

MICROWAVE 가열 건조에 의한 내화 점토의 열에너지 분포 특성 연구

이승준* · 김운제**

A Study on the Characteristics of Heat Energy Distribution of Fire-Proof Clay with Microwave Heating Drying

S.-J. Lee, and Y.-J. Kim

Key Words: Permeability(침투성), Dielectric constant(유전율), Diffusion(확산), Heat energy(열에너지)

Abstract

The characteristics of heat energy distribution on the fire-proof clay with microwave heating drying are numerically investigated using finite element method. The modelled regular hexahedron chamber(50 cm × 50 cm × 50 cm) filled with air consists of vertical heat source and sink walls, a fire-proof clay model, and adiabatic plates on the top and bottom walls. With different geometrical aspect ratios of the fire-proof clay model, the heat energy distribution is thoroughly investigated. The model gave a good prediction of the microwave heating characteristics of fire-proof clay. The optimal shape of the fire-proof clay for given chamber geometry and microwave power is analyzed.

기호설명

A_s 유효 열전달 표면적
 C_p 열용량
 F ϕ 의 표면 생성율
 G ϕ 의 체적 생성율
 h 엔탈피
 h_{conv} 대류 열전달 계수
 h_{rad} 복사 열전달 계수
 M 수분함유율
 t 시간

T 온도
 T_s 고체 표면 온도
 T_b 고체 주변 공기 온도
 V 유속
 x 표면으로부터 거리

그리스 문자

Π 분자속(分子束)
 ρ 수분 함유 고체 밀도
 ρ_s 고체 밀도
 ϕ 가열특성 매개변수

* 성균관대학교 기계공학부 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

1. 서론

미국의 스펜서 박사가 1945년에 마이크로파 도 파관 입구에서 팝콘이 가열되는 것을 관찰한 후, 마이크로파 (microwave)는 오늘날 통신 이외에 공업용, 의학용 등 용도가 더욱 다양해지고 있다.

마이크로파를 이용한 마이크로 오븐은 오늘날 생활 필수품으로 발전되었으며, 그 외에 가황고무 생산, 목재와 곡물의 건조 및 살균 작업에 응용되는 등 관련 기술이 매우 다양하고 빠르게 발전하고 있다.

Meredits⁽¹⁾는 마이크로파 가열에 의한 물체 내부의 온도 상승에 대한 열역학적 고찰과 함께 가열 장치의 구성 전반에 걸쳐 상세한 연구를 수행한 바 있다. Adu⁽²⁾는 2.45 GHz의 마이크로파로 콩(bean)을 건조하는 기술을 수학적으로 모델링하였으며, 실험을 통하여 수분율을 시간의 함수로 표시하는 모델을 제시하였다.

그러나 국내에서는 마이크로파 건조 과정에 관한 연구는 미미한 실정이다. 다만 토목, 임산 분야에서 흙의 건조도 측정, 목재의 건조 등에 종래의 열풍을 대체할 수 있는 장치 개발에 관한 연구가 일부 수행된 바 있다. 마이크로파를 이용한 목재, 곡물의 건조는 건조시간의 단축 및 건조 품질의 양질화, 에너지 절감, 살균 등 여러 가지 잇점이 있다. 국내에서는 강호양⁽³⁾이 목재를 시료로 하여 고품질의 목재를 건조할 수 있는 마이크로파 건조기술을 개발하였다.

최근에는 흙과 사과등 다공성 물질의 마이크로파 가열 건조에 대한 수치해석적 모델에 대한 연구가 최근에 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 챔버 (chamber)내에 일정한 주파수를 갖는 마이크로파 (2.5GHz, 1kW)를 주입하여, 원통형 내화벽들의 형상 변화에 대한 열에너지 분포 관계를 수치적으로 해석하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 유전체 가열

일반적으로 유전체에서는 물질 내부에 양극과

음극이 전자쌍을 이루고 있고, 전체적으로는 중성인 상태를 이루고 있다. 이 때 유전체에 강한 전자기장이 주어지면 유전체가 양극과 음극으로 극성에 따라 정렬되고, 이러한 극성 변화가 빠르게 진행되면 물질은 발열하게 된다. 그러므로, 가열하고자 하는 유전체에 이러한 마이크로파 특성을 적용하여 계속적으로 극성을 빠르게 변화시키면 분자내의 쌍극자 회전 진동이 일어나고, 내부 마찰열에 의해 열이 발생한다. 이 때 유전체내에 열로 변화하는 전력손실은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.⁽²⁾

$$P_{Loss} = \frac{1}{1.8} f E^2 \epsilon \tan \delta \times 10^{-10} \quad (1)$$

여기서, E 는 마이크로파 전계의 크기(전압 V /속도 M), f 는 주파수(Hz), ϵ 는 물체의 유전율, 그리고 $\tan \delta$ 는 유전체의 손실각이다. 식 (1)에서 발생한 열은 주파수 (f) 및 손실계수 ($\epsilon \tan \delta$)에 비례한다.

