

이유체 벤츠클리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서 합성폐수 중의 암모니아 제거특성

노다지¹, 윤찬수¹, 임준혁², 원용선², 이태윤¹, 이제근^{1,*}

¹부경대학교 환경공학과
48513 부산광역시 남구 용소로 45
²부경대학교 화학공학과
48547 부산광역시 남구 신선로 365

(2017년 2월 16일 접수; 2017년 4월 5일 수정본 접수; 2017년 4월 5일 채택)

Characteristics of Ammonia Removal from a Synthetic Wastewater in a Jet Loop Reactor with a Two-fluid Venturi-type Swirl Nozzle

Da-ji Noh¹, Chan-Su Yun¹, Jun-Heok Lim², Yong-Sun Won², Tae-Yoon Lee¹, and Jea-Keun Lee^{1,*}

¹Department of Environmental Engineering, Pukyong National University
45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

²Department of Chemical Engineering, Pukyong National University
365 Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 48547, Korea

(Received for review February 16, 2017; Revision received April 5, 2017; Accepted April 5, 2017)

요 약

본 연구에서는 합성폐수로부터 암모니아 탈기 시 이유체 벤츠클리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기의 성능을 평가하고자 하였다. 이를 위해 이유체 벤츠클리형 선회 노즐과 일반 노즐이 장착된 각각의 제트 루프 반응기를 이용하여 조업조건 변화에 따른 암모니아 제거효율과 총괄물질전달계수(K_La)를 각각 얻은 후, 이를 통해 성능을 비교하였다. 운전변수로는 pH (pH = 10-12), 액체순환유량($Q_L = 25-35 \text{ L min}^{-1}$), 공기유입량($Q_G = 5-20 \text{ L min}^{-1}$)을 변화시키며 실험하였다. 실험결과, 동일한 조업조건에서 이유체 벤츠클리형 선회 노즐(two-fluid venturi-type swirl nozzle, TVSN)이 장착된 제트 루프 반응기가 이유체 벤츠클리형 일반 노즐(two-fluid venturi-type conventional nozzle, TVCN)이 장착된 제트 루프 반응기보다 암모니아 제거효율과 K_La 가 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 이유체 벤츠클리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서 형성된 선회류 흐름에 의해 난류강도가 이유체 벤츠클리형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에 비해 높기 때문이라 판단된다. 또한, 실험조건 범위에서 K_La 는 pH, 공기유입량 및 액체순환유량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, 특히, 실험변수 중 공기유입량이 pH나 액체순환유량에 비해 K_La 에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

주제어 : 제트 루프 반응기, 암모니아 제거, 공기탈기법, 이유체 벤츠클리형 노즐, 총괄물질전달계수

Abstract : We investigated the performance of a jet loop reactor (JLR) with the two-fluid venturi-type swirl nozzle (TVSN) during experiment for ammonia removal by air stripping from a synthetic wastewater, and compared it with that of a JLR with the two-fluid venturi-type conventional nozzle (TVCN), with the variation of pH, liquid circulation rate (Q_L), and air flow rate (Q_G). Their performance levels were compared based on the ammonia removal efficiency and overall mass transfer coefficient (K_La). Investigated parameters in a JLR were pH (10-12), air flow rate ($Q_G = 5-20 \text{ L min}^{-1}$), and liquid circulation rate ($Q_L = 25-35 \text{ L min}^{-1}$). Throughout the experiment, the ammonia removal efficiency and K_La in a JLR with TVSN was higher than in a JLR with TVCN. This may be due to the enhanced turbulent intensity by swirling flow formed in the JLR with TVSN compared to that with TVCN. Further, we obtained higher K_La when pH, Q_L and Q_G were increased. In particular, K_La was increased more efficiently by increasing Q_G than by increasing pH and Q_L .

Keywords : Jet loop reactor, Ammonia removal, Air stripping, Two-fluid venturi-type nozzle, Overall mass transfer coefficient

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: leejk@pknu.ac.kr; Tel: +82-51-629-6524; Fax: +82-51-629-6523

doi: 10.7464/ksct.2017.23.2.205 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

인구 증가와 산업발전에 따라 고농도의 암모니아를 포함한 폐수가 산업공정, 매립지, 음식물폐기물 처리장 등 다양한 분야에서 발생되고 있다[1-3]. 이러한 폐수가 강이나 바다로 유입될 경우, 부영양화와 적조를 유발할 뿐만 아니라, 수중에서 아질산성 질소와 질산성 질소로 산화되면서 용존산소를 소모하여 수질을 악화시킨다[4]. 또한, 정수장과 하수처리장의 운영효율을 저하시키고 처리비용을 상승시키는 등 추가적인 문제도 발생되고 있기 때문에 암모니아가 포함된 폐수의 적절한 처리가 필요한 실정이다[5].

암모니아가 포함된 폐수는 생물학적 처리법, 물리·화학적 처리법, 막분리법, 흡착법, 공기탈기법, 마이크로파조사법 등 다양한 방법으로 처리가 가능하다[1-8]. 이 중 생물학적 처리법이 폐수 중의 탈질처리에 효율적으로 이용되고 있으나, 폐수의 농도변화에 따른 탄력적인 운전이 어렵고 넓은 처리장면적이 요구되며, 고농도 폐수가 유입될 경우, 미생물 생육을 저해하여 안정적인 처리효율을 얻기 어렵다는 문제점이 지적되고 있다. 그리고 막분리법은 고농도 폐수 처리 시 막의 수명이 단축되고, 흡착법은 폐흡착제 처리비용으로 경제성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제로 인하여 고농도의 암모니아를 포함한 폐수를 처리하기 위해서는 공기탈기법이 일반적으로 적용되고 있다. 공기탈기법은 높은 pH를 유지시키면서 다량의 공기를 불어넣어 암모니아를 탈기시키는 방법으로 구조가 단순하여 운전이 용이하고 유지비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 특히, 공기탈기장치로서 충전탑을 이용할 경우, 기체-액체의 접촉면적이 증가되어 암모니아 탈기효율은 높아지지만 폐수 중에 함유된 탄산염이나 중탄산염에 의해 충전물 내부에 스케일이 형성되어, 장시간 운전 시 과도하게 형성된 스케일에 의해 높은 압력강하가 문제점으로 지적되고 있다[9].

