

활성탄을 이용한 단일 성분계 페놀산 용액의 흡착

이원영* · 최용희

*경북대학교 농업과학기술연구소, 경북대학교 식품공학과

Adsorption of Food Born Phenolic Acid Solution on Activated Carbon in Single Solute System

Won-Young Lee* and Yong-Hee Choi

*Institute of Agricultural Science & Technology, Kyungpook National University
Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University

Abstract

Phenolic compounds are widely distributed materials in almost all the kinds of plant. They are well known to cause astringency, browning and nutrition inhibition in food material. Recently, the studies on phenolic compound have been conducted to recover or identify these materials as an antioxidant, anticancer and inhibitor of HIV(human immunodeficiency virus). Therefore, the phenolic compounds are necessary to remove or to recover for the same reason above. In this study, three phenolic acids, which existed in plant materials commonly, were conducted to analyze the adsorption dynamic phenomena. The experimental results for the adsorption velocity upon the single component adsorption showed that the *p*-coumaric acid had a fastest adsorption velocity, followed gallic acid and ferulic acid. These results were caused by the different pore diffusivities of each adsorbate that was different in shape and size. Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson and Singer-Yen models are applied to explain the adsorption dynamics for these single component and the parameter for the single solutes were obtained by a nonlinear optimization. It was found that Langmuir model was a best fitted model for these phenolic acid which showed over 0.96 R-square value. On the other hand Freundlich and Redlich-Peterson models were well adapted to ferulic acid but Singer-Yen model showed lower R-square value than other models and it was an unadaptable model for phenolic acids adsorption on activated carbon.

Key words: adsorption dynamics, phenolic acid, activated carbon, nonlinear optimization

서 론

페놀성 물질은 식품계에 널리 분포되어 있는 2차 대사산물의 하나로써 다양한 구조와 분자량을 가진다. 일반적으로 페놀성 물질은 phenolic acid 및 coumarin류, flavonoid류 그리고 탄닌류(hydrolyzable 및 condensed tannins)의 세 그룹으로 나누며 그 구조에 따라 이화학적 성질 및 생리적 기능이 달리 나타난다(이정희와 이서래, 1994a). 페놀성 물질은 식물체에 특수한 색깔을 부여하고, 산화-환원 반응시 기질로 작용하며, 미생물의 공격을 막아 식물자체를 보호하는 동시에 떫은 맛, 쓴맛과 같은 식품성 식품의 고유한 맛에 관계한다. 또한 식물성 식품의 peroxidase작용에 의한 효

소적 갈변의 원인물질로 작용한다. 한편 오랜 기간의 경험으로 우리가 섭취하게 된 일상식품중의 페놀성 물질은 인간에게 심각한 독성을 별로 발휘하지 않으나 일반적으로 탄닌은 동물이나 인간에게 영양저해인자로 인식되어 왔고 이를 제거하려는 연구들이 진행되어 왔다(이정희와 이서래, 1994b: Amiot *et al.*, 1992: Bruda *et al.*, 1990).

식품계에 널리 분포되어 있는 페놀성 물질은 그들의 phenolic hydroxyl그룹 때문에 단백질 또는 효소단백질, 기타 거대분자들과 결합하는 성질, 항산화효과, 2가 금속이온과의 결합력을 가진다. 일부 비상용 식품과 동물사료로 사용되는 식물에는 탄닌류가 상당히 높은 농도로 존재하여 떫은 맛을 주어 식이섭취량을 저하시키고 단백질과의 상호작용으로 효소활성의 저해와 단백질 배설을 증가시키며 Fe의 이용능을 저하시킨다. 또한 어떤 페놀성 물질은 동물체에서 변이원

Corresponding author: Yong-Hee Choi, Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University, 1370, Sankyuk-Dong, Taegu, 702-701, Republic of Korea

성과 발암성과 같은 심한 독성을 발휘한다. 반면 단백질과 결합하는 이러한 성질은 미생물 세포와 작용하여 성장저해를 유발시킴으로써 항미생물 효과를 보여 주고 항산화 작용에 의한 항암효과 및 HIV에 대한 저해작용 등이 제안되고 있으며 Pb, Cd과 같은 유해 중금속을 제거시키는 효과를 기대할 수 있다. 그 외에도 어떤 페놀성 물질은 특정한 호르몬과 모세혈관의 유연성에 관계하는 등 다양한 약리효과가 제시되고 있다(Kumar와 Dara, 1981; Randall *et al.*, 1975; Sakagami와 Nakashima, 1992; Wright, 1995).

