

현무암쇄석을 충전한 토양피복형 접촉산화공정의 오염물질제거효율에 관한 연구

최철호* · 이승목 · 윤종화 · 황필기 · 김정용*

관동대학교 환경공학과

*(주)토우건설

Efficiency of Nutrients Removal in a Microbial Contact Oxidation System Covered with Soil

Chul-Ho Choi* · Seung-Mok Lee · Jong-Hwa Yoon · Pil-Gi Hwang · Jung-Yong Kim*

Department of Environmental Engineering, Kwandong University

*ToWoo Construction Co. Ltd.

(Received 12 November 2004, Accepted 17 December 2004)

Abstract : Nutrients removal performance of a contact oxidation reactor covered with soil was investigated when basalt rubble was used as a contact medium under various operating conditions. The objective of the experiment was to determine the effectiveness of the system by measuring the removal efficiencies of nutrients from a technical and economical viewpoint. Under the ranges of HRT(20 and 40 hrs) in the experiment, the removal rates of organic matter were as high as 97.5% by showing an effluent BOD₅ of less than 10 mg/L. The test of nitrogen removal when the turf was planted on the top soil showed that the average removal rate increased as much as 25% as compared to that without planting. It was suggested that the construction and maintenance cost could be reduced over 20% when the HRT of the system was decreased from 72 to 40 hrs.

keywords : Contact oxidation system covered with soil, Contact media, Turf, Basalt rubble, Hydraulic retention time(HRT)

1. 서론

전국적으로 마을 하수처리시설 숫자는 점차로 증가하여 2000년 12월 현재 50 m³/d 이상 규모의 마을 하수도는 307개소가 설치·운전되고 있으며, 적용공법별로는 접촉산화법 139개소, 활성오니법 76개소, 토양트렌치법 49개소, 혐기호기법 35개소, 살수여상 2개소 그리고 기타공법이 6개소로 나타났다(한 등, 2001). 이중 담체를 이용한 접촉산화법은 계속 증가하고 있는 추세이며, 특히 토양을 이용한 접촉산화 공정은 지난 10년간 약 20%씩 증가하고 있다(이, 2002).

토양에 의한 생활하수 처리에 관한 연구는 1930년대부터 상대적으로 넓은 농경지를 가진 미국의 농촌마을을 중심으로 확산되기 시작하여, 1960년대 일본에 도입되어 광범위하게 연구되어 왔다. 16세기 독일에서 실용화되기 시작한 토양을 이용한 오수정화는 프랑스를 거쳐 1876년 영국의 60여개 도시의 하수처리에 이용되었으며 현재 미국 전 지역의 약 1/3정도가 가정오수를 토양처리법을 이용하여 처리하고 있다(EPA, 1980; 이, 2002). 토양피복형 접촉산화공정은 일반적으로 침전분리조와 쇄석으로 충전된 접촉산화조로 대별되며 세부적으로는 혐기조, 폭기1/2조, 자연여과조, 방류조로 나뉜다. 각 조의 상부를 토양으로 덮고 그 위

에 잔디를 식재함으로써 접촉산화조, 토양피복층 및 식생잔디가 가진 정화 기능을 상호 연계시킨 자연친화적인 공법이다(윤, 2003).

접촉산화조의 정화효율은 접촉여재의 특성, 시스템 운전 전략 등에 좌우되며, 특히 접촉산화조 내에 충전한 여재는 미생물의 부착 서식지로서 이의 이화학적 특성은 하수에 함유되어 있는 오염물질의 정화효율에 직접적인 영향을 미치므로 여재의 선정은 매우 중요한 설계인자 중에 하나다. 일반적으로 접촉여재의 선택 시 재질, 다공성, 비표면적 등의 이화학적 특성, 미생물 활성화도, 생물막 부착정도 등의 생물학적 특성뿐만 아니라 소규모 농촌마을에 적용한다는 특수성 때문에 경제성도 함께 고려되어야 한다(최 등, 1999). 현재 사용되고 있는 여재는 재질에 따라 다양하며, 주로 활성탄, 다공성 플라스틱류, 폐야구르트 공병, 고분자수지 섬유사, 다공성 세라믹이나 유리 담체, 규조토, 목편 등 많은 종류가 개발되어 있으나(김, 2002), 토양피복형 접촉산화시스템에서는 가격이 싸고 구입이 용이한 화강암쇄석을 기본여재로 사용하고 있다.

최 등(1996)은 토양을 이용한 처리시스템 중 현장에서 가장 많이 시공되고 있는 토양피복형 부패조시스템과 접촉산화시스템을 선정하여 생활하수 정화효율을 현장에 적용 실험한 결과, 다양한 기상조건이나 유입수의 오염부하에 대해서 접촉산화시스템이 보다 안정된 정화효율을 나타내고는 있으나, 기본여재로 사용되고 있는 화강암쇄석으로 인해 정

* To whom correspondence should be addressed.

encobio@harmail.net

화효율은 기대에 미치지 못하고 있는 것으로 지적되었다. 화강암쇄석은 가격이 싸고, 압축강도가 높아 큰 상재하중을 견딜 수 있는 장점이 있으나 자체비중이 높아 시공 및 관리에 어려움이 많으며, 접촉산화조의 구조적 안정도 고려해야 하는 단점이 있다. 또한 쇄석은 제거효율이 상대적으로 낮고, 영양염류의 제거에는 거의 효과가 없는 것으로 알려져 있다(서 등, 1991).

