

물 대사 분석법을 이용한 도시 물 관리 평가

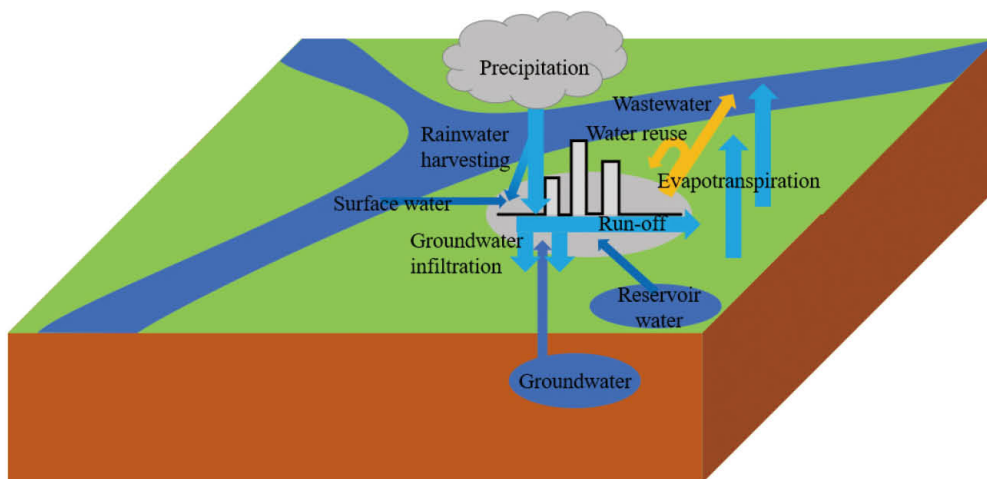
Assessment of urban water management using a water metabolism framework

서론

전 세계적으로 고령화에 따른 일인 가구와 가구당 물사용량의 증가, 양극화에 따른 물 복지 문제, 기후 변화에 따른 도시 내 홍수 및 가뭄 문제와 같은 물 관련 위험이 증가하고 있다. 한국의 경우, 기후변화에 따라 강우의 계절적 집중도가 증가하고 지역적 물 수지 불균형이 심화되고 있다. 특히 2014-2015년에 발생한 극한 가뭄으로 남부 해안지역 및 다수 도서지역이 심각한 물 부족 현상을 겪기도 하였다. 이러한 물 문제에 대응하기 위하여 저영향 개발(LID, Low impact development), 분산화(Decentralization) 및 용수 다변화(빗물 이용, 물 재이용, 해수 담수화, 물 저장 등)와 같은 전략이 추진되고 있다.

이 이슈레터에서는 용수 다변화와 같은 물 관리 전략

을 개발하고 평가하기 위한 접근법으로 물 대사 분석(Water metabolism)의 방법과 적용에 대해 고찰해 보고자 한다. 물 대사 분석은 도시와 같은 시스템이 어떤 수자원을 얼마나 활용하여 용수로 사용하고 하수 및 폐수를 도시 내·외부로 배출하는지, 물의 전반적인 흐름을 분석하는 기법이다. 산업생태학(Industrial ecology)에서는 산업시스템을 생산 및 소비를 위한 대사 과정으로 보고, 물질자원 소비패턴과 그 환경영향을 이해하기 위해 다양한 물질자원을 대상으로 물질흐름분석(Material flow analysis) 혹은 사회경제대사분석(Socio-economic metabolism)을 수행하고 있다. 대사 분석을 통해 대상 시스템의 자원 사용 패턴을 분석하고 자원 효율성을 평가할 수 있으며, 이를 기반으로 더 효율적인 자원 관리 전략을 도출할 수 있



[그림 1] 도시 물 대사 분석 개념도

다. 물 대사 분석은 대사 분석을 물 시스템에 적용한 것으로, 이를 통해 물 시스템의 전반적인 구조와 효율성을 평가하는 것이 그 목표이다.

