물 부족 문제의 해결을 위한 건축물 단위의 물재이용 시설 확대 방안

Expansion of Water Reuse Facility for Building Unit to Solve Water Shortage Problem

박용화 · 심인태* · 김현진** · 장 암*

Yong-hwa Park · In-tae Shim* · Hyun-jin Kim** · Am Jang*

성균관대학교 수자원전문대학원 · *서울대학교 건설환경공학과 · **해성엔지니어링(주) 기술연구소

Graduate School of water Resources, Sungkyunkwan University

**Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University*

***Research institute at Haesung Engineering Inc*

(Received February 17, 2017; Revised April 25, 2017; Accepted May 29, 2017)

Abstract : This study examined the possibility of solving the water shortage problem through the water reuse of buildings through the Suwon water reuse (greywater) facility installation project conducted as a pilot project of Ministry of Environment. Water reuse of individual building units can reduce city water demand by up to 25%. This is a level that can solve the water shortage problem in Korea. However, in order to revitalize the water reuse facilities of individual buildings, it is necessary to solve the problem of the user's rejection of the greywater and the economical problems. The resolution of the user's rejection can be solved by linking the MBR process with the AOP process. When the MBR process and the AOP process are operated in conjunction with each other, it is found that the users do not feel the water quality difference with the tap water. Economical problems can be solved at the water rate levels when the facility capacity is over 100 ton/day considering the construction cost and the operation cost, and when the operation cost alone is over 15 ton/day. Furthermore, when considering the social benefit cost, it is found that profit is generated from 150 ton/day.

Key Words : Greywater, MBR, AOP, Water Reuse

요약 : 본 연구는 환경부 시범사업으로 진행된 수원시 물 재이용(중수도)시설물 설치사업으로 설치된 물재이용시설을 통하여 건축물 단위의 물재이용을 통한 물 부족 문제 해결 가능성을 살펴보았다. 개별 건축물 단위의 물재이용이 이루어지며 도시의 물 수요를 최대 25%까지 줄일 수 있다. 이는 우리나라의 수자원 부족 문제를 해결할 수 있는 수준이다. 하지만 개별 건축물 단위의 물 재이용 시설을 활성화하려면 사용자의 중수도 거부감 해소와 경제성 문제를 해결하여야 한다. 중수도 거부감 해소는 MBR 공정과 AOP 공정을 연계 하였을 경우 해결 가능하다. MBR 공정과 AOP 공정을 연계하여 운영할 시 사용자들은 상수도와 중수도의 수질 차이를 느끼지 못하는 것으로 나타났다. 경제성 문제는 건설비와 운영비를 고려할 경우 시설용량 100톤/일 이상, 운영비만 고려할 경우 15톤/일 이상일 경우 상·하수도요금 수준에서 해결이 가능하다. 더 나아가 사회적 편익비용까지 고려할 시 150톤/일 이상부터는 수익이 창출되는 것으로 나타났다.

주제어 : 중수도, 분리막, 오존, 물재이용

1. 서론

우리나라의 1년 평균 강수량은 1,283 mm로 세계 평균의 973 mm보다 높지만 높은 인구 밀도로 1인당 강수량은 세계 평균의 10분의 1 정도이며 강우 시기가 6~8월에 집중되어 대체 수자원의 필요성이 대두되고 있다. 현재 환경부에서는 Water reuse 2020을 통하여 2020년까지 25.4억톤의 재이용을 통하여 대체수자원을 확보하려 하고 있으나 대부분이 공공하수처리장 방류수를 활용한 유지용수와 공업용수, 장내용수로 구성되어 있고 개별 건축물 단위에서 활용 가능한 중수도와 빗물의 경우 19%, 2%에 불과하다.¹⁾ 하지만 상수도의 대부분은 도시의 개별 건축물 단위에서 사용되고 있으므로 도시의 개별 건축물 단위의 물재이용이 활성화 되어야 대체수자원 확보 효과가 크다. 개별 건축물 단위의 물사용량은 선진국 기준으로 하루 1인당 100~180 L이며 건축물 단위에서 중

수도 활용에 가장 적합한 용도는 변기 세정용수로 중수도로 대체 시 하루 1인당 40~60 L의 물을 감소시킬 수 있고 이러한 시설이 늘어날 경우 도시의 물 수요를 10~25%까지 줄일 수 있다.²⁾ 본 연구는 개별 건축물 단위의 물재이용 확대를 통하여 대체수자원을 확보할 수 있는 조건을 분석하였다.

