

활성슬러지조내 부직포 여재 관형필터의 고액분리 특성 평가

서규태[†] · 이택순 · 박영미

창원대학교 환경공학과

(2007년 11월 28일 접수, 2008년 1월 22일 채택)

Evaluation of Tubular Type Non-woven Fabric Filter for Solid-liquid Separation in Activated Sludge Reactor

Gyu Tae Seo[†] · Teak Soon Lee · Young Mi Park

Department of Environmental Engineering, Changwon National University

ABSTRACT : Coarse pore filter could be an alternative of membrane for solid-liquid separation in an activated sludge reactor because of inexpensive cost of the filter material and high flux at low filtration pressure. However such filter module has much less specific filtration area compared to the membrane. Therefore a certain effort is required to increase the specific filtration area in the module design of such coarse pore filter for solid-liquid separation in an activated sludge reactor. In this study, tubular type coarse pore filter was designed at various diameter and configuration. The filtration performance was investigated to separate solid in the activated sludge reactor for domestic wastewater treatment. Tubular type coarse pore filter module could be successfully applicable to solid separation in the activated sludge reactor. The design parameters were the tube diameter of 10mm and vertical installation. Smaller diameter of the tube caused faster increase of the filtration pressure because of the hydraulic head loss in the tube channel.

Key Words : Activated Sludge Reactor, Non-woven Fabric Filter, Tubular Type Coarse Pore Filter Module

요약 : 활성슬러지 공정에 막을 침지한 MBR(Membrane Bioreactor)공정에서 고가의 막을 대체하여 부직포 같은 섬유 여과막을 이용한 연구가 수행되었다. 부직포는 저렴한 가격, 저압에서 높은 투과유속의 확보 등 막을 대체할 수 있는 대안으로서 가치가 높다. 그러나 부직포 여과막 모듈은 막에 비하여 비표면적이 현저하게 작기 때문에 이를 증가시키는 노력이 필요하다. 본 연구에서는 활성슬러지 공정에 부직포 여과 관형 막모듈을 침지하여 설치형태와 관직경에 따라 여과압력에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다. 관형 필터의 직경이 같을 때, 반응조내 필터 모듈의 설치형태가 여과압력 변화에 미치는 영향은 없었다. 그러나 필터의 관 직경이 작을수록 여과압력의 상승이 빠르게 나타났고 이는 관내 수리학적 손실에 기인된 것으로 해석되었다. 따라서 관형 부직포 여과막은 관경 10 mm 이상에서 비표면적을 고려하여 설계하고, 반응조내 수직형으로 설치함이 적절한 것으로 나타났다.

주제어 : 활성슬러지 공법, 부직포 여과막 모듈, 관형 모듈

1. 서론

부직포여재를 이용한 여과는 최근 새로운 고액분리기술로 활발히 연구되고 있는 정밀여과 막의 대응으로 이용 가능성이 높은 여과기술로 인식되고 있다. 특히 정밀여과막(MF)이나 한외여과막(UF)이 결합된 생물반응조는 MBR(Membrane Bioreactor)로 알려져 하(폐)수 처리에 대한 적용이 활발히 진행되고 있으나, 이는 막의 공급가격이 여전히 비싸고, 낮은 투과유속과 여과동력 그리고 막의 막힘 현상 등에 의하여 초기 설치비 및 막 교체와 세척에 따른 유지관리비가 높은 문제점을 안고 있다.

