

# 정삼투를 이용한 하수의 재이용에서 혼합비로 유도용액의 성능 평가

김승건 · 이호원<sup>†</sup>

제주대학교 생명화학공학과  
(2019년 12월 27일 접수, 2020년 1월 10일 심사, 2020년 1월 14일 채택)

## Evaluating the Performance of Blended Fertilizer Draw Solution in Reuse of Sewage Water Using Forward Osmosis

Seung-Geon Kim and Ho-Won Lee<sup>†</sup>

Department of Chemical and Biological Engineering, Jeju National University, 102 Jejudaehakno, Jeju-si, Jeju Province 63243, Korea  
(Received December 27, 2019; Revised January 10, 2020; Accepted January 14, 2020)

### 초 록

본 연구는 혼합비료를 유도용액으로 하는 정삼투 기술을 하수에 적용하여 하수를 재이용하기 위한 연구이다. 이를 위하여 본 연구에서는 J 하수처리장의 1차 침전지 유입수와 유출수, 그리고 2차 침전지 유출수를 각각 처리 대상으로 하였다. 평균 수투과선속은  $KCl + NH_4Cl > KCl + NH_4H_2PO_4 > KCl + (NH_4)_2HPO_4$ 의 순서로 크게 나타났으며, 역용선속은  $KCl + NH_4H_2PO_4 < KCl + NH_4Cl < KCl + (NH_4)_2HPO_4$ 의 순서로 작게 나타났다. 혼합비료의 종류에 관계없이 2차 침전지 유출수의 수투과선속이 가장 높게 나타났다.  $KCl$ 과  $NH_4H_2PO_4$ 의 혼합 유도용액은 비료의 주요 성분인 질소, 인 및 칼륨을 모두 포함하고 있을 뿐 아니라 낮은 비역용질 선속을 갖고 있어서 하수의 재이용에 가장 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.  $KCl$ 과  $NH_4H_2PO_4$ 의 혼합 유도용액을 사용한 경우, 2차 침전지 유출수에 대한 평균 수투과선속과 역용질선속은 각각 12.14 LMH과 0.012 mol/m<sup>2</sup>이었다.

### Abstract

This paper aims to reuse sewage by a forward osmosis using a blended fertilizer as a draw solution. This work deals with the primary sedimentation basin influent, effluent, and secondary sedimentation basin effluent from J sewage treatment plant. The average permeate water flux was higher in the order of the blend of  $KCl$  and  $NH_4Cl > KCl$  and  $NH_4H_2PO_4 > KCl$  and  $(NH_4)_2HPO_4$ , and the reverse solute flux was lower in the order of the blend of  $KCl$  and  $NH_4H_2PO_4 < KCl$  and  $NH_4Cl < KCl$  and  $(NH_4)_2HPO_4$ . Regardless of the blended fertilizer, the permeate water flux of the effluent from the secondary sedimentation basin was the highest. The blended fertilizer of  $KCl$  and  $NH_4H_2PO_4$  was found to be most useful for the reuse of sewage because it contains nitrogen, phosphorus and potassium, which are the major components of a fertilizer, and has a low reverse solute flux. When the blend of  $KCl$  and  $NH_4H_2PO_4$  was used as a draw solution, the average permeate water and reverse solute flux for the secondary sedimentation basin effluent were 12.14 L/m<sup>2</sup>hr and 0.012 mol/m<sup>2</sup>, respectively.

**Keywords:** Blended fertilizer, Forward osmosis, Water reuse, Sewage

## 1. 서 론

물 부족 상황에 대처하기 위해 댐 건설 등의 방법을 통해 수자원을 확보하는 정책을 추진해 왔으나, 환경과피 논란 및 민원 등으로 댐 설치의 한계에 도달하여 새로운 수자원 개발이 필요하며, 하수처리수 재이용과 해수담수화가 현실적인 대안으로 부상하고 있다. 하수처리수 재이용은 하수처리설비를 통해 처리한 하수처리수를 재이용 목적

에 부합되는 용수로 생산하는 것을 말하며, 하수처리수 재이용은 비교적 해수담수화보다 비교적 처리방법이 간단하며 공공수역으로 배출되는 오염부하량을 감소시킬 수 있고 상수 사용량 절감과 수자원의 효율적 이용 측면에서 그 필요성이 증가하고 있다[1-3].

국내에 적용되고 있는 재이용수는 매우 우수한 수질을 요구하고 있어 고도처리가 가능한 역삼투 공정이 하수처리수 재이용에 주로 사용되고 있지만, 역삼투 공정은 고압의 사용으로 인한 에너지 비용 막아 염 문제 등으로 사용에는 한계가 있다. 정삼투 공정(forward osmosis, FO)은 이러한 역삼투 공정의 한계를 해결하고자 최근 주목 받고 있는 공정이다. 정삼투는 고압펌프에 의한 수리학적 압력을 사용하는 대신에 높은 삼투압을 갖고 있는 용액을 유도용액으로 사용하기 때문에 역삼투 공정에 비해 막오염이 절감되고 고압이 불필요하여 에너지가

<sup>†</sup> Corresponding Author: Jeju National University,  
Department of Chemical and Biological Engineering, 102 Jejudaehakno, Jeju-si,  
Jeju Province 63243, Korea  
Tel: +82-64-754-3684 e-mail: hwlee@jejunu.ac.kr

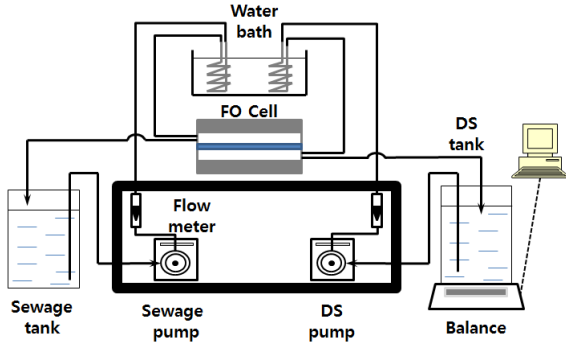


Figure 1. A Schematic diagram of fertilizer drawn FO test system.

