Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 528~534
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.528

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

그린 암모니아 누설 감지를 위한 라만 라이다(Raman LiDAR) 원격 측정 특성 연구

박병직[1†] · 조원보[2] · 김희진[3] · 김휘성[1] · 김양균[1] · 윤웅기[1] · 민동철[3] · 김기범[3]

[1]한국건설기술연구원 수소인프라센터, [2]빔텍, [3]테크에버

Remote Sensing Characteristics of Raman LiDAR for Green Ammonia Leakage Detection

BYOUNGJIK PARK[1†], WONBO CHO[2], HEEJIN KIM[3], HWISEONG KIM[1], YANGKYUN KIM[1], UNGGI YOON[1], DONGCHUL MIN[3], GIBEOM KIM[3]

[1]Fire Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Korea
[2]Vimtech Co., Ltd., 201, Songpa-daero, Songpa-gu, Seoul, 05854, Korea
[3]Techever, 190, Yongjeong 3-gil, Donghae-myeon, Goseong-gun, Gyeongsangnam-do, 52919, Korea

[†]Corresponding author :
templer83@kict.re.kr

Received 19 September, 2025
Revised 11 October, 2025
Accepted 13 October, 2025

Abstract >> Ammonia has recently emerged as a promising hydrogen carrier due to its approximately 1.7-times higher storage efficiency compared to liquefied hydrogen. However, ammonia is a toxic gas, and accidental leakage during large-scale storage or transportation can pose significant safety risks. In this study, a Raman LiDAR system employing a UV-LED light source (λ = 360 nm) was developed to experimentally evaluate the feasibility of remote ammonia leak detection. Standard ammonia gases in the range of 1,000–20,000 ppm were measured at distances of 0–1.5 m. The characteristic Raman peaks of ammonia were clearly identified in the 480–520 nm region. Multivariate regression analysis demonstrated a strong correlation between concentration and Raman spectral intensity ($R^2 \approx 0.999$), with a standard error of calibration (SEC) below 0.3 ppm, confirming the reliability of quantitative analysis. These findings demonstrate the potential of Raman LiDAR for remote and real-time monitoring of ammonia leakage, and suggest that further extension of detection range and field validation will enable its application as a core technology for the safe storage and transportation of green ammonia.

Key words : Green Ammonia(그린 암모니아), Raman LiDAR(라만 라이다), Remote sensing (원격 감지), Gas leakage(가스 누설), Hydrogen carrier(수소 운송체)

1. 서 론

암모니아는 전통적으로 질소 비료, 반도체 제조, 냉매 등 다양한 산업 분야에서 활용되어 왔다. 그러나 인체에 독성을 가진 물질로, 일정 농도 이상에서는 심각한 건강 문제를 일으킬 수 있다. 최근에는 암모니아가 수소 캐리어(hydrogen carrier)로서 주목받고 있다[1]. 동일 부피 기준으로 액화수소 대비 약 1.7배 많은 수소를 저장할 수 있고, 분해 시 고순도의 수소를 얻을 수 있어 장거리 운송 측면에서 유리하다[1,2].

하지만 암모니아는 누설 시 독성에 의한 안전사고 우려가 크다. 기존의 전기화학식, 반도체식, 적외선 기반 센서들은 가스의 존재 여부만 알 수 있으며, 원거리에서 가스의 공간 분포나 이동을 실시간으로 파악하기 어렵다[3,4]. 따라서 비접촉·원거리·실시간 감지가 가능한 새로운 기술이 필요하다.

