

# 농산물 내부품질 측정용 NMR Sensor의 Halbach형 자석상자 설계

## Design of Halbach type Magnet Console of NMR Sensor for Internal Quality Measurement in Agricultural Products

조성인\*      정창호\*

정희원      정희원

S.I.Cho      C.H.Chung

E-mail : sicho@plaza.snu.ac.kr

### 1. 서론

농산물은 그 특징상 종류가 다양하고 형상과 물성이 종류마다 차이가 남으로써 측정에 어려움이 많은 것이 사실이다. 예를 들어 함수율을 측정하는 방법도 다양하여, 샘플을 파괴하여 측정하는 방법으로 오븐법을 비롯한 직접법과 아울러 함수율에 따른 유전율 변화를 측정하는 방법, 전기 저항의 변화를 측정하는 방법, 근적외선을 이용하는 방법 등의 간접법으로 다양한 측정방법이 있다. 이와 반대로 청과물과 같이 당도로 그 품질이 결정되는 경우는 파괴적으로 굴절률을 측정하여 당도를 측정하는 방법 이외에는 측정의 정확도가 높은 방법이 거의 없는 실정이다.

최근에 들어 농업에도 첨단 기술의 보급과 아울러 농산물의 비파괴적인 측정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 농산물 품질의 비파괴적 측정 센서의 개발은 최근의 가장 핵심적인 연구 과제가 되어 가고 있으며, 연구결과에 의해 비파괴적 측정 센서가 개발 및 보급되고 있다.

최근에는 의료 분야의 치료 기기 및 이·화학 분야의 분석 기기 등에서 이용되고 있는 핵자기공명(Nuclear Magnetic Resonance) 원리를 이용한 농산물의 내부품질 측정을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

수소 핵자기공명(Proton NMR) 센서는 수소 원자가 자기장 내에서 발생하는 공명신호를 획득하여 분석하는 장치로, 크게 보아 자장을 발생시키는 자석 상자(magnet console), 고주파 신호(radio frequency signal)를 발생하는 RF switch, 신호를 탐지하기 위한 코일(RF coil) 및 신호 처리기(RF signal processor) 등으로 구성되어 있다. 이들이 모두 최적화 되어 작동함으로써 NMR 센서는 농산물의 내부 품질을 비파괴적으로 판정할 수 있다. 현재 구미 각국에서는 NMR을 이용한 농산물의 품질 측정연구가 진행중이며, 특히 미국 등에서는 고자장(고주파수, 100MHz이상)의 NMR대신 10MHz 정도의 저자장을 갖는 NMR 기기를 이용하여 농업과 식품산업에서 시료의 지방의 측정과 수분의 측정에 대한 연구가 진행되고 있다.

NMR에서 가장 기본이 되는 장치는 자석 상자로서 샘플에 강한 자장을 생성하는 부분이

---

\* 서울대학교 농업생명과학대학 농공(농업기계전공)학과

다. 일반적으로 의료 기기나 이·화학 분석 기기 등에서는 1T(10,000 gauss)이상의 자장을 발생하기 위해 초전도 자석(super conducting magnet)을 주로 이용하고 있으나, 그 가격이 고가이고 농산물의 비파괴측정에는 낮은 분해능의 NMR이면 충분하므로 1,000~2,000 gauss 정도의 자장을 형성할 수 있는 영구자석을 이용하는 것이 센서의 개발 및 생산비용 면에서 유리하다.

이에 본 연구에서는 유한요소 프로그램의 하나인 ANSYS를 이용하여 영구자석을 이용한 Halbach형의 농산물 내부품질을 비파괴적으로 측정하기 위한 NMR 센서의 자석상자의 제작을 위한 설계기술을 확보하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 자석 상자의 설계 기준

NMR 센서에 이용되는 자석 상자의 성능은 형성되는 자장의 세기(magnetic flux)와 자장의 균일도(homogeneity)에 의해 결정된다.

이들은 영구자석의 재질, 자석 상자의 형상 및 규격 등에 복합적으로 영향을 받게 되므로 원하는 성능의 자석 상자를 설계하는 것은 수많은 시행착오를 되풀이하게 된다.

