

## 근적외선 분광분석법을 이용한 청과물의 비파괴 품질계측

이강진 · 강석원 · 최규홍

농업공학연구소 품질안전성판정연구실

### Nondestructive Quality Measurement of Fruits and Vegetables Using Near-Infrared Spectroscopy

Kangjin Lee, Sukwon Kang and Kyuhong Choi

Quality and Safety Evaluation Lab., National Institute of Agricultural Engineering

#### Abstract

The quality of fruits and vegetables is determined by internal factors such as sugar content, maturity, firmness, acid content, defect and safety, and external factors such as color, shape, size and weight. These factors are very various for the fruits harvested from the same tree, and standardization technique is necessary for the customers to select and buy the uniform quality. Many techniques, such as MRI, X-ray, CT, machine vision, have been introduced and studied to standardize the quality of fruits. However, near-infrared spectroscopy method is very close to practical use. Since this method was developed in 1963, it has been applied to various fields. For the fruits and vegetables, it has been contributed to development and wide use of sorting standardization technique during the last 10 years. This paper describes the theory, application, industrialization, and some issues of near-infrared spectroscopy. For the advanced technique, it is necessary for various researchers to participate in the development of precise and sensitive instrument which can detect a very small amount of components, the development of a portable instrument, and the development of robust calibration models and reference materials to solve the weak points of near-infrared spectroscopy method.

**Key words:** fruit, quality, NIR, nondestructive evaluation

#### 서 론

과일의 내부 품질요인은 맛을 직접적으로 가리키는 당도와 산도, 뭉은 정도를 비롯하여 내부의 결합 즉 공동이나 수밀, 갈변의 유무 등을 들 수 있다.

이러한 내부 품질을 비파괴적으로 판정하기 위해서 대상물을 두들겨서 나타나는 음파를 해석하여 내부의 공동이나 속도를 판정하거나(메론, 수박), 후숙중에 발생하는 에틸렌 가스(메론)와 지연발광의 에너지를 검출하여 속도를 판정하는 방법(바나나, 매실)을 이용하기도 한다. 또 빛의 투과정도를 측정

하여 속도를 판정(과인애플, 메론)하거나 뭉은 정도를 판정(감)하는 방법이 있다. 최근에는 전기적인 입피던스나 음파를 이용하여 예전에는 측정할 수 없었던 수박이나 포도의 밀도를 계측하여 당도를 간접적으로 추정하는 방법이 사용되기도 한다.

한편, 미국을 비롯한 일부 국가에서는 의료용으로 사용되던 MRI나 X선 CT기술을 과일 선별용으로 도입하여 과일 내부의 결합과 속도를 판정하기도 한다. 이는 전자기술의 발달과 더불어 시험장비가 예전에 비해 저가화되고 있는 시점에서 시도되는 것이지만, 아직은 다른 기술이나 접근 방법에 비해 상대적으로 비용이 많이 들기 때문에 실용화의 길은 그리 가깝지 않은 듯 하다.

이처럼 과일의 내부 품질은 비파괴적으로 평가하기 위한 기술은 다양하지만, 아직 실용화에 접근한 기술은 그리 많지 않다. 먼저 이러한 기술들이 실

Corresponding author: Kangjin Lee, Senior Researcher, Quality and Safety Evaluation Laboratory, National Institute of Agricultural Engineering, Suwon 440-100, Kyonggido, Republic of Korea.  
Phone: 031-290-1874, Fax: 031-290-1930  
E-mail: jini2002@rda.go.kr

용화되기 위해서는 기존의 중량이나 크기만 선별하던 외관 선별기들이 처리하던 처리용량을 소화해 내어야 함에도 불구하고 그만큼의 처리성능을 가지지는 못했기 때문이다.

과일의 내부 품질을 판정하기 위한 여러 가지 기술 중에서 이 조건을 가장 먼저 충족시키면서 실용화에 먼저 나설 수 있었던 것이 근적외선 분광분석법에 의한 비파괴 과일 선별기술이다.

**빛과 근적외선**

빛은 전자파(Fig. 1)의 일부로서 자외선과 가시광선, 그리고 적외선으로 나뉘어지며, 근적외선은 학자에 따라 정의가 다르지만 일반적으로는 파장이 700 nm에서 2500 nm까지의 전자파를 말한다. 근적외선 분광분석은 이 근적외선을 여러 가지 파장의 조합으로 이루어진 스펙트럼의 형태로 만들어 물체의 구조나 이론적인 정량, 정성 분석에 이용하는 방법이라 할 수 있다.

**빛의 흡수원리**

물체에 빛을 조사했을 경우에 나타나는 광학현상은 여섯 가지, 즉 흡수, 형광, 인광, 산란, 방출, 화학발광 등으로 나눌 수 있다. 근적외선 분광학에서는 흡수현상을 주로 이용하며 그 원리는 다음과 같다.

물체에 적외선을 조사하면 전자기 복사선의 양자(photon)들은 분자를 여기시켜 즉각적으로 진동하게 만들며, 분자에 진동을 유발시킨 복사선은 물체에 흡수되어 이에 상응하는 흡수파장대역이 스펙트럼에 발생하게 된다. 대부분의 유기화합물의 분자들은 복합 구조로 되어 있으므로 진동에 의한 흡수스펙트럼 또한 매우 복잡하다.

물 분자를 예로 들자면, 물 분자의 진동 형태는

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 신축진동과 변형진동으로 나눌 수 있다. 신축진동은 분자를 구성하고 있는 두 원자 사이의 결합 축을 따라 원자간 거리가 연속적으로 변화하는 것을 말하며, 변형진동은 두 결합 사이의 각도가 변하는 것을 말한다.

분자의 진동에 대한 이해를 위해 먼저 조화진동자에 대한 예를 들어 설정하면 다음과 같다(Fig. 3). 탄성계수가  $k$ 이고 질량이 0인 용수철로 연결된 두 개의 원자에 대해 두 원자의 질량은 각각의 원자 중심에 집중되어 있다고 가정할 때, 그 중 한 개의 원자를 움직이면 단순조화운동이라는 진동을 유발하게 된다. 용수철의 축을 따라 어떤 힘이 가해져 한 원자가 평형위치로부터 거리  $y$ 만큼 움직이면 다

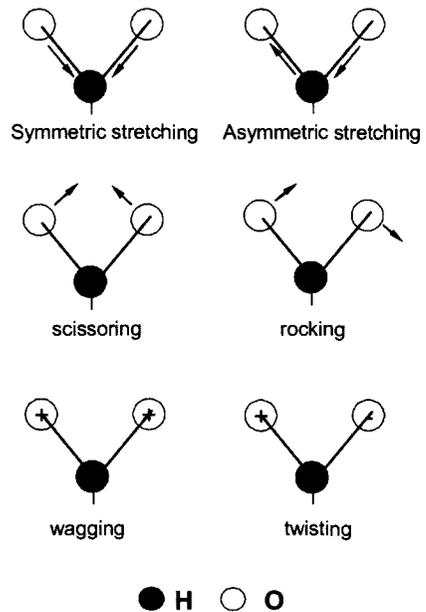


Fig. 2. Fundamental vibration modes of a water molecule.

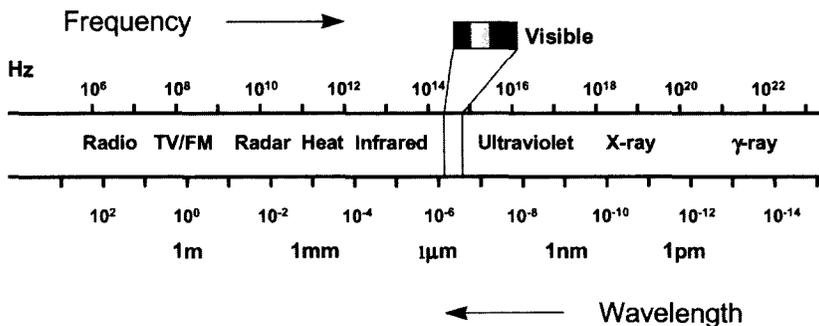


Fig. 1. Electromagnetic wave.

