

## 초청강연 II

# 막분리 기술을 응용한 배수·슬러지처리 Process

## Application of Membrane Separation Technology to Wastewater and Sludge Treatment Processes

野池達也(Tatsuya NOIKE)

Dept. of Civil Engineering, Tohoku University, Aoba, Sendai, 980 Japan

### 1. 서론

한외여과를 비롯한 막분리 기술은 의약 및 식품산업 등의 화학공학분야, 각종 제조업에서의 배수처리 및 물질회수 등에 널리 이용되는 실용기술로서 앞으로 활용이 기대되고 있다.

최근에 막분리 기술은 상·하수 및 배수 등의 수처리 분야에 있어서도 이용되고 있으며, 역침투에 의한 해수담수화, 정밀여과에 의한 탁질제거 등의 상수처리, 한외여과와 역침투에 의한 초순수제조, 한외여과와 RO 등에 의한 잠용수도의 정화처리, 한외여과와 정밀여과를 고액분리장치로서 분뇨 및 하수처리 등과 같은 처리에 광범위하게 이용되고 있다. 또한 한외여과 등으로 유용미생물을 고농도로 유지하여 특정물질의 제거와 유용물질 등을 회수하는 Process도 개발되고 있다.

일본에 있어서의 상·하수 및 배수처리에의 막분리 기술의 도입은 造水促進센터(財)가 1968년부터 수행한 역침투의 잠용수도에의 응용, 통산성의 Aqua-renaissance·90 계획에 의한 배수의 재이용 및 에너지회수를 목적으로 한 이용, 국립공중위생원과 폐기물연구재단에 의한 Human Science Project에 있어서 고액분리에의 한외여과막의 이용, 국립공중위생원과 수도상수Process 협회에 의한 MAC21계획에 의한 상수처리에의 정밀여과의 이용 등, 관민학이 공동으로 수행하는 Project형식에 의한 연구개발이 진행되고 있으며 많은 중요한 성과가 얻어지고 있다.

본 논문에서는 일본에 있어서 분리막을 도입한 배수처리 및 분뇨처리의 기술개발과 혐기성소화의 기능향상에 관한 연구의 현황에 관하여 소개하고, 분리막에 관한 한·일의 연구자간의 정보교환이 되었으면 한다.

### 2. 배수처리에의 막분리 도입

#### (1) 잠용수도에의 응용

일본에 있어서 배수처리에의 막분리 도입은 서론에서 설명했듯이 (財)造水促進센터가 수행한 역침투와 한외여과의 잠용수도에의 응용이다. 이것은 막분리 기술이 잠용수도가 요구하는 ① 설치면적이 적을 것 ② 부하변동에 강하고 간결운전에 적합할 것 ③ 운전방법이 간단할 것 ④ 만족한 수질의 재이용수가 얻어질 것 ⑤ 취기가 없을 것 ⑥ 폐기슬러지의 발생이 적을 것 등의 6조건중에서 ⑤를 제외한 5조건을 만족시켜줄 수 있다. 잠용수도에의 막분리 기술의 응용은 수처리 관련업체가 적극적으로 권유하고 있으며, 동경도내의 잠용수도시설에 대하여 실시한 설문조사의 결과, 유효회답수의 34%가 막분리 Process를 채용하고 있다.

#### (2) 하수재생이용을 위한 응용

도시의 물 수요가 증가하면 새로운 수자원이 필요하다. 공공하수처리장의 처리수는 지방자치체에 있어서는 다른 수원보다는 쉽게 취수할 수 있는 수원이다. 하수처리수의 이용을 위해서는 재생수중의 대장균군수를 거의 0으로 제어할 필요가 있다. 이를 위해 일부의 하수처리수 이용시설에서는 막분리를 도입하고 있다. 수년전과 비교하여 막분리의 비용은 감소하고 있지만, 아

직은 고가로서 대규모시설에의 적용은 어렵다. Fig.1은 동경도落合처리장에 있어서의 고도처리시설의 공정이며, Table 1은 처리성적을 나타내고 있다.

