

# 수분 제거를 위한 식물세포 *Taxus chinensis*의 마이크로웨이브를 이용한 건조 특성

남현우 · 김진현<sup>†</sup>

공주대학교 화학공학부  
(2020년 2월 26일 접수, 2020년 3월 20일 심사, 2020년 3월 23일 채택)

## Characteristics of Microwave-Assisted Drying of Plant Cells of *Taxus chinensis* for Moisture Removal

Hyeon-Woo Nam and Jin-Hyun Kim<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, South Korea  
(Received February 26, 2020; Revised March 20, 2020; Accepted March 23, 2020)

### 초 록

본 연구에서는 식물세포 *Taxus chinensis*로부터 수분 제거를 통한 바이오매스 보관 및 추출 효율 향상을 위하여, 마이크로웨이브를 이용한 건조의 특성 및 메커니즘을 조사하였다. 마이크로웨이브 파워가 100, 200, 300 W로 증가함에 따라 수분의 제거 효율은 증가하였다. 실험 데이터를 대표적 동역학적 건조 모델에 적용할 때, Page 모델과 modified Page 모델이 가장 적합한 것으로 결정되었다. 열역학적 파라미터는 마이크로웨이브를 이용한 건조의 자발적 및 흡열 특성을 나타내었으며, 건조 과정에서 무질서도는 증가함을 알 수 있었다. 마이크로웨이브 파워(100~300 W)가 증가함에 따라 수분의 유효확산계수( $3.445 \times 10^{-9} \sim 7.163 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ) 및 대류물질전달계수( $3.1529 \times 10^{-5} \sim 1.2895 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ )가 증가하였다. 작은 비오토 수(0.3890~0.7198)를 고려할 때, *Taxus chinensis*의 건조 진행은 외부 확산에 의해 조절됨을 알 수 있었다.

### Abstract

In this study, the characteristics and mechanism of microwave-assisted drying were investigated to improve the efficiency of the storage and extraction of biomass through the removal of moisture from plant cell *Taxus chinensis*. The efficiency of microwave-assisted drying increased with increasing microwave power. When the experimental data were fitted to typical drying kinetic models, the page and modified Page models were the most appropriate. The microwave-assisted drying was determined to be a spontaneous endothermic process, and randomness increased during the drying process. The effective diffusion coefficient ( $3.445 \times 10^{-9} \sim 7.163 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ) and mass transfer coefficient ( $3.1529 \times 10^{-5} \sim 1.2895 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ ) increased with increasing microwave power. The small Biot number (0.3890~0.7198) indicated that the mass transfer process was externally controlled.

**Keywords:** Biomass, Microwave-assisted drying, Kinetics, Mechanism, Thermodynamics

## 1. 서 론

파클리탁셀(paclitaxel)은 주목의 표피로부터 발견된 디테르페노이드계 항암물질로 유사분열기 암세포 분열을 억제하는 독특한 항암 작용을 가지며, 난소암, 유방암, 카포시 종양, 폐암 등의 치료에 널리 사용되고 있다[1]. 파클리탁셀은 주로 주목으로부터 직접 추출, 주목의 잎에서 전구체(바카틴 III, 10-디아세틸파클리탁셀, 10-디아세틸바카틴 III 등)를 얻어 결 사슬을 화학적으로 결합하는 반 합성, 주목 유래

캘러스(callus)를 이용한 식물세포배양으로 생산되고 있다[2-4]. 추출과 반 합성은 원료의 지속적인 공급 및 분리/정제에 많은 어려움이 있다. 반면, 식물세포배양은 기후, 환경, 원료 공급, 수확 시기 등 외부 인자의 영향이 적으며 생물반응기에서 일정한 품질의 제품을 안정적으로 대량 생산할 수 있다[5].

식물세포배양으로부터 생산된 이차대사산물인 파클리탁셀은 대부분 식물세포(바이오매스)에 축적된다. 파클리탁셀 생산을 위하여, 먼저 식물세포배양액으로부터 바이오매스를 효율적으로 회수하고 보관해야 한다. 보관 기간 동안 바이오매스의 수분 함량이 바이오매스(또는 바이오매스 내 유효 성분)의 분해에 영향을 미치기 때문에, 회수된 바이오매스의 안정적 보관을 위해 바이오매스의 적절한 건조가 필요하다[6]. 높은 수분 함량은 수분 활성을 증가시키고 미생물 활성을 증가시켜 바이오매스의 분해 및 손실을 야기한다. 또한 바이오매스로부

<sup>†</sup> Corresponding Author: Kongju National University,  
Department of Chemical Engineering, Cheonan 31080, South Korea  
Tel: +82-41-521-9361 e-mail: jinhyun@kongju.ac.kr

터 파클리락셀 회수를 위하여 일반적으로 유기용매를 이용한 추출 방법이 널리 사용되고 있다[7,8]. 바이오매스의 건조 정도는 추출 공정에서 용매 사용량뿐만 아니라 추출 효율에도 많은 영향을 미친다.

