



스마트 워터 그리드 내에서 워터 블렌딩을 고려한 역삼투 해수담수화 플랜트 설계

Design for seawater reverse osmosis plant using water blending in smart water grid

이홍주¹·박한배²·우달식²·김수한^{1,*}
Hongju Lee¹ · Hanbai Park² · Dal-Sik Woo² · Suhan Kim^{1,*}

¹부경대학교 토목공학과, ²한국계면공학연구소

¹Department of civil engineering, Pukyong National University, ²Korea Interfacial Science Engineering Institute

ABSTRACT

Smart water grid is a water network with communication to save water and energy using various water resources. In smart water grid, water product from the various sources can be blended to be supplied to end-users. The product water blending was reported by literatures while feed water blending has been rarely reported so far. In this work, a commercial reverse osmosis (RO) system design software provided by a membrane manufacturer was used to elucidate the effect of feed water blending on the performance of seawater reverse osmosis (SWRO) plant. Fresh water from existing water resource was assumed to be blended to seawater to decrease salt concentration of the RO feed water. The feed water blending can simplify the RO system from double to single pass and decrease seawater intake amount, the unit prices of the RO system components including high pressure pump, and operation risk. Due to the increase in RO plant capacity with the feed water blending, however, the RO membrane area and total power consumption increase at higher water blending rates. Therefore, a specific benefit-cost analysis should be carried out to apply the feed water blending to SWRO plants.

Key words: Smart water grid, Water blending, Reverse osmosis, Seawater desalination, Plant design

주제어: 스마트워터그리드, 워터블렌딩, 역삼투, 해수담수화, 플랜트 설계

1. 서 론

스마트 워터 그리드(smart water grid)는 전기(electricity)를 대상으로 한 스마트 그리드(smart grid)로부터 파생된 개념이다. 이는 공급자, 수요자의 정보를 상호 연결하여, 수자원의 질과 양을 비용-효율적으로 만족시킬 수 있는 새로운 개념의 수자원 시스템을 의미한다(Park et al., 2012; Kim et al., 2014). 이를 구현하기 위해서는 첨단 정보통신 기술과 수자원관리 시스템의

결합이 필요하다(MOLIT, 2011). 스마트 워터 그리드 내의 공급자는 실시간 수요량을 만족시키기 위해 다양한 수원(예: 하천, 호수수, 지하수, 우수, 해수, 하수처리수 등)을 활용하여 물을 공급하게 되고, 이 과정에서 원수나 생산수의 혼합이 발생할 수 있는데, 이를 워터 블렌딩(water blending)이라 한다.

미국 플로리다 주에서는 지표수, 지하수, 해수를 각각 원수로 하는 정수장들로부터 생산된 정수를 혼합하여 소비자에게 공급한 사례가 보고되었다(Xiao, 2004; Lovins III et al., 2005; Taylor et al., 2005). 지표수, 지하수, 해수로부터 생산된 정수의 수질이 각각 다르기 때문에

Received 18 January 2014; Revised 06 February 2015; Accepted 10 February 2015

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

pp. 1-9
pp. 11-21
pp. 23-31
pp. 33-38
pp. 39-46
pp. 47-55
pp. 57-63
pp. 65-75
pp. 77-88
pp. 89-96
pp. 97-106
pp. 107-122
pp. 123-131
pp. 133-138

이들의 혼합으로 인한 관로 시스템의 부식, 색도 변화 발생 가능성 등이 연구되었다. 호주 시드니에서는 극심한 가뭄으로 인한 상수원수 부족분을 역삼투(Reverse Osmosis; RO) 해수담수화 플랜트의 도입을 통해 해결하고 있고, 해수담수화 플랜트의 생산수와 기존 수원으로부터 생산된 정수의 혼합 시 발생할 수 있는 문제점에 대한 다양한 연구가 진행되었다(Shon and Chanan, 2014). 현재까지 국내에서 워터 블렌딩 사례는 없었으나, 국토교통부의 해수담수화플랜트 사업단의 성과물인 부산 기장 해수담수화 플랜트가 가동된다면 워터 블렌딩이 고려될 가능성이 높다(MOLIT, 2012).

