

# 전자렌지 캐비티의 전자파 해석

박광수<sup>o</sup>, 김권집, 손종철, 김상권, 박운서  
삼성전자 기술총괄 생활시스템연구소

## Analysis of 3D Microwave Oven Using Finite Element Method

Kweong-Soo Park<sup>o</sup>, Gweon-Jib Kim, Jong-Chull Shon, Sang-Gweon Kim, Yoon-Ser Park  
Living System R&D Center , Samsung Electronics Co., Ltd.

Abstract - This paper presents an analysis of the 3D microwave oven considering its forming. The results were compared with experimental data. Finite Element Method(FEM) using edge element is employed for the analysis. For solving the large sparse system matrix equation was solved using the parallelized QMR method. Analysis of the 3d cavity has troublesome difficulties such as spurious solutions, too many memory and long computation time. We overcome this difficulties by using edge element for spurious solutions and the parallelized QMR method by the aid of Paralle Virtual Machine(PVM) for the memory and computation time.

를 해석하기 위해서는 3차원적인 해석이 불가피하다.

각 형상들이 매우 불규칙적이기 때문에 해석은 필수적으로 수치적인 방법을 도입하여야 한다. 수치적인 방법에는 여러 가지가 있겠으나 일반적인 유한요소법은 복잡한 음식물 부하에 적합한 적용을 실시할 수 있으며 일반적으로 전자파 문제에서도 가상해가 나타나지 않는 장점 때문에 이를 이용한 캐비티해석과 검증을 실시하였다.

전자파 문제에서 유한요소법을 이용할 때 정적(Static)인 경우와는 달리 파장 당 최소의 변수 개수가 필요하므로 3차원의 캐비티의 경우 매우 많은 미지수를 취급하여야 한다. 따라서 대형 컴퓨터의 사용이 요구되는데, 본 연구에서는 대형 컴퓨터(Paragon<sup>TM</sup>)와 HP 735 (MM: 512MB)에서 수렴속도 비교를 위해 각각 실시하였다.

### 1. 서 론

전자렌지 캐비티의 형상을 최적설계하기 위하여 전자파 분포를 균일하게 하고 피드(Feed)와 고주파 전력원인 마그네트론의 임피던스가 잘 결합되어 지도록하여 효율적인 가열조건을 가져야 한다. 이를 위하여 캐비티내의 전자파의 분포를 해석하는 것이 필수적으로 이루어져야 한다. 에너지 효율에 기인하는 마이크로파 전계에 기준으로하는 유한요소법의 전개와 캐비티의 세부 포밍을 고려한 실제 모델 대상을 하였다. 수부하등 고유전율로 이루어진 부하의 경우 매우 많은 미지수를 다루어야 하므로 비교적 저유전율로 이루어진 부하에 대한 심플레이션과 사례연구를 통해 해의 정확성에 대한 검증에 시도되었다.

전자렌지는 최근 가정용 조리기로 세계 각 가정에 보급되어질 정도로 그 시장이 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 세계 각국의 가전기업들은 전자렌지의 시장 점유율을 높이기 위하여 렌지의 성능을 높일 수 있도록 많은 노력을 하고 있다. 캐비티내의 전자파 분포는 피드의 위치 및 형상에 매우 의존적이고 또한 공진기의 각 면에존재하는 포밍(Forming)에도 많은 영향을 받는다. 뿐만 아니라 음식물의 종류 및 이를 지지하기 위한 유전체에 의하여도 영향을 받기 때문에 전자파 분포

### 2. FEM 해석

캐비티내의 전자파를 해석할 때 전계 또는 자계의 세기를 변수를 사용할 수 있으나 본 연구에서는 전계의 세기를 변수로 취하였다. 공진기내의 전계의 세기는 벡터 Helmholtz방정식을 만족하여야 하고 또한 캐비티 및 도파관의 벽면이 완전도체로서 이루어졌다는 가정하에 벽면의 접선성분의 전계의 세기가 0이 된다는 경계조건을 만족해야 한다. 이러한 경계조건은 자계를 변수로 취했을 때에 비하여 실질적인 미지수의 수가 줄어드는 장점을 가져다준다.

