

CRT Filter

金萬永, 선임연구원乙, 崔圭勳, 수석연구원, 디젤엔진시험팀, 譯
W. Addy Majewski, PhD, President of Ecopoint Inc., <http://www.dieselnet.com/tg.html>, 著

Abstract

디젤 입자상물질의 제어를 위해 사용되는 CRT (Continuously Regenerating Trap; 연속재생트랩) 시스템은 Johnson Matthey 社에 의해 상업화된 것으로서, 입자상물질을 포집하기 위하여 세라믹 벽유동형 필터(ceramic wall-flow filter)를 사용한다. 포집된 입자상물질은 CRT 필터의 상류에 설치되어 있는 산화촉매(oxidation catalyst)에서 생성되는 이산화질소(nitrogen dioxide, NO_2)를 이용하여 연속적으로 산화된다. 한편, CRT 시스템을 충분히 이용하기 위해서는 유황함유량이 거의 없는 연료(sulfur free fuel)의 사용이 요구된다.

1. Principle of Operation

CRT 는 일반적인 엔진에 적용할 수 있는 온도인 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 이하의 온도에서 재생(regeneration)을 할 수 있는 수동트랩 시스템(passive trap system)으로서 초저유황연료(ultra low sulfur diesel fuel)과 함께 사용되어야 한다. Johnson Matthey 社에 의해 발견되고 특허취득이 된 CRT 재생(regeneration)은 이산화질소(nitrogen dioxide, NO_2)에 의해 PM 을 쉽게 산화시킬수 있다는 원리에 기초를 두고 있다. (Cooper, 1990) 그을음(soot)의 형태로 존재하는 탄소(carbon, C)는 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 이상의 온도에서 매우 높은 반응율로 산소와 산화반응을 한다. 하지만 NO_2 와는 이보다 훨씬 낮은 온도인 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 이미 산화반응이 일어나기 시작한다. 한편, CRT 시스템은 두 개의 장치로 구성된다. 즉, 상류에 있는 산화촉매(oxidation catalyst)와 하류에 있는 세라믹 벽유동형 디젤필터(ceramic wall-flow diesel filter)가 그것이다. 필터에 포집되는 디젤 입자상물질들은 NO_2 에 의해 연속적으로 산화된다. 필터의 재생(regeneration)에 필요한 NO_2 는 산화촉매(oxidation catalyst)에서 디젤의 배기가스에 존재하는 산화질소(nitrogen oxide, NO)로부터 생성된다. 아래의 Figure 1 은 CRT 의 원리를 보여주고 있다.

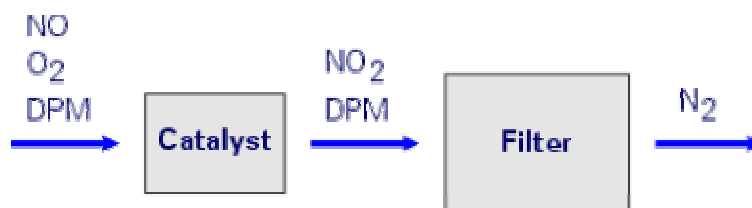


Figure 1 CRT Trap Principle

디젤엔진에서 배출되는 엔진배출(engine-out) NO_x 는 일반적으로 약 95%의 NO 와 5%의 NO_2 로 이루어져 있다. 약 300~350 °C의 온도에서 CRT 시스템의 촉매(catalyst) 부분에서의 NO_2 의 비율은 전체 NO_x 의 약 50%까지 증가한다. 하지만 촉매를 지난 후 NO_2 의 비율은 약 20% 혹은 이보다 약간 높은 정도로 떨어진다. PM의 산화과정에서 NO_2 는 감소하여 NO 와 N_2 로 분리된다.

CRT 시스템의 재생율(regeneration rate)은 온도와 NO_2 의 농도에 따라 증가하고, 그을음의 산화율(soot oxidation rate) 역시 트랩에 포집된 그을음(soot)의 전체 질량에 따라 증가한다. 한편, 시스템의 재생(regeneration)은 어느 정도까지는 촉매(catalyst)와 필터(filter)의 크기를 증가시킴으로써 최적화시킬 수 있다. 그럼에도 불구하고 CRT 시스템의 성공적인 작동을 위해서는 가공되지 않은 오염물질(raw engine emission)은 여러 가지 조건과 제한 조건을 만족해야 한다. 완전한 수동필터 시스템(passive filter system)은 모두 그러하듯이, CRT 재생(regeneration)도 차량의 비율제어 사이클(duty cycle)에 의존한다. 만일 시스템의 적용 그리고/또는 비율제어 사이클(duty cycle)이 적당하지 않으면 필터에는 그을음(soot)에 의한 막힘현상(clogging)이 발생할 수도 있다.

