

한외여과를 이용한 포도주스의 청징화 및 막오염 특성

고은정 · 최용희
경북대학교 식품공학과

Clarification of Grape Juice by Ultrafiltration, and Membrane Fouling Characteristics

Eun-Jung Ko and Yong-Hee Choi

Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University

Abstract

Grape Juice was clarified in a laboratory ultrafiltration system with hollow fiber membrane made of polysulfone and MWCO 30,000. Ultrafiltration of Grape Juice could minimize loss of flavor and many compounds, and it was expected to remove precipitation and suspended solid effectively. The results showed that permeate flux increased with the increase of operating pressure and temperature. The permeate flux declined continuously while the fouling material accumulated on the membrane as the operation time increased. Resistance 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.

Key words: grape juice, ultrafiltration, resistance

서 론

현재 선진국내에서는 막분리 공정이 초순수와 음용수 제조등의 용수처리, 염료 및 염색폐수, 오일폐수 등의 폐수처리 뿐 아니라 식품산업에 우수성을 인정받아 산업화 응용에 적용되고 있다. 특히 식품산업에서는 커피·주스농축, 저알콜음료 제조, 포도주제조, 치즈웨이로부터 단백질 및 유당의 분리, 효소고정화, 제균처리 등 가공식품의 고품질화에 많은 연구가 진행되고 있으나 국내에서는 그 이용 방법 등에 대한 연구 및 실용화가 이제 상용화되고 있는 실정이다(Mulder, 1991; 통상산업부, 1996; 한국막학회, 1996a; Dornier *et al.*, 1994a; Sheu *et al.*, 1987).

따라서 국내에서 많이 생산되고 있는 과일을 이용하여 고품질의 과일 주스 제조를 위한 가공 공정의 최적화 및 확립은 시급한 연구 과제라 사료되며, 특히 포도 주스의 고품질화가 이루어 질 수 있도록 막분리 시스템을 적용하여 포도 고유의 향기 성분과 영양성분의 손실을 최소화 시킬 수 있는 최적 가공 공정 조건을 수립하고자 한다. 또한 포도에는 주석이 다량 용해되어있는데 이는 칼슘이온과 결합하여 타르타르산칼슘염의 형태로 침전물을 형성하게 된다. 이런 침전물과 탄닌 등의 불용성 물질들

은 주스의 산도를 저하시키고, 색소침착을 일으키며 풍미에 나쁜 영향을 끼쳐 상품가치를 저하시켜 포도주스를 제조하는데 있어 문제점으로 작용하게 되는데 일반적으로 이런 침전물은 3~6개월정도 자연침전시킨다든지, 동결침전시켜 제거하게 되는데 여기에 막분리 공정을 이용하면 이미(異味)와 침전물을 효과적으로 단시간내 제거할 수 있으리라고 기대된다(이광연 등, 1985; 김선규, 1995; 유태종 등 1998; 전명석 등, 1997a)

또한 압력에 의한 막분리 공정은 지속적인 운행으로 조작 중에 플럭스량이 떨어지게 되고 막 수명이 단축되는 fouling현상이 일어나게 되므로 막 사용에 있어서 중요한 문제 중의 하나이며(Dornier *et al.*, 1994b; 전명, 1997b; 김세권 등, 1994), 이러한 fouling현상을 분석하고 해결점을 찾기 위한 연구가 국외에서는 활발히 수행중이나 국내에서는 fouling현상에 대한 연구는 미약한 실정이다. 따라서 고품질의 포도주스 제조를 위한 막분리 각 공정 조건에 대한 fouling현상을 직렬저항 모델을 적용하여 정량하여 포도주스 여과시 fouling을 일으키는 주된 저항이 무엇인지 구명하고자 하였다.

재료 및 방법

막분리 공정 시스템

본 실험에 사용된 한외여과 청징 시스템은 batch

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

system형태로서 시료 탱크는 stainless steel 항온조로서 자동 온도 조절이 가능하도록 하였으며, 시료 중 불순물을 제거하고 막의 오염을 방지하고자 펌프 도입부에 5 μm 섬유 예비 여과기를 설치하였다. 펌프를 거친 시료는 막을 통과하여 다시 시료 탱크 내로 환류 되어지도록 하였다.