현재까지의 페놀성 성분들은 부정적인 면과 긍정적인 면이 있으므로 이들 물질을 이용목적에 따라서 분리 제거하거나 회수 이용하여야 할 필요가 있다. 그러나 페놀성 물질은 식품소재물질에 소량분포하고 있고 또한 물을 많이 이용하는 식품가공과정중에 오염원으로서 작용하거나 유실되어 회수가 어렵다. 이러한 페놀성 물질을 긍정적인 면에서건 부정적인 면에서건 회수하기 위해서는 용매속에 낮은 농도로 존재할 때 이용되는 흡착분리공정이 적절할 것이다.

흡착이란 분리나 정제 또는 회수를 목적으로 다공성의 고상을 이용하여 어떤 물질을 분리하는 기술이라 할 수 있다. 흡착현상은 다공성의 입자표면과 물질간의 van der Waal's 힘 또는 화학적 결합에 의해 이루어지며 그 정도는 흡착제의 physical property 즉 입자의 공극크기, 밀도, tortuosity 등에 따라 달라지게 되므로 물질에 따른 흡착거동해석은 공정설계에 중요한 기초자료가 될 수 있다(MaCabe *et al.*, 1993). 따라서 본 실험에서는 이제까지 폐수처리에 주로 이용되어 온 활성탄을 이용하여 단일성분계일때의 페놀성 물질의 분리회수의 가능성을 타진하고 이들물질의 흡착거동을 해석하여 흡착을 이용한 페놀성 물질 분리의 기초자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

흡착재료

본 연구에서 흡착제로 사용된 활성탄(국산, D사)을 16~20 mesh 체로 입상활성탄을 분취하고 탈이온수로 4시간 동안 끓이고 다시 탈이온수로 3~5회 세척하여 활성탄내 불순물을 제거하였으며 105°C에서 48시간 동안 건조시켜 데시케이터에 보관하면서 사용하였다(Lee *et al.*, 1985). 흡착질로 사용된 페놀산은 밤이나 땅콩등 천연식품소재에 흔히 분포하는 페놀산 물질 중 3가지를 선택하여 단일성분의 모사계를 구성하고자 하였으며 이때 사용된 페놀산들은 순도 99%이상

의 *p*-coumaric acid, galic acid, ferulic acid (Sigma Co.)를 각각 사용하였다. 이들의 분석을 위해서 bis-trimethylsilyl acetamide (Sigma Co.)와 acetonitrile (1급)을 사용하였고 *p*-hydroxyl benzoic acid를 내부표준물질로 사용하였다.

페놀산 분석

시료중에 포함된 페놀산들의 농도는 Horvat와 Senter (1980)의 방법에 따라 10 ml 수용액중의 페놀산을 동량의 ethyl acetate로 재추출하고 이를 5 ml 취하여 감압건고하고 이를 1 ml의 Acetonitrile로 용해하고 이를 다시 E-tube로 옮겨 건조한 다음 100 µl acetonitrile로 재용해하고 50 µl의 BSA용액과 내부표준물질인 *p*-hydroxy benzoic acid를 25 µl 가하여 90°C에서 5분간 TMS화 시킨후 분석용 시료로 사용하였다. 이때의 GC (Shimadzu Co. Ltd)의 분석조건은 Table 1과 같다.

흡착장치

회분식 실험장치는 흡착평형 도달시간의 산출에 필요한 흡착속도곡선을 작성하기 위한 것으로서 shaking incubator를 이용하여 25°C, 200 rpm에서 실험하였다.

