

3.9 리터 기계식 디젤 엔진을 이용한 DME 엔진 개발 연구

장진영 · 우영민 · 김강출 · 조종표 · 정용진 · 고아현 · 표영덕*

한국에너지기술연구원

Development of DME Engine Using 3.9 Liter Diesel Engine with Mechanical Type Fuel System

JINYOUNG JANG, YOUNGMIN WOO, GANGCHUL KIM, CHONGPYO CHO, YONGIN JUNG, AHYUN KO, YOUNGDUG PYO†

Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

†Corresponding author :
ydpyo@kier.re.kr

Received 20 May, 2020
Revised 12 June, 2020
Accepted 30 June, 2020

Abstract >> The 3.9 liter diesel engine with a mechanical fuel injection system was converted to di-methyl ether (DME) engine and performance optimized. In order to switch to the DME engine, the plunger of the high pressure fuel pump was replaced and the diameter of the injector nozzle was increased. Through this, the disadvantage of DME having low calorific value per volume can be compensated. To optimize the performance, the number of injector nozzle holes, injector opening pressure, and fuel injection timing were changed. As a result, the optimum number of injector nozzle holes was 5, the injector opening pressure was from 15 MPa to 18 MPa, and the injection timing was 15 crank angle degree before top dead center (CAD BTDC). The power was at the same level as the base diesel engine and nitrogen oxides (NOx) emissions could be reduced.

Key words : DME(디엠이), Engine(엔진), Fuel(연료), Alternative fuel(대체연료), Mechanical type fuel system(기계식 연료장치)

1. 서론

화석연료의 고갈문제와 이들 화석연료에서 발생하는 이산화탄소를 포함한 배출가스의 문제 때문에 대체연료에 대한 관심은 꾸준히 이어지고 있다. 특히 엔진과 차량에서는 가솔린과 디젤이 주요 연료로 사용되고 있으며, 대표적인 가솔린 대체연료는 liquified petroleum gas (LPG), compressed natural gas (CNG),

바이오가스 에탄올, 부탄올 등이 있다. 디젤 대체연료는 gas to liquid (GTL), di-methyl ether (DME), 바이오디젤 등이 있다. 디젤 대체연료 중 DME는 세탄가가 디젤보다 높으면서 산소를 가지고 있는 기체 연료이기 때문에 디젤 엔진의 가장 큰 문제중에 하나인 매연 배출량을 거의 0에 가깝게 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다¹⁻³⁾.

DME 연료는 천연가스, 석탄을 이용하여 만들 수

있는 연료이며¹⁾, intergovernmental panel on climate change (IPCC) 보고서에서는 DME 연료가 biomass로부터 만들 수 있는 바이오연료 중 하나로 보고하고 있다⁴⁾. DME 연료는 분자구조상 산소를 포함하고 있으며, C 이중결합이 없다. 또한 LPG 연료와 마찬가지로 5 bar 이상으로 가압되면 기체 상태에서 액체 상태로 변하게 되어 연료의 보관과 이동이 용이하며, 액상으로 분사된 DME 연료가 빠르게 증발하여 공기와 섞일 수 있다⁵⁾. 따라서 디젤 엔진에서 농후한 연료/공기 혼합기 상태에서 많이 발생하는 매연이 DME 연료를 사용하는 경우 감소하게 된다. 하지만 몇 가지 단점을 가지고 있다. Table 1은 DME와 디젤의 물성치를 비교해 놓은 것이다. DME 연료는 27.6 kJ/kg의 저위발열량을 가지고 있어 디젤 연료(42.5 kJ/kg)의 약 65% 정도이다¹⁾. 따라서 같은 출력을 만들어 내기 위해서는 더 많은 연료를 사용해야 한다. 연료 자체로서 순환성이 거의 없어 순환첨가제를 사용하지 않는 경우 기계적 마찰이 있는 부분에서 문제가 발생하게 된다¹⁾.

