

알로에 베라의 DIS (Dewatering & Impregnation Soaking) 공정 중 물질 전달 동역학 및 미세구조에 미치는 온도의 영향

권혜미 · 차지민¹ · 허 원 · 이신영*

¹KJM 알로에 R&D 센터
강원대학교 생물공학과

Influence of Temperature on Mass Transfer Kinetic and Microscopic Structure During DIS Process of *Aloe vera* Leaf

Hye Mi Kwon, Ji Min Cha¹, Won Hur, and Shin Young Lee*

¹KJM Aloe R&D Center

Department of Bioengineering and Technology, Kangwon National University

Abstract

To enhance the performance of the DIS (dewatering & impregnation soaking) process for *Aloe vera* leaf slices, the effect of temperature on DIS was investigated. DIS performance (water loss, solid gain) at various temperatures (25°C-55°C) was analyzed and changes of cell tissue structures were monitored by microscopic examination. DIS was carried out with an immersion time of 0-2 h and a thickness of *Aloe vera* leaf slices of 0.5 cm using poly(ethylene glycol) of 40% (w/v) with a molecular weight of 4,000 Da as a hypertonic solution. Increasing immersion temperature showed higher levels of water loss. In addition, the microscopic structures of samples treated at higher temperatures (55°C) indicated more disruption than those of samples treated at lower temperatures (25 and 35°C). The highest level of glucmannan content was observed at the 35°C of immersion temperature. The DIS sample treated at 35°C for 2 h without any pretreatment was air dried at room temperature, and this dried sample showed both improved cell structure and rehydration property in comparison to that of the sample prepared without DIS. Peleg and Weibull models were found to be the most accurate for describing the rehydration kinetics of aloe samples.

Key words: *aloe vera* L., dewatering & impregnation soaking process, temperature effect, microscopic structure, mass transfer

서 론

DIS (dewatering & impregnation soaking) 공정은 50°C 이하에서 식물조직으로부터 물을 상(phase) 변화없이 탈수시킬 수 있는 최소공정(minimal process)의 하나로, 그동안 식품건조의 전처리수단으로 널리 이용되어 왔다(Forni et al., 1987; Alzamora et al., 1997; Garcia-Martinez et al., 2002; Uddin et al., 2004). 이 DIS 공정은 알로에와 같이 열에 민감한 물질의 농축에도 적합하므로 그동안 Kim et al.(2008), Yu et al.(2010), García-Segovia et al.(2010), Pisalkar et al.(2011)에 의해 알로에로의 적용이 시도된 바 있다. 하지

만 산업적 생산체제에의 적용에는 아직 미흡하며, 특히, 공정최적화나 장치설계를 위한 공정조건의 기초자료는 매우 부족한 실정이다. 더구나, 산업화를 위한 DIS 장치에 요구되는 특성은 기능요구도 분석(functional requirement analysis)을 사용하여 나타낼 수 있는 것으로 보고되었는데, 기능의 목록은 농축용액인 액상과 고체상(식품)이 접촉하는 접촉기(contactor)에 대해 6 개의 기능적 특성으로 구성된다(Marouze et al., 2001).

이 중, 장치설계와 관련하여 공정제어 변수의 조절 여부가 가장 중요하며, 이에선 식품과 용액온도, 용액농도, 식품과 용액의 정압, 교반 등 4 변수(C41-C44)가 중요하다. 따라서 DIS 장치의 산업적 응용을 위해서는 이들 4 변수에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

이와 관련하여 저자 등은 최근 고품질의 알로에 제품을 얻기 위한 신규 공정개발 연구의 일환으로 DIS 공정을 도입하고, Taguchi 법 및 만족도함수를 이용한 다중반응 최적화의 결과를 보고한 바 있다. 즉, 5 인자(침지용액온도,

*Corresponding author: Shin-Young Lee, Department of Bioengineering and Technology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

Tel: +82-33-250-6273; Fax: +82-33-243-6350

E-mail: sylee@kangwon.ac.kr

Received February 7, 2013; revised February 26, 2013; accepted February 26, 2013

침지시간, PEG(polyethylene glycol) 농도, PEG 분자량, 시료 두께), 4 수준(1, 2, 3, 4)의 Orthogonal matrix $L_{16}(4^5)$ 법에 따라 DIS를 실시하고, DIS 성능지표 값으로서의 수분소실(WL: water loss) 및 고형분획득(SG: solid gain), 품질지표값으로서의 glucomannan 및 anthraquinone 함량을 측정하고, 분석하였다. 그 결과, Derringer의 만족도 함수를 도입하여 알로에 DIS의 성능 및 품질지표값을 최대화 할 수 있는 종합만족도 함수값 0.7842를 갖는 최적공정조건을 얻을 수 있었으며, 얻어진 최적조건은 온도 55°C, 침지 2 시간, PEG 농도 40%, PEG 분자량 4,000 Da 및 시료두께 0.5 cm이었다.

하지만 확정실험결과, 직교배열실험의 예측값과 최적조건하의 실험값을 비교할 때 DIS 성능지표값인 WL은 크게 향상되나 품질지표값인 glucomannan 함량은 저하되는 결과를 보였다. 이는 얻어진 최적조건인 고온(55°C)수준에서 탈수능이 향상되지만 동시에 세포의 파괴도 이루어져 glucomannan이 삼투용액으로 유출되기 때문이라 생각되었다. 실제로 삼투탈수 중 세포의 수분소실은 부피감소를 동반하며, 세포막 변이 및 변형된 세포벽으로부터의 분리를 야기하므로, 세포조직의 형태변화와 밀접한 관련을 갖는 것으로 잘 알려져 있다(Alzamora et al., 1997). Le Maguer et al.(2003)은 식물조직의 삼투탈수에서 식물조직의 복잡한 구조와 성질이 수분소실과 고형분획득과 같은 물질전달현상에 영향을 주므로 공정최적화 및 장치설계에서 중요하다고 하였다. 또, Tortoe & Orchard(2006)도 삼투처리는 서로 다른 식물재료의 구조적 성질(cell wall, middle lamella)에 대한 현저한 영향을 준다고 하였으며, 특히, 세포간 공간이 고온에서 더 커진다고 하였다. 따라서 glucomannan의 함량을 향상시키기 위해서는 알로에 DIS시 탈수의 가장 중요한 영향인자이며(약 50% 비중), 또 세포의 구조적 성질과 밀접한 관련을 갖는 온도의 영향을 미세구조의 변화 측면에서 보다 면밀하게 검토할 필요성이 있다.