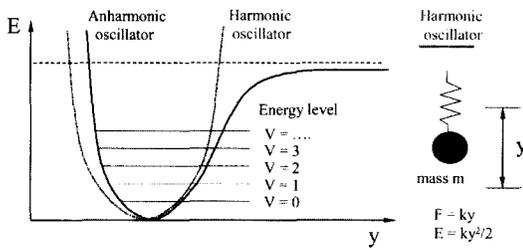


Fig. 3. The Energy of diatomic molecule undergoing simple harmonic oscillation and anharmonic vibration.

시 복구되려는 힘 F는 식 (1)과 같다.

$$F = ky \tag{1}$$

이 때의 위치에너지(potential energy) E는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{1}{2}ky^2 \tag{2}$$

여기서, 두 개의 원자 각각의 질량이  $m_1, m_2$  일 때, 진동주파수는  $\nu$ 식 (3)과 같다.

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \tag{3}$$

이를 복사선의 파수  $\bar{\nu}$ 로 표시하면, 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\nu}(\text{cm}^{-1}) &= \frac{\nu}{c} \\ &= \frac{1}{2\pi c} \sqrt{k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \\ &= 5.3 \times 10^{-12} \sqrt{k \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \end{aligned} \tag{4}$$

일반적으로 단일결합의 경우 힘의 상수 k는 300~800N/m의 범위에 있으며, 평균적으로 500N/m의 값을 갖는다. 이중결합과 삼중결합의 경우 이 값의 두 배, 세 배의 값을 갖는 것으로 알려져 있다.

그러나 분자계는 에너지가 불연속적이고 양자화된 상태를 나타내기 때문에 이 모델이 실제 분자와 잘 일치하지 않은 면이 많으며, 진동에너지 준위 또한 균일한 거리로 배열되어 있지 않아서 실제 분자의 위치에너지 곡선은 이차함수의 포물선을 그리지 않고 일정 준위에서 수렴하게 되며, 그 수렴의 정

도는 조화진동에서 비조화진동으로 옮겨갈수록 증가한다.

근적외선은 2500 nm이상의 중적외선 영역에서 나타나는 O-H, C-H, N-H 및 C=O 등과 같은 작용기의 기본 흡수에 의해 발생하는 진동(fundamental vibration)의 배 진동(overtone vibration)과 결합 진동(combination vibration)이 나타나는 파장대역이다. 기본진동은 에너지 준위 V가 0에서 1로 증가할 때, 퍼텐셜에너지가 증가하면서 진동수인 특정 파장의 빛을 흡수함으로써 발생된다.

다시 말하면, 바닥상태에서 특정 에너지(파장)의 복사선을 흡수하여 더 높은 에너지 준위로 상승하고, 낮은 에너지 준위로 다시 돌아올 때 흡수했던 에너지는 열이나 복사선의 재방출(형광 등)의 형태로 나타난다.

### 근적외선의 특성

근적외선 영역에서 나타나는 배진동에 의한 흡수의 세기는 중적외선 영역의 기본 흡수보다 10~10,000배 정도 약하다. 따라서 중적외선을 이용할 경우 높은 흡수도로 인해 시료를 희석해야 하지만, 근적외선을 이용하면 이와 같은 시료의 전처리 필요 없기 때문에 신속하게 스펙트럼을 측정할 수 있다.

일반적으로 근적외선은 물질을 투과할 때 파장이 커질수록 흡광도는 증가하고 대역폭과 경로길이는 감소한다. 반면 파장이 짧아지면 경로길이와 대역폭은 증가하며, 산란율이 작아지며 물리적인 영향을 적게 받고 흡수 되는 정도도 작기 때문에 다량의 주성분만의 분석이 가능해진다. 스펙트럼에 나타나는 흡수대역은 그 물질에 포함된 특정 성분의 작용기가 그 파장에서 진동한다는 것을 의미하며, 물질의 화학적 성분의 조성에 따라 다르다. 따라서 적절한 파장의 근적외선을 이용할 경우 여러 가지 화학 성분을 선택적으로 측정할 수 있다.

근적외선은 중적외선 영역과 비교할 때 다음과 같은 장단점이 있다. 장점으로는 ① 중적외선에 비해 침투 깊이가 크다. 일반적으로 중적외선의 경우 침투 깊이가 수  $\mu\text{m}$ 이나 근적외선은 수 mm이다. ② 대역폭이 크므로 해당주파수의 이동으로 인한 측정 오차가 적다. ③ 추출, 템퍼링, 박편 등의 시료 준비가 필요 없다. ④ 광학 장비의 가격이 비교적 싸다. 하지만, 근적외선은 특정 분자 결합의 정보가 아닌 복합된 많은 정보를 가지고 있으므로 다음과

같은 단점을 가지고 있다. ① 흡수스펙트럼의 해석이 어렵다. 흡수스펙트럼은 서로 다른 여러 분자들의 복합적인 흡수에 의해 나타나기 때문에 특정 분자 결합에 해당하는 스펙트럼 흡수 대역을 찾기 어렵다. ② 같은 분자 결합을 갖는 유사한 화합물의 스펙트럼 대역이 겹쳐진다. ③ 검량모델 작성을 위해서 많은 시료를 대상으로 한 측정이 요구된다.

근적외선은 위와 같이 스펙트럼의 분석과 해석상의 어려움이 있지만, 시료의 전처리 없이 신속하고 비파괴로 대상 시료의 성분을 통계적인 방법에 의해 정량적으로 분석할 수 있으므로 비파괴 품질판정 기술개발에 활발히 이용되고 있다.

**근적외선 스펙트럼의 측정**

시료에 입사되는 빛(I<sub>0</sub>)은 Fig. 4에서와 같이 물체의 표면에서 직접 반사하는 정반사광(R, S)과 흡수광(A), 그리고 표면 근처의 입자들과 반응을 한 후 다시 여러 방향으로 확산되는 확산반사광(D), 두께가 얇은 시료이거나 강한 에너지를 가진 광을 조사했을 경우 시료를 통과하는 투과광(I) 등의 여러 가지 형태로 분산된다. 이 중 투과광과 확산반사광은 물질을 구성하는 화합물의 농도나 구조에 영향을 받게 되어 근적외선 정량분석에 이용할 수 있다.

여기서, 빛이 물체를 통과할 때 통과되어 나오는 빛의 세기(I)는 항상 입사광의 세기(I<sub>0</sub>)보다 작으며, 입사광이 흡수되는 비율은 물질의 두께와 흡수물질의 농도의 함수로 나타낼 수 있다.

먼저 물체를 통과한 빛의 투과도를 T라 하면, 투과도는 다음 식과 같이 표시된다.

$$T = \frac{I}{I_0} = 10^{-\epsilon cb} \tag{5}$$

여기서,  $\epsilon$ 는 몰 흡수도(분자흡광계수)이고  $c$ 는 분

자의 농도이며,  $b$ 는 빛이 투과한 길이, 즉 물질의 두께를 나타낸다.

흡광도(근적외선 흡수스펙트럼)란 물질의 광흡수의 정도를 나타내는 양으로서 흡광도 A는 식 (6)과 같다.

$$A = \epsilon cb = -\log_{10}(T) = \log_{10} \frac{I_0}{I} \tag{6}$$

시료가 두꺼워 투과하는 빛이 미약하거나 투과광을 측정하기 어려운 고체인 농산물의 경우에는 투과율을 측정하는 대신, 시료내부에서 산란되어 나온 확산반사광을 이용한 반사율을 측정함으로써 그 물질을 구성하고 있는 성분에 대한 흡광도를 계산할 수 있다.

