

불활성 가스의 O₂와 CO 불순물 제거를 위한 Ni 촉매의 물성 평가

김광배², 진새라¹, 김은석², 임예솔¹, 이현준¹, 김성훈¹, 노윤영^{1*}, 송오성²
¹원의 홀딩스, ²서울시립대학교 신소재공학과

Assessment of Ni Catalyst Properties for Removal of O₂ and CO Impurity in Inert Gas

Kwangbae Kim², Saera Jin¹, Eunseok Kim², Yesol Lim¹, Hyunjun Lee¹,
Seonghoon Kim¹, Yunyoung Noh^{1*}, Ohsung Song²

¹WONIK HOLDINGS CO., LTD.

²Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul

요약 반도체 산업용 9N 이상의 초고순도 N₂, Ar 등 불활성 가스 제조를 위해 가스 정제공정에 사용되고 있는 Ni 촉매의 물성 평가 및 촉매적 특성을 확인하였다. 조성이 다른 원기둥 형태의 C1, 츠러스 형태의 C2의 두 가지 Ni 촉매에 대해 비교 평가를 진행하였다. Ni 촉매의 형상과 미세구조를 분석하기 위해 광학현미경과 FE-SEM을 이용하였으며, 조성 확인 및 물성을 분석하기 위해 EDS, XRD, 그리고 micro-Raman 분석을 이용하였다. 또한 Ni 촉매의 비표면적 및 촉매적 특성을 확인하기 위해 BET, Pulse Titration 분석을 진행하였다. 조성 분석결과, C1의 경우, 상대적으로 graphite가 불순물로 다량 포함되어 있는 것을 확인하였으며, C2는 C1에 비해 Ni의 함량이 높은 것을 확인하였다. 비표면적 분석 결과, C2의 비표면적이 C1보다 약 1.69배 정도 큰 것을 확인할 수 있었다. 촉매적 특성분석 결과, 상온에서 O₂와 CO 불순물 제거 정도가 C2가 우수함을 확인하였다. 따라서 반도체 산업용 초고순도 불활성 기체 제조를 위한 Ni 촉매로는 불순물이 적고, 비표면적이 크며, 상온에서 O₂와 CO 제거 성능이 우수한 C2가 적합함을 확인하였다.

Abstract This study examined the catalytic property of Ni-catalyst used in the gas purifying process to manufacture inert gases of N₂ and Ar with high-purity over 9N for semiconductor industrial applications. Two types of Ni-catalysts with a cylindrical shape (C1) and churros shape structure (C2) were compared for the assessment. Optical microscopy and FESEM were used to analyze the shape and microstructure of the Ni-catalyst. EDS, XRD, and micro-Raman characterization were performed to examine the composition and properties. BET and Pulse Titration analyses were conducted to check the surface area and catalytic property of the Ni-catalyst. From the composition analysis results, C1 contained a relatively large amount of graphite as an impurity, and C2 contained higher Ni contents than C1. From specific surface area analysis, the specific surface area of C2 was approximately 1.69 times larger than that of C1. From catalytic property analysis, outstanding performance in O₂ and CO impurity removal was observed at room temperature. Therefore, C2, having low-impurity and large specific surface area, is a suitable catalyst for the high-purity inert gas process in the semiconductor industry because of its outstanding performance in O₂ and CO impurity removal at room temperature.

Keywords : Ni-Catalyst, High-Purity, Impurity-Removal, BET, Pulse-Titration

*Corresponding Author : Yunyoung Noh(Wonik Holdings)

email: yynoh@wonik.com

Received January 3, 2020

Accepted April 3, 2020

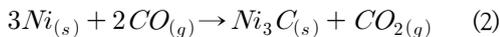
Revised February 3, 2020

Published April 30, 2020

1. 서론

최근 반도체 및 디스플레이 공정에서 6N의 고순도 가스를 넘어선 9N 이상의 초고순도 가스를 사용하고 있다 [1]. 이러한 초고순도 가스의 제조를 위해서 촉매 및 흡착제를 이용하여 6N의 고순도 가스내의 주된 CO, CO₂, O₂, H₂O 불순물을 제거하며, 이때 정제를 위한 가스 종류에 따라 사용되는 촉매 및 흡착제도 달라지게 된다 [2-4].

