Food Engineering Progress
Vol. 11, No. 1. pp. 38~44 (2007.2)

근적외선을 이용한 사과의 내부갈변 및 밀병 선별 알고리즘 개발에 관한 연구

서영욱 · 이강진* · 노상하
서울대학교 바이오시스템공학과, 농촌진흥청 농업공학연구소*

Study for Nondestructive Detection Algorithm Development of the Internal Browning and Watercore of Fuji Apple using VIS/NIR Transmittance Spectroscopy

Youngwook Seo, Kang Jin Lee*, and Sang Ha Noh

Dept. of Biosystems and Biomaterials Engineering, Seoul National University,
**National Institute of Agricultural Engineering, Rural Development Administration*

Abstract

The goal of this study is to develop a non-destructive method to detect the internal browning and water-core in Fuji apples by VIS/NIR transmittance spectroscopic method. To acquire the transmitted energy spectra of an apple, a proto-type spectroscopic sensing unit was made with a sample holder, light sources, a real time spectrometer, etc. The apple samples having the internal rots were artificially made. All spectra of the Fuji apple samples showed three peaks near 640 nm, 710 nm and 800 nm, respectively. And the transmitted energy levels of the water-core apples were higher than the sound and those of the internally rotted samples were the lowest. Classification tests, which were made with the normalized peak values and peak difference values, indicated that the most efficient classification algorithm is primarily to separate out the internally rotted from the given Fuji apples by the peak difference values of $\frac{|T_{710}-T_{800}|}{T_{675}}$, and secondly, classify the water-core apples by the values of ($\frac{|T_{645}-T_{710}|}{T_{675}}$). With such an algorithm, CCRs (correct classification ratios) of the sound, the water-core and the internally rotted samples are expected to be 100%, 91.4% and 97.6%, respectively. Classification by SIMCA method resulted that CCRs for the sound, the water-core and the internal rot were 100%, 70.0% and 81.0%, respectively.

Keywords : apple, nondestructive detection, internal browning, water-core, transmittance

서 론

사과의 내부품질을 결정하는 요소에는 당도, 산도, 경도, 성숙도, 밀병의 유무 및 내부갈변의 유무 등이 있다. 밀병(water-core)은 생육장해의 한 종류로서 당이 솔비톨(sorbitol)의 형태에서 성숙이 진행되면서 전류능력이 저하되어 솔비톨 상태로 세포 내 및 세포와 세포 사이의 공극에 집중되면서 나타나는 비정상적인 현상이다(Batjer *et al*, 1966; Meheriuk *et al*, 1982; Williams *et al*, 1973). 이러한 사과의 밀병은 내부갈변(internal browning)으로 증상이 확대되면서 저장에 어려움이 생기게 된다. 사과의 내부품질을 선별하기 위해 가시/근적외 분광분석(Upchurch *et al*, 1997), X-ray(최선태, 2001; Kim *et al*, 2000; Shahin, 1999), Machine Vision (Throop *et al*, 1989), 초음파(김기복 등, 2003), NMR (Nuclear Magnetic Resonance)(Chayaprasert *et al*, 2005), MRI(Magnetic Resonance Image) (Clark *et al*, 2003; Gonzalez *et al*, 2001; Barreiro, 2000) 등을 이용한 다양한 연구가 수행되

Corresponding author: Sang-Ha, Noh, Ph.D, Professor, Dept. of Biosystems and Biomaterials Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shillim-dong, Kwanak-ku, Seoul, 151-742, Korea.
Phone: 02-880-4603, Fax: 02-878-8316
E-mail: noh@snu.ac.kr

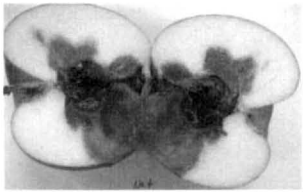


Fig. 1. Internal browning.

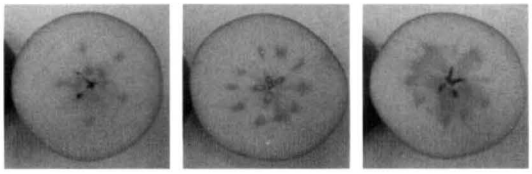


Fig. 2. Water-core of Fuji apples (a) minor, (b) mild of Fuji apple and (c) severe.

