

## 막 오염 저항성이 우수한 분리막을 이용한 MBR 시스템의 실증화 기술개발

최정환<sup>†</sup> · 이정빈 · 김인철\*

(주) 원일티앤아이, \*한국화학연구원 신화학연구원 환경에너지연구센터  
(2008년 1월 9일 접수, 2008년 2월 14일 채택)

### Development of MBR System Commercialization Technology Using a Membrane with a Good Fouling Resistance

J. H. Choi<sup>†</sup>, J. B. Lee, and I. C. Kim\*

Wonil T&I Co. Ltd, 105-3Na, Shiwha Industrial Complex, Shiheung, Kyunggi, Korea

\*Advanced Chemical Technology Division, Korea Research Institute of Chemical Technology, 100 Jang-Dong Yuseong-gu  
Daejeon 305-343, Korea

(Received January 9, 2008, Accepted February 14, 2008)

**요약:** 본 연구를 통하여 나노입자를 분리막의 표면에 함침시킴으로써 MBR 공정상에서 가장 큰 문제인 막 오염 문제를 해결하고자 하였고 실제 제작된 분리막의 현장적용 테스트를 거쳐서 개발된 분리막의 막 오염 저항성질을 확인하였다. 실험과정은 본 연구를 통한 티타니아가 함침된 분리막 제품과 국외의 타사 제품과의 장시간 현장적용 테스트를 통해 본 연구 제품의 우수성을 확인할 수 있었다. 본 연구 제품은 활성슬러지의 농도가 7,000~13,000 mg/L의 고농도인 조건에서 20~25 L/m<sup>2</sup>·hr의 투과유량을 꾸준히 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 아울러 막과 막사이의 배치거리, 막과 산기관의 배치거리, 산기관의 홀 크기, 세정액의 농도 및 처리 방법 등에 따른 분리막의 투과유량의 거동 등을 살펴보았다. 즉 이들 부수적인 변수들의 최적화를 통해 분리막의 물성을 극대화할 수 있는 방법을 모색해 보았다.

**Abstract:** In this study, we tried to solve membrane fouling with membranes made by fine nano-particle in MBR process. And we confirmed good fouling resistance in pilot test. In this test, we confirmed our membrane with titania outstanding quality by testing in the pilot long-term test by comparing to other company product. Our membrane keep up steadily 20~25 L/m<sup>2</sup>·hr high flux in 7,000~13,000 mg/L MLSS high sludge concentration. In addition to this quality, we studied membrane flux character related membrane arrangement, membrane-air line arrangement, air-line hole size, cleaning solution concentration, treatment method, etc. Using the optimization of this additional parameter, we tried to search method of maximizing membrane quality.

**Keywords:** MBR, nano-material, membrane fouling, fouling resistance

#### 1. 서론

최근의 오·폐수 처리방법으로는 생물학적 처리방법과 물리화학적 처리방법 및 이 방법들을 혼성한 혼성(hybrid)처리방법 등이 활용되어지고 있다. 특히 기존의 처리방법들 중 널리 사용되어지고 있는 활성 슬러지법(activated sludge), 산화구법(oxidation ditch), 장기폭기

법 등의 경우 비효율성 및 강화된 환경기준에 대한 부적합성 등과 같은 많은 단점들을 갖고 있다. 따라서 이러한 단점들을 해결할 수 있는 새로운 처리방법으로 침지형 막분리(membrane bioreactor, MBR)공정이 다양한 분야에 적용되어지고 있다. 많은 연구가 진행되고 있는 침지형 막 분리 공정은 종래의 활성슬러지 공정보다 처리 효율이 높고 공정의 안정성과 신뢰성이 높으며, 공정 운전 및 유지 관리가 비교적 간단하고 협소한 공간에도 설치가 간단하다는 장점이 있어 연구개발이

<sup>†</sup>주저자(e-mail : cjh2525@hanmail.net)

활발히 진행되고 있다[1,2].

침지형 막 분리 공정에 적용되어지고 있는 분리막의 경우 일반적으로 정밀여과막(MF) 정도의 기공크기를 갖는 중공사(hollow fiber), 관(tubular) 또는 평판(plate) 형태의 분리막으로 내구성이 우수한 polypropylene (PP), polyethylene (PE) 및 poly(vinylidene fluoride) (PVDF) 와 같은 소재로 이루어져 있다. 수처리용 분리막임에도 불구하고 막 소재가 소수성 고분자로 이루어진 이유는 공정상 발생하는 막오염(fouling) 즉, 미생물 블럭 등에 의해 형성되는 막오염이 전체 공정의 효율에 미치는 영향이 매우 심각하기 때문이다. 따라서 앞에서 언급한 소재들 즉, 비록 소수성이지만 내구성이 우수한 고분자를 사용함으로써 물리적, 화학적 처리 등을 통해 막 오염을 최소화하고자 하는 노력들이 다양하게 이루어지고 있다.

특히 막오염을 최소화하기 위한 물리적 처리방법으로는 대부분 역세척(backwashing)과 공기세정(aeration) 방식을 사용하고 있으나 이러한 처리방법 역시 과도한 에너지 소모와 함께 막의 수명을 저해하는 원인이 되고 있다[3-7]. 따라서 이러한 관점에서 본 연구에서 개발된 분리막은 막 표면에서 미생물 블럭 형성을 차단함으로써 막 오염을 원천적으로 방지하고 따라서 그에 따른 과도한 역세척이나 공기세정에 의한 에너지 소비를 최소화하고 막의 분리 효율 및 수명을 향상시킬 수 있는 획기적인 침지형 분리막이라 할 수 있다.

즉 본 연구를 통해 개발된 막 오염 저항성을 지닌 침지형 분리막을 실제 현장 pilot에 적용시켜서 타사 제품과 동일조건에서 직접 비교해 봄으로써 그 물성을 확인하고 현장 적용성을 확인해 보고자 한다. 또한 부수적인 시스템 상에서의 여러 부가 변수 등을 테스트해 봄으로써 최적의 운전 조건 등을 찾고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1. 재료

0.1~0.3  $\mu\text{m}$ 의 기공크기를 갖는 정밀여과막을 제조하기 위하여 상전환법을 이용하였으며, 고분자로는 폴리술폰(P6010, BASF)을 사용하였다. 미생물에 대한 저항성을 갖는 나노입자는 20 nm 입자크기를 갖는 티타니아(P25, Degussa)를 사용하였다.

용매로는 혼합용매로서 N-methyl-2-pyrrolidone (NMP, Aldrich)과 methyl cellosolve (MC, 동양화학)를 사용하

였으며, 기공형성제로는 poly(ethylene glycol) 600 (PEG 600, 동양화학)을 사용하였다. 나노입자의 분산성을 향상시키기 위하여 폴리디메틸실란(Aldrich)을 사용하였다. 부직포는 일본 AWA사의 폴리에스터 재질의 PB 1560을 사용하였다.

### 2.2. 나노입자가 함유된 고분자용액 제조

나노입자가 함유된 고분자용액을 제조하기 위하여 N-methyl-2-pyrrolidone (NMP), methyl cellosolve (MC), poly(ethylene glycol)600 (PEG 600), 폴리디메틸실란과 티타니아를 섞은 후 1시간 가량 교반하여 나노입자의 분산을 용이하게 하였다. 폴리술폰을 첨가하여 24시간 동안 60°C에서 격렬히 교반하여 균일 용액을 제조하였다.

### 2.3. 정밀여과막 제조

정밀여과막은 도포(casting) 용액의 두께를 조절할 수 있는 대형 도포기 위에 티타니아가 함유된 고분자용액을 충전한 후 부직포를 이동시켜서 제작하였다. 이때 부직포에 도포된 도포 용액을 응고조에서 고형화시켜서 제막하였다. 완성된 정밀여과막은 60°C 항온조에서 2시간 동안 침지시킴으로써 남아있는 용매를 누출시켜서 최종적으로 제조된다.

고분자 농도 및 비용매 함량 및 부직포 선정 등은 아래와 같은 과정으로 확립시켰다. 고분자 농도가 12% 이하일 경우에는 부직포 내부로 침출되는 양이 너무 많아 분리막 형성 상태가 매우 불량하며, 12% 이상일 경우에는 기공형성이 충분하지 않아서 정밀여과막으로는 부적합하다. 따라서 본 연구에서는 고분자의 농도를 12 wt%로 고정하였다. 비용매의 함량이 전체의 30 wt%를 초과할 경우에는 부직포와 도포 용액과의 접착력이 감소하여 정밀여과막이 부직포에서 이탈되는 현상이 관찰되었다. 그래서 비용매의 함량이 30%를 넘지 않는 선에서 전체 용액의 함량을 결정하였다. 즉 용액의 제조비는 PSF : NMP : MC : PEG : 티타니아 : 폴리디메틸실란 = 12 : 34 : 27.9 : 20 : 6 : 0.1의 비율로 섞어서 제조하였다. 또한 AWA사의 PA 1601과 같이 부직포 성상이 치밀한 기공을 갖는 경우 도포 용액이 부직포 속으로 충분히 함침되지 못하여 이탈되었으나 같은 회사의 PB 1560과 같이 기공이 큰 부직포를 사용할 경우 도포 용액이 부직포 내부로 스며들어 정밀여과막으로 제조될 경우 이탈되는 현상이 관찰되지 않았다.

