2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한외여과막에 의한 오일함유 방사성폐액 처리 연구

Study on Cross-Flow Ultrafiltration for the Radioactive Liquid Waste Treatment

정경환, 조은성, 이동규, 이근우, 정기정
한국원자력연구소

요 약

한외여과막에 의한 방사성오일 에멀젼 분리특성 연구를 위하여, 오일-SDS 에멀젼계와 평판형 막에 의한 cross-flow mode를 이용하여 전단압력, cross-flow 속도, 그리고 공급액의 SDS 농도 등 조업조건에 따라 막투과 flux 변화를 측정하였다.

실험 초기 막투과 flux는 막의 표면상태(친수성과 소수성)에 따라 상이하게 나타났으나, 오랜 시간의 경과로 정상상태에 도달하였고, 정상상태의 막투과 flux 값은 전단압력의 영향보다는 운전조건(cross-flow 속도)의 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 cross-flow 형식의 한외여과 시 오일 에멀젼의 분리특성은 막의 표면 상태와 용질의 특성에 따른 막투과 flux 변화를 저항과 저항 미분식을 통하여 해석할 수 있었다.

Abstract

The effect of the UF membranes on permeate flux was investigated in the ultrafiltration of dodecane(0.1 v%) / water emulsion and dodecane-SDS-water emulsion in view of the treatment of radioactive oily emulssion liquid waste in the future. For variety of membranes, experiments in cross-flow modes have been performed at various pressure and different cross-flow velocities.

Permeate flux decreased with the time and reached a constant steady-state value. Steady-state flux was found to be dependent by the hydrodynamic conditions but independent by the pressure. Flux decrease and rates of permeate flow resistance change have been analysed using

a formulation of the equations illustrating the method of resistance mechanism recognition.

1. 서 론

원자력 시설에서 발생되는 대부분의 저준위 방사성 폐액에는 방사성 핵종 뿐만 아니라 여러 종류의 비방사성 용해염, 콜로이드 화합물, 그리고 오일 및 계면활성제 등이 다양하게 포함된다. 폐액내의 오일이나 계면활성제 등의 유기물들은 이들 상호간의 작용에 의해서 안정한 형태의 콜로이드 및 에멀젼 형태로 존재하게 된다[1].

이러한 폐액은 대부분 증발기에 의해서 처리되고 있으며, 증발농축시 오일 에멀젼의 비중이 낮아 증발농축기 상부표면에 층을 만들게 되고, 물의 증발을 방해하므로서 효율이 저하된다. 뿐만 아니라 수증기가 오일 층을 통과할 때 오일 및 물 속의 계면활성제 등의 불순물로 인해 거품 등이 다량 발생되며, 이에 따라 방사성 핵종과 함께 비말동반 현상이 야기되어 처리성능이 저하된다. 따라서 오일 함유폐액의 처리를 위한 증발농축기의 성능 향상을 위해서는 오일 에멀젼이나 계면활성제와 같은 유기물을 분리할 수 있는 전처리 공정의 도입이 필요하다[2,3,4].

한외여과막공정은 폐액내에 존재하는 고분자 용질이나 미립자 및 콜로이드물질을 단시간 내에 매우 효율적으로 처리할 수 있는 장점이 있다. 따라서 이러한 폐액내에 비슷한 형태로 존재하는 방사성핵종들도 효율적으로 처리 할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 계면활성제 또는 오일 에멀젼과 같은 유기물의 분리 시에는 막의 기공이나 막표면에 fouling이 야기되어 용매이동에 대한 저항으로 작용하여 막투과 flux를 감소시키는 문제점도 있다.[5,6]

한외여과막 공정에서 flux감소현상이 일어나는 주된 이유는 흡착, 기공 막힘, 농도분극이나 겔층 형성 등의 fouling 메카니즘 중의 한 가지 이상이 작용하기 때문인 것으로 알려져 있다. 이들이 fouling에 작용하는 비중은 공급액의 조성, 막 재질과 형태 그리고 조업조건에 따라 다르다. 이러한 이유로 인하여 한외여과공정에서 막투과 flux와 fouling간의 원인분석 연구는 계속 수행되고 있다[7].