Bohner and Blenke [10]에 의해서 개발된 제트 루프 반응기(jet loop reactor, JLR)는 이유체 노즐에서 생성된 제트기류가 미세기포를 형성하여 기체-액체의 접촉면적을 증가시키고, 고속의 제트기류에 의해서 난류 강도가 증가되는 특징이 있다. 그리고 이유체 노즐에서 분사된 제트기류에 의해서 유도관과 반응기 사이의 공간을 통하여 상승하던 미세기포가 유도관 내부로 재순환되어 기포의 체류시간이 증가된다는 특징도 있다. 이에 따라 기체-액체 반응에서 물질전달률이 다른 반응기보다 높다는 장점을 가지고 있어, CO₂를 이용한 알칼리 폐수의 중화에 관한 연구 등 기체-액체 흡수반응에 제트 루프 반응기를 적용하기 위한 시도가 이루어져 왔다[11-13]. 따라서 제트 루프 반응기를 폐수 중의 암모니아 제거를 위한 공기탈기법에 적용한다면, 제트 루프 반응기가 가지는 높은 물질전달률에 의해서 다른 반응기보다 효과적으로 암모니아를 탈기시킬 수 있을 것으로 기대된다.

한편, Cha et al. [14]은 제트 루프 반응기에서 물질전달률을 상승시키기 위해서 동심으로 구성된 이유체 노즐 대신에 이유체 선회 노즐을 적용하였는데, 이유체 선회 노즐을 적용하는

것이 이유체 일반 노즐을 적용하는 것보다 더욱 미세한 기포를 만들 수 있어 기체-액체 간 접촉면적이 증가되고, 선회류 유도 노즐로부터 형성된 선회류 흐름에 의해 난류강도가 증가됨에 따라 물질전달률이 높아지는 것으로 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 합성폐수 중에 함유된 암모니아를 공기탈기법에 의해 처리하면서 이유체 벤츄리형 선회 노즐(two-fluid venturi-type swirl nozzle, TVSN)이 장착된 반회분식 제트 루프 반응기의 성능을 파악하고자 하였다. 성능평가를 위해서 이유체 벤츄리형 선회 노즐과 일반 노즐(two-fluid venturi-type conventional nozzle, TVCN)이 장착된 각각의 반회분식 제트 루프 반응기에서 시간에 따른 합성폐수 중의 암모니아 농도변화를 측정하여 암모니아 제거효율과 총괄물질전달계수(K_La)를 계산하였다. 또한, 이유체 벤츄리형 선회 노즐이 장착된 반회분식 제트 루프 반응기에서 조업조건(pH, 공기유입량, 액체순환유량)을 변화시키면서 시간에 따른 합성폐수 중의 암모니아 농도와 총괄물질전달계수의 변화를 살펴보고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치

Figure 1에 반회분식 제트 루프 반응기의 흐름도를 나타냈다. 장치구성은 크게 제트 루프 반응기와 순환펌프로 구성되어 있다. 실험에 사용된 제트 루프 반응기는 하향류 형태의 원통형 구조로 반응관, 유도관, 기체-액체 분리조, 이유체 노즐, 열교환기로 구성되어 있다. 제트 루프 반응기는 전체 높이와 유효용적이 0.84 m, 16 L가 되도록 아크릴로 제작되었다.

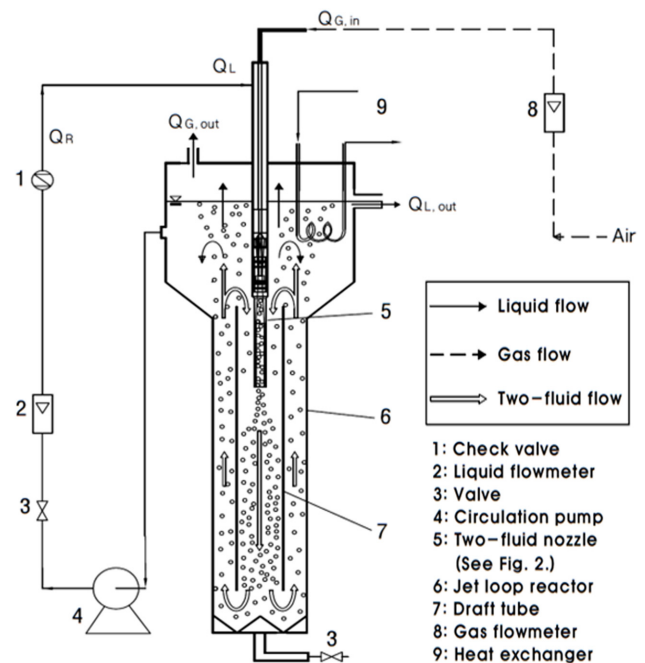


Figure 1. Schematic of the experimental apparatus used in this study.

