

탈질 조건에서 투과매질 내 미생물 성장에 관한 연구

최영화 · 오재일, 배범한*

중앙대학교 건설환경공학과, *경원대 토목환경공학과

yramt22@orgio.net

요 약 문

Subsurface biobarrier technology has potential applications to contain contaminated groundwater and/or to degrade toxic pollutants in groundwater. Most biobarrier studies were conducted under aerobic condition, however there were several obstacles to make aerobic condition. Thus, in this study, we examined biobarrier formation under denitrifying condition by using nitrate as an electron acceptor. Experiments were performed with a sand column inoculated with activated sludge from the nearby WWTP. The substrate medium was pumped to the sand column in an upflow mode. During the low substrate loading rate period, the extent of reduction rate in hydraulic conductivity was found similar throughout the column, and permeability became relatively stable after couple of days. However, during the high substrate loading rate period, the column demonstrated a gradient of permeability reduction, with the greatest reduction in sections nearest the column inlet. Rapid growth of microorganisms near the column inlet resulted in the unbalanced reduction of hydraulic conductivity throughout the sand column. As a result, at this denitrifying condition the thickness of biobarrier could be controlled by adjusting the medium conditions of microbial growth.

key word : biobarrier, hydraulic conductivity, denitrifying condition, substrate loading rate, porous media.

1. 서론

토양 내 미생물의 성장을 통한 투과 매질내 투수성(permeability)의 감소 현상은 지난 수십 년간 간헐적으로 보고되었으나 지하수 오염원을 차단·저감하는 방법인 biobarrier에로의 확장은 최근에 그 개념과 연구가 시작되었다고 할 수 있다. 토양 내 미생물 성장 촉진(biostimulation)에 의존하는 biobarrier 방법은 원활한 전자수용체(electron acceptor)의 공급이 필수적이며 산소를 전자수용체로 이용할 경우 미생물 성장속도가 크므로 선행연구 대부분이 호기성 조건에서 수행되어졌다.⁽¹⁾⁽²⁾ 하지만, 대부분 토양 내의 환경은 혐기 조건으로 형성되어 있으므로, 별도의 산소 공급을 위한 기술들이 요구된다. 하지만 산소의 물에 대한 낮은 용존 특성, 산소 공급 기술의 한계성(토양 내에 제한적인 산소 공급 초래) 및 비경제성 등으로 인하여 이러한 기술의 실제 적용 시 많은 제한점이 보고되고 있다. 따라서 이러한 한계점을 극복하고자 질산성 질소를 전자수용체로 이용하는 혐기조건(탈질조건) 하에서 의 연구가 새로운 대안으로 떠오르고 있다.⁽³⁾ 본 연구는 탈질 환경 하에서 유류 오염물에 대한 저감 효과 및 차단 효과를 동시에 추구하는 biobarrier 기술을 적용하기 위한 사전 연구로써 탈질 환경에서 미생물에 의한 biobarrier 형성 특성에 대해서 알아보고자 한다.

2. 본론

2.1 실험 방법

아크릴 재질의 원통형 컬럼을 높이 111 cm, 내경 10 cm 규격으로 제작하고 내부에 모래를 충전하였다. 컬럼에는 시료 채취를 위한 sampling port와 투수계수 산정에 필요한 압력 수두를 측정하기 위해 piezometer를 8cm 간격으로 설치하였다. 실험에 사용된 접종 미생물을 인근 하수처리장에서 채취한 활성 슬러지를 이용하였고, 하루동안 침지시킨 뒤 상등액만을 컬럼 전체에 골고루 접종하였다. 실험은 접종 미생물이 모래 매질에 원활한 부착되기 위해 24 시간의 부착 형성기를 거친 뒤 인공 배양액 일정량(6.8cm³/min)을 펌프를 통해 상향식으로 공급하면서 수행하였다. 운전 전략은 저농도 부하량(Acetate: 677mg-C/L, Nitrate: 226mg-N/L) 공급 기간과 고농도 부하량(Acetate: 2500mg-C/L, Nitrate: 1000mg-N/L) 공급 기간으로 구별되며, 미생물 성장과 이에 수반되는 각종 인자들의 변동(유출수의 pH, ORP, OD(optical density), acetate, nitrate 농도 등)과 수두 측정(투수계수 감소 경향)은 매일매일 자세히 분석하였다. 또한 필요에 따라 컬럼 내부에서의 거동을 알아보기 위해 컬럼 내부 샘플을 sampling port를 통해 채취하였다.

