

촉매 담체 CPSI에 따른 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능 Harmful Gas Reduction Performance of H₂-SCR according to Catalyst Substrate CPSI

서충길* †
Choong-Kil Seo* †

(Received 06 January 2026, Revision received 13 February 2026, Accepted 13 February 2026)

초록 : 이 논문은 H₂-SCR를 공침법으로 제조하여, 담체 CPSI에 따른 Fresh/열적 열화 조건에서 유해 가스 저감 성능을 파악하는 것이다. CPSI가 다른 3종류의 담체 및 H₂-SCR 촉매 파우더의 물리 및 화학적 특성은 SEM-EDX, TEM, BET 비표면적, H₂-TPR 분석 및 NO_x/CO 저감 성능을 통하여 파악하였다. 담체 600과 900 CPSI의 H₂-SCR(Fresh)은 동일한 NO_x 전환율 성능을 나타냈고, 담체 600 CPSI의 H₂-SCR 촉매가 100°C 온도에서 NO_x/CO 저감 성능이 약 3-23% 향상되었다. 이는 담체 CPSI가 클수록 촉매 반응 면적이 증가하기 때문에 NO_x 전환율이 향상되었다. CPSI가 다른 3종류 담체의 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능(aged)은, 담체 600 CPSI의 H₂-SCR 촉매가 100°C 온도에서 4-12%의 가장 높은 NO_x 저감 성능이 향상되었고, 열화에 대한 내구성도 양호하였다. 향후 초박막 담체의 유해 가스 성능 향상과 배압 감소를 위하여 연구할 계획이다.

키워드 : 수소, 선택적인환원촉매, 질소산화물, 일산화탄소, 담체, 셀 밀도

Abstract : This paper aims to prepare H₂-SCR via co-precipitation and evaluate its harmful gas reduction performance under Fresh/thermal aging conditions according to the CPSI of the support. The physical and chemical properties of three types of substrate with different CPSI and H₂-SCR catalyst powders were determined through SEM-EDX, TEM, BET specific surface area, H₂-TPR analysis, and NO_x/CO reduction performance. H₂-SCR (Fresh) with 600 and 900 CPSI supports showed similar NO_x conversion performance, and the H₂-SCR catalyst with a 600 CPSI support exhibited about 3-23% improved NO_x/CO reduction performance at 100°C. This improvement is because the larger CPSI of the support increases the catalyst reaction surface area, enhancing NO_x conversion. Among three different CPSI substrates, the H₂-SCR catalyst with a 600 CPSI substrate showed the highest NO_x reduction performance, improving by 4-12% at 100°C, and also demonstrated good durability against aging. Future work will focus on the development of ultra-thin wall substrates to further enhance harmful gas reduction performance while minimizing backpressure.

Key Words : Hydrogen, Selective Catalytic Reduction, NO_x, CO, Substrate, Cell (Cell Per Square Inch)

* † 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

전 세계가 지구온난화로 인한 이상 기후가 발현하고 있으며, 화석연료 사용으로 배출되는 배출물이 가장 큰 요인이라고 할 수 있다. 전 세계 패권국인 미국은 작년에 두 번째 파리협정을 탈퇴하였고, EU 또한 2035년까지 내연기관 퇴출 방침을 삭제하였다. 국제적으로 기후·에너지·환경에 대한 관심은 크지만, 정책적으로 혼선이 발생하고 있다. 국내의 경우, 내연기관 자동차의 비중은 약 89% 수준이며, 자동차, 건설기계, 선박, 농기계, 이륜자동차 및 보일러 등에 대한 배기가스 규제가 엄격하게 강화되고 있다. 특히, 내연기관의 고온에서 생성되는 질소산화물(NOx)은 유독성 물질로서, WHO에서 정한 발암물질로 강력하게 규제하고 있다. 이를 저감시키는 후처리 촉매시스템은 SCR(Selective Catalytic Reduction)^{1,2)}이 다용되고 있다. NOx를 저감시키는 환원제 종류에 따라 Urea-SCR, HC-SCR 및 H₂-SCR³⁾ 등이 있다.

최근에 CO₂ 배출이 전혀 없는 H₂-엔진이 탑재된 자동차가 출시되었고, 실증을 통하여 향후 2027~2028년경에는 상용화가 본격화될 전망이다.

