

LPG-DME 혼합연료를 사용하는 전기점화 기관의 성능 및 배기특성에 관한 연구

이 석 환^{*1)} · 오 승 묵¹⁾ · 강 건 용¹⁾ · 최 원 학²⁾ · 차 경 옥²⁾

한국기계연구원¹⁾ · 명지대학교 기계공학과²⁾

Performance and Emissions of a SI Engine Operated with LPG-DME Blended Fuel

Seokhwan Lee^{*1)} · Seungmook Oh¹⁾ · Kernyong Kang¹⁾ · Wonhak Choi²⁾ · Kyoungok Cha²⁾

¹⁾Engine Research Center, KIMM, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-338, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Myongji University, Gyeonggi 449-728, Korea

(Received 31 August 2007 / Accepted 10 October 2007)

Abstract : In this study, a spark ignition engine operated with LPG and DME blended fuel was studied experimentally. Performance and emissions characteristics of a LPG engine fuelled by LPG and DME blended fuel were examined. Results showed that stable engine operation was possible for a wide range of engine loads within 20% mass content of DME fuel. Also, engine output power within 10% mass content of DME fuel was comparable to pure LPG fuel operation. Exhaust emissions measurements showed that hydrocarbon and NOx were increased with the blended fuel at low engine speed. Engine output power was decreased and break specific fuel consumption (BSFC) was severely increased with the blended fuel since the energy content of DME was much lower than that of LPG. Considering the results of engine output power and exhaust emissions, the blended fuel within 20% mass content of DME could be used as an alternative fuel for LPG.

Key words : DME(디메틸에테르), LPG(액화석유가스), Blended fuel(혼합연료), SI(전기점화), Alternative fuel(대체연료)

1. 서 론

DME(Dimethyl ether) 연료는 인체와 환경(오존층)에 대한 안전성이 높아서 스프레이의 추진제로 이용되고 있으며, 비점이 낮아서 메탄올을 연료로 사용하는 SI 엔진의 시동보조연료로도 이용되었고,¹⁾ 최근에는 휘발유나 경유를 대체할 수 있는 새로운 자동차용 연료 및 LPG를 대신할 가정용 또는 발전용 연료로서 주목받고 있다. 또한, 높은 세탄가, 낮은 착화온도, 연소실로 분사되었을 때의 빠른 증

발 특성 등으로 디젤엔진의 대체 연료로 고려되고 있으며,^{2,3)} 최근에 저가 제조기술이 개발되고 청정 연료로 인식되면서 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^{4,5)} DME 연료는 산소함유율이 34.8%로 높고 상온상압에서 무색투명한 기체이며 LPG와 유사한 기압에서 액화된다. Table 1은 DME와 LPG(Butane) 연료의 특성을 비교한 표로써, 두 연료는 비슷한 특성을 지녔지만 LPG가 DME에 비해 저위 발위량(Lower heating value)이 37%나 높음을 알 수 있다. DME를 디젤 엔진에 적용하는 경우 낮은 저위 발위량으로 인하여 같은 출력을 얻기 위하여 매우

*Corresponding author, E-mail: shlee@kimm.re.kr

Table 1 Characteristics of DME and LPG (Butane) fuels

	DME	Butane
Chemical structure	$(CH_3)_2O$	C_4H_{10}
Liquid density (kg/m^3)	667	579
Molecular weight (g/mol)	46.07	58.12
Stoichiometric A/F	9.00	15.46
Vapor pressure (kPa)	539	210
Boiling point ($^{\circ}C$)	-25.0	-0.5
Heat of vaporization (kJ/kg)	467	358
Cetane number	55	-
LHV (MJ/kg)	28.80	45.72

많은 연료를 분사하여야 하므로 DME에 LPG를 첨가하여 연료의 에너지 밀도를 높이는 경우도 있다.⁶⁾ LPG와 DME의 혼합연료는 기존의 LPG 인프라의 적용이 가능하므로 중국, 일본 등지에서 가정용 및 수송용 연료로 적용 가능성 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 20%의 DME를 LPG에 혼합한 연료는 가정용 연료로 사용하는 경우 연소 성능이 우수하다는 결과도 보이고 있다.⁷⁾ 현재 국내에서는 연간 LPG를 800만톤 가량 소비하고 있으며 거의 50% 정도가 차량 운행에 소비되고 있다.⁸⁾ 따라서 DME 연료를 LPG와의 혼합연료로 전기점화기관에 사용하면 대체연료로써 DME 연료의 사용량을 확대할 수 있다. 본 연구에서는 LPG에 DME를 질량기준으로 0, 10, 20, 30% 첨가하여 전기점화 엔진의 성능 및 주요 배출가스의 배출특성을 살펴봄으로써 혼합연료의 적용 가능성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 대상엔진

실험에 사용된 엔진 시스템의 제원을 Table 2에 나타내었다. 엔진은 배기량 2,656 cc, 압축비 10.4인 전기점화 엔진을 사용하였으며, 분사 시스템은 별도의 기화기를 사용하지 않고 분사기를 통해 액상 상태로 LPG 연료를 분사하는 LPG 액상분사 시스템이 장착되어 있다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보여 주고 있다. 동력계(dynamometer)는 6기통 엔진의 구동을 위해 엔진의 크랭크축에 연결되고 엔진회전수와 부하를 임의적으로 제어 하였다. 연료 분사시기와 분사량은 엔진 구동 조건에 따라서 Calibration ECU를 사용하여 제어하였으며, 연료 조성 변화에 따른 엔진의 공연비를 측정하기 위하여 광역산소센서(wide band O_2 sensor)를 배기계애 장착하였다. 질소산화물(NO_x), 미연탄화수소(THC), 일산화탄소(CO)는 배출가스 분석장치(HORIBA MEXA7100)를 사용하여 분석하였으며, 제동연료소모율(BSFC)은

Table 2 Specifications of V6 DOHC LPi engine

Specifications	Resources
Engine type	V6 DOHC LPi
Bore × Stroke (mm)	86.7 × 75
Compression ratio	10.4
Displacement (cc)	2,656
Maximum power (ps)	165@5,400rpm
Maximum torque (kgf · m)	25.0@4,000rpm

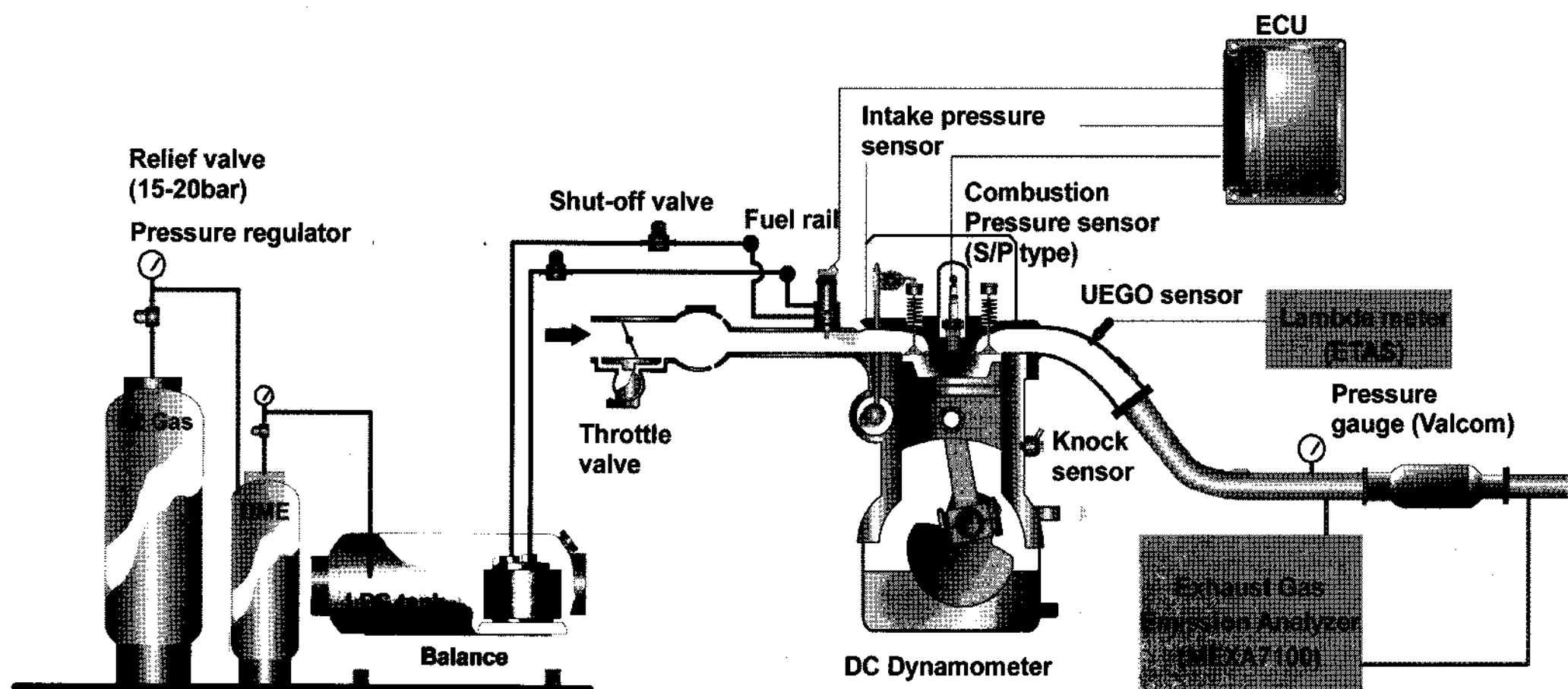


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

LPG 연료통의 무게 변화를 저울을 사용하여 측정 한 뒤 계산하였다.

