

# 초음파를 이용한 사과외경의 경도측정(I)

-저장기간에 따른 사과외경의 초음파 특성-

## Measurement of firmness in apples using ultrasonic techniques(I)

-Ultrasonic characteristics of the apple according to the storage period-

김만수*	서 룬*	김기복**	정현모*
정희원	정희원	정희원	정희원
M. S. Kim	R. Seo	K. B. Kim	H. M. Jung

### 1. 서론

과실의 품질에는 무게, 색택, 형상, 표면상태 등의 외부요인과 당도, 영양가, 육질, 보존성, 가공성, 내부 공동 및 결함 등의 내부요인이 있다. 지금까지 과실의 품질판정은 주로 외부 요인에 따라 행해지고 있으며, 내부품질판정의 경우는 전체 중 일부를 표본 추출하여 당도, 산도, 경도, 결함(공동, 갈변현상)등을 파괴적인 방법으로 측정하고 있는 실정이다. 이러한 방법은 신속하지 못하고, 전수조사가 아닌 표본조사이기 때문에 농산물의 품질에 대한 신뢰성을 확보하기가 곤란하다. 한편, 생산자인 농민의 입장에서 볼 때 파괴적인 방법은 생산물의 손실을 초래할 뿐만 아니라 부정확한 판정결과로 인하여 애써 생산한 농산물을 제값을 받지 못하고 시장으로 출하시키는 경우가 발생하며, 소비자들에게는 표본조사에서 오는 부정확한 품질 판정으로 농산물 품질에 대한 불신이 조장 될 수도 있을 것이다.

선진국에서는 외관 판정뿐만 아니라 내부 품질의 판정을 위해 근적외선(NIR), 핵자기공명(NMR), 영상처리, 초음파, X선 등을 이용하여 속도, 부패 정도 및 내부의 결함 정도를 판정할 수 있는 기술을 개발 중에 있거나 일부는 실용화에 접근하고 있다. 이러한 기술들은 컴퓨터 및 계측기와 같은 전자기술의 눈부신 발달과 센서기술의 발달로 가능해졌으며 이와 같은 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있으며 최근에는 초음파를 이용한 방법들이 많은 관심을 끌고 있다.

그러나 지금까지의 초음파 기술은 대부분 의료진단이나 산업적 비파괴 검사용으로 개발되었을 뿐 초음파를 농산물의 내부 품질 평가에 적용하기 위한 연구는 매우 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 초음파를 사과외경의 비파괴 품질판정에 이용하기 위한 기초연구로서 사과표면에 입사, 반사되는 초음파 신호를 계측 및 분석하기 위한 시스템을 구축하고, 저장기간에 따른 사과외경의 초음파 특성을 계측하고자 하였다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1 실험재료

본 실험에 사용되었던 과실은 아오리 품종의 국내산 사과이었으며, 일반농가에서 재배되어 2001년 8월에 수확된 후 약 3일 정도 저온저장( $2\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,  $85\pm 5\%$  rh)된 50개를 임의 추출하여 실험에 사용하였다. 저온저장 후 공시재료들을 실험실의 환경조건( $18^{\circ}\text{C}$ , 75% rh)으로 저장 과정 중 5개 저장기간별로 실험을 수행하였다. 시료들의 저장 기간별 기본적인 물성들은 표(1)과 같다.

---

\* 충남대학교 농업생명과학대학 농업기계공학과

\*\* 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹

Table 1. Storage period and physical characteristics of the apples used in this study

Group	Storage period (day)	Volume ( $10^{-3} m^3$ )	Mass (kg)	True density ( $kg/m^3$ )	Moisture content (% , w.b.)
Group 1	1	25.85~30.19	0.2022~0.2326	77.0466~78.9862	80.37~86.34
Group 2	8	24.21~29.98	0.1924~0.2322	77.2200~79.8187	80.83~85.25
Group 3	15	23.89~28.83	0.1885~0.2218	75.3289~80.7501	81.12~86.06
Group 4	22	23.75~28.29	0.1862~0.2195	77.1149~79.7134	81.50~86.00
Group 5	29	22.69~29.11	0.1824~0.2255	77.0705~80.7462	81.41~85.96

### 2.3 실험장치

그림(1)은 초음파실험장치의 개략도이며 그 제원은 표(2)와 같다.

