

근적외선 흡광도의 비와 차를 이용한 사과와 비파의 당도 측정

노상하 · 김형욱 · 김기복
서울대학교 농업생명과학대학 농공학과

Nondestructive Determination of Sugar Content in Apples using Ratio or Difference of NIR Spectral Absorbance

Hyung Uk Kim, Sang Ha Noh and Ki-Bok Kim
Department of Agricultural Engineering, Seoul National University

Abstract

This study was conducted to develop a regression model predicting the sugar content in apples nondestructively by measuring and analyzing the near infrared (NIR) spectral absorbance. In this study an emphasis was placed on developing regression models using the ratios or differences of NIR spectral absorbance for developing the multiple regression models. The correlation analysis was conducted between the sugar content of apples and the ratio or difference of spectral absorbance in the wavelength range of 800~2000 nm and regression models were developed and estimated. The correlations between the ratio or the difference of absorbance and the sugar content showed relatively high correlations at similar locations through all samples. The correlation coefficient (r) and standard error of prediction (SEP) of the regression model were 0.935 and 0.817 Brix % for stored apple 'Fuji', 0.958 and 1.074 Brix % for non-stored apple 'Fuji', 0.910 and 0.494 Brix % for apple 'A-ori', respectively.

Key words: near infrared spectroscopic analysis, sugar content, correlation analysis, ratio or difference of spectral absorbance, regression model

서 론

최근 과실에 대한 소비형태는 생활수준의 향상 및 식생활의 고급화와 다양화에 따라 고품질화 및 안전성 등을 추구하게 되었다. 이에 따라 기존의 과실류의 주 선별인자인 크기, 무게 등의 계급인자와 색깔, 표면상태, 외관 등의 외부품질인자에서 당도, 산도, 내부 부패 등의 내부품질인자의 중요성이 증가하고 있다. 이러한 내부품질인자를 측정하기 위한 방법중 화학적인 분석방법에 의존하는 기존의 파괴적인 방법은 전수조사가 아닌 표본조사에 의존하고 있으며 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 품질측정에 사용된 샘플을 다시 반복하여 사용할 수 없다는 단점이 있다. 반면, 비파괴 검사법은 광, 전기, 자기, 진동 등의 물리적 에너지를 이용하여 대상물을 파괴하지 않고 내부품질에 관련된 정보를 신속히 얻는 방법이며, 이러한 비파괴 검사법을 이용한 내부품질 검사에는 핵자기공명(NMR)과 X

선, 단층촬영(CT) 등의 방법이 이용되나 장치의 구성 면에서는 많은 비용이 소요된다. 근적외선 분광분석법은 각종 농산물의 화학적 성분을 비교적 정확하고 간편한 방법으로 측정할 수 있다는 점 때문에 외국의 경우 곡물뿐만 아니라 주요과실의 내부품질의 측정에 많이 이용되어 일부 실용화단계에까지 이르고 있다.

Giangiacomo 등(1986)은 근적외선 분광분석법을 이용하여 10, 25, 40%의 전당(total sugar) 수용액에서 포도당, 과당, 자당의 농도를 결정하는 회귀식을 제시하였다. 회귀식을 이용한 예측의 표준오차(SEP)는 0.35~0.69였고 신뢰한계는 $\pm 0.7 \sim \pm 1.1\%$ 였다. Upchurch 등(1991)은 사과의 흠집과 흠집 없는 부분에서 400~1012 nm 범위의 확산반사를 측정하고 손상부위를 판정하는 기준을 설정하여, 반사율의 비와 차를 사용하였을 때 판정의 오차가 2.5% 이내라고 보고하였다. Dull 등(1992)은 비파괴적으로 멜론의 가용성 고체 함량(% SS)을 측정하기 위해 근적외선 반사분광분석법을 이용한 장치를 개발하였다. SS의 범위가 5.6~13.0%인 시료를 사용해서 회귀식을 구한 결과 굴절당도계의 측정치와 비교했을 때 상관계수는 0.91, 표준오차

