

# 수소-선택적인환원촉매의 산화물 지지체에 지르코니아 첨가가 유해 가스 저감에 미치는 영향

서충길  
호원대학교 자동차기계공학과  
e-mail:ckseo@howon.ac.kr

## Effect of ZrO<sub>2</sub> Addition to Oxide Supports of H<sub>2</sub>-SCR on Harmful Gas Reduction

Choong-Kil Seo  
Dept. of Automotive & Mechanical Engineering, Howon University

지구온난화로 인한 이상기후 발생과 생태계에 초래되는 문제점이 증폭되고 있으며, 내연기관용 화석연료 대신 그린에너지로의 전환을 가속화시키고 있으며, 그 중 전기자동차 및 연료전지전기자동차로의 변화 속도가 빠르다. 이 연구는 H<sub>2</sub>-SCR의 상용화를 위하여 산화물 지지체에 조촉매 ZrO<sub>2</sub> 담지량에 따른 유해 가스 저감 성능을 파악하는 것이다. ZrO<sub>2</sub> 담지량에 따른 H<sub>2</sub>-SCR 촉매의 물리·화학적 특성은 SEM-EDX, BET 비표면적, H<sub>2</sub>-TPR, XPS 분석 및 NO<sub>x</sub>/CO 저감 성능을 통하여 파악하였다. ZrO<sub>2</sub>가 5wt%가 첨가된 (1) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75°C에서 약 21%, 125°C에서 약 55%의 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타냈고, 온도가 상승하더라도 ZrO<sub>2</sub>가 첨가되지 않은 (4) 0.75Pt-9.25MgO/CeO<sub>2</sub>(STD) H<sub>2</sub>-SCR 촉매보다 약 4~7% 수준의 NO<sub>x</sub> 전환율이 증가하였다. 그러나 과도하게 담지된 (3) 0.75Pt-9.25MgO-50ZrO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR의 NO<sub>x</sub> 전환율은, 75~350°C까지 약 10~25% 낮았다. 적절하게 산화물 지지체에 담지된 ZrO<sub>2</sub>는 산점 조절로 인한 흡착의 세기를 적절히 조절하여 반응 속도(reaction rate) 향상시켜, 유해 가스 저감 성능을 향상시켰다.

### 1. 서론

최근에 폭우, 폭설, 폭염, 한파, 가뭄과 같은 이상 기후 현상이 빈번해지고 있다. 아직까지도 에너지 의존도가 높은 화석 연료에서 배출되는 온실 가스가 주요 원인 일 것이다. 또한, 배출 가스는 인체에 해로운 뿐만 아니라 미세 먼지 등 대기 질을 악화시키고 있다. 현재 전 세계 에너지 구조에서 가장 큰 비중을 여전히 화석연료(석유·석탄·가스)이며, 전체 1차 에너지 소비의 약 82%를 차지하고 있다<sup>1)</sup>. 현재 동력 발생원은 주로 내연기관이 차지하고 있으며, 댓수가 많은 자동차는 전기차(EV)와 수소연료전지차(FCEV)로 파워트레인 전환이 진행 중이다. 내연기관은 국내외 자동차 시장에서 여전히 큰 비중을 차지하고 있다. 이에 따라 건설 기계, 선박, 농기계, 보일러 및 오토바이에 이르기까지 점차 배기가스 규제는 더욱 더 엄격하게 강화되고 있다. 내연기관은 높은 연소 온도에서 발암 물질인 질소산화물(NO<sub>x</sub>)이 배출되며, NO<sub>x</sub> 저감을 위해 가장 널리 사용되는 후처리 촉매시스템은 SCR(Selective Catalytic Reduction) 이다.