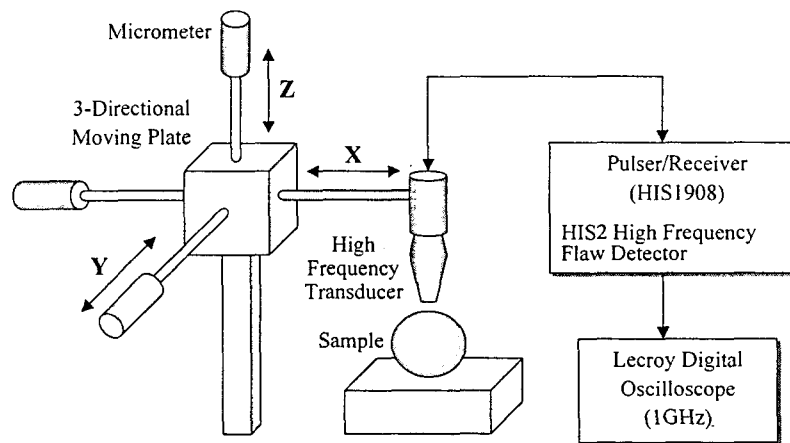


Fig. 1. Schematic diagram of the ultrasonic tester.

Table 2. Specifications of the ultrasonic tester.

Items	Specification	Remarks
Pulser/Receiver	1.5MHz~150MHz	Krautkramer
Ultrasonic sensor	500kHz	Ultran
Oscilloscope	Digital storage(1GHz)	Lecroy
Micrometer	3-direction	
Microcomputer	RAM 32MHz	Pentium 500MHz

그림(1)에서 보는 바와 같이 지지대 위에 사과를 고정시키고, 사과 표면으로부터 5mm의 일정거리를 유지하기 위해 3축 구동의 마이크로미터에 달린 센서홀더에 500kHz의 초음파센서를 고정시켰다. 본 실험에 사용된 초음파센서는 그림(4)에서 보는 바와 같이 비접촉식 센서(Ultran, 미국)이다. 접촉식 센서는 접촉압력에 따라 초음파 파형이 변하고 사과표면과 센서가 완전히 밀착되지 않았을 경우 파형이 잡히지 않는 등의 문제가 있는데 비접촉식을 사용함으로써 이같은 문제를 해결하였다.

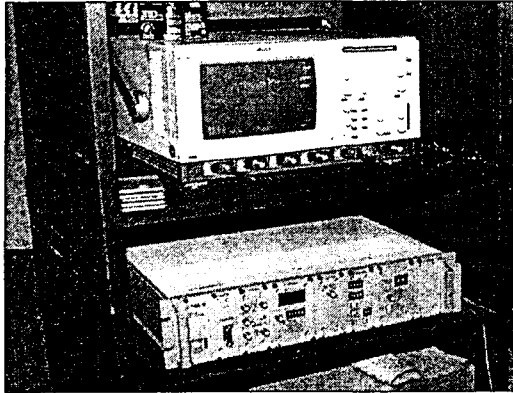


Fig. 3. Oscilloscope and pulser/receiver.

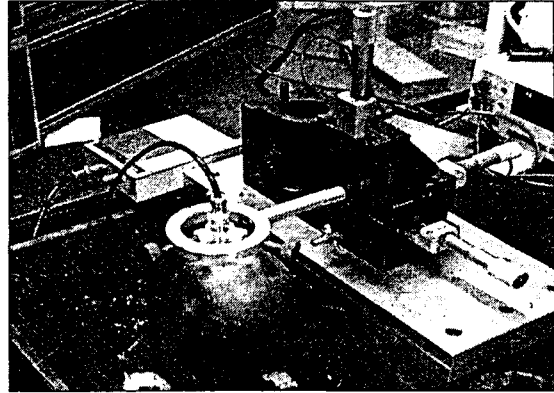


Fig. 4. Ultrasonic sensor and three directional moving plate.

