
호기성 생물반응조에 있어서 침지형 분리막의
오염특성과 혐기성 생물반응조에 있어서 침지형
분리막의 응용

차 기 철 교수(연세대)

호기성생물반응조에 있어서 침지형분리막의 오염특성과 혐기성생물반응조에있어서 침지형분리막의 응용

차기철

연세대학교 환경공학과

1. 서론

분리막의 fouling현상으로 인한 막투과 유속의 감소는 투과 유량을 낮출 뿐 아니라, 체류 시간에 변화를 주어 미생물의 세포 성장에 영향을 미치는 것이 알려져 있다.¹⁾

생물반응조내에서 용해성 성분은 생물 대사 과정에서 생성된 용해성 생물 대사 성분(Soluble Microbial Product, SMP)으로 humic과 fulvic acid, polysaccharides, proteins, fragments of DNA, antibiotics, steroids, enzymes등 세포의 대사 과정과 용해로 구성된 여러 가지 형태의 수천 이상의 고분자 유기 화합물로 되어 있다.²⁾ 막분리 활성오니 공정에서 생성된 생물 대사 성분들 중 막의 분획 분자량 이상의 거대 분자는 막의 차단 효과로 인하여 반응조내에 축적되며, 막면의 부착층 형성에 따른 막의 공경의 감소로 저분자까지 반응조내에 축적하여 미생물의 활성과 미생물의 대사과정에 영향을 주게 된다³⁾, 또한 SMP는분리막을 오염시키는 물질과 관련이 있다고 알려져 있지만, SMP의 축적이 침적형 막분리 활성오니 공정에 있어서 막 투과 유속에 미치는 영향과 분리막의 오염에 관련한 기초자료는 부족한 실정으로서 본 연구는 평막을 활성오니공정의 포기조내에 침적하여 분리막의 오염특성을 검토하였으며, 아울러 중공사막을 혐기성소화조내에 침적한 경우의 분리막의 응용가능성과 소화효율의 특성 등을 검토하였다.

<호기성 생물반응조>

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험 장치의 공정도는 활성오니공정으로서 유효 용적이 12L인 직사각형 모형의 아크릴로 제작하였으며, 반응조의 온도는 25℃로 유지하였다. 실험에 사용한 기질은 저분자량의 유기물인 phenol을 주성분으로 하였다. 사용된 분리막은 Y사에서 제조한 평막을 이용하였다.

2.2 실험 방법

분리막 운전은 조건에 따라서 연속과 간헐 흡입 방식으로 나누어 운전하였다. 즉, 간헐식 흡입하는 방식인 10분 흡입 - 5분 정지 시간으로 운전하였으며, 생물 대사 성분의 정량에 관해서는 반응조내 혼합액이 phenol농도 1.0mg/L이하로 완전히 분해되었을 때, 그 혼합액의 TOC 농도를 (0.45 μ m의 membrane filter로 통과한 것) SMP 지표로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.2.1 반응조 혼합액의 SMP 축적 농도 및 구성 성분의 축적 거동

Fig. 1에 연속 처리 실험중 반응조 혼합액과 투과수의 phenol 농도를 나타냈다. 반응조 혼

합액의 phenol 농도는 0.3mg/L이하였으며, 투과수에는 검출되지 않아 phenol이 TOC농도 상승에 영향을 주지 않는다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 2에 일정한 막투과 유속과 흡입압력의 변화를 나타냈다. 막투과 유속은 약 10LMH에서 유지시켜 주었으며, 비교적 안정된 HRT를 나타냈다. 흡입 압력은 운전 초기에 약 10mmHg의 낮은 압력을 나타내었고 이후에 서서히 증가하여 100mmHg을 나타냈으나, 세정 후 운전한 각각의 단계에서 흡입 압력은 100mmHg 이후에 급격히 증가하여 약 610mmHg에서 유지하는 경향을 나타냈다.

