



# 제주도 삼양 수원지 RO 시설 도입 연구

## A Study on the Introduction of RO Facility for Jeju Samyang Water Source

김우찬<sup>1,2</sup>·김진근<sup>1\*</sup>

Woochan Kim<sup>1,2</sup>·Jinkeun Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 환경공학과, <sup>2</sup>제주특별자치도 수자원본부

<sup>1</sup>Dept. of Environmental Engineering, Jeju National University, <sup>2</sup>Jeju Province

### ABSTRACT

Pollutants removal efficiency in pretreatment(GAC filter, multi-media filter, disk filter) and RO facilities was investigated for the Jeju Samyang spring water source where raw water intake has been stopped due to sea water intrusion. In addition, preliminary feasibility analysis was conducted between RO and groundwater intake systems. Turbidity removal in 4 different pretreatment processes was less than 25% due to low concentration of turbidity(i.e., less than 0.21 NTU), while multi-media filter is recommended for the pretreatment facility based on the low organic content in raw water as well as cheaper operation and maintenance cost. The average concentration of Cl<sup>-</sup> in raw water was 691.4 mg/L, while that of RO permeate was 9.1 mg/L(i.e., removal efficiency was 98.4%). In addition, TDS removal efficiency was 98.1%, which was quite high. The production cost for RO system(Q=4,000 m<sup>3</sup>/d) was 362.1 won/m<sup>3</sup> considering installation, operation and maintenance cost for 30 years. While that of groundwater was 262.6 won/m<sup>3</sup> which was low compared to the RO system. However, it is recommended to introduce RO system for Samyang water source rather than new groundwater development because Samyang water source has been discharged to the sea without any usage, while groundwater can be used for other purpose as a sustainable water source.

**Key words:** RO, chloride, pretreatment, feasibility,

**주제어:** 역삼투, 염소이온, 전처리, 타당성

## 1. Introduction

국내에서 가장 큰 화산섬인 제주도는 총면적이 1,850 km<sup>2</sup>이고, 연평균 강수량은 1,975 mm로서 국내 최다우 지역이다. 내륙지방과 비교하여 강수량이 많고 지역별 계절별 강수량의 편차가 크며 화산활동에 의한 지질적 특성에 의해 강수의 지하수 함양량이 매우 높은 편이다. 제주지역에는 건천(乾川)이 많은 특성상 지표수의 발달은 미미하고, 용수의 대부분을 지하수 또는 용천수에 의존하고 있다(Kim, 2015; Jeju

province, 2015).

2015년 현재 제주도는 16개의 정수장을 운영중이며, 이 중 제주시 도련정수장에 원수를 공급하기 위해 취수용량 20,000 m<sup>3</sup>/일으로 개발된 제주시 삼양 3수원지는 1992년부터 실시설계 등을 시작하여 총 사업비 143억 원을 투입해 해안 인접 지역에 1995년 완공되었다. 그러나, 취수시설 완공 직후부터 원수의 염소이온농도가 600~1,230 mg/L까지 검출되고 있으며, 높은 염소이온 농도는 삼양 3수원지 후단의 완속여과 공정으로 구성된 도련정수장에서는 거의 제거할 수 없는 상태이므로, 이를 상수원으로 사용하기 위해서는 염소이온을 제거하기 위한 별도의 시설 설치가 필요함

Received 2 February 2015; Revised 19 August 2015; Accepted 1 September 2015

\*Corresponding author: Jinkeun Kim (E-mail: kjinkeun@jejunu.ac.kr)

pp. 601-608

pp. 609-615

pp. 617-623

pp. 625-632

pp. 633-641

pp. 643-649

pp. 651-657

pp. 659-666

pp. 667-683

pp. 685-692

pp. 693-702

을 의미한다.

1996년 실시한 삼양 3수원지 수리지질조사 결과에 의하면 수원지 인근의 지반에 발달된 투수대를 통하여 해수의 역류 및 수원지 내로의 유입이 발생하여 염소이온 농도가 증가하는 것으로 밝혀졌다. 따라서, 제주도는 도련정수장의 부족한 취수원 확보를 위하여 추가로 대체 지하수를 개발하여 원수로 활용하고 있으며, 삼양 3수원지는 현재까지 운휴시설로 지정관리 중이다(Jeju province, 2015).

제주도에서는 기상관측 이래 가장 여름가뭄이 2013년에 발생하였으며, 최근 인구 및 관광객 등의 지속적인 증가에 따라 용수 수요가 상승하여 추가적인 수자원 확보의 필요성이 대두되고 있다(Jemin Ilbo, 2013). 이 경우 신규 상수원으로 지하수 관정 개발 보다는 삼양 3수원지처럼 기존에 구축된 취수시설에 필요한 수처리 설비를 추가하는 것이 경제적으로 타당할 수도 있다. 특히, 삼양 3수원지의 경우는 용천수에 일부 해수가 유입된 경우이므로, 해수를 전량 담수화하는 경우와 비교하여 전처리 간소화, 낮은 동력비 등으로 경제성이 높게 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

