



자기공명영상 기술의 농식품 분야 활용 연구

임수연¹ · 김성민^{2,3,*}

¹국립원예특작과학원 저장유통과, ²전북대학교 생물산업기계공학과, ³전북대학교 농업기계ICT융합연구소

Study on the applications of magnetic resonance imaging technique to agricultural and food products

Sooyeon Lim¹ and Seong Min Kim^{2,3,*}

¹Postharvest Technology Division, National Institute of Horticultural Herbal Science, Jeonbuk 55365, Korea

²Department of Bioindustrial Machinery Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk 54896, Korea

³Institute for Agricultural Machinery & ICT Convergence, Jeonbuk National University, Jeonbuk 54896, Korea

Abstract

This study examined nondestructive analysis of internal quality characteristics and physical changes in fresh agricultural products using magnetic resonance imaging (MRI) and evaluated its potential as a quality assessment tool. Korean melons, pears, and onions were selected, and changes in internal tissues, damage, and heterogeneity were qualitatively analyzed. After seven days of storage, moisture was redistributed from the flesh to the peel and stem-end regions in melon samples, resulting in increased signal intensity in the two regions on MRI. In pear samples, normal tissues exhibited strong and uniform signal intensity during storage, whereas damaged tissues showed reduced signal intensity and enlarged abnormal regions, owing to moisture loss and tissue degradation, respectively. In onion samples, the signal intensity of the central sprouting region was approximately twice that of the surrounding shell tissue, and the outer shell tissue exhibited higher signal intensity than the inner shell tissue due to magnetic susceptibility. These results demonstrate that MRI can evaluate the internal quality of fresh agricultural products in a nondestructive manner and grade them objectively, suggesting broad application potentials in agro-food science field.

Keywords: Magnetic resonance imaging, Korean melon, Pear, Onion, Internal quality factor

서론

신선 농산물은 현대 소비자의 요구를 충족하기 위해 가공 및 유통 전 과정에서 지속적인 품질 측정과 모니터링이 필요하다. 생물학적 특성과 환경 조건, 재배 및 수확 방식의 차이로 인해 대부분의 농산물은 동일한 성숙 단계에서 수확되지 않는다. 현대적 수확 기술은 생산 비용을 절감하지만, 동시에 정확하고 효율적인 선별 시스템의 필요성을 증가시킨다. 따라서 선별 과정을 거친 신선 농산물이더라도 시장 가치를 극대화하기 위해 명확한 품질 기준에 따라

등급화될 필요가 있다.

품질 특성은 일반적으로 외부 요인과 내부 요인으로 구분된다. 외부 요인에는 크기, 형태, 표면 색, 결점, 명 등이 포함되며, 내부 요인에는 공동(cavity), 조직 결합, 이질성, 화학 조성 등이 포함된다 (Back et al., 2020). 특히 내부의 물리화학적 특성은 품질 등급 결정에 중요한 요소이지만, 이러한 특성은 환경적 생육 조건, 수확 시 성숙도, 생리적 이상 등에 의해 영향을 받기 때문에 기존의 비파괴적 방법으로 평가하기 어렵다.

이러한 문제를 해결하기 위해 농산물의 광학적, 음향적, 열적, 전

Received: Jan 15, 2026 / Revised: Jan 19, 2026 / Accepted: Jan 21, 2026 / Published: Feb 19, 2026

Corresponding author: Seong Min Kim, Department of Bioindustrial Machinery Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk 54896, Korea
 E-mail: smkim@jbnu.ac.kr

Copyright © 2026 Korean Society for Food 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.

자기적 특성을 이용하는 다양한 영상 기술이 연구되어 왔다. 그중 핵자기공명(nuclear magnetic resonance, NMR) 및 X-ray 기반 영상 기술은 실제 내부의 단면 영상을 제공할 수 있는 장점이 있다 (Ahmed et al., 2017). 특히 NMR 특성을 기반으로 하는 자기공명영상(magnetic resonance imaging, MRI) 기술은 지난 수십 년간 빠르게 발전해 왔으며, 농업 및 식품 과학 분야에 적용 범위가 확대되고 있다. MRI는 생물학적 소재의 내부 생리 현상 관찰과 품질 평가를 비파괴적으로 수행할 수 있으며, 연조직 내 수분의 분포와 자기적 환경을 고해상도로 시각화할 수 있다는 장점을 지닌다. 대부분의 농산물이 많은 수분 또는 지방을 함유하고 있고, 이러한 특성으로 인해 품질 평가, 조직 구조 분석 및 조직화학적 특성 규명 등 다양한 수확 후 연구 분야에서 유용성이 입증되고 있다(Clark et al., 1997; Ozel & Oztop, 2021).