활성탄의 Purity 측정

흡착실험에 앞서 활성탄의 불순물이 존재하는가를 조사하기 위하여 활성탄 5 g을 1 l의 증류수에 넣고 24시간 200 rpm에서 shaking하여 200~800 nm까지 UV scanning (Shimadzu)을 행하였다.

회분식 흡착실험

평형흡착량 측정실험을 위한 흡착평형 도달시간을 조사하기 위하여 100, 300, 500, 1200 ppm의 페놀산 50 ml에 입상활성탄 0.2 g을 넣고 온도 25°C, 교반속도 200 rpm을 유지하면서 0~10시간까지는 1시간 간격으로 최종적으로 24시간 후의 흡착질의 농도변화를 측정하였고, 1200 ppm의 경우에는 0~12시간까지 2시

Table 1. Operating conditions of gas chromatograph for phenolic acid analysis

Items	Conditions
Instrument	Pye Unicam
Column	SE-30 Packed glass
Detector	Flame ionization detector
Column temp.	180°C (5 min) $\xrightarrow{2^\circ\text{C}/\text{min}}$ 240 (2 min)
Injection temp.	260°C
Detector temp.	270°C
Carrier gas	N ₂

간 간격으로 24시간 후의 흡착질의 농도변화를 측정하고 흡착속도곡선을 작성하였다.

평형흡착량 측정

흡착용액의 평형농도와 평형흡착량과의 관계적인 흡착등온선을 작성하고 등온식의 계수를 구하기 위하여 100 mL 용량의 삼각플라스크에 여러 농도의 페놀산(100~1200 ppm)을 50 mL를 주입하고 0.2 g의 입상 활성탄을 투입하여 회분식 흡착실험에서 나타난 24시간동안 흡착시켜, 평형에 도달한 후 페놀산 농도의 변화에 따른 평형농도액을 조사하여 흡착등온선 작성에 이용하였다.

결과 및 고찰

활성탄의 Purity

Fig. 1은 흡착실험을 행하기 전에 탈이온수로 세척한 활성탄에 불순물이 있는가를 확인하기 위하여 200~800 nm까지 UV로 scanning 한 결과이다. 불순물이 나타나지 않아 전처리가 잘 되었음을 확인할 수 있었다.

Phenolic acid의 분석

Fig. 2는 페놀산을 GC분석한 결과이며 페놀산의 검량곡선의 상관계수는 모두 0.99이상 이었다.

시간의 변화에 따른 흡착

흡착평형에 도달하는 시간을 구하고자 100, 300, 500 ppm 1~10시간까지 1시간 간격으로 1,200 ppm은 12시간까지 2시간 간격으로 농도를 측정하고 24시간

후에 다시 농도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 3-5에 나타냈다. 흡착진행 10시간 후의 농도와 24시간 후의 농도가 Fig. 3-5에 나타난 바와 같이 거의 같게 나타나 흡착 10시간 후에는 흡착평형에 도달함을 알 수 있었다. 2시간 이전의 흡착량의 증가가 급격히 이루어지는 부분은 흡착질이 흡착제의 macropore로의 확산이 신속히 진행되는 과정이고 2시간 이후로 흡착질의 농도가 300 ppm일 때는 4시간, 500 ppm일 때는 8시간

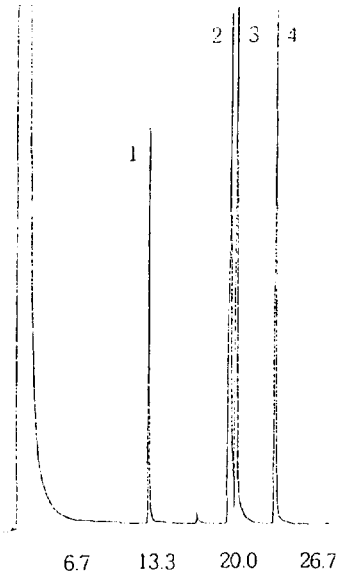


Fig. 2. Gas chromatogram of phenolic acids. 1. *p*-hydroxy benzoic acid, 2. *p*-coumaric acid, 3. gallic acid, 4. ferulic acid.

