

ORIGINAL ARTICLE

Cu 및 Mn 이온 교환된 석탄비산재 유래 제올라이트 물질의 암모니아 흡착 및 탈착 특성

박종원 · 이창한^{1)*}

부산가톨릭대학교 소방방재학과, ¹⁾부산가톨릭대학교 환경행정학과

Ammonia Adsorption and Desorption Characteristics of Cu and Mn Ion-Exchanged Zeolitic Materials Synthesized from Coal Fly Ash

Jong-Won Park, Chang-Han Lee^{1)*}

Department of Fire and Disaster Prevention, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

¹⁾Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

Abstract

In this study, a zeolitic material (HDZ) was synthesized from coal fly ash generated at the Hadong thermal power plant using a fusion/hydrothermal method. To enhance ammonia (NH₃) adsorption performance, zeolite adsorbents were prepared by ion-exchanging the synthesized HDZ with transition-metal cations, specifically Cu and Mn. XRD analysis confirmed that the characteristic Na-A crystalline structure of HDZ was stably maintained even after the ion exchange process with Mn and Cu ions. Ammonia breakthrough experiments showed that both Cu- and Mn-modified HDZ reached their optimal adsorption capacities at 5 wt% ion-exchange content. The ammonia adsorption capacities followed the order of 5 wt% Mn-HDZ (48.0 mg/g) > 5 wt% Cu-HDZ (40.7 mg/g) > HDZ (27.4 mg/g). Furthermore, the enhanced NH₃ adsorption performance, as evidenced by NH₃-TPD analysis, was attributed to ion exchange of transition metals within the pores and on the surface of the HDZ, leading to a uniform distribution of Brønsted acid sites throughout the zeolitic material. These findings suggest that the optimal loading of transition metals is a critical factor in enhancing the acidity and overall NH₃ removal efficiency of the HDZ.

Key words : Ammonia, Adsorption, Coal fly ash, Zeolitic material, Ion-exchange

1. 서론

암모니아는 산업공정, 축산분뇨, 농업 및 생활 폐기물 등 다양한 오염원으로부터 배출되는 대표적인 악취 원인 물질이자 강한 부식성을 지닌 오염물질이다. 대기 중의 이산화황이나 질소산화물과 반응하여 2차 미세먼지(PM_{2.5})를 생성하는 주요 전구물질로 규명되면서, 대

기질 관리를 위한 암모니아 저감기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다(Park et al., 2023; Chae et al., 2023). 그러나, 암모니아는 이런 환경적 유해성에도 불구하고 질소 비료, 냉매, 화학산업 등에서 많이 사용되고 있으며, 최근, 탄소중립 실현을 위한 청정수소 에너지 캐리어 및 연료로서 그 가치가 재평가되고 있다. 따라서, 암모니아 관리의 중요성은 점점 증가되고 있으며, 암모니아

Received 30 March, 2026; Revised 8 May, 2026;

Accepted 12 May, 2026

*Corresponding author : Chang-Han Lee, Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea
Phone : +82-51-510-0624
E-mail : chlee@cup.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
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.

아 제거를 넘어서 효율적인 회수 및 농축 재활용 기술 확보가 시급한 실정이다(Lee et al., 2021; Kusaka et al., 2025).

가스상 암모니아 제어 기술은 생물학적 처리, 공기 스트리핑, 흡수 및 흡착공정 등이 주로 활용되고 있다(Jorgensen et al., 1976; Bernal et al., 1993; Roo et al., 2003; Lin et al., 2013). 이 중 흡착 공정은 저농도 암모니아 제거에 탁월한 효과를 보이며, 공정이 단순하고 선택적 회수가 가능하여 경제적인 방식으로 평가받고 있다(Han et al., 2021). 다양한 암모니아 흡착 공정에서 중요한 역할을 하는 암모니아 흡착제는 제올라이트(Bernal et al., 1993; Park et al., 2017; Khabzina et al., 2018; Park et al., 2023), 활성탄(Somy et al., 2009; Oktavritri et al., 2017), 금속 유기골격체(MOF: metal-organic framework) 등의 다공성 물질이 주로 사용되고 있다. 활성탄은 표면적은 넓으나 열적 재생시 표면 산성 작용기가 손실되는 단점이 있고(Park et al., 2019), MOFs는 높은 흡착 용량을 가지지만 구조적 안정성이나 제조 비용면에서 한계가 있다(Vikrant et al., 2017; Rieth et al., 2018; Khabzina et al., 2018). 이에 반해 제올라이트는 규칙적인 세공 구조와 우수한 이온교환능력을 갖추고 있어 환경분야에서 안정적인 암모니아 흡착제로 널리 사용되고 있다(Jorgensen et al., 1976; Bernal et al., 1993; Huang et al., 2008; Bandoz et al., 2009; Oktavritri et al., 2017; Rieth et al., 2018).