또한, 입사광의 세기를 측정하는 방법으로는 표준반사물질에서 나오는 반사광을 측정해서 이에 대한 비율을 반사율로 사용하고 있으므로, 흡광도 A는 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$A = \log \frac{R_{\text{standard}}}{R_{\text{sample}}} = \log \frac{1}{R} \tag{7}$$

- 여기서,  $R_{\text{standard}}$  : 표준반사물질의 반사광의 세기
- $R_{\text{sample}}$  : 시료에서 반사되어 나온 반사광의 세기
- R : 반사율(%)

**근적외선 스펙트럼을 이용한 농산물의 품질측정**

Norris(1963)에 의해 개발된 근적외선 분광분석법은 곡류나 종자의 수분측정을 위해 특별히 설계된 분광광도계를 이용하여 700~2400 nm 파장대역에서 근적외선 투과스펙트럼을 얻은 것이 최초였는데, 이후 농산물의 품질 검사 분야보다 식품이나 의약, 화

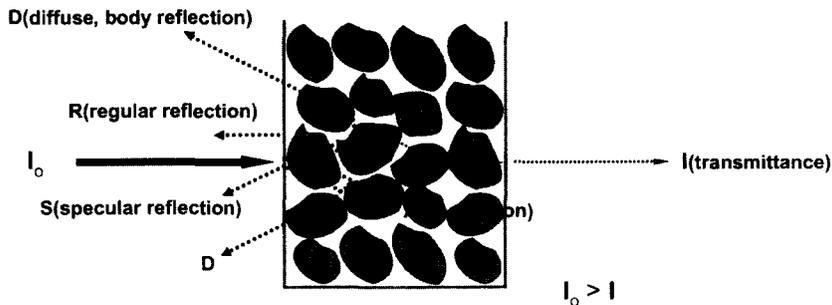


Fig. 4. Distribution of incident light in a sample.

학 분석 분야에서 눈부신 발전을 거듭하여 성분의 정성, 정량 분석법의 한 분야로서 자리 잡게 되었다.

1970년에 들어와 곡류의 품질판정에 응용되어 밀의 단백질 함량이나 전분 함량을 측정하는 기기가 개발되었으며, 미국이나 캐나다 등에서는 밀의 공인된 성분분석기로서 사용되고 있다. 일본에서는 벼 식미계로서 활용해 왔지만, 청과물에 있어서 내부 품질을 비파괴적으로 평가하는 기기로서 1980년대 말에 복숭아의 당도를 근적외선을 이용하여 판정하는 광센서가 일본에서 개발된 이후로 실제 선과장에 도입, 활용중에 있으며 배와 사과, 감귤, 멜론, 수박의 비파괴 선별에 활용되고 있다.

근적외선을 농산물의 품질 측정에 이용하는 것은 빛의 측정 방식에 따라 반사 방식과 투과 방식의 두 가지로 나눌 수 있다. 반사 방식은 확산반사되는, 투과 방식은 시료를 투과한 빛의 스펙트럼을 측정하여 품질의 측정에 이용하는 것이다.

### 반사 방식의 스펙트럼 측정

반사 방식은 근적외선을 시료에 조사시킬 때 시료로부터 확산반사된 빛의 스펙트럼을 해석하여 대상 시료의 품질을 예측하는 것으로 Fig. 5에 나타난 바와 같이 광원의 위치와 광검출기가 동일한 방향에 위치하는 것이다. 분광광도계를 이용한 분체 또는 고체의 스펙트럼 측정방식의 대부분이 이에 속한다고 볼 수 있다.

반사스펙트럼은 쌀의 함수율이나 단백질 함량, 점도 등의 예측(Han과 Natsuga, 1996)이나, 벼의 미강 제거율 예측(Wadsworth와 Sequeira, 1991)에 이용되기도 하였으며, 메밀가루의 함수율, 단백질, 아밀로스, 타닌, 녹말의 양을 예측하는데도 이용되었다(Hong *et al.*, 1995).

Carver(1994)는 이러한 반사스펙트럼으로 밀의 경도가 도정 및 분말 품질에 미치는 영향을 측정하였

으며, 밀의 경도가 단백질 성분에 영향을 주기 때문에 경도가 클수록 정성 단백질의 농도도 높게 나타나지만, 분말수율(flour yield)이나 반죽의 물리적 성질에 대한 영향은 일관성이 없거나 미세한 것으로 보고하였다.

한용수 등(1996)은 NIRS 6500 분광광도계를 이용하여 고춧가루의 반사스펙트럼을 측정하여 수분과 색소 함량, 색도 및 매운 맛 함량 등을 예측하였는데, 수분함량의 예측에서는 부분최소제곱회귀모델(PLSR 모델)보다 다중회귀모델(MLR 모델)을 이용하는 것이 더 나은 결과를 도출할 수 있을 것이라고 하였다.

분광광도계에서는 이러한 스펙트럼의 측정 정밀도를 향상시키기 위하여 시료를 회전시키거나 일정 시간 동안에 수 회 반복하여 측정되어진 스펙트럼의 평균값을 시료의 스펙트럼으로 하기도 한다.

청과물에 있어서의 반사스펙트럼의 측정은 가용성 고형물 함량(soluble solid contents, SS)이나 산함량, 경도 등의 내부 품질을 비파괴적으로 예측하는데 주로 이용되고 있다. 멜론의 가용성 고형물 함량 측정 장치의 개발 연구(Dull *et al.*, 1992)가 수행되기도 했으며, 접촉식 광섬유프로브를 이용한 복숭아의 당도측정기 개발 연구(Kawano *et al.*, 1992)에서는 복숭아의 반사스펙트럼에는 자당의 흡수 파장인 906 nm 근방에서 당도에 따라 큰 차이가 있다고 보고된 바도 있다.

Noh *et al.*(1997)은 실시간, 비접촉, 비파괴 당도 판정 장치를 개발하기 위해 후지 사과의 흡광스펙트럼(400~2400 nm)을 측정한 다음 650~1050 nm 범위에서 흡광스펙트럼의 이차 미분치와 당도의 상관성을 분석한 결과 당도와 상관관계가 높은 파장이 다수 존재함을 밝혔다. 이 결과에서는 650~1050 nm 대역에서의 반사스펙트럼만으로도 당도를 비파괴적으로 판정할 수 있을 것으로 보고하였다.

또한 Choi *et al.*(1997)도 사과에 대하여 860~1078 nm의 대역의 근적외선 반사스펙트럼을 측정 후 PLSR 모델을 개발하여 사과의 당도를 예측하였으나, 이 대역의 근적외선 스펙트럼으로 MT 경도를 예측하는 것은 다소 어려움을 토로하였다.

조래광 등(1998)은 1100~2500 nm 대역의 근적외선 반사스펙트럼을 측정하고 수분, 당도, 경도, 알칼리 적정법에 의한 산함량 예측을 위한 MLR 모델을 개발하였으며, 당도, 수분함량, 경도 및 산 함량 각각의 SEP(standard error of prediction)는 0.5°brix, 0.64%, 0.14kg/cm<sup>2</sup> 및 0.07%로 나타났다고 보고하

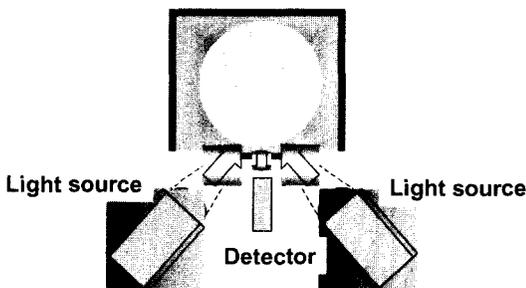


Fig. 5. Reflectance measuring system.

