

RESEARCH ARTICLE

저장 중 바나나 경도 예측을 위한 비파괴 기술의 적용 가능성 검토

조병효*, 김경철, 홍영기
농업공학부, 국립농업과학원

Examination of non-destructive technologies for banana firmness prediction during storage

Byeong-Hyo Cho*, Kyoung-Chul Kim, Youngki Hong

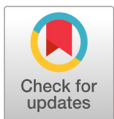
Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju 54875,
Republic of Korea

*Corresponding author: cho2519@korea.kr

Abstract

In this study, we aimed to examine the non-destructive measurement technologies for banana firmness, and two methods, such as digital image-based technology and compressed air-based deformation measurement technology, were used to nondestructively predict the banana firmness. A total of 130 mature green 'Cavendish' bananas imported from the Philippines were used as sample, and were stored in a incubator with temperature of 20°C and relative humidity of 90%. The firmness of banana was measured using destructive method after taking digital image and deformation of bananas, and ten bananas were used for each experiment. $L^*a^*b^*$ color space of banana surface was extracted from digital images using image processing, and the deformation of banana was measured using a deformation acquisition system. $L^*a^*b^*$ color space and deformation data of bananas were used as input data to develop banana firmness prediction model based on the support vector regression (SVR). As a result, the prediction models based on $L^*a^*b^*$ color space and deformation achieved accuracy with R^2 values of 0.617, 0.764 and RMSE of 12.518 N, 9.827 N, respectively. Therefore, it is considered that the technologies can be used to non-destructively predict the banana firmness. Nevertheless, it is necessary to carry out more experiments to improve the prediction accuracy in the future.

Keywords: Banana firmness, Deformation measurement, $L^*a^*b^*$ color space, Non-destructive measurement



OPEN ACCESS

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.20230001>

Received: October 17, 2022

Revised: January 03, 2023

Accepted: January 10, 2023

Copyright: © 2023 Journal of Agricultural Machinery Engineering



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

바나나(*Musa* AAA)는 열대 지역에서 재배되는 과일이며, 상업적으로 가치 있는 과일이다. 2020년 기준 전 세계 바나나 생산량은 약 119,833,677 ton이었으며, 국내의 바나나 수입량은 2021년 약 351,903 ton이었다(KREI, 2022). 한편, 바나나는 후숙과일 중 하나이기 때문에 일반적으로 덜 익은 상태로 수확되며, 저장 및 유통 중 후숙하여 소비자에게 판매된다. 바나나는 후숙을 통해 품질 변화가 발생하며, 익으면서 껍질 색이 녹색에서 노란색으로 변한다. 또한, 바나나의 경도는 부드러워지고, 전분은 설탕으로 전환되어 당도가 증가한다(Cho and Koseki, 2021). 이러한 이유로, 저장 및 유통 중 바나나의 품질 저하로 인한 과실 손실을 방지하기 위해서는 바나나의 성숙도를 예측하기 위한 수확 후 관리 방법이 필요하다.

경도는 과일의 성숙도를 평가하기 위해 일반적으로 많이 사용되는 인자이며, 바나나의 경도 또한 성숙도와 밀접한 관련이 있다고 알려져 있다. 이러한 이유로, 바나나의 경도를 비파괴적으로 예측하기 위한 연구가 많이 수행되었다. Sanaeifar 등(2016)은 MOS 기반의 전자코를 이용하여 바나나의 경도를 예측하고자 하였으며, 0.89의 R^2 에서 경도 예측이 가능하였다고 하였다. Xie 등(2018)은 바나나의 경도를 비파괴적으로 측정하기 위해 초분광 영상을 이용하였으며, 0.76의 R^2 에서 경도 예측이 가능하였다고 보고하였다. 그러나, 이러한 기술들은 고가이며, 이동성이 좋지 않고, 구현하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 이유로, 바나나를 보관하는 동안 품질 및 성숙도를 빠르고 간편하게 측정할 수 있는 비파괴 측정 기술이 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 바나나의 성숙도를 간편하게 측정할 수 있는 기술을 검토하고자 하였으며, 스마트폰 카메라로부터 얻은 디지털 영상 기반의 측정법과 압축공기 기반의 비파괴 변위 측정법을 이용하여 바나나의 성숙도를 예측하고자 하였다.

