

## 침지형 중공사막과 철염을 이용한 Pilot MBR 공정의 장기운전에 따른 질소, 인 제거 특성

정진호\* · 허용록\* · 임정대\* · 이의신\* · 박명균<sup>†</sup>

\*(주)대우건설기술연구소 · 수원대학교 토목공학과

(2005년 9월 30일 접수, 2005년 11월 22일 채택)

## Nitrogen and Phosphorus Removal in Long Term Pilot Plant Operation Using Submerged Hollow Fiber Membrane and Ferric Chloride

Cheong, Jin Ho · Heo, Yong Rok · Im, Jeong Dae · Lee, Eui Sin\* · Park, Myung Gyun<sup>†</sup>

\*Environmental Research Team, Daewoo Institute of Construction & Technology · Department of Civil Engineering, Suwon University

**ABSTRACT** : Pilot scale vertical-type membrane bioreactor was operated to examine the effect of FeCl<sub>3</sub> injection on the removal of organics, nitrogen and phosphorous, and additionally trans-membrane pressure (TMP) was observed. The membrane type was hollow fiber membrane with pore size of 0.25 μm, and the material was polytetrafluoroethylene (PTFE). The membrane permeate was continuously removed by a pump under a constant flux (25 L/m<sup>2</sup>/h). Air back-flushing technique were adopted to reduce fouling. As a result, TMP was increased more slowly than that of the operation without air back-flushing. During long-term operation, approximately 310 days, the injection of FeCl<sub>3</sub> was effective not only in removing phosphorous chemically but also in reducing TMP increase. Furthermore, while the average COD and T-N concentration of the effluent without FeCl<sub>3</sub> injection was 14.3 mg/L and 6.0 mg/L respectively, that of effluent with FeCl<sub>3</sub> was 11.3 mg/L and 6.0 mg/L respectively, which confirmed the effects of FeCl<sub>3</sub>.

**Key Words** : Membrane Bioreactor(MBR), Ferric Chloride(FeCl<sub>3</sub>), Air Back-Flushing, Transmembrane Pressure(TMP)

**요약** : 본 연구는 pilot plant 규모의 수직형 MBR 공정을 장기간 운전하면서 호기조에 직접 철염(FeCl<sub>3</sub>)을 투입하였을 때의 유기물 및 질소, 인의 제거 특성을 조사하였고 운전경과에 따른 투과압력 변화를 검토하였다. 공극크기 0.25 μm인 PTFE재질의 중공사막을 호기조에 침지시켜 투과유속 25 LMH로 일정하게 연속 운전을 하였다. 막 오염 저감을 통한 장기운전 방법으로 공기역세를 적용한 결과, 투과압력의 급격한 증가 없이 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다. 전체 310일 동안의 pilot plant 장기운전에서, 철염의 투입이 화학적 인 제거뿐만 아니라 분리막의 투과압력 저하에 효과적인 것으로 나타났다. 또한 철염을 투입한 운전조건에서의 처리수 평균 COD<sub>Cr</sub> 및 총질소 농도는 각각 11.3 mg/L, 6.0 mg/L인데 비하여 철염을 투입하지 않은 경우 처리수 평균 COD<sub>Cr</sub> 및 총질소 농도는 14.3 mg/L, 6.9 mg/L로 철염을 투입한 운전조건에서 보다 양호한 처리수질을 보였다.

**주제어** : MBR, 철염, 공기역세, 투과압력

### 1. 서 론

최근 수자원의 고갈과 수질오염의 증가 등으로 인하여 정부에서는 방류수 수질기준을 강화시키고 처리수의 재이용을 권장하고 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 생물학적 처리 공정으로는 강화된 방류수 수질기준을 안정적으로 준수하기 힘들며 특히 부유물질(Suspended Solid, SS) 제거가 완벽하지 않아 처리수를 재이용하기 위한 중수도 시스템으로도 부적절하다. 이와 관련하여 하·폐수의 생물학적 처리에 분리막을 응용하는 연구가 많이 수행되고 있다. 일부 현장에서는 이러한 막분리생물공정(membrane bioreactor, MBR)이 실질적으로 가동되고 있지만, MBR 공정에 있어서는 막오

