Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.22. No3. pp. 307-314 June. 2008

전기투석을 이용한 지하수 중의 질산성질소 제거

The removal of Nitrate-nitrogen from ground water by electrodialysis

민지희 · 김한승*
Ji-Hee Min · Han-Seung Kim*
명지대학교 환경생명공학과

(2008년 3월 4일 접수 ; 2008년 5월 15일 채택)

Abstract

In this study, the effects of applied voltage, solution pH and coexistence of other ions such as sulfate ion (SO_4^{2-}) and chloride ion (Cl^-) were investigated on the removal of nitrate-nitrogen (NO_3^--N) from ground water by electrodialysis. The examined operating conditions were evaluated for optimizing the removal efficiency of NO_3^--N. Real ground water samples taken from a rural area of Yongin city and artificial ones with components similar to the real ground water were tested for the study, which contained NO_3^--N concentration of 17mg/L that exceeds current drinking water quality standard of 10 mg/L. The increase in the removal rate of NO_3^--N was observed as the applied voltage increased from 5V to 30V, while no significant increase in the removal rate appeared at the applied voltage beyond 20V during a given operating time. The removal rate appeared to get lower at both acidic and basic condition, compared to neutral pH. Coexistence of of SO_4^{2-} and Cl^- demanded much longer operating time to achieve a given removal rate or to meet a certain level of treated water concentration. When nitrate ion was combined with $SO_4^{2-}$and Cl^-, the removal rate was reduced by 4.29% and 10.83%, respectively.

Key words : Electrodialysis, Nitrate-nitrogen, Ground water, voltage, pH, Background ions

주 제 어 : 전기투석, 질산성질소, 지하수, pH, 전압, 배경이온

1. 서 론

국내 농촌지역에서 지하수를 음용수로 사용하는 경우 가장 문제가 되는 오염물질은 질산성질소(NO_3^--N)로 알려져 있다. 환경부의 2003년 전국 지하수수질측정망 운영결과에 따르면, 오염우려지역 1,493개 지점 중 74개 지점이 지하수 수질기준을 초과하였으며, 그 중 질산성질소의 기준 초과는 29개 지점(33%)으로 두 번째로 높은 수치를 나타냈다. 질산성질소가 높게 나타나는 원인으로는 지질학적인 요인과 인공비료, 축산폐기물, 하수관거의 불량, 생활쓰레기 등의 인위적인 요인에 기인하는 것으로 보고되고 있다. 지하수에 있어서 오염문제가 심각한 이유는 일단 질산염에 노출되면 지표에서 질산염 부하가 실질적으로 감소할 지라도 수십 년간 오염이 남아있게 된다는 점 때문이다.(김, 2005; Elmidaoui et al., 2002)

국내의 현행 먹는 물 수질기준에 의하면 질산성질소는 물

*Corresponding author Tel: +82-31-330-6695, Fax: +82-31-336-6336, E-mail: kimhs210@mju.ac.kr (Kim, H. S.)

1리터당 10 밀리그램 이하로 설정되어있다(화학공업일보, 2000). 질산이온은 소화기 내에서의 환원작용에 의하여 아질산이온으로 변형되어 유아가 섭취할 경우에는 methemoglobinemia를 유발시키는 것으로 보고되고 있으며, 질산이온과 아질산이온은 발암물질로 의심되고 있는 N-nitroso compounds를 형성할 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다. 질산성질소 농도가 높은 물을 마시면 호흡성 부전을 일으킬 가능성이 있는데, 지하수를 음용수로 이용하는 경우가 많은 유럽에서는 지하수 음용에 의한 유아 사망이 보고된 사례가 있다.

수중에 존재하는 질산성질소를 제거하는 방법으로는 이온교환, 생물학적 탈질, 화학적 환원법, 역삼투 미세여과로서의 멤브레인 탈염 및 전기투석과 같은 방법들이 가장 일반적인 방법으로 보고되고 있다. 생물학적 탈질법은 많은 양의 소독제 첨가에 따른 음용수의 안정성 문제가 있으며, 이온교환법은 음이온 교환수지를 사용할 경우 지하수에 존재하는 2가의 황산염이온이 질산성질소보다 먼저 교환된다는 점과 수지의 재생에 많은 양의 NaCl이 소모되며 재생폐액이 발생한다는 단점을 가지고 있다. 재생폐액은 고농도의 질산성질소와 염분을 함유하기 때문에 처리가 어렵고, 적절히 처분되지 않고 방류될 경우 토양오염과 수계의 부영양화 요인이 될 수 있다(배, 2000).