2. 연구방법

본 연구는 환경부 시범사업으로 진행된 수원시 물재이용(중수도)시설물 설치사업을 대상으로 하였다.

2.1. 건축물 단위 물재이용(중수도)시설물 설치 및 운전

건축물 단위 물재이용 시설물은 경기대 제2공학관, 경기대 종합강의동, 권선청소년수련관, 버드네노인복지관, 장안

* Corresponding author E-mail: amjang@skku.edu Tel: 031-290-7526 Fax: 031-290-7549

Table 1. Overview of the Suwon water reuse (greywater) facility installation project

Site	Building size	Number of visitors	Capacity
Kyonggi University 2nd Engineering Building	1 underground 6 ground	2,900 people/day	25 m ³ /day
Kyonggi University lecture hall Building	1 underground 6 ground	2,500 people/day	25 m ³ /day
The Gwonseon Youth training center	1 underground 4 ground	960 people/day	8 m ³ /day
The Budnae Elderly welfare center	1 underground 4 ground	800 people/day	21 m ³ /day
The Jangan District Office	1 underground 6 ground	2,000 people/day	35 m ³ /day
Gyeonggi Small&medium Business Support Center	3 underground 16 ground	1,700 people/day	51 m ³ /day
Suwon World Cup Stadium	2 underground 4 ground	1,470 people/day	75 m ³ /day
Sungkyunkwan University Natural Science Campus	7 buildings on campus	15,650 people/day	600 m ³ /day

구청, 경기도 중소기업지원센터, 수원월드컵경기장, 성균관대학교 자연과학캠퍼스에 설치하였다. 성균관대학교 자연과학캠퍼스의 경우 MBR 공정을 거친 하수방류수라 AOP 공정만 추가하여 재이용 하였으며 나머지 7개소는 MBR 공정과 AOP 공정을 연계한 중수도 시설을 설치하였다. 기존 건축물에 물재이용 시설을 설치하다 보니 물재이용시설 시설용량은 실제 필요량이 아닌 설치 가능한 공간에 들어갈 수 있는 최대용량 기준으로 정해졌으며 유동인구가 많은 건축물을 대상으로 하여 생산된 재이용수가 100% 사용될 수 있는 공익성이 높은 건축물들이 선정되었다. 개별 건축물 규모 및 방문객 숫자, 물재이용시설 시설용량은 Table 1과 같다.

물재이용 처리공정은 Fig. 1과 같이 침지형 중공사막(ECO-NITY CF, 한국)과 미세오존기포발생장치(HIO-600, 한국)를 사용하였으며 운전조건은 Table 2와 3과 같다. 일반적으로 중수도에서 MBR 공정(Membrane Bio-Reactor)의 운전은 4일 이하의 SRT와 2시간의 HRT로 매우 낮아도 양호한 수준의 재이용수를 생산할 수 있다.³⁾ 또한 AOP 공정(Advanced oxidation processes)의 경우 3 mg/L의 오존 주입 시 2 log의 총대장균 제거효율을 얻을 수 있다.⁴⁾

Table 2. Operating conditions of MBR process

Site	HRT (hour)	MLSS (mg/L)	SRT (day)	F/M (kgBOD/kgMLSS·d)	BOD loading rate (kgBOD/m ³ ·d)
Kyonggi University 2nd Engineering Building	2	1610	∞	0.07	0.46
Kyonggi University lecture hall Building	2	1570	∞	0.07	0.45
The Gwonseon Youth training center	2	1640	∞	0.07	0.47
The Budnae Elderly welfare center	2	1810	∞	0.07	0.52
The Jangan District Office	2	1620	∞	0.07	0.46
Gyeonggi Small&medium Business Support Center	2	1600	∞	0.07	0.46
Suwon World Cup Stadium	2	1440	∞	0.07	0.41
Sungkyunkwan University Natural Science Campus	-	-	-	-	-

Table 3. Operating conditions of AOP process (10 um ozone bubble)

