

레이저 역산란 광 영상분석에 의한 배 경도 예측

이경환^{1*} · 서상룡¹ · 유승화¹ · 유수남¹ · 최영수¹

¹전남대학교 지역바이오시스템공학과

Prediction of Pear Fruit Firmness by Analysis of Laser-induced Light Backscattering Images

Kyeong Hwan Lee^{1*}, Sang Ryong Suh¹, Seung Hwa Yu¹, Soo Nan Yoo¹, Young Soo Choi¹

¹Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 500-757, Korea

(Received: August 10th, 2011; Revised: September 6th, 2011; Accepted: September 19th, 2011)

Abstract

The overall goal of this study was to examine the feasibility of predicting firmness of pear fruit by analyzing laser-induced light backscattering images. Thirty-five image analysis characteristics extracted from the laser-induced light backscattering images were used to build partial least squares regression (PLSR) models for predicting firmness of pear fruit. Experiments were conducted with three sets of pear samples which were in same “Shingo” cultivar, harvested in a same season, but produced in different counties. In every experiments with fruit samples produced in a same county, the correlation coefficients of prediction (r_p) and root mean square errors of prediction (RMSEP) of the models were 0.550-0.761 and 4.039-6.154 N, respectively. In an experiment with mixed fruit samples produced in different counties, the r_p and RMSEP of the model were 0.669 and 5.02 N, respectively. The experiment results indicate that the analysis of laser-induced light backscattering images could be a useful tool for predicting firmness of pear fruit nondestructively.

Keywords : Pear, Firmness, Backscattering image, Internal quality, Nondestructive measurement

1. 서론

과일의 품질관정을 위한 인자는 크게 외부인자(색깔, 크기, 중량, 형상, 외부상처 등)와 내부인자로 나눌 수 있으며, 내부 인자는 경도, 내부결합 등의 물리적 요인과 당도, 산도 등의 화학적 요인으로 구분할 수 있다. 과일 품질관정 기준의 핵심 인자는 주로 내부인자에 의해 결정되며, 이는 어느 한 요인에 의해 결정되기 보다는 물리적 요인과 화학적 요인의 조합에 의해 결정된다. 따라서 과일의 정확한 품질관정을 위해서는 물리적 요인과 화학적 요인을 동시에 측정하여 이들의 조합 정도를 지표화 하는 것이 요구된다.

내부인자의 물리적 요인(경도)과 화학적 요인(당도)의 동시 측정을 위해 가시광선과 근적외선 대역에서의 분광분석법이 개발되어 다양한 연구가 수행되어 왔다. 선행 연구결과에 의하면 가시광선과 근적외선 대역에서의 분광분석법은 당도 측정에 있어서 비교적 높은 정확도를 보이지만(Choi et al., 1997; Noh et al., 1997; Gomez et al., 2006; Son et al., 2007; Cayuela et al., 2008; Moghimi et al., 2010; Suh et al., 2011), 경도 측정에 있어서의 정확도는 낮은 편이다(Choi et al., 1997; Lee et al., 1998; Cho et al., 2000; Cavaco et al., 2009; Penchaiya et al., 2009; Valente et al., 2009). 과일에 조사되는 광의 일부는 표면에서 반사되고, 나머지는 과일 내부로 침투하게 된다. 내부로 침투된 광의 광자(photon)들은 각각 다른 방향으로 산란되어 일부는 내부 조직에 흡수되고, 또 다른 일부는 내부 조직을 통해서 과일 표면 밖으로 발산

*Corresponding author: Kyeong Hwan Lee
Tel: +82-62-530-2156; Fax: +82-62-530-2159
E-mail: khlee@jnu.ac.kr

된다. 여기에서 광의 흡수되는 정도(흡광도)는 일반적으로 과일의 화학적 성분과 관련이 있으며, 표면 밖으로 발산되는 정도는 과일의 물리적, 화학적 성분과 관련이 있다(Lu, 2004).

과일 품질판정을 위해 사용되고 있는 가시광선/근적외선 분광분석기는 주로 흡광도를 측정하여 과일의 품질을 측정하기 때문에, 위에서 설명한 바와 같이 당도(화학적 성분) 측정에서는 높은 정확도를 보일 수 있지만, 경도(물리적 성분) 측정에서의 정확도는 낮을 수 밖에 없는 한계를 가지고 있다. 따라서 과일 경도 측정의 정확도 향상을 위해 과일 내부의 일정 부분을 경유하여 표면에서 산란되는 광(역산란 광)의 특성에 대한 연구가 시작되었다. Lu(2004)는 사과와 배의 경도 측정을 위해 다분광(multispectral) 역산란 광 영상 시스템을 개발하였다. 4개의 파장에서 획득한 역산란 광의 각 영상간의 광 강도 비율을 조사하여 경도 측정의 가능성을 보였다. Qin and Lu(2006)는 초분광(hyperspectral) 역산란 영상으로부터 사과와 배의 경도 예측을 위한 인자를 조사하기 위해 광 분산 모델의 산란계수를 구하여 산란계수와 경도사이에 상관관계가 있음을 보였다. Qing et al.(2007)은 사과와 배의 경도 측정을 위해 5개 파장에서 레이저를 광원으로 하여 역산란 영상을 획득하고, 각 파장에서 획득한 산란영상의 광 강도 빈도수를 이용하여 경도 측정의 가능성을 보였다. Noh et al.(2007)은 초분광 역산란 영상과 형광 영상 획득이 가능한 시스템을 이용하여 사과와 배의 경도 측정이 가능함을 보였다.