지하수의 질산성질소 제거에 효과적인 방법으로 최근 전기투석법과 역삼투법이 고려되고 있다. 두 공정 모두 수질기준을 완벽히 달성할 수 있을 만큼 안정적인 처리가 가능하나 역삼투막법의 경우 고압이 요구되며, 전기투석법에 비해 상대적으로 높은 막오염을 일으키는 것으로 보고되고 있다(del Pino and Durham, 1999). 반면, 전기투석공정은 소규모 처리시설의 경우, 설치 및 운전이 용이하고 초기투자비용이 비교적 저렴한 것으로 나타났다. 또한 전기투석법은 제거된 염의 양에 비례하여 전력소모량이 증가하는 반면 역삼투법은 투과된 용매의 양에 비례하여 전력소모량이 증가하므로, 염의 농도가 낮은 음용수와 같은 용액에서는 상대적으로 전기투석법이 역삼투법보다 매우 경제적인 것으로 알려져 있다(Eyal and Kedem, 1988; Martin et al., 1995; Oldani et al., 1992). 이러한 점에 비추어 볼 때, 향후 농촌지역의 소규모 지하수 처리에 있어 전기투석이 효과적인 방안으로 적용될 것으로 판단된다. 다만, 전기투석공정 역시 유·무기물에 의한 막오염으로 인한 막전이수 감소와 전력비 증가라는 문제점을 안고 있으므로, 이에 대한 해결책 제시가 필요하다고 볼 수 있다(장 등, 2006).

본 연구에서는 경기도 용인시 관내 농촌지역에서 질산성질소 농도가 먹는물 수질기준 이상으로 측정된 지점의 지하수 및 인공 지하수를 대상으로 전기투석법을 이용한 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 전기투석의 적용에 있어 전압과 pH의 변화, 공존이온이 운전효율에 미치는 영향 및 효율적인 질산성질소 제거를 위한 최적 운전조건에 대하여 검토하였다.

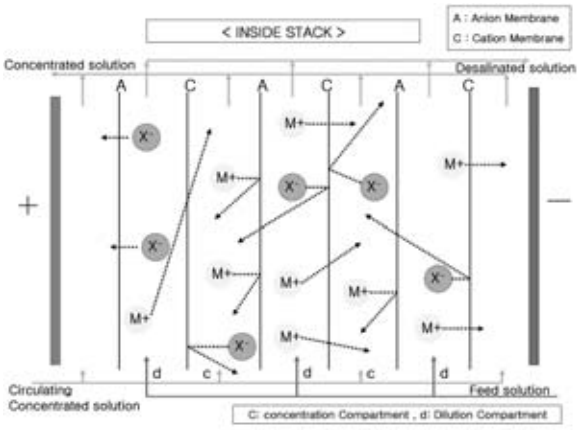


Fig. 1. Principals of electrodialyzer.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 전기투석원리

전기투석은 전위차를 구동력으로 하여 이온을 이동시키고 양이온 교환막과 음이온 교환막을 통한 이온의 선택적인 전기적 이동에 기초하여 전해질 용액에서 이온을 농축 및 희석시키는 공정이다(심 등, 2006). **Fig.1**에 전기투석의 기본적인 원리를 나타낸다. 양이온교환막(C막)은 양이온을 선택적으로 투과시키고 음이온은 투과하기 어렵게 하며, 음이온교환막(A막)은 음이온을 투과시키고 양이온은 투과하기 어렵게 한다. 일반적으로 전해질 용액, 예를 들면 NaCl 용액 중에 전극을 설치하고 한쪽을 양극, 다른 한쪽을 음극으로 하여 그 사이에 전위구배를 주면 Na^+는 음극방향으로 Cl^-는 양극방향으로 이동한다. 양이온인 Na^+는 C막을 투과하여 옆의 실로 이동할 수 있지만 A막을 투과하기는 어렵다. 마찬가지로 음이온인 Cl^-는 A막을 투과하여 옆의 실로 이동하지만 C막의 투과는 어렵게 된다. 따라서 **Fig.1**에 보인 것처럼 제 1실과 3실의 용액은 점점 희석이 되며, 제 2실과 4실은 점점 Na^+와 Cl^-가 축적되어 농도가 높아지게 된다(연 등, 1999). 이와 같은 원리를 통해 지하수중의 질산성질소 이외에 다른 이온성분 또한 제거가 가능하다. 일반적으로 이온교환막을 이용한 전기투석시스템에 영향을 주는 인자로는 투석온도, stack 전압, 탈염액의 유속, 탈염율 등이 있다(이 등, 2000).

