

## 침지형 막결합 연속회분식 반응기의 운전에서 폐수의 도입단계가 제거효율과 여과성능에 미치는 영향

김 승 건 · 이 호 원\*<sup>†</sup> · 강 영 주

제주대학교 식품생명공학과, \*제주대학교 생명화학공학과  
(2011년 9월 6일 접수, 2011년 9월 22일 수정, 2011년 9월 23일 채택)

### The Effect of Filling Step on the Removal Efficiency and Filtration Performance in the Operation of Submerged Membrane-Coupled Sequencing Batch Reactor

Seung-Geon Kim, Ho-Won Lee\*<sup>†</sup> and Yeung-Joo Kang

Dept. of Food Bioengineering, Jeju National University,

\*Dept. of Chemical and Biological Engineering, Jeju National University,

(Received September 6, 2011, Revised September 22, 2011, Accepted September 23, 2011)

**요 약:** 침지식 막결합형 연속회분식 생물반응기에서 폐수의 도입단계가 제거효율과 여과성능에 미치는 영향을 조사하였다. 호기성 단계의 초기에 공급할 경우(Mode-1)와 무산소 단계의 초기에 공급할 경우(Mode-2)에 대하여 89일 동안 동시에 운전하였다. COD 제거효율과 여과성능은 2가지 운전방식 간에 큰 차이가 없었다. 그러나 영양염류(총질소와 총인)의 제거효율에 있어서 Mode-2가 Mode-1에 비해 보다 효과적이었다. Mode-2의 경우 COD, 총질소 및 총인의 제거율은 각각 99.1, 73.3 및 77.7%이었다.

**Abstract:** In the operation of submerged membrane-coupled sequencing batch reactor, the effect of filling step on the removal efficiency and filtration performance were investigated. Two sets of operation modes, the filling step located in the beginning of aerobic step (Mode-1) and the beginning of anoxic step (Mode-2), during 89 days were conducted. There was no wide difference in the COD removal and filtration performance between two sets of operation modes. But in the removal efficiency of nutrients (total nitrogen and total phosphorous), Mode-2 was more effective than Mode-1. In the case of Mode-2, average removal efficiencies of COD, total nitrogen, and total phosphorous were 99.1, 73.3, and 77.3%, respectively.

**Keywords:** sequencing batch reactor, flat-type submerged membrane-coupled, filling step, nutrients removal

#### 1. 서 론

최근 심각해지는 수질환경오염 문제를 해결하기 위하여 폐수처리 방류수의 수질 기준을 점차 강화하고 있어서 각 산업체에서는 적은 비용으로 폐수를 완벽하게 처리할 수 있는 오염 방지 기술이 요구되고 있다. 또한 최근의 강수량 부족으로 용수 확보가 어려워짐에 따라 폐수나 오수 등의 재활용에 대한 관심도 커지고 있다 [1]. 한편 효과적인 수자원의 확보와 수질오염을 대처하

기 위하여 여러 가지 대안이 제시되고 있고, 그 해결책 중의 하나로 소규모 처리시설을 이용하여 오염 배출원에서 고도 처리하여 이를 재활용하는 것이다. 이 방법은 기존의 대규모 처리장을 이용하는 방법에서 야기되는 차집체계와 비용적인 측면을 극복할 수 있고, 보다 궁극적으로 수질오염방지와 수자원 확보를 동시에 해결할 수 있는 방법이다[2].

연속회분식 반응조(sequencing batch reactor, SBR)를 이용한 활성슬러지 공정은 단일 반응조에서 폐수의 유입, 폭기, 슬러지의 침전 및 처리수의 배출 등이 연속적으로 행하여지는 것으로서 주로 소규모 하폐수 처리에

<sup>†</sup> 교신저자(e-mail: hwlee@jejunu.ac.kr)

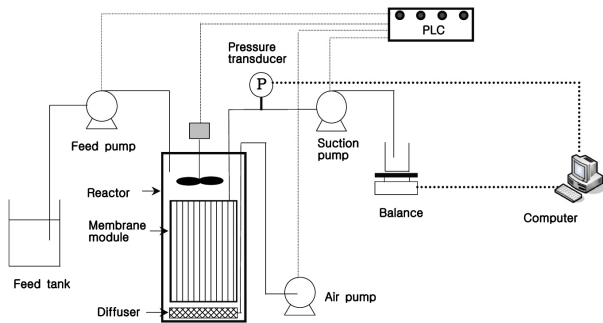


Fig. 1. Schematic diagram of FMSBR system.