한외여과 모듈은 유효 막면적이 0.7 m^2 이며 분획분자량 30,000인 hollow fiber를 장착하여 실험을 수행하였으며 공정압력 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 bar, 공정온도 20, 35, 50°C로 청징화를 수행하였다.

각 공정이 끝난 뒤에는 증류수로 먼저 세척한 다음 0.1 N NaOH 용액으로 시스템 전체를 세척하고, 20~30분 동안 증류수를 다시 흘려보낸 뒤 초기 증류수의 투과유속과 비교하여 순수 투과량을 95%이상 회복시켜 실험을 수행하였다.

시료 및 투과액의 성분분석(Padilla와 Mclellan, 1993a)

시료 및 투과액의 pH는 pH meter(Suntex SP-701)를 이용하여 15°C에서 측정하였으며 soluble solid는 굴절당도계(ATAGO N-1E)를 사용하여 °Brix로 나타내었고, turbidity는 Spectrophotometer(DUKSAN MECASYS OPTIZEN II+)를 사용하여 650 nm에서 측정 하였다. titratable acidity는 페놀프탈레인을 지시약으로 해서 0.1 N NaOH로 적정하여 tartaric acid로 산출하였고, total solid는 vacuum oven method로 65-70°C, 80 kPa, 36 시간 행하여 % w/w로 나타내었으며 spin solid는 일정량 sample 취하여 3600-3800 rpm에서 15분간 원심분리 한 것을 % settled solid로 나타내었다.

막 오염 특성 측정(Padilla와 Mclellan, 1993b; 장인성, 1995; 한경부, 1997)

실험에 사용한 한외여과 막의 오염 정도를 정량화 하여 각각의 공정조건에 따른 막오염 특성을 고찰하고자 이상적인 분리막과 용액에 대해 적용할 수 있는 Hagen-Poiseuille식에 접근하여 투과 플럭스(J)변화에 의한 저항값들을 구할 수 있다.

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

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, η 는 동점도(dynamic viscosity)이다. ϵ_s , D_p , ΔX 는 분리막에 대한 고유한 값이므로 이들 전체를 고유 막저항(intrinsic membrane 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 한외여과에 사용된 각 분리막에 대한 고유 막저항(R_m)은 사용하지 않은 분리막을 초순수에 하루 이상 담가두어 보관액을 완전히 제거한 후 초순수를 사용하여 1.0 bar에서 투과시켜 이 때의 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 한외여과에서 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 저항등이 있는데 이들 저항들을 고려하여 실제 한외 여과실험의 종료시점에서의 투과 플럭스에 의해 총 저항을 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$R_t = R_m + (R_c + R_f)$$

파울링 저항(fouling resistance, R_f)의 측정

세공 막힘, 비가역적인 표면과 세공흡착에 의한 저항으로써 케이크 층을 제거한 뒤 측정할 수 있다.

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

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 총저항과 고유 막저항, 파울링 저항의 차이로 구할 수 있다.

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

$$R_t = R_m + (R_c + R_f)$$

결과 및 고찰

공정압력과 온도에 따른 투과플럭스 변화

포도 주스를 시료로 하여 압력의 변화에 따른 투과

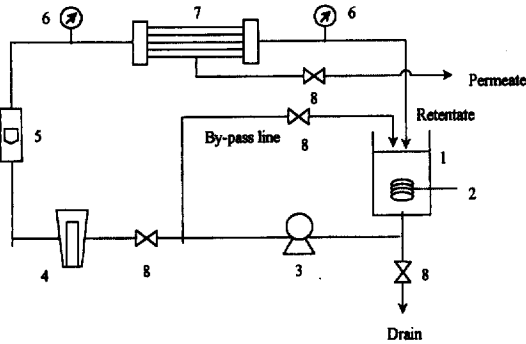


Fig. 1. Schematic diagram of ultrafiltration system. 1: Feed, Tank, 2: Temp Controller; 3: Pump, 4: Prefilter, 5: Flowmeter, 6: Pressure Gauge, 7: Module, 8: Relief Valve.

