



LPG-DME 혼합연료를 사용하는 전기점화 기관의 연소특성 연구

†이석환 · 오승묵 · 최영 · 강건용 · 최원학* · 차경옥*

한국기계연구원, *명지대학교 기계공학과
(2008년 5월 28일 접수, 2008년 7월 25일 수정, 2008년 7월 25일 채택)

Combustion Characteristics Study of an SI Engine Operated with DME Blended LPG Fuel

†Seokhwan Lee · Seungmook Oh · Young Choi · Kernyong Kang ·
Wonhak Choi* · Kyoungok Cha*

Korea Institute of Machinery and Materials, 171, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon-si 305-338, Korea
*Department of Mechanical Engineering, Myongji University, Nam-dong, Cheoin-gu, Yongin-si 449-728, Korea
(Received 28. May. 2008, Revised 25. July. 2008, Accepted 25. July. 2008)

요 약

본 연구에서는 DME가 함유된 LPG 연료를 불꽃 점화 기관에서 적용 가능 여부를 실험적으로 살펴보고 있다. LPG와 DME가 함유된 혼합연료로 엔진 구동시 엔진출력, 배출가스 특성, 연소안정성 등의 항목에 대한 실험을 1200~5200 rpm에서 수행하였다. 결과를 살펴보면 20% 내외의 범위에서 DME를 혼합하는 경우 안정된 연소성능을 얻을 수 있었으며 10%까지는 엔진 출력 저하가 거의 없다. 하지만 혼합율이 증가할수록 DME 연료는 LPG보다 에너지 밀도가 낮으므로 출력이 감소하고 제동연료소비율은 증가하는 현상을 보인다. LPG/DME 혼합연료는 향후 DME 시장을 넓혀 나가는 최선의 방법이 될 것이다.

Abstract – In this study, a spark ignition engine operated with the DME blended LPG fuel was investigated experimentally. Performance, emissions characteristics including hydrocarbon, CO, NOx, and combustion stability of an SI engine fuelled with DME blended LPG fuel were examined at 1200~5200 rpm. 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 that of pure LPG fuel operation. However, engine output power was decreased and break specific fuel consumption (BSFC) was severely increased with the amount of blended fuel as the energy content of DME was much lower than that of LPG. DME blended LPG fuel is expected to be potential for enlarging DME market.

Key words : dimethyether, liquid petroleum gas, blended fuel, spark ignition, alternative fuel

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 주목 받고 있다. 또한, 높은 세탄가, 낮은 착화온도, 연소실로 분사되었을 때의 빠른 증발 특성 등으로 디젤엔진

의 대체 연료로 고려되고 있으며[2,3], 최근에 저가 제조기술이 개발되고 청정 연료로 인식되면서 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다[4,5]. DME 연료는 산소 함유율이 34.8%로 높고 상온상압에서 무색투명한 기체이며 LPG와 유사한 기압에서 액화된다. Table 1은 DME와 LPG(Butane) 연료의 특성을 비교한 표로서, 두 연료는 비슷한 특성을 지녔지만 LPG가 DME에 비해 저위발위량(Lower heating value)이 37%나 높음을 알 수 있다. DME를 디젤 엔진에 적용하는 경우 낮은 저위발위량으로 인하여 같은 출력을 얻기 위하여 매우 많은 연료를 분사하여야 하므로 DME에 LPG를 첨가하여 연료의 에너지 밀도를 높이는 경우도 있다[6]. LPG

†주저자:shlee@kimm.re.kr

Table 1. Characteristics of DME and LPG (Butane) fuels.

Property	Fuels	
	DME	Butane
Chemical structure	(CH ₃) ₂ O	C ₄ H 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 (°C)	-25.0	-0.5
Heat of vaporization (kJ/kg)	467	358
Cetane number	55	-
LHV (MJ/kg)	28.80	45.72

와 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 연구사례도 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 질량 기준으로 0, 10, 20, 30% 첨가하여 전기점화 엔진의 성능, 배출가스 특성 및 연소 안정성을 살펴봄으로써 혼합연료의 불꽃점화기관 적용 가능성을 파악하고자 한다.

II. 실험장치 및 구성

2.1. 실험엔진

실험에 사용된 엔진 시스템의 제원을 Table 2에 나

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@5,400 rpm
Maximum torque (kgf·m)	25.0@4,000 rpm

타내었다. 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 O₂ sensor)를 배기계에 장착하였다. 실린더 내부에서 일어나는 연소현상을 파악하기 위하여 실린더 내부 압력을 피에조 타입 압력센서(Kistler 6117B)를 사용하여 측정하였으며, 제동연료소모율(BSFC)은 LPG 연료통의 무게 변화를 저울을 사용하여 측정한 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 연료소비율을 파악하였다.