Materials and Methods

바나나 샘플

본 연구에서는 총 130개의 바나나를 실험재료로 사용하였으며, 바나나는 필리핀에서 수입된 'Cavendish' 품종이었다. 손상이 없는 바나나만을 선별하였으며, 선별된 바나나는 온도 20°C, 상대습도 90%의 조건에서 보관하였다. 실험은 총 13일 간 수행되었으며, 각 실험마다 10개의 바나나가 무작위로 선택되어 샘플로 사용되었다.

경도 측정

본 연구에서는 바나나의 성숙도를 비파괴적으로 예측하기 위한 품질 요인으로 경도를 선정하였으며, 경도는 바나나의 성숙도와 밀접한 관련이 있다고 알려져 있다(Cho and Koseki, 2021). 바나나의 경도는 껍질을 제거한 후에 상부, 중부, 하부 총 세 곳에서 측정하였다. 바나나 과육의 경도는 조직 손상이 발생할 때까지 필요한 최대 힘(N)으로 표시되었으며, Table-Top Universal Testing Instruments (EZ-SX, SHIMADZU, Kyoto, Japan)를 이용하여 측정하였다. 바나나의 경도 측정을 위해 10 mm의 원통형 프로브가 사용되었으며, crosshead의 하중 속도는 50 mm/min으로 하였다(Sanaeifar et al., 2016).

영상 취득 시스템 및 영상처리

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 영상 취득 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 영상은 나일론 재질의 사각 박스 안에서 촬영되었으며, 박스 안에는 두 개의 LED 보드(32 W)를 설치하여 영상 촬영 시 광조건을 일정하게 유지하였다. 영상 취득 장치로는 스마트폰 카메라(iPhone 5s, Apple, Cupertino, USA)가 사용되었으며, 바닥으로부터 수직방향으로 250 mm 떨어진 곳에 고정하여 영상을 취득하였다. 취득된 영상은 분석을 위해 컴퓨터로 전송되었다.

취득된 영상은 바나나 표면의 색공간 데이터를 추출하기 위하여 영상처리를 수행하였으며, 본 연구에서는 Python 프로그램(Python 3.8, Python software foundation, Wilmington, USA)을 사용하여 영상처리를 수행하였다. Fig. 2에는 영상처리를 위한 흐름도를 나타내었다. 먼저, 영상의 사이즈를 523×392 로 하였으며, 이후 K-means clustering 방법을 이용하여 영상의 배경을 제거하였다. 그 후, RGB 영상을 $L^*a^*b^*$ 영상으로 변환한 후에 바나나 영역의 색공간 데이터를 추출하였다. 추출된 색공간 데이터는 학습을 위해 사용되었다.

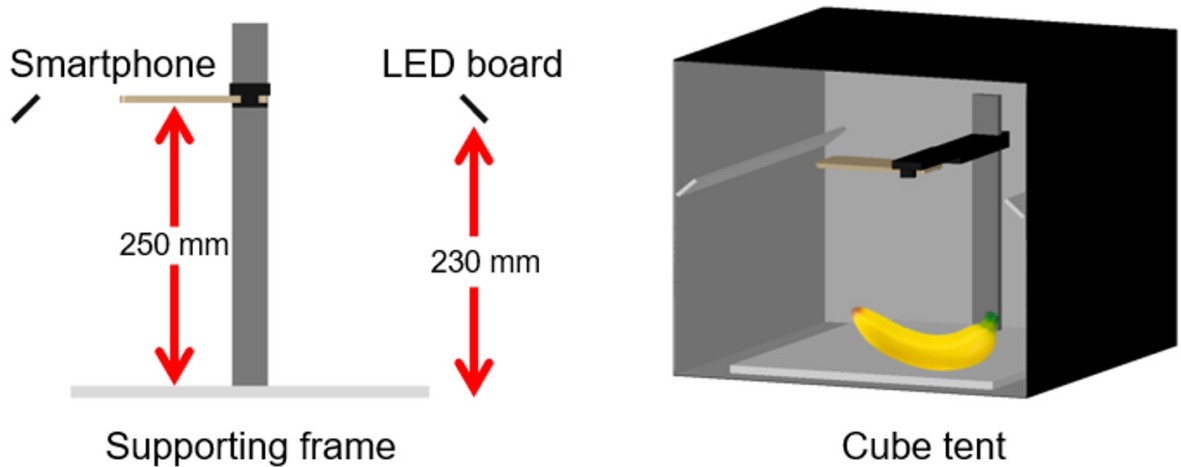


Fig. 1. The schematic diagram of image acquisition system (Cho and Koseki, 2021).