Site	HRT (min)	Ozone injection (mg/L)	I.D (mg/L O3)	Kc (10 ⁻³ /sec)	Ozone-CT (mg/L·sec)
Kyonggi University 2nd Engineering Building	30	2.5	0.38	1.35	1432.90
Kyonggi University lecture hall Building	30	2.5	0.39	1.39	1394.44
The Gwonseon Youth training center	30	2.5	0.37	1.32	1464.46
The Budnae Elderly welfare center	30	2.5	0.37	1.32	1464.46
The Jangan District Office	30	2.5	0.38	1.35	1432.90
Gyeonggi Small&medium Business Support Center	30	2.5	0.37	1.32	1464.46
Suwon World Cup Stadium	30	2.5	0.37	1.32	1464.46
Sungkyunkwan University Natural Science Campus	30	2.5	0.37	1.32	1464.46

Fig. 1. Schematic diagram of water reuse system.

측정장치는 잔류오존측정장치(ISB26-CRONOS, 영국), 미세기포측정장치(PC3400, 미국), 분광광도계(DR6000, 독일), 탁도계(Micro TOL2-HF, 미국), MLSS측정기(SS-10Z, 일본)를 사용하였다. 수질분석은 수질오염공정시험법에 준하여 8개 장소에서 6가지 항목으로 총 24회씩 각각 분석하였다.

2.2. 중수도 이용자 설문조사

중수도는 위생적으로 안정하며 심미적으로 양호하며, 환경적 유해물질이 없으며 경제적으로 타당하여야 한다.⁵⁾ 따라서 세계적으로 위의 조건을 모두 만족시키는 중수도 수질에 대한 표준이나 가이드라인은 정해지기 어렵다.⁶⁾ 우리나라의 경우 중수도 수질기준이 정해져 있지만 건축물 단위 물재이용이 실질적으로 가능하려면 정해진 법적 수질만을 만족시키는 것으로 충분하지 않으며 이용자의 중수도 사용 의사가 생기는 수질 조건을 만족하는 것이 매우 중요하다. 이용자가 물을 재이용하기 위해 가장 중요한 사항은 “수질”이다.⁷⁾ 본 연구에서는 2016년 5월 26일 성균관대학교 자연과학캠퍼

스에서 화장실 변기 세척용수로 중수도를 사용한 대학생 151명을 대상으로 설문조사를 하였다. 성균관대학교의 경우 다른 현장에 비하여 물재이용 개념에 대한 이해 후 설문조사 참여가 용이하였으며 재이용수를 일정기간 지속적으로 이용한 대상자를 선택하여 설문조사하는 것이 용이하였다. 남자 112명 여자 39명으로 구성되었으며 입학년도는 2005년에서 2016년까지이며 전공 또한 경제학과, 의학과, 기계공학, 신소재공학과, 물리학과, 소비자가족학과, 국어국문학과 등 다양하여 중수도에 대한 다양한 의견 조사가 가능하였다.

2.3. 개별 건축물 단위 물재이용 경제성 분석

건축물 단위 물재이용이 가능하려면 이용자의 중수도 사용 의사와 더불어 경제성 또한 중요하다. 상·하수도 요금보다 중수도 사용 비용이 비싸다면 개별 건축물 단위 중수도가 확대되기 힘들다. 본 연구에서는 공공하수도시설 설치사업 업무지침(환경부 2012.10)의 LCC (Life Cycle Cost) 기법을 인용하여 경제성을 분석하였다. 20년을 기준으로 순공

Fig. 2. Results of average water quality.

사비에는 수처리 시설을 포함, 공급 배관, 기존 건축물 보수 비용, 토목공사비용, 시운전비용, 설계비 등 모든 공사비를 포함하였으며, 운영비는 20년을 기준으로 대수선비, 경상수 선비, 약품비, 전력비, 인건비를 포함하였다. 효율적인 경제 성 분석을 위하여 공급배관의 경우 수처리 시설에서 재이용 수 사용처까지의 관로와 부대시설을 포함하였으며 MBR 공 정은 전처리 시설을 AOP 공정은 후처리 시설까지 포함하여 구분하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 건축물 단위 물재이용(중수도)시설물 설치 및 운전 결과

3개월간의 시운전 결과 8개소의 평균 원수의 수질과 각 공 정별 처리 수질은 Fig. 2와 Table 4~6과 같이 나타났다. MBR 공정과 AOP 공정이 연계된 8개소 현장을 연구한 결과 MBR 공정에서 BOD₅, COD_{cr}, 탁도, 총대장균군수 제거율은 각각

