

하수기반역학을 통한 도시 물 인프라의 잠재적 가치 발굴

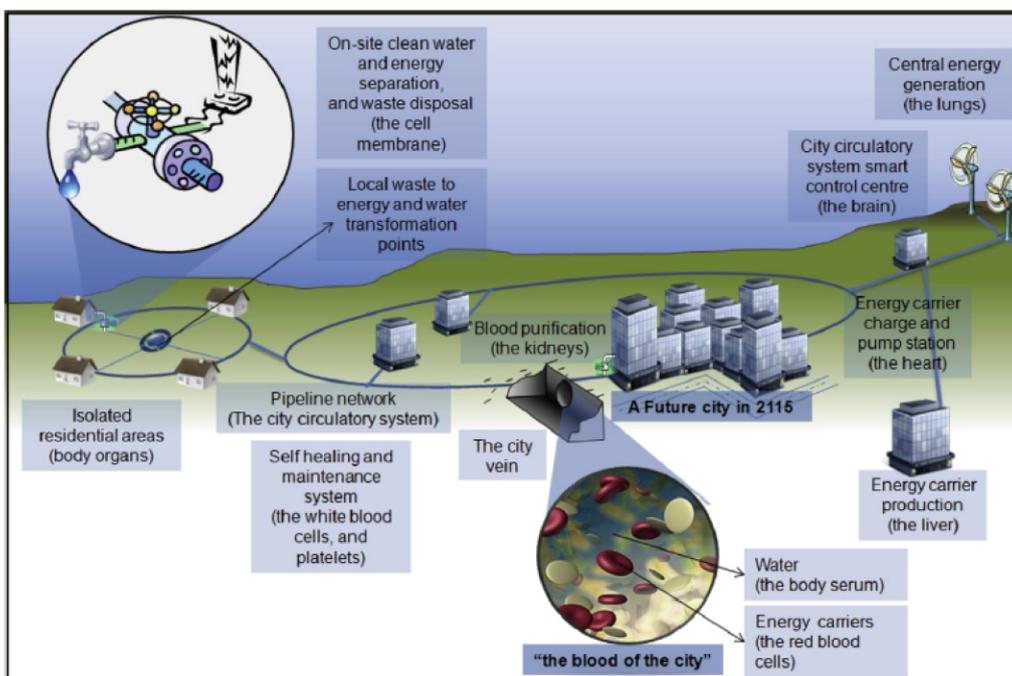
Discovering the potential value of urban water infrastructure through wastewater-based epidemiology

서언

하수도는 인간의 체내에서 배출되거나 인간이 접촉한 물질이 배출되고 이동하는 주요 통로이며, 하수는 인간 활동으로부터 배출되는 물질의 집합체와 다름없다. 따라서, 자연히 가정에서 배출하는 하수는 그 가정에서 이루어지는 활동 특성을 반영하며, 학교 캠퍼스에서 배출하는 하수는 그 캠퍼스 구성원들의 활동 특성을, 물재생센터로 유입되는 하수는 그 배수구역 내에서 이루어지는 시민의 활동 특성을 반영하기 마련이다. 우리가 사

는 도시를 하나의 생명체에 빗대어 보았을 때, 전통적인 하수관리의 목적인 배수 및 배제의 관점에서는 하수도 및 하수를 각각 비뇨기계 및 소변으로, 하수도 및 물재생시설을 재생수의 운송 공급 및 사용까지 연계시키는 도시 물 순환의 관점에서는 하수도 및 하수를 각각 정맥 및 정맥혈에 대응시킬 수 있을 것이다 ([그림 1] 참조).

소변 및 혈액검사는 개인의 건강상태와 질병 발생 여부를 판단하는 매우 중요한 의학적 도구일 뿐만 아니라, 마약 등의 복



〈그림 1〉 미래도시의 물순환 시스템과 인체 순환계 간의 유사성. Karaca 등, 2013.
Reprinted from Karaca et al. (2013), Copyright (2019), with permission from Elsevier.

