



다공성 매질의 건조 해석

이 주 석,¹ 이 창 환,¹ 배 영 민,¹ 문 영 준^{*2}

COMPUTATIONAL ANALYSIS ON DRYING OF POROUS MEDIA

Juseok Lee,¹ Chang-hwan Lee,¹ Youngmin Bae¹ and Young J. Moon^{*2}

In this study, characteristics of microwave and convective drying are studied by using a multiphase porous media model. Temperature and moisture profiles for hot-air convective heating and microwave heating of 1-D porous media with varying time and space are numerically investigated. This result shows the microwave drying method is more effective than the convective drying method. Comparing to convective drying, microwave drying can increase temperature and evaporation rate significantly since microwave generates internal heat and increases internal pressure, which results in moisture movement toward the surface on which moisture is vaporized.

Key Words : 다공성 매질(Porous Media), 다상 유동(Multiphase), 건조(Drying), 증발(Evaporation), 마이크로웨이브(Microwave)

기호 설명

c_p : 비열 [J/KgK]
 c : 질량농도 [Kg/m^3 (전체체적)]
 C : 가스혼합물의 몰밀도 [$kmol/m^3$]
 $D_{eff,g}$: 젖은 매질 내의 유효가스확산율 [m^2/s]
 D_W : 모세관 확산율 [m^2/s]
 h : 엔탈피 [J/kg]; 열전달계수 [W/m^2K]
 h_{mw} : 증기전달계수 [m/s]
 \dot{I} : 단위체적당 증기발생량 [kg/m^3s]
 k : 투과율 [m^2]
 k_t : 열전도율 [W/mK]
 \underline{M} : 분자량 [$kg/kmol$]; 수분함량 [건조체기준]
 \underline{n} : 질량유속 [kg/m^2s]
 P, p : 가스의 정압, 부분압 [Pa]
 p_c : 물의 모세관 압력 [Pa]
 \dot{q} : 단위체적당 열생성량 [W/m^3]
 R : 일반기체상수 [$J/kmolK$]
 S : 포화도
 t : 시간
 T : 온도 [K]
 x : 물분율; 거리

δ : 침투깊이 [m]
 ϕ : 공극률
 λ : 증발잠열 [J/kg]
 μ : 역학점도 [$Pa \cdot s$]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 a : 공기
 amb : 대기
 eff : 결합된 모든 상에 대한 유효
 g : 가스 (증기 + 공기)
 i : 초기
 mic : 마이크로웨이브
 s : 고체; 표면
 V : 증기
 W : 물

1. 서 론

다공성 매질이란 유체로 채워져 있는 빈 공간을 가지고 있는 고체를 말한다. 다공성매질의 종류는 종이, 토양, 돌, 직물, 식품, 산업재료에 이르기까지 매우 다양하다. 특히 이러한 다공성 매질의 건조는 식품건조나 의류건조처럼 우리 실생활과 매우 밀접한 관련이 있어서 이와 관련된 연구는 산업에 기여하는 바가 클 것으로 기대된다. 기존에 많이 사용되고 있는 열풍에 의한 다공성매질의 건조는 이미 많은 연구자들에 의하여 연구되었다. Bruin[1], Fortes[2]. 하지만 보통은 다상유동을 포함하는 다공성매질에 대한 포괄적인 접근 없이 집중해석법

1 학생회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 고려대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: yjmoon@korea.ac.kr

(Lumped method)을 통해 수분의 이동을 고찰하였다 여기에 더해서 마이크로웨이브의 우수한 건조 능력을 다공성매질의 건조에 이용하려는 연구가 Luikov[3] 와 Whitaker[4] 에 의해 진행되었다. Luikov의 모델은 현상적이고 실험값에 의존하는 계수들이 나타나므로 물리적으로 알기 어렵고 자료 또한 부족하다. 한편 Whitaker의 모델은 고체, 액체, 기체 상에 대해 각각의 질량보존과 에너지보존 방정식을 만들고 확산과 모세관힘, Darcy유동으로 물과 증기의 이동을 묘사하여 마이크로웨이브를 이용한 다공성매질 건조의 물리적인 해석이 가능하다. 근래 들어 이를 기초로 하여 다공성 매질 건조에 관해 전산해석을 수행한 연구가 있다[5]. 이 연구를 기초로 하면 추후 다양한 산업재료의 건조에도 전산해석이 적용될 수 있다.