이에 반하여 부직포와 같은 공극이 큰 여과 막은 저렴한 가격과 중력식 여과에서 높은 투과유속을 확보할 수

있는 장점을 가지므로 이를 이용한 결합형 생물반응공법에 관한 연구가 국내외적으로 상당히 이루어지고 있어 실용화 가능성을 한층 높이고 있다.^{1~6)} 그러나 본 여과 시스템의 실 공정 적용을 위하여 장기간 운전 시 투과유속의 안정적인 유지가 중요한 인자로서 작용한다. 이에 따라 부직포 여재의 투과유속을 장기간 안정하게 유지하기 위하여 공극사이의 막힘 원인물질인 미세 활성슬러지 입자의 발생 억제, 반응조 내부에 응집체 투입에 의한 현탁물질의 응집, 초기투과유속의 적정관리 및 부직포 여과모듈 직하부에서 폭기에 의한 표면세척 등에 관한 방안이 보고되고 있다.^{2,7)} 한편 이 등은⁸⁾ 주기적인 공기 역세척 시스템을 도입한 연구에서 MLSS 3,000 mg/L의 생물반응조에 침지한 35 g/m²의 평판형 부직포 여과막에 대하여 여과수두 0.3 m에 초기 투과유속 0.42 m/d가 매일 1회씩 2분간 공기역세로 약 100일간 유지할 수 있었으나 부직포 섬유질 사이에 축적한 입자에 의하여 투과유속은 점점 감소하는

[†] Corresponding author

E-mail: gts@changwon.ac.kr

Tel: 055-279-7566

Fax: 055-281-3011

추세를 보였으며, 보다 효과적인 역세를 위하여 부직포 막면에 역세공기가 균등하게 분포되어야 한다고 제시하였다. 이와 같이 부직포 여재를 이용한 생물반응조내 고액분리 시스템은 장기간 안정적인 투과유속의 확보가 관건이고, 보다 컴팩트한 시스템에서 많은 양의 물을 처리할 수 있도록 하는 것이 중요하다. 이에 따라 반응조내 침지한 부직포 여재 막모듈의 형태를 다양하게 구성할 필요가 있다. 이전의 연구⁹⁾에서는 부직포 여재막의 형태를 평판형과 관형으로 각각 구성하여 투과유속 1.73 m/d에서 여과압력의 변화를 비교한 결과 관형 모듈이 보다 안정적인 운전 특성을 보였다. 본 연구에서는 활성슬러지 반응조내 관형 부직포 막모듈을 침지하였을 때, 보다 장기운전에 적합한 모듈의 운전 인자를 파악하기 위해 관의 직경 및 설치형태에 따른 여과압력 변화 및 고액분리 특성을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에 사용된 부직포는 폴리프로필렌 재질로서 단위중량이 35 g/m²인 부직포이며 각기 직경이 다른 관형태로 모듈을 제작하여 실험하였다. 본 연구에 사용된 bench-scale은 무산소조(Anoxic reactor)와 호기조(Oxic reactor)로 구성된 A/O공정의 생물반응기이며 호기조 내부에 침지된 부직포 분리막에서 강제 흡입을 통해 처리수를 배출하도록 설계하였다. 두 반응조의 모듈 형태는 Fig. 1과 같으며, 모듈특성과 운전 조건은 Table. 1에 나타냈다. 원수로 주입된 합성폐수는 우리나라 평균 하수처리장 유입수 농도를 기준으로 약간 높게 조정하였으며 COD_{Mn} 100 ± 5 mg/L, T-N 40 ± 0.5 mg/L, T-P 8 ± 0.3 mg/L로 조정하였다. 주입원수, 처리수 및 반응조 혼액을 수질오염공정시험방법에 따라 분석하였으며, 부직포에 부착되어있는 슬러지 관찰을 위해 SEM촬영을 하였다.

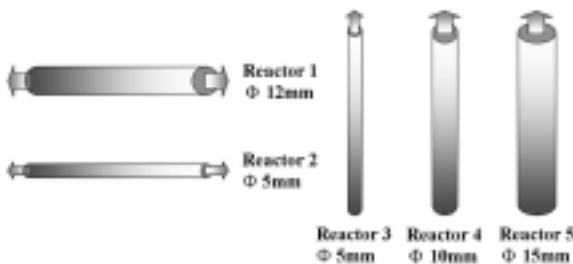


Fig. 1. Module design.

