

## 디젤 엔진에서 금속 폼을 적용한 SCR 촉매의 특성 분석

김용래\* · 최교남\*

### Characteristic Analysis of a SCR System using a Metal Foam in Diesel Engines

Yongrae Kim and Kyonam Choi

**Key Words:** Metal foam(금속 폼), SCR(선택적 촉매 환원), Urea(요소수), Diesel engine(디젤엔진), NOx emission(질소산화물 배출가스)

#### Abstract

SCR(Selective Catalytic Reduction) is a major after-treatment solution to reduce NOx emission in recent diesel engines. In this study, a metal foam is applied as an alternative SCR substrate and tested in a commercial diesel engine to compared with a conventional ceramic SCR system. Basic engine test from ND-13 mode shows that a metal foam catalyst has lower NOx conversion efficiency than a ceramic catalyst especially over 350°C. A metal foam catalyst has characteristics of high exhaust gas pressure before a SCR catalyst and high heat transfer rate due to its material and structure. NOx conversion efficiency of a metal foam catalyst shows an increasing tendency along with the increase of exhaust gas temperature by 500°C. The effect of urea injection quantity variation is also remarkable only at high exhaust gas temperature.

#### 1. 서 론

최근 수년간 디젤 엔진은 많은 기술적 진보를 거듭해 왔으며 성능 향상은 물론 배출가스도 대폭 저감하는 결과를 가져왔다. 특히 배출가스 측면에서는 디젤 연소의 특성으로 인하여 대량으로 발생하는 질소산화물의 저감이 필요한데, 엔진 연소를 개선하는 방법으로는 배기가스 재순환이 오래 전부터 적용되어 왔다. 그러나 점차 강화되는 배출가스 규제에 대응하기 위해서는 후처리 장치의 도움이 필요하게 되었으며 대표적인 방식으로는 SCR과 LNT(Lean NOx Trap)가 널리 사용되고 있다. LNT 방식은 질소산화물의 포집과 제거를 위하여 여진

히 엔진의 운전 조건을 제어해야하는 반면, SCR 방식은 별도의 환원제를 사용하기만 하면 배기가스의 온도에 따라 촉매가 적정한 온도에 이르렀을 때 질소산화물이 저감되기 때문에 엔진 제어 시스템과 독립적으로 구성할 수 있는 장점이 있다. 이미 디젤 승용차에서부터 대형 트럭에 이르기까지 상용화가 되었으며, 향후 선박이나 농기계에 이르기까지 강화된 배기규제가 적용이 된다면 사용량이 늘어날 것으로 예상된다.

현재 널리 사용되고 있는 SCR 촉매 담체의 경우에는 주로 모노리스 구조로 되어 있고 코디어라이트(Cordierite) 및 SiC 소재가 사용되고 있다. 그러나 이는 내구성에 취약한 특성을 가지고 있기 때문에 이를 극복할 수 있는 대안 중의 하나로 금속 폼 형태의 촉매 담체를 고려할 수 있다. 금속 폼은 Ni, Cr 및 Al 등으로 구성된 다공성의 구조를 가지는데, 소재의 특성상 열충격에 강하여 내구성이 좋으며 체적대비 높은 기공비를 가지므로 담체의 부피를 줄일 수 있는 가능성을 가진다. 디젤 엔진에 많이 배출되는 입자상 물질(Particulate matter)을 포집하

(2013년 11월 6일 접수 ~ 2013년 12월 13일 심사완료, 2013년 12월 17일 게재확정)

\*한국기계연구원

\*책임저자, 회원, 한국기계연구원

E-mail : yrkim@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7270 FAX : (042)868-7305

는 DPF(Diesel particulate filter) 분야에서 먼저 적용 가능성을 연구해 왔다<sup>(1,2)</sup>.

