

나노여과를 이용한 Sodium Lactate의 회수

이은교 · 강상현 · 장용근* · 장호남
한국과학기술원 화학공학과 및 생물공정연구센터

Recovery of Sodium Lactate Using Nanofiltration. Lee, Eun Gyo, Sang Hyeon Kang, Yong Keun Chang*, and Ho Nam Chang. Department of Chemical Engineering and BioProcess Engineering Research Center, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea – The effects of operating pressure, lactate concentration, impurities, and pH on solution flux and lactate rejection in nanofiltration were investigated with model sodium lactate solutions (lactate 10–200 g/L) as a model system. In the tested range of pressure (80–140 psig), the solution flux was observed to be proportional to the operating pressure and the rejection of lactate increased only slightly with the pressure. Both of the flux and the rejection decreased with lactate concentration, while the recovery rate of lactate increased. The effects of glucose and yeast extract as impurities on lactate rejection were negligible, but the flux decreased significantly with the addition of yeast extract. At low lactate concentrations, the rejection of lactate increased with pH due to the increased repulsion (Donnan exclusion effect) between lactate ions and membrane surface. But, at high lactate concentrations, the Donnan effect was observed to be overwhelmed by the effect of sodium ions added to adjust the pH, and the rejection of lactate decreased with pH. When fermentation broth containing about 89 g/L of lactate was nanofiltered, the flux and the rejection of lactate were 2.8 L/m²h and 5 %, respectively at 120 psig. Both of them were slightly lower than those with model solutions. The recovery rate was 2.6 mol/m²h.

Key words : nanofiltration, lactate recovery, NTR-729 membrane

자연계의 동식물이나 미생물의 산물로서 발견된 유기산은 현재 60여종에 이르고 있으며 그 중에서 유산(lactate)은 미생물에 의한 발효법과 화학 합성법을 통해 생산되어온 대표적인 유기산 중의 하나이다. 발효에 의해 생산된 유산은 식품 첨가제 등 식품 산업과 pH 조절제, 수술용 봉합사의 재료 등 의약품 산업 분야에서 널리 사용되고 있다[15]. 최근에는 페플라스틱으로 인한 환경문제와 관련하여 생분해성 고분자의 원료로서, 또한 의약품 전달을 위한 매체로서 큰 주목을 받고 있다[8]. 특히, 화학합성에 의한 방법으로는 라세미 혼합물(racemic mixture)이 얻어지기 때문에 생체적합성이 떨어지고 물성조절이 쉽지 않은 문제점이 있어 L(+) 형태의 유산만을 생산할 수 있는 발효에 의한 유산 제조가 주요 연구의 대상이 되고 있다[16].

유산이 범용성 고분자를 대체할 생분해성 고분자의 원료로 사용되기 위해서는 대량 생산과 고순도 정제가 가능해야 한다. 따라서, 미생물 발효의 생산성을 높이기 위한 연구와 함께 간단하면서도 효율적인 정제공정을 개발하기 위한 연구가 다양하게 진행되어 왔다. 발효에 의해 생산된 유산을 정제하기 위한 기존의 공정은 여과 활성탄처리 증발이나 결정화 등이 있으나, 비교적 낮은 순도의 유산 생산에나 적합하고 과정이 복잡하며 공정부산물인 CaSO₄ 등의 누

적으로 인해 환경적으로도 문제의 소지가 있다[11].

근래에 연구되고 있는 비교적 새로운 유산 정제방법으로는 액-액 추출, 흡착, 증류, 전기투석, 역삼투 또는 나노여과 등을 이용하는 방법들이 있다[2, 4, 7, 17]. 추출에 의한 방법은 경제적인 장점이 있으나 낮은 분배계수, 환경에 유해한 용매의 사용과 폐용매 회수의 어려움 등의 문제점이 있다. 흡착은 유산의 회수율이 좋은 반면 이온교환수지의 재생이 힘들어 발효액의 1차 처리 공정으로는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 증류에 의한 방법은 가장 고순도의 유산을 직접 얻을 수 있는 장점이 있는 반면 부산물 생성 및 낮은 증류효율이라는 문제점이 있다. 전기투석은 비싼 전기에너지를 사용한다는 단점이 있지만, 부산물 생산이 없고 높은 회수율과 환경 친화적 공정이라는 장점이 있기 때문에 많은 관심을 끌고 있는 방법이다.

나노여과는 주로 음용수 처리와 폐수 처리 등에 응용되어 왔으나[18], 최근 들어 생물 분리정제 분야에까지 응용 범위가 넓어지고 있다. 나노여과는 압력구동(pressure-driven)에 의한 막공정 중의 하나로 역삼투(reverse osmosis)와 한외여과(ultrafiltration) 중간에 위치하는 특징을 보인다. 나노막의 기공크기(pore size)는 1 nm정도이며 200 ~ 500 dalton 범위의 분획분자량(molecular weight cut-off)을 가진다. 이러한 작은 분획분자량은 섬유산업에서의 염료제거, 생물산업에서의 발효액의 처리, 제지산업에서의 원수 재활용 등에 나노막의 이용을 가능하게 해 준다[10].

