3.4L 급 농기계용 디젤-천연가스 혼소 엔진 개발

심주현* · 고춘식* · 이상민** · 이옥재** · 이창언***†

A Development of an 3.4L-class Diesel-LNG Dual Fuel Engine for Farming Machine

Juhyen Sim*, Chunsik Ko*, Sangmin Lee**, Okjae Lee**, Chang-Eon Lee***†

ABSTRACT

An experimental study was performed to provide the effect of PM reduction and the improvement of diesel alternative ratio utilizing diesel-natural gas dual-fuel combustion mode in a retrofit 3.4-liter diesel engine. In order to achieve the same power as the original diesel engine, engine control unit (ECU) of the dual-fuel engine was calibrated. As a result, diesel alternative ratio was found that the maximum value of diesel alternative ratio was about 96%. Finally PM emission experiment was performed in C1-8 mode cycle and it was shown PM emission was extremely reduced down to $7.42*10^{-7}$ g/kWh comparing with mechanical diesel engine.

Key Words : Diesel-LNG Dual Fuel Engine, Mechanical Diesel Engine, CRDi, ECU

최근 고유가 시대를 맞이하여 대체 연료 개발 및 에너지원 다변화에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 차량 및 산업용 엔진의 주 연료인 가솔린과 디젤을 LPG, CNG, LNG, DME와 같은 다른 에너지원으로 변경하되 기존 하드웨어를 그대로 활용하는 기술에 대한 실용화가 이미 많은 부분 이루어져 왔다. 이에 더불어 겸소(Bi-fuel Combustion)방식 또는 혼소(Dual-fuel Combustion)방식으로 기존 연료 시스템을 살리면서 타 연료 시스템을 추가하는 방식의 기술도 많은 부분 연구 및 실용화가 진행되고 있다.[1)]

다양한 대체 연료 중 천연가스는 매장량(약 124조 ㎥, 원유 매장량의 79%에 해당)이 풍부하고 다른 석유자원에 비해 연소를 통한 유해물질 배출량이 적다. 또한 천연가스는 낮은 미연탄화수소 및 이산화탄소 배출 특성을 가지고 있으며, 천연가스의 고옥탄가와 넓은 연소한계 특성을 이용해 기존 디젤 엔진 및 가솔린 엔진에 모두 적용이 가능한 연소 특성을 가지고 있다. 이에 천연가스는 향후 세계적으로 점점 강화되고 있는 자동차 배출가스 규제에 능동적으로 대처할 수 있는 현실적인 대체연료라 할 수 있다.[2,3)]

천연가스는 메탄(CH4)이 주성분으로 구성 되어 있어 기타 연료 중 탄소(C)의 함유량이 적어 CO 및 CO2의 배출량을 줄일 수 있는 효과를 가져 올 수 있으나, 천연가스를 전소(Dedicated Combustion)방식으로 디젤엔진에 적용할 경우 디젤엔진의 압축비를 가솔린 엔진 수준으로 변경해야하기 때문에 연소실 형상 변경이 불가피하다. 이에 반해 혼소방식의 경우 디젤연료의 압축착화 특성을 이용하여 공기와 천연가스의 혼합기를 연소실에서 점화시킬 수 있기 때문에 기존 디젤엔진의 압축비 변경 없이 천연가스 연료 시스템 추가만으로 디젤-천연가스 혼소엔진을 구성할 수 있는 장점을 가지고 있다.[4)]

본 연구에서는 디젤-천연가스 혼소엔진의 디젤 대체율 향상 가능성 및 이에 따른 배출가스 특성을 살펴보기 위하여 기계식 디젤 농기계 엔진을 CRDi 시스템이 적용된 디젤-천연가스 혼소 엔진으로 개조하여 기존 기계식 엔진과 동일한 출력 조건에서 디젤-천연가스 혼소 엔진의 디젤 대체율 및 배출가스 특성에 관하여 살펴보았다.

Table 1은 디젤-천연가스 혼소 엔진으로 개조한 대상 엔진에 대한 제원이다. 대상 엔진의 총 배기량은 약 3.4L급으로서 Turbo Charger방식의 과급기가 설치된 모델이다. 압축비는 18.5이며 정격 출력은 엔진 속도 2,600 rpm에서 85 PS(62.5 kW)의 출력 성능을 가지고 있다.

