大韓環境工學會誌 · 總說 - Review Paper - 1060～1068. 2007.

# 퍼클로레이트(Perchlorate)의 위해성과 저감기술 소개

신경희 · 손아정* · Daniel K. Cha** · 김경웅†,***

한국환경정책 · 평가연구원 정주계획평가실 · *Department of Land, Air, and Water Resources, University of California, Davis
**Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware · ***광주과학기술원 환경공학과

(2007년 6월 5일 접수, 2007년 9월 17일 채택)

# Review on Risks of Perchlorate and Treatment Technologies

**Kyung-Hee Shin · Ahjeong Son* · Daniel K. Cha** · Kyoung-Woong Kim†,*****

*Environmental Assessment Group, Korea Environment Institute*
**Department of Land, Air, and Water Resources, University of California, Davis*
***Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware*
****Department of Environmental Science and Engineering, Kwangju Institute of Science and Technology*

**ABSTRACT :** Perchlorate contamination in aquatic system is a growing concern due to the human health and ecological risks associated with perchlorate exposure. In spite of potential risks associated with perchlorate, drinking water standard has not been established worldwide. Recently, US EPA has issued new protective guidance for cleaning up perchlorate contamination with a preliminary clean-up goal of 24.5 ppb. In Korea, the drinking water standard and discharge standard for perchlorate has not been established yet and little information is available to address perchlorate problems. Perchlorate treatment technologies include ion exchange, microbial reactor, carbon adsorption, composting, in situ bioremediation, permeable reactive barrier, phytoremediation, and membrane technology. The process description, capability, and advantages/disadvantages of each technology were described in detail in this review. One of recent trends in perchlorate treatment is the combination of available treatment options such as combined microbial reduction and permeable reactive barrier. In this review, we provided a brief perspective on perchlorate treatment technology and to identify an efficient and cost-effective approach to manage perchlorate problem.

**Key Words :** *Perchlorate, Human Health, Treatment Technologies, Regulatory Status*

**요약 :** 건강유해물질인 perchlorate로 인한 음용수의 오염은 국 · 내외적으로 심각히 대두되고 있으나, 전세계적으로 perchlorate에 대한 국가 차원의 규제 기준을 가진 곳은 아직 없고 발암물질로 구분되지도 않은 상황이다. 최근엔 미국 환경청(US EPA)에서 perchlorate의 예방적 복원 지침서를 발표하였으며, perchlorate 분석 및 저감기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 국내에서는 perchlorate에 대한 먹는 물 수질기준이나 배출 허용 기준 등이 설정되어 있지 않고, perchlorate에 관한 국내 연구는 초기 단계에 머무르고 있다. 본 연구에서는 perchlorate의 성상 및 인체 유해성에 관해 간단히 고찰하였고, 기존의 이온교환(Ion exchange), 생물반응기(Bioreactor), 액상 탄소 흡착(Liquid Phase Carbon Adsorption), 퇴비화 처리(Composting), 현장 생물학적 정화(In Situ Bioremediation), 투수성 반응 벽체(Permeable Reactive Barrier), 식물정화법(Phytotechnology), 막분리기술(Membrane Technologies) 등과 같은 저감 기술의 장단점 및 효율에 관해 소개하였다. 최근 활발히 진행되고 있는 투수성 반응 벽체와 생물학적 환원 기술의 통합 등에 대한 연구 및 분석기술 개발에 대해서도 소개하였다. 본 논문을 통해 향후 국내 실정에 맞는 고효율의 perchlorate 국내저감기술 개발을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

**주제어 :** 퍼클로레이트(perchlorate), 유해물질, 저감기술, 환경규제기준

## 1. 서 론

퍼클로레이트 염(perchlorate salts)은 미국에서 1940년대 중반에 처음 생산되기 시작하였으며, 미국에서는 군사용 폭발물과 로켓트의 추진제에 주로 사용되었다. 또한 불꽃놀이용 폭발물, 기폭제, 성냥, 윤활유, 에어백, 그리고 특정 비료에도 사용되어 왔다.[1~6] 미국 환경청(US EPA)은 2002년 perchlorate 사용자 및 제조업체를 조사 확인한 결과, 최소한 22개 주 이상에서 perchlorate를 방출하고 있다고 보고하였으며,[7] 이로 인한 음용수의 perchlorate 오염은 최소 1,500만 이상의 사람들에게 영향을 미칠 수 있다는 보고가 있었다.[5,8,9] 국내의 경우 폭약제조, LCD판 제조시 세정제, 살균제 사용이 perchlorate의 주요 배출원으로 알려져 있으며, 2006년 낙동강 수계 일부 정수장에서 검출될 당시 농도는 17～18 μg/L 정도였으며, 저감대책 후 검출 농도가 6 μg/L로 검출되었다는 보고가 있었다.[10] 이처럼 국 · 내외적으로 perchlorate로 인한 음용수의 오염 문제가 심각히 대두되고 있으며, perchlorate가 인체 유해성과 밀접한 관련을 맺고 질병을 유발할 수 있는 유해물질이지만, 전세계적으로 perchlorate에 대한 국가

† Corresponding author
E-mail: kwkim@gist.ac.kr
Tel: 062-970-3391 Fax: 062-970-2434

차원의 규제 기준을 가진 곳은 아직 없고 발암물질로 구분되지도 않은 상황이다. 최근 2006년 1월 미국 환경청(US EPA)에서 perchlorate의 예방적 복원 지침서를 발표하였는데, 이는 2005년도에 제기된 환경청의 기준 함량과 미국 과학자문기관인, NAS(National Academy of Science)의 결론에 근거하여 수립되었으며 물 속의 perchlorate에 대한 예비정화 목표치를 24.5 ppb로 설정한 새로운 예방적 복원지침서이다.[11] 현재 국내에서는 perchlorate에 대한 먹는 물 수질기준이나 배출 허용 기준 등이 설정되어 있지 않고 유해화학물질관리법상 유독물 또는 관찰물질로도 지정되어 있지 않다. 최근 국내 주요 수계 및 취·정수장에서 perchlorate가 높은 농도로 검출되는 등 관련 환경 문제들이 제기되면서 많은 문제점들이 발생하고 있지만, perchlorate에 관한 국내 연구는 초기 단계에 머무르고 있다.

향후 perchlorate 관련 환경 규제기준이 제정 되거나 환경오염 사고 및 민원문제를 해결하기 위해서는 효과적인 저감기술의 도입이 필수적이므로 이에 대한 대책을 마련하여야 한다. 국내의 연구 현황을 고려해 볼 때 외국기술의 도입이 불가피하므로, 본 연구에서는 향후 국내 실정에 맞는 국내 기술개발에 필요한 기초자료를 제공하기 위해 perchlorate의 성상 및 인체 유해성에 관해 간단히 고찰하고, 기존의 저감기술에 대해 소개하고자 한다.

