

정밀여과공정을 이용한 포도주스의 여과특성 및 막오염 특성

고은정 · 최용희
경북대학교 식품공학과

Filtration Characteristics and Membrane Fouling Characteristics of Grape Juice Using Microfiltration Process

Eun-Jung Ko and Yong-Hee Choi

Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University

Abstract

This study was performed to identify the characteristics of membrane filtration and fouling effect of grape juice. Grape Juice was filtered in a laboratory microfiltration system with hollow fiber membrane made of mixed cellulose acetate with pore size of 0.1 μm . Permeate flux increased initially then subsequently decreased with increasing pressure. The permeate flux was declined continuously while the fouling material was accumulated on the surface of the membrane as the operation time passed. Total resistance was decreased with higher temperature and lower pressure, which could be explained by the expansion of pore size at higher temperature and minor compaction of the polarized layer at lower pressure. Fouling resistance was the major reason for membrane fouling in filtration of grape juice using microfiltration.

Key words: grape juice, microfiltration, membrane fouling

서 론

정밀여과는 micron 크기의 작은 입자 분리를 목적으로 하여 체분리(sieving)의 원리로서 미세여과라 하며(Valentas *et al.*, 1997; 이영무, 1990; Fukumoto *et al.*, 1998) 분자량 200,000 dalton 이상의 물질들을 선택적으로 분리하는데 유효한 공정이다. 또한 막 투과 압력은 다른 막분리 공정보다 훨씬 낮은 2 bar로 시스템 운영비가 적게 소요되며 비교적 대량으로 분리를 수행할 수 있다는 장점이 있다.

현재 정밀여과 공정은 식품 및 음료 산업에서 청징화, 생물공학에서 세포 및 세포 파편의 회수와 폐기물 처리 등에 응용되고 있으며(Grandison과 Lewis,

1996), 특히 식품산업에서 적용할 수 있는 간편하고 저렴한 막분리 공정이 개발되어 주목을 받고 있다(김길환과 김동만, 1994). 그러나 막분리 기술의 폭넓은 산업적 응용에도 불구하고 아직까지 막 오염 현상은 막의 효율적인 이용에 장애가 되고 있다. 막 오염현상은 막의 초기 투과유속이 시간의 경과에 따라 감소하는 것을 말하며, 막 오염을 일으키는 주요원인은 막의 종류, 공급액의 성질, 분리막의 운행 조건 등을 들 수 있다.

정밀여과의 분리효과는 분리대상 물질과 막의 세공크기에 의해 결정되지만 막의 세공크기보다 작은 물질들이 전부 막을 통과하는 것은 아니다. 분리대상의 물질들이 막의 세공을 막거나 흡착되어 세공크기보다 작은 크기의 물질들도 막을 통과하는데 제한을 받게 된다. 정밀여과 공정상의 가장 큰 문제점은 콜로이드성 입자에 의한 막 침착 현상을 들 수 있으며 이들 입자에 의한 농도분극현상은 막분

Corresponding author: Yong-Hee Choi, Dept. of Food Science and Technology, Kyungpook National University, Taegu, 702-701, Republic of Korea
Phone: 053-950-5777

리에서 가장 많이 지적되는 운전상의 문제점으로 이를 최소화하기 위한 방안을 마련해야 할 것이다 (우건조, 1998).

본 연구에서는 포도주스를 이용한 정밀여과 공정 시 막여과 공정조건에 따른 투과 유속의 변화와 이에 따른 막오염 정도를 정량화 하여 막오염 특성을 고찰하고자 하였다.

재료 및 방법

정밀여과 공정

본 실험에 사용된 정밀여과 시스템은 batch system 형태로서 자동온도 조절이 가능한 stainless steel 재질의 시료탱크를 사용하였으며, 시료 중 불순물을 제거하고 막의 오염을 방지하고자 펌프 도입부에 5 μm 섬유 예비 여과기를 설치하였다. 펌프를 거친 시료는 막을 통과하여 다시 시료 탱크 내로 환류되도록 하였다(Fig. 1).

정밀여과 모듈은 세공크기가 0.1 μm 인 중공사막 (spectrum사 제조)을 장착하였으며 공정압력 0.4, 0.8, 1.2 bar, 공정온도 20, 35, 50°C로 막여과를 수행하였다.

