

유도가열조리기의 최적설계 및 누설자속 해석

변진규⁰ 박일한^{*} 최경^{**} 정현교 한송엽 노희석^{***} 권경안^{***} 양우종^{***}

서울대학교 전기공학과 *숭실대학교 전기공학과

강원대학교 전자공학과 *LG전자 생활시스템 연구소

The Optimal Design and Leakage Flux Analysis of the Induction Heating Cooker

Jin-kyu Byun *Il-han Park **Kyung Choi Hyun-Kyo Jung Song-yop Hahn

***Hee-Suck Roh **Kyoung-An Kwon ***Woo-Jong Yang

School of Electrical Eng., Seoul National Univ.

*Dept. of Electrical Eng., Soongsil Univ.

**Dept. of Electronic Eng., Kangwon National Univ.

***Living System Research Lab., LG Electronics Inc.

Abstract - For the optimal design of the induction heating cooker, precise and accurate analysis of the magnetic field inside the jar must be achieved first.

Until now, design methods based on experience has been used in industry field. But this takes a lot of trial and error, high cost and also long development time. So the analysis of the magnetic field distribution is very important.

In this paper the magnetic field inside the induction heating cooker is analyzed by using axisymmetrical FEM(finite element method). And the method of the coil location design for the optimal heat source distribution using sensitivity analysis is developed. In addition, the shielding effect of the non-axisymmetrical 3-D ferrite structure used in induction heating cooker is also analyzed by the integral method.

1. 서 론

유도가열 조리기 내의 최적설계를 위해서는 조리기 내의 정확한 자장계산이 선행되어야 한다. 지금까지는 경험과 시행착오에 의한 설계방법이 현장에서 사용되어왔지만 시간과 비용의 낭비를 막기 위해 정확한 자장계산에 기초를 둔 최적설계기법의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 전자장 수치해석중 해석모델의 복잡한 형상을 고려할 수 있어서 최근 들어 많이 사용되고 있는 유한요소법을 이용하여 유도가열 조리기의 자장분포를 계산하고 이 결과를 바탕으로 민감도법을 이용해 최적의 열원분포를 얻기 위한 코일의 위치를 구하는 알고리즘을 개발하였다.

이와 별도로 유도가열조리기에 쓰이는 비축대칭 3차원 구조를 가진 페라이트의 차폐효과를 integral method를 이용해 해석하는 알고리즘도 개발하였다.

그리고 개발된 알고리즘을 현재 시판 중인 유도 가열 조리기(밥솥)의 최적설계에 적용하였다.

2. 자장해석

와전류문제에 대한 지배방정식은 일반적으로 다음과 같이 쓸 수 있다[1].

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_0 \quad (1)$$

식(1)을 축대칭 유한요소법을 적용하여 이산화하면 다음과 같은 시스템 행렬식을 얻을 수 있다[2].

$$[K][A] = [J] \quad (2)$$

윗식에서 $[K]$ 는 시스템 행렬식, $[J]$ 는 전류원 벡터이다. 그리고 $[A]$ 는 자기벡터포텐살에 절점의 반경을 곱한 rA 로 이루어진 상태변수 벡터이다. 이 시스템 행렬식을 풀면 각 절점에서의 자기벡터포텐살과 와전류값, 그리고 열원을 계산

할 수 있다.

3. 민감도법을 이용한 최적설계

3.1 민감도식 유도 및 계산

전기기기의 설계를 위한 기준으로서의 목적함수는 일반적으로 설계변수와 시스템 상태변수의 합수로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = F[\rho, X(\rho)] \quad (3)$$

$[\rho]$: 설계변수 벡터($np \times 1$)

$[X(\rho)]$: 상태변수 벡터($n \times 1$)

np : 설계변수의 수

설계변수에 대한 목적함수의 변화율(민감도)은 수학적으로 전미분의 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dF}{d[\rho]} = \frac{\partial F}{\partial [\rho]} + \frac{\partial F}{\partial [X]} \frac{d[X]}{d[\rho]} \quad (4)$$

시스템 행렬식(2)의 양변을 설계변수로 미분한 결과를 식(4)의 우변 둘째항에 대입하면 다음과 같다[3].

$$\frac{dF}{d[\rho]} = \frac{\partial F}{\partial [\rho]} + [\lambda]^T \frac{\partial}{\partial [\rho]} ([J] - [K][\bar{X}]) \quad (5)$$

여기서 $[\bar{X}]$ 는 시스템 상태방정식의 해이고 λ 는 다음의 보조변수식으로부터 계산된다.

