

자기공명영상을 이용한 복숭아 및 씨의 부피 측정과 3차원 가시화

Peach & Pit Volume Measurement and 3D Visualization using Magnetic Resonance Imaging Data

김 철 수
정희원
C. S. Kim

ABSTRACT

This study was conducted to nondestructively estimate the volumetric information of peach and pit and to visualize the 3D information of internal structure from magnetic resonance imaging(MRI) data. Bruker Biospec 7T spectrometer operating at a proton resonant frequency of 300 MHz was used for acquisition of MRI data of peach. Image processing algorithms and visualization techniques were implemented by using MATLAB (MathWorks) and Visualization Toolkit(Kitware), respectively.

Thresholding algorithm and Kohonen's self organizing map(SOM) were applied to MRI data for region segmentation. Volumetric information were estimated from segmented images and compared to the actual measurements. The average prediction errors of peach and pit volumes were 4.5%, 26.1%, respectively for the thresholding algorithm, and were 2.1%, 19.9%, respectively for the SOM. Although we couldn't get the statistically meaningful results with the limited number of samples, the average prediction errors were lower when the region segmentation was done by SOM rather than thresholding.

The 3D visualization techniques such as isosurface construction and volume rendering were successfully implemented, by which we could nondestructively obtain the useful information of internal structures of peach.

Keywords : Magnetic resonance imaging(MRI), Region segmentation, Self organizing map(SOM), 3D visualization, Volume measurement, Isosurface construction, Volume rendering.

1. 서 론

원자핵의 자기공명 특성을 이용하는 NMR기술은 1950년대 중반부터 농산물의 내부 생리변화를 검사하는데 활용되기 시작했다(Kim et al., 1999). 주로 의학 분야에서 질병진단용으로 널리 활용되어 온 자기공명영상(MRI) 기술은 대상체 내의 위치에 따른 자기공명 특성의 변화를 감지할 수 있으며, X-레이 단층(CT)영상과 함께 가장 강력한

비파괴 품질평가 기술로 알려져 있다(Chen et al., 1991). 전기·전자·컴퓨터 공학 등의 발전과 함께 자기공명 관련 장비들의 가격이 하락하여, 최근 들어서는 MRI 기술을 농산물의 선별 및 식품의 제조공정에 온라인 센서(on-line sensor)로서 활용하기 시작하였다(Kim et al., 1999).

Heil(1991) 등은 자기공명영상을 이용하여 맥주 거품의 특성을 연구하였으며, Zion(1994) 등은 가공된 벼찌 내에 씨의 존재 여부를 파악하는데 자

The paper was submitted for publication in March 2002, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in May 2002.

The corresponding author is Chul Soo Kim, Professor, Division of Bioresource Systems Engineering, Chonbuk National University, Chonju, 561-756, Korea. Email : <cskim@moak.chonbuk.ac.kr>

자기공명영상 기술이 유용하게 활용될 수 있음을 보고하였다. Barreiro(1999) 등은 MSME(multi-slice multi-echo) 자기공명영상을 이용하여 사과 내부의 조직변화를 검사하여, T₂값이 조직변화와 상관관계가 있음을 보고하였다.

자기공명영상으로부터 씨의 존재 여부를 파악하거나, 조직변화의 감지, 부피의 측정 등을 위해서는 대상체를 구성하고 있는 서로 다른 부분들을 개별적으로 정확하게 분리할 수 있는 영역 분할 기법은 필수적이다.

