

Micro-CT를 이용한 고구마 내부 병변의 이미징

이동일 · 최성영 · 김응삼*

전남대학교 자연과학대학 생물학과

접수일(2020년 6월 1일), 수정일(2020년 8월 17일), 게재화정일(2020년 9월 2일)

Imaging of Internal Lesions of Sweet Potatoes Using Micro-CT

Dong-il Lee · Seong-Young Choi and Eung-Sam Kim*

Department of Biological Sciences, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea

Received: JUN. 1. 2020, Revised: AUG. 17. 2020, Accepted: SEP. 2. 2020

초록

본 연구는 비파괴적 이미징 기법인 Micro-CT를 이용하여 시간에 따른 고구마의 내부 병변의 변화를 정량적으로 분석하였다. 현재 국내에서 고구마를 8 ~ 10월에 수확하여 다음 해 여름까지 저장하지만, 재배 혹은 수확 이후 저장 기간 중 표피썩음병을 비롯한 여러 병충해로 인하여 상품성이 떨어져 해마다 많은 고구마를 선별과정에서 폐기하고 있다. 하지만 지금까지 고구마 병변 여부 판단을 사람의 육안에 의존해왔기 때문에 고구마 내부의 병변의 크기 및 분포를 보다 정확하게 확인하는 방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서 X-선 흡수량의 차이를 통하여 피사체 내부 구조를 확인할 수 있는 Micro-CT를 이용하여 고구마 내부의 3차원적 병변의 분포와 시간에 따른 병변의 부피 변화를 정량적으로 분석하고자 하였다. 저장 이후 표피썩음병 병변이 시작된 베니하루카 품종의 고구마 시료에 대해 일주일 간격으로 6주 동안 Micro-CT 이미징을 수행하였다. 고구마 내부의 병변에 대한 단면 이미지뿐만 아니라 3차원 병변의 영역을 추출하였고 마지막 6주차에 고구마 시료의 병변 단면과 Micro-CT로 획득한 단면을 비교하였다. 또한 고구마 병변의 부피를 정량화하여 6주 동안 일반적인 저장 조건에 보관한 고구마 시료의 병변 증가 경향을 분석하였다. 비파괴적 Micro-CT 이미징을 통하여 지속적으로 고구마 내부의 병변의 3차원 분포를 시각화하고 이를 바탕으로 병변의 부피를 정량함으로써 향후 재배 및 저장 조건에 따른 병변의 발달 과정 연구에 있어 영상 및 정량 기법을 구축할 수 있었다.

검색어 - 고구마, 내부 병변, 마이크로-CT, 비파괴적 이미징, 3차원적 분포

Abstract

Using Micro-CT, a non-destructive imaging technique, this study analyzed quantitatively the changes in the internal lesions of sweet potatoes over time. Currently, sweet potatoes are harvested in Korea from August to October and stored until the summer of the following year. Many sweet potatoes have been discarded every year due to lack of commercial value due to various diseases including *Fusarium* surface rot, during the cultivation or storage period. However, since it relies on the human eye to determine whether a sweet potato has lesions, it is necessary to more accurately identify the size and distribution of the lesions inside the sweet potato. Here, we aimed to quantitatively analyze the distribution of three-dimensional lesions inside sweet potatoes and the change in volume of lesions over time using Micro-CT, which can identify the internal structure of an object through the difference in X-ray absorption. Micro-CT imaging was performed every week for six weeks on sweet potato samples of the Beniharuka cultivar, where the lesion of *Fusarium* surface rot began after storage. The distribution of the three-dimensional lesion was extracted as well as the cross-sectional image of the lesion inside the sweet potato. The cross-sectional image obtained by Micro-CT was compared with the real cross-section of the lesion site at the 6th week. Additionally, the volume of sweet potato lesions was quantified and the tendency to increase lesions of sweet potato specimens kept in general storage conditions for six weeks was analyzed. Through the non-destructive Micro-CT imaging, the three-dimensional distribution of lesions inside sweet potatoes was continually visualized and the volume of lesions was quantified, which might be applied to future studies on the development process of lesions according to cultivation and storage conditions.

Key words - Internal lesion, Micro-CT, Non-destructive imaging, Sweet potato, Three-dimensional distribution

* Corresponding author: Eung-Sam Kim

Tel: +82-62-530-3416

Fax: +82-62-530-3409

E-mail: eungsam.kim@chonnam.ac.kr

서론

고구마(학명: *Ipomoea batatas*, 분류체계: 가지목 메꽃과 나팔꽃속의 뿌리채소)는 예로부터 구황작물로서 우리나라 사람들의 유용한 식량원이었으며, 현재는 건강 간식, 다이어트 보조식품, 바이오 에너지 등으로 활용되고 있다(Jung et al., 2002; Jung et al., 2016; Yu et al., 2018). 현재 국내에서는 통상적으로 ‘꿀고구마’라 불리는 베니하루카(Beniharuka) 품종에 대한 소비자들의 선호도가 높다. 베니하루카는 2010년 일본 규슈 오기나와농업센터에서 규슈121호와 하루코가네를 교배하여 육성된 품종으로써 당도와 식감이 우수한 것으로 평가되고 있다(Kai et al., 2010).

