



# 유기물 농도가 낮은 고품질 정수 생산을 위한 고압막여과 공정 설계 시 고려사항

## Considerations to design high-pressure membrane system to produce high quality potable water with lower organic matter concentration

전종민<sup>1</sup>·김성수<sup>2</sup>·서인석<sup>2</sup>·김수한<sup>1\*</sup>

Jongmin Jeon<sup>1</sup>·Seong-Su Kim<sup>2</sup>·Inseok Seo<sup>2</sup>·Suhan Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 토목공학과, <sup>2</sup>한국수자원공사 K-water연구원 스마트워터연구소

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Pukyong National University

<sup>2</sup>Smart Water Research Institute, K-water Institute

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

### ABSTRACT

High-pressure membrane system like nanofiltration(NF) and reverse osmosis(RO) was investigated as a part of water treatment processes to produce high quality potable water with low organic matter concentration through membrane module tests and design simulation. River water and sand filtration permeate in Busan D water treatment plant were selected as feed water, and NE4040-90 and RE4040-Fen(Toray Chemical Korea) were used as NF and RO membranes, respectively. Total organic carbon(TOC) concentrations of NF and RO permeates were mostly below 0.5 mg/l and the average TOC removal rates of NF and RO membranes were 93.99% and 94.28%, respectively, which means NF used in this study is competitive with RO in terms of organic matter removal ability. Different from ions rejection tendency, the TOC removal rate increases at higher recovery rates, which is because the portion of higher molecular weight materials in the concentrated raw water with increasing recovery rate increases. Discharge of NF/RO concentrates to rivers may not be acceptable because the increased TDS concentration of the concentrates can harm the river eco-system. Thus, the idea of using NF/RO concentrate as the raw water for industrial water production was introduced. The design simulation

Received 28 August 2020, revised 16 November 2020, accepted 18 November 2020.

\*Corresponding author: Suhan Kim (E-mail: [suhankim@pknu.ac.kr](mailto:suhankim@pknu.ac.kr))

- 전종민 (박사과정) / Jongmin Jeon (Ph.D. Student)  
부산광역시 남구 용소로 45, 48513  
45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Republic of Korea
- 김성수 (책임연구원) / Seong-Su Kim (Senior Researcher)  
대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045  
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea
- 서인석 (연구소장) / Inseok Seo (Institute Director)  
대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045  
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, 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.

results with feed water and membranes used in this work reveal that the raw water guideline can be satisfied if the recovery rate of NF/RO system is designed below 80%.

**Key words:** High quality potable water, Organic matter, Reverse osmosis, Nanofiltration

**주제어:** 고품질 정수, 유기물, 역삼투, 나노여과

## 1. 서 론

최근 국내 수도물의 수질은 국외 여러 국가와 비교 하더라도 나쁘지 않다. 그럼에도 불구하고 수요자들은 수도물에 대한 막연한 불신이 존재하며 이는 수도물 직접 음용률 2~3% 미만이라는 낮은 수치로 대변된다 (Kim et al., 2016). 수도물 불신을 야기한 사례로 과불화합물 등과 같은 미량유해물질의 상수원 유입, 수도물 적수 및 갈따구 발생 사태 등이 있지만 본 연구에서는 용존성 유기물에 초점을 맞추고자 한다.

담수 상수원에는 용존성 유기물질과, 부유물질(병원성 미생물 등 포함)과 같은 오염물질들이 존재한다. 부유물질은 응집-침전-모래여과-염소소독으로 구성되어 있는 기존 정수처리공정으로 제거가 가능하다. 용존성 유기물질은 오존, 활성탄 등 고도처리로 제거가 가능하지만 활성탄의 경우 신탄 제거율은 약 80% 정도이며 4개월 후에는 40% 정도로 낮아져 높은 제거율을 기대하기는 어렵다 (Son et al., 2005). 유기물질은 염소 소독 시 소독부산물인 THM(Trihalomethane)을 발생시키고 색도 및 이취미 유발, 관로 내 미생물 재성장 문제를 야기할 수 있다 (Owen et al., 1995). 그리고 최근 낙동강 수계에 유입되어 문제가 되고 있는 미량유해물질(c.g. 과불화합물, 1-4다이옥산도)도 용존성 유기물질이다. 따라서 수요자가 안심하고 마실 수 있는 고품질 수도물 생산을 위해 유기물 농도(Total organic carbon, TOC 농도로 나타냄) 관리가 매우 중요하다.

