

초분광 반사광 영상을 이용한 방울토마토 내부품질 인자 예측

김대용 · 조병관* · 김영식¹

충남대학교 바이오시스템기계공학과, ¹상명대학교 식물산업공학과

Prediction of Internal Quality for Cherry Tomato using Hyperspectral Reflectance Imagery

Dae-Yong Kim, Byoung-Kwan Cho*, and Young-Sik Kim¹

Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University

¹Department of Plant Industry Engineering, Sangmyung University

Abstract

Hyperspectral reflectance imaging technology was used to predict internal quality of cherry tomatoes with the spectral range of 400-1000 nm. Partial least square (PLS) regression method was used to predict firmness, sugar content, and acid content. The PLS models were developed with several preprocessing methods, such as normalization, standard normal variate (SNV), multiplicative scatter correction (MSC), and derivative of Savitzky Golay. The performance of the prediction models were investigated to find the best combination of the preprocessing and PLS models. The coefficients of determination (R_p^2) and standard errors of prediction (SEP) for the prediction of firmness, sugar content, and acid content of cherry tomatoes from green to red ripening stages were 0.876 and 1.875 kgf with mean of normalization, 0.823 and 0.388%Bx with maximum of normalization, and 0.620 and 0.208% with maximum of normalization, respectively.

Key words: cherry tomato, nondestructive measurement, hyperspectral imaging, internal quality

서 론

농산물 품질은 “유통 및 소비과정에서 잘 팔릴 수 있고 선택받을 수 있는 상대적 가치”로 정의할 수 있으며 현대 농산물 마케팅에서 가격과 함께 소비를 결정하는 핵심요소이다(Chae, 2004). 농산물 품질은 외부 품질인자(1차적 품질)와 내부품질인자(2차적 품질)로 나눌 수 있으며 외부 품질인자는 수량, 크기, 형태, 색채, 중량 등 외관으로 판단할 수 있는 인자이며, 내부 품질인자는 맛, 조직감, 영양 및 기능성 성분함량, 잔류 농약, 독성 물질 함량, 미생물 오염 여부 등 외관으로 판단하기가 어려운 인자들이다. 과거에는 농산물을 선택하는 결정기준으로 외부품질인자가 주로 이용 되었지만, 오늘날 전 세계적으로 생활수준이 향상됨에 따라 농산물의 선택기준으로 외부 품질인자뿐만 아니라 맛, 영양성분, 안전성을 고려한 내부 품질인자의 비중

이 더 커지고 있는 추세이다.

기존 방식의 농산물 내부품질 측정은 측정하고자 하는 품질인자에 따라 물리적 및 화학적 방법을 이용하여 예측하게 되는데 품질 속성을 파악하기 위해 주로 파괴적인 방법에 의존하였다. 파괴 방법을 이용한 품질 예측은 시간 및 비용의 소모가 많으며 농산물의 전체 정보를 얻을 수 있는 전수 조사가 어려워 정밀한 품질 관리에 한계가 있다. 특히 농산물은 호흡을 하는 생명체로 수확 후에도 품질이 변할 수 있으며, 동일한 조건으로 재배된 경우에도 개체마다 품질이 달라 균일한 품질 선별이 어렵다. 그러므로 농산물의 품질 측정 기술로 간단하고, 빠르며, 전처리 없이 전수 조사를 실시할 수 있는 비파괴 측정법이 필요하며 꾸준히 연구 개발되고 있다(Xie et al., 2007). 이러한 비파괴 품질 측정 기술로는 진동, 음파, 레이저 분광법, 근적외선 분광법 등이 대표적이라 할 수 있다. 레이저를 이용한 기술은 뛰어난 성능에도 불구하고 시스템 구축에 드는 비용이 높아 산업화하기 어려운 단점이 있고 진동이나 음파를 이용한 분석은 농산물의 물리적 성질 측정에 제한되는 단점이 있다. 분광분석법은 다른 기술에 비해 시스템 구축비용이 많지 않고 농산물에 미치는 영향이 적어 가장 많이 이용되고 있다(Cho, 2000).

*Corresponding author: Byoung-Kwan Cho, Department of Biosystems Machinery Engineering, College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-604, Korea

Tel: +82-42-821-6715; Fax: +82-42-823-6246

E-mail: chobk@cnu.ac.kr

Received July 22, 2011; revised October 18, 2011; accepted October 26, 2011

분광분석법은 시료에 조사된 광을 스펙트럼 형태로 수집하여 시료의 내부정보를 분석하는 기법으로 광이 시료의 표면에서 반사되는 정반사(specular reflectance), 흡수(absorbance), 침투한 빛이 입자들과 반응한 후 확산되는 확산반사(diffuse reflectance), 강한 빛을 조사하였을 경우 시료를 통과하는 투과(transmittance) 등의 원리를 이용한다. 이들 중 농산물의 내부품질 측정에는 투과와 확산반사 방법이 가장 많이 이용된다(Lee et al., 2004; Suh et al., 2011). 특히 최근에는 기술의 발달로 이미지와 스펙트럼을 동시에 사용할 수 있는 초분광 영상 장치가 분광분석 기술에서 각광을 받고 있는데 이는 대상물의 영상정보와 스펙트럼 정보를 동시에 측정 및 분석할 수 있기 때문이며 이미지 프로세싱과 스펙트럼 분석 등으로 내·외부 품질을 공간적으로 정량 측정할 수 있는 장점이 있기 때문이다(Kim et al., 2010; Lee, 2010).