*Corresponding author
Tel. 042-869-3927 Fax. 042-869-8800
E-mail: ychang@sorak.kaist.ac.kr

나노막은 또한 표면에 극성을 띠고 있어 기공 크기에 상관없이 이온이나 극성분자들을 선택적으로 분리할 수 있다. 따라서 strontium[5]이나 sulfate, nitrate[12] 등과 같은 이온들을 선택적으로 분리할 수 있다. pH에 따른 아미노산과 펩타이드간의 해리도 차이를 이용하여 원하는 아미노산을 선택적으로 분리하는 연구도 수행되었다[14].

최근에는 나노막을 이용한 유기산의 정제에 대한 관심이 증대되고 있다. 실제로 나노막을 이용한 아세트산과 유산염의 정제가 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다. Han과 Cheryan[6]은 아세트산을 모델용액으로 나노막과 역삼투막의 투과성질을 연구하였고, Timmer[13]는 Nernst-Plank식을 이용하여 역삼투막과 나노막을 통과하는 유산염의 거동에 대한 모델을 제시하였다. 그러나, 이들의 연구는 모두 저농도(10 g/L 이하)에 국한되어 있어서 100 g/L 이상의 유산염을 포함하고 있는 발효액을 처리하는 경우에 대해서는 별로 유용한 정보를 제공하지 못한다.

본 연구에서는 유산염을 일차 회수하기 위한 한 방법으로 나노여과를 적용하였으며 나노여과에 있어 중요한 인자인 조압 압력 및 유산 농도 변화에 따른 배제율(rejection)과 용액의 flux 변화를 살펴보았다. 또한, 관찰된 현상을 역삼투에 적용되는 solution-diffusion 모델을 사용하여 설명하고자 하였다. 유산염 정제에 있어 중요한 인자인 발효액 내의 불순물 및 pH 등의 영향을 살펴보았고, 실제 발효액으로부터 나노여과를 이용해 유산염을 정제하는 실험도 수행하였다.

재료 및 방법

유산 및 유산 발효

모델용액으로는 스페인의 Purac Co.로부터 구입한 유산 용액(발효유산 90%)을 적당한 농도로 희석한 후, 5시간 이상 끓여 올리고머로 존재하는 유산을 단량체로 만든 후 사용하였다. pH 효과를 보기 위한 실험을 제외한 모든 실험에서는 모델용액이 발효액과 같이 sodium lactate 형태를 갖도록 하기 위해 NaOH 를 이용하여 유산용액을 pH 5.5 로 적정하여 사용하였다.

유산 발효에는 L-유산만을 생산하는 *Lactobacillus casei* ssp. *rhamnosus*(ATCC 10863)를 사용하였다. Seed culture 를 위한 배지로는 MRS 배지[3]를 사용하였고, 회분식 발효를 위하여 다음과 같은 조성(g/L)의 배지를 사용하였다: 포도당, 110; yeast extract, 30; CH₃COONa · 3H₂O, 1; KH₂PO₄, 0.5; K₂HPO₄, 0.5; MgSO₄ · 7H₂O, 0.2; MnSO₄ · 4H₂O, 0.03; FeSO₄ · 7H₂O, 0.03. 발효는 42 °C, pH 5.5의 조건에서 50 L 진탕 발효조(Korea Fermentor Co.)에서 행하였다[19].

나노여과

나노여과장치로는 일본 Nitto-Denko 사의 모델 C10-T를

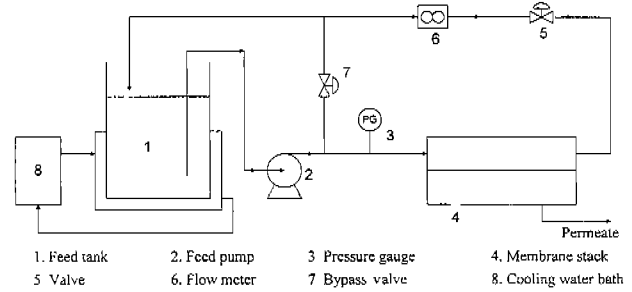


Fig. 1. Schematic diagram of nanofiltration system.

사용하였고 막으로는 역시 동회사의 제품인 NTR-729와 NTR-759를 사용하였다. 모듈은 평판형(plate and frame type)이고 막면적은 60 cm²이었다. 압력의 영향을 살펴본 실험을 제외하고는 120 psig의 일정 압력하에서 실험을 행하였고, 유량은 0.4 L/min로 유지하였다. 일반적인 막공정은 연속공정으로 이루어지고 있으나, 실험실 규모에서 이러한 연속 실험의 수행은 많은 어려움이 있다. 따라서 초기 feed 의 양을 permeate 의 유량(10~50 mL/hr)을 감안할 때 충분히 크다고 생각되는 2 L로 해줌으로써, feed 용액이 나노여과 모듈을 거쳐 순환되는 과정에서 일부가 막을 통해 빠져나가더라도 feed 용액 내의 유산염의 농도가 거의 일정하게 유지되도록 하면서 회분식 실험을 행함으로써 유사 정상상태에서 데이터를 얻는 것이 가능하도록 하였다(Fig. 1). Feed 용액 온도는 항온조를 사용하여 30 °C로 일정하게 유지하였다.