Kim(2016)은 제올라이트의 결정구조 형태, 양이온의 종류, 양이온의 농도, 이온교환 온도, 용매의 종류 등에 대해서 암모니아성 질소를 제거 하기 위한 연구를 진행하였다. 또한, 일부 연구자들에 의하면 제올라이트는 이온교환된 양이온 및 농도에 따라 제올라이트 자체의 이온교환능력 및 흡착 가능한 산점 분포가 달라지기 때문에 암모니아성 흡착 효율이 제올라이트를 구성하고 있는 양이온의 구성 성분에 따라 변한다고 보고하였다(Sherry, 1966; Gaus et al., 1981; Drummond et al., 1983; Pebalan et al., 2001).

최근 다양한 산업공정에서 발생하는 자원 부산물을 활용하여 제올라이트 합성(Lee et al., 2017; Park et al., 2017; Jung et al., 2018)은 자원순환과 폐기물 측면에서 환경 및 경제적 가치가 매우 높게 평가되고 있다. 하지만 합성된 제올라이트 자체의 흡착 성능은 한계가 있어 고농도 암모니아 제거 효율이 낮아, 결정 구조

내에 존재하는 양이온을 다른 전이금속으로 이온교환함으로써 표면 산성도와 세공 구조를 개질이 필요하다(Sherry et al., 1975; Pebalan et al., 2001; Lin et al., 2013; Bo et al., 2024; Park et al., 2026). 특히, 대기 분야 및 그린수소 분야에 적용가능한 암모니아 가스 흡착 및 회수는 Cu^{2+} 와 Mg^{2+} 로 이온교환된 X형 제올라이트를 사용한 암모니아 가스의 흡착(Park et al., 2017)과 석탄비산재로부터 합성된 제올라이트에 이온교환시킨 제올라이트를 사용하여 암모니아 가스 흡착 성능을 분석한 결과가 보고되었다(Park et al., 2023; Park et al., 2026).

따라서, 본 연구는 Park and Lee(2022)의 선행연구와 같이 석탄비산재를 재활용하여 환경 친화적인 방법으로 제올라이트(HDZ)를 합성하고, 암모니아 흡착 성능을 극대화하기 위해 두 가지 전이금속 이온(Cu^{2+} , Mn^{2+})을 각각 이온교환시킨 제올라이트 흡착제를 제조하였다. 이온교환된 제올라이트 흡착제의 물리화학적 특성은 XRD, NH_3 -TPD를 통해 분석을 하였으며, 연속식 고정층 흡착 실험을 수행하여 양이온 종류에 따른 암모니아 파과특성 및 흡착 용량을 정량적으로 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 흡착제 제조

본 연구에서는 Park and Lee(2022)에 의한 선행연구에서 제시한 용융/수열합성법의 실험절차에 따라 흡착제로 사용된 제올라이트 물질을 합성하였으며, HD 석탄 화력발전소에서 발생하는 비산재(coal fly ash : CFA)를 사용하여 합성하였다. 합성된 제올라이트 물질(zeolite synthesized using coal fly ash from Ha-dong power plants: HDZ)은 증류수에 수차례 여과 세척하고 105℃에서 12 h 이상 건조한 후 실험에 사용하였다.

또한, 암모니아 흡착성능을 향상시키기 위해 합성된 제올라이트(HDZ)에 두 가지 전이금속(Cu, Mn)을 각각 1~6 wt% 첨가된 용액에 30℃에서 24 h 교반 후 증류수로 여과과정을 3회 반복 세척 후 105℃에서 2 h 건조하였다. 또한, 잔여 염소이온을 제거를 위해 건조된 전이금속 함량별로 이온교환된 제올라이트를 550℃에서 2 h 동안 소성하여 제올라이트 흡착제를 제조하였다.