## 2. Perchlorate의 특성 및 분석 기술

### 2.1. 물리화학적 특성 및 건강 위해도

Perchlorate는 물에 대한 용해도가 높으며 이동성이 높고, 화학적으로 안정하여 쉽게 분해되지 않는다(Table 1). 예를 들어, 과염소산나트륨(sodium perchlorate)의 용해도는 2,010 g/L 이며, 과염소산암모늄(ammonium perchlorate)의 용해도는 220 g/L 정도이다.[4]

Perchlorate는 자극성 물질로서 호흡기 및 피부에 자극을 줄 수 있고, 주된 건강 영향은 갑상선의 기능과 관련이 있다. 갑상선은 혈액으로부터 요오드를 능동적으로 취해 다른 기관들과 함께 대사를 조절하는 기능을 하는데, perchlorate의 존재는 이러한 요오드 운반을 억제하여 갑상선에 의한 호르몬 생산을 방해하게 된다. 이러한 특성은 의학적으로 갑상선 기능 항진증(hyperthyroidism)을 치료하는데 이용될 수 있지만, 또한 건강 문제를 유발하는 원인이 되기도 한다.[5] 주요 노출경로는 perchlorate를 포함한 음용수나 음식의 섭취라고 할 수 있으며, 최근 미국에서는 양상추나 우유에서 perchlorate가 검출되었다는 보고도 있었는데, 미국 18개 주에서 채취된 47개 우유와 36개 모유를 조사한 결과 2 μg/L와 10.5 μg/L의 perchlorate가 검출되어 사회적 이슈가 되기도 하였다.[12]

미국의 통합위해성정보시스템(Integrated Risk Information System: IRIS)은 환경 중에서 발견되는 다양한 화학물질에 대한 노출로부터 발생하는 인간건강영향에 관한 정보를 수록한 데이터베이스로서 EPA의 연구개발국(Office of Research and Development) 국립환경평가센터(National Center for Environmental Assessment)에 의해 운영된다. IRIS는 약 500개 화학물질에 관한 EPA 규제정보에 관한 정보를 담고 있는데 perchlorate는 그 대상물질목록에 포함되어 있다. IRIS 정보에 따르면, 매일 섭취 또는 흡입하여도 인체에 치명적인 해를 입히지 않는, 가능한 인체허용수준을 나타내는 기준노출량(Reference Dose: RfD)을 0.0007 mg/kg body weight-day로 결정하고 있다.[13]

국내에서는 perchlorate를 포함한 유해오염물질에 대한 용량-반응평가를 통한 독성자료들의 연구가 미비하여 신뢰성 있는 자료를 얻을 수 없는 상황이며, IRIS와 같은 독성자료 데이터베이스를 활용 하는 수준에 머무르고 있다. 국내에서는 향후 특정수질유해물질 지정 및 배출허용기준 마련(2008년), 먹는물 감시항목 지정·관리(2008년 하반기), perchlorate의 인체 및 생태에 미치는 영향 평가, perchlorate 국내 유통/배출 현황 파악 등을 통해 유해물질로부터 인체의 위해성을 관리할 방침이라고 환경부에서 발표한 바 있다.[14]

### 2.2. 분석 기술과 규제 기준

전세계적으로 perchlorate에 대한 국가 차원의 규제기준은

**Table 1.** Physical and chemical properties of selected perchlorate compounds[4]

| Name (CAS Number) | Chemical Formula | Molecular Weight(g/mole) | Density($g/cm^3$) | Physical Appearance | Solubility in Water(mg/L) | Decomposition Temperature(℃) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ammonium Perchlorate (7790-89-9) | $NH_4ClO_4$ | 117.49 | 1.95 | White orthorhombic crystals | 200,000 at 25℃ 249,220 | 232 |
| Sodium Perchlorate (7601-89-0) | $NaClO_4$ | 122.4 | 2.52 | White orthorhombic crystals | 2,096,000 at 25℃ | 492 |
| Potassium Perchlorate (7778-74-7) | $KClO_4$ | 138.55 | 2.53 | Colorless or white orthorhombic crystals | 15,000 at 25℃ 20,620 | 653 |
| Lithium Perchlorate (7791-03-9) | $LiClO_4$ | 106.39 | 2.43 | Small white crystals | 29.9% at 25℃ | <250 ~400, become rapid at 430 |
| Magnesium Perchlorate (10034-81-8) | $Mg(ClO_4)_2$ | 223.21 | 2.21 | White, hygroscopic, granular or flaky powder | Very soluble in water with evolution of heat | 250 |

**Table 2.** State advisory levels for perchlorate[15]

| State | Advisory Level | Comment |
|---|---|---|
| Arizona | 14 μg/L | 1998 health-based guidance level; based on child exposure; to be reviewed after EPA issues final Reference Dose(RfD) |
| California | 6 μg/L - public health goal(PHG) for perchlorate in drinking water | Emphasized human clinical study; includes 10X uncertainty factor; California EPA(Cal EPA) is anticipating a proposed maximum contaminant level(MCL) in 2005 |
| Massachusetts | 1 μg/L | Precautionary recommendation to local water districts for children and at risk populations |
| Maryland | 1 μg/L | None |
| New Mexico | 1 μg/L - only for monitoring | Drinking water screening level |
| New York | 5 and 18 μg/L | 5 μg/L for drinking water planning level; 18 μg/L for public notification level |
| Nevada | 18 μg/L - public notice standard | For contaminated groundwater |
| Texas | 17 and 51 μg/L | 17 μg/L for residential protective cleanup level(PCL); 51 μg/L for industrial/commercial PCL |

아직 없으나, EPA는 가장 민감한 사람에 대한 음용수 농도를 24.5 μg/L로 권고하고 있으며 Table 2에 나타낸 바와 같이 각 주마다 권고 기준치를 제시하고 있다. 우리나라의 경우 최근 주요 수계 관할 상수 및 수돗물에서 perchlorate가 높은 농도로 검출되어 사회적 물의를 일으킨 바 있어 관련 법적 기준의 설정이 시급한 실정이다.

미국의 Unregulated Contaminant Monitoring Regulation(UCMR)은 The Safe Drinking Water Act에 바탕을 두고 현재 법적으로 규제대상이 아닌 수질 오염물질을 관측하기 위한 목적을 가지고 있다. 이러한 UCMR에 의하여 제시된 오염 물질의 목록에 perchlorate가 포함되어 있으며 대상물질에 관한 분석법이 제시되고 있다. Table 3에서 보여지는 바와 같이 EPA 314.0의 IC/Conductivity 법을 포함한 4가지 분석법이 제시되고 있다.