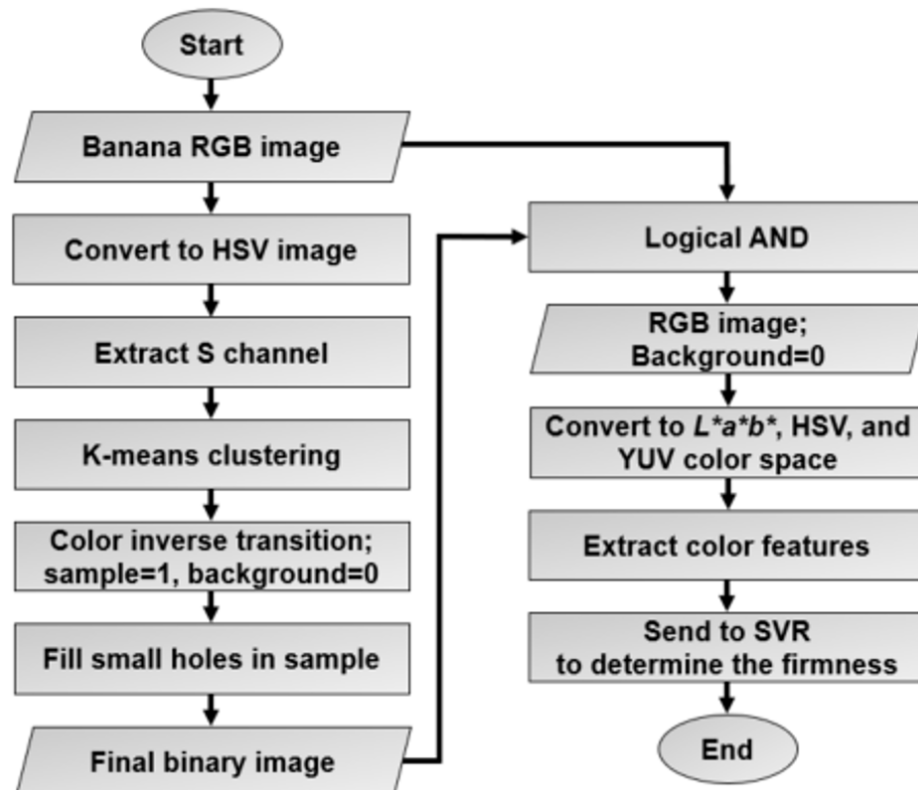


Fig. 2. The flowchart of the algorithm employed for $L^*a^*b^*$ value extraction of banana.

변위 측정 시스템

Fig. 3은 변위 측정 시스템을 나타낸 것이며, 레이저 거리 감지 시스템, 공기 압축기 및 컴퓨터로 구성되어 있다. 측정 원리는 에어 노즐을 통해 압축 공기를 바나나 표면에 방사하고, 이 과정에서 발생하는 변위를 레이저 거리 센서를 이용하여 측정한다. 에어 노즐과 바나나 사이의 거리는 50 ± 0.5 mm로 유지되며, 실험 중 압축 공기의 압력은 150 ± 5 kPa로 설정하였다. 측정된 변위는 실시간으로 컴퓨터로 전송된다.

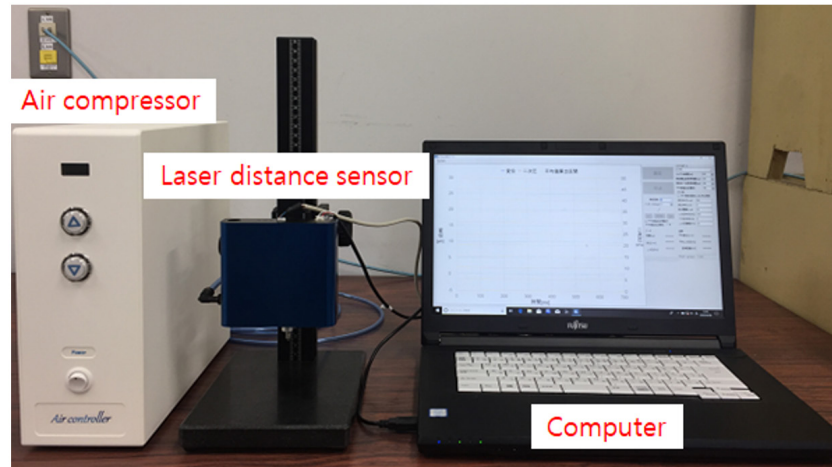


Fig. 3. The actual image of deformation measurement system.