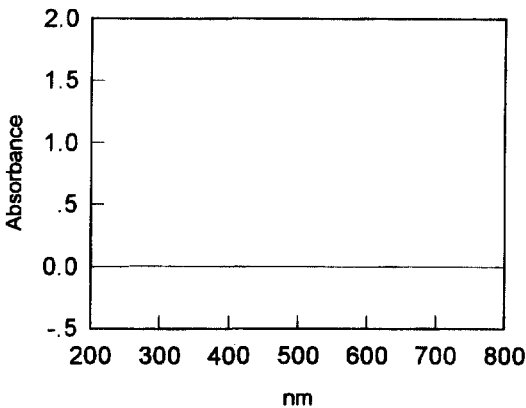


Fig. 1. UV-visible scanning spectrum for pretreated activated carbon.

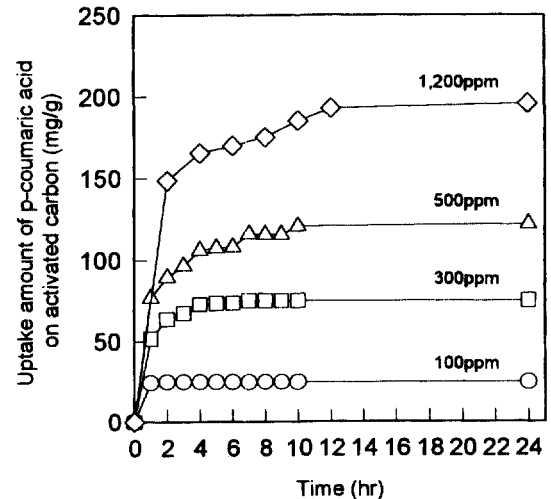


Fig. 3. Adsorption kinetics of *p*-coumaric acid on activated carbon.

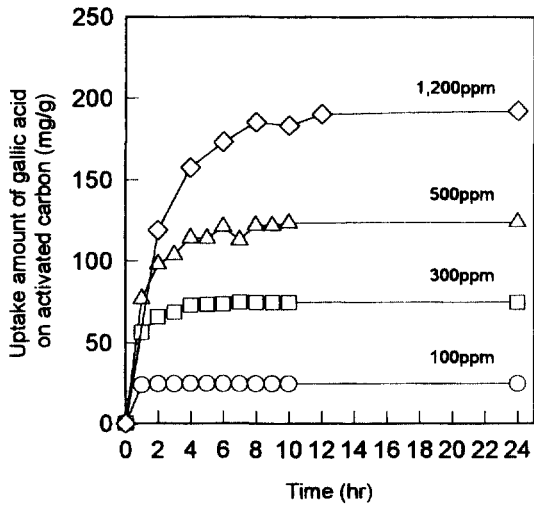


Fig. 4. Adsorption kinetics of gallic acid on activated carbon.

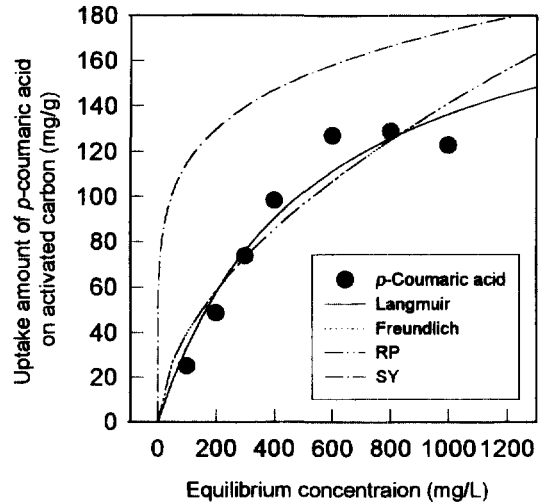


Fig. 6. Adsorption isotherms of *p*-coumaric acid on activated carbon.

