

유한 요소 해석을 이용한 벼 함수울 측정을 위한 핵자기 공명 센서용 자석 상자의 설계

Design of Magnet Console for NMR Rice Moisture Sensor with Finite Element Methods

조성인*	김승찬*	정창호*
정희원	정희원	정희원
S.I.Cho	S.C.Kim	C.H.Chung

1. 서론

농산물의 대량 집·출하가 확산, 보급되면서 농산물 수확 후 처리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 농산물 품질의 비파괴적 측정 센서의 개발은 최근의 가장 핵심적인 연구 과제가 되어 가고 있다. 수소 핵자기 공명(Proton NMR) 센서는 수소 원자가 자기장 내에서 발생하는 공명 신호를 획득하여 분석하는 비파괴적 물성 측정 센서로, 최근의 컴퓨터와 신호 처리 기술의 발달로 가능하게 되었다.

NMR 센서는 크게 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 있으며 대상물의 밀도에 영향을 받지 않고 품질 측정이 가능하다.

이들 중에 자석 상자는 자장을 생성하는 장치로, 가장 기본이 되는 장비이다. 일반적인 의료 기기나 이·화학 분석 기기 등에서는 1 T(10,000 gauss) 이상의 자장을 발생하기 위해 초전도 자석(super conducting magnet)을 주로 이용하고 있다. 농업용 NMR 센서에서는 1,000~2,000 gauss 정도의 자장을 형성할 수 있는 영구 자석을 이용하는 것이 센서의 개발 및 생산 비용 면에서 유리하다.

이에 본 연구에서는 유한 요소 해석(FEA: Finite Element Analysis)기법을 이용하여 영구 자석을 이용한 벼의 함수울 측정을 위한 NMR 센서에서 필요한 자장의 세기와 균일도를 갖는 자석 상자를 설계하기 위한 기술을 확보하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 자석 상자의 설계 기준

NMR 센서에 이용되는 자석 상자의 성능은 형성되는 자속(magnetic flux)과 자장의 균일도(homogeneity)에 의해 결정된다. 이들은 영구 자석의 재질, 자석 상자의 형상 및 규격 등에 복합적으로 영향을 받게 되므로, 원하는 성능의 자석 상자를 설계하는 것은 수많은 시행착오를 되풀이하게 된다.

영구 자석의 재료가 저가이더라도 이러한 시행착오를 통한 설계 및 제작이 수반된다면 초기 개발 비용의 상승은 물론이고 개발 기간도 상당히 지연될 것이다. 따라서 유한 요소 해석(finite element analysis) 기법에 의해서 시행착오를 컴퓨터 상에서 시뮬레이션 한다면, 개발 비용의 절감, 개발 기간의 단축뿐만 아니라 적절한 설계 규격을 선정할 수 있고, 새로운 형상의 자석 상자를

*서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 농업기계전공

설계할 경우에도 많은 도움이 되리라고 기대된다.

2.2 유한 요소 해석을 이용한 자석 상자의 설계 과정

유한 요소 해석 기법은 구조물의 정·동력학, 전·자기장, 열·유체 등의 문제 해결을 위해 많은 응용이 이루어지고 있고 이를 위한 많은 프로그램 및 기법 등이 알려져 있다. 많이 사용되고 있는 유한 요소 해석 도구로는 ABAQUS, NASTRAN, FLUENT, ANSYS 등이 있다. 일반적으로 유한 요소 분석이 이루어지는 과정을 보면 다음과 같다.

- (1) CAD를 이용한 자석 상자의 기하학적 형상 설계(drafting)
- (2) 자석, 철의 재질 등 특성 자료 입력
- (3) 유한 요소 생성(mesh generation)
- (4) 유한 요소 분석(finite element analysis)
- (5) 결과 분석(post processing)
- (6) 설계 기준을 만족하지 않으면 (1)로 되돌아간다.
- (7) CAD를 이용한 정밀 설계(detail design)

본 연구에서는 선-스파 워크스테이션에서 2차원, 3차원 형상에 대한 구조, 전자기장, 열-유체의 유한 요소 분석 도구인 ANSYS(SASI-Swanson Analysis System, Inc.) 5.0을 이용하였다.

2.3 자석 상자의 기하학적 설계 인자

자석 상자의 기본 형상은 제작 상의 편의를 고려하여 그림 1과 같은 상자형을 선택하였고, 총 11개의 설계 인자를 선정하였고, 각 설계 인자에 대한 설명은 표 1에 정리하였다.

