



하수기반역학을 이용한 커뮤니티 생활상 및 건강 관리: 물 인프라의 새로운 가치

Wastewater-based epidemiology for the management of community lifestyle and health: An unexplored value of water infrastructure

조은혜¹·김형일^{2,*}·최용주³·윤영호¹·이도연²·김근영³

Eun-Hea Jho¹·Hyoung-Il Kim^{2,*}·Yongju Choi³·Youngho Youn¹·Doyeon Lee²·Geunyoung Kim³

¹한국외국어대학교 자연과학대학 환경학과, 경기도 용인시 처인구 모현읍 외대로 81, 17035

²연세대학교 공과대학 건설환경공학과, 서울시 서대문구 연세로 50, 03722

³서울대학교 공과대학 건설환경공학부, 서울시 관악구 관악로 1, 08826

¹Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, Gyeonggi-do, Yongin-si, Cheoin-gu, Mohyeon-myeon, Oedae-ro, 81, 17035

²Department of Civil & Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, Seodaemun-gu, Yonsei-ro, 50, 03722

³Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Gwanak-gu, Gwanak-ro, 1, 08826

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

ABSTRACT

Traditional wastewater research mainly focuses on 1) estimating the amount of waste entering sewage treatment facilities, 2) evaluating the treatment efficiency of sewage facilities, 3) investigating the role of sewage treatment effluent as a point source, and 4) designing and managing sewage treatment facilities. However, since wastewater contains a variety of chemical and biological substances due to the discharge of human excreta and material used for daily living into it, the collective constituents of wastewater are likely a reflection of a community's status. Wastewater-based epidemiology (WBE), an emerging and promising field of study that involves the analysis of substances in wastewater, can be applied to monitor the state of a defined community. WBE provides opportunities for exploiting indicators in wastewater to fulfill various objectives. The data analyzed under WBE are those pertaining to selected natural and anthropogenic substances in wastewater that are a result of the discharge of metabolic excreta, illicit or legal drugs, and infectious pathogens into the wastewater. This paper reviews recent progress in WBE and addresses current challenges in the field. It primarily discusses several representative applications including the investigation of drug consumption across different communities and the management of community disease and health. Finally, it summarizes established indicators for WBE.

Key words: Wastewater-based epidemiology, Sewage chemical-information mining, Community health management, Bio-marker, Aptamer

주제어: 하수기반역학, 하수화학정보마이닝, 지역사회건강관리, 바이오마커, aptamer

Received 31 December 2018, revised 19 January 2019, accepted 24 January 2019.

*Corresponding author: Hyoung-Il Kim (E-mail: hi.kim@yonsei.ac.kr)

1. 서론

도시 물 인프라가 마주하고 있는 인구 변화, 시설 노후화, 경제 변화 등 다양한 이슈들을 해결하기 위해 도시 물 관리는 지속가능한 방향으로 나아가야 한다. 이러한 최근의 이슈들을 해결하는데 있어 데이터 확보는 하나의 중요한 전제 조건이라고 할 수 있다. 최근 센서, 미량물질 분석, 사물인터넷 기술 등의 발달로 다양하고 많은 데이터를 수집하는 것이 가능해졌고, 빅데이터 기술의 발전으로 획득한 데이터를 취급·해석하는 것이 용이해졌으므로, 이렇게 하여 얻을 수 있는 정보를 도시 물 관리에 효과적으로 활용하는 방안을 모색할 필요가 있다. 이러한 측면에서 데이터 기반 도시 물 관리는 도시 물 인프라의 지속가능성을 향상시키기 위한 발전 방향으로 제시되고 있다 (Eggimann et al., 2017).

데이터 기반 도시 물 관리를 통하여 물 인프라의 지속가능성을 향상시킬 수 있는 방안에는 여러가지 예가 있다 (Fig. 1). 빗물관리, 도심 홍수 관리, 상하수도 관망 관리에 실시간으로 수집되는 강수량 및 물

사용량 등의 데이터를 활용하여 그 효율성을 높일 수 있고, 스마트한 관개 시설을 통해 토양의 수분 함유량과 기상 예보에 맞춘 관개를 실시함으로써 물 생산성을 향상시킬 수도 있다. 또한 그린루프, 침투시설, 인공습지 등 자연형 물 관리 시설을 관거 네트워크와 연계하여 도시 전체의 물 수지를 향상시키는 통합 물 관리에 있어서도 데이터는 중요하다. 최근 관심이 높아지고 있는 분산형 물 시스템의 효율적인 유지관리를 위해서도 데이터 확보가 필수적이다. 이렇듯 더 많은 데이터의 확보와 확보한 데이터의 활용은 도시 물 관리의 효율성을 제고하고 물 인프라의 혁신을 주도할 수 있는 잠재력을 지니고 있다 (Eggimann et al., 2017; Choi et al., 2018).

하수기반역학(wastewater-based epidemiology, WBE)은 위에서 제시한 데이터 기반 도시 물 관리 사례에 비하여 상대적으로 덜 알려져 있으나, 하수가 담고 있는 데이터를 통하여 시민에게 질 높은 서비스를 제공하고, 도시 물 인프라의 가치를 한층 향상시킬 수 있을 것으로 기대되는 영역이다. 최근 국외에서는 WBE가

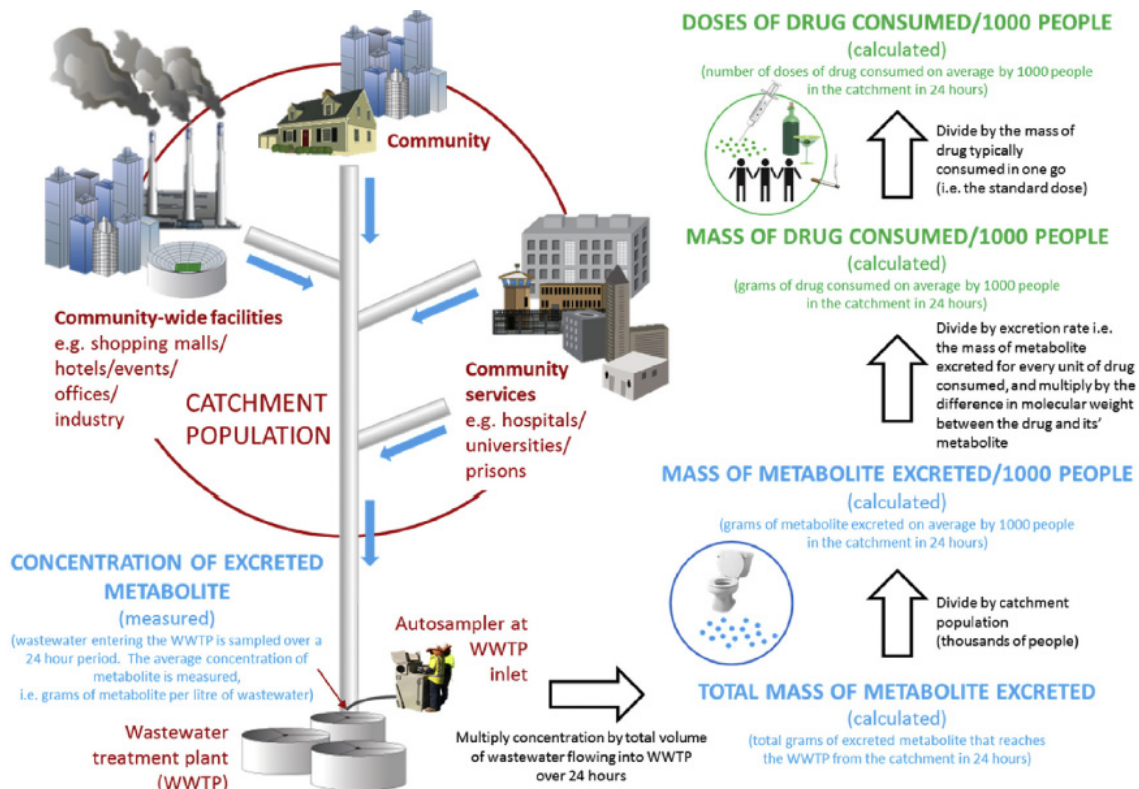


Fig. 1. Schematic of the population catchment area and methodology employed to convert measured concentration of substances in wastewater to mass loads or doses consumed per day per normalised population (reprinted from Australian Criminal Intelligence Commission (2017)).



점차 주목받고 있고, 해마다 게재되는 관련 논문도 증가하고 있는 추세이다 (Choi et al., 2018). 하수에는 사람의 배설물과 가정에서 일상 생활에 사용하는 다양한 물질들의 혼합물이 포함되어 있기 때문에 특정 지역의 하수는 그 하수를 발생시키는 커뮤니티의 생활상과 건강 상태를 반영한다고 할 수 있다. 이러한 하수의 특성에도 불구하고 기존 하수 분석의 초점은 1) 하수처리시설로 들어오는 물질의 유입량 산정, 2) 하수시설의 처리 효율 평가, 3) 하수처리 방류수의 점오염원으로서의 역할 평가 등 하수처리시설 설계 및 관리 용도에 한정되어 왔다. 이에 반하여, 하수기반역학은 하수 내 존재하는 인간의 특정 신진대사 배설물 또는 바이오마커(bio-marker)를 분석하여 하수도의 배수구역 내에 있는 인구가 섭취한 물질이나 노출된 환경의 지표로 활용함으로써 하수가 지니는 정보의 새로운 활용 방안을 제시한다.