(SEC)는 0.82%였다. 5.3~13.1%의 SS범위를 가진 36개의 멜론을 사용하여 검증을 실시한 결과 예측의 표준오차(SEP)는 1.85~%였다. 노상하 등(1997)은 국내산 주요과실에 대하여 600~1100 nm와 600~1400 nm의 두 파장 대역에서 흡광스펙트럼의 2차 미분값을 이용하여 과실의 당 및 산도를 비파괴적으로 측정할 수 있는 회귀모델을 개발하였다. 또한 최창현 등(1997)은 미국산 사과품종인 딜리셔스와 갈라의 당도 및 경도를 측정할 수 있는 PLS(partial least square)모델을 개발하여 평가한 결과 사과와 당도는 860~1078 nm 영역에서 높은 상관관계를 나타내었다고 보고하였다. 이강진 등(1998)은 미국산 사과품종인 갈라의 당도를 예측하기 위한 다중회귀모델, 신경회로망 모델, 부분 최소제곱회귀법을 이용한 모델을 각각 개발하여 평가하였다.

근적외선 분광특성을 이용한 과실의 내부품질판정에 관련한 지금까지의 연구는 주로 과실의 내부품질을 정확하게 측정하기 위한 방법으로 분광스펙트럼의 1차 및 2차 미분데이터를 이용한 다중회귀모델이나 PLS 모델 등을 개발하여 왔는데 실제 과실의 품질판정장치의 개발측면에서는 측정에 사용되는 파장의 개수를 줄이고 품질판정모델도 단순화하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

흡광스펙트럼의 미분을 이용한 내부품질 판정 회귀모델은 하나의 독립변수에 대해 각각 2개와 3개의 흡광도 데이터가 필요하며 따라서 광학필터를 사용하는 저가격의 당도측정장치의 개발에는 미분 데이터를 이용하기 어려운 것으로 판단되어 흡광도의 비 또는 차를 이용한 변수를 이용하고자 하였다.

따라서 본 연구는 근적외선 흡광도의 비와 차를 이용하여 국내에서 유통되는 주요 과실중의 하나인 사과와 당도를 비파괴적으로 측정할 수 있는 당도예측 회귀모델을 개발하여 과실의 당도를 비파괴적으로 측정할 수 있는 당도판정장치의 기초적인 설계인자를 제시하기 위하여 수행되었다.

재료 및 방법

공시재료

공시재료는 시중에서 유통되는 사과를 구입하여 가능한 한 넓은 범위의 당 함량과 다양한 속도의 개체가 포함되도록 시료의 개수를 20~50개로 하여 1개체 당 2~3부분의 스펙트럼과 당도를 측정하였다. 이때 온도 변화에 따른 스펙트럼의 변동을 최소화하기 위해 시료의 온도와 주위온도(약 20°C 내외)를 같게 유지하여 실험하였다. 실험에 사용된 시료의 품종과 수량 및 당도의 분포범위는 Table 1과 같다.

근적외선 스펙트럼 측정

대상 시료의 반사스펙트럼은 분광광도계(모델 UV-3101PC, SHIMADZU사, Japan)를 이용하였으며 과실을 절단하는 등의 사전처리를 하지 않은 시료를 대상으로 반사스펙트럼을 측정하기 위해 대형 시료실(MPC-3100, SHIMADZU)내에 얇은 금속제의 시료대를 별도로 제작하여 흑색 페인트로 도장한 다음 적분구 옆에 부착하였다. 과실을 시료실내의 시료대 위에 놓고 곡률이 큰 측면부분을 적분구 창(12×20 mm)에 밀착시켜 반사광이 적분구 밖으로 빠져나가는 것이 최소가 되도록 하였다.

근적외선 반사스펙트럼은 400~2400 nm 범위에서 2 nm 간격으로 측정하여 반사도(R)를 흡광도로 변환한 후 얻어지는 흡광스펙트럼 데이터를 이용하여 흡광도의 비와 차를 각각 구하여 분석하였다.