라만 분광법은 특정 분자의 고유 진동 모드를 활용해 분자를 식별할 수 있는 강력한 분석 도구이며, 유해 가스 감지에 적합한 방법으로 알려져 있다[5]. 라이다 기술은 원격 탐지에 적합한 기술로, 대기 성분 감지, 오염물질 모니터링, 기상 관측 등 다양한 분야에서 활용되고 있다[6-8]. 최근에는 두 기술을 융합한 라만 라이다(Raman LiDAR)가 유해 가스 감지에 적용되고 있다[9,10]. 본 연구에서는 UV-LED 광원을 이용한 라만 라이다 시스템을 구축하고, 암모니아 누설 감지 성능을 실험적으로 규명하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 사용 가스 및 챔버 구성

본 연구에서는 농도 의존적 라만 신호 특성을 규명하기 위해 표준 암모니아 가스를 사용하였다[4]. 사용한 가스는 1,000 ppm, 10,000 ppm, 20,000 ppm 농도의 NH_3/N_2 혼합 가스로, 고순도 질소(N_2, 99.999%)로 농도를 조정하였다. 챔버는 Fig. 1과 같이 투명 아크릴 재질로 제작되었으며, 크기는 깊이 300 mm, 너비 300mm, 높이 500 mm이며, 두께는 10 mm로 설정하여 기밀성을 확보하였다. 실험은 Fig. 2와 같이 챔버에는 가스 주입구와 배출구를 별도로 설치하고, 내부 혼합을 위해 저속 팬을 장착하였다. 가스 주입 후 약 3분간 확산을 통해 평형 상태에 도달하도록 하였으며, 이후 라만 라이다 측정을 수행하였다.

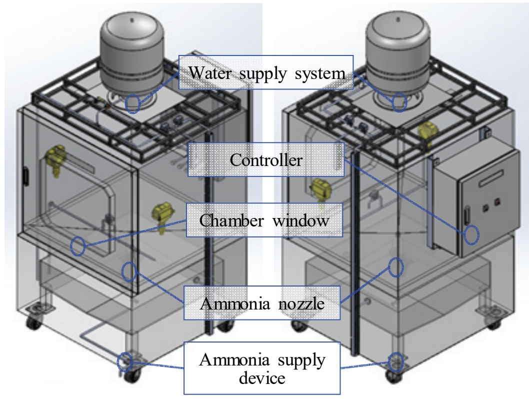


Fig. 1. Ammonia chamber image

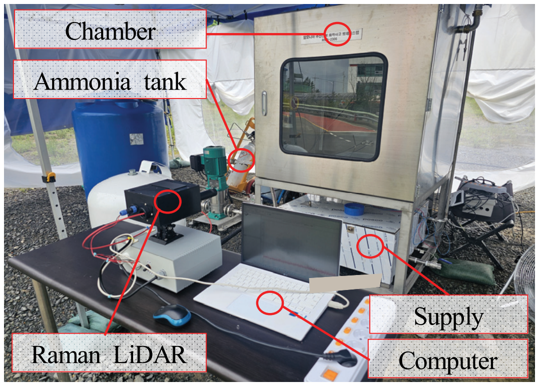


Fig. 2. Overview of the ammonia gas measurement experiment

2.2 라만 라이다 시스템 구성

본 연구에서 구축한 라만 라이다 시스템은 Fig. 3과 같이 광원부, 광학 집광계, 분광부, 검출부로 구성된다. 360 nm 대역의 COB UV-LED array를 광원으로 사용하였다. 레이저 기반 시스템은 출력은 높으나 비용과 안전성 문제를 가진 반면, LED 광원은 저비용·고안전성 측면에서 장점을 가진다[5,6]. 각 광학구조의 특징은 아래와 같다.

