



Economic analysis of reclaimed water reuse: a case study of Yongin-si water reuse

Lim, Gabyul^a · Kang, Doosun^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Kyung Hee University

Paper number: 17-110

Received: 26 December 2017; Revised: 19 January 2018; Accepted: 19 January 2018

Abstract

Recently, increased water demand and frequent droughts caused severe water shortages in South Korea. Thus, reusing the reclaimed water is receiving attention as an alternative water source rather than depending on the conventional water supply. In South Korea, three types of water reuse are mainly applied, such as rainwater reuse, gray water reuse and wastewater reuse. In this study, the wastewater reuse was analyzed since the amount of treated wastewater is relatively constant over the year and typically the water quality is acceptable for reuse. In Yongin-si, there are 26 golf clubs, which is about 10% of entire facilities currently operating in South Korea. The golf courses consume significant amount of water for landscaping; thus, if the reclaimed water used, the economic, social and environmental benefits would be tremendous. This study estimates the economic benefits and costs when supplying the reclaimed wastewater for landscaping of golf courses as a case study in Yongin-si.

Keywords: B/C ratio, Economic analysis, Reclaimed water, Water reuse

하수 재이용수의 활용을 위한 경제성 분석: 용인시 소재 골프장 조경용수 공급

임갑울^a · 강두선^{a*}

^a경희대학교 사회기반시스템공학과

요 지

최근 물 사용량의 증가와 잦은 가뭄 발생으로 인해 물 부족 현상이 심화되고 있다. 따라서 기존 취수원에 대한 의존도를 줄이고 버려졌던 물의 재이용을 활성화하여 친환경적이며 지속가능한 대체수원을 확보할 필요성이 부각되고 있다. 국내에서 활용가능한 물 재이용 방법은 빗물재이용, 중수 재이용 및 하수재이용 등 크게 세 가지로 구분할 수 있으나, 아직 국내에는 물 재이용이 활발하게 추진되고 있지 않다. 본 연구에서는 세 가지 물 재이용 방안 중 연중 발생량이 일정하고 이용가능 수량이 많으며, 수질이 비교적 양호한 하수재이용수의 활용방안을 모색하였다. 적용대상 지역으로 선정한 용인시는 총 26곳의 골프장이 운영 중에 있으며 이는 전국에서 운영 중인 골프장의 약 10%에 해당한다. 골프장은 시설 운영을 위해 많은 양의 용수를 소비하는 대규모 수요처이므로 재이용수를 활용한다면 큰 경제적, 사회·환경적 편익을 얻을 수 있을 것이다. 본 연구에서는 용인시를 대상으로 하수처리장 인근에 위치한 골프장 내 조경용수로 하수재이용수를 활용하였을 경우의 경제적 효과를 비용 및 편익 추정을 통해 분석하였다.

핵심어: 골프장 조경용수, 경제성 분석, 물 재이용, 하수 재이용수

1. 서 론

물 재이용이란 사용되지 않고 버려지던 물을 인공적인 시스템을 통해 용수공급원으로 재사용하는 것을 의미하며, 재

이용수는 생활, 공업, 농업, 조경, 하천유지용수 등의 용도로 이용이 가능하다. 물 재이용은 물 자원을 효율적으로 활용하고(수량) 환경에 미치는 영향을 저감함으로써(수질) 물 자원의 지속가능한 이용을 도모하고 국민의 삶의 질을 높이는 것을 목적으로 한다. 국내에서 활용가능한 물 재이용시설은 빗물이용시설, 중수도시설, 하수처리수 재이용시설 등 3개의 시설로 구분할 수 있다. 첫 번째로 빗물이용시설은 빗물을 집수

*Corresponding Author. Tel: +82-31-201-2513
E-mail: doosunkang@khu.ac.kr (D. Kang)

시설을 이용하여 모은 뒤 용수로 활용하는 것을 의미하며, 일정한 면적 이상의 집수면적을 가진 건물에서 활용이 가능하다. 빗물 재이용은 우수의 초기처리가 중요하며, 수질이 비교적 좋지 않은 초기우수를 배제하고 나면 3가지의 재이용 방법 중 수질상태가 가장 양호한 것이 특징이다. 국내 활용 사례로는 연간 약 20,000톤을 이용하는 인천 문학 야구장과 연간 약 16,300톤을 이용하는 서울 스타시티 빌딩이 있다. 두 번째로 중수도시설은 고분자화합물이 유입되지 않은 하수를 공공하수도로 배출하지 않고 처리하여 재이용하는 것으로, 보통 일정규모 이상의 건물에서 이용하며 건물 내에서 발생한 비교적 처리가 간단한 하수를 직접 처리하여 건물 내에서 재이용하는 것을 의미한다. 주로 조경용수나 세척용수, 양변기 등에 이용되고 하수의 발생원에 따른 분리 차집이 중요하며 비교적 간단한 처리과정을 거친다는 장점이 있다. 대표적인 예로, 용인 에버랜드 환경아카데미의 경우 중수도 시설을 이용하여 연간 약 740,000톤의 중수를 재이용하고 있으며, 이를 통해 약 6억 원의 비용을 해마다 절감하고 있는 것으로 조사되었다. 마지막으로 하수처리수 재이용시설은 하수처리장에서 1차 처리 후 하천으로 방류하는 처리수를 2차 처리하여 용수로 이용하는 시설을 의미하며, 농·공업용수, 하천 및 지하수 함양 등 광범위한 용도로 활용이 가능하다. 하수를 재이용하는 만큼 처리공정 및 기준이 엄격하고 잠재 이용가능 수량이 가장 크며, 일 발생량이 다른 재이용 방법들에 비해 일정하다는 장점이 있다. 빗물이용시설 및 중수도이용시설은 대부분 건물 단위에서 활용되는 반면, 하수처리수 재이용시설은 그 범위가 비교적 광범위하다고 할 수 있다(Jung and Lee, 2015).

