

질산염과 산소에 의한 생물학적 퍼클로레이트 환원의 저해

최혁순*

원광대학교 토목환경·도시공학부

Inhibition of Biological Perchlorate Reduction by Nitrate and Oxygen

Hyeoksun Choi*

Division of Civil, Environmental & Urban Engineering, Wonkwang University

ABSTRACT

In this study, a chloride ion probe as a direct measurement for perchlorate reduction was used to determine whether biological perchlorate reduction was inhibited by other electron acceptors (O₂ and NO₃⁻) and to investigate competition of electron acceptors for using electron donors. Profiles of chloride production (= perchlorate reduction) in flasks containing perchlorate reducing populations were monitored by a chloride ion probe. Biological reduction of 2 mM perchlorate was inhibited by 2 mM nitrate that chloride production rate was decreased by 30% compared to perchlorate used as the only electron acceptor and chloride production rate was decreased by 70% when acetate was limited. Reduction of 2mM perchlorate was completely inhibited by oxygen at 7~8 mg/L, regardless of acetate excess / limitation.

Key words : Chloride ion probe, Perchlorate reduction, Nitrate, Oxygen, Inhibition

요약문

본 연구에서는 질산염(NO₃⁻)과 용존산소(DO)에 의한 생물학적 퍼클로레이트 환원의 저해 그리고 전자공여체를 차지하기 위한 이러한 전자수용체들의 경쟁적 관계를 조사하고자 염소이온프로브(chloride ion probe)를 직접적인 측정방법으로 사용하였다. 퍼클로레이트 환원미생물을 포함하는 플라스크에서 염소이온프로브를 이용하여 염소생성 (= 퍼클로레이트 환원)을 모니터링하였다. 2 mM 퍼클로레이트의 생물학적 환원은 2 mM의 질산염에 의해 저해를 받았으며, 염소이온 생성율이 퍼클로레이트가 단독으로 존재하는 경우에 비해 30% 정도 감소하였고, 아세테이트가 제한된 상태이며 질산염과 퍼클로레이트가 공존하는 경우는 염소이온의 생성율이 약 70% 정도 감소하였다. 7-8 mg/L의 용존산소와 2 mM의 퍼클로레이트가 공존하는 조건에서 아세테이트의 공급정도와 상관없이 퍼클로레이트의 생물학적 환원작용이 완벽하게 저해를 받았다.

주제어 : 염소이온프로브, 퍼클로레이트 환원, 질산염, 산소, 저해

1. 서론

퍼클로레이트는 미국에서 1990년대 초반부터 분석기술의 발달로 인해, 음용수 수원으로 사용 가능한 지하수 또는 지표수에서 낮은 농도로 검출되고 있으며, 퍼클로레이트가 주목 받게 된 주된 원인은 인체의 갑상선호르몬 기

능의 방해 때문이다(Urbansky, 1998). 하지만 저농도로 존재하는 퍼클로레이트의 인체유해성의 판단에 대한 논란이 계속되어 2009년 현재 미국에서 퍼클로레이트에 대한 연방규제 기준농도는 정해지지 않고 있다(NRC, 2005). 1998년 이래로 미국 연방 오염물 후보리스트 (Contaminant Candidate List, CCL)에 올라 있으며 현재 공공음용수에

*Corresponding author : choihs@wonkwang.ac.kr

원고접수일 : 2009. 7. 20 심사일 : 2009. 7. 22 게재승인일 : 2009. 11. 4
질의 및 토의 : 2010. 2. 28 까지

서의 모니터링이 실시되고 있다(USEPA). 특히 미국 캘리포니아 주 보건당국(CDHS)은 6 µg/L의 기준치를 세워두고 규제하고 있다. 대부분의 지표수 및 지하수원에서의 퍼클로레이트 오염은 고체 로켓연료 물질의 처리중 발생하는 것으로 알려져 있다(Urbansky, 2002). 최근 국내의 낙동강 하류에서 저농도의 퍼클로레이트가 검출됨으로 인해 국민의 관심이 집중되고 있다(환경부, 2006).