크게 절감될 수 있으며 회수율도 높일 수 있는 공정이다. 그러나 정삼투 공정에 의해 재이용수를 계속적으로 생산하기 위해서는 희석된 유도용액을 다시 농축하는 공정이 추가적으로 필요하다[4,5].

이에 반해 비료 유도용액의 정삼투 기술을 이용한 하수처리수의 재이용 공정은 원하는 비료 성분을 수용액으로 제조하고, 이 수용액을 유도용액으로 사용하여 정삼투에 의해 하수처리수로부터 재이용수를 생산하는 공정으로서 생산된 담수를 별도의 분리 없이 바로 사용이 가능하므로 유도용액을 다시 농축하는 추가적인 공정이 필요 없어 하수 재이용 비용을 획기적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 토양 및 지하수를 보호할 수 있는 친환경 공정이다[6,7].

최근에 비료를 유도용액으로 하는 정삼투는 UTS 대학의 Shon 교수팀에서 주로 해수담수화에 적용하여 비료 유도용액의 정삼투 공정 이용 해수담수화의 활용 가능성을 제시한 바 있다[8,9]. Kim 등[10,11]은 하수처리장 방류수와 하수에 비료 유도용액의 정삼투를 각각 적용하여 유도용액의 성능과 하수 농축에 대한 기초 데이터를 제시한 바 있다.

본 연구는 혼합비료를 유도용액으로 하는 정삼투 기술을 하수에 적용하여 하수를 재이용하기 위한 연구이다. 이를 위하여 본 연구에서는 J 하수처리장의 1차 침전지 유입수와 유출수, 그리고 2차 침전지 유출수를 각각 처리 대상으로 하였으며, 유도용질로는 질소(N), 인(P) 및 칼륨(K)을 최소한 2개 이상 함유할 수 있도록 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KCl, KNO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>Cl, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 및 KHCO<sub>3</sub>를 2개 혹은 3개를 혼합한 혼합비료를 각각 사용하여 혼합비료 유도용액의 수투과선속 및 역용질확산 등을 측정하고 혼합비료 유도용액의 성능을 고찰함으로써 정삼투 기술을 이용하여 하수를 재이용하고자 하는 방안으로 혼합비료 유도용액의 적용 가능성을 살펴보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

혼합비료를 유도용액으로 사용하는 정삼투 실험장치의 모식도를 Figure 1에 나타내었다. 본 연구에 사용된 막은 HTI사에서 제조한 cellulose triacetate (CTA) 재질의 정삼투 막(OsMem™ CTA-ES)으로서 막의 활성층(activated layer)이 위로 향하도록 하였다. 본 연구에 사용된 FO 막의 자세한 특성을 Table 1에 나타내었다[11].

셀의 가로와 세로 길이는 각각 110 mm와 36 mm로서 유효 막면적은 3,960 mm<sup>2</sup>이었고, 깊이는 3 mm가 되도록 아크릴로 제작하였다. 셀의 온도는 항온조의 물을 순환시켜 25 ± 1°C로 일정하게 유지되도록 하였다.

Table 1. Properties and Operating Conditions of FO Membrane Used

Membrane type	CTA (cellulose triacetate) with embedded polyester screen support
Salt rejection (%)	99
Maximum operating temperature (°C)	71
Maximum transmembrane pressure (kPa)	70
pH range	3 to 8
Maximum chlorine (ppm)	2

Table 2. Experimental Conditions

Membrane area	3,960 mm <sup>2</sup>
Flow rate of sewage and draw solution	500 mL/min
Temperature	25 ± 1 °C
Initial volume of sewage and draw solution	2 L
Flow direction of sewage and draw solution	Counter current
Operation time	24 h

### 2.2. 실험방법

하수 및 유도용액 탱크에 하수 및 유도용액(draw solution, DS)을 각각 2 L씩 채우고, 다이어프램 펌프(DWP-62163A, Moterbank, Korea)와 기어펌프(WT3000 -1JA, Baoding Longer Precision Pump Co. Ltd, China)를 각각 사용하여 막의 윗면과 밑면으로 각각 공급되도록 하여 두 용액이 향류로 접촉하도록 하였다. 하수와 유도용액은 모두 500 mL/min의 일정한 유량으로 흐르도록 하였고, 셀을 통과한 용액은 각각 하수 및 유도용액 탱크로 순환되도록 하였으며, 운전은 24 h 동안 실시하였다. 수투과선속(water permeate flux)은 유도용액의 질량을 온라인에 의해 컴퓨터에 연결된 전자저울을 이용하여 연속적으로 기록하고, 이를 부피로 다시 환산하여 계산하였다. 본 연구의 실험 조건을 Table 2에 나타내었다.

본 연구에서는 J 하수처리장의 1차 침전지 유입수와 유출수, 그리고 2차 침전지 유출수를 각각 처리 대상으로 하였으며, 1차 침전지 유입수와 유출수의 경우에는 하수중의 부유물질을 제거하기 위하여 하수를 침전 또는 여과한 후에 사용하였다. 즉, 1차 침전지 유입수를 30 min간 정지한 후의 상등액(이하 Sewage-1), 1차 침전지 유출수를 30 min간 정지한 후의 상등액(이하 Sewage-2), 1차 침전지 유출수를 1 µm 카트리지 필터로 여과한 여과액(이하 Sewage-3), 그리고 2차 침전지 유출수(이하 Sewage-4)의 총 4종류의 하수를 각각 공급용액으로 사용하였다.