플럭스의 변화를 살펴보았다. Fig. 2는 포도 착즙액을 청정하는 동안 투과 플럭스의 변화를 나타낸 것으로 공정 온도의 상승에 따라 투과 플럭스는 linear하게 증가하는 경향이 있었다. 20°C에서는 0.285 L/m² hr에서 3.375 L/m² hr로 35°C에서는 0.33 L/m² hr에서 3.45 L/m² hr로 50°C에서는 1.088 L/m² hr에서 5.888 L/m² hr로 압력이 증가함에 따라 2~3배 정도 투과 플럭스가 높게 나타났으며 대체적으로 3.5 bar의 압력에서 높은 투과 플럭스를 보였다.

또한 Fig. 2는 포도 주스를 청정하는 동안 공정온도에 따른 투과 플럭스 변화도 알 수 있었으며 온도가 상승할수록 유입액의 점도 감소와 확산 계수의 증가, 유입액 중에 존재하는 확산물질의 용해도 증가로 인하여 투과 플럭

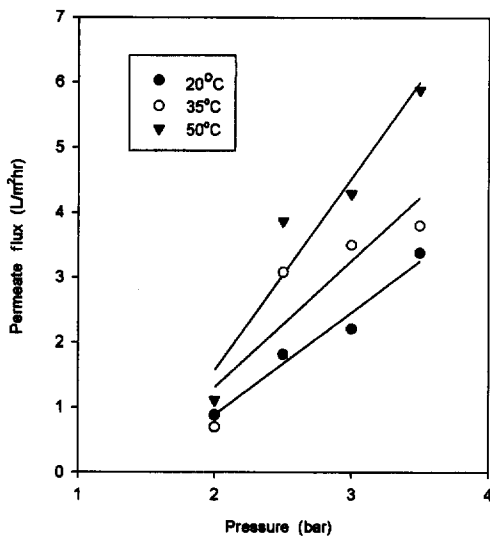


Fig. 2. Influence of pressure on permeate flux of grape juice at different temperature in UF system.

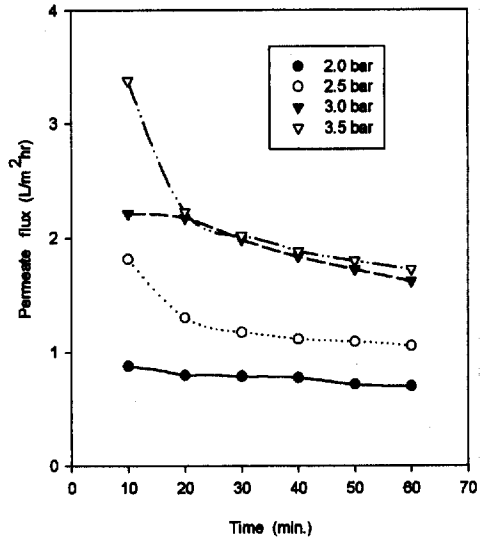


Fig. 3. Influence of process time on permeate flux of grape juice at different pressures and 20°C in UF system.

스가 증가하였다. 그리고 유입액의 온도 상승에 의한 막의 열적 팽창에 의해 막의 세공크기가 변화함으로써 투과 플럭스가 증가된다고 사료된다(Grandison과 Lewis, 1996).

공정시간에 따른 투과플럭스의 변화

Fig. 3~5는 한외여과 시스템을 이용하여 청정하는 동안 시간의 변화에 따른 투과 플럭스의 변화를 나타내었다. 청정 초기에는 투과플럭스가 급격히 감소하다 일정 시간이 흐른 후 거의 완만한 투과플럭스를 나타내었는데, 이는 청정시간이 경과하면서 막에 흡착되는 물질의 양이 증가하는 것도 원인이 된다.

초기에 급격한 투과플럭스의 감소는 농도분극층에 의한 것으로 농도분극층에 의한 투과 플럭스 감소는 가역적이며, 시간에 비존재적인 특성이 있다. 그 이후 시간의 흐름에 따라 주스 중의 용질이 막표면에 흡착되거나, 막 세공의 막힘에 의해 점차적으로 투과 플럭스가 감소하는 비가역적이고, 시간에 의존적인 오염으로 인한 플럭스 감소 현상이 일어나게 된다(Georges, 1984).

