

## 소규모 해수담수화 시설의 생산비용 절감 방안

### Cost Reduction for Small-Scale Desalination Plants

박 남 식\* / 박 준 영\*\* / 문 유 리\*\*\* / 김 자 겹\*\*\*\*

Park, Namsik / Park, Jun Yeong / Mun, Yuri / Kim, Jakyum

#### Abstract

We analyzed various cost components for approximately 40 small-scale island desalination plants operated by K-water. A significant factor affecting desalination cost was found, and we proposed a way to reduce desalination costs. All plants considered were reverse osmosis (RO) facilities. TDS concentrations of feed water varied from less than 1,000 mg/L (practically considered freshwater) to over 30,000 mg/L (nearly seawater). Analysis of desalination costs from 2005 to 2009 indicated that maintenance, labor, and energy were the three biggest components that accounted for 50.6%, 36.9% and 7.8%, respectively. It was well known that TDS of feed water directly affected energy needed for RO process. In this study we found that maintenance cost was also directly related to feed water TDS. This finding indicated that lowering feed water TDS might result in significant desalination cost reduction.

**Keywords** : RO desalination plants, islands, cost analysis, cost reduction

#### 요 지

한국수자원공사에서 위탁 관리하고 있는 서남해안 도서지역 역삼투 해수담수화 시설 40여 곳에 대한 비용 분석을 통하여 비용에 큰 영향을 미치는 요소를 찾아내고 담수화 비용 절감방안을 제시하였다. 시설에 공급되는 원수의 염도(TDS)는 담수로 취급될 수 있는 1,000 mg/L 이하에서부터 해수 수준인 3,000 mg/L 이상까지 다양한 범위를 보이고 있다. 2005년부터 5년 동안의 비용분석 결과 유지보수비가 50.6%, 인건비가 36.9%, 그리고 에너지비가 7.8%의 순으로 나타났다. 본 연구에서는 일반적으로 잘 알려진 에너지 비용은 물론 담수화 비용의 가장 큰 비중을 차지하는 유지보수 비용도 원수의 TDS 농도에 직접적인 영향을 받고 있음을 밝혔다. 이는 원수의 TDS 농도가 담수화 비용의 60%에 달하는 부분에 영향을 끼치므로 담수화 비용 절감을 위해서는 저염도 원수 확보에 노력을 기울여야 한다는 것을 의미한다.

**핵심용어** : 역삼투 시설, 도서, 비용분석, 담수화 비용절감

#### 1. 서 론

섬이란 만조 시 4면이 바다로 둘러싸이고 대륙이 아닌

육지부를 의미한다. 우리나라에서는 연육교가 설치되고 10년이 경과하면 섬으로 취급하지 않는다. 2006년 말 우리나라에는 3,201개의 섬이 있으며 유인도서는 482개 (15.2%)

\* 교신저자, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: nspark@dau.ac.kr)

Corresponding Author, Professor, Department of Civil Engineering, Dong-A University, Busan, Korea.

\*\* 동아대학교 대학원, 토목공학과 석사과정 (현, 한국수자원공사)

Graduate School, Dong-A University (Currently, Korea Water Resources Corporation)

\*\*\* 삼성SDS 환경전략그룹 수석컨설턴트

Samsung SDS, Sustainability Strategy Group

\*\*\*\* 한국수자원공사 설계사업처 처장

Director, Engineering Services Department, Korea Water Resources Corporation

로 나타났다. 그중 과반인 276개의 유인도서는 전라남도에 속해있다(환경부, 2010). 도서지역 주민 수는 818천여 명으로 전체 인구의 1.67% 수준이다.

도서의 정주환경은 상대적으로 열악하다. 도서개발촉진법(1986년도 제정·공포)에서는 도서의 생산 및 생활 기반시설을 정비하고 확충하여 생활환경을 개선하고 도서주민의 소득 및 복지를 증진하기 위하여 10년 단위의 도서종합개발계획을 수립하도록 요구하고 있다. 1988년도 제1차 도서종합개발 10개년 계획(1988~1997) 확정 및 추진, 2008년에 수립된 제3차 계획에 의거하여 사업이 추진되고 있다. 제3차 계획의 목표는 ‘매력 있고 살기 좋은 섬’ 창출이다. ‘매력 있는’ 섬은 주5일 근무제의 정착, 여가패턴의 변화에 따라 급증하고 있는 도서관광수요를 고려한 목표이며 ‘살기 좋은’ 섬은 도서에서 지속적인 소득증대가 이루어지고 문화, 복지, 교육을 향유할 수 있는 삶터로 만들고자하는 목표이다. 그러나 많은 도서에서 좋은 관광자원을 보유하고 있으나 관광인구 증가에 대한 용수원의 확보가 어려운 도서가 많다. 또한 일부 도서에서는 용수부족으로 도서 내 숙박시설 설치가 어려워 관광(단)지로의 활용에 한계가 나타나고 있다.

