

물관리 환경 바이오테크놀로지의 최신 연구 동향 (1부)

Water and wastewater microbiology of the upcoming era (Part 1)

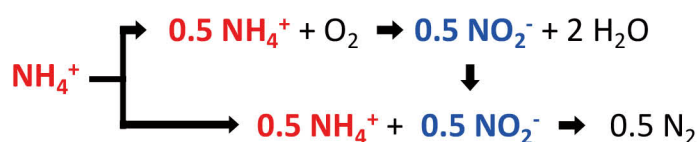
인류 문명의 발전에 있어서 물은 필수불가결한 존재였다. 인류 고대 문명의 근원지인 이집트, 메소포타미아, 양쯔, 갠지스 문명은 모두 마실 물의 공급과 하수의 방류가 용이한 대규모 하천을 중심으로 하여 기원하였으며 서울과 부산 또한 각각 한강과 낙동강을 가운데로 하여 대도시로 발전하여 왔다. 이처럼, 고대로부터 중세, 근대 사회에 이르기까지 물은 필수불가결한 자원이었으나, 인구밀집지역에서는 수자원의 오염 취약성이 상대적으로 높아 흑사병 등 전염병의 원인이 되기도 하였다. 산업화로 인해 고도의 인구 밀집이 가속화되던 19세기 런던에서 수차례의 흑사병과 테임스 강 하구의 심각한 악취 발생 현상으로 인해 체계적인 수처리의 필요성이 대두되기 시작하였고, 점차적으로 생물학적 처리를 이용한 활성슬러지(activated sludge) 기법이 일반적인 하수처리방법으로 자리잡게 되었다. 부유물질, 용존 유기물 제거에 초점을 맞추던 기존의 활성슬러지 시스템은 질소, 인 등의 영양염류를 추가적으로 처리하는 방식으로 개량되

어 현재에 이르고 있다.

이처럼 생물학적 하수처리 기술을 개발, 개량함에 있어서 환경 미생물학(environmental microbiology), 미생물 생태학(microbial ecology)은 오염물질 제거 메커니즘에 대한 이론적인 배경을 제공해 왔다. A2O 공법(anaerobic/anoxic/oxic process)은 무산소조, 혐기조, 호기조로 구성되어 각각 혐기성 종속영양균(anaerobic heterotrophic bacteria)의 탈질화(denitrification), 인 축적 미생물(PAO: polyphosphate accumulating organism)의 인 방출/흡수, 독립영양세균(autotrophic bacteria)의 질산화 반응을 조합, 극대화하여 생물학적 하수처리장에 기본이 되는 표준활성처리공법으로 자리 잡게 되었다(Ekama and Wentzel, 2008). 이러한 공법의 근간이 되는 미생물 집단의 생리적, 생태적 특성에 대한 미생물학적 지식의 진보 없이는 공법 개발은 불가능했을 것이다. 혐기성 메탄생성반응(methanogenesis)에 대한 생물학적 이해는 혐기성 소화(anaerobic digestion)를 통

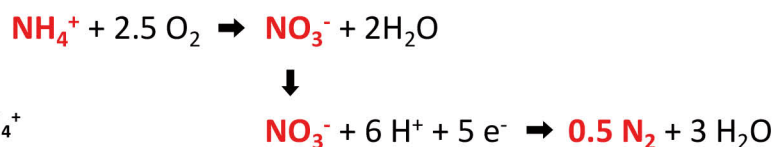
Partial nitritation / anammox:

1 mole O₂ / mole NH₄⁺



Nitrification / denitrification:

2.5 mole O₂ / mole NH₄⁺



[그림 1] 부분질산화/anammox 반응과 질산화/탈질화 반응의 산소 소요량 비교

해서 하수의 유기물이나 하수처리장의 슬러지의 유기물질로부터 난방, 발전 등에 이용할 수 있는 바이오가스의 회수를 가능케 해주었으며(Parkin and Owen, 1986), 혐기성 환경에서 암모니아(NH_3)와 아질산염(NO_2^-)를 질소가스(N_2)로 직접 전환하는 아나모क्स(anammox) 반응의 발견은 에너지 소비를 최소화하며 질소를 제거하는 SHARON(single reactor system for high activity ammonium removal over nitrite)-anammox 프로세스 등의 신기술 개발로 이어졌다(Kuenen, 2008; van Dongen et al., 2001). 이처럼 지난 100여년간 수처리 관련 환경공학(ET: environmental technology)과 생명공학(BT: biological technology)의 공진화로 생물학적 하수처리기술은 지속적인 진보를 이루어 왔다.