공정시간에 따른 투과 플럭스의 변화는 제1단계로 한외여과 조작이 시작된 이후 수분동안 걸쳐 일어나는 막 투과량의 급속한 감소단계로 막 표면 근방에 농도분극층이 형성되는 과정이다. 제2단계는 투과 플럭스의 급속한 감소이후 부터는 보다 완만한 투과 플럭스의 감소단계로서, 유입액의 용질, 기타 유·무기물등이 막 표면 또는 막 세공내에 흡착되는 단계이다. 제3단계는 그 이후의 투과 플럭스량이 서서히 감소하는 단계로 제 2단계의 흡착층 위에 추가적으로 용질등이 더 흡착되고, 침지되어

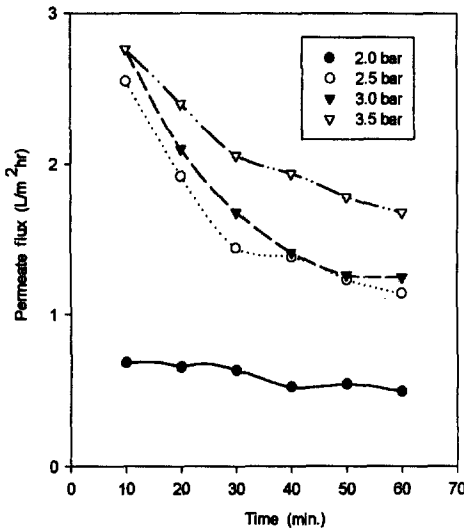


Fig. 4. Influence of process time on permeate flux of grape juice at different pressures and 35°C in UF system.

이 침지층이 고형화 되는 과정으로 준 정상상태의 과정이라고도 한다(Kuo 와 Cheryan, 1983). 공정압력이 높

Table 1. Specification of the membrane module used in this work

Classification	Items	
MWCO	30,000 (dalton)	
Configuration	Hollow-fiber(Sunkyung Industries)	
Membrane material	Polysulfone	
Operating condition	Maximum pressure	5 bar
	Maximum temp.	80
	pH range	1.0-14
Dimension (mm)	Diameter	50
	Length	580

을수록 투과 플럭스는 더욱 급격히 감소하는 경향이 두드러졌는데(한국막학회, 1996b) 이는 막오염 현상이 공정 초기에 일어나기 때문이라 사료된다.

시료 및 투과액의 성분분석

한외여과막을 통과한 포도주스의 청징화 정도를 검토하여 나타내었다. 막을 통과한 투과액의 청징 정도를 검토한 결과 산도, pH는 청징 전 후 비슷한 수준이었고 당도는 약간 낮은 수준이었는데, 이것은 당 성분이 막에

Table 2. Physicochemical properties of raw grape juice and ultrafiltered grape juice

Operating condition		Kinds of grape juice	°Brix	pH	Titratable acidity (%tartaric acid)	Turbidity (650 nm)	Total solid (% w/w)	Spin solid (% w/w)
Pressure (bar)	Temp.(°C)							
2.0	20	Raw juice	10	4.20	0.02	3.80	10.271	1.489
		Ultrafiltered juice	6.5	4.17	0.02	0.017	7.638	0.722
	35	Raw juice	10	4.31	0.046	3.49	10.615	0.881
		Ultrafiltered juice	6.8	4.21	0.035	0.010	9.244	0.481
50	Raw juice	9.6	4.23	0.049	4.32	11.136	1.438	
	Ultrafiltered juice	7.4	4.14	0.038	0.021	7.588	0.462	
2.5	20	Raw juice	10	4.3	0.041	3.96	9.998	2.390
		Ultrafiltered juice	6	4.27	0.038	0.009	6.767	0.718
	35	Raw juice	10	4.25	0.039	3.81	10.530	1.331
		Ultrafiltered juice	6.2	4.22	0.032	0.036	5.908	0.427
50	Raw juice	10	4.16	0.037	4.02	10.561	1.367	
	Ultrafiltered juice	6.9	4.18	0.035	0.019	7.636	0.584	
3.0	20	Raw juice	10	4.19	0.021	3.49	9.293	0.864
		Ultrafiltered juice	5.7	4.18	0.015	0.007	6.202	0.114
	35	Raw juice	10	4.31	0.038	3.45	10.366	1.339
		Ultrafiltered juice	5.2	4.20	0.026	0.025	6.904	0.857
50	Raw juice	10	4.28	0.09	4.15	10.774	1.588	
	Ultrafiltered juice	6.9	4.03	0.068	0.017	7.868	0.230	
3.5	20	Raw juice	10	4.26	0.038	3.84	10.784	0.655
		Ultrafiltered juice	6	4.31	0.038	0.007	6.579	0.058
	35	Raw juice	10	4.16	0.005	3.23	10.665	1.127
		Ultrafiltered juice	7.2	4.30	0.035	0.007	8.024	0.066
50	Raw juice	9.6	4.11	0.117	3.49	10.448	1.287	
	Ultrafiltered juice	7	4.00	0.103	0.014	7.968	0.001	

