

고농도 질소폐수로부터 암모니아 회수를 위한 다단수직형 암모니아스트리핑조 개발(I)

이재명, 최홍복[†]
(주)에코데이

Development of a Vertical Multi-stage Ammonia Stripping Reactor for Recovering Ammonia from wastewater with High Nitrogen Concentrations(I)

Jae Myung Lee, Hong-bok Choi[†]
EcoDays Co., Ltd.

(Received: Apr. 7, 2017 / Revised: May 24, 2017 / Accepted: May 25, 2017)

ABSTRACT: A vertical multi-stage ammonia stripping reactor using E-PFR, which has been proved to be superior in anaerobic and aerobic treatment, was developed and a lab scale experiment was conducted. According to the change of stage number condition, the removal rate of the ammonia nitrogen in the reactor with 0-stage was about 52.5% after 8 hours (pH 10, temperature 35 °C, and the air/liquid ratio 3min⁻¹). However, in the reactor with 5-stage, the removal efficiency was about 62.6%. According to the change of pH condition, the removal rate of ammonia nitrogen was about 42.6% at pH 9 after 8 hours, and was about 74.4% at pH 11 (5-stage reactor, temperature 35 °C, and the air/liquid ratio 3min⁻¹). According to the change of temperature condition, the removal rate of the ammonia nitrogen was about 51% at 25 °C after 8 hours (5-stage reactor, pH 10, and the air/liquid ratio 3min⁻¹), and was about 87.2% at 45 °C. According to the change of air injection volume condition, the removal rate of the ammonia nitrogen was about 45.8% at 2min⁻¹ after 8 hours (5-stage reactor, pH 10, and at 35 °C), and was about 75% at 4min⁻¹. Based on these results, we will follow up the applicability of the actual plant in the future through continuous operation evaluation.

Keywords: vertical multi-stage ammonia stripping, high concentration of nitrogen wastes, air stripping, gas-liquid contactor

초 록: 기존 혐기성 및 호기성 처리에서 우수성이 입증된 E-PFR을 적용한 다단수직형 암모니아 스트리핑조를 개발하고 랩스케일 실험을 수행하였다. 다단수직형 암모니아스트리핑조의 단수별 암모니아성 질소 제거 실험 (pH 10, 온도 35°C, 기액비 3min⁻¹의 동일 조건)에서 8시간 경과 후 단이 없는 반응기는 약 52.5%의 제거율을 나타냈으며, 5단 반응기에서는 약 62.6%의 제거율이 나타나 약 10%의 효율 차이가 있는 것으로 확인하였다.

[†] Corresponding author(e-mail : hbokchoi@hanmail.net)

pH 변화에 따른 암모니아성 질소 제거 실험 (5단 반응기, 온도 35°C, 기액비 3min⁻¹의 동일 조건)에서 8시간 경과 후 pH 9는 약 42.6%의 제거율을 나타냈으며, pH 11에서 약 74.4%의 제거율이 나타났다. 온도 변화에 따른 암모니아성 질소 제거 실험 (5단 반응기, pH 10, 기액비 3min⁻¹의 동일 조건)에서 8시간 경과 후 25°C에서 약 51%의 제거율을 나타냈으며, 45°C에서 약 87.2%의 제거율이 나타났다. 공기주입량 변화에 따른 암모니아성 질소 제거 실험 (5단 반응기, pH 10, 온도 35°C의 동일 조건)에서 8시간 경과 후 기액비 2min⁻¹에서 약 45.8%의 제거율을 나타냈으며, 기액비 4min⁻¹에서 약 75%의 제거율이 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 추후 연속 운전 평가를 통해 실증플랜트 설계를 위한 인자 도출에 활용하고자 한다.

