

초음파를 이용한 사과외의 경도측정(II)

-사과의 탄성계수 및 생물체항복강도 예측모델개발-

Measurement of Firmness in Apples Using Ultrasonic Techniques(II)

-Development of the prediction model for apparent elastic modulus and bioyield strength of the apples-

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

1. 서론

농산물의 품질을 비파괴적으로 판정하는 기술에 관한 연구들은 오래 전부터 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 대체로 농산물은 색택, 무게 등 외관적인 품질요소에 의해 시장에 출하 유통되어 왔으나 소비자의 농산물 품질에 대한 지식이 높아지고 고품질에 대한 선호도가 증가됨에 따라 내부품질을 고려한 선별이 중요한 과제로 대두되었다.

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, 결합(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 재값을 받지 못하고 시장으로 출하시키는 경우가 발생하며, 소비자들에게는 표본조사에서 오는 부정확한 품질 판정으로 농산물 품질에 대한 불신이 조장 될 수도 있을 것이다.

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 사과의 비파괴 품질판정에 이용하기 위한 기초연구로서 계속된 저장기간에 따른 사과의 초음파 특성과 본 연구에서 계속된 사과의 기계적 특성을 이용하여 초음파에 의한 사과의 탄성계수 및 생물체항복강도 예측모델을 개발하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

초음파 반사실험 직후에 각 시료의 기계적 특성을 계속하기 위하여 그림(1)과 같은 UTM를 이용하여 압축실험을 수행하였다. 초음파 반사 실험시 센서를 통해 신호가 입사/반사되는 지점에 대하여 ASAE 규격에서 규정하고 있는 지름 8mm, 곡률 반경 25mm의 스틸로드(rounded tip)를 이용하였으며, 10mm/min의 하중재하속도(loading rate)를 적용하였다. 계속된 힘-변형곡선에 대하여 그림(2)의 기계적 특성 분석프로그램을 이용하여 시료의 생물체항복점(bioyield point), 생물체항복변형량(bioyield deformation), 파괴점(rupture point), 극한변형량(rupture deformation) 및 탄성계수(apparent elastic modulus)등을 계속하였다.

* 충남대학교 농업생명과학대학 농업기계공학과

** 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹

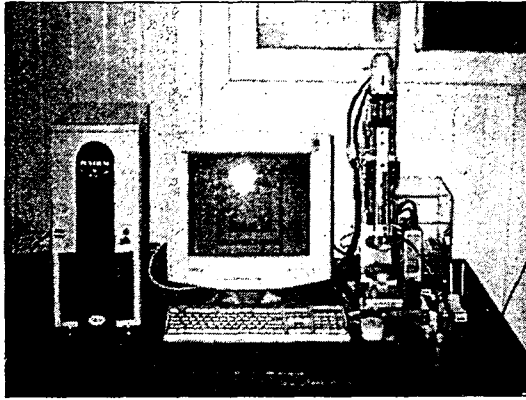


Fig. 1. The experimental equipment for compression tests.

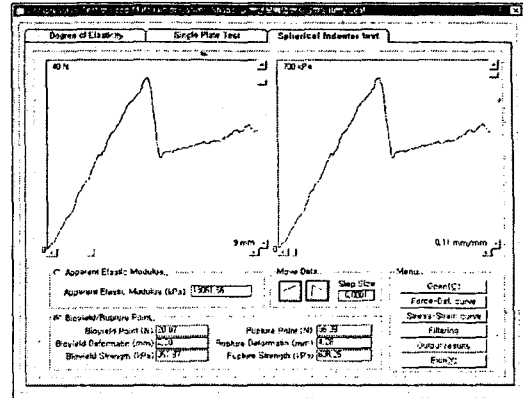


Fig. 2. Result window of the compression test.

3. 결과 및 고찰

3.1 사과에의 힘-변형곡선

UTM으로 사과에 준정적 압축하중을 가하여 그림(3)과 같은 힘-변형곡선을 얻을 수 있었다. 이 힘-변형곡선으로부터 과실의 기계적특성 즉, 생물체항복점, 파괴점, 생물체항복변형량, 극한변형량, 생물체항복강도 및 극한강도 등을 구하였다. 그림에서 보는 바와 같이 이 힘-변형곡선은 청과물의 힘-변형곡선의 전형적인 형태를 나타내고 있으며 파괴점은 뚜렷이 나타났으나 생물체 항복점은 명확하게 나타나지 않았다. 따라서 이와 같이 생물체항복점이 뚜렷하게 나타나지 않는 경우에는 파괴점의 반을 생물체항복점으로 하였다.(Abbott등, 1994, 정1999)