이와 같이 다중 수원을 활용한 물부족 해소 시에 필연적으로 워터 블렌딩이 발생하게 되고, 기존 연구는 이로 인한 부작용 발생 가능성에 초점을 맞추어 왔다. 즉, 수동적인 입장에서 워터 블렌딩(생산수 블렌딩)의 영향을 분석하였다. 그러나, 본 연구에서는 관점을 바꾸어 능동적인 입장에서, 워터 블렌딩을 활용한 기존 수자원 시스템의 개선 가능성에 초점을 맞추고자 한다. 기존 해외 사례처럼 각각 다른 원수로부터 생산된 정수를 혼합하는 경우에는 수자원 시스템의 전체 공급량이 증가되지만, 이 이상의 효과를 기대할 수 없다. 그러나, 성상이 다른 원수를 혼합하여 정수처리 공정의 효율을 향상시킬 수 있다면, 워터 블렌딩을 활용한 기존 수자원 시스템의 개선을 기대할 수 있다. 원수 혼합의 효과를 가장 극명하게 볼 수 있는 경우 중 하나는 RO 플랜트에서의 해수와 담수(기존 상수원)의 혼합이다. 이로 인해 RO 공정 원수의 염분 농도가 하락하게 되면, 삼투압의 감소로 인해 공급압력이 줄어들게 되고, 이온 투과량의 감소로 인해 생산수 수질이 향상된다. 다만, 워터 블렌딩에 사용될 담수가 상수 원수이므로 기존 정수장에서 생산되는 정수량이 부족해지고, 이를 보충하기 위해 RO 플랜트의 용량이 커지는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 장단점을 정량적으로 분석하여, 해안 도시 물 부족 발생 시 보조수원 확보 방안으로 해수담수화를 도입할 때 최적 설계 방안에 대해서 다루고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 해안도시 물부족 가상 시나리오

Fig. 1은 담수 상수원을 사용하는 해안 도시에서

물부족이 발생한 경우의 대응 방안을 가상으로 설정한 것이다. 도시의 물 수요량은 90만톤/일, 상수원 공급량은 100만톤/일, 정수장의 회수율은 90%로 가정하였다. 기후변화 등으로 인해 상수원 공급량이 10만톤/일 감소하게 되면 정수장 생산량은 81만톤/일이 되어 9만톤/일의 물 부족량이 발생하게 된다. 해안 도시의 특성상 풍부한 해수를 보조 수자원으로 활용할 수 있는데(RO 플랜트 도입), 워터 블렌딩을 고려하여 다음과 같은 세부 시나리오를 도출할 수 있다.

- 시나리오 1: 해수를 원수로 하여 9만톤/일 생산
- 시나리오 2: 해수에 담수 5만톤/일을 섞은 원수로부터 13.5만톤/일 생산
- 시나리오 3: 해수에 담수 10만톤/일을 섞은 원수로부터 18만톤/일 생산
- 시나리오 4: 해수에 담수 20만톤/일을 섞은 원수로부터 27만톤/일 생산

블렌딩되는 담수량이 늘어날수록 RO 플랜트의 규모가 증가하는 이유는 정수장에 공급될 원수의 일부를 해수에 섞어서 정수장 생산량이 감소하기 때문이다. 예를 들어, 시나리오 3에서는 정수장에 공급되는 상수원수가 80만톤/일이 되기 때문에 수돗물 생산량이 72만톤/일이 된다. 이 경우, 수요량 90만톤/일을 만족시키기 위해 RO 플랜트의 용량이 18만톤/일이 되어야 한다.

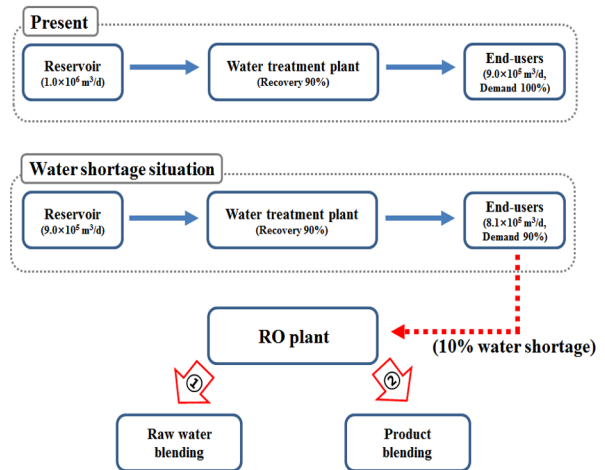


Fig. 1. An example of water blending scenario to overcome water shortage.



2.2 시나리오별 RO 플랜트 설계

각 시나리오별로 원수의 염 농도가 다르기 때문에, RO 플랜트의 회수율을 다르게 설계하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 모든 시나리오별로 RO 플랜트의 농축수 TDS (Total Dissolved Solids) 농도를 해수의 2배 수준(일반적인 역삼투 해수담수화 플랜트의 농축수 수준)으로 맞추도록 회수율이 선정되었다. 회수율 선정을 위해서는 식 1과 같은 물질평형식을 사용한다.

$$Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (1)$$

식 1에서 Qf, Cf는 원수 유량과 TDS 농도, Qp, Cp는 생산수 유량과 TDS 농도, Qc, Cc는 농축수 유량과 TDS 농도를 각각 나타낸다. 계산의 편의를 위해 생

산수의 농도(RO 막에 의한 이온 제거율을 100%로 가정)는 0으로 가정한다. 시나리오 3을 예로 들면, 담수 10만톤/일과 해수를 블렌딩하여 18만톤/일을 생산하는데, 농축수의 TDS 농도가 해수의 2배 수준이 되도록 해수의 블렌딩 양을 식 1을 이용해 계산하면 16만톤/일이 되고, 이때의 회수율은 69.2%가 된다(Table 1 참조).

