

분말활성탄 첨가가 한외여과막 투과성능에 미치는 영향

정호덕 · 고은정 · 윤광섭* · 이원영 · 최용희

경북대학교 식품공학과, *대구효성가톨릭대학교 식품공학과

The Effect on Permeability of Ultrafiltration by Addition of Powdered Activated Carbon

Ho-Duck Chung, Eun-Jung Ko, Kwang-Sup Youn*, Won-Young Lee and Yong-Hee Choi

Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University

*Department of Food Science and Technology, Hyosung Catholic University

Abstract

Major problems of membrane process are fouling and concentration polarization on the surface of membrane. These problems cause the declination of flux in the processing. Pectin was a main pollutant in membrane for the process of juices. It was investigated that the effect of powdered activated carbon(PAC) addition on the permeability of ultrafiltration process in order to improve it in this study. Generally, Fouling was increased with increment of pectin concentration. Permeate flux was less declined by addition of PAC than by non-addition. Permeate flux was improved to 122.68 ± 4.83 , 119.30 ± 1.77 , $117.46 \pm 2.82\%$ than non-addition of PAC in each 0.1, 0.3, 0.5% pectin polluted model solution. The fouling phenomena were quantitatively explained with the resistance-in-series model. In the model equation, the irreversible resistance(R_p) was decreased and the reversible resistance(R_r) was increased. These results meant that the addition of PAC prevented the deposition of pectin on membrane pore and improved permeability.

Key words: concentration polarization, pectin, powdered activated carbon, resistance

서 론

막분리 기술은 기체나 액체, 고체를 분리하는 산업 공정에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 최근들어 산업이 다양화되고 전문화되고 고기능화됨에 따라 고부가가치 제품 및 고순도 제품에 대한 요구가 점차 높아지고 있으며 그에 따른 식품산업에서의 응용도 계속적으로 확대되고 있다. 하지만 분리막에 의해 단백질과 같은 거대분자 물질을 분리정제 할 때 야기 되는 가장 큰 문제점은 분리된 거대분자들이 막표면에 가역적으로 누적되는 농도분극(concentration polarization)과 이 누적된 거대분자가 막과의 상호작용에 의해 막표면 또는 막세공내에 비가역적으로 침착되는 막오염(membrane fouling)현상을 유발시킨다는 점이다. 한외여과는 막세공과 분리대상 물질의 크기 차에 의한 체효과(sieve effect)에 의해 분리가 이

루어지는데, 농도분극과 막오염이 발생되면 한외여과막 세공의 일부 또는 전체가 막혀 막 본래의 분리능이 변화되며, 또한 막투과 플럭스(membrane permeate flux)가 감소하게 된다. 현재 까지 제시된 농도분극 및 막오염 제어법(Mulder, 1991)은 크게 분리대상 용액의 전처리법, 막표면의 친수화 개질법, 막의 주기적인 세척법, 막모듈 유로 내의 흐름을 난류상태로 유지하기 위해 도입액의 유속을 증가시키거나 유로 내에 난류 촉진물을 삽입하여 물질전달을 촉진시키는 방법이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다(Winzler와 Belfort, 1993).

다양한 유체식품의 경우 막표면에 침착되는 물질을 많이 조사되고 있다. Peri 등은 치즈 웨이공정에서 Casein, α -lactalbumin, β -lactoglobulin과 γ -globulin 등이 막표면에 침착되는 주요 오염물질원으로 밝혔다(Peri와 Dunkly, 1971; Lim *et al.*, 1971; Lee와 Merson, 1975). Watanabe 등(1979a, b)은 mandarin orange juice에서 농도분극현상과 막오염을 일으키는 주요 오염물질이 pectin과 cellulose라고 하였다. 펙틴

Corresponding author : Yong-Hee Choi, Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University, Teagu 702-701, Korea