분석

Lactate 농도는 유산을 기준으로 하였고, 분석은 HPLC (Hitachi Co., Japan)를 사용하였다. 분석조건은 다음과 같다: column, SUPELCOGEL C-610H(Supelco); detector, UV (210 nm); 이동상, 0.01 M phosphoric acid; 유량, 0.6 mL/min. 포도당 농도는 효소법(Glucose-E Kit, 영동제약)에 의해 측정하였다. Yeast extract 안에 포함되어 있는 단백질양을 측정하기 위해 Lowry 법을 응용한 DC Protein Assay Kit(Bio-Rad Lab., USA) 을 사용하였다.

결과 및 고찰

NTR-729, NTR-759 막의 테스트

유산염 정제에 알맞은 막의 선택에 있어서 중요한 요소는 flux와 배제율이다. Flux가 클수록 빠른 정제가 가능하므로 큰 flux를 갖는 막이 유리하며 동시에 불순물들의 배제율은 높고 유산에 대한 배제율(lactate rejection)은 낮은 막일수록 적합하다. 경제성을 고려한다면 높은 flux를 보이는 막을 선택하는 것이 중요하겠지만 정제공정을 간단히 하기 위해서는 작은 flux를 감수하더라도 유산정제에 알맞은

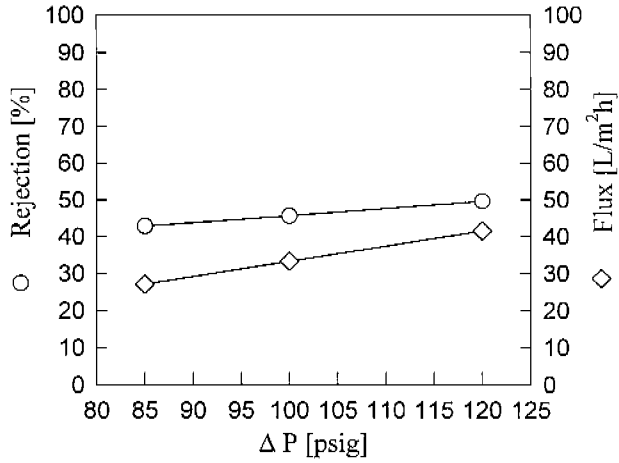


Fig. 2. Nanofiltration of NaCl solution (0.2% NaCl).

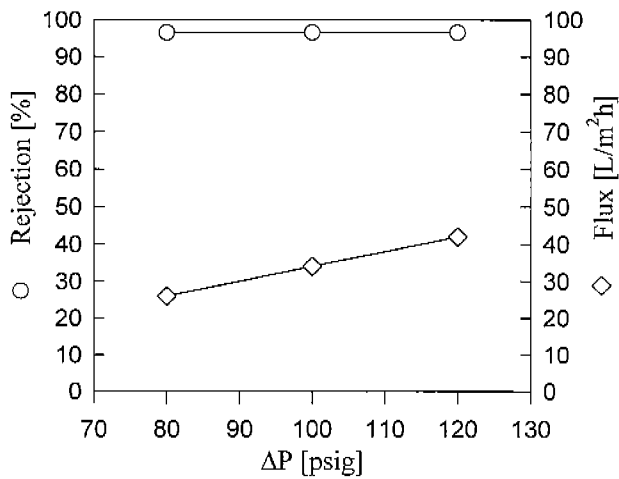


Fig. 3. Nanofiltration of MgSO₄ solution (0.2% MgSO₄).

배제율을 갖는 막을 선택하는 것이 유리할 수도 있어 flux와 배제율간의 적절한 절충이 필요하다.

NTR-729와 NTR-759는 Han과 Cheryan[6]에 의한 아세트산을 사용한 여러 가지 막의 테스트 결과에 근거하여 선택된 나노여과막이다. 막의 성능테스트에 일반적으로 사용되며 또한 본 연구에서 사용한 발효액 중에 존재하는 sodium lactate와 동일한 1가 이온들로 구성되어 비슷한 경향을 보일 것으로 예상되는 NaCl(0.2%)에 대한 압력에 따른 배제율을 먼저 살펴보았고(Fig. 2), 나노여과막의 주요 특징중의 하나인 hardness 제거 효과를 알기 위해 2가 양이온을 갖는 MgSO₄(0.2%)에 대한 배제율을 살펴보았다(Fig. 3). NTR-729의 경우 120 psig의 압력에서 NaCl에 대해서 50%의 배제율과 41 L/m²h의 flux를 보였다. 2가 이온들로 구성된 MgSO₄에 대해서는 약 97%의 매우 큰 배제율을 보였다. NTR-759(120 psig)의 경우 NaCl과 MgSO₄에 대한 배제율은 각각 89%와 97%이었고 flux는 약 23 L/m²h이었는데, flux가 낮고(NTR-729의 약 56%)