특정 화학적·생물학적 지표물질(indicator)은 하수관망으로 유입되어 궁극적으로 하수처리장에 도달하게 되므로, 하수기반역학에서 데이터 수집은 일반적으로 정해진 기간 동안 하수처리장에서 대표성을 띠는 하수 시료를 채취하는 것에서부터 시작된다. 정해진 기간 동안(주로 24시간) 하수 시료 또는 슬러지 샘플링을 통해 특정 지표물질의 농도를 측정하고, 이를 하수처리장의 유입유량과 곱해서 총 부하량을 구한다. 이를 단위인구(주로 1,000명) 당의 값으로 산정하고, 측정된 지표물질이 대사산물(metabolite)일 경우 그로부터 단위인구 당 모화합물(parent compound)의 복용량을 산정한다 (Fig. 1). 지역 주민에 대한 사전조사 자료를 수집하고, 필요 시 추가 조사를 실시하여 하수 분석으로부터 산정한 단위 인구 당 지표물질 배출량 또는 모화합물 복용량 값을 해석하는 데 활용한다.

하수기반역학은 결국 하수에 포함된 화학 정보를 채취하여 이를 통하여 하수를 배출하는 커뮤니티의 생활상 또는 건강 상태를 파악하는 작업이다. 이러한 맥락에서 관련 문헌에서는 하수기반역학(wastewater-based epidemiology) 대신에 “하수 화학정보 마이닝”(sewage chemical-information mining; SCIM)이라는 표현을 사용하기도 한다 (Daughton, 2012). 하수기반역학을 통하여 커뮤니티의 생활상 또는 건강 상태를 파악하여 이상 징후가 발견될 경우에는 그에 상응하는 조치를 실시하고, 그 결과를 다시 하수기반역학을 통하여 실시간에 가깝게 확인할 수 있다 (Daughton, 2012). 따라서,

하수기반역학은 의료 분야에서 사용하는 개인 요검사의 커뮤니티 버전이라고 볼 수 있다.

하수기반역학을 활용한 지금까지의 연구는 크게 1) 합법 및 불법 약물류 사용에 대한 조사, 2) 커뮤니티의 건강과 라이프스타일을 알 수 있는 산화스트레스, 의약품, 개인 미용 및 위생용품, 영양과 관련된 물질들에 대한 조사, 3) 전염성 병원균에 대한 조사의 세 가지 주제로 분류할 수 있다 (Eggimann et al., 2017). 하수 내 화학적·생물학적 정보에 대한 기존 연구는 주로 불법 약물 섭취, 약물 남용 등을 평가하는 목적으로 수행되었으며, 최근 연구의 범위가 질병, 건강, 라이프스타일과 관련된 정보를 얻는 것으로 확대되고 있다. 앞으로 하수기반역학은 환경 내 또는 인간이 섭취하는 음식물 또는 의약품 등에 존재하는 오염물질에 대한 노출과 이로 인해 인간에게 나타나는 건강상의 악영향(예: 당뇨, 암 등) 간의 인과관계를 명확히 밝히는 데 활용될 수 있는 가능성이 크다.

본 논문은 도시 물 인프라가 제공하는 데이터를 활용하는 새로운 방법론인 하수기반역학을 국내에 소개하는 것을 주요 목적으로 한다. 본 논문에서는 특히 커뮤니티의 “합법 및 불법 약물류에 대한 조사”에 대해 사용량 추정, 분석방법, 안전성 측면에서 논하였고, “질병 및 건강 정보 조사”에 대해서 활용 가능한 지표물질 관점에서 중점적으로 논의하였다.

2. 하수 내 합법 및 불법 약물류에 대한 조사 연구

하수기반역학은 아직까지는 주로 불법 약물 섭취량 조사 분야에 집중적으로 적용되어 왔다. 불법 약물의 사용은 전 세계적으로 인간의 질병 및 조직적인 범죄에 크게 기여하고 있다 (Lim et al., 2012; UNODC, 2015). 따라서 불법 약물(또는 마약류) 관련 피해를 최소화하기 위해 적절한 정책을 개발할 수 있도록 인구의 불법 약물 사용 수준을 감시하는 것이 중요하다. 전통적으로 불법 약물 사용에 대한 모니터링은 모집단 조사와 약물 사용 증상(예: 약물 발작) 또는 약물 관련 위해도(예: 약물 과다복용) 분석을 통해 이루어졌지만 이러한 약물의 직접적인 조사에는 한계가 있다. 또한, 국가에서 시행하는 조사만으로는 중증 마약 사용자들에 대한 평가를 하기에 충분한 정보를 수집

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

하기 어렵다 (Degenhardt and Hall, 2012). 반면 하수기 반역학은 하수처리장을 사용하는 인구 규모 단위의 약물 사용량에 대한 정보를 제공함으로써, 합법 및 불법 약물의 소비 및 사용에 대한 지역 사회 수준의 평가를 가능하게 한다. 하수 분석을 통한 약물 섭취량 산정은 미국에서 2001년 처음으로 제안된 후 꾸준히 연구가 수행되고 있다 (Gao et al., 2015). 하수를 이용한 약물 섭취량 조사와 관련된 기존 연구는 크게 세 가지 분야, 즉 1) 약물류 사용량 추정에 관한 연구, 2) 약물류 분석 방법에 관한 연구 및 3) 약물류 안정성 문제와 관련된 연구 분야로 나뉠 수 있다.

2.1 인간에 의한 약물류 사용량 추정에 관한 연구

하수기반역학을 통해 조사한 약물류에는 합법적으로 섭취가 가능한 알코올 및 담배가 있으며, 코카인(cocaine), 헤로인(heroin), 암페타민(amphetamine), 엑스티시(ecstasy)로 알려진 MDMA(methylene dioxy-methamphetamine), 메타암페타민(methamphetamine), 마리화나의 주성분인 THC(tetrahydrocannabinol)와 같은 불법 약물과 이들의 대사 산물이 있다(표 1) (Eggimann et al., 2017). 2015년에 게재된 리뷰 논문에 따르면 불법 약물 섭취와 관련된 연구는 이탈리아에서 2005년 시료 채취를 시작하여 연구를 시작하였고, 이후 유럽 여러 국가들(예: 아일랜드, 벨기에, 크로아티아, 노르웨이 등)이 하수 시료 분석을 통해 다양한 불법 약물류 섭취량을 조사하였다 (Gao et al., 2015). 아시아 국가에서는 홍콩이 2011년 하수 시료를 채취하여 연구를 시작하였다 (Lai et al., 2013; Gao et al., 2015). 이외에도 관련된 연구들이 지속적으로 이루어졌다. Scopus 데이터베이스에서 하수, 역학, 불법 마약을 주요어로 검색한 결과 총 115편의 논문이 검색되었고, 이들 논문은 249개 국가 내 도시 또는 특정 시설들을 대상으로 이루어졌다(2018년 8월 기준). 하수기반역학 관련 연구 논문들은 조사 지역 또는 시설이 위치한 지역을 기준으로 했을 때 유럽 국가에서 78%, 아시아/오세아니아 국가에서 14%, 북남미 국가에서 8%, 그리고 아프리카 국가에서 1%를 게재하였다. 이들 논문 중 약물 섭취량에 대한 문헌 30여개를 선택하였고, 본문 중에 산정한 약물 섭취량이 보고되어 있는 자료를 바탕으로 정리하여 표 2에 제시하였다.

각 약물의 사용량은 하루 약물 섭취량으로 나타낼 수 있다. 약물은 종류별로 1회 복용량(dose)이 다르며, 사용자 간의 복용량에도 차이가 존재한다. 일반적으

로 특정 하수처리장을 사용하는 지역의 인구 1,000명이 하루 동안 섭취하는 특정 약물의 평균 섭취량은 mg/day/1000 people의 단위로 표현된다. 또한 하수 내 특정 약물 성분 또는 이 성분의 대사산물 농도를 이용해 특정 약물의 섭취량을 역계산(back-calculation)을 통해 산출한다 (Gracia-Lor et al., 2016). 각 약물의 복용량이 다르기 때문에 복용량을 기준으로 하여 약물 섭취량을 doses/day/1000 people의 단위를 사용하여 표현하기도 한다. 표 2에 정리한 기존 연구들은 남용의 우려가 있는 불법 마약류에 대한 연구 내용으로 한정했다. 하지만 최근 커피, 알코올 및 담배 등과 같이 합법적인 약물류 성분에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다 (Gao et al., 2016; Zheng et al., 2017). 예를 들어, 하수기반역학 연구를 통해 노르웨이에서는 전체 알코올 섭취량의 60%가 금요일과 토요일에 섭취되고 있다는 결과를 보고한 바 있다 (Gao et al., 2015). 또한 법적으로 규제가 되고 있지 않아 빠르게 사용량이 증가하고 있는 새로운 향정신성 물질(new psychoactive substances; NPS)에 대한 연구도 수행되고 있다 (Bade et al., 2017).

표 2를 보면 대륙별 또는 국가별로 인구 1인당 섭취하는 불법 약물의 종류와 양은 다르며, 같은 국가 내에서도 도심지와 시골지역의 불법 약물 섭취량은 다를 수 있음을 알 수 있다 (Yargeau et al., 2014). 예를 들어, 벨기에에서 수행한 연구에 따르면 대도시에서는 코카인이 선호되는 흥분제인 반면, 소도시에서는 암페타민이 선호되는 흥분제라고 조사되었다 (Been et al., 2016a). 하수기반역학을 이용한 연구 초기에는 주로 특정 연도, 월, 일, 시간에 채취한 특정 하수 시료를 이용해 특정 약물류의 섭취량을 산정하는 것에 초점을 맞추어 공간적 차이를 알아보는 연구와 단기간(예: 일주일) 사용 패턴을 알아보는 연구에 초점이 맞추어져 있었다. 그러나 하수기반역학을 이용한 연구가 점점 진행되면서 장기간 모니터링을 통해 공간적 패턴뿐 아니라 시간에 따른 사용량 패턴을 조사한 내용이 보고되고 있다. 예를 들어, 벨기에에서 2011년도부터 2015년까지 수행한 조사를 통해 사람들이 사용하는 흥분제 종류의 분포가 안정적으로 유지되고 있음을 보고한 바 있다 (Been et al., 2016a).

