

하이퍼 스펙트럴 반사광 및 형광 산란을 이용한 사과 품질 측정

노현권 Renfu Lu

Apple Quality Measurement Using Hyperspectral Reflectance and Fluorescence Scattering

H. K. Noh R. Lu

Abstract

Hyperspectral reflectance and fluorescence scattering have been researched recently for measuring fruit post-harvest quality and condition. And they are promising for nondestructive detection of fruit quality. The objective of this research was to develop a model, which measure the quality of apple by using hyperspectral reflectance and fluorescence. A violet laser (408 nm) and a quartz tungsten halogen light were used as light sources for generating laser induced fluorescence and reflectance scattering in apples, respectively. The laser induced fluorescence and reflectance of 'Golden Delicious' apples were measured by using a hyperspectral imaging system. Fruit firmness, soluble solids and acid content were measured using standard destructive methods. Principal component analyses were performed to extract critical information from both hyperspectral reflectance and fluorescence data and this information was then related to fruit quality indexes. The fluorescence models had poorer predictions of the three quality indexes than the reflectance models. However, the prediction models of integrating fluorescence and reflectance performed consistently better than the individual models of either reflectance or fluorescence. The correlation coefficient for fruit firmness, soluble solid content, and titrable acidity from the integrated model was 0.86, 0.75, and 0.66 respectively. Also the standard errors were 6.97 N, 1.05%, and 0.07% respectively.

Keywords : Hyperspectral imaging, reflectance, Fluorescence, Apples, Maturity

1. 서론

사과 과수 산업에서 품질이 규격화 되지 못한 사과는 소비자 불만족을 야기하고 또한 산물 시장에 영향을 미치기 때문에 수확 후 사과의 품질은 매우 중요하다. 이 문제를 해결하기 위해서 사과는 취급, 저장 및 소비에 있어서 사과 내부 품질에 따라서 등급이 결정되고 저장 되어져야 한다. 최근에, 사과의 품질 판정에 있어서 여러 가지 면이 고려되어지고 있다. 그 예로 사과 껍질 및 내부 색상, 경도, 당도, 전분함유량,

산도 및 에틸렌 산출도 등이 쓰이고 있다. 이런 방법들은 파괴적이고, 비효율적이며 작업자의 주관적인 의견에 의존하는 경향이 있다. 파괴적인 방법은 전수 검사에 쓰일 수 없기에 이런 방법들은 몇 개의 표본을 추출하여 측정된 후 평균값을 이용하는 표본검사에 유용할 뿐이다. 따라서 비파괴적이고 믿을 수 있는 과일 품질 측정 기술이 과일 품질 최적화 및 과일의 수확시기를 결정하는데 유용할 것이다. 또한 최적의 일관된 과일의 품질을 취급 및 저장에 적용하기 위해서도 품질에 따른 과일의 선별이 이루어져야 한다.

This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University. The article was submitted for publication on 2008-10-17, reviewed on 2008-10-31, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2008-11-13. The authors are Hyun Kwon Noh, Assistant Professor, KSAM member, Dept. of Biosystems Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea, and Renfu Lu, Agricultural Engineer, USDA ARS, Sugarbeet and Bean Research Unit in EastLansing, Michigan, USA. Corresponding author: H. K. Noh, Assistant Professor, KSAM member, Dept. of Biosystems Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea; Fax: +82-43-271-4413; E-mail: <nhkig@cbnu.ac.kr>.

최근에, 근적외선 분광기(near-infrared spectroscopy: NIRS)를 이용해서 당도 같은 사과의 내부 품질을 측정하는데 상당한 연구가 이루어졌다(Lu et al., 2000; Lu, 2003). 하이퍼 스펙트랄 또는 멀티 스펙트랄 영상에 기초한 과일의 경도 및 당도 측정 기술도 연구 되어져 왔다(Polder et al., 2002). 또한 과일의 경도 및 산도 측정에 있어서 NIRS이 이용되어 왔으나(Lammertyn et al., 1998; Kim et al., 1999; Lu and Peng, 2004; Seo and Noh, 2007) 그 산도 측정 결과는 성공적이지 못했다. Seo et al.(2007)은 근적외선을 이용해 사과의 내부 갈변 및 밀병을 선별하는 연구를 수행했다.