였다.

Lee *et al.*(1998)은 사과와 당도를 비파괴적으로 예측하기 위하여 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 근적외선 반사스펙트럼 측정장치를 구성하였다.

여기서는 광섬유프로브가 장착가능한 분광광도계를 이용하였으며, 광섬유프로브는 동심원 형태로서 내부에서 광이 조사된 후 확산 반사된 빛이 외부의 광섬유를 통하여 분광기로 전달되는 구조를 사용하였다(Fig. 7).

근적외선 반사스펙트럼의 측정은 400 nm에서 2498 nm까지 2 nm 간격으로 이루어졌으나, 광전달경로상에 나타나는 잡음을 배제한 400 nm~1800 nm의 대역에서의 흡광도 및 2차 미분값(Fig. 8) 등을 이용하여 당도 예측을 위한 MLR 모델, PLSR 모델, 신경회로망 (Artificial Neural Network, ANN) 모델을 개발하고 그 결과를 비교하였다. 이 연구에서는 적절한 광다이오드어레이센서의 선발과 가장 우수한 예측모델로 선정된 2차 미분 등의 전처리가 필요하지 않은 PLSR 모델을 적용하여 당도 예측기기를 개발한다면, 이에 소요되는 시간과 노력을 훨씬 절감할 수 있을 것으로 보고하였다.

Schmilovitch 등(2000)은 망고의 생리화학적 지표

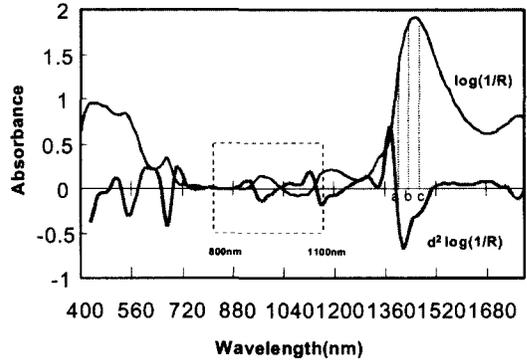


Fig. 8. Absorbance and its 2nd-derivative spectrum.

인 과육의 연화 정도, 가용성 고형물과 산 함량 등을 예측하기 위하여 1200~2400 nm 대역의 근적외선 반사스펙트럼을 측정하고 각각의 생리 지표를 예측하기 위하여 MLR 모델, PCA 모델, PLS 모델 등을 개발하였다. 이 중 흡광도로 전환한 반사스펙트럼을 2차 미분 전처리했을 경우의 MLR 모델이 가장 우수한 결과를 나타내었다고 보고하였다.

복숭아는 과육의 위치에 따라 당도의 편차가 많은 과일로서 반사스펙트럼을 이용하여 당도를 예측할 경우, 빛이 조사되는 부위의 당도만으로 복숭아 1개의 당도를 대표하기는 어렵다. 따라서, 이와 같은 이유로 수행된 것이 2분기식 광섬유프로브를 이용하여 양쪽면에 대한 반사스펙트럼을 동시에 측정하고 이를 평균한 스펙트럼으로 복숭아의 당도를 예측한 연구이다(Lee *et al.*, 2001). 결과적으로 한쪽면에 대한 스펙트럼을 측정할 때보다 안정적인 반사스펙트럼을 얻을 수 있게 되었고, 당도예측결과에서도 SEP가 0.49° brix로서 실시간으로 측정하는 스펙트럼임에도 양호한 결과를 얻을 수 있게 됨을 증명하였다.

한편, 키위의 경도와 건물율, 가용성 고형물 함량, 밀도 등을 예측하기 위하여 McGlone 등(1998, 2002)은 근적외선 반사스펙트럼을 이용하였으며, 양과(Birth *et al.*, 1985)와 멜론(Dull *et al.*, 1989)의 과육에서 건조된 물질과 가용성 고형분 함량을 비파괴로 측정하거나, 600~2500 nm 대역을 이용한 미니 토마토의 당도와 산 함량의 예측(吉川 *et al.*, 1990), 700~1200 nm의 근적외선 반사스펙트럼을 이용한 오렌지의 당도 측정(Kawano *et al.*, 1991) 연구도 수행된 바 있다.

단일 품종이 아닌 이종 품종 사과의 당도를 하나

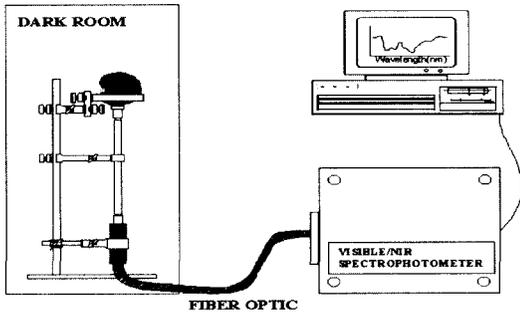


Fig. 6. Schematic of visible/NIR reflectance measurement system.

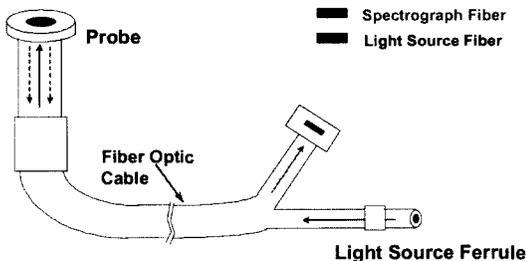


Fig. 7. Fiber optic bifurcated cable.

의 품질예측모델로 측정하기 위하여 Ama *et al.* (1990)의 연구가 있었는데, 이는 근적외선 분광분석법이 재배 환경 등 생산지의 특성에 영향을 많이 받기 때문에 이러한 영향을 배제하기 위한 강력한 예측모델의 개발은 현재까지도 계속 연구되고 있다.

### 투과 방식의 스펙트럼 측정

투과 방식은 시료 전체 또는 일부를 투과한 스펙트럼을 이용하는 것으로, 광원과 광검출기가 마주보고 위치하거나 광검출기 측에서 광원이 보이지 않게 하며, 이 때 시료를 투과한 광을 측정하는 방식이다.

광원과 광검출기의 위치에 따라 전투과방식(Fig. 9)과 반투과방식(Fig. 10)으로 구분되기도 한다. 즉, 광이 투과하기 쉬운 우유나 과즙류, 벼나 쌀, 밀 등의 곡류, 감귤, 토마토의 과실류 등에는 전투과방식이, 광의 투과가 어려운 배, 사과, 복숭아, 멜론, 수박 등의 과실에는 반투과방식이 이용되고 있다. 특히 멜론과 수박과 같이 과피가 두꺼운 과일의 투과 스펙트럼을 측정하기 위해서는 광원의 수와 출력을 크게 증대시켜야만 적정 투과스펙트럼을 얻을 수 있다.

Lanza *et al.*(1984)의 과일 주스의 투과율을 이용한 전체 당도 예측 연구에서 주스 종류에 따른 당

도의 예측모델을 개발하였다. 오렌지 주스에서 2268 nm와 1206 nm의 흡광도의 2차미분의 비를 이용하였을 때 상관계수가 0.87이면서 SEC(standard error of calibration)가 0.22° brix인 예측모델을 개발하였고, 이를 이용한 미지 시료에 의한 검증에서도 SEP는 0.25° brix로 우수한 결과를 나타내었다고 보고하였다.

