

침적식 부직포 막분리를 이용한 생물학적 폐수처리

최형섭 · 문병현¹⁾ · 허종수²⁾ · 이홍재²⁾

경상남도보건환경연구원, ¹⁾창원대학교 공과대학 환경공학과, ²⁾경상대학교 농과대학 농화학과

Biological Wastewater Treatment Using Submerged Nonwoven Fabric Separation

Hyoung-Sub Choi, Byung-Hyun Moon¹⁾, Jong-Soo Heo²⁾, and Hong-jae Lee²⁾(*Water Quality preservation Division, provincial Government Institute of Health and Environment, Chang Won, 133-1, Kyong Sang Nam-Do ; ¹⁾Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Chang-Won National University, Chang won, 641-773, Korea ; ²⁾Department of Agricultural Chemistry, College of Agriculture, Gyeongsang National University, Chin Ju, 660-701, Korea*)

Abstract : The combination of biological wastewater treatment process and membrane separation has many advantages such as better effluent quality and system stability over the conventional biological wastewater treatment process. In this study, direct membrane separation using nonwoven fabric was applied to biological wastewater treatment. A nonwoven fabric module was submerged in the aerated bioreactor. And accumulated biomass in the bioreactor was separated by suction. The system was operated with various condition to investigate pollutant removal efficiencies and flux.

After formation of biomass layer on nonwoven fabric surface, a day, the stable effluent water quality was obtained. The flux decreased at a high suction pressure faster than a low pressure. The stable flux was obtained at the pressure of 21~25cmHg. In spite of variation of hydraulic retention time, organic loading rate, the removal efficiencies of BOD, COD_{Cr}, COD_{Mn} were very high as follows : 95.2%(0.14~0.97 BODKg/m³/day), 86.0%(0.17~1.39 COD_{Cr}Kg/m³/day), 90.0%(0.097~0.61 COD_{Mn}Kg/m³/day).

서 론

급격한 도시화 및 산업화에 따라 환경오염이 심각한 사회문제로 대두되고 있고, 환경에 대한 욕구가 증대함에 따라 수질 오염물질의 처리도 보다 경제적이고 고효율을 요구하게 되었다. 폐수처리 기술 중 생물학적인 처리방법인 활성슬러지법은 유기성 폐수의 처리를 위해 널리 이용되고 있는데 이 공법은 유입수의 수질과 수량변화에 따라 미생물의 침강성이 변화하게 되어 충분한 고액 분리가 어려워 부유물질로 유출되는 위험이 항상 존재한다.¹⁾ 이러한 생물반응조에 침전조 대신 분리막을 사용하면 기존 활성슬러지에서 발생하는 슬러지 팽화등으로 인한 고액분리의 문제를 해결하여 높은 처리효율을 얻을 수 있는 장점이 있다.²⁾ 분리막에 의한 고액분리는 막에 대하여 수직으로 직접 여과하는 Dead-end 방법과 막의 방향과 수평인 Crossflow방법이 이용되어지고 있다. 그러나 운전시간이 증가함에 따라 분리막 표면에 쌓이게 되는 미생물층, 막내부의 공극폐쇄등으로 부터 기인하는 막오염이 발생하여 분리막의 운전압력 증가 및 플럭스가 크게 감소하는 단점을 가지고 있다.³⁾ 막오염을 억제하기 위해 적용되는 Crossflow방법의 운전 방식은 적절한 플럭스양의 확보를 위하여 높은 막표면 유속을 필요로 하며 재순환에 의한 에너지 소모가 크다. 그러므로 선진국의 기술양상은