아시아 국가들 중에서는 중국이 관련 연구를 선도하고 있으며, 국내에서 하수기반역학을 이용해 수행된 연구는 대표적으로 2012년에 대한민국 남부 지방의 5개 도시에 있는 15개 하수처리장을 대상으로 수행된

Table 1. WBE-based studies on the estimation of illicit drug consumption

Country	Wastewater sample	Daily dose consumption (mg/day/1000 people or *doses/day/1000 people)	Reference
Australia	Urban and rural sewage treatment plants in South East Queensland	- Urban area: Cocaine(416); MDMA(237); Methamphetamine (1126) - Rural area: Cocaine(n.a.); MDMA(n.a.); Methamphetamine (398) *not available (n.a.)	Lai et al., 2016a
Colombia	Urban sewage treatment plants in Queensland	Mephedrone(n.a.); Methylone(11.6)	Thai et al., 2016
	Sewage treatment plants in South East Queensland (488 and 712 samples in urban areas, respectively)	- Urban area: Cocaine(120-510); Methamphetamine(370-1160); MDMA(110-680) - Rural area: Cocaine(7-44); Methamphetamine(430-660); MDMA(27-60)	Lai et al., 2016b
	Urban sewage treatment plants in Bogotá and Medellín.	- Bogotá: Cocaine(82); Benzoyllecgonine(207); MDMA(4.6); THC(32) - Medellín: Cocaine(52); Benzoyllecgonine(642); MDMA(0.66); THC(47)	Bijlsma et al., 2016
USA	College campus (campus-wide and college dormitory) in the city of Miami, Florida	*Campus: Heroin(0.18-0.64); Benzoyllecgonine(0.1-0.2); Amphetamine(22); THC(12.7-46) *Dormitory: Heroin(2.3); Benzoyllecgonine(2.8); Amphetamine(2.7-9.8); THC(233) (THC: based on marijuana daily dose of 125 mg; Amphetamine: based on amphetamine daily dose of 30 mg; Heroin: based on heroin daily dose of 30 mg; Benzoyllecgonine: based on cocaine daily dose of 100 mg)	Heuett et al., 2015
Canada	Two cities (small community (75,000 population) and large urban center (1.6 million population))	- Small community: Cocaine(115); Benzoyllecgonine(241); Amphetamine(43); Methamphetamine(n.a.); MDMA(131) - Large urban center: Cocaine(348); Benzoyllecgonine(1247); Amphetamine(23); Methamphetamine(18); MDMA(69)	Yargeau et al., 2014
China	Urban sewage treatment plants in 4 mega cities (Beijing, Guangzhou, Shenzhen, and Shanghai)	- Beijing: Methamphetamine(10-47); Benzoyllecgonine(<0.2-0.3); MDMA(0.2-0.3); Amphetamine(5.0); THC(n.a.) - Shanghai: Methamphetamine(33); Benzoyllecgonine(<0.2); MDMA(<0.2-0.4); Amphetamine(0.9); THC(n.a.) - Guangzhou: Methamphetamine(63); Benzoyllecgonine(2.0-2.8); MDMA(0.9); Amphetamine(22); THC(n.a.) - Shenzhen: Methamphetamine(67); Benzoyllecgonine(1.0-5.6); MDMA(0.4-1.5); Amphetamine(3.7-42); THC(n.a.)	Khan et al., 2014
Hong Kong	Urban sewage treatment plants in Hong Kong	Methamphetamine(62±4); Benzoyllecgonine(54±3); MDMA(n.a.); Amphetamine(n.a.); Cocaine(33±4); Ketamine(62±4)	Lai et al., 2013
South Korea	Urban sewage treatment plants in five South Korean cities	Methamphetamine(1.12-29.2); MDMA(n.a.-5.55); Amphetamine(n.a.-7.18)	Kim et al., 2015
Poland	Nine urban sewage treatment plants	Methamphetamine(0.90); Benzoyllecgonine(8.44); Amphetamine(4.57)	Kluczyńska et al., 2016
Czech Republic	Sewage treatment plants	Cocaine(186); Methamphetamine(293-627); MDMA(21-173); Amphetamine(27-94); Methadone(26-48)	Baker et al., 2012
Fort-de-France	Four sewage treatment plants	Cocaine(939±287); Cannabis (37,500±18,800); THC(268-1156)	Dannien et al., 2014
Germany, Switzerland	Nine urban sewage treatment plants (22 plants in 19 cities)	Cocaine(8.4-598.3); Methamphetamine(n.a.-133.0); MDMA(n.a.-55.4); Amphetamine(n.a.-138.3); Cannabis(31.3-125.4); Heroin(n.a.-17.7)	Been et al., 2016b
Finland	Urban sewage treatment plants in 10 major cities	Methamphetamine(average dose 26); MDMA(73); Amphetamine(190); Cocaine(12) based on Benzoyllecgonine consumption	Kaukaupää et al., 2014
Greece	Three sewage treatment plants on Lesbos Island (during off-peak season)	Cocaine(0.5-33); MDMA(0.2-2.2); Cannabis(50-3400)	Gatidou et al., 2016

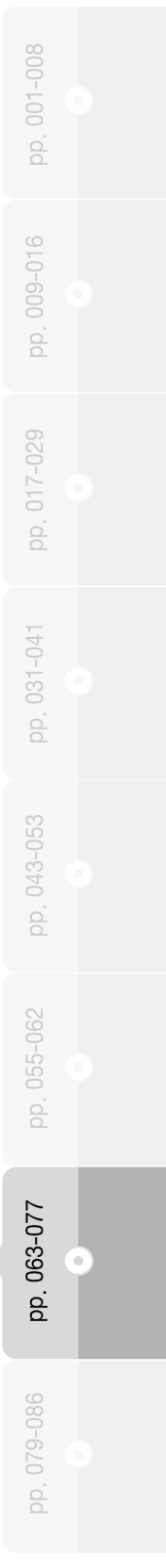


Table 2. Health and disease-related biomarkers

Category	Biomarkers	Target Disease	Reference	
Pharmaceuticals	Antibiotics	Amoxicillin, Ampicillin, Azithromycin, Chloramphenicol, Chlortetracycline, Ciprofloxacin, Clarithromycin, Dicloxacillin, Doxycycline, Erythromycin, Metronidazole, Minocycline, Norfloxacin, Oxacillin, Penicillin G, Penicillin V, Roxithromycin, Ofloxacin, Oxytetracycline, Sulfamethoxazole, Sulfapyridine, Sulfasalazine, Sulfathiazole, Tetracycline, Trimethoprim	Bacterial infections	Castiglioni et al., 2006; Gracia-Lor et al., 2012; Gros et al., 2010; Hirsch et al., 1999; Huang et al., 2011; Jelic et al., 2012; Kühne et al., 2000; Petrie et al., 2015
	Benzodiazepines	Alprazolam, Bromazepam, Chlordiazepoxide, Clobazam, Clonazepam, Clorazepate, Diazepam, Flunitrazepam, Flurazepam, Lorazepam, Lormetazepam, Medazepam, Midazolam, Nitrazepam, Nordazepam, Pinazepam, Prazepam, Temazepam, Tetrazepam, Triazolam	Anxiety and Sleep disorders	Baker et al., 2014; Borova et al., 2014; Fernández et al., 2014; Herrero et al., 2015; Kosjek et al., 2012; Petrie et al., 2015; Racamonde et al., 2014; Smith-Kielland et al., 2001
	Others	Acetaminophen, Acetylsalicylic acid, Allopurinol, Atenolol, Bezafibrate, Carbamazepine, Clindamycine, Clofibrate, Cloribric acid, Codeine, Etofibrate, Etofyllinclofibrate, Crotamiton, Diatrizoic acid, Diclofenac, Dilantin, Diltiazem, Diphenhydramine, Fluoxetine, Furosemide, Gabapentin, Gemfibrozil, Hydrochlorothizaide, Hydrocodone, Ibuprofen, Iopromide, Meprobamate, Metamizone/dipyrone, Metoprolol, Naproxen, Nifedipine, Primidone, Propranolol, Propyphenazone, Sulfapyridine, Metformin, Venlafaxine, Valsartan	Gouty, Hyperlipidemia, Central nervous system, Pyrexia, etc.	Broussard, 2004; Castrignanò et al., 2016; Dickenson et al., 2011; Funke et al., 2015; Howell et al., 1993; Huschek et al., 2004; Jjemba, 2006; O'Brien et al., 2014; Petrie et al., 2015; Riva et al., 2015; Vazquez-Roig et al., 2014
Endogenous Compounds	Ammonia, Androstenedione, Creatine, Chloesterol, Cortisol, Eicosanoids, Serotonine, 1-aminopropan-2-one, α -fetoprotein	Stress or normal metabolism, cancer, diabetes and cardiovascular disorder	Been et al., 2014; Chen et al., 2014; Thai et al., 2014	
DNA	DNA/RNA sequences	Obesity, Pathogenic Viruses, metabolic disorders	Le Chatelier et al., 2013; McLellan et al., 2013; Ryoo et al., 2013; Webb et al., 2015	

연구가 있다. 이 국내 조사 결과 메타암페타민의 섭취량은 1.12~29.2 mg/day/1000 people이었다 (Kim et al., 2015). 이는 국내에서 마약류 사용이 불법이지만 사용되고 있다는 충격적인 사실을 나타내는 결과이지만, 다른 나라에 비해 상당히 적은 양이 검출된 것을 볼 때 법적 관리의 효과가 있는 것으로 사료된다. 예를 들어, 2011년 홍콩에서 채취한 하수 시료 조사에서 메타암페타민 섭취량은 62 ± 4 mg/day/1000 people이었다 (Lai et al., 2013). 이러한 정보는 불법 약물류 사용 방지 캠페인을 마련하는데 활용할 수 있고, 기존에 관련 정보를 얻기 위해 사용되었던 설문조사의 단점을 보완할 수 있다. 설문조사를 통해 획득한 자료는 심하게 편향될 수 있고 시간차가 존재할 수 있기 때문에 하수기반역학을 이용한 조사에 비해 정확성이 떨어질 수 있다.

