외장형 연료펌프를 사용한 LPLi시스템에서 연료의 상태량 변화 예측

김재형* · 윤여빈* · 박영준* · 송춘섭* · 이성욱** · 조용석**, †

Prediction of Fuel Properties on LPLi System with an External Fuel Pump

Jae-hyung Kim, Yu-bin Yoon, Young-Joon Park, Chun-sub Song,
Seang-Woak Lee and Yong-Seok Cho

Key Words: LPG(Liquefied Petroleum Gas, 액화석유가스), LPLi(Liquid Phase LPG Injection,액상 LPG 분사), External Fuel Pump(외장형 연료펌프), 1-D simulation(1차원 해석)

Abstract

The LPG(Liquefied Petroleum Gas) fuel attracts attention as a clean alternative fuel. In order to further reduce the exhaust emission and improve performance in LPG engines, the LPLi(Liquid Phase LPG Injection) system is used. In LPLi system, the fuel pump performance is important for keeping the LPG over it's saturated vapor pressure. An external fuel pump is needed to improve the durability for LPG engines. This paper predicted the variation of fuel properties on the LPLi system with an external fuel pump. From each component's thermodynamic model, an 1-D simulation is developed for LPLi systerm with an external fuel pump. Then the 1-D simulation data analyzed and compared with the rig-test. The 1-D simulation and the rig-test produced similar results.

1. 서 론

전 세계적으로 대기오염 물질 중 자동차에서 배출되는 유해물질이 대표적인 주범으로 대두되고 있으며, 이에 대한 규제가 점차 강화되고 있다. 특히, 지구온난화에 영향을 미치는 CO_2의 저감에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 탄화수소계 연료를 사용하는 내연기관에서 CO_2는 연소과정에서 자연적으로 발생하지만 현재의 기술로는 대폭적인 CO_2의 저감을 실현하기는 어려운 실정이다. 이에 따라 고효율 및 저공해 대체에너지가 필수적으로 요구되고 있으며, 국내에서는 LPG(Liquefied Petroleum Gas, 액화석유가스) 연료의 사용을 대표적인 대안으로 인식하고 있으며, 그 사용량이 증가하고 있다[1]. 한국은 세계에서 가장 많은 LPG 차량을 보유하고 있으며, LPLi 시스템 차량의 상용화를 성공하여 세계 최고의 기술 수준을 증명하였다.

기존의 LPG 차량은 기화기방식의 2세대 믹서 연료공급시스템을 채택하고 있다. 하지만, 믹서 방식은 부정확한 혼합기 공급에 의한 연료소비율 증가 및 다량의 유해물질 발생, 연소안정성 및 출력 저하, 겨울철 냉시동성 불량 등의 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해, 현재의 LPG 차량은 제 3세대 액상 LPG 분사(Liquid Phase LPG Injection, LPLi) 시스템을 적용하였다.

LPLi 시스템은 LPG 연료를 포화증기압 이상으로 가압하여 액상의 연료를 흡기포트에 분사하는 방식으로 인젝터의 정밀제어 기술의 채택으로 가솔린기관에 준하는 출력을 얻을 수 있으며 냉시동 문제도 많은 부분 해결되었다[2-4]. LPLi 시스템의 가장 핵심기술은 연료를 항상 포화증기압 이상으로 유지하는 연료펌프 기술로

(2010년 1월 8일 접수~2010년 3월 16일 심사완료, 2010년 3월 27일 게재확정)
*국민대학교 자동차공학전문대학원
**국민대학교 자동차공학과
†책임저자, 회원, 국민대학교 자동차공학과
E-mail : yscho@kookmin.ac.kr
TEL : (02)910-4716 FAX : (02)942-7721

연료펌프의 성능 및 내구성, 제어기술이 중요하다[5].

