

부직포활성슬러지법에 의한 하수와 침출수처리에 관한 기초연구

정 유 진 · 고 현 응 · 김 경 순 · 윤 태 경 · 성 낙 창
동아대학교 환경공학과 · 동의대학교 환경공학과
(2003년 8월 22일 접수; 2003년 10월 25일 채택)

A Basic Study for Treatment of Sewage and Leachate Using Submerged Nonwoven Bioreactor(SNBR)

Yoo-Jin Jung, Hyun-Woong Koh, Goung-Soon Kim, Tea-Kyung Yoon^{*} and Nak-Chang Sung

Department of Environmental Engineering, Donga University, Busan 604-714, Korea
^{}Department of Environmental Engineering, Donggeui University, Busan 614-714, Korea*
(Manuscript received 22 August, 2003 ; accepted 25 October, 2003)

In this study, it was performed using submerged nonwoven bioreactor(SNBR) for removal of organic matter, nitrogen and phosphate under different aeration intervals(intermittent aeration). We applied the SNBR at the cheap nonwoven fiber module instead of the expensive membrane. The SNBR was mainly made up of an activated sludge reactor and a transverse flow nonwoven module, with an innovative configuration being in application between them. In case of sewage, the aeration conditions experimented consist of continuous aeration and 60min/60min, 120min/60min, 120min/120min of aeration/nonaeration time intervals, respectively. In case of landfill leachate, the intermittent aeration condition was 120min/120min at aeration/nonaeration. Consequently, a high COD removal rate (about 94%) was achieved in sewage and leachate. Although nutrient removal rate was relatively high without any additional chemicals.

Key words : Nonwoven, Sewage, Leachate, Intermittent aeration

1. 서 론

하 · 폐수의 대표적인 생물학적 처리법으로 널리 이용되고 있는 활성슬러지법은 유입수의 특성 및 운전방법에 따라 팽화 및 거품발생 등이 빈번히 발생하고 고농도 유기물 및 질소, 인의 고도처리가 이루어지지 않는 등의 고액분리 및 처리효율상의 여러 문제를 안고 있다. 한편, 생활폐기물 처분의 약 43%를 차지¹⁾하는 매립에 의해 발생하는 침출수 문제는 부적절한 처리장 설계, 처리장 운영인력의 부족, 침출수의 난분해성 등의 문제가 복합적으로 얽혀 다방면의 처리시도가 있었으나, 만족할만한 결과를 얻지 못했을 뿐만 아니라, 음식물쓰레기의 매립지 반입저지 등의 민원을 야기하고 있다.

최근에는 이러한 문제들을 해결하기 위해 다양한 분야에서 침지형막분리 공정이 적용되고 있다. 하수 처리에서는 기존 시설을 크게 변화시키지 않는 범위 내에서 활성슬러지법의 단점을 해결하기 위해 중력침전에 의한 고액분리를 막분리로 대체하고 반응기내의 미생물 농도를 증가시켜 처리효율의 향상을 꾀한 침지형 막분리 공정이 적용되고 있고²⁾, 막분리법의 적용 밖이라고 생각되어 온 침출수와 같은 폐수에 대해서도 막분리법의 도입이 적용되기 시작했다³⁾. 이와 같은 막분리법의 수처리로의 적용이 점차 기대되고 있는 것은 막분리법이 다른 방법에 비교해서 고질의 처리수를 생산하고, 그 이용이 수수급(水需給)의 회박화에 따른 물의 재이용에 대한 사회적 요청에 일치하는 동시에, 동법을 도입함으로써 종래의 수처리시스템의 변혁과 간소화, 고도화로의 기대에 의한 것이라고 생각된다⁴⁾. 하지만, 분리막으로서 활성슬러지 혼합액에서 고액분리를 목적으로 하는 경우, 세균의 크기가 0.5 μm 이상이므로 치밀한

Corresponding Author : Yoo-Jin Jung, Department of Environmental Engineering, Donga University, Busan 604-714, Korea
Phone : +82-51-200-5570
E-mail : waterlab@hanmail.net

고가의 막을 이용해서 분리를 하는 것보다는 세균이 큰 여재를 사용할 수 있는 가능성이 있어, 저가의 부직포를 막분리 여재로 선정하여 연구된 결과도 보고되고 있다⁵⁾.