2.2 하수 내 약물류 분석 방법에 대한 연구

하수 분석을 위해 우선 하수 시료를 채취할 지역에 대한 사전 조사가 이루어져야 한다. 대상 지역의 사회, 경제적 조건, 현재 및 과거의 환경 모니터링 데이터, 인구 규모 및 이동성, 범죄 통계 등의 자료를 문헌조사, 방문조사, 설문조사, 인터뷰 등을 통해 확보할 필요가 있다 (Gao et al., 2015). 이러한 정보는 하수를 분석한 데이터 해석에 중요하다. 다음으로 하수처리장의 유입수 또는 호기조나 혐기조의 활성 슬러지 시료를 채취한다. 시료 채취는 주로 정해진 기간(약 10~15분)마다 시료를 채취하는 자동시료채취기(auto-sampler)를 이용하여 24시간 동안 연속적으로 이루어진다. 채취한 시료는 필터링 또는 원심 분리 등을 통한 고형물 제거, 내부 표준 물질 추가, 농축 등의 전처리 단계를 거치게 된다. 이후 기기 분석을 통해 시료 내 다양한



약물 성분에 대한 정보를 획득할 수 있다. 시료를 채취한 후 분석 전까지 일련의 전처리 과정 및 시료 보관 기간 동안 시료 내에서 대상 물질의 생물학적 분해가 일어날 수 있기 때문에 대상 물질의 안정성을 확보할 수 있는 pH 또는 온도 조건에서 시료를 관리하는 것이 중요하다 (Lai et al., 2011). 채취한 시료는 주로 HPLC-MS(고성능 액체 크로마토그래피-질량분석법) 또는 HPLC-MS/MS를 사용하여 분석한다 (Gao et al., 2015). 기기로 분석한 농도를 식 1에 넣어 인구 1,000명당 일일 약물 섭취량을 역계산(back calculation) 할 수 있다 (Gatidou et al., 2016). 간단하게 말하자면, 측정된 약물 잔류물 농도와 일일 하수 총 유량을 곱하여 약물 잔류물의 예상 일일 섭취량을 산출한다. 이 추정치는 배출 계수를 사용하여 보정하고, 최근 인구 조사 자료에 근거한 대상 지역 면적당 인구로 정규화되어 인구 1,000명당 약물 섭취량(mg/day/1000명)의 추정치를 산출한다. 하수 내 약물류 산정을 위한 위와 같은 일련의 과정 중 가장 큰 불확실성을 가지는 단계는 역계산 중에 필요한 인구 예측이고, 이는 7-55%의 불확실성을 가진다 (Gao et al., 2015).

$$\text{섭취량 [mg(d}\cdot\text{1000명)]} = \frac{[\text{약물류 측정 농도 (ng/L)} \times \text{하수 유량 (L/d)}] / 10^6 \times \text{보정계수}}{\text{대상 지역 거주자} / 1000} \quad (1)$$

2.3 하수 내 약물류 안정성 문제와 관련된 연구

사람이 복용한 약물류가 체내에서 대사된 후 대사되지 않은 대상 물질 또는 그 대상 물질의 대사산물이 배설물에 포함되어 배출된다. 따라서 분석하고자 하는 대상 물질을 대표할 수 있는 바이오마커로 어떤 물질을 선정할지는 하수기반역학에 있어 중요하다. 배출된 배설물은 하수관망을 통해 하수처리장으로 이동하는 동안 생물학적 분해 또는 물리화학적 변화를 거칠 수 있다 (Damien et al., 2014). 기존의 연구는 하수 내 약물 성분 및 대사산물이 안정적이라는 가정하에 수행되었다. 물론 12시간 이상 안정적인 물질도 있으나, 헤로인과 대사산물인 6-아세틸몰핀의 경우 2°C에서 12시간 후 각각 66%와 26% 감소하는 것으로 밝혀지는 등 (Baker et al., 2011) 하수관망에서 이동하는 동안 상당한 농도 변화가 발생하는 물질도 다수 존재한다. 또한 최근 하수 내 약물류의 분해 정도가 온도와 pH 등의 조건에 따라 달라진다는 연구결과가 발표되었다 (McCall et al., 2016; Senta et al., 2014;

Devault et al., 2017). 예를 들어, 몰핀의 경우 하수에서 4시간 체류 후 겨울(10°C)에는 약 16%가 분해된 반면, 여름(20°C)에는 약 33%가 분해되었다 (Senta et al., 2014). 또한 pH도 약물의 안정성에 영향을 주었다 (McCall et al., 2016). 예를 들어, 암페타민과 헤로인의 경우 중성 pH에서 더 안정적이었으며, 코카인의 경우 산성 조건(pH 2)에서 더 안정적이었다 (Gheorghe et al., 2008; van Nuijs et al., 2011; van Nuijs et al., 2012). 뿐만 아니라 하수관거의 노후 정도도 하수 내 약물류 안정성에 영향을 줄 수 있다. 예를 들어, 하수관거 내 산성 조건(pH 5.0~6.5)과 연중 고수온(26~31°C)으로 인해 온대 국가에서 기타 다른 나라에 비해 하수관거가 빠르게 노화되거나 하수 내 약물 성분이 빠르게 분해될 수 있다. 이로 인한 하수의 손실과 약물 성분의 분해는 대상 물질의 잔류농도에 영향을 미칠 수 있다 (Damien et al., 2014).

3. 하수 내 질병 및 건강 정보와 관련된 연구

최근 들어 커뮤니티의 건강 및 질병의 진단에 하수가 제공하는 화학적·생물학적 정보를 이용하는 것이 하수기반역학의 새로운 적용 분야로 많은 관심을 받고 있다. 우리가 모르는 사이에 항생제나 향정신성의약품과 같은 약물질, 특정 질병에 의한 체내 발생 화합물 및 유전물질(DNA, RNA 등) 등 대상 커뮤니티의 질병 및 건강에 대한 정보를 제공하는 다양한 화학적·생물학적 물질들이 하수로 배출되며 (Daughton et al., 2012), 이런 화학적 또는 생물학적 정보를 분석함으로써 사람들의 건강과 생활양식을 평가할 수 있다. 또한, 하수기반역학을 이용한 감염병의 진단 및 예방에 대한 연구도 많은 주목을 받는 주제로, 주로 하수에 잔류하는 감염병을 유발하는 특정 바이러스나 세균을 직접 검출하거나 감염에 의해 생성되는 생화학적 물질들을 분석하는 연구가 이뤄지고 있다 (Sinclair et al., 2008; Nordgren et al., 2009; Eggimann et al., 2017).

서론 및 앞선 단락에서 소개한 바와 같이, 하수기반역학은 대상 커뮤니티를 대표할 수 있는 하수 또는 슬러지 시료를 채취하고, 이로부터 선정한 지표물질을 분석하며, 분석한 농도로부터 커뮤니티 구성원의 인구 당 지표물질 배출량을 산정하는 작업을 거친다. 이렇게 산정된 인구 당 지표물질 배출량을 통하여 커뮤니티의 건강,

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

발병특성 또는 라이프스타일을 분석하고, 이상 징후 발견 시 그에 따른 조치를 실시하며, 조치의 결과를 다시 위의 시료채취 및 분석, 인구 당 배출량 산정 작업을 통해 확인하게 된다. 커뮤니티의 질병 및 건강 진단에 하수기반역학을 활용하기 위해서는 우선적으로 그 척도가 되는 화학적·생물학적 지표물질을 적절하게 선정하여야 한다. 또한, 하수라는 다양한 구성성분을 지니는 매질로부터 지표물질의 농도를 신뢰성 있게 검출할 수 있는 분석법을 확립할 필요가 있다. 하수기반역학에 활용 가능한 지표물질은 의료 분야에서 이미 활용되는 것들이 대부분으로 (Daughton, 2012), 소변이나 혈액 등으로부터 이 물질을 검출하는 분석법은 상당 부분 개발되어 있을 가능성이 높다. 그러나, 하수의 매질 특성에 따라 분석기기에서의 간섭(interference), 매트릭스 효과(matrix effect) 등이 다르게 나타날 가능성이 높으므로, 하수 분석에 보다 적합한 시료의 전처리 및 기기분석법의 개발이 필요할 수 있다. 다음으로, 건강한 커뮤니티의 인구 당 지표물질 배출량 범위(즉, 정상 범위)를 산정하는 것이 중요하다. 도출한 정상 범위를 커뮤니티 질병 발생 및 건강 이상 감지에 활용하여야 하기 때문이다. 앞서 하수기반역학을 개인 요검사의 커뮤니티 버전이라 소개한 바 있는데, 건강검진에서 소변 내 당이나 단백질 수치 등을 측정하는 것으로부터 적절한 정상 범위의 산정 필요성을 유추해 볼 수 있다. 인구 당 지표물질 배출량 정상 범위를 산정하는 데에는 발병 여부 또는 건강 상태 이외의 커뮤니티 특성(성비, 연령분포, 인종 등)이 지표물질 배출량에 미치는 영향에 대해서도 충분히 고려하여야 한다 (Daughton, 2012).

