Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 23, No. 2, pp.281-286 (2007)

매립지 침출수 현장 처리를 위한 폴리우레탄과 개질토의 특성 분석 실험에 관한 연구

박찬수 · 정영욱 · 박중섭 · 백원석* · 신원식* · 천병식 · 한우선** · 박재우†

한양대학교 토목공학과
*경북대학교 환경공학과
**(주)해공환경

Characterization of Polyurethane and Soil Layers for In-situ Treatment of Landfill Leachate

Chan-Soo Park · Young-Wook Jung · Joong sub Park · Won seok Back* · Won sik Shin* · Byung sik Chun · Woo-Sun Han** · Jae-Woo Park†

Department of Civil Engineering, Hanyang University
**Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University*
***Haekong Environment Co.*

(Received 12 January 2007, Accepted 7 March 2007)

Abstract

A chemical and biological permeable barrier with economic feasibility is suggested to treat landfill leachate in this study. The proposed composite layers consist of bentonite, and polyurethane (PU) foam that is mixed with powdered activated carbon (PAC) and inoculated with microorganisms from local wastewater treatment plant. Each layer is mixed with local sand, and yellow brown soil. Batch tests were conducted to investigate the sorptions of nitrate on the PU foam and PAC, and nitrification/denitrification rate of each layer material. Nitrification occurred in 30 minutes with initial ammonia concentration of 100 mg/L, and the concentration of nitrate attached in the PU foam increased after 270 minutes. Results of denitrification batch tests showed 76.6%, 87.3% and 88% of nitrate removal efficiency at 10%, 20% and 30% of the volume ratio of PU foam, respectively. The pH increased from 7 to 9.42, and alkalinity increased from 980 mg/L to 1720 mg/L during the denitrification batch tests. In the column experiments using the proposed composite layers with 20% of the volume ratio of the PU foam, about 96% of BOD, 63% of COD, 58.1 ~ 79.5% of total nitrogen were removed.

keywords : Denitrification, In-situ treatment, Landfill leachate, Nitrification

1. 서 론

매립지 침출수는 고농도의 유기물과 암모니아성 질소(NH_4^+-N) 뿐만 아니라 난분해성 및 독성물질, 용해성 이온 등도 함유하기 때문에 그 처리가 용이하지 않으며, 그 중 질소성분의 대부분을 차지하는 암모니아성 질소는 처리시 탈기에 의한 악취유발, 질소(NO_2^--N)의 축적 등의 문제를 일으킨다(최 등, 2003). 이로부터 발생한 침출수는 매립지 인접지반과 지하수를 심각하게 오염시킨 것으로 보고되고 있다(Lee et al., 2002). 수질변화가 큰 침출수의 NH_4^+-N를 제거하려면 C/N비를 고려하여 이에 알맞은 운영방법을 수립하고, C/N비가 낮은 경우에도 탈질을 원활하게 수행할 수 있는 공법을 개발할 필요가 있다.

매립지 침출수 처리는, High-density polyethylene (HDPE) 또는 HDPE와 점토 및 고화토로 이루어진 sheet를 설치하여 물리적으로 흐름을 막은 후 차수벽 안쪽 집수정을 통해 침출수를 추출하여 처리장에서 물리화학적 처리, 생물학적 처리 및 고도처리로 정수하여 배출시키는 현장 외 처리 공법을 주로 사용하고 있다. 그러나 현행 처리방법은 초기 설치비가 많이 소요되고 화학적 처리 등에 있어 약품비가 다량 소요되며 운전에 있어 전문가의 조작 및 주의가 필요한 문제 등의 제약이 있으므로 보다 경제적이고 효율적인 침출수 처리 방안의 제시에는 다소 미흡한 실정이다(Price et al., 2003).

본 연구를 진행하면서 기존 연구들과의 차별성에 초점을 두었다. 첫 번째로 폴리우레탄 담체(HYPOL 3000, TWEEN 85, Powder Activated Carbon의 혼합)에 질산화 및 탈질 미생물을 부착시킨 후, 이를 이용한 침출수 내 오염물질 제거를 들 수 있다. 기존의 담체 기술과 비교하여 공존이온의 존재 시에도 효율적인 처리가 가능한 폴리우레탄 반응성 투수벽체 제조가 가능하며 폴리우레탄 반응성 투수벽체의 조성(활성탄, 제올라이트 등)에 따른 암모니아성 질소 흡착제거 효율 및 질산화균의 부착능을 평가할 수 있다.