상용차, 중장비, 발전기, 선박 등에 적용이 가능하며, 기존 엔진 기술 활용이 가능한 장점이 있지만 NO_x 저감 및 수소 인프라 구축은 해결해야 할 문제이다. H₂-SCR은 상용화될 H₂-엔진용 후처리 촉매용이나 가장 대수가 많은 가정용 보일러용 후처리 촉매로 활용이 가능하다. 이에 관한 기초 연구는 중요하며 유해 가스 저감 성능 향상, 내구성 확보와 후처리 촉매의 경제성 확보는 연구개발의 중요한 방향이다. H₂-SCR에 대한 선행 연구는 촉매의 성능 향상을 위해 촉매 물질(catalyst material)^{4,5)} 안정제(promoter)^{6,7)} 지지체(support)⁸⁾ 및 반응 메커니즘⁹⁾ 등에 관하여 연구가 이루어져 왔다. 저자는 H₂-SCR의 촉매 물질의 영향 및 제조 방법 등에 관한 연구를 진행해 왔다. 물질이 담지되는 담체(substrate)의 격자 구조 밀도를 나타내는 지표인, 즉 1제곱인치 면적 안에 몇 개의 셀이 존재하는지 CPSI(Cell Per Square Inch)는 배출가스 정화 성능과 압력 손실에 직접적인 영향을 미친다.

촉매 담체에 관한 선행연구가 진행되어 왔다. 담체구조해석,^{10,11)} CPSI와 셀구조 최적화,¹²⁾ 초박막·세라믹 담체연구,¹³⁾ 담체의 재질¹⁴⁾ 등에 관한 연구가 진행되어 왔다. 또한 H₂-SCR 촉매용 CPSI에 대한 연구가 일부 진행되어 왔지만,¹⁵⁾ 공침법을 이용한 제조법 적용 및 열적 열화에 대한 연구는 미진하며, 이 연구는 차별성이 있다. CPSI는 따른 연구는 촉매 유해 가스 저감 성능과 지나치게 높은 CPSI는 배압 증가를 유발하여 자동차 연비에 미치는 영향을 주므로 촉매 설계 시 중요한 인자이다. 이 연구는 H₂-SCR의 상용화를 위한 기초 연구로 촉매 물질이 코팅되는 담체 CPSI에 따른 유해 가스 저감 성능을 파악하고자 한다.

2. 촉매 제조 및 실험 방법

Fig. 1은 H₂-SCR의 공침법의 제조 공정도이다. 지지체 Ce 전구체(Sigma-Aldrich, Cerium(III) nitrate hexahydrate)에 9.25MgO(Sigma-Aldrich, Magnesium oxide)을 동시에 공침하였다. pH 8.0으로 조절한 후 3시간 동안 교반하였다. 오븐 온도를 100°C로 설정한 후 24시간 건조(drying)하였다. 제조된 분말을 밀링(milling)한 후 500°C에서 2시간 소성하였다. 공침으로 제조된 지지체 화합물 (CeO₂-MgO)에 0.75wt%의 Pt를 넣고 3시간 함침하였다. 밀링 및 소성을 거쳐 400, 600, 900 CPSI(Cell Per Square

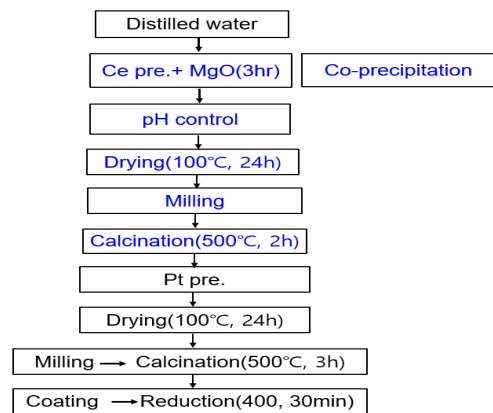


Fig. 1 Catalyst manufacturing process diagram of Co-precipitation of H₂-SCR

Inch)의 3가지 담체(substrate)에 198 g/L을 코팅하였다. 500°C에서 3 hr 동안 공기로 소성(calcination)하였고, 400°C에서 30 min 동안 H₂ 5%로 환원(reduction) 처리하였다.

Fig. 2는 H₂-SCR의 촉매 파우더와 CPSI에 따른 담체 3종류를 보여 주고 있다. 담체는 19×20 mm (직경×길이)로 체적은 5.66 cc이다. Fig. 3은 3종류의 담체를 작은 사이즈로 밀링한 후 분석한 이미지이며, Table 1은 SEM-EDX((JSM-7500F+EDS, Oxford) 분석으로 확보한 원소를 나타내고 있다. 3종류의 담체에서 Si, Al, Mg, O 원소가 검출되었고, Si, Al, Mg가 결합된 산화물로 되어 있다.