초분광 영상 장치를 이용한 연구로는 토마토의 표면에 존재하는 카르테노이드와 클로로필 예측을 위한 연구(Polder et al., 2004), 저장동안 사과와 미세한 멍을 검출하는 연구(Lee et al., 2009; ElMasry et al., 2008), 사과와 감도의 당도 예측을 위한 연구(Noh & Lu, 2010; Noh & Lu, 2009; Peng & Lu, 2008), 딸기의 숙도 판정과 수분함량, 당도, 산도의 예측을 위한 연구(ElMasry et al., 2007), 귤(citrus)의 치명적인 질병인 canker의 검출을 위한 연구(Qin et al., 2008), 복숭아의 경도 예측(Lu & Peng, 2006), 가공류의 도제과정 중 배설물이나 찌꺼기로부터 계육표면의 오염 검사 및 검출을 위한 연구(Cho et al., 2007), 사과에 묻은 가축의 배설물 검출 연구(Kim et al., 2001) 등 농·식품, 축산물 분야 등에 다양하게 적용되고 있다.

본 연구에서는 기존의 점(point) 측정에 국한되었던 반사식 분광측정 방식의 한계를 넘어 시료 전체면의 분광정보를 측정하여 분석할 수 있는 초분광 반사영상기술을 이용하여 방울토마토의 내부품질 예측 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위해 숙성 등급별로 수확된 방울토마토에서 가시광 및 근적외선 영역의 초분광 반사 영상을 획득하고 영상처리 기법을 이용해 시료 전체면의 분광정보를 추출하여 다변량 회귀식을 통해 내부품질인 경도, 당도, 산 함량 예측모형을 개발하고자 하였다.

재료 및 방법

공시재료

본 연구에 사용된 방울토마토(*Lycopersicon esculentum* Mill)는 충남 논산에서 직접 수확한 '꼬꼬' 품종이다. 재료는 실험 당일 수령 및 노지 재배지를 방문하여 USDA 칼라차트(USDA, 1997)를 기준으로 숙도 등급인 Green(GN), Breaker(BK), Turning(TN), Pink(PK), Light-red(LR), Red(RD)의 방울토마토를 수확하였다. 실험에 사용된 방울토마토는

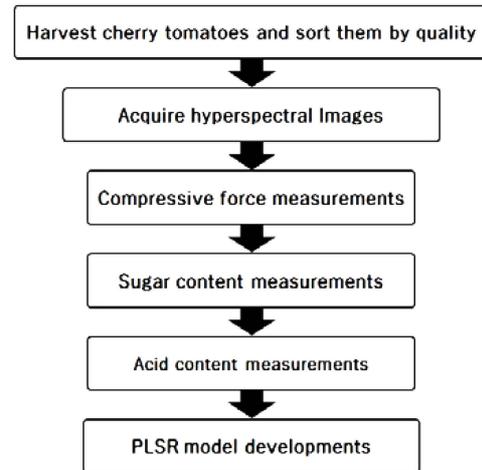


Fig. 1. Entire procedures for the measurements of internal quality of cherry tomatoes using the hyperspectral imaging system.

숙도 등급마다 30 개씩 총 180 개이다. 시료의 내부품질 예측 과정은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 초분광 영상을 획득한 후 경도, 당도, 산 함량을 측정하여 초분광 영상에서 추출된 개별 시료의 평균 스펙트럼과 비교 분석하였다.

초분광시스템을 이용한 영상획득

초분광시스템의 개략적 구조는 Fig. 2와 같으며, 시스템은 크게 영상획득부와 시료이송부로 나눌 수 있다. 영상획득부는 1004×1002 Pixel의 크기를 가지는 EMCCD(Electron multiplying charge coupled device) 카메라(DL-604M, Andor Inc, South Windsor, CT, USA)와 C-mount 렌즈, 그리고 100 W 할로젠램프(LS-F100HS-IR, Seokwang Optical Co., LTD, Hwaseong, Korea) 2 set(set당 3 개의 램프)로 배치하여 구축하였으며, 시료이송부는 스테핑모터와 모터컨트롤러, 그리고 시료 받침대로 구성하였다. 방울토마토는 표면의 광택에 의해 정반사가 발생하므로 할로젠램프를 간접적으로 조명하여 방울토마토에서 발생하는 정반사를 최소화 하도록 하였다.

초분광 영상획득은 초분광 반사광 영상 시스템을 이용하

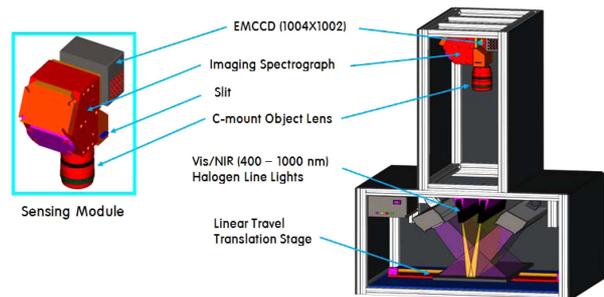


Fig. 2. Schematic diagram of the hyperspectral imaging system.

