

비접촉식 초음파 기술을 이용한 사과의 생물체항복강도 예측모델 개발

Development of prediction models for bioyield strength of apple using the noncontact ultrasonic techniques

김만수* 김기복** 정현모*** 김기석* 박정길* 이상대* 김동진*
정희원 정희원 정희원 정희원 정희원 정희원

M. S. Kim K. B. Kim H. M. Jung G. S. Kim J. G. Park S. D. Lee D. J. Kim

1. 서론

오늘날 소비자들은 고품질 및 안전성이 보장되는 농산물이나 식품을 선호하는 경향이 높아짐에 따라 이러한 농산물이나 식품의 품질판정기술에 많은 관심을 가지게 되었다. 최근에 와서 이 분야의 연구와 기술의 발전으로 근적외선(NIR), 핵자기공명(NMR), 영상처리, 초음파 등의 기술을 이용한 비파괴 품질판정시스템들이 개발되어 일부 기술은 실용화된 것들도 있다. 이러한 다양한 시스템기술 중 산업화가 많이 된 초음파 기술은 대부분 의료진단이나 산업적 비파괴 검사용으로 개발되었을 뿐 농산물의 품질평가에 응용한 연구결과는 국내 외적으로도 매우 빈약한 실정이다.

본 연구진은 2002년도부터 연구를 시작하여 2005년도에 초음파 기술을 이용한 과실의 경도 측정시스템을 개발하였다. 이 시스템은 비교적 짧은 시간에 비파괴적으로 과실의 경도를 측정할 수 있는 시스템이었지만, 선과장(APC)에서 다른 품질판정 장치와 연계하여 운용하기에는 센서와 과실을 접촉시키는데 필요한 시간 때문에 경도측정에 소요되는 시간이 크게 나타나 선과장에 실제 적용하기는 다소 어려울 것으로 판단된다. 따라서 초음파 센서의 접촉으로 인한 경도측정시간을 단축하기 위하여 비접촉 초음파센서의 하나인 공기결합 초음파 센서(air-coupled ultrasonic sensor)를 이용한 경도측정 시스템의 개발에 관심을 가지게 되었다. 기초연구를 통해 비접촉 초음파센서와 물체 표면간의 거리에 따라 달라지는 초음파 반사 파라미터들의 값에 대해 거리의 보정방법을 확립하였고, 사과의 생물체 항복강도를 계측하기 위한 실험을 실시하였다.

본 연구는 기존의 기초연구 결과인 비접촉 초음파센서의 거리보정 값을 활용하여 사과에 대한 비접촉 초음파 파라미터와 생물체항복강도와와의 상관관계를 분석하였으며 이를 토대로 사과의 생물체항복강도 예측모델을 개발하기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 사용한 사과는 일반 농가에서 구입한 것으로 품종은 양광(YouKou)과 후지(Fuji)이었다. 양광은 수확 후 바로 실험에 사용하였으며, 후지는 수확하여 약 한 달 정도 저온저장고에 보관되어진 과실이었다. 시료는 실험실(15 ℃, RH 80 %)에 보관하면서 3일

* 충남대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 생물산업기계 전공

** 한국표준과학연구원 삶의 질 표준부

*** 경북과학대학 패키징매니지먼트과

간격으로 1회에 각각 3개씩 시료를 채취하여 양광은 총 7회, 후지는 총 9회 실험을 수행하였다. 사과와 초음파 특성을 구명하기 위한 비접촉 초음파 측정 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 초음파 펄서/리시버(HIS-2, AC 100~240 V \pm 10%, 100 VA max.), 중심주파수가 0.5 MHz인 비접촉 초음파 트랜스듀서(NCT 55, Ultrason Inc., USA)와 센서 고정장치 및 거리 측정장치, 1 GHz의 sampling rate를 가지는 오실로스코프와 컴퓨터로 구성하였다.

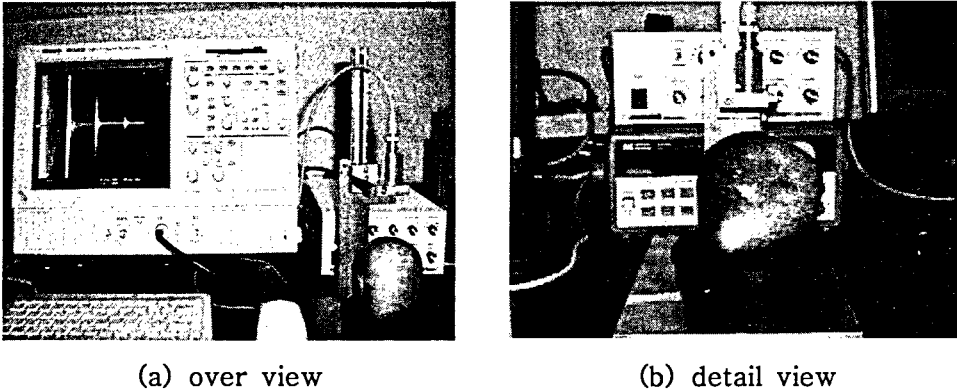


Fig. 1. Noncontact ultrasonic measurement system for apple.