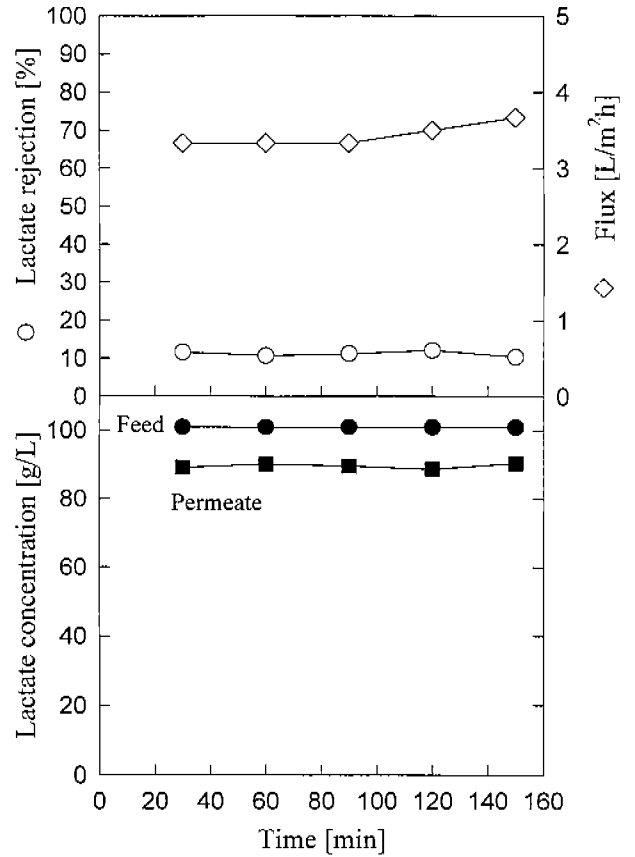


Fig. 4. Lactate recovery at 100 g/L lactate concentration (120 psig).

NaCl 배제율이 90%에 이르는 것으로 보아 역삼투막에 가까운 나노여과막인 것으로 추정된다. 따라서, NTR-759 막은 발효액 내의 불순물, 예를 들어 단백질이나 잔당류의 제거에 매우 효과적일 것으로 보이나 flux가 너무 낮고 NaCl의 배제율이 너무 크기 때문에 유산의 회수에는 불리할 것으로 예상되었다. 따라서 NTR-729를 선정하여 이후의 유산염 정제 실험에 사용하였다.

유산농도가 100 g/L일 때, NTR-729 막의 성능을 테스트한 결과를 Fig. 4에 보였다. NaCl과는 달리 유산염 용액의 flux는 3.3 L/m²h로 매우 낮았고, 유산 배제율은 약 10%의 낮은 값을 보였다. Flux가 낮은 이유는 막의 양단에 걸리는 삼투압차 때문이다. 실제로 0.2% NaCl과 100 g/L 유산의 경우에 나타나는 삼투압차는 각각 6.2와 86.2 psi로 큰 차이를 나타내었다. 시간에 따른 feed와 permeate내의 유산농도 변화가 60분 이후부터 거의 없는 것으로 나타난 바 앞에서 의도한 바와 같이 본 연구에서 행한 회분식 실험 조건하에서도 정상상태 데이터를 얻을 수 있음을 확인하였다.

압력의 영향

압력구동에 의한 막공정에서는 압력에 비례하여 flux가

증가하는 것이 일반적이다. 역삼투공정을 설명하기 위해 주로 사용되지만 나노여과 공정에 대해서도 흔히 사용되는 solution-diffusion 모델에 따르면 용액의 flux는 압력에 비례하고 용질인 유산염의 flux는 농도차에 비례하는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다[9].

$$J_v = A(\Delta P - \Delta \pi) \tag{1}$$

$$J_s = B \cdot \Delta C = B \cdot C_f R_{ef} \tag{2}$$

여기서 J_v 는 용액의 flux, A 는 용매의 투과상수, ΔP 는 막의 양단에 걸리는 압력(psig), $\Delta \pi$ 는 삼투압차(psi), J_s 는 용질인 유산의 flux, B 는 용질의 투과상수, ΔC 는 feed와 permeate용액 간의 농도차(mol/L), C_f 는 feed의 농도, R_{ef} 는 배제율이다. 삼투압차는 이상용액으로 가정된 식(3)에 의해 근사적인 값을 추정할 수 있다.

$$\Delta \pi = RT\Delta C \tag{3}$$

여기서 R 은 기체상수(L · psi/K · mol), T 는 절대 온도(K)

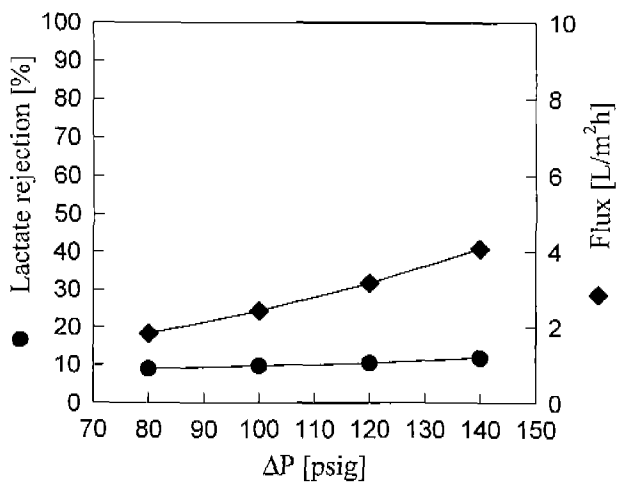


Fig. 5. Effects of pressure difference in lactate recovery (lactate 100 g/L).

