

전처리 농축 정도에 따른 *Aloe Vera* gel의 동결건조분말의 물성

이남재 · 이승주*

동국대학교 식품공학과

Physical Properties of Freeze-Dried Powder of *Aloe Vera* Gel with Respect to the Concentrating Degree as Pre-Treatment

Nam Jae Lee and Seung Ju Lee*

Department of Food Science and Technology, Dongguk University

Abstract The physical properties of freeze-dried *Aloe vera* gel powders were examined according to the influence of the concentration degrees of the gel solutions as raw materials during freeze-drying. As a pre-treatment prior to freeze-drying, the gel solutions were vacuum-concentrated at three concentration levels (g water/g solids): high (H), 76; medium (M), 119; and low (L), 159. The water contents of the three powder samples were almost the same. For their viscosity measurements, non-Newtonian fluid behavior with shear thinning was observed in samples H and M, whereas Newtonian liquid behavior was found in sample L. In electrical conductivity measurements, sample H showed the highest conductivity upon dissolving the powder in water. For their water sorption isotherms, sample H was analyzed to have the least amount of bound water. Finally, it was determined that the degree of concentration caused only slight differences in the physical properties of freeze-dried *Aloe* gel powders.

Key words: *Aloe vera* gel powder, freeze-drying, concentration, physical properties

서 론

Aloe vera gel은 수분을 98% 이상 함유하고 있고 pectin, cellulose, hemicellulose, glucomannan, acemannan, mannose 유도체인 다당류 등으로 구성되어 있다(1). 이들 성분의 복합적인 작용에 의하여 생잎의 경우 냉장 저장 중 쉽게 흑변 현상이 일어나며, 또한 생잎이 gel로 추출되면 실온에서 매우 불안정하여 *Aloe* 특유의 점성을 잃게 된다(2,3). 결국 이러한 변화는 *Aloe*의 여러 기능성의 소실을 초래한다. 따라서 *Aloe* 제품의 저장성을 향상시키기 위하여 동결건조법이 적용되었고, 또한 *Aloe vera* gel을 동결건조할 때 그 전처리 과정으로 원료를 농축한다(4).

동결건조는 식품 내 물을 얼음으로 바꾼 후 고체 상태를 유지하며 승화 건조하는 방법이다(5). 얼음 형성을 위한 예비동결의 상태는 건조 특성, 건조물의 품질 등에 영향을 미친다. 급속 동결은 보다 작은 크기의 수많은 얼음입자를 생성하는데 비하여 완만 동결은 크고 소수의 얼음입자를 생성한다. 또한 예비동결에서 수분이 많을수록 물이 얼음으로 변하면서 발생하는 부피 증가에 의한 물리적 압력에 의하여 식품이 변형될 수 있다(6). 따라서 *Aloe vera* gel의 동결건조에서 예비동결 조건은 최종 분말제품의 품질에 영향을 미칠 가능성이 있다.

식품 원료의 농축에는 가열 농축법, 진공 농축법, 냉동 농축법

등이 있으며, 건조의 전처리 과정으로 적용된다(7,8). 가열 농축법은 그 속도는 빠르나 상대적으로 열에 노출되는 정도가 커서 열변성에 민감한 물질에는 적합하지 않다. 진공 농축법은 진공에 의하여 비등점을 낮추어서 상대적으로 농축 속도를 증가시키는 방법으로 진공에 의하여 거품이 발생하는 애로점을 갖는다. 냉동 농축법은 물을 얼음으로 바꾸어 농축하기 때문에 장치 및 운용비가 높은 단점을 갖고 있다. 현재 *Aloe*의 동결건조에 농축을 적용하여 연구한 논문 수준의 보고는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 *Aloe vera* gel의 농축 정도가 동결건조분말에 미치는 물성 변화에 대하여 분석하여 전처리 단계로서의 농축에 대한 과학적인 자료를 마련하고자 하였다. 여기서 물성은 건조분말 제품이 보관 또는 재수화될 때의 성질인 수분함량, 점도(9), 전기전도도(10), 등온흡습성(11,12)을 대상으로 하였다.