반도체 산업에서 사용되는 가스 특성에 따라 불활성, 가연성, 부식성 가스 등으로 분류할 수 있으며, 이 중 N₂, Ar 등의 불활성 가스의 소요량이 가장 많다[5-7]. 반도체나 디스플레이 산업에서 요구되는 불활성 가스의 순도는 9N 이상이며, 이는 가스 내 불순물 농도가 1 ppb 미만인 것을 의미한다. 최근 반도체 및 디스플레이 소자의 고집적화로 인해 9N 이상의 초고순도 가스의 사용이 필수적이며, 이와 같은 초고순도 가스를 사용하지 않을 경우, crack, dark spot 등의 문제점이 발생되어 소자 품질과 수율에 악영향을 초래한다[8]. 따라서 9N 이상의 초고순도 가스 제조를 위해 사용되고 있는 흡착제 및 촉매에 대한 연구가 필수적이다. 일반적으로 촉매로 널리 알려진 금속은 반응활성이 뛰어난 귀금속인 백금(Pt), 루테튬(Ru) 등의 백금족[9-10]이지만, 귀금속 촉매는 고가의 재료이기 때문에 산업에서는 가격 경쟁력이 우수하면서도 반응 활성이 우수한 Ni 촉매를 가장 많이 채용하고 있다[11-12]. 이러한 Ni 촉매는 Eq. (1)과 (2) 메커니즘을 이용하여 가스내 불순물 중 O₂ 및 CO를 제거하는데 사용되고 있다[13].



Ni 촉매체의 제작 방법은 크게 함침법[14], 공침법[15], pelletizing[16]의 세 가지 제작방법이 주로 이용되고 있다. 함침법의 경우, Al₂O₃와 같은 다공성 지지체를 제작하고, Ni 촉매 수용액에 침지 후 건조시켜서 열처리하여 제작하는 방법이다. 공침법의 경우, Al 또는 Si를 포함한 수화물과 Ni이 포함된 수화물을 교반하고, 침전제를 첨가하여 침전물을 제작한 뒤 이를 열처리하여 제작하는 방법이다. 또한 pelletizing의 경우, Al 또는 Si를 포함한 수화물과 Ni가 포함된 수화물이 혼합된 슬러리를 제작하고, 이를 200~300 °C 정도 낮은 온도에서 가열 압축하여 제작하는 방법이다.

Ni 촉매의 안정성 및 효율을 높이기 위해 K. Nagaoka 등[17]은 탄소 생성에 대한 저항성을 증가시키고자 CeO₂를 첨가하여 제작한 촉매를 보고한 바 있으며, J.R. Rostrup-Nielsen 등[18]은 NiAl₂O₄ 형성을 방지하기 위한 변형된 Ni 촉매로 PtNi 합금, Pt/ZrO₂, Pt/CeO₂ 등을 보고한 바 있다. 또한 S. Xu 등[19]은 기존에 보편적으로 이용되는 Al₂O₃ 대신 산소 저장 특성과 우수한 분산성을 가진 ZrO₂와 CeO₂-ZrO₂를 지지체로 채용한 Ni 촉매를 보고한 바 있으며, M. King 등[20]은 CeO₂-ZrO₂를 지지체로 채용하고, Ni의 비율에 따른 Ni 촉매의 특성을 비교하여 15 wt% Ni가 첨가된 촉매에서 가장 우수한 활성을 나타낸 것을 보고한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 반도체 및 디스플레이 산업에서 사용되는 9N 이상의 불활성 기체를 제조하기 위해 실제 정제 산업에서 사용되고 있는 조성이 다른 두 가지 Ni 촉매의 물성 및 촉매적 특성을 확인하였다.

2. 실험방법

반도체 및 디스플레이 산업용 초고순도 불활성 가스의 제조를 위해 정제공정에 채용되는 Ni 촉매의 특성을 확인하기 위해 C1(A사 구매)과 C2(B사 구매)촉매를 준비하였다.

Ni 촉매의 매크로 분석을 위해 광학현미경의 접안렌즈에 연결된 디지털 카메라(Coolpix 4500, Nikon사)를 이용하여 10배 이하로 분석하였다.

Ni 촉매의 미세구조 분석을 위해 Field Emission Scanning Electron Microscope(FE-SEM, S-8000, Hitachi)와 Energy Dispersive X-Ray Spectrometer(EDS, Quantax Xflash 6/60, BRUKER)을 이용하였다. 이때 분석 배율은 각각 10,000배와 1,000배였으며, 가속전압은 모두 15 kV로 분석하였다.

또한 Ni 촉매의 구성 원소를 확인하기 위해 EDS 분석을 진행하였다.

상업적 촉매의 물성을 확인하기 위해 각 시료를 분말화하여 X-선 회절 분석(XRD, Empyrean, Malvern Panalytical)를 이용하였다. X선원은 Cu-K α 이며, 이때 분석 조건 current 30 mA, 가압 40 kV였다. 회절범위는 JCPDS(Ni:01-087-0712, NiO:98-016-6131, graphite:03-065-6212, SiO₂:98-005-2371)카드를 고려하여 10~90° 범위의 2 θ 에서 피크를 확인하였다.