일반적으로 잔류 수분 또는 용매 제거를 위하여, 회전 증발, 진공 건조, 초임계 건조, 분무 건조, 마이크로웨이브 건조 등이 이용되고 있다 [9-11]. 이 중에서 마이크로웨이브를 이용한 건조(microwave-assisted drying)는 장치의 규모를 최소화할 수 있으며 피가열물이 발열체가 되어 내부 전체에서의 열 이동으로 인해 가열 속도가 빠르고 균일한 건조가 가능하여 제품의 품질을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 피가열물에만 흡수되므로 열효율이 높고 전력 제어가 쉬워 마이크로웨이브를 이용한 건조는 잔류 수분 및 용매 제거에 매우 효과적이다 [12-14]. 하지만 마이크로웨이브를 이용한 건조에 의한 세포(바이오매스)의 수분 제거에 대한 연구는 상당히 미흡할 뿐만 아니라 식물세포 *Taxus chinensis*의 마이크로웨이브를 이용한 건조 공정에 대한 동역학 및 열역학적 해석에 대한 정량적인 연구는 전무한 실정이다. 동역학적 특성은 건조 경로 및 건조 속도를 파악하거나 예측할 수 있기 때문에 공정 개발, 최적화, 검정 등에 매우 유용하게 활용될 수 있으며 [15,16], 열역학적 특성은 건조의 자발성, 반응열, 가역성을 파악할 수 있어 건조 공정의 진행 양상을 쉽게 이해할 수 있다[17]. 따라서 본 연구에서 마이크로웨이브를 이용한 건조를 이용하여 식물세포 *Taxus chinensis*의 수분을 효과적으로 제거하고자 하였다. 또한 건조 공정에 대한 동역학 및 열역학적 해석을 통해 건조 특성을 자세히 조사하여 건조 공정에 대한 유용한 정보를 제공하고자 하였다. 더 나아가 건조 공정에서 유효확산계수, 물질전달계수, 비오투 수를 추정함으로써 건조 과정에서 물질전달 메커니즘을 정량적으로 해석하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 바이오매스 시료

본 실험에서 사용된 바이오매스는 식물세포 *Taxus chinensis*의 잎으로부터 유도된 세포주를 현탁 배양(24 °C, 150 rpm, 암 조건)하여 얻었다[1]. 식물세포배양 후 배양액으로부터 decanter (Westfalia, CA150 Clarifying Decanter)를 이용하여 식물세포(바이오매스)를 회수하였다. 본 연구에 사용된 식물세포는 (주)삼양바이오팜으로부터 제공받았다.

### 2.2. 수분 함량 분석

수분 함량은 수분 측정기(HG53, Metter Toled)를 이용하여 분석하였다. 분석 온도, 시간, 시료의 양은 각각 120 °C, 120 min, 2 g이었다. 각각의 샘플을 3개씩 취하여 분석 후 평균값을 취하였다.

### 2.3. 마이크로웨이브를 이용한 건조 실험

마이크로웨이브를 이용한 바이오매스의 건조 실험을 위하여, 마이크로웨이브 장치(2450 MHz Model 1501, Korea Microwave Instrument Co, Korea)을 이용하였다. 장치 크기는 W 420 mm × D 380 mm × H 420 mm이며, 냉각팬 및 열전대로 구성되었다. 주어진 마이크로웨이브 파워에서 온도를 일정하게 유지하였으며 건조 동안 온도 변화를 지속적으로 측정하기 위해 열전대를 사용하였다. 높은 마이크로웨이브 파워(> 400 W)에서 시료가 분해되기 때문에, 마이크로웨이브 파워는 100 (35 °C), 200 (45 °C), 300 W (55 °C)로 변화시켜 실험을 수행하였다[11]. 건조 시간(~100 min)에 따른 시료의 수분 함량은 수분 측정기로 분석하였다.

### 2.4. 수분 함량비

수분 함량비(moisture ratio)는 건조 공정의 설계에서 매우 중요한 요소이며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[18].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (1)$$

여기에서 MR은 수분 함량비이며  $M_t$ 는 시간 t에서 수분 함량,  $M_e$ 는 평형 수분 함량,  $M_i$ 는 초기 수분 함량이다.

### 2.5. 동역학적 건조 모델

Newton 모델은 냉각 법칙에 기초하여 다공성 흡습성(porous hygroscopic) 물질들을 건조하는 동안 수분 증발 속도는 현재의 함수율과 예측되는 함수율의 차이에 비례한다고 가정하여 만들어졌으며, 식 (2)와 같은 직선식으로 나타낼 수 있다[19].

$$\ln(MR) = -kt \quad (2)$$

여기서 k는 건조속도상수( $h^{-1}$ ), t는 건조시간(h)을 나타낸다.

Page 모델은 Newton 모델의 건조 시간(t)에 무차원 상수(n)을 도입하여 시간 효과를 완화시킴으로써 수분 손실의 예측에 보다 효과적이다[20]. 추가적으로 옥수수 건조에 대한 연구를 위해 1978년 White 등에 의해 Page 모델이 modified Page 모델로 수정되었다[21]. Page 모델과 modified Page 모델은 식 (3)과 (4)와 같이 직선식으로 나타낼 수 있다.

$$\ln(-\ln(MR)) = n \ln t + \ln k \quad (3)$$

$$\ln(-\ln(MR)) = n \ln t + n \ln k \quad (4)$$

여기에서 k는 건조속도상수( $h^{-1}$ ), t는 건조시간(h), n은 무차원 상수를 나타낸다.

Henderson and Pabis 모델은 Fick's second law에 기초하여 만들어졌으며 다양한 근사치와 변화들에 대한 건조 양상을 시뮬레이션 하기 위해 사용되고 있다[22]. Henderson and Pabis 모델은 식 (5)와 같이 직선식으로 나타낼 수 있다.

$$\ln(MR) = \ln a - kt \quad (5)$$

여기에서 k는 건조속도상수( $h^{-1}$ ), a는 무차원 상수를 나타낸다.

Geometric 모델은 경험식으로 다양한 식품 재료의 건조 양상을 시뮬레이션하기 위해 만들어졌으며, 반 이론 모델(semi-theoretical model)의 특성과 비슷한 경향을 가지고 있다[23]. 식 (6)과 같이 직선식으로 나타낼 수 있다.

$$\ln(MR) = \ln a - n \ln t \quad (6)$$

여기에서 a와 n는 무차원 상수를 나타낸다.