2.2 마이크로파 침투 깊이

마이크로파가 유전체 속으로 들어가면, 유전체 손실에 의하여 강도가 약해진다. 마이크로파의 에너지가 감쇠하는 깊이(D)는 다음 식으로 표현된다.⁽⁴⁾

$$D = \frac{\lambda}{2\pi} \left[\frac{2}{\epsilon(\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

위 식을 근사적으로 계산하여 정리하면 다음과 같다.

$$D \approx \frac{9.56 \times 10^7}{\sqrt{\epsilon \tan \delta}} \quad (3)$$

또한, 마이크로파의 전력밀도가 물체 표면의 값에 대해서 1/2로 감쇠하는 깊이를 반감 심도 (depth of half energy density)라고 하며, 다음 식으로 구해진다.

$$D \approx \frac{3.32 \times 10^7}{\sqrt{\epsilon \tan \delta}} \quad (4)$$

위 식에서 알 수 있듯이, 침투깊이(penetration

depth)는 주파수와 $\sqrt{\epsilon \tan \delta}$ 에 반비례하므로 유전손실과 손실각이 큰 물체를 중심부까지 가열하기 위해서는 주파수를 낮게 유지해야 한다.

2.3 에너지 방정식

전자기파를 고정적으로 확산시키고 조합하는 기술을 응용한 마이크로파 가열원리는 극성을 가진 유전체에 의하여 발생하는 열을 이용하는 것이다. 여기서 열원을 생성하는 유전체는 점토 내에 함유되어 있는 수분이며 마이크로파를 피가열체인 점토에 조사하였을 때 점토 내에 함유되어 있는 수분때문에 온도가 증가하게 된다.

이와 같은 현상으로 점토 내부에서 마이크로파 에너지의 흡수에 따라 피가열체인 점토내에서 열 전달과 물질전달이 이루어지며, 이러한 흡수율과 열 및 물질전달율이 마이크로파 가열의 주된 요인이 된다.

그러므로 마이크로파 가열 해석에서는 대류, 복사, 증발 열손실뿐만 아니라 에너지흡수를 정확히 고려해야 한다. 이에 에너지보존과 연속방정식을 조합한 다음 식을 적용하여 해석할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\nabla(V\phi) - \nabla\Pi - \nabla F + G \quad (5)$$

2.4 마이크로파 가열 및 물질 전달 모델

마이크로파로 가열하는 동안 수분을 함유한 피가열체의 에너지 보존 방정식과 에너지 저장율은 대류, 복사, 증발열손실에 의하여 생성된 에너지의 합과 동일하며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{A_s h_{eff}}{\rho C_p V} (T - T_b) + \frac{\rho_s}{\rho} + \left[\frac{h(M, \phi)}{C_p} \right] \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\phi M}{V \rho C_p} \quad (6)$$

여기서 유효열전달계수 h_{eff} 는 다음과 같이 정의한다.

$$h_{eff} = h_{conv} + h_{rad} \quad (7)$$

엔탈피 h 는 다음과 같이 구해진다.

$$h(M, \phi) = h_{fg} [1 + a \exp(bM)] \quad (8)$$

여기서 a, b 는 경험 상수를 나타내며, 마이크로파 가열 모델에 적용하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 조건을 가정하였다.

- 1) 피건조체 내의 초기 온도구배는 무시한다.
- 2) 피건조체는 균질하고, 물성은 일정하다.
- 3) 피건조체를 둘러싸고 있는 표면온도는 챔버 내의 대기 온도와 같다.

위와 같은 조건은 점토의 마이크로파 건조시 적용되며, 또한 작은 두께를 갖는 마이크로파 침투율에 따른 감쇠율을 무시할 수 있다는 가정이 선행된다.

2.5 해석 모델

해석영역은 챔버와 실린더를 포함한 격자계로 구성하였다. 격자의 노드수는 9,957개, 해석요소는 2,288개로 하였고 그 중에서 실린더 요소는 288개로 구성하였으며, 상용 코드인 ANSYS를 사용하였다.

정방형 챔버(50cm×50cm×50cm)는 초기에 대기압 상태 20℃의 공기가 채워져 있고, 상하부면은 단열되었으며, 2.5GHz, 1kW의 마이크로파를 주입, 가열한다고 가정하였다(Fig. 1 참조). 최적의 피건조체 형상을 구하기 위하여 피건조체의 길이(15cm≤L≤35cm) 및 직경(5cm≤D≤20cm)을 변화시켜가면서 단면중심의 에너지 분포를 해석하였다.

