



최근(2008-2019년) 하수도통계 자료 분석 기반 국내 하수재이용량 예측

Recent(2008-2019) trend and expectations in future of the water reuse capacity based on the statistics of sewerage in Republic of Korea

마정혁^{1,2}, 정성필^{1,3,*}
Jeong-Hyeok Ma^{1,2}, Seongpil Jeong^{1,3,*}

¹한국과학기술연구원 물자원순환연구단, ²서울과학기술대학교 건설시스템공학과,

³과학기술연합대학원대학교 한국과학기술연구원 스쿨 에너지-환경 융합공학과

¹Water Cycle Research Center, Korea Institute of Science and Technology

²Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

³Division of Energy & Environment Technology, KIST-school, Korea University of Science and Technology

ABSTRACT

Due to the global climate change, Korean peninsula is has been experiencing flooding and drought severely. It is hard difficult to manage water resources sustainably, because due to intensive precipitation in short periods and severe drought has increased in Korea. Reused water from the wastewater treatment plant (WWTP) could be a sustainable and an alternative water source near the urban areas. In order to understand the patterns of water reuse in Korea, annual water reuses data according to the times and regional governments were investigated from 2008 to 2019. The reused water from WWTP in Korea has been mainly used for river maintenance flow and industrial use, while agricultural use of water reuse has decreased with time. Metropolitan cities in Korea such as Seoul, Busan, Daegu, Ulsan, and Incheon have been mainly used reused reusing water for river maintenance flow. Industrial water reuse has been limitedly applied recently for the planned industrial districts in Pohang, Gumi, Paju, and Asan. By using the collected annual water reuse data

Received 21 October 2021, revised 30 November 2021, accepted 10 December 2021.

*Corresponding author: Seongpil Jeong (E-mail: spjeong@kist.re.kr)

• 마정혁 (학부연구생) / Jeong-Hyeok Ma (Research Student)

서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792
5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Republic of Korea
서울시 노원구 공릉로 232, 01811
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Republic of Korea

• 정성필 (책임연구원/부교수) / Seongpil Jeong (Principal Research Scientist/Associate Professor)

서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792
5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Republic of Korea
서울시 노원구 공릉로 232, 01811
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

pp. 379-387
pp. 389-403
pp. 405-415
pp. 417-424
pp. 425-436
pp. 437-454
pp. 455-463
pp. 465-476
pp. 477-487
pp. 489-496
pp. 497-505
pp. 507-516
pp. 517-531
pp. 533-544

from the domestic sewerage statistics of sewerage, the optimistic and pessimistic future estimations of for future annual water reuse were suggested from 2020 to 2040 on a five year interval for every five years.

Key words: Water reuse, Industrial water, River maintenance flow, Statistics of sewerage, Water scarcity

주제어: 하수재이용, 공업용수, 하천유지용수, 하수도 통계, 물 부족

1. 서 론

전 세계적으로 기후변화, 인구증가, 산업화, 도시화 등이 발생하여 물 부족 문제가 발생하고 있다. 특히, 우리나라의 경우 생활용수 목적의 취수량(6,960 million m³/yr (Mm³/yr)) 기준으로 보면 전통 수자원인 지표수(강(3,470 Mm³/yr (49.9%), 댐(3,260 Mm³/yr (46.8%)) 및 호수 등)에서의 취수에 주로(96.7%) 의존하고 있으며, 지하수 활용(160 Mm³/yr (2.3%))은 매우 적어(MOE, 2020a), 갈수기에 발생하는 가뭄과 같은 자연재해에 취약한 실정이다. 이에 지속적으로 대체수자원으로 활용될 수 있는 수자원 확보 방안들(빗물, 중수, 하수재이용, 해수담수화 등)에 대한 연구와 관심이 지속되고 있다. 빗물 회수 기술(Rainwater harvesting)의 경우, 호주 도심지와 농촌지역에 적용되어 물 사용량의 9%와 63%를 대체하고 있다 (Khan et al., 2021). 중수도 기술(Greywater)의 경우, 건물 내 화장실 용수, 관개용수 및 조경용수 등의 형태로 사용되고 있으며, LCA 분석 결과 중수도 사용 시 전반적으로 환경영향이 감소하는 것으로 나타났다 (Yoonus et al., 2020). 하수재이용 기술(Water reuse)의 경우, 아시아 48개국의 하수처리 및 하수재이용 사이의 관계를 파악한 결과, GDP가 높고, 하수처리 기술이 성숙되어 있으며, 물 부족이 심할수록 재이용 정도가 높은 것으로 파악되었다 (Liao et al., 2021). 해수담수화 기술(Seawater desalination)의 경우, 미국, 중국, 호주, 이스라엘, 싱가포르와 같은 선진국에서 대규모 플랜트를 운영하고 있으며, 베트남 메콩델타 지역의 경우, 최근 기후변화로 인한 해수면 상승으로 물 수요가 감소하여 식수 생산을 위한 담수화 생산 수요가 높다. 최근 국내 도서지역에서 운영되는 담수화 플랜트의 운영비 절감 연구가 추진된 바 있다 (Chu et al., 2021).

우리나라는 최근 기후변화에 따른 강우량 변동이 심각하게 발생하고 있으며, 가뭄 발생에 따른 용수 부족이 빈번하게 발생하고 있다. 최근 연구에서 기후변화에 따라 서울시의 강우량이 26.5%까지 증가될 수

있다는 논문이 발표된 바 있으며(Yoon et al., 2021), 기후변화에 따라 극한 강우 발생이 증가할 것으로 예측된 바 있다 (Lee et al., 2016). 그리고 국내 도서지역과 해안지역에서 가뭄 시, 물 부족 시 담수화 기술을 이용한 대응 연구도 추진된 바 있으며(Yang et al., 2020; Lee et al., 2021; Nguyen et al., 2021), 국내 도시별 물사용 분석 시 적용된 대체수자원을 고려한 연구도 추진된 바 있다 (Jeong and Park, 2020). 대용량의 대체수자원이 지속적으로 필요한 경우, 중소도시 이상의 규모에 설치되어 있는 하수처리장에서 발생하는 이차처리수를 대체수자원으로 활용할 수 있다 (Hong et al., 2010). 대체수자원 중 하수재이용이 특별히 주목 받는 이유는 1) 하수처리 기술발전에 따른 비용 감소와 2) 방류 수질 규제 강화 때문이다 (Cho et al., 2013).

미국 캘리포니아 등과 싱가포르와 같이 물 부족 지역들의 경우, 물 부족 문제를 해결하기 위하여, 대체수자원을 수자원으로 적극 활용하고 있다. 특히, 미국, 플로리다, 캘리포니아, 텍사스, 아리조나 주의 경우, 각각 15,421 Mm³/yr, 1,898 Mm³/yr, 620 Mm³/yr, 511 Mm³/yr의 수자원을 하수재이용으로 공급하고 있다 (Water online, 2016). 싱가포르의 경우 전체 용수 공급량의 40% 정도를 하수재이용으로 공급하고 있다 (Water World, 2017). 우리나라의 경우 2019년 기준으로 1,263 Mm³/yr 정도의 하수재이용을 하고 있으며, 이는 국내 전체 하수처리수의 16.1%정도를 재이용하고 있는 것이다 (MOE, 2020b).