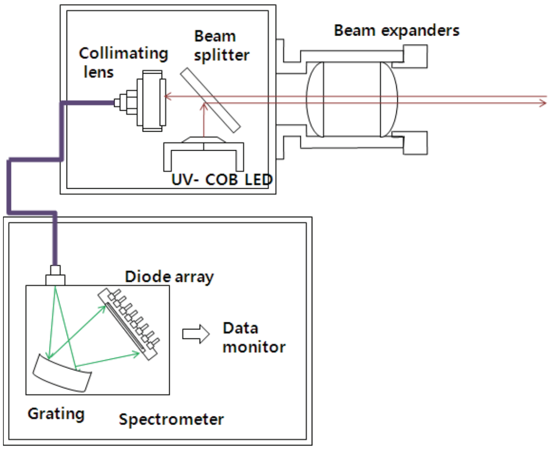


Fig. 3. Raman LiDAR optical architecture for long-distance ammonia measurement

- 광원부 : 360 nm 대역의 COB UV-LED array (총 출력 2 W)를 사용하였다. 레이저 기반 시스템 대비 출력은 낮으나, 안전성과 가격 경쟁력이 높다. LED는 집광 렌즈를 통해 빔 직경 약 3 mm로 집속되었다.
- 광학 집광계 : 빔 분할기(50:50)를 사용하여 산란광 중 후방산란(backscattering) 성분만을 수집하였다. 수렴 렌즈는 직경 50 mm, 초점거리 100 mm의 볼록렌즈로를 사용하여 수렴 효율을 극대화하였다.
- 필터 : 레일라이 산란(λ = 360 nm)을 차단하고, 400 nm 이상의 라만 산란 신호만 통과시키기 위해 Long-pass Filter (Thorlabs, cut-on 400 nm)를 적용하였다.
- 분광부 및 검출부 : 분광기는 Ocean Optics UV-VIS 모델(200–1100 nm 범위, 1200 gr/mm concave grating)을 사용하였으며, 검출기는 Si photodiode array(해상도 0.2 nm/pixel)를 사용하였다.

2.3 데이터 처리 및 분석 방법

라만 신호는 본질적으로 약하므로 평활(Smoothing)과 기초 보정(Baseline correction)이 필요하다[5]. 정량 분석에는 다중 회귀 분석(Multiple Linear Regression, MLR)을 적용하였다[2]. 데이터 처리 과정은 다음과 같다.

1) 평활(Smoothing): moving average (n=5) 및 Savitzky–Golay 필터(차수=2, window size=7)를 적용하였다.
2) 기초 보정(Baseline correction): 다항 회귀(polynomial fitting)기법으로 배경 신호를 3회 제거하였다.
3) 정량 분석: 다중 회귀 분석(Multiple Linear Regression, MLR) 기법을 사용하여 농도와 특정 파장대(403, 426, 493, 514 nm)의 신호 강도 사이의 상관성을 모델링하였다. 분석에는 상용 소프트웨어 Unscrambler (Camo, USA)를 사용하였다.

2.4 측정 절차

1) 측정 거리는 0 m(근접), 1.0 m, 1.5 m로 설정하였다.
2) 각 농도를 측정하고, 평균값과 표준편차를 산출하였다.
3) 신호 대 잡음비(SNR)는 레일라이 피크 대비 라만 피크의 강도를 이용하여 산출하였다.

2.5 거리별 측정 결과

2.5.1 암모니아 라만 스펙트럼 특성

챔버 내에서 암모니아 농도를 변화시키며 측정한 결과, 480–520 nm 영역에서 NH_3의 라만 피크가 뚜렷하게 나타났다. 이는 N–H stretching vibration mode에 해당하며, 기존 문헌의 결과[1,2]와 일치하였다. 레일라이 산란은 400 nm 부근에서 강하게 나타났으며, 라만 신호 대비 약 2–3배 강도를 보였다. 노이즈가 포함된 원신호(Raw data)는 평활(smoothing)을 통해 신호-배경비가 개선되었으며, 기초 보정(Baseline correction) 으로 정량 분석에 적합한 형태를 확보하였다(Fig. 4, Table. 1).