적용되고 있다[3]. SBR은 독립적인 침전조와 반송시스템이 필요하지 않고, 유입수의 성상에 따라 또는 유출수의 원하는 수질에 맞춰 운전 조건이나 운전모드의 변경이 쉬우며, 적절하게 운전조건을 설정함으로써 질소와 인과 같은 영양물질을 제거할 수 있다. 그러나 SBR 공정에서는 미생물의 악화에 따르는 슬러지 별킹(bulking)과 핀플록(pin floc) 현상으로 슬러지의 일부분이 부상됨으로써 유출수의 수질이 악화되는 문제가 있다[4].

SBR과 침지형 막분리 공정을 결합한 침지형 막결합 연속회분식 반응조(membrane-coupled sequencing batch reactor, MSBR)는 SBR과 MBR이 갖고 있는 장점을 유지하면서 두 반응기가 갖고 있는 단점을 보완한 반응기이다. MSBR은 활성슬러지 반응조(폭기조)에 침지된 분리막에 의해 고액분리가 되므로 SBR 공정의 침전 단계가 필요 없게 되어 조업시간이 단축된다. 또한 MSBR은 집적화할 수 있으므로 소요공간이 작고, 박테리아 등의 미생물과 부유물질 등을 제거할 수 있으며, 양질의 배출수를 얻을 수 있다[5,7].

그러나 MSBR을 이용한 오폐수의 처리에 있어 가장 큰 문제는 운전이 진행됨에 따라 막오염이 계속 진행되어 처리수량이 지속적으로 감소한다는 것이다[8,9]. MSBR에서의 막오염을 억제하여 여과성능을 높이기 위한 연구가 많이 진행되어 왔으나, MSBR에서 폐수의 공급이 반응조의 어떤 상태(호기성 또는 혐기성)에서 실시하는 것이 여과성능과 제거효율 향상에 도움이 되는 지에 대한 연구는 전혀 보고된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 평막형 모듈을 사용한 연속회분식 반응기(flat-type membrane-coupled sequencing batch reactor, FMSBR)에서 폐수의 공급 단계(호기성 또는 혐기성)에 따른 여과성능과 유기물 및 영양염류(T-N 및 T-P)의 제거 효과를 서로 비교, 검토하였다.

Table 1. Specification of Membrane used in FMSBR

Membrane material	PVC
Membrane type	Flat-sheet type
Pore size ( $\mu\text{m}$ )	0.4
pH	2~10
Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	2~38
Hydrophobic or Hydrophilic	Hydrophilic
Total surface area ( $\text{m}^2$ )	0.17

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 장치

본 연구에 사용된 실험실 규모의 막결합형 연속회분식 반응 장치는 Fig. 1과 같다. 반응기는 아크릴을 사용하여 가로 250 mm, 세로 100 mm, 높이 1,000 mm의 직육면체 형태로 제작하였으며, 반응기의 유효부피(working volume)는 17.8 L로 하였다. 산기관은 분리막 표면에 형성되는 케이크를 제어하기 위해 분리막 모듈 바로 밑에 설치하였으며, 공기의 유량은 25 L/min로 공급하여 충분한 산소공급과 활성슬러지의 원활한 혼합이 되도록 하였다. 또한 투과 플럭스는 20 LMH ( $\text{L}/\text{m}^2 \text{hr}$ )가 되도록 정속여과를 하였으며, PLC (programmable logic controller, SB-65R, Comfile Technology, Korea)를 사용하여 합성폐수의 공급, 교반기, 에어펌프 및 흡입펌프의 ON/OFF 제어와 투과유속 및 막간차압(transmembrane pressure)의 측정 등 모든 공정을 자동으로 제어하였다.