2.2. 전기투석장치

본 연구에서 사용한 전기투석장치는 Innomeditech Inc.의 Model PS5-ED1-20이다. Stack은 Tokuyama Co.의

상하수도학회지, 논문
22권 3호, pp. 307-314, 6월. 2008

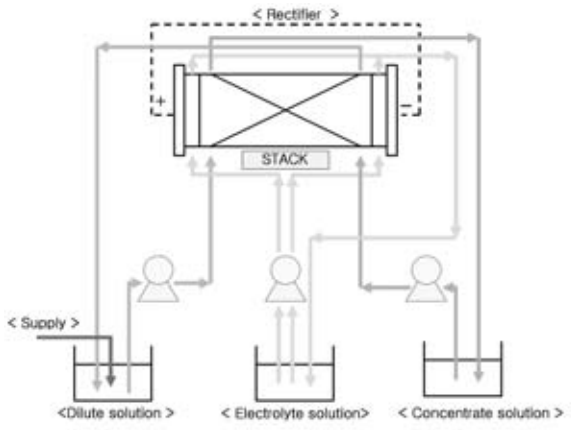


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

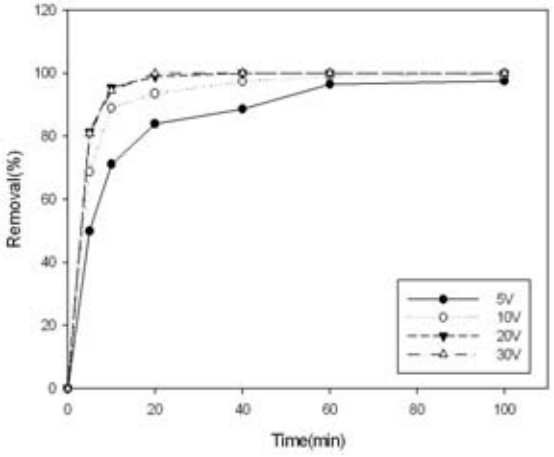
Table 1. Stack design

Description of equipmentIon		
exchange membrane	Cation exchange membrane	CMX (22 Sheets/set)
	Anion exchange membrane	AMX (20 sheets/set)
	Size of membrane	100*142
	Effective area	50cm²/Cell pair
	Cell pairs	20Cell pair/set
	Total effective area	0.1m²/set
Parameters of functioning		
Current max(A)		10
Voltage max(V)		30
Dilute compartment(l/min)		3.66
Concentrate compartment (l/min)		3.66
Electrode compartment (l/min)	Anode	2.64
	Cathode	2.64

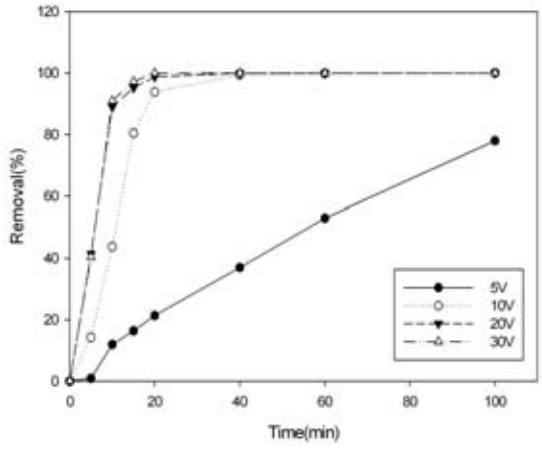
Table 2. Characteristics of the used membranes

Grade	CMX	AMX
Type	Strongly acidic cation permeable	Strongly basic anion permeable
Characteristics	High mechanical strength (Na-form)	High mechanical strength (Cl-form)
Electric Resistance	3.0	2.4
Burst Strength	≧0.40	≧0.25
Thickness	0.17	0.14
Application	Demineralization of whey Purification of organics Concentration of inorganics Demineralization of sucrose Desalination of ground water	Demineralization if whey Purification of organics Concentration of inorganics

NEOSEPTA CMX과 AMX membrane으로 구성되어 있으며 stack과 membrane에 대한 상세한 특성은 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 또한 전기투석기기 운전 시 요구되는 sample solution에 대한 조건은 멤브레인 제조회사의 가이드라인을 통하여 얻어진 값이며 Table 3에 나타내었고, 전기투석장치의 구성은 Fig. 2에 제시하였다.



