

CNG/Diesel 이중연료용 엔진의 성능 및 배출가스 특성에 대한 연구[§]

임 옥 택^{*†}

* 울산대학교 기계자동차공학부

Study on Performance and Emission Characteristics of CNG/Diesel Dual-Fuel Engine

Ock Taeck Lim^{*†}

* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan Univ.

(Received July 5, 2010 ; Revised June 27, 2011 ; Accepted August 2, 2011)

Key Words : Diesel Engine(디젤엔진), Engine Performance(엔진성능), Compressed Natural Gas(CNG 압축천연가스), Dual-Fuel Engine(혼소엔진), Emission(배출물)

초록: CNG/diesel dual-fuel 엔진은 CNG를 주 연료로 사용하고 소량의 디젤을 착화제로서 실린더 내에 분사한다. 본 연구에서는 기존의 디젤엔진을 커먼레일직접분사(CRDI)를 통하여 고압으로 디젤을 분사하고, 예혼합을 위하여 CNG를 흡기포트에 분사하는 CNG/diesel dual-fuel 엔진으로 개조하였다. CNG/diesel dual-fuel engine은 기존의 디젤엔진과 동등한 수준의 토크 및 출력성능을 나타내었다. 또한, CNG 대체율은 CNG/diesel dual-fuel 엔진의 전체 운전영역에 대하여 89% 이상을 만족시켰다. Dual-fuel 엔진의 PM 배출농도는 디젤엔진보다 94% 더 낮게 나타났지만, NOx 배출농도는 더 높게 나타났다.

Abstract: In a CNG/diesel dual-fuel engine, CNG is used as the main fuel and a small amount of diesel is injected into the cylinder to provide ignition priming. In this study, a remodeling of the existing diesel engine into a CNG/diesel dual-fuel engine is proposed. In this engine, diesel is injected at a high pressure by common rail direct injection (CRDI) and CNG is injected at the intake port for premixing. The CNG/diesel dual-fuel engine had an equally satisfactory coordinate torque and power as the conventional diesel engine. Moreover, the CNG alternation rate is over 89% throughout the operating range of the CNG/diesel dual-fuel engine. PM emission by the dual-fuel engine is 94% lower than that by the diesel engine; however, NOx emission by the dual-fuel engine is higher than that by the diesel engine.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 지구온난화 및 환경오염 그리고, 화석연료 고갈의 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이에 따라 각국에서는 많은 양의 온실가스를 배출하는 자동차에 대한 배기규제가 강화되고 있으며, 청정 대체연료에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

천연가스는 청정대체연료로써 세계 여러 지역에 산재하여 안정적 수급이 가능하므로 석유부족에 따른 대체 에너지로서 크게 각광받고 있다.

기존 디젤엔진에 천연가스를 적용하는 방법은 Dedicated(전소)방식과 Dual-Fuel 방식이 있다. Dedicated 방식은 흡기관에 가스믹서를 장착하여 공기와 예혼합 시킨 후 스파크 점화를 통하여 착화시키는 엔진이다. 예혼합 연소에 의한 PM의 저감이라는 장점을 가지고 있지만, 압축비 저하에 따른 출력 및 열효율감소와 개조비용의 증가라는 단점을 가지고 있다.

Dual-Fuel 방식은 기존 디젤엔진의 하드웨어를 그대로 사용하면서, 흡기포트 상류에 가스 인젝터를 장착하여 예혼합기를 형성한다. 압축착화가 불가능한 천연가스의 착화를 위하여 소량의 디젤 파일럿분사를 통한 디젤분무화염을 이용한다.^(1,2)

CNG/Diesel Dual-Fuel 엔진은 공기와 연료가 예혼합되어 실린더 내에 흡입되고 디젤 파일럿 분사에 의해 압축착화하기 때문에, 오토사이클과 디젤사이클의 특징을 동시에 갖는다. 이러한

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 울산지회 춘계 학술대회(2010. 5. 14., 울산대) 발표논문임

† Corresponding Author, otlim@ulsan.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

Dual-Fuel 엔진의 장점은 크게 두 가지로 요약할 수 있다.