하수처리수 재이용수를 이용하게 되면, 양질의 용수를 안정적으로 공급함으로써 지역적인 물 부족 문제를 해소하는데 도움이 되는 한편, 하수처리수를 하천으로 방류하지 않고 재이용할 경우 오염부하량 감소로 하천의 수질개선을 도모할 수 있다. 사회·경제적 측면으로는 수돗물 사용량 및 댐 주변 지역 지원비 절감 등의 사회적 편익과 저렴한 재이용수 공급으로 수요처의 비용절감 효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다(Ministry of Environment, 2009). 한편, 미국의 물 재이용 사례를 살펴보면, 세인트 피터스버그시에서는 재활용된 하수처리수를 가정, 공원, 학교, 아파트, 골프장 등의 조경수 및 냉각탑 냉각수, 소방용 보충수 등으로 이용하고 있고, 텍사스 어빈시에서는 고도 처리된 하수와 트리니티 강물을 골프장 및 초원지대 관개용수로 사용하고 있으며, 캘리포니아주 힐튼헤드 아일랜드의 경우 하수처리수를 습지보호를 위한 용수와 골프장 관개용수로 활용하고 있는 것으로 조사되었다(Choi, 2003).

Kim *et al.* (2009)은 부산시를 대상으로 수자원 확보를 위한 하수처리수 재이용방안을 제시한 바 있으며, 하수 재이용수를 주거, 상업 및 공업용수 등 3개의 용도로 분류하여 하수처리장 인근 지역에서 재이용수를 활용할 수 있도록 용도별 비율을 결정하였다. 이 중 주거용수로의 활용이 가장 큰 비율을 차지하였으며, 주로 청소용수 및 조경용수로 사용할 수 있도록 구분하였다. Park *et al.* (2014)은 물 재이용 활성화를 위한 결정요인 분석을 위해 20세 이상의 수원시민을 대상으로 설문 조사를 실시한 바 있다. 물 재이용에 영향을 미치는 요인으로 환경보호에 대한 관심도와 현재 물 관리에 대한 관심과 만족도 등 총 21개의 문항으로 이루어진 설문조사를 실시하였으며, 하수처리수 재이용에 있어서 가장 중요한 요인은 수질인 것으로 조사되었다. 재이용 용도에 대한 설문 결과로는 청소 및 화장실 용수에 적합하다는 응답이 48.6%로 가장 많았고, 샤워 및 세탁용수, 조경용수로 적합하다는 응답은 각각 20.8%와 13.4%로 조사되었으며, 음용수의 경우 4.9%로 가장 선호도가 낮았다. 이 두 연구를 종합해보면, 하수재이용수의 활용은 주거용도(청소용, 조경용)의 사용이 가장 적절하며, 시민들의 설문조사결과 음용수로의 사용은 선호하지 않는 것으로 나타났다.

현재 용인시는 총 26곳의 골프장이 운영 중에 있으며 이는 전국에서 운영 중인 골프장의 약 10%에 해당하고, 골프장의 총 면적은 여의도 면적의 약 10배에 해당한다. 골프장은 운영을 위해 많은 양의 용수를 사용한다. 현재 용인시에 위치한 골프장은 대부분 상수도를 이용하거나 인근의 지하수를 양수하여 사용하는 것으로 조사되었다. 이는 가뭄 시 상수원 고갈의 우려가 있고, 과도한 지하수 사용으로 인한 인근지역의 농업용수 공급에 차질을 일으킬 수 있는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 비교적 사용가능 수량이 많고, 연중 발생량이 일정한 하수 재이용수를 하수처리장 인근에 위치한 골프장의 조경용수로 공급하는 방안을 제시하고, 그에 따른 경제성 분석을 실시하였다. 경제성 분석을 위해 용인시에 실제 운영 중인 하수처리장과 골프장을 대상으로 시설물 설치에 필요한 제반 비용과 재이용수 활용에 따른 경제적 편익을 추정하고 비교하였다.

본 논문의 2장에서는 하수처리수 재이용시설의 공정 및 공급과정과 경제성 분석을 위한 방법론을 설명하였다. 3장의 적용대상지역 현황에서는 용인시 소재 하수처리장의 처리량 및 재이용율, 재이용수 활용현황을 정리하였으며, 골프장의 규모를 조사하고 조경용수 사용량을 산정하였다. 또한 조경용수의 공급처가 될 하수처리장과 수요처가 될 골프장을 선정하고 두 지점 간 표고차, 거리 등 공급시설을 설치하기 위해 필요한 제원들을 정리하였다. 4장의 경제성분석에서는 용수공급

시설 설치에 따른 건설비용과 운영비용을 산정하고, 또한 재이용수를 공급함으로써 발생할 수 있는 경제적 편익을 산정하였다. 이를 통해 B/C (Benefit-Cost ratio) 분석과 시설물 설치 후 원금회수기간을 산정하였다.

2. 하수처리수 재이용 방안 및 경제성 검토

물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률·시행규칙·조례(2011)를 살펴보면 1일 하수처리 용량이 5,000 m³ 이상인 처리시설은 처리량의 10% 이상을 재이용하거나 외부로 공급하도록 되어 있으며, 환경부가 지정한 수질을 반드시 만족하여야 한다. 여기서, 하수처리수 재이용시설은 하수처리수를 재이용할 수 있도록 처리하는 시설 및 그 부속시설, 그리고 공급관로를 모두 포함한다.

하수처리수의 재이용은 장내 재이용과 장외 재이용으로 나누어지며, 장내 재이용은 재이용수를 다시 하수처리장의 공정에 사용하는 것을 의미하고, 장외 재이용은 재이용수를 이용하여 농업용수, 농업용수, 하천유지용수 등으로 재이용하는 것을 의미한다. 장외 재이용의 경우 재오염 방지를 위해 개수로보다는 관로를 주로 이용한다(Chung *et al.*, 2009).

2.1 하수재이용수 생산 공정

하수재이용수는 하수처리장에서 1차 처리 후 하천으로 방류하는 처리수를 2차 처리하여 농업용수, 하천유지용수, 공업용수 및 도시용수 등으로 활용하는 처리수를 의미한다. 이때, 산업폐수의 유입여부와 4급수 만족여부에 따라 기준을 충족하지 못하는 하수는 1차 처리 후 재이용을 배제한다. 기준에 충족되는 유입 하수는 2차 처리 공정을 마친 후 보건기준에 따라 다시 분류되게 되고 보건기준을 충족하지 못한 재처리수 또한 재이용을 배제하게 된다. 이렇게 두 번의 검사를 통해 모든 기준에 부합하는 처리수만 재이용수로 이용하게 된다. Fig. 1은 하수 재이용수 생산 공정을 도식화한 흐름도를 나타낸다.