따라서, 본 연구에서는 침지형 막분리 활성슬러지 공정에서 고가의 막을 대신하여 저가의 부직포 섬유를 이용해 제작된 모듈을 고액분리 기구로써 부직포 활성슬러지법(SNBR : Submerged Nonwoven Bioreactor)법을 적용하여 하수와 쓰레기매립장 침출수의 처리시 특성을 비교·검토하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

2.1.1. 유입수

하수는 글루코스를 기본으로 한 인공폐수를 조제하여 사용하였으며, T-N과 T-P 및 알칼리도는 각각 NH₄Cl, KH₂PO₄, NaHCO₃의 시약으로 농도를 조절하였다. 침출수는 부산시 생곡 쓰레기매립장의 침사지와 스크린을 거친 후 유량조정조로 유입되기 전의 것을 채수한 후 4℃에서 냉장보관하여 사용하였다. Table 1에 인공폐수의 조성에 대하여 나타냈다.

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Composition	Concentration(mg/L)
Glucose	120.0
Peptone	90.0
Yeast extract	12.0
NH ₄ Cl	96.0
KH ₂ PO ₄	17.0
MgSO ₄ ·7H ₂ O	24.0
MnSO ₄ ·5H ₂ O	2.16
FeCl ₃ ·6H ₂ O	0.12
CaCl ₂ ·2H ₂ O	2.40
NaHCO ₃	300

Table 2. Operation conditions for submerged nonwoven bioreactor

Items	Sewage	Leachate
Working Volume (L)	40	
MLSS (mg/L)	4,000~6,000	5,000~12,000
DO (mg/L)	0.2~6.5	0.2~7.0
Air flow (L/m ³ ·min)	300	
Operating term (aeration/nonaeration)	Continuous 60min/60min 120min/60min 120min/120min	120min/120min
Flux(LMH:L/m ² ·h)	20	

2.1.2. 부직포 모듈

부직포 여재로 제작한 부직포 모듈은 유효면적이 약 0.05 m²(W×H=120 mm×210 mm×2)으로 제작하였다. 여재로 이용된 부직포는 한국부직포테크(주)의 제스본 PP-100으로 단위면적당 100 g의 폴리프로필렌 재질로 제작되었고, 합성고분자를 방사하여 고압열풍에 의해 극세섬유로 되어 용융섬유 웹으로 결합되는 meltblown 방식으로 제조되었다.

2.2. 실험방법

부산시 수영하수처리장의 반송슬러지를 채취하여, 1 mm의 체로 걸러 조대물을 제거한 것을 중슬러지로 했다. 하수의 경우, 중슬러지를 회분장치로서 간헐폭기 조건으로 1 개월간 배양하였고, 침출수의 경우는 인공폐수와 부산시 생곡쓰레기매립장 침출수를 혼합한 혼합폐수를 주입하여 간헐폭기 조건으로 1개월 이상 충분히 미생물을 순응시킨 후 식중슬러지로 하여 실험하였다. 본 연구의 운전조건과 실험장치를 Table 2와 Fig. 1에 각각 나타내었다.

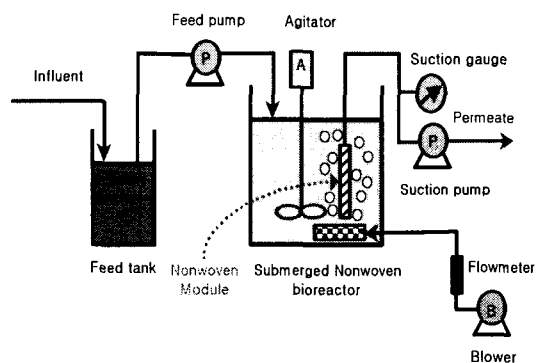


Fig. 1. Schematic diagram of submerged nonwoven bioreactor.

