

전력망 연동형 해수담수화 플랜트의 운영비용 절감효과

(The Cost Reduction Effect of Gridable Sea Water Reverse Osmosis Desalination Plant)

이중현* · 최종인 · 배시화 · 고원석**

(Jong-Hyun Lee · Jung-In Choi · Si-Hwa Bae · WonSuk Ko)

Abstract

A novel concept of the gridable desalination plant is to provide an operation management to enable an electricity plant operation cost reduction. Adjusting recovery rate responded to electricity price, an electricity plant operation cost can be saved. To show a suggested approach, the data of 10 [MIGD](Million Imperial Gallons per Day) SWRO testbed are used. The result shows that total cost reduction rate is calculated about 1.6[%] of annual total electric plant operation cost.

Key Words : Sea Water Reverse Osmosis, Cost Reduction, SWRO, Desalination Plant

1. 서 론

1.1 연구의 배경

지구상에 존재하는 물의 양은 약 14억[km³] 정도이며, 이 수자원 중 97[%]를 차지하고 있는 해수의 활용은 오래전부터 관심의 대상이 되어왔다[1]. 최근 들어 전 세계적으로 더욱 심각해지는 물 부족 사태 속에서 해수 담수화는 지구상에 거의 무한정으로 존재하는 해수를 갈수 영향 없이 담수화 하여 물 부족에 대처할 수 있는 매우 효율적인 방법이다.

이러한 해수담수화 플랜트의 총 규모는 1965년부터 지속적으로 성장하여 현재 약 5,000만[m³/day] 규모이다. 2007년 이후 기준으로 유가상승에 따라서 상대적으로 에너지 소모량이 적은 역삼투 방식이 선호되고 있으며, 현재 전체 해수담수화 플랜트 중 역삼투 방식이 약 61[%]를 차지하고 있다[2].

이러한 해수 담수화 플랜트들은 담수화를 위한 에너지의 대부분을 전력으로 소모하고 있다. 이에 따라 발전 및 해수담수화 플랜트 2종의 플랜트를 동시에 병합시켜 건설하여 에너지 효율을 극대화 하거나, 고효율 기기 등의 사용으로 에너지 효율을 향상시키고 있다. 하지만 이러한 방식의 에너지 효율향상은 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 해수담수화 플랜트를 스마트그리드에 연동하여 운영비용을 절감하는 방법을 제안하고, 기장에 건설 예정인 10[MIGD] Test-bed에 적용하였을 경우 운영비 절감 및 계통에 미치는 영향에 대해 고려하였다.

* 주저자 : 두산중공업 해수담수화 국책과제팀
** 교신저자 : 경원대학교 가천에너지연구원 책임연구원
Tel : 031-750-8557, Fax : 031-750-8571
E-mail : kwssjy@kyungwon.ac.kr
접수일자 : 2010년 9월 30일
1차심사 : 2010년 11월 11일, 2차심사 : 2010년 11월 15일
심사완료 : 2010년 11월 20일

2. 본 론

2.1 SWRO(Sea Water Reverse Osmosis) 개요

역삼투란 농도차가 있는 두 가지의 용액을 반투막으로 나누어진 수조 또는 용기에 분리해 놓았을 때, 일정한 시간이 경과하면 저농도 용액의 물이 고농도 용액쪽으로 이동하여 수위에 차이가 생기게 된다. 이러한 현상이 “삼투”현상이며 이때 발생하는 수위 차이 만큼의 압력이 “삼투압”이다. 이러한 상황에서 고농도 용액쪽에서 삼투압 이상의 압력을 가하면, 저농도 용액쪽으로 물이 이동하게 되는데 이것을 “역삼투(Reverse Osmosis)”라고 한다[3].

이러한 역삼투방식은 아래 그림 1에서 보는바와 같이, 2006년 기준 해수담수화 전체 비용구조의 약 52[%]가 건설비이며, 23[%]가 에너지 비용, 10[%]가 인건비로 나타난다[1]. 운영비 측에서 비교해보면 전체 운영비의 약 46[%]가 에너지 비용임을 알 수 있다.

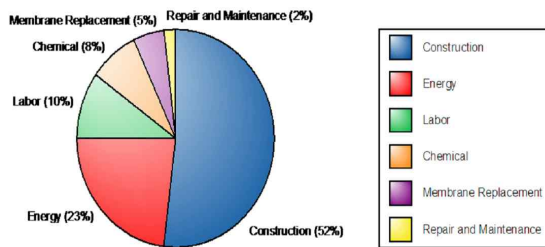


그림 1. 해수담수화 전체 비용구조[1]
Fig. 1. The cost structure of SWRO

따라서 에너지를 효과적으로 사용하고 운영하는 것이 해수담수화 플랜트의 운영비용을 절감하는 효과적인 방법임을 알 수 있다.