자기공명영상과 같은 3차원 데이터로부터 원하는 개체를 분할해내는 방법에 대한 연구는 여러 영역에서 활발하게 진행되고 있다. Danielsson(1998) 등은 이차도함수를 이용한 영역분할 기법을 자기공명영상에 적용하여 성공적으로 혈관을 분할할 수 있었다고 보고하였다. Ashton(1997) 등은 뇌에 있는 해마용기를 분할하고 정량적인 측정을 위하여 변형체와 영역확장법을 병행하여 사용하였다. Nott(1999) 등은 싱싱한 송어와 해동한 송어를 정량적으로 구분하기 위하여 자기공명 특성들(T₁, T₂, M₀, T₁[∞], M_{sat}/M₀)을 활용하여 송어 머리부분의 지질 및 교원질의 분포도를 검사하였다. Wang(1998) 등은 확률적 신경망을 이용하여 자기공명영상을 분할하고 부피를 측정하는 방법을 제안하였다. Reddick(1997) 등은 인공신경망을 이용하여 뇌의 자기공명영상을 자동으로 분할하는 방법을 제안하였다.

MRI나 CT 기술을 이용하면 동시에 여러 장의 대상체 단면영상을 얻을 수 있다. 각 단면 영상의 간격과 두께 조절이 가능하며, 인접한 단면영상을 조합하면 3차원 부피영상이 생성된다. 단면영상을 조합하여 얻은 부피영상(volumetric image)은 보통 3차원 배열로 표현하게 되며, 배열의 각 요소는 부피요소(volume element, voxel)라 한다. 3차원 영상은 대상체의 내부 구조와 조직의 상태를 쉽게 이해할 수 있도록 해주기 때문에, 의료분야에서는 병의 진단과 교육은 물론 효율적인 수술 계획의 수립에 활용될 뿐만 아니라, 농산물 및

식품의 가공 방법의 선택 등에 큰 도움이 될 수 있다. 따라서 3차원 가시화에 관한 연구도 활발하게 연구되어 여러 가지 기법들이 보고되어 있으며, 대표적인 방법으로는 등가표면 구현법(isosurface construction)과 부피 묘사법(volume rendering) 등이 있다(Bomans et al., 1990, Steen and Olstad, 1994, Tiede et al., 1998). 최근 들어 국내에서도 3차원 가시화 기법을 농업분야에 응용하려는 연구가 수행되고 있다. Kim(2000) 등은 접목묘의 활착 환경에 따른 접수와 대목의 결합 과정을 해석하기 위하여 결합 단면의 2차원 영상정보를 이용하여 접목묘 통도조직의 3차원 가시화를 시도하였다. 파라핀으로 고정시킨 생물체를 일정한 간격으로 절단하면서 2차원 단면 영상을 획득하고, 이들 2차원 영상을 조합하여 3차원 생물체 모델을 형성하는 과정을 자동화하기 위한 연구도 수행되었다(Choi et al. 2000, Hwang et al. 2001).

본 연구에서는 문턱 값 처리법과 인공 신경망에 의한 영상분할법을 활용하여 복숭아의 자기공명영상을 분할하고, 두 분할방법에 의해 예측한 복숭아 및 씨의 부피와 실제로 측정된 부피를 비교하여 두 방법의 성능을 평가하였다. 또한 복숭아의 내부구조를 쉽게 이해할 수 있도록 하기 위하여, 등가표면 구현법(isosurface construction)과 부피 묘사법(volume rendering)을 활용하여 복숭아의 자기공명영상을 3차원 가시화하였다.

2. 재료 및 방법

가. 자기공명영상

본 연구를 위하여 캘리포니아 대학이 보유하고 있는 Bruker Biospec 7T spectrometer에서 MSME(multi-slice multi-echo) 펄스 시퀀스를 이용하여 동시에 64 단면, 해상도 128×128 화소인 복숭아의 자기공명영상을 획득하였다. 따라서, 복숭아의 자기공명영상은 128×128×64 크기의 3차원 배열 데이터가 된다. 단면의 두께는 1.25 mm, FOV(field-

Table 1 Specifications of BIOSPEC spectrometer system

System	Bore Size	Field Strength	Gradient B-GA12	Shim System	Host Computer	Software
BIOSPEC 70/20	210 mm	7.05 T	200 mT/m	B-S20	BRUKER/SGI Workstation	ParaVision

of-view)는 80 mm이었기 때문에 각 부피요소의 크기는 $0.625 \times 0.625 \times 1.25 \text{ mm}^3$ 이었다. 사용된 하드웨어에 관한 자세한 사양을 표 1에 나타내었다.