1) 디젤 분사에 의해 착화가 시작되기 때문에 착화시기의 제어가 용이하다.

2) 기존 디젤엔진에 대한 개조비용 및 개조시간이 적게 든다.⁽³⁾

Dual-Fuel 엔진에 대한 기존의 연구에서는 대부분 기계식 연료분사장치를 사용하거나 EUI 분사장치를 사용하는 대형엔진을 대상으로 하였다. J. M. Addy 등은 대형버스용 디젤엔진에 기계식 연료분사 펌프로 디젤을 실린더 내에 파일럿 분사하고, CNG 를 흡기에 설치된 인젝터로 분사하여 최대 86%의 천연가스 대체비율을 얻었다.⁽⁴⁾ W. P. Johnson 등은 EUI 와 유사한 개념의 연료분사 시스템을 적용하여 디젤을 파일럿 분사하고 천연가스를 흡기에 설치된 인젝터로 분사하여 최대 95%의 천연가스 대체비율을 얻을 수 있는 것으로 보고하고 있다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 최근에 적용되고 있는 CRDI 를 사용하는 중형 디젤엔진을 대상으로, CRDI 를 이용한 소량의 디젤 파일럿 분사를 착화에 사용하고, 흡기 매니폴드에 CNG 를 분사하여 주 연료로 사용하는 CNG/Diesel Dual-Fuel 엔진으로 개조하였다. 그리고 기존 디젤엔진과 Dual-Fuel 엔진의 성능 및 배출가스 특성에 대하여 비교·분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 CNG/Diesel Dual-Fuel 엔진의 실험장치 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다.

실험장치는 엔진 다이내모(DYTEK-3000K) 및 컨트롤러, Diesel 및 CNG 연료공급장치, 배기가스 분석계(MEXA-7100) 등으로 구성된다. 측정값은 엔진 회전속도(rpm), 토크 및 출력, 연료소모량, 흡입공기량, 공연비, 온도(냉각수, 윤활유, 연료, 흡기, 배기 등), 압력(커먼레일, 흡기, 부스트, 배기 등) 등이다. 배기가스 농도는 배기가스 분석계를 이용하여 측정하였고, PM 은 광투과식 스모크미터(OPA-101)를 이용하여 농도를 측정하였다. 배기가스 농도를 분석하기 위하여 샘플링 프로브를 배기관에 설치하였다.

실험대상엔진은 CRDI 연료분사시스템을 사용하는 4 기통 2.5ℓ 급의 직접분사 Diesel 엔진이다. Diesel 모드 및 CNG/Diesel Dual-Fuel 모드 실험을 수행하기 위하여 주 연료인 CNG 를 흡기 매니폴드에 분사할 수 있도록 개조하였다.

Table 1 Specifications of the test engine

Engine	Basic Diesel Engine	CNG/Diesel Dual-Fuel Engine
Type	In-line 4	←
Valve type	DOHC 4	←
Aspiration	TCI	←
Displacement volume[cc]	2497	←
Bore × Stroke[mm]	91×96	←
Compression ratio	17.6	←
Max. Torque[kg·m]	40.1/2000rpm	
Max. Power[PS]	174/3800rpm	
Fuel supply system	CRDI	CNG MPI Diesel CRDI

