

자기공명영상을 이용한 바이오시스템 연구

김 성 민

전북대학교 농과대학 생물자원시스템공학부

Magnetic Resonance Imaging and Biosystem Research

Seong Min Kim

Division of Bioresource Systems Engineering, Chonbuk National University

Abstract

Magnetic resonance imaging techniques, which has about 30 year-old history, are widely used in various engineering fields in addition to basic scientific and medical areas recently due to relating hardware advances and hard works of many researchers in this field. Nuclear magnetic resonance (NMR) and magnetic resonance imaging (MRI) principles were briefly described. NMR techniques can be applied to various biosystems such as agricultural products, food, and biomedical tissues due to its non-destructive and non-contacting nature. MRI, which is extension of 2 dimensional NMR, is now intensively used in medical area and applied to high moisture biosystems such as fruits and food. This technique is presently utilized as a tool to refine theoretical models for improving food processes such as canning, freezing, frying, drying, form and emulsion formulation, crystallization, and extrusion processes in food or chemical engineering areas. Recently developed solid MRI techniques open new era of the application of MRI to various solid like biosystems such as solid biological tissues, dried agricultural products, low moisture food systems etc. Also, MRI techniques are now being tried and utilized in developing on-line quality monitoring and evaluating sensors.

Key words: magnetic resonance imaging(MRI), nondestructive, biosystem, solid, sensor

서 론

핵자기공명(nuclear magnetic resonance, NMR) 현상은 방사선을 방출하는 핵 물질과는 무관하고 라디오 주파수 영역에서 전자기복사선 흡수를 측정하는데 기초를 두며 1946년에 원리가 발견된 이후, 1970년대의 전자공학, 컴퓨터, 전기공학의 발전과 아울러 장치의 획기적인 발전과 그 측정기술 및 응용분야가 확대되었다. 현재 이화학용 고분해능 분석기에 응용되고 있을 뿐만 아니라 의학 분야에서도 광범위하게 이용되고 있으며, 최근에는 고자장의 NMR대신 저자장의 비교적 저렴한 NMR 기기가 개발되어 농업과 식품산업에서 내부 품질 판정

장치로서 응용이 되고 있다. NMR에서 이용하는 주파수 대역은 1~900 MHz로 이미 의료분야에서 대상체(인체)에 무해함이 증명되어 널리 이용되고 있다. 바이오시스템을 대상으로 하는 대부분의 비파괴 품질 측정 기술은 빛의 상호작용, 진동, X-ray, 마이크로웨이브, 초음파, 근적외선(near infra-red, NIR) 그리고 핵자기공명 등의 원리에 기초하고 있다. 수소 핵자기공명(Proton NMR)은 다양한 바이오시스템의 화학적 성분이나 내부 구조를 고려한 특성분석에 아주 유용하다는 것이 여러 연구자에 의해서 밝혀졌다(Kim, 1999a). 또한, 2차원 NMR의 변형인 자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging, MRI)은 시료 내부의 화학적, 전기적 환경에 기초한 거시적 또는 미시적 공간 구조 정보를 제공한다. 최근에는 저수분의 고체상태 시스템을 자기공명영상 기법을 이용하여 분석할 수 있는 기술이 개발되어 자기공명을 이용한 활발한 연구가 진행되고 있다 (Balcom *et al.*, 1996). 핵자기공명 현상은 방사선을

Corresponding author: Seong Min Kim, Assistant Professor, Division of Bioresource Systems Engineering, Chonbuk National University, Deokjin dong 66/1, Chonju, Chonbuk 561-756, Republic of Korea.
Phone: 063-270-2617, Fax: 063-270-2620
E-mail: smkim@moak.chonbuk.ac.kr

방출하는 핵 물질과는 무관하므로 일반인들에게 오해를 살 염려가 있어 최근에는 자기공명 현상으로 불린다.

