

단백질 분리를 위한 한외여과에서의 전기장의 영향

손 동 호 · 이 윤 희 · 구 자 경[†] · 조 남 준 · 장 동 일*

한국기술교육대학교 응용화학공학과, *(주)콧데
(2005년 5월 19일 접수, 2005년 6월 21일 채택)

Effect of Electrical Field on Ultrafiltration for Protein Separation

Dongho Son, Yunhee Lee, Ja-Kyung Koo[†], Namjun Cho, and Dong Il Jang*

Department of Applied Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education, 307 Gajeon-ri, Byungchon-myon, Chonan, Chungnam 330-708, Korea

*Cotde Co. Inc, 43-5 Samun-ri, Jiksan-up, Chonan, Chungnam 330-810, Korea

(Received May 19, 2005, Accepted June 21, 2005)

요 약: 단백질 분리를 위한 한외여과에서의 전기장의 영향에 대하여 조사하였다. 실험은 균일한 막간압력차(2.5 bar)에서 알부민과 라이소자임 용액을 이용하여 이루어졌으며 분리막으로는 셀룰로즈 재질의 분획분자량(MWCO) 30 kDa 한외여과막을 사용하였다. 실험결과 전기장은 알부민 용액을 여과할 때의 투과유속(permeation flux)을 크게 증가시키는데에 도움이 되었다. 투과유속의 개선 이외에도 전기장은 또 다른 흥미로운 효과를 보였다. 단백질 분자의 하전 부호에 따라 전기장은 단백질의 투과를 촉진시키기도 하고 저하시키기도 하였다. 이러한 전기장의 효과를 이용하여 한외여과에서의 용액 투과유속뿐만 아니라 투과선택도도 개선할 수 있었다.

Abstract: The effects of electrical fields on the efficiencies in ultrafiltration for protein separation were explored. The experiments were proceeded under constant transmembrane pressure (TMP) using protein (albumin and lysozyme) solutions. For ultrafiltrations, cellulose membranes with molecular weight cut off (MWCO) 30 kDa were used. It is found that electrical field improved the filtration flux of albumin solution. The electrical field showed another interesting effect for filtration of protein solution. Depending on the electrical charges of protein molecules, the electrical field promoted or hindered the permeation of proteins through membranes. With the effect of electrical field, not only the permeation flux but also the selectivity of ultrafiltration could be improved.

Keywords: ultrafiltration, protein, electrical field, electrofiltration

1. 서 론

최근 들어서 단백질의 분리정제를 위한 여러 가지 방법 중 한외여과를 사용하는 빈도가 급격히 증가하고 있으며, 한외여과공정은 생명공학은 물론 제약, 낙농 그리고 식품관련 산업에서 널리 사용되고 있는 실정이다. 이는 한외여과법이 단백질을 대규모로 분리할 수 있는 거의 유일한 방법이기 때문이다. 그러나 한외여과법을 응용하는 데에 있어서 두 가지 큰 문제점이 있다. 첫 번째 문제점으로는 막 표면에서의 케이크층 형

성과 막 오염으로 인하여 투과유속이 크게 감소하는 것이다[1-4]. 이는 주로 한외여과공정 중에 막을 통하여 차폐되는 분자가 분리막 상류부 표면에 축적, 농축되어 일어나는 것이다. 한외여과법의 또 하나의 문제점은 크로마토그래피법과 전기영동법 등 다른 분리법에 비하여 그 선택도가 매우 낮다는 것이다. 이상과 같은 문제점들은 한외여과법을 단백질 분리정제에 사용하는 데에 큰 한계점으로 작용하여 왔다. 한외여과법에서 투과유속을 높이기 위해서는 분리막 표면에서의 농도분극 현상을 최소화 하며 이를 통하여 분리막 표면의 케이크층 형성을 방지하여야 한다. 이를 위한

[†]주저자(e-mail : jay@kut.ac.kr)

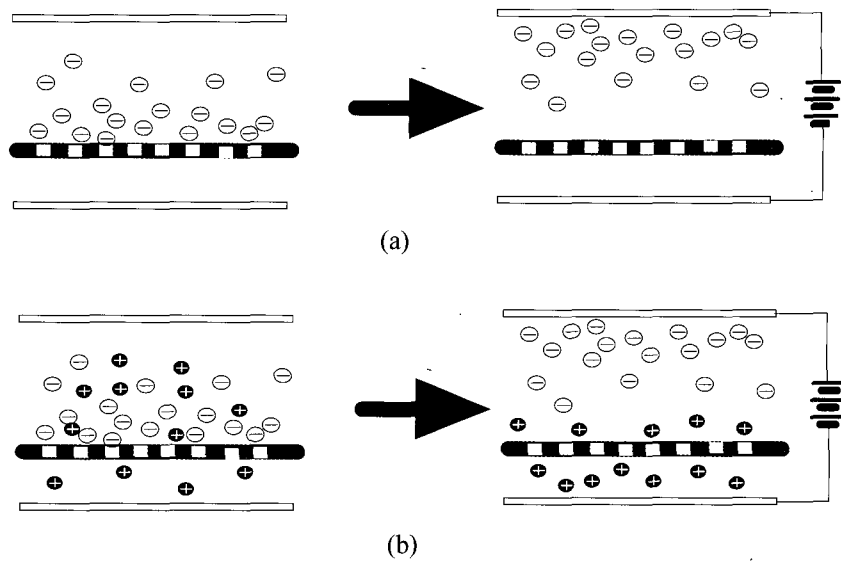


Fig. 1. Principles of electrofiltrations (a) For the improvement of flux, (b) For the improvement of selectivity.