흡착에 의한 fouling은 아주 짧은 시간에 비가역적으로 일어나면서 유량감소의 원인이 된다. 이는 일반적으로 막의 재질과 형태 그리고 용질에 따라 막과 용질사이의 소수성 작용(hydrophobic interaction), 수소결합, van der Waals 힘의 작용, 정전기 효과 등의 상호작용에 의해서 일어난다[8].

본 연구에서는 한외여과막에 의한 오일 에멀젼 분리특성을 오일-SDS 에멀젼계와 평판형 막에 의한 cross-flow mode를 이용하여 전단압력, cross-flow 속도, 그

리고 공급액의 SDS 농도 등 조업조건에 따라 막투과 flux 변화를 측정하므로서 연구하였다. 또한 막투과 flux 감쇄 곡선의 분석은 저항과 저항 미분식을 이용하므로서 fouling 메카니즘을 규명하였다.

2. 이론적 고찰

2-1 한외여과막 물질전달 방정식

일반적으로 일정 압력에서 용매입자의 크기와 막의 기공크기에 따라, 그리고 막의 표면 상태에 따라 fouling 모형이 결정된다. 즉 용매가 막의 표면이나, 기공벽에 흡착되어 막의 기공 크기를 축소시킴으로서 fouling이 일어나거나, 용매입자가 막의 기공크기와 같아 기공 막힘(pore plugging)현상을 일으키므로서 fouling이 일어난다. 또한 막표면에 gel/cake 층의 형성으로 인한 fouling도 일어난다. Hermia[9]의 일정압력 방해여과 법칙은 dead-end 여과에 직접 적용할 수 있으며, 관련된 물질수지의 적절한 수정에 의해 유사한 식을 유도하므로서 cross flow 여과에 적용이 가능하다는 보고도 있다.[10]

1) complete blocking

각 입자들이 막에 도달하여 기공을 막음으로서 blocking 현상에 참여한다는 가정하에 활성표면 감소는 다음과 같이 표현된다.

$$A = A_0 - \sigma V \qquad (1)$$

여기서 A는 활성 표면적이고, σ는 단위 여과 부피당 blocked 표면적이다.

Darcy's law에 의하면 시간 t에서의 유량은 다음과 같이 표현된다.

$$J = \Delta P A_t / \mu R \qquad (2)$$

여기서 ΔP는 전단압력, μ는 점도 그리고 R은 저항 값이다.

식(1)과 (2)을 조합하여 적분하면 다음과 같다.

$$J = J_0\{1 - \exp(-K_b\ A\ t)\} \qquad (3)$$

여기서 $K_b = \sigma \Delta P / \mu R_m$

$\ln(J/J_0)$와 시간 t에 대해서 도시하면 직선이 되고, 기울기는 $-K_b$가 된다.

2) Intermediate blocking

다시 각 입자가 필연적으로 기공을 막는다고 할 수 없으므로 기공을 막는 입자에 대한 확율로 평가하여 Intermediate blocking 여과 법칙으로서, 모든 구간에서의 활성표면은 다음과 같이 표현된다.

$$A_{t+dt} = A_t - \sigma(J_t \ dt)\ (A_t/A_t) \quad (4)$$

식(8)**과 식**(2)**를 조합하여 적분하면 다음과 같다.**

$$J = J_0(1 + K_i\ A\ J_0\ t)^{-1} \quad (5)$$

3) Standard blocking

막의 기공보다 작은 에멀젼 방울이 기공내부에 흡착되어 기공크기를 감소시키는 경우도 있다. 따라서 기공 부피는 여과액 부피와 비례해서 감소하고, 모든 기공은 같은 길이와 같은 구경이라는 가정으로 물질 수지 식으로부터 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$N(-2\pi r dr)L = X_0 \quad (6)$$

여기서 L**은 기공의 길이이며,** N**은 기공의 수이다, 그리고** X_0 **는 현탁액에 오일이 차지하는 부피 분율이다.**

식 (10)**에** Poiseuille's **식을 사용하여 다음과 같은 관계식을 얻는다.**

$$J = J_0(1 + 1/2\ K_s\ A\ J_0\ t)^{-2} \quad (7)$$

4) Cake filtration

막 근방에서의 cake**층의 형성은** Darcy's Law **저항모델로 표현되는데 전단압력에 의한 용매전달은 다음과 같다.**

$$J = \frac{\Delta P}{\mu\ R_t} = \frac{\Delta P}{\mu\ (R_m + R_c)} = \frac{1}{A}\frac{dV}{Dt} \quad (8)$$