위와 같은 재생(regeneration) 메커니즘은 어느정도까지는 백금(platinum, Pt)과 같은 활성 귀금속 촉매(active noble metal catalyst)로 코팅된 촉매화 매연여과장치(catalyzed particulate filter)에서도 일어난다. 백금촉매(platinum catalyst)에서는 필터재생(filter regeneration)에 도움이 되는 NO_2 가 일부 생성된다. 하지만 CRT 시스템은 NO_2 의 효과를 최대화시킬 수 있는 보다 우월한 반응기 형태를 지니고 있다. 즉, CRT에서 NO_2 는 필터의 상류에서 생성되기 때문에 이를 모두 그을음(soot)의 산화에 이용할 수가 있다. 한편 촉매화 트랩(catalyzed trap)의 경우 NO_2 는 모노리스(monolith)의 벽에서 생성되기 때문에 모노리스 채널(monolith channel)의 입구 부분에서 포집되는 그을음(soot)의 산화에는 이용될 수 없다.

2. Trap Design

CRT 시스템은 한 개의 하우징(housing) 안에서 서로 다른 역할을 하는 두가지 요소로 구성되어 있는데, 첫번째 구성요소는 활성산화촉매(active oxidation catalyst)이고 다른 하나는 세라믹 벽유동형 디젤필터(ceramic wall-flow diesel filter)이다. 산화촉매(oxidation catalyst)로는 일반적으로 400 cpsi의 세라믹 담체(ceramic substrate)가 사용된다. NO 의 산화에 대한 최대의 활성(best activity)은 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 시스템에서 얻을 수 있기 때문에, 일반적으로 알루미나 담층(alumina washcoat)에 $50 \text{ g}/\text{ft}^3$ 의 백금을 입힌 촉매가 사용된다. 매연여과장치로는 100 cpsi와 벽두께가 17 mm인 비촉매 코디어라이트 벽유동형 다공질(uncatalyzed cordierite wall-flow honeycomb)이 사용된다. 현재 탄화규소(SiC)와 소결금속트랩(sintered metal trap)에 대한 연구가 진행되고 있다.

Euro 0 ~ Euro 2 대형디젤 트럭/버스 엔진의 보완용으로 사용되었던 시스템의 경우 촉매의 부피는 대략 엔진배기량과 유사하였는데, 필터의 경우는 촉매부피의 2배 정도였다. 예를 들어, 배기량이 7~11 l인 엔진의 보완용으로 사용된 시스템은 체적이 각각 8.5 l인 촉매를 사용하는 시스

탱(267 mm diameter × 152 mm = 10.5 × 6 in)과 17 리터인 필터를 사용하는 시스템(267 mm diameter × 305 mm = 10.5 × 12 in)이었다. (Allansson, 2000) 한편, 아래의 Figure 2에 CRT 시스템이 나와 있다.

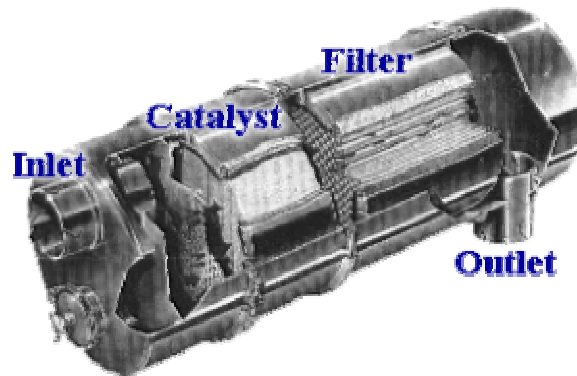


Figure 2 CRT Trap Schematic

CRT의 하우징(housing)은 네개의 스테인리스 강철(stainless steel) 모듈, 즉, (1) 입구 모듈(inlet module), (2) 촉매, (3) 필터, 그리고 (4) 출구 모듈(outlet module)로 구성되어 있다. 각 모듈은 V-클램프(clamp)로 고정되어 있다. 입구모듈에는 필터의 막힘현상(clogging)이 발생할 경우 사용되는 우회통로(bypass)가 설치되어 있다.