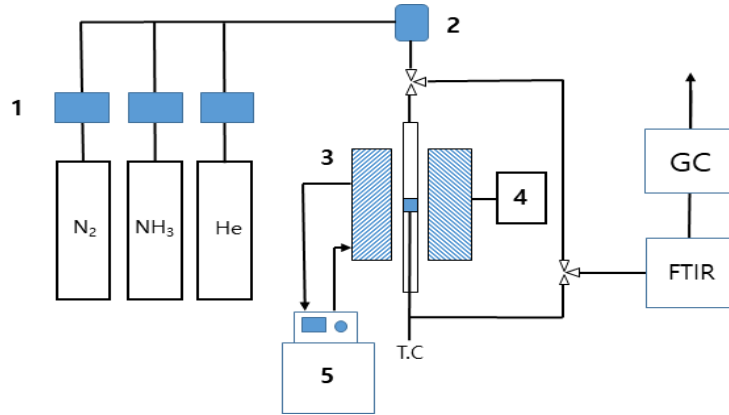


Fig. 1. Schematic diagram of the NH_3 -breakthrough test equipment. 1. Mass flow controller, 2. Mixing chamber, 3. IR-furnace, 4. Temperature controller, 5. Bath circulator.

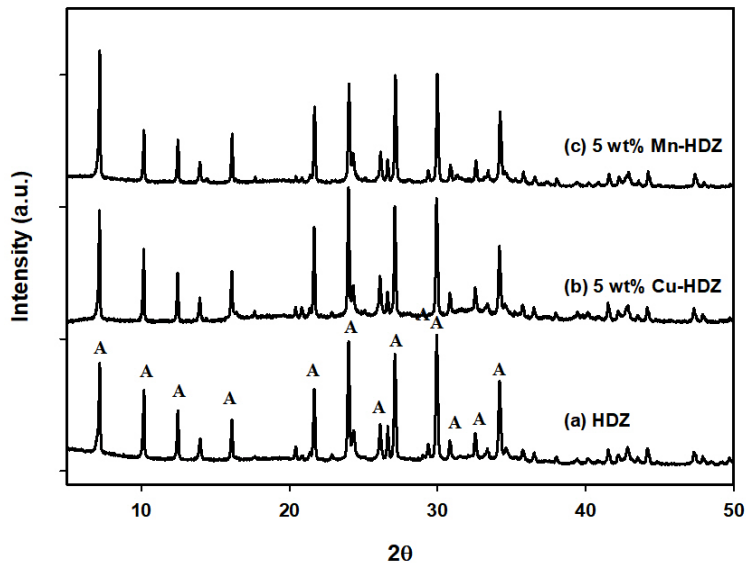


Fig. 2. XRD patterns of (a) HDZ, (b) 5 wt% Cu-HDZ, and (c) 5 wt% Mn-HDZ (A= Na-A zeolite).

2.2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 연속식 고정층 미분 반응기를 사용하였으며 Fig. 1에 개략적인 장치도를 나타내었다. 흡착 반응기는 IR furnace를 사용하여 온도를 조절하였으며, 암모니아 흡착제는 0.1 g (입자 크기, $120 < d_p < 150 \mu\text{m}$)을 Pyrex 반응기(외경 6 mm, 내경 4 mm)에 충전하여 반응기 온도를 등온으로 유지하고자 하였다. 반응물 (0.1% NH_3/He balance)은 질량유량제어기(MFC,

Brooks)를 사용하여 일정 유량으로 조절하였으며, 전체 유량이 100 mL/min, 흡착온도가 상온 조건 하에서 암모니아 흡착 실험을 실시하였다. 흡착 실험의 암모니아 정량을 분석하기 위해 FT-IR 분석기(Thermo ScientificTM, NicoletTM Summit PRO FTIR Spectrometer)를 통해 NH_3 peak를 미량 정량화하여 암모니아 흡착시간에 따른 흡착파괴곡선을 측정하였다.

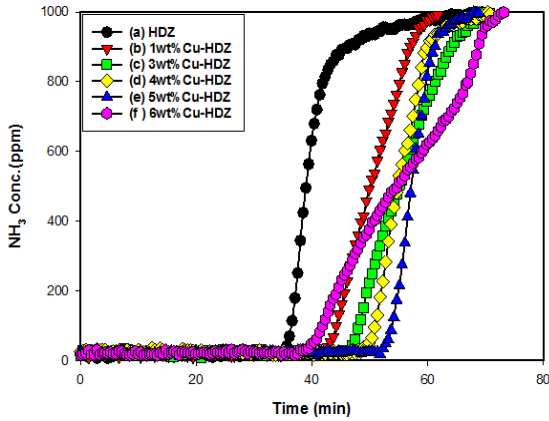


Fig. 3. NH₃ adsorption breakthrough curve of zeolite adsorbents to be ion-exchanged Cu ion (w= 0.1 g, T= 20°C, Q= 100 mL/min, C_{A0}= 1,000 ppm).