이상의 관점에서부터 본 연구에서는 최적화 연구로 얻어진 조건 중 온도를 제외한 나머지 조건을 고정시켜 서로 다른 온도조건(25-55°C)에서 DIS 실험을 수행하고, 동역학적으로 해석하였다. 아울러, 온도에 따른 유세포조직의 형태변화를 현미경 관찰로 모니터링하면서 조사, 비교하였으며, 이로부터 알로에 DIS 공정의 최적화 및 장치설계를 위한 기초자료를 마련하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

본 연구에 사용한 알로에는 (주)KJM 알로에의 제주농장에서부터 제공받은 알로에 베라(*Aloe vera* Linne)로, 4°C의 저온실에 보존하면서 사용하였다. 완전히 성숙된 신선한 알로에를 사용하였으며, 부착 토양 및 기타 부스러기를 제

거하기 위해 물로 철저히 세척하였고, 알로인을 제거 후 껍질을 포함한 두께 0.5 cm의 슬라이스로 절단하여 삼투탈수 시료로 하였다. 이 때, 삼투탈수 전 시료의 평균 수분함량은 습량기준으로 약 99%이었다. 한편, 삼투제는 분자량 4000 Da의 PEG(Daejung Co. Ltd, Shiheung, Korea)를 사용하였다.

삼투탈수 실험

삼투탈수는 밀폐된 유리제 용기를 온도조절 항온수조 내에 넣어 수행하였다. 칭량한 알로에 슬라이스를 40%(w/w)의 PEG 용액을 포함한 용기에 넣었으며, 이 때 알로에 슬라이스: PEG의 비는 예비실험에 의해 삼투처리 중 현저한 희석을 피하기 위해 1:5(by weight)로 하였다. 용기를 일정 온도(25-55°C)의 순환수조에 넣어 삼투처리하면서 알로에 슬라이스를 전체적으로 삼투용액에 침적시켰다. 각 시료 채취시간(0-2 h)에 알로에 슬라이스를 취하였고, 배수 후 가법계 흡수종이로 표면수를 제거한 후 칭량하였다. 이 때, 시료의 평균 수분함량과 건조 고형분량은 70°C의 오븐에서 24 시간 건조하여 결정하였다. 각 실험에서 신선한 시료가 사용되었으며, 모든 실험은 3 회 수행되었고, 평균값을 계산에 사용하였다.

삼투탈수의 계산

수분 소실(WL)은 초기 시료 량에 기초한 삼투건조 후 신선한 시료로 부터의 물의 소실로서 나타내었고, 고형분획득(SG)은 초기 시료 량에 기초한 고형분의 순 흡수로 구하였다. 주어진 시간 구간에서 시료를 각 용액으로부터 취하였고, 다음 식을 사용하여 무게감소(WR: weight reduction), 수분소실(WL) 및 고형분획득(SG)을 분석하였다(Lazarides et al., 1995; Sereno et al., 2001).

$$WR = (W - W_0) / W_0 \quad (1)$$

$$SG = (S - S_0) / W_0 \quad (2)$$

$$WL = WR + SG \quad (3)$$

여기서 W와 W_0 는 각각 임의의 시간 및 초기의 시료 질량이고, S와 S_0 는 각각 시료에서 각 시간 및 초기의 고형분 질량이다. 각 시료의 수분함량은 70°C의 오븐에서 24 시간 동안 측정되었다. 한편, 삼투탈수 동역학의 모델은 확산 및 삼투기작과 관련된 물질전달속도를 반영하는 Fito & Chiralt(1997)에 의해 제안된 모델에 따라 다음 식으로부터 물질전달(수분: k_w 및 고형분: k_s)의 동역학 상수를 결정하였다.

$$X_w = k_w \times t^{1/2} + k_{w_0} \quad (4)$$

$$X_s = k_s \times t^{1/2} + k_{s0} \tag{5}$$

재수화 동역학의 모델링

재수화 동역학의 모델링은 재수화에 제안된 모델 중, 수학적 단순성과 유용성 측면에서 널리 사용되는 경험적인 Peleg 모델(Peleg, 1988), Weibull 모델(Marabi et al., 2003), 1 차식 모델(Abu-Ghannam & McKenna, 1997) 및 지수함수식 모델(Krokida & Marinos-Kouris, 2003)을 사용하였다.

$$X_w = X_o + t/(A+B \cdot t) \tag{6} \text{ Peleg model}$$

$$X_w = X_e + (X_o - X_e) \exp(-(t/a)^\beta) \tag{7} \text{ Weibull model}$$

$$X_w = X_e + (X_o - X_e) \exp(-k \cdot t) \tag{8} \text{ First order model}$$

$$X_w = X_e[1 - \exp(-H \cdot t)] \tag{9} \text{ Exponential model}$$

여기서 Peleg 모델의 A는 시간의 차원을 갖는 속도상수이고, B는 무차원의 매개변수이다. 반면, Weibull 모델의 α 는 시간의 차원을 갖는 scale 매개변수이고, β 는 형태매개변수이다. 또, 1 차속도식 모델의 k는 재수화속도상수이며 (min^{-1}), 지수식 모델의 H는 동역학 속도상수(min^{-1})이다.

통계분석

실험자료의 통계분석은 Excell(MS Excell 2007, Microsoft Co.)에 의하였다. 재수화 동역학을 예측하기 위한 실험자료의 모델 적합성은 선형회귀계수(R^2), 오차제곱의 합(SSE), 카이제곱(χ^2) 및 상대평균 % 편차(MRD; mean relative percent deviation)과 같은 통계파라미터에 의해 평가하였다. SSE, χ^2 및 MRD는 다음과 같이 계산하였다.

$$SSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ei} - X_{ci})^2 \tag{10}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ei} - X_{ci})^2}{n - z} \tag{11}$$

$$MRD = \frac{100}{n} \sum \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \tag{12}$$

여기서 n은 실험자료수이다.