금속 폼 촉매를 SCR 시스템에 적용하는 연구는 주로 기초 샘플을 적용해 보는 단계에 머물러 있으며<sup>(3-5)</sup>, 세라믹 담체와의 기본적인 성능 비교와 같은 체계적 연구는 미흡한 상황이다. 이에 본 연구에서는 기존 촉매 담체와의 성능을 비교 분석하고, 다양한 조건에서 질소산화물 저감 성능 특성을 확인해 보고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에서 사용한 디젤 엔진의 주요 사양은 Table 1 에서와 같이 Euro5 배기규제를 만족하고 커먼레일 인젝터가 적용되어 있는 6리터 급의 중대형 엔진이다. Fig. 1에는 엔진의 후처리 장치인 SCR 시스템의 구조도를 나타내었다. 환원제인 요소수는 32.5%의 농도의 암모니아 수용액이며, 별도의 저장 탱크에서 공급 펌프로 가압되어 인젝터를 통하여 촉매 담체의 전단부에서 분사된다. 이때 액상 형태로 분사되므로 분사되는 위치에 장착된 믹서에 충돌 분무를 통하여 충분히 기화되고 결

국 SCR 촉매에 균일하게 전달됨으로써 NOx의 변환 반응이 일어나는 구조이다. 이 모든 작동은 배기관에 장착된 온도 및 NOx 센서 정보를 이용하여 DCU(Dosing control unit)에서 별도로 제어가 이루어진다. 그림에는 표시되지 않았으나 요소수가 분사되는 위치 전단에는 배기가스의 온도 변화에 따른 SCR 성능 특성을 확인하기 위하여 수냉식 열교환기가 장착되어 배기가스를 냉각할 수 있도록 하였다.

SCR 담체로는 기본 사양으로 직경이 270 mm이고 길이가 500 mm이며 zeolite 계열의 촉매가 코팅된 세라믹 재질의 담체를 장착하고 있으며, 비교 대상으로 금속 폼 담체를 추가 제작하였다. 금속 폼 담체는 기공률이 약 90% 수준이며 비표면적이 8.7 m<sup>2</sup>/L 인 샘플을 적용하였다. 우선은 기본 세라믹 담체와 동일한부피의 샘플을 준비하였고, 추가로 50%, 75%, 125%에 해당하는 샘플을 제작하여 비교 시험을 하기로 한다. 배기가스 성분 분석을 위한 장비로는 Horiba社의 Mexa-7100DEGR을 사용하였다.

### 2.2 실험 방법

기본 세라믹 담체와 금속 폼 담체의 성능 비교를 위한 기본적인 실험으로는 본 연구에서 사용하는 디젤 엔진의 배기규제 인증 시험인 ND-13 모드로 수행하기로 하였다. 실험 엔진의 출력 성능을 토대로 선정된 13개

Table 1 Specifications of test diesel engine

Displacement volume[cc]	5890
Bore × Stroke[mm]	100 × 125
Compression ratio	17.4
Cylinder[ea]	6
FIE	Common rail
Emission level	Euro5

Table 2 ND-13 test mode points

Mode no.	Speed [rpm]	Torque [kgf.m]
1	600	0
2	1500	97.4
3	1880	45.2
4	1880	67.8
5	1500	47.5
6	1500	71.2
7	1500	23.7
8	1880	88.1
9	1880	22.5
10	2260	79.7
11	2260	20.4
12	2260	61.2
13	2260	40.8

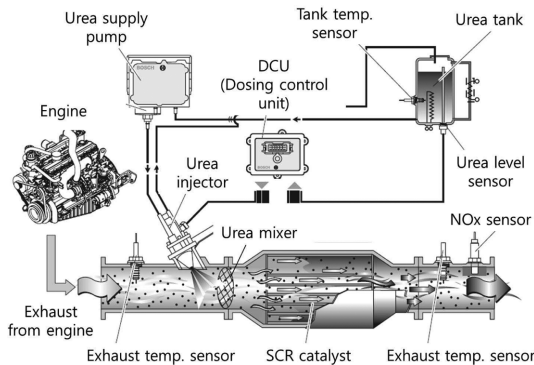


Fig. 1 SCR system of test diesel engine

의 속도 및 토크 조건은 Table 2와 같다. 시험 규정에 따라 각 모드 포인트를 정해진 시간만큼 운전하면서 배출 가스량을 측정하고 최종적으로 가중치에 따라 계산된 수치를 최소 3회 이상 평균내어 비교하였다. 요소수 분사량은 세라믹 담체를 적용한 DCU를 사용하여 금속 폼인 경우에도 동일하게 분사되도록 하였다.