막분리는 질소 이외의 수질항목에서 매우 양호한 처리성적을 보이고 있다. 하수의 처리에 적당한 막분리 Unit와 막에 주는 고형물부하를 감소시키기 위한 전처리 Process의 발달로 인하여 막분리의 운전 비용은 최근에 급속히 저하하고 있다. 일본의 일부 도시에서는 막분리를 도입한 수처리시설의 운전 또는 계획이 진행중에 있다.

### 3. 분뇨처리에서의 응용

분리막을 이용한 분뇨처리는 고부하탈질소법의 고액분리공정에 한외여과막에 의한 고액분리장치를 도입한 Process이다. 본 공정은 종래의 침전지의 관리상 월류수면을 감시할 필요가 있었지만, 그 필요성이 완전히 없어졌으며, 분뇨처리시설은 완전히 밀폐형으로 하는 것이 가능했다. 또한 Fig.2에서와 같이 Virus 등의 병원성미생물을 처리수에서 완전히 배제하는 것이 가능했다.

Fi.3은 막분리 고부하탈질소법을 나타내고 있다. 단일조에서 질소화탈질소반응을 하는 것은 막분리 방식의 특징이라고 할 수 있다. 생물반응조의 뒤에 분뇨의 난분해성유기물의 제거를 위한 응집 분리공정이 부가되어 있으며, 여기에도 고액분리공정으로서 막분리가 도입되어 있으며, 2단계 시스템으로 되어 있는 경우가 많다. Table 2는 분리막고부하분뇨처리시설의 처리성능을 나타내고 있다.

### 4. 혐기성소화법에의 응용

#### (1) Aqua-rennaissance · 90 계획

토산성은 1985년~1991년에 걸쳐 산업배수와 생활배수를 새로운 수원으로 재이용하면서 배수중의 유기오탁물질을 에너지자원으로서 회수가 가능하며, Compact한 에너지절약형, 저가의 새로운 수종합재생이용공정을 개발하는 연구개발계획으로 Aqua-rennaissance · 90계획을 관민학의 협력체제하에서 실시했다. 본 계획은 최근 급속히 발전한 Bio-technology 및 막분리 기술을 활용함으로써 획기적인 수처리공정을 개발하려고 하는 것이었다.

혐기성 Bio-reactor에 관해서는 Fig.4에 나타난 반응조에 의해 Table 3의 목표치를 두고 Table 4와 같이 실배수를 이용한 Pilot 실험에 의해 연구를 수행했다. 그 결과 저농도배수에 관해서는 혐기성소화 본래의 장점인 메탄가스의 회수는 불가능했지만, 고농도배수에 관해서는 유용한 성과가 얻어졌다. 혐기성소화 반응조의 혼합액은 일반적으로 고액분리가 좋지않으며, 조내의 미생물농도(MLSS)를 높게 유지하고 유기물부하를 증가시키기 위해서는 분리막의 도입은 효과적이라고 사료된다.

혐기성소화공정의 물질대사는 Fig.5에 나타내듯이 주로 산생성상 및 메탄생성상의 2상으로 구성되어 있으며, 최근에는 혐기성소화의 고효율화를 위한 실험으로서 종래와 같은 단일의 반응조 대신에 산발효조 및 메탄발효조의 2개의 조로 분리하여 각각을 담당하는 세균군의 증식특성에 적합한 조작을 행하는 2상혐기성소화법에 관한 연구가 활발히 진해되고 있다.

油科 등은 대두단백가공배수를 이용한 실험에 의해 2상혐기성소화법에 막분리(한외여과막)를 도입하는 효과에 관하여 검토하고, 분리막의 도입위치로서는 Fig.6의 1에 나타내듯이 산발효조-분리막-메탄발효조의 공정이 많은 양의 메탄을 회수하는 결과를 얻었다.

#### (2) 분리막도입에 의한 처리특성의 변화

저자는 분리막의 도입이 혐기성소화의 물질대사에 미치는 영향에 관하여 산생성상을 중심으로 검토하기 위해 2상혐기성소화법의 제1단계인 산생성상의 Chemostat형 반응조에 막분리를 도입하고 메탄생성세균을 포함하지 않은 혼합균체를 식중하여 그 처리특성 및 우점균종의 변화에 관하여 연구를 하였다.

