

초분광 반사광 영상을 이용한 ‘후지’ 사과 의 멍 검출에 관한 연구

조병관^{1*} · 백인석¹ · 이남근² · 모창연³

¹충남대학교 바이오시스템기계공학과, ²동양물산기업(주) 중앙기술연구소, ³농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부

Study on Bruise Detection of ‘Fuji’ apple using Hyperspectral Reflectance Imagery

Byoung-Kwan Cho^{1*}, In-Suck Baek¹, Nam-Geun Lee², Changyeun Mo³

¹Dept. of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

²Tong Yang Co., LTD., Kongju, 314-862, Korea

³Dept. of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Suwon, 441-100, Korea

(Received: September 26th, 2011; Revised: October 13th, 2011; Accepted: October 21th, 2011)

Abstract

Defects exist underneath the fruit skin are not easily discernable by using conventional color imaging technique in the visible wavelength ranges. Development of sensitive detection methods for the defects is necessary to ensure accurate quality sorting of fruits. Hyperspectral imaging techniques, which combine the features of image and spectroscopy to acquire spatial and spectral information simultaneously, have demonstrated good potentials for identifying and detecting anomalies on biological substances. In this study, a high spatial resolution hyperspectral reflectance technique was presented as a tool for detecting bruises on apple. The two-band ratio (494 nm / 952 nm) and simple threshold methods were applied to investigate the feasibility of discriminating the bruises from sound tissue of apple. The pixel wise accuracy of the discrimination was 74%. The resultant images processed with selected wavebands and morphologic algorithm distinctively showed the early stages of bruises on apple which were not discernable by naked eyes as well as a conventional color camera. Results demonstrated good potential of the hyperspectral reflectance imaging for detection of bruises on apple.

Keywords : Apple, Bruise, Hyperspectral reflectance, Image processing

1. 서론

자유무역협정에 의한 농산물 수입개방 등으로 더욱 치열해지는 국내 및 수출시장 환경에서 고품질 농산물 생산을 통한 국내 농산물의 경쟁력 제고가 절실히 요구되고 있다. 국내 소비뿐만 아니라 수출상품으로 생산 공급되고 있는 사과는 타 과수에 비해 소득이 안정적인 장점 때문에 재배면적이 꾸준히

증가하고 있다. 고품질 사과 공급을 위한 국내 사과 선별기술로는 색도, 당도 및 내부 갈변이나 밀병 까지 측정이 가능한 기술력을 보유하고 있다. 멍은 저장중 상품성을 떨어뜨리고, 특히 그 크기가 일정 이상일 경우 상품으로서의 가치를 소멸시킬 수 있는 중요한 품질인자 중 하나이다. 멍은 발생 후 시간이 경과되어 과실의 변색이 나타나기 전까지 육안 선별이 어려워 최종소비자나, 수출유통 과정에서 클레임의 원인을 제공할 수 있다. 그러나 수확 및 유통 중 발생하는 과피 아래 부분의 경미한 멍을 검출할 수 있는 정밀한 계측 기술은 아직 개발되지 않고 있다. 사과의 멍 검출 기술개발에 관한 연

*Corresponding author: Byoung-Kwan Cho
Tel: +82-42-821-6715; Fax: +82-42-823-6246
E-mail: chobk@cnu.ac.kr

구는 멍에 관한 물리적, 생물학적 또는 화학적 성질 변화에 관한 기초연구가 대부분이며 계측기술 및 시스템 개발에 관한 연구는 미흡하다. 사과와 멍 검출에 관한 주요 기초 연구로는 열 영상(Varith et al., 2002), 초분광 영상(Lu, 2000; Elmasry et al., 2008), 스펙트로스코피(Kleynen et al., 2003) 등이 이용되어 왔다. 선별기술 개발에 있어 농산물의 품종에 따라 분석 방법이 상이한데 한국의 대표적인 사과 품종인 ‘후지’에 대한 멍 검출 연구는 아직 체계적인 연구가 진행되지 않고 있다.

