

# H<sub>2</sub>-SCR의 귀금속 Pt와 Pd를 이용한 유해 가스 저감 특성 Harmful Gas Reduction Characteristics using Precious Metals Pt and Pd of H<sub>2</sub>-SCR

서충길\*†

Choong-Kil Seo\*†

(Received 04 October 2023, Revision received 31 October 2023, Accepted 06 November 2023)

**초록 :** 이 연구는 H<sub>2</sub>-SCR 촉매의 상용화를 위한 기초연구로, H<sub>2</sub>-SCR에서 가장 중요한 역할을 담당하는 주촉매(Pt, Pd) 종류와 담지량에 따른 유해 가스 저감 특성을 파악하는 것이다. 지지체 TiO<sub>2</sub> 기반에 0.5Pt보다 0.5Pd가 담지된 H<sub>2</sub>-SCR이 저온에서 활성이 좋았다. 두 종류 귀금속이 담지된 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75°C 저온에서 22%, 100°C에서 46%의 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타냈고, 저온에서 NO<sub>x</sub>/CO 저감 성능 향상과 윈도우 폭이 확대되었다. 이는 유해가스 NO<sub>x</sub>와 CO에 대한 흡착과 반응 및 탈착의 반응속도 (reaction rate)가 빨라졌기 때문이다. 0.25Pt-0.25Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 100°C 이하 온도에서 38%의 가장 낮은 NO<sub>x</sub> 저감 성능을 나타냈다. 귀금속 담지량이 가장 많은 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR이 De-NO<sub>x</sub>/CO 성능이 가장 높았고, window 또한 넓게 확대되었으며, 저온으로 이동하는 경향을 나타냈다. De-NO<sub>x</sub>/CO 성능이 높은 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 O<sub>2</sub> 소모율 또한 증가하였고, Pt와 Pd가 담지량이 많기 때문에 유해 가스 저감에 더 많은 양의 O<sub>2</sub>가 소모되었다.

**키워드 :** 수소, 선택적환원촉매, 질소산화물, 일산화탄소, 백금, 팔라듐

**Abstract :** This study is fundamental research for the commercialization of H<sub>2</sub>-SCR and aims to identify the harmful gas reduction characteristics according to the types and amount of main catalyst (Pt, Pd), which play the most important role in H<sub>2</sub>-SCR catalysts. H<sub>2</sub>-SCR with 0.5Pd loaded the support TiO<sub>2</sub> was more active at low temperature than 0.5Pt. The 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR loaded with two types of precious metals showed a NO<sub>x</sub> conversion rate of 22% at a low temperature of 75°C and 46% at 100°C, and the NO<sub>x</sub>/CO reduction performance was improved and the window width was expanded at low temperature. The reason for this is that the reaction rate of adsorption, reaction, and desorption for harmful gases NO<sub>x</sub> and CO has become faster. 0.25Pt-0.25Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR showed the lowest NO<sub>x</sub> reduction performance of 38% at temperatures below 100°C. The 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR, which contained the largest loading amount of precious metals, had the highest De-NO<sub>x</sub>/CO performance, its window was also widened, and it showed a tendency to move to low temperatures. The 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR with high De-NO<sub>x</sub>/CO performance also increased the O<sub>2</sub> consumption ratio. Since the amount of Pt and Pd was large, a greater amount of O<sub>2</sub> was consumed to reduce harmful gases.

**Key Words :** Hydrogen, Selective Catalytic Reduction, NO<sub>x</sub>, Carbon Monoxide, Platinum, Paradium

\*† 서충길(<https://orcid.org/0000-0003-2205-2111>) : 교수, 호원대학교 자동차기계공학과  
E-mail : ckseo@howon.ac.kr, Tel : 063-450-7215

\*† Choong-Kil Seo(<https://orcid.org/0000-0003-2205-2111>) : Professor, Department of Automotive & Mechanical Engineering, Howon University.  
E-mail : ckseo@howon.ac.kr, Tel : 063-450-7215

## 1. 서 론

최근에 지구온난화를 넘어 보일링, 지구열대화라는 표현까지 나오면서 전 세계는 폭염 대책 마련에 분주한다. 화석에너지원의 사용 비중이 높기 때문에 이산화탄소 배출량이 많고, 지구열대화가 가속화되고 있다. 이로 인하여 배출된 가스가 인체의 폐해와 대기의 질이 악화되고 있다. 전 세계적으로 탄소 중립 정책이 세계적인 이슈로 급부상하고 있으며,<sup>1)</sup> 각 나라마다 배기가스로 인한 환경오염을 줄이기 위하여 기술혁신 및 보조금 지원 등으로 환경문제 개선을 위해 노력하고 있다. 그 대책의 일환으로 전기차, 수소차 등 친환경 자동차로 파워트레인의 전환이 진행되고 있다. 그러나 친환경 자동차의 인프라 구축, 비용문제, 화재사고의 안정성 문제점 또한 해결해야 할 과제이다.