대구시는 EPA 및 각 주의 perchlorate 권고기준치와 수돗물을 음용하는 시민들의 건강 등을 고려해 perchlorate 권고기준치를 8 μg/L로 정한 바 있다.[10]

## 3. 저감 기술

물에 대한 용해도 및 이동성이 높으나, 화학적으로 안정하여 쉽게 분해되지 않는 perchlorate의 화학적 특징으로 인해 오염된 지하수나 지표수를 처리하기 위해 적용 가능한 기술은 제한적이다. 예를 들어, 이온교환, 생물학적 처리, 막분리 기술, 전기 투석 등의 기술 적용이 가능한데, 음이온 교환의 경우 대용량 처리가 가능하고 고효율이지만, 고비용이라는 단점이 있다. 또한 나노 필터(nano-filtration)나 역삼투(reverse-osmosis)를 이용한 기술이 Metropolitan Water District of Southern California에 의해 연구된 경우도 있지만, 이러한 막분리 공정은 이온교환보다 더 많은 비용이 소요된다는 큰 단점을 가지고 있다.[17]

지난 2005년 5월 EPA 의 보고서 "Perchlorate Treatment Technology Update"는 8가지의 Ex-situ/In-situ 저감 기술을 소개하고 있다. 이 보고서는[15] 기존의 저감 기술에 관한 원리와 제거 메커니즘, 처리 효율에 영향을 주는 주요 인자, 기술의 한계점 등에 관한 정보를 담고 있다. 이 보고서의 내용을 중심으로 현재 적용가능한 저감 기술에 관해 소개하고, 최근 발표 연구 논문을 통해 국외의 연구 동향을 소개하고자 한다.

**Table 3.** Analytical methods for perchlorate[16]

| Contaminant | CAS Registry Number | Minimum Reporting Level | Analytical Methods |
|---|---|---|---|
| Perchlorate | 14797-73-0 | 0.57 μg/L | EPA 314.0(IC/Conductivity)*<br>EPA 314.1(IC/Conductivity)**<br>EPA 331.0(LC/MS or LC/MS/MS)***<br>EPA 332.0(IC/MS or IC/MS/MS)**** |

* EPA Method 314.0 enhanced - Determination of Perchlorate in Drinking Water by Ion Chromatography.

** EPA Method 314.1 Rev 1.0 - Determination of Perchlorate in Drinking Water Using Inline Column Concentration/Matrix Elimination Ion Chromatography with Suppressed Conductivity Detection.

*** EPA Method 331.0 Rev. 1.0 - Determination of Perchlorate in Drinking Water by Liquid Chromatography Electrospray Ionization Mass Spectrometry(EPA 815-R-05-007, January 2005)

**** EPA Method 332.0 Rev. 1.0 - Determination of Perchlorate in Drinking Water by Ion Chromatography with Suppressed Conductivity and Electrospray Ionization Mass Spectrometry(EPA 815-R-05-007, March 2005)

### 3.1. 이온교환(Ion exchange)[15]

이온교환 기술은 ex situ 기술로서 주로 음용수, 지하수, 지표수의 perchlorate를 제거하기 위해 사용되며, 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 기술이다. 가장 보편적으로 이용되는 이온교환수지는 합성수지, 강알칼리, 음이온 교환수지 등이며, 제거 효율은 원수의 오염물질과 성상에 따라 달라진다. 이온 교환법은 용액 중에 용해되어 있는 이온상태의 물질을 제거하기 위해, 이온을 교환시키는 성질을 갖고 있는 물질과 접촉하여 제거시키고자 하는 이온을 포집하는 물리·화학적 과정으로서 이온교환수지에 존재하던 음이온을 perchlorate로 대체 하면서 수용액 상의 perchlorate를 제거하게 된다.

$$Resin - Cl^- + ClO_4^- << Resin - ClO_4^- + Cl^- \quad (1)$$

용해된 perchlorate는 음이온의 형태이므로, 강알칼리 교환수지가 전형적으로 널리 이용되며, divinyl benzene(DVB)을 가교제로 사용한 poly vinylbenzyl chloride 수지가 이에 포함된다. 이온교환 수지는 대부분의 경우 컬럼에 충진되는 형태로 사용되며 오염된 원수가 컬럼을 통과하면서 대상 오염물질이 교환수지의 다른 이온들과 자리바꿈을 하게 된다. 이온교환법은 처리 효율을 저하시키고 교환수지에 부착되어 막힘 현상을 일으킬 수 있는 유기물, 부유물질 또는 다른 오염물질을 제거하기 위한 여과처리나, oil-water 분리 공정 후에 적용된다.

본 EPA 보고서에 따르면, 13개 정도의 지하수 처리 사업이 시행되었으며, 초기 유입수의 perchlorate의 농도 범위는 10~100,000 μg/L이었으며, 방출수의 농도는 분석 가능치 이하이거나 2,000 μg/L 정도였다고 한다. 이온 교환을 이용하여 perchlorate를 처리 할 경우 효율에 영향을 주는 요인으로는, 경쟁 이온의 존재, 교환 수지의 막힘 현상 및 원수의 수질 등을 들 수 있다. 또한, chloride-form 수지를 사용한 경우엔 처리수가 상당량의 염소이온을 포함하고 있어 부식성이 강하게 되며 pH 또한 낮아지는 기술적 제한점을 가지고 있다.

### 3.2. 생물반응기(Bioreactor)[15]

생물반응기 저감기술은 지하수나 지표수 처리에 이용되며 주로 ex situ 형태로 적용 되는 기술이다. 지상의 반응기에서 오염수와 제거 대상물질을 선택적으로 분해 가능한 미생물과 직접 접촉시킴으로써 perchlorate를 저감시키게 된다. 일부 탈질 박테리아(Denitrification bacteria)는 perchlorate를 염소이온과 산소로 환원 시킬 수 있는 능력을 가진 것으로 밝혀졌으며, 이러한 과정에서 전자공여체와 적합한 배양 조건을 필요로 한다. Perchlorate는 산소 공급원으로 작용하며, 일반적으로 아세트산, 에탄올, 메탄올, 수소 등이 전자공여체로 사용된다.

미생물에 의한 perchlorate의 환원 과정은 다음과 같으며, 반응속도 결정 단계는 perchlorate($ClO_4^-$)가 chlorate($ClO_3^-$)로 분해되는 단계이다.

$$ClO_4^- \rightarrow ClO_3^- \rightarrow ClO_2^- \rightarrow Cl^- + O_2$$

토양 및 지하수 시료의 분석을 통해 perchlorate 환원 박테리아가 편재하고 있다는 것이 밝혀졌으며, perchlorate를 분해할 수 있으며 프로테오박테리아(proteobacteria)로 주로 분류되는 30개 이상의 균주가 확인되었다.

진행 중인 몇몇 연구들은 perchlorate 분해 과정이 두 가지의 효소에 의해 촉진되는 세 단계의 환원 과정을 포함하고 있다고 밝히고 있다. Perchlorate($ClO_4^-$)가 chlorate($ClO_3^-$)로, 이후 다시 chlorite($ClO_2^-$)로 환원되는 처음 두 단계 에서는 reductase enzyme이 반응에 촉매로서 작용하며, 다시 chlorite($ClO_2^-$)가 chloride($Cl^-$)와 oxygen($O_2$)으로 분해되는 과정엔 chlorite dismutase enzyme이 촉매 작용을 한다고 알려져 있다.