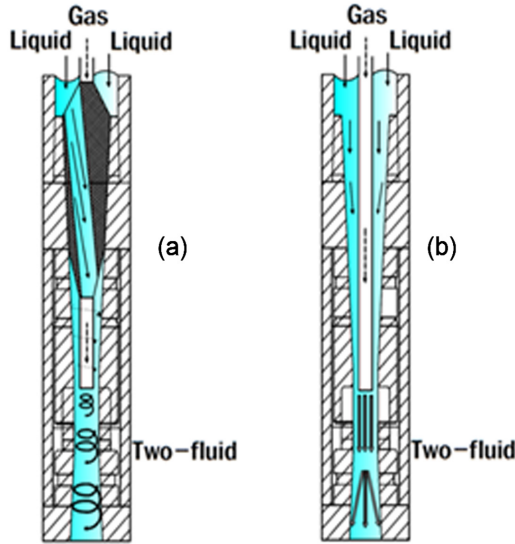


Figure 2. The cross-section of (a) two-fluid venturi-type swirl nozzle (TVSN), (b) two-fluid venturi-type conventional nozzle (TVCN), and routes of liquid, gas, and two-fluid flows.

Figure 2에 나타난 바와 같이 본 연구에서는 두가지 형태의 이유체 노즐을 사용하였다. 이유체 노즐은 PVC로 제작되었으며, 내경이 16 mm에서 8.35 mm로 감소하다가 가스유입관이 끝나는 지점부터 다시 16 mm까지 증가하도록 벤츄리 형태로 제작되었다. 가스유입관은 스테인레스 재질로 외경이 3 mm가 되도록 제작되었으며, 액체유입관의 중심축에 위치하도록 고정시켰다. 반응관의 바닥은 원뿔모양으로 제작하였다.

장치운전은 먼저, 정량펌프(Longer Co., China)를 이용하여 16 L의 합성폐수를 제트 루프 반응기에 채우고 순환펌프(SPCO, Switzerland)를 작동시켜 합성폐수가 이유체 노즐의 액체 유입관으로 흘러가도록 하였다($Q_{L, in}$). 높은 유속으로 유입되는 합성폐수에 의해서 공기는 자연스럽게 가스 유입관으로 유입된다($Q_{G, in}$). 유입된 공기는 균질한 미세기포를 형성하며, 이유체 노즐의 토출부에서 합성폐수와 미세한 공기방울이 혼합된 이유체 liquor를 형성하게 된다($Q_L + Q_G$). 이유체 liquor는 유도관을 통해 바닥을 향해서 수직으로 분사되고, 반응관의 내면과 유도관의 외면 사이를 통하여 반응관 상부로 올라가게 된다. 이 때, 이유체 벤츄리형 선회 노즐을 적용할 경우, 이유체 벤츄리형 일반 노즐의 수직적 흐름과는 다르게, 이유체 liquor는 선회관에 의해서 사선으로 배출되어 선회류 흐름을 형성하여 유도관을 통해 하강한 후 반응관의 내면과 유도관의 외면 사이를 통하여 상승한다. 반응기 상부로 올라온 이유체 liquor의 일부는 유도관 내부로 재순환되고, 재순환되지 않는 liquor는 기체-액체 분리조로 유입된다. 기체-액체 분리조로 유입된 liquor는 기체와 처리수(액체)로 분리된다. 분리된 가스는 상부의 가스 유출 밸브를 통하여 배출되고 처리수는 순환펌프에 의해서 제트 루프 반응기 외부로 순환(Q_R)되어 이유체 노즐을 통하여 재분사된다.

Table 1. Operating conditions of the JLR

Operating parameters	Value
Temperature	30 °C
Volume of synthetic wastewater (V_L)	16 L
NH ₃ - N source	NH ₄ Cl
Concentration of NH ₃ - N	300 mg L ⁻¹
Air flow rate (Q_G)	5, 10, 15, 20 L min ⁻¹
Liquid circulation flow rate (Q_L)	25, 30, 35 L min ⁻¹
Method of pH increment and maintenance	2M NaOH injection
pH	10, 11, 12

2.2. 실험방법

본 연구에서 사용한 합성폐수 중의 암모니아 농도와 실험 조건은 Table 1과 같다. 실험조건 중 액체순환유량과 공기유입량은 본 연구에서 이용된 제트 루프 반응기의 정상 가동 상태를 고려하여 운전범위를 설정하였다. 한편, 합성폐수의 pH는 제트 루프 반응기로 유입된 공기에 포함된 CO₂의 합성폐수로의 흡수반응에 의해서 조업시간이 경과됨에 따라 pH가 점진적으로 낮아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 2 M의 NaOH 용액을 이용하여 pH를 일정하게 유지시켜 주었다. 그리고 실험조건 변화에 따른 암모니아의 제거특성을 파악하기 위해 조업시간별 유출수를 채취하여 용액 중의 NH₃-N의 농도를 Nessler methods을 이용하여 분석하였다[15].

2.3. 암모니아 제거효율 및 총괄물질전달계수

반회분식 제트 루프 반응기에서 암모니아 제거효율(η)은 조업시간 변화에 따라 측정된 암모니아 농도로부터 Equation (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\eta(\%) = \frac{C_{L0} - C_{Lt}}{C_{L0}} \quad (1)$$

여기에서 C_{L0} 는 액체중의 초기 암모니아 농도(mg L⁻¹)이고, C_{Lt} 는 시간에 따른 액체중의 암모니아 농도(mg L⁻¹)이다.

