

지하수의 안전한 음용을 위한 흡착기반 질산성질소 저감화 기술

최경옥 · 서석진 · 고상훈*

세종대학교 식품공학과

Nitrate Nitrogen Reduction Technology for Safe Groundwater Drinking

Kyeong-Ok Choi, Seok Jin Seo, and Sanghoon Ko*

Department of Food Science and Technology, Sejong University

Abstract

Excessive nitrate content in drinking groundwater is one of the sources of nitrate-nitrogen that threatens human health all over the world. Nitrate-nitrogen reduction technology is categorized into membrane filtration, electro-dialysis, ion exchange, adsorption, chemical methods, and biological methods according to the principle of elimination from water. In particular, an adsorption technique is the most popular and common process because of its cost effectiveness, convenience, and effective adsorption. In this review, the application of conventional adsorbents used to reduce nitrate-nitrogen from drinking water is discussed and novel technologies on nitrate-nitrogen removal are introduced. Furthermore, the recent development of novel nitrate-nitrogen adsorbents from biopolymers such as chitosan and agricultural and industrial byproducts is reviewed.

Key words: nitrate nitrogen, reduction technology, groundwater, drinking water

서 론

최근 질소비료, 농약의 사용증가에 따른 영양염류 및 질산성질소 등 유해물질의 증가와 이로 인한 음용 지하수의 수질악화에 따른 농촌지역 주민의 건강 문제가 대두 되고 있다. 전국에 분포하는 지하수의 수질 측정 결과, 전체 지하수(2011년, 총 4,879개 조사)의 수질 기준 초과율은 8.0%였으며, 이 중 농촌 지역 지하수는 16.8%(20/119)의 가장 높은 수질 기준 초과율을 보였다. 농촌 지역 지하수의 주요 수질 기준 부적합 항목은 잔류염소, pH, 총대장균군, 질산성질소 순으로 부적합 비율이 높았으며, 특히 음용/비음용 지하수 중에는 각각 16.2%, 4.6%로 음용 지하수의 수질기준 초과율이 높았다. 이와 같은 조사 결과로부터 국내 지하수 중 농촌지역 음용수로 섭취하는 물의 관리가 필요하며, 특히 잔류염소, 총대장균군, 질산성질소에 대한 저감화가 중요함에 따라 이에 관련된 연구들이 진행되고 있다. 이 중 질산성질소의 인체 위해성이 보고되고 국내외 관련 기준이 마련되면서 음용 지하수에 존재하는 질산성질

소의 양을 저감화하는 기술 개발의 중요성이 주목 받고 있다. Table 1은 음용수에 존재하는 오염물질의 저감화에 사용되는 대표적인 음용수 처리공정의 원리 및 장단점을 나타내고 있다.

질산성질소의 지하수 유입경로에 대해서는 많은 연구 및 조사가 이루어져 왔는데, 자연계에서 진행되는 질소의 순환과정 중 동식물체에서 유래되는 유기성질소태인 단백질 및 그 분해산물인 폴리펩티드 등은 수중의 미생물에 의해서 분해되어 암모니아성 질소를 생성한다. 또한 질소비료, 가축분뇨 등에 포함된 유기성질소태 및 무기성질소태도 분해과정을 거쳐 암모니아성 질소화된다. 암모니아성 질소는 질화작용에 의해서 아질산성질소(NO_2^-)로 산화되고, 추가적인 산화되는 과정을 거쳐 최종적으로 질산성질소(NO_3^-)가 생성된다. U.S. Environmental Protection Agency(EPA)에서는 음용수 내 질산성질소($\text{NO}_2\text{-N}$ 또는 $\text{NO}_3\text{-N}$) 최대 허용 기준을 10 mg/L로 규정하고 있으며, 우리나라, 미국, 일본 등을 비롯한 세계 각국에서는 이 값을 채택하고 있는 나라가 다수이다. 일반적으로 오염되지 않은 지하수에서 질산성질소는 3 mg/L 미만으로 검출되나, 과도한 질소비료의 시비나 처리되지 않은 분뇨에 의해 지하수가 오염되면 지하수 내의 질산성질소 농도가 급격하게 증가한다.

질산성질소는 체내에서 발암성물질인 나이트로아민(nitroamine)으로 환원되어 암을 유발할 수 있으며, 영유아에게는 체내에서 산소전달을 방해하는 청색증의 원인물질

*Corresponding author: Sanghoon Ko, Department of Food Science and Technology, Sejong University 98 Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul, 143-747, Republic of Korea
Tel: +82-2-3408-3260; Fax: +82-2-3408-4319
E-mail: sanghoonko@sejong.ac.kr
Received November 8, 2013; revised December 31, 2013; accepted January 23, 2014

Table 1. Filtration technologies for drinking water treatment.

