Food Engineering Progress
Vol. 11, No. 2. pp. 67~76 (2007.5)

식품공정에서의 자기공명기술의 응용

최영진 · 정명수*
서울대학교 ALRIC 식품생명공학전공, *이화여자대학교 식품공학과

Applications of Magnetic Resonance Techniques to Food Processing

Young Jin Choi and Myong-Soo Chung
Program in Food Science & Biotechnology, ALRIC, Seoul National University
**Department of Food Science & Technology, Ewha Womens University*

Abstract

The theory and applications of nuclear magnetic resonance (MR) techniques to food processes are briefly reviewed. MR technique is based on the interaction between atomic nuclei and external magnetic field. It can measure the motional freedom of species of atoms in various types of molecules. The non-invasive and non-destructive characteristics of the MR technique are suitable for applications in real time to evaluate many internal quality factors of foods and to characterize dynamic phenomena such as flow, processing, migration during many unit operations. This review has been attempted to demonstrate that MR technique has strong potential to provide an understanding of complex food systems and to meet the need of rapid characterization of materials during various processes and storage.

Key words: nuclear magnetic resonance, magnetic resonance imaging, internal quality factor, process control, food

서 론

식품은 기능적으로 1차 기능(영양기능), 2차 기능(감각기능) 및 3차 기능(생체조절기능)을 가지고 있다. 최근 우리 사회가 고도화 · 선진화되어감에 따라 현대 소비자들의 식품에 대한 요구는 단순한 생명유지를 위한 영양기능이 아니라 건강지향성, 미식화, 편리성, 안전성 등으로 다양하고 개성적이다. 이런 요구에 부응하기 위하여 식품산업은 생산, 유통, 소비에 이르기까지 큰 변화가 나타나고 있다. 식품이 제품으로서 가져야 할 중요한 특성은 품질, 안정성과 안전성이다. 품질은 소비자의 입장에서 보면 외양, 느낌, 냄새 그리고 맛 등의 관능적인 성질로 결정되고 안정성은 성분조성, pH, 수분함량, 첨가물 등의 내부요인과 포장, 저장온도나 환경 등과 같은 외부요인에 의해 결정되고 안전성은 식품의 미생물적, 물리적, 화학적 성질에 의해 정의된다. 이러한 식품제품의 특성은 종종 식품 내의 개별성분 또는 여러 성분들의 물성과 기능성에 의해 좌우되곤 한다. 식품은 원재료가 농 · 축 · 수산물인 특성상 제품을 생산, 가공, 유통, 저장하는 중에도 크든 작든 항상 품질의 변화가 일어난다. 그러므로 일관된 품질을 유지하며 가공공정의 효율적인 제어와 저장성의 향상을 위해서는 필요한 시점에서 식품의 물리화학적인 변화를 정확하게 규명하는 것이 필수적이다.

핵자기공명(nuclear magnetic resonance, NMR)은 원자핵의 자기적 성질을 이용한 분광학적 기술로서 Bloch *et al.* (1946)과 Purcell *et al.* (1946)이 서로 독자적인 연구를 통해 처음으로 NMR 신호를 얻은 이후에 발전되기 시작하여 주로 화학적 성분 분석이나 분자 구조 분석, 화학 반응속도와 확산 현상에 관한 연구 등에 이용되고 있다. 식품학 분야에

Corresponding author: Young Jin Choi, Professor, Program in Food Science & Biotechnology, Seoul National University, Seoul, 151-921, Korea.
Phone: 02-880-4851, Fax: 02-873-5095
E-mail: choiyj@snu.ac.kr

서도 화학 분야에서와 마찬가지로 성분 분석에 자주 사용되고 식품 내 수분, 지방분의 상태나 정량 분석에도 이용된다. 자기공명영상법(magnetic resonance imaging, MRI)은 자기장의 경도를 이용하여 핵스핀 밀도(nuclear spin density)를 영상화하는 기술로서 1973년 Lauterbur가 관에 담긴 물의 2차원적 NMR 영상을 얻은 이후로 특히 의학 분야에서 환자의 질병 진단 기술로서 비약적으로 발전해왔다. MRI는 기술의 특성상 비파괴적이고 효율적으로 물체의 내부 구조와 상태 변화에 관한 시간적, 공간적인 정보를 포함한 영상을 제공하기 때문에 그 응용범위는 비단 의학뿐 아니라 공학 분야까지 확산되고 있다. MRI는 현대 hardware와 software의 기술 발전과 더불어 물체의 화학적 조성 또는 분자 구조 등 NMR에 민감한 인자들을 이용하여 고품질의 영상을 얻는 많은 방법들이 개발되었다. 하지만 이 기술의 대부분은 의학적 용도에 맞춰 최적화되어 있기 때문에 공학적인 응용에 필요한 조건들과는 많은 차이가 있어서 공학분야에서 MRI의 응용은 발전 가능성이 매우 높다(Hall과 Carpenter, 1992; Gibbs와 Hall, 1996).

식품은 원재료나 제품 내에 수분, 지방, 탄수화물이 풍부하게 들어있어서 양성자(proton)와 외부 자기장간의 상호작용에 근거하는 자기공명기술을 적용하기가 매우 용이하다. 또한 기술 자체가 비파괴적이고 비침투적이어서 안전성과 관련하여 위해성이 전혀 없는 방법이다. 자기공명기술은 정적인 구조, 밀도, 점도, 조직, pH, 수분활성도 등과 같은 다양한 물리화학적 정보를 제공할 수 있다(McCarthy와 McCarthy, 1996). 자기공명기술의 잠재력은 단순히 정적 구조 및 특성뿐 아니라 동적 구조나 시간에 따른 특성의 변화를 측정할 수 있기 때문에 식품의 가공, 저장, 포장 또는 유통 중 일어나는 동적 현상을 실시간으로 감시 또는 측정할 수 있다(Simoneau *et al.*,1993; Hills, 1995). 관련된 가공조작으로는 건조, 수화, 가열, 살균, 사출성형, 혼합, 동결 등이 있다. 식품 산업에서의 자기공명기술의 응용은 크게 제품 품질의 최적화와 실시간 가공 공정의 제어에서 행해질 수 있다(Gladden, 1995). 최종 제품의 품질과 관련하여 다양한 생산공정 인자들이 최종 제품의 품질에 미치는 영향이나 구조적 불균일성이 식품 내에서 일어나는 전달 현상에 미치는 영향 등을 조사할 수 있다. 전술한 바와 같이 다양한 공정 중 일어나는 각종 물리화학적 특성의 변화를 실시간으로 측정함으로써 공정을 효율적으로 제어할 수 있고 나아가 측정 결과들은 모델링 연구에 사용되거나, 공정 자체를 설명하거나 예측할 수 있는 이론을 개발 또는 개선할 수 있다.