본 연구에 사용된 분리막은 국내 P사에서 제조한 정밀여과용 평막으로서 재질은 PVC, 공극의 크기는 0.4  $\mu\text{m}$ , 막모듈의 표면적은 0.17  $\text{m}^2$ 이었다. 막모듈에 대한 자세한 사항은 Table 1에 나타내었다.

### 2.2. 실험 방법

FMSBR에서 폐수의 공급 단계에 따른 유기물과 영양염류의 제거 효과와 여과성능 변화를 비교하기 위하여 Table 2에 나타난 바와 같이 폐수의 공급 단계가 서로 다른 두 가지 운전모드로 동시에 운전하였다. 두 가지 운전모드의 한 cycle은 모두 180분으로 하였으며, 두 운전모드의 무산소반응과 호기반응은 각각 60분과 120분으로서 두 운전모드의 반응시간을 서로 같게 하여 두 운전모드를 비교할 수 있도록 하였다. 무산소반

**Table 2.** Operation Mode of FMSBR

	Operational step	Mixing	Aeration	Time (min)
Mode-1	Reaction (anoxic)	Yes	No	60
	Filling	No	Yes	5
	Reaction (aerobic)	No	Yes	15
	Filtration	No	Yes	20
	Reaction (aerobic)	No	Yes	20
	Filtration	No	Yes	20
	Reaction (aerobic)	No	Yes	20
	Filtration	No	Yes	20
	Total cycle time			180
	Mode-2	Filling	Yes	No
Reaction (anoxic)		Yes	No	55
Reaction (aerobic)		No	Yes	20
Filtration		No	Yes	20
Reaction (aerobic)		No	Yes	20
Filtration		No	Yes	20
Reaction (aerobic)		No	Yes	20
Filtration		No	Yes	20
Total cycle time				180

응에서는 반응기의 윗부분에 교반기를 설치하여 비포기 조건에서도 충분한 혼합이 일어나도록 하였고, 호기 반응에서는 여과방법에 대한 선행 연구결과[2]를 적용하여 비여과/여과시간을 20분/20분으로 하는 간헐적 여과를 실시하였다.

Mode-1에서는 60분 동안 무산소 반응을 실시한 후, 5분 동안 호기조건에서 폐수를 공급하였으며, Mode-2에서는 무산소반응 초기에 폐수를 공급하였다. 즉 Mode-1에서는 폐수 도입과정과 도입 후에 호기반응이 일어나고, Mode-2에서는 폐수 도입과정과 도입 후에 무산소반응이 일어나도록 하였다.

본 실험에 사용한 폐수는 Table 3과 같은 조성을 갖는 합성폐수를 제조하여 사용하였다. 탄소(C)원, 질소(N)원 및 인(P)원으로는 각각 글루코스(C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), 염화암모늄(NH<sub>4</sub>Cl) 및 인산이수소칼륨(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)를 사용하였다. 본 연구에 사용한 활성슬러지는 제주특별자치도 J 하수종말처리장의 반송슬러지를 사용하였으며, 채취한 활성슬러지는 합성폐수로 30일 정도 적응을 시킨 후에 본 실험에 사용하였다.

활성슬러지의 농도를 나타내는 MLSS (Mixed Liquor

**Table 3.** Compositions of Synthetic Wastewater

Composition	Concentration (mg/L)
Glucose	400
Peptone	30
NH <sub>4</sub> Cl	172
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	14
FeCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1
CaCl <sub>2</sub>	4
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	50
MnSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	3
NaHCO <sub>3</sub>	750
CODCr	410
T-N	44.6
T-P	3.07

Suspended Solids)와 MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids)는 표준 시험법(Standard methods)의 방법을 이용하여 측정하였다[10]. 또한 화학적 산소요구량(COD<sub>Cr</sub>), 총질소(T-N) 및 총인(T-P)은 분광광도계 (DR 5000, HACH, USA)와 분석용 키트를 이용하여 측정하였다.

2.3. 막의 여과 저항 측정 및 계산

투과 플럭스(J)와 막간차압(transmembrane pressure, TMP, ΔP) 사이의 관계는 직렬여과 저항모델(resistance in series model)을 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[4,11].