나. 영상분할 방법

문턱 값에 의하여 영상을 분할하는 방법은 프로 그래밍이 수월하고, 수행속도가 빠르면서도, 개체들의 구성이 복잡하지 않은 영상분할에서는 성공률도 높기 때문에 가장 보편적으로 활용되고 있다. 대부분의 경우에 문턱 값은 적용대상 특성을 파악하여 수동적으로 정해주지만, 문턱 값을 자동으로 결정하기 위한 새로운 방법들이 많이 연구되고 있다(Grennhill and Davies, 1995, Russ, 1995). 본 연구에서는 영상의 배경과 복숭아 씨의 화소 값이 비슷하여 하나의 문턱 값을 이용하여 복숭아를 배경으로부터 분할하는 것이 불가능하였다. 따라서 두 개의 문턱 값을 이용하여 분할한 이진 영상을 조작하여 복숭아 부분과 씨 부분을 분할하는 방법을 택하였다. 이 과정을 간단히 요약하여 그림 1에 나타내었다.

위에서 설명한 문턱 값 처리에 의한 영상분할은 기본적으로 개별적인 2차원 영상을 대상으로 영역 분할이 수행되기 때문에 3차원 데이터의 특성을 충분히 활용하지 못하는 점이 있다. 따라서 3차원 데이터의 특성을 활용할 수 있는 신경망에 의한 영상분할을 적용하였다. 본 연구에서는 각 부피요소에서 지역평균, LOG(Laplacian of Gaussian) 값, 기하학적 중심으로부터의 거리 등과 같은 3차원 특성 값을 계산하고, 이 특성 값들에 의하여 부피요소들을 분류하는 Kohonen(1984)의 SOM(Self Organizing Map)을 사용하였다. SOM에 의한 영상분할 과정을 요약하여 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

본 연구에 필요한 모든 영상처리 과정은 Math-Works사의 Matlab 소프트웨어를 이용하여 이루어

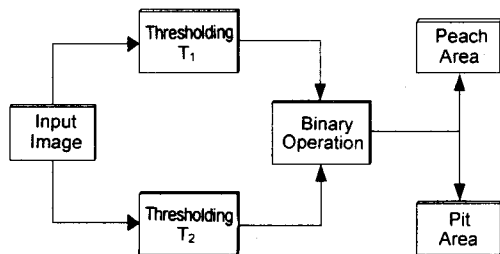


Fig. 1 Outline of the thresholding algorithm.

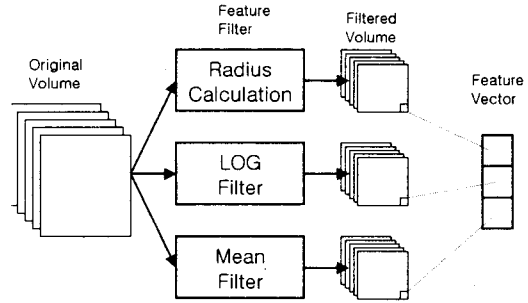


Fig. 2 Extraction of 3-dimensional features.

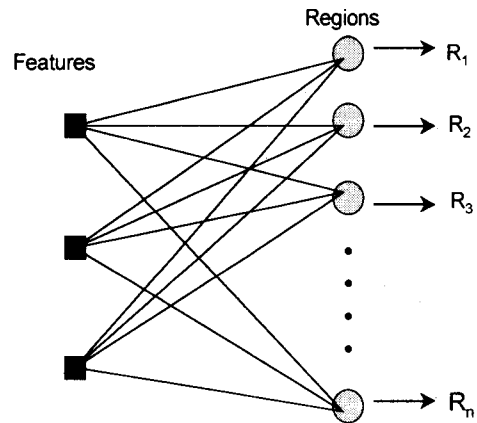


Fig. 3 Self-organizing map for clustering.