삼양 3수원지에서 문제가 되고 있는 염소이온은 일반적으로 역삼투(RO, reverse osmosis) 멤브레인 공정을 이용하여 용이하게 제거가 가능하다. RO 멤브레인은 1960년대 UCLA 대학의 Loeb와 Sourirajan이 cellulose acetate를 이용하여 해수담수화에 최초로 적용하였으며, 당시 압력은 1,000 psi 이상의 고압이었다. 이후, 지속적으로 새로운 재료의 RO 멤브레인이 상용화되고 운영 기술이 진보함에 따라 초기 설치비 및 운영비가 꾸준히 저하되어 경제성이 높아지고 있다. 최근에는 세계적으로 다수의 해수담수화시설이 도입되고 있으며, 에너지 회수장치의 비약적인 발전으로 시설 규모에 차이는 있으나 합리적인 가격으로 청정한 담수를 생산하고 있으며, 제주도내 추자도에서도 2,000 m<sup>3</sup>/일의 RO 담수화 설비를 이용하여 상수도를 공급하고 있다(Jeju province, 2015; AWWA, 2011; KWWA, 2010; AWWA, 2007).

본 연구에서는 최근 증가하는 용수 수요에 대비하여 취수시설을 이미 보유하고 있는 제주도 삼양 3수원지를 대상으로 염소이온 등 해수에 기인한 오염물질 제거를 위한 RO 멤브레인 및 전처리 시설 설치의 적용성을 검토하고 지하수 개발과 비교하여 취수원으로서의 경제성을 평가하는 것이다.

## 2. Material and Method

### 2.1 연구대상 및 pilot plant

연구대상 지역은 제주특별자치도 제주시 삼양 1동에 위치한 삼양 3수원지이다. 삼양 3수원지는 해안에서 약 20 m 떨어진 육지부에 위치하며 연중 용천수가 분출되는 지역으로 자연적으로 생성된 담수 우물을 원형의 관정으로 개발한 곳이다. 취수 시설 설치 이후 해수의 일부 유입이 관찰되었으며, 염소이온 등 해수 성분의 제거를 위한 RO 시설 도입의 타당성을 검토하기 위하여 전처리 시설과 RO 설비를 갖춘 모형플랜트(pilot plant)를 설치 운영하였다.

해수담수화시설은 일반적으로 원수설비-조정설비-역삼투설비로 구성되며, 전처리설비는 RO 막의 열화와 막힘 현상을 방지하기 위하여 응집, 침전, 여과 등으로 해수 원수 중에 포함된 입자물질을 제거하고 RO 막에 공급하기에 적당한 수질로 조정하기 위한 설비이다(KWWA, 2010). 본 연구에서는 전처리설비로서 GAC여과기, 다층여과기, 디스크필터를 설치하였다.

역삼투장치는 역삼투압을 공급하는 고압펌프, 탈염용 멤브레인, 압력 vessel 및 계측기기 등으로 구성되었으며 회수율 70%, 1 단으로 구성하였다. 고압펌프는 STS304 재질로 입형다단 형식, 유량 3.0 m<sup>3</sup>/hr, 양정 160 m, 소요동력 5.5 kw이며 구동 방식은 기동 충격을 최소화하기 위하여 인버터 구동방식으로 구성하였다. 멤브레인은 spiral wound type으로 규격은 8 inch × 40 inch, vessel 당 3 element가 적용되었으며, 생산수량 및 농축수량은 7:3의 비율로 설정하였고 웅진케미칼(주)의 polyamide 재질 BWRO 멤브레인이 적용되었다.

Table 1. Specification of pilot plant

| Item          | Description  |
|---------------|--|
| Location      | Jeju city, Samyang 1-dong, 1912-2  |
| Capacity      | 50 m <sup>3</sup> /d   |
| Pre-treatment | <ul style="list-style-type: none"> <li>• GAC Filter : Q-150 L, EBCT-3.8 min</li> <li>• Dual media filter : anthracite-100 cm, sand-40 cm, gravel-20 cm</li> <li>• Disk filter : AZUD, pore size 20 μm, operating pressure-10 kg/m<sup>2</sup></li> </ul> |
| RO process    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Type : spiral wound, polyamide (Wongjin Chem.)</li> <li>• Size : 8 inch × 40 inch</li> <li>• Recovery : 70%</li> </ul>  |



Vessel의 경우는 FRP 재질의 규격 8 inch × 3 M, 1 개를 사용하였다.

모형플랜트의 설치는 2013.8.26일부터 시작되었으며, 운전은 2013.10.8~2013.12.19 사이에 실시하였다. 모형플랜트 운전은 RO 시설 도입에 필요한 설계인자 및 운영관리비 도출, 수처리 효율, 경제성 검토 등을 위하여 삼양 3수원지 내에 설치되었고 사양은 Table 1 과 같다.

## 2.2 실험 방법

모형실험을 통해 전처리 공정별 효율 평가, 수질항목 별 RO 시설의 처리 성능 평가 등을 실시하였다. 전처리 공정은 Table 2에 표시된 바와 같이 활성탄여과기, 다층여과기, 디스크필터를 설치하고 시기별도 운영조건을 달리하면서 각각의 처리 효율을 평가하였다. 또한 RO 시설에서 처리 전후의 수질 등도 평가하였다.

일일수질검사는 원수, 전처리수 및 RO 생산수에 대하여 pH, 탁도, 맛, 냄새, 전기전도도, 온도 등에 대해 실시하고, 염소이온, 질산성질소 및 대장균은 주간검사를 실시하였으며, 경도, 암모니아성질소, 보론, 과망간산칼륨소비량 등은 월 2회 수질분석을 실시하였다.