각 시나리오별 원수 수질을 결정하기 위해, Table 1에 제시된 회수율에 맞는 블렌딩 비율과 해수, 담수 상수원의 수질이 필요하다. 각 시나리오별 담수 블렌딩 비율(Table 2의 Water blending rate) 계산 결과, 시나리오 2-4 순으로 각각 22.7%, 38.5%, 58.8%였다. 해수와 담수 상수원의 수질은 부산 기장 지역의 계절별 해수 수질 모니터링 데이터와 부산시 정수장(명장, 화명, 덕산, 범어사)의 원수 수질 데이터를 참고하여 결

Table 1. Summary of design flow rates for each desalination scenario

Scenario	Freshwater supply rate ($\times 10^3$ m ³ /d)		WTP ¹⁾ product flow rate ($\times 10^3$ m ³ /d)	RO plant product flow rate ($\times 10^3$ m ³ /d)	RO Recovery (%)
1	WTP	900	810	90	50.0
	Blending	0			
2	WTP	850	765	135	61.3
	Blending	50			
3	WTP	800	720	180	69.2
	Blending	100			
4	WTP	700	630	270	79.4
	Blending	200			

1) WTP(Water treatment plant)

Table 2. Feed water quality for each scenario (Unit: mg/l)

	Seawater	Fresh water	Water blending rate		
			22.7%	38.5%	58.8%
Na	11,437	39.31	8,846.62	7,053.28	4,732.48
K	421	-	325.32	259.08	173.35
Ca	361	-	278.95	222.15	148.65
Mg	1,297	-	1,002.23	798.15	534.06
Fe	0.01	-	0.007	0.006	0.004
Ba	0.05	-	0.04	0.031	0.021
Sr	10.36	-	8.01	6.38	4.27
Cl	19,700	60.68	15,236.52	12,146.42	8,147.46
NO ₃	0.5	-	0.39	0.31	0.205
SO ₄	2,184.31	-	1,687.88	1,344.19	899.42
F	1.12	-	0.86	0.69	0.46
HCO ₃	152	-	117.45	93.54	62.59
B	5	-	3.86	3.08	2.06
SiO ₂	0.21	-	0.16	0.13	0.08
TDS	35,569.56	100	27,508.29	21,927.42	14,705.11

pp. 1-9
pp. 11-21
pp. 23-31
pp. 33-38
pp. 39-46
pp. 47-55
pp. 57-63
pp. 65-75
pp. 77-88
pp. 89-96
pp. 97-106
pp. 107-122
pp. 123-131
pp. 133-138

정하였다(MOLIT, 2012; Busan water authority web page). 해수의 경우 기존 모니터링 데이터에서 빠진 항목은 RO 막 제조사인 Dow 사에서 제시하는 표준 해수 수질 데이터로부터 보충하였고(Dow liquid separations, 2005), 담수 상수원의 경우는 최근 1년간 부산시 정수장 원수 TDS 평균 농도가 약 100 mg/l이고 보론은 검출되지 않았음에 착안하여 Na와 Cl 이온만으로 100 mg/l을 구성하는 것으로 가정하였다(Table 2 참조).

본 연구에서는 CSM사의 CSMPRO Ver. 5를 이용하여 RO 공정을 설계 하였다(CSM webpage). 설계 프로그램의 입력 값으로는 원수 수질, 수온, 회수율, RO 막 모델, 막 엘리먼트(모듈) 수, 원수량, 생산수량, 약품주입(pH 조절) 등이 있다. Table 3은 설계 프로그램을 활용할 시 원수 수질에 따른 평균 플럭스와 최대 회수율의 설계기준을 정리한 것이다(Dow Liquid Separation, 2005). 설계 프로그램은 각각의 입력 값들을 이용하여 고압펌프 압력, 생산수 및 농축수 수질, 평균 플럭스 등의 결과 값을 계산한다. 각 결과 값이 Table 3에 제시된 설계기준에 부합하지 않는 경우 입력 값을 수정, 재계산한 후 설계기준에 부합하도록 작업을 반복한다.

