



초순수 제조 공정의 폐수발생량 저감을 위한 역삼투 공정 고회수율 설계

High recovery reverse osmosis design to minimize wastewater of ultra-pure water production process

이현우 · 김동건 · 전종민 · 김수한*
Hyunwoo Lee · Dongkeon Kim · Jongmin Jeon · Suhan Kim*

부경대학교 토목공학과
Department of Civil Engineering, Pukyong National University

ABSTRACT

The production process of ultra-pure water (UPW) involves dozens of unit processes such as reverse osmosis (RO), pretreatments, membrane degasifier, and several ion exchange processes. Recently, continuous electrodeionization (CEDI) has replaced the 2-bed and 3-tower (2B3T) ion exchange process. As a result, the majority of wastewater in UPW production now comes from the RO concentrate. The important of RO in UPW production is to produce high-quality water with a low ion concentration (around 1 mg/L) for CEDI feed water. Minimizing RO concentrate is essential to reduce the wastewater produced in the UPW production process. This can be achieved by maximizing the recovery of the RO system. However, increasing the recovery is limited by the water quality of the RO permeate. To ensure high-quality permeate water, the RO system is designed with a two-pass configuration. The recovery of each pass in the RO system is limited (e.g., < 85%) due to the expected increase in permeate water concentration at higher RO feed water concentrations. Interestingly, tests using 4-inch RO modules with low concentration feed water (≤ 35 mg/L as NaCl) revealed that the permeate concentration remains almost constant regardless of the feed water concentration. This implies that the recovery of the first RO pass can be increased as long as the average feed/concentrate concentration of the second RO pass

Received 22 May 2023, revised 12 June 2023, accepted 13 June 2023.

*Corresponding author: Suhan Kim (E-mail: suhankim@pknu.co.kr)

- **이현우 (석사과정) / Hyunwoo Lee (Master Student)**
부산광역시 남구 용소로 45, 48513
45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Republic of Korea
- **김동건 (박사과정) / Dongkeon Kim (Ph.D. Student)**
부산광역시 남구 용소로 45, 48513
45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Republic of Korea
- **전종민 (박사후연구원) / Jongmin Jeon (Postdoctoral Researcher)**
부산광역시 남구 용소로 45, 48513
45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Republic of Korea
- **김수한 (교수) / Suhan Kim (Professor)**
부산광역시 남구 용소로 45, 48513
45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

pp. 119-126

pp. 127-138

pp. 139-146

pp. 147-154

is less than 35 mg/L. According to this design criterion for the RO system, the recovery of the first and second RO pass, with a feed water concentration of 250 mg/L as NaCl, can be increased up to 94.8% and 96.0%, respectively. Compared to the conventional RO system design (e.g., 70% and 80% for the first and second RO pass) for UPW production, this maximum recovery design reduces the volume of RO feed and concentrate by up to 38.4% and 89.2%, respectively.

Key words: Ultra-pure water(UPW), Wastewater of UPW production process, Reverse osmosis (RO), The maximum RO recovery

주제어: 초순수, 초순수 제조 공정 폐수, 역삼투, 역삼투 공정 최대 회수율

1. 서론

초순수(Ultra-pure water, UPW)란 수중의 무기질, 미립자, 용존 산소 등을 제거한 초고순도의 물로 이온을 제거했다는 의미로 DIW(Deionized water)라고도 한다. 최근 급속한 경제 발전과 함께 여러 산업분야에서 순수 및 초순수 사용이 증가하고 있으며 국내에서는 90년대 말 이후부터 화력 및 원자력 발전소, 열병합 발전소, 석유화학공장, 제약회사, 반도체 분야 및 철강회사 등 많은 분야에서 초순수가 사용되고 있는 실정이다(Lee, 1996).