국내에서도 동력기계의 90% 이상을 차지하는 내연기관 자동차를 비롯하여 건설기계, 선박, 농기계 및 보일러 등에 대한 배기가스 규제가 더욱더 강화되고 있다. 그리고 2025년도에는 자동차 내연기관의 마지막 규제라 할 수 있는 엄격한 Euro 7 배기규제가 시행될 예정이다. 특히, 질소산화물(NOx)은 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서 정한 발암물질이며, 미세먼지를 유발하는 환경오염 물질이다. 현재까지 질소산화물 저감을 위한 후처리 촉매는 SCR(Selective Catalytic Reduction)이다. 주로 Fe, Cu-SCR 촉매<sup>2)</sup>의 연구 개발과 NH<sub>3</sub>-SCR 촉매의 전이금속 특성 및 조촉매의 영향<sup>3)</sup>에 대한 연구가 진행되어 왔고 상용화되었다. 또한 미래는 청정 에너지원인 수소(H<sub>2</sub>)를 제조하고 활용하는 기술이 각광을 받을 것으로 전망되므로 수소 관련 연구는 매우 중요하다.

수소를 이용하여 유해가스를 저감시키는 SCR 촉매를 H<sub>2</sub>-SCR이라고 한다. 지금까지의 연구 동향은, 환원제 H<sub>2</sub> 이용하여 NOx 저감시키는 연구가 진행되어 왔다. 주로 H<sub>2</sub>-SCR 촉매의 성능 향상을 위해 주촉매(main catalyst), 조촉매(promoter), 지지체(support) 및 반응 메커니즘 등에 관하여 선행 연구가 이루어져 왔다. 특정 H<sub>2</sub>-SCR에 대한 활성 및 선택성을 개선하기 위해 다양한 개질제가

사용되어 왔다. Yokota et al.은 Pt의 산화 효율을 감소시키는 Mo 및 Na의 첨가는, Pt/SiO<sub>2</sub>의 NO 전환 및 N<sub>2</sub> 선택성을 향상시켰다고 보고했다.<sup>4)</sup>

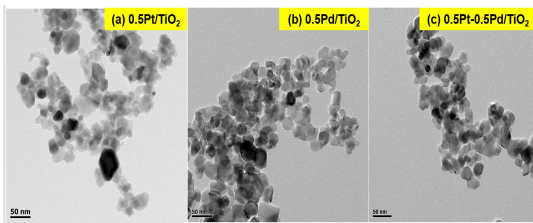
Burch와 Machida는 각각 Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Pt-ZSM-5의 성능에 대한 Na 첨가 효과를 연구했다.<sup>5)</sup> 그러나 Na 첨가 효과는 촉매 지지체의 유형에 따라 크게 달라졌다. Kureti et al.은 Pt/ZrO<sub>2</sub>에 텅스텐을 포함하면 Pt의 전자 밀도가 증가하여 H<sub>2</sub>-SCR 촉매가 활성화된다고 주장했다.<sup>6)</sup> Ti 종의 첨가는 또한 백금의 존재 상태와 분산을 변화시킴으로써 H<sub>2</sub>-SCR에서 Pt/Si-MCM-41의 활성과 선택성을 향상시켰다.<sup>7)</sup> H<sub>2</sub>-SCR의 지지체에 대한 연구도 진행되었다. G. J. kim et al.은 H<sub>2</sub>-SCR의 지지체 TiO<sub>2</sub>를 사용할 때, Pt 원자가 상태 연구와 NOx 저감 성능을 향상시켰다.<sup>8)</sup> 그리고 비표면적이 큰 zeolite 계열의 지지체를 이용하여 NOx 저감 성능과 내화성을 강화시켰다. 연구자의 선행연구는 Pt/TiO<sub>2</sub> 기반 H<sub>2</sub>-SCR 촉매의 NOx와 CO 유해 가스 동시 저감을 위해 연구해 왔으며,<sup>9)</sup> 촉매의 상용화를 위하여 유해 가스 저감 성능 향상 연구에 관심이 많다. 지금까지 두 종류(Pt+Pd) 귀금속이 동시에 담지되어 발표된 H<sub>2</sub>-SCR의 연구 결과는 전무하며, 귀금속 종류와 담지량에 대한 연구는 차별적이고 의의가 있다고 판단한다.

이 연구는 H<sub>2</sub>-SCR의 가장 중요한 역할을 담당하는 주촉매(Pt, Pd) 종류와 담지량에 따른 유해가스 저감 특성을 파악하는 것이다.