현재 사용되는 LPG 연료펌프는 연료탱크 내부에 위치하여 고장에 의한 수리나 교환시에 연료탱크 내부의 연료를 모두 제거해야 한다는 단점이 있다. 특히, 연료펌프의 주요 부품인 베어링 부의 윤활제 역할을 담당하는 LPG 연료는 점성이 매우 낮아 내구성 악화 및 부품 모듈의 고장을 초래하여 빈번한 부품 교환이나 수리가 필수적으로 요구된다. 이에 따라 외장형 LPG 연료펌프의 개발이 진행되고 있으며, 연료펌프의 외장화에 따른 연료공급시스템의 성능변화 예측이 중요하다[6].

본 연구에서는 외장형 연료펌프를 장착한 LPLi 시스템에서 연료펌프의 비정상상태 작동에 대한 연료의 상태량 변화 예측이 가능한 1-D 시뮬레이션을 개발하였다. 개발된 1-D 시뮬레이션의 신뢰성 확보를 위해 리그실험을 수행하였으며, 비정상상태에서의 연료펌프 성능을 예측하였다.

2. LPLi 시스템의 수치 해석

2.1 LPG 연료의 물성치 선도

본 연구에서는 LPG의 다양한 상태별 물성치를 파악하기 위하여 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 REFPROP(Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database) 프로그램을 이용하였다. 1-D 시뮬레이션 개발을 위해 National Instrument의 LabVIEW8.5 프로그램을 사용하였고, REFPROP 프로그램과 실시간 연동을 통하여 시간에 따른

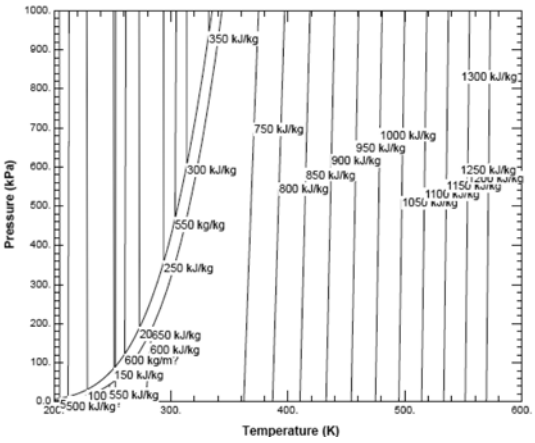

Fig. 1 Pressure-temperature diagram for enthalpy of LPG fuel

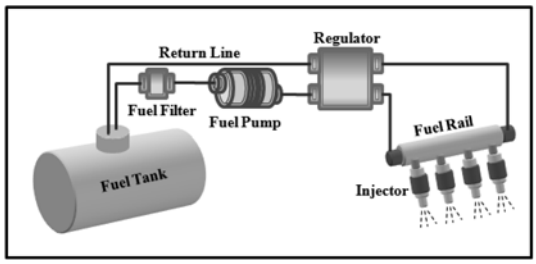

Fig. 2 Schematic diagram of LPLi system with an external fuel pump

LPG 연료의 상태량 변화를 확인하였다. Fig. 1은 LPG 연료의 압력-온도에 따른 엔탈피를 나타낸 선도이다. REFPROP 프로그램을 이용하여 LPLi 시스템에서 각 요소 및 위치에서의 압력 및 온도를 통해 다양한 연료의 상태량을 확인할 수 있다.

2.2 연료공급시스템의 수학적 모델

LPLi 시스템은 Fig. 2와 같이 다양한 요소로 구성된다. 연료의 저장을 위한 탱크, 연료의 이물질을 제거하는 필터, 연료를 포화증기압 이상으로 가압하여 인젝터에 전달하는 연료펌프, 연료레일의 압력을 일정하게 유지하는 압력조절기, 기관에 연료를 분사하는 인젝터로 이루어져 있다. 또한, 구성요소 간 연료의 이동을 위한 연료라인이 존재한다. 본 영역에서는 연료공급시스템 각각의 구성요소별 수학적 모델을 나열하였다.