데이터 분석

본 연구에서는 $L*a*b^*$ 색 공간 기반 및 변위 기반의 바나나 경도 예측모델 개발을 위해 총 130개의 바나나 데이터가 사용되었다. 데이터 세트에는 $L*a*b^*$ 색 공간, 변위 및 경도 데이터가 포함되며, 각각 학습을 진행하였다. 데이터 세트는 학습 데이터(training data, 80%)와 검증 데이터(testing data, 20%)로 나누어 모델의 성능을 평가하였다. SVR (Support vector regression)은 패턴 인식, 자료 분석 등을 위해 주로 이용되는 기계학습 모델 중 한 가지이며, 특히 데이터 수가 적은 경우에 효과적이라고 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 SVR 모델을 이용하여 예측 모델을 개발하였다. 또한, 학습 데이터의 학습 중 과적합 방지를 위해 Leave one-out cross-validation 방법을 적용하였다. SVR 모델의 파라미터는 Grid search 방법을 적용하여 선정되었으며, 파라미터 C와 gamma는 $L*a*b^*$ 색 공간 기반 모델의 경우 350, 0.01, 변위 기반 모델의 경우에는 각각 300 및 0.0001 이었다. 이를 통해 개발된 모델은 검증 데이터를 이용하여 각 모델의 예측성능을 비교 및 평가하였으며, 예측 성능은 R^2 (Coefficient of determination)와 RMSE (Root mean square error)를 이용하여 나타내었다.

통계 분석

본 연구에서는 바나나의 경도와 색공간, 변위 사이의 상관분석을 위해 이변량 상관 분석을 수행하였다. 통계 분석에는 SPSS 프로그램(IBM SPSS Statistics 20.0, IBM, Armonk, USA)이 사용되었으며, 유의성은 Pearson's test를 통해 결정되었다.

Results and Discussion

경도 변화

Fig. 4는 저장기간에 따른 바나나의 경도 변화를 나타낸 것이다. 바나나 경도의 경우에는 저장기간이 길어질수록 감소하는 경향을 나타내었으며, 72.33 N (0일차)에서 약 5.77 N (12일차)까지 감소하였다. 이처럼, 바나나의 경도가 저장기간이 증가함에 따라 감소한 이유는 효소 분해에 의한 세포벽 구조의 변화와 전분 분해 때문이라고 판단된다(Soltani et al., 2011; Sanaeifar et al., 2016). 이와 같이, 저장기간에 따른 경도 변화는 유의한 차이를 나타내었기 때문에 바나나 성숙도 예측을 위한 요인으로 사용될 수 있다고 사료된다.