환경기술의 가장 큰 특징 중 하나는 그 주된 적용 대상이 점차 확대되고 있다는 점이다. 하수 처리는 인구 혹은 산업 밀집 지역에서 전염병의 가능성을 낮추고 악취를 제거하는 목적으로 시작되었으나, 질소, 인의 환경에 대한 악영향이 알려지게 되면서 점차적으로 영양염류 제거가 그 주된 목적이 되었다. 최근에는 하수처리 공정으로부터 발생하는 이산화탄소(CO_2), 메탄가스(CH_4), 아산화질소(N_2O) 등의 온실가스, 하수를 통해 자연으로 배출되는 항생제내성균 등 2010년 이전에는 널리 인식되어 있지 않던 환경문제들이 새로운 핵심 이슈로 부상하고 있다. 또한 분석 기술의 발달로, 마실 물의 희박한 미생물들이나 미세 플라스틱처럼 과거에는 실체가 불분명했던 물질들이 인간과 환경의 건강에 영향을 미치고 있다는 사실이 밝혀지고 있다. 본 이슈레터에서는 다변화되는 환경문제에 대처하는 21세기의 환경 바이오테크놀로지의 발전 동향을 소개하고 미래에 나아가야 할 발전방향을 1, 2부로 나누어 간략하게 제시해 보고자 한다. 1부에서는 Mainstream anammox, 아산화질소 발생량 감축 기술, Comammox의 공학적 적용 가능성에 대해 소개하고 다음 분기에 발간될 2부에서는 먹는 물의 미생물학, 미세플라스틱과 PPCP, 항생제 내성 미생물 등 새로운 수질오염물질에 대한 대처 방안에 대해 소개할 것이다.