용 및 음수·흡연여부 검사, 운동선수의 금지약물 복용 여부 검사 등 우리 일상생활에서 매우 다방면에 걸쳐 활용되고 있다. 이러한 사실과 하수-소변/혈액 간의 대응성으로부터 우리는 지금까지 간과되어 왔던, 도시에서 물의 흐름에 핵심적인 부분을 담당하는 인프라인 하수도의 잠재적 가치를 발견할 수 있다. 그것은, 위에 언급한 바와 같이, 인간이 배출하는 물질의 통로로서의 하수도의 가치이며, 그것을 통해 흐르는 하수의 관점에서는 인간의 건강과 다양한 생활상을 반영하는 매질로서의 그 가치이다. 본 고에서는 아직까지 국내·외 소수의 연구자들 위주로 다루어지고 있는 개념인 하수기반역학(wastewater-based epidemiology)에 대해서 소개하고, 그 연구동향과 기대효과에 대해서 논하고자 한다. 간단히 소개하자면, 하수기반역학은 하수에 포함된 화학적·생물학적 정보의 분석을 통하여 그 하수를 배출하는 커뮤니티의 건강, 생활상, 약물사용실태 등을 파악하는 작업으로, 커뮤니티에 대한 집단 뇨검사 또는 혈액검사로 간주하여도 크게 틀림이 없다.

본 고는 지난 대한상하수도학회지 2018년 2월호에 실린 조은혜 등(2019)의 총설 논문 “하수기반역학을 이용한 커뮤니티 생활상 및 건강 관리: 물 인프라의 새로운 가치”를 기초로 하여 작성하였다. 해당 논문의 구분을 참고하여 하수기반역학에 대한 소개는 크게 1) 커뮤니티의 합법 및 불법 약물류 사용에 대한 조사연구와 2) 커뮤니티의 건강 및 질병 발생 정보에 대한 조사연구로 구분하였다. 유사한 방법론을 문헌에 따라 하수에서 화학적 정보를 추출한다는 관점에서 “하수 화학정보 마이닝(sewage chemical information mining)”이라 칭하기도 한다.

하수기반역학의 주요 과정

하수기반역학이 비교적 새로운 연구분야인 만큼, 그 주요 과정을 표준화하여 제시한 사례는 찾아보기 어렵다. 그러나 하수기반역학에 대한 주요 연구사례와 총설 논문의 내용을 종합하면, 대체로 하수기반역학의 주요 과정은 1) 측정 대상 화합물(즉, 화학적·생물학적 지표물질)의 선정, 2) 선정한 지표물질 단위인구당, 시간당 배출량의 정상 범위 결정, 3) 조사 대상 커뮤니티 선정 및 대표성 있는 하수 시료의 채취방법 결정, 4) 하수분석을 통한 지표물질의 단위인구당, 시간당 배출량 산정 및

결과분석, 5) 대상 커뮤니티 심층 분석, 개선조치 도출 및 시행, 개선조치 효과 검증 등으로 구분할 수 있다.

화학적·생물학적 지표물질의 선정

하수기반역학에서는 조사연구의 목적에 적합하고 신뢰성 있는 측정 및 평가가 가능한 대상 화합물, 즉 화학적 또는 생물학적 지표물질을 올바르게 선정하는 것이 무엇보다 중요하다. 커뮤니티의 약물류 사용에 대한 조사연구 목적으로 측정되는 화합물로는 코카인(cocaine), 헤로인(heroin), 메스암페타민(methamphetamine; 일명 히로뽕), 마리나화의 주성분인 tetrahydrocannabinol (THC) 등 불법 약물류 및 그 대사산물, 주류·담배·커피의 주요 성분인 알코올·니코틴·카페인, 벤조디아제핀(benzodiazepines) 등 향정신성의약품 등이 있다. 커뮤니티의 건강 및 질병 발생 정보에 대한 조사연구의 목적으로는 질병 발생 추정에 활용 가능한 항생제·항생물질·기타 의약품류 및 그 대사산물, 전염성 질환 발병률 증감 평가에 활용 가능한 병원균(바이러스, 세균 등) 및 그 DNA, 여러 질병의 원인이 되는 산화 스트레스(체내 활성산소의 증가) 등 보다 근본적인 커뮤니티 건강상의 위험을 감지할 수 있는 체내 합성 내인성 물질 등이 있다.

하수기반역학에 유용하게 활용되기 위한 지표물질의 조건은 다음의 항목으로 요약할 수 있다: 1) 체내 분비량이 평가하고자 하는 항목(약물 사용여부, 질병 발생, 산화 스트레스 등)에 따라 크게 변화할 것, 2) 소변 등 하수로 유입되는 형태로 인체로부터 분비되며, 이외 경로(음식물 등)의 하수 유입량 및 체외 합성량이 상대적으로 적을 것, 3) 건강한 개인의 분비량 변화(intra-individual excretion variance) 및 건강한 개인 간의 분비량 변화(inter-individual excretion variance) 폭이 크지 않을 것, 4) 하수도 내 및 실험실 보관 중 보존성이 높은(화학적·생물학적 변환 및 고형물 흡착이 상대적으로 적은) 물질일 것, 5) 하수 내에 검출한계 이상으로 존재하며, 하수의 구성 성분이 분석에 미치는 간섭 영향이 적고, 분석의 정확성 및 정밀성이 확보되어 있을 것, 6) 시료의 전처리 수요가 크지 않으며, 널리 보급된 장비로 신속·용이하게 분석 가능하고, 분석 절차가 표준화되어 있을 것.