3. 결과 및 고찰

3.1. 관형필터 형태별 여과특성

3.1.1. 투과유속에 따른 압력변화

반응조내 관형 부직포막을 수평으로 침지시켜 양쪽에서 흡인여과를 한 필터의 관경 12 mm(R1)와 5 mm(R2)에 대한 여과특성 비교와 관경 5 mm의 필터를 반응조내 수평(R2) 및 수직(R3)으로 침지한 경우의 투과 유속에 따른 여과압력의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. R1의 경우 투과유속 0.50~1.16 m/d의 범위에서 초기여과 압력은 거의 걸리지 않은 상태에서 유지되었다. 투과유속을 1.67~1.73 m/d의 범위로 증가시켰을 때 6일 동안 압력이 5.3 kPa까지 상승하였으며 이후 큰 변화 없이 일정하게 유지되었다. 그러나 직경이 5 mm인 관형 모듈을 이용하여 운전한 R2와 R3은 압력변화가 급격히 일어났다. R2는 R1과 직경만 다르고 다른 조건은 동일하게 실험하였는데 투과유속 0.9 m/d로 운전한 2일 만에 초기 여과압력 5 kPa에서 18.7 kPa까지 상승하였다. 모듈을 물리적 세척을 하여 보다 낮은 투과유속(0.39~0.45 m/d)에서의 운전결과 5일 만에 여과압력이 24.7 kPa까지 상승하였으며, 이후 새 필터로 교체하여 투과유속 0.29~0.37 m/d로 재운전한 결과 역시 7일 후에 24 kPa까지 여과압력이 상승하여 R1과 다른 운전 특성을 나타내었다. 직경 5 mm의 관형 모듈을 수직으로 침지하여 위쪽으로 흡인 여과한 R3 역시 R2와 비슷한 결과를 나타내었다. 투과유속 0.90~0.94 m/d로 운전시 2일 만에 여과압력이 16 kPa로 상승했고, 필터를 물리적으로 세척한 후 투과유속 0.37~0.41 m/d에서 5일 간 여과압력이 25.3 kPa로 상승하였으며, 새 필터로 투과 유속 0.29~0.33 m/d로 운전한 결과 역시 7일 후 여과압력이 26.7 kPa로

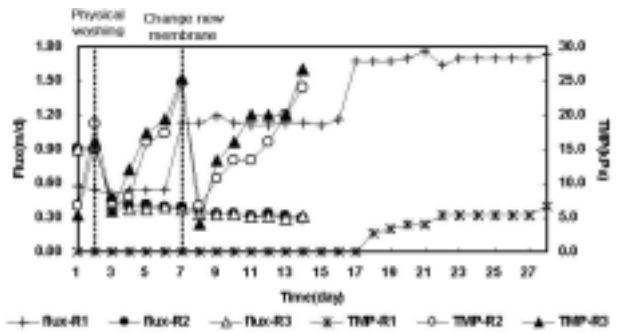


Fig. 2. Daily variation of flux and pressure of Reactor1, Reactor2 and Reactor3.

Table 1. Characteristics of module design and operation condition

	Reactor 1(R1)	Reactor 2(R2)	Reactor 3(R3)	Reactor 4(R4)	Reactor 5(R5)
Diameter or size	12 mm	5 mm	5 mm	10 mm	15 mm
Installation of the filter	Horizontal, Two side suction	Horizontal, Two side suction	Vertical, One side suction	Vertical, One side suction	Vertical, One side suction
Filtration area	0.051 m ²	0.035 m ²	0.035 m ²	0.034 m ²	0.034 m ²
Initial flux	0.5-1.73 m/d	0.5-1 m/d	0.5-1 m/d	1-2.3 m/d	1-2.3 m/d
Bath capacity	0.0192 m ³ (Anoxic 0.0072 m ³ , Aerobic 0.012 m ³)				
MLSS	2,500~3,500 mg/L				