당도 측정

각 과실의 당도는 먼저 반사 스펙트럼을 측정한 후 바로 디지털 굴절당도계(모델 DBX-55, ATAGO사, Japan)를 이용하여 측정하였다. 이때 당도는 분광광도계로 측정된 부분을 과피를 포함하여 과육내 깊이 5 mm, 반경 2 cm 이내로 절단한 후 압착하여 과즙을 얻은 다음 3회 반복하여 Brix 당도를 측정한 후 평균값을 이용하였다.

회귀 모델의 개발 및 평가 방법

당도 예측 회귀 모델을 구하기 위하여 분석검량법(analytical calibration)을 적용하여 각 과실마다 약 30개 이상의 회귀식 작성용 당도 데이터를 얻은 후 통

Table 1. Fruit samples for calibration and prediction of sugar content

Sample	Varieties	No.	No. of data			Sugar content (Brix value) range	
			Total No.	Calibration set	Prediction set	Calibration set	Prediction set
Apple	Fuji (stored)	20	44	30	14	9.2~18.0	10.3~17.0
	A-ori	25	56	35	22	10.4~15.8	10.6~15.7
	Fuji	24	55	35	20	8.1~17.8	8.3~17.2

계패키지(SAS version 6.04, SAS Institute Inc)를 이용하여 회귀 모델을 개발하였다. 이때, 흡광도의 비 또는 차를 이용하여 당도와와의 상관관계를 각각 분석하여 당도와 유의성이 있는 파장을 조사한 후, 다중회귀분석(Multi-Linear Regression, MLR)을 이용하여 2개 이상의 독립변수를 포함한 식 (1)과 같은 다중회귀 모델을 작성한 다음 미지시료로 개발된 모델을 검증하였다.

$$C = K_0 + K_1L_1(\lambda_1) + K_2L_2(\lambda_2) + \dots + K_nL_n(\lambda_n)$$

여기서, C=성분함량(Brix 당도값)

K_0 =절편(intercept)

$K_1 \dots K_n$ =회귀계수

$L_1(\lambda_1) \dots L_n(\lambda_n)$ = $\log(1/R)$ 간의 비 또는 차 등의 독립변수

λ_i =파장(nm) (1)

임의 파장 λ_i 과 λ_j 에 대해 흡광도의 비와 차는 각각 다음 식 (2)과 (3)으로 표현된다.

$$\text{흡광도의 비: } L_1(\lambda_i) = \frac{\log(1/R)_{\lambda_i}}{\log(1/R)_{\lambda_j}} \quad (2)$$

$$\text{흡광도의 차: } L_1(\lambda_i) = \log(1/R)_{\lambda_i} - \log(1/R)_{\lambda_j} \quad (3)$$

흡광도의 비와 차를 이용할 경우 변수가 복잡하지만, 두 파장의 흡광도의 변동이 서로 상쇄되는 효과를 기대할 수 있을 것으로 생각된다. 당도 예측 회귀모델의 독립변수로 사용되기 위한 흡광도의 비와 차에 포함되는 파장은 각 파장에서의 흡광도의 비와 차의 조합에 대해 당도와와의 상관관계를 분석하여 비교적 높은 상관계수를 나타내는 파장의 조합을 선정하였다.

회귀 모델의 개발에 사용된 시료에 대한 회귀 모델의 평가는 회귀의 표준오차(SEC), 상관계수(r)을 이용하였으며 모델의 검증은 모델 작성에 사용하지 않은 미지시료를 이용하여 회귀 모델로 예측한 당도와 실제 측정된 당도 값 사이의 예측표준오차(SEP)로 평가하였다(김형욱, 1995; 노상하, 1997).