환경부에서 시행하는 농어촌도서지역 상수도확충 1단계 사업의 일환으로 도서지역 식수원개발사업에 의하여 1997년부터 2004년까지 23개 시·군 123개 도서에 국고 2,181억 원을 투자하여 식수원이 개발되었다(환경부, 2010). 사업의 주요 내용은 관정은 91개소, 해수담수화 시설은 59개소, 그리고 저수지 31개소 등이다. 2005년에 시행된 2단계 계획에서는 2009년까지 21개 시·군 109개 도서에 3,980억 원을 투자하여 관정 28개소, 해수담수화시설 34개소 등을 포함한 식수원을 개발하였다. 2010년 수정계획에서는 5개

년간 10개 시·군, 49개 도서에 2,382억원의 투자계획을 포함하고 있다(문유리 외, 2009).

해수 담수화는 해수에서 염분을 제거하는 과정을 일컫는다. 염분 농도는 용질의 질량 대 용매의 질량(예: mg/g 또는 %), 또는 용질의 질량 대 용매의 부피(mg/L)로 나타내는 방법이 자주 사용된다. 전 세계 해수의 평균염도는 35mg/g(또는 %)이다. 극지 부근은 얼음이 녹아 바다로 흘러들기 때문에 해수염도가 낮다. 강수량이 많은 바다나 하천이 흘러드는 바다도 염도가 낮다. 그에 비해 유입되는 담수가 적고 건조한 기후로 해수 증발이 활발한 바다는 염도가 당연히 높다. 해수염도가 가장 높은 바다는 38.8%인 홍해, 36.8%인 페르시아 만, 35.5%인 북해순이다.

한반도 근해의 해수 염도는 세계 평균 해수염도 35%보다 낮다. 특히 서해는 중국과 한반도의 담수 유출이 많고 외해와 혼합이 활발하지 못해 평균 염도가 낮다. 동해는 활발한 조류의 영향으로 염도가 서해보다 높다. 동일 바다에서도 염도는 계절별 약간의 변화가 있다(Table 1).

유인도서의 식수원으로는 55개 도서에서는 광역상수도, 지방상수도 또는 마을상수도가, 146개 도서에서는 지하수 관정이, 49개 도서에서는 해수담수화시설이, 89개 도서에서는 지표수 시설이 운영되고 있는 것으로 나타났다

**Table 1. Average Salinities (%)**  
(<http://user.chol.com/~roparktc/>)

Season	West Sea	South Sea	East Sea
Summer	31	32	33.8
Winter	32	34	34.1

**Table 2. Desalination Plants in Korean Islands (Ministry of Environment, 2010)**

광역 시도	시군 (개소)	시설 (개소)	용량 (m <sup>3</sup> /d)	운영주체						급수 인구 (인)
				지자체		수자원공사		기타		
				시설 (개소)	용량 (m <sup>3</sup> /d)	시설 (개소)	용량 (m <sup>3</sup> /d)	시설 (개소)	용량 (m <sup>3</sup> /d)	
계	20	82	6,567	39	4,774	41	1,765	2	28	21,534
인천	1	1	200			1	200			559
경기	1	1	100	1	100					1,400
충남	4	20	645			20	645			3,522
전북	1	6	290			6	290			2,401
전남	7	41	2,954	28	2344	13	610			7,838
경북	1	2	28					2	28	50
경남	3	7	150	6	130	1	20			638
제주	2	4	2,200	4	2,200					5,126

(환경부, 2005). 이들 중 4개 도서에서는 두 가지 종류 이상의 시설이 가동되는 것으로 조사되었다. 따라서 147개 소의 도서에 대해서는 식수원에 대하여 조사된 내용이 없는 실정이다.

2010년 현재 우리나라 도서에서 운영되고 있는 해수담수화 시설의 수는 총 82개소로 조사되었다(Table 2). 그 중 50%인 41개소는 2005년부터 수자원공사에서 위탁관리하고 있고 39개소는 지자체에서 직접관리하고 있다. 수자원공사 위탁관리 시설의 경우 현지 관리인과 전문 인력의 체계적인 관리를 통해 운영 및 관리가 잘 이루어지고 있으나 지자체관리 시설의 경우 상대적으로 미흡한 것으로 나타났다(문유리 등, 2010).