물 대사 분석법 (Water metabolism framework)

도시로 유입될 수 있는 수자원은 전통 수자원인 하천표류수, 하천복류수, 댐, 저수지, 지하수 등이 있으며, 빗물, 재이용수, 해수담수화 등의 비전통수자원이 있다. 물 수집 또는 생산 과정에서 확보된 수자원은 도시의 다양한 주체에 의하여 활용되고 있다. 사용주체에 따라 생활용수, 산업/공업용수, 농업용수 등으로 나눌 수 있으며, 다양한 주체에 의해 사용된 물은 하수 또는 폐수의 형태로 방류되고 다양한 처리 과정을 거쳐서 자연계로 돌아가게 된다. 최근에는 물의 취수, 사용, 처리 및 방류와 같은 기존의 도시 내 물 흐름 이외에 물 저장 기능 또한 고려하고 있다. 그 예시로는 홍수 예방을 위한 우수 저장 시스템, 도시의 투수성을 높이는 기술 기술(Sponge city(중국), LID(미국), Water sensitive city(호주), Low impact urban design and development(뉴질랜드), Blue-Green city(영국) 등), 적극적으로 물을 지하 대수층에 저장한 후 활용하는 대수층 함양 기술(Aquifer storage and recovery, ASR) 등이 있다.

Kenway 등(Kenway et al. 2011)은 위와 같은 모든 수자원 흐름을 고려하여 다음과 같은 물 대사 분석틀을 제안하였다. 도시 물 수지는 크게 도시로 들어오는 수량(Q_i , Input water flow)과 도시에서 배출되는 수량(Q_o , Output water flow), 그리고 도시에 저장되는 수량(ΔS , Changes in storage)으로 구분할 수 있고, 유입 및 유출은 특성에 따라 다음과 같은 물 흐름으로 세분화할 수 있다.

$$\text{Input } (Q_i) = \text{Output } (Q_o) + \Delta S$$

강우량(P, Precipitation) + 중앙집중형 물공급(C, Centralized flows) + 분산형 물공급(D, Decentralized flows) + 재이용 순환흐름(R, Reuse flows) =

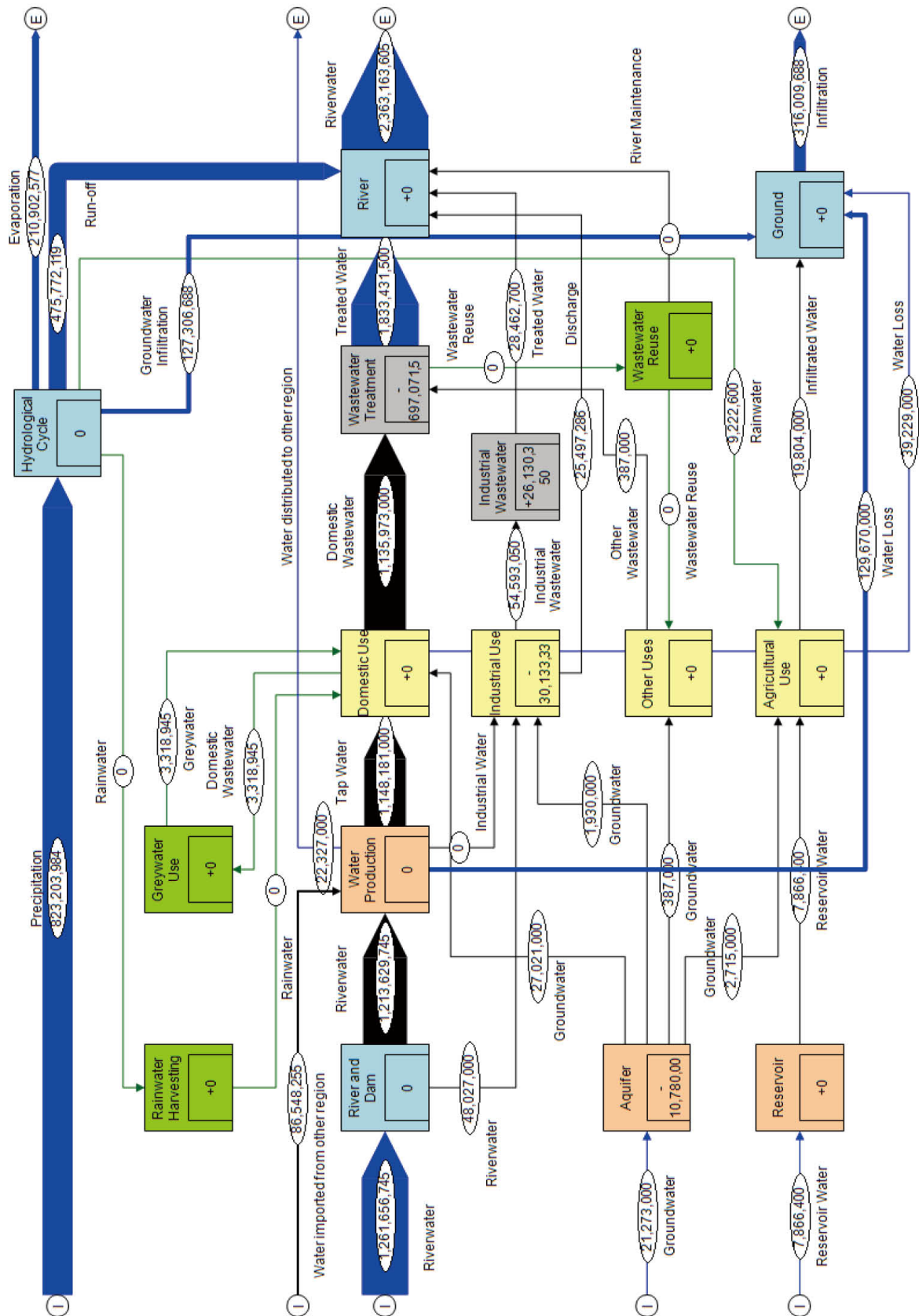
증발산량(ET, Evapotranspiration) + 강우유출량(R_s , Stormwater run-off) + 지하수침투량(G, Groundwater infiltration) + 하수방류량(W, Wastewater discharge) + 재이용 순환흐름(R, Reuse flows) + ΔS

