

# 요 약 문

## I. 연구개요

하수처리장에서 발생하는 고농도 유기성 폐수 및 슬러지의 해양투기 금지로 혐기성 소화조 처리 후 발생하는 고농도 질소함유 폐수의 하수연계 처리량이 증가하였다. 고농도 질소화합물을 함유한 탈리액은 공정 반류수에 합류되어 질소 처리 효율을 저하시켜 방류수 수질 기준 준수에 큰 부담으로 작용하고 있다. 기존 질소제거 기술인 질산화/탈질공정기술은 과도한 산소와 외부탄소원을 요구하므로 비용이 많이 드는 단점이 있다. 이에 따라 보다 안정적으로 질소 제거가 가능한 탈암모니아 공정이 전 세계적으로 적용되고 있다.

선행연구를 통해서 실험실 규모의 단일반응조 탈암모니아 반응기의 최적운전인자를 확보하였고, 파일럿 규모의 단일반응조 탈암모니아 공정을 구축하였다.

본 연구에서는 선행연구에서 도출된 결과를 바탕으로 실패수를 적용한 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정의 계절별 장기운전을 통해 공정 운전 인자를 연속적으로 모니터링하고, 안정적으로 제어하는 방안을 확립하여 국내 독자적인 탈암모니아 공정을 도입하고자 한다.

## II. 연구의 필요성 및 목적

하수처리장 하수슬러지의 에너지화 확대 및 방류수 수질 강화에 대응하기 위하여 혐기성 소화조의 탈수여액(반류수) 등 고농도 질소 함유 폐수의 처리기술 개발이 필요하다.

하수처리장 소화조 반류수의 발생량은 하·폐수 유입 유량의 1~3%임에도 불구하고 유입 질소 부하의 10~30%를 차지하기 때문에 반류수 내 고농도 질소를 안정적으로 처리할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

탈암모니아 공정은 전통적인 질산화/탈질을 통한 질소제거공정 대비 아질산염까지만 질산화를 필요로 하므로 약 60%의 산소요구량이 절감되고, 탈질공정이 필요없게 되어 요구되는 외부탄소원을 100% 줄일 수 있는 매우 경제적인 공정이다.

공공하수처리시설 소화조 반류수의 질소 처리에 적용 가능한 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정의 최적 운전 방안을 확보하기 위하여 실패수를 적용하여 계절별 장기운전을 통해 공정 매뉴얼을 구축하고 국내 독자적인 탈암모니아 공정을 도입하고자 한다.

### III. 연구의 내용 및 범위

I) 계절에 따른 반류수 온도 및 성상 변화에 대응하는 기술 개발

i) 계절에 따른 반류수 성상 변화 모니터링

II) 반류수 성상 변화에 따른 전처리 공정의 선택적 운전전략 도출

i) 전처리 공정의 선택적 적용성 평가

III) 전처리 반류수의 성상 변화에 따른 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정 제어운전 전략 확보

i) 계절별 성상 변화에 따른 질소제거 효율 평가

ii) 센서 정보의 선택적 이용을 통한 제어운전 기법의 고도화

iii) 고효율 저에너지 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정 운전 매뉴얼 구축

iv) 부분아질산화 및 아나모스 활성도 측정법 표준화

IV) 계절별 미생물종 분포 및 우점종 파악

i) NGS (Next Generation Sequencing)를 통한 계절별 미생물 군집 해석 및 우점종 파악

### IV. 연구결과

선행연구를 통해서 파일럿 규모의 혐기성 암모늄 산화 미생물(Anaerobic ammonium oxidation bacteria, AMX) 농화 배양 시스템 구축 및 실험실 규모의 단일 반응조 탈암모니아 반응기 최적 운전 인자를 확보하였고(2017년도) 실패수를 적용한 1 ton 규모의 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정 운영 방법을 도출하였다(2018년).

본 연구에서는 상기 연구 결과를 바탕으로 하수처리장에 구축된 1 m<sup>3</sup> 규모의 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정에서 사계절을 포함한 장기 운전을 실시하여, 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정 제어 및 운영 인자를 도출하고, 운전 매뉴얼을 확립하였다.

