

회분여과방식을 통한 생물대사산물의 분자량 분포 특성 평가

정태영·차기철[†]·이영무*·한상국**

연세대학교 환경공학부, *한양대학교 공과대학 응용화학 공학부, **목포해양대학교 해양시스템 공학부
(2002년 1월 31일 접수, 2002년 3월 11일 채택)

Valuation of Molecular Weight Distribution Characteristics of Soluble Microbial Products(SMP) Using the Batch Filtration Test

Tae Young Jeong, Gi Cheol Cha[†], Young Moo Lee*, and Sang Kuk Han**

Division of Environmental Engineering, Yonsei University

*Division of Chemical Engineering, College of Engineering, Hanyang University

**Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University

(Received January 31, 2002, Accepted March 11, 2002)

요약 : 본 연구에서는 회분여과방식을 이용하여 부하율에 따라 생성되는 생물대사성분의 특성 및 분포를 관찰하였다. 실험에 사용된 기질은 단일탄소원인 phenol을 사용하였으며, 분자량 분포실험을 위해서 분자량이 각각 30K, 100K Dalton 및 0.45 μm membrane filter를 이용하여 구하였다. 페놀농도가 120, 230 및 440 mg/L일 때 비기질이용율(q)은 각각 0.639, 1.281, 1.744 (mgTOC/mg MLSS/day)로 나타났으며 Run C에서 가장 높은 이용율을 나타냈다. 내생단계에서 미생물의 사멸율(k_d)은 각각 0.0536, 0.0661, 0.0749(day^{-1})이며 생성계수(SMP_c)는 각각 0.006, 0.0058, 0.0057(day^{-1})로 나타났다. 초기 유입된 기질이 기질분해에 의해 생성된 SMP_s 로 분해되어지며, 시간경과에 따라 SMP_{nd} 로 진행됨을 알 수 있었다. 기질분해 완료 후 미생물의 내생단계에 접어들면서 SMP_c 성분으로 전환되었다. 유입부하율에 따른 분자량 분포 측정결과는 운전시간이 경과함에 따라 점차 저분자 물질이 고분자의 난분해성 물질로 전환되었다.

Abstract : The formation of soluble microbial products(SMP) and molecular weight distribution on loading rate were observed in batch-type culture medium, which phenol was fed as a substrate. The molecular weight distribution was obtained by using 30K, 100 K Dalton and 0.45 μm membrane filters. When the phenol concentration as a substrate was 120, 230 and 440 mg/L, the specific substrate utilization rate(q) showed 0.639, 1.281 and 1.744 mgTOC/mgMLSS/day, respectively. The endogenous biomass decay rate constant(k_d) at each substrate concentration was 0.00536, 0.0661 and 0.0749(day^{-1}), respectively. The SMP_c product rate constant(k_{SMP_c}) showed 0.006, 0.0058 and 0.0057(day^{-1}), respectively. The initial influent substrate during the course of time degraded and produced SMP_s . The SMP_s was converted to the SMP_{nd} and endogenous phase converted to the SMP_c ingredients. The molecular weight distribution on loading rate was converted to a higher MW during the course of time.

Keywords : soluble microbial products, loading rate, MW distribution, endogenous respiration, phenol

[†]주저자(e-mail : gccha@dragon.yonsei.ac.kr)

1. 서 론

최근 활성슬러지 공정에 막분리 기술을 도입한 MBR 공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 고도처리를 위한 하·폐수 및 분뇨 처리장에서 많이 요구되어지고 있다. 이러한 MBR공정은 생물학적 유기물 분해와 물리적 막분리공정을 결합한 공정으로서, 분리막 부분이 생물반응기와는 별도로 설치되는 기존의 순환형 공정(crossflow membrane bioreactor process)과 생물반응기 내부로 포함되는 침지형 공정(submerged membrane bioreactor process)으로 분류할 수 있다.

초기에는 포기조 외부에 분리막 모듈을 설치하고 가압 펌프로 포기조 혼합액을 분리막 모듈로 운송하여 순환시켜 운전하는 외압형 방식(external membrane type)이 많이 사용되었으나, 최근에는 분리막 모듈을 포기조 내부에 설치하여 처리수를 흡입(suction)여과하는 침지형 방식(internal membrane type)의 사용이 점차 증가하고 있는 실정이다[1].