본 연구에 사용한 유도용질로는 질소(N), 인(P) 및 칼륨(K)을 최소한 2개 이상 함유할 수 있도록 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KCl, KNO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>Cl, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 및 KHCO<sub>3</sub>를 2개 혹은 3개를 혼합한 혼합비료를 각각 사용하였다. 유도용액은 혼합비료를 탈이온수에 녹여서 제조하였으며, 유도용액의 농도는 모두 2 mol/L H<sub>2</sub>O로 일정하게 하여 서로 비교할 수 있게 하였다. 본 연구에서 사용한 모든 시약은 순도 99% 이상의 1급 시약(Samchun co. Korea)을 사용하였다.

수투과선속은 유도용액 탱크를 컴퓨터와 온라인으로 연결된 전자저울 위에 올려놓고 24 h 동안 10 min 간격으로 질량변화를 측정하여 구하였다. 유도용액 내의 용질이 하수로 이동하는 역용질선속(reverse

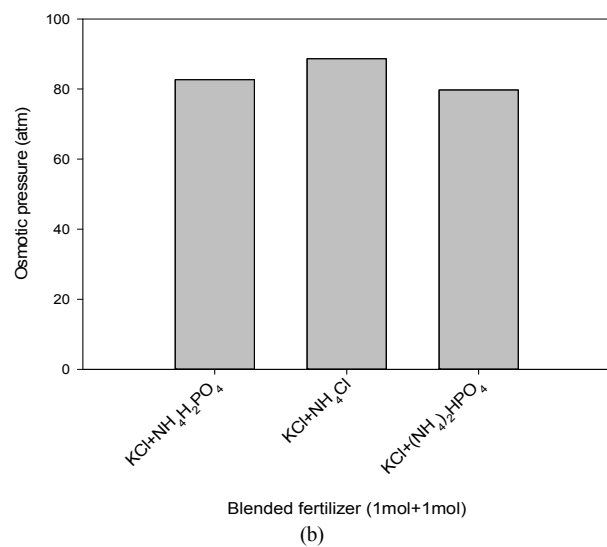
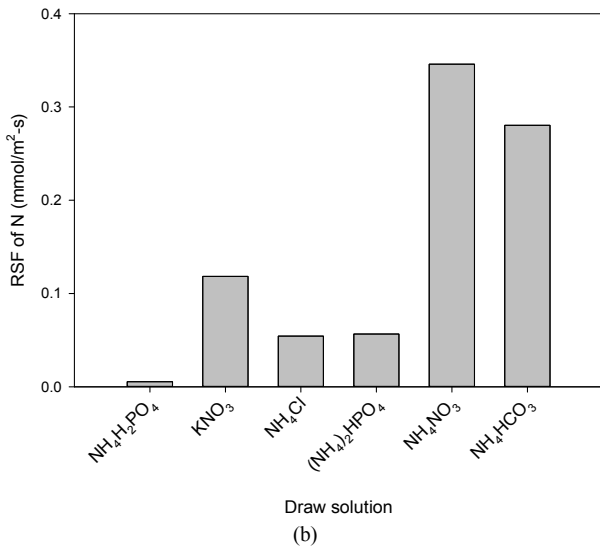
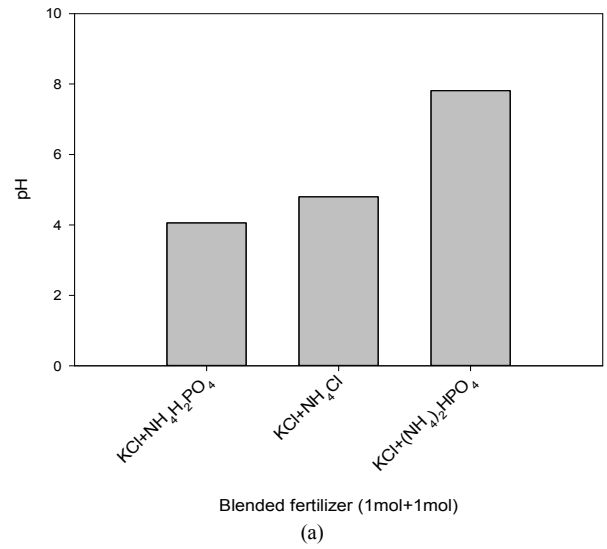
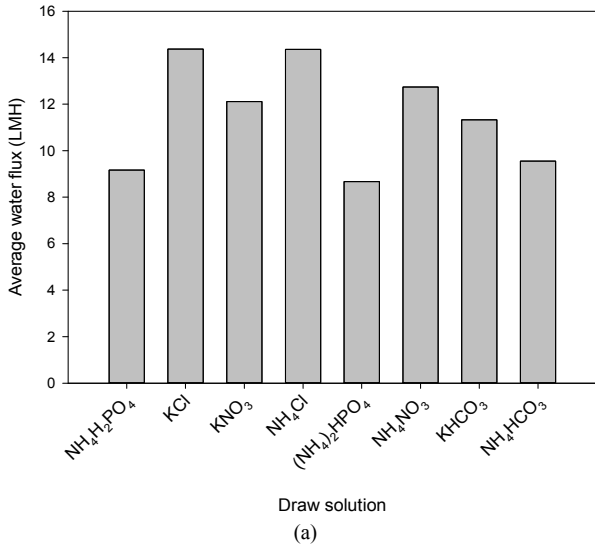


Figure 2. Average water flux (a) and reverse solute flux (b) of fertilizer draw solutions (Feed solution : DI water).