퍼클로레이트는 물에 대한 용해성이 매우 높으며 다른 물질과의 반응성이 낮아서 지하수를 타고 그 오염의 범위가 쉽게 확산되며 이러한 특성으로 인해 기존의 일반 정수처리시설 (응집, air stripping)에서는 퍼클로레이트를 쉽게 제거할 수 없다. 그래서 이온교환공법 또는 막분리와 같은 고도 분리 공정(advanced separation processes)을 이용한 퍼클로레이트 제거의 연구가 진행되고 있다(Nerenberg and Rittman, 2002; Tripp and Clifford, 2006). 그러나 이들 공정들은 처리시 퍼클로레이트와 다른 염(salt)을 포함하는 농축부산물 발생하며 이를 처리하기 위한 추가적인 후처리 공정을 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

이에 반해 퍼클로레이트는 무산소(anoxic) 조건 아래에서 퍼클로레이트 환원 미생물(perchlorate reducing bacteria)에 의하여 무기호흡과정동안 전자수용체(electron acceptor)로 작용하며 중간반응 생성물 없이 최종적으로 인체에 무해한 염소이온으로 환원된다(van Ginkel et al., 1995; Logan, 1998; Coates et al., 1999). 다음은 미생물에 의한 퍼클로레이트의 분해과정을 나타낸 것이다(Rikken et al., 1996).



대부분의 퍼클로레이트 환원미생물은 통성 종속영양미생물(facultative heterotrophic bacteria)이며 많은 종들이 하수처리장의 활성 슬러지, 소화조 슬러지 그리고 토양 등 다양한 환경에서 추출, 배양되고 있다(Coates et al., 1999; Logan et al., 2001). 그리고 퍼클로레이트 환원미생물은 질산염의 제거를 위한 탈질반응과 유사하게 전자공여체(electron donor)로서 다양한 유기물을 이용하여 무산소 조건에서 퍼클로레이트 뿐만 아니라 질산염 또한 제거할 수 있다고 보고 되고 있다(Logan, 1998; Rikken et al., 1996). 생물학적 퍼클로레이트 환원과 탈질작용은 모두 산소에 의해 방해 받는 것으로 알려져 있다(Attaway and Smith, 1993; Hermann and Frankenberger, 1998). 그리고 퍼클로레이트 환원미생물은 질산염에 의해 유기물을 차지하기 위한 방해/경쟁의 영향을 받는 것으로 알려

져 있다(Choi and Silverstein, 2008).

비료, 간이하수처리장, 도시하수처리장의 유출수등을 통해 지하수원으로 유입되는 질산염은 지하수의 주된 오염원으로 부각되고 있으며 퍼클로레이트가 오염된 물에 흔히 공존한다. 그러므로 생물학적으로 퍼클로레이트를 제거할 경우에는 물속에 공존하는 질산염 또는 용존산소의 영향을 이해/고려함으로써 생물학적 퍼클로레이트 처리의 효율을 향상시킬 수 있을 것이다.

Xu et al., (2003)은 퍼클로레이트 환원미생물의 Chlorite dismutase 활성도를 조사하기 위해 염소이온프로브를 이용하였다. 하지만 질산염과 산소의 공존과 같이 퍼클로레이트 환원미생물의 방해조건 아래에서 퍼클로레이트 환원미생물의 활성상태를 조사하기 위해 염소이온 프로브를 이용한 연구는 거의 없다.

본 연구는 산소, 질산염, 탄소원의 제한정도가 퍼클로레이트 환원미생물에 미치는 영향을 조사하기 위해 수행되었으며, 염소이온 프로브를 사용하여 퍼클로레이트 환원미생물의 활성상태 (염소이온 생성)를 직접적으로 빠르게 파악하였다.

2. 실험방법

2.1. 연속회분식 반응조

실험에 사용된 퍼클로레이트 환원미생물은 도시하수처리장의 반송활성슬러지 미생물을 무산소조건의 연속회분식반응조(SBR)에서 고농도의 퍼클로레이트만을 전자수용체로서 주입하여 2개월동안 순응하였다. SBR 반응조는 10 L의 유효용적을 지닌 원통형 투명아크릴로 제작되었으며 SBR 반응조의 외벽은 조류의 성장을 방지하기 위해 햇빛을 차단하였다. 회분식반응조는 60-70 rpm으로 반응조 상단부에 연결된 모터를 이용하여 교반하였다. 유입수는 유입탱크내 미생물의 성장을 막기 위해 2개의 분리된 유입탱크에 의해 주입되었다. 유입탱크 중 하나는 퍼클로레이트/영양소/미네랄들이 포함되어 있고 나머지 유입탱크는 유기 탄소원을 포함하였다.