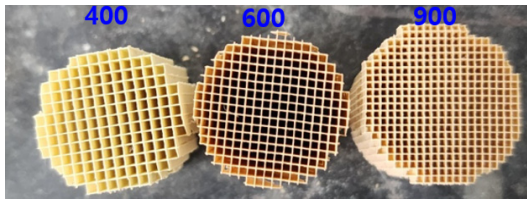
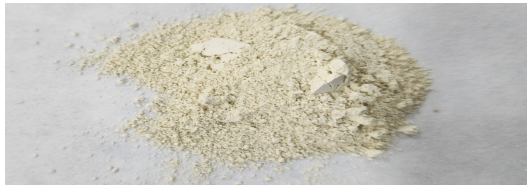


Fig. 2 Photo of catalyst powder and substrate

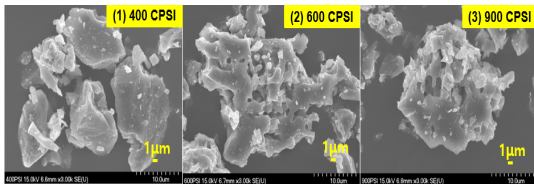


Fig. 3 SEM image of substrate

Table 1 Elements analysis according to the CPSI substrate

Elements(wt. %)	400 CPSI	600 CPSI	900 CPSI
O	47.61	47.86	46.86
Mg	8.32	8.10	8.19
Al	18.17	18.09	18.71
Si	25.89	26.26	26.23
Totals	100	100	100

Table 2 Model gas components for evaluation the performance of H₂-SCR

Gas components	Concentration
NO (ppm)	500
CO (ppm)	700
O ₂ (%)	5
H ₂ (%)	1
H ₂ O (%)	1.5
N ₂	Balance
SV (h ⁻¹)	28,000

H₂-SCR의 NO_x와 CO의 전환율을 파악을 위한 모델가스반응조건을 Table 2에 나타내었다. 가스 구성은 수 천 ppm의 NO_x를 배출하는 H₂-엔진 및 200 ppm 이하의 CO를 배출하는 가정용 보일러에서 배출되는 가스를 고려하였다. 촉매 전단 온도는 75~350°C 정상 상태 조건을 유지하면서 유해 가스 저감 성능을 파악하였다. 촉매의 NO_x와 CO의 전환율은 아래 식 (1)과 같고, 촉매 전단에 들어가는 유해 가스(NO_x, CO) 농도 대비 H₂-SCR 촉매 후단에서 배출되는 유해 가스의 농도로 구한다. 분석기로는 MRU 가스분석기(VarioPlus Industrial, MRU Instruments, Inc.)를 이용하여 실시간으로 정량적으로 측정하였다.

$$\frac{(NO_x/CO_{in} - NO_x/CO_{out}) \times 100}{(NO_x/CO_{in})} \quad (1)$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 H₂-SCR의 촉매 powder의 물리·화학적인 특징

Fig. 4는 3가지 CPSI 담체에 담지된 동일한 0.75Pt-9.25MgO/CeO₂ H₂-SCR의 촉매 파우더의 SEM-EDX 분석 자료이다. 미량의 0.75 wt%의 Pt는 피크가 낮고, 주 지지체 Ce는 4.2~6.2 keV 영역에서 넓고 중간 정도의 피크가 잘 생성되고 있다. 강한 염기성, 높은 열적 안정성, 금속 분산성 및 촉매 피독에 대한 저항성을 제공하는 MgO는 약 1.2 keV에서 Mg 피크가 잘 생성되어 있다.

Fig. 5는 H₂-SCR의 SEM/TEM(JEM-2000FX II

(200 kV), JEOL) 이미지를 나타내고 있다. 주 지지체 CeO_2 는 플루오라이트(fluorite)형 구조로, 입방정계(cubic crystal system)에 속하며, 10~50 nm 급으로 잘 분포되어 있다. 보조 지지체 MgO 는 입방정계 구조에 속하며, 합성 방법과 조건에 따라 크게 달라지며 일반적으로 수 nm 시작해서 사이즈가 다양하다. SEM 이미지에서 약 600 nm 직경

