

DME를 연료로 하는 고압펌프의 성능 및 내열 특성 평가

백범기¹ · 임옥택^{2†}

¹울산대학교 대학원 건설기계공학과, ²울산대학교 기계공학과

Performance and Thermal Endurance Tests of a High Pressure Pump Fueled with DME

BUM-GI BAEK¹, OCK-TAECK LIM²

¹Graduate School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

²School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

†Corresponding author :
otlim@ulsan.ac.kr

Received 20 December, 2019

Revised 31 January, 2020

Accepted 28 February, 2020

Abstract >> The main scope of this paper is to see if the conventional pump can be properly used for a specific fuel, Di-methyl Ether (DME) despite of its low lubricity and high reactivity in the experimental conditions. A wobble plate type fuel pump was connected to the common rail to verify that the pump could deliver the fuel at the required pressure and resultantly DME could be used as fuel without modifying the original pump. At each required pressure (30 Mpa, 35 Mpa, 40 Mpa, 45 Mpa, and 50 Mpa), the pump met the pressure required by the common rail. In addition, pump performance experiments tended to follow the usual performance curve while the flow rate decreased as the pressure increased. The maximum flow rate of the pump was 470 kg/h at 30 Mpa and all measurements were taken with keeping DME temperature below 60 °C.

Key words : DME (Di-methyl Ether), High fuel pump(고압 연료 펌프), Wobble plate type fuel pump(사판식 연료 펌프)

1. 서론

현재 전 세계적으로 미세먼지 저감 및 배출가스 감소를 위하여 많은 연구가 행해지고 있다. 엔진 연소 시스템의 개선과 새로운 연소 시스템 개발, 친환경 청정 대체 연료의 개발 등 여러 분야에서 배출가스 감소 연구가 진행되고 있는 가운데 대체 연료의 개발의 경우 자동차의 구조를 크게 변경하지 않고 기존의 연소 시스템을 사용할 수 있는 장점이 있다¹⁾.

Di-methyl Ether (DME)는 높은 세탄가로 인하여 기존 엔진에 사용되던 압축착화 방식 엔진의 대체 연료로써 적합할 뿐만 아니라 연소 시 연료 자체의 산소 함유량이 높아 입자상물질(PM)의 발생량이 적어 친환경적인 연료로 연구가 진행되고 있다²⁾. 하지만 디젤 연료에 비해 점도가 낮고, 윤활성이 떨어지기 때문에 연료 펌프와 연료 분사 기구의 구동부 마모를 초래하여 이를 방지하기 위한 연구가 진행되고 있다²⁾.

해당 연구에서는 실험적 조건에서 DME를 연료로 사용한 경우를 가정하여 Wobble plate 타입의 고압 연료 펌프에 DME를 적용시켜 실험을 진행하여 압력 변화에 따른 펌프의 성능 변화(유량, 온도)를 측정하고 해당 Wobble plate 타입의 펌프가 DME 연료 자동차의 연료 펌프로 타당한지에 대한 신뢰성 평가를 실시하였다. 이를 통하여 안정적인 DME 연료 공급 시스템을 구축하기 위한 기본 데이터 획득을 하고자 하였다.

2. 시험 장치 및 실험 방법

본 연구에 적용된 Wobble plate 타입 고압 연료 펌

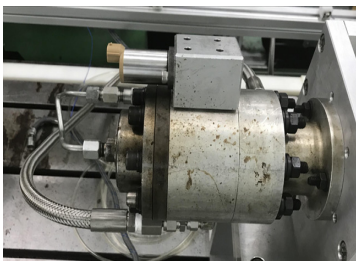


Fig. 1. Wobble plate type high pressure fuel pump used in experiment

프는 5개의 Wobble plate 방식 플런저를 사용하고 있어 다른 연료 펌프에 비해 idle 유량이 4-5배 많아 대 유량 대응 및 초기 엔진 시동성이 우수할 것으로 예상되며, 단위 회전수당 토출 유량 핏수가 많아 레일의 맥동특성이 우수한 장점이 있다²⁾. 해당 펌프 및 시스템 구성 사진은 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