SBR에 사용된 인공 합성 유입수의 성상은 Table 1에 나타내었다. 퍼클로레이트는 NaClO₄ · H₂O가 이용되었으며 150 mg/L ClO₄⁻, 에너지/탄소원으로 200 mg/L CH₃COO가 사용되었다. 영양소인 질소와 인의 사용량은 100 : 12 : 3의 C : N : P 질량비를 이용하였으며 유입수는 250 mg/L CaCO₃의 알칼리도를 포함하였다. SBR은 fill, reaction, settle, decant를 포함하는 24시간 주기로 운전하였다. SBR 반응조의 주기는 시간 프로그래밍이 가능한 기계(XT

Table 1. Characteristics of the synthetic feed water for SBR

Component	Unit	Concentration
ClO_4^-	mg/L	150
CH_3COO^-	mg/L	200
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	mg/L	46.8
K_2HPO_4	mg/L	13.7
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	mg/L	51.3
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	mg/L	43.0
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	mg/L	2.5

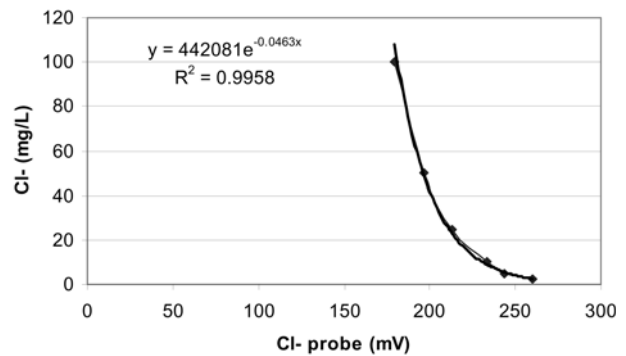
series, ChronTrol Corp., SanDiego, CA)에 의해 조절되었다.

2.2. 염소이온프로브(Chloride ion probe)를 이용한 batch flask test

생물학적 퍼클로레이트 환원이 다른 전자수용체인 질산염 또는 산소에 의해 저해를 받는지를 조사하기 위해 배치 플라스크 실험이 수행되었다. 본 실험에서는 퍼클로레이트 환원미생물의 퍼클로레이트 제거능력의 지표로서 염소이온 생성농도를 염소이온프로브(Denver instrument, PN: 300742.0)를 이용하여 측정하였다(Xu et al. 2003). 실험이 수행되기 전에 염소이온프로브는 10mM phosphate buffer를 포함하는 여섯개 (100~2.5 mg/L)의 standards 이용하여 보정되었다. 염소이온 프로브를 이용하여 얻어진 standard curve는 Fig. 1에서 나타내었다.

산소, 질산염, 그리고 탄소가질 제한과 같은 퍼클로레이트 환원미생물의 저해조건을 위한 실험은 SBR에서 순응된 부유미생물을 이용하였다. 240 mL의 부유미생물 (MLSS)이 SBR에서 추출되었으며 6개의 50 mL 용량의 콘형 플라스틱 원심분리기용 튜브에 옮겨졌다. 옮겨진 MLSS는 2000~3000 rpm의 속도로 3분동안 원심분리기(Beckman, GS-6 centrifuge)를 이용하여 고체와 액체를 분리하였다. 그리고 10mM phosphate buffer (pH = 7.0)를 이용하여 잔존하는 염소이온(Cl^-)를 세척, 제거하였다. 이러한 phosphate rinse 작업은 2회 진행하였고 이를 통해 농축된 미생물(MLSS)은 250 mL 플라스크 속에 배지와 함께 혼합되었다.

채취된 부유미생물(MLSS)은 200 mg/L 퍼클로레이트를 함유하고 있으며 산소의 유/무조건(DO = 0 or 7 mg/L), 질산염의 유/무($\text{NO}_3\text{-N}$ = 0 mg/L or 28 mg/L) 그리고 탄소원의 제한(limitation) 유/무(Table 2)와 같이 다양한 퍼클로레이트 환원미생물의 환원 방해 조건을 가진 플라스크 속에 희석되었다. pH 7.0을 유지하기 위해서 phosphate buffer가 첨가되었다.

**Fig. 1.** Cl^- standard curve by using chloride electrode probe.

높은 농도의 퍼클로레이트가 본 실험에 적용되었으며 그 이유는 첫째, 환원미생물의 높은 반응율(reaction rate), 둘째는 염소이온프로브의 염소이온탐지능력이 1 mg/L 이상으로써 화학양론식에 의한 퍼클로레이트 환원반응에 의하면 많은 양의 퍼클로레이트 환원이 요구되기 때문이다(Choi and Silverstein, 2007).