유동층 반응기(fluidized bed reactors)와 충전층 반응기(packed bed reactors) 형태가 주로 이용되며, 보고서에 따르면 몇몇 지표수 처리에 적용한 경우 유입수 내 perchlorate의 농도범위는 55~200,000 μg/L이었으며, 처리 후 유출수의 농도는 2~18 g/L 정도였다. 음용수에 적용한 경우는 유입수에서 75~2,500 μg/L, 유출수에서 4 μg/L 이하 농도의 perchlorate가 검출되었다고 한다. 생물반응기로 perchlorate를 처리할 경우 처리 효율에 영향을 미칠 수 있는 운전 인자로는 용존 산소, 질산염 이온의 공존, 탄소원과 기타 영양소의 공급, 역세(backwash) 등이 있다. 생물반응기를 이용한 기술의 경우 대부분이 방류에 적합한 정도의 제거 효율을 나타내지만, 음용수의 처리에 적용한다면 유출수 내의 biosolids를 제거하기 위한 적절한 2차 처리가 요구된다는 단점이 있다.

### 3.3. 액상 탄소 흡착(Liquid Phase Carbon Adsorption)[15]

액상 탄소 흡착법은 활성탄(GAC), 활성 알루미나 또는 다른 적합한 매체로 충진된 컬럼을 사용하는 기술로서, 활성탄은 지표수, 지하수 및 폐수로부터 유기 오염물질과 금속성 오염물질 제거에 주로 사용 되는 대표적 유기흡착제 이다. 활성탄은 흡착된 휘발성 오염물질의 제거를 위해 열적 처리 등을 거쳐 재생(regeneration)되며, 이 과정에서의 발생 가스(off-gas)는 대기로의 방출 전에 적절한 처리를 거치게 된다.

비용측면을 고려할 때, 일반적으로 활성탄을 이용한 저감기술은 용해도가 낮은 비극성 오염물질로 오염된 수처리에 효과적이라고 알려져 있으며, perchlorate와 같은 무기 오염물질에는 비효율적인 기술로 간주되어 왔다. Perchlorate 제거를 위해 활성탄을 사용할 경우 처리 효율이 급감하므로, 이러한 낮은 처리 용량이 액상 탄소 흡착 기술의 단점으로 지적되어 왔다. 최근 활성탄을 이용한 perchlorate 제거의 처리 용량을 높이기 위한 연구들이 현재도 진행되고 있으며, 이중 tailored GAC라고 일컬어지는 새로운 접근 방법은 탄소에 이온 교환 가능한 점(sites)을 만들기 위해 활성탄을 4기 아민(quaternary amine, cetyl trimethyl ammonium chloride)으로 처리 하는 단계를 포함한 방법이다.

이온교환 가능한 점들을 가진 탄소의 경우 비용 측면에서 기존의 표준 이온 교환 수지와 결합한 고분자 물질을 대체할 수 있는 가능성이 제시되었으며, 이런 경우 perchlorate와 유기오염물질의 동시 제거를 기대할 수도 있다. 특히, 폭발성

오염물질인 Royal Demolition Explosives(RDX), cyclotetramethylene trinitramine(HMX), trinitrotoluene(TNT) 또는 휘발성 유기오염물질의 동시 제거에 관한 처리 가능성을 평가하고자 하는 연구도 진행된 바 있다.

보고서에 따르면 몇몇 지하수 처리에 적용한 경우 유입수 내 perchlorate의 농도범위는 1.8~5 μg/L이었으며, 처리 후 유출수의 농도는 0.35 μg/L 이하로 검출되었다. 액상 탄소 흡착 기술의 처리 효율에 영향을 미칠 수 있는 운전 인자로는 유량, 오염물질의 극성 및 수용해도, 막힘 현상 등을 들 수 있다. 유입수 내의 부유물질을 제거하지 않았을 경우 오염물질의 흡착을 위한 컬럼에 축적되어 압력 강하 등의 문제를 초래하게 되므로, 부유물질 제거를 위한 전처리 과정이 필요하며, 적당한 전처리 과정을 거치지 않았을 경우 유입되어 컬럼내에 축적된 부유물질은 역세 과정을 통해서만 제거가 가능하다. 또한 사용 후 오염된 탄소는 폐기 전에 적절한 처리 과정이 필수적이다.

### 3.4. 퇴비화 처리(Composting)[15]

퇴비화 처리 기술은 오염된 토양을 처리하기 위해 드물게 적용된 ex-situ 기술로서, 호열성 조건인 54~65°C에서 미생물의 작용을 이용해 토양 내 존재하는 perchlorate를 덜 유해한 부산물로 전환시키는 처리기술이며 오염물질을 분해하는 동안 미생물에 의해 발생된 열은 퇴비 더미의 온도를 증가시킨다. Perchlorate의 분해 · 전환 과정은 위의 3.2절의 생물학적 반응기 기술 적용 시와 동일하다. 오염된 토양을 굴착 후 약제와 나무 부스러기, 짚, 분뇨, 채소(감자) 폐기물 같은 유기 개량제와 혼합하게 되는데, 적절한 개량제의 선택은 알맞은 공극률을 얻기 위해 필수적인 단계이며, 호열성 미생물의 활성을 증진시키기 위한 적절한 탄소와 질소 비율 또한 제공해 주어야 한다. 운영시에는 함수율을 정확히 모니터링하고 온도를 유지함으로써 분해 효율을 최대화 할 수 있다.

퇴비화 기술은 세가지 형태로 운전이 가능한데, 폭기식 고정 더미 퇴비화(aerated static pile composting), 기계적 교반 용기 내 퇴비화(mechanically agitated in-vessel composting) 그리고 이랑 퇴비화(windrow composting)이다. 폭기식 고정 더미 퇴비화에서는 퇴비가 흙 더미에서 생성되며 블로어나 진공 펌프에 의해 공기가 주입되고, 기계적 교반용기 내 퇴비화의 경우는 반응기내에서 퇴비가 혼합되고 폭기된다. 그리고 이랑 퇴비화의 경우엔, 퇴비가 이랑처럼 긴 흙 더미에 위치하고 이동식 장치를 이용해 주기적으로 혼합된다.

비료화 기술을 full-scale로 적용한 프로젝트의 경우 6곳에서 토양샘플을 채취해 분석한 결과, 초기 perchlorate 농도는 500 mg/kg, 처리 후 농도는 270 mg/kg 미만으로 나타났다.

