

〈논 문〉 SAE NO. 97370036

천연가스 자동차의 Emission 배출특성 및 저감법

Emission Characteristics of Natural Gas Fueled Vehicle and its Purification Technologies

최 병 철*, 이 지 연**, 손 건 석**, 이 귀 영***
B. C. Choi, G. Y. Lee, G. S. Son, K. Y. Lee

ABSTRACT

Experiments have been conducted to investigate emission characteristics of compressed natural gas fueled vehicle(CNGV) by the FTP 75 mode test. Its purification technologies were also investigated. It was found that CNGV was operated on the rich A/F condition by comparison with gasoline vehicle. The Pd catalyst was higher in methane purification performance than Pt and Pd/Pt/Rh catalysts. Up to 60% portion of the accumulative HC emissions(that contains above 80% methane) from CNGV occurs during the first phase of the FTP 75 mode. CO that is exhausted at rich conditions of the air-fuel ratio more than lean conditions should be used for the catalytic reduction of NOx, because the methane is not the effective reduction for NOx in the CNGV with 3-way catalyst system.

주요기술용어 : Catalyst(촉매), Natural Gas(천연가스), Methane(메탄), ULEV(Ultra Low Emission Vehicle), Exhaust Gas(배출가스), Emission After-treatment(배기후처리)

1. 서 론

미국 California주의 Air Resources Board (ARB)의 Ultra Low Emission Vehicle(ULEV) 규제치를 만족시키기 위한 최근의 기술을 분류하면 엔진 개발 기술, 배기 후처리 기술, 새로운

연료의 이용기술로 나눌 수가 있다. 이 중 배기 후처리 기술로서 가솔린 자동차에서는 주촉매인 under-body catalytic converter(UCC) 이외에 close-coupled catalyst(CCC)¹⁾, electrically heated catalyst(EHC)²⁾, burner heated catalyst(BHC)³⁾ 등의 냉시동시의 배출가스 저감을 위한 보조장치를 고안하여 그 적용 가능성의 시험을 행하고 있다. 그러나 이러한 보조 후처리 시스템을 고려하는 경우 후처리 시스템의 코스트

* 정회원, 전남대학교

** 고등기술연구원

*** 정회원, 고등기술연구원

는 20~25% 이상 증가한다⁹⁾. 그리고 새로운 연료의 이용기술 측면에서는 가솔린 연료를 대신할 수 있는 저공해 자동차 연료 혹은 석유연료의 대체 연료로서 천연가스^{4)~8)}, 알코올⁹⁾, 수소¹⁰⁾ 등에 관한 연구가 진행되고 있다. 이들 대체 연료 중에서 천연가스는 연료의 장기적 공급, 경제성 및 안전성 등의 면에서 다른 대체연료보다 유리하고, 최적의 배기 후처리 시스템의 사용에 의해 ULEV 규제치를 만족시킬 수 있는 가능성이 높아 저공해 연료로서 각광을 받고 있다.

천연가스는 우수한 antiknock특성을 가지고 있으며, 착화 에너지가 가솔린에 비교해 작아 희박영역의 공연비에서도 안정된 연소가 가능하다¹¹⁾. 따라서, 엔진은 고압축비를 유지할 수 있으며, 희박영역에서 안정된 운전이 가능하여 가솔린 자동차보다 높은 열효율을 달성할 수 있다¹²⁾. 저공해의 측면에서는 연료의 주성분이 80~99%가 메탄이기 때문에, 가솔린과 같은 고탄화수소 연료에 비하여 CO₂의 배출이 20~25%나 낮다¹²⁾. 연료의 주성분인 메탄은 광화학 반응성이 낮은 성질을 가지고 있으나¹³⁾, 촉매에서의 활성온도가 가솔린엔진 배기 중의 탄화수소보다 높은 특성이 있다. 이러한 특성이 있는 천연가스를 연료로 하는 자동차의 배기 후처리에는 엔진의 운전조건에 따라, 이론공연비 운전의 삼원촉매(three-way catalyst, TWC)와 희박연소(lean-burn)의 산화촉매(oxidation catalyst)가 있으나, 현재 대부분의 승용차에서는 TWC 시스템을 이용하고 있다.

