

초순수 생산을 위한 최적공정 조합 평가 A Study of the Optimization Process Combination on the Ultrapure Water Treatment System

이경혁[†] · 김동규* · 권병수* · 정관수**

Kyung Hyuk Lee[†] · Dong Gyu Kim* · Boung Su Kwon* · Kwan Sue Jung**

K-water연구원 · *한국수자원공사 · **충남대학교 토목공학과

K-water Institute · *Korea Water Resource Corporation · **Chungnam National University

(Received May 12, 2016; Revised June 1, 2016; Accepted June 24, 2016)

Abstract : In this paper, the technique that determines efficient process combinations for the ultrapure water production was studied. The ultrapure water is one of the industrial water used in industrial activity and required in the advanced technology integrated industry. It is produced by combined process including filtration, ion exchange processes, the reverse osmosis (RO) process, degassing (DG) process and UV-oxidation (UVox) process. An ultrapure water production process consists of 15-20 different water treatment unit process. In this study, a pilot plant was built and operated to research the design parameters for the individual process. Through the pilot plant operation, 19 effective combinations were optimized among various processes. And then, 11 of them satisfied the final quality of the ultrapure water. The stability and economic feasibility were evaluated about the final 11 process combinations.

Key Words : Ultrapure Water, Optimization, Industrial Water, Pilot Plant, Process Combination

요약 : 본 연구에서는 초순수 생산을 위한 개별공정들의 특성을 고려하여 공정조합 최적화 방안을 결정하는 기법을 연구하였다. 산업 활동에 사용하는 공업용수 중 고도의 기술집합 산업에서 요구되는 고순도 용수인 초순수를 생산하는 공정은 여과, 이온교환, 역삼투, 탈기, 자외선 산화 등 이 있다. 초순수 공정은 다양한 15~20개 정도의 수처리 단위 공정이 조합을 이루고 있다. 본 연구에서는 초순수 생산 모형플랜트를 운영하여 다양한 처리 공정의 조합을 통해 수질 및 경제성을 고려하여 평가하였다. 평가된 19종류의 공정조합 중 11개 공정조합이 목표로 하는 최종 수질을 만족했다. 이러한 11종의 공정조합에 대해 안정성과 경제성을 평가하였다.

주제어 : 초순수, 최적화, 산업용수, 모형플랜트, 공정조합

1. 서론

급속한 경제 발전과 함께 여러 산업분야에서 고순도의 공업 용수 사용이 증가하고 있으며 국내에서는 90년대 말 이후 화력 및 원자력 발전소, 열병합발전소, 석유화학공장, 제약회사, 반도체 분야 및 철강회사 등 많은 분야에서 고순도 공업 용수가 사용되고 있는 실정이다.⁴⁾ 일반적으로 공업용수는 원수 또는 침전수 등 이 산업체로 공급되면 산업체는 개별 업체별 용도에 맞게 추가로 처리하여 사용하고 있다. 이러한 고순도 공업용수를 일반적으로 수질 측면에서 순수, 초순수로 정의되어 사용되고 있으며, 세계적으로 시장규모는 2011년 3.3조에서 2025년 12.4조원까지 증가될 것으로 추정된다.²⁾ 순수 및 초순수 등 산업용수 수처리 시장에서 경쟁력을 갖추기 위해서는 다양한 개별 공정에 설계 기술 확보를 위한 연구가 필요하다. 국내 산업용수 운영 사업에 대한 현황을 살펴보면 대부분이 일본, 프랑스, 미국 등 선진 외국 기업에서 선점하고 있다.¹⁾ 국내 산업분야가 첨단화 되어갈수록 공장을 운영하기 위한 유틸리티 특히 산업용수 분야는 국내기술을 기반으로 한 공정 개발이 어려

워지고 있는 실정이다. 이를 위해 다양한 연구가 수행되어야 할 필요가 있다. 초순수를 생산하기 위한 단위 공정인 역삼투막, 이온교환공정 등 개별공정에 대한 연구는 다수 수행이 되었으나³⁾ 초순수 공정의 전체 시스템에 대한 평가를 수행한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 초순수 모형플랜트를 운영하면서 개별공정에 대한 설계인자의 특성을 평가 및 분석하고 19종류의 공정조합을 구성하여 수질 분석, 경제성 및 안정성을 평가하여 초순수 생산을 위한 최적 조합공정 선정 기법을 연구하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 25 m³/일 생산 용량의 모형플랜트를 운영하여 평가하였다. 공정 구성은 전처리 공정, 순수처리 공정, 초순수처리 공정 등 3개의 공정으로 구성되어 있으며, 개별공정으로는 Fig. 1과 같이 총 23개 단위 공정으로 구성되어 있다. 모형플랜트의 유입수 수질과 목표로 하는 초순수 생산수의 수질을 다음 Table 1에 정리하여 나타내었다.