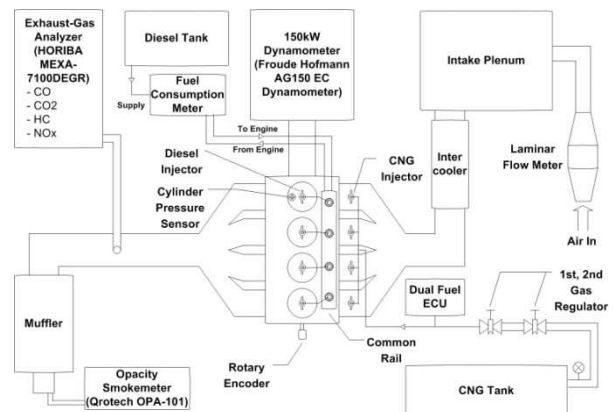


Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

Table 1 은 기존 디젤엔진과 개조한 CNG/Diesel Dual-Fuel 엔진의 제원을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 기존의 Diesel 연료 사용시에는 Diesel 을 Diesel 탱크로부터 Common Rail 로 공급하여 인젝터에 의해 실린더 내에 분사되는 기존의 시스템을 사용하였다. 그리고 CNG/Diesel Dual-Fuel 사용시에는 기존의 CRDI 연료공급시스템을 그대로 적용하여 소량의 Diesel 을 착화연료로 사용하면서, 별도의 CNG 연료공급시스템을 장착하여 CNG 를 공급할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

주 연료인 CNG 를 실린더 내에 공급하기 위하여 CNG 연료탱크, 탱크압력 레귤레이터, 솔레노이드 방식의 긴급차단밸브를 설치하였다. 그리고 가스 인젝터를 각 실린더 별로 1 개씩

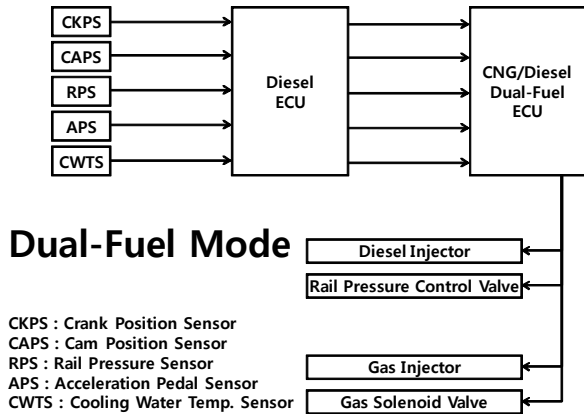


Fig. 2 Schematic diagram of engine control system

장착하여 흡기 매니폴드 상으로 분사하여 예혼합하는 MPI 방식을 사용하였다.

CNG 공급압력은 CNG 연료탱크로부터 두 개의 감압용 레귤레이터를 사용하여 분사 시 8bar 로 일정하게 유지시켰다. 그리고 솔레노이드 방식의 긴급 차단밸브를 설치하여 비상 시 또는 엔진 정지 시에 CNG 의 공급을 차단할 수 있도록 하였다.

Fig. 2 는 엔진제어시스템을 나타낸 것이다. 엔진 제어는 기존 디젤엔진의 ECU 를 사용하는 동시에 Dual-Fuel ECU 를 추가로 설치하여, Diesel 모드 및 Dual-Fuel 모드를 모두 사용할 수 있도록 하였다. 즉, 순수 Diesel 만 사용할 경우에는 기존 디젤엔진의 ECU 를 사용하고, CNG/Diesel Dual-Fuel 사용시에는 Dual-Fuel ECU 를 통해 엔진을 제어하였다. Dual-Fuel ECU 는 기존 엔진에 장착된 일부 센서(CKPS, CMPS, APS, Rail Pressure 등)의 출력데이터를 공유함으로써, Diesel 및 CNG 의 분사량 및 분사시기 제어가 가능하도록 하였다.

2.2 실험방법

CNG/Diesel Dual-Fuel 모드 실험에 앞서 Diesel 모드에서의 토크 및 출력, 연료분사시간, 연료분사 시기, 연료소모량 등을 확인하는 실험을 선행하여 기존 Diesel 엔진의 출력 및 배출가스 특성을 확인하였다. 이 실험결과는 Dual-Fuel 모드에서 Diesel 분사시기, Diesel 분사량 등의 선정을 위한 기초 데이터로 활용하였다.

Dual-Fuel 모드의 CNG 및 Diesel 의 분사량 및 분사시기의 선정은 Diesel 전소모드 실험에서 확인된 기초데이터를 참고하여 Diesel 분사량을 설정하고, Diesel 분사량을 감소시키면서 CNG 분사량을 증가시키는 방식으로 진행하였다. 선행

된 연료 분사량 및 분사시기 선정 결과를 기본으로 하여 분사시기 및 분사시간을 조절하고 Diesel 대체율 및 엔진의 동적 안정성 향상을 가져올 수 있도록 실험을 진행하였다.