수많은 연구자들에 의해 농식품 분야에 자기공명영상 기술을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, Lim et al. (2003)은 MRI를 이용하여 신선 인삼의 재배 연한을 확인하는 방법과 정상 및 이상 조직의 구분 가능성을 확인하였다. Joyce et al. (2002)은 MRI를 통해 망고의 후숙 상태를 모니터링 하였으며, Kim et al. (2008)은 자기공명영상으로부터 궤의 씨와 냉해 부위를 검출하는 방법을 연구하고 이를 활용하여 온라인 궤 품질 검출 시스템 개발 가능성을 제시 하였다. 또한 Taglienti et al. (2009)은 저장 조건이 키위 조직 구조 변화에 미치는 영향을 평가하였다. Patel et al. (2015)은 다양한 MRI 기술을 이용한 농식품 품질 분석 연구를 정리하며, 자기공명영상의 신호 강도가 농식품의 물리화학적 차이에 따라 달라진다는 점을 강조하였다. 더불어 MRI는 성숙도 및 품질 평가뿐 아니라 생리적 변화 과정을 관찰할 수 있다는 장점도 제시되었다. Baek et al.은 방울토마토를 여섯 단계의 성숙도에서 수확하여 각 단계별로 자기공명영상을 획득하고, 내부 조직 구조와 성숙도 간의 연관성을 정성적·정량적으로 분석하였다.

Guiheneuf et al. (1996)은 고자장 자기공명영상 장치를 활용하여 염지한 돼지고기 조직의 자기공명 특성을 측정하는 연구를 수행하였으며 Bertram et al. (2004)은 마이크로 자기공명영상 장치를 이용하여 토끼 근육의 미세 구조를 분석하였다. 그리고 Duce et al. (2011)은 메추리알의 부화 과정을 고자장 7.1 T MRI 장치를 이용하여 3차원 이미지를 처리하여 모니터링 하였고, Kim & Kim (2024)은 저자장 1 T 산업용 MRI 장치를 이용하여 계란을 부화시키면서 무정란을 조기에 판별할 수 있는 기술을 개발하였다.

자기공명영상(MRI) 기술은 농산물의 내부 조직 변화, 품질 평가, 생리적 변화 분석에 매우 효과적인 비파괴 분석 기법이며, 내부 조직 변화 체계를 가장 명확하게 시각화할 수 있는 기술로 평가된다. 본 연구의 목적은 자기공명영상 기술을 활용하여 배, 참외, 그리고

양파 등의 신선 농산물의 내부 품질 자기공명 영상 특성과 물리적 변화를 시각화 하고 비파괴적으로 분석하며, 이를 품질평가 지표로 활용할 가능성을 구명하는 것이다.

재료 및 방법

재료 및 자기공명영상 획득

실험에 사용된 참외, 배, 양파 시료들은 국립원예특작과학원 저장유통과(Wanju-gun, Korea)에서 제공하였고 MRI 획득 실험은 전북대학교 농업기계 ICT융합 연구소(Jeonju-si, Korea)에 설치된 1.0 Tesla 영구자석 산업용 MRI 시스템을 이용하여 자기공명영상을 획득하였다. Fig. 1과 같이 MRI를 획득하기 위해 내부 직경이 110 mm인 원통형 RF 코일을 사용하였다. 참외 저장 실험에 사용된 “강찬꿀” 참외 시료는 20개이며 상온 약 20℃에서 8일간 저장하면서 0일차, 1일차, 3일차, 5일차 그리고 7일차 등 5회 영상을 획득하였으며 영상 획득 전 무게를 측정하였다. 자기공명영상 파라미터 TR과 TE는 각각 12 ms와 4 ms로 설정하고 Fig. 2와 같이 횡단면(axial) 방향과 관상면(coronal) 방향으로 64 슬라이스(slice) 영상을 얻었으며 각 슬라이스 두께(slice thickness)는 2 mm로 설정하였다. 배 저장 실험에 사용된 “신고” 배 시료는 10개이며 2024년 이상 고온 현상에 노출되어 내부 조직에 이상이 있는 시료를 사용하였다. 시료는 섭씨 1℃에서 약 300일간 저장하면서 약 한 달에 한 번씩 총 9회 영상을 획득하였으며 영