하수재이용의 시장 동향으로는 2007년 0.1백억 달러에서 연평균 18%의 성장세를 보여 2025년 2.1백억 달러로 20배 이상 급증할 것으로 전망되고 있다 (Kwon, 2015). 최근(2016-2025) 전 세계에 설치되거나 설치 예정인 하수재이용 시설 규모를 보면 매년 약 2,500~4,400 Mm³/yr 정도 증가하는 것으로 나타나 있으며, 2020년 기준 누적 설치 총량은 전 세계에서 동아시아지역이 약 21,000 Mm³/yr으로 가장 컸으며, 다음은 북미(18,000 Mm³/yr), 중동(8,400 Mm³/yr), 서유럽



(5,100 Mm³/yr) 등 순이었다 (Birch and Weaver, 2020). 중국이 하수재이용 분야에서 가장 큰 시장이었으며, 미국 이외에 인도, 스페인, 호주 등의 국가들도 재이용시설을 많이 보유하고 있다. 따라서, 국내 물 산업 발달 및 세계 시장에서의 경쟁력 확보 등을 위하여 국내 하수재이용 기술의 개발 및 정책적 지원이 요구된다.

우리나라는 2001년에 하수처리수 재이용을 의무화한 이후, 2005년에 하수처리수 재이용 촉진을 위한 계획을 수립하였으며, 2008년부터 하수도통계에 하수재이용량을 기록하기 시작하였다. 또한, 2010년 하수처리수의 재이용, 빗물 이용, 중수도를 등 법률을 통합한 물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률이 제정되었으며, 2011년에는 물재이용 기본계획이 수립된 바 있다 (Kim et al., 2013). 우리나라에서도 최근 대규모 공업용수 공급을 위한 하수재이용 시설들이 설치되어 운영되고 있으나, 광역자치단체 수준까지의 하수재이용 상세 연구가 진행된 바는 아직 없다.

이 논문에서는 대체수자원에 대한 중요성이 높아짐에 따라 하수도 통계 자료를 바탕으로, 국내 하수재이용의 개발 특징을 분석하고자 한다. 국내 하수재이용 목표와 현재 하수재이용 용량을 비교하고, 연도별, 사용 목적별, 지역별 하수재이용량을 확인하고자 한다. 하수재이용량을 바탕으로 향후 국내 하수재이용량을 예측하고자 한다. 또한, water stress index를 기반으로 외국의 하수재이용량과 현재 및 향후 국내 하수재이용량과 비교하여 분석하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 국내 하수재이용 자료 조사

하수도 통계(2008, 2009, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2019) 자료(MOE, 2009; MOE, 2010; MOE, 2011; MOE, MOE, 2013; MOE, 2015; MOE, 2019; MOE 2020b)를 국가하수도정보시스템(National sewer information system)에서 확보하였다. 2008년 자료의 경우, 전국 단위의 조사량만 제시되어 있어, 2009년의 자료를 추가 확보하였으며, 2020년의 하수도 통계가 발간되지 않아 2019년의 자료를 추가하였다. 각 하수도 통계 자료에서 하수처리량(Annual effluent of WWTP, Q_{EWW}), 하수재이용량(Annual water reuse of WWTP, Q_{RWW}), 처리

수재이용율(Water reuse ratio, WRR_{EWW}), 장내용수(Water reuse in WWTP), 장외용수(Water reuse outside of WWTP: 공업용수(Industrial use), 농업용수(Agricultural use), 하천유지용수(River maintenance flow), 기타용수(Other use))를 자료로 정리하였다. 특히, 장외용수 중 기타용수의 경우, 하수도통계자료 중 다음의 항목들을 합하여 표기하였다(장외중수도 및 장외 기타용수(2008-2016년), 청소화장실 용수, 세척살수 용수, 조경용수 및 친수용수(2018-2019년)).

2.2 국내 하수재이용 정책 목표와 달성도 비교 분석

국내 하수재이용 정책에 따라 수립된 연도별(2008년, 2012년, 2016년 및 2020년), 용도별(장내용수 및 장외용수(공업용수, 농업용수, 하천유지용수, 기타용수)) 하수재이용량 정책 목표(Kwon, 2015)와 비교하기 위하여 연도별, 용도별 하수재이용량을 하수도통계에서 확보하였다. 2020년 달성도의 경우 2020년 하수도 통계가 아직 발간되지 않았기 때문에, 2019년 하수도 통계의 하수재이용량을 이용하였다.

2.3 광역자치단체별 하수재이용 현황 분석

하수도 통계 자료를 바탕으로 광역자치단체별 현재까지의 하수재이용 실태 파악하였다. 광역자치단체에는 8개의 시(서울특별시, 부산광역시, 대구광역시, 인천광역시, 광주광역시, 대전광역시, 울산광역시, 세종특별자치시)와 9개의 도(경기도, 강원도, 충청북도, 충청남도, 전라북도, 전라남도, 경상북도, 경상남도, 제주특별자치도)가 포함된다.

2.4 국내 하수재이용량 예측

확보된 2008-2019년 하수도 통계 자료를 바탕으로 하수처리량과 하수재이용량(상세 내용 포함)을 2020, 2025, 2030, 2035, 2040년까지 5년 주기로 다음의 두 가지 방식으로 예측하였다. 1) 하수재이용 용도별로 구분하여 회귀분석을 수행하여 예측식을 도출하였다. 2) 2.3에 언급된 광역자치단체별 하수재이용 현황 분석을 바탕으로 예측을 수행하였다. 처리수 재이용율의 경우, 다음 식(Eq. (1))을 이용하여 계산하였다.

$$WRR_{EWW}(\%) = \frac{Q_{RWW}}{Q_{EWW}} \times 100 \quad (1)$$

pp. 379-387
pp. 389-403
pp. 405-415
pp. 417-424
pp. 425-436
pp. 437-454
pp. 455-463
pp. 465-476
pp. 477-487
pp. 489-496
pp. 497-505
pp. 507-516
pp. 517-531
pp. 533-544

2.5 전 세계 하수재이용량, water stress index 자료 조사 및 물 사용 특성 분석

전 세계 하수재이용 현황을 비교하기 위하여 13개국(이스라엘, 스페인, 아랍에미리트, 이탈리아, 중국, 미국, 그리스, 한국, 파키스탄, 일본, 싱가포르, 네덜란드, 독일)의 water stress index(WRI, 2021) 및 연간 하수재이용량 결과를 확보하였다. 하수재이용량의 경우 연구 대상이 되는 13개 국가의 동일 연도 자료를 구하는데 어려움이 있어, 이스라엘, 아랍에미리트, 파키스탄, 일본, 싱가포르, 한국의 경우 2020년(Liao et al., 2021), 스페인의 경우 2019년(Jodar-Abellan et al., 2019), 미국의 경우 2015년(Wateruse, 2015), 이탈리아, 그리스, 네덜란드, 독일의 경우에는 2000년(Sanz and Gawlik, 2015)의 자료를 사용하였다. 추가 분석을 위하여 다음의 식(Eq. (2-3))을 이용하여 1인당 연간 하수재이용량(Annual water reuse per capita, Q_{RC})과 담수 총량 기반의 물재이용율(Water reuse ratio including freshwater withdrawals, WRR_{TW})을 계산하였다.