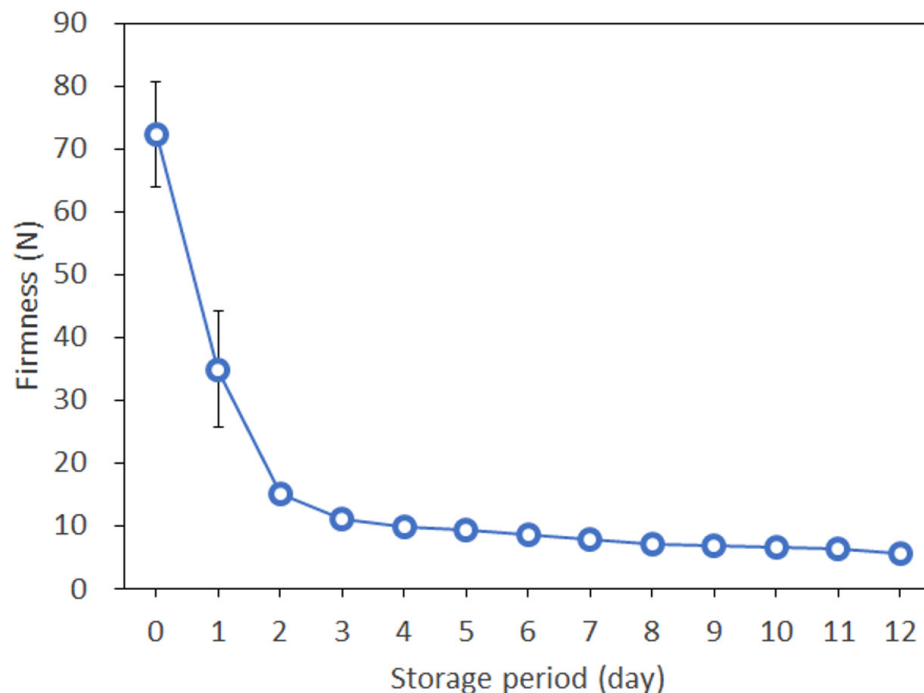


Fig. 4. The changes of banana firmness according to storage period.

바나나 색공간 및 변위

저장기간에 따른 바나나의 색공간 및 변위의 변화는 Fig. 5에 나타내었다. L^* 값은 저장기간이 증가할수록 감소하다가 노화가 시작되면서 약간 증가하는 경향을 나타내었으며, 바나나의 성숙도와 밀접한 관련이 있는 경도와 유의한 상관관계를 나타내었다($p < 0.01$). a^* 값의 경우에는 저장기간이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 바나나의 껍질 색갈이 녹색에서 황색으로 변하기 때문으로 판단된다. 또한, a^* 값의 경우에는 바나나의 경도와 음의 상관관계($p < 0.01$)를 나타내어 L^* 값과 a^* 값을 이용할 경우 경도 예측이 가능할 것이라고 사료된다. b^* 값은 점차적으로 증가하다가 노화가 시작되면서 감소하였으며, 이는 바나나 껍질 색깔이 녹색에서 황색으로 변하고 노화가 시작되면서 갈색 반점이 생겼기 때문이라고 사료된다.

변위의 경우에는 a^* 값과 마찬가지로 저장기간에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 바나나 경도 변화와 밀접한 관계가 있다고 판단된다($p < 0.01$).

