

## 근적외선 초분광 영상을 이용한 사과 외부결함 검출

이아영, 김진세, 홍석주\*  
국립농업과학원 농업공학부

### Segmentation of Apple's External Defect Based on Near-Infrared Hyperspectral Imaging System

Ahyeong Lee, Jinse Kim, Suk-Ju Hong\*  
Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences

**요약** 과일의 품질은 모양, 크기, 색상, 외부결함과 같은 외부품질과 당도, 산도, 경도, 내부결함과 같은 내부품질에 의해 결정된다. 이러한 품질 요소 중 외부품질은 소비자가 과일을 구매하는 결정을 할 때 중요한 영향을 미친다. 현재 농산물 산지유통센터에서 수행되고 있는 대부분의 과일 선별 작업은 작업자에 의해 육안으로 수행되어진다. 본 연구에서는 육안 검사를 대체하기 위한 비파괴적인 검사 기술로써 근적외선 초분광 영상 시스템을 활용하고자 하였다. 이를 위해 병해와 상처가 있는 결함 사과에 대하여 987~1700 nm 파장 대역의 초분광 반사 영상을 획득하였다. 획득한 초분광 영상을 이용하여 판별 모델을 개발하기 위해 관심 영역을 설정하여 결함 부위와 정상 부위에 대한 스펙트럼을 추출하였다. 결함 판별 모델로는 차 영상과 비 영상을 이용한 이 파장 분석법과 세 종류의 머신러닝 알고리즘을 사용하였다. 그 결과, 개발된 모델 중 k-NN 모델이 가장 높은 판별 성능을 나타냈다. 최종적으로 개발된 모델을 초분광 영상에 적용한 결과, 결함 부위를 성공적으로 검출하는 것을 확인하였다.

**Abstract** The value of fruit is determined by external qualities, such as shape, size, color, and external defects, as well as internal qualities, such as sweetness, acidity, firmness, and internal defects. Among these factors, external quality is a crucial factor affecting the purchasing decisions of consumers. Currently, workers in agricultural products processing centers mostly select fruit manually. This study utilized near-infrared hyperspectral imaging as a non-destructive inspection technique to replace visual inspections. Hyperspectral reflectance images in the wavelength range of 987 to 1700 nm were acquired for apples with scabs and cuts. For defect discrimination, the spectra of the defect and sound areas were extracted from the hyperspectral images. Two wavelength selection algorithms and three machine learning algorithms were used to discriminate the defect areas. The k-NN model exhibited the highest discrimination accuracy. The defect sites were segmented successfully when applying the model to hyperspectral images.

**Keywords** : Apple, External Defect, Hyperspectral Image, Near-Infrared, Segmentation

### 1. 서론

전 세계적으로 1인 가구 등 소규모 가구가 증가하면서  
식생활 패턴이 변화해 가격이 저렴하고 양이 많은 것보

다 품질이 좋은 농산물을 구매하는 경향이 늘어나고 있  
다. 그 중에서도 과일은 비타민 C, 식이섬유 등 여러 영  
양학적인 가치와 적당한 가격대로 인하여 소비자들의 수  
요가 지속적으로 발생하는 농산물 중 하나이다[1]. 과일

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술연구개발사업(과제번호: PJ01709502)의 지원에 의해 이루어진 것임.

\*Corresponding Author : Suk-Ju Hong(National Institute of Agricultural Sciences)

email: hsj5596@Korea.kr

Received October 31, 2023

Accepted December 8, 2023

Revised November 23, 2023

Published December 31, 2023

의 상품 가치는 모양, 크기, 색상, 상처 등의 외부품질과 당도, 산도, 경도, 내부결함 등의 내부품질에 의해 결정된다[2]. 외부품질은 소비자에게 중요한 구매 결정 인자이며 외부품질에 직접적인 영향을 주는 결함(자상, 명, 병해)은 생장 환경, 수확 시기, 수확 후 처리 과정, 저장 환경 등 다양한 상황에서 발생하게 된다[3,4]. 다양한 원인으로 발생한 결함은 영양 성분을 손실시켜 상품 가치를 하락시키고 소비자의 구매 의사 결정에 직접적인 영향을 주어 농가 수익 및 경제적 손실로도 이어진다[5,6]. 따라서, 유통 전 단계에서 결함이 발생한 과일들을 선별해내는 과정이 필요하다. 특히, 과피 내 경미한 명과 같은 결함은 검출이 어렵고 저장 및 유통 과정에서 상품성을 지속적으로 하락시키기므로 초기 단계에서의 정밀한 검출이 필요하다[7].

사과는 독소 제거, 이노 작용 등의 효능을 가진 과일로 전 세계적으로 수요가 높은 과일 중 하나이다[8]. 2022년 세계 사과 생산량은 약 7,876만 톤으로 보고되었으며[9] 한국의 경우, 56만 6천 톤으로 전년도보다 약 10% 증가한 생산량을 보였다[10]. 사과는 크기, 색상, 결함 여부 등 다양한 품질 기준에 의해 등급화된다. 미국은 사과를 총 4등급으로 구분하고 있으며 유럽 연합 국가에서는 유엔유럽경제위원회(UNECE)에서 국제적으로 합의하여 세 가지 범주로 구분하고 있다[11-13]. 한국의 경우, 농산물 검사, 검정 방법 및 절차 등에 관한 규정에 따라 과실류의 검사기준을 결점과 혼입율에 대하여 중결점과 2% 이내, 경결점과 3% 이내로 정하고 있다. 하지만 현재 사과의 품질을 구분하기 위한 선별 작업은 대부분 작업자에 의해 수작업으로 수행되고 있다. 육안 선별의 경우, 노동력이 요구될 뿐만 아니라 검사자의 주관에 따라 판단 기준이 달라 신뢰성이 떨어지게 된다.

