

커먼레일 연료분사 시스템을 장착한 경량 DME 트럭의 연구 및 개발

정수진^{*1)} · 전문수²⁾ · 박정권¹⁾

자동차부품연구원 동력시스템연구센터¹⁾ · 한국교통대학교 에너지시스템공학과²⁾

Research and Development of a Light-Duty DME Truck Using Common Rail Fuel Injection Systems

Soo-Jin Jeong^{*1)} · Mun Soo Chon²⁾ · Jung-Kwon Park¹⁾

¹⁾Powertrain System R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjung-Ri, Pungse-Myun, Dongnam-Gu, Chonan-Si, Chungnam 330-912, Korea

²⁾Department Energy System Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea

(Received 2012. 04. 02. / Accepted 2012. 04. 30.)

Abstract : In this study, the trucks(2.9-liter) have been developed to use DME as fuel, and performance test of the vehicle's DME engine, power, emissions, fuel economy and vehicle aspects was conducted. For experiments, the fuel system(common-rail injectors and high-pressure pump included) and the engine control logic was developed, and ECU mapping was performed. As a result, the rail pressure from 40MPa to approximately 65% increase compared to the base injector has been confirmed that. Also, the pump discharge flow is 15.5 kg/h when the fuel rail pressure is 400rpm(40 MPa), and the pump discharge flow is 92.1 kg/h when the fuel rail pressure is 2,000rpm(40MPa). The maximum value of full-load torque capability is 25.5kgfm(based on 2,000rpm), and more than 90% compared to the level of the diesel engine were obtained. The DME vehicle was developed in this study, 120 km/h can drive to the stable, and calculated in accordance with the carbon-balance method of fuel consumptions is 5.7 km/L.

Key words : DME (Di-Methyl Ether, 디메틸에테르), Common Rail Fuel Injection (전자제어식 연료분사 시스템), Light Duty Truck (경량 트럭), High Pressure(고압 연료펌프), IMV (Inlet Metering Valve : 입구 유량 제어 밸브)

1. 서론

수송용 연료로써 DME(Di-Methyl Ether)는 환경오염과 지구온난화로 인해 전세계적으로 강화되고 있는 배출가스 규제와 CO₂ 규제에 대응이 가능한 저공해 대체연료이다. 이러한 이유로 한국, 일본, 중국을 비롯한 여러 국가에서 DME 연료의 차량 적용 타당성 및 보급을 위해 인라인 분사방식의 디젤 차량을 대상으로 DME 차량을 개발해왔다. 그러나 인라인 분사방식으로 고효율을 달성하기 어렵고, 보다 높은 효율을 위

해서는 커먼레일 시스템과 같은 고압 연료시스템의 개발이 필요하며, 이와 관련한 연구는 활발하게 진행되고 있다.

2004년 Y. Sato¹⁾ 등은 DME 연료를 Jerk 타입 인라인 분사 시스템에 적용하였으며, '04년 M. Oguma²⁾ 등은 인라인 분사시스템에 디젤과 DME를 사용시 성능과 배기 특성을 비교하였다. '05년 S. Goto³⁾ 등은 중형 DME를 개발하였고, '06년 H. Teng⁴⁾ 등은 새로운 US 2007/2010 규제를 만족하는 DME 차량에 관한 연구를 진행했다. '08년에 이르러 기존 인라인 방식보다 고효율의 고압분사시스템에 DME를 적용하는 연구가 활발하였는데, M. Kim⁵⁾ 등은 고압분사시스템에 DME를

*Corresponding author, E-mail: sijeong@katech.re.kr

적용하여 배기 특성을 분석하였고, ‘10년 G. Lee⁶⁾ 등은 DME 커먼레일 인젝터를 설계를 위한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 기존 커먼레일 시스템의 인젝터와 고압연료펌프의 설계를 변경하여 DME 커먼레일 인젝터와 고압연료펌프의 시제품을 개발하고, DME 커먼레일 벤치 평가 시스템을 구축하여 성능을 시험한다. 성능시험을 통해 우수한 시제품을 선정하여 DME 커먼레일 엔진을 시제작하여, 엔진동력계 실험을 통한 동력성능과 배기성능을 분석하고, 엔진제어로직 개발 및 ECU 매핑을 수행하였다.