본 실험은 실제 차량에 적용하기 전, 펌프가 커먼 레일에서 요구하는 압력을 충족시키는지 확인함과 동시에 해당 펌프의 압력 변화에 따른 성능을 조사하기 위하여 실제 차량의 조건보다 낮은 압력에서 진행되었다. 펌프가 30 Mpa, 35 Mpa, 40 Mpa, 45 Mpa, 50 Mpa의 커먼레일 요구 압력을 만족할 수 있는지 커먼레일과 커먼레일 드라이버를 연결하여 실험적으로 연구하였으며, 유량 공급이 원활한지 조사하기 위하여 용적식 유량계(volumetric flow meter)를 설치해 유량을 측정하였다.

유량계의 설치 위치 및 흐름도는 Fig. 2에 나와 있다. 유량계의 최대 허용 압력인 2.0 Mpa를 초과하는 압력이 발생하는 경우를 대비하여 유량계 입구-출구에 릴리프 밸브를 설치하였으며, 릴리프 밸브 출구쪽에 압력계를 설치하여 2.0 Mpa 이상의 압력이 가해지는지 확인하였다.

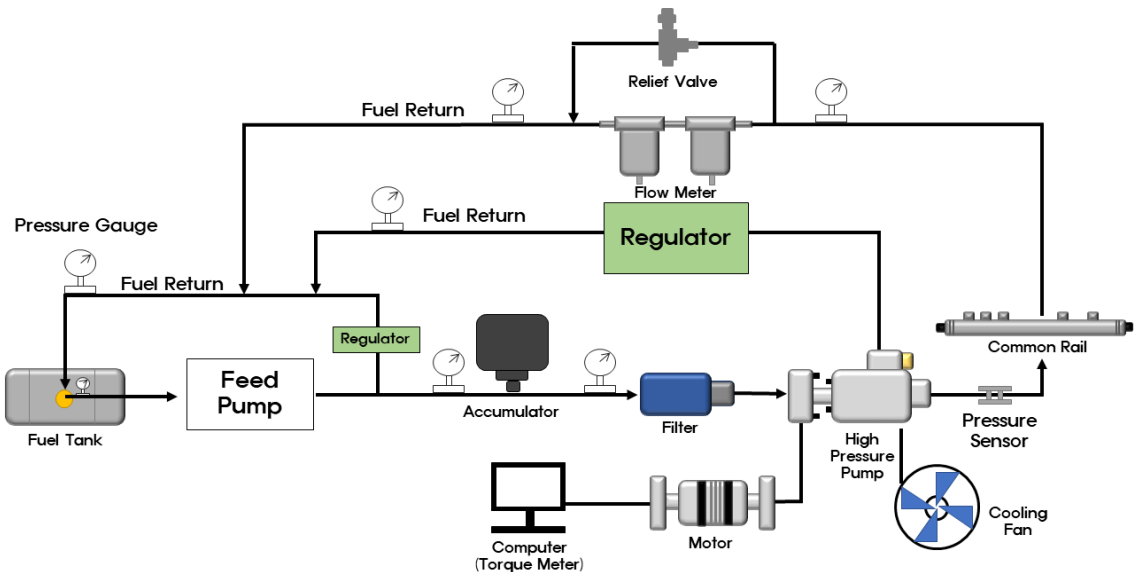


Fig. 2. Experiment system configuration and flow diagram

또한 펌프의 Torque는 모터 회전부에 장착된 토크 미터(Torque meter)를 이용해 측정하였고 펌프 입구, 리턴, 표면 및 커먼레일 리턴 부분에 온도 측정 센서를 부착하여 DME 연료의 온도를 실시간으로 측정하였다. DME 연료의 특성상 낮은 기압에서 기화하므로 실험 시스템의 리턴 압력을 1.5 Mpa 이상, 펌프 공급 압력은 2.0 Mpa로 유지하였으며 측정된 펌프의 압력은 DAQ를 사용하여 필터링하여 토출 압력을 유지하였다.