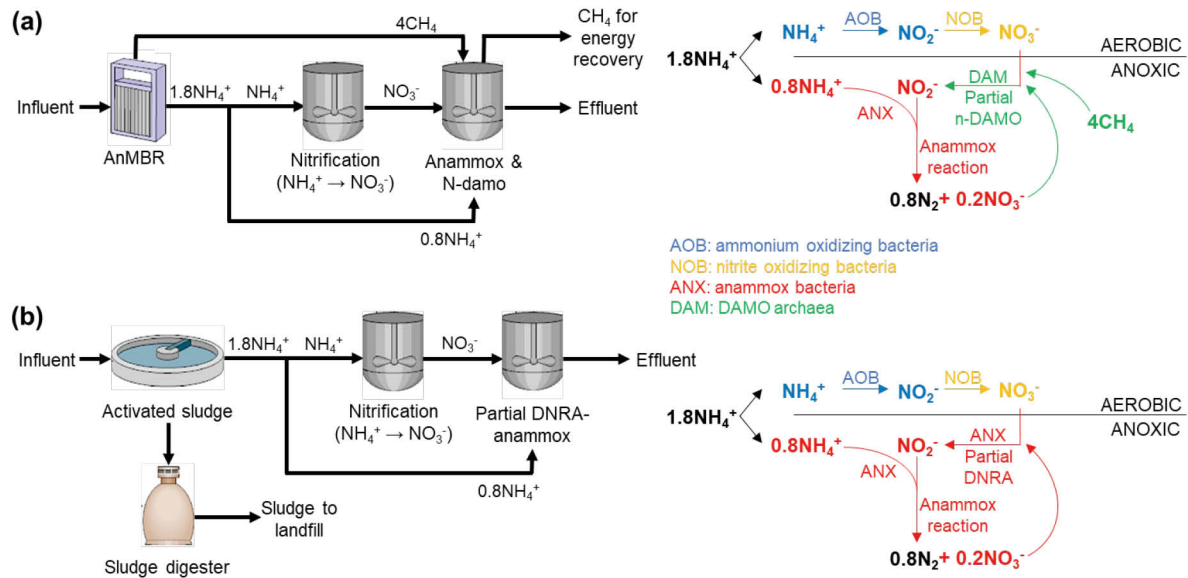
Mainstream anammox

기후변화와 지구온난화는 인류가 직면한 전지구적인 환경문제로 대기중으로 배출되는 온실가스가 그 주범이라는 것은 이미 과학적인 정설로 굳어지고 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change: 기후 변화에 관한 정부간 패널)의 보고에 의하면 하수처리에서 대기중으로 배출되는 온실가스가 전지구적 CO_2 환산 배출량(CO_2eq)의 약 1.5%를 차지하는 것으로 산정되고 있으며, 따라서 이를 감축하기 위한 대책이 시급한 실정이다(IPCC, 2014). 전과정적(life-cycle) 관점으로 볼 때, 활성슬러지 방식의 하수처리시설에서 배출되는 온실가스는 에너지 소비로 인한 CO_2eq 배출과 생물학적 반응에 의해서 직접적으로 배출되는 CO_2 , CH_4 , N_2O 등, 크게 두 갈래로 나뉠 수 있다(Foley et al., 2010). 우선, 에너지 소비량 절감을 통한 CO_2eq 배출량을 감축을 목표로 하는 기술로 mainstream anammox 기술이 있다.

Anammox는 anaerobic ammonia oxidation의 약어로 말 그대로 혐기성 환경에서 NO_2^- 를 전자수용체로 하는 암모니아의 산화 반응을 의미한다(식 1).



열역학적으로는 ΔG° 이 -357.8 kJ/mol NH_4^+ 로 충분히 실현 가능한 반응이지만, 실제로 이 반응을 일으킬 수 있는 미생물이 발견된 것은 불과 20여년 전이었다. 현재 운영되고 있는 anammox 방식의 수처리 시설은 주로 혐기성 소화조의 배출수 등 C:N 비가 낮은 하수의 처리에 쓰이고 있으며, mainstream anammox와 구분하는 의미에서 sidestream anammox라 칭한다. Anammox공정은 SHARON 공법을 이용한 NO_2^- 의 부분적 질산화(partial nitrification)와 연동되어 운영되는 것이 일반적이다. 동일한 양의 질소를 처리하는데 있어서, SHARON-anammox 공정은 이론적으로 A2O 공법에 비해서 폭기량을 60% 절감할 수 있다(그림 1). 하폐수 처리시설의 폭기량은 에너지 소

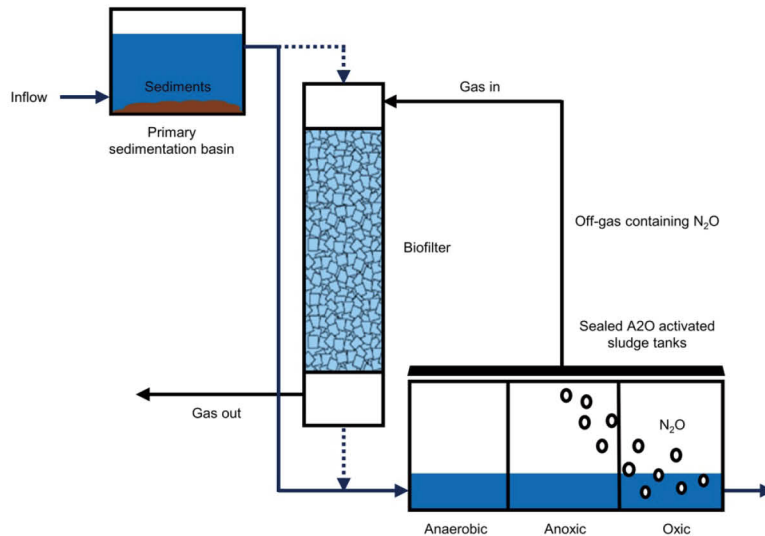


[그림 2] (a) AnMBR과 anammox/N-damo를 이용한mainstream anammox 모식도와 주요 반응 (Cogert et al., 2019에서 인용)와 (b) Anammox/DNRA 반응을 이용한 모식도와 주요 반응(Castro-Barros et al., 2017에서 인용)

요량과 직결되므로 비용적인 이점이 있을 뿐 아니라, CO_2eq 배출량을 대폭으로 감축할 수 있다는 장점이 있다.

