

비료 유도용액의 정삼투를 이용한 하수처리수의 재이용 - 유도용액의 성능 평가 -

김 승 건 · 이 호 원[†]

제주대학교 생명화학공학과

(2016년 3월 29일 접수, 2016년 4월 11일 수정, 2016년 4월 15일 채택)

Water Reuse of Sewage Discharge Water Using Fertilizer Drawn Forward Osmosis - Evaluating the Performance of Draw Solution -

Seung-Geon Kim and Ho-Won Lee[†]

Department of Chemical and Biological Engineering, Jeju National University, Jejudaehakro 102, Jeju 63243, Republic of Korea
(Received March 29, 2016, Revised April 11, 2016, Accepted April 15, 2016)

요 약: 비료를 유도용액으로 사용하는 정삼투를 하수처리수(2차 침전지 유출수)의 재이용에 적용하여 유도용액의 성능을 평가하였다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 비료 중에서 삼투압, 용해도 및 pH 등을 고려하여 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl , KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , NH_4HCO_3 및 KHCO_3 을 유도용액 후보군으로 선정하고, 수투과선속 및 역용질선속을 측정하여 유도용액의 성능을 평가하였다. 평균 수투과선속은 $\text{KCl} > \text{NH}_4\text{Cl} > \text{NH}_4\text{NO}_3 > \text{KNO}_3 > \text{KHCO}_3 > \text{NH}_4\text{HCO}_3 > \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 > (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 의 순서로 나타났으며, KCl 을 유도용액으로 사용하였을 때, 평균 수투과선속은 13.49 LMH이었다. 하수처리장 2차 침전지 유출수의 삼투압은 탈이온수의 삼투압에 비해 큰 차이가 없었다. 역용질선속은 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 < \text{NH}_4\text{Cl} < (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 < \text{KNO}_3 < \text{NH}_4\text{HCO}_3 < \text{NH}_4\text{NO}_3$ 의 순서로 나타났으며, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 를 유도용액으로 사용하였을 때, 역용질선속은 $4.96 \times 10^{-3} \text{ mmol/m}^2 \cdot \text{sec}$ 이었다.

Abstract: This study is to evaluate the performance of draw solutions in the water reuse of sewage discharge water using fertilizer drawn forward osmosis. Feed water used in all experiments was the effluent from secondary sedimentation tank in activated sludge process. Considering osmotic pressure, solubility, and pH, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl , KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , NH_4HCO_3 , and KHCO_3 were screened from a comprehensive lists of fertilizer. Their performances were evaluated in terms of water permeate flux and reverse solute flux. KCl showed the highest average water flux followed by NH_4Cl , NH_4NO_3 , KNO_3 , KHCO_3 , NH_4HCO_3 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, and $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Using KCl as draw solution, the average water permeate flux was 13.49 LMH. There was no big difference in osmotic pressure between the effluent from secondary sedimentation tank and deionized water. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ showed the lowest reverse solute flux followed by NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, KNO_3 , NH_4HCO_3 , and NH_4NO_3 . Using $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ as draw solution, the reverse solute flux was $4.96 \times 10^{-3} \text{ mmol/m}^2 \cdot \text{sec}$.

Keywords: fertilizer drawn forward osmosis, draw solutions, water reuse, sewage discharge water

1. 서 론

재이용수는 물 공급의 지역적인 불균형을 완화할 수 있는 대체 수자원으로 적극 활용할 수 있고, 특히 신규

수자원 확보의 사회적, 경제적인 어려운 여건에 따라 대체 수자원 개발의 필요성이 대두되고 있으며 연중 사용량이 일정한 생활하수를 재활용하여 부족한 수자원을 확보하는 것이 중요하다. 세계 수자원 수요량의 2/3 정도는 농업용수로 사용되고 있다. 하수 재이용 분야에

[†]Corresponding author(e-mail: hwlee@jeju.ac.kr, <http://orcid.org/0000-0003-4013-5893>)

서도 농업용수로의 재이용이 가장 중요한 부분을 차지하며, 많은 나라에서 생활하수를 처리하여 관개용수로 재이용하려는 노력을 하고 있다[1,2].

하수를 재이용하기 위해서는 염화물을 제거해야 하는데, 염화물을 제거하기 위해서 현재 주로 사용되고 있는 방법은 역삼투 공정(reverse osmosis, RO)이다. 그러나 역삼투 공정은 상당한 고압이 필요하고, 이로 인해 역삼투 공정을 이용한 하수처리 재이용은 설치비와 운전비용이 많이 소요되어 현실적으로 적용에 어려움이 많다. 이에 반해 정삼투 공정(forward osmosis, FO)은 막을 사이에 두고 공급용액과 유도용액 간의 삼투압차를 이용하여 담수(재이용수)를 생산하는 기술로서, 고압이 불필요하여 에너지 비용과 막오염이 크게 절감되어 앞으로 역삼투 공정을 대체할 수 있는 신기술로 판단되고 있다[3-6].

