

식품 금속검출기 개발에 관한 기초연구

조성인 · 강 은* · 정창호 · 최낙진

서울대학교 농업생명과학대학 농공학과, *삼성전자 기술총괄

Preliminary Study for Developing Metal Detector in Food

Seong-In Cho, Eun Kang, Chang-Ho Chung and Nak-Jin Choi
Department of Agricultural Engineering, College of Agriculture and
Life Sciences, Seoul National University
*Samsung Electronics, Corporate Technical Operations

Abstract

Food safety is a major concern of today's customers. Safe food should not include any contaminator including metal particles. This research was a preliminary study for developing the metal detector. FEA (Finite Element Analysis) was conducted to find out a possibility of detecting metals in food. A magnet box was designed for the FEA simulation. Magnet flux density was changed with metals in food and the change of flux increased with larger metal. In order to validate the simulation, a prototype of metal detector was constructed. It consisted of a magnet box and a gauss meter. Food samples containing metals were located at the center of box. The flux change with 5.5 mm steel ball in sausage had 3 gauss difference compared with a non-metal sausage. This result has shown that the prototype of metal detector could be used to detect metals in food.

Key words: food safety, metal detector, FEA simulation, flux density

서 론

식품에 있어 금속을 비롯한 이물질이 전혀 없는 안전한 식품의 공급은 국민 건강을 위해 필수적인 요소이다. 그러나 선 접촉이 있는 기어를 이용하여 분쇄공정이 있는 곳에서는 자연히 금속가루가 제품에 포함될 수 있으며, 기타 산업공정중에서도 금속은 언제든지 식품에 포함될 수 있다. 식품의 경우 소비자는 과거와 마찬가지로 금속과 이물질에 대하여 거의 무방비 상태에 놓여 있다고 해도 과언이 아니다. 대부분의 소비자는 구입한 제품에 대하여 신뢰를 가지고 있으며 식품에 금속이 없을 것이라고 생각한다. 따라서 이러한 소비자의 욕구를 충족시키기 위해서는 소비자에게 제품이 전달되기 전에 금속검출을 통한 식품의 검사가 이루어져야 한다. 그러나 아직까지 국내에는 식품내의 금속의 유·무를 검사하기 위한 기초연구가 전무한 실정이어서 금속 및 비금속검출기의 개발을

위한 연구가 시급하다.

금속검출기는 제과류 등과 같이 포장되어진 식품류 뿐만 아니라 고춧가루나 곡류 등과 같은 농산물에 대한 금속검출에도 이용가능하며 의약품내의 금속검출과 완성된 의류속의 바늘과 같은 금속검출에도 이용이 가능하여 그 사용가능성은 다양하다.

현재 개발되어 있는 금속검출기는 전·자기장의 원리를 이용하는 것이 대부분으로, 전·자기장내에 금속이 들어왔을 때의 변화를 검출하여 금속을 검출한다. 자속밀도의 변화를 이용하는 측정방법은 영구자석내에 위치한 금속에 의해 변화된 자속밀도의 변화를 이용하여 금속의 유무를 검출하는 방법이다. 고주파 발전형 회로의 코일 내·외부에 위치한 금속표면에 와류전류가 흐르는 전자기효과를 이용한 금속검출기는 금속의 유무에 따른 주파수 위상변화를 측정하여 금속의 유무를 측정하는 방법이다(Fuending, 1982). 이와 아울러 X-ray 분광법을 이용한 금속 및 비금속의 검출기가 있으며, 이를 이용하여 양의 금속속을 검출하는 연구가 진행되었다(White et al., 1992). 자기장을 이용한 금속검출기는 미국에서는 현재 1 mm정도의 금속물질을 검출할 수 있는 제품이 생산되

Corresponding author: Seong-In Cho, Associate Professor, Dept. of Agricultural Engng., College of Agriculture and Life Sciences, S.N.U., 103 Seodun-dong, Kwonsun-Gu, Suwon 441-744, Korea

고 있지만, 산업계에서는 0.25 mm 정도의 금속물질까지도 검출할 수 있는 금속검출기를 원하고 있다 (National Food Processors Association, 1990).

현재 개발중인 금속검출기는 측정대상이 철과 스테인레스에 국한되어 있으며, 아직까지는 유리, 플라스틱, 구리 등을 비롯한 비철금속에 대한 연구가 진행중이나 안정성 여부를 포함한 뚜렷한 연구결과 및 상용화가 이루어지고 있지 않다.

