

LPG 가스분사 방식 연료공급시스템의 관로 유동해석에 관한 연구

윤 정 의^{*1)} · 김 명 환¹⁾ · 남 현 식¹⁾ · 정 태 형²⁾

강원대학교 메카트로닉스공학부¹⁾ · GM 대우자동차²⁾

A Study on the Fluid Network Analysis for the LPG Supply System of the Gaseous Fuel Injection Type

Jeong-Eui Yun^{*1)} · Myung-Hwan Kim¹⁾ · Hyeon-Sik Nam¹⁾ · Tae-Hyuung Jeong²⁾

¹⁾Division of Mechatronics, Kangwon National University, Gangwon 245-711, Korea

²⁾Technical Center, GM Daewoo Auto&Technology Co., 199-1 Cheongcheon-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

(Received 4 May 2006 / Accepted 18 September 2006)

Abstract : The gaseous fuel injection (GFI) type in LPG fuel supply system has more advantage than the liquified fuel injection type from the viewpoint of durability and cost reduction. But in GFI system, to control pressure and temperature of gaseous fuel is needed to get precision fuel metering for the compressible characteristic of gaseous fuel. In this study, the effects of pressure and temperature on the fuel metering was simulated by commercial flow network analysis package, Flowmaster. And the fuel composition effects on the fuel metering were also studied to figure out the fuel metering characteristics.

Key words : LPG fuel(LPG 연료), Gaseous fuel injection type(가스분사방식), Fuel metering(연료제어), Fuel supply system(연료공급시스템), Gaseous flow network analysis(가스 유로망 해석)

1. 서 론

최근 배기가스의 규제 강화에 대한 대응으로 청정가스연료를 활용한 엔진의 개발이 각광을 받고 있다. 이러한 청정가스연료로 현재 상용화되어 사용되고 있는 것은 LPG와 CNG 등이 있으며, 이중 LPG 연료는 특히 저압에서 액화가 가능하고 옥탄가가 상대적으로 높으므로 승용차 엔진의 대체연료로 각광을 받고 있다.¹⁻⁴⁾

초기의 LPG연료를 사용한 엔진의 경우에는 기존의 엔진에 단지 믹서 시스템만을 추가하여 사용하였다. 이와 같이 믹서가 장착된 초기의 LPG 차량에서는 연료량이 흡입공기량에 대하여 기계적으로 결

정되고 피드백 제어를 통해 소량의 연료를 가감한다. 그러므로 급격하게 변하는 운전조건에서는 공연비의 제어가 어려우므로 LPG는 자동차연료로서 청정성이 부각되지 못하였다. 그러나 최근 가솔린의 다점 인젝션분사시스템과 같이 각 실린더의 포트에 액상 또는 기상의 LPG를 분사하는 시스템이 소개됨으로 LPG연료는 다가올 SULEV 규제를 극복할 수 있는 대체 연료로써 그 가능성이 높아지고 있다.

LPG 분사시스템의 경우 액상 및 기상 인젝터 중 어떠한 형식을 채택하는가에 따라 전체적인 시스템의 구성이 달라지며 그 나름대로의 장점과 단점을 안고 있다. 본 연구에서 해석하고자하는 LPG 연료공급시스템은 3세대 다점 기체분사방식으로, 정밀한 공연비 제어가 가능하므로 SULEV를 극복할 수 있는 가장 적합한 시스템으로 인식되고 있지만 정

*Corresponding author, E-mail: jeyun@kangwon.ac.kr

밀 연료조절을 위해서는 추가로 연료공급시스템에서의 기체의 온도 및 압력에 대한 정보가 필요하다.⁵⁾ 그러므로 본 연구에서는 정밀 유량제어를 위한 기초연구로 다점 기체분사방식의 LPG 연료공급시스템의 관로에 있어서 인젝션에 따른 관로 내의 가스의 압력 변동현상을 해석하고자 한다. 이를 위해 상용 관로해석 프로그램인 Flowmaster II를 사용하여 대상 연료시스템을 모델링 하였으며, 비정상 압축성 해석을 통해 공급연료의 조성비, 분사시간, 연료온도, 공급압력 등의 변화에 따른 관로 내의 압력 변동 및 분사량의 변동에 대한 특성을 규명하였다.