염(fouling) 문제가 큰 단점으로 지적되어 이러한 문제의 해결이 요구되고 있는 실정이다.<sup>1,2)</sup>

일반적으로 MBR 공법은 미생물과 처리수가 막을 통하여 물리적으로 분리되므로 미생물의 침강 특성에 영향을 받지 않고 고액 분리가 가능한 공정으로써, 미생물농도를 높게 하여 유기물부하에 대한 완충력을 확보하며 생물학적 공정의 처리 효율을 증대시켜 양질의 수질을 안정적으로 확보할 수 있다는 장점이 있다.<sup>3~5)</sup> 또한 미생물 성장계수가 낮은 질산화 세균과 같은 독립영양세균을 고농도로 배양할 수 있으므로 질산화 공정에 효율적이다. MBR 공정은 낮은 F/M비에서 운전되는데 일반 도시 하수의 경우 F/M비가 0.1 kgBOD/kgMLSS.day에서 미생물의 성장속도와 사멸속도가 같아지게 되어 유발되는 슬러지의 양을 최소화할 수 있는 장점이 있다.<sup>6)</sup> 그러나 SRT(Sludge retention time)를 길게 유지하여 슬러지를 고농도로 유지하는 MBR 공법의 특성상 상대적으로 인의 제거가 어려운 문제점이 있다.<sup>6)</sup>

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: mgpark08@suwon.ac.kr

Tel: 031-220-2291

Fax: 031-220-2291

본 연구에서는 상부의 호기조와 하부의 무산소조로 구성된 pilot plant 규모 수직형 MBR 공정을 장기간 운전하였고 호기조에 직접 철염(FeCl<sub>3</sub>)을 투입하였을 때의 유기물 및 질소, 인의 제거 특성을 조사하였다. 또한 운전경과에 따른 투과압력(transmembrane pressure, TMP) 변화를 검토하였으며 막 오염 저감을 통한 장기운전 방법으로써 공기역세방법의 타당성도 조사하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 수직형 MBR 반응조 및 분리막 사양

본 연구를 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 유효용적 11.6 m<sup>3</sup>(호기조 6.7 m<sup>3</sup>, 무산소조 4.9 m<sup>3</sup>)의 수직형 막 결합 생물 반응조를 경기도 A시 내 하수처리장에 설치하였다. 유입수는 무산소 영역으로 유입되어 하부의 슬러지층에서 탈질이 진행된 후 상부의 호기조로 이동하여 유기물 제거 및 질산화 과정을 거치게 되며, 다시 호기조에서 발생하는 수류 흐름에 의해 무산소조로 재순환되도록 하였다. 처리수의 유입에 따라 반응조가 일정한 수위를 유지할 수 있도록 level sensor에 연동된 펌프로 유입수를 반응조에 공급하였다. 산기장치는 호기조내 미생물에의 산소 공급과 막표면에 부착되는 슬러지를 제거하기 위한 충분한 전단응력을 제공하기 위해 막 모듈 하단부에 설치하였다.

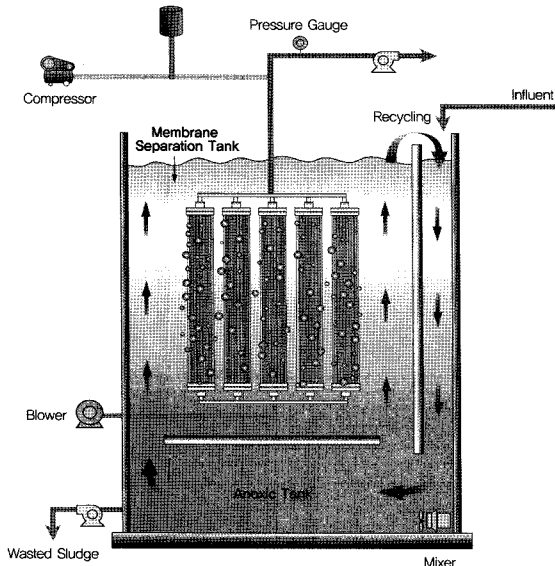


Fig. 1. Schematic diagram of the vertical MBR reactor.