Fig.7은 실험장치를 나타내고 있다. 여기서는 기질로서 glucose를 이용하였으며, Fig.8 ~ Table 5에 연구성과의 일부를 나타냈다. 여기에서 Run1:막분리형, Run2:종래형이며, 운전조건은 HRT:2일, 소화온도 : 35℃로 하였다.

이러한 연구성과로부터 아래와 같은 사항을 알 수 있었다.

- ① 막분리형의 반응조는 종래형의 반응조의 약 18배 정도의 균체량을 유지할 수 있다.
- ② 막분리를 도입한 반응조는 균체가 고농도로 축적했기 때문에 생성물로서는 proionate, acetate, valrate 및 butyrate의 농도 순서를 나타냈으며 acetate 와 butyrate를 주체로 하는 중 슬러지와 다른 처리특성을 보였다.
- ③ MPN법에 의한 세균의 분포에 관해서는 기질이 glucose인데도 단백질분해능을 갖는 세균이 산생성세균과 거의 같은 order로 존재하였다. 또한 SRT를 제외한 동일조건하에서 수행한 산발효와는 다른 세균의 구성을 보였다.
- ④ 반응조내의 균체농도는 HRT의 감소에 따라 직선적으로 증가했다.
- ⑤ 휘발성지방산(VFA)의 거동은 HRT의 감소에 따라 長鎖의 것으로 변화하여 가는 것이 알 수 있었다.