* 인하대학교 자동차 동력계부품 지역혁신센터
** 엠코(주)
*** 인하대학교 기계공학과
† 연락저자, chelee@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7323 FAX : (032)813-7840

Table 1 Specification of Target Engine

Bore × Stroke (mm)	98 × 113
Total displacement (cc)	3,409
Intake Air Charging	Turbo Charger
Compress Ratio	18.5
Rated Power (ps/rpm)	85/2,600
Max Torque (kgf · m/rpm)	28/2,000
Idle (Max, rpm)	2,830
Idle (min, rpm)	1,300
Weight (kg)	245
Injection Angle	BTDC 14±0.5°

Fig. 1은 디젤-천연가스 혼소 엔진의 시스템 구성도이며, Table 2는 Fig. 1의 각 구성 품에 대한 설명이다. 디젤 연료 공급시스템은 CRDi(Common Rail Direct Injection)시스템을 적용하였으며, 천연가스는 LNG형태로 공급하였다. 천연가스 연료 공급 시스템은 LNG탱크를 통해 공급된 LNG 연료가 기화기⑧를 거쳐 기화된 후 압력 레귤레이터⑦를 통해 흡기매니폴드에 설치한 천연가스용 연료 레일에 약 6.5~7bar의 압력을 유지하며, ECU의 명령에 따라 LNG 연료 인젝터⑥를 통해 흡기 포트에 공급되어 흡기와 함께 혼합기를 형성하도록 구성하였다. 본 시스템은 디젤 연료 공급 시스템과 천연가스 연료 공급 시스템을 하나의 ECU에서 제어하도록 구성한 것을 특징으로 한다. 또한 디젤 연료 및 천연가스 연료의 공급량을 UEGO(Universal Evolutionary Global Optimizer)센서⑨를 이용해 산출된 공기과잉율을 토대로 조정하도록 구성하였다. 또한 배기라인에는 삼원촉매장치를 설치하여 NOx 및 CO, HC의 배출량을 저감할 수 있도록 하였다.

ECU는 Woodward사의 ECM-128 모델을 사용하였으며, MotoHawk Toolkit이 설치된 Mathworks사의 Simulink 소프트웨어를 활용해 ECU 알고리즘을 구현하였다. 디젤 연료와 천연가스 연료의 분사량을 조정하여 디젤대체율을 변화 시키기 위해 각 연료의 분사량을 엔진 속도(RPM)에 따라 지정할 수 있도록 디젤 연료 분사량 및 천연가스 연료 분사량에 대한 Mapping Table을 각각 구성하였다.

개발된 ECU의 Calibration 과정에서는 디젤-천연가스 혼소 엔진의 디젤 대체율을 높이기 위해 디젤 연료 분사량을 전 엔진 속도 영역에서 idle 운전 상태와 동일하게 유지시키면서 나머지 출력 요소를 천연가스 분사를 통해 구현하는 전략을 적용하였으며, 실제 Calibration 과정에서 본 전략은 무리 없이 적용할 수 있었다.

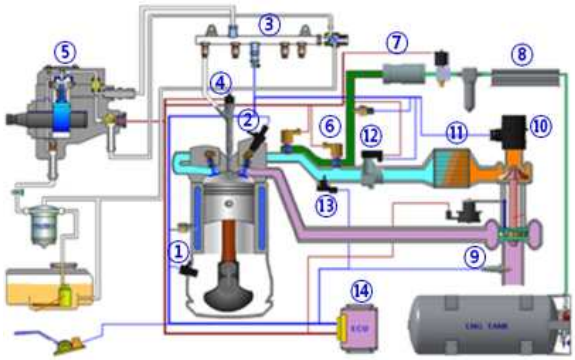

Fig. 1 Diagram for System of Diesel-LNG Dual Fuel Combustion Engine

Table 2 Parts List for Diesel-LNG Dual Fuel Combustion Engine System

#	Item
1	CAS(Crank Angle Sensor)
2	CPS(Cam Position Sensor)
3	Diesel Common Rail
4	Diesel Injector
5	High Pressure Pump for Diesel Fuel
6	LNG Injector
7	LNG Gas Regulator
8	LNG Vaporizer
9	UEGO Sensor
10	AFS(Air Flow Sensor)
11	Inter-cooler
12	ETC(Electric Throttle Controller)
13	TMAP (Temperature Manifold Air Pressure)
14	ECU(Engine Control Unit)

Fig. 2는 디젤-천연가스 혼소 엔진의 출력 성능 및 디젤 대체율, 배출 가스 성능을 측정하기 위한 실험 장치 구성도이다. 개조된 디젤-천연가스 혼소 엔진은 Eddy Current type(Max. 400PS)의 엔진 동력계에 설치하였으며, 디젤 대체율을 산출하기 위해 디젤 연료용 연료 소모율 측정 장비(AVL 735S) 및 천연가스 연료용 질량 유량계를 설치하였다.

