

침지형 분리막 여과공정에서 운전조건에 따른 임계플럭스에 대한 연구

Effects of Operation Parameters on Critical Flux During Submerged-Type Membrane Filtration System

김준성 · 안규홍*

Kim, Jun-Sung · Ahn, Kyu-Hong*

한국과학기술연구원

(2002년 8월 20일 접수, 2002년 11월 27일 최종수정논문 채택)

Abstract

A bench-scale submerged-type membrane filtration system (SMFS) was constructed to study a feasibility of membrane filtration for solid-liquid separation in water and wastewater treatment processes. In the case of applying the SMFS to a biological wastewater treatment process, so-called membrane bioreactor, aeration underneath membrane modules is usually employed in order to provide oxygen demand for microbial growth as well as to control membrane fouling. A study was investigated the effects of operation parameters by aeration intensity, feed concentration, foulant type and airlift pore size on critical flux. Critical flux tends to increase with aeration rate. Optimal aeration flow rate was found to be 10 L/min/module. Feed concentration and foulant type has a significant effect on membrane fouling and filtration performance. But down-ward position and pore size of airlift has no a significant effects on membrane fouling and filtration performance.

Key words: submerged-type membrane filtration system, critical flux, fouling

주제어: 침지형 분리막 여과공정, 임계플럭스, 막오염

1. 서론

막분리 공정은 높은 처리효율, 낮은 에너지 소비, 규격설계와 오염물질에 대한 선별성을 가지고 있어 최근 고도처리기술로서 각광받고 있는 방법 중의 하나이다. 또한 막분리 공정은 기존 물리적인 처

리공법 뿐만 아니라 생물학적 처리공법에도 응용될 수 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

막분리공정과 생물반응기를 결합한 membrane bioreactor(MBR) 장치는 생물학적 방법을 이용하여 유기물을 처리하며, 처리수는 막을 통해 여과하여 배출하는 시스템이다. 따라서 처리수 수질이 매우

*Corresponding author Tel.: +82-2-958-5832, Fax: +82-2-958-6854, E-mail: khahn@kist.re.kr (Ahn, K.H.)

우수하며, 처리에 필요한 면적을 최소화할 수 있다는 이점으로 하수 및 중수도 고도처리에 적용되어 사용되고 있다(Ahn, 1998, Kishino, 1996).

MBR은 십자류형(crossflow type)과 침지형(submerged type)으로 크게 두 가지로 구분된다. 십자류형 분리막여과공정은 막모듈이 생물반응기 바깥쪽에 위치하게 되고 순환펌프를 이용하여 하수를 막모듈에 흘려보내는 일부를 처리하는 형태인 반면, 침지형 분리막여과공정(submerged membrane filtration system: SMFS)은 막모듈이 반응기 안에 침적되어 흡입에 의해 처리수를 배출한다(Ueda, 1997). SMFS는 순환펌프가 필요없기 때문에 십자류형 분리막여과 보다 동력비를 줄일 수 있으며, 흡입펌프의 동력비가 낮아 운전비 감소효과를 보인다.

SMFS는 고체-액체분리에 있어 막을 투과하지 못한 고체가 막표면에 케이크층(cake layer)을 형성시켜 막여과저항을 증가시킨다. 이러한 원인인자로는 입자의 크기분포, 용존유기물, 점도 및 플럭스(flux) 등이 있으며, 운전조건 및 오염유발물질 특성에 따라 그 영향이 전혀 다른 양상들을 보이기도 한다. 막오염에 의한 저항을 줄이기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다. 운전조건 및 장치를 이용한 연구 중 막표면에 공기를 지나가게 하여 막 주변에 난류를 발생시켜 케이크층을 떨어버리는 방법, 운전시 간헐흡입을 통해 케이크층의 압밀도를 완화시켜 주는 방법등이 있다(송, 1998). 이러한 방법들은 입자가 막에 붙는 속도보다 입자를 탈락시키는 속도를 크게 하여 케이크층이 형성되지 않도록 하는 방법으로써 일정한 플럭스를 얻을 수 있는 방법들이다. 막오염이 일어나지 않고 얻을 수 있는 최대 플럭스를 임계플럭스라고 하며 임계플럭스 이하에서 운전하는 방법 등이 연구되어지고 있다(Defrance, 1997; Field, 1995). 이러한 연구들은 막표면에 쌓이는 케이크층의 양을 줄이거나 속도를 지연시키려는 시도라고 할 수 있다. 막에 케이크층이 일정이상되면 플럭스 양이 상당히 적어지므로 물리·화학적 방법을 이용하여 세정을 해주어야 한다. 물리적인 방법으로는 역세척, 표면세척 등을 이용하여 직접 케이크층을 제거하는 방법이다. 화학적인 방법은 세정액을 이용하여 막의 오염물을 세척하는 것인데 세척을 위해 막모듈을 반응조로부

터 꺼내서 세정해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 반응조 안에 침전된 상태에서 세정액을 역세척으로 일정량 밀어넣어 세정해주는 방법 등이 연구되어지고 있다(Kwon, 1998; Bouhabila, 1998; Tardieu, 1999).