결과 및 고찰

알로에 DIS 공정의 성능지표 및 미세구조에 미치는 온도의 영향

DIS 공정은 온도에 의해 현저한 영향을 받으므로 온도는 수분소실(WL)과 고형분증가(SG)의 동역학에 영향을 주는 가장 중요한 매개변수이다. 특히, Kwon et al.(2013)의 알로-

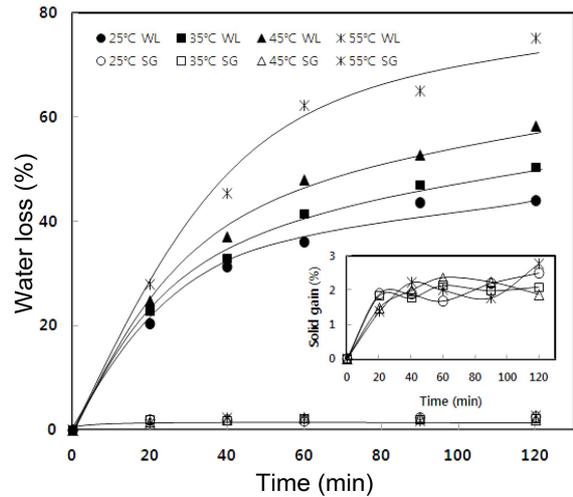


Fig. 1. Time course of water loss and solid gain during DIS of *Aloe vera* at different immersion temperatures of 25, 35, 45 and 55°C.

에 DIS 연구에서는 온도, 삼투제 농도 및 분자량, 시료두께, 침지시간 등 5 개 인자 중, 온도가 약 50%의 기여도를 갖는 가장 중요한 인자이었다.

따라서 삼투용액의 서로 다른 온도(25, 35, 45 및 55°C)에서 삼투탈수하면서 수분소실(WL) 및 고형분획득(SG)의 경시변화를 조사하였고, 그 결과는 Fig. 1과 같다.

수분의 소실은 각 온도에서 시간의 증가에 따라 초기에 급격히 증가하다가 이후 서서히 증가하는 2 단계 양상을 보였다. 이러한 양상은 온도가 증가할수록 증가하는 경향이었고, 온도증가에 따라 급격히 수분소실이 증가하는데 필요한 시간도 낮은 온도측(25-35°C)에서는 40 분 정도였으나 고온측(45-55°C)에서는 60 분으로 증가하였다.

이러한 온도증가에 따른 초기의 빠른 수분소실 증가는 세포막의 반투막 투과성 변화에 의해 더 많은 물이 밖으로 확산되는 것에 기인한다. 또, 고온에서의 더 빠른 수분소실은 세포막의 팽윤 및 가소화를 통해 물의 확산이 더 빨라지기 때문이며, 동시에 삼투제의 점성이 낮아져 시료표면 위에서 더 양호한 물질전달 특성을 나타내기 때문이다 (Martinez-Valencia et al., 2011). 아울러, 초기의 빠른 수분소실 후 느리게 소실하는 것은 시간에 따라 시료와 삼투용액사이의 수분농도구배가 감소하기 때문이라 생각되었다.

시간경과 2 시간 후 WL은 삼투용액의 온도 25°C에서는 44.1%이었으나 온도증가에 따라 증가하여 35°C에서 50.4%, 45°C에서 58.4%이었으며, 55°C에서는 75.1%로 25°C에 비해 거의 1.8 배나 증가하여 매우 높은 온도의존성을 보였다.

또, 고형분 획득의 증가도 수분소실과 마찬가지로 시간 경과에 따라 초기 20 분에 급격히 증가한 이후 일정값에 도달하는 경향이였다. 하지만 Fig. 1의 inset에서 보는 바와 같이, 온도에 따른 일정한 경향은 보이지 않았고, 1.8-

2.78% 범위에서 기록을 보였다. 평균값은 $2.31 \pm 0.41\%$ 로 다른 식품시료와 비교하면 매우 낮은 고형분획득값 범위이었다. 이러한 낮은 고형분획득은 전보(Kwon et al., 2013)에서 언급한 바와 같이, 본 실험에 사용한 PEG 삼투제의 분자량(4000 Da)이 시료의 세포 크기보다도 매우 크기 때문에 용질침투현상이 방지되었기 때문이다. 이와 같이, 온도 증가로 수분소실은 현저하게 증가한 반면, 고형분(용질) 증가는 온도의존성이 거의 없었는데, 이러한 결과는 Beristain et al.(1990)에 의해서도 보고된 바 있다. 특히, 고온의 경우에도 용질의 증가가 없었던 것은 용질이 세포막을 통해 물처럼 쉽게 확산할 수 없기 때문이라 할 수 있는데, Beristain et al.(1990)은 고온에서 삼투평형에 도달은 용질증가보다는 세포로부터 물의 흐름에 의해 우선적으로 이루어지므로 이러한 형태의 평형에서 제품에 의한 용질증가는 더 낮은 결과를 초래한다고 하였다.

한편, 어떤 주어진 시간에 수분소실(ΔM_w), 고형분획득

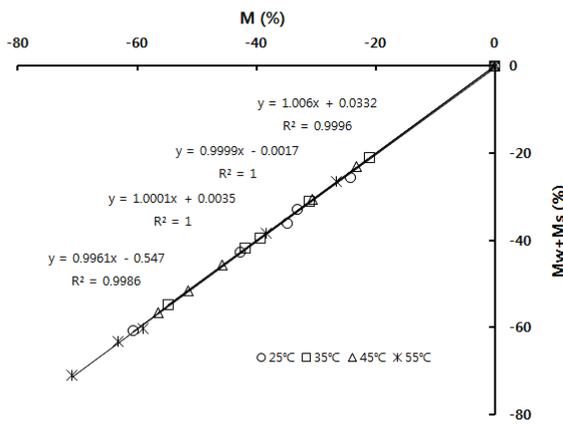


Fig. 2. Relationship between the values of Mw+Ms vs. M in DIS aloec.

(ΔM_s) 및 중량소실(ΔM) 사이에는 $\Delta M = \Delta M_w + \Delta M_s$ 의 관계식이 성립하며(Fito & Chiralt, 1997), 이 질량수지 관계식은 서로 다른 실험결과들의 일치를 증명하기 위해 널리 사용된다.