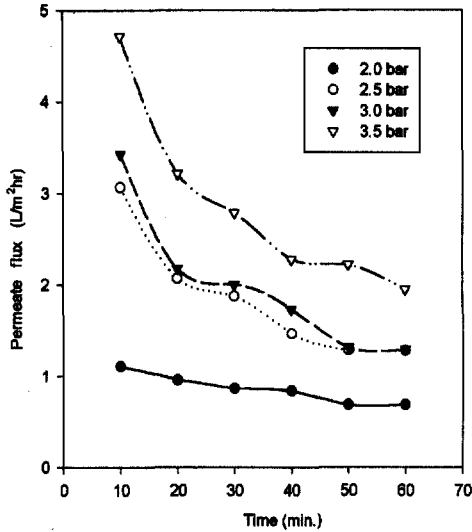


Fig. 5. Influence of process time on permeate flux of grape juice at different pressures and 50°C in UF system.

있는 증류수에 의해 회석되고, 펙틴이나 그의 부유고형물과 함께 막 세공을 통과하지 못했기 때문에 투과액의 농도가 투과전보다 낮게 나타났다고 사료된다. 막도는 모든 공정조건에서 95% 이상 월등히 개선되었으며, total solid와 spin solid 또한 투과 전보다 투과 후의 투과액에서 낮게 나타남을 알 수 있었는데, 이는 막의 세공을 통해 펙틴, 탄닌 그의 부유 고형물이 막을 투과하지 못했기 때문으로 사료되며 특히, 공정압력이 높고 공정온도가 낮을수록 제거율이 높았는데 이는 막 오염 현상과 관련이 있는 것으로 사료된다.

청정화 공정에서의 고유 막저항, 총저항, 겔층 저항의 측정

포도주스 중의 용질에는 다당류, 단백질, 콜로이드성 물질이 존재하는데 이런 고분자 물질들의 농도가 높아지면 청정시간이 경과되면서 결정화되거나 sol상태에서 gel 상태가 되고 이것이 막 표면에 축적되므로써 secondary membrane을 형성하게 된다. 이런 현상은 플럭스를 감소시키고 원래 막의 고유특성인 MWCO를 변화시키기도 하며 용질제거율 등이 변화하게 되어 막 효율을 저하시키기 되는 결과를 초래하게 된다.

그러므로 투과유속의 감소원인, 즉 막오염을 일으키는 주된 인자가 무엇인지를 파악해야 막오염을 줄일 수 있는 효과적인 방안을 제시할 수 있으므로 선행되어야 할 과제라 사료된다. 따라서 한외여과 공정의 각 공정조건에 따른 고유 막 저항과 총저항, 파울링저항, 케이크 층 저항을 직렬저항 모델을 이용하여 정량화 하였다. Table 3은 어떠한 저항이 투과플럭스 감소에 지배적으로 영향을 미쳤는가를 보여준다. 분리막 종류에 따라서는 막의 고유저항에 차이를 보이나 Table 3에서 보듯이 막의 고유저항은 $5.49 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ 로 동일하였다. 공정온도가 높고 공정압력이 낮을수록 총저항이 작게 나타남을 알 수 있는데 이는 공정온도가 높게 됨에 따라 막세공이 느슨해져 막 내에서의 유입액의 흐름이 저항을 덜 받게 되거나 낮은 압력에서는 겔층의 압축이 최소화되기 때문으로 사료되며(Dornier et al., 1994; Bayindirli et al., 1988; Vigneswaran와 Kiat, 1988), 공정압력이 높아지면 투과 플럭스는 많아지게 되지만 막 표면에 형성된 케이크 층이 압축되고 막 자체의 압밀화 현상이 일어나게 되어 총저항은 높아지게 된다. 고유 막 저항에 대한 파울링 저항의 변화(R_f/R_m)를 살펴보면 낮은 압력에서는 막의 세공에