목적으로 여러 가지 방안이 제안되어 왔다[5-8]. 이들 여러 방안중의 한 가지 방안이 전기여과법(electro-filtration)이다[9,10].

이들 여러 가지 방법 중 전기여과법은 전기장을 사용하여 분리막 표면에서의 단백질 케이크층의 형성을 방해하며 이미 형성된 케이크층도 제거할 수 있는 방법이다. 전기여과법에서는 전기장의 작용으로 막 표면에 용질의 축적이 대폭 감소하므로 투과흐름에 대한 저항이 크게 감소하며 이로 인해 막을 통한 투과플럭스가 대폭 개선되는 것으로 알려져 왔다. 이러한 방법은 단백질의 분리정제에 가장 적합하게 응용될 수 있다. 이는 단백질 용액의 경우 용액의 pH를 통하여 단백질 분자의 전하를 비교적 자유롭게 조절할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 전기여과를 통하여 한외여과 공정의 투과 플럭스 뿐 만 아니라 그 선택도까지도 개선할 수 있음을 보였다. 모든 단백질 분자는 수용액내에서 pH에 따라 단백질 성분별로 각기 상이한 하전 양상을 보인다. 용액 내에 두 성분 이상의 단백질이 존재할 때에 용액의 pH를 변화함에 따라서 용액 내의 단백질은 음으로 혹은 양으로 하전된다. 이렇게 다양하게 하전된 단백질 혼합 용액에 전기장을 거는 경우 각각의 단백질 분자에는 서로 상이한 정전기력이 작용하게 되고 이러한 정전기력의 상이성을 단백질 성분간의 분리에 응용할 수 있으며, 이들 단백질의 하전 특성을 이용

하여 단백질 성분간의 선택도를 대폭 개선할 수도 있다.

본 연구의 목적은 한외여과에서의 투과유속 및 투과 선택도를 최대화 하는 목적으로 전기여과를 응용할 수 있는 가능성을 보이는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 공급원액의 pH와 전극간의 전압을 변화시켜 가면서 한외여과 실험을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 투과유속 향상을 위한 전기여과

전기여과법은 주로 농도분극 현상과 이로 인한 케이크층 형성을 최소화하여 막분리공정에서의 투과유속을 개선하는 것이 가장 널리 알려진 목적이다[9,10]. 전형적인 전기여과법은 Fig. 1(a)에서 나타난 바와 같이 분리막의 상류부와 하류부에 각각 하나씩의 전극을 분리막과 평행한 방향으로 설치하고 전압을 가하면서 한외여과를 수행하는 것이다. 전극에 직류전압이 가하여지면서 분리막의 수직 방향으로 전기장이 형성된다. 이때 하전을 띤 입자는 입자의 하전과 반대부호의 전극으로 이동하며 이러한 현상을 전기영동(electrophoresis)이라 한다. Fig. 1(a)에서 보듯이 전기장이 없이는 한외여과를 통하여 단백질이 농축되는 경우 분리막 표면에는 알부민의 농도분극 현상이 일어나고 알부민 분자들로 이루어진 케이크층이 형성되어 투과에 대한 저

향으로 작용한다. 반면, 막 하류부의 전극에 음전압, 그리고 막 상류부의 전극에 양전압이 걸리는 동안 음전하를 띤 단백질 용액의 한외여과가 이루어지는 경우 음전하를 띤 단백질 분자는 막 하류부의 음전극과는 척력이 작용하고 막 상류부의 양전극과는 인력이 작용하게 된다. 이로 인해 분리막 표면에 농축되었던 알부민 분자는 분리막 표면에서 밀려나서 제거되며 막 상류부에 위치한 양전극 주변으로 몰리게 된다. 이러한 작용에 의해 분리막 표면에 이미 형성된 케이크층이 제거되며, 추가의 농도분극 현상을 방지하는 효과도 함께 얻을 수 있다. 결과적으로 전기여과법을 통하여 막 표면의 케이크층 형성은 물론 막 오염도 예방하여 분리막을 통한 용액의 투과유속이 대폭 개선될 수 있다[9,10].

2.2. 선택도 향상을 위한 전기여과

전기여과법은 이상 설명한 바와 같은 투과유속 개선의 효과 이외에도 단백질 분자의 성분별 하전 특성을 이용하여 막분리공정에서의 선택도 증가의 효과도 기여할 수 있다. 모든 단백질은 성분별 특성치로서의 등전점(isoelectric point, pI)을 갖으며, 용액의 pH가 특정 단백질 성분의 등전점보다 낮은 경우 단백질 분자는 용액 내에서 양으로 하전되고 용액의 pH가 특정 단백질 성분의 등전점보다 높은 경우에는 단백질 분자는 음으로 하전된다. 용액 내에 두 성분의 단백질이 존재하며 용액의 pH가 두 단백질 성분의 등전점 사이의 구간으로 조절될 경우 용액 내에서 한 성분의 단백질은 양으로 하전되고 다른 한 성분은 음으로 하전된다. 이러한 용액을 Fig. 1(b)에서와 같이 분리막을 사이에 둔 두 전극 사이에 전압이 걸린 상태로 용액 내의 단백질 성분간의 분리정제가 이루어지는 경우 양으로 하전된 단백질 성분은 음극과 인력이 작용하게 되고 음으로 하전된 성분은 양극과 인력이 작용하여 이동하게 된다. Fig. 1(b)에서 보듯이 분리막의 하류부에 음전극이 설치된 경우 양으로 하전된 단백질 분자는 음전극에 끌려서 투과가 촉진되며, 음으로 하전된 단백질 분자는 음전극과의 척력으로 인하여 투과가 저지된다. 이와 같이 각 성분간에 차별적으로 작용하는 정전기 효과를 사용하면 분자 용적의 차이 만에 의하여 분리가 이루어지는 한외여과법에 비해 그 선택도를 월등히 높일 수도 있다.