고 있다. 특히 가시/근적외선 분광분석을 활용한 농산물 내부품질 연구는 밀감(Ryu, 2000), 고구마(Ryu *et al*, 2005), 배(Ryu *et al*, 2003) 등에서 수행되었으며 성능이 우수한 알고리즘이 보고된 바 있다. 본 연구에서는 가시 및 근적외 투과광의 최소 혹은 최대 세기 값(intensity value)으로 정규화하여 갈변 및 밀병과와 정상과를 판별하는 알고리즘 개발 가능성을 알아보고, SIMCA 법을 활용하여 정상, 갈변 및 밀병과의 판별 성능을 검토하였다.

재료 및 방법

재료

본 연구에 사용한 사과 품종은 후지사과이며 과일상점에서 구입하였다. 내부갈변과는 부패 균을 주입하여 3개월간 저장 후에 사용하였다. 시료의 사진은 Fig. 1과 Fig. 2에, 실험에 사용한 시료에 관한 정보는 Table 1에 실었다. Fig. 2에서는 밀병과의 정도에 따라 (a) 약, (b) 중간, (c) 강의 단계로 나누었으며 (a) 약의 경우 스펙트럼으로 밀병을 확인하기 어려운 경우가 존재하므로 본 연구에는 중간 및 강의 밀병만을 밀병과로 구분하여 분석하였다. 모든 시료의 스펙트럼을 측정한 후에 내부 품질을 확인하기 위해서 사과를 절반으로 잘라서 살펴보았다.

Table 1 Fuji apple samples used for tests

Type of sample	No. of samples
Class 1 (sound)	50
Class 2 (water-core)	45
Class 3 (internal Browning)	50
Total	145

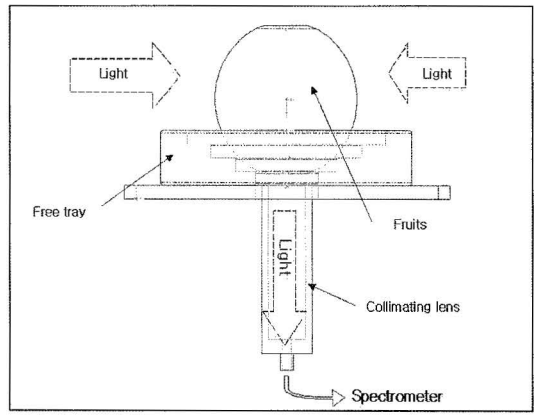


Fig. 3. Schematic diagram of a spectrum.

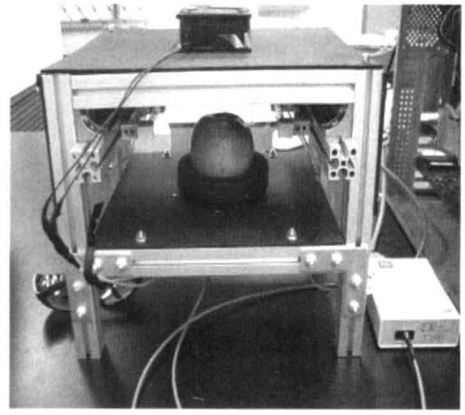


Fig. 4 Outlook of measurement device experimental apparatus.

실험장치

후지사과의 투과스펙트럼을 얻기 위해서 간이 실험장치를 제작하여 실험에 사용하였다(Fig. 3, Fig. 4). 광원은 500 W급 텅스텐-할로겐 램프를 2개 설치하였고, 광프로브를 아래에 설치해서 투과광을 획득하였다. 시료의 자세를 일정하게 유지하고, 외부광을 차단하기 위해서 개발된 시료 접시를 사용하였다. 사과시료는 400-1100 nm의 파장대역에서 투

과광을 분광기(S2000, OceanOptics사, USA)를 사용하여 획득하였다.