여 방울토마토의 촬영과 분광을 통해 영상 정보와 스펙트럼 정보를 구성하는 과정이다. 방울토마토를 시료받침대에 일정한 간격으로 올려놓고 측정을 하면 설정한 노출시간 0.5 초 동안 정지하면서 라인영상이 획득되고 이후 이송간격 0.5 mm로 시료가 이송되도록 하였다. 이러한 라인스캔을 400 번 수행하여 총 200 mm 길이의 영상을 획득하였다. 라인영상은 spectrograph에 의해 분광되어 영상 및 스펙트럼이 구성되며 스테핑모터의 이동이 끝나면 방울토마토 시료는 초분광 반사광 영상 시스템에 의해 영상정보와 스펙트럼 정보를 가지는 3D Hypercube로 컴퓨터에 저장된다.

분석에 사용된 방울토마토의 초분광영상은 400-1000 nm 파장영역이며, 공간해상도는 0.5 mm, 스펙트럼해상도는 약 5 nm이다. 초분광영상은 반사스펙트럼으로 반사율을 구하기 위하여 White reference와 Dark reference를 촬영하였고 아래의 식 1을 이용하여 반사율로 변환하였다. White reference로는 광반사율이 99.9% 이상인 Teflon board를 이용하였고 Dark reference는 광을 완전히 차단한 암실내부에서 촬영한 영상값을 이용하였다. White reference와 Dark reference는 각각 20 프레임 촬영한 영상값의 평균을 이용하였다(Lee et al., 2009).

$$R = \frac{R_i - D}{W - D} \times 100(\%) \quad (1)$$

Where, R : calculated relative reflectance values

R_i : raw intensity values of each pixel

D : intensity values of dark current image

W : intensity values of white reference image

초분광 영상 반사스펙트럼 획득

Fig. 3은 초분광 영상으로부터 반사스펙트럼을 획득하는 과정을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 등급별로 구분한 방울토마토 샘플이며 Fig. 3(b)는 초분광시스템으로부터 획득한 초분광영상이다. Fig. 3(c)와 (d)는 한 개의 방울토마토 초분광 영상으로부터 내부품질 예측에 필요한 과육부분만을 선택하여 전체의 스펙트럼을 획득한 과정이다. 전체 스펙트럼은 픽셀마다 스펙트럼이 포함되어 있어 과육부분을 선택한 픽셀 수만큼 스펙트럼이 생성된다. Fig. 3(e)는 전체

스펙트럼을 평균하여 나타낸 것이다. 한 지점만의 스펙트럼을 이용하는 것과는 달리 초분광 영상은 전체의 시료에 대한 스펙트럼을 이용하므로 시료의 반사 분광정보에 대한 대표성을 유지한다고 할 수 있다.

방울토마토 내부품질 측정

경도 측정

경도는 만능재료시험기(SY-T-001, Sunyoung Systec Inc., Daejeon, Korea)를 이용하여 측정하였다. 만능재료시험기는 평판지그를 사용하였으며, 하중재하속도는 60 mm/min으로 하였다. 방울토마토는 시료가 너무 작아서 경도 측정 중에 파괴되면 과즙의 손실로 당도와 산 함량 측정에 영향을 미치게 되므로 파괴되지 않는 범위 내의 압축 변위를 지정하였다. 따라서 시료가 힘을 받는 지점부터 3 mm 이동했을 때 로드셀에 측정된 압축력은 측정의 최대압축력이 되는데 이때의 압축력을 경도 값으로 사용하였다(Kim et al., 2010).

당도 및 산 함량 측정

경도를 측정한 후 당도 및 산 함량을 측정하였다. 경도 측정이 완료된 시료는 과육조직을 균질하게 분쇄하고 체를 이용하여 고형성분을 제거한 뒤 굴절당도계(PR-32 α , Atago, Tokyo, Japan)로 당도를 측정하였다. 남은 과즙으로 산 함량을 측정하였는데 식품공전의 산의 적정법을 이용하여 방울토마토의 주산인 구연산(citric acid)을 측정하였다. 측정방법은 과즙 1 mL을 증류수 30 mL에 섞은 다음 pH미터로 측정하여 수치가 8.3%가 될 때까지 0.1 N NaOH 용액을 디지털 뷰렛(Digital Burette, Brand, Wertheim, Germany)으로 첨가하였다. 첨가된 0.1 N NaOH 용액의 양을 식 2, 3, 4를 이용하여 계산하였다(Park et al., 2004).

$$N \cdot V = N' \cdot V' \quad (2)$$

$$N' = \frac{N \cdot V}{V'} \quad (3)$$

Where, N : Concentration of NaOH

V : Volume of NaOH

N' : Acid concentration of sample

V' : Volume of sample

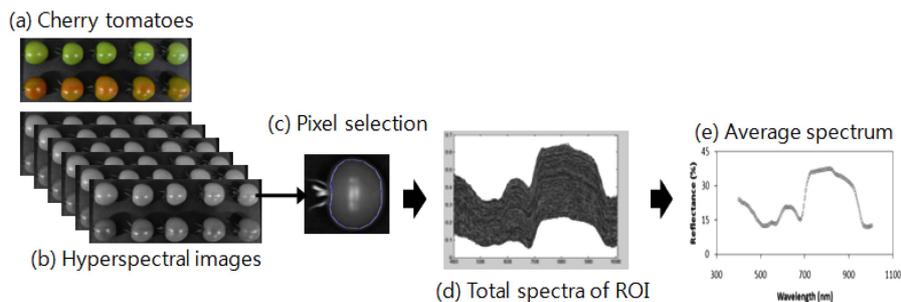


Fig. 3. Procedure for obtaining reflectance spectra from hyperspectral images.