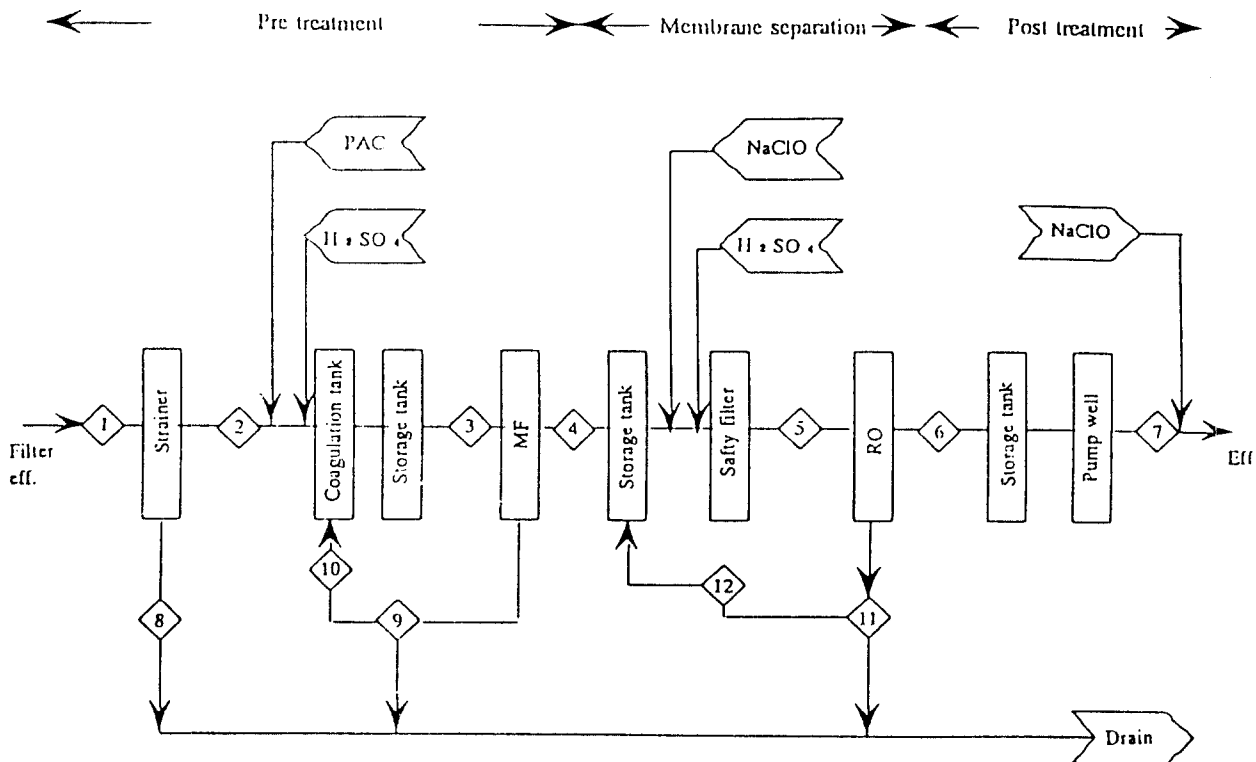
## 5. 결론

지구환경시대라고 볼 수 있는 현 시점에서 새로운 관점으로 수처리 및 슬러지처리를 다시 생각할 필요성이 있다. 막분리 기술은 배수처리분야에 있어서 광범위하게 응용 및 실용화되고 있다. 그러나, 막분리라는 새로운 고액분리공정을 보다 유효하게 이용하기 위해서는 막 자체의 성능, 여과조건과 여과저항의 관계 및 막의 막힘과 세정방법의 관계 등의 운전관리에 관한 제문제, 또한 막분리의 도입에 의한 생물의 정화기능에의 영향 등, 검토해야할 문제가 많이 남아 있다.

이러한 문제를 착실히 해결해 간다면 막분리를 도입한 배수·슬러지처리법은 21세기에 있어서 수환경의 보전을 위해 큰 역할을 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 1) 西村和之, “生物處理プロセスにおける限外濾過膜の応用關する基礎的研究”, 東北大學學位論文, 1994年.
- 2) 油科嘉則, “分離膜導入による醱酵の性能向上に關する研究”, 東北大學學位論文, 1991年.
- 3) 小松敏宏, “分離膜導入した嫌氣性酸醱酵に關する研究”, 東北大學學位論文, 1994年.
- 4) 車基喆, “低溫域における嫌氣性酸醱酵に關する研究”, 東北大學學位論文, 1994年.
- 5) 井上雄三, “し尿處理技術の開發の動向”, 都市清掃第22号, 第47卷, 1994年.



Design flow rate m<sup>3</sup>/day

No. 1	2	3	4	5	6	7
Filter eff.	Strainer	MF inf.	MF. eff.	RO inf.	RO.eff.	Total eff.
71.3	70.2	223	64.9	90.9	50.0	50.0
No. 8	9	10		11		12
Strainer	MF	MF		RO		RO
Drain.	Dain.	Circular		Condensed		Circular
1.1	5.3	152		14.9		26.0

Fig. 1 東京都落合處理場에 있어서 막분리 공정의 개요

	Law Water (Filtered secondary effluent)	Rivers Osmosis Effluent
Color unit	20	1.0
Turbidity	1	<0.5
Suspended Solid mg/l	<1	<1
Dissolved Solid mg/l	270	91
TOC mg/l	2.6	1.4
T-P mg/l	0.74	<0.01
T-N mg/l	11	6.7
Fecal Coli. cfu/100 ml	43	n.d. membrane filter tech.
Total Coli. cfu/100 ml	110	n.d. membrane filter tech.
Heterotrophic plate count	14,000	n.d.