### 2.6. 동역학 및 열역학적 해석 방법

동역학적 해석을 위하여 건조 데이터를 다섯 종류의 건조 모델(Newton, Henderson and Pabis, Page, modified Page, Geometric)에 적

용하였다[20]. 결정계수(coefficient of determination,  $r^2$ )를 고려하여 최적의 모델을 선정하였다. Arrhenius equation으로부터 활성화에너지 ( $E_a$ , kJ/mol)를 계산하였으며[21], 선형의 arrhenius equation은 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\ln k_2 = \ln k_0 + \left( \frac{-E_a}{R} \right) \frac{1}{T} \quad (7)$$

Eyring equation으로부터 활성화 파라미터인 활성화 Gibbs 자유에너지 변화( $\Delta G^*$ ), 활성화 엔탈피 변화( $\Delta H^*$ ), 활성화 엔트로피 변화( $\Delta S^*$ )를 계산하였다[24]. 선정된 최적의 건조 모델로부터 계산된 속도상수  $k$ 를 이용하여 식 (8)의 Eyring equation에 의해 먼저  $\Delta H^*$ 와  $\Delta S^*$ 를 구한 후 식 (9)를 통해  $\Delta G^*$ 를 계산할 수 있다.

$$\ln \frac{k}{T} = - \frac{\Delta H^*}{RT} + \ln \frac{k_0}{h} + \frac{\Delta S^*}{R} \quad (8)$$

$$\Delta G^* = \Delta H - T\Delta S \quad (9)$$

여기서  $R$ 은 기체상수(8.314 J/mol · K),  $T$ 는 절대온도(K)이며,  $k$ 는 속도상수,  $k_0$ 는 Boltzmann 상수( $1.3807 \times 10^{23}$  J/K),  $h$ 는 Planck 상수( $6.6261 \times 10^{-34}$  J · s)이다.

van't Hoff equation으로부터 열역학적 파라미터인 표준 Gibbs 자유에너지 변화( $\Delta G^0$ ), 표준 엔탈피 변화( $\Delta H^0$ ), 표준 엔트로피 변화( $\Delta S^0$ )를 계산하였다[17]. 즉,  $\Delta H^0$ 와  $\Delta S^0$ 는 식 (10)의 평형상수( $K_e$ )를 이용한 식 (11)의 van't Hoff equation으로부터 먼저 구한 후 식 (12)로부터  $\Delta G^0$ 를 계산할 수 있다.

$$K_e = \frac{C_e}{C_{se}} \quad (10)$$

$$\ln K_e = - \frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (11)$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_e \quad (12)$$

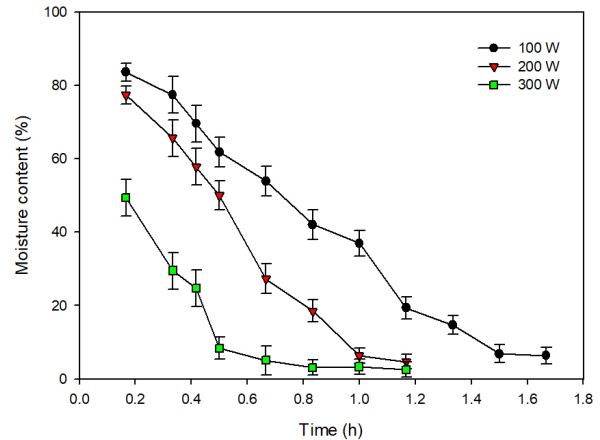
여기에서  $C_e$ 와  $C_{se}$ 는 각각 바이오매스에서 제거된 수분의 양과 남아있는 수분의 양이다.

**2.7. 유효확산계수 및 물질전달계수 계산**

비정상 상태에서 단일 방향 물질 전달의 경우, 바이오매스의 수분 확산은 식물세포 *Taxus chinensis* (평균 식물세포 반지름:  $42.5 \times 10^{-6}$  m)의 구조를 구체(sphere)로 가정할 때 Fick's second law에 의해 표현될 수 있다[25-28]. 유효확산계수( $D_e$ )는 적절한 초기 및 경계 조건에서 Crank[29]에 의해 제시된 구에 대한 해석적 해(analytical solution)로부터 계산할 수 있으며 식 (13)으로 주어진다.

$$MR = \left( \frac{6}{\pi^2} \right) \exp \left[ -D_e t \left( \frac{\pi^2}{r^2} \right) \right] \quad (13)$$

여기서  $D_e$ 는 유효 확산 계수( $m^2/s$ )이고,  $t$ 는 시간(s),  $r$ 은 구의 반지



**Figure 1. Effect of drying time on the moisture content of biomass at different microwave powers.**

름(m)으로 평균 세포 반지름을 의미한다. 또한 물질 전달에 대한 내·외부 저항의 상대적인 크기를 조사하기 위해 비오투 수(Biot number,  $Bi$ )를 계산하였으며[27], 물질전달계수( $h_m$ , m/s)와 유효확산계수( $D_e$ ,  $m^2/s$ )는 물질 전달을 위한 무차원 비오투 수에 의해 서로 연관된다[26].

$$Bi = \frac{h_m r}{D_e} \quad (14)$$

Dincer와 Hussain[30]은 비오투 수와 무차원 Dincer 수를 연관시키는 식을 제시하였다:

$$Bi = \frac{24.848}{Di^{0.375}} \quad (15)$$

$$Di = \frac{u}{kr} \quad (16)$$

여기서  $k$ 는 건조 속도 상수( $s^{-1}$ ),  $u$ 는 건조 공기의 속도(m/s)이며 마이크로웨이브 장치에서  $u$ 는 3.8 m/s이다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 마이크로웨이브 파워에 따른 수분 함량 변화**

바이오매스로부터 잔류 수분을 제거하는 것은 바이오매스의 보관 및 바이오매스 추출 과정에서 매우 중요하다. 바이오매스의 수분 제거를 위하여, 마이크로웨이브 파워 100 (온도: 35 °C), 200 (온도: 45 °C), 300 W (온도: 55 °C)에서 각각 마이크로웨이브를 이용한 건조 실험을 수행하였다. 건조 시간 경과에 따른 바이오매스의 수분 함량(moisture content) 변화와 수분 비(moisture ratio) 변화를 각각 Figures 1과 2에 나타내다. 모든 마이크로웨이브 파워에서 건조 초기에 수분 함량이 급격히 감소하다 이후에는 완만하게 감소하였다. 파워 100 W (35 °C)에서 건조 1.5 h, 200 W (45 °C)에서 건조 1.0 h, 300 W (55 °C)에서 건조 0.5 h 후에 거의 평형에 도달하였다. 초기 수분 함량이 급격히 감소하는 경향은 파워가 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타났다. 건조 초기에는 시료의 수분 함량이 상대적으로 높아 마이크로웨이브 흡수율이 향상되고, 이로 인해 수분 확산이 빨라져 건조 효율이 향상