실험은 1200~5200 rpm의 엔진 회전 속도 조건에서 수행되었으며, 저부하 조건에서 전부하 조건(WOT; wide open throttle)의 범위로 부하를 변화시켰다. 실험에 수행된 연료 혼합비율은 LPG(Butane 100%) 대비 DME의 질량혼합비가 0~30%까지 10% 간격으로 변화시키면서 엔진의 성능과 연료소모율을 파악하였다. 배출가스의 배출 경향 및 촉매정화 효율은 저속 엔진회전수 조건인 1800 rpm과 고속 엔진회전수 조건인 3600 rpm 조건에서 파악하였다.

3. 실험결과

3.1 DME 혼합비율에 따른 엔진성능 측정결과

100% LPG 연료에 DME 연료를 질량대비 최대 30%까지 혼합하는 경우 혼합비에 따른 엔진 성능을 파악하였다. Fig. 2는 DME 혼합율이 각각 0, 10, 20, 30%인 경우의 엔진 토크값을 나타낸 그래프이다. 1200~5200 rpm의 엔진 회전수 조건에서 전부하 조건 상태에서의 토크값을 측정하였다. LPG 연료에 첨가되는 DME 연료의 비율이 증가할수록 최대 토크값은 감소하는 경향을 나타내고 있는데 10% 이내의 양으로 혼합하는 경우에는 순수 LPG를 사용하는 경우와 비교하여 토크값이 거의 동등한 결과를 나타내었다. 하지만 DME 연료의 비율이 30%인 경우는 고회전수 영역에서 순수 LPG 연료를 사용한

경우에 비해서 거의 20% 정도의 토크값 하락을 보이고 있다. 본 실험에서는 기존 ECU에 매핑되어 있는 연료량을 그대로 사용하므로 연료의 조성이 바뀌더라도 전부하 조건에서의 분사량은 일정하다. Table 1에서 보면 LPG(Butane 100%)와 DME 연료의 저위발위량은 각각 45.72, 28.8 MJ/kg으로써 그 차이가 상당히 크므로 같은 양의 연료를 분사하더라도 혼합 연료를 사용하면 엔진 출력이 감소하는 것이다. 또한, 고회전 영역에서는 DME 연료가 가지는 자발화성에 의해서 노킹현상이 심해지고 이를 보정하기 위해서 분사시기가 지각(retard)되면서 출력은 추가적으로 감소하게 된다. Fig. 3은 DME 혼합율에 따른 제동연료소비율(Break specific fuel consumption)을 비교한 그래프이다. DME 혼합율이 높아질수록 같은 출력을 내기 위하여 더 많은 연료가 필요하므로 연료소비율은 높아지는 경향을 보이는데 혼합율이 10% 정도의 범위에서는 100% LPG 연료를 사용하는 경우와 큰 차이가 없다. DME의 함유량이 증가하면 특히 고회전 영역에서 노킹현상이 심하게 발생하므로 순수 LPG 연료에 비해서 제동연료소비율은 30%까지 차이가 나기도 한다. Fig. 4에서는 DME 혼합율에 따른 배출가스 온도 변화를 나타내었다. DME 혼합율의 증가에 따라서 배출가스 온도도 증가하는데 이는 DME 연료 자체가 합산소 연료이며 LPG에 비해 이론공연비 값이 낮기 때문에 기존 LPG 연료를 기준으로 ECU에 매핑된 연료량을 사용하면 공기과잉률(λ)이 증가하게 되면서 증발잠