폐수처리에 있어서 막분리 기술의 도입은 처리효율 및 공정의 안정성과 신뢰도 등 여러 가지 많은 장점을 가지고 있지만, 한정된 분획분자량(MWCO)으로 인한 반응조 내의 용해성 성분의 축적과 이로 인해 발생하는 막오염 현상(fouling)에 기인한 막투과 유속의 감소는 막분리 활성슬러지 공정(MBR)의 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다[2]. 이러한 fouling 현상은 여과저항을 상승시켜 결국에는 막의 투과유속을 낮출 뿐 아니라 체류 시간에 변화를 주어 미생물의 세포 성장에 영향을 미치는 것이 알려져 있다[3].

Beoro 등[4]은 생물반응기중이나 유출수 중에 존재하는 유기화합물들은 유입원수에 포함된 물질보다는 생물대사에 의해 좌우되며, 이러한 유기물질들의 대부분은 생물대사산물에 근원한다고 보고하고 있다. 이러한 대사산물을 총괄적으로 생물대사성분(SMP, soluble microbial products)[5]로 표현되며, 생물 대사 과정에서 생성한 SMP는 humic과 fulvic acid, polysaccharides, proteins, fragments of DNA, antibiotics, steroids, enzymes 등 세포의 대사 과정과 용해로 구성된 여러 가지 형태의 수천 이상의 고분자 유기 화합물로 되어 있다[6]. 그리고 MBR공정에서 SMP는 막 공정의 폐색을 유발하고, 막면 gel층 형성에 기여하여 막 투과 유속의 저하에 직접적인 원인이 되는 동시에 막의 분획분자량 이상의 물질들은 반응조내에 축적되는 경향을 보이며, 반응조내 점도를 증가시켜 결국 막의 여과저항을 증가시키며[7] 미생물 활성의 저해작용을 일으키는 동시에 THM 등의 전구물질이 되는 것으로 보고되고 있다[8]. Figure 1은 생물학적 처리 공정에서

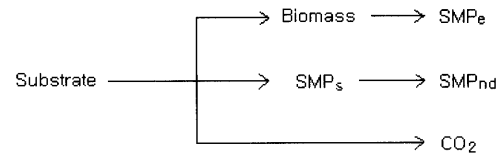


Fig. 1. SMP formation in biological treatment process.

반응액 중에 존재하는 SMP의 형성[9]을 나타냈다.

SMP는 기질 대사(substrate metabolism)로부터 형성되는 UAP(utilization associated product)와 기초 대사(basal metabolism)로부터 생성되는 BAP(biomass associated product)의 합으로 구성되어 있다[9-11]. Figure 1에서 보듯이 초기 기질이 유입되면 기질분해에 의해 생성되는 중간 대사 산물(SMP_s)로 분해되어 가고 이러한 SMP_s는 생물해성을 갖지 않는 즉 생물난분해성인 최종 대사 산물(SMP_{nd})이 형성되어진다. 또한, 미생물의 자산화 및 사멸에 의해 생성되어지는 생물난분해성 물질인 최종 대사산물(SMP_e)로 생성되는 단계를 보여주고 있다.

또한, 생물학적 폐수처리공정에 있어서 이러한 용해성 생물대사산물은 고분자의 유기물질인 생물난분해성 대사산물로서 막투과유속 감소의 주요 원인 뿐만 아니라 미생물 활성도 등 생물대사반응 자신에 복잡한 영향을 가져다 줄 수 있다. 이러한 SMP의 변화에 대한 연구는 최근 들어 많은 연구가 진행되고 있지만, 유입 부하량에 따라 생성되는 SMP의 농도변화에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유입부하량에 따른 SMP의 농도 변화를 회분여과실험을 통해 SMP_s, SMP_{nd}, SMP_e의 분포를 알아보고 이에 따른 분자량 분포를 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 방법

