ISSN(Print): 1225-7672 / ISSN(Online): 2287-822X
DOI https://doi.org/10.11001/jksww.2020.34.3.221

배관 해석 프로그램을 통한 해수담수화 플랜트 수압 시스템 분석

Analysis of hydraulic system for seawater desalination plant through piping analysis program

최지혁[1]·최용준[1]·양흥식[1]·이상호[1*]·최준석[2]
Jihyeok Choi[1]·Yongjun Choi[1]·Heungsik Yang[1]·Sangho Lee[1*]·June-Seok Choi[2]

[1]국민대학교 건설시스템공학부, [2]한국건설기술연구원 국토보전연구본부
[1]*School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University,*
[2]*Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*

ABSTRACT

In actual seawater desalination plant, the pressure loss due to frictional force of pipe is about 3~5 bar. Also, the pressure loss at pipe connection about 1~3 bar. Therefore, the total pressure loss in the pipe is expected to be about 4~8 bar, which translates into 0.111 to 0.222 kWh/m^3 of energy when converted into the Specific Energy Consumption(SEC). Reducing energy consumption is the most important factor in ensuring the economics of seawater desalination processes, but pressure loss in piping is often not considered in plant design. It is difficult to prevent pressure loss due to friction inside the pipe, but pressure loss at the pipe connection can be reduced by proper pipe design. In this study, seawater desalination plant piping analysis was performed using a commercial network program. The pressure loss and SEC for each case were calculated and compared by seawater desalination plant size.

Key words: Seawater desalination plant, Hydraulic system, Pressure loss, Pipe design, Specific energy consumption

주제어: 해수담수화 플랜트, 수압 시스템, 압력 손실, 배관 설계, 고유전력소비

Received 7 May 2020, revised 12 June 2020, accepted 17 June 2020.

*Corresponding author: Sangho Lee (E-mail: sanghlee@kookmin.ac.kr)

- **최지혁 (박사과정) / Jihyeok Choi (Doctoral Course)**
  서울특별시 성북구 정릉로 77, 02707
  77, Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Republic of Korea
- **최용준 (연구교수) / Yongjun Choi (Researcher Professor)**
  서울특별시 성북구 정릉로 77, 02707
  77, Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Republic of Korea
- **양흥식 (석사과정) / Heungsik Yang (Master Student)**
  서울특별시 성북구 정릉로 77, 02707
  77, Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Republic of Korea
- **이상호 (조교수) / Sangho Lee (Assistant Professor)**
  서울특별시 성북구 정릉로 77, 02707
  77, Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Republic of Korea
- **최준석 (수석연구원) / June-Seok Choi (Senior Researcher)**
  한국건설기술연구원, 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223
  283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, 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.

1. 서 론

최근, 급격한 인구증가에 따른 환경오염과 기후 변화로 인한 강우 패턴의 변동 등의 원인에 의하여 전 세계적인 물 부족 현상이 심화되고 있다. UN 보고서에 따르면 2025년에는 약 30억 명의 인구가 물 부족 상황에 직면할 것으로 예상하고 있다 (Chung et al., 2012). 이러한 상황에서 해수담수화는 전체 수자원의 98%를 차지하고 있는 바닷물을 담수로 이용할 수 있다는 측면에서 물 부족 문제를 해결할 수 있는 대안으로 관심이 높아지고 있다. 특히 역삼투(Reverse Osmosis, RO) 공정은 현재 여러가지 해수담수화 기술 중에서 가장 널리 적용되고 있다.

그러나 RO 공정에 의한 해수담수화는 상대적으로 에너지 사용량이 높다는 단점을 가지고 있다. 증발법 등 다른 해수담수화 기술에 비하면 RO 공정의 에너지 사용량은 낮은 편이나 지표수나 지하수를 이용하는 기존 정수처리 공정에 비해서는 상당히 높은 편이다 (Lauren et al., 2009; Zarzo and Prats, 2018). RO 해수담수화 공정의 운영에 필요한 에너지는 해수와 생산수(담수) 사이의 삼투압 극복을 위한 에너지, RO 막이 적절한 투과 유량을 확보하기 위한 에너지, 펌프와 기자재 등을 운영하는 과정에서 발생하는 손실 에너지 등이 포함된다 (Lee et al., 2011). 해수의 삼투압은 용존 이온의 농도에 따라 다르나 일반적으로 20~30 bar 정도이며, 이를 1.5배에서 2배까지 농축하여 생산수를 생산하기 위해서는 최소 30~60 bar의 압력이 필요하게 된다 (Gordon and Hui, 2016). 여기에 RO 막의 투과 유량을 10~20 L/m^2-hr 정도 확보하여 공정을 운영하기 위해서는 추가적으로 10~30 bar의 압력이 필요하게 된다 (Ahmed et al., 2019). 이러한 이론적인 에너지 요구량 외에도 펌프와 밸브, 배관 등에서의 기계적 손실, 모터와 전원장치에서의 전기적 손실 등을 고려하게 되면 RO 해수담수화 공정은 1 m^3의 담수를 생산하기 위하여 약 3~6 kWh/m^3(취수와 전처리 등 포함)의 에너지를 필요로 하게 된다 (Avlonitis et al., 2003; Gordon and Hui, 2016; Kim et al., 2019).