스펙트럼 분석

사과를 투과한 스펙트럼은 시료의 크기, 단단함, 숙성도, 화학성분 및 외부의 잡음 등의 다양한 요인에 영향을 받는다. 본 연구에서는 다양한 내외부의 환경요인을 최소화하기 위해서 스펙트럼을 평활화 및 전처리를 하여 사용하였다. 본 연구에 사용한 평활화 알고리즘은 PLS_toolbox(version 2.0, Eigenvector Research, Inc.,USA)에서 제공하는 Savitzky-Golay 알고리즘을 사용하였다. 평활화된 데이터는 95% 신뢰구간에서 *t*-test를 거쳐 outlier를 제거하였다. 이 과정까지 마친 스펙트럼은 각 스펙트럼의 최소값 및 최대값을 이용한 정규화 과정을 거쳐서 정상, 밀병 및 내부갈변의 스펙트럼이 가지는 각 봉우리 값들의 차 및 비를 구하게 된다. 봉우리 값의 차를 PDV(Peak Difference Value), 봉우리 값의 비를 PV(Peak Value)라고 명명하였다. 최대값으로 정규화한 경우 PV는 1로 나누어서 비의 효과를 나타나지 않는 경우도 있기 때문에 PV라고 명명하게 되었다. 본 연구에서 사용하게 되는 PV 및 PDV 식은 식 (1) 및 (2)에 나타내었다.

$$PV = \frac{T_{\lambda i}}{T_{\lambda j}} \tag{1}$$

$$PDV = \frac{(T_{\lambda i} - T_{\lambda j})}{T_{\lambda k}} \tag{2}$$

여기에서, λ_i, λ_j 는 λ_i 및 λ_j 부근의 봉우리 값, λ_k는 λ_k nm파장 부근의 최대값 및 최소값을 나타내고 있다.

또한, 본 연구에서는 Maesschalck 등(1999)이 제안한 SIMCA(Soft Independence Modeling of Class Analogy) 알고리즘을 사과의 내부 이상과 선별에 제안하였다. 이것은 일종의 supervised 이산법(discrimination method)으로서 PCA(Principal Component Analysis)를 이용하여 각 클래스를 독립적으로 취급하여 고유한 클래스별 특징을 찾아내는데 적합한 정성알고리즘이다. 사과의 투과광은 Matlab(version 6.5, MathWorks, USA)과 PLS Toolbox(version 2.0, MathWorks, USA)를 사용하여 분석하였다.

PD, PV 및 SIMCA를 활용하여 선별한 결과값은 CCR(Correct Classification Rate)을 이용하여 모델의 적합성을 판단하였다. CCR은 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$CCR(\%) = \frac{(\text{number correctly classified samples})}{(\text{number of total sample})} \times 100 \tag{3}$$

결과 및 고찰

투과광의 특성

Fig. 5는 500-900 nm 파장대역에서 획득한 후지 사과의 정상(-o-, 청색), 밀병(-*-, 녹색) 및 내부갈변(-l-, 적색)의 스펙트럼을 평균한 그림이다. 그림에서 675및 765 nm 부근에서 엽록소 및 물의 흡수파장대역으로 판단되는 흡수파장대역을 관찰할 수 있으며, 각 시료마다 645, 710 및 800 nm의 3곳에 봉우리가 있음을 볼 수 있다.

Fig. 6은 675 nm 부근의 최소값으로 전(全) 파장

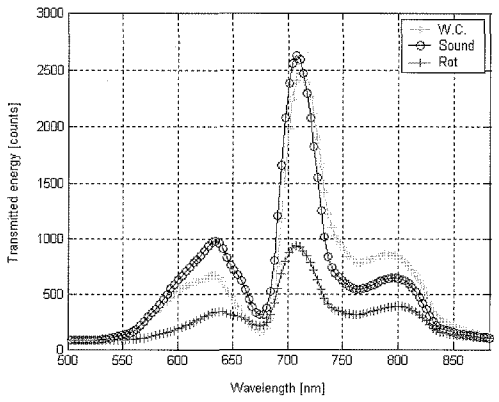


Fig. 5. Mean transmitted energy spectra.