2.5.2 쳄버와 라이다 센서의 거리별 측정 특성

- 근접(0 m): 라만 신호 강도는 농도 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 레일라이 산란은 농도 변화와 무관하게 일정한 값을 보였으며, 신호세기(Counts, AD digital values)가 가장 낮게 측정되었다.
- 1 m: 레일라이 산란 세기는 24,000 counts 이상으로 근접 측정보다 강했으며, 라만 신호는 일부 농도에서 비선형성을 보였다. 이는 산란 경로 상 손실 및 광학계 정렬 오차의 영향으로 판단된다.
- 1.5 m: 레일라이 산란이 가장 강하게 나타났으며, 28,000 counts 수준이었다. 라만 신호는 저농도(1,000 ppm) 조건에서 상대적으로 강해지는 이상값이 관찰되었는데, 이는 배경 잡음 및 외부광(Ambient light)의 간섭 때문으로 추정된다.

3. 표준 암모니아 가스 정량 분석

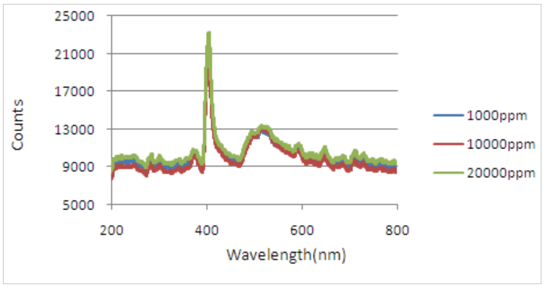
3.1 다변량 분석법 기반 다중 회귀 정량 분석

회귀 분석은 농도와 산란 세기(레일라이 산란, 라만 산란)에 따라 변화하는 데이터나 어떤 영향은 가설적 실험 인과관계의 모델링 통계적 예측에 이용될 수 있다. 하나의 독립변수만을 고려하여 종속 변수와의 관계를 분석하는 방법을 단순 회귀 분석이라고 하고, 두 개 이상의 독립변수를 고려하는 방법을 다중회귀분석이라고 한다. 다중회귀분석은 여러 개의 독립변수를 사용함으로써 예측 능력을 높일 수 있다. 이 모형은 정량적인 종속변수 Y와 독립변수 X1, X2 ----, Xi 사이의 관계를 적합 시키기 위해서 사용한다. 다중 회귀 분석의 기본 모형은 아래의 식과 같다.

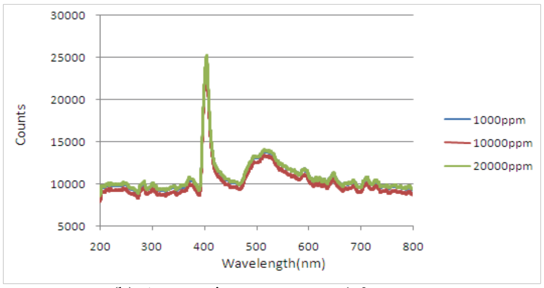
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \bullet \bullet \bullet \bullet + \beta_i x_i + \epsilon$$

Table 1. Counts (signal strength) at specific wavelengths according to changes in concentration over distance

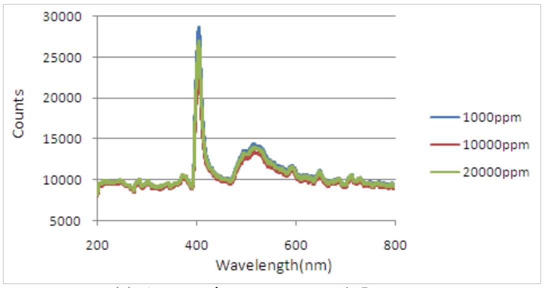
Distance (m)	Wave (nm) \ Standard Gas (ppm)	1,000	10,000	20,000
0 m	403	20,490	18,850	21,040
	426	11,860	10,620	11,300
	496	12,310	12,160	12,670
	518	12,760	12,940	13,230
1.0 m	403	23,170	22,530	23,430
	426	12,245	11,622	12,426
	496	13,140	12,540	13,240
	518	13,760	13,250	13,930
1.5 m	403	28,620	24,170	26,940
	426	12,333	11,851	12,246
	496	13,510	12,630	13,160
	518	14,160	13,290	13,830