효율적인 막오염 제어는 막 수명을 연장시킬 뿐만 아니라 처리수 수질을 양호하게 유지시키기 위해 중요하다. 따라서 본 연구에서는 분리막을 이용한 침지형 분리막여과공정(SMFS)의 운전조건을 이용하여 막오염 발생을 최소화 시키면서 투과플럭스를 극대화 시킬 수 있는 적정 운전조건을 최적화하는데 있다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치

본 실험에 사용된 분리막은 일본 미쯔비시에서 제조한 중공사형 모듈이며 막의 제원은 Table 1과 같다. 또한 SMFS 실험장치는 Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 반응조, 분리막 모듈, 산기장치, 흡입펌프와 모니터링시스템으로 구성되어 있다.

가로, 세로 33cm, 높이 50cm의 반응조 안에 세 개의 중공사막 모듈(Mitsubishi Rayon, Japan)이 내부에 장착되었다. 반응조안의 모듈의 위치는 유속계를 이용한 수리학적 분포조사를 통해 전체적인 순환이 원활히 일어나는 모듈위치를 선정한 결과 벽면과 분리막의 거리가 11cm, 모듈간의 간격은 5.5cm, 반응조 바닥과 분리막의 거리는 5cm로 조정하여 장착되었다(Lee, 2001). 6개의 구멍을 가진 산기관은 막모듈 밑에 설치되어 송풍기로 일정량 공기를 주입할 수 있으며, 모듈내로 유입된 유입수는 흡입펌프(Micropump Co., USA)를 사용하여 일정한 유량으로 흡입하였다. 이때의 압력과 유량은 압력계(Cole-Parmer Co., USA)와 유량계(Cole-Parmer Co., USA)를 통해 측정되었으며, LabView 프로그램

Table 1. Membrane and module specification

Surface	0.2m ²
Pore size	0.1μm
Membrane material	polyethylene hollow fiber membrane
Property	hydrophilic

Fig. 1. Schematic diagram of the MBR system.

을 이용하여 데이터를 모니터링하였다.

2. 2. 실험재료

본 실험에 사용된 용액은 kaolin과 yeast(Sigma Co., USA)를 대상으로 초순수(Millipore Co., USA)를 이용하여 적정농도로 조제하여 사용하였다. 조제시 입자 상호간에 응집되는 것을 방지하기 위해 80mg/L sodium metaphosphate 농도(w/v)와 미생물에 의한 오염방지를 위해 0.01% sodium azide를 첨가하여 용액을 제조하였다. 모든 실험은 0.1N NaOH 와 0.1N HCl를 이용하여 pH 7.0 ± 0.1로 조정하여 실험하였다. Fig. 2는 입도분석기(Malvern Instruments, UK)를 이용하여 kaolin과 yeast의 입도 분포를 나타내었고 kaolin과 yeast의 평균입자 크기는 각각 0.8µm, 1.2µm로 나타났다.

2. 3. 막저항값 및 임계플럭스의 결정

2. 3. 1. 막저항값 실험

오염된 막의 저항값을 측정하기 위해서는 우선 막자체의 저항값을 측정하기 위해 초순수로 순수투과도를 측정하여 초기 막저항값(R_m)을 구한다.

$$J_0 = \frac{\Delta P}{\mu R_m} \quad (1)$$

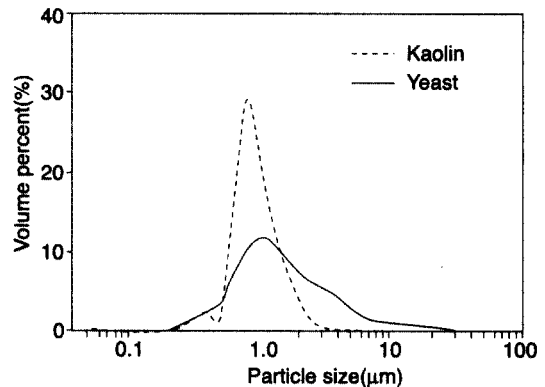


Fig. 2. Particle size distributions of kaolin and yeast. (a) 4L/min/module (b) 7L/min/module (c) 10L/min/module (d) 15L/min/module