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} \tag{1}$$

$$R_t = R_m + R_c + R_f \tag{2}$$

여기서, R<sub>t</sub>는 총여과저항, R<sub>m</sub>은 막고유저항, R<sub>c</sub>는 케이크 저항, R<sub>f</sub>는 세공 막힘 등의 막오염(membrane fouling)으로 인한 막오염저항이다. 막고유저항(R<sub>m</sub>)은 운전 전에 증류수를 사용하여 측정하였고, 총여과저항(R<sub>t</sub>)은 운전 종료 시점에서 플럭스와 막간차압을 측정하여 계산하였다. 막표면의 케이크 층을 스펀지로 제거한 후 (R<sub>m</sub>+R<sub>f</sub>)를 측정하였으며, 식 (2)를 이용하여 R<sub>f</sub>와 R<sub>c</sub>를 각각 계산하였다.

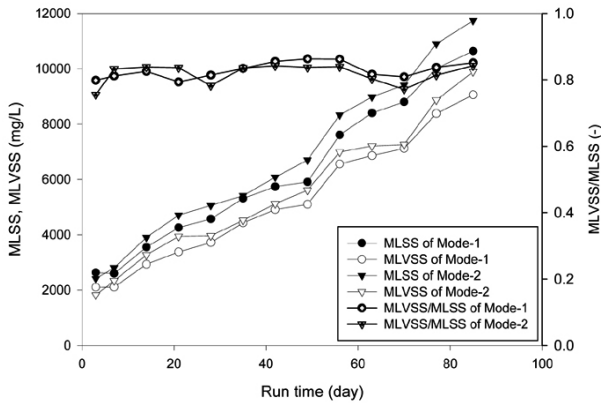


Fig. 2. Variations of MLSS, MLVSS, and MLVSS/MLSS during the operation of FMSBR.

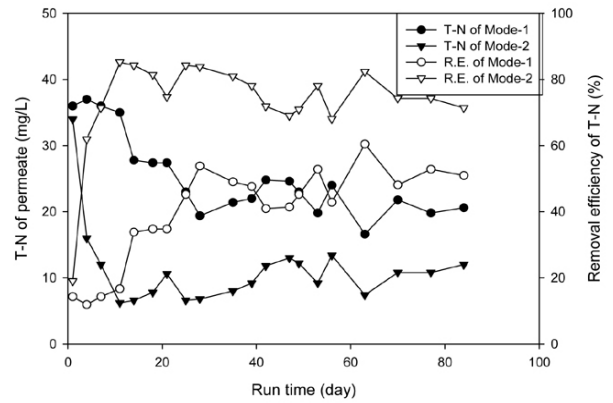


Fig. 4. Variations of T-N of the permeate and removal efficiency during the operation of FMSBR.

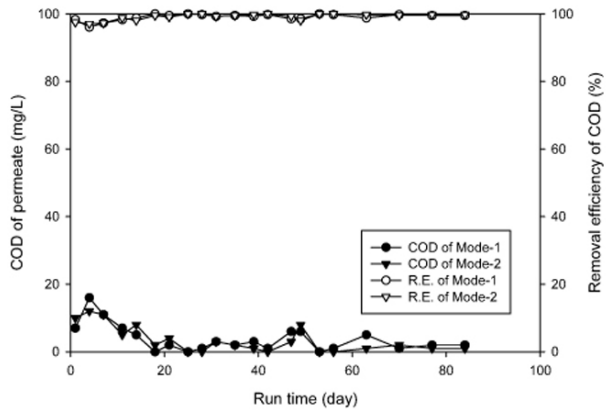


Fig. 3. Variations of COD<sub>Cr</sub> of the permeate and removal efficiency during the operation of FMSBR.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 활성슬러지 농도 변화

운전시간 경과에 따른 반응기 내의 MLSS 및 MLVSS의 농도변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 MLSS와 MLVSS는 운전시간이 경과함에 따라 지속적으로 증가하였다. Mode-1에서의 MLSS는 운전초기에 2,630 mg/L에서 85일 경과 후에는 10,640 mg/L로 증가하였고, Mode-2에서의 MLSS는 2,410 mg/L에서 85일 경과 후에는 11,740 mg/L로 증가하였다. 또한, Mode-1에서의 MLVSS는 운전초기에 2,100 mg/L에서 85일 경과 후에는 9,060 mg/L, Mode-2에서의 MLVSS는 1,820 mg/L에서 9,890 mg/L로 증가하였다. 이러한 결과는 MLSS 측정과 활성슬러지의 입자 크기 분석을 위한 샘플링을 제외하고는 슬러지의 배출이 없

었기 때문이며, 침지형 막결합 활성슬러지 시스템에서 MLSS의 농도는 운전시간이 경과함에 따라 증가한다는 Nagaoka 등의 결과와 유사한 결과이다[12].