Figure 2는 본 연구에서 사용된 회분식 배양기와 분자량분포 측정을 위한 장치의 모식도를 나타냈다. 기질은 정확한 미생물 대사 활동과 기질분해 특성을 살펴보기 위해 실험수 대신 저해요소 및 난분해성 물질을 포함하지 않은 인공기질을 사용하였다. 인공기질은 Phenol을 탄소원으로, 질소원으로는 NH₄Cl을 사용하였고, NaHCO₃를 pH buffer로 이용하였다. 실험에 사용된 기질조건은 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 회분식 배양기는 4 L 용적 삼각플라스크를 사용하였으며, 포기는 10 L/min의 공기를 연속적으로

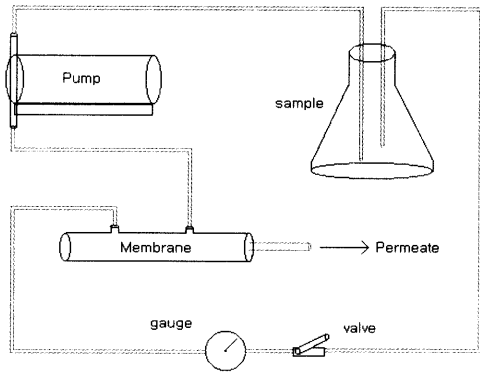


Fig. 2. Schematic diagram of molecular weight distribution apparatus.

Table 1. Composition of Synthetic Wastewater

Components	Concentration (mg/L)
KH ₂ PO ₄	80
NH ₄ Cl	50
MgSO ₄ ·7H ₂ O	100
MnSO ₄ ·7H ₂ O	9.0
FeCl·6H ₂ O	1.0
CaCl ₂ ·2H ₂ O	20
NaHCO ₃	625

Table 2. Experimental Conditions

Run	A	B	C
Phenol(mg/L)	120	230	440
TOC loading rate ^{a)}	0.04	0.074	0.138
MLSS(mg/L)	2300	2390	2435

a) : mgTOC/mgMLSS

산기관을 통해 고르게 공급시켰다. 미생물은 W시 소재 하수종말처리장의 포기조내 슬러지를 채취하여 약 30일 동안 실험 조건과 동일하게 적응 후 실험에 사용하였다. 기질주입은 1회 투입 후 어떠한 외부원을 주입하지 않았다.

실험에 사용된 phenol의 양과 부하율 그리고 초기 MLSS의 조건은 Table 2에 나타냈다. 본 연구에서 사용된 기질은 단일탄소원인 phenol을 사용하였는데 이는 분자량이 94인 Phenol이 저분자 유기물로서 쉽게 분해되기 때문에 생물대사성분을 정량하는데 사용하였다. 반응조 혼합액의 phenol 농도가 1mg/L 이하로 분해되었을 때, 0.45 μm의 membrane filter를 통과한 TOC 농도를 SMP(Soluble Microbial Products)로 정의하였다[12].

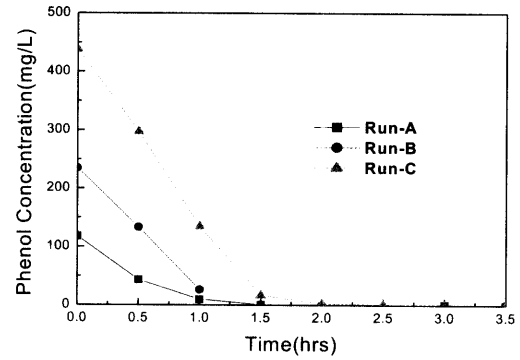


Fig. 3. Degradability of substrate for operating time at each run.

각 SMP의 분자량 분포를 살펴보기 위해 분자량이 각각 30 K, 100 K Dalton인 중공사막과 0.45 μm의 공경을 갖는 membrane filter 등 3가지 종류의 분리막을 사용하였다. 분자량 분포는 시간이 경과함에 따라 반응조의 상등액을 채취해 위의 3가지 막을 통과한 sample의 TOC 농도를 사용하여 분석하였다. 생성되는 SMP의 대한 분류는 다음과 같이 실시하였다.