여러 연구자(Cho and Han, 1999; McGlone et al., 1997; Tu et al., 1995)들은 단일 주파수대역에서의 빛의 산란을 이용하여 과일의 경도와 품질을 측정하였다. Tu et al.(1995)은 컬러 CCD 카메라를 이용하여 사과로부터 빛의 산란을 기록한 후 과일의 경도와 품질을 적색 대역 CCD의 포화 픽셀수를 이용하여 계산하였다. McGlone et al.(1997)은 단일 채널 CCD 탐지기를 이용하여 레이저에서 야기된 후방산란 빛을 측정 후 수학적 모델을 적용해서 산란 프로파일을 변수화한 후 키위의 경도를 측정하는데 이용했다. 이 연구들은 빛의 산란이 과일의 경도와 품질을 측정하는데 유용하다는 것을 보여준다.

형광은 짧은 파장의 빛(자외선 또는 레이저)이 과일 조직의 분자에 의해 흡수된 직후에 긴 파장의 빛(가시광선)이 발광하는 것으로 이 현상은 생물학적 물질 연구, 생물체의 환경적, 화학적, 생물학적 스트레스 검출 및 식품 품질의 모니터링 등에 쓰여 왔다(Takeuchi et al., 2002; Gavel and Marsalek, 2004). 특히 클로로필 형광은 수확후 과일 품질 측정(결함 및 품질)의 연구에 이용 되어 왔으나(DeEll et al., 1995; Nedbal et al., 2000; Bodria et al., 2002), 발표된 연구결과에 따르면 클로로필 형광은 과일 품질의 측정에는 충분치 못한 것으로 나타났다. Bron et al.(2004)은 그의 연구에서 사과야의 품질을 결정하는데 있어서 클로로필 형광만으로는 신뢰할 수 없으며 다른 품질 평가 기술과 결합해야만 한다고 결론을 지은 바 있다.

이 연구의 목적은 사과의 품질을 비파괴적으로 측정하기 위해 사과로부터 하이퍼 스펙트랄 영상을 획득한 후 이로부터 수학적 모델들을 이용하여 유용한 정보를 도출하고, 그 정보들을 이용해서 사과의 품질과 관련된 경도, 당도, 산도 등의 품질 지수를 측정하는 모델을 개발하는 것이다.

2. 재료 및 방법

하이퍼 스펙트랄 영상 시스템을 이용해서 사과의 레이저 유도 형광 및 반사광을 측정하였다. 실험은 우선 사과로부터 하이퍼 스펙트랄 영상을 획득한 후 여러 품질 지수(경도, 당도, 산도)를 파괴적인 방법으로 병행해서 측정하였다.

가. 공시재료

400개의 사과(GD: Golden delicious)를 미국 미시간 주립 대학의 클락스빌 과수원 및 미시간의 다른 과수원으로부터 수확한 후 저온 저장고(온도 0.5℃, 습도 90%)에 보관했으며 다양한 범위의 사과 품질지수를 얻기 위해서 한번에 100개씩 총 4회(기간은 1주~2주)에 걸쳐서 실험을 실시했다. 저온 저장고에서 꺼내온 사과를 실험 전에 상온의 실험실에서 18시간 동안 보관하여 사과의 온도를 상온과 평형을 유지하게 한 후 영상획득 및 다른 물성 실험에 이용하였다. 실험에 사용된 사과의 경도와 당도(가용성 고형물 함량), 및 총 산도(Titratable acidity: T-acid)는 표 1과 같다.

나. 실험 장치의 구성

형광을 유도하기위한 광원으로써 다이오드 레이저(SRT-F 408-20, Micro Laser Systems, Garden Grove, CA, USA)를 이용하였고 반사광 측정을 위한 광원으로써 할로젠등(quartz tungsten halogen: Spectra-Physics, Mountain View, CA, USA)을 사용하였다. 그림 1에 영상획득 시스템을 나타내었다. 사과의 영상 획득은 하마마쯔 초분광 CCD(Charged Couple Device) 카메라(Hamamatsu C4880-21: Hamamatsu Photonics, Hamamatsu city, Japan)를 이용하였다. 영상 스펙트로그래프(image spectrograph: ImSpector V9, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland)를 이용하여 사과의 선 스캔에 의한 스펙트랄 산란 정보를 프리즘 등급 시스템을 거쳐 각기 다른 파장에 따른 스펙트랄 정보로 얻을 수 있었다. 산란된 빛 신호는 CCD 검출기에 투영되어 2차원(하나는 공간정보를 다른 하나는 스펙트랄 정보)의 영상으로 나타내진다. 이 초분광 영상획득 시스템은 유효한 파장이 500 nm에서 1040 nm이고 1.65 nm의 분해능을 갖추고 있다.