$$TA(\%) = N' \times 64.04 \times \frac{1}{1000} \times 100 \quad (4)$$

Where, *TA*: Concentration of acidity in the 100 mL Citric acid M. W. of 1 N : 64.04 g/L

내부품질 예측모델 개발

획득된 스펙트럼은 광 산란, 광 경로의 변화, 측정 장치 자체의 잡음, 실험 시간 동안의 환경 변화 등에 따라 스펙트럼의 변화가 일어나며 이를 제거하고 보다 안정적인 모델을 만들기 위해 전처리 기법을 사용하게 된다(Ryu et al., 2000). 따라서 다양한 전처리를 실시한 모델을 비교하여 예측성능이 우수한 모델을 선택하게 된다. 본 연구에서도 평균(mean), 최대값(maximum), 범위(range)를 이용한 정규화(normalization)와 MSC(multiplicative scatter correlation), SNV(standard normal variate), Savitzky Golay의 1 차와 2 차 미분처리 전처리 기법을 활용하여 예측성능이 우수한 모델을 선정하였다.

내부품질 예측모델은 PLSR(partial least square regression)을 이용하여 개발하였고 사용된 소프트웨어는 Unscrambler (ver. 9.7, Camo Co., Oslo, Norway)이다. 분석에 사용한 PLSR 데이터는 내부품질 데이터를 중심으로 정렬한 후 순차적으로 모델개발과 예측 검증 데이터를 70:30의 비율이 되도록 나누었다. 분석에 사용된 경도, 당도, 산 함량의 데이터 구성은 Table 1과 같다.

예측모델의 평가 기준

PLS 회귀식은 일반적으로 상관계수(coefficient of correlation; *r*), 결정계수(coefficient of determination; *R*²), SEC(standard error of calibration), SEP(standard error of prediction), Bias, PLS factor의 수 등을 고려하여 예측모델의 성능을 평가하게 된다. 본 연구에서는 우수한 예측모델을 결정하기 위해 개발된 모델의 결정계수와 검증시료의 결정계수가 높고, SEC와 SEP이 낮은 값을 가지는 모델을 선정하였다(Kim et al., 2010). SEC, SEP, Bias의 계산식은 5, 6, 7과 같다.

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2}{(m-1)}} \quad (5)$$

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m ((\hat{y}_i - y_i) - Bias)^2}{(n-1)}} \quad (6)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (7)$$

Where, \hat{y}_i : Predicted value of the *i*-th observation
 y_i : Measured value of the *i*-th observation
m: Number of observations in the calibration set
n: Number of observations in the validation set

결과 및 고찰

스펙트럼 분석

방울토마토 180 개의 반사스펙트럼은 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같으며 6 등급별 30 개씩 평균하여 나타난 반사스펙트럼은 Fig. 4(b)와 같다. 반사스펙트럼의 두드러진 특징으로는 녹색에 해당하는 550 nm 영역의 반사율이 선별된 방울토마토의 속도에 따라 낮아져 RD 등급에서는 최저 반사율을 나타내었으며, 빨간색에 해당하는 640 nm 영역은 속도가 진행될수록 높아져 PK, LR, RD 등급에서는 높은 반사율을 보였다. 일반적으로 방울토마토의 미숙과는 빨간색이 결핍되고 상대적으로 녹색이 우세하며 속도가 진행될수록 빨간색이 증가하는데 측정된 스펙트럼 결과가 이와 잘 일치하고 있음을 보여준다. 또한 Polder et al.(2004)의 가시영역 이미징 스펙트로포토미터를 이용한 토마토의 카로테노이드와 클로로필의 표면 분포의 함량 예측 연구에서도 유사한 결과 그래프를 보여주고 있다. 특히 속도가 완전히 진행된 RD 등급의 반사스펙트럼은 다른 속도 등급의 반사스펙트럼보다 낮은 반사율을 보였다.

675 nm는 일반적으로 클로로필 흡수 영역으로 알려져 있는데 본 연구에서도 방울토마토의 반사스펙트럼에서 클

Table 1. Properties of the samples.

Characteristics	Set	Items			
		No.	Range	Mean	Std. dev.
Firmness (kg _f)	Calibration	125*	4.76 - 25.27	12.31	5.15
	Prediction	54	4.99 - 27.17	12.42	5.36
Sugar content (°Bx)	Calibration	126	4.2 - 8.9	6.05	0.94
	Prediction	54	4.4 - 8.4	6.04	0.93
Acid contents (%)	Calibration	126	0.58 - 1.94	1.27	0.33
	Prediction	54	0.65 - 2.11	1.28	0.34

*one test failure of firmness measurement

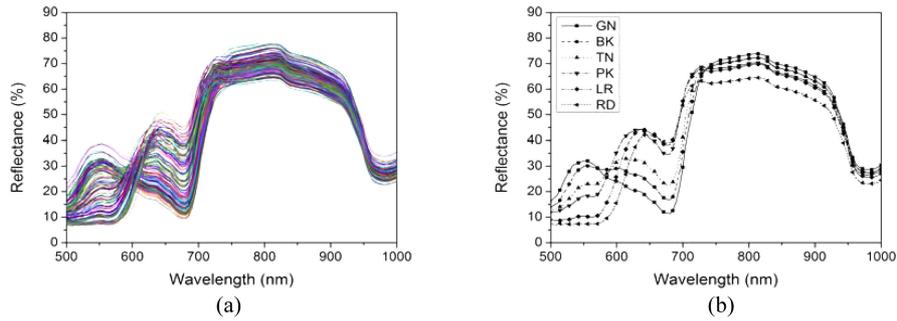


Fig. 4. Reflectance spectra of cherry tomatoes acquired by hyperspectral imaging system (a) individual reflectance spectra of cherry tomatoes (b) average reflectance spectra according to six grades of cherry tomatoes.