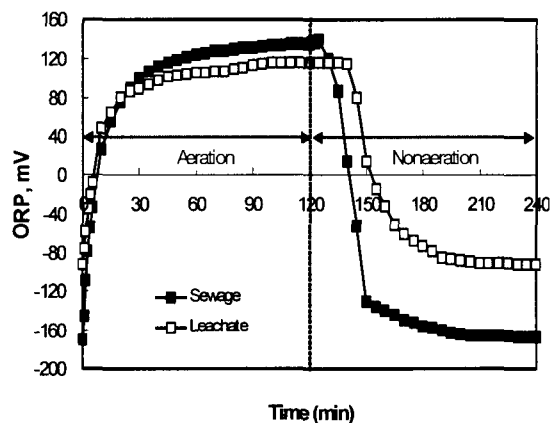


Fig. 2. ORP variation of sewage and leachate in aeration/nonaeration(120min/120min).

3. 결과 및 고찰

3.1. ORP 변화 비교

Fig. 2는 폭기/비폭기 120분/120분에서의 하수와 침출수의 ORP 변화를 나타낸 것이다.

혐기, 무산소, 호기상태의 만족도를 간접적으로 측정할 수 있는 산화-환원 측정전위(oxidation reduction potential : ORP)의 최적 범위는 혐기상태에서 -125~-275 mV, 무산소 상태에서 -100 mV, 호기상태에서는 60~200 mV의 변화를 보인다⁶⁾. 본 연구에서는 폭기/비폭기 주기 120분/120분에서 하수의 ORP는 폭기 후 30분까지 상승하여 비폭기전까지 약 140 mV으로 유지되어 호기상태를 나타냈으며, 폭기를 멈춘 후 ORP는 계속 감소하여 비폭기 1시간만에 -170 mV까지 내려가 혐기상태를 나타내었다.

침출수에 있어서 폭기/비폭기 시간 120분/120분에서의 ORP 변화를 살펴보면, 마찬가지로 기질부족으로 인한 ORP 굴곡점은 발견되지 않았으며, -92.0~-117.0 mV의 변화를 보였다.

교반종료시점에서 ORP 값은 -92.0 mV로 이러한 결과는 Wareham 등⁷⁾은 NO₃-N가 zero로 탈질될 때의 ORP 값 -80~-100 mV라고 보고한 수치와 비슷하였으나, 본 연구에서는 NO₃-N의 농도가 zero로 나타나지 않았다.

교반종료시점에서 ORP값이 높은 이유는 질산화는 충분히 진행된 상태에 비해 탈질이 충분히 일어나지 못했으므로, 조내에 NO₃-N와 같은 산화종이 많기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 상기 연구자들이 보고한 탈질과정에서 ORP 변곡점도 찾을 수 없었다. 또한, 이 등⁸⁾은 ORP 굴곡점이 형성되기 위해서는 적당한 탈질시간과 더불어 더욱 중요한 것이 충분한 기질을 이용하여 완전한 탈질을 이룰 때만 형성된다고 하였으며, 질소 제거효율이 낮은 이

유를 탈질에 필요한 기질부족이 주요원인이라 보고, 질소제거능력을 향상시키기 위해서는 비폭기시 의 부탄소원을 주입해야 한다고 보고하였다.

한편, 폭기시간은 계절 및 수온, 유입수 성상, 유입량 등에 따라 40~120 min/cycle로 운전되며, 폭기단계 초기에는 산소가 공급됨에도 불구하고 반응조 내부상태는 전 싸이클의 무산소 및 혐기성 상태의 영향으로 즉시 호기성 상태로 전환되기 어렵기 때문에 폭기단계 초기에는 무산소 상태로서 탈질화가 일어나며 질소제거가 이루어진다⁹⁾.

3.2. DO 농도변화 비교

Fig. 3은 폭기/비폭기 주기가 120분/120분인 경우 하수와 침출수의 DO 농도변화를 나타낸 그림이다.

하수에 있어서 폭기/비폭기 주기 120분/120분 일 때 DO 농도변화를 살펴보면, 폭기 직후 약 5분만에 DO 농도 4.5 mg/L을 나타내었고 폭기 종료 전까지 DO 농도 최대값인 약 6.5 mg/L에 도달하여 일정하게 유지되었다. 폭기가 끝난 시점으로부터 약 15분 후 DO 농도는 0.02 mg/L으로 나타내었다. DO 농도는 *Nitrosomonas*가 1.5~2.0 mg/L 이상, *Nitrobacter*가 3.0~4.0 mg/L 이상이 적당¹⁰⁾하기 때문에, 본 실험조건에서는 미생물 활동에 필요한 DO 농도를 충분히 만족시켜, 유기물 및 영양염류를 제거할 수 있다고 생각된다.