본 연구에서 사용된 실험 장비의 주요 사양 및 기타 실험의 조건은 Tables 1-3에 명시된 바와 같다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 커먼레일 압력 변화에 따른 펌프 압력 분석

자동차에 사용되는 커먼레일이 요구하는 압력을 해당 펌프가 만족할 수 있는지에 대한 실험이 진행

Table 1. Wobble plate pump specifications

Power (V/Hz)	380/60
Motor (HP)	15 (Inverter type)
Motor speed (rpm)	0-4,000
Supply pressure (MPa)	Low : max. 0.4/high : max. 4.0
Air pressure (MPa)	0-0.3

Table 2. Flow meter specifications

Flow meter type	Volumetric flow meter
Maximum pressure (Mpa)	0-2.0
Maximum flow rate (lpm)	0.3 to 20
Accuracy (%)	± 0.2

Table 3. Experiment Conditions

Intel fuel pressure (Mpa)	2.0
Return fuel pressure (Mpa)	1.5
Feed pump speed (rpm)	500-770
High pressure pump speed (rpm)	500
Common rail pressure (Mpa)	3.0-5.0

되었으며 결과는 Figs. 3-7과 같다. 샘플의 개수는 약 120,000개이며 한 칸 당 0.8 μs로 총 96 ms (0.096 s) 시간의 샘플을 수집하였다.

커먼레일의 압력을 30 Mpa부터 5.0 Mpa 단위로

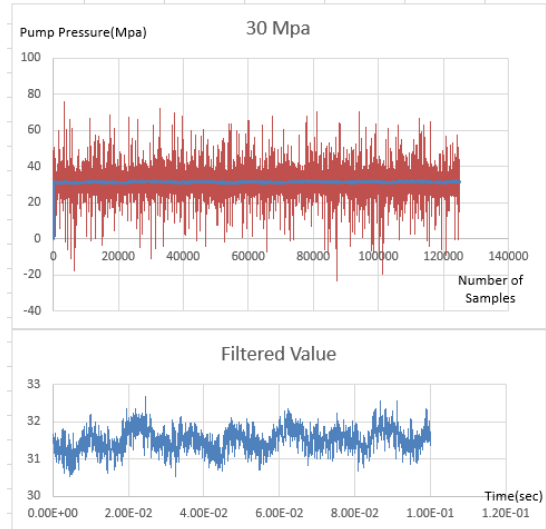


Fig. 3. Pump discharge pressure in common rail 30 MPa condition (red line : experiment value, blue line : DAQ filtered value, horizontal axis : number of samples, vertical axis : pump pressure)

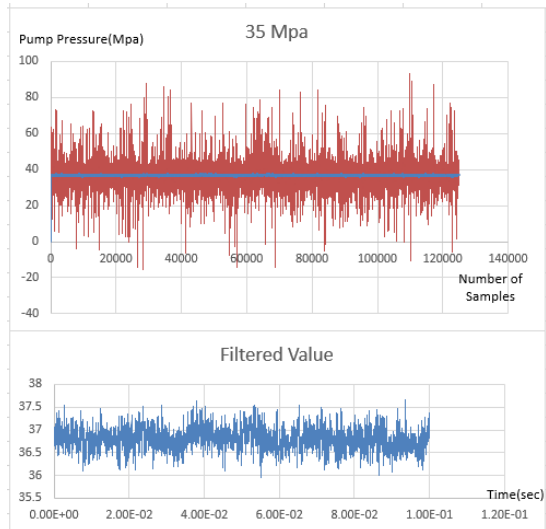


Fig. 4. Pump discharge pressure in common rail 35 MPa condition (red line : experiment value, blue line : DAQ filtered value, horizontal axis : number of samples, vertical axis : pump pressure)