**Table 2.** Experimental modes for pretreatment facilities

|        | GAC filter | Dual filter | Disk filter | Period             |
|--------|------------|-------------|-------------|--------------------|
| Mode 1 | ◎          | ◎           | ◎           | 2013.10.08 ~ 10.27 |
| Mode 2 | ◎          | -           | -           | 2013.11.02 ~ 11.17 |
| Mode 3 | -          | ◎           | -           | 2013.11.18 ~ 12.03 |
| Mode 4 | -          | -           | ◎           | 2013.12.04 ~ 12.19 |

한편, RO 막의 파울링 정도는 SDI(silt density index)를 측정하여 평가 하였다. SDI는 MFI(modified fouling index)와 함께 파울링을 평가하는 대표적인 지표로서 SDI가 높을수록 막의 파울링이 쉽게 발생하여 막의 수명 단축, 성능 저하, trans-membrane pressure(TMP) 및 역세척 횟수 증가 등 막의 효율에 부정적인 영향을 미친다. SDI는 아래의 식과 같이 산정되었으며, 일반적으로 SDI의 범위가 0~2이면 별도의 전처리 없이 RO 적용이 가능하고, NF의 경우에는 SDI가 0~3일 경우 전처리 없이 적용 가능한 것으로 알려져 있으나, 구체적인 SDI의 적용 범위는 막의 제조사에 따라 상이할 수 있다(AWWA, 2011; AWWA, 2007).

$$SDI=100 \times \left(1 - \frac{T_i}{T_f}\right) / T_t$$

여기서,  $T_i$  : 시료를 500 mL, 207 kPa(30 psig)로 가압하여 여과시킬 때 소요되는 시간,  $T_f$  : 207 kPa로 가압하여 15분간 여과시킨 후 다시 시료 500 mL를 207 kPa로 가압하여 여과시킬 때 소요되는 시간,  $T_t$  : 총 실험시간

## 2.3 경제성 검토

삼양 3수원지를 대상으로 RO 도입과 신규 수자원 개발간의 경제성을 평가하였다. 해당 지역은 인근에 상시 유출이 발생하는 하천이 없어 신규 수자원 개발의 경우 지하수 관정 개발에 한정하여 검토하였다. 경제성 검토시에는 취수량을 삼양 3수원지에서 원수를 공급받고 있는 도련정수장의 시설용량 및 지하수 개발 가능량 등을 고려하여 각각 4,000, 8,000 m<sup>3</sup>/일로 구분하여 평가하였다.

지하수 개발의 경우 별도의 전처리 시설이 불필요하므로 취수량 전량을 정수장에 원수로 공급가능한 양으로 산정하였고, RO 시설의 경우 회수율을 70%로 가정하여 정수장에 4,000 m<sup>3</sup>/일, 8,000 m<sup>3</sup>/일 공급하기 위해서 실제 취수량을 각각 5,700 m<sup>3</sup>/일, 11,400 m<sup>3</sup>/일로 가정하였다. 또한, RO 시설의 예상 flux는 22.74 Lmh이고, 계열 구성은 계획정수량이 4,000 m<sup>3</sup>/일 경우에는 RO 멤브레인을 1st stage에 24ea., 2nd stage 12ea.를 설치하고, 8,000 m<sup>3</sup>/일 경우에는 1st stage에 48ea., 2nd stage 24ea.를 설치하는 것으로 가정하였다.

경제성 검토시에 시설물의 내용연수는 지방공기업법을 참조하여 30년으로 산정하였으며, RO 시설 중 토목 공사비를 제외한 기계 및 전기 설비는 15년 후 내용 연수가 경과하여 재투자가 이루어져야 하므로 이를 반영하여 분석하였다(Kim, 2015; MOGAHA, 2015).

# 3. Results and Discussion

## 3.1 원수 수질현황

2011.3~2013.11월까지의 원수 수질조사 결과는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 염소이온은 22~970 mg/L (평균 450.4 mg/L)의 농도 범위로 먹는 물 수질기준인 250 mg/L를 대부분 초과하고 있다. 제주도내 지하수

- pp. 601-608
- pp. 609-615
- pp. 617-623
- pp. 625-632
- pp. 633-641
- pp. 643-649
- pp. 651-657
- pp. 659-666
- pp. 667-683
- pp. 685-692
- pp. 693-702

상수원의 경우 염소이온 농도가 일반적으로 30 mg/L 이하로 검출되고 있으므로(Jeju province, 2015) 삼양 3수원지에서의 높은 염소이온 농도는 해수의 영향으로 판단된다. 특히 2011년 봄의 경우 염소이온의 농도가 급격하게 증가하는데 이는 봄 가뭄으로 지하수위가 낮아지면서 해수 유입량이 증가하여 나타나는 현상으로 추정된다.

전기전도도(EC; electric conductivity)는 수용액에서 전류흐름의 정도를 측정하는 것으로 수용액내의 이온 농도 합에 비례한다. 삼양 3수원지 원수에서의 전기전도도는 173~2,800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 1,570  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )으로 담수에 비해 매우 높게 나타났는데, 이는 해수 유입에 비례하여 이온 농도가 증가하여 발생하는 현상으로 평가된다. Fig. 1(A)에서 전기전도도와 염소이온의 농도는 유사한 경향을 나타내고 있는데 이는 해수 유입량의 증감에 따라 나타나는 현상을 보인다.