DME를 디젤 엔진에 적용하여 연료를 분사하게 되면 연료 자체가 가지는 압축성 때문에 DME를 가압하기 위해서는 더 많은 에너지가 소모된다⁵⁾. 또한 이 때문에 연료 분사시점이 늦어지게 된다⁶⁾. 분사된 DME 연료는 증발온도와 압력이 낮아 디젤 연료보다 빨리 기화되어 공기와의 혼합이 빨라진다. 분무의 특징을 살펴보면, 분무거리는 짧아지고 분무각은 넓어진다⁷⁾.

DME를 커먼레일 방식의 디젤 엔진에 적용하는

Table 1. Fuel property¹⁾

	DME	Diesel
Chemical structure	CH ₃ -O-CH ₃	
Low calorific value (MJ/kg)	27.6	42.5
Density (g/mL)	0.668	0.84
Cetane number	>>55	46-50
Auto ignition Temp. (K)	508	523
Boiling point (K) at 1 atm	248.1	450-643
Vapor pressure (kPa) at 298 K	530	<<10

연구도 많이 진행되었으나, 아직까지 DME 전용 고압펌프와 인젝터가 상용화되지 않아 엔진 보급이 활발히 이루어지고 있지 않다. 하지만 기계식 시스템의 경우 고압펌프와 인젝터의 일부 변경을 통해 DME 연료 사용이 가능하여 커먼레일 방식보다 빨리 적용이 가능하며, 국내에서 운행되는 많은 노후 경유 차량과 발전기가 기계식 시스템을 사용하고 있어 DME 연료 적용이 가능하다. 2000년대 초에 일본에서는 Goto 박사 등이 기계식 디젤 엔진을 가지는 트럭을 DME 엔진으로 개조한 결과를 보고하였으며, 한국에서는 표영덕 박사 등이 중형버스에 사용되는 기계식 디젤 엔진을 DME 엔진으로 개조한 결과를 보고하였다. 중국 상하이교통대에서는 중국 정부의 지원을 바탕으로 DME 엔진을 탑재한 버스를 시제작하였다.

앞선 사례에서 기계식 엔진에서 분사와 관련된 변경에 의한 차이를 종합적으로 제시하고 있지 않았다. 이에 본 연구는 기계식 연료 시스템을 사용하는 디젤 엔진을 DME로 변경하여 출력 및 배기 성능을 최적화하기 위하여 연료 분사와 관련된 분사 홀 수, 인젝터 개변압력, 분사시기 변경에 따른 성능변화를 확인하고 설명하는 것이다. 이를 통해 기계식 DME 엔진의 특성을 확인하고 최적화하는 방향에 대하여 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

2.1.1 실험엔진

기계식 연료 시스템을 가지는 디젤엔진을 DME 연료를 사용할 수 있는 엔진으로 개조하기 위하여 Table 2와 같은 제원을 가지는 디젤엔진을 사용하였다. Fig. 1은 엔진의 실제 모습이다. 실험에 사용된 엔진은 4기통 3.9 L, 압축비 16.5:1의 디젤 엔진이다.

Fig. 2와 같이 DME 엔진으로 사용하기 위하여 연료 라인을 서스 튜브로 하였다. DME는 공기 중에서 가스상태로 존재하기 때문에 0.5 MPa 이상으로 가압된 상태로 연료 탱크에 존재하며, 가압된 상태의 연

료를 이용하기 때문에 일반 고무 튜브를 사용할 수 없다. 이 외에 연료 시스템에 사용되는 밸브에서 연료의 누설을 막기 위하여 오링의 재료는 hydrogenated nitrile butadiene rubber (HNBR) 재질을 사용하였다.

DME 연료의 낮은 발열량을 보상하기 위하여 더 많은 연료를 분사시켜야 하므로 고압펌프에서 더 많은 연료를 보낼 수 있도록 Fig. 3과 같이 기계식 펌프 내부의 플런저를 퓨얼 리미트가 해제된 것으로 교체하여 사용하였다.