[†] Corresponding author E-mail: kh.lee@kwater.or.kr Tel: 042-870-7526 Fax: 042-870-7549

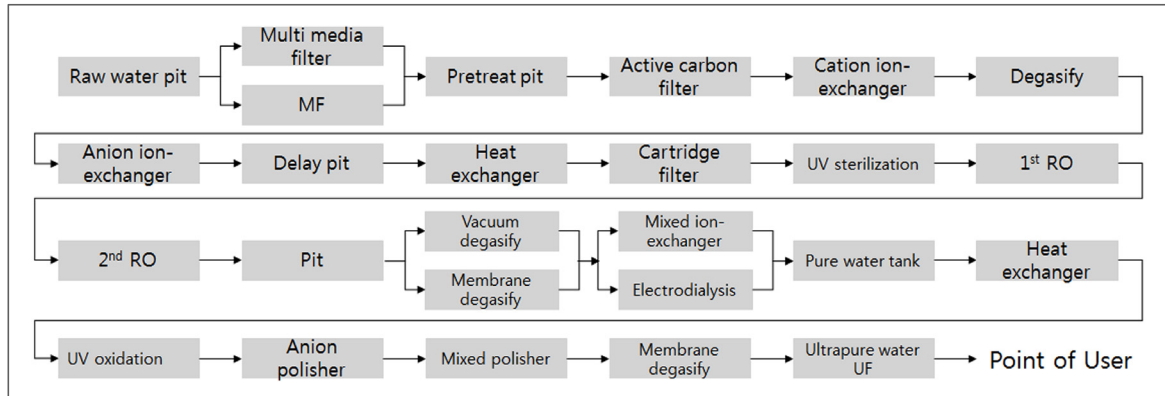


Fig. 1. Pilot plant diagram for UPW production.

Table 1. Ultrapure water production water quality objectives

Unit	Value	Unit	Value		
Resistivity	MΩ·cm	> 18.2	Na	ppt	< 50
TOC	ppb	< 5	Cu	ppt	< 50
DO	ppb	< 1	K	ppt	< 50
Particle	EA/mL	< 1	ZN	ppt	< 50
Silica	ppb	< 1	Fe	ppt	< 50
Boron	ppt	< 100	Cl	ppt	< 100
Bacteria	CFU/L	< 10	NH ₄	ppt	< 100
TEMP.	℃	24~26	NO ₂	ppt	< 100
PRESSURE	Kg/cm ²	1~2	PO ₄	ppt	< 100
Ca	ppt	< 50	SO ₄	ppt	< 100

초순수 공정의 단위공정 및 최종 조합공정의 수질 항목 분석은 다음 Table 2에 제시한 바와 같이 수질 측정용 계측기를 설치하여 수질을 모니터링 하였다.

Table 2. Ultrapure water production water quality measurement analyzers

Process	Point	Analyzers	Maker	Model	Article	Range
Pre-treatment process	Cation ion-exchanger	Na analyzer	METTLER TOLEDO	2300Na Sodium analyzer	Na	0,001-100,000 (ppb)
		pH analyzer	METTLER TOLEDO	M300	pH	0-14
	Anion ion-exchanger	Electrical conductivity	METTLER TOLEDO	M300	Electrical conductivity	0,02-50,000 (us/cm)
TOC analyzer		SIEVERS	900 on-line TOC analyzer	TOC	0,03-50 (ppm)	
Pure-water	RO (Revers Osmosis)	Silica analyzer	HACH	5500Sc silica analyzer	Silica	0,5-5,000 (ppb)
		TOC analyzer	SIEVERS	900 on-line TOC analyzer	TOC	0,03-50 (ppm)
	Electrical conductivity	METTLER TOLEDO	M300	Electrical conductivity	0,02-50,000 (us/cm)	
	VDG/MDG	DO analyzer	METTLER TOLEDO	M300	DO	0-10,000 (ppb)
	MB/EDI/MDI	Electrical conductivity	METTLER TOLEDO	M300	Electrical conductivity	0,02-50,000 (us/cm)
Silica analyzer		HACH	Series 5000 silica analyzer	Silica	0-5,000 (ppb)	
Ultra pure-water	AP	Boron	SIVERS	UPW Boron analyzer	boron	0,015-20 (ppb)
		Electrical conductivity	METTLER TOLEDO	M300	Electrical conductivity	0,02-50,000 (us/cm)
	MP/CP	Electrical conductivity	METTLER TOLEDO	M300	Electrical conductivity	0,02-50,000 (us/cm)
	MDG	DO analyzer	METTLER TOLEDO	M300	DO	0-10,000 (ppb)
	UF	Electrical conductivity	METTLER TOLEDO	M300	Electrical conductivity	0,02-50,000 (us/cm)
		TOC analyzer	GE	Checkpoint	TOC	0,05-1,000 (ppb)
		Particle analyzer	RION	XP-L4 A1	0,05, 0,1, 0,15, 0,2 um	0-1,000 (ea/mL)
	Particle analyzer	Particle mesuring systems	M50e	0,05, 0,1, 0,15, 0,2 um	0-10,000 (ea/mL)	