또한, Mode-1과 Mode-2의 MLVSS/MLSS의 평균값은 각각 0.83과 0.82로 일반적인 활성슬러지의 MLVSS/MLSS 값인 0.65~0.75[13]보다 높게 나타났으나, 전형적인 혐기-호기 SBR 공정에서의 MLVSS/MLSS 값인 0.87보다는 조금 낮게 나타났다[14].

#### 3.2. 유기물 및 영양염류의 제거

FMSBR에서 운전시간에 따른 투과수의 COD<sub>Cr</sub> 농도 및 제거율 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Mode-1과 Mode-2의 COD<sub>Cr</sub>의 제거율은 모두 운전시간의 경과에 따라 큰 변화가 없었으며, Mode-1과 Mode-2의 COD<sub>Cr</sub>의 제거율 차이도 없었다. Mode-1에서 투과수의 평균 COD<sub>Cr</sub> 농도와 평균 제거율은 각각 3.86 mg/L와 99.05%이고, Mode-2에서 투과수의 평균 COD<sub>Cr</sub> 농도와 평균 제거율은 각각 3.52 mg/L와 99.13%이었다.

Fig. 4는 FMSBR에서 운전시간에 따른 투과수의 T-N의 농도변화와 제거율을 나타낸 것이다. Mode-1과 Mode-2에서의 투과수 T-N 농도는 운전 초기를 제외하고는 크게 변화가 없었으나, 특이할 만 한 점은 Mode-2에서의 투과수 T-N 농도가 Mode-1에서의 투과수 T-N 농도보다 매우 낮았다는 사실이다. Mode-1과 Mode-2에서의 투과수 T-N 농도는 각각 16.6 mg/L~37.0 mg/L (평균 25.4 mg/L)와 6.2 mg/L~34.0 mg/L (평균 11.2 mg/L)이며, T-N 제거율은 각각 11.9%~60.5% (평균 39.6%)와 19.1%~85.2% (평균 73.3%)이었다. Mode-2

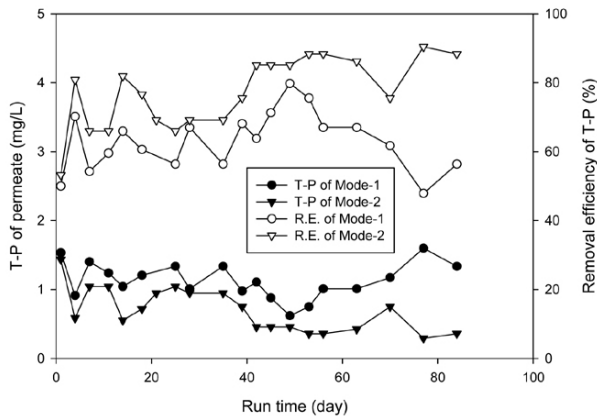


Fig. 5. Variations of T-P of the permeate and removal efficiency during the operation of FMSBR.

의 T-N 제거율은 Mode-1에 비해 약 1.8배 높게 나타난 것으로 보아 원수(폐수) 도입 후에 무산소반응을 실시하는 것이 원수 도입 후에 호기반응을 실시하는 것 보다 T-N 제거에는 보다 효과적임을 알 수 있었다.