물환경정보시스템(Water Environment Information System)에 따르면 국내 상수원 중 TOC 농도가 가장 높은 곳은 낙동강으로 2019년 평균 TOC 농도는 4.37 (최대 6.4) mg/l로 한강 상수원의 평균 TOC 농도(2.22 (최대 3.3) mg/l)와 비교 시 약 2배 높다. 낙동강 수계 정수장 수도물의 TOC 농도는 1.5(최대 2.06) mg/l이며 한강 수계 정수장 1.06(최대 1.21) mg/l로 수도물 TOC 농도도 낙동강 수계 정수장이 더 높다. 먹는물 수질기준에 TOC 항목은 없지만 서울 상수도사업본부에서는

심미적 물질 중 하나로 TOC 농도를 5 mg/l 이하로 관리하며 2006년부터 발표한 수질결과에 따르면 아직 목표를 초과한 적은 없다. 한편, 부산 상수도사업본부에서는 물맛평가 항목 중 하나로 TOC 2 mg/l 이하를 목표로 하고 있지만 이를 초과하는 경우도 가끔 발생하고 있다.

프랑스의 Mery-sur-Oise 정수장에서는 1999년 수도물의 TOC 농도가 2 mg/l를 초과하자 기존 정수시설의 가동을 중단하였다. 그리고 기존 340,000 m<sup>3</sup>/d 규모 중 140,000 m<sup>3</sup>/d를 NF(Nanofiltration)로 개조하여 기존 공정과 NF 공정에서 생산된 생산수를 블렌딩 한 후 소독처리하여 공급한다. 즉, 프랑스 정수장은 수도물 TOC 농도가 2 mg/l를 초과하지 않도록 운영하고 있다는 의미로도 볼 수 있다 (Ventresque et al., 2000). 스페인의 Sant Joan Despi 정수장은 원수의 최대 TOC 농도가 33 mg/l를 초과하는 경우도 발생하여 RO(Reverse osmosis) 공정을 도입하여 운영하고 있다 (Teuler et al., 2013). 네덜란드의 Heemskerk 정수장은 TOC 농도가 3 mg/l 정도인 원수로 정수처리 시 RO 공정을 도입하였으며, 생산수 TOC 농도는 약 0.2 mg/l로 고품질 수도물을 공급하고 있다 (Kruithof et al., 1998).

낙동강 수계 정수장은 전오존, 후오존, 활성탄 등 높은 수준의 고도처리가 도입되었음에도 최대 TOC 농도가 2 mg/l를 초과할 때가 있었다. 프랑스 Mery-sur-Oise 정수장 사례를 고려하면, 수도물 고품질화를 위해 RO나 NF와 같은 고압막여과 도입을 검토해볼 필요성이 있다.

그리고, 수도물 고품질화를 위한 방법 중 하나로 분산형 정수시스템이라는 개념이 있다. 분산형 정수시스템은 공급하고자 하는 지역에 다수의 소규모 정수시설을 분산 배치하는 것으로 수도물의 관내 체류시간(Waterage)이 짧다는 장점이 있다 (Chang et al., 2013). 이러한 장점에도 불구하고 수도물의 유기물 농도가 높다면, 관로 내 미생물 재성장 등을 야기하여 (Lee et al., 2007) 수도물 고품질화에 악영향을 미칠 수 있으므로 부산에코델타시티에서는 분산형 정수장



에 고압막여과 도입을 검토 중에 있다. 부산에코델타 시티는 부산광역시, K-water, 부산도시공사에서 시행하고 있는 스마트 시티 시범도시 조성사업으로 달성 목표 중 하나로 스마트 물관리 기술을 적용해 물 특화 도시를 구축할 계획이다.

본 논문에서는 유기물 농도가 낮은 고품질 수돗물 생산을 위해 고압막여과를 도입할 경우의 주요 고려 사항(유기물 제거율, 회수율의 상승에 따른 제거율 감소, RO와 NF 막의 성능 비교)을 막모듈 실험과 설계 시뮬레이션을 통해 검토해보고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 수질측정 항목 및 분석 방법

원수는 낙동강 지류인 평강천 하천수(River water, RW)와 낙동강 수계 D정수장 모래여과수(Sand filter permeate, SFP)를 사용하였다. RW는 직접 취수했으며, SFP는 D정수장의 협조를 통해 원수를 제공받았다. 취수 시 RW의 탁도가 고압막여과 실험을 하기에 높았기 때문에(20 NTU 초과), 24시간 침전시킨 후 상정수를 다시 카트리지 필터(MPE-250-0.2, 필터테크)를 통해 여과 전처리한 후 실험에 사용하였다.