Table 1. Specifications of MF membrane

Parameters	Specification
Materials	Polytetrafluoroethylene
Pore size(μm)	0.25
Area(m <sup>2</sup> /module)	3
O.D./I.D.(mm)	2.0/1.0
Dimensions(mm)	∅150×1200H
Type	Hollow fiber

사용된 막은 Polytetrafluoroethylene(PTFE)재질의 정밀여과막(microfiltration, MF)이고, Table 1에 기본적 사양과 특성을 나타내었다. 모듈당 막면적은 3.0 m<sup>2</sup>고 Fig. 1과 같이 5개의 모듈이 하나의 프레임으로 연결되어 있으며 총 5개의 프레임이 반응조에 투입되었다.

### 2.2. 운전조건 및 유입수 성상

초기운전에는 활성슬러지농도를 7,000 mg/L 정도에서 막을 충전하여 실험을 시작하였다. 막 오염을 최소화하기 위해 간헐운전 및 공기역세를 실시하였다. 즉, 막 운전기간(8분) 동안 처리수를 생산하고 휴지기간(2분)에는 막 운전을 정지하였다. 휴지기간 중 초기 30초 동안 압축기(Compressor)를 통해 공기를 모듈 내부로 주입하는 역세방식을 도입하여 운전을 수행하였다. 정량여과의 운전방식을 택하여 운전기간 동안 투과유속을 25 LMH(L/m<sup>2</sup>/hr)로 일정하게 유지하여 수리학적 체류시간(hydraulic retention time, HRT)을 7.7시간으로 고정하였으며 시간이 경과함에 따라 상승하는 투과압력에 의해 막 오염 및 약품세정 여부를 판단하였다. 전체 HRT는 7.7시간으로 F/M비는 0.1정도로 유지되었고 운전 SRT는 45-50일 정도를 유지하였다(Table 2).

실험에 사용한 시료는 동 하수처리장의 일차침전지 윗층수를 사용하였으며, 약 310일의 전체 운전기간 동안 유입수의 평균 COD<sub>Cr</sub>, SS, T-N, T-P는 각각 190.2, 113.0, 31.9, 5.10 mg/L였다(Table 3).

유입수의 평균 C/N(COD<sub>Cr</sub>/TKN) 비는 5.6으로 Randall 등<sup>7)</sup>이 외부 탄소원의 주입 없이도 탈질이 가능하다고 제시한 8~10보다 다소 낮은 값을 나타내었다.

Table 2. Operating conditions of the vertical MBR reactor

Constant flux(L/m <sup>2</sup> /hr)		25
Maximum transmembrane pressure(kPa)		30
Air flow rate(m <sup>3</sup> /hr)		75
Working volume(m <sup>3</sup> )	Aerobic zone	6.7
	Anoxic zone	4.9
HRT(hr)		7.7
SRT(days)		45-50
F/M ratio		0.10
MLSS in aerobic zone(mg/L)		10,046

Table 3. Process performance of the vertical MBR reactor

Parameters	Units	Raw water		Treated water		Removal %
		Average	Standard deviation	Average	Standard deviation	
COD <sub>Cr</sub>	mg/L	190.2	37.7	13.0	5.6	93.1
SS	mg/L	113.0	32.4	0.2	0.2	99.8
T-N	mg/L	31.9	6.2	6.5	1.1	79.2
T-P*	mg/L	5.32	1.3	2.33	0.5	55.7
T-P**	mg/L	4.81	1.5	0.46	0.3	89.7

\*without FeCl<sub>3</sub>, \*\*with FeCl<sub>3</sub>

한편, 인 제거를 위한 약품으로는 33% 철염(FeCl<sub>3</sub>)을 사용하였고 철염 투입에 따른 반응조 pH 유지를 위해 33% NaOH 용액을 철염과 함께 투입하였다. 운전초기에 철염 주입량은 Yoon 등<sup>8)</sup>이 제시한 식 (1)을 이용하여 1.3 L/day로 주입하였다.

$$Dose(g/day) = \frac{Q \cdot (C_o - C) MW_c}{MW_p} \times S \quad (1)$$

식 (1)에서 Q는 유량(m<sup>3</sup>/day), C<sub>o</sub>는 응집제를 투입하지 않았을 때의 유입수의 총 인 농도(5.1 mg/L), C는 목표 수질(0.5 mg/L), MW<sub>c</sub>는 철염의 분자량(162.5 g/mol), MW<sub>p</sub>는 인산염의 분자량(95 g/mol), S는 안전율(1.5)을 나타낸다.