이러한 육안 선별의 문제점을 해결하기 위해 다양한 비파괴기술을 이용한 품질 측정 연구가 이루어지고 있다. 농산물의 품질을 비파괴적으로 측정, 판별하는 연구로는 대표적으로 분광분석법이 있다. 분광분석법은 물체에 빛을 조사했을 때 반사 또는 투과되는 빛의 세기를 물체의 구조나 품질과 관련된 정량, 정성 분석에 이용하는 방법이다[14]. 1963년 곡류와 종자의 수분 측정을 위해 근적외선 투과 스펙트럼을 측정하는 것이 농산물에 활용된 첫 사례이다[15]. 그 후, 농산물의 건물중을 예측하거나 과일의 당도를 예측하고, 더 나아가서는 농산물에 묻은 살충제나 식품 첨가물, 독소를 검출하는 등 식품 안전과 관련된 연구에도 이용되고 있다[16-18]. 이러한 분광분석법은 과일의 당도, 산도 등의 내부 품질을 예측하는 데

는 활용될 수 있으나, 특정 위치에 있는 외부결함을 검출하는 데는 활용하기 어렵다.

과일의 외부결함을 검출한 연구사례들을 살펴보면 RGB 영상을 활용한 연구들이 주를 이룬다. RGB 영상을 활용한 기존 연구들은 색상 차이가 확실한 결함에 대해서는 높은 검출 정확도를 나타내지만 과피 내 명과 같은 색상 차이가 미미한 결함에는 그 정확도가 낮다. 또한, 꼭지 부분과 색상이 비슷한 결함이 존재할 때는 꼭지를 결함으로 오검출하는 문제가 발생한다[19-21]. 이에 따라 색상 차이가 적은 결함 종류에 대한 검출 기술로서 초분광 영상기술이 주목받고 있다. 초분광 영상은 2차원의 영상데이터와 1차원의 분광 데이터가 혼합된 3차원의 데이터로써, 물질의 물리화학적 특성을 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 공간적 정보를 동시에 획득할 수 있어 농산물의 결함 검출에 적합하다[22].

따라서 본 연구에서는 과일 선별 작업의 자동화 기반 기술 개발을 위한 기초연구로서 상처와 병해가 있는 결함 사과에 대해 초분광 영상기술을 활용하여 결함을 검출하는 모델을 개발하고자 하였다. 이를 위해, 라인 스캔 방식의 초분광 영상 장치를 활용하였으며 987~1700 nm 파장 대역의 초분광 반사 영상을 획득하였다. 검출 정확도를 높이기 위하여 두 가지 파장 대역의 초분광 영상을 이용한 검출 모델과 여러 개 파장을 이용한 머신러닝 알고리즘을 적용하여 초분광 영상을 분석하였으며 정확도 비교를 통해 결함 검출에 적합한 알고리즘을 선정하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시 재료

본 실험에 사용된 사과는 전북 진안군에 위치한 농특산물 산지유통센터에서 선별된 부사 품종으로 숙련된 작업자들에 의해 선별된 결함 사과이다. 결함 유형은 병원균의 침해를 받아 장애가 발생한 반점성 병해(Scab)와 외부의 물리적 요인에 의해 찌임이나 자상이 발생한 상해(Cuts)이며 결함별로 각각 15개씩 총 30개 사과를 선발하였다(Fig. 1). 병해 사과의 경우, 반점성 장애 증상을 보이는 사과로 병해 크기가 다양하나 대부분 직경이 5mm 미만이며 발현 부위가 다양한 사과 위주로 선발하였다. 상해가 발생한 사과의 경우, 대부분 조직이 괴사하면서 색깔이 검게 변하거나 껍질이 벗겨져 나간 특징을 보이는 사과로 선발하였다. 분류된 사과는 4 °C로 설정된

저온 저장고에 냉장 보관되었으며 7일간의 저장 후 초분광 영상을 측정하였다. 초분광 영상 측정은 온도 18 °C, 상대 습도가 40 %인 실험실에서 진행되었다.