Table 4. Results of average inflow water quality

Site	BOD ₅		COD _{cr}		Color		Total coliforms (CFU/100 mL)		Turbidity (NTU)		Odor	
	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Kyonggi University 2nd Engineering Building	38.5	17.1	74.3	32.8	30.2	13.3	681	301	5.5	2.1	1	0
	18.9	81.4	36.2	158.1	15.1	65.1	363	1454	2.4	10.9	1	1
Kyonggi University lecture hall Building	37.5	14.2	76.1	28.6	34.8	13.2	665	253	4.9	1.9	1	0
	7.2	57.1	14.4	116.0	7.0	52.9	127	1013	1.1	7.5	1	1
The Gwonseon Youth training center	39.1	14.9	77.0	28.8	30.2	11.5	700	264	4.4	1.5	1	0
	13.3	62.3	26.5	125.4	10.6	48.3	243	1059	2.0	7.0	1	1
The Budnae Elderly welfare center	43.1	24.2	83.6	47.6	32.5	18.4	748	406	5.7	3.0	1	0
	8.3	78.6	10.9	153.7	5.9	59.1	137	1346	1.3	10.0	1	1
The Jangan District Office	38.6	14.2	72.2	25.7	25.9	9.5	665	232	6.2	2.2	1	0
	7.3	62.3	15.0	115.2	5.0	41.8	168	1014	1.4	10.3	1	1
Gyeonggi Small&medium Business Support Center	38.2	18.3	79.1	37.2	33.1	15.6	641	301	5.3	2.5	1	0
	9.0	64.8	18.7	136.6	8.6	56.1	185	1014	1.0	8.6	1	1
Suwon World Cup Stadium	34.5	21.3	69.3	41.7	29.1	18.1	636	392	4.8	2.9	1	0
	9.5	77.8	20.3	154.2	7.7	66.0	175	1436	1.3	10.6	1	1
Sungkyunkwan University Natural Science Campus	1.1	0.4	6.4	2.4	5.2	1.9	18	6	0.5	0.2	1	0
	0.4	1.6	2.8	10.1	2.1	7.3	6	26	0.2	0.8	1	1

Table 5. Results of average MBR outflow water quality

Site	BOD ₅ (mg/L)		COD _{cr} (mg/L)		Color (CU)		Total coliforms (CFU/100 mL)		Turbidity (NTU)		Odor	
	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Kyonggi University 2nd Engineering Building	1.5	0.6	9.7	4.4	11.3	4.9	27	12	0.5	0.2	1	0
	0.7	3.0	4.8	21.5	5.7	24.0	15	58	0.2	1.0	1	1
Kyonggi University lecture hall Building	1.9	0.7	10.2	3.8	13.9	5.1	33	12	0.4	0.2	1	0
	0.6	3.1	1.9	15.2	3.0	20.8	7	48	0.1	0.7	1	1
The Gwonseon Youth training center	1.3	0.5	10.2	3.8	11.2	4.1	21	7	0.2	0.1	1	0
	0.5	2.0	4.0	17.1	4.3	19.3	8	31	0.1	0.4	1	1
The Budnae Elderly welfare center	1.5	0.7	10.5	5.8	12.7	7.0	20	10	0.4	0.2	1	0
	0.4	2.7	1.6	18.9	2.5	22.9	5	35	0.1	0.7	1	1
The Jangan District Office	1.6	0.5	9.8	3.3	14.5	5.4	25	8	0.3	0.1	1	0
	0.4	2.4	2.3	15.1	3.4	23.1	7	39	0.1	0.5	1	1
Gyeonggi Small&medium Business Support Center	1.2	0.6	9.9	4.5	13.5	6.2	21	10	0.3	0.1	1	0
	0.3	2.1	2.6	16.9	4.0	23.0	7	37	0.1	0.6	1	1
Suwon World Cup Stadium	1.3	0.8	9.4	5.6	11.5	7.0	22	13	0.2	0.1	1	0
	0.3	2.8	2.8	20.9	3.2	26.5	6	46	0.1	0.4	1	1
Sungkyunkwan University Natural Science Campus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Table 6. Results of average AOP outflow water quality