한편, Fig. 1(B)는 질산성질소와 탁도의 농도 변화를 나타내고 있다. 질산성질소는 조사 기간 동안 1.5~3.2 mg/L(평균 1.9 mg/L) 범위로 관찰되어 먹는물 수질기준인 10 mg/L 보다 매우 낮은 수준으로 나타났다. 탁도는

0.10~0.42 NTU(평균 0.20 NTU)로 조사되어 먹는물 수질기준인 0.5 NTU 보다 항상 낮게 검출되었다. 탁도와 질산성질소는 모두 2012.9월에 급격하게 증가하는데 이는 태풍의 영향으로 집중호우가 발생하여 나타나는 현상으로 파악된다. Fig. 1(B)에서 탁도와 질산성질소의 농도는 유사한 경향을 나타내는데 이는 해당 지하수의 수질이 강수에 많은 영향을 받아 강수량이 높을 경우 지상에서 유출된 탁질물질과 비점오염원의 영향으로 탁도와 질산성질소가 동반 상승하는 것으로 추정된다.

### 3.2 Pilot plant 운전결과

#### 3.2.1 전처리 시설의 효율평가

RO 시설에 적합한 전처리 공정을 선택하기 위해 활성탄여과기, 다층여과기, 디스크필터를 대상으로 처리 효율, 경제성 등을 평가하였다. 해수담수화 용도의 RO 막에 전처리 공정을 도입할 경우에는 원수의 탁도 또는 현탁물질의 다소에 따라 일반적으로 응집침전여과방식, 직접응집여과방식, 무약주여과방식, 해안우물방식, 막여과(MF/UF) 방식으로 구분할 수 있으며, 무약주여과방식의 경우 원수의 탁도가 1 NTU 이하일 경우 적용가능하다(JWWA, 2012). 연구대상인 삼양 3수원지의 경우 해안우물에 해당되고 원수의 탁도가 연중 0.5 NTU 이하이므로 무약주여과방식을 적용하였다.

탁도의 평균 제거율에서는 Table 2에 표시된 mode 1, 2, 3, 4에서의 각각 24.1%, 16.9%, 12.2%, 11.5%로 나타났다(Fig. 2 참조). Mode 1의 경우는 활성탄여과기, 다층여과기, 디스크필터를 직렬로 연결한 경우로서 탁도 제거율이 가장 높았으며, mode 2~4의 경우에는 모두 20% 이하로 조사되었다. 원수가 대부분 청정한 용천수이며 해수가 일부 유입된 상태에서 입자물질의 농도가 높지 않아 전처리 공정에서의 탁도 제거율이 낮은 것으로 판단된다. 한편, 염소이온, 질산성질소 및 전기전도도 등 용존성 물질의 경우 입자물질의 분리를 목적으로 하는 전처리 공정의 특성상 제거율이 매우 낮았다.

전처리 유입수의 SDI는 0.3~2.8(평균 1.5)로 나타났으며, 전처리 시설을 거친 후에는 2.0 미만의 SDI 값이 안정적으로 도출되었다. 원수의 SDI는 대체적으로 2.0 이하로 유입되고 있으나 부분적으로 2.0을 초과하므로, RO 시설의 안정적인 운영을 위하여 전처리 설비가 필요한 것으로 검토 되었다.

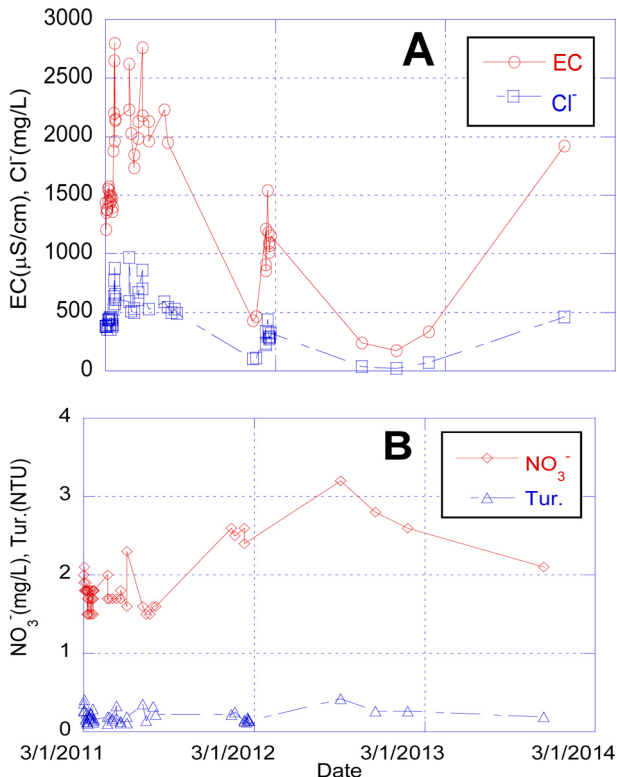


Fig. 1. Raw water qualities(electric conductivity(EC),  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , turbidity)