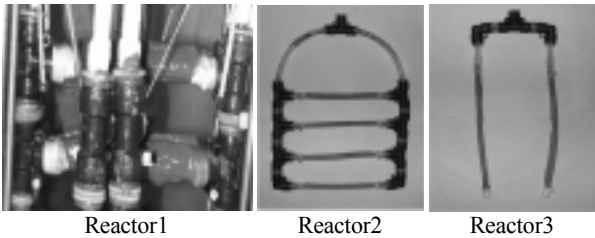


Fig. 3. Photograph of the modules after operation.

급격한 상승을 나타내었다. 이상과 같이 R1과 R2의 운전 결과에서 튜브의 직경은 낮은 여과 압력으로 안정적인 투과 유속을 가지기 위해 고려되어야할 주요 영향 인자이며, 그에 반해 반응조내 침지형태 및 흡인방식을 비교한 R2와 R3는 운전결과에 별 차이가 나타나지 않았다.

Fig. 3은 일정기간 운전 후 각 필터모듈의 모습을 나타낸 것이다. R1은 30일 운전 후, R2와 R3은 14일 운전 후 부직포 막 표면에 부착되어 있는 슬러지층을 관찰하였다. R1의 경우 육안으로도 볼 수 있을 만큼 많은 양의 슬러지가 부착되어 있었으며 부착되어 있는 슬러지를 채취하여 건조무게를 구한 다음 부직포 면적으로 나누어 구한 부직포 단위 면적(cm²)당 슬러지 무게(mg)는 22.43 mg/cm²으로 나타났다. 반면 압력상승이 급격히 일어난 R2와 R3의 모듈은 육안으로 보기에 슬러지 케익층이 두껍게 형성되어 있지 않았다. 그러므로 급격한 압력 상승 유발 원인으로 R2와 R3 부직포 표면에 얇은 슬라임 층과 미세 슬러지 입자로 인한 부직포내 공극의 오염이 유발된 것으로 판단되어 R2와 R3의 부직포를 양끝, 가운데 부분을 각각 채취하여 SEM촬영을 실시하였다. Fig. 4는 SEM촬영을 한 결과이며 부직포 공극 사이에 슬러지가 부착되어 있는 것을 관찰할 수 있었다.

R1에서 관형 부직포막을 수평으로 설치하였을 때, 일부 슬러지가 막 모듈에 쌓여 두꺼운 슬러지층을 형성함으로써 압력상승의 원인으로 판단하여 R4와 R5에서는 직경이 각각 10 mm, 15 mm인 관형 막을 호기조내 수직으로 침지하여 위로 한쪽여과를 실시하였다. Fig. 5에 투과유속의 변화에 따른 압력변화를 나타내었다. 투과유속을 직경이 큰

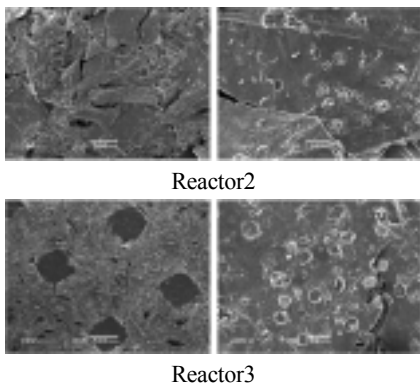


Fig. 4. SEM photograph of the filter surface in Reactor 2 and 3(×35, ×150).

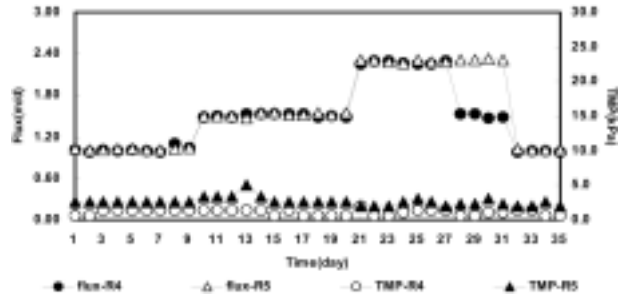


Fig. 5. Daily variation of flux and pressure of Reactor 4 and Reactor 5.