Table 1 Firmness, SSC and T-acid of apple samples

	Mean	STD	Min	Max
Firmness [N]	48.3	12.7	26.8	83.7
SSC [%]	13.3	1.5	9.2	17.5
T-acid [%]	0.289	0.094	0.087	0.511

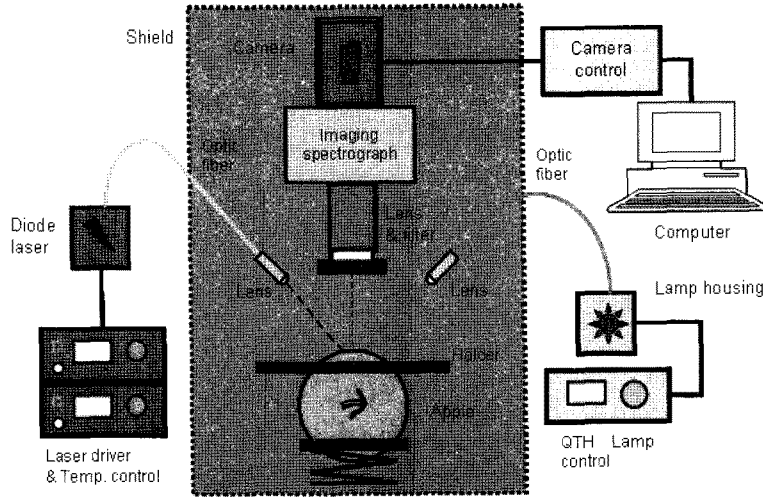


Fig. 1 Laser induced fluorescence and reflectance imaging system.

그림 1에서와 같이 각각의 사과는 적도 부분이 카메라에 수직인 방향으로 홀더에 놓여지게 된다. 홀더에는 카메라 렌즈와 사과와의 거리를 균일하게 유지하기 위해 지름 30 mm의 구멍이 나 있으며 형광과 반사광 영상은 차례로 컴퓨터에 저장 된다.

형광 유도를 위한 다이오드 레이저는 407 nm의 파장을 가지며 사과 접촉 부위에서 3 mW의 세기를 가지며 5 μm 광섬유 및 초점을 맞추기 위한 렌즈로 연결이 되는데 이 연구에서는 지속적인 자극 형광 시스템이 적용 되었다. 사과의 형광 영상은 레이저 셔터 열림과 동시에 저장되고 계속해서 신호가 안정되는 5분까지 매 분마다 저장되었다. 광학필터(430 nm의 롱패스 필터)가 카메라 앞에 설치되어서 사과로부터 나오는 형광 신호 중에 포함된 형광 자극용 입사신호를 분리했다. 이 시스템은 외부로부터의 빛을 차단하기 위해 그림에서와 같이 암실을 설치했다. 형광 영상을 획득하고 난 후에는 레이저 빔을 셔터를 이용하여 차단하고 텅스텐 할로겐등(QTH)을 켜고 사과의 똑같은 부위에 대한 반사광 영상을 획득하였다.

반사광과 형광 각각의 경우 입사 빔의 크기는 직경 0.5 mm로 같았고, 카메라의 라인 스캔 위치를 입사 빔 중앙으로부터 1.5 mm 떨어져 위치시킴으로써 입사 빔에 의한 CCD 감지기의 포화를 막고자 하였다.

다. 사과 품질 측정

사과의 경도는 11 mm 강철 탐침을 갖춘 텍스처 분석기(TA.XT2i, Texture Technologies, Scarsdale, NY, USA)를 이용 영상 획득을 마친 사과에 대하여 영상을 획득한 부분의 껍질을 약 2 mm 두께로 제거한 후 측정하였다. 탐침이 9.0 mm 깊이 까지 2.0 mm/s의 속도로 사과를 침투하는 동안 깊

이에 따른 힘이 저장 되었으며 이 연구에서는 그 힘중 최대값을 사과의 경도로 썼다.

브릭스로 표시되는 당도(Soluble solid content: SSC)는 소형 디지털 굴절계(PR-101 alpha, ATAGO CO, Itabashi-ku, Tokyo, Japan)를 이용해서 측정하였다. 경도 측정 후 경도 측정 부위의 사과즙을 이용하여 당도 측정 실험을 수행 하였다.