분석항목은 COD, SS, TKN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TP 등이며 이 기준은 Standard Methods<sup>9)</sup>에 기준하였다. 초기에는 온도를 실온에서 운전하였으며 온도효과를 알아보는 시기에서는 가온기를 설치하여 25℃와 35℃로 온도를 조절하여 실험을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 공기역세 유무에 따른 분리막의 투과특성

미생물이 고농도로 유지되는 MBR 반응조의 경우 잉여 슬러지의 발생량은 적지만, 미생물이 상대적으로 반응조 내에서 오래 체류하는 동안 다양한 물질들이 생성되어 막 오염을 유발하는 것으로 알려져 있다. 침지형 MBR pilot plant 장기운전 실험에 앞서 막 오염 최소화 방안으로써 공기역세방법의 타당성을 검토하였다. 공기역세는 Fig. 2에 나타난 것처럼 운전 중에 막 표면에 쌓인 입자들을 휴지기 동안 막 내부에서 여과 반대방향으로 압축공기를 주입함으로써 막 공경에 흡착되거나 막 공경을 가로 막는 입자들을 효과적으로 제어하는 방법이다. 공기역세는 매 6시간 마다 2분의 휴지기 동안 처음 30초 동안 2 bar의 압축공기를 여과배관을 통해 막 내부로 주입하는 방법을 사용하였다.

Fig. 3은 공기역세 유무에 따른 투과유속과 투과압력의

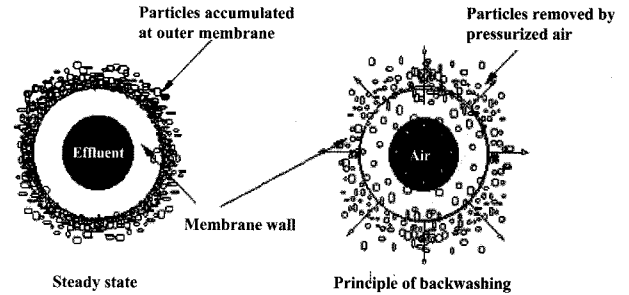


Fig. 2. A principle of air back-flushing.

거동을 나타낸 것이다. 동일한 운전조건을 위해 투과유속은 25 LMH로 일정하게 유지하였고, 운전기간 경과에 따른 투과압력의 거동을 관찰하였다. 공기역세를 하지 않은 경우에는 운전경과 후 약 30일이 지나면서부터 투과압력의 증가정도가 빨라지는 것을 확인할 수 있는 반면에 공기역세를 실시한 경우에는 주기적으로 압축공기를 막 내부로 주입하여 막 표면에 부착된 오염물질을 탈착시킴으로써 투과압력의 급격한 증가현상이 나타나지 않았다. 즉, 침지형 MBR 공정에서 막 오염 저감을 위한 방법으로써 증공사막 내부에서 외부로 공기역세를 실시하는 것이 효과적이며, 화학적 세정 없이도 장기간 안정적인 운전이 가능할 것으로 판단되었다.

#### 3.2. 장기 운전에 따른 투과유속 및 투과압력의 거동

Fig. 4에 전체 운전기간 동안의 투과유속과 이에 따른 투과압력의 변화를 나타내었다. 운전기간 동안 투과유속은 25 LMH로 일정하게 유지하였으며 이때의 TMP의 거동을 살펴보면, 운전 경과 후 약 100일 동안은 투과압력이 12 kPa 이하에서 서서히 증가하였고 그 이후에 급격한 투과압력의 상승으로 인해서 운전경과 약 180일에 이르러서는 약품 세정의 기준으로 설정한 30 kPa에 도달하였다.

이는 주기적인 공기역세에도 불구하고 반응조 내 생물대사산물 등 용해성 유기물질의 증가에 의해서 효과적인 공기역세가 이루어 지지 않았던 모듈 하단부의 막 표면에서부터 케이크 층이 형성되면서 급격히 막의 오염이 진행되었기 때문으로 판단된다(Fig. 5).