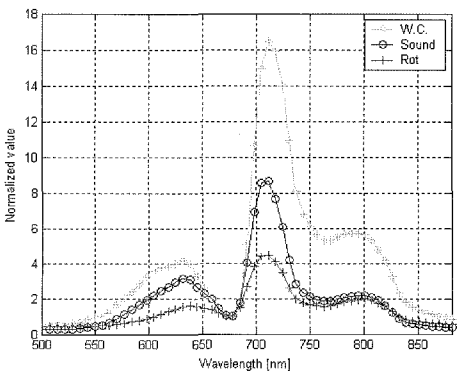


Fig. 6. Mean normalized transmitted energy spectra.

대역의 스펙트럼을 나눈 값을 보여주고 있다. 최소값으로 정규화한 결과 Fig. 5에서보다 정상과의 스펙트럼이 다른 두 종류의 스펙트럼에 비해 두드러지게 값의 변화(축소)된 모습을 볼 수 있다. 그 결과로 밀병과의 봉우리가 유난히 커 보이는 효과를 낳고 있다. 본 연구에서 한 지점의 파장을 선정하지 않고 파장대역 부근의 값에서 최소값 혹은 최대값을 이용하는 이유는 같은 시료 클래스의 스펙트럼이라도 약간씩 차이가 있기 때문에 한 지점의 값으로는 정확한 최소 혹은 최대값을 찾을 수 없기 때문이다. Fig. 6에서 800 nm 부근의 밀병과의 스펙트럼이 다른 두 종류의 사과와 확연히 차이가 나는 것으로 보아 800 nm 부근의 봉우리 값만으로도 밀병과를 선별하는데 충분한 기준이 될 것으로 보인다. 또한, 710 nm 부근의 봉우리 값은 세 종류의 사과가 뚜렷한 차이를 보이고 있어서 좋은 선별 기준이 될 것으로 기대된다.

PV 및 PDV를 이용한 선별

식 (1)에 표현한 PV(Peak Value) 식을 이용하여 구체적으로 식 (4)와 식 (5)를 만들어 시료의 선별에 활용하였다. Fig. 7은 PV_{12}를 이용하여 세 종류의 시료를 동시에 선별하는 결과값을 보였다.

$$PV_{11}=\frac{T_{645}}{T_{675}},\quad PV_{12}=\frac{T_{710}}{T_{675}},\quad PV_{13}=\frac{T_{800}}{T_{675}} \tag{4}$$

$$PV_{21}=\frac{T_{645}}{T_{710}},\quad PV_{22}=\frac{T_{800}}{T_{710}} \tag{5}$$

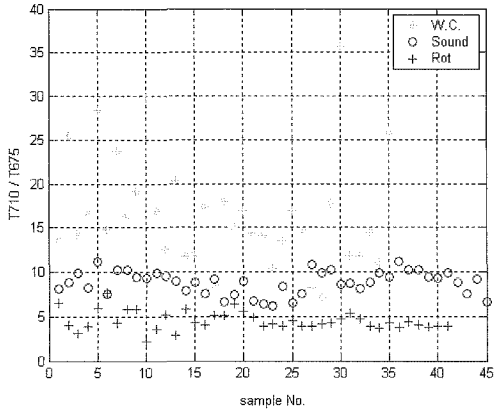


Fig. 7. Distribution of PR values (T_{710}/T_{675}) of Fuji samples

Table 2 Classification result of the sound, the water-core and the browned Fuji apple samples by using the ratios of (T_{710}/T_{675})

By model \ Actual	Sound (45)	Water-core (35)	Browning (41)	Avg. CCR
Class 1 (sound)	45	5	3	
Class 2 (water-core)	0	30	0	
Class 3 (Browning)	0	0	38	
CCR (%)	100	85.7	92.7	92.8

*The number in parenthesis is total number of the corresponding sample.

Fig. 7의 결과는 Fig. 6에서 675 nm 부근의 봉우리 값으로 선별 가능성을 높이 예측했으며 그 결과도 유효함을 확인할 수 있었다. 이것은 Fig. 5에서는 찾아볼 수 없는 정규화된 데이터가 가지는 장점임을 알 수 있다. 위의 그림에서 나타난 결과를 CCR을 이용해 정리한 것을 Table 2에 실었다.