본 연구에서는 마이크로웨이브와 열풍을 이용한다공성매질의 건조특성을 알아보고 이에 따른 열풍건조와 마이크로웨이브건조의 비교를 통해 각각의 시간과 공간에 따른 수분과 온도의 변화를 알아본다

2. 이론 배경

건조 시 다공성 매질 내에는 수증기와 공기 그리고 액체 상태인 물이 공존한다 일단 다공성매질에 마이크로웨이브가 들어오면 유전가열에 의하여 수분이 증발한다 이때 수분의 증발량은 물(액체)과 증기에 관한 질량보존 방정식과 연결된다. 다공성 매질 내에서의 수분증발로 인하여 내부의 압력과 온도는 상승하게 되고 이에 따라 내부의 물과 증기는 확산과 모세관힘, Darcy유동의 형태로 매질 표면까지 이동한다 표면에 도달한 물과 증기는 Fig. 1에서 보는 것처럼 모두 증기의 형태로 증발되고 열풍에 의하여 날아간다 이러한 표면증발은 식 (13)에서 나타낸 바와 같이 유효증발면적과 질량보존에너지 보존에 의하여 결정된다

2.1 가정

본 연구에 쓰인 가정은 다음과 같다

- (1)고체, 액체, 기체 상은 각각 연속적이다
- (2)국소열평형이 성립된다 즉, 세 가지 상의 온도는 동일하다.
- (3)증기압은 물 포화도와 온도의 함수이다
- (4)수분함량에 크게 영향을 받는 모세관힘과 가스의 정압구배로 인한 대류유동에 기인하여 액체가 이동한다
- (5)증기와 공기는 증기농도구배에 영향을 받는 확산과 가스의 정압구배로 인한 대류유동에 의해 움직인다
- (6)에너지전달에 대한 대류의 영향은 무시한다
- (7)가열로 인한 형상의 변형은 무시한다

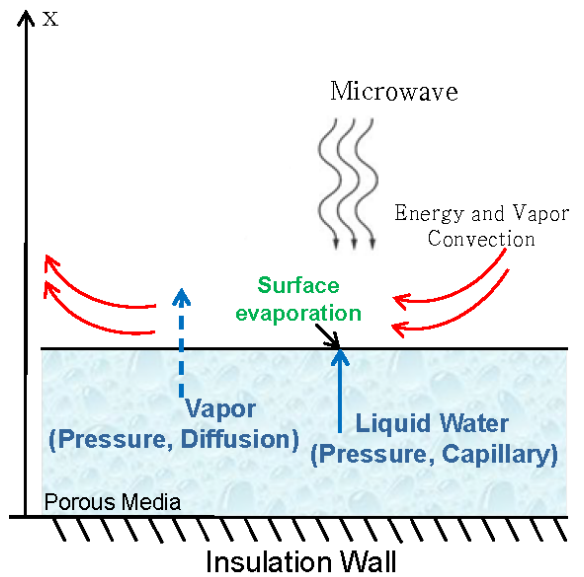


Fig. 1 Schematic diagram of the 1D system and heating process with the boundary conditions

2.2 지배방정식

해석에 사용되는 공극률 ϕ , 포화도 S , 밀도, ρ , 질량농도, c ,는 식 (1)-(5)와 같이 정의된다 여기서 R 은 일반기체상수, m 은 질량, ΔV 는 검사체적, M 은 분자량을 나타내며 하첨자 s, w, g, a 는 각각 고체와 물, 가스(증기+공기), 공기를 나타낸다.

$$\Delta V = \Delta V_s + \Delta V_w + \Delta V_g \tag{1}$$

$$\phi = \frac{\Delta V_w + \Delta V_g}{\Delta V} \tag{2}$$

$$S_w = \frac{\Delta V_w}{\Delta V_w + \Delta V_g} = \frac{\Delta V_w}{\phi \Delta V} \tag{3}$$

$$S_g = \frac{\Delta V_g}{\Delta V_w + \Delta V_g} = \frac{\Delta V_g}{\phi \Delta V}$$

$$\rho_v = \frac{\Delta m_v}{\Delta V_g} = \frac{p_v M_v}{RT}$$

$$\rho_a = \frac{\Delta m_a}{\Delta V_g} = \frac{p_a M_a}{RT} \tag{4}$$

$$\rho_g = \frac{\Delta m_v + \Delta m_a}{\Delta V_g} = \rho_v + \rho_a$$



$$\begin{aligned}
 c_V &= \frac{\Delta m_V}{\Delta V} = \frac{p_V M_V S_g \phi}{RT} \\
 c_a &= \frac{\Delta m_a}{\Delta V} = \frac{p_a M_a S_g \phi}{RT} \\
 c_W &= \frac{\Delta m_W}{\Delta V} = \frac{\rho_W \Delta V_W}{\Delta V} = \rho_W \phi S_W
 \end{aligned} \tag{5}$$

