

인공신경망을 이용한 수박의 음향특성 분석(I)-속도 및 공동

Acoustic Characteristics of the Watermelon using Neural Network(I)-Ripeness and Crack

최동수*	최규홍*	이영희*	이강진*	윤진하*	김만수**
정회원	정회원	정회원	정회원	정회원	정회원
D. S. Choi	K. H. Choi	Y. H. Lee	K. J. Lee	J. H. Yun	M. S. Kim

1. 서론

원예작물중 수박은 연간생산액이 고추다음으로 7,800억원에 달하는 중요한 작물로서 주로 형상과 크기에 의해 유통되고 있으며, 속도나 결함 등의 내부품질은 거의 고려되지 못한 채 유통되고 있는 실정이다. 총생산면적에 50%에 달하는 노지재배 수박의 경우 대부분 포전매대로 일시에 수확하는 경우가 많아 품질이 고르지 못해 선별 출하를 하여야 한다. 인력에 의한 내부품질판정은 극히 일부 숙련자들에 의해 행해지고 있으나, 객관적인 판별기준이 없기 때문에 일반인들이 판정한다는 것은 어려운 일이다. 따라서 경험과 전문기술 없이도 고품질의 수박을 수확·선별하기 위해서는 비파괴적으로 내부품질을 판정할 수 있는 기술이 시급히 개발되어야 하는 실정이다.

비파괴적인 방법으로 내부품질을 평가하는 기술은 근적외선 분광법, 핵자기공명법, X선 CT스캔법, 타음해석법, 초음파 등을 이용하여 당도, 공동, 과육변질, 부패, 경도 등의 내부품질의 판정에 이용되고 있다.

외국에서는 오래전부터 음향기술을 이용하여 농산물의 내부품질을 평가하고자 하는 연구들이 많이 수행되어 왔다. Chen 등(1994)은 타격에 의해 발생된 수박의 음향신호에 대해 자기상관함수 분석기법을 도입하여 내부품질을 예측하였다. 자기상관함수의 피크점들에 대한 포락선을 검출하여 질량을 성공적으로 예측할 수 있었으며, 예측된 질량의 에러를 문턱값으로 설정하여 속도 및 공동을 판정하였다.

Sugiyama 등(1998)은 타격에 의해 발생된 음향신호를 음의 전달속도를 측정하여 메론의 속도를 판정하였다.

농산물의 내부품질을 비파괴적인 방법으로 평가하기 위한 연구가 국내에서 활발하게 수행되고 있다. 국내에서는 김 등(1997)이 수박에 타격을 하였을 때 외부 충격에 대한 반발력의 형상, 음향반응, 감쇄변화 등을 측정분석하여 속도를 판정할 수 있는 속도판별 센서를 개

* 농업기계화연구소 기초기술기계과

** 충남대학교 농과대학 농업기계공학과

발하였다. 또한 김 등(1998)은 등숙정도가 미숙에서 적숙으로 진행될수록 시간영역에서 파형의 형태가 복잡해지고 저주파 성분이 강하게 나타나며, 주파수 성분은 무게, 밀도 등에 영향을 받는다고 하였다.

본 연구에서는 여러 신호처리 기법 및 인공 신경망 기법을 도입하여 타격에 의해 발생된 수박의 음향신호와 내부품질과의 관계를 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

본 연구에서 사용된 공시재료는 충남 예산에서 하우스재배에 의해 1998년 9월 중순에 수확된 품종이 '하나로'인 수박으로 적숙과 미숙으로 구분해서 각각 29통, 20통씩 현지에서 구입하여 사용하였다.

나. 실험방법

(1) 음향신호 계측 시스템

수박의 음향신호를 계측하기 위하여 구성된 시스템의 개략도는 그림 1과 같으며, 시스템을 구성하고 있는 계측기의 제원은 표 1과 같다. 타격부의 타격구는 무게가 17.18g인 아크릴구를 사용하였으며, 진자의 길이는 35cm이었다.