수질 항목은 칼슘, 마그네슘, 철, 망간, TDS(Total dissolved solid), TOC, 탁도, SDI(Silt density index)를 분석하였다. 칼슘, 마그네슘, 철, 망간은 농축수 수질 예측 계산을 위해 Shimadzu사의 AA-7000F로 측정하였다. TDS는 고압막여과 공정 설계인자인 삼투압을 간접적으로 알아보기 위해 Myron L사의 ULTRAMETER로 측정하였다. TOC는 고압막여과 공정의 유기물 제거 능력을 확인하기 위해 Shimadzu사의 TOC-vcph로

측정하였다. 탁도의 경우 막의 파울링 위험도와 배출수 수질 예측 계산을 위해 측정하였으며 HF scientific사의 HF Micro TPW로 측정하였다. SDI는 ASTM D4189-95에서 제시된 방법으로 측정하였다. SDI를 제외하고 모든 수질은 3회 측정하여 평균과 표준편차를 나타내었다.

### 2.2 막모듈 테스트 및 소규모(2,000 m<sup>3</sup>/d) 고압막 시스템 설계

막모듈 테스트는 연구실에서 직접 구축한 4인치 고압막모듈 실험장치를 사용하였다. 정수처리에 사용할 수 있도록 상하수도협회의 인증을 받은 막모듈을 사용하였다. 2020년 기준으로 상하수도협회 인증막은 도레이케미칼(주)사의 NE8040-90과 RE8040-Fen으로 RO와 NF 각 하나씩 존재한다. 실험에는 이 막들의 4인치 버전인 NE4040-90과 RE4040-Fen를 사용하였다. 본 연구에서는 플럭스는 19 LMH로 고정하였으며, 회수율은 80%까지 높이면서 실험을 진행하였다. 실험방법은 막모듈의 농축수를 원수탱크에 보내고, 생산수를 버리는 방식으로 원수탱크에 들어있는 용액의 부피를 20%까지 줄이는 방식으로 운전하였다 (Fig. 1 참조). 원수 농축률이 각각 1, 2, 3, 5배(즉, 회수율이 0, 50, 66.7, 80%)가 될 때 생산수의 TDS와 TOC를 측정하였다.

서론에서 언급된 부산에코델타시티의 분산형 정수 시스템을 고려하여 2,000 m<sup>3</sup>/d 규모의 고압막 시스템을 설계하였다. 제조사에서 제공하는 설계 프로그램(CSMPRO)을 사용하였으며, 막모듈은 NE8040-90과 RE8040-Fen을 적용하였다. 원수 수질 정보는 실제로 측정한 값(Table 1 참조)을 입력하였으며, 계절에 따른

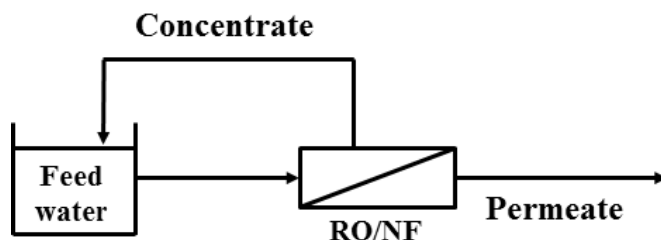


Fig. 1. Schematic and picture of high pressure membrane system used in this work.

수온 변동을 고려하기 위해 5, 25°C 두 경우에 대해 설계를 진행하였다. 참고로, 원수 온도가 높아질수록 물의 점성이 낮아지고 막의 투과능이 높아지므로 요구 압력이 낮아지게 되고 수질은 나빠지게 된다. 회수율은 농축수 TDS 농도를 고려하여 80%로 제한하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 수질분석 결과

Table 1은 원수의 수질분석 결과를 요약한 것이다. TDS의 경우 RW가 SFP보다 높았는데, RW 취수 지점이 D 정수장 취수장보다 낙동강 하구에 가깝기 때문이다. 또한 원수 취수 시기가 7-8월 하계였기 때문에 SFP의 TDS 값은 일반적인 지표수 TDS 값보다 다소 낮은 경향을 보였다. SFP는 전오존, 응집, 침전, 모래여과를 거쳤기 때문에, RW보다 탁도 및 TOC 농도도 낮았다. RW의 경우 SDI 실험 도중 필터가 막혀서 더 이상 진행이 되지 않았기 때문에 이론상 최대 SDI 값인 6.67로 나타내었다. SFP는 5보다 약간 높은 SDI 값을 얻었다.