Table 3. Various resistance values in ultrafiltration of grape juice

Operating Condition		R_m	R_f	R_c	R_t	R_f/R_m	R_f/R_c	R_f/R_t
Pressure (bar)	Temp.(°C)	($10^{13} \times \text{m}^{-1}$)	($10^{13} \times \text{m}^{-1}$)	($10^{13} \times \text{m}^{-1}$)	($10^{13} \times \text{m}^{-1}$)			
2.0	20	5.49	92.45	15.39	71.57	13.0	0.17	0.77
	35	5.49	83.01	12.58	64.94	11.8	0.15	0.78
	50	5.49	72.68	11.91	55.28	10.1	0.16	0.76
2.5	20	5.49	119.26	22.42	91.35	16.6	0.19	0.77
	35	5.49	95.78	19.15	71.14	13.0	0.20	0.74
	50	5.49	66.33	7.86	52.98	9.65	0.12	0.80
3.0	20	5.49	100.31	12.33	82.49	15.0	0.12	0.82
	35	5.49	87.38	8.32	73.57	13.4	0.10	0.84
	50	5.49	84.64	5.04	74.11	13.5	0.06	0.88
3.5	20	5.49	149.25	22.10	121.66	22.0	0.15	0.82
	35	5.49	161.97	41.23	115.25	20.9	0.25	0.71
	50	5.49	101.62	24.59	71.54	13.0	0.24	0.70

침투하지 못했던 거대분자가 압력의 증가에 따라 형태가 변화되거나 압축에 의해 막의 세공에 침투하여 세공을 막히게 하거나 비가역적인 표면과 세공흡착에 의한 파울링 저항이 증가하기 때문이라고 사료된다. 또한 낮은 온도와 높은 압력에 총저항 중에 케이크 층 저항이 차지하는 비율(R_f/R)은 공정조건에 따른 경향이나 그 변화의 정도는 크지 않은 것으로 보이며, 총저항 중에 파울링 저항이 차지하는 비율(R_f/R) 또한 공정조건에 변화에 대해 큰 영향을 받지 않아 비슷한 값을 가지는 것으로 나타났다. 포도주스의 여과에서는 케이크 층에 의한 저항보다는 세공막힘이나 표면 또는 세공의 흡착에 의한 비가역적 저항, 즉 파울링 저항이 차지하는 비율이 0.88~0.70으로 케이크 층이 차지하는 비율 0.06~0.25보다 더 크게 나타나 파울링 저항에 의한 플릭스 감소가 포도주스 여과시 막오염의 가장 큰 원인임을 알 수 있었다. 이는 막 표면 위의 케이크 층 저항에 의해 투과 플릭스가 감소하는 경우 역세척 등의 물리적 세척으로 투과 플릭스를 회복시키는 것이 쉬우나, 파울링 저항과 같은 비가역적 저항으로 투과 플릭스가 감소하는 경우 물리적 세척의 효과는 작게 나타나리라고 사료된다. 때문에 분리막 운전시 막오염을 정량화 하여 막오염의 주된 원인을 파악하여 적절한 세척 방법과 시료에 따른 여과 막 재질, 적절한 막의 분획분자량을 선택할 수 있으리라 사료된다.

요 약

포도 고유의 향기 성분과 영양성분의 손실을 최소화시키고 다량의 이미(異味)와 탄닌, 주석등의 침전물을 효과적으로 제거하여 포도주스의 고품질화가 이루어질 수 있도록 막분리 시스템을 적용하였다.