초음파 센서에 대한 초기 가진 신호의 간섭을 배제시킨 후 사과와 표면과 비접촉 초음파 센서간의 거리를 양광품종의 경우 5 mm간격으로, 후지품종의 경우 3 mm간격으로 변화시키면서 0~25 mm, 0~15 mm까지 반사법에 의하여 초음파 신호를 계측하였다.

비접촉 초음파 반사 신호를 계측하고 분석하기 위해 시간영역에서는 첫 번째 반사 신호와 두 번째 반사 신호의 최대 amplitude 값과 TOF(Time of Flight) 값을 주파수영역에서는 첫 번째 반사 신호와 두 번째 반사 신호의 제 1, 제 2 magnitude 값과 PSD 값을 선택하여 총 10개의 파라미터를 서로 조합하여 거리를 보정한 후 생물체항복강도 예측모델개발에 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 거리 보정 factor

비접촉 초음파 센서를 이용하여 계측을 할 때 거리에 따라 공기 중의 감쇠량이 다르기 때문에 실제 계측된 데이터를 가지고 분석할 경우 거리에 따른 오차가 발생하게 된다.

따라서 센서와 사과 표면과의 거리에 관계없이 초음파 특성 값이 일정하게 유지되도록 보정을 해야만 하고, 선행되어진 연구를 통해 수신된 신호의 amplitude, TOF, magnitude, PSD 등 10개의 초음파 파라미터에 대하여 다음 식 (1)~(6)과 같은 6개의 거리보정 factor를 찾을 수 있었다.

$$\begin{aligned} \text{Factor1} &= (\text{amp.2}/\text{amp.1})/(\text{TOF2}/\text{TOF1}) && \text{----- (1)} \\ \text{Factor2} &= (\text{mag.21}/\text{mag.11})/(\text{TOF2}/\text{TOF1}) && \text{----- (2)} \\ \text{Factor3} &= (\text{mag.22}/\text{mag.12})/(\text{TOF2}/\text{TOF1}) && \text{----- (3)} \\ \text{Factor4} &= (\text{mag.12}/\text{mag.11})/(\text{TOF2}/\text{TOF1}) && \text{----- (4)} \\ \text{Factor5} &= (\text{mag.22}/\text{mag.21})/(\text{TOF2}/\text{TOF1}) && \text{----- (5)} \\ \text{Factor6} &= (\text{PSD.2}/\text{PSD.1})/(\text{TOF2}/\text{TOF1}) && \text{----- (6)} \end{aligned}$$

where, amp.1 = Max. amplitude of the first reflection signal,
 amp.2 = Max. amplitude of the second reflection signal,
 TOF1 = Time of flight of the first reflection signal,
 TOF2 = Time of flight of the second reflection signal,
 mag.11 = First magnitude of the first reflection signal,
 mag.12 = Second magnitude of the first reflection signal,
 mag.21 = First magnitude of the second reflection signal,
 mag.22 = Second magnitude of the second reflection signal,
 PSD1 = Power spectrum density of the first reflection signal,
 PSD2 = Power spectrum density of the second reflection signal

실제 비접촉 초음파 센서로 계측하려고 할 때 센서와 사과 표면과의 거리는 약 10~15 mm이내일 것으로 예상되기 때문에, 초음파 센서에 대한 초기 가진 신호의 간섭을 최대한 배제하여 양광품종의 경우 5~15 mm, 후지품종의 경우 6~12 mm에서 계측된 데이터를 이용하여 거리보정을 하고, 그 거리보정 factor를 이용하여 사과의 생물체항복강도 예측모델을 개발하였다.

3.2 생물체항복강도 예측모델

가. 다중회귀모델

사과의 생물체 항복강도와 비접촉 초음파 반사 신호의 거리보정 factor값을 이용하여 다중회귀모델을 개발하였다. 각 품종에 대하여 개발된 예측모델은 표 1에서 보는바와 같이 결정계수 값이 양광에서는 0.7912, 후지에서는 0.6349로 두 값들 간에는 큰 차이가 없었으며 다중회귀모델을 가지고 사과의 생물체항복강도를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다.

