

도시하수에서 생물학적 퍼클로레이트의 환원 Biological Perchlorate Reduction in Municipal Sewage

최혁순[†]
Hyeoksun Choi[†]

원광대학교 토목환경공학과
Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University

(2013년 8월 20일 접수, 2013년 9월 25일 채택)

Abstract : This research was done to evaluate the potential for destruction of perchlorate in municipal sewage. Laboratory experiments were conducted in flasks containing 3 liters of raw sewage. Sewage was mixed with defined amount of perchlorate and various additives. Perchlorate reduction in sewage did occur, but was quite variable, ranging from 0 to 72% over 72 hour. Addition of even a small amount of perchlorate acclimated biomass (167 mg/L SS) significantly reduced the lag and resulted in complete perchlorate removal. Perchlorate reduction in sewage-brine mixtures was inhibited when the dissolved oxygen level was greater than 2 mg/L, and when the mixture salinity was relatively high (conductivity = 14 mS with equivalent TDS = 8 g/L). When nitrate (NO₃⁻) was present with perchlorate in the laboratory flask tests of sewage-brine mixtures, nitrate reduction proceeded first. A significant amount of nitrite (NO₂⁻) accumulated in the sewage-brine mixtures, accounting for about 66% of initial nitrate nitrogen (NO₃-N).

Key Words : Perchlorate, Nitrate, Sewage, Brine

요약 : 본 연구는 도시하수에서 퍼클로레이트 분해의 잠재성을 알아보기 위해 수행되었다. 3 L 생하수를 포함하는 플라스크를 이용한 실험이 수행되었다. 하수에 일정농도의 퍼클로레이트와 다양한 첨가물이 혼합되었다. 하수에서 퍼클로레이트의 제거가 일어났으나, 교반 72시간 동안 0에서 72%의 매우 다양한 제거율을 보였다. 퍼클로레이트로 순응된 미생물의 미량(167 mg/L SS) 주입만으로도 퍼클로레이트 분해 지체시간은 현저하게 감소되었으며 하수에서 퍼클로레이트가 완전히 제거되었다. 용존 산소농도가 2 mg/L 이상 그리고 염분농도가 비교적 높은(전기전도도 14 mS; TDS 8 g/L) 조건의 하수/brine 혼합수에서 퍼클로레이트 제거는 방해를 받았다. 퍼클로레이트와 질산염이 공존하는 하수/brine 혼합실험에서 퍼클로레이트 환원에 비해 질산염 환원이 우선적으로 진행되었으며, 초기 질산성 질소의 약 66%에 해당되는 많은 양의 아질산염이 축적되었다.

주제어 : 퍼클로레이트, 질산염, 하수, 염수

1. 서론

인체의 갑상선 호르몬 기능에 영향을 미치며 내분비계교란물질로 알려진 퍼클로레이트(ClO₄⁻)는 주로 로켓연료 또는 폭발물의 제조과정에서 발생된다.¹⁻³⁾ 높은 용해성, 비휘발성, 다른 물질과의 매우 낮은 반응성과 같은 특성으로 인해 물속의 퍼클로레이트는 흡착, 여과를 포함하는 일반정수처리시설에서 제거가 어려워 이온교환법, 막여과, 생물학적 처리와 같은 별도의 고도처리를 필요로 한다.²⁾ 이온교환법(ion exchange)은 높은 제거율과 현장 적용성이 매우 우수하여 가장 선호되는 퍼클로레이트 처리방법이다.⁴⁾ 하지만 처리과정에서 발생하는 재생폐액(regenerant brine)은 높은 염도와 농축된 퍼클로레이트와 질산염(NO₃⁻)을 함유하고 있으므로 별도의 처리를 필요로 하는 단점이 있다.³⁾ 막여과(membrane filtration)법 역시 퍼클로레이트 처리과정에서 발생한 비투과 농축수(retentate)를 별도의 처리공정을 거친 후 처분해야 한다.³⁾

1990년대 초반 이래로 퍼클로레이트를 전자수용체(e⁻ acceptor)로 이용한 혐기성호흡(anaerobic respiration)에 의한 생물학적 퍼클로레이트 환원에 대한 연구가 지속적으로 이루어

지고 있다. 퍼클로레이트환원미생물(perchlorate reducing bacteria)은 퍼클로레이트를 중간생성물 없이 최종적으로 인체에 무해한 염소이온(Cl⁻)으로 환원시키는 것으로 알려져 있다.⁵⁻⁷⁾ 퍼클로레이트로 오염된 지하수 뿐만 아니라, 퍼클로레이트에 노출된 적이 없는 토양, 혐기성소화슬러지, 활성슬러지 등 다양한 환경으로부터 퍼클로레이트환원미생물을 배양할 수 있는 것으로 보고되었다.⁸⁾ Wu⁹⁾는 아세테이트를 이용한 도시하수 배양액에서 3 × 10⁴ viable cells/mL의 퍼클로레이트 환원미생물을 측정하였다.