본 논문에서는 우선 자기공명기술의 원리를 간단히 설명하고 식품 분야에서 응용된 다양한 사례를 살펴봄으로써 이 기술이 가진 잠재성을 고찰하였다.

자기공명영상법(MRI)의 원리

자기공명은 외부자기장과 다양한 핵들간의 상호작용에 근간하는 것으로서 스핀(spin)을 가진 원자핵과 그 상호작용을 정확하게 수학적으로 설명하려면 양자역학과 통계역학이 필요하다. 그러나, 실제로 NMR을 수행할 때, 다량의 원자핵들이 독립적으로 행동하지만 거시적으론 마치 입자들의 모임체가 하나의 단일체처럼 연속적으로 행동하는 것처럼 보이기 때문에 핵자화도(nuclear magnetization)로 일컬어지는 간단한 벡터량을 이용하여 고전적인 역학으로 설명하는 것이 가능하다(Callaghan, 1991).

물질 내의 여러 종류의 핵들은 스핀에 의한 각운동량(angular momentum)을 가지며 이에 의해 자기쌍극자 모멘트(magnetic dipole moment)를 가진다. 일반적으로 자기쌍극자 모멘트는 무질서하게 무작위의 방향을 가리킨다. 하지만 외부 자기장이 걸리면 자력선의 방향으로 정렬하게 되는데 수소의 원자핵인 양성자와 같이 스핀이 1/2인 핵들은 자기능률의 방향이 자기장과 동일하거나 반대인 방향으로만 정렬된다. 이렇게 양자화된 스핀들은 각각의 벡터합을 구하면 전체적인 하나의 벡터 성분을 얻을 수 있는데 이를 순자화(net magnetization) 또는 자화도라고 한다. 이 과정을 Fig. 1에 나타내었다.

자화도는 외부 정자장(B_0)의 방향을 축으로 어떤 각도를 이루면서 일정한 주파수로 세차운동(pre-

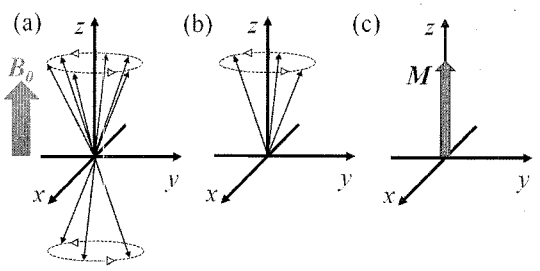

Fig. 1. The formation of net magnetization, *M*: (a) Alignment of the individual magnetic moments along the external magnetic field B_0, (b) microscopic net magnetization, and (c) vector sum of net magnetization with rotating frame.

cession)을 한다(Fig. 1a). 이 때의 주파수를 Larmor 주파수(w_0)라고 하며 외부 자기장의 크기와 핵의 자기회전비(gyromagnetic ratio, γ)의 곱에 해당한다.

$$\omega_0 = \gamma B_o \quad (1)$$

Larmor주파수는 ^{1}H의 경우 자기장이 1 Tesla일 때 42.57 MHz이고, ^{31}P의 경우는 17.24 MHz, ^{23}Na의 경우는 11.26 MHz이다.

xy평면으로부터 Larmor주파수를 가진 회전자장펄스(radio frequency pulse, RF pulse)를 가하면 외부 자기장 방향(z방향)으로 정렬해 있던 스핀들이 에너지를 흡수하면서 전이가 일어나서 점점 역방향으로 이동하게 되고 결과적으로 이들의 벡터합으로 횡자화(transverse magnetization)가 형성되며 이 상태를 여기(excitation)되었다고 한다(Fig. 2). 이 때 RF 펄스의 세기와 시간에 따라서 여기되는 각도가 달라지게 되는데 그 각이 90°가 되도록 즉 자화도를 xy 평면상에 위치하게 하는 RF 펄스를 90° RF 펄스라고 부른다. 핵자기공명이란 용어는 RF 펄스의 주파수가 핵 세차운동 주파수와 동일해야 한다는 점에서 유래되었다. 이처럼 적절한 주파수를 사용함으로써 선택적으로 특정한 원자핵만을 공진시킬 수 있다. 그러나 양성자에 비하여 다른 원자핵들은 신호감도가 낮고 생체 내의 농도가 낮기 때문에 자기공명영상법은 주로 양성자에 대한 것이다. 식품 내엔 분자당 양성자 2개를 포함하는 수분이 풍부하므로 효과적으로 MRI를 사용할 수 있다.

RF 펄스를 제거하면 횡자화는 흡수했던 에너지를 방출하면서 다시 종자화(longitudinal magnetization)로 복귀한다. 복귀과정에서 자화도는 xy 평면상에서 자유롭게 회전하여 물체 주위에 설치된 코일에 기전력을 발생시키는데 이것을 자유 유도 감쇄(free induction decay, FID)라고 부르고 MRI는 이 신호를 검출하여 영상화하는 것이다.

완화현상(relaxation)은 스핀이 흡수한 RF 에너지를 분산하면서 열적평형상태로 돌아갈 때, 즉 원래의 종자화를 회복할 때 일어난다. 완화가 일어남에 따라 자화도는 동시에 횡면(xy 평면)에서는 감소하고 종면(z축 방향)으로 회복하게 된다. 이 두 과정은 독립적이지만 동시에 일어나게 된다. T_1은 스핀-격자 완화시간(spin-lattice relaxation time) 또는 종완화시간(longitudinal relaxation time)이라고 불리며 스핀 시스템이 열평형상태, 즉 원래의 종자화도의 63%를 회복하는 데 걸리는 시간으로서 이 과정에서 스핀 시스템으로부터 주위 격자로의 에너지 전환이 일어난다(Fig. 3). T_2는 스핀-스핀 완화시간 (spin-spin relaxation time) 혹은 횡완화시간(transverse relaxation time)이라고 부르며 자화도가 xy 평면 내에서 위상(phase)이 흩어지지 않은 채 남아 있는 기간의 시간 상수로서 이는 횡자화가 원래 값의 37%까지 감소하는 데 걸리는 시간이다(Fig. 4). 에너지 교환이 없는 T_2는 일반적으로 T_1과 같거나 작다. T_1과 T_2는 물질과 그 상태에 따라서 다른 고유의 값으로서 물질의 상태 규명에 있어서 매우 중요하며 양성자 밀도와 함께 MRI에 있어서 중요한 인자가 된다.