국내 반도체 산업에서 사용되는 공업용수의 약 50%가 초순수로 반도체 산업의 성장에 따라 초순수의 소비량은 더욱 증가할 것으로 보인다. 2019년 반도체 산업에서 사용되는 공업용수량은 44.6만 m³/일로 국내에서 하루 공급되는 공업용수량의 12.7%에 달하며 2040년 169.5만 m³/일에 달할 것으로 추정된다(Park, 2021). 그러나, 현재 용수 부족과 초순수 공정에서 배출되는 폐수로 인한 수질 오염 등에 대한 문제로 국내외 여러 반도체 공정에서 초순수 공급에 문제를 겪고 있다(Hwang, 2020). 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 농축수 재이용, 수처리 신기술 도입 등 다양한 연구가 진행되고 있지만 가장 근본적인 방안으로 초순수 공정의 원수 사용량을 줄이고 농축 폐수 발생량을 저감하는 것이 필요하다.

초순수 공정은 초기 이온교환수지를 이용한 2Bed 3Tower(2B3T: 양이온제거탑+탈기장치+음이온제거탑) 방식을 주로 이용하였으며, 80년대 이후 본격적인 역삼투(Reverse osmosis, RO) 막의 개발에 따라 2B3T와 RO 공정을 조합한 다양한 공정을 시도하였다(Choi, 2013; Lee et al., 2016). 하지만, 이온교환수지 재생 시 염산, 가성소다 등의 재생 후 대량의 폐액이 발생하여 비용 및 환경적인 측면에서 문제가 되고 있다. 이에

대한 대체기술로 전기를 이용한 이온제거 기술의 적용이 증가하고 있다. 연속식전기탈이온(Continuous electrodeionization, CEDI) 공정은 전기투석공정과 이온교환공정의 장점을 결합하여 재생이 필요하지 않고 이온을 제거할 수 있는 공정으로, 최근 RO 공정과 CEDI 공정을 결합한 RO+CEDI 공정이 주목받고 있다(Song et al., 2002; Choi, 2013).

RO+CEDI를 적용한 초순수 제조 공정에서 대부분의 농축 폐수가 발생하는 공정은 1차 pass RO의 농축수이다. 그러므로 RO 공정의 회수율을 높인다면 원수 부족과 농축 폐수 처리 문제를 해결할 수 있다. 하지만 고순도 수질을 요구하는 초순수 공정의 경우 RO 공정의 회수율을 높이면 생산수질이 저하될 수 있다. 이러한 이유 등으로 RO 공정의 경우 회수율을 70-90%로 제한하여 운전한다(Lee et al., 2016).

그러나, 본 연구팀의 사전 실험 결과 1차 pass RO의 생산수질이 저하됨에도 2차 pass RO 생산수질이 일정한 수치가 나온다는 결과를 보여줬는데 이는 초순수 공정의 RO 공정 회수율 상승이 생산수질 측면에서 문제가 없을 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 초순수 공정의 2-pass RO 공정에서 다양한 원수 농도 조건에 따른 생산수질 변화를 실험을 통해 조사하였고 이러한 결과를 바탕으로 초순수 공정에 활용되는 RO 공정을 고회수율로 설계하여 생산수질 변화와 원수 및 농축수 유량의 변화를 평가하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 실험재료 및 장치

초순수 제조 공정에 포함된 RO 공정은 대체로 2-pass 시스템으로 운영된다. 2-pass RO 시스템에서는



1차 pass의 생산수가 2차 pass의 원수가 되어 고순도의 수질을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 4인치 RO 막 모듈을 이용한 2-pass RO 시스템을 Fig. 1과 같이 구현하였다. 1차 pass RO 원수는 고압 펌프를 통해 RO 모듈로 유입된다. 다양한 원수 농도 조건을 만들기 위해 각 pass RO의 농축수는 원수 탱크로 순환하여 원수를 농축시키면서 실험을 진행하였다 (Jeon et al., 2020). 초순수 제조 시 RO 공정 전처리로 모래여과, 활성탄여과 등을 사용하기 때문에, 수돗물 수질과 유사하다고 판단하여 1차 pass RO의 실험 원수로 수돗물을 사용하였다 (Kim et al., 1998). 그리고 수돗물에 존재할지 모르는 잔류염소로 인한 RO 막 표면 손상을 막기 위해 수돗물에 Sodium bisulfite(SBS, NaHSO_3)를 주입하였다 (Sheikholeslami et al., 2001).