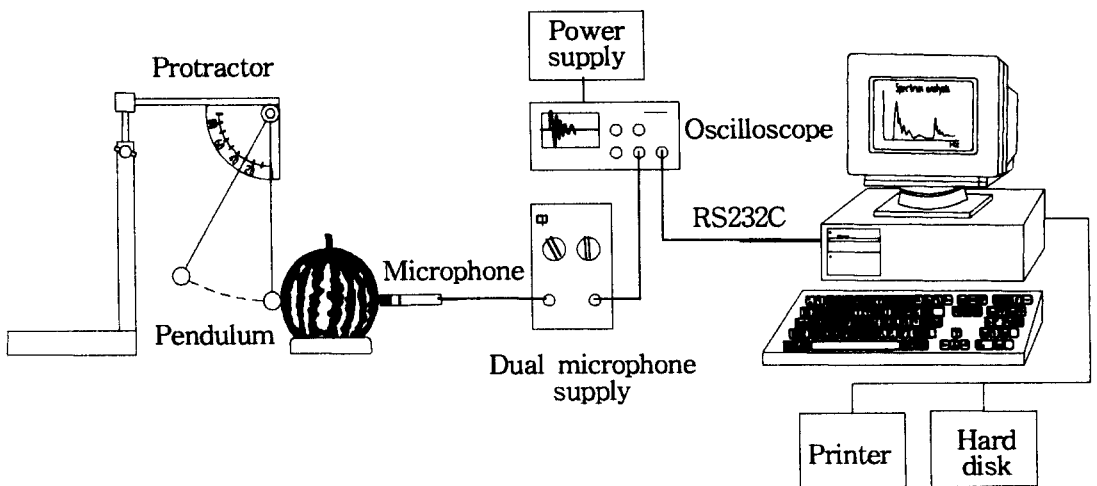


Fig. 1 Schematic diagram of measuring system for acoustic impulse responses.

Table 1 Specification of measuring system for acoustic impulse responses

Item	Specifications	Remark
Microphone set	<ul style="list-style-type: none"> . microphone : 4~40kHz . microphone preamplifier : 3~200kHz . dual microphone power supply : 200V, -5~55dB channel gain range 	Bruel & Kjaer
Digital oscilloscope	<ul style="list-style-type: none"> . Sampling rate : max. 2GS/s . Two channel . Bandwith : 400MHz 	Tektronix model : TDS380
Digital refractometer	<ul style="list-style-type: none"> . Measurement range : Brix 0.0~55.0%(min. unit Brix 0.1%) 	ATAGO Co. model : PR-1
Digital balance	<ul style="list-style-type: none"> . Weighing range : 0.5~25kg 	CAS Engineering model : SC-25P
Texture analyzer	<ul style="list-style-type: none"> . Max. force : 250kg . Force accuracy : 0.025% . Speed range : 0.01~5mm/sec 	STABLE MICRO SYSTEMS model : TA-HD/250

(2) 음향신호 데이터 수집

타격각도를 40° 로 하여 수박의 적도부에 임펄스를 가하고 그 타격점에서 180° 되는 지점에서 마이크로폰으로 음향신호를 검출하였으며, 이 신호를 마이크로폰 앰프에서 50dB로 증폭시킨다음 디지털오실로스코프에서 5kHz로 샘플링하였다. 이 때 데이터 점수는 1000점으로 RS232C를 통해 컴퓨터의 하드디스크에 데이터를 저장하였다.

(3) 외관 및 파괴적인 방법에 의한 품질평가

비파괴적으로 내부품질을 판정하는 모델을 개발하는데 객관적인 기준이 될 수 있는 수박의 품질에 관한 물성들(무게, 밀도, 당도, 경도, 과육의 상태 등)을 측정하고, 속도와 공동 여부를 검사하였다. 먼저 타격실험에 앞서 무게와 밀도를 측정한 다음, 타격실험 후 공시재료를 반으로 쪼개어 껍질두께를 측정하였다. 당도는 굴절당도계(DBX-55ATAGO, Japan)를 이용하여 Brix 당도로 측정하였다. 속도의 지표가 될 수 있는 경도는 당도가 가장 높게 나타나는 반구의 구심부분을 TA-HD2 Texture Analyzer를 이용하여 측정하였다. 이 때 ASAE Standard에 명시되어 있는 직경이 11.2mm가 되는 프로브를 사용하였으며, 하중재하 속도와 관입깊이는 각각 25mm/min, 7.9mm로 하였다.