(a) synthetic water



(b) groundwater

Fig. 3. Effect of voltage in the removal rate of nitrate in synthetic water and groundwater.

2.3. 실험방법

원수는 경기도 용인시에서 채취한 실제 지하수를 사용하였으며, 채취한 시료의 성상은 Table 4와 같다. 수질조사 결과를 토대로 지하수 중에 먹는 물 수질기준 이상으로 함유되어있는 NO_3^--N와 수중에 높은 농도로 존재하는 이온인 SO_4^{2-} 및 Cl^-을 선정하여, 이 성분이 함유된 인공 원수를 제

Table 3. Sample solution quality required for electrodialyzer operation

Item	Rangel
Temperature	15~40℃
Ca^{2+}	less than 30mg/l
pH	4~9
Fe^{2+}	less than 0.1mg/l
SO_4^{2-}	less than 50mg/l
SiO_2	less than 20mg/l
HCO_3^-	less than 20mg/l

조하여 실험에 사용하였다. 실험에 사용된 NO_3^-와 SO_4^{2-} 및 Cl^-은 $NaNO_3$과 Na_2SO_4, NaCl로 조제하였다. 전기투석 장치의 전극액(electrolyte solu tion)으로 1% NaSO4를 1.7L 사용하였고, 농축조(Concentration Compartment)와 희석조(Dilution Compartment)에는 전압의 변화를 통한 NO_3^--N의 제거를 알아보기 위해 16mg/l의 NO_3^--N를 1.7L 넣어 지하수와 동일한 pH로 조절 후 5, 10, 20, 30V의 전압에서 운전하면서 제거율을 측정하였다. 또한 실제 지하수에 대해서도 동일한 범위의 전압에서 수중의 NO_3^--N의 제거율을 확인하였다. 한편, NO_3^--N의 제거에 있어 pH의 영향을 알아보기 위하여 0.1%의 NaOH와 HCl을 사용하여 pH를 4, 6, 9로 변화시켜가면서, 전압 10V에서 실험하였다.

공존이온의 영향을 알아보기 위하여 먼저 질산성질소와 동일한 음이온성분에 대하여 실험하였다. SO_4^{2-}, Cl^-의 영향을 살펴보고자 하였으며 두 이온의 농도는 실제 지하수와 동일하게 50mg/l, 16mg/l로 제조하였다. 또한 지하수에 함유된 이온들의 농도가 항상 동일하지 않기 때문에 NO_3^--N의 제거에 영향을 미치는 이온에 대하여 알아보고자 세 이온의 농도를 70mg/l로 제조하여 실험하였다. 70mg/l는 NO_3^--N의 농도를 질산이온으로 환산한 값이다. 실제 지하수와 동일한 pH로 인공 지하수를 제조하여, 전압 10V에서 실험을 하였으며, 실제 지하수 실험을 통해 결과를 비교하였다. 실험시간은 전기전도도의 변화가 없어지는 시점인 100분으로 하였다.

음이온의 정량분석은 이온크로마토그래피(Ion Chromatography IC, Alltech)를 사용하였다. 측정방법은 0.45㎛필터링 한 후 Alltech Allsep Anion 7㎛컬럼을 사용하여 0.85mM Na_2CO_3이동상을 1.0ml/min의 속도로 흘려 측정하였다.

3. 실험결과

3.1. 전압변화를 통한 NO_3^--N의 제거

전압변화를 통한 NO_3^--N의 제거 실험에서는 실제 지하수와 동일한 농도의 NO_3^--N만 존재하는 인공 원수를 제조하여 각각의 전압에 따른 제거율을 확인하였고, 또한 실제 지하수로 전압변화에 따른 제거율을 확인하였다. 그 결과를 Table.5와 Fig.3에 나타내었다.