졌으며, Kohonen의 SOM 알고리즘 구현은 핀란드 헬싱키 기술대학의 컴퓨터과학과에서 제공하는 SOM 툴박스를 이용하였다.

다. 가시화 방법

등가평면(isosurface)이란 3차원 등고선(contour)을 일컫는 말로써, 여러 개의 다각형들을 이어 붙여서 대상체의 표면을 형성하게 된다. 본 연구에서는 등가평면을 생성하기 위하여 잘 알려진 Marching-Cubes 기법(Schroeder et al., 1997)을 이용하였으며, 등가평면 구현 과정을 그림 4에 요약하여 나타내었다. 등가평면 구현법은 대상체의 표면만이 화면에 나타나기 때문에 매우 신속한 가시화가 가능한 장점이 있는 반면에, 대상체 내부의 정보를 상실하게 되는 단점이 있다.

부피 묘사법(volume rendering)은 색상과 투명도

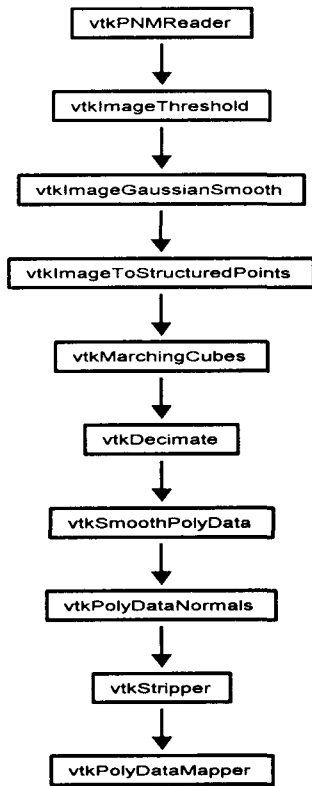


Fig. 4 Isosurface construction.

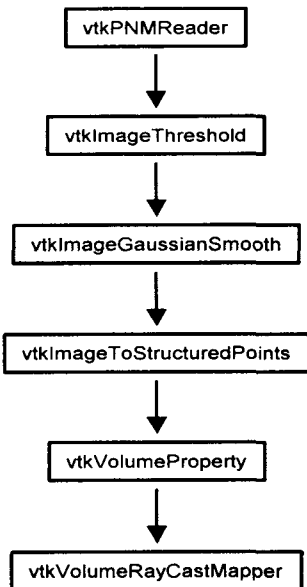


Fig. 5 Volume rendering.

를 정의한 LUT(look-up-table)에 근거하여 각 부피 요소(voxel)에서 불투명도(opacity)가 계산되며, 불투명도에 따라 빛의 투과정도가 달라지며, 투과 경로에 위치한 모든 부피요소들이 대상체의 외관에 영향을 미치게 된다. 따라서 부피묘사법은 광추적법(ray tracing) 또는 광조사법(ray casting)이라고도 한다. 본 연구에서 이용된 부피 묘사 과정을 그림 5에 요약하여 나타내었다. 부피 묘사법은 대상체를 현실감 있게 묘사할 수 있는 장점이 있는 반면에, 물체간의 경계가 불분명해지고 구현시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

본 연구에서는 가시화를 위하여 KitWare사의 VTK(Visualization ToolKit) V2.0을 이용하였다. VTK는 객체지향형 프로그래밍 환경에 알맞게 개발되어 있기 때문에, TCL 스크립트를 이용하여 각 가시화 클래스(class)를 연결시킬 수 있다.

3. 결과 및 고찰

가. 복숭아 및 씨의 부피 측정

MRI 데이터로부터 영상을 추출하여 복숭아와 씨의 영역을 얻기까지의 중간 단계 영상을 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 복숭아 단면의 원래 영상을 나타내는데, 배경과 경계를 이루는 가장자리 부근이 요철형상을 이루고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 자기공명영상을 얻을 때 사용한 RF 코일의 내경에 비하여 복숭아의 크기가 너무 커서 자화율(magnetic susceptibility)에 영향을 미친 현상을 나타내고 있다. 이러한 현상은 대상체의 정확한 부피 측정에 장애가 되기 때문에 입력영상을 획득하는 과정에서 발생되지 않도록 주의할 기울여야 한다.