2.2 하수재이용수 공급 공정

재이용수를 공급하기 위해서는 공급처와 수요처를 연결하기 위한 관로와 송수를 위한 펌프시설의 설치가 필요하다. 하수처리장은 자연유하에 의한 하수유입을 유도하기 위해 대부분 지대가 낮은 곳에 위치하고, 골프장은 하수처리장에 비해 상대적으로 지대가 높은 곳에 위치하기 때문에 송수 펌프가 요구된다. 펌프를 설치하고 운영하기 위해서는 펌프의 필요양정고와 유량, 동력을 계산해야 하고 이를 위해서는 송수관의 길이와 직경, 재질 및 두 지점 사이의 표고차를 결정해야

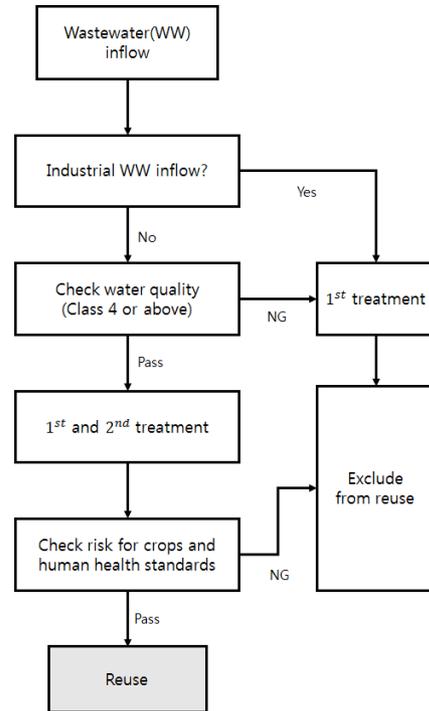


Fig. 1. Wastewater reclamation process

한다. 펌프의 설계유량은 골프장으로 공급하고자 하는 계획공급유량으므로, 펌프의 양정고와 동력을 아래의 절차에 따라 산정할 수 있다.

- 1) 공급처에서 수요처로 물이 공급되는 과정에서의 손실수두 계산(Hazen-Williams Equation)

$$H_f = 10.66 * \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852} * \frac{L}{D^{4.87}} \quad (1)$$

여기서, H_f 는 송수관 내 손실수두(m), Q 는 송수관 내 유량(=계획공급유량) (m³/sec), C 는 송수관의 재질에 따른 조도계수, L 은 관로의 길이(m), D 는 송수관의 직경(m)이다.

- 2) 펌프의 소요양정고 계산

관로의 길이(L), 직경(D), 재질(C)을 결정한 후, Eq. (1)에 의해 손실수두를 계산한 다음 지점 간 표고차를 산정하여 Eq. (2)에 의해 펌프의 소요양정고를 계산할 수 있다.

$$H_c = \Delta H + H_f \quad (2)$$

여기서, H_c 는 펌프의 소요양정고(m), ΔH 는 공급처와 수요처 간의 표고차(m)이다.

3) 펌프의 소요동력 계산

송수펌프의 소요동력은 계획공급유량과 펌프의 소요양정고를 이용하여 Eq. (3)에 의해 계산할 수 있다.

$$P = \frac{9.8 * Q * H_e}{\eta} \quad (3)$$

여기서, P 는 펌프의 소요동력(kW), η 는 펌프의 효율(%)이다.

2.3 경제성 분석 방안

하수재이용수 공급을 위한 비용 산정은 송수펌프 및 관로의 설치를 위한 건설비용과 해당 시설물의 유지보수비용, 펌프 운영에 소요되는 전력비용과 재이용수의 처리비용을 포함한다. 펌프의 운영비용은 펌프를 24시간 운영하는 경우와 전력요금의 경부하시간(23시~09시) 동안만 운영하는 두 가지 경우로 나누어 산정하였다. 편익은 하수재이용수의 공급 및 판매를 통해 발생하는 수익, 즉 재이용수의 원단위 요금과 공급수량을 이용하여 산정하였다.

먼저, 하수재이용수의 처리 및 공급을 위한 총 비용 산정 과정은 다음과 같다.

- 1) 공급처의 시설 용량과 수요처의 사용량을 고려한 일별 계획공급유량을 결정하고, 펌프의 시간대별 송수유량을 산정
- 2) 공급처와 수요처 사이의 거리, 표고 차 산정(기존 도로를 따라 송수관로를 배치하는 경로 산정)
- 3) 계획공급유량 수송에 적합한 관경 및 관중 결정
- 4) 식(1)~(3)을 이용하여 펌프의 소요양정과 소요동력 계산
- 5) 송수펌프의 설치비용을 계산하기 위해 펌프의 용량에 따른 펌프의 토공, 구조물공, 배관공, 부대공, 기계공, 전기 및 계장공 등을 계산
- 6) 관로의 설치비용을 계산하기 위해 관중 및 관경에 따른 관자재비 및 공사비를 계산

7) 펌프와 관로의 유지보수비용은 설치비용의 10%로 가정

8) 펌프의 운영비용(전력비용)은 4)에서 산정한 펌프의 소요동력과 Table 1의 계절별, 운영시간별 전력 단가를 이용하여 연간 전력비용을 산정

9) 현재가 분석을 위해 Eq. (4)를 이용하여 시설물의 운영연수에 따른 총 전력비용을 현재가로 환산

$$PumpOC = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} * PumpAOC \quad (4)$$

여기서, $PumpOC$ 는 n 년간 펌프전력비용의 현재가(원), i 는 할인율(%), n 은 운영년수(년), $PumpAOC$ 는 연간 펌프전력비용(원)을 나타낸다.

10) 하수재이용수의 처리비용은 톤당 처리비용에 계획공급유량을 곱하여 연간 처리비용을 산정한 후 Eq. (4)를 이용하여 현재가로 환산

11) 송수펌프 및 관로의 설치비용, 유지보수비용, 펌프운영비용, 하수처리비용을 모두 합산하여 총 소요비용을 현재가로 산정

다음으로, 하수재이용수의 공급을 통한 편익은 재이용수의 톤당 요금에 연간 공급량을 곱하여 연간 용수공급수익을 계산한 후, n 년간 용수공급을 통해 발생한 총 편익은 Eq. (4)를 이용하여 현재가로 산정한다.