여기서 R_c**는** cake **층의 형성에 따른 퇴적저항이다. 이 저항은 다음으로 계산된다.**

$$R_c = \frac{\alpha}{A} V \quad (9)$$

여기서 α**는 퇴적 단위 높이에 따른 특성 저항이다.**

식 (8)**을 일정압력에서 적분하면 다음과 같다.**

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu R_m}{A\ \Delta P} + K_d V \quad (10)$$

$$\frac{t}{V} = \frac{1}{J_o} + K_d V$$

여기서

$$K_c = \frac{\alpha X_o}{2A\ J_o R_m} \quad (11)$$

그리고 cake **형성으로 인한 유량변화는 다음과 같다.**

$$J = J_0(1 + 2\ K_c\ (A\ J_0)^2 t)^{-1/2} \quad (12)$$

식(5), (7)와 (12)로 부터 묶어 일반화하면 다음과 같다.

$$J = J_0[1 + k(2-n)(A J_0)^{(2-n)}t]^{1/(n-2)} \quad (13)$$

여기서 k는 식(10)-(12)에 사용된 상수이고 n은 intermediate blocking, standard blocking, 그리고 cake 형성에서 각각 1, 0.5, 및 0으로 표현된다.

일정압력에서 막의 전단압력차 ΔP를 식(8)에 적용하여 이를 식(13)에 대입하여 저항을 구하면 다음과 같다.

$$R = \Delta P / J = R_0[1 + k(2-n)(A J_0)^{(2-n)}t]^{1/(2-n)} \quad (14)$$

여기서 $R_0 = \Delta P / J_0$

식(14)를 t에 대하여 1차미분하면

$$dR/dt = R_0 k(A J_0)^{(2-n)}[1 + k(2-n)(A J_0)^{(2-n)}t]^{(n-1)/(2-n)} \quad (15)$$

또 식(15)를 t에 대하여 다시 미분하면 다음과 같다.

$$d^2R/dt^2 = (n-1)R_0 k^2(AJ_0)^{2(2-n)}[1 + k(2-n)(AJ_0)^{(2-n)}t]^{(2n-3)/(2-n)} \quad (16)$$

식(16)에서 음과 양의 부호를 결정하는 것이 (n-1)의 부호이다. 시간에 따른 저항의 일차미분식을 도시하면 저항 메카니즘이 나타난다. 즉 양의 기울기($n>1$)이면 pore blocking이고, 음의 기울기이면 cake 여과 형태이다.

3. 실 험

3-1 실험 장치

실험장치는 Millipore사의 Minitan Ⅱ UF system (hold-up 30ml) 를 사용하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1.과 같다.

본 실험장치는 막에 시료를 주입할 공급탱크와 공급펌프, 그리고 UF system으로 구성되어있다. 공급펌프는 막에 일정한 주입량을 유지하기 위해 Masterflex pump (Model 7533-20, Cole-palmer Instrument, Chicago, IL), adjustable speed motor (Model type 7016-20)을 사용하였고, 막의 주입부와 출구에 각각 압력게이지를 설치하였으며, 밸브는 주입부와 retentate 부분에 각각 설치하였다. 그리고 막을 통과한 permeate와 retentate는 다시 공급탱크로 돌아오는 연속 운전 sysytem으로 되어있다.

3-2 실험재료

본 실험에 사용된 막은 plate(sheet) type으로 미국의 Millipore 사에서 제조된 평판 직사각형의 한외여과막이다. 이의 유효면적은 30㎠이다. 막의 재질은

polyethersulfone, regenerated cellulose, high-flux hydrophilic PES이고 분극분자량(MWCO)은 30,000이다.