여과 방법	여과 원리	장점	단점	참고문헌
역삼투 막분리	역삼투 원리	- 중금속 제어 가능 - 높은 효율(99% 이상 제거) - 순수한 물 확보	- 염류 제거 - 가압펌프, 전기설비 필요(고가) - 재생 불가능 - 걸러지는 물의 양이 적음	(Shannon et al., 2008)
활성탄 흡착	물리적, 화학적 흡착 이용	- 운전조작이 용이 - 재사용 가능 - 비교적 긴 사용기간 - 흡착력 우수	- 전처리 시설 필요 - 활성탄 재생에 고비용 발생 - 흡착이 진행될수록 효율 저하 - 낮은 효율	
이온교환수지 흡착	이온화 물질 교환	- 작은 전력으로 유지 - 이온으로 존재하는 물질 제거에 용이	- 이온재생을 위해 역세주기가 빠름 - 전력 공급 장치 추가 설치 - 유지비용 높음 - pH에 따라 흡착률 차이 발생	
한외여과	공극 크기에 의한 물질 여과	- 높은 에너지 효율 - 적용의 유연성 - 경제성	- 탁한 물질이 많을 경우 효율 저하 - 공극 폐색 우려	
전하필터	전하에 의한 물질 제거	- 높은 효율성 - pH 비의존성 - 유지관리가 용이	- 색, 냄새, 맛 등 제거의 어려움 - 압력 조절이 필요 - 고가의 유지관리 비용	

로 알려져 있다(Duncan et al., 1997). 따라서 WHO에서는 고농도 질산성질소(22 mg/L 이상)를 함유하는 음용수의 유아식에 사용을 금지하고 있다.

본 논문에서는 기존에 사용되어 온 대표적인 음용수 내 질산성질소 저감화 기술의 특성 및 장단점을 살펴보고, 음용수 처리에 가장 널리 이용되는 흡착기반 질산성질소 저감화 기술에 대해 더욱 심층적으로 살펴보고자 한다. 특히, 흡착소재의 종류 및 특성에 따른 질산성질소 제거 메커니즘을 살펴보고 흡착소재의 개질 및 새로운 소재 개발을 통한 질산성질소 제거효율 향상 기술에 대해 기술하고자 한다.

음용 지하수의 질산성질소 저감화 기술

음용수에 존재하는 질산성질소의 대표적인 저감화 기술은 역삼투, 전기투석, 이온교환, 흡착, 생물학적 탈질소, 화학적 환원공정으로 분류할 수 있으며, 처리하는 음용수의 양, 음용 원수의 오염도, 처리여건에 따라 적절한 공정을

선택하는 것이 중요하다(Bhatnagar & Sillanpää, 2011). Table 2은 음용수에 존재하는 질산성질소의 저감화에 사용되는 대표적인 처리공정의 원리 및 특징을 나타내고 있다. 투석과 역삼투 공정은 질산성질소를 포함하여 대부분의 오염물질에 대해 높은 제거율을 보이거나, 막 자체의 노화 및 오염, 설치 및 유지관리 비용이 높은 단점이 있다(Sablani et al., 2001). 이온교환공정은 역삼투 공정에서와 같이 질산성질소에 대해 높은 제거율을 보이거나, 이온교환수지의 재생 및 재생 폐액 처리 문제 때문에 그 이용이 제한되고 있다. 흡착공정은 상대적으로 가격이 저렴하고 다양한 물질에 대한 흡착률을 보이기 때문에 그 활용도가 높으나, 질산성질소에 대한 선택적 친화도가 낮으며 제조 조건 및 처리 환경에 따라 제거율이 달라지는 단점이 있다(Ahmad & Normanbhay, 2012). 생물학적 탈질소공정은 질산성질소에 대한 높은 선택성 및 제거 효율을 나타내지만, 사용되는 미생물에 의한 이차 오염 가능성이 높다(Matijū et al.,

Table 2. Nitrate nitrogen reduction technology for groundwater.