지금까지 어떻게 하면 플럭스를 높일가에 많은 노력을 기울여 왔으며 플럭스의 감소를 막면적용 증가시킴으로서 여과 수량을 증가시키기위해 단위 용적당 막면적이 큰 중공사막을 이용하여 많은 연구가 진행되어 왔으며 이러한 막분리기술은 점진적으로 보급 활용되고 유용한 폐수처리 시설로서 주목 받고 있다.^{4,5)} 그러나 국내에서 진행된 대부분의 연구는 외국에서 생산되고 고가인 중공사막등을 이용하여 진행되어 왔으며, 이 또한 국내 폐수처리시설에 적용하기에는 경제성이 낮고 충분한 운전결과와 경험이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 막소재로서 국내에서 생산되고 경제적인 부직포를 생물학적 처리공법에 적용하였다. 폭기조에 부직포 분리막을 직접 침적하여 막표면 유속의 유지 등에 필요한 에너지 소모를 감소시키는 흡입식방법으로 운전하였다. 운전경과시간에 따른 운전압력, 플럭스의 변화, 유기물 제거 및 SS 배제능력 등을 관찰 비교하였다.

재료 및 방법

실험재료

본 실험에 사용한 막은 H회사제조의 polyester 재질의 부직포(100g/m²)를 봉투모양으로 제작하고 가운데에 망상형 spacer를 넣어 부직포를 사각형 형태로 제작하여 사용하였

다. 부직포막 1개의 유효면적은 약 0.02m²(10×10×1cm)였다. 반응조에 주입한 기질폐수는 탄소원으로 글루코스, Yeast Extract 및 펩톤을 사용하여 인공 제조한 것이며 Table 1과 같은 성상의 원액을 운전목적에 맞게 지하수로 희석하여 사용하였다. 식중슬러지는 H하수처리장에서 채취한 반송슬러지를 약 15일 동안 폭기시키면서 fill and draw방식으로 합성폐수에 적용시킨 후 필요한 농도로 맞춘 후 주입하였다.

Table 1. Composition of Synthetic Wastewater.

성분	농도(mg/l)
Glucose	4,000
Peptone	4,000
Yeast extract	400
(NH ₄) ₂ SO ₄	3,200
KH ₂ PO ₄	640
MgSO ₄ ·7H ₂ O	800
MnSO ₄ ·6H ₂ O	72
FeCl ₃ ·6H ₂ O	4
CaCl ₂ ·2H ₂ O	8

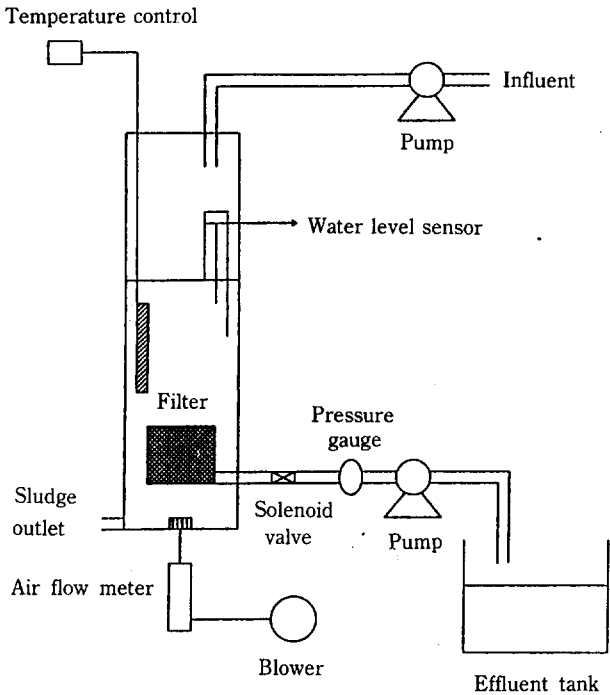


Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

실험방법

본 연구에 이용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 부직포로 제작된 막모듈 2개를 생물반응조에 침적함으로 생물학적으로 기질폐수를 처리하면서 동시에 막여과를 통해 고액을 분리하도록 구성되었다. 이 생물반응조는 내경 19cm, 높이 60cm의 아크릴 관으로 제작하였고 수위 감지기를 두어 최고 및 최저 수위를 설정함으로써 반응조내의 유효용적을 최저 5.24ℓ, 최고 6.09ℓ(평균 5.67ℓ)로 조정되도록 구성하였다.