반응조내의 SMP농도(Fig.3)는 운전 초기부터 19일까지 거의 일정한 값인 20mgTOC/L에서 점차 증가하여 36일째에는 축적 농도는 67.2mgTOC/L가 되었고, 운전 말기인 81일째에는 반응조내의 SMP농도는 118mgTOC/L가 되었다. 따라서, SMP의 축적 농도는 운전 초기 약 20mgTOC에서 운전 말기인 36일째에는 67mgTOC/L의 축적 농도를 나타내며 약 36일 동안 운전되었고, 세정후 37일경부터 62일까지 26일간의 운전에서 SMP의 축적 농도는 36.3~75mgTOC/L, 운전 경과 63일부터 81일까지 SMP축적 농도는 62~118mgTOC/L를 나타냈다.

운전 개시후 SMP는 비교적 저분자 물질로 구성되어 분리막의 공극을 낮추는 역할을 하여 작은 유효 공극 크기에 대해 일정한 유량을 얻어야 하므로 흡입 압력을 상승시켰으며, 막면의 부착층인 저항층 형성으로 흡입 압력은 최대치인 약 600mmHg까지 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 4에 carbohydrate농도의 변화에 대해 나타냈다. carbohydrate는 미생물 세포외의 고분자 물질로서 높은 점성을 형성하는 주된 성분으로서, 이러한 고분자 물질은 반응조내의 플러크 형성에 도움을 줄뿐만 아니라 다른 부유 물질의 부착을 가능하게 해준다고 보고⁴⁾⁵⁾되고 있으며, 막분리 활성오니 공정에 있어서 이러한 고분자 물질은 막면의 부착층 형성과 반응조 혼합액의 유기물 농도의 상승에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다⁶⁾.

운전 개시후 반응조내 carbohydrate농도는 운전 초기에 6.8mg/L에서 운전 말기인 84일째에는 55mg/L까지 반응조내에 축적되었다. 본 실험에서는 carbohydrate가 SMP의 구성 성분의 대부분을 차지하고 있는 것으로 보아 미생물의 용혈이나 대사 과정으로 생성된 SMP의 구성 성분 중 carbohydrate가 반응조 혼합액의 고분자 대사 산물의 축적에 상당히 관여하고 있음을 추측할 수 있다.

3.2.2 난분해성 물질의 거동

난분해성 물질의 간접적인 척도인 E_{260} 의 변화⁷⁾⁸⁾를 Fig. 5에 나타냈다. 생물 대사 물질은 최종적으로 생물 난분해성 물질인 SMP_{na} 와 SMP_e 로 존재하게 되며, 이러한 난분해성 물질은 막투과 유속의 감소에 결정적인 영향을 주게 된다. 이러한 난분해성 물질은 분리막의 차단 효과로 인해 장시간 체류할 경우 대부분 고분자 난분해성 물질로 존재하여 분리막 세정 후 운전할 경우 이러한 고분자성 난분해성 물질로 인하여 운전 기간이 현저하게 단축되게 된다.

운전 초기에 생물 난분해성 성분의 척도인 E_{260} 은 분리막의 차단 효과로 운전 초기에 0.114에서 점차 증가하여 운전 말기에는 0.311까지 축적되었다. 투과수 E_{260} 은 운전 초기부터 36일까지 0.048에서 0.072로 거의 일정한 변화를 나타냈으며, 63일째에는 0.138까지 증가하는 경향을 보였으나, 세정후 다시 감소하여 거의 일정한 변화를 나타내어 MF막의 특성상 분리막의 공극 크기보다 작은 저분자 대사 물질인 BAP와 중간 대사 산물의 분해로 생성되는 최종 물질인 저분자 대사 물질이 부분적으로 계외로 투과⁹⁾되는 것으로 사료된다.

3.2.4 SMP의 축적 농도에 따른 막 투과 성능의 평가

연속 처리 기간 중에 SMP농도에 대한 막투과 유속의 시간적인 변화를 알아보기 위해서 축적 SMP 농도에 대한 60분 회분 여과 실험을 Fig. 6에 나타냈으며, SMP농도에 대한 $(J/J_0)_{ss}$ 를 관계를 Fig. 7에 나타냈다. 60분 여과 시간에 있어서 J_{60}/J_0 의 비는 0.5~1.0의 변화를 나타내며 SMP축적 농도의 증가에 따라 감소는 경향을 나타냈다. 운전 시작 후 5일째 SMP의 농도는 20mgTOC/L으로 J_{60}/J_0 는 서서히 감소하여 여과시간 5분 이후부터 0.63정도에서 유지하였고, SMP농도 약 6배가 증가된 81일째 J_{60}/J_0 비는 급격히 감소하여 여과시간 6분 이내에 약 0.5에서 유지되었다. 이상의 결과로부터 막투과 성능은 SMP 농도와 $(J/J_0)_{ss}$ 의 밀접한 관계를 갖는다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 SMP의 축적 농도에 따른 여과 실험을 통해 SMP축적 농도가 막투과 성능의 감소에 상당히 영향을 주는 것으로 나타났다.