각 공정이 끝난 뒤에는 시스템 전체를 증류수로 먼저 세척한 다음 0.3% NaOCl 용액으로 세척하고, 20~30분 동안 증류수를 다시 흘려보낸 뒤 초기 증류수의 투과유속과 비교하여 순수 투과량을 95% 이상 회복시켜 실험을 수행하였다.

시료 및 투과액의 성분분석

시료 및 투과액의 pH는 pH meter (Suntex SP-701)를 이용하여 측정하였으며 soluble solid는 굴절당도계(ATAGO N-1E)를 사용하여 °Brix로 나타내었다. Turbidity는 spectrophotometer (DUK SAN MECASYS OPTIZEN II+)를 사용하여 650 nm에서 측정하였으며 acidity는 페놀프탈레인을 지시약으로써 0.1N NaOH로 적정하여 tartaric acid로 산출하였다. Total solid는 vacuum oven method로 65~70°C, 80 kPa, 36시간 행하여 % w/w로 나타내었으며 insoluble solid는 시료 일정량을 취하여 3600~3800 rpm에서 15분간 원심분리 한 것을 % settled solid로 나타내었다(Padilla와 Mclellan, 1993a).

막 오염 특성 측정

정밀여과 시 막 오염 정도를 정량화 하여 각각의 공정조건에 따른 막오염 특성을 고찰하기 위하여 이상적인 분리막과 용액에 대해 적용할 수 있는 Hagen-Poiseuille식을 사용하여투과 플러스 (J)변화에 의한 저항값들을 계산하였다(Padilla와 Mclellan, 1993b; 장인성, 1995; 서울대학교 환경안전연구소, 1997).

$$J = \frac{\epsilon_s D^2 \Delta T}{32 \Delta X \eta} \quad (1)$$

여기서 ϵ_s 는 표면 공극률(surface porosity), D_p 는 세공의 지름, ΔP 는 막투과 압력, ΔX 는 분리막 스킨층(skin layer)의 두께, h 는 동점도(dynamic viscosity)이다. ϵ_s , D_p , ΔX 는 분리막에 대한 고유한 값이므로 이들 전체를 고유 막저항(intrinsic membrane

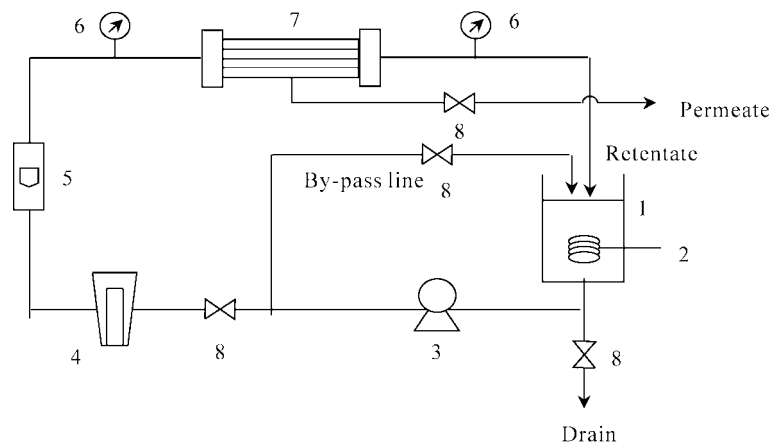


Fig. 1. Schematic diagram of ultrafiltration system.

1. Feed Tank 2. Temp. Controller 3. Pump 4. Prefilter, 5. Flowmeter 6. Pressure Guage 7. Module 8. Relief Valve

resistance) R_m 으로 묶어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P}{\eta R_m} \quad (2)$$

고유 막저항(Intrinsic membrane resistance, R_m)의 측정

회분식 정밀여과에 사용된 각 분리막에 대한 고유 막저항(R_m)은 사용하지 않은 분리막을 초순수에 하루 이상 담가두어 보관액을 완전히 제거한 후 초순수를 사용하여 일정 압력하에서 투과시켜 이때의 투과 플럭스를 다음 식에 대입하여 R_m 을 측정하였다.

$$R_m = \frac{\Delta P}{\eta J} \quad (3)$$

총 저항(Total membrane resistance, R_t)의 측정

실제 용액의 정밀여과 공정에서 발생하는 투과 플럭스의 감소원인들에는 분리막의 표면위에 형성되는 농도분극에 의한 분극층 저항, 표면 위에 가역적으로 쌓이게 되는 케이크의 저항, 세공 막힘에 의한 저항, 분리막의 흡착에 의한 저항 등이 존재한다. 이들 저항들을 고려하여 실제 정밀 여과 실험의 종료시점에서의 투과 플럭스에 의해 총 저항을 다음과 같이 구하였다.