Delwiche(1993)는 근적외선 영역(740~1,140 nm)에서 밀의 투과스펙트럼을 측정하여 분광분석법에 의한 밀의 경도 예측 가능성을 조사하였다. 10개의 품종에 대하여 각 품종당 낱알 100개씩 스펙트럼을 얻어 30개는 교정용으로, 70개는 검증용으로 사용하여 경도 예측용 MLR 모델, PLSR 모델 등을 개발하였다. 이 연구에서  $\log(1/T)$ 와  $d^2\log(1/T)/d\lambda^2$  등의 투과스펙트럼에서 1, 3, 5 개의 파장으로 이루어진 MLR 모델을 개발한 결과 전처리하지 않은 5개의 파장을 이용한 모델의 예측능력이 가장 우수한 것으로 보고하였다. 이 때 파장은 765, 804, 911, 958, 1088 nm, 결정계수는 0.707, SEC와 SEP는 각각 14.0, 14.2이었다.

황인근(2000)은 당·산도 측정장치 개발을 위해 순수당 및 사과산의 흡수 파장대역 구명을 위한 투과스펙트럼 측정 실험에서 혼합당의 농도를 예측한 결과 SEP는 0.391 g/100 ml, 결정계수는 0.982로 매우 정확하게 농도 측정이 가능함을 보여 주었고, 사과산의 농도를 예측에서도 결정계수 0.935, SEP 52.5 mg/100ml의 예측모델을 제시하였다.

고체 시료의 품질 계측을 위한 투과 방식의 근적외선 시스템 개발에 관한 연구는 주로 과일이 대상이었다. 일본의 Miyamoto *et al.*(1996, 1998)은 감귤의 당도를 비파괴적으로 측정하기 위하여 근적외선 투과분광법을 이용한 예측모델을 개발하였으며, 품종과 재배 지역, 수확 시기 및 생산연도에 따른 여러 영향을 조사하였다.

Scharre과 Fraser(2000)는 키위의 가용성 고형물 함량과 밀도를 비파괴적으로 예측하기 위하여 반사방식, 투과 방식, 접촉반사방식으로 근적외선 스펙트럼을 측정 후 각각의 성능을 비교하였다. 가장 우수한 성능을 나타낸 것은 접촉반사모드로서 가용성 고형물함량의 경우 0.80° brix의 SEP와 0.93의 결정계수를 나타냈고, 전체 과일의 밀도는 3.6kgm<sup>-3</sup>의 SEP와 0.74의 결정계수를 나타내었다고 보고하였다.

Lee *et al.*(2004)은 여러 개의 광원에서 출력되는 에너지를 하나로 집광시킬 수 있는 광원장치를 개발하여 편평하게 놓여진 감귤에 조사하고, 이 때 투

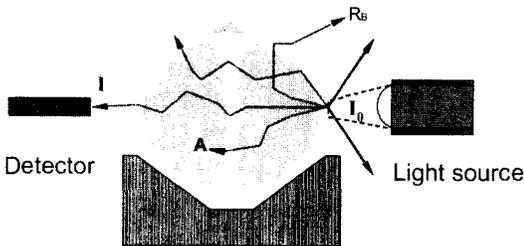


Fig. 9. Full transmittance measuring system.

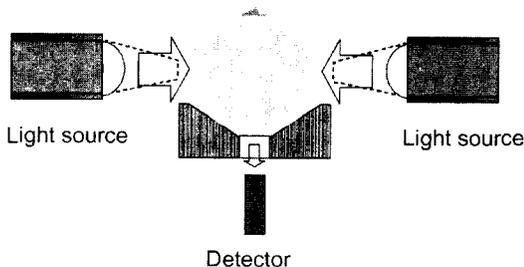


Fig. 10. Half transmittance measuring system.

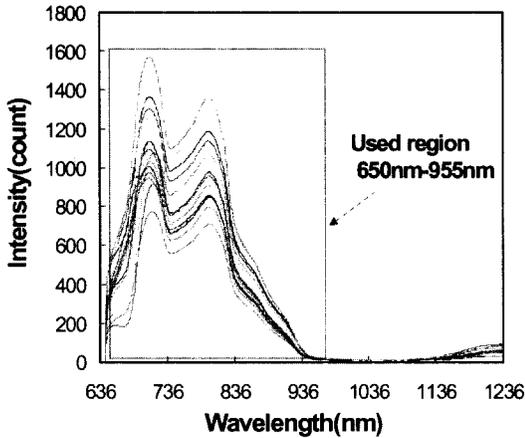


Fig. 11. Transmittance spectra of citrus fruit.

과된 근적외선 스펙트럼(Fig. 10)을 CCD배열센서로 측정하였다. 또한, 감귤의 크기와 자세가 투과스펙트럼에 미치는 영향을 살펴보고 획득된 투과스펙트럼에서 감귤의 당도와 산 함량을 실시간으로 예측할 수 있는 지 검토하였다. 이 연구에서 하우스 감귤의 경우 초당 60 cm의 속도로 이송 중에 획득된 투과스펙트럼을 이용하여 개발된 PLSR 모델의 미지 시료의 당도와 산 함량의 예측 정밀도는 각각 0.8, 0.56의 결정 계수와 0.45° brix, 0.07%의 SEP를 나타냈다고 보고하였다. 한편, 광원과 광검출기 사이에 놓여지는 감귤의 자세가 정밀도에 영향을 미치게 되므로 감귤을 광원과 광검출기의 중간에 정렬하여 안착시킬 수 있는 장치의 개발이 필요하다고 피력하였다.

내부 결함 검출을 위한 근적외선 분광분석

당도, 밀도, 경도, 수분, 전분 및 단백질 함량 등 내부 품질을 예측하는 것과 달리 내부 갈변이나 미숙과의 검출 등 내부 결함을 판정하기 위하여 근적외선 분광분석법이 이용되기도 한다.

Upchurch *et al.*(1990)은 400~1000 nm에서 두 파장의 비, 차 및 미분을 이용해 명든 사과의 검출을 시도하였다. 773 nm와 836 nm의 비, 718 nm와 434 nm의 차, 830 nm에서의 미분을 이용하여 개발된 명검출 모델의 결정계수는 각각 0.79, 0.66, 0.81로 보고하였다.

Clark *et al.*(2003)은 사과의 내부 갈변(Fig. 12)을 측정하기 위하여 광원과 광검출기의 위치를 달리하면서 근적외선 투과스펙트럼을 측정하였다. 내부 갈

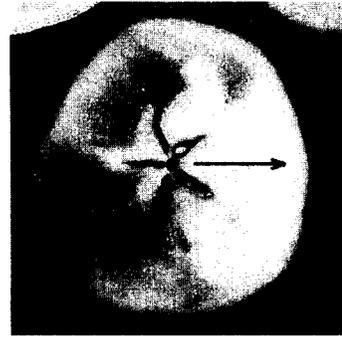


Fig. 12. Brownheart in 'braeburn' apple.

변이 발생한 면적을 예측함에 있어서 7.9~15.4%의 오차가 발생하였는데 이는 내부 갈변의 발생위치가 사과마다 다르기 때문에 광원과 광검출기의 배열이 예측정밀도에 영향을 주기 때문으로 보고하였다. 이와 같은 이유로 이 연구에서는 사과의 중심상에 광원을 설치하고 사과의 적도부 여러 면에서 투과스펙트럼을 측정하는 것이 바람직하다고 제안하였다.

Kim *et al.*(2004)은 감귤의 가시광선 및 근적외선 투과스펙트럼을 이용하여 속도와 결함파를 판정하기 위한 연구를 수행하였다. 그 결과 710 nm와 713 nm의 두 파장을 이용하여 속도를 판정할 경우 전문가에 비해 약 91%의 정확도로 속도를 판정할 수 있고, 내부 결함 판정을 위해 개발된 PLSR 모델로 약 97%의 정확도로 내부 결함을 판정할 수 있다고 하였다. 오류가 발생하는 부분은 근적외선시스템에 기계시각시스템을 추가함으로써 보다 정밀하게 결함을 검출할 수 있을 것으로 언급하였다.