3.2.5 여과 저항 시간적 변화

본 연구에서는 투과 성능에 영향을 미치는 각 여과 저항의 분포를 살펴보기 위해 막면의 부착 물질로서 막의 세공에 막히는 물질, gel화에 의해 형성된 gel층과 오니의 퇴적으로 생기는 cake층이 존재한다는 것을 고려하여 실험 종료 후 분리막을 회수하여 물, 스폰지, 약품 세정(0.5% NaOCl)을 하고 다음 여과저항식^{3),9)}(1)에 의해 각각의 여과 저항을 검토하였다

$$J = \frac{\Delta P}{\mu (R_m + R_p + R_g + R_c)} \dots \dots (1)$$

Fig. 8에 연속 처리 실험에 있어서 막면의 부착물 형성에 대한 각 여과저항의 시간적 변화를 나타냈다. 여과 저항 중 cake층에 의한 저항은 초기 $2.9 \times 10^{10}/m$ 에서 점차 증가하여 운전 말기에는 $4.0 \times 10^{10}/m$ 까지 증가하였으며, gel층의 저항은 $5 \times 10^9/m$ 에서 운전 말기에는 $10 \times 10^9/m$ 로 증가하였고 막의 공경에 막히는 저항은 가장 낮은 $2.5 \sim 2.7 \times 10^8/m$ 를 나타냈다. 생물 대사 물질은 부착 성분을 빨리 막면에 부착시키는 역할을 하는 것과 동시에 부착 성분의 축적에 영향을 주지만, 계속적으로 막면에 축적하는 것이 아니라 생물 대사 물질의 부착과 사멸을 동시에 일어나는 평형 상태에 있는 것과 관련한다면, 본 실험의 cake층값은 SMP 축적 농도에 대해 대체적으로 비례하며 증가하는 경향을 나타냈다¹⁰⁾.