새롭게 개발한 DME 커먼레일 엔진을 적용하여 2.9 리터급 DME 트럭을 시제작하고, 차량시험으로 주행 성능과 연비성능을 분석, 파악하였다.

2. DME 커먼레일 시스템

기존 디젤 커먼레일 시스템에 DME 연료를 적용하기 위해서는 DME 연료의 특성을 고려한 설계 변경이 필요하다. 본 연구에서는 기존 커먼레일 시스템의 핵심부품인 인젝터와 연료펌프를 DME 연료의 특성에 맞도록 재설계하고 시제품을 제작하여 벤치 평가를 통한 성능시험을 수행하였다.

2.1 노즐유동모델을 통한 DME 커먼레일 인젝터 노즐 설계 및 개발

DME 연료는 산소함유 특성과 저운활특성으로 인해 인젝터 내부 부품의 산화반응으로 인한 부식과 마모가 급속히 진행되어진다. 이러한 문제들을 해결하

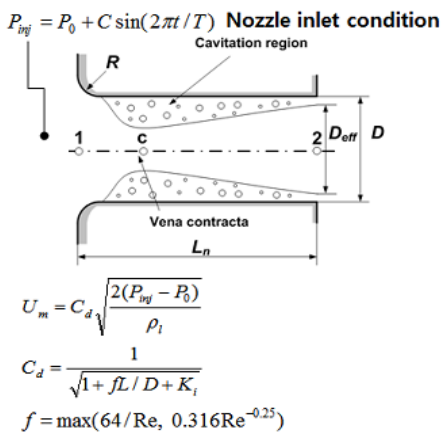


Fig. 1 Nozzle flow model for nozzle design



Fig. 2 The prototype of the injector nozzle

Table 1 Specifications of the prototype injector nozzle

No.	Item	Base	TypeA	TypeB
1	Nozzle type	Mini-SAC	VCO	SAC
2	No. of hole[ea]	7	6	5
3	Dia. of hole [mm]	0.124	0.25	0.28
4	Dia. of SAC [mm]	0.44	-	1.0
5	Spray-cone angle [deg.]	151.4	139.6	151.4
6	Dia. of needle seat [mm]	1.88	-	2.2
7	Max. mass flow rate [g/s]	-	59.05	61.88

기 위해 Fig. 1의 노즐 홀 설계를 위한 노즐유동모델 (Nozzle flow model)을 사용하였다⁶⁾. 이 모델은 노즐 유로의 각 상태점에서의 압력과 속도를 경험식으로부터 계산하는 식으로 노즐의 주요 설계인자인 노즐 출구에서의 유효속도(Effective velocity), 유효직경(Effective diameter) 그리고 유량계수(Discharge coefficient)를 결정할 수 있다. Fig. 2는 이러한 과정으로 개발된 시제품으로써, 주요 설계인자의 치수는 Table 1에 수록하였다.

2.2 DME 고압연료펌프 설계 및 개발

DME 커먼레일 시스템에 적용되는 고압연료펌프는 기존 디젤 엔진의 출력을 고려하여 토출유량을 확보하기 위한 재설계가 필요하다. 따라서, 기존과 동등한 출력을 위한 토출유량을 확보하기 위해 고압연료펌프의 주요 치수를 변경하여 재설계하고, 누설 방지를 위해 플런저 표면처리를 통해 표면조도를 향상시켰다. 또한 Fig. 3 과 같이 유량확보를 위해 2개의 캠과 2개의 스트로크/캠을 이용한 대유량 컨셉의 고압연료펌프를 개발하였다. 기존 고압연료펌프와 비교해 플런저의 누설을 최소화 하는 10μm의 간극으로 체크 밸브의 내구성능을 강화하고, 스트로크 수와 스프링 상수, 두께를 증가시켰다.