위의 선행 연구에서 사용한 다분광 혹은 초분광 영상획득 시스템은 과일의 당도와 경도를 동시에 측정할 수 있는 장점이 있지만, 구성이 다소 복잡하고 고가라는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 비교적 저가이며 구성이 간단한 단파장의 레이저에 의해 유도된 역산란 광 영상 획득장치를 개발하고, 역산란 영상분석을 통해 배의 경도 측정 가능성을 조사하고자 한다.

2. 재료 및 방법

가. 실험 재료

실험은 전남지역 3개 군에서 2009년 가을에 생산한 ‘신고’ 품종의 배를 대상으로 총 3회에 걸쳐 수행되었으며, 표 1에 나타낸 바와 같이 실험 a는 전남 장성산 배 69개, 실험 b는 전남 장흥산 배 80개, 실험 c는 전남 나주산 배 100개를 대상으로 실시되었다. 시료의 중량과 적도 부위에서의 둘레는 각각 478.0~925.7 g과 30.5~38.6 cm 범위였으며, 경도는 10.2~52.4 N 범위 내에 분포되어 있었다. 경도는 농산물용 인장압 측정시험기(model: Multi-Test 1-i, Mecmesin, UK)를 이용하여 측정되었다. 시료의 표피를 제거한 후 직경 8 mm인 탐침을 압입속도 24 mm/min로 시료의 15 mm 깊이까지 압입시켜(ASABE Standards s368.4 참조) 측정된 최대값을 경도로 하였다. 수확 후 시료는 8°C의 저온 창고에서 저장되었으며, 실험 전 하루 동안 상온(22°C)에서 보관하였다. 실험 a, b, c는 각각 2009년 11월, 2009년 12월, 2010년 4월에 수행되었다.

나. 레이저 역산란 광 영상획득 장치

레이저에 의해 유도된 역산란 광 영상획득 장치는 그림 1과 같이 레이저 광원 모듈과 전원공급기, 컬러 카메라와 영상 저장을 위한 컴퓨터, 시료 받침대로 구성되었다. 레이저 광원은 635 nm 파장의 다이오드 모듈로서 출력은 3 mW였다. 레이저 빔 확산은 1.5 mrad 이하였으며, 입사각도는 약 15°였다. 시료 표면에 조사된 레이저 빔의 일부는 시료 내부로 흡수되고, 일부는 내부 일정부분을 경유하여 표면에서 산란되었다. 이 역산란 영상은 줌렌즈(1.4-11 mm의 초점거리)를 장착한 CCD 디지털 컬러 카메라(model: DFK-31BF03, Imaging Source, USA)에 의해 1024×768 픽셀 크기의 컬러영상으로 저장되었다. 역산란 영상은 시료 적도 부위의 등간격 3지점(120° 간격)을 대상으로 외부의 빛이 차단된 암실 챔버 내에

Table 1 Properties of fruit samples

Property		Exp. a	Exp. b	Exp. c
Cultivar		Shingo	Shingo	Shingo
Produced county		Chonnam, Jangseog	Chonnam, Jangheung	Chonnam, Naju
Harvest season		2009. 11	2009. 10	2009.10
No. of sample		69	80	100
Weight (g)	Range	478.0~925.7	604.7~781.7	516.4~578.8
	Mean±S.D.	686.9±101.2	656.1±28.2	547.9±13.7
Perimeter at a central equator (cm)	Range	30.5~38.6	33.0~37.8	31.7~34.7
	Mean±S.D.	33.7±1.8	35.1±0.8	33.2±0.6
Firmness (N)	Range	20.1~43.7	16.6~52.4	10.2~41.9
	Mean±S.D.	29.6±4.3	29.0±6.2	25.2±6.2

서 획득되었으며, 시료의 공급은 수작업으로 이루어졌다. 크기가 다른 시료에 대해서 동일한 대상체 거리를 유지하기 위해 카메라로부터 일정한 거리에 카메라에 포착되지 않는 위치에 마커를 설치하고, 시료 상부 표면이 항상 이 마커에 도달할 수 있도록 시료 받침대의 높이를 조절하였다.