모듈을 세워서 설치하면 보다 안정된 운전이 가능할거라는 예상과는 달리 슬러지층이 잘 형성되지 않고 불규칙적으로 슬러지가 유출되어 여과압력이 5 kPa 이하에서 상승과 하강을 반복하였다.

3.1.2. 관내 수리특성에 따른 여과압력의 변화

위 결과를 조합해 볼 때, 관형 모듈의 여과방식과 모듈 직경에 따라 내부에 손실압력이 다르다 생각되어 중공사막의 마찰손실을 구하는 이론적인 공식을 참고하여 관형 모듈의 예상여과압력을 구하고 실제 측정여과압력과 비교하여 보았다. 이론압력에 대한 이론 투과유속을 F_e , 실제 압력에 대한 실제 투과유속을 F_r 이라 하면 둘은 다음과 같은 관계가 있다.

$$F_r = \frac{F_e}{\lambda [\cos \theta (\frac{\lambda}{L}) + \lambda (\frac{L_s}{L})]}$$

(Permeate Flow in one end open Hollow Fiber)

$$F_r = \frac{F_e}{\lambda [\cos \theta (\frac{\lambda}{2}) + \lambda (\frac{L_s}{L})]}$$

(Permeate Flow in two ends open Hollow Fiber)

이론압력에 대한 이론 투과 유속 F_e 를 구하기 위해 증류수로 실험방법과 동일하게 실시하여 대조실험 데이터를 이용해 계산한 여과압력을 예상압력으로 하였다. R1과 R2는 양쪽여과이므로 두 번째 식을 사용하여 계산하였고, R3, R4와 R5는 한쪽여과이므로 첫 번째 식을 적용하였다. 실제 실험으로 측정된 여과압력과 비교한 그래프를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

R1의 경우 운전이 장기로 가면서 예상압력보다 실제압력이 증가하면서 막 내부 또는 슬러지층에 의해서 압력 손실이 일어나는 것을 알 수 있다. R2와 R3의 경우 투과 유속 0.5~1 m/d에서 예상 압력은 2 kPa 미만의 매우 낮은 값을 나타내었으나 실제 측정값은 매우 높게 나타났다. 피크를 기준으로 물리적 세척과 새막교체 작업이 있었으며 투과유속을 적절하게 조절하였다. 재가동 후 급방 압력이 다시 올라가는 것으로 보아 부직포막 공극사이의 오염이 급격히 빠르게 일어남으로 인한 압력손실이 매우 큼