Ni 촉매의 물성을 확인하기 위해 micro-Raman분광

기(UniRaman, Unithink)를 사용하여 확인하였다. 이때 시료는 모두 분말화하여 분석하였으며, 광원은 514 nm 을 채용하고, 30초 동안 노출 후 50회 반복 측정하였다.

Ni 촉매 비표면적 및 기공크기 분석을 위해 BET (Autosorb-iQ/MP, Quantachrome Instruments) 분석기를 이용하였다. 이때 C1과 C2 모두 벌크형태로 각각 0.598 g, 0.438 g을 준비하고, 77 K 온도 조건에서 N₂ 가스를 이용하여 분석하였다.

Ni 촉매의 O₂, CO 가스의 화학적 흡착 정도 및 금속 분산도를 분석하기 위해 C1, C2 모두 벌크형태 시편으로 촉매 분석기(BELCAT-M, BEL Japan)를 사용하여 Pulse Titration 분석을 진행하였다. Pulse Titration 기법은 설정 온도에서 동일한 부피의 가스를 규칙적으로 주입하여 가스 물질과 촉매의 화학적 흡착 정도 및 금속 분산도를 확인할 수 있는 방법이다[21]. 금속 분산도는 표면에 노출된 금속 원자의 비율로, 금속 분산도가 클수록 가스와의 화학 흡착 및 촉매 반응이 우수하다[22-24]. 일반적으로 O₂, CO 가스와의 흡착 반응을 통해 금속 분산도를 측정한다[25]. 실제 반도체 및 디스플레이 공정의 가스 정제 조건과 동일하게 상온 조건에서 각 촉매의 Pulse Titration 실험을 진행하였다. 각각의 분석을 진행하기 전에 촉매 표면의 수분을 제거하기 위하여 350 °C 고온 전처리를 진행하였으며, 전처리는 350 °C까지 10 °C/min.으로 승온 후 1시간 유지 조건으로 실시하였다. 전처리 진행 후 상온 조건에서 5 % O₂/He, 10 % CO/He 가스를 각각 규칙적으로 동일한 양으로 주입하여 O₂, CO Pulse Titration을 진행하였다. 이때 명확한 비교를 위해 그래프의 피크를 노멀라이징하여 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1에는 조성이 다른 C1, C2의 두 가지 상업용 Ni 촉매의 광학현미경 이미지를 나타내었다.

(a)는 C1의 광학현미경 이미지이며, 우 상단에 삽입한 이미지는 C1의 단면을 나타내었다. C1은 지름 5.06(±0.2) mm, 높이 4.57(±0.3) mm의 원기둥 형태를 가진 것을 확인할 수 있었다.

(b)는 C2의 광학현미경 이미지이며, 우 상단에 삽입한 이미지는 C2의 단면을 나타내었다. C2의 단면은 중심에 지름 0.81 mm의 원형을 기준으로 3개의 0.41 mm 높이 돌기들을 가지고 있으며, 길이 3.63(±2) mm 쉘러스 모양의 넓은 비표면적을 나타내는 것을 확인하였다.

따라서 두 가지 Ni 촉매는 각각 다른 형태를 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 성형 기구 및 성형 방법이 제조사마다 차이가 있기 때문에 나타난 결과이다.