한편, 전처리 설비별 처리수의 SDI는 모두 2.0 미만으로 안정적인 운영이 가능하며, 탁도 제거율도 전처리 시설별로 큰 차이는 없는 것으로 분석되었다. 활성탄여과기는 다층여과기에 비해 미량유기물질까지 제거가 가능한 장점이 있으나, 삼양 3수원지의 경우 원수중의 유기물질 농도가 매우 낮으며, 시설의 유지관리 및 경제성 등을 고려하여 다층여과기를 도입하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

### 3.2.2 탁도 제거율

Fig. 2에서 보는 바와 같이 pilot plant 운영기간인 2013.10.08~2013.12.19일 동안 원수의 탁도는 0.15~0.50 NTU(평균 0.21 NTU)로 유입되었으며, 전처리수의 탁도는 0.11~0.41 NTU(평균 0.17 NTU)로 나타났다. 또한 RO 처리수는 0.08~0.18 NTU(평균 0.10 NTU)의 값을 보였다. 모형플랜트 운영 기간 동안 전처리 공정에서의 평균 탁도 제거율은 17.0%였으며, RO 공정에서의 탁도 제거율은 38.9%로 조사되었다.

삼양 3수원지 원수 탁도는 먹는물 수질기준인 0.5 NTU 이하로 안정적으로 유입되었는데, 용천수는 강수가 토양 및 암반층을 통과하는 과정에서 여과 작용으로 탁도가 낮아지고, 유입된 해수도 수원지 인근의 지하 투수대를 통과하는 과정에서 여과작용으로 탁질의 일부가 제거되어 나타나는 현상으로 파악된다.

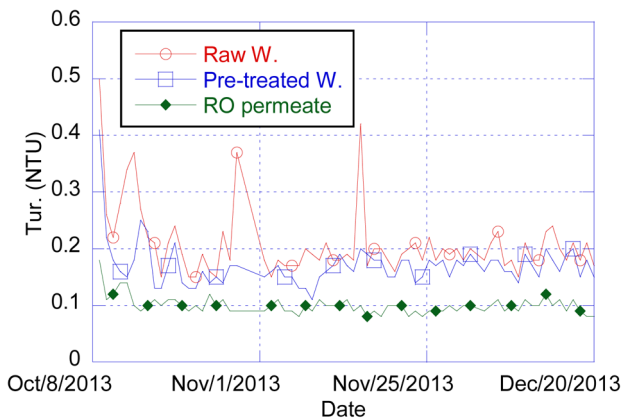


Fig. 2. Measurement of turbidity.

### 3.2.3 염소이온 및 전기전도도 제거율

염소이온은 Fig. 3(A)와 같이 원수의 경우 156.3~1,135.3 mg/L(평균 691.4 mg/L) 범위로 유입되었다. 전처리 공정에서는 염소이온은 거의 제거되지 않았으

며, RO 처리수에는 5.0~17.6 mg/L(평균 9.1 mg/L)로 검출되어 RO 공정에서의 염소이온 제거율은 98.0~98.9%(평균 98.4%)로 나타났다. RO 처리수에서의 염소이온 농도는 먹는물 수질기준의 2.0~6.6% 수준의 매우 낮은 농도로 검출되었다.

역삼투막에 의한 전기전도도 제거율은 Fig. 3(B)에서 97.4~98.7%(평균 98.1%)로 거의 일정하였으며 원수에 따라 RO 처리수의 전기전도도가 달라져 처리수에는 22~66  $\mu$ S/cm(평균 38.9  $\mu$ S/cm)로 낮은 수준으로 검출되었다. 반면에, 전처리 시설에서는 용존물질의 특성상 전기전도도의 변화는 거의 관찰되지 않았다.

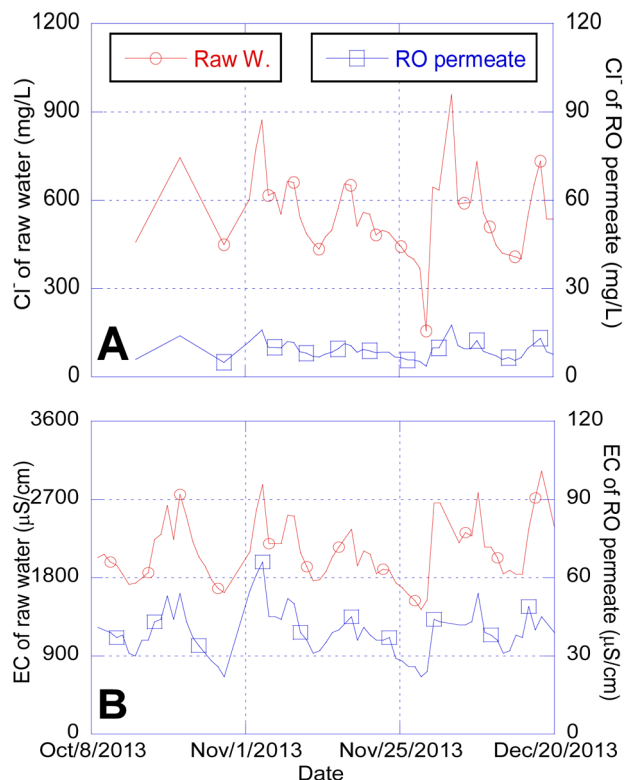


Fig. 3. Measurement of chloride(A) and EC(B).