은 식물 세포조직의 일차세포벽이나 세포 사이의 중간층에서 발견되는 다당류로서 식물세포의 기계적 강도 및 세포간의 결합에 관계하며, 또한 세포벽내에 존재하는 수분의 분산과도 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 펙틴은 야채나 과일의 숙성 중 조직의 단단함(firmness), 응집성(cohesiveness) 및 이들 가공제품의 텍스처(texture), 점조도(con-sis-tency)에 큰 영향을 미치는 물질이다. 따라서 식품내에서 펙틴은 점조성을 가지게 하며 다른 물질과 결합하여 크게 응집하므로 막분리 공정을 통한 청징화 주스제조시 크게 농도분극현상과 막오염을 일으키는 물질로 알려져 있다.

PAC-UF system 은 저분자물질을 분말활성탄에 흡착시키고 이 분말활성탄을 한외여과에 의해 제거하는 시스템이다. 이 시스템은 Lainé등 (1990)에 의해 연구되기 시작했는데 분말활성탄이 비가역적 막오염의 원인이 되는 유기물을 흡착하여 분리막 표면에 쌓이는 유기물의 양을 줄여 주고 또한 쌓이는 케이크의 수력학적 투과저항을 감소시켜 주므로 투과유속이 증가하고 일정량의 여과수를 얻는데 필요한 분리막의 소모가 적게 되어 전체적인 운전비용이 감소하게 되는 특징을 가진다.

본 연구는 막오염 완화방법(Fane과 Fell, 1987) 중 고도정수처리에서 저분자량인 유기물을 제거할 목적으로 수처리 공정에서 새롭게 도입되어 쓰이고 있는 PAC-UF system (Crozes *et al.*, 1993; Jacangelo *et al.*, 1995; Adham *et al.*, 1991)의 적용과 함께 고분자 오염물질인 펙틴에 대한 막오염 완화여부를 알아 보는데 있다.

재료 및 방법

분말활성탄

국내 D사의 분말활성탄을 사용하였으며, 본 실험에서는 200 mesh(75 μm)를 통과하고 300 mesh(45 μm)를 통과하지 못하는 크기의 분말활성탄을 사용하였다. 분말활성탄은 초순수에 담가 교반하고 하루 동안 방치하여 상층에 떠 있는 재를 제거하고 이와 같은 과정을 3회 반복하여 재를 제거하였다. 위의 과정을 거친 분말활성탄을 세공크기 1 μm 인 여과지(Toyo 5C)로 걸러 105°C에서 건조시킨후 사용하였다.

펙틴

국내 S.B.I.사에서 1998년에 만들어진 펙틴(citrus pectin)을 사용하였다.

직렬여과저항(resistance in series model)

분리막의 투과유속은 저항의 직렬 연결 개념에서 근거한 여과저항 모델(Padilla-Zakour와 McIellan, 1993)에 의해 표현될 수 있다. 이 모델은 표준 세공 폐쇄 모델(standard pore blocking model)이나 박막이론 모델(film theory model)등이 설명할 수 없는 막오염 효과, 압력 의존성 등을 동시에 설명할 수 있다.

$$J_t = \frac{\Delta P}{\eta R_t} = \frac{\Delta P}{\eta(R_m + R_p + R_f)} \quad (1)$$

J_t 는 총투과플럭스, ΔP 는 압력, η 는 투과액의 점도, R_m 은 분리막 자체에 의한 저항, R_p 는 가역적인 농도분극 현상 및 부분적인 막표면 오염층에 의한 저항, R_f 는 비가역적인 세공 내부 및 표면 막오염에 의한 저항을 의미한다.