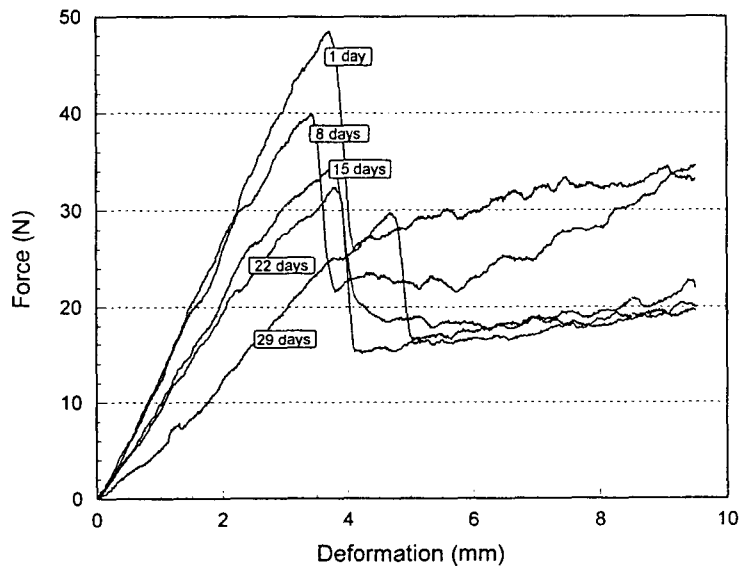


Fig. 3. Force-deformation curves of the apple according to the storage period.

3.2 사과와 생물의체항복점 및 파괴점

생물의체항복점은 농산물의 미세한 파괴가 시작되는 지점으로, 농산물의 손상에 대한 기준으로 많이 사용되어지고 있다. 표(2)는 사과와 저장기간에 대한 사과와 생물의체항복점 및 파괴점을 나타내었으며, 저장기간이 길어질수록 생물의체항복점 및 파괴점 모두 감소하는 경향이였다.

Table 2. Bioyield point and rupture point of the apple according to the storage period

Items		Storage period (day)				
		1	8	15	22	29
BP (N)	AVE	33.41	22.09	17.91	13.27	10.24
	SD	5.06	3.84	3.75	2.02	2.16
RP (N)	AVE	49.86	41.51	35.82	33.85	30.03
	SD	6.00	10.11	7.85	3.94	4.27

Note: BP=Bioyield Point, RP=Rupture Point, AVE=Average, SD=Standard Deviation

3.3 사과와 생물의체항복변형량 및 극한변형량

표(3)은 저장기간에 따른 사과와 생물의체항복변형량 및 극한변형량을 나타내었으며, 저장기간이 길어질수록 사과와 생물의체항복변형량은 감소하는 경향이였으나, 극한변형량은 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 저장기간이 길어질수록 사과와 탄성거동 영역이 점차 점성거동으로 전환되면서 시료를 파괴하는 변형량이 점차 증가되는 것으로 판단되었다.

Table 3. Bioyield deformation and rupture deformation of the apple according to the storage period

Items		Storage period (day)				
		1	8	15	22	29
BD (mm)	AVE	2.51	1.82	1.75	1.54	1.52
	SD	0.27	0.26	0.26	0.26	0.25
RD (mm)	AVE	3.80	3.73	3.94	4.10	4.59
	SD	0.24	0.51	0.43	0.34	0.54

Note: BD=Bioyield Deformation, RD=Rupture Deformation, AVE=Average, SD=Standard Deviation

3.4 사과와 생물의체항복강도 및 극한강도

표(4)는 사과와 저장기간에 따른 생물의체항복강도 및 극한강도를 나타내었다. 저장기간이 길어질수록 사과와 생물의체항복강도 및 극한강도는 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 4. Bioyield strength and ultimate strength of the apple according to the storage period

Items		Storage period (day)				
		1	8	15	22	29
BS (kPa)	AVE	586.18	387.48	314.11	232.33	195.32
	SD	88.68	67.32	65.72	34.82	57.76
US (kPa)	AVE	874.48	728.09	628.19	593.71	526.76
	SD	105.33	177.32	137.67	69.16	74.93

Note: BS=Bioyield Strength, US=Ultimate Strength, AVE=Average, SD=Standard Deviation

3.5 사과 탄성계수

사과의 탄성계수는 응력-변형률곡선(stress-strain curve)상에서 파괴점 50% 지점에서의 시컨트 모듈러스(secant modulus)를 측정하였으며, 표(5)는 저장기간에 따른 사과의 탄성계수를 나타내었다. 사과의 탄성계수는 저장기간이 길어질수록 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 5. Apparent elastic modulus of the apple according to the storage period