사과 선별에 사용된 PDV값은 식 (6)과 (7)에서 정의하였다.

$$PDL_{12}=\frac{|T_{645}-T_{710}|}{T_{675}},\ PDL_{13}=\frac{|T_{675}-T_{800}|}{T_{675}}$$
$$PDL_{23}=\frac{|T_{710}-T_{800}|}{T_{675}} \tag{6}$$

$$PDL_{13}=\frac{|T_{645}-T_{800}|}{T_{710}} \tag{7}$$

분석결과 식 (6) 에서 정의한 PDV값 중에서는 PDL_{12}와 PDL_{23}이 가장 분별능이 좋은 것으로 나타났다(Fig. 8, Fig. 9). PDL_{12}의 경우 정상과와 밀병

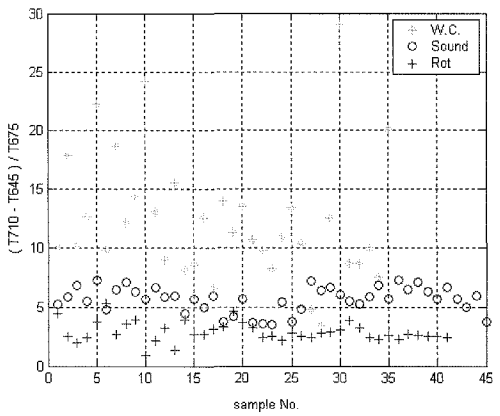


Fig. 8 Distribution of PDL_{12} values.

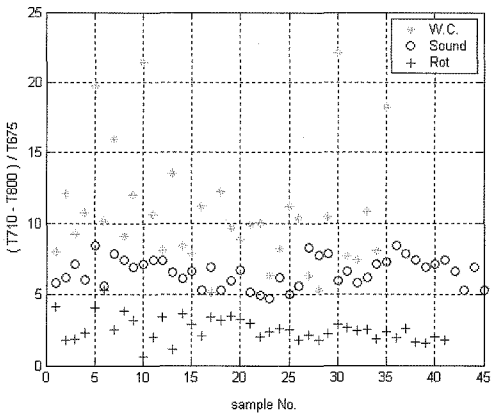


Fig. 9 Distribution of PDL_{23} values.

과의 분별성능이 91.4%로 가장 좋았고(Table 2), PDL_{23}의 경우에는 정상과와 내부갈변과의 분별성능이 97.6%로 가장 양호한 결과를 나타내고 있음을 볼 수 있다(Table 3).

Table 2와 3에서 볼 수 있듯이 전체적인 선별성능은 87.8%로 두 알고리즘의 성능이 유사함을 알 수 있으며, 각 알고리즘으로 밀병 혹은 내부갈변과를 각각 선별하는 방식으로 중복 사용하면 더 좋은 선별성능을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

SIMCA법을 이용한 선별

총 121개의 시료를 3개의 class로 나누어 SIMCA법을 이용한 정성분석을 시도하였다. 정상시료는 class 1, 밀병시료는 class 2로 하였으며 class 3는 내부갈변과로 나누었다. 또한 외부 환경의 잡음을 최소화하기 위해서 SNV(Standard Normal Variant), MSC, 1차 및 2차 미분 등을 사용하였으며 가장 좋은 조합을 이용하여 SIMCA모델에 적용하였다. 실험결과 본 연구에서는 전처리없이 평활화한 데이터가 가장 좋은 예측성능을 가진 것으로 나타났다.

Table 3 Classification result of the sound, water-core and browned Fuji apple samples by using the peak differences ($|T_{645}-T_{710}|/T_{675}$)

By model \ Actual	Sound (45)*	Water-core (35)*	Browning (41)*	Avg. CCR
Class 1 (sound)	45	3	9	
Class 2 (water-core)	0	32	0	
Class 3 (Browning)	0	0	32	
CCR (%)	100	91.4	78.1	87.8