2. 연료공급시스템의 1차원 유동해석 모델링

Fig. 1은 6기통 LPG 엔진의 다점 기체분사방식의 연료공급시스템을 모델링 한 모습을 보여주고 있다. 그림에서 #1 요소는 연료탱크를 그리고 #4와 #51은 각각 베이퍼라이저의 입구 및 출구부분을 의

미한다. 그리고 #1-#4사이에서는 액체상태의 연료가 흐르게 되며, #51부터 각 인젝터로 공급되는 연료는 기체 상태로 흐르게 되도록 모델링 하였다. 액체상체에서 기체상태로 상변화가 일어나는 베이퍼라이저 부분은 액상과 기상을 각각 분리하여 모델링 하였으며, 이들 사이에는 압력과 유량의 연속조건을 만족하도록 하였다.

#101-115는 1번 가스 인젝터를 모델링 한 것으로 외부 공간(#101), 외부와 내부공간을 연결하는 8개의 오리피스(#102-#109), 내부 공간(#110), 솔레노이드 밸브 및 인젝션 제어기(#111, #112), 끝단의 확산기(#113) 그리고 각종 모니터링 부분(#114, #116)으로 구성되어져 있다.

그리고 #115-#615는 각각 인젝터가 위치하고 있는 엔진의 포트 열 유동 환경을 모델링 한 것이다. 본 연구에서는 WOT조건으로 작동하는 경우로 가정하여 포트의 압력을 대기압으로 가정하여 해석을

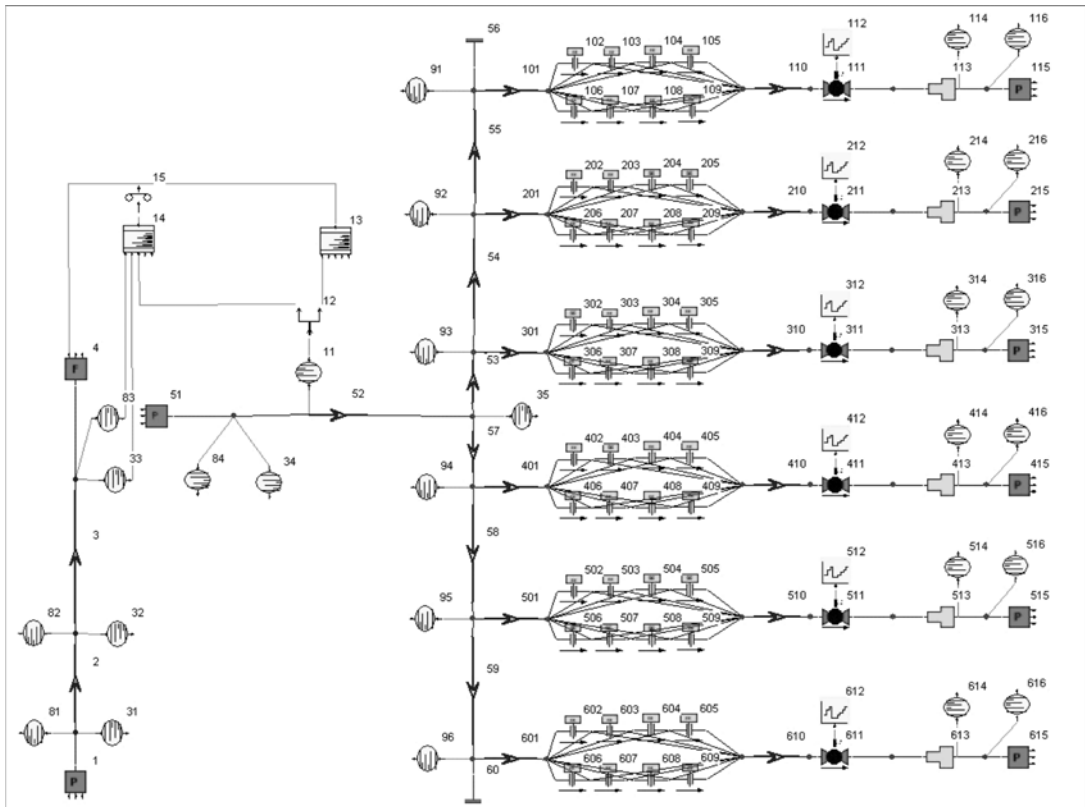


Fig. 1 Analysis model for LPG fuel injection system

수행하였다.