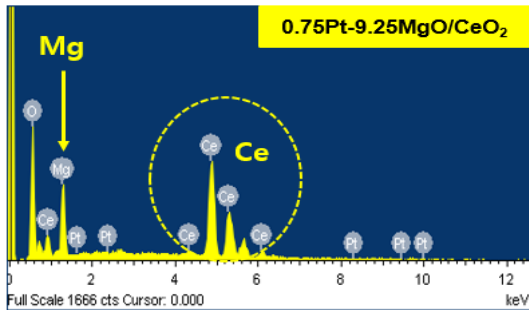
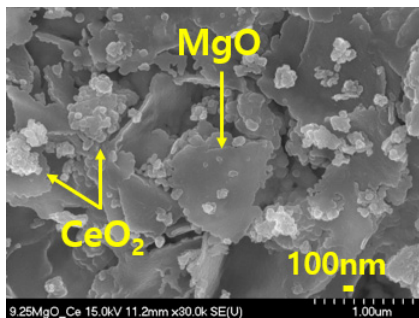
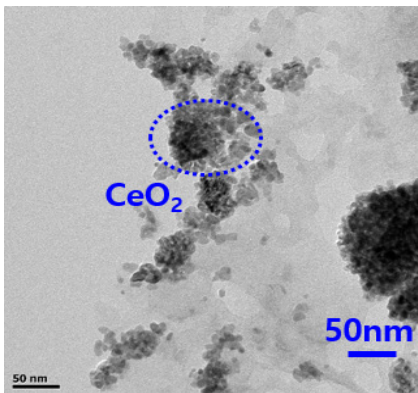


Fig. 4 SEM-EDX of catalyst power of H₂-SCR



(a) SEM



(b) TEM

Fig. 5 SEM/TEM image of H₂-SCR powder

Table 3 Physical specification of H₂-SCR

Catalyst	BET (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size(nm)
0.75Pt-9.25MgO/Ce	60.526	0.0951	6.285

에 얇은 폭의 형상을 나타내고 있다. 작은 사이즈의 입자는 촉매 높은 표면적을 가지고 촉매 활성화에 유리하며, 큰 사이즈의 입자는 내구성과 열적 안정성에 유리한 특징을 가지고 있다.

Table 3은 함침법으로 제조된 H₂-SCR의 BET 비표면적(ASAP 2020, Micromeritics Instruments Corp, USA)의 특성을 나타내고 있다. 이 기기는 미세 다공성(0.35~2 nm) 및 중다공성(2~50 nm) 물질의 기체 흡착 분석에 이상적이다. 질소로 기존의 등온선을 수집할 수 있고, BET 비표면적 및 BJH 기공 크기 분포를 쉽게 판정할 수 있다.

0.75Pt-9.25MgO/CeO₂ H₂-SCR의 BET 비표면적은 60.526 m²/g이며, Pore volume은 0.0951 cm³/g, Pore size는 6.285 nm이다. 물리적으로 BET 비표면적이 크고, pore size는 작고 pore volume이 크면, 촉매가 반응하는 활성사이트(active site)가 많아져 유해 가스 저감 성능의 향상에 유리할 수 있다. 그러나 더욱더 중요한 점은 반응 가스와 촉매 물질 간의 흡착-반응-탈착(adsorption-reaction-desorption)의 전체 화학 반응 속도(reaction rate)가 빨라져야 촉매의 유해 가스 저감 성능이 향상될 수 있다.

Fig. 6은 H₂-SCR의 0.75Pt-9.25MgO/CeO₂ H₂-TPR (Temperature Programmed Reduction, BEL-CAT)을 나타내고 있다. H₂-TPR은 촉매의 환원 특성 분석으로 촉매 물질의 환원 온도 분포와 H₂ 양으로부터 환원 정도를 관찰할 수 있는 분석법이다. 100~350°C에서 생성된 피크는 촉매 제조 과정에서 생성된 주촉매 PtO 산화물에서 Pt⁰로 환원되는 것이다. 약 450°C에서 생성된 피크는 CeO_x (surface)가 Ce_x로 환원되는 피크이다. 약 860°C에서 생성된 피크는 주지지체 CeO₂(bulk)가 Ce^x로 환원되는 것이다. 이는 촉매를 구성하는 물질과 촉매 제조 방법에 따라 물질 간의 결합력이 다르기 때문에 환원 피크 온도가 다르다.