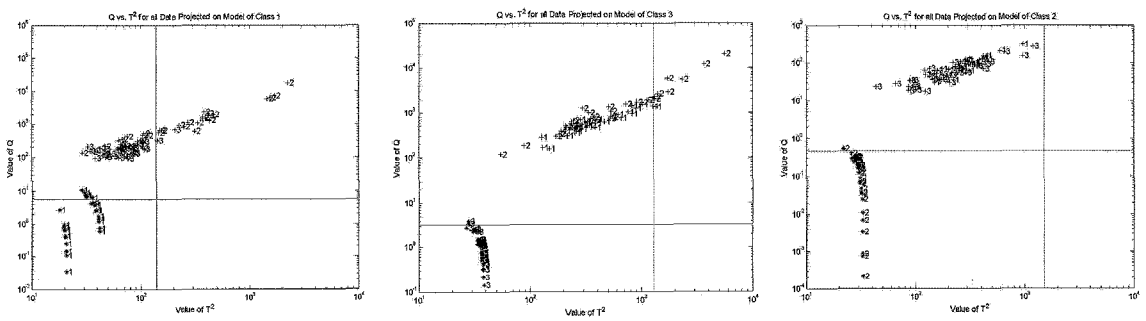
*The number in parenthesis is total number of the corresponding sample.

Table 4. Classification result of the sound, water-core and browned Fuji apples by using the peak differences ($|T_{710}-T_{800}|/T_{675}$)

	Sound (45)*	Water Core (35)*	Browning (41)*	Avg. CCR
Class 1 (sound)	45	12	1	
Class 2 (water-core)	0	23	0	
Class 3 (browning)	0	0	40	
CCR (%)	100	65.7	97.6	87.8

*The number in parenthesis is total number of the corresponding sample.

먼저 85개의 시료를 활용하여 SIMCA 모델을 개발하였으며, 나머지 시료로 모델을 검증하였다. 그 결과는 Fig. 10은 각기 다른 3개의 class가 가지는 Q-T^2 값을 보여주고 있다. 여기서 Q는 각 스펙트럼별 잔차의 제곱 합이며, T^2는 스코어의 제곱 합을 나타낸다. 위의 그림에서 나타내는 Q-T^2 값은 신뢰구간 95%의 *t*-test를 거쳐서 만들어지게 된다. 이렇



(a) sound apple (b) watercore (c) internal browning

Fig. 10. Q-T^2 plot of the sound, the water-core and internally browned Fuji apple samples.

Table 5 Validation results of the SIMCA model to classify the Fuji apple samples into the sound, the water-core and the internal browning

Actual By model	Sound (15)	Water-core (10)	Browning (11)	Average CCR (%)
Class 1 (sound)	15	3	1	
Class 2 (water-core)	0	7	1	
Class 3 (browning)	0	0	9	
CCR (%)	100	70	81.8	83.9

게 만들어진 모델에 미지의 시료 스펙트럼으로 모델의 검증시험을 실시하였다. 그 결과는 Table 5에 나타내었다.

SIMCA법을 이용한 정상, 밀병 및 내부갈변과의 선별결과는 83.9%의 선별성능을 보였다.

결 론

사과의 내부 갈변 및 밀병은 저장 중 그 정도가 심해질 우려가 있으며, 같은 장소에서 저장하는 다른 과실의 품질에 직접적으로 영향을 끼칠 수 있다. 소비자들에게 좋은 품질의 과실을 제공하기 위해서는 내부 품질을 선별하는 과정을 통해서 내부 이상과를 선별하는 기술이 필요하다.

본 연구에서는 근적외선 투과광을 이용하여 사과의 내부 갈변 및 밀병과를 선별할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

후지 사과의 모든 스펙트럼에서 645, 710 및 800 nm 부근에서 봉우리를, 675, 765 그리고 835 nm에서는 흡수 파장대역을 확인하였다. 675 nm 부근에서 최소값으로 전 파장대역을 나누어 정규화한 스펙트럼은 밀병이 정상과나 내부 갈변과 보다 더 큰 에너지 투과값을 가지고 있음을 알 수 있다. 후지 사과의 투과 스펙트럼을 분석한 결과를 바탕으로 내부 갈변과 선별에는 스펙트럼의 차를 이용한 $\frac{|T_{710}-T_{800}|}{T_{675}}$ 가, 밀병 선별에는 $\frac{|T_{645}-T_{710}|}{T_{675}}$ 알고리즘이 97.6%, 91.4%로 가장 좋은 결과를 보였다. 선별에는 두 알고리즘을 이용하여 각각의 내부 이상과를 선별하는 것이 가장 적합할 것으로 사료된다. 또한 SIMCA를 이용한 동시선별에서는 83.8%의 선별성능을 보였다.