식 (6)에서처럼 Dalton의 법칙을 적용하면 가스의 정압은 증기 압력과 공기 압력의 합과 같다

$$P = p_V + p_a \tag{6}$$

증기의 유속, \vec{n}_V , 과 공기의 유속, \vec{n}_a 은 확산과 대류유동으로 구성되며 물의 유속은 가스의 정압 P와 모세관압력 P_c 으로 표현된 Darcy유동으로 구성된다 여기서 k, C, x는 각각 투과율, 물밀도, 물분율을 나타낸다

$$\begin{aligned}
 \vec{n}_V &= -\rho_V \frac{k_g}{\mu_g} \nabla P - \frac{C_g^2}{\rho_g} M_a M_V D_{eff,g} \nabla x_V \\
 \vec{n}_a &= -\rho_a \frac{k_g}{\mu_g} \nabla P - \frac{C_g^2}{\rho_g} M_a M_V D_{eff,g} \nabla x_a \\
 \vec{n}_W &= -\rho_W \frac{k_W}{\mu_W} \nabla P_W = -\rho_W \frac{k_W}{\mu_W} \nabla (P - p_c) \\
 &= -\rho_W \frac{k_W}{\mu_W} \nabla P - D_W \rho_W \phi \nabla S_W
 \end{aligned} \tag{7}$$

해석에 이용된 유효가스 확산율 $D_{eff,g}$ 과 모세관 확산율 D_W , 수분함량 M은 다음과 같다.

$$D_{eff,g} = 2.6 \times 10^{-5} ((1 - S_W) \phi)^{4/3} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 D_W &= 1.0 \times 10^{-8} \exp(-2.8 + 2.0M) \\
 M &= \frac{\rho_W \phi S_W}{(1 - \phi) \rho_s}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Fig. 1에서 보는 것처럼 대기와 접해 있는 면(대기 경계면)으로 마이크로웨이브가 들어오고 그 면에서 열과 수분이 대류로 인해 증발한다 아래 면은 단열되어있고 열과 수분의 이동이 없다 대류 유속 뿐 아니라 확산 유속 또한 내부로부터 대기 경계면으로 발생한다 다공성 매질 내에서의 증기와 물, 공기 각각에 대한 질량보존과 에너지보존 방정식은 식 (10)에 나타난 바와 같이 성립한다 여기서 \dot{I} , k_t , λ , 는 각각 단위체적당 증기발생량 열전도율, 증발잠열을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial c_V}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_V) &= \dot{I} \\
 \frac{\partial c_W}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_W) &= -\dot{I} \\
 \frac{\partial c_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_a) &= 0 \\
 (\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla \cdot (k_{t,eff} \nabla T) - \lambda \dot{I} + \dot{q}_{mic} \\
 (\rho c_p)_{eff} &= \rho_s c_{ps} (1 - \phi) + \rho_W c_{pW} \phi S_W \\
 &+ \rho_g c_{pg} \phi (1 - S_W) \\
 k_{t,eff} &= k_{ts} (1 - \phi) + k_{tW} \phi S_W + k_{tg} \phi (1 - S_W)
 \end{aligned} \tag{10}$$

마이크로웨이브의 열속 \dot{q}_{mic} 은 수분함량에 종속적인 침투 깊이, δ_{mic} 의 변화에 따라 지수적으로 감소한다[6].

$$\dot{q}_{mic}(x) = \frac{F_{mic,s}}{\delta_{mic}(x)} \exp\left(-\int_0^x \frac{dx}{\delta_{mic}}\right) \tag{11}$$

2.3 경계조건

식 (12)에 나타난 것처럼 아래의 단한 경계면(단열면)에서는 열과 질량의 출입이 없다 여기서 n은 단위면적당 질량유속을 의미한다

$$\begin{aligned}
 n_W + n_V &= 0 \\
 n_a &= 0 \\
 -k_{t,eff} \frac{\partial T}{\partial x} &= 0
 \end{aligned} \tag{12}$$