천연가스 자동차가 저공해성 자동차로서의 입지를 확보하기 위해서는 배출가스의 배출특성을 먼저 파악하여 이에 따른 촉매의 선정 및 최적운전 조건을 선택할 필요가 있다. 본 연구에서는, 천연가스 자동차가 삼원촉매의 window 영역에서 운전될 경우 배출가스의 배출특성을 가솔린 자동차와 비교 관찰하고, 배출특성에 부합하는 천연가스 자동차 전용촉매를 선정한다. 그리고, 이들 전용촉매장치를 차량에 장착하여 FTP 75 mode 시험에서의 배출가스 배출특성을 조사하여 천연가스 자동차운전조건 최적화 및 배출가스정화의 고효율화를 달성할 수 있는 기초자료로 제공한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 Model gas 촉매반응 실험장치

Model gas 촉매반응 실험장치는 대기압 고정층 유동형 반응장치로, 그림 1에 나타난 것과 같이 가스공급부, 예열부, 촉매반응부 및 가스분석장치로 구성되어 있다. 유통가스인 질소(N₂), 산소(O₂), 메탄(CH₄), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 및 일산화질소(NO) 등은 임의의 농도로 고압가스용기로부터 공급하였다.

공급가스는 질량유량 조절기에 의해 유량이 조절되어 예열부에서 110°C까지 가열되어 촉매반응부에 들어가 반응 후에 배출된다. 촉매반응부는 내경 15mm, 길이 380mm의 석영관으로 제작하였으며, 그 내부는 촉매를 고정할 수 있는 구조로 되어 있다. 반응부의 촉매온도는 반응부의 전기로의 가열에 의해 조절하였다. 촉매온도는 촉매중심부에 직경 0.5mm의 K sheathe형 열전대를 삽입하여 측정하였다. 가스성분은 촉매반응부의 입구 및 출구에서 측정하였다. 이들 성분 중 메탄은 FID(Flame Ionization Detector)가 부착된 가스크로마토그래프를 이용하였다.

실험시 촉매의 온도상승률은 약 5°C/min이며, 촉매의 온도가 소정의 실험조건에서 안정된 후 30분간 동일조건을 유지한 후 배기의 농도를 측정하였다. 측정은 분석의 재현성을 확보하기 위하여 동일 조건에서 3회 이상 실시하였으며, 실험시 분석의 재현성은 ±5% 정도이다.

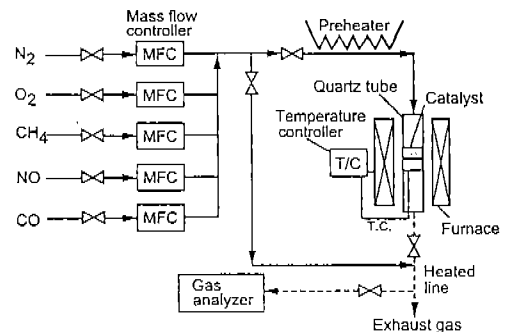


Fig.1 Experimental apparatus for the model gas test

본 연구에서 사용한 촉매의 사양을 표 1에 나타낸다. 촉매는 자동차용으로 사용되고 있는 코디에라이트(cordierite) 담체에 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 및 각종 조촉매를 첨가한 washcoat에 귀금속 촉매를 코팅한 모노리스(monolith)형으로 셀은 62mesh/cm이다. 귀금속 촉매의 loading량은 1.8g/L이며, 촉매의 외형은 직경 14.0mm, 두께 10.0mm이며, 이를 석영 촉매 반응관에 세 개를 넣어 500°C의 수소분위기에서 1시간 환원처리한 후 실험에 이용하였다.

2.2 차량시험

시험에 이용된 차량의 사양을 표 2에 나타낸다. 기술린 자동차의 엔진과 천연가스 자동차의 엔진 사양은 각 연료의 특성에 따라 최적화된 엔진을 채용하고 있어, 실험조건이 약간 상이하지만 엔진의 운전특성에 따른 배출가스의 배출경향을 파악하기에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다. 기술린자동차의 ECU(Electronic Control Unit)는 시판용을 그대로 사용하고, 천연가스 자동차의 ECU는 배기정확을 향상을 위하여 mapping의 일부를 수정하였다. 각 자동차에 사용한 연료로는, 기술린은 시판의 레귤라 기술린이며, 천연가스는 주성분이 99.9% 이상이 메탄으로 된 압축천연가스(Compressed Natural Gas, CNG)이다. 차량시험에 이용한 촉매는, 천연가스 자동차가 fresh 상태의 Pd, Pd/Pt/Rh, 2-bed type(1.8L)의 촉매장치를, 기술린 자동차가 실제 도로에서 80,000km를 주행한 Pt/Rh, 2-bed type(1.8L) 촉매장치를 장착하고 있다.