생물학적 질소 제거는 질산화 박테리아에 의해 암모니아성 질소를 아질산성 질소로, 아질산성 질소를 질산성 질소로 산화시키는 질산화 과정을 거친 후, 탈질 박테리아에 의해 환원되어 질소가스를 대기 중으로 방출시켜 이루어진다[15]. 또한 탈질을 효과적으로 이루어지기 위해서는 유기물이 필요하다[3]. Mode-1 경우에는 원수가 도입된 후 호기반응이 먼저 일어나므로 원수중의 유기물이 호기성 반응에서 거의 산화되어 무산소 반응에서 탈질에 이용할 유기물이 없는 반면에, Mode-2의 경우는 무산소 반응에서 유기물이 공급되므로 탈질이 Mode-1에 비해 높게 되어 총질소의 제거율이 높은 것으로 사료된다.

한편, 본 연구에서 Mode-2의 경우 COD<sub>Cr</sub>/T-N 비가 9.2일 때 T-N의 제거율은 73.10%로서 Yang 등이 MBMBR (moving bed membrane bioreactor)에서 COD/T-N 비가 8.9일 때 실험한 결과인 T-N 제거율 70.0%와 유사한 결과를 나타내었다[16].

Fig. 5는 FMSBR에서 운전시간에 따른 투과수의 T-P의 농도 변화와 제거율을 나타낸 것이다. Mode-1과 Mode-2에서 투과수의 T-P 농도 변화는 각각 0.62 mg/L ~ 1.60 mg/L (평균 1.14 mg/L)와 0.29 mg/L ~ 1.44 mg/L (평균 0.70 mg/L)이었으며, T-P 제거율은 각각 47.9% ~ 79.8% (평균 62.9%)와 53.2% ~ 90.4% (평균 77.3%)이었다. T-P의 제거율 거동은 T-N의 제거율 거

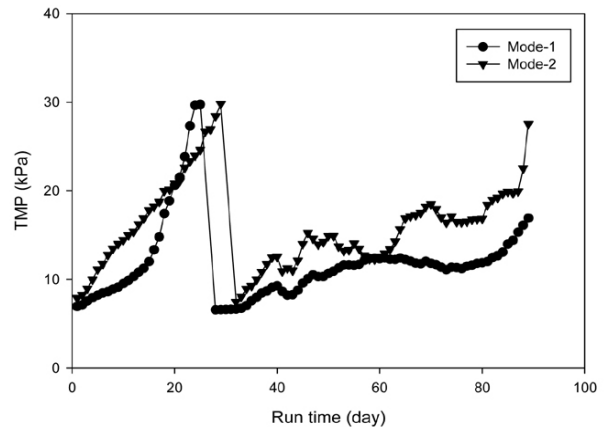


Fig. 6. TMP variations during the operation of FMSBR.

동과 비슷하였으며, Mode-2의 경우가 Mode-1에 비해 T-P의 제거율이 1.2배 높게 나타났다.

### 3.3. 운전 시간에 따른 TMP의 변화

FMSBR은 분리막이 모두 활성슬러지 내에 침지되어 있으므로 운전 조건과 방식에 따라 차이는 있지만 막오염으로 인하여 TMP의 증가가 야기된다. 이와 같은 막오염이 어느 정도 진행되면 TMP 또는 플럭스 회복을 위하여 침지된 분리막을 활성슬러지에서 분리하여 물리적 방법이나 화학적 방법에 의해 막을 세정하여야 한다[2, 17-19]. 본 연구에서 사용한 분리막의 세정은 물리적 세정 후 화학적 세정을 실시하였다. TMP가 약 30 kPa에 도달하였을 때, 분리막을 반응기에서 꺼내어 부드러운 스펀지와 tap water로 막 표면에 형성된 케이크를 제거한 후, 5,000 ppm NaOCl 용액으로 막을 세정하였다.