저감화 방법	질산성질소 저감화 원리	처리 후 질소 형태	특징	문제점	참고문헌
생물학적 탈질	전자공여체로 유기물을 사용하여 생물학적으로 질산이온 환원	질소가스	- 유지비용 저렴 - 대규모 처리 가능	- 잔존유기물의 제거 어려움 - 다량의 잉여슬러지 생성 - 유지관리 어려움	(Bhatnagar & Sillanpää, 2011)
이온교환	교환수지에 흡착제거	질산성 질소	- 유지비용 저렴 - 신속한 반응속도 - 부산물이 없음 - 유지관리 용이	- 다량의 소금을 재생제로 사용하여 고농도의 폐액발생	
역삼투	역삼투에 의한 질산이온 제거	질산성 질소	- 부산물이 없음 - 유지관리 용이 - 적은 화학물질 사용	- 다른 염류도 제거 - 폐농축액에 고농도 NO ₃ ⁻ 함유 - 고가의 처리비용	
전기투석	전기투석막에 의해 질산이온 제거	질산성 질소	- 부산물이 없음 - 유지관리 용이 - 적은 화학물질 사용	- 다른 염류도 제거 - 폐농축액에 고농도 NO ₃ ⁻ 함유 - 고가의 처리비용	

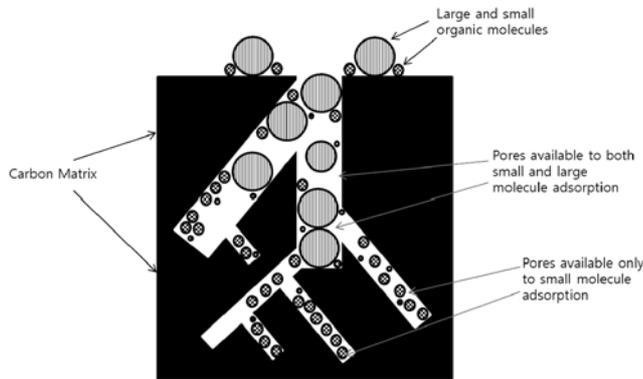


Fig. 1. Adsorption principle of activated carbon for chemicals.

1992). 화학적 환원공정은 비용이 저렴하고 조작성이 간편하나, 처리환경에 따라 질산성질소의 제거율이 달라지며 환원공정에 의한 부산물이 생성되는 단점이 있다(Cheng et al., 1997). WHO에서는 생물학적 탈질공정 및 이온교환공정을 가장 효율적인 질산성질소 제거공정으로 규정하고 있으며, U.S. EPA에서는 이온교환, 역삼투, 전기투석공정을 가장 효율적인 공정으로 규정하고 있다(Bhatnagar & Sillanpää, 2011).

흡착공정을 이용한 음용 지하수 내 질산성질소 저감화 기술

흡착공정에 의한 질산성질소 저감화 기술은 편의성, 간편성, 저비용, 다양한 물질에 대한 흡착력 등의 장점이 있기 때문에 질산성질소 제거기술 연구에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다(Ali & Gupta, 2007). 흡착공정의 메커니즘은 반데르발스 힘, 정전기적 인력, 이온결합 등 다양한 물리적, 화학적, 정전기적 작용의 복합적인 반응에 의해 일어나기 때문에, 흡착소재의 표면 특성, 표면 작용기 특성, 공극의 크기 및 분포, 흡착이 일어나는 환경 조건, 제거하고자 하는 물질의 특성 등에 따라 흡착 효율이 달라진다(Moreno Castilla, 2004)

흡착공정에 의한 질산성질소의 저감화 연구는 기존의 흡착에 사용하는 물질의 제조 방법을 개선하여 질산성질소를 음용수에서 선택적으로 제거하는 기술 개발 등이 진행되고 있으며(Liou et al., 2005; Samatya et al., 2006), 질산성질소를 포집할 수 있는 신규 담체 및 흡착소재 개발에 대한 연구도 수행되고 있다(Chen et al., 2004). 특히, 기존 흡착소재의 질산성질소 흡착 효율 향상, 흡착소재의 재생효율 향상, 비용 절감을 위한 새로운 흡착소재 개발 연구 등이 활발히 수행되고 있으며(Tezuka et al., 2004; Afkhami et al., 2007; Mena-Duran et al., 2007), 흡착에 사용되는 소재의 비용절감을 위하여 상대적으로 가격이 저렴한 흡착소재나 농업 부산물 및 산업 부산물을 활용한 흡착소재의 개발 연구가 이루어지고 있다(Jaafari et al., 2001; Jaafari et

al., 2004; Yu et al., 2007; Rezaee et al., 2008). 또한, 다른 흡착원리의 질산성질소 흡착소재를 복합적으로 적용하여 질산성질소 제거 효율을 향상시키려는 연구도 이루어지고 있다(Back et al., 2003; Sim et al., 2008; Kim & Choi, 2010).

음용수 내 질산성질소 저감화에 가장 널리 연구 또는 이용되는 흡착소재로 활성탄, 탄소나노튜브, 그래핀과 같은 탄소기반 흡착소재(Deb et al., 2012), 점토(Belfiore et al., 1984), 제올라이트(Mažeikiene et al., 2008)가 있으며, 이외에도 키토산과 같은 생체 고분자 물질, 농업 및 산업 부산물 유래 흡착소재 개발연구가 활발히 진행되고 있다(Mishra & Patel, 2009; Patil et al., 2013). 특히, 질산성질소와 친화성이 높은 작용기를 흡착소재 표면에 결합시켜 선택적으로 제거하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Bhatnagar & Sillanpää, 2011).