본 연구에서는 강원도 농어촌이나 산간지역에 오폐수처리시설로서 적합하다고 사료된 토양피복형 접촉산화공법을 하수종말처리장 유입수에 적용하였으며, 기존에 현장적용 시 처리효율 저하 등의 여러 가지 문제점을 야기한 화강암쇄석 대신 현무암쇄석을 여재로 충전하여 상이한 체류시간, 반송율 그리고 식물식재를 통한 유기물질과 영양염류제거 특성을 연구하여 이 결과를 현장시공 및 유지관리개선을 위한 기초 자료로 마련하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서 이용한 오수처리용 실험 장치는 토양생태계를 이용하기에 적합한 토양피복형 접촉산화시설로서 (주)토우건설에서 제작·사용하던 장치를 임차하여 설치하였으며, G시 하수종말처리장 1차 침전지 부근에 설치하여 실험용 하수의 유입을 용이하도록 하였다. 실험 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 오니 농축조, 혐기1조, 혐기2조, 폭기1조(1실/2실), 침전조, 폭기2조, 여과조, 유출조 등 모두 8개의 반응조로 구성되어 있으며, 각 반응조 내부에는 스테인리스 지지대를 설치하여 현무암 쇄석 여재를 충전하였고 여재상부에는 토양의 유실을 막기 위한 모관 망을 덮고 다공질 토양을 피복하였다. 마지막 여과조에는 인 제거효율을 향상시키기 위해 굴 껍질을 충전하였다. 토양층위에는 잔디를 식생시킴으로서 토양 미생물과 식물의 자연정화 기능을 이용하여 오염물질 정화기능이 향상되도록 하였다. 제작된 플랜트는 온실 내부에 설치하여 보온과 통풍이 원활하도록 하였으며 실험실 내부는 자동온도조절 장치를 설치하여 연중 20~30°C를 유지하였다.

기존에 여재로 사용되던 화강암쇄석은 수직하중에 강하고 가격이 저렴하여 주로 이용되어 왔으나, 유기물과 영양염류의 제거효율이 만족스럽지 못하며, 미생물 막의 형성이 불량하고 비표면적과 공극률이 작은 문제점을 가지고 있다(최, 1997). 화강암쇄석의 일반적인 물리적 특성은 입자밀도 2.85 g/cm³, 비표면적 4.18 m²/g, 공극률 53.4%로 측정되었다. 그러나 본 실험에서 사용된 현무암쇄석은 공극률에서는 거의 차이가 없었으나 비표면적이 화강암에 비해 65% 정도 더 큰 평균 6.9 m²/g로 나타났다. 실험 장치와 관련된 구체적인 사양을 Table 1에 요약하였다.

2.2. 운전조건

반응조의 유입수는 하수처리장의 1차 침전지를 통과한 원수를 사용하였다. 반응조와 여재에 붙어있는 협잡물 제거

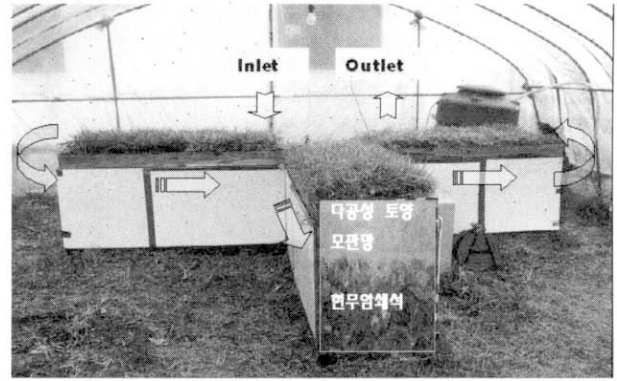


Figure 1. Microbial contact oxidation system covered with soil.

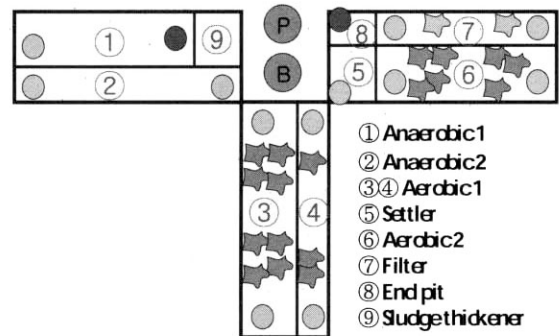


Fig. 1. Over view of microbial contact oxidation system covered with soil.

(P, pump; B, blower; ○, pipe systems; ★, basalt rubble)

와 미생물의 빠른 부착을 위하여 우선 수돗물로 5일간 운전 후, 그 후 일주일간 하수처리장의 반송 슬러지를 폭기조 당 1 L/d씩 투입하였다.