재료 및 방법

실험 재료

A 회사(김제 농장)에서 재배한 *Aloe vera* 3년산 생잎을 수확한 직후 상온에서 1일간의 운송기간을 거쳐 곧 바로 실험에 사용하였다.

농축

생잎을 물로 세척한 후 외피를 제거하고 중심부의 조직을 잘게 자른 후 마쇄하였다. 마쇄한 gel 시료에 거품이 가라앉을 때까지 상온에 방치한 후 진공오븐(VO-10, Jeio Tech Co. Ltd., Seoul, Korea)을 사용하여 액상의 gel을 100 mL에서 80 mL, 60 mL, 40 mL에 이르도록 각각 농축시켰다. 특히 진공을 부가한 직후 30분 동안은 거품이 용기를 넘쳐서 수작업으로 압력을 증감시키면서 실

*Corresponding author: Seung Ju Lee, Department of Food Science and Technology, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea
Tel: 82-2-2260-3372
Fax: 82-2-2260-3372
E-mail: Lseungju@dongguk.edu
Received July 28, 2008; revised November 12, 2008;
accepted November 19, 2008

험하였다. 최종적으로 수분함량(g water/g dry solids, dry-basis)이 각각 159, 119, 76인 농축액을 얻었다. 여기서 제거된 수분량을 일반적인 수분함량(wet-basis)의 차이로 나타내지 않은 이유는 농축에서 상당량의 물을 제거했음에도 불구하고 수분함량은 거의 차이가 나지 않기 때문이다. 예로서 물을 100 mL로부터 80 mL, 60 mL, 40 mL에 까지 농축한 것을 수분함량(wet-basis)으로 환산하면 99.4, 99.2%, 98.7%의 차이에 지나지 않는다. 또한 더 농축을 시키지 않았던 이유는 알로에 특성상 점도에 따른 농축과정 중 거품의 넘침 등의 상당한 무리가 나타났으며, 본 농축은 건조의 예비과정으로 물을 일부 제거하는데 근본 목적을 두었기 때문이다.

동결건조

농축액을 동결건조기용 Pyrex 플라스크에 넣고 -40°C로 맞추어진 심온동결기(Gudero, Iilshin Lab Co. Ltd., Korea)에서 하루 동안 예비동결시켰다. 플라스크를 동결건조기(FD3, Heto Lab Ins., Denmark)에 장착하여 응축기 온도 -54°C, 진공도 20 millitorr의 조건에서 72시간 동안 동결건조하였다.

수분함량 측정

동결건조분말의 수분함량(% wet-basis)은 건조오븐에서 105°C, 48시간 건조하여 산출하였다.

점성 측정

점성에 대한 고형분 함량(전체 용액에 대한 고형분 질량의 백분율)의 효과를 보기 위하여 2.6-3.4%가 되도록 분말시료의 양을 달리하여 시료를 제조하였다. 동결건조분말을 증류수에 섞고 균질화(model 099C S33, Glas-Col Co. Ltd., USA)하여 점도를 측정하였다. 회전형점도계(model DV-III, Brookfield Co., USA)와 narrow gap spindle-cup인 SC4-21 set을 사용하여 전단속도 별 전단응력을 측정하였다. 항온수조를 시료 cup의 jacket에 연결하여 시료의 온도를 25°C로 유지하였다. Herschel-Bulkley 모델 식(1)을 적용하여 점성을 분석하였다(13).

$$\tau = k\dot{\gamma}^n + \tau_0 \tag{1}$$

여기서 τ 와 $\dot{\gamma}$ 는 전단응력(Pa)과 전단속도(s⁻¹)를 의미하고, τ_0 , k , n 은 항복응력, consistency index(Pa·sⁿ), flow behavior index를 각각 의미한다.