2.2.1 연료필터 모델

연료탱크로부터 이송된 LPG 연료는 연료필터를 거쳐 연료펌프로 공급된다. 연료필터에서는 필터의 공극률과 재질에 의해서 압력변동이 유발된다. 본 시뮬레이션에서는 필터에서 발생하는 압력강하를 Darcy's law를 적용하여 예측하였다.

$$P_2 = P_1 - \frac{Q \cdot L_{filter}}{k \cdot A_{filter}} \tag{1}$$

여기서 Q는 연료공급시스템에서 필터를 지나는 LPG 연료의 유량, L_{filter}는 연료필터의 길이, A_{filter}는 필터의 단면적, k는 투수계수를 의미한다. 필터의 재질과 공극률에 의해 결정되는 k값은 2liter급 LPLi 시스템 차량에 실제로 적용된 연료필터 단품의 투수계수 k를 사용하였다.

2.2.2 연료펌프 모델

연료필터를 지난 LPG 연료는 외장형 연료펌프에 의해 가압되어 압력조절기로 공급된다. 연료펌프에는 펌

프의 작동을 위해 전기에너지($\dot{W}_{pump}$)가 공급되고, 열에너지($\dot{Q}_{pump}$)가 발생한다. 내장형 연료펌프는 발생한 열에너지가 LPG 연료에 전달되지만 외장형 연료펌프는 대기 중에 노출되어 있어 발생한 열에너지는 외부로 손실된다. 에너지보존법칙을 적용한 외장형 연료펌프에서 LPG 연료의 상태량 변화는 다음과 표현할 수 있다.

$$\dot{h}_2 = \dot{h}_1 + (\dot{W}_{pump} - \dot{Q}_{pump}) / \dot{m} \qquad (2)$$

여기서 $\dot{h}_1$ 는 펌프로 유입되는 LPG 연료의 엔탈피를 나타내며, $\dot{h}_2$ 는 펌프에서 토출되는 연료의 엔탈피, $\dot{W}_{pump}$ 는 펌프로 공급되는 전기에너지, $\dot{Q}_{pump}$ 는 펌프 작동에 의해 발생하여 손실되는 열에너지, $\dot{m}$ 는 연료의 질량유동이다.

펌프로 유입되는 연료의 엔탈피 $\dot{h}_1$ 은 탱크에서 포화상태로 존재하는 LPG 연료의 포화압력 및 포화온도를 통해 계산 할 수 있고, 펌프 출구 연료의 엔탈피 $\dot{h}_2$ 는 펌프로 공급되는 전기에너지와 손실되는 열에너지를 통해 계산할 수 있다. 여기서 연료펌프 작동에 따른 열손실량은 공급되는 전기에너지의 40%로 가정되어 적용하였다. 이를 통하여 연료펌프의 작동조건에 따른 펌프 전 · 후 LPG 연료의 상태량 변화를 예측하였다.

2.2.3 연료라인 모델

LPG 연료공급시스템을 구성하는 연료탱크, 연료필터, 연료펌프, 압력조절기, 인젝터 간 연료의 이동은 연료라인으로 연결된다. 따라서 연료라인에서의 LPG 연료의 압력 및 온도변화를 정확하게 예측하는 것이 중요하다.

연료라인에서의 압력변화를 예측하기 위하여 연료라인의 길이와 내경, 유속을 고려하여 압력변화를 계산할 수 있다.

$$P_2 = P_1 + (Lf \cdot L \cdot \rho \cdot v^2) / d^2 \qquad (3)$$

여기서 Lf는 마찰손실 압력수두에 관한 무차원 변수, L은 연료라인의 길이, ρ는 LPG 연료의 밀도, v는 관내 유체의 유속, d는 연료라인의 직경을 의미한다.

온도변화는 외부로의 열전달에 의해 손실되는 에너지를 통하여 계산하였다.

$$T_2 = T_1 + (\dot{Q}_{loss} \cdot L) / (A \cdot k) \qquad (4)$$

여기서 $\dot{Q}_{loss}$ 는 연료라인에서의 단위시간당 열손실량을 계산한 것이고, A는 연료라인의 단면적, k는 연료라인의 대류 열전도 계수이다.

전체 연료공급시스템에서의 구성요소 간 연료이동을 위한 연료라인에서의 미세한 압력변화와 온도변화를 계산하여 정확한 LPG 연료의 상태량 변화를 예측하였다.