수리학적 체류시간(HRT)의 단축을 통한 경제성 절감효과를 관찰하기 위해 HRT를 40 hr, 20 hr로 변경하며 유기물질 제거 효율을 측정 하였으며, 외부 반송 비를 100%와 200%로 설정하여 영양염류 제거 효율을 관찰하였다. 또한 토양피복부에 식물 식재를 통한 영양염류 제거효율을 측정하기 위해 잔디를 선정하여 잔디 식재 전·후의 질소와 인의 농도변화를 관찰하였다. 실험횟수별 각각의 운전조건을 Table 2에 나타내었다.

본 반응조에서 부하가 높은 폭기조1에서 탈리된 biomass는 폭기조2에서 다시 담체에 부착하여 저 부하 조건에서 내생호흡을 하기 때문에 슬러지가 거의 발생하지 않았으므로 별도로 잉여슬러지는 인발하지 않았다. 하지만 운전 시에는 약 40일 경과 후마다 역세척을 통해 담체에 부착된 슬러지를 제거하였다.

2.3. 시료채취 및 분석

시료의 채취 및 분석은 유입수, 혐기 1조, 혐기 2조, 폭기 1조, 폭기 2조, 유출수를 1회/5일 간격으로 하여 채취·분석하였으며, 분석방법은 Standard methods(APHA 등, 1998)와 수질오염 공정시험방법(환경부, 2000)에 근거하여 실시하였다. 각 운전조건의 변화에 따른 하수 처리특성을

Table 1. Specifications of experimental units

Item		Specification	
Reactor	Sl. thickener	Size(L×W×H(m)), Effectiveness Volume(m ³)	0.26×0.36×0.47, 0.044
	Anaerobic 1		1.23×0.36×0.45, 0.200
	Anaerobic 2		1.50×0.16×0.45, 0.108
	Aerobic 1		1.50×0.49×0.89, 0.654
	Settler		0.30×0.31×0.43, 0.040
	Aerobic 2		1.20×0.30×0.42, 0.151
	Filter tank		1.20×0.11×0.42, 0.055
	Effluent		0.30×0.11×0.40, 0.013
Air Blower		2 set	
Pump		2 set	
Soil Layer		Thickness, Surface	0.15 m, Turfing
Packed Media		Material Particle density Specific surface area Porosity	Basalt Rubble 2.640 g/cm ³ 6.5927.253 m ² /g 53.3%

Table 2. Experimental design for each test

Test No.	HRT(hr)	Recycle ratio(%)	Turfing	Experiment period(days)	
Test 1	20	100	No	56	
Test 2		200		45	
Test 3	40	100		Yes	31
Test 4		200			19
Test 5	40	100	15		
Test 6		200	64		
Test 7	20	200	30		
Test 8		100	30		

과약하기 위하여 정기적으로 측정된 수질항목은 수온, pH, SS, COD_{cr}, BOD₅, T-N, T-P이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시료의 성상

강릉시 하수종말처리장 유입수의 성분별 분포를 Table 3에 나타내었다. 질소와 인의 연중 변화는 비교적 적게 나타났으나 BOD₅, SS 그리고 COD는 계절별, 시간별 변화가 심하게 나타나는 것으로 확인되었다. 특히 겨울과 봄철에

Table 3. Characteristics of influent wastewater

Item	Test No.	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
	pH	Max.	7.56	7.12	7.12	7.11	7.07	7.23	7.26
Min.		7.06	7.6	7.07	7.06	7.06	6.82	7.10	7.0
Ave.		7.14	7.9	7.11	7.06	7.06	7.08	7.18	7.16
Temp. (°C)	Max.	14.6	9.6	12.1	12.9	13.7	21.9	24.2	16.4
	Min.	8.9	8.4	9.6	12.1	12.6	14.7	21.1	15.2
	Ave.	12.1	9	11	12.5	13.1	19.2	22.3	15.7
BOD ₅ (mg/L)	Max.	204.4	204.4	210	159	165	208	148	380
	Min.	78.4	132	117	112.8	159	44.4	36.2	102.7
	Ave.	134	176.5	167	131.7	162	133	94.8	216.8
COD _{cr} (mg/L)	Max.	848	848	328	216	172	152	92	162
	Min.	122	112	132	96	96	48	46	48
	Ave.	344.3	386	189.3	160	136	97.4	66.9	96
SS (mg/L)	Max.	188	503	670	228	393	505	530	590
	Min.	52	144	156.7	130	196	85	170	51.24
	Ave.	124.1	303.4	434.1	177.8	272.3	290.7	281.1	314.4
T-N (mg/L)	Max.	60.1	68.1	45.1	42.5	42.5	47.6	43.4	130
	Min.	31.6	25.5	25.6	27.2	39.7	23.7	27.8	20.99
	Ave.	41.2	39.2	38.4	33.8	41.3	33	33.2	52.45
T-P (mg/L)	Max.	8.25	10.75	8.24	5.22	5.26	6.84	4.94	10.43
	Min.	2.91	2.69	3.63	2.69	4.14	2.71	1.91	1.425
	Ave.	4.78	6.20	5.84	4.15	4.66	3.84	2.89	3.6

걸쳐 실시된 Test 1~5까지는 나머지 실험기간에 비해 수온이 낮아 부착 미생물의 성장에 어느 정도 영향을 주었을 것으로 사료된다.