자기공명 현상(Nuclear Magnetic Resonance)

양성자(proton)와 같이 자기 모멘트를 갖는 원자핵이 외부의 강한 자기장(B)에 놓이면 시료에는 거시적 자화(magnetization) M이 발생한다. M의 크기는 시료 안에 있는 양성자('H)의 수에 비례한다. 이 자화는 외부의 자기장과 같은 방향으로 생성된다. 이런 원자핵들의 자기 모멘트는 자기장의 방향으로 정렬하려는 성질이 있으며 외부의 자기장의 크기와 관련이 있는 특정한 주파수(ω)로 그들의 축에 대하여 세차운동(precess)을 한다. 자기공명 분광법의 원리는 Larmor 관계식이라고 알려진 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\omega = \gamma B \quad (1)$$

여기서 γ , gyromagnetic 비율의 단위는 $\text{rads}^{-1}\text{gauss}^{-1}$ 이고 B의 단위는 gauss이다. Gyromagnetic 비율은 원자핵의 종류에 따라 변하는 상수이다('H의 γ 는 $2.68 \times 10^4 \text{ rads}^{-1}\text{gauss}^{-1}$ 이다. 따라서 1 tesla(1,000 gauss)의 자장 크기의 자석에서 발생하는 proton의 주파수는 42.65 MHz이다. 자화 M은 추가적으로 라디오 주파수(radio frequency, RF) 펄스(pulse), B_1 을 입사(excitation)하여 검출할 수 있다. 외부에서의 펄스 입사 후 수신 코일에 유도되는 신호는 시간에 대하여 지수적(exponentially)으로 감소한다. 이 현상을 이완(relaxation)이라 부른다. 이완 현상이 발생하는 과정에 원자의 spin들은 에너지를 외부로 방출하며 에너지 평형상태로 돌아온다. 이완 현상은 두 과정으로 설명되어진다. 그 중 하나는 세로축 relaxation(spin-lattice 또는 T_1 relaxation)이고 다른 하나는 가로축 relaxation(spin-spin 또는 T_2 relaxation)이라 부른다. 이 T_1 과 T_2 시상수 값이 물질의 화학적, 물리적 상태에 따라 변하며 다양한 물질의 특징을 나타내는 NMR 특성치이다.

실제로 시료 내부에서는 외부 자기장의 영향으로 인한 화학적, 전자적 환경의 변화로 생긴 국소적 자기장의 변화가 원자핵들에 영향을 미친다. 그러므로 proton을 포함하는 오일, 당분, 그리고 수분 등과 같은 다양한 분자들은 각기 다른 주파수의 신호를 발생한다. 이렇게 같은 원자라 할지라도 분자구조에 따라 다른 신호를 발생하는 현상을 chemical

shift라 한다. 대부분의 바이오시스템은 'H, ^{13}C , ^{19}F , ^{23}Na , ^{31}P 그리고 ^{39}K 같은 NMR 성질을 갖는 원소들을 갖고 있다. 이들 원소 중 'H은 모든 생물체에 가장 풍부하다. 그러므로 여기서는 'H에 초점을 둔 수소 NMR과 MRI에 관하여 설명하겠다.

자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging, MRI)

자기공명영상은 시료로부터 공간 위치의 함수로서 NMR 특성을 측정하는 실험 방법이다. 시료로부터 공간 위치에 따라 다른 주파수를 발생시키기 위해 선형의 자기장 gradient를 이용한다. 주파수와 자기장의 관계는 다음 식으로 나타낸다.

$$\omega = (B + Gx) \quad (2)$$

여기서 ω 는 주파수(rad/sec), G는 선형 자기장 gradient, gauss/cm) 그리고 x는 공간상의 거리(cm)이다. 예를 들어 공간상의 x 방향의 증가에 따라 자기장의 세기가 변하는 선형 자기장 gradient를 시료에 작용시키면 시료 내에 공간적으로 분포하고 있는 proton들은 자기장의 세기 변화에 따라 서로 다른 주파수로 세차운동을 한다. 이 주파수는 외부에서 가하는 균일한 자기장(B)과 선형 자기장과 공간 위치에 의해 발생하는 자기장(Gx)의 함수이다. 따라서 선형 자기장 gradient를 적절히 사용하여 시료 내의 NMR 신호를 1차원, 2차원 그리고 3차원으로 사상(mapping)할 수 있다.