기존의 Diesel 엔진과 CNG/Diesel Dual-Fuel 엔진의 성능 및 배출가스 특성을 비교하기 위하여 Diesel 모드와 Dual-Fuel 모드 실험 시, 모두 엔진 회전속도를 1000 ~ 3500rpm 까지 500rpm 간격으로 설정하여 전부하 영역에 대하여 실험을 수행하였다.

또한 각 조건에서 CNG 에 의한 디젤 절감율은 Diesel 모드와 CNG/Diesel Dual-Fuel 모드의 출력에 대비하여 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$Diesel_{Reduction} = \left[\left(\frac{Power_{Dual-Fuel}}{Power_{Diesel}} \right) \times Diesel_{Diesel} \right] + Diesel_{Dual-Fuel} \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 엔진 성능 특성

Fig. 3 과 Fig. 4 는 Diesel 모드와 CNG/Diesel Dual-Fuel 모드의 토크 및 출력을 나타낸 것이다. Dual-Fuel 모드에서의 성능은 기존 Diesel 엔진의 성능을 충족하도록 하여 동등한 수준을 만족하도록 Diesel 및 CNG 의 분사량과 분사시기를 조절하였다. 그 결과, Diesel 모드 실험 시 최대 토크 289 N·m/ 2500rpm, 최대 출력 128 PS/3500rpm 으로 나타났으며, CNG/Diesel Dual-Fuel 모드 실험 시 최대 토크 295 N·m/2500rpm, 최대 출력 132 PS/3500rpm 으로 나타났다. 따라서 Dual-Fuel 시스템을 적용한 본 엔진은 기존 Diesel 엔진 대비, 편차 5% 이내의 출력특성을 가지도록 하였으며, 디젤엔진과 동등한 수준의 엔진성능을 만족시킬 수 있도록 하였다.

Fig. 5 는 Diesel 모드에 대비한 Dual-Fuel 모드의 Diesel 절감율을 나타낸 것이다. Diesel 절감율은 선행된 Diesel 모드 실험의 Diesel 소모량 결과와 CNG/Diesel Dual-Fuel 실험에서의 Diesel 소모량을 출력에 대비하여 계산하였다. 그 결과, Dual-Fuel 모드의 전 엔진운전영역에 대하여 최대 90%의 Diesel 절감율을 확보할 수 있었다.

Fig. 6 은 각 조건에서의 A/F 를 나타낸 것이다. 전 운전영역에 대하여 기존 Diesel 엔진보다 Dual-Fuel 엔진에서 더 희박한 운전이 가능한 것을 알 수 있다.