3.2. 수리학적 체류시간에 따른 제거특성

3.2.1. SS제거특성

HRT 20 hr, 40 hr에서 운전한 결과 유입수 SS가 각각 52~503 mg/L(평균 217.3 mg/L), 85~670 mg/L(평균 305.6 mg/L)일 때, 유출수의 SS는 두 경우 모두 0.2~9.4 mg/L로서 평균 1.2 mg/L와 2.6 mg/L로 나타났으며, 제거율은 평균 99.4%와 99.1%로 아주 우수한 것으로 확인되었다. 전반적으로 반응조 유입수의 농도변화가 심할 경우에도 유출수 농도는 큰 변화 없이 안정적으로 나타났다. 반면 500 mg/L이상의 고농도 유입수에 대해서는 HRT 40 hr에서는 별다른 영향을 받지 않았으나, 20 hr일 경우에는 다소 영향을 받는 것으로 나타나 고농도의 유입수를 침전, 제거하기에는 체류시간이 충분치 않았던 것으로 판단된다(Fig. 2).

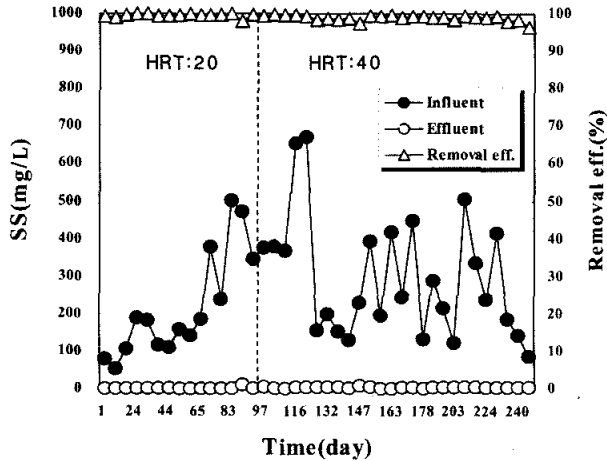


Fig. 2. Variation of SS removal efficiencies, influent and effluent concentration with HRT.

3.2.2. BOD₅ 제거특성

HRT 20 hr과 40 hr에서의 유입수 BOD₅가 각각 78.4~204.4 mg/L(평균 152 mg/L)와 90.6~210 mg/L(평균 145.3 mg/L)이었으며, 유출수 BOD₅는 12 mg/L 이하로서 평균 5.6 mg/L와 3.6 mg/L로 측정되어 제거율은 각각 평균 96.3%와 97.5%를 보여주고 있다(Fig. 3). 가동 후 40일, 80일, 120일 등에 슬러지 제거 직후에 BOD가 약간 높게 나타난 것을 제외하고는 HRT를 20 hr로 단축시켜도 향후 강화될 수질 기준인 10.0 mg/L를 거의 만족하고 있는 것으로 나타났다. 기존 화강암 쇄석을 사용한 접촉산화조의 경우 체류시간을 60~72 hr로 설계하는 것에 비하면 현무암 쇄석을 담체로 사용할 경우 부착 미생물의 증가로 인한 유기물질 제거 효과가 상당히 큰 것으로 판단된다.

3.2.3. COD_{cr} 제거특성

유입수 농도는 HRT 20 hr와 40 hr에서 112~848 mg/L(평균 333 mg/L)와 48~328 mg/L(평균 130 mg/L)로 비교적

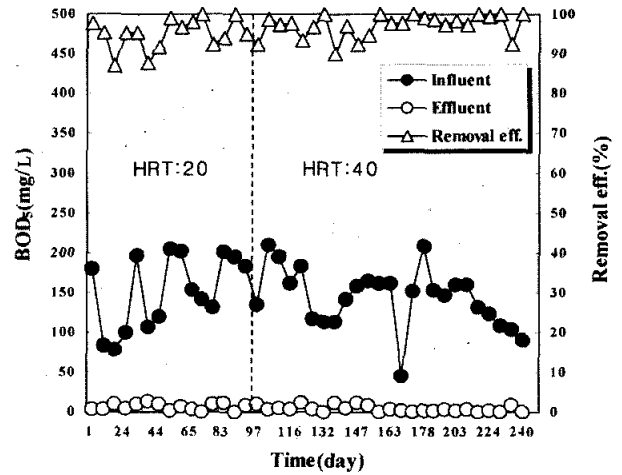


Fig. 3. Variation of BOD₅ removal efficiencies, influent and effluent concentration with HRT.

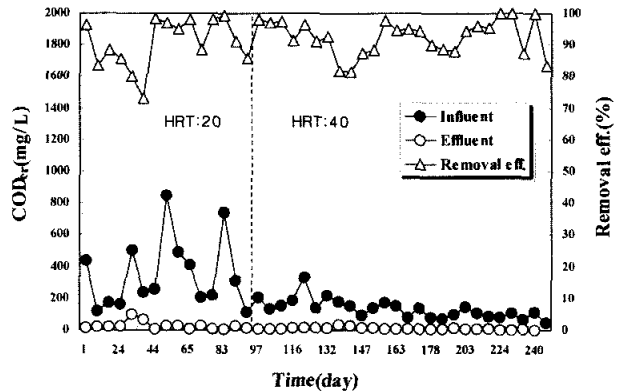


Fig. 4. Variation of COD_{cr} removal efficiencies, influent and effluent concentration with HRT.