대기경계면에서는 에너지와 증기물, 공기의 교환이 일어나며 내부로부터 대기경계면으로 이동한 물과 증기는 모두 증기의 형태로 증발되고 열풍에 의하여 날아간다 이러한 표면증발은 식 (13)에서처럼 유효증발면적과 질량보존 에너지 보존에 의하여 결정된다 여기서 h_{mv} , ρ_{W0} , amb , 는 각각 증기전달계수, 대기 수증기밀도, 대기를 나타낸다

$$\begin{aligned}
 n_V + n_{W,s} &= \phi \left(\frac{p_V M_V}{RT} - \rho_{W0} \right) h_{mv} \\
 P_s &= P_{amb} \\
 -k_{t,eff} \frac{\partial T}{\partial x_s} &= h(T - T_{amb}) + n_W \lambda
 \end{aligned} \tag{13}$$

2.3 수치 해석 방법

본 연구에서는 FTCS(Forward-Time Central-Space) 방법으로 Fig. 1과 같은 비정상상태의 일차원 형상에 대하여 수치해석하였다. 대기경계면에서의 열전달과 질량전달을 계산할 때에는 해석의 편의를 위하여 이전 시간의 값을 이용하여 계산하였는데 비록 시간차가 있기는 하지만 경계 값의 시간에 따른 변화율이 상대적으로 작기 때문에 이로 인해 발생하는 에러 또한 작다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열풍 건조

입력 값들은 Table. 1과 같으며 다공성매질의 물성치는 감자를 기준으로 계산하였다[6]. 모델의 정확도를 비교하기 위하여 같은 조건에서 전산 해석된 값과 비교하였다[7]. 본 연구의 모델과 [7]의 모델을 비교해보면 같은 경향성을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 2에서 보는바와 같이 시간이 지남에 따라 매질 내 물 포화도의 감소를 확인할 수 있으며 특히 열풍에 의한 대기 경계면에서의 감소가 눈에 띈다 매질 내부의 온도는 동적열평형을 이루어 비교적 균일한 상태를 유지한 채 상승한다.

3.2 마이크로웨이브 건조

마이크로웨이브 건조에는 대기온도293.15[K] 와 마이크로웨이브 표면 열속 $30,000 [W/m^2]$ 이 사용되었으며 이 밖에 모든 입력 값은 Table. 1의 입력 값과 동일하다 열풍건조와 비교하면 물 포화도가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다 마이크로웨이브 단독으로 건조 시에는 대기와 접해있는 매질면이 축축하게 젖는다 이러한 현상은 마이크로웨이브 건조 시에 나타나는 특징 중 하나로써 마이크로웨이브에 의한 다공성매질 내부의 증발로 인하여 매질 내부의 압력이 상승하

Table. 1 Summary of parameters

두께	0.01
공극률	0.88
대기수증기밀도	0
열전달계수	20
증기전달계수	0.01
초기물포화도	0.8
초기압력	100,000
초기온도	293.15
대기압력	100,000
대기온도	450.15
고체정압비열	1566
고체밀도	1419