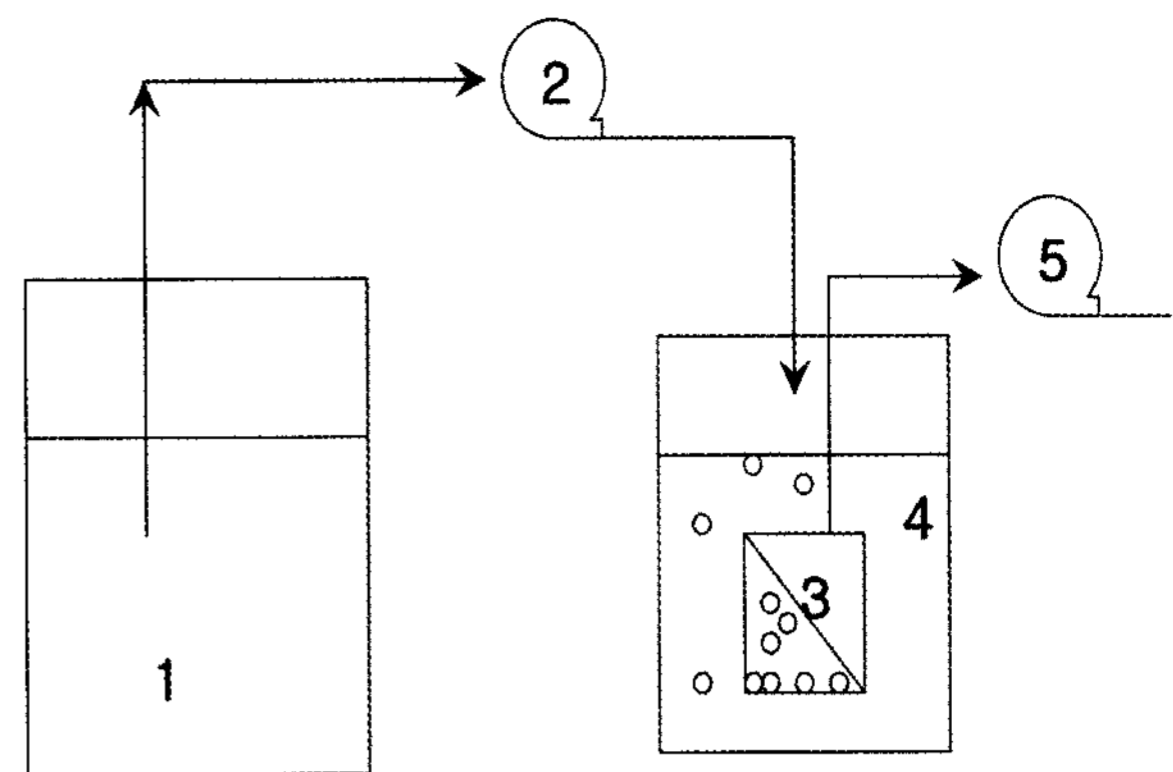
**Table 1.** The Characteristics of Support Membrane (Nonwoven fabric)

	PA 1601	PB 1560
Basis weight (g/m <sup>2</sup> )	(CD)59.5 (MD)59.6	(CD)72.3 (MD)73.0
Thickness (μm)	137.16	88.9
Tensile Strength (kg/15 mm)	(CD)2.9 (MD)4.8	(CD)5.0 (MD)9.3
Frazier (ft <sup>3</sup> /ft <sup>2</sup> /min)	46.1	5.7
Width (inch)	40	40

즉, 정밀여과막과 같이 기공이 큰 분리막을 제조하기 위해서는 도포 용액 내에 비용매를 과량 첨가하여야 하므로 기공이 큰 부직포를 사용하여야 하고 한외여과막과 같이 비교적 기공이 작은 분리막을 제조할 경우에는 기공이 작은 부직포를 사용해도 무방하다. 본 연구에서는 정밀여과막을 제조하기 위해서 비용매를 많이 첨가하여야 하므로 상대적으로 기공이 큰 PB 1560을 부직포로 사용하였다. 각 부직포의 물성은 Table 1에 제시하였다. 고분자 용액을 응고시키기 위한 응고제로는 수돗물을 사용하였으며 수돗물 내에 함유되어 있는 거대 입자들을 제거시키기 위하여 정밀여과 카트리지를 통과시킨 후 사용하였다.

2.4. 정밀여과막 평가

Fig. 1은 본 연구에서 테스트를 위한 MBR 반응조의 개략도를 나타낸 것이다. 미생물은 플록을 형성하는 박테리아와 사상성 박테리아가 혼합된 활성슬러지를 이용하였으며 활성슬러지는 시흥시의 폐수처리장에서 채취하였다. 또한 본 연구에서는 MBR 반응조를 통해서 MBR 프레임에서의 막과 막사이의 거리, 막과 산기관 사이의 거리 등의 분리막 자체의 물성 외에 부가적인 요소들이 투과 유량에 미치는 영향들을 살펴보았다. 활성슬러지의 먹이로 이용되는 폐수는 모델폐수를 제조하여 사용하였다. 유기물로는 glucose를 사용하여 COD로 1,000 ppm을 맞추었다. COD : N : P는 100 : 10 : 1의 비율로 제조하였으며 MgSO<sub>4</sub>를 보조제로 사용하였다. pH를 중성으로 조절하기 위해서 NaHCO<sub>3</sub>를 첨가하였다. N과 P의 제조원으로는 NH<sub>4</sub>Cl과 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>를 각각 사용하였다. 컴프레서를 이용하여 산소를 계속 공급하여 폭기조를 운영하였고 DO 농도는 5~7 ppm을 유지하였다. 폭기조의 부피는 40 L로 고정하였다. 투과수는 정량펌프를 이용하여 일정량을 채취하였다. 이 실험을



**Fig. 1.** A Schematic representation of MBR process apparatus. 1: feed tank, 2: pump, 3: membrane unit, 4: reaction tank, 5: pump.

통해 분리막 자체의 물성뿐만 아니라 분리막이 장착되어지는 프레임 제작에서의 최적배치 연구도 병행하여 실시하였는데, 막과 막간의 최적거리, 막과 산기관과의 최적거리, 산기관의 최적 홀 크기, 초기 막 설치 시 폭기 가동유무에 따른 투과유량비교, 세정액 농도에 따른 세정효과 비교, 세정액에 침지한 시간에 따른 세정효과 비교, 세정 시 폭기 가동 유무에 따른 세정효과 비교 등을 살펴보았다.

이와는 별도로 외부 현장 pilot에서 실제로 운전되고 있는 현장사이트에서 본 연구를 통한 제품을 외부 타사 제품과 동일한 운전 조건에서 테스트 해 보았다. 국내의 환경업체인 D사와 C사의 현장사이트에서 업체들이 현재 사용하고 있는 해외 제품들과 동등한 조건에서 테스트를 실시함으로써 본 연구를 통한 제품의 물성을 직접 비교하여 검증할 수 있는 기회를 가질 수 있었다. 운전 조건은 운전시간과 휴지시간을 5분과 1분으로 하였으며, 기존의 운전 조건인 운전/휴지시간인 7분/3분 또는 8분/2분에서 변경하여 동력비를 절감할 수 있도록 하였다. 본 연구 제품의 막 오염 저항성질로 인해서 실제 공정상에서 동력비를 절감하고도 유효한 투과유량을 확보함으로써 실제 공정상에서 많은 잇점을 얻을 수 있었다. D사의 현장 활성슬러지 농도는 8,000~13,000 mg/L이며 C사의 활성슬러지 농도는 7,000~9,000 mg/L로 상당히 높은 수준이었으며 육안으로 보기에 결속한 상태로 막 오염 측면에서 상당히 악조건이었다. 현장에서의 테스트를 통해 당사 제품의 현장 적용성을 가늠할 수 있었고 타사제품과의 직접 비교를 통해 품질의 수준을 알아볼 수 있었다.