따라서 서로 다른 온도하의 수분소실(ΔM_w)+고형분획득(ΔM_s)의 모든 값과 중량소실(ΔM)의 관계를 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 도시하였다.

서로 다른 온도실험간의 ($\Delta M_w + \Delta M_s$) vs. M의 관계는 직선관계를 보였고, $R^2 \geq 0.9925$ 로 서로 다른 실험들이 잘 일치함을 보였다.

한편, 수분소실 및 고형분획득의 물질이동 속도를 구하기 위해 각 시간에서의 값을 초기값에 대한 비로 무차원화 하여 이를 시간의 제곱근으로 도시하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다.

수분소실의 경우, 직선관계가 잘 성립하였으며, 온도증가로 기울기값도 증가하였다. 이 기울기값은 확산에 따른 수분소실의 물질전달계수(k_w)로, 온도가 25°C에서 55°C로 증가함에 따라 0.044에서 0.073 $h^{-1/2}$ 로 약 1.7 배 증가하였다. 반면, 용질의 경우(k_s)는 온도에 따른 뚜렷한 경향이 없었고, 또 온도별 편차가 심하지 않아 평균값으로 나타내었다. 하지만 기울기가 서로 다른(k_{s1} , k_{s2}) 두 개의 직선관계를 보여서 용질증가가 수분소실의 물질전달과는 다른 기작에 의한 함을 보여주었다. 대체로 용질이동은 초기에 매우 빠르게 이루어지나($k_{s1} = 0.1 h^{-1/2}$) 이후에는 거의 용질 증가가 매우 미미($k_{s2} = 0.019 h^{-1/2}$)하였다.

또, 수분소실 및 고형분획득 속도상수의 온도의존성을 알아보기 위해 Arrhenius 식에 따라 도시한 결과는 Fig. 4와 같다.

수분소실 속도상수의 경우 단일의 직선관계를 보이면서 Arrhenius 식에 따른 온도의존성을 보였으며, 기울기값으로부터 구한 활성화 에너지는 13.35 kJ/gmol로 비교적 낮은

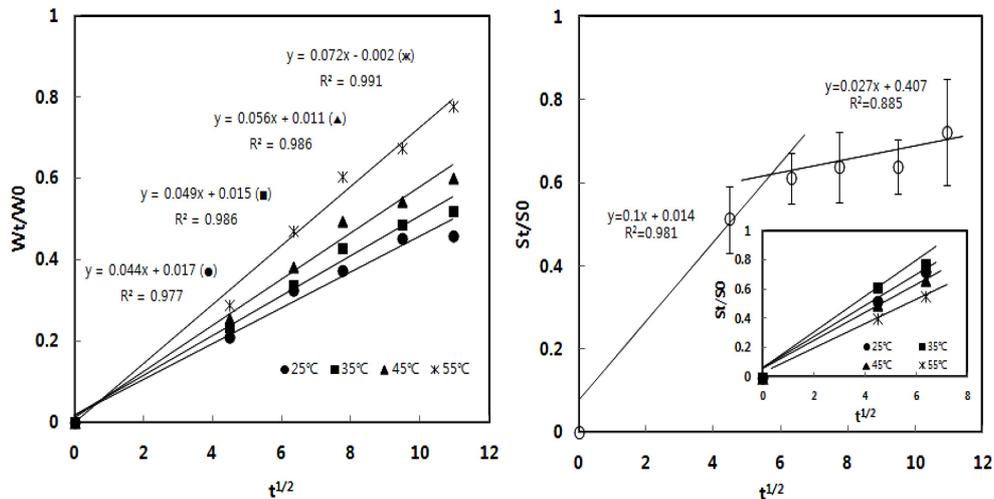


Fig. 3. Relationship between normalized moisture and solid contents from DIS aloec of contacting time during DIS at different temperatures.

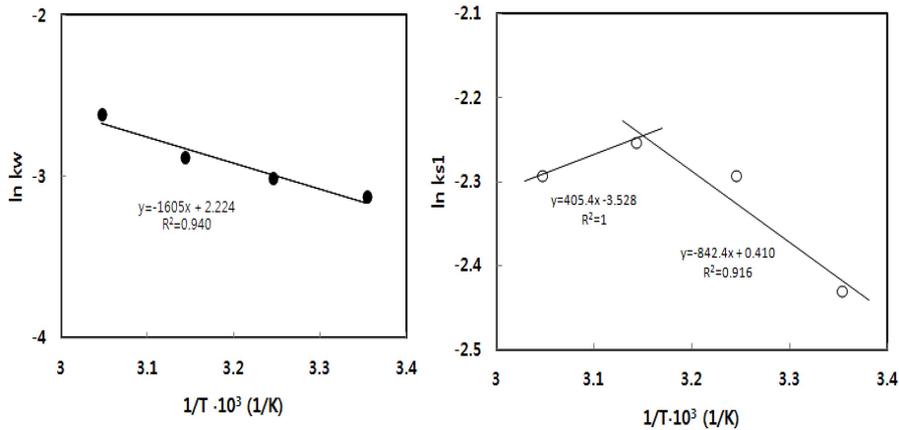


Fig. 4. Arrhenius plot of $\ln k_w$ and $\ln k_s$ vs. $1/T$.

온도의존성을 나타내었다. 그러나 용질증가속도는 45°C를 교차점으로 이보다 낮은 온도측에서는 온도증가로 증가하나 고온측에서는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이는 아마도 고온에서는 세포의 파괴로 삼투용질의 시료로의 주입보다는 시료내부의 가용성 용질들이 세포 밖으로 유리되어 순 이동 용질량이 감소하였기 때문이라 생각된다. 이를 명확히 확인하기 위해 각 온도별 2 시간 삼투처리하고 유조직세포를 광학현미경으로 관찰하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다.

그림에서 보는 바와 같이, 55°C 처리구에서는 세포벽이 파괴되었음을 보였으며, 이에 따라 내용물이 세포 밖으로 유리됨을 확인할 수 있었다.