SMP_s는 초기 기질이 투입되어 phenol의 농도가 완전히 0에 근접(1mg phenol/L 이하)하였을 때 반응조의 TOC의 농도를 사용하였으며, SMP_{nd}는 기질 분해에 의한 SMP_s가 분해되어 더이상 SMP성분이 반응조에 남아 있지 않은 상태의 TOC 농도로 사용하였다. 그리고 SMP_e는 내생단계에 접어들면서 반응조내 MLSS의 감소가 진행되기 시작되는 시점을 기준으로 하였다. 또한, 반응조 상등액의 TOC 농도가 증가되는 시점에서 반응조 상등액의 TOC 농도가 최저점일 때의 값(SMP_{nd})을 영(0)점으로 보정해 주었다[13]. 기질 분해 특성을 살펴보기 위해 phenol측정은 direct photometric method로 TOC 측정은 TOC-5000 analyzer(Shimadzu)를 사용하였다.

따라서 본 실험의 초기 MLSS는 Run-A, B, C 각각 2300, 2390, 2435 mg/L로 시작하여 기질을 반응조에 투입한 후 batch식으로 운전하여 각 SMP 즉, SMP_s, SMP_{nd}, SMP_e의 변화와 이에 따른 분자량 분포를 알아보기 위하여 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 3은 각 조건에 따른 기질 분해 특성을 나타내었다. Figure 3에서 보듯이 기질 분해는 매우 짧은 시간 안에 분해됨을 보여주고 있으며 각 조건에서도 분해되는 시간의 차이는 크게 나타나지 않음을 보여

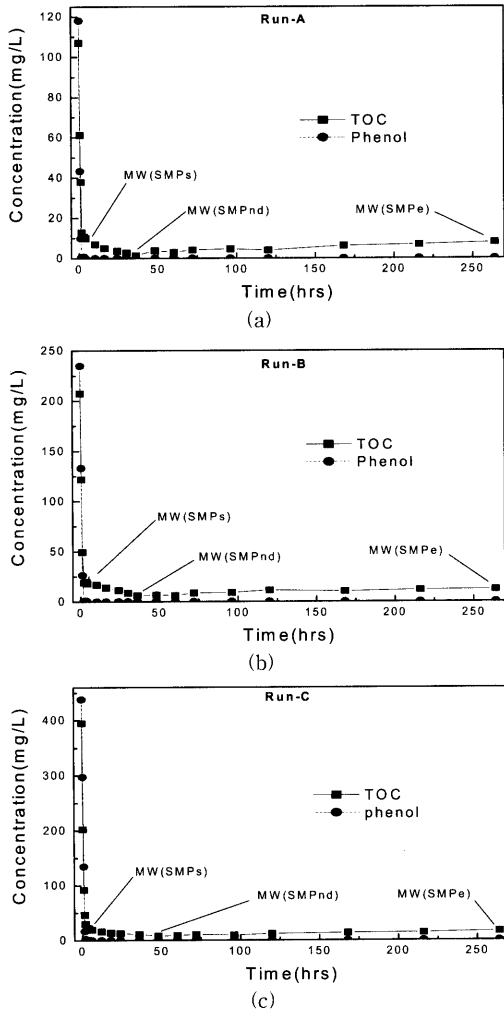


Fig. 4. Variation of TOC and Phenol (a) Run-A, (b) Run-B, (c) Run-C.

주고 있다. 이를 통한 미생물에 의한 기질농도의 변화는 다음 식 (1)으로 표현할 수 있다[14].

$$q = \frac{dS/dt}{X} \quad (1)$$

여기서 dS/dt 는 기질 이용율(mg TOC/L/day)이며 q 는 비기질 이용율($\text{mg TOC/mg MLSS/day}$), X 는 미생물의 농도(mg/L)이다.

따라서 식 (1)을 이용하여 각 단계에서의 비기질 이용율(q)은 각각 0.639(Run A), 1.281(Run B), 그리고 1.744 day^{-1} (Run C)로 나타났다. 따라서 부하율이 높을수록 비기질 이용율은 높게 나타났으며, 이는 유

입기질이 높을수록 미생물에 의한 기질분해는 매우 용이함을 보여주고 있다고 사료된다.