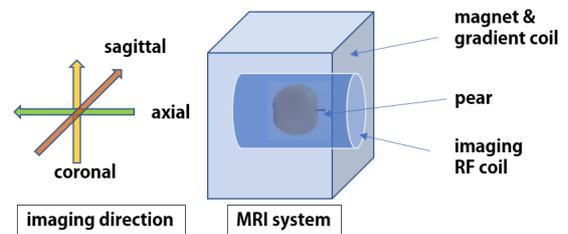


Fig. 1. Schematic diagram of a magnetic resonance imaging system showing a sample in an RF imaging coil and imaging directions.

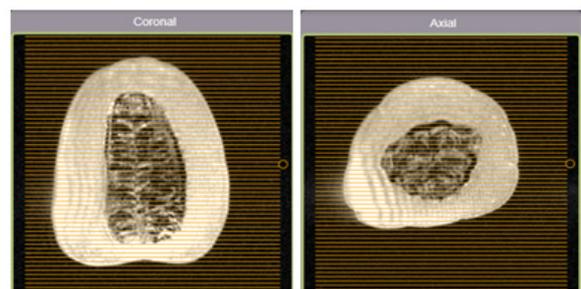


Fig. 2. Magnetic resonance images of a Korean melon showing image acquisition directions, axial (left) and coronal (right), and image slices on coronal and axial planes respectively.

상 획득 전 무게를 측정하였다. MRI 파라미터 TR과 TE는 각각 12 ms와 4 ms로 설정하였다. Fig. 3과 같이 횡단면 방향으로 64 슬라이스 영상을 얻었으며 각 슬라이스 두께는 1.5 mm로 설정하였다. 양파 내부의 맹아(sprouting) 생성 여부를 판별하기 위해 50개의 “키타마루” 양파 시료를 제공 받아 횡축면과 시상면의 MRI를 획득하였다. 자기공명영상 파라미터 TR과 TE는 각각 12 ms와 4 ms로 설정하고 횡단면(axial) 방향과 관상면(coronal) 방향으로 64 슬라이스(slice) 영상을 얻었으며 각 슬라이스 두께(slice thickness)는 1.5 mm로 설정하였다.

가로와 세로 방향의 영상획득 범위는 각각 110 mm로 설정하였으며 획득한 영상은 256×256 픽셀의 해상도를 가지고 있는 DICOM 형식이다. MRI에서 하나의 화소(pixel)는 넓이와 두께 정보를 가지고 있기 때문에 voxel (volume element)이라 불린다.

자기공명영상 펄스 시퀀스

자기공명영상 펄스 시퀀스 중 대상 시료의 빠른 내부 변화가 일어나는 경우나 영상 획득 시간을 단축하기 위해 경사예코(gradient recalled echo, GRE) 펄스 시퀀스를 많이 사용한다(Baek et al., 2020). GRE 펄스 시퀀스에서 영상 인자 중 하나인 플립각(flip angle, FA)은 자기공명영상에서 좀 더 자세히 알고자 하는 부분과 관계가 없는 다른 부분들 간의 차이를 구별 및 분석하기 위해 사용된다(Baek & Kim, 2020). 따라서 본 연구에서는 대상 시료의 자기공명영상 특성을 분석하였고 관찰 부위에 따라 플립각을 다르게 하면서 그 효과를 분석하였다.