I) 계절에 따른 반류수 온도 및 성상 변화에 대응하는 기술 개발

i) 계절에 따른 반류수 성상 변화 모니터링

- 부산환경공단 수영사업소에 구축된 1 m<sup>3</sup> 규모 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정에서 계절에 따른 반류수 성상 변화에 대응 가능한 안정적인 공정 제어 방안을 도출하기 위하여 반류수 성상 변화를 지속적으로 분석하였다.

- 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정의 유입수는 수영 사업소에서 발생하는 혐기소화조 탈리여액, 침전지 중력 농축액, 슬러지 원심 농축액이 혼합된 종합 반류수를 이용하였다.
- 종합 반류수 내 각 성분들의 농도는 지속적으로 감소하는 경향으로 나타났다. 특히, 암모늄 농도는 2018년 9-11월 가을철에 350 mg/L 이상이었으나 겨울동안(12-1월) 300 mg/L 이하로 감소하였다. 현재(2019년 12월) 약 150 mg/L로 유지되고 있다. 유기물 농도와 알칼리도도 지속적으로 감소하여 현재(2019년 12월) 56 mg/L, 588 mg/L로 각각 나타났다.
- 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정에서 부분아질산화에 요구되는 알칼리도/N 비는 약 3.6 이상이며, 공정 운영 동안 월별 실제 알칼리도/N 비는 대부분 이론값 범위로 나타났다. 부족한 알칼리도/N 비는 부분아질산화에 영향을 미치는 인자로 적용될 수 있으나, 변동이 크지 않기 때문에 전체 공정 효율에 큰 영향은 없다고 판단된다. C/N 비는 평균 0.5로 비교적 동일하게 유지되었다.

## II) 반류수 성상 변화에 따른 전처리 공정의 선택적 운전전략 도출

### i) 전처리 공정의 선택적 적용성 평가

- 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정에 안정적인 처리수를 공급하고 공정운영비 절감이 가능하도록 반류수 성상 변화에 따른 전처리 공정의 선택적 적용성을 평가하였다.
- 탈암모니아 공정에서 공정 운영 가능 유입 부유물질 농도는 200-300 mg TSS/L으로 알려져 있다. 종합 반류수내 부유물질 농도는 100 mg/L 이하로 매우 낮은 농도로 함유되어있어 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정 유입 시 별도의 전처리 없이 운영 가능하였다.
- 고농도 질소를 함유한 반류수 처리를 위한 탈암모니아 공정에서 공정 운영 가능 유입 유기물 농도는 최소 0.3에서 최대 3.7의 C/N 비로 알려져 있다. 정기적인 월별 반류수 성상 분석 결과에서 유기물 농도는 20-135 mg/L로 낮았으며, 평균 C/N비도 0.5로 낮게 유지되어 별도의 전처리 없이 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정에 적용하여 운영하였다.
- 수영 사업소의 종합 반류수에 함유된 부유물질과 유기물농도는 낮은 농도로 유지되고 있으며, 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정의 장기간 운영에도 큰 저해인자로 작용하지 않은 것으로 사료되었으나, 갑작스런 성상변동에 따른 영향을 방지하고자 침전조(0.1 RPM)를 상시 운영하였다.

