



운전조건 변화가 HCNG 엔진용 삼원촉매 전환효율에 미치는 영향

김창기 · 이성원 · 이의형 · [†]박철웅 · 이선엽 · 최 영 · 이장희

한국기계연구원 그린동력연구실

(2015년 11월 2일 접수, 2015년 12월 23일 수정, 2015년 12월 24일 채택)

Effect of Operating Condition Change on the Conversion Efficiency of TWC with HCNG Engine

Chang-Gi Kim · Sung-Won Lee · Ui-Hyung Yi

[†]Cheol-Woong Park · Sun-Youp Lee · Young Choi · Jang-Hee Lee

Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-Ro
Yuseong-Gu Daejeon 305-343, Korea

(Received November 2, 2015; Revised December 23, 2015; Accepted December 24, 2015)

요약

이론공연비방식 엔진은 삼원촉매를 이용하여 유해배기가스를 매우 효과적으로 저감시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 삼원촉매는 높은 정화효율을 보이는 공연비범위가 좁기 때문에 엔진에서의 공연비 제어가 매우 중요하다. 본 연구에서는 삼원촉매 성능을 평가하기 위하여 다양한 운전영역에서 삼원촉매의 전환효율을 비교 분석하였다. 최적의 전환효율을 보이는 당량비를 확인하기 위하여 당량비 제어값 변화에 의한 전환효율을 살펴보았다. 실험결과 당량비 제어를 통하여 각 운전조건에서 NMHC, CH₄, CO 및 NO_x의 전환효율이 95% 이상 나타내는 최적 운전조건을 찾을 수 있었다. 동등한 배기가스 온도 조건에서는 출력이 증가할수록 최적당량비가 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

Abstract - Stoichiometric combustion engine with Three-way catalyst had an advantage that can reduce the harmful emissions effectively. Fuel equivalence ratio controlled from engine is very important because Fuel equivalence ratio with high conversion efficiency was narrow. This study analyzed the conversion efficiency under whole range of operating area for to evaluate the performance of three-way catalyst. In order to identify the Optimum conversion efficiency, the conversion efficiency due to change the control value of fuel equivalence ratio was investigated. The result show that conversion efficiency of emissions(more than 95%) has discovered by means of fuel equivalence ratio control at each test condition. As engine power increases, optimal fuel equivalence ratio tended to increase linearly under operating conditions of similar exhaust gas temperature.

Key words : HCNG(Hydrogen- Compressed Natural gas Blends), stoichiometric, TWC(Three-way Catalyst), conversion efficiency, equivalence ratio

1. 서론

시내버스용 대형 천연가스엔진은 에너지다변화 및 배기가스 저감을 위하여 2000년 초부터 우리나라

에 보급되어 왔으며 현재 대부분의 시내버스는 천연 가스엔진을 사용하고 있다. 도입초기에는 배기규제가 엄격하지 않아 희박연소를 통해 연비 및 배기가스 규제를 동시에 만족할 수 있었다. 하지만 배기가스 규제치가 더욱 엄격해진 EURO-6가 시행됨에 따라 De-NO_x촉매 및 메탄산화촉매와 같은 고가의 후처리 장치가 필수적인 요소가 되었다. 이러한 영향

[†]Corresponding author:cwpark@kimm.re.kr
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

으로 이론공연비 방식의 천연가스엔진이 다시 부각되어 현재 EURO-6을 만족하는 대형 천연가스엔진은 희박연소와 이론공연비방식 엔진이 공존하고 있다. 하지만 미규제물질 및 OBD(On-board diagnostics)기능이 강화될 것으로 예상되는 차기배기가스 규제를 만족하기 위해서는 삼원촉매를 활용할 수 있는 이론공연비연소 방식이 상대적으로 유리하다고 인식되고 있다.[1,2]

이론공연비연소는 연소실에 흡입된 공기와 연료가 화학 반응하여 완전 연소하는 방식을 의미하며 연료에 따라 각기 다른 이론공연비를 가지고 있다. 삼원촉매는 이론공연비 부근에서 배출가스를 대부분 정화할 수 있는 촉매이며 상대적으로 구조가 단순하여 OBD 적용이 유리하다. 또한 배기가스 규제를 하나의 촉매로 대응할 수 있기 때문에 경제적으로도 유리한 장점을 가지고 있다. 하지만 희박연소방식에 대비하여 연비가 낮으며 연소온도가 높기 때문에 열내구성 측면에서 단점을 가지고 있다. 이론공연비 엔진의 주요 개발방향은 효율증가와 연소온도 감소에 의한 열내구성 향상이다. EGR율을 증가를 통하여 연비 향상 및 연소온도 감소를 동시에 향상시키는 연구가 이루어지고 있다.[3,4]