### 3.5. 현장 생물학적 정화(In Situ Bioremediation)[15]

현장 생물학적 정화기술(ISB)은 perchlorate를 염소이온과 산소로 전환 시킬 수 있는 미생물을 이용하는 생물학적인 과정을 포함하며, 혐기성 조건하에서 선택된 박테리아에 의한 효소적 분해 과정을 통해 perchlorate 감소를 기대하게 된다. 적절한 영양소 공급 및 미생물의 성장에 알맞은 조건이 요구되는 기술이다 Urbansky and Schock는[18] 몇몇 박테리아는 혐기성 조건에서 perchlorate를 염소이온과 산소로 분해하려는 자연적인 성향을 가지고 있으며 *Ideonella dechloratans*, *Proteobacteria*, *Vibrio dechloraticans Cuzensove* B-1168, *Wolinella succinogenes* HAP-1 등이 이에 해당된다고 하였다. 그 외에 *Dechloromonas*와 *Dechlorosoma* 속의 다른 균주들도 perchlorate 환원 능력을 가진 것으로 알려졌다.[19,20]

대부분의 perchlorate의 생물학적인 처리기술의 경우 특정 미생물(대부분의 경우, 박테리아)의 작용이 요구되고, 이러한 미생물의 활성을 증가시키기 위해 충분한 형태의 영양소 및 전자공여체의 공급이 필요하다. 통상적으로 이용되는 전자공여체는 유기산(예. acetate, citrate, lactate), 당(예. Glucose), 알코올(예. Ethanol), 그리고, 고단백 물질(예. casamino acids, whey) 등이 있다. 식물성 기름 에멀젼이 전자공여체로 사용되는 경우 지표 아래에 오랫동안 천천히 방출 되어 나오는 기질(substrate)로써 작용하게 되는 장점이 있다.

Enhanced ISB의 경우, 전자공여체나 영양물질이 오염부지로 직접 주입되며, 주입구의 위치나 개수는 오염물질 plume의 정도나 주입 부지의 설계(예. 재순환, 장벽, 격자), 또는 지표하(subsurface)의 암석학, 주입물질의 형태 등 여러 가지 요인에 의해 결정된다. 주입된 기질은 perchlorate로 오염된 매체 내에서의 환원반응을 유도하게 된다. ISB에 의한 perchlorate의 생물학적인 분해는 현재도 많은 연구가 진행 중이며, 현재까지의 연구 결과에 따르면, 세 단계 과정으로 환원되는데, 3.2절의 생물학적 반응기 기술 적용 시와 동일하다.

ISB 처리 효율에 영향을 주는 인자로는 개량제(amendments)의 종류, pH, 수문지질학 등이 있다. 적당한 개량재의 선택은 미생물의 성장에 필요한 적정 탄소, 질소의 양을 제공하기 위해 필수적이며, 토양내 생물학적인 활동에 영향을 주는 구성요소들의 용해도나 이용가능성은 pH 조건에 따라 달라진다. 또한 개량제의 효과적인 주입을 위해서는 수문학적인 정보가 요구된다.

ISB는 perchlorate를 염소이온과 산소로 완전 분해하지만, ISB에 의해 처리된 물은 박테리아가 존재하므로 음용수로 사용될 수 없으며, 어떤 경우엔 처리 후에 대수층내에 강한 환원 환경이 유발되어, 철이나 망간과 같은 금속의 이동성을 높이고, 메탄을 생성하는 등의 문제점이 제기 되었다. ISB 기술을 pilot-scale로 적용한 6개의 프로젝트의 경우, 최종 처리된 지하수의 농도범위는 4~22 μg/L로 나타났다.

### 3.6. 투수성 반응 벽체(Permeable Reactive Barrier)[15]

Permeable reactive barrier(PRB)는 이 벽체를 통과하는 지하수의 흐름을 통해 오염물질을 고착화(immobilize) 시키거나 분해시키는 등, 반응 물질을 처리 할 수 있는 구역(zone)을 의미한다. PRB는 영구적, 반영구적, 또는 임시적 설비로 오염물질 흐름을 가로질러 설치되고, PRB를 통과하는 지하수 내의 오염물질은 화학적 또는 생물학적으로 분해된다. 벽체는 특정 오염물질을 처리할 목적으로 하는 반응성 물질로 만

들어지며, PRB에 사용되는 반응성 물질로는, 예를 들면, 콩기름이나, 그 외의 식용 기름, 나무 부스러기, 피칸 껍질, 목화씨, 키틴질, 석회석, 또는 그 외의 혼합물질들이 있다.

생물학적인 처리과정이 적용될 경우, 반응성 물질에는 토착미생물들의 성장을 증진시키거나, 처리하고자 하는 오염물질을 생물학적으로 분해시킬 수 있는 미생물이 직접 공급되어야 하는 경우도 있다. Perchlorate로 오염된 지하수를 처리할 경우, 반응성 벽체에는 perchlorate를 염소이온과 산소로 전환시킬 수 있는 혐기성 박테리아가 주입되어야 할 것이다.

PRB는 두 가지 기본적인 구성을 이용하여 설치 될 수 있는데, funnel-and-gate 또는 continuous trench 방식이다. Funnel-and-gate 시스템은 반응성 물질(미생물 또는 화학물질)을 포함한 gate와 지하수 흐름의 길을 내는 고체벽으로 구성된 funnel이다. The trench 시스템은 하나 이상의 trench를 오염물질 plume을 가로질러 굴착한 후 반응성 물질로 채우는 형식이다.

Perchlorate로 오염된 지하수 처리를 위해서는 PRB 시스템이 perchlorate의 환원을 유도하기 위한 electron donor와 미생물을 번식시키기 위한 유기 기질(substrate)을 포함한 반응성 물질로 채워지게 된다.

PRB 효율에 영향을 주는 인자로는 벽체를 구성하는 물질의 종류, 수문지질학 등이 있다. PRB의 적합한 설치는 오염된 지하수의 깊이까지의 접근이 필수적이며, 이러한 설비 조건은 깊은 곳의 지하수 오염 처리에 어려움으로 작용한다. 주입 가능한 물질을 사용하는 PRB 시스템의 경우 더 깊은 곳까지 설치를 가능하게 한다. 그럼에도 불구하고, PRB는 시간이 흐름에 따라 반응성이 감소하게 되며, 반응성 물질이나 기질의 대체, 자양물의 재공급, 또는 재주입 등이 필요하다는 제한점을 가지고 있다. Pilot-scale로 PRB 기술을 적용한 프로젝트의 결과, 초기 유입시 13,000 μg/L였던 perchlorate 농도가 처리 후 0.45 μg/L 이하로 감소되었다.

### 3.7. 식물정화법(Phytotechnology)[15]

식물정화법은 지하수, 지표수, 토양으로부터 오염물질을 제거하기 위해 식물을 이용하는 기술을 일컫는다. 식물정화법은 근권(rhizosphere)에서의 생물학적인 분해, phytovolatilization, phytostabilization, 및 phytoextraction과 같은 다양한 기작을 포함하고 있다. 근권(rhizosphere)에서의 생물학적인 분해(rhizodegradation 또는 rhizosphere degradation)는 뿌리를 둘러싸고 있는 토양 내에 존재하는 미생물의 활동에 의해 진행되며, 식물뿌리에서 방출된 자연 물질은 미생물군에게 영향물질을 제공한다. 이러한 미생물은 생물학적으로 토양이나 지하수에 존재하는 perchlorate를 환원시키게 된다.

Perchlorate로 오염된 환경 매체들을 식물정화법을 이용하여 제거할 경우의 기작은 아직 확립되지 않았으나, 실험식 규모의 연구 결과들은 버드나무, 포플러, 미루나무, 수련 등과 같은 특정 식물종의 경우 perchlorate 제거 가능성을 나타냈다고 보고하고 있다.