여기서 R_m 은 (2)식에 의해 구하여 지는데 J_w 는 순수 투과 플럭스이고, η_w 는 순수 점도이다.

$$R_m = \frac{\Delta P}{\eta_w \cdot J_w} \quad (2)$$

또한 비가역적인 저항 R_f 는 초순수로 10분간 세척 후에 측정된 J_f 를 가지고 (3)식에 대입하여 얻는다.

$$R_f = \frac{\Delta P}{\eta_w \cdot J_f} - R_m \quad (3)$$

나머지 가역적인 저항 R_p 는 (4)식에 의해 구해진다.

$$R_p = R_t - R_f - R_m \quad (4)$$

총저항 R_t 는 실험후의 플럭스를 이용하여 (5)식에 의해 구한다.

$$R_t = \frac{\Delta P}{\eta \cdot J_t} \quad (5)$$

한외여과 시스템

본 실험에 사용된 막분리 시스템은 Fig. 1과 같이 구성된 것으로 사용하였다. 사용된 막은 polysulfone 재질의 중공사형막(SUNKYONG Inc, Korea)으로 막공경크기가 30 K dalton cut-off인 것과 polyacrylonitrile 재질의 100 K인 것을 장치하여 사용하였다. 막의 크기 및 특성은 Table 1과 같다. 또한 분리막 공정은 펙틴용액의 농도와 분말활성탄의 첨가여부에 따른 투과플럭스 영향을 살펴보았다. 펙틴용액의 온도는 20°C(± 3)로 고정하고, 막횡단압력을 1 kgf/cm²로

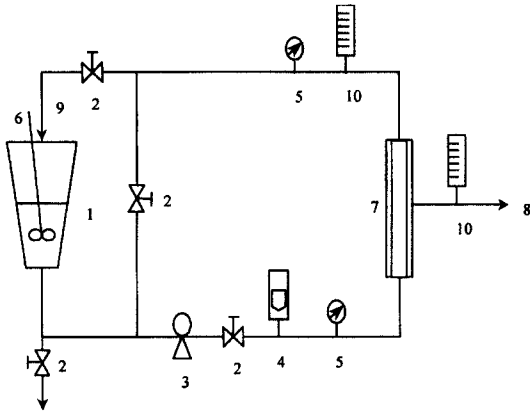


Fig. 1. Schematic diagram of BUS-200 system.
 1. Feed Tank, 2. Valve, 3. Feed Pump, 4. Rotameter, 5. Pressure Gauge, 6. Stirring moter, 7. Membrane, 8. Permeate, 9. Retentate, 10. Flowmeter.

Table 1. Specification of ultrafiltration modules

Term	Unit	Grade No.	SKUF30	PN10B-PV130
		Serial No.	103-0830	NSU31110446
Initial Flux	L/hr		28.8 ¹⁾	15.0 ²⁾
MWCO	-		30,000	100,000
Membrane Material	-		Polysulfone	Polyacrylonitrile
Membrane Area	m ²		0.06	0.06
Membrane Size (ID/OD)	mm		0.8/1.4	0.8/1.4
Module Size (OD*length)	mm		26*360	33*345
Max. Pressure	Kg/cm ²		3	5
Max. Temperature	°C		60	50
pH range	-		2-13	2-12
Module Housing	PVC		PVC	
Potting Material	Epoxy		Epoxy	

¹⁾Evaluated by pure water at 25°C, 2 Kg/cm².
²⁾Evaluated by pure water at 25°C, 1 Kg/cm².

둔 상태에서 실험을 하였다. 분말활성탄의 양(200 mg)은 흡착량을 고려하여 펙틴양의 0.5%내의 양을 결정하고, 김(1994)과 이(1996)의 내용을 참조하였다.

펙틴분석

펙틴의 성분분석은 3,5-dimethylphenol 발색시약을 사용하여 흡광도를 측정하였다. 측정방법은 다음과 같다. 샘플 125 µl을 취하여 2% NaCl 125 µl와 함께 혼합한다. 여기에 95% H₂SO₄ 2 mL를 첨가하여 10분 동안 70°C에서 가열시킨다. 가열후 20-30초 동안 식

히고 3,5-dimethylphenol 100 µl를 첨가한다. 10-15분 뒤에 흡수선량 450 nm와 400 nm에서 흡광도를 측정한다. 농도의 계산은 450 nm에서 400 nm의 흡광도값을 뺀 값을 이용하였다. standard는 D-galacturonic acid monohydrate를 사용하였다(Carbonell *et al.*, 1989).