결과 및 고찰

사과의 스펙트럼특성 및 당도분포

근적외선 각 파장에서 당도에 따른 사과의 평균 흡광스펙트럼 및 평균 흡광스펙트럼의 2차미분 스펙트럼은 Fig. 1과 2에서 보는바와 같이 사과 시료의 각 품종간의 흡광 스펙트럼 및 2차 미분스펙트럼의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

한편, 근적외선 각 파장에서 당도에 따른 저장된 후

지 사과의 흡광스펙트럼을 측정된 결과 Fig. 3에서 보는바와 같다. 각 당도 수준에서 800 nm 부근의 흡광도

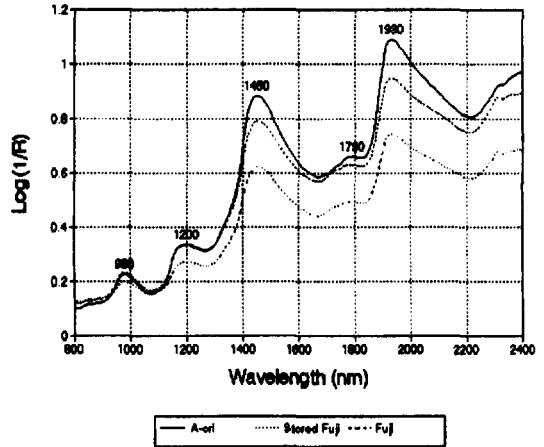


Fig. 1. NIR log (1/R) spectra of Apple.

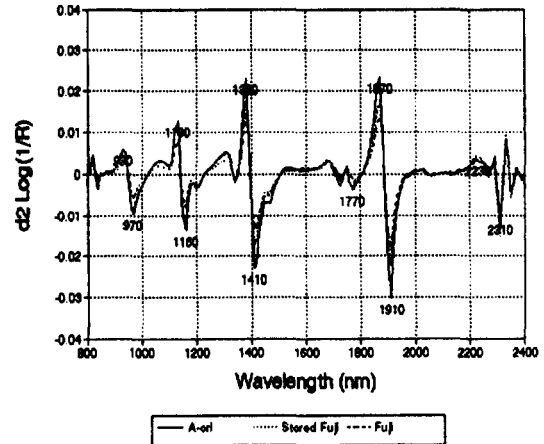


Fig. 2. NIR d²log(1/R) spectra of Apple.

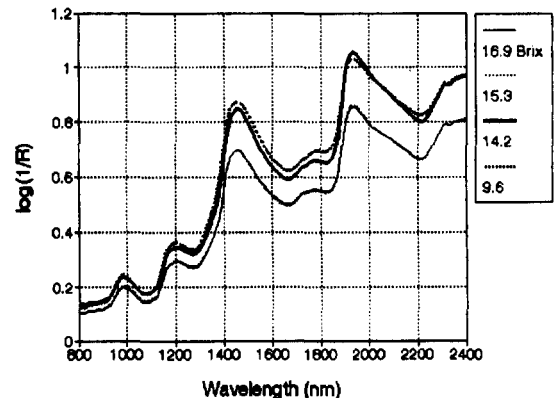


Fig. 3. NIR spectral absorbance log (1/R) of Apple (Fuji, stored).

가 가장 낮게 나타났으며 1000 nm 이상에서는 특정 파장 부분을 제외하고는 2400 nm에 가까울수록 흡광도가 크게 나타났다. 이러한 특성은 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 평균 흡광스펙트럼과 비슷한 양상을 나타내는 것으로 분석되었는데 대체적으로 1450 nm와 1930 nm 부근에서의 흡광도가 크게 나타났다.

당도와 유의성이 있는 파장의 선정

당도예측 회귀모델의 독립변수로서 흡광도의 비와 차에 이용될 파장을 선택하기 위해 800~2000 nm의 범위에서 각 파장에서의 파장 조합에 대해 당도와의 상관관계를 분석하였다. 유의수준 1%에서 상관계수가 0.8이상을 나타내는 조합을 Table 2에서 보는 바와 같이 선정하여 당도예측 모델의 개발에 사용하였다. Table 2에서 흡광도의 비와 차에 포함되는 2개의 파장 조합은 대체적으로 서로 인접한 파장대역에서 당도와 상관계수가 높은 것으로 나타났다.