지배방정식과 경계조건으로부터 가중잔차법을 이용하여 정식화하여 선형 행렬방정식을 도출하여 이 방정식의 해를 구함으로써 공진기 내부의 전계분포를 구할수 있다. 이러한 과정에서 전자파의 여기(Excitation)수단으로 마그네트론이 사용되고 있으며 마그네트론의 소스 모델링이 매우 중요하다. 이를 표현하기 위하여 선전류(Line source)를 사용하였다.

#### 2.1 지배방정식

전자렌지에서 마이크로파를 발생시키는 마그네트론의 출력 안테나 형태에 따라 전류원  $\vec{j}$  를 포함하는 벡터

Helmholtz 방정식이다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} \right) - k_0^2 \epsilon_r \vec{E} = -j\omega \mu_0 \vec{J} \quad \dots\dots\dots (1)$$

모든 면에서  $n \times \vec{E} = 0$ , 여기서  $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$  이고 캐비티의 모든 면은 미소한 유전특성값의 도장된 상태이므로 해석에 대한 전자파 감쇄는 무시한다. 즉, 완전도체라 가정한다.

우변항은 선전류 여기항으로 발전관의 모든 형태와 마찬가지로 마그네트론의 안테나에 급전되는 웨이브 형태를 모델링함으로써 얻을 수 있다. 도파관내 도출되는 길이는  $\lambda(\text{파장})/4$ 의 정현함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{J} = \hat{z} J_0 \sin\left(\frac{z_2 - z}{z_2 - z_1} \frac{\pi}{2}\right), \quad z_1 \leq z \leq z_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

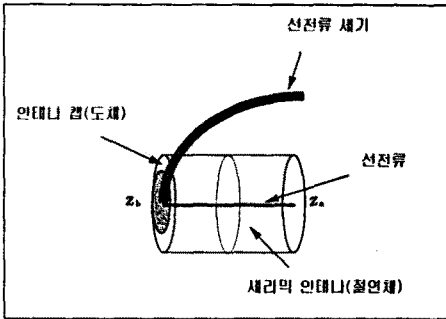


그림 1. 마그네트론 안테나 및 선전류 분포

### 2.2 유한요소 정식화

전계항을 기준으로하는 지배방정식(1)에서 경계조건과 발산 이론을 이용하여 가중잔차법 중에서 가중함수로 요소의 형상함수 - 보간함수를 사용하는 Galerkin법을 이용하여 (1)에 대한 유한요소 정식화를 얻을 수 있다. 요소의 형상함수를  $N$ 이라 하고, 먼저(1)식에 Galerkin법을 적용하여 완전도체에 대한 면적분을 0으로 하면 다음을 얻는다.

$$\int_V [(\nabla \times \vec{N}) \cdot \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \right) - k_0^2 \epsilon_r \vec{N} \cdot \vec{E}] dv = -j\omega \mu_0 \int_V \vec{N} \cdot \vec{J} dv \quad \dots\dots\dots (3)$$

좌변의 체적적분과 우변의 소스항(2)에 대하여 전류 형태로 나타내는 것이 필요하다.

### 3. 계산 환경

본 연구에서는 대형 선형 행렬방정식의 반복법인 QMR법을 이용한 Ethernet 병렬구현을 HP735 Cluster 컴퓨터를 이용하여 구현하였다. 30만개의 미지수에 대해서까지 시도를 해

보았고 8대의 HP735를 사용하여 약 2일 정도가 걸렸다.

병렬컴퓨터(Paragon™) 환경에서 80만개의 미지수를 5 모델의 솔버시간은 종합 2시간으로 매우 신속한 계산환경은 가질수 있었다. QMR법의 경우 계산 시간은 행렬의 질, 전처리기의 사용, 요구되는 정확도 그리고 프로세서 간의 통신 상황 등이 계산 시간에 영향을 주는 중요한 인자이기 때문에 정확히 계산시간을 예측하기에는 어려움이 많았으나 병렬 처리기 간의 최적화 이후 안정된 계산 환경을 제공되게 되었다.