† To whom correspondence should be addressed.
jaewoopark@hanyang.ac.kr

공극률 조절에 의한 질산화균 과다성장에 의한 clogging 현상 해소방안 도출이 가능하다. 두 번째로 호기조, 흡착 및 저류조, 혐기조로 구성된 반응 층에 산소의 공급으로 호기성 상태 유지와 함께 질산화 반응을 시작으로 각 매질에 의한 흡착 및 유입된 매립지 침출수의 체류시간 지속, 또한 메탄을 공급에 의한 탈질 반응으로 매립지와 폐광산의 침출수(갱내수)를 현장에서 처리할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 현장 내 복합 반응층은 총 3단계의 반응층으로 구성되어 있다. 1단계는 호기성 폴리우레탄 반응층으로 투수벽체내 충진물질을 호기성 미생물이 부착된 폴리우레탄과 황토, 모래를 압축강도 평가를 통해 적절한 비율로 혼합, 충진하였다. 1단계에서는 질산화에 의한 매립지 침출수의 처리로서, 질산화에 관여하는 주요 미생물로는 *nitrosomonas, nitrobacter*가 있는데 이들은 성장에 필요한 에너지를 무기질소의 산화에 의해 얻기 때문에 독립영양세균으로 분리된다(Barnes et al., 1983). 단계별 질산화 반응은 다음과 같다.

$$NH_4^+ + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow NH_2OH + H^+$$

암모니아성 질소의 산화과정은 Hydroxylamine과 같은 불안정한 중간물질을 거쳐 이루어진다.

$$NH_2OH + O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + H^+ + Energy$$

이 단계에서는 암모니아성 질소의 산화 시 얻을 수 있는 대다수의 에너지가 생성된다.

$$NH_4^+ + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow NO_2 + H_2O + 2H^+ + Energy$$

위의 반응에서 암모니아 1 mol을 기준으로 하여 약 58-84 kcal/mol의 에너지를 얻을 수 있다.

$$NO_2^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow NO_3^- + Energy$$

위의 식에서 아질산성 질소 1 mol을 기준으로 약 15.4 ~20.9 kcal/mol의 에너지를 얻는다(Anthonissen et al., 1976; Sharma et al., 1977).

2단계인 soil-bentonite wall층은 황토와 벤토나이트(2%)를 균일하게 혼합하여 충진하였다. 2단계 반응층에서는 각 매질에 의한 그리고 각 매질의 혼합에 의한 오염물질의 수착을 극대화하기 위해 호기성/혐기성 반응층 사이에 설치하였다. 또한 2단계층에서 적절한 벤토나이트 함량조절을 통하여 수리전도도 조절이 가능하다.

3단계는 혐기성 폴리우레탄 반응성 투수벽체 내 충진물질을 혐기성 미생물이 부착된 폴리우레탄과 황토, 모래를 압축강도 평가를 통해 적절한 비율로 혼합 충진하였다. 3단계에서는 탈질에 의한 처리로써, 탈질은 이화작용에 의하여(dissimilatory) NO_2^-, N_2 가스로 환원시키는 것이다. 탈질에 관여하는 미생물로는 *pseudomonas, Alcaligenes, Hyphomicrobium* 등이 있다. 탈질균은 *pseudomonas, Alcaligenes, Hyphomicrobium*, 그리고 *Thiobacillus*와 같은 그램음성 *Proteobacteria*에 속하는 흔한 미생물이다. 탈질의 반응은 다음과 같다(US. EPA, 1993; Soransen et al., 1993).

$$2NO_2 + 3H_2 \rightarrow N_2\uparrow + 2H_2O + 2OH$$

(아질산 탈질반응)

$$2NO_3 + 5H_2 \rightarrow N_2\uparrow + 4H_2O + 2OH^-$$

(질산 탈질반응)

H_2 : 수소공여체 (유기물 BOD 중의 구성수소)

따라서 본 연구는 반응층에 사용된 각 매질의 특성 파악을 위한 회분식 실험과 실질적인 현장 적용을 위한 실내 컬럼 실험을 통하여, 현장 적용을 위한 기초 자료를 확보하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