Table 1. Major Properties of the Proteins

	Molecular weight (kDa)	Isoelectric point (pI)	% of total protein
Conalbumin	80	6.1	12~15%
Ovomucin	5,500~8,300	4.7	3~4%
Lysozyme	14.3	11.0	3.4%

3. 실험

3.1. 실험재료

본 연구는 난백내의 라이소자임을 분리정제하기 위한 연구에 응용하기 위하여 수행되었다. 실험에 사용된 단백질은 난단백의 주요성분인 라이소자임(L-6876)과 알부민(A-5503)을 Sigma Chemical Company로부터 구입하여 사용하였다. 본 실험에 사용된 단백질의 분자량 및 등전점을 Table 1에 나타내었다. 분리막은 직경이 44.5 mm이고 MWCO 30 kDa의 재생 셀룰로즈 재질 한외여과막(PLTK4310)을 Micropore사로부터 구입하여 사용하였다. 단백질 용액은 라이소자임 혹은 알부민을 0.1% (1 g/L)의 농도로 2차 증류수에 용해한 후 공극직경 0.2 μ m의 정밀여과막을 통하여 여과하여 제조하였다. 단백질 용액의 pH를 조절하기 위하여 HCl 혹은 NaOH를 이용하였으며, 이를 통해 용액의 pH를 3, 7, 9, 11로 조절하며 실험하였다.

3.2. 실험장치

Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다. 투과가 일어나는 투과조는 45 mm ID×50 mm OD×60 mm H의 원통형으로 제작하였으며 그 용량은 50 mL가 되도록 하였다. 투과조 하부에는 직경 44.5 mm의 분리막이 고정되도록 하였다. 투과조에서 분리막 상류부와 하류부에는 각각 직경 40 mm의 백금 재질의 전극을 분리막 사이에 두고 20 mm의 거리로 설치하여 한외여과 과정에서 분리막의 상 하류부에 걸쳐 전기장이 걸리도록 하였다. 투과조에 단백질 용액이 주입된 이후 실린더로부터의 질소를 통하여 2.5 bar의 TMP가 걸리도록 하였다. 한외여과가 이루어지는 도중 막 상류부와 하류부에 각각 양극과 음극의 전압을 걸고 한외여과를 수행하여 전기장의 효과를 관찰하였다.

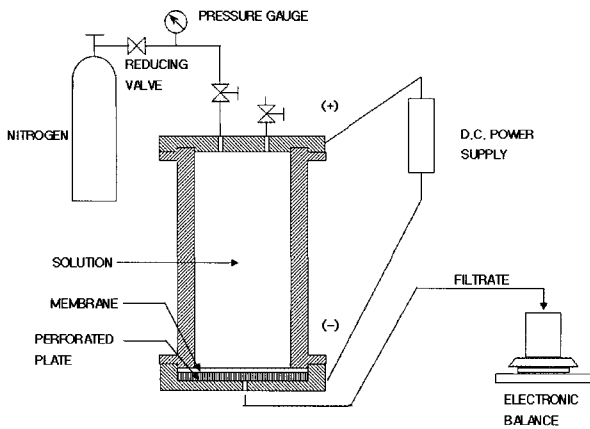


Fig. 2. Experimental set-up for electrofiltration.

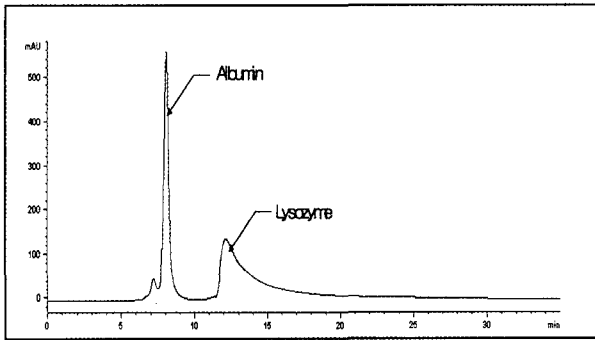


Fig. 3. HPLC (using Shodex WAT035943 column) peaks for lysozyme (0.5%) and albumin (0.5%) solution.

3.3. 분석장치

공급원액과 투과용액의 조성은 HPLC (Hewlett Packard series 1100)를 이용하여 분석하였다. 칼럼으로는 단백질 분석용으로 원형 실리카 겔 표면에 친수성기로 도포된 재질로 충전된 GPC 칼럼(shodex, WAT035943)을 사용하였으며 이동상은 20 mM, pH 7의 인산염 완충용액을 사용하였다. HPLC 분석 peak를 통하여 용액 내의 단백질 농도를 평가하는 기준으로서 알부민과 라이소자임 함량이 각각 0.5%인 용액을 사용하여 표준 peak를 작성하였다. Fig. 3은 표준 0.05%의 라이소자임과 0.05% 알부민 용액에 대하여 HPLC 분석을 통하여 얻은 표준 peak이다

