

마이크로웨이브 연속 건조기를 위한 전자계 분포 해석

곽영복*, 김민준*

*동의대학교

Electromagnetic Field Distribution Analysis for Microwave Continuity Dry System

Young-bok Kwak* · Min-jun Kim*

*Donggeui University

E-mail : ybkwag@hanmail.net

요 약

마이크로웨이브 연속 건조기는 전자파를 사용하여 피건조물의 내부로부터 건조시키는 가열장치로서 주로 ISM 주파수 대역(915MHz와 2450MHz)을 사용한다. 피건조물의 연속적인 가열을 위해서는 건조체가 통과하는 입·출구가 개방되어야한다. 이러한 마이크로웨이브 연속 건조기는 응용 분야가 무한함에도 불구하고 균일 가열, 개방 공간 작업과 같은 기술적 제약으로 인해 가정용 마이크로웨이브 오븐 정도의 수준에 머물고 있는 상태이다. 본 논문에서는 2450MHz의 마이크로웨이브 주파수에서 동작하는 연속 건조기에 적합한 구조 설계를 위해 유한 차분 시간 영역(FDTD : Finite-Difference Time-Domain)법을 이용하여 건조기 내부와 외부의 전자계 분포를 해석하였다.

ABSTRACT

Microwave continuous drier system mostly uses the ISM frequency band(915MHz or 2450MHz). It dry the material off from it's inside by the electromagnetic wave. The structure whose openings is needed for dry system to continuously feeds a materials into the system. So it is too difficult to shield the leakage of electromagnetic energy through the apertures. In this paper, we designed microwave continuous drier structure which operates at 2450MHz and analyzed the field distributions at the internal and external region of the structure.

1. 서 론

전자파 에너지가 임의의 매질내를 통과하는 경우에 에너지의 손실이 발생하며 이러한 손실의 대부분은 열에너지로서 방출된다. 이러한 전자파의 성질을 마이크로웨이브 오븐에서 응용하고 있다. 마이크로 오븐에서는 2450MHz의 전자파를 사용하며 방사된 전자파가 조리물 내부의 수분에 의해 열에너지로서 변환된다.

이러한 원리를 분말 상태의 산업 제품이나 곡물 등의 건조에 적용하여 마이크로 웨이브대의 전자파를 피건조물에 방사하면 건조 시스템의 개발이 가능하다. 그러나 분말 상태의 피건조물을 연속적으로 전자파 발생 장치에 노출 시키기 위하여 주로 컨베이어 시스템이 많이 사용되는데, 이

러한 구조의 제약점은 건조 시스템의 입·출력 부분이 개방되는 것이다.

마이크로 오븐과 같이 완전 밀폐된 공간을 유지할 수 없는 경우에는 자유공간에 노출된 부분을 통한 전자파의 누설에 대한 대책이 절대적으로 요구되는데, 이와 같이 자유공간에 노출된 부분으로의 전자파 방사를 최대한 감소시켜 누설 전자파에 대한 인체의 영향을 최소화 해야한다.

이를 위해 본 논문에서는 3차원 유한 차분 시간 영역(FDTD)법을 이용하여 입·출력 부분이 개방된 구조의 연속 건조 시스템의 전·자계 분포를 해석하였다.

II. FDTD법에 의한 이론적 해석

맥스웰 방정식은 전계와 자계의 직접적인 값들을 제공하지 않고, 단지 전계와 자계 값들 사이의 변화율만을 제공한다. 이러한 맥스웰 방정식을 공간과 시간적으로 이산화하여, 이웃하는 장들의 미분관계에 중심 유한 차분(central finite differencing)을 적용, 근사화하여 수치화하는 방법이 FDTD이다.

전원은 없으나 전자장 에너지를 열로 변환하는 손실 자성체 또는 손실 도전체를 고려하면, 자기 손실 원리(magnetic loss mechanism)를 설명하기 위해 등가 자기 전류밀도 J_M 은 식 (1)과 같다.

$$M = \rho \dot{H} \quad (1)$$

그리고 전기손실 원리(electric loss mechanism)를 설명하기 위해 등가 전기 전류밀도는 다음과 같다.

$$J = \sigma E \quad (2)$$

여기서 ρ , $[\Omega/m]$ 는 등가 자기저항률이고, σ $[S/m]$ 는 등가 전기도전율이다.