Sidestream anammox는 미국, 네덜란드, 덴마크 등지에서는 이미 널리 이용되고 있으며 최근에는 일본이나 중국에서도 anammox 방식을 적용한 하폐수 시설들이 점차 늘어나는 추세이다. 최근에는 그 적용 범위를 확대하여 일반 하수의 질소 제거 공정을 대체하는 기술, 즉 mainstream anammox가 미래의 수처리 기술로 학계의 집중 조명을 받고 있다. Mainstream anammox는 처리 대상이 되는 하수에 NH_4^+ 와 함께 COD(chemical oxygen demand)가 다량 포함되어 있으므로, 탈질화균이 anammox 균과의 경쟁에서 우위를 점하게 되는 현상이 쉽게 일어난다. 또한, 유입되는 하수의 물리화학적 성상과 수온 변화로 인해서 부분적 질산화의 제어가 어려워져 nitrite-oxidizing bacteria(NO₂-oxidizing bacteria)의 반응에 의해서 NO_3^- 까지 질산화 반응이 일어나게 되어 anammox의 기질이 아닌 NO_3^- 가 축적되는 현상이 쉽게 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 장애 요소들을 극복하기 위한 연구가 학계에서 활발하게 진행중이다. 그 중 한 가지 접근법으로, AnMBR(anaerobic membrane bioreactor)와 질산화/anammox반응기를 연결하고

AnMBR로부터 생성되는 메탄 가스를 anammox 반응기에 공급하여 n-DAMO(nitrate-driven anaerobic methane oxidation) 반응을 동시에 일으켜서 NO_3^- 의 축적을 방지하고 지속적으로 NO_2^- 를 공급하는 방법이 제시되고 있다 (그림 2a)(Cogert et al., 2019; Xie et al., 2018). Anammox 반응기 내에서 DNRA(dissimilatory nitrate reduction to ammonium) 반응이 탈질화반응에 우선되게 하여 NO_3^- 를 NO_2^- 와 NH_4^+ 로 환원시켜서 NO_3^- 의 축적을 방지하고 anammox 균 군집에 기질을 제공하는 방법도 미국 University of Washington의 Winkler 교수 연구진에 의해서 제시된 바 있다(그림 2b)(Castro-Barros et al., 2017). 하지만, 현 시점에서는 아직 두 가지 방법 모두 그 핵심이 되는 n-DAMO와 DNRA 균주들의 생리학적, 생태학적 특성에 대한 규명이 충분히 이루어지지 않았고 공정 내에서 안정적으로 이 반응들을 유지하는 방법에 대한 연구 결과가 충분하지 않아, mainstream anammox가 현실화되기까지는 어느 정도 시간이 필요할 것으로 보인다. 하지만, 온실가스 배출량, 에너지 소량, 비용, 배출 슬러지량을 대폭적으로 저감할 수 있는 기술이라는 점에서 볼 때, 매우 매력적인 기술임에는 틀림이 없다.



[그림 3] 무동력 무탄소 운전으로 하수처리장 배출가스의 N_2O 제거가 가능한 바이오필터의 모식도(Yoon et al., 2017에서 인용)

아산화질소 (N_2O) 발생량 감축 기술

생물학적 질소 제거공정에서는 필연적으로 온실가스인 N_2O 가 필연적으로 발생된다. N_2O 는 대기 중 농도는 320 ppb 정도로 낮지만 1 몰 당 온실효과가 이산화탄소의 300배에 달하는 매우 강력한 온실가스이다. 하수의 질소는 관거를 지나면서 대부분 무기화(mineralize)되어 NH_4^+-N 으로 하수처리장에 유입된다. 대부분의 대규모 하수처리장이 택하고 있는 방식인 A2O(혐기조-무산소조-폭기조) 형식의 하수처리공정에서는 NH_4^+-N 를 폭기조에서 NO_3^--N 로 산화하여 무산소조에서 N_2 로 환원하여 제거하는 방식으로 하수의 질소를 제거한다. 질산화 반응과 탈질 반응에서 N_2O 가 발생되어 대기 중으로 배출된다는 것은 널리 알려져 있다(Kampschreur et al., 2009). 본격적으로 하수처리시설에서 N_2O flux의 측정이 가능해진 것은 미국 Columbia University의 Kartik Chandran 교수 연구진이 floating flux chamber 방법을 정립한 2008년 이후로, 아직까지는 미국, 북유럽, 호주 등의 최선진국을 제외하면 N_2O 발생량이 측정된 하수처리시설은 아직 극소수에 불과하다(Ahn et al., 2010). 이 때문에 아직 배출량에 대해서 특별한 규제가 정해져 있지는 않다. 하지만 A2O 방식이나 Anammox의 부분질산화 반응조 등에서 상당한 N_2O 배출량이 검출되면서 제거 기술에