염소이온 프로브를 이용한 퍼클로레이트의 환원(염소생성)상태의 모니터링 실험은 60분동안 지속되었다. 배치플라스크실험에서 플라스크내의 산소를 없애기 위해 질소가스를 사용하였다. 그러나 산소에 의한 저해 현상 실험에서는 질소가스를 사용하지 않았다. 그리고 생성된 염소이온 데이터를 얻기 위해 매번 프로브를 플라스크 용액속에 넣어 직접 모니터링 하였다.

염소이온프로브 테스트가 수행된 후 매번 부유미생물의 농도를 측정하였으며 이 값들은 specific chloride production rate의 계산에 이용되었다. 염소이온프로브 실험결과를 검증하기 위해 실험시작과 종료시 샘플내 퍼클로레이트와 질산염의 농도를 이온크로마토그래프(Dionex model DX300)에 의해 분석하였다. 특히, 퍼클로레이트 분석을 위해 IonPac AS11 분석칼럼과 AG11 가드칼럼을 이용하였으며 100 mM NaOH eluent와 1,000 μL 샘플루프를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 질산염(NO_3^-)에 의한 생물학적 퍼클로레이트 환원의 저해

염소이온프로브를 이용한 질산염의 생물학적 퍼클로레이트 환원에 미치는 영향에 관한 실험은 2 mM 퍼클로레이트(200 mg/L ClO_4^-)를 함유하고 있는 플라스크에 2 mM NO_3^- (28 mg/L $\text{NO}_3\text{-N}$)를 첨가/미첨가에 의해 수행되었다. 질산염과 퍼클로레이트가 공존하는 실험에서 아

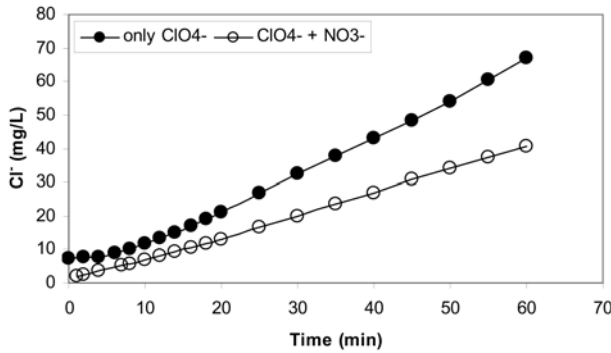


Fig. 2. Effect of nitrate on biological perchlorate reduction with excess carbon addition in flasks (only ClO_4^- : 2 mM ClO_4^- and 6.78 mM CH_3COO^- , $\text{ClO}_4^- + \text{NO}_3^-$: 2 mM ClO_4^- , 2 mM NO_3^- and 6.78 mM CH_3COO^-).

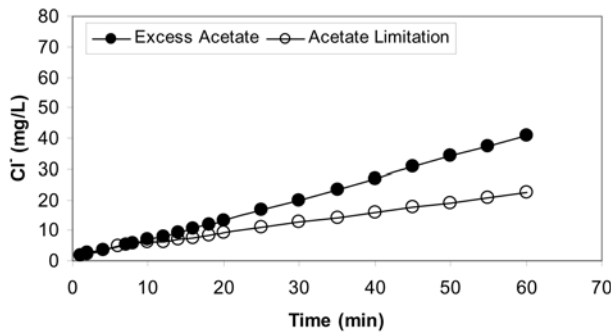


Fig. 3. Effect of acetate limitation on biological perchlorate reduction in the presence of nitrate in flasks (Excess Acetate: 2 mM ClO_4^- , 2 mM NO_3^- and 6.78 mM CH_3COO^- , Acetate limitation: 2 mM ClO_4^- , 2 mM NO_3^- and 0.42 mM CH_3COO^-).

세테이트는 6.78 mM(400 mg/L CH_3COO^-)의 농도로 충분히 주입되었으며 아세테이트의 제한실험에서는 0.42 mM(25 mg/L CH_3COO^-)의 농도로 감소시켜 주입하였다. 그리고 플라스크실험이 수행되는 동안 플라스크내 퍼클로레이트 환원 부유미생물의 농도는 약 5.0 MLSS g/L였다.