영구자석의 재료가 초전도자석에 비해 저가이지만 시행착오를 통하여 설계 및 제작된다면 초기 개발비용의 상승 및 개발 기간의 지연의 문제가 발생할 것이다. 이를 방지하기 위해서 유한 요소 해석(finite element analysis) 기법에 의해서 시행착오를 통해 컴퓨터 상에서 시뮬레이션 한다면 개발비용의 절감, 개발 기간의 단축뿐만 아니라 적절한 설계 규격을 선정할 수 있고 새로운 형상의 자석 상자를 설계할 경우에도 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

### 2.2 자석 상자 유한 요소 해석 모형

자석 상자의 자장의 세기 및 균일도를 해석하기 위해 유한 요소에서 사용하는 지배 방정식은 식 (1)과 같은 전자기장에 관한 맥스웰 방정식(Maxwell equation)을 이용하였다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{j} \\ \vec{B} &= \nabla \times \vec{\Phi} = \mu \cdot \vec{H} \\ \nabla \cdot \vec{\Phi} &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

where,  $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$

### 2.3 자석의 자장강도 및 불균일성 평가

Graphic Simulation의 결과를 토대로 제작된 자석상자는 적절한 세기의 자장 및 균일도를 가져야 한다.

제작된 자석상자의 자기장 세기는 공명주파수에 해당하는 크기를 가져야 하며 (식 2)에

의해 그 강도가 결정된다.

$$B_0 = \left(\frac{2\pi}{\gamma}\right) \nu_0 \quad (2)$$

공명주파수의 크기가 5.1MHz인 자석상자를 개발하기 위해서는 자기장의 세기는 1197.83 gauss(20°C 기준)의 크기를 가져야 된다.

균일도를 검증하기 위해 X-Z 또는 Y-Z plane의 중심으로부터 반경 3cm이내의 원 영역을 설정하고 (식 3)에 의하여 중심에서의 자장의 균일도를 측정하였다.

$$\begin{aligned} \text{균일도} &= \frac{\text{최대 편차}}{\text{평균}} \times 10^6 \text{ (ppm)} \\ &= \frac{|\phi_i - \phi_{\text{avg}}|_{\text{max}}}{\phi_{\text{avg}}} \times 10^6 \text{ (ppm)} \end{aligned} \quad (3)$$

#### 2.4. Halbach형 자석상자

1980년에 Halbach는 그림 1, 2와 같은 자석상자의 제작가능성을 구명하였다. 그림 1은 이상적인 형태로 제작된 자석내에서의 자장의 흐름도를 나타내고 있으며, 그림 2는 실제 제작 현장에서 구현가능한 자석상자의 외형 및 자장의 흐름도를 나타내고 있다.

이상적인 경우의 자석상자는 영구자석내에서 자화방향이 자석의 형태에 따라 연속적으로 연결되어 자장의 감쇠가 없고 외부로의 자장의 누설도 거의 없으며, 따라서 자석상자내의 전 범위에서 균일도가 높은 자장을 형성하게 된다. 그러나, 실제로 제작되는 자석상자의 형태는 그림 2와 같이 한 방향으로만 자화된 8개, 16개 이상의 영구자석을 이용하여 이론적인 자석상자와 근사하게 제작할 수 있다. 제작되는 영구자석의 수가 증가하면 증가할수록 자장의 손실이 적고 균일하지만 많은 영구자석을 설치하면 제작이 어려울 것이므로 적절한 영구자석 개수의 선택이 요구된다.

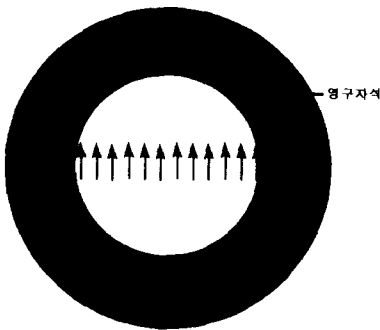


Fig. 1 Ideal Multipole-Magnet

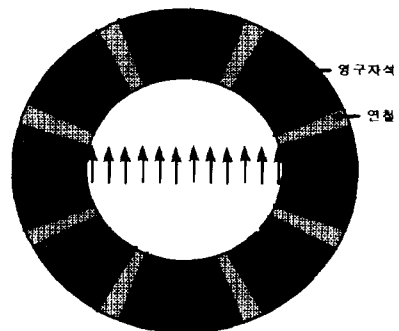


Fig. 2 Practical Multipole Magnet design

그림 3과 표 1은 Halbach형 자석상자의 형상과 설계변수를 나타내었다. 설계변수로는 자석상자의 내경, 외경, 자석의 각도와 자석의 길이로 구성되며 반복적으로 각 변수의 값을 변

화시켜 가면서 X-Z, Y-Z 2차원 평면에서 시뮬레이션하였다.