Table 2. Test engine specification

Item	Value
Engine type	4 cycle, water cooled
Injection type	Direct injection
# of cylinder	4-in line
Aspiration	Turbo-charger
Displacement (L)	3.9
Bore×stroke (mm)	104×115
Compression ratio	16.5 : 1



Fig. 1. DME engine



Fig. 2. Fuel system of test engine

2.1.2 측정장치

DME 엔진과 base 디젤 엔진의 성능을 측정하기 위하여 극동 사(Gunpo, Korea)의 220 kW, eddy current (EC) 엔진 동력계를 이용하여 엔진 회전수 및 부하를 제어하였다. 엔진에서 배출되는 가스들의 농도는 Horiba 사(Kyoto, Japan)의 MEXA-9100d를 이용하여 측정하였다.

2.2 실험조건

Base 디젤 엔진 대비 DME 엔진의 성능을 파악하기 위하여 엔진의 운전은 각 엔진회전수의 전부하조건으로 하였다. DME 엔진의 성능 최적화를 위한 parameter 확인 실험을 위하여 Tables 3, 4와 같이 인젝터 노즐 홀 크기, 인젝터 노즐 홀 수, 인젝터의 개변압, 연료 분사시기 등을 변화시켰다. 인젝터 노즐 홀 크기의 경우 DME의 저위발열량이 디젤에 비해 약 1.54배 낮은 것을 고려하여 많은 연료가 나올 수 있도록 홀 단면적이 약 1.78배 큰 인젝터 노즐을 사용



Fig. 3. Modified plunger of DME high pressure pump

Table 3. Base diesel engine test conditions

Engine	Injector nozzle hole size (mm)	Injector nozzle hole #	Injector open pressure (MPa)	Injection timing (CAD BTDC)
Base diesel engine	0.21	5	22	7

하였다. Base 디젤엔진에 사용된 인젝터가 22 MPa 이상으로 연료압이 상승하였을 때 인젝터 니들이 울려져 연료가 분사되도록 개변압(injector open pressure)이 설정되어 있는데, DME 연료의 경우 압축성 연료이기 때문에 동일한 개변압을 적용할 경우, 더 많은 일이 소요될 수 있어 디젤 인젝터보다는 낮은 15, 16, 18 MPa로 개변압을 설정하였다. Goto 등도 베이스 디젤 엔진의 인젝터에서 사용하는 개변압력인 16.2/19.8 MPa보다 낮은 11.8 MPa의 개변압력을 가지는 인젝터를 사용하였다⁸⁾. 디젤 엔진의 분사시기가 7 CAD BTDC로 설정되어 있는데, DME는 압축성 연료이기 때문에 압축압력이 형성되는 데 시간이 더 걸리는 것을 고려하여 더 이른 시기에 분사가 되도록 설정하였다.

기계식 디젤 엔진에서 분사 시기는 플런저를 구동시키는 캠샤프트를 회전시킴으로써 변경이 가능하다. 다만 엔진 구동 전에 변경을 시켜야 하며, 엔진 구동 중에는 변경이 불가능하다.

DME 엔진의 분사 시기 영향을 실험할 때, 개변압력과 분사시기가 변경되었는데, 개변압력의 경우 인젝터 내부에 있는 스프링의 탄성력을 맞추는 데 있어서 오차가 발생하여 16 MPa로 맞춰진 것이며, 분사시기의 경우 앞서 설명한 것과 같이 플런저를 구동시키는 캠샤프트를 회전시켜 맞추는 과정에서 발생한 오차이다.

Table 4. DME engine test conditions

	Injector nozzle hole # effect	Injector open pressure effect	Injection timing effect
Hole size (mm)	0.28	0.28	0.28
Hole #	4, 5	5	5
Open pressure (MPa)	18	15, 18	16
Injection timing (CAD BTDC)	14	14	13, 15, 17