3. 결과 및 고찰

3.1. 조합공정의 최종수질 검증

최적공정조합 검증 결과는 안정성과 경제성으로 지표를 선정하였으며 배점에 대한 객관적인 근거 확보방안을 검토 하였다.

초순수 최적공정조합은 Pilot Plant 표준공정(①)을 기준으로 조합 가능한 19개 공정을 나타내면 Table 4.18과 같다. 초순수 19개 공정조합의 선정은 다음 사유로 설명이 가능하다. 초순수 Pilot Plant의 기본 설계공정을 기본으로 개별공정의 필요성 등을 감안하여 18개 조합공정을 선정하였다. 기본적인 설계공정은 다음의 Table 3의 ①번 공정으로 표기하였으며 ①번 공정은 초순수 Pilot Plant의 설계공정으로 전체 공정이 빠짐없이 포함되었다.

이온교환공정과 역삼투 공정의 순서에 따라 이온교환 +

Table 3. 19 System combining of ultrapure water pilot plant

No.	Pure water treatment system							Ultrapure water treatment system									
	SC	DG	SA	RO1	RO2	RO3	SC	DG	SA	MDG1	MB	UV	AP	CP	MDG2	UF	
①	SC	DG	SA	RO1	RO2					MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
②	SC	DG		RO1	RO2					MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
③	SC	DG		RO1	RO2					MDG	MB	UV			MDG	UF	
④		DG		RO1	RO2					MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑤				RO1	RO2					MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑥	SC	DG	NaOH (pH 10.5)	RO1						MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑦	SC	DG	NaOH (pH 10.5)	RO1						MDG	MB		AP	CP	MDG	UF	
⑧	SC	DG	NaOH (pH 9.0)	RO1						MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑨	SC	DG		RO1						MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑩				RO1	RO2		SC	DG	SA	MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑪				RO1	RO2		SC		SA	MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑫				RO1	RO2	RO3				MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑬				RO1						MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑭	SC	DG	SA	RO1	RO2					MDG	MB			CP	MDG	UF	
⑮	SC	DG	SA							MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑯	SC	DG	SA	RO1	RO2					VDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑰	SC	DG	SA	RO1	RO2					MDG	EDI	UV	AP	CP	MDG	UF	
⑱	SC	DG		RO1	RO2					MDG	EDI	UV			MDG	UF	
⑲	SC	DG	SA	RO1	RO2					MDG	MB	UV	AP	CP		UF	

- SC (Strong Cation IonExchanger)
- RO (Reverse Osmosis)
- MB (Mixed Bed Ion Exchanger)
- CP (Cation Polisher)
- DG (Degassifier)
- vDG (Vacuum Degassifier)
- UV (Ultraviolet)
- UF (UltraFiltration)
- SA (Strong Anion IonExchanger)
- MDG (Membrane Degassifier)
- AP (Anion Polisher)

역삼투(①,⑭,⑲,②,③,⑱,④) 역삼투 + 이온교환(⑩,⑪) 공정 조합이 가능하며 이온교환공정 중 생략이 가능한 경우의 공정 조합도 고려가 가능하다. 또한 이온교환만 이용한 공정 조합(⑮)과 역삼투공정의 경우는 1단(⑬), 2단(⑤), 3단(⑫)으로 공정 조합이 가능하다. 1단역삼투공정의 경우 pH를 조정하여 운전하는 역삼투 공정 조합(⑥,⑦,⑧,⑨)도 실험하였다. 초순수 공정에서도 자외선산화 공정과 이온교환 공정, 막탈기 공정의 생략이 가능할 것으로 판단되는 공정 조합(⑦,⑱,③,⑭,⑲)도 실험하였다. 각 개별 공정간의 성능비교 실험이 가능한 조합공정(①,⑯,⑰)에 대해서도 실험하였다.