1차 pass RO 장치의 원수 및 농축수 압력은 아날로그 압력계로 보정된 전자 압력계(A-10, WIKA, Lawrenceville, GA, USA)를 사용하여 측정하였고, 농축수 및 생산수 유량은 두 개의 전자 유량계(P525-1S and 3-2536-P0, GF Signet, El Monte, CA, USA)로 측정되었다. 원수 및 생산수 유량은 고압 펌프의 인버터와 농축수 라인의 밸브를 사용하여 조절하였다. 원수 유량(Q_f)은 측정된 생산수 및 농축수 유량(Q_p 및 Q_c)의 합으로 식 (1)로 계산하였다 (Jeon et al., 2023).

$$Q_f = Q_p + Q_c \quad (1)$$

RO 공정 회수율(R)은 원수 유량에 대한 생산수 유량의 비율로 식 (2)로 계산하였다.

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (2)$$

생산수 플럭스(J)는 단위 면적당 투과 유량으로 식 (3)으로 계산하였다.

$$J = \frac{Q_p}{A} \quad (3)$$

여기서 A 는 막모듈의 표면적(Membrane surface area)이다.

원수 및 생산수 전기전도도(Conductivity)는 Inline GF Signet 전도도계(3-2822-1 및 3-2820-1, GF Signet, El Monte, CA, USA)로 측정되었다. 2차 pass RO 장치의 원수 및 농축수 압력은 아날로그 압력계(삼성계기, KSB5305)를 사용해 측정되었고, 농축수 및 생산수 유량은 1리터의 부피를 채우는데 걸린 시간을 실측하여 계산하였다. 원수 전도도계(3-2820-1, GF Signet, El Monte, CA, USA)와 초순수용 온라인 TOC(TOC-1000e, Shimadzu, Japan)장치의 전기전도도 센서를 이용하여 생산수 전기전도도를 측정하였다. 각 pass별 전기전도도는 휴대용 수질 측정기(Ultrameter II 6PFC^E,

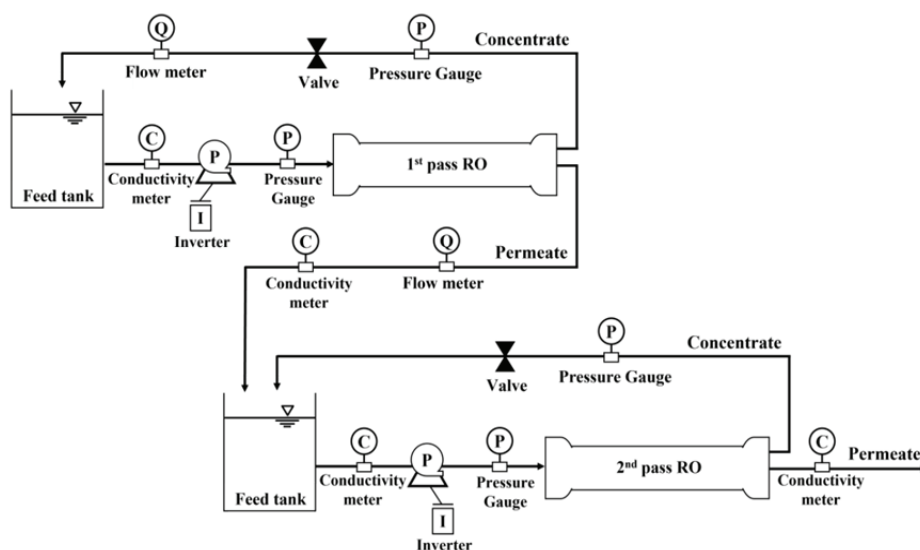


Fig. 1. Schematic of the 2-pass RO module bench-scale system.

Table 1. 4-inch brackish water reverse osmosis (BWRO) membrane modules used in this work

Manufacturer	Module	Area (m ²)	Salt rejection (%)	Permeate flow rate (m ³ /day)
Toray Chemical Korea Inc	RE4040-BE	7.9	99.7	9.1
LG Chem	BW 4040 R	7.9	99.6	9.5
Toray Chemical Korea Inc	RE4040-BLR	7.9	99.6	7.2
Dupont Water Solutions	LC HR-4040	8.7	99.7	11

Table 2. Experimental condition

Process	Feed TDS (mg/L)	Feed temperature (°C)	Permeate flux (LMH)	Recovery rate (%)
1 st pass RO	70-900	15-30	11-19	25
2 nd pass RO	0.9-35	20-30	15-26.6	16