### 3.2.4 질산성질소, 경도, TDS 제거율

용존물질인 질산성질소, 경도, 총용존고형물(TDS)의 농도변화는 Fig. 4에 나타났다. 원수에서 질산성질소의 농도는 1.1~2.5 mg/L(평균 1.6 mg/L)의 범위로 관찰되었으며 전처리 공정에서의 제거율은 거의 나타나지 않았다. RO 공정에서의 질산성질소 제거율은 81.8~99.9%(평균 91.5%)로 안정적인 제거율을 나타냈다(Fig. 4(A) 참조).

- pp. 601-608
- pp. 609-615
- pp. 617-623
- pp. 625-632
- pp. 633-641
- pp. 643-649
- pp. 651-657
- pp. 659-666
- pp. 667-683
- pp. 685-692
- pp. 693-702

경도는 Fig. 4(B)에 표시된 바와 같이 원수에서 179~419 mg/L(평균 272.8 mg/L)의 범위로 관찰되었으며 수돗물의 수질기준인 300 mg/L를 초과하는 경우도 다수 발생하였다. 경도물질의 경우에도 전처리 공정에서의 제거율은 거의 관찰되지 않았으며, RO 공정에서의 제거율은 97.4~99.9%(평균 99.6%)로 나타나 RO 처리수에서의 경도 농도는 불검출~11.0 mg/L(평균 1.6 mg/L)로 나타났다.

TDS는 원수에서 888~1,996 mg/L(평균 1,325.8 mg/L) 수준으로 검출되었으며, 다른 용존물질과 유사하게 전처리

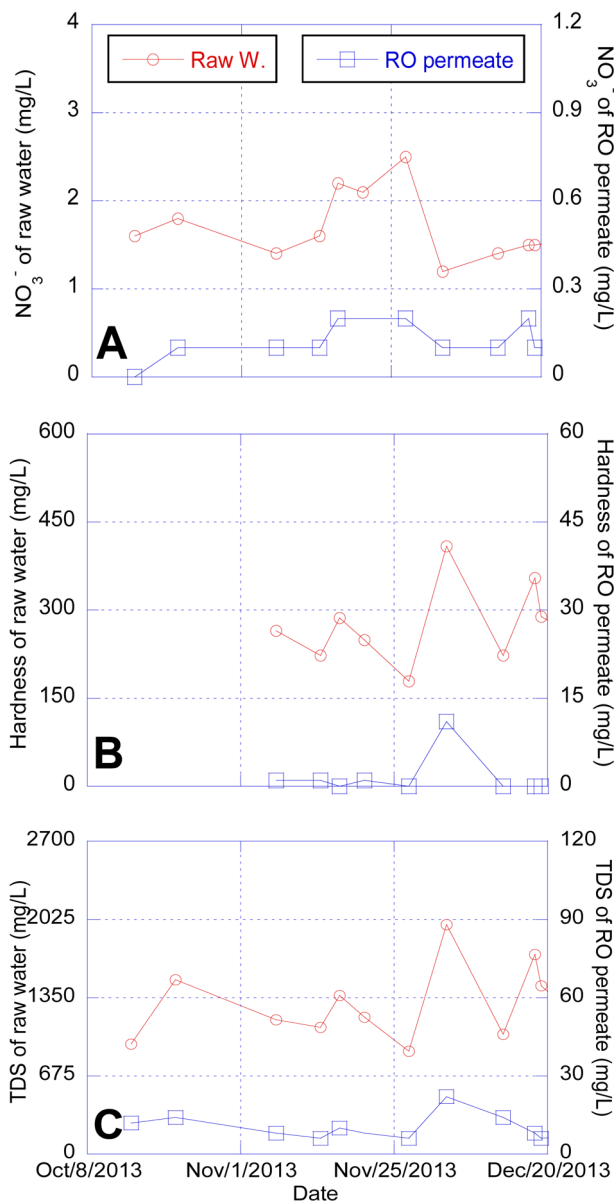


Fig. 4. Measurement of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(A), Hardness(B), TDS(C).

공정에서 제거율은 거의 관찰되지 않았다. 일반적으로 해수에서의 TDS 농도는 35,000 mg/L 정도이며, 1,000 mg/L 이하일 경우에는 담수, 1,000~10,000 mg/L일 경우에는 기수로 본다(MWH, 2012). Pilot plant에서 RO 처리수의 TDS 농도는 6~22 mg/L(평균 10.0 mg/L)로 분석되어 제거율은 98.7~99.6%(평균 99.2%)로 매우 높게 나타났다(Fig. 4(C) 참조).

RO 공정도입의 운영에 있어서 회수율은 경제성에 큰 영향을 미치고 있다. Fig. 5는 실험기간 동안의 모형플랜트 원수 유입량, 전처리수 유출량, RO 처리수량을 나타내고 있다. 회수율의 경우 70%로 설정하여 운영하였으나, 원수의 양호한 수질을 고려할 경우 향후 실공정 운영시에는 일정 부분 회수율 향상이 가능할 것으로 예상된다.