본 연구에서는 초분광 영상을 이용하여 ‘후지’ 사과의 멍을 조기 검출 할 수 있는 최적 반사광 파장 조합을 구명하고 이를 이용하여 멍 검출 영상처리 알고리즘을 개발하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료

사과는 경북 문경의 과수농가에서 2009년 11월에 수확한 ‘후지’ 품종의 사과 18개를 사용하였다. 농가에서 사과를 직접 수확하여 당일 실험실로 이송한 후 1일 동안 상온에 보관한 후 실험에 사용하였다. 사과는 5, 10, 15 cm의 높이에서 알루미늄 판을 떨어뜨리는 방법으로 멍을 발생시켰다. 저장 방법은 9개씩 상온(20°C ± 2°C, 30% ± 10% RH)과 저온(0°C ± 1°C, 90% ± 5% RH)에서 저장하였다. 사과는 멍을 발생시킨 후 1시간 후부터 1일 간격으로 9일 동안 초분광 영상과 육안 판별 기록용 일반 컬러 영상을 획득하여 분석하였다. 실험에 사용된 사과의 특성 및 저장방법은 표 1에 나타내었다.

Table 1 Characteristics of apples used in the experiments

Cultivar	Fuji	
Harvest date	2009. 11	
Mass (g)	283.56 ± 35.87	
Major axis (mm)	85.30 ± 3.49	
Minor axis (mm)	82.79 ± 3.42	
Temperature (°C)	0 ± 1	20 ± 2
Relative humidity (%)	90 ± 5	30 ± 10

나. 초분광 영상 획득 시스템

사과의 멍을 검출하기 위한 초분광 영상획득 시스템은 electron multiplying charge-coupled device(EMCCD) 카메라(Luca RDL- 604M, Andor Technology, USA), Imaging spectrograph(VNIR, Headwill photonics, Fitchburg, MA, USA)와 스텝모터로 구동되는 시료 이송부, 그리고 광량 조절이 가능한 할로겐 광원(100 W, 12 V)으로 구성하였다. 할로겐 광원은 광섬유 가이드를 이용하여 3개의 line light를 세트 구성하였으며 시료의 양쪽을 고르게 비추기 위해 시료 상부에 수직 방향으로 약 15°의 각도로 설치하였다. 또한 시료의 곡면으로 인한 반사광의 불균일성을 최소화하기 위해 3개의 line light 간의 각을 30°정도로 구부려 호형상으로 구성하였다.

초분광 영상 획득 프로그램은 Visual Basic 6.0으로 구성하였으며, 렌즈의 노출시간을 설정하면 카메라에서 자동으로 스텝모터의 이동속도 및 촬영시간을 계산하여 스텝모터를 구동시키게 된다. 렌즈에 투사된 영상은 25 μm 두께의 slit을 통과하면서 line-scan되고 spectrograph에 의하여 각 파장별로 분광 영상이 생성된다. 분광된 정보는 EMCCD 카메라에 의해 증폭되어 이미지로 저장되게 된다. 이 연구에서는 초분광 영상 촬영 시 노출시간(exposure time)을 5 μsec로 하고

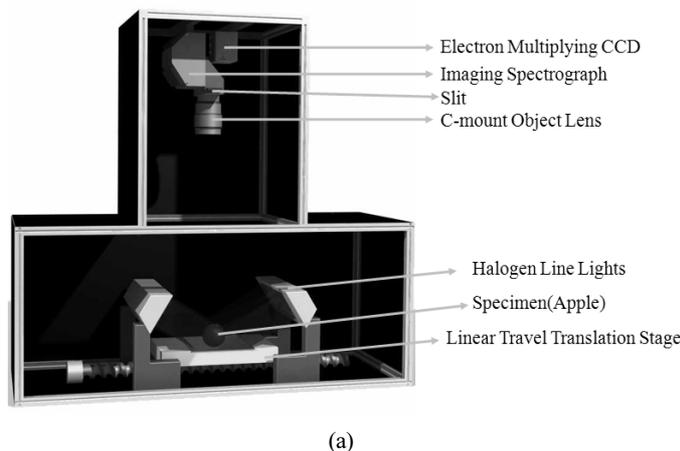


Fig. 1 Schematic (a) and photo (b) of the hyperspectral imaging system.