일반적인 해수담수화용 역삼투(seawater reverse osmosis; SWRO) 막의 보론 제거율은 낮기 때문에, 최종 생산수의 수질을 먹는물수질기준에 맞추기 위해서는 RO 막을 두 번 통과시켜야 한다(2-pass 시스템). 이때, 해수를 통과시키는 첫 번째 RO 시스템을 1st pass라고 하고, 이의 생산수를 통과시키는 두 번째 RO

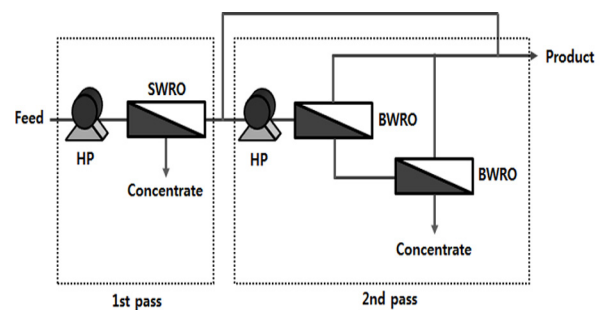
시스템을 2nd pass라고 한다(Fig. 2(a) 참조). 2nd pass의 용량을 감소시키기 위해 1st pass의 생산수 일부만 2nd pass로 보내고, 나머지 1st pass 생산수와 2nd pass 생산수를 섞어 최종 생산수를 만들게 된다. 2nd pass로 보내는 1st pass 생산수의 비율은 최종 생산수의 보론 농도를 기준으로 결정한다. 본 연구에서는 0.9 mg/l을 기준으로 하였다(국내 먹는물수질기준에서의 보론 농도 허용범위는 1.0 mg/l 미만이나, 안전율을 고려하여 기준을 10% 낮춤).

2nd pass에 사용되는 RO 막은 기수용 역삼투(brackish water reverse osmosis; BWRO) 막을 사용하게 되고, 보론 제거율 향상을 위해 pH를 11 이상으로 조정하여 보론을 $B(OH)^{4-}$ 의 형태로 존재하도록 한다. 1st pass 생산수의 염농도가 낮고 파울링 유발물질도 없기 때문에, 2nd pass의 회수율은 90% 이상으로 하고 Fig. 2(a)와 같이 2-stage BWRO 시스템(1st stage의 농축수가 2nd stage로 가서 회수율을 올리는 RO막 구성 방식)으로 구성한다. 해수와 담수를 섞어서 원수로 활용하는 경우에는 회수율이 60% 이상으로 올라가기 때문에(Table 1 참조, Fig. 2(b)와 같이 2-stage SWRO 시스템을 도입한다.

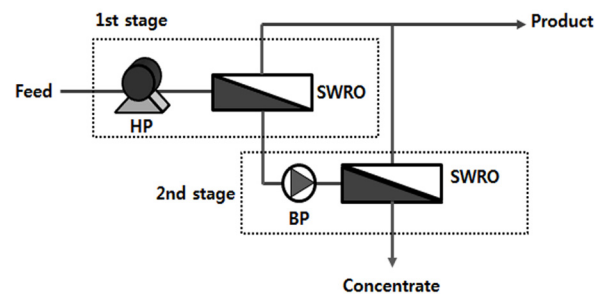
Table 3. RO system design guidelines for flux and element recovery

Feed source	Average system flux (LMH ¹)	Maximum element recovery (%)
RO Permeate	36-43	30
Well water	27-34	19
Surface supply	22-29	17
	20-27	15
Wastewater plant effluent	MF	17-24
	Conventional	14-20
Seawater	Well or MF	13-20
	Open intake	11-17

1) LMH: Litters per square meter per hour



(a) 2-pass SWRO system



(b) 2-stage SWRO system

Fig. 2. Schematics of RO plant system for seawater desalination (HP: high pressure pump, BP: booster pump).



설계프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과값으로 도출되는 압력 데이터와 식 2를 이용하여 각 시나리오별 RO플랜트의 에너지 비용을 계산할 수 있다.

$$E_p = \frac{\sum(Q_f P_f / \eta_p) - \eta_{ERD} Q_c P_c}{36 Q_p} \quad (2)$$

식 2에서 E_p 는 단위 생산량 당 에너지 소비량(단위: kWh/m³)을 나타내고 Q_f , P_f 는 펌프에 의해 발생하는 유량(단위: m³/d)과 압력(단위: bar)을 나타낸다. Q_c , P_c 는 에너지 회수장치로 보내지는 농축수의 유량(단위: m³/d)과 압력(단위: bar), Q_p 는 생산수 유량(단위: m³/d)을 나타낸다. η_p 와 η_{ERD} 는 각각 펌프와 에너지 회수장치의 효율(본 연구에서는 각각 0.9로 가정)을 나타낸다. Fig. 2와 같이 시스템 내에 펌프가 여러 대 있는 경우는 유량과 압력의 곱을 각각 더하여(식 2 참조) 에너지 소모량을 구한다.