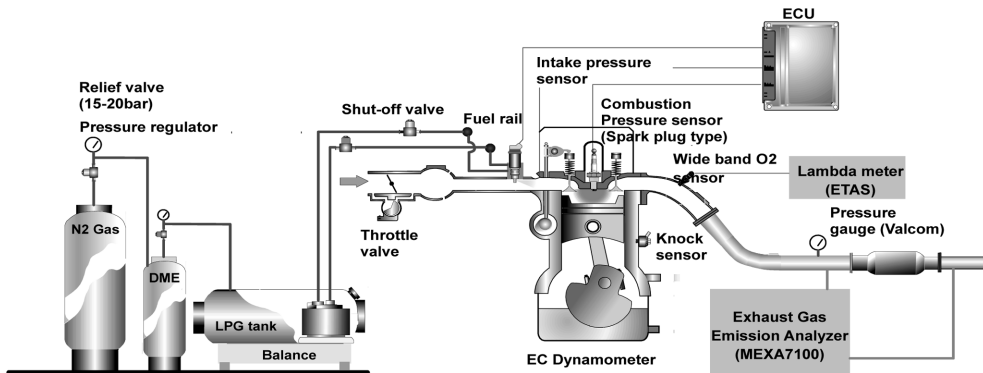


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

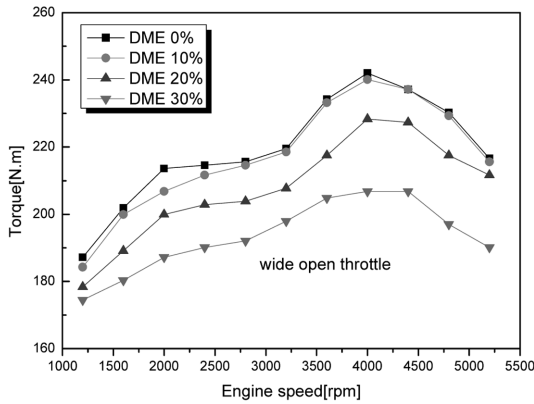


Fig. 2. Engine torque according to DME mass % at WOT.

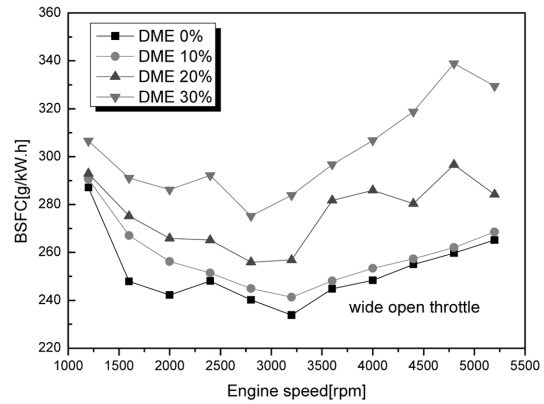


Fig. 3. Break specific fuel consumption according to DME mass % at WOT.

III. 실험결과

3.1. DME 혼합비율에 따른 엔진성능

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 매핑(mapping) 되어있는 연료량을 그대로 사용하므로 연료의 조성이 바뀌더라도 전부하 조건에서의 분사량은 일정하다. Table 1에서 보면 LPG(Butane)와 DME 연료의 저위발열량은 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 범위에서

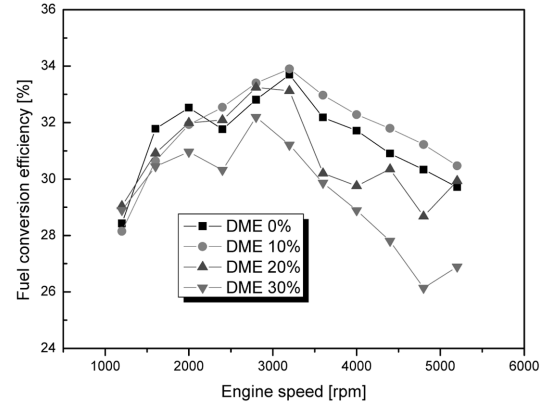


Fig. 4. Fuel conversion efficiency according to DME mass % at WOT.

는 100% LPG 연료를 사용하는 경우와 큰 차이가 없다. DME의 함유량이 증가하면 노킹현상이 심하게 발생하므로 순수 LPG 연료에 비해 DME가 30% 함유된 경우에는 제동연료소비율이 30%까지 차이가 나기도 한다.