결과 및 고찰

펙틴용액과 분말활성탄 현탁액의 분리막에 대한 영향

PAC-UF system의 적용여부를 알기 위해서 분리막에 대한 분말활성탄 현탁액과 실험조건 중 가장 높은 농도인 0.5%펙틴용액의 투과플럭스를 Fig. 2에 비교하였다. 0.5% 펙틴용액을 1시간 30분동안 여과한 분리막의 투과플럭스는 초기증류수의 플럭스 123L/m² hr에 비해 약 73%나 감소하였다. 이것은 Watanabe 등(1979a, b)이 보고하듯이 펙틴이 막오염 물질을 나타내 주었다. 반면에 분말활성탄 200 mg/L 용액을 여과하였을 때에는 분리막의 플럭스는 약 15% 정도로 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 분말활성탄 입자의 크기가 분리막의 세공 크기보다 훨씬 크기 때문에 세공 사이를 막거나 내부에 침착되어 막을 오염시키보다는 단지 표면층에 쌓여 플럭스의 감소를 나타내는 것으로 판단되어진다.

세공크기에 따른 투과플럭스 변화

세공크기에 따른 투과플럭스의 변화는 Belfort 등(1994)이 나타냈듯이 막분리 물질이 세공크기보다 작거나 같을 경우 막오염(fouling)은 세공내의 흡착

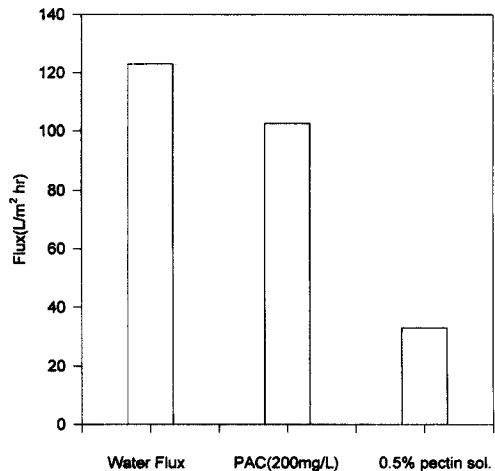


Fig. 2. Effects of solutes (after 1.5 hrs operation) on ultrafiltration flux.

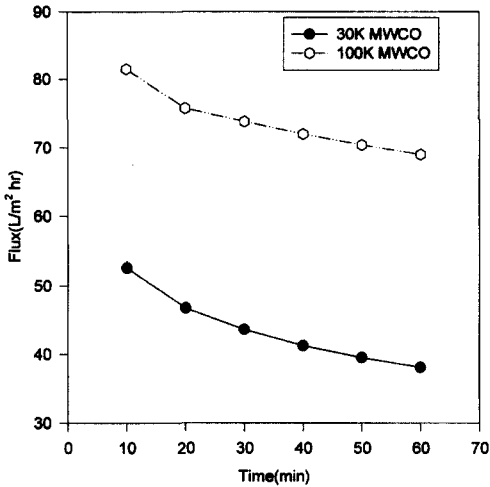


Fig. 3. Flux declines of the different membranes in 0.1% pectin solution.

(adsorption)과 세공막음(blockage)으로 투과플럭스의 감소에 영향을 주고, 막분리 물질이 세공크기보다 클 경우 막표면의 침착(deposition)을 통해 투과플럭스의 감소에 영향을 주는 것으로 밝히고 있다. Fig. 3은 단시간내의 MWCO에 따른 플럭스의 변화를 나타내는 것으로 MWCO가 큰 100 K에서 적게 감소하는 것으로 나타났는데, 그것은 30 K에 비해 세공이 크기 때문이라 할 것이다. 이것은 Cheryan (1998)이 제시했듯이 단시간동안에 투과플럭스는 세공이 큰 막이 더 많이 측정되어졌다. 하지만 여과공정이 오래동안 지속될 경우 100 K인 막은 그 세공안에 blockage와 adsorption 현상이 더 심해지므로 단순히 막표면에 쌓여 투과플럭스의 감소를 보이는 30 K보다 투과플럭스의 감소가 급격히 변하여 더 낮아질 것이다.