3. 연구결과 및 토의

3.1 시나리오별 RO 플랜트 설계 결과

각 시나리오별로 RO 플랜트를 설계한 결과가 Table 4에 요약되어 있다. 해수의 온도 범위는 부산 기장의 해수 수온 모니터링 결과를 바탕으로 5-25°C로 가정하였다. 저온에서는 해수의 점성이 높아지고 막의 공격이 축소되기 때문에, RO 막에 걸리는 압력이 높아지고 생산수 수질이 향상된다. 따라서, 수온이 25°C일 때, 생산수 보론 수질이 본 연구에서 선정한 설계 기준인 0.9 mg/l 미만이 되도록 RO 시스템을 구성하였다(Table 4 참조). 해수를 원수로 사용하는 시나리오 1과 담수 블렌딩 비율이 낮은 시나리오 2의 경우에는 원수의 보론 농도가 높아서 2-pass 시스템으로 구성된다. 담수 블렌딩 비율이 높아 원수의 보론 농도가 낮아지는 시나리오 3과 4의 경우에는 단일 pass로 시스템이

Table 4. Summary of design results for each desalination scenario

Configuration		Seawater ¹⁾			Water blending rate				
		2 pass			22.7% ²⁾			38.5% ³⁾	58.8% ⁴⁾
		1	2	Total	2 pass			1 pass	1 pass
Recovery (%)	5°C	50.0	90.0	48.0	61.4	90.0	59.4	69.23	79.4
	25°C								
Pressure (bar)	5°C	75.0	21.0	-	68.8	20.6	-	57.55)	49.65)
	25°C	64.8	11.7	-	59.1	11.1	-	45.85)	38.15)
Feed Flow rate (×10 ³ m ³ /d)	5°C	187.2	36.6	187.2	230.4	45.0	230.4 (180.46))	260.4 (160.46))	340.2 (140.26))
	25°C								
Product Flow rate (×10 ³ m ³ /d)	5°C	93.7	33.0	90.0	139.5	40.5	135.0	180.0	270.0
	25°C								
Flux (LMH)	5°C	14.4	38.6	-	14.3	39.4	-	14.6	14.6
	25°C								
Membrane area (ha)	5°C	27.17)	3.68)	-	40.77)	4.38)	-	51.47)	77.08)
	25°C								
TDS (mg/l)	5°C	167.1	1.6	106.4	153.4	1.6	107.8	120.4	97.8
	25°C								
Boron (mg/l)	5°C	0.77	0.05	0.51	0.69	0.05	0.5	0.54	0.42
	25°C								

- 1)-4) Scenario 1-4
- 5) 2-stage system, 20 bars of interstage booster pump pressure
- 6) Seawater feed flow rate = Total feed flow rate - Blending freshwater flow rate
- 7) RE16040-SHN (a SWRO membrane element)
- 8) RE16040-BLR (a BWRO membrane element)

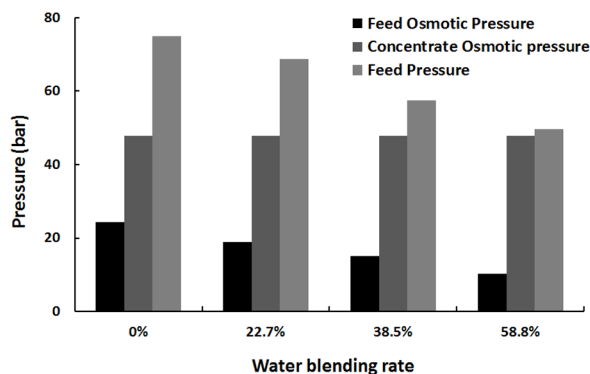
- pp. 1-9
- pp. 11-21
- pp. 23-31
- pp. 33-38
- pp. 39-46
- pp. 47-55
- pp. 57-63
- pp. 65-75
- pp. 77-88
- pp. 89-96
- pp. 97-106
- pp. 107-122
- pp. 123-131
- pp. 133-138

구성되는데, 회수율이 높아 2-stage 시스템으로 구성된다. 2-pass 시스템을 단일 pass 시스템으로 단순화할 경우에는 건설비만 감소하는 것이 아니라, 운영비의 절감도 기대할 수 있으므로, 단일 pass 시스템으로도 최종 생산수 보론 농도를 기준치 미만으로 조절할 수 있는 블렌딩 비율을 선정하는 것이 효과적이다. 이러한 관점에서 보면, 본 연구에서는 블렌딩 비율이 38.5% (시나리오 3) 이상인 경우가 적합하다고 볼 수 있다 (Table 4 참조).