Değermenci et al. [16]은 제트 루프 반응기에 대한 총괄 물질수지식(overall material balance)과 미분소 물질수지식(differential material balance)로부터 총괄물질전달계수($K_L a$)를 다음과 같이 유도하였다.

$$-\ln \frac{C_{Lt}}{C_{L0}} = K_L a t \quad (2)$$

따라서 본 연구에서도 제트 루프 반응기를 이용해 폐수 중의 암모니아를 공기탈기법에 의해 처리하면서, 운전시간에 따라 암모니아 농도를 측정한 후, Equation (2)를 이용하여 $K_L a$ 를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 노즐별 암모니아 제거효율 및 총괄물질전달계수 비교

본 실험에서는 이류체 벤츠티형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기의 성능을 평가하기 위하여 이류체 벤츠티형 선회 노즐과 일반 노즐이 장착된 각각의 제트 루프 반응기를 이용하여 합성폐수 중의 암모니아를 공기탈기법으로 제거하며 조업시간에 따른 암모니아 제거효율을 살펴보았으며, 그 결과를 Figure 3에 나타내었다. 기존에 보고[16,17]된 제트 루프 반응기를 이용한 암모니아 탈기에 관한 실험결과는 본 실험에 이용된 반응기와 규격 및 실험조건에 차이로 비교분석에 어려움이 있어, 본 연구에서는 자체 제작한 이류체 벤츠티형 선회 노즐과 일반 노즐이 장착된 각각의 제트 루프 반응기를 이용한 실험결과를 서로 비교하여 반응기의 성능을 평가하였다. 이 때, 실험조건은 폐수 온도 30 °C, 액체순환유량 35 L min⁻¹, 공기유입량 20 L min⁻¹으로 일정하게 유지해주었다. 한편, 수중의 암모늄 이온은 pH가 높아짐에 따라서 암모니아로 전환되며, pH 11에서 95% 이상, pH 12 이상에서 대부분의 암모늄 이온이 암모니아로 전환된다고 보고된 바 있다[18]. 이에 따라 고알칼리성 폐수는 pH 12에서 암모니아를 탈기하는 것이 유리할 것으로 판단되나, 이 외의 폐수는 pH 12를 유지하기 위해 pH 조정제가 과도하게 소모되기 때문에 일반적으로 pH 11에서 암모니아를 탈기시키고 있다[2,9]. 따라서 본 실험에서도 pH는 11로 유지하였다. Figure 3에서와 같이, 조업시간이 2,000분일 때, 이류체 벤츠티형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서 암모니아 제거효율은 95%이었으나, 이류체 벤츠티형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서는 87%로 나타났다.

Figure 4에는 Figure 3의 조업시간에 따른 암모니아 농도로부터 Equation (2)를 이용하여 총괄물질전달계수를 계산하여 나타내었다. 이류체 벤츠티형 선회 노즐이 장착된 제트 루

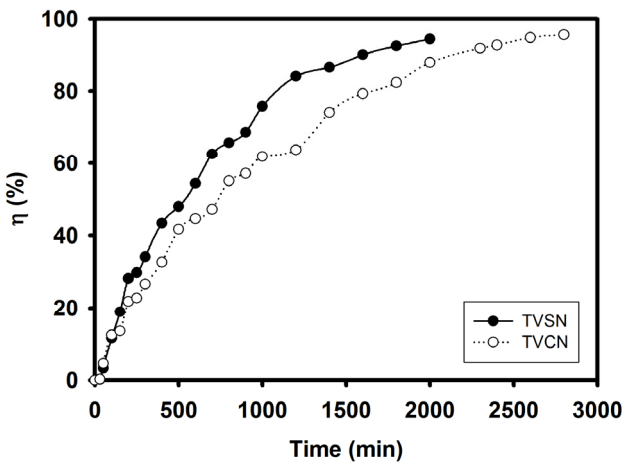


Figure 3. Comparison of ammonia removal efficiency between TVSN and TVCN at T=30 °C, pH=11, Q_L=35 L min⁻¹, and Q_G=20 L min⁻¹.

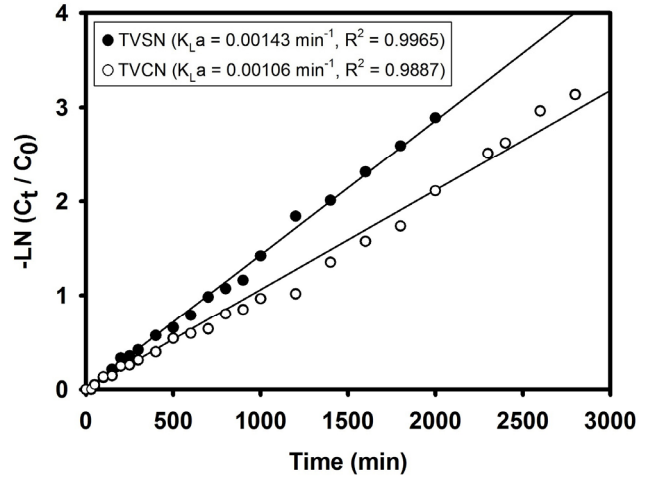


Figure 4. Comparison of overall mass transfer coefficient (K_{La}) between TVSN and TVCN at T=30 °C, Q_L=35 L min⁻¹, and Q_G=20 L min⁻¹.

프 반응기에서 총괄물질전달계수는 0.00143 min⁻¹으로 이류체 벤츠티형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서의 0.00106 min⁻¹보다 높은 것으로 나타났다. Kang et al. [11]과 Cha et al. [14]은 이류체 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기보다 이류체 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기를 이용하는 것이 struvite 결정화 및 CO₂ 흡수반응에서 물질전달률이 높고 성능이 우수한 것으로 보고하였다. 이러한 결과는 Figure 2에서 나타낸 이류체 liquor의 흐름과 같이 이류체 벤츠티형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서 합성폐수와 공기가 혼합된 이류체 liquor는 노즐 후단에서 직선적인 움직임을 나타내지만, 이류체 벤츠티형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서는 노즐 내 선회판을 따라 사선으로 배출된 폐수에 의해서 선회류가 형성되어 난류강도가 증가되었고, 이에 따라 총괄물질전달계수도 증가되었기 때문으로 판단된다. 또한, 노즐 후단에서 생성된 선회류에 의해서 보다 미세한 기포가 형성되어 기체-액체 접촉면적이 증가되어 물질전달률이 높아졌기 때문으로 판단된다[14]. 따라서 이류체 벤츠티형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기가 이류체 벤츠티형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기를 이용하여 암모니아를 탈기시키는 것보다 유리할 것으로 판단된다.