그림 6(b)와 그림 6(c)는 문턱 값을 30과 80으로 설정하여 분할한 2진 영상이다. 이 두 개의 2진 영상을 적절히 조합하여, 그림 6(d)와 그림 6(e)에 나타난 복숭아 및 씨앗 영역으로 분할하게 된다. 참고로 그림 6(f)와 그림 6(g)는 SOM(self-organizing-map)을 이용하여 분할한 복숭아와 씨앗의 영역을 각각 나타낸다. 이와 같이 각 단면별로 분할한 결과를 총합하면 3차원 복숭아와 씨앗에 속하는 부피화소(voxel)의 수를 얻게 되며, 여기에서 얻어진 결과에 부피환산계수($0.625 \times 0.625 \times 1.25/1000$)를 곱해 주면 각각의 부피를 계산할 수 있다.

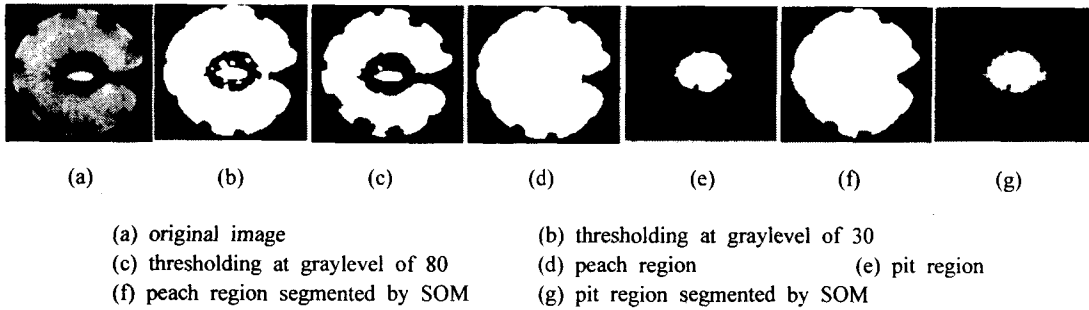


Fig. 6 Segmentation of peach & pit regions.

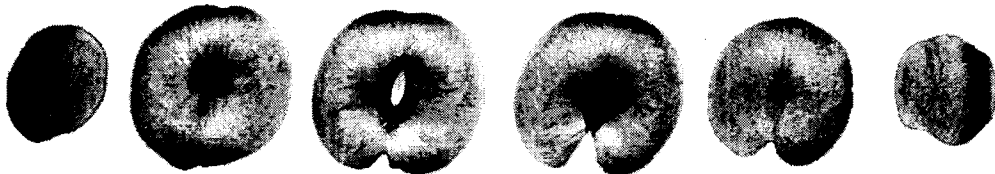


Fig. 7 Sample slice MR images of peach.

각 분할 방법을 4개의 복숭아 자기공명영상에 적용하여 예측한 부피 값들을 메스실린더를 사용하여 실제 측정된 값과 비교한 결과를 표 2에 나타내었다. 문턱 값 처리법을 적용하여 부피를 예측한 경우 복숭아 부피는 4.5%, 씨 부피는 26.1%의 평균 예측 오차를 나타내었다. SOM을 이용한 경우에는 복숭아 부피는 2.1%, 씨 부피는 19.9%의 평균 예측 오차를 나타내었다. 두 방법 모두 씨의 부피를 예측할 때의 예측 오차가 복숭아 부피를 예측할 때에 비하여 낮은 정확도를 나타내었다.

이는 씨와 그 주변의 경계가 불분명하여 분할에 어려움이 크고, 씨의 부피가 복숭아에 비하여 상대적으로 작기 때문인 것으로 사료된다.