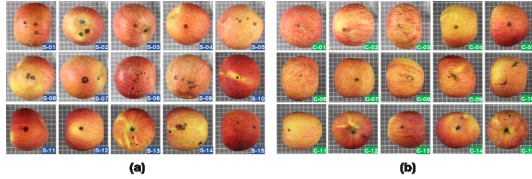


Fig. 1. Defective apples used in this study  
(a) Scab (b) Cuts

## 2.2 근적외선 초분광 영상 시스템

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 근적외선 초분광 영상 시스템이다. 시스템은 크게 영상획득부, 조명부, 이송부로 나눌 수 있다. 영상획득부는 분광기(Imaging spectrograph; HyperspecTM NIR G4-249, Headwall Photonics, MA, USA)와 줌 렌즈(C-mount object lens; Model OB-NIR35/2, Optec, Parabiago, Italy)를 장착한 카메라(InGaAs FPA Camera; Xeva-3035, Xenics, Leuven, Belgium)로 이루어진다. 조명부에서는 150W DC의 할로겐 라인 광(Halogen line lights; LS-F100HS-IR, SeokwangInc., Hwasung, Korea) 2개가 수직 방향으로 15도 기울어져 사과 시료에 집중하여 조사된다. 사과 시료에서 반사된 광은 25 μm × 18 mm 크기의 조리개 슬릿(Slit)을 통과한 후 분산 격자에 의해 분산되어 FPA 카메라에 투사된다. 이를 통하여 수평축을 따른 공간 치수와 FPA 카메라의 수직축을 따른 스펙트럼 치수를 갖는 2차원 영상이 형성된다. 이송부는 z축 방향으로 카메라의 높낮이를 조절할 수 있는 z축 이송 장치(Z-axis transfer unit)와 사과가 놓인 시료 이송대가 x축 방향으로 이동할 수 있는 x축 이송 장치(X-axis transfer unit)로 구성되어 있다. 초분광 영상 획득과 z축 및 x축 이송은 컴퓨터로 제어되며 컴퓨터를 제외한 모든 구성 장치는 외부 광 유입을 막기 위해 무광 검정의 밀폐 케이스 내에 장착하였다. 초분광 영상 촬영 시 노출시간을 14 ms, 이송대의 이동 간격은 0.5 mm로 설정하였다. 최종적으로, 본 시스템을 이용하여 획득된 초분광 영상은 987~1700 nm 파장 대역에 대해 3.2 nm의 간격으로 224개의 스펙트럼 대역을 가지며 각 대역은 640개의 수직 픽셀과 250개의 수평 픽셀의 해상도를 가진다.

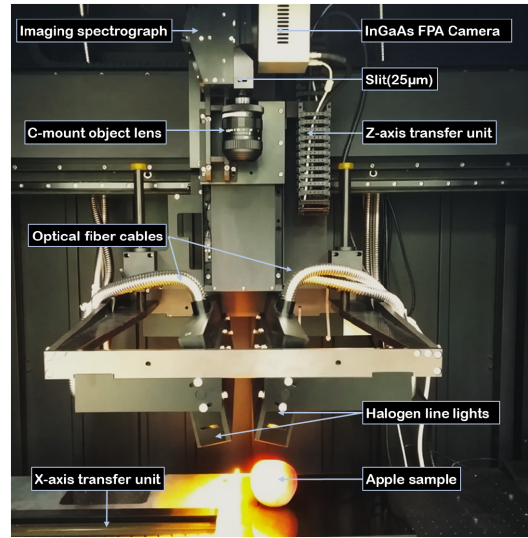


Fig. 2. Near-infrared hyperspectral imaging system

## 2.3 초분광 영상 전처리

근적외선 초분광 영상 시스템을 통해 측정된 초분광 영상은 크게 기준 흑색 영상(dark reference image), 기준 백색 영상(white reference image), 시료 영상으로 나누어진다. 기준 흑색 영상은 카메라에 의해 발생할 수 있는 노이즈를 보정하기 위해 광원이 없는 상태에서 획득된 영상이다. 기준 백색 영상은 각각의 수직 픽셀에 대한 광원의 강도 보정을 위해 99% 확산 반사 표준(Spectralon™, SRT-99-120, Labsphere, NH, USA)을 이용하여 획득한 영상이다. 기준 흑색 영상과 기준 백색 영상은 Eq. (1)과 같이 원본 반사 영상을 보정된 반사 영상으로 변환하는 역할을 한다. 보정을 통해 초분광 영상의 반사 강도는 0에서 1 사이 값으로 변환된다.

$$I_{calibrated} = \frac{I_{raw}(i) - I_d(i)}{I_w(i) - I_d(i)} \quad (1)$$

여기서,  $i$  번째 파장에서,  $I_{calibrated}$ 는 보정된 반사 영상이다.  $I_r$ 은 원본 초분광 반사 영상,  $I_d$ 는 기준 흑색 영상,  $I_w$ 는 기준 백색 영상이다.

## 2.4 초분광 영상을 이용한 결함 판별 모델

결함판별모델을 만들기 위하여 초분광 영상 데이터에서 사과의 평균 스펙트럼과 픽셀 스펙트럼을 추출하였다. 추출된 데이터에서 정상 부분은 “0”, 결함 부분은 “1”로 구분하여 지정한 후 두 개 파장을 이용하거나 여러 개의 파장을 이용하여 판별 모델을 개발하였다. 두 개 파

장을 이용한 판별 모델은 서로 다른 두 가지 파장 대역의 차 영상과 비 영상을 이용하여 결함을 검출한다. 이 방법은 단파장 영상에서 발생하는 거리 차이로 인한 불균일 반사 특성의 문제점을 해결하기 위하여 사용되었다.

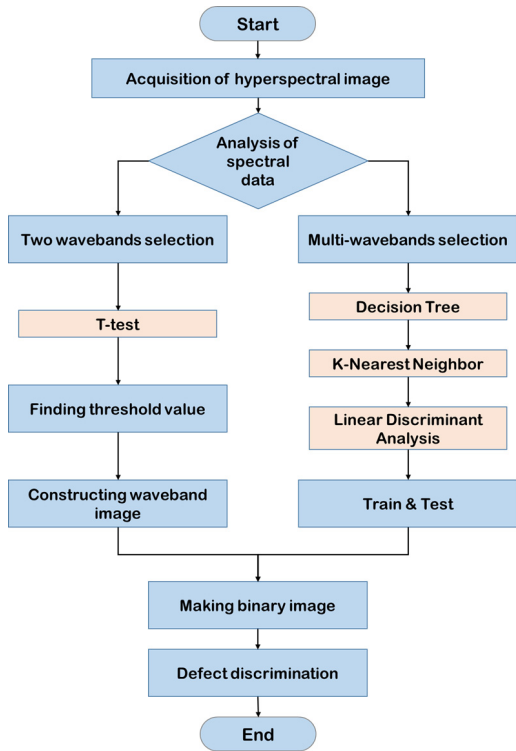


Fig. 3. Flow chart of the hyperspectral image processing procedure for apple's defect discrimination