Figure 3. pH (a) and calculated osmotic pressure (b) of blended fertilizer draw solutions at 25 °C using OLI Stream Analyzer.

solute flux, RSF)은 실험이 종료된 후에 하수에 존재하는 질소(N) 성분을 분석하여 계산하였으며, 질소(N) 성분은 persulfate digestion method (Method 10072, HACH, USA)에 의해 분광광도계(DR-5000, HACH)를 이용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 혼합비료의 삼투압 및 pH

혼합비료를 선정하기 위하여 탈이온수(DI)를 대상으로  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , KCl,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$  및  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ 의 총 8종류 유도물질의 수투과선속과 역용질선속을 측정하고 그 결과를 Figure 2에 나타내었다.

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , KCl,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$  및  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ 의 평균 수투과선속은 각각 9.16, 14.37, 12.11, 14.35, 8.67, 12.74, 11.32 및 9.55 LMH로 나타나  $\text{KCl} > \text{NH}_4\text{Cl} > \text{NH}_4\text{NO}_3 > \text{KNO}_3 > \text{KHCO}_3 > \text{NH}_4\text{HCO}_3 > \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 > (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 의 순서로 크게 나

타났다.

유도용액 중에서 질소 성분을 함유한  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  및  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ 의 역용질선속은 각각 0.005, 0.118, 0.054, 0.057, 0.346 및 0.280 mmol/m²·s로 나타나,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 < \text{NH}_4\text{Cl} < (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 < \text{KNO}_3 < \text{NH}_4\text{HCO}_3 < \text{NH}_4\text{NO}_3$ 의 순서로 작게 나타났다.

따라서 본 연구에서는 총 8종의 비료 중에서 평균 수투과선속이 가장 큰 유도물질인 KCl과 질소에 대한 역용질선속이 적은 유도물질인  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  및  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 를 선택하여 혼합비료를 제조하였다. 즉,  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl}$  및  $\text{KCl} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 를 각각 (1 mol + 1 mol)/L  $\text{H}_2\text{O}$ 로 하는 총 3종류의 혼합비료를 유도용액으로 사용하였다.

이 혼합비료 유도용액의 pH와 혼합비료의 삼투압을 Figure 3에 나타내었다. 이때 각 유도용액의 pH와 삼투압은 stream analyser 3.2 (OLI Systems Inc., Morris Plains, NJ, USA)를 이용하여 계산하였다.  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl}$  및  $\text{KCl} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 의 pH는 각각

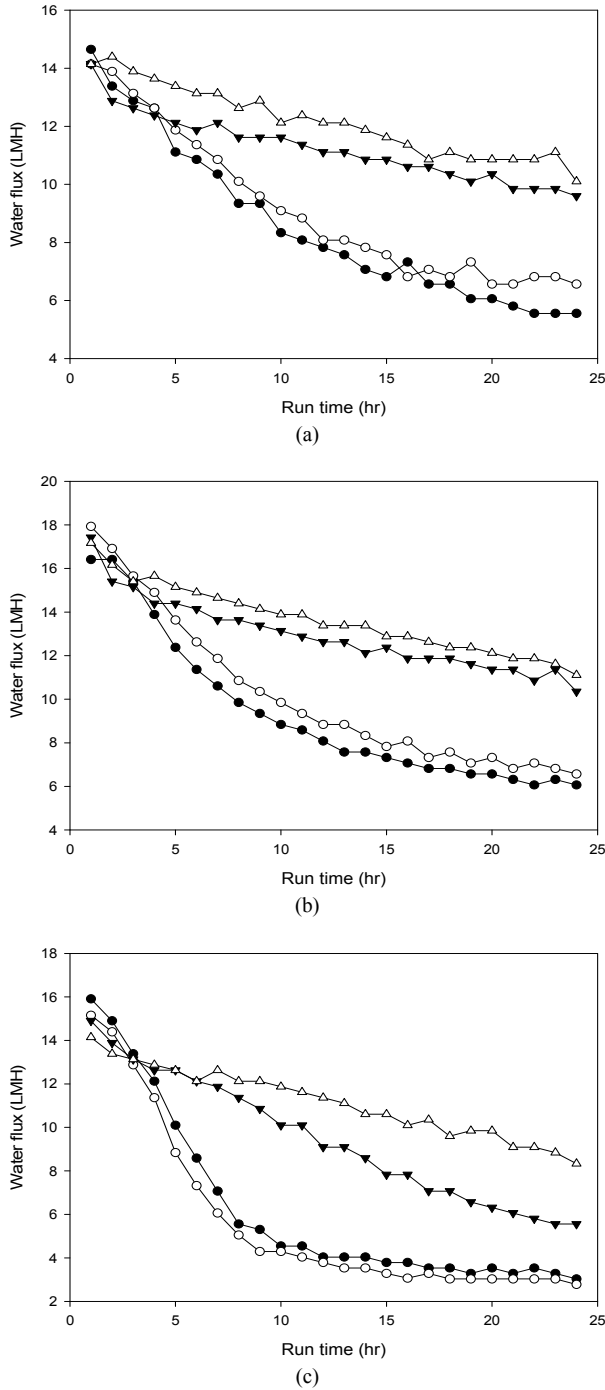


Figure 4. Variations of water flux with operating time using the blend of KCl and  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (a), the blend of KCl and  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (b), and the blend of KCl and  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  (c) (●: Sewage-1, ○: Sewage-2, ▼: Sewage-3, △: Sewage-4).