큰 폭으로 변화하였으나 유출수 농도는 각각 4~100 mg/L(평균 25.3 mg/L), 32 mg/L(평균 8.7 mg/L) 이하로서, HRT 40 hr에서는 안정된 처리 효율을 나타내고 있으나 20 hr에서는 조금 불안정한 경향을 보여주고 있다(Fig. 4). 이 결과를 BOD 제거율과 비교해 보면 부착 미생물의 농도가 증가하여도 난분해성 물질을 분해하는 데는 체류시간 20 hr가 충분치 않은 것으로 판단된다. 각 수리학적 체류시간에서의 제거율은 20 hr에서 평균 92.4%, 40 hr에서 평균 93.3%로서 상당히 양호한 것으로 나타났다.

3.2.4. 질소 제거 특성

플랜트에 피복된 토양에 잔디를 식재하기 전의 질소 제거 효율을 살펴보았다. HRT 20 hr일 때 유입수와 유출수의 총 질소 농도를 비교해 본 결과 26~68 mg/L(평균 39 mg/L)에서 14~22 mg/L(평균 19 mg/L)로 감소하여 평균 51%의 제거율을 보여 주었다(Fig. 5). HRT가 40 hr에서는 유입수와 유출수 농도가 26~45 mg/L(평균 38 mg/L)와 15~20 mg/L(평균 18 mg/L)로 나타나 평균 제거율이 53%로서 HRT 20 hr의 경우와 비슷한 제거효율을 보여주고 있다. 실험 기간 중 HRT 20 hr에서 제거효율이 두 번 크게 감소하였는데 그 이유는 담체의 생물막이 탈리현상 등으로 이상이

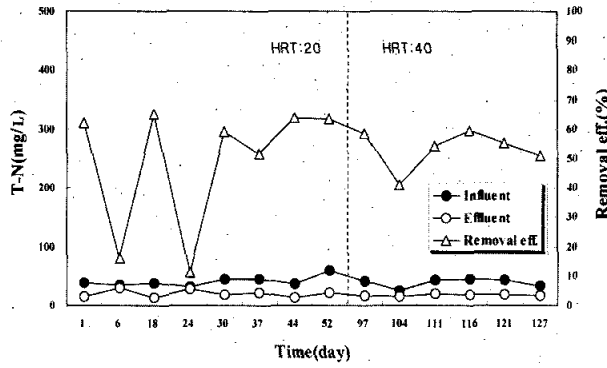


Fig. 5. Variation of T-N removal efficiencies, influent and effluent concentration with HRT.

생긴 상태에서 고농도의 유기물이 유입되어 폭기조에서 질산화가 제대로 일어나지 않았으며 결과적으로 혐기조로의 반송에 의한 탈질이 일어나지 못했던 것으로 사료된다.

두 HRT에서 제거 경향을 비교해 볼 때, 유입수·유출수 간의 농도범위와 평균치는 비슷하였으나, 전체적으로 20 hr 일 때가 제거율 변화가 심하여 다소 불안정한 것으로 나타났다. 이는 짧은 HRT로 인해 호기성 반응조에서 기질과 산소와의 충분한 접촉시간이 제공되지 못하여 *Nitrobacter*에 의한 질산 생산이 이루어지지 못하고 아질산의 축적이 발생하여 혐기성 반응조에서의 탈질화 반응에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.2.5. 인 제거 특성

HRT 20 hr에서 유입수와 유출수의 총인 농도를 비교해 본 결과 2.9~8.3 mg/L(평균 4.8 mg/L)에서 0.5~2.6 mg/L(평균 1.9 mg/L)로 감소하여 평균 60.3%의 제거율을 보여 주었다(Fig. 6). HRT 40 hr에서는 유입수와 유출수의 농도가 3.6~8.2 mg/L(평균 5.8 mg/L)와 1.9~3.5 mg/L(평균 2.6 mg/L)로 나타나 제거율이 평균 55.5%로서 HRT 20 hr에서 인 제거 효과가 더 큰 것으로 나타났다. HRT 40 hr에서 인 제거율이 낮은 이유는 질산화가 진행되면서 반송 슬러지에 포함된 질산성질소가 혐기성조로 유입되어 인 제거 미생물의 인산방출을 방해하는 것으로 판단된다. 질산화율의 증가로 인해 폭기조의 NO_x의 증가에 의한 영향과 탈

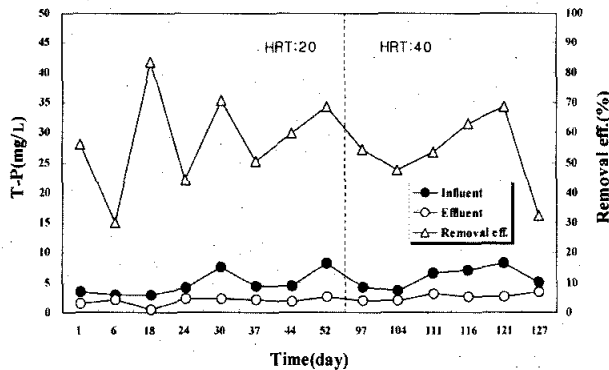


Fig. 6. Variation of T-P removal efficiencies, influent and effluent concentration with HRT.