2.2.4 연료탱크, 압력조절기, 인젝터 모델

LPLi 시스템에서 압력조절기는 연료레일에 일정한 LPG 연료 압력을 유지하도록 한다. 연료레일에 장착된 인젝터에 의해 분사되는 연료는 소모된다고 가정하였다. 대부분의 연료는 소모되지 않고 약 70%의 연료가 연료탱크로 회수되도록 가정하였으며, 연료탱크에서 LPG는 포화상태로 존재하며 온도와 압력은 일정하다고 가정하였다.

2.3 1-D 시뮬레이션 개발

연료공급 시스템의 구성요소에 대한 모델링을 통하여 외장형 연료펌프를 장착한 LPLi 시스템에 대한 1-D 시뮬레이션을 개발하였다. Fig. 3은 개발된 1-D 시뮬레이션의 front panel과 block diagram을 나타낸다. 연료공급

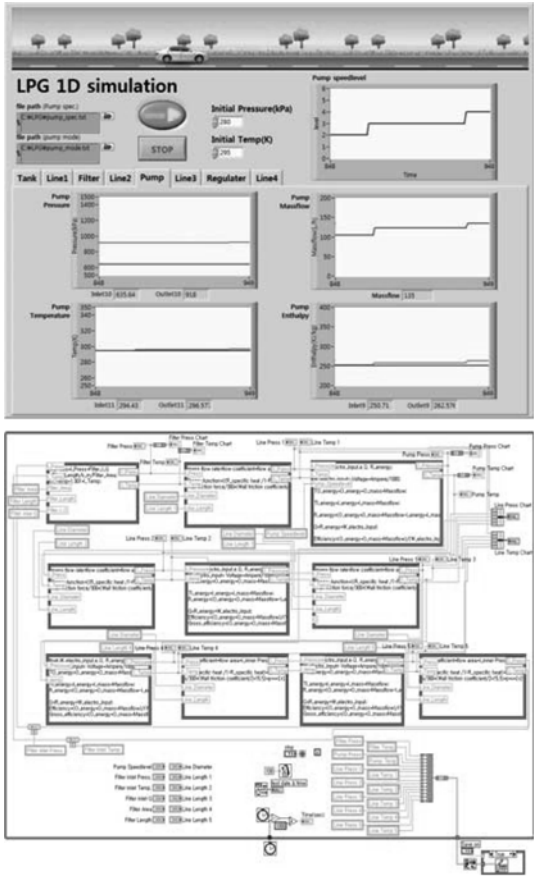

Fig. 3 Front panel & block diagram of 1-D simulation

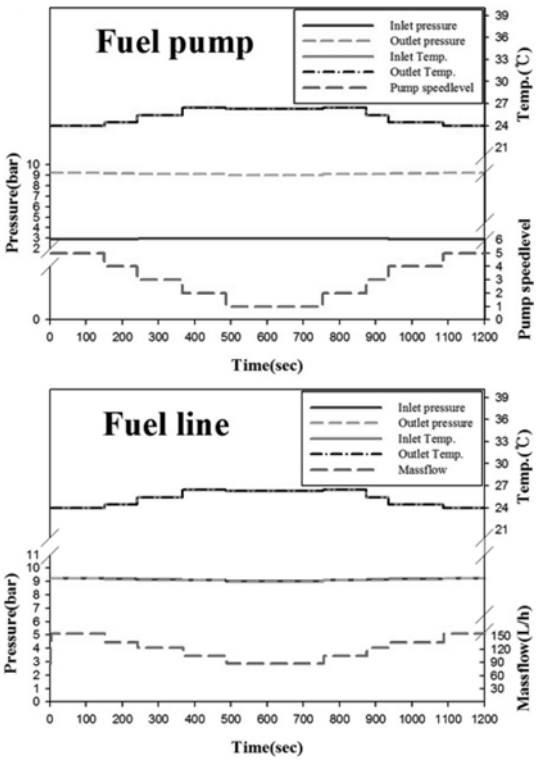

Fig. 4 Variation of fuel properties on fuel pump and fuel line

시스템의 구성요소는 실제차량에 장착 순서대로 배열되었으며, LPLi 시스템의 구성요소 전·후단에서 LPG 연료의 상태량(온도, 압력)에 따른 에너지변화를 예측할 수 있도록 하였다.