전술한 바와 같이 에너지를 흡수하는 주파수는 스핀이 경험하는 자기장의 크기에 의해 결정된다. MRI는 이러한 특성을 이용하여 기존의 균일한 자기장에 또 하나의 선형적으로 세기가 다른 자기장을 걸어줌으로써 공간의존적인 주파수 편이(frequency shift, Δw)를 일으키게 한다.

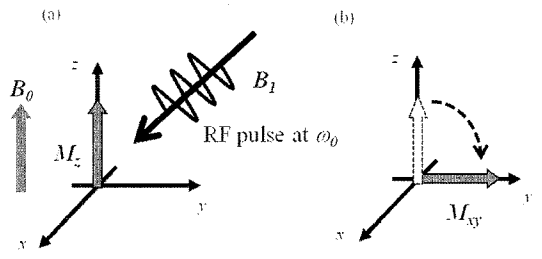

Fig. 2. Excitation of spin and magnetization after applying 90° RF pulse with Larmor frequency: (a) longitudinal magnetization at thermal equilibrium and (b) formation of transverse magnetization.

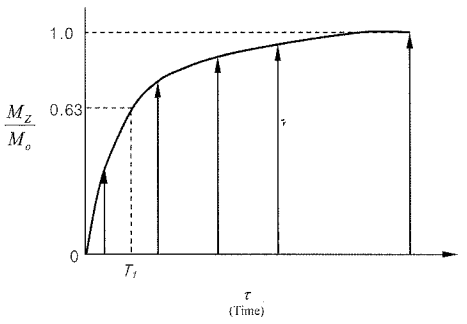

Fig. 3. Typical T_1 relaxation curve. The arrows are the size of z component of the net magnetization.

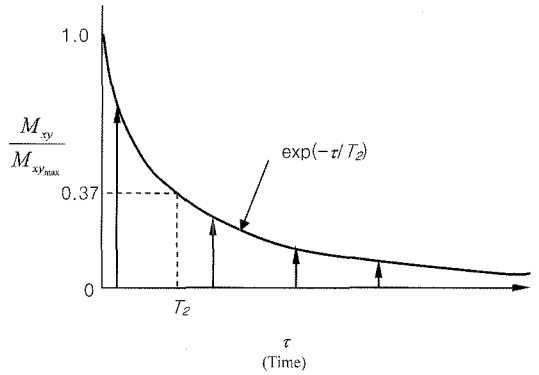

Fig. 4. Typical T_2 relaxation curve. The arrows are the size of z component of the net magnetization.

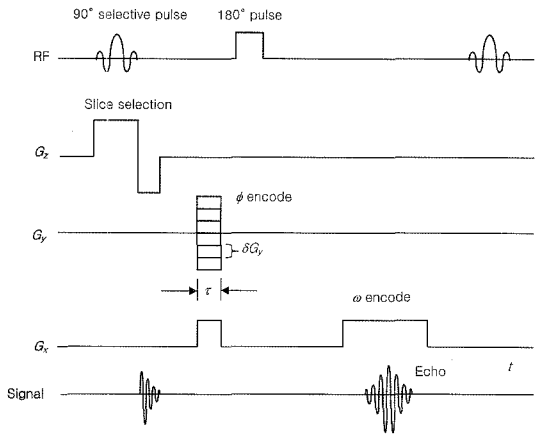

Fig. 5. Spin echo pulse sequence.

$$\Delta\omega = \gamma G_x \cdot \Delta x \quad (2)$$

여기서 G_x는 경사자계(magnetic field gradient)이고 Dx는 자장 경도에 따른 핵의 공간적 거리이다. 그러므로 경사자계의 기울기와 FID의 주파수를 안다면 신호의 공간적 위치를 파악할 수 있다.

MRI로 3차원 물체의 2차원 단면 영상을 얻는 과정은 먼저 측정할 단면을 선택한 후 그 단면 내의 원자핵으로부터의 신호에 공간 정보를 담고 마지막으로 자기공명신호를 검출한다. 이런 조작을 위하여 적절한 자계를 적용하는 순서를 pulse sequence라고 한다. Pulse sequence는 보통 측정하고자 하는 단면에 수직인 방향으로 slice selection gradient라고 부르는 경사자계를 걸어주면서 시작한다. 이 경사자계가 있는 상태에서 좁은 주파수 대역을 가진 RF 펄스를 가하면 주파수 대역에 해당하는 만큼의 두께를 가진 평면 내의 핵들만 선택적으로 공명을 일으키게 된다. 이렇게 선택된 평면 내에서 2차원적인 공간정보는 주파수와 위상을 변조시키는 방법을 사용하여 얻게 된다. 임의의 한 방향에 frequency encoding gradient를 가하면 식 (2)에서 보듯이 원자핵의 위치에 따라 선형적으로 Larmor 주파수가 달라지게 된다. 이 때 시간좌표상에서 얻어진 FID 신호를 Fourier transform하면 공간의존적인 주파수의 스펙트럼을 얻을 수 있다. 다른 한 방향의 공간정보는 phase encoding gradient를 이용하여 얻는다. 단면을 선택한 후와 신호를 검출하기 전 중간에 phase encoding gradient를 frequency encoding과 slice selection한 방향과 수직인 방향으로 걸어준다. Pulse sequence는 필요한 공간정보를 얻을 때까지 반복적으로 시행되는데 매번 phase encoding gradient의 크기를 달리하면 그 방향으로 위치에 따라 위상 차이가 발생하고 이를 이용해 공간 정보를 형성할 수 있다.