설계표준(standard design)에는 같은 직경의 산화촉매(oxidation catalyst)와 여과장치(particulate filter)를 사용한다. 일반적으로 이 CRT 시스템은 차량의 소음기(silencer) 자리에 장착된다. 비록 그 무게는 소음기보다 훨씬 무겁지만 시스템의 크기는 소음기와 비슷하다. 위의 Figure 2에 나와 있듯이 모듈설계(modular design)로 이루어져 있기 때문에 파손時 교체가 용이할 뿐만 아니라 서로 다른 촉매와 필터 모듈의 전체 개수를 최소화할 수 있다. 필터모듈은 형성된 무기물 재(inorganic ash)를 제거할 수 있도록 축방향으로 회전할 수 있는 구조로 되어 있어서 결과적으로 필터의 수명을 연장시킬 수 있다. 한편, 차량에 장착되는 소음기(muffler)에 끼울 수 있는 구조로 설계된 시스템도 있다. 이 경우 시스템의 개조는 비교적 쉽지만 필터를 통과하는 유동의 방향은 변경할 수 없다.

3. Application Limits

아래의 항목은 CRT 시스템의 오염물질 저감 성능과 재생(regeneration)에 영향을 미치는 중요한 인자들이다.

- 배기가스 온도 (275 °C min.)
- 연료의 유황함유량 (50 ppm wt. max.)
- 배기가스 중의 NO_x/PM 비율 (8:1 min.)

위에서 괄호 안의 수치는 Johnson Matthey 社의 사양이다. 이 수치들은 단순한 참고치일 뿐이며 과도(transient) 상태의 변동(fluctuation)과 같은 실제 작동되는 중요한 상황에 꼭 맞는 것을 제시한 것은 아니다. 한편, 배기가스의 온도를 높이면 유황의 요구량이나 NO_x/PM 비율을 더욱 낮추어야 하는 상반관계(trade-off)가 일부 존재한다. 그리고 제조업자들은 CRT 시스템이 장착될 수 있는 엔진의 사양을 추천하고 있는데, MY 1985 엔진이나 그 이후 제작된 엔진에 장착할 것을 요구한다.

한편, CRT 재생(regeneration)은 엔진에서 나오는(engine-out) 배기가스 중 NO_x/PM 비율의 영향을 많이 받는다. 배기가스 중 NO_x/PM 의 비율이 높아지면 NO_2 의 농도가 증가하여 필터의 재생(regeneration)에 더욱 효과적이다. 일부 CRT의 경우 250°C 정도의 낮은 배기온도에서 배기가스 중의 NO_x/PM 비율이 25 이상이면 효과적으로 PM을 제거할 수 있다고 한다. (Hawker, 1997)

하지만 CRT 시스템의 성능은 유황(sulfur)에 의하여 타격을 받을 수 있다. 대부분의 CRT 시스템 테스트는 최대 유황함유량이 10 ppm인 Swedish Environmental Class 1 디젤연료를 사용하여 수행되었는데, 일부 시험결과에 의하면 이보다 유황함유량이 높은 50 ppm S 연료에서도 만족할 만한 성능이 나오는 것으로 발표되고 있다.

한편, 이산화황(sulfur dioxide, SO_2)은 NO와 강한 경쟁반응(competition reaction)을 하면서 CRT의 촉매에 있는 촉매활성점(catalytically active site) 위에 흡착된다. 이러한 경쟁흡착(competitive adsorption)은 촉매활성점(active site)을 가로막아 결국 촉매의 NO/NO_2 변환을 낮추게 된다. 이 경우 충분한 양의 NO_2 가 생성되지 않기 때문에 트랩의 활성을 위해 배기가스의 온도를 높여야 할 뿐만 아니라 필터의 막힘현상(clogging)이 발생할 확률이 높아진다.