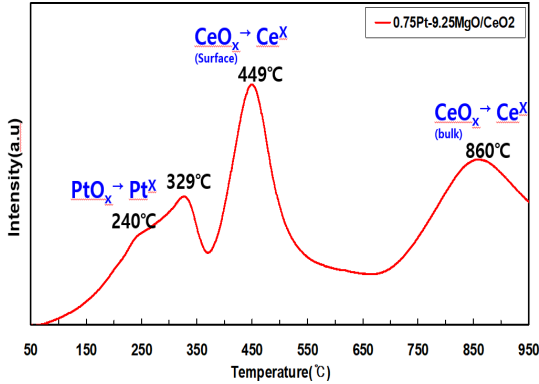


Fig. 6 H₂-TPR profile of 0.75Pt-9.25MgO/CeO₂

3.2 촉매 담체 CPSI에 따른 H₂-SCR의 de-NO_x/CO 성능

소량으로 담지된 백금(Pt)은 O₂가 있는 연소 분위기에서 NO와 CO를 산화시키며, NO는 NO₃⁻ 질산염(nitrate)으로 흡장된 뒤 환원제 H₂가 공급될 때 환원이 된다. 환원제 H₂는 저온에서도 spillover가 되므로 NO_x를 저감시킬 수 있다.

식 (2)~(6)은 유해 가스 NO와 CO의 환원과 산화 반응을 나타내고 있다.

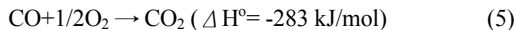
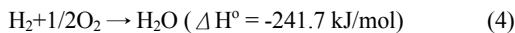
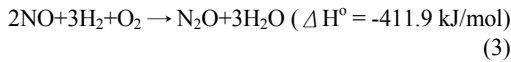
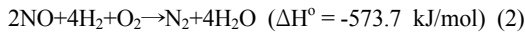
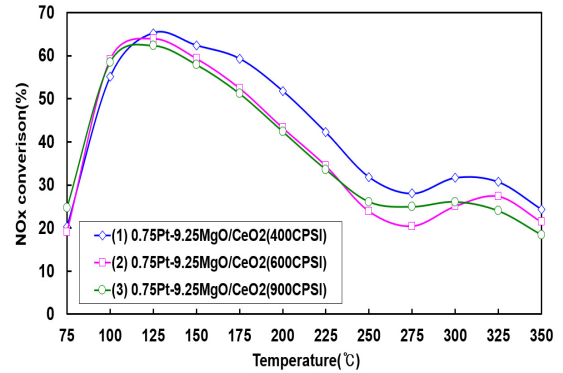
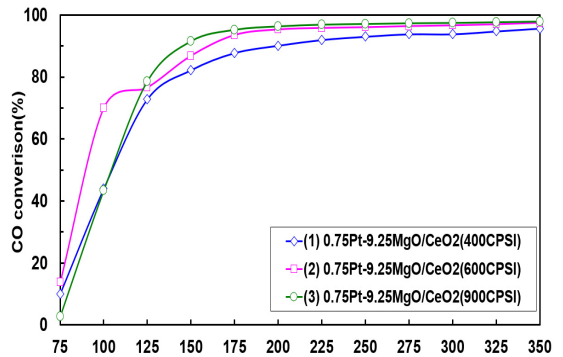


Fig. 7은 촉매 담체의 CPSI에 따른 유해 가스 de-NO_x/CO 성능을 나타내고 있다. 기존 연구에 사용된 400 CPSI 담체의 H₂-SCR은 촉매 온도 75°C 에서 약 20%, 125°C 에서 약 66%의 NO_x 전환율을 나타내고 있다. 150°C 이상 온도에서는 환원제 H₂의 산화로 인하여 NO_x 전환율이 감소하고 있다. 새롭게 적용된 담체 600과 900 CPSI의 H₂-SCR은 촉매 온도 75°C 에서 약 20%, 24%, 100°C 에서 약 58%의 NO_x 전환율을 나타내고 있으



(a) NO_x conversion

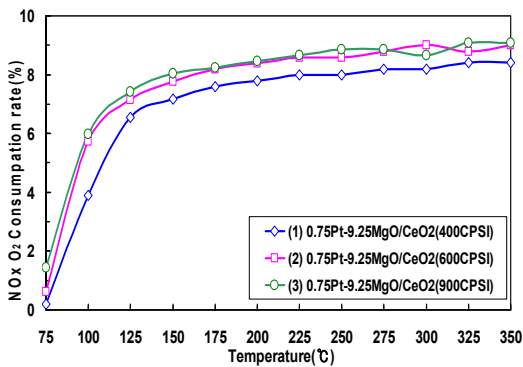


(b) CO conversion

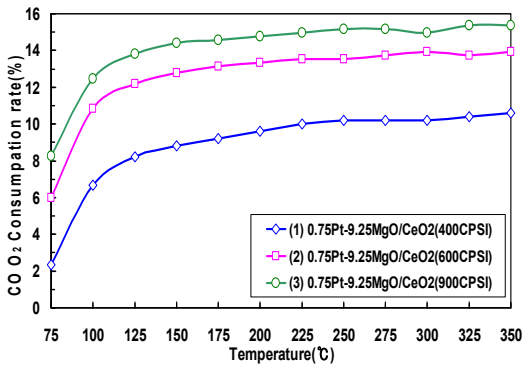
Fig. 7 De-NO_x/CO performance of H₂-SCR according to the CPSI of catalyst substrate