대한 필요성이 인식되고 있으며 생물학적인 N_2O 환원반응을 이용한 기술 개발이 한국, 네덜란드, 덴마크, 일본의 연구진들에 의해 진행되고 있다.

상온에서 기체나 용존 상태의 N_2O 를 제거할 수 있는 반응은 NosZ 효소에 의한 생물학적 N_2O 환원 반응이 유일하다. NosZ는 탈질화균에서 일반적으로 발견되는 효소이므로 생물학적 반응을 이용하여 발생하는 N_2O 를 제거할 수 있다는 아이디어는 특별할 것이 없어 보인다. 하지만 이를 실제 하수처리공정에 적용하기에는 해결하기 어려운 두 가지 문제가 있다. 우선 하수처리장에서 배출되는 N_2O 의 농도는 100 ppm 이내의 낮은 농도로 배출되며, 그 편차가 크다는 점이 문제가 된다. 생물학적인 반응은 일반적으로 Michaelis-Menten kinetic(식 2)을 따르기 때문에 기질의 농도가 낮아지면 효율이 낮아질 수 밖에 없다. 또한, 낮은 농도 때문에 제거할 수 있는 총량이 적으므로 공정 설계에 있어서 에너지나 화학약품 소요를 최소화하여야 한다는 어려움이 존재한다. NosZ를 활용하는 탈질화균이나 아산화질소 환원균은 호기성 환경에서는 활성을 갖지 못한다는 점도 큰 문제가 된다. 폭기조에서 대부분의 N_2O 가 배출되는데 배출가스의 산소 농도는 일반적으로 15%를 상회한다. 아직까지 이런 호기성 환경에서의 N_2O 환원 반응은 학계에 발표된 바가 없다.

$$v = \frac{V_{max}[S]}{K_m + [S]} \quad (\text{식 2})$$

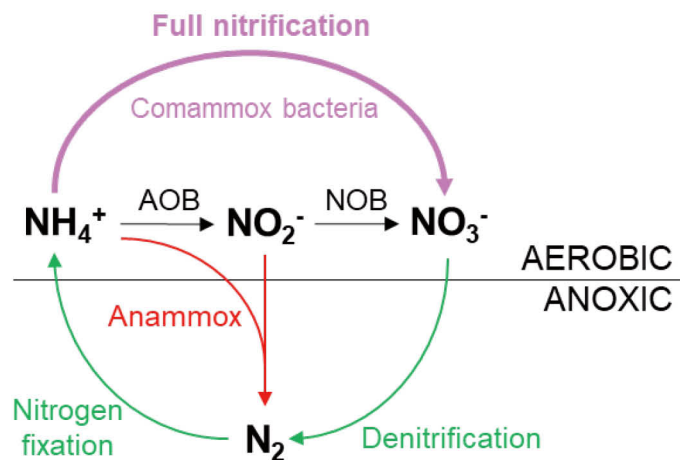
(v: 효소 반응 속도; Vmax: 최대 반응 속도;
Km: 반포화상수; [S]: 기질 농도)