따라서 맥스웰 방정식은 식 (3)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu} \nabla \times E - \frac{\rho}{\mu} H \\ \frac{\partial E}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \nabla \times H - \frac{\sigma}{\epsilon} E \end{aligned} \quad (3)$$

그림 1과 같이 Yee 공간격자의 육면체 단위 셀에서 x, y, z 방향의 공간 증분을 Δx , Δy , Δz 라 하고, 각 노드에 대응하는 공간점들 i, j, k라 하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (4)$$

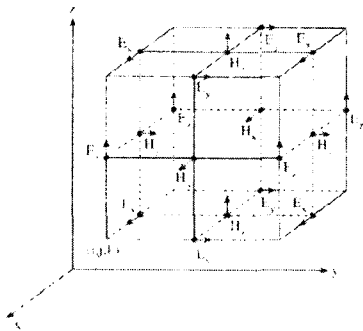


그림 1. 직각 좌표계에서의 격자구조

단위 격자에는 여섯 개의 유일한 성분만이 존재하므로, 각 성분들의 시간 스텝(time step)을 윗첨자 n으로 표현하고, 중심 유한 차분을 사용하면 식 (3)의 맥스웰 방정식은 식 (5)로 표현된다.

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2} &= D_a \Big|_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot H_x^{n-1/2} + D_b \Big|_{i,j+1/2,k+1/2} \\ &\cdot (E_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^n - E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n + E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n - E_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^n) \\ E_x^{n+1} &= C_a \Big|_{i+1/2,j,k} \cdot E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n + C_b \Big|_{i+1/2,j,k} \\ &\cdot (H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2} + H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $C_a \Big|_{i,j,k}$ 와 $C_b \Big|_{i,j,k}$, $D_a \Big|_{i,j,k}$, $D_b \Big|_{i,j,k}$ 는 전계와 자계 알고리즘 계수로서 식 (6)으로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} C_a \Big|_{i,j,k} &= \frac{1 - \sigma_{i,j,k} \Delta t / 2\epsilon_{i,j,k}}{1 + \sigma_{i,j,k} \Delta t / 2\epsilon_{i,j,k}} \\ C_b \Big|_{i,j,k} &= \frac{\Delta t / \epsilon_{i,j,k} \Delta s}{1 + \sigma_{i,j,k} \Delta t / 2\epsilon_{i,j,k}} \\ D_a \Big|_{i,j,k} &= \frac{1 - \rho_{i,j,k} \Delta t / 2\mu_{i,j,k}}{1 + \rho_{i,j,k} \Delta t / 2\mu_{i,j,k}} \\ D_b \Big|_{i,j,k} &= \frac{\Delta t / \mu_{i,j,k} \Delta s}{1 + \rho_{i,j,k} \Delta t / 2\mu_{i,j,k}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 Δs 는 $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ 일 때의 격자 증분을 의미한다.

식 (5)의 $\pm 1/2$ 시간 스텝들은 전계와 자계 시간 도함수들의 중심 유한 차분을 구하는데 교대로 계산됨을 보여준다. 이 방정식의 유전율과 투자율은 각 전자계 성분들의 위치에 따라 적절한 값으로 계산되어지고, 공기와 유전체 경계면상은 평균을 사용한다.

