패 등과 밀접한 연관이 있어 이미 외국에서는 많은 연구가 되었으며 소비자의 구매 행위 시 가장 중요한 선택 기준이 되고 있다. 사과와 감의 경우 미국에서 품질 평가 기준으로 파괴적 측정법인 Magness -Talyer(MT) 측정법이 이용되고 있으나 아직 비파괴적으로 경도를 측정하는 방법이 실용화된 것은 거의 없는 실정이며 초음파를 이용하기 위한 연구가 시도되고 있다(Liljedahl and Abbott, 1994, Mizrach. et al, 1997, Kim et al, 2003a, 2003b).

과실의 경도 판정에 초음파 기술을 적용하면 비교적 간단하게 측정시스템을 구성할 수 있으며 검사 대상체와 검사자에게 위험 요소가 전혀 없고 초음파 검사 결과를 실시간으로 알 수 있어 기존에 연구되고 있는 당도 및 산도 온라인 선과 시스템과 연계하여 선과 시스템을 자동화할 수 있다. 그러나 현재까지 개발된 비접촉 초음파 센서는 공업용이며 공기 중에서 감소가 심한 초음파의 특성으로 인해 제작이 어려워 매우 고가의 제품으로 구성되어 있다. 이러한 상용 비접촉 초음파 센서를 바로 경도 측정 시스템에 이용하는 데는 비용이나 센서의 작동 특성상 여러 가지 어려움이 존재한다.

본 연구는 경도 측정 시스템의 제작비용을 절감하고 과실에 적합한 비접촉 초음파 센서를 개발하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

가. 비접촉 초음파 센서의 구조

제작하고자 하는 초음파 센서는 비접촉식 초음파 센서이며 하나의 초음파 센서가 송신과 수

* 한국표준과학연구원 삶의질표준부 안전그룹

** 충남대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학과

* 본 연구는 농촌진흥청 농업특정 연구과제의 연구비 지원에 의해 수행되었음

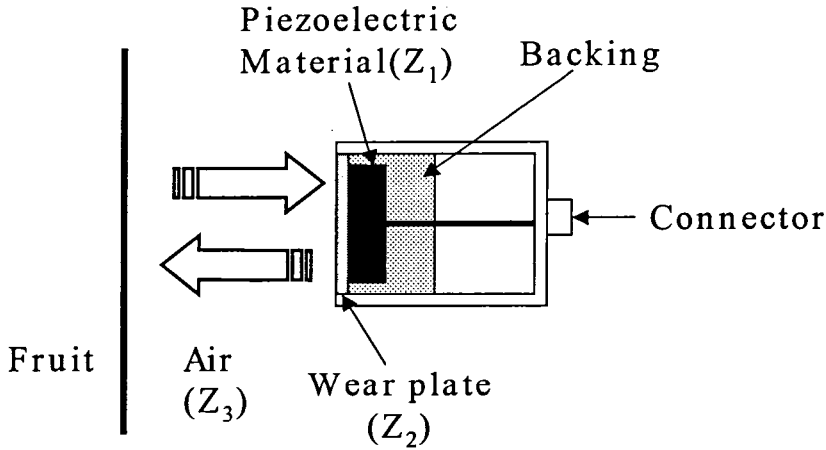


Fig. 2. Design of ultrasonic transducer.

신 두 가지 역할을 하게 된다. 초음파 센서의 구조는 그림 1과 같이 전면 정합층, 압전 소자, 후면재, 케이스 그리고 커넥터로 구성된다.

나. 비접촉 초음파 센서의 설계

공기는 밀도(1.2kg/m^3)와 음향 임피던스(0.0004MRayL)가 낮아 초음파의 감쇠가 크게 나타난다. 비접촉식 초음파 센서는 감쇠가 심한 공기를 투과하여야 하므로 에너지 변환 효율이 좋고 높은 출력을 갖는 압전 소자를 선정하였다. 이를 위해 압전소자는 송신 특성을 나타내는 d 값과 에너지 변환 효율을 나타내는 Q 값이 큰 재료를 선정하였다. 압전 소자는 1-3 composite와 PZT C-62를 선정하였으며 이들의 물성은 표 1과 같다. 감쇠가 심한 공기를 투과하기 위해 초음파 센서의 중심 주파수는 1MHz 로 설계하였다.