3. 적용대상지역 현황

용인시 하수도사업소에서 제공하는 하수처리장 현황 자료를 살펴보면, 용인시 관내에는 총 16개의 하수처리장이 운영되고 있으며, 일일 하수처리량은 총 251,080톤인 것으로 조사

Table 1. Energy tariff (KEPCO, 2012)

Basic cost (BC) (won/kWh)	Time		Energy cost (won/kWh)		
			Summer (Jul~Aug)	Spring · Fall (Mar~Jun, Sep~Oct)	Winter (Nov~Feb)
7,400	Low	23:00 ~ 09:00	56.0	56.0	61.8
		Medium	09:00 ~ 11:00	105.7	77.8
	12:00 ~ 13:00				
	17:00 ~ 23:00				
	High	11:00 ~ 12:00	181.0	105.9	155.7
		13:00 ~ 17:00			

되었다. 이 중 19.4%인 48,093톤이 재이용되고 있는데, 수요처가 많지 않아 대부분의 재이용수가 하수처리장내 용수로 이용되거나 하천유지용수의 용도로 하천에 방류되고 있다. 본 연구에서는 용인시 관내 7곳의 하수처리장과 하수처리장 인근 8곳의 골프장을 선정하여 하수재이용수를 골프장의 조경용수로 활용하는 방안과 이에 따른 경제성을 분석하였다.

3.1 하수처리장 선정

용인시 하수처리장의 현황은 Fig. 2와 Tables 2 and 3을 통해 확인할 수 있다.

Table 2는 용인시 하수처리장 16곳의 현황을 나타내며, Table 3은 이 중 6곳의 하수처리장에서 장외용수로 재이용수를 활용하기 위한 재이용시설들의 현황을 나타낸다. Tables 2 and 3을 통해 알 수 있듯이 대부분의 재이용수는 처리장내 용수로 이용되고 있으며, 장외용수는 대부분 하천유지용수로 이용되고 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 적용대상으로 선정한 처리장은 상현, 수지, 구갈, 기흥, 남사, 천리, 동부처리장 등 7곳이다. 상현처리장은 일 처리량이 7,176톤이며 재이용율은 9.4%로 상대적으로 재이용율이 낮으며, 수지처리장은 일 처리량이 103,913톤으로 가장 많은 양의 하수를 처리하고 있지만 재이용율이 상대적으로 낮아 선정하였다. 구갈처리장과 기흥처리장은 재이용율이 각각 43.5%와 32.7%로

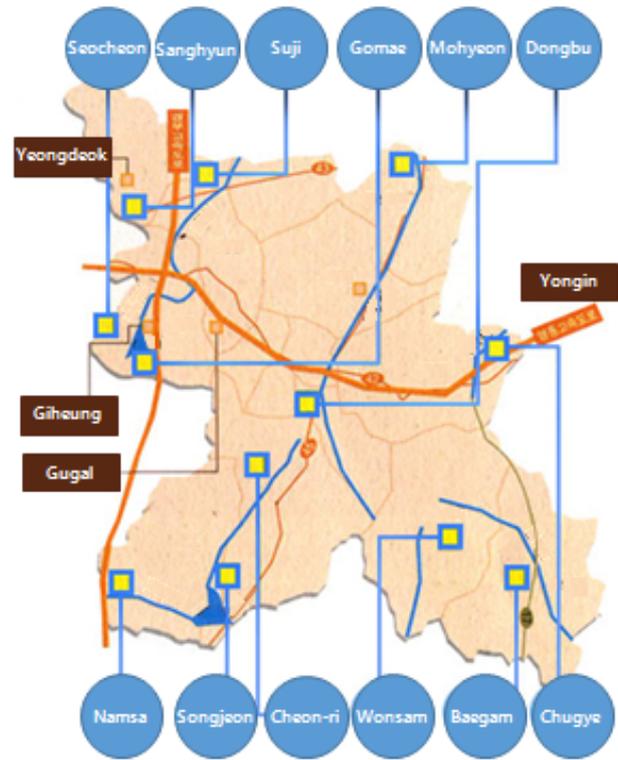


Fig. 2. Wastewater treatment plant (WWTP) locations in Yongin-si (Water supply office of Yongin-si, 2017)

Table 2. WWTP operating information in Yongin-si (Water supply office of Yongin-si, 2017) (unit: m³/d, %)

WWTP	Total treatment amount	Water reuse rate	Total reused amount	Internal reused amount	External reused amount
Yongin	37,481	6.7%	2,505	2,505	0
Giheung*	33,532	32.7%	10,959	3,212	7,747
Gugal*	31,524	43.5%	13,702	7,081	6,621
Yeongdeok	6,417	7.6%	489	489	0
Suji*	103,913	13.4%	13,883	1,043	12,840
Sanghyun*	7,176	9.4%	677	677	0
Seocheon	2,623	1.4%	36	36	0
Gomae	4,735	68.9%	3,263	261	3,002
Mohyeon	14,335	2.2%	321	321	0
Dongbu*	441	6.8%	30	30	0
Chugye	361	11.9%	43	43	0
Cheon-ri*	3,252	13.1%	426	426	0
Songjeon	1,957	100%	1,957	251	1,706
Namsa*	1,537	14.1%	217	217	0
Wonsam	214	7.9%	17	17	0
Baegam	1,582	11.3%	178	178	0
Total	251,080	19.4%	48,093	16,787	31,916

*Selected WWTPs for application study

Table 3. External usage of the reclaimed water (Water supply office of Yongin-si, 2017)

WWTP	External usage of reclaimed water	Capacity (m ³ /d)	Facility size
Suji	River maintenance flow (Tancheon)	30,000	Pump: 10.5 m ³ /min * 80 mH * 3 EA, 185 kW Pipe: Diameter = 600 mm, Length = 4.53 km
	River maintenance flow (Seongbokcheon)	30,000	Pump: 10.5 m ³ /min * 60 mH * 3 EA, 150 kW Pipe: Diameter = 600 mm, Length = 4.23 km
Giheung	River maintenance flow (Jigokcheon)	20,000	Pump: 7.0 m ³ /min * 75 mH * 3 EA, 150 kW Pipe: Diameter = 400 mm, Length = 2.2 km
Gugal	River maintenance flow (Suwoncheon)	13,000	Pump: 4.6 m ³ /min * 35 mH * 3 EA, 45 kW Pipe: Diameter = 400 mm, Length = 1.74 km
	River maintenance flow (Osancheon)	19,000	Pump: 6.6 m ³ /min * 28 mH * 3 EA, 37 kW Pipe: Diameter = 450 mm, Length = 1.81 km
Yeongdeok	River maintenance flow (Yeongdeokcheon)	10,000	Pump: 3.7 m ³ /min * 55 mH * 3 EA, 75 kW Pipe: Diameter = 300 mm, Length = 2.17 km
Gomae	Wastewater sludge flushing water	3,000	Pump: 2.1 m ³ /min * 16 mH * 1 EA, 11 kW Pipe: Diameter = 200 mm, Length = 0.2 km
Songjeon	Landscaping water (golf club)	2,300	Pump: 1.6 m ³ /min * 103 mH * 2 EA, 75 kW Pipe: Diameter = 200 mm, Length = 4.0 km

높지만 장내 용수와 하천유지용수로만 이용되고 있어 선정하였고, 또한 선정된 처리장 인근에는 재이용수 공급이 가능한 골프장이 위치하고 있는 것으로 조사되었다. 남사, 천리, 동부 처리장은 일 처리량과 재이용율이 낮아 재이용율을 향상시키기 위해 선정하였다.