Figure 4에는 시간의 변화에 따른 TOC와 phenol의 농도변화를 나타내었다. 부하량에 따른 기질의 TOC 농도는 Run-A, B, C 각각 약 92, 176, 337 mg/L 이다. Figure 3에서 보듯이 phenol의 농도는 점차 감소하여 Run-A와 B는 기질 투입 후 1.5시간 이후, Run-C는 2.5시간 이후에 1 mg/L 이하로 분해됨에 따라 이후의 TOC 농도를 생물대사에 의한 농도임을 보여주고 있다. 따라서 이 시점부터 본 연구에서 나타내고 있는 SMP 농도를 규정할 수 있음을 보여주었다.

또한, 위에서 언급했듯이 SMP의 형성과정에 따라 phenol이 1 mg/L 이하의 농도로 됨에 따라 초기 기질분해에 의한 즉, 생분해성을 갖는 중간대사산물인 SMP_s 가 생성되며, 시간이 경과함에 따라 SMP_s 가 분해되어 최종대사산물인 SMP_{nd} 로 즉, 난분해성 물질이 생성됨을 보여주고 있다. 이러한 기질분해에 의해 난분해성 물질이 끝나게 되면 미생물의 내생단계에 이르게 된다. 이러한 내생단계는 미생물의 용출·사멸에 의해 난분해성 물질인 SMP_e 가 생성됨을 보여주고 있다. 따라서 Run-A, B, C 모두의 TOC 농도변화는 초기 기질분해에 의한 SMP_s 성분이 나타나고 다시 SMP_s 가 분해됨에 따라 감소하는 형태임을 알 수 있으며, 다시 미생물의 내생호흡에 의하여 SMP_e 가 증가한다는 것을 알 수 있다.

따라서 기질분해에 의한 SMP_s 는 초기 TOC 농도에 비하여 각각 11.94, 9.12 그리고 5.78%가 SMP_s 로 전환됨을 알 수 있었으며, 이 SMP_s 는 다시 분해되어 SMP_{nd} 로 전환되어지는데 이는 각각 3.6, 3.3 그리고 2.1%로 SMP_s 의 값에 비해 감소되는 것으로 보아 SMP_s 가 다시 분해됨을 나타내고 있다. 이러한 이유는 SMP_s 가 대부분이 생물분해가 가능한 유기화합물로 이루어졌기 때문이라 사료된다.

Figure 5에는 미생물이 내생호흡에 들어가는 시기인 48시간부터의 MLSS 농도와 SMP_e 농도의 변화를 나타내었다. Figure 4에서 보는 바와 같이 내생호흡 단계에서는 보여주는 MLSS농도와 SMP_e 의 농도 변화는 기질이용단계와는 달리 매우 느리게 진행되며 대사산물이 서서히 생성됨을 보여주고 있다. 또한, 시간에 따른 미생물의 변화는 일차반응으로 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$X_t = X_0 \cdot e^{-k_d \cdot t} \quad (2)$$