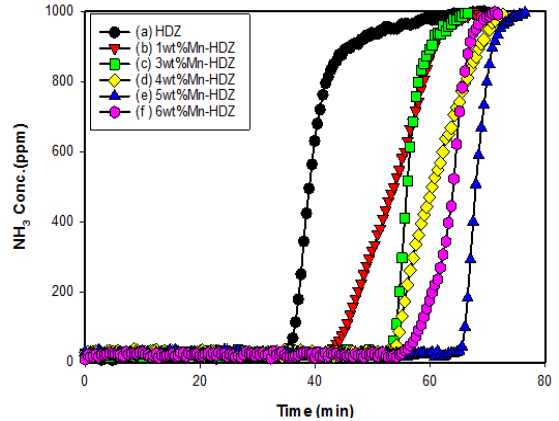


Fig. 4. NH₃ adsorption breakthrough curve zeolite adsorbents to be ion-exchanged Mn ion (w= 0.1 g, T= 20°C, Q= 100 mL/min, C_{A0}= 1,000 ppm).

2.3. 흡착제의 물리화학적 특성 분석

합성된 제올라이트 물질에 두 가지 전이금속(Cu, Mn)을 각각 이온교환시킨 후 이온교환된 제올라이트 흡착제의 결정성 구조 변화를 알아보기 위해 분말시료를 X-선 회절분석기(X-ray diffraction, XRD, Rigaku, Primus IV)를 이용하여 실험을 수행하였으며, 분석조건은 40 kV, 30 mA, scan range 5~50° 및 step size 0.02°이다.

또한, 금속이온이 이온 교환된 제올라이트(HDZ)의 산점 세기 특성을 알아보기 위해 암모니아 승온 탈착 실험(NH₃-TPD)을 진행하였다. NH₃-TPD 분석을 위해 열전도검출기(TCD, thermal conductivity detector)가 장착된 BETCAT-M (Belcat Inc., Japan) 장비를 사용하였다. 분석 시료의 양은 100 mg으로 하였으며, 전처리 조건은 선행연구에서 실시한 절차와 동일하게 진행하였다(Park and Lee, 2022). 전처리 후, 30°C에서 5 mol/mol%의 NH₃/He 가스(50 mL/min)를 흡착시키고 He로 purge 시킨 후, 550°C까지 10°C/min으로 승온하면서 탈착되는 암모니아를 TCD를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Na-A 제올라이트 물질 및 제올라이트 흡착제의 특성 분석

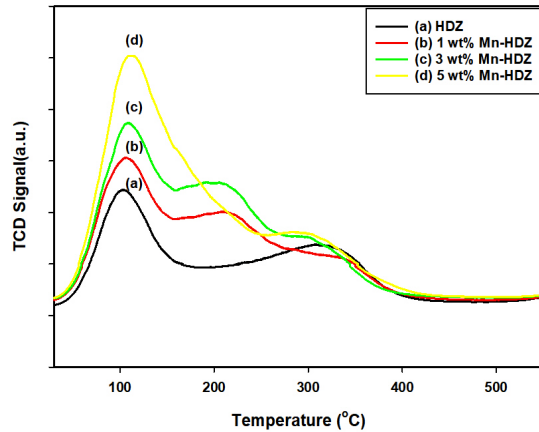
Park and Lee(2022)의 선행연구에서 석탄비산재(CFA)로부터 합성된 제올라이트 물질 중 제올라이트 결정화도와 암모니아 흡착과과실험으로 우수한 합성된 제올라이트(HDZ)를 선정하였다. Fig. 2는 석탄비산재로부터 합성된 제올라이트 물질(HDZ) 및 5 wt% 전이금속(Cu, Mn)이 이온교환된 제올라이트 흡착제에 대한 XRD 결과를 나타내었다. Fig. 2(b)와 (c)는 각각 5 wt%의 Mn과 Cu 이온을 이온교환시킨 제올라이트 흡착제로서 Fig. 2(a)에 나타낸 Na-A 제올라이트로 합성된 HDZ의 XRD 특성 피크와 동일한 위치와 패턴을 나타내고 있다. 이 결과로부터 5 wt%의 Mn과 Cu 이온이 이온교환되는 조건에서는 Na-A 제올라이트의 골격구조 변화에 영향을 주지 않지만, 다른 연구(Joshi et al., 2003)에서는 금속이온의 종류, 크기 및 이온교환량에 따라 제올라이트 결정구조에 달라질 수 있다고 보고하였다.