50 Mpa까지 상승시킨 실험 결과 펌프는 커먼레일이 요구하는 압력을 만족시켰으며 펌프의 순간적인 압력은 DAQ로 필터링한 압력을 보면 기준 커먼레일이 요구하는 압력보다 최소 1.0 Mpa, 최대 3.0 Mpa 높

게 토출되는 것을 볼 수 있다. 요구되는 압력 변화에 따라 펌프에서 토출되는 추가 압력의 변화는 무시할 수 있을 정도로 관측된다. 따라서 펌프는 커먼레일의 요구 압력의 변화에 무관하게 최소 약 0.5 Mpa, 최대 2.5 Mpa 높게 압력을 공급한다는 것을 알 수 있다.

특이사항으로는 저압력구간(30-35 Mpa)에서는 펌프의 토출 압력이 불안정한 경향을 보이며 특히 35 Mpa로 압력이 증가하면 펌프의 토출 압력이 일정한 주기를 볼 수 없을 정도로 불안정해지는 경향을 보인다. 그러나 35 Mpa에서 40 Mpa로 압력이 증가하면 펌프의 토출 압력이 더욱 안정화된 주기를 보이는 그래프를 나타내며 50 Mpa에서 제일 안정된 주기의 그래프를 볼 수 있다.

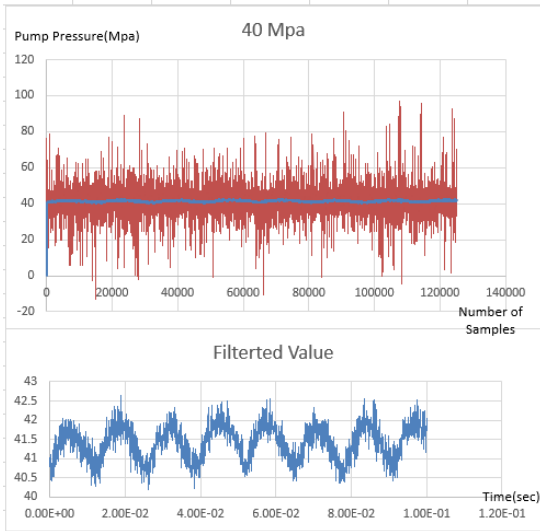


Fig. 5. Pump discharge pressure in common rail 40 MPa condition (red line : experiment value, blue line : DAQ filtered value, horizontal axis : number of samples, vertical axis : pump pressure)

3.2 커먼레일 압력 변화에 따른 펌프 유량 분석

커먼레일의 압력 증가에 따른 유량의 변화는 Fig. 8과 같다. 커먼레일의 요구 압력이 증가할수록 유량은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 일반적인 펌프의 펌프 특성 곡선과 동일한 경향을 보인다³⁾. 커먼레일의 압력을 증가시킬수록

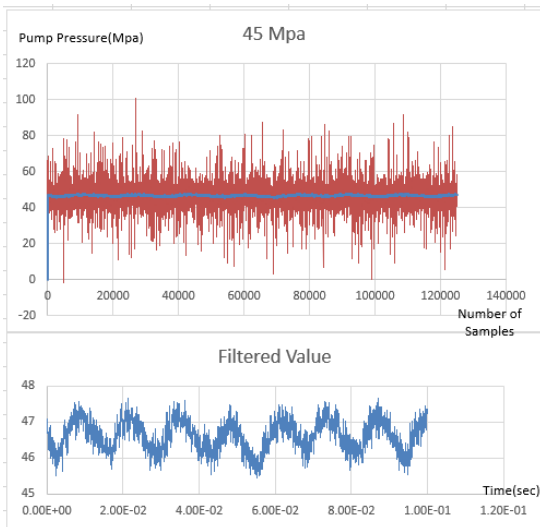


Fig. 6. Pump discharge pressure in common rail 45 MPa condition (red line : experiment value, blue line : DAQ filtered value, horizontal axis : number of samples, vertical axis : pump pressure)