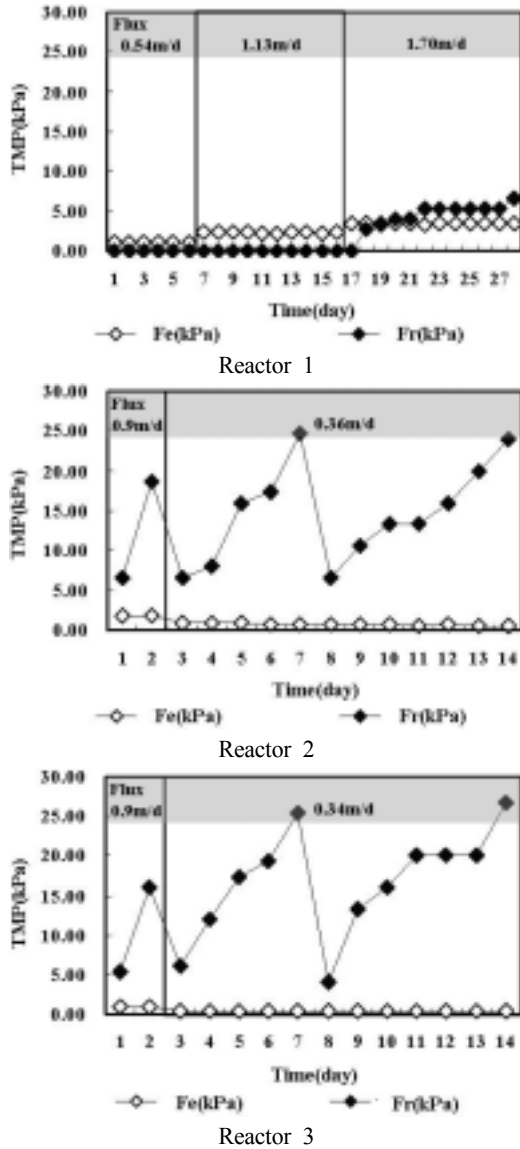


Fig. 6. Comparison of computational pressure with experimental pressure for reactor 1, 2 and 3.

을 알 수 있다. R1과 R2, R3을 비교하였을 때 모듈의 직경에 따른 내부 예상압력은 비슷한 것으로 나타났으나, 직경이 작을수록 모듈 외부에서 내부로의 유속과 슬러지에 대한 영향이 큰 것으로 사료된다. 이후 모듈 직경에 따른 외부인자들의 변화에 대한 추후실험이 이루어져야 할 것이다. 위의 결과로 모듈의 직경은 안정된 장기운전을 위한 주요 인자임을 알 수 있다. 양쪽여과일 때 보다 한쪽 여과일 때 예상압력이 다소 낮게 나타났으나, 직경이 작은 경우에는 그 차이가 보이지 않았다.

한편 R4와 R5의 예상압력은 실제압력과 비슷하게 나타나 R1의 결과와 비교할 때, R4 및 R5의 부직포 막은 표면 슬러지층에 의한 여과 손실이 거의 없다고 해석할 수 있다. 이는 R4 및 R5의 부직포막 표면에 안정된 슬러지층이 형성되지 않은데 기인하고, 여과수에 슬러지 유출이 불규칙적으로 일어나는 현상을 설명할 수 있다.

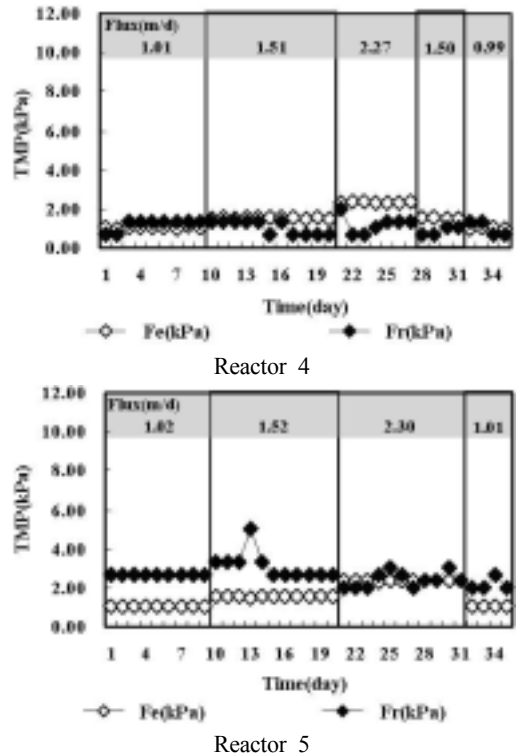


Fig. 7. Comparison of computational pressure with experimental pressure for reactor 4 and 5.