참고로, SDI는 막여과 공정의 파울링 발생 가능성을 나타내는 지표로 막 제조사에서는 기준값을 3-5 범위 내에서 권고하고 있다. 따라서, D 정수장이나 에코델타시티 분산형 정수시스템에 고압막여과 공정 도입 시 SFP를 사용한다면, 파울링 대비(예: 전처리 공정 추가, 고압막여과 공정의 설계 플렉스 및 회수율 감소 등)가 필요할 것으로 판단된다. SFP의 철, 망간 농도는 막 제조사에서 권고하는 0.05 mg/l 이하를 만족하고 탁도도 낮기 때문에, 5보다 높은 SDI 값이 나온 이유는 상대적으로 높은 TOC 값 때문인 것으로 판단된다.

**Table 1.** Feed water quality

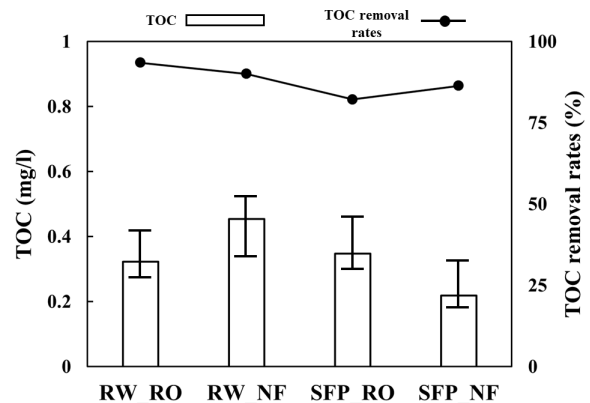
	RW	SFP
TDS (mg/l)	310.55±35.41	104.51±8.94
Calcium (mg/l)	12.27±4.30	11.85±1.29
Magnesium (mg/l)	4.87±0.101	4.43±0.185
Iron (mg/l)	0.13±0.016	0.02±0.003
Manganese (mg/l)	0.03±0.007	0.02±0.001
Turbidity (NTU)	2.01±0.293	0.46±0.056
TOC (mg/l)	4.72±0.23	1.81±0.192
SDI	6.67	5.21

실제 원수에 대한 다양한 실험 결과에 의하면(Kim et al., 2011), 탁도가 낮더라도 TOC 값이 높으면 SDI 값이 높아질 수 있다.

#### 3.2 막모듈 테스트 결과 분석

RW를 원수로 진행한 RO와 NF 실험을 각각 RW\_RO, RW\_NF로 지칭하고 SFP를 원수로 진행한 RO와 NF 실험을 각각 SFP\_RO, SFP\_NF로 지칭한다. RW\_RO, RW\_NF, SFP\_RO, SFP\_NF의 원수 TOC 농도는 각각 4.96, 4.55, 1.95, 1.60 mg/l였다. Fig. 2는 각 막모듈 테스트별 생산수 TOC 농도와 제거율을 나타낸다. RW\_RO와 SFP\_RO는 원수 종류와 상관없이 생산수 TOC 농도가 0.32(0.26-0.41), 0.35(0.27-0.47) mg/l로 비슷하지만, RW\_NF와 SFP\_NF는 각각 0.45(0.30-0.51), 0.22(0.18-0.33) mg/l로 차이가 난다. 상대적으로 고분자 유기물이 응집-침전되거나 모래 입자 표면에 부착되어 처리되는데, SFP는 전오존-응집-침전-모래여과 공정을 거친 원수이기 때문에 RW 대비 고분자 유기물 비중이 낮을 것으로 추정된다. NF는 RO보다 공극이 크기 때문에 고분자 유기물 투과율이 높을 것으로 기대되며, 이로 인해 RW를 원수로 썼을 때의 생산수 TOC 농도가 SFP를 원수로 썼을 때와 비교해서 높았을 것이다. 참고로, SFP\_RO의 생산수 TOC 농도가 SFP\_NF보다 높은 이유는 SFP\_RO의 원수 TOC 농도가 1.95 mg/l로 SFP\_NF의 원수 TOC 농도(1.60 mg/l)보다 높기 때문으로 추정된다.