시료 내부의 한 영역에 있는 운동성이 있는 proton의 농도에 비례하는 NMR 신호의 크기는 자기공명영상의 농도나 밝기의 변화를 일으킨다. 즉, proton의 농도가 큰 수록 강한 신호를 발생한다. 이외에 relaxation 상수인 T_1 과 T_2 는 시료의 상태에 따라 변하는 중요한 영상 농도 변환 인자이다. 이 세 가지 인자는 대상체의 상태에 따라 변하는 인자들이다. 이들 인자 외에도 자기공명영상의 농도는 온도, 확산(diffusion), 유체 속도, 자기 민감도(magnetic susceptibility) 등의 변화에 따라 변한다.

자기공명영상 시스템(MRI System)

자기공명기술은 1970년대 후반부터 기초 생명과학분야와 의료분야에서 사용되어 괄목할만한 기술적 성장을 이룩하였다. 여기에 최근 전기, 전자, 컴퓨터기술 분야의 비약적인 발달과 다양한 자기공명영상 기술의 개발로 실시간 자기공명영상(functional

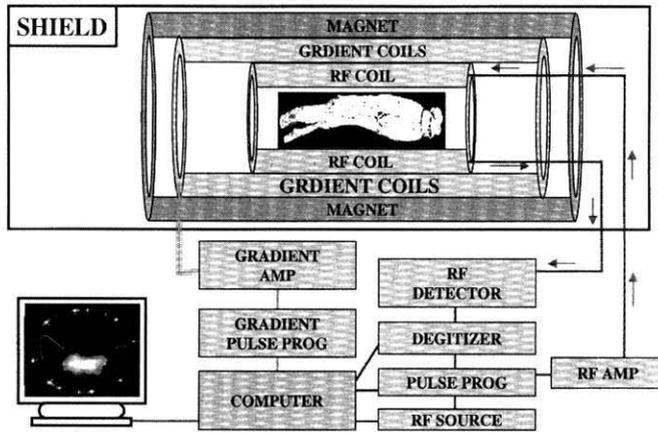


Fig. 1. Schematic diagram of magnetic resonance imaging system.

MRI), 미세 자기공명영상(MR microimaging), 고체 자기공명영상(solid MRI) 등의 기술이 속속 개발되어 다양한 분야의 연구에 응용되고 있다. 한마디로 자기공명영상 기술은 21세기를 대표하는 첨단 기술이라 할 수 있다. 현재 농산가공공학, 식품공학, 화학공학 분야 등에서 공정제어와 물질분석에 활발히 응용되고 있다. Fig. 1은 자기공명영상 시스템의 개략도를 보여주고 있다.

자기공명영상 기술은 어떤 대상체에 어떠한 목적으로 사용하는 따라 적절한 시스템을 선택하느냐가 중요하다. 선택기준 인자는 다양하나 중요한 것은 자석, 선행자기장 코일, 라디오파 코일 등의 선택이다.

자석(Magnet)

주 자기장을 생성하는 자석은 영구자석, 전자석, 초전도자석 등 크게 세 가지로 나누어지며 자석이 발생하는 최적의 자기장 크기는 대상체와 얻고자 하는 정보에 따라 변할 수 있다. NMR 분광법에서는 거대 분자, 고체 시료 등을 대상으로 하여 자기장의 세기가 센 초전도자석 NMR 시스템을 주로 사용하나 2차원 NMR 분광법의 연장인 자기공명영상 기술은 저자장의 자석을 이용해도 대상체 내부의 공간적 정보를 얻을 수 있다.

초전도자석은 초전도 현상을 유지하기 위해 극저온 상태를 필요로 하며 이를 위해 주기적으로 액체 헬륨이나 질소를 자석이 있는 밀폐된 공간에 채워주어야 한다. 따라서 장치의 사용 유무에 관계없이 항상 장치를 가동하여야 하며 유지비가 많이 든다. 초전도자석은 아주 센 자장을 발생시킬 수 있으며 미

세영상이나 고체영상에 유효하다. 현재 900 MHz(대략 210000 gauss) 자기공명 시스템이 개발되어 최첨단의 바이오 연구 분야에서 분자 구조의 분석에 활용되고 있다.