MYRON L, Carlsbad, CA, USA)와 버퍼용액을 활용하여 보정하였다. 측정된 전기전도도는 전기전도도 값과 TDS(Total dissolved solids) 값의 상관관계를 나타내는 검량선을 작성하여 TDS로 변환하여 사용하였다. 식 4는 전기전도도 0.7-55 $\mu\text{S/cm}$, 식 5는 55-1800 $\mu\text{S/cm}$ 범위에서 TDS 변환식을 나타낸 것이다. 식 (4), (5)에서 TDS는 mg/L 단위, Conductivity는 $\mu\text{S/cm}$ 단위이다.

$$TDS = 0.3745 \text{Conductivity} + 0.0724 \quad (4)$$

$$TDS = 0.5069 \text{Conductivity} - 9.2315 \quad (5)$$

염 제거율(r)은 생산수 수질(C_p)과 원수 수질(C_f)의 비율을 통해 계산되며 식 (6)으로 계산된다.

$$r = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (6)$$

Table 1은 실험에 사용된 기수(Brackish water)용 RO 막 모듈 사양을 나타내고, Table 2는 각 pass별 실험 조건을 나타낸다.

2.2 초순수 공정의 2-pass RO 공정 설계

RO 공정 설계 프로그램은 설계인자에 사용하는 막, 원수 이온 조성 및 농도, 막모듈 배열 형태(벡셀 수, 벡셀 당 모듈 수 등), 설계 회수율, 설계 생산수량 등을 입력하면 프로그램에서 생산수질과 공급 압력이 출력 값으로 계산된다 (Kim et al., 2021). 1차 pass RO

는 제조사에서 제공하는 설계 프로그램 데이터와 실험 결과가 큰 차이가 없어 설계 프로그램을 활용하였다.

2차 pass RO의 경우 유량과 압력은 설계 프로그램 데이터를 활용하였고, 생산수질은 설계 프로그램 데이터와 실험 결과가 상이하여 본 연구를 통해 얻은 실험 데이터를 적용하여 계산하였다. 설계 프로그램에서 출력된 1차 pass RO의 생산수 TDS와 유량 데이터를 바탕으로 2차 pass RO의 각 모듈의 유입수질이 TDS 35 mg/L이하이면 생산수 TDS는 0.558 mg/L으로 출력되게 설계하였다. 농축수 수질(C_c)은 물질평형식을 나타내는 식 (7)로 계산하였다.

$$C_f Q_f = C_p Q_p + C_c Q_c \quad (7)$$

평균 농축수 수질(C_{avg})은 식 (8)로 평균 농도를 직접 계산하여 활용하였다 (DUPONT Technical manual).

$$C_{avg} = C_f \times \frac{\ln\left(\frac{1}{1-R}\right)}{R} \quad (8)$$

최종 생산수량은 95 m³/hr, 1차 pass RO 플럭스 18.8-19.1 LMH(L/m² · hr), 2차 pass RO 플럭스 26.4 LMH와 수온 25°C로 고정하였고, 벡셀 당 모듈 수는 8개로 구성하였다. 2-pass RO 공정의 2차 pass RO 농축수는 1차 pass RO 원수보다 수질이 좋으므로 1차 pass RO 원수로 회수되게 설계하였다. 설계 변수 조건은 1차/2차 pass RO 회수율 70/80%, 80/90%, 최대 회수율, 원수 TDS 125, 250, 500, 1000 mg/L로 설정하였고, 필요에 따라 공정 구성과 벡셀 수 등을 변화시켰다.