2.2 결과 및 고찰

본 연구의 미생물 주입에 의한 생물 벽체 형성에 대한 결과는 크게 컬럼 내에 주입된 기질 용액에 의한 혼합 탈질 미생물의 성장 특성과 그에 따른 투수 계수 감소 경향에 대한 내용으로 대변 할 수 있다. 우선 기질 부하량 단계별 기질 용액의 주입에 의한 미생물의 성장 특성(Fig. 1)을 살펴보면 유입수(pH 7.2±0.2) 대비 유출수의 pH는 기질 부하량 단계에 관계없이 높은 pH(9.6±0.2) 조건을 유지하고 있으면 이는 탈질반응에 의해 형성되는 alkalinity에 의해 상승한 것임을 알 수 있다. 또한 유입 ORP(20~90mV) 대비 유출수 ORP(-50mV~-250mV)가 크게 감소함을 보이는데, 이 또한 컬럼 내부가 탈질반응에 의해 환원상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 기질 부하량 단계에 따라 주입된 기질 용액의 미생물 활용도를 확인하기 위해 측정된 유출수 기질 농도 분석(Fig. 2)에 의하면 소비된 C/N ratio는 1.2:1~1.3:1 정도임을 보여주고 있고, 아래 식은 acetate를 활용하여 세포합성과 에너지 대사에 관련된 탈질 반응식을 보여주고 있다.

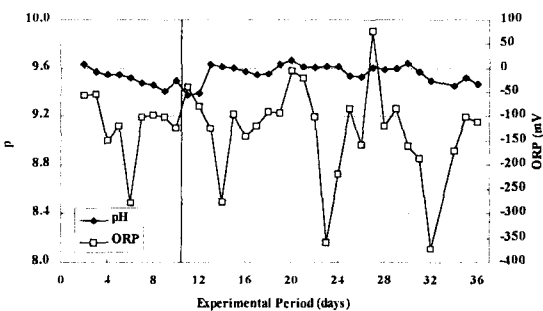
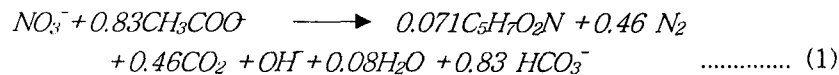


Fig 1. pH and ORP data of effluent as experimental periods

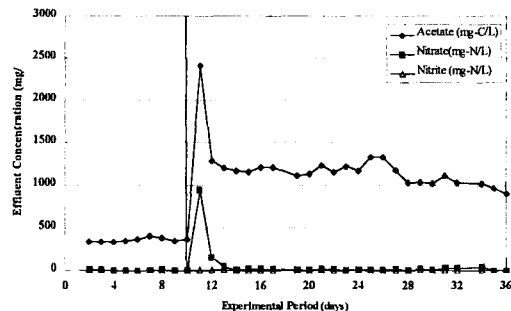


Fig 2. Substrate concentration of effluent as experimental periods

일정기간(10일) 저부하량 기간을 거친 뒤 의 투수계수 감소 촉진을 위해 고농도 기질을 주입한 경우라도 미생물에 저해 요인 없이 충분한 적응과 대사를 보여주고 있음을 알 수 있다.

기질 부하량 단계별 주입에 따른 투수 계수 감소는 컬럼에 부착된 piezometer에서 측정된 수두를 Darcy 법칙에 의해 계산 할 수 있다.

