

## MBR공정에서 내부 반송비에 따른 생물대사성분의 거동

이원배 · 차기철<sup>†</sup> · 정태영 · 김동진<sup>\*</sup> · 유익근<sup>\*\*</sup>

연세대학교 환경공학부

<sup>\*</sup>한림대학교 환경시스템공학부

<sup>\*\*</sup>울산대학교 생명화학공학부

## Behavior of Soluble Microbial Products by the Internal Recycle Rate in MBR Process

Won-Bae Lee · Gi-Cheol Cha<sup>†</sup> · Tae-Young Jeong · Dong-Jin Kim<sup>\*</sup> · Ik-Keun Yoo<sup>\*\*</sup>

Department of Environmental Engineering, Yonsei University

<sup>\*</sup>Department of Environmental System Engineering, Hallym University

<sup>\*\*</sup>School of Chemical Engineering and Bioengineering, Ulsan University

(Received 27 June 2005, Accepted 7 September 2005)

### Abstract

A laboratory-scale experiment was conducted to investigate control of soluble microbial products (SMP) by the internal recycle rate in the submerged membrane separation activated sludge process. The internal recycle rate of the reactor RUN 1 and RUN 2 were 100 % and 200 %, respectively. SMP concentration was rapidly accumulated in the reactor (RUN 1). The variation of accumulated SMP concentration was related to the denitrification rate at the beginning experiment however SMP concentration decreased without correlatively to the denitrification rate during long operation time. The microbial kinetic model was rapidly presented in the both microbial growth and extinction in the reactor (RUN 1). In the SMP kinetic model, Internal recycle rate is the lower, value of UAP and BAP which SMP matter were presented low. The study about development of kinetic model is relatively well adjusted to the experiment exception SMP. In the future, SMP formation equation must be thought that continually research is necessary.

**keywords** : Soluble microbial products, Internal recycle rate, Denitrification rate, Kinetic model

## 1. 서 론

최근 막분리 기술 도입은 수자원 고갈에서 나오는 물 문제에 당면한 과제를 해결할 수 있는 방안으로 대두되고 있으며, 하·폐수의 생물학적 처리에 분리막(Membrane bioreactor, MBR)을 응용하는 연구가 많이 수행되고 있다(Mulder, 1991; 차 등, 2000, 2001). 그러나 MBR 공정에 있어서 가장 큰 문제점은 막오염이며, 이에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나(권, 2001; 차 등, 2004) 막오염 유발물질의 규명은 연구가 미비한 실정이다. 최근 들어 막오염에 기인하는 물질을 용해성 생물대사산물(soluble microbial products, SMP)이라고 보고하고 있다(Boero et al., 1996, Namkung et al., 1988).

SMP는 처리수 내의 미분해된 유입수의 잔여 유기물보다는 생분해성을 갖지 않는 성분인 SMP가 최종 처리수 내에 존재하여 처리수의 농도를 증가시키고, floc형성에 영향을 주어 침전성 불량을 가져오는 것으로 보고되고 있으며 고

분자의 유기물질인 생물난분해성 대사산물로서 막투과 유속 감소의 주요 원인이라고 고찰되어져 왔다(Pribyl et al., 1996).

이러한 막오염의 주된 요인인 SMP 농도 제어에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 방법으로는 GAC 흡착과 고농도 ferric chloride를 이용한 화학침전 제거법(Parkin et al., 1975)과 유출수 전처리 과정으로서 유출되기 전에 염소 화합물이 존재할 때 THM으로 형성한 후 처리하는 방법(Namkung et al., 1998) 그리고 간헐 포기 방식의 MBR 공정에서 질산화와 호기상 탈질(Simultaneous Nitrification Denitrification, SND)을 이용한 질소 제거법(Kikuchi et al., 1999) 등이 있다(Duncan et al., 1999).

따라서 본 연구에서는 SMP 제어 방법으로 생물학적 제어 방법의 일종으로 탈질조를 별도로 두어 포기조에서 생성된 SMP 농도를 탈질조로 반송시켜 탈질조에 의한 SMP 제어 가능성을 평가하고자 하였다.