결과 및 고찰

참외 저장 실험에서 시료 20개의 8일간 무게 감소율은 평균 3.35%이었으며 무게 감소율이 4.20%로 가장 큰 시료를 분석하였다. MRI 획득 시 플립각은 5°로 하였고 voxel당 부피는 0.369 mm³/voxel로 계산되었다. Fig. 4는 7일차 참외 시료의 횡단면과 관상면 영상을 획득한 것이다. 횡단면 영상에서는 수관부와 체관부(tube), 씨를 많이 포함하

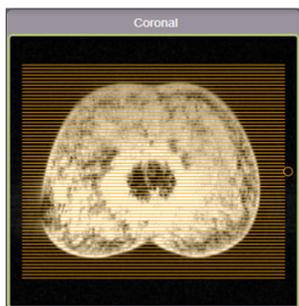


Fig. 3. Magnetic resonance image of an abnormal pear showing axial image slices on a coronal plane.

고 있는 태좌부(placenta region) 구조 그리고 껍질(rind) 부분의 골(ridge)과 산(body) 부분을 쉽게 관찰할 수 있었으며 관상면 영상에서는 꼭지(stem end) 부분과 더 넓은 범위의 태좌부 씨의 구조를 관찰할 수 있었다. MRI에서는 수분의 양이나 활성도가 높은 부분에서 다른 부분보다 강한 영상 신호를 보인다. 저장 7일 후 과육 내부에 있던 수분들이 껍질이나 꼭지 부분으로 이동하여 신호가 강하게 발생하는 것을 알 수 있다. 두 영상 좌측 하단부의 신호가 강하게 나오는 부분은 불균일한 자기장에 의해 발생한 일종의 노이즈(artifact)라고 생각할 수 있다. Fig. 5에 7일간 저장하면서 얻은 시료의 횡단면 MRI와 중앙부의 1차원 영상 강도 프로파일을 나타냈다. 0일차 영상에서는 과육(flesh), 체관 및 수관 부, 껍질 부의 영상 농도 차이가 많이 나지 않고 거의 같으나 3일차 이후에는 껍질 부와 체관 및 수관 부의 영상 농도가 과육 부분보다 커지는 것을 알 수 있다. 이는 저장 중 과육 부분의 수분이 체관 및 수관 부를 통해 이동하고 껍질을 통해 시료 주위의 대기로 증발한다는 것을 추측할 수 있으며 이는 저장 중 시료의 무게가 감소하는 것으로도 수분이 시료로부터 대기로 이동한다는 것을 알 수 있다. Fig. 6에 저장 0일차, 3일차, 7일차 관상면 MRI와 중앙부 꼭지 꼭

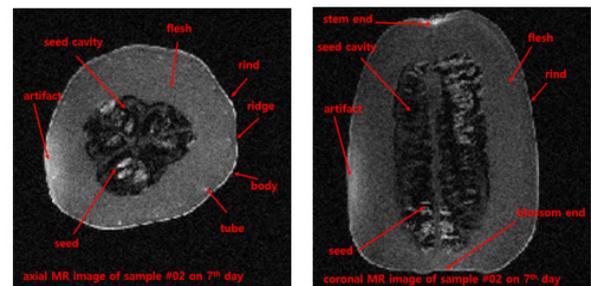


Fig. 4. Magnetic resonance images of a Korean melon with structural explanations of axial plane (left) and coronal plane (right) acquired on 7th day of storage.

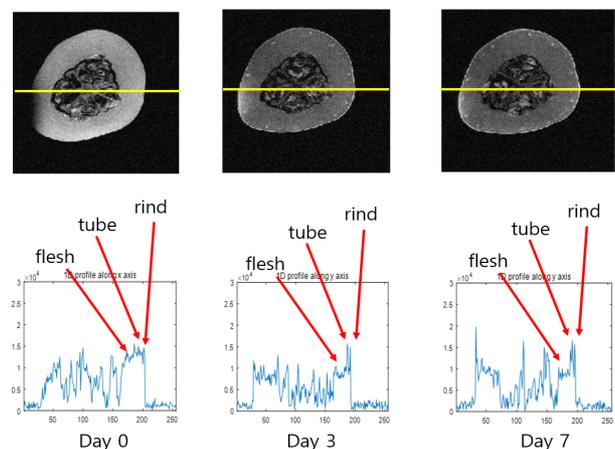


Fig. 5. Acquired magnetic resonance images of Korean melons of axial plane (top row) and their 1 dimensional profiles (bottom row) along x axis (yellow lines) acquired on 0th, 3rd, and 7th day of storage.