이와 같이 까다로운 조건을 만족하는 지표물질을 개발하는 것은 매우 어려운 작업이다. 그러나, 의학 분야에서 이미 많은 지표물질들이 개발되고 활용되고 있으며, 그 분석법 또한 상당 부분 정립되어 있고, 간편하고 저렴한 분석키트 또는 분석장비가 개발되어 있는 경우가 많다. 따라서, 하수기반역학의 지표물질 선정을 위하여 의학 분야의 연구성과 및 적용사례를 우선적으로 심도 있게 살펴보는 것이 가장 합리적이고 용이한 접근법이라 할 수 있다. 다만, 지표물질의 농도는 소변 또는 혈액보다 하수에서 훨씬 낮게 나타날 개연성이 높고, 지표물질의 거동 양상이 하수에서 다르게 나타날 수 있으며, 분석에 있어 하수에 존재하는 간섭물질의 작용 특성은 소변 또는 혈액 내 간섭물질의 특성과 다를 수 있으므로, 의학 분야에서 사용 중인 지표물질 및 그 분석법의 적용성을 하수라는 새로운 매질과 하수도라는 새로운 환경에서 검증하는 절차가 반드시 필요하다.

선정한 지표물질 단위인구당, 시간당 배출량의 정상 범위 결정

하수기반역학에 활용되는 화학적·생물학적 지표물질의 상단수(특히, 체내 합성 내인성 물질)는 건강한 개인 또는 그들로 구성된 커뮤니티에서도 일정 수준 분비되는 것들이다. 따라서, 이러한 지표물질을 대상으로 하수기반역학 연구를 수행하기 위해서는 건강한 커뮤니티에서 배출되는 지표물질 양의 적절한 범위를 결정하고, 추후에 조사 대상 커뮤니티에 대하여 측정된 양과 비교하여 조사 대상 커뮤니티의 건강상태, 질병 발생 양상, 약물사용 실태, 특이적 생활상 등을 평가할 필요가 있다. 이는 개인의 건강진단에서 혈액검사를 통해 측정된 간 기능 관련 수치들을 정상 범위와 비교하거나, 소변검사를 통해 측정된 당·단백·적혈구·백혈구 등의 수치들을 정상 범위와 비교하는 작업과 유사하다고 볼 수 있다.

하수기반역학에서 지표물질의 배출량은 커뮤니티의 단위인구당, 시간당 지표물질 배출량으로 표기하게 되며, 가장 일반적으로는 유효인구 1000명당 일간 배출량(mg/day/1000 pe¹⁾) 단위를 사용한다. 이 값의 정상 범위를 얻기 위해서 되도록 그 범주를 명확하게 정의할 수 있고 건강상태가 양호한 커뮤니티를

대상으로 한 배출량 자료를 충분히 확보할 필요가 있다. 정상 범위 결정에 활용되는 커뮤니티는 그것이 속한 사회의 다양성(성별, 연령, 인종, 소득수준, 문화적 배경 등)을 충분히 반영할 수 있어야 한다. 배출량의 정상 범위 결정 과정에서 발생하는 오류는 궁극적으로 조사 대상 커뮤니티의 건강상태 판정에 있어 결정적인 오류를 초래하므로, 신뢰성 있는 배출량 정상 범위 결정은 하수기반역학 연구에서 매우 중요한 부분이다.

조사연구 대상 커뮤니티 선정 및 이를 대표하는 하수 시료의 채취방법 결정

다음으로 이루어지는 과정은 조사연구 대상 커뮤니티를 선정하고, 그 커뮤니티를 대표할 수 있는 하수 시료의 채취방법을 결정하는 것이다. 이 과정에서는 대상 커뮤니티의 활동이 이루어지는 지역에서의 하수관거 네트워크에 대한 정보(배수경로, 합류식/분류식 여부 등) 및 커뮤니티의 활동 양상, 조사 대상 이외 인구집단에 의한 기여 가능성 등을 면밀히 검토하여야 한다. 또한, 대상 커뮤니티가 배출하는 하수의 유량 및 지표물질 배출량의 시간별·날짜별·계절별 변화 등을 고려하여 대표성 있는 시료를 채취하는 전략을 수립할 필요가 있다.