학계에서는 high-affinity 아산화질소 환원균에 대한 연구를 통해 첫번째 난제를 해결하고자 노력 중이다. 카이스트 윤석환 교수와 University of Tennessee의 Löffler 교수가 2016년 *Applied and Environmental Microbiology*에 발표한 논문의 연구결과가 기폭제가 되어 clade II *nosZ*를 보유한 박테리아들의 high-affinity N₂O 환원 반응에 대한 연구가 활발하게 진행중이며(Yoon et al., 2016), TU Delft의 Loosdrecht 교수 연구진과 Technical University of Denmark의 Smets 교수 연구진, 동경 농공대의 Terada 교수 연구진의 후속 연구에 의해서 재현성이 확인되고 있다(Conthe et al., 2018; Suenaga et al., 2019). 특히 *Dechloromonas*나 *Flavobacterium* 계열의 미생물들이 ppm 단위의 매우 낮은 농도의 N₂O를 환원할 수 있는 것으로 밝혀지고 있다. 산소로 인한 N₂O 환원 저해 현상을 극복하기 위한 연구는 호기성 환경에서 N₂O의 환원이 가능한 미생물을 찾는 것과 바이오필름 내에서 산소와 N₂O의 mass transfer 차이를 이용해서 국소적 혐기성 환경에서 N₂O 환원반응이 일어나게 하여 N₂O를 제거하는, 두 가지 방향으로 연구가 진행되고 있다.

후자의 경우, 국내의 윤석환 교수 연구진이 제시한 바이오필터의 바이오 필름 내부에 형성되는 무산소 환경에서 N₂O를 제거하는 공정이 학계의 관심을 끌고 있다 (그림3)(Yoon et al., 2019; Yoon et al., 2017). 이 기술은 A2O 방식의 하수처리시설의 설계상 특성을 적극적으로 활용하는 것으로 미처리 하수를 영양염분으로 이용하고 중력과 폭기로 인해 발생하는 양압을 이용하여 무동력 무탄소 운전이 가능하게 한 획기적인 기술로 국제 환경공학계에 인정받고 있다. 추후 북유럽의 N₂O 배출량에 대한 규제가 선진국부터 순차적으로 법제화 된다면, 생물학적 N₂O 환원 반응과 이를 활용한 공정 개발에 대한 관심은 크게 증가될 것으로 예상된다.

Comammox의 발견과 가능성

2015년, University of Vienna의 Daims 교수 연구진과 Radboud University의 Lüscher 교수 연구진에서 환경공학과 미생물학 학계의 통설을 뒤엎는 엄청난 발견을 *Nature*지에 거의 동시에 발표했다 (그림 4)(Daims et al., 2015; van Kessel et al., 2015) 질산화 반응에서 NH₃의 NO₂⁻로의 산화반응은 암모니아 산화균 및 고세균(ammonia oxidizing bacteria and archaea)에 의해, NO₂⁻의 NO₃⁻로의 산화 반응은 아질산염 산화균(nitrite oxidizing bacteria)에 의해 이루어지며, NH₃의 완전한 산화는



[그림 4] Comammox 반응(Kuypers et al., 2015에서 인용)

이 두 집단의 미생물들이 공존하는 상태에서만 일어날 수 있는 반응인 것이 지난 100여년간 정설로 여겨져 왔다. Comammox 미생물의 발견은 이러한 패러다임을 일시에 무너뜨리는 획기적인 발견이었다. 아질산염 산화균으로만 알려져 있던 *Nitrospira* 속의 미생물 중에 NH_3 를 NO_3^- 로 완전히 산화할 수 있는 미생물들이 발견된 것이다. 이들 comammox *Nitrospira*는 암모니아 산화균의 *amoA* 유전체와 쉽게 구분되는 고유의 *amoA*를 보유하고 있으며 암모니아에 대한 친화성이 일반적인 암모니아 산화균보다 월등하게 높아 암모니아 고세균과 마찬가지로 저농도의 암모니아를 활용하는데 있어서 경쟁적 우위를 점할 것으로 생각된다(Kits et al., 2017).