따라서 알로에 DIS의 처리 온도는 55°C보다 낮은 35-45°C의 온도가 더 적합한 것으로 판단되었는데, Talens (2002)도 만약 식품구조의 최소손상이 요구되면 더 높은 온

도에서는 세포막의 변성, 막투과성의 저하, 식품구조, 조직 및 향의 변화 등이 일어나므로 40-50°C보다 낮은 온도에서 처리하는 것이 좋다고 하였다. 또, Deng et al.(2009)도 사과와 삼투탈수에서 50°C의 삼투온도는 삼투탈수된 사과의 가장 큰 경도소실량을 이끌고 가장 심각한 세포수식 및 구조적 붕괴를 이끈다고 하였다. Saurel et al.(1994)도 침지 용액의 온도가 너무 높을 경우는 세포막의 구조적 변화를 야기하여 선택적 투과능력을 잃어버린다고 하였는데, 이 때문에 Lazarides & Mavroudis(1996)는 고온의 적용은 높은 용질함량을 갖는 제품이 바람직할 경우만 적합하다고 하였다.

알로에 DIS 공정의 품질지표에 미치는 온도의 영향

적정온도를 예측하기 위해 각 처리온도별로 알로에 품질 지표값인 glucomannan의 함량을 540 nm에서의 OD 값으로 조사하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 35°C 시료에서 최대의 OD 값 (0.476)을 보였으며, 이 보다 높은 온도에서는 OD 값이 감

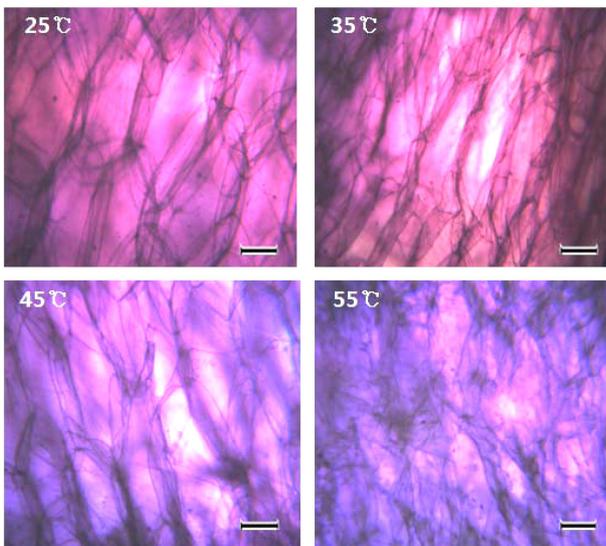


Fig. 5. Microscopic view of DIS aloe at different temperature (4×). Bars = 500 μ m

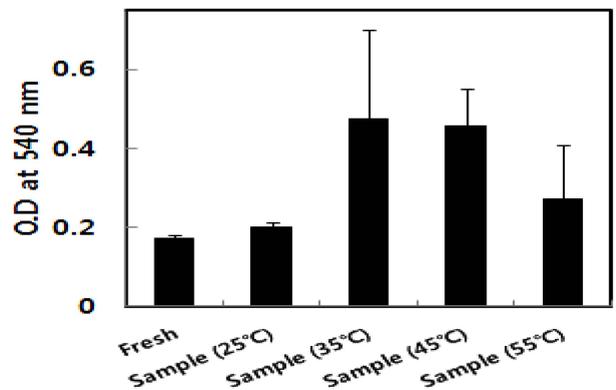


Fig. 6. Effect of temperature on glucomannan content (OD 540 nm) of *Aloe vera* gel during DIS process.

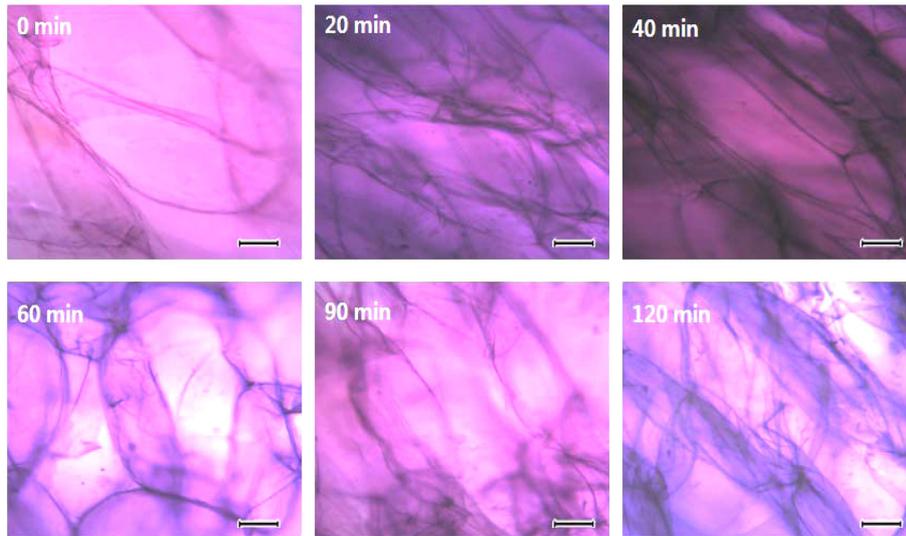


Fig. 7. Time changes for microscopic views of cell structure of *Aloe vera* slice during DIS at 35°C (10×). Bars : 100 μm

소하고 55°C 시료에서는 0.273까지 낮아져서 glucomannan 함량이 감소함을 보였다. 그러므로 알로에 DIS의 최적온도는 55°C에서 탈수량이 극대값을 갖더라도 세포막을 보호할 수 있고, 또 이에 따라 세포내 가용성 물질의 유리를 방지할 수 있는 35°C 조건이 최적인 것으로 생각되었다.

이를 확인하기 위해 35°C의 삼투처리 중 유세포 조직의 경시변화를 조사하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다.

2 시간까지 유세포 조직의 파괴없이 그대로 유지함을 볼 수 있으며, 이 때 얻어진 WL값은 약 50%, SG 값은 약 2.1%이었고, glucomannan의 함량은 0.45(OD at 540 nm)이었다. 이 결과는 55°C의 경우보다 WL 값은 2/3 수준이었으나 glucomannan 함량은 1.74 배나 향상되어 35°C 조건이 알로에 DIS의 품질유지에 가장 적합함을 알 수 있었다.