여기서, dX/dt 는 단위시간당 감소하는 미생물의 양 (mg/L/day), X_0 는 내생단계에서 초기 미생물농도

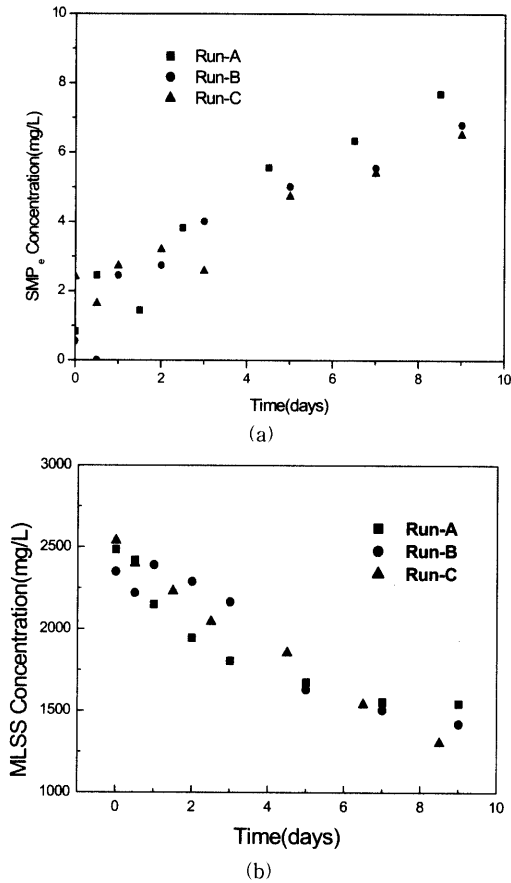


Fig. 5. Variation of (a) SMP_e concentration, (b) MLSS concentration.

(mg/L), k_d 는 미생물 사멸계수(day^{-1}), 그리고 t 는 운전시간(day)이다. 또한, 내생단계에서 생성되는 SMP_e는 다음 식 (3)과 (4)로 표현할 수 있다[4].

$$\frac{dSMP_e}{dt} = Y_{SMP_e} \cdot X \cdot k_d \cdot X_0 \quad (3)$$

$$\frac{dSMP_e}{dt} = k_{SMP_e} \cdot X_0 \quad (4)$$

여기서, $Y_{SMP_e \cdot X}$ 는 단위 미생물의 분해에 따른 내생 SMP생성량($\text{mgSMP}_e/\text{mgCell}$)이며, $k_{SMP_e} (= Y_{SMP_e} \cdot X \cdot k_d)$ 는 내생단계에서의 순수 SMP_e 생성율(day^{-1})이다.

위의 수식들을 이용하여 내생단계에서 미생물의 사멸계수와 SMP_e의 동력학적 인자(k_{SMP_e})를 산출한 값을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Parameters of kinetic at endogenous respiration

	Run A	Run B	Run C
k_d (day^{-1})	0.0536	0.0661	0.0749
k_{SMP_e} (day^{-1})	0.006	0.0058	0.0057

내생단계에서의 미생물 농도는 초기 2,400 mg/L에서 점차 감소하여 Run-A, B, C 각각 1,500, 1,400, 1,300 mg/L까지 감소하였으며, 식 (2)을 통한 미생물 사멸계수(k_d)는 부하량이 높을수록 계수값이 높게 나타났다. 또한, 식 (4)를 통해 SMP_e의 생성율은 부하율이 낮을수록 그 생성량이 많음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 부하율이 낮은 미생물에 비해 높은 부하율에 적응된 미생물들이 기질소비가 급격히 진행됨에 따라 사멸율은 높게 나타난 반면 SMP_e의 생성량은 적게 나타나고 있다고 사료된다. 따라서 연속포기식에서 부하율에 따른 미생물의 내생호흡단계에서 생성되는 SMP_e는 낮은 부하율일수록 점차 증가되어져 미생물의 활성과 유출수 수질에 악영향을 가져다줄 수 있다고 사료된다.

Figure 6은 각 단계에서 반응조의 상등액에 존재하고 있는 SMP_s, SMP_{nd}, SMP_e의 분자량 분포 변화를 나타낸 그림이다. 대사과정 속에 생성되는 SMP_s, SMP_{nd}, SMP_e의 분자량 분포변화 측정 시기는 기질인 phenol이 분해될 때(SMP_s), 미생물이 감소하며 TOC 농도가 증가하기 전(SMP_{nd}), 그리고 실험종료 후(SMP_e)에 각각 행하였다.

Figure 6에서 보듯이 SMP성분에 따른 각각의 분획분자량의 막을 통해 관찰된 분자량 분포는 초기 기질분해에 의한 대사산물의 경우(Figure 6-a), 전반적으로 30 K dalton 이하의 저분자량 분포가 대부분 차지하고 있으며, 순차적으로 분자량 분포가 되어 있음을 보여주었다. 하지만 기질 분해의 산물이 분해되는 시점에서(Figure 6-b), 30 K dalton 이하의 저분자가 감소되고 0.45 μm 이상의 고분자 물질이 증가된 현상을 보여주고 있어 이는 SMP_s가 분해되면서 SMP_{nd}로 진행되어가고 있음을 사료된다. 또한, 내생단계에서는(Figure 6-c) 시간이 지날수록 30 K dalton 이하의 저분자 물질은 감소되고 0.45 μm 이상의 고분자물질이 더욱 생성되는 것으로 나타났다. 또한, Run-A의 경우 즉, 부하량이 낮은 조건에서는 초기 시간 경과 후 기질분해에 의한 SMP_s 물질이 빠르게 분해되어 SMP_{nd}로 전환됨을 나타내었다. 반면 Run-B와 Run-C의 경우는 초기 SMP_s 물질이 SMP_{nd}로 분해되어 가는 과정이 Run-A와는 비교적