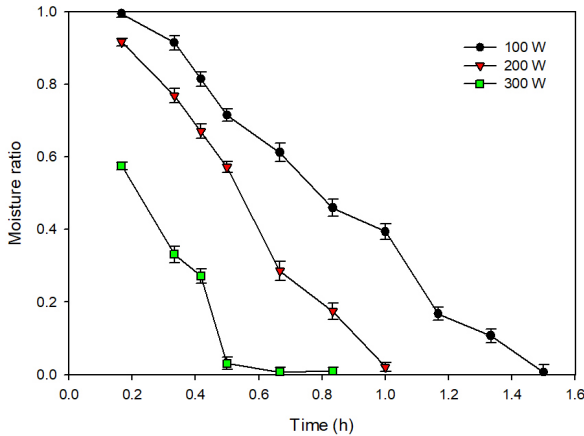


Figure 2. Effect of drying time on the moisture ratio of biomass at different microwave powers.

되는 것으로 판단된다[31,32]. 마이크로웨이브 파워가 증가할수록 건조 효율이 증가하여 짧은 건조 시간에 바이오매스의 수분 제거가 완료됨을 확인하였다. 마이크로웨이브 파워가 높을수록 복사에너지가 증가되어 잔류 수분 증발에 이용되는 잠열량이 많아 건조 속도가 빨라지는 것으로 판단된다[33].

### 3.2. 동역학 및 열역학적 해석

건조 특성의 정량적 해석을 위하여, 대표적 다섯 가지 건조 모델 (Newton, Page, modified Page, Henderson and Pabis, Geometric)에 실험데이터를 적용하였다. 결정 계수( $r^2$ )로 모델의 적합성을 비교하였다. Newton, Page, modified Page, Henderson and Pabis, Geometric 건조 모델을 선형화하여 Figure 3에 나타내었으며, 직선식의 기울기와 절편으로부터 계산된 매개변수와 결정계수는 Table 1에 정리하였다. Newton 모델로부터 계산된  $k$ 값은 0.0495~10.606, Page 모델로부터 계산된  $k$ 와  $n$ 값은 1.3711~7.0781과 1.5004~2.7391, modified Page 모델로부터 계산된  $k$ 와  $n$ 값은 1.1221~3.6852와 1.5004~2.7391, Henderson and Pabis 모델로부터 계산된  $k$ 와  $n$ 값은 0.0495~10.606과 3.1887~6.8586, Geometric 모델로부터 계산된  $n$ 과  $a$ 값은 1.6293~2.9066과 0.00628~0.1531이었다. 마이크로웨이브 파워가 증가할수록  $k$ 값이 증가하여 더 빠르게 건조됨을 알 수 있었다. 또한 값은 Newton 모델 0.7477~0.8030, Page 모델 0.9002~0.9764, modified Page 모델 0.9002~0.9764, Henderson and Pabis 모델 0.7477~0.9013, Geometric 모델 0.5391~0.8534이었다. 다섯 종류의 건조 모델을 비교한 결과, Page 모델과 modified Page 모델이 가장 높은  $r^2$ 값을 가져 마이크로웨이브를 이용한 건조에 의한 식물세포 *Taxus chinensis*의 수분 제거에 가장 적합함을 알 수 있었다. 또한 마이크로웨이브를 이용한 건조를 통한 감자 절편 (potato slice)의 경우  $k$ 값은 6.3~7.8 (마이크로웨이브 파워: 200~300 W)로, 본 연구의 경우보다 상대적으로 높은 건조 속도를 보였다[34].

Page와 modified Page 모델의 속도상수  $k$ 를 Arrhenius equation에 적용시켰을 때 값이 1에 더 가까운 modified Page 모델을 이용하여 활성화에너지( $E_a$ )를 구하였다. Arrhenius equation을 이용하여  $\ln k$  대  $1/T$ 를 도식화하여 Figure 4에 나타내었다. 직선의 기울기로부터 구한 값은 68.9314 kJ/mol이었다(Table 2). Eyring equation을 이용하여 건조 공정에서의 활성화 파라미터들(activation parameters)을 계산하였다. 실험 데이터를 이용하여  $\ln(k/T)$  대  $1/T$ 로 도식화하여 Figure 5에 나

Table 1. Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis and Geometric Model Constants for the Microwave-assisted Drying of Biomass

Model	Parameter	Power (W)		
		100	200	300
Newton	$k$ ( $h^{-1}$ )	0.0495	3.2629	10.606
	$r^2$	0.7477	0.9013	0.8030
Page	$k$ ( $h^{-1}$ )	1.3711	2.8285	7.0781
	$n$	2.7391	2.0622	1.5004
Modified Page	$k$ ( $h^{-1}$ )	1.1221	1.6549	3.6852
	$n$	2.7391	2.0622	1.5004
Henderson and Pabis	$k$ ( $h^{-1}$ )	0.0495	3.2629	10.606
	$a$	3.1887	2.2984	6.8586
Geometric	$n$	1.6293	1.5983	2.9066
	$r^2$	0.5391	0.7517	0.8534