따라서 Kwon et al.(2013)의 공정최적화 연구와 연계하여

온도 35°C, 침지 2 시간, PEG 농도 40%, PEG 분자량 4000 Da 및 시료두께 0.5 cm를 알로에 DIS의 수정된 최적화 조건으로 하였다.

DIS 알로에의 재수화 특성

재수화는 식품성질의 회복을 목표로 한 복잡한 과정으로, 그 특성은 최종적인 건조나 건조전처리에 의한 물질손상의 지표이므로 실온 건조한 시료를 물에 침지하고 25 및 60°C에서 재수화 특성을 조사하였고, 그 결과는 Fig. 8과 같다.

재수화 온도에 상관없이 DIS 처리하지 않은 건조 알로에 시료(non-DIS)는 시간 경과에 따라 초기 10 분 동안에 매우 가파른 물의 흡수를 보였으며, 이후 30 분까지 서서히 증가하다가 30 분 후 거의 평형값에 도달하여 60 분 후에는 거의 일정한 값에 머물렀다. 또, 재수화 온도의 증가로 대

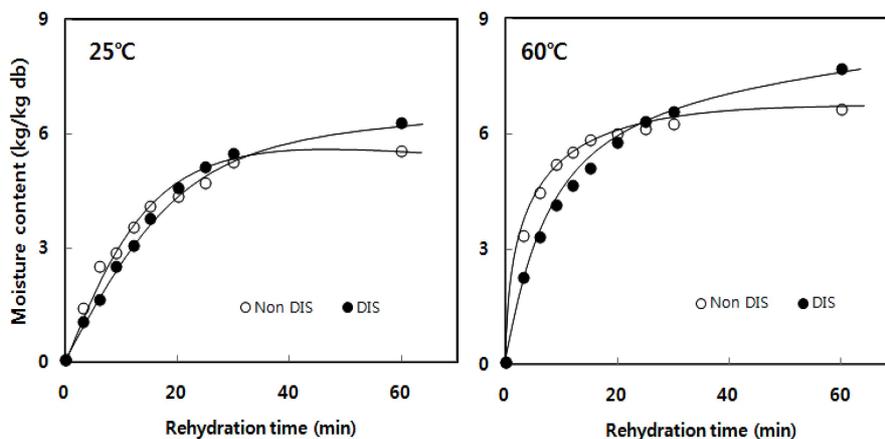


Fig. 8. Time changes for rehydration capacity of non-DIS and DIS aloe at 25°C and 60°C.

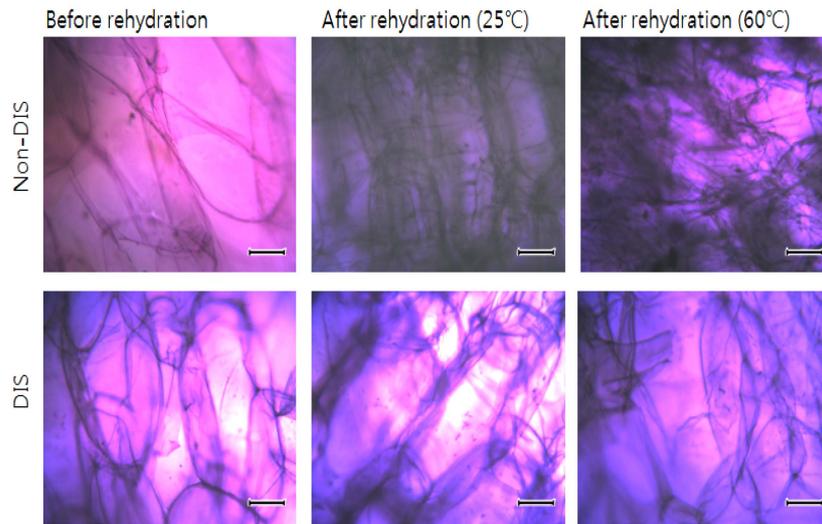


Fig. 9. Microscopic view of non-DIS and DIS aloes before and after rehydration at 25°C and 60°C ($\times 10$). Bar : 100 μm

응하는 시간에서 물의 흡수도 증가하였으며, 60 분 후 수분 함량은 25 및 60°C 시료에서 각각 5.54 및 6.64 kg-water/kg-solid이었다. 이러한 초기의 빠른 물흡수는 시료표면 모세관의 채워짐에 기인하며, 이후 수분흡수가 진행되면서 세포공간과 나머지 모세관이 물로 채워져 수분흡수가 늦어지며, 결국 흡수되는 물이 최소가 되면서 평형에 도달한 것으로 해석된다(Abu-Ghannam & McKenna, 1997).

반면, DIS 시료의 경우는 초기 30 분까지는 non-DIS 시료보다 물의 흡수가 낮았다. 그러나 이후 평형값에 도달하지 않고 60 분까지도 서서히 증가하여 60 분 후에는 non-DIS 시료보다 13-16% 더 높은 물흡수능을 보임으로써 재수화능의 시료차이를 보였다.

일반적으로 건조 및 탈수과정은 비가역적이며, 구조 손상 및 세포파괴로 재수화능을 소실하여 신선한 시료상태의 평형수분함량에 도달하지 못한다. 따라서 DIS 시료의 계속적인 수분흡수로 평형수분함량이 높아진 것은 상대적으로 구조손상이나 세포파괴의 정도가 더 낮은 것과 관련되는 것으로 생각된다(Krokida & Marinos-Kouris, 2003).

한편, 60°C 시료의 최종 평형상태에서의 재수화비 ($PR = (X+1)/(X_i+1)$)를 계산한 결과, 그 값은 non-DIS 시료에서 약 7.3, DIS 시료에서 약 8.3로 DIS가 더 높은 값을 나타내었다. 이는 60°C에서 14 종 건조 과일 및 채소류의 $(X+1)/(X_i+1)$ 로 나타낸 재수화비가 1-4 라고 한 Krokida & Marinos-Kouris(2003)의 보고값과 비교하면 매우 높은 값 범위이었다. 본 시료의 이러한 재수화비는 재수화비가 높은 토마토, 당근 및 후추 등보다도 약 2 배나 높은 값이다. 특히, 이들 시료의 경우는 60°C에서 100 분 이상의 재수화로 얻은 값이므로 60°C에서 60 분의 재수화로 얻은 본 시료의 재수화비는 본 시료가 매우 높은 재수화 특성을 나타냄을 지적한다.