고구마 재배 과정에서 빈번하게 발생하는 질병 가운데 하나인 덩굴쪼김병은 *Fusarium oxysporum*으로 인해 발생하고, 그 증상으로 줄기나 갈라지거나 검게 변하며 부패하고 잎은 누렇게 되어 시들게 된다(Lee et al., 2012; Son et al., 2015). 또한, 고구마 수확 이후 저장 과정에서 자주 발생하는 표피썩음병은 *F. oxysporum*, *F. solani* 및 *F. commune*으로 인해 발생하고 증상은 고구마 과근(덩이 뿌리) 표면에 반점 모양으로 얼룩이 생긴다. 이 두 질병의 병원균들은 계통적으로 매우 유사하여 토양에서 수년간 생존이 가능해 토양 전염을 일으킨다(Harter et al., 1918; Choi et al., 2014). 국립식량과학원의 통계 자료에 따르면 매년 고구마 저장 중 발생하는 병충해로 인해 한 해 고구마 수확량의 10~30% 정도 폐기되고 있으며, 이 가운데 표피썩음병으로 인한 피해가 대부분이라고 알려져 있다(농업진흥청 바이오에너지작물연구소 소속 담당자를 통한 인수집정보).

일반적으로 8 ~ 10월에 수확되는 고구마는 수확 직후 출하되는 상품 이외 나머지는 저장되어 그 다음 해 여름까지 출하된다. 표피썩음병으로 인한 수확량 감소 및 저장 기간 동안 상품성 저하로 인하여 매년 고구마 재배 농가와 유통업체의 경제적 손실이 발생하고 있다. 현재 고구마 출하 이전 세척 단계에서 개별 고구마 병변 여부를 대부분 육안 식별에 의존하고 있어 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 초기 단계의 병변은 육안으로 식별하기 쉽지 않아 선별 정확도가 높지 않다. 이미 병원균을 보유한 고구마가 출하되어 유통과정을 거쳐 소비자의 구입으로 연결될 경우 생산 농가에 대한 신뢰도 저하 및 소비자의 고구마 선호도가 낮아질 것이다. 따라서, 고구마 병변에 대한 부정확한 육안 선별법으로 인하여 고구마 가격의 불안정성 및 품질 하락, 선호도 감소에 따른 소비량 감소를 초래할 수 있다.

CT(Computed Tomography, 컴퓨터 단층촬영)는 X-선을 피사체에 투사하여 피사체의 내부의 단면 이미지로 보여주는 기술이다(Jiang, 2009). X-선 발생장치로부터 나온 X-선은 collimator를 통해 결집되어 피사체를 통과한 후 X-선 탐지기로 검출된다. 이때, 피사체는 공간적으로 고정되어 있으며, X-선 발생장치와 X-선 탐지기가 360° 돌아가며 촬영이 진행된다. 이와 반대로 피사체가 360° 회전하는 경우도 있다. X-선 흡수량이 많을수록 흰색, 적을수록 검은색

으로 표현되도록 이미지화하여 사이노그램(sinogram)을 형성하고, back projection이라는 컴퓨터 연산 과정을 거쳐 단면 이미지로 변환한다. 최종적으로 이 단면 이미지들을 모아 피사체 내부에 대한 3D 이미지로 변환할 수 있다. Micro-CT는 소형의 생물 혹은 사물에 적용되는 CT이며, 소형 시료의 이미지를 수 μm 수준까지 확인할 수 있다. 시료를 훼손시키지 않고, 내부 형상을 이미지화 할 수 있어 생물학과 의학을 포함한 많은 분야에서 활용되고 있다 (Landis & Keane, 2010; Yanniotis et al., 2011; Kim et al., 2017).

본 연구는 Micro-CT를 이용하여 장기간 고구마 내부 병변의 변화를 모니터링하여 저장 기간에 따른 고구마 병변의 크기 변화를 분석하는 데 그 목표를 두고 있다. 표피썩음병에 의한 베니하루카 고구마 시료에 대한 병변의 부피 변화를 6주간 측정하여 3차원적 병변의 분포를 영상화할 뿐 아니라 정량적인 부피를 추출하여, 저장 기간에 따른 병변 부피 추세를 분석하였다.