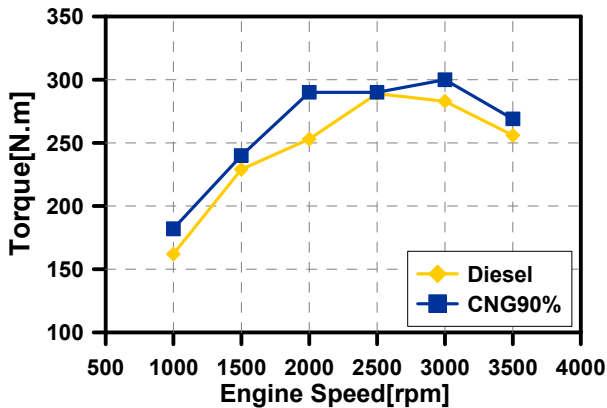


Fig. 3 Comparison of torque output

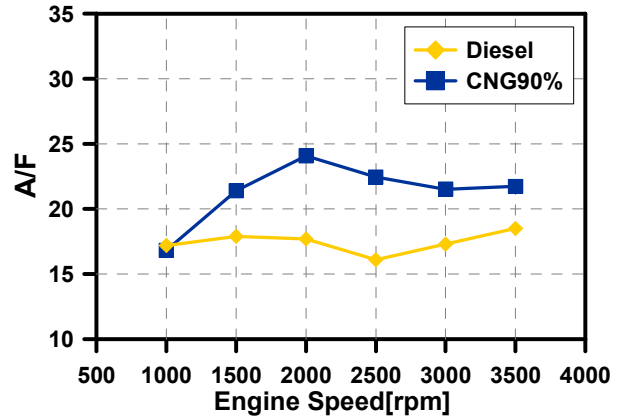


Fig. 6 Comparison of A/F

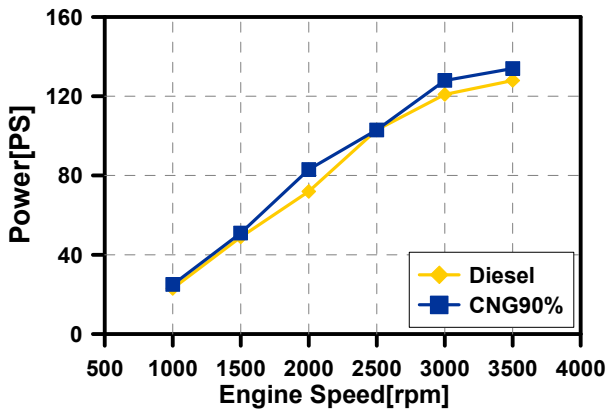


Fig. 4 Comparison of power output

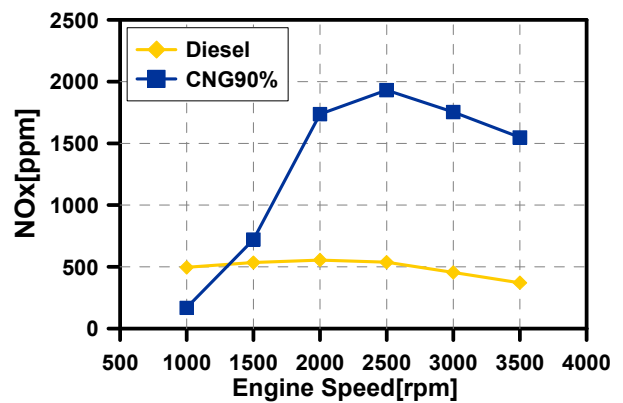


Fig. 7 Comparison of NOx emissions

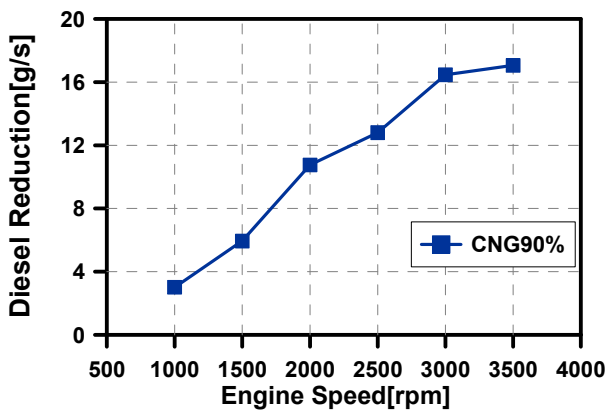


Fig. 5 Diesel Reduction rate contrast to existing diesel engine

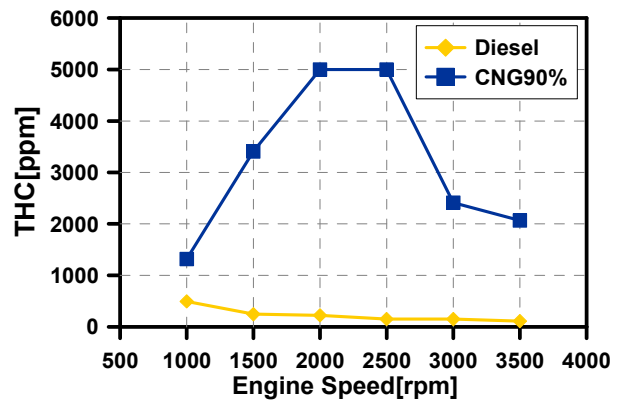


Fig. 8 Comparison of THC emissions

3.2 배출가스 특성

Fig. 7 은 Diesel 모드와 Dual-Fuel 모드의 NOx 배출가스 특성을 나타낸 것이다. Diesel 모드 실험 시 NOx 배출농도는 전 운전영역에 대하여 600ppm 이하로 나타났다. Dual-Fuel 모드 실험 시에는 모든 조건에 대하여 Diesel 모드보다 NOx 배출농도가 증가하였다. Dual-Fuel 모드에서 NOx

배출농도가 더 높은 이유는 균질한 CNG 예혼합기 때문에 연소속도가 증가하고, 이에 따라 실린더 내 압력 및 온도 증가에 따른 것으로 판단된다.