전자석은 자장을 발생하기 위해 구리나 알루미늄 전도 코일에 일정한 전류를 흘려주어야 한다. 이 자석은 이동하거나 설치하기에 용이하나 무게가 많이 나가고 자장을 발생하기 위해 항상 전원을 공급하여야 하며, 균일한 자장을 얻기 위해 사용하기 전에 일정 시간의 준비 기간이 필요하다. 또한 전원을 오래 공급하면 자석이 가열되는 현상이 발생하여 자석을 냉각할 수 있는 장치가 필수적으로 필요하다.

영구자석은 다양한 형태의 자석을 만들 수 있고 자기장을 발생하기 위해 부가적인 전원이나 장치가 필요 없는 장점이 있다. 그러나 자기장의 세기가 큰 자석을 제작하기 힘들며 자장을 증가시키기 위해 특별한 장치를 부착하는 경우도 있다. 현재 저분해능 MRI를 이용한 응용분야에서 가장 많이 사용되고 있는 자석이다.

선행자기장 코일(Gradient coil)

선행자기장 코일은 주 자기장에 위치한 시료로부터 발생한 NMR 신호를 공간적인 정보를 얻기 위해 자기장을 생성해주도록 설계되었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 시료와 주 자기장을 생성하는 자석 사이에 위치하며 3차원 정보를 얻기 위해 3축의 선행자기장 코일이 필요하다. 선행자기장 코일은 고분해능 자기공명영상분광 기기에도 다양하게 사용되며 저분해능 자기공명분광에서도 시료의 diffusion

을 측정하기 위해 사용되기도 한다. 저수분 상태의 바이오시스템의 영상을 얻을 때에는 자석은 저장장을 발생하는 영구자석을 사용할 수도 있으나 선형 자기장 코일은 센 선형자기장(60 Gcm^{-1} 이상)을 발생시킬 수 있는 선형자기장 코일이 필수적이다. 일반적인 고수분 시스템의 영상을 위해서는 10 Gcm^{-1} 이하의 선형 자장을 발생시킬 수 있는 선형자기장 코일이면 충분하다.

라디오파 코일(Radio Frequency, RF, coil)

라디오파 코일은 시료가 놓여진 자석이 발생하는 주파수와 같은 주파수를 생성할 수 있는 공명기(resonator)이다. 일반적으로 레이더에서 음파를 발생하여 추적체에서 반사되는 음파를 수집하여 분석하는 것과 유사한 원리로 작동한다. 이 코일의 회로는 일반적인 RLC 회로(저항-인덕터-커패시터 회로)로 고순도의 구리선과 nonmagnetic 커패시터로 구성한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 코일 안이나 위에 시료를 놓고 라디오파를 보내고 시료에서 발생한 미약한 NMR 신호를 감지한다. 신호의 SNR(signal to noise ratio)를 높이기 위해 시료의 형상과 크기에 따라 적절한 코일을 선택하여야만 한다. 다양한 코일의 설계에 필요한 구체적인 요인들은 Link(1992)의 논문을 참조하기 바란다.

자기공명영상 기술을 활용한 바이오시스템 연구

NMR 기술은 50년 넘게 생물체를 연구하는데 쓰이고 있다. 이제 NMR 분광법은 화학자나 생물학자에게는 필수적으로 쓰이는 물질 분석법이 되었다. MRI는 80년대 초반부터 의료분야에서 이용되고 있으며 점차 X-ray에 의한 진단법을 대체하고 있다. MRI의 역사가 25년 밖에 되지 않음을 감안할 때 놀라운 일이라 할 수 있다. NMR 기술의 주요 특징으로는 첫째, 비파괴 기술이다. 둘째, 거의 모든 생물체에 적용할 수 있다. 셋째, 원하는 원소의 정보를 선택적으로 취할 수 있다. 마지막으로 이 기술은 대상체의 물리적 구조, 화학적 조성에 따라 변하는 정보를 제공한다.