3.2. 고액분리특성

반응조 내의 MLSS를 비교한 Fig. 8에서 운전초기 2,500~3,000 mg/L로 MLSS를 주입하였다. R1의 경우 부직포 막에 슬러지가 부착됨으로써 MLSS 농도는 점점 감소하는 경향을 보였다. 이에 인위적으로 외부 슬러지를 주입하여 반응조내 MLSS 농도를 3,000~3,500 mg/L로 일정하게 조절하였다. 반면 R2와 R3의 MLSS 농도는 약 3,000 mg/L로 운전기간 동안 변화 없이 유지되었다. 운전기간 동안 반응조 유출 SS농도는 평균 3~7 mg/L로 R1, R2, R3 모두 안정적인 고액분리가 이루어짐을 확인하였다.

반면 R4와 R5는 불규칙적으로 슬러지의 유출이 너무 많았다. 안정적으로 운전될 때에는 2~12 mg/L의 SS가 유출되었고, 슬러지층의 형성이 불안정한 경우에는 22 mg/L에서 최고 165 mg/L까지 유출되었다. R4에서는 유출량이 너무

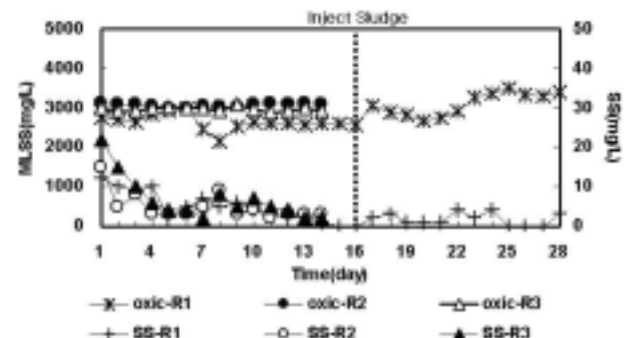


Fig. 8. Daily variation of MLSS and effluent SS concentration of Reactor 1, 2 and 3.

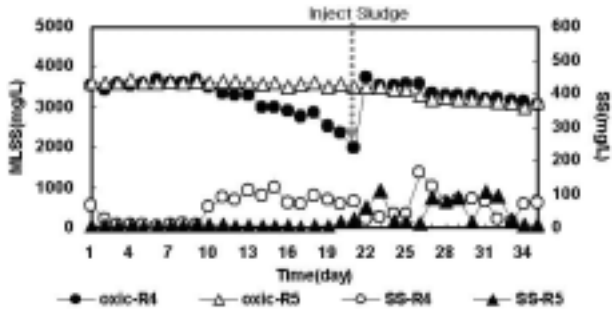


Fig. 9. Daily variation of MLSS & effluent SS concentration of Reactor 4 and 5.

많아 반응조내 MLSS의 농도가 2,000 mg/L 이하로 떨어져 인위적으로 외부 슬러지를 주입하여 초기농도를 조절하였다.

유입 원수의 평균농도는 TOC와 COD가 각각 71.32 mg/L, 109.35 mg/L였으며, 유출농도는 운전조건에 상관없이 TOC 평균 3.49~5.26 mg/L, COD 평균 4.68~5.55 mg/L로 나타나 91~98%의 유기물 처리효율을 보였다. 영양염류의 처리효율은 T-N 40%, T-P 25% 이상으로 나타났다.

4. 결론

이상의 결과로부터 활성 슬러지조내 관형 부직포 여과필터의 고액분리 특성은 관의 직경과 활성슬러지조내 설치형태에 따라 상당한 영향이 있음을 알 수 있다.

관형 필터의 직경에 대하여 직경 5 mm 모듈과 직경 12 mm 모듈과 비교하였을 때, 동일 여과유속에서 운전에 따른 여과압력은 직경 12 mm 모듈이 상당히 안정적으로 나타났다. 이는 관의 내부순실압력 보다 부직포 막 표면의 수리특성에 따라 표면에 형성된 슬러지 층의 형태가 다른 것에 기인하였다. 즉 직경 12 mm의 모듈은 부직포막 표면의 슬러지층은 두껍고 느슨한 데 비하여, 직경 5 mm의 모듈은 부직포 표면에 얇은 생물막이 압착된 것으로 부직포 단면에 대한 SEM촬영으로 확인할 수 있었다.