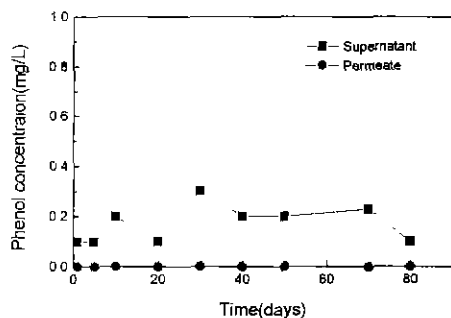


Fig 1 Change of phenol concentration

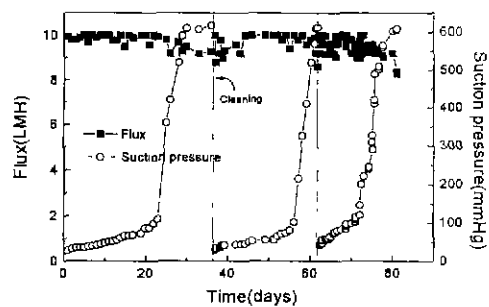


Fig 2 Time course of flux and suction pressure

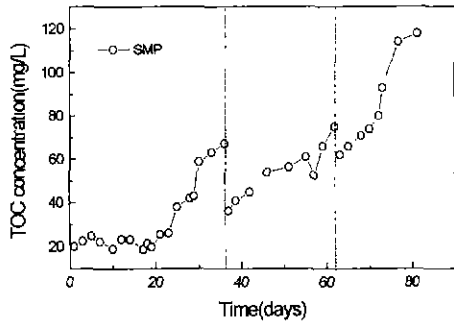


Fig 3 Time course of TOC(SMP) concentration

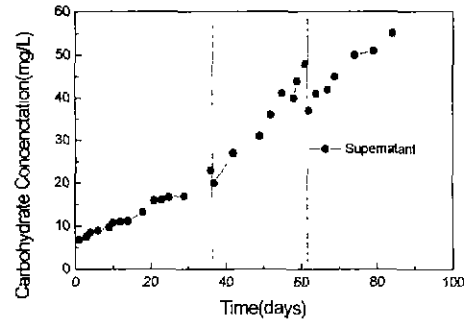


Fig. 4 Time courses of carbohydrate concentration

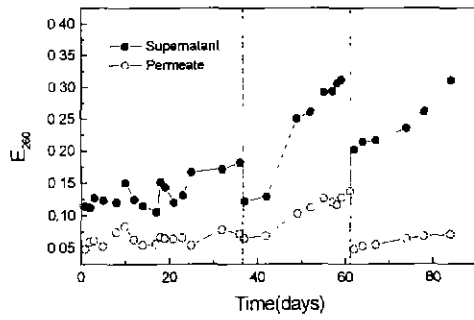


Fig 5 Time courses of E_{260}

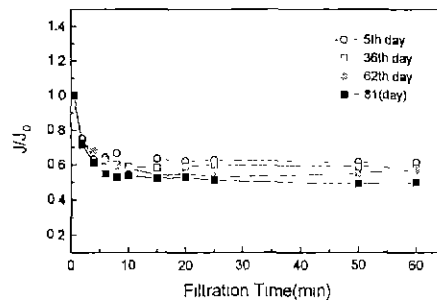


Fig. 6 Batch filtration test

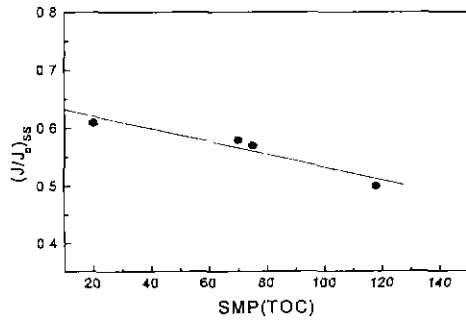


Fig. 7 Relationship between SMP and $(J/J_0)_{ss}$

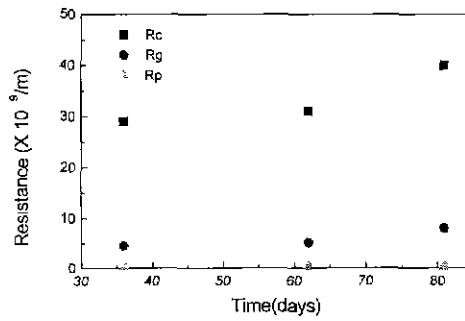


Fig. 8 Time course of each kind of resistance

<혐기성 생물반응조>

1. 실험장치 및 방법

1.1 실험장치

본 연구에서 이용한 실험장치는 아크릴재질의 반응조를 제작하였으며, 침적하지 않은 반응조(Run I)와 분리막을 침적한 반응조(Run II)를 운전하여 각각의 소화효율의 특성을 검토 비교하였다. 소화혼합액은 suction pump를 이용하여 투과수로서 배출되게 하였다. 반응조는 일정한 온도를 유지하기 위하여 항온조내에 설치하였다.

1.2 실험조건 및 방법

반응조의 온도는 30℃를 유지하였으며, RUN-II에서의 flux는 7.5 및 15 ℓ/m^2-h (LMH)가 되도록 하였다. 본 연구에 이용한 막모듈은 D산업개발연구소제품의 중공사막을 U자형태로 제작하여 반응조내에 침적하였다.

RUN-II에 있어서의 운전은 1.0일의 HRT에서 시작하여 유량을 증가시킴으로써 0.5일의 HRT가 되도록 하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 이용한 투입기질은 glucose를 탄소원으로 하는 합성기질이며, 유기물은 평균 10,650 mg/ℓ의 CODcr농도와 평균 10,050 mg/ℓ의 탄수화물농도를 나타냈다.