따라서 RO 해수담수화 공정에서의 에너지 사용량을 감소시키기 위한 다양한 연구가 현재까지 진행되었다 (Ahmed et al., 2019; Al-Othman et al., 2019; Mito et al., 2019; Park et al., 2020; Zarzo and Prats, 2018). 해수와 생산수 사이의 삼투압 차이는 해수담수화 플랜트의 입지조건과 처리수 수질 요구 수준에 의하여 결정되므로 이를 조절하여 에너지 사용량을 감소시키기는 어려우나(Koutsou et al., 2020; Li, 2013), 농축수가 가지고 있는 유체역학적 압력을 회수하는 에너지 회수 장치(Energy Recovery Device, ERD)의 적용으로 RO 공정의 에너지 사용량을 감소시킬 수 있다 (Alhathal Alanezi et al., 2020; Liu et al., 2016). 최근에는 농축수의 삼투압도 회수하여 역삼투 공정의 에너지를 보다 많이 절감하는 압력지연삼투(Pressure retarded osmosis) 기술이 연구되고 있다 (Chung et al., 2012; Kasaeian et al., 2019; Lee et al., 2019; Mavukkandy et al., 2019). 한편, 막의 수투과율을 높여서 투과 유량 확보를 위한 에너지를 절감하기 위한 신소재 분리막 연구도 지속적으로 진행되고 있으며 (Anis et al., 2019; Lee et al., 2011; Saleem and Zaidi, 2020), 이를 통하여 저압 고플럭스의 운전이 가능한 RO막이 개발되고 있다 (Lee et al., 2011). 또한 펌프와 기자재 등에서 발생하는 에너지 손실 저감을 위해서는 고효율의 장치를 개발하거나 플랜트의 규모를 증가시켜 효율을 증가시키는 방법이 적용되고 있다 (Kim et al., 2009; Li, 2013).

에너지 절감을 위한 RO 공정설계 기술로는 모듈 분배 방법인 ISD(Internally Staged Design), 새로운 공정 구성 및 운영 방법인 CCD(Closed Circuit Desalination) 등이 활발하게 이루어지고 있다. ISD는 DOW Chemical사에서 특허를 받은 구성으로, 압력용기(Pressure vessel) 내에 직렬로 배열되는 4~8개의 분리막 모듈들을 서로 다른 모듈을 사용하는 것이 특징이다 (Jeong et al., 2017). 반면에 CCD는 역삼투 공정에서 발생하는 농축수를 순환시켜서 재처리하여 생산수량을 최대로 하는 반면에 배출되는 농축수량을 최소로 하는 방법이다 (Riley et al., 2018). 그러나 아직까지 해수담수화 공정의 배관에서 발생하는 에너지 손실을 감소시키기 위한 공정설계 기술의 개발은 활발하게 진행되지 않았다 (Kim et al., 2019; Lauren et al., 2009; Li, 2013). 현재 해수 담수화 공정의 배관 설계는 주로 유량 분배의 불균형을 해결하기 위한 목적으로 진행되고 있으며, 배관에서의 압력 손실에 의한 에너지 소모량은 대부분 플랜트 설계 시 고려되지 않는 경우가 많다. 비록 배관 내부에서의 마찰에 의한 압력 손실 자체를 없앨 수는 어렵지만 배관 연결부에서의 압력 손실은 적절한 배관 설계를 통해 저감할

수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 해수담수화 플랜트 단위 공정별 배관에서의 압력 손실을 분석하기 위한 목적으로 진행되었다. 이를 위하여 플랜트 관망 해석을 할 수 있는 상용프로그램을 사용하였으며 500 m^3/day과 1,000 m^3/day 규모의 담수화 시설에 대하여 배관 및 운전 조건별 유체역학적 해석을 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 해수담수화 플랜트 공정 구성

Fig. 1에서 나타낸 바와 같이, 해수담수화 플랜트는 기본적으로 취수(Intake), 전처리(Pretreatment), 카트리지 필터(Cartridge filter), 역삼투, 후처리 공정으로 구성되어 있다. 실제 해수담수화 플랜트에서 배관의 마찰력에 의한 압력 손실은 3~5 bar 수준이며 배관 연결 부분에서의 압력 손실은 1~3 bar 수준이다. 식 1에 나타낸 바와 같이 1~3 bar의 압력손실을 단위 부피의 물을 생산하기 위한 비에너지(Specific Energy Consumption; SEC)로 환산하였을 경우, 0.111~0.222 kWh/m^3으로 계산된다 (Li, 2013).

$$\text{Specific Energy Consumption, SEC} = \frac{Energy\ used}{Product's\ amount} \quad (1)$$

2.2 배관 해석 프로그램

본 연구에서는 기존 상용프로그램인 PIPENET을 사용하여 배관 해석을 수행하였다. PIPENET은 파이프와 덕트 사이에 흐름을 분석하고, 파이프내에서의 수력학 조건들을 해석할 수 있는 프로그램이다. PIPENET의 장점으로는 각 해수담수화 플랜트에서의 배관 연결 방식을 비교할 수 있고, 펌프 특성 곡선에 따른 펌프 효율을 분석할 수 있다. 또한 각 지점별 유량 및 압력 변화를 예측할 수 있고, 마찰 손실(Friction loss)을 예측할 수 있다. 예측된 값을 통하여 에너지 사용량을 계산하고, 유입 조건 변화에 따른 에너지 효율을 분석할 수 있다. 액체 및 가스의 일반적인 흐름을 해석하는 모듈인 PIPENET STANDARD 모듈을 사용하였으며, Fig. 2와 같이 국내에 설치되어 있는 소규모 해수담수화 파일럿 플랜트 도면을 참조하였다. 설계에 이용된 펌프의 성능은 제공된 펌프특성곡선을 따라 설정하였으며, 배관에서의 압력의 손실만을 고려하기 위하여 각종 펌프(고압 펌프, 부스터 펌프, ERD 펌프)의 효율은 100%로 가정하였다. 단위 공정별 사용된 피팅 및 밸브의 loss coefficient(K)는 종류별로 0.2~0.8으로 설정하여 피팅과 밸브로 인한 손실을 고려하여 계산하였다. 전체 배관의 재질은 PVC계열의 재질로 가정하였고, roughness는 0.005~0.045 mm로 가정