폐수는 반응조의 수위 감지기가 최저에 도달했을 때 자동으로 작동되어 주입되고 최고수위에 도달하면 정지되도록 하였다. 또한 반응조 혼합액의 공기공급과 부직포의 급속한 Clogging을 방지하기 위하여 Blower를 Diffuser에 연결하고 유량계를 부착하여 공기량을 4ℓ/min로 조절하여 반응조 하부에서 공급하였다. 그리고 여과방식은 유출부에 여과막(부직포)과 연결된 다이어프램식 정량펌프를 설치하여 진공 흡입 방식을 채택하였으며 진공압을 관찰하기 위하여 여과막과 펌프사이에 진공 게이지를 부착하였다. 또한 여과 시작후 일정한 시간이상에서는 분리막의 내부가 펌프작동 능력보다 큰 부압상태가 되므로 진공 게이지 앞부분에 solenoid valve을 timer와 연결시켜 30분에 1초씩 solenoid valve가 개방되도록 하여 대기압과 같은 상태로 유지하였다. 초기의 유출 유량은 다이어프램식 정량펌프의 유량조절 valve와 strokes스위치를 조절하여 일정하게 설정하였으며 진공압력은 solenoid valve가 개방되기 전 나타내는 최고 압력으로 하였다. 그리고 필요에 따라 유출측 펌프의 유량조절 valve와 strokes스위치를 조작하여 압력을 변화시켰다.

활성슬러지법으로 폐수를 처리할 시 충격부하등 여러 조건에 적용력이 약하여 슬러지 bulking이 발생하여 폐수처리장에서 처리수 수질을 악화시키는 경우가 있다. 따라서 단기간 실험으로 SVI 300ml/g(MLSS : 4500mg/ℓ)을 나타내는 슬러지 bulking이 발생한 미생물을 이용하여 막의 SS 배제 능력을 알아보기 위하여 1개의 막을 이용하고 반응조내 MLSS농도를 일정하게 유지하면서 초기 유출 유량이 12.5 ml/min으로 되도록 유출측의 펌프를 조정하여 8시간동안 유출수 SS를 관찰하였다. 또한 연속 실험에서는 여과에 2개의 막을 사용하고 초기 미생물 농도는 표준 활성슬러지 농도 범위내의 MLSS : 2910mg/ℓ(MLVSS : 2300mg/ℓ)으로 조절하고 침강성은 SVI를 측정해본 결과 288mg/ℓ로서 매우 나쁜 상태였다. 반응기 내 MLSS는 약 3000mg/ℓ, DO는 6.4~6.8mg/ℓ정도로 유지하였고 수온은 10~14℃, pH는 6.1~6.9를 나타내었다. 항목별 수질분석은 Standard method[®]에 준하였다.

결과 및 고찰

부유물질 제거 효율

슬러지 bulking이 발생한 미생물을 이용하여 막의 SS 배제 능력을 알아보기 위하여 1개의 막을 이용하고 반응조내 MLSS농도를 일정하게 유지하면서 초기 유출 유량이 12.5 ml/min로 되도록 유출수의 펌프를 조정하여 8시간 동안 유출수 SS를 관찰한 결과는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 SS는 초기 10분까지는 200mg/ℓ 정도 유출되지만 4시간 후에는 52.1mg/ℓ로 감소하는 것을 알 수 있다. 그 후 하루가 경과한 후 SS는 10 mg/ℓ였다.