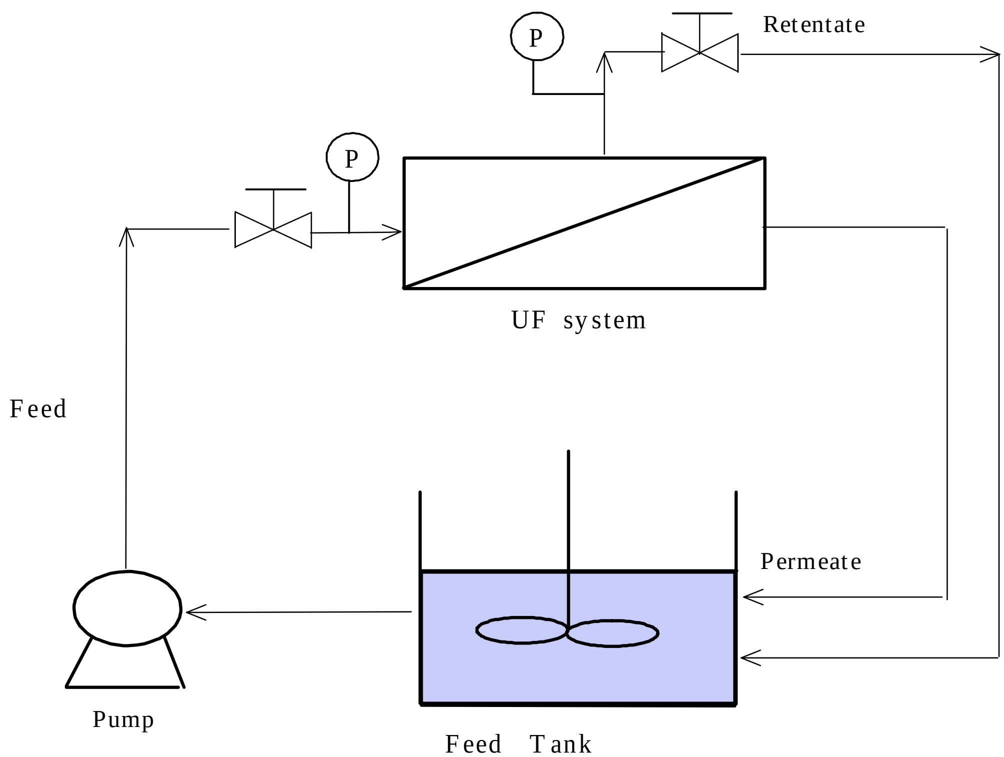

Fig. 1. Schematic diagram of crossflow filtration exprimental equipment.

실험에 사용된 시약으로서, 오일은 n-dodecane(Fluka)를 사용하였고, 계면활성제는 음이온계면활성제인 SDS(Sodium Dodecyl Sulfate, Fluka)를 사용하였다.

3-3 실험 방법

먼저 에멀젼은 초음파 에멀젼 제조장치로 제조하였다. 이 장치로 제조된 에멀젼은 평균 크기와 분포에 대한 재현성이 없기 때문에 균일한 실험조건을 유지하지는 못하였다. 그러나 동일한 order의 평균 크기(1-3 ㎛)로 실험하였다. 오일 에멀젼에 대한 특성 실험은 UF막을 이용하였으며, 용액은 오일 에멀젼 용액과 오일 계면활성제 에멀젼 용액을 각각 제조하여 막을 투과시켰다.

오일의 농도는 TOC(Total Organic Carbon Analyzer,ASTRO)에 의해서 분석하였고, 에멀젼의 크기는 즉시 Coulter Counter(Coulter Electronics Limited)

의 siphon mode를 이용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

오일 에멀젼의 막투과 실험전에 순수 물의 막투과 실험을 각각의 막에 대하여 수행하였다. 오일 에멀젼 막투과 실험은 전단압력 1 과 0.5 kgf/cm^2 그리고 cross-flow 속도가 31.7과 55.1 m/h에서 각각의 막에 대하여 수행하였다. 막투과 실험 초기의 flux값과 평형상태일 때의 막투과 flux값을 Table 1에 나타내었다.

Experiment No.	ΔP (kgf/㎠)	U (m/h)	Initial flux (㎥/㎡・h)	Final flux (㎥/㎡・h)
Polyethersulfone	0.5	55.1	0.2	0.029
Polyethersulfone (treated memb. (SDS))	1 0.5	31.7 55.1	0.103 0.2	0.028 0.035
Regenerated cellulose	1 0.5	31.7 55.1	0.334 0.225	0.03 0.028
High-flux hydrophilic PES	1 0.5	31.7 55.1	0.195 0.118	0.028 0.032

Table 1. Summary of results for the three tested UF membrane.
(dodecane-SDS emulsion)

4-1. 막의 표면특성 효과

오일 에멀젼 용액을 한외여과할 때 막의 fouling을 감소시키기 위해서 오일 에멀전 용액에 계면활성제를 첨가하여 실험하였다. 오일 에멀젼 용액에 계면활성제를 첨가하면 오일은 계면활성제의 용해 특성에 의해 안정한 형태의 오일/계면활성제 에멀전을 형성하게 되고 오일 표면은 정전기 전위를 갖게 된다. 그리고 여분의 계면활성제 양에 따라 계면활성제 미셀과 계면활성제 monomer가 공존하게 될 것이다.

