

과실용 비접촉 초음파 센서의 성능 개선에 관한 연구+

Study on Performance Enhancement of Non-contact Ultrasonic Transducer for Fruit

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

1. 서 론

최근 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. 비파괴 측정기술로서 주로 적용되는 방법은 가시광선과 근적외선을 이용한 분광분석법, 마이크로파를 이용한 토모그래피 기술, 핵자기 공명기술, 음향가진법, 초음파 기술 등이 있다. 이들 기술들은 각각 서로 다른 특징을 가지며 이에 따라 적용대상이나 품질 평가인자 등이 서로 다르다. 여러 가지 비파괴 측정 기술 중 초음파 기술은 의학 분야뿐만 아니라 식품 및 농산물의 내부 품질측정, 식품 공정제어 등에 다양하게 응용될 수 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 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 의료용과 공업용이 대부분이며 공기 중에서 감쇠가 심한 초음파의 특성으로 인해 제작이 어려워 매우 고가의 제품으로 구성되어 있다. 이러한 상용 비접촉 초음파 센서를 바로 과실의 경도 측정 시스템에 이용하는 데는 비용이나 센서의 작동 특성상 여러 가지 어려움이 존재한다.

본 연구진은 과실의 경도측정을 위해 1MHz 과실용 비접촉 초음파 센서를 개발한 바 있다(김 등. 2006). 공기 중에서의 초음파 감쇠는 매우 심하며 특히 주파수가 높아지면 감쇠 폭이 매우 커져 효율적인 비접촉 초음파 신호 측정이 어렵게 된다. 따라서 본 연구는 1MHz 과실용 비접촉 초음파 센서의 성능을 개선하기 위해 비접촉 초음파 센서의 중심 주파수를 낮추어 공기 중에서의 감쇠를 줄이고 초음파 센서의 감도를 향상시키는 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

가. 과실용 비접촉 초음파 센서의 성능 개선 방안 검토

* 한국표준과학연구원 삶의질표준부 안전그룹

** 충남대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학과

† 본 연구는 농촌진흥청 농업특정 연구과제의 연구비 지원에 의해 수행되었음

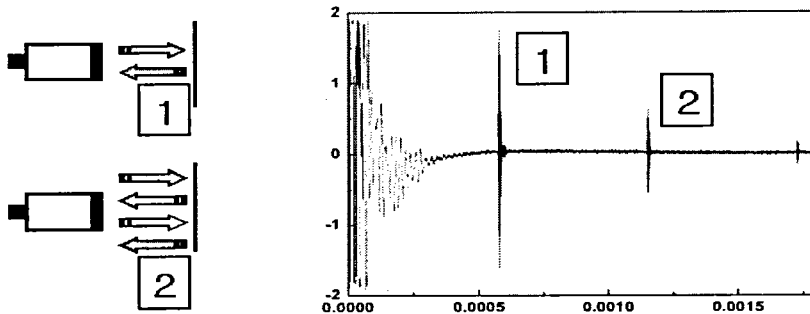


Fig 2. Reflected signal of the non-contact ultrasonic transducer.

비접촉 초음파를 이용한 과실의 경도 측정은 그림 1과 같이 과실의 표면에서 반사되는 첫 번째 반사 신호와 두 번째 반사 신호의 차이를 이용한다. 그림 1에서 1번 신호는 초음파가 과실의 표면에서 반사되는 첫 번째 신호이고 2번 신호는 1번 신호가 센서 표면에서 다시 반사되어 과실 표면을 맞고 돌아온 신호이다. 이 때 실험 대상과 센서 사이의 거리는 일정하므로 공기 중에서 발생하는 감쇠는 일정하게 된다. 따라서 1번 반사 신호와 2번 반사 신호 사이의 비는 실험 대상인 과실의 경도 차이에 의해서만 변화하게 된다.