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dx} \quad \dots\dots\dots(2)$$

여기서 Q: 주입 기질 용액의 유량 (cm³/sec)
 A: 컬럼 단면적 (cm²)
 K: 투수계수 (cm/sec)
 h: piezometer에서 측정되는 수두(cm)
 x: 각 포트별 수직 길이

Fig 3.은 각 포트 별로 실험 기간동안 투수계수 변화량에 대해 측정된 것으로 모래 컬럼의 초기 투수 계수는 5.17×10^{-2} cm/sec이었다. 기질 부하량에 따른 컬럼 하단부의 투수계수 감소 경향은 초기의 급격한 투수계수 감소 기간을 지나 quasi-steady-state의 투수계수 정체기가 반복적으로 나타남을 보여주고 있다. 하지만 컬럼 상단부의 경우 미생물 성장이 하단부에 집중됨에 따라 이러한 현상이 보여주지 않고 있으며, 부하변동에 따라 투수계수에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다. 특히 이러한 결과는 기질 부하량에 따라 biobarrier의 투수계수의 조절 및 biobarrier의 두께(목표로 하는 투수계수 이하의 구간)가 조절 가능함을 의미한다. Fig.3에서 고농도 기질 유입의 경우 각 컬럼 구간별로 투수 계수 감소량이 많은 차이를 볼 수 있는데, 이러한 기질 부하량에 따른 각 구간별 투수 계수 감소량을 Fig 4.와 같이 다시 표현 할 수 있었다. 저농도 기질 유입 시에는 투수 계수 감소량이 컬럼 구간에 걸쳐 크게 차이가 없음을 볼 수 있는데, 이는 컬럼 유입부에 저농도 기질 대사에 의한 biomass 성장과 컬럼을 통과하여 흐르는 배양액 체류시간(투수성)이 적절하게 조화를 이루어 컬럼 후단부에 biomass 성장에 필요한 배양액이 공급 가능하기 때문이다. 하지만, 고농도 기질 유입 시 컬럼 유입부에는 많은 biomass량이 급격히 형성되고 이는 다시 공극을 감소시켜 투수성을 떨어뜨리고 이는 후단에 공급될 기질의 감소로 이루어지는 순환을 이루게 되어 후단부의 미생물은 매우 낮은 기질 조건에서 성장해야하는 조건이 유지된다. 따라서 이러한 컬럼 구간에 불균일한 biomass 분포는 구간별 투수계수의 차이를 보인다고 하겠다.

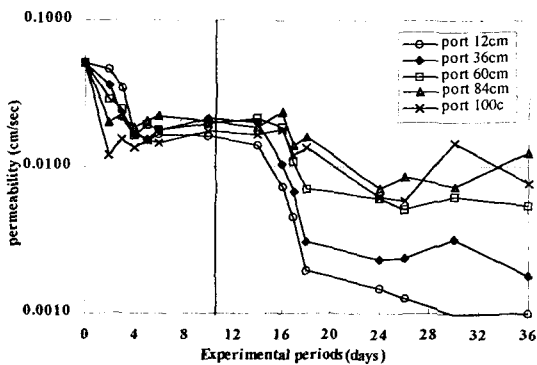


Fig 3. Hydraulic conductivity as function of experimental periods

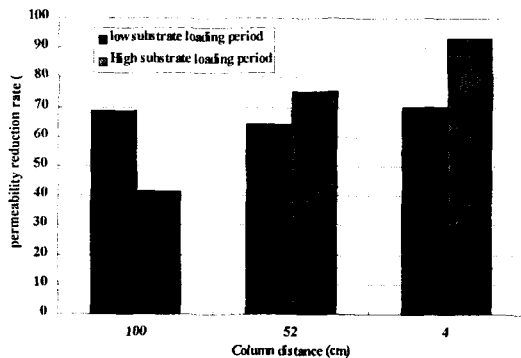


Fig 4. Permeability reduction rate as column distance and loading rate

투과 매질을 통과하여 유출되는 아주 작은 입자의 biomass량을 O.D(과장 600nm)로 측정 한 Fig 5.를 살펴보면 실험 기간 중에 크게 두 부분에서 유출수 O.D 값의 상승 현상을 볼 수 있다. 저농도에서 고농도로의 기질 부하량 조건 변화 초기 부분에 보이는 상승과 고농도 기질 부하량 조건 후기에 보이는 상승 부분이다.