조 내 모듈의 설치형태에 따른 비교에서 직경이 10 mm 이상일 때 수평으로 양쪽여과가 수직 한쪽여과보다 고액분리의 측면에서 안정적인 운전이 가능하였다. 이는 수직으로 설치한 모듈은 하부의 폭기에 의해 슬러지 케익층이 제대로 형성되지 못하여 고액분리가 안정적으로 이루어지지 않은 것에 기인하였다.

결론적으로, 관형 부직포 여과 막모듈의 설계시 여과방식과 내부직경에 따라 부직포 여과 압력특성이 달라지며 적절한 내부직경을 결정하여야 한다. 또한 모듈 설계시 예상여과압력보다 실측압력이 약간 높을 수 있도록 설계되어야 막면 슬러지 층이 안정적으로 형성되어 효율적인 고액분리가 이루어질 수 있다.

사 사

본 연구는 2006년도 창원대학교 교내 연구비의 지원에 의해 수행된 것으로써 이에 감사드립니다.

기호설명

- F_e : elementary flux per unit pressure
- F_r : real flux per unit pressure($J_r/\Delta P_f$)
- d_e : outer diameter of fiber
- d_i : inner diameter of fiber
- μ : viscosity of water
- L : fiber length
- l_s : sealing length
- $\lambda = HL$

$$H = \sqrt{\frac{128\mu d_e F_e}{d_i^4}}$$

참고문헌

1. 北尾高嶺, 西田耕治, 木曾秋, “不織布モジュールろ過分離を利用した間歇曝氣による生物學的高度處理に關する研究,” 淨化槽研究, **8(1)**, 27~35(1996).
2. 北尾高嶺, 西田耕治, 井水敏文, 木曾秋, “不織布ろ過分離材を用いたろ過分離バイオリクターの長期運轉に關する研究,” 日本下水道協會誌論文集, **35(425)**, 12~22(1998).
3. Kiso, Y., Jung, Y., Ichinari, T., Park, M., Kitao, T., Nishimura, K., and Min, K., “Wastewater treatment performance of a filtration bio-reactor equipped with a mesh as a filter material,” *Water Res.*, **34(17)**, 4143~4150(2000).
4. 정용준, 민경석, “간헐폭기 Mesh 침지여과분리법을 이용한 하수처리와 운전 안정성,” 대한환경공학회지, **23(1)**, 13~20(2001).
5. Seo, G.T., Moon, B.H., Lee, T.S., Lim, T.J., and Kim, I.S., “Non-woven fabric filter separation activated sludge reactor for domestic wastewater reclamation,” *Water Sci. Technol.*, **47(1)**, 133~138(2002).
6. 이종호, 조광명, “교차 간헐 폭기식 부직포 여과막 생물 반응조를 이용한 하수의 유기물 및 질소 제거,” 대한환경 공학회지, **26(2)**, 184~190(2004).
7. 정용준, 木曾祥秋, 민경석, “메쉬 침지여과막을 이용한 활성슬러지의 고액분리,” 대한환경공학회지, **26(3)**, 299~304(2004).
8. 이상우 최철희, 박영미, 서규태, “파일럿 규모의 침지식 부직포 여과 활성슬러지 공정의 시스템 처리 특성에 관한 연구,” 상하수도학회지, **20(2)**, 289~294(2006).
9. Seo, G.T., Moon, B.H., Park, Y.M., and Kim, S.H., “Filtration characteristics of immersed coarse pore filters in an activated sludge system for domestic wastewater reclamation,” *Water Sci. Technol.*, **55(1-2)**, 51~58(2007).
10. 환경부, 공해공정시험법(2007).
11. Wong, Yen Kiat, “Application of externally pressurised hollow fiber membrane to wastewater treatment for solid liquid separation,” Doctoral dissertation of The University of Tokyo, 24~27(1991).