동일한 몰농도의 질산염과 퍼클로레이트가 공존할 때 충분한 아세테이트가 첨가되었음에도 불구하고 염소생성률(퍼클로레이트환원율)이 감소됨을 보였다(Fig. 2). 그리고 아세테이트가 제한된 조건에서는 충분히 공급된 조건에 비해 현저하게 염소생성률(퍼클로레이트 제거율)이 감소하였다(Fig. 3).

질산염에 의한 퍼클로레이트 환원 저해가 탄소원 제한에 의한 저해보다 그 영향이 더 적은 것으로 나타났다(Fig. 4).

Fig. 5는 퍼클로레이트가 단독으로 존재할 때 탄소원(아세테이트)의 제한이 미치는 영향에 대한 실험결과를 나타

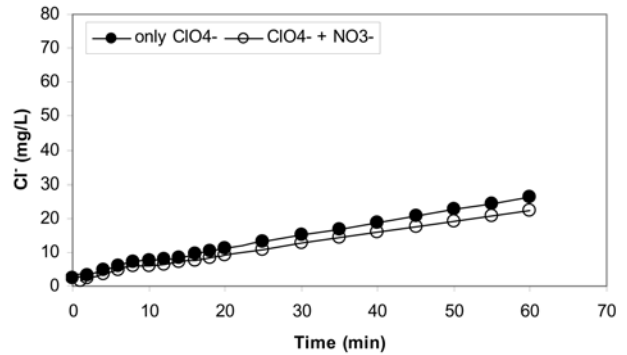


Fig. 4. Effect of acetate limitation on biological perchlorate reduction in the presence/absence of nitrate in flasks (only ClO_4^- : 2 mM ClO_4^- and 0.17 mM CH_3COO^- , $\text{ClO}_4^- + \text{NO}_3^-$: 2 mM ClO_4^- , 2 mM NO_3^- and 0.42 mM CH_3COO^-).

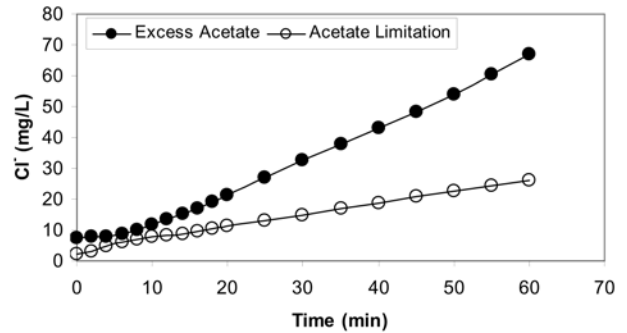


Fig. 5. Effect of acetate limitation on biological perchlorate reduction with only perchlorate as an e^- acceptor in flasks (Excess Acetate: 2 mM ClO_4^- and 6.78 mM CH_3COO^- , Acetate Limitation: 2 mM ClO_4^- and 0.17 mM CH_3COO^-).

내었으며 그 결과는 아세테이트를 98%로 감소시켰을 때 퍼클로레이트 환원율이 현저하게 감소함을 보여준다.

3.2. 산소(O_2)에 의한 생물학적인 퍼클로레이트 환원의 저해

본 실험에서는 고농도의 용존산소가 퍼클로레이트와 공존하므로 퍼클로레이트환원 미생물이 탄소원의 제한을 받지 않기 위해서 앞서 수행된 질산염과 퍼클로레이트가 공존하는 실험에서 사용된 양보다 더 많은 8.47 mM (500 mg/L CH_3COO^-) 아세테이트가 이용되었다.

본 실험에 사용된 미생물은 무산소조건에서 퍼클로레이트만을 유일한 전자수용체로 이용하여 수개월동안 배양되었다. 하지만 본 실험에서 7-8 mg/L의 용존산소가 공존할 때, 즉각적으로 퍼클로레이트 환원작용이 멈추었다(Fig. 6). 그리고 이 현상은 유기 탄소원의 공급정도와 상관없이 동일하게 나타났다(탄소원이 제한된 실험 결과 데이터는 생략).