에서 꽃받침 쪽의 1차원 영상 강도 프로파일을 나타냈다. 횡단면 MRI 분석에서와 같이 저장 3일 후부터 꼭지 쪽 부분의 영상 강도가 꽃받침 쪽보다 급격히 증가함을 알 수 있다. 이것은 참외 내부의 수분이 꼭지 쪽으로 이동하여 외부로 이동함을 알 수 있다.

이렇게 참외 저장 실험에서 관찰된 과육 내부 수분의 겹질 및 꼭지 방향 이동 현상은 저장 중 증량 감소와 직접적으로 연관된 내부 생리 변화로 해석될 수 있다. Clark et al. (1997)과 Joyce et al. (2002)은 과실류에서 MRI 신호 강도가 수분 활성도와 밀접한 관련이 있음을 보고한 바 있으며, 본 연구에서도 저장 기간이 경과함에 따라 과육 중심부의 신호 강도가 감소하고 외곽부 및 꼭지 부위에서 신호가 증가하는 양상이 확인되었다. 이는 참외 저장 중 수분 이동 경로를 비파괴적으로 규명할 수 있음을 시사하며, 기존 증량 감소율 측정이나 파괴적 분석으로는 확인이 어려웠던 내부 수분 이동 메커니즘을 시각적으로 제시한 점에서 의의가 있다.

배 저장 실험에서 시료의 311일 동안의 무게 감소율은 평균 3.50%이었으며 무게 감소율이 가장 큰 시료는 9.10%이었다. MRI 획득 시 플립각은 5°로 하였고 voxel 당 부피는 0.277 mm³/voxel로 계산되었다. Fig. 7은 내부 조직 파열이 있는 정상 조직 시료, 내부 이상 조직 시료 그리고 내부에 부패 결함이 있는 시료를 보여주고 있다. 배는 크게 과육이 있는 부분(mesocarp)과 씨앗이 있는 씨방 부분(endocarp)으로 나눌 수 있다. 정상적인 조직은 영상 신호 강도가 강하고 균일하나 비정상적인 조직은 조직 손상으로 인한 수분 감소로 신호가 약해 검은색으로 나타남을 알 수 있고 조직 이상은 씨방 부분에서 먼저 발생함을 알 수 있다. 또한 외부 충격에 의해 내부 손상이 발생하면 조직 세포가 파괴되어 수분이 조직 사이로 나와 초기에는 강한 신호를 발생하나 시간이 경과하면 수분이 증발하여 신호가 약하게 나타난다. 그리고 외부 또는 내부의 곰팡이 침

투 등으로 인해 내부 조직이 부패하기 시작하면 부패가 일어나는 부분에서는 생리활성도가 증가하여 정상 조직보다도 강한 신호를 나타내며 시간이 오래 경과한 중심 부분에서는 수분이 증발하여 신호가 약하게 발생함을 알 수 있다. Fig. 8은 시료의 저장 기간 중 내부 조직 변화를 보여주는 자기공명영상과 이 영상들의 중앙부 1차원 프로파일 그래프를 나타내는 그림이다. 저장 32일째 획득한 2차원 영상에서는 신호의 강도가 작은 이상 조직의 영역이 적었으나 저장 기간이 155일이 지나면서 이상 조직의 영역이 급격히 확대됨을 알 수 있다. 또한, 저장 기간이 32일째 얻은 영상에서 정상 조직으로 예측되는 부위가 저장 기간이 155일 이후부터 이상 조직으로 변하는 것을 알 수 있다. 1차원 프로파일 그래프 분석에서는 저장 기간 중 중앙부 정상 조직의 영상 강도의 변화는 크지 않았으며 311일 저장 후 얻은 1차원 프로파일에서 이상 조직의 확대로 신호의 강도가 정상 조직보다 훨씬 작음을 관찰할 수 있었다.