주제어: 다단 수직형 암모니아스트리핑, 고농도 질소폐수, 탈기, 기액접촉기

1. 서론

최근 에너지 문제와 해양투기금지 정책의 일환으로 유기성폐기물 바이오가스화 사업, 하수처리장 에너지자립화 사업, 그리고 가축분뇨 에너지화 사업 등이 각광을 받고 있으나 정작 경제성 있는 혐기성소화 후 처리 공정 기술은 미진한 실정이다. 하수처리장의 경우 혐기성소화액 처리를 위하여 하수와 희석하여 기존 수처리 공정을 이용해 처리하였으나, 2012년부터 방류수 총질소(TN) 수질 기준이 20mg/L 이하로 강화되면서 별도의 수처리 공정이 필요해졌다. 가축분뇨 처리시설의 경우 가축분뇨 처리시설의 80%이상이 개별처리를 통하여 자원화 혹은 정화처리 하고 있다. 그러나 개별농가 처리 시설의 기술적 한계 및 퇴액비 시설의 사후 관리 미흡 등으로 미처 제거하지 못한 질소 포함 폐수가 토양, 하천 등으로 방류되어 환경 오염을 일으키고 있다. 이에 방류수 수질 기준에 적합한 시설을 설치해야 한다는 논의가 이뤄지고 있다¹⁾. 또한 돈사에서 배출되는 심한 악취는 주로 분뇨 중의 암모니아성 질소 태에 의한 액상에서 기상으로의 물질전환을 통해 발생되므로 이에 대한 적절한 방안이 필요한 실정이다²⁾.

현재 질소 제거를 위한 상용화된 처리 시스템은 질산화 반응을 위해 호기 조건을 조성하고, 탈질 반응을 위해 유기탄소원의 약품을 투입하는 방식이다. 그러나 혐기성소화액, 침출수 등 유기물(C) 농도가 낮고, 질소(N) 농도가 높은 폐수의 경우 탈질을 위한 폐수내 탄소원이 많이 부족하기 때문에 외부 탄소원의 사용으로 인한 비용 상승의 문제점이

있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 물리, 화학적 질소처리기술이 다양하게 발전하고 있으며, 그 중 혐기성소화액처럼 낮은 C/N비의 고농도 질소함유 폐수 처리는 물리화학적 처리 방법인 암모니아 스트리핑이 비용이 저렴하고 처리에 효율적인 것으로 알려져 있다^{3,4)}. 암모니아 스트리핑은 수중에 암모니아가 존재할 때 그 화학식에 의해 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}^+$ 의 이온평형이 유지 되어 있으며, 계가 알칼리 영역으로 변하게 되면 평형은 오른쪽으로 이동하게 되어 암모늄이온이 암모니아로 변하게 되고, 동시에 공기를 주입하여 암모니아를 탈기시켜 제거하는 방법이다. 암모니아의 제거 효율은 보통 탈기탑의 온도, pH, 공기-물의 접촉효율 등에 의해 결정된다. 그러나 pH 조정에 과다한 약품비가 투입되고 공기 주입에 따른 많은 동력비가 소모된다. 또한 혐기성소화액, 가축분뇨 등과 같은 고농도 고형물(TS) 함유 폐수의 경우 탈기탑 폐색의 문제점으로 인해 현장에 적용하는데 어려움이 있다.

본 연구는 기존 혐기성 및 호기성 처리에서 우수성이 입증된 E-PFR을 적용한⁵⁻⁷⁾ 다단수직형 암모니아 스트리핑조를 개발하고 랩스케일 실험을 수행하였다. 유체이동관과 격벽을 통해 다단으로 구성된 개발 스트리핑조는 기체체류공간에 의한 원활한 교반으로 기액접촉면을 늘려 처리 효율을 향상할 수 있다. 또한 이러한 구조적인 특성으로 인해 기존의 암모니아 스트리핑 공법의 단점으로 지적되었던 약품비 및 동력비를 절감할 수 있다. 그리고 기존 스프레이 방식의 문제였던 폐색 문제를 극복하고 기액접촉면적을 늘리면서 고농도 고형물 함유 폐수를 처리할 수 있다. 따라서 본 연구는 반응기의 구

조적 특성에 기인한 처리 효율의 정도를 확인하고, 온도, pH, 공기량의 조건 변화에 따른 실험 결과를 실증플랜트 설계를 위한 인자 도출에 활용하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 랩스케일 장치 구성 방법

2.1.1. 다단수직형 암모니아탈기 반응기 제작

다단수직형 암모니아스트리핑조의 개발을 위해 아크릴을 주재료로하는 반응기를 제작하였다[Fig. 1]. 지름 100mm의 원형 반응기는 원하는 단수만큼 조절할 수 있도록 분리와 결합이 가능한 구조이며, 본 실험 중 최대 결합한 총 높이는 1,330mm이다. 한 단의 부피는 액체가 포함되지 않는 기체체류공간을 제외한 1.1775L이며, 암모니아가스를 배출하는 마지막 단은 0.785L를 나타낸다. 또한, 첫 단은 폐수 및 공기를 유입할 수 있는 원터치 밸브가 각각