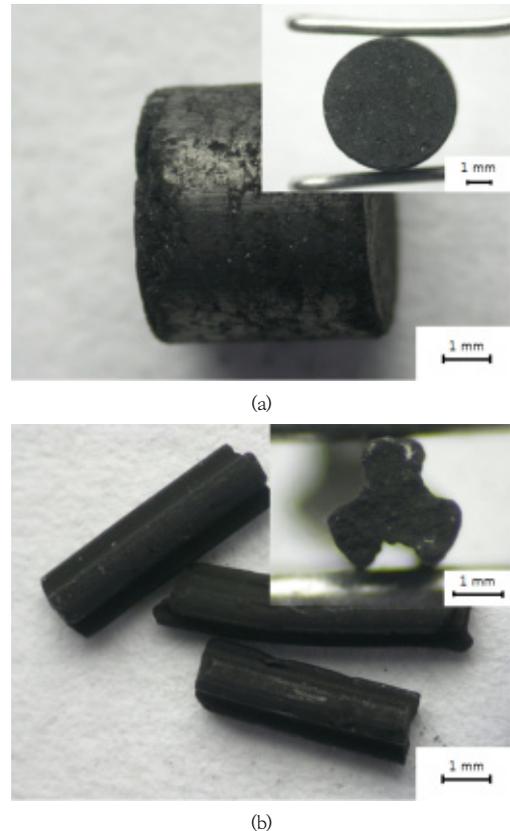


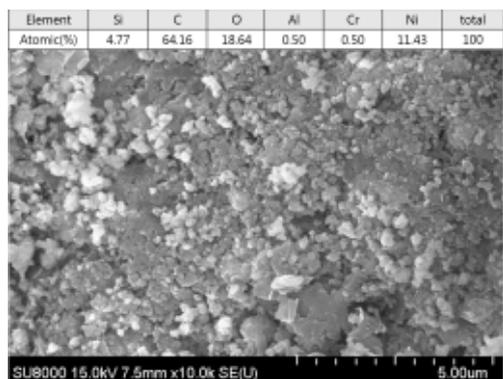
Fig. 1. Optical microscopy images of Ni catalysts; (a) C1, (b) C2.

Fig. 2에는 Fig. 1에서 확인한 각 촉매의 미세구조를 나타내었으며, 상단에는 EDS 결과를 나타내었다. (a)는 C1의 미세구조 이미지로 약 254 nm 입도의 구 형태를 가진 것을 확인하였으며, 상단의 EDS 분석 결과 Si, C, O, Al, Cr, Ni로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 특히 C가 64.16 %로 집중되어 있는 것을 EDS 분석 결과로 확인할 수 있었으며, 이러한 C가 촉매적 특성에 영향을 줄 것으로 예상되었다. 반면, Ni는 상대적으로 적은 11.43 %만 확인되었다.

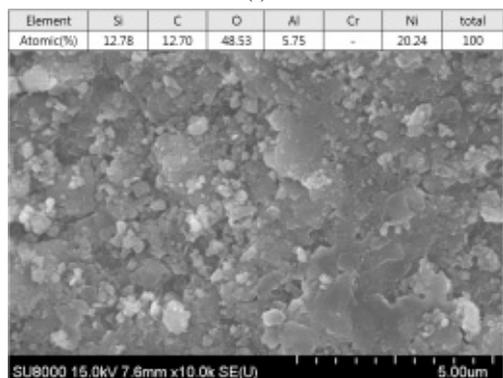
(b)는 C2의 미세구조 이미지로 C1 보다 큰 약 620 nm 입도를 확인하였으며, (a)와 동일하게 EDS 분석 결과를 상단에 나타내었다. EDS 분석 결과, C2는 Si, C, O, Al, Ni로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다. C1에

비해 C의 비율은 12.70 %로 낮고, Cr은 확인되지 않았으며, Ni은 20.24 %로 약 2배 정도 많은 비율로 구성되어 있었다.

따라서 C1, C2 모두 Al₂O₃, SiO₂ 기지에 Ni 촉매층이 형성된 촉매제로서 C1은 C2에 비해 C의 함량이 높고, Cr이 함유된 Ni 촉매이고, C2는 C1에 비해 Ni 함량이 높고, Cr이 없는 Ni 촉매임을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 2. FE-SEM images of Ni catalysts; (a) C1, (b) C2.

Fig. 3에는 C1과 C2의 XRD 분석 결과를 그래프로 나타내었다. 그래프의 하단에는 C1의 분석 결과를 나타내었으며, 상단에는 C2의 분석 결과를 나타내었다.

C1 분석 결과, 21.9°에서 (111)면에 상응하는 SiO₂ peak와 26.5°에서 (002)면에 상응하는 graphite peak를 확인할 수 있었으며, 44.5°, 51.9°, 76.4°에서 각각 (111), (200), (220)면에 상응하는 Ni peak, 36.8°, 62.0°에서 각각 (101), (104)면에 상응하는 NiO peak를 확인할 수 있었다.

C2 분석 결과, 44.5°, 51.9°, 76.4°에서 각각 (111), (200), (220)면에 상응하는 Ni peak, 36.8°, 62.0°에서 각각 (101), (104)면에 상응하는 NiO peak만이 확인되

었다. 이때 Ni peak가 C1보다 약 2배 높게 나타난 것을 확인할 수 있는데 이는 앞선 EDS에서 함량이 약 2배 높게 나타난 것과 일치하는 결과였다.

따라서 Fig. 2의 EDS 분석 결과에서 확인한 바와 같이 C1에는 graphite가 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, C2는 C1보다 Ni이 2배 많이 존재하는 것을 확인하였다.