전기전도도 측정

분말이 물에 용해되는 과정을 분석하기 위하여 전기전도도의 변화를 측정하였다(10). 25°C의 증류수 100 mL를 자석식 교반기 위에 놓인 비이커 속에서 3 cm 길이의 magnetic stirring bar를 120 rpm으로 교반하면서, 분말 시료 0.1 g을 떨어뜨린 직후부터 시간 경과에 따른 전기전도도의 변화를 전기전도도계(model 162, Orion Co. Ltd., USA)와 그 recorder 상에서 실시간으로 측정하였다.

등온흡수성 측정

평형상대습도(수분활성도)에 대한 평형수분함량을 측정하였다. 5종류의 포화 염용액(Table 1)이 각각 담긴 데시케이터에 시료를 넣고 25°C의 항온기에 보관하면서 시간에 따른 무게 변화를 측정하였다. 시료의 무게 변화가 없을 때를 평형상태에 도달한 것으로 간주하여 그 때의 수분함량을 평형수분함량으로 측정하였다.

5개의 수분활성도/평형수분함량 데이터를 GAB(Guggenheim-Anderson-deBoer) 모델에 대입하여 회귀분석하였다(11,12,14).

Table 1. Water activity vs. equilibrium water content of the freeze-dried *Aloe* powder from the concentrated gel solutions by different degrees

Salts*	Water activity	Equilibrium water content (g-water/g-dry solids)		
		H**	M	L
LiCl·H ₂ O	0.11	0.06±0.002***	0.07±0.002	0.07±0.002
MgCl ₂ ·H ₂ O	0.33	0.10±0.003	0.11±0.004	0.12±0.004
NaNO ₃	0.58	0.15±0.007	0.15±0.006	0.16±0.005
NaCl	0.75	0.23±0.014	0.25±0.014	0.27±0.010
BaCl ₂	0.93	0.44±0.023	0.47±0.030	0.50±0.028

*Saturated salt solutions corresponding to their water activity at 25°C, respectively.

**Samples from concentrated gel solutions by three levels (unit: g-water/g-dry solids): high (H), 76; medium (M), 119; low (L), 159.

***Values are mean ± SD with respect to the concentrations ($p < 0.01$ for all the salts, $n = 5$).

$$X_{we} = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 + (C - 1) K a_w)} \tag{2}$$

여기서 a_w 은 수분활성도, X_{we} 는 평형수분함량(g-물/g-고형분, dry-basis)을 의미한다. X_m 은 단분자층의 수분함량이고, C 와 K 는 분자흡착 관련 GAB 모델 상수이다.

통계적 분석

분말의 수분함량, 점성관련 상호변수값, 등온흡수성의 평형수분함량의 5회 반복 측정 데이터를 분산분석과 함께 그 평균값과 표준편차값으로 나타내었다. 전기전도도의 변화 측정은 5회 반복 실험하여 실험 특성상 평균값이 아닌 각 조건에 대하여 가장 대표적인 곡선을 각각 결과로 제시하였다.

등온흡수곡선의 GAB 모델의 상호변수값은 비선형회귀분석(non-linear regression analysis)에 의하여 산출하였으며 fitting의 정도는 결정계수(r^2)로 나타내었다. 상기의 통계 처리를 위하여 SAS/STAT(version 8) 컴퓨터 프로그램을 사용하였다.

결과 및 고찰

수분함량

Aloe vera 동결건조분말의 수분함량은 농축도가 높은 경우에 더 낮게 나타났으나, 그 차이가 근소하였다(Table 2). 수분함량을 측정할 이유는 동결건조의 예비동결과정에서 gel 용액의 농축 정도에 따른 얼음양의 차이로부터 과생될 수 있는 고형분의 변성 여부를 보기 위함이었다(15). 건조물의 최종수분함량의 차이가 매우 근소한 점으로 보아 얼음 생성에 의한 가능한 친수 고형분의 변형은 없는 것으로 추측되나, 나중에 언급될 등온흡수성의 결과인 GAB 모델의 결합수 단분자층에 대한 변수의 변화가 일부 반영된 것으로 생각된다.