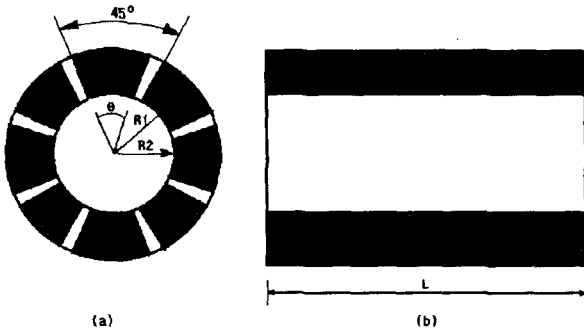


Table 1 Design parameters of Magnet

Variable	Description
R1	Outer radius of magnet
R2	Inner radius of magnet
L	Total length of magnet
$\theta$	Angle of magnet element

Fig. 3 Prototype of Halbach Magnet

### 2.5 영구자석의 재질

영구자석의 재료는 Nd-Fe-B, Rare-Earth, Ceramic 계열 등 여러 가지가 있고, 이들은 각각 발생시킬 수 있는 자장의 세기에 한계를 지니고 있다. Nd-Fe-B, Rare Earth 등은 상대적으로 고가인 반면 高자장을 형성할 수 있고 Ceramic 계열은 저가의 영구자석으로 低자장을 형성한다. 물론 최종적으로 형성되는 자장의 세기는 설계된 자석 상자의 형상 및 크기에 많은 영향을 받는다.

이러한 영구자석의 재질은  $\mu$ (magnetic permeability of the medium)로 표현되는 데,  $\mu$  값도 자장의 세기에 따라 변화하는 비선형적 관계(B-H curve)를 형성하고 있다. 이러한 영구자석의 B-H curve는 주변 온도에 따라 약간의 변화를 보이는데, 본 연구에서는 상온(20°C) 기준의 B-H curve를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 ANSYS를 이용한 유한 요소 해석을 위한 프로그램 개발

ANSYS는 APDL(Ansys Parametric Design Language)을 지원하여 분석 과정을 모듈화하여 프로그램 함으로써 분석 과정의 수정 및 추가를 용이하게 하고 있다. 본 연구에서 개발한 자석 상자 분석 설계 프로그램(MCDSYS II-Magnetic Console Design SYStem II)은 다음과 같은 구조로 구성되어 있다.

- 전처리 모듈 (형상 모델링 + 재질 특성 + 유한 요소 생성)
- 유한 요소 해석 모듈
- 결과 분석 모듈

### 3.2 X-Z 평면에서의 자석상자 설계

시뮬레이션할 자석상자는 자석과 철 프레임으로 구성된다. 전체 자석상자를 이루기 위해

각각 8개씩의 자석과 철 프레임이 필요하며 전체 8개쌍의 절편들이 360°를 이루어 자석 1개와 철 프레임 1개는 45°의 각을 일정하게 이루게 된다. 따라서 자석의 각도(Fig. 3의  $\theta$ )를 결정하면 철 프레임의 각도는 45°에서 뺀 나머지 각이 된다. 또한 자석의 두께에 따른 자장과 균일도를 측정하기 위해 일반 과일이 통과할 수 있도록 내경을 14cm로 유지시켰으며 외경의 크기를 변화시켜 시뮬레이션하였다.

### 3.2.1 자석의 각도와 두께가 자장의 균일도에 미치는 영향

그림 4는 자석의 각도를 변화시켜갈 때 자석 상자내의 지름 6cm이내에서 자장의 균일도를 나타내고 있다.

자석각도는 4°에서 44°까지 변화시켰으며 자석의 외경과 내경의 비는 1.7, 2.0, 2.2, 2.5로 변화시켜가면서 측정하였다. 그림 4에서와 같이 균일도를 500ppm이하로 유지시킬 수 있는 자석의 각도는 자석의 두께와 무관하게 자석의 각도가 20°이하에서 분포하였으며 자석의 각도가 20°이상에서는 자석의 두께가 증가할수록 균일도는 증가하는 경향을 나타내었다. 자석의 각도가 40°를 초과하면 균일도가 향상되는 것으로 나타나는 이유는 자석의 각도가 45°에 도달하면 철프레임은 없어지고 자석만 남게 되어 자석만으로 구성된 자석상자가 되며 이때가 가장 균일도가 높기 때문이다.