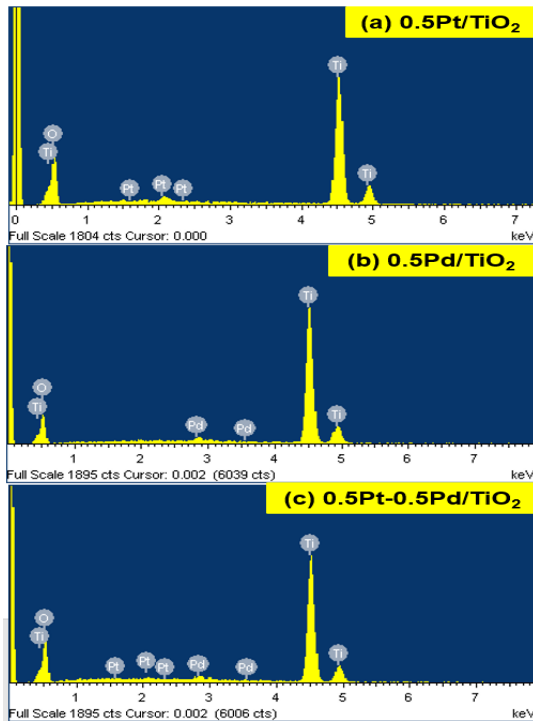
## 2. 촉매 특성 및 실험 방법

제조된 H<sub>2</sub>-SCR은 함침법(impregnation method)으로 제조되었다. 함침법은 지지체를 활성물질이 녹아있는 용액에 담근 후 용매를 증발시켜 활성 물질을 지지체에 담지하는 방법이다. H<sub>2</sub>-SCR은 400CPSI(Cell Per Square Inch) 담체(substrate)에 198 g/L을 코팅하였다. 500℃에서 3시간 동안 공기로 소성하였고, H<sub>2</sub> 5%, 400℃에서 1시간 환원(reduction) 처리하였다. Fig. 1은 H<sub>2</sub>-SCR의 담지된 귀금속 종류에 따른 TEM 및 SEM-EDX 분석 자료이다. 촉매의 2차원 표면 분석은 주사전자현미

경인 SEM(JSM-7500F+EDS, Oxford) 분석기를 이용하였다. H<sub>2</sub>-SCR의 물질의 형상과 사이즈를 분석하기 위해 TEM(JEM-2000FX II (200kV), JEOL)을 이용하였다. Fig. 1(b)의 SEM-EDX 분석 자료에서 주 촉매 Pt와 Pd 귀금속 물질이 H<sub>2</sub>-SCR에 잘 담지되어 있다. Fig. 2는 H<sub>2</sub>-SCR의 귀금속 종류에 따른 촉매 소성(calcination) 후 제조된 촉매 파우더와 담체(substrate)에 코팅된 이미지이다. 귀금속 물질에 따라 색깔(회색, 황토색, 짙은 황토색)이 상이하며, 이는 물질의 결정 구조가 다르기 때문이다.



(a) TEM



(b) SEM-EDX

Fig. 1 TEM and SEM-EDX spectra according to the types of precious metals H<sub>2</sub>-SCR



Fig. 2 Image of catalyst powder and coated catalyst after calcination of H<sub>2</sub>-SCR

Fig. 3은 3종의 H<sub>2</sub>-SCR의 H<sub>2</sub>-TPR 피크를 나타내고 있다. 실험 조건은 500°C에서 3시간 동안 공기에서 소성(calcination)한 촉매 파우더에 BEL-CAT(H<sub>2</sub>-TPR) 분석기를 이용하여 H<sub>2</sub> 5%/Ar을 50~1,000°C까지 분당 10°C 상승시켜 거동을 파악하였다. Fig. 3(a) 0.5Pt/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR의 경우 250, 550°C에서 발생된 피크는 Pt<sup>4+</sup>, Pt<sup>2+</sup>가 metallic Pt로 환원되었다고 판단된다. 분석기를 이용하여 PtO의 화합물보다는 metallic Pt가 촉매 활성을 촉진시킬 수 있다. Fig. 3(b) 0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR의 경우, 60°C에서 발생된 음의 피크는 Pd 하이드라이드(hydride)가 분해되는 것이다. 350°C와 460°C 부근에서 존재하는 피크들은 지지체 TiO<sub>2</sub> 세공 안에 존재하는 Pd-oxo 화합물과 Pd cation의 환원에 의한 것이라고 판단한다. Fig. 3(c) 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR의 H<sub>2</sub>-TPR에서 큰 환원 피크는 발생되지 않고 550°C에서 낮은 피크는 Pt<sup>2+</sup>의 metallic Pt로 환원되었다고 판단한다.

