Food Engineering Progress
Vol. 13, No. 4. pp. 297~301 (2009.11)

산업식품공학
Food Engineering Progress

근적외선 분광을 이용한 딸기의 당도예측모델 개발

손재룡* · 이강진 · 강석원 · 양길모 · 서영욱[1]
농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부, [1]서울대학교 바이오시스템 · 소재학부

Development of Prediction Model for Sugar Content of Strawberry Using NIR Spectroscopy

Jaeryong Son*, Kangjin Lee, Sukwon Kang, Gilmo Yang, and Youngwook Seo[1]
National Academy of Agricultural Science, RDA
1Department of Biosystems & Biomaterials Science and Engineering, Seoul National University

Abstract

This study was performed to develop a prediction model of sugar content for strawberry. Near-infrared (NIR) spectroscopy has been prevailed for on-line and portable applications for non-invasive quality assessment of intact fruit. This work presents effects of illumination method and coating of reflection surface of light source on prediction result of sugar content. Effect of preprocessing methods was also examined. A low-cost commercially available VIS/NIR spectrometer was used for estimation of total soluble solids content (Brix). To predict sugar contents of strawberry, the best results were obtained with the spectrum data measured under intensive illuminations at three locations induced from the light source with fiber optic bundles. Gold coating of reflection surface of light source lamp gave favorable effect to prediction result. The best results in validation of PLSR model were r_{SEP} = 0.891 and SEP = 0.443 Brix under OSC preprocessing and those of PCR were r_{SEP} = 0.845, SEP r_{SEP} = 0.520 Brix, under no preprocessing.

Key words: NIR, non-destructive, strawberry, sugar content

서 론

딸기는 적당한 신맛과 단맛이 조화되어 사람의 입맛을 상쾌하게 해주는 기능이 있으며, 비타민 C가 풍부하여 영양소로서도 주목을 받는 작목이다. 그러나 딸기는 개체 간 당도편차가 다소 커 동일한 산지 내에서 수확한 딸기일지라도 맛의 차이가 큰 편이다. 현재 국립농산물품질관리원에서 정한 딸기의 표준규격 중에서 당도를 기준으로 정해놓은 등급규격은 11°Bx 이상인 경우를 “특”으로 규정하고 있으며, 9-11°Bx는 “상”으로 규정하고 있다(2008년 기준). 시중 판매되는 딸기의 당도가 이와 같은 기준을 충족할 경우에는 소비자로부터 불만이 없겠지만, 기준에 적합하지 않은 딸기가 섞여 있을 경우에는 맛의 차이로 인한 소비자의 불만을 야기시킬 수 있을 것이다.

농산물 비파괴 당도 품질판정의 연구는 맛있는 과실을 찾는 소비자의 기대에 부응하기 위함이며 이와 같은 연구는 지속적으로 시도되었다. 근적외선 분광법을 이용한 초기의 연구 형태는 주로 오프라인 상태에서 정밀급 분광광도계를 이용하여 스펙트럼을 측정하여 판정하는 것이 대부분이었다. 그 예로서 사과(Ama et al., 1990), 복숭아(Kawano et al., 1992), 감귤(Kawano et al., 1993) 등에 적용하였다. 그 후 현장에 직접 적용 가능한 시스템으로의 개발이 진전되었다(Lee et al., 1998; Lammertyn et al., 2000; Golic et al., 2006). 광을 이용한 스펙트럼 분석에 사용되는 파장대역은 가시광대역인 400-700 nm와 근적외대역인 700-1100 nm을 주로 사용하게 된다. 이것은 기술의 발전으로 인하여 상용으로 사용되는 CCD 칩이 실시간으로 측정할 수 있는 성능을 갖추고 있으며 가격 또한 저렴하기 때문이다. 따라서 과실의 비파괴 당도판정을 온라인 상태에서도 가능하게 하였으며, 실용적인 선별시스템으로의 기능을 수행할 수 있게 되었다.