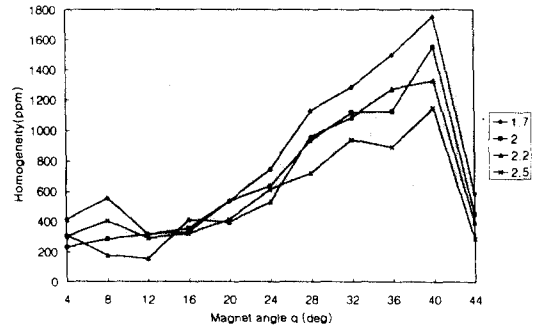


Fig. 4 Homogeneity with magnet angle  $\theta$  (X-Z plane)

### 3.2.2 자석의 각도와 두께가 자장의 강도에 미치는 영향

그림 5는 그림 4와 마찬가지로 자석각도를 4°에서 44°까지 변화시키고, 자석의 내경과 외경의 비를 1.7, 2.0, 2.2, 2.5로 변화시켰을 때의 자장의 강도를 나타내고 있다. 자장의 강도는 중심점을 대상으로 측정하였다.

그림 5와 같이 자석의 강도는 자석의 각도가 커짐에 따라 증가하고 있음을 나타낸다. 아울러 자석두께가 증가할수록 자석의 각도가 커짐에 따라 강도도 커지는 경향을 보여주고 있으며 철 프레임은 자장의 균일도를 높이는 역할은 하지만 자장의 강도를 낮추고 있음을 알 수 있었다.

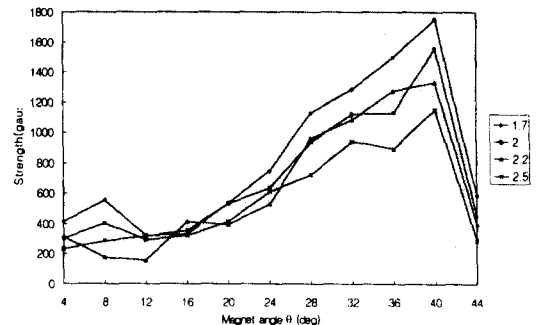


Fig. 5 Strength with magnet angle  $\theta$  (X-Z plane)

## 3.3 Y-Z 평면에서의 자석상자 설계

### 3.3.1 자석의 길이와 두께가 자장의 균일도에 미치는 영향

그림 6은 자석의 길이를 변화시켜갈 때 길이, 너비 6cm의 면적에서의 자장의 균일도를 나타내고 있다. 자석길이는 17cm에서 22cm로 변화시켰으며 자석의 외경과 내경의 비는

1.7, 2.0, 2.3, 2.5로 변화시켜가면서 측정하였다. 그림 6에서와 같이 균일도를 500ppm이하로 유지시킬 수 있는 자석의 길이는 18cm이상임을 알 수 있었다. 자장의 불균일성은 자석의 길이가 19cm를 전후에서 가장 낮았으며, 자석의 길이가 짧으면 자장의 불균일성은 매우 증가하는 현상을 나타내었다.

자석의 두께가 증가할 수록 균일도는 X-Z평면에서의 결과와 달리 불규칙하게 나타났다. 이는 자석의 두께가 증가하면 일반적으로 자석의 균일도를 증가시키지만 자석의 끝단에서 자장의 변화가 크게 되어 이 변화가 자석의 길이가 짧을 경우 중심에서의 균일도에 많은 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 전반적으로 자석의 길이가 18cm이상이면 500ppm정도의 균일도를 획득할 수 있으므로 공진 주파수에 해당하는 적절한 자장의 강도의 선정이 균일도보다 중요한 요소임을 알 수 있었다.

### 3.3.2 자석의 길이와 두께가 자장의 강도에 미치는 영향

그림 7은 자석의 길이를 17cm에서 22cm로 변화시키고 외경과 내경의 길이 비를 1.7, 2.0, 2.2, 2.5로 변화시켰을 때의 자장의 강도를 나타내고 있다. 자석의 강도는 중심점을 대상으로 측정하였다. 그림 7과 같이 자석의 강도는 자석의 길이가 짧아짐에 따라 강도가 증가하는 현상을 보이고 있다. 이는 자석의 끝단에서 자장의 크기가 가장 크므로 자석의 길이가 짧아짐에 따라 중심의 강도는 증가하는 양상을 나타내고 있다. 그러나, X-Z평면에서 각도의 변

화에 따른 자장 강도의 변화와 달리 길이가 1cm증가함에 따라 자장의 강도의 세기는 평균 10gauss이내로 그 차이가 크지 않음을 알 수 있었으며, 따라서 500ppm이하의 자장의 균일도와 공진 주파수에 해당하는 자장강도를 갖는 자석상자는 길이가 가능한 짧고 외경과 내경의 비가 작게 함으로써 최적의 설계가 가능함을 알 수 있었다.