결함 영역 검출을 위한 전체적인 분석 과정은 Fig. 3과 같다. 두 개 파장을 이용한 차 영상과 비 영상은 Eq. (2), (3)과 같이 계산되었다. 결함을 검출하기 위한 최적의 파장 조합을 찾기 위해 가능한 모든 파장 조합에 대해 평균 스펙트럼을 추출한 후 정상과 결함 부분의 차이가 가장 큰 파장 조합을 t 검정을 통해 선정하였다. 이후 선정된 파장 조합을 이용해 두 영역을 구분하는 문턱값(threshold value)을 계산하였다. 문턱값은 차 영상과 비 영상을 통해 계산된 값들을 정상 부분과 결함 부분에 대하여 각각 히스토그램을 그린 후 교차하는 지점으로 정하였다. 만들어진 모델의 결함 영역 검출 정확도를 확인하기 위해 획득한 근적외선 초분광 영상에서 관심 영역(ROI, Region of Interests)을 설정하여 사과와 배경을 분리하는 이진화 작업을 수행하였으며 문턱값을 이진화

영상에 적용하여 결함 영역을 검출하는지 확인하였다.

$$S = HSI_{\lambda_1} - HSI_{\lambda_2} \quad (2)$$

$$R = \frac{HSI_{\lambda_1}}{HSI_{\lambda_2}} \quad (3)$$

여기서, S는 차(subtraction) 영상, R은 비(ratio) 영상,  $HSI_{\lambda_1}$ 은 파장  $\lambda_1$ 에 대한 초분광 영상,  $HSI_{\lambda_2}$ 는 파장  $\lambda_2$ 에 대한 초분광 영상을 나타낸다.

다파장을 활용한 판별 모델의 경우, 의사결정트리(DT, Decision Tree), k-최근접 이웃(k-NN, k-Nearest Neighbor), 선형 판별분석(LDA, Linear Discriminant Analysis)과 같은 머신러닝 알고리즘을 이용하였다. 머신러닝 알고리즘을 이용한 결함 검출을 위하여 초분광 영상에서 추출된 픽셀 스펙트럼을 학습 그룹과 테스트 그룹으로 나눈 후 학습 그룹을 통해 판별 모델을 개발하고, 테스트 그룹을 통하여 모델 검증 수행하였다. 모델의 예측 정확도는 Eq. (4), (5)와 같이 계산하였다.

$$Specificity = \frac{TN}{TN+FP} \quad (4)$$

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP+FN} \quad (5)$$

TP (True Positive)는 결함 부분을 정확하게 검출한 빈도, FP (False Positive)는 정상 부분을 결함 부분으로 잘못 예측한 빈도, TN (True Negative)는 정상 부분을 정확하게 예측한 빈도, FN (False Negative)는 결함 부분을 정상 부분으로 잘못 예측한 빈도이다. 정확도가 높은 모델을 선정 후, 이 파장 모델과 마찬가지로 이진화 영상에 적용하여 결함 영역 검출 결과를 확인하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 초분광 스펙트럼 개형

결함판별모델을 만들기 위하여 초분광 영상으로부터 정상 영역과 결함 영역의 스펙트럼을 획득하였다. 이 파장 모델을 개발하기 위해서 상처 시료와 병해 시료 각각에 대해 정상 부위와 결함 부위의 평균 스펙트럼을 30개씩 획득하였다. 평균 스펙트럼을 얻기 위해 상처 시료의 경우, 정상 부위에서 981개, 결함 부위에서 938개로 총 1,919개의 픽셀 스펙트럼을 추출하였으며 병해 시료에서는 정상 부위 901개, 결함 부위 857개의 픽셀 스펙트럼을 획득하였다. 머신러닝 알고리즘을 이용한 다파장 모델의 경우, 검출 오차를 줄이기 위해 이 파장 모델에서 사용한 픽셀 스펙트럼보다 더 많은 스펙트럼을 획득하여

분석하였다. 병해 판별에 사용된 스펙트럼은 157,667개이며, 상처 판별에 사용된 스펙트럼은 151,373개이다.

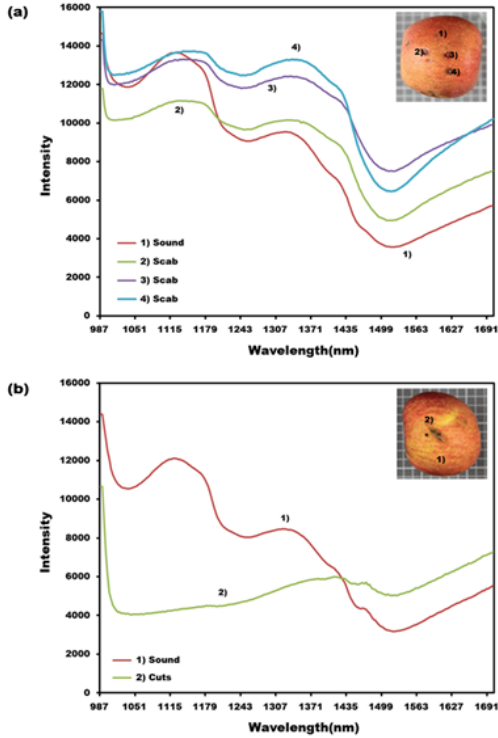


Fig. 4. Representative spectra about defective and normal parts of apples (a) Scab (b) Cuts