Table 1. Statistical tests and values of the parameters of all models for rehydration kinetics of non-DIS and DIS aloes at 25°C and 60°C.

Model	Parameters	Temperature (°C)			
		25°C		60°C	
		Non-DIS	DIS	Non-DIS	DIS
First-order	k	0.0880	0.0530	0.0880	0.0620
	R ²	0.9540	0.9970	0.9170	0.9890
	SSE	0.0231	0.0813	1.1237	0.3081
	χ^2	0.0256	0.0904	1.2486	0.3423
	MRD(%)	3.8109	5.8068	17.3436	12.1948
Peleg	A	1.7200	2.7820	0.4750	1.0020
	B	0.1430	0.0990	0.1430	0.1250
	R ²	0.9930	0.9890	0.9980	0.9920
	SSE	0.0136	0.0350	0.0029	0.0189
	χ^2	0.0152	0.0388	0.0032	0.0210
	MRD(%)	2.4621	3.7850	0.7877	3.0516
Weibull	$\alpha(\text{min})$	11.4455	16.2627	4.9239	12.8148
	β	0.9380	1.1080	0.6110	0.7520
	R ²	0.9780	0.9910	0.9880	0.9980
	SSE	0.0167	0.0094	0.0060	0.0028
	MRD(%)	2.9042	3.4642	1.3173	1.2827
Exponential	H	0.0880	0.0690	0.0880	0.0620
	R ²	0.9540	0.9930	0.9170	0.9890
	SSE	0.0242	0.0738	1.1652	0.3350
	MRD(%)	14.0836	18.4330	27.6599	22.7148

* A, B, $\alpha(\text{min})$, β , k and H are constants of each model.

R²: linear regression coefficient

SSE: sum of square error

χ^2 : Chi-square

MRD: Mean relative percent deviation

앞서 언급한 바와 같이, 이러한 재수화 정도는 세포 및 구조파괴정도와 밀접한 관련을 가지므로 시료간 재수화능의 차이가 이들과 관련되는 지를 보기위해 각 유세포조직을 광학현미경으로 관찰하였으며, 그 결과는 Fig. 9와 같다.

여기서 완전히 건조된 시료의 현미경 조사는 이들의 깨지기 쉬운 구조와 취약성(fragility) 때문에 어려우므로 재수화 후 시도되었는데, Fig. 9에서 보는 바와 같이, 재수화된 non-DIS 알로에 시료에서는 유세포 조직의 파괴가 관찰되었다. 그러나 DIS 처리 시료는 유조직 세포를 잘 유지하였으며, 따라서 재수화비가 높았던 결과는 유세포 조직의 파괴정도와 밀접한 관련을 가짐이 확인되었다.

한편, 알로에 시료 재수화과정의 동역학 모델링을 위해 경험식에 근거한 여러 동역학 모델에 대한 적합성을 시험하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

알로에 시료의 재수화에 대해 Peleg 및 Weibull의 두 모델은 다른 모델에 비해 R²값이 크고(≈ 1), SSE 및 χ^2 값이 낮았으며, MRD도 적합성 기준인 10% 보다 매우 낮아서 (0.7877-3.7850%) 이들 모델의 적합성이 높았다. 그러나 non-DIS 시료는 Peleg 모델의 적합성이 더 높은 반면, DIS 시료는 Weibull 모델에 더 적합하여 시료간의 차이를 보였으며, 이는 두 시료간의 재수화 동역학 특성이 서로 차이가 있음을 지적한다.

먼저, Peleg 모델에 의해 살펴보면, 이 식의 상수 A값은 두 시료에서 모두 온도증가로 감소하였으며, non-DIS 시료는 DIS 시료의 값보다 더 낮았는데, 이는 재수화 초기과정에서 물흡수능이 더 높음을 의미한다. 또, B값은 온도증가로 증가경향을 보였고, non-DIS 시료는 DIS 시료의 값보다 더 높았는데, 이는 DIS의 더 높은 물의 흡수 및 평형수분값을 의미한다(Vega-Galvez et al., 2009; Noshad et al., 2011). 따라서 DIS 시료는 초기 물의 흡수속도는 낮았지만 더 높은 물을 흡수하여 최종 평형수분값이 높음을 확인할 수 있었고, 이는 Fig. 8의 결과와도 잘 일치하였다.

한편, Weibull 모델에 의해 고찰해 보면, 역시 재수화 초기의 물흡수속도 지표인 이 식의 동역학 특성값 β 는 두 시료에서 0.6110-1.1080 범위이었는데, 온도증가로 감소하였고, non-DIS 시료는 DIS 시료의 값보다 더 낮았다. β 값이 낮을 수록 초기 물흡수능이 빠름을 의미하므로 온도증가로 물흡수능이 빠르고, 또, 초기에 non-DIS의 물흡수속도가 빠름을 의미하여 Peleg 모델의 동역학적 해석과 마찬가지로의 결과를 보였다. 또, 상수 α 값은 온도증가로 감소하였고, DIS 시료 값은 non-DIS 시료 값보다 높았는데, 이는 α 값이 공정의 63%를 수행하는데 필요한 시간이므로 non-DIS가 빨리 재수화됨을 의미한다(Noshad et al. 2011). 그러나 이 모델에서는 초기 물흡수속도에 대한 정보는 주지만 최종 평형수분함량의 차이에 대한 정보를 제공하지 않으므로 본 시료의 재수화 동역학은 Peleg 모델에 의해 더 잘 설명할 수 있는 것으로 판단하였다.