Fig. 8 은 Diesel 모드와 Dual-Fuel 모드의 THC 배출가스 특성을 나타낸 것이다. Diesel 모드 실험 시 THC 배출농도는 전 운전영역에서 500ppm 이하로 나타났다. Dual-Fuel 모드 실험 시 Diesel 모드에 비해 많은 양의 THC 가 배출된 것으로 나타났다.

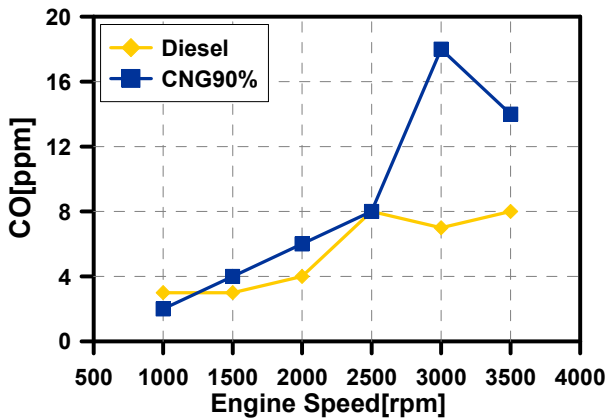


Fig. 9 Comparison of CO emissions

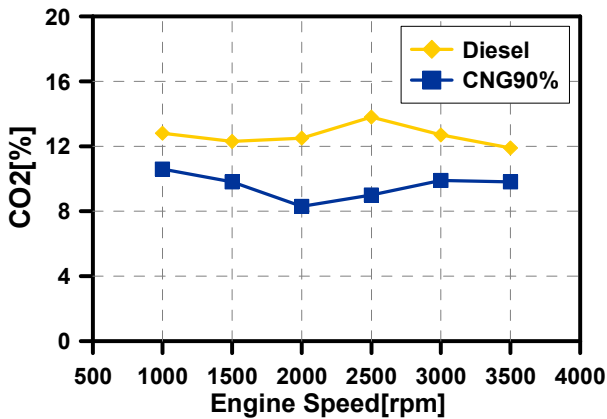


Fig. 10 Comparison of CO2 emissions

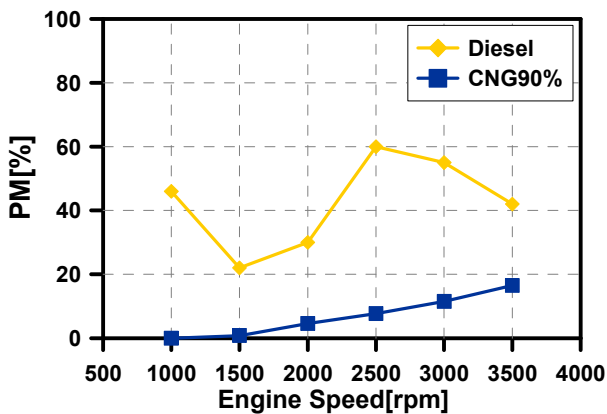


Fig. 11 Comparison of PM emissions

Fig. 9 는 Diesel 모드와 Dual-Fuel 모드의 CO 배출가스 특성을 나타낸 것이다. Diesel 모드와 Dual-Fuel 모드에서 CO 배출농도는 엔진회전수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 Dual-Fuel 모드에서 CO 의 배출농도가 조금 더 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 10 은 Diesel 모드와 Dual-Fuel 모드의 CO₂ 배출가스 특성을 나타낸 것이다. 두 모드에서

rpm 에 따른 배출농도 변화는 거의 없었으며, Diesel 모드 실험 시 CO₂ 배출농도가 더 높게 나타났다. 이는 Diesel 보다 CNG 의 탄소함량이 적기 때문으로 판단된다. 전 운전영역에 대하여 Diesel 모드에 비해 Dual-Fuel 모드에서 약 30%의 CO₂ 가 저감되었다.