3.2. 운전조건 변화에 따른 노즐별 총괄물질전달계수의 변화

본 실험에서는 이류체 벤츠티형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기의 운전조건 변화가 암모니아 농도와 총괄물질전달계수에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 pH (pH = 10, 11, 12), 액체순환유량(Q_L = 25, 30, 35 L min⁻¹), 공기유입유량(Q_G = 5, 10, 15, 20 L min⁻¹)을 변화시키면서 조업시간에 따른 암모니아의 농도를 측정하고, 그 결과로부터 총괄물질전달계수를 계산하였다. 또한, 이류체 벤츠티형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기를 이용하여 동일한 실험을 수행하여 이류

체 벤츄리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서 구한 총괄물질전달계수와와의 비교를 통해 각 노즐이 장착된 반응기의 성능을 평가하고자 하였다.

한편, 기존 연구결과에 따르면 총괄물질전달계수는 암모니아 농도 변화에 따라 일정하다고 보고하였고[16,17], 탈기공정에서 장시간 운전 시 시간에 따른 암모니아 농도 변화로부터 총괄물질전달계수를 계산한 본 연구결과(Figure 4)에서도 상관계수가 0.9887-0.9965로 높게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 총괄물질전달계수를 구하기 위한 암모니아 농도변화 실험에서 운전시간은 최대 500분까지로 한정하였다.

3.2.1. pH

이유체 벤츄리형 선회 노즐과 일반 노즐이 장착된 각각의 제트 루프 반응기를 이용하여 암모니아를 탈기시킬 때, pH가 암모니아 제거에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 pH를 10-12로 변화시키며 조업시간에 따른 암모니아 농도를 측정하고, 이로부터 총괄물질전달계수를 계산하여 Figure 5에 나타내었다. Figure 5에서 보면 총괄물질전달계수는 이유체 벤츄리형 선회 노즐과 일반 노즐이 장착된 각각의 반응기 모두에서 pH가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 pH가 수중의 암모니아 분율에 미치는 영향에 의한 것으로 pH가 증가할 경우, 페수 중 암모늄 이온이 암모니아로 전환되어 탈기가 보다 쉽게 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다[19].

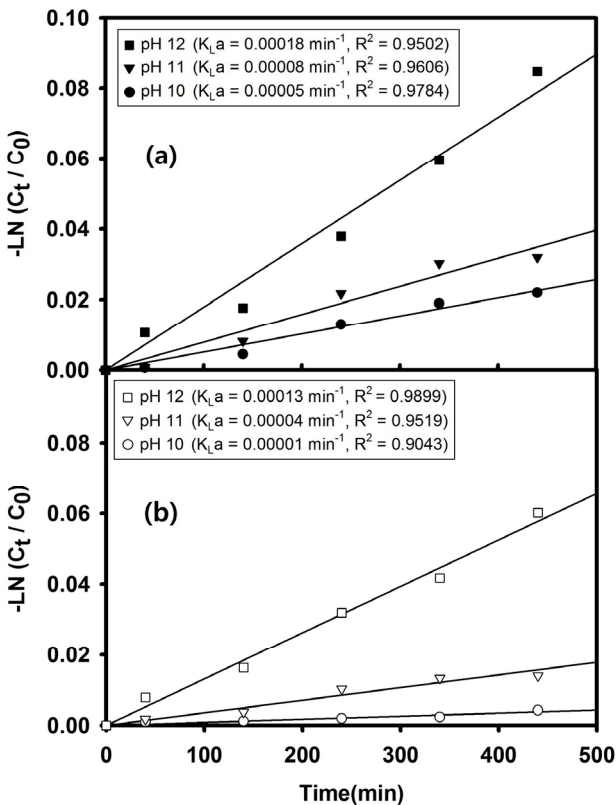


Figure 5. Effect of pH on overall mass transfer coefficient ($K_L a$): (a) TVSN, (b) TVCN at $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $Q_L = 35\text{ L min}^{-1}$, and $Q_G = 5\text{ L min}^{-1}$.

한편, 총괄물질전달계수는 동일한 pH에서 이유체 벤츄리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기가 이유체 벤츄리형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기보다 높은 값을 나타내었다.

3.2.2. 액체순환유량(Q_L)

Figure 6에는 이유체 벤츄리형 선회 노즐과 일반 노즐이 장착된 각각의 제트 루프 반응기에서 액체순환유량(Q_L)을 25, 30, 35 L min^{-1} 으로 증가시켰을 때, 조업시간에 따른 총괄물질전달계수의 변화를 나타내었다. 총괄물질전달계수는 액체순환유량이 증가할 때, 함께 증가하는 것으로 나타났다. 이유체 벤츄리형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서 액체순환유량이 35 L min^{-1} 일 때, 총괄물질전달계수는 0.00007 min^{-1} 로 나타났다. 하지만 이유체 벤츄리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서 액체순환유량이 30 L min^{-1} 일 때, 총괄물질전달계수는 0.00008 min^{-1} 으로 나타나, 이유체 벤츄리형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기를 이용한 경우보다 낮은 액체순환유량에서 높은 총괄물질전달계수를 얻을 수 있었다.