2.2 전력망 연동형 해수담수화 플랜트

대부분의 기존 해수담수화 플랜트 에너지 효율 관련 연구들은 플랜트의 에너지효율화 문제를 ‘플랜트 내부

에너지 소비량 최소화’의 관점에서 규정하고 다루었다. 하지만 이미 유닛트레인의 대형화를 통하여 에너지 효율을 거의 최대로 끌어올렸기 때문에, 기술발달을 통하여 플랜트의 에너지 효율을 향상시키는 것은 한계가 있다. 따라서, CO₂ 배출량저감의 관점에서 문제를 바라보고 해결방안을 모색하는 새로운 방법이 필요하다. 석탄으로 생산된 전력 1[kWh](약 1[kg]의 CO₂ 발생)와 신재생에너지로 생산된 전력 1[kWh](10[g] 이하의 CO₂ 발생)는 CO₂ 배출량의 관점에서는 100배의 차이가 있다고 볼 수 있다. 그러므로 전력을 더 많이 사용하여 물의 생산량을 늘려도 CO₂ 배출량을 최소화할 수 있는 방법이 존재한다고 할 수 있다. 신재생 설비를 충분히 갖추고, ESS(Energy Storage System)나 전기자동차 연동(plug-in), 실시간 요금제에 연동하여, 전기요금이나 CO₂ 배출이 낮을 때는 플랜트의 운전 효율을 높이거나 ESS, 전기자동차를 충전, 전기요금이 높을 때는 충전된 전력을 방전하거나 플랜트의 운전효율을 낮추는 식으로 운전할 경우 플랜트의 에너지비용과 CO₂ 배출을 매우 크게 낮출 수 있다. 그림 2는 전력망 연동형 해수담수화 플랜트 개념도로서 해수담수화플랜트와 전력망과의 개념도를 제안하였다. 전력을 구성하는 요소들로 해수담수화플랜트의 자체발전기, 고압펌프, 신재생에너지, 전기자동차 등을 고려하였다. 또한 해수담수화플랜트 에너지 통합관리 시스템으로 에너지를 모니터링하고 제어할 수 있도록 하였다.



그림 2. 전력망 연동형 해수담수화 플랜트 개념도
Fig. 2. Gridable sea water reverse osmosis plant

2.3 해수담수화플랜트 Test-bed

해수담수화플랜트 사업단은 해외 시장에서 경쟁력을 가진 글로벌 TOP의 대용량 해수담수화 플랜트 설계 및 건설 기술을 확보하기 위하여, 1) 대용량 해수담수화 플랜트를 위한 8[MIGD](36,368[m³/day])급 트레인의 설계 기술을 개발하고, 2) 개발기술의 실용화 및 상용화를 위하여 8[MIGD](36,368[m³/day])급 트레인을 포함한 10[MIGD](45,460[m³/day])규모의 테스트베드[4]를 그림 3과 같이 2012년 12월 기장에 완공 할 예정이다.



그림 3. 해수담수화 플랜트 테스트베드
Fig. 3. Testbed of SWRO in KOREA

2.4 Test-bed의 전력비용 절감 운전 방법

기장에 설치되는 Test-bed에서 사용하는 전력요금은 산업용 병중 고압전력 B 선택 III에 해당하는 요금제로서 표 1에 한전에서 공시하는 전력요금제[5]를 나타내었다. 해당 요금제는 표 1과 같이 계절별, 시간별로 그 가격 차이를 가지고 있다. 따라서 경부하 시 가동률을 높여 물 생산을 늘리고, 최대부하 시 가동률을 낮추어 담수생산량을 절감하는 방식으로 운영비용을 절감하고, 전력시스템의 부하율을 높일 수 있다. 이러

한 부하율의 증가는 기저부하의 증대를 통한 전력시스템의 경제성 증대에 기여할 수 있다.