그러나 정삼투 기술의 실질적인 적용에서의 가장 큰 문제는 담수를 계속적으로 생산하기 위해서 희석된 유도용액으로부터 유도용질을 분리하는 추가 공정이 필요하다는 것이다[7-10]. 반면에 비료를 유도용액으로 하는 정삼투 기술을 이용한 하수처리수 재이용 공정은 고농도 비료 농축액을 유도용액으로 사용하여 정삼투에 의해 담수(재이용수)를 생산하고, 이때 생산된 담수는 별도의 분리공정 없이 액비 또는 적하시비(fertigation, 적하식 관수(灌水) 장치의 물에 비료를 섞어 공급)로 사용이 가능하므로 역삼투 공정에 비해 에너지 비용을 획기적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 토양 및 지하수를 보호할 수 있는 친환경 공정이다. 비료를 유도용액으로 하는 정삼투 기술은 최근에 개발되고 있는 신기술로서 이를 해수담수화에 적용한 사례는 있으나, 하수처리수의 재이용에 적용한 사례는 아직 보고된 바 없다[11-15].

본 연구는 비료를 유도용액으로 하는 정삼투 기술을 하수처리수의 재이용에 적용하고, 이에 대한 활용 가능성을 살펴보기 위한 연구이다. 이를 위하여 본 연구에서는 제주하수처리장 2차 침전지 유출수를 대상으로 하였으며, 유도용액으로서는 삼투압, 용해도 및 pH 등을 고려하여 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl , KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , NH_4HCO_3 및 KHCO_3 를 각각 사용하였고, 이 유도용액의 성능평가를 위하여 순수 선속(pure water flux) 및 역용질선속(reverse solute flux)를 측정 및 평가하였다.

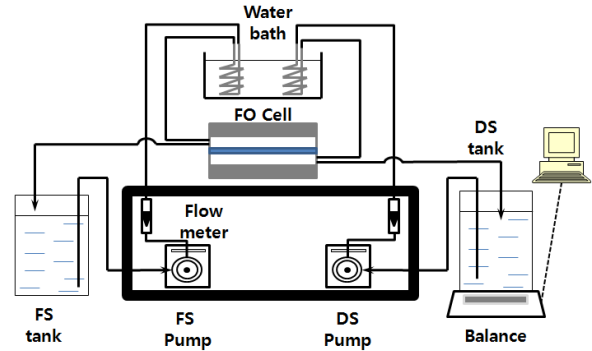


Fig. 1. Schematic of FO experiment apparatus.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험 장치

본 연구에 사용된 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에 사용된 셀의 유로는 가로, 세로 및 깊이를 각각 110, 36 mm 및 3 mm가 되도록 아크릴로 제작하였으며, 막면적은 $3,960 \text{ mm}^2$ 이다. 공급용액(feed solution, 이하 FS)은 다이어프램 펌프(DWP-62163A, Moterbank, KOREA)를 이용하고, 유도용액(draw solution, 이하 DS)은 기어펌프(WT3000-1JA, Baoding Longer Precision Pump Co. Ltd, China)를 이용하여 정삼투 실험용 셀에 공급하였다. 비료를 유도용액으로 사용한 정삼투 실험용 셀의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 항온조(M20, LAUDA, Germany)를 이용하였으며, 운전 온도는 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

FO 막은 활성층(activated layer)이 위로, 공극층(porous layer)이 밑으로 향하도록 셀에 장착하였으며, 공급용액은 FO 막의 윗면으로 흐르게 하였고, 유도용액은 FO 막의 밑면으로 공급용액과 향류로 흐르게 하였다. 본 연구에 사용된 FO 막은 HTI사에서 제조한 cellulose triacetate (CTA) 재질의 평막(OsMemTM CTA-ES)으로서 본 연구에 사용된 FO 막의 자세한 특성을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 실험 방법

PE 재질의 FS 및 DS 탱크에 FS 및 DS를 각각 2 L 씩 채우고, 펌프를 사용하여 FS 및 DS를 각각 정삼투 실험용 셀로 공급을 하였다. FS와 DS는 모두 500 mL/min의 일정한 유량으로 향류로 흐르도록 하였으며, 정삼투 실험용 셀을 통과한 용액은 각각 FS 및 DS 탱크로 순환되도록 하였다. 비료를 유도용액으로 사용한 정

Table 1. Physical and Chemical Properties of FO Membrane Used

Membrane type	CTA (cellulose triacetate) with embedded polyester screen support
Salt rejection	99%
Maximum operating temperature	71°C
Maximum transmembrane pressure	70 kPa
pH range	3 to 8
Maximum chlorine	2 ppm
Cleaning guideline	Use only cleaning chemicals approved for CA/CTA RO membranes

삼투 실험의 운전은 24시간 동안 실시하였다. 또한 FS 탱크에는 교반기를 설치하여 공급용액을 교반하였다. Table 2에 본 연구의 운전조건을 자세히 나타내었다.