산도는 적정될 수 있는 산도(Titrable acidity: T-acid)[%]로 표시되며 적정법(농도를 알고자 하는 일정한 부피의 시료용액과 정량적으로 반응을 하는 정확히 농도를 알고 있는 표준용액의 부피를 측정하는 정량 분석법)을 이용하였다. 사과의 산도를 측정하는데 0.50%의 말산(사과산)이 표준용액인 참고값으로 쓰였다. 적정법에 쓰일 사과즙을 만들기 위해 당도 측정 후 사과를 냉장고에서 얼린 뒤 실온에서 녹여 즙을 만드는 방식(얼었다 녹은 사과를 짜면 쉽게 건더기가 없는 즙을 얻을 수 있으므로)을 이용했다.

라. 영상처리

그림 2는 사과의 품질 예측을 위한 모델 개발의 과정을 보여 주고 있다. 사과의 초분광 영상으로부터 각 파장에서의 최대, 평균 그리고 표준편차 값들을 계산한 후에 이 값들을 주인자분석(principle component analysis, PCA)분석을 이용하여 어느 파장이 각 데이터를 잘 나타내고 있는가를 찾아내었다. 그런 다음에 그 데이터들을 사과의 품질 예측을 위한 모델을 개발하기 위해 신경망에 입력 자료로 이용하였다.

마. 신경망 알고리즘(Neural network algorithm)

신경망 모델은 학습효과에 의한 시스템을 분석하는 방법으로 복잡한 모델개발에도 이용되고 있다. 이 연구에서 사과의 경도,

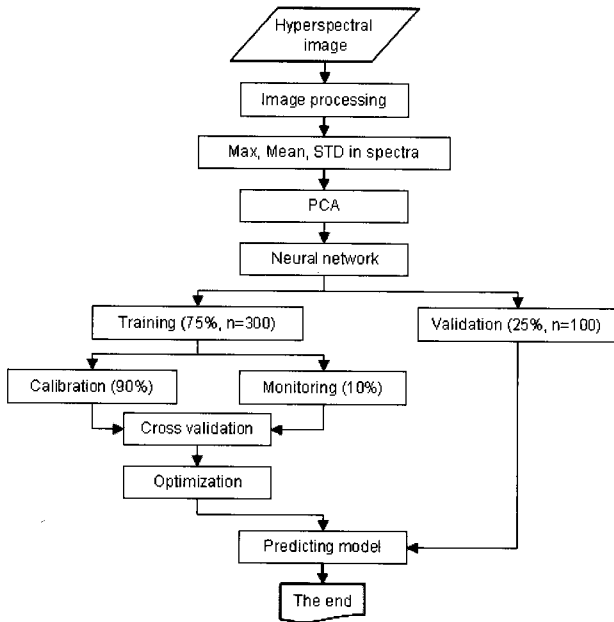


Fig. 2 Flowchart diagram for development of apple maturity prediction model.

당도 및 산도를 예측하기 위해서 역전파(back-propagation, BP) 신경망 모델을 적용했으며 반사광 및 형광을 입력 데이터로, 품질 지표를 출력 데이터로 하여 모델을 학습시켰다.

일단 사과의 경도 예측에 초점을 맞춰서 이 알고리즘을 설명하면 다음과 같다. 그림 2에 나타난 바와 같이 우선 사과 데이터를 크게 두 그룹(학습과 검정)으로 분리하였다. 총 400개의 사과를 경도 값에 따라 정렬한 후 첫 번째 3개의 사과는 학습용, 네 번째 사과는 검정용으로 분리하고, 이를 반복되게 전체 시료에 적용하여 75% 사과(300개)는 학습용 25%(100개)는 검정용으로 사용하였다. 영상 프로세싱 PCA 분석을 통해 25개의 주인자수(Principle component scores)가 신경망의 입력 자료로 쓰였다. 역전파 신경망 모델에서 neurons, epochs 및 주인자수를 최적으로 하기 위해 학습 데이터를 이용하여 교차 검정을 실시했다. 매번 학습용 시료를 2개의 그룹(교정 90% 과 관찰 10%)으로 나누어서 관찰용 시료의 표준오차(Standard Error of Monitor: SEM)가 최적수준에 도달하는 neurons, epochs 및 주인자수 를 결정하였다.

교차 검정 후 관찰용 시료는 다시 교정 그룹에 포함되고 다른 10%의 시료가 관찰용 그룹으로 재선택 되기 때문에 상관계수(r)와 관찰용 표준오차(SEM)는 모든 조합의 neurons, epochs

및 주인자에서 얻을 수 있었다. 그 조합들 중에서 가장 작은 관찰 표준오차(SEM)를 갖는 모델을 최적으로 간주하였고 이를 이용하여 검정 시료에 대하여 사과의 경도를 예측하였다. 이 과정은 입력 자료인 최대, 평균, 표준편차를 조합(7조합)하여 실행되었으며 각각의 조합에 대하여 7개의 최적의 신경망 경도 예측 모델을 얻어 낼 수 있었다.