전술된 82개 시설에 추가하여 2009년 1월 현재 전국 7개 시·군 10개 도서에 시설용량 680 m<sup>3</sup>/d로 급수인구 1,869 명을 계획으로 설치 또는 계획 중에 있어 담수화 시설이 확충되고 있는 추세이다. 그러나 실상을 살펴보면 담수화 시설이 물 공급에 바람직한 대안이라고만 생각할 수 없다. 시설의 설치비용은 국비와 지방비가 7:3의 비율로 조달되지만 설치 후 시설의 운영비는 전적으로 지방자치단체 또는 주민의 책임으로 남겨져 있다. 따라서 다수의 시설이 운영비의 부담으로 시설이 방치되거나 제한적으로 가동되고 있는 실정이다. 상술된 82개소에 포함되지 않은 15개 담수화 시설이 전기료 등의 부담으로 가동이 중단되거나 폐쇄된 실정이다(강경식, 2006).

또한 40여개의 시설에서 2005년부터 위탁관리를 맡고 있는 수자원공사에서는 연간 약 20억 여 원의 손해를 보고 있는 실정이다. 수자원공사에서는 손실을 줄이기 위하여 시설 개선을 통한 유수율 제고와 인건비 절감을 목표로 추진하고 있다. 본 연구에서는 수자원공사에서 관리하고 있는 40여개 시설의 정밀 비용분석을 통하여 소규모시설의 담수화비용 절감 방안을 제시하고자 한다. 담수화의 경제성에 대해서는 국내외에서 많은 연구가 수행되었다. 그러나 대부분의 연구가 한두 개 특정 시설을 대상으로 하는데 세부 비용도 연구에 따라 상이하여 시설 간의 비용 또는 경제성 분석이 거의 불가능한 실정이다. 본 연구에서는 40여개 시설에 대하여 동일 기준으로 구분된 비용을 분석하였다는 점에서 기존의 연구와 차별성을 가진다.

## 2. 역삼투 담수화의 경제성

담수화방법은 크게 증발법과 막여과법으로 구분할 수 있으며, 증발법에는 다단플래쉬법(Multiple Stage Flash, MSF), 다중효용법(Multiple Effect, ME) 및 증발압축법(Vapor Compression, VC)이 있다. 또한 막여과법에는 역삼투법(Reverse Osmosis, RO)과 전기투석법(Electro

Dialysis, ED)이 있다. 그 외에 결빙법(Freezing Process, FP), 이온교환수지법(Ion Exchange, IE) 등이 있다. 우리나라에 설치된 시설은 모두 역삼투시설이다.

담수화 시설의 가장 큰 문제점은 에너지가 많이 필요하고 가격 경쟁력이 약하다는 점이다. Kalogirou (2005)는 2000년 기준 세계의 해수담수화 시설용량이 22백만m<sup>3</sup>/d이며 시설 가동에 연간 203백만톤의 기름이 요구되며 온실가스 발생량이 과다하다고 주장하였다. 대규모 시설의 경우 생산비가 US\$1/m<sup>3</sup> 이하인 것으로 알려져 있으나 우리나라 도서지역에 설치된 시설의 경우 대부분 100 m<sup>3</sup>/d 이하로서 생산비는 그보다 훨씬 더 많다.

담수화 방법 중에는 역삼투법이 에너지 사용량(약 7 kWh/m<sup>3</sup>)이 가장 적고 증발법이 18~25 kWh/m<sup>3</sup>으로 가장 에너지 소비가 큰 것으로 알려져 있다. 역삼투법은 염도 1000 mg/l마다 0.6~0.8 kgf/cm<sup>2</sup> 범위에서 증가하는 삼투압보다 큰 압력을 염수 측에 가해서 담수를 추출하는 방법으로 통상 50~60 kgf/cm<sup>2</sup>의 범위의 압력을 가한다. 따라서 담수화 비용 절감을 위해서는 저염도 원수를 사용하는 것이 유리하다. 그러나 에너지 비용이 담수화 비용의 적은 부분을 차지한다면 저염도 원수의 확보는 중요하지 않을 수 있다. 본 연구에서는 수자원공사에서 위탁관리하고 있는 41개 담수화시설의 비용 분석을 통하여 염도가 담수화비용에 미치는 영향을 분석하고 저염도 원수 확보의 중요성을 제시하고자 한다.