재료 및 방법

1. 고구마 시료 설정 및 보관 조건

베니하루카 품종에 해당하는 고구마 시료는 2019년에 전라북도 고창 지역에서 수확된 것으로 저장 과정에서 육안으로 표피썩음병 병변이 관찰되기 시작한 것을 선택하였다. Micro-CT 촬영에 사용된 고구마 시료는 수확 이후 3일 시점에서 큐어링(curing) 이루어 진 것이며 그 이후 21일 경과되었다. Micro-CT의 베드(bed)의 폭을 고려하여 고구마의 최대 직경이 5 cm 내외인 시료를 선별하였다. 고구마 최적 저장 온도와 상대습도는 각각 12~15°C와 80%이며 정기적인 환기가 요구되고 있다(Lee, 2009). 실제 고구마 저장고와 유사한 환경인 온도 15°C와 상대습도 65~80%(저장 공간에서 측정한 최저~최고 습도 값), 그리고 3일 간격의 환기 조건에서 고구마 시료를 보관하였다.

2. 고구마에 대한 Micro-CT 이미징

한국기초과학지원연구원(Korea Basic Science Institute) 광주 본원이 보유한 Micro-CT 장비(*in vivo* X-ray radiography Micro-CT system, Quantum GX, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 고구마 시료에 대한 Micro-CT 촬영을 진행하였다. 각 고구마 시료를 Micro-CT 장비 내부의 베드(bed)에 탑재한 후 각 촬영에 있어 동일한 부위에 대한 이미징을 수행하기 위하여 병변 부위를 실선 표시하고 그 실선과 일치하는 베드 지점을 노란색 테이프를 부착하여 표시하였다 (Fig. 1A). X-선 관(X-ray tube)의 전압은 90 kV, 전류는 80 μA , 관측 범위(Field of View: FOV) 60 mm의 조건에서 복셀(voxel, volume pixel)의 크기가 120 μm 인 고해상도 주사 방식(high-resolution scan mode)

으로 4분 동안 Micro-CT 촬영을 진행하였다. 이 촬영 조건에서 고구마 시료가 받게 되는 X-선 선량은 162 mGy에 해당한다.

3. Micro-CT 이미지를 이용한 고구마 내부 병변 측정

획득된 Micro-CT 2D 이미지는 장비 제조사인 Perkin Elmer에서 제공하는 전용 프로그램(Simple Viewer, version 1.0.1.0)을 통하여 분석되었다. 6주차 Micro-CT 이미지 종료 시점에서 고구마 시료를 잘라 실제 단면과 Micro-CT를 통해 얻은 단면 이미지를 비교하였다. 또한 제조사에서 제공하는 3D 이미지 전용 프로그램(3D Viewer, version 1.0.0.0)과 BIR (Biomedical Imaging Resource)에서 제공하는 Analyze 14.0을 이용해 고구마 시료 내부의 병변의 공간적 분포를 확인하고 이를 통해 병변의 전체 부피를 정량화하였다.

이를 위해 threshold 값 조정을 통한 고구마 영역 선택 시, 고구마와 bed가 같이 선택되는 문제가 존재하여 프로그램의 기능을 이용해 두 영역을 분리한 후 bed 영역을 제거, 고구마만 선택되게 한 후 해당 부피를 분석하는 방식으로 고구마 전체 부피를 정량적으로 분석하였다. 이후 흰색에 가까운 전체 시료 부분은 765~최대값으로 threshold를 설정하고, 병변으로 추정되는 검은색 부분은 0~최대값으로 threshold를 설정하여 두 부분을 구분하여 그 변화를 확인하였다. 6주차 고구마 시료의 병변 단면과 micro-CT 단면 이미지를 비교하여, 병변 부위를 가장 많이 표현할 수 있는 기준 값과 그 값의 $\pm 5\%$ 수치를 적용하여 병변 부피를 반복적으로 추출하였다.

4. 통계처리

고구마 시료의 병변의 부피는 평균과 표준편차(Mean \pm SD)로 표현하였으며, One-way ANOVA test (all pairwise multiple comparison)를 통하여 시간에 따른 병변 부피의 평균 사이의 통계적 유의성($p < 0.05$)을 분석하였다. GraphPad Prism 6.0 (GraphPad Software, San Diego, USA)를 이용하여 시간에 따른 고구마 시료의 병변 부피를 막대 그래프로 도식하였다.