(a) Ammonia spectrum at 0 meters



(b) Ammonia spectrum at 1.0 meters



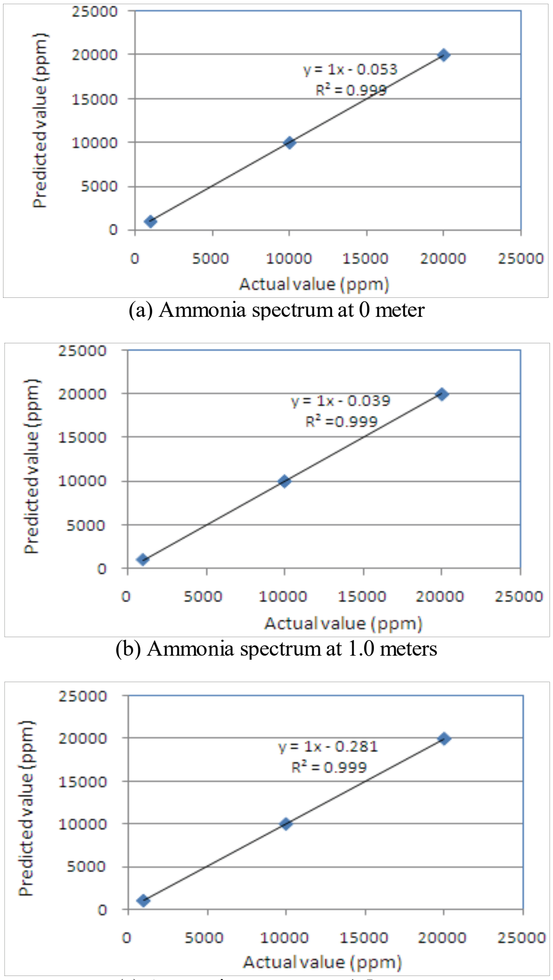
(c) Ammonia spectrum at 1.5 meters

Fig. 4. Counts (signal strength) graph according to wavelength change at different distances (Blue: 1,000 ppm, Red: 10,000 ppm, Green: 20,000 ppm)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2 x_2$ • • • • • $, \beta_i$ 은 회귀계수이고, ϵ는 종속 변수 Y를 측정할 때 발생하는 오차이다. 회귀 모형의 추정은 회귀 계수 $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$ • • • • • $+ \beta_i x_i + \epsilon$를 찾는 것을 말한다. 다중 회귀 곡선으로 정량 분석을 하게 되는 데, 이때 정량 분석 계산 방법으로는 다변량 기반한 소프트 웨어(Unscrambler, Camo, USA)를 사용하였다.

3.2 암모니아 라만 세기와 농도의 다중 회귀 곡선

챔버에 표준 암모니아 가스(1,000 ppm, 10,000 ppm, 20,000 ppm)를 사용해서 챔버 내부에 가스를 주입하고, 거리별(0 m, 1.0 m, 1.5 m) 농도에 따라서 레일라이와 라만 스펙트럼 세기를 확인하였다. 레일라이 대표적인 파장 하나인 400 nm와 암모니아 라만 대표 파장인 419 nm과 518 nm를 선택하여 전체 스펙트럼 경향을 확인하였으며, 다변량 분석을 기반한 정량 분석에 있어서는 파장 선택이 약간 더 많아야 정량 분석을 하게 된다. 따라서 레일라이 파장을 하나가 아닌 두 가지를 선택하는데, 이때 레일라이 산란으로써 최고 높은 산란 세기 파장인 403 nm를 스펙트럼 바탕값으로서, 낮은 산란 세기를 가진 426 nm 두 가지를 선택하고, 라만 산란 세기에서는 라만 세기 두가진 신호가 가장 높은 493 nm과 514 nm을 선택하는 데, 이는 라만 세기가 레일라이 세기보다는 낮은 스펙트럼 세기를 가지기 때문에, 세기가 높은 2가지 파장을 선택하였다. 4가지 특징을 가진 레일라이 산란과 라만 산란을 선택하여 Fig. 5와 Table 2와 같이 다중회귀 곡선을 정량 분석하였다.