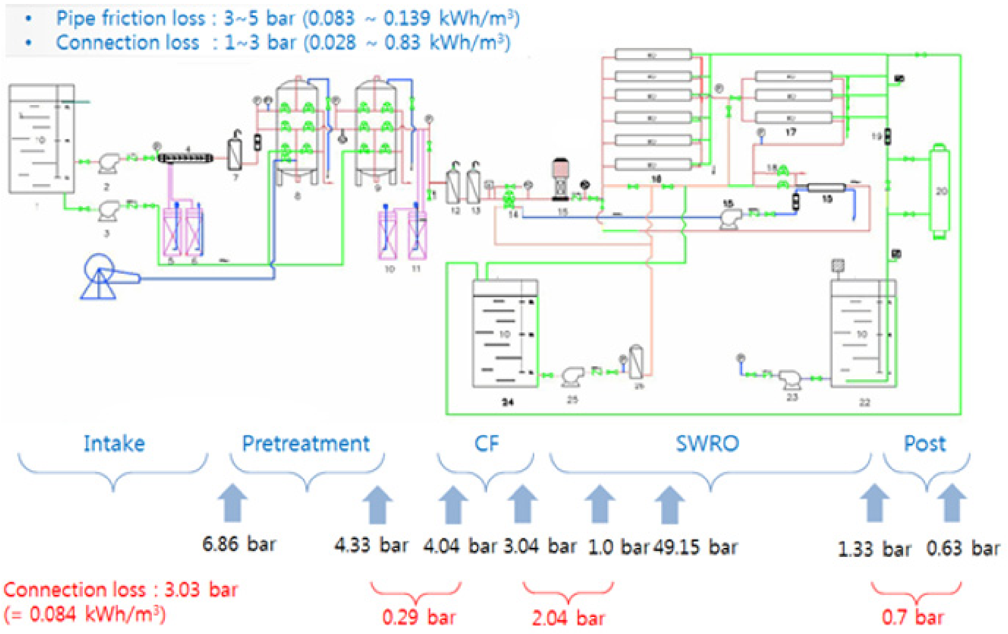


Fig. 1. Average energy consumption of desalination plant.

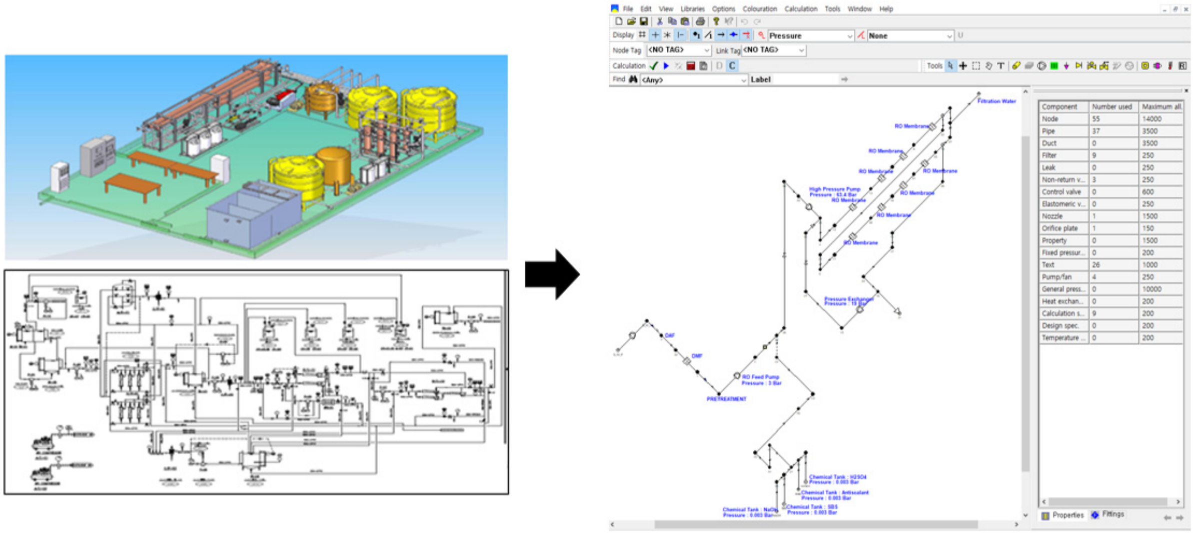


Fig. 2. Basic model of pipnet using SWRO pilot plant design drawing.

하여 해석을 진행하였다. 한외여과 필터와 카트리지 필터의 회수율은 100%로 가정하였으며, 역삼투 필터는 40%로 설정한 후에 공정별 압력 손실에 따른 비에너지 값을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 플랜트 규모별 해석

국내에 설치되어 있는 해수용 역삼투(Seawater Reverse Osmosis, SWRO) 파일럿 플랜트를 참조하여 500 m^3/day과 1,000 m^3/day 규모의 기본적인 담수화 플랜트 수압 시스템 모델을 구축하였다. 규모별 해석을 위한 모델 구성은 Fig. 3과 4와 같으며, 공정 구성은 기본 취수 시설(Intake), 전처리로 적용될 한외여과(Ultrafiltration, UF)와 전단에 카트리지 필터(Cartridge filter; CF)를 사용한 역삼투 공정으로 구성하였다. 후처리 공정에서의 압력 손실은 규모가 크지 않은 역삼투 파일럿 플랜트에서의 압력 손실이 미세할 것으로 판단하여, RO공정 배출 라인에 포함하여 분석을 진행하였다.