$$R_m = \frac{\Delta P}{\eta J} \quad (4)$$

파울링 저항(Fouling resistance, R_f)의 측정

세공 막힘, 비가역적인 표면과 세공흡착에 의한 저항으로써 케이크 층을 제거한 뒤 측정하였다.

$$R_m = \frac{\Delta P}{\eta J} - R_m \quad (5)$$

케이크층 저항(Cake layer resistance, R_c)의 측정

투과 플럭스의 변화를 가져오는 막 표면위에 형성되는 농도분극에 의한 분극층 저항과 표면위에 가역적으로 쌓이게 되는 케이크에 의한 케이크 층 저항 등 여러 가지 저항을 따로 분리하지 않고 합쳐서 케이크 층 저항, R_c 로 나타내었으며 이는 총 저항과 고유 막저항, 파울링 저항의 차이로 구하였다.

$$R_c = R_c + R_p$$

$$R_c = R_t - (R_m + R_f) \quad (6)$$

결과 및 고찰

공정압력과 온도에 따른 투과플럭스 변화

정밀여과막 0.1 μm 를 이용하여 포도주스를 여과하는 동안 압력의 변화에 따른 투과 플럭스의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 공정압력이 높아질수록 투과 플럭스가 증가하는 한외여과의 경우(고온정과 최용희, 1999a)와는 달리 공정 초기에는 압력이 높아짐에 따라 투과 플럭스가 직선적으로 증가하다 일정 압력 이후에는 압력이 상승하여도 투과 플럭스는 비슷하거나 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Fig. 2에서 보듯이 어떤 지점까지는 압력이 상승함에 따라 투과 플럭스가 직선적으로 증가하는 pressure-control region이 존재하며 최대 투과 플럭스를 나타낸 이후 압력이 증가해도 투과 플럭스가 비직선적으로 증가되거나 감소하는 mass transfer controlled state로 압력의 변화에 그다지 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 압력의 지속적인 증가에도 불구하고 투과 플럭스가 증가하지 않는 것은 막 표면에서 용질입자가 겔을 형성하여 이 겔

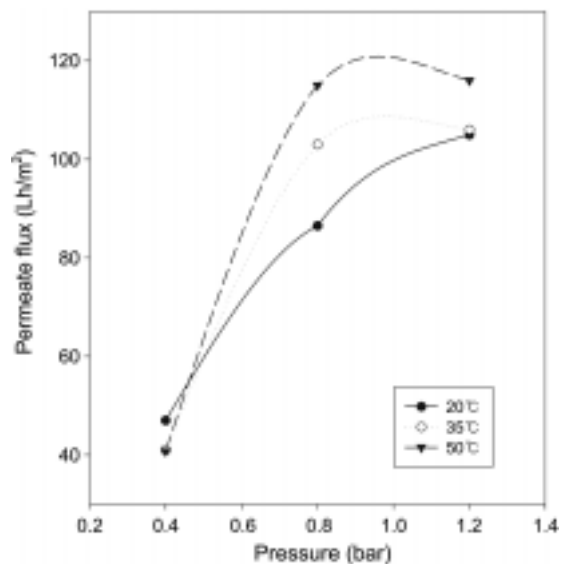


Fig. 2. Effect of pressure on the permeate flux of grape juice using MF system equipped with 0.1 μm pore size membrane

층이 압착되면서 막을 덮기 때문이다. 즉, 최대 투과 플럭스에서의 압력이 최적 공정압력임을 의미하며 높은 투과 플럭스값을 나타내는 구간을 최적 압력으로 결정한다는 보고도 있다(Kirk *et al.*, 1983; 우건조 등, 1996; 이은영과 우건조, 1998). 또 Chiang과 Cheryan (Chiang과 Cheryan, 1986)은 이런 현상이 배제된 용질 분자가 막 표면에 농도 분극을 형성하게 되며 압력에 비의존적인 지역에서의 주요 저항이 겔층 저항이기 때문이라고 보고하였다. Cheryan (Cheryan, 1986)에 의하면 막 분리시 초기 투과 플럭스는 압력에 의존적이다가 특정지점 이후에는 농도분극과 겔층 형성에 의해 투과 플럭스가 압력에 비의존적이 된다고 설명하였다.