활성탄을 이용한 질산성질소 저감화 기술

활성탄(activated carbon)은 나무, 토탄, 석유코치 또는 견과류껍질과 같은 탄소가 주 골격이 되는 물질을 높은 온도에서 가열하여 탄화시킨 후 고온 또는 염화아연이나 인산과 같은 활성화 물질을 이용하여 활성화시킨 탄소기반 물질이다. 활성탄은 표면적이 넓고 많은 미세 공극이 존재하며, 활성화 과정 중에 생성되는 표면 카복실기, 수산기 또는 에폭사이드기에 의해 다양한 물리흡착 및 화학흡착 특성을 나타낸다. 활성탄은 다양한 물질에 대한 흡착력이 높아 가장 널리 연구되고 산업적으로 이용되어 온 흡착소재이다. 활성탄의 흡착 효율은 공극의 크기 및 분포, 표면적, 표면 작용기, 탄화 온도, 흡착 온도 및 용액의 pH에 따라 달라진다. Bhatnagar(2008) 등은 활성탄 제조 시 탄화온도가 500°C 일 때 질산성질소 제거 효율이 가장 높고, 그 이상의 온도에서는 오히려 제거 효율이 낮아진다고 보고하였다. 이는 활성탄 제조 시 500°C 이상의 온도에서 탄소 입자들이 서로 밀착하여 응고하며 수축하기 때문에 표면적이 감소하고 공극의 분포가 감소하기 때문인 것으로 평가하였다. 활성탄은 다양한 물질에 대한 흡착력이 뛰어나지만, 음이온에 대한 흡착력은 상대적으로 낮아, 질산성질소(NO_3^-) 제거 효율이 상대적으로 낮다(Bhatnagar & Sillanpää, 2011).

활성탄의 질산성질소 제거 효율 향상을 위해 많은 연구진에 의해 다양한 방법이 제시되었으며, 대부분의 기술이 활성탄의 표면개질(surface modification)을 통한 질산성질소 친화성 향상에 중점을 두고 있다. Mizuta(2004) 등은 대나무 활성탄이 상업적으로 판매되고 있는 활성탄보다 질산성질소 제거율이 더 뛰어나다는 것을 증명하였다. Khan(2011) 등은 ZnCl_2 로 표면개질 된 활성탄이 표면개질 하지 않은 활성탄보다 질산성질소 제거 효율이 높다는 것을 증명하였으며, 이는 활성탄 표면에 존재하는 Zn^{2+} 에 의해 질산성질소에 대한 친화력이 높아졌기 때문으로 분석하였다.

Table 3. Adsorption capacities and parameters for the removal of nitrate by different adsorbents.

흡착소재	최대 흡착량	Nitrate 농도	온도 (°C)	pH	경쟁이온	흡착시간 (h)	참고문헌
Bamboo powder charcoal	1.25 mg/g	0-45 mg/L	10-20	-	-	120	(Mizuta et al., 2004)
ZnCl ₂ modified lignite granular activated carbon	4.4 mg/g	5-150 mg/L	10-45	2-12	Cl ⁻ , CO ₃ ²⁻ , PO ₄ ³⁻	2	(Khan et al., 2011)
Rice husk activated carbon	142.86 mg/g	50-600 mg/L	25	7	-	24	(Ahmadzadeh Tofighy & Mohammadi, 2012)
Sugar beet bagasse activated carbon	300 mg/g	27.55 mg/L	25-45	3-10	-	-	(Demiral & Gündüzoğlu, 2010)
ZnCl ₂ treated coconut granular activated carbon	10.2 mg/g	5-200 mg/L	25	5.5	-	2	(Bhatnagar et al., 2008)
Chitosan coated natural zeolite	0.74 meq/g	10-3100 mg/L	4-20	-	-	72	(Arora et al., 2010)
HDTMA functionalized clinoptilolite	11.4 mg/g	10-300 mg/L	20-60	1.66-11	-	24	(Onyango et al., 2010)
HDTMA functionalized organoclays	14.76 mg/g	100 mg/L	25	5.4	-	17	(Xi et al., 2010)
HDTMA modified UZM-5	18.62 mg/g	30-100 mg/L	25-60	3-11	SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻	12	(Aghaii et al., 2013)
HDTMA, DODMAB modified clinoptilolite and montmorillonite	125 mg/g	160-280 mg/L	30-40	3-11	-	~ 40	(Bhardwaj et al., 2012)
ODTMAC, CTMAB modified organoclay	0.287 meq/g	61.98 mg/L	25	-	SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	~ 24	(Seliem et al., 2013)
Quaternized chitosan beads	~ 70 mg/g	50-1000 mg/g	25	2-12	SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻	~ 2	(Sowmya & Meenakshi, 2013)
NaHSO ₄ conditioned chitosan beads	104 mg/g	500 mg/L	30	3-8	-	24	(Chatterjee et al., 2009)
Chitosan beads	92.1 mg/g	50-1000 mg/L	20-50	3-8	-	24	(Chatterjee & Woo, 2009)