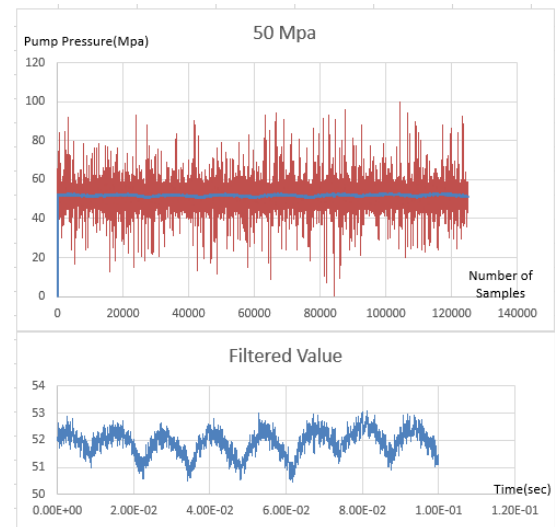


Fig. 7. Pump discharge pressure in common rail 50 MPa condition (red line : experiment value, blue line : DAQ filtered value, horizontal axis : number of samples, vertical axis : pump pressure)

커먼레일의 유로에서 출구쪽이 좁아지게 되므로 압력은 올라가고 빠져나오는 유량은 적어지게 된다. 따라서 펌프의 압력이 증가할수록 펌프에서 리턴되는 연료가 증가하게 되고 커먼레일로 토출되는 연료가 감소하게 된다.

토출 유량은 용적식 유량계를 사용하였기 때문에 1분 동안 토출된 DME의 부피에 DME의 밀도인 0.667 g/cm^3 를 곱하여 도출해내었다. 그 결과 30 Mpa에서 최대인 470 kg/h, 50 Mpa에서 최소인 390kg/h로 측정되었으며 압력이 증가할수록 선형적인 감소 추세를 보이거나 35-40 Mpa에서 유량이 다른 압력 변화 지점보다 크게 감소하는 것으로 나타난다.

일반적인 디젤 승용차 연료 펌프의 요구 유량은

2.5-110 lpm, 가솔린 승용차 연료 펌프의 요구 유량은 2.5-50 lpm이며⁴⁾ 실험에 사용된 Wobble plate 펌프는 9-12 lpm의 유량을 보여주었다. 해당 실험에서는 커먼레일에서 인젝터로 소모되는 압력이 존재하지 않고 모든 연료가 다시 연료 탱크로 돌아가는 시스템이기 때문에 펌프의 토출 유량이 실제와 차이가 있을 수 있으나 디젤 및 가솔린 승용차가 요구하는 펌프 유량을 만족한다는 것을 알 수 있다.

3.3 펌프 성능 평가 및 신뢰성 평가

3.1절의 결과와 3.2절의 결과를 비교해보면 해당 실험에 사용된 Wobble plate 타입의 펌프는 압력이 증가할수록 펌프의 상태가 안정화되는 경향을 보이

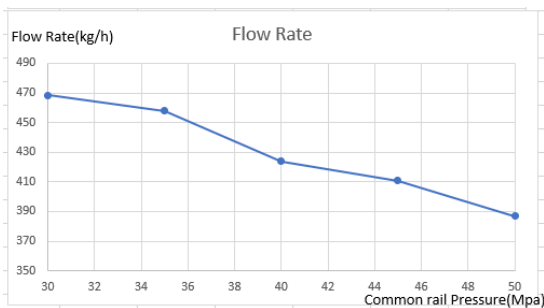


Fig. 8. Wobble plate type pump flow rate change according to common rail pressure change