다. 음향신호처리

시간영역의 음향신호를 FFT처리를 할 경우 수박의 특성을 나타내는 주요 피크들 외에 작은 피크 성분들이 많이 나타나 수박의 공진 주파수를 검출하는데 어려운 점이 있다. 본

연구에서는 최대엔트로피법(Maximum Entropy Method, MEM)기법을 도입하여 음향신호에 나타나는 노이즈 성분의 작은 피크들을 제거하여 매끄러운 스펙트럼을 구하였다. MEM은 공진특성을 갖는 신호(지진파, 음성, 지자기변동)을 분석할 때 유용한 방법으로 공진기를 종속 접속한 시스템이라 말할 수 있다. MEM은 FFT보다 확실히 높은 분해능을 가지고 정확한 위치에서 피크를 추정할 수 있는 장점을 가지고 있다. MEM에서 신호 $x[n]$ 은 식(1)과 같다.

$$x[n] = - \sum_{k=1}^M a_k x[n-k] + \delta[n] \quad \text{----- (1)}$$

여기서, $x[n]$ = 공진 시스템을 통해 얻어진 신호

$\delta[n]$ = 입력신호

a_k = 예측계수

M = 시스템 차수

신호 $x[n]$ 을 발생하는 시스템의 주파수 특성은 a_k 에 의해 정해지므로 a_k 를 구함으로써 $x[n]$ 의 스펙트럼을 구할 수 있다. 공진 시스템의 파워스펙트럼 $P(\omega)$ 는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$P(\omega) = \frac{1}{\left| 1 + \sum_{k=1}^M a_k \exp(-j\omega kT) \right|} \quad \text{----- (2)}$$

여기서, T = 샘플링 간격

ω = 각주파수 ($\omega = 2\pi f$, f 는 샘플링 주파수)

$-j$ = 허수단위

M = 시스템 차수

라. 인공신경망에 의한 내부품질 예측 알고리즘

수박의 음향신호를 FFT에 의한 스펙트럼으로 나타내면 내부품질의 특징을 보이는 공명주파수를 얻을 수 있다. 많은 연구자들이 과일의 음향스펙트럼에서 첫 번째, 두 번째, 세 번째 피크주파수, 밀도, 무게를 이용하여 속도지수를 표현하고자 하였으나 그 상관계수가 높지 않았다. 수박의 경우, 속도나 내부품질의 정도에 따라 주파수의 변이를 볼 수 있지만, 내부품질의 차이가 다양하여 세 피크주파수에 의해 정량화된 패턴을 찾는다는 상당한 어려움이 있다. 이러한 어려움 때문에 인공 신경망을 이용하여 농산물의 등급을 판정하고자하는 연구들이 수행되어 왔다.

인공 신경망 학습과 검증의 높은 정확도를 얻기 위해서는 내부품질에 가장 영향을 미치는 유효한 데이터를 선정하여야 한다. 총 49개의 시료중 35개 시료는 인공 신경망 학습에 사용하고 14개 시료를 검증하는데 사용하였다. 학습 및 검증에 사용할 데이터는 MEM에서 구한 스펙트럼을 정규화한 후, 전체 주파수영역중 500~1500Hz 주파수대역의 100개의 매그

니튜드(magnitude)값을 데이터로 선정하고, 피크 주파수를 검출한 후 6개 매그니튜드값을 데이터를 선정하여 파일로 저장되도록 하였다.

본 연구에서 인공 신경망은 입력층과 은닉층, 출력층의 3개 층으로 구성하였으며, 입력층은 신호처리 프로그램에서 주파수대역과 피크 주파수의 매그니튜드값으로 만들어진 데이터로 사용하였다. 주파수대역의 입력층 데이터 수는 100개, 피크 주파수의 입력층 데이터 수는 6개이었다. 또한 오차 역전파 학습법을 이용하였으며, 전달함수로는 logsigmod 함수를 사용하였다. 각 경우마다 100,000번의 학습을 하였으며, 표 2에 인공 신경망의 학습조건을 나타내었다.

Table 2 Conditions of neural network

Data type	Number of unit			Transfer function
	Input layer	Hidden layer	Output layer	
Frequency bandwidth	100	10	2	Logsigmoidal activation function $\text{logsig}(n) = \frac{1}{1 + \exp(-n)}$
		15		
		20		
		30		
		50		
Peak frequency	6	3	2	
		6		
		9		
		12		
		15		
		18		
		21		

3. 결과 및 고찰

가. 수박의 물성

본 연구에 사용된 공시재료의 물성을 표 3에 나타내었다.

