

전자레인지 내부에 위치한 부하의 전자파 패턴에 관한 실험 및 수치해석

조성호\*, 이영민, 김현정  
LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 요소기술팀

Numerical and experimental analysis of the electromagnetic field of the load in a microwave oven

Cho Seong-Ho\*, Lee Young-Min, Kim Hyun-Jung  
LG Electronics, Digital Appliance Research Laboratory, Core Technology Team

**Abstract** - FDTD(Finite Difference Time Domain) 방법을 적용하여 마이크로웨이브 오븐 내부의 전자기장을 해석하였고, 적외선사진을 통하여 실험과 비교 검증하였다. 부하의 종류와 형태에 따른 전자기장의 패턴 변화를 고찰하였고, 여러 가지 포밍형태와 오프닝 형태에 따른 전자기장의 패턴을 적외선 사진과 비교하였다. 표면 보정 기법을 적용하여 부하표면에서의 전자파 패턴을 보다 정확히 예측할 수 있었으며, 또한 마그네트론의 공진 주파수에 따른 전자파 파워 패턴의 변화를 살펴 보았다. 이와 같이 개발된 마이크로 웨이브 오븐 내부의 전자파 해석 프로그램을 이용하면, 균일 가열 성능 향상을 위한 마이크로웨이브 오븐의 캐비티 설계 기간을 크게 단축할 수 있을 것으로 생각된다.

1. 서 론

그동안 마이크로 웨이브를 이용한 가열시스템 기술은 산업체의 가열공정부분과 가전 조리부분에 많이 사용되어 왔다. 이러한 마이크로웨이브 가열 시스템을 수치적으로 연구하기 위하여, 그동안 FEM방법이 많이 적용되어 왔으나, 수치기법상의 복잡함과 계산시간이 많이 걸린다는 단점때문에 마이크로웨이브오븐에 활발하게 적용되지는 않았다. 그러나 최근에는 Yee(1966)가 개발한 FDTD방법은 안테나, 마이크로웨이브 장치, 임의의 물체에서의 전자파 산란문제, 피파피 검사시스템등 다양한 부문에 적용되기 시작하였다. 처음에는 Yee가 개발한 FDTD방법이 흡수경계조건을 처리하지 못하는 한계를 가지고 있었기 때문에 그 적용범위가 제한되어 있었으나, Berenger(1994)가 개발한 PML(Perfectly Matched Layer)조건을 적용함으로써 FDTD방법이 모든 전자기장 해석분야에 확대되기 시작하였다. 본 연구에서는 마이크로웨이브 오븐 내부의 전자기장 해석을 위하여, FDTD방법에 의한 3차원 전자기장 해석프로그램을 개발하였고, 이를 통하여 다양한 구조를 갖는 마이크로웨이브 캐비티 내부의 전자기장을 해석함으로써, 전자기장의 확고한 이해를 바탕으로 균일가열연구에 기초를 마련하고자 하였다.

본 연구에서 사용한 마이크로웨이브 오븐은 각각 캐비티, 부하, 웨이브가이드, 오프닝, 마그네트론의 안테나 및 캡으로 구성되어 있다. 마그네트론에서 발전한 마이크로 웨이브는 마그네트론의 안테나와 캡을 통하여 웨이브가이드로 들어가고, 오프닝을 거쳐서 캐비티 내부로 입사하며, 캐비티 내부에 위치한 부하는 흡수된 전자파의 세기와 부하의 유전율에 비례해서 온도가 상승하게 된다. 즉 부하의 물성치와 캐비티 및 웨이브가이드의 구조에 따라서 부하에 흡수되는 전자파의 세기가 국부적으로 다르게 나타난다. 이와 같이 불균일하게 나타나는 전자파 패턴을 수치계산을 통하여 해석함으로써, 균일가열 성능이 좋은 캐비티를 빠른 시간안에 설계할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 본 론

2.1 수치계산방법

마이크로웨이브 오븐 캐비티 내부의 전자기장을 지배하는 방정식은 각각 전기장벡터(E)와 자기장벡터(H)가 서로 연결되어 있는 맥스웰방정식이다.