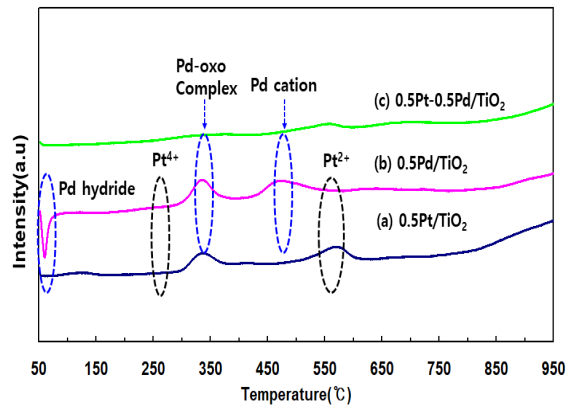


Fig. 3 H<sub>2</sub>-TPR according to the types of precious metals H<sub>2</sub>-SCR

Table 1 Model gas components for evaluation the performance of H<sub>2</sub>-SCR

Gas components	Concentration
NO(ppm)	500
CO(ppm)	700
O <sub>2</sub> (%)	5
H <sub>2</sub> (%)	1
H <sub>2</sub> O(%)	1.5
N <sub>2</sub>	Balance
SV(h <sup>-1</sup> )	28,000

Table 1은 H<sub>2</sub>-SCR의 de-NOx/CO 성능 평가를 위한 모델가스조건이다. H<sub>2</sub>-SCR의 유해 가스 저감성능을 파악하기 위하여 모델가스반응장치를 이용하였다.<sup>9)</sup> 모델가스반응장치는 가스 공급부, 유량 제어부, 촉매 반응부 및 분석부로 구성된다. 촉매온도는 75~350°C 정상상태(steady state) 조건에서 5분을 유지하면서 de-NOx/CO 성능을 측정하였다. 공간 속도(Space Velocity, SV)는 배출가스 유량/촉매 체적을 의미하며, 28,000 h<sup>-1</sup>이다. H<sub>2</sub>-SCR의 유해 가스 정화 성능은 아래 식(1)과 같이 계산하였으며, 촉매 반응 후의 가스성분은 MRU 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 1초 간격으로 정량적으로 측정하였다.

$$\frac{(NOx_{in} - NOx_{out}) \times 100}{(NOx_{in})} \quad (1)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 H<sub>2</sub>-SCR의 Pt와 Pd를 이용한 de-NOx/CO 성능

Fig. 4는 H<sub>2</sub>-SCR의 유해 가스 NOx와 CO의 동시 저감 메커니즘을 나타내고 있다. NO와 CO가 O<sub>2</sub>와 공존하는 분위기에서 CO는 주촉매 Pt에서 CO<sub>2</sub>로 변환된다. NO는 Pt에서 NOx 종으로 산화되며, 환원제 H<sub>2</sub> 분자가 공급되면 분해되어 저장된 NOx 종과 반응하여 NH<sub>3</sub>를 생성시킨다. 중간

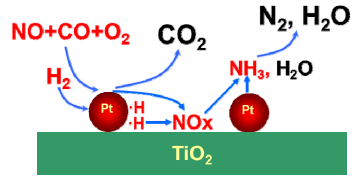
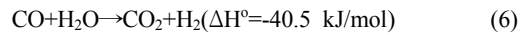
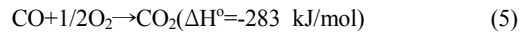
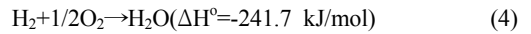
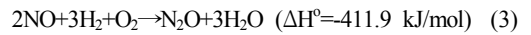
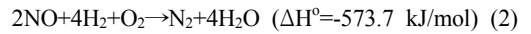


Fig. 4 Mechanism of simultaneous harmful gas reduction of H<sub>2</sub>-SCR



생성물 NH<sub>3</sub>는 NOx의 환원제로서 NH<sub>3</sub>-SCR 환원 반응에 의해 N<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>O로 환원된다. NO와 CO가 저감되는 에너지 변환식은 식 (2)~(6)에 나타내었다. 촉매는 주촉매, 조촉매 및 지지체로 구성되어 있다. 그중 대상으로 하는 물질에 촉매 반응의 선택도가 강한 주촉매(Pt, Pd, Rh, Ag, Cu, Fe, etc)에 따라 성능의 차이가 크므로 주촉매의 역할은 중요하다.