해석은 각각의 운전 조건에 입력조건 및 이에 상응하는 인젝션 분사순서(1-5-3-6-2-4) 및 Interval을 입력으로 주어 시간간극(Time Step) $\Delta T=0.00001$ 로 3사이클에 상응하는 기간 동안 압축성 비정상 과도 해석 (compressible, unsteady transient analysis)을 수행하였다.

Fig. 2는 해석 모델의 타당성 검증을 위해 모델링에서 해석한 결과와 실험을 통해 인젝션 시간 변화(T_i)에 따라 측정된 유량 값을 서로 비교하여 그려놓은 그림이다. 해석조건은 실험조건과 일치시켜 수행하였으며 해석결과는 인젝션 시간을 3msec - 18msec 까지 실험결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

Fig. 3은 모델링 한 연료공급시스템에서 연료레일 쪽으로 공급되는 압력을 변화시키면서 인젝터를 통해 포트에 분사되는 연료의 유량을 계산한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 공급압력이 증가하면 분사되는 유량이 증가하지만 일정압력 이상에서는 질식 조건(choking condition)으로 더 이상 유량이 증가하지 않는 한계를 가지게 됨을 보여준다.

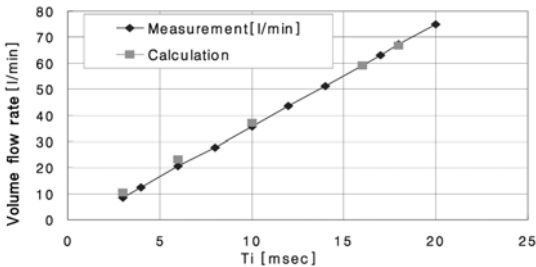


Fig. 2 Comparison between measurement and simulation result for injection flow. supply pressure to fuel rail $\Delta P=1.3\text{bar}$

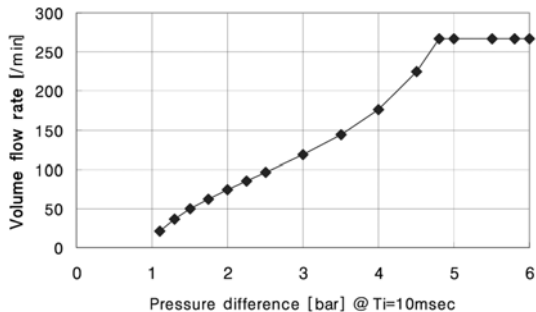


Fig. 3 Variation of volume flow rate due to supply pressure to fuel rail

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 4는 모델링 한 인젝터를 통해 인젝션기간동안($T_i=18, 10, 3\text{msec}$) 포트에 분사되는 기체유량의 체적유량을 나타낸 그림이다. 과도해석이므로 처음 사이클과 나중 사이클 사이에서 유량의 거동에 차이가 있음을 보여주고 있다. 그러나 세 가지 경우 모두 세 개의 사이클이 지날 경우 해석결과가 수렴된다는 것을 알 수 있다. 그리고 인젝션 기간 동안 유량이 변동하는 것은 압축성 유체이기 때문에 나타나는 자연적인 현상이다. 베이퍼라이저 출구를 통해 나오는 기체상태의 연료는 긴 유로(#52, 632.8mm)를 거쳐 각각의 인젝터로 공급되며, 이 과정에서 압축성유체의 압력파의 영향으로 연료를 인젝터로 공급하는 연료레일 안에서 압력의 변동이 발생하게 된다. 이러한 현상이 심할 경우 압력차에 의해 유량이 제어되는 인젝터의 유량제어에 심각한 오차가