며, 150°C 이상 온도에서는 400 CPSI 담체보다 NO_x 전환율은 약 5% 이하로 감소하고 있다. 담체 600과 900 CPSI의 H₂-SCR은 동등한 수준의 NO_x 전환율 성능을 나타내며, 100°C 이하 저온에서는 기존 담체 400 CPSI의 H₂-SCR보다 약 3% 수준의 NO_x 전환율이 향상되고 있다. 동일한 양의 촉매 파우더가 코팅되더라도 촉매 담체의 CPSI가 클수록 담체 표면에 얇게 도포되는 다공성 층인 워시 코트(washcoat) 층이 더 얇게 담체에 도포되므로 촉매 반응 면적인 활성사이트가 증가하기 때문에 NO_x 전환율이 증가하였다고 판단할 수 있다. 또한 100°C 이하 온도에서 약 3%의 수준의 NO_x 전환율이 향상되는 경향은, 촉매의 활성사이트 증가로 인한 촉매의 반응 속도가 증가하기 때문이다. Fig. 7(b)의 CO 전환율을 살펴보면, 기존 담체 400

CPSI의 H₂-SCR에 비해 담체 600 CPSI의 H₂-SCR은 75°C 저온에서 약 13%, 100°C에서 약 70%, 200°C에서 이르러 약 95%의 CO 전환율을 나타내고 있으며, 가장 낮은 활성 및 window 폭 또한 가장 넓다. 담체 900 CPSI의 H₂-SCR은 기존 담체 400 CPSI에 비해 CO 전환율은 대폭 향상되었지만, 전반적으로 담체 600 CPSI의 촉매 성능이 좋은 편이다. Fig. 8은 유해 가스 NO_x와 CO를 단독으로 각각 모델가스반응장치에 공급한 후, NO_x와 CO가 저감될 때 O₂ 소모율을 나타내고 있다.



(a) NO_x



(b) CO

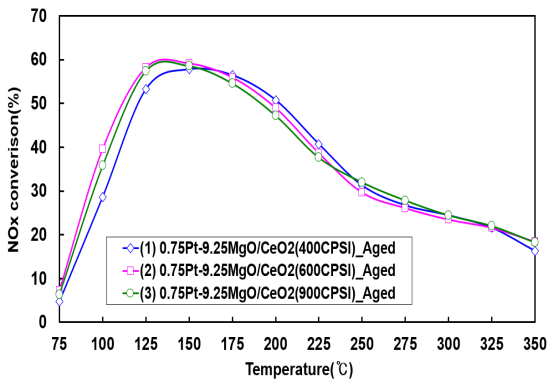
Fig. 8 O₂ consumption rate of H₂-SCR according to the CPSI of catalyst substrate

식 (2)~(6)에서 O₂는 NO_x와 CO의 환원과 산화 반응에 필수적인 요소이다. 환원반응에는 O₂ 양이 작을수록 산화반응에는 O₂ 양이 많을수록 유리할 수 있다. 기존 담체 400 CPSI의 H₂-SCR에 비해,

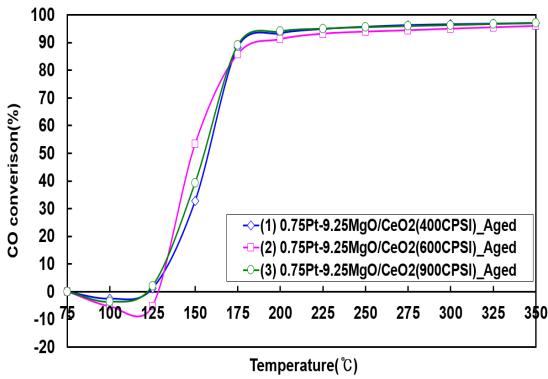
담체 600과 900 CPSI의 H₂-SCR은 O₂ 소모율이 전체 온도 영역대에서 약 0.5~10%가 높으며, 두 종류의 담체는 동등한 수준의 경향을 나타내고 있다. Fig. 8(b)는 CO 가스를 CO₂로 산화시킬 때 O₂ 소모율을 나타내고 있다. 기존 담체 400 CPSI의 H₂-SCR의 O₂ 소모율은 75°C에서 약 2.2%에서 시작해 350°C에서는 약 10%의 수준의 O₂ 소모율을 나타내고 있다. 새롭게 적용된 담체 600과 900 CPSI의 H₂-SCR은, 담체 400 CPSI의 H₂-SCR에 비해 75°C에서 6%, 8.2%, 350°C에서 약 13.5%, 15%의 O₂ 소모율이 증가하였다. 담체 900 CPSI의 H₂-SCR은 CO의 산화에 필요한 O₂ 소모율이 온도 전체영역에서 크다. 이는 담체에 코팅되는 촉매 물질이 많아짐에 따라 촉매가 반응하는 면적, 즉 활성사이트가 증가하였기 때문이다. 또한 NO_x 환원에 소모되는 O₂ 소모율은 CPSI가 다른 담체에 따라 큰 차이는 없었지만, 유해 가스 CO의 산화에는 CPSI가 큰 담체일수록 두드러지게 O₂ 소모율의 차이가 컸다.