실제로 엔진에서 소비된 연료가 얼마만큼의 일을 하였는지를 살펴보기 위하여 엔진효율(Fuel conversion efficiency)을 구하였다. 엔진효율을 구하기 위하여 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\eta_f = \frac{3600}{sfc(g/kW \cdot h) Q_{HV}(MJ/kg)}$$

sfc : Specific fuel consumption

Q_{HV} : Lower heating value

Fig. 4는 전부하 조건에서 DME 혼합비율에 따른 엔

진효율을 나타내고 있다. 저속엔진회전수 조건에서는 DME 혼합비율에 따른 엔진효율의 차이가 크지 않지만 엔진회전수의 증가에 따라서 DME 혼합비율이 높은 경우 엔진효율이 감소하였다. 하지만 DME를 10% 혼합하는 경우 저속엔진회전수 조건에서는 순수 LPG를 사용하는 경우에 비해서 엔진효율이 낮지만 3200 rpm 이상의 고속엔진회전수 조건에서는 엔진효율이 더 높다. 이는 DME를 혼합한 연료가 LPG에 비해서 제동연료소비율값은 비슷하나 저위발위량값이 낮기 때문에 엔진효율이 더 크게 나오는 것이다. DME를 10% 정도 혼합하는 경우에는 엔진효율 측면에서도 좋은 결과를 보이고 있다.

3.2. DME 혼합비율에 따른 엔진 연소특성

DME 혼합비율이 엔진 연소특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 DME 혼합비율에 따른 연소실 압력과

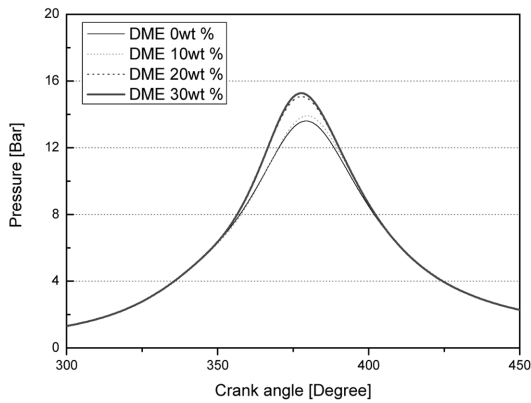


Fig. 5. Combustion pressure according to DME mass % at 1800 rpm, 40N·f.

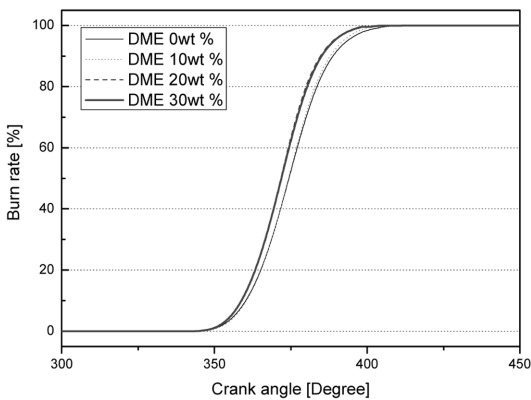


Fig. 6. Burn rate according to DME mass % at 1800 rpm, 40N·f.

연소율을 확인해 보았다. 1800 rpm, 40 N·m의 부하 조건에서 DME 혼합비율에 따른 연소실 압력을 Fig. 5에 나타내었는데 모든 조건에서 점화시기는 BTDC 33°로 고정하였으므로 점화가 일어나는 시기는 동일하다. 혼합비율이 증가할수록 연소상(Combustion phase)이 약간 진각되면서 최대 연소압도 높아지는데 이는 DME가 LPG에 비해 최소 점화에너지(Minimum ignition energy)와 자발화 온도(Self ignition temperature)가 낮아 연소상이 진각되면서 최대 연소압도 높아지는 것이다 [6]. DME 혼합비율이 10%에서 20%로 증가할 때는 그 차이가 크게 나타나는데 연소율의 경우 Fig. 6과 같이, DME 혼합비율의 증가에 따라서 연소완료에 걸리는 시간이 짧아진다. DME 첨가에 따라서 동일한 엔진회전수, 부하조건, 점화시기 조건에서도 연소상이 약간 진각하므로 최대 연소압이 증가하며 도시평균유효압력(IMEP) 값도 약간 증가한다.

3.3. DME 혼합비율에 따른 연소안정성

불꽃점화기관에서 고부하 운전시 연료가 연소실내에서 자발 점화하는 노킹 현상이 발생할 확률이 있으며 노킹 현상 발생시 출력저하, 엔진파손 등의 심각한 현상을 초래할 수도 있다. 노킹 현상을 방지하기 위하여 옥탄가가 높은 연료를 사용하는 것이 추천되는데 DME 연료는 오히려 자발점화성의 척도인 세탄가가 높은 연료이므로 혼합연료를 사용하여 엔진 연소를 하는 경우 연소가 불안정해질 가능성이 있다. DME를 엔진 연료에 사용시 연소 안정성을 파악하기 위하여 각 운전조건에서 IMEP값에 따른 IMEP_COV값을 혼합비율별로 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 도기평균유효압력 변동계수(IMEP_COV)값 5%를 기준으로 하여 5%가