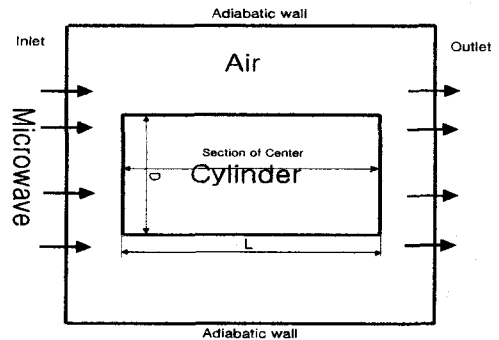


Fig. 1 Schematic diagram of the modelled chamber.

3. 결과 및 고찰

원통형 피건조체의 길이 방향으로 단면 중심을 8등분하여, 열에너지 분포를 해석하였다. Fig. 2에 도시한 것처럼 길이 35cm일때 직경 5cm에서 에너지량은 높으나, 에너지 분포는 균일하지 않았다. 반면에 나머지 모델에서는 (D=10cm, 15cm, 20cm) 에너지 분포는 균일하나, 에너지량이 낮아 효율이 떨어짐을 알 수 있다.

원통형 피건조체의 길이가 30cm일 때 모든 직경에서 비교적 상당히 높은 에너지량을 가지고 있으나 에너지 분포가 균일하지 못하는 경향을 나타내었다 (Fig. 3 참조).

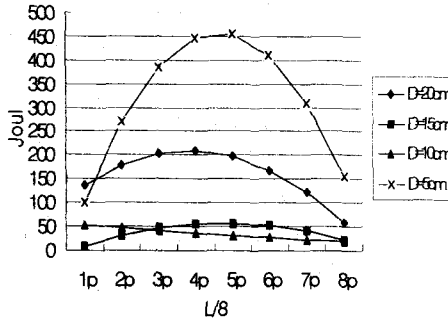


Fig. 2 Heat energy distribution with different diameter at length of 35cm

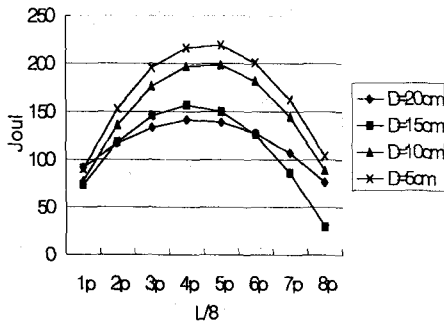


Fig. 3 Heat energy distribution with different diameter at length of 30cm

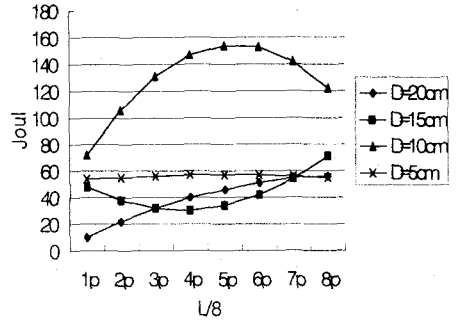


Fig. 4 Heat energy distribution with different diameter at length of 25cm

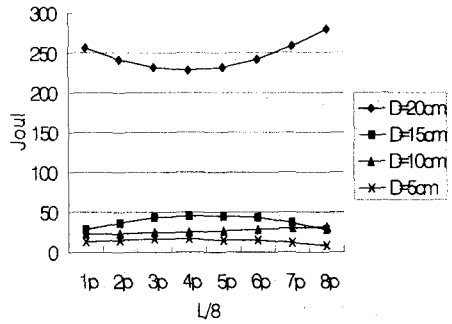


Fig. 5 Heat energy distribution with different diameter at length of 20cm

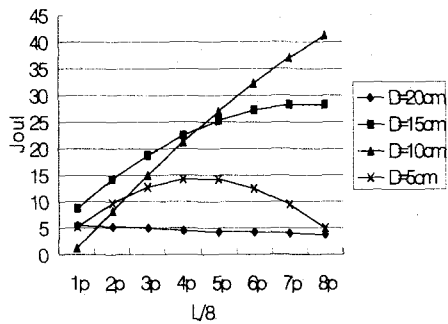


Fig. 6 Heat energy distribution with different diameter at length of 15cm

Fig. 4에 도시한 것처럼 $L=25\text{cm}$ 일때 $D=5\text{cm}$ 에서 에너지 분포는 균일하지만, 에너지량이 낮음을 알 수 있다. 또한, 직경 15cm, 20cm인 경우 에너지 분포가 불균일하고 에너지량도 낮은 편에 속한다. 하지만, $D=10\text{cm}$ 인 경우 에너지량은 높은 편이나 분포가 불균질한 경향을 나타내었다.