이와 같이 두개의 반사 신호를 얻기 위해서는 센서의 중심 주파수가 낮아야만 초음파가 감쇠가 심한 공기층을 투과하여 두 번째 반사 신호까지 수신할 수 있다. 이러한 점을 고려하여 제작하고자 하는 초음파 센서의 중심 주파수를 500kHz로 선정하였다.

나. 비접촉 초음파 센서의 설계

공기는 밀도(1.2kg/m³)와 음향 임피던스(0.0004MRayL)가 낮아 초음파의 감쇠가 크게 나타난다. 비접촉식 초음파 센서는 감쇠가 심한 공기를 투과해야 하므로 음향 임피던스가 낮은 1-3 composite를 압전 소자로 선정하였다. 1-3 composite는 압전 소자를 여러 개의 작은 사각 기둥으로 자른 후 그 사이에 접착제를 채워 제작한다. 1-3 composite를 제작하는데 사용되는 압전 소자는 PZT 5A와 PZT 5H가 일반적이며 이것들의 물리적 특성은 표1과 같다. 본 실험에서는 PZT 5A와 PZT 5H 두 가지 압전 소자를 이용하여 제작된 1-3 composite를 이용하였다.

전면 정합층은 압전 소자와 공기층 사이에 위치하는 일종의 마모판이다. 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 계산된 전면 정합층의 음향임피던스는 0.077 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.

그림 2는 초음파 센서 제작을 위한 설계도이며 그림과 같이 두 가지 형태로 제작되었다. 그림 2(a)는 지름이 18mm로 하였으며 커넥터를 센서의 옆 부분에 설치하였다. 그림 2(b)는 지름을 27mm로 하여 초음파 발생 면적을 넓히고 커넥터를 센서의 뒷부분에 설치하는 구조로 하였다.

Table 1. Physical and electrical properties of 1-3 composite materials.

Piezoceramic	PZT 5A	PZT 5H
Permittivity/1kHz ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$)	1850	3800
Coupling factor (k_t)	0.48	0.51
Piezoelectric charge coefficient (d_{33})	440	680
Piezoelectric voltage coefficient (g_{33})	2020	1960
Frequency constant (N_t)	2030	1885
Mechanical quality factor (Q_m)	80	75

Table 2. Physical properties of wear plates.

	velocity(m/sec)	Density(kg/m ³)	Impedance(MRayL)
Phenolic	1420	1340	1.9
Paper	820	500	0.41

Table 3. Acoustic impedance of backing materials.

	Velocity (m/sec)	Density (kg/m ³)	Impedance (MRayL)
Epoxy(Araldite)	2620	1140	2.98
Epoxy:Tungsten = 1:2	1361	2782	3.8
Epoxy:Tungsten = 1:4	1286	4322	5.5

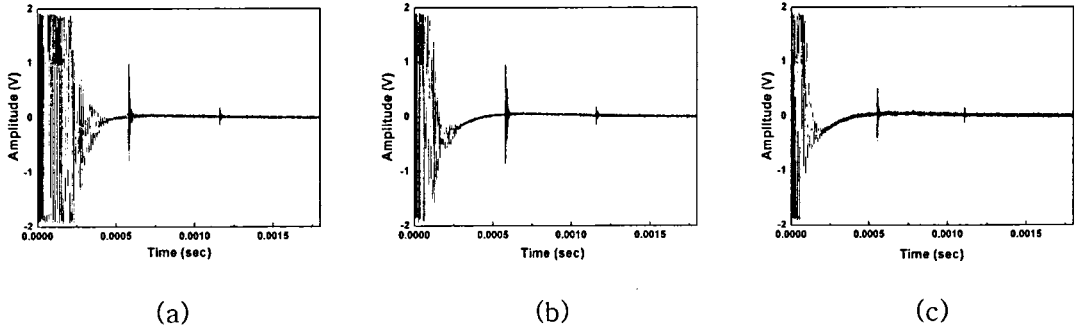


Fig 6. The reflected ultrasonic signals according to the backing material conditions. (a) epoxy resin backing, (b) epoxy resin : tungsten = 1 : 2 and (c) epoxy resin : tungsten = 1 : 4.