3.2 골프장 선정

하수 재이용수의 수요처가 될 골프장은 우선적으로 하수 처리장 인근에 위치한 곳으로 선정하였으며, 처리장의 가용 처리용량 등을 고려하여 36홀 규모의 골프장 3곳, 27홀 골프장 2곳, 18홀 골프장 3곳 등 총 8곳의 골프장을 선정하였다.

Table 4. Overview of selected WWTP and golf club

WWTP (supplier)	Wastewater treatment capacity (m ³ /d)	Golf club (user)	No. of Hole	Designed supply (m ³ /d)
Sanghyun	7,176	Taekwang CC	36	2,000
Gugal	31,524	Suwon CC	36	2,000
Giheung	33,532	Namboo CC	18	1,000
Namsa	1,537	Plaza CC	36	1,500
Suji	103,913	Hansung CC	27	1,500
Cheon-ri	3,252	Haesolia CC	27	1,500
		Hwasan CC	18	1,000
Dongbu	441	Eunhwasam CC	18	400

Table 5. Elevation and distance between WWTP and golf club

WWTP	Elevation (m)	Golf club	Elevation (m)	ΔH (m)	Distance (km)
Sanghyun	66	Taekwang CC	124	58	5.3
Gugal	82	Suwon CC	107	25	1.8
Giheung	59	Namboo CC	131	72	4.0
Namsa	20	Plaza CC	110	90	5.1
Suji	64	Hansung CC	143	79	4.6
Cheon-ri	78	Haesolia CC	124	46	5.3
		Hwasan CC	177	99	8.2
Dongbu	100	Eunhwasam CC	190	90	1.1

또한 골프장의 9홀 당 평균 물 사용량은 500 m³/day로 조사되었으며, 하수처리장의 가용처리량과 골프장의 규모를 고려하여 계획공급량을 Table 4와 같이 산정하였다. Table 5는 각 처리장과 골프장 사이의 표고차이 및 거리를 나타낸다.

4. 경제성 분석 결과

선정된 지점을 대상으로 관로 및 펌프의 설치비용, 펌프를 운영하는 데 필요한 전력비용, 관로 및 펌프의 유지보수비용 그리고 재이용수의 처리비용 등을 산정하였다. 이때, 전력비용, 유지보수비용, 그리고 처리비용 등은 시설물의 사용연한을 30년, 할인율을 1.5%로 가정하여 현재가 분석을 실시하였다.

4.1 비용 산정

4.1.1 펌프 및 관로의 설치비용

각 지점별로 송수관의 적정관경과 송수펌프의 적정용량을 결정하기 위하여, 송수관의 관경을 가용한 상업용 관경의 범

위 내에서 최소관경에서부터 한 단계씩 증가시키면서(펌프 용량은 반대로 감소) 최소비용이 발생하는 관경과 펌프를 각각 선택하였다. 최소관경에서부터 관경을 증가시키게 되면 펌프의 소요용량은 반대로 감소하게 되어 관로의 설치비용은 증가하고 펌프의 설치비용과 운영비용은 감소하게 된다. 이때, 관로의 설치비용과 펌프의 설치비용 및 운영비용의 합이 최소가 되는 관경을 적정 관경으로 선택하였다. 관로의 재질은 덕타일 주철관(C = 100)을 선택하였으며, 펌프 및 관로의 설치비용 계산결과는 Tables 6 and 7에 각각 수록하였다. 이때, 처리장에서 골프장으로 재이용수를 공급하는 방안을 크게 두 가지로 구분하였다. 24시간 운영은 1일 계획공급량을 24시간동안 일정한 유량으로 공급하는 방안을 의미하고, 경부하시간 운영은 전력단가가 낮은 경부하시간(23시~09시)에만 계획공급량을 송수하는 방식이다. 두 가지 운영방안을 비교하였을 때, 경부하시간 운영이 짧은 시간에 동일한 수량을 공급해야 하므로 소요관경 및 펌프용량이 크고, 따라서 시설물 설치비용이 24시간 운영에 비해 높은 것을 알 수 있다.

Table 6. Pump design capacity and construction cost

WWTP	Golf club	Design flow (m ³ /hr)		Design head (m)		Construction cost (10 ³ won)	
		24 hour operation	Off-peak operation	24 hour operation	Off-peak operation	24 hour operation	Off-peak operation
Sanghyun	Taekwang CC	83.3	200.0	84.4	76.5	335,277	724,606
Gugal	Suwon CC	83.3	200.0	61.9	71.1	301,919	724,606
Giheung	Nambo CC	41.7	100.0	94.5	81.5	167,638	402,332
Namsa	Plaza CC	62.5	150.0	95.0	95.0	251,458	603,498
Suji	Hansung CC	62.5	150.0	92.6	88.5	251,458	603,498
Cheon-ri	Haesolia CC	62.5	150.0	61.5	72.4	226,439	543,455
	Hwasan CC	41.7	100.0	99.7	99.7	167,638	402,332
Dongbu	Eunhwasam CC	16.7	40.0	98.2	95.7	67,055	160,933

Table 7. Pipe design diameter and construction cost

WWTP	Golf club	Pipe length (km)	Design diameter (mm)		Construction cost (10 ³ won)	
			24 hour operation	Off-peak operation	24 hour operation	Off-peak operation
Sanghyun	Taekwang CC	5.3	200	300	765,600	1,024,320
Gugal	Suwon CC	1.8	150	200	238,420	263,900
Giheung	Nambo CC	4.0	150	250	525,310	685,710
Namsa	Plaza CC	5.1	250	350	872,100	1,137,300
Suji	Hansung CC	4.6	200	300	669,900	896,280
Cheon-ri	Haesolia CC	5.3	200	250	765,600	902,880
	Hwasan CC	8.2	350	500	1,826,370	2,866,500
Dongbu	Eunhwasam CC	1.1	100	150	117,700	144,100