또한, 1-D 시뮬레이션에서는 시간에 따라 연료펌프의 단수가 변화하도록 설정하여 비정상상태 조건을 구현하였다. 각 요소별 연료상태량을 온도, 압력, 유량, 엔탈피 데이터로 구분하여 시간에 따라 데이터를 수집할 수 있도록 하였다.

Figure 4는 1-D 시뮬레이션으로부터 예측된 연료의 상태량을 나타낸다. 연료펌프의 작동단수 변경에 따라 각 요소 전·후단에서 변화하는 연료의 상태량을 예측하였으며, 이를 실제의 실험 장치를 통해 얻은 데이터와 비교하여 검증하였다.

3. 실험 장치 및 설정

실제 차량의 연료공급시스템을 모사한 실험장치를 구성하여 연료공급 구성요소에 대한 연료상태량 변화 데이터를 수집하여 1-D 시뮬레이션의 예측 결과와의 비교

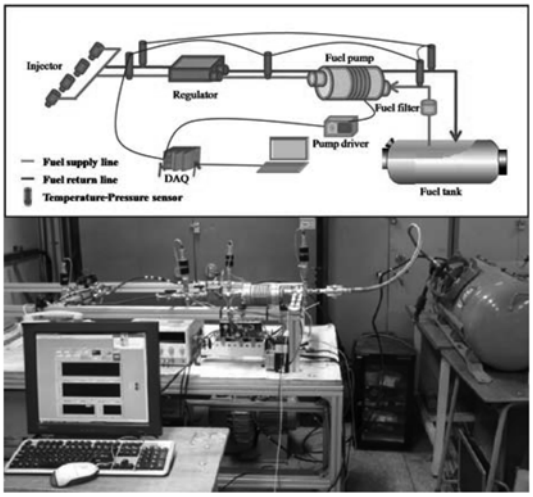

Fig. 5 Schematic diagram & photograph of experimental apparatus

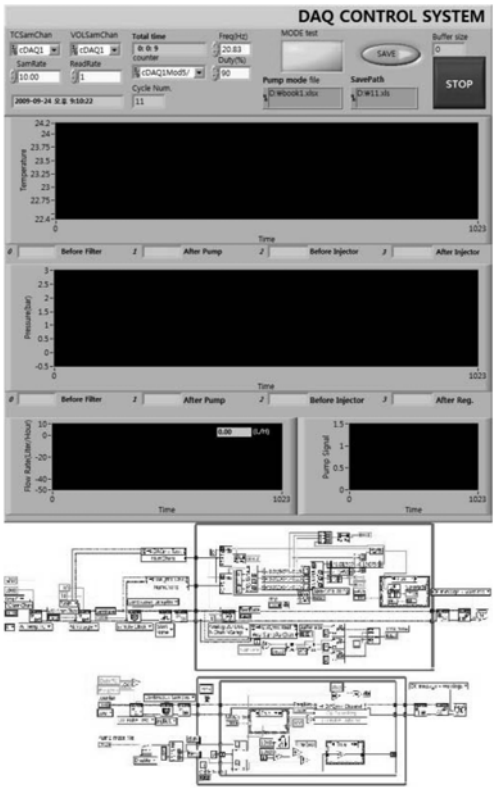

Fig. 6 Fuel pump & DAQ system control program of experimental apparatus

를 통해 정확도를 개선하고 신뢰성을 확보하였다.

Figure 5는 LPLi 시스템을 모사한 실험장치의 개략도와 실제사진을 나타내며, Fig. 6은 비정상상태 구현이 가능한 연료펌프 제어 프로그램을 나타낸다. 실험장치에서는 연료펌프, 연료필터, 연료라인에서 연료의 상태량 변화를 보다 정밀하게 측정하기 위하여 인젝터와 압력조절기를 제어하지 않았다. 인젝터의 경우 연료분사를 실시하지 않았으며, 압력조절기 자체의 저항없이 연료가 탱크로 회수되도록 하였다.