(a) Ammonia spectrum at 0 meter

(b) Ammonia spectrum at 1.0 meters

(c) Ammonia spectrum at 1.5 meters

Fig. 5. Multiple regression analysis by distance

3.3 정량 분석 결과

403, 426, 493, 514 nm 파장에서의 세기를 다변량 회귀 분석에 적용한 결과, 세 가지 거리 모두에서 $R^2 \approx 0.999$의 높은 선형성을 확보하였다. Standard Error of Calibration(SEC)은 0.0 ~ 0.3 ppm 수준으로, 초저농도에서도 안정적인 정량 분석이 가능함을 확인하였다.

Table 2. Multiple regression curve analysis

Distance (m)	Linear coefficient	SEC (ppm)	Bias
0 m	0.999	0.144	-0.083
	$y = -6.291 \cdot x_{403nm} - 8.107 \cdot x_{426nm} + 42.112 \cdot x_{493nm} + 22.885 \cdot x_{514nm} - 585,786$		
1.0 m	0.999	0.0625	-0.0625
	$y = 42.75 \cdot x_{403nm} - 175.38 \cdot x_{426nm} + 118.45 \cdot x_{493nm} + 25.03 \cdot x_{514nm} - 989,600$		
1.5 m	0.999	0.30	-0.30
	$y = 19.62 \cdot x_{403nm} + 337.12 \cdot x_{426nm} - 907.25 \cdot x_{493nm} + 535.45 \cdot x_{514nm} + 535,451$		

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 UV-LED(λ = 360 nm)를 광원으로 한 라만 라이다 시스템을 구축하고, 표준 암모니아 가스(1,000, 10,000, 20,000 ppm)에 대한 원격 감지 성능을 실험적으로 검증하였다. 측정 거리는 근접(0 m), 1 m, 1.5 m로 설정하여, 농도 및 거리 변화에 따른 라만 신호 특성을 분석하였다.

4.1 암모니아 라만 스펙트럼 특성

측정 결과, 480–520 nm 영역에서 암모니아(NH_3)의 N–H stretching vibration mode에 해당하는 라만 피크가 뚜렷하게 나타났다. 이는 기존 문헌 보고와 일치하며, 본 연구에서 개발한 LED 기반 라만 라이다 시스템이 분자 고유 신호를 검출할 수 있음을 입증하였다. 레일라이 산란은 400 nm 부근에서 강하게 확인되었고, 라만 대비 약 2–3배 강도를 보였다. 원신호(raw data)는 노이즈가 포함되어 있었으나, smoothing과 baseline correction을 통해 정량 분석에 적합한 신호로 개선되었다.

4.2 거리별 측정 특성

1) 0 m(근접): 라만 신호는 농도 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 반면 레일라이 산란은 농도와 무관하게 일정한 값을 유지하였다.
2) 1 m: 레일라이 산란 강도는 24,000 counts 이상으로 증가했으며, 라만 신호는 일부 농도에서 비선형성을 보였다. 이는 산란 경로 손실 및 광학계 정렬 오차의 영향을 받은 것으로 판단된다.
3) 1.5 m: 레일라이 산란은 가장 강하게 나타났고(약 28,000 counts), 라만 신호는 저농도(1,000 ppm)에서 상대적으로 높은 세기가 관찰되었다. 이는 배경 잡음 및 외란광(ambient light)의 간섭으로 인한 이상값으로 해석된다.

4.3 정량 분석 결과

다중 회귀 분석을 적용한 결과, 선택된 네 개의 특성 파장(403, 426, 493, 514 nm)에서 농도와 스펙트럼 강도 간의 상관성이 매우 높게 나타났다($R^2 \approx 0.999$). Standard Error of Calibration (SEC)은 0.0~0.3 ppm 범위로 확인되어, 저농도 영역에서도 정밀한 정량 분석이 가능함을 보여주었다. 특히 1 m 거리에서의 SEC가 0.0625 ppm으로 가장 낮아, 실제 원거리 감지 응용에서 최적의 조건임을 확인하였다.