대부분 탈질조의 경우 탄소원이 부족하여 외부 탄소원을 주입하고 있으나, 본 연구에서는 SMP 농도를 탈질원으로 이용이 가능한지 살펴보고 이에 따른 기초적인 자료를 조사하고자 하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
gccha@dragon.yonsei.ac.kr

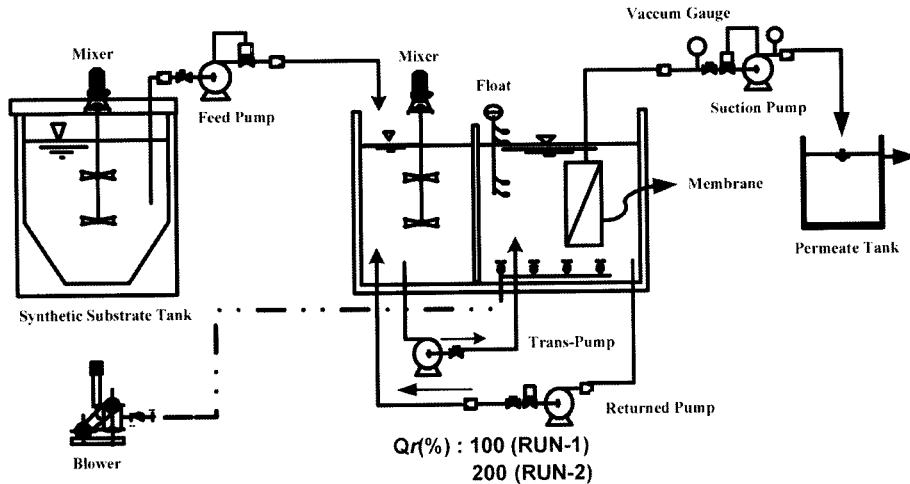


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험장치 및 재료

본 연구에 사용된 혼합 미생물종 슬러지는 하수종말처리장의 포기조 내 활성슬러지를 채취하여 약 30일간 fill and draw 방식으로 수리화적인 조건과 생물화적인 조건에 의해 배양하여 적응시킨 후 사용하였다.

Fig. 1에 본 연구에 사용된 실험실 규모의 반응조 모식도를 나타냈다. 반응조는 아크릴로 제작하였고, 막모듈은 반응조 내에 직접 침지하여 처리수를 획득하였다. 또한, 포기조내 막 모듈 하단부에 산기관을 설치하여 air를 주입시켰으며, 이 산기관을 통해 막면에 부착되는 물질의 제거와 포기조내의 용존산소를 유지시켰다.

실험에 사용한 분리막의 막모듈은 평막(flat-sheet type) 형태의 폴리에틸렌 재질과 유효 공경과 유효 막면적이 0.2 μm와 0.1 m<sup>2</sup>인 것을 사용하였다.

본 연구에서는 SMP특성을 검토하기 위하여 주탄소원으로 단일기질인 폐놀을 사용하였는데, 이는 저분자로서 쉽게 분해되기 때문에 정량화하는데 사용하였다. 질소원으로 NH<sub>4</sub>Cl을 사용하여 탈질에 따른 질소제거 특성을 살펴보았으며, Table 1에 나타냈다.

### 2.2. 실험 방법

실험의 운전조건을 Table 2에 나타냈다. 운전은 막투과 유속의 영향을 배제하기 위해 Flux를 10 L/m<sup>2</sup>/hr (LMH)로 일정하게 유지시킨 상태에서 내부 반송비의 변화에 따라 운전하였다. 처리수는 포기조에서만 흡입펌프를 이용하여 투과하도록 하였고, 탈질조는 교반기를 이용하여 반응조 혼합액을 완전 혼합시켰다. 반응조의 온도는 열 제어장치를 사용하여 유지하였고, 기질 주입은 peristaltic pump를 사용하여 일정하게 유입하고 송기량은 10 LPM으로 유지하였다.

Table 1. Composition of synthetic substrate

Contents	Concentration (mg/L)
Phenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)	600
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	80
NH <sub>4</sub> Cl	100
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	100
MnSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	9
FeCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	20
NaHCO <sub>3</sub>	666

Table 2. Experimental conditions

RUN	1-1*	1-2*	2-1*	2-2*
HRT (hour)	12		12	
Recycle ratio	100%(Q)		200%(2Q)	
Reactor Volume (L)	6	12	6	12
Aeration amount (LPM;L/min)	10		10	
Flux (LMH)	10		10	
Temperature (°C)	30	25	30	25
DO (mg/L)	0~0.5	6.5~7.5	0~0.5	6.5~7.5

\* 1-1 : Denitrification reactor on 100% (Q) in the internal recycle rate.

1-2 : Nitrification reactor on 100% (Q) in the internal recycle rate.

2-1 : Denitrification reactor on 200% (2Q) in the internal recycle rate.

2-2 : Nitrification reactor on 200% (2Q) in the internal recycle rate.

### 2.3. 분석방법

SMP 지표는 저분자 유기물인 폐놀이 1.0 mg/L 이하로 분해되었을 때 반응 혼합액의 TOC 농도(1.2 μm GF/C로 여과하여 0.45 μm의 membrane filter를 통과한 것)로 설정하였다.