## 2.2 실험방법

본 실험은 시료 50개를 10개씩 5개의 군(群)으로 나누어서 7일 간격으로 5차례 수행하였다. 하나의 군에 대해 실험을 수행할 때 나머지 군들은 상온(room temperature, 18°C)하에 보관하였다. 저온저장을 하지 않은 이유는 상온하에 보관함으로써 시료들의 빠른 경도변화를 보기 위함이었다. 각 군(群)의 시료 각각에 대해 기본적인 물성값인 질량, 체적 및 밀도를 측정하였다. 저울을 이용해 중량을 측정한 후 시료를 물에 잠기게 하였을 때 시료가 배제한 물의 무게를 측정하여, 이로부터 각각 시료의 체적과 밀도를 계산하였다.

기본적인 물성값을 측정한 후 시료 각각에 대해 초음파 반사 실험을 수행하였다. 500kHz의 비접촉식 초음파센서를 사용하여 사과표면과 센서와의 간격이 5mm의 일정간격이 되도록 유지하면서 실험을 수행하였다. 투과방법은 센서에서 보내진 신호를 다시 같은 센서에서 받는 반사법과 시료의 한쪽 끝에서 신호를 보내고 다른 한쪽 끝에서 신호를 받는 투과법이 있는데, 사과의 경우 씨방 등의 영향으로 투과되는 초음파가 산란 및 감쇠될 우려가 있어서 투과법보다는 반사법이 더 효과적이므로 본 실험에서는 반사법을 사용하였다.

초음파 센서를 통해 받아들여진 신호는 오실로스코프 상에서 실시간으로 전압-시간 그래프로 나타나며, 이를 데이터파일로 저장하여 통계 프로그램을 이용해 초음파 응답신호의 진폭(Peak-To-Peak, PTP)값을 계산하고 Matlab(ver 5.01)으로 작성된 신호처리 프로그램을 이용하여 초음파 응답신호를 시간 및 주파수영역에서 분석하였다. 계측된 초음파 응답신호의 시간과형에 대하여 FFT(Fast Fourier Transform)가 실행되며, 이 주파수 과형에 대해서 주파수 대역의 에너지(파형면적 즉 에너지 스펙트럼 밀도함수, nergy spectral density function) 및 대역/대역의 에너지비를 검출하였다. 또한 주파수 영역에서의 각 피크주파수 및 매그니튜드를 검출하기 위하여 최대엔트로피법(Maximum Entrophy Method, MEM)을 적용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 사과의 초음파 응답신호에 대한 시간 및 주파수영역 분석

사과의 초음파 응답신호의 시간 및 주파수영역에 대한 파라미터들을 분석하기 위해, 그림(5)와 같이 작성된 신호처리 프로그램을 이용하여 초음파 응답신호에 대하여 시간 및 주파수영역으로 도시하였다.

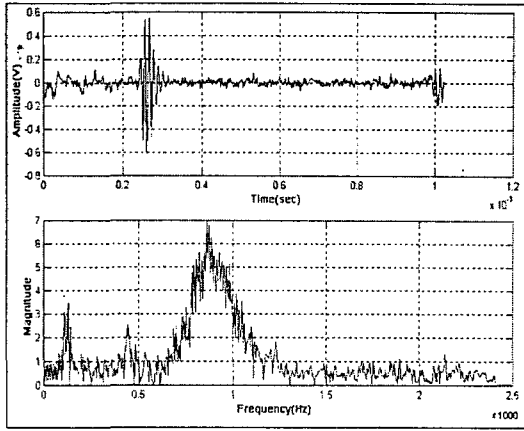


Fig. 5. Typical amplitude-time and magnitude-frequency of ultrasonic response signal for the apples.