3.2. 제올라이트 흡착제의 NH₃ 가스 흡착과 특성

제올라이트(HDZ)와 제올라이트 흡착제(1-6 wt% Cu-HDZ와 1-6 wt% Mn-HDZ)의 암모니아 흡착 특성을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3은 HDZ에 Cu 전이금속을 1-6 wt% 함량으로 이온교환시킨 후 NH₃ 가스 흡착특성 결과를 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 Cu 이온교환량에 따라 NH₃ 가스 흡착과과 실험결과에서 Cu 이온교환량이 5 wt% > 4 wt% > 3 wt%

Table 1. Adsorption capacity of NH₃ through the NH₃-breakthrough curve

Adsorption capacity of NH ₃ (mg/g)	
HDZ	27.4
4wt% Cu-HDZ	38.5
5wt% Cu-HDZ	40.7
6wt% Cu-HDZ	38.9
4wt% Mn-HDZ	43.2
5wt% Mn-HDZ	48.0
6wt% Mn-HDZ	44.4

**Fig. 5.** NH₃-TPD profiles of HDZ and Mn-HDZ samples (1 wt%, 3 wt%, and 5 wt%).

> 6 wt% > 1 wt% > HDZ 순으로 흡착시간에 따른 흡착 파과곡선을 나타내었으며, Cu 이온교환 함량이 5 wt% 이상일 경우 암모니아 흡착능력이 오히려 감소하는 경향을 보였다.

HDZ에 Mn 전이금속을 1-6 wt% 함량으로 이온교환시킨 후 NH₃ 가스 흡착 특성을 Fig. 4에 나타내었다. NH₃ 가스 흡착파과곡선은 Mn 이온교환량이 5 wt% > 6 wt% > 4 wt% > 3 wt% > 1 wt% > HDZ 순으로 흡착시간에 따른 암모니아 흡착파과곡선을 나타내었으며, Mn 이온교환량이 5 wt% 이상으로 이온교환시키면 Fig. 3의 Cu로 이온교환된 제올라이트 흡착제와 유사하게 암모니아 흡착 능력이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 이는 1-5 wt% 구간에서는 금속 이온교환량이 증가함에 따라 이온교환된 전이금속이 공극 및 표면에 잘 분산되어 노출되는 산점의 수 증가로 흡착 성능이 향상되지

만(Lin et al., 2013), 6 wt% 이상 이온교환되면 금속 응집체 형성에 따른 미세 기공구조 폐쇄(pore blocking) 현상이 발생하거나 표면 변형으로 인해 물리화학적 특성이 변화하기 때문에 암모니아 확산을 방해하여 흡착 용량이 감소하는 것으로 판단된다(Benaliouche et al., 2008; Kim, 2016).

3.3. 암모니아 흡착량 평가

암모니아 흡착파과곡선으로부터 같이 고정층 흡착 실험으로부터 얻어지는 파과곡선에서 실험시간까지 흡착된 흡착질의 양을 나타내는 흡착제의 흡착용량(mg adsorbate/g adsorbent)을 다음과 같은 이론식으로 구할 수 있다(Park et al., 2022).

$$q = \frac{C_{A0}Q}{wM_w} \left[t - \int_0^t \frac{C_A}{C_{A0}}(t) dt \right] \dots\dots\dots (1)$$

이때, q는 흡착용량(mg adsorbate/g adsorbent), C_{A0}와 C_A는 각각 반응기 입출구에서 흡착질의 농도(ppm), Q는 혼합가스 유량(mL/min), w는 흡착제의 양(g), M_w는 흡착질의 분자량(g/mol), t는 반응기 운전 시간(min)을 나타낸다. Fig. 3와 Fig. 4의 암모니아 흡착파과곡선을 통계 분석프로그램(Sigma plot 14.5)를 이용하여 회귀분석을 통해 C_{NH3}와 t를 계산하고 식 (1)에 적용하여 흡착 용량(q)를 구한 후 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타난 바와 같이 전이금속(Cu, Mn)이 이온교환된 제올라이트는 HDZ에 비해 암모니아 흡착 성능이 크게 향상되는 경향을 보였다.

Table 1에 나타난 바와 같이 전이금속 이온교환량에 따른 영향을 살펴본 결과, Cu와 Mn 모두 5wt% 함량에서 가장 높은 암모니아 흡착용량을 기록하였다. Cu 금속이 이온교환된 경우, 5 wt% Cu-HDZ (40.7 mg/g) > 6 wt% Cu-HDZ (38.9 mg/g) ≈ 4 wt% Cu-HDZ (38.5 mg/g) 순으로 흡착용량이 나타났다. Mn 금속의 경우에도 5 wt% Mn-HDZ (48.0 mg/g) > 6 wt% Mn-HDZ (44.4 mg/g) > 4 wt% Mn-HDZ (43.2 mg/g) 순으로 나타나, 두 금속 모두 5 wt%가 최적의 이온교환 농도임을 확인하였다. 또한, Mn-HDZ (48.0 mg/g)가 Cu-HDZ (40.7 mg/g)보다 우수한 성능을 보이는 것은 망간 이온이 제올라이트 표면과 기공에 더 많은 수의 산점을 균일하게 생성하여