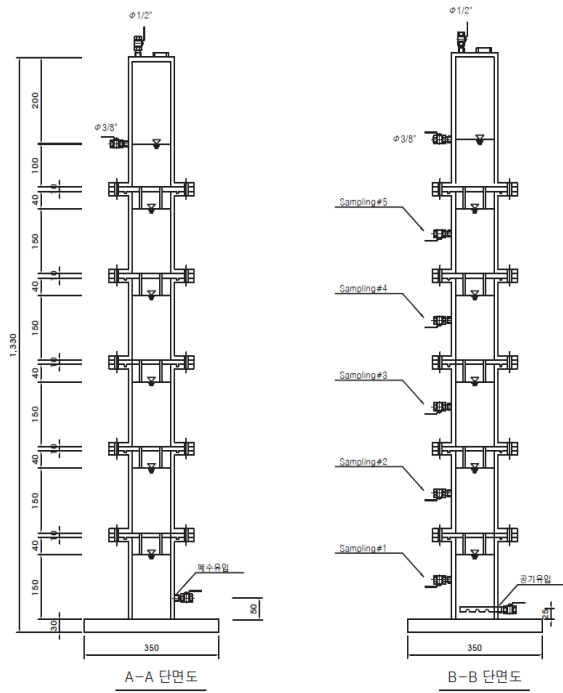


Fig. 1. Schematic of the vertical multi-stage ammonia stripping reactor(lab scale).

있으며, 각 단마다 샘플을 채취할 수 있는 $\phi 3/8$ "의 원터치밸브도 구성되어 있다. 그리고 마지막 단은 $\phi 1/4$ "의 기체배출밸브가 추가되어 있다. 단과 단 사이의 기체체류공간을 만들기 위하여 유체이동관이 포함된 중간 분리판을 배치하였다. 유체이동관은 하나의 분리판에 지름 10mm, 길이 40mm로 각각 2개의 관으로 구성되어있으며[Fig. 2], 누수를 방지하도록 고무링으로 패킹되어 있다[Fig. 3]. 또한 실험 결과의 비교를 위해 대조군으로 부피 6.6725L의 일체형 반응기를 따로 제작하였다.

2.1.2. 온도 조절 장치

온도 조건을 변화시키기 위하여 열선을 반응기에 감았으며, 온도센서를 통해 제어가 가능한 온도조절기(DH-5232A, 동화전자)를 사용하였다. 또한 발포폴리에틸렌 보온재(태화론®)를 사용하여 반응기의 온도를 일정하게 유지하였다.

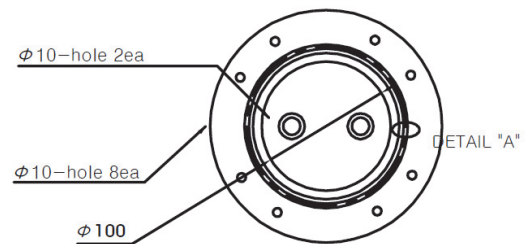


Fig. 2. Cross section of the partition plate.

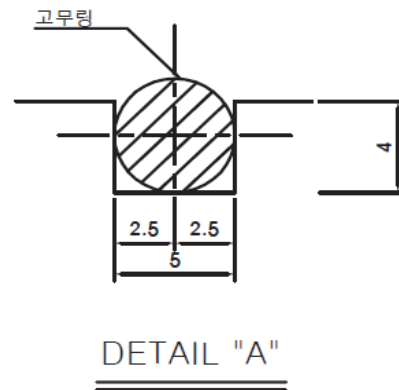


Fig. 3. Detail drawing of the rubber ring.

2.1.3. pH 조절 장치

pH를 일정하게 유지하기 위하여 슬레노이드 펌프를 사용하는 pH제어기(BL7916, Hanna instrument)을 사용하였다. 이 기기를 통하여 실시간으로 pH 및 온도가 확인 가능하였으나 간헐적인 pH와 온도를 확인하기 위하여 pH/온도 센서 감지기(DM-32P, DKK-TOA)를 별도로 사용하였다.