일련의 실험을 통하여 본 연구 제품의 현장적용성과

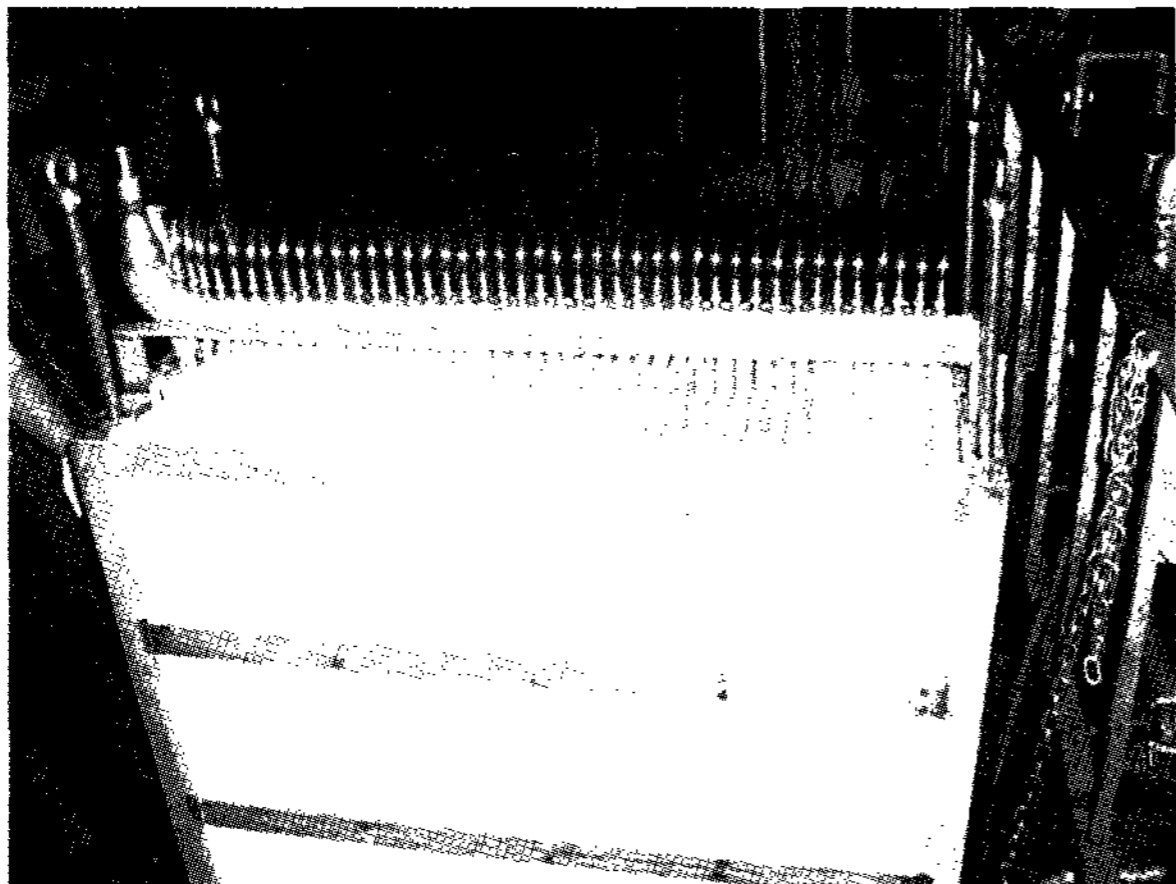


Fig. 2. Membrane frame in the pilot site.

타사제품과의 성능비교, 분리막 장착시의 여러 부가변수들을 최적화함으로써 물성의 극대화를 이뤄냄으로써 경쟁력을 키우고 현장에 쉽게 접근할 수 있는 기회를 갖고자 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 현장 Pilot를 통한 티타니아 함침 분리막 제품의 테스트

Fig. 2는 티타니아를 함침한 본 연구 제품의 현장적용 테스트를 위해 제작한 분리막이 장착된 프레임 사진을 나타낸 것이다. 분리막이 장착된 상태에서 각각의 분리막을 하나의 집수관으로 연결시켜 집수관에 흡입 펌프를 연결시켜 투과수를 채취하였다. 분리막 아래에는 산기관이 자리 잡고 있어서 흡입 시 막 표면에 부착되는 미생물 필름층을 폭기 과정을 통해 효율적으로 탈착시키고자 하였다. 이 프레임을 외부 현장 반응조에 직접 침지시켜서 분리막의 물성을 평가할 수 있었다. Fig. 3은 대형환경업체 D사에서 수행한 본 연구 제품과 업체에서 직접 사용하고 있는 타사제품과의 비교 테스트를 한 결과이다. 현장은 아파트의 오·폐수 자체처리 시설에서 이루어졌으며 실험기간은 약 6개월가량 실시되었다. 운전조건은 운전/휴지시간이 5분/1분으로 이루어졌으며 활성슬러지 농도는 8,000~13,000 mg/L로 상당히 고농도에서 진행되었다. 폭기 강도는 50 L/min이었으며 약 10일에 한 번씩 투과유량을 측정하여 분리막의 물성을 테스트하였다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구 제품의 초기 투과 유량이 타사 제품보다 뛰어났고 운전시간이 지남에 따라 막 오염에 따른 투과유량의 저

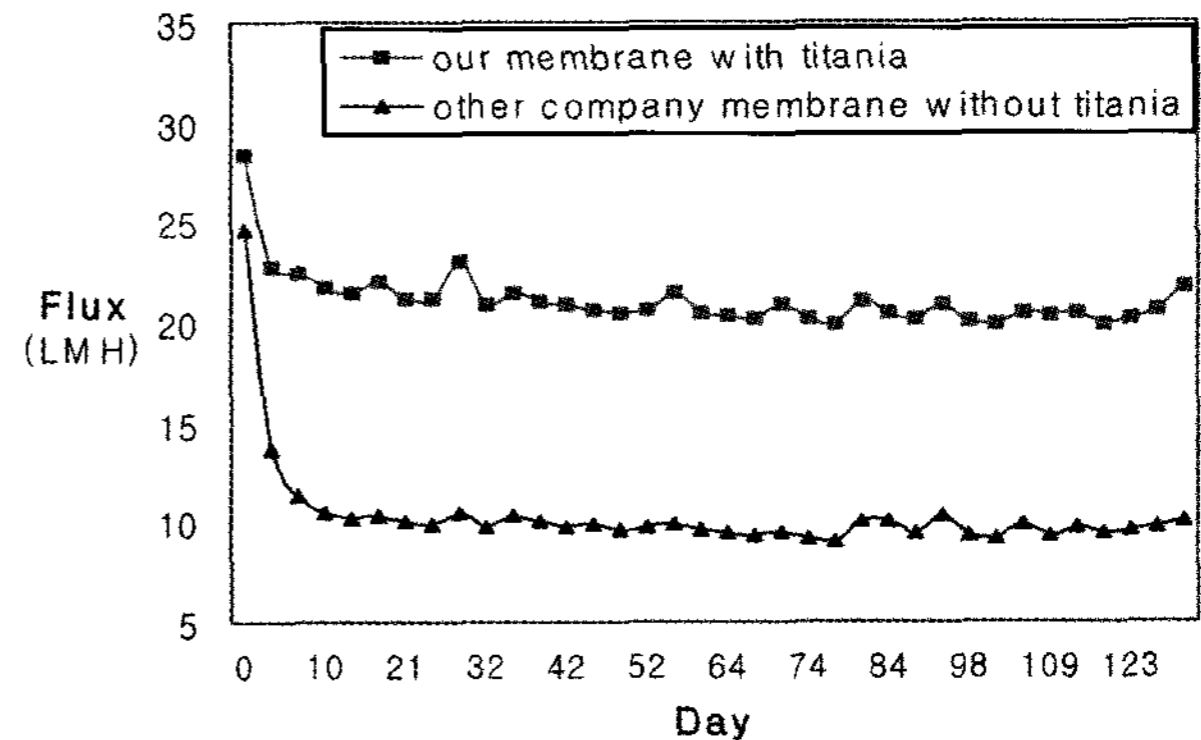


Fig. 3. Long-term test result in the pilot site (D company).

감현상도 당사제품이 더 우수한 것으로 나타났다. 이를 통해 본 연구 제품인 분리막의 표면에 함침된 나노입자들의 영향으로 초기 투과유량도 커졌으며 미생물 플록에 의한 막 오염 측면에서도 뛰어난 장점을 가짐으로써 쉽게 오염되지 않으면서 막 투과유량을 보전할 수 있는 것으로 사료된다. 이는 본 연구 제품의 분리막에 함침되어 있는 친수성의 티타니아 입자로 인해 친유성의 미생물 바이오 필름층이 막 표면에 약하게 부착되게 된다. 친수성의 티타니아로 인해 막 투과 유량도 커지며 실제 MBR공정에서 폭기로 인한 공기방울의 상향류로 인해 미생물 필름층이 쉽게 탈착됨으로 막 오염도 훨씬 저감되는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 또 다른 환경업체인 C사에서 마찬가지로 본 연구 제품과 업체에서 직접 사용하고 있는 타사제품과의 비교 테스트를 한 결과이다. 이곳도 아파트의 오·폐수 자체 처리시설에서 실험이 진행되었으며 실험기간은 약 3개월가량 실시되었다. 운전조건은 운전/휴지시간이 5분/1분으로 이루어졌으며 활성슬러지 농도는 7,000~9,000 mg/L이었다. 폭기 강도는 20 L/min으로 진행되었다. 이곳에서의 테스트에서도 본 연구 제품 분리막이 업체에서 사용되고 있는 타사 분리막보다 뛰어난 투과 유량을 보였으며 투과 유량이 보전되는 것을 확인할 수 있었다. 다만 초기 투과유량이 앞선 실험에 비해 많이 떨어지는 것을 볼 수 있었는데 이는 현장에서의 활성슬러지 상태가 기름 성분이 많이 나타나는 등 정상적인 상태가 아닌 것으로 보였으며 이로 인해 막 표면에 초기에 급격한 오염층을 형성했기 때문인 것으로 사료되어진다.