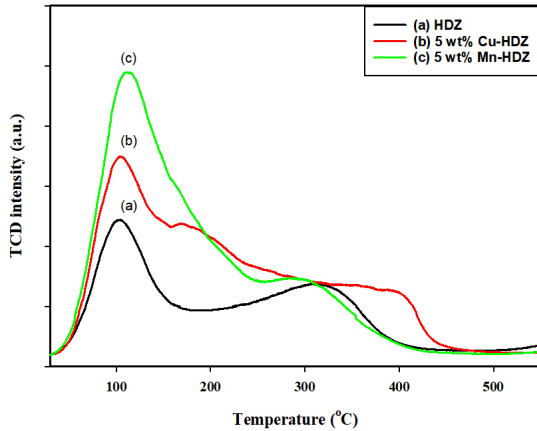


Fig. 6. NH_3 -TPD profiles of HDZ, 5 wt% Cu-HDZ, and 5 wt% Mn-HDZ samples.

Table 2. Desorption capacity of NH_3 through the NH_3 -TPD test

	Amount of NH_3 desorption (mmol/g)
HDZ	1.122
1 wt% Mn-HDZ	1.570
3 wt% Mn-HDZ	1.847
5 wt% Mn-HDZ	2.277
5 wt% Cu-HDZ	1.986

암모니아와의 화학적 흡착 활성점을 증대시켰기 때문으로 판단된다. 이와 같이 암모니아 흡착 성능이 향상되는 이유는 합성 제올라이트(HDZ) 내외부에 존재하는 양이온들이 전이금속(Cu, Mn) 양이온들과 이온 교환되어 형성된 브뢴스테드 산점이 제올라이트 공극 및 표면에 고르게 분포됨으로써 암모니아 흡착 성능이 증가하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 확인된 Mn-HDZ의 우수한 흡착 성능은 망간 이온이 제올라이트 골격 내에서 암모니아와의 결합력이 강한 산점을 효율적으로 형성하기 때문으로 판단되며, 이 결과는 이전 연구결과들과도 일치한다(Benaliouche et al. 2008; Park et al., 2023).

3.3. 흡착제의 NH_3 -TPD 평가

합성된 제올라이트 HDZ와 전이금속(Mn, Cu)이 이온교환된 시료들의 암모니아 탈착 특성 및 산점 분포를

고찰하기 위해 NH_3 -TPD 분석을 수행하였다. Fig. 5는 Mn의 함량 변화에 따른 암모니아 탈착 프로파일을 나타내었다. 합성된 제올라이트인 (a) HDZ의 경우, 100°C 부근에서 저온부(Low Temperature : LT)과 320°C 부근의 고온부(High Temperature : HT)에서 각각 암모니아 탈착피크가 관찰되었다. 하지만, Mn의 이온교환량에 증가함에 따라 LT 탈착 피크는 100~112°C 범위로 유지되면서 피크의 면적이 점점 증가하였으며, 특히 1 wt%와 3 wt% Mn-HDZ에서는 210~220°C 부근에서 새로운 중온부(Middle Temperature: MT) 탈착 피크가 형성되었다. 5 wt% Mn-HDZ의 경우 MT 피크는 명확하게 구분되지 않았으나, 전체적인 탈착피크의 면적이 가장 크게 나타나 최대의 산점을 보유하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 암모니아 흡착 성능이 가장 우수한 5 wt% Mn-HDZ과 5 wt% Cu-HDZ의 탈착 거동을 비교한 결과이다. Fig. 6 (b) 5 wt% Cu-HDZ 경우 170°C 부근에서 MT 탈착 피크가 나타났으며, 특히, HT 탈착 피크가 400°C 이상의 고온 영역으로 이동하며 완만하게 감소하는 특성이 나타났다. 이는 Cu가 이온교환된 경우 Mn 등 타 금속에 비해 암모니아 탈착에 더 높은 에너지가 요구됨을 의미하며, Cu^{2+} 이온과 암모니아 분자간의 결합력이 상대적으로 강함을 알 수 있다.

Table 2는 NH_3 -TPD 결과에 대해 정량적 탈착량을 분석한 결과 나타난 것으로, HDZ의 탈착량은 1.122 mmol/g이었으나, 5 wt% Mn-HDZ 일때 2.277 mmol/g으로 HDZ 대비 약 2.0배, 5 wt% Cu-HDZ는 1.986 mmol/g으로 약 1.8배 정도로 전이금속 이온교환에 따라 탈착량이 크게 증가하였다.