LPG 연료펌프의 작동모드 구현은 자체적으로 개발한 제어 프로그램을 이용하였으며, 1-D 시뮬레이션에서도 실험장치와 동일한 연료펌프의 작동모드로 제어되도록 하여 연료의 상태량 변화를 비교 가능하도록 하였다. 이러한 방법으로 설정된 비정상상태 조건에서 시간에 따라 변화하는 연료공급시스템 구성요소의 전 · 후단에서 연료상태량 변화 데이터를 수집하여 1-D 시뮬레이션과 비교하였다.

4. 수치해석 및 실험 결과

1-D 시뮬레이션을 통한 연료의 상태량 변화 예측과 실험을 통해 얻은 결과의 비교를 통해 개발된 1-D 시뮬레이션을 검증하였고 개선하였다. 연료펌프는 전체 20분 동안 작동하도록 설정하였다. 구간 (1)에서는 연료펌프의 성능이 극적으로 요구되도록 최초 5단에서 시작하여 총 10분 동안 일정 기간씩 기어단수를 낮춰 1단까지 작동하며, 최종에는 작동이 멈추도록 설정하였다. 이어서 구간 (2)에서는 30 sec 동안 작동을 멈춘 상태로 유지한 후 차량의 일반적인 가속 조건을 고려하여 연료펌프가 1단에서 시작하여 5단까지 연속적으로 작동하도록 설정하였다.

Figure 7은 연료펌프 전 · 후단에서 1-D 시뮬레이션으로 예측 및 리그실험으로 측정한 결과 중 압력 변화를 나타낸다. LPG 연료는 연료탱크에서 포화증기압 이상인 약 3 bar 수준으로 공급되며, 필터를 거쳐 연료펌프로 전달된다. 연료펌프의 작동기어단수에 따라 압력이 일정량 차이를 보이며 약 9 bar로 가압되어 토출됨을 확인할 수 있다. 위의 Fig. 7을 통해 1-D 시뮬레이션을 통한 예측과 리그실험을 얻은 연료의 압력변화량이 95% 이상 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 연료펌프 전단에서의 압력변화는 1-D 시뮬레이션을 통한 예측과 실험을 통한 측정값에서 같은 초기 압력으로 시작하였

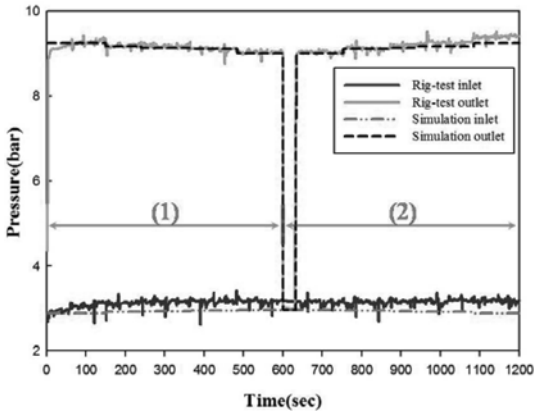

Fig. 7 Comparison pressure of 1-D simulation and rig-test on fuel pump

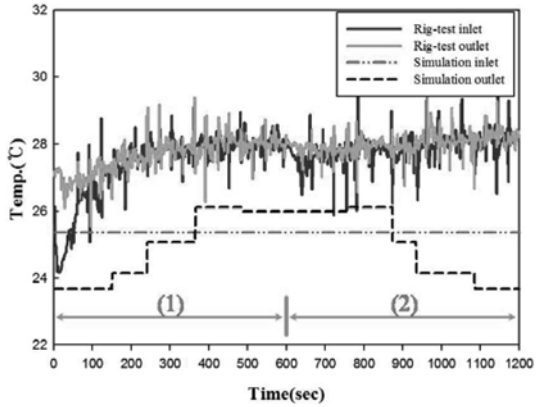

Fig. 8 Comparison temperature of 1-D simulation and rig-test on fuel pump

음에도 불구하고 펌프가 구동함에 따라 약 0.2 bar 정도의 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 연료펌프의 작동에 따라 발생하는 열에너지가 공급되는 연료에 전달되어 압력상승에 일정부분 영향을 미치기 때문이다. 이는 Fig. 8의 온도 데이터를 통해 파악할 수 있다.