Table 1. 막분리 공정의 처리성적

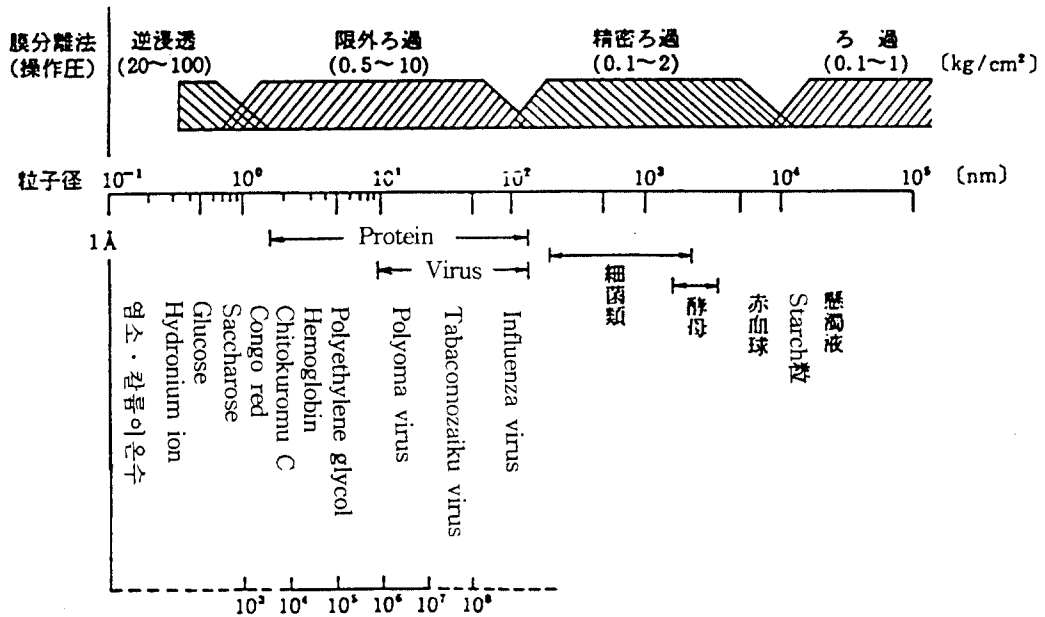


Fig. 2 막분리법과 대표적 분리대상물질

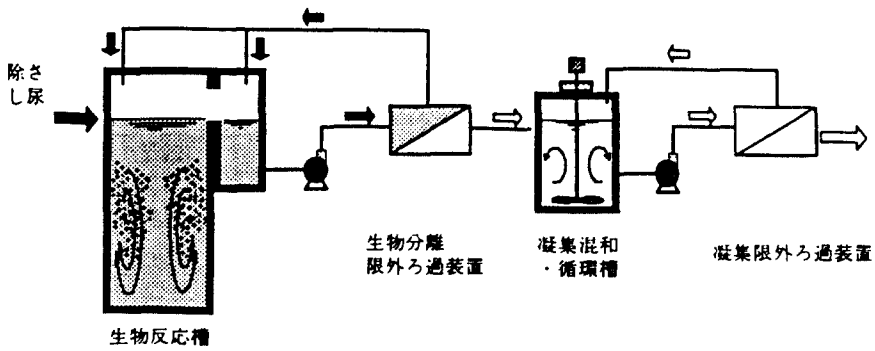
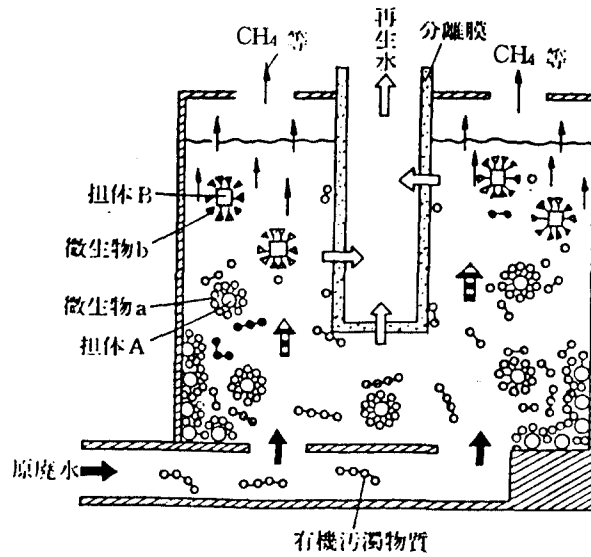