이 결과는 HDZ에 Cu^{2+} 와 Mn^{2+} 이온이 최적량으로 이온교환된 제올라이트는 공극 및 표면에 균일하게 분산되어, 결정 구조내 알루미늄 사이트의 브뢴스테드 산점수를 증가시켰기 때문으로 판단되며, 전이금속의 이온교환이 제올라이트의 화학적 흡착 활성점을 증가시켜 암모니아 흡착 효율이 높아진다는 것을 확인하였다(Benaliouche et al., 2008).

4. 결론

용융/수열합성법에서 의한 석탄 비산재 유래 제올라이트 물질(HDZ)를 합성하였고, 합성된 제올라이트(HDZ)의 암모니아 흡착 성능을 증가시키기 위해 두 가

지 양이온(Cu, Mn)을 이온교환 시킨 후 흡착제의 암모니아 흡착파괴곡선 및 흡착성능 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. HDZ에 Cu와 Mn이 각각 이온교환시킨 결과, Cu가 이온교환된 경우 5 wt% > 4 wt% > 3 wt% > 6 wt% > 1wt% > HDZ와 Mn가 이온교환된 경우 5 wt% > 6 wt% > 4 wt% > 3 wt% > 1 wt% > HDZ 순으로 암모니아 흡착 파괴곡선이 나타났다. 하지만, Cu와 Mn의 이온교환 최적 함량 이상으로 증가하면 제올라이트 표면 구조 변화로 인해 미세 기공구조가 막히거나 표면이 변형되는 물리화학적 특성이 변화에 의해 흡착 용량이 감소하는 것으로 판단된다.
2. 암모니아 탈착 특성을 알아보기 위해서 NH₃-TPD 실시한 결과, Cu와 Mn이 이온교환된 경우 암모니아 탈착량도 증가하였으며, 5 wt% Cu-HDZ일 때 1.986 mmol/g과 5 wt% Mn-HDZ의 2.277 mmol/g의 탈착량으로 1.122 mmol/g인 HDZ에 비해 암모니아 탈착량이 높은 것을 알 수 있다.
3. 최적 금속 이온교환량이 교환된 합성 제올라이트(HDZ)인 5 wt% Cu-HDZ와 5 wt% Mn-HDZ의 흡착용량은 각각 40.71 mg/g과 48.00 mg/g으로서 27.44 mg/g인 HDZ에 비해 암모니아 흡착용량이 1.5배 이상 높게 나타났다. 이는 HDZ 내외부에 전이금속 양이온들과 이온교환되어 브뢴스테드 산점들이 제올라이트의 공극 및 표면상에 고루 분포하기 때문에 암모니아 흡착성능이 향상된 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 부산가톨릭대학교 교내학술연구비의 지원과 2026년도 교육부의 재원으로 한국연구재단 대학혁신지원사업의 ‘대학특성화 분야 논문 게재료 지원 프로그램’의 지원을 받아 수행 및 게재된 논문임.