4.06, 4.80 및 7.81로 나타났으며, Table 2에 나타낸 바와 같이 본 연구에 사용한 정삼투 막의 적용 pH 범위는 3~8이므로 모두 사용가능한 pH 허용범위 내에 있음을 확인하였다.

$\text{KCl} + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl}$  및  $\text{KCl} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 의 삼투압은 각각 82.6, 88.6 및 79.7 atm으로  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl} > \text{KCl} + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 > \text{KCl} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 의 순서로 크게 나타났다. 이러한 결과는 탈이온

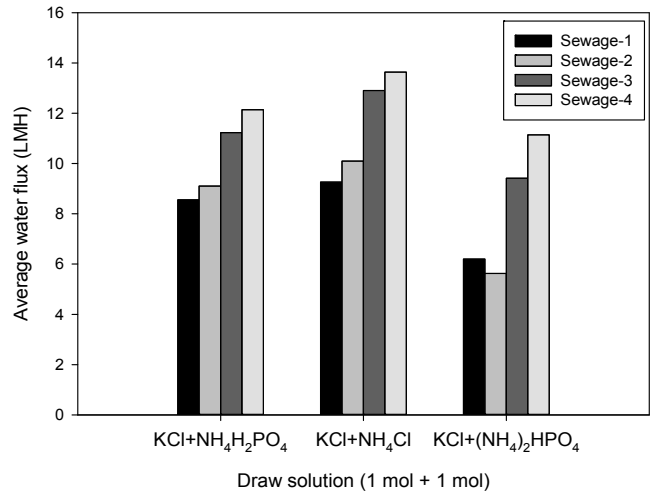


Figure 5. Average water flux of blended fertilizer draw solutions.

수(DI)를 공급용액으로 하였을 때 유도용액별 평균 수투과선속 결과 (Figure 2)와 밀접하게 관련 있음을 알 수 있었다.

### 3.2. 수투과선속

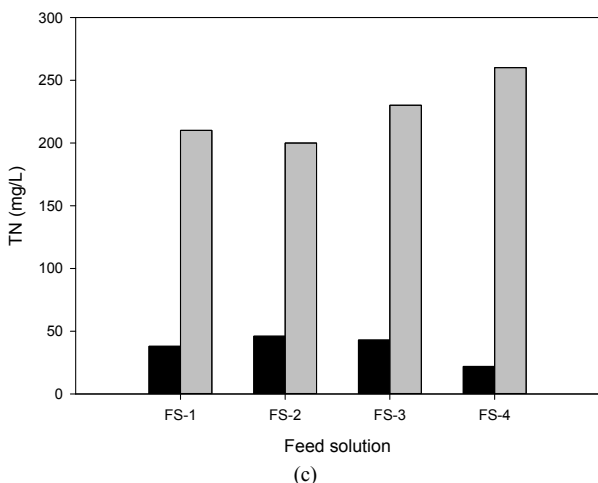
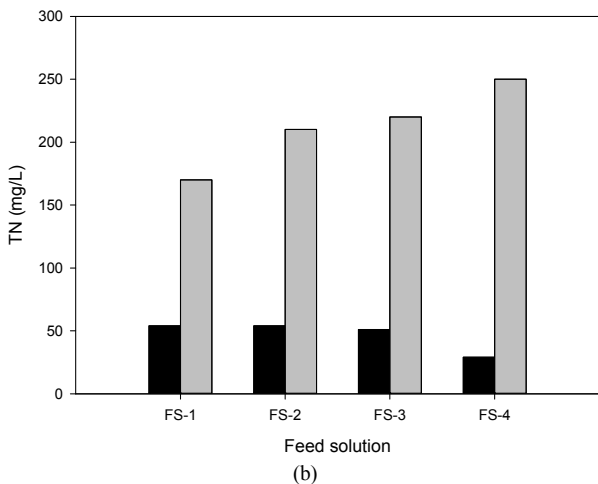
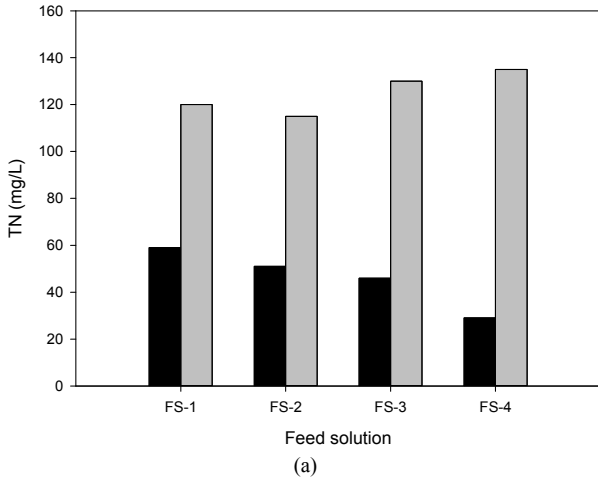
$\text{KCl} + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl}$  및  $\text{KCl} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  혼합비료를 각각 유도용액으로 사용하여 4종류의 하수를 대상으로 한 정삼투 실험에서 운전시간에 따른 수투과선속의 변화를 측정하고, 이 결과를 Figure 4에 나타내었다. 모든 혼합비료에서 운전시간이 경과함에 따라 수투과선속은 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 단일비료를 사용한 경우와 동일하였다[10].