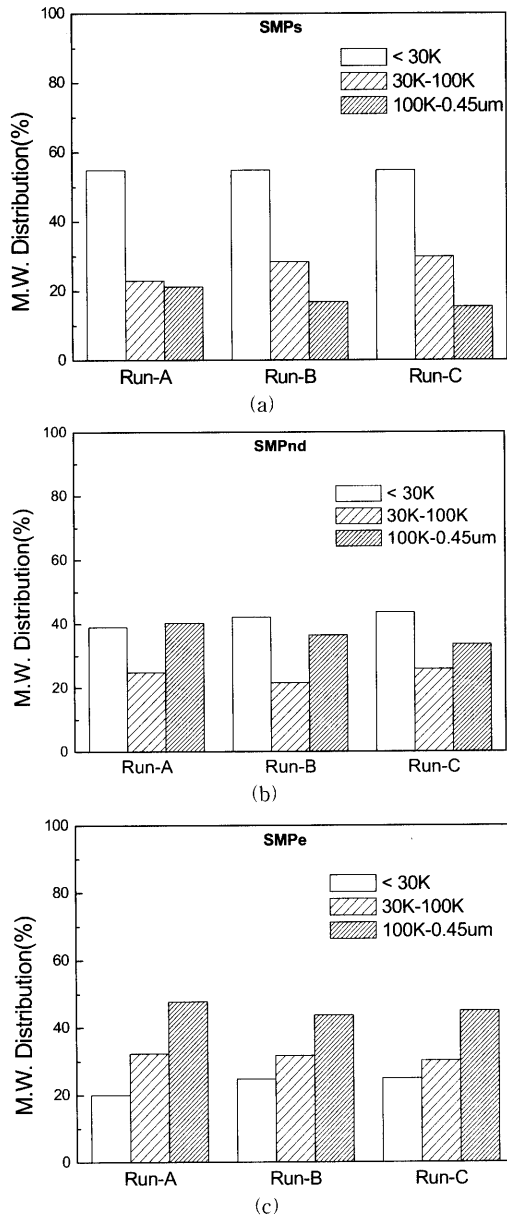


Fig. 6. Molecular weight distribution (a) SMP_s , (b) SMP_{nd} , (c) SMP_e .

느리게 SMP_{nd} 로 전환되는 것으로 나타내었다. 이는 기질분해에 의해 생성된 SMP_s 성분이 Run-B나 Run-C에 비하여 낮은 부하율로 인해 SMP_s 성분이 SMP_{nd} 로 빨리 분해됨에 따라 고분자 물질로 전환되었다고 사료된다. 반면, Run-B와 C의 경우에는 Run-A보다는 높은 부하율에 의해 기질분해에 의한 SMP_s 성분이 남아 있어 같은 시간대에 나타나는 분자

량 분포가 낮게 보여주고 있는 것으로 사료된다.

따라서 너무 낮은 부하율에는 미생물이 분비되는 대사산물이 고분자로 빨리 전환되어짐을 알 수 있으며 이는 미생물 활성에서도 큰 영향을 미칠 것이라 보고 적절한 부하율을 유지하는 것이 효율적인 처리 방식에 유리하다고 판단된다. 또한, 초기 SMP_s 의 생물대사물질은 최종적으로 생물 난분해성 물질인 SMP_{nd} 와 SMP_e 로 존재하게 되며, 이러한 난분해성 물질은 분리막의 차단효과로 인해 장시간 체류할 경우 대부분 고분자의 난분해성 물질로 존재하여 막투과 유속의 감소에 결정적인 영향을 미치게 되는 것이라 사료된다.[4,14]