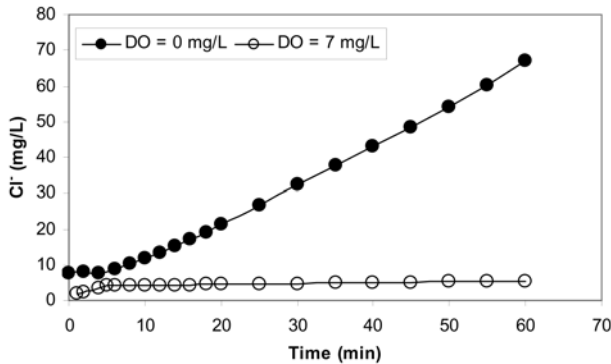


Fig. 6. Effect of high DO on biological perchlorate reduction with excess carbon addition in flasks (DO = 0 mg/L: 2 mM ClO_4^- and 6.78 mM CH_3COO^- , DO = 7 mg/L: 2 mM ClO_4^- , and 8.47 mM CH_3COO^-).

이러한 결과들은 퍼클로레이트 환원 미생물은 통성 (facultative)이며 이전의 성장조건에 상관없이 우선적으로 기질전자(substrate electron)를 산소로 전환하였음을 의미한다. 고농도 용존산소의 존재는 아세테이트의 이용도와 관계없이 미생물의 퍼클로레이트 환원능력을 완전히 방해하였다. 이러한 결과들은 퍼클로레이트 환원에 대해서 산소와 질산염이 미치는 영향은 아마도 서로 다른 mechanism을 갖는 것을 가리키며 이는 *Paracoccus denitrificans*에서 산소가 질산염의 세포내 흡수를 방해함을 발견한 Stouthamer(1991)의 연구결과에 기초하여 추측할 수 있다.

3.3. Specific Cl^- generation rate

염소생성률(Specific chloride generation rate, $\text{mgCl}^-/\text{gMLSS} \cdot \text{min}$)은 Fig. 2~6의 염소생성 프로파일을 사용해서 선형회귀분석(linear regressions)에 의해 계산되었다. 염소전극프로브의 초기 lag 영향을 제거하기 위해서 20분에서 60분 사이의 데이터값을 이용하여 계산하였으며 계산된 비율(rates)은 Table 2에 요약하였다.

퍼클로레이트를 단독 전자수용체로 사용한 실험에 대해 계산된 부유미생물의 염소생성률은 $0.21 \text{ mgCl}^-/\text{gMLSS} \cdot \text{min}$ 이었다. 퍼클로레이트와 질산염이 공존하는 조건에서는 염소생성률은 약 33% 정도 감소한 $0.14 \text{ mgCl}^-/\text{gMLSS} \cdot \text{min}$ 였다. 퍼클로레이트가 단독 전자수용체이고 탄소원(아세테이트)이 제한된 조건에서는 염소생성률이 $0.07 \text{ mgCl}^-/\text{gMLSS} \cdot \text{min}$ 로 감소하였다. 퍼클로레이트와 질산염이 공존하며 탄소원이 제한된 실험에서의 염소생성률은 탄소원이 제한되며 퍼클로레이트를 단독 전자수용체로 사용한 경우의 생성률에 비해 14% 이상 감소한

Table 2. Specific Cl^- generation rates in flask batch tests (ClO_4^- : 2 mM, NO_3^- : 2 mM, DO : 7 to 8 mg/L)

	Only ClO_4^-		ClO_4^- with NO_3^-		ClO_4^- with O_2	
	Ex.	Lim.	Ex.	Lim.	Ex.	Lim.
Acetate (mM)	6.78	0.17	6.78	0.42	8.47	0.85
rate*	0.21	0.07	0.14	0.60	0.04	0.04

* $\text{mgCl}^-/\text{gMLSS} \cdot \text{min}$
Ex: Excess, Lim: Limitation

$0.06 \text{ mgCl}^-/\text{gMLSS} \cdot \text{min}$ 이었다.

t-test(Kleinbaum et al., 1998)를 이용한 통계학적인 비교를 통해 동일한 몰농도의 질산염과 퍼클로레이트가 공존할 때 specific perchlorate reduction(chloride generation) rate가 퍼클로레이트가 단독으로 존재할 때에 비해 현저히 감소함을 확인하였다($p \leq 0.05$). 본 실험에 사용된 SBR cultures는 전혀 질산염에 노출된 적이 없었기 때문에 이것은 매우 흥미로운 결과이었다. 그리고 아세테이트 제한 조건에서는 질산염의 공존 여부에 상관없이 specific perchlorate reduction rate가 현저히 감소함을 나타냈다($p \leq 0.05$).