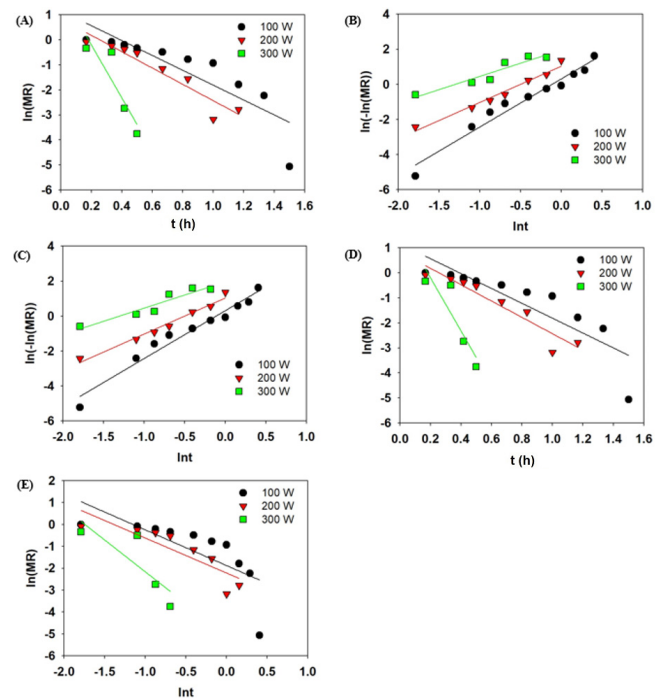


Figure 3. Microwave-assisted drying kinetics for biomass using linear form of model at different microwave powers: Newton model (A), Page model (B), modified Page model (C), Henderson and Pabis model (D), Geometric model (E).

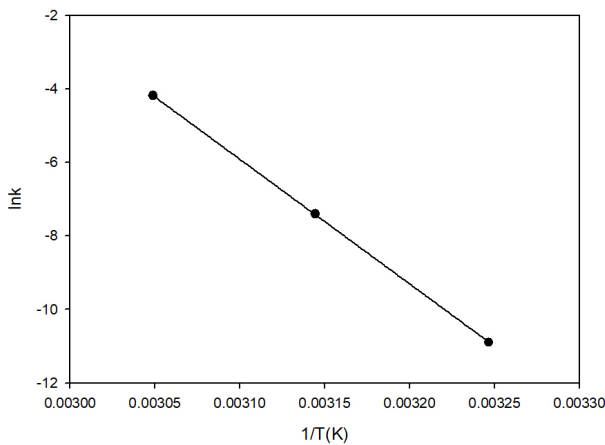
타냈다. 기울기와 y절편을 이용하여 활성화 엔탈피 변화( $\Delta H^*$ ) 및 활성화 엔트로피 변화( $\Delta S^*$ )를 구한 후 활성화 Gibbs 자유에너지 변화( $\Delta G^*$ )를 계산하였다(Table 2).  $\Delta H^*$ 의 값은 +66.00 kJ/mol로 건조 공정이 흡열반응(endothermic)이며 건조 과정에 에너지가 요구됨을 알

**Table 2. Activation Parameters for the Microwave-assisted Drying of Biomass at Different Microwave Powers**

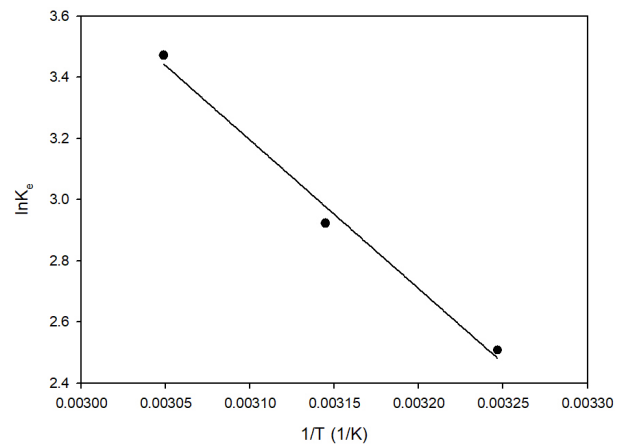
Power (W)	k (h <sup>-1</sup> )	E <sub>a</sub> (kJ/mol)	ΔH <sup>*</sup> (kJ/mol)	ΔS <sup>*</sup> (J/mol · K)	ΔG <sup>*</sup> (kJ/mol)
100	1.1221				74.7996
200	1.6549	68.9314	65.9959	-28.5834	75.0854
300	3.6852				75.3713

**Table 3. Thermodynamic Parameters for the Microwave-assisted Drying of Biomass at Different Microwave Powers**

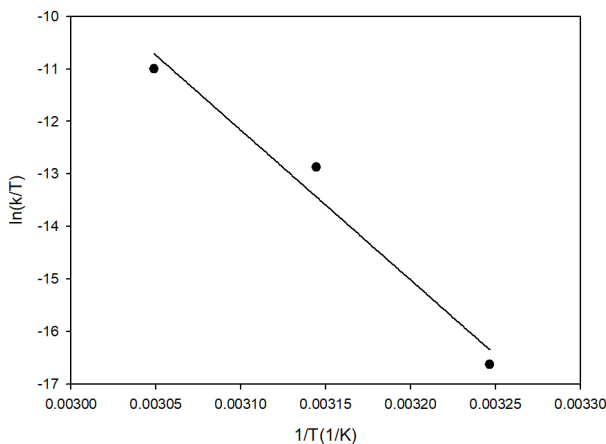
Power (W)	K <sub>e</sub> (-)	ΔH <sup>0</sup> (kJ/mol)	ΔS <sup>0</sup> (J/mol · K)	ΔG <sup>0</sup> (kJ/mol)
100	12.2708			-6.3521
200	18.5823	40.4385	151.9176	-7.8713
300	32.1969			-9.3905