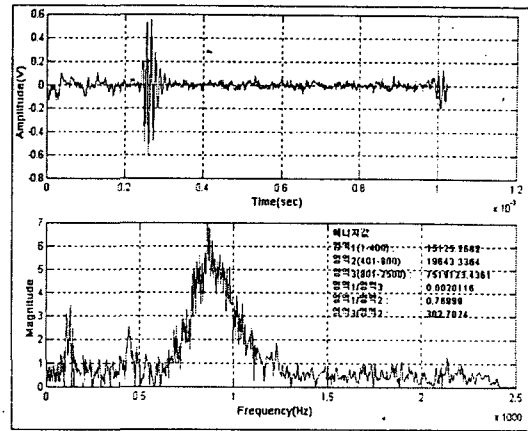


Fig. 6. Detection of frequency bandwidth energy.

표(3)에 저장기간별 시간영역에 대한 초음파 응답신호의 진폭(PTP)을 나타내었으며, 저장기간이 길어질수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 저장기간이 길어질수록 시료의 점성거동 영역이 점차 증가되면서 초음파 응답신호의 진폭(PTP)이 증가한 것으로 판단되었다.

Table 3. Amplitude(PTP) of ultrasonic response signal for the apple in time domain according to the storage period

Items		Storage period (day)				
		1	8	15	22	29
Amp. (V)	AVE	0.67109	0.70625	0.98906	1.05972	1.44687
	SD	0.08895	0.15604	0.15118	0.09510	0.13675

Note: Amp.=Amplitude(Peak to Peak), AVE=Average, SD=Standard Deviation

그림(6)은 이 들의 주파수 파형에 대해서 주파수 대역의 에너지(파형면적 즉, 에너지 스펙트럼 밀도함수, Energy spectral density function) 및 대역/대역의 에너지비를 검출하기 위한 신호처리 프로그램의 한 예를 도시한 것이다.

Table 4. Energy spectral density function of ultrasonic response signal for the apple in frequency domain according to the storage period

Items	FR (Hz)		Storage period (day)				
			1	8	15	22	29
Range1	1~400	AVE	14571.33	13000.64	13901.04	14987.45	2324.84
		SD	10995.89	7240.57	10573.90	6732.18	1636.29
Range2	401~800	AVE	25189.66	21181.85	21843.16	26203.23	8354.01
		SD	23795.86	13442.01	18328.98	17316.26	3498.33
Range3	801~2500	AVE	3230175.14	3675186.21	5475662.30	6299145.07	10199757.41
		SD	839449.18	2115228.13	1181070.45	2694294.44	1729934.55

Note: FR=Frequency Range, AVE=Average, SD=Standard Deviation

표(4)는 주파수 영역에서의 초음파 응답신호의 각 주파수 대역(1~400, 401~800, 801~2500 Hz)에 해당하는 에너지 스펙트럼 밀도함수를 저장기간별로 나타낸 것이다. 1 및 2 영역에서의 에너지 스펙트럼 밀도함수는 사과 저장기간에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았으나, 3영역 주파수 대역의 에너지 스펙트럼 밀도함수는 사과 저장기간이 길어질수록

증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 주파수 영역에서의 피크주파수 대역이 3영역(801~2500 Hz)의 주파수 대역에 편중되어 있기 때문에 판단되었다. 표(5)는 각 영역의 에너지 스펙트럼 밀도함수의 비를 나타내었다. 표 및 그림에서 알 수 있듯이 3영역의 에너지 스펙트럼 밀도함수의 영향을 받는 1영역/3영역의 비는 사과 저장기간이 길어질수록 감소하는 경향이었으며, 3영역/2영역의 비는 저장기간이 길어질수록 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 5. Energy spectral density function ratio of ultrasonic response signal for the apple in frequency domain according to the storage period