Fig. 5는 귀금속 종류에 따른 유해가스 NO와

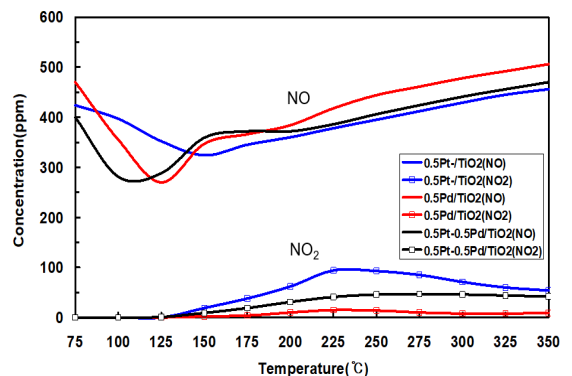
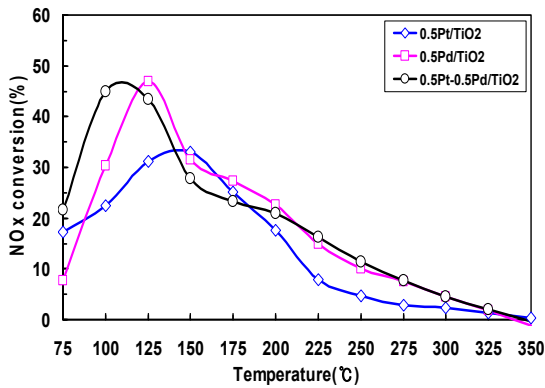


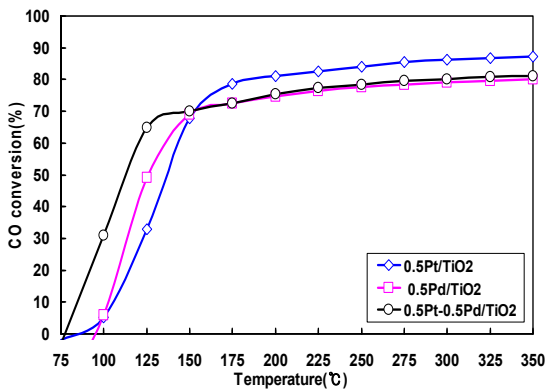
Fig. 5 Behavior of NO and NO<sub>2</sub> gases according to the types of precious metals of H<sub>2</sub>-SCR

NO<sub>2</sub>의 거동을 나타내고 있다. 귀금속 Pt는 NO, CO의 산화에 선택성이 있고, Pd는 HC 가스 중 산화에 선택성이 있다. 0.5Pt/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR의 경우 NO 저감 능력이 낮고, 225℃에서 NO<sub>2</sub> 농도가 가장 높다. 0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 Pt/TiO<sub>2</sub> 촉매보다 NO와 NO<sub>2</sub> 생성 농도가 낮다. 특히 NO<sub>2</sub> 농도가 낮은 특징을 나타내며, 귀금속 Pt보다 환원 능력이 좋다고 판단된다. 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75℃에서 가장 낮은 NO 농도를 나타내며, 저온 활성이 좋다. Pt와 Pd 두 가지 귀금속이 담지됨에 따라 단일 귀금속이 담지된 H<sub>2</sub>-SCR 촉매보다 NO 저감 능력이 좋다.

Fig. 6은 귀금속 종류에 따른 de-NOx/CO 성능을 나타내고 있다. 0.5Pt/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 저온에서



(a) NOx conversion



(b) CO conversion

Fig. 6 De-NOx/CO performance according to the types of precious metals of H<sub>2</sub>-SCR

가장 활성이 낮고, 윈도우 폭 또한 낮다. 0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR는 75℃에서 8%, 125℃에서 약 48%의 NOx 전환율을 나타내고 있다. 두 종류 귀금속이 담지된 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75℃ 저온에서 22%, 100℃에서 46%의 NOx 전환율을 나타내며, 저온에서 NOx 저감 성능 향상과 윈도우 (window) 폭 또한 확대되었다. 두 종류 귀금속 Pt와 Pd 담지에 따른 유해가스 NOx에 대한 흡착과 반응 및 탈착의 반응 속도(reaction rate)가 빨라졌기 때문이다. Fig. 6(b)의 CO 전환율에서 0.5Pt/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 100℃에서 시작해 175℃에서 약 80%의 CO 전환율을 나타내며, 촉매의 유해 가스 저감 성능이 낮다. Pt가 담지된 경우보다 Pd가 담지된 0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 촉매온도 100℃에서 시작해서 150℃까지 0.5Pt/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR 보다 촉매 활성이 향상되었다. 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 100℃에서 31%, 150℃에서 70%의 온도 영역대에서 CO 전환율이 향상되었다.