RO와 NF의 평균 TOC 제거율은 각각 93.99%와 94.28%였는데, t-검정 통계 분석을 진행해보면(Microsoft Excel 활용) P-value가 0.4로 통계적 유의도가 낮아 RO와



**Fig. 2.** TOC concentration values of permeate water and removal rates of high pressure membrane module tests.

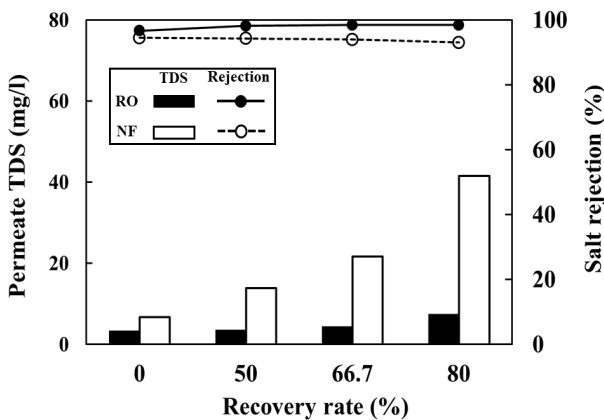


NF의 TOC 제거율 차이가 거의 없다고 볼 수 있다. 통계 분석에 사용된 데이터 수가 8개라 충분하지 않았고, 실험을 위한 원수 취수 시기가 모두 달랐기 때문에 유기물 구성성분 비중이 달라서 NF에 유리한 환경이었을 가능성도 무시할 수 없다. 그러나, 원수와 막의 종류에 관계없이 생산수 TOC 농도는 대체로 0.5 mg/l보다 낮았기 때문에, 고압막여과 공정 도입의 목적이 TOC 농도를 줄이기 위한 용도로 한정된다면 NF도 충분히 좋은 선택일 수 있다.

참고로, 본 실험에서 사용한 NF는 사양서상 NaCl 제거율은 85-95%이다. 이는 다른 NF 제품의 NaCl 제거율(40-70%)보다 최대 2배 이상 높아 NF 모듈 중에서도 공경이 작고 제거율이 높은 모델이다. 그래서 TOC 제거율이 RO와 비슷한 결과를 보였다고 생각된다 (CSM Technical manual). RO와 NF 선택여부와 관계없이 고품질 수돗물을 생산할 수 있을 것으로 예상되므로 구동압력이 RO보다 낮은 NF를 사용하는 것이 효율적일 수 있다. 하지만, 다양한 사양의 NF 모듈이 존재하므로 모듈 선정 시 주의할 필요가 있다.

**Table 2.** Feed pressure of RO/NF membrane module tests according to recovery rates

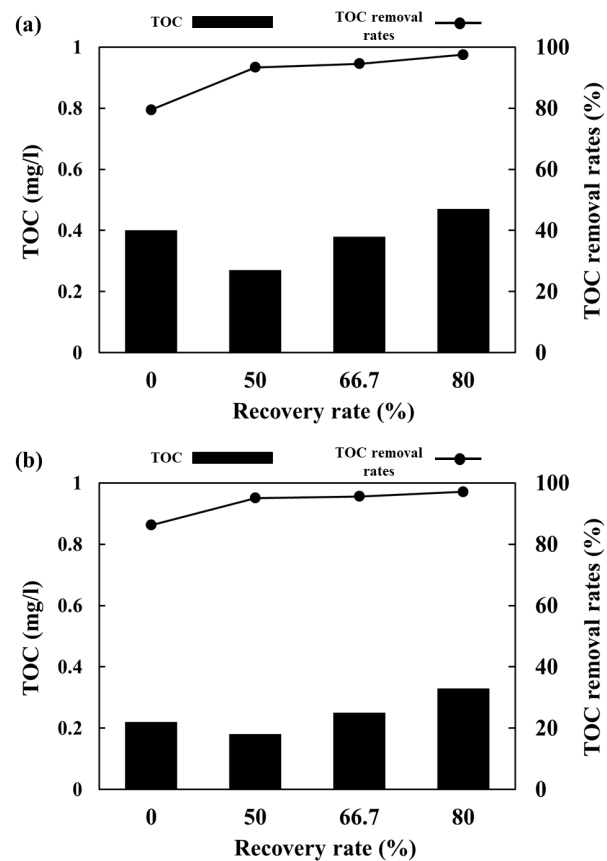
Recovery rate (%)	Feed pressure (bar)			
	RW_RO	RW_NF	SFP_RO	SFP_NF
0	6.72	2.91	4.67	2.00
50	7.06	3.08	4.85	2.04
66.7	7.24	3.56	4.87	2.19
80	8.11	3.91	5.43	2.45



**Fig. 3.** The effect of recovery rate on permeate TDS concentration and salt rejection.

막모듈 테스트 시 회수율 증가에 따른 원수압력을 Table 2와 같이 나타내었다. RO 공극이 NF보다 작아 원수에 관계없이 RO 원수압력이 높게 측정되었으며, RW의 TDS가 SFP보다 높아 같은 종류의 막일 때 RW로 실험한 경우의 원수압력이 높게 측정되었다. 회수율을 높이기 위한 농축으로 인해 삼투압이 증가하므로 모든 실험에서 회수율이 높아질수록 원수압력이 증가하였다.