TOC 분석은 TOC-5000A(Shimadzu)을 사용하고, E<sub>260</sub> 분석은 자외선 흡광 광도계(UV Spectrophotometer, Shimadzu)를 사용하였으며, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N은 Ion Chromatography(Dionex)를

사용하였다. 그 외는 Standard Method를 따랐다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. SMP 농도 변화

Fig. 2는 SMP와 흡입압력간의 관계를 나타내었다.

SMP 농도에 따른 흡입압력의 변화는 두 조건 모두 운전 초기에는 운전 경과 23일, 36일까지 100 mmHg 이하의 저압을 나타내며 유지하였으나 이후 급격히 증가하여 56일, 68일에는 최대 압력인 약 500 mmHg까지 도달하였다. 시간이 경과함에 따라 흡입압력이 증가한 이유는 반응조 내의 SMP가 계속적으로 포기조 내에 축적함에 따라 막오염 현상이 급속하게 진행되었다고 사료된다. 이는 SMP 성분이 막투과유속을 감소시키는 주된 물질이라는 보고(Chudoba, 1985)와 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 내부 반송비가 적은 반응조에서 SMP 농도가 빠르게 축적됨에 따라 이에 따른 막힘 현상도 빠르게 나타났다.

그러나 SMP 농도는 어느 시점에서부터는 증가하지 않고 점점 감소하는 경향을 나타낸 반면 흡입압력은 계속적으로 증가하는 경향이 나타났다. 이는 탈질에 의한 SMP 농도는 감소되었지만 연구 보고에 의하면 SMP 농도의 행태가 저분자에서 고분자 물질로 전환됨에 따라 압력 상승의 결과

를 초래하였다고 사료된다(Namkung et al., 1988).

위와 같이 SMP 농도가 난분해성으로 전환된 형태를 살펴보기 위해 본 연구에서는 난분해성 물질의 간접적인 척도로 측정이 되는 E<sub>260</sub>을 살펴보았다. E<sub>260</sub>은 난분해성 물질의 간접적인 척도로서 고분자 유기 물질인 생물 난분해성 성분이 자외선 흡광도인 260nm에서 발현하는 특성을 이용한 측정법(小松敏宏, 1994)이기 때문에 본 연구에서도 E<sub>260</sub>을 이용하여 SMP 성분 중 난분해성 물질을 검토하였다.

Fig. 3은 SMP와 E<sub>260</sub>의 상관관계를 나타내었다. E<sub>260</sub>값은 SMP 농도 증가와 유사한 형태를 나타내고 있으며 어느 시점부터는 SMP 농도는 감소되었지만 E<sub>260</sub>은 계속해서 증가된 형태를 나타냈다. 이는 SMP 성분이 최종적으로 생물 난분해성 물질로 전환됨을 알 수 있다.

Pribyl 등(1996)은 생물 처리에 있어서 처리수 내의 최종 대사 산물은 장기간 체류할 경우 유출수내에 존재하게 되어 유출수의 TOC 농도를 상승시키고 악영향을 주지만, 분리막을 이용한 생물 처리에서는 분리막의 차단 효과에 의해 중간 대사 물질은 계외로 투과되지 못하고 최종 대사 산물로 되어 대부분 유출수보다는 반응조 내에 잔류하여 난분해성 물질의 축적의 결과를 초래한다고 보고하고 있다.

Silva 등(1998)은 SMP 농도가 운전 초기에 비교적 저분자량으로 되어 있는 생물 난분해성 물질 중의 분리막의 분획 분자량 이상의 물질들은 계외로 투과되기도 하지만, 한편으로는 파울링이 되는 시점부터 반응조 내에 축적되게 된다. 막 투과수에서 발견되는 대사 산물은 대부분 저분자량의 미생물을 이용한 대사산물이며, 중간 대사 산물의 분