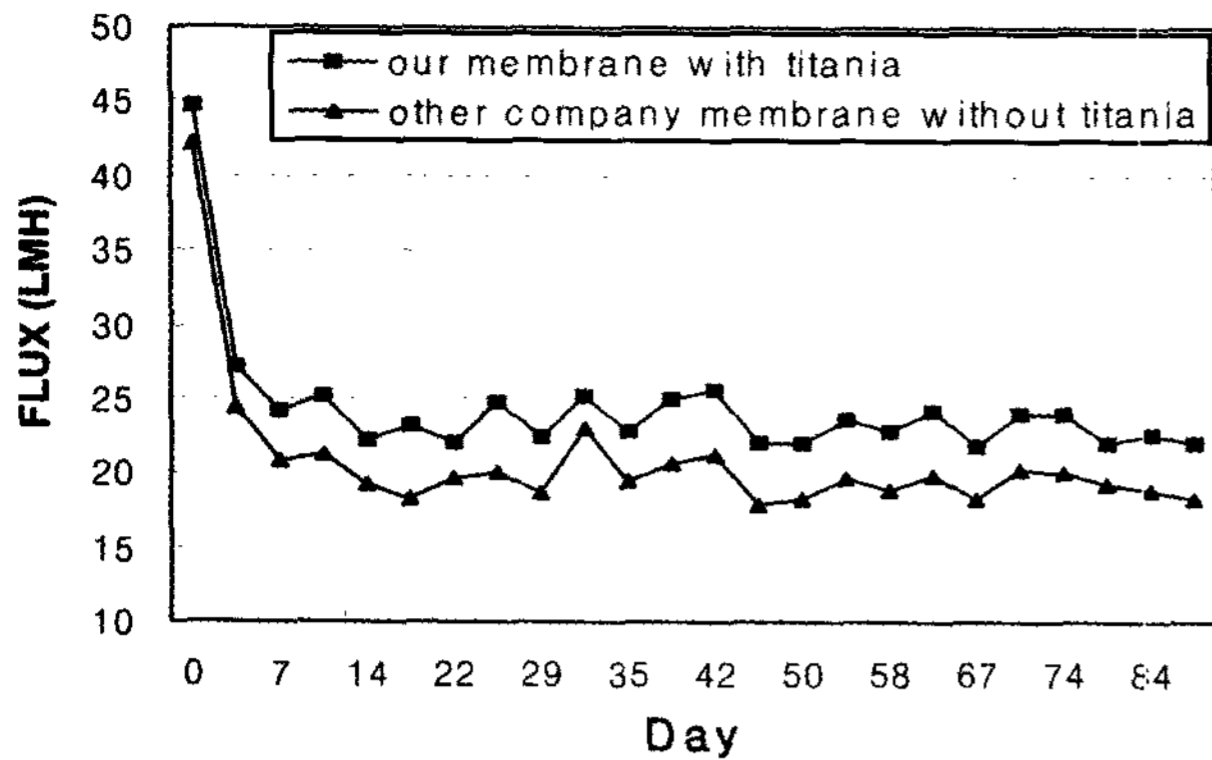


Fig. 4. Long-term test result in the pilot site (C company)

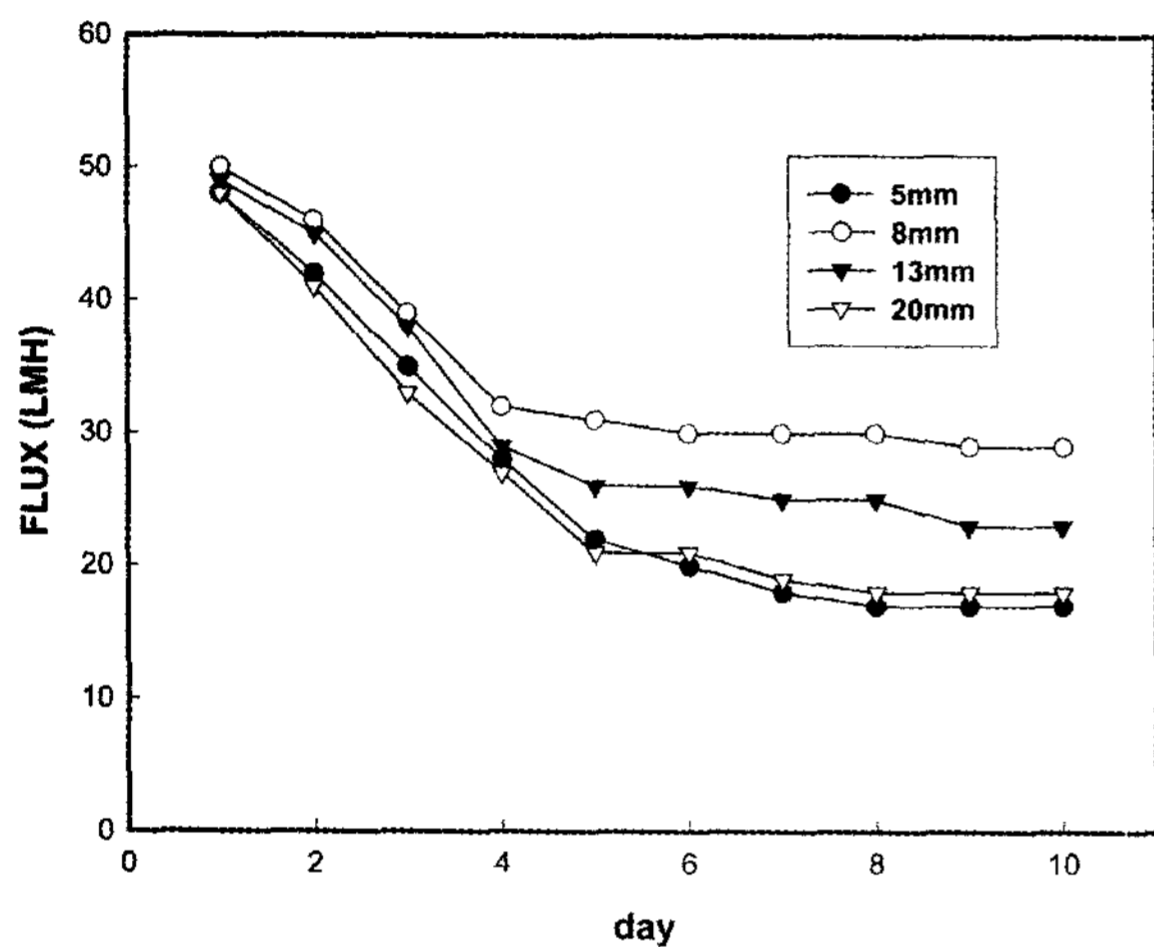


Fig. 5. The change of permeate flux according to membrane module arrangement difference.

### 3.2. MBR 공정 운전 조건 최적화를 위한 테스트

#### 3.2.1. 분리막과 분리막 사이의 막 간 거리에 따른 투과 유량 비교

분리막을 막 프레임에 장착할 시 막과 막사이의 거리에 따라 아래 산기관에서 방출되는 공기방울들이 효율적으로 막 표면에 도달하여 표면근처에서 산재되어 있는 미생물 필름층을 효과적으로 탈착시킬 수 있었다. 분리막과 분리막 사이의 거리가 너무 멀 경우는 분리막을 많이 장착할 수 없었으며 일정 수량의 분리막을 장착시키기 위해서 프레임의 크기가 커질 수 밖에 없었다. 또한 막과 막사이의 거리가 너무 가까울 경우에는 산기관에서 공급되는 공기방울이 막 사이로 쉽게 들어가지 못하는 경우가 발생하면서 막 오염이 급격하게 생기는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5에서는 분리막과 분리막 사이의 막간 거리를 5, 8, 13, 20 mm로 각각 변화를 두어 투과량을 체크해 보