포도주스를 여과하는 동안 공정온도에 따른 투과 플럭스 변화도 살펴볼 수 있는데 일반적으로 막 분리 온도가 상승할수록 유입액의 점도 감소와 확산 계수의 증가, 유입액 중에 존재하는 확산물질의 용해도 증가로 인하여 투과 플럭스가 증가하는 경향을 나타내었다(우건조와 하성미, 1997; Hernandez *et al.*, 1992). 공정압력 0.4 bar에서는 온도의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났으며 압력이 높은 경우 온도 상승에 따라 투과 플럭스가 약간 상승함을 알 수 있었다.

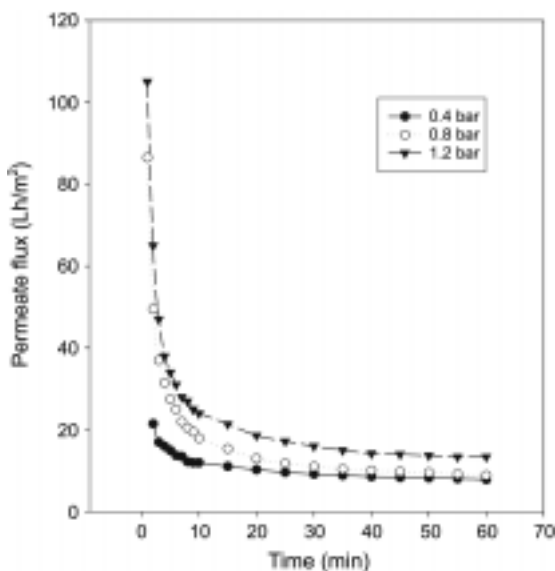


Fig. 3. Effect of process time on the permeate flux of grape juice using MF system equipped with $0.1\mu\text{m}$ pore size membrane at 20°C .

공정시간에 따른 투과플럭스의 변화

정밀여과 공정을 이용하여 여과하는 동안 시간 경과에 따른 포도주스의 투과 플럭스 변화를 Fig. 3~5에 나타내었다. 여과 초기에는 온도에 관계없이 투과 플럭스가 급격히 감소하였다. 이는 유입액 중의 용질, 기타 유·무기물 등이 막 표면 또는 막

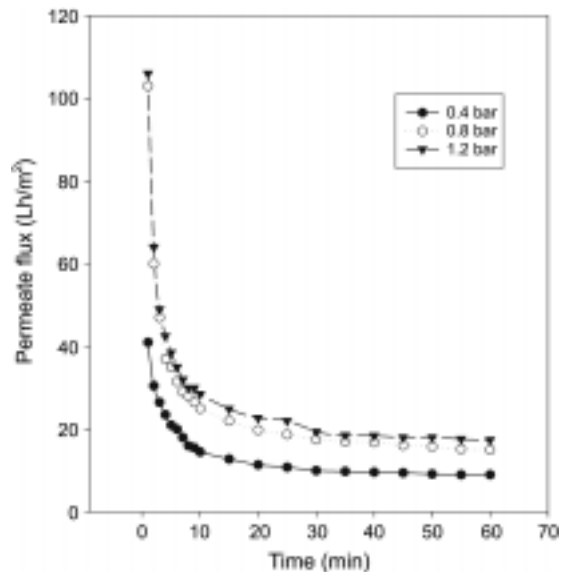


Fig. 4. Effect of process time on the permeate flux of grape juice using MF system equipped with $0.1\mu\text{m}$ pore size membrane at 35°C .

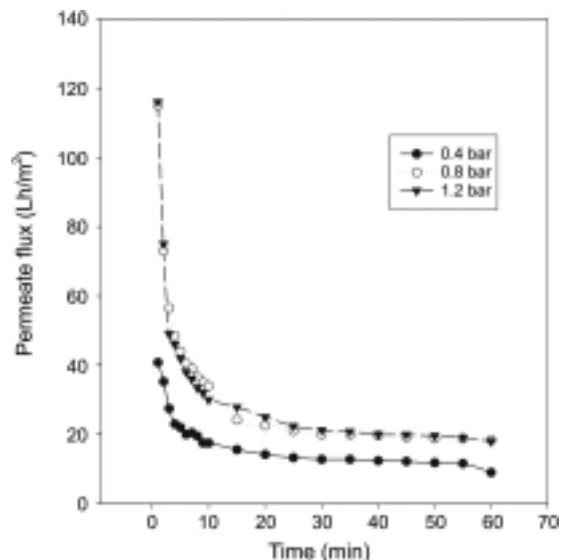


Fig. 5. Effect of process time on the permeate flux of grape juice using MF system equipped with $0.1\mu\text{m}$ pore size membrane at 50°C .