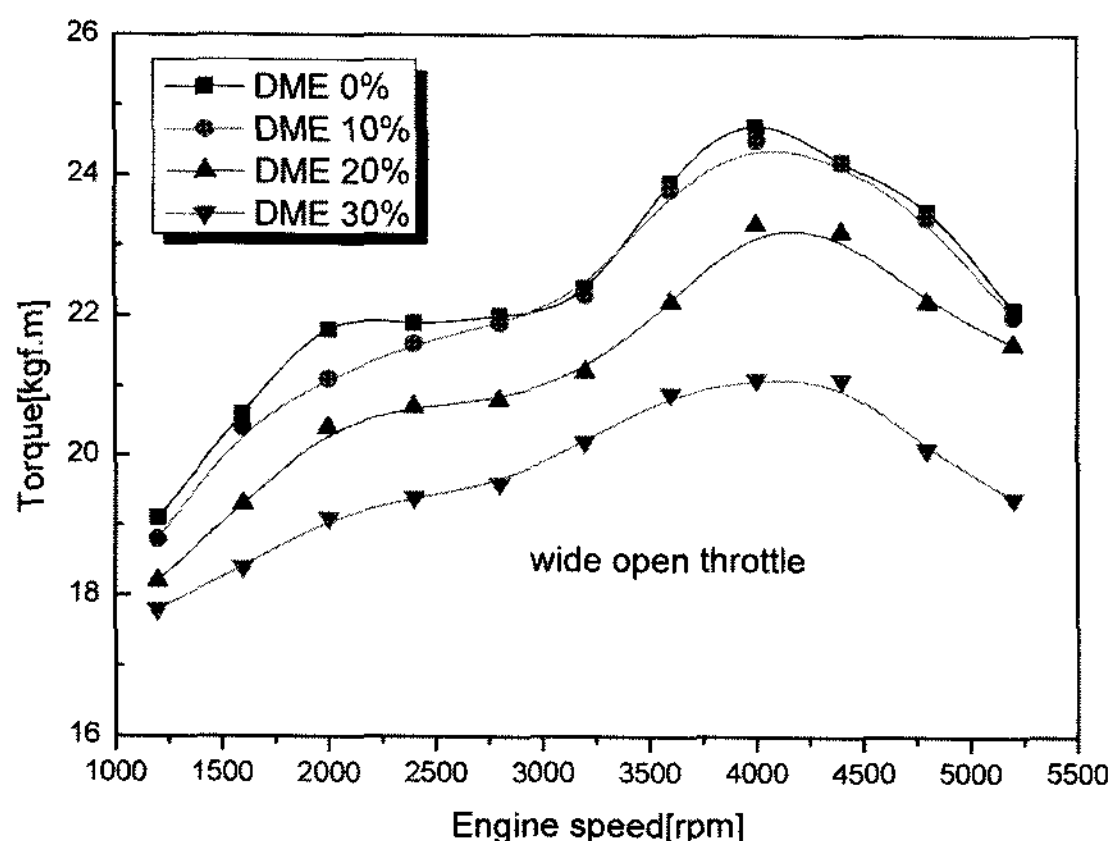


Fig. 2 Engine performance test according to DME mass % at WOT

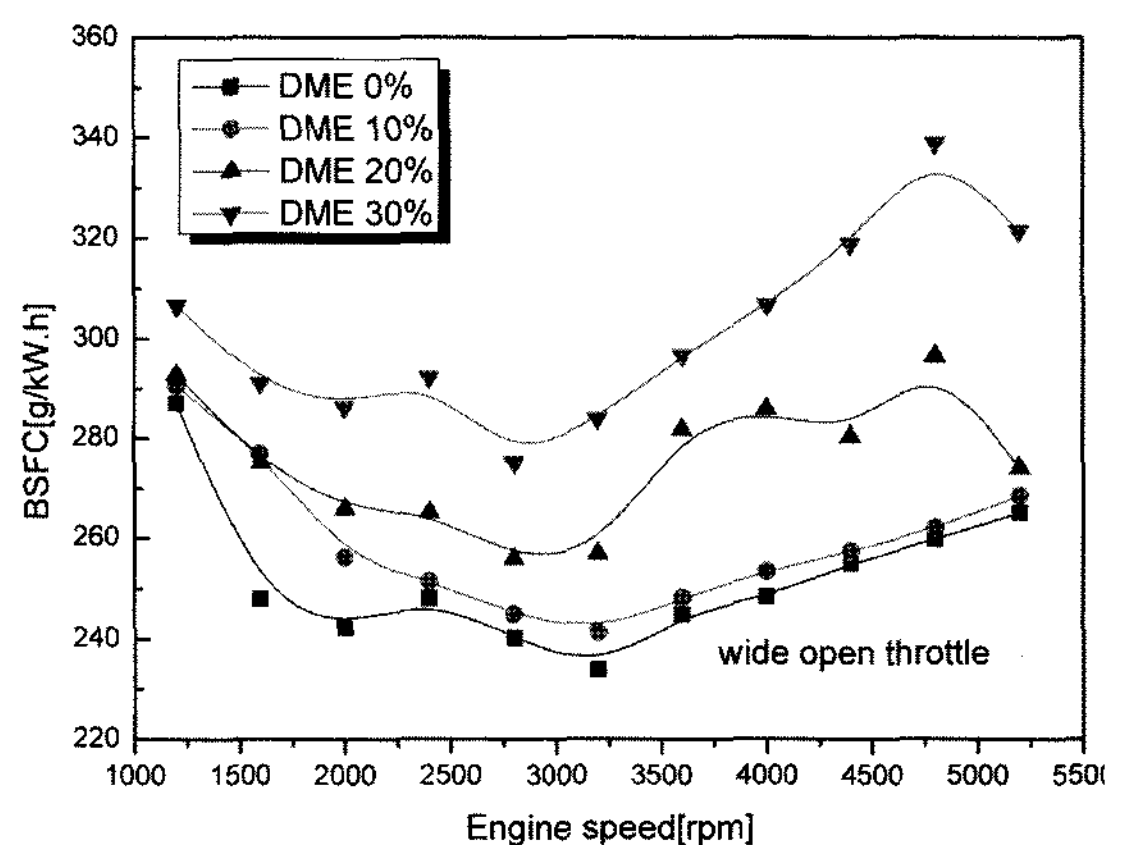


Fig. 3 Break specific fuel consumption according to DME mass % at WOT

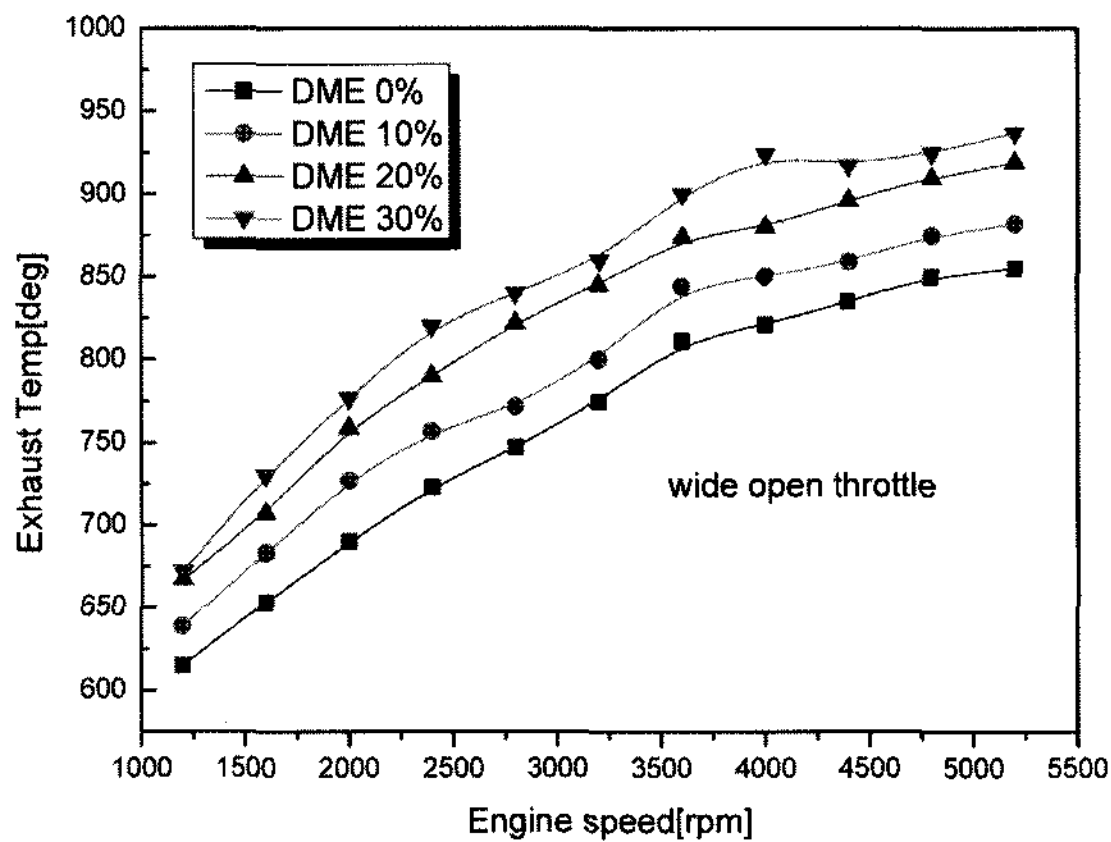


Fig. 4 Exhaust gas temperature according to DME mass % at WOT

열에 의한 엔진냉각 효과가 감소하기 때문이다. 또한, 고부하 운전영역에서는 노킹 발생에 의하여 분사시기가 지각되므로 배출가스 온도는 더욱 상승한다. Fig. 5는 엔진 회전수의 증가에 따라서 배출압력은 증가하지만 DME 연료 혼합을 차이는 압력 증가에 별다른 영향을 미치지 않는다는 결과를 보이고 있다.

3.2 DEM 혼합비율에 따른 노킹현상 특성

DME 연료는 자발화 특성이 매우 강한 연료이므로 LPG 연료와 혼합하여 전기점화 기관에서 연소하면 노킹현상이 발생할 확률이 매우 높아진다. 보통 엔진에서 노킹이 일어나는 경우 ECU는 분사시기를 최대 15 °CA 지각시키는 로직을 발생시켜 엔진을 보호하게 된다. Fig. 6에서는 DME 혼합비율에 따른 노킹발생 여부를 엔진운전 전영역에서 살펴보았다. 각각의 조건을 나타내는 선 이상의 부하영역에서는 노킹현상이 발생하게 된다. 노킹현상은 저속 엔진회전수, 고부하에서 발생 빈도가 높은 경향을 보였는데, 100% LPG 연료를 사용하는 경우는 2000 rpm 아래의 저속 엔진회전수, 고부하 조건에서만 노킹이 발생하였다. DME를 혼합한 연료를 사용하면 대부분의 경우 최고 부하에 이르기 전에 노킹현상이 발생하였다. DME의 혼합율이 증가할수록 노킹 발생영역은 큰 폭으로 증가하고 있으며 30%의 혼합율 조건에서는 저속 엔진회전수에서 1/2 부하 운전영역에서부터 노킹현상이 일어났다. 노킹현상이 일