J_0 = permeate flux = constant

ΔP = transmembrane pressure (TMP)

μ = viscosity of permeate

R_m = intrinsic membrane resistance

막여과실험을 통해 막표면 위에 형성되는 입자의 케이크 층에 의한 가역적 저항값(R_f) 및 용질과 분리막 간의 상호작용에 의한 표면 흡착 또는 세공막힘에 의한 비가역적 막저항값(R_{ir})이 발생된다. 이때의 여과저항식은 다음과 같다.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_r + R_{ir})} \quad (2)$$

R_r = resistance due to reversible fouling

R_{ir} = resistance due to irreversible fouling

실험을 통해 생성된 오염을 제거하기 위해 역세척 실시한 후 순수투과도를 측정하면 역세척에 의해 케이크 층은 제거되지만 흡착이나 세공막힘에 의한 비가역적 오염은 제거되지 않는다. 그러므로 초기 막저항값 보다 높은 저항값을 나타낸다.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_{ir})} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 역세척후 측정된 막저항값에 초기막저항값을 빼줌으로 비가역적 저항값을 계산할 수 있으며 식 (2)를 이용하여 가역적 저항값을 산출할 수 있다.

2.3.2. 임계플럭스 실험

임계플럭스 실험은 침지형 분리막 여과장치를 이용하여 케이크가 발생되지 않는 최대플럭스를 측정하기 위한 임계플럭스 실험을 하였다. 실험방법은 초순수를 이용하여 초기막저항값(R_m)을 측정한 후 반응조안에 용액을 채우고 플럭스를 10LMH ($L/m^2/hr$)로 조정하여 막여과를 30분간 수행하면서 시간에 따른 TMP(trans membrane pressure)의 변화를 관찰한다. TMP의 변화가 없는 경우 플럭스를

20, 30, 40 및 50LMH로 점차 증가시키면서 시간에 따른 압력의 변화가 관찰될 때까지 여과를 진행한다. 압력증가가 급격히 일어나는 조건에서 30분간 진행한 후 다시 플럭스를 낮추면서 여과를 수행하여 시간에 따른 투과압력의 변화를 관찰하였다. 막저항값은 플럭스에 따라 초기막저항값(R_m), 가역적 저항값(R_r)과 비가역적 저항값(R_{ir})의 합이 측정되었으며 플럭스를 낮추면서 여과를 수행시 감소되지 않는 저항값을 비가역적 저항값으로 산정하였다.

실험 후 오염된 막은 임계플럭스 이상에서 10분간 초순수로 역세척 또는 0.1N NaOCl 세정액을 통해 초기 막저항값으로 유지시킨 후 다음 실험을 준비하였다.

2.4. 인자변화 실험조건

SMFS의 운전조건을 이용하여 플럭스를 극대화시키면서 막오염 발생을 최소화시킬 수 있는 운전조건을 도출하기 위해 Table 2의 운전조건에서 실험을 하였다. 폭기량에 따른 임계플럭스 실험은 반응조 안의 공기유량을 4, 7, 10 및 15L/min/module로 증가시키면서 실험하였으며, 용액의 농도변화에 따른 실험은 1,000mg/L, 4,000mg/L 및 8,000mg/L로 용액을 증가시켜 막오염을 관찰하였다. 또한 산기 장치의 폐쇄현상을 감소시키기 위한 방법으로, 산기 장치를 바닥으로 향하게 하여 막오염을 측정하였다. 그리고 산기관 구멍크기를 0.5mm, 0.8mm, 1.0mm 및 1.5mm로 조정하였을 경우 임계플럭스 실험을 하였다.

Table 2. Operation conditions

	Test I	Test II	Test III	Test IV
Solution	Kaolin	Yeast	Kaolin	Kaolin
Concentration(mg/L)	1,000	1,000-8,000	1,000	1,000
Aeration flow(L/min/module)	4-15	7	7	7
Flux(LMH)	10-50	10-70	10-50	10-50
Airlift pore size(mm)	1.0	1.0	1.0	0.5-1.5