농도별 투과플럭스 변화

Fig. 4는 펙틴용액 농도별 투과플럭스의 감소를 보여주는 것으로 MWCO 30 K인 분리막을 이용하였다. 펙틴용액의 농도가 증가할수록 투과플럭스의 감소는 크게 낮아졌다. 공정 2시간후의 플럭스를 비교해보면 0.1% 펙틴용액에 비해 0.5% 펙틴용액은 플럭스가 약 19%가 줄어들었다. 이것은 거대분자인 펙틴을 많이 함유한 용액일수록 그 점성의 증가로 주어진 압력하에서 투과율이 떨어지게 되면서 그 플럭스의 감소가 크게 일어날 수 있다는 것을 나타내고 있다. 따라서 분리막을 이용한 청정화 주스 제조시 전처리 공정으로 펙틴의 제거가 반드시 있어야 그 제조 공정의 효율성과 함께 경제성도 높일수 있을 것

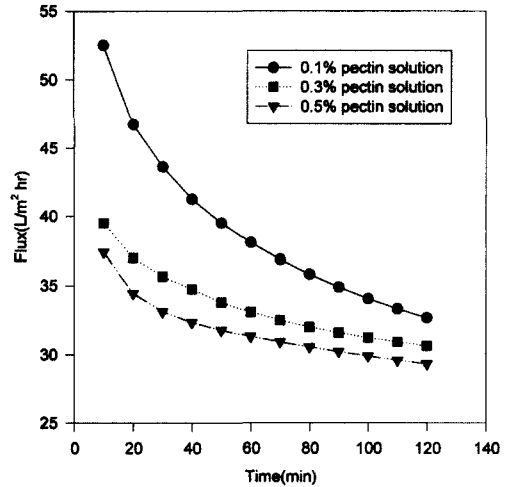


Fig. 4. Change of permeate flux in various pectin solution (MWCO 30 K).

이라 판단되어진다.

분말활성탄 첨가에 따른 투과플럭스의 변화

Fig. 5는 펙틴용액에 분말활성탄을 첨가했을 때와 첨가하지 않았을 때의 투과용액의 펙틴농도를 나타내어주는 것으로 MWCO 30 K인 분리막을 이용한 것이다. 실험을 거치는 동안 두 가지 용액에서 펙틴이 거의 검출되지 않았다. 60분간의 여과공정을 하는 동안 분말활성탄을 첨가하지 않은 용액의 투과액의 펙틴농도는 계속해서 줄어들고 있는 반면 분말활성탄

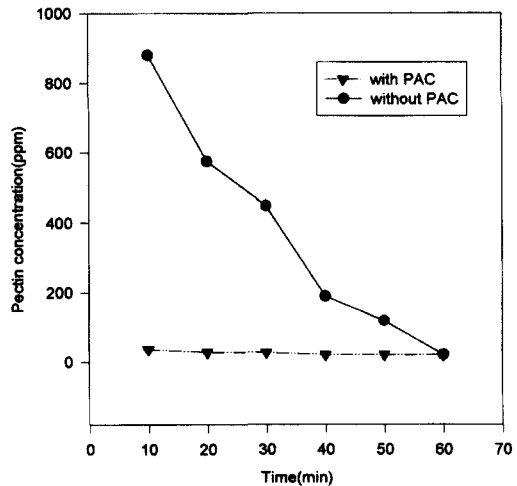


Fig. 5. Pectin concentration of permeate during UF processing of 0.5% pectin solution with 200 mg/L PAC and without PAC (MWCO 30 K).