Table 1 Catalyst specifications

Catalyst	Precious Metal	Ratio
MS1	Pd	1
MS2	Pd/Pt	5/1
MS3	Pd/Pt/Rh	5/1/1
(MS+B)1	Pd	1
(MS+B)2	Pd/Pt	5/1
(MS+B)3	Pd/Pt/Rh	5/1/1

Table 2 Engine specifications

	Gasoline(CIELO)	CNG(CIELO)
Engine type	4 cylinder, 4 valve, DOHC	4 cylinder, 2 valve, SOHC
Displacement(cc)	1499	1598
Bore x Stroke(mm)	76.5×81.5	79×81.5
Compression ratio	9.5 : 1	10.7 : 1
Combustion chamber type	Pent-roof	bath-Rub

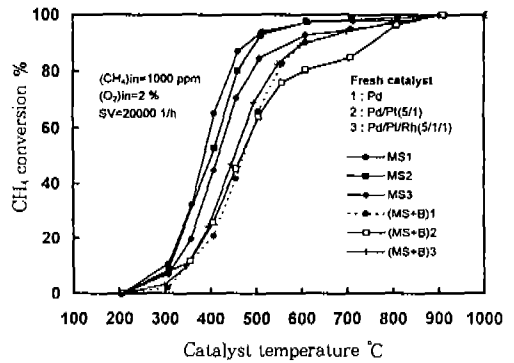


Fig.2 Methane purification characteristics on the fresh catalyst for CNGV

3. 실험결과 및 고찰

3.1 CNGV 전용 촉매의 선정

압축천연가스 자동차(Compressed Natural Gas Vehicle, CNGV)의 배기 성분이 기술린 자동차(gasoline vehicle, GV)의 배기와 다른 점은 HC(Hydrocarbon) 성분이다. 천연가스 자동차의 배기의 HC성분 중 약 80% 이상이 메탄이다. 메탄은 일반적으로 기술린에 포함되어 있는 고분자 탄화수소에 비교하여 촉매에서의 반응성이 낮다. 따라서, 천연가스 자동차용 촉매의 선정에 있어서 메탄의 정화성능 평가는 필수적이라 할 수 있다.

그림 2는 2종류의 washcoat에 각종 귀금속(Precious Metal, PM)을 loading한 fresh상태의 촉매에 있어서 메탄의 정화특성을 나타내고 있다. 정화율은 $(1 - (\text{CH}_4)_{\text{out}} / (\text{CH}_4)_{\text{in}}) \times 100\%$ 로 나타내며, 여기서 $(\text{CH}_4)_{\text{in}}$, $(\text{CH}_4)_{\text{out}}$ 는 각각

촉매 입구 및 출구에서 CH₄의 농도이다. 촉매 입구에서 혼합기의 조건은 메탄이 1000ppm, 산소가 2%이고, 공간속도(space velocity=표준 상태에서 촉매에 공급되는 혼합기의 flow/촉매의 체적, SV)는 20,000 1/h이다. 촉매는 MS계 washcoat 촉매 및 (MS+B)계 washcoat 촉매를 이용하고 있다. 여기서, MS는 γ -Al₂O₃ washcoat에 Ce, Zr, La 등과 같은 조촉매를 첨가한 것이고, (MS+B)는 MS에 새로이 내구성 향상을 위한 첨가제 B를 첨가한 것이다. MS1 촉매(Pd only)가 메탄 정화에 가장 우수한 정화 성능을 나타내고 있다. 동일한 귀금속이 있어서는 MS계 washcoat의 촉매가 (MS+B)계 washcoat의 촉매에 비교하여 우수한 정화 성능을 나타내고 있다. MS계 washcoat의 촉매는 촉매 온도가 약 500°C에서 80% 이상의 메탄 정화율을 나타내고 있다. 첨가제 B를 첨가하여 메탄의 정화 성능이 MS계에 비교하여 다소 떨어지고 있다. 이들에 대해서는 B의 첨가방법이나 B의 첨가에 의한 내구성 및 메탄의 정화 성능의 반응기 구동에 관한 보다 상세한 검토가 요구되어진다.

CNGV 전용 촉매는 메탄 정화에 유리한 Pd 촉매와 삼원촉매로서 NO_x 정화 특성을 고려하여 선정한 Pd/Pt/Rh 촉매를 2-bed로 하여 촉매 장치(catalytic converter)를 제작하였다.

3.2 배출가스의 특성

CNGV의 배출가스 특성을 FTP 75(LA4) mode를 중심으로 관찰하고 GV와 비교 검토 하였다. 그림 3은 GV의 FTP 75 mode 운전시 tail-out의 배출가스 총배출량에 대한 각 측정점(FTP 75모드의 속도 변화 구간을 23개 cycle로 구분)까지의 경과시간에 대한 배출가스의 축적량의 비율을 나타내고 있다. Q_i는 배출가스의 배출총량, Q_j는 각 측정점까지의 경과시간에 대한 배출가스의 축적량이다. HC, NO_x의 경우는 시동후 약 300초 동안에 총배출량의 80%, 65%에 각각 도달하고 있다. CO의 경우는 같은 시간 300초에서 약 30%에 미치지 못하고 있다. 이것은 HC, NO_x의 경우는 촉매가 활성화 온도에 도달하지 않아 촉매에서의 정화율이 낮은 상태에