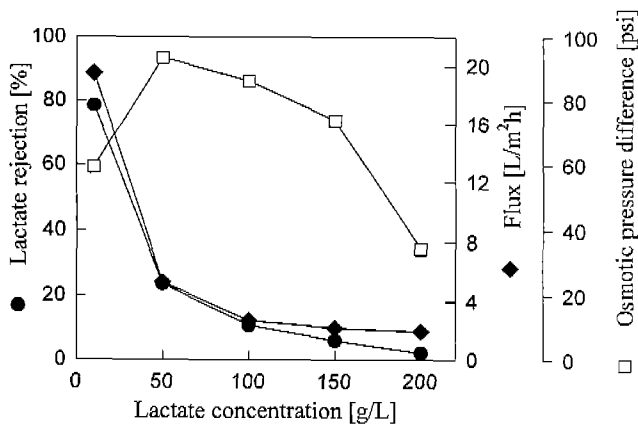


Fig. 6. Effects of lactate concentration.

이다. 위의 식들로부터 알 수 있는 사실은 조업 압력과 용액간의 삼투압차에 따라 용매의 flux가 변하고, 막 양단의 농도차에 의해 용질의 flux가 변한다는 것이다.

나노 여과의 조업압력 범위인 80~140 psig 내에서 20 psi 간격으로 압력을 변화시키면서 flux와 배제율을 측정한 결과를 Fig. 5에 보였다. 식(1)로부터 예상할 수 있는 바와 같이 압력이 증가함에 따라 flux는 선형적으로 증가하였다. 압력이 커짐에 따라 보다 증가된 용매의 양에 의해 permeate의 농도가 낮아지므로 농도차(ΔC)가 커지게 되고 이에 따라 배제율이 다소 증가하는 현상이 나타났다(식 2 참조).

유산농도의 영향

유산농도는 실제 발효공정 및 농축과정을 고려하여 정하였다. 연속식 발효시 얻을 수 있는 50 g/L의 낮은 유산농도부터 회분식 발효로부터 얻어진 유산(약 100 g/L)을 증발공정을 통해 농축하였을 때 얻어질 수 있는 200 g/L의 비교적 높은 유산 농도에 걸쳐 배제율 및 flux의 변화를 살펴 보았다. Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 농도 증가에 따라 유산의 배제율이 19%에서 2%까지 떨어졌고, flux도 4 L/m²h에서 2 L/m²h로 감소하였다. 용액의 농도가 낮을 때 일반적으로 가정할 수 있는 이상용액의 경우 막에 대한 이온의 용해도에 의한 영향이 있더라도 이를 무시할 수 있으나 [9], 본 연구에서처럼 고농도 유산염 용액의 경우에는 feed 중의 유산 농도가 증가할 때, 유산염의 막에 대한 용해도 증가에 따른 투과상수(용해도×확산)의 증가로 인해 유산염의 배제율이 크게 감소하는 것으로 생각된다.

막을 통한 용액의 flux는 식(1)에 의하면 삼투압차와는 반대의 거동을 보일 것으로 예상되나, 고농도 용액의 경우 (50 g-lactate/L 이상)에는 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 전혀 다른 현상이 관찰되었다. 식 (3)으로부터 계산된 삼투

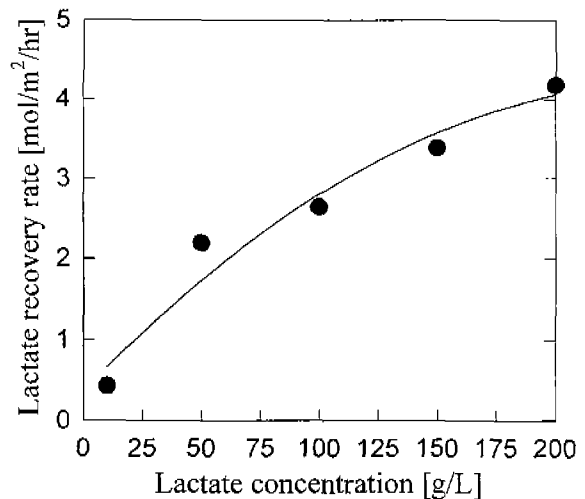


Fig. 7. Lactate recovery rate with concentration.

압은 농도에 따라 일정하게 증가하는 것처럼 나타나지만 실제 삼투압은 농도에 따라 지수함수처럼 증가하기 때문에 실제 보다 낮게 계산된 것으로 생각된다[1].

한편, 유산염의 정제속도는 일정한 면적의 막을 단위시간당 투과하는 유산의 양으로 나타내는데, 유산농도가 50 g/L일 때와 200 g/L일 때의 정제속도는 각각 2.19 mol/m²h와 4.18 mol/m²h이었다. 따라서, 본 연구에서 실험한 농도범위에서는 유산 농도가 증가함에 따라 flux가 낮아짐에도 불구하고 정제속도는 훨씬 커지는 것을 알 수 있었다(Fig. 7).

불순물의 영향

발효액 중에 남아있는 미사용 포도당과 yeast extract가 유산염의 배제율 및 flux에 어떠한 영향을 미치는 가를 알아보기 위해 100 g/L의 유산염 용액에 0.5~4.0 g/L의 포도당 및 yeast extract를 첨가하여 각각의 영향을 살펴 보았다.