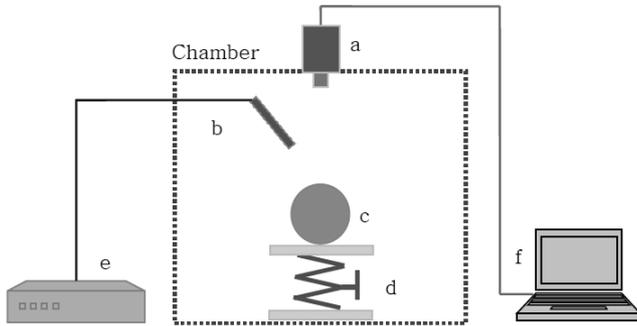


Fig. 1 Schematic view of the laser-induced light backscattering image acquisition system (a: CCD digital color camera, b: 635 nm diode laser module, c: fruit sample, d: height adjustable sample holder, e: power supply for laser module, f: computer for image acquisition).

다. 영상 분석

획득된 컬러영상은 각각 Red(R), Green(G), Blue(B) 영상으로 분리되었다(Fig. 2). 각 R, G, B 영상에 대해 Otsu 방법 (Gonzalez et al., 2004)에 의해 문턱치 처리를 수행하고 적응 중간값 필터(adaptive median filter)를 적용하여 이진영상을 얻었다. 따라서 배경으로부터 역산란 영역만을 추출할 수 있었다. 각 R, G, B 영상 공간에서 추출한 역산란 영역의 픽셀 개수를 세어 G 공간에서 추출한 역산란 영역의 픽셀 개수에 대한 R 공간에서 추출한 역산란 영역의 픽셀 개수의 비율, B 공간에서 추출한 역산란 영역의 픽셀 개수에 대한 R 공간에서 추출한 역산란 영역의 픽셀 개수의 비율, B 공간에서 추출한 역산란 영역의 픽셀 개수에 대한 G 공간에서 추출한 역산란 영역의 픽셀 개수의 비율을 구하였다.

또한, 컬러영상은 그레이스케일 영상으로 변화되었으며 위에서 설명한 문턱치 처리와 필터링 방법에 의해 배경으로부터 역산란 영역만을 라벨링할 수 있었다. 따라서 그레이스케일 영상으로부터 역산란 영역만을 추출할 수 있었다. 추출한 역산란 영역만을 대상으로 픽셀의 밝기(0-255) 분포를 조사하여 10개의 픽셀 밝기 간격으로 히스토그램을 구하였다.

그레이스케일 영상의 역산란 영역의 질감을 정량화하기 위해서 식 (1)~(6)에 나타낸 바와 같이 평균 밝기(m), 평균 콘트라스트(σ), 밝기 평탄도(R), 3차 모멘트(μ_3), 밝기 균일도(U), 밝기 엔트로피(e)를 구하였다(Gonzalez et al., 2004).

$$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i) \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 p(z_i)} \quad (2)$$

$$R = 1 - \frac{1}{1 + \sigma^2} \quad (3)$$

$$\mu_3 = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^3 p(z_i) \quad (4)$$

$$\mu_3 = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^3 p(z_i) \quad (5)$$

$$\mu_3 = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^3 p(z_i) \quad (6)$$

where, z_i : random variable indicating light intensity
 $p(z_i)$: histogram of the light intensity levels
 L : number of possible intensity levels

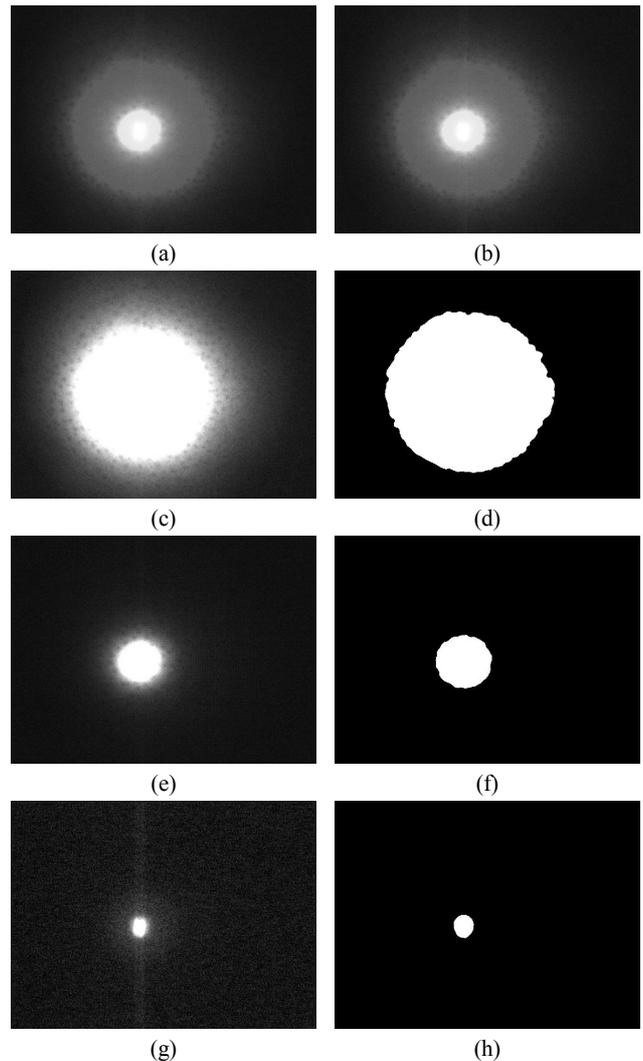


Fig. 2 Light backscattering images of pear fruit: (a) color image, (b) grayscale image, (c) red image, (d) binarized red image, (e) green image, (f) binarized green image, (g) blue image, (h) binarized blue image.