지금까지 대부분의 하수기반역학 연구는 하수처리장 유입수를 대상으로 이루어졌다. 이는 하수처리장 유입수가 시료채취에 가장 용이하고, 배수구역에 대한 정보를 쉽게 얻을 수 있으며, 주어진 하수도 시설에서 채취 가능한 시료 중 가장 큰 단위의 커뮤니티에 대한 분석이 가능한 시료이기 때문인 것으로 추정된다. 대규모 커뮤니티 대상 하수기반역학 연구는 개인·집단의 프라이버시 침해 또는 기타 사회갈등 야기 가능성을 회피하는 데 유리한 측면이 있다. 그러나 소규모 커뮤니티를 대상으로 한 하수기반역학 연구는 그 커뮤니티가 지니는 특징적인 요인 또는 건강상태와 지표물질 배출량 간의 인과관계를 보다 명확하게 밝힐 수 있다는 점에서 큰 장점이 있다. 따라서, 하수 네트워크에 대한 정보를 통하여 대상 커뮤니티를 대표할 수 있는 하수 시료의 채취 지점을 선정함으로써 하수처리장 서비스 대상인구보다 작은 규모의 커뮤니티를 대상으로 하수기반역학을 실시하는 방안을 강구할 필요가 있다.

배수구역에서 이루어지는 인간 활동의 특성 및 배수구역 내 부지이용·산업 특성 등에 따라 지표물질 배출량의 시간에 따

1) population equivalent

른 변화 양상 및 배출량에 기여하는 인구집단과 배수구역 간의 관계는 상당히 달라질 수 있다. 예를 들어, 도시 중심업무지구에서의 하수 및 하수 내 지표물질 배출량은 업무시간 중 가장 높게 나타나고 주로 비거주민에 기인하는 반면, 베드타운에서의 하수 및 하수 내 지표물질 배출량은 아침 및 저녁에 가장 높게 나타나고 주로 거주민에 기인한다. 따라서, 조사연구 대상 커뮤니티를 대표할 수 있는 하수 시료를 획득하기 위해서는 하수 배수구역 내에서 이루어지는 활동 및 이에 따른 하수·지표물질 배출량에 대한 이해가 선행되어야 하며, 이와 관련된 정보를 활용하여 적절한 시료채취 시점 및 지점을 결정할 필요가 있다.