분광특성을 이용한 과실의 내부품질판정으로는 주로 가용성 고형분(soluble solids contents, SSC)(Birth, 1978; Kawano, 1994)과 산도(acid)의 측정이 대부분이나(Lammertyne et al., 1998), 과실의 단단함이나 숙도(Zude-Sasse et al., 2002) 및

Corresponding author: Jaeryong Son, Researcher, National Academy of Agricultural Science, Suwon-city, Gyeonggi-do 441-100, Republic of Korea.
Tel: +82-31-290-1901; Fax: +82-31-290-1900
E-mail: son1892@korea.kr
Received May 4, 2009; revised September 21, 2009; accepted November 21, 2009

내부의 갈변정도(Kim et al., 2004) 등을 측정하는데도 다양하게 이용되고 있다.

근적외선 분광법을 이용해서 과실의 성분을 측정하기 위해서는 주로 주성분분석을 이용한 PLS와 PCR 등의 회귀분석을 많이 이용하고 있다. 얻어진 스펙트럼은 농산물의 특성상 크기 및 형상의 다양성, 개체마다 자세의 불균일 등에 따른 산란과 노이즈를 제거하기 위해 최적인 예측모델을 개발하는데 다양한 전처리가 이용되고 있다.

본 연구에서는 딸기의 비파괴 당도판정기술을 개발하고자 조명 방법이 예측성능에 미치는 영향을 구명하고 전처리에 따른 최적 회귀모델을 제시하고자 수행하였다.

재료 및 방법

공시재료

본 실험에 사용된 딸기는 2009년 충남 논산지역에서 재배된 '육보' 품종으로 조명장치의 적정화를 위한 시험에 사용된 시료('09년 3월 3일 구입)와 금 코팅 유무에 따른 당도판정 성능시험에 사용된 시료('09년 4월 10일 구입)는 동일한 품종이지만 수확시기가 다른 시료이다. 시험시료는 각각 150개를 사용하였으며, 스펙트럼 데이터는 1 시료당 서로 다른 부위 2곳을 측정하여 총 300개를 획득하였다. 시료의 당도분포는 첫 번째 시험인 "조명방법에 따른 당도판정 결과"에서 사용된 시료는 최대 10.9°Bx와 최소 7.3°Bx로서 그 차이는 3.6°Bx이었으며, 두 번째 시험인 "금코팅 유무에 따른 영향"에서 사용된 시료는 최대 당도 12.3°Bx와 최소 당도 6.7°Bx로서 그 차이는 5.6°Bx이었다.

한편, 각 시료는 전처리 없이 구입한 그대로 실험에 사용하였으며, 실시간 당도 판정 후 착즙하여 굴절당도를 측정한 후 스펙트럼의 예측값과 비교하였다. 착즙은 압착기를 이용하여 과즙을 만들며 굴절당도의 측정은 디지털 굴절당도계(PR-32a, Atago Co., Japan)를 이용하여 측정하였다.

당도판정에 적합한 조명 방법 선정

근적외선 분광특성을 이용하여 과실의 당도를 비파괴적으로 판정하는 기술이 개발되어 현장에 보급 운영되고 있다. 그러나 딸기는 크기가 작아 이송 중인 상태에서 실시간으로 근적외선 분광 스펙트럼을 획득하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 딸기에 적합한 조명 방법을 개발하기 위한 시험을 실시하였다.

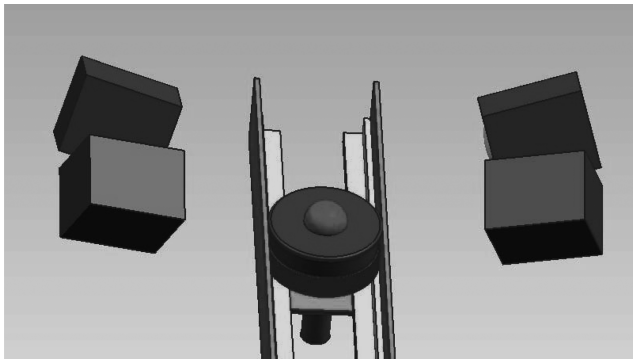

Fig. 1. Direct light system for halogen lamp.

