

FDTD방법을 이용한 마이크로웨이브오븐의 전자파 해석 및 부하의 열해석

조성호, 이영민, 김현정, 강형주
 LG전자 홈어플라이언스연구소 마이크로웨이브응용팀

Analysis of the electromagnetic fields in microwave cavities and the temperature fields in loads using Finite-Difference Time Domain method

S.H.Cho, Y.M.Lee, H.J.Kim, H.J.Kang
 M/W Application team, Home Appliance Research Laboratory, LG Electronics Inc.

Abstract - FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 방법을 이용하여 마이크로웨이브 오븐 내부의 전자파를 해석하였고, 열전달방정식을 이용하여 부하의 열 분포를 해석하였다. 다양한 형태의 오프닝구조를 갖는 캐비티에 관하여 수치계산을 수행하였고, 서로 다른 종류의 부하가 존재할 때 부하의 온도 분포가 어떻게 변화하는지 알아보았다. 또한 마그네트론의 안테나와 캡이 존재하는 실제 웨이브가이드를 모델링하여 수치 계산한 후, 적외선사진에 의한 부하의 온도분포와 비교하였다.

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, 피파괴 검사시스템등 다양한 부문에 적용되기 시작하였다. 처음에는 Yee가 개발한 FDTD방법이 흡수경계조건을 처리하지 못하는 한계를 가지고 있었기 때문에 그 적용범위가 제한되어 왔으나, 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, 부하의 열분포의 소스로 작용하는 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 발진한 마이크로 웨이브는 마그네트론의 안테나와 캡을 통하여 웨이브가이드로 들어가고, 오프닝을 거쳐서 캐비티 내부로 입사하며, 캐비티 내부에 위치한 부하에 흡수된 전자파의 세기와 부하의 유전율에 비례해서 부하의 온도가 상승하게 된다. 즉 부하의 물성치와 캐비티 및 웨이브가이드의 구조에 따라서 부하에 흡수되는 전자파의 세기가 각기 다르며, 특히 국부적으로 다른 온도 분포를 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 부하를 균일하게 가열하기 위한 가장 효과적인 캐비티 구조를 알아보기 위하여, FDTD방법을 이용하여 다양한 구조를 갖는 마이크로웨이브 오븐의 전자기장을 수치적으로 계산하고, 계산된 전자파의 세기로부터 열전달 방정식을 적분하여 부하의 온도분포를 해석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 수치계산방법

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} - \sigma E_z \right)$$

위의 맥스웰방정식을 시간과 공간상으로 2차의 수치정확도를 갖도록 차분화하여 계산하는 것이 Yee(1966)가 개발한 FDTD방법이다. 자기장벡터와 전기장벡터가 서로 연결되어 있기 때문에, 각각의 자기장 요소(E_x, E_y, E_z)와 전기장 요소(H_x, H_y, H_z)는 시간상으로 1/2단위시간 간격만큼 엇갈려 있으며, 공간상으로도 1/2단위격자길이 간격만큼 엇갈려 위치한다. 격자길이는 수치적인 정확도를 위해서 최소한 마이크로웨이브 한 파장길이의 1/10배이상 유지해야 한다. 또한 시간간격은 수치적인 안정성때문에 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta t = \frac{1}{C \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}$$

이 때 C는 광속을 의미한다.

캐비티와 웨이브가이드의 벽면은 모두 완전한 도체로 가정한다. 단지 웨이브가이드의 캐비티 입사면과 반대쪽에 위치한 면은 들어오는 모든 웨이브를 완벽하게 흡수할 수 있도록, Berenger(1994)가 제안한 PML(Perfectly Matched Layer)경계 조건으로 정의하였다.

마그네트론의 안테나에서 입사조건을 모델링하기 위하여 입사 전자파의 주파수와 입사 전자파의 세기를 알아야 한다. 입사 전자파의 주파수는 마그네트론의 발진주파수로 주어지며, 입사파의 세기는 마그네트론의 파워 및 안테나의 비저항 값으로 정의할 수 있다. 입사파의 세기를 시간에 따라 일정하게 두면 수치계산의 수렴성이 좋지 않으므로, 본 연구에서는

Hyperbolic Tangent 함수를 이용하여 20주기까지 입사 전자파의 세기가 부드럽게 증가하는 것으로 모델링하였다. 시간적으로 계속 적분해 나가면 일정시간이후에는 부하면에서 같은 전자기장 패턴이 주기적으로 반복됨을 알 수 있다. 따라서 한 주기동안 시간 평균된 전자기장의 분포와 적외선사진을 통한 실험결과를 비교 해석하였다.