HCNG엔진은 수소와 천연가스를 혼합한 믹스가스를 사용하는 엔진을 의미하며 연료의 탄소대비 수소의 비율이 높기 때문에 이산화탄소가 원천적으로 저감되는 장점을 가지고 있다. 특히 수소의 빠른 화염속도의 영향으로 고 EGR율에서도 연소안정성을 확보할 수 있기 때문에 이론공연비방식 엔진개발 측면에서 많은 주목을 받고 있다.[5-7]

삼원촉매는 희박한 운전조건에서는 질소산화물의 전환효율이 매우 낮으며 유해 배출가스가 모두 저감

되는 공연비범위가 좁기 때문에 엔진에서의 공연비 제어가 매우 중요하다.[8,9] 이에 본 연구에서는 이론공연비 HCNG엔진개발의 일환으로써 다양한 운전영역에서 삼원촉매의 전환효율을 비교 분석하고 최적의 전환효율을 발휘하는 당량비를 도출하여 데이터베이스로 활용하고자 한다.

II. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 장치

본 연구의 대상이 되는 엔진은 11L급 대형 천연가스 엔진을 기반으로 하여 HCNG 연료 공급 및 이론공연비 연소를 구현할 수 있도록 개발 중인 엔진이다. 고압축비 피스톤 및 EGR시스템이 추가된 사양이며 엔진제원은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 연료공급 시스템 및 엔진을 포함한 실험장치의 전체

Table 1. Engine specification

Type	Description
Number of cylinders	6 ea
Displaced volume	11.051 L
Compression ratio	11.5 : 1
Max power	222kW at 2000rpm
Max. torque	1150Nm at 1260rpm
Type of ignition	Spark ignition
Type of turbocharger	waste gate
EGR	LP-EGR

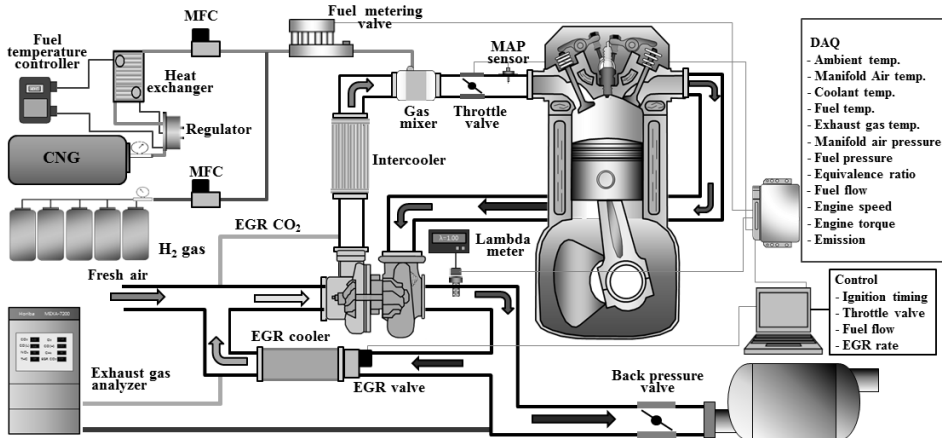


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

Table 2. Specification of Tree-way catalyst

composition	Pt, Pd, Rh trimetallic
size [mm]	266.7 × 152.4 (10.5 × 6")
cell density [cps/mil]	400/6
Substrate material	cordierite

적인 구성을 보여주고 있다. 엔진은 와전류식 동력계 (Schenck co.)에 연계하여 설치하였으며 동력계 제어 프로그램(Dcon, Dasan RND co.)를 사용하여 엔진의 속도 및 부하를 제어하였다.