Fig. 4의 (a)는 반점성 병해가 발생된 15개의 시료 중에서 1번째 시료에 발생한 병해 부위(b, c, d)와 정상 부위 (a)에 대한 반사스펙트럼을 비교한 것이며, Fig. 4의 (b)는 상처가 발견된 사과 결함 시료 15개 중 9번째 시료에 대한 상처 부위 (b)와 정상 부위 (a)에 대한 반사스펙트럼을 비교한 것이다. 병해의 경우, 정상 부위와 결함 부위 모두 전체 파장 대역에서 유사한 반사도 세기를 나타내는 것을 확인하였으며, 두 부위 모두 1500 nm 대역에서 가장 낮은 반사도 값을 나타냈다. 상처의 경우, 정상 부위의 반사스펙트럼은 후반부 파장으로 진행할수록 반사도가 감소하다 1500 nm 대역에서 반사도가 증가하는 추세를 가졌다. 그에 반해, 상처 부위의 스펙트럼은 1000 nm 대역에서 급격한 감소 후 미세한 증가 폭을 나타냈다. 1435 nm 대역에서 결함 부위와 정상 부위의 반사도 세기가 교차하였으며, 1435 nm 아래 대역에서는 상처 부위의 세기 값이 낮게 나타나고, 1435 nm 이상 대역에서는 높은 반사도를 나타냈다. 이를 통해, 단순히

한 파장 대역의 스펙트럼 강도 차이를 이용하여 결함을 검출하는 것은 어려울 것으로 판단되었다.

### 3.2 이 파장 영상을 이용한 결함 검출

사과의 병해와 상처 결함 검출을 위해 두 가지 파장 대역의 초분광 영상들을 조합하여 차 영상과 비 영상을 만든 후 정상 부위와 결함 부위에서 가장 큰 차이를 나타내는 파장 조합을 t 검정을 통해 Table 1과 같이 구하였다. 가장 큰 차이를 나타내는 파장 조합은 t 검정 후 p-value가 가장 작은 조합으로 선정하였다. 병해 사과의 경우, 가장 큰 차이를 보이는 비 영상 조합은 1419 nm와 1435 nm이고, 차 영상 조합은 1368 nm와 1365 nm였다. 상처 사과의 경우 1186 nm와 1192 nm의 비 영상 조합과 1435 nm와 987 nm의 차 영상 조합이 가장 큰 차이를 나타냈다. 네 조합 모두 p-value가 0.001 이하 값을 나타냈다.

Table 1. Selected two wavelength bands for external defect discrimination of apples

Defect	Ratio			Subtract		
	Band1	Band2	p value	Band1	Band2	p value
Scab	1419	1435	< 0.001	1368	1365	< 0.001
Cuts	1186	1192	< 0.001	1435	987	< 0.001

선정된 파장 조합에 대해 정상 부위와 결함 부위의 값을 히스토그램으로 그린 후 교차하는 값을 문턱값으로 적용하여 결함 부위를 검출하였다. Fig. 5 (a)는 이진화 영상에 차 영상, 비 영상 모델을 적용하여 병해 부위를 검출한 결과이다. 차 영상 모델의 경우 사과의 가장자리 부분을 결함 부위로 오검출한 시료가 다수 존재하였으며, 결함 부위 또한 실제 결함 영역보다 작게 검출되었다. 비 영상 모델의 경우 병해의 크기와 위치가 차 영상 모델보다 상대적으로 정확하게 나타났다. 하지만, 사과의 꼭지 부분이 보이는 영상들에서 꼭지를 결함으로 오검출하는 문제가 똑같이 발생하였다. 또한 7, 8, 9, 11번 시료의 초분광 영상에서 시료 중앙부에 빛 반사가 높게 나타난 모습을 확인할 수 있었는데 비 영상 모델에서는 빛 반사 부분이 결함 부위로 잘못 예측되었다. Fig. 5 (b)는 이진화 영상에 차 영상, 비 영상 모델을 적용하여 상처 부위를 검출한 결과이다. 차 영상 모델의 경우, 병해 사과 영상과 마찬가지로 사과 가장자리 부분을 오검출한

사례가 1, 2, 3번 시료에서 나타났으나 병해 검출 모델보다는 상대적으로 상처 부위를 잘 검출하였으며 비 영상 모델 역시, 결함 위치와 크기를 잘 예측하였다. 그러나 사과 꼭지 부분이 함께 촬영된 12, 14, 15번 시료에서 차 영상 모델과 비 영상 모델 모두 사과 꼭지 부분을 결함 부위로 잘못 예측하는 결과를 나타냈다. 이를 통해 사과의 상처와 병해 검출에는 차 영상보다는 비 영상 모델이 더 효과적임을 확인하였다. 하지만 두 모델 모두 RGB 영상을 이용했을 때와 마찬가지로 꼭지를 결함으로 오검출하는 문제점이 나타나 실제 결함 검출에 활용하기에는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