Table 1은 500 m^3/day 해수담수화 플랜트의 수압 시스템 해석결과를 나타내고 있다. 한외여과와 카트리지 필터의 회수율을 100%로 가정하여, 각 공정의 유입 유량은 모두 1,250 m^3/day 로 동일하게 해석을 진행하였다. 배관에서의 손실은 취수와 역삼투에서 1 bar와 1.3 bar로 가장 크게 나타났다. 전체 배관에서의 압력 손실은 2.71 bar로 해석 되었으며, 에너지 손실량은 유입 유량과 압력 손실의 비율로 계산하였을 때, 최대 1.881 kW 이다. 이를 비에너지(SEC)로 환산하였을 때, 0.188 kWh/m^3의 에너지 사용량으로 계산되었다.

Table 2은 1,000 m^3/day 규모의 해수담수화 담수화 플랜트에 대한 배관 해석을 수행한 결과이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 담수생산량을 제외한 공정 구성 및 해석 조건은 Fig. 3의 500 m^3/day 규모 해수담수화 플랜트와 동일하게 진행하였다. Table 2는 1,000 m^3/day 해수담수화 플랜트 수압 시스템 모델의 해석 결과를 나타낸 것으로써, 전체 배관에서의 압력 손실은 500 m^3/day 담수화 플랜트 수압 시스템 모델의 해석결과와 비슷한 수준인 2.77 bar로 해석되었다. 이를 비에너지로 환산하였을 때 0.192 kWh/m^3이다.

Table 1과 Table 2의 결과를 종합적으로 분석해보면, 500~1000 m^3/day 정도의 소규모 해수담수화 플랜트에서는 배관에서의 압력손실이 대략 2.7 bar 내외이며 0.19 kWh/m^3에 해당함을 확인할 수 있다. 해수담수화 전체 공정의 비에너지가 4~5 kWh/m^3라고 가정한다면 압력 손실에 의한 비에너지는 전체 에너지 사용량의 3.8~4.8% 정도로 볼 수 있다. 플랜트의 규모가 2배 정도 증가하였으나 손실량이 유사한 것으로 보아 배관 압력 손실은 본 연구에서 고려된 범위 내에서는 플랜트 규모보다는 배관의 형태와 구성방법에 보다 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

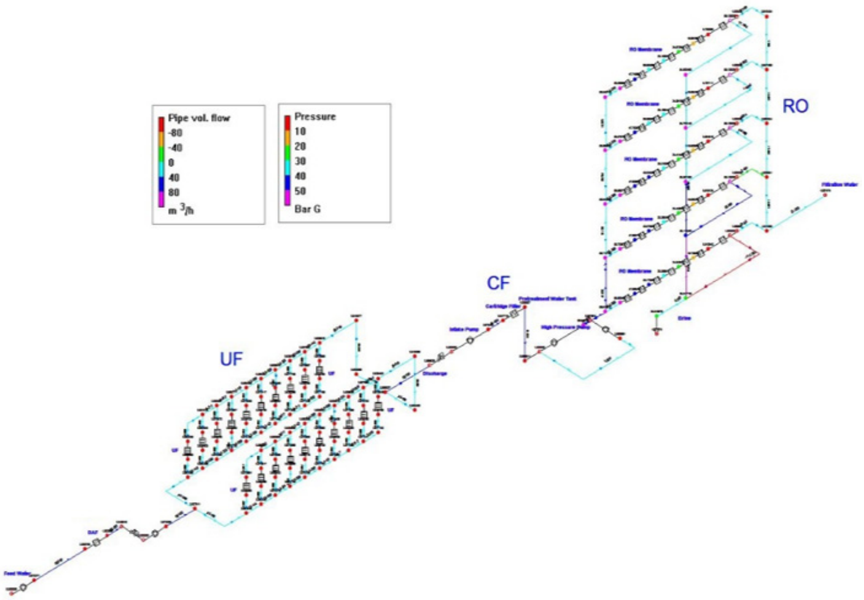


Fig. 3. The hydraulic system model of the 500 m3/day desalination plant.

Table 1. 500 m^3/day desalination plant hydraulic system model analysis results

	Intake	Pretreatment (UF)	CF	RO
Flow rate (m^3/day)	1,250	1,250	1,250	1,250
Pressure (In-out, bar)	3.0-2.0	3.0-2.65	3.3-3.2	56.5-55.2
Pressure drop (bar)	1.0	0.35	0.06	1.30
Energy consumption (kW)	1.447	0.506	0.087	1.881
SEC (kWh/m^3)	0.069	0.024	0.004	0.090
Total SEC (kWh/m^3)	0.188			