유산염 농도에 비하여 포도당의 농도가 상당히 낮은 관계로 이의 변화가 유산의 투과 특성에는 크게 영향을 미치지 않았다. 포도당의 배제율은 34%~38% 정도를 나타내었으며 미세하지만 농도가 증가함에 따라 배제율이 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 8). 이와 같이 낮은 포도당 배제율은 이후 고순도 정제에 있어 문제가 될 수도 있기 때문에 발효공정에서 포도당을 대부분 소모해야 할 필요가 있음을 의미한다. Yeast extract의 경우에 유산의 배제율에 미치는 영향은 미미하였지만 flux에 있어서는 최대 15%의 감소를 초래하였다(Fig. 9). Flux의 감소는 일반적으로 알려진 바와 같이 yeast extract에 상당량 함유된 단백질이 foulant로 작용한 결과로 추측된다. 또한, yeast extract의 주성분인 아미노산의 대부분은 분자량(분자량 75~204)이 나노여과막을 투과할 만큼 충분히 작기 때문에 상당량의 아미노산이 투과액 중에 불순물로 존재할 가능성이 있으므로 이에 대한 연구가 이루어져야 한다.

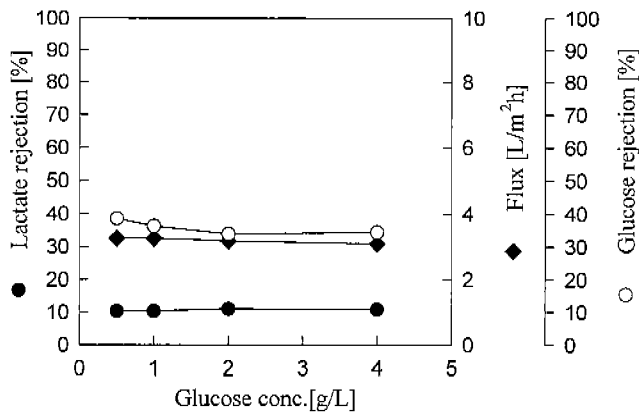


Fig. 8. Effects of glucose concentration (lactate 100 g/L).

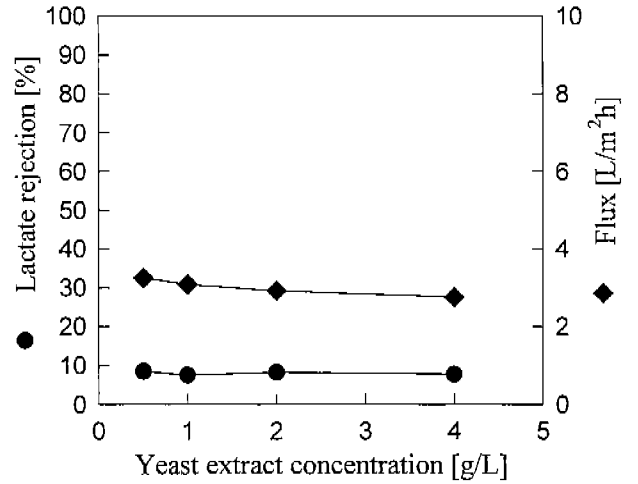


Fig. 9. Effects of yeast extract concentration(lactate 100 g/L).

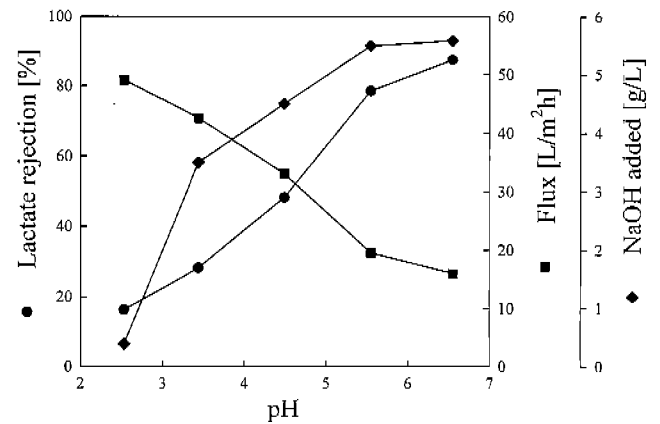


Fig. 10. Changes in lactate rejection and flux with pH for a dilute lactate solution (lactate 10 g/L).

pH의 영향

나노여과막은 표면에 전하를 갖는 것으로 보고되어 있고 이 성질에 의해 다가 (multivalent)의 양이온 및 음이온 제거 효과를 보이는 것으로 알려져 있다. 유산염의 해리는 pH에 따라 dissociated 형태(pH>pKa) 또는 undissociated 형태(pH<pKa)를 주로 가지게 되므로 배제율과 flux가 pH에 따라 크게 변화할 것으로 예상된다. NTR-729 막은 표면에 음전하를 가지고 있는 것으로 보고되어 있고 예비실험을 통해 살펴본 바에 의해서도 음전하를 가지고 있는 것을 확인하였기 때문에 유산이 해리되었을 때가 해리되지 않은 때보다 배제율이 클 것이라 추측할 수 있다. 따라서, 낮은 pH에서는 막표면의 전하에 상관없이 분자크기에 의한 단순 확산에 의해 투과가 이루어지므로 낮은 배제율을 보이는 반면 높은 pH에서는 Donnan배제효과(Donnan exclusion)에 의해 높은 배제율을 보일 것으로 예상할 수 있다. 10 g/L의 유산용액을 NaOH를 사용하여 pH를 2.5에서부터 6.5까지

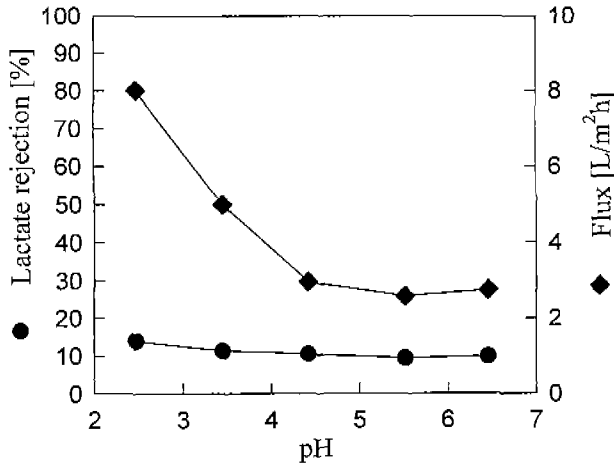


Fig. 11. Changes in lactate rejection and flux with pH for a concentrated lactate solution (lactate 100 g/L).