Fig. 7은 Fig. 5의 귀금속 종류에 따른 NOx와 CO가 저감될 때 얼마나 O<sub>2</sub>가 소모되었는지를 가늠하는 O<sub>2</sub> 소모율을 나타내고 있다. 귀금속 Pt가 담지된 0.5Pt/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR의 경우, 75℃에서 약 2.8% 수준의 O<sub>2</sub>가 소모율을 나타내고 있다. 75℃ 이상에서 Pd가 담지된 0.5Pd/TiO<sub>2</sub>의 O<sub>2</sub> 소모율이 증가하고 있다. O<sub>2</sub> 소모율이 증가할수록 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 de-NOx/CO 성능이 향상되는 경

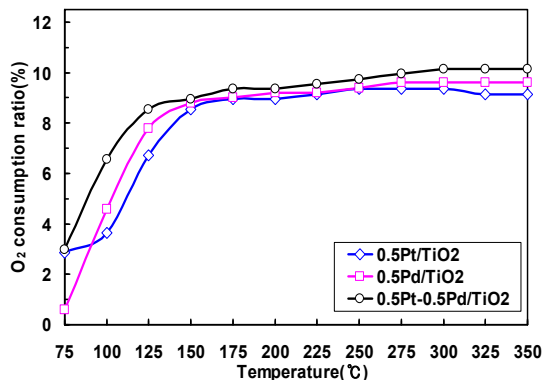


Fig. 7 O<sub>2</sub> consumption ratio according to the types of precious metals of H<sub>2</sub>-SCR

향을 파악할 수 있다. 두 종류의 귀금속이 담지된 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 촉매 온도 전체영역에서 약 3%~10%의 가장 높은 O<sub>2</sub> 소모율을 나타내고 있다. 이는 두 가지 귀금속 Pt와 Pd가 담지되는 경우 화학반응의 활성사이트가 넓어짐에 따라 유해가스 저감 성능 향상에 조금 더 많은 산소 소모량이 증가하였기 때문이다. 적정량의 O<sub>2</sub>는 촉매 활성화에 중요한 요소가 된다.

### 3.2 H<sub>2</sub>-SCR의 귀금속 Pt와 Pd의 담지량에 따른 de-NOx/CO 성능

전 절에서는 두 가지 귀금속이 담지된 H<sub>2</sub>-SCR 촉매의 de-NOx/CO 성능이 향상됨을 파악하였고, 이를 토대로 귀금속 담지량(0.25, 0.5, 0.75wt%)이 NOx와 CO 저감 성능에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

Fig. 8은 귀금속 담지량에 따른 유해가스 NO와 NO<sub>2</sub>의 거동을 나타내고 있다. 귀금속 담지량이 가장 낮은 0.25Pt-0.25Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR의 경우, 촉매온도 125℃에서 NO는 298 ppm으로 가장 농도가 낮고, NO<sub>2</sub>는 250℃에서 46 ppm으로 가장 높은 거동을 나타내고 있다. 일산화질소(Nitrogen Monoxide, NO)는 화학적으로 안정된 물질로서 이산화질소(Nitrogen Dioxide, NO<sub>2</sub>)보다 저감하기 어렵다. 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75℃에서 NO는 422 ppm, 100℃에서 281 ppm 농도를 나타내며, 125℃ 이상에서는 NO 저감 능력이 저하되고 있다. 귀금속 담지량이 가장 많은 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75℃에서 NO는 383 ppm, 100℃에서 219 ppm 농도를 나타내며, 125℃ 이상에서도 다른 H<sub>2</sub>-SCR보다 NO 저감 능력이 향상되고, window가 넓게 확대되고 있다. 이 이유는 유해가스 NO와 CO 가스에 대한 촉매의 활성 사이트(active site)가 증가하였기 때문이다.

Fig. 9는 귀금속 Pt와 Pd의 담지량에 따른 de-NOx/CO 성능을 나타내고 있다. 0.25Pt-0.25Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 촉매 온도 75℃에서 약 15%, 125℃에서 약 42%의 NOx 저감 성능을 나타내고 있다. 귀금속 담지량이 작기 때문에 이로 인한 유해 가스와 반응하는 귀금속의 활성 사이트

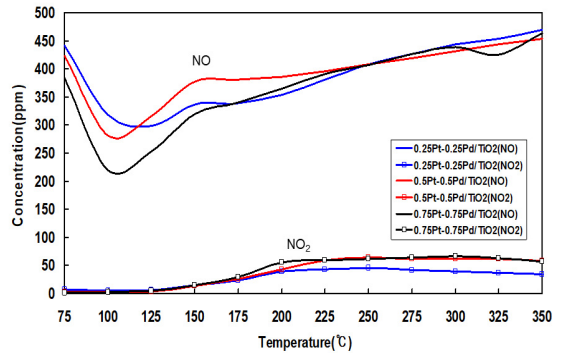
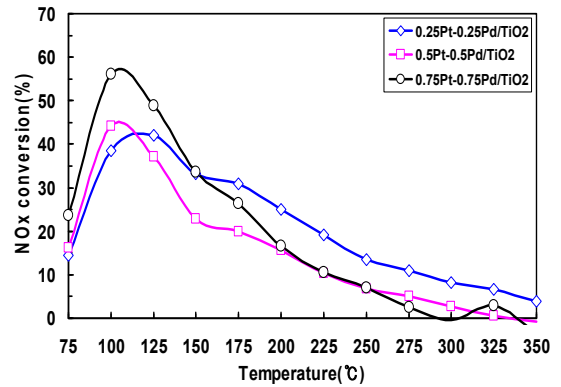