선행 연구 중 담수화 비용 항목을 제시한 연구가 다수 있다. 해외 연구의 경우 많은 경우 시설 설치비, 토지비용, 금융비용 그리고 감가상각비용 등으로 구성된 자본비용(capital cost)이 담수화비용에 포함된 경우가 많다. 수자원공사에서는 담수화 비용을 크게 에너지비, 인건비, 유지보수비, 그리고 기타로 구분하고 있다. 유지보수비는 담수화 전 공정에서 발생하는 비용으로 역삼투막 교체, 고압펌프 개보수, 배관 보수 등을 위한 비용으로 구성되며 기타 비용에는 여비 및 잡비가 포함된다. 자본비는 포함되지 않았다. 수자원공사(2010)에서 관리하는 40여개소의 담수화비용 중 유지보수비, 인건비 그리고 에너지비가 각각 50.6%, 37% 그리고 7.8%의 비율로 나타난다고 보고하였다.

수자원공사의 비용 분석 결과와 문헌의 비용분석 결과를 비교하기 위하여 선행연구 중에서 세부 항목이 제시된 결과를 가능한 범위 내에서 분석하였다. 자본비용이 포함된 연구는 자본 비용을 제외하고 비용을 분석하였다(Table 3). 그 결과 담수화 비용의 구성비는 크게 차이나는 것으로 나타났다. 에너지비는 최소 4%에서 최대 70%의 범위에, 유지보수비는 17~56%, 인건비는 6~37%의 범위로 나타났다. 여기서 주목할 내용은 에너지비용의 비중이 크게 변한다는 것이다. 기수를 사용하는 시설을

제외하더라도 에너지비의 비율은 16~70%로 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서 파악된 문헌으로는 원수의 염도를 낮춤으로서 담수화비용 절감에 크게 기여할 수 있는지 판단하는 것이 곤란하다.

담수화 비용을 구성하는 주요 3개 항목 중에서 에너지비와 염도의 관계는 잘 알려져 있는 것처럼 선형비례관계이다. 수자원공사 관리 시설의 경우 평균 에너지비용 비율이 7.8%에 불과한 것으로 조사되었다. 이 수치만을 고려하면 시설에 공급되는 원수의 염도를 낮춤으로써 기대되는 비용절감효과가 미미하다고 할 수 있다. 비율이 37%에 달하는 인건비는 시설 전체에 걸쳐 거의 고르게 분포되는 것으로 염도와 상관성이 거의 없다고 볼 수 있다. 그러나 담수화비용의 50% 이상을 차지하는 유지보수비용과 염도의 상관성에 대해서는 조사된 바가 없으나 상관성이 없다고 단언하기는 어렵다. 따라서 본 연구의 주안점

은 유지보수비와 염도의 상관성을 밝히는 것이다.

### 3. 수자원공사 위탁관리 담수화시설

#### 3.1 경영 현황

수자원공사는 2005년부터 32개 담수화 시설에 대한 위탁관리를 시작한 이후 2006년부터는 40개 내외의 시설을 관리하고 있다 (Table 4). 용수 공급량은 '05년 114천m<sup>3</sup>/yr부터 '08~'09년의 268천m<sup>3</sup>/yr까지 증가하였다. 검침량 기준 담수화 비용은 2005년에 16천원/m<sup>3</sup>에서 '08~'09년에는 8천원/m<sup>3</sup>까지 줄었으나 700~800원/m<sup>3</sup> 수준인 판매가에 비하여 10배 이상에 달한다. 그리하여 수자원공사는 2005년부터 5년간 약 104억원의 손실을 기록하고 있다. 유수율 자료가 확보된 2008~2009년 2개년에 대한 생산량 (772천 m<sup>3</sup>) 기준 단위 담수화 비용은 5,912원/m<sup>3</sup>으로 나타난다.

Table 3. Percentages of Energy, Operation & Maintenance, and Labor Costs

	비용 구성항목별 비율 (%)				공급수 종류 또는 TDS 농도 (mg/L)	비고
	에너지	유지보수	인건비	소계		
Malek et al. (2006)	16	17		33	해수	
USBR(2003)	4	29		33	2,500	비율미상 자본비 포함
	6	51		57	5,000	
	27	50		77	35,000	
Younos (2005)	24	56	20	100	기수	
	70	24	6	100	해수	
강경식 (2006)	52.4	47.6		100	기수 또는 해수	
신항식 (1996)	42	47	11	100		
한국수자원공사 (2009, 2010)	7.8	50.6	37.0	94.2	담수~해수	5개년 평균 (2005~2009)
평균	27.7	41.4	18.5			
최소	4	17	6			
최대	70	56	37			

Table 4. Balance Sheet for Desalination Plants Operated by K-water Between 2005 and 2009