제올라이트 및 점토를 이용한 질산성질소 저감화 기술

제올라이트와 점토는 광물의 일종으로 음용수의 처리 공정에 흡착소재로 널리 이용된다. 제올라이트와 점토는 알루미노 실리케이트를 주요 구성성분으로 하고 있으나 결정 모양 및 구조적인 차이로 인해 다른 특성을 나타낸다. 제올라이트는 다공성의 결정으로 많은 미세 공극을 가지기 때문에 분자량이 작은 이온 물질의 흡착에 효과적이며, 점토는 여러 층이 겹쳐진 층상구조로 이루어져 있기 때문에 제올라이트에 비해 큰 분자를 흡착시키는 성질을 지닌다.

제올라이트나 점토는 이온성 계면활성제나 분자 내 전하를 가지는 폴리머로 표면을 코팅하여 다양한 물질에 대한 흡착 효율을 높일 수 있다. Arora(2010) 등은 천연 제올라이트의 표면에 키토산을 결합시켜 질산성질소 흡착 효율을 향상시켰으며, Onyango(2010) 등은 hexadecyltrimethyl ammonium(HDTMA)를 결합시켜 표면개질된 제올라이트를 제조한 후 다양한 경쟁이온 존재 하에서 질산성질소의 흡착률을 향상시키는 연구를 수행하였다. HDTMA를 이용하여 표면개질한 제올라이트 소재의 질산성질소 흡착량은 표면개질된 제올라이트의 사용량을 증가시킬수록 증가하며 경쟁이온의 존재는 질산성질소의 흡착률을 감소시킨다고 보고하였다. Xi(2010) 등은 점토광물의 일종인 벤토나이트(bentonite), 할로이사이트(halloysite), 카올리나이트(kaolinite)

에 hexadecyltrimethylammonium bromide(HDTMABr)을 결합시킨 후 질산성질소를 흡착시킨 결과, 점토광물의 종류에 따라 다른 흡착률을 보였으며, 표면개질된 벤토나이트에서 질산성질소의 흡착률이 90% 이상으로 가장 높은 질산성질소 흡착률을 보인 것으로 보고하였다. Zhang(2011) 등은 나노영가철로 표면개질시킨 층간가교점토(pillared clay)를 이용하여 질산성질소를 흡착시킨 결과, 표면개질 전보다 더 높은 흡착률을 보였으며, 이는 층간가교점토의 흡착성과 나노영가철의 환원성에 의한 상승효과 때문인 것으로 보고하였다.

키토산을 이용한 질산성질소 저감화 기술

키토산은 D-glucosamine(2-amino-2-deoxy-D-glucose)의 β-(1→4) 중합체로 갑각류 및 곤충 등의 외골격에 존재하는 키틴을 탈아세틸화해서 만드는 탄수화물의 일종이다. 키토산은 생체 고분자 탄수화물로서 가격이 싸고, 다양한 물질에 대한 흡수력 및 흡착력이 뛰어나며, 분자 내 아마인 작용기를 포함하고 있기 때문에 음이온성 물질에 대한 결합력이 크다. 음용수 처리를 위한 흡착공정에서 키토산은 주로 중금속 제거용(Saifuddin & Kumaran, 2005)으로 연구 또는 이용되어 왔으나, 최근에는 중금속 뿐만 아니라 다양한 금속이온(Wan Ngah et al., 2002), 유기물 및 방사

성 물질(Stopa & Yamaura, 2010)에 대한 흡착소재로 연구되고 있다. 키토산 분자 내에 존재하는 아마인 작용기는 낮은 pH에서 양전하를 띄기 때문에 키토산 자체는 훌륭한 음이온성 물질 흡착소재로 작용한다. 음이온성 물질 흡착은 키토산에 존재하는 아마인 작용기의 양전하와 흡착하고자 하는 물질의 음전하 사이의 이온결합(ionic bond)에 의존한다. 키토산은 분자 내에 아마인 작용기의 개수를 증가시키기 위하여 음이온성 계면활성제 또는 유기산을 키토산의 표면에 작용기로 결합시켜 용액 내에 존재하는 양이온성 중금속 및 방사성물질을 높은 효율로 제거할 수 있다.