1970년대 중반에 알려진 자기공명영상 기술은 현재 자기공명 미세영상(NMR microimaging)과 f-MRI(functional MRI)를 이용한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. f-MRI 기술을 이용하여 실시간으로 인간의 뇌가 다양한 주위 환경의 변화에 따라 변하는 것을 연구할 수 있다. 또한 자기공명 미세영상을 이

용하여 과일 내부의 수분의 이동 변화와 당도의 분포를 알 수 있으며 현재 동물과 식물 단세포를 MRI를 이용하여 분석할 수 있는 단계에 있다. 연구자들은 이 방법으로 세포벽의 투과도(permeability)를 측정할 수 있으리라 생각된다. 또는 저장이나 가공 중에 일어나는 세포의 재구성 과정도 연구할 수 있다. 식품 내에서 수분의 역할과 이동을 NMR과 MRI 기술을 이용하여 효과적으로 연구할 수 있으며, 농산물에 관한 최근의 연구는 농산물의 생리적 변화와 품질 평가 센서로 NMR 기술을 이용하는데 있다. 이 방법은 비파괴적이고 신호를 얻기 위해 센서가 시료와 접촉할 필요가 없기 때문에 바이오시스템의 품질 측정 센서로 적합하다(Kim, 2001).

MRI를 이용한 고수분 바이오시스템 연구

자기공명영상 기술로서 잘 알려진 공간 영역(spatial domain)에서의 NMR 기술은 현재 의학 분야에서 가장 활발히 사용되어 지고 있다. 1970년대 중반에 그 기술이 발견되어 Hinshaw *et al.*(1977)에 의해 최초로 자기공명영상 기술이 Nature지에 발표된 이후 Hinshaw *et al.*(1979)에 의해 다양한 바이오시스템을 대상으로 자기공명영상의 가능성을 보였다. 자기공명영상 기술은 1980년대부터 지금까지 의료 분야에 사용되기 시작하면서 급속도로 발전하고 있다. 현재 MRI는 농업과학 및 식품관련 분야에서도 농산물이나 식품의 생리적 현상, 물질의 이동 및 품질의 측정 등의 다양한 연구 분야에서 고전적인 연구 분석 방법과 함께 이용되면서 기준에 알 수 없었던 현상을 규명하는데 많이 쓰이고 있으며 앞으로 많은 분야에서 그 활용도를 찾을 수 있는 기술이다. 최근에 식품에 대한 자기공명영상 기술의 응용에 대한 연구는 다음과 같다.

Duce *et al.*(1995)은 버터, 콩, 리가토니, 파스타 그리고 스낵류의 수화(hydration)를 자기공명영상에 의해 비 침투적으로 영상화하였다. 시료에 흡수되는 수분의 비율과 변화를 관찰하였으며, 영상 신호의 강도와 수분 함량 사이의 관계도 조사되어졌다. Sonogo *et al.*(1995)은 증상이 매우 심해져도 외부적으로 나타나지 않는 복숭아의 질병인 woolly breakdown을 관찰하기 위해 저온 저장 상태 하에서, 파괴적인 방법(펙틴 조성)과 비파괴적인 방법(NMR 영상과 X-선)을 사용하였다. Woolly breakdown은 낮은 프로톤 밀도에 상응하는 어두운 영역이 NMR 영상으로 발견되어졌으나, woolly 진행 단계에서 복숭아