Table 2. PLS results for the calibration of firmness, sugar content and acid content using reflectance spectra of cherry tomatoes.

Preprocessing	Firmness (kg _f)				Sugar contents (°Bx)				Acid contents (%)				
	R_c^2	SEC	R_{cv}^2	SECV	R_c^2	SEC	R_{cv}^2	SECV	R_c^2	SEC	R_{cv}^2	SECV	
Raw data	0.869	1.862	0.858	1.950	0.663	0.542	0.634	0.569	0.806	0.146	0.700	0.183	
Normalization	Mean	0.888	1.718	0.874	1.841	0.885	0.316	0.758	0.462	0.806	0.146	0.703	0.182
	Maximum	0.888	1.722	0.872	1.852	0.885	0.315	0.757	0.463	0.816	0.142	0.724	0.175
	Range	0.887	1.726	0.872	1.856	0.871	0.335	0.737	0.482	0.809	0.144	0.688	0.186
MSC	0.863	1.904	0.851	1.999	0.882	0.320	0.737	0.482	0.810	0.144	0.699	0.184	
SNV	0.877	1.798	0.863	1.914	0.737	0.478	0.677	0.535	0.815	0.142	0.697	0.184	
Savitzky-Golay	1 st deri.	0.871	1.846	0.858	1.949	0.922	0.259	0.752	0.468	0.773	0.158	0.691	0.186
	2 nd deri.	0.883	1.758	0.851	2.001	0.808	0.408	0.699	0.516	0.612	0.206	0.563	0.221

R_c^2 and R_{cv}^2 : Coefficient of determination of calibration and validation

로로필 흡수 영역이 확인되었으며 속도가 진행될수록 클로로필의 반사율이 명확히 구분됨을 볼 수 있었다. 이는 속도가 진행될수록 내부에는 카르테노이드 계열의 라이코펜과 클로로필 계열이 침착 및 변화가 나타나기 때문으로 판단된다. 840 nm와 960 nm 근적외선 영역의 흡수는 당과 수분에 의한 영향으로 알려져 있으며(EIMarsy et al., 2008), 방울토마토의 반사스펙트럼도 당과 수분에 의한 흡수 영역이 관찰되었다.

전처리별 모델 개발 결과

경도, 당도 및 산 함량과 반사스펙트럼을 이용한 PLS 예측모델의 결과는 Table 2에 나타내었다. PLS 결과는 예측모델의 SEC과 결정계수(R_c^2)를 구하였으며, Full cross validation을 실시하여 SECV과 결정계수(R_{cv}^2)를 구하고 각각의 전처리별로 비교하였다. Table 2의 PLS 예측모델의 결과를 볼 때 전처리를 수행한 예측모델이 전처리를 하지 않은 스펙트럼의 분석 결과보다 대부분이 결정계수가 높고 SEC, SECV이 낮은 결과가 확인되었다.

경도의 경우 예측모델의 성능에서 개발된 결정계수와 교차검증의 결정계수가 크게 차이가 없이 나타났으며 당도와 산 함량에서 개발된 결정계수는 교차검증의 결정계수와 다

소 차이가 나타났다. 따라서 경도가 예측모델의 성능이 가장 우수하였으며 그 다음으로 당도와 산 함량 순서였다. 이는 반사스펙트럼이 방울토마토의 속도를 결정하는 착색도를 잘 반영하고 착색도는 방울토마토의 물성인 경도와 뚜렷한 선형성을 보이기 때문이라 사료된다. Zude et al.(2006)의 연구에서도 가시광 및 근적외선 분광분석을 이용하여 사과가 나무에 열려 있을 때와 저장 기간 동안 경도 및 당도를 PLS 분석으로 예측을 한 결과에서 경도가 당도보다 높게 나타났다고 보고하였다.

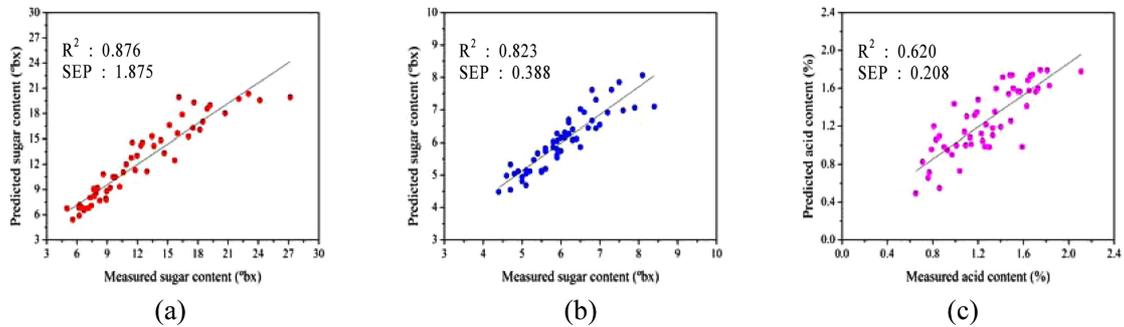
Table 2에 나타낸 바와 같이 경도는 전처리 방법 중 평균을 이용한 정규화 전처리가 가장 높은 결정계수를 나타내었으며, 당도는 Savitzky Golay의 1 차 미분에서 가장 높은 결정계수가 확인되었으나 교차검증의 결정계수와 차이가 크게 나타났다. 산 함량은 최대값을 이용한 정규화에서 가장 높은 결정계수가 확인되었다.