당도와 산도의 예측 모델 개발도 앞에서 설명한 절차에 따라서 진행되었다. 각각의 영상 모델에 대한 최적의 스펙트럼 입력자료 조합은 표 2에 나타난 바와 같다. 경도 예측에서는 스펙트럼의 평균값과 표준편차(STD) 값들이 최대값보다 좋은 결과를 보인 반면에 당도와 산도에서는 최대값이 평균값과 STD값보다 더 많이 쓰였다는 것을 알 수 있다. 3개의 영상 모델중 가장 좋은(Fig. 4, 5, 6) 형광 및 반사광 통합 모델에서는 경도 예측에는 STD 값, 산도 예측에는 최대값이 쓰인 반면에 당도 예측에는 최대값, 평균값, 및 STD 값들이 모두 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

그림 3에 시간에 따른 형광 및 반사광 영상의 스펙트럼을 나타내었다. 반사 및 형광 영상은 256×256픽셀(스펙트럼 × 공간)의 영상으로 저장되었으며 세 개의 축으로 되어 있다. 첫 번째 축은 스펙트럼 축으로(영상의 세로축) 정해진 파장에서의 빛의 산포 단면을 나타내고, 두 번째 축은 공간 축으로 이 축에서 취한 단면은 사과 특정 부위 한 점에서의 스펙트럼으로 그림 3에 나타난 것과 같이 나타난다. 따라서 각각의 영상은 사과 표면의 각기 다른 지점에서 나오는 수백 개의 스펙

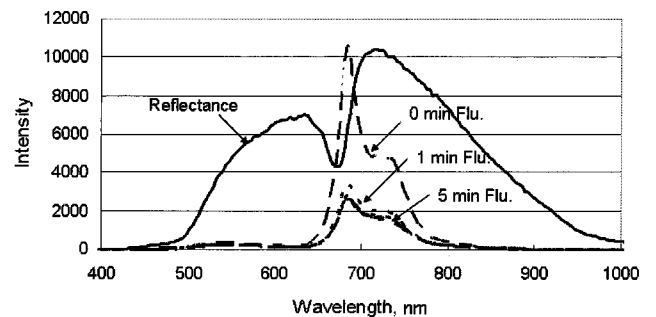


Fig. 3 Spectral profile of fluorescence with time and reflectance image at the center of the apple.

Table 2 Spectra combination of best model for firmness, SSC, and T-acid in image model

	Fluorescence model	Reflectance model	Integrated model
Firmness [N]	Mean	STD	STD
SSC [%]	Max, Mean, STD	Mean	Max, Mean, STD
T-acid [%]	Mean, STD	Max	Max

트럼으로 구성되어진다. 마지막으로 z축은 영상의 강도를 나타낸다. 시간에 따른 스펙트럼은 공간영상의 중간 지점에서 처음부터 5분까지 매분마다 총 6개를 취하였다.

스펙트럼 단면도에서 보듯이 사과와 형광은 시간이 지남에 따라 감소하였다. 이 현상은 빛을 쬐었을 때 형광이 급격히 증가했다가 천천히 감소하여 안정 상태에 이르는 것인데 광화학냉각의 변화에 의해 기인하며 형광 유도 운동 또는 Kautsky 효과라 한다. 이 Kautsky 효과를 이번 실험에서 그림 2에서와 같이 볼 수 있었는데 최초 1분 동안에 다른 기간보다 형광이 많이 변화했으며 5분 만에 안정 상태로 접어들었음을 확인할 수 있었다.

사과의 품질과 관련된 품질 지수인 경도, 당도, 산도를 예측하는 모델을 개발하기 위하여 형광, 반사광을 각각 사용하였고 형광과 반사광을 통합해서도 사용했으며 그 결과는 다음과 같다.

가. 형광 모델(Fluorescence Model)

그림 4는 형광 모델로부터 얻은 경도, 당도, 및 산도 예측 결과를 나타낸 것으로 y축에는 검정 데이터로부터 신경망 모델을 통해 얻은 예측 값을, x축에는 실제로 측정된 사과의 품질과 관련된 경도, 당도, 산도값을 나타내었다. 경도, 당도, 및 산도의 상관계수(r) 값은 각각 0.75, 0.66, 0.57이며, 검증시의 표준오차(standard error for validation: SEV)는 8.57 N, 1.19%,

0.08%이다. 이 결과로부터 형광을 기본으로 하는 신경망 모델은 경도 예측이 가능하나 당도 및 산도 예측에서는 그리 좋은 결과를 보여 주지 못했다.