Table 1. Multiple linear regression equation for bioyield strength of the apple as a function of noncontact ultrasonic correction factors.

Cultivar	BS = a×Factor1+b×Factor2+c×Factor3+d×Factor4+e×Factor5+f×Factor6+g							R ²
	a	b	c	d	e	f	g	
YouKou	826.432	-444.379	1154.787	193.918	-162.153	-1540.052	188.724	0.7912**
Fuji	-499.518	2100.376	-1226.254	-56.292	116.502	-24.691	102.989	0.6349**

※ Note : BS = Bioyield Strength, Factor 1~6 = Distance correction factors.

나. 주성분회귀모델

주성분분석의 경우 독립변수들 간의 상호의존성인 다중 공선성 문제를 고려하지 않을 경우 통계적 결과가 매우 불안정하게 된다. 따라서 사과 품종별 거리보정 factor들 간에 상관관계를 분석한 결과 거리보정 factor들 간에는 강한 상관성이 없는 것으로 나타났으며, 거리보정 factor들을 가지고 주성분 분석을 실시하였다. 주성분 분석결과 전체 주성분의 첫 번째에서 네 번째에 이르는 주성분이 전체 데이터 변이의 99%이상을 차지하는 것으로 나타났다. 즉, 이것은 제 1 주성분에서 제 4 주성분만으로도 사과의 생물체항복강도를 예측할 수 있는 모델을 만들 수 있음을 의미한다. 따라서 최종적으로 4개의 주성분을 가지고 생물체항복강도를 추정할 수 있는 모델을 개발한 결과 표 2에서 보는바와 같다. 개발된 주성분 회귀모델을 분석한 결과 대체적으로 모델의 결정계수 값은 다중회귀모델보다 낮게 나타났으며, 양광에서는 결정계수 값이 0.5939, 후지에서는 결정계수 값이 0.6082로 나타났으며 다만, 다중회귀분석과 달리 주성분분석에서는 후지에서의 결정계수가 양광에서보다 다소 높게 나타났다.

Table 2. Principal component regression equation for bioyield strength of the apple.

Cultivar	Y = a×PC1+b×PC2+c×PC3+d×PC4+e					R ²
	a	b	c	d	e	
YouKou	-83.390	-192.236	-273.217	-456.980	158.492	0.5939**
Fuji	390.566	-132.888	-259.398	-237.077	77.992	0.6082**

※ Note : Y = Bioyield strength, PC1 = 1st principal component, PC2 = 2nd principal component, PC3 = 3rd principal component, PC4 = 4th principal component

다. 인공신경망모델

사과의 경도를 예측하기 위한 인공신경망의 구성은 학습 회수 및 속도, 수렴속도, 출력결과 등을 고려하여 은닉층이 하나인 구조로 하였으며, 또한 입력층의 입력패턴으로서 이미 분석되었던 6개의 거리보정 factor를 이용하였다.

사과의 각 품종별 은닉층의 노드수는 표 3에서 보는 바와 같이 1~15개까지 2단계의 간격으로 노드의 수를 증가시키면서 진행하였으며, 각각의 경우에 대해 다수의 실험을 반복하면서 최적의 값을 찾기 위한 분석을 하였다. 학습수행 시 양광의 오차 목표값은 0.009, 학습율은 0.001, 모멘텀은 0.95로 하였으며, 후지의 오차 목표값은 0.005, 학습율은 0.001, 모멘텀은 0.95로 하였으며 학습회수는 오차의 목표값 이하가 될 때까지로 하였다. 본 연구에서 구성된 인공신경망은 입력층에서 은닉층까지의 전달함수로 tangent sigmoid 함수를, 은닉층에서 출력층까지의 전달함수로 pure linear 함수를 사용하였다. 학습수행 결과 양광과 후지 모두에서 노드수가 1개일 때 0.9697, 0.9020으로 상관계수가 높게 나타났다. 다

만, 인공신경망 분석의 경우 노드수, 학습률, 오차 목표값의 변화에 따라 그 상관계수의 값이 큰 차이를 보이고 있으며, 다수의 반복학습을 통해 최적의 값을 구하는 과정에서 변수가 많이 발생하기 때문에 시스템에 적용하기가 용이하지 않을 것으로 판단되었다.