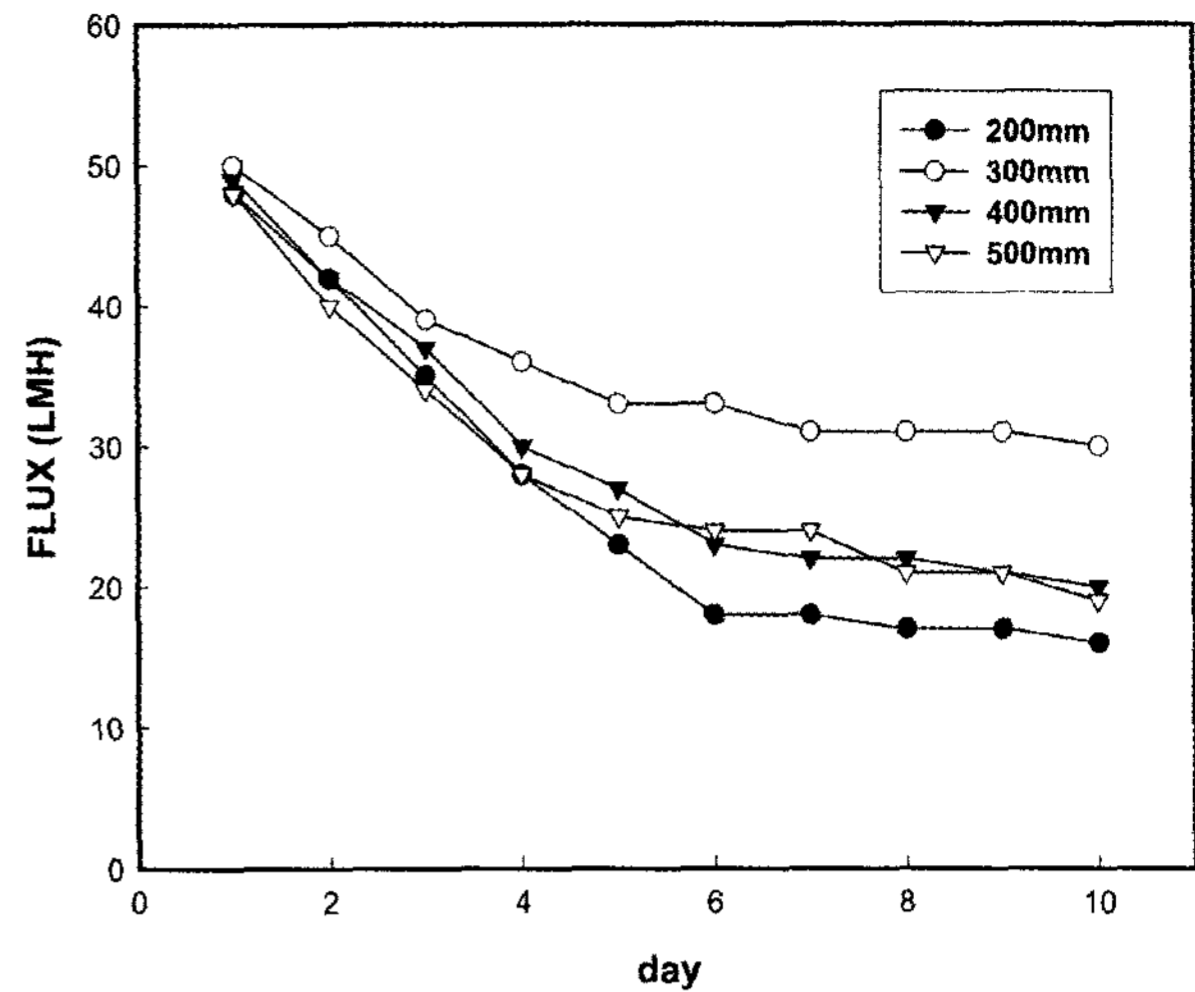


Fig. 6. The change of permeate flux according to membrane module and aeration line distance.

았다. 막간 거리가 가장 짧은 5 mm로 했을 경우에는 막간거리가 짧아서 산기관의 공기 방울이 충분히 막 표면에 전달되지 못해서 막 오염이 급격하게 발생하여 시간이 지남에 따라 투과량의 저감이 발생함을 알 수 있었다. 또한 13, 20 mm로 막 간격을 넓혔을 경우에는 산기관의 공기방울이 막과 막사이로 충분히 도달은 하지만 막 사이의 간격이 넓어서 막과 막 사이에서 왕복 운동하면서 생기는 공기방울들의 힘이 줄어들어서 오염이 다소 발생하는 현상을 발견할 수 있었다. 하지만 8 mm의 막 간격에서는 효율적인 공기방울의 공급으로 인해 막 표면에 퇴적되어지는 미생물 필름층이 신속히 제거되어지며 이로 인해 막 오염으로 인한 투과유량의 저감이 작아지며 투과량이 크게 나타나는 것으로 사료되어진다.

#### 3.2.2. 분리막과 산기관 사이의 거리에 따른 투과 유량 비교

다음은 프레임에 장착된 분리막과 산기관과의 거리에 따른 투과 유량의 차이를 테스트해 보았다. 앞선 막간 거리에서와 마찬가지로 산기관과 막 사이의 거리에 따른 투과 유량의 차이도 분명히 존재하였다. 산기관과 막 사이의 거리가 너무 짧을 경우 공기 방울이 막 사이로 충분히 공급되지 않아서 막 오염이 빠르게 진행되며 산기관과 막 사이의 거리가 너무 먼 경우에는 공기방울의 힘이 약해져서 마찬가지로 막 오염이 다소 빨리 진행되는 것으로 사료되어진다.

Fig. 6에서처럼 산기관과 분리막 사이의 거리가 200 mm일 경우 거리가 짧아서 산기관의 공기방울이 효과

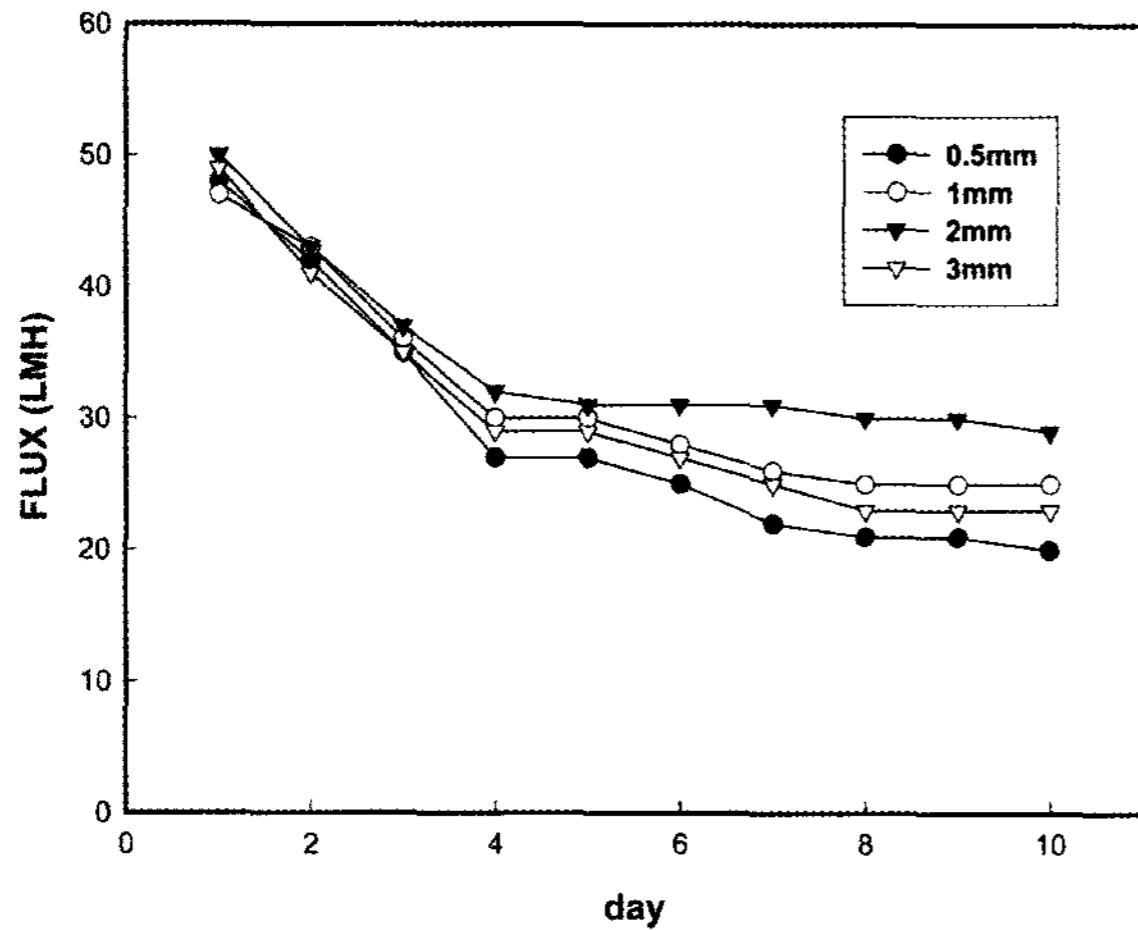


Fig. 7. The change of permeate flux according to aeration line's hole size difference.

적으로 막 사이로 스며들지 못해서 운전기간이 지남에 따라 막오염이 빠르게 진행되는 것을 알 수 있었다. 또한 산기관과 막 사이의 거리가 400, 500 mm로 늘어남에 따라 마찬가지로 공기 방울이 막 표면에 도달했을 경우의 힘이 약해졌거나 효율적으로 분포되지 못해서 막 오염이 다소 많이 진행되어서 투과량의 저감이 발생할 수 있었다.