부하에서 온도분포를 지배하는 방정식은 다음과 같은 열 전달방정식이다. 이때 열원은 전기파워와 부하의 유전율의 곱으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 부하의 유전율은 부하내부에서 균일하다고 가정하였고, 온도에 따른 변화는 없다고 가정하였다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \text{ 여기서 } Q = \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E|^2$$

3. 결 론

우선 본 연구에서 개발된 FDTD방법을 이용한 전자기장 해석코드를 검증하기 위하여, 캐비티의 크기가 200X280X280mm이고, 웨이브가이드의 크기가 59.4x119x150mm이고 웨이브가이드 중앙에 2.45GHz의 주파수를 갖는 입사전자파가 위치하는 단순한 마이크로웨이브오븐 내부에 크기가 20X240X240mm이고 유전율이 $\epsilon = 2.3 - j0.25$ 인 나무로 만들어진 부하가 캐비티 아랫면에서 20mm떨어진 곳에 존재할 경우, 각각 FDTD방법에 의한 수치계산결과와 적외선사진에 의한 실험결과를 비교하였다. 그림1.을 보면, 적외선 사진에 의한 부하의 아랫면과 뒷면의 온도분포가 수치계산에 의한 전기 파워 분포와 거의 비슷한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 수치계산에 의한 전기 파워 분포로부터 부하의 온도패턴을 유추할 수 있다.

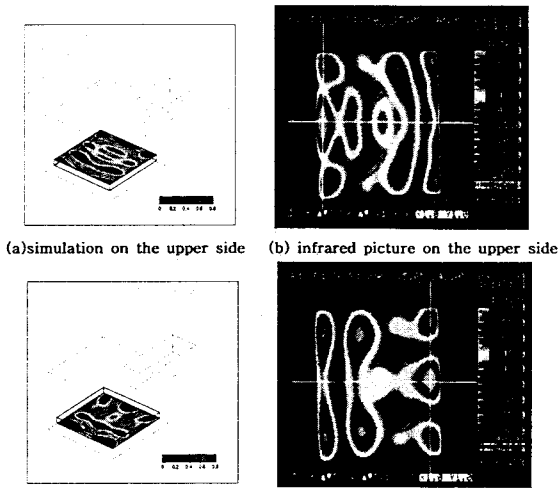


Figure1. Comparison of the electric power distribution by simulation and the temperature distribution by infrared picture of the wood plate

위열림(top opening), 아래열림(bottom opening), 위아래열림(twin opening)과 같은 다양한 오픈닝구조를 갖는 마이크로웨이브오븐의 캐비티의 아랫면에서 20mm떨어진 곳에, 앞의 경우와 같이 나무로 된 부하를 위치시킬 경우에 관한 수치계산을 수행하였다. 그림2.로부터 오픈닝구조에 따라 부하 윗면에서 다양한 형태의 가열패턴이 나타남을 알 수 있다. 예상한 바

와 같이 LG전자에서 채용한 바 있는 Twin Opening 구조가 균일가열성능이 좋게 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용한 수치계산을 통한 해석연구가 균일 가열 성능 향상을 위한 오픈닝 구조를 설계하는데 많은 도움이 되리라고 생각된다.