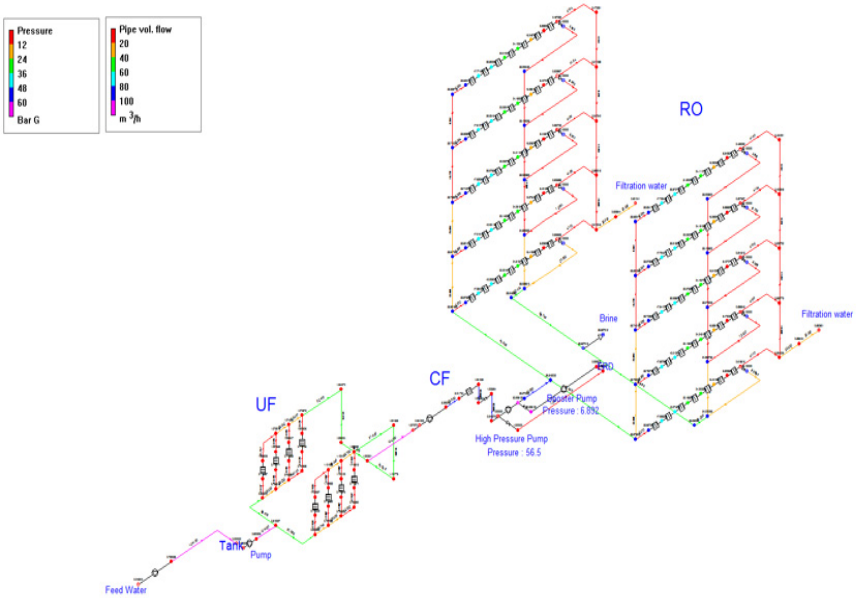


Fig. 4. The hydraulic system model of the 1,000 m^3/day desalination plant.

Table 2. 1,000 m^3/day desalination plant hydraulic system model analysis results

	Intake	Pretreatment (UF)	CF	RO
Flow rate (m^3/day)	2,500	2,500	2,500	2,500
Pressure (In-out, bar)	2.5-1.4	2.9-2.5	3.3-3.2	56.5-55.3
Pressure drop (bar)	1.10	0.42	0.06	1.19
Energy consumption (kW)	3.183	1.215	0.174	3.443
SEC (kWh/m^3)	0.076	0.029	0.004	0.083
Total SEC (kWh/m^3)	0.192			

3.2 배관 조건 변경에 따른 해석

기존 해수담수화 플랜트를 이용하여 구축된 모델의 총 배관에서의 압력 손실을 저감하기 위하여 배관의 직경(diameter), 길이(length), 재질(Roughness), 배관 높이(Elevation) 및 연결 방법(Fittings) 등을 조정하였다. 각 공정 연결 배관의 길이를 최소화 하였고, Fig. 5와 같이 압력 손실과 배관 가격을 고려하여 기존 직경에 비하여 20% 증가하여 해석을 진행하였다. 또한 압력 손실을 줄이기 위하여 공정간 연결에 쓰는 피팅 및 벨브를 최소화하여 수압 시스템 해석을 진행하였다. Table 3은 500 m^3/day 해수담수화 플랜트 배관 설계 개선 후의 결과를 나타낸 것으로써, 배관에서의 압력손실이 2.71 bar에서 1.63 bar로 1.08 bar 감소하는 것을 확인할 수 있다. 비에너지로 환산할 경우 0.074 kWh/m^{3}이 감소하는 것으로 나타났다. 1,000 m^3/day 담수화 플랜트 개선 결과를 Table 4에서 확인할 수 있듯이, 배관에서의 압력손실이 2.77 bar에서 1.61 bar로 감소하는 것을 확인하였다. 비에너지로 환산할 경우 0.081 kWh/m^3

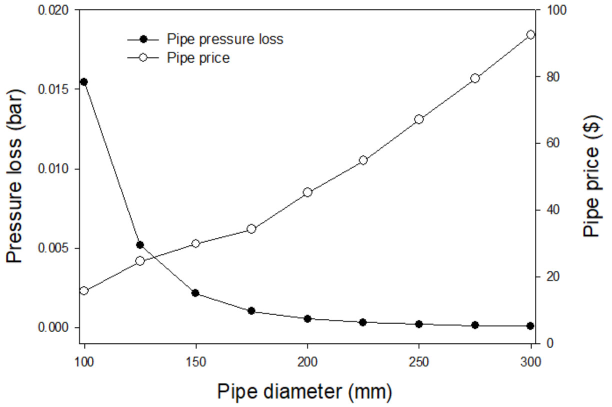


Fig. 5. Pressure loss and price according to pipe diameter (Pipe length: 1 m).

Table 3. 500 m^3/day desalination plant hydraulic system model analysis results pipe improvement

	Intake	Pretreatment (UF)	CF	RO
Flow rate (m^3/day)	1,250	1,250	1,250	1,250
Pressure (In-out, bar)	3.0-2.3	3.0-2.83	3.3-3.2	56.5-55.8
Pressure drop (bar)	0.7	0.17	0.06	0.70
Energy consumption (kW)	1.013	0.246	0.087	1.013
SEC (kWh/m^3)	0.049	0.012	0.004	0.049
Total SEC (kWh/m^3)	0.114			

Table 4. 1,000 m^3/day desalination plant hydraulic system model analysis results after pipe improvement

	Intake	Pretreatment (UF)	CF	RO
Flow rate (m^3/day)	2,500	2,500	2,500	2,500
Pressure (In-out, bar)	2.5-1.8	2.9-2.8	3.3-3.2	56.5-55.8
Pressure drop (bar)	0.75	0.10	0.06	0.70
Energy consumption (kW)	2.112	0.289	0.174	2.025
SEC (kWh/m^3)	0.051	0.007	0.004	0.049
Total SEC (kWh/m^3)	0.111			

이 감소하는 것으로 나타났다. 취수에서 배관 길이 및 직경, 위치를 수정해주었을 때, 압력 손실을 많이 줄일 수 있음을 확인하였다. 해수담수화 플랜트에서는 취수의 결정이 중요하고, 공정 간에 연결되는 배관을 개선하면 압력 손실을 줄일 수 있을 것으로 확인되었다.