비료를 유도용액으로 사용한 정삼투 실험에서의 수 투과선속(water permeate flux)은 유도용액 탱크 내의 유도용액의 질량변화로부터 측정하였다. 유도용액의 질량변화는 10분 간격으로 온라인에 의해 컴퓨터에 연결된 전자저울을 이용하여 연속적으로 기록하고, 이를 부피로 다시 환산하여 계산하였다.

본 연구에서는 제주하수처리장 2차 침전지 유출수를 공급용액으로 사용하였으며, 유도물질로는 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl , KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , NH_4HCO_3 및 KHCO_3 를 각각 사용하였다. 유도용액은 유도물질을 탈이온수에 녹여서 제조하였으며, 유도용액의 농도는 2 mol/L H_2O 로 농도를 일정하게 하였다. 본 연구에서 사용한 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl , KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , NH_4HCO_3 및 KHCO_3 은 모두 순도 99% 이상의 시약(Samchun co. Korea)을 사용하였다.

단일비료를 유도물질로 사용한 유도용액의 삼투압과 pH는 OLI Stream Analyser 3.2 (OLI Systems Inc., Morris Plains, NJ, USA)를 이용하여 계산하였다. 유도용액과 공급용액 간의 삼투압차에 의해 공급용액에서 유도용액으로 이동하는 수투과선속은 24시간 동안 유도용액 탱크를 컴퓨터와 온라인으로 연결된 전자저울 위에 올려놓고 10분 간격으로 질량변화를 측정하여 구하였다.

유도용액 내의 용질이 공급용액으로 이동하는 역용질선속(reverse solute flux, RSF)은 실험이 종료된 후에

Table 2. Experimental Conditions

Membrane area	3,960 mm ²
Flow rate of FS and DS	500 mL/min
Temperature	25 ± 1°C
Initial volume of FS and DS	2 L
Flow direction of FS and DS	Counter current
Operation time	24 hr

공급용액에 존재하는 총질소(T-N)를 분석하였다. 총질소는 persulfate digestion method (Method 10072, HACH, USA)에 의해 분광광도계(DR-5000, HACH, USA)을 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유도용액의 삼투압 및 pH

정삼투 공정에서 가장 중요한 인자는 유도용액과 공급용액의 삼투압차이다. 즉, 공급용액과 유도용액 사이의 삼투압차가 클수록 이론적인 수투과선속은 증가한다. 또한 정삼투 공정에 사용하는 막은 재질에 따라 허용 pH의 범위가 다르기 때문에 유도용액과 공급용액의 pH 또한 정삼투 공정에서 중요한 인자로서 허용 범위를 벗어나는 유도용액 혹은 공급용액을 사용할 경우에 정삼투막의 변형을 일으킬 수 있다.

본 연구에서 사용한 유도용액의 삼투압은 OLI Stream Analyser 3.2 (OLI Systems Inc., Morris Plains, NJ, USA)를 이용하여 계산하였다. 유도용액의 농도에 따른 삼투압 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 농도가 증가함에 따라 삼투압은 비선형적으로 증가하였다. Fig. 3은 유도용액의 농도를 2 mol/L H_2O 로 하였을 때, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl , KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , NH_4HCO_3 및 KHCO_3 의 삼투압을 나타낸 그림이다. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl , KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , NH_4HCO_3 및 KHCO_3 의 삼투압은 각각 86.3, 89.3, 64.9, 87.7, 95.0, 64.9, 66.4 및 76.3 atm으로 나타났으며, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 > \text{KCl} > \text{NH}_4\text{Cl} > \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 > \text{KHCO}_3 > \text{NH}_4\text{HCO}_3 > \text{KNO}_3, \text{NH}_4\text{NO}_3$ 순서로 나타났고, KNO_3 와 NH_4NO_3 의 삼투압은 거의 같게 나타났다.

Fig. 4는 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl , KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , NH_4HCO_3 및 KHCO_3 의 농도가 2 mol/L H_2O 일 때 Stream Analyser 3.2 (OLI Systems Inc., Morris

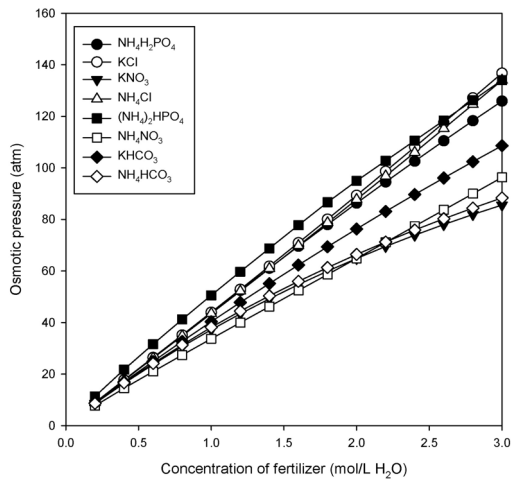


Fig. 2. Osmotic pressure of draw solutions as a function of concentration.. Prediction made using OLI Stream Analyser at 25°C.