세공내에 흡착되는 단계와 그 흡착층 위에 용질 등이 추가적으로 흡착되어 고형화 되는 과정에 좀 더 빨리 도달하는 것으로 생각된다. 특히 공정압력 1.2 bar에서는 그 현상이 더욱 심하게 일어나 일정시간이 흘러 준정상상태에 도달하게 되는 지점에서는 압력이 낮은 경우와 거의 비슷한 수준의 투과 플럭스량이 관찰되었다. 전 온도구간에 걸쳐 시간 경과에 따른 투과 플럭스 변화는 유사한 경향을 나타내었다.

정밀여과에서 처음 10분내의 급격한 플럭스 감소가 발생하는데 이는 공정압력이 높을 때 매우 두꺼운 농도분극이 생성되었다는 것을 의미한다. 이런 현상 때문에 세공 크기가 다른 것의 2배 되는 막을 사용해도 25~30분 경과 후에는 막의 세공크기에 관계없이 유사한 투과 플럭스를 나타냄을 보고하였다 (Alvarez *et al.*, 1996; Tarleton과 Wakeman, 1993).

시료 및 투과액의 성분분석

정밀여과 공정을 이용하여 포도주스를 여과한 경

Table 1. Specification of the membrane module used in microfiltration process

Pore size (mm)	0.1
Material	mixed cellulose ester
Module Size (O.D. × length, mm)	90 × 230
Effective Area (m ²)	1.2
Max. Pressure (bar)	2.0
Max. Temperature (°C)	82
pH	1.0-14

우 pH, 탁도와 산도의 변화를 Table 2에 나타내었다. 정밀여과 공정에 의한 포도주스의 pH, 산도는 여과 전후 비슷한 수준이었으며 탁도는 여과 후의 개선정도가 80%이상으로 나타났다. 전보(고은정과 최용희, 1999b)의 결과에서와 같이 한외여과막과 비교해 볼 때 정밀여과막을 통과한 포도주스의 탁도가 한외여과 후의 탁도보다 더 어두운 경향이였다. 이는 정밀여과 막의 세공크기가 한외여과막의 세공 크기보다 크기 때문에 주스의 부유물이나 용질이 쉽게 통과하기 때문으로 사료된다.

정밀여과 공정을 이용하여 포도주스를 여과한 경우 soluble solid, total solid와 insoluble solid 변화를 Table 2에 나타내었다. Soluble solid의 농도는 여과 전후 비슷한 수준이었으며 total solid와 insoluble solid의 함량은 다소 감소하였다. 막여과 전후 total solid 농도의 차이는 polysaccharides인 펙틴, 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스와 단백질, 페놀물질의 제거 여부에 의한 것이며 이들 물질은 주스 안정성에 영향을 미친다고 한다(Padilla와 Mclellan, 1989). 분리막의 종류나 공정조건에 따라 투과액 중 성분 함량의 차이가 나타나는 이유는 세공 내부나 표면에 흡착되거나 막 표면에 형성된 케이크 층에 의해 제거되는 정도가 서로 다르기 때문이라고 사료된다.

막여과 공정에서의 고유 막저항, 총저항, 겔층 저항의 측정

정밀여과 공정을 이용한 포도주스 여과시 막오염 특성을 파악하기 위해 직렬여과저항모델을 적용시

Table 2. Changes of physicochemical properties in grape juice by microfiltration process at various pressures and temperatures

Operating conditions		pH	Turbidity (650 nm)	Acidity (% acid)	Soluble solid (°Brix)	Total solid (% w/w)	Insoluble solid (% w/w)
Pressure (bar)	Temperature (°C)						
raw		3.68	1.69	0.627	10.0	7.898	1.668
	20	3.69	0.16	0.600	9.60	7.259	1.345
0.4	35	3.66	0.18	0.670	9.40	7.692	0.697
	50	3.71	0.30	0.617	9.20	7.581	0.729
0.8	20	3.68	0.16	0.685	9.60	7.545	1.102
	35	3.74	0.20	0.590	10.0	7.762	1.299
	50	3.68	0.18	0.535	9.60	7.566	0.894
1.2	20	3.68	0.17	0.647	9.60	7.693	1.266
	35	3.64	0.19	0.568	9.40	7.055	1.029
	50	3.70	0.19	0.631	9.60	7.461	0.773