Fig. 3은 SFP 실험에서 회수율이 증가함에 따른 염제거율을 나타낸 그래프이다. 일반적으로 고압막에서 원수농도가 높아지면 염제거율이 낮아진다. NF는 회수율이 증가할수록 생산수 TDS가 6.7 mg/l에서 41.5 mg/l로 증가하는 경향이 명확하게 보이며 제거율도 94.5%에서 93%로 소폭 감소하였다. 하지만 RO는 회수율이 증가할수록 생산수 TDS가 3.4 mg/l에서 7.5 mg/l로 NF보다 증가폭이 작았으며 제거율도 96.6%에서 98.5%로 오히려 증가하였다. 그 이유는 SFP의 TDS가 실제 RO에 사용되는 원수에 비해 낮아서 이런 경향이 나타나는 것으로 추정된다.



**Fig. 4.** The effect of the recovery rate on permeate TOC concentration and TOC removal rate; (a) SFP\_RO, (b) SFP\_NF (Flux 19 LMH).

pp. 393-402  
pp. 403-410  
pp. 411-423  
pp. 425-435  
pp. 437-443  
pp. 445-462  
pp. 463-471  
pp. 473-480  
pp. 481-493  
pp. 495-502  
pp. 503-512

Fig. 4의 (a), (b)는 SFP\_RO, SFP\_NF 실험에서 회수율이 0, 50, 66.7, 80%가 될 때 생산수 TOC 농도와 제거율을 나타낸 그래프다. 본 실험 결과에서는 TOC 제거율이 원수가 농축될수록 계속 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 농축수를 원수로 회수하면서 농축실험을 진행하기 때문에 제거되지 않는 큰 유기물질이 계속해서 원수에 남아 농축되고 막을 통과하는 유기물질은 일정하게 막을 통과하여 생산수 측으로 이동하기 때문이라 추측된다. 생산수 TOC 농도의 경우 회수율 80%를 달성하는 (원수가 5배 농축되는) 동안 RO와 NF 생산수 TOC 농도는 초기 생산수(회수율 0%) 대비 각각 1.2, 1.5배 농축되어 원수가 농축된 비율보다는 낮은 것으로 나타났다.

### 3.3 소규모(2,000 m<sup>3</sup>/d) 고압막 시스템 설계 및 농축수 처리 방안

막모듈 테스트 결과, TOC 농도에만 초점을 맞춘다면 본 연구에 사용된 NF와 RO 막 모두 비슷한 품질의 수돗물을 생산할 수 있다는 결론을 얻었다. 하지만, 다양한 미량유해물질에 대한 대응 관점에서 보면 NF보다 RO가 유리하기 때문에(Jang et al., 2005), 고압막 도입의 목적에 따라 적절한 막 선택이 필요하다. 본 절에서는 2020년 현재 수도법 기준으로 선택할 수

있는 모든 고압막(RE8040-Fen, NE8040-90)을 이용한 설계 결과를 비교 분석하였다.

2.2절에서 언급한 대로 회수율을 80%로 설정했기 때문에, 회수율 80%를 만족하기 위해 2 스테이지(2:1 배열)로 설계하였다. 막모듈 개수는 생산수량과 플럭스에 의해 결정되는데, 스테이지 별 모듈 개수는 각각 80개, 40개로 설정하면, 시스템 평균 플럭스가 막모듈 테스트에서 사용된 플럭스인 19 LMH와 근접한 18.7 LMH로 결정된다. 원수압력, 농축수 압력, TDS, 에너지 소모량과 생산량 1 m<sup>3</sup> 당 전력비를 Table 3에 나타내었다. 전력비는 한국전력공사에서 공표하고 있는 산업용 전기 가격(96.7원/kWh)을 기준으로 계산하였다.

수온이 증가하면 물, 이온 투과율이 높아지기 때문에, 생산수 TDS 농도가 높아지고, 원수 압력은 감소하게 된다. 고압막 도입 시 수돗물 생산량 1 m<sup>3</sup> 당 16.4-59.9원의 전력비가 추가로 발생한다. 부산상수도사업본부의 2019년 경영평가결과에 의하면 70.6원/m<sup>3</sup>의 평균 전력비가 수돗물 생산 시 사용되므로 기존 전력비 대비 23-85%의 추가 전력비가 요구됨을 알 수 있다. 고압막 도입 시 유기물 제거에만 초점을 맞춘다면 15.5-29.9원의 전력비 절감을 위해 NF를 선택할 수도 있지만, 불특정 다수의 미량유해물질에 대한 보다 안정적인 대응을 위해서는 RO를 선택할 수도 있을 것이다.