여기서, 중앙집중형 물공급은 댐공급과 같은 지표수(C_s , Surface water) 취수, 지하수(C_g , Groundwater) 취수 등을 포함하며($C = C_s + C_g$), 분산형 물공급은 빗물(D_p , Precipitation)을 비롯하여 계곡수(D_s , Stormwater), 소규모 분산형 지하수(D_g , Groundwater), 해수담수화 생산수(D_d , Desalinated water) 등을($D = D_p + D_s + D_g + D_d$), 재이용은 빗물이용(R_p , Rainwater harvesting), 하수재이용(R_w , Wastewater recycling), 중수이용(R_g , Greywater reuse)을 포함한다($R = R_p + R_w + R_g$).

물 대사 분석에서 System boundary는 도시의 행정적인 Boundary를 기준으로 할 수 있다. 이러한 Boundary는 지역정부나 기관에서 관리하는 상하수 시스템을 분석하기에는 유용하지만, 빗물의 수집 또는 지하수의 흐름과 관련되는 자연계 물 흐름과는 부합하지 않을 수 있어서 자료의 적절한 재처리가 필요할 수 있다. 예를 들어 증발산량, 강우유출량, 지하수침투량과 같은 자연계 물 흐름은 수문모델에 의해서 추정되는데, 도시 전체에 대한 자연계 물 흐름은 도시 내 다양한 토지이용을 고려한 추산이 필요하다.

물 대사 분석은 일차적으로 수량을 중심으로 분석한다. 그러나 물 시스템에서는 비점오염원, 녹조와 같은 수질오염문제, 정수, 하수 및 폐수처리 과정에서 발생하는 수질변화를 모니터링하는 것이 중요하며, 이에 따라 물 대사 분석도 수질까지 고려하는 방향으로 확장되고 있다. Renouf 등(Renouf et al., 2018)의 경우 수량 분석 뿐 아니라 물 시스템의 에너지 사용량 및 Nutrient 흐름을 동시에 고려하였다.

물 대사 분석의 예시로서 2005년 통계 자료를 활용한 서울시 물 대사 분석 결과를 아래 [그림 2]에 나타내었다. 2005년 서울 지역에는 연간 약 8.2억 m^3 의 비가 내렸으며, 약 4.7억 m^3 이 도시의 지표면을 따라 흘러 한강으로 유입되었고, 2.1억 m^3 은 증발, 1.3억 m^3 은 대수층으로 이동하였다. 대부분의 물 공급이 한강(12.6억 m^3)을 통해 이루어졌으며, 일부 지하수(0.2억 m^3)와 저수지 용수(0.08억 m^3)도 소량 활용되었다. 정수장으로 유입된 12.1억 m^3 의 강물과 광역상수도에서 제공받은 0.9억 m^3 의 지표수를 처리하여 11.5억 m^3 의 정수가 생산되어 서울시로 공급되었으며, 1.3억 m^3 정도의 강물이 손실되고, 0.2억 m^3 의 정수는 타 지역으로 이송되었다. 즉, 2005년 당시 서울에서는 정수장 유입수의 약 10% 정도가 손실되었던 것으로 나타났다. 서울의