나. 반사광 모델(Reflectance Model)

그림 5는 반사광 모델로부터 얻은 경도, 당도, 산도의 예측 결과를 보여 주고 있다.

경도, 당도 및 산도 예측시의 상관계수 값은 각각 0.8, 0.72, 0.63 이고 검증시의 표준오차는 7.88 N, 1.13%, 0.08%로 나타났다. 이 결과로 볼 때 반사광 모델 또한 형광 기본 모델과 비슷한 경향을 보였다.

다. 형광 및 반사광 통합 모델(Fluorescence and Reflectance Combined Model)

그림 6은 반사광과 형광을 통합한 모델로부터 얻은 경도, 당도 및 산도의 예측 결과를 보여 주고 있다. 상관계수 값은 경도, 당도, 및 산도에 대해 각각 0.86, 0.75, 0.66 이고 검증시의 표준오차는 6.97 N, 1.05%, 및 0.07%이다. 상관계수와 검증시의 표준오차 값들로 판단했을 때, 형광과 반사광을 통합했을 때 경도, 당도, 산도에 대해서 더 나은 예측 값을 얻을 수 있었다. 그러나 결론적으로 통합모델 또한 경도의 예측에는 적합하나 당도 및 산도 예측에는 부족한 감이 있다고 판단

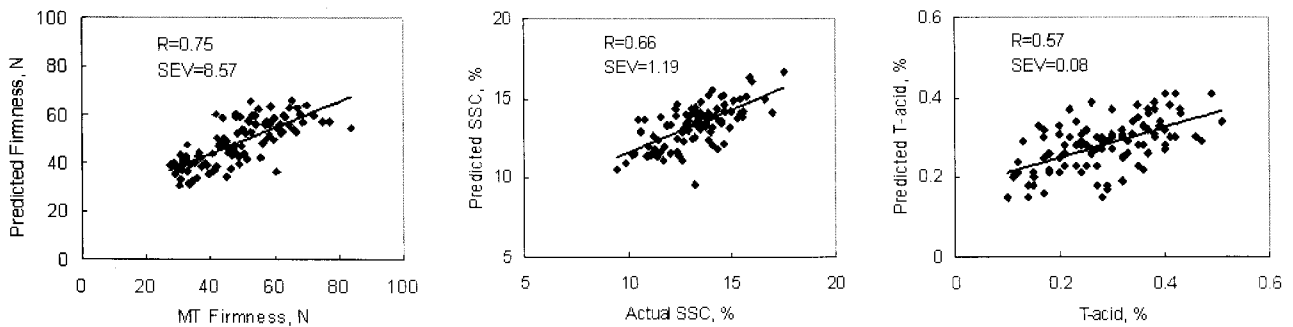


Fig. 4 Actual and predicted firmness, soluble solids contents and acidity of apples by fluorescence model.

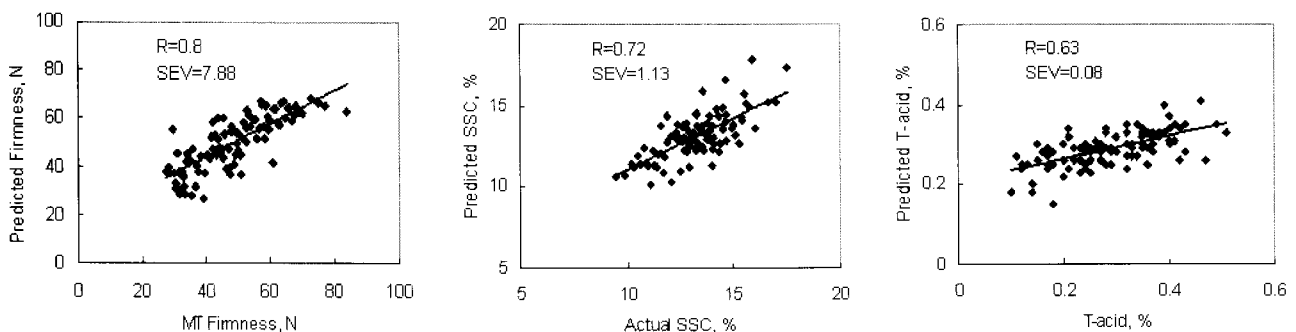


Fig. 5 Actual and predicted firmness, soluble solids contents and acidity of apples by reflectance model.