Table 3 Physical properties of watermelon used in experiment

Grade	Date		diameter (m)	weight (kg)	density ($\times 10^3 \text{kg/m}^3$)	volume ($\times 10^{-3} \text{m}^3$)	sugar content (Brix %)	firmness (N)
	full bloom	harvest						
ripe	98.8.13	98.9.26	0.210~0.275	5.95~8.80	0.8696~0.9931	6.10~9.25	9.8~12.7	3.88~12.63
unripe	98.8.24	98.9.26	0.194~0.225	4.35~7.70	0.9184~1.2317	4.10~8.05	8.3~10.4	8.62~22.57
crack	98.8.13	98.9.26	0.210~0.228	5.90~6.75	0.862~0.915	6.45~7.60	9.8~10.6	9.80~17.32

속도별 경도와 당도를 측정된 결과는 그림 2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 경도는 등숙정도가 적숙으로 진행됨에 따라 감소하는 경향을 보였다. 경도 측정시 수박은 사과와 달리 과육의 상태(황대, 과숙 등)에 따라 등숙정도가 같다고 하더라도 경도 차이가 많이 난다. 경도를 보다 정확히 측정할 수 있다면 비파괴 품질판정시 치감과 같은 품질요인을 평가하는데 좋은 지표가 되리라 판단 된다.

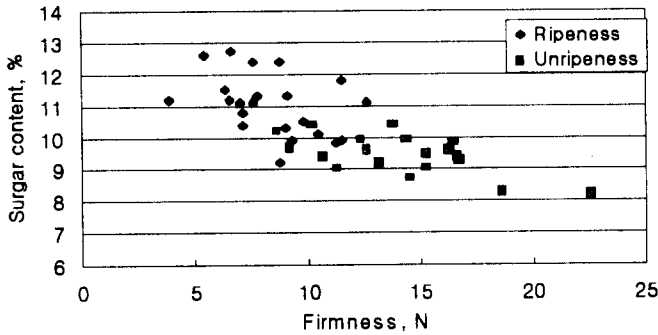


Fig. 2 Firmness and sugar content of watermelons used in experiment

나. 수박의 음향 스펙트럼

그림 3에서 보는바와 같이 수박의 속도가 미숙의 상태일 때 첫 번째 피크이후에 좁은 간격으로 파형의 진동이 일어나고, 적숙상태가 되면 균일한 시간간격으로 파형의 진동이 일

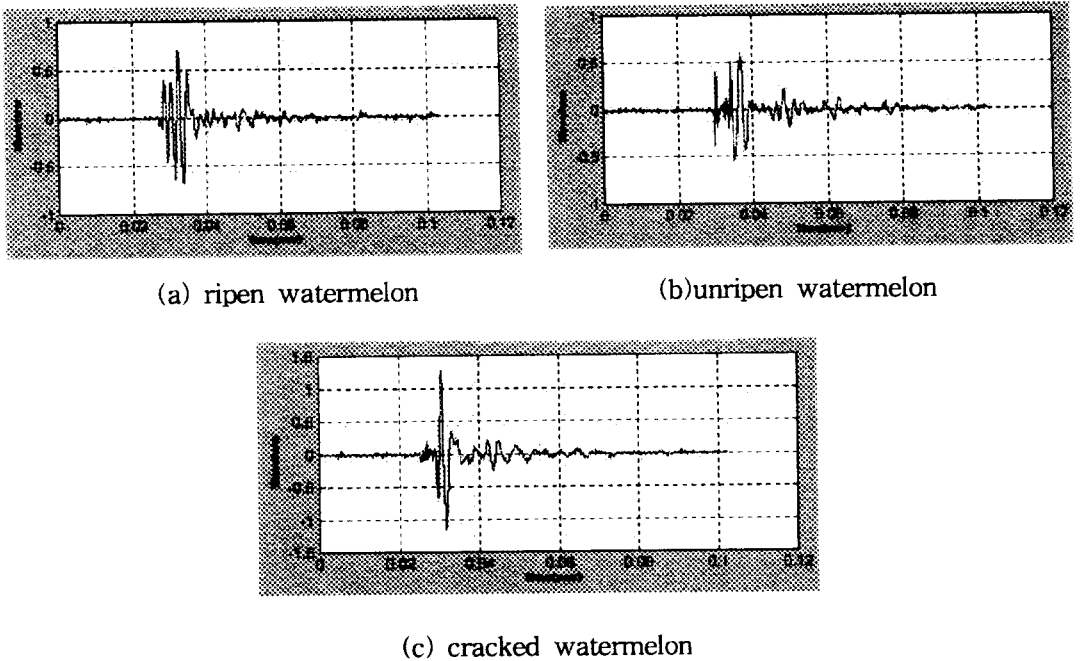


Fig. 3 The acoustic waves of ripen, unripen and cracked watermelon in time domain.