2. 결과 및 고찰

2.1 물질분해의 거동

2.1.1 유기물의 분해율

분리막을 침적하지 않은 반응조(RUN-I)와 분리막을 침적한 반응조(RUN-II)에 있어서 탄수화물의 제거율을 측정된 결과를 Fig.9에 나타냈다. HRT 0.5일의 조건을 갖는 RUN-I에서는 84.4%의 제거율을 보이고 있으며, RUN-2에서의 반응조내 상등수와 투과수에서는 각각 93.5%, 99.6%의 제거율을 보였다. 한편, HRT 1.0일의 조건을 갖는 RUN-1에서는 86.8%, RUN-II의 상등수 및 투과수에서는 각각 98.0%, 99.7%의 제거율을 나타냈다.

2.1.2 MLVSS의 변화

각 RUN에 있어서의 MLVSS농도를 Fig.10에 나타냈다. RUN-I에서 HRT 0.5일과 1.0일의 조건에서는 각각 약 1,790 mgCOD/L, 1,905 mgCOD/L정도의 농도를 나타내고 있는 반면에 RUN-II에서는 시간의 경과에 따라 부유물질이 분리막에 의해 지속적으로 증가할 것으로 예상하였으나, 일정시간 이후에는 일정한 범위내에서 서서히 변화하여 각 HRT에서 약 55일째부터 거의 변화가 없는 농도를 나타냈다. 반응조내에서 SS가 지속적으로 증가하지 않은 것은 SS가 미생물에 의해 일부 분해되면서 안정상태로 되기 때문으로 사료된다. 시간경과에 따라 60일째의 MLVSS농도는 HRT 0.5일과 1.0일의 조건에서 각각 약 9,462 mgCOD/L, 7,387 mgCOD/L정도를 나타내어 분리막이 있는 반응조에서의 MLVSS농도가 4~5배 정도 높았다. RUN-II에서는 0.5일 및 1.0일의 HRT에서 각각 15 LMH, 7.5 LMH의 일정한 투과수를 유지하기 위하여 suction압력이 서서히 증가하였지만(Fig.11), 1.0일의 HRT에서는 35일째부터 약 10 mmHg정도 유지되었으며, 0.5일의 HRT에서는 17일째부터 약 20 mmHg정도가 큰 변화없이 유지되었다. 혐기성소화조에서 생물대사물질의 특성¹¹⁾과 막분리형혐기성소화조내의 생물대사물질에 관한 연구¹²⁾에서는 난분해성물질의 존재와 거동

에 관하여 보고하고 있으며, 막분리활성오니공정에 관한 연구에서는 막을 오염시키는 것은 SS농도의 증가에 의한 것보다는 혼합액중의 용해성성분으로 되어 있는 생물대사성분이 주로 관여하고 있다고 보고된 것과 관련하여⁽³⁾⁽¹⁴⁾, 본 연구에서도 반응조내의 증가하는 SS성분에 의한 것보다는 세균에 의해 대사되는 성분 가운데 고분자 유기물 성분이 난분해성물질로 존재하면서 이러한 물질이 막을 서서히 오염시키는 것으로 생각할 수 있다.

2.1.3 산생성 및 메탄생성

Table 1에 각 RUN의 60일 이후에 있어서의 유기산, 가스생성량 및 가스조성을 나타냈다. 분리막이 없는 RUN-I에서는 CO₂ 64.7~66.8%, H₂ 28.9~33.9%, CH₄ 0.4~1.8%의 조성으로서 CO₂와 H₂가 주성분이며, CH₄은 미량으로 나타났다. 분리막이 침지되어 있는 RUN-II에서는 CO₂ 40.5~40.8%, CH₄ 46.1~51.3%의 조성으로서 CO₂와 CH₄가 주성분이며, H₂는 검출되지 않았다. 한편, RUN-I에서의 유기산은 HRT의 조건에 따라 구성비율이 달랐으며, HRT 0.5일과 1.0일에서의 주성분은 각각 n-HBu, HPr으로 나타났다. Total 유기산은 HRT 0.5일과 1.0일에서 각각 약 4,928 mgCOD/L, 6,415 mgCOD/L로서 짧은 HRT에서 볼 수 있는 전형적인 산생성과정이 진행되고 있으며, 이러한 유기산의 축적에 의해 pH는 5.8~6.2정

Table 1. Variation of VFA production and Gas production rate in the digester with and without membrane