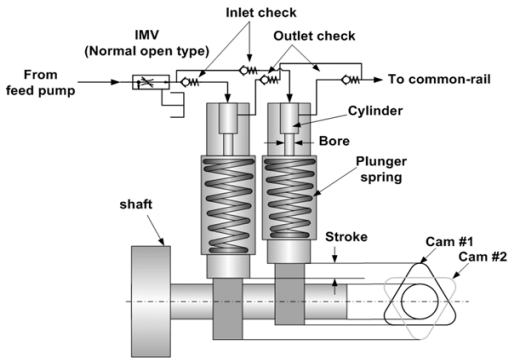


Fig. 3 Schematic view of common-rail high-pressure fuel pump

2.3 커먼레일 시스템 성능시험

본 연구를 통해 개발된 DME 커먼레일 인젝터와 고압연료펌프의 시제품에 대한 성능평가를 위해 벤치 평가 시스템을 개발하여 성능평가를 수행하였다.

2.3.1 인젝터 성능평가

기존 디젤 인젝터에 DME 연료를 사용할 경우, 인젝터에서 복합적인 성능문제가 내구성 문제가 발생된다. 따라서 본 연구에서는 노즐의 주요 치수를 변경하여 재설계하고, 인젝터의 성능을 평가하였다.

개발된 DME 커먼레일 인젝터의 성능을 평가한 결과는 Fig. 4와 같다. 최종 선정된 Type A는 레일 압력이 40MPa인 경우 Base 인젝터 대비 약 65%의 유량 증가를 보였고, 분사압력이 커질수록 연료량이 증가하는 특성을 가진다. 또한 대기용 엔진에 적용되는 인젝터 간의 연료분사량의 편차를 확인하여 보다 정확한 평가를 위해 동일 제어기로 인젝터를 변경하면서 성능

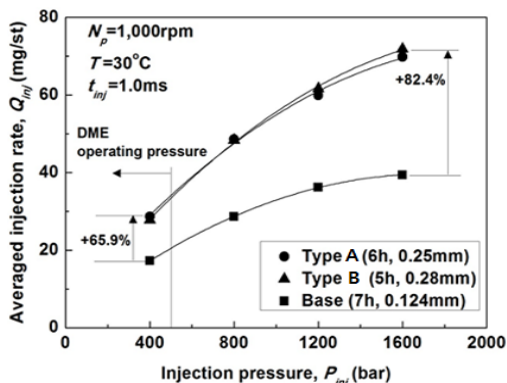


Fig. 4 Injection rate curves of the test injection operated with various injection nozzle types

시험을 수행하였다. 디젤유를 이용한 인젝터의 연료 분사량 편차를 확인한 결과 40MPa에서 3.9mg으로 약 15% 편차가 존재했으나, ECU 제어를 통해 이를 보정하였다.

2.3.2 고압연료펌프 성능평가

DME 고압연료펌프 시제품에 대한 성능 평가를 위해 편심 캠 타입의 고압연료펌프 시제품을 제작하였고, 입구 IMV를 정상개방 조건으로 설정하여 토출유량을 측정하였다. 연료 레일압 400rpm(40MPa)에서 펌프 토출유량은 15.5kg/h이고, 최대 회전수인 2,000rpm(40MPa)에서 토출유량은 92.1kg/h로 나타났고, 회전수 증가에 따라 Fig. 5와 같이 토출유량은 선형적으로 증가하였다. DME 고압연료펌프 출구 압력을 60MPa로 증가시키면 최대 회전수 2,000rpm에서 토출유량은 82.4kg/h로 40MPa 대비 약 10.1% 감소하였다.

3. DME 커먼레일 엔진

본 연구를 통해 개발된 DME 인젝터와 고압연료펌프를 적용한 DME 커먼레일 엔진을 시제작하고, 엔진 성능시험과 제어로직 개발 및 ECU 매핑을 수행하였다.