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma \cdot H_x \right), \quad \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - \sigma \cdot H_y \right),$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - \sigma \cdot H_z \right), \quad \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma \cdot E_x \right),$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma \cdot E_y \right), \quad \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma \cdot E_z \right)$$

위의 맥스웰방정식을 시간과 공간상으로 2차의 수치정확도를 갖도록 차분화하여 계산하는 것이 Yee(1966)가 개발한 FDTD방법이다. 자기장벡터와 전기장벡터가 서로 연결되어 있기 때문에, 각각의 자기장요소(E<sub>x</sub>, E<sub>y</sub>, E<sub>z</sub>)와 전기장요소(H<sub>x</sub>, H<sub>y</sub>, H<sub>z</sub>)는 시간상으로 1/2단위 시간 간격만큼 엇갈려 있으며, 공간상으로도 1/2단위격자 길이 간격만큼 엇갈려 위치한다. 격자길이는 수치적인 정확도를 위해서 최소한 마이크로웨이브 한 파장길이의 1/10배이하로 유지해야 하며, 부하의 유전율이 커질수록 더 작은 격자길이가 요구된다. 또한 시간간격은 수치적인 안정성때문에 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta t = \frac{1}{C \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \text{ 이 때 } C \text{는 광속을 의미한다}$$

캐비티와 웨이브가이드의 벽면은 모두 완전한 도체로 가정한다. 단지 안테나의 입사면은 들어오는 모든 웨이브를 완벽하게 흡수할 수 있도록, Berenger(1994)가 제안한 PML(Perfectly Matched Layer)경계조건으로 정의하였다.

마그네트론의 안테나에서 입사파의 세기를 시간에 따라 일정하게 두면 수치계산의 수렴성이 좋지 않으므로, 본 연구에서는 Hyperbolic tangent 함수를 이용하여 20주기까지 입사 전자파의 세기가 부드럽게 증가하는 것으로 모델링하였다. 맥스웰방정식을 시간적으로 계속 적분해나가면 일정시간이후에는 같은 전자기장 패턴이 주기적으로 반복됨을 알 수 있다. 따라서 전자기장의 분포는 한 주기동안 시간평균하여 해석하였다.

또한 다음과 같은 경계조건으로부터 부하의 표면에서 전자기장을 결정하는 표면보정기법을 적용하였다.

$$H_y^{(0)} = H_y^{(2)}$$

$$\frac{1}{\beta_1} \left( \frac{\partial H_y}{\partial z} \right)^{(0)} = \frac{1}{\beta_2} \left( \frac{\partial H_y}{\partial z} \right)^{(2)} \text{ 여기서 } \beta = \sqrt{\epsilon \left( 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right)^2} \right)}$$

2.2 결과 및 토론

우선 본 연구에서 개발된 전자기장 해석 프로그램을 이용하여, 단순한 마이크로웨이브오븐 내부에 사각유리 가 부하로 존재하는 경우에 관한 수치해석을 수행하였

다. 사각유리의 유전율은 유전율측정장치(HP)를 이용하여 측정 한 값( $\epsilon=6.5-j0.6$ )을 사용하였다. 그러나 적외선 사진결과와 일치하는 해석결과를 얻을 수 없었기에 그림1과 같이 유전율을 변경해 가면서 해석을 수행한 결과, 적외선사진과 일치하는 해석결과를 얻을 수 있었다. 이와같이 측정된 유전율의 오차를 계산으로 검증하여 유전율을 재정의함으로써, 정확한 해석결과를 얻을 수 있었다.