Table 2. Water contents of the freeze-dried *Aloe* powder from the concentrated gel solutions by different degrees

Samples*	Water content (% w/w, wet-basis)
H	3.58±0.07**
M	3.75±0.04
L	3.95±0.07

*Refer to Table 1.

**Values are mean ± SD with respect to the concentrations ($p < 0.01$).

점성

식품 유체의 유변(rheological) 현상은 대부분 내재하는 복잡한 구조로 인하여 다양한 점성 모델로 표현된다. 즉, Casson, Bingham, Power-law, Herschel-Bulkley 모델 등으로 나타나는데(16), 본 실험에서는 공통적으로 항복응력과 shear thinning이 관찰됨에 따라 Herschel-Bulkley 모델을 적용하였다. 이에 따라 항복응력, k, n값을 분석하였다.

Fig. 1은 농축도가 서로 다른 *Aloe vera* gel 용액을 동결건조하여 만든 분말을 여러 수준의 양으로 용해하여 제조한 수용액의 항복응력을 각각 비교한 결과이다. 수용액의 고형분 양에 무관하게 농축도가 높을수록 항복응력이 크게 나타났다. 항복응력이란 현탁액 내 입자간의 가역적 결합력으로(17) 농축도가 증가할수록 수용액내 입자간 결합력이 더 증가한 것으로 보인다.

Fig. 2는 농축도에 따른 flow behavior index인 n값의 결과로서,

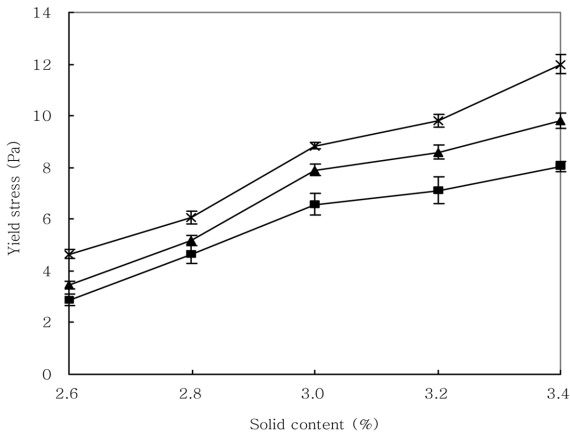


Fig. 1. Yield stress (τ_0) in Herschel Bulkley model for aqueous solutions of the different contents of the freeze-dried *Aloe* powder from the concentrated gel solutions by three levels (unit: g-water/g-solids): high level (H), 76; medium (M), 119; low (L), 159. \times : H, \blacktriangle : M, \blacksquare : L. Values are mean \pm SD with respect to the concentrations ($p < 0.01$ for all the solid contents, $n = 5$).

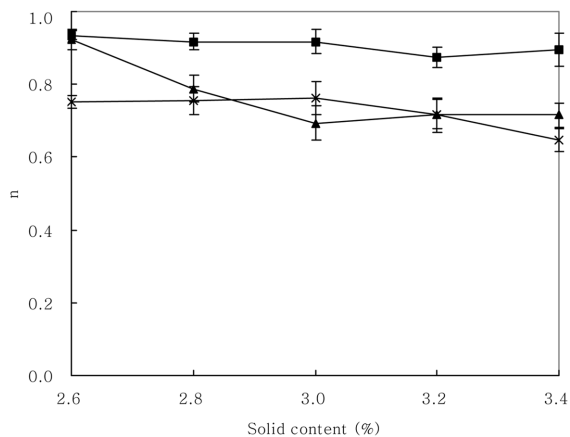


Fig. 2. Flow behavior index (n) in Herschel-Bulkley model for aqueous solutions of the different contents of the freeze-dried *Aloe* powder from the concentrated gel solutions by three levels (unit: g-water/g-solids): high level (H), 76; medium (M), 119; low (L), 159. \times : H, \blacktriangle : M, \blacksquare : L. Values are mean \pm SD with respect to the concentrations ($p < 0.05$ for the solid contents, $n = 5$).