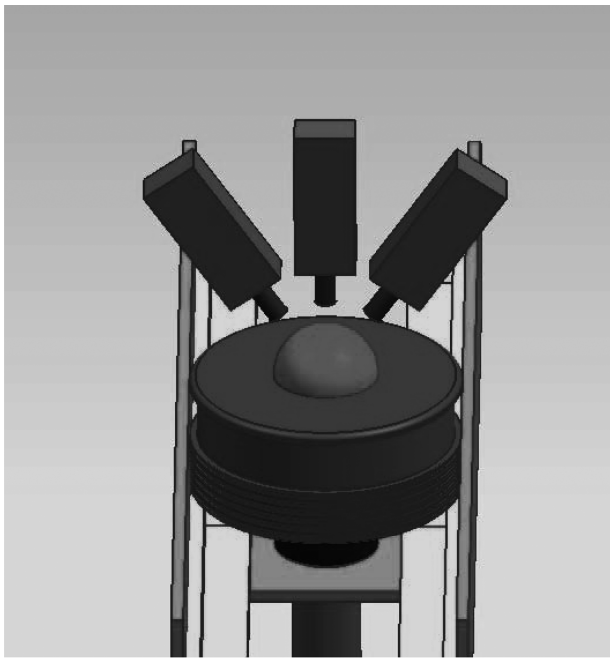

Fig. 2. Partial light system for optical fiber

조명 방법에 대한 시험으로는 세 가지 형태로 시험을 하였는데, 첫 번째는 램프로부터 나온 빛이 직접 딸기에 조사되는 형태로서 Fig. 1과 같이 할로겐램프에서 조사되는 빛을 직접 이용하며, 양 측면에 각각 2개씩 설치하였다. 두 번째와 세 번째는 Fig. 2와 같이 광 화이버(다발 끝단의 지름:8 mm, 재질:유리섬유)를 통해 국부적으로 딸기를 조사하는 형태로서 딸기의 수직 위쪽에 설치된 광 화이버 하나만을 이용하는 경우와 수직 위쪽을 포함하여 좌우측에 설치된 조명 모두를 이용하는 경우 등이다.

딸기의 당도를 판정하는데 최적인 조명방법이 구명된 후에는 할로겐램프의 금 코팅 유무가 당도판정 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 근적외선의 파장대역은 700-2,500 nm이며, 할로겐램프의 등갓에 금도금을 함으로써 근적외선 빛이 보다 강하게 조사되므로 당도판정성능이 향상되는지의 여부를 분석하고자 하였다. 이 연구에서는 근적외선 투과 스펙트럼을 획득하여 분석하였다.

당도판정모델 개발

딸기의 당도판정을 위하여 투과스펙트럼을 획득하였으며 파장대역이 587-1,100 nm인 스펙트로메터(AvaSpec-3648, Avantes co., Netherland)를 이용하였다.

당도 예측 모델 개발을 위해서 PLSR(partial least square

regression)과 PCR(principle component regression) 회귀모델을 사용하였으며, 사용된 전처리는 SNV(standard normal variate), MSC(mean scattering correction), 1차 미분, OSC(orthogonal signal correction), Detrending, Savitzky-Golay Smoothing 등이었다. 회귀모델에 사용된 전처리의 적정성 여부를 평가하기 위해서 상관계수(r), 평균예측오차(SEP), 모델의 예측 에러 값(PRESS) 및 교차검정(cross-validation)을 이용하였다.

만들어진 모델에서 예측한 당도 값과 실제 당도 값을 계산한 예측 에러 값인 PRESS(prediction residual error sum of squares)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$PRESS = \sum_{i=1}^{m} (C_i^E - C_i)^2$$

여기서, m은 회귀식 개발에 사용한 총 샘플 수, C_i^E는 추정한 당도값, C_i는 교차검정 과정 중 i번째 사용한 시료의 실제 당도 값을 나타내었다.