과실의 당도예측을 위한 회귀 모델 개발

회귀 모델에 당도와 유의성이 있는 파장이 많이 포함될수록 회귀식의 예측값과 측정값간의 상관계수는 높아지지만, 실제의 당도측정장치의 개발 측면에서는 실용성이 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 Table 2에서 분석된 결과를 기초로 하여 4개 이내의 파장을 선택하여 당도예측 회귀모델을 개발하였다.

저장된 후지 사과와 회귀 모델: 저장된 후지 사과와 회귀모델을 개발하기 위하여 30개의 데이터로 회귀 모델을 작성하고, 14개의 미지시료 데이터로 검증을 하였다. 회귀 모델에서 이용한 파장과 회귀계수 및 회귀 모델의 평가를 위한 SEC, SEP, Bias를 나타낸 결과는 Table 3에서 보는바와 같다. Table 3의 결과에서 당도예측 모델의 선정은 1620, 1660, 1840 nm에서의 흡광도를 1680 nm의 흡광도로 각각 나눈 비를 독립변수로 이용할 경우 모델의 상관계수, SEP, Bias가 각각 0.968, 0.869 Brix%, -0.098로서 1100과 940 nm에서의 흡광도를 1050 nm의 흡광도로 각각 나눈 비를 이용할 때 보다 다소 양호한 결과를 나타내고 있으나 1050 nm의 흡광도로 나눈 비를 이용할 경우 모델에 포함되는 파장의 개수가 상대적으로 작아지기 때문에 실제의 당도 측정장치 개발 측면에서 유리할 것으로 판단된다. 따라서 1050 nm의 흡광도로 나눈 비를 포함하는 모델을 선정하여 당도예측 회귀식을 다음 식 (4)와 같이 나타낸 다음 분석한 결과 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 여기서 미지시료의 당도를 예측한 Fig. 4의 (b)는 기준선에서 SEP의 2배 범위를 나타내는 것으로 예측된 미지시료의 당도 값의 95%가 이 범위 내에 있게 됨을 의미한다.

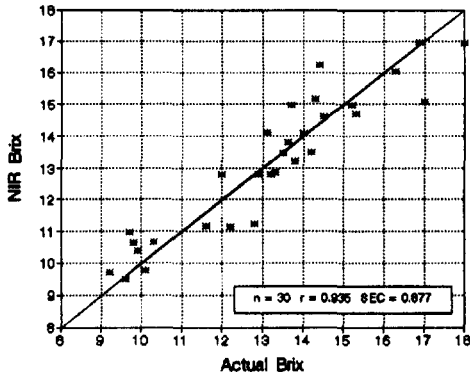
$$C(\text{Brix}\%) = 547.293 - 448.466 \times \frac{\log(1/R)_{1100}}{\log(1/R)_{1050}} - 86.326 \times \frac{\log(1/R)_{940}}{\log(1/R)_{1050}} \quad (4)$$

Table 2. Wavelength having high local correlation coefficient between the Brix value and the ratio or difference of the absorbance log (1/R)

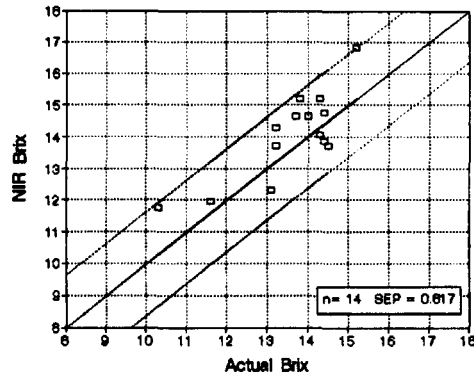
Fruits	Ratio of log (1/R)			Difference of log (1/R)		
	Wave length 1 (λ_1 nm)	Wave length 2 (λ_2 nm)	Correlation coefficient (r)	Wave length 1 (λ_1 nm)	Wave length 2 (λ_2 nm)	Correlation coefficient (r)
Apple (Stored Fuji)	1080	1070	0.9005	1080	1070	0.9197
	1100	1050	0.9008	1290	1240	0.9235
	1280	1250	0.9078	1560	1400	0.9023
	1290	1240	0.9240	1620	1390	0.8992
	1570	1400	0.9182	1820	1790	0.9037
	1620	1390	0.9161	1830	1800	0.9016
Apple (A-ori)	1300	1190	0.8800	1300	1190	0.8814
	1700	1380	0.8250	1720	1380	0.8206
	1770	1390	0.8141	1760	1390	0.8299
	1820	1790	0.8039	1820	1790	0.8255
	1830	1800	0.8132	1830	1800	0.8151
Apple (Fuji)	990	980	0.8543	1280	1250	0.9049
	1000	970	0.8599	1290	1230	0.9321
	1020	960	0.8545	1380	1700	0.8845
	1280	1260	0.8753	1520	1410	0.8747
	1580	1400	0.8782	1560	1400	0.9127
	1630	1390	0.8540	1610	1390	0.9290