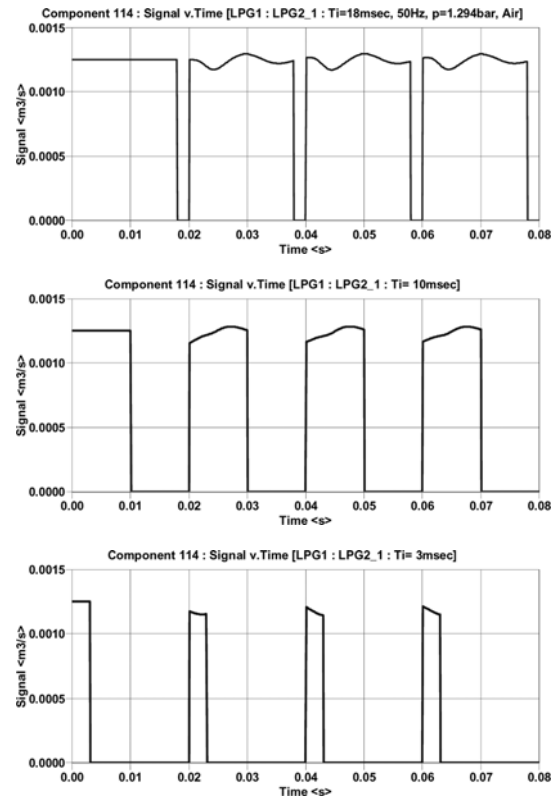


Fig. 4 Transient analysis results of injection flow rate for specified injection duration. signal in Y-axis means volume flow rate

발생할 수 있으며, 본 연료 시스템에서도 베이퍼라이저의 출구 단에서 1.3bar를 유지하도록 다이어프램 형태의 압력제어 장치를 장착하였다.(해석 모델링에서도 베이퍼라이저의 출구 단에서는 항상 1.3bar를 유지하는 것으로 하였다.)

Fig. 5는 연료레일에서 각각의 인젝터 쪽으로 연료를 공급하는 위치에서 계산한 압력의 변동 값을 계산한 결과이다. 그림을 살펴보면 베이퍼라이저에서부터 인젝터 전단까지 연결되는 긴 연료공급라인으로 인해 나타나는 느린 주파수 값을 갖는 압력과 함께 6개의 인젝터가 갑작스럽게 열리고 닫히면서 발생하게 되는 고주파 성분의 압력변동 값이 중첩되어 나타나고 있다는 것을 보여주고 있다. 이러한 압력 변동이 인젝터들 사이의 질량유량의 변동의 직접적인 원인이 되는 것이다.

Fig. 6은 인젝터의 구동신호와 인젝터 입구 측의 압력변동 값 과 인젝터를 통해 엔진 쪽으로 빠져나가는 유량 값을 함께 그려놓은 그림을 보여주고 있다. 그림에서 명확하게 알 수 있듯이 인젝터로 빠져나가는 유량은 인젝터 입구 측 연료레일에서의 압

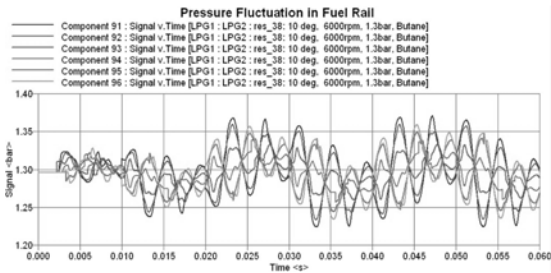


Fig. 5 Transient analysis results of injection flow rate for specified injection duration. signal in Y-axis means volume flow rate

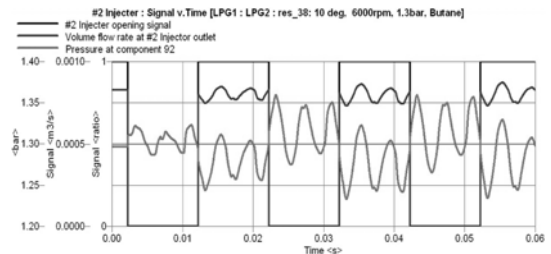


Fig. 6 Transient analysis results of injection flow rate for specified injection duration. signal in Y-axis means volume flow rate

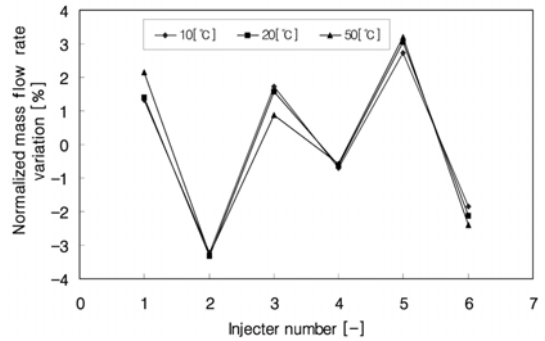


Fig. 7 Variation of normalized mass flow rate of injection fuel in each port (Ti-10msec)