Comammox가 공학적으로 특히 중요한 의미를 갖는 것은 수처리와 관련된 시설에서 높은 빈도로 발견되고 있고 질소 제거 반응에서 중요한 역할을 수행하기 때문이다. Smets 교수 연구진은 지하수를 필터링하여 상수도로 공급하는 급속모래여과 시스템에서 comammox *Nitrospira*가 질산화 반응을 일으키는 것을 확인하였고(Fowler et al., 2018). 미국 Northeastern University의 Pinto 교수 연구진, Hong Kong University of Science and Technology의 Zhang 교수 연구진은 그리드로 공급되는 수돗물에서도 메타지놈 시퀀싱 결과로부터 comammox *Nitrospira*의 존재를 확인하였다(Pinto et al., 2016; Wang et al., 2017). 상수도에서 comammox 균들에 의해 진행되는 질산화 반응은 공학적으로는 중요성을 논하기에는 아직 이르나, 영양분의 농도가 극도로 낮은 상수도의 마이크로바이옴이 형성 유지되는데 있어서 중요한 역할을 수행하고 있을 가능성을 배제할 수 없다. A2O 방식의 하수처리시설에서도 comammox *Nitrospira*가 높은 abundance를 갖는 것으로 나타나는 경우가 적다. Pinto 교수 연구진의 최근 연구결과에 따르면, solids retention time이 길수록 질산화 반응에서 comammox가 차지하는 비중이 높아지는 상관관계가 나타나는 것으로 나타났으며, 부착성장 방식을 이용하는 질소제거공정의 경우 comammox *Nitrospira*의 비중이 보다 높은 것으로 밝혀졌다(Cotto et al., 2020). 또한 이 연구에서 comammox *Nitrospira*의 빈도가 높게 나타나는 하수

처리시설이 일반적인 암모니아 산화균 / 아질산염 산화균의 비중이 높은 시설들에 비해서 보다 안정적으로 용존 질소가 제거된다는 결과가 보고되었다. Comammox에 의한 질산화 반응에서는 N_2O 의 발생량이 매우 낮고 바이오매스 수율이 낮은 것으로 밝혀지고 있어, comammox를 이용한 보다 효율적이고 환경친화적인 방향으로 질소제거공정을 개선할 수 있는 가능성이 제시되고 있다(Prosser et al. *in press*). 하지만 현재까지 분리된 comammox 균주는 *Nitrospira inopinata*가 유일하며, 학문적으로도 확실하게 확인된 바가 거의 없으므로 공학적 적용 시도 이전에, 자연과학적인 접근을 통해 생리학적, 생태학적 특성에 대한 이해를 증진하여야 할 필요가 있다.

(2부에 계속)

참고문헌

- Ahn, J. H., Kim, S., Park, H., Rahm, B., Pagilla, K., Chandran, K., 2010. N₂O Emissions from Activated Sludge Processes, 2008–2009: Results of a National Monitoring Survey in the United States. *Environmental Science & Technology*, vol. 44, pp. 4505–4511.
- Castro-Barros, C. M., Jia, M., van Loosdrecht, M. C. M., Volcke, E. I. P., Winkler, M. K. H., 2017. Evaluating the potential for dissimilatory nitrate reduction by anammox bacteria for municipal wastewater treatment. *Bioresource Technology*, vol. 233, pp. 363–372.
- Cogert, K. I., Ziels, R. M., Winkler, M. K. H., 2019. Reducing cost and environmental impact of wastewater treatment with denitrifying methanotrophs, anammox, and mainstream anaerobic treatment. *Environmental Science & Technology*, vol. 53, pp. 12935–12944.
- Conthe, M., Wittorf, L., Kuenen, J. G., Kleerebezem, R., van Loosdrecht, M. C. M., Hallin, S., 2018. Life on N₂O: deciphering the ecophysiology of N₂O respiring bacterial communities in a continuous culture. *The ISME Journal*, vol. 12, pp. 1142–1153.
- Cotto, I., Dai, Z., Huo, L., Anderson, C. L., Vilardi, K. J., Ijaz, U., Khunjar, W., Wilson, C., De Clippeleir, H., Gilmore, K., Bailey, E., Pinto, A. J., 2020. Long solids retention times and attached growth phase favor prevalence of comammox bacteria in nitrogen removal systems. *Water Research*, vol. 169.
- Daims, H., Lebedeva, E. V., Pjevac, P., Han, P., Herbold, C., Albertsen, M., Jehmlich, N., Palatinszky, M., Vierheilig, J., Bulaev, A., Kirkegaard, R. H., von Bergen, M., Rattei, T., Bendinger, B., Nielsen, P. H., Wagner, M., 2015. Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria. *Nature*, vol. 528, pp. 504–509.
- Ekama, G. A., Wentzel, M. C., 2008. Nitrogen removal. *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*, pp. 87–138.