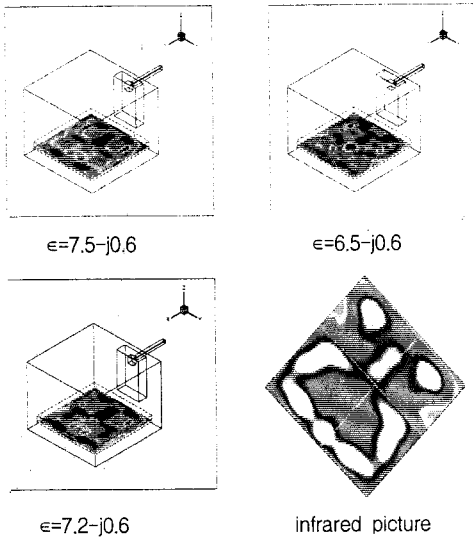


그림1. 유전율의 변화에 따른 부하의 전자파 패턴 비교

표면보정기법의 효용성을 검증하기 위하여 단순한 마이크로웨이브 오븐 내부에 등방성의 유전율을 가지는 베이클라이트( $\epsilon=4.3-j0.3$ )를 위치시키고 수치해석을 수행하였다. 그림2에서 표면보정기법을 적용한 해석결과가 표면보정기법을 적용하지 않은 해석결과보다 적외선 사진결과와 더 정확히 일치함을 알 수 있다. 따라서 부하 면에서 정확한 전자파 해석을 위해서는 표면보정기법이 필수적임을 알 수 있었다.

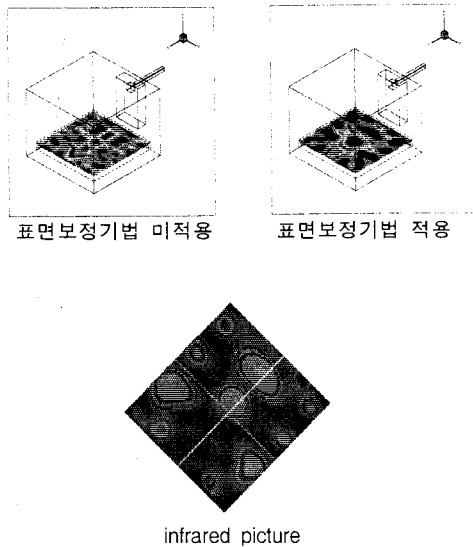


그림2. 표면보정기법에 따른 부하 표면 상부면에서의 전자파 패턴

마그네트론의 발진주파수에 따른 부하의 전자파 패턴을 그림3에서 비교하였다. 발진주파수가 1%정도 바뀌어도 부하의 전자파 패턴이 서로 완전히 다른 패턴을 보인다. 따라서 Network Analyzer를 이용하여 정확히 측정된 마그네트론의 공진주파수를 소스로 정의함으로써 해석의 정확도를 높일 수 있었다.

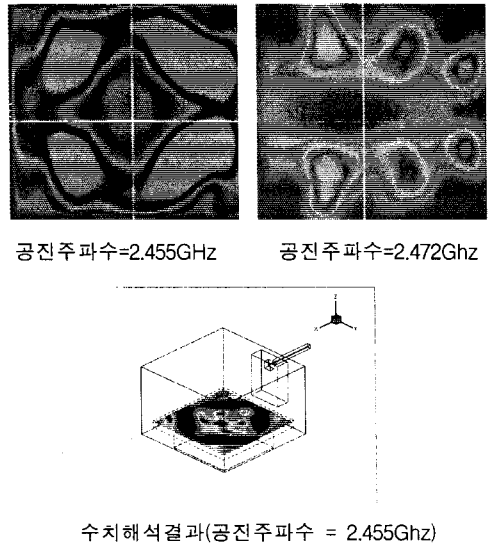


그림3. 공진주파수 변화에 따른 전자파 패턴 비교

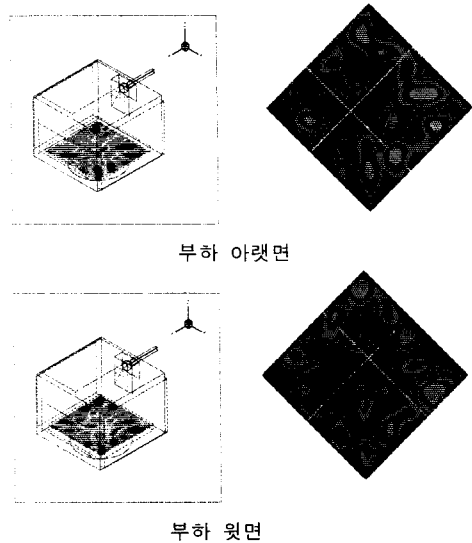


그림4. 실제 전자레인지의 부하상/하면에서 전자파 패턴에 관한 수치해석결과와 적외선사진 비교

실제 마이크로 웨이브오븐에서 본 프로그램의 정확도를 알아보기 위하여 0.7cubic feet의 실제 전자레인지의 모든 포밍과 웨이브가이드, 안테나, 오프닝을 모델링하고, 계산을 수행한 결과 그림4에서 보듯이 적외선 사진결과와 거의 일치하는 결과를 얻었다. 이와 같은 결과로부터 본 해석 프로그램을 이용하면 복잡한 전자레인지에서도 충분히 정확한 전자파 해석결과를 얻을 수 있음