Fig. 2와 같이 구성된 엔진 실험 장치를 이용하여 대상 엔진의 제작사에서 제공한 엔진 출력 성능과 디젤-천연가스 혼소 엔진의 출력 성능을 비교하였다. 엔진 속도(RPM)는 2,000 ~ 2,800 rpm 영역에서 200rpm씩 증가시켰으며, 전부하(Full-Load) 조건에서 실험을 수행하였다.

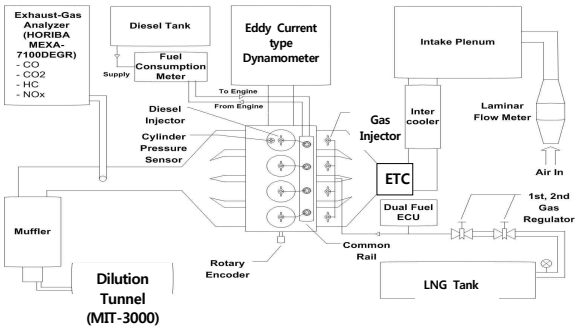

Fig. 2 Diagram for Engine Test

또한 디젤-천연가스 혼소 엔진의 출력 성능 실험을 수행하면서 디젤 연료 소모율과 천연가스 연료의 질량유량을 측정하여 각 엔진 속도(RPM)별 전부하 조건에서의 디젤 대체율을 산출하였다.

디젤-천연가스 혼소 엔진의 배출 가스 성능 실험은 ISO-8178 규격에서 제시한 C1-8모드에 따라 수행하였다. Table 3은 ISO-8178 규격에서 제시하고 있는 C1-8 모드에 대한 시험 사이클 내용이다.

디젤-천연가스 혼소 엔진의 디젤 대체율은 디젤-천연가스 혼소 엔진의 출력 성능 실험을 통해 얻은 디젤 연료 소모율 데이터를 통해 산출하였다. 디젤 대체율은 대상 엔진인 기계식 디젤 엔진의 제작사에서 제시한 디젤 연료의 BSFC(Brake Specific Fuel Consumption) 데이터와 디젤-천연가스 혼소 엔진을 통해 측정된 디젤 연료의 BSFC 결과 값을 이용하여 식(1)에 의해 산출하였다.

$$\text{디젤대체율}(\%) = \frac{BSFC_{DieselEngine} - BSFC_{DualFuelEngine}}{BSFC_{DieselEngine}} \times 100 \quad (1)$$

식(1)에서 $BSFC_{DieselEngine}$은 기계식 디젤 엔진의 디젤 연료 소모율을 의미하며, $BSFC_{DualFuelEngine}$은 디젤-천연가스 혼소 엔진의 디젤 연료 소모율을 의미한다.

Table 3 test cycle of C1-8 mode in ISO-8178 Reg.

mode #	1	2	3	4	5	6	7	8
Speed	Rated				Immediate			Idle
Torque(%)	100	75	50	10	100	75	50	0
Factor	0.15	0.15	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15

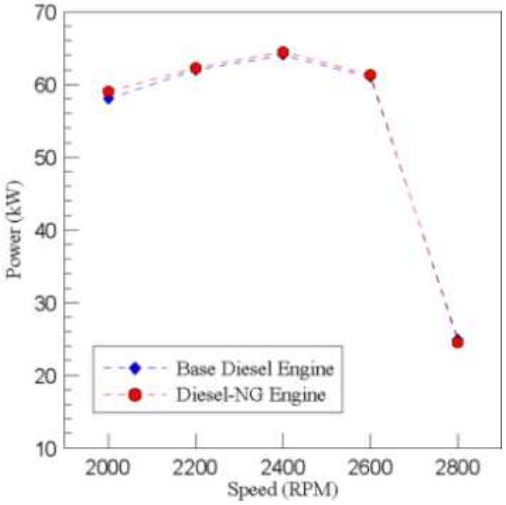

Fig. 3 Comparison Power between Base Diesel Engine and Diesel-NG Engine

Fig. 3은 대상 엔진인 기계식 디젤 엔진(Base Diesel Engine)의 출력 성능과 디젤-천연가스 혼소 엔진(Diesel-NG Engine)의 출력 성능 결과를 비교한 그래프이다. Fig. 3을 통해 전체적인 엔진 속도(RPM) 영역에서 두 엔진의 출력 성능이 일치함을 알 수 있다.

Table 4는 C1-8 모드에 따라 수행한 배출 가스 성능 시험의 결과 이며, Table 5는 Non-Road 엔진(농기계 및 산업용 엔진) 계열에 대하여 미국 EPA에서 제시한 Tier-3 규제치 항목 및 규제 값이다.