대부분의 퍼클로레이트환원미생물은 임의성 종속영양미생물(facultative heterotrophs)로서 미생물의 성장과 에너지 생산을 위해 유기탄소원을 필요로 한다. 설탕(glucose), 알콜(ethanol), 카르복실산(acetate, butyrate) 등과 같이 매우 다양한 유기화합물이 퍼클로레이트환원미생물에 이용될 수 있는 것으로 알려져 있다.^{5,7,8)} 하지만, 지하수 또는 하천수의 퍼클로레이트 오염농도가 주로 1 mg/L 이하로 매우 낮고 탄소원으로 이용 가능한 유기물질이 매우 희박하여 생물반응조내 퍼클로레이트환원미생물의 성장과 유지가 어렵다. 아울러 퍼클로레이트에 비해 상대적으로 매우 높은 농도로 존재하는 질산염은 유기물을 차지하기 위한 생물학적 퍼클로

[†] Corresponding author E-mail: choihs@wonkwang.ac.kr Tel: 063-850-6713 Fax: 063-850-6792

레이트 환원의 방해물질로 작용한다.¹⁰⁾

도시하수는 퍼클로레이트 환원을 가능하게 하는 카르복실산과 같은 발효생성물을 포함한 용해성과 입자성 유기물질의 혼합물질로 구성되어 있다. 하수는 생물학적 퍼클로레이트 제거에 유리한 환경을 제공할 것으로 추측된다. 첫째 이유는 퍼클로레이트환원미생물에 의해 빠르게 이용될 수 있는 카르복실산과 같은 발효생성물을 포함한 높은 농도의 유기탄소를 포함하고 둘째는 퍼클로레이트 환원에 유리한 비교적 낮은 용존산소를 포함하며 셋째로 퍼클로레이트환원미생물을 포함한 다양한 미생물군들이 서식할 것이기 때문이다. 본 연구는 퍼클로레이트 오염수를 하수에 포함시켜 처리가능한 지를 알아보고자 수행되었으며, 또한 이온교환 처리공정에서 발생하는 고염분성 퍼클로레이트 함유 재생폐액을 도시 하수관거로 방류하여 하수와 혼합되어 제거가 이루어질 수 있는 지 그 가능성을 조사하였다. 그리고 세부적으로 하수에서 생물학적 퍼클로레이트 환원을 향상 또는 감소시키는 조건을 조사하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치

모든 실험은 4 L 플라스크를 이용하였으며 플라스크 내부는 퍼클로레이트와 첨가물 stock solution의 일정량을 도시하수에 혼합하여 3 L 용량으로 채워졌다. 하수와 첨가용액은 72시간 동안 혼합되었으며 혼합수의 교반을 위해 자석막대(magnetic stirrer bars)와 자석교반기가 사용되었다. 혼합수의 용존산소(DO) 조절을 위해 diffuser를 이용하여 질소가스(N₂)를 선택적으로 주입하였다.

2.2. 실험방법

하수에서 생물학적 퍼클로레이트 환원 가능성과 영향 인자의 조사를 위해 총 4단계(Phase 1~4)의 플라스크를 이용한 배치실험이 수행되었으며 단계별 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 실험1단계는 하수에서 생물학적 퍼클로레이트 제거의 가능성을 알아보기 위해 수행되었으며, 2단계는 비생물학적 퍼클로레이트 제거현상을 조사하였고, 3단계는 퍼클로레이트 환원의 영향 인자를 조사하였고, 4단계는 퍼클로레이트와 질산염을 함유하는 brine과 하수의 혼합수에서 퍼클로레이트 제거 가능성을 조사하였다.