$$[K]^T[\lambda] = \frac{\partial F}{\partial [X]^T} \quad (6)$$

3.2 유도가열용기의 민감도식

유도가열용기 바깥쪽 표면의 최적열원분포를 얻기 위하여 목적함수 F 를 다음과 같이 정의한다.

$$F = \frac{1}{4} \sum_e \left(\omega^2 \sigma \frac{A_e A_e^*}{r_e^2} - \frac{J_{0e}^2}{\sigma} \right)^2 \quad (7)$$

식(7)에서 e 는 가열용기 바깥쪽 표면의 절점들을 의미하고 A_e 는 절점에서의 상태변수값(rA), $\frac{J_{0e}^2}{\sigma}$ 는 그 절점에서 얻고자하는 열원의 세기로서 최적열원의 분포에 따라 결정되는 상수이다.

식(4)의 우변 첫째항은 상태변수가 일정할 때 설계변수만에 의한 목적함수의 변화율인데 F 가 A 의 양함수로 표현되므로 그 값은 0이 된다. 우변 둘째항의 계산에서 F 는 실수, A 는 복소수이므로 $\frac{\partial F}{\partial A}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial F}{\partial A_r} - j \frac{\partial F}{\partial A_i} \quad (8)$$

그리면 설계변수에 대한 목적함수의 변화율 $\frac{dF}{dp}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{dF}{dp} &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial F}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial p} \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left[\lambda^T \frac{\partial}{\partial p} (f - K\bar{A}) \right]\end{aligned}\quad (9)$$

보조변수식(6)의 구동항은 역시 식(8)으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial A_k} &= \frac{\partial F}{\partial A_{kr}} - j \frac{\partial F}{\partial A_{ki}} \\ &= \left(\omega^2 \sigma \frac{A_k A_k^*}{r_k^2} - \frac{J_{ik}^2}{\sigma} \right) \frac{\omega^2 \sigma}{r_k^2} A_k^*\end{aligned}\quad (10)$$

마지막으로 식(9)에서 $\frac{\partial f}{\partial p} (f - K\bar{A})$ 를 계산하는데, 설계변수는 코일의 위치이기 때문에 $\frac{\partial K}{\partial p}$ 는 0이고, $\frac{\partial f}{\partial p}$ 는 요소별로 국부좌표계를 이용하여 계산하고 조립할 수 있다. 이상으로 유도가열용기의 민감도식 계산은 완료된다.

3.3 사례 연구

이상에서 언급한 민감도를 이용한 최적설계기법을 유도가열법술에 적용시켜보았다. 최적화 기법은 최대경사법(steepest descent method)을 사용하였고 설계변수는 코일의 위치로 정했는데 안쪽 코일다발은 상하좌우로 평행이동이 가능하게 했고 바깥쪽 코일다발은 용기의 곡면을 따라 움직여 있으므로 움직이는 방향은 고정시키고 곡면의 중심으로부터의 거리가 늘어나거나 줄어들도록 했다.

임의로 변화시킨 코일위치(그림 1.)를 초기값으로하고 목적함수는 현재 설계된 코일위치에서의 용기 바깥쪽 표면 열원분포로 잡고 최적화를 수행시켜보았다.

최적화 결과 반복계산 5번 이내에 목적함수가 초기값의 10%이하로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 첫 번째 Iteration에서 목적함수가 가장 큰 폭으로 감소하였고 반복계산 6회를 넘으면 목적함수는 작은 비율로 줄어든다. 최적화 후 열원의 분포와 설계변수는 목적했던 값과 거의 일치하는 것을 관찰할 수 있다.

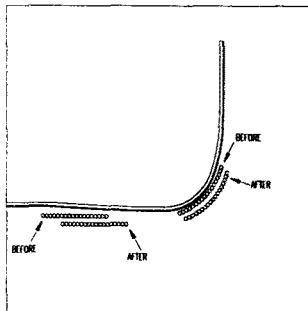


그림 1. 최적화 전후의 코일의 위치변화

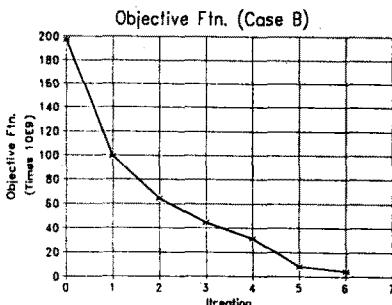


그림 2. 반복계산에 따른 목적함수값의 감소

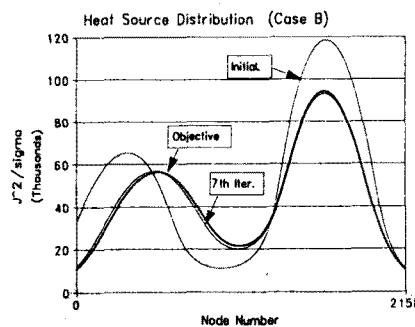


그림 3. 최적화 전후의 열원분포변화

4. 누설자속해석

4.1 해석이론

3차원 공간에 임의의 도선전류와 자성체가 있을 때 Integral method를 이용하여 자장률 구하고 축대칭 유한요소법과 결합시켜서 페라이트의 차폐효과를 분석하는 방법은 다음과 같다.