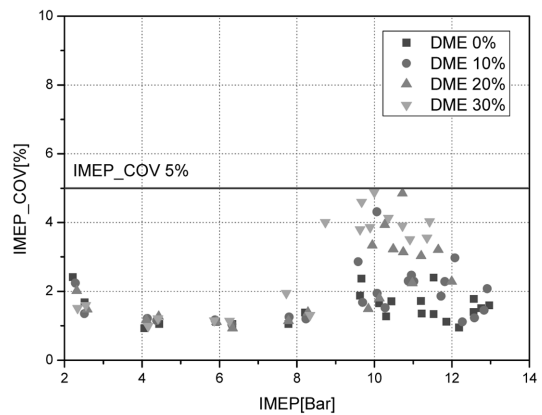


Fig. 7. IMEP_COV according to DME mass %.

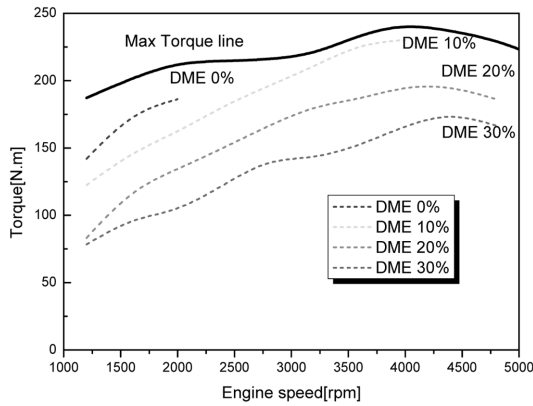


Fig. 8. Knock limit according to DME mass %.

넘으면 연소가 불안정하다고 판단하였다. 저부하에서는 모든 경우에서 2% 안쪽의 안정된 연소성능을 보여주고 있으나 IMEP 10 bar 이상의 고부하 조건에서는 DME 혼합비율이 20~30%인 경우에는 IMEP_COV 값이 커져서 5%에 이르고 있다. 그러나, 모든 경우에 기준점인 IMEP_COV 5%를 넘지는 않았다.

3.4. DME 혼합비율에 따른 노킹현상특성

DME 연료는 자발화 특성이 매우 강한 연료이므로 LPG 연료와 혼합하여 전기점화 기관에서 연소하면 노킹 현상이 발생할 확률이 매우 높아진다. 보통 엔진에서 노킹이 일어나는 경우 ECU는 분사시기를 최대 15° CA 지각시키는 로직을 발생시켜 엔진을 보호하게 된다[9]. Fig. 8에서는 DME 혼합비율에 따른 노킹발생 여부를 엔진 운전 전 영역에서 살펴보았다. 각각의 조건을 나타내는 선 이상의 부하영역에서는 노킹현상이 발생하게 된다. 노킹 현상은 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 일어나면 점화시기가 지각되므로 출력이 감소하고 제동연료소비율은 증가한다.

VI. 결 론

LPG 연료와 특성이 비슷한 DME 연료를 혼합하여

전기점화기관에서 연료의 혼합율에 따른 엔진의 출력과 연료소비율, 연소안정성을 측정하였으며, 엔진 실험을 통하여 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

1. 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.
2. DME 혼합율이 높아질수록 같은 출력을 가지기 위하여 더 많은 연료가 필요하므로 제동연료소비율은 높아지는 경향을 보인다.
3. DME 첨가에 따라서 같은 엔진회전수, 부하조건에서 점화시기가 동일하다고 하더라도 연소상이 약간 진각하므로 최대 연소압이 증가하며 IMEP 값도 약간 증가한다.
4. DME 연료의 자발화성으로 인하여 연료 혼합시 연소안정성이 저하되며 노킹 현상이 발생하는 운전영역도 큰 폭으로 증가한다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] Murayama, T., 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] An, S.G., 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”, *Transaction of KSAE*, **15**(2), 74-80, (2007)
- [3] Maroteaux, F., G. Descombes and F. Sauton, “Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Running with DME”, *2001 ICE Spring Technical Conference*, **1**, 73-81, (2001)
- [4] Kapus, P. and H. Ofner, “Development of Fuel Injection Equipment and Combustion System for DI Diesels Operated on Dimethyl Ether”, SAE 950062, (1995)
- [5] An, B.I., 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] Kajitani, S., 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] Weidou, N., T. Lijian and F. Dewei, “Rational Cognition of DME Market in China”, 3rd Asian DME Conference Proceeding, 21-38, (2006)
- [8] Kim, B.J. “Kogas DME Business”, 3rd Asian DME Conference Proceeding, 197-205, (2006)
- [9] Abu-qudais, M. “Exhaust Gas Temperature for Knock Detection and Control in Spark Ignitoin Engine”, *Energy Conversions*, **37**(9), 1381-1392, (1996)