질에 의한 유기탄소원의 소모로 인한 C/P비의 감소 때문에 HRT가 길수록 질소 제거에 유리하며 HRT가 짧을수록 인 제거에 유리한 경향을 보여주었다.

본 접촉산화조에서 인의 제거는 미생물의 인 과잉 섭취에 의한 제거와 동시에 여과조에 충전한 굴 껍질의 흡착에 의한 제거 효과도 나타났을 것으로 사료된다. 문 등(1997)에 의하면 폐굴껍질을 이용한 생물막법에서 활성슬러지법에 비해 인 제거효율이 22.3%에서 39.3%로 향상되었다고 하였다. 이에 대한 더 자세한 결과를 알기 위해서는 향후 실험을 더 계속해 보아야 할 것이다.

3.3. 반송율에 따른 질소, 인 제거특성

시스템 내의 반송율이 증가하게 되면 유속이 빨라져서 기질과 산소와의 접촉시간이 줄어들게 되어 질산화에 악영향을 미치게 되며, 또한 반송수 내의 낮은 유기물질이 무산소 반응조로 대량 유입되면 기질 부족에 의한 탈질 감소가 일어날 수 있다. 그러나 반송율이 너무 감소되면 질산성 질소의 반송비가 줄어들어 탈질에 악영향을 미치게 된다. 인 제거 미생물의 경우 반송율이 증가하게 되면 SRT가 길어지게 되어 슬러지 발생량이 줄어들게 되고 결과적으로 인 제거율이 감소하게 된다. 또한 질소 제거 미생물과 마찬가지로 반송수 내의 낮은 유기물질이 대량 유입되어 인 제거에 악영향을 미칠 수 있다. 그러나 인 제거 미생물은 성장률이 낮으므로 어느 정도의 SRT는 유지시켜 주어야 한다.

본 실험 결과를 가지고 HRT를 20 hr와 40 hr로 고정하고, 반송율을 100%와 200%로 변화시켰을 때의 총질소 제거율을 조사하여 보았다. HRT를 20 hr로 운전하였을 경우, 반송율 100%일 때 제거율은 평균 49%이고 반송율 200%일 때에는 평균 45%이었다. HRT를 40 hr으로 증가시킨 경우, 반송율 100%일 때 제거율은 평균 53%이고 반송율 200%일 때에는 평균 47%로 측정되어 반송율 100%에서 질소 제거 효과가 4~5% 높은 것으로 나타났다.

동일한 조건에서 인 제거 특성을 조사해 본 결과, HRT를 20 hr로 운전할 경우, 반송율 100%일 때 제거율은 평균 58%이고 반송율 200%일 때 제거율은 평균 51%이었다. HRT를 40 hr로 증가시킨 경우, 반송율 100%일 때 제거율은 평균 53%이고 반송율 200%일 때 제거율은 평균 39%로서 질소의 경우와 마찬가지로 반송율 100%에서 인 제거 효과가 7~14% 더 높은 것으로 나타났다.

결과적으로 본 시스템의 실험조건에서는 반송율 100%에서 질소 및 인 제거 효과가 약간 향상된 것으로 나타났다. 질소의 경우 제거율의 변화폭이 큰 현장실험에서 그 정도의 차이는 큰 의미가 없는 것으로 사료되지만, 인의 경우에는 HRT가 길어졌을 때 반송율의 감소가 인 제거에 도움을 주는 경향이 있는 것으로 나타났다.

3.4. 식물식재에 의한 제거 특성

3.4.1. 질소 제거 특성

식물에 의한 질소제거 효과를 확인하기 위하여 HRT 40

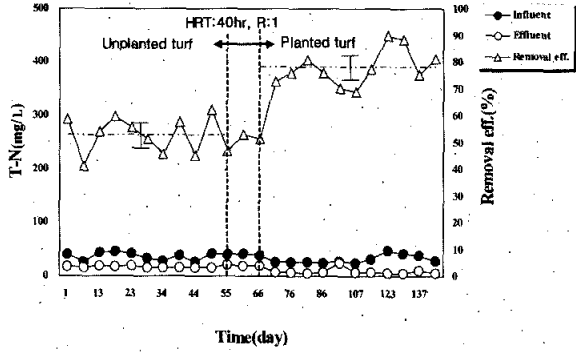


Fig. 7. Variation of T-N removal efficiencies, influent and effluent concentration with and without turfing.