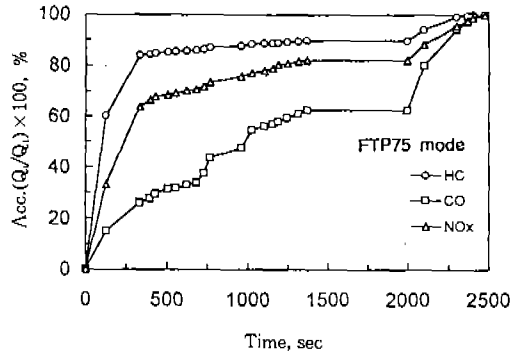


Fig.3 Accumulation ratio of emissions during FTP 75 mode(GV)

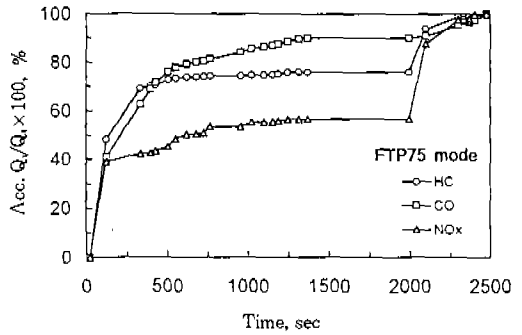


Fig.4 Accumulation ratio of emissions during FTP 75 mode(CNGV)

서 배출된 양을 나타내고, CO는 촉매에서의 활성 온도가 비교적 낮아 정화 특성이 HC, NO_x보다 좋기 때문이다. 그림 4는 CNGV의 결과이다. HC, CO의 경우는 약 300초까지 배출되어 축적되는 양이 총배출량의 70% 이상에 도달하고 있으나, NO_x의 축적량은 40% 정도를 나타내고 있다. GV와 비교하여 CO 및 NO_x의 배출 특성이 상이하다. 시동후 초기에 CO, HC의 축적율이 높고 NO_x의 축적율이 낮은 것은 천연가스 자동차의 배기정화를 향상을 위하여 ECU mapping을 다소 rich한 공연비의 운전조건으로 설정했기 때문인 것으로 생각된다. 그림 5는 CNGV의 공연비에 대한 배기의 정화율을 나타내고 있다. 시험은 open loop 엔진 제어상태, 450°C의 촉매 온도 조건에서 실시하였다. 3성분

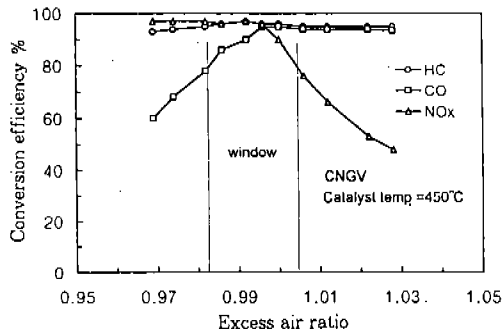


Fig.5 Conversion efficiencies at open loop engine control with various excess air ratio

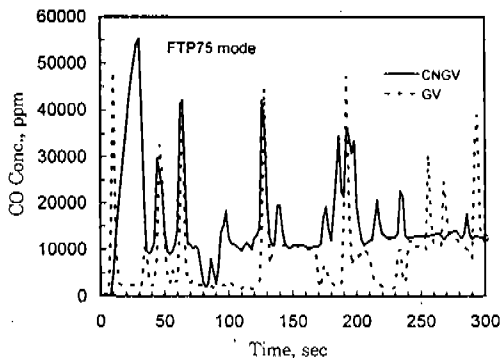


Fig.7 Comparison of CO emission for phase 1 of the FTP 75 mode

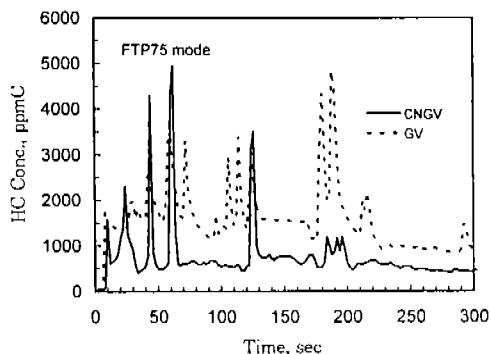


Fig.6 Comparison of HC emission for phase 1 of the FTP 75 mode

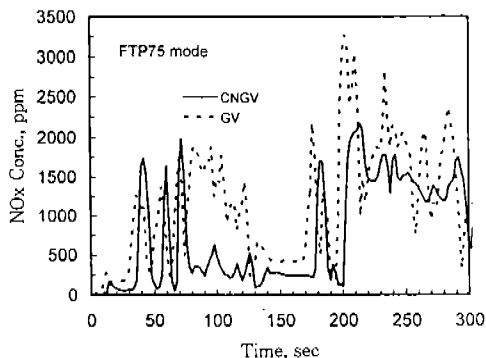


Fig.8 Comparison of NOx emission for phase 1 of the FTP 75 mode

의 정확율이 80% 이상의 공연비 범위를 λ -window로 정의하면, λ -window는 0.982~1.004의 범위로 rich한 영역에 치우쳐 존재함을 알 수 있다.