결과 및 고찰

1. Micro-CT를 통한 고구마 내부 이미지 획득

베니하루카 품종의 고구마 시료는 Micro-CT 장비의 bed에 탑재된 후, 시료 표피에 표피썩음병 병변이 육안으로 보이는 부분을 정의된 FOV 안에 위치하도록 고구마를 위치를 조정하였다 (Fig. 1A). 한 고구마 시료에 정의된 FOV에 대해 4분 동안의 Micro-CT 이미징을 통하여, 각 지점에 대한 3가지 단면(즉, 상면, 정면, 측면) 이미지를 얻을 수 있었다 (Fig. 1B, 1C, 1D). 고구마 시료에 대한 Micro-CT 단면 이미지를 통해 육안으로 확인된 표피썩음병 지점의 X-선 흡수량이 이 그 주변의 고구마 조직의 X-선 흡수량보다 적어 상대적으로 쉽게 표시되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 고구마 시료의 피총 부분과 피총이 싸고 있는 내부와의 X-선 흡수량의

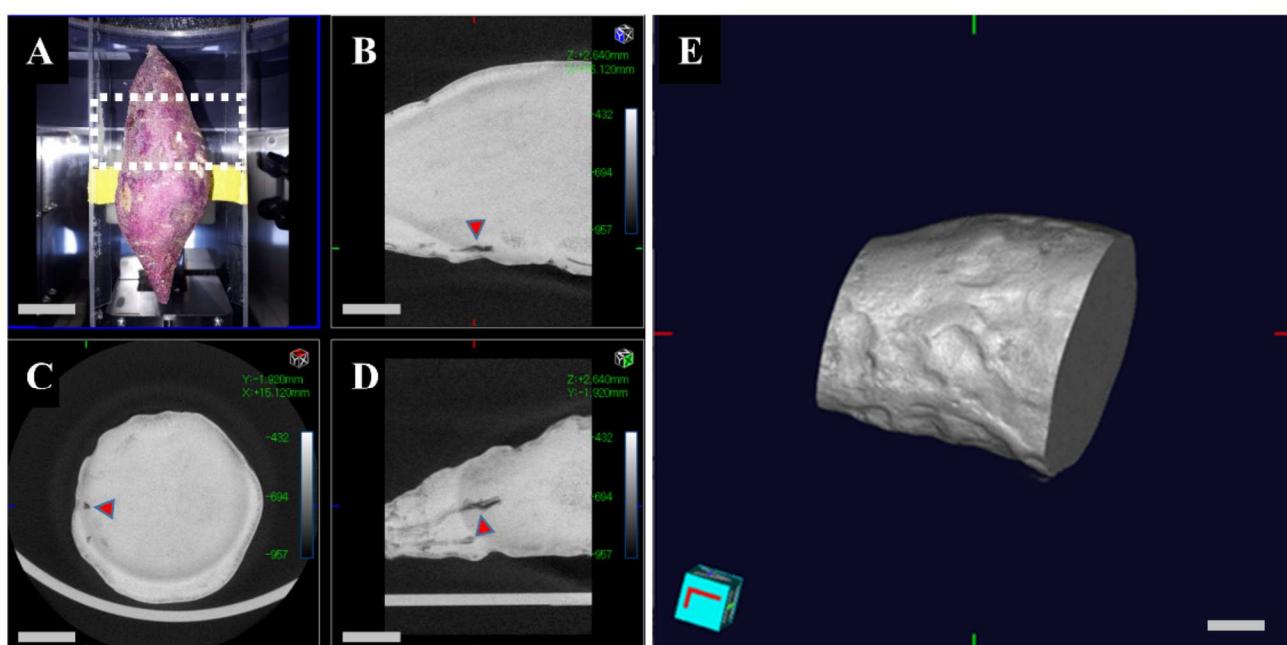


Fig. 1. Cross-sectional images and three-dimensional images obtained through Micro-CT imaging on sweet potato samples. (A) A sweet potato sample mounted on a bed in a Micro-CT equipment. A rectangle of white dotted lines indicates the field of view (FOV). (B) Top view. (C) Front view, (D) Side view, (E) 3D image of a sweet potato place in the FOV. Scale bars: 1.0 cm.

차이로 인하여 파충과 내부 조직의 경계를 확인할 수 있었다.

한 FOV의 모든 점에서 얻어진 세 단면 이미지를 3D Viewer 프로그램에 입력하여 최종적으로 고구마 시료의 FOV에 대한 3차원적 이미지를 생성할 수 있다 (Fig. 1E). 이 3차원 이미지에 나타난 표면의 요철 형태와 분포는 실제 고구마 표면의 굴곡 형태와 분포와 일치하였다.

2. 고구마 병변의 실제 단면과 Micro-CT 이미지 비교

일주일 간격으로 총 6주 동안 각 고구마 시료의 FOV에 대한 Micro-CT 이미징이 순차적으로 진행되었다. 매주 Micro-CT 이미징이 완료된 시료는 다음 이미징 시점까지 동일한 저장 조건에서 보관되었다. 각 시료에 대해 처음에 정해진 고구마 부위를 FOV 영역과 일치시켜 Micro-CT 단면 이미지를 비교하였을 때, 표피썩음병의 병변의 위치 확인과 변화 양상 관찰이 용이하도록 하였다. 세 개의 고구마 시료에 대하여 6주 동안 FOV 내의 모든 점에 대한 단면 이미지를 획득하였으며, 이 가운데 병변 부위에 대한 가상의 절단면에 대한 주차별 이미지를 시간 순서대로 배열하였을 때, 고구마 내부에서 표피썩음병의 병변 부위가 시간에 따라 변화되는 양상을 관찰할 수 있었다 (Fig. 2).