Table 3. Various resistance values in microfiltration process at various pressures and temperatures

Operating conditions		Resistance($\times 10^{13} \text{ m}^{-1}$)				Resistance ratio (%)			
Pressure (bar)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	R_m ¹⁾	R_t ²⁾	R_c ³⁾	R_f ⁴⁾	R_c+R_f	$R_c/(R_c+R_f)$	$R_f/(R_c+R_f)$	R/R_t
0.4	20	0.079	1.39	0.23	1.08	1.31	17.4	82.6	78.0
	35	0.091	1.21	0.44	0.68	1.12	39.4	60.6	56.1
	50	0.120	1.36	0.25	0.98	1.24	20.6	79.4	72.3
0.8	20	0.091	2.55	1.04	1.42	2.46	42.2	57.8	55.7
	35	0.027	1.61	0.12	1.47	1.59	7.49	92.5	91.0
	50	0.020	1.19	0.09	1.07	1.17	7.95	92.1	90.5
1.2	20	0.024	2.69	1.59	1.07	2.66	59.8	40.2	39.9
	35	0.022	2.09	0.35	1.71	2.06	17.0	83.1	82.2
	50	0.027	1.98	0.03	1.92	1.96	1.67	98.3	96.9

¹⁾ R_m : Intrinsic membrane resistance, ²⁾ R_t : Total resistance, ³⁾ R_c : Cake layer resistance, ⁴⁾ R_f : Fouling resistance

켜 각각의 저항값을 정량하였다. 정밀여과 공정에서 투과 플럭스 감소의 주요 요인이 되는 것은 유입액 중의 콜로이드 입자들에 의해서이다. 정밀여과막의 세공과 콜로이드 입자크기의 유사성은 분리막의 내부 막오염(internal fouling)을 유발하여 투과 플럭스를 저하시킨다고 한다(추광호, 1996a).

Table 3은 0.1 μm 의 분리막을 이용한 포도주스 여과시 막오염 특성을 정량한 결과이다. 고유 막저항은 초순수의 투과 플럭스로 구할 수 있다. Dornier 등(Dornier *et al.*, 1994)은 투과액에 함유된 입자 크기를 조사한 결과 가장 큰 지름을 가진 입자의 크기는 막의 세공크기보다 훨씬 더 작았다고 보고하였다. 이는 막에 형성된 오염층이 2차막의 역할을 하여 막 자체의 분획분자량을 감소시켜 막 투과력이 변하기 때문이다. 정밀여과막 0.1 μm 의 경우 공정조건에 따른 막오염 특성은 공정압력이 낮고 온도가 높을수록 총저항이 감소하는 것을 알 수 있었다. 공정온도가 높아짐에 따라 막 세공이 느슨해져 막 내에서의 유입액의 흐름이 저항을 적게 받으며, 낮은 압력에서는 겔층의 압축이 최소화되기 때문에 저항을 적게 받는다고 보고한 결과와 일치하였다(Jiratananon과 Channachai, 1996a; Vigneswari와 Yen, 1988; Bruin *et al.*, 1980). 공정압력이 높아지면 투과 플럭스는 많아지게 되지만 막 표면에 형성된 케이크 층이 압축되고 막 자체의 압밀화 현상이 일어나게 되어 총저항은 높아지게 된다. 또한 케이크 층 저항은 온도가 증가할수록 유입액으로의 용질의

역확산에 의해 케이크층의 두께가 점차적으로 감소하기 때문에 케이크 저항은 감소하는 것을 알 수 있었으며 Jiratananon과 Channachai (Jiratananon과 Channachai, 1996b)의 결과와 일치하였다. 파울링 저항은 공정압력이 증가함에 따라 그 값도 증가하는 경향이였다. 파울링 저항은 공정압력이 상승하면 용액 중의 더 많은 량의 당이나 산, 부유고형물이 막 세공을 통과하려 하기 때문에 저항은 증가하게 되지만 온도에 대한 영향은 그리 받지 않는다고 Jiratananon과 Channachai등과 Labbe 등(Jiratananon과 Channachai, 1996c; Labbe *et al.*, 1990)은 보고하였다. 특히 유입액 입자들의 부착에 의한 막오염은 세공 막힘에 의한 것과는 달리 단순한 물리적 현상이 아니라 분리막과 입자와의 상호작용에 의한 것으로 하나의 화학적 반응으로 간주하기도 한다고 보고하였다(추광호, 1996b). 파울링 저항은 분리막의 장기적인 운전시에 투과 플럭스를 결정하게 되어 막분리 공정의 효율을 좌우하게 되므로 투과 플럭스 면에서 우선 고려의 대상이 되어야 한다.