FTP 75mode의 경우 초기 냉시동(cold-start)시의 HC, CO 배출의 저감은 전체 배출량의 저감에 있어서 대단히 중요하다. 따라서, 여기에서는 FTP 75 mode의 초기 300초간을 배출가스의 배출특성 분석 대상으로 한다.

CNGV 및 GV의 FTP 75mode에서 냉시동 후 초기 300초간의 engine-out emission의 배출특성을 그림 6, 7, 8에 나타내었다. 그림 6은 CNGV의 HC가 GV보다 낮은 특성을 보이고 있다. 그림 7에서는 CNGV의 CO가 GV보다 상당히 높은 농도로 배출되고 있음을 알 수 있다. 그

림 8은 CNGV의 NOx가 GV보다 상당히 낮은 농도로 배출되고 있음을 보이고 있다. 이와 같이 CO 및 NOx의 농도 경향은 그림 5에서 나타낸 것과 같이 CNGV의 운전상태는 이론공연비보다 rich한 영역에서 운전되고 있기 때문이다.

이들의 배출특성을 경과시간에 대한 배출가스의 축적량으로 그림 9, 10, 11에 나타낸다. 그림 9에 CNGV 및 GV의 HC 축적량을 비교하고 있다. 참고로 FTP 75mode의 차량 속도를 나타내었다. 그림 6에 나타난 결과와 같이 HC의 축적량은 CNGV가 GV보다 낮은 특성을 나타내고 있다. 그림 10은 CO의 경과시간에 대한 축적량을 나타내고 있다. CO는 CNGV가 GV보다 높은 특성을 나타내고 있다. 이것은 촉매에서의 정

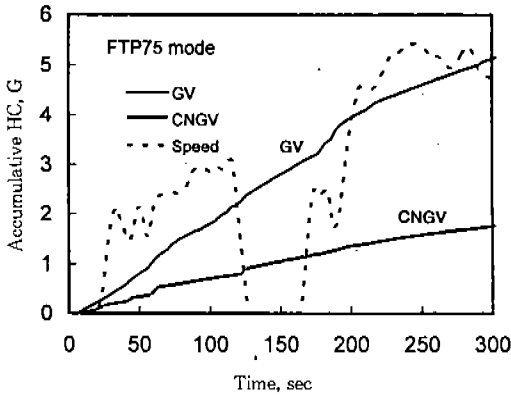


Fig.9 Accumulative HC emission of CNGV and GV(FTP 75 mode)

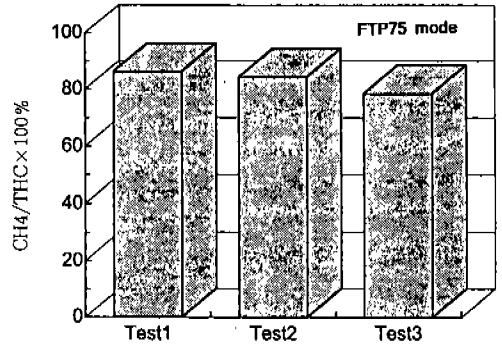


Fig.12 Methane ratio of HC emissions of CNGV(FTP 75 mode)

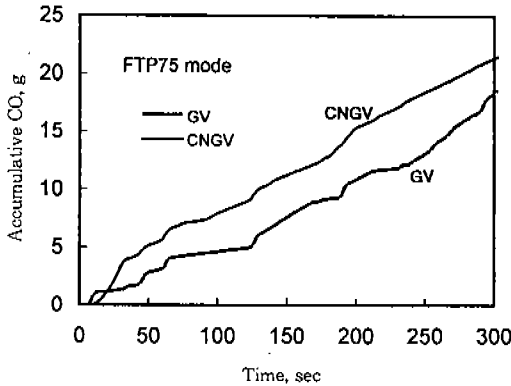


Fig.10 Accumulative CO emission of CNGV and GV(FTP 75 mode)