모델의 검증을 위해서는 r(상관계수), SEP를 사용하였으며, 모델의 예측 표준 오차 값인 SEP는 다음과 같이 구하였다.

$$SEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} [(C_i^E - C_i) - Bias]^2}{N-1}}$$

여기서 N은 샘플 수, C_i^E는 추정 당도 값, C_i는 실측 당도 값을 나타낸다. 그리고 bias는 다음과 같이 구하였다.

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^{N} (C_i^E - C_i)}{N}$$

회귀모델 작성을 위해 상용의 통계프로그램인 Unscrambler 7.6(Camo co., Norway)과 Matlab(Mathworks Inc., USA)을 이용하였다.

결과 및 고찰

조명 방법에 따른 당도판정 결과

광 시스템의 구조 및 배치 등과 같은 물리적인 조건이 당도판정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 직접조명 방법과 광 화이버에 의한 점 조명 방법으로 시험한 결과 다음과 같이 나타났다.

당도예측 회귀모델은 PLS 회귀식을 사용하였으며, 성능평가는 상관계수, SEC, SEP 등의 값을 이용하여 분석하였다. 적정 조명방법을 찾는 시험에서의 회귀식 개발 과정에는 전처리를 사용하지 않고 교차검정에 의한 성능을 평가하였다.

Table 1은 조명 방법이 딸기의 당도판정에 미치는 영향을 분석한 결과로서 4개의 램프로 시료에 직접조명을 하는 경우 당도예측 성능은 r_{SEP} = 0.603, SEP = 0.502°Bx, 광 화이버에 의한 점 조명 방법 중 1점 조명(딸기의 수직 위쪽 명)에 의한 당도예측 성능은 r_{SEP} = 0.674, SEP = 0.454°Bx이었으며, 3점 조명 방법(수직 위쪽, 왼쪽 및 오른쪽)에 의한 당도예측 성능은 r_{SEP} = 0.715, SEP = 0.433°Bx으로서 가장 양호한 성능을 나타내었다.

근적외선 투과스펙트럼 획득 시 직접조명에 의한 방법보다는 광 화이버를 통한 점 조명 방법이 양호한 것으로 나타났으며, 점 조명의 경우 1 부위보다는 3 부위를 이용했을 때 더 좋은 결과가 나타났다. 지름 8 mm의 광 화이버를 이용한 점 조명 방법은 딸기 표면만을 비추도록 설계되어 있으나 직접 조명방법은 램프에서 조사된 빛이 넓게 퍼져서 딸기를 비추게 되는데 이때 빛의 손실로 인한 광 세기의 저하 및 점 조명방법에 비해 상대적으로 누광의 영향이 큰 것으로 판단된다. 한편 1점 조명방법에 비해 3점 조명방법이 광 세기가 증가하여 당도판정에 유리하게 나타나는 것은 광 세기가 증가할수록 보다 많은 정보를 획득할 수 있는 장점이 있어 당도판정 성능이 향상된다는 이전의 연구결과 (Son et al., 2009)와 일치하는 것으로 나타났다.

금코팅 유무에 따른 영향

통상적으로 할로겐램프를 구매하게 되면 갓의 표면은 크롬도금으로 되어 있으며 근적외선을 이용하여 당도판정 성능을 향상시키기 위하여 이 연구에서는 램프표면에 금도금을 하여 보다 많은 근적외선 정보를 획득코자 하였다. Fig. 3은 금도금 유무에 따른 빛의 특성을 나타낸 것으로서 700 nm 이후의 근적외선 파장대역에서 금도금된 할로겐램프가 그렇지 않은 램프보다 빛의 세기가 큰 것을 알 수