**Figure 4. Plot of lnk versus 1/T (r<sup>2</sup> = 1.000).**



**Figure 6. Plot of lnKe versus 1/T (r<sup>2</sup> = 0.9903).**



**Figure 5. Plot of ln(k/T) versus 1/T (r<sup>2</sup> = 0.9703).**

수 있었다. ΔG<sup>\*</sup>는 마이크로웨이브 파워(100, 200, 300 W)가 증가할수록 +74.80 < +75.09 < +75.37 kJ/mol로 증가하는 경향을 보였다. 따라서 건조 공정이 비자발적으로 반응을 하기 위해 추가적인 에너지를 필요로 하는 것으로 판단된다[4]. ΔS<sup>\*</sup>은 음수 값(-28.5834 J/mol)으로 전이 상태(transition state)의 활성화물(activated complex) 생성 과정이 비가역적임을 알 수 있었다. 또한 열역학적 파라미터들(thermodynamic parameters)을 계산하기 위하여 van't Hoff 식을 이용하여 대 1/T

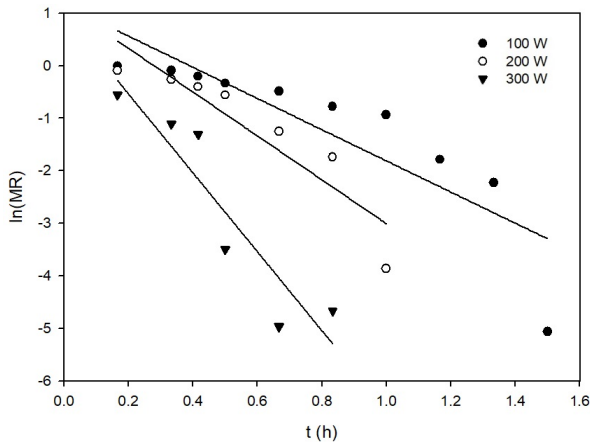
를 도식화하여 Figure 6에 나타냈다. 기울기와 y절편을 이용하여 표준 엔탈피 변화(ΔH<sup>0</sup>) 및 표준 엔트로피 변화(ΔS<sup>0</sup>)를 구한 후 표준 Gibbs 자유에너지 변화(ΔG<sup>0</sup>)를 계산하였다. 계산된 ΔH<sup>0</sup> 및 ΔS<sup>0</sup>, ΔG<sup>0</sup>는 Table 3에 나타내었다. ΔH<sup>0</sup>의 값은 +40.44 kJ/mol로 건조 공정이 흡열반응(endothermic)이며 건조 과정에 에너지가 요구됨을 알 수 있었다. ΔG<sup>0</sup>는 마이크로웨이브 파워(100, 200, 300 W)가 증가할수록 각각 -6.352 > -7.871 > -9.391 kJ/mol로 감소하는 경향을 보였다. 따라서 건조 공정이 자발적으로 이루어지며 추가적인 에너지를 필요로 하지 않는 것으로 판단된다. ΔS<sup>0</sup>은 양수 값(+151.918 J/mol · K)으로, 건조 과정에서 무질서도(randomness)가 증가함을 알 수 있었다.

**3.3. 유효확산계수 및 물질전달계수 결정**

Fick's second law를 적용하여 ln MR 대 t를 도식화하여 Figure 7에 나타내었으며, 기울기로부터 유효확산계수(D<sub>e</sub>)를 구한 후 비오토 수 (Bi) 및 물질전달계수(h<sub>m</sub>)를 계산하였다 [26,27]. Table 4에서 보는 바와 같이 마이크로웨이브 파워 100, 200, 300 W에서 유효확산계수(D<sub>e</sub>)는 각각 3.445 × 10<sup>-9</sup>, 5.167 × 10<sup>-9</sup>, 7.163 × 10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s이었으며 마이크로웨이브 파워가 증가할수록 유효확산계수는 증가하였다. 온도가 증가하여 바이오매스가 빠르게 가열되고 바이오매스 내부의 증기압이 상승하며 이로 인해 바이오매스 내부에 기공이 형성되어 잔류 수분의 확산/증발이 촉진되기 때문으로 판단된다[35]. 유효확산계수 값은 식품 재료의 수분 건조 과정에서의 일반적인 D<sub>e</sub>값의 범위(10<sup>-11</sup>~10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s)

Table 4. Mass Transfer Properties of Moisture Calculated for Three Microwave Powers (100, 200 and 300 W)

Power (W)	$D_e \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_i \times 10^4$	$h_m \times 10^5$ (m/s)	Bi
100	3.4450	6.5212	3.1529	0.3890
200	5.1674	3.1641	6.2027	0.5101
300	716.33	1.2632	1289.5	0.7198

Figure 7. Plot of  $\ln(MR)$  versus  $t$  ( $r^2 = 0.7477$  at 100 W,  $r^2 = 0.8424$  at 200 W, and  $r^2 = 0.8538$  at 300 W).