키토산은 중성 및 알칼리 조건에서 NH_2 상태로 존재하기 때문에 지하수의 평균 pH(약 pH 6-7)를 고려해 봤을 때 음용 지하수에서 질산성질소의 흡착소재로 이용하는 데 큰 제약이 따른다. 몇몇 연구진에 의해 키토산의 수소이온첨가($\text{NH}_2 \rightarrow \text{NH}_3^+$) 반응에 의한 키토산의 질산성질소 제거효율 향상 방안이 개발되었지만 질산성질소 제거 수준은 전반적으로 아직 미미한 실정이다(Chatterjee et al., 2009). Chatterjee & Woo(2009)는 키토산 하이드로겔 비드를 제조하여 pH와 온도변화에 따른 수용액 내 질산성질소 흡착 특성을 연구하였다. 키토산 하이드로겔 비드의 질산성질소 흡착률은 30°C의 pH 3 수용액에서 가장 높았으며, pH와 온도가 증가할수록 감소하였고, 키토산 하이드로겔 비드를 재사용하기 위한 흡착된 질산성질소의 탈착은 pH 12에서 87%로 가장 높게 나타났다고 보고하였다. 또한, sodium bisulfate로 표면개질한 키토산 하이드로겔 비드를 이용하여 질산성질소 흡착률을 평가한 결과, 표면개질한 키토산 하이드로겔 비드가 그렇지 않은 것보다 더 높은 흡착률을 보였다고 보고하였다(Chatterjee et al., 2009). Jaafari(2001) 등은 HCl로 표면개질 한 가교 키토산 겔 비드를 이용하여 수용액 내 질산성질소 제거율을 평가한 결과 약 70%의 질산성질소 제거율을 보였으며, 20 ppm의 질산성질소를 포함하고 있는 지하수를 이용하여 고정 베드 컬럼에서 시뮬레이션 하여 실제 질산성질소 제거율을 평가하였다(Jaafari et al., 2004). 질산성질소 제거율은 컬럼의 지름보다 길이에 영향을 받으며, 지름 0.2 m, 길이 1.5 m의 컬럼 이용 시 5-10 명의 하루 평균 섭취량의 물을 처리할 수 있을 것으로 평가했다.

요 약

본 논문에서는 음용수 내 질산성질소 저감화 기술에 대해 간략히 소개하였으며 그 중 흡착기술을 이용한 질산성질소 저감화 기술에 대해 세부적으로 논의하였다. 또한, 기존 흡착소재의 개질 및 새로운 소재 개발을 통한 질산성질소 제거효율 향상 기술을 간략하게 소개하였다. 본문에서 살펴본 바와 같이 질산성질소 저감화 기술은 제거원리에 따라서 크게 몇 가지로 분류할 수 있으나, 본문에서 언급

되지 않은 새로운 기술이 지속적으로 연구 또는 개발되고 있다. 흡착소재는 가격, 설치 및 유지비가 상대적으로 저렴하고, 설치 및 조작이 간편하며, 정수 규모에 상관없이 쉽게 적용할 수 있기 때문에 수처리 산업에서 가장 널리 이용되고 있다. 활성탄과 같은 탄소소재, 제올라이트나 점토와 같은 실리케이트는 다양한 물질에 대한 흡착력을 보이며 표면개질을 통한 특정 오염원의 제거 향상률이 높기 때문에 오래 전부터 흡착소재로 가장 널리 연구되어 왔으며, 최근에는 키토산과 같은 생체고분자 물질이나 농업 및 산업 폐기물을 재활용한 새로운 소재 개발이 활발히 진행되고 있다. 음용수의 오염 및 소비자들의 물에 대한 불신이 커져가고 있는 시점에서 현재 연구되고 있는 새로운 흡착소재의 개발 및 저렴하고 제거효율이 뛰어난 흡착소재의 개발은 안전한 음용수의 공급을 가능케 하여 국민 건강에 이바지 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 토양지하수오염방지 기술개발사업(GAIA project 2013000550009)에서 지원받았습니다.