Table 3. Correlation analysis between measured bioyield strength of apple and predicted one by ANN at several numbers of node in the hidden layer.

Cultivar	No. of node	1	3	5	7	9	11	13	15
YouKou	Coefficient of correlation	0.9697	0.9402	0.9496	0.2728	0.3761	0.3775	0.2815	-0.2268
Fuji	Coefficient of correlation	0.9020	0.6771	0.7352	0.3965	0.3432	0.3956	0.3022	0.2081

이들 3가지 분석방법에 따른 사과와 생물체항복강도 예측모델들을 비교해 보면 인공신경망모델에서 가장 좋은 결과를 얻었으나 다른 모델들과 차이가 크지 않았었다. 또한 예측모델들 간의 예측정확도의 차이가 크지 않다면 비교적 간단하게 생물체항복강도를 예측할 수 있는 다중회귀모델을 사용하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 비접촉 초음파 기술을 이용한 과실경도 온라인 측정시스템 개발을 위한 기초연구 중 일부로서 사과에 대한 비접촉 초음파 센서와 사과 표면간의 거리에 따른 초음파 파라미터를 측정하고, 거리에 따라 초음파 파라미터가 영향을 받지 않도록 보정한 후 그 거리보정 factor를 이용하여 사과의 생물체항복강도 예측모델을 개발하기 위하여 수행되었다.

사과는 상온 및 저온 저장하면서 저장기간에 따라 UTM에 의한 사과의 생물체 항복강도를 측정·분석하였으며, 동일 시료에 대하여 비접촉식 초음파 계측실험을 수행하고 거리보정을 통해 얻어진 factor를 이용하여 사과의 생물체항복강도를 예측할 수 있는 다중회귀모델, 주성분회귀모델, 인공신경망을 개발하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 사과의 생물체항복강도를 예측할 수 있는 다중회귀모델을 개발하였던 결과 양광 및 후지에서의 결정계수가 각각 0.7912, 0.6349로 나타났다.
2. 사과의 각 품종에 대한 주성분 분석을 실시한 결과 대체적으로 전체 4개의 주성분만으로도 생물체항복강도의 설명이 가능한 것으로 분석되었으며, 이들 주성분들을 이용하여 생물체항복강도를 예측할 수 있는 회귀모델을 개발하였던 결과 양광의 경우 결정계수가 0.5939로, 후지의 경우 결정계수가 0.6082로 나타났다.
3. 인공신경망을 이용하여 사과의 경도를 예측할 수 있는 모델은 입력층, 은닉층, 출력층

이 한 개씩인 간단한 구조로 구현하였다. 은닉층의 개수를 최적화하여 구현한 신경망을 이용하여 실측값과 예측값 사이의 상관관계를 분석한 결과 양 품종 모두 노드수가 1개 일 때 상관계수가 양광의 경우 0.9697, 후지의 경우 0.9020등의 상관관계를 나타내었다.

4. 개발된 비접촉식 초음파 시스템을 이용한 사과와 생물체항복강도 예측 알고리즘은 상관계수가 높게 나타났던 인공신경망보다 비교적 간단하게 구현할 수 있는 다중회귀모델을 적용하는 것이 적합할 것으로 분석되었다.

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. Leedom, D., Krimholtz, R., and Matthaei, G., "Equivalent Circuits for transducers Having Arbitrary Even-or-Odd-symmetry Piezoelectric Excitation." IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, SU-18, 128-141(July 1971)
4. Park, B. 1996, "Ultrasonic Technology for Nondestructive Food Quality Evaluation." , Proc. Int. Symp. Quality Evaluation of Agricultural Products and Foods Using NDE, pp.112-134
5. 박정길. 2005. "초음파 파라미터를 이용한 사과와 감의 경도 추정" , 충남대학교 석사학위논문.
6. 서륜. 2002. "초음파를 이용한 사과와 감의 경도 측정" , 충남대 석사학위논문.
7. 이상대. 2005. "과실 비파괴 검사용 초음파 트랜스듀서 개발" , 충남대학교 석사학위논문.
8. 김기복, 이상대, 김만수, 박정길, 김기석. 2006. "과실용 비접촉 초음파 센서 개발을 위한 연구" , 한국농업기계학회 2006 동계 학술대회 논문집 11(1):118-123
9. 김만수, 김기복, 정현모, 김기석, 박정길, 이상대, 박성운. 2006. "비접촉 초음파 센서와 물체 표면간의 거리에 따른 초음파 특성" , 한국농업기계학회 2006 동계 학술대회 논문집 11(1):269-276