분획분자량 30,000인 hollow fiber을 사용하여 공정압력 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 bar, 공정온도 20, 35, 50°C에서 투과 플릭스를 조사하고 막을 통과한 투과액의 성분분석을 행하였다. 공정압력에 따른 포도주스의 투과 플릭스는 압력이 증가함에 따라 투과 플릭스가 거의 직선적으로 증가하는 경향이였으며 공정온도 변화에 따른 투과 플릭스의 변화는 온도가 상승할수록 주스의 점도 감소와 확산계수의 증가로 투과 플릭스는 증가하는 경향이었다. 공정시간에 따른 투과플릭스의 변화는 청징 초기에는 투과 플릭스가 급격히 감소하다 일정시간이 흐른 후 더 이상 회복되지 않음을 알 수 있었다. 또한 막을 통과한 투과액의 청징 정도를 검토한 결과 청징 전 후의 당도, 산도, pH는 비슷한 수준이었고 탁도는 월등히 개선되었으며, total solid와 insoluble solid 또한 투과액이 낮게 나타남을 알 수 있었는데 이는 막의 세공을 통해 펙틴, 탄닌

그 외 부유 고형물이 막을 투과하지 못했기 때문으로 사료된다. 또한 공정조건에 따른 고유 막 저항, 총저항, 겔층저항을 정량하였는데, 총저항과 겔층저항은 온도가 낮고, 압력이 높을수록 저항값이 높게 나타나는 경향이었다.

감사의 글

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

문 헌

- 김신규. 1995. 포도심기부터 판매까지. 농민신문사, 서울, 대한민국
- 김세권, 변희국, 이환근, 하진환. 1994. 중공사 막 반응기에서 단백질 용액의 한외여과시 유출속도에 미치는 fouling 영향. 한국생물공학회지 9(5): 483
- 이광연, 고팡출, 이재창, 유영산, 김신규. 1985. 앞으로의 포도 재배. 대한교과서주식회사 유태중, 이상진, 김두진. 식품기공학. 문운당, 서울, 대한민국
- 장인성. 1995. 막결합형 활성슬러지 시스템에서의 막오염 특성 연구. 서울대학교 대학원 박사학위논문
- 전명석, 김재진, 장문석. 1997a. 막여과 시스템에서 막오염 현상과 제어방안. 화학공업과 기술. 15(3): 196
- 전명석, 김재진, 장문석. 1997b. 막여과 시스템에서 막오염 현상과 제어방안. 화학공업과 기술. 15(3): 196
- 통상산업부. 1996. 막분리 시스템 보급을 위한 정책연구에 관한 최종보고서. 한국막학회, 서울, 대한민국
- 서울대학교 환경안전연구소. 1997. 김치산업에서의 염수 제어용 기술. 환경부, 서울, 대한민국
- 한국막학회. 1996a. 막분리 기초편. 자유아카데미, 서울, 대한민국
- 한국막학회. 1996b. 막분리 기초편. 자유아카데미, 서울, 대한민국
- Bayindirli, A., F. Yildiz, and M. Ozolgen. 1988. Modeling of sequential batch ultrafiltration of red beet extract. *J. Food Sci.* 53(5): 1418
- Dornier, M., M. Decloux, A. Lebert, and G. Trystram. 1994a. Use of experimental design to establish optimal crossflow filtration conditions-application to raw cane sugar clarification. *J. Food Process Eng.* 17: 73
- Dornier M., M. Decloux, A. Lebert, and G. Trystram. 1994b. Use of experimental design to establish optimal crossflow filtration conditions-application to raw cane sugar clarification. *J. Food Process Eng.* 17: 73
- Georges Belfort. 1984. *Synthetic Membrane Processes, Fundamental and Water Applications.* Academic Press, USA
- Grandison, A.S. and M.J. LEWIS. 1996. *Separation Processes in the Food and Biotechnology Industries-Principle and Application.* Woodhead Publishing, USA
- Kun-Pei Kuo and Munir Cheryan. 1983. Ultrafiltration of acid whey in a spiral-wound unit-effect of operating parameters on membrane fouling. *J. Food Sci.* 48(3): 1113.
- Marcel Mulder. 1991. *Basic Principle of Membrane Technology.* Kluwer Academic Publishers, USA
- Padilla-Zakour, O. and M.R. McLellan. 1993a. Optimization and modeling of apple 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 apple juice cross-flow Microfiltration with a ceramic membrane. *J. Food Sci.* **58**(2): 69

Sheu, M.J., R.C. Wiley, and D.V. Schlimme. 1987. Solute and enzyme recoveries in apple juice clarification using

ultrafiltration. *J. Food Sci.* **52**(3): 732

Vigneswaran, S., Wong Yen Kiat. 1988. Detailed Investigation of effects of operating parameters of ultrafiltration using laboratory-scale ultrafiltration unit. *Desalination* **70**: 299