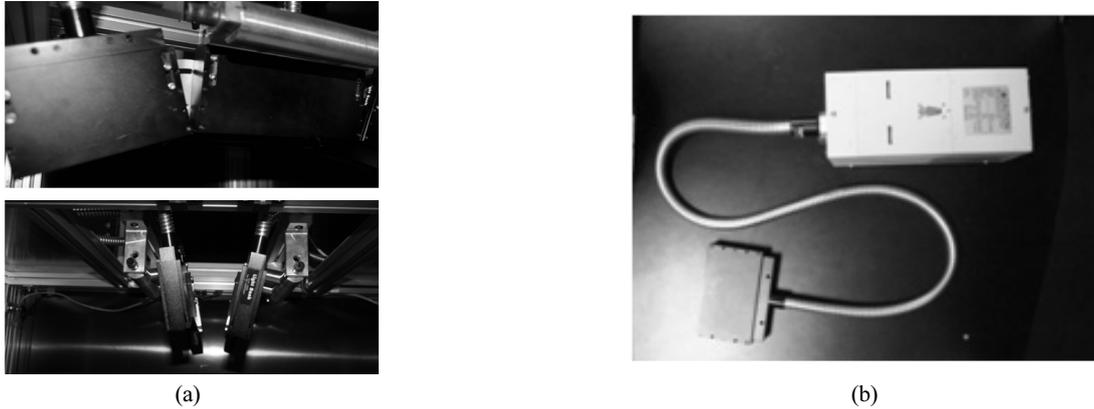


Fig. 2 Photos of (a) line light sources and (b) halogen lamp controller with a fiber optic guide.

Table 2 Specification of the vision system

Part	Item	Specification
Vision System	EMCCD camera	Active pixels : 1004 × 1002 Pixel Size : 8 × 8 μm Image area : 8 × 8 mm Max readout rate : 13.5 MHz Frame rate : 12.4 fps Pixel readout rate : 13.5 MHz Digitization : true 14 bit Peak quantum efficiency : 65% Cooling : -20°C @ Air-cooled
	Spectrograph	Spectral range = 400-1000 nm Spectral dispersion = 100 nm/mm Aperture = F/2*1 Includes the choice of one slit assembly (12, 25, 40 or 60 micron × 18 mm)
	Lens	Lenses are designed for 400 - 1000 nm precision imaging and are useful while prototyping.
	Lighting	100 W Halogen Lamp × 3 (2 sets)
	Slit	25 μm slit
	Vision controller	Quad core (2.4 GHz) CPU, 2 Gbyte main memory

모터의 이동을 1 mm 간격으로 200 스텝으로 하여 시료를 포함하는 총 20 cm 길이의 면적에 대한 초분광 영상을 획득하였다.

다. 이미지 분석 방법

한 과장의 분광 영상만으로는 렌즈와 과실 표면의 불균일한 거리 차이로 인해 발생하는 불균일 반사특성을 최소화하기가 쉽지 않다. 이를 해결하기 위하여 두 개 과장의 영상을 이용한 비율영상을 이용하면 불균일한 거리차이에 의해 발생하는 광세기의 영향을 줄일 수 있다. 비율영상 구성에 이용될 최적 과장을 선정하기 위하여 멍 부위와 정상부위에서 스펙트럼 데이터를 각각 추출한 후 가능한 모든 두 과장 조합들의 비율 값이 멍과 정상부의 그룹에 어떻게 분포되는가를 ANOVA 분석법에 의한 F값을 비교함으로써 최적 과장 조합을 구명하였다. F값이 클수록 두 그룹의 분리정도가 크다는 것을 나타내므로 전체 조합에서 두 그룹의 F값이 최대가 되

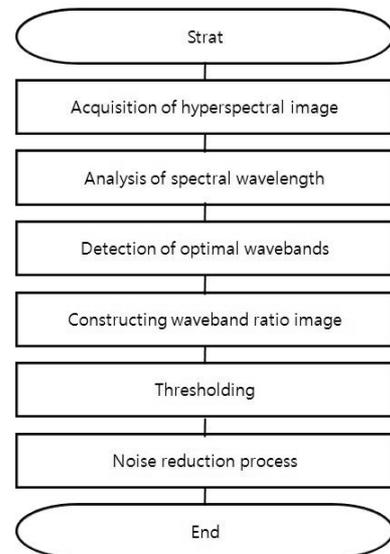


Fig. 3 Flow chart of the entire image processing procedure for apple bruise detection.