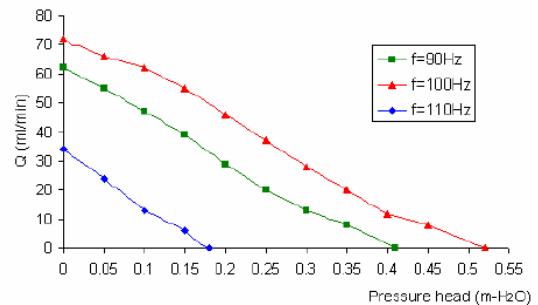


Fig. 9. Pump characteristic curve

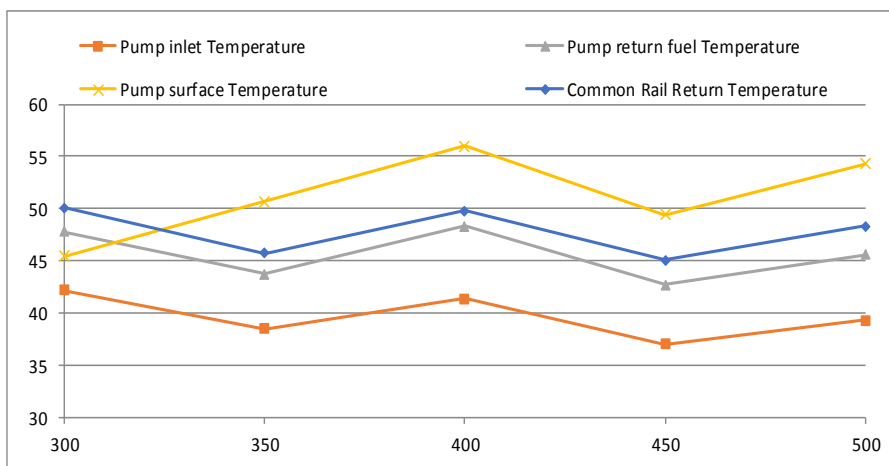


Fig. 10. Fuel temperature change at each point according to pressure change. Horizontal axis : common rail pressure, vertical axis : temperature (°C)

지만 유량이 감소하기 때문에 상황에 따른 커먼레일의 제어(압력 제어)가 필요하다는 것을 알 수 있다. 디젤 연료에 비해 점도가 낮고, 윤활성이 떨어지는 특성을 가진 DME 연료를 고려하여 안정화 된 펌프의 연료 공급은 필수적이며 LPG가 DME에 비해 저위발위량(lower heating value)이 37%나 높기 때문에 DME를 디젤 엔진에 적용하는 경우 낮은 저위발위량으로 인하여 같은 출력을 얻기 위하여 매우 많은 연료를 분사하여야 하므로⁵⁾ 유량의 감소는 엔진 연료로 사용 시 문제를 일으킬 수 있다.

DME의 온도의 경우 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 펌프 30 Mpa 에서의 펌프 표면 온도를 제외하고는 펌프 표면 온도-커먼레일에서의 리턴 연료 온도-펌프에서의 리턴 연료 온도-펌프 입구에서의 연료 온도 순으로 온도가 높게 측정되는 것을 볼 수 있다. 이는 부하가 많이 걸리는 펌프와 오리피스로 인해 고압이 걸리는 커먼레일에서 높은 온도가 측정된다고 파악할 수 있으며 부하가 걸리지 않는 펌프 입구와 펌프의 리턴 연료는 온도가 그다지 올라가지 않는 것을 알 수 있다. DME의 경우 높은 증발점이 낮아 기화되기 쉬우며 인젝터에 도달하기 전 기화가 될 경우 기체 상태로 연료가 전달되어 연료의 밀도가 급격히 낮아질 수 있으므로 온도의 조절이 필요하다. DME 연료의 작동 적정 온도는 60°C 이하이므로 모든 구간에서 작동 적정 온도를 만족하였으나 고부하가 필요한 경우 펌프 내부 에서 60°C 이상으로 연료의 온도가 상승할 가능성이 있으므로 주의가 필요하다.