4. 결과 및 고찰

4.1. 투과유속

한외여과가 이루어지는 중에 막 상류부와 하류부에

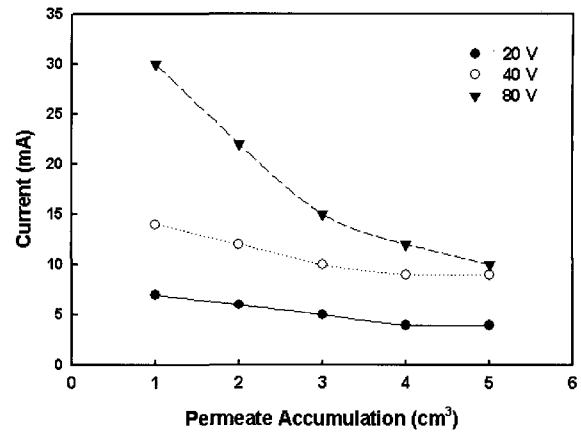


Fig. 4. Decay of electric current between electrode through the accumulation of permeate.

각각 양전압과 음전압이 걸리는 경우 용액에는 전기장이 형성되고 용액을 통하여 전기의 흐름이 생성된다. Fig. 4는 한외여과를 통하여 pH 7, 0.1%의 알부민 용액이 농축되는 과정에서 전압이 걸린 이후 용액을 통한 전류의 흐름을 나타낸다. Fig. 4에서 보듯이 전압이 걸린 직후에 전류의 흐름이 형성되며 한외여과가 지속되면서 전류의 값은 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 한외여과 과정 중 용액 전체에 분포되어 있거나 농도분극 현상에 의해 막 상류부 표면에 집중적으로 존재하던 단백질 분자 및 기타 하전을 띤 입자가 전압이 걸리면서 각자 반대의 전하를 띤 전극을 향하여 이동하는 동안에는 비교적 높은 전류의 흐름을 보이지만, 이들 하전입자의 이동이 계속 진행되면서 전류는 점차 감소하고, 각각의 전극 주변에 집중되면서 이들의 이동이 완료된 이후에는 초기보다 낮은 전류의 흐름으로 일정하게 유지된다.

Fig. 5는 pH 7의 1% 알부민 용액의 전압이 걸리기 전후와 전압이 걸리는 동안 막을 통한 투과유속의 변화양상을 나타낸다. 전기장이 형성되지 않는 경우, 즉 전압이 걸리지 않는 경우에는 한외여과가 지속되면서 투과유속은 점차 감소함을 볼 수 있다. 이는 한외여과 과정에서 필연적으로 발생하는 농도분극현상과 케이크 층의 형성으로 인한 것이다. 막을 통한 투과가 이루어지는 중에 전압이 걸리면 Fig. 5에서 보듯이 투과유속이 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 농도분극 현상에 의해 분리막 표면에 형성된 케이크층이 분리막 하류부에 위치한 음전극과의 정전기적 작용으로 인하여 제거되기 때문이다. 공급원액의 pH에서는

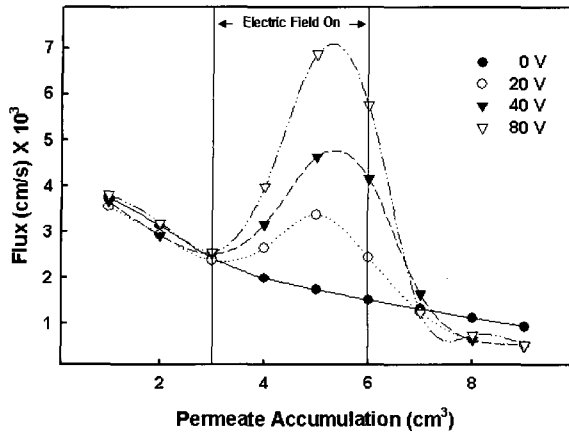


Fig. 5. Permeation flux of pH 7, 0.1% albumin solution before and after the electrical field is started.

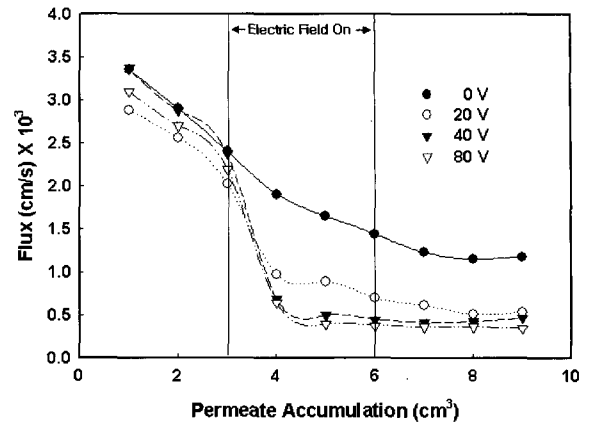


Fig. 7. Permeation flux of pH 3, 0.1% albumin solution before and after the electrical field is started.

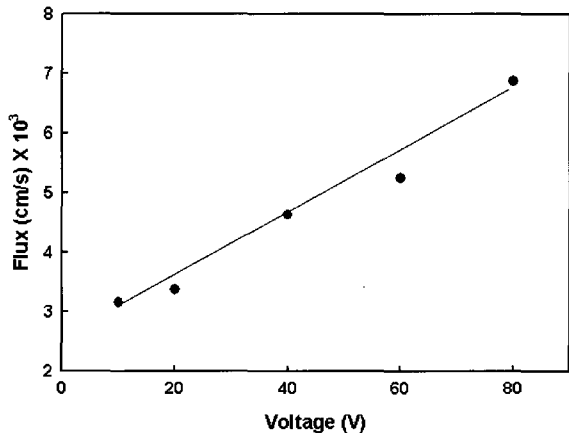


Fig. 6. Effect of voltage on the permeation flux in pH 7, 0.1% albumin solution.