식물정화법은 식물종, 오염물질의 농도 등에 의해 그 처리 효율이 영향을 받을 수 있다. Perchlorate가 어떤 식물에는 독성을 나타낼 수 있으므로, 적합한 식물종을 고르는 것이 중요하며, 과량의 perchlorate는 식물에 치명적인 영향을 나타내므로, 정화기법을 적용하기 전, 선택된 식물종의 한계치를 결정하여야 한다.

식물정화법은 오염물질의 제거를 돕기 위해 식물종을 사용하는 자연적인 처리 과정을 적용하는 처리법이다. 높은 농도의 오염물질은 식물 성장과 처리 과정을 방해하는 요인으로 작용할 수 있으며, 기후적인 변화는 식물 성장에 심각한 장애를 초래할 수 있으므로, 처리 기간에 변화를 주어야 할 경우도 있다. 또한, 기존의 연구 결과를 이용하여 대상 오염물질의 처리에 특정 식물종이 적합한지 결정해야 할 필요성도 있다.

### 3.8. 막분리기술(Membrane Technologies)[15]

반투과성 또는 투과성 막을 이용하여 perchlorate를 제거하는 기술이 막분리기술로 분류 된다. 전기투석 (Electrodialysis) 과 역삼투(reverse osmosis)가 지하수나 지표수 및 폐수에서 perchlorate를 제거하기 위해 사용되는 막분리기술의 예들이다.

#### 3.8.1. 전기투석(Electrodialysis)

전기투석은 전류를 이용하는 막분류기술로서 물리적인 처리방법이며, 전류가 perchlorate 오염수에 가해지고, 오염수가 양이온을 선택적으로 투과 시키는 막을 통과하게 된다. Perchlorate의 오염은 대부분 ammonium perchlorate와 potassium perchlorate의 형태로 나타나는데, 이러한 perchlorate salt는 전류에 의해 양이온과 음이온으로 분리된다. 음전하를 띠는 perchlorate 이온은 cationic-selective membrane(양이온 통과막)에 축적되며, 결과적으로 농축수 또는 염수 형태로 포집 된다. 비슷한 원리로, 양전하를 띤 이온은 anionic-selective membrane(음이온 통과막) 에 축적된다. 이러한 전기투석 방법은 두 가지 형태의 처리수를 생성하게 되는데, 오염수는 양이온과 음이온이 제거된 정제수 혹은 탈염수(demineralized product)로 되어 유출된다. 제거된 이온들이 포함된 농축수(Concentrate)는 재처리 되거나 폐기된다.

보고서의 나타난 기존의 연구 수행결과들에 의하면, 초기 유입수의 perchlorate 농도는 15~130 μg/L였으며, 막분리기술 적용 후 유출수의 농도는 11~17 μg/L 범위로 나타났다. 전기투석 기술의 단점으로는 막의 선택투과도가 낮거나, 막힘 현상이 일어날 경우, 전기투석의 처리 효율이 저하될 수 있다는 것과, 처리 후 생성된 농축수를 폐기 전 2차 처리하는데 많은 양의 물을 필요로 한다는 점이다.

#### 3.8.2. 역삼투(Reverse Osmosis)

Perchlorate 제거를 위해 사용될 수 있는 또 다른 하나의 막분리기술은 역삼투를 이용한 기술이다. 농도가 다른 두 용액을 반투과성 막으로 차단하였을 때 저농도에서 고농도로 용매가 이동하여 평형을 이루려는 현상을 삼투현상이라 한

다. 역삼투를 이용할 경우, 한쪽 chamber는 perchlorate 오염수가 또 다른 한쪽은 담수가 채워지고, 그 사이를 반투과성 막으로 차단한다. 수압을 고농도쪽에 가해 perchlorate 오염수로부터 용매인 물을 분리하는 것을 역삼투라고 한다. 막을 통과하여 여과된 물은 사용가능하며, perchlorate와 다른 오염물질들을 포함한 물은 후처리를 거친 후 폐기 처분 된다.

보고서에 제시된 기존의 연구 결과들에 의하면, 초기 유입수의 perchlorate 농도는 125~20,000 μg/L였으며, 역삼투 기술 적용 후 유출수의 농도는 5~80 μg/L 범위로 나타났다. 많은 양의 유기물이나 미생물이 존재하는 오염수를 처리할 경우 막의 손상을 초래할 수 있으며, 알칼리 토류 금속(alkaline earth metals)이 존재할 경우, 막오염 현상(membrane fouling)을 증가 시키는 문제가 발생할 수 있다.

### 3.9. Perchlorate 분석기술 관련 최근 연구

최근 국외의 perchlorate에 관한 연구는 perchlorate 저감기술과 더불어, 보다 민감한 검출을 위한 분석기술 향상과 바이오 센서등과 같은 새로운 기술의 접목으로 확장되고 있다. Li and George는[21] Reversed-phase liquid chromatograhy/electrospray ionization tandem mass spectrometry(LC-ES-MS/MS)를 사용하여 물속의 perchlorate를 측정하는데 있어서 0.05 μg/L(ppb)까지 그 검출한계를 낮추었으며, Seyfferth and Parker는[22] IC-ES-MS로 식물속의 perchlorate를 40 ng/L 한계까지 측정해내었다. Wendelken는[23] EPA method 331(IC-MS-MS)을 바탕으로 물속의 perchlorate의 검출한계(0.03 ng/mL)를 결정하였다.

최근 한 연구는[24] perchlorate 환원효소($ClO_4^-$ reductase)를 이용하여 지하수 속의 perchlorate 오염을 신속하게 검출하기 위한 바이오센서를 개발해 내었으며, Thrash et al.은[25] 미생물을 이용한 perchlorate 환원반응에 전기화학적 자극에 관한 연구를 하였는데 챔버안의 양극(cathode)이 *Dechloromonas*와 *Azospira* 종의 perchlorate 환원 미생물의 전자공여체로 사용되었다. 또한 perchlorate의 실질적 규제를 위한 환경영향평가[26] 정책적 정보를 제공하는 관점에서의 연구[27] 또한 진행되고 있다.

## 4. 저감기술 관련 국내외 최근 연구 동향

위의 3절에서 기술한 다양한 저감기술들이 perchlorate 처리에 적용될 수 있지만, 현존하는 방법들은 다른 물질들과 함께 처리할 때 성공률이 낮고, 이온교환이나 막분리기술의 경우 perchlorate를 무해한 성분으로 전환시키는 것이 아니라 오염물질을 단지 물에서 고체 수지등과 같은 다른 매체로 이동시킬 뿐이라는 문제점을 안고 있다. 따라서 최근엔 환원과정에 의한 화학적인 분해 및 생물학적 처리 기술의 반응 속도 증가시키거나 처리 비용을 낮추기 위한 처리 조건, 다양한 오염물질과의 동시 제거 등에 관한 연구가 많은 부분을 차지하고 있다.