보다 큰 값을 가졌다[36]. 이러한 차이는 건조 방법, 시료 형태, 조성, 조직 특성, 계산에 사용된 모델 종류 등의 영향에 의해 설명할 수 있다[29]. 마이크로웨이브 장치에서 건조 공기의 속도( $u$ )는 3.8 m/s이었으며, 건조 속도 상수  $k$ 는 modified Page 모델로부터 구하였으며 마이크로웨이브 파워 100 (35 °C), 200 (45 °C), 300 W (55 °C)에서 각각 1.122, 1.655, 3.685 h<sup>-1</sup>이었으며, 마이크로웨이브 파워(건조 온도)가 증가할수록  $k$ 값이 증가하여 더 빠르게 건조됨을 알 수 있었다. 마이크로웨이브 파워 100, 200, 300 W에서  $D_i$ 는 각각  $6.521 \times 10^4$ ,  $3.164 \times 10^4$ ,  $1.263 \times 10^4$ 이었다. Bi를 계산한 결과, 마이크로웨이브 파워 100, 200, 300 W에서 각각 0.3890, 0.5101, 0.7198을 나타내었다. 식품 재료의 수분 건조 과정에서 Bi값(0.1020~0.3528)과 점토 기와(clay roof tile)의 건조 과정에서 Bi값(0.0212~0.00342)보다 높았다[34,37]. 바이오매스 표면과 중심에서의 온도와 수분 함량은 거의 차이가 없으므로 바이오매스 전반의 온도와 수분 분포가 균일하다. 수분 제거 속도는 고체/공기 계면에서의 물질 전달의 강도에만 의존하므로 물질 전달 과정이 외부 요인에 의해 제어된다. 즉, 외부 저항이 내부 저항보다 훨씬 크을 의미한다. 물질전달계수( $h_m$ )는 마이크로웨이브 파워 100, 200, 300 W에서 각각  $3.1529 \times 10^5$ ,  $6.2027 \times 10^5$ ,  $1.2895 \times 10^2$  m/s이었다. 식품 재료의 수분 건조 과정에서의 일반적인  $h_m$  값( $10^{-5}$ ~ $10^9$  m/s)보다 매우 낮았다[30,34]. 또한 물질전달계수는 유효확산계수보다 더 큰 폭으로 증가하여 확산계수보다는 물질전달계수가 마이크로웨이브 파워에 더 크게 영향을 받았다. 본 연구결과는 식물세포 *Taxus chinensis*의 수분 제거를 위한 건조공정에서의 유효확산계수 및 물질전달계수의 결정 방법을 제공함으로써 건조 공정 설계 및 특성 분석에서 유용한 정보로 활용될 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 마이크로웨이브를 이용한 건조에서 마이크로웨이브 파워에 따른 식물세포 *Taxus chinensis*의 수분 제거 효율에 대해 조사하였으며, 건조 공정에 대한 동역학 및 열역학적 해석을 수행하였다. 마이크로웨이브 파워 100 (35 °C), 200 (45 °C), 300 W (55 °C)에서 건조 초기에 수분함량이 급격히 감소하다 이후 완만하게 감소하였으며 건조 1.5 (100 W), 1.0 (200 W), 0.5 (300 W)에 각각 평형에 도달하였다. 마이크로웨이브 파워가 증가할수록 바이오매스의 수분 제거 효율도 증가하였다. 실험값을 건조 모델(Newton model, Page model, modified Page model, Henderson and Pabis model, Geometric model)에 적용한 결과, Page model과 modified Page model이 가장 큰 결정 계수 값(0.9002~0.9625)을 가져 가장 적합하였다. 또한 마이크로웨이브를 이용한 건조에서의 활성화에너지는 68.9314 kJ/mol이었으며, 활성화 엔트로피 변화(-28.58 J/mol)는 음수 값인 반면 활성화 엔탈피 변화(+66.00 kJ/mol)와 활성화 Gibbs 자유에너지 변화(+74.80~+75.37 kJ/mol)는 모두 양수 값을 나타냈다. 표준 Gibbs 자유에너지 변화(-6.352~-9.391 kJ/mol)는 음수 값인 반면 표준 엔탈피 변화와 표준 엔트로피 변화(+151.9176 J/mol·K)는 양수 값을 나타냈다. 이러한 결과로부터 건조 공정이 자발적 흡열반응이며 비가역적으로 수행됨을 알 수 있었다. 유효확산계수는 마이크로웨이브 파워 100, 200, 300 W에서 각각  $3.445 \times 10^{-9}$ ,  $5.167 \times 10^{-9}$ ,  $7.163 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s이었으며, 마이크로웨이브 파워가 증가함에 따라 유효확산계수가 증가하였다. Dincer 수와 비오트 수를 이용하여 물질전달계수와와의 관계식을 기반으로 물질전달계수를 계산한 결과, 마이크로웨이브 파워 100, 200, 300 W에서 각각  $3.1529 \times 10^5$ ,  $6.2027 \times 10^5$ ,  $1.2895 \times 10^2$  m/s를 나타내었다. 마이크로웨이브 파워가 증가함에 따라 물질전달계수도 증가하였다. 이를 통해 마이크로웨이브 파워가 높을수록 건조 효율이 높음을 알 수 있었으며, 비오트 수(0.3890~0.7198)를 고려할 때 *Taxus chinensis*의 건조의 진행은 외부 확산에 의해 조절됨을 알 수 있었다.

## 감 사

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 결과물입니다(과제번호: 2018R1D1A-3A03000683).

## References

1. T. W. Kim and J. H. Kim, Kinetics and thermodynamics of paclitaxel extraction from plant cell culture, *Korean J. Chem. Eng.*, **33**, 3175-3183 (2016).
2. Y. S. Kim and J. H. Kim, Isotherm, kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of paclitaxel onto sylopute, *J. Chem. Thermodyn.*, **130**, 104-113 (2019).