전 실험구에서 1.0이하로 나타나 전단속도가 증가할수록 점도가 낮아지는 shear thinning 현상을 보였다(18). 농축도가 낮은 경우 (159 g-물/g-고형분) n값이 1에 근접하여 Newtonian 액체 성질로의 경향을 보였고 그보다 농축도가 높은 조건에서는 n값이 감소하여 전단속도에 따라 점성이 바뀌는 non-Newtonian 유체의 경향을 나타냈다. 그리고 수용액내 고형분 함량이 증가할수록 농축도가 높은 경우 n값이 약간 감소하여 전단속도에 따른 입자간 결합력이 약화되는 성질을 반영하였다(18). 그러나 농축도가 낮은 경우에는 고형분 함량에 무관하게 n값이 일정하게 유지되는 것으로 보아 수용액내 고형분은 입자가 아닌 보다 풀린 형태로 존재할 가능성이 높은 것으로 생각된다.

Fig. 3은 농축도에 따른 건조분말 수용액의 consistency index인 k값의 결과이다. 농축도가 높은 경우 수용액내 고형분 양에 따른 k값은 증가하였고, 농축도가 낮은 경우에는 거의 변화가 없었다. 수용액내 고형분의 점도에 대한 효과는 근본적으로 고형분이 차지하는 부피에 의한 것으로(19) 농축도가 낮은 경우에는 고형분의 부피 효과가 수력학적으로(hydrodynamic) 낮음을 보여준다.

현탁시 전기전도도의 변화

Aloe 분말의 물에 대한 용해성을 분석하기 위하여 전기전도도를 측정하였다. *Aloe vera* gel은 전해질과 당류를 함께 함유하는데(2) 전기전도도는 수용액내 전해질 성분이 존재하면 증가하고, 당과 같은 비전해질이 있으면 오히려 감소한다(20). 전해질인 소금과 비전해질인 설탕의 전기전도도를 측정한 예비 실험을 통해서 상기와 같은 사실을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 교반되고 있는 물에 분말을 떨어뜨린 순간부터 전기전도도의 변화를 측정한 결과로서 특이하게 농축 정도와 무관하게 초기에는 모두 전도도가 급격히 증가하고 그 이후에는 다시 감소하는 경향이 여러 반복 실험을 통하여 동일하게 나타났다. 분말이 물에 풀림에 따라 전해질은 용해성이 높아서 급격히 용해되고 당 성분은 상대적으로 용해가 서서히 일어난 것으로 가정한다면, 상기의 특이 현상은 다음과 같이 해석할 수 있을 것이다. 즉, 초기의 급격한 전도도 증가는 전해질의 용해에 의한 것이며, 그 이후의 전도도의 감소는 당 성분의 용해에 의한 일종의 보상 현상으로, 앞으로 이 특이 현상에 대한 원인 규명의 추가적인 연구가 요구된다.

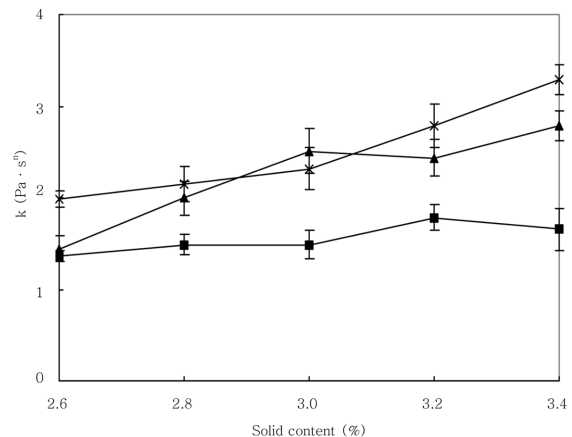


Fig. 3. Consistency index (k) in Herschel-Bulkley model for aqueous solutions of the different contents of the freeze-dried *Aloe* powder from the concentrated gel solutions by three levels (unit: g-water/g-solids): high level (H), 76; medium (M), 119; low (L), 159. \times : H, \blacktriangle : M, \blacksquare : L. Values are mean \pm SD with respect to the concentrations ($p < 0.0$ for the solid contents, $n = 5$).