침출수에서 폭기/비폭기 주기가 120분/120분인 경우 폭기시 DO 농도는 폭기 시작 후 10분경에 최대 7.6 mg/L를 유지하였으며, 비폭기 시작 후 45분 정도에 0.1 mg/L로 나타났다.

3.3. COD_{Cr} 농도변화 비교

Fig. 4와 Fig. 5는 폭기/비폭기 주기에 따른 부직포 모듈의 하수와 침출수에 대한 COD_{Cr} 농도변화를 나타낸 그림이다.

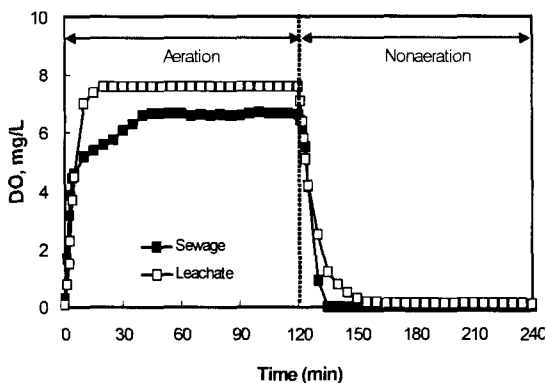


Fig. 3. DO variation of sewage and leachate in aeration/nonaeration(120min/120min).

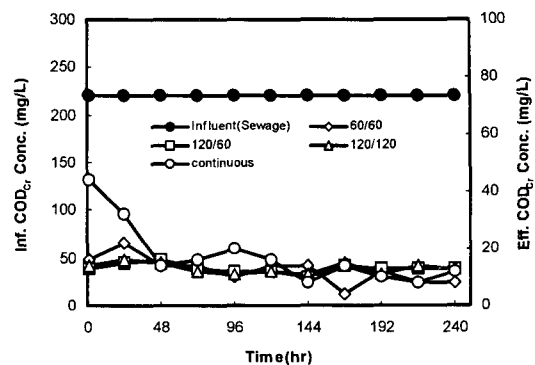


Fig. 4. Variation of effluent COD_{Cr} concentration of sewage with aeration/nonaeration operation.

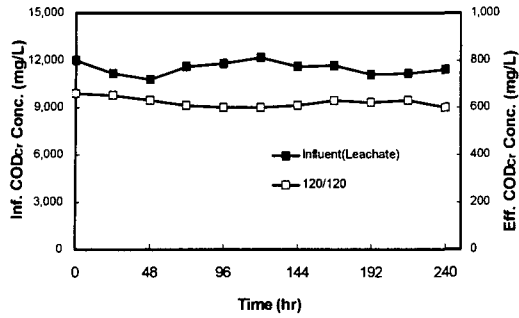


Fig. 5. Variation of effluent COD_{Cr} concentration of leachate with aeration/nonaeration operation.

하수의 경우 유입수 COD_{Cr}의 평균농도는 220.0 mg/L이며, Fig. 4에서 폭기/비폭기 주기를 연속폭기, 60분/60분, 120분/60분, 120분/120분으로 간헐폭기 운전한 결과 평균 유출 농도는 각각 17.6 mg/L 와 12.4 mg/L, 13.1 mg/L, 13.1 mg/L로 나타나 COD_{Cr}의 평균 제거율은 각각 92.0%와 94.4%, 94.0%, 94.0%로 나타나 안정한 수질을 얻을 수 있었다. 이런 결과는 여러 연구자들의 연구 결과와도 일치한다^{11,12)}.