CRT 시스템에 초저유황연료(ultra low sulfur fuel)를 사용하는 또 다른 이유는 이산화황(sulfur dioxide, SO_2)의 촉매산화(catalytic oxidation) 때문이다. NO/NO_2 변환을 극대화시키기 위하여 CRT 시스템에 활성이 매우 높은 산화촉매를 사용한다. 하지만 이러한 촉매는 SO_2 를 SO_3 로 산화시키는 데에도 효과적이어서 황산염 입자상물질(sulfate particulate)의 배출을 증가시킨다. 황산염 입자상물질(sulfate particulate)의 결정핵생성(nucleation)은 필터를 지난 후에 발생하기 때문에 PM의 필터링 효율이 저하되게 된다. 이러한 현상은 아래의 Figure 3에 도시된 것처럼 연료 중 유황함유량과 배기가스 온도의 영향을 받는다. 500 ppm S의 연료를 사용한 일부 시험결과에 의하면 배기가스의 온도가 400°C 이상일 경우 필터에 의한 입자상물질의 배출이 증가하여 엔진 PM 기준치의 두배에 이르기도 하였다. (Myers, 1995)

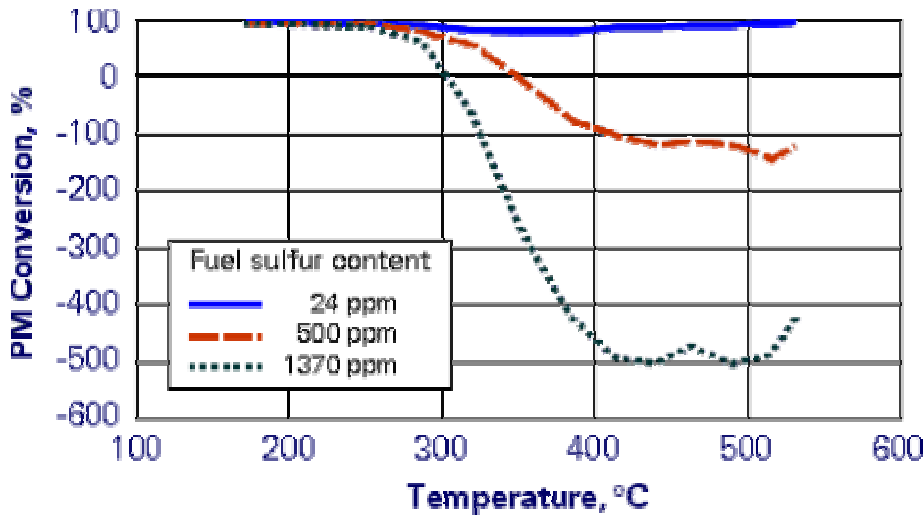


Figure 3 Effect of Fuel Sulfur Content on PM Conversion in the CRT

4. Performance

4.1 Gases

촉매(catalyst)와 필터(filter)의 조합으로 구성되어 있는 시스템인 CRT 는 입자상물질 뿐만 아니라 기체상 오염물질(gaseous pollutant)의 배출에도 영향을 미친다. Euro 1 및 Euro 2 대응엔진에 CRT 시스템을 장착하여 시험한 결과에 따르면, ECE R49, ESC, 또는 ETC 테스트 사이클에서 CO 와 HC 의 배출은 약 85~95% 정도 감소하는 것으로 알려져 있다. 하지만 US FTP 과도사이클(transient cycle)의 경우 배기온도가 낮기 때문에 70~90% 정도의 효율이 관측되었다. (Allansson, 2000) 한편, 포름알데히드(formaldehyde) 및 아세트알데히드(acetaldehyde)를 포함한 알데히드(aldehyde)는 약 50~90% 정도 감소한다.

비록 이산화질소(nitrogen dioxide, NO_2)는 재생(regeneration) 과정에서 소모된다고는 하지만 CRT 시스템 전후의 전체 NO_x 배출량은 별 차이가 없다. 하지만 전체 NO_x 배출량 중에서 시스템에 의한 NO_2 의 배출비율은 증가하는데, 이는 직업 때문에 발생하는 건강문제와 같은 일부 상황에서는 큰 문제가 될 수 있다. 한편, CRT 를 장착하지 않은 경우의 디젤배기가스(untreated diesel exhaust)에서는 NO_2/NO_x 비율이 약 5% 정도에 불과하지만 CRT 시스템을 장착한 경우 배기관에서의 NO_2/NO_x 비율은 테스트 사이클에 따라 약 20~60%가 측정된다. (Hawker, 1998)

4.2 Particulate Matter

10 ppm S 연료를 사용하면 전체 입자상물질은 질량기준으로 약 90% 정도 감소한다. 따라서 CRT 를 장착한 Euro 2 대응엔진으로 Euro 4/5 배기규제를 만족시키는 것이 가능하다. 한편, 약 0.2 g/mile 의 PM 을 배출하는 현재의 소형디젤엔진에 CRT 시스템을 장착하면 PM 의 배출량을 약 0.02 g/mile 이하로 감소시킬 수 있기 때문에 Euro 4와 US Tier 2 배기규제를 만족시킬 수 있