RUN	HRT (d)	pH	VFA production(mgCOD/L)					GAS production					
			Total	HAc	HPr	n-HBu	n-HVa	n-HCa	rate ^{a)}	CO ₂	H ₂	CH ₄	
I	0.5	6.2	4928.3	957.1	331.2	3487.1	112.0	0	4096.0	64.7	33.9	0.4	
	1.0	5.8	6415.9	1087.0	2707.6	1878.4	182.3	401.5	2449.0	66.8	28.9	1.8	
II	0.5	6.7	1507.3	810.2	438.5	217.9	40.7	0	2100.2	40.5	0	51.3	S ^{b)}
	0.5	6.9	1561.2	767.2	461.1	199.5	132.4	0	-	-	-	-	P ^{c)}
	1.0	6.9	2070.4	989.2	659.2	423.1	162.9	0	1000.3	40.8	0	46.1	S
	1.0	7.0	2114.6	963.1	594.3	323.5	232.7	0	-	-	-	-	P

a) ml/L-d, b) Supernatant, c) Permeate

도로써 낮은 범위를 나타냈다. 한편, RUN-II에서의 유기산은 각 HRT의 조건에서 반응조내의 유기산과 투과수내의 유기산이 거의 동일한 농도를 보이고 있으며, RUN-II의 반응조내 Total 유기산은 0.5일 및 1.0일의 HRT에서 각각 약 1,507 mgCOD/L, 2,070 mgCOD/L로서 유기산의 축적은 보이지 않았으며, pH는 6.9~7.1정도를 나타냈다. 한편, 짧은 HRT에서는 산생성과정이 주로 진행되어 유기산의 생성과 축적으로 인하여 pH가 저하되는 것이 일반적이지만⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾, 분리막을 이용함으로써 분리막에 의해 미생물이 농축되고 이러한 미생물의 활성으로 인하여 생성된 유기산이 메탄으로의 전환이 순조롭게 진행됨에 따라 유기산의 축적에 의한 pH의 저하는 볼 수 없었다. 혐기성소화에 있어서 메탄의 약 70%는 acetate를 경유하여 생성되고 있으며, 또한 메탄의 약 30%는 H₂를 경유하여 생성되고 있는 것⁽¹⁷⁾과 관련한다면, 짧은 HRT의 조건에서 메탄이 46.1~51.3%의 높은 조성을 나타내는 것은 반응조내에 HAc와 H₂를 이용하여 메탄을 생성하는 세균이 많이 존재하고 있음을 시사하고 있으

며, 이러한 시사는 세균군의 분포에 의해 확인되고 있다. 이상의 결과로부터 0.5일과 1.0일의 짧은 HRT에서 분리막을 침적함으로써 혐기성소화의 단점인 장시간의 체류시간을 단축하면서 고효율의 메탄화를 도모할 수 있으며, 또한 외부순환형의 분리막을 이용한 공정에서의 빈번한 막오염에 따른 막모듈의 교체비용 등의 문제점을 보완하면서 공정의 축소화가 가능함을 보여주고 있다.

2.2 세균군의 분포특성

RUN-I 과 RUN-II에서의 분리막의 유무에 따른 반응조내에서 증식하고 있는 각 세균군의 분포를 검토하기 위하여 각 HRT에서 약 60일이 경과한 반응조내 세균군을 계수하여 Table 2에 나타냈다. acidogens는 RUN-I에서 $5.1 \sim 8.4 \times 10^8$ MPN/ml이며, RUN-II에서는 $1.7 \sim 5.0 \times 10^9$ MPN/ml정도 계수되어 각 RUN에서 HRT의 단축과 분리막에 의한 균수는 2~3배정도의 증가로 큰 수의 변화는 없었으며, 분리막의 차단효과에 의해 VSS가 농축되지만, acidogens는 10배정도의 균수만이 증가하여 산생성에 관여하고 있음을 알 수 있다. homoacetogens는 RUN-I에서 $8.0 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6$ MPN/ml정도이며, RUN-II에서는 $5.0 \times 10^7 \sim 2.4 \times 10^8$ MPN/ml정도 계수되어 동일한 HRT에서 100배 정도 높은 균수를 보였는데, 분리막의 차단효과가 있음을 알 수 있다. 한편, acetate-utilizing methanogens는 RUN-I에서 $5.1 \sim 8.0 \times 10^4$ MPN/ml정도 계수되었으며, RUN-II에서는 $2.3 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^8$ MPN/ml정도 계수되어 분리막에 의해 약 $10^2 \sim 10^4$ 배정도 균수가 증가하였고, H_2 -utilizing methanogens는 RUN-I에서 $4.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5$ MPN/ml정도이며, RUN-II에서는 $1.3 \times 10^7 \sim 9.2 \times 10^8$ MPN/ml정도 계수되어 분리막에 의해 $10^2 \sim 10^3$ 배정도의 균수가 증가한 것을 알 수 있다. RUN-II에서는 acidogens와 homoacetogens는 HRT가 0.5일보다 1.0일에서 높은 균수를 나타냈지만, methanogens수는 HRT가 0.5일에서 높은 균수를 나타냈다.