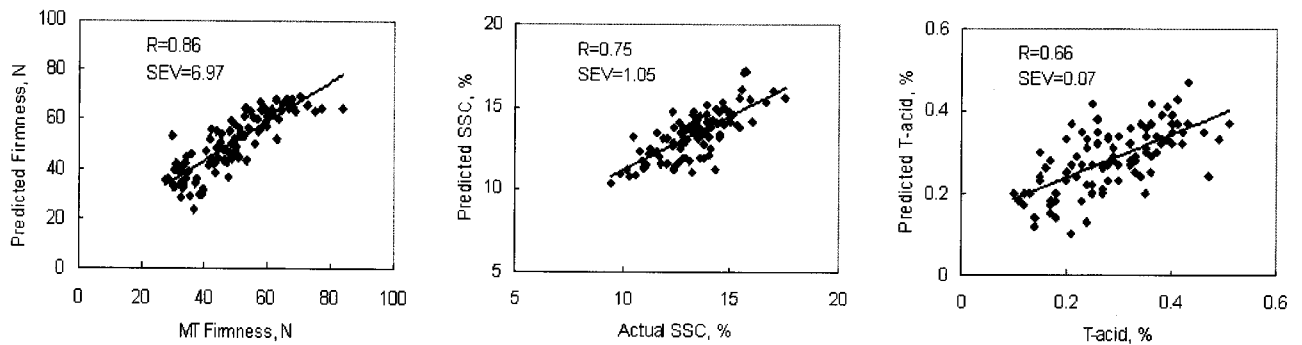


Fig. 6 Actual and predicted firmness, soluble solids contents and acidity of apples by fluorescence and reflectance combined model.

된다.

사과의 내부 품질을 측정하기 위해 가시광선 및 근적외선 분광분석, 초음파(Kim et al., 2003), X-ray(Choi et al., 2001), NMR(Clark et al., 2003) 등을 이용한 다양한 연구가 수행되었으며 성능이 우수한 알고리즘이 보고된 바 있다. 이번 연구는 사과의 내부 품질을 비파괴 적으로 측정하는데 있어 기존의 반사광에 레이저 유도 형광을 더하여 그 정확도를 높였다는데 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서 클로로필 형광만으로 품질과 관련된 품질을 측정하는 데는 한계가 있었다. 반사광과 형광의 두 가지 기술은 비파괴적이고 신속한 측정 방법으로 이 두 기술은 과일의 품질을 측정하는데 있어서 다른 원리를 이용하므로 서로 보상되는 측면이 있다. 과일의 품질은 과일의 품질과 상태의 여러 가지 면을 고려하여 판정되므로 본 연구에서 초분광 반사광과 형광을 결합한 기술을 이용함으로써 사과의 여러 품질 속성을 더 정확하게 측정할 수 있도록 할 수 있었다.

이 연구의 목적은 사과의 경도, 당도, 산도 등 사과 품질을 나타내는 변수를 측정하기 위하여 초분광 반사광과 형광을 결합하는 새로운 기술을 개발하는 것이었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 모델 상관계수 r 값과 표준오차 값을 고려했을 때 사과의 반사광과 형광을 통합함으로써 사과의 품질과 관련된 인자의 측정에 있어서 더 효과적이고 충실한 예측 값을 얻을 수 있었다.
- (2) 사과의 경도 측정에 있어서 통합된 모델의 상관계수는 0.86이었고 평균 오차 값은 6.97 N이었다. 이 두 값들은 반사광 모델이나 형광 모델 등 개별적으로 이용한 것보다 향상된 값을 보여주며, 이런 경향은 당도 및 산도 예측에서도 같이 나왔다.

- (3) 통합된 모델의 당도 및 산도 각각의 상관계수는 0.75, 0.66이고 검증 표준오차는 1.05%, 0.07%이었다.

이 연구의 결과, 사과의 품질을 예측하는데 있어서 형광과 반사광 각각의 개별 모델을 이용했을 때 보다 두 가지를 통합하는 모델이 검증 표준오차 대비 7~22% 정도 더 나은 결과를 보였다. 그러나 보다 정확하게 사과의 품질을 예측하기 위해서는 형광과 반사광 기술을 좀 더 시간적, 기술적인 측면에서 개선할 필요성이 있다고 판단된다.