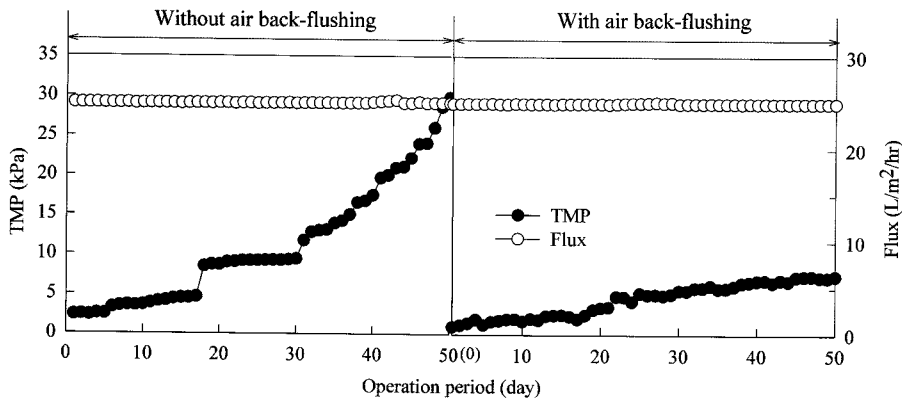


Fig. 3. Variation of flux and TMP without and with air back-flushing.

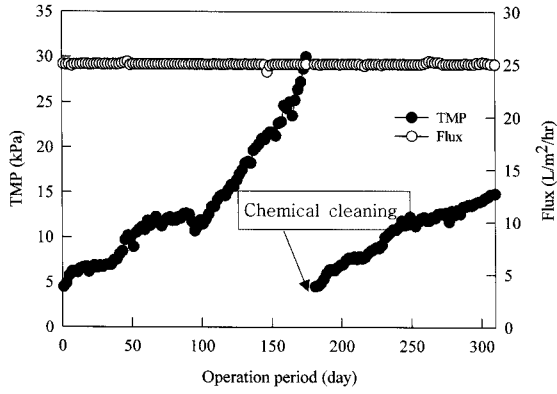


Fig. 4. Variation of flux and TMP for operation time.



Fig. 5. Fouled membrane module after 180d of operation.

약품 세정 후에는 철염을 투입하여 실험하였으며 그 외의 조건은 세정 전과 동일하게 유지하였다. 인 제거를 위하여 철염을 투입하였을 때가 철염을 투입하지 않았을 때에 비해 투과압력이 낮고 안정적인 상태로 유지되는 것을 확인할 수 있는데 이는 투입한 철염이 혼합액내에 존재하는 콜로이드 성 현탁물질을 응집시키고 아울러 알칼리도 성분과 반응해서 금속수산화물을 생성시켜 미세플록을 조대플록으로 전환시킨 것이 안정된 투과압력을 낮추는 데 기여한 것으로 판단된다.<sup>10)</sup>

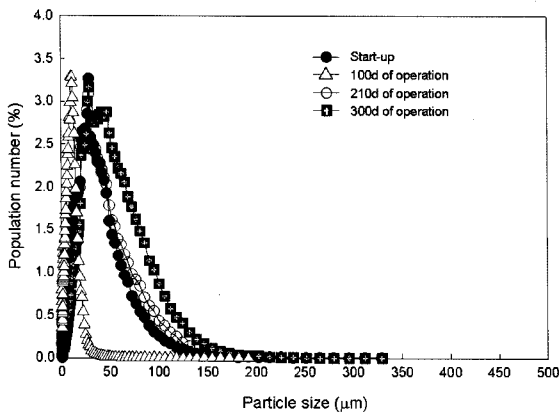
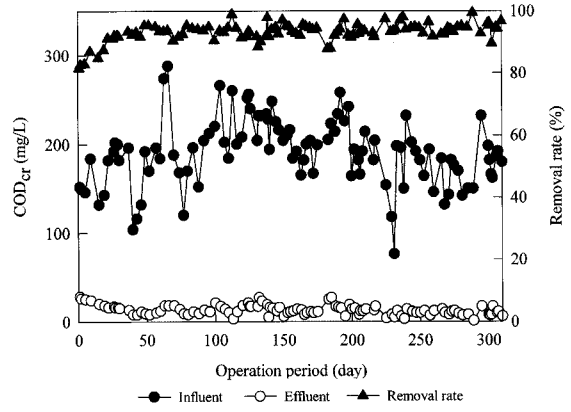
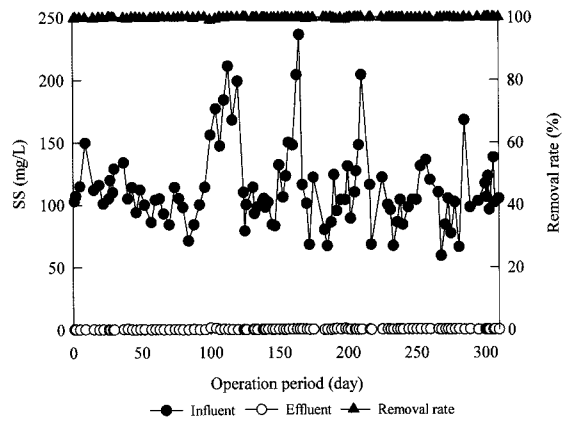