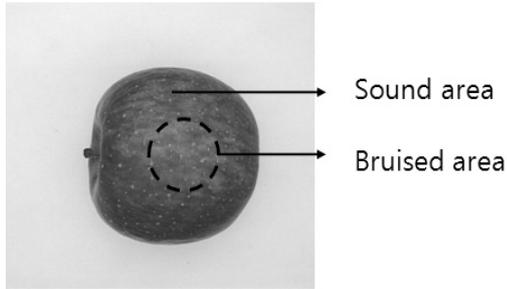
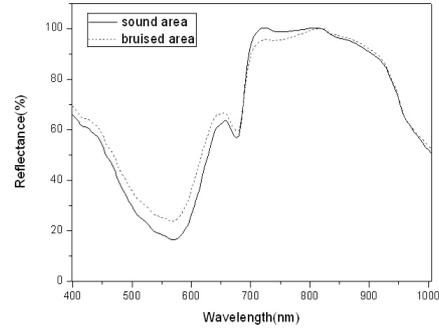


Fig. 4 Representative spectra of sound and bruised areas of apples.



는 과장비를 최적과장 비로 선정하였다. 선정된 최적과장 비와 문턱값을 이용하여 이진화 영상을 만들고 잡음제거를 위해 침식 영상처리법을 적용하여 최종 적인 멍 검출 알고리즘을 구성하였다. 영상처리 전 과정은 MATLAB software(Version 7, The mathworks, USA)를 사용하였다. 멍 검출을 위한 전체 분석 과정은 그림 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

가. 스펙트럼 분석

사과의 저장기간에 따른 멍 부위와 정상 부위의 평균 스펙트럼은 그림 4에 나타난 바와 같다. 사과에 포함되는 carotenoids와 chlorophyll 등의 색소의 영향으로 500~680 nm 범위에서 흡수율이 높았다. 껍질에 있는 chlorophyll의 영향으로 680 nm 부근에서 스펙트럼의 흡수가 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 900 nm 부근에서 스펙트럼의 완만한 흡수가 나타나는 것을 볼 수가 있는데 이는 사과산(crystalline malic acid)의 영향 때문인 것으로 판단된다. 정상 부위와 멍 부위의 스펙트럼의 비교결과 480~600 nm와 950~1000 nm에서 약간의 차이를 볼 수 있지만, 차이가 미세하기 때문에 단과장을 이용해서는 정확한 멍 검출이 어렵다는 것을 알 수 있다. 480~600 nm와 950~1000 nm의 영역에서 정상부위와 멍 부위의 스펙트럼 패턴이 변하는 것을 볼 수 있는데 이러한 변화를 비율로 나타내면 더 뚜렷한 구분이 가능하게 된다. 또한 두 과장영상을 비율로 나타내면 불균일 반사현상도 현저히 감소가 되는 장점이 있다.

나. 최적과장 선정

멍 부위와 정상 부위를 구분할 수 있는 최적 과장조합을 구하기 위해 두 과장의 비를 멍 부위와 정상 부위 스펙트럼에 적용하여 비율 값을 구하고 이 두 그룹에 대한 분산분석(ANOVA)을 실시하였다. 그림 5는 분산분석을 실시한 후의 두 과장 조합에 대한 F값을 나타낸 것이다. 스펙트럼 정보 중

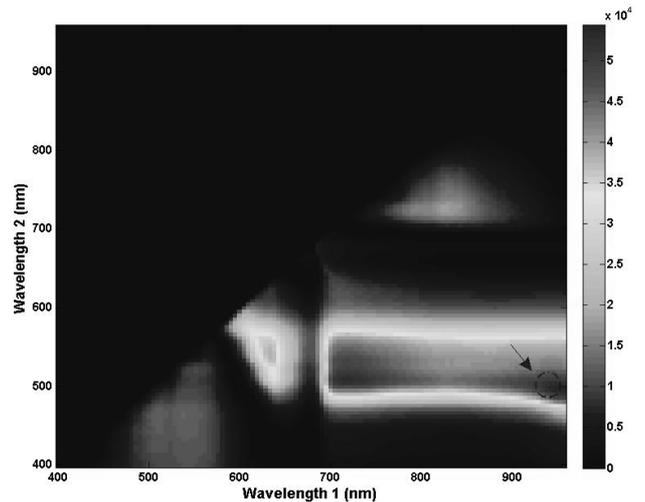


Fig. 5 F values of wavelength pairs used for discriminating bruised area from sound one of apples.