조직 내에서의 수분의 이동에 영향을 주지 않았다. Clark *et al.*(1996)은 수확한 감을 5주 동안 저장할 때, 이완 특성에 대한 시간과 저장시의 대기 상태의 효과에 대해서 조사하였다. 냉해 과정의 초기 단계에서 영상의 시각적인 검사나 이완 특성의 변화로는 확인할 수 없었으나, MA(Modified Atmosphere) 처리된 과실에 있어서 감소된 호흡으로부터 발생하는 용해성 대사산물의 증가된 농도는 T_1 보다는 T_2 에 더욱 민감한 징후를 나타내었다. Kerr *et al.*(1997)은 덜 익은 키위의 결빙 과정을 자기 공명 영상으로 관찰하였는데, 과실의 표피에서 시작하여 서서히 중심 방향으로 동결이 진행되는 부분은 신호의 감소에 의해 영상화되어졌다. 이 실험에서 동결이 된 후 T_2 이완 상수의 현저한 감소는 저온 저장시 장애를 입은 과실을 선별하는 on-line 센서의 설계가 가능함을 시사하였다. Clark *et al.*(1998)은 저온 저장 중에 감소되는 후지 사과와 밀병을 관찰하는 데 있어서 횡단면 및 종단면에서 수집된 2차원 multi-slice 영상과 사과 전체에 대한 3차원 데이터 배열의 조작을 기초로 한 자기 공명 영상을 이용하였다. Song *et al.*(1998)은 낱알 밀의 3차원적인 수분 분포에 대해서 비파괴적으로 측정할 수 있음을 증명하기 위해서 연구를 수행했는데, 3D MRI 기술이 12% 저장습도(wet basis)상태에서 낱알 밀을 조사하기 위해 적용되어졌다. 3D projection reconstruction(3 DPR) 기술은 고 해상도 프로톤 밀도 영상을 획득하기 위해서 사용되어졌으며, 영상의 공간 분해능은 $94 \times 94 \times 94 \text{ m}^3$ 이었다. 3D 프로톤 밀도 영상은 밀에서의 3D 수분 분포에 관련되었으며, 12% 수분 함량에서, 밀의 녹말 내배유(endosperm)에서 수분 분포는 균일하지는 않았다. Kerr *et al.*(1998)은 식품이 동결하는 동안에 얼음이 형성되는 과정을 MRI에 의해 조사하였는데, 얼음의 형성은 공간상에 위치한 NMR 신호 강도의 감소로서 관찰되어졌다. 토마토, 당근, 완두콩과 닭다리 등이 350 m의 해상도로 연구되어졌으며, 수분 또는 지방의 함유에 따라 강조되어졌던 내부 구조들은 자기공명영상에 의해 구분되어졌다. 이 실험으로, MRI는 동결 시간과 동결 과정에서 식품 구조에 대한 중요성을 평가할 수 있음을 제시하였다. Kim *et al.*(1999a)은 초전도 자기공명영상 시스템을 이용하여 컨베이어 벨트 위에 놓여져 움직이는 체리의 1차원 영상을 획득하고 이를 분석하여 체리 내부에 씨의 유무를 확인할 수 있는 MRI 센서의 가능성에 관한 연구를 시도하였다. 컨베이

어 벨트는 초당 최대 250 mm까지 구동되었으며 이 속도에서도 자기공명영상 신호가 크게 왜곡되지 않음을 밝혔다. 또한 Kim(1999b)은 자기공명영상 기법을 이용하여 소고기의 이완이상수를 공간적으로 얻을 수 있는 방법을 제시하여 다양한 부위의 자기공명특성을 일련의 영상을 통해 쉽고 빠르게 얻을 수 있었다. Lim *et al.*(2003)은 자기공명영상 기술과 디지털 영상처리 기법을 이용하여 수삼의 연근을 추정하고 내부의 이상 조직을 검출할 수 있는 방법도 제시하였다.

MRI를 이용한 저수분 바이오시스템 연구

자기공명영상은 다양한 분야에서 상대적으로 긴 자기공명 이완상수값들을 갖는 대상체의 내부구조를 시각화할 수 있는 좋은 방법이다. 그러나 수분 함량이 낮은 고체 상태의 시스템은 매우 짧은 이완상수값을 갖게 되어 새로운 영상기법의 도입이 시도되고 있다. 저수분 시스템 연구에 사용된 기존의 자기공명영상 기법들은 영상을 얻기 위해 시간이 많이 걸리고 3차원 영상을 얻는데 문제점이 많이 있었다. 그러나 최근에 개발된 새로운 자기공명영상 기법들은 영상 시간을 단축시키고 3차원의 영상 신호를 얻을 수 있어 폴리머, 고체 생체조직, 가스 성분 등의 저수분 시스템을 연구하는데 많은 도움을 준다(Balcom, 1998).

Balcom(1998)은 고체 자기공명영상 기법의 일종인 SPRITE(single-point ramped imaging with T_1 enhancement) 기법을 이용하여 spin-spin 이완상수 변형인 T_2^* 가 약 130 μs 인 콘크리트 시료의 영상을 얻는데 성공하였고 가스상태의 ^{19}F 의 영상을 얻는데 성공하였으며 ^{31}P 영상을 통해 뼈의 3차원 영상을 얻는데 성공하였다. Seo *et al.*(1998)은 기존의 자기공명영상 기법인 gradient-echo(GE)와 spin-echo(SP) 기법을 이용하여 고체 생체조직의 영상획득이 어렵다는 것을 발견하였고 CTI(constant-time-imaging) 기법을 이용하여 뼈, 연골, 이빨 등의 고체 생체조직을 연구하였다. Cornillon과 Salim(2000)은 저자장의 영구자석 MRI 장치에서 SPRITE 기법을 이용하여 저수분의 cereal과 쿠키가 수분을 흡수하는 과정을 연구하였다. 1차원 SPRITE 기법을 통하여 시간 변화에 따른 자기공명영상 신호의 변화를 분석하였고 기존의 MRI 영상기법과 비교하여 각각의 방법의 이점을 설명하였다. Lim과 Kim(2003)은 고자장의 초전도 MRI 시스템에서 고체 자기공명영상 기법의