X-Ray fluorescence spectrophotometer (XRF)를 이용하여, 실험에 사용된 모래와 황토의 성분을 분석하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다. 또한 벤토나이트((주)왕표화학)의 불순물을 제거하기 위하여 수회 세척하여 사용하였으며, 주요특성은 Table 2에 나타내었다. 폴리우레탄은 폴리우레탄 폴리머(Hypol 3000), Tween 85 계면활성제와 분말 활성탄을 혼합하여 제조하였다. 폴리우레탄 제조에 사용되는 Hypol 3000 프리폴리머는 항온조에서 55°C로 2시간이상 유지하였다. Tween 85 계면활성제는 증류수를 사용하여 30 g/L로 만든 다음 8°C로 냉각하여 제조하였다. Hypol 3000

Table 1. Composition of sand and yellow brown soil

Metal oxides	Local sand (wt %)	Yellow brown soil (wt %)
Silica (SiO_2)	94	58.51
Alumina (Al_2O_3)	3.5	20.42
Titanium oxide (TiO_2)	-	0.71
Iron oxide (Fe_2O_3)	0.15	7.65
Magnesia (MgO)	0.1	1.21
Lime (CaO)	0.1	0.14
Sodium oxide (Na_2O)	-	1.33
Potassium oxide (K_2O)	-	3.57
Manganese oxide (MnO)	-	0.08
Phosphorus pentoxide (P_2O_5)	-	0.07
Loss due to ignition	0.3	6.28
Total	98.15	99.96

Table 2. The main characteristics of bentonite

Chemical formula	$(NaCa)_3(AlMg)_2Si_4O_{10}(OH)_2(H_2O)$
Theoretical composition	Al_2O_3(22.6%), 4Si(53.4%), $6H_2O$(24%)
Structure	Plate structure (Layer structure of Diatahdral)
Refractive index	1.55 ~ 1.56 (nD)
Hardness	1.5 ~ 2.0
pH	8 ~ 10.5
Swelling property	5 ~ 15 mL/G
Density	2.5 ~ 2.6
CEC	60 ~ 120 me/100 g

과 Tween 85 계면활성제와 활성탄을 일정한 양으로 혼합하여 약 20초간 플라스틱 막대로 교반하며 격렬히 반응시킨 후 원통형 플라스틱 통에 부어 팽창시켜 폴리우레탄 담체를 형성시켰다. 형성된 폴리우레탄은 표면의 불투명 층은 잘라낸 후 증류수로 반복하여 세척하고 60°C의 오븐에서 건조한 다음 다시 증류수로 반복 세척하여 사용하였다.

2.2. 회분식 질산화 실험

회분식 질산화 실험은 총 세 가지를 실시하였다. 첫 번째, 회분식 실험을 통하여 담체 충진 비율별 질산화 효율을 비교하였다. 대조군으로 폴리우레탄 담체를 포함하지 않고 실험을 실시하고 나머지는 각각 담체의 비율을 10 ~ 30%를 포함하여 실시하였다. 모래와 황토는 무게비 8:2이고 초기 암모니아의 농도와 초기 pH 값은 각각 100 mg/L, 7.4로 실험을 실시하였다.

또한, 외부탄소원의 첨가 없이 미생물이 부착된 담체를 30%로 충진하여 암모니아의 농도를 20 ~ 150 mg/L 변화시켜 가며 질산화 실험을 실시하였다. 10,000 mg/L의 인공폐수를 제조하여 20, 50, 100, 150 mg/L로 희석하여 농도별 질산화를 관찰하였다. 마지막으로, 실험에 사용한 시료는 매립장 침출수를 희석하여 초기 암모니아성 농도가 125 mg/L가 되도록 하였고 외부 탄소원으로 MeOH 100 mg/L를 주입시켰다.

2.3. 회분식 탈질 실험

생물학적 탈질은 무산소 조건에서 다양한 종류의 종속영양균에 의해 질산염과 아질산염이 질소가스로 전환되는 과정이다. 이 과정에서 질산화물은 전자수용체로 이용되며 탄소원과 에너지원으로 유기물이 요구된다. 따라서 탈질을 위해서는 충분한 양의 유기물이 공급되어야 하는데 적정 유기물 공급의 지표로는 COD/NO_3-N 비가 중요한 근거로 사용되고 있다.