본 연구에서는 이러한 설계 인자들의 특성과 이들이 자장의 세기와 균일도에 미치는 영향을 유한 요소 해석 기법을 이용하여 분석하고, 이들을 최적 선정함으로써 원하는 성능을 발휘하는 자석 상자 설계를 하였다. 표 1에서 air gap은 농산물 재료가 놓이게 되는 공간으로 자석 상자의 설계에 있어서 제한 요인으로 작용하였다.

Shimming plate (d, k)와 corner steel은 자장의 세기와 균일도를 향상시키기 위하여 본 연구에서 고안된 구조물이다. 이는 영구 자석의 자장의 분포를 분석하여 얻어진 결과로, air gap의 양쪽 끝에서 외부로 향하는 자장의 방향을 안쪽으로 향하게 함으로써 자장의 누설을 방지하기 위한 구조물이다.

2.4 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.

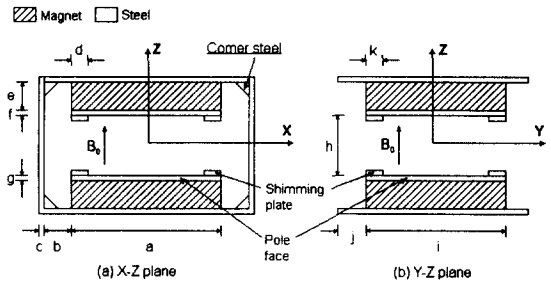


Fig. 1 Magnet console prototype (Box type)

Table 1 Design parameters for magnet console

Variable	Description
a	Total width of magnet
b	Horizontal space gap (X-Z)
c	Thickness of steel cover
d	Width of shimming plate (X-Z)
e	Thickness of magnet
f	Thickness of pole surface plate
g	Thickness of shimming plate
h	Air gap
i	Total length of magnet
j	Horizontal space gap (Y-Z)
k	Width of shimming plate (Y-Z)
*	Corner Steel (X-Z)

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} \\ \vec{B} = \nabla \times \vec{\Phi} &= \mu \cdot \vec{H} \\ \nabla \cdot \vec{\Phi} &= 0 \quad \text{where, } \nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \end{aligned} \quad \dots\dots (1)$$

2.5 영구 자석의 재질

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

영구 자석의 재질은 투자도(magnetic permeability of the medium, μ)로 표현되는 데, 자장의 세기에 따라 변화하는 비선형적 관계(B-H curve)를 형성하고 있다. 이러한 영구 자석의 B-H curve는 주변 온도에 따라 약간의 변화를 보이는데, 본 연구에서는 상온(20℃) 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-Magnetic Console Design SYStem)은 다음과 같은 구조로 구성되어 있다.

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

본 연구에서는 분석에 소요되는 시간을 절감하고자 3차원 분석이 아닌 X-Z 평면과 Y-Z 평면에 대하여 각각 2차원 분석을 수행하였고, 따라서 프로그램도 2개이다.

3.2 유한 요소 해석에 의한 자석 상자의 설계 기술 검증

유한 요소 해석에 의해 분석된 결과는 실제 상황과 비교를 통해 검증을 수행한 후에 새로운 자석 상자의 설계에 이용될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 다음과 같은 절차를 걸쳐 유한 요소 분석에 의한 결과를 실제 제작된 자석 상자와 비교 검증하였다.

- (1) 유한 요소 해석 및 설계
- (2) 실험용 자석 상자의 제작
- (3) Gauss meter 계측 및 검증

검증을 위해 제작된 실험용 자석 상자의 규격은 표 2와 같다. 사용된 영구 자석 Ceramic-8 및 자석 상자의 골격을 이루고 자장의 통로 역할을

Table 2 Geometry of magnet console prototype (mm)

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
304.8	38.1	25.4	12.7	76.2	12.7	12.7	152.4	304.8	38.1	19.1

한 철판(steel plate)의 특성은 상온에서의 B-H curve를 이용하였다.