순자화는 여기된 직후에는 위상이 같지만 시간이 지남에 따라 위상을 잃고 흩어지게 되는데 이를 다시 재규합하여 동위상을 만드는 방법을 refocusing이라고 하며 이 때의 신호를 echo라고 한다. 그 방법에 따라 spin-echo pulse sequence와 gradient-echo pulse sequence로 크게 나눌 수 있다. Fig. 5는 spin-echo pulse sequence를 나타낸 그림이다. 여기서 slice selection gradient를 걸어 준 상태에서 90° RF 펄스로 여기시킨 후 phase encoding을 한 후 다시 180° RF 펄스를 이용하여 신호를 refocusing한다. 자기공명신호인 echo는 180° RF 펄스 이후에 두 펄스 사이의 시간-공명시간(echo time)-에 해당하는 시간이 흐른 후에 형성된다. 공명이 일어날 때 frequency encoding을 행한다. 이 방법은 주자장이 비교적 균일하지 않아도 양질의 영상을 얻을 수 있는 장점이 있으나 refocusing을 위한 180° RF 펄스를 사용하는 일정 시간이 필요하므로 공명시간을 최소화하는데 제한이 있다. Gradient-echo pulse sequence는 스핀의 refocusing을 위한 180° 펄스 대신에 경사자계를 반대방향으로 바꾼 후 FID 신호를 얻는 방법으로서 여기에 사용되는 RF 펄스로 보통 90° 보다 작은 flip angle을 사용한다. 그럼으로써 TR (pulse repetition time)을 짧게 할 수 있어 전체적으로 빠른 시간 안에 영상을 취득할 수 있지만 비균일한 주자장에 의한 신호감쇄를 보상할 수 없는 단점이 있다.

핵자기공명영상법은 측정하고자 하는 성질에 대

한 신호의 감도를 최대화하는 수많은 방법들이 개발되어 있다. 핵자기공명기술의 원리에 대한 보다 깊고 자세한 설명은 Callaghan (1991), McCarthy (1994), Blümich (2000) 등이 쓴 참고서적을 참조하길 바란다.

자기공명기술을 이용한 식품의 내부 품질인자의 측정

식품의 품질인자는 색, 맛, 향기, 조직, 기능성 성분 농도 등으로 다양한데 이런 품질인자는 가공, 저장, 유통 중에 화학반응 또는 효소에 의한 반응 등의 이유로 변하게 된다. 전통적인 품질 인자 평가법은 각 단계에서 샘플링을 통하여 식품을 절단하여 정량적인 방법을 적용하여야만 한다. 하지만 자기공명영상법은 비파괴적이고 실시간으로 물질의 내부 구조를 시각화함으로써 기존의 노동력과 시간이 많이 드는 방법들을 대치할 수 있다. 현재의 기술로서 얻을 수 있는 공간구조의 해상도는 약 10 mm에 이르고 단순히 물체의 내부구조만을 시각화하는 것이 아니라 영상은 다름아닌 공간에서의 위치에 따른 NMR 스펙트럼의 집합체이기도 하므로 다양한 정보를 취득할 수 있는 잠재력이 있다(Ablett, 1992). 자기공명신호는 주로 자유수와 기타 다른 대사물의 양성자의 농도와 그 상태변화에 민감하므로 식품 또는 원재료인 농, 수, 축산물의 내부 성분 구성 또는 다양한 내부 품질인자를 평가하는데 자기공명기술이 사용되어 왔다. 내부 단면을 영상화함으로써 과일 채소류에 있어서 비파괴적으로 여러 품질인자들을 NMR 인자를 적절히 조절함으로써 차이를 극대화하여 보여줄 수 있다. Chen *et al.*(1989)은 2차원의 영상을 통하여 손쉽게 사과, 배, 양파와 복숭아에서의 멍, 내부 갈색화, 건조부위, 충해, 공동, 씨 등의 조직적 결함들을 감별할 수 있음을 보여주었고(Fig. 6), Fig. 7은 오렌지 내부의 결함들을 바로 보여줄 수 있는 연속 단면 자기공명영상이다. Wang *et al.*(1988)은 MRI를 이용하여 사과(Red Delicious)에서 밀병(watercore)의 존재 여부와 그 분포도를 측정하였다. 또한 Chen *et al.*(1993)은 영상신호의 크기, 과일 내 수분의 T_1과 T_2, 그리고 1D NMR 스펙트럼으로부터 얻은 수분과 지방의 비율 등이 아보카도의 성숙도와 깊은 상관관계가 있음을 보여주었다.

마찬가지로 다양한 성분을 함유하는 식품에 있어서 성분간의 자기공명특성 차이를 이용하면 성분의 양, 분포, 또는 변성 등을 식별할 수 있다. 자기공명영상법을 이용하여 곡식과 씨앗(Rollwitz, 1985; Brusewitz와 Stone, 1987), 지방 종자 (Gambhir, 1992), 크래커 (Yan *et al.*, 1996) 내의 수분 또는 지방분의 양을 정량하였다. 또한 지방분의 농도에 따라 완화시간이 차이가 나는 점을 이용하여 relaxation mapping 영상을 이용하여 쇠고기와 돼지고기 (Groenveld *et al.*,1984), 양고기와 닭고기 (German, 1990), 송어(McCarthy and Kauten, 1990) 내의 지방 농도를 측정하였다. Ishida *et al.* (1991)은 ^{23}Na 영상을 이용하여 식품 내 염분의 양을 결정하였다.

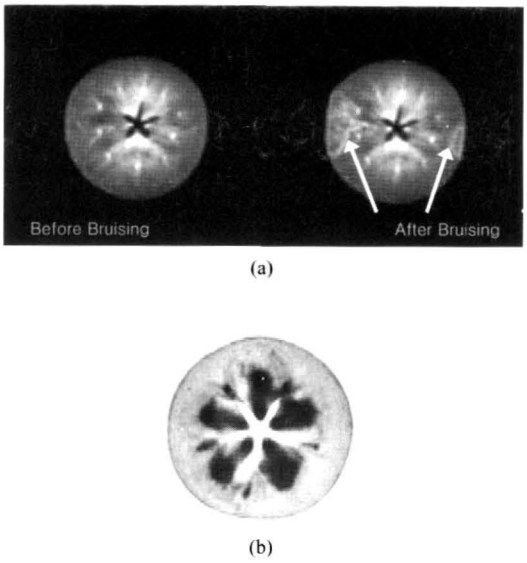

Fig. 6. Detection of internal defects in apple. (a) bruise and (b) internal browning. Adapted from Chen et al. (1989), reprinted with permission.