요 약

알로에의 최소공정개발 연구의 일환으로 DIS(dewatering & impregnation soaking) 공정에 미치는 온도의 효과를 조사하였다. 삼투탈수는 분자량 4000의 PEG을 삼투제로 하여 이의 40%(w/v) 용액에 두께 0.5 cm의 알로에 잎 슬라이스를 넣고 간헐적으로 교반하면서 2 시간 동안 수행하였다. 서로 다른 침지온도(25-55°C)가 DIS의 성능(수분소실 및 고형분 획득)에 미치는 영향을 현미경관찰에 의한 세포조직 구조의 경시변화를 모니터링하면서 조사, 비교되었고, 동역학적으로 분석하였다. 고온(55°C) 처리에서는 저온(25 and 35°C)에서보다 더 높은 수분소실을 보였으나 세포조직의 파괴를 동반하였다. 또, 품질지표값으로서의 glucomannan 함량은 세포조직구조를 잘 유지하였던 침지온도 35°C에서 얻어졌다. 얻어진 시료의 실온건조제품을 재수화시켜 조사하고 동역학적으로 해석한 결과, 재수화 동역학은 Peleg 및 Weibull 모델로 잘 설명할 수 있었다. DIS 제품은 DIS 처리하지 않은 제품에 비해 세포구조 및 재수화성질의 향상을 주어 적정온도하에서 DIS 처리함으로써 최소공정의 알로에 제품을 얻을 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 광역연계협력사업비(과제번호: R000451) 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- Abu-Ghannam N, McKenna N. 1997. Hydration kinetics of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). J. Food Sci. 62: 520-523.
- Alzamora SM, Gerschenson LN, Vidales S, Nieto A. 1997. Structural changes in the minimal processing of fruits: Some effects of blanching and sugar impregnation. In: Food Engineering 2000. Fito P, Ortega-Rodriguez E, Barbosa-Canovas GV (ed). Chapman & Hall, New York, USA, pp. 117-140.
- Beristain CI, Azuara E, Cortes R, Garcia HS. 1990. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. Int. J. Food Sci. Technol. 25: 576-582.
- Deng Y, Zhang QG, Yang HS. 2009. Effects of temperature on firmness and microstructure of pulsed vacuum osmodehydrated apples. Food Sci. 30: 75-78.
- Fito P, Chiralt A. 1997. An approach to the modelling of solid-liquid operations: application to osmotic dehydration. In: Food Engineering 2000. Fito P, Ortega-Rodriguez E, Barbosa-Canovas GV (ed). Chapman & Hall, New York, USA, pp. 231-252.
- Forni E, Torreggiani D, Crevelli G, Mastrelli A, Bertolo G, Santelli F. 1987. Influence of osmosis time on the quality of dehydrofrozen kiwifruit. Acta Hort. 282: 425-433.
- Garcia-Martinez E, Martinez-Monzo J, Chamacho MM, Martinez-Navarrete N. 2002. Characterization of reused osmotic solution as ingredient in new product formulation. Food Res. Int. 35: 307-

- 313.
- García-Segovia P, Mognetti C, Andrés-Bello A, Martínez-Monzó J. 2010. Osmotic dehydration of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller). *J. Food Eng.* 97: 154-160.
- Kim SA, Baek JH, Lee CW, Lee SY. 2008. Effects of osmotic agents, operating pressure and agitation processing on osmotic dehydration process of *Aloe vera* gel. *Food Eng. Prog.* 12: 275-283.
- Krokida MK, Marinos-Kouris D. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *J. Food Eng.* 57: 1-7.
- Kwon HM, Cha JM, Hur W, Lee SY. 2013. Optimization of DIS (dewatering and impregnation soaking) process for concentration of *Aloe vera* gel by using Taguchi approach with desirability function analysis. *Food Eng. Prog.* 17: 8-18.
- Lazarides HN, Katsanidis E, Nockolaidis A. 1995. Mass transfer kinetics during osmotic pre-concentration aiming at minimal solid uptake. *J. Food Eng.* 25: 151-166.
- Lazarides HN, Mavroudis NE. 1996. Kinetics of osmotic dehydration of a highly shrinking vegetable tissue in a salt-free medium. *J. Food Eng.* 30: 61-74.
- Le Maguer M, Shi J, Fernandez C. 2003. Mass transfer behavior of plant tissues during osmotic dehydration. *Food Sci Tech Int.* 9: 187-192.
- Marabi A, Livings S, Jacobson M, Saguy IS. 2003. Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *Eur. Food Res. Technol.* 217: 311-318.
- Marouze C, Giroux F, Collignan A, Rivier M. 2001. Equipment design for osmotic treatments. *J. Food Eng.* 49: 207-221.
- Martinez-Valencia BB, Abud-Archila M, Ruiz-Cabrera MA, Grajales-Lagunes A, Dendooven L, Ovando-Chacon SL, Gutierrez-Miceli FA. 2011. Pulsed vacuum osmotic kinetics of melon (*Cucumis melo* L.) var. cantaloupe. *Afr. J. Agric. Res.* 6: 3588-3596.
- Noshad M, Mohebbi M, Shahidi F, Ali Mortazavi S. 2011. Kinetic modeling of rehydration in air-dried quinces pretreated with osmotic dehydration and ultrasonic. *J. Food Process. Preserv.* DOI 10.1111/j.1745-4549.2011.00593.x.
- Peleg M. 1988. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *J. Food Sci.* 53: 1216-1217.
- Pisalkar PS, Jain NK, Jain SK. 2011. Osmo-air drying of aloe vera gel cubes. *J. Food Sci Technol.* 48: 183-189.
- Saurel R, Raoult-Wack AL, Rios G, Guilber S. 1994. Mass transfer phenomenon during osmotic dehydration of apple. I. fresh plant tissue. *Int. J. Food Sci. Technol.* 29: 531-542.
- Sereno AM, Moreira R, and Martinez E. 2001. Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *J. Food Eng.* 47: 43-49.
- Talens P. 2002. Osmotic treatments on the cryoprotection of strawberry and kiwifruit. Ph.D. dissertation. Universidad Politecnica de Valencia: Valencia, Spain.
- Tortoe C, Orchard J. 2006. Microstructural changes of osmotically dehydrated tissues of apple, banana, and potato. *Scanning* 28: 172-178.
- Uddin MB Ainsworth P, Ibanoglu S. 2004. Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of carrots using response surface methodology. *J. Food Eng.* 65: 473-477.
- Vega-Galvez A, Notte-Cuello E, Lemus-Mondaca R, Zura L, Miranda M. 2009. Mathematical modelling of mass transfer during rehydration of *Aloe vera* (*Aloe barbadensis* Miller). *Food Bioprod. Process.* 87: 254-260.
- Yu DJ, Wang SM, Song KB. 2010. Dehydration of *Opuntia ficus-indica* and *Aloe vera* slices using polyethylene glycol and comparison with other drying methods. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 39: 1024-1029.