4.4 고찰

본 연구의 결과는 LED 기반 라만 라이다가 암모니아와 같은 독성 가스를 원거리에서 정량적으로 탐지할 수 있음을 보여준다. 다만 거리 증가에 따라 라만 신호의 강도가 약화되고 비선형적 특성이 나타났으므로, 향후 수십 미터 이상의 원거리 확장을 위해서는 광원 출력 증대, 대구경 집광계(optics) 도입, 및 고감도 검출기 적용이 필요하다. 또한 저농도 조건에서의 이상값 발생은 환경 광원 및 잡음에 의한 영향으로 판단되며, 필터링 및 외란광 억제 기술을 병행할 필요가 있다. 본 연구는 그린 암모니아의 안전 운송·저장을 위한 실시간 모니터링 기술로 발전 가능성이 크며, 향후 실증 환경에서의 적용성을 검증하는 것이 주요 과제로 제시된다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영지원비지원사업(주요사업)으로 수행되었습니다(과제 번호 20250242-001, 수소도시 기반시설의 안전 및 수용성 확보기술 개발).

References

1. M. Portarapillo, A. B. Sessa, D. Russo, and A. di Benedetto, “Ammonia as a hydrogen carrier: energetic assessment of processes integrated with fuel cells for power generation”,

Energy & Fuels, Vol. 39, No. 5, 2025, pp. 2843-2853, doi: https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c04626.
2. D. Erdemir and I. Dincer, "A quicker route to hydrogen economy with ammonia", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 82, 2024, pp. 1230-1237, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.067.
3. H. Lu, C. Zheng, L. Zhang, Z. Liu, F. Song, X. Li, Y. Zhang, and Y. Wang, "A remote sensor system based on TDLAS technique for ammonia leakage monitoring", Sensors, Vol. 21, No. 7, 2021, pp. 2448, doi: https://doi.org/10.3390/s21072448.
4. V. Negro, M. Noussan, and D. Chiaramonti, "The potential role of ammonia for hydrogen storage and transport: a critical review of challenges and opportunities", Energies, Vol. 16, No. 17, 2023, pp. 6192, doi: https://doi.org/10.3390/en16176192.
5. S. Xi, W. Wu, W. Yao, R. Han, S. He, W. Wang, T. Zhang, and L. Yu, "Hydrogen production from ammonia decomposition: a mini-review of metal oxide-based catalysts", Molecules, Vol. 29, No. 16, 2024, pp. 3817, doi: https://doi.org/10.3390/molecules29163817.
6. C. Chen, Y. Zhou, H. Fang, X. Peng, and L. Jiang, "Progress and challenges in energy storage and utilization via ammonia", Surface Science and Technology, Vol. 1, No. 13, 2023, pp. 1-24, doi: https://doi.org/10.1007/s44251-023-00013-6.
7. D.A. Burgard, G. A. Bishop, and D. H. Stedman, "Remote sensing of ammonia and sulfur dioxide from on-road light duty vehicles," Environmental Science & Technology, Vol. 40, No. 22, 2006, pp. 7018-7022, doi: https://doi.org/10.1021/es061161r.
8. Y. Park, H. Chang, and J. Park, "Development of hydrogen detection sensor for hydrogen fuel cell systems", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 4, 2025, pp. 425-430, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.4.425.
9. W. Cho, Y. Lim, Y.Kim, and B. Park, "A basic study for the performance evaluation of a Raman LiDAR detector for detecting hydrogen gas", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 205-211, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.205.
10. K. S. Jeon, J. Sim, W. B. Cho, and B. Park, "Research on long-range hydrogen gas measurement for development of Raman lidar sensors", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 67, 2024, pp. 119-126, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.126.