Site	BOD ₅		COD _{cr}		Color		Total coliforms (CFU/100 mL)		Turbidity (NTU)		Odor	
	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD	AVG	SD
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Kyonggi University	1.5	0.6	7.5	3.4	1.0	0.4	0	0	0.5	0.2	0	0
2nd Engineering Building	0.7	3.0	3.7	16.6	0.5	2.1	0	0	0.2	0.9	0	0
Kyonggi University	1.9	0.7	7.9	2.9	1.1	0.4	0	0	0.4	0.1	0	0
lecture hall Building	0.6	3.1	1.5	11.7	0.2	1.6	0	0	0.1	0.7	0	0
The Gwonseon Youth	1.3	0.5	8.0	3.0	0.8	0.3	0	0	0.2	0.1	0	0
training center	0.5	2.0	3.1	13.4	0.3	1.4	0	0	0.1	0.4	0	0
The Budnae Elderly	1.5	0.7	8.1	4.5	1.0	0.6	0	0	0.4	0.2	0	0
welfare center	0.4	2.7	1.2	14.6	0.2	1.8	0	0	0.1	0.6	0	0
The Jangan District Office	1.6	0.5	7.4	2.5	1.5	0.6	0	0	0.3	0.1	0	0
	0.4	2.4	1.8	11.4	0.4	2.4	0	0	0.1	0.5	0	0
Gyeonggi Small&medium	1.2	0.6	7.6	3.5	1.2	0.6	0	0	0.3	0.1	0	0
Business Support Center	0.3	2.1	2.0	13.0	0.4	2.0	0	0	0.1	0.6	0	0
Suwon World Cup Stadium	1.3	0.8	7.1	4.2	1.1	0.7	0	0	0.2	0.1	0	0
	0.3	2.8	2.1	15.8	0.3	2.5	0	0	0.1	0.3	0	0
Sungkyunkwan University	1.2	0.7	1.8	1.1	0.5	0.3	0	0	0.5	0.2	0	0
Natural Science Campus	0.3	2.6	0.5	4.0	0.1	1.2	0	0	0.2	1.0	0	0

96.2%, 86.9%, 93.7%, 96.4%로 우수한 효율을 보였지만 색도, 냄새 제거율은 각각 58.9%와 0%로 낮은 효율을 보였다. AOP 공정에서는 색도, 냄새, 총대장균군수 제거율이 91.3%, 100%, 100%로 우수한 효율을 보였으며 BOD₅, COD_{cr}, 탁도는 각각 -15.9%, 23.1%, 8.2%로 낮은 효율을 보였다.

중수도의 COD : BOD₅는 약 0.5로 생물학적 처리에 좋은 조건이다.^{8,9)} 물재이용시설 운영 결과 MBR 공정 운전 시 생물학적 처리는 매우 잘 되었다. MBR 공정에서 총대장균은 4~6 log 제거 달성이 가능하나 저장 및 운송 시스템에서 미생물의 재생장을 촉진시켜 총대장균이 검출될 수 있다.¹⁰⁾ 실험 결과 MBR 후단에서 총대장균이 검출되었다. 따라서 후단에 소독처리 시설이 필요하다. 미세기포 오존산화는 침지형 분리막이 처리 못한 총대장균을 소독할 뿐만 아니라 유기물 및 색도도 제거 가능하다.¹¹⁾ 색도가 있으면 사용자가 물의 청정도에 의심을 갖게 될 뿐만 아니라 난분해성 물질이기에 인체에 유해한 영향을 준다.¹²⁾ 따라서 건축물 단위 물재이용 시스템에서 MBR 공정과 AOP 공정의 연계는 서로의 단점을 보완하여 BOD₅, COD_{cr}, 색도, 총대장균군수, 탁도, 냄새를 각각 95.2%, 89.6%, 96.3%, 100%, 93.1%, 100% 제거하여 양질의 재이용수를 공급할 수 있었다.

MBR 공정의 경우 슬러지 반출 없이 SRT를 무한으로 하여 운전하였다. 슬러지 반출이 없음에도 7개 현장의 MLSS는 평균 1,613 mg/L로 매우 낮게 운전되었다. 이는 유기물 유입이 매우 작은 상태에서 멤브레인 세정을 위한 과폭기로 인하여 미생물이 자산화 되었기 때문이라 판단된다. 따라서 개별 건축물 단위 물재이용 시설에는 별도의 슬러지 반출 없이 운전을 하다 멤브레인 약품 세정 주기에 맞춰 조를 청소해주는 것이 유리하다. AOP 공정의 경우 BOD₅가

Fig. 3. Behavior of Ozone decomposition in AOP process.