따라서 회분식 실험을 통하여 탈질에 관련된 총 세 가지 실험을 실시하였다. 첫 번째, 담체의 충진율을 10%, 20%, 30%로 달리하여 초기 질산성 질소 농도가 150 mg/L, 탄소원 MeOH 450 mg/L인 시료를 주입하여 탈질효율을 비교 실험하였다. 두 번째, 담체의 충진율을 30%로 하여 외부 탄소원 주입의 영향을 살펴보기 위해 C/N 비를 1, 2, 3으로 달리하여 탈질효율을 비교한 것이다. 초기 메탄올 농도 및 초기 질산성 질소의 농도는 각각 450 mg/L, 150 mg/L로 실험을 실시하였다. 마지막으로 회분식 탈질실험에서 pH의 변화를 시간별로 확인하였다. 모든 실험은 5M NaOH를 이용하여 초기 pH를 7.0으로 조정하여 실시하였다.

2.4. 컬럼 실험

pyrex glass 재질의 컬럼의 총 길이는 45 cm로 제작되었다. 컬럼은 총 3단계로 구분하여 구성하였으며 제1단을 질산화를 위한 호기성층 제2단을 soil/bentonite층, 제3단을 탈질을 위한 혐기성층으로 구성하였으며, 각 단의 길이는 15 cm의 높이로 설치됐다. 제1단인 호기성층에 있는 호기성 미생물이 침출수 내 산소를 소모함으로써 침출수내 산소가 부족하게 되고 제3단은 혐기성층 조건으로 만족하게 되었다. 호기성단과 혐기성단에는 생물막 형성을 위한 비표면적과 공극율이 각각 620 m^2/m^3, 0.82인 폴리우레탄 담체를 부피비로 20%로 충진하여 실험을 실시하였다. 컬럼에 유입되는 오수는 수도권매립지관리공사 매립장 침출수를 평균적으로 약 10배 희석하여 사용하였으며, 오염물질의 농도를 차츰 증가시켜 peristaltic pump를 이용하여 유량을 10 ml/min으로 하여 주입시켰다. 컬럼 내 미생물의 서식을 원활하게 하기 위하여, 호기단과 혐기단의 충진 물질들에 각각 하수처리장에서 채취한 활성슬러지와 반송슬러지를 이용하여 미생물을 24시간 충분히 적셔 부착시킨 후 Fig. 1과 같이 컬럼을 충진하였다.

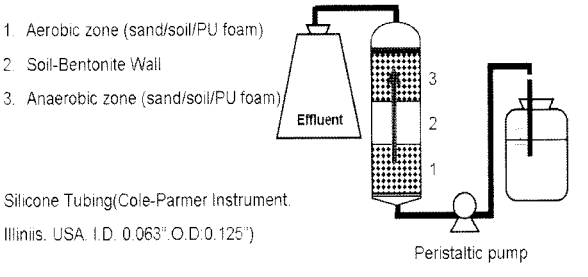

Fig. 1. The column experiment for the reactivity of polyurethane.

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분식 질산화 실험

실험 결과 실험 시작 후 30분 이후부터 암모니아성 질소의 농도가 감소하는 것으로 나타났으며, 반응 초기 암모니아성 질소가 O_2에 의해서 산화되면서 생성되는 초기 질산성 질소 농도는 담체 충진률에 상관없이 모두 비슷하게 생성되는 것으로 나타났다. 담체를 충진하지 않을 경우, 초기에 생성된 질산성 질소 농도는 반응시간이 늘어나도 일정 농도로 유지되는 것으로 나타났으나, 담체를 10%, 20%, 30% 충진한 경우에서는 생성된 질산성 질소가 반응시간이 늘어나면서 점차 감소하다가 4시간 30분(270분) 이후에는 다시 증가하는 것으로 Fig. 2에 나타냈다. 반응 초기에 질산성 질소의 감소는 폴리우레탄의 질산성 질소 흡착에 의한 것이며, 4시간 30분(270분) 이후부터는 질산성 질소의