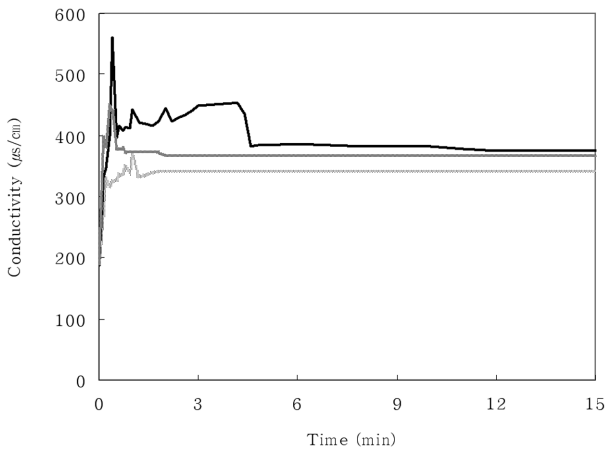


Fig. 4. Time course of electrical conductivity of aqueous solution during dissolving the freeze-dried *Aloe* powder from the concentrated gel solutions by three levels (unit: g-water/g-solids): high level (H), 76; medium (M), 119; low (L), 159.
 : H, — : M, - - - : L.

Fig. 4에서 전기전도도가 평형에 도달하였을 때 농축의 효과를 서로 비교해 보면 농축도가 가장 높은 경우에 전도도가 가장 낮게 나타났다. 이는 분말의 화학적 조성은 같을지라도 재수화시 전기전도를 방해하는 물질이 더 많이 용해됐음을 의미하며, *Aloe* 고형분 성분의 대부분이 당류인 점으로 보아 농축도가 높은 경우의 분말이 물에 대한 용해성이 높은 것으로 해석된다. 그러나 중간 수준과 낮은 수준의 농축 시료의 전도도는 그 순서가 근소하게 바뀌어 이러한 현상의 더 정확한 규명은 앞으로 더 밝혀져야 할 과제로 생각된다.

한편, 앞에서 항복응력의 결과에서 농축도가 높을수록 수용액 내 입자간 결합력이 증가하였는데, 일반적으로 교질 용액 내 전하를 띄지 않는 입자는 서로 결합하는 사실로부터(21), 농축도가 높은 분말 교질용액의 낮은 전기전도도는 높은 입자간 결합력과 연관되어 있음을 유추할 수 있다.

등온흡습곡선

식품 분말을 가공하여 포장하거나 저장할 때 여러 환경 요소들로 인하여 수분 흡착이나 탈습이 수반된다(22). *Aloe vera* gel 동결건조분말의 등온흡습성에 원료의 농축 정도가 미치는 효과에 대하여 알아보았다. 수분활성도/평형수분함량의 실험결과(Table 1)를 fitting한 등온흡습곡선은 Fig. 5에서 보는 것처럼 전형적인 sigmoid형 곡선을 나타내었다. 농축을 많이 한 경우일수록 전체적으로 특정 수분활성도에 대한 평형수분함량이 낮게 나타났다. 이 곡선에서 나타난 GAB 모델의 유효 범위인 수분활성도 0.1-0.9 영역의 데이터를 이용하여 X_m , C, K의 값을 구하였다(Table 3). 농축을 많이 한 경우일수록 단분자층 수분함량인 X_m 값이 더 작게 나타났다. 분자 흡착과 관련된 C값과 K값도 농축도가 큰 경우일수록 감소하는 경향을 보였다. 결과적으로 농축도가 클수록 건조분말은 결합수의 감소를 나타내는 등온흡습성을 갖는 것으로 나타났다.