6주차 Micro-CT 이미징이 완료된 시점에서 각 시료에서 병변 부분을 절단하여 실제 고구마 단면 사진을 얻었다. 이후 실제 고구마 단면 이미지와 6주차 Micro-CT 이미징에서 얻은 단면과 비교하여 병변의 크기 및 분포 일치 여부를 조사하였다. 이를 통하여 실제 내부의 표피썩음병이 나타나는 위치에서 Micro-CT 단면 이미지의 검은색 부분이 두드러지게 분포하는 것을 확인하였다. 다만, 실제 병변의 분포 영역 가운데서 일부분(즉, 면적 기준으로 30~50%)이 Micro-CT 이미지 상에서 주변 조직보다 X-선 흡수량이 다른 것으로

로 분석되었다.

고구마 시료 1에서 관찰되는 뚜렷한 병변 부위인 왼쪽 하단을 보면 Micro-CT 이미지와 마찬가지로 실물에서도 명확하게 관찰된다. 하지만 실물 단면에서 관찰되는 시료 가장자리를 둘러싸고 있는 검은색에 가까운 병변은 Micro-CT 이미지에서는 뚜렷하게 관찰되지 않는다. 고구마 시료 2의 Micro-CT 이미지 왼쪽 상단에서 보이는 특이한 병변은 실물에서도 명확하게 보인다. 전체적인 모양 또한 매우 일치함을 알 수 있다. 고구마 시료 3의 Micro-CT에서 관찰되는 충을 이루는 듯한 병변의 모양은 실물에서도 관찰되며 매우 유사함을 알 수 있다. 모든 시료의 실물에서 전체적으로 병변이 뚜렷하게 검은 부분은 Micro-CT 이미지에서도 확인하게 나타나지만 상대적으로 옅은 진회색으로 표시된 병변은 Micro-CT 이미지에서는 뚜렷하게 관찰되지 않았다.

3. 고구마 내부 병변의 3차원적 분포 시각화

각 고구마 시료에 대해 6주 동안 주차별로 수행된 Micro-CT 이미징에서 얻어진 단면 이미지를 3D Viewer 프로그램으로 통합하여 FOV에 위치한 고구마 시료의 외부 및 내부에 대한 3차원 이미지로 전환하였다 (Fig. 3). 6주차 고구마 시료의 실물 단면 사진에 나타나는 병변 분포를 가장 잘 반영할 수 있는 threshold 값을 Micro-CT 3차원 이미지에 적용하여 고구마 내부에 분포하는 표피썩음병 병변의 3차원적 분포를 추출하였다. 3차원 공간의 z 축에 대한 회전 각도 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$)에 따른 병변의 분포를 비교함으로써 그 병변의 3차원 분포를 시각적으로 제시할 수 있었다.

6주 동안 병변의 분포가 시간이 지남에 따라 확장되는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 병변이 나타나는 영역들이 군집을 형성하고 있지만, 모든 병변 영역이 서로 연결되어 있지 않다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 최종적으로 결정된 threshold 값이 의해 추출된