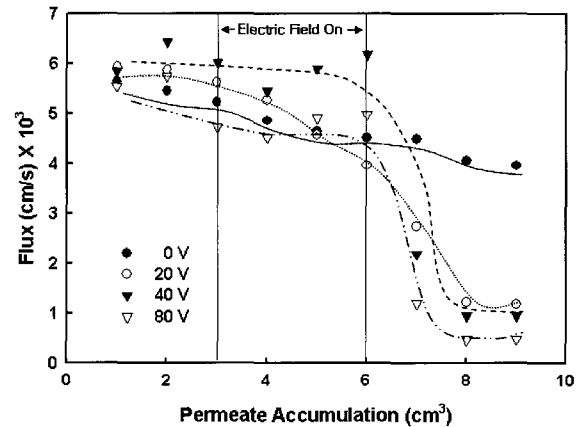


Fig. 8. Permeation flux of pH 7, 0.1% lysozyme solution before and after the electrical field is started.

분리막 표면에 형성되는 케이크층의 주 성분인 알부민은 음으로 하전되므로 막 하류부에 위치한 음전극과는 척력이 작용하게 되고 이로 인해 막 상류부 표면의 케이크층은 상당부분 제거되며 그 결과로 케이크층에 의해 작용하는 투과저항도 사라지게 되어서 결과적으로는 투과유속이 급증하는 것이다[9,10].

Fig. 6은 pH 7, 1%의 알부민 용액의 한외여과 과정에서 전극 간에 걸리는 전압의 증가에 따른 투과유속의 변화를 보인다. Fig. 6에서 보듯이 전압이 증가하면서 투과유속이 더 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 전압이 증가할수록 정전기 작용에 의하여 막 표면의 케이크 층이 제거되는 현상이 더더욱 심화되며 분리막 주변에 알부민의 농도가 떨어지기 때문이다.

Fig. 7은 pH 3 알부민 용액의 전압이 걸리기 전후와

전압이 걸리는 동안 막을 통한 투과유속의 변화양상을 나타낸다. pH 7 용액의 경우와는 반대로 전압이 걸리면서 막을 통한 투과유속은 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 수용액 내의 알부민과 막 하류부의 음전극간에 작용하는 정전기적인 인력에 의한 것이다. 알부민 분자는 pH 3 용액 내에서는 양으로 하전되며 막 하류부의 음전극과는 정전기적인 인력이 작용하므로 알부민 분자들은 분리막 표면에 모이게 된다. 결과적으로 분리막 표면에서의 농도분극 현상과 케이크층 형성을 촉진하며 케이크층에 의한 투과저항이 크게 증가하는 것이 그 이유이다.

Fig. 8은 pH 7 라이소자임 용액의 전압이 걸리기 전후와 전압이 걸리는 동안 막을 통한 투과유속의 변화양상을 나타낸다. 전압이 걸리면서 투과유속은 변화는

거의 없는 것을 알 수 있다. 이 경우 라이소자임은 pH 3 용액에서의 알부민과 같이 양전하를 띠게 되며, 막 하류부의 음전극과는 정전기적인 인력이 작용한다. 이러한 이유로 라이소자임 분자는 분리막 표면에 모이게 되며 농도분극 현상이 촉진될 것으로 예측할 수 있다. 그러나 라이소자임 분자는 그 용적이 알부민 분자에 비해 매우 작으며 분리막 공극(MWCO : 30 kDa)을 비교적 자유롭게 통과하므로[11] 알부민의 경우와 같이 농도분극 현상이 심하게 일어나지는 않기 때문이다.

4.2. 단백질의 투과

한외여과에서 단백질의 성분별 투과양상을 대별하는 대표적인 투과특성으로는 여과계수(sieving coefficient, τ)가 있다. 여과계수는 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\tau_{ob} = \frac{C_p}{C_b} \quad (1)$$

위의 식에서 C_b 와 C_p 는 각각 공급원액과 투과용액에서의 특정단백질의 농도를 의미하며, 여과계수는 특정성분의 분리막을 통한 투과의 용이도를 나타낸다. 한편, 전기장의 효과로 인하여 단백질의 여과계수가 변화된 정도를 나타내기 위한 새로운 특성치가 필요하여 본 연구에서는 아래와 같은 특성치를 고안하여 사용하였으며 여과계수비(sieving coefficient ratio)라고 명명하였다.

$$\theta = \frac{\tau_v}{\tau_0} \quad (2)$$

위의 식에서 τ_0 는 전압이 걸리기 전의 한외여과에서의 여과계수 값이며, τ_v 는 전압 v 가 걸린 이후의 여과계수 값이다. 결과적으로 여과계수비는 전압이 걸린 이후의 여과계수 값의 전압이 걸리기 이전의 순수한 한외여과만으로 얻어진 여과계수 값에 대한 비를 의미한다. 여과계수 값이 1보다 큰 경우 전기여과에 의해 특정성분의 투과가 촉진됨을 의미하며, 여과계수 값이 1보다 작은 경우 반대로 전기여과에 의해 특정성분의 투과가 억제됨을 의미한다.