$$Q_{RC} = \frac{Q_{RWW}}{Capita} \quad (2)$$

$$WRR_{TW}(\%) = \frac{Q_{RWW}}{Q_{TW}} \times 100 = \frac{Q_{RWW}}{Q_{RWW} + Q_{FW}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, 수식에 필요한 각 국가별 인구 자료의 경우 국가통계포털(KOSIS, 2021)에서 확보하였으며, 연간 담수 총량 자료(Annual freshwater withdrawals, Q_{FW})의 경우 Our world in data의 2017년 자료(Our world in data, 2017)를 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 국내 하수재이용량 목표 및 달성도

3.1.1 연도 및 용도별 하수재이용량 비교

Fig. 1(a)-(c)에 국내 연도 및 용도별 하수재이용량 목표와 달성도를 나타내었다. Fig. 1(a)에 나타난 것처럼, 연도별 하수재이용량의 경우, 2008년을 제외하고 모두 목표에 미달하고 있음을 알 수 있다. 하수재이용량의 경우, 장내용수량(Fig. 1(b))과 장외용수량(Fig. 1(c))의 합계로 구성되어 있으며, 장내용수의 경우 목표를 초과 달성하였으며, 장외용수의 경우 목표에 미달한 것으로 나타났다.

3.1.2 연도별 장외용수 하수재이용량 비교

장외용수 중 어떤 세부 항목에서 미달했는지 확인하기 위하여, Fig. 2(a)-(b)에 용도별 장외용수량($Q_{RWW}(O)$) 목표값과 달성값을 나타내었다. 장외용수의 목표 값과 달성값 모두 시간이 지남에 따라 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 장외용수를 구성하는 네가지 용수(공업용수, 농업용수, 하천유지용수, 기타용수) 모두에서 미달하는 결과가 나타났다. 장외용수량 목표값(Fig. 2(a))의 경우, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수, 기타 용수 모두 증가시킬 것을 계획하였으나, 장외용수량 달성값(Fig. 2(b))을 보면, 공업용수와 하천유지용수의 경우 증가하였으나, 농업용수의 경우 감소하였으며, 기타 용수의 경우 비슷하게 유지되었다.

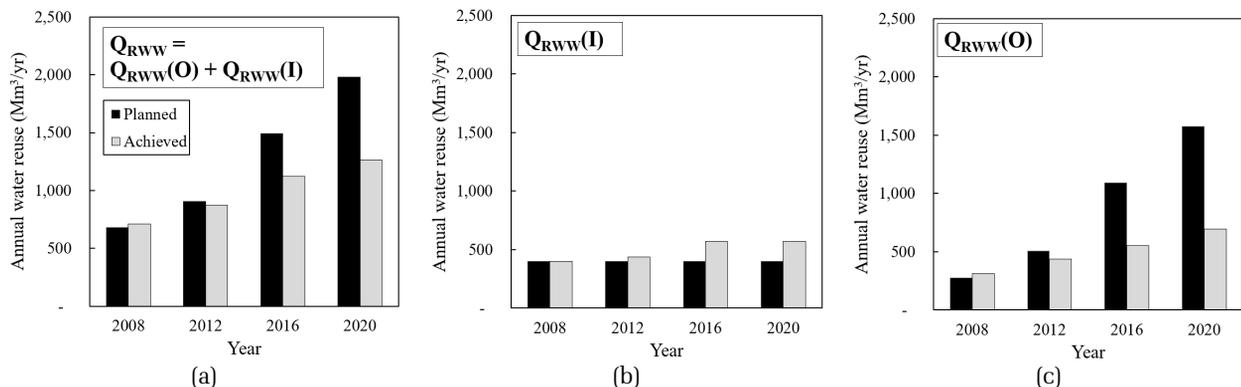


Fig. 1. Planned and achieved annual water reuses (Q_{RWW}) according to years (a: annual water reuse, b: annual water reuse in the WWTP ($Q_{RWW}(I)$), c: annual water reuse outside of the WWTP ($Q_{RWW}(O)$)).

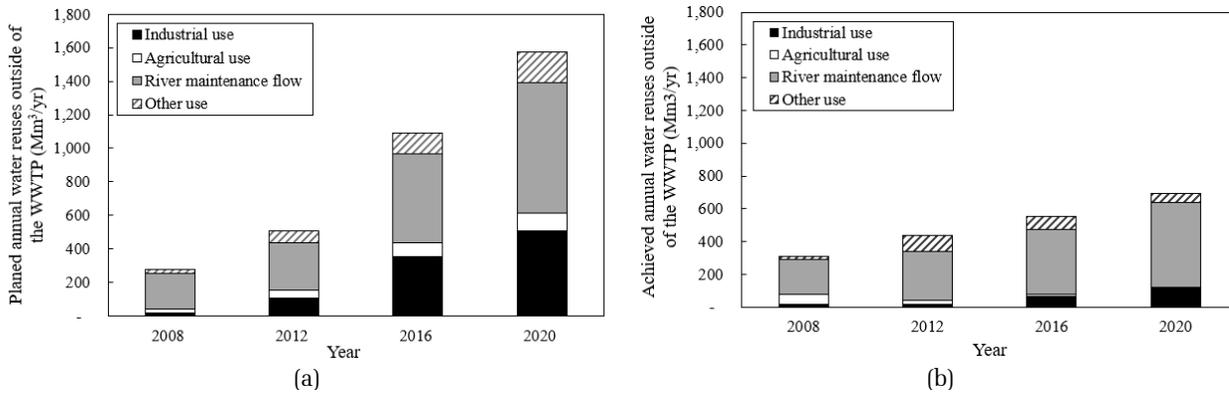


Fig. 2. Planned (a) and achieved (b) annual water reuses outside of the WWTP ($Q_{RWW}(O)$) according to the detailed water uses.

3.2 국내 하수재이용량 예측

3.2.1 회귀분석 기반 국내 하수재이용량 예측

장외용수량(공업용수량(Fig. 3(a1)), 농업용수량(Fig. 3(a2)), 하천유지용수량(Fig. 3(a3)), 기타용수량(Fig. 3(a4))과 장내용수량(Fig. 3(b)), 및 하수처리량(Fig. 3(c))의 연도별 증감 경향을 Fig. 3(a)-(c)에 나타내었다. 3.1장에서 분석된 것처럼, 장외용수량($Q_{RWW}(O)$, Fig. 3(a1-a4)의 합계)과 장내용수량($Q_{RWW}(I)$, Fig. 3(b)) 모두 시간이 지남에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, 장외용수의 용도별 경향의 경우, 시간이 지남에 따라 공업용수와 하천유지용수의 경우 증가하였으나, 농업용수의 경우 감소하였으며, 기타 용수의 경우 비슷하게 유지되었다. 따라서, 각 그림에 표기된 회귀식을 이용하