Fig. 3 막분리 고부하생물탈질소법

Table 2. 막분리 고부하분뇨처리시설의 처리성능

施設名		KA	S町	I市	KN
除さし尿	pH	8.1	7.2	6.3	7.6
	BOD (mg/l)	5,500	6,600	4,700	4,700
	COD (mg/l)	2,200	3,680	3,307	5,300
	SS (mg/l)	3,980	8,390	8,345	6,700
	T-N (mg/l)	2,370	2,300	683	2,500
	T-P (mg/l)	-	216	56	220
	Cl (mg/l)	-	1,560	259	1,900
生物処理 限外ろ過 限透過水	膜の材質	Polysulfone	Polyoreffin	Polyoreffin	Polyoreffin
	分画分子量	-	2万	10万	2万
	pH	7.3	6.6	7.2	7.1
	BOD (mg/l)	< 1	7.2	13.7	2.6
	COD (mg/l)	124	226	53.8	330
	SS (mg/l)	< 1	ND	10.1	< 2
	T-N (mg/l)	21	47	5.1	29
	T-P (mg/l)	73	90	13.3	-
Cl (mg/l)	-	1,440	329	1,400	
凝集限外 ろ過限透 過水	膜の材質	-	Polysulfone	Polyoreffin	Polysulfone
	分画分子量	-	10万	10万	10万
	pH	6.3	5.7	6.8	4.6
	BOD (mg/l)	< 1	4.7	-	< 1
	COD (mg/l)	62	112	18.4	67
	SS (mg/l)	< 1	ND	ND	< 2
	T-N (mg/l)	12	37	-	13
	T-P (mg/l)	0.6	0.5	0.4	< 0.1
	色度 (度)	-	333	61	-
Cl (mg/l)	-	2,580	311	2,000	
活性炭 処理水	pH	6.6	6.7	7.1	5.0
	BOD (mg/l)	< 1	3.4	0.9	< 2
	COD (mg/l)	11	5.8	7.5	< 1
	SS (mg/l)	2	ND	ND	< 1
	T-N (mg/l)	8	26	3.9	3.8
	T-P (mg/l)	0.2	0.4	0.4	< 0.1
	色度 (度)	< 10	10	13	< 6
	Cl (mg/l)	-	2,450	306	1,800



原废水 ⇨ ⇨ ⇨ 再生水

微生物 a の機能

○-○-○ を分解

微生物 b の機能

○-○ } Bio-gas(CH<sub>4</sub>等)化

Fig. 4 Bio-reactor와 분리막에 의한 수처리

Table 3. Bio-reactor의 목표치

方式	廢水の種類 (BOD濃度)	有機物負荷 (kg·BOD/m <sup>2</sup> ·月)	
		現 状	開發目標
嫌氣	高濃度 (10,000mg/l以上)	4	15以上
	中濃度 (1,000 ~10,000mg/l)	(30~40℃)	(30~40℃)
	低濃度 (200mg/l程度)	0.5~1	5以上
好氣	低濃度 (200mg/l程度)	0.5~1	5以上

Table 4. 실배수를 이용한 Pilot-plant 실험

对象排水 (排水内容)	Process、槽、容積	① 实施例：原水→处理水COD(mg·ℓ <sup>-1</sup> ) ② 负荷(COD kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) ③ pH (-) ④ 温度(℃)	
치즈 製造工程水	MARS : 浮遊床 (38m <sup>3</sup> ) + UF	① 60,000 → 305 ② 8.2 ③ 6.8~7.2 ④ 35	
埋立地浸出水	UASB (60m <sup>3</sup> ) + RO	① 25,000~35,000 → 5~8 ② 15 ③ 7.4~7.8 ④ 不明	
紙維漂白水	酸 + 메탄조 (合計 2 m <sup>3</sup> ) + MF	① 8,000~10,000 → 1,000以下 ② 8 ③ 9~13 ④ 30-50	
Aqua-Renaissance 90 project	大規模下水	UASB (5.42m <sup>3</sup> ) + UF, SS可溶化槽(2.0m <sup>3</sup> )	① 351 → 135 ② 0.95 ④ 可溶化槽35℃、 UASB ③ 6.8~7.2
	小規模下水	流動床 (1 m <sup>3</sup> ) + UF 可溶化槽 (0.5m <sup>3</sup> )	① 349 → 39 ② 1.6 ④ 可溶化槽30℃、 流動床 常温 ③ 6.8~7.2
	油脂·蛋白排水 (大豆)	固定床酸發酵 (1 m <sup>3</sup> ) + UF + 메탄발효조 (2 m <sup>3</sup> )	① 1,300 → 100 ② 3 ③ 酸 6.0, 메탄 7.5 ④ 30
	Starch 배수 (小麥)	固定床酸發酵槽 (3 m <sup>3</sup> ) + UF + UASB (2 m <sup>3</sup> )	① 19,000 → 180 ② 39 ③ 酸 5.4, 메탄 7.3 ④ 37
	Alcohol 배수 (糖 蜜)	硫黃除去塔 (5.5m <sup>3</sup> ) + 流動床(8.0m <sup>3</sup> ) + UF	① 44,000 → 17,100 ② 28.8 ③ 6.5 ④ 37
	紙·Pulp 배수 Methanol	固定床 1 槽 (7 m <sup>3</sup> ) + UF	① 19,200 → 1,540 ② 38.3 ③ 6.7~7.0 ④ 53
	분뇨	UF + 可溶化槽 (0.5m <sup>3</sup> ) + UF + UASB (0.4m <sup>3</sup> )	① 14,140 → 1,135 ② 30.8 ③ 7.0~8.0 ④ 35