Fig. 9는 pH 7의 0.1% 알부민 용액을 한외여과 하였을 경우의 여과계수비에 대한 전압의 영향을 나타낸다. Fig. 9에서는 전압이 상승하면서 알부민의 여과계

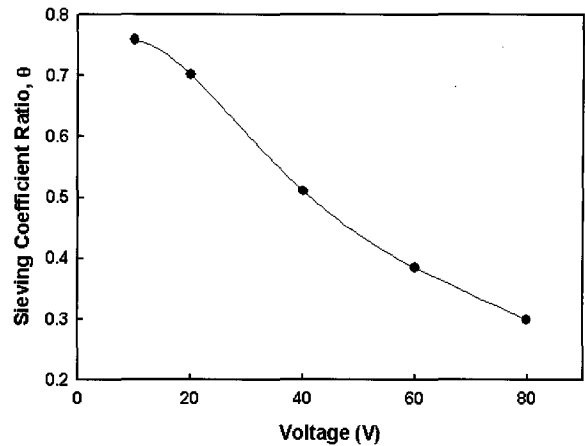


Fig. 9. Effect of voltage on the sieving coefficient ratio of albumin (in electrofiltration of pH 7, 0.1% albumin solution).

수비는 감소하는 것을 볼 수 있다. 앞서 설명하였듯이 알부민은 pH 7 용액에서는 음으로 하전 되며 음전하를 띤 알부민 분자는 분리막의 하류부에 설치된 음전극과는 정전기적인 척력이 작용하여 막 상류부로 밀려 올라가게 된다. 또한 막 상류부로 밀려올라간 알부민 분자는 막 상류부에 설치된 양전극과의 정전기적인 인력이 작용하여 양극 주변에 집중되어 분포하게 된다. 결과적으로 분리막 상류부 표면에는 알부민의 농도가 크게 감소하게 되며 이로 인해 투과용액중의 알부민의 함량과 한외여과과정의 알부민의 여과계수비는 전극을 통해 용액에 걸리는 전압의 증가에 따라 줄어들게 된다.

Fig. 10은 pH 7의 0.1% 라이소자임 용액을 한외여과 하였을 경우 여과계수비에 대한 전압의 영향을 나타낸다. Fig. 10에서 보듯이 알부민 용액을 한외여과 과정과는 반대로 라이소자임 용액을 한외여과 하였을 경우에는 전압이 걸리지 않았을 경우에 가장 작은 여과계수비 값을 보였으며 전압의 상승에 따라 라이소자임의 여과계수비는 증가하였다. 이는 pH 7 용액에서는 라이소자임은 양으로 하전 되며 또한 용액내의 라이소자임 분자는 막 상류부에 설치된 양전극과는 척력이 작용하여 분리막 쪽으로 밀려 내려가게 되고, 분리막 하류부에 설치된 음전극과는 정전기적인 인력이 작용하여 막 하류부로 당겨지고 그 투과가 촉진된다. 결과적으로 투과용액 내의 라이소자임의 함량과 한외여과과정의 라이소자임 여과계수비는 전극을 통해 용액에 걸리는 전압에 따라 증가하게 된다. Fig. 10에서 또한

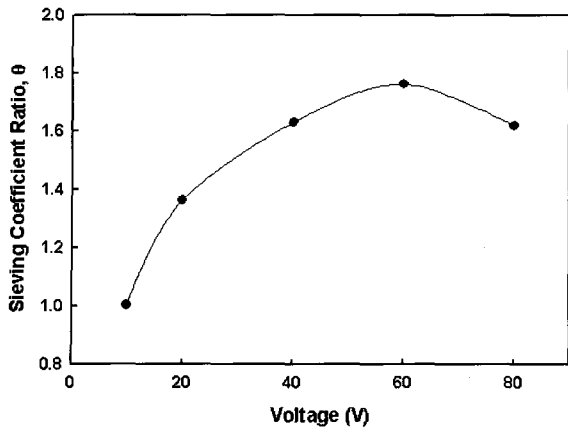


Fig. 10. Effect of voltage on the sieving coefficient ratio of lysozyme (in electrofiltration of pH 7, 0.1% lysozyme solution).

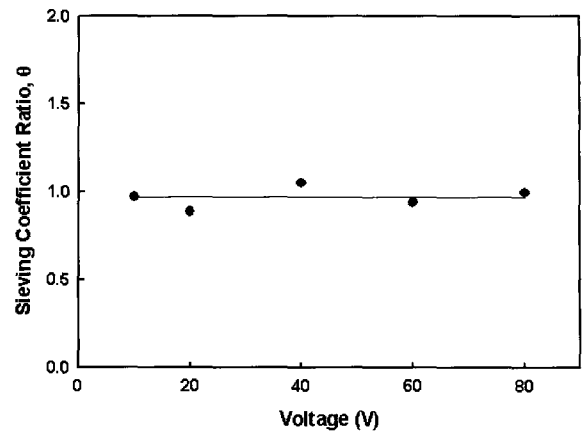


Fig. 12. Effect of voltage in the sieving coefficient ratio of albumin (0.1%, pH 3).

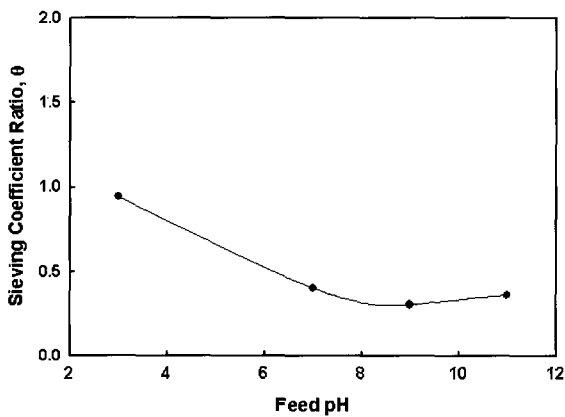


Fig. 11. Effect of pH on the sieving coefficient ratio of albumin (0.1% albumin, 20 V).