Table 3. Results of RO/NF design simulation

	RO		NF	
	5 °C	25 °C	5 °C	25 °C
Feed pressure (bar)	11.98	6.46	6.06	3.38
Permeate TDS (mg/l)	0.74	1.60	13.3	24.8
Concentrate TDS (mg/l)	517.1	513.6	466.7	420.7
Energy consumption (kWh/m <sup>3</sup> )	0.62	0.33	0.31	0.17
Electricity price (KRW/m <sup>3</sup> )	59.9	31.9	30.0	16.4

Table 4. Water quality of RO/NF concentrates

	Concentrate				Guideline <sup>1)</sup>
	SFP_RO		SFP_NF		
	5 °C	25 °C	5 °C	25 °C	
TDS (mg/l)	517.1	513.6	466.7	420.7	< 500
Hardness (mg/l)	81.1	80.8	79.0	76.5	< 300
Iron (mg/l)	0.1	0.1	0.1	0.09	< 0.3
Manganese (mg/l)	0.1	0.1	0.1	0.09	< 0.3
Turbidity (NTU)	< 2.3	< 2.3	< 2.3	< 2.3	< 5

<sup>1)</sup> Source: <https://www.dgwater.go.kr/2014>



고압막 도입 시 필연적으로 발생하는 농축수(회수율 80%의 경우 20%가 농축수)는 이온 성분이 농축되어 TDS 농도가 높기 때문에, 담수 하천에 바로 방류하기에 큰 부담이 있다. 본 연구에서는 농축수를 방류하지 않는 방안 중 하나를 제안하고자 한다. Table 4는 CSMPRO 설계 결과를 통해 얻은 각 고압막 공정의 농축수 수질을 공업용수 수질 권고치와 비교한 것이다. 설계프로그램에 직접 입력되어 농축수 수질 정보를 얻을 수 있는 타 항목과는 달리 탁도는 제거율 100%로 가정하여 농축수 수질을 계산하였다.

Table 4에 나타났듯이, 수온이 높아지면 이온 투과율이 높아지기 때문에 농축수의 이온 농도는 감소하게 된다. NF 막 적용 시에는 모든 항목에서 공업용수 권고치를 만족하였고, RO 막 적용 시에는 TDS를 제외하고 만족하였다. TDS 조건을 만족시키기 위해서는 회수율을 감소시키거나 기존 공업용수(부산 D 정수장의 경우는 모래여과 처리수)와 블렌딩하는 방법 등이 있으므로 경제성 등을 고려하여 적절한 방법을 선택하는 것을 추천한다.

부산상수도사업본부에 따르면 D정수장의 공업용수 공급 가능량은 352,000 m<sup>3</sup>/d인데, 2019년 평균 공업용수 공급량은 67,960 m<sup>3</sup>/d이다. 농축수를 전량 공업용수로 활용하는 조건에서 부산 D 정수장의 고압막여과 공정 규모를 결정한다면, 농축수량이 공업용수 실제 공급량보다 적어야하기 때문에 생산량 기준 271,840 m<sup>3</sup>/d 규모까지(회수율 80% 기준) 건설이 가능하다. 이는 부산 D 정수장의 정수 생산량(556,800 m<sup>3</sup>/d, 2020년 8월 26일 기준)의 약 50%에 해당되는데, 기존 수돗물과 고압막여과 공정 생산수(고품질 수돗물)가 거의 1대 1의 비율로 생산된다는 의미가 된다. 서론에서 언급된 프랑스의 Mery-sur-Oise 정수장은 기존 고도처리시설로 200,000 m<sup>3</sup>/d의 수돗물을 생산하고, NF 공정에서 140,000 m<sup>3</sup>/d의 고품질 수돗물을 생산하여 3대 2의 비율로 블렌딩 후 수돗물을 공급하고 있으므로, 이를 참고하여 고압막여과 공정 도입을 고려하면 될 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 유기물 농도가 낮은 고품질 수돗물 생산을 위해 고압막여과를 도입할 경우의 주요 고려

사항을 검토하였다.

(1) 낙동강을 원수로 쓰는 정수장의 수돗물 TOC 농도가 2 mg/l를 초과하는 경우도 간혹 발생하고 있다. 프랑스의 경우 수돗물의 TOC 농도가 2 mg/l를 초과하여 고압막여과를 도입한 사례도 있으므로 유기물 농도가 낮은 고품질 수돗물 생산을 위해 고압막여과 도입을 검토해볼 필요성이 있다.