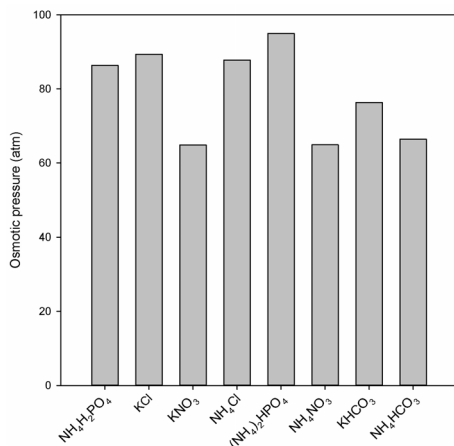


Fig. 3. Osmotic pressure of draw solutions at 2 mol/L H₂O. Prediction made using OLI Stream Analyser at 25°C.

Plains, NJ, USA)를 이용하여 계산한 pH를 나타낸 그림이다. NH₄H₂PO₄, KCl, KNO₃, NH₄Cl, (NH₄)₂HPO₄, NH₄NO₃, NH₄HCO₃ 및 KHCO₃의 pH는 각각 4.0, 6.9, 7.0, 4.6, 7.7, 4.9, 7.7 및 7.8으로 나타났으며, Table 1에 나타난 바와 같이 본 연구에 사용한 CTA-ES 정삼투 막의 적용 pH 범위는 3~8이므로 모두 사용가능한 pH 허용범위 내에 있었다.

3.2. 수투과선속

각 유도용액에 대하여 운전시간에 따른 수투과선속 (water permeate flux)의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 유도용액의 종류에 관계없이 운전시간에 따라 수투과

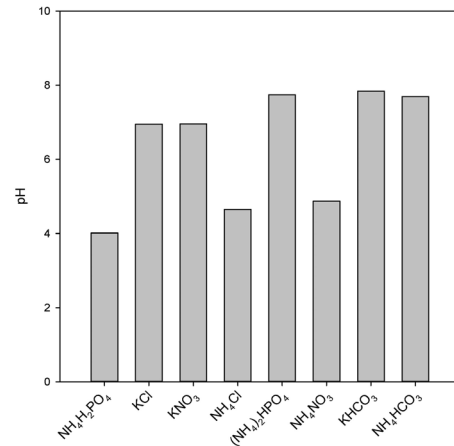


Fig. 4. pH of draw solutions at 2 mol/L H₂O.

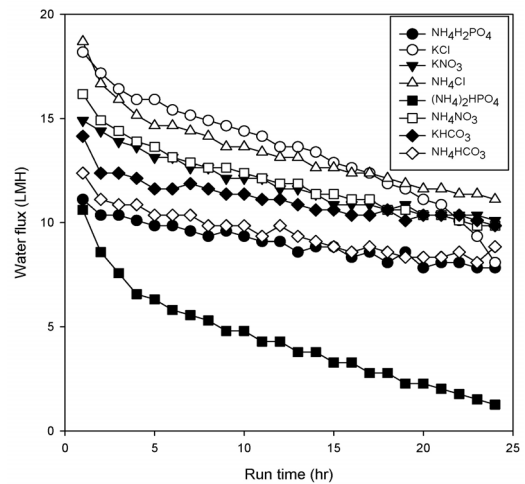


Fig. 5. Water flux as a function of run time.

선속은 감소하였다. 이러한 이유는 운전시간에 따라 유도용액의 농도가 감소할 뿐만 아니라 하수 처리수의 부유물질(suspended solid, SS)에 의해 막오염이 증가하기 때문으로 판단된다. 하수 처리수의 부유물질 농도는 공정시험법에 의해 측정하였으며, 평균 부유물질 농도는 8.3 mg/L이었다.

또한, 유도용액으로 KCl 및 NH₄Cl를 사용한 경우가 수투과선속이 가장 높게 나타났으며, (NH₄)₂HPO₄를 유도용액으로 사용한 경우가 수투과선속이 가장 낮게 나타났다. (NH₄)₂HPO₄를 유도용액으로 사용한 경우에 다른 유도용액에 비해 수투과선속이 낮게 나타난 이유는 FO 막 활성층의 표면에 결정성 스케일이 형성되었기 때문으로 사료된다. 유도용액으로 (NH₄)₂HPO₄를 사용하였을 때, 실험이 종료된 후에 막의 활성층을 SEM 및