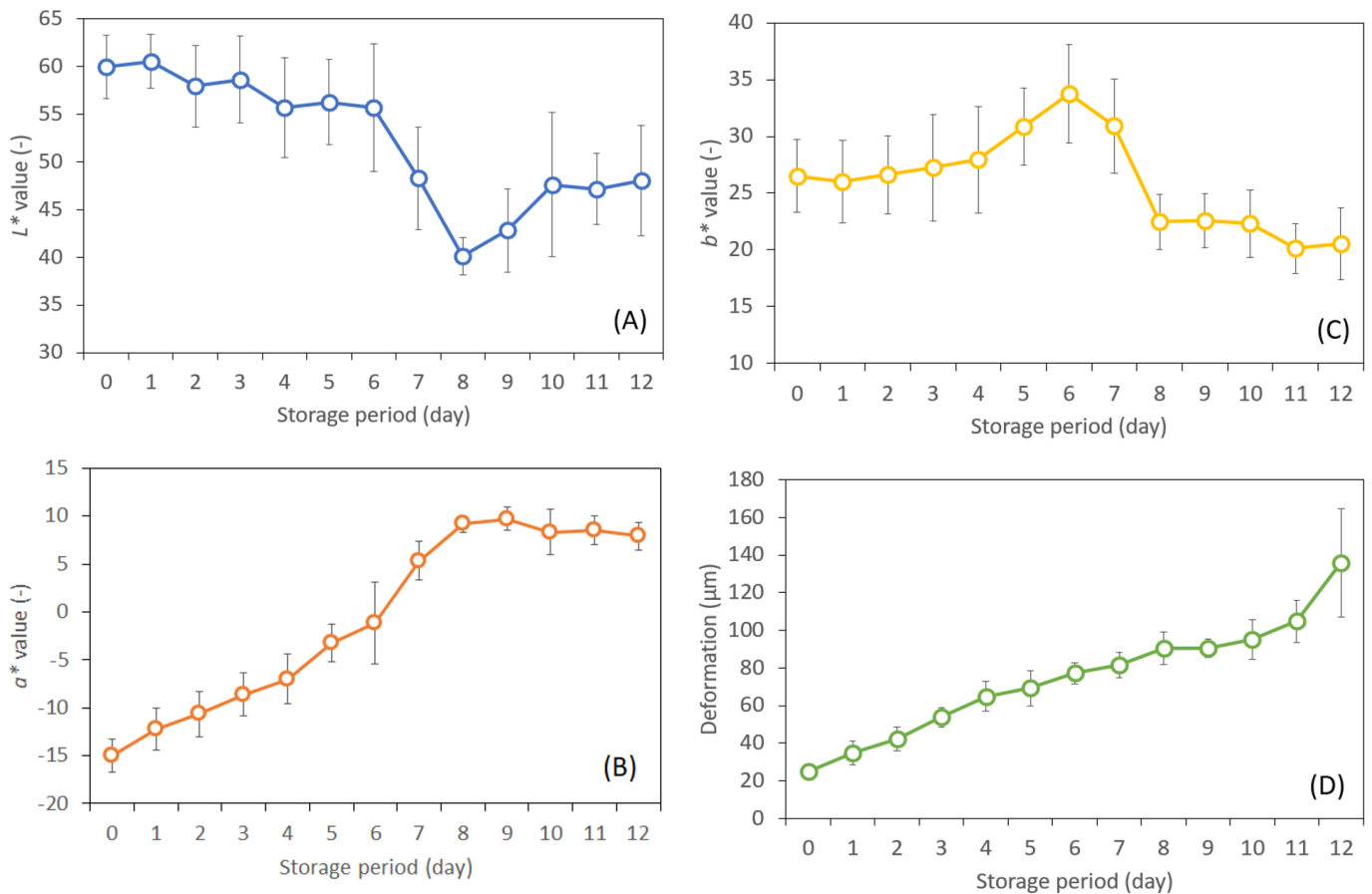


Fig. 5. The changes of banana color spaces and deformation according to storage period: (A) L* value, (B) a* value, (C) b* value, and (D) Deformation.

예측 모델

Fig. 6은 색 공간 및 변위 기반의 모델로부터 얻은 테스트 세트의 경도 예측 결과를 나타낸 것이다. 그래프의 x축은 파괴적인 방법으로 측정된 실제 경도 값을 나타내며, y축은 SVR 모델을 통해 얻은 예측 값을 나타낸다. 색 공간을 기반으로 개발된 예측 모델의 경우 R^2 는 0.617, RMSE는 12.518 N의 정확도를 나타내었다. 변위 데이터를 기반으로 개발된 예측 모델의 정확도는 R^2 의 경우 0.764, RMSE는 9.827 N로 나타났다. 이처럼, 변위 기반의 예측 모델의 정확도는 색 공간 기반의 예측 모델보다 약간 높은 경향을 나타내었다. 이러한 이유로는 바나나의 특성에 따른 것으로 사료된다. 먼저, 바나나의 색 변화의 경우에는 저장환경에 따라 차이가 발생할 수 있으며, 같은 저장고 내에서도 온도 편차로 인하여 색 변화 차이가 발생할 수 있다. 한편, 변위는 한 점의 최종 위치와 처음 위치 사이의 차이를 물리적으로 나타내는 것이며, 이는 바나나의 경도 변화와 직접적인 연관이 있을 수 있는 요인이다. 따라서, 색 공간 기반의 모델과 비교하여 비교적 높은 정확도에서 바나나의 경도 예측이 가능하였다고 사료된다. 그러나, 두 예측 모델 모두 바나나의 경도 예측을 위해서는 낮은 정확도를 나타내었으며, 모델의 정확도를 높이기 위해서는 더 많은 실험을 통해 샘플 수를 늘릴 필요가 있다고 판단된다.