여 연도별 예측량을 계산하였다. 예를 들어, Fig. 3(a1)의 공업용수량의 경우, x축의 연도와 y축의 연도별 공업용수량 자료를 엑셀의 분산형 그래프를 이용하여 작성하였으며, 분산형 그래프에 나타난 자료의 추세선 분석을 통하여 추세식을 도출하였다. 도출된 추세식에 예측하고자 하는 연도값을 입력하여 해당 연도의 공업용수량을 확보하였다. 기타용수의 경우는 2008-2019년의 평균값으로 일정하게 유지된다고 가정하였으며, 하수처리량의 경우는 최근 3년간의 값을 평균한 하수처리량이 일정하게 유지될 것으로 가정하였다. 이 회귀식 및 경향 파악 기반의 예측의 경우, 하수재이용량 중 가장 많은 부분을 차지하는 장내용수량과 하천유지용수량이 지속적으로 증가하는 경향을 이용하였으며 공업용수량이 최근 기하급수적인 증가를 보이고 있기 때문에 국내 하

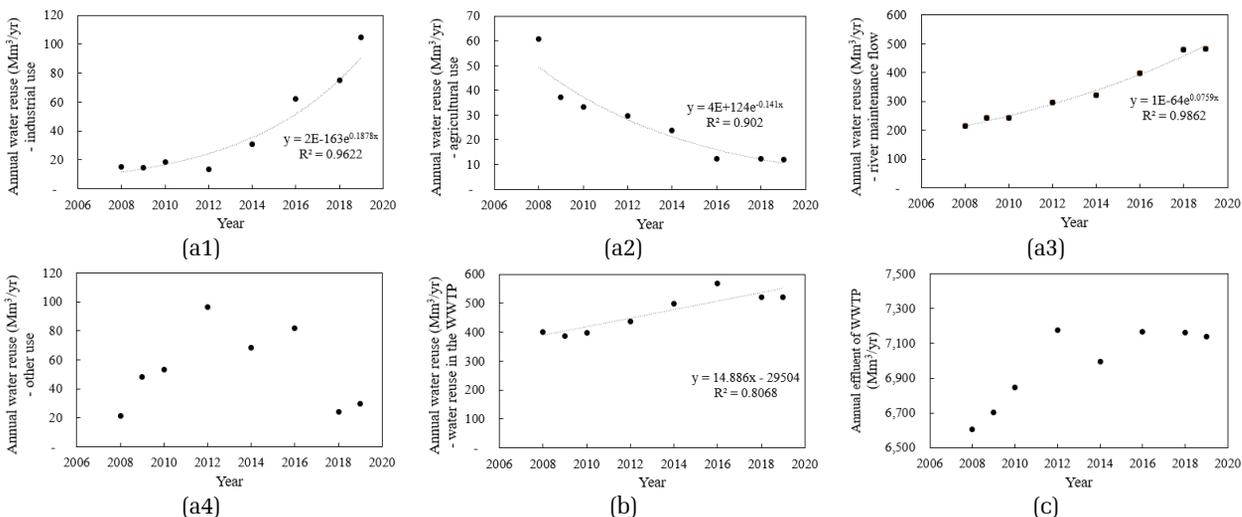


Fig. 3. Variations of water amounts with time (a1: industrial use, a2: agricultural use, a3: river maintenance flow, a4: other uses, and b: water reuse in WWTP, c: annual effluent of WWTP).

pp. 379-387
pp. 389-403
pp. 405-415
pp. 417-424
pp. 425-436
pp. 437-454
pp. 455-463
pp. 465-476
pp. 477-487
pp. 489-496
pp. 497-505
pp. 507-516
pp. 517-531
pp. 533-544

수재이용량이 최대한 증가될 수 있는 희망적(optimistic) 결과가 도출될 것으로 판단된다.

위의 예측식들과 평균값을 바탕으로 하여 국내 하수재이용량을 2040년까지 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 하수재이용율(WRR_{EW})의 경우, 2025년에 24.4%, 2030년에 36.6%, 2035년에 60.9%, 2040년에 113.6%의 달성 가능성이 있는 것으로 예측되었다. 국가 물 재이용 총 목표량은 2,570 Mm³/yr로 빗물, 중수도 및 폐수재이용을 제외하고 하수재이용으로 1,977 Mm³/yr을 달성하는 것으로 되어 있다 (Ahn, 2011). 2025년(1,749 Mm³/yr)과 2030년(2,622 Mm³/yr)의 하수재이용량 예측량을 기반으로 보면, 2025-2030년 사이에 국가 하수재이용량 목표를 달성할 수 있을 것으로 예측되었다. 하지만, 2020년 이후의 국가 하수재이용량의 목표가 제시되어 있지 않기 때문에, 2030년 이후의 예측된 하수재이용량과 비교하기는 어렵다.

위의 예측과 관련하여, 국내에서 하수재이용량의 증대를 기대할 수 있는 관련 자료를 조사하였다. 우리나라의 2차(2021-2030년) 물재이용 기본계획의 정책 방향에 하수처리수 재이용 사업을 기후변화 및 물산업 발전을 위하여 지속 가능한 안정적 수자원으로 추진하고자 하고 있으며, 용수 수급 계획과의 연계 및 하수도 계획에서 물 재이용 역할을 강화하고 국가 및 민간 기반 투자사업개발을 활성화하는 것으로 제시되어 있다 (Ahn, 2020). 아울러, 보령화력(국가 재정 사업), 오산산단(국가 재정 사업), 천안산단(민간투자사업) 등에도 2020년까지 재이용량 기준 각각 12,000, 3,000, 3,000 m³/일의 용량의 공업용수를 확보하는

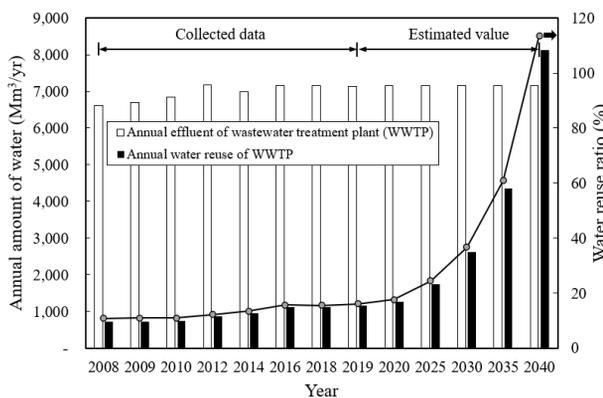


Fig. 4. Summary and optimistic expectation of annual water reuses, annual effluent of WWTP, and water reuse ratio in Korea (2008-2040).

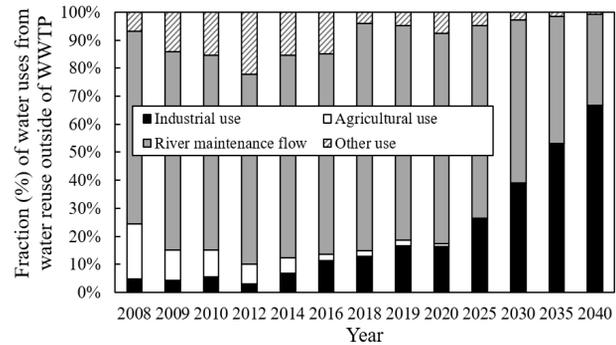


Fig. 5. Summary and optimistic expectation of water use fractions from water reuse in WWTP (2008-2040).