혼합비료의 종류에 따른 공급용액별 평균 수투과선속을 Figure 5에 나타내었다. 평균 수투과선속은 공급용액에 상관없이  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl} > \text{KCl} + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 > \text{KCl} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 의 순서로 크게 나타났으며, 이러한 현상은 혼합비료의 삼투압이  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl} > \text{KCl} + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 > \text{KCl} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 의 순서로 크게 나타난 것과 같은 경향을 나타내었다. 또한 혼합비료의 종류에 관계없이 Sewage-4의 수투과선속이 가장 높게 나타났으며, 반대로 Sewage-1과 2의 수투과선속은 가장 낮게 나타났다. 이러한 이유는 Sewage-4를 대상으로 한 경우 정삼투막의 막 오염이 가장 작게 나타났기 때문으로 판단된다.

$\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl}$ 를 유도용액으로 사용한 경우에 Sewage-1~4의 평균 수투과선속은 각각 9.26, 10.10, 12.91 및 13.67 LMH이었고,  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 의 경우에는 각각 8.55, 9.10, 11.23 및 12.14 LMH이었다.

$\text{KCl} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 를 유도용액으로 사용한 경우에 Sewage-1의 평균 수투과선속이 Sewage-2의 평균 수투과선속에 비해 높게 나타난 이유는 공급부의 막표면에 결정이 생긴 것과 채수일 1 day 전까지 약 2 day간의 강우가 복합적으로 영향을 준 것으로 판단된다.

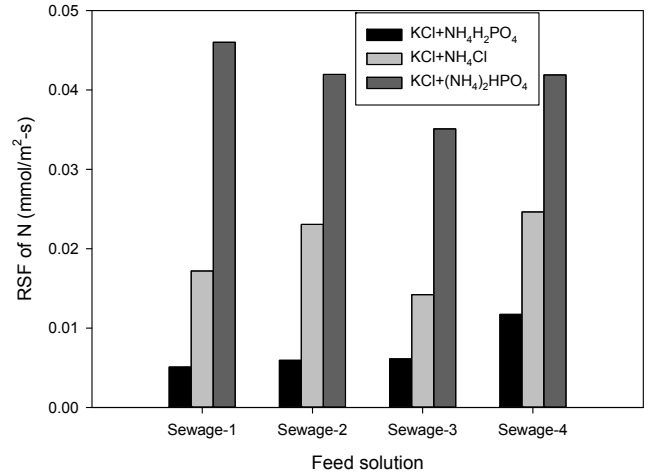
$\text{KCl} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  혼합비료를 유도용액으로 사용하였을 때,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 만을 사용하였을 때[10]와 같이 막표면 위에 결정이 생성되었으나, 결정의 생성 정도는  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 만을 사용하였을 때보다 적게 생성되었다. 이러한 이유는 혼합비료를 사용하였을 때  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 의 농도가 1.0 mol/L  $\text{H}_2\text{O}$ 로서  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 만을 사용하였을 때의 농도, 2.0 mol/L  $\text{H}_2\text{O}$ 에 비해 낮았기 때문으로 사료된다. 한편,  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl}$ 와  $\text{KCl} + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 에서는 결정이 관찰되지 않았다.



**Figure 6.** Total nitrogen changes before and after experiment using the blend of KCl and NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (a), the blend of KCl and NH<sub>4</sub>Cl (b), and the blend of KCl and (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (c) (■: before FDFO, ▒: after FDFO).

**3.3. 역용질선속**

KCl + NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KCl + NH<sub>4</sub>Cl 및 KCl + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>을 유도용액으로 하고 Sewage-1~4를 공급용액으로 하였을 때, 정삼투 실험 전과



**Figure 7.** Reverse solute flux of blended fertilizer draw solutions for sewage feed solutions.

후에 공급용액의 총질소를 측정하고 그 결과를 Figure 6에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 공급용액과 유도용액에 관계없이 정삼투 실험 후의 총질소는 실험 전의 총질소에 비해 높게 나타났다. 이러한 현상은 공급용액의 물이 삼투현상에 의해 유도용액 쪽으로 이동함에 따라 공급용액의 질소성분이 농축될 뿐만 아니라 용질이 유도용액으로부터 공급용액으로 이동하는 역용질확산에 의한 것으로 사료된다.

공급용액별 유도용액에 따른 역용질선속을 Figure 7에 나타내었다. 이때 역용질선속(RSF)은 실험 전과 후의 총질소 농도로부터 식 (1)에 의해 계산하였다. 여기서 V<sub>f</sub>와 C<sub>f</sub>는 각각 실험 종료 후 공급용액의 부피 및 농도이고, V<sub>i</sub>와 C<sub>i</sub>는 각각 초기 공급용액의 부피 및 농도이며, A는 막 단면적, T는 운전시간이다.

$$RSF = \frac{V_f C_f - V_i C_i}{AT} \tag{1}$$

역용질선속은 공급용액에 관계없이 KCl + NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> < KCl + NH<sub>4</sub>Cl < KCl + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>의 순서로 작게 나타났다. 이러한 현상은 단일비료를 유도용액으로 사용하였을 때 역용질선속이 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> < NH<sub>4</sub>Cl < (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>의 순서로 작게 나타난 결과[10]와 일치하였다.

KCl + NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>를 유도용액으로 사용한 경우, Sewage-1~4에서의 역용질선속은 각각 0.005, 0.006, 0.006 및 0.012 mol/m<sup>2</sup>·s이었고, KCl + NH<sub>4</sub>Cl을 유도용액으로 사용한 경우 역용질선속은 각각 0.017, 0.023, 0.014 및 0.023 mol/m<sup>2</sup>·s이었으며, KCl + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>를 유도용액으로 사용한 경우 역용질선속은 각각 0.046, 0.042, 0.035 및 0.042 mol/m<sup>2</sup>·s이었다.