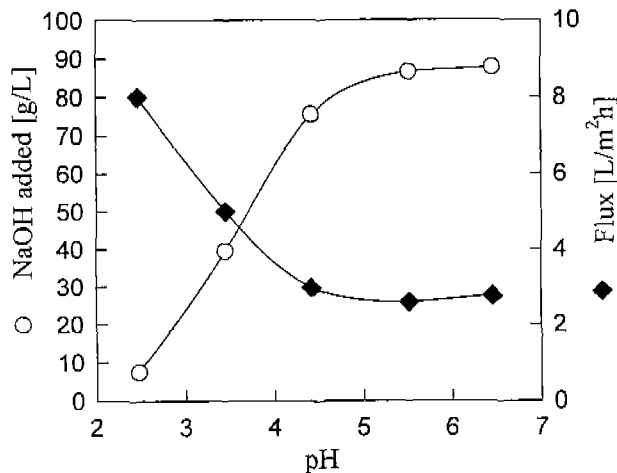


Fig. 12. Relationship between flux and sodium hydroxide added (lactate 100 g/L).

변화시킨 후 flux와 배제율의 변화를 살펴보고 Fig. 10에 그 결과를 보였다. pH가 2.5에서 6.5까지 변할 때 배제율은 Donnan 배제효과에 의거해 예측한 바와 같이 16%에서 87.5%까지 매우 큰 변화를 보였으며, flux는 삼투압차 증가의 영향으로 인해 감소하였다.

발효액과 유사한 농도인 100 g/L의 유산 농도에서도 pH의 영향을 살펴보고 그 결과를 Fig. 11에 보였다. pH가 증가함에 따라 flux는 8 L/m²h에서 2.6 L/m²h까지 급격히 변화하였다. 이러한 현상은 pH를 높이기 위해 첨가된

NaOH양과 flux가 서로 밀접한 관계 때문인 것을 알 수 있는데, pH 조절을 위해 첨가한 Na⁺ 이온이 전체 이온농도를 증가시킨 결과를 초래하여 flux는 Na⁺ 이온 농도가 증가함에 따라 감소하였다. 한편, 유산의 배제율은 Fig. 10과는 반대로 13%에서 9.3%로 감소하였다. 이처럼 유산의 배제율이 앞서 살펴본 10 g/L 유산 용액의 경우와 정반대의 경향을 보이는 원인은 pH조절을 위해 첨가한 Na⁺ 이온에 의한 용액 농도의 증가가 유산의 헤리에 의한 영향보다 크기 때문인 것으로 생각된다. 따라서, Na⁺ 이온 농도가 증가할수록 막을 투과하는 Na⁺ 이온의 양이 많아지므로 이것과 전기적 평형을 이루기 위한 유산이온의 투과가 증가하게 된다. 그러므로 고농도 유산용액의 pH에 따른 투과특성은 Donnan 배제효과에 의한 영향보다는 Na⁺ 이온 농도의 영향에 의해 더 크게 지배받게 되는 것으로 생각된다.

발효액으로부터의 유산염 회수

NTR-729를 사용하여 실제 발효액(87~89 g-lactate/L)으로부터 유산염을 회수한 결과를 Table 1에 보였다. 포도당의 배제율은 모델 유산용액을 사용한 경우보다 약간 높은 값(46%)을 얻었고 유산염 배제율과 flux를 모델용액을 이용한 실험결과와 비교하면 배제율 및 flux가 모두 감소한 것을 알 수 있다. 발효배지 내에 포함된 단백질 등의 불순물들로 인해 flux가 다소 낮게 나타난 것으로 생각되며, 특히 배제율이 낮은 이유는 Donnan 효과로 인해 배지중에 존재하는 다가(multivalent)의 음이온(SO₄²⁻, PO₄³⁻ 등)이 배제되는 반면 양이온(Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 등)은 막을 통해 자유롭게 투과되므로 전기적 평형을 맞추기 위해 유산이온의 투과가 그만큼 증가하였기 때문인 것으로 생각된다. 발효 배지에 존재하는 이온들의 영향은 별도의 체계적인 실험을 통하여 규명될 필요가 있다. 나노여과를 통해 얻을 수 있는 유산염의 정제속도는 2.6 mol/m²h (232.7 g/m²h)였는데, 이는 농도가 약간 높은 100 g-lactate/L 모델용액 사용시의 정제속도 2.65 mol/m²h와 비슷한 수준이다.