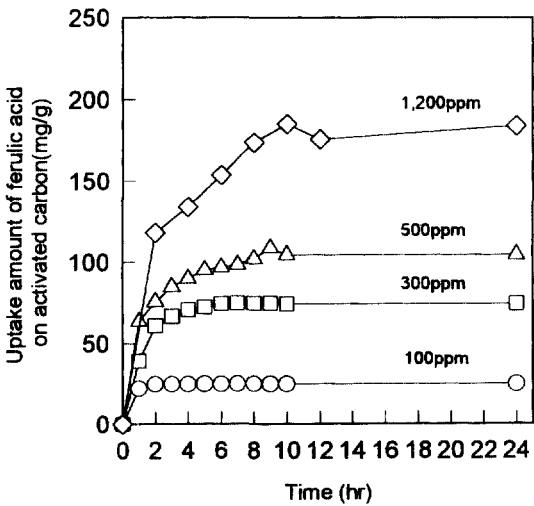


Fig. 5. Adsorption kinetics of ferulic acid on activated carbon.

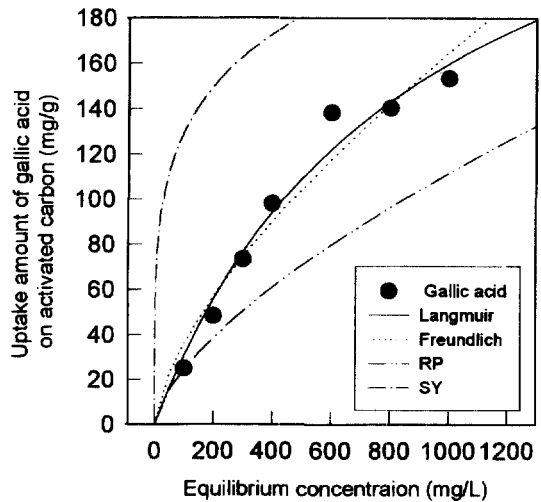


Fig. 7. Adsorption isotherms of gallic acid on activated carbon.

그리고 1,200 ppm일 때는 12시간까지 흡착질의 농도가 변하는 구간은 mesopore로의 확산과정이며 그 이후로 흡착질의 농도변화가 적게 나타나는 과정은 micropore로의 확산이 천천히 이루어지는 3단계의 과정으로 나타나고 있으며 흡착질의 농도변화가 5% 이내로 나타나는 24시간을 흡착평형에 이르는 시간으로 선정하였다.

평형흡착량

세 가지 페놀산 물질 중 *p*-coumaric acid가 흡착평형에 가장 빨리 이르게 되고 다음 순으로 gallic acid,

ferulic acid의 순으로 평형에 이르게 된다. 세 가지 흡착질의 단일성분에 대한 회분식 흡착실험에서의 흡착질의 농도변화에 대한 흡착량은 *p*-coumaric acid의 흡착량이 가장 많으며 다음으로 gallic acid, ferulic acid의 순이었다. 이러한 결과는 페놀 물질의 흡착시 흡착거동은 흡착질의 분자크기, 용매에 대한 용해도, 방향족 고리의 reactivity에 따라 달라지게 되며 흡착제의 구조와 pore size에 따라 달라지게 되어 서로 다른 크기와 모양의 작용기를 가진 흡착질들의 기공확산계수 (pore diffusivity)의 차이에 의해 흡착량의 차이가 발생한 것으로 생각된다(Streat *et al.*, 1995).

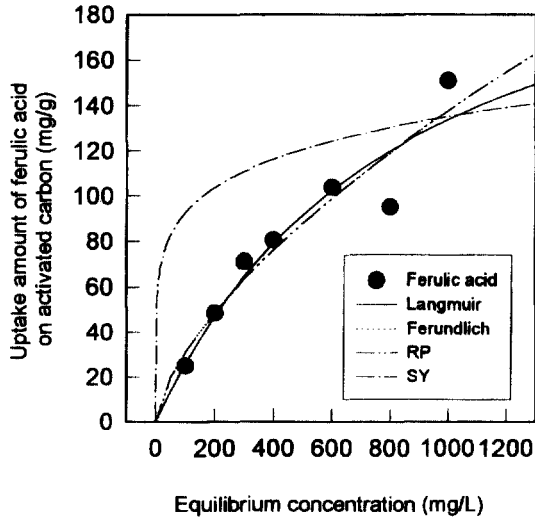


Fig. 8. Adsorption isotherms of ferulic acid on activated carbon.