*Test I: critical flux tests for aeration flow rates

Test II: critical flux tests for various concentration

Test III: critical flux tests for reverse diffuser

Test IV: critical flux tests for airlift diffuser pore size

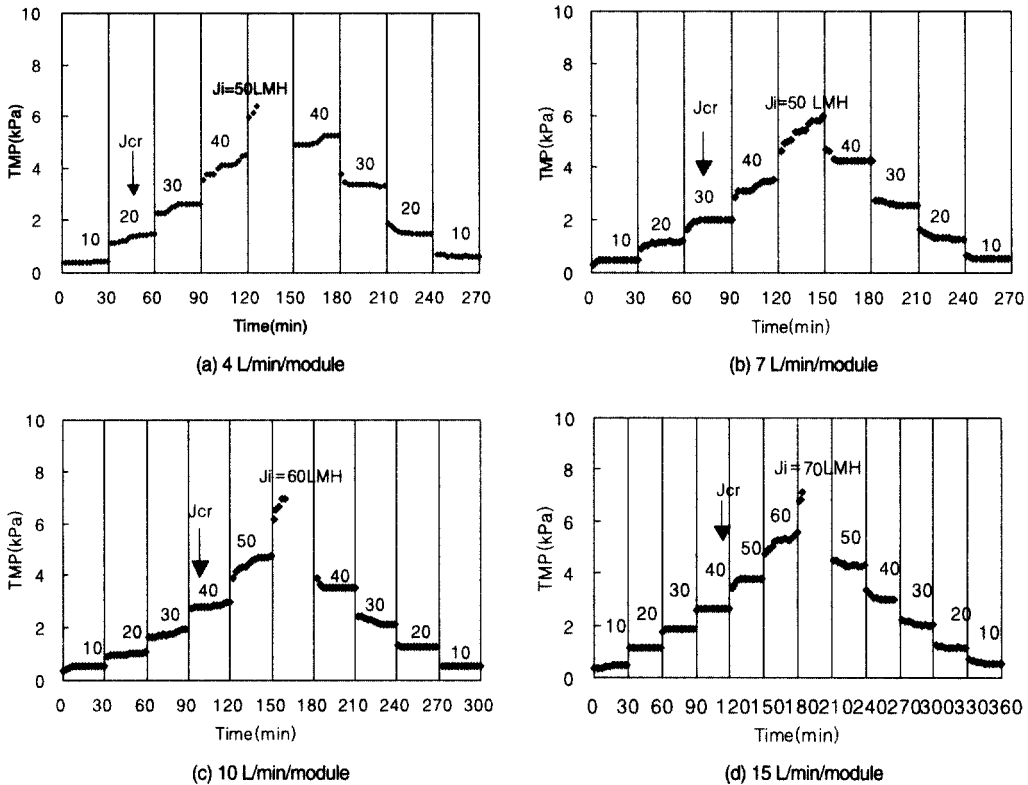


Fig. 3. Effects of aeration intensity on critical flux (Koalin = 1,000mg/L).

3. 결과 및 고찰

3.1. 공기유량 변화에 따른 임계플럭스의 영향

공기유량에 따른 임계플럭스 실험결과는 Fig. 3에 나타내었다. 플럭스를 10LMH에서 30분간 운전하고 10LMH씩 올려주며 실험한 결과, 공기유량이 4L/min/module인 경우, 플럭스가 30LMH에서 TMP가 올라가는 것은 막오염이 일어나는 것이므로 TMP가 상승하지 않는 지점인 20LMH를 임계플럭스로 볼 수 있다. 또한 공기유량이 7L/min/module인 경우는 임계플럭스가 30LMH로 나타나 공기유량의 증가가 막오염을 지연시키는 것으로 나타났다. 그러나 공기유량이 10L/min/module 및 15L/min/module로 증가시킴에 따라 임계플럭스는 35LHM 및 40LMH로 점차 증가하였으나 증가 폭은 감소하였다. 임계플럭스 이상인 50LMH는 TMP가 크게 증가하다가 플럭스를 40LMH로 낮추

면 TMP가 더 이상 증가 없이 일정한 압력으로 유지되는데 이때의 TMP는 플럭스를 올려줄때의 40LMH의 TMP 보다 높게 나타난다. 이에 대한 차이는 높은 플럭스에서 발생된 막오염에 의해 형성된 케이크층은 플럭스가 감소 할지라도 임계플럭스 이상이므로 케이크층 제거보다 형성되는 비율이 크기 때문에 나타나는 차이인 것으로 판단된다 (Defrance, 1997; Lie, 2000). 그러나 임계플럭스 이하에서 운전시 TMP 차이는 줄어들는데 이는 임계플럭스 이하에서는 막오염은 일어나지 않고, 폭기에 의한 케이크 제거비율이 커짐으로 인해 TMP의 차이가 낮아지는 것으로 판단된다.