배 저장 실험에서는 정상 조직과 이상 조직 간의 MRI 신호 강도 차이가 명확히 구분되었으며, 저장 기간이 증가함에 따라 이상 조직의 면적이 확대되는 경향이 관찰되었다. 이는 Taglienti et al. (2009)

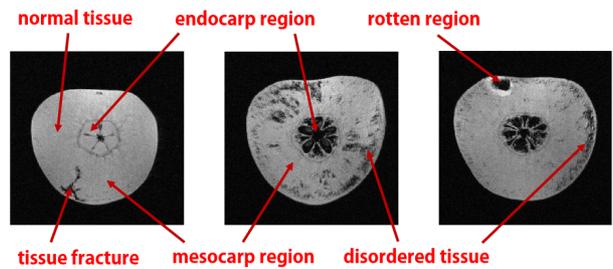


Fig. 7. Magnetic resonance images of pears representing a normal sample with internal tissue fracture (left), an abnormal sample with disordered tissues (middle), and an abnormal sample with rotten region and disordered tissues (right).

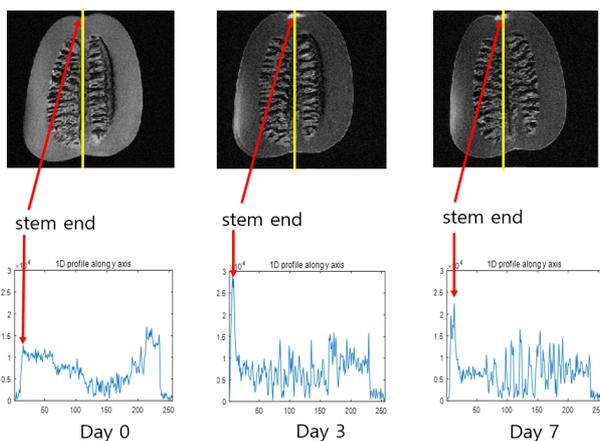


Fig. 6. Acquired magnetic resonance images of Korean melons of coronal plane (top row) and their 1 dimensional profiles (bottom row) along y axis (yellow lines) acquired on 0th, 3rd, and 7th day of storage.

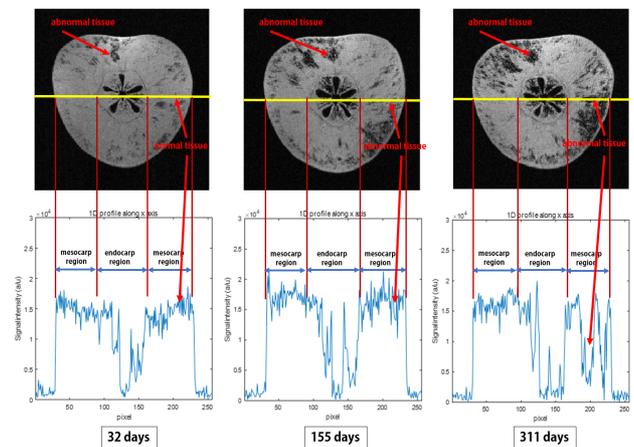


Fig. 8. Magnetic resonance images of a pear acquired on 32nd day (top row on left), 155th day (top row on middle), and 311st day (top row on right) of storage, and their 1 dimensional profiles (bottom row).

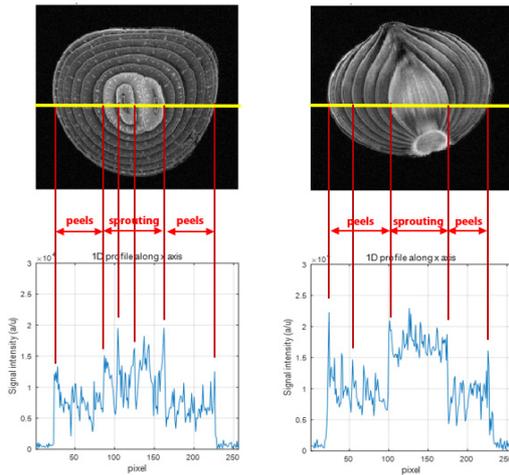


Fig. 9. Magnetic resonance images of an onion (top row) acquired in axial direction (left) and coronal direction (right) of an onion sample, and their 1 dimensional profiles (bottom row).