알 수 있었다. 따라서 본 해석 프로그램과 최적화 알고리즘을 이용하면 보다 효율적으로 캐비티를 설계할 수 있을 것이다.

0.7cubic feet의 실제 전자레인지에 케익반죽( $\epsilon = 24 - j6.8$ )을 부하로써 위치시키고 전자파 해석을 수행하였다. 그림5와 같이 적외선 사진결과와 거의 비슷한 수치해석결과를 얻을 수 있었다. 따라서 케익반죽과 같은 중부하에서도 정확한 해석결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

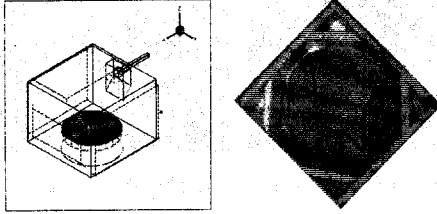


그림5. 실제 전자레인지에서 케익반죽에 관한 수치해석결과와 적외선 사진 비교

실제 전자레인지에 복잡한 형상을 갖는 턴테이블을 위치시키고 전자파 해석을 수행하였다. 턴테이블이 복잡한 형상을 가지므로 격자간격을 1mm로 하여 수치계산을 수행하였다. 그림6과 같이 수치해석결과와 적외선 사진이 정확히 일치하지는 않으나 HOT POINT의 위치는 어느정도 일치한다. 따라서 턴테이블과 같이 복잡한 형상을 가지는 부하도 충분히 작은 격자간격을 가지고 계산하면 전자파 패턴을 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

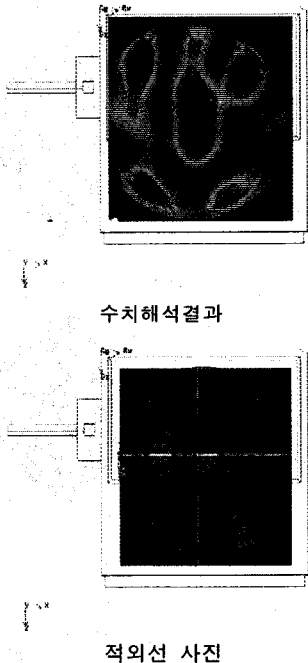


그림6. 실제 전자레인지에서 턴테이블에 관한 수치해석결과와 적외선 사진 비교

### 3. 결 론

FDTD방법을 적용하여 마이크로웨이브 오븐 내부의 전자기장을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 이용하여 전자파를 해석하였고, 적외선사진을 통하여 실험과 비교 검증하였다. 표면보정기법의 적용, 정확한 유전율과 공진주파수의 입력을 통하여 해석의 정확도를 높일 수 있었다.

이와 같이 개발된 마이크로 웨이브 오븐 내부의 전자파 해석 프로그램을 이용하면, 균일 가열 성능 향상을 위한 마이크로웨이브 오븐의 캐비티 설계 기간을 크게 단축할 수 있을 것으로 생각된다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] J.P.Berenger, A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves, Journal of Computational Physics, Vol. 114, pp. 185-200, 1994
- [2] K.S.Lee, Numerical Solution of Initial Boundary Problems Involving Maxwells Equations in Isotropic media, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 14, pp.302-307, 1966
- [3] S.H.Cho and H.J.Kang, Numerical Analysis of the Electromagnetic Fields in a Microwave Cavity Using Finite-Difference Time-Domain Method, Proceedings 33rd Microwave Power Symposium, pp.13-16, 1998
- [4] H.Zhao, Computational Models and Numerical Techniques for Solving Maxwells Equation, Queensland University Of Technology, Ph.D thesis, Australia, 1998