Table 3은 정밀여과 공정을 이용한 포도주스 여과시 저항비를 산출한 결과이다. 막오염 정도를 나타내는 R_c+R_f 는 압력은 높을수록 온도는 낮을수록 막오염 정도가 증가하는 경향이였다. 케이크 저항비는 공정온도가 높을수록 저항비가 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이는 유입액으로의 용질의 역확산이 이루어져 케이크 층 두께가 감소하기 때문으로 사

료된다. 반면에 파울링 저항비는 케이크 저항비와 반대의 경향을 나타내었으며 정밀여과 공정을 이용한 포도주스 여과에서는 파울링 저항에 의한 플럭스 감소가 막오염의 주된 원인을 알 수 있었다.

요 약

정밀여과 공정을 이용하여 포도 주스의 여과 특성 및 여과 전후 포도주스의 성분변화를 관찰하였으며 이 때 발생하는 막오염을 분석하여 포도주스 여과에 대한 정밀여과 공정의 특성을 고찰하고자 본 연구를 수행하였다.

정밀여과막 0.1 μm 의 중공사막을 사용하여 공정 압력 0.4, 0.8, 1.2 bar, 공정온도 20, 35, 50°C에서 투과 플럭스를 조사하고 막을 통과한 투과액의 성분분석을 행하였다. 공정압력에 따른 포도주스의 투과 플럭스는 초기에는 압력이 높아짐에 따라 투과 플럭스가 직선적으로 증가하다 일정 압력 이후에는 압력이 상승하여도 투과 플럭스는 비슷하거나 감소하는 경향을 나타내었다. 공정온도 변화에 따른 투과 플럭스의 변화는 온도가 상승할수록 주스의 점도 감소와 확산계수의 증가로 투과 플럭스는 증가하는 경향이였다. 공정시간에 따른 투과 플럭스의 변화는 여과 초기에는 온도에 관계없이 투과 플럭스가 급격히 감소하였으며 일정시간이 흐른 후 더 이상 회복되지 않음을 알 수 있었다. 또한 막 여과 전후의 포도주스의 성분 분석 결과 pH, 산도, 당도는 비슷한 수준이었고 탁도는 막 여과 후 80%정도 개선됨을 알 수 있었다. Total solid와 insoluble solid 또한 투과액 중의 그 농도가 낮게 나타났으며 이는 막의 세공을 통해 펙틴, 탄닌 그 외 부유 고형물이 막을 투과하지 못했기 때문으로 사료된다. 또한 공정조건에 따른 막오염 특성을 고찰하기 위해 고유 막 저항, 총저항, 케이크 저항 및 파울링 저항을 정량하였다. 총저항은 공정압력은 낮고, 온도는 증가할수록 감소하는 경향이였으며 케이크 층 저항은 온도가 높을수록 감소하였으며 파울링 저항은 압력이 증가할수록 저항도 증가하는 경향을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 농림부 지원 첨단기술개발 사업비에 의하여 수행된 결과의 일부이며, 이에 깊이 감사드립니다.