Fig. 5에 도시한 $L=20\text{cm}$ 경우, 피건조체의 직경이 5cm, 10cm, 15cm에서 에너지 분포는 균일하였지만, 에너지량은 낮게 나타났다. 하지만, 원통형 피건조체의 직경이 20cm일 경우에는 에너지량도 높고 분포도 비교적 균질한 경향을 보였다. 이는 마이크로파 강도와 주어진 챔버의 기하학적 형상변화에 따른 최적의 피건조체 형상이 마이크로파 건조 특성에 중요한 인자임을 내포한다고 할 수 있다.

한편, $L=15\text{cm}$ 일때는, 서로 다른 직경을 갖는 원통형 피건조체 모든 모델에서 에너지량이 낮게 나타났으며, $D=20\text{cm}$ 를 제외하고는 에너지 분포도 불균일하였다 (Fig. 6 참조).

2.5GHz, 1kW의 일정한 마이크로파를 주입한다는 조건하에, $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 챔버 중앙에 위치한 원통형 내화점토를 가열한다고 가정한 해석 결과를 살펴볼 때, 에너지 분포가 가장 균일하고 에너지량이 높아 가장 효율적인 원통형 내화점토의 크기는 $L=20\text{cm}$, $D=20\text{cm}$ 임을 알 수 있다. 즉, 주어진 챔버 환경에서 2.5GHz, 1kW 마이크로파 주파수의 진폭과 가장 잘 맞는 피건조체의 형상이라고 말할 수 있다.

효율이 저하되는 원통 모델의 에너지 분포를 살펴보면 원통형 피건조체 전체가 유전체 가열을 받지 못하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 피가열체에 흡수되지 않은 마이크로파는 공기중으로 흡수된 것으로 유추할 수 있다.

4. 결 론

정방형 챔버내에 놓여진 원통형 내화물질의 기하학적 형상변화에 따른 마이크로파 가열 건조특성을 고찰하였다. 물질의 유전율이 동일하다고 가정하면 유전체의 손실각이 달라져 에너지 분포가 달라짐을 알 수 있었다. 즉, 마이크로파 가열

건조시에는 챔버 특성에 맞는 피가열체의 최적 형상을 확보하는 것이 건조성능 및 에너지 절약 측면에서 매우 중요한 변수임을 알 수 있었다. 그렇지 않으면, 주파수의 변화를 주어 피가열체에 최적화된 주파수를 찾아야 할 것으로 생각된다. 그러나 주파수 사용 대역이 제한되기 때문에 특정 주파수에 최적화된 형상의 크기를 찾는 것이 용이하다고 생각된다.

향후 연구에서는 마이크로파 강도에 따른 챔버와 원통 모델에 관한 최적의 기하학적 상관관계 정립이 필수적이라 사료된다. 그리고 모델의 크기 변화에 따른 수분의 변화를 고찰하여 최적 크기를 찾아야 할 것으로 생각된다. 더 심화하여 다양한 형태의 입체 모델에 관한 마이크로파 강도에 따른 챔버의 입체 모델의 최적 크기와 기하학적 상관관계의 정립이 필요하다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Meredith, R., 1998, Engineers handbook of industrial microwave heating. IEE. Press.
- (2) Adu, B. and Otten, L., 1993, Modeling microwave heating characteristics of granular hygroscopic solids, *Journal of microwave Power and Electro-magnetic Energy*, Vol. 31, No. 1, pp. 35-42.
- (3) 강호양, 1999, 목재용 Microwave 진공건조기 및 응용기술개발, 기전문화사.
- (4) 김영해, 1993, 공업용 마이크로파 응용기술, 기전문화사.
- (5) Keey, R. B., 1972, *Drying; Principles and practice*. Pergamon Press.
- (6) Adu, B. and Otten, L., 1994, Modeling thin layer microwave drying of soybeans, *Can. Agric. Eng.*, 36(3):135-141

- (7) Brown, R.B., 1989, Determination of thermal properties of seeds using systems response analysis, Ph.D., Dissertation., Univ. of Guelph. ON, Canada.
- (8) Gibson, C., Mathews, I., and Samuel, A. 1988, Microwave enhanced diffusion in polymeric materials., J. Microwave Power and Electromagn
- (9) Metaxas, A.C. and Meredith, R.L. 1983, Industrial Microwave Heating., Peter Peregrinus Ltd., London, U.K