본 연구에서는 자속밀도의 변화를 이용한 금속검출기-철을 중심으로-에 대한 기초연구를 우선적으로 실시하고자 하며, 그 세부목적은 다음과 같다.

- 1) 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션을 통하여 금속검출의 원리의 타당성을 분석한다.
- 2) 유한요소해석의 결과를 이용하여 각 부분의 자속밀도의 변화를 측정하여 자속밀도 측정위치를 설정한다.
- 3) 시뮬레이션 결과를 토대로 실제 제작된 자석상자를 이용하여 그 결과를 검증한다.

재료 및 방법

기본원리

자석에 의해 형성되는 자기력선은 N극에서 출발하여 매질을 통과하여 S극으로 흐른다. 이때 어떠한 매질을 통과하느냐에 따라 일정 면적당 통과하는 자기력선의 수는 달라진다. 이때 일정한 면적에 통과하는 자기력선의 수를 자속밀도라고 하고 그 단위를 gauss로 표시한다.

일정하게 유지되고 있는 자기장내에 철이 놓여 있으면 자기력선은 공기보다 자력선의 흐름이 훨씬 좋은 철을 통과하려는 경향을 나타낸다. 따라서 일정한 곳에서 자기장의 세기를 계속 측정할 때 철이 자기장내에 놓이기 전과 놓인 후의 자기장의 밀도에는 차이가 생긴다. 자기장의 밀도차이는 철의 절대적인 부피

와 철의 재질에 따라 다르게 되나, 기본적으로 자기장의 밀도변화에 의해 철의 유무를 측정할 수 있다.

자장의 밀도의 차이는 철의 양에 비례하는 특성을 나타낸다. 즉, 철의 양이 많으면 더 많은 자기력선이 철을 통하여 이동함으로써 자기력은 공기에 노출될 때보다 더 증가하는 특성을 나타내게 된다. 따라서 강도의 차이를 상대값으로 환산하면 철의 크기를 측정하는 것이 가능하다.

투자율

투자율이란 자기력선이 매질을 통과하는 정도를 의미한다. 재료를 통과하는 자기력선의 수는 재료의 재질에 따라 달라 물질의 특성값이 되며, 공기의 투자율(μ)을 1로 표시할 때, 보통 철은 공기에 비해 1000배 정도의 투자율을 가지고 있다. 즉, 단일 면적의 공기에 1개의 자력선이 통과할 수 있다면 철은 1000개의 자기력선을 통과시킬 수 있다는 의미이다.

자속의 흐름

자기력선은 공기를 통과할 때는 Fig. 1처럼 균일하게 분포하지만 자기장내에 투자율이 1보다 큰 물체가 존재할 경우에는 Fig. 2와 같이 자기력선의 밀도가 변하게 된다. 따라서 물체의 투자율에 따른 자기장내의 자속밀도의 변화를 측정하여 금속의 존재 유무를 판별하는 것이 가능하다.

유한 요소 해석을 이용한 금속검출기 시뮬레이션

유한 요소 해석 기법은 구조물의 정·동역학, 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, NANSTRAN, FLUENT, ANSYS 등이 있다. 일반적으로 유한 요소 분석이 이루어지는 과정을 보면 다음과 같다.

- 1) CAD를 이용한 자석 상자의 기하학적 형상 설계

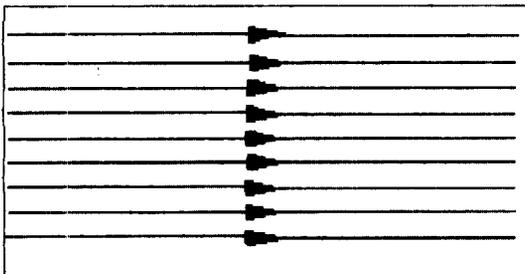


Fig. 1. The distribution of magnetic field in air

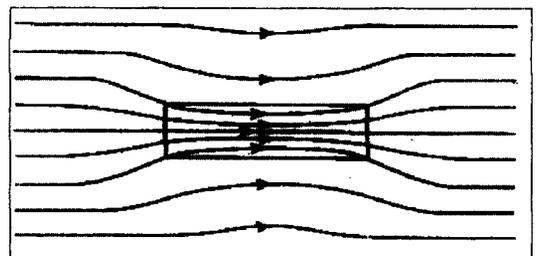


Fig. 2. The distribution of magnetic field in air and steel.