년도	운영 개소	계량기 검침량 (천m <sup>3</sup> /년)	손실 B-A (백만원)	수익 (백만원)		담수화 비용 (백만원)					
				총매출 (A)	판매단가 (원/m <sup>3</sup> )	합계 (B)	단위 비용 (원/m <sup>3</sup> /년) 검침량기준	에너지	인건비	유지 보수비	기타
2005	32	115	1,770	84	729	1,853	16,157	155	232	1,374	93
2006	40	149	2,494	111	742	2,604	17,479	147	1,030	1,336	91
2007	40	189	1,958	161	852	2,119	11,228	185	1,014	832	88
2008	42	269	1,985	214	795	2,199	8,161	218	940	935	106
2009	41	269	2,154	211	784	2,365	8,794	169	899	1,165	133
평균 또는 합계	39	991	10,361	780	780	11,141	11,244	874	4,115	5,641	510
비중 (%)								7.8	36.9	50.6	4.6

### 3.2 원수의 등급별 특성

수자원공사가 관리하는 시설에서는 원수의 총용존고형

물 (TDS) 농도에 따라 막의 종류가 구분된다. TDS 농도가 10,000 mg/L 이상이면 해수막을, 1,000~10,000 mg/L 이면 기수막을 사용한다. 관리 시설 중에는 TDS 농도가

Table 5. Basic Statistics of Desalination Plants Operated by K-Water

권역	시군	도서명	설치년도	시설용량(m <sup>3</sup> /d)	평균 TDS (mg/L)	평균 유수율 (%)
수도권	용진군	대연평도	2007	200	-	-
경남권	거제시	지심도	1997	20	39,233	98
전남권	신안군	홍 도	1997	100	28,527	98.5
		나발도	2005	30	7,768	106.5
	여수시	대두라도(대두)	2004	50	12,147	63
		대두라도(선창)	2004	20	8,644	103
		부 도	2005	10	4,051	79
		송 도	2001	50	10,630	58
		여자도(대동)	2002	60	19,708	94.5
		자봉도	2005	30	3,547	78.5
		화태도(월진)	2004	30	15,947	67
		화태도(화태)	2004	100	13,442	42.5
		황간도	2005	50	3,065	62.5
햇 도	2005	30	9,207	58		
전북권	군산시	관리도	1999	20	15,935	52
		방축도	2002	30	201	56.5
		선유도	2006	100	7,486	100
		야미도	2006	50	17,007	60.5
		어청도	2003	50	1,704	81
		연 도	2003	40	360	79.5
충청권	당진군	소 도	2003	50	3,418	44
	보령시	고대도 I	1997	60	3,684	86.5
		고대도 II	1997	60	4,703	86.5
		삼시도(밤섬)	2000	30	403	73
		삼시도(윗마을)	2003	50	207	82
		소난지도	2004	10	8,839	82.5
		외연도	2000	50	551	82.5
		원산1리(선촌)	2004	50	3,619	39.5
		원산2리(저두)	2005	50	1,233	36
		원산2리(점촌)	2004	50	185	57.5
		원산3리(사창)	2003	50	497	74.5
		원산3리(초전)	2005	20	716	60
		월 도	2002	10	13,813	90
		육 도	2002	20	21,800	91.5
		장고도	2001	50	12,746	76
		추 도	2004	10	9,038	72
		허육도	2002	10	8,266	74.5
		호 도	2001	30	274	70
		효자도	2005	50	162	86.5
	서산시	고파도	1999	20	1,369	63
		우 도	2001	15	10,443	81.5
	홍성군	죽 도	1998	20	21,804	74
			평균		44	8,448
		최소		10	162	36.0
		최대		200	39,233	106.5
		편차		34	8,771	17.7

1,000 mg/L 이하인 시설도 상당수 있는데 이 경우에는 담수로 취급되어 역삼투 공정을 가동하지 않고 전처리와 소독만으로 처리하고 있다.

수자원공사에서는 2008년에는 42개소, 2009년에는 41개소를 관리하는 것으로 나타났으나 TDS 농도가 보고되지 않은 4개소를 제외한 79개소 중에서 역삼투 장치가 가동되는 시설은 58개소였으며 그중 해수막이 28개소, 기수막이 30개소로 나타났다. 원수가 담수인 시설도 21개소로 나타났다. Table 5에는 각 시설의 설치년도, 2개년 평균 TDS 농도와 유수율을 수록하였다.

2개년 간 79개 시설의 전기유류비를 원수의 TDS 농도 등급 별로 합산한 결과를 Table 6에 제시하였다. Table 6의 기타 비용은 특정 시설에 포함되지 않는 에너지 비용으로 염도와 무관한 것으로 가정하였다. 개소별 평균에서 기수와 담수 시설은 3백만여원/개소로 큰 차이가 없었으나 해수 시설의 경우 2배 이상 에너지를 많이 사용한 것으로 나타났다.