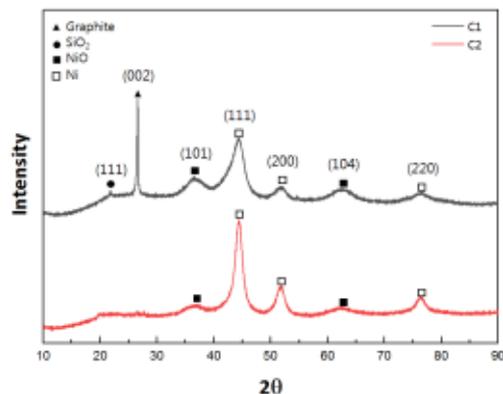


Fig. 3. XRD results of Ni catalysts.

Fig. 4에는 C1과 C2의 Raman 분석 결과를 나타내었다. Fig. 3에서 확인한 바와 같이 C1에서는 graphite의 Raman peak인 1340 cm⁻¹의 D-band peak와 1590 cm⁻¹의 G-band peak가 확인되었으며, 이는 S. Roscher 등[22]이 보고한 바와 일치하는 결과로 C1에는 graphite가 내포되어 있는 것을 확인하였다. 반면 C2에서는 graphite peak가 확인되지 않았는데, 앞선 EDS 결과에서 소량의 C가 검출된 것이 확인되어 Ni 층 내부의 SiO₂ 및 Al₂O₃ 기지 사이에 graphite가 존재할 것으로 예상되었으며, 표면에 graphite가 있다하더라도 Raman으로 검출되지 않을 정도의 미량으로 판단하였다.

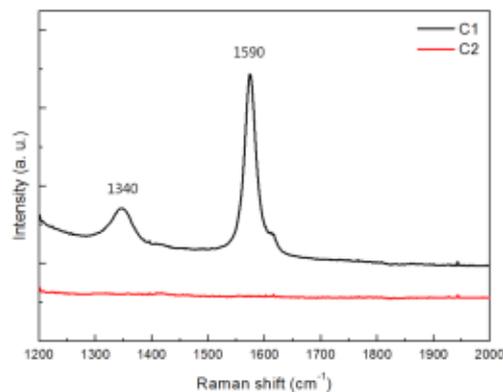


Fig. 4. Micro-Raman spectra of Ni catalysts.

Table 1. BET results of the Ni catalysts; (a) C1 and (b) C2

Sample	C1	C2
Mesopore diameter (nm)	3.40	3.39
Mesopore volume (cc/g)	0.203	0.337
Surface Area (m ² /g)	163.94	277.62

Table 1에서는 BET 측정결과로 C1, C2의 기공 크기 및 부피와 비표면적을 나타내었다. C1, C2의 mesopore 크기는 각각 3.40 nm, 3.39 nm 로 비슷하였으나, mesopore 부피는 각각 0.203 cc/g, 0.337 cc/g을 나타내어 C2의 mesopore 부피가 약 1.66배 큰 것을 확인하였다. 이러한 mesopore 크기 및 부피 결과로 확인된 최종 비표면적의 경우, 각각 163.94 m²/g, 277.62 m²/g를 나타내어 C2의 비표면적이 C1보다 약 1.69배 정도 큰 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 C2가 비표면적이 더 우수함에 따라 결국 열린 기공으로 더 많은 채널링을 가질 것으로 예상되었으며, 이를 통해 C2의 촉매 특성이 상대적으로 우수할 것으로 판단되었다.

Fig. 5에서는 C1, C2의 화학적 흡착 정도 및 금속 분산도를 알아보기 위해 Pulse Titration 결과를 나타내었다. 좌상단에 삽입된 표는 Pulse Titration 그래프의 상세 결과이다. O₂의 경우, 투입량 0.5351 cm³에서 C1 및 C2의 O₂ 흡착량이 각각 0.0748 cm³, 0.1076 cm³를 나타내어 C2가 C1에 비해 O₂ 흡착량이 1.44배 높은 것을 확인할 수 있었다. O₂와 반응하는 금속 분산도는 C1, C2 각각 0.4621 %, 0.9254 %를 나타내어 C2가 C1에 비해 2배 높았다. CO의 경우, 투입량 0.4559 cm³에서 C1 및 C2의 CO 흡착량이 각각 0.0199 cm³, 0.0351 cm³를 나타내어 C2가 C1에 비해 CO 흡착량이 1.76배 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한, CO와 반응하는 금속 분산도는 C1, C2 각각 0.1640 %, 0.2272 %를 나타내어 C2가 C1에 비해 약 1.4배 높았다. 따라서 상온 조건에서 C2의 촉매 특성이 우수한 이유는 앞선 조성 결과에서 확인한 바와 같이 C2가 C1에 비해 니켈 함량이 많아 서론부에 나타낸 Eq. (1)과 (2) 반응으로 NiO_(s)와 Ni₃C_(s)를 형성하기에 유리하기 때문이다[13]. 또한 BET 및 Pulse Titration 결과에서 C1에 비해 C2의 비표면적 및 금속 분산도가 더 크기 때문이라고 판단하였다. 따라서 반도체 및 디스플레이 산업에서 사용되고 있는 정제 공정에 채용하는 것은 C2가 C1에 비해 유리한 것으로 예상되었다.