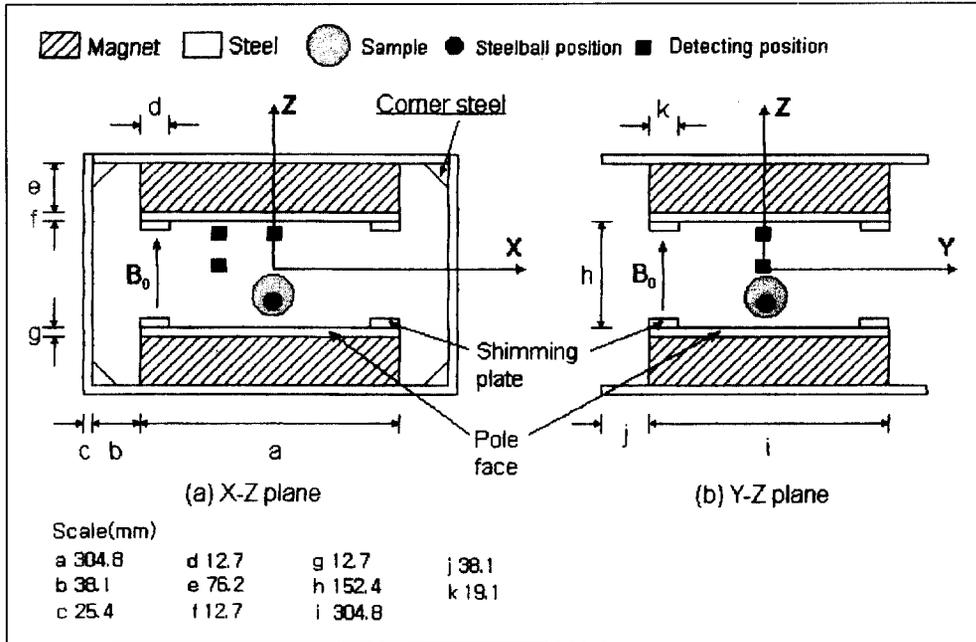


Fig. 3. The positions of detection and magnetic console

(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 Sun-spark Workstation에서 2차원, 3차원 형상에 대한 전자기장 해석에 신뢰성이 높은 ANSYS (SASI-Swanson Analysis System, Inc.,1992) 5.0을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

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

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} = \mu \cdot \vec{H} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0$$

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

자속밀도 측정

시뮬레이션 결과를 이용하여 자속밀도를 측정하기

위해 먼저 금속구를 중앙 하단부(z=-4 cm)에 위치시켰다. 중앙하단부에 위치한 금속구에 의해 주변의 자속 밀도는 영향을 받게된다. 이 영향을 검출하기 위해 Fig. 3과 같이 자장밀도의 검출위치는 1) xy 평면의 중심(x=y=0 cm, z=7 cm), 2) x=-10, y=0 cm, z=7 cm, 3) x=-10, y=0 cm, z=0 cm 세 점에서 검출하였다.

결과 및 고찰

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(MDMC I-Metal Detectin with Magnetic Console I)은 다음과 같은 구조로 구성되어 있다.

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

XZ, YZ평면 시뮬레이션

Fig. 4와 5는 ANSYS를 이용하여 XZ 평면에서 시뮬

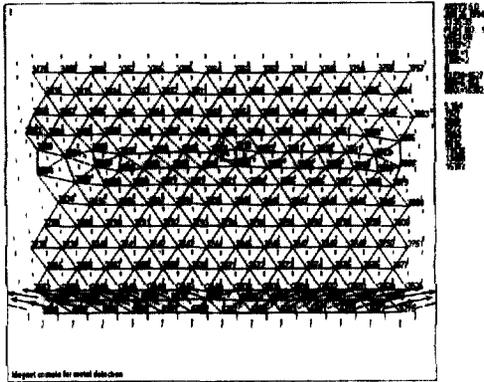


Fig. 4. Flow of flux without any steel balls

레이션한 결과이다. Fig. 4는 자석상자내에 금속이 전혀 존재하지 않을 때의 자기력선의 흐름을 나타내고 있다. Fig. 4와 같이 자력선은 아래에서 위로 자장의 밀도가 균일하게 분포하고 있음을 관찰할 수 있다.