각각의 시료 당 일자별로 600개씩 무작위로 총 97,200개(시료 18개 × 9일 × 600개 = 97200개)의 멍 부위와 정상부위의 스펙트럼을 각각 선정하여 전체 자료 중 50%를 이용하여 두 그룹이 가장 잘 분리되는 과장비를 분산분석을 통해 분석하였다. 분산분석 결과 494 nm와 952 nm의 비율값에서 F값이 가장 큰 것으로 나타났다. 최적 과장비를 이용하여 과장 비를 계산한 후 멍과 정상 부위를 가장 높은 정확도로 구분할 수 있는 문턱값을 정하였다. 분석에 사용되지 않았던 스펙트럼에 구해진 최적 과장비 및 문턱값을 적용하여 멍과 정상부위 구분을 위한 정확도를 검증하였다.

두 과장의 비율 값에서 멍 검출을 위한 최적의 임계값을 찾기 위해 비율 값의 분포를 히스토그램으로 표현하면 그림 6과 같다. 수평축은 비율 값으로 0.5~3.5의 값을 가지게 되고 수직축은 해당 값의 수에 해당하는 빈도수를 나타낸다. 멍과 정상부위의 각각의 히스토그램 데이터를 이용하여 가우시안 회귀 모델을 구하였다. 멍 부위와 정상부위의 회귀 모델은 아래 식 (1)과 식 (2)에 나타내었다. 식 (1)과 식 (2)의 결정계수(R^2)는 0.989와 0.983으로 나타났다. 두 모델의 교점을 구

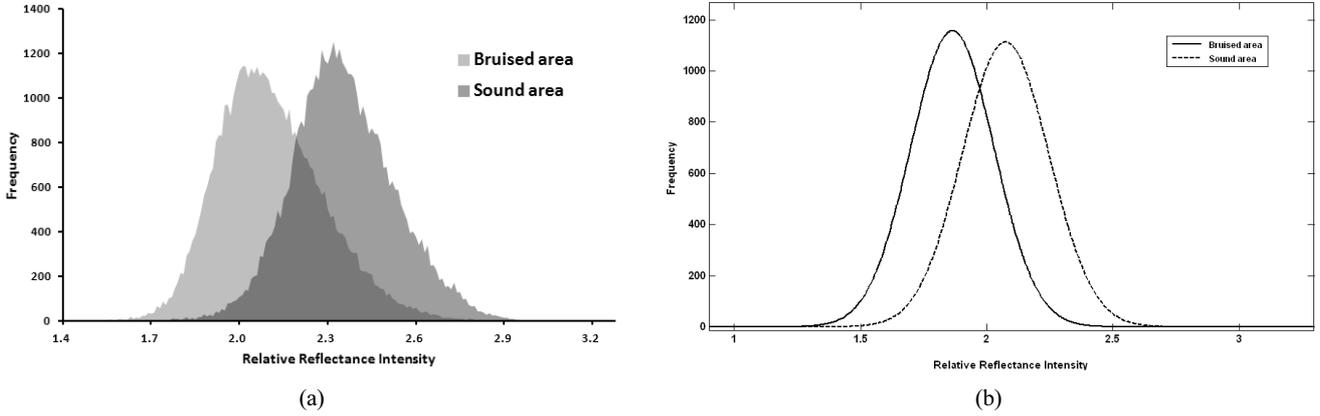


Fig. 6 Histogram (a) and frequency distributions (b) of the ratio values at optimized wavebands pair.