상승하는 현상이 발생하였다. 이는 오존의 영향으로 난분해성 물질들이 생물학적 분해 가능한 물질로 전환이 촉진되고 COD_{cr}이 BOD 성분으로 전화됨에 따른 현상으로 판단된다. 따라서 MBR 공정에서 충분한 BOD₅ 제거가 이루어지지 않으면 AOP 공정으로 인하여 BOD₅ 수질기준을 충족시키지 못하는 현상이 발생할 수 있다. 또한 Fig. 3과 같이 AOP 공정 처리수의 잔류오존은 평균 0.19 mg/L로 AOP 공정뿐만 아니라 후단의 최종수조도 오존에 의한 부식에 대비하여야 한다.

3.2. 건축물 단위 물재이용(중수도)시설물 이용자 설문 조사 결과

MBR 공정과 AOP 공정이 연계된 재이용수를 사용한 151명의 의견은 Fig. 4~7과 같이 나타났다. MBR 공정과 AOP 공정이 연계될 경우 이용자의 94%가 상수도와 차이를 느끼지 못하였다. 또한 75%는 내 주거공간에서도 화장실 양변기 수세용수로 중수도를 사용하겠다고 응답하였으며 87%는 물 부족 문제 해결을 위해 물재이용시설 설치가 확대되어야 한다고 응답하였다. 마지막으로 사회적 편익을 위해서라면

Fig. 4. Water quality difference between tap water and reuse water.

Fig. 6. Necessity of expansion of water reuse facilities.

중수도요금을 얼마까지 지불하겠느냐는 질문에는 수도요금의 50% 이하가 94%로 조사되었다.

3.3. 개별 건축물 단위 물재이용 경제성 분석 결과

MBR공정과 AOP공정이 연계된 건축물 단위의 물재이용 시설의 세부 순공사비와 운영비 및 중수도 생산단가는 Table 7, 8과 같이 나타났다. 하수방류수를 이용하여 여러 건물에 재이용수를 공급한 성균관대학교 자연과학캠퍼스와 기존의 공급배관을 활용한 장안구청과 경기도 중소기업지원센터를

Fig. 5. Willingness to use reuse water as a toilet flush water in my house.

Fig. 7. Willingness to pay greywater fee.

Table 7. Net construction and Operating costs

(unit : one million won)

Site	Net construction costs				Operating costs (20 years)			
	Supply piping	MBR	AOP	Total	Supply piping	MBR	AOP	Total
Kyonggi University 2nd Engineering Building	116 ¹³⁾ (31%)	119 (32%)	138 (37%)	373 ¹³⁾ (100%)	39 ¹³⁾ (16%)	95 (39%)	110 (45%)	244 ¹³⁾ (100%)
Kyonggi University lecture hall Building	120 ¹³⁾ (35%)	106 (31%)	117 (34%)	343 ¹³⁾ (100%)	36 ¹³⁾ (16%)	92 (41%)	97 (43%)	225 ¹³⁾ (100%)
The Gwonseon Youth training center	135 ¹³⁾ (5%)	75 (45%)	90 (50%)	300 ¹³⁾ (100%)	5 ¹³⁾ (2%)	114 (47%)	124 (51%)	243 ¹³⁾ (100%)
The Budnae Elderly welfare center	108 ¹³⁾ (38%)	86 (30%)	91 (32%)	285 ¹³⁾ (100%)	44 ¹³⁾ (19%)	92 (40%)	94 (41%)	230 ¹³⁾ (100%)
The Jangan District Office	13 ¹³⁾ (45%)	114 (25%)	127 (30%)	254 ¹³⁾ (100%)	43 ¹³⁾ (20%)	84 (39%)	94 (41%)	215 ¹³⁾ (100%)
Gyeonggi Small&medium Business Support Center	26 ¹⁴⁾ (5%)	238 (45%)	264 (50%)	528 ¹⁴⁾ (100%)	5 ¹⁴⁾ (2%)	125 (48%)	131 (50%)	261 ¹⁴⁾ (100%)
Suwon World Cup Stadium	289 ¹⁴⁾ (35%)	254 (31%)	277 (34%)	820 ¹⁴⁾ (100%)	66 ¹⁴⁾ (18%)	146 (40%)	153 (42%)	365 ¹⁴⁾ (100%)
Sungkyunkwan University Natural Science Campus	1,357 ¹⁴⁾ (65%)	-	731 (35%)	2089 ¹⁴⁾ (100%)	341 ¹⁴⁾ (33%)	-	693 (67%)	1034 ¹⁴⁾ (100%)