제한된 시료의 개수로 인하여 통계적으로 의미 있는 결과를 얻지는 못하였으나, 영상분할 방법으로 SOM을 이용했을 때가, 문턱 값 처리법을 이용했을 때에 비해 상대적으로 평균예측 오차가 낮은 것으로 나타났다. 따라서, 2차원 정보에 의존하는 문턱 값 처리법에 비해 3차원 정보를 활용하는 SOM에 의한 분할방법이 자기공명영상의 분할에

Table 2 Peach and pit volumes predicted by volume segmentation algorithms

(units : mm³)

Sample No.		1	2	3	4
Peach Volume	Measured(Actual)	200.0	167.5	182.5	174.5
	Thresholding	201.2	179.9	192.0	182.5
	SOM	191.3	172.2	182.3	172.9
Pit Volume	Measured(Actual)	7.5	6.5	7.0	8.7
	Thresholding	7.3	5.4	4.2	4.8
	SOM	9.4	7.0	6.0	5.9

보다 더 효과적인 것으로 판단되며, 추가적인 3차원 특성 값들을 활용하면 보다 더 정확한 3차원 정보를 정량적으로 얻는 것도 가능할 것으로 판단되었다.

나. 복숭아의 3차원 가시화

전술한 분할 방법을 이용하여 배경영역을 제거한 MRI 단면영상들 중의 일부를 그림 7에 나타내었으며, 이들 영상이 3차원 가시화를 위하여 사용되었다. 그림에서와 같이 과육 부분의 화소 값이 높고, 복숭아 씨 부분의 화소 값이 낮은 것을 알 수 있는데, 이는 두 부분의 스핀 밀도에 차이가 있기 때문이다.

X-축, Y-축, Z-축 방향으로 복숭아를 절단하였을 때의 단면모양을 종합하여 그림 8에 나타내었다. 절단 평면을 전후좌우로 이동시키면서 원하는 위치의 단면모양을 살펴볼 수가 있다.

그림 9는 복숭아의 외관을 등가평면 구현법으로 표현한 후에, 상반부의 1/4을 절단하고, 중앙부에 부피묘사법으로 구현한 복숭아 씨를 결합한 것이다. 복숭아를 등가평면으로 표현하였기 때문에 절개한 곳을 통하여 내부를 들여다 볼 수가 있으며 과육과 씨의 상대적 위치를 쉽게 파악할 수 있다. 복숭아를 회전시키게 되면 씨앗은 보이지 않게 된다.

그림 10과 11은 부피 묘사법을 이용하여 전체 복숭아와 2분된 복숭아를 구현한 것이다. 앞에서

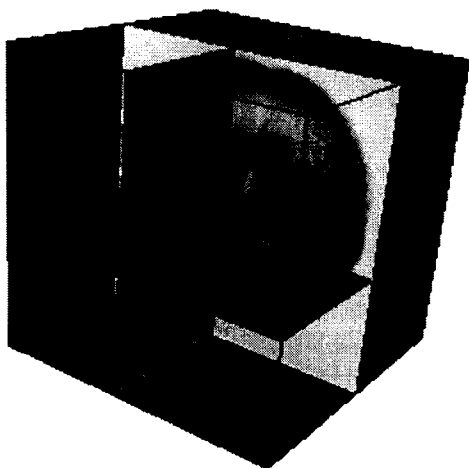


Fig. 8 Projected peach image into three orthogonal directions.

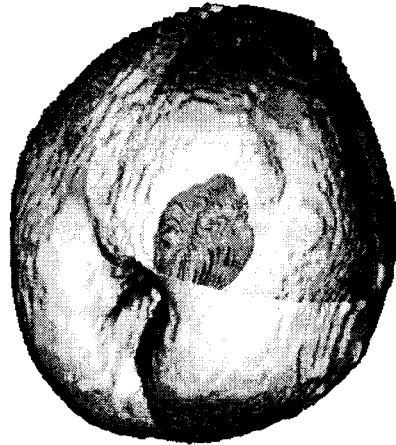


Fig. 9 Volume rendered pit within the surface rendered peach skin.