하수기반역학을 이용한 커뮤니티의 질병 및 건강 정보 획득은 비교적 최근에 제안이 이루어진 연구분야로, 아직 상대적으로 기초 단계에 머물러 있다. 따라서 현재까지의 연구는 이러한 정보를 얻기에 적합한 지표물질 선정에 초점을 맞춰 진행되어 왔다. 여기에서는 하수로부터 커뮤니티의 발병 및 건강 정보를 획득하기 위하여 요구되는 지표물질의 특성과 지금까지 제시된 주요 지표물질에 대하여 살펴보도록 한다.

3.1 커뮤니티 질병 및 건강 평가에 적합한 지표물질의 특성

하수로부터 목표하는 커뮤니티의 질병 및 건강 관련 정보를 얻기 위해서는 이를 신뢰성 있게 대변하는

적절한 지표물질 선정이 중요하다 (Choi et al., 2018). 인간이 분비한 물질이 하수처리장으로 유입되기까지 관망을 통해 이동하면서 물질 중 일부는 분해 혹은 변형될 수 있고, 샘플링 시간 또는 방법에 따라서도 물질의 농도가 달라질 수 있다. 이 후 시료의 보관, 전처리, 분석이라는 일련의 과정을 거치면서도 하수 시료 내 물질의 농도가 변할 수 있다 (Gao et al., 2015). 따라서 지표물질로 선정되기 위해서는 다음과 같은 사항들이 고려되어야 한다. 우선 1) 일관성 있는 양이 인간으로부터 배출되어야 하고, 2) 하수에서 검출이 가능한 양으로 배출되어야 하며, 3) 하수에서의 분석이 상대적으로 용이해야 한다. 또한 4) 인간의 대사산물이어야 하며, 5) 인체로부터의 분비 이외의 경로(식품, 관료에서의 생물학적 변환 등)로부터 발생하는 양이 상대적으로 적어야 하고, 6) 하수 내에서 안정적인 물질이어야 한다. 그 밖에도 7) 1일 1인이 배출하는 양의 변화가 작아야 하고, 8) 계절이나 날씨 또는 지역과 같은 요인이 배출량에 유의한 영향을 주지 않는 물질을 지표물질로 선정해야 한다 (Daughton, 2012; Gracia-Lor et al., 2017). 의료 분야에서 이루어진 연구를 포함, 기존 문헌으로부터 이러한 요구특성을 일정 부분 만족하는 지표물질이 여럿 제시되어 왔으며, 본 논문에서는 대표적인 부류로 바이오마커와 aptamer를 제시하고 이에 대해 정리하여 표 2와 표 3에 각각 제시하였다.

3.2 사용 가능한 지표물질 후보군: 바이오마커

바이오마커는 개체가 환경 스트레스나 질병에 의한 자극을 받았을 때 생성되거나 변형된 생체역학적 화학물질로, 정성, 정량 분석을 통해 개체 내에 발생한 질병을 예측할 수 있다.

바이오마커는 표 2와 같이 외인성 물질, 내인성 물질, DNA의 3가지로 크게 구분할 수 있다. 외인성 물질은 질병 치료나 증상 완화를 위해 체외로부터 섭취되는 항생제나 향정신성의약품과 같은 의약품을 일컫으며, 내인성 물질은 암 등 질병이나 스트레스에 의해 체내에서 합성되는 물질을 뜻한다. 바이오마커로 사용할 수 있는 DNA는 특정 질병에 의해 구조나 염기서열이 변형되는 것들이다.

외인성 물질인 의약품은 1) 항생제, 2) 향정신성의 약품을 의미하는 벤조디아제핀(benzodiazepine)과 3) 기타로 세분화할 수 있으며, 각각의 질병에 사용되는



Table 3. Health and disease related aptamers

Category	Target molecule	Disease	Reference
Chloramphenicol aptamer	Chloramphenicol	Genetic toxicity, Embryo and Fetus toxicity, Carcinogenesis Possibility, Anemia	Mehlhorn et al., 2018
Nucleic acid aptamer	Epithelial cell adhesion molecule (EpCAM), H5Nx virus	Colorectal cancer, Influenza	Chang et al., 2017; Nguyen et al., 2016
Biotin-streptavidin interaction aptamer	HIV-1 Tat protein	HIV	Tombelli et al., 2005
HBsAg (Hepatitis B virus surface antigen)-specific DNA aptamer	Hepatitis B virus	HBV	Xi et al., 2015

서로 다른 바이오마커의 특성을 통해 넓게는 커뮤니티 내부의 건강상태를, 작은 범위로는 특정 질병에 대한 감염 여부를 예측할 수 있다.

현재 질병 예측에 활용되는 바이오마커 중 아목시실린(amoxicillin)을 비롯한 약 25종이 항생제로 분류되며, 이들은 소변으로 배출될 때 거의 변형이 일어나지 않는다는 장점을 가진다 (Castiglioni et al., 2006; Huang et al., 2011). 또한, 복용 시 체내 대사 작용의 일환으로 특정 대사산물을 생산하기 때문에 하수 내의 항생제 양과 그에 상응하는 특정 대사산물을 비교하면, 하수로 직접 버려지는 항생제와 실제 복용된 항생제를 구분할 수 있다. 이러한 특성을 이용해 대상 커뮤니티의 항생제 관련 처방전이나 판매량과 하수에서 측정되는 항생제 농도를 비교하면 그 커뮤니티의 항생제에 대한 남용이나 오용 정보를 구할 수 있는 가능성이 있다. 하지만 현재 의료 분야에서 활용되고 있는 이들 바이오마커가 하수 내에서 안정적으로 존재하는지 여부는 아직 명확하게 밝혀지지 않았으므로, 하수기반역학에 적용하기 위해서는 이와 관련된 연구가 필요한 상황이다.

대표적인 향정신성의약품인 벤조디아제핀은 주로 불면증이나 수면 장애와 관련된 질병에 사용되는 물질로 할로젠화 화합물로 이루어져 생분해에 저항성을 가진다. 이러한 특성은 하수에 적용 가능한 바이오마커로서 큰 장점이며 커뮤니티의 질병 예측에 벤조디아제핀이 사용될 수 있다는 것을 보여준다. 그 외에도 약 39종의 의약품들이 바이오마커로 사용될 수 있다고 알려져 있으며 (Gracia-Lor et al., 2017), 절반 이상의 의약품들이 라세미 혼합물(racemic mixture)로 합성되기 때문에 (Petrie et al., 2015, Vazquez-Roig et al., 2014) 광학 이성질체 성질을 이용해 의도적으로 하수에 배출되는 의약품들과 체내를 통과한 후 배출

되는 의약품을 구분하여 보다 유용한 정보를 얻을 수 있다.

체내에서 합성되는 내인성 물질로 하수를 통한 건강 및 질병 예측에 사용 가능한 바이오마커는 아이소프로스탄(isoprostane)을 비롯해 약 10종이 존재하며, 실제로 심혈관 질환이나 당뇨, 암과 같은 질병을 진단하는 데에 이와 같은 내인성 물질이 사용되고 있다 (Gracia-Lor et al., 2017). 외인성 물질의 경우 처방되는 양과 검출되는 양 간의 상대적인 값이 의미를 갖는다면, 체내 대사물인 내인성 물질은 절대적인 값이 더 강조되며, 시간별 또는 커뮤니티 간의 값을 비교하는 것이 더 큰 의미를 갖는다.

아이소프로스탄은 내인성 물질 중에서 가장 활발하게 연구가 진행되고 있는 대표적인 물질로, 활성산소에 의해 만들어지기 때문에 커뮤니티의 산화스트레스 예측에 사용될 수 있다 (Gracia-Lor et al., 2017). 산화스트레스는 비만, 고혈압, 심혈관 질환, 당뇨병과 같은 만성 염증성 질환을 발병하게 하는 가장 큰 요인이며, 하수에 존재하는 아이소프로스탄을 정량 분석해 시간에 따른 변화량을 추적할 경우, 그에 비례한 커뮤니티의 활성산소 양의 변화를 추정할 수 있게 된다. 또한, 아이소프로스탄 생성과 함께 연쇄적으로 발생하는 과산화지질에 의해 발병 가능한 질병들(심근경색, 동맥경화 등)의 발병 가능성도 예측할 수 있다.

최근에는 PCR(polymerase chain reaction) 기법 또는 NGS(next-generation sequencing) 기반 분자생물학적 기법을 통한 DNA/RNA 염기서열 분석이 수월해지면서, DNA를 이용해 커뮤니티의 비만도나 병원성 바이러스, 대사 장애와 같은 건강 문제를 예측할 수 있게 되었다. 이를 통해 내·외인성 바이오마커 외에 DNA 또한 건강 상태를 진단하는 바이오마커로 크게 주목받고 있다.