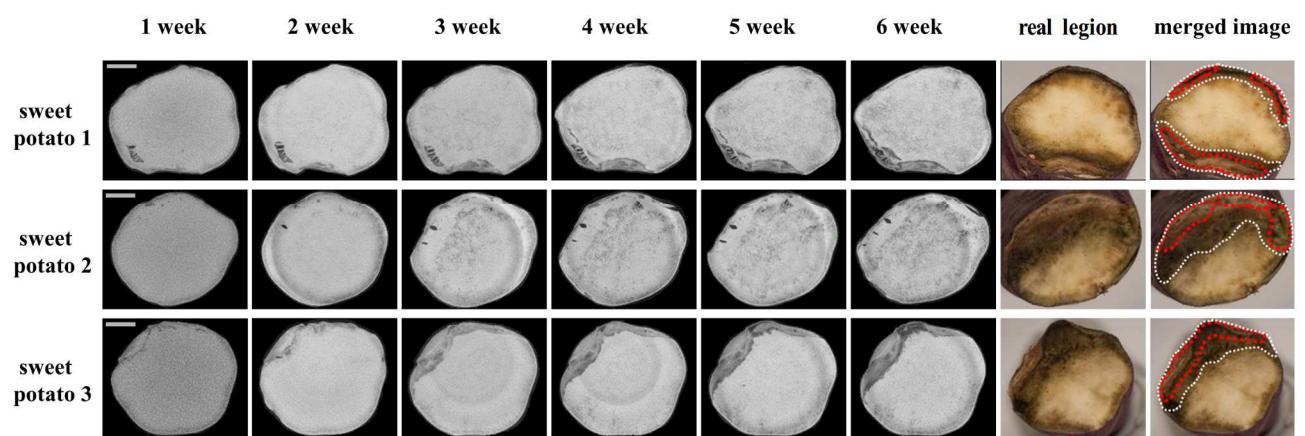


Fig. 2. Comparison of cross-sectional images of sweet potato lesions obtained at weekly intervals over six weeks with real legions observed at the sixth week. Real legions of sweet potatoes are enclosed by white dots in the merged image. The red dotted domain indicates the overlapped region of real legions and micro-CT images both obtained at the 6th week. Scale bars: 1.0 cm.

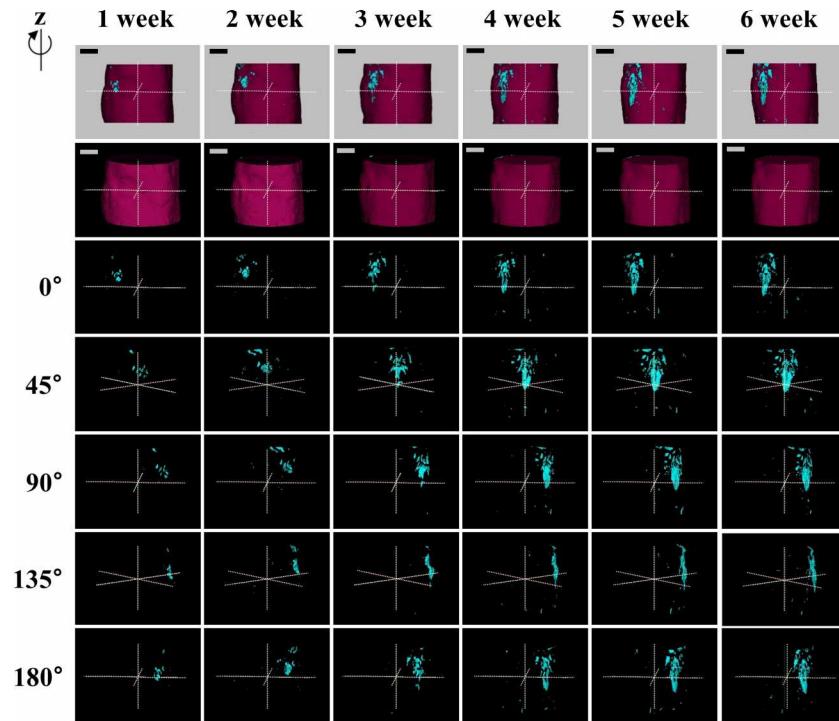


Fig. 3. Comparison of 3-D distribution of sweet potato lesions at weekly intervals. The extracted lesion domain is rotated clockwise 0° , 45° , 90° , 135° , and 180° around the z axis. Scale bars: 1.0 cm.

병변 영역들 사이의 병변은 X-선 흡수량의 정상 고구마 조직과 유사한 것으로 추측된다.

4. 시간에 따른 고구마 내부 병변의 부피 변화 분석

각 고구마 시료의 FOV에서 확인된 주차별 병변의 3차원적 분포를 토대로, 병변 군집의 부피를 합하여 FOV 내에 존재하는 병변의 부피를 정량화하였다. 6주간의 시간에 따른 정량화된 병변 부피의 변화를 막대 그래프로 표시하였다 (Fig. 4). 고구마 시료 1의 경우, 1주차 병변 부피가 10 mm^3 였지만 시간이 지남에 따라 점진적으로 증가하다가 5주차에서 100 mm^3 에 도달하였고 6주차에서도 이 병변의 부피를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 이 고구마의 시료의 경우, 3차원 공간상의 병변 분포에서도 5주차와 6주차 사이에 차이가 거의 없었다. 고구마 시료 2의 경우, 1주차에는 병변의 부피가 미미하였지만, 2주차때 10 mm^3 에 도달하였다. 그러나 이 후 시료 1에 비하여 느린 속도로 늘어나 6주차에 33 mm^3 의 병변의 부피를 보여주었다. 시료 3의 경우, 3주차 때까지 미미한 병변의 부피를 보여 준 이후, 4 주차 때 본격적으로 증가하기 시작하여 2주만에 병변 부피가 약 30 mm^3 로 증가하였다.