hr, 반송율 100%로 고정 시키고 잔디식재 전후에 따른 질소농도를 비교하여 보았다(Fig. 7). 잔디 식재 전 유입수와 유출수의 총질소 농도는 각각 26~45 mg/L(평균 37 mg/L)와 15~20 mg/L(평균 17 mg/L)로서 제거율은 41~62%로 나타났다. 잔디식재 후에는 잔디가 자라기 시작한 초기의 약 10일간은 제거율에서 거의 차이가 없다가, 그 이후부터 제거율이 급격히 향상되었다. 따라서 잔디가 자라기 시작한 초기의 약 10일간을 제외한 나머지 데이터를 가지고 측정해 본 결과, 유입수와 유출수 농도는 각각 24~48 mg/L(평균 31 mg/L)와 5~24 mg/L(평균 8 mg/L)로서 제거율은 69~90%로 증가되었다. 이 결과를 가지고 잔디식재 이후에 질소 제거율이 향상되었는지 검증하기 위해 t분포로 검정해 보았다. 그림에서 데이터 상의 점선은 평균치를 나타내고 고저 값을 보여주고 있는 수직선은 신뢰구간을 나타낸다. 검정 결과 식재 전 제거율에 대한 95% 신뢰구간은 52.5±4.66%이며 식재 후의 제거율은 77.8±4.56%로서, 본 접촉산화조 상부에 식재된 잔디에 의해 질소의 제거 효과가 평균 25% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 향후 다양한 식물을 적용하여 연구를 계속한다면 식물 식재에 따른 영양물질 제거 효과를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3.4.2. 인 제거 특성

잔디 식재 전후의 인 농도 변화를 질소제거 실험에서와 동일한 조건에서 살펴보았다(Fig. 8). 잔디 식재 전 유입수와 유출수의 인 농도는 각각 2.7~8.2 mg/L(평균 5.2 mg/L)와 1.6~3.7 mg/L(평균 2.6 mg/L)로서 제거율에 대한 95% 신뢰구간은 44.8±12.3%로 나타났다. 잔디식재 후에는 질소 제거 시에 보여준 경향과는 달리 잔디의 성장과 인의 제거율과는 상관관계가 없는 것처럼 보이며, 유입수와 유출수 농도는 각각 2.7~6.8 mg/L(평균 3.9 mg/L)와 1.0~4.1 mg/L(평균 2.0 mg/L)로서 평균 제거율은 48.8±9.0%로 나타났다. 실험결과에 따르면 잔디식재 후에 인 제거율은 평균 4% 정도 증가하는 것으로 나타났으나 t분포에 의한 검정 결과 제거율 차이는 없는 것으로 확인되었다.

질소와 인의 제거율에 있어 잔디식재 효과가 이렇게 차이를 보이는 것은 말린 잔디에서 인과 질소의 양적비율이 0.5% : 35%인 것을 근거로 하였을 때(잔디·환경연구소,

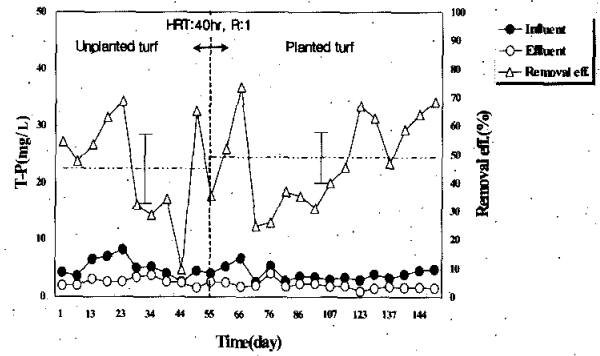


Fig. 8. Variation of T-P removal efficiencies, influent and effluent concentration with and without turfing.

2004), 이는 잔디의 영양소 선택성에 따른 결과로 판단된다.

3.5. 체류시간에 따른 시설비 절감효과

소규모 오수처리시설로서 현장에 적용하고 있는 토양피복형 접촉산화법은 침전분리조(헤파기 1/2조), 폭기 1/2조, 여과조, 방류조로 구성되어 있으나 하수의 성상 및 부하 정도에 따라 각 조의 숫자를 가감하여 시공하고 있다. 또한 쇄석의 충전율, 시설물 높이와 넓이의 비율 등에 따라 HRT가 변하게 되어 일률적으로 시설비를 산출하기는 어려운 실정이다. 그러나 현재 각 조의 충전율이 정상적으로 포함된 용량에서 HRT는 72시간으로 설계되어 있으므로, 이때의 시설비와 본 연구를 통해 안정적인 처리 효율을 보여준 HRT 40시간의 경우를 비교하여 보았다.

Table 4에서는 100 m³/d 규모의 접촉산화조를 시공할 경우 인건비를 제외한 총공사비를 토목공사, 기계설 건축공사, 기계 설치공사, 전기공사로 나누어 개략적으로 산출해 보았다. 토목공사에는 가설공사, 토공사, 콘크리트공사, 방수 및 보호몰탈, 다공질토양 충전, 접촉모판려 및 받침대 설치, 기타 자재 및 운반비 등이 포함되었으며, 기계설 건축 및 기계설치 공사에는 가설공사, 토공사, 콘크리트공사, 철골 및 판넬공사, 배관공사 등이 계산되었고, 전기공사에는 컨트롤 판넬, 전선 및 잡자재, 각종 기기 및 분전함 등이 포함되어 있다. 이 결과에 의하면 HRT가 72시간일 때 총공사비가 2억8천만 원인데 비하여 HRT가 40시간으로 줄어들면 2억 2천4백만 원 정도로서 약 20%의 시설비 절감 효과를 가져왔다. 더구나 운영 및 관리비를 포함하면 그 이상의 절감효과를 가져올 것으로 판단되며 부지 확보에서