Fig. 6은 Mode-1과 Mode-2에 대하여 운전 시간에 따른 TMP의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Mode-1과 Mode-2는 운전을 시작한지 각각 25일과 29일 경과 한 후에 TMP가 약 30 kPa에 도달하였으며, 이때 앞에서 제시한 세정방법에 따라 분리막을 세정하였다. 운전을 처음 시작할 때의 Mode-1과 Mode-2의 초기 TMP는 각각 6.9와 7.9 kPa이었고, 세정 후의 TMP는 각각 6.6과 7.5 kPa로서, 세정 후 TMP는 Mode-1과 Mode-2에서 모두 운전 초기의 TMP로 거의 회복되었다. 세정 후에는 Mode-2의 TMP는 Mode-1의 TMP에 비해 다소 높게 나타났으며, 89일 후에 Mode-1과 Mode-2의 TMP는 각각 16.9과 27.3 kPa로 Mode-2

**Table 4.** Filtration Resistances in the Operation of Mode-1 and Mode-2

	(Unit; $\times 10^{11}/m$ )	
	Mode-1	Mode-2
$R_m$	0.98	1.24
(%)	(4.52)	(2.95)
$R_f$	0.90	2.89
(%)	(4.14)	(6.86)
$R_c$	19.74	37.97
(%)	(91.34)	(90.19)
$R_t$	21.61	42.11
(%)	(100.00)	(100.00)

의 경우가 높게 나타났으나, 두 운전 모드간의 큰 TMP의 차이는 없었다.

또한, 89일 동안 FMSBR에서 운전을 한 후 막모듈을 반응기에서 꺼내어 순수 플럭스를 측정하고, 식 (1)을 이용하여 총여과저항( $R_t$ )을 측정하였다. 막표면의 케이크 층을 스펀지로 제거한 후 여과저항을 측정하고, 식 (2)를 이용하여 ( $R_m+R_f$ )를 계산하였으며, 막오염저항( $R_m$ )은 운전 전에 막간차압에 따른 순수 플럭스 변화로부터 이미 측정된 값이므로 막오염저항( $R_f$ ) 값을 산출하였다. 실험과 식 (1) 및 식 (2)를 이용하여 산출한 각 여과저항 값을 Table 4에 나타내었다. Mode-1과 Mode-2의  $R_t$ 는 각각  $21.61 \times 10^{11}/m$ 와  $42.11 \times 10^{11}/m$ 로서 Mode-1에 비해 Mode-2가 약 2배 높게 나타났으며, 이는 Fig. 6에서 89일 후의 TMP 측정값과 비슷한 결과이다. 또한 Mode-1과 Mode-2에서 케이크 저항의 비율은 각각 91.34%와 90.19%로서 막여과 저항의 대부분은 케이크 저항( $R_c$ )이었다. 이러한 결과는 MBR 공정에서 케이크 저항이 전체 막여과 저항의 대부분을 차지한다는 연구결과와 거의 일치하였다[4].

#### 4. 결 론

평막결합형 연속회분식 생물반응기(FMSBR)에서 폐수를 호기성 단계의 초기에 공급할 경우(Mode-1)와 무산소 단계의 초기에 공급할 경우(Mode-2)에 있어서 유기물 및 영양염류의 제거효과와 여과성능에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Mode-1에서의 MLSS는 운전초기에 2,630 mg/L에서 85일 경과 후에는 10,640 mg/L로 증가하였고, Mode-2

에서의 MLSS는 2,410 mg/L에서 85일 경과 후에는 11,740 mg/L로 증가하였으며, Mode-1과 Mode-2의 MLVSS/MLSS의 평균값은 각각 0.83과 0.82이었다.

2)  $COD_{Cr}$  제거율은 폐수공급 단계의 순서에 관계없이 99% 이상의 높은 제거율을 나타내었다.

3) Mode-1과 Mode-2에서의 T-N 평균제거율은 각각 39.6% 및 73.3%로서 Mode-2의 T-N 제거율이 Mode-1에 비해 약 1.8배 높았다.

4) Mode-1과 Mode-2에서의 T-P 평균제거율은 각각 62.9% 및 77.3%로서 Mode-2의 T-N 제거율이 Mode-1에 비해 약 1.2배 높았다.

5) Mode-2의 첫 번째 세정주기는 Mode-1에 비해 4일 길었고, 세정 후 Mode-2의 TMP는 Mode-1의 TMP에 비해 다소 높게 나타났으나, 두 운전모드 간의 큰 TMP 차이는 없었다.

6) Mode-1과 Mode-2에서 케이크 저항의 비율은 각각 91.34%와 90.19%로서 폐수공급 단계의 순서에 관계없이 막여과 저항의 대부분은 케이크 저항이었다.