ND-13 모드의 경우에는 각 모드 포인트별 운전 시간이 충분히 안정화되기에는 부족하며 각각의 배기가스 조성이 다르다. 따라서 특정 운전 조건을 고정하여 배기 조성을 일정하게 한 뒤, 배기가스의 온도를 열교환기를 통해 변화시킴으로써 가장 중요한 온도에 따른 NOx 저감 성능을 비교 분석하는 시험을 수행하였다. 이때 금속 폼필터는 앞서 언급한 다양한 체적 샘플을 테스트하였으며, 추가적으로 금속 폼 촉매의 경우에는 보다 높은 고온 영역에서 요소수 분사량 변화에 따른 성능 차이를 확인하는 실험도 실시하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 ND-13 모드 측정 결과 비교

동일한 체적을 가지는 기본 세라믹 재질의 촉매 담체와 금속 폼 재질의 촉매 담체에 대하여 ND-13 모드 평가를 수행한 결과를 Table 3에 나타내었다. 두 담체의 평가에 있어서 촉매 전단부에서의 배기가스 배출량이 동일하지 확인하기 위해서 촉매 전단부도 별도로 측정을 하였으며, 모든 배기가스 성분에 대하여 거의 동일한 수준을 유지하고 있음을 확인할 수 있었다. 촉매 후단에서의 결과를 살펴보면 SCR 촉매가 필터링 역할은 하지 못하기 때문에 PM은 전혀 변화가 없으나, THC와 CO의 경우에는 부수적인 저감 효과를 보이는 것을 확인할 수 있다. THC는 두 담체 모두 절반 이하의 저감율을 보이고, CO는 기본 세라믹 담체에서만 저감되는 결과를

Table 3 ND-13 test results (unit: g/kWh)

항목	SCR 전단		SCR 후단		Euro5 규제
	Ceramic	Metal foam	Ceramic	Metal foam	
NOx	9.59	9.60	1.92	4.68	2.00
THC	0.16	0.15	0.05	0.07	0.46
CO	0.31	0.34	0.25	0.33	1.50
PM	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02

보이는 것을 보아 촉매의 산화 반응이 있었을 것으로 추측할 수 있다. 그러나 촉매 전단 배출량이 규제치보다도 훨씬 못 미치는 수준이었기 때문에 큰 의미는 없으며, 가장 중요한 NOx 저감 효과를 살펴보면 세라믹 담체의 경우에는 규제치를 만족할 만큼의 저감 결과를 보였으나 금속 폼 담체는 규제치의 두 배를 초과하는 수준의 결과를 보인다.

즉, SCR 촉매에서 가장 중요한 NOx 저감 성능은 금속 폼 담체가 떨어지는 것을 확인할 수 있는데 이를 조금 더 자세하게 분석하기 위하여 Fig. 2-3와 같이 각 모드 포인트의 온도 및 압력 조건들과 비교하여 살펴보았다. Fig. 2에서는 NOx 전환율이 약 25% 이하인 일부 운전 모드를 제외하면 모두 세라믹 담체가 더 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 한편 운전 모드별로 촉매 전단의 배기가스 온도와 NOx 전환율의 관계를 Fig. 3과 같이 비교해 보면, 대략 350°C를 기준으로 이하 온도 조건(1, 7, 9, 11모드)에서는 차이를 보이지 않다가 350°C 이상의 배기가스 온도 조건에서는 금속 폼