반면 Fig. 5는 금속구(Φ30 mm)가 자석사이에 존재

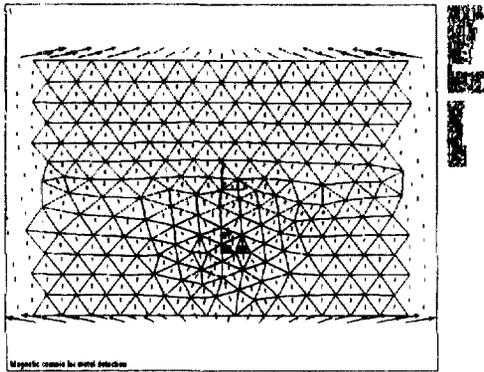


Fig. 5. Flow of flux with the steel ball

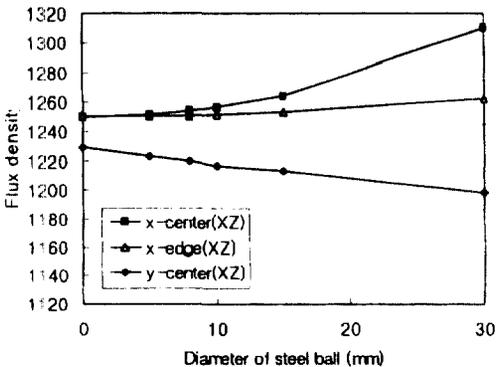


Fig. 6. Result of the simulation in XZ plane.

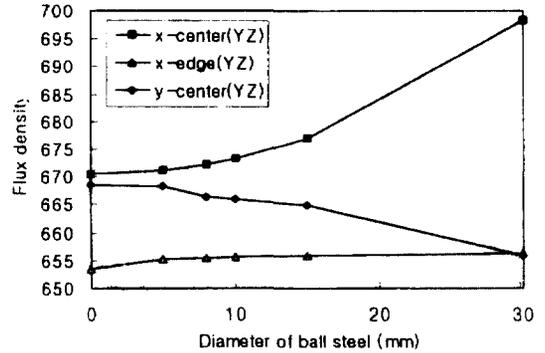


Fig. 7. The result of simulation in YZ plane

할 경우의 시뮬레이션 결과이다. Fig. 5의 금속구가 존재하는 구간을 관찰하면 자력선이 금속구를 향하여 흐르고 있음을 알 수 있다. 따라서 자기장내에 금속이 존재할 때 자기력선은 공기보다는 투자율이 높은 매질인 금속구를 통과하려는 경향이 있음을 관찰할 수 있다.

YZ 평면에서의 시뮬레이션 결과는 XZ 평면에서의 시뮬레이션 결과와 유사하였다. Fig. 6과 7은 XZ, YZ 평면에서 세개의 측정점에 대하여 금속구의 크기의 증가에 따른 자속밀도의 변화에 대한 그림이다.

XZ, YZ평면에서 금속구의 바로 윗방향(x-center; Fig. 3의 x=y=0, z=7 cm 지점)은 자속밀도가 금속구 크기변화에 민감하게 변화하는 경향을 나타내었다. 왼쪽 윗지점(x-edge; Fig. 3의 x=-10, y=0, z=7 cm 지점)의 자속밀도는 금속구의 크기에 비해 큰 차이가 없었으며, 왼쪽지점(y-center; Fig. 3의 x=-10, y=0, z=0 cm)은 금속구의 크기에 어느 정도 변화가 있었지만 그 밀도의 크기변화는 작은 것으로 나타났다. 따라서 자속밀도의 측정 위치는 중심부분이 가장 좋은 것으로 나타났으며 이 부분에서 자속밀도의 변화를 측정함으로써 금속물질의 유무판정이 가능할 것으로 판단되었다.