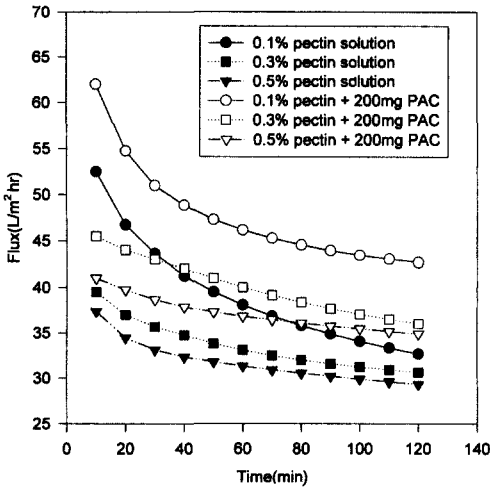


Fig. 6. Flux declines for ultrafiltration processing of various pectin solution with and without PAC (MWCO 30 K).

을 첨가한 것은 시작했을 때의 펙틴농도와 거의 변화가 없는 것을 보여주고 있다. 이것은 분리막의 MWCO가 30K이기 때문에 거대분자인 펙틴이 분리막을 통과하지 못하고 통과하더라도 극히 일부만 통과하는 것으로 보여진다. 또한 분말활성탄을 첨가했을 때가 첨가하지 않았을 때 보다 투과용액 속의 펙틴농도가 훨씬 낮음을 볼 수 있다. 더 자세한 설명으로 Fig. 6은 각 농도별 투과플럭스의 감소와 분말활성탄 첨가여부에 따른 투과플럭스의 감소를 본 것으로 농도가 높아질 수록 투과플럭스가 감소하는 것을 보여주고 있으며, 분말활성탄을 첨가시 0.1, 0.3, 0.5% 농도에서 122.68 ± 4.83 , 119.30 ± 1.77 , 117.46 ± 2.82 % 정도의 투과플럭스의 증가가 나타나고 있다.

따라서 분말활성탄은 막을 통과해 지나가는 동안에 펙틴과 먼저 접촉을 하면서 활성탄 세공안으로 펙틴의 일부를 plugging시키는 것으로 판단되어진다. 그에 따라 막세공 사이를 막아버리던 펙틴의 양을 줄이게 된 것이라 판단된다. 또한 분말활성탄이 가지는 고유의 입자 크기때문에 막표면을 지나가면서 농도분극층의 크기를 줄여주는 rolling ball과 같은 역할과 함께 막표면에서의 난류효과도 있을 것이라 판단되어진다.

막오염의 정량적 해석

직렬여과저항(Bitter, 1991)을 이용하여 어떤 저항이 투과플럭스 감소에 지배적으로 영향을 미쳤는가를 관찰할 수 있었고, 여과액의 분말활성탄이나 펙틴농도 변화에 따른 저항의 변화를 관찰할 수 있었다. Table 2는 각 농도에 따른 실험의 결과에서 계산한 저항값들과 전체 저항에 대한 각 저항의 백분율을 나타내었다. 펙틴농도가 증가됨에 따라 가역적인 저항인 농도분극에 의한 저항(R_p)은 감소하였고, 비가역적인 저항인 여과저항(R_f)은 증가하는 추세를 보였다. 이것은 투과플럭스의 감소를 정량적으로 설명하여 주는 것으로 펙틴이 막표면의 농도분극층보다 막세공을 막음으로써 생기는 비가역적인 저항이 투과플럭스에 크게 기인함을 알 수 있다. 또한 동일한 농도의 펙틴에 대하여 분말활성탄의 첨가가 가역적인 저항(R_p)의 증가를 보여주고 있는 반면, 비가역적인 저항(R_f)은 줄어든 모습을 보여주고 있다. 이것은 분말활성탄의 첨가로 인한 투과플럭스의 감소가 펙틴이 분리막의 세공안을 막음으로써 생기는 비가역적인 내부 막오염보다는 분말활성탄의 입자의 크기가 분리막의 세공 크기보다 크기 때문에 막표면에 형성되는 농도분극