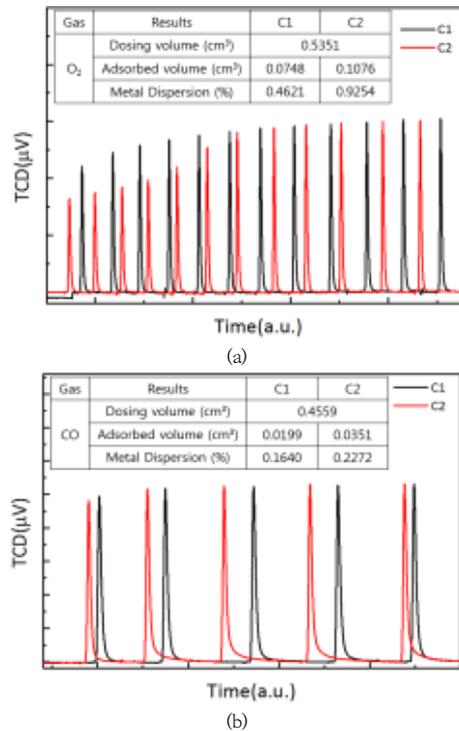


Fig. 5. Gas pulse titration data of Ni catalysts; (a) O₂, (b) CO

4. 결론

반도체 산업용 9N 이상의 초고순도 N₂, Ar 등 불활성 가스 제조를 위해 가스 정제공정에 사용되고 있는 Ni 촉매에 대한 물성 평가를 진행하였다. C1 촉매는 원기둥 형태의 촉매이며, C2는 튜리스 형태의 형상을 가진 촉매였으며, 각각의 미세구조로 확인한 세부 입도는 C1이 약 254 nm, C2가 약 620 nm로 확인되었다. EDS 분석 결과, Ni의 함량은 C2가 C1보다 Ni 함량이 약 2배 정도 높은 것을 확인하였다. XRD 분석 결과 C1과 C2에서 모두 Ni과 NiO가 확인되었으며, C1에서만 graphite가 확인되었다. Raman 분석 결과에서도 C1에서만 graphite 피크가 확인되었다. 또한 BET 결과를 통해 C2의 비표면적이 C1보다 약 1.69배 정도 큰 것을 확인하였으며, Pulse Titration 결과, C2가 C1보다 O₂와 CO 흡착특성이 각각 1.44배, 1.76배 우수함을 확인하였다. 따라서 Ni 함량과 비표면적이 우수한 C2가 초고순도 가스 정제 공정의 촉매로 적합함을 확인하였다.