이 키워 저장 중 조직 구조 변화와 MRI 신호 변화의 상관성을 보고 한 결과와 유사한 경향으로, 배에서도 저장 중 수분 손실과 조직 붕괴가 MRI 신호 감소로 반영됨을 확인할 수 있었다. 특히 본 연구에서는 고온 스트레스 이력이 있는 배 시료를 활용하여, 저장 초기에 외관상 정상으로 판단되던 조직이 시간이 경과함에 따라 이상 조직으로 전이되는 과정을 비파괴적으로 추적할 수 있음을 제시하였다. 이는 저장-유통 단계에서 내부 장애 발생 가능성을 조기에 예측할 수 있는 기술적 가능성을 보여준다.

양파 맵아 판별 실험에서는 MRI 획득 시 플립각은 15°로 하였고 voxel 당 부피는 0.277 mm³/voxel로 계산되었다. Fig. 9는 양파 시료의 횡단면과 관상면 자기공명영상과 이 영상들의 중앙부 1차원 프로파일 그래프를 나타내는 그림이다. 이 그림에서 보면 중앙의 맵아 부분의 영상 강도는 주위 껍질(peel) 부분의 영상 강도보다 2배 정도 높음을 확인할 수 있으며, 이는 해당 부위의 높은 수분 함량과 생리적 활성 증가에 기인한 것으로 판단된다. 기존 연구에서 Kim & Kim (2024)은 계란의 배아 발달을 MRI로 조기 판별할 수 있음을 보고하였으며, 본 연구 결과는 이를 구근류 작물인 양파에 적용하여 내부 맵아 발생 여부를 외관 손상 없이 판별할 수 있음을 보여준다. 또한 껍질 부분에서는 외피 부분의 영상 강도가 같은 껍질 내부 조직보다 더 강한 신호를 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 양파 껍질 부분의 자기장과 반응하는 물질로 인해 자기 감수율(magnetic susceptibility) 차이에 의해 신호가 강하게 발생하는 것으로 추정할 수 있다(Begh et al., 2012).

요약

산업용 MRI 장치를 이용하여 참외와 배의 저장 중 내부 물리화학

적 변화를 관찰하였고 양파 구근의 맵아 발생 여부를 관찰하였다. 참외 저장 실험에서는 저장 기간이 늘어날수록 참외의 무게는 감소하며 이는 내부 수분의 감소와 관계가 밀접하다. 저장 중 내부의 수분은 수관이나 체관을 통해 껍질로 이동한다는 것을 횡단면 자기공명영상에서 확인하였고 관상면 영상에서는 꼭지 부분으로 수분이 이동하는 것을 확인하였다. 또한 배 저장 실험에서도 저장 기간이 늘어날수록 배의 무게는 감소하며 이는 내부 수분의 감소 및 조직 변화와 관계가 있음을 확인하였다. 저장 중 내부의 수분의 이동에 의한 조직 변화도 관찰되었고 저장 기간이 늘어날수록 비정상 조직의 면적도 증가함을 실험을 통해 확인하였다. 그리고 내부 조직 파괴 및 부패 결함에서도 수분의 변화에 의한 조직 변화를 확인할 수 있었다. 양파 구근의 횡단면과 관상면 영상을 얻어 맵아 생성 여부를 관찰하였다. 두 영상 모두에서 맵아 부분의 영상 강도가 높았는데 이는 이 부분에서 수분이 껍질 부위보다 많고 생리적 변화가 활발히 이루어지고 있어 수분의 활성도가 높음을 확인할 수 있다. 맵아는 한 개 또는 그 이상 발생할 수 있으므로 횡단면 자기공명영상을 얻어 맵아의 발생 개수를 확인할 수 있을 것으로 생각된다. 자기공명영상 기술을 활용하여 3가지 신선 농산물의 물리화학적 내부조직 변화를 정성적으로 분석하였고 이 기술을 활용하면 다른 신선 농축산식품의 내부 정보를 비파괴적으로 분석할 수 있다는 것을 확인하였다.

이와 같은 결과는 MRI 신호 강도 및 분포 변화가 신선 농산물의 내부 수분 이동, 조직 손상 및 생리 활성 변화와 밀접하게 연관되어 있음을 보여주며, MRI 기반 내부 품질 평가 지표 설정 가능성을 시사한다. 본 연구는 자기공명영상 기술을 신선 농산물의 저장-유통 단계 품질 평가에 적용할 수 있는 기초 자료를 제시한 것으로, 향후 MRI 영상에서 도출되는 내부 지표를 물리적 품질 인자와 연계함으로써 비파괴 내부 품질 예측 기술로의 확장이 가능할 것으로 판단된다.