Table 2. A Series of resistances for one membrane on pectin solution filtration

MWCO	Feed		Value ($10^9 \times m^{-1}$)				Percentage (%)		
	Pectin (%)	PAC (mg/L)	Rm	Rf	Rp	Rt	Rm	Rf	Rp
30,000	-	200	3.00	0.43	0.17	3.06	83.33	11.95	4.72
	0.1	-	2.63	5.91	2.97	11.51	22.85	51.35	25.80
	0.3	-	2.13	5.93	2.88	10.94	19.47	54.20	26.33
	0.5	-	2.12	8.59	2.12	12.83	16.52	66.95	16.53
	0.1	200	2.44	2.77	2.91	8.12	30.05	34.11	35.84
	0.3	200	2.56	3.28	3.18	8.74	26.12	37.52	36.36
	0.5	200	2.70	3.78	3.65	10.13	26.65	37.32	36.03

Rm: membrane resistance.
 Rf: polarization layer resistance.
 Rp: fouling resistance.
 Rt: total resistance.

층 및 표면 막오염층에 쌓여 생기는 가역적인 오염에 크게 기인함을 알 수 있다. 또한 세공내에 침착될 펙틴이 막세공보다 큰 분말활성탄에 미리 침착되어 막표면에 분말활성탄과 함께 쌓이기 때문임을 알 수 있다. 만일 분말활성탄과 펙틴사이에 정상적인 흡착이 일어났다면 더 큰 효과가 있었겠지만 분말활성탄 내의 작은 세공은 분리막의 세공보다 더 작으므로 펙틴이 그 세공에 흡착되는 것은 어려운 것으로 보여진다. 흡착이 일어났다고 하더라도 극히 적은 양이 분말활성탄의 미세공보다 큰 세공 구멍에 흡착되었을 것으로 여겨진다. 그리고 분말활성탄의 첨가는 각 농도에 대해 전체 투과저항값이 각각 29.45, 6.86, 21.04 %의 감소를 보여주고 있다. 이것은 비가역적인 저항(R_m)의 감소에 따른 영향이 전체 투과 저항값의 감소에 크게 영향을 주는 것으로 판단되어진다. 이에 따라 R_m 의 비율은 상대적으로 증가하는 것으로 나타나고 있다. 또한 PAC-UF system을 이용한 펙틴 용액의 한외여과 공정이 막오염의 완화를 가져다 주는 것으로 보여진다. 이 결과는 저분자량인 미량유기물을 PAC-UF system을 이용하여 제거한 김((1994)과 이(1996)의 결과와 비슷하게 나타났다. 따라서 고분자량인 펙틴도 이 system을 제거할 수 있는 것으로 사료된다.

요 약

주스 제조시 가장 큰 오염물질로 여겨지는 펙틴은 분리막 이용시 제거 공정이 필요한 물질임이 보고되어졌다. 여기에 새로운 분리막기술의 하나로 분말활성탄과 분리막을 동시에 이용하는 PAC-UF system을 이용하여 막투과성능에 미치는 영향을 보았다. 분말활성탄은 거대분자인 펙틴과 미리 접촉을 통하여 분리막 세공안에 침착될 펙틴을 활성탄 내부의 세공에 침착시켜 모든 펙틴용액에서 122.68 ± 4.83 , 119.30 ± 1.77 , $117.46 \pm 2.82\%$ 투과플럭스의 증가를 가져왔다. 이것은 직렬여과 저항을 통해 투과플럭스를 감소시키는 저항이 막표면에 형성되는 농도분극층 및 표면 막오염층인 가역적인 저항보다는 비가역적인 내부 막오염임을 알 수 있었다. 분말활성탄과 함께 분리막을 통과시켰을 때에 그 투과플럭스의 증가효과는 뚜렷이 나타났음을 실험의 결과로 볼 수 있었다. 마치 막으로 분말활성탄의 첨가는 전체 투과저항값이 각각 29.45, 6.86, 21.04 %의 감소를 보여주고 있어 막오염의 완화를 가져다 주는 것으로 판단되어진다.