평형 흡착량 예측모델 및 parameter

단일 성분의 흡착평형은 일정한 온도와 압력에서 유체상의 흡착질의 농도와 고체상의 흡착질의 흡착농도의 균형으로 나타내어 흡착질과 흡착제 사이에 흡착친화력을 나타낸다. 이와 같은 흡착친화력을 정량적으로 나타낼 때 흡착등온선이 이용된다. 본 연구에서는 단일성분 흡착 모델로 Langmuir 모델과 Freundlich모델, 그리고 이 두 모델의 단점을 보완한 Redlich-Peterson모델과 Singer-Yen모델을 택하여 거동을 해석하고자 하였으며 각각의 흡착계수값들은 실험자료들을 이용한 비선형 최적화 기법에 의해 구하였다(고경진과 정재권, 1985; 남영우, 1989; 이병선 등, 1988; Cooney, 1987; Jossens, 1978; Yen과 Singer, 1984).

Langmuir모델

Langmuir모델은 원래 기상흡착에 대한 모델이었으며, 유도시 도입된 가정은 다음과 같다. 흡착 에너지는 일정하며, 표면점유와는 독립적이며, 흡착질간의 상호작용은 무시하며, 흡착은 단일층으로 일어난다. Langmuir모델은 아주 낮은 농도범위에서는 열역학적인 조건을 잘 만족하지만 높은 농도범위에서는 실험자료와 일치되지 않는 경우가 있다.

액상흡착에 대한 Langmuir모델은 다음과 같다.

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} = \frac{a C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$

Table 2. Langmuir parameters of each phenolic acids for adsorption

	q_m	b	$a (=q_m b)$	Correlation coefficient
<i>p</i> -Coumaric acid	3.993E-1	1.9233E-3	7.6797E-4	0.9396
Gallic acid	3.451E-1	1.1557E-3	3.9883E-4	0.9732
Ferulic acid	2.923E-1	1.1855E-3	3.4652E-4	0.9033

여기서 q_e 는 흡착제 단위 질량당 흡착된 흡착질의 흡착농도, C_e 는 평형농도를 나타내며, q_m 는 단층흡착능력(monolayer adsorption capacity)을 그리고 b 는 흡착상수를 각기 나타낸다. Table 2에 각 parameter들의 값을 나타내었으며 R-square가 0.96이상의 높은 적용성을 나타내었다.

Freundlich모델

Langmuir모델은 이론적으로는 좋은 타당성을 가지지만 보통 흡착등온선 실험자료를 정확하게 표현하기에는 부족함이 많다. 그래서 Ferundlich는 비록 낮은 농도영역에서는 열역학적인 조건을 만족하지 못하여 Henry의 법칙에 위배되지만 중간 농도와 높은 농도영역에서 실험데이터를 만족스럽게 표현하는 흡착등온선을 제시하였다.

$$q_e = K_f C_e \frac{1}{n_f} \quad (2)$$

여기서 K_f 와 n_f 는 Ferundlich 흡착계수이며, $K_f 1/n_f$ 는 각각 상대적인 흡착용량과 반응의 강도나 에너지를 나타낸다. 이들 parameter들은 Table 3에 나타내었으며 ferulic acid의 경우에는 잘 적용되었으나 *p*-coumaric acid나 gallic acid에서는 Langmuir식보다 R-square가 낮게 나타났다.

Redlich-Peterson 모델

Redlich-Peterson모델은 매개변수를 2개 포함하고 있는 Langmuir와 Ferundlich모델과는 달리 매개변수 3개를 포함하고 있는 경험적인 흡착등온식으로 Redlich와 Peterson이 분자체의 기상흡착에 대해 처음으로 제안되었으며, 다음으로 주어진다.