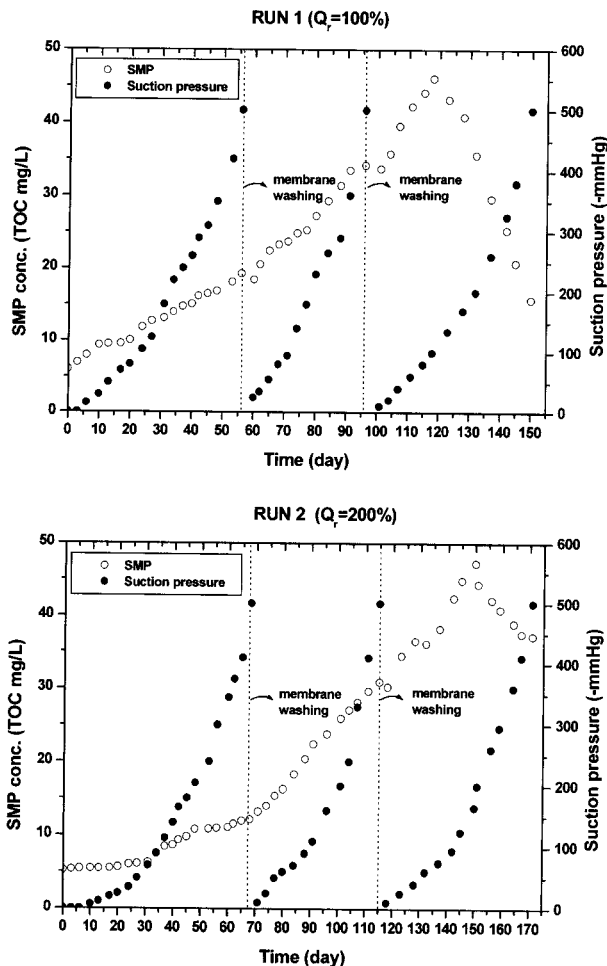


Fig. 2. Variation of SMP conc. and Suction pressure.

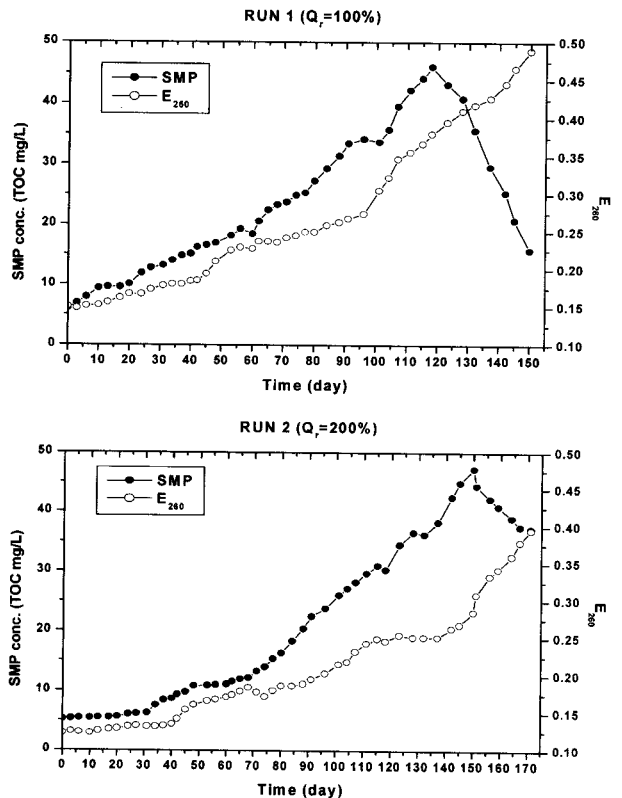


Fig. 3. Relationship between SMP conc. and E<sub>260</sub>.

해로서 생성되는 물질도 있다고 알려져 있다. 또한 이러한 생물 난분해성 대사 산물은 장시간 반응조 내에 체류할 경우 대부분 난분해성 고분자 물질로 전환하여 분리막 운전 에 상당한 영향을 주게 된다고 보고하고 있다.

이에 따라 본 연구에서도 시간의 경과함에 따라 SMP 농도가 어느 시점에서는 감소되고 있는 반면 난분해성물질의 척도인 E<sub>260</sub>이 증가추세로 나타나고 있어 저분자인 SMP농도가 고분자 난분해성 물질로 전환되었다고 판단할 수 있다.

3.2. SMP 농도와 질산화율과 탈질율의 관계

MBR 공정에서 간헐포기 방식은 호기와 무산소 상태의 교차를 지원할 수 있고 이로 인한 유입수 암모니아성 질소의 질산화와 탈질화를 획득할 수 있다. 또한 막분리 활성 슬러지 공정과 생물학적 탈질 과정의 혼합으로 이루어져 있다. 이로 인하여 질소 제거 효율이 높을수록 SMP 농도가 제어된다는 것을 보고하고 있다(Kikuchi et al., 1999). 이를 기초로 하여 전달질 후질산화 공법을 이용하여 내부 반송비에 따른 SMP 농도와 질소와의 관계를 알아보고자 Fig. 4에서 SMP 농도와 질산화율과 탈질율의 관계를 나타내었다. 두 반응조 모두 질산화율은 일정하게 유지된 반면 탈질율은 내부 반송비가 적을수록 비교적 낮게 나타났다. 이는 탈질에 필요한 유기물 성분이 부족하여 질산화에 의해 생성되는 질산성 질소가 탈질에 의해 제거되지 못하여 충분한 탈질이 이루어지지 않은 것으로 보고된 바와 같이 (Plisson-Saune et al., 1996) 본 연구에서도 내부 반송비가 적음에 따라 SMP 농도가 탈질원으로 부족하여 나타난 것으로 사료된다.