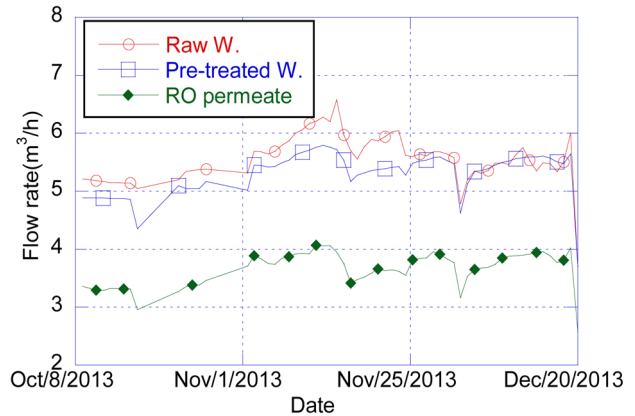


Fig. 5. Flow rate variation.

### 3.3 RO 공정도입의 경제성 평가

삼양 3수원지를 원수로 하는 RO 공정을 도입하고 30년간 운영관리하는 것으로 가정할 경우 운영관리비를 포함한 총사업비는 Table 3과 같이 시설용량 4,000 m<sup>3</sup>/일, 8,000 m<sup>3</sup>/일에서 각각 159억 원, 275억 원으로 나타났다(Jaewon engineering, 2014).

공사비를 공종별로 분석하여 보면 막여과시설은 종합시운전비를 포함하면 67.4%로 가장 높았으며, 그 다음은 토목공사 21.9%, 건축공사 7.5% 순으로 나타났다. 토목 및 건축공사비는 바닷가에 인접한 현장 특성을 고려하여 육상에 모든 시설을 설치하는 것으로 검토하였다.

연간 유지관리비는 pilot plant 운영자료를 근거로 시설용량 4,000 m<sup>3</sup>/일, 8,000 m<sup>3</sup>/일에서 각각 369백만 원,



**Table 3.** Cost analysis for RO based water supply system

| Item                               |            | Description |              |
|------------------------------------|------------|-------------|--------------|
| Capacity (m <sup>3</sup> /d)       | Intake     | 5,700       | 11,400       |
|                                    | Production | 4,000       | 8,000        |
| Recovery (%)                       |            | 70%         | 70%          |
| Cost (×10 <sup>9</sup> W)          | Const.     | 4.79        | 6.84         |
|                                    | O&M        | 0.369/year  | 0.689/year   |
|                                    | Total      | 15.9/30year | 27.51/30year |
| Production cost(W/m <sup>3</sup> ) |            | 362.1       | 314.0        |

689백만 원으로 분석되었고, 동력비가 전체 운영관리비에서 각각 47.2%, 50.3%로 가장 컸으며 그 다음으로는 멤브레인 필터 교체 등 소모품비 17.6%, 16.9%, 약품비는 15.1%, 16.4%로 순으로 분석되었다(Kim, 2015).

RO 시스템의 설치비 및 운영관리비만을 고려한 생산원가는 시설용량 4,000 m<sup>3</sup>/일, 8,000 m<sup>3</sup>/일의 경우 각각 362.1 원/m<sup>3</sup>, 314.0 원/m<sup>3</sup>으로 분석되었다. 한편, 삼양 수원의 양호한 수질을 고려할 경우 향후 RO 공정의 회수율을 향상시킨다면 생산원가는 더 절감될 수 있을 것으로 보인다. 수돗물 생산원가는 취수-정수-송수-급배수 전과정에서의 시설비, 운영관리비, 인건비 등이 모두 포함된 금액이므로 RO 시설에서 생산된 수돗물의 생산원가는 Table 3에 제시된 금액보다 당연히 상승하게 된다. 2014년에 준공된 표면해수를 원수로 하는 국내 최대 규모인 부산 기장 해수담수화 시설의 수돗물 생산원가가 849 원/m<sup>3</sup>임을 고려할 때, 삼양 3수원을 이용한 RO 시설의 원가는 상대적으로 매우 낮은 것으로 조사되었는데, 이는 기존 취수시설을 이용하므로 초기 설치비가 저렴하고, 삼양 3수원의 낮은 염분농도와 양호한 원수 수질에 기인하는 것으로 판단된다(Segye Ilbo, 2014).

한편, 지하수를 상수원으로 개발하는 경우의 소요사업비는 인근 지역의 지하수 취수량을 고려하여 1공당 취수량을 600~800 m<sup>3</sup>/일로 적용할 경우 Table 4와 같이 분석되었다. 총사업비는 지하수 관정 개발 위치에 따라 1공당 소요사업비가 달라지는데 1공당 취수량을 600~800 m<sup>3</sup>/일로 추정하는 경우 총 취수량이 4,000 m<sup>3</sup>/일, 8,000 m<sup>3</sup>/일의 경우 각각 3,883백만 원, 11,725백만 원으로 산출되었다.

지하수 개발에 따른 유지관리비는 1공당 취수량을 600~800 m<sup>3</sup>/일로 가정하는 경우는 취수량이 4,000 m<sup>3</sup>/일, 8,000 m<sup>3</sup>/일 경우 각각 254백만 원/년, 508백만 원/년으로

**Table 4.** Cost analysis for groundwater based water supply system

| Item                               |            | Description                           |   |
|------------------------------------|------------|---------------------------------------|---|
| Capacity (m <sup>3</sup> /d)       | Intake     | 4,000 (800 m <sup>3</sup> /d × 5 Ea.) | 8,200 (800 m <sup>3</sup> /d × 5 Ea. 600 m <sup>3</sup> /d × 7 Ea.) |
|                                    | Production | 4,000                                 | 8,000   |
| Cost (×10 <sup>9</sup> W)          | Const.     | 3.88                                  | 11.725  |
|                                    | O&M        | 0.254/year                            | 0.508/year  |
|                                    | Total      | 11.5/30year                           | 26.9/30year   |
| Production cost(W/m <sup>3</sup> ) |            | 262.6                                 | 307.1   |