오일 에멀젼 dodecane(1 mℓ/ℓ)과 계면활성제인 SDS(6.3×10^{-3} M)를 증류수에 넣고 제조하였으며, 이 용액을 대상으로 한외여과 처리하였다. 이때 운전 변수는 전단압력과 cross-flow 속도의 변화이며, 각각의 막으로 막투과 flux를 관찰한

결과가 Table1에 나타내었다.

Table 1에 나타난 결과를 보면, regenerated cellulose 막으로 오일 에멀젼을 처리할 때 초기 막투과 flux가 가장 크게 나타났으며, 반면 SDS로 선 처리한 polyethersulfone 막으로 처리할 때가 가장 작게 나타났으나, 시간의 경과에 따라 막투과 flux는 막의 표면상태나, 전단압력, 그리고 유속의 변화와 무관하게 유사한 막투과 flux를 나타냈다.

오일 에멀젼 용액을 대상으로 UF할 때 fouling은 오일에 의한 막의 기공 막힘과 흡착이 크게 나타난 반면, 오일 에멀젼 용액에 계면활성제를 첨가함으로서 에멀젼에 의한 기공 막힘이나 흡착이 현저히 줄어든 대신 농도분극(CP)현상은 크게 나타났다. 따라서 동일한 조업 조건에서 용액 내 계면활성제의 종류와 농도에 따라 농도분극현상을 조절할 수 있으며, 이에 따라 전체 fouling 크기가 지배될 것으로 보인다.

한외여과를 시작하면 막투과 flux는 막의 상태와 용액의 조건에 따라 변한다. Lee(11)등이 압력변화에 따른 UF flux 변화를 실험하였는데, 압력 3기압까지 압력효과가 농도 분극(CP)효과 보다 우선하게 나타났다고 보고하였다. 마찬가지로 막의 선처리나 에멀젼의 조건을 바꿈으로서 UF 초기에 농도분극 효과에 의한 flux 감소를 개선하는 효과를 볼 수 있었다.

일정시간 후에 막의 flux는 이들 조건과 무관하게 되는데, 이는 Lee 등의 실험에서 압력변화와 무관하게 나타난 것과 같은 것이다. 이러한 현상은 이 영역에서 농도분극으로 인한 저항이 막에 의한 것보다 우선하고, 이에 따라 겔의 완전한 발달로 막 표면의 개선이나 압력의 증가와 관계없이 단순한 겔층의 증가로 나타남을 알 수 있다.

4-2 Fouling 메카니즘의 분석

일반적으로 한외여과시 나타나는 전형적인 막투과 flux 곡선은 다음과 같은 구간으로 나눌 수 있다.

(Ⅰ). 초기 출발은 순수 물의 flux에서 약간의 시간경과에도 급격히 떨어지고

(Ⅱ). 오랜 기간 점진적인 flux 감소가 뒤따르며,

(Ⅲ). 마지막으로 정상상태 flux 가 된다.

StageⅠ혹은 stageⅢ는 시간이 짧은 경우이거나 혹은 몇몇 실험에서는 관찰되지 않지만, stage Ⅱ는 어느 운전 조건에서도 모든 막 공정에서 나타나는 fouling의 전형적인 현상이다. 예를 들어 정상상태 flux는 압력이 충분히 높고 공급액 농도가 충분히 낮으면 오랜 시간 운전 후 도달된다. 따라서 만일 실험이 정상상태 도달 전에 종결되면 관찰되지 않을 수 있다.