일반적으로 부착 형성된 biofilm에서 외부 조건이 변화할 경우 biofilm의 탈리 현상이 관찰 되며, 이것이 처음 부분 O.D 값의 상승으로 판단된다.⁽⁴⁾ 하지만 이후의 O.D 값 상승은 외부 조건의 변

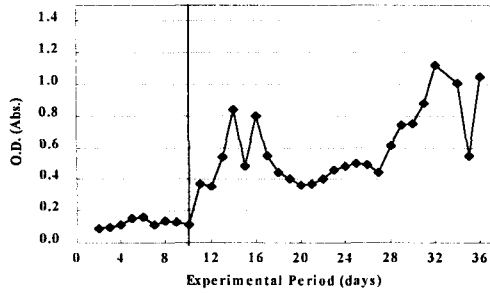


Fig 5. Optical density of effluent as experimental periods

3. 결론

토양 내에서 오염물을 차단하기 위한 방법인 biobarrier 형성을 위해 탈질 조건 하에서 탈질 미생물의 성장에 의한 투수 계수 감소 특성에 대해서 실험을 수행하였다. 컬럼 내 투과 매질에 부착 형성된 탈질 미생물은 biomass 증진을 위한 고농도 기질 용액에서도 충분한 활성을 보였으며, 기질 부하량 변화 조건 실험에서 상이한 투수 계수 감소 경향을 보였다. 고농도 주입에 따른 투수 계수 감소량은 각 컬럼 구간별로 차이를 보였으며, 이는 유입부 부근의 국부적인 미생물 성장으로 인한 기질 용액의 분배가 이루어지지 못한 것으로 분석되었다. 투수 계수의 저감은 투과 매질 내 수리 전단력에 증가를 초래하며 부착 형성된 biomass의 탈리현상으로 추가적인 저감에는 한계가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 보여준 결과는 기질 농도 부하량의 제어를 통해서 투수 계수 저감이 가능하다는 것을 확인 할 수 있었으며, 산소를 대신한 질산성질소 주입에 의해서도 biobarrier 형성을 확인할 수 있었다.

4. 참고문헌

1. Michael L. Daniel and John P. Turner, "Hydraulic conductivity of compacted soil treated with biofilm." *J. Geotech. Geoenviron.* 124(2), 120~127 (1998).
2. G.A. James, B.K. Warwood, A.B. Cunningham, P.J. Sturman, R. Hiebert and J.W. Coseteron, "Evaluation of subsurface biobarrier formation and persistence." *Proceedings of the 10th annual conference on Hazardous Waste Research*, Manhattan, Kansas, pp.82~91 (1995).
3. Jung Jeng Su and David Kafkewitz, "Toluene and xylene degradation by denitrifying strain of xanthomonas maltophilia with limited or no oxygen." *Chemosphere*, 32(9), pp.1843~1850 (1996).
4. William G. Characklis and Kevin C. Marshall, *Biofilm*, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 195-231(1990).

화가 없음에도 불구하고 변동하는 경향을 보이는데, 이것은 점진적인 biomass량의 증가에 따른 공극의 감소와 이에 의해 유발되는 유속(linear velocity)이 증가함으로써 투과 매질 내에 전단력이 상승하게 되는데, 이렇게 형성된 전단력이 실제 투과 매질 내에 biomass가 갖는 임계 전단력 이상의 값을 가짐으로써 탈리 되는 경향을 보인다 하겠다. 기존 biobarrier 논문을 보면 대부분 실험 후반에 Fig 3.과 같은 투수계수의 정체를 보이게 되는데, 이러한 전단력의 증가가 투수 계수 정체에 영향을 미치는 것으로 판단된다.