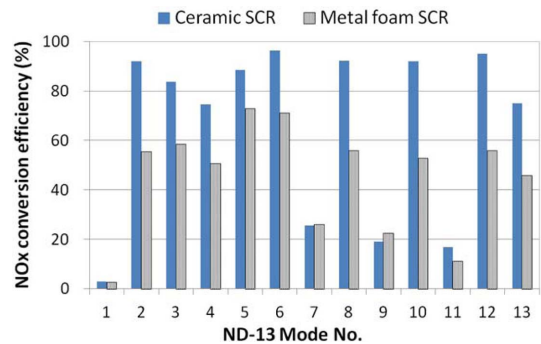


Fig. 2 NOx conversion efficiency from ND-13 mode test

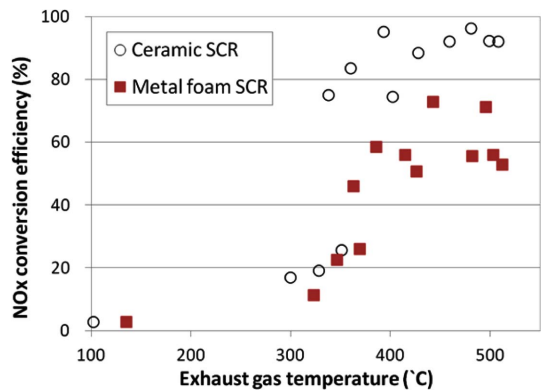


Fig. 3 NOx conversion efficiency according to the exhaust gas temperature

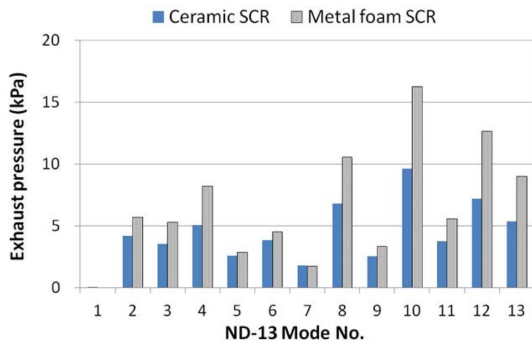


Fig. 4 Exhaust pressure before SCR catalyst from ND-13 mode test

담체의 NOx 저감율이 현저하게 떨어지는 것을 볼 수 있다.

금속 폼을 사용한 경우가 배기가스와 접촉할 수 있는 표면적이 몇 배 이상 증가하기 때문에 NOx 저감에 보다 유리한 장점을 가질 것으로 기대하였으나 결론적으로는 보다 악화된 성능을 보여주고 있다. 물론 금속 폼 담체에 코팅된 촉매의 양이 충분하지 않을 수도 있고, 담체 재료의 차이로 인하여 귀금속 등의 촉매 성분을 표면에 부착시키는데 사용되는 물질의 성분 차이로 인한 성능 차이도 고려하여야 한다.

본 실험에서 확인이 가능한 물리적인 현상들에 대하여 좀 더 살펴보고자 Fig. 4에는 각 운전 모드에서 SCR 촉매 전단의 배기압력을 나타내었는데, 금속 폼 담체가 대략 20~40% 가량 높은 수준을 보이고 있다. 이는 기공 크기의 감소와 불규칙한 패턴을 가지는 금속 폼의 구조를 생각하면 충분히 유추할 수 있는 결과이며, 엔진의 성능 관점에서는 다소 불리한 점으로 작용할 수 있다. 배압이 증가하면 연비가 악화되는 영향을 주는데, 실제로 실험 결과에서도 금속 폼 담체의 경우가 약 2% 가량의 연비 악화 결과를 보였다. 동일 배압을 유지하기 위해서는 보다 작은 부피의 담체 체적을 가져야 할 것으로 보인다.

SCR 촉매의 전후단에서의 배기가스 온도 차이(전단 온도-후단 온도)를 Fig. 5에 나타내었는데 대부분이 촉매를 지나면서 온도가 감소하지만 엔진 부하가 줄어드는 7, 9, 11 모드에서는 충분히 식지 못한 촉매 때문에 온도가 증가하기도 하였다. 온도의 감소폭은 금속 폼 담체의 경우가 더 큰 결과를 보이고 있는데, 이는 금속의 열전달율이 높기 때문이라고 유추할 수 있다. 그래프에는 표시되지 않았지만 SCR 촉매 전단의 온도는 금

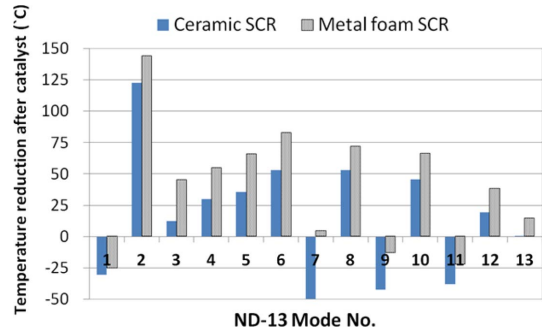


Fig. 5 Exhaust gas temperature reduction after SCR catalyst from ND-13 mode test

속 폼 담체의 경우가 평균적으로 10°C 가량 더 높았는데, 이는 앞에서 언급했던 배압 증가로 인하여 동일 출력을 유지하기 위한 미량의 추가 연료 분사량 증가에 따른 결과이다. 높은 배기가스 온도는 촉매 활성화에 긍정적인 영향을 줄 것으로 생각할 수 있으나 열전달 증가로 인하여 실제 촉매 부분의 온도는 더 낮은 수준일 수도 있을 것으로 사료된다. 이는 향후 촉매 담체의 내부 온도를 측정하는 등의 방법으로 검증할 필요가 있다.