공기유량에 따른 임계플럭스의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 공기유량이 증가함에 따라 임계플럭스도 증가하는 경향이 나타났지만, 공기유량이 10L/min/module과 15L/min/module인 경우 더 이상 크게 증가되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 공기

유량의 증가는 운전비용의 상승을 초래하므로 임계 플럭스가 최대이면서 공기유량을 줄일 수 있는 조건은 10L/min/module로 나타났다. Ueda(1997)는 공기 유량에 따른 막오염의 관계를 연구하였는데 막오염의 제어는 공기가 막 주변의 유체 유속을 증

가시켜 막오염을 제어하는 것으로 연구되었으며, 본 연구결과와 같이 일정 유량이상에서는 막오염 제어효율이 떨어지는 경향으로 나타났다.

3.2. 농도 증가에 따른 임계플럭스의 영향

SMFS를 이용하여 고농도 원수로 운전시 변화되는 임계플럭스를 관찰하기 위해 Fig. 5에 원수농도에 따른 임계플럭스의 변화를 나타내었다. 농도가 1,000mg/L일 때 임계플럭스는 40LMH로 나타났으며 4,000 및 8,000mg/L는 임계플럭스가 30 및 20LMH로 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 용액의 입자 농도가 증가할수록 입자 침적비율이 증가되어 전체적인 막오염이 증가되었음을 알 수 있다.

플럭스 증가에 따른 막저항값은 Fig. 6에 나타내었다. 10LMH에서 시작시 발생된 저항값은 흡착이나 세공막힘에 의한 비가역적 저항값으로써, 막표

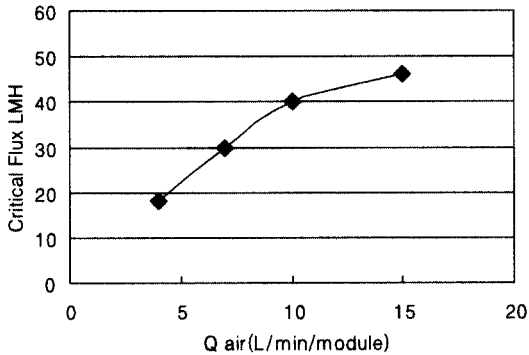
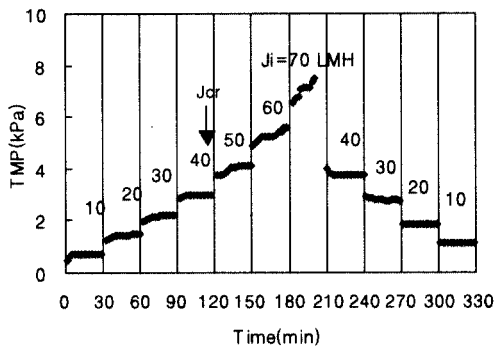
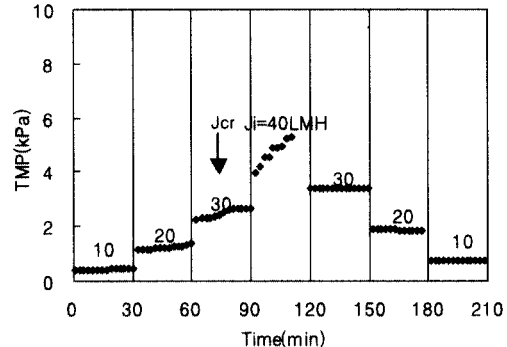


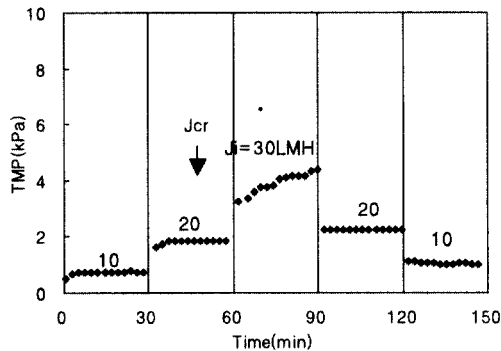
Fig. 4. Variation of critical flux by aeration flow rate (Koalin = 1,000mg/L).



(a) 1,000mg/L



(b) 4,000mg/L



(c) 8,000mg/L

Fig. 5. Effects of concentration on critical flux (Yeast, aeration rate = 7L/min/module).