전면 정합층은 압전 소자와 공기층 사이에 위치하는 일종의 wear plate이다. 이 부분은 초음파의 투과효율과 관계되며 음향임피던스와 두께가 제작 변수가 된다. 특히, 공기와 같이 음향 임피던스가 낮은 대상일 때는 적절한 전면 정합층의 선정이 초음파 센서 제작에 있어서 가장 큰 변수가 된다. 전면 정합층의 음향임피던스와 두께는 다음 식에 의해 계산된다(Kino, 1987).

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (1)$$

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

여기서, Z_1 = 압전소자의 음향임피던스, Z_2 = 전면 정합층의 음향임피던스

Z_3 = 과실의 음향임피던스, λ = 파장, L = 전면 정합층의 두께

위 식에 의해 이론적인 전면 정합층의 음향임피던스는 0.073~0.118 MRayL이다. 전면 정합층으로 사용할 수 있는 재료 중에는 이론적으로 계산된 값과 같은 재료가 존재하지 않으므로 이와 가장 유사한 값을 갖는 재료를 표 2와 같이 선정하였다.

후면재는 압전소자의 뒷부분에 위치하여 압전소자의 진동을 제한하는 damper 역할을 하며 분해능을 높이고 주파수 대역폭을 넓히는 작용을 한다. 본 연구에서는 선정된 압전소자의 음향임피던스를 고려하여 적절한 후면재의 제작 조건을 찾고자 하였다. 표 3은 제작 조건에 따른 후면재의 음향임피던스 값을 나타낸다.

Table 1. Physical and electrical properties of piezoelectric materials.

Physical & Electrical property	Piezoelectric material	
	1-3 composite	PZT C-62
Thickness coupling coefficient (%), kt	0.48	52
Piezoelectric strain constant, d_{33}	583	700
Piezoelectric voltage constant, g_{33}	19.1	19.8
Mechanical Quality factor, Q_M	65	30
Frequency constant (kHz-m), Nt	-	2032
Acoustic impedance (MRayl), Z_a	13.4	35
Sound velocity (m/sec), V_s	3200	4615

Table 3. Physical properties of wear plates.

	velocity(m/sec)	Density(kg/m ³)	Impedance(MRayL)
Phenolic	1420	1340	1.9
Epoxy	2640	1202	3.17
Paper	820	500	0.41
Teflon	1350	2200	3

Table 4. Acoustic impedance of backing materials.

	Velocity (m/sec)	Density (kg/m ³)	Impedance (MRayL)
Epoxy(Araldite)	2620	1140	2.98
Epoxy:Tungsten = 1:1	1603	1954	3.1
Epoxy:Tungsten = 1:2	1361	2782	3.8
Epoxy:Tungsten = 1:2.5	1323	3080	4.1

3. 결과 및 고찰

개발된 초음파 센서를 이용하여 반사 실험을 하기 위해 그림 2와 같은 측정 장치를 구성하였

다. 실험 장치는 고풍력 초음파 송수신이 가능한 JSR 900V amp. Pulser/receiver, 디지털 오실로스코프(500MHz sampling rate, Tektronix Inc, USA)와 거리 조절이 가능한 센서 지그로 구성되어 있다. 그림 3은 설계 조건에 따라 선정된 재료를 이용하여 제작된 비접촉 초음파 센서의 사진이다.