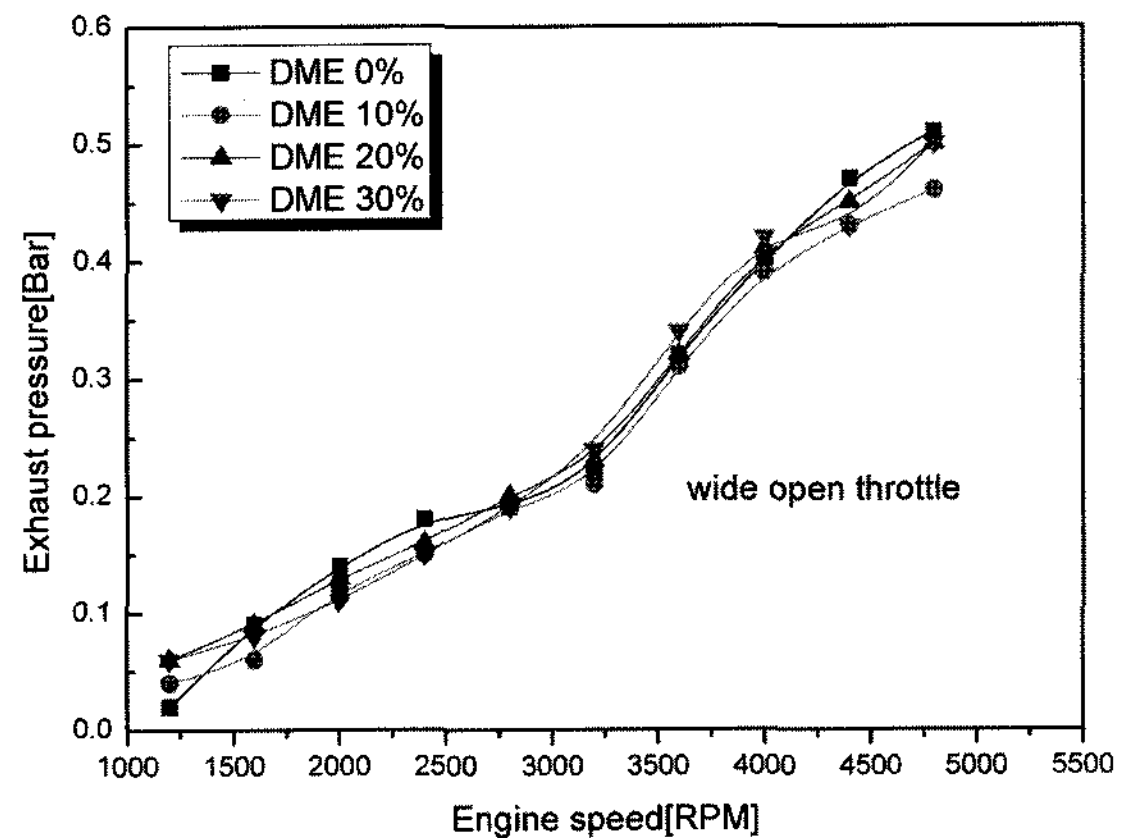


Fig. 5 Exhaust gas pressure according to DME mass % at WOT

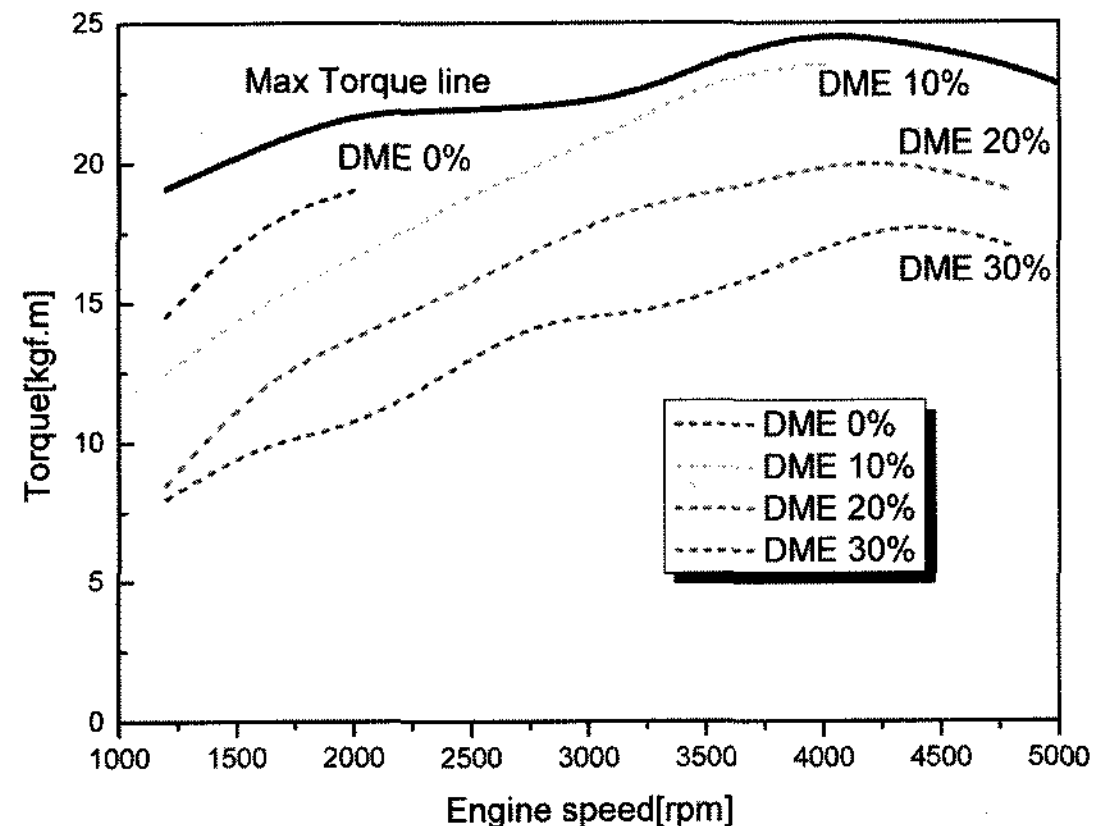


Fig. 6 Knock limit according to DME mass %

어나면 점화시기가 지각되므로 출력이 감소하고 제동연료소비율은 증가하게 된다.

3.3 엔진회전수 1800 rpm에서 부하에 따른 배기성능 및 촉매정화효율

Fig. 7~Fig. 9에서는 엔진회전수 1800 rpm 조건에서 DME 연료를 최대 30%까지 혼합하는 경우 유해배출가스인 미연탄화수소(THC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx)의 배출량과 각각의 촉매 정화효율을 살펴보았다. THC는 DME를 혼합하게 되면 배출량이 약간 증가하는 경향이 있지만 전체적인 배출량은 350 ppm 미만으로 낮게 측정된다. DME의 첨가로 인하여 연료 구성에 변화가 있으므로 촉매 정화효율은 떨어지는 경향을 보인다. 이론공연비 영역에서 운전되는 구간에서는 70% 이상의 정화율