3.1 DME 커먼레일 엔진 시제작

DME 커먼레일 엔진에는 새롭게 개발한 DME 커먼레일 시스템과 DME 엔진의 최적 성능 구현을 위한 ECU 시스템을 개발하였다. 주요 개발 내용으로 모델 기반의 제어 알고리즘을 바탕으로 엔진 캘리브레이션이 가능하고, 슬레노이드 타입의 인젝터를 제어하는

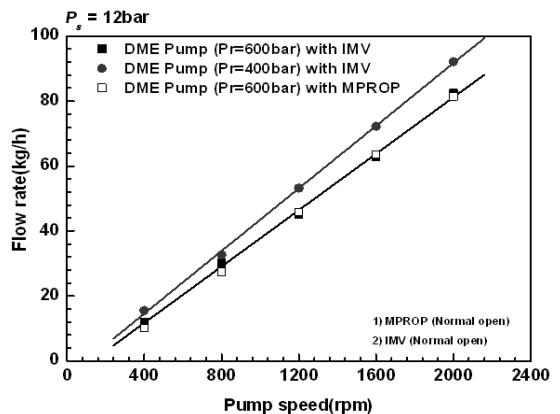


Fig. 5 Flow rate curves of the test fuel pump operated with various valve conditions

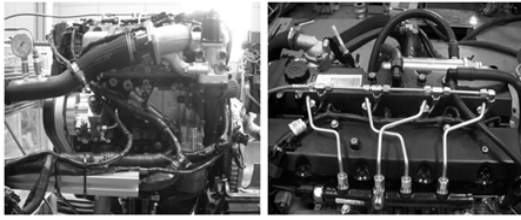


Fig. 6 DME common-rail engine with the new DME common-rail system

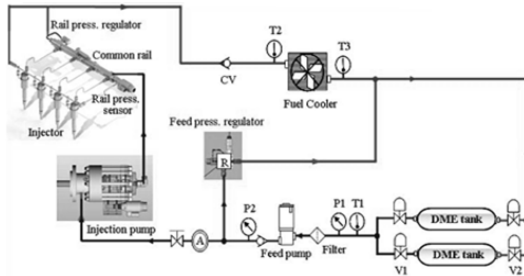


Fig. 7 Schematic view of common-rail system

Table 2 Specifications of the DME common-rail engine

Item	Specification
Displacement volume	2,902cc
Bore×Stroke	98.0mm × 101.5mm
Compression Ratio	17.4
Idle speed	890 ± 10rpm
Intake timing	BTDC 26°CA / ABDC 50°CA
Exhaust timing	BBDC 72°CA / ATDC 32°CA
Fuel system	Common-rail direct injection

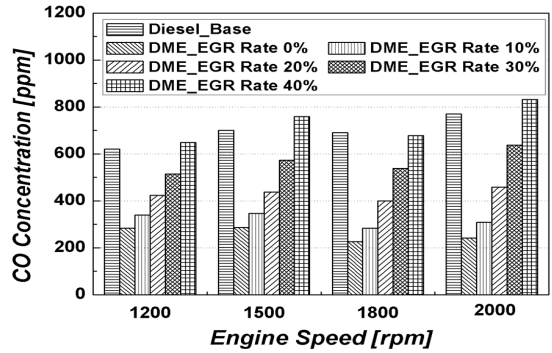
별도의 인젝터 드라이버를 포함하고 있다. 또한 ECU 맵핑을 통해 연료량, 연료압력, 분사시기, 분사기간, 다단분사, 부스트압력, EGR율 등의 변경이 가능하도록 설계하였다. Fig. 6은 시제작되어 개발된 DME 엔진의 연료분사시스템을 나타내고 있으며, Fig. 7은 연료분사 시스템의 전체 구성도를 나타내고 있다. 주요 제원은 Table 2에 수록하였다.

3.2 엔진 성능시험

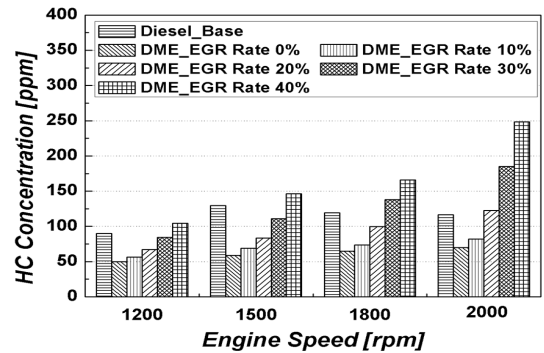
DME 커먼레일 엔진의 동력성과 배기성을 평가하기 위해 엔진동력계 성능시험을 수행하였다.