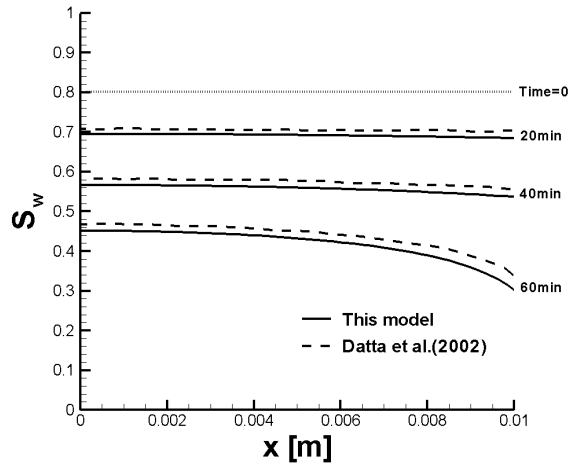


Fig. 2 Water saturation profile in convective heating

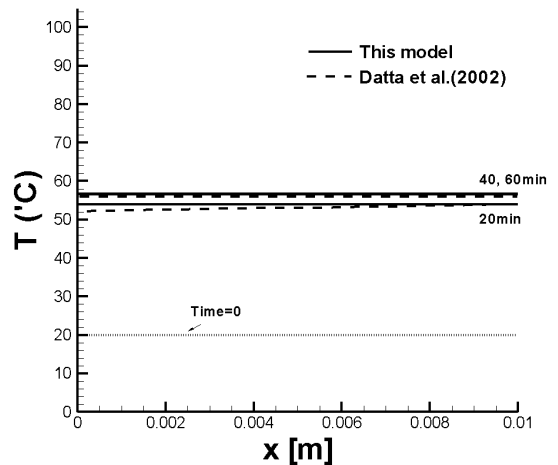


Fig. 3 Temperature profile in convective heating

게 되고 이에 따라 물과 증기가 대기경계면으로 밀려나오기 때문이다. 이때 다공성매질 내 온도는 물의 유전가열에 의하여 열풍건조 시 온도보다 급속히 증가함을 볼 수 있다 또한 매질 내 압력은 내부 증발에 의하여 2분 내 최고치에 달한다 이에 따라 내부압력구배가 발생하며 압력의 정점인분 후에는 수분이 고갈됨에 따라 압력도 따라서 감소한다

3.3 마이크로웨이브와 열풍의 복합건조

마이크로웨이브와 열풍을 다공성매질의 건조에 이용하였다. 입력 값은 Table. 1과 동일하며 마이크로웨이브 표면 열속은 $30,000 [W/m^2]$ 이다. 마이크로웨이브만을 이용한 건조와 비교해보면 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 모든 시간대에 걸쳐 물