이는 부직포 표면에 미생물 층이 형성됨에 따라 이 층 자체가 새로운 여과막으로 작용하여 유출수 SS을 일정하게

유지할 수 있게 하는 것으로 생각된다. 이러한 현상은 부직포를 이용한 여과실험에서 나타났다.⁷⁾ 따라서 중공사막이나 한외여과막에 비하여 자체 공극이 큰 부직포로도 일정한 생물막을 형성시킴으로서 처리수내의 현탁성분을 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 그러므로 부직포 막을 고액분리에 이용하는 경우 하루가 경과한 후 운전할 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 반응조내의 생물상의 침강성을 살펴보기 위하여 SVI를 측정된 결과는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 대략 200~300의 범위에 있고 평균 267로서 매우 침강성이 불량하여 중력 침전방식으로는 고액분리가 어려운 상태였으나 Fig. 3에서 보는 바와 같이 유출수 SS는 1.5~23.5mg/l(평균 6.2mg/l)로 나타났다. 이상과 같이 부직포에 생물막이 형성되면 유출수의 수질은 안정되지만 이 생물막은 Flux를 감소시키는 원인으로 작용한다. 따라서 적당한 생물막을 형성시키면서 동시에 일정한 Flux를 유지할 수 있는 연구가 필요하다.

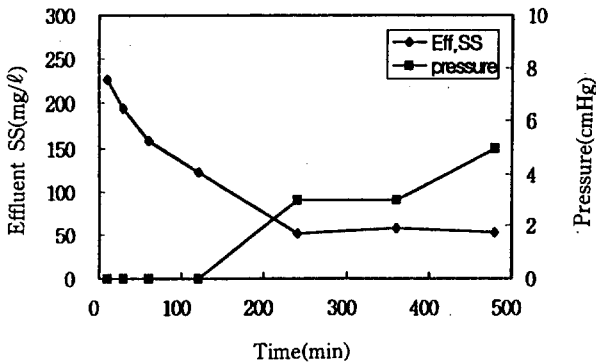


Fig. 2. Effluent SS concentration versus operation time in short term experiment.

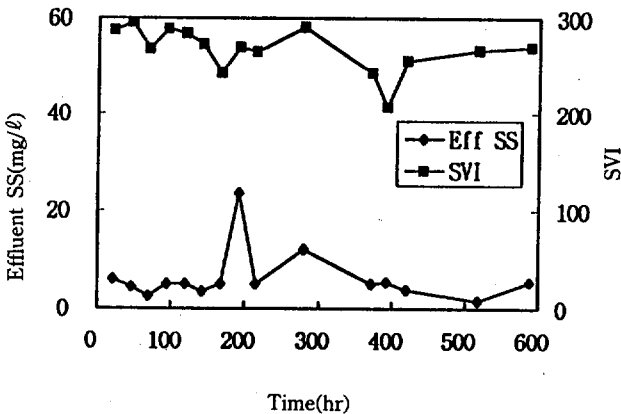


Fig. 3. Effluent SS and SVI versus operation time in long term experiment.

압력 및 플럭스 변화

막분리 공정에서 추진력(Driving force)이 되는 것이 분리막의 유입측과 유출측 사이의 차압 즉 투과압력이다. 이러한 투과압력과 플럭스와의 관계는 다음 같은 식으로 나타내어진다.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m}$$

- J=flux
- p=pressure
- μ=viscosity of water
- R_m=Total resistance

막결합형 활성슬러지 시스템은 운전시간이 증가함에 따라 분라막 표면에 쌓이게 되는 미생물층,공극내부의 패쇄등으로 인한 막오염이 발생하여 운전압력이 증가하고 플럭스가 감소한다. Fig. 4는 투과압력을 변화시키면서 플럭스의 변화를 관찰한 결과이다. 초기에 유출측 펌프를 적당히 조절하고 21.5 hr후의 압력상승을 관찰해본 결과 9cmHg로 나타났다. 이 압력상승 동안 플럭스는 0.321m³/m²day였으며 이후 압력은 9cmHg로 유지되면서 플럭스는 계속 감소하여 118hr(약 5일)후에 0.076m³/m²day로 초기 플럭스에 대하여 약 24%의 플럭스를 기록하였다.