2.1.4. 공기 주입 장치

반응기에 연결된 튜브의 재질은 우레탄이며, 공기공급튜브의 내경/외경은 4/6mm(DH. U002, 대한과학), 암모니아 배출튜브 6.5/10mm(DH. U004, 대한과학)를 사용하였다. 공기 주입 장치는 최대 160L/min까지 송풍이 가능한 블로워(DY-160, 동양사)를 사용하였다. 분배구는 조대기포를 배출하는 지름 5mm~10mm의 일반 분배구를 사용하였으며, 주입되는 공기공급량을 확인하고 유지하기 위하여 유량계(RMA-23-SSV, Dwyer)를 설치하였다.

2.1.5. 암모니아 회수 장치

암모니아 회수장치는 황산(0.5M)이 담긴 2L 삼각플라스크 2개를 통해 암모니아가스를 흡수하였으며, 삼각플라스크의 황산암모늄 및 수증기 등의 합성용액이 삼각플라스크에 찰 때마다 황산을 교체해주었다.

2.2. 실험 수행 및 분석 방법

2.2.1. 실험 수행 방법

1) 원수 성장: 탄산수소나트륨(NaHCO_3)과 수산화나트륨(NaOH)을 이용하여 알칼리도 5,000mg/L

as CaCO_3 의 용액을 제조 한 후, 염화암모늄(NH_4Cl)을 첨가하여 $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도를 약 2,500mg/L인 시료를 제조하였다.

2) 단수 적용: pH 10, 수온 35°C, 공기량 20L/min으로 고정 후, 0단에서 5단까지 탈기량을 측정하였다. 단수에 따른 효율차이가 보이지 않을 시 공기량을 10L/min으로 줄여서 재실험하였다.

3) 수온: 단수실험에서 결정된 적정단수, pH 10, 공기량 20L/min으로 고정 후, 25°C, 35°C, 45°C에 대한 탈기량을 측정하였다.

4) pH: 단수실험에서 결정된 적정단수, 수온실험에서 결정된 적정수온을 고정 후, pH 9, pH 10, pH 11에 대한 탈기량을 측정하였다.

5) 공기 주입량: 단수실험에서 결정된 적정단수, 수온실험에서 결정된 적정수온, pH실험에서 결정된 적정 pH를 고정 후, 공기 주입량을 13L/min, 20L/min, 26L/min에 대한 탈기량을 측정하였다 [Table 1].

2.2.2. 시료 분석 방법

암모니아성 질소의 분석은 C-Mac사의 Nessler Method 시험 키트를 이용하였다. 분석할 시료를 적당량 채취하여 최대 300배까지 희석한 후, 두 개의 솔루션 (Ammonia Vial (Nessler method), Ammonia Nessler Solution)을 이용하여 상용화된 매뉴얼대로 처리한다. 그 후 흡광도 장치(QVIS-X100, C-Mac)를 통해 파장 425nm로 측정한다. Ammonia 존재 시 노란색으로 발색된다. 시료의 반응시간은 최대 8시간까지 측정하였고, 시료 측정 간격은 최소 1시간이었다.

Table 1. The list of the experiment conditions

| Item | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L) | Alkalinity (mg/L) | Stage number (#) | Temperature (°C) | air/liquid ratio (min^{-1}) | pH |
|--|------------------------------------|----------------------|------------------------|---------------------|---|-----------|
| Stage number (#) | 2,500 | 5,000 | 0,1,2,4,5 | 35 | 3 | 10 |
| Temperature (°C) | | | 0, 5 | 25, 35, 45 | 3 | 10 |
| pH | | | 0, 5 | 35 | 3 | 9, 10, 11 |
| air/liquid ratio (min^{-1}) | | | 0, 5 | 35 | 2, 3, 4 | 10 |

3. 결과 및 고찰

3.1. 단수 변화에 따른 탈기 효율 결과

단수 변화에 따른 암모니아 탈기 효율을 측정하기 위하여, 초기 pH 조건은 10으로 온도 조건은 35°C 그리고 공기량은 20L/min (기액비 3min⁻¹)으로 고정한 후, 0단, 1단, 2단, 4단, 5단으로 단수를 조절하여 실험을 수행하였다. 8시간 운전기간동안 암모니아성 질소의 농도를 측정한 결과는 [Fig. 4]와 같으며, 대부분의 반응기가 8시간이 지난 후 50%이상의 제거율을 보였다.