분석되었다. 지하수로 상수도를 공급하는 경우를 가정하여 초기투자 및 시설 노후시 개량을 가정하여 15년차에 재투자하는 것으로 추정하였으며, 지하수 공수 결정은 개발지역의 고도차에 따라 1공당 취수 가능량이 달라졌다. 제주도에서 운영중인 지하수 관정의 경우 표고가 105~120 m인 경우는 1공당 1,000 m<sup>3</sup>/d, 표고가 300 m인 경우는 600 m<sup>3</sup>/d이 취수되는 것으로 조사되어 표고가 취수량에 중요한 변수이다(Kim, 2015).

지하수 관정을 신규로 개발하여 도련 정수장에 공급할 경우 관정 개발비 및 운영관리비만을 고려한 생산원가는 시설용량 4,000 m<sup>3</sup>/일, 8,000 m<sup>3</sup>/일의 경우 각각 262.6 원/m<sup>3</sup>, 307.1 원/m<sup>3</sup>으로 분석되었다.

삼양 3수원지를 대상으로 RO 시설을 도입하는 것이 정수장 인근에서 지하수를 취수하여 정수처리 후 공급하는 방식보다 총 비용이 높은 것은 현실이나, 삼양 3수원의 경우 해안지역에서 용출되어 다른 용도로 사용되지 않고 바다로 유출되는 용천수이고 신규로 개발하는 지하수는 해안 지역이 아닌 해발 100 m 내외에서 굴착하는 것으로 다른 용도로도 사용될 수 있는 귀중한 수자원이다. 따라서 총 시설비 및 운영관리비 측면에서는 지하수 개발이 다소 유리하지만 지하수자원의 지속적인 사용증가로 인한 고갈과 바다로 방류되는 용천수의 활용이라는 측면에서 제주 삼양 3수원지를 활용한 RO 공정 도입은 경제적 가치가 충분하다고 판단된다.

## 4. Conclusion

해안지역에서 담수 용천수를 취수하기 위한 시설을 이미 구축하였으나, 염소이온 등 해수 유입으로 취수

pp. 601-608

pp. 609-615

pp. 617-623

pp. 625-632

pp. 633-641

pp. 643-649

pp. 651-657

pp. 659-666

pp. 667-683

pp. 685-692

pp. 693-702

가 중단된 제주 삼양 3수원을 대상으로 전처리 공정과 RO 공정에서의 오염물질 제거효율을 평가하고 지하수 개발과 비교한 RO 공정의 경제성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 원수의 평균 탁도가 0.21 NTU로서 입자물질의 농도가 매우 낮아 전처리 시설에서 탁질 제거율은 모두 25% 이하로 나타났으며, 용존유기물의 농도가 낮은 원수특성과 유지관리의 용이성 등을 종합적으로 고려할 경우에 다층여과기가 전처리 설비로 적합한 것으로 판단된다.

2) RO 공정에서 염소이온, 전기전도도, TDS 등 용존물질의 제거율은 모두 91.5% 이상으로 조사되었다. 특히 가장 문제가 되었던 염소이온의 경우 유입원수의 평균농도는 691.4 mg/L이었으나, RO 처리수는 평균 9.1 mg/L로서 평균제거율은 98.4%를 나타내었다.

3) RO 시설의 추가설치비와 유지관리비만을 고려하고 내용연수를 30년으로 가정하였을 경우 생산원가는 취수용량을 4,000 m<sup>3</sup>/일로 하였을 경우 362.1 원/m<sup>3</sup>으로 신규 지하수 관정 개발 및 유지관리비만을 고려한 262.6 원/m<sup>3</sup> 보다는 다소 높았다. 그러나 삼양 3수원지는 바다로 방류되는 담수 용천수를 취수원으로 하는 것이고 지하수 개발은 다른 용도로도 사용할 수 있는 유용한 수자원이므로 지속가능한 수자원관리 측면에서는 신규 지하수 개발보다 취수시설을 이미 갖

추고 있는 삼양 3수원지에 RO 공정을 추가로 도입하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

## Acknowledgments

이 논문은 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음

## References

- AWWA (2007) Reverse osmosis and nanofiltration, 2nd Ed. AWWA.
- AWWA (2011) Water quality and treatment, 6th Ed. AWWA.
- Jaewon engineering (2014) Feasibility analysis on water quality improvement methods of Jeju Samyang water source. Jeju special self-governing province, Division of water supply (2015) [www.jejuwater.go.kr](http://www.jejuwater.go.kr).
- Jemin Ilbo (2013) <http://www.jemin.com>(2013.8.23).
- Kim, W. (2015) A study on introduction of desalination process for jeju samyang 3rd water source, Master thesis, Jeju National University.
- Korea Water Works Association(KWWA) (2010) Standards for water supply facilities.
- MOGAHA(Ministry of Government Administration and Home Affairs) (2015) [www.mogaha.go.kr](http://www.mogaha.go.kr).
- Segye Ilbo (2014) <http://www.segye.com>(2014.11.23).