압력 상승에 대한 플럭스 변화를 관찰하기 위하여 인위적으로 적당히 유출측 펌프의 유량조절 valve와 strokes 스위치를 증가시킨 다음 24.5 hr 후의 압력은 21cmHg였으며 플럭스는 0.169m³/m²day로 증가하였다. 이후 계속해서 21 cmHg로 압력이 유지되면서 플럭스 변화는 약 5일 후 압력 변환 시점의 플럭스와 비교하여 73.4 %인 0.124m³/m²day를 보였다. 그러나 피스톤 펌프의 작동불량으로 약 42 hr 동안 유출수 없이 계속 공폭기가 진행되었고 펌프의 재가동 후 12 hr 동안의 플럭스는 0.242m³/m²day, 압력은 25cmHg를 나타내었다.

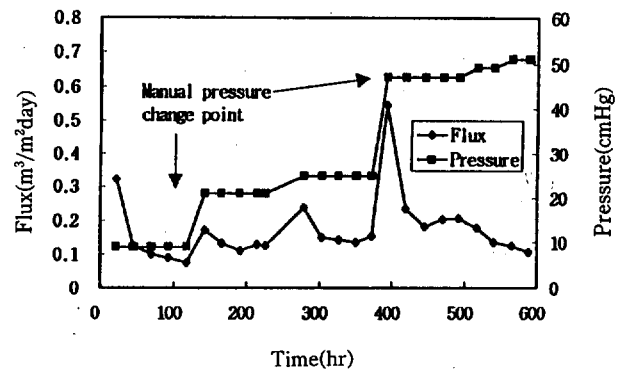


Fig. 4. Permeate Flux and Pressure along Operating Time.

이와 같이 플럭스가 증가한 것은 폐수의 공급이 중단되어 기질부족에 의한 미생물층의 부착능력이 저하되었고 폭기에 의하여 막표면의 Fouling이 일부 제거되어 나타난 현상으로 보여지며 압력상승은 폭기에 의하여 Cleaning된 막표면에 잔류입자들이 강한 진공압에 의하여 순간적으로 흡착되면서 압력증가로 나타난 것으로 보여진다.

이후 플럭스는 4일정도 일정하게 안정되었다. 이보다 더 높은 압력에서의 플럭스 변화를 관찰하기 위하여 앞의 조작과 같이 유출부의 펌프를 조절하여 압력을 47cmHg로 조

정하였을 때 플럭스는 0.546m³/m²day으로 급격히 증가하였으나 흡입압력이 21~25cmHg의 경우처럼 플럭스가 일정한 시간 동안 유지되지 않고 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 높은 압력일 수록 플럭스의 감소율이 크다는 Yamamoto 등⁸⁾의 연구와 비슷한 결과를 보여주고 있다. 따라서 안정한 플럭스를 유지하기 위한 압력은 21~25cmHg 범위에서 운전하는 것이 효율적인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 신 등⁹⁾이 연구한 Polysulfone계 재질의 비대칭 중공사막(HIP 30~20, 분획분자량 30,000)을 이용한 Crossflow방식의 막형 생물반응조 실험조건인 운전압력 20~25Psi, 플럭스 0.247m³/m²day에 비하면 낮은 압력으로 운전하여 상당한 양의 플럭스를 얻은 것으로 생각된다. 또한 Yamamoto 등⁸⁾이 보고한 Polyethylene으로 만들어진 중공사막(Pore size 0.1micron)으로 진공압력을 이용하여 합성폐수를 연속 처리한 결과인 "초기 플럭스 0.216m³/m²day에서 5일 후에 진공압력이 100 Kpa까지 도달했으며 5일후 플럭스는 점차적으로 감소하여 0.017m³/m²day까지 감소하였다"라는 결과와 비교하면 유출수의 수질에는 차이가 있지만 본 연구에 사용된 부직포는 낮은 압력으로도 적절한 플럭스를 유지할 수 있었다. 그 외 山口¹⁰⁾, 中條勝好¹¹⁾ 등은 활성슬러지법을 이용하는 하수처리장의 2차처리수를 섬유여재로 여과해 본 결과 손실수두는 여과량과 원수 SS농도와 상관성을 나타내었다고 한다. 따라서 여과압력을 크게 함으로서 지속적으로 높은 플럭스를 얻을 수 있는 것은 아닌 것으로 보이며, 본 연구의 결과에서도 플럭스는 운전 초기와 높은 압력에서 감소율이 크게 나타났으며 흡입압 21~25cmHg(약 30 Kpa)에서 0.124m³/m² day로 안정되었다. 따라서 Table 2에서 보는 바와 같이 지