Table 4. Physicochemical characteristics of the studied groundwater

Parameters	Groundwater(July)	Average annual	Drinking Water Regulation
Conductivity	320㎲/cm	–	–
pH	6.5	6.45	5.8~8.5
Temperature	22~25℃	–	–
Hardness	88mg/l	87.8	≤ 300mg/l
Turbidity	0.26NTU	0.43	≤ 0.5NTU
Cl^-	16mg/l	21	≤ 250mg/l
NO_3^--N	16mg/l	16.7	≤ 10mg/l
SO_4^{2-}	50mg/l	47	≤ 200mg/l

Table 5. Effect of voltage in the removal rate of nitrate in synthetic water and ground water

Time	NO_3^--N(mg/l)			
(min)	5v	10v	20v	30v
0	16	16	16	16
5	8.02	5.01	2.96	3.06
10	4.61	1.77	0.73	0.87
20	2.57	1.03	0.16	0.01
40	1.82	0.4	0.00	0.00
60	0.55	0.17	0.00	0.00
100	0.38	0.	0.00	0.00

(a) synthetic water

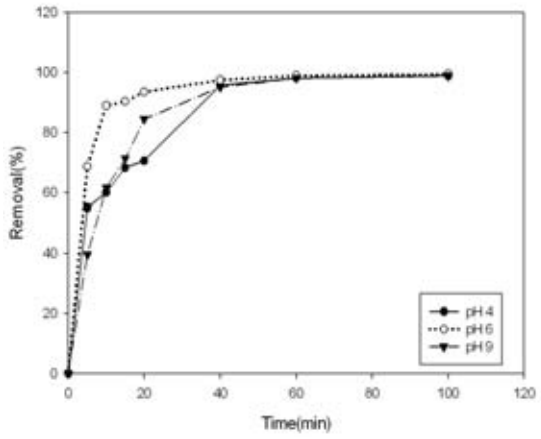
Time	NO_3^--N(mg/l)			
(min)	5v	10v	20v	30v
0	16	16	16	16
5	15.85	13.72	9.37	9.53
10	14.09	9	1.76	1.44
20	12.58	0.98	0.19	0
40	10.08	0.99	0	0
60	7.52	0.03	0	0
100	3.52	0	0	0

(b) groundwater

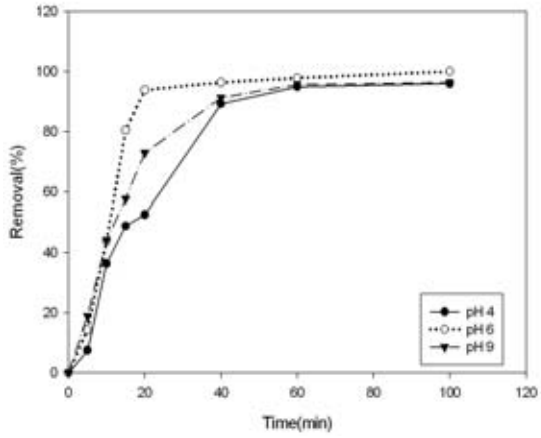
실험 결과 실제 지하수와 NO_3^--N만 함유한 인공 지하수 모두 저압 5V에서 낮은 효율을 보였다. 먹는물 수질기준을 만족하기 위해서는 인공 지하수의 경우 5분을 전후하여 만족하였지만 실제지하수의 경우 40분이상의 운전이 요구되었다. 특히 실제 지하수의 경우 더욱 낮은 제거율을 보였는데, 이와 같은 결과는 지하수 중에 다른 이온 성분들이 공존하기 때문이며 인공 지하수의 경우 탁도와 경도 등의 인자들을 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단되었다. 10V이상의 전압에서는, 제거율의 증가가 둔화되는 것을 관찰할 수 있었다. 특히 20V이상에서는 전압의 증가에 의한 제거율의 변화는 크게 나타나지 않았다. 이 결과를 바탕으로 20V가 적정 최대 전압이라는 것을 알 수 있었다. 10V에서도 고효율의 제거율을 보였지만, 20V와 비교하여 볼 때 운전시간의 차이가 있어 추후 시간과 전압과의 관계를 고려해 적정 전압을 선정해야 할 것으로 판단된다.