시설이 준공 예정으로 있다 (Ahn, 2020). 최근 수원시에서 세계 최대규모의 하수재이용 시설을 민간투자사업으로 추진하고 있는 등 하수재이용량의 증가가 기대된다고 할 수 있다 (Bridgenews, 2019).

위의 예측 결과에 따라, 연도가 증가함에 따라 장외용수량의 용도별 예측값의 비율을 Fig. 5에 나타내었다. 2008년을 시작으로 하천유지용수의 비율이 전체 장외용수 중 70~80% 정도를 차지하며 2020년 이후부터는 감소하는 추세를 보여준다. 지금과 같은 추세로 하수재이용량이 증가하였을 때, 2025년부터 공업용수가 장외용수량의 약 25% 이상을 차지하게 되며, 2035년부터 공업용수가 장외용수량의 약 50% 이상을 차지하는 것으로 예상되었다. 공업용수와 하천유지용수가 지속 증가한다는 가정을 하였을 때, 농업용수와 기타용수의 비율은 거의 없을 것으로 나타났다.

3.2.2 지역별 자료 기반 국내 하수재이용량 예측

앞 장에서 공업용수와 하천유지용수가 우리나라의 주요한 하수재이용 대상으로 파악되었다. 따라서, 현재 추세대로 공업용수와 하천유지용수가 지속적으로 증가할 수 있는지를 확인하기 위하여, 광역자치단체별 공업용수와 하천유지용수의 변화 추이를 파악해보았다.

전국에서 하수재이용을 하여 공업용수로 공급하는 광역자치단체는 경북, 경기, 충남, 인천, 경남, 전북, 울산, 광주, 강원, 충북, 전남이었으며, Fig. 6에 사용량이 많은 경북, 경기, 충남, 인천을 제외한 나머지 지역의 경우 기타로 나타내었다. 기타 지역의 경우 2009년에는 전체 공업용수 재이용량 중 12.2%를 차지하였으나, 2010년에는 3.1%로 감소하였으며, 2014년 이후에는



pp. 379-387
pp. 389-403
pp. 405-415
pp. 417-424
pp. 425-436
pp. 437-454
pp. 455-463
pp. 465-476
pp. 477-487
pp. 489-496
pp. 497-505
pp. 507-516
pp. 517-531
pp. 533-544

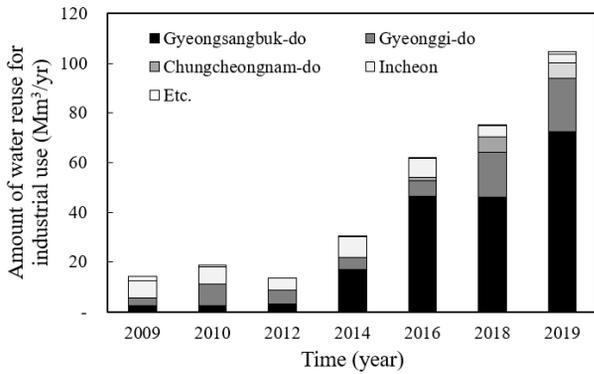


Fig. 6. Annual water reuse for industrial use according to the regional governments in Korea.

1% 이하의 용량을 차지하였다. 따라서, 경북, 경기, 인천, 충남에서 대부분의 하수재이용 기반 공업용수를 활용하고 있다고 볼 수 있다. 또한, 인천을 제외한 대도시(서울, 부산, 대구, 대전) 및 세종시와 제주에서는 해수재이용 기반 공업용수 활용이 전혀 없었다. 이는 대도시 지역이 하수가 많이 발생하지만 공업용수의 수요적인 공업단지가 없기 때문에 공업용수로의 재이용에 부적합한 것으로 보인다. 세종시와 제주의 경우도 공업용수를 공급받을 공업단지가 없어 같은 상황으로 판단된다.

대도시 중 유일하게 공업용수로 하수재이용수를 사용하고 있던 인천광역시의 경우, 지속적으로 그 사용량이 감소하고 있다. 그에 비해 2014년 이후, 경북, 경기, 충남 지역에서 하수재이용수를 공업용수로 활용하는 양이 급증하였다. 이것은 경북의 경우, 포항 및 구미에 10만 m³/day 및 9만 m³/day 규모의 하수재이용 플랜트가 설치되었기 때문이다. 경기의 경우, 최근 파주시에 하수재이용 시설이 도입된 바 있다. 또한, 충남의 경우, 아산신도시에 대규모 하수재이용 시설이 설치 운영됨에 따라 공업용수로 활용하게 되었다. 공업용수로 재이용수를 활용하는 특징을 살펴보면, 하수재이용 플랜트의 용량이 결정되어 있기 때문에 한번 설치되고 나면, 그만큼의 용량을 지속 생산하는 점이 있었다. 따라서, 공업용수 재이용량의 경우, 점진적으로 증가할 수 있는 것이 아니라 새로운 하수재이용 플랜트를 건설하거나 기존 공업용수 공급 시설을 하수재이용 시설로 대체하면서 계단식 성장을 하는 특징이 나타났다.

다음으로 국내 광역자치단체별 하수재이용수를 하천유지용수로 활용 현황을 Fig. 7에 정리하였다. 대구,

인천, 부산의 경우, 2009년부터 비슷한 정도의 많은 양을 하천유지용수로 활용해 오고 있으며, 기타 지자체들의 연도별 하천유지용수의 총합 또한 2009년의 하천유지용수량과 비교하였을 때, 크게 변화하지 않았다. 최근 하천유지용수 증가에 주요하게 관여한 지자체는 경기도, 서울특별시, 전라북도, 울산광역시였다. 서울특별시, 전라북도, 울산광역시는 하천유지용수를 활용하지 않았으나, 2014년 이후 하천유지용수를 활용하기 시작하였으며, 그 양은 연도별로 증가하지 않았다. 광역자치단체 중 유일하게 경기도의 경우 하천유지용수량이 지속적으로 증가하고 있다. 대전광역시, 세종시, 제주의 경우, 하천유지용수를 전혀 활용하지 않았다. 따라서, 하천유지용수를 증대하기 위한 방안으로는 아직 하천유지용수를 활용하지 않고 있는 지자체의 하천유지용수 활용 참여 또는 경기도의 지속적인 활용처 발굴일 것으로 판단된다.