하지만 산기관과 막 사이의 거리가 300 mm일 경우에는 산기관의 공기방울이 효과적으로 막 표면에 도달하여 막 표면에 퇴적되는 미생물 필름을 신속하게 제거함으로써 투과유량의 저감이 상대적으로 적음으로써 운전기간이 지남에 따라서 투과량이 크게 나타남을 알 수 있었다.

### 3.2.3. 산기관의 홀 크기에 따른 투과 유량 비교

산기관에서 발포되는 공기방울의 크기에 따라서 막 표면에 존재하는 미생물 필름의 제거에 영향을 미침에 착안해서 산기관의 홀 크기의 변수에 따른 분리막의 투과 유량의 변화를 관찰해 보았다. 산기관의 홀 크기가 작아지면 좀 더 많은 산기관 구멍을 뚫을 수 있어서 발포되는 공기방울의 양이 늘어날 수 있지만 상대적으로 공기방울의 강도가 약해질 수밖에 없다. 반대로 산기관의 홀 크기가 커지면 발포되는 공기방울의 강도가 커져서 막 표면의 오염층을 더 잘 제거할 수는 있지만 기포의 크기가 커짐으로써 막 사이로 스며들어가는데 제한이 있을 수밖에 없다. 또한 산기관의 홀 숫자가 작아질 수밖에 없음으로서 공기방울의 숫자가 작아질 수밖에 없다.

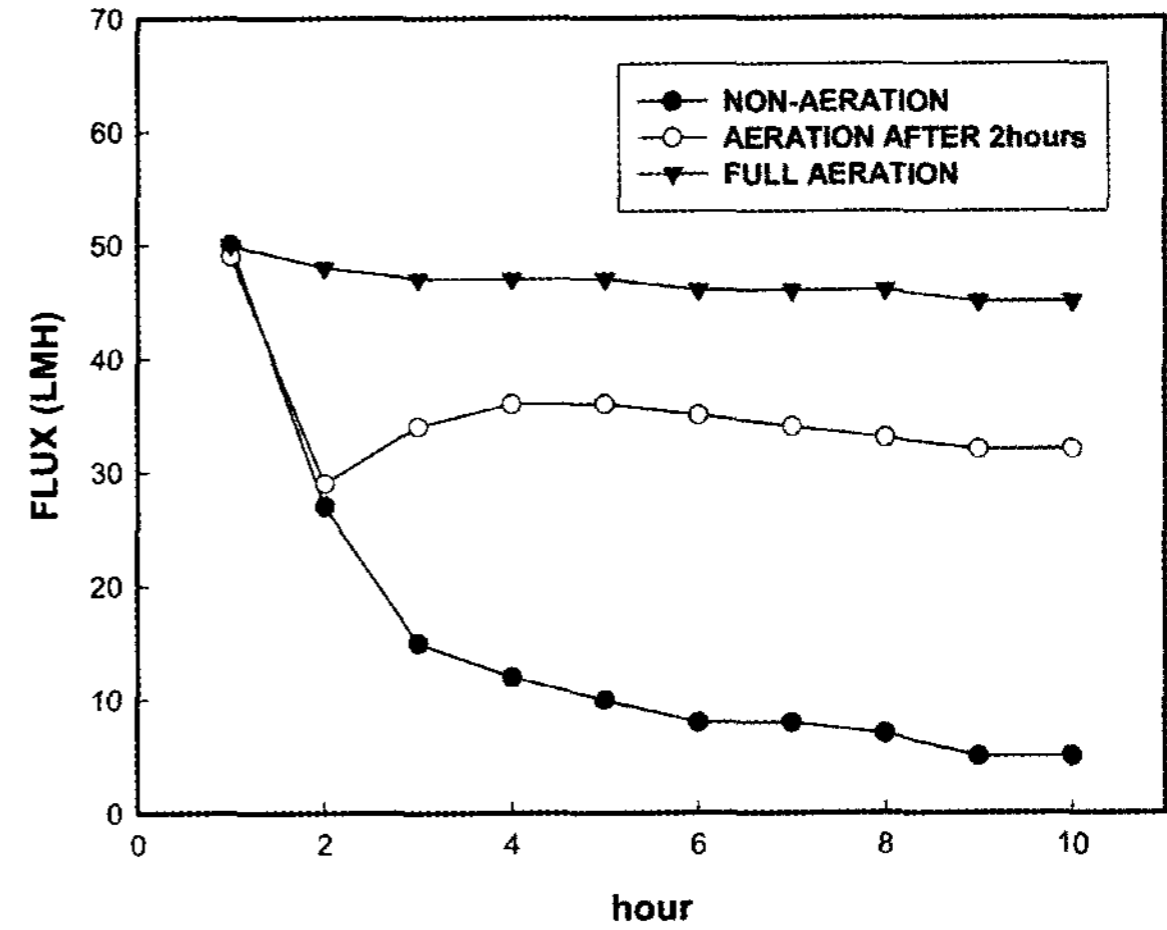


Fig. 8. The change of permeate flux according to aeration operation.

Fig. 7에서처럼 산기관의 홀 크기가 0.5나 1 mm일 경우에는 홀 크기가 너무 작아서 상대적으로 공기방울이 막 사이로 잘 스며들 수는 있지만 그 강도가 약해서 효과적으로 막 오염층을 제거할 수 없는 것으로 보인다. 또한 산기관의 홀 크기가 3 mm일 경우에는 공기방울의 크기가 커서 그 힘이 클지는 모르나 그 크기로 인해 막 사이로 쉽게 스며들지 못함으로써 효과적으로 막 오염층을 제거하지 못하는 것으로 보인다.

하지만 산기관의 홀 크기가 2 mm인 경우에는 공기방울의 크기가 적당하여 막 사이로 골고루 잘 도달하며 그 힘도 적당하여 막 오염층을 효과적으로 제거하여 상대적으로 투과량을 잘 보전하는 것으로 사료되어진다.

### 3.2.4. 초기 분리막 장착 후 폭기 가동 유무에 따른 투과 유량 비교

반응조에 분리막 장착 후 흡입펌프를 작동하여 오·폐수를 처리하는 과정에서 반드시 폭기를 선행한 후 흡입펌프를 가동해야 한다는 것을 실험적으로 확인하고자 하였다. 폭기가 선행되지 않은 상태에서 흡입펌프가 가동하여 분리막에 의한 분리가 이루어질 경우 오염층이 막 표면에 짧은 순간에 대량으로 부착되어 막오염이 급격하게 발생하며 차후에 폭기를 가동한다 하더라도 원상회복이 어렵거나 더디게 유량회복이 이뤄지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 초기 운전시 폭기를 가동시키지 않은 상태에서 흡입운전을 할 경우에는 투과유량이 급격하게 감소하여 분리막의 수명이 급속히 짧아지는 것을 알 수 있었다. 여기서 우리가 간과하기 쉬운