어난다. 만약, 균일한 시간간격의 파형이 아닌 경우에는 수박의 내부품질이 이상이 있다고 판단할 수 있다. 이 파형들을 주파수로 형태로 변환하게 되면 다른 연구자들이 보고한 것처럼 속도가 적속으로 진행됨에 따라 특정 공명주파수가 감소하게 된다. 공동과의 파형은 첫 번째 피크가 공동의 정도에 따라 작게 나타나는 경향이 있다.

그림 4에 FFT에 의해 구한 스펙트럼과 MEM에 의해 구한 스펙트럼을 나타내었다. MEM의 차수는 80차로 FFT의 스펙트럼의 공명주파수와 거의 일치하는 차수로 설정하였다.

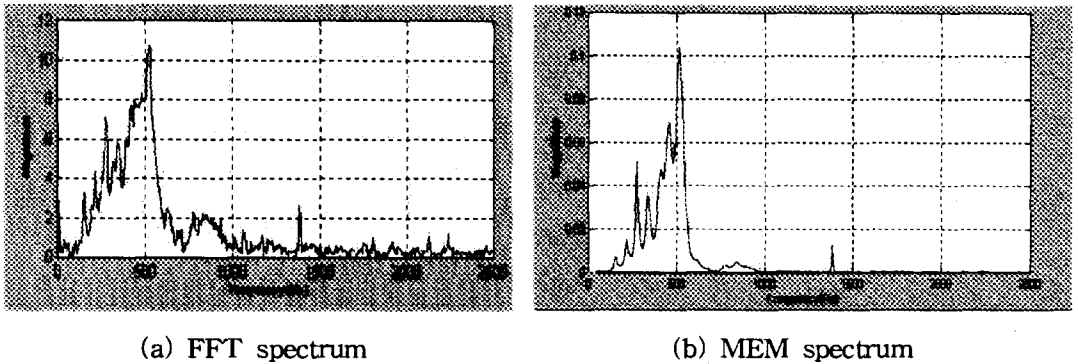


Fig. 4 The frequency spectrums obtained with an FFT and a MEM.

다. 인공 신경망 학습 및 검증

인공 신경망 학습 및 검증에 사용한 입력패턴, 목적패턴, 검증패턴수는 각각 33, 33, 15 개이었다.

주파수대역의 100개의 매그니튜드 값을 데이터로 사용하여 입력층 유닛을 100개, 속도와 공동의 유무인 데이터를 사용한 출력층의 유닛을 2개, 은닉층의 유닛수를 10, 15, 20, 30, 50개로 변화를 주면서 인공 신경망을 학습시켰으며, 피크 주파수의 6개 매그니튜드 값을 데이터로 사용하여 입력층 유닛은 6개, 속도와 공동의 유무인 데이터를 사용한 출력층 유닛을 2개, 은닉층의 유닛수를 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21개로 변화를 주면서 인공신경망을 학습시킨 결과를 표 4에 나타내었으며, 학습시키지 않은 미지의 데이터를 가지고 검증한 결과를 표5에 나타내었다.

표 4에서 보는 바와 같이 주파수대역의 경우 은닉층의 유닛 수가 10, 20, 50일 때 속도 및 공동에 대해 각각 100%의 학습 정확도를 얻었으나, 표 5에서 보는 바와 같이 검증결과 속도는 80, 80, 73.3%, 공동의 경우는 73.3, 73.3, 80%로 다르게 나타났다.

피크 주파수의 경우는 은닉층의 유닛 수가 21일 때 속도 및 공동에 대한 학습 정확도가 각각 100%이었지만, 검증결과 속도의 경우는 은닉층의 유닛 수가 15일 때 92.9%로 가장 높았으며, 공동의 경우는 은닉층의 유닛 수가 9, 12, 18, 21일 때 78.6%의 정확도를 나타내었다.