### III) 전처리 반류수의 성상 변화에 따른 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정 제어운전 전략 확보

#### i) 계절별 성상 변화에 따른 질소제거 효율 평가

- 1 m<sup>3</sup> 규모 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정은 실제 반류수를 적용하여 연속 회분식(Sequencing Batch Reactor, SBR)으로 유입, 반응(무산소/호기), 침전, 방류로 운영되었으며, 선행연구에서 도출된 운영 알고리즘을 바탕으로 암모늄 센서를 이용하여 유출 암모늄 농도 20 mg/L, pH 센서를 이용하여 pH 6.6에서 반응시간이 종료되도록 제어하였다.
- 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정은 초기 운전기간동안 최대 94% 이상의 높은 질소제거효율을 달성하였다.
- DO 농도에 따라 공기 공급을 제한하여 암모늄의 부분아질산화 반응을 제어하기 위하여 송풍기에서 반응기로 유입되는 배관을 분지하여 유입배관과 유압조절을 위한 배출배관으로 수정하여 공급 유압을 조절하여 송풍량을 제한하였다.
- 불안정한 공기 공급으로 급격한 질산화가 진행되어 질산염이 축적되어, pH 감소로 암모늄의 산화가 충분히 되지 않은 상태에서 반응이 종료되거나(송풍량 과잉), 아질산화 반응시간이 길어져 최종 탈암모니아 공정 운영 시간이 길어지기도 하였다(송풍량 부족).
- 유출수의 암모늄은 제한된 농도(20 mg/L)보다 높은 30 mg/L 이상에서 pH의 감소로 반응이 종료되어 잔류하였다. 또 공급되는 알칼리도/N 비가 약간 감소하여 충분한 부분아질산화 반응이 수행되지 않은 것으로 판단하였고 알칼리도 보충과 pH 부하 변동 을 보완하고자 알칼리도/N 비 5를 기준으로 하여 중탄산염을 추가 공급하였다. 알칼리도 보충 후 암모늄 농도는 20 mg/L 이하로 배출되었으며 pH의 급감도 완화되었다.
- 축적된 질산염 제거를 위하여 무산소 구간 30 min을 호기 구간 앞에 추가하여 종속 탈질을 유도하였다. 무산소 구간 추가 후 질산염의 농도가 감소하였다.
- 종합 반류수의 암모늄 농도가 200 mg/L이하로 지속적으로 감소함에 따라 총질소제거속도는 감소하였으나, 암모늄 농도는 20 mg/L 이하로 배출되었으며, 아질산염 축적 없이 탈암모니아화가 안정적으로 수행되어 총 질소제거효율은 85% 이상 달성하였다.
- 안정적인 공기 공급을 위해서 송풍기의 유량 조절이 가능한 시스템으로 정비하였다. 수정된 송풍기를 통해 일정하게 공기를 공급함으로 과도한 공기 공급에 의한 질산화를 제어할 수 있었다. 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정 유출수는 암모늄 농도 20 mg/L이하, 질산염 농도 10 mg/L이하로 안정적으로 나타났다.

- 호기 구간에서 폭기량을 제한하고 반응기 내 낮은 DO(0.3 mg/L이하)로 제어함으로써 부분아질산화, 아나목스 반응 뿐만 아니라 중속탈질 반응이 동시에 기여되어 질산염이 소모된 것으로 판단되었다.
- 무산소 구간 동안 중속탈질에 의한 질산염 감소는 미비한 것으로 나타났다. 무산소 구간을 제외 후 질소제거속도 0.25 kg/m<sup>3</sup>/day를 달성하였다.

#### ii) 센서 정보의 선택적 이용을 통한 제어운전 기법의 고도화

- 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정에서 센서 정보의 선택적 운전 제어를 통하여 유입수 변동 부하에서도 동일한 유출수 수질을 보장할 수 있고, 저해 인자를 제한하여 미생물 활성이 안정적으로 유지될 수 있도록 운영 가능하다.
- 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정은 암모늄 센서를 이용하여 최종 암모늄 농도 20 mg/L, pH 센서를 이용하여 pH 6.6 도달시 호기구간이 종료되도록 제어하였다. 호기 구간에서 DO 센서를 이용하여 DO 농도 0.1 mg/L 이하일 때 공기를 공급하고, 0.2 mg/L 이상일 때 공기 공급을 중단하여 반응기 내 DO 농도를 0.3 mg/L 이하로 낮게 유지하였다.
- 센서 정보의 선택적 이용으로 유입 암모늄의 농도가 증가 또는 감소에도 불구하고 탈암모니아 반응에 따른 암모늄 농도와 pH 변화를 모니터링하여 반응시간을 제어함으로써 안정적인 총질소제거효율을 유지하였다.

#### iii) 고효율 저에너지 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정 운전 매뉴얼 구축

- 계절별 장기 운전을 통하여 수집한 데이터를 바탕으로 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정 운전 매뉴얼과 물질수지를 작성하였다.