Table 1. Results of light source comparison

Illumination methods		Results of PLSR	
Illumination with fiber bundle	One fiber bundle	r_{SEC} = 0.737	SEC = 0.414
		r_{SEP} = 0.674	SEP = 0.454
	Three fiber bundles	*r_{SEC} = 0.790*	*SEC = 0.377*
		r_{SEP} = 0.715	*SEP = 0.433*
Illumination with 4 lamps		r_{SEC} = 0.628	SEC = 0.490
		r_{SEP} = 0.603	SEP = 0.502

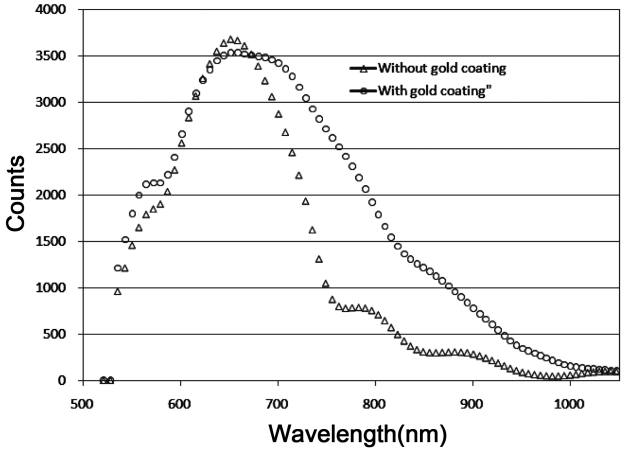

Fig. 3. Characteristics of light by the lamp with/without gold coating

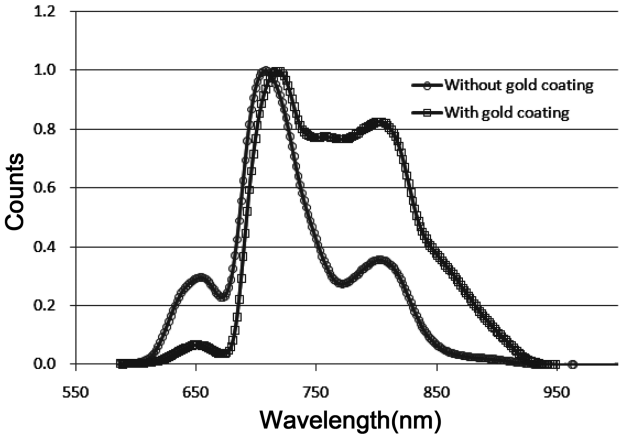

Fig. 4. Typical spectra of the strawberry acguired by the lamp with/without gold coating

있다. 또한 Fig. 4는 램프코팅 유무에 따른 딸기의 투과스펙트럼을 나타낸 것으로서 700 nm 이후의 파장대역에서 금코팅한 경우 그렇지 않은 경우보다 스펙트럼의 정보가 높게 나타나 금도금 램프를 이용할 경우 당도판정에 다소 유리한 것으로 판단된다.

Table 2는 광원 램프의 반사면에 금 코팅 유무에 따른 당도판정 성능 결과로서 광 시스템 조건으로는 광 화이버 3개, 할로겐램프는 금 코팅의 유무이었다. 금 코팅된 할로겐램프를 사용한 경우 r_{SEP}= 0.837, SEP = 0.510°Bx로서 그렇지 않은 경우의 r_{SEP}= 0.756, SEP = 0.580°Bx보다 양호한 결과가 나타나 금 코팅에 대한 당도판정 효과가 있는 것으로 나타났다. 본 실험에 사용한 딸기 시료의 당도 분포는 최대 12.3°Bx에서 최소 6.7°Bx로서 그 차이는 5.6°Bx이며, 당도분포가 다소 넓어 예측당도 측정오차(SEP)는 만족할 만한 성능으로 판단된다. 상관계수(r_{SEP}= 0.837) 또한 당도판정 성능으로서 만족할 만한 수치인 것으로 판단되었다.