Fig. 6. Particle size distribution of activated sludge in mixed liquor.

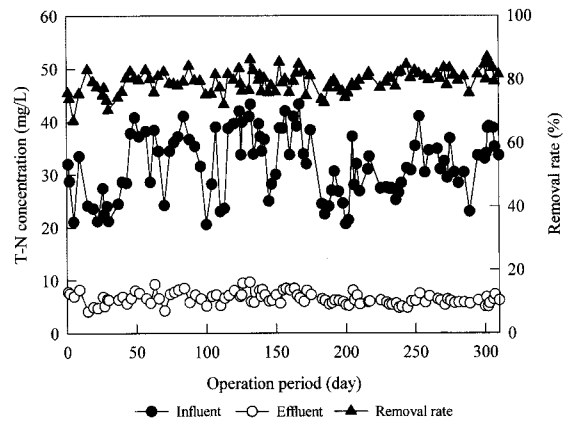
Fig. 6은 반응조 내 0.05 µm에서 500 µm 범위의 미생물 플록 입자들의 분포를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 철염을 투입하지 않고 100일이 경과한 슬러지 입자 크기가 초기 슬러지에 비해 오히려 작은 것을 확인할 수 있는데, 이것은 반응조 내 미생물이 자가분해 등을 통하여 플록을 안정적으로 형성하지 못하고 미세하게 해체되기 때문인 것으로 판단된다. 반면에 철염을 투입한 경우에는 앞서 설명한 바와 같이 미세플록이 조대플록으로 전환되는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Variation of COD<sub>Cr</sub>(a), SS(b) and T-N(c) for operation time.

### 3.3. 철염 투입 유무에 따른 제거 효율 평가

#### 3.3.1. 유기물 및 질소 제거

Fig. 7에 운전기간 동안의 유기물 및 총질소의 농도 변화를 나타내었다. 유입수의 유기물농도 190 mg COD<sub>Cr</sub>/L, 113 mg SS/L에 대하여 처리수의 평균농도는 13 mg COD<sub>Cr</sub>/L, 0.2 mg SS/L로 나타났고, COD<sub>Cr</sub>이 평균 93.1%, SS가 평균 99.8%의 높은 제거율을 나타내었다. 유기물 제거가 높은 수준에서 안정적으로 이루어진 것은 분리막에 의한 반응조 내 고형물의 완벽한 저류로 인해 반응조 내 미생물 농도를 높게 유지함으로써 유기물 부하에 잘 대처할 수 있고 슬러지의 침강성과는 관계없이 부유성 입자가 거의 100% 제거된 처리수 생산이 이루어졌기 때문이다.

총질소의 평균 유입농도 31.9 mg/L에 대하여 처리수의 평균농도는 6.5 mg/L로 나타나 제거효율은 79.2%였다. 운전기간 동안 질산화율은 평균 98%로 유입수내 질소성분의 대부분이 질산성 질소로 전환되는 것으로 나타났는데, 이는 MBR 공정에서 SRT가 10일 이상일 경우 질산화율이 99%로 거의 완벽하게 이루어진다고 보고한 Fan<sup>11)</sup> 등의 연구결과와 일치하며, MBR 공정에서 막에 의한 미생물군집의 완벽한 차단 환경이 nitrobactor나 nitrosomonas와 같은 질산성 미생물의 다수를 확보할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