HCNG는 천연가스와 수소의 혼합가스를 의미한다. 각 연료를 적정 체적비율로 혼합하기 위한 공급량 제어장치를 포함한 연료 공급시스템을 구성하였다. 천연가스는 약 20 MPa 로 충전된 고압용기에서 레귤레이터를 거친 후 약 0.7 MPa로 감압되어 공급된다. 연료의 팽창에 의한 냉각을 막기 위해 40°C로 제어되는 열교환기를 설치하였으며 천연가스의 공급 유량은 MF(Mass flow meter)을 통하여 측정된다. 수소는 안정적인 공급을 위하여 약 10 MPa로 충전된 고압수소가스용기를 병렬로 연결한 후 레귤레이터 전단으로 공급이 이루어질 수 있도록 설치하였다. 약 0.7 MPa로 감압된 수소의 공급유량은 MFC (Mass flow controller)를 이용하여 제어된다. HCNG 연료는 MF(Mass flow meter)로 측정된 천연가스의 체적유량에 대비하여 수소의 체적유량 비율을 MFC로 컨트롤하여 혼합된다. 연료는 6개의 가스 인젝터로 이루어진 FMV (Fuel metering valve)에서 분사되며 가스믹서를 통하여 흡입공기와 예혼합된 후 흡기매니폴드로 공급된다. 모든 운전조건에서 적절한 엔진냉각수온도(82.5 ± 2.5°C)와 흡입공기온도(40 ± 2.5°C)를 유지할 수 있는 냉각수 온도제어 및 인터쿨러 온도제어 시스템을 구성하였다. EGR 가스를 연소실에 공급하기 위하여 터보차저 후단의 배기가스를 인터쿨러 전단에 공급하는 저압 EGR 시스템을 구성하였다.

ECU제어프로그램(Woodward Co.)을 사용하여 엔진의 운전상태 확인 및 당량비등의 연소조건을 제어 하였다. 온도 및 압력등과 같은 전반적인 실험결과 데이터는 GL820(Graphtec Co.)을 통하여 취득하였으며 배기분석기(AMA i60, AVL Co.)을 사용하여 주요 배출가스인 일산화탄소(CO), 탄화수소계열 배출가스(NMHC), 메탄(CH₄) 및 질소산화물(NO_x)등을 측정하였다. 연구의 대상이 되는 촉매는 HCNG 엔진 개발용으로 제작된 시제품이며 Table 2에 촉매 사양을 나타내었다.

Table 3. Fuel properties

Property	HCNG30
Volume portion of H ₂ [%]	30
Weight portion of H ₂ [%]	4.62
Energy portion of H ₂ [%]	10.55
H/C ratio [-]	4.54
(A/F) _{stoich} [-]	17.62
Low Heating value [MJ/Nm ³]	30.69
Low Heating value [MJ/kg]	52.56
Density at 20°C [kg/m ³]	0.5441

2.2 실험 방법

삼원촉매 전환효율은 당량비 뿐만 아니라 배기 유량 및 배기가스온도 등 엔진운전 조건에 영향을 받기 때문에 다양한 운전영역에 대한 실험데이터가 필요하다. 본연구의 실험 운전영역은 사용빈도가 적은 600 rpm (Idle)을 제외한 800rpm에서 최대 출력 엔진회전수인 2000rpm까지이며, 200 rpm 간격으로 운전조건을 변경하였다. 이때의 엔진부하조건은 25%, 50%, 75%, 100%이다.

주요 평가인자인 당량비는 ECU에서 feedback 제어로 이루어지며 설정하고자 하는 당량비인 Desired phi 값을 변경하여 엔진 운전조건에 따라 제어값을 변경할 수 있다. 기준이 되는 운전조건을 17.62의 이론공연비에 해당하는 당량비 1.0으로 설정하였으며, 당량비 증가에 따른 효과를 살펴보기 위하여 Desired phi를 0.005 씩 증가시켜가며 개발용 삼원촉매의 HC, CO 및 NO_x의 전환효율을 비교 분석하였다.

엔진이 충분히 예열된 후 모든 실험을 진행하였으며 온도, 압력 연료량 및 배기가스등의 측정 데이터는 엔진이 안정된 상태에서 취득하였다. 수소의 혼합비율은 이전 연구결과를 바탕으로 최적의 효율로 판단되는 HCNG30(H₂ 30 vol%, CNG 70 vol%)을 사용하였으며, 연료속성은 Table 3과 같다.[10]