Items		Storage period (day)				
		1	8	15	22	29
E (kPa)	AVE	18233.62	17007.97	13409.15	12310.80	9387.59
	SD	2033.65	1618.12	1725.57	996.81	1407.79

Note: E=Apparent Elastic Modulus, AVE=Average, SD=Standard Deviation

3.6 저장기간에 따른 기계적 특성값들의 통계분석

표(6)은 사과의 저장기간이 기계적 특성값들에 미치는 영향이 유의성이 있는지 분석하기 위하여 통계분석용 프로그램(Datafit 7.0)을 이용해 분산분석을 하였던 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 시료의 저장기간이 기계적 특성값들인 BP, RP, BD, RD, BS, RS, E에 미치는 영향은 1% 수준에서 F-value가 모두 $F(0.01)=7.56$ 보다 크므로 '매우 유의'하다고 할 수 있다.

Table 6. Analysis of variance of mechanical properties for the apple according to storage period

Factors	DF	SS	MS	F-value
BP	1	3042.51	3042.51	183.01**
RP	1	2238.05	2238.05	47.82**
BD	1	5.1574	5.1574	57.34**
RD	1	3.7752	3.7752	19.97**
BS	1	877744.13	877744.13	153.92**
RS	1	688604.55	688604.55	47.82**
E	1	501278336.4	501278336.4	108.97**

3.7 사과의 물성, 기계적특성 및 초음파특성의 상관관계 분석

사과의 질량, 체적, 밀도 및 함수율의 기본물성, 압축시험에 의한 사과의 기계적 특성치 및 초음파 특성치에 대한 총 24개 물리량의 상관계수를 분석하였으며, 사과의 경도를 나타내는 생물체 항복 강도, 극한 강도 및 탄성계수등과 초음파 특성치인 피크 주파수 및 스펙트럼의 전체 면적 간에는 상관 관계가 높지 않았으나 주파수 영역별 에너지와 주파수 영역의 에너지비는 사과의 기계적 특성치들과 비교적 높은 상관 관계를 나타내었으며 특히 초음파 응답 신호의 진폭값(PTP) 및 영역 3의 에너지가 생물체 항복 강도 및 탄성계수와는 매우 높은 상관 관계를 나타내었다. 또한 각 영역에 대한 에너지 비도 약간 높은 상관 관계를 보였다.

3.7.1 사과의 탄성계수와 초음파 응답신호의 진폭(PTP)과의 관계

그림(4)은 탄성계수와 시간영역에서의 초음파 응답신호의 진폭(PTP)값과의 관계를 그래프로 도시한 것으로 사과의 탄성계수가 감소함에 따라 초음파 응답신호의 진폭은 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 사과의 저장기간이 길어지면 탄성계수는 작아지지만, 초음파 응답신호의 진폭은 증가한다는 것을 의미한다.

3.7.2 사과와 탄성계수와 초음파 응답신호의 에너지 밀도함수 3영역과의 관계

그림(5)에서는 사과와 탄성계수와 주파수영역에서의 초음파 응답신호의 에너지 스펙트럼 밀도함수 3영역과의 관계를 그래프로 도시하였다. 사과와 탄성계수가 작아질수록 FFT에 의한 주파수영역에서 초음파 응답신호의 에너지 스펙트럼 밀도함수 3영역은 증가하는 경향을 보였다. 이것은 탄성계수가 작아질수록 시간영역의 초음파 응답신호의 진폭이 증가하기 때문에 피크주파수 대역이 편중되어 있는 에너지 스펙트럼 밀도함수 3영역이 증가하기 때문이다.

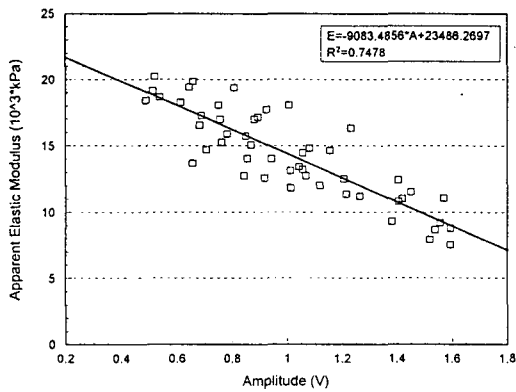


Fig. 4. Relationship between apparent elastic modulus and amplitude(PTP).