중심에서의 자속밀도 변화

Table 1은 XZ, YZ평면에서 시뮬레이션된 값을 평

Table 1. Results of the simulations

금속구의 지름	x=0, y=0 z=7 cm	x=-10, y=-10 z=7 cm	x=-10, y=-10 z=0 cm
Φ 30 mm	1004.72	958.515	926.875
Φ 15 mm	970.72	954.57	939.155
Φ 10 mm	964.875	953.665	941.51
Φ 8 mm	963.26	953.31	943.24
Φ 5 mm	961.435	952.95	945.855
Φ 0 mm	960.26	951.945	948.705

Table 2. Results of the experiments

금속구의 지름	x=0, y=0 z=7 cm	x=-10, y=-10 z=0 cm
φ 30 mm	1001	936
φ 15 mm	979	945
φ 10 mm	965	953
φ 7.14 mm	962	956
φ 5.55 mm	958	960
φ 0 mm	955	964

균한 것으로, 실제 자석상자와 그 오차가 5%내에 있음이 조성인 등(1996)의 연구결과에 의해 검증되었다. Table 1에서 관찰하는 것도 XZ, YZ 각 평면에서 나온 결과와 일치하며 가장 좋은 측정 위치는 중앙으로 판단된다.

실제 자석상자를 통한 실험

시뮬레이션 결과를 토대로 비교적 밀도변화가 큰 $x=y=0$ cm, $z=7$ cm 지점과 $x=-10$, $y=0$, $z=0$ cm 지점에서 자속밀도를 측정하였다.

실제 측정에 이용된 금속구의 크기는 5.5, 7.14, 10, 15, 30 mm이었으며, 금속구는 35 mm 정도의 직경을 갖는 식용 소시지의 중심에 위치시킨 후 실제 금속검출기를 통과하는 모습을 묘사하기 위해 자석상자내의 중앙 하단부에 위치시켰다.

자석 상자의 자장의 세기를 측정하기 위하여 Gaussmeter (MG-4D, Walkers Co., ± 0.5 gauss 또는 ± 0.05 %)를 사용하여 X-Z 평면, Y-Z 평면을 각각 측정하였다. 자속밀도의 변화의 실측치는 Table 2에 나타내었다.

요약 및 결론

본 연구는 식품내의 금속검출을 위한 기초연구로 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션과 실제 제작된 자석상자내에 금속이 포함된 식품을 넣어 그 자속밀도의 변화를 통하여 금속검출의 가능성을 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션 결과를 통하여 철의 존재에 따라 자속밀도의 변화가 생기는 현상을 관찰하였다.

2) 시뮬레이션을 통해 샘플내에 포함된 금속을 검출하기 위해서는 샘플 위에서 자속밀도의 변화를 측정하는 것이 가장 효과적임을 발견하였다.

3) 실제 제작된 자석상자를 이용하여 시뮬레이션을 검증하였으며, 실제 식품내에 포함된 금속을 검출하는 것이 가능함을 발견하였다.

향후 계속되는 연구는 본 연구를 바탕으로 다음과 같은 점을 개선 및 발전시켜야 할 것이다.

1) 금속구의 크기가 작을 때는 자속밀도의 변화가 미소하므로 자속밀도의 작은 변화를 감지할 수 있는 자속 측정기의 개발 또는 도입이 검토되어야 한다.

2) 시뮬레이션은 1개의 금속구와 1개의 측정점만 이용하였는데, 여러개의 금속구와 2~3개의 측정점을 설정하고 각 측정점의 결과를 토대로 금속의 유·무를 비롯하여 금속의 크기를 측정하는 신호처리 기술 개발에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

문 헌

- 김광윤 외 9인. 1992. 자성재료학. 반도출판사, pp. 23,70-73.
- 조성인, 김승찬, 정창호. 1996. 유한요소해석을 이용한 베타 감수율 측정을 위한 핵자기공명센서용 자석상자의 설계. 한국농업기계학회 동계학술대회 논문집, pp. 80-84.
- ANSYS. 1992. *User's manual* (ver 5.0). Swanson Analysis Systems, Inc.
- Cho, S. I., G. W. Krutz, H. G. Gibson and K. Haghghi. 1990. Magnet console design of an NMR-based sensor to detect ripeness of fruit. *The Transactions of the ASAE*, 33(4): 1043-1050.
- Fuendling, H. G. 1982. Metal detectors in the confectionery industry. *Suesswarenindustrie*, 26(3):82, 84.
- White, I. R. et al. 1984. Detection of cobalt bullets in live sheep. *The Veterinary Record*, 115(10):254.
- National Food Processors Association. 1990. Assessment of Sensors used in the Food Industry (Final Report) *Energy Conservation*. pp.97.