최근에는 지구 온난화의 주요 원인인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 배출하지 않는 청정 에너지원인 수소(hydrogen)의 제조, 생산, 운송 및 활용에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 그중에서도 H<sub>2</sub>-SCR<sup>2)</sup>은 배기가스 온도가 낮은 가정용 보일러(한국 규제)와 곧 상용화될 H<sub>2</sub>-엔진에서 발생하는 유해 가스를 저감시키기 위한 후처리 촉매 시스템으로서 향후 활용 가능성이 매우 높다. 지금까지의 H<sub>2</sub>-SCR의 연구 개발 동향은 주촉매 특성, 조촉매

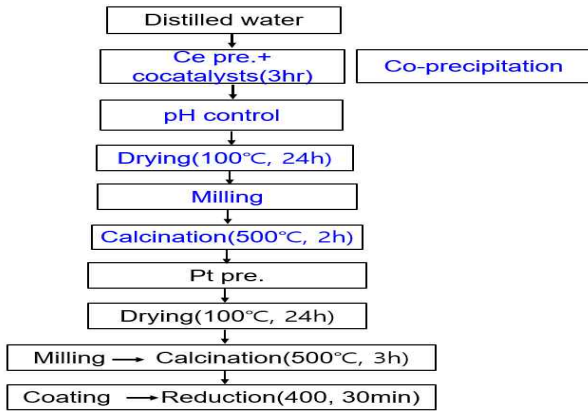
(promoter) 영향, 지지체 특성, 촉매 제조 방법 및 반응 메커니즘 등에 관하여 연구를 진행해왔다. 저자의 선행 연구는 H<sub>2</sub>-SCR의 NO<sub>x</sub>와 CO 유해 가스 저감 성능 향상을 위하여 촉매 물질 영향, 조촉매 영향, 제조 방법 및 후처리 복합 시스템 등에 관하여 연구를 진행해 왔다.

이번 연구는 알칼리 계열 지르코니아(ZrO<sub>2</sub>)가 산화물 지지체에 첨가되었을 때, H<sub>2</sub>-SCR의 유해 가스 저감 성능에 미치는 영향을 파악하는 것이다.

### 2. 실험 방법

Fig. 1은 H<sub>2</sub>-SCR의 공침법의 제조 공정도를 나타내고 있다. 주 지지체 Ce 전구체(Sigma-Aldrich, Cerium(III) nitrate hexahydrate)에 10wt% 이하로 조촉매를 담지하였다. 조촉매는 MgO (Sigma-Aldrich, Magnesium oxide), ZrO<sub>2</sub>(Sigma-Aldrich, Zirconium nitrate hydrate)를 사용하여 동시에 공침하였고, 촉매 물질간의 계면활성을 위하여 pH 8.0으로 조절한 후 3시간 동안 교반하였다. 건조기 온도를 100°C로 설정 한 후 24시간 건조(Drying) 하였다. 제조 된 분말을 밀링(Milling) 한 후 500°C에서 2시간 소성(Calcination) 하였다. 지지체 화합물(9.25MgO-XZrO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub>)에 0.75wt%의 Pt를 넣고 3시간 함침하였다. 밀링 및 소성을 거쳐 400CPSI(Cell Per Square Inch)의 담체(substrate)에 198g/L을 코팅하였다. 50 0°C에서 3 시간 동안 공기로 소성하였고, 400°C에서 30분 동안

H<sub>2</sub> 5%로 환원(reduction) 처리하였다. H<sub>2</sub>-SCR의 NO<sub>x</sub>와 CO의 유해가스 성능을 파악을 위한 모델가스반응조건을 Table 1에 나타내었다. 가스 구성은 수 천ppm의 NO<sub>x</sub>를 배출하는 H<sub>2</sub>-엔진 및 200ppm 이하의 CO를 배출하는 가정용 보일러에서 배출되는 가스(한국 규제)를 고려하였다. 촉매 전단 온도는 75~350°C 정상 상태 조건을 유지하면서 유해 가스 저감 성능을 파악하였다. 분석기로는 MRU 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 1초 간격으로 정량·정성적으로 측정하였다.



[그림 1] H<sub>2</sub>-SCR의 제조 공정

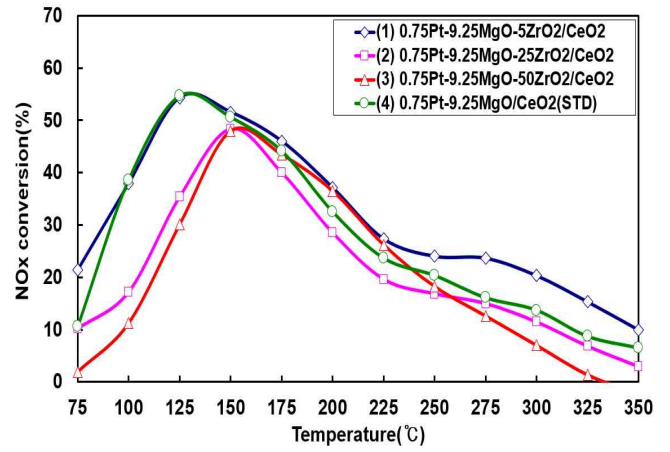
[표 1] H<sub>2</sub>-SCR의 성능 평가를 위한 모델가스 반응조건