Table 3 Calibration and validation results of classification using optimum threshold value

Calibration	Classification results		
	Correct*	Incorrect*	Accuracy
Bruise	34628	13972	71.3%
Sound	37008	11592	76.2%
Total	71636	25564	73.7%
Validation	Classification results		
	Correct*	Incorrect*	Accuracy
Bruise	34772	13828	71.6%
Sound	36993	11607	76.1%
Total	71765	25435	73.8%

*Number of pixels

한 결과 1.972이며 이 값을 두 분포를 구분하는 최적의 문턱값으로 사용하였다. 멍 부위의 파장 비율 화소의 값이 문턱값보다 작거나 정상 부위의 화소 값이 큰 경우는 정상 분류로 나타났고, 반대의 경우는 오 분류로 나타내었다. 멍 부위와 정상 부위의 최적 파장비율 (952 nm / 494 nm) 화소 값에 문턱값을 적용 하였을 때의 예측정확도를 표 3에 나타내었다. 두 부위의 화소단위 구분의 정확도는 약 74%로 나타났다. 일반적으로 멍 부위는 충격에 의해 발생하므로 그 크기가 지름 1 cm 이상이다. 따라서 멍 부위 자체는 높은 정확도로 구분이 가능하다. 그러나 멍 부위의 크기를 정량적으로 예측할 경우 그 정확도는 표 3에서 화소단위로 정확도를 계산한 결과와 거의 일치한다고 볼 수 있다.

$$Y = 1157 \times \exp \left[- \left[\frac{(X - 0.03817)}{0.4354} \right]^2 \right] \quad (1)$$

$$Y = 1113 \times \exp \left[- \left[\frac{(X - 2.074)}{0.2431} \right]^2 \right] \quad (2)$$

where, Y = Frequency
X = Relative Reflectance Intensity

다. 영상처리

멍 검출의 영상처리 과정은 그림 7과 같다. 719 nm의 파장 영상으로 배경을 제거한 마스킹 이미지를 작성 하였다. 마스킹 이미지에서 사과 영역은 '1' 값을 가지고 배경부분은 '0' 값을 가지게 되는데, 952와 494 nm 영상에 곱하기 연산을

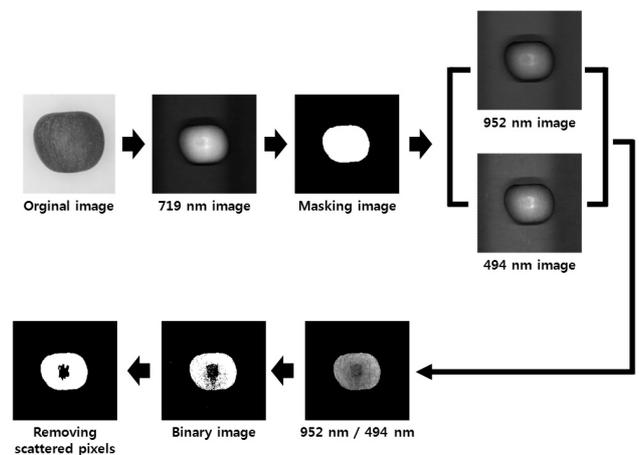


Fig. 7 Image processing for detecting bruises of apple.