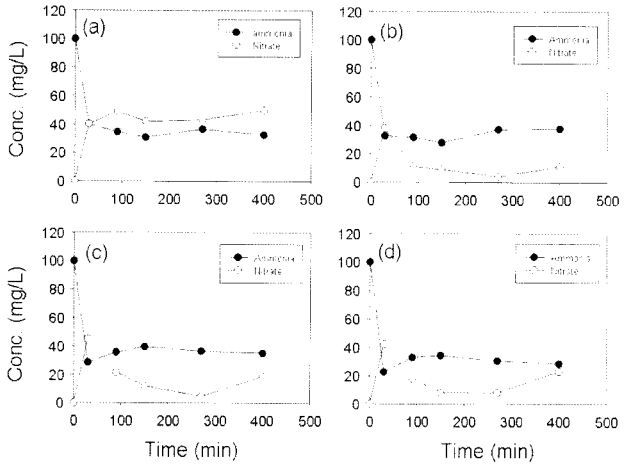

Fig. 2. Efficiency of nitrification in batch test (a) none, (b) PU media 10% added, (c) PU media 20% added, (d) PU media 30% added. (initial MeOH Conc. = 100 mg/L, yellow brown soil : sand = 2 : 8 (wt%), initial ammonia-N Conc. = 100 mg/L, initial pH = 7.4).

다소 증가하는 것으로 나타났다. 이는 실험 후기에 질산화 반응이 좀 더 활성화된 결과로 추측된다.

20 mg/L, 50 mg/L의 암모니아성 질소는 2시간 정도에서 거의 대부분 질산성 질소로 바뀌었으며(Fig. 3), 100 mg/L, 150 mg/L의 암모니아성 질소의 경우 6시간 이상이 걸렸고 질산화율 또한 거의 100%로 나타났으며 상당히 빠른 시간에 질산화가 이루어졌다. 매립장 침출수를 사용한 실험에서는 담체를 충진하지 않은 경우는 합성폐수와는 달리 질산화가 전혀 일어나지 않았다. 담체를 충진한 경우 Fig. 4와 같이 담체 충진율에 관계없이 2시간 만에 65% 이상의 암모니아성 질소가 질산성 질소로 변화되었다. 담체 충진율에 따른 질산화율은 담체 충진율이 증가할수록 더 높게 나타났다.

3.2. 회분식 탈질 실험

질산성 질소의 제거율은 담체의 충진율 10%에서 76.6%, 20%에서 87.3%, 충진율 30%에서 88%로 Fig. 5에 나타냈

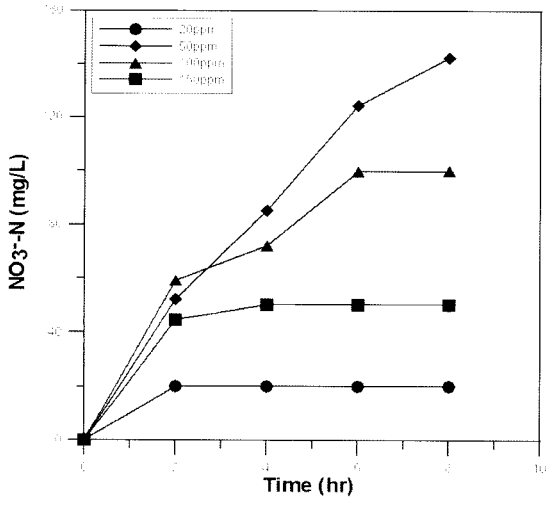

Fig. 3. Nitrification rate without exterior carbon source.