각 고구마 시료의 시간에 따른 병변 부피 추세에서 일부 구간(시료 1의 5 ~ 6주차 구간, 시료 2의 4~5주차 구간, 시료 3의 2~3주차 구간)에 병변 부피의 소폭 감소 현상이 관찰되었다. 시간이 경과했

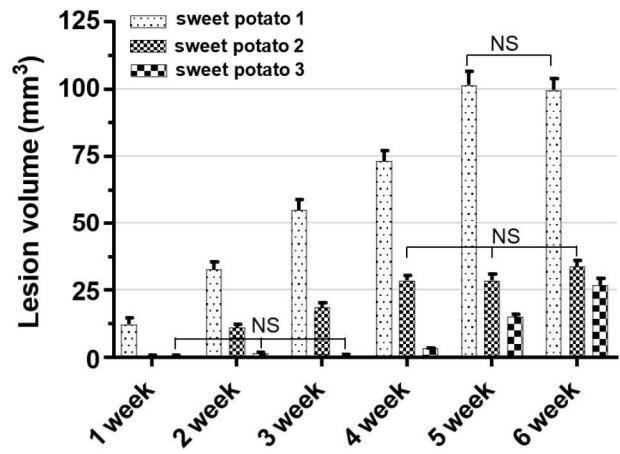


Fig. 4. Volume change of sweet potato sample lesions over 6 weeks ($p<0.05$, one-way ANOVA test; NS: not significant).

음에도 불구하고 고구마 내부의 병변 부피의 소폭 감소가 관찰되는 원인으로 Micro-CT 장비의 특성을 들 수 있다. Micro-CT 장비 내부의 bed에 고정된 고구마 시료에 대해 X-tube와 detector가 360° 회전하며 촬영하게 되는데, 이 때 발생하는 진동이 고구마 시료에 전달되어 최종적으로 병변의 부피 변화가 크지 않을 때 부피 오차로 나타나는 것으로 볼 수 있다.

6주 동안 습도 조건을 유지하면서 고구마 시료를 보관하였음에도

불구하고 1주차와 6주차의 FOV 내의 고구마 부피를 비교했을 때 시간 경과에 따라 약 10%의 고구마 부피의 감소가 발생하였다. 이는 고구마 시료 저장 기간 동안 수분 손실, 상대적으로 습도 유지가 어려운 Micro-CT 장비 내부에서 고구마의 수분 손실 및 병변 확대로 인한 고구마 내부의 수분 분포 변화에 기인한 것으로 추측된다.

X-선을 조사하여 비파괴적으로 다양한 피사체 내부를 관찰할 수 있는 Micro-CT를 활용하여 고구마 내부의 병변을 시각화하고 지속적인 모니터링을 수행한 본 연구는 하기와 같은 의미를 가질 수 있다. 먼저 고구마 시료를 물리적 혹은 화학적으로 훼손하지 않은 상태에서 장기간 Micro-CT 이미징함으로써 주어진 고구마 시료의 내부 변화에 대한 여러 정보를 얻을 수 있다. 더불어 수십 μm 수준까지 구현되는 고구마 내부의 3D 이미지를 통해 보다 실제에 가까운 입체적인 구조와 형태를 고해상도의 이미지로 얻을 수 있다.

또한 외부에서 확인되지 않는 고구마의 내부 구조와 형태를 관찰하고 이를 정량화함으로써 향후 고구마 병변에 대한 연구에 있어 중요한 자료로 활용될 수 있다 (Kim et al., 2017). 현재 국내에서 고구마 병변으로 인한 고구마 상품성 판단은 고구마 출하 직전의 선별 과정에서 사람의 육안 선별법에 의존하고 있다. 하지만 이 선별 법은 일관적이지 않을 수 있을 뿐 아니라 미세한 병변이나 내부의 병변을 정확하게 확인할 수 없다는 한계점을 가지고 있다. 따라서 향후 Micro-CT와 컨베이어 벨트 형태의 자동 이송 시스템을 결합하여 고속으로 고구마 내부를 조사하면서 동시에 고구마 선별 작업을 진행할 수 있는 자동 선별시스템이 고안될 수 있을 것으로 예상된다. 더불어 Micro-CT 운영에 있어 기본적으로 X-선이 고구마 표면과 내부에 흡수되게 되는데, 이 과정에서 X-선에 의한 병원체에 대한 살균 효과를 부가적으로 기대할 수 있다(Kim et al., 2013).

본 연구 결과에서 알 수 있듯이 Micro-CT를 이용한 이미징은 X-선 흡수계수 차이를 이용하는 원리로 인해 고구마의 정상 내부 조직과 병변 사이의 흡수계수의 차이가 크지 않을 경우, 정상 조직과 병변 부위를 구별하는 것이 어렵다는 한계가 있다. 본 연구의 고구마 실물에서 관찰되는 병변의 주변부는 Micro-CT 이미지에서 뚜렷하게 이미징되지 않는 것을 확인할 수 있었다.