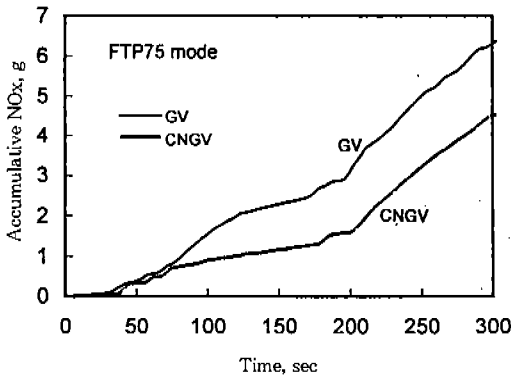


Fig.11 Accumulative NOx emission of CNGV and GV(FTP 75 mode)

화율이 같다고 가정했을 때 상대적으로 rich한 공연비에서 운전되는 CNGV 엔진출구에서의 CO가 고농도로 배출되어, 촉매에서 정화되지 않은 CO 농도도 높기 때문이다. 그림 11은 NOx의 경과시간에 대한 축적량을 나타내고 있다. NOx는 CNGV가 GV보다 낮은 경향을 보이고 있는데, 이것은 촉매가 아직 완전히 활성화 온도까지 도달하기 전의 상태이기 때문에 엔진출구의 농도가 지배적이다. 즉, CNGV가 GV보다 낮은 주요인은 가솔린보다 천연가스의 단열화염온도가 낮은점¹²⁾과 CNGV가 이론공연비보다 약간 rich한 영역에서 운전되어 연소온도가 낮아 thermal NOx의 생성농도가 낮기 때문이라 생각할 수 있다.

그림 12는 CNGV tail-out emission의 HC 중 메탄성분을 분석한 결과이다. Test 1, 2, 3은 각 촉매의 조건이 다른 FTP 75 mode 시험 결과이지만, 전체적으로 보면 메탄이 80% 이상을 차지하고 있다. 그림 5에서 CNGV의 HC가 GV보다 낮은 특성을 보였지만, 이와 같이 HC중 메탄이 차지하는 비율이 높으므로 이 메탄의 정화는 천연가스자동차의 배기저감에 중요한 요인이 될 수 있다.

이상의 결과와 같이 CNGV의 공연비가 GV보다 rich한 영역에서 제어되고 있는 것은, CNGV촉매의 배기 정화율을 높이기 위하여, 즉 λ-window영역이 rich한 영역에 존재하기 때문

이다. 삼원촉매에서 NO_x를 환원시키는데 사용되는 환원제로는 HC, H₂, CO를 들 수 있다. CNGV의 경우 배기 중 HC는 대부분이 NO_x의 환원제로써 기여도가 크지 못한 메탄이기 때문에¹³⁾, NO_x의 정화를 위한 환원제로써 CO를 보다 적극적으로 이용해야 한다. 따라서 CNGV의 운전 조건을 이론공연비보다 농후한 영역으로 이동하게 된다.

3.3 CNGV용 촉매의 정화 특성

CNGV 전용 촉매의 선정으로부터 Pd 촉매와 Pd/Pt/Rh 촉매를 2-bed로 한 촉매장치(catalytic converter)를 이용하여 FTP 75mode에 의한 차량 시험을 행하였다.

그림 13은 촉매장치의 입구 온도, 촉매 전단 및 촉매 후단의 중앙부의 온도를 각각 나타내고 있다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 메탄의 정화율이 80% 이상을 나타내는 촉매온도는 약 500℃이다. 촉매의 전단부가 이 온도에 도달하는 시간은 약 200초가 소요됨을 알 수 있다. 냉시동 시 촉매의 온도가 약 500℃까지 올라가는 중에는 엔진출구의 미연소 상태의 메탄이 정화되지 않고 배출되는 확률이 높게 된다.

그림 14에 FTP 75 mode 초기 300초간의 HC의 엔진 출구 및 tail-out의 배출 특성을 축적량으로 나타낸다. 촉매에서의 정화 특성을 보면 약 200초까지는 선형적으로 증가하고 있다.