### 3.2 금속 폼 담체의 체적 변동 결과

앞에서 살펴본 ND-13 모드 테스트는 각 모드 포인트에서 운전되는 시간이 2분 이내로 엔진의 모든 영역이 정상 상태가 되기에는 다소 짧다. 따라서 SCR 성능에서 가장 중요한 인자인 온도에 따른 NOx 전환율을 살펴보기 위해 특정 운전 조건(ND-13 모드의 5번, 배기유량=500 kg/h)에서 정상 상태를 계속 유지하면서 배기가스를 냉각시키면서 실험을 수행하였고 이를 Fig. 6에 나타내었다. 이 때 금속 폼 담체는 기본 세라믹 담체와 동일한 부피를 100%로 설정하고, 각각 50%, 75%, 100%, 125%에 해당하는 부피의 샘플들에 대하여 모두 동일한 실험을 진행하였다. Fig. 3에서 350°C를 경계로 차이를 보이던 경향과는 달리 본 실험 조건에서는 200°C 수준의 저온 영역부터 세라믹 담체와 금속 폼 담체는 다른 성능을 보이고 있으며, 전 영역에서 금속 폼 담체의 성능이 더 낮은 것으로 나타났다. 세라믹 담체의 경우 300°C부터 90%가 넘는 NOx 전환율을 가지지만, 금속 폼 담체는 온도 증가에 따라 NOx 전환율도 계속 증가하는 경향을 보임에도 불구하고 동일 체적 조건에서 65%가 최대였다.

담체의 체적 변화에 따른 경향을 살펴보면 체적이 증

가할수록 추가적인 NOx 전환율의 증가량은 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 담체 체적이 커진다고 해서 요소수가 담체의 모든 영역에 고른 분포로 전달되지 않을 가능성이 크기 때문이라 사료된다.

### 3.3 요소수 분사량 변동 결과

금속 폼 담체를 적용하는 경우에 요소수 분사량에 따른 NOx 전환율 차이를 확인하는 실험을 추가하였으며, 이때 배기 온도 조건은 이전 실험 조건보다 보다 높은 영역의 특성을 살펴보고자 실험 조건을 보다 고출력 조건(회전수=1850 rpm, 토크=82.5 kgf.m, 배기유량=880 kg/h)으로 변경하고 앞서 실시했던 배기온도 변경 실험도 동시에 수행하였다. 세라믹 담체를 사용한 경우에 설정된 기본 요소수 분사량은 2.6 kg/h 이며, 2.1~4.1 kg/h 만큼 분사량을 변경해 보았다.

실험 결과를 정리한 Fig. 7를 살펴보면 전반적으로 NOx 전환율은 Fig. 6의 실험 조건에서보다 더 낮아졌음

을 볼 수 있다. 배기 온도 조건에 따라 요소수 분사량 변경에 따른 결과가 다르게 나타나는데, 300°C 수준의 배기 온도에서는 NOx 전환율이 요소수 분사량에 거의 차이를 보이지 않지만 배기온도가 증가할수록 NOx 전환율 변화가 크게 나타나고 있다. 특히 400°C 이상의 고온에서 요소수 추가 공급에 따른 NOx 저감 효과가 거의 비례하는 수준 정도로 크다. 금속 폼 촉매는 고온의 영역에서 좀더 NOx 전환 반응이 활발하다는 것을 확인할 수 있었으나, 추가적인 성능 개선을 위해서는 암모니아 슬립량 측정 등의 상세 배기성분 분석이 필요할 것으로 보인다. 본 연구에서는 다양한 종류의 금속 폼 촉매를 세라믹 촉매와 비교하지 못하였기 때문에 낮은 NOx 전환율을 보인 원인이 단순히 본 샘플의 특성인지 금속 폼 자체의 특성인지를 분석할 수 없는 한계를 지니고 있다. 따라서, 향후에는 이를 보완하기 위하여 촉매 성분과 로딩량을 변경한 다양한 샘플들에 대한 추가 연구가 진행될 예정이다.