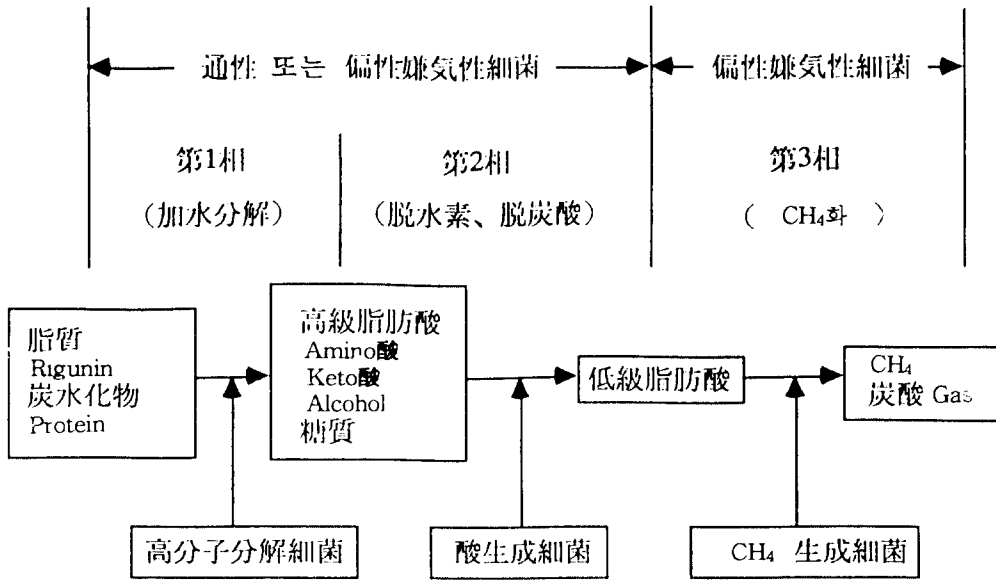
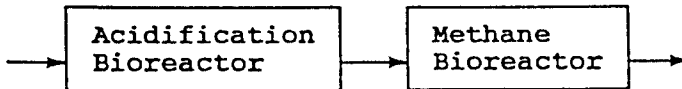
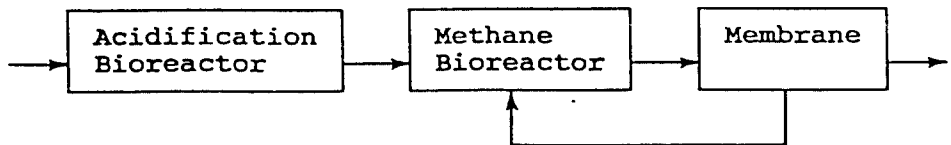