III. 실험결과

Fig. 2는 이론공연비연소를 위하여 다양한 운전영역에서 Desired phi를 1.0으로 설정한 기본 상태에서의 실험 결과이며 촉매전단 배기파이프에서 측정된 당량비를 보여주고 있다. ECU에서 제어되는 당량비는 Desired phi에 비하여 희박하게 제어되는 것을 볼 수 있으며, 최소 약 0.988에서 최대 약 0.994의 측정값을 보여주고 있다. 이러한 희박한 운전 상태는

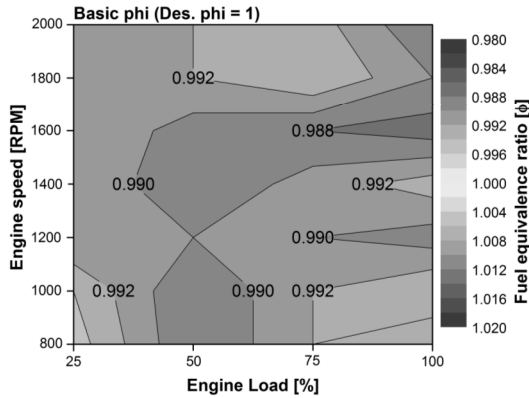


Fig. 2. Fuel equivalence ratio according to Engine load and speed at basic phi.

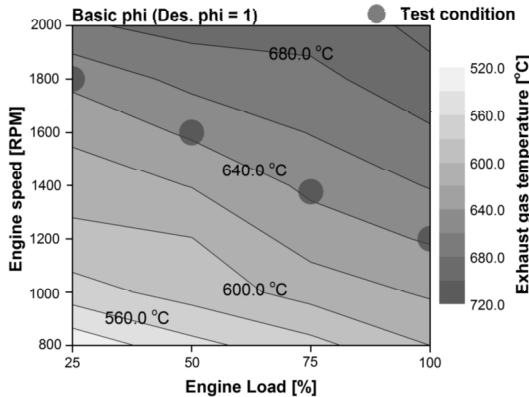


Fig. 3. Exhaust gas temperature and test condition according to Engine load and speed at basic phi.

삼원촉매 전환효율에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 Desired phi 변경을 통하여 1.0에 가깝게 제어되어야만 한다.

저속 저 부하 운전영역에서는 상대적으로 희박하게 제어되며 고속 고부하 운전영역에서는 농후하게 제어되는 경향을 보이고 있다. 이는 배기유량이 많아짐에 따라 공급연료 유량의 미세한 편차에 의한 영향이 증가하여 나타나는 현상으로 판단된다. 800 rpm 20% 운전조건 대비 2000 rpm 100% 조건에서 배기유량은 최대 약 8.8배 증가한다. 이때 당량비는 약 0.006 낮게 제어되어 상대적으로 희박하게 운전되는 것을 볼 수 있다. 같은 Desired phi로 엔진을 운전할 경우 운전조건에 따라 실제 측정되는 당량비의 차이를 보이기 때문에 각 운전조건에 따른 제어 값이 필요할 것으로 판단된다.

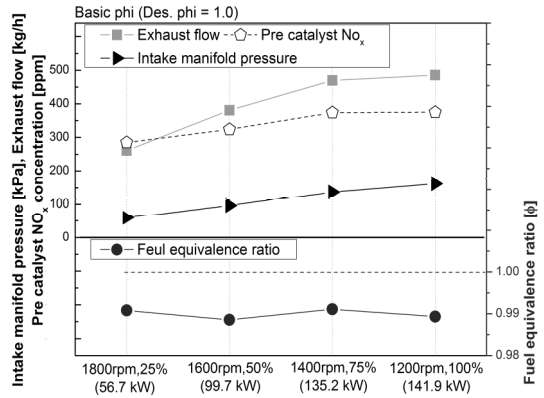


Fig. 4. Exhaust gas flow, NOx concentration and fuel equivalence ratio at each test conditions.

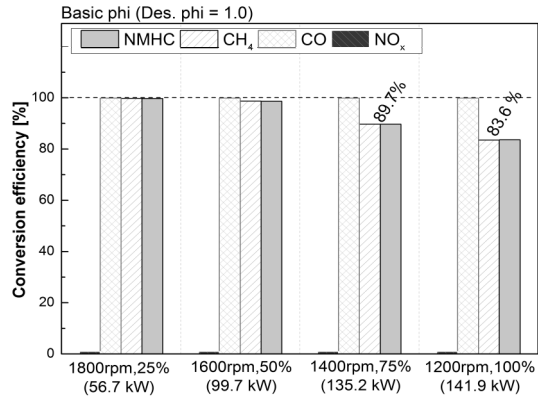


Fig. 5. THC, CH₄, CO and NO_x conversion efficiency at each test conditions.