8시간 경과 후의 제거율 결과를 살펴보면, 0단 반응기에서 4단 반응기까지는 제거율이 52.5~56.8%정도로 그 차이가 미비한 반면, 5단 반응기는 62.6%로 상대적으로 제거 효율이 높았다[Fig. 5]. 이는 최소 5단의 반응기부터 탈기 효율이 차이가 나타난 것이라 판단된다.

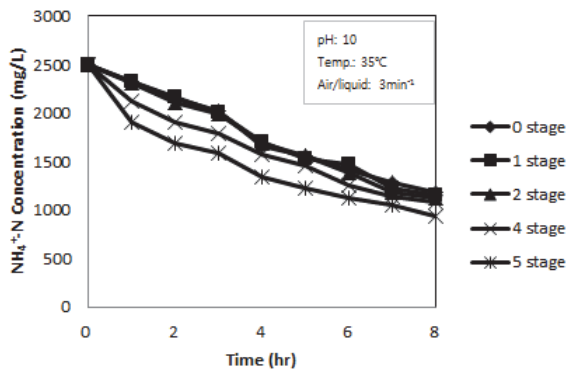


Fig. 4. Residual concentrations of NH₄⁺-N at various stage number.

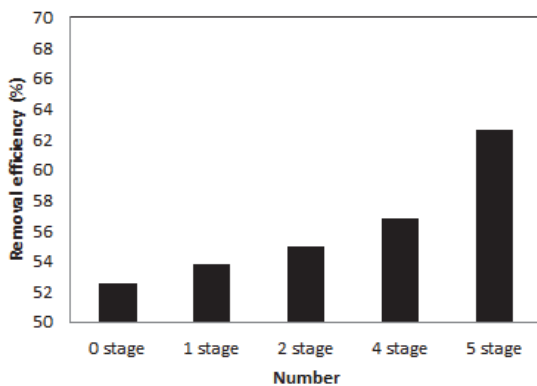


Fig. 5. Removal efficiency at various stage number.

안(2011)의 연구에 의하면 공기가 접촉하는 면적을 25, 50, 75 100%로 조절하여 암모니아 제거 속도를 측정하였을 때 접촉 면적의 증가가 암모니아의 탈기 효율을 증가시킬 수 있는 결과를 도출하였다. 본 연구 결과가 비록 단수의 증가(접촉면적 증가)에 따라 탈기 효율이 비례적으로 증가하지는 않더라도 5단부터 차이가 나는 것으로 보아 기체와 공기 접촉 면적이 증가할수록 탈기 효율이 높아진다고 판단된다. 단이 없는 0단 반응기와 5단 반응기 간에 암모니아 탈기율의 차이는 확인할 수 있었으나 그 차이가 10% 이내로 크지 않았다. 이러한 결과가 나타난 원인에 대해서는 몇 가지 가능성을 생각해 볼 수 있는데, 첫 번째로 SS성분이 없는 인공폐수를 사용하여 SS에 의한 암모니아 탈기 저해가 반영이 되지 않았고, 두 번째로 실험장치의 수심이 1.5m 정도로 실플랜트의 수심인 5m에 비해 낮아 다단 반응기에서 기대하는 기액접촉면적 증대효과가 상대적으로 낮게 나타났던 것으로 사료된다. 따라서 향후 추가적으로 수심 2m 이상의 다단 반응기(5단 이상)를 이용하여 실패수를 적용한 실험을 수행함으로써 단수 증가에 따른 제거율의 변화를 살펴볼 예정이다.

3.2. pH 변화에 따른 탈기 효율 결과

용액의 pH는 수중의 암모니아의 분율을 결정하는 중요한 인자이다. pH가 높아질수록 자유 암모니아의 분율이 높아지므로 공기 주입시 탈기될 수 있는 자유 암모니아의 양이 많아지기 때문이다. 단수 변화 실험에서 탈기 효율이 높았던 5단 반응기 및 기액비 3min⁻¹을 적용하고, 온도는 35°C로 고정하여 pH 9~11로 각각 변화 시킨 후 실험을 수행하였다. pH 9 조건에서는 8시간 경과 후 약 42.6%의 제거율을 보였으며, pH 10과 pH 11에서는 각각 62.6%, 74.4%의 제거율이 나타났다. 실험 중 최소 조건인 pH 9와 최대 조건인 pH 11과의 제거율 차이가 약 32%를 보인 반면, pH 10과 pH 11의 제거율 차이는 약 11%로 근소한 차이를 보였다[Fig. 6].