운영결과 11개 공정 조합은 반도체급 초순수 수질을 만족하였다. 최종수질을 만족하지 못하는 공정은 Table 4와 같이 ③⑦⑨⑩⑪⑬⑱ 공정이다. 그 외 11개 공정은 최종수질을 만족하는 공정이다.

최종 목표 수질을 만족하지 못하는 이유는 공정 조합시 공정 축소 및 처리 특성 변화에 따라 처리 효율이 감소하여 나타난 결과이다. ③번 공정은 초순수 공정에서 AP (Anion Polisher) - CP (Cation Polisher) 공정이 제외되면서 비저항 수질이 13.21 MΩcm로 18.2 MΩcm 이상을 만족하지 못하였다. ⑦번 공정은 UV (Ultra Violet)공정이 제외되면서 실리카 수질이 1.25 ppb (part per billion)로 1 ppb 이하를 만족하지 못하였다. ⑨번 공정은 1단 RO (Reverse Osmosis)를 선정하여 RO공정이 축소되면서 보론 수질이 0.14 ppb로 0.1 ppb 이하를 만족하지 못하였다. ⑩번 공정은 RO공정 후단에 이온교환 공정을 설치하면서 제거효율이 낮아져 보론 수질이 0.12 ppb로 0.1 ppb 이하를 만족하지 못하였다. ⑪번 공정은 ⑩번 공정에서 탈기공정을 제외하면서 보론 수질이 0.108 ppb로 0.1 이하를 만족하지 못하였으며 TOC

Table 4. Water quality of ultrapure water

Design parameter		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Resistivity	18.2 MΩcm ↑	18.29	18.32	13.21	18.32	18.32	18.32	18.31	18.32	18.33	18.30
TOC	5 ppb ↓	1.85	0.51	0.30	0.50	0.61	2.13	3.08	0.81	2.48	4.16
DO	1 ppb ↓	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SILICA	1 ppb ↓	0.21	0.78	-	0.99	0.85	0.51	1.25	0.17	0.63	0.66
Particle	1 ea ↓	0.80	0.22	0.20	0.31	0.25	0.09	0.13	0.58	0.68	0.47
BORON	0.1 ppb ↓	0.011	0.055	-	0.018	0.017	0.024	0.040	0.089	0.14	0.12
Result	-	OK	OK	NG	OK	OK	OK	NG	OK	NG	NG

Design parameter		⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	비고
Resistivity	18.2 MΩcm ↑	18.29	18.31	18.31	18.30	18.31	18.27	18.26	12.45	18.26
TOC	5 ppb ↓	5.12	3.74	4.07	4.37	4.66	1.36	1.37		1.37
DO	1 ppb ↓	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00
SILICA	1 ppb ↓	-	0.29	1.10	0.93	0.61	0.64	0.54	0.75	0.54
Particle	1 ea ↓	0.20	0.14	0.37	0.16	0.13	0.70	0.23	0.17	0.23
BORON	0.1 ppb ↓	0.108	0.058	0.066	0.055	0.065	0.011	0.011		0.011
Result	-	NG	OK	NG	OK	OK	OK	OK	NG	NG

(Total Organic Carbon) 수질도 5.12 ppb로 5 ppb 이하를 만족하지 못하였다. ⑬번 공정은 순수공정을 RO단일 공정으로 선정하면서 실리카 수질이 1.10 ppb로 1.0 ppb 이하를 만족하지 못하였다. ⑱번 공정은 AP-CP 공정이 제외되면서 비저항 수질이 12.45 MΩcm로 18.2 MΩcm 이상을 만족하지 못하였다. ⑲번 공정은 탈기공정이 제외되면서 DO (Dissolved Oxygen) 수질이 10 ppb로 1 ppb 이하를 만족하지 못하였다.

주요한 공정이 제외되면서 제거효율이 낮아져 최종수질을 만족하지 못하였다. Table 5와 같이 초순수 공정(UV, AP, CP, MDG2 (Membrane Degassfier))을 생략한 ③, ⑦, ⑱, ⑲ 공정 과 1단 RO공정으로 구성된 ⑨, ⑬ 공정이 최종 수질을 만족하지 못하였다. 설계공정과 대비하여 역삼투 공정 + 이온교환 공정으로 구성을 바꾼 ⑩, ⑪ 공정 또한 설계수질을 만족하지 못하였다. ⑨, ⑩, ⑪ 공정은 보론 수치가 0.1 ppb 이상으로 설계치를 초과하여 설계수질을 만족하지 못하였다.