또한, 침출수의 경우 유입수 평균 COD_{Cr} 농도는 11,509.1 mg/L로서 유출수의 평균 COD_{Cr} 농도는 621.8 mg/L를 나타내어 평균 제거율 94.6%로 조사되었다. 실험 초기 유출수의 COD_{Cr} 농도가 높은 것을 알 수 있는데, 이것은 유출수 중의 SS 성분에 의한 COD_{Cr} 농도의 상승으로 생각되며, 이후 막분리에 의한 SS 성분이 배제됨에 따라 유출수 중의 COD_{Cr} 농도의 감소를 볼 수 있었다.

3.4. T-N 농도변화 비교

Fig. 6과 Fig. 7은 폭기/비폭기 주기에 따른 하수와 침출수에 대한 T-N 농도변화를 나타낸 그림이다.

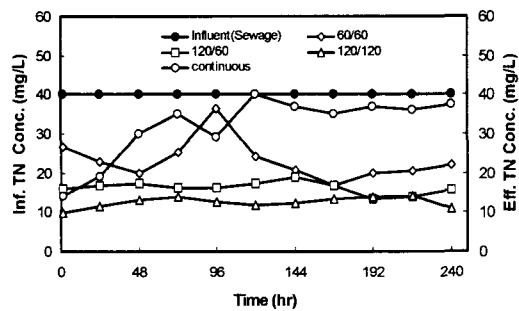


Fig. 6. Variation of effluent T-N concentration of sewage with aeration/nonaeration operation.

하수의 경우 유입수 T-N의 평균농도는 40.0 mg/L이며, Fig. 6에서 폭기/비폭기 주기를 연속폭기, 60분/60분, 120분/60분, 120분/120분으로 간헐폭기 운전한 결과 평균 유출 농도는 각각 31.8 mg/L 와 23.2 mg/L, 16.2 mg/L, 12.4 mg/L로 나타나 T-N의 평균 제거율은 각각 20.5%와 42.0%, 59.5%, 69.0%로 나타났다. 따라서 폭기/비폭기를 120분/120분으로 운전한 것이 충분한 질산화시간과 탈질시간을 확보했기 때문에 다른 폭기/비폭기 시간보다 T-N의 제거율이 높다고 생각된다.

침출수의 경우 유입수 평균 T-N 농도는 1,291.0 mg/L로서 유출수의 평균 T-N 농도를 살펴보면 236.4 mg/L로 나타났으며, 평균 제거율은 81.7%로 조사되어 하수보다 높은 제거율을 나타냈는데, 이는 하수보다 침출수의 C/N비가 높기 때문이라고 생각된다.

간헐폭기에 의한 생물학적 질소제거방법은 질산화와 탈질화로 구분되는데, 이러한 과정이 수행되기 위해서는 간헐폭기 반응조 내에 호기/무산소 상태가 유지되어야 한다. 호기상태로 유지되는 폭기조에서 독립영양균에 의한 질산화에 의해 암모니아성 질소가 산화되어 아질산성질소나 질산성질소로 2단계에 걸쳐 진행된다. 이와 같은 질소산화물은 준혐기성 또는 무산소 상태로 유지되는 비폭기시에 탈질화에 의해 제거된다¹³⁾.

3.5. T-P 농도변화 비교

Fig. 8과 Fig. 9는 폭기/비폭기 주기에 따른 하수와 침출수에 대한 T-P 농도변화를 나타낸 그림이다.

하수 유입수의 평균 T-P 농도는 5.0 mg/L이며, Fig. 8에서 폭기/비폭기 주기를 연속폭기, 60분/60분, 120분/60분, 120분/120분으로 간헐폭기 운전한 결과 평균 유출수 농도는 연속폭기가 3.8 mg/L인데 반해 간헐폭기의 경우 모두 1.9 mg/L로 평균 제거

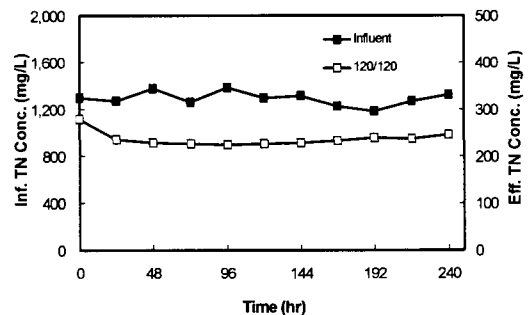


Fig. 7. Variation of effluent T-N concentration of leachate with aeration/nonaeration operation.