도시하수에 일정량의 퍼클로레이트와 첨가물의 stock solution을 플라스크에 주입하여 72시간 교반을 진행하였으며 화학적, 생물학적 분석을 위해 14~16차례 시료 채취를 하였다. 플라스크 실험에서 퍼클로레이트 초기농도가 1,000과 500 µg/L ClO₄⁻가 되도록 과염소산나트륨 stock solution을 희석하였다. 퍼클로레이트와 질산염이 공존하는 실험의 경우는 초기 질산염농도가 100과 168 mg/L NO₃-N가 되도록 하였다. 하수에서 비생물학적 퍼클로레이트 환원 현상을 조사하기 위해서 미생물의 성장 억제를 위해 50 mM sodium azide (NaN₃)를 주입하는 비생물학적 조절(abiotic control) 실험이 수행되었다.^{11,12)} 하수에서 생물학적 퍼클로레이트 환원을 확인하기 위한 실험에서는 퍼클로레이트순응미생물(perchlorate-acclimated biomass)이 167 mg/L SS가 되도록 주입되었다. 퍼클로레이트순응미생물은 도시하수처리장의 활성슬러지를 채취하여 퍼클로레이트를 유일한 전자수용체로 하여 무산소조건의 연속회분식반응조에서 2개월간 순응시켰다. 하수/brine 혼합실험에서 플라스크내 혼합액의 전기전도도는 14 mS (TDS = 8,000 mg/L)으로 조절되었다.

Table 1. Flask constituents in Phase 1, 2, 3, and 4 experiments with municipal sewage and additives

	Flask1	Flask2	Flask3	Flask4	Flask5
Phase 1	1,000 µg/L ClO ₄ ⁻ DO = 1.4-0.8 mg/L				
Phase 2	1,000 µg/L ClO ₄ ⁻ DO = 1.5 mg/L	1,000 µg/L ClO ₄ ⁻ DO = 1.4 mg/L	1,000 µg/L ClO ₄ ⁻ DO = 1.5 mg/L		
		50 mM NaN ₃ (abiotic)	TDS = 8,700 mg/L		
Phase 3	1,000 µg/L ClO ₄ ⁻ DO = 0.5-4.1 mg/L	1,000 µg/L ClO ₄ ⁻ DO = 2.9-7.2 mg/L	1,000 µg/L ClO ₄ ⁻ DO = 0.1-1.6 mg/L	1,000 µg/L ClO ₄ ⁻ DO = 0.3-0.6 mg/L	1,000 µg/L ClO ₄ ⁻ DO = 0.6-4.9 mg/L
		50 mM NaN ₃ (abiotic)	ClO ₄ ⁻ culture	N ₂ sparged	100 mg/L NO ₃ -N
Phase 4	500 µg/L ClO ₄ ⁻ 68 mg/L NO ₃ -N EC = 14 mS DO = 0.7-3.1 mg/L	500 µg/L ClO ₄ ⁻ 68 mg/L NO ₃ -N EC = 18 mS DO = 1.3-5.7 mg/L	500 µg/L ClO ₄ ⁻ 68 mg/L NO ₃ -N EC = 14 mS DO = 0.3-1.4 mg/L	500 µg/L ClO ₄ ⁻ 68 mg/L NO ₃ -N EC = 14 mS DO = 0.4-2.0 mg/L	
		N ₂ sparged 50 mM NaN ₃ (abiotic)	N ₂ sparged ClO ₄ ⁻ culture	N ₂ sparged	

Phase 4: sewage-brine mixture experiment
DO values = initial-final flask concentration
Final DO concentrations were not measured at Phase 2
ClO₄⁻ culture: perchlorate-acclimated activated sludge culture

2.3. 분석방법

플라스크에 하수와 첨가물 용액이 채워진 후 72시간 동안 교반이 이루어졌으며 피펫을 이용하여 주기적으로 플라스크 내 혼합수 시료를 채취하였다. 시료에 포함된 음이온(ClO_4^- , NO_3^- , NO_2^-)은 이온크로마토그래프를 이용하여 분석하였다. 화학적산소요구량(COD)은 Standard Method 5220 D법(Closed Reflux Colorimetric Method)에 의해 측정되었다. 용해성 COD (SCOD)실험은 시료를 0.2 μm 필터를 이용하여 여과 후 측정하였다. 플라스크내 혼합용액의 용존산소농도는 YSI DO meter와 probe를 이용하여 측정하였다. 하수/brine 혼합수에서 전기전도도(electrical conductivity)와 총용존고형물(TDS)은 전기전도도 미터(Model 720, Orion)와 프로브를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수에서 퍼클로레이트의 생물학적 환원

실험1단계(Phase 1)는 예비 실험단계로서 하수/퍼클로레이트 혼합수에서 생물학적 퍼클로레이트 제거 가능성을 알아보고 시료 채취 빈도와 실험계획 수립을 위해 수행되었다. Fig. 1에서 나타나듯이 퍼클로레이트의 환원이 시작되기 전에 8시간의 지체시간이 관찰되었으며, 60시간 경과 후 초기 퍼클로레이트의 약 72%가 제거되었다. 혼합수의 용존산소는 실험기간 동안 1.4에서 0.8 mg/L DO로 감소하였다.