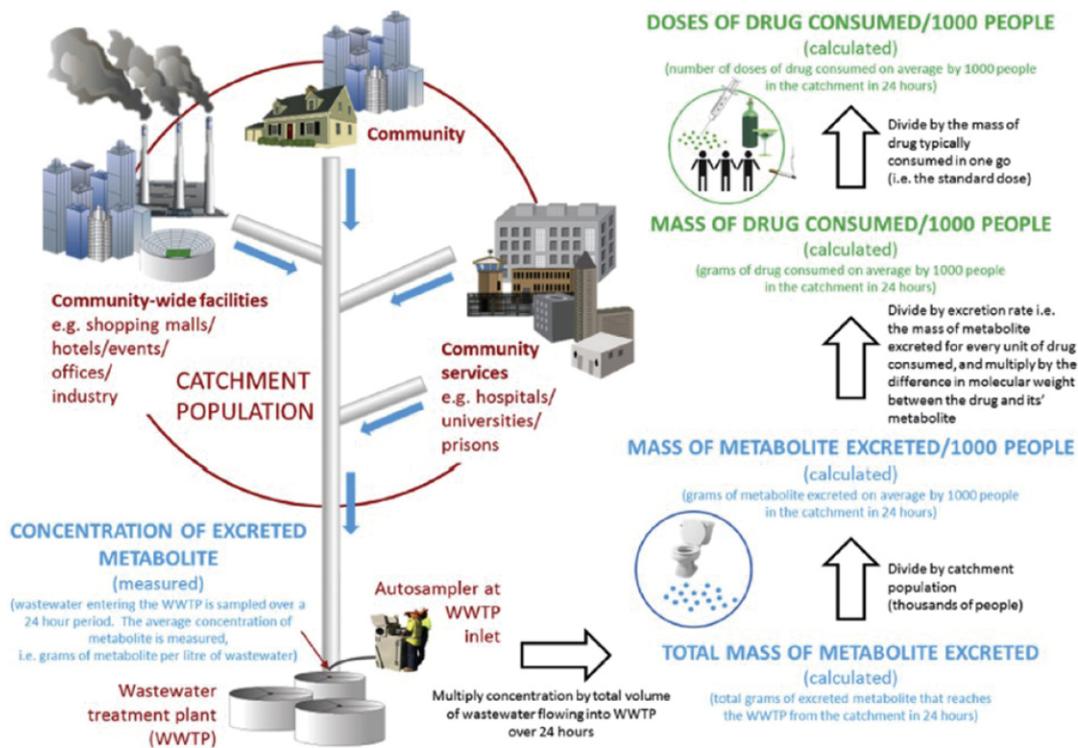
하수분석을 통한 지표물질의 단위인구당, 시간당 배출량 산정 및 결과분석

대상 커뮤니티를 대표할 수 있는 하수 시료를 채취하면, 적절한 분석방법을 통하여 지표물질의 농도를 측정하고, 이것을 바탕으로 대상 커뮤니티의 지표물질 단위인구당, 시간당 배출량을 산정한다. 산정한 결과는 추가적인 분석을 통하여 보다 직접

적이고 유의한 정보를 생산하는 데 활용한다. [그림 2]에는 합법 또는 불법 약물류를 대상으로 한 그 과정이 잘 나타나 있다. 간략하게 소개하자면, 우선적으로 측정된 지표물질 농도를 하수 유량과 곱하여 시간당 부하량을 계산하고, 이를 하수 배출인구로 나누어 단위인구당 배출량을 산정한다. 지표물질이 인간이 복용하는 약물의 대사산물일 경우, 이미 밝혀진 약물의 투약량과 지표물질 분비량의 상관관계를 이용하여 단위인구당, 시간당 약물 투약량을 계산한다. 일반적인 투약횟수당 투약량을 추정 가능한 약물의 경우, 추가적으로 단위인구당 시간당 투약횟수를 산출할 수 있다. 이렇게 하여 도출한 조사대상 커뮤니티에 대한 값을 앞서 기술한 정상 범위와 비교·분석함으로써 대상 커뮤니티의 건강상태, 생활상, 약물복용실태 등을 파악한다.

대상 커뮤니티 심층 분석, 개선조치 도출 및 시행, 개선 조치 효과 검증

본 단계는 하수기반역학 조사를 통해 대상 커뮤니티에서 도출한 정보를 커뮤니티 구성원의 건강, 삶의 질 등의 향상을 위하여 활용하는 단계이다. 하수기반역학 조사로부터 대상 커뮤



<그림 2> 하수처리장 유입수를 이용한 약물류 대사산물 단위인구당, 시간당 배출량 산정 및 이를 이용한 약물류 투약량·투약횟수 산출과정.
Reprinted from Australian Criminal Intelligence Commission (2017).

니티의 약물복용, 전염성 질병 발생, 전반적인 건강상태 등에 대한 이상 신호가 감지되면, 우선적으로 이러한 이상이 발생하게 된 근본적인 원인을 분석할 필요가 있다. 커뮤니티 구성원의 위생 상태, 비만도, 과도한 스트레스 유무, 음주 및 흡연율, 불법 마약류 관리의 실패 등이 그것이다. 분석 과정을 통해 유의미한 인과관계가 발견되면, 이에 대한 개선조치를 도출하여 시행하고, 그 효과를 다시 하수기반역학 조사를 통해 검증하게 된다.