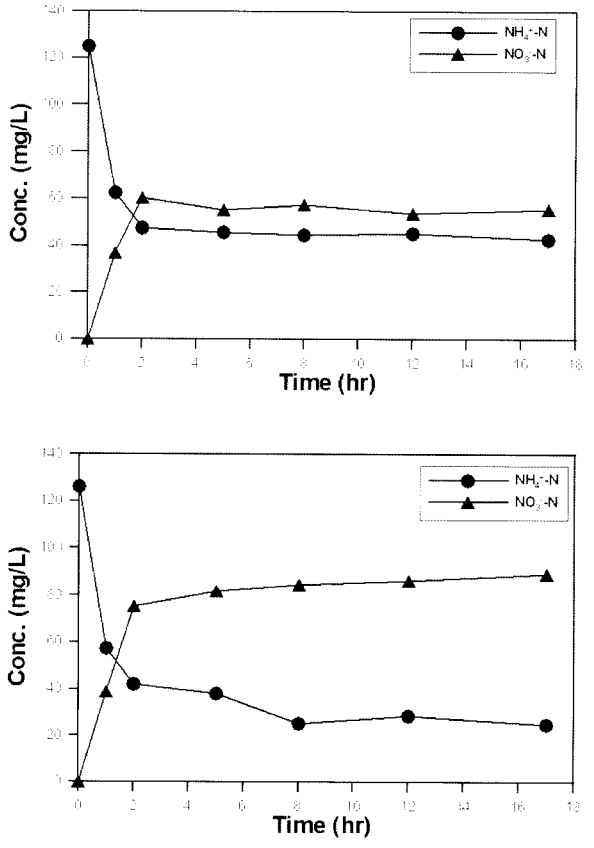

Fig. 4. Efficiency of nitrification in batch test using landfill leachate (a) PU media 10% added, (b) PU media 20% added (initial methanol Conc. = 100 mg/L, initial ammonia-N Conc. = 125 mg/L, initial pH = 7.4).

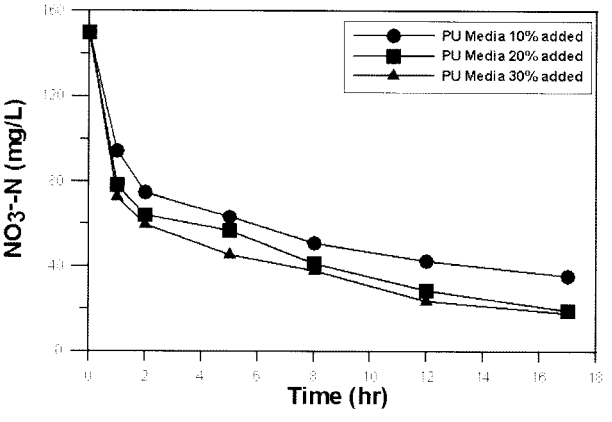

Fig. 5. Efficiency of denitrification in batch test with various PU added (initial methanol Conc. = 450 mg/L, initial nitrate Conc. = 150 mg/L).

다. 담체의 충진율이 높아질수록 질산성 질소의 제거율이 증가함을 알 수 있다. 질산성 질소 제거율을 살펴보면 외부 탄소원을 공급하지 않은 Control의 경우 57%, C/N비 1의 경우 87.5%, C/N 비 2의 경우 90.5%, C/N비 3의 경우 96%로 Fig. 6에 나타냈다. 이는 탈질 과정에서 C/N 비가 중요한 역할을 하며, C/N 비가 높을수록 탈질의 효율이 더 높다는 것을 알 수 있다. 생물학적 탈질에 있어 pH는 가장 중요한 인자 중 하나이다. 따라서 회분식 탈질실험에서 pH

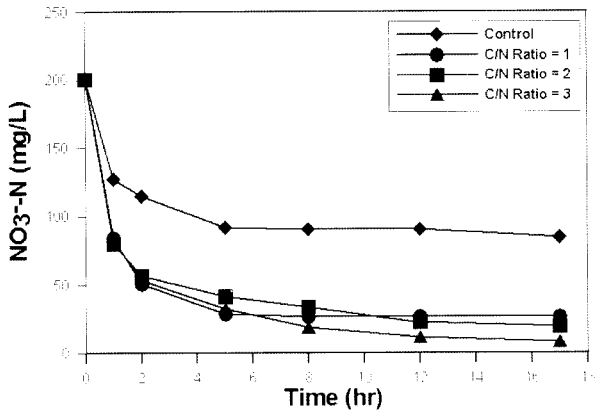

Fig. 6. Efficiency of denitrification in batch test with various C/N ratio (initial nitrate Conc.= 200 mg/L).