60 V와 80 V 사이의 전압 구간에서는 전압이 증가함에 따라 라이소자임의 여과계수비가 약간 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 라이소자임의 농도분극 현상으로 설명할 수 있다. 전압이 증가함에 따라 라이소자임이 분리막 상류부 표면에 모이는 현상이 심화되면서 라이소자임에 의한 농도분극 현상이 일어나므로 새로운 투과저항이 형성되며 이로 인해 투과계수비가 감소하는 것이다.

Fig. 11은 0.1% 알부민 용액의 pH를 3, 7, 9, 11로 변화시켜 가면서 전극을 통해 전압을 걸었을 때의 한외여과를 통한 알부민의 여과계수비를 나타낸다. Fig. 11은 pH 3, 0.11% 알부민 용액의 한외여과에서 전압의 증가에 따른 여과계수비의 변화양상을 나타낸다. Fig. 11을 통해 알부민의 등전점 보다 높은 pH 범위인

pH 7, 9, 11에서는 pH 변화에 따라 알부민의 여과계수비 값이 크게 변화하지 않으며 1보다 작은 여과계수비를 유지하는 것을 볼 수 있다. 그러나 용액의 pH가 3으로 떨어졌을 때에는 알부민의 여과계수비가 확실히 증가한 것을 볼 수 있다. 알부민 분자는 pH 3 용액에서는 양으로 하전되므로 막 하류부의 음전극과는 정전기적 인력이 작용하며 용액 내의 알부민은 분리막 주변으로 밀려들게 된다. 결과적으로 전극을 통하여 전압이 걸렸을 경우 전압이 걸리지 않는 경우에 비해 투과용액 내의 알부민 함량은 더 높은 값을 보일 것이며 알부민의 여과계수비의 값은 1보다 높은 값을 보일 것으로 예상할 수 있다. 그리고 알부민 여과계수비 값은 전압의 증가와 함께 증가할 것으로 예상할 수 있으며 이러한 현상은 Fig. 10에서 라이소자임의 경우에서 이미 관찰되었다. 그러나 pH 3의 경우 알부민 여과계수비 값은 pH 7, 9, 11의 경우보다는 높은 값을 보이지만 여전히 1보다 약간 작은 값을 보였으며 이는 전압이 걸려도 전압이 걸리지 않았을 때보다 알부민 분자의 투과가 전혀 촉진되지 않았음을 뜻한다. 이는 막 상류부 표면에서 일어나는 농도분극 현상으로 설명할 수가 있다[1-4]. 라이소자임의 경우 그 분자용적이 알부민에 비해 작으므로 분획분자량 30 kDa 분리막의 공극을 상대적으로 자유롭게 통과하였으며 매우 높은 전압에서 농도분극 현상에 의한 여과계수비의 저하가 약간 관찰되었다. 그러나 알부민의 경우 라이소자임과 마찬가지로 양으로 하전되었기는 하나 그 분자의 용적이 라이소자임보다 크므로 분획분자량 30 kDa 분리막의 공극을 라이소자임만큼 자유롭게 통과하지 못

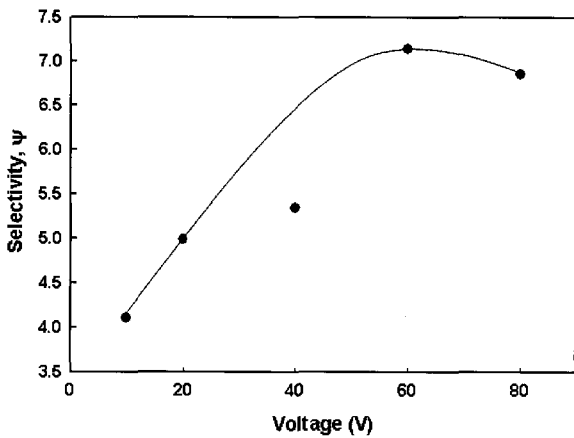


Fig. 13. Estimated lysozyme selectivity over albumin in the voltage (in electrofiltration of pH 7, 0.1% solutions of lysozyme and albumin).

한다. 이러한 알부민 분자가 막 하류부의 음전극에 끌리면 막 상류부 표면에 알부민 분자가 축적되어 농도가 증가하면서 케이크층이 형성된다. 이때 형성되는 케이크층은 전압이 걸리지 않았을 경우 단순히 알부민 분자에 대한 용매의 선택적 투과에 의해 형성되는 케이크층에 비해 더 높은 알부민 농도를 보일 것이며, 이러한 고농도의 케이크층은 막 하류부에 위치한 음전극과의 정전기적인 인력에 의해 더더욱 압축되어 그 밀도는 매우 커질 것이다. 이러한 고밀도 케이크층을 통하여서 작용하는 투과저항은 매우 클 것이며 이렇게 매우 큰 투과저항으로 인해 용액중의 알부민과 막 하류부의 전극과의 정전기적 인력에도 불구하고 투과용액중의 알부민의 농도는 증가하지 못한다. Fig. 12는 pH 3 알부민 용액에서의 전압의 증가가 알부민의 여과계수비 값에 미치는 영향을 나타낸다. 이 그림을 통해서 pH 3 용액의 알부민 용액에서는 전압의 증가에도 알부민 여과계수비 값은 크게 변화하지 않았음을 볼 수 있다.