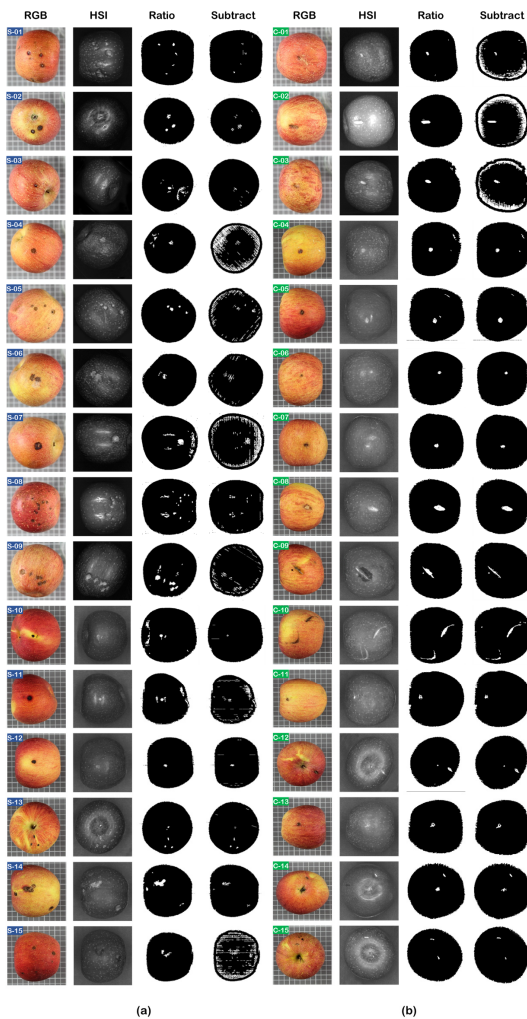


Fig. 5. Defect discrimination results by two wavelength selection algorithms (a) Scab (b) Cuts

### 3.3 머신러닝 알고리즘을 이용한 결함 검출

이 파장 알고리즘에서 나타나는 오검출을 해결하기 위해 다파장을 이용한 머신러닝 알고리즘을 적용하였다. 세 가지 머신러닝 알고리즘(DT, k-NN, LDA)을 이용해 판별 분석한 결과는 Table 2와 같다. 병해의 경우, 검정 그룹에서의 시험군에 대한 LDA 분석의 정확도가 89.47%, DT 분석의 정확도가 90.06%로 나타났으며 상처의 경우, 검정(Test) 그룹에서의 시험정확도가 66.14%로 나타났다. k-NN 분석을 했을 경우 병해 결함에 대해서 검정 그룹에서 대조군의 정확도가 99.96%, 시험군에서 95.91%의 정확도를, 상처에 대해서 검정 그룹에서 대조군의 정확도가 99.94%, 시험군에서는 88.36%의 정확도로 가장 높은 성능을 나타냈다.

Table 2. Machine learning results for external defect discrimination of apples

Accuracy (%)		Specificity		Sensitivity	
		Train	Test	Train	Test
Scab	DT	99.95	99.95	88.48	90.06
	k-NN	100	99.96	100	95.91
	LDA	99.68	99.67	86.44	89.47
Cuts	DT	99.93	99.91	70.23	66.14
	k-NN	100	99.94	100	88.36
	LDA	99.83	99.80	79.04	78.31

Fig. 6은 머신러닝 알고리즘 중 가장 높은 정확도를 나타낸 k-NN 모델을 이진화 영상에 적용하여 결함 부위를 검출한 결과이다. 결함 부위를 100% 정확도로 검출하였으며, 사과 꼭지나 빛 반사가 심한 부분을 오검출하지 않은 것을 볼 수 있다. 따라서 근적외선 대역의 초분광 반사 영상을 이용하여 사과 외부의 병해, 상처를 검출할 수 있을 것으로 판단되며 이를 위한 판별 모델로 k-NN 모델이 적합하다.

기존 유사 연구의 경우, Zou[19]는 칼라 카메라와 Blemish segmentation을 이용하여 정상 사과는 84.93%, 결함 사과는 95.8%의 정확도로 결함을 검출해냈다. Zhang[20]은 결함 검출을 위해 칼라 카메라와 lightness correction을 이용하였다. 꼭지가 보이지 않는 정상 사과의 경우 100%의 정확도로 분류하였으나 꼭지가 보이는 사과는 92.5%의 정확도로 분류하였다. 결함 사과의 경우, 94.74%의 검출 정확도를 나타냈다. Alam[23]은 403~988 nm 파장대역에 대한 초분광 영상과 주성분분석을 이용하여 결함을 검출하였고 이진화 영상을 통한

최종 검출 정확도는 97 %로 나타났다.