요구되는 결과의 정확도에 따라 달라지지만, 수치적인 분산의 영향을 최소화하기 위해 매질내의 단위 격자의 크기는 근사적으로 $\lambda/10$ 이하가 되어야하고, 수치 안정성을 보충하기 위한 안정조건인 식 (7)에 의해 최대 시간 스텝을 제한한다.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (7)$$

소스로는 식 (8)로 표현되는 가우시안 펄스를 사용하여, TE₁₀ 모드를 waveguide 포트에 인가하였다.

$$y(t) = \cos[2\pi f_0(t - t_0)] \cdot e^{-\frac{(t-t_0)^2}{\tau}} \quad (8)$$

f_0 : 변조 주파수 $2t_0$: 입사 펄스 시간 주기

소스 면상의 재반사와 경계면에서의 반사로 인해 발생할 수 있는 수치적 오차를 줄이기 위해, 계산 영역의 매질과 임피던스가 같고, 손실이 있는 인공적인 흡수층으로 주파수와 입사각에 무관하게 경계면에서 반사가 0인 PML(Perfectly

Matched Layer) 경계조건을 사용하였다.

III. 시뮬레이션 및 특성 해석

시뮬레이션 프로그램으로는 독일 IMST사의 3D FDTD tool인 Empire를 사용하였다.

그림 2와 그림 5는 각각 건조체의 입·출력단과 waveguide 포트 방향이 수직, 수평인 구조를 보인다. 각 구조의 입력치는 waveguide의 경우, R밴드 대역의 $109.22 \times 54.61(mm)$ 를 사용하였고, 큰 사각 박스 구조는 한 변의 길이가 5λ ($612.25mm$)인 정육면체 박스 외부에 두께 $10mm$ 의 도체판을 적용하였다.

입·출력 arm의 경우 $200 \times 200(mm)$ 에 길이 $370mm$ 이며, 동일하게 두께 $10mm$ 의 도체판을 적용하였다.

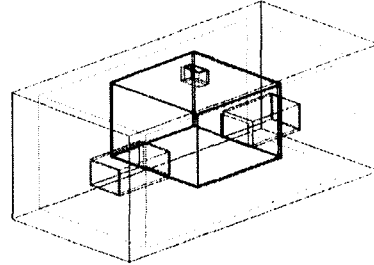


그림 5. 포트 방향과 수평

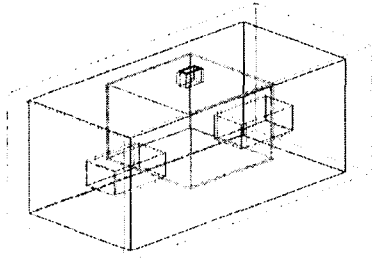


그림 2. 포트 방향과 수직

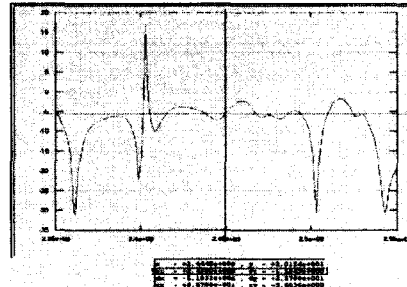


그림 6. waveguide 포트에서의 S11

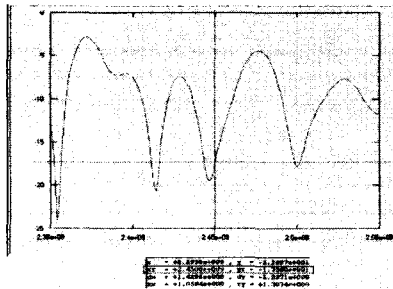


그림 3. waveguide 포트에서의 S11



그림 7. 그림 5 구조의 펄스 전파

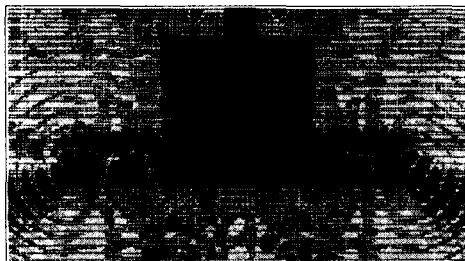


그림 4. 그림 2 구조의 펄스 전파

그림 3과 6은 각각 그림 2와 5의 구조의 입력 반사(S_{11})를 보여준다. 그림 3의 경우 $2450MHz$ 에서 대략 $-17.36dB$ 의 값을 보였으며 그림 6은 $-5.584dB$ 의 값을 보였다.