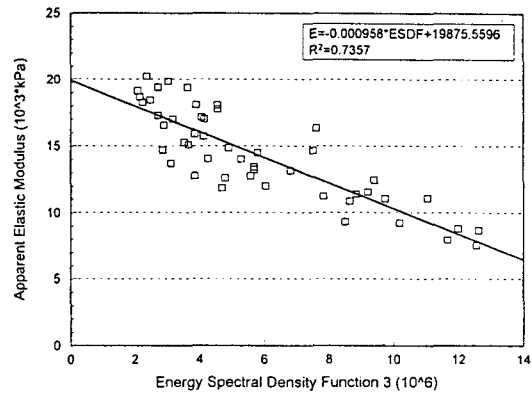


Fig. 5. Relationship between apparent elastic modulus and energy spectral density function (Range 3).

3.7.3 사과와 생물체항복강도와 초음파 응답신호의 진폭(PTP)과의 관계

그림(6)은 사과와 생물체항복강도와 시간영역에서의 초음파 응답신호의진폭(PTP)값과의 관계를 그림으로 도시한 것으로 생물체항복강도가 감소함에 따라 초음파 응답신호의 진폭(PTP)값은 증가하는 경향을 보였다. 이것은 사과와 저장기간이 길어지면 시료의 미세한 파괴가 발생시키는 응력이 감소하며, 이에 따라 초음파 응답신호의 진폭은 증가하게 된다.

3.7.4 사과와 생물체항복강도와 에너지 밀도함수 3영역과의 관계

그림(7)은 사과와 생물체항복강도와 주파수영역에서의 초음파 응답신호의 에너지 밀도함수 3영역과의 관계를 그림으로 도시한 것으로 사과와 생물체항복강도가 감소함에 따라 초음파 응답신호의 에너지 밀도함수 3영역은 증가하는 경향을 보였다.

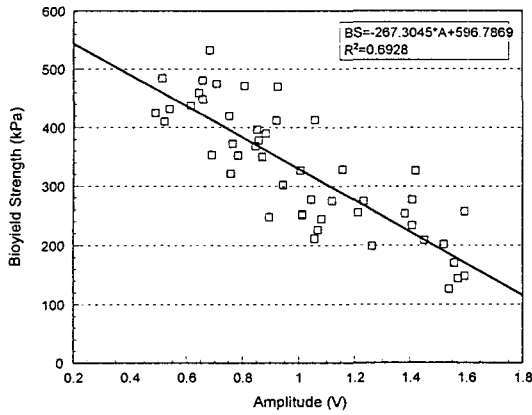


Fig. 6. Relationship between bioyield strength and amplitude(PTP).

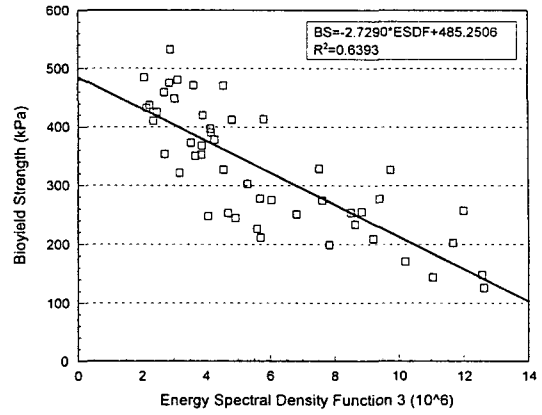


Fig. 7. Relationship between bioyield strength and energy spectral density function (Range 3).

3.8 사과와 탄성계수 및 생물체항복강도 예측모델개발

3.8.1 사과와 탄성계수 예측모델개발

사과의 탄성계수에 영향을 미치는 인자들은 앞에서 분석하였던 바와 같이 여러 가지가 있으며 이들 인자들이 복합적으로 작용한다. 그 인자들중 상관관계 분석을 통하여 탄성계수와 상관성이 높은 인자들을 선택하였다. 그 인자들에는 이미 알려진 사과의 기본 물성치들인 체적 및 질량, 초음파 특성치인 시간영역에서의 초음파 응답신호의 진폭(PTP) 및 주파수영역의 3영역의 에너지 스펙트럼 밀도함수가 있다. 사과의 탄성계수를 종속변수로 하고 이들 4개의 인자들과 저장기간을 독립변수로 하여 통계분석용 프로그램(Datafit 7.0)을 이용하여 탄성계수 예측용 모델을 찾은 결과, 다음 표(7)에서와 같은 사과의 체적(V), 질량(M), 시간영역의 진폭(PTP), 주파수영역의 3영역의 에너지 스펙트럼 밀도함수(ESDF) 및 저장기간(D)의 5개의 독립변수를 가지는 다중선형회귀 모델을 개발하였으며 분산분석 결과는 표(8)에 나타내었다.