Items		Storage period (day)				
		1	8	15	22	29
Range1/Range3	AVE	0.0050526	0.0039865	0.0026863	0.0029369	0.0002496
	SD	0.0043876	0.0018680	0.0023534	0.0019505	0.0002014
Range1/Range2	AVE	0.667239	0.664010	0.699513	0.642435	0.324905
	SD	0.131763	0.128830	0.116224	0.114937	0.282067
Range3/Range2	AVE	326.320	209.114	789.464	618.896	1572.933
	SD	361.7534	136.057	896.989	1088.500	1055.158

Note: AVE=Average, SD=Standard Deviation

### 3.1.1 사과 초음파 응답신호에 대한 피크주파수의 진폭 분석

사과의 저장기간에 따른 초음파 응답신호에 대한 각 피크주파수 및 매그니튜드를 검출하기 위하여 최대엔트로피법을 적용하였다. 그림(7)은 시간영역의 응답신호에 대하여 최대엔트로피법을 적용하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 초음파의 응답신호에 대부분의 영향을 미치는 5순위까지의 진폭을 갖는 피크주파수와 진폭을 검출하였다. 사과 초음파 응답신호에 대한 5순위까지의 각 피크주파수의 경우에는 표(6)과 같이 모든 시료에 대하여 거의 비슷한 대역에서 발생하였다.

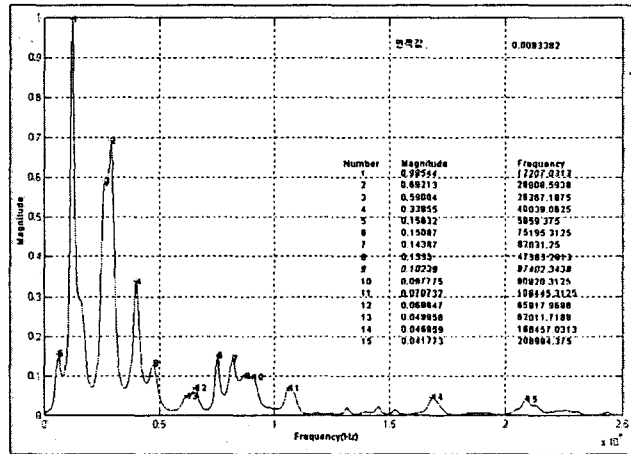


Fig. 7. Peak point detection of frequency spectrum.

Table 6. Peak frequencies of ultrasonic response signal using MEM

Items	Peak frequency magnitude number				
	1	2	3	4	5
PF (Hz)	12207.03	28808.59	26367.19	40039.06	5859.38

Note: PF=Peak Frequency

표(7)은 사과와 저장기간에 따른 초음파 응답신호에 대하여 최대엔트로피법을 적용하여 5순위까지의 매그니튜드 값을 나타내었다. 저장기간에 따른 각 피크주파수 매그니튜드 값의 차이가 매우 작았다.

Table 7. Peak frequency magnitude of ultrasonic response signal in frequency domain according to the storage period

Items		Storage period (day)				
		1	8	15	22	29
PFM1	AVE	1.10743	1.07410	1.07055	1.10966	1.06312
	SD	0.07342	0.08744	0.06629	0.10732	0.08105
PFM2	AVE	0.74751	0.69272	0.69943	0.70120	0.90138
	SD	0.05421	0.06232	0.05469	0.07403	0.03596
PFM3	AVE	0.40626	0.50458	0.49384	0.50616	0.52381
	SD	0.14258	0.12186	0.13558	0.12584	0.16234
PFM4	AVE	0.30032	0.30078	0.31268	0.31171	0.36622
	SD	0.06216	0.06981	0.08531	0.07411	0.06357
PFM5	AVE	0.17963	0.17562	0.18079	0.18113	0.23677
	SD	0.04138	0.03572	0.04197	0.01332	0.04887