[그림 2] 서울시 도시 물 대사 분석 예시(2005년 기준, 단위: m^3/yr)

수도수는 100% 지표수로 공급되고 있었으나, 생활용수로는 수도수(11.5억 m^3)와 지하수(0.3억 m^3) 그리고 중수도(0.03억 m^3)가 함께 사용되었다. 서울시의 공업용수의 유입 원수로서 지하수(0.02억 m^3)와 처리하지 않은 강물(0.5억 m^3)이 활용되었으며, 농업용수로는 빗물(0.09억 m^3), 저수지(0.08억 m^3) 및 지하수(0.03억 m^3) 등 다양한 수자원이 활용되었다. 생산된 각 용수들은 생활용수, 산업용수, 농업용수 및 기타 용수로 활용된 후, 하수처리장 또는 산업폐수처리장에서 처리되었으며, 농업용수의 경우 하수도로 유입되지 않기 때문에, 100% 지하수계로 이동하는 것으로 평가하였다. 이 흐름 분석을 통하여 도시 내 다양한 물 대사 과정을 이해할 수 있으며, 주요 물 대사 과정의 파악을 통하여 앞으로 도시 내 물 공급 방향을 결정하거나 안정적인 물 공급을 위하여 용수 다변화 계획 등을 세울 때 있어 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

이 분석을 수행하는 경우, 각 지역 별로 물 공급 및 사용 형태를 한 눈에 파악할 수 있으며, 다른 도시 또는 지역과의 비교를 통하여 적절한 물 공급 방식에 대한 아이디어를 제시할 수 있을 것이다. 서울 지역의 경우 대부분의 물이 한강 수계를 통하여 공급되고, 생활용수로 활용된 후, 다시 한강 하류로 방류되는 특징이 있다. 따라서, 서울시의 대체 수자원 확보에 대한 방안을 결정할 때에는 생활용수 중심으로 활용될 수 있는 수자원을 중점적으로 개발할 필요가 있으며, 수자원의 안정적인 공급을 위해서 집중적인 원수 공급원을 다각화할 필요가 있을 것으로 판단된다.

물 대사 지표 분석

물 대사 분석을 통하여 도시 내 물 흐름을 파악하였다면, 물

대사 지표 분석을 통하여 도시의 물 관리 성과(Performance)를 평가할 수 있다. 아래 [표 1]에 2005년 서울시 지역과 참고문헌(Renouf et al., 2018)에서 나온 물 수지 값을 이용한 지표를 계산하여 나타내어 보았다. 물 대사 분석에는 다양한 지표를 활용할 수 있으나 이번 이슈레터에서는 5가지 지표를 소개하고자 한다.

1) Water use intensity (m^3 /capita/yr)

Water use intensity는 도시 연간 총 물 사용량을 인구로 나눈 값이다. Renouf 등의 물 대사 분석에 따르면, 2013-2014년도 자료 기준으로 Perth가 160-180 m^3 /capita/yr로 Water use intensity가 가장 높았으며, South East Queensland (SEQ) 및 Melbourne 지역의 경우 90-110 m^3 /capita/yr 정도의 유사한 결과를 보였다 (Renouf et al., 2018). 유럽 국가들의 경우 산업 용수를 국가별 및 생산 공정별에 따라 Water use intensity를 계산하여 보고하고 있다(<https://ec.europa.eu/eurostat>). 또한, [그림 3]에 미국의 주 별 물 사용 총량(Dieter et al., 2018)과 주 별 인구수(<https://www.infoplease.com/us/states/state-population-by-rank> (U.S. Census Bureau, Population Division))를 이용하여 지표 값을 구해보았다. 아래 축에서 왼쪽에서 부터 물 사용량이 많은 주이며, 실제 인구 당 물 사용량을 보면, Washington DC의 1인당 물 사용량이 가장 높은 것으로 나타났으며, 총 사용량이 많다고 하여 1인당 물 사용량이 많은 것이 아님을 알 수 있었다. 이런 자료들은 해당 지역의 물 이용 특성을 파악할 수 있는 자료로 활용될 수 있을 것이다.