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

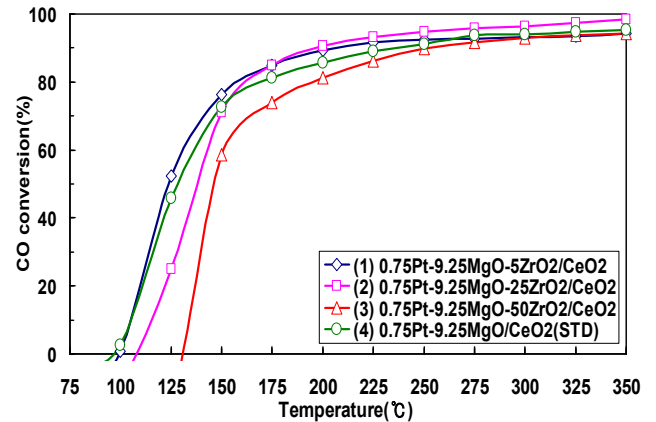
### 3. H<sub>2</sub>-SCR의 ZrO<sub>2</sub> 담지량에 따른 유해 가스 저감 성능

그림 2는 H<sub>2</sub>-SCR의 ZrO<sub>2</sub> 담지량에 따른 유해 가스 저감 성능을 나타내고 있다. (4) 0.75Pt-9.25MgO/CeO<sub>2</sub>(STD) H<sub>2</sub>-SCR은 알칼리 계열 ZrO<sub>2</sub>를 산화물 지지체에 첨가하지 않은 촉매이다. 75°C에서 약 11%, 125°C에서 약 55%의 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타내며 온도가 상승 할수록 환원제 수소(H<sub>2</sub>)의 산화로 인하여 성능은 감소하고 있다. ZrO<sub>2</sub>가 5wt%가 첨가된 (1) 0.75Pt-9.25MgO-5ZrO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 75°C에서 약 21%, 125°C에서 약 55%의 NO<sub>x</sub> 전환율을 나타내며 온도가 상승하더라도 ZrO<sub>2</sub>가 첨가되지 않은 (4) 0.75Pt-9.25MgO/CeO<sub>2</sub>(STD) H<sub>2</sub>-SCR 촉매보다 약 4~7% 수준의 NO<sub>x</sub> 전환율이 증가하였다. 그러나 과도하게 담지된 (3) 0.75Pt-9.25MgO-50ZrO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR의 NO<sub>x</sub> 전환율은, 75~350°C까지 약 10~25%가 낮다. 그림 2(b)의 CO 전환율에서 5wt%가 첨가된 (1)

0.75Pt-9.25MgO-5ZrO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR은 125°C에서 약 52%, 250°C에서 90%의 CO 전환율을 나타내며, 가장 우수한 유해 가스 CO를 저감시키고 있다. 그러나 (3) 0.75Pt-9.25MgO-50ZrO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>-SCR의 CO 전환율은 가장 낮은 정화 성능을 나타내고 있다. 적절하게 산화물 지지체에 담지된 ZrO<sub>2</sub>는 산점 조절로 인한 흡착의 세기를 적절히 조절하여 반응 속도(reaction rate) 향상시켜, 유해 가스 저감 성능을 향상시켰기 때문이다.



(a) NO<sub>x</sub>



(b) CO

[그림 2] H<sub>2</sub>-SCR의 ZrO<sub>2</sub> 담지량에 따른 유해 가스 저감 성능

### 참고문헌

- [1] <https://www.enerdate.co.kr>, Global Energy Trends: Integrated Energy Statistics and World Outlook, 2025년.
- [2] 김성수, “배가스 중 CO가 H<sub>2</sub>-SCR 반응에 미치는 영향 연구”, Appl. Chem. Eng., 제21권 4호, pp. 391-395, 8월, 2010년.