딸기의 당도 예측모델 개발

1) PLSR을 이용한 당도 예측모델 개발

딸기의 당도를 판정하는데 적정한 조명방법을 구명한 후 여러 가지 전처리를 이용하여 당도예측모델을 개발하였다. Table 3은 PLSR을 이용하여 딸기의 당도판정 결과를 나타낸 것이다. 조명방법은 할로겐램프에 금 코팅을 한 광원과 3개의 광 화이버를 이용하는 점 조명하에서 스펙트럼을 측정하였다. 시험결과 전처리 방법에 따라 SEP가 0.443-0.541°Bx로 약간의 차이가 있었으며, 전처리를 하지 않은 경우 r_{SEP}= 0.860, SEP=0.498°Bx로 양호한 결과가 나타났으나, OSC 전처리를 한 경우 r_{SEP}= 0.891, SEP = 0.443°Bx, LV=14로 가장 양호한 결과를 나타내었다.

2) PCR을 이용한 당도 예측모델 개발

Table 2. Comparison result of light source between gold coating and no-coating

Gold coating of reflection surface of lamp	Results of PLSR		Illumination method
No	r_{SEC}=0.773	SEC = 0.563	Local illumination with three fiber bundles
	r_{SEP}=0.756	SEP = 0.580	
Yes	r_{SEC}=0.861	*SEC = 0.473*	
	r_{SEP}=0.837	*SEP = 0.510*	

Table 3. Prediction results of validation using PLSR

Item	Preprocessing methods						
	SNV	MSC	1st D	OSC	DT	SM*	X**
r	0.846	0.852	0.832	*0.891*	0.854	0.853	0.860
SEP	0.52	0.511	0.541	*0.443*	0.508	0.508	0.498
LV***	10	10	8	*14*	12	11	12

snv : standard normal variate, msc : mean scattering correction, 1st d : 1st derivative, osc : orthogonal signal correction, dt : detrending, sm : smoothing, x** : no-preprocess, lv: no. of latent variables

Table 4. Prediction results of validation using PCR

Item	Preprocessing methods						
	SNV	MSC	1st D	OSC	DT	SM*	X**
r	*0.842*	0.841	0.841	0.606	0.845	0.830	0.845
SEP	*0.525*	0.526	0.526	0.774	0.521	0.542	0.52
PC***	*17*	16	15	13	17	13	17

snv : standard normal variate, msc : mean scattering correction, 1st d : 1st derivative, osc : orthogonal signal correction, dt : detrending, sm : smoothing, x** : no-preprocess, lv***: no. of latent variables

PCR을 이용할 경우 전처리에 따른 당도판정 결과는 Table 4와 같다. 시험조건은 PLSR에 의한 당도판정 성능시험과 동일한 조건이었다. PCR을 이용한 당도 예측은 전처리를 하지 않은 경우 r_{SEP}= 0.845, SEP = 0.520°Bx, LV=17으로서 DT 전처리에서의 r_{SEP}= 0.845, SEP = 0.521 Brix, LV=17보다 오히려 높게 나타났으며, SNV, MSC, 1st D, OSC, SM* 등의 전처리에서도 더 좋은 성능이 나타나지 않아 전처리에 따른 효과는 없는 것으로 나타났다. 한편, PCR에서의 당도예측 성능은 PLSR에 비해 낮게 나타났다.

요 약

본 연구에서는 딸기의 당도예측모델을 개발하기 위하여 수행하였으며, 딸기의 당도판정에 보다 적합한 조명장치를 설계하기 위해 조명의 영향을 구명하고, 딸기의 당도예측 모델을 개발하였으며, 주요연구 결과는 다음과 같다.