Fig. 11 은 Diesel 모드와 Dual-Fuel 모드의 PM 배출가스 특성을 나타낸 것이다. Dual-Fuel 모드의 PM 배출농도가 Diesel 모드에 비해 현저히 낮게 나타났다. 이는 Dual-Fuel 모드에서 Diesel 을 착화제로만 사용하기 때문에 분사량이 감소하고, CNG 예혼합기의 연소 때문에 연소실 내에 국부적인 고온/농후영역이 형성되지 않았기 때문으로 생각한다. 전 운전영역에서 Dual-Fuel 모드는 Diesel 모드에 비해 약 93%의 PM 농도가 저감되었다.

4. 결론

기존의 디젤엔진을 CNG 예혼합이 가능한 Dual-Fuel 엔진으로 개조하고, Diesel 및 CNG/Diesel Dual-Fuel 모드에서 CNG 혼합율에 따른 엔진성능 및 배출가스 특성에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 기존의 디젤엔진을 CNG/Diesel Dual-Fuel 엔진으로 개조하여, CRDI 를 통해 착화연료인 Diesel 을 실린더 내에 직접 분사하고 흡기포트에 CNG 를 분사하여 예혼합 할 수 있도록 실험장치를 구성하였다.

(2) CNG/Diesel Dual-Fuel 엔진의 CNG 공급량을 조절하여 기존 Diesel 엔진과 동등한 수준의 토크 및 출력성능을 만족시킬 수 있었다. 이와 동시에 Dual-Fuel 모드의 전 엔진 운전영역에 대하여 Diesel 모드 대비 평균 90% 이상의 Diesel 절감율을 확보할 수 있었다.

(3) Dual-Fuel 엔진의 PM 배출농도는 Diesel 분사량의 감소와 균질한 CNG 예혼합기 때문에 연소실 내에 국부적인 고온/농후영역이 형성되지 않음으로써, Diesel 전소모드보다 현저히 낮은 배출농도를 나타내었다.

(4) Dual-Fuel 엔진의 NO_x 배출농도는 균질한 CNG 예혼합기 때문에 연소속도가 증가하여 연소실 내의 온도가 증가하였기 때문에, Diesel 모드에 대비하여 배출농도가 증가하였다.

(5) Dual-Fuel 엔진은 모든 시험조건에서 PM 배출농도가 매우 낮으나, NO_x 는 순수 Diesel 연소 시 보다 증가하는 것으로 나타나, 후처리 등의

대책이 필요한 것으로 판단된다.

후 기

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다. 지원에 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, J., Pyo, Y., Kwon, O., Lee, Y., Na, P., Ryu, J. and Lee, Y., 2006, "Performance and Emission Characteristics of a Diesel Pilot Compression Ignition CNG Engine," KSAE paper 06-S0300.
- (2) Yoon, S., Heo, S. and Roh, Y., 2008, "Characteristics of Dual Fuel System for Diesel Engine and Vehicle driving," KSAE paper 08-S0076.
- (3) Shen, J., Qin, J. and Yao, M., 2003, "Turbocharged diesel/CNG Dual-fuel Engines with Intercooler: Combustion, Emissions and Performance," SAE paper 2003-01-3082.
- (4) Addy, J. M., Bining, A., Norton, P., Peterson, E., Campbell, K. and Bevillaqua, O., 2000, "Demonstration of Caterpillar C10 Dual Fuel Natural Gas Engines in Commuter Buses," SAE paper, 2000-01-1386.
- (5) Johnson, W. P., Beck, N. J., Lovkov, O., Koshkin, V. K. I., Piatov, S. and van der Lee, A., 1990, "All Electronic Dual Fuel Injection System for the Belarus D-144 Diesel Engine," SAE paper, 901502.