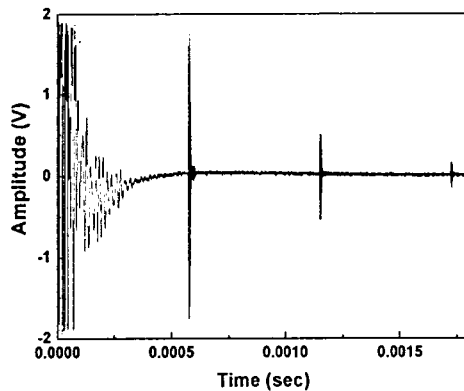


Fig 7. Reflected ultrasonic signal by finally performance enhanced non-contact ultrasonic transducer.

그림 5(a)는 PZT 5A 1-3 composite와 후면재를 에폭시만 사용한 센서의 실험 결과이다. 실험 결과 센서 자체의 진동을 나타내는 메인방 신호가 커서 첫 번째 반사 신호가 메인방의 영향을 받지 않게 하기 위해서는 센서와 바닥면과의 거리가 약 100mm 이상 떨어져야하는 것으로 나타났다. 이것은 실제 경도 측정 시스템을 제작할 때 과실과 센서 사이의 거리가 100mm 이상 되어야 한다는 의미가 된다. 과실과 센서 사이의 거리가 멀어지면 실험 장치의 크기가 커질 뿐만 아니라 공기 중을 진행하는 초음파가 주위 환경 변화에 의한 영향을 많이 받게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 후면재를 음향 임피던스가 큰 재료를 사용하여 메인방 신호를 줄이고 과실과 센서 사이의 거리를 줄일 필요가 있다. 그림 5(b)는 에폭시와 텅스텐을 1:2로 배합한 후면재를 사용한 것이고 그림 5(c)는 에폭시와 텅스텐을 1:4로 배합

한 후면재를 사용한 것이다. 에폭시와 텅스텐의 배합 비율을 1:4 이상으로 하는 것은 메인방의 신호를 줄이는 것보다 반사 신호의 크기를 줄이는 효과가 더 크므로 배합 비율을 더 크게 하는 것은 의미가 없는 것으로 나타났다. 에폭시와 텅스텐의 배합 비율이 1:4일 때 센서와 바닥면과의 거리는 약 50mm까지 줄일 수 있었다.

그림 6은 PZT 5H 1-3 composite을 이용하고 에폭시와 텅스텐의 배합 비율을 1:4로 하여 후면재를 제작한 후 그림 2(b)의 설계 조건을 이용하여 제작한 센서의 실험 결과이다. 그림 5(c)와 비교한 결과 수신 감도가 약 3배 커져 압전 재료를 바꾸고 설계 구조를 변경한 것이 더 우수한 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 과실의 경도 측정에 적합한 비접촉 초음파 센서 개발을 위해 수행되었다. 과실의 경도 측정용 비접촉 초음파 센서는 감쇠가 심한 공기층을 투과하여 두 번째 반사 신호까지 수신하여야 하므로 음향 임피던스가 낮은 1-3 composite를 압전 소자로 이용하였다. 또한 공기층과의 음향 임피던스 매칭을 위해 종이를 전면 정합층으로 이용하였다. 후면재는 센서와 실험 대상과의 거리를 최소화하고 적절한 크기의 두 번째 초음파 반사 신호를 수신할 수 있도록 제작하였다. 또한 초음파 송·수신부의 크기를 증가시키고 과실의 경도 측정 시스템 제작이 편리하도록 센서 구조를 개선하였다. 개선된 초음파 센서가 이전의 센서에 비해 수신감도가 약 3배 정도 증가한 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. 김기복, 이상대, 김만수, 박정길, 김기석, 2006, 과실용 비접촉 초음파 센서 개발을 위한 연구, 한국농업기계학회 동계 학술대회 논문집, 11(1):118-123.
4. Kino, G. S. 1987. *Acoustic waves-Devices, imaging & analog signal processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
5. 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.
6. 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.