향후에 Micro-CT보다 분해능이 높아 더 미세한 관찰이 가능한 Nano-CT를 이용한 고구마 병변 이미징을 시도해 볼 수 있을 것으로 사료된다 (Singhal et al., 2013). 또한 고구마의 병변 이외에 여러 농작물에서 수분 손실로 인한 내부 조직의 바람들 (granulation, pithiness) 현상의 시간에 따른 전개 과정 연구도 Micro-CT 이미징을 통해 시도할 수 있을 것이다. 마지막으로 본 연구에서 비파괴적 병변 이미징을 시도한 베니하루카 품종 이외에 다른 고구마 품종과 더 많은 수의 고구마 시료에 대한 병변 이미지 분석, 그리고 병원균에 대한 동정 및 분포 분석을 통하여 보다 체계적인 고구마 병변 변화 양상에 대한 연구로 발전할 수 있으리라 예상된다.

감사의 글

본 연구는 전남대학교 2019학년도 대학원생+학부생 학술연구 모임 지원사업과 대한민국 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 현장맞춤형 이공계 인재양성 지원사업(No. 2019 H1D8A1109673)과 기초연구실 지원사업(No.2018R1A4A1023882)의 지원을 받아 수행되었습니다. Micro-CT 이미지 분석에 관해 조언해 준 KBSI의 박재일 박사와 김은빈 연구원에게 감사합니다. 본 연구에 사용된 고구마 시료는 전라북도 고창 황토배기 청정고구마 연합영농조합법인(대표: 서재필)을 통해 공급 받았습니다.

References

- Choi HW, Hong SK, Lee YK, Nam YJ, Lee JG, An CJ. 2014. Occurrence of *Fusarium* surface rot on sweet potato caused by *Fusarium commune*. Kor. J. Mycol. 42: 91-94.
- Harter LL, Weimar JL and Adams JMR. 1918. Sweet potato storage rots. J. Agr. Res. 15: 337-368.
- Jiang H. 2009. Computed tomography: Principles, design, artifacts, and recent advances. SPIE. pp.55-139.
- Jung BC, Oh YH, Ahn YS, Lee JS, Jung MN, Kim YB, Jang YS and Kim HS. 2002. Sweet potato production and utilization. 222. Honam Agricultural Test Station, Rural Development Administration.
- Jung KH, Lee JH, Jeon MH and Lee YS. 2016. A strategy to respond to changes in sweet potato consumption trend. 83. Gyeonggi Agricultural Technology Institute, Hwaseong, Gyeonggi, Korea.
- Kai Y, Katayama K, Sakai T and Yoshinaga M. 2010. Beniharuka: A new sweet potato cultivar for table use. Sweetpotato Research Front. 23: 2.
- Kim EB, Sung HC, Lee DH, Kim GJ, Nam DH and Kim ES. 2017. Nondestructive skeletal imaging of *Hyla suweonensis* using micro-computed tomography. Asian Herpetol. Res. 88: 235-243.
- Kim JK, Song BS, Kim JH, Park JH, Byun EB and Lee JW. 2013. Sterilization characteristics of ionizing irradiation and its industrial application. J. Kor. Musculoskeletal Transplant Soc. 13: 49-57.
- Landis EN and Keane DT. 2010. X-ray microtomography. Mater. Charct. 61: 1305-1316.
- Lee JS. 2009. Agricultural technology-storage and shipment management of sweet potatoes in winter season. Agricultural Technology Bulletin 46: 34-35.
- Lee KH, Choi IH, Lee HW, Paik CH, Lee YK, Kim JS, Choi KS, Paik CH, Kwon M and Jwa JH. 2012. Technology development of management and ecology of main crop

- pests in agricultural zones. 208. Rural Development Administration, Jeonju, Jeollabuk, Korea.
- Singhal A, Grande JC and Zhou Y. 2013. Micro/nano-CT for visualization of internal structures. *Microscopy Today* 21: 16-22.
- Son CS, Kim KS, Kim JH, Choi WY, Jang SH, Park SY, Jeon YS, Hwang JB, Um MO, Song DY, Park HH, Kim SH, Kwon EK, Jang BC and Kwon KH. 2015. A collection of questions and answers on key technologies for sweet potato cultivation to solve questions at production sites. Rural Development Administration, Jeonju, Jeollabuk, Korea. pp.37-62.
- Yanniotis S, Proshlyakov A, Revithi A, Georgiadou M and Blahovec J. 2011. X-ray imaging for fungal necrotic spot detection in pistachio nuts. *Procedia Food Science* 1: 379-384.
- Yu GD, Lee HU, Nam SS, Hwang EJ, Yang JW, Narayan CP, Lee KB, Goh S and Kang YG. 2018. Difference of storability according to the curing treatment in Korean sweet potato varieties. *Korean J. Int. Agric.* 30: 44-50.