실험2단계(Phase 2)는 모든 비생물학적 퍼클로레이트 제거 현상을 확인하기 위해서 미생물의 성장을 억제하는 sodium azide (50 mM NaN_3)를 이용하였다. 총 3개의 4 L 플라스크가 동시에 실험에 이용되었다. 하수혼합액의 퍼클로레이트 초기농도는 모든 플라스크에서 각각 1,000 $\mu\text{g/L}$ ClO_4^- 가 되도록 stock solution을 주입하였다. 첫 번째 플라스크(flask 1)의 하수혼합액은 하수와 퍼클로레이트만으로 구성되었다. 두 번째 플라스크(flask 2)는 비생물학적 퍼클로레이트 제거 현상을 확인하기 위해 하수/퍼클로레이트 혼합수에 sodium azide (50 mM NaN_3)를 주입하였다. 세 번째 플라스크(flask 3)는 높은 염도가 퍼클로레이트 환원에 미치는 영

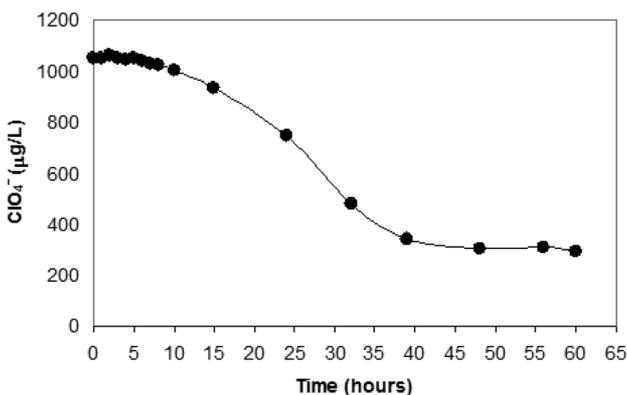


Fig. 1. Perchlorate consumption in sewage-perchlorate mixture.

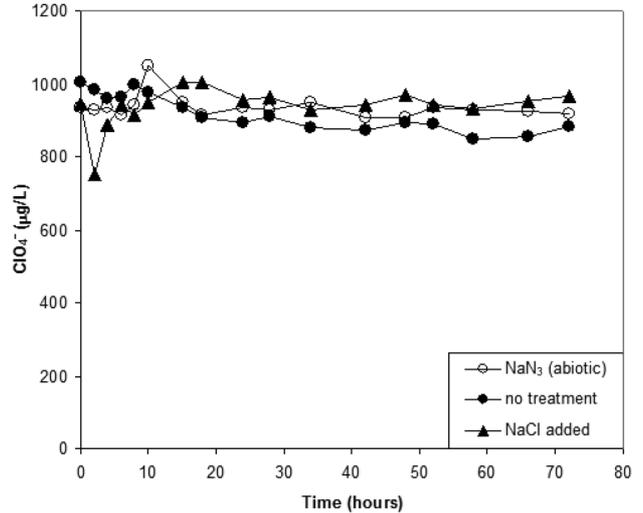


Fig. 2. Perchlorate profiles in flask media containing municipal sewage and perchlorate with separate treatments (NaN_3 and NaCl).

향을 조사하기 위해 소금(NaCl)을 첨가하여 하수/퍼클로레이트 혼합수의 전기전도도를 15.5 mS ($\text{TDS} = 8,700 \text{ mg/L}$)로 상향조절하였다. 이온교환 재생폐액과 같은 높은 염도를 지닌 퍼클로레이트 함유 오염수는 생물학적 퍼클로레이트 환원에 큰 영향을 미칠 것이다. Cang¹³⁾의 연구결과는 활성슬러지로부터 배양된 미생물이 15 g/L NaCl 이하의 염도에서 퍼클로레이트를 환원할 수 있었으며, 해양으로부터 순유된 미생물은 더 높은 염도(30~60 g/L NaCl)에서 퍼클로레이트를 환원할 수 있는 것으로 보고하였다. 플라스크 실험2단계에서 얻어진 퍼클로레이트 농도변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보듯이 sodium azide를 이용한 비생물학적 조절 혼합수와 높은 염도 조건의 혼합수에서 퍼클로레이트 제거가 이루어지지 않았다. 실험1단계의 결과에 비해 하수/퍼클로레이트 혼합수에서 낮은 퍼클로레이트 제거율(14%)을 보였다. 그리고 퍼클로레이트 환원을 위해 약 10시간의 지체(lag)시간이 관찰되었다. 3개의 플라스크 모두 초기 용존산소농도는 1.4~1.5 mg/L DO로 유사하였다. 하수/퍼클로레이트 혼합수에서 Sodium azide는 생물학적 퍼클로레이트 환원작용을 막는데 효과적인 것으로 나타났다. 아울러, 높은 염분 또한 하수/퍼클로레이트 혼합수에서 생물학적 퍼클로레이트 환원을 저해하는 것으로 나타났다.