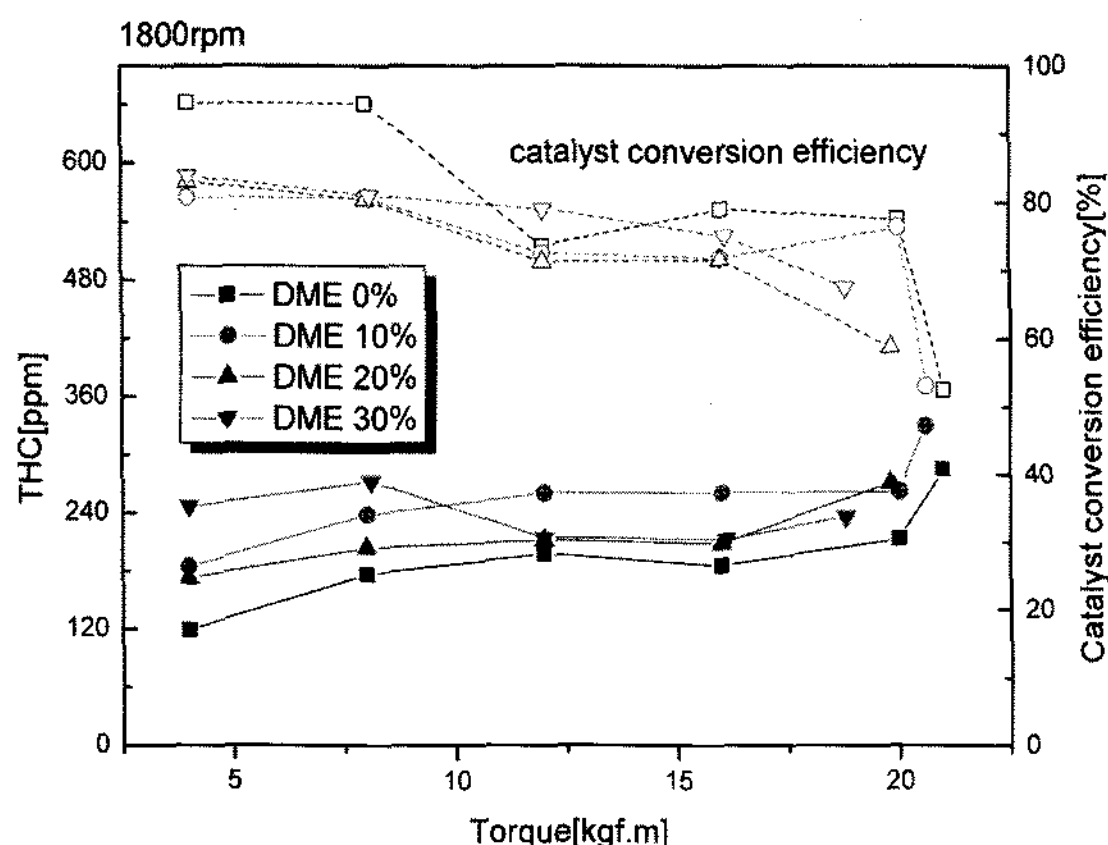


Fig. 7 Engine-out hydrocarbon emission according to DME mass % at 1800 rpm

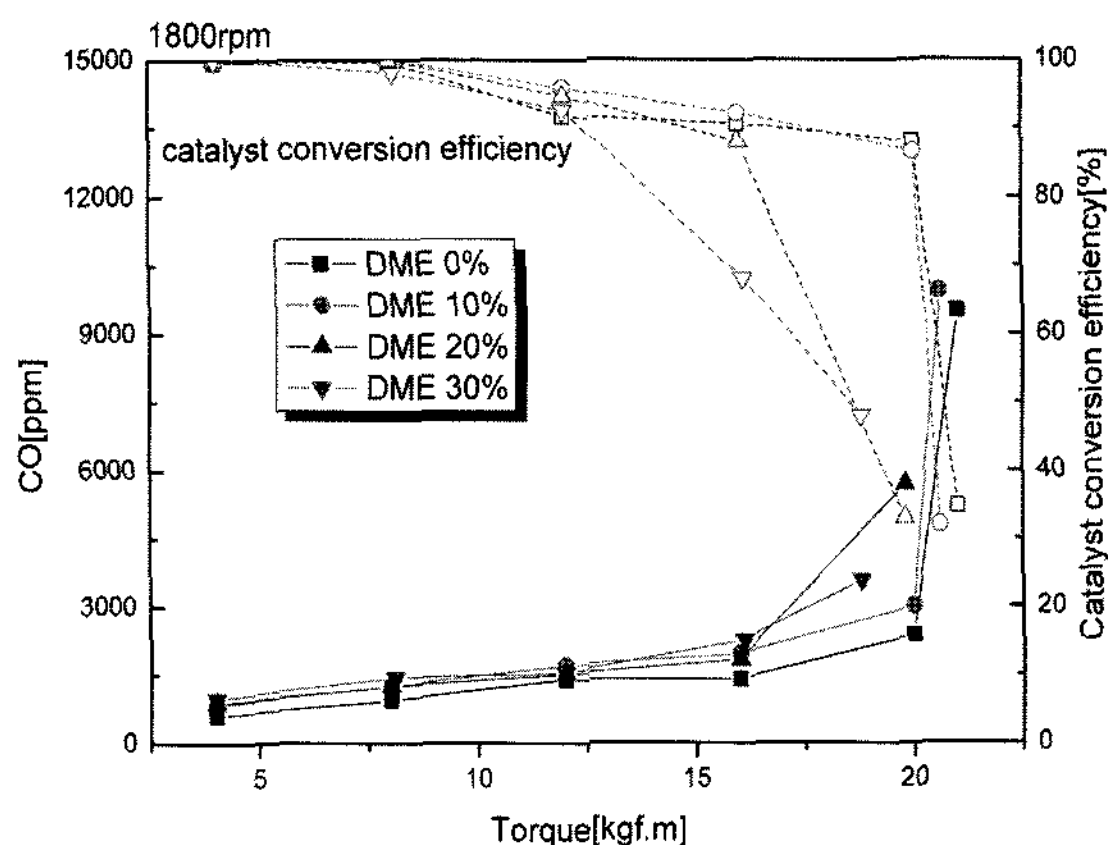


Fig. 8 Engine-out CO emission according to DME mass % at 1800 rpm

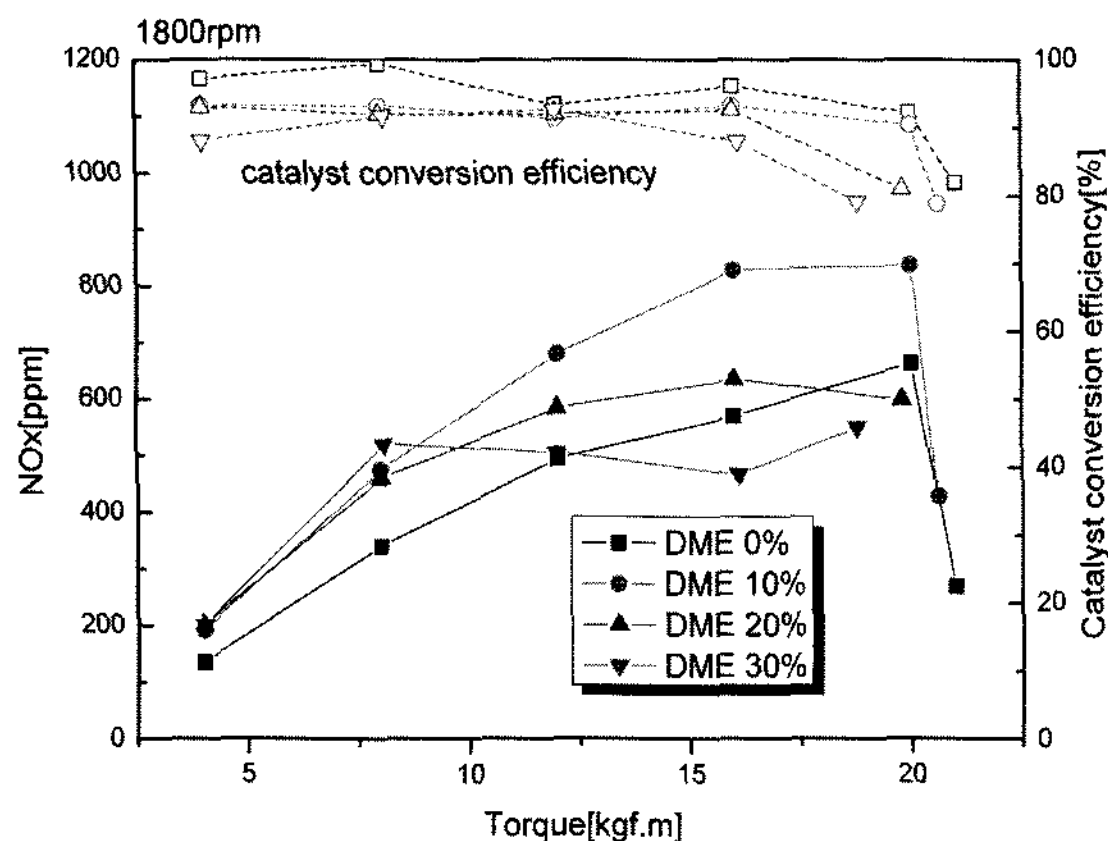


Fig. 9 Engine-out NOx emission according to content of DME at 1800 rpm

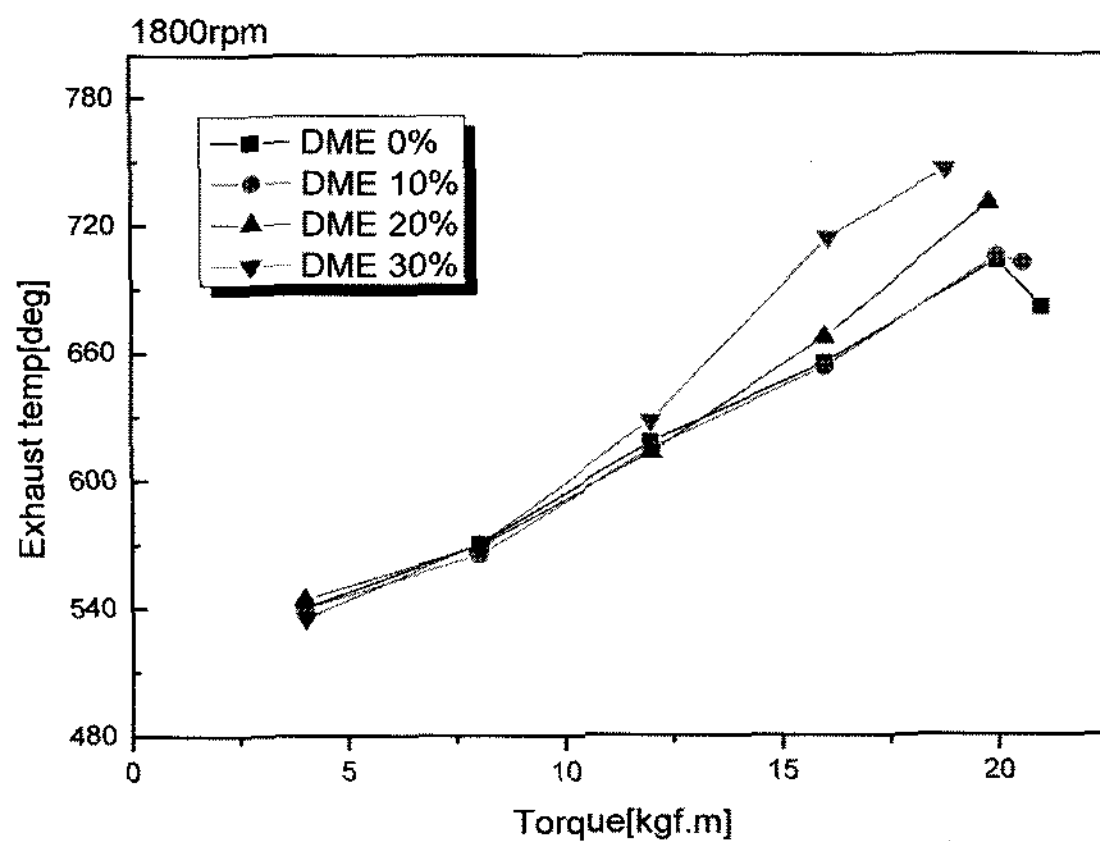


Fig. 10 Exhaust gas temperature according to content of DME at 1800 rpm

을 보이지만 전부하 영역에서는 공연비가 농후한 운전이 하게 되므로 정화효율이 60% 이하로 떨어진다. CO의 경우는 DME의 첨가에 따라서 배출량의 변화가 거의 없었지만 농후한 운전을 하게 되는 전부하 영역에서는 모든 조건에서 배출량이 급증하게 되고 촉매의 정화효율은 급격하게 감소하게 된다. NOx 발생량은 DME의 첨가에 의해 증가하는 경향이 있는데 이는 DME가 LPG에 비해 최소 점화에너지(Minimum Ignition Energy)와 자발화 온도(Self Ignition Temperature)가 낮아 연소상이 진각되면서 NOx가 발생할 수 있는 영역이 증가하기 때문이다. 하지만 혼합율이 20% 이상인 경우 8kgf.m 이상의 부하조건에서는 오히려 혼합율의 증가에 따라서 NOx 발생량이 감소한다. 이는 DME 연료가 세탄가

가 55이상으로 자발화 성질이 매우 강한 연료이므로 DME 연료의 혼합율이 증가하게 되면 전기점화기관에서의 자발화 현상인 노킹 현상이 생길 확률이 높아진다. 이때 엔진의 ECU는 점화시기를 지각시켜서 노킹현상을 제거하고자 하는 로직을 발동하게 되고 갑자기 지각된 점화시기로 인하여 NOx의 배출량은 급감하게 된다. 또한 고부하시 DME 혼합율이 높은 경우 노킹이 생기므로 배출가스의 온도가 상당히 높아지는 결과를 Fig. 10에서 볼 수 있다.