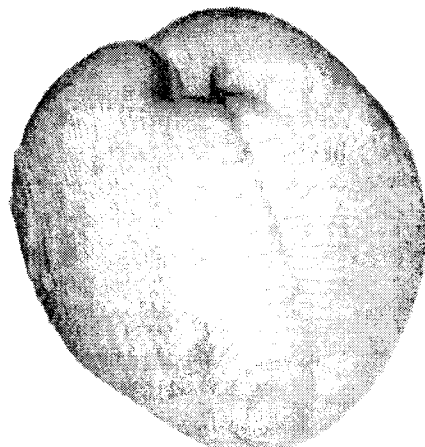


Fig. 10 Whole peach visualized by volume rendering.

설명한 바와 같이 부피 묘사법은 색상과 투명도에 따라 외관이 달라지게 되기 때문에, 각 LUT (look-up-table)의 값들을 변경함으로써 전혀 다른 느낌의 가시화를 구현하는 것이 가능하다. 특히 특정한 화소 값 범위를 완전 투명하도록 LUT을 설정해주면, 그 범위 내의 화소들은 화면에 나타나지 않게 되며, 뒤에 가려진 물체가 나타나게 된다. 즉, 그림 10의 복숭아는 마우스를 한 번씩 클릭할 때마다 부피가 안쪽으로 줄어들도록 구현되어 있다. 또한 클리핑 기능을 활용하여 그림 11에서와 같이 특정 부위를 화면에 나타나지 않도록



Fig. 11 Pit and sliced peach visualized by volume rendering.

할 수도 있다.

복숭아 자기공명영상에 여러 가지 3차원 가시화 기법을 적용함으로써 가공 및 선별에 도움이 되는 내부구조에 대한 정보를 비파괴적으로 얻을 수 있었다. 이러한 기법들은 전자현미경, 컴퓨터 단층촬영, 초음파 영상 등으로부터 대상체의 내부구조 정보를 이해하기 쉽게 전달하는데 널리 활용될 수 있을 것이다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 복숭아의 자기공명영상 데이터를 활용하여 복숭아와 씨의 부피를 예측하였고, 내부구조에 대한 정보를 비파괴적으로 얻을 수 있는 가시화 기법을 소개하였다. 복숭아의 자기공명영상을 얻기 위하여 Bruker Biospec 7T spectrometer를 이용하였고, 영상처리와 가시화를 위한 소프트웨어로는 MathWorks사의 Matlab과 KitWare사의 Visualization ToolKit을 각각 이용하였다.

부피 측정을 위하여 문턱 값 처리(thresholding)에 의한 영상분할법과 인공신경망(SOM)을 이용한 영상분할법을 구현하였으며, 각각의 방법에 의한 예측결과를 실측값과 비교하였다. 문턱 값 처리법을 적용하여 부피를 예측한 경우 복숭아 부피는 4.5%, 씨 부피는 26.1%의 평균 예측 오차를 나타

내었다. SOM을 이용한 경우에는 복숭아 부피는 2.1%, 씨 부피는 19.9%의 평균 예측 오차를 나타내었다. 두 방법 모두 씨의 부피를 예측할 때의 예측 오차가 복숭아 부피를 예측할 때에 비하여 낮은 정확도를 나타내었다.

시료의 제약으로 인하여 두 방법의 우열을 판별하기 위한 통계적인 자료를 얻지는 못하였으나, 영상분할 방법으로 SOM을 이용했을 때가, 문턱 값 처리법을 이용했을 때에 비해 상대적으로 평균 예측 오차가 낮았고, SOM을 이용한 영상분할법이 3차원 데이터로의 확장가능성이 높기 때문에, 이 방법의 보안을 위한 추후 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