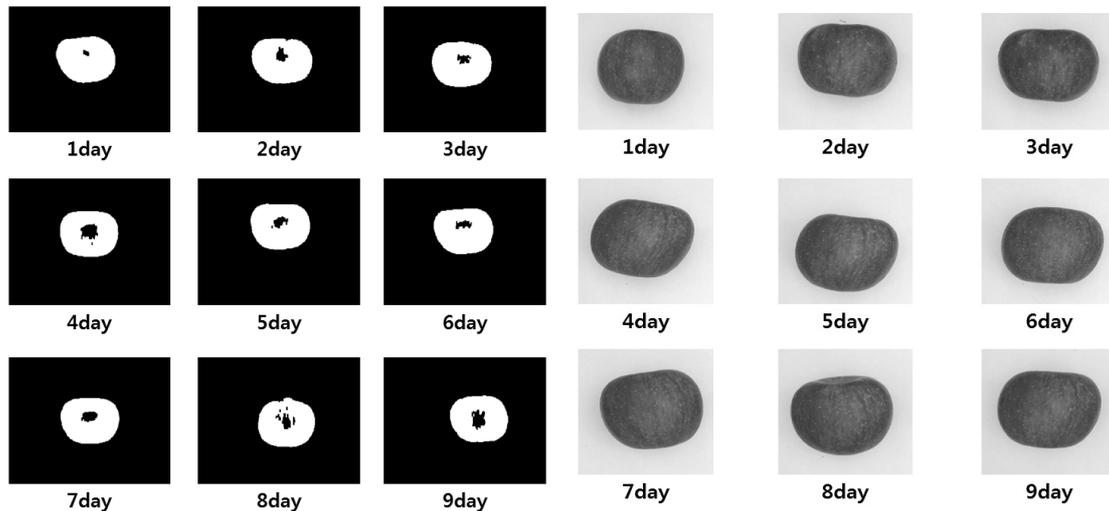


Fig. 8 Representative processed images of an apple in terms of storage period.

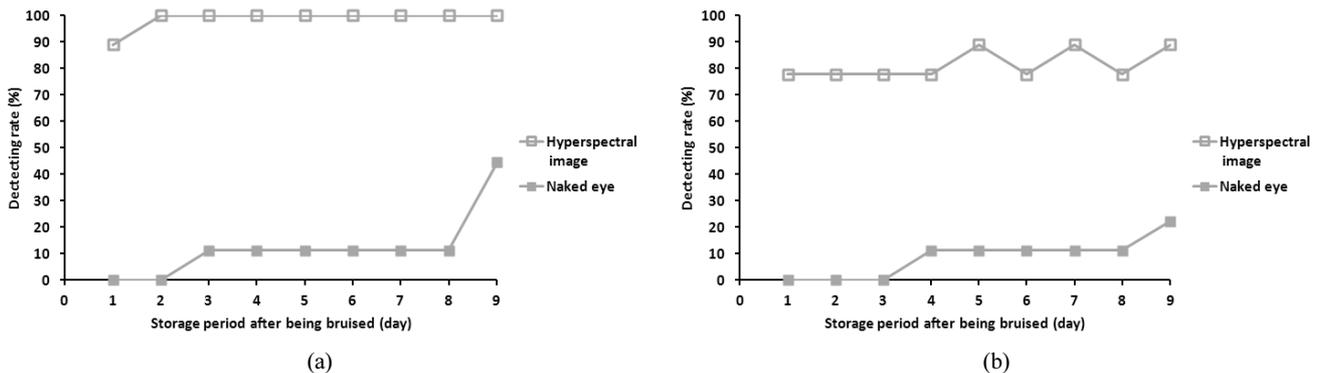


Fig. 9 Detecting rate of bruised area on apples stored at low (a) and room (b) temperature with naked eyes and hyperspectral imaging technique.

이용하여 사과 이외의 배경부분은 제거가 되도록 하였다. ANOVA분석을 통하여 선정된 952 nm와 494 nm의 비율 영상을 이용해 임계값을 적용하여 멍 부위만을 검출한 후 열기 닫기 영상처리 연산을 이용하여 노이즈를 제거하여 최종 결과 영상을 얻을 수 있었다.

저장 기간 별 멍 검출 영상을 그림 8에 나타내었다. 육안 및 일반 CCD 컬러 카메라로는 검출하기 힘든 멍 부위를 초분광 영상을 이용하면 멍 발생 후 1일 후부터 멍이 검출 가능한 것을 확인할 수 있었다. 일부 시료는 일정 기간 후에 멍이 검출되는 경우가 발생하였는데 이는 대상 사과의 조직이 상대적으로 단단하여 멍이 잘 진행되지 않았기 때문인 것으로 사료 된다.