Fig. 3은 기본 상태에서 엔진부하 및 엔진 회전수에 따른 배기가스온도를 보여주고 있다. 엔진 출력이 증가함에 따라 배기가스 온도가 약 540°C에서 약 700°C까지 증가하는 경향을 보이고 있다. 삼원촉매의 경우 배기가스온도가 너무 낮으면 활성화 에너지 부족으로 전환효율이 낮아지며 전환효율이 최대가 되는 온도영역을 넘어서면 열에 의한 활성화 저하로 전환효율이 오히려 감소할 수 있다. 따라서 특정 변수에 따른 전환효율을 분석하기 위해서는 동등한 배기온도를 보이는 운전영역에서 평가가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구의 주요 실험운전조건은 640°C의 동등한 배기온도를 보이는 운전영역이며, 이때의 엔진회전수 및 엔진부하는 1200 rpm 100%, 1400 rpm 75%, 1600 rpm 50% 및 1800 rpm 25%이다.

Fig. 4는 각 테스트조건에서 배기유량, 촉매전단

O₂ 배출량 및 당량비를 보여주고 있다. 엔진회전수와는 무관하게 출력이 증가함에 따라 배기유량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 스토틀링에 따른 결과이며, 흡기압력을 살펴보면 고출력으로 갈수록 증가하며 테스트 조건 내에서 최대 3배 이상 증가하는 결과를 보였다. NO_x 배출량은 촉매전단에서 측정된 결과이며, 출력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 특히 1400 rpm 75% 및 1200 rpm 100%에서 최대 32% 증가하였다. 아래쪽에 도시화한 그래프는 당량비를 보여주고 있으며 모든 테스트조건에서 1.0이하로 희박하게 운전되는 결과를 보였다.

Fig. 5는 NMHC, CH₄, CO 및 NO_x의 전환효율을 보여주고 있다. NMHC와 CH₄의 경우 저출력 조건에서는 100%에 근접한 전환효율을 나타내지만, 배기가스온도가 640°C 수준으로 동등한 운전조건임에도 불구하고 1400 rpm 75% 및 1200 rpm 100%에서는 10% 이상 전환효율이 낮은 것을 볼 수 있다. 일반적으로 촉매는 담체체적과 배기유량으로 계산되어지는 공간속도를 기준으로 정화용량이 정해져 있다. 따라서 배기유량 증가로 인하여 정화용량을 초과하는 고출력 운전조건에서는 전환효율이 떨어지는 결과를 보인 것으로 판단된다. 또한 배기가스에 NO_x가 많이 포함되어 있으면 탄화수소 계 배출가스(HC)의 산화 성능이 떨어진다고 알려져 있으며[9], 본 실험에서도 전환효율이 낮은 고출력 운전조건에서 촉매전단 NO_x 배출량이 상대적으로 많은 것을 볼 수 있다.

CO의 경우 모든 운전조건에서 99.5% 이상의 전환효율을 보여주고 있다. CO의 경우 배출가스중 반응성이 제일 좋은 것으로 알려져 있으며 가장 우선적

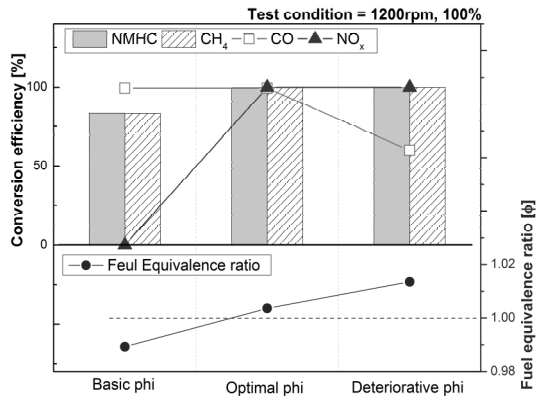


Fig. 6. Emissions conversion efficiency and trend of Fuel equivalence ratio at 1200rpm 100% condition.