국내의 경우 최근 김정화 등은[28] 미국 EPA 시험방법을 근거로 perchlorate 분석방법 확립을 위한 검출한계, 회수율, 재현성 등을 검증하였으며, 국내 주요 수계 중 검출될 가능성이 있는 원수 및 수돗물을 조사 분석하여 검출 현황을 파악하였다. 윤재경 등은[29] RO와 NF 멤브레인을 이용한 perchlorate의 제거에 관한 연구를 수행하였으며, Tak-Hyun Kim et al.은[30] mesoporous media를 이용하여 perchlorate를 제거하는 연구를 수행한 바 있다. 생물학적인 처리기술의 경우, 홍재화 등은[31] membrane bioreactor를 이용하여 nitrate 유무에 따른 perchlorate의 부하별 처리 효율 및 전자공여체 소모량을 파악하고자 하였다. 연구결과는 전자공여체인 acetate가 충분히 존재하는 경우 perchlorate 환원균인 JB 101에 대해 perchlorate와 nitrate가 서로 경쟁적 저해 관계에 있음을 보여주었다. 최근엔, 안창훈 등에[32] 의해 고농도 염분을 함유한 이온 교환수의 nitrate와 perchlorate의 저감방안에 관한 연구가 진행되었다. 생물막(MBfR) 공정을 적용한 결과, 고농도 염분(3%)을 함유한 유입수의 경우 nitrate는 완전환원이 가능하였지만, perchlorate의 농도는 유입수의 농도(90 mg/L) 수준으로 측정되어 별다른 변화를 보이지 않았다.

최근 국외의 많은 연구가 투수성 반응 벽체 기술 적용을 위한 적합한 반응성 물질에 대한 연구이며, 영가 철을 벽체로 이용하고자 하는 연구들이 다양하게 진행되고 있다. 최근 Oh et al.은[33] 영가 철($Fe^0$)을 이용하여 고온에서 perchlorate를 처리하기 위한 연구를 진행하였으며, 온도가 증가함에 따라 환원반응에 의한 perchlorate 의 제거율이 증가하는 연구 결과를 보였다. Son et al.은[34] 혐기적 조건에서의 영가철($Fe^0$)의 부식반응에 의해 발생되는 수소 가스를 전자공여체로 이용 가능한 균주를 이용하여 perchlorate를 환원시키고자 하였으며, 연구결과 perchlorate의 제거율은 acetate를 전자공여체로 주입한 경우와 비슷하게 나타나 65 mg/L에 이르는 perchlorate를 6일만에 제거하였다. 이로써, Son et al.[34]은 처리수에 잔존 유기물을 남기지 않으며 수소가스보다는 안전하고 저렴한 전자공여체로서 영가 철을 제안하였으며 perchlorate를 환원시키는 균주(pure culture)를 따로 배양할 필요없이 편재하는 mixed culture를 사용한 것(수처리장의 활성슬러지를 따로 enrichment 없이 사용함)을 이 방법의 장점이라고 설명하였다. 유사하게 Yu et al.은[35] 영가철이 환원될 때 발생하는 수소가스를 전자공여체로 사용하여 autotropic bacteria(pure culture)가 존재하는 반응기를 개발하였는데, 이 방법은 *Dechloromonas sp. HZ*라는 균주를 먼저 배양해내야 하는 번거로움이 있어 실제 현장 응용에는 어려움이 예상된다.

## 5. 향후 연구과제 및 결론

Table 4에 요약된 것처럼 perchlorate의 저감기술의 처리 효율은 오염매체, 오염농도 범위, 오염원의 특성 및 기타 세부적인 운전조건의 영향을 받게 된다. 국내의 실정에 적합한 고효율의 저감 기술 개발을 위해서는 우선적으로 국내 배출원 분포현황, 배출원별 특성, 주요 수계 원 · 정수에서의

**Table 4.** Performance summaries[15]

| Perchlorate treatment technology | | Contaminated media treated | Influent concentration | Effluent concentration |
|---|---|---|---|---|
| Ion exchange | | drinking water, groundwater | 10～10,000(μg/L) | N.D.～2,000(μg/L) |
| Bioreactor | | drinking water, groundwater | 55～150,000(μg/L) | 2～18(μg/L) |
| Liquid Phase Carbon Adsorption | | drinking water, groundwater | 1.8～5, 75～92(μg/L) | <0.35, N.D.(μg/L) |
| Composting | | soil | 57～500(mg/kg) | 0.64～270(mg/kg) |
| In Situ Bioremediation | | groundwater, soil | 530～430,000(μg/L), 5,000～430,00(μg/kg) | 4～22(μg/L) 40～500(μg/kg) |
| Permeable Reactive Barrier | | groundwater | 120～13,000(μg/L) | 0.45～20(μg/L) |
| Phytotechnology | | groundwater | 34(mg/L) | 23(mg/L) |
| Membrane Technologies | Electrodialysis | drinking water, groundwater | 15～130(μg/L) | 11～17(μg/L) |
| | Reverse Osmosis | drinking water, groundwater | 125～2,000(μg/L) | 5～80(μg/L) |

perchlorate 농도 추이 및 상수원의 기타 수질조건 등에 대한 자료의 확보가 선행되어야 하며 기존의 토양/지하수 오염 저감기술 및 상하수처리 시설과의 결합가능성에 대한 분석도 필요할 것으로 사료된다. 정수처리 공정의 경우 최근 오존-활성탄에 의한 고도정수처리공정의 처리 효율 및 유지관리에 문제점이 지적되면서, 막여과공정을 이용한 고도정수처리공정의 개발에 관심이 집중되고 있는 점을 감안한다면,[36] 막분리기술을 이용한 perchlorate의 처리는 기존의 공정과의 결합이 비교적 용이할 수 있을 것으로 예상된다.

향후 국내 다양한 오염매체를 통한 perchlorate 오염 문제를 통합적이고, 효율적으로 관리하기 위해서는 고효율, 저비용의 저감기술 개발을 위한 연구 및 정책적인 대책이 추진되어야 하며 적절한 환경 기준 설정을 위해서는 perchlorate의 인체 및 생태에 미치는 영향 평가 자료 확보를 위한 연구가 추진되어야 할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 광주과학기술원 국제환경연구소(International Environment Research Center)의 지원에 의해 진행되었음.