$$\text{질산화율} = \frac{C_{NH_4} \text{ in} - C_{NH_4} \text{ out}}{\Theta_h} \text{ (mgN/L} \cdot \text{h)}$$

$$\text{탈질율} = \frac{C_{NH_4} \text{ rem} - C_{NO_3} \text{ out}}{\Theta_h} \text{ (mgN/L} \cdot \text{h)}$$

- \* CNH<sub>4</sub> in = 유입수 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도 (mg/L)
- CNH<sub>4</sub> out = 유출수 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도 (mg/L)
- CNH<sub>4</sub> rem = (유입 - 유출) NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 농도 (mg/L)
- CNO<sub>3</sub> out = 유출수 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도 (mg/L)
- Θ<sub>h</sub> = 수리학적 체류시간 (hr)

본 연구에서는 내부 반송비에 따른 SMP 제어를 살펴보기 위해 탈질조를 별도로 설치하여 탈질율에 따른 SMP 농도의 변화를 살펴보고자 Fig. 5에 나타냈다. 두 반응조 모두 어느 시점까지는 탈질율이 감소하다가 다시 증가하는 형태로 나타났다. 이는 운전 초기 미생물에 의한 암모니아 분해 과정에서 생성되는 질산염의 형태를 탈질 미생물에 의해 제거가 미비하였다가 반응조의 막차단효과로 인해 미생물의 농축됨에 따라 탈질 미생물이 활발히 진행되어 탈질율이 증가한 것으로 사료된다.

탈질을 변화에 따른 SMP 농도는 내부 반송비가 적은 반

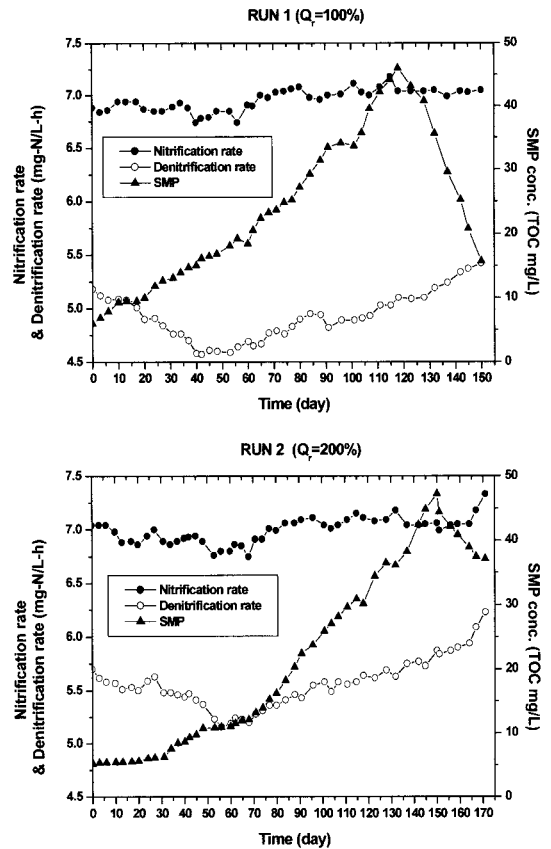


Fig. 4. Relationship between SMP conc. and Nitrification rate, Denitrification rate.