Figure 8은 연료펌프 전후단에서 리그실험과 1-D 시뮬레이션의 시간에 따른 온도변화를 나타낸다. 연료펌프 전단의 LPG 연료는 연료펌프 작동이후 250 sec 동안 약 4°C 정도 온도가 상승한다. 이는 연료펌프가 작동함에 따라 연료펌프 외부로의 열손실과 연료로의 열전달이 평행상태에 이르기까지의 기간이다. 연료펌프 후단의 온도도 250 sec 동안 펌프의 작동에 따라 열전달에 의해 일정하게 온도가 상승한다.

최초 연료펌프 작동에 의한 온도 상승 이후 구간 (2)에서 연료펌프 단수가 상승할수록 지속적인 온도 상승

을 관찰할 수 있다. 이는 연료펌프 작동에 의해 발생한 열에너지의 열전달로 인한 영향이며 단수에 따라 증가하는 것이다.

1-D 시뮬레이션에 의한 예측과 실험을 통한 결과를 비교하였을 때, 전체적으로 약 2~3°C의 오차를 보여주고 있으며 압력 결과와 마찬가지로 최초 연료펌프 구동에 따른 전단으로 유입되는 연료의 온도 상승 부분에서 차이점을 발견하였다. 이는 연료펌프 작동 단수에 따른 열손실량의 차이를 고려한 모델 수정과 발생한 열에너지의 열전달로 인해 연료에 미치는 영향에 대한 추가적인 변수 적용을 통한 보완으로 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 LPLi 시스템에서의 LPG 연료의 상태량 변화를 예측할 수 있는 1-D 시뮬레이션을 개발하였고, 실제의 실험 결과와의 비교를 통해 이를 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연료펌프 작동에 따른 전 · 후단의 압력 변화에서 95% 이상의 정확도를 보여주었으며 온도 변화에서 약 2~3°C의 오차가 발생하였다.

2) 모델 지배방적식의 보완과 연료펌프 작동에 의해 발생한 열에너지의 열전달 등에 관한 변수를 추가하여 개발된 1-D 시뮬레이션의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3) 개발된 1-D 시뮬레이션을 통하여 다양한 작동조건 뿐 아니라 장시간 내구성능 검증 등의 조건에 적용하여 연료의 상태량 변화를 예측할 수 있다. 또한 각 요소별 변수의 수정을 통해 LPLi 시스템 외의 연료공급시스템에도 적용이 가능하다.

후 기

본 연구는 지식경제부 “에너지·자원기술개발사업”의 지원 아래 이루어 졌으며, 이에 저자일동은 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Harry Watson, Mohammad Ali Khan, Gordon Liew and Paul Baker, “Opportunities for making LPG a clean and low greenhouse emission fuel”, 2005, SAE 2005-01-2217.

(2) A. A. Boretti and H. C. Watson, “Development of a Direct Injection High Efficiency Liquid Phase LPG Spark Ignition Engine”, 2009, SAE 2009-01-1881.

(3) K. Y. Kang, D. Y. Lee, S. M. Oh and C. U. Kim, “Performance of an Liquid Phase LPG Injection Engine for Heavy Duty Vehicles”, 2001, SAE 2001-01-1958.

(4) Andrzej Sobiesiak, Matthew W. Hag and Mohsen Battoei-Avarzaman, “Injector Durability and Emissions from Liquid LPG Port Injected Spark Ignition Engine”, 2003, SAE 2003-01-3090.

(5) Y. S. Jang, S. D. Woo, H. S. Kim, C. J. Park and I. Y. Ohm, “An Experimental Study on LPG Gas Injection System”, 2006, KSAE 06-S0312.

(6) A. S. Lee and C. U. Kim, “A Design Fitness Analysis of Journal Bearings for LPLi Fuel Pump Application”, Journal of the KSTLE Vol. 25, No. 5, October 2009, pp. 324~329.