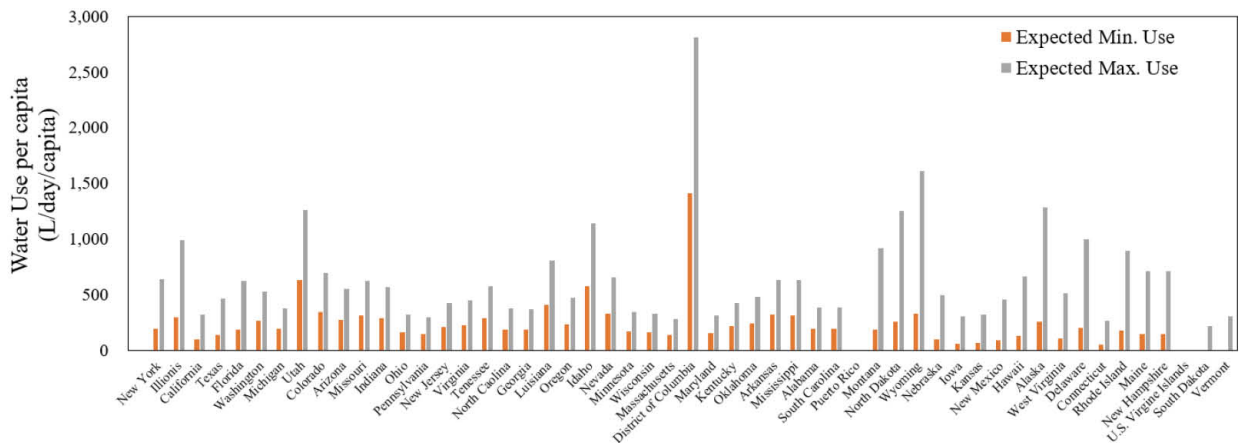
2) Water use internalisation(%)

도시 내 전체 물 사용량 중에서 도시 내부에서 자체적으로 얻을 수 있는 용수량을 나타낸 지표로서, 수식으로 다음과 같이

[표 1] 서울과 호주 지역의 지표 비교(예시)

지역	서울	SEQ 주*	Perth 시*
자료 조사 년도	2005	2013-14	2013-14
Water use intensity (m^3 /capita)	136	90-110	160-180
Water supply internalization (%)	0.9	14	27
Rainfall potential (%)	59	918	201
Wastewater potential (%)	128	60	36

*Renouf 등(Renouf et al., 2018) 논문의 문헌 값을 이용한 계산치



[그림 3] 미국 내 도시들의 Water use intensity 비교(L/day/capita)

(Dieter et al., 2018, <https://www.infoplease.com/us/states/state-population-by-rank> (U.S. Census Bureau, Population Division))

나타낼 수 있다.

$$\text{Water use internalisation(\%)} = (D + R) / (C + D + R) \times 100 (\%)$$

도시 내 분산형 시스템 기반의 빗물, 계곡수, 소규모 지하수

이용이 증가하거나 하수처리수 재이용 또는 중수 이용이 증가

하는 경우, Water use internalisation 값이 증가한다. 이는 해당

도시가 외부나 Non-renewable 수자원에 의존하는 대신 자체적

[표 2] 국가 통계 자료별 수집 자료

	상수도 통계	하수도 통계	지하수연보	WAMIS
원수처리수량	O			
총급수량	O			
유효수량	O			
유입하수량		O		
방류량		O		
공공하수처리수 재이용		O		
중수도		O		
빗물이용시설현황		O		
지하수이용량	O		O	O
간이상수도				O
강수량				O
농업용수			O	O
산업/공업용수	O	O	O	O
생활용수	O	O	O	O
기타용수			O	
지표수	O			O
지하수	O		O	O
저수지	O			
댐	O			

인 수자원을 적극적으로 활용한다는 의미로, 물 관리 측면에서 지속가능성이 높은 것을 시사한다. [표 1]에서 서울시의 경우가 지표 값이 호주의 2개 도시에 비해 매우 낮게 나타났다. 즉, 서울시의 경우 안정적인 물 관리를 위하여, 분산형 시스템 또는 재이용 형태의 수자원 용량 확대가 필요하다는 것을 시사한다고 할 수 있다.