Elmidaoui et al.(2002)은 약 30mg/l의 NO_3^--N를 함유한 Morocco의 지하수를 대상으로 전기투석을 적용한 결과, 적용 전압 5V와 10V에서 20분 동안 운전하였을 때, 각각 70% 및 90%의 제거율이 나타나는 것을 보고하였다. 경제적인 측면에서는 5V의 경우 0.044Kwh/m^3, 10V일때는 0.107Kwh/m^3의 전력을 소비하였다. 이 같은 경우 85%이상의 NO_3^--N를 제거할 때 운전비용은 US$0.1/$m^3$을 넘지 않은 것으로 나타났다.

상하수도학회지, 논문
22권 3호, pp. 307-314, 6월. 2008



(a) synthetic water



(b) groundwater

Fig. 5. Effect of pH in removing nitrate in (a) synthetic water, and (b) groundwater.

3.2. pH의 변화에 따른 NO_3^--N의 제거

원수 중 NO_3^--N의 농도를 16mg/l로 제조하여 pH 4, 6, 9에서 10V로 운전하였을 때 NO_3^--N의 제거율 변화와 실제지하수의 NO_3^--N의 제거 결과를 **Fig. 5**에 나타내었다. 실제 지하수와 인공 지하수 모두 실제 지하수와 같은 pH6에서 가장 제거효율이 높게 나타났고, 4와 9일때 제거율이 감소되는 것을 관찰 할 수 있었다. 염기 조건일 때에는, pH 조정을 위해 첨가한 NaOH가 해리되어 수중에 증가된 질산성 질소와 같은 음이온을 띄는 hydroxyl group이 질산성질소의 제거에 방해인자로 작용하였다고 판단된다. 그리고 산성조건일 때에는 마찬가지로 pH 조정을 위해 HCl을 넣어 주었기 때문에 HCl이 해리되어 수중의 다량의 chlorine ion과 hydrogen ion이 증가되어 질산이온의 제거에 영향을 주는 것으로 판단되었다. 따라서 pH가 중성일 때 NO_3^--N의 제거효율이 가장 높을 것으로 사료된다.

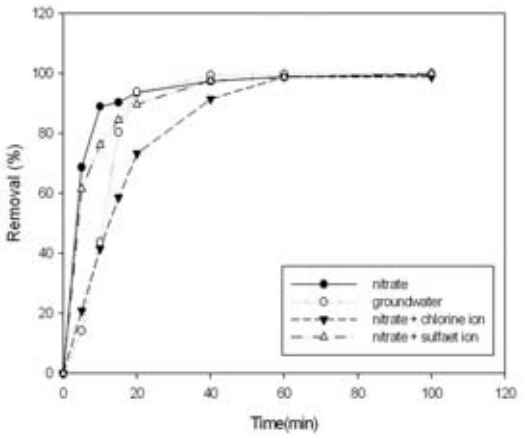
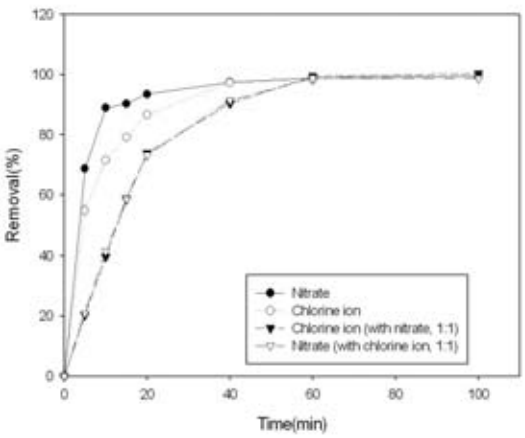
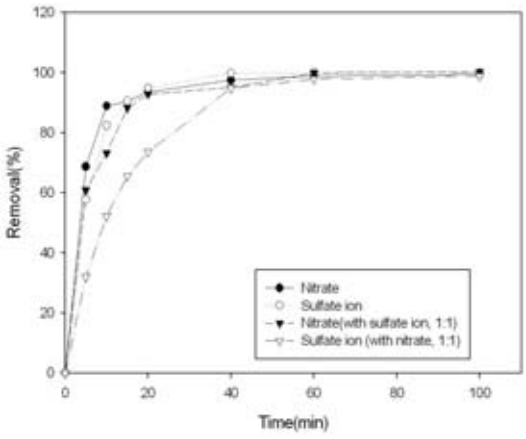


Fig. 6. Comparison of nitrate removal in the presence of other ions.