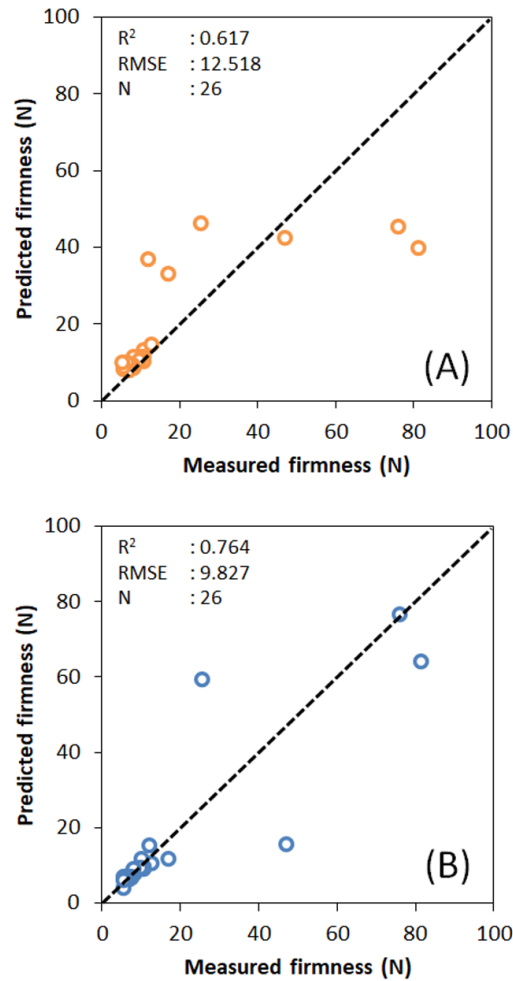


Fig. 6. The match between measured and predicted firmness of banana for testing set using (A) $L^*a^*b^*$ value obtained from digital images and (B) Deformation.

Conclusion

본 연구에서는 바나나의 경도를 비파괴적으로 예측할 수 있는 기술을 검토하고자 하였으며, 디지털 영상 기반의 측정법과 압축공기 기반의 비파괴 변위 측정법을 이용하였다. 이를 위해 외부 손상이 없는 총 130개의 ‘Cavendish’ 바나나가 실험 재료로 사용되었으며, 바나나는 녹색의 미숙과 상태에서 구매하여 온도 20°C, 상대습도 90%의 인큐베이터에서 저장되었다. 매일 10개의 바나나를 사용하여 13일간 실험을 진행하였으며, 디지털 영상 촬영 및 변위 측정 후에 파괴적인 방법으로 바나나의 경도를 측정하였다. 디지털 영상의 경우 영상처리를 통해 바나나 표면의 $L^*a^*b^*$ 색 공간을 평균 값으로 추출하였다. 바나나 표면의 변위는 3반복 측정하여 평균 값으로 계산하였으며, $L^*a^*b^*$ 색 공간과 변위 데이터는 각각 SVR 모델의 학습을 위해 입력 데이터로 사용되었다. 그 결과, $L^*a^*b^*$ 색 공간 기반의 예측모델의 경우 R^2 는 0.617, RMSE는 12.518 N의 정확도에서 바나나의 경도 예측이 가능하였으며, 변위 기반의 예측모델의 경우에는 0.764의 R^2 , 9.827 N의 RMSE에서 경도 예측이 가능하였다. 이처럼, 변위 기반의 예측 모델의 정확도는 색 공간 기반의 예측 모델보다 약간 높은 경향을 보였으나, 두 모델 모두 R^2 가 0.8 이하로 정확도 개선을 위해서는 더 많은 실험이 필요하다고 판단된다. 그럼에도 불구하고, 본 연구를 통해 비파괴적으로 바나나의 경도 예측을 위해 디지털 영상과 압축공기 기반의 변위 측정장치의 사용 가능성을 확인할 수 있었다.

References

- Cho BH, Koseki S. 2021. Determination of banana quality indices during the ripening process at different temperatures using smartphone images and an artificial neural network. *Scientia Horticulturae* 288: 110382. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110382>
- FAOSTAT. 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Assessed in <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> 15 July 2022.
- KREI. 2022. Agricultural Outlook service. Assessed in <https://aglook.krei.re.kr> 16 July 2022.
- Marriott J, Robinson M, Karikari SK. 1981. Starch and sugar transformation during the ripening of plantains and bananas. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 32: 1021-1026. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740321011>
- Sanaeifar A, Bakhshipour A, de la Guardia M. 2016. Prediction of banana quality indices from color features using support vector regression. *Talanta* 148: 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.10.073>
- Soltani M, Alimardani R, Omid M. 2011. Evaluating banana ripening status from measuring dielectric properties. *Journal of Food Engineering* 105: 625-631. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.032>
- Xie C, Chu B, He Y. 2018. Prediction of banana color and firmness using a novel wavelengths selection method of hyperspectral imaging. *Food Chemistry* 245: 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.079>