Table 4 Learning results of neural network with the number of hidden layer units

Data type	No. of hidden layer unit	10	15	20	30	50		
Freq. bandwidth	Detection rate of ripeness(%)	100	97	100	97	100		
	Detection rate of crack(%)	100	100	100	100	100		
	MSE	0.0001253	0.0152635	0.0001212	0.0152545	0.00011556		
Peak freq.	No. of hidden layer unit	3	6	9	12	15	18	21
	Detection rate of ripeness(%)	97.1	94.3	100	100	97.1	100	100
	Detection rate of crack(%)	94.3	94.3	97.1	91.4	94.3	97.1	100
	MSE	0.04399	0.04719	0.01517	0.04577	0.04382	0.01509	0.00167

Table 5 Accuracy of the internal quality evaluation of watermelon by neural network algorithm

Data type	No. of hidden layer unit	10	15	20	30	50		
Freq. bandwidth	Detection rate of ripeness(%)	80	66.7	80	60	73.3		
	Detection rate of crack(%)	73.3	80	73.3	80	80		
Peak freq.	No. of hidden layer unit	3	6	9	12	15	18	21
	Detection rate of ripeness(%)	78.6	78.6	78.6	42.9	92.9	85.7	71.4
	Detection rate of crack(%)	71.4	71.4	78.6	78.6	71.4	78.6	78.6

4. 결론

본 연구는 인공 신경망을 이용하여 수박의 내부품질중 속도와 공동을 판정하는 알고리즘을 개발하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수박의 음향신호는 내부품질의 차이에 따른 뚜렷한 경향을 보였다. 시간영역의 음향신호를 관찰해 보면 적숙과의 경우 균일한 시간간격으로 피크점들을 갖으며, 미숙과의 경우는 첫 번째 피크후에 좁은 시간간격의 피크점들이 나타났으며, 공동과의 경우 첫 번째 피크가 작게 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 특징들은 신경망의 학습 및 검증에 필요한 유효한 데이터를 선정하는데 기준이 되었다.
2. 인공 신경망 학습 및 검증을 각각 35, 14개의 패턴을 사용하여 수행한 결과 주파수대역에서의 학습 정확도는 97~100%이었으며, 검증의 정확도는 속도의 경우 66.7~80%, 공동의 경우 73.3~80%이었다. 피크 주파수에서의 학습의 정확도는 91.4~100%이었으며, 검증의 정확도는 42.9~92.9%로 은닉층의 유니트수가 15일 때 속도의 판정율이 92.9% 가장 높았다.

5. 참고문헌

1. 김만수, 최동수, 이영희, 조영길. 1998. 수박의 음향특성에 관한 연구. 한국농업기계학회지 23(1) : 55~66
2. 김창수, 명병수. 1997. 반발특성을 이용한 수박의 속도판별 센서의 개발. 한국농업기계학회지 22(1) : 49~58
3. 박선호. 1995. 디지털 신호처리의 기초와 DSP응용실무. 국제테크노정보연구소
4. 이강진, W. R. Hruschka, J. A. Abbott, 노상하, B. S. Park. 1998. 근적외선을 이용한 사과의 당도예측(II)-부분최소제곱 및 인공신경회로망 모델. 한국농업기계학회 23(6) : 571~582
5. 이경옥. 1998. MATLAB 길잡이. 멀티정보사
6. 이상엽. 1998. 기계시각을 이용한 마늘 선별 알고리즘 개발. 서울대학교 석사학위논문
7. 이수희, 노상하, 이종환. 1995. 신경회로망을 이용한 사과의 선택선별 알고리즘 개발에 관한 연구. 한국농업기계학회 20(4) : 376~382
8. 임종수. 1998. MATLAB 완벽가이드. 가상과 현실
9. 이채욱. 1996. 디지털 신호처리. 청문각
10. 南茂夫. 1986. 科學計測のための波形データ處理. CQ出版社
11. MATLAB Signal Processing Toolbox User's Guide. The MATHWORKS inc.
12. MATLAB Neural Network Toolbox User's Guide. The MATHWORKS inc.
13. Sugiyama J., T. Katsurai, J. Hong, H. Koyama, K. Mikuriya. Melon ripeness monitoring by a portable firmness tester. Transactions of the ASAE 41(1) : 121~127