(a) nitrate와 chlorine ion



(b) nitrate와 sulfate ion

Fig. 7. Effect of (a) chlorine ion and (b) sulfate ion in nitrate removal.
(concentration of other ions is the same as nitrate ion)

3.3 공존 이온 성분에 의한 NO_3^--N의 제거

공존 이온 성분에 의한 NO_3^--N의 제거율의 미치는 영향에 대하여 검토하였다. NO_3^--N가 단독으로 존재하는 인공

지하수와 SO_4^{2-} 및 Cl^-이 각각 공존하는 인공 지하수, 그리고 실제 지하수를 동일한 조건에서 실험하였으며, 실험 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 실제 지하수의 NO_3^--N 제거율과 NO_3^--N만 함유한 인공 지하수의 제거율에 차이가 나타남을 알 수 있었다. 실제 지하수의 경우가 훨씬 낮은 제거율을 나타냈는데 원인으로는 지하수 중에 존재하는 이온 성분에 의한 영향이라 판단되었다. 지하수 중에 존재하는 NO_3^--N와 같은 음이온 성분인 SO_4^{2-}, Cl^-을 실제 지하수와 동일하게 하여 실험한 결과 이온들의 영향에 다소 차이는 있지만, NO_3^--N가 단독으로 존재할 경우보다 두 이온과 공존할 경우 제거율이 감소한다는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과로부터 공존 음이온들의 영향에 의해 NO_3^--N 제거율이 감소한다는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 지하수 중에는 각각의 이온들이 다양한 농도로 존재하므로 제거율의 차이가 농도에 의한 것인지 공존 이온의 종류에 의한 것인지 명확히 할 필요가 있다. 이를 분명히 구별하기 위해 세 이온의 농도를 동일하게 하여 실험하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

질산이온과 Cl^-이 공존할 경우, NO_3^--N이 단독으로 존재할 때 보다 제거율이 감소하는 것을 확인하였고, Cl^-도 NO_3^--N에 의해 제거율에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. SO_4^{2-}의 경우에도 마찬가지로 NO_3^--N이 혼자 존재할 때보다 제거율이 감소하였으며, 또한 SO_4^{2-}은 NO_3^--N에 의해서 제거율에 영향을 받으며 단독으로 존재할 경우보다 제거율이 현저히 떨어짐 알 수 있었다. 이것은 NO_3^--N과 공존함으로 인해 SO_4^{2-}보다 NO_3^--N이 우선제거 되었기 때문이라 판단된다. 각 그래프에서 질산성 질소 이온이 각각의 이온들과 공존할 경우 수질기준 도달 시간에 대한 제거율을 계산해보면, SO_4^{2-}과 공존할 때에는 약 4.29%, Cl^-과 공존 시에는 약 10.83% 감소하였다. 제거율면에서는 SO_4^{2-}보다 Cl^-이 NO_3^--N의 제거에 더 많은 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 2가의 음이온인 SO_4^{2-}은 1가인NO_3^-보다 우선제거 되지 않으며, 동일한 1가 음이온인 Cl^-는 NO_3^-과 비슷하게 음이온 교환막을 통과해 제거되기 때문이다.

지하수 중의 질산성질소를 제거하고자한 다른 논문에서도 이와 비슷한 결과를 보였다. 지하수 중의 NO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-을 동일한 농도로 제거실험을 한 결과 NO_3^- 〉 Cl^- 〉 HCO_3^- 〉SO_4^{2-} 의 순서로 제거됨을 확인하였고 본 연구와 비슷한 실험결과를 나타내었다(Elmidaoui et al., 2001).