다. (Zelenka, 2000)

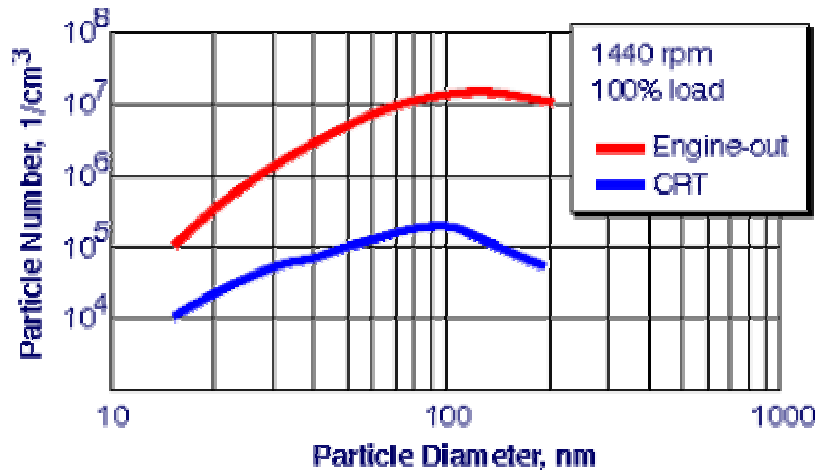


Figure 4 Particle Size Distribution with CRT Trap

CRT 트랩은 위의 Figure 4에서 알 수 있듯이 극초미세입자(極超微細粒子, nanoparticle)의 배출수량 역시 감소시킬 수 있는 것으로 발표되고 있다. 위 그림의 데이터는 정격출력이 169 kW @2,400 rpm 인 6-실린더, DI, 터보차저/인터쿨러 장착 EURO II 디젤엔진에서 측정된 것이다. (Hawker, 1998) 하지만 일부 필터 시스템의 경우 트랩의 하류에서 발생하는 탄화수소(hydrocarbon)와 유황염(sulfate)의 결정핵생성(nucleation)으로 인한 극초미세입자(nanoparticle)의 배출수량이 증가하기도 한다. CRT 시스템 내에서는 탄화수소 및 SOF 제거효율이 높기 때문에 결정핵생성(nucleation)에 이용될 수 있는 탄화수소가 거의 존재하지 않는 것으로 생각된다.

5. Field Experience

현재 초저유황 디젤연료(ultra low sulfur diesel fuel)가 공급되는 국가에서는 Johnson Matthey 社 또는 이 회사와 공급계약을 체결한 공급자로부터 CRT 시스템을 구입할 수 있다. 현재까지 약 6,000 대의 차량에 CRT 시스템이 공급되었다. (Allansson, 2000) 이 시스템은 주로 스웨덴의 버스와 트럭에 장착되었고, 독일, 영국, 그리고 다른 EU 국가들에서도 일부 장착되어 운행되고 있다. 이 시스템을 장착한 거의 모든 차량들은 유황함유량이 10 ppm S 인 Swedish Class 1 연료 혹은 이에 상응하는 연료를 사용하고 있다. 일부 시스템의 경우 50 ppm S 의 연료를 사용한 시험도 수행되었지만 유황이 전혀 없는(sulfur-free) 바이오디젤(biodiesel)을 사용한 시험은 아직 이루어지지 않았다. 2000년 에 캘리포니아 지역에서 15 ppm S 디젤연료가 시판되기 시작하면 미국에서도 CRT 시스템은 상업화되어 이용될 수 있을 것이다.

한편, 현재 사용되고 있는 CRT 시스템의 오염물질 배출저감 성능을 결정하기 위한 내구 시험도 수행되었다. (Allansson, 2000) 버스, 트럭 및 철도차량에서 106,000 ~ 600,000 km 정도 사용된

7개의 CRT 시스템이 평가대상이었는데, 여러 가지 테스트 사이클에서 측정된 PM 저감효율은 약 80~95% 였다. 하지만 현재 사용되고 있는 CRT 시스템 전후 배출가스의 압력강하(pressure drop)는 보고되지 않았다.