Note: PFM=Peak Frequency Magnitude, AVE=Average, SD=Standard Deviation

### 3.1.2 저장기간에 따른 초음파 특성값들의 통계분석

표(8)은 사과와 저장기간이 초음파 응답신호의 진폭(Peak-To-Peak, PTP) 및 3영역의 에너지 스펙트럼 밀도함수에 미치는 영향이 유의성이 있는지 분석하기 위하여 통계분석용 프로그램(Datafit 7.0)을 이용해 분산분석을 하였던 결과이다. 표(8)에서 보는 바와 같이 시료의 저장기간이 PTP에 미치는 영향은 1%수준에서 F-value가 F(0.01)=7.56보다 크므로 '매우 유의'하다고 할 수 있고, 마찬가지로 저장기간이 3영역에 미치는 영향은 1%수준에서 F-value가 F(0.01)=7.56보다 크므로 '매우 유의'하다고 할 수 있다.

Table 8. Analysis of variance of PTP and range3 for the apple according to storage period

Factors	DF	SS	MS	F-value
PTP	1	2.8624	2.8624	60.14**
Range 3	1	2.3392E014	2.3392E014	50.37**

Note : DF=Degree of freedom, SS=Sum of squares, MS=Mean square

## 4. 결론

본 연구에서는 초음파를 사과와 비파괴 품질관정에 이용하기 위한 기초 연구로서 사과 표면에 입사, 반사되는 초음파 신호를 계측 및 분석하기 위한 시스템을 구축하고, 저장기간에 따른 사과와 초음파 특성을 계측하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

1. 구성된 비 접촉식 초음파 장치를 이용하여 전압-시간 그래프에서 전압의 진폭(PTP)값을 구하였고 신호처리용 프로그램을 이용하여 획득한 신호를 주파수 영역에서 분석하여 피크주파수, 영역별 에너지 밀도함수 등을 구하였다.
2. 사과와 초음파 특성을 분석한 결과 사과와 저장기간은 초음파 응답신호의 진폭(PTP) 및 제 3영역 에너지 스펙트럼 밀도함수와 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다.

3. 초음파를 농산물의 비파괴 품질판정에 적용시 문제가 되고 있는 센서와 시료와의 접촉응력에 의한 응답신호의 변형에 의한 문제를 해결하고자 비 접촉식 센서를 사용하였으며, 실제 농산물에 적용이 가능한 것으로 판단되었다.

## 참고문헌

1. Abbott, J. A., N. F. Childers, G. S. Bachman, J. V. Fitzgerald and F. J. Matusik. 1968b. Acoustic vibration for detecting texture quality of apples. Proc. of Amer. Soc. Hort. Sci. 93 : 725.
2. Garret, R. E. and R. B. Furry. 1972. Velocity of sonic pulses in apple. Trans. of the ASAE 32(3) : 953-957.
3. Clark, R. L. 1975. An investigation of the acoustical properties of watermelon as related to maturity. ASAE Paper No. 75-6004. st. Joseph, MI : ASAE.
4. Mizrach, A, N. Galili, and G. Rosenhouse. 1989. Determination of vegetable properties by ultrasonic excitation. Trans. of the ASAE. 32(6) : 2053-2058.
5. Cheng, Y, and C. G. Haugh. 1994. Detecting hollow heart in potatoes using ultrasound. Trans. of the ASAE. 37(1) : 217-222.
6. Abbott, J. A., D. R. Massie, B. L. Upchurch, and W. R. Hruschka. 1995. Nondestructive sonic firmness measurement of apples. Trans. of the ASAE. 38(5) : 1461-1466.
7. 장경영, 김만수, 조한근. 1998. 수박에서의 초음파 전파 특성에 관한 실험적 연구. 한국농업기계학회지 23(6) : 615-620
8. 이영희. 1996. 청과물의 초음파 전파특성. 충남대학교 석사학위논문.
9. 최동수. 2001. 음파특성을 이용한 수박의 비파괴 내부품질 판정기술 개발. 충남대학교 박사학위 논문.
10. 전자기술연구회. 1996. 알기 쉬운 초음파 응용. 기문사.