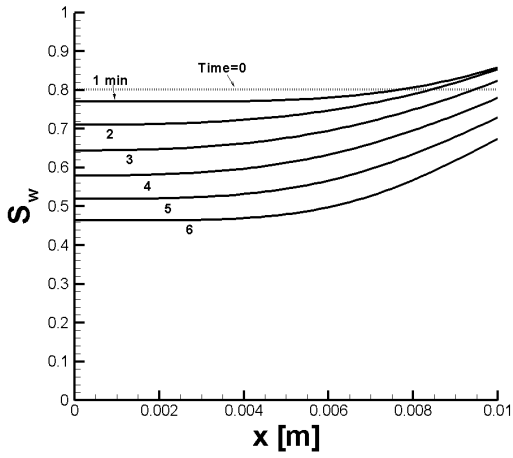


Fig. 4 Water saturation profile in microwave heating

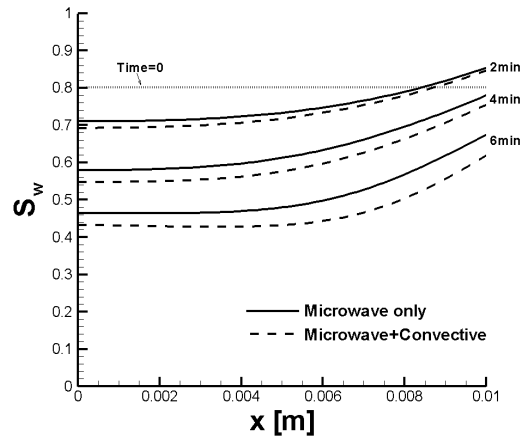


Fig. 7 Water saturation profile in microwave and convective heating

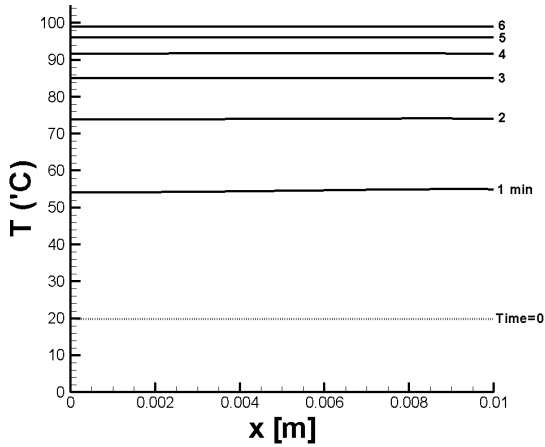


Fig. 5 Temperature profile in microwave heating

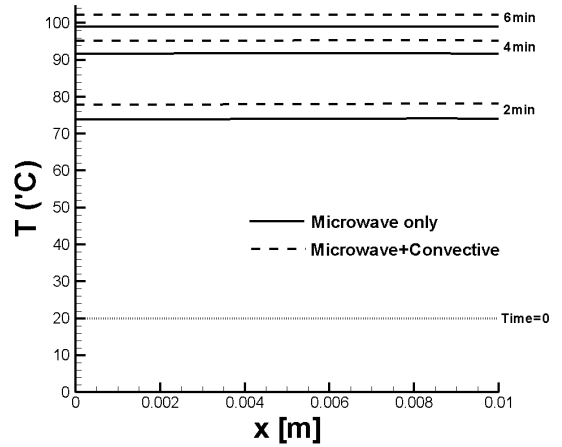


Fig. 8 Temperature profile in microwave and convective heating

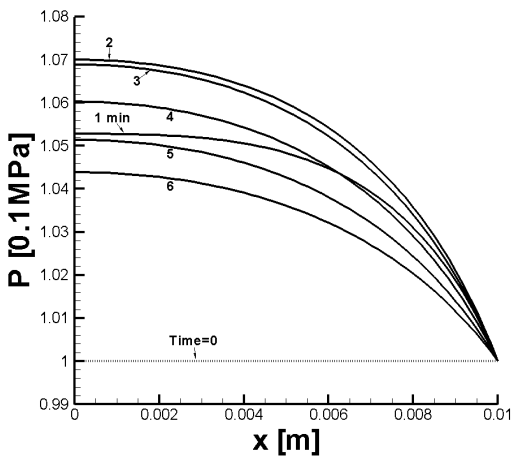


Fig. 6 Pressure profile in microwave heating

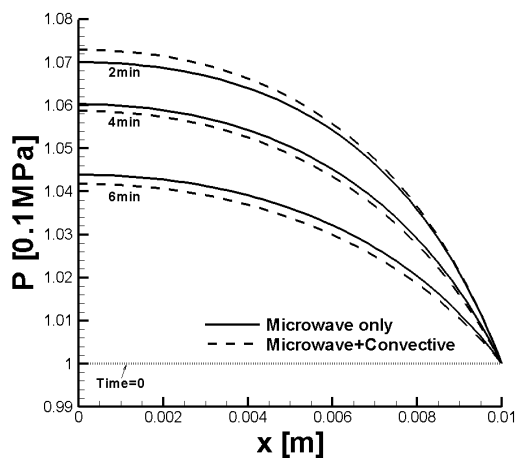


Fig. 9 Pressure profile in microwave and convective heating



포화도의 감소를 확인할 수 있다 이것은 마이크로웨이브의 증발효과에 더불어 열풍에 의한 대기경계면에서의 표면증발이 더 증가했기 때문이다 Fig. 8-9를 보면 열풍에 의해서 온도가 추가로 상승한다 따라서 건조초기 내부증발이 증가하게 되고 복합건조 시 압력이 마이크로웨이브 단독건조에 비하여 더욱 상승한다. 하지만 건조시작 2분 이후에는 Fig. 7처럼 물 포화도의 감소가 가속화되므로 압력 또한 더 감소한다

4. 결 론

열풍과 마이크로웨이브에 의한 다공성 매질의 건조효과를 1차원 비정상상태 전산해석을 통하여 계산하였다 결과를 통해 열풍 건조에 비하여 마이크로웨이브를 이용했을 때 건조 시간을 더 단축시킬 수 있음을 확인하였다 다만 마이크로웨이브를 이용한 건조 시에는 내부 압력에 의해 밀려나온 증기와 물로 인하여 대기경계면의 물 포화도가 내부에 비해 상승한다. 마지막으로 열풍과 마이크로웨이브를 동시에 이용한 건조를 계산하였다 각각 단독으로 건조하였을 때보다 다공성매질의 온도가 더욱 상승하고 물 포화도가 감소하였으므로 열풍과 마이크로웨이브의 복합 건조 성능이 더 우수함을 확인하였다. 추후에는 다공성매질의 건조에 관한 2차원 전산해석을 통한 건조성능해석이 필요하다.

참고문헌

- [1] 1980, Bruin, S. and Luyben, K., "Drying of food materials : a review of recent developments," *Adv in Drying*;1:155-215
- [2] 1980, Fortes, M. and Okos, MR, "Drying theories : their bases and limitations as applied to foods and grains," *Adv in Drying*;1:119-54.
- [3] 1975, Luikov, A.V., "Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies(review)," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.18(1-A), pp.1-13.
- [4] 1977, Whitaker, S, "Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media : a theory of drying," *Adv Heat Transfer*, Vol.13, pp.119-203.
- [5] 1999, Ni, H., Datta, A.K. and Torrance, K.E., "Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.42, (1999), pp.1501-1512.
- [6] 1997, Ni, H., "Multiphase moisture transport in porous media under intensive microwave heating," *Ph.D. thesis*, Cornell University, 1997.
- [7] 2002, Datta, A.K. and Ni, H., "Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture," *Int. J. Food Engineering*, Vol.51, (2002), pp.355-364.