3) Hydrological performance(%)

Hydrological performance는 도시의 자연계 물 흐름인 증발, 증발산량(ET, Evapotranspiration), 강우유출량 (R_s , Stormwater run-off), 지하수 침투량(G, Groundwater infiltration)을 도시화 이전의 값으로 나눈 비율으로서, 도시화에 따른 자연계 물 흐름 변화를 확인할 수 있는 지표이다. Renouf 등(Renouf et al., 2018)의 연구에서 도시화 이후 증발산량과 지하수 침투량은 큰 변화가 없었으나(100%), 강우유출량이 약 180~580%까지 늘어나서, 도시화에 따른 피복효과로 강우유출량이 크게 증가한 것을 확인할 수 있었다(Renouf et al., 2018). 강우유출량의 증가는 도시 내 물 저장량의 감소에 따른 수자원의 감소와 홍수 위험의 증가를 유발할 수 있다.

4) Rainwater/Wastewater potential(%)

Rainwater potential과 Wastewater potential은 연간 강수 총량과 연간 하수발생량 총량에서 연간 물 사용 총량을 나눈 값으로서, 빗물이나 하수재이용을 통하여 도시 내 물을 어느 정도 공급할 수 있는지를 보여주는 지표이다. 이 지표들은 향후 도시 내 물 공급 방식을 빗물 기반 분산형 시스템 또는 하수 재이용 기반으로 어느 정도 까지 대체할 수 있을지 예측하는 자료로 활용될 수 있다.

5) Water-related energy/nutrient efficiencies

물 사용 효율 뿐만 아니라, 물 시스템이 유발하는 에너지사용 효율도 분석이 가능하다. Water-related energy efficiency는 물 시스템이 사용하는 총 에너지를 해당 지역의 총 인구로 나누는 것으로 계산할 수 있다. Nutrient의 경우, 물 시스템 전체에서 Nutrient의 회수에 대하여 다음의 지표를 계산할 수 있다

(Renouf et al., 2017).

$$\text{Nutrient recovery from urban water} = N_{re}/N_{wwin}$$

여기서, N_{re} 는 회수된 Nutrient의 양이며, N_{wwin} 은 하수처리 장으로 유입된 Nutrient의 양이다. 이 지표를 이용하여 도시에서의 탄소, 질소와 인과 같은 Nutrient의 회수 정도를 확인할 수 있다. 최근 들어, 바이오 가스 생산 공정과 신재생 에너지를 결합한 에너지 생산형 하수처리장이 실제 운영 중에 있다.

물 대사 분석을 위한 통계의 중요성

도시 물 대사 분석은 국가통계자료 및 지역 자체조사자료를 기반으로 한다. 우리나라 물 관련 통계로는 상수도 통계와 하수도 통계가 있으며, 지하수연보, 산업폐수처리 통계, 그리고 각 지방 자치단체에서 발행하는 백서 등에서 물 관련 자료들을 확인할 수 있다. 웹 기반의 다부처 물 관리 데이터베이스인 국가수자원관리종합정보시스템(Water resources management information system (WAMIS), <http://www.wamis.go.kr>) 또한 물 관련 각종 정보를 제공하고 있으며, 환경부 산하의 국가상수도정보시스템(<https://www.waternow.go.kr>), 국가하수도정보시스템(<https://www.hasudoinfo.or.kr>)도 상수도과 하수도 관련 웹기반 물 관리 데이터베이스로 활용되고 있다. 표 2은 서울의 물 대사 분석에 사용된 국가통계와 그 구조를 나타낸 것이다.

물 대사 분석을 수행하는 데 있어서 다음과 같은 어려움이 있는 것으로 보인다. 물 대사 분석을 위해서는 각기 다른 통계에 산재되어 있는 물 흐름 자료를 통합하여야 하는데, 이 과정에서 통계 수치의 설명이 부족하여 통계자료의 관계를 명확히 확인하기 어렵거나, 동일한 흐름에 대한 수치가 달라 데이터의 신뢰성을 확보하기 어려운 경우가 있었다. 또한 물 관리의 효과적인 평가를 위해서는 시간적, 공간적으로 더욱 세분화된 데이터가 필요하며, 수량에 대한 자료 뿐 아니라 수질, 에너지, 비용 등에 대한 관련 데이터의 연계가 필요하다. 앞으로 빅데이터 및 통합 물 관리 시대를 맞아, 도시의 물 관리를 효율적으로 평가할 수 있도록 통계항목을 표준화하고, 각종 통계가 명확히 연계되어 쉽게 통합될 수 있는 통합 물 관리 데이터 시스템이 구축되기를 기대한다.