먼저 일반적으로, magnetic flux density \vec{B} 는 다음과 같이 표시된다[4].

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' - \mu_0 \nabla \Psi^*(\vec{r}) + \mu_0 \vec{M}(\vec{r}) \quad (11)$$

여기서, $\Psi^*(\vec{r})$ 는 magnetic scalar potential, V는 전류와 자성체가 있는 전체 영역, S는 V의 표면과 내부에서 다른 매질사이의 경계이다.

그러면 magnetic field intensity \vec{H} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\vec{H}(\vec{r}) &= \frac{1}{\mu_0} \vec{B}(\vec{r}) - \vec{M}(\vec{r}) \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' - \nabla \Psi^*(\vec{r})\end{aligned}\quad (12)$$

자성체가 동방이고 선형적일 때 $\vec{M}(\vec{r}) = \chi_m \vec{H}$ 이므로,

$$\begin{aligned}\vec{M}(\vec{r}) &= \frac{\chi_m}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' \\ &- \frac{\chi_m}{4\pi} (\vec{r} - \vec{r}') \left(\int_V \frac{-\nabla' \cdot \vec{M}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' \right) \\ &- \int_S \frac{\vec{M}(\vec{r}') \cdot \vec{n}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} da'\end{aligned}\quad (13)$$

윗식에서 우변 첫 항을 알면, 윗식은 \vec{M} 을 미지수로 하는 적분방정식이 된다. 자성체를 일정한 자화를 갖는 여러개의 요소로 분할하여 각 요소에서의 자화를 미지수로 하는 system 방정식을 도출하면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned}-\vec{H}_{aij} &= \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N (P_{iix} M_{ij} + P_{iyy} M_{ij} + P_{izz} M_{ij}) - \frac{\vec{M}_{ij}}{\chi_m} \\ -\vec{H}_{aj} &= \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N (P_{iix} M_{ji} + P_{iyy} M_{ji} + P_{izz} M_{ji}) - \frac{\vec{M}_{ji}}{\chi_m} \\ -\vec{H}_{ai} &= \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N (P_{iix} M_{jj} + P_{iyy} M_{jj} + P_{izz} M_{jj}) - \frac{\vec{M}_{jj}}{\chi_m}\end{aligned}\quad (14)$$

여기서 $P_{iix}, P_{iyy}, \dots, P_{izz}$ 는 i번째 요소의 중심점과 j번째 요소표면의 한 대표점 사이의 거리, 방향 그리고 j번째 요소의 표면적, 표면의 방향 등에 의해서 정해지고, \vec{H}_{ai} 는 유한요소법에 의한 해석결과로서, 자성체가 없을 때 i번째 요소에서의 \vec{H} 값이다.

식(14)를 전체요소에 대하여 system matrix를 조립하고 이것을 풀면 각 요소에서의 자화 \vec{M} 가 구해진다.

최종적으로 식 (11)에 자화 \vec{M} 을 대입하여 해석영역 내의

임의의 한 점에서 magnetic flux density \vec{B} 를 구할 수 있다.

4.2 사례 연구

이상의 3차원 자장해석이론을 이용하여 페라이트에 의한 H 의 차폐효과를 계산해 보았다. 본 연구에서는 적사각형 요소를 사용했고 페라이트 1개 표면의 절점수는 122개, 요소수는 116개, 총 절점수는 488개, 총 요소수는 464개이다. 페라이트의 양끝은 자속이 집중되는 부분이므로 요소수를 많게 했다.