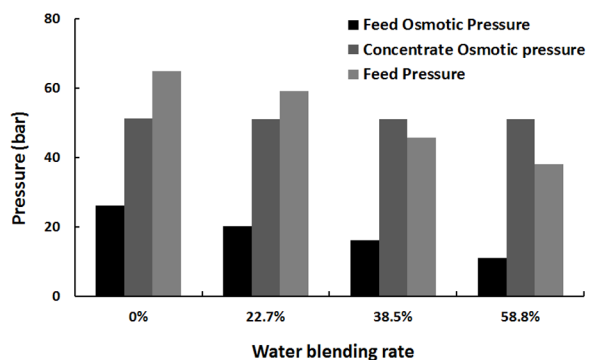
모든 시나리오에서 생산수 TDS는 97.8-208.4 mg/l 범위로 국내 먹는물수질기준인 500 mg/l를 만족시킨다 (Table 4 참조). RO 막 투과플럭스는 Table 3의 설계 기준을 근거로 1st pass의 경우 14.5 LMH 안팎, 2nd pass의 경우 39 LMH 안팎으로 설정하였다. 막 면적은 담수 블렌딩 비율이 높아질수록 증가하는 데, Table 1에 언급된 바와 같이 RO 플랜트 용량이 증가하기 때문이다. 워터 블렌딩으로 인해 필요 막면적이 증가한다는 것은 막 설치 및 교체 비용의 증가를 의미하므로 과도한 워터 블렌딩 비율은 경제성 하락의 주원인이 된다. 한편, 담수 블렌딩 비율이 높아질수록 물 부족을 해소하는 데 활용되는 해수의 비중이 다소 낮아지는 경향을 보였다 (Table 4 참조). 즉, 워터 블렌딩으로 인해 해수 취수 비용의 소폭 절감을 기대할 수 있다.

3.2 워터 블렌딩이 RO 플랜트 압력에 미치는 영향

Table 4에 정리된 바와 같이 블렌딩 비율이 높아질수록 저온(5°C)에서의 펌프 압력이 하락하는 경향을 보였다. 해수를 원수로 사용한 경우에는 최대 75.0 bar의 압력을 필요로 하였으며, 담수 블렌딩 비율이 58.8%까지 증가한 경우에는 최대 49.6 bar의 압력을 필요로 하였다. Fig. 3은 원수 펌프 압력과 원수, 농축수의 삼투압을 각 시나리오별로 비교한 결과를 나타낸다. 일반적으로 원수 펌프 압력은 농축수의 삼투압을 상회해야 한다. 수온이 25°C인 경우에 블렌딩 비율이 38.5%와 58.8%인 경우, 원수 펌프 압력이 농축수 삼투압보다 낮은 경향을 나타내는 데, 이는 Fig. 2와 Table 4에 나타난 바와 같이 stage 사이에 부스터 펌프 (압력 20 bar)를 설치했기 때문에 나타난 현상이다. 즉, 원수 펌프와 부스터 펌프의 압력을 합친 값은 농축수 삼투압보다 크게 된다. Fig. 3에 의하면, 원수의 삼투압은 블렌딩 비율이 높아질수록 원수 TDS 농도가



(a) Temperature = 5°C



(b) Temperature = 25°C

Fig. 3. Effect of water blending on pressures.

감소하기 때문에 감소하고, 농축수의 삼투압은 블렌딩 비율에 관계없이 해수의 2배 수준의 TDS 농도를 갖도록 설계되었기 때문에 동일한 경향을 보인다.

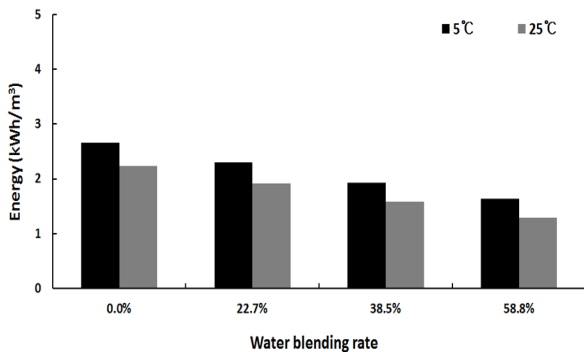
RO 플랜트의 원수 압력 필요량이 증가하면 사용되는 부품의 내구성이 우수해야 하며, 고압 운전으로 인한 운영 리스크도 증가한다. 따라서, 워터 블렌딩으로 인해 원수 압력 필요량이 감소하게 되면, 부품 단가 감소(내구성이 낮은 부품 사용 가능, 저압 펌프 사용 등), 운영 리스크 감소(저압 운전) 등의 편익이 발생한다. 3.1절에서 분석된 바와 같이 블렌딩으로 인해 플랜트 용량이 증가하더라도, 사용되는 부품의 단가 절감 및 운영리스크 감소로 인해 편익을 얻을 수 있기 때문에 담수 자원과 해수 자원이 공존하는 경우에는 RO플랜트를 설계할 때, 워터 블렌딩을 고려할 만한 가치가 있다고 볼 수 있다.