그러나 원수의 염도가 높을수록 공급량이 적었기 때문에 단위 공급량에 대한 에너지비용에서는 염도의 영향이 분명히 드러난다. 해수시설에서는 기수시설에서보다 평균 2배 이상, 기수시설에서는 담수시설에서보다 단위 공급량 당 에너지 비용이 2배 이상 더 소요되었음을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 에너지비용은 원수의 염도와 양의 상관성을 가진다. 단위 담수화 비용 5,912원/m<sup>3</sup> 중에서 에너지 비용 (482원)은 8%에 불과하므로 에너지 비용 절감만으로는 담수화비용 절감 효과가 미미하다.

생산비의 50%를 초과하는 유지보수비용을 원수의 TDS 농도 등급별로 분석하였다 (Table 7). 여기서도 원수의 염도가 낮을수록 비용이 적게 드는 것을 알 수 있다. 비용적인 측면에서 에너지 비용보다는 유지보수 비용이 4배 이상 많이 소비된다. 기타 유지보수비용은 369천원은 염도와 무관하다고 가정하였다. 원수의 수질에 따른 차이도 에너지 비용에서보다 더 큰 차이를 보인다. 이는 원수의 염도가

Table 6. Energy Costs (2008~2009) for Feedwater TDS Groups

구분	시설수 (개소)	공급량 (m <sup>3</sup> )	전기료/유류비		
			계 (천원)	개소별 평균 (천원/개소)	공급량별 평균 (원/m <sup>3</sup> )
해수	28	210,147	199,734	7,133	950
기수	30	226,580	103,069	3,436	455
담수	21	335,275	64,226	3,058	192
기타			5,251		
총계	79	772,002	372,280	4,712	482

Table 7. Maintenance Costs (2008-2009) for Feedwater TDS Groups

구분	시설수 (개소)	공급량 (m <sup>3</sup> )	유지보수 비용		
			계 (천원)	개소별 평균 (천원/개소)	공급량별 평균 (원/m <sup>3</sup> )
해수	28	210,147	872,149	31,148	4,150
기수	30	226,580	466,985	15,566	2,061
담수	21	335,275	237,396	11,305	708
기타			369,005		
총계	79	772,002	1,945,535	24,627	2,520

Table 8. Detailed Maintenance Records (2008-2009) for Feedwater TDS Groups

구분	공정별 유지보수 현황 (건)									시설별 평균 (건/소)	공급량별 평균 (건/천m <sup>3</sup> )
	합계	취수	전처리	역삼투	약품처리	송수배수	계측제어	전기	기타		
해수	338	99	23	73	5	73	9	19	37	12.1	1.6
기수	191	45	16	40	2	36	7	5	31	6.4	0.8
담수	80	13	2	10	3	26	1	8	17	3.8	0.2
계	609	157	41	123	10	135	17	32	85	7.7	0.8

낮은 시설에서 유지보수 비용이 훨씬 적게 소요됨을 나타내는 것이다.

유지보수 비용은 유지보수 건수에 영향을 받는다. Table 8에는 수질 등급별 세부항목별 유지보수 건수가 제시되어 있다. 염도가 높을수록 거의 모든 유지보수 항목의 건수가 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 취수와 역삼투 공정에서 TDS농도에 따라 보수 건수가 증가하는 것은 주목할 만한 사실이다. 특히 취수공정과 역삼투공정에서의 유지보수건수가 해수에서 가장 높다는 것은 원수의 수질에 전처리와 역삼투 시설이 영향을 받고 있다는 것을 나타낸다. 송수와 배수공정의 유지보수 건수가 높은 이유는 수자원공사에서 유수율 제고사업을 하면서 보수공사가 많아졌기 때문이다.

### 3.3 시설별 특성

79개 시설에 공급되는 원수의 평균 TDS 농도는 담수인 100 mg/L에서부터 해수 수준인 40,000 mg/L까지 다양하다. 따라서 시설별 TDS 농도와 담수화 비용 관계를 분석하였다. 역삼투압 공정에서 에너지 비용은 원수의 농도와 선형관계에 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 1에 각 시설의 단위 공급량 당 에너지 비용을 도시하였다. 2008년과 2009년 자료를 다른 도형으로 표기하고 도형의 크기로 공급량을 나타냈다. 단위 에너지 비용은 최소 40원/m<sup>3</sup>에서 6,000원/m<sup>3</sup>까지 100배 이상 차이를 보이거나 염도가 증가함에 따라 에너지 비용이 증가하는 추세를 분명하게 나타내고 있다.

각 시설의 단위 공급량 당 유지보수 건수 및 비용과 염도 간의 상관관계를 Figs. 2 and 3에 도시하였다.