Table 3. Freundlich parameters of each phenolic acids for adsorption

	K_f	n_f	Correlation coefficient
<i>p</i> -Coumaric acid	3.1526	1.8160	0.88163
Gallic acid	1.7325	1.5159	0.94646
Ferulic acid	1.6148	1.5537	0.90987

Table 4. Redlich and Peterson parameters of each phenolic acids for adsorption

	a	b	β	Correlation coefficient
p-Coumaric acid	1.2753E+7	3.1520	0.5507	0.8816
Gallic acid	1.1767E+7	1.7325	0.6597	0.9464
Ferulic acid	1.0975E+6	1.6148	0.6436	0.9098

$$q_e = \frac{aC_e}{1 + (\frac{a}{b})C_e^{1-\beta}} \quad (3)$$

여기서, a, b, β 는 실험적인 흡착매개변수이다.

위의 식에서 낮은 농도의 범위에서는 $(\frac{a}{b})C_e^{1-\beta} \ll 1$ 이

기 때문에 선형 흡착등온식에 따르며, β 가 0인 경우에는 Langmuir 흡착등온식을 따른다.

Table 4에 각 parameter들을 나타내었으며 R-square 값도 유사하게 나타나며 ferulic acid에서의 적용성이 높게 나타났다.

Singer-Yen 모델

Singer와 Yen은 Ferundlich 흡착등온식을 바탕으로 새로운 흡착매개변수 q_s 로 정의하였다. $q_e \geq q_s$ 인 높은 농도범위에서는 Ferundlich 모델을 따르며, $q_e \leq q_s$ 인 낮은 농도범위에서는 식 (5)를 따르는 Singer-Yen 모델은 다음과 같다.

$$q_{e,i} \geq q_{s,i} \text{이면}$$

$$\log C_{e,i} = n_i(\log q_{e,i} - \log K_i) \quad (4)$$

$$q_{e,i} \leq q_{s,i} \text{이면}$$

$$\log C_{e,i} = \log \left(\frac{q_{e,i}}{q_{s,i}} \right) - \frac{1}{\ln 10} (n_i - 1) \left(1 - \frac{q_{e,i}}{q_{s,i}} \right) + n_i \log q_{s,i} - \log K_i \quad (5)$$

위 식의 parameter들은 Table 5에 나타내었으며 4가지 모델식 중 R-square가 가장 낮아 적용성이 낮은 것으로 나타났다.

Table 5. Singer and Yen parameters of each phenolic acids for adsorption

	K	n	q_s	Correlation coefficient
p-Coumaric acid	5.5596	50.069	24.990	0.8807
Gallic acid	4.9115	51.118	24.990	0.8808
Ferulic acid	6.1464	43.952	24.990	0.9157

단일 성분의 흡착등온선

흡착거동을 해석하기 위해서 흡착매개변수가 2개인 Langmuir 모델과 Freundlich 모델 그리고 흡착매개변수가 3개로 주어지는 Redlich-Peterson (RP)모델과 Singer-Yen (SY)모델을 사용하였다. 각 흡착질에 대한 흡착거동의 해석은 Fig. 6~8에 각각 나타내었다. Langmuir모델과 Freundlich모델의 두 흡착매개변수와 RP모델과 SY모델의 세 흡착 매개변수를 비선형 최적화 기법에 의해서 결정하였으며 2-흡착매개변수 모델과 3-흡착매개변수 모델의 상관계수가 0.88이상으로 나타났으며 Freundlich식과 Redlich-Peterson식은 거의 유사하여 Fig. 6~8에서 겹치는 것으로 나타나고 있다.

결 론

식물성계에 널리 분포하고 있는 페놀성 물질들은 그동안 식품에 있어 영양저해물질로서 식품에 떼운 맛, 갈변등을 일으키는 주 원인물질로 인식되어 왔으며 최근에 이들 물질들이 항산화성 또는 항암성 등의 다양한 기능들이 밝혀지면서 제거 또는 분리회수의 필요가 생기게 되었다.