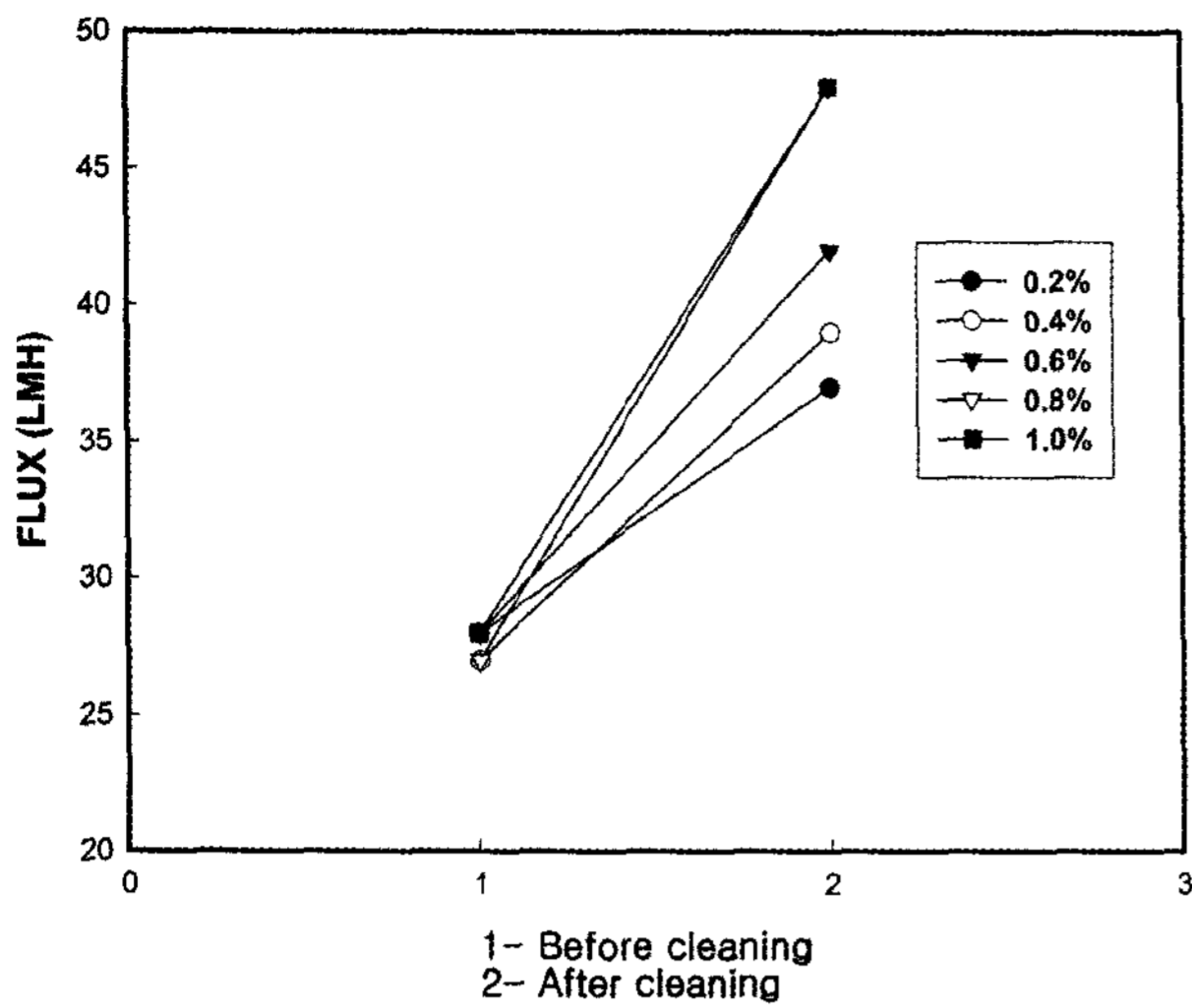


Fig. 9. The change of permeate flux according to cleaning solution concentration.

점을 파악할 수 있었는데 흡입펌프를 작동하기 이전에 반드시 폭기를 가동시켜서 분리막에 주어지는 오염층의 부착에 따른 부하를 줄여야 한다는 점이다. 두 번째로 폭기를 가동시키지 않은 상태로 2시간 흡입 운전을 한 후 2시간부터 폭기를 가동한 경우 투과유량이 어느 정도 회복되는 것을 알 수 있었다. 즉 폭기에 의해 막 표면에 부착되어 있는 오염층이 어느 정도 제거되는 것을 알 수 있었다.

마지막으로 폭기가 계속 가동되는 조건에서 흡입운전이 가동되면 막 오염현상이 현격하게 줄어들어 투과유량의 감소가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있었다.

이 실험에서 MBR운전 시 폭기 가동이 얼마나 분리막 물성 및 수명에 큰 영향을 미치는지를 알 수 있었다.

### 3.2.5. 세정액 농도에 따른 분리막 투과 유량 조사

MBR 운전 조작시 초기 압력에서 차압이 30 cmHg 이상인 경우 세정액 NaOCl을 사용하여 막 표면에 부착되어있는 오염층을 제거하여 다시 사용하였다. 이때 세정액의 농도를 최적화시켜서 사용하여야만 분리막의 손상 없이 투과유량을 원상회복할 수 있다. 그러므로 세정액의 농도를 각기 달리하여 투과유량의 회복이 적정한 세정액의 농도를 구하는 실험을 수행하였다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 먼저 투과유량인 28 LMH정도인 5종류인 분리막을 각각 세정액의 농도를 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0%로 달리하여 세정액에 2시간 정도 침지하여 막 세정을 실시한 후에 다시 반응조에 침지하여 초기 투과량을 조사해 보았다.

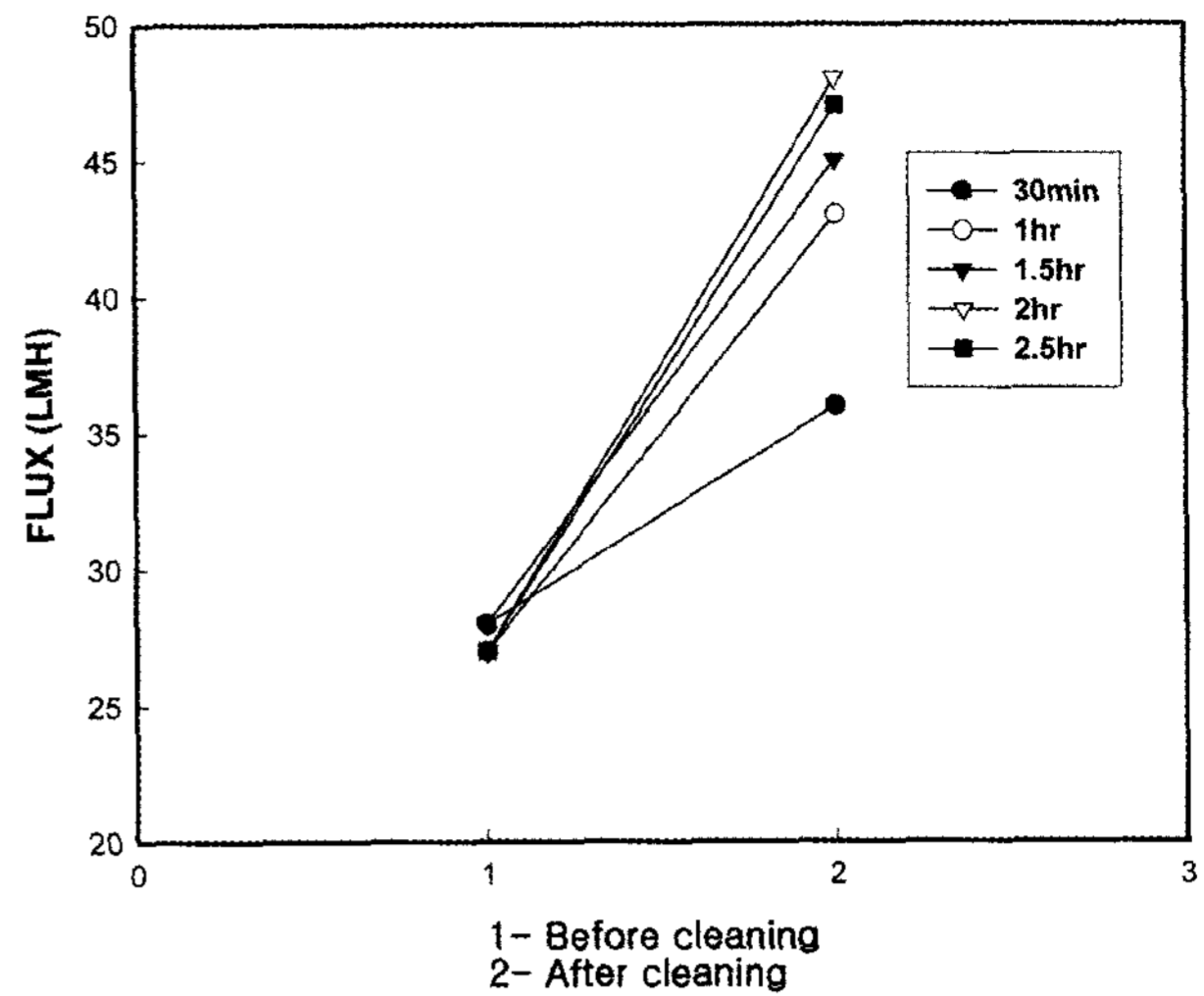


Fig. 10. The change of permeate flux according to cleaning time.

세정액의 농도가 0.2%에서 0.8%까지는 투과유량의 회복이 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있었고 1%로 농도를 올렸을 경우에는 거의 0.8% 농도와 비슷한 것으로 알 수 있었다. 즉 세정액의 농도가 0.8% 정도 일 때가 막 표면에 부착되어 있는 오염층의 제거가 거의 완벽하게 이루어진다는 것을 알 수 있었다.

### 3.2.6. 세정액에 침지한 시간 변화에 따른 투과유량 회복 변화 테스트

세정액의 농도뿐만 아니라 세정액에 침지한 시간 변수에 따라 막 오염층의 제거정도가 각기 다를 것으로 예상하여 실험을 수행하였다. 앞서의 세정액 농도테스트에서 최적의 농도인 0.8%를 기준으로 분리막의 침지시간을 각각 달리하여 투과유량의 회복 정도를 살펴보았다.

Fig. 10에서처럼 침지시간이 2시간까지는 막의 투과유량 회복정도가 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 그 이후부터는 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

그러므로 최적의 분리막 침지시간은 약 2시간 정도인 것을 알 수 있었다.