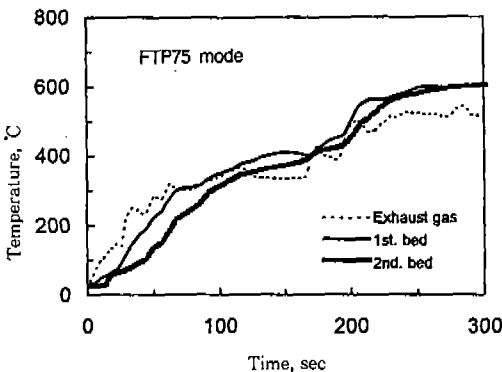


Fig.13 Temperature profiles of CNGV catalytic converter

그림 4에서도 나타난 것과 같이 시동후 초기 200초간의 배출량은 총배출량의 약 60% 정도에 달하는 수준이다. 그림 15는 CO의 축적량을 나타내고 있다. CO는 약 70초까지 증가하다가 그 이후에 증가추세가 완만해지고 있다. 이것은 앞에서 언급한 것과 같이 CO의 촉매 활성온도가 비교적 낮기 때문이다. 그림 16은 NO_x의 축적량을 나타내고 있다. NO_x의 배출특성은 연소시작 후부터 대단히 작은 기울기로 증가하고 있다. 이것은 TWC의 한 특성으로 이론공연비보다 농후한 영역에서 NO_x의 정화율은 대단히 높기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 FTP 75mode 시험 결과를 Low Emis-

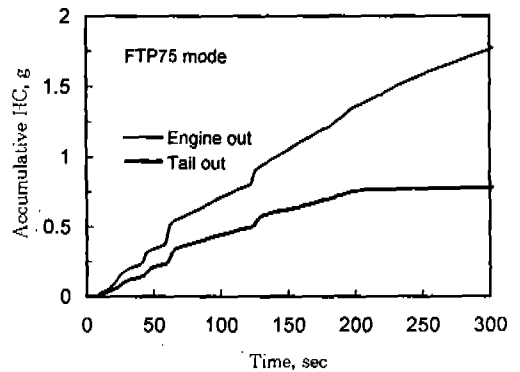


Fig.14 Accumulative HC of CNGV during phase 1 of the FTP 75 mode

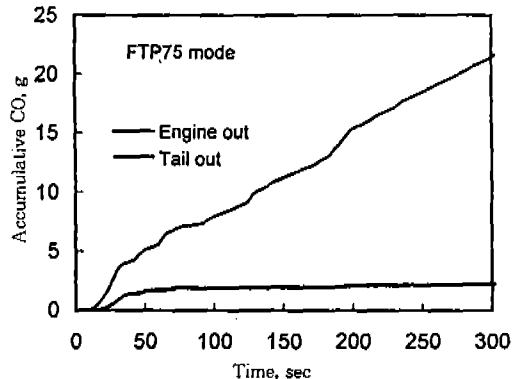


Fig.15 Accumulative CO of CNGV during phase 1 of the FTP 75 mode

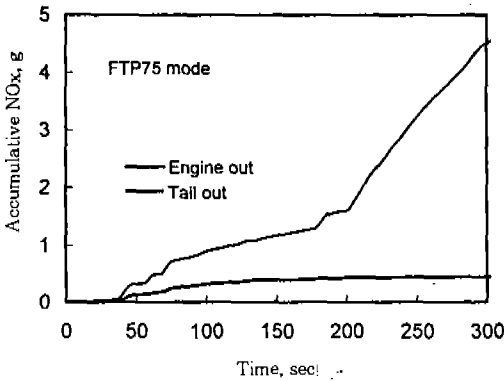


Fig.16 Accumulative NOx of CNGV during phase 1 of the FTP 75 mode

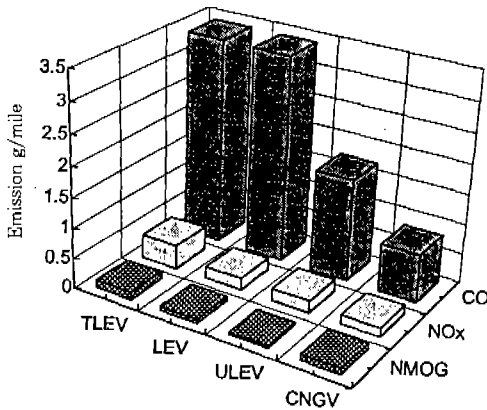


Fig.17 Test results of the fresh catalyst by the FTP 75 mode

sion Vehicle(LEV) 규제치와 비교한 결과를 그림 17에 나타낸다. 여기서 CNGV의 NMOG(Non-methane Organic Gas) 값은 측정된 THC(Total Hydrocarbon) 농도를 CARB에서 제안한 Reactivity Adjustment Factors(천연가스 자동차의 경우 0.43)를 곱하여 산정한 값이다¹⁴⁾. CNGV용 fresh 촉매의 시험 결과, CO 농도는 ULEV 규제치의 50% 이하를 나타내고 있다. 따라서, 그림 10에서 CNGV의 CO가 GV보다 고농도로 배출되었지만 ULEV 기준치에 관해서는 문제가 되지 않는다. NOx는 ULEV 규제치의 75% 수준으로 만족하고 있다. HC는 TLEV

규제치를 만족하지만, LEV 규제치를 25% 정도 초과하고 있다. 이를 저감시키기 위해서는 엔진의 공연비가 GV보다 농후한 쪽으로 shift하며 좁은 영역의 λ-window에 들어갈 수 있는 정밀한 CNGV 특유의 공연비 제어를 할 필요가 있다. 그리고, HC는 그림 14에서 본바와 같이 초기의 냉시동후 약 200초간에 배출되는 양을 줄이는 것이 최상의 방법이라 생각된다. 이를 위해서는 light-off time이 짧고 저온에서의 활성이 좋은 새로운 촉매의 개발 혹은 코스트가 다소 증가하더라도 close-coupled catalyst(CCC) 등과 같은 보조적인 시스템을 이용하여 시동 직후 가능한 짧은 시간에 촉매의 온도를 활성온도로 상승시키는 방법도 생각할 수 있다.