또한 냉해를 입은 과일 또는 채소류의 선별 공정에도 자기공명기술을 응용할 수 있다. Clark와 Forbes (1994)는 감에서 냉해의 형성과정을 영상화하였고, Gambhir *et al.*(2005)은 Fig. 8과 Table 1에서 보듯이 냉해를 입은 오렌지의 T_2값이 신선한 것에 비하여 작다는 점을 보여주었다. T_2값 차이는 냉해에 의해 내부조직이 상하게 되어 수분이 재분포되기 때문에 일어나는데 이런 차이를 이용하여 자동화 선별 공정에 응용될 수 있다.

자기공명기술을 이용한 식품 내 동적 현상의 측정

자기공명기술은 식품의 공정 중 일어나는 동적현상에 관한 연구에 훌륭한 도구로서 이용될 수 있다 (McCarthy와 McCarthy, 1994). 시간에 따른 수분

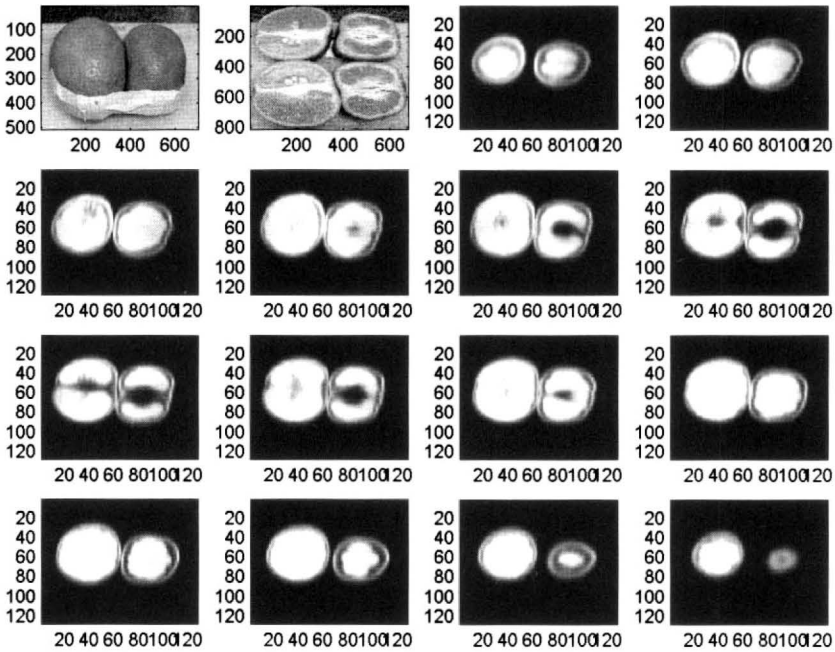

Fig. 7. Detection of various defects in oranges such as hollow center, dried regions and seeds.

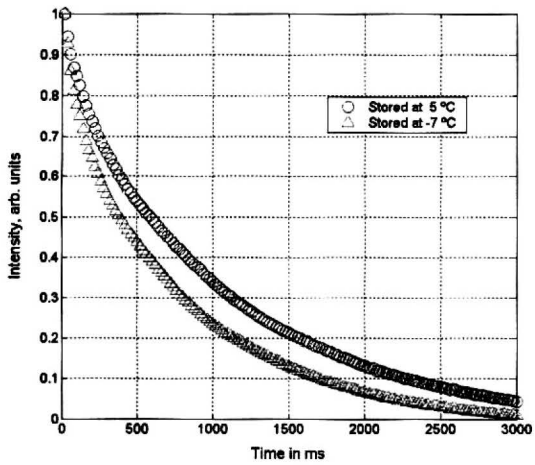

Fig. 8. CPMG decay curve from flesh segments of Navel oranges (var. Washington) stored overnight at 5°C and -7°C and thawed.

또는 특정 성분이 이동하면 공간상에서 재분포되고 이는 자기공명신호의 변화를 가져온다. MRI는 수분, 온도 또는 여러 품질인자와 연계된 정량적 영상을 얻을 수 있는데 이를 이용하면 동적 전달 현상에 관하여 이론화가 가능하게 된다. 왜냐하면 물질의 이동은 주로 확산에 의하여 일어나는데 확산모델에 사용되는 수분확산계수(moisture diffusivity), 열확산율(thermal diffusivity), 열용량(heat capacity), 반응속도상수(reaction rate constants) 등의 고유한 식품 인자들은 식품 내 수분량, 수분 분포, 온도, 미세구조와 성분 구성 등에 의존하기 때문이다(Hills, 1995). 자기공명기술은 그 동안 많은 식품에서 수화 또는 건조 중의 수분 이동의 측정에 이용되었다(Schmidt와 Lai, 1991; Watanabe와 Yoshida, 1991; Heil *et al.*, 1992; McCarthy와 McCarthy, 1994; Traoutman *et al.*, 2001). McCarthy와 Kauten(1990)은 치즈 유장(whey)의 T_2가 치즈 응유(curd)의 T_2 보다 크다는 점을 이용하여 치즈 제조 공정 중 일어나는 유장의 도출량을 온도와 시간의 함수로 표현하였다. 초콜릿 과자류에서의 지방분의 이동에 관하여 Guiheneuf *et al.* (1997)은 헤이즐넛 기름과 dark 초콜릿을 이용하여 19°C와 28°C에서의 이동 profile을 보고하였고 Choi *et al.* (2005)은 지방분 이동에 영향을 미치는 인자들을 통계적으로 결정하였다. Fig. 9는 각각 조성이 다른 초콜릿 과자류의 다른 저장시간에서의 영상이다. 상대적으로 지방분이 적은 초콜릿이 하부에 충진되어 있고 땅콩버터

Table 1. T_2 relaxation time of Navel oranges (var. Washington)

Chilled (5°C)			Frozen (-7°C) and Thawed		
Orange#	T_2 (ms)		Orange#	T_2 (ms)	
	Peel	Flesh		Peel	Flesh
1A	360	1070	1B	379	920
2A	396	1000	2B	401	910
3A	340	1080	3B	379	900
4A	350	1070	4B	357	860
5A	402	1120	5B	366	890
6A	331	1010	6B	367	790
7A	343	990	7B	381	986
8A	371	1000	8B	396	940
9A	364	1010	9B	365	880