막 여과에서 flux 감소는 막 저항의 증가와 다른 저항층의 발달의 결과인데, 이것은 각각 기공 막힘과 케익 형성이란 현상으로 설명된다. 기공 막힘은 막 저항을 증가시키지만, 케익 형성은 투과 flow에 저항하는 부가적인 층을 형성한다. 이러한 면에서 기공 막힘과 케익 형성은 막 fouling에 대한 두 개의 본질적인 메카니즘으로 고려될 수 있다. 용매 흡착, 막 기공 안으로의 입자 퇴적, 케익 층의 특성변화와 같은 각기 다른 인자들은, 이들 두 개의 본질적인 메카니즘들 중 둘 다이거나 한 개의 증진 또는 수정을 통한 막 fouling에 영향을 주게된다. 농도 분극층의 발달 역시 다른 저항층의 증가이다. 그러나 농도 분극층의 효과는 일반 여과식의 논의에서 보여지는 것처럼 적용된 압력의 수정으로 고려될 수 있다.

시간 경과에 따른 막투과 flux의 운전 초기의 급격한 하락은 막 기공의 빠른 막힘 때문이다. flux 최대치(순수 물 여과 flux)는 항상 여과 초기에 일어난다. 왜냐하면 모든 막 기공은 그 순간에 물을 투과시킬 수 있다. 그러나 시간의 경과에 따라 막 기공의 감소 즉 기공 막힘에 의하여 flux는 감소된다. 기공 막힘 정도는 입자와 기공의 모양 및 크기에 따라 변하게 된다. 입자와 기공이 모양과 크기가 유사할 때 막힘 현상은 더욱 빠르게 일어난다. 기공 막힘은 케이크 형성과 비교해서 빨리 일어나기 때문에, 입자에 의한 케익층의 형성보다도 입자에 의한 기공막힘이 빠르게 일어난다.

기공 막힘 후에 이어지는 flux 감소는 막 표면의 케익층 형성과 성장에 기인한다. 케익층은 여과된 입자의 양만큼 막 표면에 형성된다. 즉, 케잌층은 투과 흐름에 대한 부가적인 저항을 형성하게되고, 케익층의 저항은 케익층 두께의 성장으로 인하여 증가하게 된다. 결과적으로 투과 flux는 시간에 따라 감소가 이어진다.

주어진 운전 변수에 따라 cross-flow 여과의 케익층은 평형이 되면 일정한 두께가 형성된다. 케익층의 평형두께는 적용된 압력에 따라 증가한다. 압력이 높으면 두꺼운 케익층을 형성하기 때문이다. 케익층이 평형두께로 성장했을 때 flux는 정상상태에 도달할 것이다. 높은 압력 하에 아주 희석된 현탁액의 여과에서 케익층이 평형두께로 자랄 때까지의 시간은 오래 걸리게 되는데, 이는 케익층의 평형두께가 두꺼워 지면서 케익성장을 서서히 자라게 하기 때문이다.

막을 계면활성제로 선 처리하거나, 오일 에멀젼에 계면활성제를 첨가함으로서 시간에 따른 flux 변화를 관찰할 수 있는데, 이때 저항과 저항의 미분값으로 flux 변화 정도를 분석함으로서, fouling 메카니즘과 계면활성제 활용 효과를 알 수 있다.

운전 변수에 따라 cross-flow 여과에 대한 막투과 flux의 저항은 투과 유량으로 나타내면 이론전개에서 나타낸 식(14)와 같다.

$$R(t) = \Delta P / J(t)$$

시간에 따른 dR/dt 값을 각각의 실험조건에 따라 측정하였다. Dodecane-SDS

에멀젼의 UF시 시간에 따른 dR/dt 값은 실험 초기 급격히 감소하다가 44분 이상에서는 서서히 감소하는 경향이 나타났는데, 이때의 d^2R/dt^2 값은 거의 0에 가까워진다. dR/dt 값의 급격한 감소는 이미 언급한 바와 같이 기공 막힘(pore blocking)에 의한 것이고, d^2R/dt^2 값이 거의 0이 되는 것은 cake(gel)층이 형성됨을 알 수 있다. 즉, Dodecane 에멀젼의 UF와 dodecane-SDS 에멀젼의 UF때의 초기 fouling은 pore blocking에 의해 지배됨을 알 수 있었다.

이러한 조건하에서 한외여과 후 공급탱크에 증류수를 넣고 동일한 조건으로 운전을 하여 막을 세척한 다음, 이 막으로 순수한 물을 한외여과 시켰다. 그 결과 dodecane 에멀젼을 실험한 막의 경우 실험전의 순수 물의 실험치와 비교하면, 막투과 flux 회복율이 31%-53%이고, dodecane-SDS 에멀젼으로 실험하였을 때의 막투과 flux 회복율은 50%-80%로 나타났다.