4.1.2 시설물 운영 · 유지보수 비용

펌프와 관로의 유지보수비용은 설치비용의 10%로 가정하였다. 펌프운동을 위한 전력비용은 Table 1의 계절별, 시간대별 전력단가를 반영하여 연간 전력비용을 산정하였다. 참고로, 겨울철에는 조경용수를 사용하지 않는 골프장의 특성을 반영하여 12월~2월(3개월) 기간에는 재이용수의 공급이 없는 것으로 가정하였다. 연간 전력비용을 이용하여 30년간 펌프운동을 위한 총 전력비용을 현재가분석을 통해 산정하였다. Table 8은 각 처리장의 송수펌프 소요동력과 30년간 펌프 운영비용을 정리한 표이다. 계산결과를 살펴보면, 경부하시간 운영방법이 24시간 운영에 비해 소요동력이 크지만, 펌프 운전시간이 짧고, 상대적으로 전력단가가 낮은 시간에 운전하기 때문에, 총 전력비용은 낮은 것으로 분석되었다(구갈-수원CC, 천리-해솔리아CC 제외).

하수 재이용수의 처리단가는 Kim (2015)이 정리한 국내 사례를 참고하여 톤당 500원으로 산정하였다. 시설물별 계획 처리용량과 30년 운영을 가정하여 현재가로 환산한 하수재이용수 처리비용의 계산 결과는 Table 9와 같다.

4.1.3 총 소요비용

Table 10은 펌프와 관로의 설치비용과 유지보수 비용, 펌프의 운영비용 그리고 재이용수의 처리비용을 모두 합한 총 소요비용을 정리한 표이고, Fig. 3은 해당결과를 그래프로 도시한 결과이다. 해당결과를 분석해보면, 총 소요비용 중 재이용수의 처리비용이 가장 큰 비중을 차지하는 것을 알 수 있으며, 따라서 경제성 확보를 위해서는 재이용수의 처리단가를 줄이는 것이 효과적임을 알 수 있다. 처리비용을 제외하면 관로의 설치비용이 그 다음으로 높은 비중을 차지하므로 재이용시설의 설치여부를 판단하기 위해서는 수요지가 되는 골프장의 위치와 송수거리가 중요한 결정요소임을 알 수 있다. 반면, 펌프운동을 위한 전력비용은 상대적으로 비중이 낮은 것을 확인할 수 있다.

두 가지 운영방안을 비교한 결과, 모든 처리장에서 24시간 운영방안이 경부하시간 운영에 비해서 경제적인 것으로 나타났다. 처리장 별로 총 소요비용을 비교해보면, 상현처리장-태광CC 시설이 가장 높은 비용이 소요되고, 동부처리장-은화삼CC 시설이 가장 비용이 낮은 것을 알 수 있다. 동부처리장-은화삼CC의 경우는 계획공급량이 적고 송수 거리가 짧기 때문인 것으로 분석된다.

Table 8. Pump design power and 30-yr operation cost

WWTP	Golf club	Pump design power (kw)		30-yr operation cost (10 ³ won)	
		24 hour operation	Off-peak operation	24 hour operation	Off-peak operation
Sanghyun	Taekwang CC	25.5	55.6	399,485	335,765
Gugal	Suwon CC	10.3	29.4	288,852	310,151
Giheung	Namboo CC	14.3	29.6	219,912	174,588
Namsa	Plaza CC	21.6	51.7	336,719	310,667
Suji	Hansung CC	21.0	48.2	329,286	286,889
Cheon-ri	Haesolia CC	13.9	39.4	215,337	232,818
	Hwasan CC	15.1	36.2	240,922	220,602
Dongbu	Eunhwasam CC	5.9	13.9	99,376	83,974

Table 9. Reclaimed water treatment cost for 30 years

WWTP	Golf club	Designed supply (m ³ /d)	30-yr treatment cost (10 ³ won)
Sanghyun	Taekwang CC	2,000	6,604,355
Gugal	Suwon CC	2,000	6,604,355
Giheung	Namboo CC	1,000	3,302,178
Namsa	Plaza CC	1,500	4,953,267
Suji	Hansung CC	1,500	4,953,267
Cheon-ri	Haesolia CC	1,500	4,953,267
	Hwasan CC	1,000	3,302,178
Dongbu	Eunhwasam CC	400	1,320,871

Table 10. Total cost for reclaimed water supply

WWTP	Golf club	Total cost (10 ³ won)	
		24 hour operation	Off-peak operation
Sanghyun	Taekwang CC	8,214,805	8,863,939
Gugal	Suwon CC	7,487,580	8,001,863
Giheung	Nambo CC	4,284,333	4,673,612
Namsa	Plaza CC	6,525,899	7,178,811
Suji	Hansung CC	6,296,046	6,889,912
Cheon-ri	Haesolia CC	6,259,847	6,777,053
	Hwasan CC	5,736,509	7,118,495
Dongbu	Eunhwasam CC	1,623,478	1,740,381

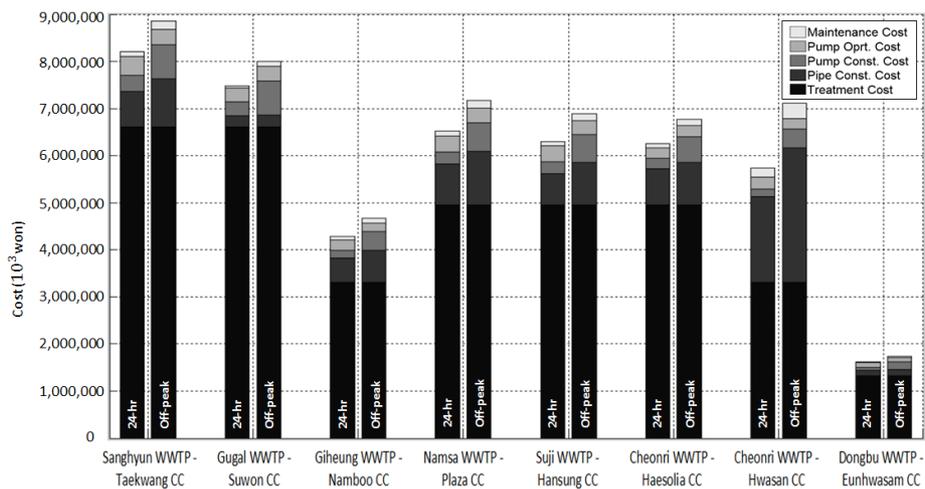


Fig. 3. Total cost comparison

4.2 편익산정

공급자(처리장) 입장에서의 편익은 하수재이용수를 공급함으로써 발생하는 판매수익으로 산정할 수 있다. 즉, 연간 재이용수 공급량(톤)에 판매요금 원단위(원/톤)을 곱하여 연간 재이용수 판매수익을 계산한 후, 현재가 분석을 통해 30년간 총 편익을 산정하였으며, Table 11에 시설물 별 산정결과를