이와 관련하여, 실제 각 지자체의 하수재이용 관련 정책을 살펴보았다. 경기도에서 많은 하수재이용 사업이 실제로 추진되고 있다. 수원시의 경우, 앞에서 한번 설명한 바와 같이 민간투자사업으로 세계 최대 규모의 하수재이용 사업을 추진 중에 있다 (Bridgenews, 2019). 또한, 경기도에서 2018년에 국비 286억원을 신청하여 파주시의 공업용수 공급을 추진한 바 있으며, 용인, 부천, 김포시에는 하천유지용수를 공급한 바 있다 (Joongdo, 2017). 대도시와 관련한 하수재이용 사업에는 서울특별시의 경우 2021년에 탄천물재생센터에 총인 처리 시설을 도입하여 향후 도로 등의 세척용수로 활용하고자 하는 계획이 있으며(Kuktoilbo, 2021), 부산광역시의 경우에도 스마트 워터시티 구축하여 하수재이용수를 세척수 또는 공원용수로 활용하고자 하고 있다 (Businesspost, 2020). 인천광역시에서는 2025년까지 한국중부발전에서 필요한 수자원의 70%를 하수재이용수로 활용하기 위한 로드맵을 수립하여 추진하고 있다 (News1, 2021). 울산광역시의 경우 2019년에 온산수질개선사업소의 하수처리수를 공업용수로 재이용하기 위한 사업을 추진한 바 있다 (Pressian, 2019). 즉, 경기도의 경우, 공업용수 및 하천유지용수 차원으로 하수재이용수를 활용하고자 하는 시도가 지속적으로 추진되고 있으며, 서울특별시와 부산광역시의 경우는 장외용수(기타)가 일부 증가될 수 있을 것으로 예상되며, 인천광역시와 울산광역시의 경우는 하수재이용수를 공업용수로 공급할 것으로 예상된다.

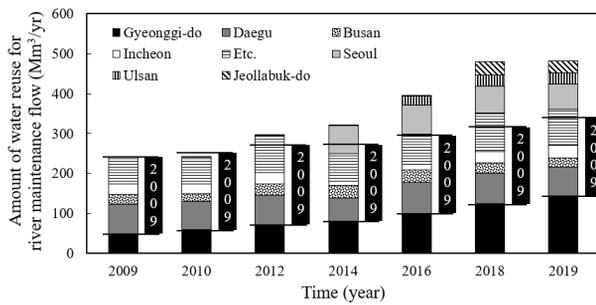


Fig. 7. Annual water reuse for river maintenance flow according to the regional governments in Korea.

국내 광역자치단체별 하수재이용 기반 공업용수량과 하천유지용수량 연도별 변화를 분석한 결과, 경기도에서의 하천유지용수량이 지속적으로 증가하는 것을 제외하면, 타지역에서는 하수재이용량이 증가하지 않으며, 하수재이용량이 결정되면, 해당 용량으로 고정됨을 알 수 있었다. 따라서, 광역자치단체별 결과를 바탕으로 국내 하수재이용량 중 공업용수는 더 이상 증가하지 않고, 하천유지용수의 경우 타지역의 증가는 없고 경기도만 지속적으로 증가하는 경우의 비관적인(pessimistic) 시나리오를 바탕으로 향후 하수재이용량 예측을 수행하여 보았다 (Fig. 8). 그 결과, 2040년까지 증가되었을 때 하수재이용율이 약 23% 정도에 도달할 수 있을 것으로 판단되며, 이 경우 국내 대부분의 하수재이용은 하천유지용수의 형태가 될 것으로 예측되었다 (Fig. 9).

국내 하수재이용량 증가와 관련하여 희망적인 시나리오(Fig. 4)와 부정적인 시나리오(Fig. 8)의 결과를 비교해 보면, 하수재이용 총량에서 큰 차이가 나타났다. 가장 큰 차이가 나타난 것은 최근 실제 하수도통계

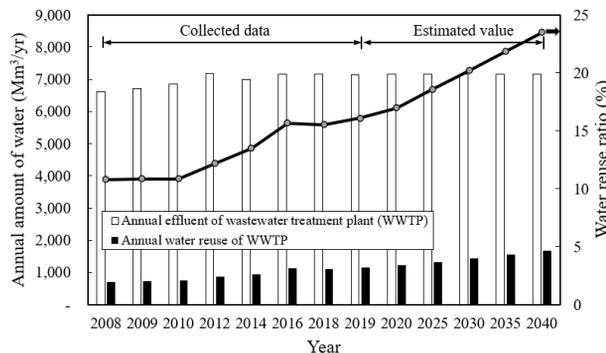


Fig. 8. Summary and pessimistic expectation of annual water reuses, annual effluent of WWTP, and water reuse ratio in Korea (2008-2040).

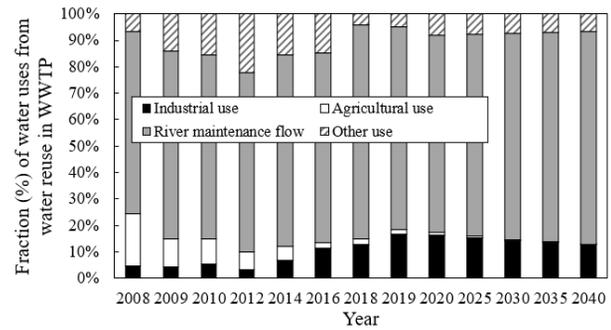


Fig. 9. Summary and pessimistic expectation of water use fractions from water reuse in WWTP (2008-2040).

자료에 나타난 것처럼 공업용수 하수재이용량이 기하급수적으로 증가하는 것으로 예측되었기 때문이다. 또한, 희망적인 시나리오 조건에서 장기간의 추세 예측 시 공업용수 하수재이용량이 타 하수재이용량에 비해 매우 증가하는 것으로 확인되었으나(Fig. 5), 부정적인 시나리오에서는 각 하수재이용량별 비율 변화가 거의 없었다 (Fig. 9). 앞서 언급한 바와 같이 공업용수로 활용가능한 하수재이용량을 지속 증대하고자 하는 정부 정책이 추진되고 있어, 하수재이용량이 점진적으로 계속 증가할 것으로 판단된다.

3.3 국외 하수재이용량 비교 분석

조사대상 13개국의 water stress index, 하수재이용량, 인구 1인당 하수재이용량, 담수 총량 기반 하수재이용량, 담수 총량에 대한 자료를 아래 Fig. 10(a)-(e)에 정리하였다. 각 그림에서 water stress index가 높은 국가부터 왼쪽부터 정렬하였으며, 아랍에미리트와 싱가포르의 수치는 같았다. Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이, 중국을 제외하고 타 국가들의 하수재이용량의 경우 비슷했으며, 그리스, 독일, 네덜란드의 하수재이용량이 상대적으로 낮은 값을 보였다. Fig. 10(c)에 나타난 인구별 하수재이용량의 경우, 미국, 중국, 한국, 일본, 파키스탄의 경우가 상대적으로 낮은 값을 보였다. Fig. 10(e)의 국가별 담수 총량을 기반으로 계산한 담수 총량 기반 하수재이용율(Fig. 10(d))의 경우, 싱가포르와 이스라엘이 약 40-48%의 높은 값을 보여 국가 수자원의 상당량을 하수재이용수로 충당하고 있음을 확인할 수 있었다. 아랍에미리트의 경우는 상대적으로 낮은 25% 정도의 담수총량 기반 하수재이용율을 나타내었으나, 아랍에미리트의 하수재이용량 자료가