참고문헌

- Afkhami A, Madrakian T, Karimi Z. 2007. The effect of acid treatment of carbon cloth on the adsorption of nitrite and nitrate ions. *J. Hazard. Mater.* 144: 427-431.
- Aghaii MD, Pakizeh M, Ahmadpour A. 2013. Synthesis and characterization of modified UZM-5 as adsorbent for nitrate removal from aqueous solution. *Sep. Purif. Technol.* 113: 24-32.
- Ahmad Z, Normanbhay S. 2012. The removal of uranium from aqueous solution. *J. Nuclear Related Technol.* 9: 109-120.
- Ahmadzadeh Tofighy M, Mohammadi T. 2012. Nitrate removal from water using functionalized carbon nanotube sheets. *Chem. Eng. Res. Des.* 90: 1815-1822.
- Ali I, Gupta VK. 2007. Advances in water treatment by adsorption technology. *Nat. Protoc.* 1: 2661-2667.
- Arora M, Eddy NK, Mumford KA, Baba Y, Perera JM, Stevens GW. 2010. Surface modification of natural zeolite by chitosan and its use for nitrate removal in cold regions. *Cold Reg. Sci. Technol.* 62: 92-97.
- Back K, Lee HH, Kim BK, Yang JW. 2003. Characteristics of nitrate removal using micellar-enhanced ultrafiltration. *J. Soil Groundwater Environ.* 8: 36-43.
- Belfiore A, Panciatici G, Lomoro A. 1984. Removal of thorium and uranium from surfaces by attapulgus clay suspensions. *Inorg. Chim. Acta* 94: 159-160.
- Bhardwaj D, Sharma M, Sharma P, Tomar R. 2012. Synthesis and surfactant modification of clinoptilolite and montmorillonite for the removal of nitrate and preparation of slow release nitrogen fertilizer. *J. Hazard. Mater.* 227-228: 292-300.
- Bhatnagar A, Ji M, Choi YH, Jung W, Lee SH, Kim SJ, Lee G, Suk H, Kim HS, Min B, Kim SH, Jeon BH, Kang JW. 2008. Removal of Nitrate from Water by Adsorption onto Zinc Chloride Modified Activated Carbon. *J. Hazard. Mater.* 157: 285-292.