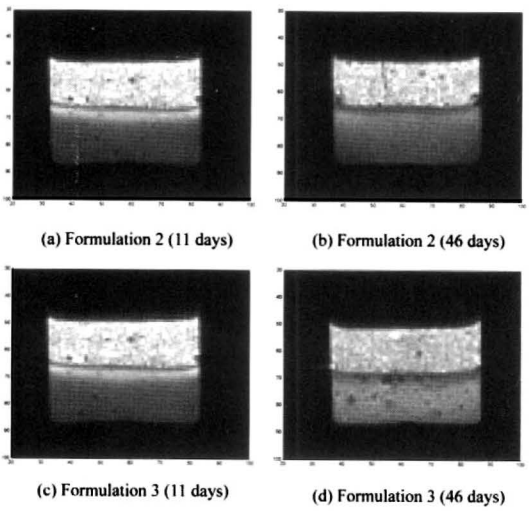

Fig. 9. Representative 2D cross-sectional MR images of Formulation 2 at (a) 11 d and (b) 46 d, and MR images of Formulation 3 at (c) 11 d and (d) 46 d.

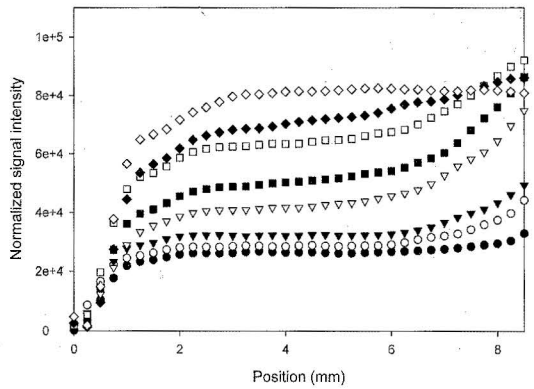

Fig. 10. 1D signal intensity profiles of the chocolate region at 1d (●), 2 d (○), 3 d (▼), 5 d (▽), 11 d (■), 22 d (□), 46 d (◆), and 106 d (◇) for Formulation (b).

가 그 위에 놓여져 있다. 11일 저장 후의 영상과는 달리 46일이 지나면 땅콩버터중의 많은 지방분이 초콜릿으로 침투하였음을 볼 수 있다. 이 때 영상으로부터 수직방향으로 신호를 평균하면 횡면으로의 지방분의 이동을 정량화할 수 있다 (Fig. 10). Ruiz-Cabrera *et al.*(2005)은 비슷한 방법으로 즉, 2차원의 영상 신호를 한 방향으로 평균하여 얻은 1차원의 수분 이동 프로파일을 이용하여 젤라틴 젤의 건조에서의 수분확산도를 결정하였고 Greg *et al.*(1997)은 Silver carrot 제품의 무균공정 중 유체로부터 입자로의 대류열전달계수를 온도의 차이를 나타낼 수 있는 temperature mapping과 Finite element modeling을 이용하여 결정하였다. Watanabe *et al.*(2001)은 쌀이나 국수가락 같은 전분식품을 끓일 때 발생하는 수분의 이동을 non-Fickian 모델로 설명하였다.

많은 식품, 의약, 화학 제품들은 원료의 처리로부터 시작하여 혼합, 열처리, 수송 등 여러 단위공정을 거쳐서 완제품으로 만들어진다. 제품의 균일한 품질을 확보와 공정의 효율적인 제어를 위해선 각각의 단계에서 제품의 특성을 빠른 시간에 정확하게 규명하는 것이 중요하다. 제품의 물리화학적인 특성을 측정하기 위하여 현재 많이 쓰이는 방법들은 보통 시료를 공정 중에 채취하여 일정한 전처리 과정을 통해 준비하고 측정하는 노동, 시간집약적인 offline 방법들이 대부분이다. 상기하였듯이 자기공명기술은 다양한 품질인자에 관한 정량적인 정보를 실시간으로 제공할 수 있기 때문에 공정 제어 센서로서 이용하고자 하는 시도가 점차 늘어나고 있는 추세이다.

예를 들어 혼합공정은 특히 의약품처럼 정제당 일정한 함량의 약성분이 균일하게 포함되어야만 하는 제품에 있어 매우 중요한 공정이다. 하지만 혼합기의 다양한 기하학적 구조와 많은 혼합성분의 물리화학적 특성이 영향을 미치기 때문에 혼합공정의 정량적 해석에는 어려움이 많다. 서로 자기공명 신호가 다른 성분들을 이용하여 초기 분리영상으로부터 혼합의 진행에 따라 신호의 세기와 분포가 달라지는 점을 이용하여 정량적, 통계적으로 혼합 공정을 해석한 시도가 있다. Lee *et al.*(2001)은 이성분계의 1회성 혼합 공정을 패들의 회전수에 따라 얻은 자기공명영상을 이용하여 통계적으로 정량분석 하였고 일반적인 혼합기와 다른 Couette geometry(Corbett *et al.*,1995), 표면긁기 열교환기(Wang *et al.*, 2000), Kenics 혼합기(McCarthy와 McCarthy, 2000)와 쌍날압출성형기(Choi *et al.*, 2004) 내에서의 혼합 공정도 평가되었다.