3. 결과 및 토의

3.1 2-pass RO 실험 결과

Fig. 2는 1차 pass RO의 원수 TDS 변화에 의한 생산수 TDS 변화를 나타낸 것이다. 원수 TDS가 감소할수록 생산수 TDS 또한 감소하였다. 동일한 원수 TDS에서 생산수 TDS의 차이는 플럭스와 수온의 변화로 발생한 결과이다. 원수 TDS 190 mg/L에서 실험 결과 고평럭스(19 LMH)에서 생산수 TDS는 1.39 mg/L로 측정되었고, 저플럭스(11.8 LMH)에서 생산수 TDS는 1.64 mg/L로 생산수질이 저하되었다. 또한 동일한 원수 농도의 저온(20.9°C) 조건에서는 생산수 TDS는 1.34 mg/L로 측정되었고, 고온(22.8°C)에서 생산수 TDS는 1.49 mg/L로 저하되었다. 이러한 결과는 일반적인 RO 공정의 이온 제거율에서 나타나는 현상과 동일하다. 플럭스가 상승할수록 RO 막을 통과하는 물

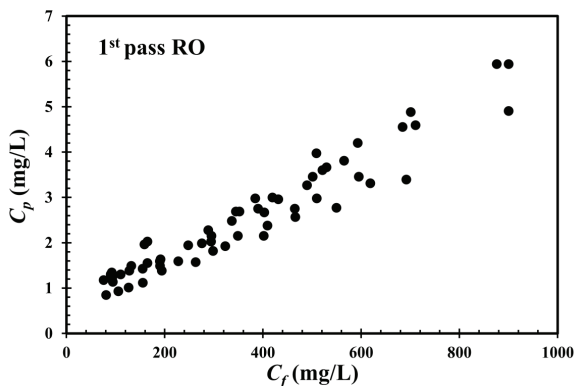


Fig. 2. Effect of feed concentration on the permeate concentration of the 1st pass RO.

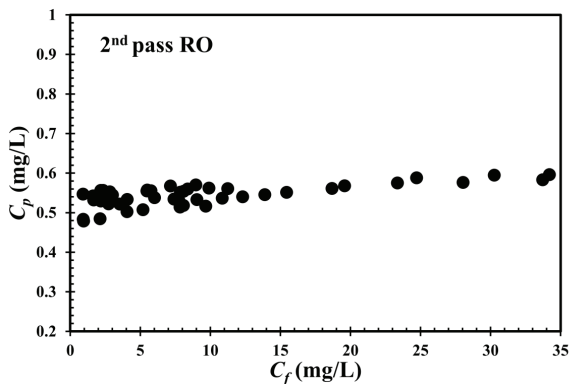


Fig. 3. Effect of feed concentration on the permeate concentration of the 2nd pass RO.

과 이온의 물질전달 속도 차이가 커져 제거율이 향상되고, 수온이 증가할수록 물의 점성계수가 낮아지고 RO 막의 공극이 팽창하여 제거율이 감소된다 (Kim et al., 2014; Lee and Kim, 2014).

Fig. 3은 2차 pass RO의 원수 TDS 변화에 의한 생산수 TDS 변화를 나타낸 것이다. 2차 pass RO의 경우 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 원수 TDS가 변화해도 생산수 TDS는 0.5-0.6 mg/L 범위에서 일정하게 유지되는 경향을 볼 수 있다. 또한 플럭스 15-26.6 LMH 범위와 수온 20-30°C 범위에서 플럭스와 수온의 변화에도 생산수질의 변화는 없었다. 원수에 포함된 TDS 0.5 mg/L 정도의 미량 이온들은 RO 공정을 통해 제거하기 어렵고, 저농도 원수 조건(TDS 35 mg/L 이하)에서는 원수 농도, 플럭스, 수온 같은 영향인자들이 생산수질에 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 이는 초순수 공정에서 RO 공정을 운전할 때 1차 pass RO의 회수율을 높이는 것이 2차 pass RO의 생산수질에 영향을 주지 않을 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 초순수 공정의 2-pass RO 공정에서 회수율을 최대한 높게 설계하였을 때 생산수질 변화(3.2 절 참조)와 원수 및 농축수 유량의 변화(3.3 절 참조)를 평가하였다.

3.2 원수 농도와 회수율 변화에 의한 생산수질 변화

설계 프로그램과 3.1 절의 실험 데이터를 활용해 초순수 공정의 2-pass RO 공정을 설계하였다. Fig. 4는 2-pass RO 설계 공정 중 하나로 원수 TDS가 250 mg/L인 경우의 최대 회수율 설계 공정 모식도이다. 회수율을 최대한 높이기 위해 각 pass를 3 stage로 설계하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 2차 pass RO의 농축수는 feed tank로 회수되기 때문에 2-pass RO 공정에서 1차 pass RO의 농축수만 폐수로 발생된다.