조명방법에 따른 당도 예측 성능을 비교한 결과 4개의 램프로 시료를 직접 조명하는 경우 r_{SEP}= 0.603, SEP = 0.502°Bx으로 나타났으며, 광 화이버로 빛을 유인하여 국부적으로 시료에 점 조명한 경우(광 화이버 3개 사용)에는 r_{SEP}= 0.715, SEP = 0.433°Bx으로서 후자가 더 좋은 성능을 나타내었다. 또한 램프 반사면의 금 코팅 유무에 따른 당도판정 성능시험을 실시한 결과 금 코팅된 할로겐램프를 사용한 경우 r_{SEP}= 0.837, SEP = 0.510°Bx으로서 그렇지 않은 경우의 r_{SEP}= 0.756, SEP = 0.580°Bx보다 양호한 결과가 나타나 금 코팅에 대한 당도판정 효과가 있는 것으로 나타났다.

딸기 당도판정을 위한 최적 회귀모델을 개발하기 위하여 PLSR과 PCR을 이용하였다. 전처리를 하지 않은 경우 r_{SEP}= 0.860, SEP=0.498°Bx로 양호한 결과가 나타났으나, 가장 좋은 결과는 상기에서 언급된 최적의 조명상태에서 측정된 스펙트럼 데이터에 OSC 전처리를 한 경우 r_{SEP}= 0.891, SEP = 0.443°Bx, LV=14로 가장 양호한 결과를 나타내었다.

한편, PCR을 이용한 당도 예측은 전처리를 하지 않은 경우 r_{SEP}= 0.845, SEP = 0.520°Bx, LV=17으로서 DT 전처리에서의 r_{SEP}= 0.845, SEP = 0.521°Bx, LV=17보다 오히려 높게 나타나 전처리에 따른 효과는 없는 것으로 나타났다.

참고문헌

Ama T, Ueda E, Matsue H, Hiniki H. 1990. Determination of brix in intact apple by NIRS. Abstract of the 6th non-destructive measurement symposium, pp. 98-102.

Birth GS. 1978. Non destructive quality evaluation of agricultural products-introduction. J. Food Prot. 41: 48-49.

Golic M, Walsh KB. 2006. Robustness of calibration models based on near infrared spectroscopy for the in-line grading of stonefruit for total soluble solids content. Analytica Chimica Acta 555: 286-291

Kawano S, Watanabe H, Iwamoto M. 1992. Determination of sugar content in intact peaches by near infrared spectroscopy with fiber optics in interactance mode. J. Japanese Soc. Horticultural Sci. 61: 45-451.

Kawano S, Fujiwara T, Iwamoto M. 1993. Nondestructive determination of sugar content in satsma mandarin using near infrared (NIR) transmittance. J. Japanese Soc. Horticultural Sci. 62:465-470.

Kawano S. 1994. Non-destructive NIR quality evaluation of fruits and vegetables in Japan. NIR news 5: 10-12.

Kim G, Lee K, Son J, Choi D, Kang S. 2004. Defect and ripeness inspection of citrus using NIR transmission spectrum. Key Engineering Materials 270-273: 1018-1013.

Lammertyn J, Nicolai B, Ooms K, De Smedt V, De Baerdemaerker J. 1998. Non-destructive measurment of acidity, soluble solids, and firmness of Jonagold apples using NIR spectroscopy. T. ASAE 41: 1089-1094.

Lammertyn J, Peirs A, Baerdemaeker JD, Nicolai B. 2000. Light penetration properties of NIR radiation in fruit with respect to non-destructive quality assessment. Postharvest Biol. Technol. 18: 121-132.

Lee KJ, Hruschka WR, Abbott JA, Noh SH, Park BS. 1998. Predicting the soluble solids of apples by near infrared spectroscopy (I) -multiple linear regression models. J. Korean Soc. Agr. Mach. 23: 561-570.

Son JR, Lee KJ, Kang S, Kim G, Yang GM, Mo CY, Seo Y. 2009. Development of prediction models for nondestructive measurement of sugar content in sweet persimmon. J. Biosystems Eng. 34: 197-203.

Zude-Sasse M, Truppel I, Herold B. 2002. An approach to non-destructive apple chlorophyll determination. Postharvest Biol. Technol. 25: 123-133.