4. 결 론

부하율에 따른 각 생물대사산물(SMP)의 형성과 분자량 분포 특성에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기질분해에 의해 SMP_s , SMP_s 성분의 분해에 의해 SMP_{nd} 그리고, 미생물의 내생호흡에 의해 SMP_e 성분이 생성됨을 확인할 수 있었다.
2. 각 조건에서 비기질이용율(q)은 각각 0.639(Run A), 1.281(Run B), 그리고 1.744 day^{-1} (Run C)로 나타나 부하율이 높을수록 높게 이용되었다.
3. 각 조건에서 사멸계수와 SMP_e 의 생성량은 부하율과는 달리 반대 현상이 일어났다 이는 기질소비가 급격히 진행됨에 따라 부하율이 높은 조건에서는 미생물이 사멸되는 속도가 빠르게 진행되었으며, 반면 높은 부하율일수록 SMP_e 의 생성율은 낮게 나타나고 있다.
4. 분자량 분포 측정결과 운전시간이 경과함에 따라 점차 저분자 물질이 고분자의 난분해성 물질로 전환되었으며, 부하율이 낮은 단계에서 대체적으로 높은 분자량분포를 보여주고 있어 초기 SMP_s 의 분해가 빠르게 SMP_{nd} 로 도달되어 고분자로 전환되었다.

감 사

본 연구는 일부 BK21 연구비 지원과 일부과학재단 목적기초연구(R02-2000-00349)지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCE

1. K. Brindle, and T. Stephenson, "The application of membrane biological react or for the treatment of wastewaters," *Biotech & Bioeng*, **49**, 601 (1996).
2. 深川勝之ら, "膜分離活性汚泥法における限外過膜の日詰まり物質に関する研究," *水環境學會誌*, **28**, 125 (1992).
3. M. Mulder, "Basic principle of membrane technology," Kluwer Academic Publisher, (1991).
4. V.J. Boreo, et al., "Soluble microbial product formation in biological systems," *Water Science and Technology*, **23**, 1067 (1991).
5. M. Pribyl, F. Tucek P. A. Wilderer, and J. Wanner, "Amount and nature of soluble refractory organics produced by activated sludge microorganisms in SBR and continuous flow reactors-A comparative study," *First IAWQ specialized conference on Sequencing Batch Reactor Technology* (1996).
6. J. Chudoba, "Quantitative estimation in COD units of refractory organic compounds produced by activated sludge microorganisms," *Wat. Res.*, **19**, 37 (1985).
7. G. F. Parkin and P. L. McCarty, "Production of soluble organic nitrogen during activated sludge treatment," *J. Wat. Pollut. Control. Fed.*, **53**, 99 (1981).
8. S. G. Lu, T. M. Imai, M. Ukita, and M. Sekine, "A model for membrane bioreactor process based on the concept of formation and degradation of soluble microbial products," *Wat. Res.*, **35**(8), 2038 (2001).
9. E. Namkung and B. E. Rittmann, "Soluble microbial products(SMP) formation kinetics by biofilms," *Water Science and Technology*, **20**, 795 (1986).
10. D. J. Barker and D. C. Stuckey, "A review of soluble microbial products(SMP) in wastewater treatment systems," *Wat. Res.* **33**, 3063 (1999).
11. E. Namkung, E. Bruce and B. E. Rittmann, "Effects of SMP on biofilm-reactor performance," *J. Envir. Eng. Division*, **144**, 199 (1988).
12. 柳根勇ら, "膜分離活性汚泥法における膜透過性能に対する 生物代謝成分の影響," *水環境工學研究論文集*, 第**20**卷, 第7号, 473 (1997).
13. 차기철, 황명구, 정형근, 김동진, "활성슬러지 공정에서 호기-무산소 조건변화에 따른 생물대사산물(SMP)의 분자량 분포 특성," *대한환경공학회*, **23**, 1803 (2001).
14. L. D. Benefield and C. E. Randall, "Biological process design for wastewater treatment. Englewood cliffs," Prentice-Hall Inc. (1980).