3.4 엔진회전수 3600 rpm에서 부하에 따른 배기성능 및 촉매정화효율

Fig. 11~Fig. 14에서는 엔진회전수 3600 rpm 조건에서 DME 연료를 최대 30%까지 혼합하는 경우 유

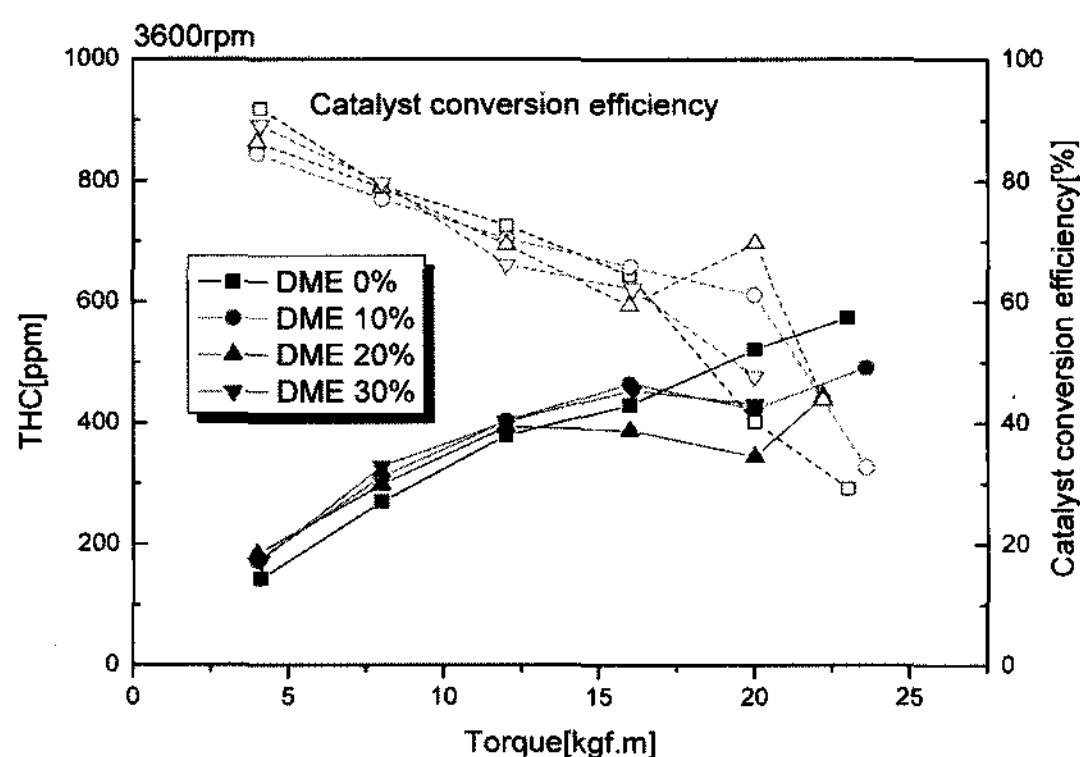


Fig. 11 Engine-out hydrocarbon emission according to DME mass % at 3600 rpm

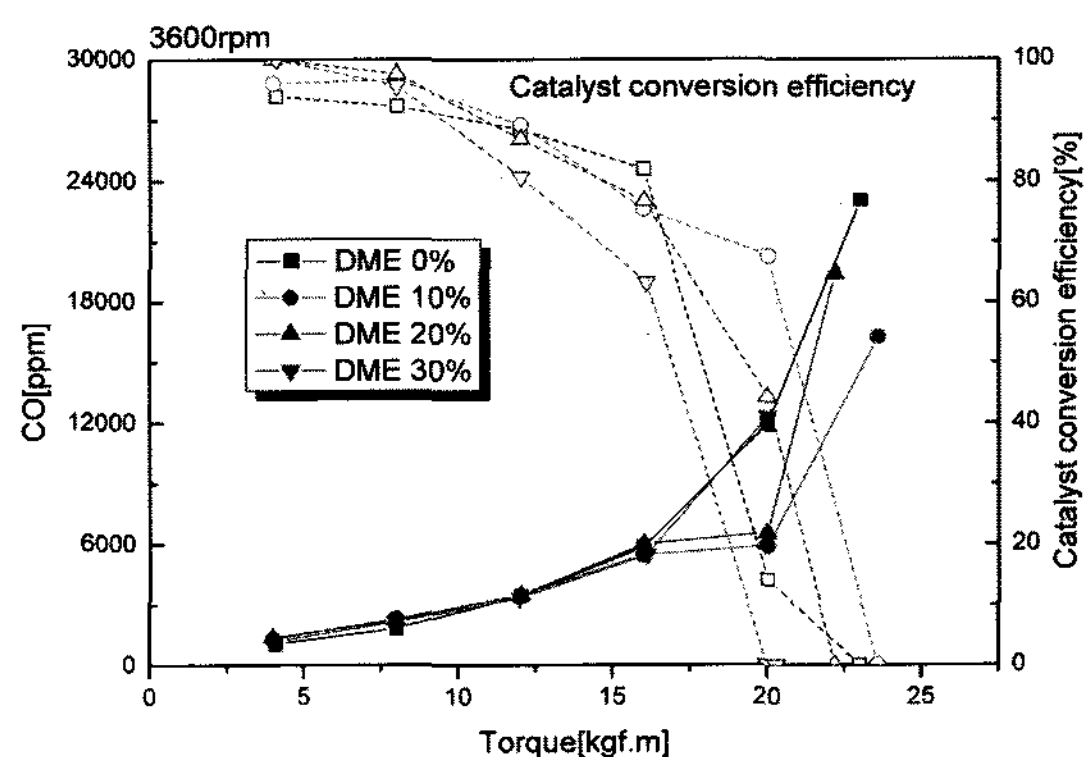


Fig. 12 Engine-out CO emission according to DME mass % at 3600 rpm

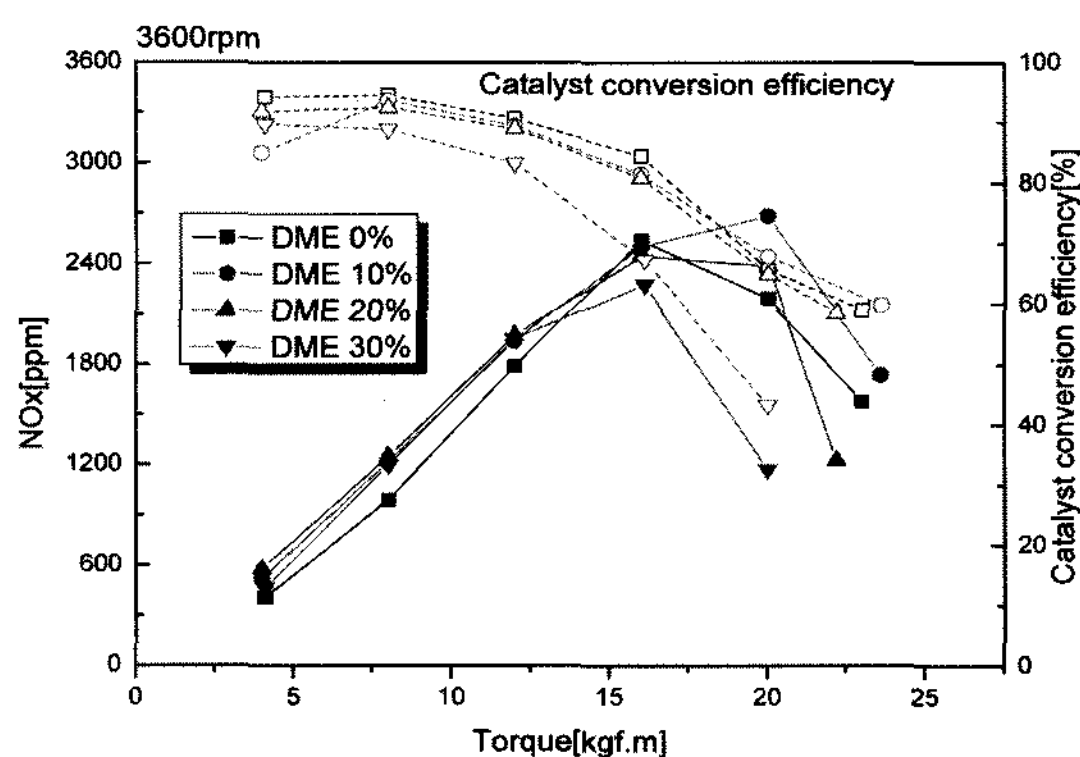


Fig. 13 Engine-out NOx emission according to DME mass % at 3600 rpm

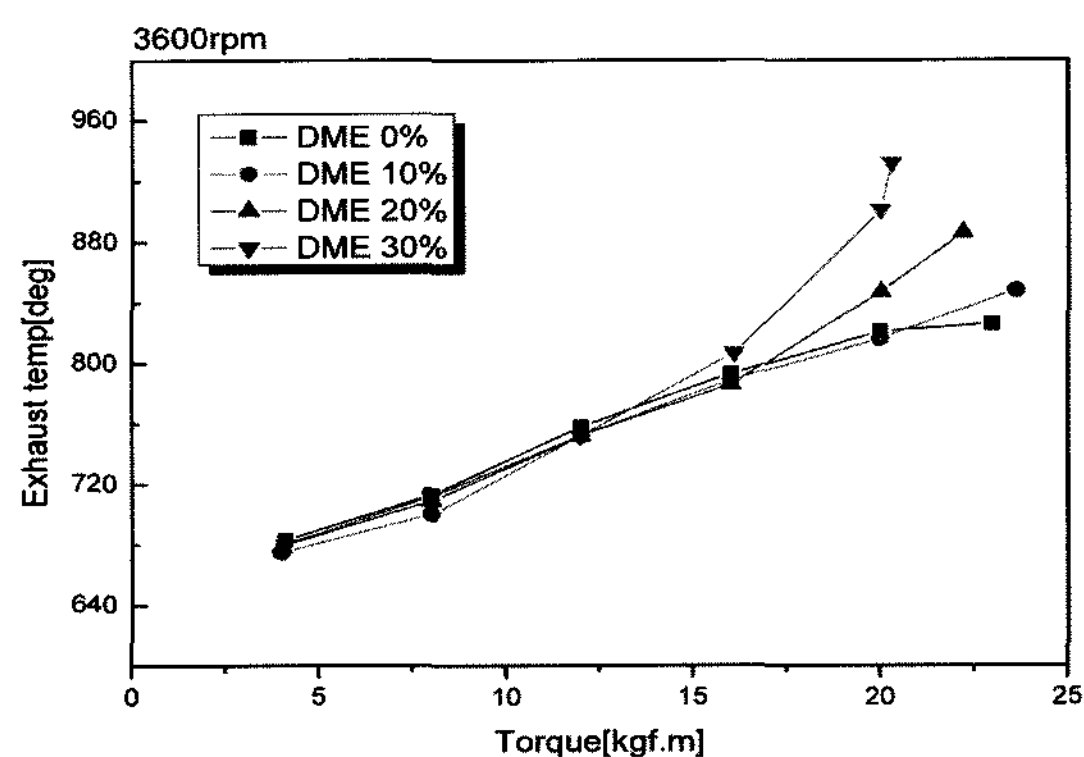


Fig. 14 Exhaust gas temperature according to DME mass % at 3600 rpm

해 배출가스인 미연탄화수소(THC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx)의 배출량을 살펴보았다. THC는 부하가 증가하는 경우 DME 혼합율의 증가에 따라 배출량이 약간 감소하는 경향이 있는데 이는 DME 연료의 함산소 효과에 의한 것으로 판단된다. 촉매 정화효율은 저부하에서 90% 이상의 높은 정화효율을 보이다가 농후한 혼합기가 형성되는 고부하 조건에서 30% 정도로 떨어진다. CO의 경우 저부하에서는 배출량이 혼합율에 상관없이 비슷한 배출량을 나타내지만 고부하로 갈수록 농후한 혼합기 형성에 의하여 CO 배출량이 모든 경우에 급증하였다. 또한 CO의 촉매 정화효율은 공연비에 매우 민감하므로 고부하 조건에서는 촉매가 CO를 전혀 정화하지 못하였다. 저속 엔진회전수와 마찬가지로 DME 연료 혼합율이 30%인 경우 부하가 20 kgf.m의 조건에서 NOx의 배출량이 갑자기 감소하는 것을 볼 수 있