으로 반응하기 때문에 고출력 운전조건에서도 상대적으로 높은 전환효율을 나타낸 것으로 판단된다. NO_x의 경우 전환효율이 0%에 근접한 결과를 보이고 있다. 각 실험조건에서 약 0.99의 희박한 운전조건을 보이고 있으며 이러한 산소가 많은 조건에서는 NO_x가 환원되기 어려운 환경이기 때문에 삼원촉매에서 환원되지 않고 배출된 것으로 판단된다.

NMHC, CH₄ 및 NO_x의 전환효율을 높이기 위해서는 당량비를 1.0에 가깝게 증가시켜 삼원촉매의 정화성능을 높이는 것이 가장 효율적이다. 일반적으로 삼원촉매 시스템에서 HC, CO, NO_x의 전환효율이 모두 80% 이상 일 때의 공연비를 λ-window라고 정의하고 있다. 본 연구에서는 세 가지 배출가스의 목표 전환효율을 95% 이상이며, 이때의 당량비를

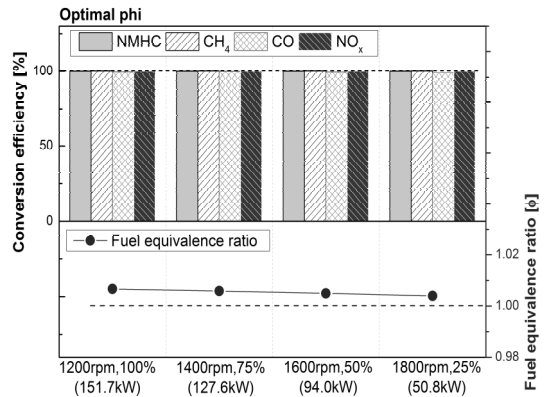


Fig. 7. Emissions conversion efficiency and trend of Fuel equivalence ratio at test condition with Optimal phi.

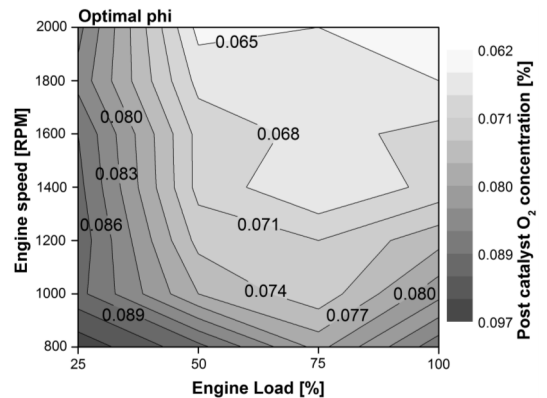


Fig. 8. Post catalyst O₂ concentration according to engine speed and load at optimal phi.

Optimal phi로 정의하였다. 당량비가 계속 증가함에 따라 산소 부족으로 CO가 증가하는 조건까지 실험을 진행하였으며 Deteriorative phi로 정의 하였다.

실험조건 중 배기유량이 가장 많고 엔진의 최대토크 조건과 유사한 1200rpm 100% 운전조건에서 당량비 증가에 따른 배출가스 전환효율을 살펴보았으며 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 기본 상태에서 약 83% 이었던 HC 전환효율은 Optimal phi에서 99.5% 이상 증가하며, 0%에 가깝던 NO_x의 전환효율도 99.5%까지 증가하는 결과를 보였다. 이는 당량비가 증가로 통하여 산화와 환원의 동시반응이 가장 높은 당량비 범위에 도달하였기 때문이다. 하지만 Optimal phi 이상의 당량비로 증가시키면 촉매내의 산소가 부족하여 CO의 전환효율이 감소하는 결과를 보이고 있다.

Fig. 7은 Optimal phi에서 각 운전조건의 전환효율과 당시의 당량비 값을 보여주고 있다. 각 운전조건에 대한 전환효율은 100%에 근접한 결과를 보이고 있으며 당량비의 경우 출력이 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 동등한 배기가스 온도 조건에서는 배기유량이 증가함에 따라 Optimal phi에 도달하기 위한 당량비도 같이 증가하는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 촉매 후단에서 O₂량을 feedback 제어하는 방식이 아닌 촉매 전단의 O₂량으로 당량비를 제어하는 방식을 사용하고 있다. 하지만 안정적으로 산화촉매의 전환효율을 최상으로 유지하기 위해서는 촉매후단의 feedback 제어가 필요하다.