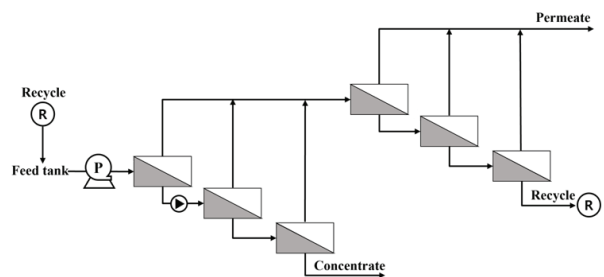


Fig. 4. Schematic of the 2-pass RO system.

최대 회수율 설계는 프로그램 경고가 발생하지 않는 수준에서 회수율을 원수 TDS 125, 250 mg/L일 때 1차 pass RO 94.8%, 2차 pass RO 96.0%, 원수 TDS 500, 1000 mg/L일 때 1차 pass RO 90.0%, 2차 pass RO 96.8%까지 높였다. Fig. 5는 원수 TDS 농도와 1/2차 pass RO의 회수율 변화에 의한 생산수 TDS 변화를 나타낸 것이다. 원수 농도와 회수율이 높아질수록 생산수질은 나빠졌지만 생산수질은 모두 TDS 1 mg/L 미만으로 그 차이는 미미했다. 이 결과는 일반적인 초순수 공정의 RO 공정을 고회수율로 설계하여도 생산수질 측면에서는 문제가 없을 것을 의미한다.

Fig. 6은 Fig. 4의 2차 pass RO의 2단 stage의 모습으로 와권형 RO 막 모듈 8개를 직렬로 연결했을 경우의 모듈별 원수 수질과 유량의 변화를 각각 나타낸 것이다. 각 모듈에 유입되는 원수는 후단으로 갈수록 농축

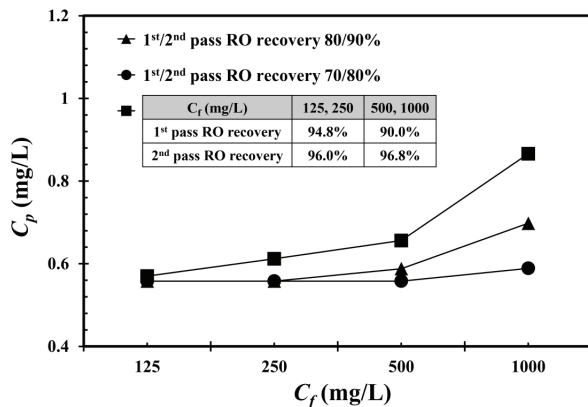


Fig. 5. Effect of recovery rate on permeate concentration by feed concentration.

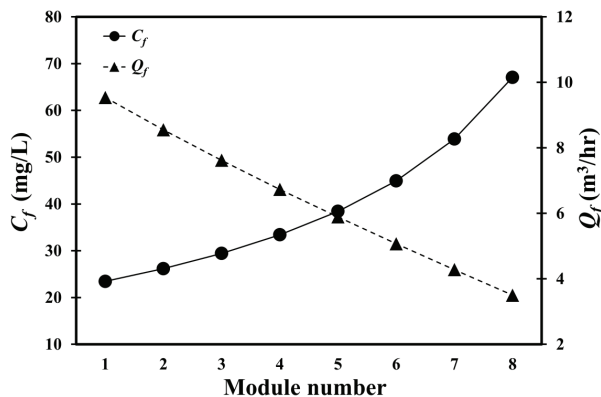


Fig. 6. Experimental results of RO system with 8-stage serial arrangement.

되어 농도가 점차 증가하고, 유량을 반대로 감소한다. 5번 모듈 이전(원수 TDS 35 mg/L 이하)에서는 생산수질이 TDS 0.558 mg/L로 일정하게 유지되고, 이후 모듈에서는 1차 pass RO 실험 데이터를 적용하여 생산수질을 계산했다. 회수율을 높게 설계할수록 후단 모듈에서 원수 TDS가 35 mg/L 이상으로 농축되어 생산수질이 저하되지만, 생산수량이 줄어들기 때문에 최종 생산수질에는 큰 차이가 없었다.