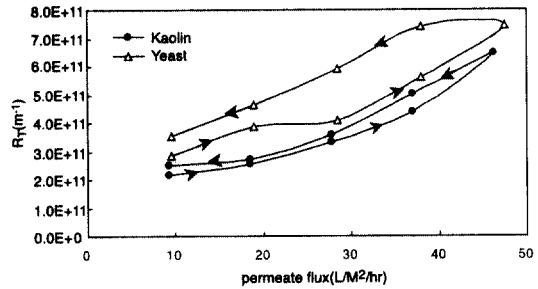


Fig. 7. Variation of fouling resistance with permeate flux of foulants (Kaolin = 1,000mg/L, Yeast = 1,000mg/L, Aeration rate = 7L/min/module).

Fig. 6. Variation of fouling resistance with permeate flux (Yeast = 1,000mg/L, aeration rate = 7L/min/module).

면적이 한정되어 있기 때문에 일정한 값을 나타내고 있다. 플럭스가 50LMH에서부터 저항값이 증가됨을 알 수 있는데 이때부터 케이크에 의한 저항값이 나타나기 시작한다. 따라서 40LMH가 이 실험의 임계플럭스라 하겠다(Munir, 1998). 임계플럭스 미만의 플럭스에서는 침적속도보다 탈락속도가 크므로 케이크가 형성되지 못하나 임계플럭스를 지나치게 되면 플럭스의 흡입압력에 따라 침적속도가 증가하여 막에 케이크가 형성되며, 더불어 용액내 입자농도가 증가되면 케이크 형성속도도 증가되어 급속히 막저항값이 올라간다고 볼 수 있다.

3.3. 막오염물질에 따른 막저항값의 변화

막오염물질(foulant)에 따른 저항값 변화를 보고자 kaolin 1,000mg/L와 yeast 1,000mg/L을 대상으로 플럭스 증가에 따른 막저항값의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 플럭스 10LMH에서 시작하여 플럭스를 증가시키에 따라 막저항값(R_f)이 서서히 증가하다가 30LMH 이상에서는 급격히 증가하는 것을 볼 수가 있다. 따라서 임계플럭스는 30LMH로 볼 수 있다. 30LMH 이상에서는 막으로부터 입자들이 탈락되는 속도보다 막에 침적되는 속도가 커서 케이크층이 형성되므로 막오염이 증가되는 것으로 나타났다. 플럭스를 50LMH까지 올려주었다가 감소시키면 케이크 형성비율은 플럭스에 따라 감소되어 저항값이 점차 낮아지게 된다. 또한 플럭스 감소로 인한 압력감소와 폭기에 의해 케이크가 떨어지는 현상으로 인해 막오염은 점차 감소된다. 막오염물

질에 따른 막오염 경향은 kaolin의 경우 플럭스를 증가할때와 감소할때의 경향이 유사하지만 yeast는 임계플럭스 이상에서는 급격히 증가하였으나 플럭스가 감소할때는 서서히 감소되었다. 이러한 결과는 막오염물질의 특성에 따라 달라지며 발생된 케이크층은 kaolin의 경우 흡입압력의 감소와 더불어 떨어졌지만 yeast는 케이크가 형성될 때 물질의 점성으로 인해 압밀되어 흡입압력이 감소되었을지라도 케이크가 쉽게 제거되지 않는 것으로 사료된다.

또한 임계플럭스인 30LMH에서 플럭스가 증가할때와 감소할때의 30LMH의 막저항값의 차이는 케이크 저항값(R_f)으로 볼 수 있다(Howell, 1995). 그리고 초기 10LMH의 저항값과 끝날 때의 10LMH의 저항값이 차이가 발생되는데 이는 비가역적 표면 흡착과 세공막힘에 의한 오염저항(R_{ir}) 값을 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 오염물질의 특성에 따라 kaolin은 비가역적 오염이 적은 반면 yeast는 큰 것으로 나타났다.

3.4. 산기관 형태에 따른 임계플럭스의 영향

SMFS에서 막오염 제어방법은 시스템 내의 폭기가 주요한 제어방법이다. 본 실험에서는 폭기의 효율을 증대시키기 위한 방안으로 산기관 구멍크기 변화에 따른 영향을 관찰하였다. 또한 MBR 시스템에서 간헐폭기시 고농도 유기물이 침전되어 산기관에 폐쇄현상이 발생하게 된다. 폐쇄현상을 방지하기 위해 산기구를 바닥으로 향하게 고정한 후 임계플럭스의 영향을 실험하였다(Fig. 8).