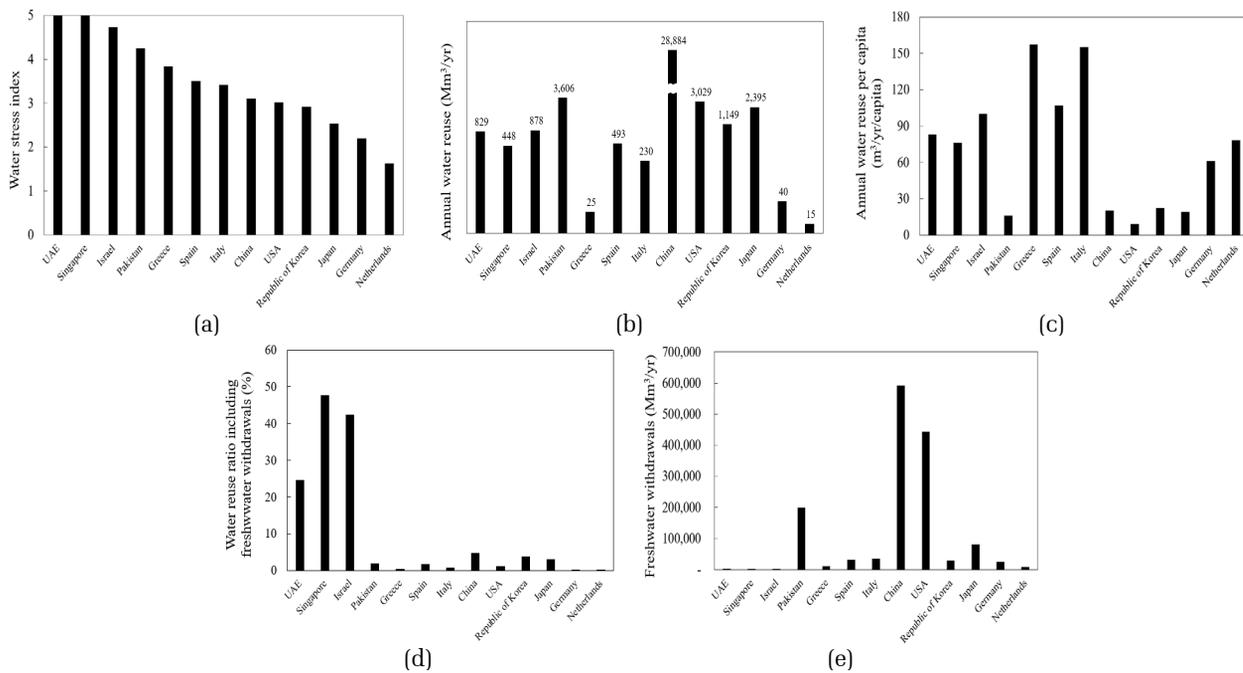


Fig. 10. Annual water reuse and water stress index for 13 countries (a:water stress, b:water reuse, c:water reuse per capita, d:water reuse ratio including freshwater withdrawals, e:freshwater withdrawals).

2000년 자료여서 상대적으로 낮은 것으로도 판단된다.

Fig. 10(b)-(d)의 결과를 비교하면, water stress index가 가장 높은 3개국(아랍에미레이트, 싱가포르, 이스라엘)의 경우, 담수총량 기반의 하수재이용율이 가장 높았다. 이는 국가의 담수원 부족의 상당부분을 하수재이용으로 충당하고 있는 것으로 보이며, 타 국가들과 명확한 차이를 보였다 (Fig. 10(d)). 따라서, 아랍에미레이트, 싱가포르, 이스라엘을 그룹 1(중동 및 싱가포르)으로 구분하였으며, 하수재이용이 가장 활발하게 이루어지는 그룹으로 판단된다.

그 다음으로 중국, 한국, 일본 및 파키스탄의 경우, 담수총량 기반의 하수재이용율(Fig. 10(d))이 그룹 1 다음으로 높으면서, 1인당 하수재이용량이 낮고, 하수재이용량은 큰 특징이 있어 그룹 2(아시아)로 묶일 수 있었다. 그룹 2는 그룹 1 다음으로 하수재이용율이 큰 그룹이나, 상대적으로 인구가 많은 국가들이어서 1인당 하수재이용량이 낮게 나타났다.

위의 국가 그룹과 반대적인 특징을 갖는 그룹 3(유럽)으로 그리스, 스페인, 이탈리아, 독일 및 네덜란드가 묶일 수 있었다. 조사된 13개국 중에서 하수재이용율이 가장 적은 국가군이나, 인구가 상대적으로 적어 1인당 하수재이용량은 상대적으로 높게 나타났다.

미국의 경우는 그룹 2-3과 일부 유사한 특징을 공유하여 따로 그룹을 구분하지 않았으며, 상세히 보면 하수재이용량 및 1인당 하수재이용량의 경우, 중국, 한국, 일본, 파키스탄과 유사한 경향을 보였으나, 담수총량 기반의 하수재이용율에서는 그리스, 스페인, 이탈리아, 독일 및 이탈리아와 유사한 특징을 나타내었다.

각 그룹에 대한 특징별로 다시 정리해 보면, 물 재이용율이 높은 그룹은 그룹 1(중동 및 싱가포르) > 그룹 2(아시아) > 그룹 3(유럽) + 미국으로 나타났다. 1인당 물 재이용량 기준으로는 그룹 3(유럽) > 그룹 1(중동 및 싱가포르) > 그룹 2(아시아) + 미국 순으로 나타났다.

국내 현재 하수재이용량의 경우, 타 국가와 비교해 보았을 때 크게 낮은 결과는 아니었으나, 기후변화 적응의 한 방식으로 싱가포르, 이스라엘, 아랍에미레이트와 같은 국가들의 물 대응 수준으로 우리나라도 물 관리를 하고자 한다면, 하수재이용량의 지속적인 증대가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 국내 하수재이용 현황을 연도별, 광역자치단체별로 분석하여 그 자료를 바탕으로 향후

pp. 379-387
pp. 389-403
pp. 405-415
pp. 417-424
pp. 425-436
pp. 437-454
pp. 455-463
pp. 465-476
pp. 477-487
pp. 489-496
pp. 497-505
pp. 507-516
pp. 517-531
pp. 533-544

국내 하수재이용량을 예측해 보았다. 국내 하수재이용 경향의 특징을 파악해 본 결과, 하천유지용수와 공업용수 중심으로 증가하고 있으나, 농업용수로의 활용은 점차 줄고 있다. 하천유지용수의 경우 대도시 및 광역자치단체에서 일정량을 지속적으로 활용하고 있으며, 경기도의 경우에만 하천유지용수 사용량을 지속 확대하고 있다. 공업용수 재이용의 경우, 특정 대규모 공업단지를 중심으로 공급하고 있어, 향후 대규모 공업단지의 형성 또는 용수 형태 변경 시에 확대가 가능할 것으로 판단되었다. 대도시 중 대전광역시 지역의 경우 하천유지용수가 활용되지 않고 있어 그 필요도를 파악하여 적용할 필요가 있을 것으로 사료된다. 2030년까지 국내 하수재이용량을 증가시키는 정책 방향이 제안되어 있으며, 각 광역자치단체에서도 공업용수 및 세척용수 등으로 하수재이용량을 증가시키는 방안들이 제시되고 있다. 13개국의 하수재이용량을 비교해 본 결과 하수재이용량 특징에 따라 중동 및 싱가포르 그룹, 아시아 그룹 및 유럽 그룹의 3개 그룹으로 구분이 가능하였으며, 물 재이용율 또는 1인당 물 재이용량에 따라 서로 다른 특징을 보였다. 물 재이용율 우리나라가 기후변화에 따른 적응 문제를 해결하기 위하여 대체수자원을 확보하고자 한다면 하수재이용량의 추가 확보도 적절한 대안이 될 것으로 판단된다.