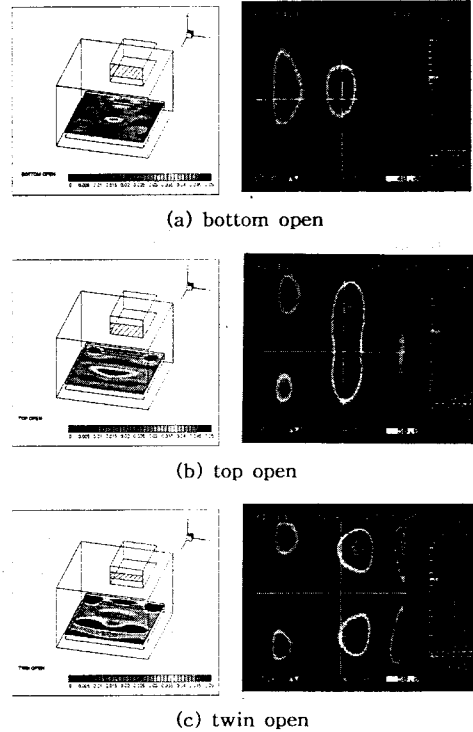


Figure2. Comparison of the electric power distribution by computation and the temperature distribution by infrared picture

그림3.은 그림1.에서와 같은 마이크로웨이브오븐 캐비티에 나무대신에 유전율이 $\epsilon = 5.8 - j0.6$ 인 유리로 된 부하가 존재할 경우, 수치계산을 통한 부하윗면의 전기파워 분포와 적외선사진에 의한 온도분포를 나타내고 있다. 적외선사진에 의한 온도 패턴과 수치계산에 의한 전기파워 패턴이 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 그림1.과 같이 부하가 나무일 경우와 비교해보면, 유리인 경우의 온도패턴이 더 복잡하게 나타난다. 이러한 현상은 부하의 유전율의 크기 변화에 의한 것이다.

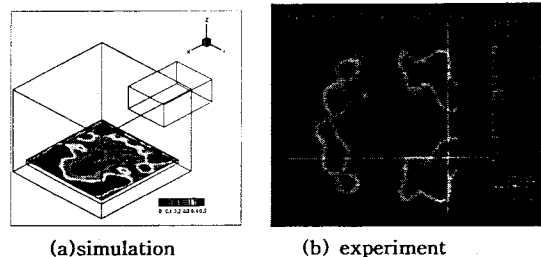


Figure3. Comparison of the electric power distribution by simulation and the temperature distribution by infrared picture of the glass plate

앞의 경우와 달리 웨이브가이드에 마그네트론의 안테나 및 캡이 존재하는 실제 웨이브가이드 시스템에 그림1.과 같이 나무로 된 부하가 존재하는 경우에 관하여 수치계산을 수행하였다. 그림4로부터, 수치계산결과와 적외선사진에 의한 실험결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 적용한 마그네트론의 안테나 및 캡 모형과 입사전자파의 조건이 실제 현상을 정확하게 모형화하고 있음을 확인할 수 있다.

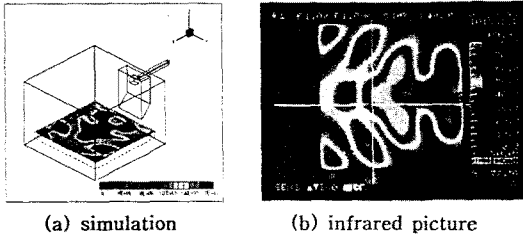


Figure4. Comparison of the electric power distribution by simulation and the temperature distribution by infrared picture of the glass plate

열전달방정식과 열원의 모형을 검증하기 위하여 앞의 그림1과 같은 캐비티 내부에 유리로 된 부하 (30x70x70mm)가 존재할 경우에 관한 수치계산을 수행하였다. 그림5.로부터, 2분 동안 가열 후, 수치계산과 적외선 사진에 의한 최고 온도가 약 45도까지 올라가는 것을 알 수 있다. 이로부터 본 프로그램에 적용된 열원모형이 타당함을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 개발된 전자기 해석 및 부하의 열해석 프로그램과 최적프로그램을 이용하면, 균일 가열 성능이 향상된 새로운 캐비티를 설계할 수 있을 것으로 생각된다.

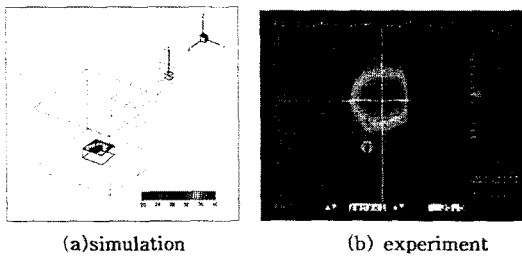


Figure5. The temperature field by simulation and by infrared picture of a glass box

[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