Table 3은 Table 2에서 개발된 예측모델로부터 검증 데이터(n=54)를 이용하여 검증한 결과를 나타낸 것이다. 여러 전처리들 중 경도의 결정계수는 0.836에서 0.876의 범위를 가지며 SECV이 1.875에서 2.161 kg_f의 범위를 가지는 것으로 확인되었다. 이중 경도는 평균을 이용한 정규화에서 0.876의 결정계수와 1.875 kg_f의 SEP가 가장 우수한

Table 3. PLS results for prediction of firmness, sugar content and acid content using reflectance spectra of cherry tomatoes.

Preprocessing		Firmness (kg _f)		Sugar contents (°Bx)		Acid contents (%)	
		R_p^2	SEP	R_p^2	SEP	R_p^2	SEP
Raw data		0.848	2.084	0.642	0.552	0.583	0.217
Normalization	Mean	0.876	1.875	0.821	0.390	0.615	0.209
	Maximum	0.874	1.896	0.823	0.388	0.620	0.208
	Range	0.863	1.969	0.805	0.407	0.609	0.211
MSC		0.836	2.161	0.809	0.403	0.614	0.210
SNV		0.853	2.047	0.692	0.510	0.620	0.209
Savitzky-Golay	1 st deri.	0.850	2.070	0.752	0.452	0.569	0.221
	2 nd deri.	0.838	2.153	0.786	0.426	0.586	0.215

R_p^2 : Coefficient of determination of prediction.

**Fig. 5.** Best results for the prediction of (a) firmness with mean of normalization, (b) sugar content with maximum of normalization, and (c) acid contents with maximum of normalization of cherry tomatoes.

모델로 확인되었다. 당도의 결정계수는 0.642에서 0.823의 범위를 가지며 SECV는 0.388에서 0.552°Bx 의 범위로 나타났다. 가장 우수한 당도의 예측모델은 최대값을 이용한 정규화에서 0.823의 결정계수와 0.388°Bx 의 SEP가 확인되었다. 산 함량의 결정계수는 0.583에서 0.620의 범위를 가지며 SECV는 0.208에서 0.221%의 범위로 나타났다. 이중 산 함량은 SNV와 최대값을 이용한 정규화 전처리를 수행한 모델에서 우수한 모델로 확인되었으나 SEP가 더 낮은 최대값을 이용한 정규화 전처리를 수행한 모델이 가장 우수한 모델로 확인되었다. 따라서 최대값을 이용하여 정규화 전처리를 수행한 산 함량 모델은 결정계수가 0.620이며, 0.208%의 SEP였다.

경도, 당도, 산 함량의 순으로 검증결과가 좋게 확인되었으며, Table 3의 검증한 결과를 토대로 각각의 전처리에서 가장 좋은 예측모델로 평가한 경도, 당도, 산 함량의 결과값을 Fig. 5에 나타내었다. 경도의 결과값 분포가 가장 좋은 선형성을 보이고 있으며 산도의 결과값 분포는 다른 변수에 비해 선형성이 낮게 나타남을 확인할 수 있다.

상품성을 고려한 시료의 예측모델 성능 평가

방울토마토는 수확 후 숙도의 진행이 빠른 특징을 가지

고 있어 저장할 수 있는 기간이 짧아 일반적으로 착색이 시작된 PK 등급부터는 수확한 후 바로 유통시키고 있다 (Kim et al., 2010). 따라서 즉시 상품화할 수 있는 등급은 6 등급 중 PK, LR, RD 등급이 해당된다. 본 연구에서는 이를 반영하여 PK에서 RD 등급에 해당하는 방울토마토 90 개를 70:30의 비율인 모델 개발에 63 개와 검증에 27 개로 나누어 PLS 회귀 분석을 실시하였다. Table 4와 5에 나타난 바와 같이 전처리별로 예측모델의 성능평가 및 검증한 결과를 나타내었다.

개발된 예측모델을 이용하여 경도, 당도, 산 함량의 검증한 결과 경도는 일정 범위를 적용한 정규화의 전처리에서 결정계수가 0.679이며 SEP가 0.976 kg_f 로 가장 높았으며, 당도의 경우 최대값을 이용한 정규화의 전처리에서 0.586의 결정계수와 0.546°Bx 의 SEP로 가장 높게 나타났다. 산 함량은 Savitzky Golay의 2 차 미분 전처리에서 0.547의 결정계수와 SEP가 0.188%로 가장 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