이(2000)의 연구⁸⁾에서 반응온도 25°C, 공기 주입량 5L/L/min, 반응시간 10시간을 적용하고, pH를 9.5, 10.5, 11.5로 각각 달리 적용했을 경우 암모니

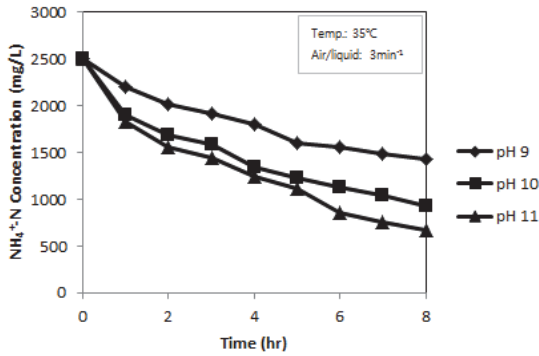


Fig. 6. Residual concentrations of NH₄⁺-N at various pH.

아성 질소의 농도가 1,500mg/L에서 500mg/L (제거효율 약 66%)를 달성하기까지 각각 8, 5, 4시간이 걸린 것으로 나타났다. 5단 반응기 pH 9조건에서 8시간 지난 후 효율은 약 42.6%로 이(2000)의 연구 결과 약 66%보다 적게 나타났지만, 이러한 차이는 기액비가 서로 다르기 때문에 발생한 것으로 보인다. 반면 안(2011)의 연구에서는 pH 8.9, 반응 온도 30°C, 기액비 5min⁻¹에서 약 40%의 제거효율이 나타났다. 적정 pH 선정할 시 선행 연구와 마찬가지로 pH 10.5와 pH 11.5와의 차이는 미비한 것으로 보아, 경제성을 고려한다면 pH 10정도의 조건이 적당한 것으로 여겨진다.

3.3. 온도 변화에 따른 탈기 효율 결과

온도 변화에 따른 탈기 효율 실험은 5단 반응기, 기액비 3 그리고 pH 10을 적용하고, 온도는 25~35°C로 변화시킨 후 실험을 수행하였다. 온도 25도 조건에서 8시간 경과 후 약 51%의 제거율을 보였으며, 35도 및 45도에서 각각 62.6%, 87.2%의 제거율을 보였다[Fig. 7]. 온도 45도에서 가장 제거 효율이 높았으나 온도를 유지하기 위해서 에너지를 많이 필요로 하기 때문에 혐기성소화액 유출 평균 온도와 비슷한 35도를 사용하는 것이 효과적이라고 판단된다.

허(2001)의 연구 결과⁹⁾를 살펴보면 폐수온도 17~22°C, 35°C, 55°C 조건에서 탈기탑을 운전한 결과, 폐수의 pH가 낮더라도 온도에 의하여 제거 효율이 향상된 결과를 도출하였다. 온도를 증가시킬 경우 수증 암모니아 기체 분자 분을 증가와 동시

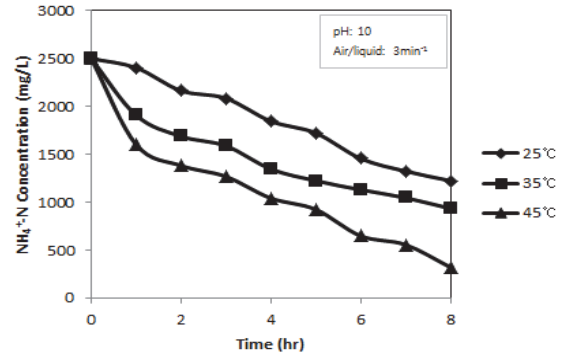


Fig. 7. Residual concentrations of NH₄⁺-N at various temperature.

에 기체 용해도 감소로 탈기능이 증가하기 때문에 이 점에서 온도 조건은 암모니아 스트리핑에서 탈기 효율을 결정하는 매우 중요한 변수라 여겨진다.