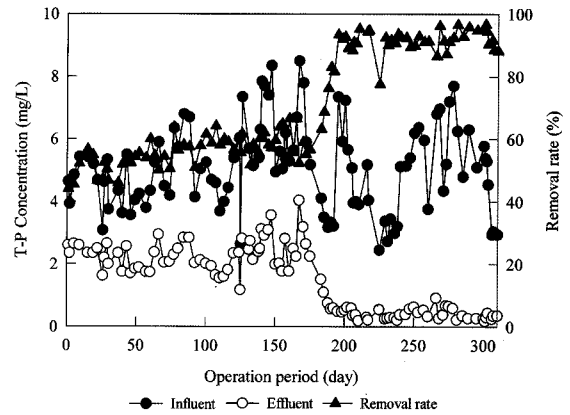
Table 4는 철염 투입 유무에 따른 운전 결과를 나타낸 것이다. 철염을 투입한 운전조건의 유기물 및 질소제거 효율이 철염을 투입하지 않은 경우보다 약간 높게 나타났는데 이는 점성을 갖는 미생물 대사산물이 철염과 반응하여 불용성 금속염으로 전환됨으로써 나타난 결과로 판단된다. 따라서 호기조에 직접 철염을 투입하는 것은 단순히 인성분의 화학적 제거뿐만 아니라 혼합액내 미생물 대사산물과 반응하여 처리수의 수질향상을 가져오는 것으로 판단된다.

#### 3.3.2. 인제거

MBR 공정의 가장 큰 장점이자 인 제거 측면에서 단점은 잉여 슬러지의 폐기를 최소화하는 것이다. 즉, 일반 활성슬러지 공정에 비해 반응조 내 미생물을 3~4배의 고농도로 유지함으로써 갖는 장점이 여러 가지가 있는 반면에, 생물학적 인 제거 기작에 의한 궁극적인 인의 제거 수단인 슬러지 폐기량이 적기 때문에 결국 반응조 내에 인이 축적되고 처리효율이 개선되지 않는다는 단점을 동시에 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 반응조 내의 용해성 인을 응집제를 이용하여 화학적으로 제거함으로써 질소와 인의 동시 제거를 구현하고자 하였다.

**Table 4.** Effect of FeCl<sub>3</sub> injection on COD<sub>Cr</sub>, SS, T-N and T-P removal

Content	COD <sub>Cr</sub>		SS		T-N		T-P	
	Eff. (mg/L)	R.E. (%)	Eff. (mg/L)	R.E. (%)	Eff. (mg/L)	R.E. (%)	Eff. (mg/L)	R.E. (%)
without FeCl <sub>3</sub>	14.3	92.4	0.2	99.8	6.9	78.6	2.33	55.7
with FeCl <sub>3</sub>	11.3	93.9	0.2	99.8	6.0	80.0	0.46	89.7



**Fig. 8.** Variation of T-P for operation time.

Fig. 8은 운전기간 동안 인의 농도 변화를 나타낸 것이다. 유입수의 평균 총인 농도는 5.1 mg/L로 나타났고, 철염을 투입하지 않은 운전초기부터 180일 동안의 처리수의 평균 농도와 제거율은 각각 2.33 mg/L, 55.7%인데 비하여 철염을 투입한 180일 이후의 처리수의 평균 농도와 제거율은 각각 0.46 mg/L, 89.7%의 높은 제거율을 보였다(Table 4).

철염 주입하기 전과 비교해 보면 제거율이 44% 향상되었음을 확인할 수 있었다. 운전경과 265일부터 약 일주일 정도 철염주입 펌프의 고장으로 철염이 반응조에 주입되지 않았음에도 불구하고 제거율이 높게 유지된 것은 반응조에 투입된 철염이 불용성 금속염을 형성하고 이것이 외부로 유출되지 않고 장시간 반응조 내에 축적되면서 재용출, 재용해 및 재반응 했기 때문인 것으로 판단된다.<sup>11)</sup> 따라서 펌프 수리 후부터는 철염 주입량을 1.0 L/day로 낮추어 운전했음에도 불구하고 운전기간 동안 누적된 철염으로 인해서 처리수질이나 투과압력면에서 별다른 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다.<sup>12)</sup>