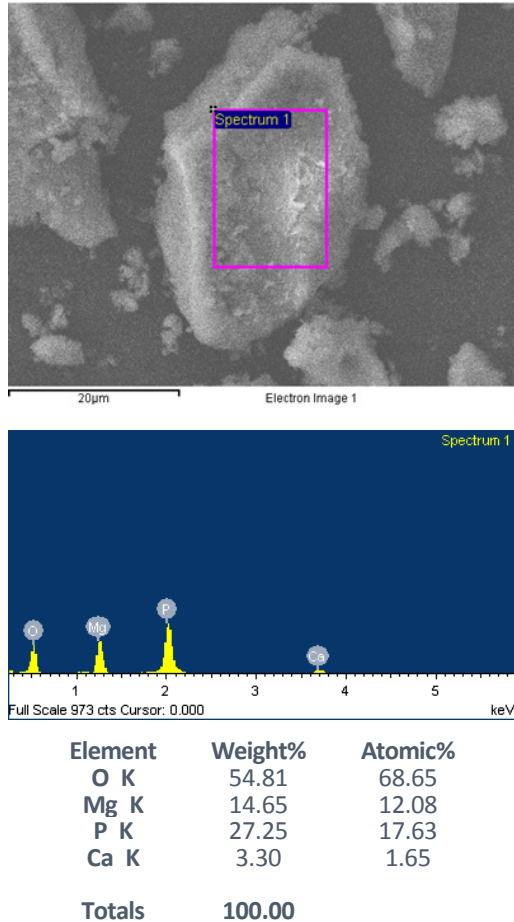


Fig. 6. SEM-EDS images element analysis for substance formed on top-surface of membrane. The DS was $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ of 2 mol/L H_2O .

SEM-EDS (JSM-6701F, JEOL)로 각각 촬영한 사진을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 막표면에 결정이 형성되었음을 확인할 수 있었고, 이 결정은 O, P, Ca 및 Mg로 이루어져 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 결정은 유도용액으로 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 를 사용하였을 때에만 형성되었고, 나머지 유도용액을 사용하였을 때에는 어떠한 결정도 형성되지 않았다. 따라서 이러한 결정이 생긴 이유는 유도용액 중의 인 성분이 역확산되어 생긴 것으로 판단된다.

2 mol/L H_2O 의 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl, KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , NH_4HCO_3 및 KHCO_3 를 각각 유도용액으로 사용하였을 때, 24시간 동안의 평균 수투과선속을 계산하여 이를 Fig. 7에 나타내었다. 평균 수투과선속은 $\text{KCl} > \text{NH}_4\text{Cl} > \text{NH}_4\text{NO}_3 > \text{KNO}_3 > \text{KHCO}_3 > \text{NH}_4\text{HCO}_3 > \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 > (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 의 순

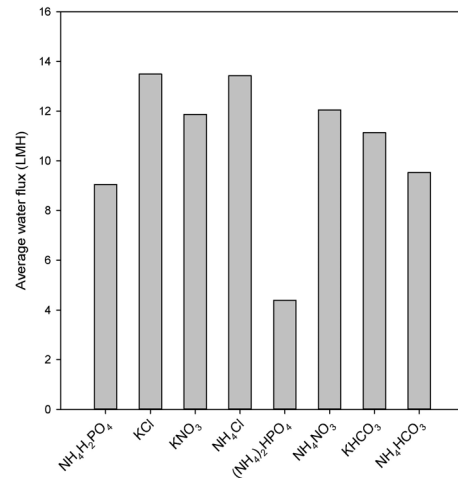


Fig. 7. Average water flux for each draw solutions using sewage discharge water as feed solution.

서로 나타났다. 이러한 경향은 유도용액별 삼투압의 크기와 무관하지는 않으나, 일치하지 않았다. 특히 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 를 유도용액으로 사용한 경우에 삼투압은 가장 크게 나타났으나, 평균 수투과선속은 가장 작게 나타났는데, 이러한 이유는 앞에서 언급한 바와 같이 막표면 위에 결정이 형성되었기 때문으로 판단된다. 유도용액으로 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl, KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , NH_4HCO_3 및 KHCO_3 를 사용하였을 때, 평균 수투과선속은 각각 9.04, 13.49, 11.87, 13.42, 4.39, 12.05, 11.13 및 9.53 LMH이었다.

3.3. 역용질선속

8종류의 비료를 유도용액에 대하여 정삼투 실험 전과 후에 공급용액 중의 질소 성분을 분석하고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 공급용액의 질소 성분 농도는 정삼투 실험 전에 비해 실험 후에 높게 나타났다. 이러한 이유는 공급용액의 물이 정삼투 현상에 의해 유도용액으로 이동하여 질소 성분이 농축되었고, 유도용액에 포함된 질소 성분이 정삼투 막을 통하여 공급용액으로 역확산 되었기 때문으로 판단된다.

그림에 나타난 바와 같이 정삼투 실험 전과 후의 공급용액의 질소 성분을 비교하였을 때, 유도용액 중에서 질소 성분이 함유된 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 및 NH_4HCO_3 를 사용한 경우가 질소 성분이 없는 KCl과 KHCO_3 에 비해 정삼투 실험 후에 공급용액의 질소 농도가 일반적으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 질소 성분이 없는 유도용액을 사용한 경우에는

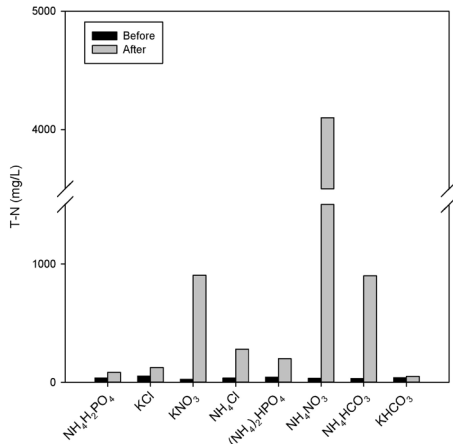


Fig. 8. Before and after total nitrogen concentration changes for each draw solutions.