Table 7. Coefficients of multiple linear model for apparent elastic modulus of the apples

Variables	E=a×D+b×V+c×M+d×ESDF+e×PTP+f			R ²
	Coefficients	Standard error	t-value	
a	-80.4445	36.8642	-2.1821	0.8021
b	-1095444.119	738459.2561	-1.4834	
c	161.8175	106.4539	1.5200	
d	-0.0004088	0.0003177	-1.2868	
e	-3553.6391	3128.4365	-1.1359	
f	16823.0998	5451.1015	3.0861	

Note : D=Days of storage, V=Volume of apple (m³), M=Mass of apple (kg)
ESDF=Energy spectral density function of the range 3, PTP=Peak-to-peak of the amplitude (V)

Table 8. ANOVA table of the model for apparent elastic modulus of the apples

Source	DF	SS	MS	F-value
Regression	5	448279044.9	89655808.98	33.15243677**
Error	43	11628707.5	2704350.5	
Total	48	564566116.4		

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

Table 9. Coefficients of multiple linear model for bioyield strength of the apples

Variables	E=a×D+b×V+c×M+d×ESDF+e×PTP+f			R ²
	Coefficients	Standard error	t-value	
a	-3.6363	1.2554	-2.8965	0.7439
b	3836.4840	25148.3147	0.1525	
c	-1.0152	3.6253	-0.2800	
d	2.5907E-06	1.0820E-05	0.2394	
e	-212.6412	106.5392	-1.9958	
f	693.3404	185.6378	3.7349	

Note : D=Days of storage, V=Volume of apple (m³), M=Mass of apple (kg)
 ESDF=Energy spectral density function of the range 3, PTP=Peak-to-peak of the amplitude (V)

3.8.2 사과와 생물체항복강도 예측모델개발

사과의 생물체항복강도 예측모형을 개발하기 위하여 사과의 생물체항복강도를 종속변수로 하고 사과의 체적(V), 질량(M), 시간영역의 진폭(PTP) 및 주파수영역의 3영역의 에너지 스펙트럼 밀도함수(ESDF)의 4개의 독립변수를 가지는 생물체항복강도 예측용 모델을 찾은 결과, 다음 표(9)에서와 같은 다중선형회귀 모델을 개발하였으며 분산분석 결과는 표(10)에 표시하였다.

Table 10. ANOVA table of the model for bioyield strength of the apples

Source	DF	SS	MS	F-value
Regression	5	391853.3321	78370.66641	24.9876759**
Error	43	134864.0294	3136.372776	
Total	48	526717.3614		

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

4. 결론

초음파를 사과의 비파괴 품질판정에 이용하기 위한 기초연구로서 계속된 저장기간에 따른 사과의 초음파 특성과 본 연구에서 계속된 사과의 기계적 특성을 이용하여 초음파에 의한 사과의 탄성계수 및 생물체항복강도 예측모델을 개발하고자 하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. UTM을 이용하여 사과의 기계적 특성치를 분석하여 생물체항복점, 생물체항복변형량, 생물체항복강도, 파괴점, 극한변형량, 극한강도 및 탄성계수 등을 구하였다.
2. 사과의 기본 물성, 초음파 특성과 기계적 특성값 들을 분석한 결과 사과의 질량, 체적, 시간영역의 진폭(PTP), 제3영역 에너지 스펙트럼 밀도함수가 기계적 특성 중 생물체항복강도, 탄성계수와 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다.
3. 사과의 저장 기간, 질량, 체적, Peak-to-peak, 제3영역의 에너지값 등 5개의 독립변수를 가지는 다중선형회귀모형으로 사과의 탄성계수 및 생물체 항복강도 예측모형을 개발하였다.

참고문헌

1. 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.
2. Abbott, J. A. 1994. Firmness measurement of freshly harvested Delicious apples by sensory methods, sonic transmission, Magness-Taylor, and compression. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 119(1) : 510-515.
3. Mizrach, A., U. Flitsanov, and Y. Fuchs. 1997. An ultrasonic nondestructive method for measuring maturity for mango fruit. *Trans of the ASAE* 40(4) : 1107-1111
4. 김만수, 박종민, 최동수. 1992. 과실의 힘-변형 특성. *한국농업기계학회지* 17(2) : 156-170.
5. 박종민. 1993. 과실의 점탄성 특성과 그 응용. *충남대학교 박사학위논문*.
6. 정현모. 1999. 청과물의 기계적 특성에 관한 연구. *충남대학교 석사학위논문*.