등가표면 구현법과 부피 묘사법을 활용하여 내부구조를 가시화한 결과를 제시하였다. 이와 같은 3차원 가시화 기법을 복숭아 자기공명영상에 적용함으로써 가공 및 선별에 도움이 되는 내부구조에 대한 정보를 비파괴적으로 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Ashton, E. A., K. J. Parker, M. J. Berg and C. W. Chen. 1997. A novel volumetric feature extraction technique with applications to MR images. *IEEE Trans. Medical Imaging*, vol. 16(4).
2. Barreiro, P., J. Ruiz-Cabello, M. E. Fernandez-Valle, C. Ortiz and M. Ruiz-Altisent. 1999. Mealiness assement in apples using MRI techniques. *Magnetic Resonance Imaging*, vol. 17(2):275-281.
3. Bomans, M., K. H. Hohne, U. Tiede and M. Riemer. 1990. 3D segmentation of MR images of the head for 3D display. *IEEE Trans. Medical Imaging*, vol 9, June.
4. Chen, P. and Z. Sun. 1991. A review of non-destructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products. *J. Agric. Engineering Res.* 49:85-98.
5. Choi, T. H., H. Hwang and C. S. Kim. 2000. Development of automatic system for 3D visualization of biological objects. *Agri. & Biosys. Eng.*, vol 1(2):95-99.
6. Danielsson, P. E., Q. Lin and Q. Ye. 1998. Segmentation of 3D-volumes using second

- derivatives. EE Dept. Linkoping University, Sweden.
7. Grennhill, D. and E. R. Davies. 1995. A new approach to the determination of unbiased thresholds for image segmentation. *Image Processing and Its Application*, IEEE Conference Publication.
 8. Heil, J. R., K. L. McCarthy, J. B. German and M. J. McCarthy. 1991. Use of magnetic resonance imaging for evaluation of beer foam characteristics. *The American Society of Brewing Chemistry*, vol 48(4):119-122.
 9. Hwang, H., T. H. Choi, C. S. Kim and S. H. Lee. 2001. Development and evaluation of system for 3D visualization model of biological objects. *The Journal of the KSAM*, vol. 26(6):545-552.
 10. Kim, S. M., P. Chen, M. McCarthy and B. Zion. 1999. Fruit internal quality evaluation using nuclear magnetic resonance sensors. *J. agric. Engineering. Res.* vol 74:293-301.
 11. Kim, Y. H. and C. S. Kim. 2000. Three dimensional visualization for vessel structure of grafted seedlings. *Proceedings of the KSAM 2000 Winter Conference*, vol. 5(1):492-498.
 12. Kohonen, T. 1984. *Self organization and Associative Memory*, Springer-Verlag.
 13. Nott, K. P., S. D. Evans and L. D. Hall. 1999. Quantitative magnetic resonance imaging of fresh and frozen-thawed trout. *Magnetic Resonance Imaging*, vol. 17(3):445-455.
 14. Reddick, W. E., J. O. Glass and E. N. Cook. 1997. Automated segmentation and classification of multispectral magnetic resonance images of brain using artificial neural networks. *IEEE Trans. Medical Imaging*, vol. 16(6).
 15. Russ, J. C. 1995. *The Image Processing Handbook*, 2nd ed., CRC Press..
 16. Schroeder, W., K. Martin and B. Lorensen. 1997. *The Visualization Toolkit*. Prentice Hall.
 17. Steen, E. and B. Olstad. 1994. Volume rendering of 3D medical ultrasound data using direct feature mapping. *IEEE Trans. Medical Imaging*, vol 13, Sept.
 18. Tiede, U., T. Schiemann and K. H. Hohne 1998. High quality rendering of attributed volume data. *IEEE Comput. Graphics Appl.* vol 18.
 19. Wang, Y., T. Adah and S. Y. Kung. 1998. Quantification and segmentation of brain tissues from MR images: A probabilistic neural network approach. *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 7(8).
 20. Zion, B, M. J. McCarthy and P. Chen. 1994. Real-time detection of pits in processed cherries by magnetic resonance projections. *Food Science and Technology*, 27(5), 457-462.