최종수질 측면에서는 최종수질을 만족하는 공정은 11개 (①, ②, ④, ⑤, ⑥, ⑧, ⑫, ⑭, ⑮, ⑯, ⑰) 공정이며 비저항은 ③, ⑱

공정을 제외하고는 18.2 MΩcm 이상으로 설계치를 만족하며, 이온교환공정 + 역삼투 공정(①~③, ⑧, ⑯~⑲번 공정)이 TOC 측면에서 1 ppb정도로 역삼투 공정 + 이온교환 공정 (⑩, ⑪번 공정)의 4~5 ppb 보다 더 좋은 수질을 나타낸다. 역삼투공정 + 이온교환공정에서 TOC 4~5 ppb를 나타냄으로 TOC 측면의 제거율이 낮으나 이는 RO제거율 및 최종수질측면에서는 역삼투공정 + 이온교환공정인 ④, ⑤, ⑩~⑬ 공정이 효율적이다. 최종수질 비저항 18.2 MΩcm ↑, TOC 5 ppb ↓, DO 1 ppb ↓, Silica 1 ppb ↓, Particle 1 ea ↓, Boron 0.1 ppb ↓를 만족하지 못한 공정은 19개 공정 중 11개(①, ②, ④, ⑤, ⑥, ⑧, ⑫, ⑭, ⑮, ⑯, ⑰) 공정이다.

3.2. 경제성 평가

초순수 Pilot Plant로 조합이 가능한 19개 조합공정에 대한 투자비, 운영비를 비교하였다. 투자비는 초순수 Pilot Plant에 대한 투자비를 기준하였으며 초순수 Pilot Plant 기에서 공정의 Skip에 따라 감소되는 비용을 산출하여 비

Table 5. The process of unsatisfactory on water quality

	SC	DG	SA	RO1	RO2	SC	DG	SA	MDG1	MB	UV	AP	CP	MDG2	UF
⑱	SC	DG		RO1	RO2				MDG	EDI	UV			MDG	UF
⑲	SC	DG	SA	RO1	RO2				MDG	MB	UV	AP	CP		UF
③	SC	DG		RO1	RO2				MDG	MB	UV			MDG	UF
⑦	SC	DG	NaOH (pH 10.5)	RO1					MDG	MB		AP	CP	MDG	UF
⑨	SC	DG		RO1					MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
⑩				RO1	RO2	SC	DG	SA	MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
⑪				RO1	RO2	SC		SA	MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
⑬				RO1					MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF

용을 산출하고 이를 20년간 생산되는 초순수량으로 나눠서 산출하였다. 운영비는 초순수 Pilot Plant의약품, 폐액처리, 전력, 기타비용으로 구성하였다. 초순수 Pilot Plant 는 이온교환공정의 재생약품(염산, 가성소다 등), 재생 후 발생되는 폐액처리비, Pump 등 전력비, 기타(질소, 계측기 시약 등)의 운영비가 소모되며 공정의 변동에 따라 재생약품과

폐액 발생량이 변동되어 운영비 차이가 발생한다. 초순수 Pilot Plant 표준공정인 ①번 공정에 대한약품, 폐액, 전력, 기타비용 등 Table 6과 같이 산출한 결과 1.3억원/년이 산출되었다. 폐수처리비용은 위탁처리를 기준으로 단가 계약분인 143천원/m³을 적용하였다. 경제성 검토결과 Table 7과 같이 초순수의 투자/운영 단

Table 6. Pilot plant operating costs calculated based on the ultrapure water

	Division	Usage	Unit cost	Times	Cost (won/year)	Sum (thousand won/year)
Chemicals (Regen.)	SC Regen.	41 kg/time	1,760 won/kg	2 times/week	7,504,640	31,002
	SA Regen.	170 kg/time	1,870 won/kg	1 times/week	16,530,800	
	MB Regen.	23 kg/time 50 kg/time	1,760 won/kg 1,870 won/kg	1 times/week	6,966,960	
Waste water treatment	SC	0,9 m ³ /time	143,000 won/m ³	2 times/week	13,384,800	43,128
	SA	1,7 m ³ /time	143,000 won/m ³	1 times/week	12,641,200	
	MB	1,3 m ³ /time	143,000 won/m ³	1 times/week	9,666,800	
	Analyzer	1,0 m ³ /time	143,000 won/m ³	1 times/week	7,436,000	
Power rates	Pump	82 kwh	71 won/kwh	1 times/week	51,050,000	51,070
	SC Regen.	1 kwh	71 won/kwh	1 times/week	7,384	
	SA Regen.	1 kwh	71 won/kwh	1 times/week	3,692	
	MB Regen.	2 kwh	71 won/kwh	1 times/week	7,384	
etc.	N ₂	1 EA	70,400 won/EA	1 EA/week	3,660,800	9,805
	Water	23 m ³ /day	160 won/m ³	30 day/month	1,344,000	
	Etc.	-	400,000 won/month	12 month/year	4,800,000	
Sum	• Chemicals + Waste water treatment + Power rates + etc.					135,006