#### 참 고 문 헌

1. J. K. Shim and K. Y. Chung, "Application of Membrane Bioreactor in Water Treatment", *NICE*, **20(6)**, 721 (2002).
2. H. W. Lee, S. G. Kim, and S. S. Khang, "The effect of operation modes on filtration performance and removal efficiency in a flat-sheet membrane coupled sequencing batch reactor", *J. of KSEE*, **29(10)**, 1138 (2007).
3. J. Y. Han, "Removal characteristics of nitrogen and phosphorus in sewage by change of operating conditions on SBR process", M.S. Dissertation, Jeju National Univ., Jeju (1998).
4. B. C. Ma, "Effect of physicochemical characteristics of microbial flocs on membrane performance in membrane-coupled sequencing batch reactor with and without anoxic phase", M.S. Dissertation, Seoul National Univ., Seoul (2004).
5. B. Arrojo, A. Mosquera-Corra, J. M. Garrido, R. Méndez, E. Ficara, and F. Malpei, "A membrane coupled to a sequencing batch reactor for water re-

- use and removal of coliform bacteria”, *Desalination*, **170**, 109 (2005).
6. K. Y. Ryu, B. K. Park, and C. H. Lee, “Filtration performance in MSBR (membrane-coupled sequencing batch reactor) using a membrane for both filtration and aeration”, *J. of KSWQ*, **21(4)**, 337 (2005).
  7. S. G. Kim, H. W. Lee, and Y. J. Kang, “Nutrient removal characteristics on organic material loading in submerged flat sheet type sequencing batch membrane reactor”, *Membrane Journal*, **20(3)**, 241 (2010).
  8. J. A. Howell, H. C. Chua, and T. C. Arnot, “In situ manipulation of critical flux in a submerged membrane bioreactor using variable aeration rate, and effects of membrane history”, *J. Membrane Sci.*, **242**, 13 (2004).
  9. Y. K. Choi, O. S. Kwon, H. S. Park, and S. H. Noh, “Mechanism of gell layer removal for intermittent aeration in the MBR process”, *Membrane Journal*, **16(3)**, 188 (2006).
  10. APHA, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 21th ed., pp. 55-59, American Public Health Association, Washington D. C. (2005).
  11. C. Psoch and S. Schiewer, “Resistance analysis for enhanced wastewater membrane filtration”, *J. Membr. Sci.*, **280**, 284 (2006).
  12. H. Nagaoka, S. Yamanishi, and A. Miya, “Modeling of Biofouling by Extracellular Polymers in a Membrane Separation Activated Sludge System”, *Wat. Sci. Tech.*, **38(4-5)**, 497 (1998).
  13. G. Bitton, “Wastewater Microbiology”, 3th ed., p. 226, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey (2005).
  14. T. Kuba, G. Smolders, M. C. M. Van Loosdrecht, and J. J. Heijnen, “Biological Phosphorus Removal from Wastewater by Anaerobic-Anoxic Sequencing Batch Reactor”, *Wat. Sci. Tech.*, **27(5-6)**, 241 (1993).
  15. G. D. Whang and S. H. Bae, “The effect on the attached growth in aerobic reactor on nitrogen removal in A<sup>2</sup>/O process”, *J. of KSWQ*, **22(6)**, 1022 (2006).
  16. S. Yang, F. Yang, Z. Fu, and R. Lei, “Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor on organic carbon and nitrogen removal”, *Bioresour. Technol.*, **100**, 2369 (2009).
  17. H. Nagaoak and C. Kudo, “Effect of loading rate and intermittent aeration cycle on nitrogen removal in membrane separation activated sludge process”, *Wat. Sci. Tech.*, **46(8)**, 119 (2002).
  18. H. S. Kim, H. Katayama, S. Takizawa, and S. Ohgaki, “Development of a microfilter separation system coupled with a high dose of powdered activated carbon for advanced water treatment”, *Desalination*, **186**, 215 (2005).
  19. J. Y. Jang and Y. M. Lee, “Application of ENVIS<sup>®</sup> MEMBRANE SYSTEM(submerged flat sheet MF membrane)”, *Membrane Journal*, **15(3)**, 241 (2005).