3.2. 하수에서 생물학적 퍼클로레이트 환원에 영향을 미치는 인자

실험3단계(Phase 3)는 생물학적 퍼클로레이트 환원에 영향을 미칠 수 있는 용존산소, 퍼클로레이트환원미생물, 질산염의 공존과 같은 3가지 환경조건에서 수행되었다. 생물학적 퍼클로레이트 환원과 탈질작용은 모두 용존산소에 의해 방해받는 것으로 알려져 있다.^{14,15)} 그리고, 퍼클로레이트 오염수에 흔히 공존하는 질산염은 유기물을 차지하기 위한 생물학적 퍼클로레이트 환원의 경쟁/방해물질로 작용하는

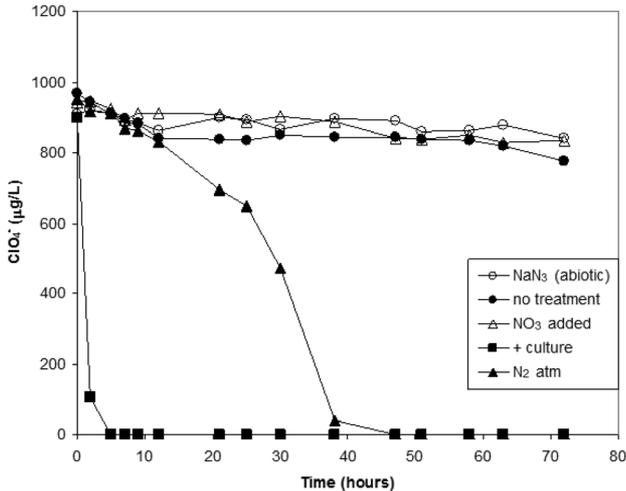


Fig. 3. Perchlorate profiles in flask media containing municipal sewage and perchlorate with separate treatments (NaN_3 , NO_3^- , perchlorate-acclimated activated sludge culture, N_2 gas).

것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 실험에는 총 5개의 4 L 플라스크가 동시에 사용되었다. 한 개의 플라스크(flask 4)는 질소가스를 주입하여 하수혼합수에 존재하는 용존산소농도를 제거하였고 나머지 4개의 플라스크는 질소가스가 주입되지 않았다.

Fig. 3은 생물학적 퍼클로레이트 환원에 영향을 미칠 수 있는 다양한 조건에서 플라스크내 하수혼합물에 포함된 퍼클로레이트의 농도변화를 나타내고 있다. 무산소조건의 연속 회분식반응조에서 퍼클로레이트만을 전자수용체로 이용하여 순응된 활성슬러지를 채취하여 비교적 낮은 농도(167 mg/L SS)로 플라스크에 주입하였음에도 불구하고 혼합수에서 매우 빠른 퍼클로레이트 제거를 보였다. 2시간 경과 후 채취한 하수혼합물 시료에서 약 90%의 퍼클로레이트가 제거되었고, 5시간 경과 후 하수혼합물의 퍼클로레이트는 IC 검출농도(4 µg/L) 이하로 완전히 제거되었다. 질소가스가 주입된 플라스크에서도 퍼클로레이트의 완전한 제거가 이루어졌다. 그러나 10시간 경과 후 약 10%의 퍼클로레이트 제거율을 보여 퍼클로레이트순응미생물이 첨가된 플라스크에 비해 초기 퍼클로레이트 제거율이 매우 낮았으며 완전한 퍼클로레이트 제거에는 38시간이 소요되었다. 이전에 수행된 실험2단계의 결과와 마찬가지로 sodium azide를 이용한 비생물학적 조절실험에서 퍼클로레이트는 제거되지 않았으며, 초기 퍼클로레이트의 농도가 거의 변함없이 지속되었다. 퍼클로레이트와 질산염이 동시에 존재하는 하수혼합물 플라스크에서 퍼클로레이트와 질산염 둘 다 거의 제거가 되지 않았다(Fig. 4). 질소가스가 주입되지 않은 하수와 퍼클로레이트와 질산염이 공존하는 혼합수는 자석막대에 의한 교반으로 인해 혼합수의 초기 DO농도가 0.6 mg/L DO에서 72시간 경과 후 4.9 mg/L DO로 매우 높게 증가하였다. 이러한 결과에 의해 용존산소에 의해 생물학적 퍼클로레이트와 질산염의 환원이 현저하게 방해받았 것으로 추정할 수 있다.