최근 유체역학과 유변학에 있어 자기공명기술의 응용이 발전하고 있다. 자기공명기술을 이용하면 공간의 정보가 담겨있는 성분의 농도와 속도 프로파일을 얻을 수 있다. 자기공명기술을 이용하여 관에서 흐르는 다양한 유체의 속도 프로파일을 얻은 연구들이 많다(Grover와 Singer 1971; Kose *et al.*, 1985; Callaghan과 Xia, 1991; Xia와 Callaghan, 1991; Altobelli *et al.*, 1991; Sinton과 Chow, 1991; McCarthy *et al.*, 1992; Seymour *et al.*, 1993; McCarthy *et al.*, 1997). 자기공명기술로 얻은 유체의 속도 프로파일을 이용하여 유변학적 특성을 측정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 관내를 흐르는 비압축성 유체의 점도를 측정하기 위해서는 steady state 상태의 정류 조건을 만족시켜야 한다. 선형모멘트 보존 법칙에 의하여 전단응력(shear stress, σ)은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma(r) = \frac{-(\Delta P)}{2L} r \tag{3}$$

여기서 r은 관의 반경이고 ΔP는 일정한 거리 L에서의 압력강하이다. Pulsed gradient spin-echo (PGSE) 펄스시퀀스(Arola *et al.*, 1997)를 이용하여 유체의 속도 프로파일을 측정한 후(Fig. 11), 속도 프로파일을 1차 미분함으로써 각각의 위치에서의 전단속도(shear rate, $\dot{\gamma}$)를 구할 수 있다.

$$\dot{\gamma}(r) = \left| \frac{dv(r)}{dr} \right| \tag{4}$$

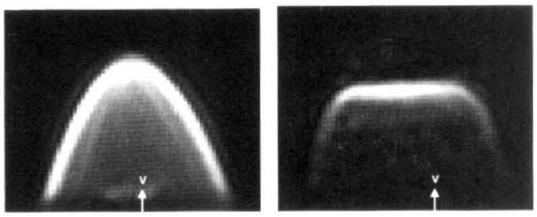

Fig. 11. MR images of velocity profile of (a) corn syrup solution and (b) tomato concentrate.

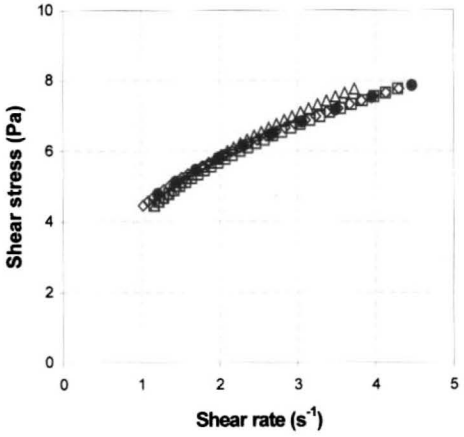

Fig. 12. Shear rate versus shear stress relationships for tomato juice obtained by MRI (l) and UDV using a pulse repetition number of 512 (◇), 1024 (□) and 2048 (△).

여기서 v는 축방향 유체의 속도이다. 최종적으로 위의 두 식을 조합하면 전단점도(shear viscosity η)를 구할 수 있게 된다(Fig. 12).

$$\eta(r) = \frac{\sigma(r)}{\dot{\gamma}(r)} \tag{5}$$

전단응력을 전단속도에 대하여 도해해 보면 점도 이외에도 빙햄플라스틱 유체의 경우 전단이 시작되는 위치로부터 항복응력도 쉽게 구할 수가 있다 (Choi *et al.*, 2002).

요 약

본 논문을 통하여 자기공명기술의 원리를 간단히 살펴보고 식품분야에서 이 기술이 가진 잠재력을 소개하고자 하였다. 즉, 비파괴적이고 물질의 물리화학적 성질에 민감한 자기공명기술의 특성은 공간과 시간의 정보가 담겨있는 다차원의 영상을 제공

함으로써 복잡한 식품의 내부 품질인자를 정량적으로 규명하는 데에 유용하게 쓰일 수 있고 여러 단위 공정 중 일어나는 동적 현상을 실시간으로 평가할 수 있어서 기존의 노동, 시간 집약적인 측정방법을 대신하여 빠르고 재현성이 높은 측정도구로서 이용될 수 있다.

참고문헌

Ablett S. 1992. Overview of NMR applications in food science. *Trends in Food Sci. & Technol.* **3**: 246-248

Altobelli, S.A., R.C. Givler and E. Fukushima. 1991. Velocity and concentration measurements of suspensions by nuclear magnetic resonance imaging. *J. Rheol.* **35**: 721-734

Arola, D.F., G.A. Barrall, R.L. Powell and M.J. McCarthy. 1997. Measurement time reducing methods for NMR flow profile imaging: Hankel transforms, velocity aliasing and rapid repetition time. *J. Magn. Reson.* Ser A **3**: 175-184

Blümich, B. 2000. *NMR Imaging of Materials*. Oxford University Press, Oxford, UK

Brusewitz, G.H. and M.L. Stone. 1987. Wheat moisture by NMR. *Trans. ASAE* **30**: 858-862

Callaghan, P.T. 1991. *Principles of nuclear magnetic resonance microscopy*. Oxford University Press, Oxford, UK

Callaghan, P.T. and Y. Xia. 1991. Velocity and diffusion imaging in dynamic NMR microscopy. *J. Magn. Reson.* **91**: 326-352

Chen, P., M.J. McCarthy and R. Kauten. 1989. NMR for internal quality evaluation of fruits and vegetables. *Trans. ASAE* **32**: 1747-1753

Chen, P., M.J. McCarthy, R. Kauten, Y. Sarig and S. Han. 1993. Maturity evaluation of avocados by NMR methods. *J. Agric. Eng. Res.* **55**: 177-187

Choi, Y.J., K.L. McCarthy and M.J. McCarthy. 2002. Tomographic techniques for measuring fluid flow properties. *J. Food Sci.* **67**: 2718-2724

Choi, Y.J., K.L. McCarthy and M.J. McCarthy. 2005. Oil migration in a chocolate confectionery system evaluated by magnetic resonance imaging, *J. Food Sci.* **70**: E312-E317

Choi, Y.J., M.J. McCarthy and K.L. McCarthy. 2004. MRI for process analysis: co-rotating twin screw extruder, *J. Proc. Anal. Chem.* **9**: 72-85

Clark, C.J. and S.K. Forbes. 1994. Nuclear magnetic resonance imaging of the development of chilling injury in 'Fuyu' persimmon (Diospyroskaki). *NZ J. Crop Hort. Sci.* **22**: 209-215

Corbett, A.M., R.J. Phillips, R. Kauten and K.L. McCarthy. 1995. Magnetic resonance imaging of concentration and velocity profiles of pure fluids and solid suspensions in rotating geometries. *J. Rheol.* **39**: 907-924

Gambhir, P.N. 1992. Applications of low-resolution pulsed NMR to the determination of oil and moisture in oilseeds. *Trends in Food Sci. & Technol.* **3**: 191-196