막모듈 밑에 부착된 산기관의 공기 구멍에 따른

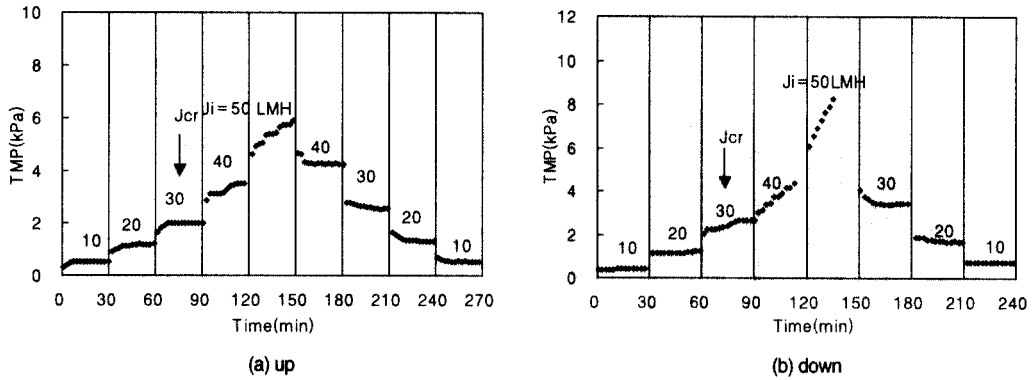


Fig. 8. Effects of diffuser situation on critical flux (Koalin = 1,000mg/L, aeration rate = 7L/min/module).

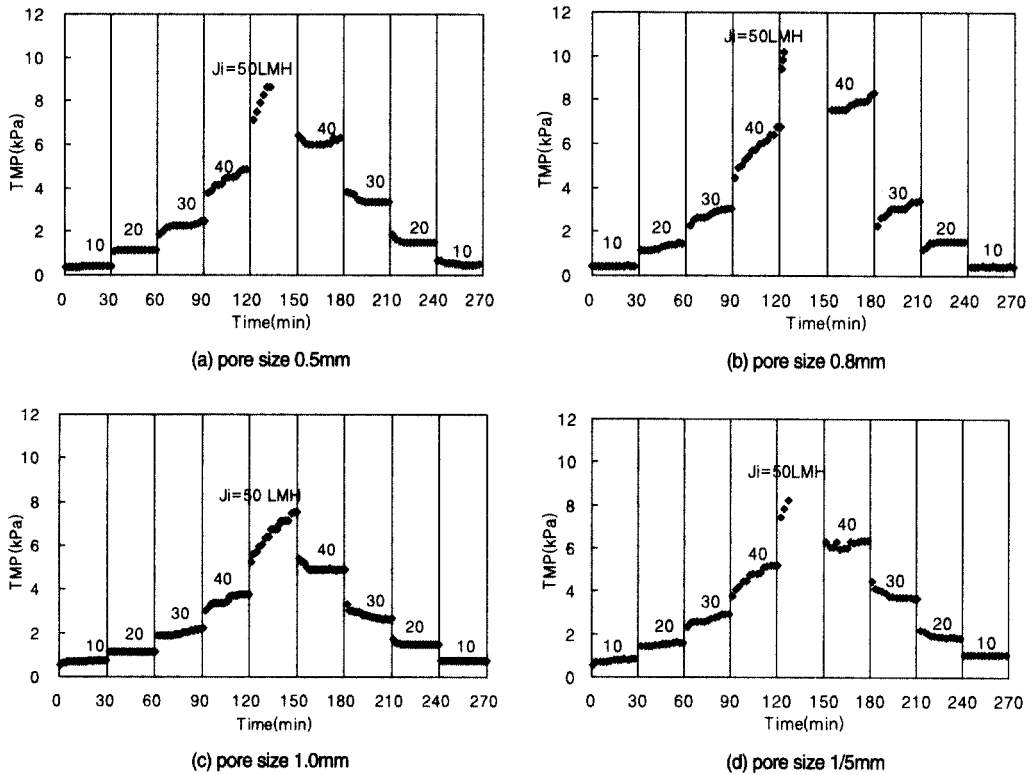


Fig. 9. Effects of airlift diffuser pore size on critical flux (Koalin = 1,000mg/L, aeration rate = 7L/min/module).