실험3단계 결과를 통해 퍼클로레이트 제거의 시작과 퍼클

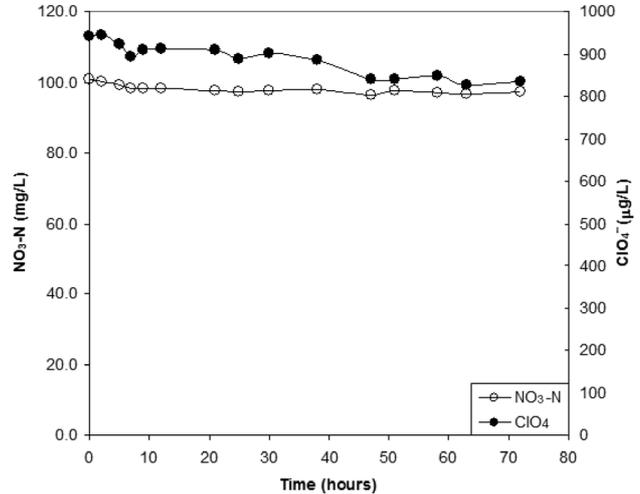


Fig. 4. Perchlorate and nitrate profiles in flask containing municipal sewage, perchlorate, and nitrate.

로레이트 제거율의 가장 중요인자는 퍼클로레이트 환원 조건에 순응되어진 미생물군의 존재인 것을 알 수 있었다. 그리고 용존산소의 제거 또한 생물학적 퍼클로레이트 환원의 결정적 인자임을 추측할 수 있다. 이 두 가지 요소가 생물학적 퍼클로레이트 환원의 상승적인 역할을 할 것으로 추측된다. 모든 플라스크 실험은 실험초기에 낮은 DO농도로 시작되었지만 퍼클로레이트순응미생물의 주입 또는 질소가스 주입(용존산소제거)에 의해 무산소 상태(anoxic condition)에서 생물학적 퍼클로레이트 환원이 빨라진 두 플라스크(flask 3, 4)만이 DO농도가 낮게 유지되었다. 퍼클로레이트환원미생물의 낮은 활성도와 headspace로부터 산소전달이 이루어지는 플라스크에서 하수혼합물의 DO농도 상승은 생물학적 퍼클로레이트 환원 또는 탈질(denitrification)미생물의 충분한 성장을 방해한 것으로 판단된다.

3.3. 퍼클로레이트와 질산염을 함유하는 하수/brine 혼합 실험

실험4단계(Phase 4)에서 퍼클로레이트와 질산염을 함유하는 하수/brine 혼합(전기전도도 14 mS) 플라스크 실험이 수행되었다. 총 4개의 플라스크가 실험에 이용되었으며 한 개의 플라스크를 제외한 3개의 모든 플라스크 실험에서 질소가스가 주입되었다. Fig. 5에서 보듯이 퍼클로레이트순응미생물이 첨가된 플라스크에서만 퍼클로레이트 감소가 이루어졌다. 실험시작 8시간 경과 후에 약 10%의 퍼클로레이트가 제거되었으나 그 이후에 퍼클로레이트 제거율은 거의 증가하지 않았다. 이와 달리 Fig. 6에서 보듯이 sodium azide를 이용한 비생물학적 조절 플라스크를 제외한 생물학적 활성을 가진 모든 하수/brine 혼합 플라스크에서 질산염의 환원이 관찰되었다. 그리고, 질소가스가 주입된 플라스크는 72시간 경과 후 질산염의 농도가 39 mg/L $\text{NO}_3\text{-N}$ 로 측정되어 초기 질산염농도의 약 44%가 제거되었다(Fig. 6). 이는 질산염이 퍼클로레이트보다 훨씬 높은 농도로 존재하였고 생물학

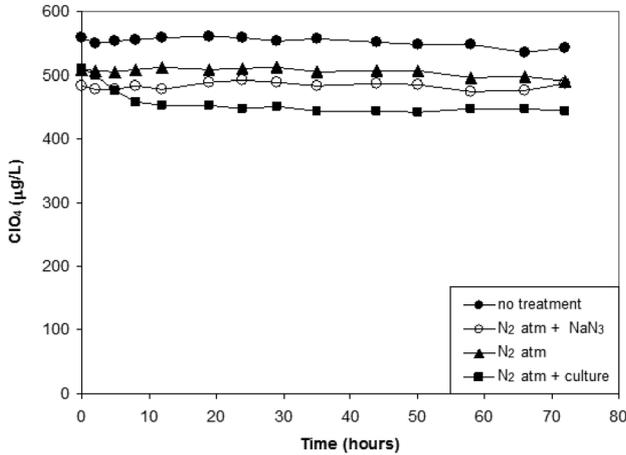


Fig. 5. Perchlorate profiles for flasks containing municipal sewage, perchlorate and nitrate with brine.