약자

Q_i , Input water flow: 도시로 들어오는 수량
 Q_o , Output water flow: 도시에서 배출되는 수량
 ΔS , Changes in storage: 도시에 저장되는 수량
 P , Precipitation: 강수량
 C , Centralized flows: 중앙집중형 물공급
 D , Decentralized flows: 분산형 물공급
 D_p , Precipitation: 빗물
 D_s , Stormwater: 계곡수
 D_g , Groundwater: 소규모 분산형 지하수
 R , Reuse flows: 재이용 순환흐름
 R_p , Rainwater harvesting: 빗물이용
 R_w , Wastewater recycling: 하수재이용
 R_g , Greywater reuse: 중수이용
 ET , Evapotranspiration: 증발산량
 R_s , Stormwater run-off: 강우유출량
 G , Groundwater infiltration: 지하수침투량
 W , Wastewater discharge: 하수 방류량
 N_{re} , Recovered nutrient: 회수된 nutrient의 량
 $N_{ww_{in}}$, Nutrient input in wastewater: 하수처리장으로 유입된 nutrient의 량

참고문헌

S. Kenway, A. Gregory, J. McMahon, Urban water mass balance analysis, *J. Ind. Ecol.* 15 (5) (2011) 693–706.
 T.A. Farooqui, M.A. Renouf, S.J. Kenway, A metabolism perspective on alternative urban water servicing options using water mass balance, *Water Res.* 106 (2016) 415–428.
 M.A. Renouf, S. Serrao-Neumann, S.J. Kenway, E.A. Morgan, D. Low Choy, Urban water metabolism indicators derived from a water mass balance e Bridging the gap between visions and performance assessment of urban water resource management, *Water Res.* 122 (2017) 669–677.
 장석환, 지속가능한 통합물관리를 위한 과제와 방안, 물관리 혁신포럼 창립총회, 서울대학교 호암교수회관, 2019년 7월 16일
 M.A. Renouf, S.J. Kenway, K.L. Lam, T. Weber, E. Roux, S. Serrao-Neumann, D. Low Choy, E.A. Morgan, Understanding urban water performance at the city–region scale using an urban water metabolism evaluation framework, *Water Res.* 137 (2018) 395–406
[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Water_use_in_the_manufacturing_industry_by_activity,_2011_\(m%C2%B3_per_inhabitant\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Water_use_in_the_manufacturing_industry_by_activity,_2011_(m%C2%B3_per_inhabitant).png)
 C.A. Dieter, M.A. Maupin, R.R. Caldwell, M.A. Harris, T.I. Ivahnenko, J.K. Lovelace, N.L. Barber, K.S. Linsey, Estimated use of water in the United States in 2015: U.S. Geological Survey Circular 1441 (2018) 65 p.
 환경부 블로그, <https://blog.naver.com/mesns/221293637829>
<https://www.infoplease.com/us/states/state-population-by-rank> (U.S. Census Bureau, Population Division)

대한상하수도학회-한국물환경학회 통합 미래위원회

위원장 | 남경필, 김형일

위 원 | 권세윤, 김민철, 김상현, 김우열, 김연주, 김영모, 김은주, 김이중, 김정원, 김지혜, 박제량, 박주영, 박찬혁,
배성준, 배효관, 송재민, 신승구, 윤석환, 이윤호, 이재상, 이창하, 이태권, 정석희, 정성필, 조강우, 조은혜,
최용주, 최정권, 한창석

Water4FutureCity 2019년 2호

※ 이번 2019년 2호는, 한국과학기술연구원 정성필 박사, 고려대학교 박주영 교수가 집필하였습니다.

대한상하수도학회 서울특별시 강남구 광평로 280 로즈데일빌딩 1323호

Tel. 02-507-1170 | Fax. 02-502-1170 | E-mail, ksww@ksww.or.kr

한국물환경학회 서울특별시 종로구 삼봉로 81 두산위브 파빌리온 1137호

Tel. 02-389-4250 | Fax. 02-385-3702 | E-mail, kswe@kswe.org

※ 본 이슈레터는 2019년 1호부터 대한상하수도학회와 한국물환경학회에서 공동으로 운영하는 통합 미래위원회에서 발간합니다.