3. 결과 및 고찰

3.1 분사 홀 수 영향

Fig. 4는 base 디젤 엔진의 전부하 출력과 DME 엔진으로 개조하기 위하여 노즐 크기 0.28 mm, 개변압 15 MPa, 분사시기 14 CAD BTDC로 변경한 후의 전부하 출력을 분사홀수에 따라 측정한 결과이다. 이때 홀수 외의 실험조건은 같게 하였다. 인젝터 노즐 홀수가 5개인 경우에 2,700, 2,900 rpm에서 10% 정도 최대 출력이 낮지만 나머지 엔진회전수 조건에서는 base 디젤 엔진과 동등 이상의 출력을 보이고 있다. 인젝터 노즐 홀수가 4개인 경우에는 전 구간에서 전부하 출력성능이 많이 떨어지고 있는데, 이는 인젝터 홀수 감소로 인하여 충분한 연료가 분사되지 못하였기 때문이다. 기계식 연료펌프의 특성상 5홀 인젝터에 맞춰서 연료 분사량을 조절해 놓게 되면 엔진 회전수와 스로틀량에 따라 기계식 고압연료 펌프에서 인젝터로 보내는 연료량이 일정하기 때문이다. 따라서 비례적으로 계산을 하였을 때 인젝터 홀수가 5개에서 4개로 1개 감소하게 되면 20%의 연료가 덜 나가게 된다. 실제 결과에서는 5홀 인젝터를 사용한 경우보다 4홀 인젝터를 사용한 경우에 출력이 12-17% 정도 감소하였다.

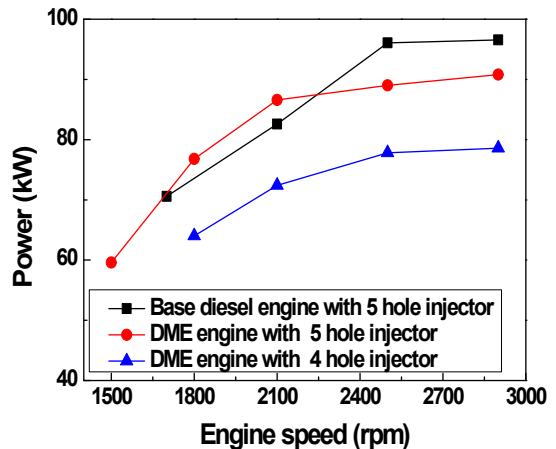


Fig. 4. The effect of # of nozzle hole on power

배출가스 중에서는 디젤 엔진에서 가장 문제가 되고 있는 배출가스 중에 하나인 질소산화물(nitrogen oxides, NOx)에 대한 비교를 Fig. 5에 나타내었다. DME 엔진의 경우 PM 발생이 거의 없으므로 base 디젤 엔진과 비교하는 것은 무의미하기 때문에 본 연구에서는 PM 배출량 비교를 하지 않았다. NOx의 경우 base 디젤 엔진에서 DME 엔진보다 많이 배출되고 있었다. DME가 연소실에 분사되면서 빠르게 증발하게 되면서 증발잠열에 의한 냉각효과와 빠른 혼합에 의한 농후 혼합기가 적게 발생하여 NOx 발생량이 감소한 것으로 판단된다¹⁾. 5홀 인젝터를 사용한 DME 엔진과 4홀 인젝터를 사용한 DME 엔진을 비교하였을 때는 4홀 인젝터를 사용한 경우에 더 적은 NOx 발생량을 보였다. 앞서 설명한 것과 같이 4홀 인젝터를 사용한 경우에 연료 분사량이 적어지면서 NOx 발생량도 함께 감소한 것이다.

본 연구에 사용된 인젝터 중에서는 DME 연료의 낮은 발열량과 압축성 문제로 인해 인젝터 홀수는 상대적으로 많은 5홀이 더 적당한 것으로 판단된다.