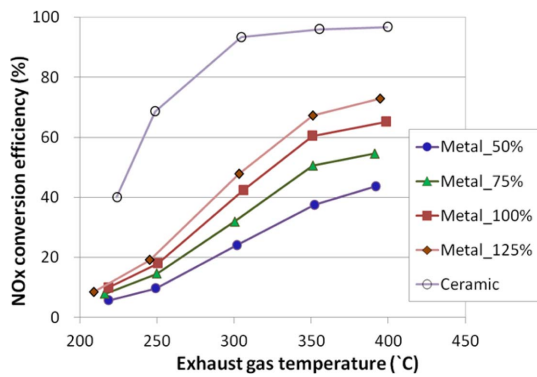


Fig. 6 NOx conversion efficiency with variation of metal foam catalyst volume

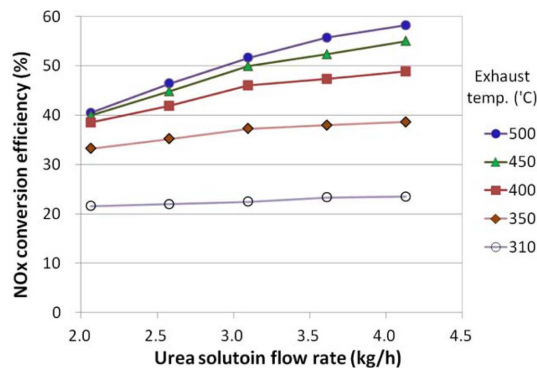


Fig. 7 NOx conversion efficiency with variation of urea injection quantity

## 4. 결 론

SCR 후처리장치가 적용된 디젤 엔진에서 기존 세라믹 담체 대신 금속 폼 담체를 적용하여 기본적인 성능 비교를 수행하였다. 특히 리그장치에서 배기가스를 모사하여 실험하는 것과는 달리 엔진을 운전함으로써 실제 배기가스를 사용하고 온도를 변경하는 실험을 실시한 데에 의의가 있으며 그 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 1) 본 연구에서 사용된 금속 폼 담체의 경우 세라믹 담체와 동일 체적을 적용한 ND-13 테스트에서는 NOx 전환율이 낮은 결과를 보였다.
- 2) 금속 폼 담체는 고온 영역일수록 NOx 전환율이 높아지는 특성을 보였으며, 500°C 수준의 배기온도까지는 계속 증가하였다.
- 3) 금속 폼 담체의 체적 증대는 NOx 전환율 증대에 효과가 있으나 체적량 증가에 비례하여 증가하지는 않는다.
- 4) 요소수 분사량 변경에 대한 NOx 전환율 변화는 대략 400°C 수준의 배기온도 이상에서 효과가 크게 나타났다.

## 참고문헌

(1) M. Park, J. Lee, E. Lee, S. Hong and K. Oh, "Charac-

- teristics of Metal Foam DPF”, KSAE annual conference, 2009, pp.619~623.
- (2) J. Seok, S. Song, K. Chun, J. Lee and K. Kim, “Filtering Characteristics of Metal Foam Filter as a Function of Soot Particle Number Density and Diameter”, KSAE conference, 2013, pp.104~106.
- (3) C. Kim, G. Cho, D. Kim, Y. Jeong, K. Oh, B. Shin and M. Kim, “A Study on the NO<sub>x</sub> Reducing Performance of a Metal Foam SCR Catalyst”, KSAE annual conference, 2009, pp.701~706.
- (4) T. Maunula, R. Lylykangas, A. Lievonen and M. Harkonen, “NO<sub>x</sub> Reduction by Urea in the Presence of NO<sub>2</sub> on metal Substrated SCR Catalysts for Heavy-duty Vehicles”, SAE technical paper, 2003, 2003-01-1863.
- (5) F. Jayat, S. Seifert and M. Fathepurkar, “Investigation of Underbody Metal SCR Systems with Active Thermal Management: Experience Update”, SAE technical paper, 2013, 2013-26-0048.