이를 통해 k-NN 알고리즘이 모델 판별 정확도의 경우 기존 연구와 유사한 것을 확인할 수 있었다. 이진화 영상을 통한 결함 부위 검출의 경우, 꼭지를 오검출하지 않고, 결함 부위의 검출 정확도가 더 높은 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 사과의 외부 상처와 병해 부위를 근적외선 대역의 초분광 반사 영상을 이용하여 비파괴적으로 검출하는 판별 모델을 개발하고자 하였다. 이를 위해, 라인 스캔 방식 방식의 초분광 영상 장치를 이용하였으며 987~1700 nm 파장 대역의 초분광 반사 영상을 획득하였다. 획득된 초분광 영상에서 정상 부위와 결함 부위의 픽셀 스펙트럼과 평균 스펙트럼을 추출하였다. 결함 검출 모델로는 두 개 파장 대역 영상의 비와 차를 이용한 이 파장 모델과 다파장을 이용하는 여러 머신러닝 알고리즘을 사용하였다. 이에 관한 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 이 파장 모델의 경우, 차 영상과 비 영상을 이용하여 정상과 결함 부분 차이가 가장 큰 파장 조합을 t 검정을 통해 획득하였다. 그 결과, 병해 사과는 1419 nm와 1435 nm 파장의 비 영상과 1368 nm와 1365 nm 파장의 차 영상이 선정되었다. 상처 사과의 경우 1186 nm와 1192 nm 파장의 비 영상과 1435 nm와 987 nm 파장의 차 영상이 선정되었다.
- (2) 이 파장 모델을 초분광 영상에 적용하여 결함 부위를 검출한 결과, 결함 부위를 성공적으로 검출하기는 하나 사과의 꼭지나 가장자리, 빛 반사가 나타난 부분에 대해 결함 영역으로 오검출하는 문제가 발생하는 것을 확인하였다.
- (3) 머신러닝 알고리즘의 경우, k-NN 모델이 병해 결함에 대해 검정 그룹에서 대조군의 정확도가 99.96 %, 시험군에서 95.91 %의 정확도를, 상처에 대해 검정 그룹에서 대조군의 정확도가 99.94 %, 시험군에서는 88.36 %의 정확도를 나타내 가장 높은 판별 정확도를 나타냈다.
- (4) k-NN 모델을 초분광 영상에 적용하여 검출 영역을 확인한 결과, 이 파장 모델과는 달리 결함 부위만을 성공적으로 검출하는 것을 볼 수 있었다.
- (5) 따라서 초분광 영상과 머신러닝 알고리즘을 이용하여 상처, 병해와 같은 외부 결함 검출이 가능한 것을 확인하였다. 추후 초분광 영상 기술을 과일 선별 작업 자동화 기술로 활용하기 위해서는 과일의 전면에 대한 초분광 영상 획득이 필요하다. 이를 위해서는 과일에 상처를 유발하지 않으면서 안정적으로 굴릴 수 있는 회전 장치 제작이 필요할 것으로 보인다.

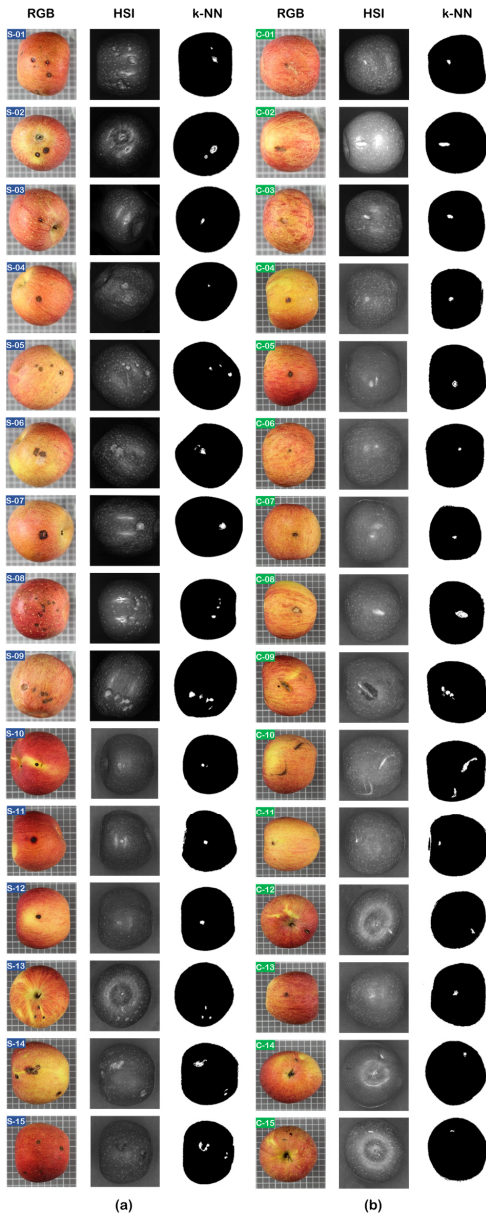


Fig. 6. Defect discrimination results by k-NN algorithm (a) Scab (b) Cuts

## Acknowledgements

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ01709502)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## References