본 실험에서는 식품계에 널리 존재하고 있는 phenolic acid인 gallic acid, p-comaric acid, ferulic acid를 선정하여 페놀성 물질들의 제거 혹은 분리목적의 기초자료를 제공하고자 활성탄을 이용하여 Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 그리고 Singer-Yen 모델을 이용하여 흡착거동을 해석하고자 하였으며 선정된 phenolic acid에 대해 Langmuir모델은 상관계수가 0.90 이상으로 나타나 비교적 좋은 흡착거동을 예측할수 있었으며, 특히 gallic acid의 경우는 상관계수가 0.97로 나타나 흡착거동을 잘 해석 할 수 있었으며, Freundlich, Redlich-Peterson모델은 ferulic acid에 대해 Langmuir 모델에 비해 비교적 잘 적용되었으며 Singer-Yen모델은 다른 모델식들에 비해 잘 적용되지 않는 것으로 사료된다.

참고문헌

고경진, 정재권. 1985. 수용액에서 활성탄에 의한 올소인산의 제거. 화학공학회지. 23(5): 303-311.
 남영우. 1989. 활성탄에 의한 페놀계 유기용액의 흡착. 화학공학회지. 27(2): 215-223.
 이병선, 하기성, 김주봉. 1988. 국산활성탄의 유기화합물흡착특성(1). 화학공학회지. 26(6): 583-590.
 이정희, 이서래. 1994. 국내산 식물성 페놀성 물질의 함량 분석. 한국식품과학회지. 26(3): 310-316.
 이정희, 이서래. 1994. 식물성 식품중 페놀성 물질의 몇가지

- 생리활성. 한국식품과학회지, **26**(3): 317-323.
- Amiot, M. J., S. Aubert and J. Nicolas. 1992. Phenolic composition and browning susceptibility of various apple cultivars at maturity. *Journal of Food Sci.*, **57**(4): 958-962.
- Bruda, S., W. Oleszek and C.Y. Lee. 1990. Phenolic compound and their changes in apples during maturation and cold storage. *J. Agric. Food Chem.*, **38**(4): 945-948.
- Cooney, C. W. 1987. *Liquid-phase adsorption fundamentals*. Chem. Eng. Educ., pp.200-203.
- Hobert, R. J., and S. D. Senter. 1980. A gas-liquid chromatographic method for analysis of phenolic acids in plants. *J. Agric. Food Chem.*, **28**: 1292-1295.
- Jossens, L. 1978. Thermodynamics of multi-solute adsorption from dilute aqueous solutions. *Chem. Eng. Sci.*, **33**: 1097-1106.
- Kumar, P., S. S. Dara. 1981. Binding heavy metal ions with polymerized onion skin. *Journal of Polymer Science*, **19**: 397-402.
- Lee, J. J., Y. H. Chang and B. R. Cho. 1985. Adsorption characteristics of Cd-chelate compounds on activated carbon. *Hwahak Konghak*, **23**(5): 313-320.
- McCabe, W. L., J. C. Smith and P. Harriott. 1993. *Unit Operation of Chemical Engineering* 5th. McGraw-Hill, pp. 810-837.
- Randall, J. M., F. W. Reuter and A. C. Waiss. 1975. Removal of cupric ion from solution by contact with peanut skins. *Journal of Applied Polymer Science*, **19**: 1563-1571.
- Sakagami, H. and H. Nakashima. 1991. Structures and activities of tannins in crude drugs (4). Proceedings of the 8th symposium on the Studies and Application of Naturally Curing Drugs, July, 26, Tokyo.
- Wright, C. W. 1995. Natural products in the fight against aids. *The Pharmaceutical Journal*, **254**: 583-587.
- Yen, C.Y. and P. C. Singer. 1984. Competitive Adsorption of phenols on activated carbon. *J. Environ. Eng.*, **110**(5): 976-989.
- Streat, M., J. W. Patrick and M. J. Camporro Perez. 1995. Sorption of phenol and para-chlorophenol from water using conventional and novel activated carbons. *Wat. Res.*, **29**(2): 467-472.