수확 시기의 판단

과수원에서 과일의 수확 시기를 적절하게 판단하는 것은 유통 기간이나 저장 기간, 판매와 관련된 중요한 인자라고 할 수 있다. 지금까지는 주로 과일 몇 개를 잘라서 생산자가 육안으로 판단해 왔으나, 휴대형 근적외선 분광기의 개발로 머지않아 과수원 또는 포장에서 객관적이고 편리한 방법으로 수확 시기를 결정할 수 있게 될 것 같다.

Ventura *et al.*(1998)은 근적외선 분광분석법에 기초하여 듀얼빔 및 광섬유프로브로 이루어진 휴대형 분광광도계를 이용하여 사과의 가용성 고형물 함량을 비파괴적으로 측정하였다. 5개월의 저장 기간 후에 측정된 근적외선 흡광도를 이용하여 가용성고형물 함량을 예측하기 위한 MLR 모델에서 가장 유

의한 결과를 나타낸 것은 흡광도를 1차 미분한 스펙트럼으로서 결정계수가 0.56이었으며, 이 모델의 표준오차(SEC)는 1.01° brix, 미지 시료에 대한 예측표준오차는 1.14° brix이었다. 이 연구에서 과수원에서 분광분석기를 사용하는 데는 많은 어려움이 있을 것으로 보고하였다. 즉, 과일의 스펙트럼은 빛이 차단된 상태에서 측정되어야 하며 프로브는 측정시에 시료에서 6 mm에서 떨어진 45°의 위치에서 측정되어야 하기에 새로운 측정 장치의 개발이 선행되어야 한다고 하였다.

Peirs *et al.*(2001)은 서로 다른 품종의 사과에 대하여 수확시기를 예측하기 위하여 가시광선 및 근적외선 분광분석법을 도입하였다. 속도의 예측은 수확 이전의 일수로 하였는데 상당히 정확한 결과를 나타내었다. 속도를 가장 강력하게 예측할 수 있는 모델을 이용하여 미지 시료의 숙기를 예측했을 때의 상관계수는 0.90이었고, SEP는 7.4일이었다.

Taira *et al.*(2004)은 망고(irwin과 keitt)의 내부 품질을 자신들이 개발한 휴대형 NIRS 장비(FQA-NIR GUN)를 이용하여 조사하였다. 650 nm에서 1050 nm까지 2 nm 간격으로 근적외선 반사스펙트럼을 비파괴적으로 획득한 후, 당도, 과당, 자당, 포도당, 구연산은 HPLC로서, 무기물의 함량은 ICP를 이용하여 측정하여 휴대형 NIRS 장비의 검량식 작성과 검증에 이용하였다. 흡광스펙트럼과 흡광스펙트럼의 이차미분 전처리한 스펙트럼  $d^2\log(1/R)$ 을 이용하여 다중회귀분석법으로 품질인자를 예측하기 위한 모델을 개발하였다. 이 휴대형 NIRS 장비는 당도와 구연산, 그리고 열대 과일의 다른 인자들을 비파괴 분석할 수 있는 유용하고 효과적인 수단이 될 수 있을 것으로 보고하였다.

Saranwong *et al.*(2004)은 망고의 숙도를 예측하기 위하여 Fig. 13에 나타낸 바와 같이 과수원에서 사용할 수 있는 휴대형 NIR 기기를 이용하여 600~1000 nm의 근적외선 대역에서 망고의 반사스펙트럼을 획득한 후, 숙도와 관련된 건물율과 전분함량을 예측하기 위한 모델을 개발하였다. 또한, 스펙트럼이 외부에서 측정되어야 하기 때문에 스펙트럼에서 태양의 영향을 배제할 수 있도록 하였으며, 이 시스템은 재배 농민에게는 적정 수확기를 결정할 수 있게 하는 수단으로, 소비자에게는 고품질의 신선한 과일을 제공할 수 있는 수단이 될 수 있을 것으로 보고하였다.

Choi *et al.*(2004)은 광원과 광섬유프로브, 광검출

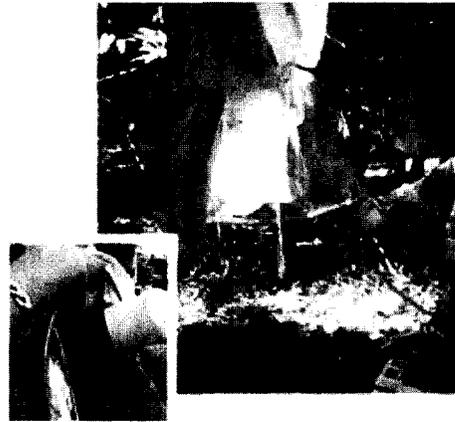


Fig. 13. Reflectance measurement of mango fruit on tree.

부, 등급판정부, 전원공급부 등으로 구성된 휴대형 당도판정센서를 개발하여 배(shingo)의 반사스펙트럼을 획득하고 당도를 예측한 결과 SEP가 0.46° brix로 나타나 현장에서 활용가능할 것으로 보고하였으나 배터리 용량에 따른 사용 시간의 한계, 부피 및 중량 등의 개선 등이 필요한 것으로 지적하였다.

#### 스펙트럼의 측정에 미치는 요인

대상 시료에 대한 반사스펙트럼과 투과스펙트럼을 측정할 경우, 측정된 스펙트럼에는 빛의 산란 영향이나 시료의 밀도 및 입도, 온도, 표면 상태, 기기의 상황 등 품질 인자와는 다른 요인이 스펙트럼에 반영되어 나타나게 된다. 또한 여러 물질이 혼합되어 구성되는 시료의 특성상 단일 성분만을 측정하는 것도 그리 쉽지 않은 것이다. 따라서 이러한 요인들을 배제하기 위하여 여러 가지 기법들이 이용되고 있으며, 대상 시료의 온도에 대한 연구 사례는 다음과 같다.

Lammertyn 등(2000)은 근적외선 분광분석에서 데이터 전처리 방법에 따라 상관계수는 79%에서 91%까지 차이가 있음을 지적하였고, Kawano 등(1995)은 근적외선 분광법을 이용하여 복숭아의 당도를 예측하기 위한 모델 개발에서 근적외선 스펙트럼은 시료의 온도에 영향을 받으며, 특히 841 nm에서 966 nm대역에서 근적외선이 흡수되는 세기가 증가하는 것으로 보고하였다.

Bellon-Maurel *et al.*(1996)도 근적외선 스펙트럼을 온라인으로 측정할 때 온도에 대한 고려가 중요하며, 당도의 경우 15°C의 온도차이가 약 3° brix의

편차를 초래하는 것으로 보고하였다. Lee *et al.* (2002)은 과일표면온도가 당도판정을 위한 스펙트럼의 분석에 미치는 영향을 검토하고, 부분최소제곱회귀법을 이용하여 온도에 영향을 받지 않는 범용 당도판정모델을 개발하였다. 분석에 소요된 파장대역은 654 nm에서 1052 nm까지로서 2.5 nm 간격의 반사스펙트럼 데이터를 이용하여 모델을 개발하였다. 실시간 온도 계측장치를 장착하지 않고 실용적이고 저렴한 당도예측시스템의 개발을 위해서는 모델개발시에 온도에 대한 영향을 줄일 수 있도록 다양한 온도와 당도분포를 가진 시료를 선별할 수 있도록 주의를 요한다고 보고하였다.

**센서융합**

근적외선 스펙트럼은 광검출기와 가장 가까운 과육의 영향을 가장 많이 받기 때문에 전체 내외부 품질을 정량하는 데는 한계가 있을 수 밖에 없다. 또한 모든 성분을 정량할 수 없기 때문에 다른 센싱 기술과 조합함으로써 대상물의 여러 성분을 종합적으로 계측할 수 있는 연구가 필요하게 된다.