Table 8. The greywater price per ton (unit : one thousand won)

Site	Considering construction cost and operation cost				Considering only operation cost			
	Supply piping	MBR	AOP	Total	Supply piping	MBR	AOP	Total
Kyonggi University 2nd Engineering Building	848 (25%)	1,175 (35%)	1,358 (40%)	3,381 (100%)	214 (16%)	521 (39%)	602 (45%)	1,337 (100%)
Kyonggi University lecture hall Building	855 (27%)	1,088 (35%)	1,169 (38%)	3,112 (100%)	197 (16%)	505 (41%)	530 (43%)	1,233 (100%)
The Gwonseon Youth training center	3,048 (35%)	2,720 (30%)	3,051 (35%)	8,818 (100%)	736 (20%)	1,436 (39%)	1,509 (41%)	3,682 (100%)
The Budnae Elderly welfare center	992 (30%)	1,158 (34%)	1,210 (36%)	3,359 (100%)	285 (19%)	600 (40%)	615 (41%)	1,500 (100%)
The Jangan District Office	69 (4%)	894 (46%)	982 (50%)	1,945 (100%)	19 (2%)	447 (47%)	485 (51%)	951 (100%)
Gyeonggi Small&medium Business Support Center	85 (4%)	975 (46%)	1,060 (50%)	2,119 (100%)	14 (2%)	337 (48%)	351 (50%)	701 (100%)
Suwon World Cup Stadium	647 (30%)	931 (34%)	786 (36%)	2,164 (100%)	120 (18%)	267 (40%)	280 (42%)	667 (100%)
Sungkyunkwan University Natural Science Campus	388 (54%)	-	325 (46%)	713 (100%)	78 (33%)	-	158 (67%)	236 (100%)

Fig. 8. The greywater price considering construction cost and operation cost.

Fig. 9. The greywater price considering only operation cost.

Fig. 10. The greywater price considering construction cost, operating cost, social benefits.

제외한 5개소의 개별 건축물 단위 물재이용에 투자되는 비용은 공급배관에 29%, MBR 공정에 34%, AOP공정에 37%의 비율로 나타났다. 또한 MBR 공정과 AOP 공정의 경우 1톤의 중수를 생산하기 위해 투자하는 비용이 AOP 공정이 MBR 공정에 비해 1.1배 정도 비싼 것으로 나타났다.

개별 건축물 단위의 상·하수도 이용요금은 건축물 유형,

위치, 환경에 따라 요금이 상이하다. 따라서 개별 건축물 단위 물재이용시설의 경제성을 평가하려면 기준이 필요하며 본 연구에서는 서울대학교 상·하수도 요금인 2,000원/톤¹⁾을 기준으로 하였다. 개별 건축물 단위에서 MBR 공정과 AOP 공정을 연계하였을 때 경제성이 나오는 구간은 순공사비와 운영비를 모두 고려하였을 경우에는 Fig. 8과 같이 물재이용 시설의 용량이 100톤/일 이상, 운영비만 고려하였을 경우에는 Fig. 9와 같이 15톤/일 이상인 것으로 나타났다. 마지막으로 사회적 편익 가치 1,626원/톤¹⁾을 고려하였을 경우에는 Fig. 10과 같이 150톤/일 이상이면 수익도 창출되었다.

4. 결론

수원시 물재이용(중수도)시설물 설치사업으로 설치된 물재이용 시설을 분석한 결과 다음의 결과를 도출하였다.