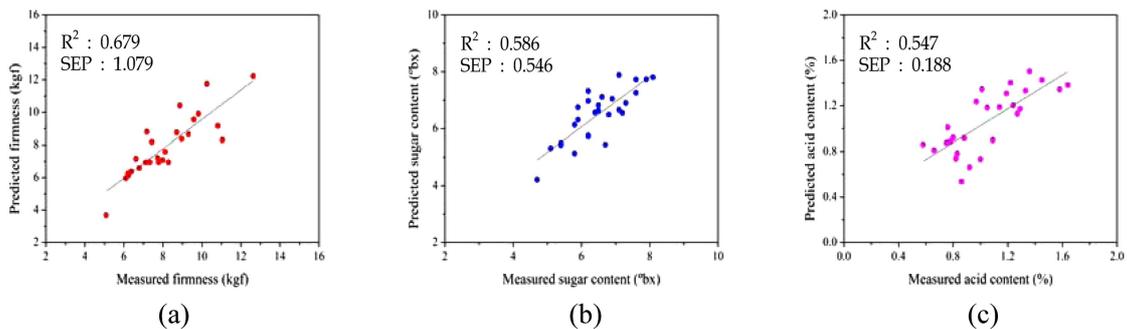
상품성을 고려한 시료의 PLS 회귀 분석은 전체의 시료를 이용한 PLS 회귀 분석보다는 낮은 결정계수를 나타내었는데 이는 PK, LR, RD 등급만 사용했을 시 품질인자 측정값의 분포 범위가 좁아지기 때문으로 판단된다. Fig. 6

Table 4. PLS results for the calibration of firmness, sugar content and acidity content using reflectance spectra of cherry tomatoes at PK, LR, and RD grades.

Preprocessing	Firmness (kg _f)				Sugar contents (°Bx)				Acid contents (%)				
	R_c^2	SEC	R_{cv}^2	SECV	R_c^2	SEC	R_{cv}^2	SECV	R_c^2	SEC	R_{cv}^2	SECV	
Raw data	0.790	0.927	0.718	1.091	0.935	0.231	0.662	0.538	0.536	0.193	0.512	0.201	
Normali-zation	Mean	0.903	0.629	0.764	0.997	0.951	0.200	0.694	0.511	0.568	0.186	0.541	0.195
	Maximum	0.920	0.571	0.754	1.081	0.940	0.222	0.696	0.509	0.548	0.190	0.534	0.196
	Range	0.893	0.660	0.744	1.040	0.937	0.228	0.706	0.502	0.568	0.186	0.542	0.195
MSC	0.927	0.546	0.771	0.983	0.861	0.339	0.665	0.536	0.541	0.192	0.528	0.198	
SNV	0.905	0.622	0.741	1.046	0.859	0.342	0.640	0.556	0.538	0.192	0.525	0.198	
Savitzky-Golay	1 st deri.	0.908	0.613	0.748	1.031	0.820	0.386	0.631	0.562	0.555	0.189	0.516	0.200
	2 nd deri.	0.885	0.684	0.726	1.076	0.844	0.359	0.642	0.553	0.832	0.116	0.603	0.181

Table 5. PLS results for the prediction of firmness, sugar content and acidity content using reflectance spectra of cherry tomatoes at PK, LR, and RD grades.

Preprocessing	Firmness (kg _f)		Sugar contents (°Bx)		Acid contents (%)		
	Prediction		Prediction		Prediction		
	R_p^2	SEP	R_p^2	SEP	R_p^2	SEP	
Raw data	0.612	1.110	0.524	0.583	0.525	0.190	
Normalization	mean	0.626	1.074	0.572	0.555	0.510	0.192
	maximum	0.614	1.079	0.586	0.546	0.523	0.190
	range	0.679	0.976	0.576	0.552	0.512	0.191
MSC	0.567	1.136	0.539	0.569	0.522	0.191	
SNV	0.550	1.174	0.548	0.565	0.522	0.191	
Savitzky-Golay	1 st deri.	0.555	1.167	0.274	0.703	0.517	0.191
	2 nd deri.	0.602	1.119	0.559	0.548	0.547	0.188

**Fig. 6.** Best results for the prediction of (a) firmness with range of normalization, (b) sugar contents with maximum of normalization, and (c) acid contents with 2nd derivative of Savitzky Golay of cherry tomatoes at PK, LR, and RD grades.

은 Table 4를 토대로 각각의 전처리에서 가장 좋은 예측모델로 평가한 경도, 당도, 산 함량의 예측한 결과 값을 그래프로 나타내었다.

요 약

초분광영상을 이용하여 방울토마토의 전체 면에서 반사

스펙트럼을 획득하였으며 속도 등급(GN-RD)에 따른 스펙트럼의 차이를 관찰하였다. 방울토마토의 반사스펙트럼에서 클로로필에 의한 675 nm 영역의 흡수가 관찰되었고, 당과 수분의 영향으로 알려진 840 nm, 970 nm 영역에서 흡수가 관찰되었다. 특히 GN에서 RD 등급으로 속도가 진행될수록 평균 스펙트럼의 경우 반사율이 낮아지는 경향이 관찰되었다.

총 8 개의 전처리를 이용하여 전 속도 등급의 시료에 적용한 PLS 회귀 분석에서 내부품질들 중 경도 예측모델이 가장 우수한 것으로 확인되었다. 이때 전처리는 평균값을 이용한 정규화이었으며 결정계수는 0.876, 그리고 SEP은 1.875 kgf 이었다. 당도의 경우는 최대값을 이용한 정규화에서 결정계수가 0.823과 SEP 0.388°Bx로 나타났으며, 산 함량의 경우 최대값을 이용한 정규화에서 0.620의 결정계수와 0.208%의 SEP이 확인되었다.