Gambhir, P.N., Y.J. Choi, D.C. Slaughter, J.F. Thompson and M.J. McCarthy. 2005. Proton spin-spin relaxation time of peel and flesh of Navel orange varieties exposed to freezing temperature. *J. Sci. Food Agric.* **85**: 2482-2486

German, J.B. 1990. Muscle lipids. J. *Muscle Foods* **1**: 339-361

Gibbs, S.J. and L.D. Hall. 1996. What roles are there for magnetic resonance imaging in process tomography? *Meas. Sci. Technol.* **7**: 827-837

Gladden, L.F. 1995. Industrial applications of nuclear magnetic resonance. *Chem. Eng.* **56**: 149-158

Groenveld, E., E. Kallweit, M. Henning and A. Pfau. 1984. *In vivo* measurement of body composition in meant animals. D. Lister (ed.). Elsevier, Amsterdam, Netherlands. pp 94-89

Grover, T. and J.R. Singer. 1971. NMR spin-echo flow measurements. *J. Appl. Phys.* **42**: 71-86

Guiheneuf, T.M., P.J. Couzens, H-J. Wille and L.D. Hall. 1997. Visualization of liquid triacylglycerol migration in chocolate by magnetic resonance imaging. *J. Sci Food Agric.* **73**: 265-273

Heil, J.R., M.N. McCarthy and M. Özilgen. 1992. Magnetic resonance imaging and modeling of water uptake into dry beans. *Lebensm. Wissenschaft Technol.* **25**: 280-285

Hills, B. 1995. Food processing: an MRI perspective. *Trends in Food Sci. & Technol.* **4**: 111-117

Ishida, N., T. Kobayashi, H. Kano, S. Nagai and H. Ogawa. 1991. ^{23}Na-NMR imaging of foods. *Agric. Biol. Chem.* **55**: 2195-2200

Kose, K., K. Satoh, T. Inouye and H. Yasuoka. 1985. NMR flow imaging. *J. Phys. Soc. Jpn.* **54**: 81-92

Lauterbur, P.C. 1973. Image formation by induced local interactions: examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature* **242**: 190-191

Lee, Y., M.J. McCarthy and K.L. McCarthy. 2001. Extent of mixing in a two-component batch system measured using MRI. *J. Food Eng.* **50**: 167-174

Mansfield, P. and P.K. Grannell. 1973. NMR 'diffraction' in solids? *J. Phys.* C **6**: L422-L426

McCarthy, K.L., R.J. Kauten, M.J. McCarthy and J.F. Steffe. 1992. Flow profiles in a tub rheometer using magnetic resonance imaging. *J. Food Eng.* **16**: 109-125

McCarthy, K.L., W.L. Kerr, R.J. Kauten and J.H. Walton. 1997. Velocity profiles of fluid/particulate mixtures in pipe flow using MRI. *J. Food Eng.* **20**: 165-177

McCarthy, K.L. and M.J. McCarthy. 2000. MRI for process analysis: Kenics static mixer. *J. Proc. Anal. Chem.* **5**: 94-103

McCarthy, M.J. 1994. Magnetic resonance imaging in foods.

Chapman & Hall. New York, USA

McCarthy, M.J. and K.L. McCarthy. 1994. Quantifying transport phenomena in food processing with nuclear magnetic resonance imaging. *J. Sci. Food Agr.* **65**: 257-270

McCarthy, M.J. and K.L. McCarthy. 1996. Applications of magnetic resonance imaging to food research. *Mag. Reson. Imaging* **14**: 799-802

McCarthy, M.J. and R.J. Kauten. 1990. Magnetic resonance imaging applications in food research. *Trends in Food Sci. & Technol.* **12**: 134-139

Rollwitz, W.L. 1985. Using radiofrequency spectroscopy in agricultural applications. *Agric. Eng.* **66**: 12-14

Ruiz-Cabrera, M.A., L. Foucat, J.M. Bonny, J.P. Renou and J.D. Daudin. 2005. Assessment of water diffusivity in gelatin gel from moisture profiles. I- Non-destructive measurement of 1D moisture profiles during drying from 2D nuclear magnetic resonance images. *J. Food Eng.* **68**: 209-219

Schmidt, S.J. and H.M. Lai. 1991. Use of NMR and MRI to study water relations in foods. In: *Water Relationships in Foods: Advances in the 1980s and Trends for the 1990s. Advances in Experimental Medicine and Biology* (vol. 302). H. Levine and L. Slade (ed.). Plenum, York, UK. pp. 405-452

Seymour, J.D., J.E. Maneval, K.L. McCarthy, M.J. McCarthy and R.L. Powell. 1993. NMR velocity phase encoded measurements of fibrous suspensions. *Phys. Fluids A* **5**: 3010-3012

Simoneau, C., M.J. McCarthy and J.B. German. 1993. Magnetic resonance imaging and spectroscopy for food systems. *Food Res. Int.* **26**: 387-398

Sinton, S.W. and A.W. Chow. 1991. NMR flow imaging of fluids and solid suspensions in Poiseuille flow. *J. Rheol.* **35**: 735-772

Wang, C.Y., P.C. Wang and M. Faust. 1988. Non-destructive detection of watercore in apple with nuclear magnetic resonance imaging. *Scientia Hort.* **35**: 227-234

Wang, W., J.H. Walton and K.L. McCarthy. 2000. Mixing in scraped surface heat exchanger geometry using MRI. *J. Food Proc. Eng.* **23**: 403-418

Watanabe, H., M. Fukuoka and T. Watanabe. 1995. Recent advances in characterization of foods using nuclear magnetic resonance(NMR). In: *Characterization of food, emerging methods.* A.G. Goankar (ed.). Elsevier Science, New York, USA. p. 177

Watanabe, H., M. Fukuoka, A. Tomiya and T. Mihori. 2001. A new non-Fickian diffusion model for water migration in starchy food during cooking. *J. Food Eng.* **49**: 1-6

Yan, Z-Y., M.J. McCarthy, L. Klemann, M.S. Otterburn and J. Finley. 1996. NMR applications in complex food systems. *Mag. Reson. Imaging* **14**: 979-981

Xia, Y. and P.T. Callaghan. 1991. Study of shear thinning in high polymer solution using dynamic NMR microscopy. *Macromolecules* **24**: 4777-4786