표 1. 산업용 병중 고압전력 B, 선택 III 요금(원)
Table 1. Industrial (C), High Voltage (B), option III (Won/Kwh)

계절	일시	경부하	중간부하	최대부하
하계	7~8월	38.8	80.6	141.3
춘,추계	3~6월, 9~10월	38.8	58.2	80.6
동계	11월~익년2월	38.8	73.3	103.1

아래 그림 4 Recovery rate curve에서 보는 바와 같이 일정한 TDS(Total dissolved solids, 총용존고형물)일 경우 펌프의 출력을 조절, 멤브레인에 가해지는 압력을 조절 변화시켜, Recovery rate(회수율)을 변화시키는 방법으로 플랜트의 생산량을 조절할 수 있다. 하지만 그림 5와 같이 펌프의 Head와 Flow rate를 높일 경우 펌프의 효율이 높아지고, 담수의 생산량도 많아지지만, 멤브레인에 과도한 압력이 걸리게 되어 멤브레인의 수명단축을 초래한다. 또한 펌프의 출력을 낮출 경우 펌프의 효율이 낮아지고, 담수의 생산량도 적어지지만, 멤브레인에 가해지는 압력이 낮아지게 된다. 통상적인 멤브레인의 recovery rate는 제조사에 따라 다르지만 약 48~50[%] 내외이다. 이를 전력가격 신호에 맞추어서 전력가격이 낮을 경우에는 Recovery rate를 62[%]까지 올려 멤브레인에 과도한 압력을 주지만 전력가격이 높을 경우에는 Recovery Rate를 37[%]까지 절감하여, 멤브레인에 낮은 압력을 가하는 방식으로 멤브레인에 수명에 거의 영향을 미치지 않는 범위 내에서 전력가격에 연동하여 플랜트를 운전할 수 있다.

전력 가격신호에 기반하여 운전시 정확한 전력 요금 절감량 산정을 위해서는 운전량에 상관없이 계속 유지되어야만 하는 기타유지전력(조명, 컴퓨터 등)과 운전량에 영향을 받는 전력을 구분하여야 한다. 운전량에 영향을 받는 전력은 거의 대부분이 Pump에서 소모되는 전력량으로, 기타 다른 전력사용량은 무시할 수 있다.

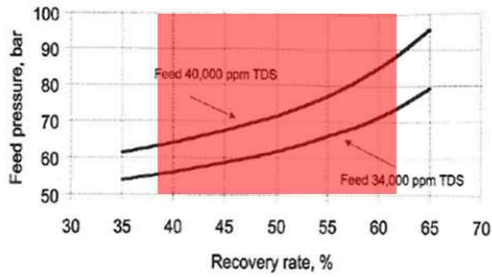


그림 4. Recovery rate 곡선
Fig. 4. Recovery rate curve

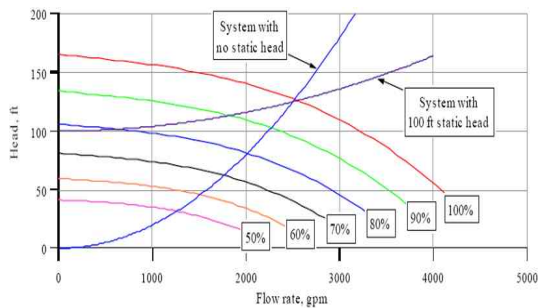


그림 5. 속도변화에 따른 시스템 과 펌프 헤드 용량 곡선
Fig. 5. System and pump head-capacity curves at varying speeds

표 2. PFD(Process Flow Diagram)에 따른 각 구간간의 값

Table 2. Each section value of PFD(Process Flow Diagram)

Parameters	Raw Water Flow	Raw Water TDS	2MiGD HP Pump Flow	2MiGD HP Pump Press	2MiGD Pelton Drv Flow	2MiGD Pelton Drv Press
Unit	m ³ /hr	PPM	m ³ /hr	bar		
Row Number	1	2	3	4	5	6
Original Design(c1)	4220	34500	834	38.8	432	52.1
Parameters	2MiGD Re'vry	8MiGD HP Pump Flow	8MiGD HP Pump Press	8MiGD ERD outlet Flow	8MiGD ERD outlet Press	8MiGD Boost Pump Flow
Unit	[%]	m ³ /hr	bar	m ³ /hr	bar	m ³ /hr
Row Number		7	8	9	10	11
Original Design(c1)	48	1612	55.1	1725	50.5	1725

Parameters	8MiGD Boost Pump Press	8MiGD Re'vry	8MiGD high TDS Permeate	8MiGD low TDS Permeate	2MiGD high TDS Permeate	2MiGD low TDS Permeate
Unit	bar	[%]	m ³ /hr	m ³ /hr	m ³ /hr	m ³ /hr
Row Number	12		13	14	15	16
Original Design(c1)	55.1	48	856	752	214	188
Parameters	2nd Pass Feed Inlet	2nd Pass Feed Press	2nd Pass Permeate	2nd Pass bypassed Permeate	Total Product Water	
Unit	m ³ /hr	bar	m ³ /hr	m ³ /hr	m ³ /hr	
Row Number	17		18	19	20	
Original Design(c1)	1070	13.1	974	940	1914	