Fig. 5 혐기성소화의 물질대사과정

1. Bioreactor (BR) Process



2. Membrane Bioreactor (MBR) Process



3. Two-phase Membrane Reactor (TMR) Process

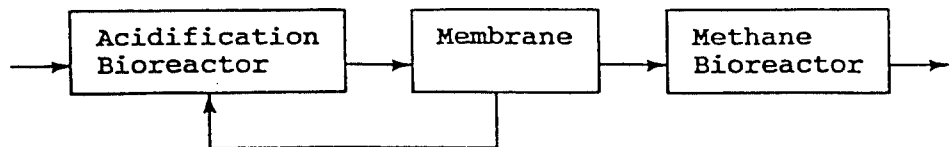


Fig. 6 분리막의 도입 위치

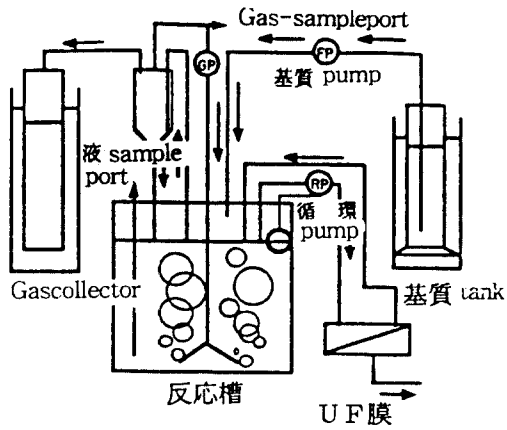


Fig. 7 분리막도입의 산발효실험장치

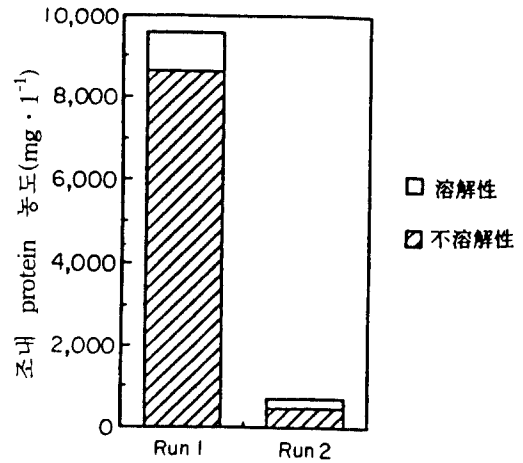


Fig. 8 각 반응조내 단백질농도

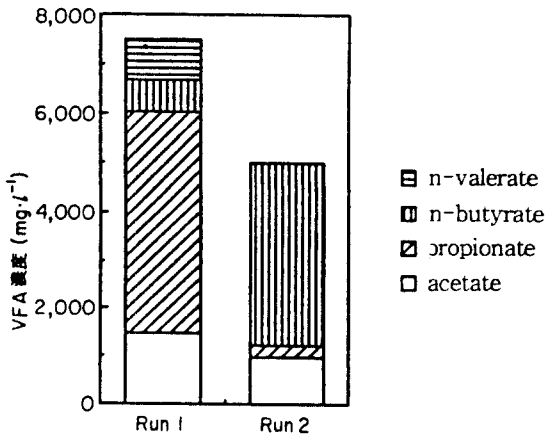


Fig. 9 각 반응조에 있어서 VFA농도

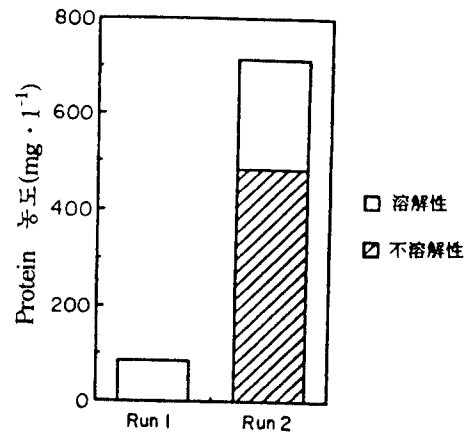


Fig. 10 각 반응조 배출액의 단백질농도

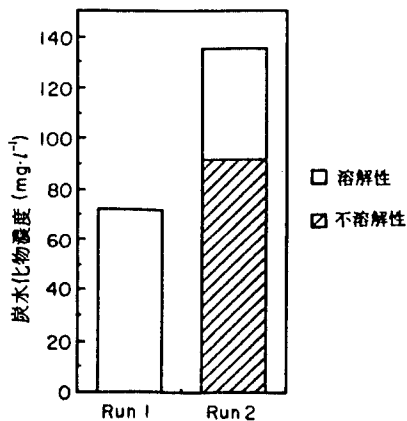


Fig. 11 각 반응조 배출액의 탄수화물농도

Table 5. 각 반응조의 세균수(MPN/ml)

	酸生成細菌	炭水化合物分解細菌	蛋白質分解細菌
Run 1	$1.1 \times 10^{10}$	$1.1 \times 10^{10}$	$7.9 \times 10^8$
Run 2	$3.3 \times 10^7$	$3.3 \times 10^7$	ND*

\*ND:  $10^5$ MPN·ml<sup>-1</sup> 未滿