농축에 의해서만 농도가 높아지나, 질소 성분을 함유한 유도용액을 사용한 경우에는 농축뿐만 아니라 정삼투막을 통한 질소의 역확산에 의해서 질소 농도가 높아졌기 때문에 판단된다.

본 연구에서 사용된 비료 성분은 질소(N), 인(P) 또는 칼륨(K)으로 구성되어 있으나, 정 등[15]의 유도용액으로 혼합비료를 사용한 정삼투식 해수담수화에서 담수화 성능에 대한 유도용액 농도의 영향에 대한 연구에서 역용질선속은 질소(N) > 칼륨(K) > 인(P)의 순서로 나타나, 본 연구에서는 정삼투 실험 전과 후의 공급용액에 포함된 질소 성분만을 측정하여 질소 성분의 역용질선속(reverse solute flux, RSF)을 계산하였다.

유도용액의 질소(N) 성분이 공급용액으로 역확산되는 정도를 분석하기 위하여 정삼투 실험 전과 종료된 후에 공급용액의 질소 농도를 측정하였으며, 식 (1)을 이용하여 역용질선속, J_s를 계산하였다.

$$J_s = \frac{V_f \times C_f - V_i \times C_i}{A \times t} \quad (1)$$

여기서, V_f와 V_i는 각각 정삼투 실험 전과 후의 공급용액 부피, C_f와 C_i는 각각 정삼투 실험 전과 후의 공급용액 내에 존재하는 질소 농도, A는 정삼투 막의 단면적, 그리고 t는 운전시간이다. 이때 식 (1)에 의해 계산된 역용질선속의 단위는 mmol/m²·sec로 나타내었다.

각 유도용액에 대한 역용질선속 값을 Fig. 9에 나타내었다. 이때 각 역용질선속의 값은 식 (1)을 이용하였다. 질소 성분을 포함하고 있는 유도용액을 사용한 경우

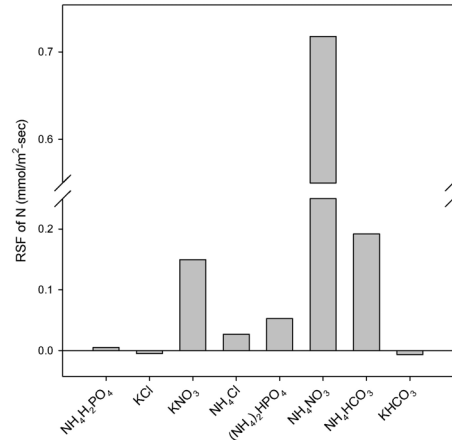


Fig. 9. Reverse solute flux of nitrogen for each draw solutions using sewage discharge water as feed solution.

에 역용질선속은 양(+)의 값을 가지나, KCl 및 KHCO₃과 같이 질소 성분이 없는 유도용액을 사용한 경우에는 질소의 역용질선속 값은 음(-)의 값을 나타내었다. 이러한 이유는 공급용액의 물이 유도용액으로 이동될 때 배제(rejection)되지 못한 질소 성분이 정방향으로 이동되었기 때문에 판단된다.

한편, 유도용액으로 KHCO₃와 KCl을 각각 사용한 경우에 공급용액의 농도와 유도용액의 최종 농도로부터 배제율을 구하였으며, 정삼투막에 의한 T-N의 평균 배제율은 각각 85%이었다.

유도용액 중 질소 성분을 함유한 유도용액의 역용질선속은 NH₄H₂PO₄ < NH₄Cl < (NH₄)₂HPO₄ < KNO₃ < NH₄HCO₃ < NH₄NO₃의 순서로 나타났다. NH₄H₂PO₄를 유도용액으로 사용하였을 때, 역용질선속은 4.96 × 10⁻³ mmol/m²·sec이었다. NH₄NO₃이 다른 유도용액에 비해 역용질선속이 크게 나타났는데 이러한 이유는 NH₄NO₃이 2 mol/L H₂O에서 해리도가 낮고, 비해리된 용질은 이온(NH₄⁺ 또는 NO₃⁻)보다 역용질 확산이 잘되기 때문에 판단된다[12].