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

3.3 사용 가능한 지표물질 후보군: 압타머

커뮤니티의 건강 및 질병을 예측하기 위한 또 다른 중요한 지표물질은 압타머가 있다. 압타머는 표적 물질과 높은 친화력을 가져 특이적으로 강하게 결합할 수 있는 핵산 물질로, 특정 표적 물질과 강한 결합을 제공하는 기능 때문에 항체의 대체 기술로 활발히 연구되고 있다 (Tombelli et al., 2005; Chang et al., 2017). 또한, 하수에 존재하는 다양한 화학물질 중 특정 타겟 물질을 선택적으로 검출해 질병 발생 상황을 예측하는 바이오센서형 지표물질로 사용할 수 있다.

표적 물질에 따라 친화력을 갖는 압타머가 다르므로, 표 3과 같이 대상 질병에 따라 다양한 압타머가 존재한다. 표적 물질에 따른 압타머를 선별하기 위해서는 일반적으로 SELEX(systematic evolution of ligands by exponential enrichment)기법이 사용된다 (Yüce et al., 2018).

대표적으로 유전 독성, 태아나 배아 독성과 관련된 질병을 진단하기 위해 항생물질 중 하나인 클로람페니콜(chloramphenicol)을 검출하는데, 이 때는 클로람페니콜과 친화력을 갖는 핵산 압타머를 이용한다 (Mehlhorn, 2018). 또한, M-13 박테리오파지를 결합한 압타머의 경우 대상 단백질을 갖고 있는 박테리오파지를 보여주는 디스플레이 기술을 적용해 암이나 심혈관 질환 진단에 응용할 수도 있다 (Kim, 2016).

이 외에도 표면플라즈몬공명 기술인 SPR(surface plasmon resonance)과 QCM(quartz crystal microbalance) 기술 등을 압타머 측정에 접목한 시도들이 성공하면서 보다 많은 관심을 받고 있다. 대표적으로 biotin-streptavidin interaction 압타머의 경우 이러한 나노기술을 접목해 HIV 진단에 성공하였고 (Tombelli et al., 2005), 자성 나노입자 기술을 도입해 현재 병원에서 사용하고 있는 ELISA (enzyme linked immunosorbent assay) 기술보다 더 높은 정확성으로 B형 간염 바이러스를 검출하는 것에 성공하기도 했다. 이런 다양한 압타머 기술의 발전은 하수를 통한 건강 및 질병 예측의 범위를 넓히고 보다 나은 정확성을 제공할 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 리뷰를 통해 최근 주목받고 있는 새로운 형태의 데이터 기반 도시 물관리기술인 하수기반역학 혹은

하수 화학정보 마이닝의 최근 연구동향에 대해 알아 보았다. 하수기반역학 조사는 고전적인 약물 사용량 전수조사나 건강/질병 감시시스템과 달리 개개인을 조사하는 것이 아니고 하수에 모아진 집단의 정보를 분석하기 때문에 개인의 프라이버시를 침해하는 문제를 배제할 수 있고 높은 정보의 신뢰성을 가진다는 장점이 있다. 또한, 커뮤니티 전체의 정보를 다루기 때문에 해당 도시의 전반적인 생활 수준, 약물 사용량, 건강 및 질병 발생가능성 등을 기타 다른 도시와 비교해 국가 차원에서 시민 건강관리를 가능하게 한다는 장점이 있다. 추가적으로 이렇게 수집된 정보들을 모니터링하고 분석함으로써 질병 발생 동향을 신속히 감지하고 지역을 특정할 수 있게 되므로 질병 발생 조기 경보 시스템 등에도 적용 할 수 있는 가능성이 있다. 예를 들어, 미국 보건복지부에서 공동체의 건강 정보 수집을 위해 2010년부터 실행한 community health data initiative(CHDI)등 (United States Department of Health & Human Services, 2010)과 같은 후향성 평가의 기준이 되는 기존 커뮤니티 질병 데이터 마이닝 시스템은 하수기반역학을 바로 적용할 수 있는 좋은 예이다. 우리나라는 수질 관리 체계가 수질환경기준에 의해 하천, 호소 및 지하수와 같은 상수원 수질관리에 초점이 맞춰져 있고 하수도로 인한 큰 재난이 없었기 때문에 아직까지 하수기반역학분야에 큰 관심을 기울이지 않았다. 하지만 최근 실시된 불법 약물질 추정에 대한 연구를 계기로 데이터 기반 도시 물관리 기술로서 하수기반역학에 대한 관심이 높아지고 있으며, IT 강국으로써 하수기반역학을 활용할 수 있는 튼튼한 기반을 가지고 있기에 국내 적용 시 빠른 발전이 기대되는 분야 중 하나이다. 하수기반역학은 위와 같이 다양한 가능성 및 장점을 가지고 있으나, 개인 및 집단정보보호에 대한 법률적인 문제, 광범위한 데이터 수집을 위한 초기 인프라 구축에 대한 비용 문제, 운영 범위 및 시스템 선정 등 제도적 변화 요구사항, 하수에 이용 가능한 지표물질에 대한 연구부족, 하수로부터 얻은 정보의 신뢰성 문제등 여러가지 해결해야 될 장애물이 남아 있다. 또한 상수도에서 새로운 신종오염물질이 계속해서 검출되고 있고 예상하지 못한 다양한 변환대사물질이 하수 내에 존재할 수 있기 때문에 선정된 지표물질만을 선택적으로 조사하는 표적분석방식은 커뮤니티의 정보를 종합적으로 반영하기에 한계를 가진다. 궁극적으로 비표적 스크리닝



기술(non-target screening)을 이용해 하수를 포괄적으로 조사해야 될 필요성이 있으며, 상수공급시설과의 연계 조사를 통해 커뮤니티에서 사용되고 배출된 정보를 한정 지을 필요가 있다. 그럼에도 불구하고 하수 기반역학은 도시 물 인프라가 제공하는 데이터를 활용하는 새로운 방법론으로 미래의 커뮤니티 건강관리 기술로써 큰 의미를 가지며 계속해서 발전이 기대되는 분야이다.

사 사

본 연구는 환경부 글로벌담환기술사업(그린패트를 측정기술개발사업, 과제번호 201801840003), 과학기술정보통신부 한국연구재단 신진연구자지원사업(NRF-2018R1C1B6005143)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한 본 연구는 2018년 한국외국어대학교 교내연구지원에 의해 수행되었습니다.

References

Australian Criminal Intelligence Commission. (2017). National wastewater drug monitoring program report ACIC, Canberra, 18.

Bade, R., Bijlsma, L., Sancho, J.V., Baz-Lomba, J.A., Castiglioni, S., Castrignanò, E., Causanilles, A., Gracia-Lor, E., Kasprzyk-Hordern, B., Kinyua, J., McCall, A.K., van Nuijs A.L.N., Ort, C., Plósz, B.G., Ramin, P., Rousis, N.I., Ryu, Y., Thomas, K.V., Voogt, P., Zuccato, E. and Hernández, F. (2017). Liquid chromatography-tandem mass spectrometry determination of synthetic cathinones and phenethylamines in influent wastewater of eight European cities, *Chemosphere*, 168, 1032-1041.

Baker, D.R. and Kasprzyk-Hordern, B. (2011). Critical evaluation of methodology commonly used in sample collection, storage and preparation for the analysis of pharmaceuticals and illicit drugs in surface water and wastewater by solid phase extraction and liquid chromatography-mass spectrometry, *J. Chromatogr. A*, 1218(44), 8036-8059.

Baker, D.R., Barron, L. and Kasprzyk-Hordern, B. (2014). Illicit and pharmaceutical drug consumption estimated via wastewater analysis. Part A: Chemical analysis and drug use estimates, *Sci. Total Environ.*, 487, 629-641.

Baker, D.R., Očenášková, V., Kvalova, M. and

Kasprzyk-Hordern, B. (2012). Drugs of abuse in wastewater and suspended particulate matter-further developments in sewage epidemiology, *Environ. Int.*, 48, 28-38.

Been, F., Rossi, L., Ort, C., Rudaz, S., Delémont, O. and Esseiva, P. (2014). Population normalization with ammonium in wastewater-based epidemiology: Application to illicit drug monitoring, *Environ. Sci. Technol.*, 48(14), 8162-8169.

Been, F., Lai, F.Y., Kinyua, J., Covaci, A. and van Nuijs, A.L.N. (2016a). Profiles and changes in stimulant use in Belgium in the period of 2011-2015, *Sci. Total Environ.*, 565, 1011-1019.

Been, F., Bijlsma, L., Benaglia, L., Berset, J.D., Botero-Coy, A.M., Castiglioni, S., Kraus, L., Zobel, F., Schaub, M.P., Bücheli, A., Hernández, F., Delémont, O., Esseiva, P. and Ort, C. (2016b). Assessing geographical differences in illicit drug consumption-a comparison of results from epidemiological and wastewater data in Germany and Switzerland, *Drug. Alcohol Depend.*, 161, 189-199.

Bijlsma, L., Botero-Coy, A.M., Rincón, R.J., Peñuela, G.A. and Hernández, F. (2016). Estimation of illicit drug use in the main cities of Colombia by means of urban wastewater analysis, *Sci. Total Environ.*, 565, 984-993.

Borova, V.L., Maragou, N.C., Gago-Ferrero, P., Pistos, C. and Thomaidis, N.S. (2014). Highly sensitive determination of 68 psychoactive pharmaceuticals, illicit drugs, and related human metabolites in wastewater by liquid chromatography-tandem mass spectrometry, *Anal. Bioanal. Chem.*, 406(17), 4273-4285.

Broussard, L. (2004). Disposition of toxic drugs and chemicals in man, 7th Baselt, R.C., Foster City, CA: Biochem. Publ., 1250.

Castiglioni, S., Bagnati, R., Fanelli, R., Pomati, F., Calamari, D. and Zuccato, E. (2006). Removal of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Italy, *Environ. Sci. Technol.*, 40(1), 357-363.