3.2.1 동력 성능평가

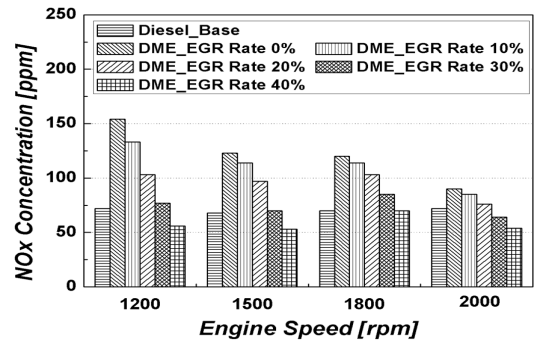
동력 성능평가는 DME 커먼레일 엔진의 차량적용



(a) CO



(b) HC



(c) NOx

Fig. 8 Emission characteristic curves of the test engine operated with DME and diesel fuel

을 위한 실험 단계로써, DME 커먼레일 시스템과 DME 전용 ECU 시스템을 이용하여 연구를 수행하였다. 그 결과 900rpm ~ 3,300rpm의 전부하영역에서 베이스 디젤엔진 대비 DME 엔진의 동력성능은 평균 90% 수준으로 확보할 수 있었다.

3.2.2 배기 성능평가

DME 커먼레일 엔진의 배기 성능과 EGR율에 따른 배출가스 특성을 평가하기 위해 촉매(DOC) 전단에서 배출된 배기가스를 측정하였다. Fig. 8은 BMEP 2.0bar 조건에서 DME 엔진의 배기가스 특성을 측정한 결과로써, CO의 발생량은 EGR율 30%에서 디젤엔진 대비 80%, EGR율 40%에서는 동등한수준을 보였다. 또한 THC와 NOx도 EGR율 30%에서 디젤엔진과 동등한 수준임을 확인하였다.

3.3 엔진 제어로직 개발

본 연구에서는 DME 커먼레일 엔진의 연소실 압력, 엔진 성능, 배출가스 수준 등을 고려하여 크랭킹 상태(Cracking state), 런 상태(Run state), 스톨 상태(Stall state)에 따라 ECU 제어로직을 구성하였다. Fig. 9는 ECU 제어로직의 구성도로써 스톨은 엔진의 정지 상태, 크랭크는 외부의 힘에 의한 엔진의 회전 상태, 런은 스스로 회전하는 상태를 나타낸다. 여기서 천이(Transition) 조건은 주로 엔진 회전속도와 엔진 운전을 유지하는 사이클로 구성된다.

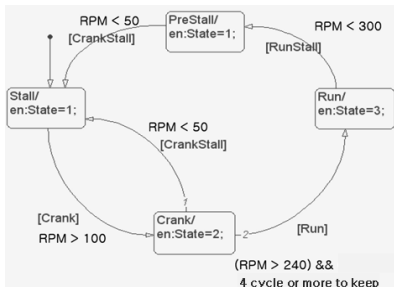


Fig. 9 Decision flowchart of the system state at ECU of DME fuelled vehicle

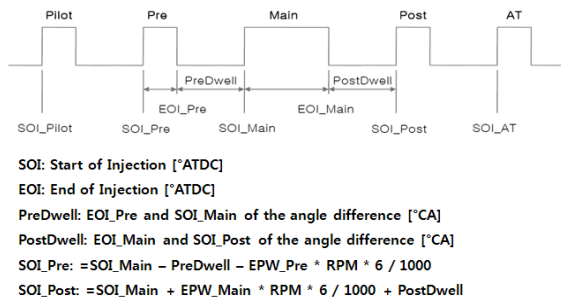


Fig. 10 Variables that determines the injection timing in 5-stage injection signal