위에서 설명한 역산란 광 영상분석 방법들은 Matlab Image Processing Toolbox(Ver. 6.1, The MathWorks, USA)와 Gonzalez et al.(2004)이 제공한 함수를 사용하여 Matlab(Ver. 7.6, The MathWorks, USA)에 기반하여 구현되었다.

라. 예측모델 개발

역산란 광 영상은 시료 적도부위의 등간격 3지점에서 획득되었으며 영상분석 인자별로 3지점의 평균값을 시료의 대푯값으로 사용하였다. 각 영상분석 인자들 간의 변이 범위를 일정하게 하기 위해 정규화 전처리를 수행하였다. 이러한 영상 분석 자료를 이용하여 배 경도 예측모델을 개발하고 검증하기 위해 부분최소제곱회귀법(partial least squares regression, PLSR)을 사용하였다. 각 실험별 시료의 2/3를 모델 개발용으로, 1/3을 모델 검증용으로 사용하였다. 예측모델의 성능평가를 위해 모델개발 단계에서의 상관계수(correlation coefficient of calibration, r_c)와 자승-평균-평방근 오차(root mean square error of calibration, RMSEC), 모델검증 단계에서의 상관계수(correlation coefficient of prediction, r_p)와 자승-평균-평방근 오차(root mean square error of prediction, RMSEP)를 각각 구하였다. 또한 모델의 독립변수 인자(factor) 수를 조사하였다. 이상의 예측모델의 개발과 검증은 Matlab PLS Toolbox(Ver. 4.2, Eigenvector Research Inc., USA)가 제공하는 함수를 이용하여 Matlab에 기반하여 수행되었다.

3. 결과 및 고찰

가. 역산란 영상 특성

시료 경도값에 따른 레이저 역산란 광 영상분석 자료의 특성을 파악하기 위하여 실험 c의 가장 낮은 경도값(10.2 N)을 갖은 시료와 가장 높은 경도값(41.9 N)을 갖은 시료에 대해 영상 분석을 실시하였으며, 그 결과는 그림 3, 4, 5에 나타난 바와 같다. 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 R, G, B 모든 공간에서 저경도의 역산란 영역의 면적은 고경도의 역산란 영역의 면적보다 크게 나타났다. 이는 조사된 광은 연한 과육에서 더 넓게 산란되고 있음을 보여주고 있다. 하지만 동일한 경도의 시료에 대해서도 시료의 크기나 시료 곡면의 기울기, 시료 표면의 영상 획득 위치에 따라 역산란 영상 영역의 면적은 달라질 수 있고 이는 경도측정의 오차 요인이 될 수 있다. 따라서 이러한 요인에 의한 경도측정 오차를 최소화 하기위해서 R, G, B 각각의 공간에서 측정된 역산란 영역의 면적 비율을 구하였다. 즉, G 공간에서의 역산란 영상 면적에 대한 R 공간에서의 역산란 영상 면적의 비율(R/G), B 공간에서의 역산란 영상 면적에 대한 R 공간에서의 역산란 영상 면적의 비율(R/B), B 공간에서의 역산란 영상 면적에 대한 G 공간에

서의 역산란 영상 면적의 비율(G/B)을 구하여 경도측정을 위한 인자로 사용하였다. 그 결과는 그림 3(b)에 나타난 바와 같다. 낮은 경도의 시료에서 R/B와 G/B 값은 높은 경도의 시료에서 보다 크게 나타났으며, R/G 값은 두 경도에서 거의 동일하였다.

그림 4는 역산란 영역 내 픽셀의 밝기 분포를 나타낸 히스토그램을 보여주고 있다. 픽셀의 밝기정도 20과 30에서만 고경도의 빈도수가 저경도의 빈도수에 비해 높게 나타났으며, 그 외의 밝기정도에서는 저경도의 빈도수가 높게 나타났다. 이는 대체적으로 저경도에서의 역산란 영상이 고경도에서의 역산란 영상보다 다소 밝다는 것을 의미하며, 픽셀의 밝기 분포를 나타낸 히스토그램이 경도측정에 유용할 수 있음을 보여주고 있다.