Table 4. Total construction costs for 100m³/d treatment plant (unit : thousand won)

Engineering works	Hydraulic retention time(HRT)	
	72 hr	40 hr
Construction cost	210,800	165,360
Machinery room construction	12,425	12,425
Machinery & equipments	33,200	26,900
Electricity	24,200	19,850
Total	280,625	224,535

도 많은 경제적 이익이 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 토양피복형 접촉산화공정에서 사용되던 화장암쇄석을 현무암쇄석으로 대체하여 수리학적 체류시간, 반송율, 잔디식재 유·무에 따른 유기물질과 영양염류 제거특성을 확인한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 수리학적 체류시간(HRT)에 따른 유기물질과 영양염류의 제거율을 비교해본 결과, SS, BOD₅, COD_{cr}에서의 제거효율은 HRT 20 hr과 40 hr일 때 모두 유사하게 나타났으며, 총 질소의 경우 HRT 40 hr, 총 인은 HRT 20 hr에서 다소 양호한 제거효율을 보여 주었다. 그러나 HRT 20 hr에서는 제거율의 변화폭이 커지는 등 시스템이 불안정한 경향을 나타내었으며, 특히 고농도의 유입수를 처리하기에는 체류시간이 충분하지 않은 것으로 나타났다.
2. 반송율에 따른 영양염류 제거효율 면에서는 반송율 100~200% 범위 내에서 100%일 때 질소 및 인 제거 효과가 각각 최고 5%, 14% 정도 향상된 것으로 측정되었다. 질소의 경우 제거율의 변화폭이 큰 현장실험에서 그 정도의 차이는 큰 의미가 없는 것으로 사료되지만, 인의 경우에는 HRT가 길어졌을 때 반송율의 감소가 인 제거에 도움을 주는 경향이 있는 것으로 나타났다.
3. 식생에 의한 영양염류 제거효율을 조사하기 위하여 잔디를 식재한 결과 총 질소의 경우 잔디 식재 전 평균 53%의 제거율을 보였으나, 식재 후 78%의 제거율을 보여 식물에 의한 총 질소의 제거율이 25% 정도 큰 폭으로 향상이 되는 것으로 나타났다. 반면 총 인의 제거율은 잔디 식재 전후에 별 차이가 없는 것으로 확인되어 잔디 식재로 인한 영양염류 제거는 총 질소에 더 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.
4. 소규모 오수처리시설로서 현장에 적용하고 있는 토양피복형 접촉산화법의 HRT는 72시간으로 설계되어 있으나, 본 연구를 통해 수리학적 체류시간을 40시간까지 단축시킬 경우 시설비와 운영비를 포함하여 20% 이상의 절

감효과를 가져올 것으로 판단되며 부지 확보에서도 많은 경제적 이익이 있을 것으로 사료된다. 향후 토양피복형 접촉산화공법의 효율적인 현장시공과 운전을 위하여 다양한 접촉 여재와 식물을 대상으로 상이한 운전조건을 적용하여 보다 구체적인 기초자료를 확보해야 할 것이다.

참고문헌

김동민, 생물접촉산화법을 이용한 소규모 오수처리 시설(KDBR)과 미생물 담체제조에 관한 연구, 관동대학교 석사학위논문 (2002).

문병현, 이택순, 서정윤, 서희정, 폐갈집질을 이용한 침적식 생물막법에 의한 폐수 처리, 한국수질보존학회지, 13(3), pp. 227-234 (1997).

서봉수 외 12인, 오염심화 소하천의 정화기술 실용화(I)-자갈층 접촉산화법, 국립환경연구원보, 13, pp. 421-429 (1991a).

서봉수 외 12인, 오염심화 소하천의 정화기술 실용화(II)-토양트렌치법, 국립환경연구원보, 13, pp. 431-442 (1991b).

윤종화, 토양피복형 접촉산화법에 의한 마을하수처리 공정 연구, 관동대학교 석사학위논문 (2003).

이창균, 마을하수도의 처리특성 및 적정 관리방안에 관한 연구, 대전대학교 박사학위논문 (2002).

잔디·환경연구소, 잔디화개론, 삼성에버랜드 (2004).

최동윤, 경축복합마을의 오수처리를 위한 토양피복접촉산화시스템의 적용, 서울대학교 석사학위논문 (1997).

최홍림, 임종완, 손재호, 토양식 정화기술을 이용한 경축복합마을의 생활오폐수 처리효율에 관한 실험적 연구, 한국축산학회지, 38(6), pp. 637-648 (1996).

최홍림, 최동윤, 고석영, 손재호, 임종완, 토양피복접촉산화조에 충전한 접촉여재의 오염물질 제거효율에 관한 실험적 연구, 한국축산학회지, 41(1), pp. 109-128 (1999).

한기봉, 이영준, 임연택, 권오상, 이인신, 이덕길, 안우정, 홍성민, 마을 하수처리시스템 구축에 관한 연구(I), 국립환경연구원 (2001).

환경부, 수질오염공정시험방법 (2000).

APHA, AWWA, WEF, Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th Ed. (1998).

EPA, Design Manual for On-site Wastewater Treatment and Disposal System, EPA/625/1-80-012, U. S. A. (1980).