3.3 회수율 변화에 의한 원수 및 농축수 유량 변화

Fig. 7은 초순수 공정에서 2-pass RO 공정의 회수율 변화에 의한 1차 pass RO 원수 및 농축수 유량 변화를 나타낸 것이다. 회수율이 높아질수록 원수 유량 대비 생산수량의 비율이 증가하여 원수 및 농축수 유량이 줄어든다. 저회수율 설계(1/2차 pass RO 회수율 70/80%)에 비해 최대 회수율 설계(1/2차 pass RO 회수율 94.8/96%) 시 원수 유량은 169.6 m³/hr에서 104.4 m³/hr로 38.4% 감소하였으며, 농축수 유량은 50.6 m³/hr에서 5.5 m³/hr로 89.2% 감소하였다.

최근 초순수 공정으로 적용되고 있는 RO+CEDI 공정은 이온교환수지를 사용하지 않아 약품 재생이 필요 없는 공정이다. 2-pass RO 공정의 2차 pass RO의 농축수는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 원수로 회수된다. 또한 CEDI 공정의 경우 농축수를 RO 공정 원수로 회수할 경우 회수율을 99%까지 높일 수 있다 (OEM engineering manual). 즉 초순수 공정에서 주로 발생하는 농축 폐수는 1차 pass RO의 농축수로 RO 공정의 회수율 상승이 초순수 공정의 농축 폐수 발생량을 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 본 연구는 이러한 고회

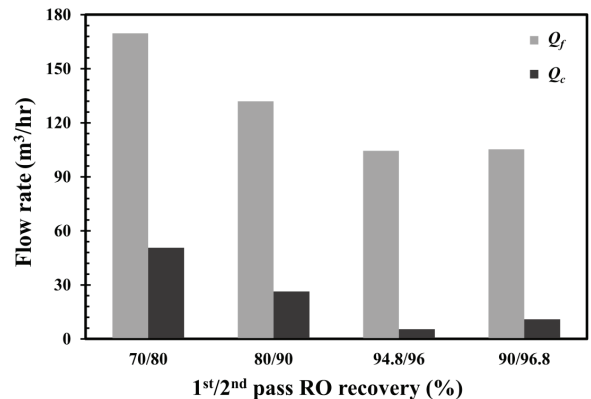


Fig. 7. Effect of recovery rate on flow rate.



수율 RO 공정 설계가 원수 부족과 농축 폐수 처리에 대한 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 방안이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 초순수 제조용 RO 공정에서 원수 TDS 변화에 따른 생산수 TDS 변화를 실험을 통해 조사하였고, 이를 바탕으로 고회수율 RO 공정을 설계 및 평가하였다. 2차 pass RO 실험 결과 저농도 조건(35 mg/L 이하)의 경우 생산수질은 원수 농도, 플럭스, 수온과 같은 인자들의 영향을 거의 받지 않았고 TDS 0.5-0.6 mg/L로 일정한 수준의 수질로 생산된다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 이는 1차 pass RO와 같은 일반적인 RO 공정의 이온 제거율에서는 볼 수 없는 결과로 저농도 조건에서만만의 특징인 것으로 판단된다.

저농도 조건의 실험 데이터를 반영한 2-pass RO 공정 설계 결과 회수율이 높아지더라도 생산수 TDS의 큰 변화는 없었다. 즉, 1차 pass RO에서 회수율을 제한하여 고순도의 수질을 얻는 것이 2차 pass RO의 생산수질에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 또한 최대 회수율 설계 시 저회수율 설계 대비 원수 유량은 169.6 m³/hr에서 104.4 m³/hr로 38.4% 감소하였고, 농축수 유량은 50.6 m³/hr에서 5.5 m³/hr로 89.2% 감소했다. RO+CEDI를 활용하는 초순수 제조 공정에서 농축 폐수가 주로 발생하는 공정은 1차 pass RO 공정으로 RO 공정에서 발생하는 원수 및 농축수 유량을 줄인다면 최근 문제되는 초순수 공정의 원수 부족과 농축 폐수 처리에 대한 문제를 효과적으로 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 본 연구는 수돗물 속에 포함된 불특정 이온성 물질에 대한 결과로 RO 공정에서 상대적으로 제거율이 낮은 유기물과 질소계 물질의 경우 본 연구에서 설계한 회수율과는 다른 결과를 나타낼 수 있다. 따라서 향후 유기물과 질소계 물질에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