본 연구에서는 역산란 영상의 질감을 정량화하기 위해서 평균 밝기(average intensity), 평균 콘트라스트(average contrast), 밝기 평탄도(smoothness), 3차 모멘트(3rd moment), 밝기 균

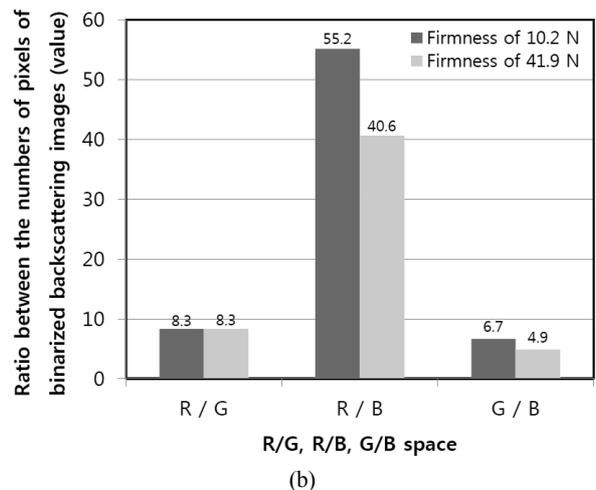
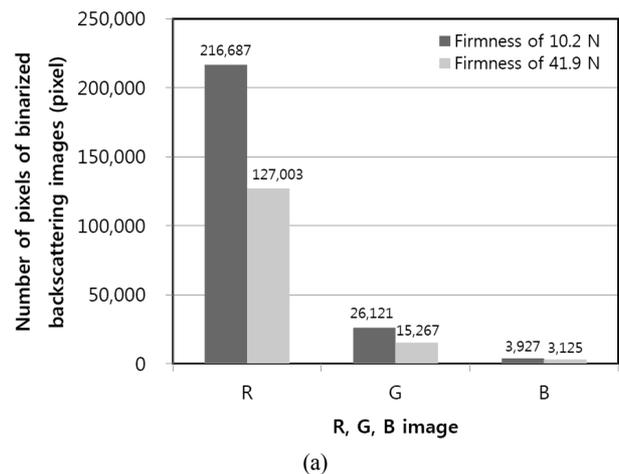


Fig. 3 Analysis of the number of pixels of binarized backscattering images: (a) number of pixels in R, G, B spaces, (b) ratio between the numbers of pixels in R/G, R/B, G/B spaces.

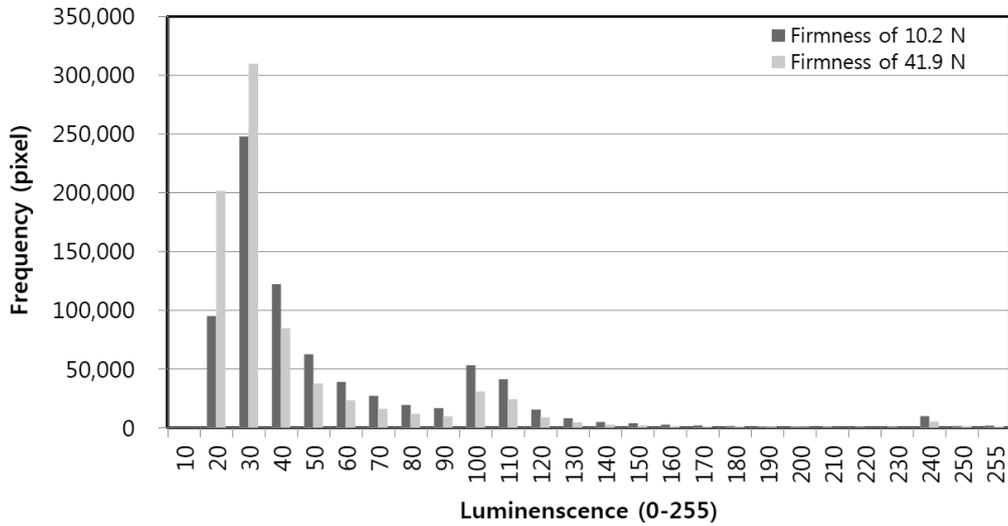


Fig. 4 Histogram of pixels of the grayscale image.