4. 결 론

본 연구에서는 NO_3^--N 농도가 먹는 물 수질기준을 초과하는 지하수에 대하여 전기투석을 이용한 실험을 하였으며, 전압의 변화, pH의 변화, 공존이온이 질산성질소 제거에 미치는 영향을 실험을 통하여 알아보았다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 적용전압의 변화에 따른 실험에서, 20V까지는 전압의 증가에 의한 제거율의 증가가 나타났으나, 20V이상에서는 제거율의 증가가 보이지 않았다. 따라서, 전기투석의 효율적인 적용에 있어서 적정 전압이 존재할 것으로 판단되며, 운전시간과 목표 제거율을 고려하여 적용전압을 설정할 필요가 있는 것으로 판단된다.
2) 실제 지하수 및 인공 원수를 대상으로 pH를 변화시켜 실험해 본 결과, NO_3^--N의 제거율은 중성 조건에서 비해 산성과 염기성의 조건에서 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 중성에서 벗어날수록 이온이 막을 투과하는 경향이 높아지기 때문으로 판단되며, 따라서 전기투석의 적용시 지하수의 pH가 중성에서 벗어날수록 제거율은 상대적으로 낮아질 수 있음을 나타낸다.
3) NO_3^--N와 같은 음전하를 띤 SO_4^{2-}와 Cl^-를 첨가하여 실험한 결과, 먹는물 수질기준 도달시간에 도달하기 위해서는 더 많은 운전시간이 소요되었다. 이는 전기투석에 있어서 공존 이온들에 의해 지하수에서의 NO_3^--N 제거율이 감소됨을 나타내는 것으로, 각각의 이온들과 공존할 경우 수질기준 도달 시간에 대한 제거율은 SO_4^{2-}과 공존할 때에는 약 4.29%, Cl^-과 공존 시에는 약 10.83%의 감소를 보였다. 한편, SO_4^{2-}보다 Cl^-이 NO_3^--N의 제거에 더 많은 영향을 주는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 전기투석법을 이용한 지하수의 질산성질소의 제거에 있어서, 운전조건의 최적화를 위해서는 대상지하수의 수질 특성을 명확히 파악하는 것이 무엇보다 중요한 것임을 알 수 있었다.

KSWW

사 사

본 연구는 2007년 경기지역환경기술개발센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김현정 (2005) "지하수 중 질산성질소의 연차적변화 및 분포특성", ***보건환경연구원보***, **15권**, p190-196
2. 배병욱 (2000) "지하수 내 질산성질소 제거를 위한 이온교환공

상하수도학회지, 논문
22권 3호, pp. 307-314, 6월. 2008

정의 적용", ***대전대학교 산업기술연구소 논문집***, **11**(2), p149-159

3. 심주현, 서형준, 서재희, 김대환 (2006) "이온교환과 전기투석을 이용한 니켈회수의 비교연구", ***대한환경공학회지***, **28**(6), p640-647
4. 연경호, 문승현 (1999) "전기투석과 전기탈이온법에 의한 음용수에서의 질산성질소 제거", ***대한환경공학회지***, **21**(1), p87-99
5. 이병철, 박재규 (2000) "***전기투석에 의한 금속이온 분리에 관한 연구***", 홍익대 산업기술, p643-650
6. 장대익, 추광호, 김은수, 남미연, 안재희, 장리리, 정지현, 김학석 (2006) "하수처리수 재이용을 위한 전기투석공정에서의 막오염 현상 연구", ***한국막학회 2006년 춘계 학술발표회***, p89-92
7. 화학공업일보 (2000) "질산성질소제거 시스템개발", ***해외과학기술동향***, 432호
8. del Pino, M. P. and Durham, B (1999) "Wastewater reuse through dual-membrane processes: opportunities for sustainable water resources", ***Desalination***, **124**, p271-277
9. Elmidaoui, A., Elhannouni, F., Menkouchi Sahli, M. A., Chay, L., Elabbassi, H., Hafsi, M. and Largeteau, D. (2001) "Pollution of nitrate in Moroccan ground water: removal by electrodialysis", ***Desalination***, **136**, p325-332
10. Elmidaoui, A., Elhannouni, F., Taky, M., Chay, L., Menkouchi Sahli, M. A., Echihabi, L. and Hafsi, M. (2002) "Optimization of nitrate removal operation from ground water by electrodialysis", ***Separation and Purification Technology***, **29**, p235-244
11. Eyal, A. and Kedem (1988) "Nitrate-selective anion exchange membrane", ***J. of membrane Sci.***, **38**, p101-111
12. Martin, C., Kartinen Jr., E. O. and Condon, J. (1995) "Examination of processes for multiple contaminant removal from groundwater", ***Desalination***, **102**, p35-45
13. Oldami, M., Killer, E. and Miguel, A. and Schock, G. (1992) "On the nitrate and monovalent cation selectivity of ion exchange membranes used in drinking water purification", ***J. of Membrane Sci.***, **75**, p265-275