3.3 SWRO-BWRO 배관 해석

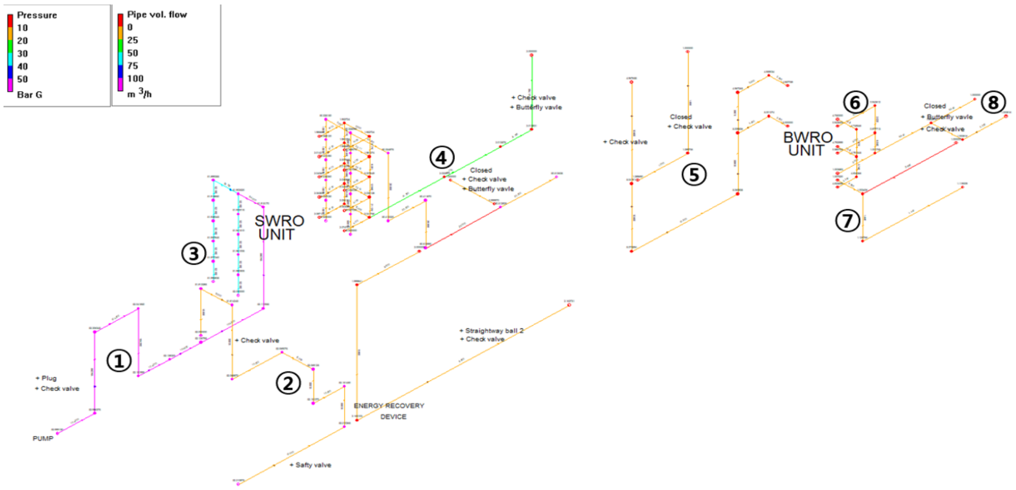
배관 조건 변경에 따른 해석을 수행하였을 때, 역삼투 공정에서의 압력 손실을 크게 줄일 수 없었기에, 압력 손실을 최소화하기 위하여 Fig. 6와 같이 국내 플랜트의 ISO도면을 적용하여 SWRO와 BWRO로 구간을 세분화하여 배관 해석을 진행하였다. Table 5를 확인하였을 때, SWRO는 총 4가지의 구간으로 나누어 해석하였다. 기존 원수와 ERD를 거쳐서 나온 원수가 합쳐질 때, 압력손실이 가장 큰 것으로 확인되었다. SWRO 모듈을 거치고 나온 생산수와 농축수에서의 압력 손실은 미세하였다. 역삼투 공정에서 압력 손실을 줄이기 위해서는 모듈 전단에서의 배관 설계가 중요할 것으로 판단된다. SWRO 배관에서의 압력 손실은 0.55 bar 이다. 이를 비에너지로 환산하였을 때 0.024 kWh/m^3 이다. BWRO 역시 4가지 구간의 압력 손실을 확인하였다. SWRO에 비해 운전되는 압력이 작기 때문에, BWRO에서의 압력 손실은 미세한것으로 해석되었다. BWRO 배관에서의 압력 손실은 0.07 bar로 SWRO 배관에 비해 미세한 압력 손실을 확인하였다. Table 6에서 확인할 수 있듯이, 유량을 고려하여 관경을 20% 증가시

Table 5. SWRO-BWRO piping analysis results

	Flow rate (m^3/day)	Pressure, In (bar)	Pressure, Out (bar)	Pressure drop (bar)	Energy consumption (kW)	SEC (kWh/m^3)
①	1,000	52.27	52.12	0.15	0.17	0.004
②	1,500	50.08	50.00	0.08	0.14	0.004
	1,500	52.27	52.12	0.15	0.26	0.006
③	2,500	52.12	52.00	0.12	0.35	0.009
④	1,000	2.05	2.00	0.05	0.06	0.001
Total				0.55	0.98	0.024
⑤	253.5	5.04	5.00	0.04	0.012	0.001
⑥	90	4.75	4.75	0.00	0	0
⑦	34.5	4.55	4.55	0.00	0	0
⑧	200	1.00	0.97	0.03	0.007	0.001
Total				0.07	0.019	0.002
Total loss amount				0.62	0.999	0.026

Table 6. SWRO-BWRO piping analysis results after piping improvement (20% increasing in pipe diameter)

	Flow rate (m^3/day)	Pressure, In (bar)	Pressure, Out (bar)	Pressure drop (bar)	Energy consumption (kW)	SEC (kWh/m^3)
①	1,000	52.25	52.16	0.09	0.17	0.003
②	1,500	1.08	1.00	0.08	0.14	0.003
	1,500	52.14	52.00	0.14	0.26	0.006
③	2,500	52.09	52.00	0.09	0.35	0.006
④	1,000	2.05	2.00	0.05	0.06	0.001
Total				0.45	0.80	0.019
⑤	253.5	5.04	5.00	0.04	0.012	0.001
⑥	90	4.75	4.75	0.00	0	0
⑦	34.5	4.55	4.55	0.00	0	0
⑧	200	1.00	0.97	0.03	0.007	0.001
Total				0.07	0.019	0.002
Total loss amount				0.52	0.819	0.021



① 1st stage, The feed water ② 1st stage, Before and after the brine in ERD
③ 1st stage, The confluence of feed (①+②) ④ 1st stage, The production water
⑤ 1st stage, The feed water ⑥ 1st stage, The brine
⑦ 2nd stage, The feed water ⑧ 2nd stage, The production water

Fig. 6. Piping analysis of SWRO-BWRO.