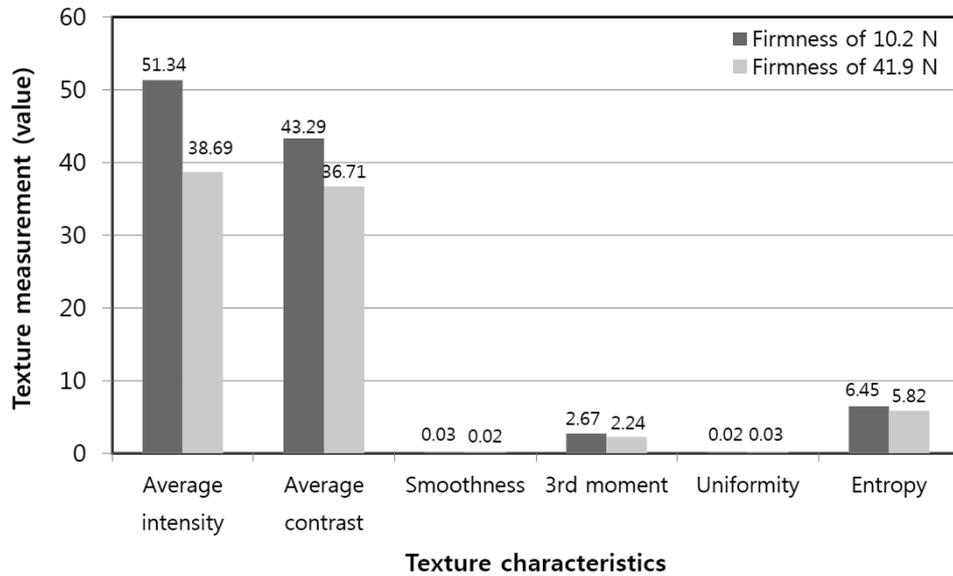


Fig. 5 Measurement of texture characteristics of the grayscale image.

일도(uniformity), 밝기 엔트로피(entropy) 등을 사용하였으며, 두 경도에 대한 결과는 그림 5에 나타난 바와 같다. 역산란 영상의 평균밝기는 고경도 시료에서 보다 저경도 시료에서 높게 나타났으며, 이는 그림 4의 분석결과와 일치한다. 평균 콘트라스트 또한 고경도 보다 저경도에서 높게 나타났으며, 이는 밝기정도의 표준편차가 저경도에서 더 크다는 것을 의미한다. 밝기 평탄도는 밝기의 상대적인 변화 정도를 나타낸 지표로서, 일정한 밝기 영역(밝기의 표준편차가 0인 영역)에 대해서는 0이고 밝기가 크게 다른 영역(밝기의 표준편차가 큰 영역)에서는 1에 근접한다. 두 경도에서 밝기 평탄도는 0에 근접하므로 역산란 영상의 밝기 변화는 대체적으로 일정하다는 것을 의미한다. 3차 모멘트는 히스토그램의 비대칭도를 나타내는 지표이다.

저경도의 3차 모멘트 값이 다소 높게 나타났으며, 이는 저경도 히스토그램의 비대칭도가 고경도 보다 다소 높음을 의미한다. 밝기 균일도는 모든 밝기정도의 빈도수가 같을 때 최대이고, 빈도수가 크게 다르거나 특정 밝기정도의 빈도수에 집중될 때 0에 근접한다. 두 경도에서 밝기 균일도는 0에 근접하므로 밝기정도의 빈도수가 크게 다르거나 특정 밝기정도의 빈도수에 크게 의존하고 있음을 나타내며 이는 그림 4에서 확인할 수 있다. 엔트로피는 밝기의 무작위성을 나타내는 지표로서 저경도의 역산란 영상에서 다소 높게 나타났다. 이상의 결과는 역산란 영상의 질감을 나타내는 6가지 인자들이 경도 측정에 유용하게 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

나. 예측모델 성능

역산란 영상 분석을 통해 구한 3가지 역산란 영상 면적 비율(R/G, R/B, G/B), 밝기 히스토그램의 26가지 빈도수 분포, 6가지 영상질감 측정 인자를 사용하여 배 경도 예측을 위한 PLSR 모델을 개발하고 검증한 결과는 표 2와 같다. 실험 a, b, c에서 모델 개발의 r_c 와 RMSEC 각각 0.681~0.873과 2.591~3.541 N이었으며, 모델 검증의 r_p 와 RMSEP는 각각 0.550~0.761과 4.039~6.154 N이었다. 모델의 독립변수 인자 수는 5~8이었다. 특히, 실험 c의 r_p 와 RMSEP는 0.761과 4.419

N로서 배 경도 측정을 위한 모델의 성능이 다른 실험 보다 우수함을 보여주고 있다. 이상의 결과는 Qing 등(2008)이 사과에 대해 5개의 파장에서 획득한 레이저 역산란 영상을 분석하여 얻은 결과($r_p = 0.80\sim 0.90$) 보다 다소 낮지만, 1개의 단파장 레이저를 사용하여 하드웨어를 간소화하고 대신 다양한 영상분석 특성인자를 사용하여 그 성능을 소프트웨어적으로 보상하려는 연구목적에는 부합된다고 판단된다.

수확시기와 품종이 유사하지만 생산지역이 다른 배의 경도 예측을 위해 실험 a, b, c의 모델 개발용 시료를 혼합하여 모

Table 2 Performance of PLSR models for predicting firmness of pear fruit

Exp.	No. of factor	r_c	RMSEC (N)	r_p	RMSEP (N)
a	5	0.681	2.591	0.713	4.039
b	8	0.773	3.541	0.550	6.154
c	7	0.873	2.861	0.761	4.419
a+b+c	9	0.704	4.020	0.669	5.020