ORCID

- Sooyeon Lim <https://orcid.org/0000-0002-8929-3377>
- Seong Min Kim <https://orcid.org/0000-0002-6809-8126>

Conflict of interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

Not applicable.

Data availability

Upon reasonable request, the datasets of this study can be

available from the corresponding author.

Authorship contribution statement

Conceptualization: Kim SM.

Data curation: Kim SM.

Formal analysis: Kim SM.

Methodology: Lim S, Kim SM.

Software: Kim SM.

Validation: Lim S, Kim SM.

Investigation: Lim S, Kim SM.

Writing - original draft: Kim SM.

Writing - review & editing: Lim S, Kim SM.

Ethics approval

Not applicable.

References

- Ahmed MR, Yasmin J, Lee WH, Mo C, Cho BK. 2017. Imaging technologies for nondestructive measurement of internal properties of agricultural products: a review. *J. Biosyst. Eng.* 42: 199-216.
- Baek SH, Kim SM. 2020. Development of MRI technique for the investigation of intact dried green coffee bean hydration process. *Food Eng. Prog.* 24: 15-22.
- Baek SH, Lim JG, Lee JG, McCarthy MJ, Kim SM. 2020. Investigation of the maturity changes of cherry tomato using magnetic resonance imaging. *Appl. Sci.* 10: 5188.
- Begh V, Kording F, Venkatachalam TK, Reutens DC. 2012. Magnetic susceptibility derived from T2 and T2*-weighted magnetic resonance magnitude images. *Concepts Magn. Reson. Part B Magn. Reson. Eng.* 41: 28-36.
- Bertram HC, Whittaker AK, Andersen HJ, Karlsson AH. 2004. Visualization of drip channels in meat using NMR microimaging. *Meat Sci.* 68: 667-670.
- Clark CJ, Hockings PD, Joyce DC, Mazucco RA. 1997. Application of magnetic resonance imaging to pre- and post-harvest studies of fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 11: 1-21.
- Duce S, Morrison F, Welten M, Baggott G, Tickle C. 2011. Micro-magnetic resonance imaging study of live quail embryos during embryonic development. *Magn. Reson. Imaging.* 29: 132-139.
- Guiheneuf TM, Tessier J, Herrod NJ, Hall LD. 1996. Magnetic resonance imaging of meat products: automated quantitation of the NMR relaxation parameters of cured pork by both bulk NMR and MRI methods. *J. Sci. Food Agric.* 71: 163-173.
- Joyce DC, Hockings PD, Mazucco RA, Shorter AJ. 2002. ¹H-nuclear magnetic resonance imaging of ripening 'Kensington Pride' mango fruit. *Funct. Plant Biol.* 29: 873-879.
- Kim HS, Kim SM. 2024. Early detection of infertile egg using magnetic resonance imaging. *J. Korea Acad. Ind. Coop. Soc.* 25: 603-610.
- Kim SM, Milczarek R, McCarthy MJ. 2008. Fast detection of seeds and freeze damage of mandarins using magnetic resonance imaging. *Mod. Phys. Lett. B* 22: 941-946.
- Lim JG, Kim CS, Lee SJ, Kim SM. 2003. Internal quality evaluation and age identification of fresh Korean ginseng using magnetic resonance imaging. *J. Korean Soc. Agric. Mach.* 28: 157-166.
- Ozel B, Oztop MH. 2021. A quick look at the use of time-domain nuclear magnetic resonance relaxometry and magnetic resonance imaging for food quality applications. *Curr. Opin. Food Sci.* 41: 122-129.
- Patel KK, Khan MA, Kar A. 2015. Recent development in applications of MRI techniques for foods and agricultural produce: An overview. *J. Food Sci. Technol.* 52: 1-26.
- Taglienti A, Massantini R, Botondi R, Mencarelli F, Valentini M. 2009. Postharvest structural changes of Hayward kiwifruit by means of magnetic resonance imaging spectroscopy. *Food Chem.* 114: 1583-1589.