4. 결 론

이상 천연가스 자동차 엔진의 배출가스의 특성을 가솔린 자동차와 비교 검토하고, 이들의 저감을 위하여 전용촉매를 개발하여 배기정화에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 메탄의 정화에는 촉매의 MS계 washcoat가 (MS+B)계 washcoat보다 우수하며, 귀금속 중에서는 Pd 촉매가 다른 Pt, Pd/Pt/Rh 촉매보다 우수하다.
- 2) 천연가스 자동차의 FTP 75 mode 시험에서 냉시동 후 약 200초간에 배출되는 HC의 전배출량은 약 60%로 가솔린자동차의 약 80%에 비해 낮지만 그 성분의 약 80%는 메탄이 차지하고 있다.
- 3) 삼원촉매 시스템의 천연가스 자동차의 운전조건이 rich한 공연비에서 운전되는 것은, 배기 중 메탄이 NOx의 환원제로서 기여도가 크지 못하여 CO를 환원제로 이용하기 위한 것이다.

본 연구는 95년 G7 차세대 자동차 기술 산업의 일환으로 대우자동차가 주관하고 있는 “압축천연가스를 사용하는 고효율엔진의 설계기술” 사업의 위탁과제로 실시한 성과의 일부임을 부기하며, 과제수행비의 일부를 지원해 주신 통상산업부, 과기처 및 대우자동차의 관계자께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Hu, Z., Heck, R. M., High Temperature Ultra Stable Close-Coupled Catalyst, SAE paper No. 950254.
2. Socha, L. S., Thompson, F. and Weber, P. A., Optimization of Extruded Electrically Heated Catalysts, SAE paper No. 940468.
3. Langen, P., Theissen, M., Mallog, J. and Zielinski, R., Heated Catalytic Converter Competing Technologies to Meet LEV Emission Standards, SAE paper No. 940470.
4. Sakai, T., Choi, B. C., Osuga, R., Ko, Y. and Kim E., Unburned Fuel and Formaldehyde Purification Characteristics of Catalytic Converters for Natural Gas Fueled Automotive Engine, SAE paper No. 920596.
5. Choi, B. C. and Sakai, T., Characteristics of Formaldehyde Formation from Catalytic Reaction of Methane in the Presence of NO, SAE paper No. 942008.
6. Subramanian, S., Kudla, R. J. and Chattha, M. S., Treatment of Natural Gas Vehicle Exhaust, SAE paper No. 930223.
7. Sakai, T., Reviews on the Current Technologies of HD Natural Gas Engines for Automotive Use, 8th Int. Pacific Conference on Automotive Engineering(Japan), 1995. 11.
8. Choi, B. C. and Sakai, T., Characteristics of Methane Oxidation Reaction on Pd/Al₂O₃ Catalysts Loaded with Lanthanoid, The 11th Internal Combustion Engine Symposium, Japan, 1993. 7.
9. Seko, T., Hori, M. and Kim, E., Comparison of Various Methanol Combustion Systems for Heavy-Duty application, 8th Int. Symposium on Alcohol Fuels(Japan), 1988.
10. Takiguchi, M., Furuhashi, S., Suzuki, T. and Tsujita, M., Combustion Improvement of Liquid Hydrogen Fueled Engine for Medium-Duty Trucks, SAE paper No. 870535.
11. Einang, P., Valberg, I. and Gausen, H., Emission Optimized Lean Burn Gas Engine Using Electronic Control System, The 3rd Binnual Int. Conf. & Exhi. on Natural Gas Vehicles, 1992.
12. Ishii, M., Ishizawa, S., Inada, E., Experimental Studies on a natural Gas Vehicle, SAE paper No. 942005.
13. Yuu, Y., Torikai, Y., Sato, S., Iwamoto, M., Selective Catalytic Reduction of NO by Hydrocarbons in Oxidizing Atmosphere, Catalyst(in Japan), Vol.33, No.2, 1991.
14. CARB, Proposed Amendments to Low-Emission Vehicle Regulations, May, 1, 1995.