스톨 상태 제어는 연료 분사시간과 목표 레일압, EGR 밸브 개도, WGT 제어 등을 모두 0으로 하고, 이를 통해 엔진에 회적력이 발생하지 않도록 제어하였다. 크랭크 상태 제어는 엔진의 시동성을 위해 엔진 회전수와 냉각수 온도를 기반으로 제어한다. 런 상태 제어는 엔진의 정상 운전을 위해 엔진 회전속도와 가속 페달, 냉각수 온도 등을 기반으로 제어하며, 이를 통해 동력 및 배기성능 그리고 운전성 및 정숙성 등을 요구 범위 이내로 제어할 수 있으며, Fig. 10과 같이 다단분사로직을 적용하여 최대 5단 분사가 가능하도록 설계하였다.

4. DME 커먼레일 차량

2.9리터급 트럭에 DME 커먼레일 엔진을 장착하기 위해 커먼레일 시스템을 일부 수정하고, DME 트럭을 시제작한다. 새롭게 개발된 DME 트럭의 차량시험을 통해 연비 및 주행 성능을 연구하였다.

4.1 DME 차량 개발

본 연구를 통해 개발된 DME 커먼레일 시스템을 2.9 리터급 트럭에 적용하기 위해, Fig. 11과 같이 연료 탱크는 짐칸 상부에 설치하였고, 하부에는 DME 연료 공급장치를 설치하였다. 또한 DME 차량의 기동정지 및 데이터 저장장치를 조수석 앞쪽에 설치하여 운전 성과 편의성을 확보하였다. Table 3은 개발된 DME 차량의 제원을 나타내고 있다.

4.1 DME 차량 주행성능 평가

DME 엔진의 매핑 데이터를 DME 차량의 실차 토크 제어로직에 적용하여 차량 매핑을 통한 주행 성능을 확보하였고, Fig. 12와 같이 NEDC 시험 모드를 통해

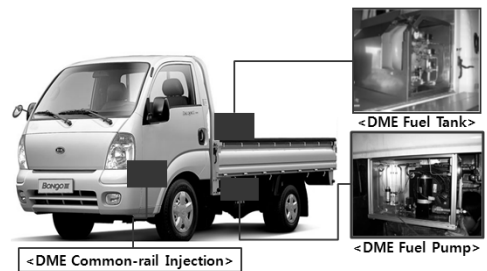


Fig. 11 Mounting position of the common-rail system for DME truck (2.9liter)

Table 3 Specifications of the DME truck (2.9-liter)

Model Description	J3-TDI
Max. Power, PS(kW)/rpm	135(99)/3800
Max. Torque, kgf-m(lbf-ft)/rpm	31.5(228)/2000
Displacement, cc(cu in)	2.902(177)
Bore × Stroke, mm(in)	97×98(3.8×3.9)
Valve Type	DOHC
Comb. Chamber Type	D.I
No. of Cylinder	4(in-line)
No. of Valve(Cyl.)	4
Fuel Injection Order	1-3-4-2
Cooling Method	Water Cooled
Coolant Capacity, liter, (us qt, imp qt)	9.4(9.9, 8.3)
Rotation Viewed from Fan	Clockwise
Electrical Voltage, Voltage	12



Fig. 12 Performance test of DME truck (NEDC mode)

차량의 성능 평가를 수행하였다. 그 결과 냉시동 로직에 의한 단발시동이 가능하였고, 최고 시속 120km/h로 주행이 가능하였다. 또한 운전자의 주행감(drivability)을 확보하는 차량 매핑을 수행하였고, 카본밸런스법(Carbon Balance Method)에 의거하여 계산된 DME 차량의 연비는 5.7km/L로써 디젤 베이스 차량의 연비인 11.0km/L의 48% 수준임을 확인하였다. 이는 DME 연료의 저위발열량(MJ/kg)이 디젤 대비 35% 정도 낮아서, 디젤과 동등한 동력성능을 유지하기 위해 연료의 사용량이 증가한 것으로 판단된다.