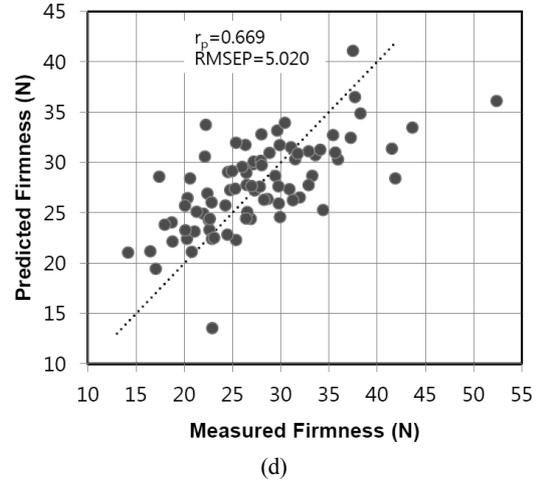
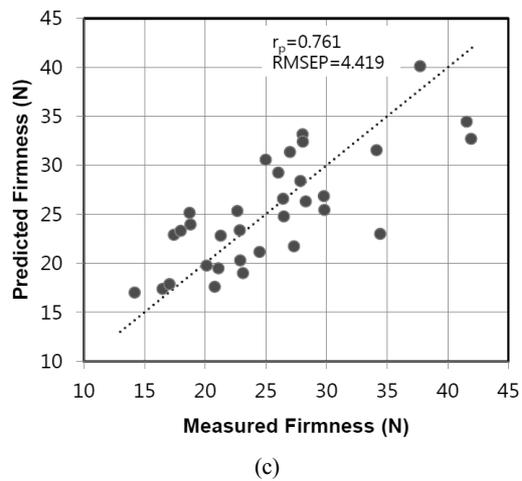
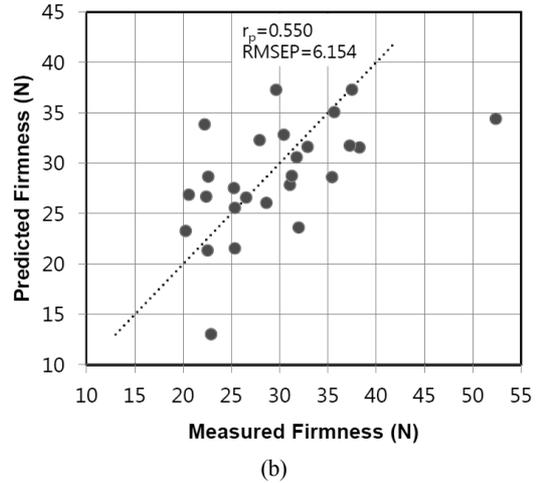
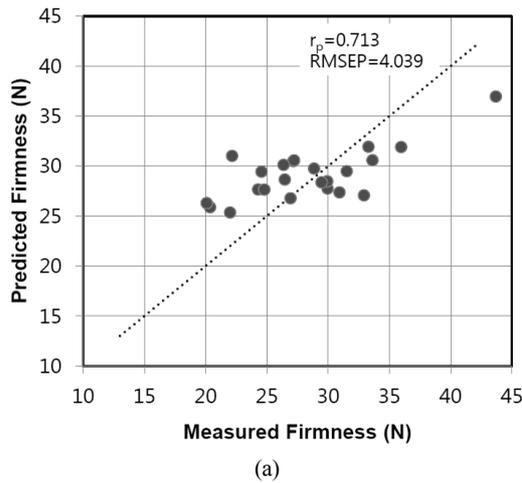


Fig. 6 Validation of PLSR models for predicting firmness of pear fruit: (a) experiment a, (b) experiment b, (c) experiment c, (d) mixture of experiments a, b, and c.

텔을 개발하고, 실험 a, b, c의 모델 검증용 혼합 시료에 대해 검증하였다. 그 결과 모델 개발의 r_c 와 RMSEC는 각각 0.704와 4.02 N이었으며, 모델 검증의 r_p 와 RMSEP는 각각 0.669와 5.02 N이었다. 이는 단과장의 레이저에 의해 유도된 역산란 광 영상분석 방법은 수확시기와 품종이 동일하고 생산지역이 다른 배를 대상으로도 경도 측정이 가능함을 보여주고 있다. 하지만 배의 물성은 생산농가의 재배법, 토양의 특성, 기후 등에 따라 달라질 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 요약 및 결론

배 경도 예측을 위해 단과장 레이저에 의해 유도된 역산란 광 영상 획득장치를 개발하고, 역산란 영상분석을 통해 배 경도 예측에 유용한 35개의 인자를 발굴하였다. 이 인자들을 이용하여 배 경도 예측을 위한 PLSR 모델을 개발하였으며, 그 모델의 성능을 검증하였다. 실험은 동일한 '신고' 품종으로 수확시기가 유사하고 생산지역이 다른 시료군을 대상으로 총 3회에 걸쳐 수행되었으며, 그 실험 결과는 다음과 같다.