력 값에 직접적으로 비례한다는 것을 보여주고 있다. 그러므로 정밀 유량제어를 위해서는 연료 레일의 압력 변동을 최소화하는 방안을 찾아 제거해주는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 6,000rpm에서 각각의 인젝터들로부터 분사되는 연료의 질량 유량에 대한 변동량을 정규화하여 %로 표시한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 인젝터들 사이에 최대 약 6%의 변동 값을 보여주고 있다. 이러한 원인은 Fig. 5와 Fig. 6에서 설명하였듯이 인젝터가 연결되어 있는 연료 레일내의 연료 압력이 압축성의 특성에 의해 변동하기 때문에 나타나는 물리적인 현상이다. 그러므로 가스인젝션 시스템에서는 이러한 압력변동을 완화시켜줄 수 있는 연료레일의 적절한 설계가 중요하다.

일반적으로 LPG연료로 사용되어지고 있는 부탄(C_4H_{10})과 프로판(C_3H_8)은 포화 증기압, 밀도 점도 등 열역학적 특성이 상당히 다르므로 이들 연료를 사용하여 열 유동을 해석하기 위해서는 이들에 대한 열역학적 특성을 정확히 적용하는 것이 절대적으로 필요하다.⁶⁾ 해석을 위해 노말부탄($n-C_4H_{10}$), 노말부탄 70%+프로판(Propane) 30%에 대한 연료의 물성치는 미국 National Institute of Standards and Technology의 REFPROP Database를 이용하여 구하였다.⁷⁾

Fig. 8은 노말부탄과 프로판 그리고 노말부탄 70% + 프로판 30% 연료의 물성치중에서 온도에 따른 밀도의 변화를 나타낸 그림이다. 그림을 살펴보면 프로판 보다는 노말부탄의 밀도가 큰 값을 가지고 있으며, 겨울철 LPG차량용으로 현재사용하고

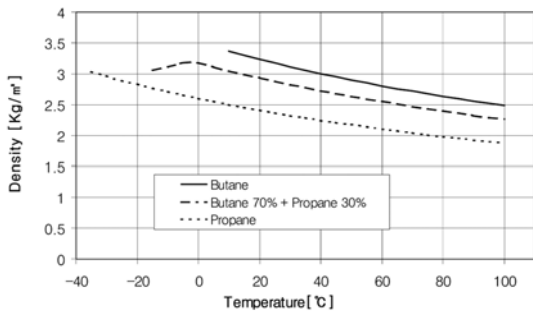


Fig. 8 Variation of density due to temperature in fuel composition

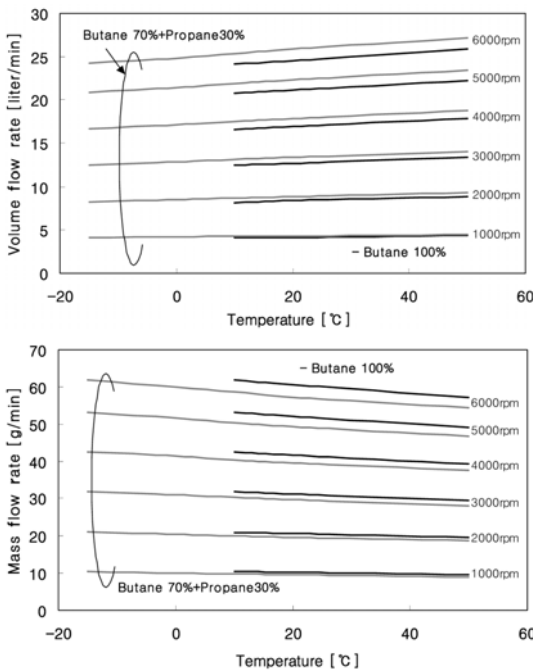


Fig. 9 Variation of volume and mass flow rate of injected fuel due to temperature and engine rpm condition (Ti=10msec)