## 4. 결론

Pilot plant 규모(처리수량 36 m<sup>3</sup>/day)의 수직형 막 결합 생물 반응조를 310여 일 동안 운전하면서 철염 투입 유무에 따른 처리효율 및 운전 특성에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 침지형 MBR 공정에 공기역세를 적용한 결과, 공기역세에 의해 막 표면에 부착된 오염물질을 주기적으로 탈착시킴으로써 공기역세를 하지 않은 경우에 비해 투과압력이 급격한 증가 없이 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다. 따라서, 공기역세를 실시하는 것이 침지형 MBR 공정에서 막 오염을 최소화하여 약품세정 주기를 연장함으로써 장기 운전을 위한 효과적인 방법이 될 것으로 판단된다.
- 2) 미생물을 고농도로 유지하는 MBR 공정의 특성상 인 제거율이 떨어지는 단점을 보완하고자 호기조에 1.3 L/day로 철염을 투입한 결과, 처리수내 인의 농도는 철염을 투입하기 전 2.33 mg/L에서 철염 투입 후 0.46 mg/L로 약 44%

의 제거효율 향상을 나타내었다. 또한 응집작용 및 미생물 대사산물 등과 같은 용존 물질의 불용성 고형물화에 의해 분리막의 투과압력 저하에 효과적인 것으로 나타났다.

3) 철염을 투입한 운전조건의 처리수 평균 COD<sub>Cr</sub> 및 총질소 농도는 각각 11.3 mg/L, 6.0 mg/L인데 비하여 철염을 투입하지 않은 경우 처리수 평균 COD<sub>Cr</sub> 및 총질소 농도는 14.3 mg/L, 6.9 mg/L로 철염을 투입한 운전조건에서 보다 양호한 처리수질을 보였다. 따라서 호기조에 직접 철염을 투입하는 것은 단순히 인성분의 화학적 제거뿐만 아니라 혼합액내 미생물 대사산물과 반응하여 처리수의 수질향상을 가져오는 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 Eco-Technopia 21 과제의 연구비 지원에 의하여 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 양병수, 박남배, 이재관, "질소 및 인제거를 위한 기존 폐수처리장 개선방안에 관한 연구," *물환경학회지*, **15**(3), 50~61(1990).
2. 차기철, 정태영, 정형근, 김동진, 한상국, "MBR 공정에서 수리학적 체류시간의 변화에 따른 생물대사산물과 막오염," *대한환경공학학회지*, **24**(10), 1829~1837(2002).
3. Stephenson, T., Judd, S., Jefferson B., and Brindle, K., *Membrane bioreactors for wastewater treatment*, IWA publishing, London(2000).
4. Cote, P., Buisson, H., Pound, C., and Arakaki, G., "Immersed membrane activated sludge for the reuse of

- municipal wastewater," *Desalination*, **113**, 189~196(1997).
5. Ueda, T., Hata, K., Kikuoka, Y., and Seino, O., "Effects of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor," *Water Res.*, **31**(3), 489~494(1997).
6. 김규진, 윤성훈, "Membrane bioreactor(MBR)을 이용한 오·폐수처리," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**(3), 239~248(2001).
7. Randall, C. W., Stansel, H. D., and Barnard, J. L., *Design of activated sludge biological nutrient removal plants*, In: *Design and Retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal*, edited by Randall, C. W. Technomic Publishing, Co. Inc.(1992).
8. Yoon, S. H., Kim, H. S., Park, J. K., Kim, H., and Sung, J. Y., "Influence of important operational parameters on performance of a membrane biological reactor," *Water Sci. Technol.*, **41**(10-11), 235~242(2000).
9. APHA, *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*, 20th ed., American Public Health Association, Newyork(1998).
10. 박재로, 김응호, "침지형막분리법과 응집제첨가활성슬러지법의 조합에 의한 하수중의 유기물 및 인제거 특성에 관한 연구," *한국물환경학회지*, **16**(3), 401~411(2000).
11. Fan, X. J., Urbain, V., Qian, Y., and Manem, J., "Nitrification and mass balance with a membrane bioreactor for municipal wastewater treatment," *Water Sci. Technol.*, **38**(4-5), 421~428(1996).
12. Yasutoshi, S., "Filtration characteristics of hollow fiber micro filtration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment," *Water Res.*, **30**(10), 2385~2392(1996).