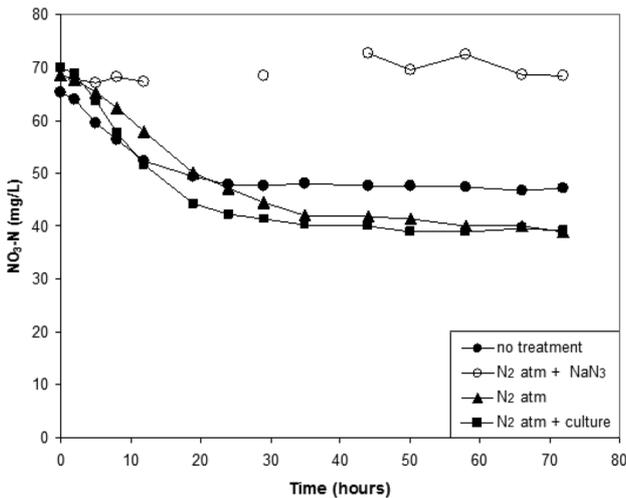


Fig. 6. Nitrate nitrogen (NO₃-N) profiles for flasks containing municipal sewage, perchlorate and nitrate with brine.

적 질산염 환원이 퍼클로레이트 환원에 비해 자연환경에서 더 광범위하게 존재하는 미생물 신진대사(bacterial metabolism)이므로 생물학적 퍼클로레이트 환원보다 생물학적 탈질이 더 선호되는 것으로 추정할 수 있다. 게다가 이용 가능한 유기탄소물질이 제한된 조건에서 생물학적 탈질이 생물학적 퍼클로레이트에 비해 더 선호되는 것으로 판단할 수 있다. Table 2는 다른 첨가물(NaN₃ 또는 퍼클로레이트순응 미생물) 없이 질소가스를 주입한 하수/염분 혼합 플라스크에서 SCOD, 질산염, 퍼클로레이트, 그리고 DO농도 변화를 나타낸다. Table 2에서 SCOD 소비량 대 질산성질소(NO₃-N) 제거량 비율은 1.7로써 산소를 이용하는 일반 폐수처리장에 적용되는 COD:N 비율에 비해 낮은 수치로 나타났다.

Table 2. SCOD, NO₃-N, ClO₄⁻, and DO concentration change in sewage and brine mixtures with DO control

Initial/Final SCOD (mg/L)	Initial/Final DO (mg/L)	ΔNO ₃ -N (mg/L)	ΔClO ₄ ⁻ (µg/L)
120/70	0.4/2.0	30	18

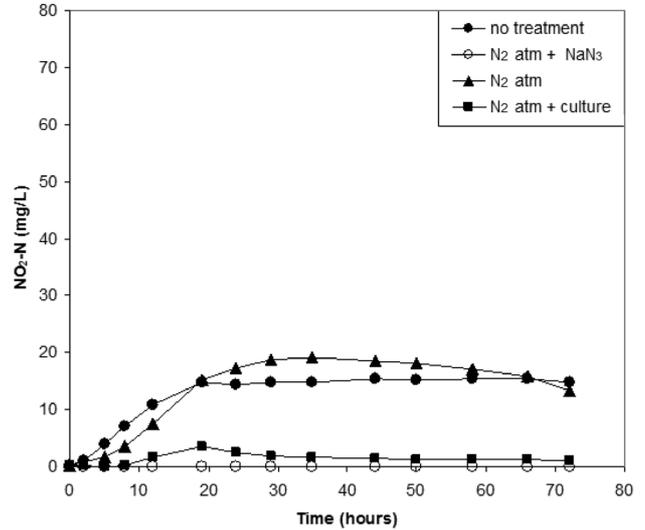


Fig. 7. Nitrite nitrogen (NO₂-N) profiles for flasks containing municipal sewage, perchlorate and nitrate with brine.