촉매의 내구성을 평가할 때 가장 많이 사용하는 실험은, 수분을 함유한 고온의 배기가스 조건인 수열 열화 조건을 많이 적용한다. Fig. 9는 촉매 담체 CPSI에 따른 3종류 0.75Pt-9.25MgO/CeO₂ H₂-SCR 촉매를 전기로에 750°C 12 hr로 열적 열화시켰다. Fig. 9(a)는 3종류의 담체의 CPSI에 따른 H₂-SCR의 NO_x 전환율을 나타내고 있다. Fig. 7의 Fresh 조건에 비해 열화된 H₂-SCR은, 촉매 온도 75~125°C를 제외하고 동등한 수준의 NO_x 전환율을 나타내고 있다. Fresh 조건에 비해 열화된 H₂-SCR은, 125°C 이하 저온에서 활성이 저하되는 경향을 나타내고 있다. Fig. 9(b)는 열화된 H₂-SCR의 CO 전환율을 나타내고 있으며, 3종류 CPSI 담체의 H₂-SCR은 NO_x 전환율 경향처럼 동등한 수준의 CO 전환율을 나타내고 있다. Fresh 조건에 비해 열화된 3종류의 H₂-SCR은 촉매 온도가 150°C 이하에서 CO 전환율이 감소하는 두드러진 경향을 나타내고 있다. CO 전환율의 저온 활성이 좋은 600 CPSI의 경우, Fresh 조건은 150°C 온도에서 85%, 열화된 경우, 55%로 열적 열화로 인하여 약 30%가 감소하였다. 이는 귀금속 Pt가 고온

의 열화로 인하여 입자의 이동(migration), 응집(aggregation)으로 촉매의 반응 속도가 저하되었기 때문이다. 또한 CPSI가 다른 3종류 담체의 영향보다는 코팅된 0.75Pt-9.25MgO/CeO₂ H₂-SCR 촉매가 주요한 영향이었다고 판단한다. CPSI가 다른 3종류 담체의 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능(Fresh/aged)에서 담체 600 CPSI의 H₂-SCR 촉매가 유해 가스 저감 성능이 소폭 향상되었고, 열화에 대한 내구성도 양호하였다.



(a) NO_x conversion



(b) CO conversion

Fig. 9 De-NO_x/CO performance of H₂-SCR according to the CPSI of catalyst substrate (750 °C 12hr aged)

4. 결론

H₂-SCR의 상용화를 위한 기초 연구로 촉매 물

질이 코팅되는 담체 CPSI에 따른 유해 가스 저감 성능을 파악하고자 결과는 아래와 같다.

1) H₂-TPR 분석에서 100~350°C에서 생성된 피크는 주촉매 PtO 산화물에서 Pt^x로 환원되었다. 450°C에서 생성된 피크는 CeO₂(surface)가 Ce^x로 환원되었고, 860°C에서 생성된 피크는 CeO₂(bulk)가 Ce^x로 환원되었다. 촉매를 구성하는 물질과 촉매 제조 방법에 따라 물질 간의 결합력이 달랐기 때문에 환원되는 피크 온도가 달랐다.

2) 담체 600과 900 CPSI의 H₂-SCR은 동일한 NO_x 전환율 성능을 나타냈고, 100°C 이하 저온에서는 기존 담체 400 CPSI의 H₂-SCR보다 약 3% 수준의 NO_x 전환율이 향상되었다. 담체 CPSI가 클수록 촉매 반응 면적이 증가하기 때문에 NO_x 전환율이 향상되었다.