다. 이는 역시 DME 연료가 가지는 자발화 성질에 의한 영향으로 파악되며 고부하 영역에서 노킹 현상이 생기고 있음을 알 수 있다. 모든 연료 조건에서 20 kgf.m 이상의 부하 조건에서는 ECU에서 노킹 방지를 위하여 점화시기를 지각함으로써 NOx의 발생량이 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig. 14는 3600 rpm의 엔진회전수 조건에서는 부하의 증가에 따라서 배출가스 온도를 나타낸 것인데 배출가스는 부하에 따라서 별 차이가 없다가 20 kgf.m 이상의 고부하시 점화시기의 지각으로 인하여 배출가스의 온도가 상당히 높아지며 혼합율이 30%가 넘는 경우에는 배기가스 온도가 900°C 이상으로 상승하여 촉매의 파손을 일으킬 수 있는 가능성이 있다.

3.5 혼합연료에서 전부하 조건시 공연비 조정에 따른 엔진 성능 평가

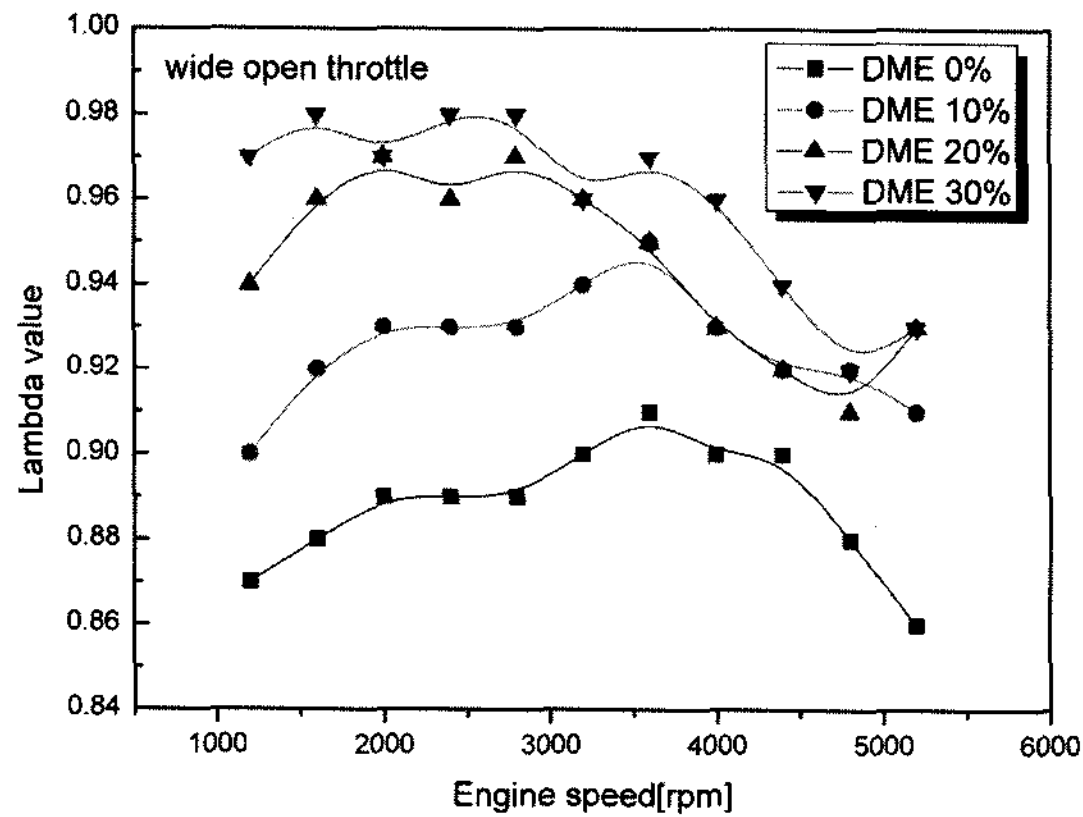


Fig. 15 Lambda value according to DME mass % at WOT

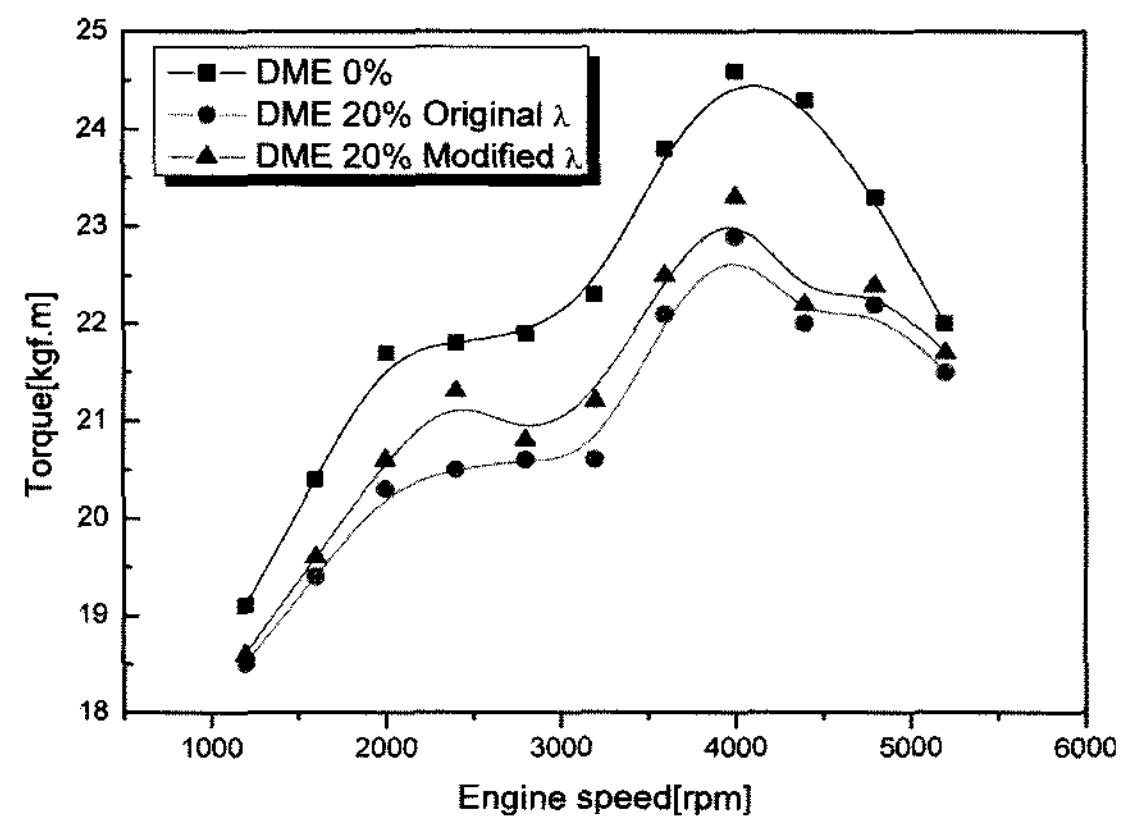


Fig. 16 Effect of lambda modification on torque change at WOT (20% mass blend of DME)

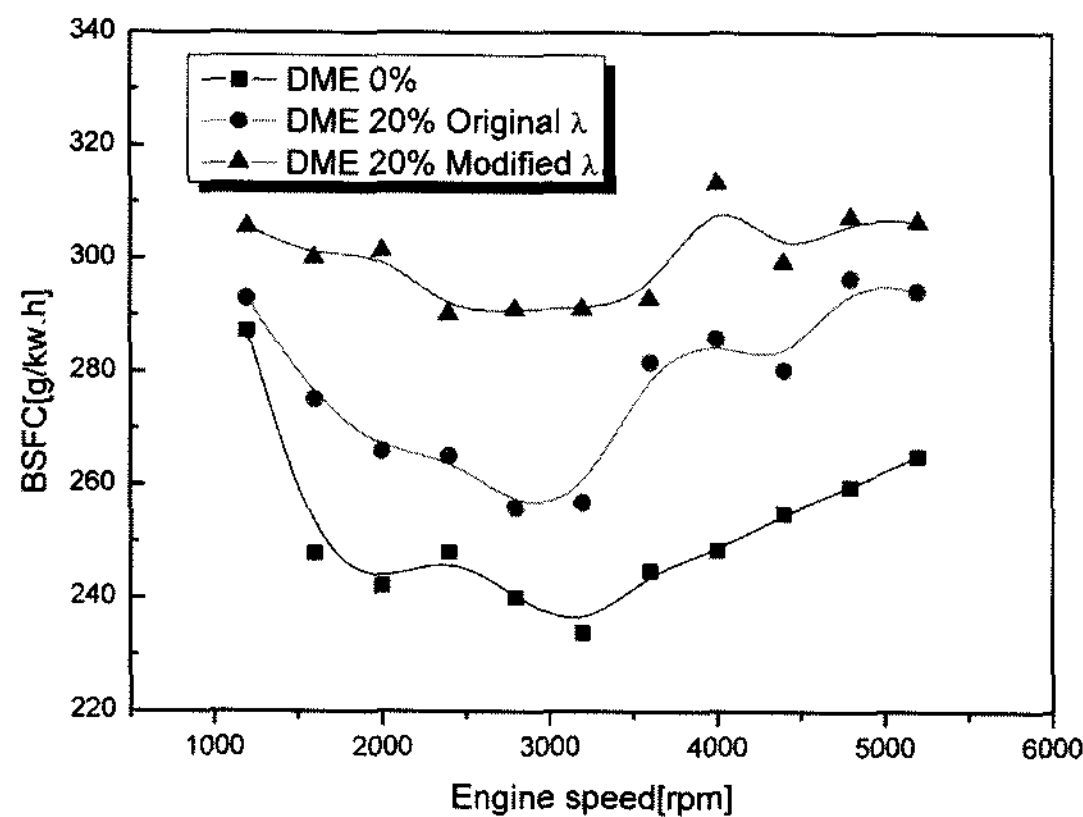


Fig. 17 Effect of lambda modification on BSFC change at WOT (20% mass blend of DME)