- ride Treated Activated Carbon. *Separ. Sci. Technol.* 43: 886-907.
- Bhatnagar A, Sillanpää M. 2011. A review of emerging adsorbents for nitrate removal from water. *Chem. Eng. J.* 168: 493-504.
- Chatterjee S, Lee DS, Lee MW, Woo SH. 2009. Nitrate removal from aqueous solutions by cross-linked chitosan beads conditioned with sodium bisulfate. *J. Hazard. Mater.* 166: 508-513.
- Chatterjee S, Woo SH. 2009. The removal of nitrate from aqueous solutions by chitosan hydrogel beads. *J. Hazard. Mater.* 164: 1012-1018.
- Chen SS, Hsu HD, Li CW. 2004. A new method to produce nanoscale iron for nitrate removal. *J. Nanopart. Res.* 6: 639-647.
- Cheng IF, Muftikian R, Fernando Q, Korte N. 1997. Reduction of nitrate to ammonia by zero-valent iron. *Chemosphere* 35: 2689-2695.
- Culp GL, Culp RL. 1974. New concepts in water purification. Van Nostrand Reinhold Co., New York, USA.
- Deb A, Ilaiyaraja P, Ponraju D, Venkatraman B. 2012. Diglycolamide functionalized multi-walled carbon nanotubes for removal of uranium from aqueous solution by adsorption. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 291: 877-883.
- Demiral H, Gündüzoğlu G. 2010. Removal of nitrate from aqueous solutions by activated carbon prepared from sugar beet bagasse. *Bioresour. Technol.* 101: 1675-1680.
- Duncan C, Li H, Dykhuizen R, Frazer R, Johnston P, MacKnight G, Smith L, Lamza K, McKenzie H, Batt L, Kelly D, Golden M, Benjamin N, Leifert C. 1997. Protection against oral and gastrointestinal diseases: Importance of dietary nitrate intake, oral nitrate reduction and enterosalivary nitrate circulation. *Comp. Biochem. Phys. A* 118: 939-948.
- Jaafari K, Elmaleh S, Coma J, Benkhouja K. 2001. Equilibrium and kinetics of nitrate removal by protonated cross-linked chitosan. *Water SA* 27: 9-13.
- Jaafari K, Ruiz T, Elmaleh S, Coma J, Benkhouja K. 2004. Simulation of a fixed bed adsorber packed with protonated cross-linked chitosan gel beads to remove nitrate from contaminated water. *Chem. Eng. J.* 99: 153-160.
- Khan MA, Ahn YT, Kumar M, Lee W, Min B, Kim G, Cho DW, Park WB, Jeon BH. 2011. Adsorption studies for the removal of nitrate using modified lignite granular activated carbon. *Sep. Sci. Technol.* 46: 2575-2584.
- Kim JW, Choi GW. 2010. Comparison of nitrate-nitrogen removal characteristics between membrane process and ion exchange process. *J. Korean Soc. Water Sci. Technol.* 18: 55-60.
- Liou YH, Lo SL, Lin CI, Hu CY, Kuan WH, Weng SC. 2005. Methods for accelerating nitrate reduction using zerovalent iron at near-neutral pH: effects of H₂-reducing pretreatment and copper deposition. *Environ. Sci. Technol.* 39: 9643-9648.
- Matějů V, Čížinská S, Krejčí J, Janoch T. 1992. Biological water denitrification—A review. *Enzyme Microb. Tech.* 14: 170-183.
- Mažeikiene A, Valentukevičiene M, Rimeika M, Matuzevičius AB, Daukyns R. 2008. Removal of nitrates and ammonium ions from water using natural sorbent zeolite (clinoptilolite). *J. Environ. Eng. Landsc.* 16: 38-44.
- Mena-Duran CJ, Sun Kou MR, Lopez T, Azamar-Barrios JA, Aguilar DH, Domínguez MI, Odriozola JA, Quintana P. 2007. Nitrate removal using natural clays modified by acid thermoactivation. *Appl. Surf. Sci.* 253: 5762-5766.
- Mishra PC, Patel RK. 2009. Use of agricultural waste for the removal of nitrate-nitrogen from aqueous medium. *J. Environ. Manage.* 90: 519-522.
- Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, Nishihara K, Nakanishi T. 2004. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal. *Bioresour. Technol.* 95: 255-257.
- Moreno Castilla C. 2004. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon* 42: 83-94.
- Onyango M, Masukume M, Ochieng A, Otieno F. 2010. Functionalised natural zeolite and its potential for treating drinking water containing excess amount of nitrate. *Water SA* 36: 655-662.
- Patil ID, Husain M, Rahane VR. 2013. Ground water nitrate removal by using 'Chitosan' as an adsorbent. *IJMER* 3: 346-349.
- Rezaee A, Godini H, Dehestani S, Khavanin A. 2008. Application of impregnated almond shell activated carbon by zinc and zinc sulfate for nitrate removal from water. *Iran. J. Environ. Healt.* 5: 125-130.
- Sablani SS, Goosen MFA, Al-Belushi R, Wilf M. 2001. Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review. *Desalination* 141: 269-289.
- Saifuddin N, Kumaran P. 2005. Removal of heavy metal from industrial wastewater using chitosan coated oil palm shell charcoal. *Electron. J. Biotechn.* 8: 43-53.
- Samatya S, Kabay N, Yüksel Ü, Arda M, Yüksel M. 2006. Removal of nitrate from aqueous solution by nitrate selective ion exchange resins. *React. Funct. Polym.* 66: 1206-1214.
- Seliem MK, Komarneni S, Byrne T, Cannon FS, Shahien MG, Khalil AA, Abd El-Gaid IM. 2013. Removal of nitrate by synthetic organosilicas and organoclay: Kinetic and isotherm studies. *Sep. Purif. Technol.* 110: 181-187.
- Shannon MA, Bohn PW, Elimelech M, Georgiadis JG, Mariñas BJ, Mayes AM. 2008. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature* 452: 301-310.
- Sim JH, Kang SH, Seo HJ. 2008. Study on the improvement of nitrate removal efficiency in multi-step electro-chemical process. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 30: 155-160.
- Sowmya A, Meenakshi S. 2013. An efficient and regenerable quaternary amine modified chitosan beads for the removal of nitrate and phosphate anions. *JECE* 1: 906-915.
- Stopa LCB, Yamaura M. 2010. Uranium removal by chitosan impregnated with magnetite nanoparticles: adsorption and desorption. *Int. J. Nuclear Energy Sci. Tech.* 5: 283-289.
- Tezuka S, Chitrakar R, Sonoda A, Ooi K, Tomida T. 2004. Studies on selective adsorbents for oxo-anions. Nitrate ion-exchange properties of layered double hydroxides with different metal atoms. *Green Chem.* 6: 104-109.
- Wan Ngah WS, Endud CS, Mayanar R. 2002. Removal of copper(II) ions from aqueous solution onto chitosan and cross-linked chitosan beads. *React. Funct. Polym.* 50: 181-190.
- Xi Y, Mallavarapu M, Naidu R. 2010. Preparation, characterization of surfactants modified clay minerals and nitrate adsorption. *Appl. Clay Sci.* 48: 92-96.
- Yu W, Gao BY, Yue WW, Yue QY. 2007. Preparation and utilization of wheat straw anionic sorbent for the removal of nitrate from aqueous solution. *J. Environ. Sci. China* 19: 1305-1310.
- Zhang Y, Li Y, Li J, Hu L, Zheng X. 2011. Enhanced removal of nitrate by a novel composite: Nanoscale zero valent iron supported on pillared clay. *Chem. Eng. J.* 171: 526-531.