### 3.2.7. 분리막 세정 작업시 폭기 가동 유무에 따른 투과유량 회복 변화 테스트

분리막을 세정액에 침지한 후 일정시간이 지났을 때 막 오염층이 제거되는 것을 앞선 실험에서 확인할 수 있었다. 여기서 세정작업이 진행되는 동안 폭기 가동

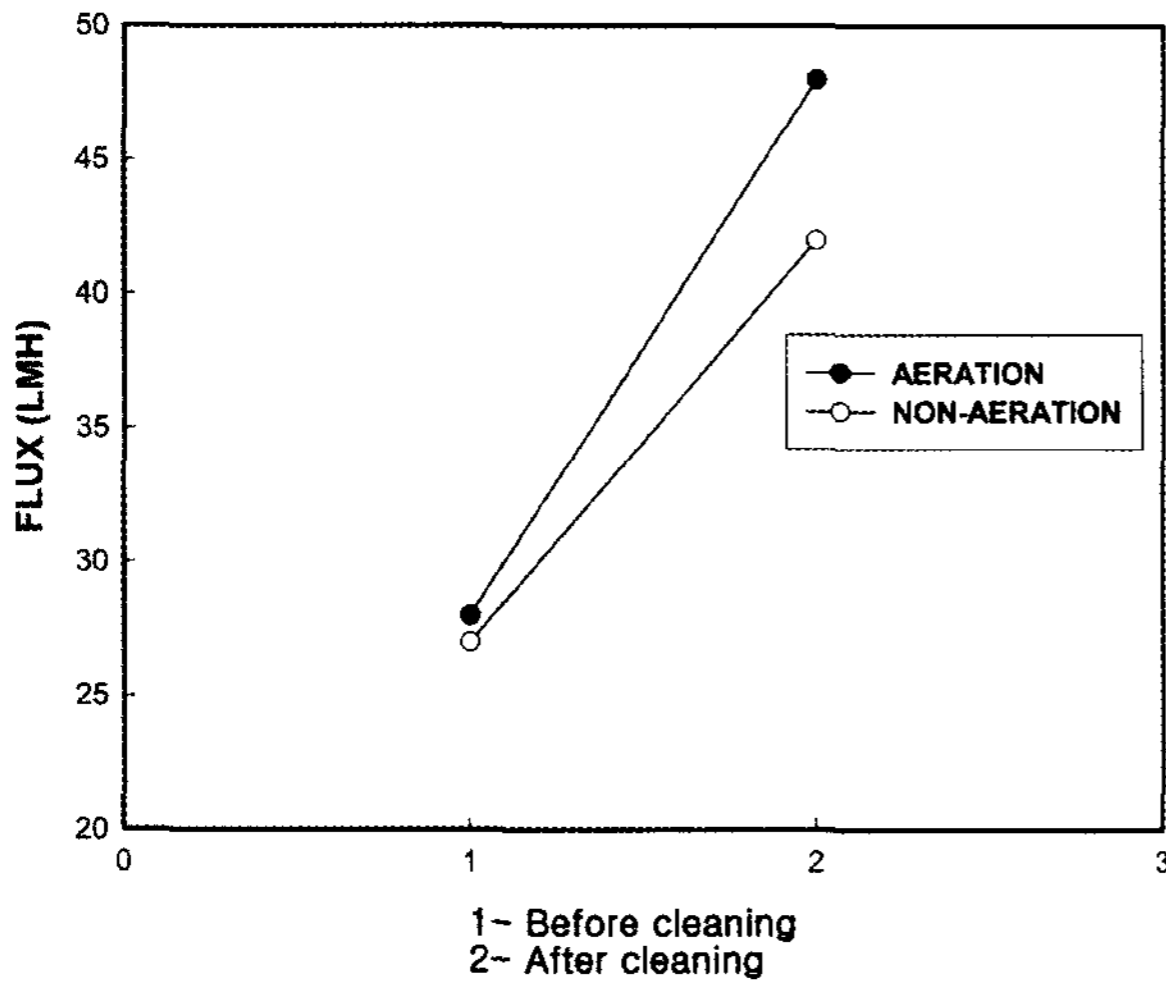


Fig. 11. The change of permeate flux according to aeration during cleaning process.

유무에 따라 막 오염층의 제거 차이가 확연하게 나타나는 것을 실험적으로 알 수 있었다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 세정액 농도 0.8%용액에 2시간 동안 침지할 경우 폭기 가동 유무에 따라 투과 유량의 회복에 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉 세정 작업시 폭기를 함으로써 세정액과 막 오염층과의 접촉을 좀 더 원활하게 함으로써 막 오염층 제거에 좀 더 효율적인 영향을 줌을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 분리막에 막 오염 저항성을 부여시켜 제작한 티타니아 함침 분리막 제품을 활용하여 외부 환경업체에서 기존의 타사제품과의 비교 테스트를 수행하였다. 이를 통해서 본 연구 제품의 현장 적용성과 타사제품과의 비교적용을 통해 물성을 검증받을 수 있는 기회를 가지게 되었다. 또한 분리막 자체의 물성 파악 및 향상과 더불어 분리막의 물성이 극대화될 수 있는 운전 조건상의 최적화를 실험을 통해 알아보았다. 막과 막사이의 거리, 막과 산기관사이의 거리, 산기관의 홀 크기, 폭기 가동유무, 세정액의 농도, 침지시간 등의 변수에 따라 실제 분리막의 투과 유량이 어떻게 변하는지를 살펴봄으로써 이들의 최적화를 통해 분리막의 물성을 극대화시키고자 하였다. 일련의 실험과정을 통해 다음과 같은 결론을 도출해 낼 수 있었다.

1) 티타니아의 함침으로 막 오염 저항성질을 부여한 분리막은 초기 투과 유량이 타 제품들보다 뛰어났으며

운전시간이 지남에 따른 막 오염도 적게 발생했으며 투과 유량이 보전되는 것을 확인할 수 있었다. 기존 타사제품과의 비교 테스트에서도 우수한 투과 유량을 나타냈으며 현장 테스트에서도 뛰어난 적용성을 나타내었다. 그 이유는 친수성인 티타니아 입자가 막 표면에 함침되어 있음으로 해서 막 표면에 친유성인 미생물 바이오 필름층의 부착강도가 약하게 된다. 이로 인해 실제 MBR 공정에서 폭기에 의한 공기방울의 상향류로 바이오 필름층의 제거가 용이하게 이루어진다. 그러므로 티타니아 입자가 함침되어 있지 않은 다른 분리막보다 투과유량이 크게 나타나는 것으로 사료된다.

2) 기존의 MBR 공정에서 운전/흡입시간이 7분/3분 또는 8분/2분으로 적용된 상황에서 본 실험에서는 5분/1분으로 축소시켜 시행하여 동력비를 절감시킬 수 있게 하였고 이런 조건에서도 운전상 큰 문제점이 발생하지 않았으며 적절한 투과유량을 확보할 수 있었다.

3) 분리막의 물성을 극대화하기 위해서 분리막의 배치 및 산기관과의 거리, 세정액 농도 및 침지시간 및 폭기가동 유무 변수 등의 실험을 수행하여 실험 결과를 얻을 수 있었다.

프레임에 분리막 장착 시 막간 거리는 8 mm가 적당하였고, 산기관과 막과의 거리는 300 mm가 적절하였다. 이는 공기방울이 유효적절하게 분리막 표면에 분포해서 오염층을 적절하게 제거하기 때문이며 이를 실험적으로 확인할 수 있었다. 또한 산기관의 홀 크기는 2 mm가 적당하였고 분리막의 초기 운전시 반드시 폭기가 선행된 후 흡입 운전이 이뤄져야 했다. 분리막의 오염층 제거를 위한 화학적 세정으로는 NaOCl 0.8%수용액에 2시간 정도 침지가 적절했으며 이때 폭기를 병행해야만 오염층 제거가 훨씬 수월하게 진행되었다.

#### 감 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업의 연구비 지원으로 수행하였으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. S. H. Choi, N. U. Cho, and M. Y. Han, "The Estimating of Rapid Increase to a Membrane in the Intermittent Aeration MBR Process using Alum Treatment", *Membrane J.*, **15**, 70 (2005).



2. T. M. Tak and T. H. Bae, "Effect of Biomass Concentration and Sludge Loading Rate on Bioactivity and Membrane Fouling in a Submerged Membrane Bioreactor system", *Membrane J.*, **14**, 289 (2004).
3. Y. Shimizu, "Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment", *Water Res.*, **30**, 238 (1996).
4. A. G. Fane, "Membranes for water production and wastewater reuse", *Desalination*, **106**, 1 (1996).
5. H. Kishino, H. Ishida, H. Iwabu, and I. Nakao, "Domestic wastewater reuse using a submerged membrane bioreactor", *Desalination*, **106**, 115 (1996).
6. M. Bodzek, Z. Debkowska, E. Lobos, and K. Konieczny, Biomembrane "wastewater treatment by activated sludge method", *Desalination*, **107**, 83 (1996).
7. T. Ueda, K. Hata, and Y. Kikuoka, "Effects of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor", *Water Res.*, **31**, 489 (1997).