Table 2. Culture counts of bacteria in the digester(MPN/ml)

Run	HRT (day)	Acidogenic bacteria	Hydrogen-utilizing methanogenic bacteria	Acetate-utilizing methanogenic bacteria	Homoacetogenic bacteria
II	1.0	5.0×10^9	1.3×10^7	2.3×10^9	3.0×10^8
	0.5	1.7×10^9	9.2×10^6	2.0×10^8	7.0×10^7
I	1.0	8.4×10^8	1.0×10^5	8.0×10^4	1.2×10^6
	0.5	5.1×10^8	4.0×10^4	5.1×10^4	8.0×10^5

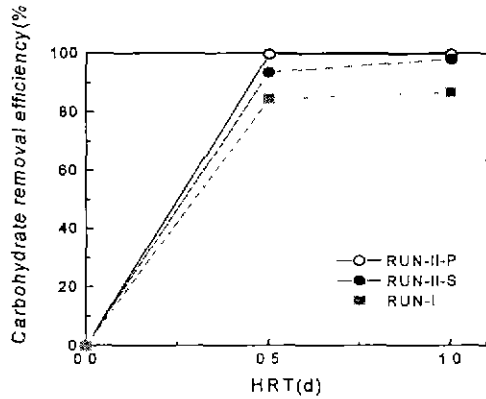


Fig 9 Effect of on carbohydrate removal efficiency at each RUN, Supernatant(S), Permeate(P)