3.4. 탈이온수(DI)에 대한 수투과선속 및 역용질선속

탈이온수(DI)를 공급용액으로 하였을 때, 8종류(NH₄H₂PO₄, KCl, KNO₃, NH₄Cl, (NH₄)₂HPO₄, NH₄NO₃, KHCO₃ 및 NH₄HCO₃)의 유도용액(2 mol/L H₂O)별 평균 수투과선속을 Fig. 10에 나타내었다. NH₄H₂PO₄, KCl, KNO₃, NH₄Cl, (NH₄)₂HPO₄, NH₄NO₃, KHCO₃ 및 NH₄HCO₃의 평균 수투과선속은 각각 9.16, 14.37, 12.11, 14.35, 8.67, 12.74, 11.32 및 9.55 LMH이었다. 이러한 결과는

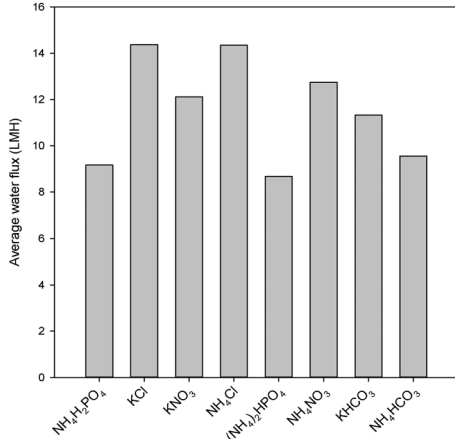


Fig. 10. Average water flux for each draw solutions using DI water as feed solution.

하수처리장 2차 침전지 유출수를 사용하였을 때와 유사한 결과이다. 따라서 하수처리장 2차 침전지 유출수의 삼투압은 탈이온수의 삼투압에 비해 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 다만 유도용액으로 (NH₄)₂HPO₄를 사용하였을 때, 하수처리장 2차 침전지 유출수의 경우에는 스케일이 형성되었으나 탈이온수의 경우에는 스케일이 형성되지 않아 약 2배 정도의 수투과선속의 차이가 있었다.

탈이온수(DI)를 공급용액으로 하였을 때, 질소 성분을 함유한 6종류의 유도용액별 역용질선속을 Fig. 11에 나타내었다. NH₄H₂PO₄, KNO₃, NH₄Cl, (NH₄)₂HPO₄, NH₄NO₃ 및 NH₄HCO₃의 역용질선속은 각각 0.005, 0.118, 0.054, 0.057, 0.346 및 0.280 mmol/m²sec로 나타나, NH₄H₂PO₄ < NH₄Cl < (NH₄)₂HPO₄ < KNO₃ < NH₄HCO₃ < NH₄NO₃의 순서로 나타났으며, 하수처리장 2차 침전지 유출수를 대상으로 하였을 때와 유사한 경향을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구는 비료를 유도용액으로 하는 정삼투 기술을 하수처리수의 재이용에 활용하기 위한 연구로서 제주 하수처리장 2차 침전지 유출수를 재이용 대상으로 하였으며, 유도용액으로서는 삼투압, 용해도 및 pH 등을 고려하여 NH₄H₂PO₄, KCl, KNO₃, NH₄Cl, (NH₄)₂HPO₄, NH₄NO₃, NH₄HCO₃ 및 KHCO₃를 각각 사용하였고, 이 유도용액의 성능평가를 위하여 수투과선속(water per

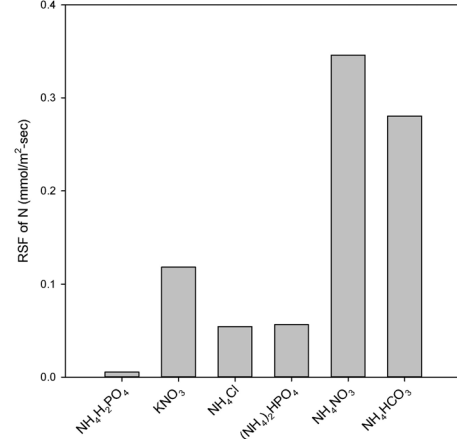


Fig. 11. Reverse solute flux of nitrogen for each draw solutions using DI water as feed solution.

meate flux) 및 역용질선속(reverse solute flux)를 측정 및 평가하였다.

1) 유도용액의 삼투압은 (NH₄)₂HPO₄ > KCl > NH₄Cl > NH₄H₂PO₄ > KHCO₃ > NH₄HCO₃ > KNO₃, NH₄NO₃ 순서로 나타났으며, 2 mol/L H₂O일 때 NH₄H₂PO₄, KCl, KNO₃, NH₄Cl, (NH₄)₂HPO₄, NH₄NO₃, NH₄HCO₃ 및 KHCO₃의 삼투압은 각각 86.3, 89.3, 64.9, 87.7, 95.0, 64.9, 66.4 및 76.3 atm이었다.

2) 유도용액의 종류에 관계없이 운전시간에 따라 수투과선속은 감소하였다. 이러한 이유는 운전시간에 따라 유도용액의 농도가 감소하고 막오염이 증가하기 때문으로 판단된다.

3) 유도용액으로 (NH₄)₂HPO₄를 사용한 경우에 FO 막 활성층의 표면에 결정성 스케일이 형성되었고, 이 결정은 O, P, Ca 및 Mg로 이루어져 있는 것을 알 수 있다.