한편, Değermenci et al. [16]는 제트 루프 반응기에서 액체순환유량이 증가함에 따라서 반응기 내 유체는 bubbly flow regime에서 churn turbulent flow regime으로 변화하여 기포의 상승 속력과 기포합체현상이 발생하게 되며, 이에 따라 물질전달을 위한 기체-액체 간 계면이 감소되어 총괄물질전달계수가 감소한다고 보고한 바 있다. 하지만 본 실험 중의 액체

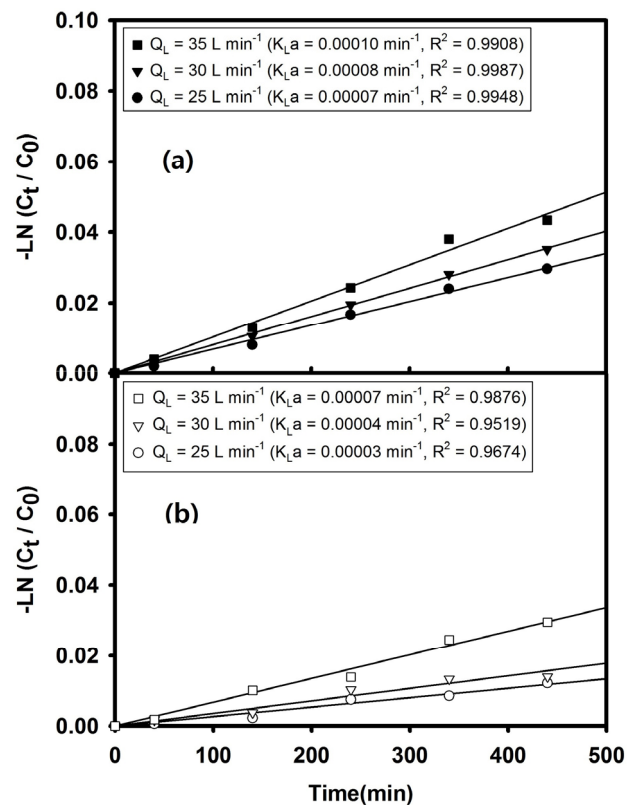


Figure 6. Effect of liquid circulation rate (Q_L) on overall mass transfer coefficient ($K_L a$): (a) TVSN, (b) TVCN at $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 11$, and $Q_G = 5\text{ L min}^{-1}$.

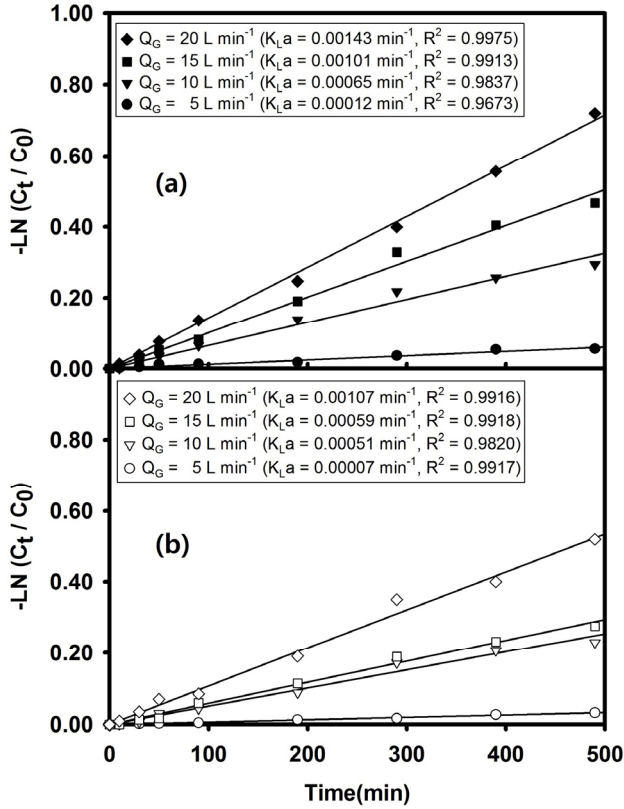


Figure 7. Effect of air flow rate (Q_G) on overall mass transfer coefficient (K_La): (a) TVSN, (b) TVCN at $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 11$, and $Q_L = 35\text{ L min}^{-1}$.

순환유량 변화 범위 내에서 이러한 현상은 관찰되지 않았다.

3.2.3. 공기유입량(Q_G)

Figure 7에는 이유체 벤츨리형 선회 노즐과 일반 노즐이 장착된 각각의 제트 루프 반응기에서 공기유입량(Q_G)의 변화가 조업시간에 따른 총괄물질전달계수에 미치는 영향을 나타내었다. 실험결과, 공기유입량이 증가할수록 총괄물질전달계수는 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 동일한 공기유입량에서 총괄물질전달계수는 이유체 벤츨리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기가 이유체 벤츨리형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기보다 높은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 앞에서 설명한 바와 같이 이유체 벤츨리형 선회 노즐에 의해서 이유체 벤츨리형 일반 노즐보다 더욱 미세하고 균질한 기포를 생성할 수 있어 기체-액체 접촉면적을 높여 물질전달률을 증가시켰기 때문으로 판단된다. 그리고 이유체 벤츨리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기의 노즐 토출부에서 형성된 선회류에 의해 난류강도가 증가되어 총괄물질전달계수가 향상되고, 미세기포의 체류시간도 증가되어 기체-액체 간 물질전달을 위한 접촉시간이 증가되었기 때문으로 판단된다[14].