Steinmetz *et al.*(1999)은 과일의 품질을 측정함에 있어서 성능을 향상시키기 위한 센서융합기술을 개발하였다. 이 기술은 영상처리기술과 근적외선 분광분석법을 조합하여 사과의 당도와 외관 품질을 측정하였다. 영상처리기술은 과일의 색깔 정보를 제공하는 반면에 근적외선 분광분석법은 사과의 당도를 예측하는데 이용되었다. 두 기술을 융합하였을 때 당도의 예측 성능 및 선별성능이 개선되며, 사과 1개당 처리 시간은 3.5초정도 소요되는 것으로 보고하였다.

한편 근적외선 영상처리기법을 이용하여 키워

(Martinsen 등, 1998)와 멜론(Sugiyama, 1999)의 내부 당도를 가시화하는 연구가 수행되기도 하였다.

Choi *et al.*(2000)은 영상처리시스템과 근적외선을 이용한 비파괴 당도판정시스템을 조합한 통합 시스템을 개발하여 당도와 색깔, 무게, 크기 등 사과의 내외부 품질을 실시간 판정성능을 시험하였으며, 이 시스템은 시간당 10,800개의 사과를 선별할 수 있는 능력을 가진다고 보고하였다(Fig. 14).

**결론**

과거 40년간 근적외선 분광분석법은 아주 우수한 비파괴 품질평가기술을 제공해 왔지만, 과거의 연구는 근적외선 분광분석법을 현장에 적용하기 위한 연구에 초점이 맞추어져 있었기 때문에 기초적인 연구의 결핍을 가져왔다고도 할 수 있다. 앞으로는 새로운 근적외선 분광분석법의 개발을 위한 기초 연구가 더욱 활발해져야 하고, 이러한 것은 기기의 개발자와 분석화학자와의 공조 체제하에 이루어져야 할 것이다.

또한, 현재의 근적외선 분광시스템은 불과 100 ppm 정도의 성분을 측정할 수 있는 감도를 가지고 있지만 중요한 분석기술의 하나로서 자리매김하기 위해서는 감도가 더욱 증대된 새로운 분광기의 개발도 이어져야 한다.

근적외선 분광법을 이용한 시스템은 현장에서 사용할 때도 근적외선 분광법의 특성을 그대로 따르게 된다. 품질예측모델 개발시에 포함된 농산물의 상황과 다른 조건에서 생산된 농산물을 예측할 경우에 편차가 발생하는 것을 보정해주어야 하고, 품종에 따라서도 매우 다양한 예측모델의 개발이 필요하다. 이러한 점을 개선하기 위하여 범용성이 우수한 품질예측모델이 개발되어야 하며, 예측모델 개발을 위한 기준 물질을 개발함으로써 시스템의 설정에 소요되는 노력의 단축도 도모해야 할 것으로 판단된다.

근적외선 분광분석법은 모든 성분을 정밀하게 계측할 수 있는 만능의 수단이 아니다. 계측 대상의 확대와 정밀도 향상을 위하여 다른 계측 기술과 융합된 기술의 개발도 필요하다. 즉, fourier transform near infrared (FT-NIR), near infrared photoacoustic (NIR-PAS), near infrared computed tomography (NIR-CT), near infrared nuclear magnetic resonance (NIR-NMR) 등 이른바 hyphen technology와 이를 뒷받침

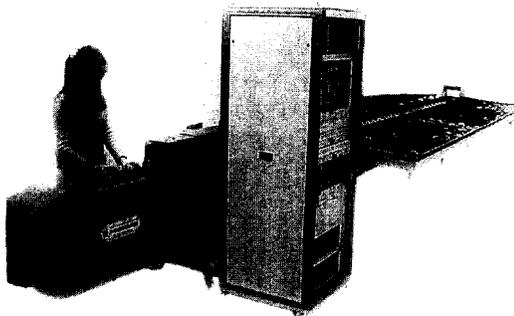


Fig. 14. An integrated grader for apples.

할 수 있는 계량화기술의 개발도 이루어져야 한다.

끝으로, 농산물의 비파괴 선별이나 식품 생산 공정에서의 품질의 측정 결과가 생산이나 공정에 즉각적으로 되돌려질 수 있는 전반적 시스템이 구축되어야 할 것이다. 이를 위해서는 모두가 납득할 수 있는 구조화된 데이터베이스의 개발로 측정의 결과가 생산이나 공정에 피드백되어 기여할 수 있게 함으로써 전반적인 생산성 향상을 도모해야 할 것이다.

## 문 헌

- Ama, T., E. Ueda, H. Matsu and H. Shinoki. 1990. Determination of brix in intact apple by NIRS. 6th Non-destructive measurement symposium: 98-102
- Bellon-Maurel, V., V. Steinmetz and L. Dusserre-Bresson. 1996. Nir applications for food and agricultural product quality evaluation. Quality evaluation of agricultural products and foods using nondestructive techniques. 87-111
- Birth, G. S., G. G. Dull, W. R. Renfro and S. J. Kays. 1985. Nondestructive spectrophotometric determination of dry matter in onions. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* **110**(2): 297-303
- Carver, B. F. 1994. Genetic implications of kernel NIR hardness on milling and flour quality in bread wheat. *J. of Sci. food agric.* **65**: 126-132
- Delwiche, S. R. 1993. Measurement of single-kernel wheat hardness using near-infrared transmittance. *Transactions of the ASAE* **36**(4): 1431-1437
- Choi, C. H., K. J. Lee and B. S. Park. 1997. Prediction of soluble solid and firmness in apple by visible/near-infrared spectroscopy. *J. of the Korean society for agricultural machinery* **22**(2): 256-265
- Choi, K. H., K. J. Lee, D. S. Choi and Y. S. Han. Development of an integrated grader for apples. *Proceedings of the 3rd international conference of agricultural machinery engineering*, Nov. 13-16, 2000, Seoul, Korea. pp. 513-520
- Choi, W., K. Choi, K. Lee and S. Kang. Development of a portable sensor for measuring sugar contents of pears. *Proceedings of the KSAM 2004 winter conference*. Feb. 19, 2004, Suwon, Korea. pp. 468-471
- Clark, C.J., V. A. McGlone and R. B. Jordan. 2003. Detection of brownheart in 'Braeburn' apple by transmission NIR spectroscopy. *Postharvest biology and technology*. **28**: 87-96
- Delwiche, S. R. 1993. Measurement of single-kernel wheat hardness using near-infrared transmittance. *Transactions of the ASAE* **36**(4): 1431-1437
- Dull, G. G., G. S. Birth and D. A. Smittle and R. G. Leffler. 1989. Near infrared analysis of soluble solids in intact cantaloupe. *J. Food Sci.* **54**(2): 393-395.
- Dull, G. G., R. G. Leffler, G. S. Birth and D. A. Smittle. 1992. Instrument for nondestructive measurement of soluble solids in honeydew melons. *Tras. Amer. Soc. Agr. Eng.* **35**(2): 735-737
- Kim, G., K. Lee, K. Choi, J. Son, D. Choi and S. Kang. 2004. Defect and ripeness inspection of citrus using NIR transmission spectrum. *Key engineering materials*. **V270-273**: 1008-1013
- Han, C. S. and M. Y. Natsuga. 1996. Development of constituent prediction model of domestic rice using near infrared reflectance analyzer(I) - constituent prediction model of brown and milled rice -. *J. of the Korean society for agricultural machinery* **21**(2): 198-207
- Hong, J. H., K. Ikeda and I. Kreft. 1996. Near-infrared diffuse reflectance spectroscopic analysis of the amounts of moisture, protein, amylose, and tannin in buckwheat flours. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* **42**:359-366
- Kawano, S., H. Abe and M. Iwamoto. 1995. Development of a calibration equation with temperature compensation for determining the brix value in intact peaches. *J. near infrared spectroscopy* **3**: 211-218
- Kawano, S., H. Watanabe and M. Iwamoto. 1992. Determination of sugar content in intact peaches by near infrared spectroscopy with fiber optics in interactance mode. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* **61**(2): 445-451
- Kawano, S., T. Sato and M. Iwamoto. Determination of sugars in satsuma oranges using NIR transmission. paper L11-05, *Proceedings of 4th international conference on NIR spectroscopy*, 19-24 aout 1991, Aberdeen, Ed. par I.Murray, Scottish college of agriculture
- Lammertyn, J., A. Peirs, J. D. Baerdemaeker and B. Nicolai. 2000. Light penetration properties of NIR radiation in fruit with respect to non-destructive quality assessment. *Postharvest biology and technology*. **18**(2): 121-132
- Lanza, E. and B. W. Li. 1984. Application for near infrared spectroscopy for predicting the sugar content of fruit juices. *J. Food Sci.* **49**: 995-998
- Lee, K. J., K. H. Choi and D. S. Choi. Development of automatic peach grading system using NIR spectroscopy. *Proceedings of the KSAM 2001 winter conference*. Feb. 16-17, 2001, Suwon, Korea. pp. 365-370
- Lee, K. J., K. H. Choi, G. Kim and D. Choi. 2002. Compensation of surface temperature effect in determination of sugar content of shingo pears using NIR. *J. of the Korean society for agricultural machinery* **27**(2): 117-124
- Lee, K., W. Choi, K. Choi, and S. Noh. 2004. Determination of sugar contents of apples by VIS/NIR transmittance spectroscopy. *Proceedings of the KSAM 2004 summer conference*. June. 9-10, 2004, Chungju, Korea. pp. 258-261
- Lee, K. J., W. R. Hruschka, J. A. Abbott, S.H. Noh and B. S. Park. 1998. Predicting the soluble solids of apples by Near infrared spectroscopy (I) - Multiple linear regression models. *J. of the Korean society for agricultural machinery* **23**(6): 561-570