3.3 워터 블렌딩이 RO 플랜트 에너지 소비량에 미치는 영향

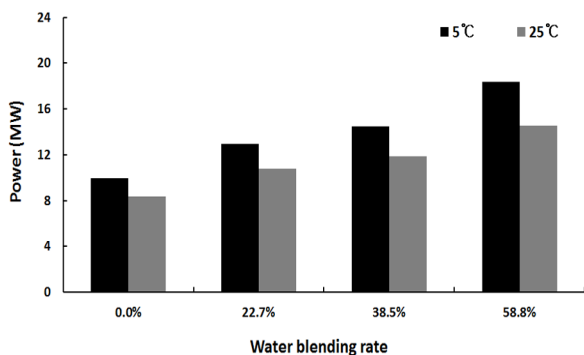
서론에서 언급되었듯이, RO 플랜트의 워터 블렌딩



를 도입했을 때 나타나는 최대 효과는 원수 삼투압 감소로 인한 에너지 단가 절감이다. Fig. 4(a)에 따르면, 워터 블렌딩 비율이 증가할수록 에너지 단가(일 생산량 당 에너지 소비량, 단위: kWh/m³)이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그러나, 에너지 단가에 플랜트 총 생산유량을 곱한 전력의 경우, 워터 블렌딩 비율이 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 담수의 블렌딩 비율이 증가할수록 RO 플랜트 용량이 증가하기 때문에 발생하는 현상이다. 3.1절에서 검토된 필요 막면적 사례와 함께 이 현상은 RO 플랜트 설계에 워터 블렌딩을 고려할 때 최대의 걸림돌이 블렌딩으로 인한 플랜트 용량 증가임을 명백하게 보여주고 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 블렌딩에 사용되는 담수(혹은 해수보다 농도가 낮은 기수)를 본 연구 사례와 같이 기존 상수원에서 얻는 것이 아니라, 하수 처리수와 같은 비 상수원으로부터 얻는 방법을 고려해 볼 수 있다. 그러나, 이는 수요자들의 반발을 불러일으킬 뿐 아니라, 기존 수도법에 위배되므로 현재로서는 실현이 요원한 대안이라 할 수 있다.



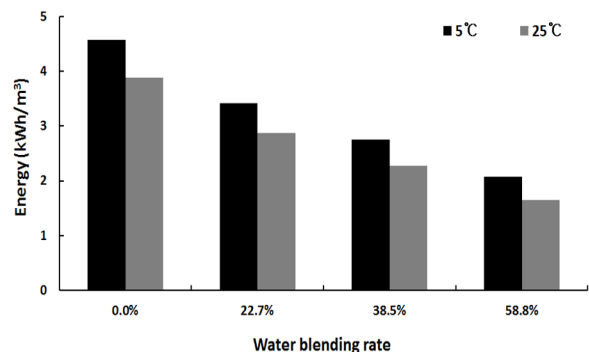
(a) Energy consumption per unit production



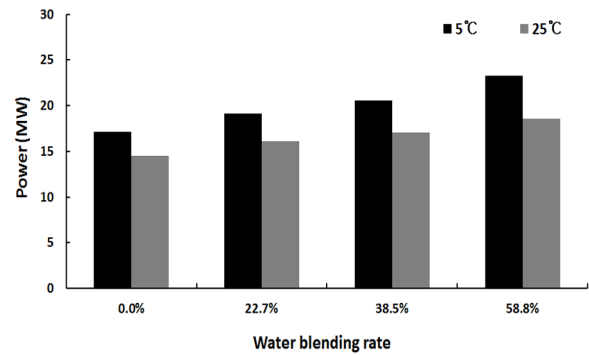
(b) Power demand for total plant operation

Fig. 4. Effect of water blending on energy consumption with application of energy recovery device.

Fig. 5에 따르면, 에너지 회수장치를 고려하지 않은 경우에는 워터 블렌딩 비율이 증가할수록 에너지 단가가 급격하게 감소하고, 전체 플랜트 전력의 증가치가 완만한 경향을 보이고 있다. 에너지 회수장치로 인한 에너지 절감치는 농축수의 유량에 비례하기 때문에(식 2 참조), 회수율이 낮을수록 높아진다. 워터 블렌딩 비율이 증가할수록 회수율이 높아져서(Table 4 참조), 에너지 회수장치 적용으로 인한 절감치가 줄어들 수밖에 없으므로, Fig. 4(에너지 회수장치 고려)에서의 에너지 단가는 완만한 감소 경향을 보였으나 Fig. 5에서는 급격한 감소 경향을 보이게 된다. 즉, 에너지 회수장치를 도입하지 않은 RO 플랜트에서는 워터 블렌딩으로 인해 플랜트 용량이 증가하더라도 총 전력 증가치가 크지 않으므로, 3.1절, 3.2절에서 언급된 워터 블렌딩의 편익을 함께 고려한다면 워터 블렌딩이 충분히 경쟁력 있는 대안이 될 수 있다. 물론 일정 규모 이상(예: 수천 톤/일 이상)의 RO 플랜트에서는 대부분 에너지 회수장치를 도입하기 때문에, 이런 경우는 소규모 RO 플랜트 적용 시로 제한된다.