### 4. 실제 모델 적용

당사의 전자랜지, 실제 모델을 해석하여 보았다. 선전류 피딩을 이용하여 해석하였으며, 빈 공간기의 손실이 있는 유전체(brownies)가 있는 경우에 대해서 해석을 해 보았다. 캐비티의 치수는 346mm × 222mm × 359mm이다. 유전체가 들어있는 캐비티의 형상이 나와있다. 음식물은 원기둥 모양이며 반지름이 105mm이고 높이는 20mm이다. 슬리드 모델링 과정에서 요소를 생성할 수 없을 정도로 작은 포밍(forming)이나 라운딩(rounding)은 고려하지 못하였다.

그림 2는 유전체가 들어있는 경우의 요소분할 그림이고 전체적으로 1 파장 당 10개 정도의 크기로 요소를 나누었다. 이 경우의 요소면의 평균 길이는 12mm 이다. 유전체 부분의 요소는 공기중에 파장보다 작은 거리를 가지므로 더욱 밀집된 요소를 보여주고 있다. 이 경우 유전율이 공기의 4배 정도이었기 때문에(4.55-j0.9282) 유전체 부분의 요소의 변의 길이는 6mm로 하였다. 전체 미지수의 갯수가 너무 커지지 않도록 빈 공간기에 비하여 영역을 더 많이 나누어서 요소분할을 하였다.

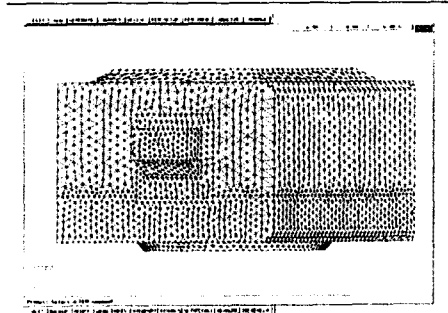


그림2. 유전체가 들어있는 캐비티 요소분할

#### 4.1 수치해결과

미지수의 수량과 에러에 대한 정의는 실적용 캐비티의 해석을 반복함으로써 시간절약을 위해 1.e-7까지를 두었다. 후처리된 계산된 결과는 각 전계의 세기는 각 방향 성분에 대해 복소수로 주어지는 데, 그래픽 결과는 각 방향 전계 세기의 절대값과 평균을 보이도록 하였다.

그림 3에는 전계의 세기를 계산한 단면의 위치와 선전류의 위치가 표시되어 있다. 공간기의 여러 모드들이 존재함을 알 수 있는데 포밍 또는 공간기 내의 이물질로 인하여 발생하는 캐비티의 모드형상이 불규칙하여짐을 볼 수 있다.

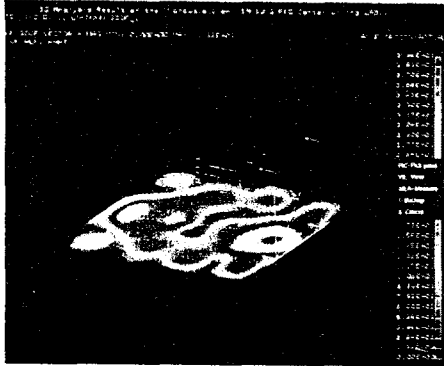


그림3. 해석된 캐비티내 음식물의 온도분포

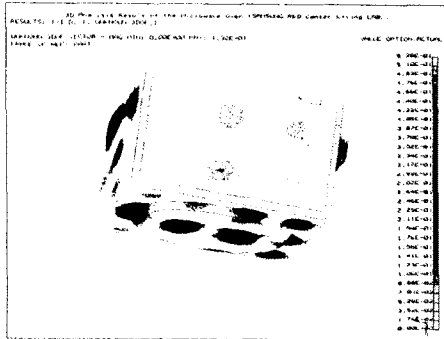


그림4. 해석된 캐비티 벽면의 전계분포

그림4는 캐비티 벽면의 전계분포를 나타내는 것으로 임피던스의 불균형으로 특정분야에 집계가 집중되는 예측을 실시할 수 있으며 도아부분의 전자파 누설에 대한 예측과 해석을 확대함으로써 정량적인 해를 가질수 있다. 캐비티의 임피던스를 해석하기위해서 부하물(물 1,000cc 기준)의 에너지 분포와 소비에너지를 계산하였고 개구홀에 생성된 요소의 입사와 반사를 이용해 임피던스를 계산하였다.