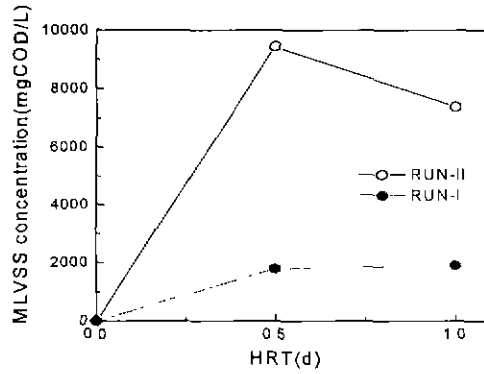


Fig 10 Effect of HRT on MLVSS concentration at each RUN

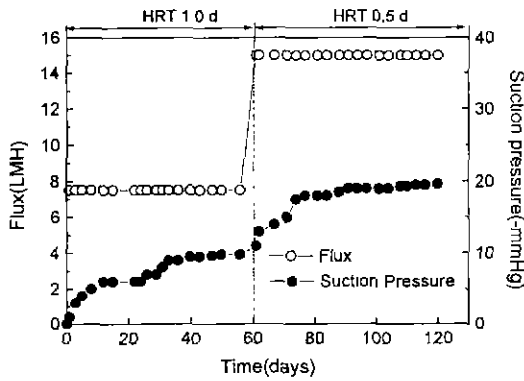


Fig. 11 Variation of the flux and suction pressure

결 론

1. 막투과 성능은 SMP 축적 농도의 증가에 따라 현저하게 감소하였다.
2. 여과 저항의 영향에 대하여 R_c 가 가장 큰 저항값을 나타냈으며, SMP의 축적 농도의 증가에 따라 각각의 여과 저항도 증가하는 경향을 나타냈다.
3. 생물 난분해성 물질의 척도로서 E_{260} 은 분리막의 차단 효과로 인하여 반응조내에 축적되었다.
4. 반응조 혼합액의 TOC증가에도 불구하고 유기물 제거 효율은 99.5%로 분리막의 도입에 따른 안정된 처리 효율을 나타냈다.
5. 탄수화물의 제거율은 분리막을 침지하지 않은 반응조에서 약 84.4~86.8%정도이며, 분리막을 침지한 반응조에서는 상등수 및 투과수에서 각각 93.5~98.0%, 99.6~99.7%를 나타냈다.
6. MLVSS농도는 분리막이 침지된 반응조의 0.5일 및 1.0일의 HRT조건에서 각각 약 9,462 mgCOD/L, 7,387 mgCOD/L정도로서 분리막이 없는 반응조에서의 농도보다 4~5배정도 높은 농도를 보였다.

7. 생성된 가스중의 CH₄조성은 분리막이 없는 반응조에서는 0.4~1.8%이며, 분리막이 침지된 반응조에서는 메탄생성세균의 고농도로 농축되어 46.1~51.3%의 조성을 보였다
8. 산생성과정이 진행되는 짧은 HRT에서도 분리막에 의하여 메탄생성과정이 진행되었다.

참 고 문 헌

- 1) Brindle, K. and Stephenson, T., The Application of Membrane Biological Reactors for the Treatment of Wastewaters, *Biotech & Bioeng.*, Vol. 49, 601-610(1996).
- 2) Herbert H. P. Fang and Xiao-Shan Jia, "Soluble microbial products(SMP) of acetotrophic methanogenesis", *Biore. Tech.*, **66**, 235-239(1998).
- 3) 柳根勇ら, "膜分離活性汚泥法における膜透過性能に對する生物代謝成分の影響", *水環境學會誌*, **20**(7), 473-480(1997).
- 4) Jin W. Lee., "Production of zoogloea gum by *Zoogloea ramigera* with glucose analogs", *Biotech Lett.*, **19**(8), 799-802(1997).
- 5) Cooper, T. A., "Exopolysaccharide production from lactose by wild type and polyhydroxybutylate minus strains *Zoogloea ramigera*", *Am. Chem. Soc. 198th National Meeting.*, Miami, U.S.A.(1989).
- 6) 柳根勇ら, "管狀限外ろ過膜における膜透過流速に影響を及ぼす因子に関する研究", *環境工學研究論文集*, **34**(9), 439-446(1993).
- 7) 上田達己, "膜分離活性汚泥法における溶解性有機物の動態と膜ろ過性能", *水環境學會誌*, **20**(4), 233-237(1997).
- 8) 丹保憲仁, "水環境工學における成分の流れと收支の平価", *土木學會論文集*, II-4, pp.35~45(1985).
- 9) Mulder, M., Basic principle of membrane technology, Kluwer Academic Publishers(1996).
- 10) Namkung, E., Bruce E. and Rittmann, "Effects of SMP on biofilm-reactor performance", *J. Envir. Eng. Division*, **1**, 199-210(1988).
- 11) Herbert H. P. F., *et al.*, Soluble microbial products(SMP) of acetotrophic methanogenesis, *Biores. Technol.*, Vol. 66, 235-239 (1998).
- 12) 二階堂聰 외 2인, 膜分離型嫌氣性處理における脂肪酸含有排水處理に関する研究, *水環境學會誌*, 第19卷, 第3號, 220-227 (1996).
- 13) 松井謙介, 膜分離脱窒素處理方式のフラックス管理の實際, *用水と廢水*, 第35卷, 17-23 (1993).
- 14) Namkung, E., *et al.*, Soluble microbial products(SMP) formation kinetics by biofilms, *Water Sci. Technol.*, Vol. 20, 795-806 (1986).
- 15) 小松敏宏 외 1인, 膜分離の酸生成相への影響及其の處理特性變化, *下水道協會誌論文集*, 第29卷, 第345號, 31-40 (1994).
- 16) 車基喆 외 2인, 低溫域における酸發酵特性に及ぼす溫度とHRTの影響, *衛生工學研究論文集*, 第28卷, 29-37 (1992).
- 17) Kaspar, H. F., *et al.*, K., Kinetic parameters and relative turnover of some important catabolic reaction in digesting sludge, *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 36, 1-9 (1978).