해석결과 방사형으로 4개가 놓여있는 페라이트의 바로 아래부분에서는 거의 50%에 가깝게 H 의 크기가 감소했지만 페라이트와 페라이트 사이의 빈 공간(그림 6.의 B10)에서는 차폐효과가 거의 없는 것을 알 수 있다. 또 페라이트의 끝쪽에서 가까운 공간은 자속이 집중되는 곳이므로 다른 곳에 비해 차폐효과가 줄어들거나 오히려 자속의 세기가 커지는 현상도 발생한다. 중심에 가까운 곳에서는 페라이트의 끝쪽이라도 이러한 효과가 덜한데, 이것은 중심쪽은 페라이트가 밀집되어 있어 페라이트의 끝과 끝 사이의 공간을 제외하고는 자속이 공기중으로 거의 새어나가지 않기 때문으로 보인다. 그리고 대체적으로 방사형구조의 중심에서 멀어질수록 차폐효과가 떨어지는 것으로 수치해석결과 나타났다.

이상과 같은 문제점을 해결하기 위해 보다 효과적인 차폐구조가 차후에 연구되어야 할 것이다.

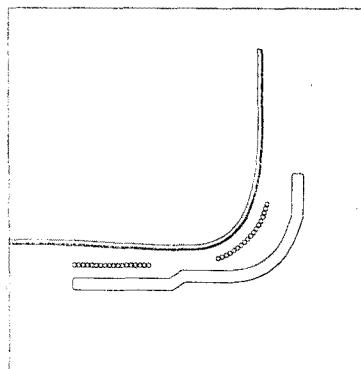


그림 4. 페라이트와 용기, 코일의 위치

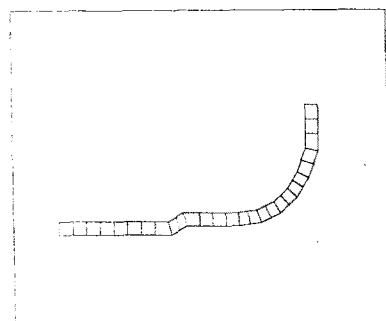


그림 5. 페라이트 1개의 요소분할도(측면)

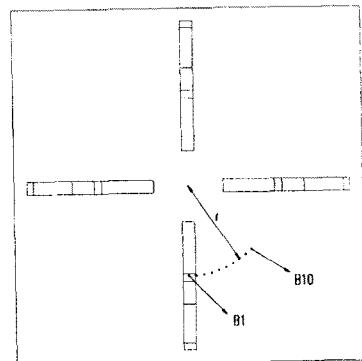


그림 6. 자계의 세기(H)의 계산위치
(B1~B10), $z=27[\text{mm}]$

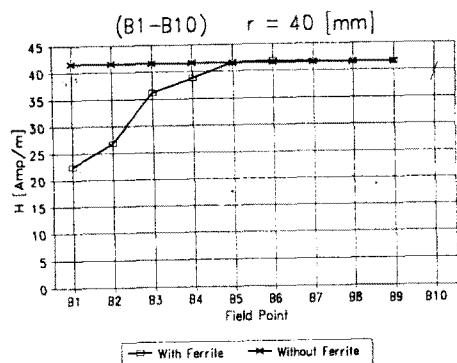


그림 7. $r=40[\text{mm}]$ 일 때 B1~B10 에서의 H [A/m]

5. 결 론

유도가열 조리기 내의 정확한 전자계분포를 얻기 위해 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였다. 그리고 이러한 해석을 바탕으로 민감도를 이용한 최적설계이론을 적용해 최적화를 실시하였다. 실제 모델에 대하여 최적열원분포를 실행시킨 결과 코일의 위치와 열원의 분포가 목적하는 값으로 짧은 반복계산안에 수렴하는 것을 확인하였다.

이와는 별도로 축대칭이 적용되지 않는 3차원 자계차폐문제도 병행하여 연구하였다. 개발된 알고리즘을 유도가열 조리기 내의 방사형 페라이트의 차폐 효과 해석에 적용하고 정성적으로 검토한 결과 물리적으로 타당함을 확인할 수 있었다.

개발된 알고리즘들은 유도가열조리기의 설계시간 단축, 정확한 결과예측 및 신제품 개발에 이용될 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] H.H.J.M. Janssen, E.J.W. ter Maten, D. van Houwelingen, "Simulation of coupled electro-magnetic and heat dissipation problems," IEEE Transactions on magnetics, vol. 30, no. 5, pp.3331~3334, september 1994.
- [2] A.J. Davies, *The Finite Element Method: A First Approach*, Clarendon Press · Oxford, 1980.
- [3] 곽인구, 이향범, 박일한, 한송엽, "유도기 효율향상을 위한 회전자슬롯 형상최적화", 대한전기학회 하계학술대회논문집(B), pp.929~931, 1993.
- [4] 박일한, "자기편향 요-크에서의 자제와 전자궤도 해석", 석사학위논문, 서울대학교 전기공학과, 1986.