Fig. 8 Behaviour of NO and NO<sub>2</sub> gases according to the types of precious metals of H<sub>2</sub>-SCR



(a) NOx conversion

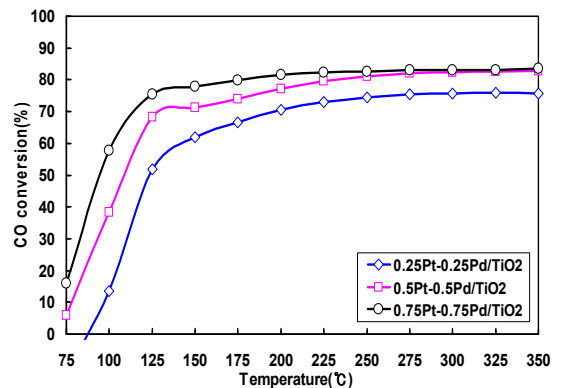


Fig. 9 De-NOx/CO performance according to the loading amount of precious metals of H<sub>2</sub>-SCR

가 작기 때문이라고 판단된다.

0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 촉매 온도 75℃에



서 약 16%, 100℃에서 약 44%의 NO<sub>x</sub> 저감 성능을 나타내고 있다. 귀금속 담지량 가장 많은 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 촉매 온도 75℃에서 약 24%, 100℃에서 약 56%의 가장 NO<sub>x</sub> 저감 성능을 나타내고 있으며, 150℃ 이하 온도에서 가장 높은 NO<sub>x</sub> 저감 성능이 나타났다. 전반적으로 NO<sub>x</sub> 전환율의 window가 저온 쪽 좌측으로 이동(shift)되며, 귀금속 담지량이 작을수록 window가 우측으로 이동하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9(b)의 CO 전환율에서 0.25Pt-0.25Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 100℃에서 약 13%, 350℃에서 약 76%의 가장 낮은 CO 전환율을 나타내고 있으며, 3가지 조건의 H<sub>2</sub>-SCR 촉매 중에서 가장 낮은 CO 저감 성능을 나타내고 있다. 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75℃에서 약 6%, 350℃에서 약 83%의 CO 전환율을 나타내고 있으며, CO 전환율 성능과 window가 높고 넓게 향상되었다. 귀금속 함량이 가장 많은 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 촉매 온도 75℃에서 약 16%, 350℃에서 약 84%의 가장 높은 CO 저감 성능을 나타내고 있으며, window 또한 가장 넓게 확대되고 되었다. 귀금속 담지량이 가장 많은 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR이 de-NO<sub>x</sub>/CO 성능이 가장 우수하고, window 또한 넓게 확대되며 저온으로 이동하는 경향을 나타내고 있다. 그 이유는 Pt와 Pd의 활성 사이트가 증

가하였고 촉매의 반응속도가 빨라졌기 때문이다.

Fig. 10은 귀금속 담지량에 따른 O<sub>2</sub> 소모율을 나타내고 있다. 0.25Pt-0.25Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR의 경우 75℃에서 1.8%, 350℃에서 9.9%의 O<sub>2</sub>가 소모율을 나타내고 있다. 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75℃에서 2.4%, 350℃에서 10.7%의 O<sub>2</sub>가 소모율을 나타내며 조금 더 O<sub>2</sub> 소모율이 증가하고 있다. 귀금속 담지량이 많은 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75℃에서 3.5%, 350℃에서 10.9%의 가장 높은 O<sub>2</sub> 소모율을 나타내고 있다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 de-NO<sub>x</sub>/CO 성능이 가장 좋은 이유는, Pt와 Pd가 담지량이 많음으로 인해 유해 가스 저감을 위해 더 많은 양의 O<sub>2</sub>가 소모되었기 때문이다. 그러나 선행 연구<sup>10)</sup>를 살펴볼 때 너무 많은 귀금속이 담지되면 오히려 귀금속 분산도를 저하시켜 촉매의 활성을 저하시킬 수 있으므로, 0.75wt% 이상의 담지량을 실험 조건으로 하지 않았다. 귀금속 담지량의 최적화 연구가 향후에 진행될 것이다.

#### 4. 결 론

이 연구는 수소 엔진 및 보일러에서 배출되는 유해 가스 저감용 H<sub>2</sub>-SCR의 실용화를 위한 기초 연구이다. H<sub>2</sub>-SCR에 귀금속 Pt와 Pd가 담지되었을 때와 0.25, 0.5, 0.7wt%의 3가지 담지량 조건에 따른 유해 가스 저감 특성을 파악한 결과는 다음과 같다.