정리하였다. 참고로, 하수 재이용수의 판매요금은 Kim (2015)이 정리한 국내 사례를 참고하여 톤당 550원을 적용하였다. 한편, 사용자(골프장) 입장에서 하수재이용수를 이용함으로써 얻을 수 있는 편익은 상수도 이용요금과 하수재이용수 이용요금의 차액으로 계산할 수 있다.

Table 11. Benefit estimates of supplier (unit: 10³ won)

WWTP (supplier)	Golf club (user)	Annual supply (m ³)	Annual benefit	30-yr benefit
Sanghyun	Taekwang CC	550,000	302,500	7,264,791
Gugal	Suwon CC	550,000	302,500	7,264,791
Giheung	Nambo CC	275,000	151,250	3,632,395
Namsa	Plaza CC	412,500	226,875	5,448,593
Suji	Hansung CC	412,500	226,875	5,448,593
Cheon-ri	Haesolia CC	412,500	226,875	5,448,593
	Hwasan CC	275,000	151,250	3,632,395
Dongbu	Eunhwasam CC	110,000	60,500	1,452,958

4.3 B/C (Benefit-Cost Ratio, 편익-비용 비율) 분석

공급자 입장에서의 편익은 하수재이용수 판매수익이며, 비용은 펌프 및 관로의 설치비용과 시설의 운영비용(시설물 유지보수비용, 재이용수생산비용, 전력비용 등)의 합이 된다. 30년 동안 시설을 운영하면서 발생하는 편익 및 비용을 각각 할인율(i) 1.5%, 3%, 5%를 적용하여 B/C Ratio를 계산한 결과를 Fig. 4에 정리하였다. 참고로 해당 결과는 24시간 운영방안을 적용한 결과를 나타내고 있으며, 할인율이 커질수록 B/C Ratio는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 천리처리장-화산CC 경우를 제외한 모든 시설에서 B/C가 0.75를 상회하는 값을 보이며, 구갈처리장-수원CC 경우 가장 높은 B/C Ratio를 보이거나 그 값이 1.0을 초과하지 못한다. 분석지점의 B/C Ratio가 1.0을 넘지 못하므로 사업성이 없다고 판단할 수 있으나, 해당 분석은 2차 편익 즉, 상수도 사용량 절감, 댐 건설비 절감, 댐 주변의 지원비 및 관리비 절감 등을 포함하지 않았음을 고려할 필요가 있다.

앞선 비용 산정 결과에서 재이용수의 처리비용이 전체 비용 중 가장 큰 비율을 차지하는 것을 확인하였다. 향후 하수 처리기술의 발달과 새로운 처리기법의 도입으로 인해 재이용수 처리비용이 감소할 경우를 가정하여 B/C 분석을 재실시하

였다. 즉, 톤당 500원으로 적용한 처리 비용이 각각 400원, 300원으로 감소할 경우 B/C Ratio를 계산하여 Fig. 5에 정리하였다 (할인율은 1.5% 적용). 처리비용이 감소함에 따라 B/C Ratio가 높아지는 것을 알 수 있으며, 처리단가가 톤당 400원으로 낮아질 경우, 천리처리장-화산CC를 제외한 모든 시설에서 B/C Ratio가 1.0에 근접하거나 초과함을 알 수 있다.

4.4 원금회수기간 산정

할인율이 1.5%, 재이용수 처리비용이 톤당 400원일 경우를 가정하여 원금회수기간을 산정하였다. 재이용수를 공급하여 발생하는 편익이 초기투자비용(펌프 및 관로의 설치비용)과 운영비용(하수 처리비용, 전력비용 등)의 합을 초과하는 운영연수를 계산하여 산정하였으며, 결과를 Table 12에 정리하였다. B/C Ratio가 높은 지점일수록 원금회수기간이 짧은 것을 알 수 있으며, 구갈처리장-수원CC의 경우 약 8년이 경과된 후 원금회수가 가능한 것으로 분석되었다. 반면, 천리처리장-화산CC의 경우 B/C Ratio가 매우 낮아 원금회수가 불가능한 것으로 분석되었다. 두 지점을 제외한 다른 지점의 경우 20~32년 기간 내에 원금회수가 가능한 것으로 분석되었다.

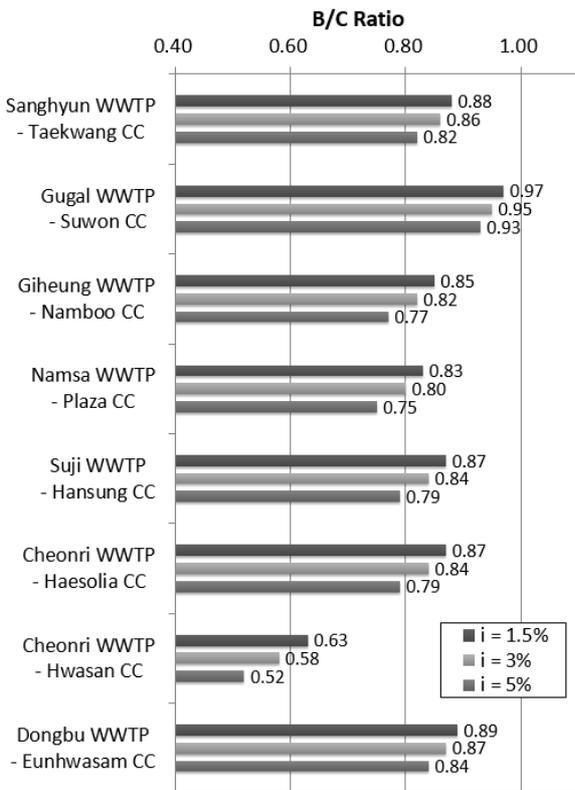


Fig. 4. B/C Ratio (discount rate of 1.5, 3 and 5%)