3) 담체 900 CPSI의 H₂-SCR은 CO의 산화에 필요한 O₂ 소모율이 온도 전체 영역에서 컸다. 이는 담체에 코팅되는 촉매 물질이 많아짐에 따라 촉매가 반응하는 면적, 즉 활성사이트가 증가하였기 때문이다.

4) CPSI가 다른 3종류 담체의 H₂-SCR의 유해 가스 저감 성능(Fresh)은 담체 600 CPSI의 H₂-SCR 촉매가 100°C 온도에서 NO_x/CO 저감 성능이 약 3~23% 향상되었고, 열화에 대한 내구성도 양호하였다. 실제 차량에 장착하여 실증을 하지 못한 점은 연구의 한계를 나타냈고, 향후 초박막 담체의 유해 가스 성능 향상과 배압 감소를 위하여 연구할 계획이다.

Author contributions

C. K. Seo; Conceptualization. Data curation. Investigation. Project administration. Writing-original draft. Writing-review & editing. S. G. Cho; Investigation, Resources.

References

1. H. Sjövall, R. Blint and L. Olsson, 2009, "Detailed kinetics modeling of NH₃ SCR over

- Cu-ZSM-5”, *Applied Catalysis B: Environmental*, 92(1-2), 138-153.
(<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.07.020>)
2. D. Karamitros and G. Klotsakis, 2017, “Model-based Optimization of Catalyst Zoning on SCR-coated Particulate Filters”, *Chemical Engineering Science*, 173(14), 514-524.
(<https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.08.016>)
 3. C. K. Seo, 2024, “Effect on Reduction of NO_x and CO according to the Alkali Metal Loading of H₂-SCR”, *Journal of Power System Engineering*, 28(3), 13-20.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2024.28.3.013>)
 4. 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/TiO₂ catalyst for selective catalytic reduction with H₂”, *Applied Surface Science*, 608, 155040.
(<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155040>)
 5. C. N. Costa and A. M. Efstathiou, 2007, “Mechanistic Aspects of the H₂-SCR of NO on a novel Pt/MgO-CeO₂ Catalyst”, *The Journal Physical Chemistry C*, 111(7), 3010-3020.
(<https://doi.org/10.1021/jp064952o>)
 6. F. J. P. Schott, P. Balle, J. Adler and S. Kureti, 2009, “Reduction of NO_x by H₂ on Pt/WO₃/ZrO₂ 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. R. Burch and M. D. Coleman, 2002, “An Investigation of Promoter Effects in the Reduction of NO by H₂ under Lean-Burn Conditions”, *Journal of Catalysis*, 208(2), 435-447.
(<https://doi.org/10.1006/jcat.2002.3596>)
 8. C. K. Seo, 2024, “DE-NO_x/CO Performance According to Ag Loading Amount and Support Type of H₂-SCR”, *International Journal of Automotive Technology*, 25, 745-754.
(<https://doi.org/10.1007/s12239-024-00088-6>)
 9. 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/S0169-4332\(97\)00305-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(97)00305-X))
 10. S. R. Lee and S. S. Cho, 2015, “The Structural Analysis of Three-Way Catalyst Substrate using Coupled Thermal-Fluid-Structural Analysis”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 16(5), 3035-3043.
(<http://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.5.3035>)
 11. A. Chivate and P. Dengale, 2017, “Design, Analysis & Testing of Catalytic Converter for emission Reduction & Backpressure Optimization”, *Proceeding of 70th International Conference*, 02nd, 28-32.
 12. S. Hajimirzaee, D. Show, P. Howard and A. Doyle, 2021, “Industrial scale 3D Printed catalytic converter for emissions control in a dual-fuel heavy-duty engine”, *Chemical Engineering Science*, 231(15), 116287.
(<https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116287>)
 13. Y. Ichikawa, K. Umehara and T. Hijikata, 1999, “Catalyst Layout Optimisation for Ultra Thin-Wall and High Cell-Density Ceramic Substrate”, *SAE Technical Paper 990019*.
(<https://doi.org/10.4271/990019>)
 14. K. C. Oh, C. K. Seo and S. C. Go, 2014, “Commercialization research of a metal DOC based on Fe-Cr-Ni substrate”, *Chemical Engineering Journal*, 254(15), 426-433.
(<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.125>)
 15. K. S. Lee, K. B. Lee, J. W. Chung and K. C. Oh, 2022, “Reaction Characteristics on DeNO_s Performance of H₂-SCR Catalysts”, *KSAE spring conference*, 22AKASE_2026, 233.