표 3. 각 펌프의 전력소비량 계산

Table 3. Electric consumption calculation of each pump

name	Flow	[%] rec	Head	density	gravity	Hy Eff	Mo Eff	power
Energy for 2MiGD HP Pump	834	48	386.11	1,024	9.81	85	95	1,112.7
Energy recovery Pelton drive	432		503.53	1,024	9.81	75		455.24
Energy for 8MiGD HP Pump	1,612	48	548.31	1,024	9.81	85	95	3,054.3
	1,612	62	647.82	1,024	9.81	85	95	3,608.6
	1,612	37	468.7	1,024	9.81	85	95	2,610.9
Energy recovery PX drive	1,725		502.53	1,030	9.81	100		2,433.1
8MiGD booster Pump	1,725	48	45.509	1,030	9.81	80	95	289.92
	1,725	62	45.509	1,030	9.81	80	95	289.92
	1,725	37	45.597	1,028	9.81	80	95	289.92
2nd Pass RO pump	1,070	91	133.49	1,000	9.81	80	95	512.13
	1,344	88	112.09	1,000	9.81	80	95	540.16
	864	94	152.85	1,000	9.81	80	95	473.51

전력망 연동형 해수담수화 플랜트의 운영비용 절감효과

펌프의 전력소비량 계산은 Test-bed 설계 데이터인 표 2의 값을 아래 수식에 대입하여 표 3과 같이 구할 수 있으며, 이 값을 이용하여 Recovery rate(%)에 따른 전체 전력소모량 및 담수 1[m³]생산 시 들어가는 전력량을 표 4와 같이 정리할 수 있다.

$$Power(Kw) = \frac{Flow \times Head \times Density \times Gravity}{3.6 \times 10^6 \times Moeff \times Hyeff}$$

- P : 축동력(kW)
- Density : 밀도(kg/m³)
- Flow : 유량([m³/시])
- Head : 압력(전양정([m]))
- Hy eff : 펌프효율(%)
- Mo eff : 모터효율(%)

표 4. 회수율에 따른 전력소모량
Table 4. Electric consumption of Recovery rate

Recovery rate(%)	37	48	62
Total energy for RO (kWh)	4,969	5,551	4,487
Pump energy for RO (kWh)	2,596	2,402	2,830

위 전력소모량 데이터를 사용, 표 1의 전력 가격 신호에 반응하여 전력요금이 비싼 시간에는 Recovery rate를 37[%]로 낮추어 담수 생산량 및 전력소모량을 낮추고, 전력요금이 싼 시간에는 Recovery rate를 62[%]로 높여 담수 생산량 및 전력소모량을 높이는 방식으로 아래 그림 6과 같이 운전할 수 있다. 그림 6 처럼 운전 시 절감되는 계절별 전력요금은 그림 7과 같으며, 연간 53,501,756원으로 전체 소모되는 전력요금 3,330,803,113원의 약 1.6[%]에 해당한다.

그림 7의 계절별 일일 전력 요금 절감량을 비교하여 보면 봄, 가을 103,897원, 여름 250,207원, 겨울 180,725원으로 여름철에 에너지 비용 절감이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이는 하계(7~8월)에 시간대별 전력요금의 차가 상대적으로 다른 계절에 비하여 크기 때문이다.