있는 노말부탄 프로판 혼합연료는 그 중간 값을 가지고 있다. 그러므로 단지 압력차에 의해 공급되는 연료의 체적유량을 제어하는 가스 인젝터의 특성을 고려하면 이러한 사용연료들 사이 밀도차이로 인한 질량유량의 제어에 상당한 주의가 요구된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 노말부탄 70% + 프로판 30% 연료를 사용하여 온도 및 엔진 회전수 변화에 따른 체적 및 질량 유량변동을 계산한 결과를 보여주고 있다. 그리고

인젝터로 공급되는 LPG의 공급압력이 1.3bar에서 노말부탄의 경우는 6.2°C이하부터 액화가 되므로 10°C부터 50°C까지 온도를 변화시켜가면서 시물레이션을 하였으며, 노말부탄 70% + 프로판 30%는 -16.4°C이하에서 액화가 되므로 해석의 범위를 -15°C부터 50°C까지로 제한하였다. 결과를 살펴보면 LPG 연료 모두는 온도가 증가함에 따라 체적유량은 증가하는 경향을 보이지만 실제 질량유량으로 환산할 경우에는 오히려 감소하는 결과를 주게 된다는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 온도증가에 따른 연료의 밀도의 감소 때문이다. 그러므로 정밀 유량제어를 위해서는 이러한 온도변화에 따른 영향을 반드시 고려해 주어야만 한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 차세대 LPG차량의 핵심적인 연료 공급시스템으로 주목받고 있는 다점 기체분사방식의 연료시스템에 있어서 정밀 유량제어를 위한 기초연구로 가스 인젝션에 따른 인젝터와 연료시스템 관로사이의 상호 작용에 의한 관로 내의 가스의 압력 변동현상을 규명하고자 하였다. 이를 위해 상용 관로해석 프로그램인 Flowmaster II를 사용하여 대상 연료시스템을 모델링 하였으며, 비정상 압축성 해석을 통해 공급연료의 조성비, 분사시간, 연료온도, 공급압력 및 운전조건 등의 변화에 따른 관로 내의 압력변동 및 분사량의 변동에 대한 특성을 조사하였다. 이를 통해 아래의 결론을 얻었다.

- 1) 주어진 해석 시스템의 경우 6,000rpm에서 각각의 인젝터들로부터 분사되는 연료의 질량 유량에 대한 변동량은 인젝터들 사이에 최대 약 6%의 변동 값을 보여준다.
- 2) 다점방식의 가스연료공급 특성 및 연료 레일 내의 공급연료의 압축성 특성에 기인한 압력 변동의 완화가 정밀 유량제어를 위해 매우 중요하다.
- 3) LPG연료는 온도가 증가함에 따라 질량유량이 감소하는 결과(체적유량은 증가)를 주게 되므로 정밀 유량제어를 위해서는 이러한 온도변화에 따른 영향을 반드시 고려해 주어야만 한다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project(무.저공해자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) A. Gerini, G. Monnier and R. Bonetto, "Ultra Low Emissions Vehicle Using LPG Engine Fuel," SAE 961079, 1996.
- 2) W. Kim, J. Lee and C. Jang, "A Study on the Combustion Characteristics and the Control on the Fuel Flow Rate of LPG Intake Port Injection Engine," Transactions of KSAE, Vol.8, No.6, pp.31-39, 2000.
- 3) M. C. Lim, S. W. Choi, C. L. Myung, S. Park, J. N. Park and S. K. Kim, "The Study of Performance and Engine Application Characteristic of Turbine Type LPi Fuel Pump with LPG Composition Rate," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.1891-1896, 2006.
- 4) C. L. Myung, H. Kwak and S. Park, "Development on Enhanced Leaked Fuel Recirculation Device of LPLi Engine to Satisfy SULEV Standard," Int. J. Automotive Technology, Vol.7, No.4, pp.407-413, 2006.
- 5) C. P. Pan, M. C. Li and S. F. Hussain, "Fuel Pressure Control for Gaseous Fuel Injection Systems," SAE 981397, 1998.
- 6) B. R. Lutz, R. H. Stanglmaier, R. D. Matthews, J. T. Cohen and R. Wicker, "The Effects of Fuel Composition, System Design, and Operating Conditions on In-System Vaporization and Hot Start of a Liquid-Phase LPG Injection System," SAE 981388, 1998.
- 7) National Institute of Standards and Technology, "REFPROP Standard Reference Database," Ver. 6.01, 1998.