자장의 세기와 균일도에 대한 실측치와 예측치의 오차를 비교하였다. 균일도는 직경 100 mm 이내의 원 이내의 영역의 자장의 세기를 조사하여 식 (2)에 의해 계산하여 비교하였다.

$$\frac{1}{\text{균일도}} = \frac{\text{최대 편차}}{\text{평균}} \times 10^6 \text{ (ppm)} \quad \dots\dots (2)$$

$$= \frac{|\Phi_i - \Phi_{\text{avg}}|_{\text{max}}}{\Phi_{\text{avg}}} \times 10^6 \text{ (ppm)}$$

제작된 실험용 자석 상자의 자장의 세기를 측정하기 위하여 gauss meter (MG-4D, Walkers Co., ± 0.5 gauss 또는 $\pm 0.05\%$)를 사용하여 X-Z 평면, Y-Z 평면을 각각 측정하였다. 자장의 세기는 예측치가 959 gauss이고 실측치가 985 gauss이므로 2.64%의 상대 오차, 균일도는 예측치가 1195.84 ppm (X-Z), 396.84 ppm (Y-Z), 실측치가 1015.23 ppm (X-Z, Y-Z)로 판명되었다. 실측시의 실내 온도는 21.5℃ 였다.

이러한 오차가 발생하게 되는 원인은 여러 가지가 있는데, 우선 유한 요소 분석이 원래 대상체를 유한 요소로 분해하여 이를 바탕으로 근사해를 구하는 방법이므로 분해된 유한 요소의 크기, 형상 등에 의한 오차가 존재하게 된다. 또한 유한 요소 분석에 사용한 B-H curve는 상온 (20℃)에서의 특성이므로 실측 당시의 자석의 주변 온도에 의한 오차도 존재하게 된다. 그러나 본 검증에서 사용한 Ceramic-8의 온도에 따른 자장의 세기의 변화는 20℃ 기준, 0.19% loss/℃ (Tebble, 1969)이고, 실측 당시의 온도가 상온에 근접하므로 본 연구에서는 온도에 따른 오차는 크지 않다고 할 수 있다.

3.3 Shimming plate와 Corner steel의 효과 검증

본 연구에서는 자석 상자의 균일도를 증가시키기 위해 pole face에 shimming plate를 설치하였다. 이러한 shimming plate의 설치로 인한 균일도의 향상을 검증하기 위해 shimming plate를 설치하지 않은 자석 상자의 자장의 세기와 균일도를 유한 요소 해석에 의하여 분석하였다. 분석에 사용된 자석 상자의 규격은 표 2의 것을 그대로 사용하였다. 분석에 의해 계산된 자장의 세기와 균일도를 shimming plate를 설치한 자석 상자의 자장의 세기와 균일도와 비교하면, shimming plate를 설치하였을 경우가 설치하지 않았을 경우(1043 gauss)에 비해 자장의 세기는 8.0% 감소하지만, 균일도는 92.7%(X-Z), 97.6%(Y-Z)가 향상되었다. 이런 결과를 통해 shimming plate는 자장의 균일도를 획기적으로 향상시키는 반면, 자장의 세기는 상당 부분 감소시키는 것으로 판명되었다.

Shimming plate로 인해 감소된 자장의 세기를 증가시키기 위해서는 영구 자석의 두께(e), 길이(i), 또는 폭(a) 등을 변경하여야 한다. 본 연구에서는 자장의 균일도에 대한 영향을 최소화하면서 자장의 세기를 보상할 수 있도록 영구 자석의 두께(e)를 변화시켜서 자장의 세기를 향상시키는 방법을 이용하였다. 자석의 두께를 10%, 20% 늘려 가면서 자장의 세기의 변화를 분석한 결과, 자석의 두께를 10%(7.6 mm) 늘려서, shimming plate가 없을 때의 자장의 세기에 근접한 자장 (1033 gauss)의 자석 상자를 설계할 수 있었다. 자장의 균일도는 324.16 ppm(X-Z), 337.95 ppm(Y-Z)로 그다지 크게 변하지 않았다.

본 연구에서 고안된 shimming plate와 corner steel의 효과는 같은 균일도의 자석 상자를 이러한 구조물 없이 설계한 것과 비교하면 더욱 두드러지게 된다. 영구 자석의 균일도를 향상시키기 위하여 영구 자석의 폭(a), 길이(i)를 향상시키는 방법을 이용하였다. 영구 자석의 폭과 길이를 각각 50%, 100% 늘려 유한 요소 분석을 수행한 결과, 자석의 폭, 길이를 증가시킴으로써 균일도를 상당히 향상시킬 수 있었지만 자장의 세기가 급격히 감소하는 것으로 확인되었다.