참고문헌

김기복, 김만수, 정현모, 이상대, 2003, 저장기간에 따른 사과과육의 기계적 특성 및 초음파 파라미터. 한국농업기계학회지 **28(3)**: 239-244

최선태, 이종석, 정대성, 정현규, 장규섭, 2001, 비파괴적 방법에 의한 '후지' 사과의 내부갈변 판별. 한국원예학회지, **42(1)**: 83-86

황용수, 김일, 이재창. 1998. '후지'사과의 과실 성숙도와 저장 환경이 밀병, 과육 갈변 및 품질에 미치는 영향. 한원지. **39(5)**: 569-573

Barreiro, P., C. Ortiz, M. Ruiz-Altisent, J. Ruiz-Cabello, M.E. Fernandez-Valle, I. Recasens and M. Asensio. 2000. Mealiness assessment in apples peaches using MRI techniques, Magnetic Resonance Imaging, **18**: 1175-1181.

Batjer, L.P. and M.W. Williams. 1966. Effect of Alar on watercore and harvest drop of apples. Proc. Am. Soc. Hortic. Sci., **88**: 76-79

Chayaprasert, W. and R.L. Stroshine. 2005. Rapid sensing of internal browning in whole apple using a low-cost, low-field proton magnetic resonance sensor. Postharvest Biol. Technol **36**: 291-301

Clark, C.J., J.S. MacFall and R.L. Bieleski. 1998. Loss of watercore in Fuji apple observed by magnetic resonance imaging. Sci. Horti. **73**: 213-227

Gonzalez, J.J., R.C. Valle, S. Bobroff, W.V. Biasi, E.J. Mitcham and M.J. McCarthy. 2001. Detection and monitoring of internal browning development in 'Fuji' apples using MRI. Postharvest Biol. Technol. **22**: 179-188

Kim, S. and T.F. Schatzki. 2000, Apple watercore sorting system using X-ray imagery:. Algorithm development, Transactions of the ASAE, Vol. **43(6)**: 1695-1702

Maesschalck, R.De., A. Candolfi, D.L. Massart, and S. Heuerding. 1999. Decision criteria for soft independent modeling of class analogy applied to near infrared data, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, **47**: 65-77

Meheriuk, M., R.K. Prange, P.D Lidster and S.W. Porritt. 1982, *Postharvest disorder of appes and pears.* Agricultural Canada Publication Inc., Canada pp.39-41

Ryu, D. S. 2001. Development of nondestructive internal quality evaluation system for citrus using VIS/NIR transmittance spectroscopy, 2001. Ph.D. thesis of Seoul National University

Ryu D.S., S.H. Noh and H. Hwang. 2003. Nondestructive internal defects evaluation for pear using NIR/VIS Transmittance spectroscopy, Int. J. of Agri. Biosys. Eng., **4(1)**: 1-7

Ryu D.S., S.Y. Lee and S.H. Noh. 2005. On-line detection of internal defects of sweet potato using VIS/NIR transmittance spectroscopy. Proceeding of Academic PLAZA, FOOMA Japan, Vol. 12, pp 243-246

Shahin, M.A., E.W. Tollner, M.D. Evans, and H.R. Arabnia. 1999. Watercore features for sorting red Delicious apples : A statistical approach, Trans., of the ASAE, **42(6)**: 1889-1896

Throop, J.A., G.E. Rehkugler and B.L. Upchurch. 1989, Application of Computer Vision for Detecting Watercore in Apples, Trans. ASAE **32**: 2087-2092

Upchurch, B.L., J.A. Throop and D.J. Aneshansley. 1997. Detecting internal breakdown in apples using interactance measurements. Postharvest Biol. Technol. **10**: 15-19

Williams, M.W. and H.D. Billingsley. 1973. Watercore development in apple fruit as related to sorbitol levels in the tree sap and to minimum temperatures, J. Am. Soc. Horti. Sci. **98**: 205-207