Table 2. Flux compared with other studies^{8,9)}

Membrane materials	Pore size	Filtration method	Operating pressure	Flux (m ³ /m ² /day)	MLSS(mg/l)	Researcher
Polysulfone (Hollow fiber)	MWCO 30,000	Crossflow	140~180 Kpa	0.247	5,200	Hang Sik Shin et. al
Poyethylene (Hollow fiber)	0.1μm	Suction	0~100Kpa	0.216 →0.017	17,000 -9,500	Yamamoto et. al
Polyester (Nonwoven fiber)	Thickness 0.3mm	Suction	27.6Kpa	0.124	3,000	This experiment

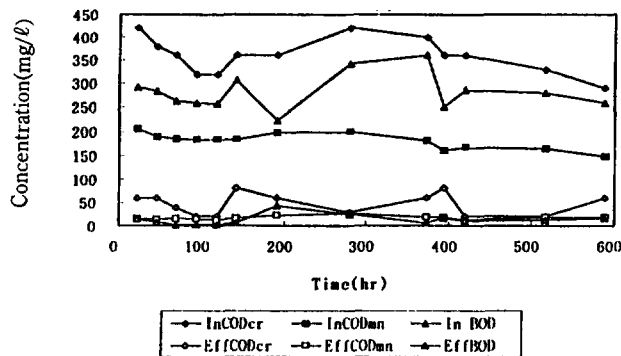


Fig. 5. Influent and effluent concentration of COD and BOD.

금까지 연구에 사용된 중공사막보다 본 연구에서 사용된 부직포는 낮은 압력에서도 상당한 양의 플럭스를 얻을 수 있을 것으로 보여진다.

HRT변화에 따른 유기물 제거효율

실험에 사용된 유입수의 COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD의 범위와 평균치는 각각 290~420mg/l(평균 360mg/l), 147.6~205.8 mg/l(평균 180mg/l), 222~293mg/l(평균 240.5mg/l)였으며 유출수의 COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD는 각각 20~80mg/l(평균 46.9mg/l), 12.6~26.0(평균 17.5mg/l), 1.2~44.0mg/l(평균 12.7mg/l)로 Fig. 5와 같다. 이로 미루어 볼 때 본 시스템은 유입수의 수질변동과 생물 반응조내의 미생물상태가 유출수의 수질에 미치는 영향은 비교적 적음을 알 수 있다.

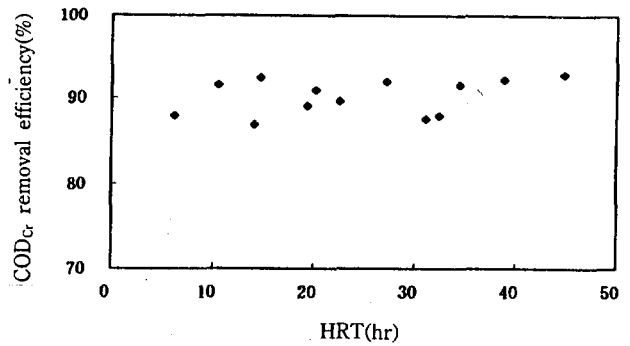


Fig. 6. HRT effects on COD_{Cr} removal efficiency.