이상에서 보았듯이 pH 7에서의 라이소자임 용액에서는 전압의 증가에 따라 라이소자임의 투과는 촉진되었고 알부민의 투과는 억제되었다. 이는 한외여과 과정에서 전압을 깊으므로 알부민에 대한 라이소자임의 분리효율을 개선할 수도 있음을 보여준 것이라 볼 수 있다. 한외여과공정을 통한 특정성분의 분리효율을 표현하기 위하여서는 선택도(selectivity)라는 새로운 척도가 필요하다. 선택도는 특정성분과 다른 성분과의 여과계수의 비를 의미한다. 예컨대 라이소자임과 알부

민 간의 선택도는 아래의 식과 같이 라이소자임과 알부민 간의 여과계수의 비로 나타낼 수 있다.

$$\psi = \frac{\tau_{lys}}{\tau_{alb}} \quad (3)$$

위의 식에서 나타낸 바와 같이 라이소자임의 알부민에 대한 선택도가 1보다 크다는 것은 라이소자임의 여과계수가 알부민의 여과계수보다 크다는 것을 의미한다. 본 연구에서 라이소자임 용액과 알부민 용액으로 개별적인 실험을 한 결과가 라이소자임과 알부민의 혼합용액에서도 유사하게 나타난다고 가정하면 라이소자임의 알부민에 대한 선택도는 전압에 대하여 Fig. 13과 같은 상관관계를 보일 것이다. Fig. 13에서 보듯이 전압이 상승하면서 라이소자임의 여과계수는 증가하는 반면 알부민의 여과계수는 감소함으로써 라이소자임의 알부민에 대한 선택도는 증가하게 될 것이며, 이는 라이소자임의 알부민에 대한 분리효율의 향상을 의미한다. 즉 단백질의 한외여과에서 전기여과에 의해 선택도는 향상시킬 수 있으며 전압의 증가에 따라 그 향상되는 정도는 더 커질 것이다.

5. 결론

막 상류부와 하류부에 각각 양전극과 음전극을 설치하고 전압을 건 상태에서 0.1% 알부민 용액과 0.1% 라이소자임 용액에 대한 한외여과실험을 수행하였으며 그 결과로부터 아래와 같은 결론이 도출되었다.

1) PH 7 알부민 용액의 한외여과에서는 전기장에 의해 투과유속은 증가하였으며, 알부민의 여과계수비는 감소하였다.

2) PH 7 라이소자임 용액의 한외여과에서는 전기장에 의해 투과유속이 소폭 감소하였으며, 여과계수비는 증가하였다.

3) PH 3 알부민 용액의 한외여과에서는 전기장에 의해 투과유속은 감소하였으며, 알부민의 여과계수에는 큰 변화가 없었다.

4) 한외여과에서의 라이소자임의 알부민에 대한 선택도는 전기장에 의해 대폭 개선할 수 있음을 보였다.

감 사

본 연구는 한국산업기술재단에서 주관하는 ‘지역혁신석박사연구인력양성사업’의 지원으로 수행되었으며 이를 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. V. Maugueijo, M. N. de Pinho, and M. N. Geraldes, “Numerical and experimental study on mass transfer in lysozyme ultrafiltration”, *Desalination*, **145**, 193 (2002).
2. H.-M. Yeh, “Decline of permeate flux for ultrafiltration along membrane tubes”, *Desalination*, **145**, 153 (2002).
3. X. Hu, E Bekassy-Monlar, and A. Koris, “Study of modelling transmembrane pressure and gel resistance in ultrafiltration”, *Desalination*, **163**, 355 (2004).
4. 염경호, “고분자 용액의 한외여과에서의 농도분극층 저항에 관한 연구”, *멤브레인*, **2**, 59 (1992).
5. 육영재, 염경호, “초음파를 이용한 한외여과의 성능 향상”, *멤브레인*, **13**, 283 (2003).
6. H.-M. Wang, C.-Y Li, S.-J. Chen, T.-W. Cheng, and T.-L. Chen, “Abatement of concentration polarization in ultrafiltration using n-hexadecane/water two phase flow”, *J. Membr. Sci.*, **238**, 1 (2004).
7. T. W. Cheng and J. G. Wu, “Quantitative flux analysis of gas-liquid two-phase ultrafiltration”, *Sep. Sci. Technol.*, **38**, 817 (2003).
8. C. H. Muller, G. P. Agarwal, T. Melin, and T. Wintgens, “Study of ultrafiltration of single and binary protein solution in a thin spiral channel module”, *J. Membr. Sci.*, **227**, 51 (2003).
9. E. Iritani, Y. Mukai, and Y. Kiyotomo, “Effects of electric field on dynamic behaviors of dead-end inclined and downward ultrafiltration of protein solutions”, *J. Membrane Sci.*, **164**, 57 (2000).
10. C. C. Yang and T.-Y Yang, “Reclamation of high quality water from treating CMP wastewater by a novel crossflow electrofiltration/electrodialysis process”, *J. Membr. Sci.*, **233**, 151 (2003).
11. M. Balakrishnan and G. P. Agarwal, “Protein fractionation in a vortex flow filter I: Effect of system hydrodynamics and solution environment on single protein transmission”, *J. Membr. Sci.*, **112**, 47 (1996).