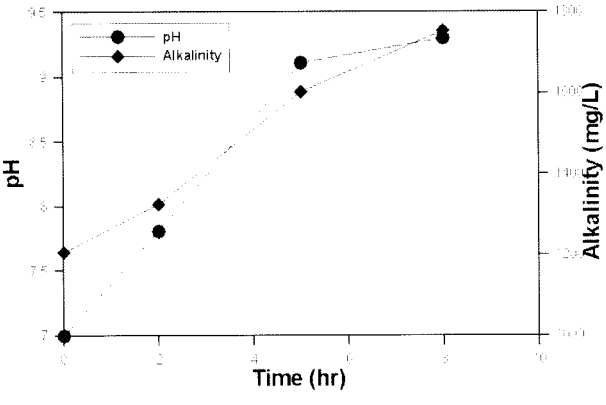

Fig. 7. Variation of pH and alkalinity in the denitrifing process.

의 변화를 시간별로 확인하였다. 모든 실험은 5M NaOH를 이용하여 초기 pH를 7.0으로 조정하여서 실시하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 pH는 7에서 9.42까지 서서히 증가하는 경향을 나타내었고 알칼리도 또한 증가하였다. 이는 NO_3^-에서 N_2로 환원되는 과정에서 강한 염기가 형성된 것으로 볼 수 있다. 이 과정에서 N_2 가스로 환원된 NO_3^-는 동량의 H^+를 소비하며 이것은 질산성 질소 그램당 $CaCO_3$ 3.57g의 알칼리를 생성하게 된다. 이것은 미생물의 물질대사나 미네랄 축적에 의한 현상인 것으로 예상된다.

3.3. 컬럼 실험

질산화를 위한 호기단과 탈질을 위한 혐기단의 담체 첨가양을 부피비로 20% 컬럼에 충진하여 매립장 침출수의 초기농도를 BOD_5 181.9~444.3 mg/L, COD_{mn} 54.5~143.5 mg/L, T-N 144.3~682.5 mg/L로 하여서 컬럼 실험을 하였다. 담체의 충진율이 각 층의 컬럼 부피의 20%로 하여 컬럼실험을 한 결과 운전기간 중 제거율을 Fig. 8에 나타냈다. BOD_5 95.7%, COD_{mn} 62.5%가 제거되어 유출수의 수질은 BOD_5 7.3~17.8 mg/L, COD_{mn} 21.4~36.7 mg/L로 안정하게 유지되었다. 그러나 T-N의 경우 초기 농도가 144.3~288.4에서는 29.3~61.5 mg/L로 비교적 제거율(76.2~79.5%) 높은 제거율을 나타냈으나 농도가 증가할수록 제거율이 현저히 떨어져 초기농도 682.5 mg/L의 경우 제거율이 58.1%로 유출수의 T-N농도는 316.5 mg/L로 나타났다.

컬럼 실험에서는 회분식 실험과 달리 담체의 충진율이 높을수록 오염물질의 제거율은 더 향상되었으나, 담체의 충진율이 증가될수록 시간이 경과함에 따라 충진 물질들이 눌려 벽체의 변형이 생겼다. 실제로 담체의 충진율이 30%의 경우 시간이 경과함에 따라 충진 물질들의 하중에 의해 벽체의 변형이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 현장 적용 시 설치된 담체의 변형이 일어난다고 가정하여도 전체 부피에는 변화가 없기에 실질적인 결과 값에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 또한 실내 컬럼 실험의 경우 처리한 유출수에 대한 각 항목별 농도는 모두 국내 폐기물관리법의 관리형 매립시설의 침출수 배출허용기준 이하로 배출되었다.

4. 결 론

매립지 침출수의 현장 처리를 모의하기 위해 모래, 황토, 벤토나이트 및 폴리우레탄 매질의 혼합으로 이루어진 복합반응층으로 회분식 및 컬럼 실험을 실시하였다. 질산화를 위한 호기성층과 오염물질 흡착의 극대화와 질산화/탈질의 전체 반응시간 조절을 위한 벤토나이트층 및 탈질을 위한 혐기성으로 복합 반응층은 이루어졌다.