- Foley, J., de Haas, D., Hartley, K., Lant, P., 2010. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. *Water Research*, vol. 44, pp. 1654–1666.
- Fowler, S. J., Palomo, A., Dechesne, A., Mines, P. D., Smets, B. F., 2018. Comammox *Nitrospira* are abundant ammonia oxidizers in diverse groundwater-fed rapid sand filter communities. *Environmental Microbiology*, vol. 20, pp. 1002–1015.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change*.
- Kampschreur, M. J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M. S. M., van Loosdrecht, M. C. M., 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, vol. 43, pp. 4093–4103.
- Kits, K. D., Sedlacek, C. J., Lebedeva, E. V., Han, P., Bulaev, A., Pjevac, P., Daebeler, A., Romano, S., Albertsen, M., Stein, L. Y., Daims, H., Wagner, M., 2017. Kinetic analysis of a complete nitrifier reveals an oligotrophic lifestyle. *Nature*, vol. 549, pp. 269–272.
- Kuenen, J. G., 2008. Anammox bacteria: from discovery to application. *Nature Reviews Microbiology*, vol. 6, pp. 320–326.
- Kuypers, M. M. M., 2015. A division of labor combined. *Nature*, vol. 528, pp. 487–488.
- Parkin, G. F., Owen, W. F., 1986. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 112, pp. 867–920.
- Pinto, A. J., Marcus, D. N., Ijaz, U. Z., Bautista-de los Santos, Q. M., Dick, G. J., Raskin, L., 2016. Metagenomic evidence for the presence of comammox *Nitrospira*-like bacteria in a drinking water system. *mSphere*, vol. 1, pp. e00054–15.
- Prosser, J. I., Hink, L., Gubry-Rangin, C., Nicol, G. W., in press. Nitrous oxide production by ammonia oxidisers: physiological diversity, niche differentiation and potential mitigation strategies. *Global Change Biology*.
- Suenaga, T., Hori, T., Riya, S., Hosomi, M., Smets, B. F., Terada, A., 2019. Enrichment, isolation, and characterization of high-affinity N₂O-reducing bacteria in a gas-permeable membrane reactor. *Environmental Science & Technology*, vol. 53, pp. 12101–12112.
- van Dongen, U., Jetten, M. S. M., van Loosdrecht, M. C. M., 2001. The SHARON®–Anammox® process for treatment of ammonium rich wastewater. *Water Science and Technology*, vol. 44, pp. 153–160.
- van Kessel, M. A. H. J., Speth, D. R., Albertsen, M., Nielsen, P. H., Op den Camp, H. J. M., Kartal, B., Jetten, M. S. M., Lückner, S., 2015. Complete nitrification by a single microorganism. *Nature*, vol. 528, pp. 555–559.
- Wang, Y., Ma, L., Mao, Y., Jiang, X., Xia, Y., Yu, K., Li, B., Zhang, T., 2017. Comammox in drinking water systems. *Water Research*, vol. 116, pp. 332–341.
- Xie, G.-J., Liu, T., Cai, C., Hu, S., Yuan, Z., 2018. Achieving high-level nitrogen removal in mainstream by coupling anammox with denitrifying anaerobic methane oxidation in a membrane biofilm reactor. *Water Research*, vol. 131, pp. 196–204.
- Yoon, H., Song, M. J., Yoon, S., 2017. Design and feasibility analysis of a self-sustaining biofiltration system for removal of low concentration N₂O emitted from wastewater treatment plants. *Environmental Science & Technology*, vol. 51, pp. 10736–10745.
- Yoon, H., Song, M. J., Kim, D. D., Sabba, F., Yoon, S., 2019. A serial biofiltration system for effective removal of low-concentration nitrous oxide in oxic gas streams: mathematical modeling of reactor performance and experimental validation. *Environmental Science & Technology*, vol. 53, pp. 2063–2074.
- Yoon, S., Nissen, S., Park, D., Sanford, R. A., Löffler, F. E., 2016. Nitrous oxide reduction kinetics distinguish bacteria harboring clade I versus clade II *NosZ*. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 82, pp. 3793–3800.

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, 조경진,
조은혜, 최용주, 최정권, 한창석

Water4FutureCity 2019년 3호

※ 이번 2019년 3호는, KAIST 윤석환, 명재욱, 연세대학교 이태권 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 한국물환경학회와 대한상하수도학회가 공동으로 운영하는 통합 미래위원회에서 발간합니다.