**3.4. 복합비료(21-17-17) 유도용액**

복합비료(21-17-17)는 질소(N) : 인(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) : 칼륨(K<sub>2</sub>O)의 중량비(w/w%)를 21 : 17 : 17로 제조한 비료로서 제주지역에서 가장 많이 사용되고 있는 비료이다. 이러한 복합비료를 유도용액으로 사용하기 위하여 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 및 KCl을 이용하여 질소 : 인 : 칼륨의 중량비가 21 : 17 : 17이 되도록 제조하였다. 이때 복합비료의 농도는 단일비료 및 혼합비료와 비교하기 위하여 2 mol/L H<sub>2</sub>O로 하였다.

Sewage-1~4 하수를 대상으로 하여 운전시간에 따른 수투과선속의 변화를 Figure 8에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 공급용

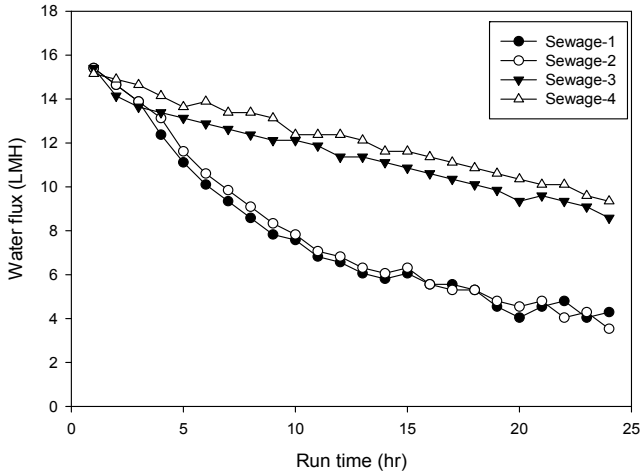


Figure 8. Variations of water flux with operating time using blended fertilizer (21-17-17).

액에서 운전시간에 따라 수투과선속의 감소하는 경향이 나타났다. 또한 Sewage-1과 2의 수투과선속이 Sewage-4와 3에 비해 낮게 나타났는데 이러한 이유는 Sewage-4와 3에 비해 Sewage-1과 2의 막오염이 크게 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

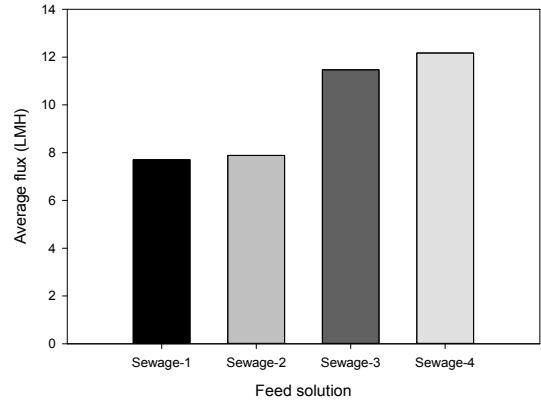
복합비료(21-17-17)를 유도용액으로 사용한 경우 평균 수투과선속, 실험 전과 후의 공급용액의 질소 농도 변화 및 역용질선속을 Figure 9에 나타내었다. 평균 수투과선속은 Sewage-4 > Sewage-3 > Sewage-2 > Sewage-1의 순서로 크게 나타났으며, Sewage-1~4에 대한 평균 수투과선속 값은 각각 7.70, 7.88, 11.47 및 12.17 LMH이었다. 이러한 수투과선속 값은 KCl + NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>를 유도용액으로 사용한 경우의 수투과선속 값과 거의 유사하였다.

복합비료(21-17-17)를 사용한 경우에도 정삼투 실험 후에 막표면에 결정이 관찰되었다. 그 원인은 복합비료(21-17-17) 중에 포함되어 있는 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>만을 유도용액으로 사용한 경우[10]와 KCl + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>로 구성된 혼합비료를 유도용액으로 사용한 경우에 비해 결정의 양은 적게 나타났다. 이러한 이유는 복합비료(21-17-17)에 포함된 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>의 농도는 0.43 mol/L H<sub>2</sub>O로서 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>만을 사용한 경우와 혼합비료를 사용한 경우에 비해 농도가 낮아 결정이 적게 생성되기 때문이다.

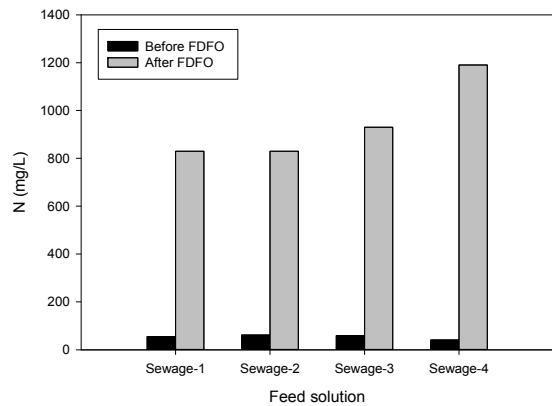
실험 후의 질소 농도는 정삼투 실험 전의 질소 농도에 비해 모든 공급용액에서 높게 나타났다. 이는 농축에 의해 질소 농도가 증가되는 것뿐만 아니라 유도용액에 함유되어 있는 질소 성분이 공급용액으로 이동하는 역용질확산에 의한 것으로 사료된다.

또한 Sewage-3을 제외하고 모든 하수의 역용질선속은 유사하게 나타났다. Sewage-4의 경우 Sewage-1과 2의 역용질선속과 유사한 것은 정삼투 실험의 종료된 후에 공급용액의 총질소 농도가 높게 나타났지만, 평균 수투과선속이 다른 하수에 비해 가장 크게 나타났기 때문이다.