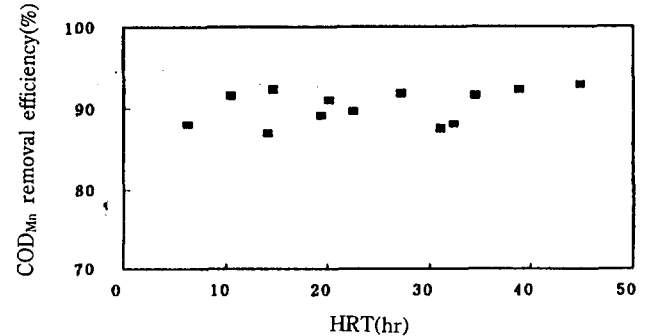


Fig. 7. HRT effects on COD_{Mn} removal efficiency.

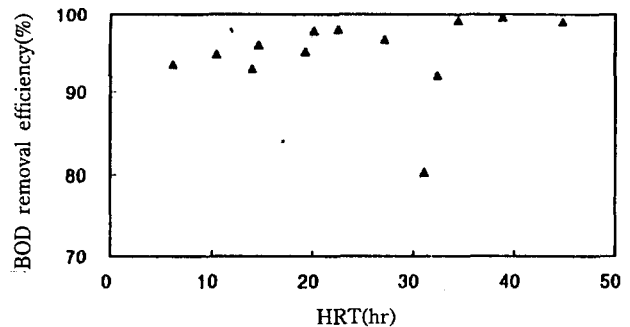


Fig. 8. HRT effects on BOD removal efficiency.

본 시스템은 유입수의 농도와 유출수 Flux양에 따라 미생물 반응조의 수리학적체류시간(HRT) 및 용적부하량이 변하게 된다. HRT 변화에 대한 처리효율은 Fig. 6, Fig. 7,

Fig. 8과 같다. COD_{Cr}과 COD_{Mn}은 제거율이 체류시간에 의존하는 경향은 인지되지 않았다. 그러나 BOD항목은 체류시간이 증가하면서 제거율도 증가하는 경향으로 나타났다. 이는 체류시간이 증가함으로 생물학적으로 분해 가능한 물질은 제거율이 증가하나 난분해성 물질과 무기물 등의 제거율은 체류시간과의 영향이 없음을 시사한다. 또한 유출수 SS도 운전개시와 압력변화 후 하루가 경과한 후부터는 일정한 유출수준을 유지하는 것으로 미루어 체류시간이 SS의 제거에 미치는 영향은 거의 없었다. 조작압력을 상승시키는 순간 용존성 유기물이 순간적으로 유출되고 그 이후 부직포에 일정한 수준의 생물막이 형성됨에 따라 일정한 수질을 유지하는 것으로 판단된다. 그러므로 전체적인 제거율을 고려할 때 체류시간을 되도록 짧게 유지하도록 Flux를 높이는 연구가 필요한 것으로 사료된다. Fig. 9는 유기물 부하율의 증가에 따른 유기물 제거 속도를 나타낸 것으로 BOD 용적부하는 플럭스의 변화에 따라 0.14~0.97kg/m³day까지 넓은 범위로 변했지만 유출 용적부하량은 0.07kg/m³day 이하로 매우 안정했다.이 때의 F/M은 0.04~0.30kg/kg MLSS day 범위였으며 표준활성슬러지법의 용적부하 0.3~0.8kg/m³ day, F/M비는 0.2~0.4kg/kg MLSS day와 비교¹²⁾하여 넓은 범위로 운전되었음을 알 수 있다. COD_{Mn}에 대하여도 유입 용적 부하량은 0.097~0.61kg/m³day 였으며 유출부하량은 최대 0.07kg/m³day, 평균 제거율은 약 90%였다. 또한 CO₂-D_{Cr}의 평균 제거율은 86%로 나타났다. 이러한 결과를 살펴볼 때 부직포막분리를 이용하는 본 생물학적 폐수처리시스템은 넓은 용적부하량 범위에서도 운전이 가능하고 안정된 제거 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