본 연구에 따르면, 초순수 공정의 RO 공정을 설계할 때 최종 생산수질의 변화가 크지 않은 조건에서 회수율을 최대한 높여서 설계하는 것이 원수 및 농축 폐수량을 감소시킬 수 있는 방법이라고 사료된다. 회수율을 높이면 에너지소모량이 증가할 수 있지만, 막 모듈의 개수와 유입 유량이 감소하면서 기대되는 에

너지소모량 저감 효과를 고려하면 에너지소모량 증가에 대한 문제도 일부 해결될 것으로 판단된다. 다만 고회수율 운전 시 스케일 형성으로 인해 회수율을 높이지 못하는 문제가 있을 수 있는데, 향후 스케일 형성 억제 연구가 병행된다면 초순수 제조 공정에서 RO 공정의 고회수율 설계도 고려해볼 만한 방법이라 할 수 있다.

사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 고순도 공업용수 생산공정 국산화 플랜트 설계/시공기술 개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2021003210007).

References

- Choi, B.S. (2013). Ultrapure water industry and technology trends, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Issue Report of KAIA, 1-16.
- DUPONT Water Solutions FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf> (May 19, 2023).
- Hwang, J.S. (2020). The Korea Economic Daily, <https://www.hankyung.com/economy/article/202305195887i> (May 19, 2023).
- Jeon, J.M., Kim, D.K., Kim, N.R., and Kim, S.H. (2023). Applicability and limitation of the industrial reverse osmosis system simulators, *Desalination*, 549, 116358.
- Jeon, J.M., Kim, S.S., Seo, I.S., and Kim, S.H. (2020). Considerations to design high-pressure membrane system to produce high quality potable water with lower organic matter concentration, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 34(6), 473-480.
- Jung, J.H., Kim, N.R., Jeon, J.M., and Kim, S.H. (2019). Reliability assessment of reverse osmosis system projection programs, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 41(1), 42-47.
- Kim, K.S., Moon, D.S., Kim, H.J., Lee, S.W., Ji, H., Jung, H.J., and Won, H.J. (2014). The effect of feed temperature on premeate flux during membrane separation, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy.*, 17(1), 13-19.
- Kim, S.H., Kang, S.T., and Park, H.K. (1998). A study of optimal

- pretreatment system for the desalination using reverse osmosis, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 20(10), 1367-1375.
- Lee, C.S. (1996). The current of ultra water system, *Membr. J.*, 6(3), 127-140.
- Lee, H.J., and Kim, S.H. (2014). Removal of low concentration organic matter by reverse osmosis membranes in ultrapure water production process, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 28(4), 391-396.
- Lee, H.K., Jin, Y.X., and Hong, S.K. (2016). Recent transitions in ultrapure water (UPW) technology: Rising role of reverse osmosis (RO), *Desalination*, 399, 185-197.
- OEM Engineering Manual Electropure™ XL & EXL Series EDI, [https://www.snowpure.com/docs/Electropure-EDI-Engr-OEM-Manual-v3.5.0-\(CE\)-A4.pdf](https://www.snowpure.com/docs/Electropure-EDI-Engr-OEM-Manual-v3.5.0-(CE)-A4.pdf) (May 19, 2023).
- Park, S.K. (2021). THE SEOUL SHINMUN, <https://www.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=20210728022002> (May 19, 2023).
- Sheikholeslami, R., Al-Mutaz, I.S., Koo, T., and Young, A. (2001). Pretreatment and the effect of cations and anions on prevention of silica fouling, *Desalination*, 139, 83-95.
- Song, J.H., Yeon, K.H., Kim, J.B., Cho, J.W., and Moon, S.H. (2002). A study on production of high purity water for a power plant using an RO-CEDI (Reverse osmosis-Continuous electroceionization), *Theor. Appl. Chem. Eng.*, 8(2), 4189-4192.