5. 결론

친환경 대체연료인 DME 연료를 사용하는 차량개발을 위해 DME 커먼레일 시스템의 주요 구성품인 인젝터와 고압연료펌프를 재설계하여 시제품을 제작하고, 각 제품의 성능시험을 수행하였다. 이를 통해 선정된 시제품을 DME 커먼레일 엔진에 적용하여 엔진 성능시험을 수행하고, 엔진 제어로직 개발과 ECU 매핑을 수행하였다. 이를 통해 DME 커먼레일 시스템을 장착한 2.9 리터급 DME 트럭을 개발하였고, 차량시험을 통해 연비 및 주행성능을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) DME 커먼레일 시스템의 성능시험 결과, 분사시간 1.0ms 조건에서 분사율 특성은 디젤 연료 대비 응답성이 약 0.045ms 지연되고, 최대 분사율은 44.3mm³/ms 로 확인되었다.
- 2) DME 커먼레일 엔진의 출력 성능시험 결과, 900 rpm ~ 3,300rpm의 전부하영역에서 베이스 디젤 엔진 대비 평균 90% 수준을 확보하였다.
- 3) DME 커먼레일 엔진의 배기 성능시험 결과, BMEP 2.0bar 조건에서 CO는 EGR 30%에서 디젤엔진 대비 80% 수준이며, EGR 40%에서는 동등한 수준이고, THC와 NO_x도 디젤엔진과 동등 수준임을 확인 할 수 있었다.
- 4) DME 커먼레일 엔진의 제어로직은 크랭킹 상태(Cracking state), 런 상태(Run state), 스톱 상태(Stall state)에 따라 ECU 제어로직 구조가 변경되도록 구성하였다. 또한 매핑을 위해 분사시기, 분사시간 및 연료량 등을 최적화하고, 냉각수 온도에 따라 예열플러그의 작동시간, 연료량, 레일 압력의 최적화를 통해 냉시동성 개선 매핑을 확보할 수 있었다.
- 5) NEDC 시험 모드를 통한 DME 개발 차량의 주행 및 연비 성능시험 결과, 냉시동 및 단발시동이 가능하였고 최고 시속 120km/h 임을 확인하였다. 또한 카본밸런스법에 의거하여 개발된 DME 차량의 연비는 5.7km/L임을 확인할 수 있었다.
- 6) 향후 ECU 제어로 연료분사를 최적화 하는 전략을 개발하고, DME 인젝터의 성능향상을 위한 해석 및 성능평가, 최적 설계를 병행함으로써 고연비 고효율의 DME 차량을 개발하고자 한다.

후 기

본 연구는 지식경제부 주관 “산업원천기술개발사업 (1003303)”의 일환으로 수행되었으며, 관계기관의 협조에 감사드립니다.

References

- 1) Y. Sato, S. Nozaki, T. Noda, “The Performance of a Diesel Engine for Light Duty Truck Using a JerkType In-Line DME Injection System”, SAE Paper 2004-01-1862, 2004
- 2) M. Oguma, S. Goto, T. Watanabe, “Engine Performance and Emission Characteristics of DME Diesel Engine With Inline Injection Pump Developed for DME”, SAE Paper 2004-01-1863, 2004
- 3) S. Goto, M. Oguma, S. Suzuki, “Research and Development of a Medium Duty DME Truck”, SAE 2005-01-2194, 2005
- 4) H. Teng, J. C. McCandless, “Can Heavy-Duty Diesel Engines Fueled with DME Meet US 2007/2010 Emissions Standard with A Simplified Aftertreatment System?”, SAE 2006-01-0053, 2006
- 5) M. Kim, S. Yoon, B. Ryu, C. Lee, “Combustion and emission characteristics of DME as an alternative fuel for compression ignition engines with a high pressure injection system”, Fuel, Vol 87, pp. 2779-2786, 2008
- 6) G. Lee, D. Kim, H. Kim, S. Jung, “Design of Injector Nozzle Holes for DME Using 1-D Nozzle Flow Model”, KSAE, pp. 204-208, 2010