Figs. 2 and 3에서 염도가 증가하면 단위 공급량 당 유지보수 건수와 비용이 증가하는 경향을 명확히 볼 수 있다. 시설별로 파악은 곤란하지만 2009년에는 유지보수 건수가 대체로 감소하여 2008년에 비하여 시설의 성능이 개선되었음을 나타낸다. 기수(1,000 mg/L 이상) 이상의 염도영역에

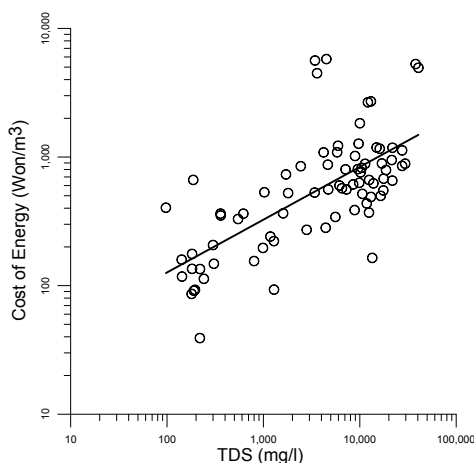


Fig. 1. Energy Cost per Unit Production

대한 추세선은 염도가 30,000 mg/L인 원수의 경우 염도가 1,000 mg/L인 원수에 비하여 단위공급량 당 유지보수 건수가 10배 이상 증가함을 보여준다. Fig. 4에는 에너지 비용과 유지보수 비용의 합을 도시하였다. 에너지와 유지보수는 총 담수화비용의 60%에 육박하는 비중을 차지하는데 염도가 증가함에 따라 증가추세가 여실하다.