Table 7. Economic evaluation of the combination process ultrapure water (1~19)

Number	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Skip	-	SA	SA,AP,CP	SA,SC	SA,SC,DG	SA,RO2	SA,RO2,UV	SA,RO2	SA,RO2	UVox, AP
Regen. Process	SC,SA,MB	SC, MB	SC, MB	MB	MB	SC, MB	SC, MB	SC, MB	SC, MB	SC,SA,MB
Invest cost (K won/year)	942,602	922,775	899,272	870,314	851,747	901,113	871,460	901,113	901,113	942,602
Invest unit (won/m ³)	26,183	25,633	24,980	24,175	23,660	25,031	24,207	25,031	25,031	26,183
Chemical	31,002	14,472	14,472	13,934	13,934	17,338	17,338	17,052	24,574	31,002
Operation cost (K won/year)	43,129	30,488	30,488	26,770	26,770	30,488	30,488	30,488	35,321	43,129
Power	51,070	51,066	51,066	51,058	50,411	49,698	47,521	49,698	49,698	51,070
Etc.	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805
sum	135,006	105,830	105,830	101,566	100,920	107,329	105,152	107,042	119,398	135,006
Operation unit (won/m ³)	75,004	58,795	58,795	56,426	56,066	59,627	58,418	59,468	66,332	75,004
Sum unit (won/m ³)	101,187	84,427	83,774	80,601	79,726	84,658	82,625	84,499	91,363	101,187

Number	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲
Skip	DG	SC,DG,SA	SC,DG,SA,RO2	UV-ox, AP	RO1, RO2	-	-	SA	MDG2
Regen. Process	SC,SA,MB	MB	MB	SC,SA,MB	SC,SA,MB	SC,SA,MB	SC, SA	SC	SC,SA,MB
Invest cost (K won/year)	924,826	919,390	900,049	921,516	932,456	942,201	942,696	921,513	910,516
Invest unit (won/m ³)	25,690	25,539	25,001	25,598	25,902	26,172	26,186	25,598	25,292
Chemical	31,002	13,934	20,901	31,002	34,486	31,002	24,035	7,505	31,002
Operation cost (K won/year)	43,129	26,770	36,436	43,129	47,962	43,129	33,462	20,821	43,129
Power	50,419	51,058	49,460	48,894	47,836	51,413	51,063	51,059	50,822
Etc.	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805	9,805
sum	134,355	101,566	116,602	132,830	140,089	135,349	118,365	89,189	134,758
Operation unit (won/m ³)	74,642	56,426	64,779	73,794	77,827	75,194	65,758	49,549	74,865
sum unit (won/m ³)	100,332	81,964	89,780	99,392	103,729	101,366	91,944	75,147	100,157

가로서 단위는 [원/m³]이며, 투자/운영비 합계로 표기한다. 투자/운영비 분석결과 SA, DG, SC를 생략하여 운전한 2단 RO(⑤) 공정이 투자/운영비가 최적이나 이는 공정의 변경에 따른 전체 공정의 비교가 아닌 단순 비교이다. SA, DG, SC를 생략하여 운전한 ⑤공정(2단RO)이 연간 운영비가 1.0억 원/년(단가 56,066원/m³)으로 최적운영비를 나타내고 있으며, 설계 기준의 운영비 1.3억 원/년(단가 75,004원/m³) 보다 0.35억 원/년(단가 18,937원/m³)이 절감되어 75% 수준이다.

투자비는 8.5억 원(단가 23,660원/m³)으로 9.4억(단가 26,183원/m³) 대비하여 0.9억 원(단가 2,524원/m³, 90%수준)이 더 경제적이다. 설계공정 대비하여 79% 수준의 사업비(투자비 + 운영비) 산출되었다. 경제성만을 고려한 최적공정은 2단 RO(⑤) 공정이 효율 및 경제성이 우수하다. 1번(설계)공정 대비하여 79% 수준, ⑥번 공정 대비 94% 수준이다.