Table 3. Result of calibration and prediction for determination of Brix value of Apple (Fuji, stored)

Model	Wavelength (nm)				Regression coefficient					Calibration (n=30)		Prediction (n=14)	
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4	r	SEC	SEP	Bias
Ratio ($\lambda_n/1680$ nm)	1620	1840	1660	-	600.969	823.466	-272.630	-1141.668	-	0.968	0.625	0.859	-0.098
Ratio ($\lambda_n/1050$ nm)	1100	940	-	-	547.293	-448.466	-86.326	-	-	0.935	0.877	0.817	0.500



(a) Calibration



(b) Prediction

Fig. 4. Plot of actual Brix value vs. NIR value calculated by multiple regression model using two ratios of log (1/R) of Apple (Fuji, stored).

저장되지 않은 후지 사과 of 회귀 모델: 저장되지 않은 후지 사과 of 경우 총 35개의 데이터를 이용하여 회귀 모델을 작성하고, 20개의 미지시료 데이터를 이용하여 검증한 결과는 Table 4에서 보는 바와 같다. 1290 nm에서 흡광도의 차를 이용할 경우 상관계수 및 SEP가 각각 0.958 및 1.074 Brix %로 나타나 가장 좋은 결과를 나타내었다.

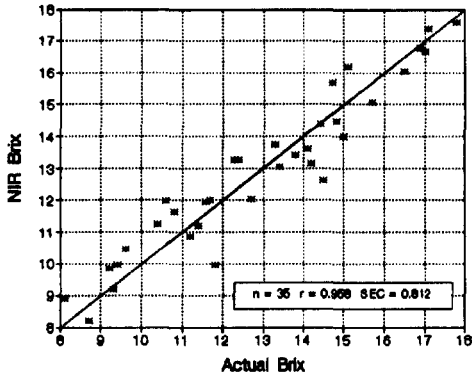
$$C(\text{Brix}\%) = 11.001 + 562.952 \times (\log(1/R)_{1610} - \log(1/R)_{1390}) - 31.323 \times (\log(1/R)_{1940} - \log(1/R)_{1390}) \quad (5)$$

상기 식 (5)를 이용하여 미지 시료의 당도를 예측한 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 다른 사과 시료의 회귀 모델보다 정확도가 낮아진 것으로 분석되었는데 이것은 후지 사과 of 경우 다른 사과 시료보다 당도의 범위가 넓고 개체간의 속도 차이가 크게 나타났기 때문인 것으로 생각된다.