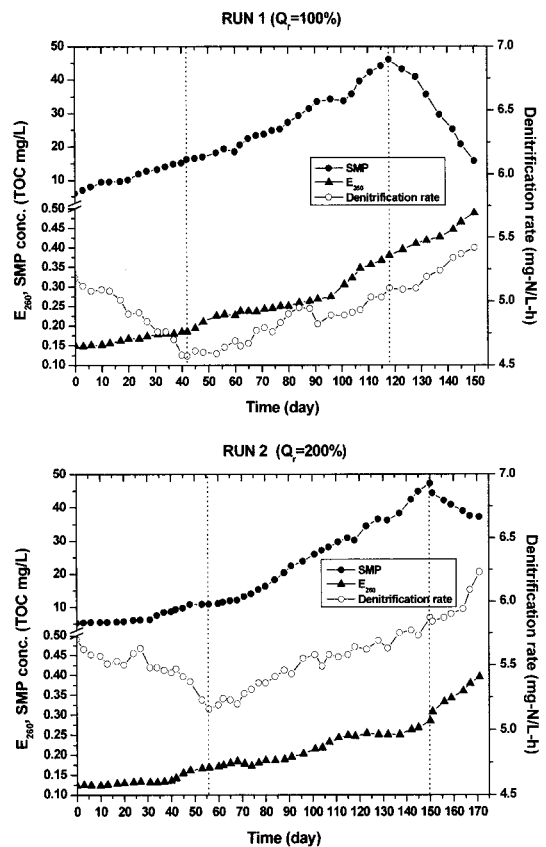
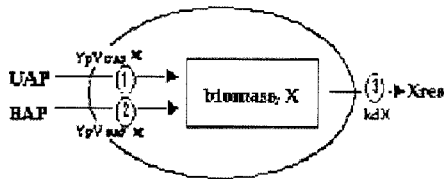


Fig. 5. Relationship between SMP conc. and Denitrification rate, E<sub>260</sub>.

응조에서 운전 120일 이후 탈질을 증가와 함께 SMP 농도는 급격히 감소된 형태를 나타내고 있다. 따라서 탈질율은 SMP 농도와 어느 정도 관계가 있다고 판단된다. 그러나 탈질 미생물이 SMP 농도를 탄소원으로 사용되기도 하지만 시간이 경과함에 따라 최종 대사산물인 SMP 농도가 난분해성 물질로 전환되고 또한 반응조 내에 계속 축적됨에 따라 막오염을 제어하기에는 쉽지 않다고 판단된다.

3.3. 동력학적 특성

SMP는 기질 대사로부터 형성되는 UAP(utilization associated product)와 기초 대사로부터 생성되는 BAP(biomass associated product)의 합으로 구성되며(Fig. 6), MBR 공정에 있어서 미생물과 기질, 그리고 생물대사산물에 대한 동력학식은 다음과 같이 표현할 수 있다.



- ① : Biomass synthesis is by utilization of substrate UAP.
- ② : Biomass synthesis is by utilization of substrate BAP.
- ③ : Formation of inert biomass from decay.

Fig. 6. Schematic of electron flow for UAP and BAP utilization.

1) 미생물 동력학

$$\frac{1}{X} \cdot [(S_i - S_s - S_p) \cdot D - \frac{dS}{dt}] \cdot Y = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} + k_d$$

2) UAP와 관련된 SMP 동력학

$$\frac{1}{X} \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{\alpha_{UAP}}{X} \cdot$$

$$\left( (S_i - S_s - S_p) \cdot D - \frac{dS}{dt} \right) Y + \beta_{UAP}$$

3) BAP와 관련된 SMP 동력학

$$\frac{1}{X} \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{\alpha_{BAP}}{X} \cdot \frac{dX}{dt} - \alpha_{BAP} \cdot k_d + \beta_{BAP}$$

- \* X : 미생물농도(mg · L<sup>-1</sup>)
- k<sub>d</sub> : 사멸속도(day<sup>-1</sup>)
- S<sub>i</sub> : 유입 기질농도(mg · L<sup>-1</sup>)
- S<sub>s</sub> : 포기조 기질농도(mg · L<sup>-1</sup>)
- S<sub>p</sub> : 유출 기질농도(mg · L<sup>-1</sup>)
- D : 희석율(day<sup>-1</sup>)

Y : 수율계수(mg-biomass · mg-sub strate<sup>-1</sup>)

P : SMP의 농도(mgTOC/L)

α : SMP 상수(mg SMP/mg cells)

β : SMP 상수(mg SMP/mg cells/day)

Table 3에 동력학적 상수를 나타냈다. 동력학적 적용 결과, 표 3에 나타냈듯이 비정상상태와 정상상태 모두 미생물의 성장수율은 내부반송비가 적을수록 미생물의 성장수율이 높게 나타났다. 그러나 사멸율의 경우, 내부반송비가 적을수록 높게 나타났다. 이는 내부 반송비가 적을수록 미생물의 증식과 사멸이 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

생물대사에 의해 생성되는 SMP의 동력학을 적용한 결과 기질대사에 의해 생성되는 UAP 값은 내부반송비가 높은 RUN 2가 높게 생성되었으며 반면 기초대사에 의해 생성되는 BAP의 값은 내부반송비가 낮은 RUN 1이 높게 나타났다. 이는 내부반송비가 적은 RUN 1 경우, 반응조내 유입되는 기질을 미생물들이 분해할 수 있는 시간이 충분함에 따라 기질대사에 의해 생성된 UAP 값들이 BAP로 전환되었다고 사료된다. 차 등(2001)은 기질대사에 의해 생성된 UAP도 내생단계에서 BAP로 전환됨을 보고하는 것과 유사한 결과이다.