약어 정리

- 하수처리량(Annual effluent of WWTP, Q_{EWW})
- 하수재이용량(Annual water reuse of WWTP, Q_{RWW})
- 처리수재이용율(Water reuse ratio, WRR_{EWW})
- 1인당 연간 하수재이용량(Annual water reuse per capita, Q_{RC})
- 연간 담수 총량(Annual freshwater withdrawals, Q_{FW})
- 담수 총량 기반의 물재이용율(Water reuse ratio including freshwater withdrawals, WRR_{TW})
- 하수처리장(Wastewater treatment plant, WWTP)

사 사

본 연구는 KIST Global Knowledge Platform 연구사업(2Z06604)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ahn, J.H. (2011). Status and strategy of national water reuse policy, Workshop for establishing the water cycle system.
- Ahn, J.H. (2020). Research on the national plan for water reuse, Korea Environment Institute, Ministry of Environment.
- Birch, H. and Weaver, R. (2020). Desalination & reuse market update July 2020, GWI Desaldata, Global water intelligence.
- Bridgenews (2019). <http://www.viva100.com/main/view.php?key=20191226010009085> (November 29, 2021).
- Businesspost (2020). http://www.businesspost.co.kr/BP?command=article_view&num=174400 (November 29, 2021).
- Cho, I.H., Lee, S.J. and Kim, J.T. (2013). Trends and directions in the development of wastewater reclamation and reuse technology for alternative water resources, J. Korean Soc. Water Environ., 29(1), 127-137.
- Chu, K.H., Oh, B.G., Kook, S., Ko, J., Lim, J., Kim, H.K., Chae, K.J. and Hwang, M.H. (2021). Operational strategies for brackish water desalination plants in island regions of South Korea, J. Clean. Prod., 278, 123540.
- Hong, K., Lee, S., Kim, C., Boo, C., Park, M., An, H. and Hong, S. (2010). Evaluation of RO process feasibility and membrane fouling for wastewater reuse, J. Korean Soc. Water Environ., 26(2), 289-296.
- Jeong, S. and Park, J. (2020). Evaluating urban water management using a water metabolism framework: A comparative analysis of three regions in Korea, Resour. Conserv. Recycl., 155, 104597.
- Joongdo (2017). <http://www.joongdo.co.kr/web/view.php?key=20170628000007141> (November 29, 2021).
- Jordan-Abellan, A., Lopez-Ortiz, M.I. and Megarejo-Moreno, J. (2019). *Wastewater Treatment and Water Reuse in Spain*. Current Situation and Perspectives, 1551.
- Khan, Z., Alim, M.A., Rahman, M.M. and Rahman, A. (2021). A continental scale evaluation of rainwater harvesting in Australia, Resour. Conserv. Recycl., 167, 105378.
- Kim, Y., Choi, B., Park, S. and Cho, J. (2013). Zero Discharge system for sustainable water recycling in city planning, J. Korean Soc., 27(2), 275-283.
- Korea Statistical Information Service (KOSIS) (2021). 2021 Statistics of UAE, Singapore, Israel, Pakistan, Greece, Spain, Italy, China, Republic of Korea, Japan, Germany, and Netherlands.
- Kuktoilbo (2021). <http://www.ikld.kr/news/articleView.html?idxno=236418> (November 29, 2021).
- Kwon, E. (2015). Survey for industrial development strategy



- of water treatment and desalination and membrane market, Knowledge Industry Information Institute.
- Lee, G., Kim, H.-W., Boo, C., Beak, Y., Kwak, R., Kim, C. and Jeong, S. (2021). Bibliometric analysis of twenty-year research trend in desalination technologies during 2000-2020, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 35(1), 39-52.
- Lee, O., Park, M., Lee, J. and Kim, S. (2016). Future PMPs projection according to precipitation variation under RCP 8.5 climate change scenario, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 49(2), 107-119.
- Liao, Z., Chen, Z., Xu, A., Gao, Q., Song, K., Liu, J. and Hu, H.Y. (2021). Wastewater treatment and reuse situations and influential factors in major Asian countries, *J. Environ. Manage.*, 282, 111976.
- Nguyen, H.T., Cho, K., Jang, A. and Jeong, S. (2021). Cost analysis and scheduling of the desalination vessel using reverse osmosis technology, *Membr. Water Treat.*, 12(4), 177-185.
- Ministry of Environment (MOE). (2009). 2008 Statistics of Sewerage.
- MOE. (2010). 2009 Statistics of Sewerage.
- MOE. (2011). 2010 Statistics of Sewerage.
- MOE. (2013). 2012 Statistics of Sewerage.
- MOE. (2015). 2014 Statistics of Sewerage.
- MOE. (2017). 2016 Statistics of Sewerage.
- MOE. (2019). 2018 Statistics of Sewerage.
- MOE. (2020a). 2019 Statistics of Waterworks.
- MOE. (2020b). 2019 Statistics of Sewerage.
- News1 (2021). <https://www.news1.kr/articles/?4467123> (November 29, 2021).
- Our world in data (2017). <https://ourworldindata.org/water-use-stress> (October 22, 2021).
- Pressian (2019). https://www.pressian.com/pages/articles/229324?no=229324&utm_source=naver&utm_medium=search#0DKU (November 29, 2021).
- Sanz, L.A. and Gawlik, B.M. (2014). European Commission 2015, water reuse in europe relevant guidelines, needs for and barriers to innovation, 11.
- Wateruse (2015). <https://www.bluefieldresearch.com/research/focus-report-us-municipal-waste-water-reuse-market-trends-opportunities-forecasts-2015-2025/> (October 22, 2021).
- Water online (2016). <https://www.wateronline.com/doc/water-reuse-gains-momentum-in-u-s-amid-drought-water-scarcity-0001> (October 22, 2021).
- WaterWorld (2017). <https://www.waterworld.com/international/wastewater/article/16203044/reclaimed-wastewater-meets-40-of-singapores-water-demand> (October 22, 2021).
- WRI(World Resources Institute). (2015). <https://www.wri.org/research/aqueduct-projected-water-stress-country-rankings> (October 22, 2021).
- Yang, H., Koo, J., Hwang, T. and Jeong, S. (2020). Cost analysis of water supply and development of desalination vessel as a drought response, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 34(1), 53-60.
- Yoon, S.K., Lee, T., Seong, K. and Ahn, Y., (2021). Calculation of future rainfall scenarios to consider the impact of climate change in Seoul City's hydraulic facility design standards, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 54(6), 419-431.
- Yoonus, H. and Ghamdi-Al, S.G. (2020). Environmental performance of building integrated grey water reuse systems based on Life-Cycle Assessment: A systematic and bibliographic analysis, *Sci. Total Environ.*, 712, 136535.

pp. 379-387

pp. 389-403

pp. 405-415

pp. 417-424

pp. 425-436

pp. 437-454

pp. 455-463

pp. 465-476

pp. 477-487

pp. 489-496

pp. 497-505

pp. 507-516

pp. 517-531

pp. 533-544