Fig. 8은 촉매의 전환효율이 99.5%이상 나타나는 Optimal phi로 다양한 운전영역을 mapping한 후 촉매후단의 O₂ 배출량을 측정된 결과이다. 각 운전조건에 따라 촉매전단의 O₂량은 상이한 결과를 보였지만 Optimal phi에서 평균 0.08% 수준의 배출량을 보이고 있다. 또한 출력이 증가함에 따라 0.1%에서 0.06%까지 감소하는 경향을 보이고 있다. 배기가스 온도가 상대적으로 높은 고출력 운전조건에서는 O₂량의 변동 폭이 크지 않지만 상대적으로 배기가스 온도가 낮은 저부하 운전조건에는 O₂량의 변동 폭이 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 과도응답 운전조건에서 촉매후단 feedback 제어를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

IV. 결론

본 연구에서는 이론공연비 HCNG엔진 개발의 일환으로써 개발용 삼원촉매의 성능을 평가하기 위하여 다양한 운전영역에서 전환효율 실험을 수행하였다. 최적의 전환효율을 보이는 Optimal phi를 찾기 위하

여 당량비 제어값을 증가시켜가며 각 배출가스의 전환효율을 비교 분석한 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) ECU 프로그램을 통하여 제어되는 당량비의 경우 des. phi보다 희박하게 제어됨을 알 수 있었으며, 이에 따라 NO_x의 전환효율이 0%에 근접한 결과를 보였다. 또한 고출력 운전조건에서는 배기유량 증가로 인하여 HC 전환효율도 85%이하로 감소하는 결과를 보였다.

2) 전환효율이 100%에 근접하는 Optimal phi는 최소 1.002에서 최대 1.008이었으며 출력이 증가할수록 Optimal phi가 선형적으로 증가하는 결과를 볼 수 있었다.

3) 시험 운전영역 Optimal phi에서 측정되는 촉매후단 O₂량은 0.06% ~ 0.1% 범위이며 출력이 증가할수록 감소하는 경향을 볼 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 친환경자동차기술개발사업단의 "Post EURO-6 대응 시내버스용 수소-천연가스 혼합연료(HCNG) 엔진 개발" 과제 일환으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

REFERENCES

- [1] Kallinen, K., Harkonen, M. and Pitkanen, M., "Advanced Catalysts for CNG-Engines", *SAE Technical paper*, 2004-25-0028 (2004)
- [2] Khan, M. I., Yasmin, T. and Shakoore, A., "Technical Overview of Compressed Natural Gas (CNG) as a Transportation Fuel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 785-797, (2015)
- [3] Schoengaber, J., Richter, J. M., Despres, J., Schmidt, M., Spiess, S. and Roesch, M., "Advanced TWC Technology to Cover Future Emission", *SAE Technical paper*, 2015-01-0999 (2015)
- [4] Alger, T., Gingrich, J. and Mangold, B., "The Effect of Hydrogen Enrichment on EGR Tolerance in Spark Ignited Engines", *SAE Technical paper*, 2007-01-0475 (2007)
- [5] Jilakara, S., Vaithianathan, J. V., Natarajan, S., Ramakrishnan, V. R., Subash, G. P. and Abraham, M., "An Experimental Study of Turbocharged Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engine", *SAE Technical paper*, 2015-26-0051

- (2007)
- [6] Hu, E. and Huang, Z., "Optimization on Ignition Timing and EGR Ratio of a Spark-Ignition Engine Fuelled with Natural GasHydrogen Blends", *SAE Technical paper*, 2011-01-0918 (2011)
- [7] Lee, S. W., Lee, U. H., Lee, S. Y., Choi, Y. and Kim, C. G., " A Study on the Applicablity of Piston for Stoichiometric HCNG engine", *KIGAS Spring conference*, 7, 9-9 (2015)
- [8] Saanum, I., Bysveen M., Tunestal,P., Johansson, B. "Lean Burn Versus Stoichiometric operation with EGR and 3-way Catalyst of an Engine Fueled with Natural Gas and Hydrogen-enriched Natural Gas", *SAE Technical paper*, 2007-01-0015 (2007)
- [9] Choi, B. C., "Development of Catalyst for Natural Gas Fueled Vehicle", *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, 17(2), 1-6, (1995)
- [10] Park, C. W., Kim, C. G., Choi, Y. and Won, S. H., "The Influence of Hydrogen on the Performance and Emission Characteristics of a Heavy Duty Natural Gas Engine" *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(5), 3739-3745, (2011)