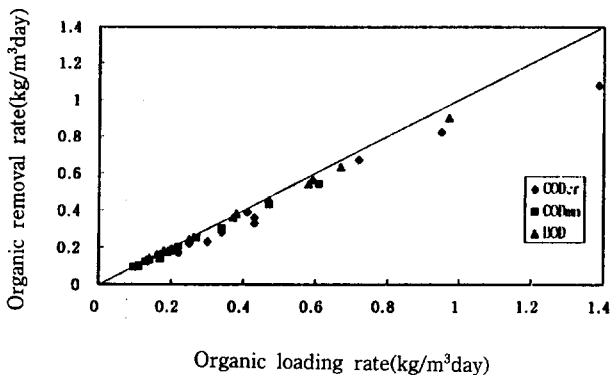


Fig. 9. Organic loading rates versus removal rates.

요 약

침적식 부직포 막분리와 생물학적처리를 조합한 본 연구 시스템을 합성폐수에 적용 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 부직포는 기존 여과막보다 공극이 크므로 부직포 모울을 하루정도 침적한 후 생물여과막이 형성된 후 처

리수가 안정됨으로 장치의 설치후 하루이상 경과한 후 가동되어야 한다.

2. 수리학적 체류시간, 부하량등의 변화에도 유기물 제거율은 평균 COD_{Cr} 86.0%, COD_{Mn} 90.0%, BOD 95.2%를 나타내었으며, 유출수 SS은 평균 6.2mg/l이었다.
3. 플럭스는 운전 초기 및 높은 압력에서 감소율이 크게 나타났으며 흡입압 21~25cmHg(약 30kpa)에서 0.124 m³/m²day로 안정되었다.
4. 본 시스템의 단위체적당 처리량을 증가시키기 위한 적정한 부직포막의 선정 및 막면의 증가와 부직포 표면의 생물여과막의 조절을 위한 지속적인 연구가 필요하다

참고문헌

1. 김갑수, 김오식(1988). 신활성 슬러지법, 녹원출판사 : 48~51.
2. 中村恭士, 清野修, 菊岡保入, 上田達己, 端憲二(1996). 浸清型膜分離活性汚泥法における反應能槽内の粘度變化について, 第30回 日本水環境學會年會講演集 : 34~50.
3. 환경부, 건설교통부(1996). 처리수 재이용시스템 기반 기술 개발 : 365~519.
4. 한국과학기술원(1994).실무자를 위한 폐하수처리 현장기술-맑은 물 공급을 위한 교육프로그램(I) : 81~98.
5. 첨단환경기술(1996). 중공사막 필터를 이용한 고농도 유기성 폐수처리 : 32~37
6. Standard methods for the examination of water and wastewater, APHA, AWWA, WPCF, 18th Edition
7. 金富吉(1992). 嫌氣性接觸沈殿法およびろ過分離型バイオリアタ-による生活排水處理システムの開發に關する研究, 豊橋機術科學大學 博士學位論文 : 58~85.
8. Kazuo Yamamoto, Masami Hiasa, Talat Mahmood and Tomonori Matsuo(1989). Direct solid-liquid seperation using hollow filber membrane in an activated sludge aeration tank, Wat. Sci. Tech 21 : 43~54
9. 신항식, 임경호(1995). 모형 생물반응조를 이용한 폐하수 처리, J. KSWQ May : 135~142.
10. 小笹泰, 山口實, 田中基晴(1991). 纖維濾材おを用いた2次處理水の急速濾過實驗について, 第28回下水道研究發表會講演集 : 541~543
11. 船本正和, 中條勝好, 千田輝雄(1991).極細纖維濾材による下水2次處理水の濾過, 第28回下水道研究發表會講演集 : 855~857.
12. Metcalf & Eddy(1979). Wastewater engineering treatment diposal/reuse, McGraw Hill Book Co. : 483~486.