3.4. 공기주입량 변화에 따른 탈기 효율 결과

공기주입량 변화에 따른 탈기 효율 실험은 5단 반응기, pH 10 및 온도는 35°C로 적용하고, 기액비를 2min⁻¹, 3min⁻¹, 4min⁻¹로 각각 적용시킨 후 실험을 수행하였다. 기액비 2min⁻¹ 조건에서 8시간 경과 후 약 45.8%의 제거율을 보였으며, 3min⁻¹ 및 4min⁻¹ 조건에서 각각 62.6%, 75%의 제거율을 보였다[Fig. 8]. 이 결과에 의하면 공기주입량이 증가할수록 암모니아의 탈기속도도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 기액비 2min⁻¹의 조건에서는 50% 이하의 낮은 제거율을 나타나기 때문에 50%이상의 제거율을 유지하기 위하여 기액비 3min⁻¹ 이상의 조건이 적당할 것으로 판단된다.

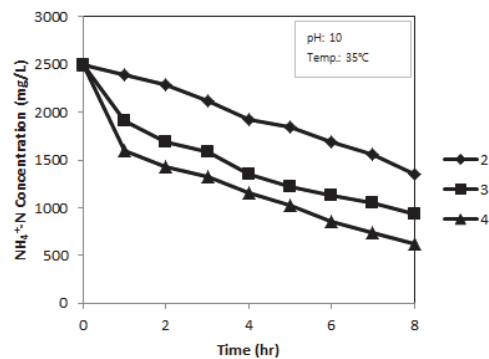


Fig. 8. Residual concentrations of NH₄⁺-N at various air/liquid.

또한 이(2000)의 추가 연구¹⁰⁾에서도 공기 주입량을 2.5L/L/min으로 적용하였을 때 25°C, 35°C 모두 반응 시간 10시간 경과 후에도 처리 목표치에 도달하지 못한 점을 보면 기액비는 최소 3min⁻¹ 이상으로 설계하는 것이 좋을 것이라고 판단된다.

4. 결론

당사는 고농도 질소함유 폐수를 처리하기 위하여 다단수직형 암모니아스트리핑조를 개발하였다. 반응기 개발을 위해 기존 단이 없는 반응기와 각 단수의 증가에 따라 암모니아성 질소 제거 효율을 비교하였으며, pH, 온도, 공기주입량 조건 변화에 따라서 차이점을 비교하여, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 다단수직형 암모니아스트리핑조의 단수별 암모니아성 질소 제거 실험 (pH 10, 온도 35°C, 기액비 3min⁻¹의 동일 조건)에서 8시간 경과 후 단이 없는 반응기는 약 52.5%의 제거율을 나타냈으며, 5단 반응기에서는 약 62.6%의 제거율이 나타나 약 10%의 효율 차이가 있는 것으로 확인하였다.

2. pH 변화에 따른 암모니아성 질소 제거 실험 (5단 반응기, 온도 35°C, 기액비 3min⁻¹의 동일 조건)에서 8시간 경과 후 pH 9는 약 42.6%의 제거율을 나타냈으며, pH 11에서 약 74.4%의 제거율을 나타냈다.

3. 온도 변화에 따른 암모니아성 질소 제거 실험 (5단 반응기, pH 10, 기액비 3min⁻¹의 동일 조건)에서 8시간 경과 후 25°C에서 약 51%의 제거율을 나타냈으며, 45°C에서 약 87.2%의 제거율이 나타났다.

4. 공기주입량 변화에 따른 암모니아성 질소 제거 실험 (5단 반응기, pH 10, 온도 35°C의 동일 조건)에서 8시간 경과 후 기액비 2min⁻¹에서 약 45.8%의 제거율을 나타냈으며, 기액비 4min⁻¹에서 약 75%의 제거율이 나타났다.

5. 현재 S하수처리장에서 혐기성소화액 파일럿플랜트 추가 실험을 수행 중이며, 연속 운전 평가를 통해 실험플랜트 현장 적용성에 대해 평가할 예정이다.