3.3. TVSN이 장착된 JLR에서 총괄물질전달계수 비교

Figure 8은 이유체 벤츨리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프

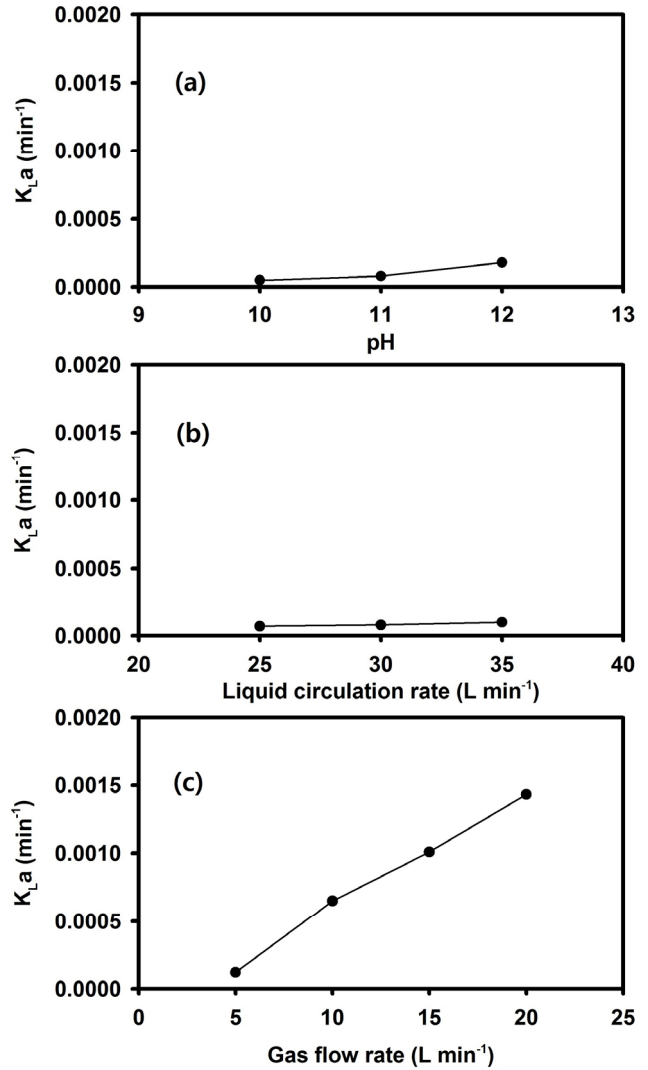


Figure 8. Variations of overall mass transfer coefficient (K_La) with respect to (a) pH, (b) Q_L , and (c) Q_G . Experimental condition: (a) $Q_L = 35\text{ L min}^{-1}$, $Q_G = 5\text{ L min}^{-1}$; (b) $\text{pH} = 11$, $Q_G = 5\text{ L min}^{-1}$; (c) $\text{pH} = 11$, $Q_L = 35\text{ L min}^{-1}$.

반응기에서 조업조건 변화가 총괄물질전달계수에 미치는 영향을 비교하기 위해 앞의 결과(Figures 5-7)로부터 조업조건 변화에 따른 총괄물질전달계수로 나타내었다. Figure 8의 결과에서 총괄물질전달계수는 pH 변화에 따라 0.00005-0.00018 min⁻¹, 액체순환유량(Q_L) 변화에 따라 0.00007-0.0001 min⁻¹, 공기유입량(Q_G) 변화에 따라 0.00012-0.00143 min⁻¹으로 변화하는 것으로 나타났으며, 공기유입량의 변화가 pH와 액체순환유량의 변화보다 총괄물질전달계수에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 공기유입량의 변화가 pH나 액체순환유량의 변화에 비해 영향력이 큰 이유는 공기유입량이 증가하게 되면 제트 루프 반응기내에서 기체 체류량(gas holdup)이 증가할 뿐만 아니라, 제트 루프 반응기의 액체 내로 분사된 기포는 공기의 높은 유입속력에 의해 전달응력이 상승되어 보다 미세한 기포가 발생되기 때문에 기체-액체의 접촉 면적이 증가되어 물질전달률이 높아진다. 그 결과, 총괄물질전달

계수에 대한 공기유입량의 영향이 pH와 액체순환유량에 비해 크게 나타난 것으로 판단된다[17,20,21]. 또한, 암모니아 가스는 물에 대한 용해도가 높기 때문에 공기 탈기에 의한 암모니아 제거 공정에서 총괄물질전달저항은 가스막(gas film) 저항에 의해 영향을 크게 받게 된다[16]. 따라서 공기유입량이 증가하게 되면 총괄물질전달저항이 감소되어 총괄물질전달계수는 공기유입량 증가에 따라 크게 증가하게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 합성폐수 중에 함유된 암모니아를 공기탈기법에 의해 제거하면서 이유체 벤츄리형 선회 노즐이 장착된 반회분식 제트 루프 반응기의 성능을 평가하고, 조업조건 변화(pH 10-12, $Q_L = 25-35 \text{ L min}^{-1}$, $Q_G = 5-20 \text{ L min}^{-1}$)에 따른 총괄물질전달계수의 변화를 살펴보고자 실험을 수행하였다. 이를 위해서 이유체 벤츄리형 선회 노즐과 일반 노즐이 장착된 각각의 제트 루프 반응기에서 조업조건을 변화시키며 조업시간에 따른 암모니아 농도를 측정하여 결과로부터 암모니아 제거효율과 총괄물질전달계수를 계산하였으며, 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 동일한 조업조건에서 이유체 벤츄리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기가 이유체 벤츄리형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에 비해 암모니아 제거효율이 우수하였다. 이유체 벤츄리형 선회 노즐과 일반 노즐이 각기 장착된 제트 루프 반응기에서 pH, 액체순환유량, 공기유입량이 증가할수록 총괄물질전달계수는 증가하는 경향을 보였으며, 공기유입량의 영향이 pH나 액체순환유량에 비해 크게 나타났다. 또한, 동일한 조업조건에서 총괄물질전달계수는 이유체 벤츄리형 선회 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서 이유체 벤츄리형 일반 노즐이 장착된 제트 루프 반응기에서보다 높게 나타났다.