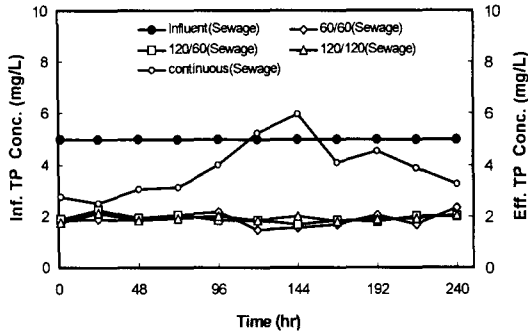


Fig. 8. Variation of effluent T-P concentration of sewage with aeration/nonaeration operation.

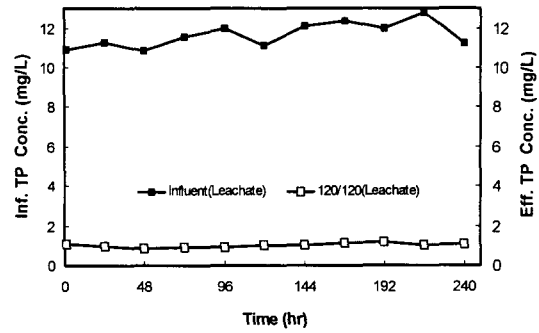


Fig. 9. Variation of effluent T-P concentration of leachate with aeration/nonaeration operation.

율은 각각 24.0%, 62.0%를 나타내었다.

침출수 유입수의 평균 T-P 농도는 11.7 mg/L로서 유출수 농도를 살펴보면 1.0 mg/L로 나타났으며, 평균 제거율은 91.5%로 안정된 처리수를 얻을 수 있었다.

활성슬러지법의 경우 폭기과정에서 대량의 에너지를 소모하는데, 하수처리장에 투입되는 전체 에너지의 37%, 또는 전체 운전비의 40%가 폭기공정에서 사용되어지고 있는 점¹⁴⁾을 감안한다면, 간헐폭기로 인해 폭기과정에 소요되는 동력비를 절감하는 동시에 영양염류의 제거도 이루어 낼 수 있었다. 또한, 유기물질과 영양염류제거를 위한 가장 적절한 간헐폭기 조건으로서 폭기/비폭기 주기는 120분/120분이라고 판단된다. 이는 최¹⁵⁾의 연구결과인 제거효율과 안정성 면에서 120분/120분의 경우가 가장 좋은 조건이라는 결론과 일치하며, 이것은 다른 연구에서도 폭기/비폭기 시간비율이 동일한 경우가 가장 좋다¹⁶⁾는 결과와 일치하기도 한다.

4. 결론

본 연구에서 부직포 활성슬러지법을 적용하여 하수와 침출수를 처리하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 하수의 경우 폭기/비폭기 주기를 60분/60분, 120분/60분, 120분/120분으로 간헐폭기 운전한 결과, 120분/120분으로 운전한 경우가 유기물 제거면이나 영양염류제거에 대해 가장 적절한 것으로 나타났다.
- 2) ORP의 변화를 살펴보면, 하수의 경우 폭기 후 약 30까지 상승하여 비폭기전까지 약 140 mV로 유지되었으며, 폭기가 끝난 후 1시간만에 -170 mV까지 감소하였다. 또한, 침출수의 경우 기질 부족으로 인한 ORP 굴곡점은 발견되지 않았으며, -92~117 mV의 변화를 보였다.
- 3) DO의 변화를 살펴보면, 하수의 경우 폭기 직후

약 5분만에 DO 농도 4.5 mg/L를 나타내었고, 최대 6.5 mg/L를 유지하였으며, 폭기가 끝난 후 약 15분 이후 DO 농도는 0.02 mg/L를 나타내었다. 침출수의 경우 DO의 변화는 폭기 직후 약 10분경에 DO 농도는 최대 7.6 mg/L를 유지하였으며, 폭기가 끝난 후 약 45분 이후 DO 농도는 0.1 mg/L를 나타내었다.