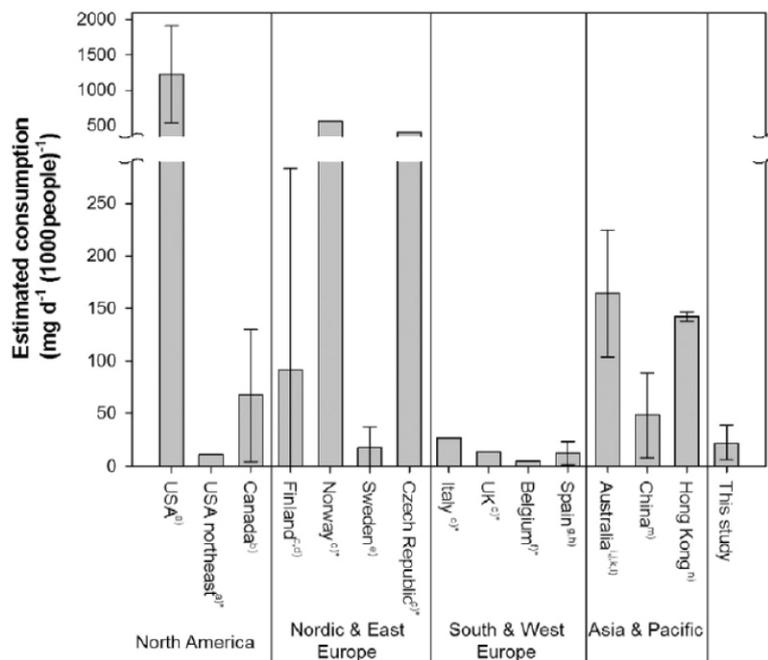
하수기반역학은 커뮤니티 건강상의 문제와 그 원인이 될 수 있는 요인 간에 유의미한 인과관계를 도출하고, 개선조치의 효과를 검증하는 데 있어 일반적인 역학조사의 한계를 보완 또는 극복할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 평가자가 연구대상을 선정하고 유해인자(예: 비만)로 의심되는 요인에 있어 서로 다른 조건을 갖춘 집단 간의 건강상 악영향(예: 고혈압) 차이를 분석하는 일반적인 역학조사의 방법론과 비교하여 하수기반역학은 다음의 장점이 있다(Daughton, 2012). 하수기반역학을 이용하면 보다 쉽고 빠르게 커뮤니티 전반의 건강상태를 계량할 수 있으며, 유해요인에 의한 영향 및 개선조치의 효과를 보다 즉각적으로 평가할 수 있다. 또한, 하수기반역학의 인과관계 판단은 평가자에 의해 미리 선정된 유해인자에 국한되지 않으므로 한정된 유해인자에 의존한 건강관리로부터 탈피할 수 있다. 하수

기반역학에서는 평가자가 인위적으로 집단을 구분하지 않으므로, 평가 과정에서의 인위적 오류 발생을 방지할 수 있다.

하수기반역학의 연구동향 및 연구사례

커뮤니티의 합법 및 불법 약물류 사용에 대한 조사연구

합법 및 불법 약물류 사용에 대한 하수기반역학 적용은 상대적으로 연구가 활발히 이루어지고 있는 분야이다. 특히, 마약류에 대한 각국의 하수기반역학 연구 사례는 비교적 쉽게 찾아볼 수 있다. 2005년에 이탈리아에서 불법 약물류 측정 목적의 하수시료 분석연구가 최초로 실시된 이래, 아일랜드, 벨기에, 크로아티아, 노르웨이 등 다수의 유럽 국가에서 불법 약물류 대상 하수기반역학 연구가 이루어졌고, 2011년에는 홍콩에서 연구를 시작하였다. 국내에서도 부산대학교 오정은 교수 연구팀이 연구한 결과가 2015년에 발표된 사례가 있다(Kim 등, 2015). 조은혜 등(2019)에 따르면, 2018년말 현재 마약류에 대한 하수기반역학 연구논문은 Scopus 데이터베이스 기준 115편이 존재하며, 총 249개 도시를 대상으로 한 결과가 보고된 바 있다. 발표논문의 대륙별 분포는 유럽 78%, 아시아/오세아니아 14%, 북남미 8%, 아프리카 1%로 유럽의 연구사례가 가장 많으나, 점



(그림 3) 국내 5개 도시의 메스암페타민 투약량 추정치 및 각국의 추정치와의 비교. Kim 등, 2015.
Reprinted from Kim et al. (2015), Copyright (2019), with permission from Elsevier.

차 유럽 외 대륙 및 국가에서의 연구도 활발해지고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 주류, 담배, 커피 등 기호식품과 벤조디아제핀 등 항정신성의약품 사용실태에 대한 연구도 점차 등장하고 있는 추세이다. 예를 들어, 노르웨이에서 실시된 알코올 섭취에 대한 하수기반역학 연구에서는 전체 알코올 섭취량의 60%가 금요일과 토요일에 이루어진다는 흥미로운 결과를 발표한 바 있다(Gao 등, 2015).