5. 결 론

dodecane 에멀젼을 표면 특성이 다른 막으로 한외여과(cross-flow mode) 처리한 결과 운전 초기 막투과 flux는 regenerated cellulose 막으로 오일 에멀젼을 처리할 때 초기 막투과 flux가 가장 크게 나타났으며, 반면 SDS로 선 처리 polyethersulfone 막으로 처리할 때 가장 작게 나타났다. 그러나 시간의 경과에 따라 막투과 flux는 막의 표면상태나, 전단압력, 그리고 유속의 변화에도 최종적으로 거의 유사한 막투과 flux가 나타났다.

일정시간 후에 막의 flux는 전단압력과 무관하게 되는데, 이것은 이 영역에서 농도분극으로 인한 저항이 막자체에 의한 것보다 우선하고, 이에 따라 겔층의 완전한 발달로 막표면의 개선이나 압력의 증가와 관계없이 단순한 겔층의 증가로 나타남을 알 수 있다.

실험전 순수 물에 의한 여과 실험치와 같은 막으로 dodecane 에멀젼을 실험한 후의 순수 물로의 회복 실험치와의 비교 결과 막투과 flux 회복율이 31%-53%이었으며, dodecane-SDS 에멀젼의 경우는 막투과 flux 회복율이 50%-80%로 나타났다.

오일 에멀젼의 cross-flow UF를 통하여 막표면과 용질의 특성에 따른 막투과 flux 변화를 저항과 저항 미분식을 통하여 설명하였으며, pore blocking과 겔(cake)층의 형성 메카니즘 및 이들 사이의 이동 메카니즘 등을 저항과 저항 미분식으로 확인하였다. 오일 함유 방사성 폐액 내에는 핵종 뿐만 아니라 여러 가지 계면활성제나 화합물이 다양하게 존재함으로 폐액의 물리화학적 특성에 따라 분리성능이 좋은 막분리 시스템을 선정해야 한다. 따라서 상기의 결과는 오일-계면활성제 함유

폐액의 한외여과시 fouling 메카니즘 규명과 flux 증대방안에 기여를 할 것이다.

참 고 문 헌

1. G. Trigilio, "Volume reduction techniques in low-level radioactive waste management", NUREA/CR-2206 (1981)
2. A. O. Hobbs and P. E. Raleigh, "Review of operating LWR experience with membrane technology", Proceeding of Waste Management '84, University of Arizona, Tucson AZ (1984)
3. P. G. Minard and R. R. Stana, "Two years experience with a reverse osmosis radioactive laundry water concentrator", 2nd National Conf. on Complete Water Reuse, Illinois, May (1975)
4. F. T. Teng and C. J. Shih, "Treatment of laundry lastewater from a nuclear power plant by reverse osmosis", Proc. Ind. Waste Conf., 39 (1985) 281
5. D. Bhattacharyya, A. B. Jumawan, R. B. Grieves, and L. R. Harris, "Ultrafiltration characteristics of oil-detergent-water systems : Membrane Fouling Mechanisms", Sep. Sci. Technol., 14(6), (1979) 529
6. A. Jonsson, "The influence of nonionic & ionic surfactants on hydrophobic and hydrophilic ultrafiltration membrane", J. Membr. Sci., 56, (1991) 49
7. H. Strathmenn, "Water and wastewater treatment experience in Europe and Japan using ultrafiltration", in: G. Belfort(Ed.), Synthetic Membrane Processes, Academic Press, New York, NY, (1984) 343.
8. J. N. Israelachvili, Intermolecular and Surface Forces, Academic Press, New York, NY, (1985)
9. Hermia, J., Constant pressure blocking filtration laws - Application to power-law non-Newtonian fluids, Trans. IChemE, 60 (1982) 183-187
10. Koltuniewicz, A.B., Field, R.W., and Arnot, T.C., Cross-flow and dead-end microfiltration of oily-water emulsion. Part I : Experimental study and analysis of flux decline, J. Memb. Sci., 102 (1995) 193-207
11. Lee, S.B., Aurelle, Y., and Roques, H., Concentration polarization, membrane fouling and cleaning in ultrafiltration of soluble oil, J. Memb. Sci.,