요 약

유산염을 발효액으로부터 회수하기 위한 한 방법으로서 나노여과를 제시하였으며, 나노여과를 이용하여 유산을 정제하는데 있어 중요한 인자인 조압압력, feed 유산농도, pH 등에 따른 배제율과 flux의 변화를 살펴보았다. 압력이 증가함에 따라 flux는 선형적으로 증가하였고, 배제율도 다소

Table 1. Lactic acid recovery from fermentation broth with NTR-729 membrane

Exp.	Lactate (lactic acid equivalent)			Glucose		Flux[L/m²h]
	Feed[g/L]	Permeate[g/L]	Rejection[%]	Feed[g/L]	Rejection[%]	
1	87.2	84.1	3.6	0.42	45.8	2.8
2	89.5	85.1	4.9	0.42	45.9	2.7

증가하는 경향을 보였다. 일정압력 하에서 flux와 배제율은 feed 유산농도의 영향을 크게 받았는데, 유산 농도가 증가함에 따라 flux와 배제율이 동시에 감소하였다. 유산의 정제속도는 유산 농도에 따라 증가하였다. 포도당에 의해서는 유산 배제율이나 flux가 크게 영향을 받지 않았으나 yeast extract에 의해서는 flux가 상당히 감소하였다. NaOH를 사용하여 feed 용액의 pH를 까지 변화시키면서 실험을 행한 결과 유산농도가 비교적 낮은 경우에는 pH에 따르는 Donnan 배제효과가 지배적이었으나 유산 농도가 높은 경우에는 pH조절을 위해 첨가된 Na⁺이온 농도의 영향에 의해 Donnan배제 효과가 줄어드는 것으로 나타났다. 실제 발효액으로부터 유산을 회수한 결과 유산의 배제율은 약 5%로 예상보다 다소 낮게 나오는 바람직한 결과를 보였으나 flux는 순수한 유산염 용액을 사용한 경우보다 다소 낮게 측정되었다.

REFERENCES

- Cheryan, M. 1998. *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*. Technomic Publishing Company, Basel, Switzerland.
- Datta, R., S. P. Tsai, P. Bonsignore, S. H. Moon, and J. R. Frank. 1995. Technological and economic potential of poly (lactic acid) and lactic acid derivatives. *FEMS Microbiol. Rev.* **16**: 221-231.
- De Man, J. C., M. Rogosa, and M. E. Sharpe. 1960. A medium for the cultivation of *Lactobacilli*. *J. Appl. Bact.* **23**: 130-135.
- Filachione, E. M. and C. H. Fisher. 1946. Purification of lactic acid. *Ind. Eng. Chem.* **38**: 228-232.
- Gaubert, E., H. Barnier, L. Nicod, A. Favre-reguillon, J. Fos, A. Guy, C. Bardot, and M. Lemaire. 1997. Selective cesium removal from a sodium nitrate aqueous medium by nanofiltration-complexation. *Separation Sci. Technol.* **32**: 2309-2320.
- Han, I. S. and M. Cheryan. 1995. Nanofiltration of model acetate solutions. *J. Membrane Sci.* **107**: 107-113.
- King, C. J. and P. A. Sanchez. 1987. Process for sorption solute recovery. USP 4,670,155.
- Lipinsky, E. S. and R. G. Sinclair. 1986. Is lactic acid a commodity chemical? *Chem. Eng. Progress.* **82**: 26-32.
- Mulder, M. 1996. *Basic Principles of Membrane Technology*. Kluwer Academic Publishers.
- Nystrom, M, L. Kaipia, and S. Luque. 1995. Fouling and retention of nanofiltration membranes. *J. Membrane Sci.* **98**: 249-262.
- Pescott, S. C. and C. G. Dunn. 1959. *Ind. Microbiol.* 3rd ed. McGraw-Hill, New York.
- Rautenbach, R. and R. Mellis. 1994. Waste water treatment by a combination of bioreactor and nanofiltration. *Desalination.* **95**: 171-188.
- Timmer, J. M. K., H. C. Horst, and T. Robbertsen. 1993. Transport of lactic acid through reverse osmosis and nanofiltration membrane. *J. Membrane Sci.* **85**: 205-216.
- Tsuru, T., T. Shutou, S. I. Nakao, and S. Kimura. 1994. Peptide and amino acid separation with nanofiltration membranes. *Separation Sci. Technol.* **29**: 971-984.
- Wang, C. J., R. K. Bajpai, and E. L. Iannotti. 1991. Nondispersive extraction for recovering lactic acid. *Appl. Biochem. Biotechnol.* **28**: 589-602.
- Vick Roy, T. B. 1985. Lactic acid, pp. 761-776. In M. Mooyoung (ed.), *Comprehensive Biotechnology*, vol. 3. Pergamon Press.
- Vick Roy, T. B., D. K. Mandel, D. K. Dea, H. W. Blanch, and C. R. Wilke. 1983. The application of cell recycle to continuous fermentative lactic acid production. *Biotechnol. Lett.* **5**: 665-670.
- Watson, B. M. and C. D. Hornburg. 1989. Low-energy nanofiltration membrane for removal of color, organics, and hardness from drinking water supplies. *Desalination* **72**: 11-22.
- Yoo, I. K., H. N. Chang, E. G. Lee, Y. K. Chang, and S. H. Moon. 1997. By-product formation in cell-recycled continuous culture of *Lactobacillus casei*. *Biotechnol. Lett.* **19**: 237-240.

(Received April 3, 1999)