시간 경과에 따른 미생물의 기질 분해와 대사산물이 형성되는 추이를 단계적으로 검토한다는 것은 미생물의 전반적인 분해 특성을 파악하기 위해서 필요하다.

Table 3. Kinetic parameter values at each experimental condition

	RUN 1		RUN 2	
	Unsteady	Steady	Unsteady	Steady
Y (mgMLSS/ mgTOC)	2.121	1.561	0.624	0.784
K <sub>d</sub> (1/day)	0.0091	0.0075	0.0004	0.0052
UAP (mgTOC <sub>p</sub> / mgTOC <sub>s</sub> )	0.00002	0.2527	0.0138	1.8195
BAP (1/day)	42.65	85.50	23.22	2.46
α (mgSMP/ mgcell)	42.65	85.25	23.23	0.6443
β (mgSMP/ cell/day)	0.0054	0.0129	0.0058	0.0092

동력학적 상수를 이용하여 내부 반송비에 따른 각 실험의 미생물 농도에 대한 실험값과 계산값을 Fig. 7에 나타내었다. 본 실험의 미생물 동력학적 적용 결과 MLSS의 실험값과 계산값은 거의 일치하는 경향을 나타냈으며, 내부 반송비에 따른 본 실험의 미생물 동력학에 대한 모델식 적용이 적합한 것으로 나타났다. 그러나 SMP에 대한 동력학적 표현은 본 연구에서 제시한 식을 이용한 결과 적합하지 않

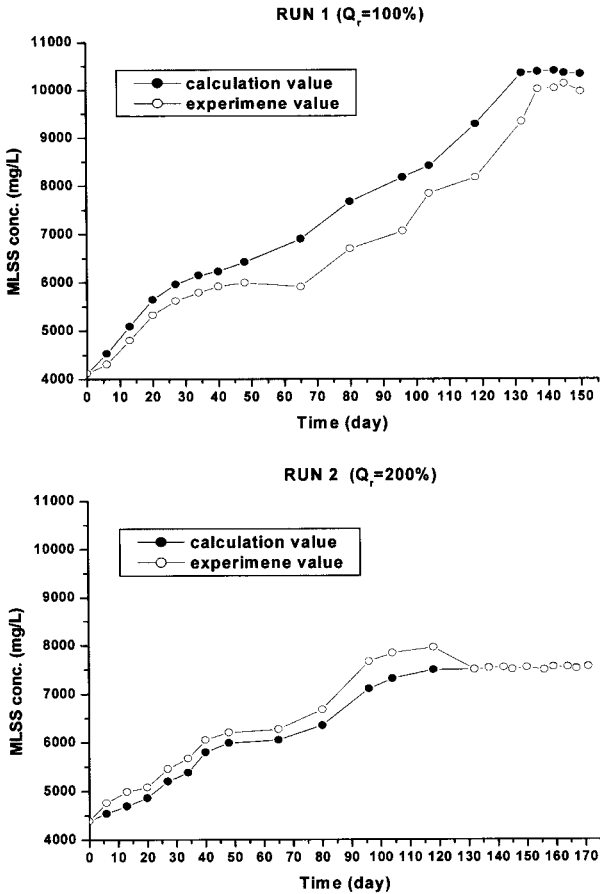


Fig. 7. Comparison of experimental and calculation MLSS conc. value.

아 동력학에 대한 모델식을 제시하지 않았다. 본 연구에서 제시한 SMP 동력학식은 포기조 상태에서의 단순 SMP 농도 변화를 이용한 식이므로 본 연구에서와 같이 탈질조를 이용한 동력학적 모델의 이용에는 적합하지 않았다. 이는 포기조의 SMP 농도가 탈질조에서 미비하지만 탄소원으로 이용되기 때문에 탈질조에 대한 SMP 감소 요인을 고려해야 된다고 사료된다. 또한 두 조건 모두 UAP 값이 감소하였으며, 내부 반송비가 적은 반응조에서는 SMP 농도가 UAP에서 BAP로 전환되면서 BAP 값이 큰 값을 나타내고 있다. 따라서 이에 대한 동력학적 모델이 추가되어야 한다고 사료된다.