RO 공정의 장기적 관점에서의 영향성(막세정 주기, 막교체 주기 등)과 폐수 발생에 의한 운영, 투자비 등의 공정 간의 전체적인 경제성 검토에 필요한 실험 자료 확보는 어렵다. RO공정의 전처리 공정으로 이온교환공정이 없는 공정(⑤)과 RO전단이 변경된 공정(⑩~⑬번)의 경우 RO공정의 전단약품투입 및 막세정의 영향성, 막교체 주기 단축 등에 대한 장기적인 실험 Data확보가 어려워 경제성 분석이 불가하다. 공정의 변경에 따른 MB 인입수질의 변화는 MB의 재생주기가 변경되어 경제성에 영향을 줌으로 이에 대한 실험이 필요하나 MB의 재생주기 확인을 위해 1회 실험시 1개월 이상 기간이 소요되어 실험을 통한 결과 확인이 어렵다.

19개 공정조합 결과 수질을 만족하는 11개 공정조합에 대

해 경제성과 안정성을 평가하였다. 경제성은 투자 및 운영비를 검토하여 원단위 개념으로 경제성을 평가하였다.

원단위 개념으로 0~50점으로 점수를 배분하여 평가하였다. 총점이 50점이 되도록 하였으며 70%인 37.5점을 기본 점수로 하고 30%인 12.5점이 최대원단위와 최소원단위에 의해 점수 획득이 가능토록 구성하였다. 이는 일반적인 평가 시 기본점수와 상대점수를 평가하는 기준에 의해 아래식과 같이 선정하였다.

$$* \text{산출식} = 37.5 + \frac{\text{최대 원단위} - Y}{\text{최대 원단위} - \text{최소 원단위}} \times 12.5$$

3.3. 안정성 평가

안정성은 수질과 설비에 대한 최종수질(25점) 만족여부와 설비(25점) 안정성으로 평가하여 50점의 점수를 배점하였다.

수질을 만족하는 설계값에서 최대값까지의 범위를 0~4.2점까지 점수화하였다. 초순수 최종수질은 6종류 수질(총점 25점)항목이 있으므로 이를 합하여 가장 많은 점수를 획득한 공정이 1순위이다. 수질항목별 산출식은 아래와 같다. 이는 일반적인 평가시 각 항목별 점수차이가 발생할 수 있도록 하는 기준에 의해 아래 식과 같이 선정하였다.

$$* \text{수질관련 산출식} = \frac{\text{최대값} - Y}{\text{최대값} - \text{최소값}} \times 4.2\text{점}$$

설비 안정성은 주요 설비별로 점수를 배분하였으며 주요 설비는 RO공정 전처리 설비, RO공정구성, 기타항목으로 구

Table 8. Verification of ultrapure water combined process results

Economy	Stability	Ranking	Number	Pure Water						Ultra Pure Water							
				SC	DG	SA	RO1	RO2	RO3	MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF	
1 st (79,726) (50)	9 th (21/10)	4 th (81.9)	⑤				RO1	RO2			MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
2 nd (80,601) (49.1)	10 th (21/10)	5 th (80.9)	④		DG		RO1	RO2			MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
3 rd (81,964) (47.7)	11 th (19/10)	7 th (77.3)	⑫				RO1	RO2	RO3		MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
4 th (84,427) (45.1)	4 th (22/20)	1 st (87.1)	②	SC	DG		RO1	RO2			MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
5 th (84,499) (45.0)	7 th (22/15)	3 rd (82.0)	⑧	SC	DG	NaOH (pH 9.0)	RO1				MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
6 th (84,659) (44.9)	8 th (21/15)	6 th (80.9)	⑥	SC	DG	NaOH (pH 10.5)	RO1				MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
7 th (91,944) (37.3)	2 nd (20/25)	2 nd (82.6)	⑰	SC	DG	SA	RO1	RO2			MDG	EDI	UV	AP	CP	MDG	UF
8 th (99,392) (29.5)	5 th (18/23)	10 th (70.3)	⑭	SC	DG	SA	RO1	RO2			MDG	MB			CP	MDG	UF
9 th (101,187) (27.6)	1 st (20/25)	8 th (73)	①	SC	DG	SA	RO1	RO2			MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
10 th (101,366) (27.5)	3 rd (20/25)	9 th (72.5)	⑮	SC	DG	SA	RO1	RO2			VDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF
11 th (103,729) (25)	6 th (19/20)	11 th (63.6)	⑮	SC	DG	SA					MDG	MB	UV	AP	CP	MDG	UF