요 약

농축시킨 *Aloe vera* gel을 동결건조하였을 때 그 농축도 차이에 의한 최종 건조분말의 물성 변화를 비교분석하였다. 분말의

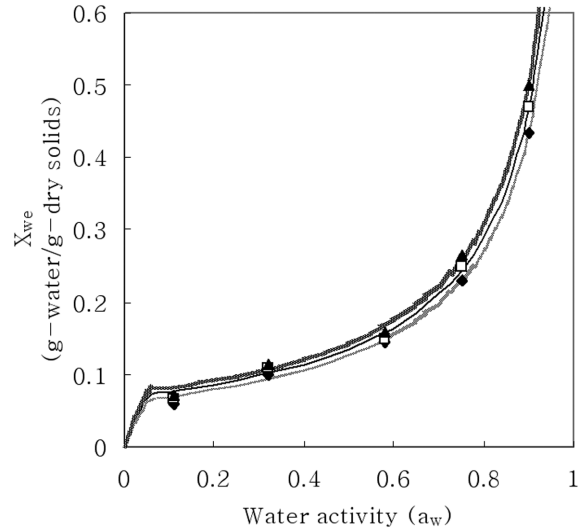


Fig. 5. Water sorption isotherm curves of the freeze-dried *Aloe* powder from the concentrated gel solutions by three levels (unit: g-water/g-solids): high level (H), 76; medium (M), 119; low (L), 159. Experimental data are ◆: H, □: M, ▲: L. Curve estimates of GAB model are : H, — : M, - - - : L.

Table 3. Fitted GAB parameters of water sorption isotherm of the freeze-dried *Aloe* powder from the concentrated gel solutions by different degrees

Samples*	GAB model parameters**			R ² ****
	X_m	C	K	
H	0.068 ± 0.001***	113.698 ± 24.6	0.938 ± 0.001	0.998
M	0.072 ± 0.002	166.367 ± 10.3	0.941 ± 0.001	0.994
L	0.076 ± 0.001	196.853 ± 16.7	0.943 ± 0.001	0.991

*Refer to Table 1.
 ** X_m means a monolayer value, and C and K are the sorption constants in the GAB model equation.
 ***Values are mean ± SD with respect to the concentrations ($p < 0.01$ for X_m and C, $p < 0.05$ for K, $n = 5$).
 ****Determination coefficients.

최종 수분함량은 거의 차이가 없었으며, 점성 측정에서는 높은 농축 조건의 경우 전형적인 shear thinning 현상과 non-Newtonian 유체의 속성을 나타냈다. 이에 비하여 낮은 농축 조건의 경우 Newtonian 액체의 성질과 고형분이 입자가 아닌 풀린 형태로 존재할 때 나타나는 현상을 보였다. 분말이 물에 용해되는 동안 전기전도도의 변화를 실시간으로 측정된 결과 평형상태에 도달하였을 때, 가장 높은 농축 조건에서 전기전도도가 가장 낮게 나타나, 비전해질성 물질의 용해도가 가장 큰 것으로 해석되었다. 분말의 등온흡습성에서는 농축이 증가할수록 수분 흡착과 결합수의 양이 작아지는 것으로 분석되었다. 결과적으로 *Aloe vera* gel을 농축하여 동결건조할 때는 그 농축도에 따라 점성, 현탁시 전기전도도에 따른 용해성, 등온흡습성이 변하는 것으로 나타나, 특정 품질의 동결건조제품을 얻기 위해서는 그에 대한 농축의 최적화가 필요한 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 (주)김정문알로에의 지원에 의한 것입니다.