#### iv) 부분아질산화 및 아나목스 활성도 측정법 표준화

- 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정에서는 하나의 반응조에서 암모니아 산화 미생물(Ammonia oxidizing bacteria, AOB)과 AMX, 중속영양탈질미생물(Denitrifying bacteria, DNB)의 복합적인 탈암모니아 반응이 수행된다. 안정적인 반응을 유지하기 위하여 미생물의 활성도를 측정하였다.
- AOB의 활성도도는 0.40 g N/g VSS/d 였으며, AMX의 활성도는 0.14 g N/g VSS/d로 나타났다. 그 외 아질산 산화 미생물(Nitrite oxidizing bacteria, NOB)은 0.17 g N/g VSS/d, DNB는 0.02 g N/g VSS/d이었다.
- 정기적인 미생물 활성도 측정을 통하여 최적 탈암모니아 미생물 활성을 평가하고 보다 안정적인 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정의 검토 지표로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### IV) 계절별 미생물종 분포 및 우점종 파악

i) NGS (Next Generation Sequencing)를 통한 계절별 미생물 군집 해석 및 우점종 파악

- 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정 식중원으로 수영사업소 활성슬러지를 적용하여 발현한 AOB와 수영사업소 내 대량배양 시스템에서 배양된 *Candidatus Brocadia* 우점 AMX 그래놀을 이용하였다.
- 사계절에 따른 반류수 온도 및 질소부하, pH, 알칼리도 등의 정상변화는 탈암모니아화에 기여하는 미생물들의 활성 변화에 영향인자로 작용하므로 실패수를 적용한 계절 변화와 운영 변화에 따라 NGS 기술인 MiSeq 방법을 이용하여 군집을 해석하였다.
- AMX를 포함하는 혐기성 암모늄 산화 미생물 군집은 초기에 21.28%로 나타났으나, 송풍기 유량 제어 시스템이 개선되기 전 9-10%로 약 50% 이상 감소하였다. 송풍기 유량 제어 시스템 개선 후 15.35%까지 증가하였고, 이는 송풍량이 일정하게 공급되지 않은 조건에서 감소하였지만, 송풍량 공급 개선으로 회복된 것으로 판단된다.
- AOB는 초기 11.64%로 나타났으며, 송풍기 유량 제어 시스템 개선 후 약 3%로 유지되었다. 이는 산소 공급 제한에 따라 활성이 제한된 것으로 판단된다.
- NOB는 초기 0.22%로 미비하였으나, 송풍량 제어가 되지 않았을 때 9.47%로 급격히 증가하였다. 그러나 송풍량 제어 시스템 개선에 따라 1%이하로 빠르게 감소하였으며, 이 구간에서 질산염의 축적도 감소하여 탈암모니아 공정이 안정적으로 개선되었다.
- 유기물을 이용하는 DNB는 초기에 8.56%로 나타났으나, 공정 운영 후 모든 구간에서 24-33% 이상으로 나타났다. 종합 반류수에 포함된 유기물 함량은 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정에 큰 피해를 미치지 않으나, 공정에서 지속적으로 유입되는 유기물을 이용하여 DNB 분율이 유지된 것으로 판단된다.

#### V. 연구결과의 활용계획

- 계절별 유입수 정상 변동에 따른 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정의 장기 운전 을 통하여 확보된 독자적 운전 정보를 부산시 하수처리장의 하수슬러지 및 음폐수 통합처리 현장에 실규모 공정 설계 기준으로 활용하고자 한다.
- 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정을 이용하여 실규모 현장 적용시 필요한 운영 방법 및 운영 진단 등 운전자를 고려한 체계적인 공정 정보화 도구 개발 연구에 활용하고자 한다.
- 기존의 고농도 질소 처리 공정과 비교하여 처리 효율 및 경제성 분석을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.
- 단일반응조 탈암모니아 파일럿 공정운전을 통해 확보된 탈암모니아 미생물은 대형화 및 실규모 현장 적용 시 식중 미생물로 활용하고자 한다.