3.2 인젝터 개변압 영향

디젤 엔진의 기계식 연료 시스템은 고압연료 펌프에서 고압으로 가압된 연료가 인젝터로 공급되고, 연

료 압력에 의한 스프링으로 눌러있던 니들이 연료압력에 의해 들어 올리지면서 연료가 노즐을 통해 분사된다. 스프링의 힘을 조절하여 니들이 올라가는 압력을 변경할 수 있는데, 이를 통해 낮은 압력에서 연료가 분사되게 할 수 있으며, 높은 압력에서 연료가 분사되게 할 수 있다. 실험에 사용된 base 디젤 엔진의 인젝터는 22 MPa에서 연료가 분사되도록 되어 있다. 본 연구에서는 DME 인젝터의 기본 개변압을 15 MPa로 설정하였다. 이는 두 가지 이유에서인데, 첫째, DME를 연료로 사용하는 경우 DME 연료의 압축성 성질에 의해 연료의 압력을 높이는 데 더 많은 시간이 필요하여 개변압을 base 디젤 엔진과 동일하게 하는 경우, DME 연료의 분사시기가 너무 늦어질 수 있기 때문이다. 개변압을 낮추게 되면 이른시기에 연료가 분사될 수 있다. 둘째, DME 연료의 낮은 발열량 때문에 개변압을 낮추게 되면 분사시간이 길어질 수 있어 더 많은 연료를 분사할 수 있게 되어 디젤 연료를 분사할 때와 같은 발열량을 얻을 수 있기 때문이다.

Fig. 6은 base 디젤 엔진과 DME 인젝터 개변압 변화에 따른 전부하 출력성능을 보여주고 있다. 개변압이 낮은 경우에 일부 저속 운전 구간에서 출력이 높았다가 고속에서 낮은 결과를 보였다. 개변압력이 높은 경우 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어지게 되어

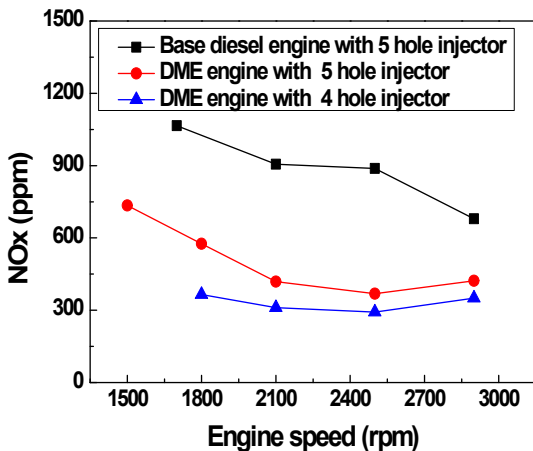


Fig. 5. The effect of # of nozzle hole on NOx emission

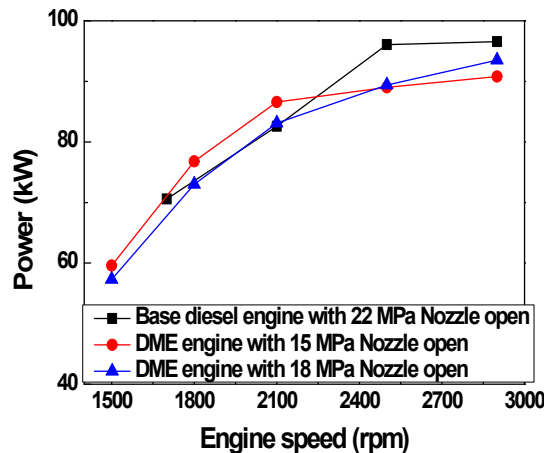


Fig. 6. The effect of nozzle open pressure on power

고속에서 짧은 순간에 연소되기 쉬워지면서 발생한 현상으로 판단된다.

Fig. 7은 base 디젤 엔진과 DME 인젝터 개변압 변화에 따른 NOx 배출량 변화를 보여주고 있다. 엔진에서의 NOx 발생은 대부분 thermal NOx로서 고온의 연소온도 분위기에서 발생한다^{9,10}. 앞서 출력에서와 같이 개변압력이 높은 조건에서 저속에서는 NOx 발생량이 상대적으로 낮았다가 고속에서 다시 높아지는 현상을 보이는데, 이 역시 연료와 공기의 혼합이 잘 되기 때문에 연소가 활발히 일어나게 되어 나타난 결과로 판단된다.