감사의 글

본 연구는 농림부에서 시행한 첨단기술개발사업의 지원으로 수행된 연구결과의 일부로 이에 감사드립니다.

문 헌

- Adham, S.S., U.L. Snoeyink, M.M. Clark and J.L. Bersillon. 1991. Predicting and verifying organics removal by PAC in an ultrafiltration system. *J. AWWA* **83**(12): 81
- Belfort, G., R.H. Davis and A.L. Zydney. 1994. The behavior of suspensions and macromolecular solutions in crossflow microfiltration. *J. Memb Sci.* **96**: 1
- Bitter J.G.A. 1991. *Transport Mechanisms in Membrane Separation Process*. Plenum press, New York
- Carbonell, E., E. Costell and L. Duran. 1989. Evaluation of various methods for measurement of pectin content in jam. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* **72**(4): 689
- Cheryan, M. 1998. Fouling and Cleaning. In *Ultrafiltration and Microfiltration HANDBOOK*. Technomic Publishing Co., Inc. pp237
- Crozes, G., C. Anselme and J. Mallevalle. 1993. Effect of adsorption of organic matter on fouling of ultrafiltration membrane. *J. Memb Sci.* **84**: 61
- Fane, A.G. and C.J.D. Fell. 1987. A review of fouling and fouling control in ultrafiltration. *Desalination* **62**: 117
- Jacangelo, J.G., J.M. Laine., E.W. Cummings. and S.S. Adham. 1995. Ultrafiltration with pretreatment for removing DBP precursors. *J. AWWA* **88**(3): 100
- Lañé J-M, M.M. Clark and J. Mallevalle. 1990. Ultrafiltration of lake water: Effect of pretreatment on the partitioning of organics, THMFP, and flux. *J. AWWA* **82**(11): 82
- Lee, D.N. and R.L. Merson. 1975. Examination of cottage cheese whey proteins by scanning electron microscopy: Relationship to membrane fouling during ultrafiltration. *J. Dairy Sci.* **58**: 1423
- Lim, T.H., W.L. Dunkely and R.L. Merson. 1971. Role of protein in the reverse osmosis of cottage cheese whey. *J. Dairy Sci.* **58**: 658
- Mulder, M. 1991. *Basic Principles of Membrane Technology*. Kluwer Academic Publisher, Netherlands
- Padilla-Zakour, O. and M.R. Mclellam. 1993. Optimization and modeling of apple juice cross-flow microfiltration with ceramic membrane. *J. Food Sci.* **58**(2): 369
- Peri, C. and Dunkely, W.L. 1971. Reverse osmosis of cottage cheese whey. 1. influence of composition of the feed. *J. Food Sci.* **36**: 31
- Watanabe, A., S. Kimura, Y. Ohta, J.M. Randall and S. Kimura. 1979a. Nature of the deposit on reverse osmosis membrane during concentration of pectin/cellulose solution. *J. Food Sci.* **44**: 1505
- Watanabe, A., Y. Ohta, S. Kimura, K. Umeda and S. Kimura. 1979b. Fouling materials on the reverse osmosis membrane during concentration of mandarin orange juice. *J. Japan Soc. Food Sci & Tech.* **26**: 260

Winzeler, H. and G. Belfort. 1993. Enhanced Performance for Pressure driven Membrane Process. *J. Memb. Sci.* **80**: 35

김재신. 1994. 분말활성탄 - 한외여과 시스템을 이용한 미량유기물 제거. 서울대학교 대학원 공업화학과 석

사학위논문

이승진. 1996. PAC-UF 시스템을 이용한 미량유기물 및 휴민산의 제거에 관한 연구. 서울대학교 대학원 공업화학과 석사학위논문