지금까지 유일한 국내 연구사례로 파악되는 Kim 등(2015)의 연구에서는 2012-13년 성탄절-새해 기간에 국내 5개 도시 14개 하수처리장을 대상으로 17종의 불법 약물류에 대한 조사를 실시하였다. 그 결과, 헤로인, 코카인, 케타민(ketamine), 메타돈(methadone) 등 다른 국가에서 실시된 연구에서 빈번하게 검출되었던 마약류의 상당수가 검출되지 않았으나, 메스암페타민, 암페타민(amphetamine), 코데인(codeine) 등 3종의 물질은 검출되었다. 이 중 메스암페타민 및 암페타민은 불법 약물류인 메스암페타민(일명 히로뽕) 투약 및 투약된 물질의 체내 대사를 통해 배출된 것으로, 마약성 진통제인 코데인은 의료 목적으로 사용된 것이 배출된 것으로 추정되었다. 다만, 배출량으로부터 추정된 국내 도시의 메스암페타민 단위인구당, 시간당 투약량은 다른 국가들에서 추정된 값에 비해서 상대적으로 낮은 수준을 나타내었다([그림 3] 참조).

커뮤니티의 건강 및 질병 발생 정보에 대한 조사연구

커뮤니티의 건강 및 질병 발생 정보를 조사하기 위한 하수기반역학 연구는 항생제를 포함한 의약품류에 대한 연구가 가장 많이 이루어져 왔으며, 약물류 관련 연구와 마찬가지로 2000년대 중반부터 시작된 것으로 파악된다(Castiglioni 등, 2006). 최근에는 분자생물학적 기술의 발달로 하수 내 병원균 DNA 분석을 통해 커뮤니티 내 전염성 질환 발생을 조기에 경보할 수 있는 방법론 연구도 이루어지고 있다. 또한, α -fetoprotein, Carcinoembryonic antigen 등 암의 진단에 사용되는 지표물질을 활용하고자 하는 시도도 있다. 나아가, 몇몇 연구자들은 커뮤니티 건강상태의 전반적인 문제를 발생시키는 근본적인 요인(비만, 스트레스 등)과 관련성이 깊은 생물학적 지표물질을 하수기반역학에 적용하는 방안을 연구하고 있다. 그 대표적인 예로는 비만, 고혈압, 협심증, 뇌경색 등 질병의 원인이 되는 산화스트

레스(활성산소 과다) 조건에서 분비량이 증가하는 isoprotanes의 측정(Daughton, 2012), 비만도 증가에 의해 분비량이 유의하게 증가하는 특정 세균종의 DNA 측정 등이 있다(Garcia-Lor 등, 2017). 일례로, Newton 등(2015)은 미국 71개 도시의 하수 내 분변성 대장균 분포 특성을 DNA 분석을 통하여 실시하였는데, 하수 내 대장균 분포 특성으로부터 해당 커뮤니티 구성원 비만도의 심각성 여부를 상당히 신뢰성 있게 예측할 수 있다는 결과를 얻었다(비만인구 21.5% 이하 커뮤니티를 81%, 비만도 31.3% 이상 커뮤니티를 89% 정확도로 예측).

결언

위의 논의에서 확인할 수 있듯이, 하수기반역학을 시민 건강 관리의 신뢰성 있는 도구로 활용하기 위해서는 상당한 연구성과와 경험의 축적이 필요하다. 하수기반역학에서 적절한 지표물질의 선정, 하수에서의 분석방법 확립 등은 매우 핵심적인 부분으로, 여기에는 고도의 의학 및 분석화학 분야 지식이 필요하다. 이는 다수의 물 관련 전문가에게 익숙하지 않은 내용이므로, 타 분야 전문가와의 긴밀한 협력이 필요하며, 연구 수행자들이 이러한 타 분야에 대한 기초적인 이해를 갖출 필요가 있다. 이러한 측면에서, 물 관련 전문가들이 하수기반역학을 수행하는 데에는 어느 정도 어려움이 따르는 것이 사실이다. 그러나, 하수기반역학은 하수도라는 도시 기반 인프라와 하수라는 매질을 기반으로 이루어지는 연구이며, 대표성 있는 하수시료를 채취하고, 하수도 및 하수 내에서 지표물질의 거동 특성을 이해하며, 지표물질의 분석결과를 이용하여 커뮤니티의 특성에 대해 전반적인 분석을 실시함에 있어 관련 분야 전문가의 지식과 역량이 수반되어야 함도 분명하다. 따라서, 하수기반역학을 물 관련 전문가들이 시민 건강에 기여할 수 있는 중요한 기회로 인식하고, 이를 활용하여 보다 도전적이고 발전적인 연구를 추진하는 혁신의 노력이 필요하다.