4. 결 론

본 연구는 염소이온 프로브를 이용하여 산소와 질산염이 생물학적 퍼클로레이트 환원미생물에 미치는 영향을 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 7-8 mg/L의 용존산소가 존재하는 조건에서 미생물에 의한 퍼클로레이트 환원은 기질의 이용성과 상관없이 완벽하게 방해를 받았다. 이를 통해 산소가 퍼클로레이트 reductase 시스템의 활동을 억제함을 추측할 수 있다.
- 동일한 몰농도의 퍼클로레이트와 질산염이 존재할 경우, 비록 충분한 아세테이트가 첨가된 상태일지라도 퍼클로레이트 제거율은 약 30% 정도 감소하였다. 이는 퍼클로레이트에 순응된 mixed culture에서 질산염의 환원이 퍼클로레이트의 환원보다 더 선호됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- Attaway, H. and Smith, M., 1993, Reduction of perchlorate by an anaerobic enrichment culture, *Journal of Industrial Microbiology*, **12**, 408-412.
- Choi, H. and Silverstein, J., 2007, Effluent recirculation to improve perchlorate reduction in a fixed biofilm reactor, *Biotechnology and Bioengineering*, **98**(1), 132-140.

- Choi, H. and Silverstein, J., 2008, Inhibition of perchlorate reduction by nitrate in a fixed biofilm reactor, *Journal of Hazardous Materials*, **159**, 440-445.
- Coates, J.D., Michaelidou, U., Bruce, R.A., O'connor, S.M., Crespi, J.N., and Achenbach, L.A., 1999, Ubiquity and diversity of dissimilatory (per)chlorate-reducing bacteria, *Applied and Environmental Microbiology*, **65**(12), 5234-5241.
- Herman, D.C. and Frankenberger, J.W.T., 1998, Microbial-mediated reduction of perchlorate in groundwater, *Journal of Environmental Quality*, **27**, 750-754.
- Kleinbaum, D.G., Kupper, L.L., Miller, K.E., and Nizam, A., 1998, Applied regression analysis and other multivariable methods, Duxbury Press, Pacific Grove.
- Logan, B.E., 1998, A review of chlorate- and perchlorate-respiring microorganisms, *Bioremediation Journal*, **2**(2), 69-79.
- Logan, B.E., Zhang, H., Mulvaney, P., Milner, M. G., Head, I. M., and Unz, R.F., 2001, Kinetics of perchlorate- and chlorate-respiring bacteria, *Applied and Environmental Microbiology*, **67**(6), 2499-2506.
- Nerenberg, R. and Rittmann, B.E., 2002, Perchlorate as a secondary substrate in a denitrifying, hollow-fiber membrane biofilm reactor, *Water Science and Technology: Water Supply*, **2**(2), 259-265.
- NRC. 2005, Health implications of perchlorate ingestion. Washington, D.C., The National Academic Press.
- Rikken, G.B., Kroon, A.G.M., and van Ginkel, C.G., 1996, Transformation of (per)chlorate into chloride by a newly isolated bacterium: reduction and dismutation, *Applied Microbiology and Biotechnology*, **45**, 420-426.
- Stouthamer, A.H., 1991, Metabolic regulation including anaerobic metabolism in *Paracoccus denitrificans*, *Journal of Bioenergetics and Biomembranes*, **23**(2), 163-185.
- Tripp, A.R. and Clifford, D.A., 2006, Ion exchange for the remediation of perchlorate-contaminated drinking water, *Journal AWWA*, **98**(4), 105-114.
- Urbansky, E.T., 1998, Perchlorate chemistry: Implications for analysis and remediation, *Bioremediation Journal*, **2**(2), 81-95.
- Urbansky, E.T., 2002, Perchlorate as an environmental contaminant, *Environ. Sci. Pollut. Res.* **9**, 187-192.
- US Environmental Protection Agency (USEPA): http://www.epa.gov/fedfac/documents/perchlorate_links.htm
- van Ginkel, C.G., Plugge, C.M., and Stroo, C.A., 1995, Reduction of chlorate with various energy substrates and inocular under anaerobic conditions, *Chemosphere*, **31**(9), 4057-4066.
- Xu, J. and Logan, B.E., 2003, Measurement of chlorite dismutase activities in perchlorate respiring bacteria, *Journal of Microbiological Methods*, **54**, 239-247.
- 환경부, 2006, 낙동강 '퍼클로레이트' 저감가이드라인 설정 합의, 환경부 보도자료.