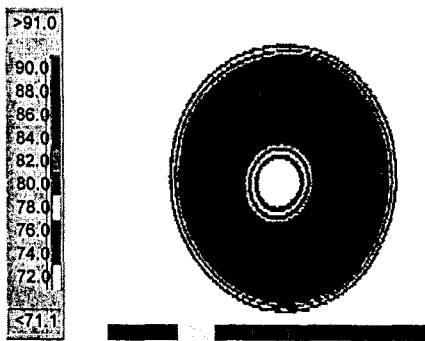


그림5. 실제 음식물의 온도분포

그림 5는 실제 음식물 조리후 분포된 열에너지 분포를 열적외선 카메라로 나타낸 것으로 비교결과 5%이내의 정확한 수치결과를 얻었다.

## 5. 결 론

마이크로와 가열의 더 좋은 해를 구하기 위해서는 패키지 디자인의 최적화 방법이 필요하다. 수학적인 모델링이 설계자에게 이러한 최적화 요소를 제공한다. 마이크로와 가열의 분야에 있어서 수학적인 모델링이 전체적으로 실험적 분야를 대체하지는 않을 것이나 실험에서 얻을 수 있는 가치있는 결과를 제공한다.

이상과 같은 프로그램을 이용하여 제품 차별화를 가질수 있으며 상품 경쟁력 강화를 가져올 것으로 기대하고 있다. 또한 (1) 신속한 개발환경 및 비용절감 (2)조리성능 향상을 기할수 있으므로 균일해동에 장점을 가져다 준다.

본 캐비티설계 소프트웨어는 알고리즘의 정제화와 상호연계된 구성 Processing의 결합으로, 복잡한 구조를 포함한 실험형상 설계에 가장 근접한 소프트웨어로 판단되고 있다. 전자렌지를 완전하게 시뮬레이션하기 위해서는 대용량의 하드웨어를 요구하는 것이 단점으로 새로운 알고리즘의 도입을 요하고 있다. 마이크로와 해석에 대한 본질적인 문제해결을 위해서는 새로운 해 수립과 Hardware, Software간 연계된 최적 Algorithm에 있다. 향후에는 설계자의 판단을 대신할수 있는 적응 최적화 프로그램을 개발하여 전자렌지의 성능 무한대에 도전하여 형상 최적화를 위한 알고리즘 구현과 User-friendly한 실사용 조건 조성을 위해 Personal Computer수준에서 형상 최적화를 완료할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] R. F. Harrington, Time Harmonic Electromagnetic Fields, McGraw-Hill, 1961
- [2] R. E. Collin, Foundations for Microwave Engineering, McGraw-Hill, 1992.
- [3] R. E. Collin, Field Theory of Guided Waves, IEEE Press, 1991.
- [4] Al Geist, et al. PVM 3 User's Guide and Reference Manual, Oak Ridge National Library, May,1994.
- [5] J. Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, John Wiley & Sons, Inc., 1993
- [6] T. Itoh, Numerical Technique for Microwave and Millimeter-wave Passive Structures, John Wiley & Sons, 1989.
- [7] A. Sekkak, L. Pichon, A. Razeq, "3D FEM Magneto-Thermal Analysis in Microwave Ovens", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30, No. 5, pp3347-3350, September, 1994.
- [8] A. Ahagon, T. Kashimoto, "Three-Dimensional Electromagnetic Wave Analysis Using High Order Edge Element", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.31, No.3, pp1753-1756, MAY,95.