1) 물재이용 시설 운전 결과 MBR 공정과 AOP 공정의 연계는 개별 건축물 단위 물재이용에 매우 큰 시너지를 가진

다. 이는 MBR 공정이 부족한 색도, 냄새, 총대장균 처리에서 AOP 공정이 매우 높은 효율을 가지기 때문이며 반대로 AOP 공정이 부족한 BOD₅, 탁도 처리에서 MBR 공정이 매우 높은 효율을 가지기 때문이다. 따라서 MBR 공정과 AOP 공정을 연계하면 이용자가 만족할 수 있는 재이용수 수질을 얻을 수 있다.

2) 설문조사 결과 물 부족 문제로 인한 물재이용 시설 확대 필요성에는 공감대가 형성되었다. 하지만 실제 물재이용 시설의 확대에는 어려움이 있을 것으로 나타났다. 수질적인 측면에서는 MBR 공정과 AOP 공정의 연계로 해결 가능하나 경제적인 측면에서는 재이용수 비용으로 수도요금의 50% 이상을 지불할 의사는 없었기 때문이다.

3) 개별 건축물 단위에서 MBR 공정과 AOP 공정이 연계된 물재이용 시설을 설치할 경우 상·하수도 요금 2,000원/톤¹⁾을 기준으로 공공건축물의 경우 15톤/일 이상이면 운영비를 상쇄하는 경제성이 나오므로 정부차원에서 공사비를 지원하여 물재이용 시설의 시범운영을 통하여 물재이용에 대하여 알릴 필요가 있으며 민간건축물의 경우 100톤/일 이상인 경우 공사비와 운영비를 고려하더라도 경제성이 있으므로 정부차원에서 물재이용 시설을 민간에 권장하여 재이용시설을 확대할 필요가 있다. 마지막으로 150톤/일 이상일 경우 공사비와 운영비를 고려하더라도 경제성은 물론 사회적 편익에 의한 국가적 이득까지 발생하므로 공공과 민간 건축물 구별없이 정부 차원에서 적극적으로 지원하여 물재이용을 통한 국가적 수익을 늘려야 하겠다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임(과제번호 : 2016002210002).

KSEE

References

1. Ministry of Environment, “Water reuse master plan,” (2011).
2. Friedler, E. and Hadari, M., “Economic feasibility of on-site greywater reuse in multi-storey buildings,” *Desalination*, **190**, 221~234(2006).
3. Lesjean, B. and Gnirss, R., “Grey water treatment with a membrane bioreactor operated at low SRT and low HRT,” *Desalination*, **199**(1-3), 432~434(2006).
4. Sumikura, M. and Hidaka, M., “Ozone micro-bubble disinfection method for wastewater reuse system,” *Water Sci. and Technol.*, **56**(5), 53~61(2007).
5. Nolde, E., “Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings - over ten years experience in Berlin,” *Urban Water*, **1**, 275~284(1999).
6. Lazarova, V., Hills, S. and Birks, R., “Using recycled water for non-potable, urban uses: a review with particular reference to toilet flushing,” *Water Sci. Technol. Water Supply*, **3**(4), 69~77(2003).
7. Park, H. J., Kim, T. I. and Han, M. Y., “Determinant Factor Analysis for the Spread of Water Reuse,” *Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(4), 271~276(2014).
8. Hernandez, L., Zeeman, G., Temmink, H. and Buisman, C., “Characterization and biological treatment of greywater,” *Water Sci. Technol.*, **56**(5), 193~200(2007).
9. Knerr, H., Engelhart, H. J., and Sagawe, G., “Separated grey- and blackwater treatment by the KOMPLETT water recycling system-. a possibility to close domestic water cycle. Proceeding of Sanitation Challenge: New Sanitation Concepts and Models of Governance,” *Wageningen*, **2008**, 260~269(2008).
10. Fangyue, L. and Knut, W., “Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses,” *Sci. Total Environ.*, **407**, 3439~3449(2009).
11. Shim, I.-T. and Han, M. Y., “Design and operation of the rainwater-Greywater Hybrid System : SNU No. 39 Building,” *Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(12), 676~682(2016).
12. Lee, B. H. and Kim, S. H., “Advanced Secondary Wastewater Treatment Using the DOF (dissolved Ozone Flotation) System,” *Korean Soc. Water and Wastewater*, **19**(6), 767~774(2005).
13. Suwon-si, “Establishment of water reclamation facilities (grey-water) 1st pilot project report,”(2015).
14. Suwon-si, “Establishment of water reclamation facilities (grey-water) 2nd pilot project report,”(2016).