3. S. H. Lee and J. H. Kim, Kinetic and thermodynamic characteristics of microwave-assisted extraction for the recovery of paclitaxel from *Taxus chinensis*, *Process Biochem.*, **76**, 187-193 (2019).
4. H. J. Kang and J. H. Kim, Adsorption kinetics, mechanism isotherm and thermodynamic analysis of paclitaxel from extracts of *Taxus chinensis* cell cultures onto sylopute, *Biotechnol. Bioproc. Eng.*, **24**, 513-521 (2019).
5. G. Y. Park, G. J. Kim, and J. H. Kim, Effect of tar compounds on the purification efficiency of paclitaxel from *Taxus chinensis*, *J. Ind. Eng. Chem.*, **21**, 151-154 (2015).
6. J. H. Kim, C. B. Lim, I. S. Kang, S. S. Hong, and H. S. Lee, The use of a decanter for harvesting biomass from plant cell cultures, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **16**, 337-341 (2000).
7. J. Y. Lee and J. H. Kim, Effect of water content of organic solvent on microwave-assisted extraction efficiency of paclitaxel from plant cell culture, *Korean J. Chem. Eng.*, **28**, 1561-1565 (2011).
8. J. E. Hyun and J. H. Kim, Microwave-assisted extraction of paclitaxel from plant cell cultures, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **23**, 281-284 (2008).
9. J. H. Kim, H. B. Park, U. S. Gi, I. S. Kang, H. K. Choi, and S. S. Hong, Removal of residual solvents in paclitaxel by supercritical carbon dioxide, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **16**, 233-236 (2001).
10. U. S. Gi, B. Min, J. H. Lee, and J. H. Kim, Preparation and characterization of paclitaxel from plant cell culture, *Korean J. Chem. Eng.*, **21**, 816-820 (2004).
11. J. Y. Lee and J. H. Kim, Microwave-assisted drying of paclitaxel for removal of residual solvents, *Process Biochem.*, **48**, 545-550 (2013).
12. Y. Li, Y. Lei, L. B. Zhang, J. H. Peng, and C. L. Li, Microwave drying characteristics and kinetics of ilmenite, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **21**, 202-207 (2011).
13. H. S. Kim, Y. B. Chae, S. B. Jung, and Y. N. Jang, Drying of by-product gypsum by microwave heating, *J. Miner. Soc. Korea*, **21**, 193-200 (2008).
14. A. S. Kassem, A. Z. Shokr, A. R. El-Mahdy, A. M. Aboukarima, and E. Y. Hamed, Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying, *J. Saudi Soc. Agr. Sci.*, **10**, 33-40 (2011).
15. Y. C. Cheung and J. Y. Wu, Kinetic models and process parameters for ultrasound-assisted extraction of water-soluble components and polysaccharides from a medicinal fungus, *Biochem. Eng. J.*, **79**, 214-220 (2013).
16. Y. C. Cheung, K. C. Siu, and J. Y. Wu, Kinetic models for ultrasound-assisted extraction of water-soluble components and polysaccharides from medicinal fungi, *Food Bioprocess Technol.*, **6**, 2659-2665 (2013).
17. D. K. Saxena, S. K. Sharma, and S. S. Sambhi, Kinetics and thermodynamics of gossypol extraction from defatted cottonseed meal by ethanol, *Pol. J. Chem. Technol.*, **14**, 29-34 (2012).
18. H. S. Kim and J. H. Kim, Kinetics and thermodynamics of microwave-assisted drying of paclitaxel for removal of residual methylene chloride, *Process Biochem.*, **56**, 163-170 (2017).
19. W. S. Jang and J. H. Kim, Characteristics and mechanism of microwave-assisted drying of amorphous paclitaxel for removal of residual solvent, *Biotechnol. Bioproc. Eng.*, **24**, 529-535 (2019).
20. G. E. Page, *Factors Influencing the Maximum Rate of Air Drying Shelled Corn in Thin-layers*, MS Dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA (1949).
21. G. M. White, T. C. Loewer, and I. J. Ross, Seed coat damage in thin layer drying of soybeans as affected by drying conditions, *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, **23**, 224-227 (1978).
22. S. M. Henderson and S. Pabis, Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient, *J. Agr. Eng. Res.*, **6**, 169-174 (1961).
23. D. C. Chinweuba, R. N. Nwakuba, and V. C. Okafor, Thin layer drying modelling for some selected nigerian produce: A review, *Am. J. Food. Sci. Nutr. Res.*, **3**, 1-15 (2016).
24. P. Saha and S. Chowdhury, *Insight into Adsorption Thermodynamics*, Mizutani Tadashi (ed.), ISBN: 978-953-307-544-0, InTech, Available from: <https://www.intechopen.com/books/thermodynamics/insight-into-adsorption-thermodynamics> (2011).
25. L. Rakotondramasy-Rabesiaka, J. L. Havet, C. Porte, and H. Fauduet, Estimation of effective diffusion and transfer rate during the protopine extraction process from *Fumaria officinalis* L., *Sep. Purif. Technol.*, **76**, 126-131 (2010).
26. A. J. Sahin, I. Dincer, B. S. Yilbas, and M. M. Hussain, Determination of drying times for regular multi-dimensional objects, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **45**, 1757-1766 (2002).
27. H. Hata, S. Saeki, T. Kimura, Y. Sugahara, and K. Kuroda, Adsorption of taxol into ordered mesoporous silica with various pore diameters, *Chem. Mater.*, **11**, 1110-1119 (1999).
28. H. Darvishi, A. R. Asl, A. Asghari, G. Najafi, and H. A. Gazori, Mathematical modeling, moisture diffusion, energy consumption and efficiency of thin layer drying of potato slices, *J. Food Process Technol.*, **4**, 1-6 (2013).
29. J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, 2<sup>nd</sup> ed., 89-103, Clarendon Press, Oxford, UK (1975).
30. I. Dincer and M. M. Hussain, Development of a new Bi-Di correlation for solids drying, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **45**, 3065-3069 (2002).
31. B. E. Prasad and K. K. Pandey, Microwave drying of bamboo, *Eur. J. Wood Prod.*, **70**, 353-355 (2012).
32. I. A. Ozken, B. Akbudak, and N. Akbudak, Microwave drying characteristics of spinach, *J. Food Eng.*, **78**, 577-583 (2007).
33. H. Lee and C. S. Han, *Drying and Quality Characteristics of Agricultural and Fishery Products Using Far Infrared Rays*, MS Dissertation, Chungbuk National University, Cheongju, Korea (2009).
34. R. P. F. Guiné, M. J. Barroca, and V. Silva, Mathematical modeling, moisture diffusion, energy consumption and efficiency of thin layer drying of potato slices, *Int. J. Food Prop.*, **16**, 251-262 (2013).
35. G. P. Sharma and S. Prasad, Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying, *J. Food Eng.*, **65**, 609-617 (2004).
36. E. Mirzaee, S. Rafiee, A. Keyhani, and Z. Emam-Djomeh, Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots, *Res. Agr. Eng.*, **55**, 114-120 (2009).
37. A. Sander, J. P. Kardum, and D. Skansi, Transport properties in drying solids, *Chem. Biochem. Eng. Q.*, **15**, 131-137 (2001).