문 헌

- 고은정, 최용희. 1999a. 한외여과를 이용한 포도주스의 청징화 및 막오염 특성. *산업식품공학* **3**(2): 57-63
- 고은정, 최용희. 1999b. 한외여과를 이용한 포도주스의 청징화 및 막오염 특성. *산업식품공학* **3**(2): 57-63
- 김길환, 김동만. 1994. 식품산업에서의 분리막을 이용한 분리농축기술. *멤브레인* **4**(3): 122-141
- 서울대학교 환경안전연구소. 1997. 김치산업에서의 염수 재이용 기술. 환경부, 서울, 대한민국
- 우건조. 1998. 생리활성물질과 식품산업 신가공기술 - 막분리 공정을 중심으로. *식품과학과 산업* **31**(3): 18-29
- 우건조, 남진, 은정방. 1996. 감귤 과피 유래 식이섬유 생산을 위한 막분리 공정 최적화. *한국식품과학회지* **28**(2): 378-383
- 우건조, 하성미. 1997. β -Cyclodextrin 중합체와 한외여과 공정을 이용한 감귤류의 쓴맛 성분 제거. *한국식품과학회지* **29**(2): 302-308
- 이영무. 1990. 기능성 고분자 분리막. *화학공업과 기술* **8**(4): 390-396
- 이은영, 우건조. 1998. 중공사막을 이용한 감귤 과피 bioflavonoids 분리 및 식이 섬유회수 공정 최적화. *한국식품과학회지* **30**(1): 151-160
- 장인성. 1995. 막결합형 활성슬러지 시스템에서의 막오염 특성연구. 서울대학교 대학원 박사학위논문
- 추광호. 1996a. 막결합형 혐기성 소화 시스템에서 분리막의 여과특성 연구. 서울대학교 박사학위논문
- 추광호. 1996b. 막결합형 혐기성 소화 시스템에서 분리막의 여과특성 연구. 서울대학교 박사학위논문
- Alvarez, V., L. J. Andres, F. A. Riera, and R. Alvarez. 1996. Microfiltration of Apple juice using inorganic membranes: Process optimization and juice stability. *The Can J. Chem. Eng.* **74**: 156-162
- Bruin, A., A. Kikkert, J. A. G. Weldring and J. Hiddink. 1980. Overview of concentration polarization in ultrafiltration. *Desalination* **35**: 223-230
- Cheryan, M. 1986. *Ultrafiltration Handbook*. Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, P.A.
- Chiang, B. H. and M. Cheryan. 1986. Ultrafiltration of skim milk in hollow fibers, *J. Food Sci.* **51**: 340-344
- Dornier, M., M. Deloux, A. Lebert and G. Trystram. 1994. Use of experimental design to establish optimal crossflow filtration conditions: Application to raw cane sugar clarification. *J. Food Process Eng.* **17**: 73-92
- Fukumoto, L. R., P. Delaquis and B. Girard. 1998. Microfiltration and ultrafiltration ceramic membrane for apple juice clarification. *J. Food Sci.* **63**(5): 845-850
- Grandison, A. S., and M. J. Lewis. 1996. Separation processes in the food and biotechnology industries; Principles and Application. Woodhead publishing Ltd., England., p. 97
- Hernandez, E., R. Couture, R. Rouseff, C. S. Chen and S.

- Barros. 1992. Evaluation of ultrafiltration and adsorption to debitter grapefruit juice and grapefruit pulp wash. *J. Food Sci.* **57**(3): 664-666
- Jiratananon, R., A. Chananchai. 1996a. A study of fouling in the ultrafiltration of passion fruit juice. *J. Membrane Sci.* **1**: 39-48
- Jiratananon, R. and A. Chananchai. 1996b. A study of fouling in the ultrafiltration of passion fruit juice. *J. Membrane Sci.* **1**: 39-48
- Jiratananon, R. and A. Chananchai. 1996c. A study of fouling in the ultrafiltration of passion fruit juice. *J. Membrane Sci.* **1**: 39-48
- Kirk, D. E., M. W. Montgomery and M. G. Kortekaas. 1983. Clarification of pear juice by hollow fiber ultrafiltration. *J. Food Sci.* **48**: 1663-1666
- Labbe, J. P., A. Quemerais, F. Michchel and G. Daufin. 1990. Fouling of inorganic membranes during whey ultrafiltration: Analytical methodology. *J. Membrane Sci.* **51**: 293-307
- Padilla, O. I. and M. R. Mclellan. 1989. Molecular weight cut-off of ultrafiltration membranes and the quality and stability of apple juice. *J. Food Sci.* **54**(5): 1250-1254
- Padilla-Zakour, O. and M. R. Mclellan. 1993a. Optimization and Modeling of Appl Juice Cross-flow Microfiltration with a Ceramic Membrane. *J. Food Sci.* **58**(2): 69
- Padilla-Zakour, O. and M. R. Mclellan. 1993b. Optimization and Modeling of Appl Juice Cross-flow Microfiltration with a Ceramic Membrane. *J. Food Sci.* **58**(2): 69
- Tarleton, E. S. and R. J. Wakeman. 1993. Understanding flux decline in crossflow micrifiltration: Part I-Effects of particle and pore size. *Trans. IChemE.* **71**: 399-410
- Valentas, K. J., E. Rotstein and R. P. Singh. 1997. Handbook of Food Engineering practice. CRC Press, pp. 167-177
- Vigneswarn, S. and K. W. Yen. 1988. Detailed investigation of effect of operation parameter of ultrafiltration using laboratory-scale ultrafiltration. *Desalination* **70**: 299-316