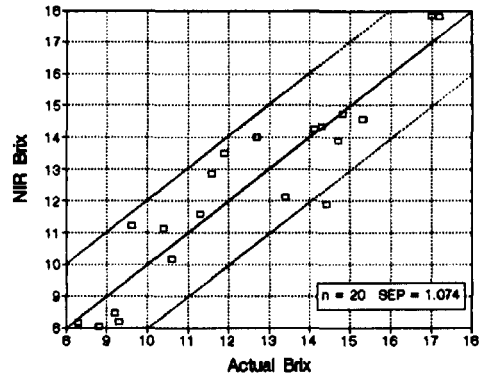
아오리 사과 of 회귀 모델: 35개의 데이터를 이용하여 회귀 모델을 작성하고, 22개의 미지시료 데이터로 검증한 결과는 Table 5와 같다. 1190 nm와 1230 nm의 흡광도를 1300 nm의 흡광도로 각각 나누는 비를 독립변

Table 4. Result of calibration and prediction for determination of Brix value of Apple (Fuji, not stored)

Model	Wavelength (nm)				Regression coefficient					Calibration (n=35)		Prediction (n=20)	
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4	r	SEC	SEP	Bias
Ratio ($\lambda_n/960$ nm)	1020	1120	-	-	-374.084	716.333	-334.661	-	-	0.929	1.052	1.111	-0.333
Ratio ($\lambda_n/1400$ nm)	1580	1770	-	-	-254.606	401.976	-130.457	-	-	0.951	0.879	1.151	-0.288
Difference (λ_n-1390 nm)	1610	1940	-	-	11.001	562.952	-31.23	-	-	0.958	0.812	1.074	-0.007
Difference (λ_n-1400 nm)	1560	840	-	-	1.231	542.722	-15.342	-	-	0.943	0.944	1.136	-0.132



(a) Calibration



(b) Prediction

Fig. 5. Plot of actual Brix value vs. NIR value calculated by multiple regression model using two differences of log (1/R) of Apple (Fuji, not stored).

Table 5. Result of calibration and prediction for determination of Brix value of Apple (A-ori)

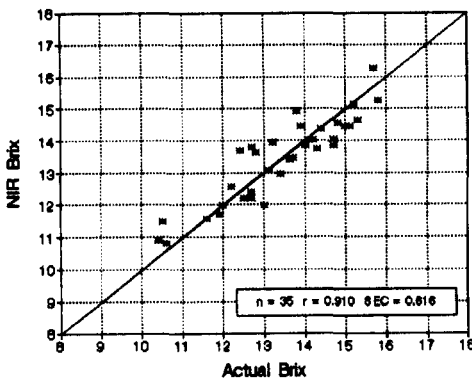
Model	Wavelength (nm)					Regression coefficient					Calibration (n=35)		Prediction (n=22)	
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4	r	SEC	SEP	Bias	
Ratio ($\lambda_n/1300$ nm)	1190	1230	-	-	-357.403	605.640	-242.321	-	-	0.910	0.616	0.494	-0.124	
Difference (λ_n-1300 nm)	1190	1900	-	-	4.980	1301.865	9.128	-	-	0.918	0.588	0.577	-0.206	

수로 이용한 결과, SEP 및 Bias가 각각 0.494 Brix% 및 -0.124로서 다음 식 (6)과 같은 회귀 모델이 가장 양호한 결과를 나타내었다.

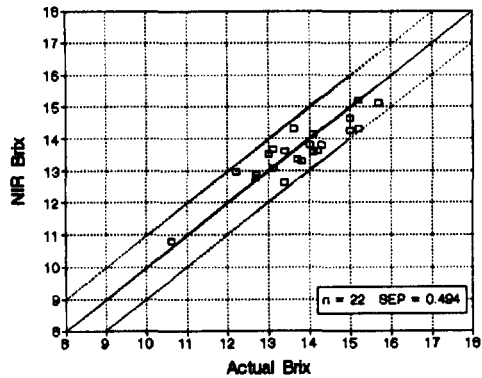
$$-242.321 \times \frac{\log(1/R)_{1230}}{\log(1/R)_{1300}} \quad (6)$$

$$C(\text{Brix } \%) = -357.403 + 605.640 \times \frac{\log(1/R)_{1190}}{\log(1/R)_{1300}}$$

상기의 회귀 모델로 당도를 예측한 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같으며 SEP만을 비교할 때 아오리 사과의 경우 후지 사과보다 모델의 예측 정확도가 높은 것으



(a) Calibration



(b) Prediction

Fig. 6. Plot of actual Brix value vs. NIR value calculated by multiple regression model using two ratios of log (1/R) of Apple (A-ori).