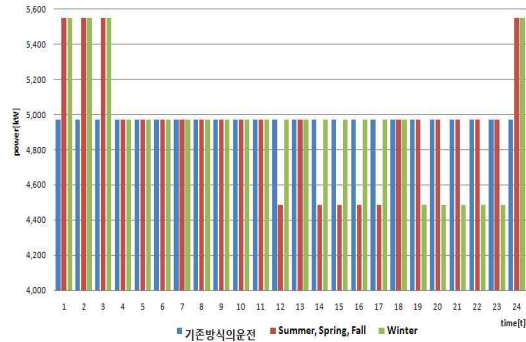


그림 6. 가격신호에 기반한 운전
Fig. 6. Operation based on electricity cost

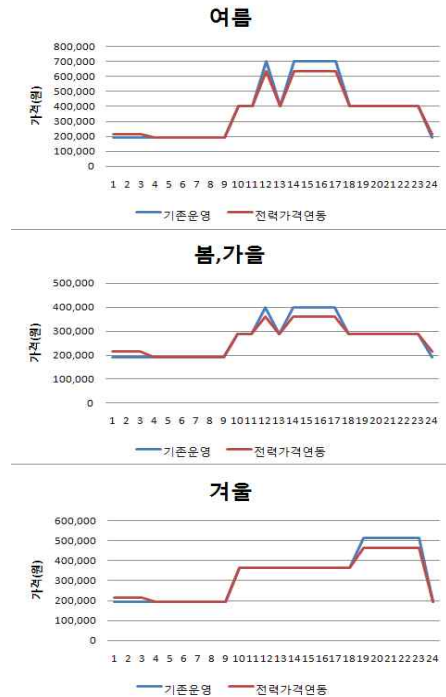


그림 7. 기준운영과 전력가격 연동방식의 계절별 운영비 비교
Fig. 7. A comparison of normal operation cost and operation based on electricity cost

3. 결론

역삼투압식 해수담수화 시장은 연평균 17[%]의 성장률(1994년~2003년 발주실적)을 나타내고 있으며, 대부분 50,000[m³/day] 이상의 대형플랜트 중심으로 성장하고 있다. 이러한 시장 성장 속도는 당초의 예상

을 훨씬 뛰어넘는 빠른 행보이다. 이 같은 시장의 변화에 발맞추어 국내에서도 8[MIGD](36,368[m³/day])의 대용량 트레인과 대형 16인치 Membrane 개발, 그리고 에너지 회수 장치를 적용하여, 대형화, 저에너지의 사용 및 플랜트 설치/운영비용을 절감할 수 있는 방향의 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 해수담수화 플랜트를 전력망에 연동하여, 에너지 비용을 절감할 수 있는 전력망 연동형 해수담수화 플랜트의 개념에 대하여 소개하였다. 그리고 그 예로 전력가격에 연동하여 Recovery rate를 37~62[%]까지 조정, 플랜트의 생산량을 조정함으로써 전력요금을 절감할 수 있는 운영 방법을 제시하고, 그 절감량을 계산하였다. 차등요금제에 맞추어 스케줄링 운전시 얻을 수 있는 연감 절감액은 10[MIGD] 기준 연간 전체 전력요금의 1.6[%]인 약 5,300 만원으로 예상된다. 향후 실시간으로 전력요금이 변하는 ‘실시간 전력 요금제’ 및 국제 에너지 가격에 따라 전기요금이 변하는 ‘전기요금 연료비 연동제’가 실시되면 얻을 수 있는 이득은 더욱 커질 것으로 예상된다. 또한 해수담수화 플랜트 설계 시 공급 설비 여유율과 주간의 물 공급에 차질이 없게 하기 위한 저수공간을 확보한다면, 해수 담수화플랜트의 국내 운영 시 전력시장에 다양한 참여를 통하여 전력요금 절감을 꾀할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 플랜트기술 고도화사업의 해수담수화플랜트 고효율 운영 및 유지관리(10-해수담수B04-1) 과제와 경원대학교의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] 한국건설교통기술평가원, 해수담수화플랜트 사업단 상세 기획연구, 2007.08.
- [2] www.roplant.or.kr 막여과·해수담수화 연구센터, 해수담수화 전문자료.
- [3] http://www.csmfilter.co.kr/, 웅진캐미칼 CSM, 기술메뉴얼.
- [4] http://www.seahero.org, 해수담수화 플랜트 사업단 홍보자료, 사업단 카달로그.

[5] http://cyber.kepco.co.kr/cyber/01_personal/01_payment/payment_table/payment_table.jsp, 한국전력 사이버 지점 전력요금표.

◇ 저자소개 ◇



이종현(李種賢)

1979년 7월 2일생. 2006년 경원대학교 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2010년~현재 두산중공업 해수담수화 국책과제팀.



최중인(崔重仁)

1956년 10월 7일생. 1979년 서울대학교 공과대학 원자핵공학과 졸업. 1987년 미국 MIT 졸업. 1993년~현재 경원대학교 에너지IT학과 정교수.



배시화(裴是花)

1952년 4월 6일생. 1992년 서울대학교 대학원 건축계획학과 졸업(박사). 1992년~현재 경원대학교 건축공학과 정교수.



고원석(高潑錫)

1971년 8월 20일생. 2007년 Univ. of Central Florida 졸업(박사). 2008년~현재 경원대학교 가천에너지연구원 책임연구원.