(a) Energy consumption per unit production



(b) Power demand for total plant operation

Fig. 5. Effect of water blending on energy consumption without application of energy recovery device.

pp. 1-9

pp. 11-21

pp. 23-31

pp. 33-38

pp. 39-46

pp. 47-55

pp. 57-63

pp. 65-75

pp. 77-88

pp. 89-96

pp. 97-106

pp. 107-122

pp. 123-131

pp. 133-138

4. 결 론

스마트 워터 그리드에서는 다양한 수자원을 적절히 활용하여 수요자에게 물을 공급하게 되고, 이 과정에서 워터 블렌딩이 필연적으로 발생한다. 담수 수자원을 주로 활용하고 있는 해안 도시에 해수담수화용 RO 플랜트를 도입할 경우, RO 플랜트 생산수와 기존 정수장에서 생산된 정수를 혼합하는 것이 일반적이다(생산수 블렌딩). 본 연구에서는 생산수 블렌딩 대신 해수 원수와 기존 담수 수자원을 섞을 경우(원수 블렌딩), RO 플랜트에 어떤 장단점이 있는지 분석하였다.

원수 블렌딩을 도입하면 RO 시스템의 간소화(2-pass → 단일 pass)로 인한 건설비/운영비 절감(본 연구 사례의 경우 원수 블렌딩 비율 38.5% 이상인 경우에 해당됨), 해수 취수량 감소(본 연구 사례의 경우 원수 블렌딩 비율 38.5% 시 14.3% 감소), 펌프 등 플랜트 부품의 단가 절감, 저압운전으로 인한 운영 리스크 감소, 에너지 단가(kWh/m³) 절감(본 연구 사례의 경우 원수 블렌딩 비율 38.5% 시 27.4% 절감) 등의 많은 편익이 발생하지만, RO 플랜트 용량이 증가하게 되므로 필요 막면적 증가(본 연구 사례의 경우 원수 블렌딩 비율 38.5% 시 67.4% 증가), 총 전력(MW) 증가(본 연구 사례의 경우 원수 블렌딩 비율 38.5% 시 45.3% 증가) 등의 단점도 공존한다. 따라서, 해수담수화용 RO 플랜트에 워터 블렌딩을 도입할 경우, 본 연구에서 분석된 내용을 실제 상황에 따른 편익과 비용으로 정량화 하여 최적 블렌딩 비율을 선정할 필요가 있다.

사 사

본 논문은 2014년도 정부(국토교통부)의 재원으로 스마트워터그리드 연구과제 (KW-14-SWG)로 수행된 연구입니다.

References

- Busan water authority web page, <http://water.busan.go.kr/purity/statistics.do>
- CSM web page, http://www.csmfilter.com/csm/upload/CSMPRO5_SETUP.zip
- Dow liquid separations, Filmtec reverse osmosis membranes technical manual,
- The Dow Chemical Company (2005). Form No. 609-00071-0705.
- Kim, S., Lim, F.L., Park, J. Y., Kim, J.O. (2014). Effect of flux fluctuation on the fouling in membrane water treatment system for smart water grid, *Desalination and Water Treatment*, 52, 1028-1034.
- MOLIT (2011). Report for planning water grid intelligence technology, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- MOLIT (2012). Development of test-bed performance evaluation algorithm and methodology for reverse osmosis membrane maintenance, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Lovins III, W.A., Duranceau, S.J., Powell, R.M., Richard Voorhees, J. (2005). Experiences with Blending Multiple Source Waters In a Common Water Distribution System, *Florida water resources journal.*, March, 31-35.
- Park, N.S., Kim, S.S., Chae, S.H., Kim, S., (2012). The effect of fluctuation in flow rate on the performance of conventional and membrane water treatment for a smart water grid, *Desalination and Water Treatment*, 47, 17-23.
- Shon, H.K., Chanan, A. (2014). Water management in sydney: Challenges, progress and the future, Smart water grid international conference, Incheon, Korea, 177-180.
- Taylor, J.S., Dietz, J.D., Randall, A.A., Hong, S.K., Norris, C.D., Mulford, L.A., Arevalo, J.M., Imran, S., Le Puil, M., Liu, S., Mutoti, I., Tang, J., Xiao, W., Cullen, C., Heaviside, R., Mehta, A., Patel, M., Vasquez, F., Webb, D. (2005)
- Effects of blending on distribution system water quality, AWWA Research Foundation and American Water Works Association.
- XIAO, W. (2004). Effect of source water blending on copper release in pipe distribution system: Thermodynamic and empirical models, Ph.D. Dissertation, University of Central Florida Orlando, Florida.