그림 9에서는 멍의 유무를 육안으로 확인한 결과와 초분광 영상을 이용하여 멍을 검출한 결과를 비교하여 나타내었다. 멍의 관찰 여부는 멍이 발생된 과피의 색에 따라서도 달랐는데 사과의 경우 멍의 위치가 과피의 녹색 부위 아래에서 발생했을 때 붉은색 부위 아래에 위치 했을 때 보다 육안으로 쉽게 관찰 할 수 있었다. 따라서, 육안에 의한 멍의 검출은

매우 제한적으로 가능한 반면 초분광 영상을 이용한 결과는 멍을 초기에 검출할 수 있음을 보여주었으며, 저온 및 상온 저장에 관계없이 멍이 발생한 후 1일 이후부터 멍을 검출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 가시광 및 근적외선초분광 반사광 영상 획득 시스템을 이용하여 국내의 대표적 사과 품종인 ‘후지’에 대한 멍 검출 기술 개발에 관한 연구를 수행하였다. 초분광 반사광 영상을 획득하고 멍 검출을 위한 최적 파장조합 및 영상처리 기법을 활용하여 사과 멍 검출을 위한 최적 영상 알고리즘을 제시하였다. 본 논문에서 제안한 기술이 실제 현장에서 활용되기 위해서는 다양한 사과 부위에서 발생하는 멍 검출 기술과 특정 파장대의 영상 조합을 구현할 수 있는 실시간 다분광 영상시스템 개발 등에 대한 추가 연구가 필요 하리라 사료된다. 본 논문의 전체적인 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 가시광 및 적외선 영역의 두 파장인 952 nm와 494 nm의 파장 비가 사과 멍 검출을 위해 가장 높은 분류 능력을 제공할 수 있음을 확인할 수 있었다.
- (2) 멍과 정상 부위를 구별하는 최적의 임계값을 구하기 위하여 히스토그램의 데이터를 회귀화해 교차점을 구한 결과 952 nm / 494 nm의 비율값이 1.972인 경우 최소의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이때 멍과 정상 부위를 화소단위로 구분할 수 있는 정확도는 약 74%였다.
- (3) 초분광 영상 결과는 육안으로 관찰이 어려운 멍이 효과적으로 검출 될 수 있음을 보여주었다. 분석된 특정 파장의 비율 영상을 이용하면 미세한 충격 및 압착에 의해 발생하는 멍 검출이 가능하므로 고품질 사과 생산을 위한 선별기술로 현장에서 활용될 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2010년 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

참 고 문 헌

1. Elmasry, G., N. Wang, C. Vigneault, J. Qiao and A. ElSayed. 2008. Early detection of apple bruises on different background colors using hyperspectral imaging. *Food Science and Technology* 41(2):337-345.
2. Kleyne, O., V. Leemans and M. F. Destain. 2003. Selection of the most efficient wavelength bands for 'Jonagold' apple sorting. *Postharvest Biology and Technology* 30(3):221-232.
3. Lu, R. 2003. Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging. *Transactions of the ASAE* 46(2):523-530.
4. Varith, J., G. M. Hyde, A. L. Baritelle, J. K. Fellman and T. Sattabongkot. 2003. Non-contact bruise detection in apples by thermal imaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 4(2):211-218.
5. Xing, J and J. Baerdemaeker. 2005. Bruise detection on 'Jonagold' apples using hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology* 37(2):152-162.
6. Baranwski, P., W. Mazurek, B. Witkowska-Walczak and C. Slawinski. 2009. Detection of early apple bruises using pulsed-phase thermography. *Postharvest Biology and Technology* 53(3):91-100.
7. Kim, M. S., A. M. Lefcourt and Y. R. Chen. 2003. Multispectral laser-induced fluorescence imaging system for large biological samples. *Applied optics* 42(19):3927-3944.
8. Kim, M. S., A. M. Lefcourt and Y. R. Chen. 2003. Optimal Fluorescence Excitation and Emission Bands for Detection of Fecal Contamination. *Journal of Food Protection*. 66(7): 1198-1207.
9. Lee, K. J., S. Kang, S. R. Delwiche, M. S. Kim and S. H. Noh. 2008. Correlation analysis of hyperspectral imagery for multispectral wavelength selection for detection of defects on apples. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety* 2:90-96.
10. Nicolai, B. M., E. Lotze, A. Peirs, N. Scheerlinck and K. I. Theron. 2006. Non-destructive measurement of bitter pit in apple fruit using NIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology* 40(1):1-6.
11. Xing, J., C. Bravo, P. T. Jancsok, H. Ramon and J. Baerdemaeker. 2005. Detecting Bruise on 'Golden Delicious' Apples using Hyperspectral Imaging with Multiple Wavebands. *Biosystems Engineering* 90(1):27-36.