Castrignanò, E., Lubben, A. and Kasprzyk-Hordern, B. (2016). Enantiomeric profiling of chiral drug biomarkers in wastewater with the usage of chiral liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry, *J. Chromatogr. A*, 1438, 84-99.

Chang, C., Zhou, S., Cai, Y. and Tang, F. (2017). Nucleic acid aptamer application in diagnosis and therapy of colorectal cancer based on cell-SELEX technology, *NPJ. Precis. Oncol.*, 1, 37.

Chen, C., Kostakis, C., Gerber, J.P., Tschärke, B.J., Irvine, R.J. and White, J.M. (2014). Towards finding a population biomarker for wastewater epidemiology studies, *Sci. Total*

pp. 001-008
pp. 009-016
pp. 017-029
pp. 031-041
pp. 043-053
pp. 055-062
pp. 063-077
pp. 079-086

- Environ., 487, 621-628.
- Choi, P.M., Tscharke, B.J., Donner, E., O'Brien, J.W., Grant, S.C., Kaserzon, S.L., Mackie, R., O'Malley, E., Crosbie, N.D., Thomas, K.V. and Mueller, J.F. (2018). Wastewater-based epidemiology biomarkers: Past, present and future, *Trends Anal. Chem.*, 105, 453-469.
- Damien, D.A., Thomas, N., Hélène, P., Sara, K. and Yves, L. (2014). First evaluation of illicit and licit drug consumption based on wastewater analysis in Fort de France urban area (Martinique, Caribbean), a transit area for drug smuggling, *Sci. Total Environ.*, 490, 970-978.
- Daughton, C.G. (2012). Using biomarkers in sewage to monitor community-wide human health: isoprostanes as conceptual prototype, *Sci. Total Environ.*, 424, 16-38.
- Degenhardt, L. and Hall, W. (2012). Extent of illicit drug use and dependence, and their contribution to the global burden of disease, *Lancet.*, 379(9810), 55-70.
- Devault, D.A., Lévi, Y. and Karolak, S. (2017). Applying sewage epidemiology approach to estimate illicit drug consumption in a tropical context: Bias related to sewage temperature and pH, *Sci. Total Environ.*, 584-585, 252-258.
- Dickenson, E.R.V., Snyder, S.A., Sedlak, D.L. and Drewes, J.E. (2011). Indicator compounds for assessment of wastewater effluent contributions to flow and water quality, *Water Res.*, 45(3), 1199-1212.
- Eggimann, S., Mutzner, L., Wani, O., Schneider, M.Y., Spuhler, D., Moy de Vitry, M., Beutler, P. and Maurer, M. (2017). The potential of knowing more: A review of data-driven urban water management, *Environ. Sci. Technol.*, 51(5), 2538-2553.
- Fernández, P., Regenjo, M., Fernández, A.M., Lorenzo, R.A. and Carro, A.M. (2014). Optimization of ultrasound-assisted dispersive liquid-liquid microextraction for ultra performance liquid chromatography determination of benzodiazepines in urine and hospital wastewater, *Anal. Methods*, 6, 8239-8246.
- Funke, J., Prasse, C., Eversloh, C.L. and Ternes, T.A. (2015). Oxypurinol - A novel marker for wastewater contamination of the aquatic environment, *Water Res.*, 74, 257-265.
- Gao, J., O'Brien, J., Lai, F.Y., van Nuijs, A.L.N., He, J., Mueller, J.F., Xu, J. and Thai, P.K. (2015). Could wastewater analysis be a useful tool for China? - A review, *J. Environ. Sci.(China)*, 27, 70-79.
- Gao, J., O'Brien, J., Du, P., Li, X., Ort, C., Mueller, J.F. and Thai, P.K. (2016). Measuring selected PPCPs in wastewater to estimate the population in different cities in China, *Sci. Total Environ.*, 568, 164-170.
- Gatidou, G., Kinyua, J., van Nuijs, A.L.N., Gracia-Lor, E., Castiglioni, S., Covaci, A. and Stasinakis, A.S. (2016). Drugs of abuse and alcohol consumption among different groups of population on the Greek Island of Lesbos through sewage-based epidemiology, *Sci. Total Environ.*, 563-564, 633-640.
- Gheorghe, A., van Nuijs, A., Pecceu, B., Bervoets, L., Jorens, P.G., Blust, R., Neels, H. and Covaci, A. (2008). Analysis of cocaine and its principal metabolites in waste and surface water using solid-phase extraction and liquid chromatography-ion trap tandem mass spectrometry, *Anal. Bioanal. Chem.*, 391(4), 1309-1319.
- Gracia-Lor, E., Sancho, J.V., Serrano, R. and Hernández, F., (2012). Occurrence and removal of pharmaceuticals in wastewater treatment plants at the Spanish Mediterranean area of Valencia, *Chemosphere*, 87(5), 453-462.
- Gracia-Lor, E., Zuccato, E. and Castiglioni, S. (2016). Refining correction factors for back-calculation of illicit drug use, *Sci. Total Environ.*, 573, 1648-1659.
- Gracia-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., Zuccato, E. and Bijlsma, L. (2017). Measuring biomarkers in wastewater as a new source of epidemiological information: current state and future perspectives, *Environ. Int.*, 99, 131-150
- Gros, M., Petrović, M., Ginebreda, A. and Barceló, D. (2010). Removal of pharmaceuticals during wastewater treatment and environmental risk assessment using hazard indexes, *Environ. Int.*, 36(1), 15-26.
- Herrero, L., Calvarro, S., Fernández, M.A., Quintanilla-López, J.E., González, M.J. and Gómara, B. (2015). Feasibility of ultra-high performance liquid and gas chromatography coupled to mass spectrometry for accurate determination of primary and secondary phthalate metabolites in urine samples, *Anal. Chimica Acta*, 853, 625-636.
- Heuett, N.V., Ramirez, C.E., Fernandez, A. and Gardinali, P.R. (2015). Analysis of drugs of abuse by online SPE-LC high resolution mass spectrometry: communal assessment of consumption, *Sci. Total Environ.*, 511, 319-330.
- United States Department of Health & Human Services. (2010). HHS open government plan, version 1.1, 71-74.
- Hirsch, R., Ternes, T., Haberer, K. and Kratz, K.L. (1999). Occurrence of antibiotics in the aquatic environment, *Sci. Total Environ.*, 225(1-2), 109-118.



- Howell, S.R., Husbands, G.E.M., Scatina, J.A. and Sisenwine, S.F. (1993). Metabolic disposition of ¹⁴C-venlafaxine in mouse, rat, dog, rhesus monkey and man, *Xenobiotica*, 23(4), 349-359.
- Huang, C.H., Renew, J.E., Smeby, K.L., Pinkston, K. and Sedlak, D.L. (2011). Assessment of potential antibiotic contaminants in water and preliminary occurrence analysis, *J. Contemp. Water Res. Educ.*, 120(1), 4.
- Huschek, G., Hansen, P.D., Maurer, H.H., Kregel, D. and Kayser, A. (2004). Environmental risk assessment of medicinal products for human use according to European Commission recommendations, *Environ. Toxicol.*, 19(3), 226-240.
- Jelić, A., Gros, M., Petrović, M., Ginebreda, A. and Barceló, D. (2012). Occurrence and Elimination of Pharmaceuticals During Conventional Wastewater Treatment. In: Guasch, H., Ginebreda, A. and Geiszinger, A. (Ed.), *Emerging and Priority Pollutants in Rivers*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Jemba, P.K. (2006). Excretion and ecotoxicity of pharmaceutical and personal care products in the environment, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 63(1), 113-130.
- Kankaanpää, A., Ariniemi, K., Heinonen, M., Kuoppasalmi, K. and Gunnar, T. (2014). Use of illicit stimulant drugs in Finland: a wastewater study in ten major cities, *Sci. Total Environ.*, 487, 696-702.
- Khan, U., van Nuijs, A.L.N., Li, J., Maho, W., Du, P., Li, K., Hou, L., Zhang, J., Meng, X., Li, X. and Covaci, A. (2014). Application of a sewage-based approach to assess the use of ten illicit drugs in four Chinese megacities, *Sci. Total Environ.*, 487, 710-721.
- Kim, K.Y., Lai, F.Y., Kim, H.Y., Thai, P.K., Mueller, J.F. and Oh, J.E. (2015). The first application of wastewater-based drug epidemiology in five South Korean cities, *Sci. Total Environ.*, 524-525, 440-446.
- Kim, S.Y., Ministry of Environment (2016). Core Probe Technology Development for Simultaneous Detection and Removal of Water Micro-pollutant, *Technologies for the Water Environmental Policy*, 413-111-007.
- Klupczynska, A., Dereziński, P., Krysztofiak, J. and Kokot, Z.J. (2016). Estimation of drug abuse in 9 Polish cities by wastewater analysis, *Forensic Sci. Int.*, 260, 14-21.
- Kosjek, T., Perko, S., Zupanc, M., Zanoški Hren, M., Landeka Dragičević, T., Žigon, D., Kompare, B. and Heath, E. (2012). Environmental occurrence, fate and transformation of benzodiazepines in water treatment, *Water Res.*, 46(2), 355-368.
- Kühne, M., Ihnen, D., Möller, G. and Agthe, O. (2000). Stability of tetracycline in water and liquid manure, *Transbound. Emerg. Dis.*, 47(6), 379-384.
- Lai, F.Y., Ort, C., Gartner, C., Carter, S., Prichard, J., Kirkbride, P., Bruno, R., Hall, W., Eaglesham, G. and Mueller, J.F. (2011). Refining the estimation of illicit drug consumptions from wastewater analysis: co-analysis of prescription pharmaceuticals and uncertainty assessment, *Water Res.*, 45, 4437-4448.
- Lai, F.Y., Bruno, R., Leung, H.W., Thai, P.K., Ort, C., Carter, S., Thompson, K., Lam, P.K.S. and Mueller, J.F. (2013). Estimating daily and diurnal variations of illicit drug use in Hong Kong: a pilot study of using wastewater analysis in an Asian metropolitan city, *Forensic Sci. Int.*, 233(1-3), 126-132.
- Lai, F.Y., O'Brien, J., Bruno, R., Hall, W., Prichard, J., Kirkbride, P., Gartner, C., Thai, P., Carter, S., Lloyd, B., Burns, L. and Muller, J. (2016a). Spatial variations in the consumption of illicit stimulant drugs across Australia: a nationwide application of wastewater-based epidemiology, *Sci. Total Environ.*, 568, 810-818.
- Lai, F.Y., O'Brien, J.W., Thai, P.K., Hall, W., Chan, G., Bruno, R., Ort, C., Prichard, J., Carter, S., Anuj, S. and Kirkbride, K.P., Gartner, C., Humphries, M. and Mueller, J.F. (2016b). Cocaine, MDMA and methamphetamine residues in wastewater: Consumption trends (2009-2015) in South East Queensland, Australia, *Sci. Total Environ.*, 568, 803-809.
- Le Chatelier, E., Nielsen, T., Qin, J., Prifti, E., Hildebrand, F., Falony, G., Almeida, M., Arumugam, M., Batto, J.M., Kennedy, S., Leonard, P., Li, J., Burgdorf, K., Grarup, N., Jørgensen, T., Brandslund, I., Nielsen, H.B., Juncker, A.S., Bertalan, M., Levenez, F., Pons, N., Rasmussen, S., Sunagawa, S., Tap, J., Tims, S., Zoetendal, E.G., Brunak, S., Clément, K., Doré, J., Kleerebezem, M., Kristiansen, K., Renault, P., Sicheritz-Ponten, T., de Vos, W.M., Zucker, J.D., Raes, J., Hansen, T.; MetaHIT consortium, Bork, P., Wang, J., Ehrlich, S.D. and Pedersen, O. (2013). Richness of human gut microbiome correlates with metabolic markers, *Nat.*, 500, 541-546.
- Lim, S.S., Vos, T., Flaxman, A.D., Danaei, G., Shibuya, K. and Adair-Rohani, H. (2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the global burden of disease study 2010, *Lancet*, 380(9859), 2224-2260.
- McCall, A.K., Bade, R., Kinyua, J., Lai, F.Y., Thai, P.K., Covaci,