상품성을 고려한 PK, LR, RD 등급의 시료에서 PLS 회귀 분석을 실시한 결과 내부품질 중 전체의 속도 등급의 시료를 사용하여 예측한 결과보다는 전체적으로 다소 낮은 예측결과를 확인할 수 있었다. 내부 품질 중 경도에서 가장 높은 예측모델이 확인되었으며, 전처리는 일정 범위를 이용한 정규화이고 0.679의 결정계수와 0.976°Bx의 SEP이 확인되었다. 당도는 최대값을 이용한 정규화에서 0.586의 결정계수와 0.546 kgf의 SEP의 결과를 보였으며 산 함량은 Savitzky Golay의 2차 미분에서 0.547의 결정계수와 0.188%의 SEP을 보였다.

본 연구에서는 최근 연구 활용이 시작되고 있는 최신기술인 초분광 반사광 영상을 이용하여 방울토마토 내부품질인 경도, 당도, 산 함량 예측의 가능성을 확인하였다. 초분광 영상은 영상처리를 이용하여 외부의 결함 및 외부 착색도 등도 측정할 수 있으므로 본 연구에서 수행한 내부품질 측정과 융합하여 복합적인 농산물 품질 선별기 개발에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농림수산식품부에서 주관하는 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임.

참고문헌

- Chae JC. 2004. Quality Evaluation and Control of Agricultural Products. Hayngmoonsa, Seoul, Korea, pp. 13-17.
- Cho HS. 2000. Measurement of apple firmness by VIS/NIR transmittance. MS thesis. Seoul National University, Seoul, Korea.
- Cho BK, Chen YR, Kim MS. 2007. Multispectral detection of organic residues on poultry processing plant equipment based on hyperspectral reflectance imaging technique. *Comput. Electron Agr.* 57: 177-189.
- ElMasry G, Wang N, Elsayed A, Ngadi M. 2007. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. *J. Food Eng.* 81: 98-107.
- ElMasry G, Wang N, Vigneault C, Qiao J, ElSayed A. 2008. Early detection of apple bruises on different background colors using hyperspectral imaging. *LWT-Food Sci. Technol.* 41: 337-345.
- Kim MS, Chen Y, Mehl PM. 2001. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food safety and quality. *Trans. ASABE.* 44: 721-729.
- Kim DY, Cho BK, Mo CY, Kim YS. 2010. Study on prediction of internal quality of cherry tomato using Vis/NIR spectroscopy. *J. Biosystems Eng.* 35: 450-457.
- Kim DY, Lee NG, Back IS, Cho BK. 2010. Study on detection of damage on apple 'Fuji' using multispectral imagery. In: *Proceedings of the KSAM Winter Conference.* February 19, Jeonju, Korea, pp. 19-22.
- Lee KJ, Kang SW, Choi KH. 2004. Nondestructive quality measurement of fruits and vegetables using near-infrared spectroscopy. *Food Eng. Prog.* 8: 158-169.
- Lee NG, Cho BK, Kim MS. 2009. Study on bruise detecting at the inner parts of pears using hyperspectral imaging. In: *Proceedings of the KSAM Summer Conference.* July 9, Sokcho, Korea, pp. 434-437.
- Lee NG. 2010. Study on bruise detecting technique using hyperspectral imaging system. MS thesis. Chungnam National University, Daejeon, Koera.
- Lu R, Peng Y. 2006. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. *Biosyst. Eng.* 93: 161-171.
- Noh HK, Lu R. 2009. Apple quality measurement using hyperspectral reflectance and fluorescence scattering. *J. Biosystems Eng.* 34: 37-43.
- Noh HK, Lu R. 2010. UV/blue light-induced fluorescence assessing apple quality. *J. Biosystems Eng.* 35: 124-131.
- Park WP, Cho SH, Kim CH. 2004. Quality characteristics of cherry tomatoes packaged with paper bag incorporated with antimicrobial agents. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 33: 1381-1384.
- Polder G, Heijden GWAM, Voet H, Young IT. 2004. Measuring surface distribution of carotenes and chlorophyll in ripening tomatoes using imaging spectrometry. *Postharvest Biol. Technol.* 34: 117-129.
- Peng Y, Lu R. 2008. Analysis of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biol. Technol.* 48: 52-62.
- Qin J, Burks TF, Kim MS, Chao K, Ritenour MA. 2008. Citrus canker detection using hyperspectral reflectance imaging and PCA-based image classification method. *Sens. Instrumen. Food Qual.* 2: 168-177.
- Ryu DS, Hwang IG, Noh SH. 2000. Pre-processing techniques on VIS/NIR spectral data for non-destructive quality evaluation of fruits. In: *Proceedings of the Korean Society Agricultural Machinery 2000 Winter Conference.* February 18, Suwon, Korea, pp. 451-456.
- Suh SR, Lee KH, Yu SH, Yoo SN, Choi YS. 2011. Comparison of performance of measuring method of VIS/NIR spectroscopic spectrum to predict soluble solids content of 'Shingo' pear. *J. Biosystems Eng.* 36: 130-139.
- USDA. 1997. United States Standards for Grades of Fresh Tomatoes. United States Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service, Washington DC, USA.
- Xie L, Ying Y, Ying T, Yu H, Fu X. 2007. Discrimination of transgenic tomatoes based on visible/near-infrared spectra. *Anal. Chim. Acta* 584: 379-384.
- Zude M, Herold B, Roger JM, Maurel VB, Landahl S. 2006. Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life. *J. Food Eng.* 77: 254-260.