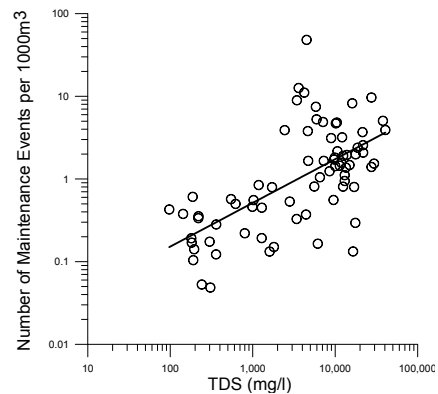


Fig. 2. Number of Maintenance Events per Unit Production

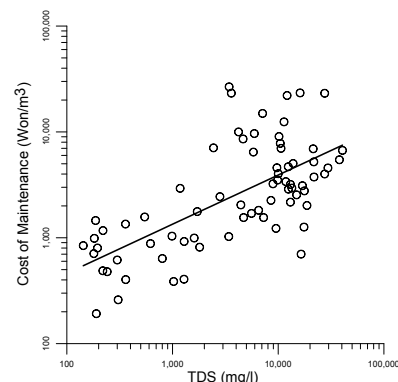


Fig. 3. Maintenance Costs per Unit Production

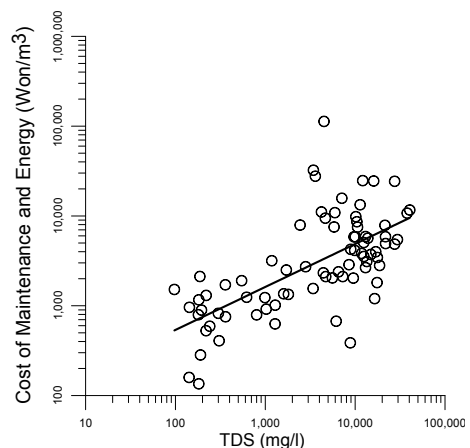


Fig. 4. Maintenance and Energy Costs per Unit Production

## 4. 결론

2009년 말 기준 우리나라의 도서에 설치된 82개소의 담수화 시설은 모두 담수화공정 중 에너지 비용이 가장 적게 드는 역삼투압 설비를 갖추고 있다. 그 중 과반의 시설을 한국수자원공사에서 위탁관리하고 있다. 수자원 공사에서는 2005년부터 위탁관리를 시작한 이후 2009년까지 5년 동안 100억 여 원의 손실을 보았다. 이는 정수 판매비용(780여원/m<sup>3</sup>)이 담수화 비용 (검침량 기준 11,200여원/m<sup>3</sup>, 2008~2009 생산량 기준 5,912원/m<sup>3</sup>)의 극히 일부에 지나지 않았기 때문이다. 담수화 비용 분석결과 유지보수비가 50.6%로 가장 큰 비중을 차지하였고, 인건비가 36.9%, 에너지비용 7.8% 그리고 기타비용이 4.6%로 나타났다. 역삼투압에서 시설에 공급되는 원수의 염도가 높아지면 소요 역삼투압도 높아지므로 에너지 비용이 많이 소요된다. 수자원공사 관리 시설의 경우 에너지 비용이 7.8%에 불과하므로 원수의 염도는 그다지 중요하지 않은 것으로 보일 수 있다. 수자원공사에서는 비용 절감을 위하여 유수율제고와 인건비절감을 추진하고 있다. 다만 2008~2009 유수율은 평균 74%로 도서의 열악한 배수관망시스템과 간헐적 물 공급 상황을 고려하면 향후 크게 개선되기는 쉽지 않을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 현재까지 조사된 바 없는 담수화 비용 절감 방안을 도출하기 위하여 수자원공사에서 2008년과 2009년 2개년 동안 관리한 79개 시설의 일관성을 가지고 취합된 담수화 비용을 정밀 분석하였다. 또한 공급되는 원수가 담수인 경우부터 해수인 경우까지 다양한 분포를 가지고 있어 염도가 담수화 비용에 미치는 영향을 명백히 밝힐 수 있었다. 기존의 경제성분석 연구들에서는 일관성있는 자료를 가진 대상 시설의 수가 기껏해야 두 세 개에 불과하였다. 본 연구에서는 이미 알려진 에너지 비용 외에도 유지보수비용 역시 염도와 높은 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 원수의 염도가 담수화 비용에 미치는 영향이 60%에 육박함을 의미한다. 따라서 해수담수화시설의 경영수지 개선을 위해서는 기존에 추진되어온 유수율제고와 인건비절감 외에도 저염도 원수로의 전환을 심각하게 고려해야함을 의미한다. 본 연구는 기존 시설에 대한 비용 분석을 바탕으로 수행되었으나 저염도 원수 확보는 기존 담수화 시설에서 뿐 아니라 신규 시설 설치 시에도 매우 중요함을 의미한다.

해안 지역 관정에서 양수되는 지하수의 염도는 관정의 위치 및 심도 등으로 조절이 가능하다. 일반적으로 지하수 개발량과 관정(펌프)심도는 반비례 관계에 있으므로

저염도 지하수 확보 문제는 전형적인 최적화 문제이며 수자원의 지속적 확보기술개발사업단(2009)의 연구에서 해안 지하수 최적 개발을 위한 구체적인 방법이 제시된 바 있다.

## 감사의 글

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- 강경식 (2006). 국내 해수담수화 장치의 운영상 문제점 및 개선방향. 석사학위논문, 서울산업대 산업대학원.
- 신항식, 김도현, 박희경, 황응주, 강석태, 박민규, 박미현 (1996). 담수화 시스템 최적화; 담수화시스템의 경제성 분석 및 운전인자 선택. 한국과학기술연구원.
- 수자원의 지속적 확보기술개발사업단 (2009). (3-3-3) 지하수 적정관리시스템 구축 및 적용 기술지원 요약보고서. 동아대학교.
- 문유리, 이민주, 김자겸, 박남식 (2010). “도서지역의 친환경적 용수공급계획 수립방안.” 환경정책평가연구원.
- 문유리 외. (2009). “도서지역 용수공급체계에 관한 고찰.” 한국환경정책·평가연구원.
- 한국수자원공사 (2009). 2008 수자원공사 운영백서. K-water 수도기술처.
- 한국수자원공사 (2010). 2009 수자원공사 운영백서. K-water 수도기술처.
- 환경부 (2005). 농어촌·도서지역 2단계 ('05~'14) 상수도 확충계획.
- 환경부 (2010, 2010~2014). 농어촌·도서지역 2단계 ('10~'14) 상수도 확충수정계획.
- 행정자치부 (2008). 제3차 도서종합개발 10개년 ('08~'17) 계획.
- Kalogirou, K.A. (2005) “Seawater desalination using renewable energy sources”, Cyprus University of Technology.
- Malek, A., Hawlader, M.N.A., and Ho, J.C. (2006). Design and economics of RO seawater desalination. Desalination, Vol. 105, Issue 3, pp. 245-261.
- Younos, T. (2005). “The Economics of Desalination.” Universities Council on water resources, journal of contemporary water & education, Issue 132, pp. 39-45.
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation,



(USBR) Technical Service Center, Water Treatment Engineering and Research Group (2003). DESALTING HANDBOOK FOR PLANNERS (Third Edition), Desalination Research and Development Program

Report No. 72.

논문번호: 11-064	접수: 2011.06.14
수정일자: 2011.09.21	심사완료: 2011.09.21