Table 9. Optimal combination of process validation results

		Point	①	②	④	⑤	⑥	⑧	⑫	⑭	⑮	⑯	⑰
Economy	Unit	50 point	27,6	45,1	49,1	50,0	44,9	45,0	47,7	29,5	25,0	27,5	37,3
		Ranking	9	4	2	1	6	5	3	8	11	10	7
	Quality	25 point	20,3	22,0	21,8	21,9	21,0	22,0	19,6	18,3	18,6	20,0	20,3
		Ranking	6	1	4	3	5	2	9	11	10	8	7
Stability	Utility	25 point	25,0	20,0	10,0	10,0	15,0	15,0	10,0	22,5	20,0	25,0	25,0
		Ranking	1	5	9	9	7	7	9	4	5	1	1
	Sum	50 point	45,3	42,0	31,8	31,9	36,0	37,0	29,6	40,8	38,6	45,0	45,3
		Ranking	1	4	10	9	8	7	11	5	6	3	2
Sum		100 point	73,0	87,1	80,9	81,9	80,9	82,0	77,3	70,3	63,6	72,5	82,6
		Ranking	8	1	5	4	6	3	7	10	11	9	2

분하였으며 점수는 총 25점 중에 RO공정 전처리 설비(15), RO공정구성(5), 기타항목(5)으로 점수화 평가하였다.

*** 설비관련 산출식**

- RO전처리 : SC-DG-SA공정(15점), SC-DG공정(10), DG공정(2.5), 전처리공정없음(0)
- RO구성 : 2단RO(5), 1단RO(2.5), RO공정없음(0)
- 약품주입 : RO공정전단 약품주입 없음(2.5), 약품주입(0)
- 초순수 공정구성 : 초순수 공정생략 없음(2.5), 초순수 공정생략(0)

19개 공정조합 결과 수질을 만족하는 11개 공정조합에 대해 Table 8과 같이 경제성과 안정성을 평가하였다.

경제성에 대한 괄호안의 수치는 m³당 초순수 생산 원단위이며 Pilot Plant 설치비 및 운영비 합계에 대한 가중치 50점이며, 안정성에 대한 괄호안의 수치는 두 가지가 있으며 수질과 설비에 대한 배점을 각 50점으로 하여 평가한 가중치 총 50점이다.

4. 결론

1) 본 연구 결과 경제성과 안정성을 고려한 최적공정을 Pilot Plant를 운영하여 다양한 조합공정을 기반으로 선정하였다. Table 9와 같이 표준공정에서 SA공정을 제외한 ②번 공정이 최적공정으로 선정되었다. 기본 Pilot Plant의 ①번 공정과 비교하여 투자비 7.7%, 운영비 24.8% 절감이 가능하다.

2) 이 결과는 하루 25톤 규모의 Pilot Plant를 기준으로 선정된 결과이다. 향후 추가 보완 사항으로는 실증 플랜트 규모(Scale-up 인자) 및 운영조건에 대한 고려가 반영되어야 하며 장기적 관점의 공정 특성 및 공급배관 재질검토 등을 위해 실증 플랜트 설치 및 검증이 필요하다.

References

1. Choi, B. S., "Issue Report of Ultrapure Water Industry and Technology Trends," Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, pp. 1~16(2013).
2. Lola, A., Hector, B., Christopher, G., Marta, H., Heather, L., Antoine, S., Jelena, S. and Jablanka, U., Industrial Desalination & Water Reuse, 1st ed, Global Water Intelligence, Oxford, pp. III~IV(2012).
3. Kwon, B. S. and Lee, H. G., The research of Based on Technology for Pure and Ultrapure water treatment plant, 1st ed, K-water, Deajeon, pp. 50~62(2011).
4. Lee, C. S., "Ultrapure Water into the Manufacturing Process," The Membrane Society of Korea Summer Workshop, pp. 91~119(1996).
5. Park, S. C., Kwon, B. S., Lee, K. H. and Jung, S. S., "The Design Parameter Evaluation of Ion Exchange Process For Ultra Pure Water Production," Korean Soc. Water Wastewater, 29(1), 65~75(2015).
6. Motomura, Y., The Science of Ultrapure Water, Research of Based Technology for the Semiconductor, Realize, Tokyo, pp. 100~150(2007).
7. Yabe, K., Motomura, Y. and Mizuniwa, T., Pure and Ultrapure water Technology, Japanese Industrial Standards Committee (JISC), Tokyo, pp. 50~55(2004).