4) 24시간 동안의 평균 수투과선속은 KCl > NH₄Cl > NH₄NO₃ > KNO₃ > KHCO₃ > NH₄HCO₃ > NH₄H₂PO₄ > (NH₄)₂HPO₄의 순서로 나타났으며, 유도용액으로 NH₄H₂PO₄, KCl, KNO₃, NH₄Cl, (NH₄)₂HPO₄, NH₄NO₃, NH₄HCO₃ 및 KHCO₃를 사용하였을 때, 평균 수투과선속은 각각 9.04, 13.49, 11.87, 13.42, 4.39, 12.05, 11.13 및 9.53 LMH이었다.

5) KCl 및 KHCO₃과 같이 질소 성분이 없는 유도용액을 사용한 경우에는 질소의 역용질선속 값은 음(-)의 값을 나타내었는데, 이러한 이유는 공급용액의 물이 유도용액으로 이동될 때 배제되지 못한 질소 성분이 정방

향으로 이동되었기 때문으로 판단된다.

6) 유도용액 중 질소 성분을 함유한 유도용액의 역용질선속은 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 < \text{NH}_4\text{Cl} < (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 < \text{KNO}_3 < \text{NH}_4\text{HCO}_3 < \text{NH}_4\text{NO}_3$ 의 순서로 나타났다.

7) 탈이온수에 대한 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl , KNO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4NO_3 , KHCO_3 및 NH_4HCO_3 의 평균 수투과선속은 각각 9.16, 14.37, 12.11, 14.35, 8.67, 12.74, 11.32 및 9.55 LMH로서 하수처리장 2차 침전지 유출수를 대상으로 하였을 때와 유사한 결과를 나타내어 하수처리장 2차 침전지 유출수의 삼투압은 탈이온수의 삼투압에 비해 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

감 사

이 논문은 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원 사업에 의하여 연구되었음.

Reference

1. G. Daigger, "Evolving urban water and residuals management paradigms: Water reclamation and reuse, decentralization, and resource recovery", *Water Environ. Research*, **81**, 898 (2009).
2. A. G. Fane, "Membrane for water production and wastewater reuse", *Desalination*, **106**, 11 (1996).
3. Y. Chio, J. Choi, Y. Shin, H. Cho, J. Sohn, and S. Lee, "A feasibility study on sewage discharge water treatment for water reuse by direct contact membrane distillation", *Membr. J.*, **26**, 70 (2016).
4. H. Ahn, J. Kim, and Y. N. Kwon, "Preparation of cellulose acetate membrane and its evaluation as a forward osmosis membrane", *Membr. J.*, **24**, 136 (2014).
5. E. O. Ko, J. D. Moon, and J. M. Park, "Status-of-arts of desalination technology", *Membr. J.*, **20**, 185 (2010).
6. L. A. Hoover, W. A. Phillip, A. Tiraferri, N. Y. Yip, and M. Elimelech, "Forward with osmosis: emerging applications for greater sustainability", *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 9824 (2011).
7. T. S. Chung, S. Zhang, K. Y. Wang, J. Su, and M. M. Ling, "Forward osmosis processes: Yesterday, today and tomorrow", *Desalination*, **287**, 78 (2012).
8. J. R. McCutcheon, R. L. Mc Ginnis, and M. Elimelech, "Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance", *J. Membr. Sci.*, **278**, 114 (2006).
9. Y. Xu, X. Peng, C. Y. Tang, Q. S. Fu, and S. Nie, "Effect of draw solution concentration and operating conditions on forward osmosis and pressure retarded osmosis performance in a spiral wound module", *J. Membr. Sci.*, **348**, 298 (2010).
10. J. R. McCutcheon, R. L. Mc Ginnis, and M. Elimelech, "A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process", *Desalination*, **174**, 1 (2005).
11. A. Achilli, T. Y. Cath, and A. E. Childress, "Selection of inorganic-based draw solutions for forward osmosis applications", *J. Membr. Sci.*, **364**, 233 (2010).
12. S. Phuntsho, H. K. Shon, S. Hong, S. Lee, and S. Vigneswaran, "A novel low energy fertilizer driven forward osmosis desalination for direct fertigation: Evaluating the performance of fertilizer draw solutions", *J. Membr. Sci.*, **375**, 172 (2011).
13. S. Phuntsho, H. K. Shon, T. Majeed, I. E. Saliby, S. Vigneswaran, J. Kandasamy, S. Hong, and S. Lee, "Blended fertilizers as draw solutions for fertilizer-drawn forward osmosis desalination", *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 4567 (2012).
14. N. Jeong, S. G. Kim, and H. W. Lee, "Evaluating the performance of draw solutions in forward osmosis desalination using fertilizer as draw solution", *Membr. J.*, **24**, 400 (2014).
15. N. Jeong, S. G. Kim, D. K. Kim, and H. W. Lee, "The effect of draw solution concentration on forward osmosis desalination performance using blended fertilizer as draw solution", *Membr. J.*, **23**, 343 (2013).