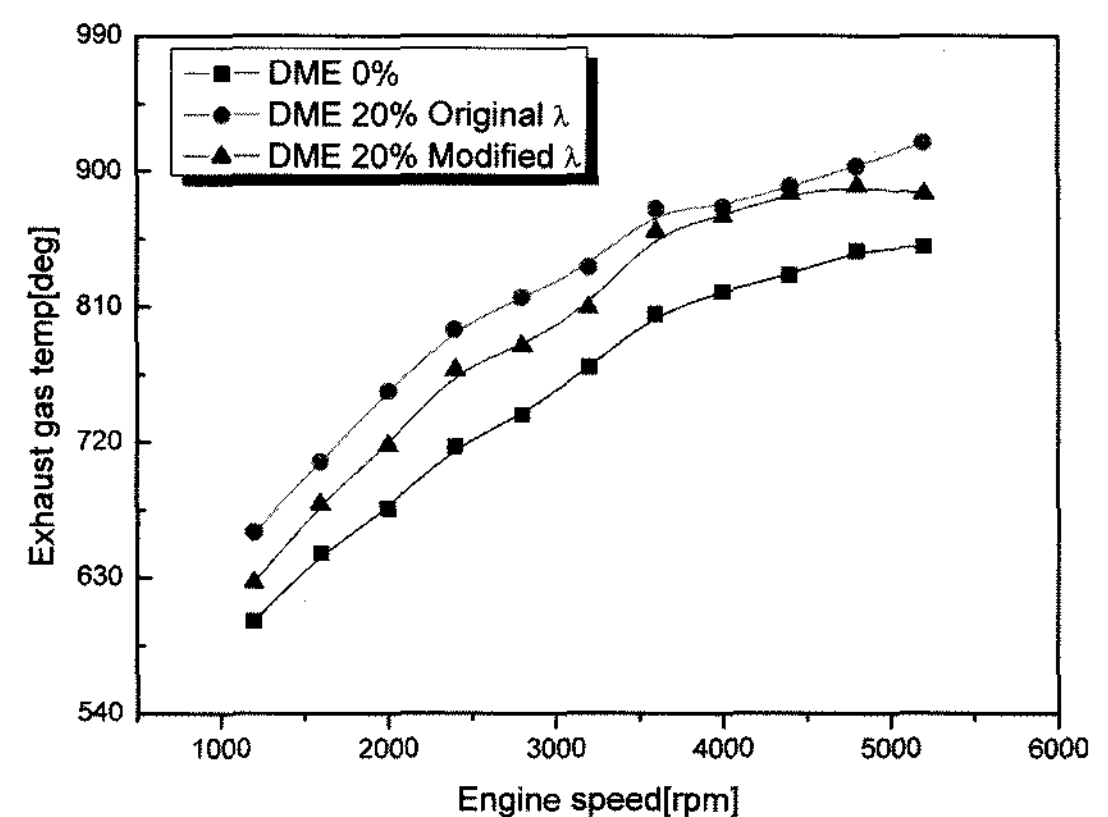


Fig. 18 Effect of lambda modification on exhaust gas temperature change at WOT (20% mass blend of DME)

전부하 조건에서 엔진은 공연비 제어를 통한 이론공연비 영역에서 운전되지 않고 최대 출력을 가지면서 고온의 환경으로부터 촉매를 보호하기 위한 공기과잉률 0.90 이하의 상당히 농후한 영역에서 운전된다. 순수 LPG 기준으로 ECU에 매핑된 연료량을 혼합연료에 사용하게 되면 이론공연비 차이로 인하여 상대적으로 희박한 환경에서 엔진이 운전된다. Fig. 15는 전부하 조건에서 각각의 연료에 대한 공기과잉률 값을 나타내었다. LPG 연료의 경우는 0.86~0.90 정도의 농후한 영역에서 운전되는데 비해 DME 연료가 30% 혼합된 경우는 0.92~0.96의 상대적으로 희박한 영역에서 운전되므로 엔진의 출력이 감소하며 촉매 보호를 위한 배출가스 냉각 효과가 미비해진다. 이를 보완하기 위하여 인위적으로 연료를 추가 분사하여서 공기과잉률 값을 LPG 연료를

사용하는 경우와 동일하게 맞추었을 때 엔진 성능 결과를 Fig. 16~Fig. 18에 나타내었다. DME를 20% 혼합하는 경우 공기과잉률을 변경하니 토크값은 최대 4% 증가하였으며, 제동연료소비율은 최대 13% 증가하였고, 배출가스 온도는 36°C까지 저감이 가능하였다. 연료를 추가적으로 분사하여 공기과잉률 값을 LPG 기준으로 동일하게 맞추었지만 여전히 출력저하가 크며, 제동연료소비율의 증가가 크다.

4. 결 론

LPG 연료와 특성이 비슷한 DME 연료를 혼합하여 전기점화기관에서 연료의 혼합율에 따른 엔진의 출력과 연료소비율, 배출가스 배출량을 측정하였으며, 엔진 실험을 통하여 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

LPG 연료에 첨가되는 DME 연료의 비율이 증가할수록 최대 토크값은 감소하는 경향을 나타내고 있다. LPG 연료와 DME 연료의 저위발위량의 차이가 상당히 크므로, 같은 양의 연료를 분사하게 되는 경우 LPG 연료를 사용할 때 엔진 출력이 더 커진다.

DME 혼합율이 높아질수록 같은 출력을 가지기 위하여 더 많은 연료가 필요하므로 제동연료소비율은 높아지는 경향을 보인다.

DME 혼합율의 증가에 따라서 배출가스 온도도 증가하는데 이는 DME 연료 자체가 합산소 연료이며 LPG에 비해 이론공연비 값이 낮으므로 기존 ECU 매핑 상태에서는 회박연소를 하기 때문이다. 또한, 고회전 엔진회전수 영역에서는 노킹이 생기면서 분사시기가 지각되면서 배출가스 온도의 상승률이 커진다.

1800rpm과 3600rpm의 엔진회전수 조건에서 유해 배출가스의 배출량을 측정한 결과 DME 혼합율이 20%를 넘지 않는 범위 내에서는 배출가스 배출량의 증가가 크지 않기 때문에 LPG 연료와 혼합하여 연소시키는 것이 가능할 것으로 판단된다.

DME를 20% 혼합하는 경우 추가적인 연료 분사를 통하여 공기과잉률을 기존 LPG 연료가 가지는 값과 동일하게 변경한 결과 토크값은 3% 증가하였으며, 제동연료소비율은 최대 13% 증가하였고, 배출가스 온도는 36°C까지 저감이 가능하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단에서 지원되는 “중소형 LPG 상용차 개발사업”의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) T. Murayama, N. Miyamoto, T. Yamada, J. Kawashima and K. Itow, “A Method to Improve the Solubility and Combustion Characteristics of Alcohol-Diesel Fuel Blends,” SAE 821113, 1982.
- 2) S. G. An, M. Y. Kim, S. H. Yoon, J. H. Lee and C. S. Lee, “Combustion and Exhaust Emission Characteristics of DME in a Common-rail Diesel Engine,” Transactions of KSAE, Vol.15, No.2, pp.74-80, 2007.
- 3) F. Maroteaux, G. Descombes and F. Sauton, “Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Running with DME,” 2001 ICE Spring Technical Conference, Vol.1, pp.73-81, 2001.
- 4) P. Kapus and H. Ofner, “Development of Fuel Injection Equipment and Combustion System for DI Diesels Operated on Dimethyl Ether,” SAE 950062, 1995.
- 5) B. I. An, Y. Sato, S. W. Lee and T. Takayanagi, “Effects of Injection Pressure of Combustion of a Heavy Duty Diesel Engine with Common Rail DME Injectio System,” SAE 2004-01-1864, 2004.
- 6) S. Kajitani, C. L. Chen, M. Oguma, M. Alam and K. T. Rhee, “Direct Injection Diesel Engine Operated with Propane-DME Blended Fuel,” SAE 982536, 1998.
- 7) N. Weidou, T. Lijian and F. Dewei, “Rational Cognition of DME Market in China,” 3rd Asian DME Conference Proceeding, pp.21-38, 2006.
- 8) B. J. Kim, “Kogas DME Business,” 3rd Asian DME Conference Proceeding, pp.197-205, 2006.