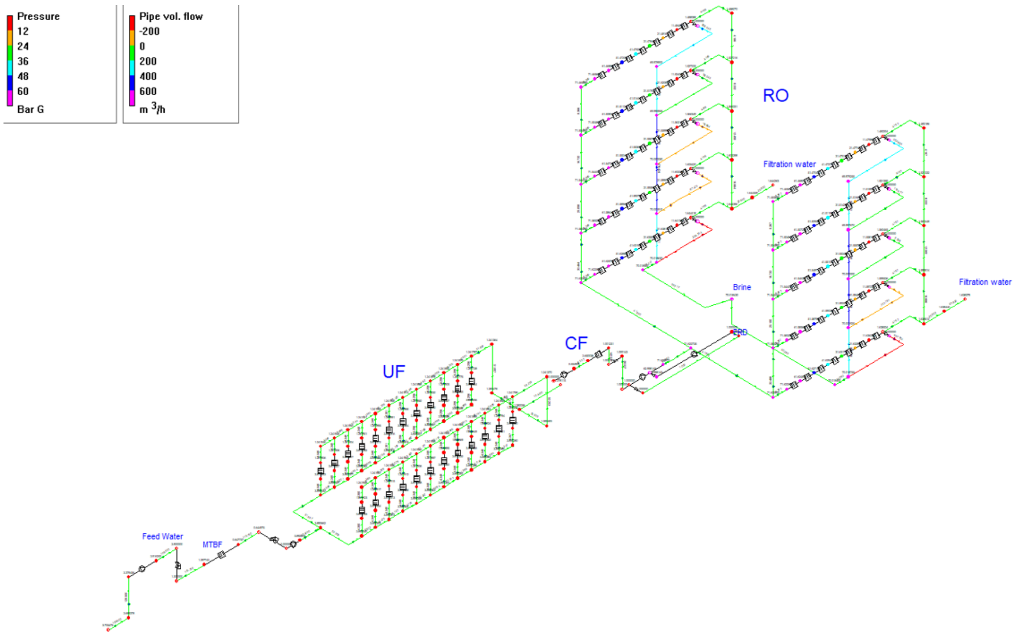


Fig. 7. The hydraulic system model of the 500 m3/day desalination plant.

켰을 때, 구간별로 압력 손실량이 약 0.005 kWh/m^3 줄어들었음을 확인하였다.

3.4 압력, 유량별 배관 해석

압력과 유량에 따른 에너지 손실량을 확인하기 위하여 기본 플랜트 모델을 설계하여 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 다시 수행하였다. Fig. 8은 공정 압력별 비 에너지 손실량을 계산한 그래프이다. 생산량 1,000 m^3/day 기준으로 개별 공정의 유입 압력에 따라 해석을 진행하였다. 취수에서는 3~3.9 bar, UF는 1~1.3 bar, CF는 2~2.6 bar, SWRO에서는 55~71.5 bar 기준으로 총 4가지 케이스를 진행하였다. 케이스별 압력이 커질

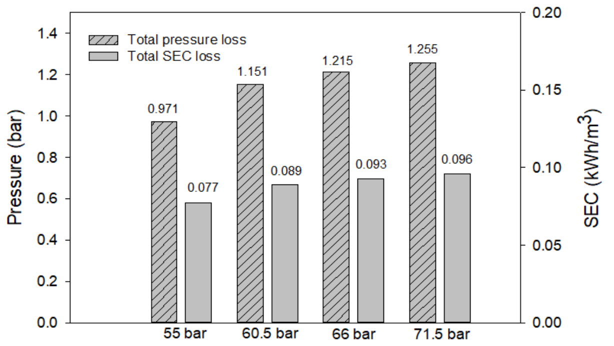


Fig. 8. Piping loss by SWRO pressure based on 1,000 m^3/day.

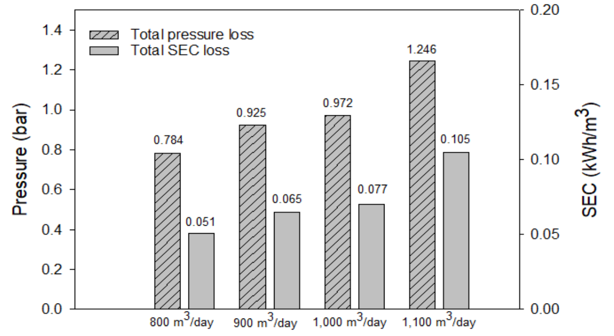


Fig. 9. Piping loss by flow rate based on fixed pressure (SWRO 60.5 bar).

수록 SEC 손실량은 최대 0.096 kWh/m^{3}까지 증가하였고, SWRO에서 유입 압력이 증가할수록 손실 증가폭은 줄어들었다. Fig. 9에서는 공정별 압력을 고정한 후에 생산수량에 따라 SEC 손실을 계산하였다. 생산수량이 800 m^3/day에서 1,100 m^3/day로 증가함에 따라 SEC 손실량이 최대 0.105 kWh/m^{3}까지 증가함을 확인할 수 있다. 결과를 확인하였을 때, SEC 손실량은 압력에 의한 영향보다는 생산수량에 영향이 큰 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 해수담수화 플랜트 배관에서 발생되는 압력 손실을 줄여 전체 에너지 사용량을 저감하기 위하여 수압 시스템 영향 평가를 진행하였다. 국내에 설치되어 있는 SWRO 파일럿 플랜트를 참조하여 기본 모델을 구축하였고, 상용화 프로그램인 PIPENET을 통하여 배관에서의 압력 손실을 계산하였다. 또한 구축된 모델의 압력 손실을 저감하기 위하여 배관의 직경, 길이, 높이, 위치 및 연결 방법 등을 고려하여 수압 시스템을 설계하였다. 손실된 압력을 통하여 비에너지(SEC)를 계산할 수 있었으며, 배관 조건 변경을 통하여 약 0.075~0.080 kWh/m^{3}의 에너지 손실을 감소할 수 있음을 확인하였다. 압력과 유량에 따른 압력 손실을 확인하기 위하여, 생산수량과 공정 운전 압력을 각각의 조건에서 고정하여 비교를 진행하였다. 배관의 압력 손실은 단위 공정의 유입 압력에 의한 영향보다 생산수량에 영향을 더 크게 받는 것으로 해석되었다. 따라서, 본 연구 결과를 활용하여 해수담수화 플랜트의 배관에서의 압력 손실을 저감시켜 에너지 사용량을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute (KEITI) through Industrial Facilities & Infrastructure Research Program, funded by Korea Ministry of Environment (MOE) (1485016423)