우리는 도시 물 인프라를 통해서 시민에 유용한 가치를 개발하고 생산해 내는 데 노력해 왔다. 안전한 물의 공급과 하수배제 등을 통한 개인위생 향상은 19세기 이래 보건환경 분야의 가장 큰 성과로 꼽히며, 인간 수명의 연장에 가장 결정적인 공헌을 한 것으로 인정받고 있다(Ferriman, 2007). 또한, 하수처리

기술의 개발과 하수처리 인프라 확충은 물환경을 보전하고 복원하는 데 기여해 왔으며, 더욱 고도화된 하수처리를 통하여 갈수록 보다 높은 가치의 물을 생산하고 있다. 최근에는 하수를 자원으로 재인식하고, 물 재이용, 자원 회수, 에너지 생산 등을 통하여 하수의 자원으로서의 가치를 개발하는 데 많은 이들이 노력을 기울이고 있다. 이제, 물 관련 전문가들이 인류의 삶에 공헌하기 위해 발굴해 낼 수 있는 또다른 물 및 물 인프라의 가치는 무엇인지 모색해 보아야 할 때이다. 본 고에서 제시하는 하수기반역학은 기존에 간과되어 왔던 물질의 이동통로로서의 하수도, 시민의 삶을 투영하는 매질로서의 하수의 가치를 활용하는 것으로, 앞으로 물 관련 연구의 발전방향으로 꼭 검토해 볼 만한 것이라 판단된다.

참고문헌

- Australian Criminal Intelligence Commission (ACIC), (2017). National wastewater drug monitoring program report 1, ACIC, Canberra, Australia.
- Castiglioni, S., Bagnati, R., Fanelli, R., Pomati, F., Calamari, D., Zuccato, E., 2006. Removal of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Italy. *Environmental Science & Technology*, vol. 40, pp. 357–363.
- Daughton, C. G., 2012. Using biomarkers in sewage to monitor community-wide human health: Isoprostanes as conceptual prototype. *Science of the Total Environment*, vol. 424, pp. 16–38.
- Feriman, A. 2007. BMJ readers choose sanitation as greatest medical advances since 1840. *British Medical Journal* 334, p. 111.
- Gao, J., O'Brien, J., Lai, F. Y., van Nuijs, A. L., He, J., Mueller, J. F., Xu, J., Thai, P. K., 2015. Could wastewater analysis be a useful tool for China? – A review. *Journal of Environmental Sciences*, vol. 27, pp.70–79.
- García-Lor, E., Castiglioni, S., Bade, R., Been, F., Castrignanò, E., Covaci, A., González-Mariño, I., Hapeshi, E., Kasprzyk-Hordern, B., Kinyua, J., Lai, F. Y., Letzel, T., Lopardo, L., Meyer, M. R., O'Brien, J., Ramin, P., Rousis, N. I., Rydevik, A., Ryu, Y., Santos, M. M., Senta, I., Thomaidis, N. S., Veloutsou, S., Yang, Z., Zuccato, E., Bijlsma, L., 2017. Measuring biomarkers in wastewater as a new source of epidemiological information: Current state and future perspectives. *Environment International*, vol. 99, pp. 131–150.
- Karaca, F., Camci, F., Raven, P.G., 2013. City blood: A visionary infrastructure solution for household energy provision through water distribution networks. *Energy*, vol. 61, pp. 98–107.
- Kim, K. Y., Lai, F. Y., Kim, H. -Y., Thai, P. K., Mueller, J. F., Oh, J. -E., 2015. The first application of wastewater-based epidemiology in five South Korean cities. *Science of the Total Environment*, vol. 524–525, pp. 440–446.
- Newton, R. J., McLellan, S. L., Dila, D. K., Vineis, J. H., Morrison, H. G., Eren, A. M., Sogin, M. L., 2015. *mBio*, vol. 6, no. 2, e02574–14.
- 조은혜, 김형일, 최용주, 윤영호, 이도연, 김근영, 2019. 하수기반역학을 이용한 커뮤니티 생활상 및 건강관리: 물 인프라의 새로운 가치. *대한상하수도학회지*, vol. 33, no. 1, pp. 63–77.

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 1호

※ 이번 2019년 1호는 서울대학교 최용주 교수, 연세대학교 김형일 교수, 한국외국어대학교 조은혜 교수가 집필하였습니다.

한국물환경학회 서울특별시 종로구 삼봉로 81 두산위브 파빌리온 1137호

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

대한상하수도학회 서울특별시 강남구 광평로 280 로즈데일빌딩 1323호

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

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