References

- [1] K. Kato, Y. Shionoiri, Y. Sekine, K. Furutani, T. Hatano, T. Aoki, M. Sasaki, H. Tomatsu, J. Koyama, S. Yamazaki, "Evaluation of Off-State Current Characteristics of Transistor Using Oxide Semiconductor Material, Indium-Gallium-Zinc Oxide", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.51, No. R2, pp.021201-021207, Jan. 2012.
DOI:<https://doi.org/10.1143/JJAP.51.021201>
- [2] Y. Li, L. Zhang, X. Zhong, A. Windle, "Synthesis of high purity single-walled carbon nanotubes from ethanol by catalytic gas flow CVD reactions", *Nanotechnology*, Vol.18, No.22, May 2007.
DOI:<https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/22/225604>
- [3] F.Garcí, Y. Ma, I. Rodríguez-Ramos, A. Ruiz, "High purity hydrogen production by low temperature catalytic ammonia decomposition in a multifunctional membrane reactor", *Catalysis Communications*, Vol.9, No.3, pp.482-486, Mar. 2008.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.catcom.2007.07.036>
- [4] C. Xu, X. Xu, J. Su, Y. Ding, "Research on unsupported nanoporous gold catalyst for CO oxidation", *Journal of Catalysis*, Vol.252, No.2, pp.243-248, Dec. 2007.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jcat.2007.09.016>
- [5] K. TODA, T. SHIMIZU, I. SANEMASA, "Double Schottky Diode-Type Gas Sensor for Discriminative Detection of Phosphine and Hydrogen", *Analytical Sciences*, Vol.11, pp.317-318, Nov. 1995.
DOI:<https://doi.org/10.2116/analsci.11.317>
- [6] T. Itoh, N. Izu, T. Akamatsu, W. Shin, Y. Miki, "Elimination of Flammable Gas Effects in Cerium Oxide Semiconductor-Type Resistive Oxygen Sensors for Monitoring Low Oxygen Concentrations", *Sensors*, Vol.15, No.4, pp.9427-9437, Apr. 2015.
DOI:<https://doi.org/10.3390/s150409427>
- [7] E. Erdoğan, M. Kundaklı, A. Kasapoglu, E. Gur, "p-Si(100)/InGaN thin film structure and investigation of its physical properties: N₂ gas flow effect", *Materials Today: Proceedings*, Vol.18, No.5, pp.1868-1874 2019.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.675>
- [8] S. Campbell, Y. Qu1, J. Major, D. Lararde, C. Labbe, "Direct evidence of causality between chemical purity and band-edge potential fluctuations in nanoparticle ink-based Cu₂ZnSn(S,Se)₄ solar cells", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.52, pp.11, Jan. 2019.
DOI:<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aafe60>
- [9] A. Ostroverkh, V. JohaneK, M. Dubau, P. Kus, I. Hhalakhan., "Optimization of ionomer-free ultra-low loading Pt catalyst for anode/cathode of PEMFC via magnetron sputtering", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.44, No.35, pp.19344-19356, Jul. 2019.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.206>
- [10] F. Chen, D. He, L. Chen, X. Chang, D. Z. Wang., "Chirality-Economy Catalysis: Asymmetric Transfer Hydrogenation of Ketones by Ru-Catalysts of Minimal Stereogenicity", *ACS Catalysis*, Vol.9, No.6, pp.5562-5566, May 2019.
DOI:<https://doi.org/10.1021/acscatal.9b01535>
- [11] Jens, R. R.-N., "Activity of Nickel Catalysts for Steam Reforming of hydrocarbons", *Journal of Catalysis*, Vol.31, No.2, pp.173-199, Nov. 1973.
DOI:[https://doi.org/10.1016/0021-9517\(73\)90326-6](https://doi.org/10.1016/0021-9517(73)90326-6)
- [12] S. Fang, Z. Cui, Y. Zhu, C. Wang, J. Bai, X. Zhang, "In situ synthesis of biomass-derived Ni/C catalyst by self-reduction for the hydrogenation of levulinic acid to γ -valerolactone", *Journal of Energy Chemistry*, Vol.37, pp.204-214, Oct. 2019.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.03.021>
- [13] J. Chen, P. C. Hyayes, "Mechanisms and Kinetics of Reduction of Solid NiO in CO/CO₂ and CO/Ar Gas Mixtures", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol.50B, No.6, 2623-2635, Dec. 2019.
DOI:<https://doi.org/10.1007/s11663-019-01662-5>
- [14] Y. Oh, H. Roh, K. Jun, Y. S. Baek, "A highly active catalyst, Ni/Ce-ZrO₂-Al₂O₃, for on-site H₂ generation by steam methane reforming: pretreatment effect", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.28, pp.1387-1392, Dec. 2013.
DOI:[https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(03\)00029-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(03)00029-6)
- [15] A. I. Tsyganok, T. Tsunoda, S. Hamakawa, K. Suzuki, K. Takehira, "Dry reforming of methane over catalysts derived from nickel-containing Mg-Al layered double hydroxides", *Journal of Catalysis*, Vol.213, No.2, pp.191-203, Jan. 2003.
DOI:[https://doi.org/10.1016/S0021-9517\(02\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9517(02)00047-7)
- [16] D. Suh, T. Park, J. Kim, K. Kim, "Nickel-alumina aerogel catalysts prepared by fast sol-gel synthesis", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol.225, pp.168-172, Apr. 1998.
DOI:[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00039-8)
- [17] K. Nagaoka, K. Sato, S. Fukuda, H. Nishiguchi, Y. takita, "Oxidation of Rh/Ce_{0.5}Zr_{0.5}O₂ reduced under mild conditions as an initiator of n-butane oxidative reforming at ambient temperature", *Catalysis Communications*, Vol.8, pp.1807-1810, Nov. 2007.
DOI:<https://doi.org/10.1002/cssc.200900194>
- [18] R. R.-N. Jens, S. Jens, K. N. Jens, "Hydrogen and synthesis gas by steam- and CO₂ reforming", *Advances in Catalysis*, Vol.47, pp.65-139, Apr. 2002.
DOI:[https://doi.org/10.1016/S0360-0564\(02\)47006-X](https://doi.org/10.1016/S0360-0564(02)47006-X)
- [19] S. Xu, X. Wang, "Highly active and coking resistant Ni/CeO₂-ZrO₂ catalyst for partial oxidation of methane", *FUEL*, Vol.84, No.5, pp. 563-567, Mar. 2005.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.008>
- [20] M. King, T. Lee, J. Lee, "Influence of Ni/CeO₂-ZrO₂ catalysts on Methane Autothermal reforming", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol.47, No.1, pp. 17-23, Feb. 2009.
- [21] S. Tada, M. Yokoyama, R. Kikuchi, T. Haneda, H.