(2) 낙동강 지류 하천수(RW)와 부산 D정수장 모래여과수(SFP)에 대한 막모듈 테스트를 실시한 결과, RO(RE4040-Fen)와 NF(NE4040-90)의 생산수 TOC 농도는 대부분 0.5 mg/l 미만이었다. 또한, RO와 NF의 유기물 제거율의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다. 따라서, 고압막여과 공정 도입의 목적이 TOC 농도를 줄이기 위한 용도로 한정된다면 NF도 충분히 좋은 선택일 수 있다. 그러나, NE4040-90 모델은 일반적인 NF 막 대비 제거율이 높은 편에 속하므로, 본 연구 결과가 모든 NF 제품에 대한 결과를 대표한다고는 볼 수 없다.

(3) 일반적인 이온제거율 경향과는 달리, 유기물 제거율은 회수율이 증가할수록 높아지는 경향을 보였다. 이는 회수율 증가 시 농축되는 원수에 잔류하는 유기물은 상대적으로 고압막을 통과하지 못하는 고분자 물질을 많이 함유하고 있기 때문이라 보여진다.

(4) 고압막여과 공정의 농축수는 이온 농도가 높아져 담수 하천에 직접 방류하기엔 부적합하다. 본 연구에서 사용된 원수(SFP)의 경우 회수율 80%로 설계한다면, 농축수 수질이 공업용수 수질 권고치를 거의 만족시킬 수 있다는 결과를 얻었다. 이를 고려하여 실제 정수장에 고압막여과 공정 도입 시 설계 용량을 결정할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 K-water 연구원 “다수원별 수질특성 조사 및 고압막여과 공정 적용성 평가 학술용역”의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- Chang, D.E., Ha, K.R., Jun, H.D., Kim, J.H., and Kang, K.H. (2013). Determination of the optimal location for water treatment plants in the decentralized water supply

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

- system, J. Korean Soc. Water Wastewater, 27(1), 1-10.
- CSM Technical manual(Reverse osmosis membrane), <http://www.csmfilter.co.kr/csm/upload/CSMTechnicalManual.pdf> (August 20, 2020).
- Jang, H.W., Chung, Y.C., Jung, J.Y., and Hong, S.K. (2005). Rejection of organic micropollutants by NF/RO membranes, J. Korean Soc. Water Wastewater, 17(0), 110-116.
- Kim, J.Y., Do, Y., Joo, G.J., Kim, E., Park, E.Y., Lee, S.H., and Back, M.S. (2016). The research trend and social perceptions related with the tap water in South Korea, Korean J. Environ. Ecol., 49(3), 208-214.
- Kim, S., Kim, C.H., Kang, S.H., Lee, W.T., and Lim, J.T. (2011). Verification of Silt Density Index(SDI) as a fouling index for reverse osmosis(RO) feed water, J. Korean Soc. Water Wastewater, 25(4), 489-495.
- Kruithof, J.C., Schippers, J.C., Kamp, P.C., Folmer, H.C., and Horman, J.A.M.H. (1998). Integrated multi-objective membrane systems for surface water treatment: pretreatment of reverse osmosis by conventional treatment and ultrafiltration, Desalination, 117, 37-48.
- Lee, D.J., Kim, Y.I., Kim, S.S., Lee, K.H., and Park, H.A. (2007). Effect of advanced treatment process for residual chlorine decay and THM formation in water distribution system, J. Korean Soc. Environ. Eng., 29(4), 419-424.
- Owen, D.M., Amy, G.L., Chowdhury, Z.K., Paode, R., Mccoy, G., and Viscosil, K. (1995). NOM characterization and Treatability, J. Am. Water Works Assoc., 87(1), 46-63.
- Son, H.J., Roh, J.S., Kim, S.G., Bae, S.M. and Kang, L.S. (2005). Removal characteristics of chlorination disinfection by-products by activated carbon, J. Korean Soc. Environ. Eng., 27(7), 762-770.
- Teuler, A., Vega, A., Coma, J., Vidal, D., and Aumatell, J. (2013). Operational experience of the brackish water reverse osmosis of the water treatment plant in Sant Joan Despí, Desalin. Water Treat., 51, 140-149.
- Ventresque, C., Gisclon, V., Bablon, G., and Chagneau, G. (2000). An outstanding feat of modern technology: the Mery-sur-Oise Nanofiltration Treatment Plant (340,000 m<sup>3</sup>/d), Desalination, 131, 1-16.
- Water Environment Information System, <http://water.nier.go.kr> (August 20, 2020).