선정된 두개의 압전 소자와 phenolic 전면 정합층을 이용하여 표 3의 후면재 조건에 따라 초음파 센서를 제작하여 알루미늄 바닥과 50mm 간격을 두고 반사 실험을 수행하였다. 선정된 두개의 압전 소자 중에서 PZT C-62에서는 반사 신호가 나타나지 않았으며 이는 전면 정합층으로 선정된 다른 재료를 이용하여 제작한 초음파 센서에서도 같은 결과가 나타났다. 공기와의 음향 임피던스 차이가 크고 초음파 발생 특성(d_{33})만 큰 PZT C-62는 비접촉 초음파 센서용 압전 소자로 적합하지 않은 것으로 나타났다. 선정된 후면재 조건에서는 후면재의 효과가 가장 적은 액폭시만으로 제작된 후면재의 수신 특성을 가장 우수한 것으로 나타났다. 그림 4은 후면재의 두께에 의한 영향을 알아보기 위해 1-3 composite에 phenolic 전면 정합층을 이용하여 초음파 센서를 제작한 후 후면재인 epoxy층 두께를 조절하여 실험한 결과이다.

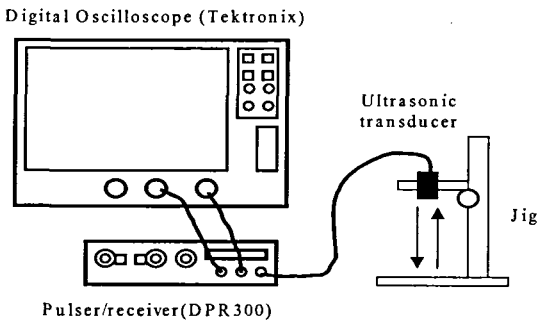


Fig. 5. Ultrasonic measurement system.

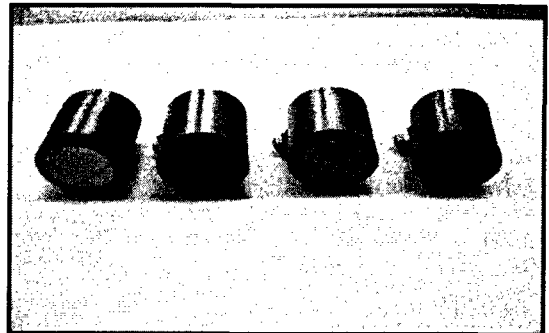


Fig. 5. Fabricated ultrasonic transducer.

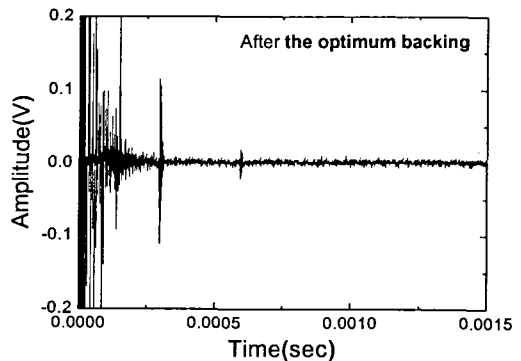
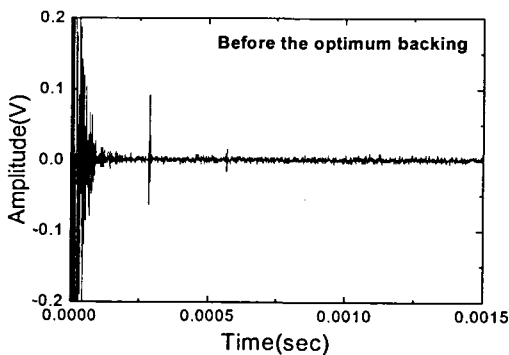
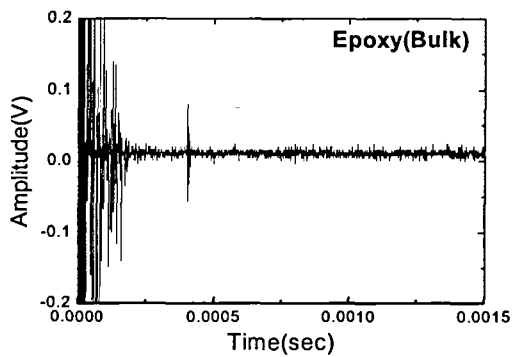
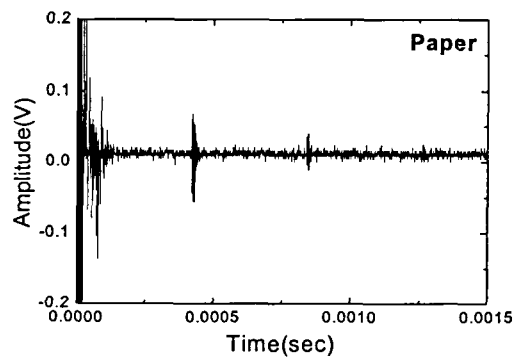