임계플럭스의 결과는 Fig. 9와 같다. 각 실험의 임계플럭스는 30LMH로써 공기구멍의 크기에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 폭기에 의한 막오염 제어효과는 공기가 막주변을 지나가면서 유체의 유속을 증가시켜 막오염을 지연시키는 방법과

공기방울이 막에 부딪쳐서 막에 쌓인 케이크 층을 떨어뜨리는 효과를 동시에 가져올 수 있다. 동일한 공기유량인 경우, 산기관내의 구멍크기가 커지면 공기방울이 커져서 막의 케이크층을 떨어뜨리는 효과가 증가되는 반면 산기관내의 압력이 감소되어 공

기방울의 유속을 감소시키는 요인이 된다. 이러한 영향에 따라 산기관 구멍크기에 따른 임계플럭스는 두가지 효과에 의한 상쇄작용으로 인해 큰 영향이 없는 것으로 사료된다.

산기구 방향을 바닥으로 향하게 한 경우, 임계플럭스는 30LMH로써 산기구 방향이 위인 경우와 같은 조건에서 비교시 큰 차이는 나타나지 않는 것으로 보인다. 따라서 산기관방향을 바꾸는 방법보다 폐쇄현상이 일어나지 않도록 장치적인면에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

4. 결론

임계플럭스 실험을 통해 SMFS의 운전조건에 따른 영향을 실험한 결과는 다음과 같다.

- 공기유량이 증가될수록 임계플럭스는 상승하지만, 운전비용을 고려하여 임계플럭스를 높이면서 경제성을 고려한 공기유량은 10L/min/module로 나타났다.

- 원수농도가 증가할수록 임계플럭스는 yeast 1,000mg/L인 경우 40LMH에서 yeast 8,000mg/L인 경우 20LMH로 현저히 떨어졌다.

- 발생된 막저항값은 임계플럭스 이상에서는 비가역적 저항값과 케이크 저항값의 합으로 나타나며, 입자의 특성에 따라 막저항값이 다르게 나타났다.

- 산기관을 바닥으로 설치하였을 경우와 산기관 구멍크기 변화실험에서는 임계플럭스에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

막오염은 처리수 수질 뿐만 아니라 효율을 낮추므로 운전조건 최적화나 막오염 제거장치 개발로 임계플럭스를 상승시키면서 막오염을 효과적으로 제어할 수 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

C. Munir (1998) Ultrafiltration and microfiltration, Technomic

- publishing company University of Illinois Urbana, USA.
- D. Y. Kwon and S. Vigneswama. (1998) Influence of particle size and surface charge on critical flux of crossflow microfiltration, *Wat. Sci. Tech*, **38**(4-5), pp. 481-488.
- E.H. Bouhabila, A.B. Roger, and B. Herve. (1998) Microfiltration of activated sludge using submerged membrane with air bubbling (application to wastewater treatment), *Desalination*, **118**, pp. 315-322.
- E. Tardieu, A. Grasmick, V. Geaugey and J. Manem. (1999) Influence of hydrodynamics on fouling velocity in a recirculated MBR for wastewater treatment, *J Membrane Sci.*, **156**, pp. 131-140.
- H. Kishino, H. Ishida, H. Iwabu, and I. Nakano. (1996) Domestic wastewater reuse using a submerged membrane bioreactor, *Desalination*, **106**, pp. 115-119.
- J.A. Howell. (1995) Sub-critical flux operation of microfiltration, *J Membrane Sci.*, **107**, pp. 165-171.
- K.H. Ahn, H.Y. Cha, and I.T. Yeom et al. (1998) Application of nanofiltration for recycling of paper regeneration wastewater and characterization of filtration of resistance, *Desalination*, **119**, pp. 169-176.
- L. Defrance and M.Y. Jaffrin. (1997) Reversibility of fouling formed in activated sludge filtration, *J Membrane Sci.*, **157**, pp. 73-84.
- R. Liu, X. Huang, and C. Wang et al. (2000) Study on hydraulic characteristics in submerged membrane bioreactor process, *Process Biochemistry*, **36**, pp. 249-254.
- R.W. Field, D. Wu, J.A. Howell, and B.B. Gupta (1995) Critical flux concept for microfiltration fouling. *J. Membrane Sci.*, **100**, pp. 259-272.
- T. Ueda, K. Hata, Y. Kikuoka, and O. Seino (1997) Effects of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor, *Wat. Res.*, **31**, pp. 489-494.
- Y.H. Lee, K.H. Ahn, and I.T. Yeom et al. (Mar, 2001) Evaluation and Optimization of An Immersed Membrane Filtration System for Liquid-Solid Separation: Effect of Hydrodynamic Conditions on Fouling and Critical Flux, AWWA membrane technology conference.
- 송경근, 안규홍, 홍진모 (1998) 교반세척을 이용하는 간헐흡입 정밀여과에 의한 중수의 생산, *대한토목학회지*, **18**(2-3), pp. 317-327.