- 4) 폭기/비폭기 주기가 120분/120분 일 때 T-N의 농도변화를 살펴보면, 하수의 경우 평균 유입수 농도 40.0 mg/L에 대해 처리수 농도는 12.4 mg/L(제거율 69.0%)로 나타났으며, 침출수의 경우 평균 유입수 농도 1,291.0 mg/L에 대해 처리수 농도는 236.4 mg/L(제거율 81.7%)로 나타났다.
- 5) 폭기/비폭기 주기가 120분/120분 일 때 T-P의 실험결과를 살펴보면, 하수의 경우 평균 유입수 농도 5.0 mg/L에 대해 처리수 농도는 1.9 mg/L(제거율 62.0%)였으며, 침출수의 경우 평균 유입수 농도 11.7 mg/L에 대해 처리수 농도는 1.0 mg/L(제거율 91.5%)를 나타내어, T-P의 경우 침출수의 제거율이 하수의 제거율보다 월등히 높음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2002학년도 동아대학교 교내학술연구비(공모과제) 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) 환경백서, 2002, 환경부, 545pp.
- 2) 신항식, 안현희, 강석태, 최광호, 임성균, 1999, 침지형 막분리 공정의 막오염 요인 연구(II), 한국물환경학회지, 15(3), 421-428.
- 3) Massound, P., R. Varadarajan, N. B. Badri and S. H. Kim, 1996, Hybrid membrane filtration

- process for leachate treatment, *Wat. res.*, 30(11), 2691-2706.
- 4) 尾崎博明, 1995, 막분리법의 하·배수처리로의 적용, *수환경학회지*, 18(2), 79-84.
 - 5) 정유진, 2000, 침지형 부직포·막분리 활성슬러지법과 Oyster-Zeolite 흡착탑을 이용한 하수의 고도처리에 관한 연구, 동아대학교 대학원 박사학위논문, 106pp.
 - 6) Koch, F. A. and W. K. Oldham., 1985, Oxidation reduction potential - A tool monitoring, control and optimization of biological nutrient removal system, *Water Sci. Tech.*, 17, 259-281.
 - 7) Wareham, D. G., K. J. Hall and D. S. Mavinic, 1993, Real-time control of aerobic-anoxic sludge digestion using ORP, *J. Environ. Eng., ASCE*, 119, 120-136.
 - 8) 이해군, 배준석, 최광수, 한기백, 김창원, 1998, 간헐폭기 활성슬러지에서 질소제거를 위한 폭기-비폭기 주기 및 ORP 적용성 평가, *대한환경공학회지*, 20(1), 9-18.
 - 9) 장해남, 2001, 단일반응조 간헐방류식 장기포기공정에 의한 고도하수처리기술, *첨단환경기술*, 90-91pp.
 - 10) Culp R. L. and G. L. Culp, 1976, *Handbook of advanced wastewater treatment*, Vanmostrand Reinhold Co., 348-359pp.
 - 11) Araki, H., K. Koga, T. Kusuda and Y. Awaya, 1990, Intermittent aeration for nitrogen removal in small oxidation ditch, *Wat. Sci. Tech.*, 22(2/3), 131-138.
 - 12) Nakajima J. and M. Kaneko, 1991, Principle performance of nitrogen removal in small-scale sewage treatment plants operated in intermittent aeration mode, *Wat. Sci. Tech.*, 23(4/6), 709-718.
 - 13) 서정범, 윤근희, 임연택, 홍정선, 류재근, 서윤수, 1997, 활성슬러지와 UF막의 조합공정에 의한 폐수처리, *J. KSWQ.*, 10(2), 90-95.
 - 14) 김동하, 1999, 고도 하수처리 시스템의 처리성능 및 경제성 평가에 관한 연구, *대한상하수도학회지*, 13(1), 61-71.
 - 15) 최창규, 1999, 단일간헐폭기공정을 이용한 생물학적 영양염류 제거, *충북대학교 대학원 석사학위논문*, 61pp.
 - 16) 서인석, 김병균, 1997, 간헐포기 활성슬러지시스템에서 C/N비가 질소제거에 미치는 영향, *춘계 학술연구발표회 논문집*, *대한환경공학회*, 549-552pp.