REFERENCES

- Bandosz, T. J., Petit, C., 2009, On the reactive adsorption of ammonia on activated carbons modified by impregnation with inorganic compounds, *J. Colloid Interface Sci.*, 338, 329-345.
- Benaliouche, F., Boucheffa, Y., Ayrault, P., Mignard, S., Magnoux, P., 2008, NH₃-TPD and FTIR spectroscopy of pyridine adsorption studies for characterization of Ag and Cu-exchanged X zeolite, *Micropor. Mesopor. Mat.*, 111, 80-88.
- Bernal, M. P., Lopez-Real, J. M., 1993, Natural zeolites and sepiolite as ammonium and ammonia adsorbent materials, *Bioresour. Technol.*, 43, 27-33.
- Bo, X., Guo, M. X., Li, X. C., Wu, J. J., Liu, S. X., Wang, C. Y., 2024, The adsorption characteristics of salt modified zeolite to ammonia nitrogen, *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 22, 2835-2857.
- Chae, S., Ryu, K., Lee, S. H., 2023, Trend and future strategy of ammonia gas recovery based on adsorption from livestock fields, *Resources Recycling*, 32, 45-53.
- Drummond, D., Jonge, A. D., Rees, L. C., 1983, Ion-exchange kinetics in zeolite A, *J. Phys. Chem.*, 87, 1967-1971.
- Han, B., Butterly, C., Zhang, W., He, J. Z., Chen, D., 2021, Adsorbent materials for ammonium and ammonia removal: A Review, *J. Clean. Prod.*, 283, 124611.
- Huang, C. C., Li, H. S., Chen, C. H., 2008, Effect of surface acidic oxides of activated carbon on adsorption of ammonia, *J. Hazard. Mater.*, 159, 523-527.
- Jorgensen, S. E., Libor, O., Lea Graber, K., Barkacs, K., 1976, Ammonia removal by use of clinoptilolite, *Water Res.*, 10, 213-224.
- Joshi, U. D., Joshi, P. N., Tamhankar, S. S., Joshi, V. V., Rode, C. V., Shiralkar, V. P., 2003, Effect of nonframework cations and crystallinity on the basicity of NaX zeolites, *Appl. Catal. A*, 239, 209-220.
- Khabzina, Y., Farrusseng, D., 2018, Unravelling ammonia adsorption mechanisms of adsorbents in humid conditions, *Micropor. Mesopor. Mat.*, 265, 143-148.
- Kim, C. G., 2016, Removal of ammonium and nitrate nitrogens from wastewater using zeolite, *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc.*, 24, 59-63.
- Kusaka, S., Ichikawa, T., Miyaoka, H., Ichikawa, T., 2025, Numerical adsorption simulation of low-concentration ammonia, *Aisan Technical Journal*, 8, 4-8.
- Lee, H. K., Woo, Y. M., Lee, M. J., 2021, The needs for R&D of ammonia combustion technology for carbon neutrality, *J. Korean Soc. Combust.*, 26, 59-83.
- Lin, L., Lei, Z., Wang, L., Liu, X., Zhang, Y., Wan, C., Lee, D. J., Tay, J. H., 2013, Adsorption mechanisms

- of high-levels of ammonium onto natural and NaCl-modified zeolites, *Sep. Purif. Technol.*, 103, 15-20.
- Oktavetri, N. I., Purnobasuki, H., Kuncoro, E. P., Purnamasari, I., 2017, Ammonia removal using coconut shell based adsorbent: Effect of carbonization duration and contact time, *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 3, 26-32.
- Park, J. W., Seo, Y. J., Ryu, S. H., Kim, S. D., 2017, Ammonia adsorption capacity of zeolite X with different cations, *Appl. Chem. Eng.*, 28, 355-359.
- Park, J. H., Hwang, R. H., Yoon, H. C., Yi, K. B., 2019, Effects of metal loading on activated carbon on its adsorption and desorption characteristics, *J. Ind. Eng. Chem.*, 74, 199-207.
- Park, J. W., Lee, C. H., 2022, Ammonia adsorption capacity and breakthrough curve of zeolitic materials synthesized from coal fly ash, *J. Environ. Sci. Int.*, 31, 833-844.
- Park, J. W., Kwak, J. Y., Lee, C. H., 2023, Evaluation of Ammonia adsorption capacity using various metal ion-exchanged zeolitic materials synthesized from coal fly ash, *J. Environ. Sci. Int.*, 32, 343-353.
- Park, J. W., Lee, C. H., 2026, Estimation of Ammonia adsorption capacity on zeolitic material exchanged with Co and Fe metal ions, *J. Environ. Sci. Int.*, 35, 67-76.
- Pebalan, R. T., Bertetti, F. P., 2001, Cation-exchange properties of nature zeolites, *Rev. Mineral. Geochem.*, 45, 435-518.
- Rieth, A. J., Dincă, M., 2018, Controlled gas uptake in metal-organic frameworks with record ammonia sorption, *J. Am. Chem. Soc.*, 140, 3461-3466.
- Roo, W. H., Lee, W. M., Baek, I. H., Bae, J. S., 2003, The synthesis of zeolite using fly ash and its investigate adsorption character, *Korean Chem. Eng. Res.*, 41, 537-541.
- Sherry, H. W., 1966, The ion-exchange properties of zeolites. I. Univalent ion exchange in synthetic faujasite, *J. Phys. Chem.* 70, 1158-1168.
- Somy, A., Mehrnia, M. R., Amrei, H. D., Ghanizadeh, A., Safari, M., 2009, Adsorption of carbon dioxide using impregnated activated carbon promoted by zinc, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, 3, 249-254.
- Vikrant, K., Kumar, V., Kim, K. H., Kukkar, D., 2017, Metal-organic frameworks (MOFs): potential and challenges for capture and abatement of ammonia, *J. Mater. Chem. A*, 5, 22877-22896.
-
- Professor. Jong-Won Park
Department of Fire and Disaster Prevention, Catholic University of Pusan
pjw2131@cup.ac.kr
 - Professor. Chang-Han Lee
Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan
chlee@cup.ac.kr