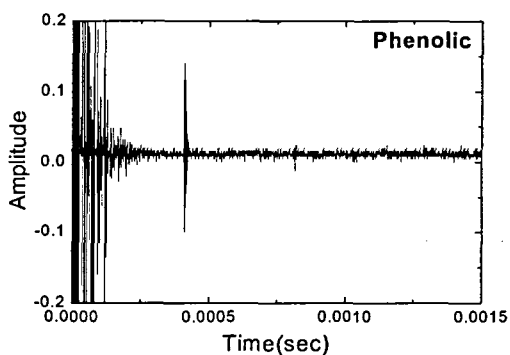
Fig. 5. The ultrasonic signals of previously and after optimization of backing condition.



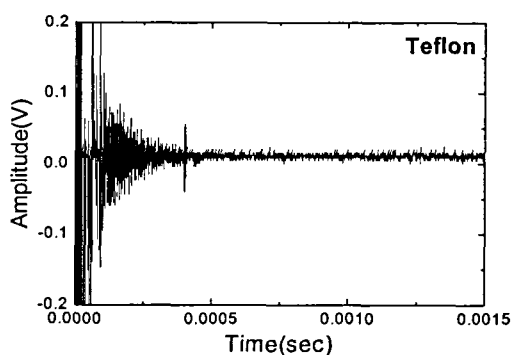
(a) Wear plate : Epoxy



(b) Wear plate : Paper



(c) Wear plate : Phenolic



(d) Wear plate : Teflon

Fig. 5. the ultrasonic signals according to selected wear plates

후면재인 epoxy층의 두께를 최소로 하여 최적화한 결과 최적화 이전의 반사 신호에 비해 수신 감도가 25% 증가하고 ringing도 커지는 것으로 나타났다. 그림 5는 1-3 composite와 최적화된 후면재 조건을 이용하여 선정된 4개의 전면 정합층을 이용하여 제작한 초음파 센서의 반사 실험 결과이다. 선정된 4개의 전면 정합층 재료 중에서 phenolic을 전면 정합층으로 이용한 초음파 센서의 수신 특성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 과실물성 측정에 적합한 비접촉 초음파 센서를 개발하기 위해 수행되었다. 이를 위해 감쇠가 심한 공기 중에서 초음파 송·수신이 가능하도록 하기 위해 초음파 발생 특성이 우수한 PZT C-62와 1-3 composite를 선정하였으나 PZT C-62는 공기 중에서 반사되는 초음파 반사 신호를 수신하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 1-3 composite를 이용하여 비접촉 초음파 센서를 제작하였다. 음향 임피던스가 낮은 공기와의 임피던스 매칭을 위해 4개의 전면 정합층

을 선정하였으나 phenolic이 가장 적합한 것으로 나타났다. 수신된 신호의 감도를 향상하기 위해 후면재의 재료와 두께를 최적화하여 수신 감도를 향상시켰다. 그러나 초음파 센서의 성능 향상을 위해 공기와 음향 임피던스 매칭이 더 적합한 전면 정합층 재료와 후면재 조건에 대한 연구가 필요한 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. Kino, G. S. 1987. *Acoustic waves-Devices, imaging & analog signal processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
4. 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.
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.