- Lee, K. J., W. R. Hruschka, J. A. Abbott, S.H. Noh and B. S. Park. 1998. Predicting the soluble solids of apples by near infrared spectroscopy (II) - PLS and ANN models. *J. of the Korean society for agricultural machinery* **23**(6): 571-581
- Lee, K., G. Kim, S. Kang, J. Son, D. Choi and K. Choi. 2004. Measurement of sugar contents in citrus using near infrared transmittance. *Key Engineering Materials* **V270-273**: 1014-1019
- Martinsen, P. and P. Schaare. 1998. Measuring soluble solids distribution in kiwifruit using near-infrared imaging spectroscopy. *Postharvest biology and technology*. **14**: 271-281
- McGlone, V. A. and S. Kawano. 1998. Firmness, dry-matter and soluble-solids assessment of postharvest kiwifruit by NIR spectroscopy. *Postharvest biology and technology* **13**: 131-141
- McGlone, V. A., R. B. Jordan, R. Seelye and P. J. Martinson. 2002. Comparing density and NIR methods for measurement of kiwifruit dry matter and soluble solids content. *Postharvest biology and technology* **26**: 191-198
- Miyamoto, K., M. Kawauchi and T. Fukuda. 1998. Classification of high acid satsuma mandarins by near infrared transmittance spectroscopy. *J. Food. Sci. Technol.* **4**(2): 143-148
- Miyamoto, K., Y. Kitano, S. Yamashita, H. Handa and T. Nakanishi. Fruit quality control of satsuma mandarin in packing house using nondestructive measurement by near infra-red spectroscopy. *Proceedings of International society of citriculture*. 1996. pp. 1126-1128
- Noh, S. H., W. K. Kim and J. H. Lee 1997. Nondestructive measurement of sugar-acid contents in fruits using spectral reflectance. *J. of the Korean society for agricultural machinery* **22**(2): 247-255
- Peirs, A., J. Lammertyn, K. Ooms and B. M. Micolai. 2001. Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS/NIR-spectroscopy. *Postharvest biology and technology* **21**: 189-199
- Saranwong, S., J. Sornsrivichai and S. Kawano. On-tree harvesting quality evaluation of mango fruit with a handheld NIR Instrument. *Proceedings of Japan-thailand joint symposium on nondestructive evaluation technology*, May. 18-21, 2004, Bangkok, Thailand. pp. 160-167
- Schaare, P. N. and D. G. Fraser. 2000. Comparison of reflectance, interactance and transmission modes of visible-near infrared spectroscopy for measuring internal properties of kiwifruit (*Actinidia chinensis*). *Postharvest biology and technology*. **20**: 175-184
- Schmilovitch, Z., A. Mizrach, A. Hoffman, H. Egozi and Y. Fuchs. 2000. Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. *Postharvest biology and technology* **19**: 245-252
- Steinmetz, V., J. M. Roger, E. molto and J. Blasco. 1999. On-line fusion of colour camera and spectrophotometer for sugar content prediction of apples. *J. Agric. Engng. Res.* **73**: 207-216
- Sugiyama, J., 1999. Visualization of sugar content in the flesh of a melon by near-infrared imaging. *J. Agric. Food Chem.* **47**: 2715-2718
- Taira, E., M. Ueno, Y. Kawamitsu, K. Kikuchi and T. Tanabe. Development of quality evaluation system for mango fruit using mobile NIR. *Proceedings of Japan-thailand joint symposium on nondestructive evaluation technology*, May. 18-21, 2004, Bangkok, Thailand. pp. 153-159
- Upchurch, B. L., H. A. Affeldt, W. R. Hruschka and J. A. Throop. 1991. Optical detection of bruises and early frost damage on apples, *Trans. Amer. Aoc. Agr. Eng.* **34**(3): 1004-1009
- Ventura, M., A. D. Jager, H. D. Putter and F. Roelofs. 1998. Non-destructive determination of soluble solids in apple fruit by near infrared spectroscopy(NIRS). *Postharvest biology and technology*. **14**: 21-27
- Wadsworth, J. I. and D. J. Sequeira. 1991. Rice degree of milling measured by NIR. *ASAE Paper No. 91-6030*
- 吉川年彦ら. 1990. 近赤外線による品質評価. 青果物の貯蔵・流通の新技術
- 이강진, 최규홍, 손재룡, 최동수, 김기영, 이수장, 2001, 감귤 비파괴 당산도 판정시스템 개발. 농업기계화연구소. 2001년도 농업기계화시험연구보고서. pp 361-389
- 이강진, 최규홍, 최동수, 이기우, 2000, 복숭아 비파괴 자동선별시스템 개발. 농업기계화연구소. 2000년도 농업기계화시험연구보고서. pp. 433-440
- 이강진, 최규홍, 최동수, 이수장, 조영길, 1998, 근적외선을 이용한 과일 비파괴 품질판정기술 개발. 농업기계화연구소. 1998년도 농업기계화시험연구보고서. pp. 109-169
- 조래광, 손미령, 권영길, 이경희, 박우철, 1998, 근적외 분광분석법을 응용한 사과와 비파괴 품질 측정 가능성 조사. 한국농화학회지 **41**(2): 256-265
- 한응수, 홍성희, 배민정, 고경육, 김영미. 1996. 고춧가루의 품질관리체계 연구개발. 농림수산특정연구사업 보고서.
- 황인근. 2000. VIS/NIR 분광분석법에 의한 사과와 온라인 당·산도 선별시스템 개발. 서울대학교. 박사학위논문