특히 자석의 폭과 길이를 1.5배로 증가시켰을 경우에 본 연구에서 설계된 자장의 세기와 비슷한 자장의 세기를, 균일도는 그 보다 좋지 않은 성능을 보여주었고, 2배로 증가시켰을 경우에는 자장의 균일도는 X-Z 평면의 경우 본 연구에서 설계된 것과 비슷한 성능을 보여주었지만, 자장의 세기가 112 gauss가 더 감소되었고, Y-Z 평면의 균일도는 역시 본 연구에서 설계된 것에 못

미침을 알 수 있었다. 역시 감소된 자장의 세기를 보상하기 위하여 자석의 두께를 증가시켜 본 결과, 두께를 55%를 증가시켰으므로써 자장의 세기는 1024 gauss, 균일도는 173.05 ppm (X-Z), 291.88 ppm (Y-Z)에 도달할 수 있었다. 즉 shimming plate와 corner steel이 없이는 4배 이상의 영구 자석 재료를 더 사용하더라도 원하는 자장의 세기와 균일도를 나타내는 자석 상자의 설계가 불가능하지만, 본 연구에서는 shimming plate와 corner steel을 사용함으로써 약 20%의 영구 자석 재료와 shimming plate와 corner steel을 위한 철(steel)을 추가함으로써 원하는 자장의 세기와 균일도를 나타내는 자석 상자의 설계가 가능하였다. 또한 영구 자석의 크기를 확대하여 자석 상자를 설계할 경우에는 자석 상자의 크기가 증가하여 공간 상의 여러 가지 제한 조건에 영향을 받게 될 것이다.

본 연구 결과를 종합하기 위해 shimming plate 및 corner steel을 사용한 설계와 사용하지 않은 설계에 의해 비슷한 자장의 세기와 균일도를 갖는 자석 상자를 설계하여 비교한 결과, shimming plate 및 corner steel을 사용하지 않은 설계는 이들을 사용한 설계에 비해 두께는 40.9%, 폭, 길이는 각각 100%씩 크게 설계되었고, 이는 약 6배의 재료를 사용해야만 하는 것을 알 수 있었다. 즉 본 연구에서 제안한 방법을 이용함으로써 1/6의 재료로써 원하는 자장의 세기와 균일도를 갖는 자석 상자의 설계가 가능하였다.

마지막으로 실험실에서 제작된 자석 상자의 균일도를 좀 더 향상시키기 위해 shimming plate의 규격을 변화시켜 가면서 유한 요소 해석을 수행하여 자장 및 균일도의 변화를 분석하였다. 유한 요소 분석을 통해 새로 작성된 shimming plate의 규격은 $d=20.3$ mm, $k=17.8$ mm로 변경되었다. 새로 설계된 자석 상자의 경우 균일도가 X-Z 평면의 경우 1195.84 ppm에서 345.18 ppm으로, Y-Z 평면의 경우 396.84 ppm에서 115.74 ppm으로 향상되었으며, 자장의 세기는 958 gauss에서 956 gauss로 약간 감소하였다. 여기에 X-Z 평면 상의 4개 구석에 corner steel을 부착, 설계하여 유한 요소 분석을 한 결과 자장의 세기는 956 gauss에서 962 gauss로 증가하였고, 균일도는 X-Z 평면에 있어 103.23 ppm으로 더욱 향상된 결과를 보였다(Y-Z 평면은 설계 변경이 없으므로 전과 동일한 결과를 보임).

4. 요약 및 결론

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

개발된 기술에 의해 설계, 제작된 자석 상자의 자장의 균일도를 향상시키기 위하여 shimming plate 및 corner steel를 고안하여 설치하였으며, 유한 요소 분석 결과와 실제로 제작된 자석 상자에서 그 성능이 입증되었다. 고안된 shimming plate의 영향으로 저하된 자장의 세기는 영구 자석 두께를 10% 정도 증가시켰으므로써 보상할 수 있음을 보였다.

5. 참고문헌

1. Tabbie, R. S. and D. J. Craik. 1969. *Magnetic materials*. John Wiley & Sons, Ltd, pp 451-455.
2. SASI. 1992. *ANSYS 5.0 User's manual*. Swanson Analysis Systems, Inc.
3. PERMAG. 1989. *Magnet Catalog No. P5A*. PERMAG Network.
4. 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.