다른 첨가물(NaN₃ 또는 퍼클로레이트환원미생물)이 없는 질소가스가 주입된 플라스크와 질소가스가 주입되지 않은 플라스크에서 약 66%의 질산성질소 제거에 해당하는 높은 농도의 아질산염(NO₂⁻)이 축적되었다(Fig. 7). 그리고 축적된 아질산염은 72시간의 반응기간동안 현저하게 제거되지 않았다. 퍼클로레이트순응미생물이 주입되고 headspace에 질소가스를 주입한 플라스크(flask 3)에서 아질산염의 축적은 거의 무시할 수준이었다. 이를 통해 아질산염 축적은 유기탄소원의 제한과 용존산소의 존재와 관계가 있음을 추정할 수 있었다.^{15,16)}

4. 결론

본 연구는 하수에서 생물학적 퍼클로레이트 환원이 일어나는지 확인하고자 수행되었으며 하수에서 생물학적 퍼클로레이트 환원에 미치는 요인을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하수에서 퍼클로레이트의 생물학적 환원을 위해서 무산소상태와 퍼클로레이트환원미생물의 존재를 필요로 한다.
- 2) 용존산소농도가 2 mg/L 이상 그리고 염도(전기전도도 14 mS; TDS 8 g/L)가 높은 하수/염분 혼합수에서 생물학적 퍼클로레이트 환원은 방해받았다. 퍼클로레이트 환원 미생물이 희박하게 서식하는 하수에서 낮은 농도의 용존산소 유지는 생물학적 퍼클로레이트 환원을 위해 매우 중요한 요소이다.
- 3) 퍼클로레이트와 질산염이 공존하는 하수/염분 혼합수에서 생물학적 퍼클로레이트 환원에 비해 생물학적 탈질이 우선적으로 진행되었으며, 초기 질산성질소의 약 66%에 해당하는 많은 양의 아질산염이 축적되었다.

사 사

이 논문은 2011학년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행됨.

KSEE

참고문헌

1. Gullick, R. W., Lechevallier, M. W. and Barhorst, T., "Occurrence of perchlorate in drinking waster sources," *J. Am. Water Works Assoc.*, **93**(1), 66~77(2001).
2. Urbansky, E. T., "Perchlorate chemistry: implications for analysis and remediation," *Biorem. J.*, **2**(2), 81~95(1998).
3. Urbansky, E. T. and Schock, M. R., "Issues in managing the risks associated with perchlorate in drinking water," *J. Environ. Manage.*, **56**(2), 79~95(1999).
4. U.S. Environmental Protection Agency, "Perchlorate treatment technology update," EPA 542-R-05-015(2012).
5. Attaway, H. and Smith, M., "Reduction of perchlorate by an anaerobic enrichment culture," *J. Ind. Microbiol.*, **12**(6), 408~412(1993).
6. Rikken, G. G., Kroon, A. G. M., van Ginkel, C. G., "Transformation of (per)chlorate into chloride by a newly isolated bacterium: reduction and dismutation," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **45**(3), 420~426(1996).
7. Logan, B. E., "A review of chlorate- and perchloate-respiring microorganisms," *Biorem. J.*, **2**(2), 69~79(1998).
8. Coates, J. D., Michaelidou, U., Bruce, R. A., O'connor, S. M., Crespi, J. N. and Achenbach, L. A., "Ubiquity and diversity of dissimilatory (per)chlorate reducing bacteria," *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**(12), 5234~5241(1999).
9. Wu, J., Unz, R. F., Zhang, H. and Logan, B. E., "Presistence of perchlorate and the relative numbers of perchlorate- and chlorate-respiring microorganismss in natural water, soils, and wastewater," *Biorem. J.*, **5**(2), 69~79(2001).
10. Choi, H. and Silverstein, J., "Inhibition of perchlorate reduction by nitrate in a fixed biofilm reactor," *J. Hazard. Mater.*, **159**(2-3), 440~445(2008).
11. Ginestet, P., Audic, J., Urbain, V. and Block, J., "Estimation of nitrifying bacterial activities by measuring oxygen uptake in the presence of the metabolic inhibitors allylthiourea and azide," *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**(6), 2266~2268(1998).
12. Johnsen, A. R., Bendixen, K. and Karlson, U., "Detection of microbial growth on polycyclic aromatic hydrocarbons in microtiter plates by using the respiration indicator WST-1," *Appl. Environ. Microbiol.*, **68**(6), 2683~2689(2002).
13. Cang, Y., Roberts, D. J. and Clifford, D. A., "Development of cultures capable of reducing perchlorate and nitrate in high salt solution," *Water Res.*, **38**(14-15), 3322~3330(2004).
14. Herman, D. C. and Frankenberger, J. W. T., "Microbial-mediated reduction of perchlorate in groundwater," *J. Environ. Qual.*, **27**(4), 750~754(1998).
15. Oh, J. and Silverstein, J., "Oxygen inhibition of activated sludge denitrification," *Water Res.*, **33**(8), 1925~1937(1999).
16. Oh, J. and Silverstein, J., "Acetate limitation and nitrite accumulation during denitrification," *J. Environ. Eng.*, **125**(3), 234~242(1999).