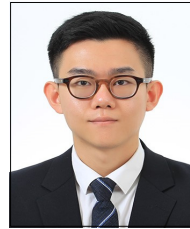
- [1] M. Paraschivu, O. Cotuna, M. Paraschivu, A. Ciobanu, C.V. Oltenacu, "Infection of *Erwinia amylovora* on different apple varieties and the impact on fruits quality", *Scientific Papers. Series B, Horticulture*, Vol.LXV, No.1, pp.219-227, 2021.
- [2] J.Y. Yoon, K.H. Park, H.U. Park, "Analysis of impacts on indigenous fruits and fruits-vegetables sector from diversified fruit imports and issues to cope with", *Korea rural economic institute*, <http://librarv.krei.re.kr/pyxis-api/1/digital-files/d488f5a2-ccab-4abb-8f5f-21a65a6996f8>, Accessed 16 July, 2020.
- [3] G. ElMasry, N. Wang, C. Vigneault, "Detecting chilling injury in Red Delicious apple using hyperspectral imaging and neural networks", *Postharvest biology and technology*, Vol.52, No.1, pp.1-8, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.11.008>
- [4] S.D. Lee, K.B. Kim, J.G. Park, M.S. Kim, "Basic study for analyzing the mechanical properties of the apple using ultrasonic parameters", *Journal of agriculture and life sciences*, Vol.41, No.1, pp.50-55, 2010.
- [5] U.L. Opara, P.B. Pathare, "Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce—a review", *Postharvest Biology and Technology*, Vol.91, pp.9-24, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.12.009>
- [6] W. Huang, J. Li, Q. Wang, L. Chen, "Development of a multispectral imaging system for online detection of bruises on apples", *Journal of Food Engineering*, Vol.146, pp.62-71, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.09.002>
- [7] B.K. Cho, I.S. Baek, N.G. Lee, C.Y. Mo, "Study on burise detection of 'Fuji' apple using hyperspectral reflectance imagery", *Jornal of biosystems engineering*, Vol.36, No.6, pp.484-490, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5307/JBE.2011.36.6.484>
- [8] G. Mamajonov, A.K. Sulaymonov, "CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF APPLE FRUIT DEPENDING ON THE CULTIVATION IN THE REGIONS", *Journal of Integrated Education and Research*, Vol.1, No.4, pp.268-271, 2022. [https://ois.rmasav.com/index.php/ois/article/view/241/ARTICLE\\_2022\\_1\\_4\\_TEX\\_1](https://ois.rmasav.com/index.php/ois/article/view/241/ARTICLE_2022_1_4_TEX_1)
- [9] United States Department of Agriculture, "Fresh Apples, Grapes, and Pears: World Markets and Trade", *Foreign Agricultural Service*, pp.1-12, 2023.
- [10] KOSIS, <https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT1ET0292>
- [11] USDA, United States Standards for Grades of Apples, 2019.
- [12] UNECE STANDARD FFV-50 2017 EDITION, "Apples quality standards", United Nations Economy Commission for Europe. 53 rd. Ses. N Y., Geneva, 8 June, 2018.
- [13] M. Stefano, S. Sara, "Review: Apple fruit quality: Overview on pre-harvest factors", *Scientia Horticulturae*, Vol.234, pp.409-430, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.057>
- [14] K.J. Lee, S.W. Kang, K.H. Choi, "Nondestructive Quality Measurement of Fruits and Vegetables Using Near-Infrared Spectroscopy", *Food Engineering Progress*, Vol.8, No.3, pp.158-169, 2004.
- [15] K.H. Norris, 21-A SIMPLE PHOTOMETER WITH WIDE DYNAMIC RANGE. Measurement of Thermal Radiation Properties of Solids: A Symposium Held September 5, 6, 7, 1962. Vol. 31. Washington, Office of Scientific and Tec, 1963.
- [16] G.S. Birth, G.G. Dull, W.T. Renfro, S.J. Kays, "Nondestructive spectrophotometric determination of dry matter in onions", *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol.110, No.2, pp.297-303, 1985. DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS.110.2.297>
- [17] A.Y. Lee, J.S. Shim, B.G. Kim, H.Y. Lee, J.G. Lim, "Non-destructive prediction of soluble solid contents in Fuji apples using visible near-infrared spectroscopy and various statistical methods", *Journal of Food Engineering*, Vol.321, pp.110945, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.110945>
- [18] X. Fu, Y. Yibin, "Food safety evaluation based on near infrared spectroscopy and imaging: a review", *Critical reviews in food science and nutrition*, Vol.56, No.11, pp.1913-1924, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.807418>
- [19] Z. Xiao-bo, Z. Jie-wen, L. Yanxiao, M. Holmes, "In-line detection of apple defects using three color cameras system", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.70, No.1, pp.129-134, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.09.014>
- [20] B. Zhang, W. Huang, L. Gong, J. Li, C. Zhao, C. Liu, D. Huang, "Computer vision detection of defective apples using automatic lightness correction and weighted RVM classifier", *Journal of Food Engineering*, Vol.146, pp.143-151, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.08.024>
- [21] S.R. Dubey, A.S. Jalal, "Apple disease classification using color, texture and shape features from images", *Signal, Image and Video Processing*, Vol.10, No.5, pp.819-826, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11760-015-0821-1>



- [22] A.Y. Lee, S.B. Park, J.Y. Yoo, J.S. Kang, J.G. Lim, Y.W. Seo, B.G. Kim, G.Y. Kim, "Detecting Bacterial Biofilms using Fluorescence Hyperspectral Imaging and various discriminant analyses", *Sensors*, Vol.21, No.6, pp.2213, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/s21062213>
- [23] M.N. Alam, I. Pineda, J.G. Lim, O. Gwun, "Apple defects detection using principal component features of multispectral reflectance imaging", *Science of Advanced Materials*, Vol.10, No.7, pp.1051-1062, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1166/sam.2018.3277>

홍 석 주(Suk-Ju Hong)

[정회원]



- 2016년 8월 : 서울대학교 바이오 시스템공학과 (공학사)
- 2022년 8월 : 서울대학교 바이오 시스템공학과 (공학박사)
- 2023년 4월 ~ 현재 : 국립농업과학원 농업공학부 전문연구원

이 아 영(Ahyeong Lee)

[정회원]



- 2017년 8월 : 서울대학교 바이오 시스템공학과 (공학사)
- 2019년 8월 : 서울대학교 바이오 시스템공학과 (공학석사)
- 2023년 2월 : 서울대학교 바이오 시스템공학과 (공학박사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 국립농업과학원 농업공학부 농업연구사

<관심분야>

분광분석, 영상처리

<관심분야>

농업공학, 품질계측, 수확후공정공학

김 진 세(Jinse Kim)

[종신회원]



- 2000년 2월 : 고려대학교 물리학과 (물리학석사)
- 2018년 8월 : 충남대학교 농기계 공학과 (농기계공학박사)
- 2013년 10월 ~ 현재 : 국립농업과학원 수확후관리공학과 농업연구사

<관심분야>

물리학, 농업공학