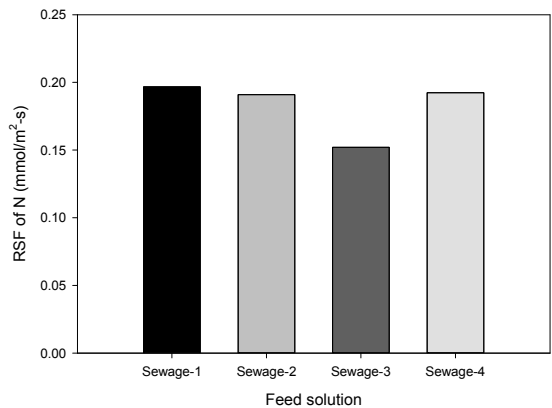
복합비료(21-17-17)를 유도용액으로 사용한 경우 Sewage-1~4의 역용질선속은 각각 0.20, 0.19, 0.15 및 0.19 mmol/m<sup>2</sup>s로 나타나 KCl + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>를 유도용액으로 사용한 경우의 역용질선속 값인 0.046, 0.042, 0.035 및 0.042 mol/m<sup>2</sup>s보다 약 5배 높게 나타났다. 이러한 이유는 복합비료(21-17-17)의 경우 질소(N) : 인(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) : 칼륨(K<sub>2</sub>O)의 중량비(w/w%)를 21 : 17 : 17로 제조하기 위하여 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 및 KCl을 사용하였는데 이 중에서 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>으로 인해 역용질확산이 커지기 때문인 것으로 판단된다. NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>는 해리도가 낮는데 해리도



(a)



(b)



(c)

Figure 9. Average water flux (a), total nitrogen change (b), and reverse solute flux (c) for sewage feed solutions using blended fertilizer (21-17-17).

지 않은 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 이온이나 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 이온에 비해 역용질확산이 잘 되기 때문이다. 2 M NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>는 약 1.15 M의 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>가 해리되지 않고 분자형태로 남아 있는 것으로 보고되고 있다[8].

#### 4. 결 론

본 연구에서는 하수처리장 1차 침전지의 유입수를 30 min간 정지한 후 상등액(Sewage-1), 1차 침전지의 유출수를 30 min간 정지한 후

상등액(Sewage-2), 1차 침전지 유출수를 1  $\mu\text{m}$  카트리지 필터로 여과한 여과액(Sewage-3) 및 2차 침전지 유출수(Sewage-4)의 모두 4종류의 하수를 대상으로 혼합비료 유도용액을 사용하여 정삼투하였다. 혼합비료 유도용액으로 KCl + NH<sub>4</sub>Cl, KCl + NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KCl + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>의 3종류 혼합비료, 그리고 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, KCl 및 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>를 적절하게 조합하여 TN : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O의 중량비(wt%)를 21 : 17 : 17로 혼합한 복합비료(21-17-17)를 각각 사용하여 수투과선속과 역용질확산을 측정하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 혼합비료 유도용액의 삼투압과 수투과선속은 KCl + NH<sub>4</sub>Cl > KCl + NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> > KCl + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>의 순서로 크게 나타났다.
- 2) 혼합비료의 종류에 관계없이 Sewage-4의 수투과선속이 가장 높게 나타났으며, Sewage-1과 2의 수투과선속은 가장 낮게 나타났다.
- 3) 역용질선속은 공급용액에 관계없이 KCl + NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> < KCl + NH<sub>4</sub>Cl < KCl + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>의 순서로 작게 나타났다. 이러한 현상은 단일비료를 유도용액으로 사용하였을 때 역용질선속이 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> < NH<sub>4</sub>Cl < (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>의 순서로 작게 나타난 결과와 일치하였다.
- 4) KCl과 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>의 혼합비료 유도용액을 사용한 경우, 2차 침전지 유출수에 대한 평균 수투과선속은 12.14 LMH이었고, 역용질선속은 0.012 mol/m<sup>2</sup>s이었다.

## 감 사

이 논문은 2018학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

## References

1. G. S. Song, Domestic and overseas technology trends in sewage treatment water reuse, *Konetic Report 2016-101*, 2-10 (2016).

2. H. W. Lee and G. H. Ahan, *Water Reuse and Recycling*, 140-207, Nuri Press, Jeju (2012).
3. T. Asano and A. D. Levine, Wastewater reclamation, recycling and reuse: Past, present, and future, *Water Sci. Tech.*, **33**, 1-14 (1996).
4. T. Y. Cath, A. E. Childress, and M. Elimelech, Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments, *J. Membr. Sci.*, **281**, 70-87 (2006).
5. J. Korenak, S. Basu, M. Balakrishnan, C. H. Nielsen, and I. Petrinic, Forward osmosis in wastewater treatment process, *Acta Chim. Slov.*, **64**, 83-94 (2017).
6. S. Phuntsho, H. K. Shon, S. Hong, S. Lee, S. Vigneswaran, and J. Kandasamy, Fertilizer drawn forward osmosis desalination: The concept, performance and limitations for fertigation, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, **11**, 147-168 (2011).
7. S. G. Kim and H. W. Lee, The performance evaluation of blended fertilizers as draw solution in forward osmosis desalination, *Membr. J.*, **28**, 45-54 (2018).
8. 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**, 172-181 (2011).
9. 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**, 4567-4575 (2012).
10. S. G. Kim and H. W. Lee, Water reuse of sewage discharge water using fertilizer drawn forward osmosis: Evaluating the performance of draw solution, *Membr. J.*, **26**, 108-115 (2016).
11. S. G. Kim and H. W. Lee, Reuse and concentration of sewage by forward osmosis using fertilizer as draw solution, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 122-131 (2017).