로 분석되었는데, 이러한 이유로는 아오리 사과와 사과와 과육이 후지에 비해 낮고 덜 단단하여 광의 투과가 더 잘되며, 당도의 분포범위가 다른 시료에 비해 크지 않아 상대적으로 오차가 줄어들었기 때문이라고 판단된다.

결 론

본 연구는 근적외선 분광분석법을 이용하여 과실의 흡광스펙트럼을 측정·분석하고 비파괴적으로 당도를 예측하는 회귀 모델을 개발하며, 당도 측정장치의 기본적인 설계인자를 제시하기 위하여 수행되었다. 800~2000 nm의 파장 범위에서 사과에 대한 흡광도의 비 또는 차와 당도와의 상관관계를 분석하여 상관계수가 큰 파장의 조합을 조사하였으며, 이를 기초로 하여 사과에 대한 당도예측 회귀모델을 개발하고 평가하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 당도 판정장치에 적용하기 위한 흡광도의 비와 차에 포함되는 파장 조합과 당도와의 상관관계를 분석한 결과 대체적으로 비슷한 범위에서의 파장 조합이 당도와 상관관계가 높은 것으로 분석되었다.

2. 저장된 후지 사과의 경우 940과 1100 nm에서의 흡광도를 1050 nm의 흡광도로 각각 나눈 비를 독립변수로 하여 당도 예측 모델을 개발하고 평가한 결과 상관계수와 SEP가 각각 0.935 및 0.817 Brix%의 정확도를 나타내었으며 저장되지 않은 후지 사과의 경우는 1390 nm에서의 흡광도를 기준으로 하여 1610과 1940 nm에서의 흡광도와의 차를 이용할 경우 결정계수와 SEP가 각각 0.958 및 1.074 Brix%로 나타났다.

3. 아오리 사과의 경우 1190과 1230 nm의 흡광도를 1300 nm의 흡광도로 각각 나눈 비를 독립변수로 당도

예측 모델을 개발하고 평가한 결과 결정계수와 SEP가 각각 0.91 및 0.494 Brix%로 나타났다.

4. 본 연구에서 개발된 흡광도의 비와 차를 이용한 당도 예측모델을 이용한 당도판정장치를 개발하기 위해서는 서로 다른 품종 및 저장상태 등과 같은 보다 다양한 시료에 대한 보완실험을 통하여 당도 예측모델의 정확도를 향상시키기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

문 헌

- 김형욱. 1995. 근적외선 분광분석법에 의한 과실의 비파괴 당도 측정. 서울대학교 석사학위논문
- 노상하, 김우기, 이종관. 1997. 분광 반사 특성을 이용한 주요 과실의 비파괴 당·산도 측정. 한국농업기계학회지 22(2): 247-255
- 이강진, W.R. Hruschka, J.A. Abbott, 노상하, B.S. Park. 1998. 근적외선을 이용한 사과의 당도 예측(Ⅰ)-다중회귀 모델. 한국농업기계학회지 23(6): 561-570
- 이강진, W.R. Hruschka, J.A. Abbott, 노상하, B.S. Park. 1998. 근적외선을 이용한 사과의 당도 예측(Ⅱ)-부분최소 제곱 및 인공신경회로망 모델. 한국농업기계학회지 23(6): 571-582
- 최창현, 이강진, 박보순. 1997. 가시광선/근적외선 분광분석법을 이용한 사과의 당도 및 경도 측정. 한국농업기계학회지 22(2): 256-265
- Dull, G. G., R. G. Leffler, G. S. Birth and D. A. Smittle. 1992. Instrument for nondestructive measurement of soluble solids in honeydew melons. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.* 35(2): 735-737
- Giangiaco, R. and G. G. Dull. 1986. Near infrared spectrophotometric determination of individual sugars in aqueous mixtures. *J. Food Sci.* 51(3): 679-683
- 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. Soc. Agr. Eng.* 34(3): 1004-1009