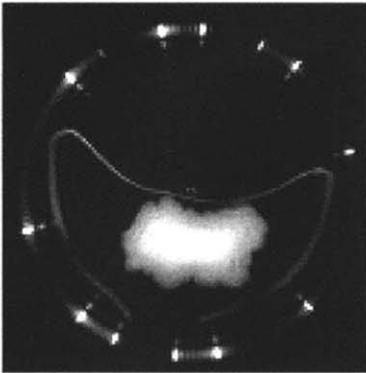


Fig. 2. 2D MR images of heaven grade red ginseng.

하나인 SPI(single-point-imaging) 기법을 이용하여 수분이 약 13%인 홍삼의 영상을 얻어 내부구조 변화에 따른 영상 신호의 변화를 분석하였다. Fig. 2는 SPI 기법을 이용하여 얻은 3차원 자기공명영상으로 영상범위는 40×40×80 mm이며 해상도는 0.315 mm이다. 홍삼의 경우 T_2^* 가 약 300 s로 일반적인 MRI 시스템을 이용하면 영상을 얻기 힘들다. 이 기법을 이용하면 시료 주위를 감싸고 있는 종이 테이프에서도 신호가 발생함을 알 수 있었다.

결 론

대략 30년 정도의 역사를 갖고 있는 자기공명영상 기술은 최근 비약적인 하드웨어의 발전으로 기초 과학과 의학 분야뿐만 아니라 공학분야에도 많이 응용되고 있다. 간략하게 자기공명과 자기공명영상 기술의 원리에 관하여 알아보았으며 이 기술들을 이용한 다양한 연구에 관하여도 알아보았다. 비파괴적이며 비접촉 방식의 자기공명영상 기술은 식품, 재료, 의공학 등 다양한 공학분야에서 그 활용도가 무궁무진하다. 농산물이나 식품의 물리적 또는 화학적 정보를 대상체의 손상 없이 얻을 수 있으며 식품의 분석에서는 기존의 분석 방법과 연계하면 새로운 연구 분석 방법을 제시할 뿐만 아니라 농산물과 식품의 저장, 가공 중에 일어나는 여러 과정을 좀더 명확히 연구할 수 방법을 제공한다. 최근에는 고체 상태의 시스템을 영상으로 분석할 수 있는 다양한 방법이 개발되어 이 기술을 이용한 연구 영역은 급속도로 확산되고 있다. 또한 MRI 기술을 이용한 센서는 기존의 센서들이 제공하지 못했던 새로운 차원의 정보를 제공한다.

현재 역사가 일천한 NMR 기술은 날로 새로운 연구 기술과 방법을 제공하고 있으며 가장 큰 약점으로 작용하고 있는 MRI 장치의 가격도 전자 공학, 물리학, 컴퓨터 기술 등의 발달과 사용자 저변의 확대로 가격이 급격히 하락하고 있어 최근에는 해외에서 다양한 분야에서 활발히 이용되고 있으며 연구용뿐만 아니라 산업 현장에서도 사용이 되고 있다. 국내에서도 이미 의료분야에서는 많이 사용하고 있으며 최근에는 농산물과 식품을 대상으로 하는 초보 단계의 연구가 진행되고 있으며 앞으로 농산물과 식품 연구 분야에 활발히 이용되리라 기대가 된다.