문 헌

1. Bozzi A, Perrin C, Austin S, Arce Vera F. Quality and authenticity of commercial *Aloe vera* gel powders. *Food Chem.* 103: 22-30 (2007)
2. Reynolds T. Aloe chemistry-a review. *Med. Aroma. Plant-Ind. Profiles* 38(Aloes): 39-74 (2004)
3. Chang XL, Wang CH, Feng YM, Liu ZP. Research on viscosity and thermal stability of aloe gel of *Barbadensis* mill. *Jingxi Huagong* 21: 496-498, 509 (2004)
4. Xu M. Method for processing *Aloe* gel, *Aloe* whole leaf gel and *Aloe* skin gel and preparing *Aloe* polysaccharide products. Faming Zhuanli Shenqing Gongkai Shuomingshu 18pp. Patent No. CN1582713 (2005)
5. Lee SJ. Consideration for the optimum operation of vacuum freeze drying-a review. *Food Eng. Prog.* 8: 147-157 (2004)
6. Genin N, Rene F. Influence of freezing rate and the ripeness state of fresh courgette on the quality of freeze-dried products and freeze-drying time. *J. Food Eng.* 29: 201-209 (1997)
7. Litvin S, Mannheim CH, Miltz, J. Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. *J. Food Eng.* 36: 103-111 (1998)
8. Clary C, Gamache A, Cliff M, Fellman J, Edwards C. Flavor and aroma attributes of Riesling wines produced by freeze concentration and microwave vacuum dehydration. *J. Food Process. Pres.* 30: 393-406 (2006)
9. Sam Saguy I, Marabi A, Wallach R. New approach to model rehydration of dry food particulates utilizing principles of liquid transport in porous media. *Trends Food Sci. Tech.* 16: 495-506 (2005)
10. Weerts AH, Martin DR, Lian G, Melrose JR. Modelling the hydration of foodstuffs. *Simul. Model. Pract. Th.* 13: 119-128 (2005)
11. Simal S, Femena A, Llull P, Rossell C. Dehydration of aloe vera: Simulation of drying curves and evaluation of functional properties. *J. Food Eng.* 43: 109-114 (2000)
12. Vega A, Uribea E, Lemusa R, Mirandaa M. Hot-air drying characteristics of *Aloe vera* (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *Lebensm-Wiss Technol.* 40: 1698-1707 (2007)
13. Tomasik P, Sikora M, Sady M, Schilling CH. Time-dependent characteristics of Herschel-Bulkley fluids from edible powders. *Int. J. Food Sci. Tech.* 40: 149-156 (2005)
14. Tunc S, Duman O. Thermodynamic properties and moisture adsorption isotherms of cottonseed protein isolate and different forms of cottonseed samples. *J. Food Eng.* 81: 133-143 (2007)
15. Kong JY, Kim JH, Kim MY, Bae SK. Effect of freezing conditions on the formation of ice crystals in food during freezing process. *J. Korean Soc. Food Nutr.* 21: 213-218 (1992)
16. Darby R, Rogers BA. Non-Newtonian viscous properties of methacool suspensions. *Aiche J.* 26: 310-312 (1979)
17. See H, Brian P. Measuring the yield stress of a particulate suspension under high electric fields. *Powder Technol.* 160: 40-44 (2005)
18. Chetana R, Krishnamurthy S, Reddy SRY. Rheological behavior of syrups containing sugar substitutes. *Eur. Food Res. Tech. mol.* 218: 345-348 (2004)
19. Arefinia R, Shojaei A. On the viscosity of composite suspensions of aluminum and ammonium perchlorate particles dispersed in hydroxyl terminated polybutadiene-New empirical model. *J. Colloid Interf. Sci.* 299: 962-971 (2006)
20. Ribeiro ACF, Estes MA, Lobo VMM, Valente AJM, Simoes SMN, Sobral AJFN, Burrows HD. Interactions of copper (II) chloride with sucrose, glucose, and fructose in aqueous solutions. *J. Mol. Struct.* 826: 113-119 (2007)
21. Zholkovskij EK, Czarnecki J, Masliyah JH. Electrostatic repulsion in concentrated disperse systems. *J. Colloid Interf. Sci.* 234: 293-315 (2001)
22. Kim YS, An DS, Woo KL, Lee DS. Moisture sorption isotherm and quality deterioration of dry jujube. *Korean J. Posthaw. Sci. Technol.* 4: 33-38 (1997)