그림 4와 7은 각 구조에서의 postprocessing 후 전계가 전파하는 과정을 보였다. 그림 4의 경우 arm 상부 도체에서 반사가 되어 대부분의 전계가 아래 방향으로 전파가 됨을 보인다. 반면에 그림 7은 arm 출력면과 파의 진행방향이 수직이 됨을

보인다. 이같은 경우 arm 내부를 따라 직접적으로 누출되는 전자파를 효과적으로 차단하기가 어렵다.

그림 8에 개선된 구조를 보였다. 사각 박스 내에 사선 모양의 도체를 삽입하고, arm 상부에 가로·세로 20mm, 길이 200mm의 도체 요철(LLI)을 넣어 상부에서의 반사를 줄였고, 바닥에서의 반사를 줄이기 위해, 큰 사각 박스와 arm의 바닥에 두께 25mm의 소금물의 유전율과 도전율 ($\epsilon_r = 74$, $\sigma = 4$)을 인가하였다.

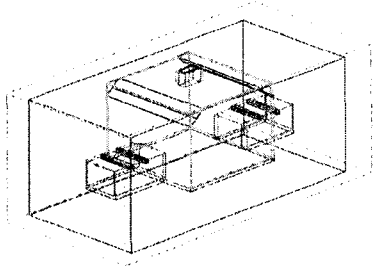


그림 8. 개선된 구조

그림 9에서 보인 입력 반사는 -8.1dB로 그림 2의 구조보다 성능이 2배 정도로 떨어졌다. 반면에 자유공간으로 누출되는 전자파는 많이 감소되었음을 그림 10을 통해 볼 수 있다.

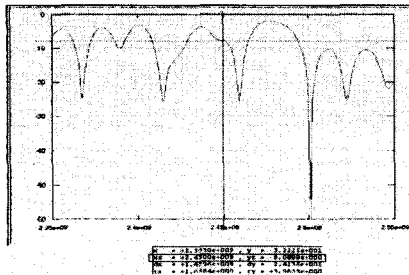


그림 9. waveguide 포트에서의 S11

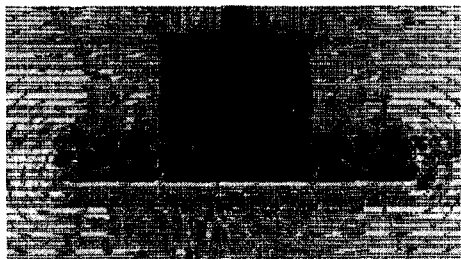


그림 10. 그림 8 구조의 펄스 전파

IV. 결 론

3차원 유한 차분 시간 영역법을 사용하여 마이크로웨이브 연속 건조기를 시뮬레이션한 결과 건조기의 입력 반사는 waveguide 포트의 방향과 건조체의 형태, arm의 길이와 arm을 둘러싼 매질의 종류에 따라 값이 변화함을 알 수 있었다.

개선된 구조가 2.45GHz가 아닌 2.5GHz에서 공진이 발생하는 문제점이 있으나 누설되는 전자파의 분포를 파악하고 있으므로 이는 arm의 길이와 arm을 둘러싼 매질의 종류를 조절함으로써 가능할 것으로 사료된다. 앞으로 실제 제작을 통해 실험치와 비교 분석하고, waveguide의 외부로부터 전원을 입력하는 것이 아니라, 내부 전원을 사용하여 waveguide 외부의 farfield, 즉 건조체 내부로의 방사 패턴을 분석하여 좀 더 실제적이고 복잡한 모델을 통한 작업도 병행할 계획이다.

참고문헌

- [1] W L. Stutzman and G A. Thiele, "Antenna Theory and Design", Wiley, pp 498~508, 1998
- [2] A Taflove and C Hagness "Computational Electrodynamics - the finite difference time domain method" Artech House, pp 80~87, 2000
- [3] 최희주, "FDTD법을 이용한 GPS 위성 수신 안테나의 설계 해석", 대한전자공학회 추계 종합학술대회 논문집 제21권, pp 145~146, 1998