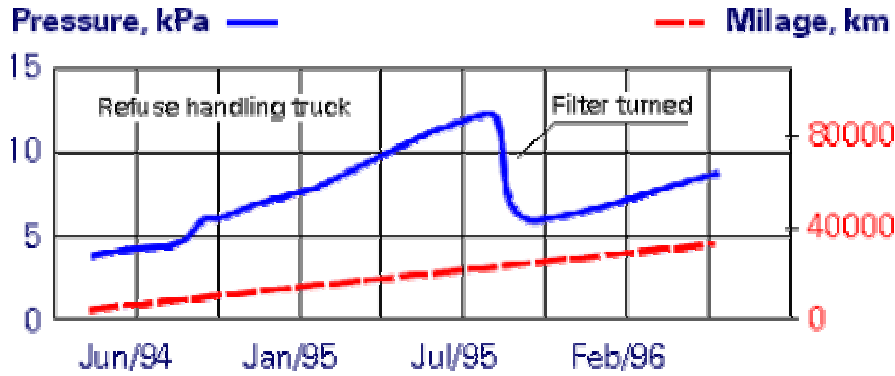


Figure 5 Exhaust Back-Pressure with CRT Trap

필드 시험결과(field experience)에 의하면, 위의 Figure 5에서 알 수 있듯이, 시스템을 사용할수록 필터에 재(ash)가 쌓이기 때문에 엔진 배압(exhaust back-pressure)이 점차 증가하는 것으로 알려져 있다. (Hawker, 1997) 따라서 필터에 부착된 재(ash)를 제거하기 위한 수단으로 필터모듈을 주기적으로 반대로 해줄 것을 추천하고 있다. 잔류 재(residual ash)가 1.8% 인 일반적인 EU HD 디젤오일을 사용한 경우 CRT 시스템을 일년에 한 번 정도 반대로 해주는 것이 필요하다. (Allansson, 2000)

한편, 발표된 필드 테스트 결과에 따르면, CRT 시스템을 사용하는 경우 엔진 배압의 증가로 인하여 약 1~3%의 연비손실이 발생하는 것으로 알려져 있다.

6. SCRT System

한편, PM 과 NO_x 의 동시저감 요구에 부응하기 위하여 CRT 필터와 우레아-SCR (selective catalytic reduction) 촉매가 결합된 SCRT 시스템이 제안되었다. (Chandler, 2000) 배기가스 중의 NO₂ 함유량을 증가시켜서 SCR의 성능을 향상시키기 위하여 CRT 시스템은 SCR 촉매의 상류지점에 위치한다.

한편, 장착한 현재의 엔진에 SCRT 시스템을 장착한 경우 Euro 4/5의 PM 및 NO_x 규제를 만족할 수 있다는 연구결과가 발표되었다. SCRT 시스템과 관련하여 향후 최적화가 필요한 항목들로는 (1) N₂O 와 암모니아 슬립(ammonia slip), (2) 배기가스의 과도한 압력강하 (약 20 kPa 정도), (3) 주로 암모니아 질산염(ammonium sulfate) 및 황산염(sulfate)으로 이루어진 것으로 추정되는 PM의 2차 오염문제, 그리고 (4) 시스템의 내구문제 등이 있다.

참 고 문 헌

1. Allansson, R., et al., 2000, "European Experience of High Mileage Durability of Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter Technology," SAE 2000-01-0480.
2. Chandler, G. R., et al., 2000, "An Integrated SCR and Continuously Regenerating Trap System to Meet Future NOx and PM Legislation," SAE 2000-01-0188.
3. Cooper, B. J., Jung, H. J., and Thoss, J. E., 1990, "Treatment of Diesel Exhaust Gases," U.S. Patent #4902487 (Johnson Matthey).
4. Hawker, P., et al., 1997, "Experience with a New Particulate Trap Technology in Europe," SAE 970182.
5. Hawker, P., et al., 1998, "Effect of a Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter on Non-Regulated Emissions and Particle Size Distribution," SAE 980189.
6. Myers, N., 1995, "Continuously Regenerating Trap (CRT) for Diesel Engines," SAE Catalysts, Emission Control and Catalytic Combustion TOPTEC, Costa Mesa, CA, October 1995.
7. Zelenka, P., Egert, M, and Cartellieri, W., 2000, "Ways to Meet Future Emission Standards with Diesel Engine Powered sport Utility Vehicles (SUV)," SAE 2000-01-0181.