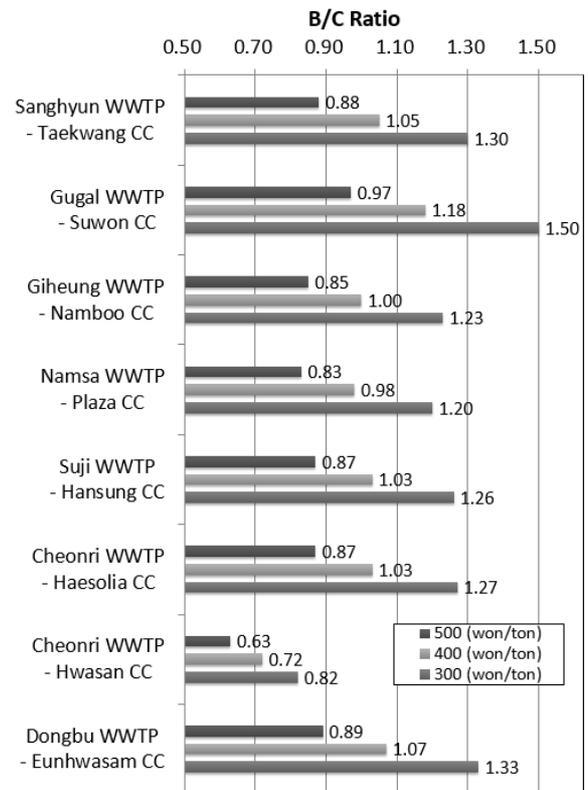


Fig. 5. B/C Ratio (treatment cost of 500, 400, and 300 won/ton)

Table 12. Payback period estimation

WWTP	Golf club	B/C Ratio (30-yr operation)	Payback period (year)
Sanghyun	Taekwang CC	1.05	20
Gugal	Suwon CC	1.18	8
Giheung	Nambo CC	1.00	29
Namsa	Plaza CC	0.98	32
Suji	Hansung CC	1.03	24
Cheon-ri	Haesolia CC	1.03	24
	Hwasan CC	0.72	N/A
Dongbu	Eunhwassam CC	1.07	18

5. 결론

물 재이용에 대한 논의와 요구는 지속적으로 제기되었지만, 실제 국내 적용사례는 많지 않은 것이 현실이다. 빗물이용, 중수도재이용, 하수처리수 재이용 등 국내에서 적용 가능한 물 재이용 방안 중에서 연중 발생유량이 일정하고 가용수량이 많은 하수처리수 재이용수를 활용하는 것이 경제적인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 용인시 소재 골프장에 조경용수로 하수 재이용수를 공급하는 방안을 제시하였으며, 이 과정에서 발생하는 비용 및 편익을 공급자(처리장)의 입장에서 추정하였다. 용인시 관내 7곳의 하수처리장과 처리장 인근에 위치한 8곳의 골프장을 대상으로 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 재이용수를 24시간 일정하게 공급하는 방안과 경부하 시간에만 공급하는 방안을 비교한 결과, 24시간 운영방안이 보다 경제적인 것으로 분석되었다. 하지만, 본 연구에서는 경제성만을 고려하였으며, 실제 적용을 위해서는 하수처리장의 재이용수 처리시간 및 용량, 골프장의 저류시설 규모 등을 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.
- 2) 재이용수 공급을 위한 비용은 펌프 및 관로의 설치비용과 시설의 운영비용(시설물유지보수비용, 재이용수처리비용, 전력비용)으로 구분할 수 있으며, 이중 재이용수의 처리비용이 가장 높은 비율을 차지하고 다음으로는 관로의 설치비용이 높게 산정되었다. 반대로, 편익은 재이용수의 공급량이 많을수록 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 처리장과 인접하고 표고차가 크지 않으며, 조경용수 사용량이 많은(일반적으로 규모가 큰) 골프장으로 재이용수를 공급하는 것이 경제적인임을 알 수 있다.
- 3) 할인율 1.5%, 처리비용 톤당 500원, 판매요금 톤당 550원을 적용한 결과, 분석대상인 7곳의 처리장은 모두 B/C

Ratio가 1.0에 미치지 못하는 것으로 계산되었다. 하지만, 이러한 결과는 재이용수 보급을 통한 2차 편익, 즉 상수도 사용량 절감, 댐 건설비 절감, 댐 주변의 지원비 및 관리비 절감 등을 고려하지 않은 점을 감안할 필요가 있으며, 향후 연구에서는 이러한 2차 편익과 더불어 사회·환경적 편익을 모두 고려할 필요가 있다.

- 4) 재이용수 공급시설을 운영하는데 있어 재이용수 처리비용이 가장 큰 비율을 차지하므로, 향후 처리기술의 발달과 새로운 처리기법의 도입으로 재이용수의 처리비용을 절감할 수 있다면 재이용수 공급시설의 사업성은 지속적으로 향상될 것으로 판단된다. 실제로 처리비용을 톤당 400원으로 가정할 경우 대부분의 지점에서 B/C Ratio가 1.0을 상회하는 것을 확인하였으며, 원금회수기간의 경우 8~32년으로 산정되었다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단사이언스·교육허브개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2017M3C1A6075016). 이에 감사드립니다.

References

- Choi, S. (2003). "Recent water conservation practices in U.S." *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol. 11, No. 1, pp. 105-126.
- Chung, G., Kim, T., Lee, J., and Kim, J. (2010). "Optimization of water reuse system under uncertainty." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 2, pp. 131-138.

- Jung, Y., and Lee, E. (2015). "Water reuse operation cases and development ways." *Journal of Water Policy and Economy*, Vol. 27, pp. 31-44.
- Kim, J., Moon, S., and Park, Y. (2009). "Reuse methods of treated sewage for securing water resource in Busan." *Proceedings of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, pp. 1232-1237.
- Kim, K. (2015). *Service report of cost estimating for rating of reclaimed water in Sejong-si*. Korea Waterworks Management Institute.
- Korea Electric Power Corporation (KEPCO) (2012). *Electric power statistics information system*.
- Ministry of Environment (2009). *Wastewater reuse guidebook*.
- Ministry of Environment (2011). *Promotion of and support for water reuse act*.
- Park, H., Kim, C., and Han, M. (2014). "Determinant factor analysis for the spread of water reuse." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 36, No. 4, pp. 271-276.
- Water supply office of Yongin-si (2017). <https://water.yongin.go.kr/water/index.do>.