참고 문헌

1. Bodria, L., M. Fiala, R. Oberti. and E. Naldi. 2002. Chlorophyll fluorescence sensing for early detection of crop's diseases symptoms. ASAE Paper No. 021114. ASAE, St. Joseph, Michigan, USA.
2. Bron, I. U., R. V. Ribeiro, M. Azzolini, A. P. Jacomino and E. C. Machado. 2004. Chlorophyll fluorescence as a tool to evaluate the ripening of 'Golden' papaya fruit. *Postharvest Biology and Technology* 33(2):163-173.
3. Cho, Y. J. and Y. J. Han; 1999. Nondestructive characterization of apple firmness by quantitation of laser scatter. *Journal of Texture Studies* 30(6):625-638.
4. Choi, S., C. S. Lee, D. Chung, H. Jung and K. Chang. 2001. Nondestructive Evaluation of Internal Browning in 'Fuji' Apples. *Journal of the Korean Society of Horticultural Science* 42(1):83-86.
5. Clark, C. J., J. S. MacFall and R. L. Bieleski. 1998. Loss of watercore in Fuji apple observed by magnetic resonance imaging. *Scientia Horticulturae* 73:213-227.
6. DeEll, J. R., R. K. Prange and D. P. Murr. 1995. Chlorophyll fluorescence as a potential indicator of controlled-atmosphere disorders in 'Marshall' McIntosh apples. *HortScience* 30(5): 1084-1085.
7. Gavel, A. and B. Marsalek. 2004. A novel approach for phyto-

- toxicity assessment by CCD fluorescence imaging. *Environmental Toxicology* 19(4):429-432.
8. Kim, K. B., M. S. Kim, H. M. Chung and S. D. Lee. 2003. Mechanical Properties and Ultrasonic Parameters of the Apple Flesh while in Storage. *Journal of Biosystems Engineering* 28(3):239-244.
 9. Kim, H. U, S. H. Noh and K. Kim. 1999. Nondestructive determination of sugar content in apples using ratio of difference of NIR spectral absorbance. *Food Engineering Progress* 3(1):8-14.
 10. Lammertyn, J., B. Nicolai, K. Ooms, V. De Smedt and J. De Baerdemaeker. 1998. Non-destructive measurement of acidity, soluble solids, and firmness of Jonagold apples using NIR-spectroscopy. *Transactions of the ASAE* 41(4):1089-1094.
 11. Lu, R., D. E. Guyer and R. M. Beaudry. 2000. Determination of firmness and sugar content of apples using near-infrared diffuse reflectance. *Journal of Texture Studies* 31(4):615-630.
 12. Lu, R. 2003. Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging. *Transactions of the ASAE* 46(2):523-530.
 13. Lu, R. and Y. Peng. 2004. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. ASAE Paper No. 043007. ASAE, St. Joseph, Michigan, USA.
 14. McGlone, V. A., H. Abe and S. Kawano. 1997. Kiwifruit firmness by near infrared light scattering. *Journal of NIR Spectroscopy* 5:83-89.
 15. Nedbal, L., J. Soukupova, J. Whitmarsh and M. Trtilek. 2000. Postharvest imaging of chlorophyll fluorescence from lemons can be used to predict fruit quality. *Photosynthetica* 38(4): 571-579.
 16. Polder, G., G. W. A. M. van der Heijden and I. T. Young. 2002. Spectral Image Analysis for Measuring Ripeness of Tomatoes. *Transactions of the ASAE* 45(4):1155-1161.
 17. Seo, Y., K. J. Kim and S. H. Noh. 2007. Study for non-destructive detection algorithm development of the internal browning and watercore of fuji apple using VIS/NIR transmittance spectroscopy. *Food Engineering Progress* 11(1):38-44.
 18. Seo, Y. and S. H. Noh. 2007. Discriminant analysis internal quality of "Fuji" apples using transmittance NIR spectra. *Proceedings of the KSAM conference* 12(2):397-401.
 19. Takeuchi, A., Y. Saito, M. Kanoh, T. D. Kawahara, A. Nomura, H. Ishizawa, T. Matsuzawa and K. Komatsu. 2002. Laser-induced fluorescence detection of plant and optimal harvest time of agricultural products (Lettuce). *Applied Engineering in Agriculture* 18(3):361-366.
 20. Tu, K., R. De Busscher, J. De Baerdemaeker and E. Schrevens. 1995. Using laser beam as light source to study tomato and apple quality non-destructively. In *Proc. of the Food Processing Automation IV Conference*. pp.528-536. Chicago, IL, USA.