회분식 질산화 실험을 수행한 결과, 암모니아 100 mg/L를 투여하였을 때, 30분 안에 질산화 과정이 일어나 질산성 질소가 생성되는 것으로 나타났으며, 생성된 질산성 질소는 폴리우레탄 담체에 빠르게 흡착되어 감소하다가 270분 이후에는 다시 질산성 질소의 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 이때 폴리우레탄의 충진률이 높을수록 질산성 질소의 증가량이 더 큰 것으로 나타났다. 회분식 탈질 실험을 수행한 결과, 질산성 질소 제거율은 담체 충진율 10%에

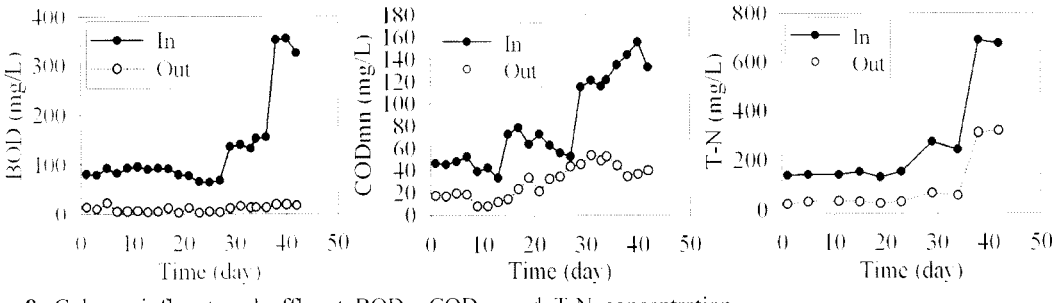

Fig. 8. Column influent and effluent BOD_5, COD_{mn} and T-N concentration.

서 76.6%, 20%에서 87.3%, 30%에서 88%로 담체의 충진율이 높을수록 질산성 질소 제거율이 증가하였으며, 외부 탄소원을 공급하여 C/N비가 3에서 질산성 질소 제거율이 96%로 가장 높게 나타났다. 회분식 탈질 실험에서 pH와 알칼리도가 각각 7에서 9.42, 980 mg/L에서 1,720 mg/L으로 서서히 증가하였다. 또한 컬럼 실험은 유입수의 유속 10 mL/min와 미생물을 부착한 폴리우레탄으로 컬럼 실험을 실시한 결과 처리 효율은 BOD_5 95.7%, COD_{cr} 62.5%, T-N 58.1~79.5%로 나타났다.

본 연구의 결과를 바탕으로 산간 지역이나 농촌 등의 소규모 매립장 및 오폐수 시설에 복합 반응층 기술을 적용시킬 경우 외부 탄소원 주입 등의 부가적인 운영 관리가 필요 없으며, 처리 후 2차적인 오염 물질이 발생되지 않을 것으로 보인다. 또한 기존의 침출수를 하수 종말 처리장에 이송시켜 침출수를 관리하는 비용보다 경제적인 효과를 거둘 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

최영화, 오재일, 배범한, 이태호, 류희욱, 탈질환경에서 투과매질 내 생물벽체 형성, *대한환경공학회지*, **25**(5), pp. 616-623 (2003).

Anthonissen, A. C. and Lochretal, R. C., Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid, *JWPCF*, **48**(5), pp. 835-852 (1976).

Barnes, D. and Bliss, P. J., Biological control of nitrogen in wasterwater treatment, School of civil engineering the university of new south wales, Australia, pp. 36-45 (1983).

Lee, T. Y., Benson, C. H. and Park, J. W., Remediation of Groundwater Contaminated with Zinc Using Permeable Reactive Barriers Containing Foundry Sands, *한국지반공학회논문집*, **18**(5), pp. 159-167 (2002).

Price, G. A., Barlaz, M. A. and Hater, G. R., Nitrogen management in bioreactor landfill, *Waste Management*, pp. 675-688 (2003).

Sharma, B. and Ahlert, R. C., Nitrification and nitrogen removal, *Wat. Res.*, **11**, pp. 897-925 (1977).

Soransen, B. H. and Jorgensen, S. E., The removal of nitrogen compounds from waster water, ELSEVIER Science publishers B.V Molenwerfl, pp. Box 211, 1000AE Amster dam (1993).

U. S. Environmental Protection Agency, Manual : Nitrogen control, EPA/625/R-93/010 (1993).

Watts, S. H. and Seitzinger, S. P., Denitrification rates in organic and mineral soils from riparian sites: a comparison of N2 flux and acetylene inhibition methods, Soil biology & biochemistry, **32**(10), pp. 1383-1392 (2000).