문 헌

- Balcom, B.J., R.P. MacGregor, S.D. Beyea, D.P. Green, R.L. Armstrong and T.W. Bremner. 1996. Single-point ramped imaging with T1 enhancement (SPRITE). *Journal of magnetic resonance, series A* **123**: 131-134
- Balcom, P. 1998. SPRITE Imaging of Short Relaxation Time Nuclei. In: *Spatially Resolved Magnetic Resonance*. Blümler *et al.* (ed.), Wiley-VCH, New York, USA. pp. 75-86
- Clark, C.J. and J.S. MacFall. 1996. Magnetic resonance imaging of persimmon fruit (*Diospyros kaki*) during storage at low temperature and under modified atmosphere. *Postharvest Biology and Technology* **9**: 97-108
- Clark, C.J., J.S. MacFall, and R.L. Bielecki. 1998. Loss of watercore from 'Fuji' apple observed by magnetic resonance imaging. *Scientia Horticulturae* **73**: 213-227
- Cornillon, P. and L.C. Salim. 2000. Characterization of water mobility and distribution in low- and intermediate-moisture food systems. *Magnetic Resonance Imaging* **18**: 335-341
- Duce, S.L. and L.D. Hall. 1995. Visualization of the Hydration of Food by Nuclear Magnetic Resonance Imaging. *Journal of Food Engineering* **26**: 251-257
- Hinshaw, W.S., P.A. Bottomly and G.N. Holland. 1977. Radiographic thin-section image of the human wrist by nuclear magnetic resonance. *nature* **270**: 722-723
- Hinshaw, W.S., P.A. Bottomly and G.N. Holland. 1979. A Demonstration of the resolution of NMR imaging in biological systems. *Experientia* **35**: 1268-1269
- Kerr, W.L., C.J. Clark, M.J. McCarthy and J.S. de Ropp. 1997. Freezing effects in fruit tissue of kiwifruit observed by magnetic resonance imaging. *Scientia Horticulturae* **69**: 169-179
- Kerr, W.L., R.J. Kauten, M.J. McCarthy and D.S. Reid. 1998. Monitoring the Formation of Ice During Food Freezing by Magnetic Resonance Imaging. *Lebensm. Wiss. u. Technol* **31**: 215-220
- Kim, S.M., P.C. Chen, M.J. McCarthy and B. Zion. 1999. Fruit

- Internal Quality Evaluation using On-line Nuclear Magnetic Resonance Sensors. *J. Agric. Engng Res* **74**: 293-301
- Kim, S.M. 1999a. Applications of Magnetic Resonance Techniques in Agriculture. *J. of KSAM* **24**(3): 275-288
- Kim, S.M. 1999b. Evaluation of Internal Structure of Beef Using Magnetic Resonance Imaging. *J. of KSAM* **24**(6): 531-538
- Kim, S.M. 2001. Magnetic Resonance Techniques and Food Engineering. *Food Engineering Progress* **5**(4): 258-265
- Lim, J.G., C.S. Kim, S.J. Lee and S.M. Kim. 2003. Internal Quality Evaluation and Age Identification of Fresh Korean Ginseng using Magnetic Resonance Imaging. *J. of KSAM* **28**(2): 157-166
- Lim, J.G. and S.M. Kim. 2003. Analysis of Magnetic Resonance Characteristics and Images of Korean Red Ginseng. *J. of KSAM* **28**(3): 253-260
- Link, J. 1992. The Design of Resonator Probes with Homogeneous Radiofrequency Fields, *NMR Basic Principles and Progress*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg **26**
- Seo, Y., H. Takamiya, H. Ishikawa, T. Nakashima, Y. Sharf and G. Navon. 1998. NMR Imaging of Rigid Biological Tissues. In: *Spatially Resolved Magnetic Resonance*. Blümner *et al.* (ed.). Wiley-VCH, New, York, USA. pp. 445-457
- Sonego, L., R. Ben-Arie, J. Raynal and J.C. Pech. 1995. Biochemical and physical evaluation of textural characteristics of nectarines exhibiting woolly breakdown: NMR imaging, X-ray computed tomography and pectin composition. *Postharvest Biology and Technology* **5**: 187-198
- Song, H.P., S.R. Delwiche and M.J. Line. 1998. Research Note: Moisture Distribution in a Mature Soft Wheat Grain by Three-Dimensional Magnetic Resonance Imaging. *Journal of Cereal Science* **27**: 191-197