References

Ahmed, F.E., Hashaikeh, R., Diabat, A. and Hilal, N. (2019). Mathematical and optimization modelling in desalination: State-of-the-art and future direction, Desalination, 469, 114092.

Ahmed, F.E., Hashaikeh, R. and Hilal, N. (2019). Solar powered desalination – Technology, energy and future outlook, Desalination, 453, 54-76.

Alhathal Alanezi, A., Altaee, A. and Sharif, A.O. (2020). The effect of energy recovery device and feed flow rate on the energy efficiency of reverse osmosis process, Chem. Eng. Res. Des., 158, 12-23.

Al-Othman, A., Darwish, N. N., Qasim, M., Tawalbeh, M., Darwish, N.A. and Hilal, N. (2019). Nuclear desalination: A state-of-the-art review, Desalination, 457, 39-61.

Anis, S.F., Hashaikeh, R. and Hilal, N. (2019). Functional materials in desalination: A review, Desalination, 468, 114077.

Avlonitis, S.A., Kouroumbas, K. and Vlachakis, N. (2003). Energy consumption and membrane replacement cost for seawater RO desalination plants, Desalination, 157,

151-158.
Chung, T.S., Li, X., Ong, R.C., Ge, Q.C., Wang, H.L. and Han, G. (2012). Emerging forward osmosis (FO) technologies and challenges ahead for clean water and clean energy applications, Curr. Opin. Chem. Eng., 1, 246-257.
Gordon, J.M. and Hui, T.C. (2016). Thermodynamic perspective for the specific energy consumption of seawater desalination, Desalination, 386, 13-18.
Jeong, K.H., Park, M.K., Ki, S.J. and Kim, J.H. (2017). A systematic optimization of Internally Staged Design (ISD) for a full-scale reverse osmosis process, Desalination, 540, 285-296.
Kasaeian, A., Rajaee, F. and Yan, W.M. (2019). Osmotic desalination by solar energy: A critical review, Renew. Energy, 134, 1473-1490.
Kim, J., Park, K., Yang, D.R. and Hong, S. (2019). A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants, Appl. Energy, 254, 113652.
Kim, Y.M., Kim, S.J., Kim, Y.S., Lee, S., Kim, I.S. and Kim, J.H. (2009). Overview of systems engineering approaches for a large-scale seawater desalination plant with a reverse osmosis network, Desalination, 238(1), 312-332.
Koutsou, C.P., Kritikos, E., Karabelas, A.J. and Kostoglou, M. (2020). Analysis of temperature effects on the specific energy consumption in reverse osmosis desalination processes, Desalination, 476, 114213.
Lauren, F.G., Desmond, F.L., Benny, D.F., Benoit, M. and Philippe, M. (2009). Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges, Water Res., 43, 2317-2348.
Lee, K.P., Arnot, T.C., and Mattia, D. (2011). A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential, J. Membr. Sci., 370(1), 1-22.
Lee, S., Choi, J., Park, Y.G., Shon, H., Ahn, C.H. and Kim, S.H. (2019). Hybrid desalination processes for beneficial use of reverse osmosis brine: Current status and future prospects, Desalination, 454, 104-111.
Li, M. (2013). A unified model-based analysis and optimization of specific energy consumption in BWRO and SWRO, Ind. Eng. Chem. Res., 52, 17241-17248.
Liu, N., Liu, Z., Li, Y. and Sang, L. (2016). Development and experimental studies on a fully-rotary valve energy recovery device for SWRO desalination system, Desalination, 397, 67-74.
Mavukkandy, M.O., Chabib, C.M., Mustafa, I., Al Ghaferi, A. and AlMarzooqi, F. (2019). Brine management in desalination industry: From waste to resources generation, Desalination, 472, 114187.
Mito, M.T., Ma, X., Albuflasa, H., and Davies, P.A. (2019). Reverse osmosis(RO) membrane desalination driven by wind and solar photovoltaic (PV) energy: State of the art and challenges for large-scale implementation, Renew. Sustain. Energy Rev., 112, 669-685.
Park, K., Kim, J., Yang, D.R. and Hong, S. (2020). Towards a low-energy seawater reverse osmosis desalination plant: A review and theoretical analysis for future directions, J. Membr. Sci., 595, 117607.
Riley, S.M., Ahoor, D.C., Oetjen, K. and Cath, T.Y. (2018). Closed circuit desalination of O&G produced water: An evaluation of NF/RO performance and integrity, Desalination, 442, 51-61.
Saleem, H. and Zaidi, S.J. (2020). Nanoparticles in reverse osmosis membranes for desalination: A state of the art review, Desalination, 475, 114171.
Zarzo, D. and Prats, D. (2018). Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future?, Desalination, 427, 1-9.