Kameyama, "N₂O Pulse Titration of Ni/ α -Al₂O₃ Catalysts: A New Technique Applicable to Nickel Surface-Area Determination of Nickel-Based", Catalysts, *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol.117, pp. 14652-14658, Jun. 2013.
DOI:<https://doi.org/10.1021/jp404291k>

- [22] S. Roscher, R. Hoffmann, O. Ambacher, "Determination of the graphene-graphite ratio of graphene powder by Raman 2D band symmetry analysis", *Analytical Methods*, Vol.11, pp.1224-1228, Jan. 2019.
DOI:<https://doi.org/10.1039/C8AY02619J>
- [23] M. G. Calvo, C. J. González, B. Rivas, J. I. G. Ortiz, R. L. Fonseca, "Novel Nickel Aluminate-Derived Catalysts Supported on Ceria and Ceria-Zirconia for Partial Oxidation of Methane", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.56, pp.6186-6197, May 2017.
DOI:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b00986>
- [24] B. Lin, L. Heng, H. Yin, B. Fang, J. Ni, X. Wang, J. Lin, L. Jiang, "Effects of Using Carbon-Coated Alumina as Support for Ba-Promoted Ru Catalyst in Ammonia Synthesis", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.58, No.24, pp. 10285-10295, May 2019.
DOI:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01610>
- [25] A. Borodzinski, M. Bonarowska, "Relation between Crystallite Size and Dispersion on Supported Metal Catalysts", *Langmuir*, Vol.13, No.21 5613-5620, Oct. 1997.
DOI:<https://doi.org/10.1021/la962103u>

김 광 배(Kwangbae Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 서울시립대학교 일반대학원 신소재공학과 (공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 일반대학원 신소재공학과 박사과정

<관심분야>

반도체재료, 태양전지

진 새 라(Saera Jin)

[정회원]



- 2018년 2월 : 중앙대학교 일반대학원 화학과 (이학석사)
- 2019년 1월 ~ 현재 : 원익홀딩스 기술연구소 연구원

<관심분야>

반도체재료, 신소재개발, 소재분석

김 은 석(Eunseok Kim)

[준회원]



- 2018년 6월 ~ 현재 : 서울시립대학교 일반대학원 신소재공학과 석사과정

<관심분야>

반도체재료, 다공성 물질, 구조 세라믹스

임 예 슬(Yesol Lim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 인하대학교 일반대학원 신소재공학과 (공학석사)
- 2018년 1월 ~ 현재 : 원익홀딩스 기술연구소 연구원

<관심분야>

반도체재료, 신소재개발, 소재분석

이 현 준(Hyunjun Lee)

[정회원]



- 2016년 4월 : 원익IPS 연구개발팀 연구원
- 2016년 5월 ~ 현재 : 원익홀딩스 기술연구소 팀장

<관심분야>

반도체재료, 신소재개발, 소재분석

송 오 성(Ohsung Song)

[종신회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 일반대학원 금속공학과 (공학석사)
- 1994년 5월 : MIT 재료공학 (공학박사)
- 1996년 3월 : NTT 기초연구원
- 1997년 8월 : 삼성전자 CPU기술팀
- 1997년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 교수

<관심분야>

반도체재료, 태양전지, 자성재료

김 성 훈(Seonghoon Kim)

[정회원]



- 1995년 2월 : 명지대학교 일반대학원 물리학과 (이학석사)
- 2005년 11월 : ATTO 연구소 연구원
- 2016년 4월 : 원익 IPS 연구개발팀 팀장
- 2016년 5월 ~ 현재 : 원익홀딩스 기술연구소 소장

<관심분야>

반도체재료, 신소재개발, 소재분석

노 윤 영(Yunyoung Noh)

[정회원]



- 2015년 8월 : 서울시립대학교 일반대학원 신소재공학과 (공학박사)
- 2015년 12월 : 서울시립대학교 신소재공학과 박사후연구원
- 2016년 11월 : 서울시립대학교 신소재공학과 연구교수
- 2017년 1월 ~ 현재 : 원익홀딩스 기술연구소 연구원

<관심분야>

반도체재료, 신소재개발, 소재분석