펌프의 경우 펌프의 요구부하량에 따라 가변속 운전할 경우 15-30%까지 운전효율을 향상시킬 수 있다⁶⁾. 해당 실험에서 실시한 저부하(500 rpm, 50 Mpa 이하) 구간 이외로 고부하 구간(3,000 rpm 이상)에서 작동이 필요한 경우 가변속 운전을 이용한 펌프의 성능 개선이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 실제 차량에 적용하기 전, 실험실 조건에서 DME를 연료로 사용한 경우를 가정하여 Wobble

plate 타입의 고압 연료 펌프에 DME를 적용시켜 실험을 진행하여 압력 변화에 따른 펌프의 성능 변화(유량, 온도)를 측정하고 해당 Wobble plate 타입의 펌프가 DME 연료 자동차의 연료 펌프로 타당한지 알아보기 위한 연구이다.

실험적 연구 결과 해당 Wobble plate 타입의 펌프는 커먼레일에서 요구하는 압력 조건을 모두 만족시켰으며 유량은 일반적인 펌프의 P-Q 선도를 따라가는 경향을 보였다. 유량은 9-12 lpm으로 측정되었으며 일반적인 디젤 승용차의 요구 조건인 2.5-110 lpm, 가솔린 승용차의 요구 조건인 2.5-50 lpm의 저유량 구간에서 만족시키는 결과를 나타내었다.

DME의 대표적인 문제점은 단위 체적당 발열량(heating value)이 낮아 생기는 출력 저하를 해결하기 위하여 펌프의 토출 유량을 증가시킬 필요가 있으므로 고압 분사 시 떨어지는 유량을 해결시킬 수 있는 방법이 필요하다. 또한 유량이 높은 커먼레일 필요 압력 30 Mpa, 35 Mpa에서 펌프의 토출 압력이 불안정한 경향을 보이기 때문에 저압에서의 안정적인 유량 공급을 위한 시스템 구성 혹은 펌프 개선이 필요하다.

온도의 경우 모든 지점에서 작동 적정 온도인 60°C 이하를 유지하였으나 부하에 따라 펌프 내부의 연료 온도가 60°C 이상으로 증가할 가능성이 있기 때문에 고부하에서의 주의가 필요하다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부가 지원한 ‘혁신도시 공공기관연계 육성사업’ (과제명: 전지-ESS 기반 에너지산업혁신생태계구축사업, NO. G02P00620001502) 과 한국에너지기술평가원의 지원(과제명: 미세먼지 저감 청정연료 DME 엔진 실증연구사업, NO. 20182010106370)을 받아 수행된 연구 결과입니다.

References

1. C. S. Lee, "Atomization and combustion characteristics of

- alternative fuels for automotive diesel engine”, The Korean Society Of Automotive Engineers, 2012, pp. 2714-2719. Retrieved from <http://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE02083961>.
2. Y. Sin, G. Lee, H. Kim, S. J. Jeong, K. Park, and H. K. Suh, “Effect of flow control valve type on the performance of DME high pressure fuel pump”, Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 21, No. 5, 2013, pp. 67-68, doi: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2013.21.5.067>.
 3. H. K. Ma, B. R. Hou, H. Y. Wu, C. Y. Lin, J. J. Gao, and M. C. Kou, “Development and application of a diaphragm micro-pump with piezoelectric device”, Microsyst. Technol., Vol. 14, No. 7, pp. 1001-1007, 2008, doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-007-0462-6>.
 4. P. R. Dixon, “Certificate pursuant to section 12 of the weights and measures act 1985”, Department for Business Innovation & Skills, 2016, pp. 4-10. Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296219/UK-2780-revision-3.pdf.
 5. S. H. Lee, S. M. Oh, Y. Choi, K. Y. Kang, W. H. Choi, and K. O. Cha, “Combustion characteristics study of an SI engine operated with DME blended LPG fuel”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 12, No. 3, 2008, pp. 7-12. Retrieved from <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200831235452965.page>.
 6. S. H. Suh, H. H. Kim, M. D. Rakibuzzaman, K. W. Kim, and I. S. Yoon, “A study on the performance evaluation of variable-speed drive pump”, The KSFM Journal of Fluid Machinery, 2017, pp. 83-88, doi: <https://doi.org/10.5293/kfma.2014.17.5.083>.