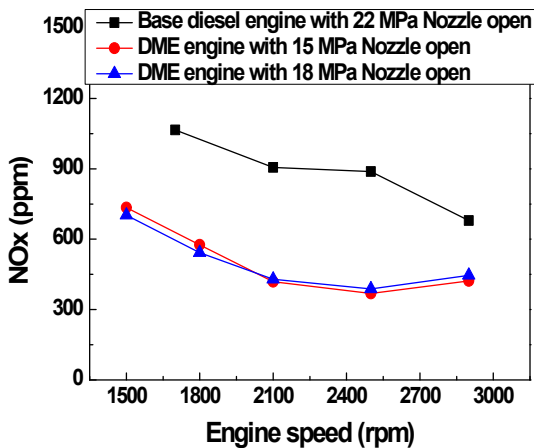


Fig. 7. The effect of nozzle open pressure on NOx emission

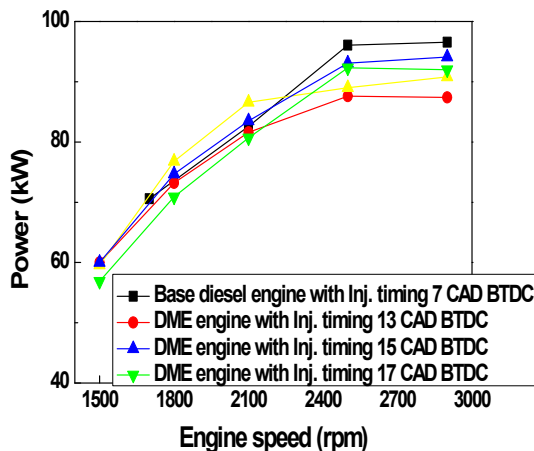


Fig. 8. The effect of fuel injection timing on power

3.3 연료 분사시기 영향

Base 디젤 엔진의 경우에는 분사시기가 7 CAD BTDC로 고정되어 있으며, DME 엔진은 앞서 설명한 것과 같이 압축성 성질에 의해 늦게 분사될 가능성이 있기 때문에 더 이른 시기에 분사되도록 하였다. 분사시기는 13, 15, 17 CAD BTDC로 변경하여 실험을 진행하였다. 인젝터 홀 수는 5홀이며, 개변 압력은 16 MPa로 하였다.

Fig. 8은 분사시기에 따른 전부하 출력성능을 비교하고 있다. 분사시기가 진각될수록 고속 구간에서의 출력이 높아지다가 17 CAD BTDC에서 다시 출력이 감소하는 결과를 보였다.

Fig. 9는 분사시기에 따른 NOx 배출량을 보여주고 있다. 디젤 엔진의 경우 분사시기가 빨라질수록 예혼합기가 많아져 연소온도가 높아지게 되어 NOx 발생량이 더 많아지는 특징을 가지고 있다. Fig. 9에서도 DME의 분사시기를 진각시킬수록 NOx 배출량이 증가하는 모습을 확인 할 수 있다.

DME 엔진의 출력과 NOx 발생량을 고려해 볼 때 본 연구에 사용된 DME 엔진의 분사시기는 15 CAD BTDC가 적당한 것으로 판단된다.