### 3.4 5.1MHz용 자석상자 설계

X-Z평면과 Y-Z평면의 시뮬레이션을 토대로 하여 5.1MHz의 공진 주파수에 해당하는 자장의 세기를 갖고 500ppm이하의 균일도를 갖는 자석상자를 설계하였다. 설계의 시행착오를 줄이기 위해 X-Z평면에서 설계변수를 먼저 정하고 정확한 자장의 세기는 Y-Z평면에서 공진 주파수에 해당하는 자장강도를 맞추어 설계하였다.

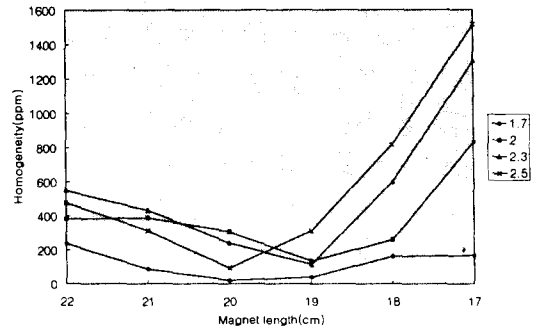


Fig. 6 Homogeneity with magnet length (Y-Z plane)

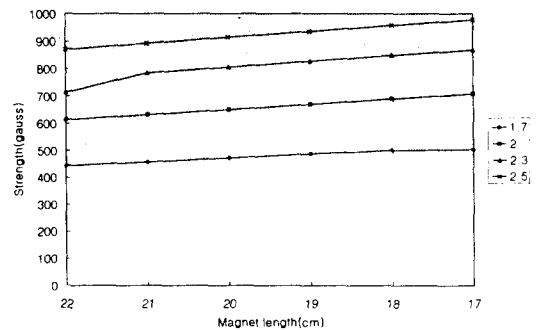


Fig. 7 Strength with magnet length (Y-Z plane)

내경 (cm)	외경 (cm)	자석 길이 (cm)	각도 (deg)		자장의 강도 (gauss)		자장의 불균일도 (ppm)	
			자석	철	XZ	YZ	XZ	YZ
7	17.1	19	21.8	23.2	1489.9	908.6	436	275

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 영구자석을 이용한 자석 상자의 유한 요소 해석 설계 기술을 개발함으로써 추후 NMR 센서의 개발에 사용될 수 있는 균일한 자장 분포와 원하는 자장의 세기를 만족하는 자석 상자의 설계를 가능하게 하였다.

개발된 기술에 의해 설계, 제작된 자석 상자의 자장을 공명주파수에 일치시키고 균일도를 향상시키기 위한 연구를 위해 자석상자의 각도를 변화시켜가면서 자장의 강도변화와 균일도를 평가하였다. X-Z평면의 경우 500ppm이하의 균일도를 유지하기 위해서는 자석의 각도를 20°에서 24° 이내로 유지시켜야 함을 알 수 있었으며, Y-Z평면에서는 자석의 길이가 19cm일 때 가장 균일한 자장의 분포를 나타내었다. 이 결과를 이용하면 정해진 자장강도에서 최적의 균일도를 유지하며 부피 및 중량이 작은 자석상자를 제작하는 것이 가능할 것이다.

#### 5. 참고문헌

1. Cho, S.I., S.C.Kim, and C.H.Chung. 1996. 유한요소해석을 이용한 벼 함수울 측정을 위한 핵자기공명센서용 자석상자의 설계. 한국농업기계학회 동계학술대회 논문집, pp. 80-84.
2. Table, R. S. and D. J. Craik. 1969. *Magnetic materials*. John Wiley & Sons, Ltd, pp 451~455.
3. SASI. 1992. *ANSYS 5.0 User's manual*. Swanson Analysis Systems, Inc.
4. PERMAG. 1989. *Magnet Catalog No. P5A*. PERMAG Network.
5. Cho, S.I., G.W.Krutz, H.G.Gibson, and K.Haghighi. 1990. Magnet console design of an NMR-based sensor to detect ripeness of fruit. *The Transactions of the ASAE*, Vol. 33(4), pp. 1043~1050.
6. Marinescu, M and N.Marinescu. 1984. Anisotropic effects in permanent multipole magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. Mag-20(5), 1930-1932
7. Halbach K. 1980. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. *Nuclear Instruments and Methods*. Vol. 169, 1-10.