C1-8 mode에 따라 수행한 결과를 Tier-3 기준과 비교해 보면, 모든 배출 가스 항목이 Tier-3 기준을 만족하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 기존 기계식 디젤엔진이 Tier-3 기준을 만족하고 있는 점을 미루어 보아 디젤-천연가스 혼소 엔진으로 변환한 후 배출 가스 성능이 악화되지 않았음을 의미한다.

Table 4 Result of Test for Exhaust Gas according to C1-8 mode in ISO-8178

THC	CH4	NMHC	CO	NOx	PM
g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
1.89266	1.55261	0.45498	0.27392	3.12278	7.42×10^{-7}

Table 5 Tier-3 Regulation of EPA, USA

Tier-4	NMHC	NOx	CO	PM
Unit	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
37≤kW≤75	4.7		5.0	0.4

Fig. 4는 디젤-천연가스 혼소 엔진의 출력 성능 실험을 통해 얻은 디젤 연료에 대한 BSFC 결과이다. 디젤-천연가스 혼소 엔진의 디젤 연료의 BSFC는 엔진 속도 전 영역에서 동일하게 나타났다. 이는 디젤-천연가스 혼소 엔진의 ECU Calibration 과정에서 디젤 연료 분사량을 엔진 속도의 전 영역에서 idle 운전 상태와 동일하게 구현한 전략에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 디젤-천연가스 혼소 엔진의 출력 성능 실험을 통해 산출한 디젤 대체율 결과이다. 디젤-천연가스 혼소 엔진의 디젤 대체율은 평균 93.53%의 높은 대체율을 보였다. 또한 디젤-천연가스 혼소 엔진의 디젤 대체율은 엔진 속도 2,000 rpm ~ 2,600 rpm 영역에서 약 93%를 유지하였으며, 엔진 속도 2,800 rpm에서 약 94.4%로 다소 증가하였다. 이는 기계식 디젤 엔진의 BSFC가 엔진 속도의 변화에 따라 완만하게 증가하다가 2,800 rpm 영역에서 변화율이 증가함에 따른 것이다.

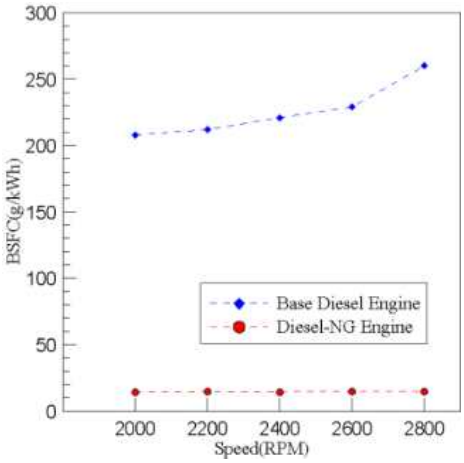

Fig. 4 Comparison BSFC between Base Diesel Engine and Diesel-NG Engine on Full-Load Test

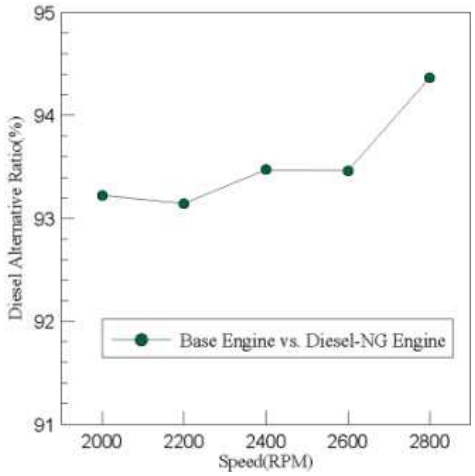

Fig. 5 Diesel Alternative Ratio of Diesel-Natural Gas Dual Fuel Engine

후 기

본 연구는 지식경제부 지정 '인하대학교 자동차 동력계부품 지역혁신센터'의 지원에 의한 것입니다.

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연공동기술개발사업(No. 00040947)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고 문헌

[1] Myung-Ho Park, "A Development of Converting Technology for the Marine Gasoline/CNG Bi-fuel Engine", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 34, No. 5, 2010, pp. 632-637.

[2] J. Y. Kim and J. Y. Ha, "The comparison of performance and emission characteristics between CNG engine and gasoline engine", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, 2003, pp. 16-21.

[3] C. G. Chang and C. W. Park, "A Study on performance characteristics for a CNG regulators of automotive vehicle", KIKAS, Vol. 11, No. 4, 2007, pp. 12-16.

[4] BokSeok Kim, Masahiro Shioji, ChanGuk Park, "Improving Performance and Emissions in a Diesel Engine Dual Fuel with Compressed Natural Gas", KSAE, Vol. 8, No. 2, 2000, pp. 57-63.