#### 4. 결론

Lab scale의 실험을 통하여 침지형 막분리 활성슬러지 공정에서 내부 반송비 변화에 따른 생물대사성분의 제어 가능성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SMP 성분의 농축은 내부 반송비가 적은 반응조에서 계속적으로 축적되면서 반송비가 높은 경우보다 막힘 현상도 빠르게 나타났다.
- 2) 시간이 경과할수록 SMP 농도가 난분해성 물질로 전환되고, SMP 농도가 증가할수록 E<sub>260</sub>도 증가된 형태를 나

타났다.

- 3) 반응조 내 SMP 농도 축적은 질산화율과는 관련이 없었고, 반응 초기에는 탈질율과 상반된 관계를 보이고 있었으나, 어느 시점 이후부터는 SMP가 난분해성으로 전환됨에 따라 탈질율에 상관없이 E<sub>260</sub>에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 4) 내부 반송비가 적은 반응조에서 Y, K<sub>d</sub>, UAP, BAP 값이 반송비가 높은 경우보다 모두 낮게 나타났다.
- 5) 미생물 축적과 관련된 동력학식에서는 실험값과 계산값은 거의 일치하는 경향을 보여 본 실험에 대한 모델식 적용이 적합한 것으로 나타났다.
- 6) 내부 반송비에 따른 SMP 농도 제어는 어느 정도의 가능성을 보였지만, 장시간 운전시 SMP 성분이 축적되면서 난분해성 물질로 전환되어 계외로 투과되지 않았으며, 완전한 SMP 제어는 쉽지 않았다.

#### 사 사

본 연구는 2004년도 연세대학교 매직학술연구비의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

권택훈, 침지형 막분리 활성슬러지 공정에서 HRT에 따른 생물대사성분 특성, 원우논문집, 33, pp. 86-108 (2001).

차기철, 유영욱, 김동진, 유익근, MBR공정에서 유기물 부하율의 변화에 따른 SMP와 ECP의 거동, 대한환경공학회지, 26(2), pp. 211-218 (2004).

차기철, 이동열, 유익근, 김동진, 심진기, 침지형 막분리 활성오니법에 있어서 생물대사성분과 막오염의 특성, 대한환경공학회지, 22(9), pp. 1661-1670 (2000).

차기철, 황명규, 정형근, 김동진, 활성슬러지 공정에서 호기-무산소 조건변화에 따른 생물대사성분(SMP)의 분자량 분포 특성, 대한환경공학회지, 23(11), pp. 1803-1810 (2001).

小松敏宏, 膜分離を導入した嫌気性発酵に関する研究, 東北大学, 博士學位論文 (1994).

Boero, V. J., Bowers, A. R. and Eckenfelder, Jr. W. W., Molecular Weight Distribution of Soluble Microbial Products in Biological Systems, Water Sci. Technol., 34, pp. 241-248 (1996).

Chudoba, J., Quantitative Stimulation in COD Units of Refractory Organic Compounds Produced by Activated Sludge Microorganisms, Wat. Res., 19, pp. 37-43 (1985).

De Silva, D. G. V., Urbain, V., Abeyasinghe, D. H. and Rittman, B. E., Advanced Analysis of Membrane Bioreactor Performance with Aerobic-anoxic Cycling, Wat. Sci. Tech., 38(4-5), p. 505 (1998).

Duncan, J. B. and David, C. S., A Review of Soluble Microbial Products (SMP) in Wastewater Treatment Systems, Water Sci. Technol., 33(14), pp. 3063-3082 (1999).

Kikuchi, T., Saito, T. and Tansanka, K., Study on Simultaneous Nitrification and Denitrification using Immobilized Pellets,

- Proceedings of the 7th IAWQ Asia-Pacific regional conference, pp. 505-510 (1999).
- Mulder, M., Basic Principle of Membrane Technology, Kluwer Academic Publisher, pp. 281-311 (1991).
- Namkung, E. and Rittmann, B. E., Effects of SMP on Biofilm-Reactor Performance, *J. Envir. Eng. Division*, **1**, pp. 199-209 (1988).
- Parkin, G. F. and McCarty, P. L., Characteristics and Removal of Soluble Organic Nitrogen in Treat Effluents, *Prog. Water Tech.*, **7**(3-4), pp 435-445 (1975).
- Plisson-Saune, S., Capdevile, B., Mauret, M., Debuin, A. and Baptiste, P., Real-Time Control of Nitrogen Removal using Three ORP Bending Points : Signification, Control Strategy and Results, *Wat. Sci. Tech.*, **33**(1), pp. 275-280 (1996).
- Pribyl, M., Tucek, F., Wilderer, P. A. and Wanner, J., Amount and Nature of Soluble Refractory Organic Produced by Activated Sludge Microorganisms in SBR and Continuous Flow Reactors, *Water Sci. Technol.*, **35**(1), pp. 27-34 (1996).