- 1) 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75℃ 저온에서 22%, 100℃에서 46%의 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타냈고, 저온에서 NO<sub>x</sub>/CO 저감 성능 향상과 윈도우 폭이 확대되었다.
- 2) 0.5Pt-0.5Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 촉매 온도 전체 영역에서 약 3%~10%의 가장 높은 O<sub>2</sub> 소모율을 나타냈고, Pt와 Pd가 더 많은 유해 가스를 저감시키기 위해서 O<sub>2</sub>가 더 많이 요구되었다.
- 3) 귀금속 담지량이 가장 많은 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR이 De-NO<sub>x</sub>/CO 성능이 가장 높았고, window 또한 넓게 확대되었으며, CO 저감 성능 또한 175℃ 이하 온도에서는 다른 촉매보다 약 5~20% 높았다. Pt와 Pd의 활성 사이트가 증가하였

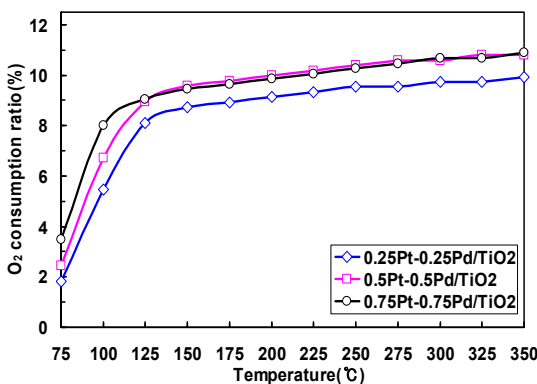


Fig. 10 O<sub>2</sub> consumption ratio according to the loading amount of precious metals of H<sub>2</sub>-SCR

고, 촉매의 반응속도가 빨라졌다.

4) 귀금속 담지량이 많은 0.75Pt-0.75Pd/TiO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75°C에서 3.5%, 350°C에서 10.9%의 가장 높은 O<sub>2</sub> 소모율을 나타냈고, 이는 Pt와 Pd 주 촉매의 활성사이트가 많아져서 NO<sub>x</sub>와 CO 저감에 기여했기 때문이다.

## Author contributions

C. K. Seo; Conceptualization. Data curation. Investigation. Project administration. Writing-original draft. Writing-review & editing.

## References

1. KIEP, 2021, "International community's carbon neutral policy direction and implications" World Economy Today, 21(1).
2. C. K. Seo and K. S. Lee, 2021, "Characteristics of Exhaust Emissions Conversion of Commercial Cu-and Fe-SCR Catalysts", International Journal of Automotive Technology, 21(6), 1401-1408. (<https://doi.org/10.1007/s12239-020-0132-6>)
3. X. Zhang, X. Zhang, X. Yang, Y. Chen, X. Hu and X. Wu, 2021, "CeMn/TiO<sub>2</sub> Catalysts prepared by different methods for enhanced low-temperature NH<sub>3</sub>-SCR catalytic performance" Chemical Engineering Science, 238, 116588. (<https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116588>)
4. K. Yokota, M. Fukui and T. Tanaka, 1997, "Catalytic removal of Nitric Oxide with Hydrogen and Carbon Monoxide in the presence of Excess Oxygen", Applied Surface Science, 121-122(2), 273-277. ([https://doi.org/10.1016/50169-4332\(97\)00305-X](https://doi.org/10.1016/50169-4332(97)00305-X))
5. R. Burch and M. D. Coleman, 2002, "An Investigation of Promoter Effects in the Reduction of NO by H<sub>2</sub> under Lean-Burn Conditions", Journal of Catalysis, 208(2), 435-447. (<https://doi.org/10.1006/jact.2002.3596>)
6. F. J. P. Schott, P. Balle, J. Adler and S. Kureti, 2009, "Reduction of NO<sub>x</sub> by H<sub>2</sub> on Pt/WO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> catalyst in oxygen-rich exhaust", Applied Catalysis B: Environmental 87(1-2), 18-29. (<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.08.021>)
7. L. Li, P. Wu, Q. Yu, G. Wu and N. Guan, 2010, "Low Temperature H<sub>2</sub>-SCR over Platinum Catalysts supported Ti-containing MCM-41", Applied Catalysis B: Environmental, 94(3-4), 254-262. (<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.11.016>)
8. G. J. Kim, J. H. Shin, S. B. Kim and S. C. Hong, 2023, "The role of Pt valence state and La doping on titanium supported Pt-La/TiO<sub>2</sub> catalyst for selective catalytic reduction with H<sub>2</sub>", Applied Surface Science, 608, 155040. (<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155040>)
9. C. K. Seo, 2021, "Characteristics of Harmful Gases of H<sub>2</sub>-SCR Catalyst for Domestic and Industrial Boilers", Journal of Power System Engineering, 25(4), 62-68. (<https://doi.org/10.9726/kpspe.2021.25.4.062>)