감사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었습니다(C-D-2016-1282).

References

- Jang, S. H., Kim, G. E., Shin, H. M., Song, Y. C., Lee, W. K., and Youn, Y. N., "Study on Removal of Ammonia Nitrogen from Metal Working Fluids Using Aluminum Electrode," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **33**(7), 710-715 (2016).
- Lee, B. J., and Cho, S. H., "Removal of Ammonia-Nitrogen Contained in Landfill Leachate by Ammonia Stripping(II)," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **24**(2), 219-229 (2002).
- Yoon, A. H., Park, N. B., Bae, J. H., Jun, H. B., and Kwon, Y. B., "Treatment of Food Waste Leachate Using Pure-Oxygen Jet Loop Reactor (JLR)," *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **24**(6), 763-773 (2010).
- Oh, D. Y., Jenog, J. Y., Choi, W. H., and Park, J. Y., "Modeling of Ammonia Mass Transfer Using a Hollow Fiber Membrane Contactor," *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **25**(4), 503-510 (2011).
- Yoon, T. K., Lee, G. C., Jung, B. G., Han, Y. R., and Sung, N. C., "Effects of Operating Parameters on the Removal Performance of Ammonia Nitrogen by Electrodialysis," *Clean Technol.*, **17**(4), 363-369 (2011).
- Jafarpour, M. M., Foolad, Ar., Mansouri, M. K., Nikbakhsh, Z., and Saeedizade, H., "Ammonia Removal from Nitrogenous Industrial Waste Water Using Iranian Natural Zeolite of Clinoptilolite type," *World Academy of Sci., Eng. and Technol.*, **4**(10), 481-487 (2010).
- Na, C. K., and Song, M. K., "Removal Property of Ammonia Nitrogen from Aqueous Solution by Rice Husk Grafted with Acrylic Acid in Batch Mode and Fixed Bed Columns," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **31**(5), 487-497 (2014).
- Shin, S. Y., Koo, B. H., Kim, T. H., Lee, Y. H., and Ahn, J. H., "Ammonia Nitrogen Removal in Wastewater Using Microwave Irradiation," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **30**(5), 486-490 (2014).
- Yuan, M. H., Chen, Y. H., Tsai, J. Y., and Chang, C. Y., "Ammonia Removal from Ammonia-Rich Wastewater by Air Stripping Using a Rotating Packed Bed," *Process Safety and Environ. Protection*, **102**, 777-785 (2016).
- Bohner, K., and Blenke, H., "Gasgehalt und flüssigkeitsumwälzung im Schlaufenreaktor," *Verfahrenstechnik*, **6**, 50 (1972).
- Kang, D. Y., Lim, J. H., Lee, T. Y., and Lee, J. K., "Study of Struvite Crystallization in A Semi-Batch Jet Loop Fluidized Bed Reactor," *Korean J. Chem. Eng.*, **32**(11), 2342-2346 (2015).
- Cha, G. E., Kim, M. R., and Lee, J. K., "Phosphorus Removal from Wastewater by Struvite Formation in a Jet Loop Crystallizer," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **30**(8), 923-930 (2013).
- Kang, D. Y., Kim, M. R., Lim, J. H., Lee, T. Y., and Lee, J. K., "Neutralization of Alkaline Wastewater with CO₂ in a Continuous Flow Jet Loop Reactor," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(1), 101-107 (2016).
- Cha, G. E., Sung, H. J., Lim, J. H., Lee, T. Y., and Lee, J. K., "CO₂ Absorption Characteristics of a Jet Loop Reactor with a Two-Fluid Swirl Nozzle in an Alkaline Solution," *Korean J. Chem. Eng.*, **31**(4), 701-705 (2014).
- Meseguer-Lloret, S., Molins-Legua, C., and CampinsFalco, P., "Ammonium Determination in Water Samples by Using OPA-NAC Reagent: A Comparative Study with Nessler and Ammonium Selective Electrode Methods," *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, **82**(7), 475-489 (2002).
- Değermenci, N., Ate, O. N., and Yildiz, Y., "Ammonia Removal by Air Stripping in a Semi-Batch Jet Loop Reactor," *J. Ind. Eng. Chem.*, **18**(1), 399-404 (2012).
- Nugroho, D. H., Adisalamun, and Machdar, I., "Recovery of Ammonia Solutions from Fertilizer Industry Wastewater by Air Stripping Using Jet Bubble Column," *Proc. 5th Sriwijaya*

- International Seminar on Energy, Environ. Sci. and Technol.*, **1**(1), 102-108 (2014).
18. Capodaglio, A. G., Hlavinek, P., and Raboni, M., "Physico-Chemical Technologies for Nitrogen Removal from Wastewaters: A Review," *Revista Ambiente & Agua*, **10**(3), 481-498 (2015).
 19. An, J. S., Lim, J. H., Back, Y. J., Chung, T. Y., and Chung, H. K., "Effect of the Physical Parameters and Alkalinity in the Ammonia Stripping," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **33**(8), 583-590 (2011).
 20. Prasad, K. Y., and Ramanujam, T. K., "Gas Holdup and Overall Volumetric Mass-Transfer Coefficient in a Modified Reversed Flow Jet Loop Reactor," *Can. J. Chem. Eng.*, **73**(2), 190-195 (1995).
 21. Jain, D. K., Patwari, A. N., Khan, A. A., and Bhagawantha RAO, M., "Liquid Circulation Characteristics in Jet Loop Reactors," *Can. J. Chem. Eng.*, **68**(6), 1047-1051 (1990).