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

- A., Bijlsma, L., van Nuijs, A.L.N. and Ort, C. (2016). Critical review on the stability of illicit drugs in sewers and wastewater samples, *Water Res.*, 88, 933-947.
- McLellan, S.L., Newton, R.J., Vandewalle, J.L., Shanks, O.C., Huse, S.M., Eren, A.M. and Sogin, M.L. (2013). Sewage reflects the distribution of human faecal lachnospiraceae, *Environ. Microbiol.*, 15(8), 2213-2227.
- Mehlhorn, A., Rahimi, P., and Joseph, Y. (2018). Aptamer-based biosensors for antibiotic detection: A Review, *Biosens.*, 8(2), 54.
- Nguyen, V.T., Seo, H.B., Kim, B.C., Kim, S.K., Song, C.S. and Gu, M.B. (2016). Highly sensitive sandwich-type SPR based detection of whole H5Nx viruses using a pair of aptamers, *Biosens. Bioelectron.*, 86, 293-300.
- Nordgren, J., Matussek, A., Mattsson, A., Svensson, L. and Lindgren, P.E. (2009). Prevalence of norovirus and factors influencing virus concentrations during one year in a full-scale wastewater treatment plant, *Water Res.*, 43(4), 1117-1125.
- O'Brien, J.W., Thai, P.K., Eaglesham, G., Ort, C., Scheidegger, A., Carter, S., Lai, F.Y. and Mueller, J.F. (2014). A model to estimate the population contributing to the wastewater using samples collected on census day, *Environ. Sci. Technol.*, 48(1), 517-525.
- Petrie, B., Barden, R. and Kasprzyk-Hordern, B. (2015). A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring, *Water Res.*, 72, 3-27.
- Racamonde, I., Rodil, R., Quintana, J.B., Villaverde-de-Sáa, E. and Cela, R. (2014). Determination of benzodiazepines, related pharmaceuticals and metabolites in water by solid-phase extraction and liquid-chromatography-tandem mass spectrometry, *J. Chromatogr. A.*, 1352, 69-79.
- Riva, F., Zuccato, E. and Castiglioni, S. (2015). Prioritization and analysis of pharmaceuticals for human use contaminating the aquatic ecosystem in Italy, *J. Pharm. Biomed. Anal.*, 106, 71-78.
- Ryoo, S.R., Lee, J., Yeo, J., Na, H.K., Kim, Y.K., Jang, H., Lee, J.H., Han, S.W., Lee, Y., Kim, V.N. and Min, D.H. (2013). Quantitative and multiplexed microRNA sensing in living cells based on peptide nucleic acid and nano graphene oxide(PANGO), *ACS Nano*, 7(7), 5882-5891.
- Senta, I., Krizman, I., Ahel, M. and Terzic, S. (2014). Assessment of stability of drug biomarkers in municipal wastewater as a factor influencing the estimation of drug consumption using sewage epidemiology, *Sci. Total Environ.*, 487, 659-665.
- Sinclair, R.G., Choi, C.Y., Riley, M.R. and Gerba, C.P. (2008). Pathogen surveillance through monitoring of sewer systems, *Adv. Appl. Microbiol.*, 65, 249-269.
- Smith-Kielland, A., Skuterud, B., Olsen, K.M. and Mørland, J. (2001). Urinary excretion of diazepam metabolites in healthy volunteers and drug users, *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, 61(3), 237-246.
- Thai, P.K., Lai, F.Y., Edirisinghe, M., Hall, W., Bruno, R., O'Brien, J.W., Prichard, J., Kirkbride, K.P. and Mueller, J.F. (2016). Monitoring temporal changes in use of two cathinones in a large urban catchment in Queensland, Australia, *Sci. Total Environ.*, 545-546, 250-255.
- Thai, P.K., O'Brien, J., Jiang, G., Gernjak, W., Yuan, Z., Eaglesham, G. and Mueller, J.F. (2014). Degradability of creatinine under sewer conditions affects its potential to be used as biomarker in sewage epidemiology, *Water Res.*, 55, 272-279.
- Tombelli, S., Minunni, M., Luzi, E. and Mascini, M. (2005). Aptamer-based biosensors for the detection of HIV-1 tat protein, *Bioelectrochemistry*, 67(2), 135-141.
- United Nations Office on Drugs and Crime. (2015). World drug report 2015, E.15.XI.6, 5.
- Van Nuijs, A.L.N., Abdellati, K., Bervoets, L., Blust, R., Jorens, P.G., Neels, H. and Covaci, A. (2012). The stability of illicit drugs and metabolites in wastewater, an important issue for sewage epidemiology?, *J. Hazard. Mater.*, 239-240, 19-23.
- Van Nuijs, A.L.N., Castiglioni, S., Tarcommicu, I., Postigo, C., de Alda, M.L., Neels, H., Zuccato, E., Barcelo, D. and Covaci, A. (2011). Illicit drug consumption estimations derived from wastewater analysis: a critical review, *Sci. Total Environ.*, 409(19), 3564-3577.
- Vazquez-Roig, P., Kasprzyk-Hordern, B., Blasco, C. and Pico, Y. (2014). Stereoisomeric profiling of drugs of abuse and pharmaceuticals in wastewaters of Valencia (Spain), *Sci. Total Environ.*, 494-495, 49-57.
- Webb, A.L., Kruczkiewicz, P., Selinger, L.B., Inglis, G.D. and Taboada, E.N. (2015). Development of a comparative genomic fingerprinting assay for rapid and high resolution genotyping of *Arcobacter butzleri*, *BMC Microbiol.*, 15, 94.
- Xi, Z., Huang, R., Li, Z., He, N., Wang, T., Su, E. and Deng, Y. (2015). Selection of HBsAg-Specific DNA Aptamers Based on Carboxylated Magnetic Nanoparticles and Their Application in the Rapid and Simple Detection of Hepatitis B Virus Infection, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 7(21),



11215-11223.
 Yargeau, V., Taylor, B., Li, H., Rodayan, A. and Metcalfe, C.D. (2014). Analysis of drugs of abuse in wastewater from two Canadian cities, *Sci. Total Environ.*, 487, 722-730.
 Yüce, M., Kurt, H., Hussain, B. and Budak, H. (2018). Chapter 8: Systematic evolution of ligands by exponential enrichment for aptamer selection, In: Sarmento, B., das

Neves, J. (Ed.), *Biomed. Appl. Funct. Nanomater.*
 Zheng, Q.D., Lin, J.G., Pei, W., Guo, M.X., Wang, Z. and Wang, D.G. (2017). Estimating nicotine consumption in eight cities using sewage epidemiology based on ammonia nitrogen equivalent population, *Sci. Total Environ.*, 590-591, 226-232.

pp. 001-008	
pp. 009-016	
pp. 017-029	
pp. 031-041	
pp. 043-053	
pp. 055-062	
pp. 063-077	
pp. 079-086	