## 참고문헌

1. Espenson, J. H., The problem and perversity of perchlorate, In Perchlorate in the Environment, Urbansky, E.T.(ed), New York, Kluwer Academic/Plenum, pp. 1～8(2000).
2. Logan, B. E., "Assessing the outlook for perchlorate remediation," *Environ. Sci. Technol.*, A-Pages, **35**, 482A～487A(2001).
3. Moore, A. M., De Leon, C. H., and Young, M., "Rate and extent of aqueous perchlorate removal by iron surfaces," *Environ. Sci. Technol.*, **37**(14), 3189～3198(2003).
4. Sellers, K., Alsop, W., Clough, S., Hoyt, M., Pugh, B., Robb, J., Weeks, K., Perchlorate: Environmental problems and solutions, CRC press, p. 15(2006).
5. Urbansky, E.T., "Perchlorate chemistry: Implications for analysis and remediation," *Remediation J.*, **2**(2), 81～95(1998).
6. Xu, J., Song, Y., Min, B., Steinberg, L., and Logan, B. E., "Microbial degradation of perchlorate: principles and applications," *Environ. Eng. Sci.*, **20**(5), 405～422(2003).
7. U.S. Environmental Protection Agency(US EPA), EPA report, "Perchlorate Environmental Contamination: Toxicological Review and Risk Characterization", external review draft(2002).
8. Logan, B.E., "A review of chlorate and perchlorate respiring microorganisms," *Bioremediation J.*, **2**(2), 69～79(1998).
9. Miller, J. P. and Logan, B. E., "Sustained perchlorate degradation in an autotrophic, gas-phase, packed-bed bioreactor," *Environ. Sci Technol.*, **34**(14), 3018～3022(2000).
10. 대구광역시 보도자료, "낙동강 수계 퍼클로레이트(Perchlorate) 검출-대구시, 원·정수 일일 수질검사 및 정수처리 강화 조치," http://nakdongriver.nier.go.kr/docs/notice/notice_view.html?idx=325&av_pg=15&mcode=10(2006).
11. 우남칠, "US EPA 퍼클로레이트의 예방적 복원 지침서 발표-2006년 1월 26일," 환경지질연구정보센터 지하수 모니터링 연구그룹 연구정보, http://ysgeo.yonsei.ac.kr/ip/ip02-08-11.htm(2006).
12. Kirk, A. B., Martinelango, P. K., Tian, K., Dutta, A., Smith, E. E., and Dasgupta, P. K., "Perchlorate and Iodide in Dairy and Breast Milk," *Environ. Sci. Technol.*, **39**(7), 2011～2017(2005).
13. EPA Integrated Risk Information System(IRIS), "Perchlorate and Perchlorate Salts" IRIS Web Page. http://www.epa.gov/iris/subst/1007.htm Downloaded April(2005).
14. 환경부, "[2006 국감]낙동강 퍼클로레이트 검출에 따른 향후 대책(낙동강청)," http://me.korea.kr/me/jsp/me1_branch.jsp?_action=news_view&_property=pi_sec_1&_id=155144903&currPage=1&_category=(2006)
15. U.S. Environmental Protection Agency(US EPA) "perchlorate treatment technology update," EPA 542-R-05-015 http://www.epa.gov/tio/download/remed/542-r-05-015.

pdf(2005).
16. U.S. Environmental Protection Agency(US EPA) "UCMR (Unregulated Contaminant Monitoring Regulation) for Public Water Systems Revisions; Proposed Rule," http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-WATER/2005/August/Day-22/w16385.htm(2005).
17. U.S. Environmental Protection Agency(US EPA), EPA Region 9 Perchlorate update, http://www.epa.gov/safewater/ccl/perchlorate/pdf/r9699fac.pdf(1999).
18. 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).
19. Coates, J.D., Michaelidou, U. Bruce, R. A., O'Connor, S. M., Crespi, J. N., and Achenbach, L. A., "The ubiquity and diversity of dissimilatory(per)chlorate-reducing bacteria," *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**(12), 5234~5241(1999).
20. Coates, J. D., Michaelidou, U., O'Connor, S.M., Bruce, R.A., and Achenbach, L.A., "The diverse microbiology of(per)chlorate reduction," In Perchlorate in the Environment(E. Urbansky, ed.) New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 257~270(2000).
21. Li, Y. and George, E.J. "Reverse-phase liquid chromatography electrospray ionization tandem mass spectrometry for analysis of perchlorate in water," *J. Chromatogr. A*, **1133**(1-2), 215~220(2006).
22. Seyfferth, A.L. and Parker, D.R., "Determination of low levels of perchlorate in lettuce and spinach using ion chromatography-electrospray ionization mass spectrometry (IC-ES-MS)," *J. Agric. Food. Chem.*, **54**(6), 2012~2017(2006).
23. Wendelken, S.C., Vanatta, L.E., Coleman, D.E., Munch, D.J. "Perchlorate in water via US Environmental Protection Agency Method 331 Determination of method uncertainties, lowest concentration minimum reporting levels, and Hubaux-Vos detection limits in reagent water and simulated drinking water," *J. Chromatogr. A*, **1118**(1), 94~99(2006).
24. Okeke, B. C., Ma, G., Cheng, Q., Losi, M. E., Frankenberger, W. T. Jr. "Development of a perchlorate reductase-based biosensor for real time analysis of perchlorate in water," *J. Microbiol. Methods*, **68**(1), 69~75(2007).
25. Thrash, J. C., Van Trump, J. I., Weber, K. A., Miller, E., Achenbach, L. A., Coates, J. D. "Electrochemical stimulation of microbial perchlorate reduction," *Environ. Sci. Technol.*, **41**(5), 1740~1746(2007).
26. Baier-Anderson, C., "Risk assessment, remedial decisions and the challenge to protect public health: The perchlorate case study(vol. 567, pg. 13, 2006)," *Analytica Chimica Acta*, **581**(2), 388(2007).
27. Siegel, L. "Perchlorate: Science and policy from the public perspective," Abstracts of American Chemical Society, **230**, U1611(2005).
28. 김정화, 김현구, 정일록, 박선구, 김형보, "수돗물의 퍼클로레이트 적정관리 방안 연구," 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2006공동 추계학술발표회 논문집, C51~C57(2006).
29. 윤재경, Gary Amy, 윤여민, 김충환, 안효원, "RO, NF 멤브레인을 이용한 Perchlorate 이온 제거 및 운전조건에 따른 스케일 형성에 관한 연구," 2005 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 1111~1112(2005).
30. Kim, T. H., Jang, M., Park, J. K., "Perchlorate removal by ammonia bifunctionalized mesoporous media," 2005 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문집, pp. 477~478(2005).
31. 홍재화, 장명수, 이일수, 배재호, "MBR을 이용한 perchlorate 및 nitrate의 제거," 2004 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 1116(2004).
32. 안창훈, 정진욱, B. E. Rittmann, "생물막(MBfR) 공정을 이용한 고농도 염분을 함유한 이온 교환수의 질산염과 과염소산염의 저감방안," 2006 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문집, pp. 80~81(2006).
33. Oh, S.Y., Chiu, P.C., Kim, B.J., Cha, D.K., "Enhanced reduction of perchlorate by elemental iron at elevated temperatures," *J. Hazard. Mat.*, **B129**(3), 304~307(2006).
34. Son, A., Lee, J., Chiu, P.C., Kim, B.J., Cha, D.K., "Microbial reduction of perchlorate with zero-valent iron," *Water Res.*, **40**(10), 2027~2032(2006).
35. Yu, X. Y., Amrhein, C., Deshusses, M. A., Matsumoto, M. R., "Perchlorate reduction by autotrophic bacteria attached to zero-valent iron in a flow-through reactor," *Environ. Sci. Technol.*, **41**(3), 990~997(2007).
36. 오희경, "국내정수처리현황과 막여과공정의 도입," 대우건설기술연구원 기술동향브리핑, 제553호(2007).