사사

본 연구는 환경부 “환경산업선진화기술개발사업 (과제번호: 2014000150006)”으로부터 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [정승현, “가축분뇨 정화방류 현황 및 시설개선 비용조사”, 대한한돈협회] Jung, S. H., "Survey on the status of the livestock manure discharge and the facility improvement", Korea Pork association, (2013).
- [손보균, 강성구, 조은주, 김신도, 이창주, 김정호, “돈분뇨의 적합한 호기성 액비화를 위한 암모니아 탈기조건 설정”, 한국토양비료학회지] Sohn, B. K., Kang, S. G., Cho, E. J., Kim, S. D., Lee, C. J., and Kim, J. H., "Estimation of Ammonia Stripping Condition for Adequate Aerobic Liquid-Composting of Swine Manure", Korean J. Soil Sci. Fert., 39(2), pp. 73~79. (2006)
- [안주석, 임지혜, 백예지, 정태영, 정형근, “반응조의 물리적 인자와 알칼리도가 암모니아 탈기에 미치는 영향에 관한 연구”, 대한환경공학회] An, J. S., Lim, Y. J., Chung, T. Y., and Chung, H. K., "Effect of the Physical Parameters and Alkalinity in the Ammonia Stripping", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 33(8), pp. 583~590. (2011).
- [황구대, 조영무, “축산폐수 전처리를 위한 암모니아 탈기공정의 운전조건이 암모니아 제거에 미치는 영향”, 한국물환경학회] Hwang, G. D., and Cho, Y. M., "Effect of Operating Condition of Stripping Process on Ammonia Removal for Pre-treatment of Swine Wastewater", Journal of Korean Society on Water Quality, 20(1), pp. 86~92. (2004).
- [이재기, 최홍복, 신응배, 박주형, 최은주, 김정래, 박영숙, “다단수직형 호기성반응기(ER-1)를 이용한 음식물 폐수의 생물학적 처리기술”, 유기물자원화] Lee, J. K., Choi, H. B., Shin, E. B., Park, J. H., Choi, E. J., Kim, J. R., and Park, Y. S., "Biological treatment process for Food wastewater Using ER-1 bioreactor", J. of

- KORRA, 14(4), pp. 113~120. (2006).
6. [김범식, 최홍복, 이재기, 박주형, 지덕기, 최은주, "E-PFR 반응기를 이용한 유기성 폐기물의 혐기성 처리와 재생에너지 생산에 관한 연구", 유기물자원학회 Kim, B. S., Choi, H. B., Lee, J. K., Park, J. H., Ji, D. G., and Choi, E. J., "Anaerobic Organic Wastewater Treatment and Energy Regeneration by Utilizing E-PFR system, J. of KORRA, 16(2), pp. 57~65. (2008).
 7. [석종혁, 최홍복, "마개흐름형 다단식 혐기성 반응기의 교반 특성 및 음식물 폐기물 처리 시 충격부하 영향", 한국폐기물 자원순환학회] Seok, J. H., and Choi, H. B., "Mixing Characteristics in a Plug-flow Multi-stage Anaerobic Reactor and Effects of Shock Loads in Food Waste Treatment, The Journal of Korea Society of Waste Management, 28(6), pp. 621~631. (2011).
 8. [이병진, 조순행, "암모니아 탈기공정을 이용한 침출수의 암모니아성 질소 제거(I)", 대한환경공학회] Lee, B. J., and Cho, S. H., "Removal of Ammonia-Nitrogen Contained in Landfill Leachate by Ammonia Stripping(I)", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 22(10), pp. 1893~1904. (2000).
 9. [허남효, 박순철, 이진석, 이준표, 강호, "암모니아 탈기공정을 이용한 혐기소화 슬러지 탈수액의 고농도 암모니아성 질소 제거 및 회수", 대한환경공학회] Heo, N. H., Park, S. C., Lee, J. S., Lee, J. P., and Kang, H., "Removal and Recovery of High Strength Ammonia-Nitrogen from Dewatering of Anaerobic Digested Sludge using Ammonia Stripping", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 23(4), pp. 601~612. (2001).
 10. [이병진, 조순행, "암모니아 탈기공정을 이용한 침출수의 암모니아성 질소 제거(II)", 대한환경공학회] Lee, B. J., and Cho, S. H., "Removal of Ammonia-Nitrogen Contained in Landfill Leachate by Ammonia Stripping(II)", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 24(2), pp. 219~229. (2002).