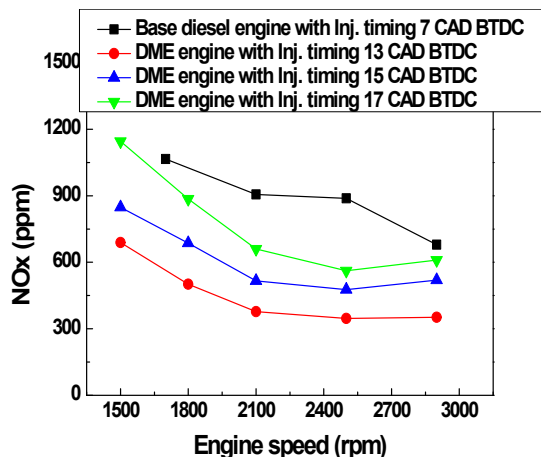


Fig. 9. The effect of fuel injection timing on NOx emission

4. 결 론

기계식 연료 분사 시스템을 가지는 3.9 리터 디젤 엔진을 DME 엔진으로 변경한 후 분사와 관련된 인자에 대한 연구를 진행하였다. 인젝터 노즐 홀 수, 인젝터 분사기 개변압, 연료 분사시기를 변경하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 4홀 인젝터와 5홀 인젝터를 사용하였을 때의 DME 엔진을 비교해 보면, 4홀 인젝터 사용 시 NOx 배출량이 감소하여 배출가스에서는 유리하지만 출력이 감소하여 베이스 디젤 엔진 대비 75% 정도만 나왔다. 기계식 연료 시스템의 경우 연료 유량이 부하와 엔진회전수에 따라 일정하게 인젝터에 공급되므로, 현재의 고압연료 펌프가 5홀 인젝터에 맞추어진 것으로 판단된다.

2) 인젝터 개변압을 높이면 연료 분사시기가 늦어지지만 높은 압력을 분사되기 때문에 연료와 공기의 혼합에는 도움이 된다. 하지만 개변압이 너무 높아지게 되면 연료량이 감소할 수 있어, 본 연구에서 사용된 DME 엔진에서는 낮은 개변 압력 조건을 사용하는 것이 더 좋은 것으로 판단된다.

3) DME 엔진 출력을 고려하였을 때는 17 CAD BTDC 조건이 좋으나, NOx 배출량까지 같이 고려한 경우에는 15 CAD BTDC 조건이 최적 조건으로 판단된다.

4) 본 연구에 개조한 5홀 인젝터를 가지는 DME 엔진은 인젝터 개변압 15 MPa 이상 18 MPa 이하, 분사시기 15 CAD BTDC 정도로 맞추는 것이 최적인 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부의 산업기술혁신사업(미세먼지 저감 청정연료 DME 엔진 실증연구사업)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. C. Acroumanis, C. Bae, R. Crookes, and E. Kinoshita, "The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: a review", *Fuel*, Vol. 87, No. 7, 2008, pp. 1014-1031, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.06.007>.
2. S. Kajitani, Z. Chen, M. Konno, and K. Rhee, "Engine performance and exhaust characteristics of direct-injection diesel engine operated with DME", *SAE Technical Paper 972973*, 1997, doi: <https://doi.org/10.4271/972973>.
3. Y. Pyo, S. Nam, G. Kim, Y. Kim, and Y. Lee, "Effects of cooled EGR on exhaust emission characteristics of DI DME engine", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 14, No. 2, 2003, pp. 138-145. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/264017419_Effects_of_Cooled_EGR_on_Exhaust_Emission_Characteristics_of_DI_DME_Engine.
4. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, and L. A. Meyer, "Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007", Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 2007. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg3_full_report-1.pdf.
5. S. C. Sorenson, M. Glensvig, and D. Abata, "Dimethyl ether in diesel fuel injection systems", *SAE Technical Paper 981159*, 1998, doi: <https://doi.org/10.4271/981159>.
6. R. Egnell, "Comparison of heat release and NOx formation in a di diesel engine running on DME and diesel fuel", *SAE Technical Paper 2001-01-0651*, 2001, doi: <https://doi.org/10.4271/2001-01-0651>.
7. K. Wakai, K. Nishida, T. Yoshizaki, and H. Hiroyasu, "Spray and ignition characteristics of dimethyl ether injected by a D.I. diesel injector", In: *Proceedings of the fourth international symposium COMODIA'98*: 1998. pp. 537-542. Retrieved from https://www.jsme.or.jp/esd/COMODIA_Procs/Html/004.html.
8. S. Goto, M. Oguma, and S. Suzuki, "Research and development of a medium duty DME truck", *SAE Technical Paper 2005-01-2194*, 2005, doi: <https://doi.org/10.4271/2005-01-2194>.
9. S. Kim, K. Min, C. Park, H. Lee, and B. Na, "Performance and emissions characteristics of agricultural generator and air heater using DME fuel", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 4, 2016, pp. 431-440, doi: <http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2016.27.4.431>.
10. J. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals", McGraw-Hill Book Company, USA, 1998, pp. 572-592.