- (1) 품종, 수확시기, 생산지역이 동일한 시료를 대상으로 한 실험에서 PLSR 모델 개발의 r_c 와 RMSEC는 각각 0.681~0.873과 2.591~3.541 N이었으며, 모델 검증의 r_p 와 RMSEP는 각각 0.550~0.761과 4.039~6.154 N으로써, 역산란 영상분석에 의한 배 경도 측정의 가능성을 보여주었다.
- (2) 수확시기와 품종이 유사하지만 생산지역이 다른 시료군을 혼합하여 모델을 개발하고 검증하였다. 그 결과 모델 개발의 r_c 와 RMSEC는 각각 0.704와 4.02 N이었으며, 모델 검증의 r_p 와 RMSEP는 각각 0.669와 5.02 N이었다. 이는 역산란 영상분석에 의한 경도 측정방법은 생산지역이 다른 혼합 시료군을 대상으로도 적용할 수 있음을 보여주고 있다.

감사의 글

This work was supported by National Research Foundation of Korea Grant funded by the Korean Government (Ministry of Education, Science and Technology)(NRF-2008-355-D00025).

참고 문헌

1. Cavaco, A. M., P. Pinto, M. D. Antunes, J. M. Silva and R. Guerra. 2009. 'Rocha' pear firmness predicted by a Vis/NIR

- segmented model. *Postharvest Biology and Technology* 51: 311-319.
2. Cayuela, J. A. 2008. Vis/NIR soluble solids prediction in intact oranges (*Citrus sinensis* L.) cv. Valencia Late by reflectance. *Postharvest Biology and Technology* 47:75-80.
3. Cho, H. S., S. H. Noh, I. G. Hwang and H. Y. Lee. 2000. Measurement of apple firmness by VIS/NIR transmittance. *Proceedings of the 2000 Winter Conference, Korean Society for Agricultural Machinery*:164-469. (In Korean)
4. Choi, C. H., K. J. Lee and B. S. Park. 1997. Prediction of soluble solid and firmness in apple by visible/near-infrared spectroscopy. *Journal of Korean Society for Agricultural Machinery* 22(2):256-265. (In Korean)
5. Gomez, A. H., Y. He and A. G. Pereira. 2006. Non-destructive measurement of acidity, soluble solids and firmness of satsuma mandarin using Vis/NIR-spectroscopy techniques. *Journal of Food Engineering* 77:313-319.
6. Gonzalez, R.C., R.E. Woods and S. L. Eddins. 2004. *Digital image processing using Matlab*. Pearson Education Inc., New Jersey, USA.
7. Lee, K. J., K. H. Choi, B. S. Park and Y. K. Cho. 1998. Firmness measurement of apples by NIR spectroscopy. *Proceedings of the 1998 Winter Conference, Korean Society for Agricultural Machinery*:357-362. (In Korean)
8. Lu, R. 2004. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology* 31:147-157.
9. Moghimi, A., M. H. Aghkhani, A. Sazgarnia and M. Sarmad. 2010. Vis/NIR spectroscopy and chemometrics for the prediction of soluble solids content and acidity (pH) of kiwifruit. *Biosystems Engineering* 106:295-302.
10. Noh, H. K., Y. Peng and R. Lu. 2007. Integration of hyperspectral reflectance and fluorescence imaging for assessing apple maturity. *Transactions of the ASABE* 50(3):963-971.
11. Noh, S. H., W. G. Kim and J. W. Lee. 1997. Nondestructive measurement of sugar, acid contents in fruits using spectral reflectance. *Journal of Korean Society for Agricultural Machinery* 22(2):247-255. (In Korean)
12. Penchaiya, P., E. Bobelyn, B. E. Verlinden, B. M. Nicolai and W. Saeyns. 2009. Non-destructive measurement of firmness and soluble solids content in bell pepper using NIR spectroscopy. *Journal of Food Engineering* 94:267-273.
13. Qin, J., and R. Lu. 2006. Measurement of the optical properties of apples using hyperspectral diffuse reflectance imaging. *ASABE paper No. 063037*.
14. Qing, Z., B. Ji, and M. Zude. 2007. Predicting soluble solid content and firmness in apple fruit by means of laser light backscattering image analysis. *Journal of Food Engineering*

- 82:58-67.
15. Son, J. R., K. J. Lee, S. W. Kang and Y. W. Seo. 2007. Quality evaluation of sugar contents for grapes using NIR spectroscopy. Proceedings of the 2007 Summer Conference, Korean Society for Agricultural Machinery 12(2):151-154. (In Korean)
16. Suh, S. R., K. H. Lee, S. H. Yu, S. N. Yoo and Y. S. Choi. 2011. Comparison of performance of measuring method of Vis/NIR spectroscopic spectrum to predict soluble solids content of 'Shingo' pear. Journal of Biosystems Engineering 36(2): 130-139. (In Korean)
17. Valente, M., R. Leardi, G. Self, G. Luciano and J. P. Pain. 2009. Multivariate calibration of mango firmness using Vis/NIR spectroscopy and acoustic impulse method. Journal of Food Engineering 94:7-13.