

가스분사 방식 LPG 엔진의 연료공급시스템 관로 유동해석[§]

윤 정 의*†

* 강원대학교 삼척캠퍼스 메카트로닉스공학과

Fluid Network Analysis for the Fuel-Supply Systems of Gaseous-Injection-Type LPG Engines

Jeong-Eui Yun *

* Dept. of Mechatronics, Kangwon Nat'l Univ. - Samcheok Campus

(Received June 21, 2011 ; Revised July 27, 2011 ; Accepted July 30, 2011)

Key Words: Gaseous Fuel Injector(가스 분사 인젝터), Fuel Metering(연료 제어), Flow Network Analysis(유로 망 해석), Helmholtz Resonator(헬름홀쯔 공진기)

초록: LPG 분사시스템의 경우 액상 및 기상 인젝터를 사용하는 두 가지 방식이 있으며, 가스 분사 방식의 경우 내구성 및 가격 측면에서 장점이 있지만 가스의 압축성 특성으로 인한 정밀 유량제어에 어려움이 있다. 본 연구에서는 가스분사 방식 LPG 연료 분사 시스템에서 정밀 유량 제어를 위한 수단으로 헬름홀쯔 공진기를 사용하는 방안을 제시하였다. 그리고 상용 유동해석 프로그램인 Flowmaster를 사용하여 대상 자동차의 연료 시스템에 대해 유동해석을 통해 최적의 공진기를 설계방안을 설계하였으며, 공진기 설치 후 개선 효과를 제시하였다.

Abstract: The gaseous fuel injection(GFI) type of LPG fuel-supply system is more advantageous than liquefied fuel injection(LFI) from the viewpoint of durability and cost reduction. However, compared with LFI types of LPG fuel-supply systems, in the GFI systems it is difficult to achieve precision fuel metering because of the compressible characteristic of the gaseous fuel. In this study, a Helmholtz resonator is proposed as an appropriate system for precision fuel metering in GFI systems, and the effects of the Helmholtz resonator on the fuel metering are simulated by the commercial flow-network-analysis package Flowmaster.

1. 서 론

최근 배기가스의 규제 강화와 더불어 유가 상승에 따른 부담감으로 청정가스연료를 활용한 엔진의 개발이 각광을 받고 있다. 이러한 청정가스 연료로 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 초기

의 LPG 차량에서는 연료량이 흡입공기량에 대하여 기계적으로 결정되고 피드백 제어를 통해 소량의 연료를 가감한다.

그러므로 급격하게 변하는 운전조건에서는 공연비의 제어가 어려우므로 LPG는 자동차연료로서 연비 및 청정성이 부각되지 못하였다. 그러나 최근 가솔린의 다점 분사시스템과 같이 각 실린더의 포트에 액상 또는 기상의 LPG를 분사하는 시스템이 소개됨으로 LPG연료는 연비 및 배기가스의 규제 측면에서도 기존의 가솔린에 대해 경쟁력을 가질 수 있는 대체 연료로써 자리 메김을 하고 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 해석하고자 하는

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 강원지회 춘계 학술대회(2011. 5. 20., 강원대) 발표논문임

† Corresponding Author, jeyun@kangwon.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

LPG 연료공급시스템은 3세대 다점 기체분사방식으로, 정밀한 공연비 제어가 가능하므로 연비 및 배기가스 규제에 대응할 수 있는 가장 적합한 시스템으로 인식되고 있지만 정밀 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 규명하고 압력 변동을 최소화 할 수 있는 대안을 찾아보고자 한다. 이를 위해 상용 관로해석 프로그램인 Flowmaster II를 사용하여 대상 연료시스템을 모델링 하였으며, 비정상 압축성 해석을 통해 분사시간, 공급압력 등의 변화에 따른 관로 내의 압력변동 및 분사량의 변동에 대한 특성을 규명하였다. 최종적으로 기존의 연료 공급 시스템의 관로 내에서 발생하는 가스압력 변동을 최소화하기 위한 대안으로 헬름홀츠 공진기(Helmholtz resonator)를 설계하였으며, 그 결과 압력 변동이 현저히 줄어들음을 해석을 통해 검증하였다.

2. 연료공급시스템의 1차원 유동해석 모델링

Fig. 1은 6기통 LPG 엔진의 다점 기체분사방식의 연료공급시스템을 1-D 유로망 해석용 상용 프로그램인 Flowmaster를 사용하여 모델링 한 모습을 보여주고 있다. 그림에서 #1 요소는 연료탱크

를 그리고 #4와 #51은 각각 베이퍼라이저의 입구 및 출구부분을 의미한다. 그리고 #1-#4사이에서는 액체상태의 LPG 연료가 흐르게 되며, #51부터 각 인젝터로 공급되는 연료는 기체 상태로 흐르게 되도록 모델링 하였다.

액체상태에서 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), 솔레노이드밸브 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 수행하였다. 해석은 각각의 운전 조건에 입력조건 및 이에 상응하는 인젝션 분사순서 (1-5-3-6-2-4) 및 Interval을 입력으로 주어 시간간극(Time Step) $\Delta T=0.00001[\text{sec}]$ 로 3사이클에 상응하는 기간 동안 압축성 비정상 과도해석을 수행하였다.

Fig. 2는 해석 모델의 타당성 검증을 위해 모델링에서 해석한 결과와 실험을 통해 인젝션 시간 변화(Ti)에 따라 측정된 유량 값을 서로 비교하여 그려놓은 그림이다. 해석조건은 실험조건과 일치

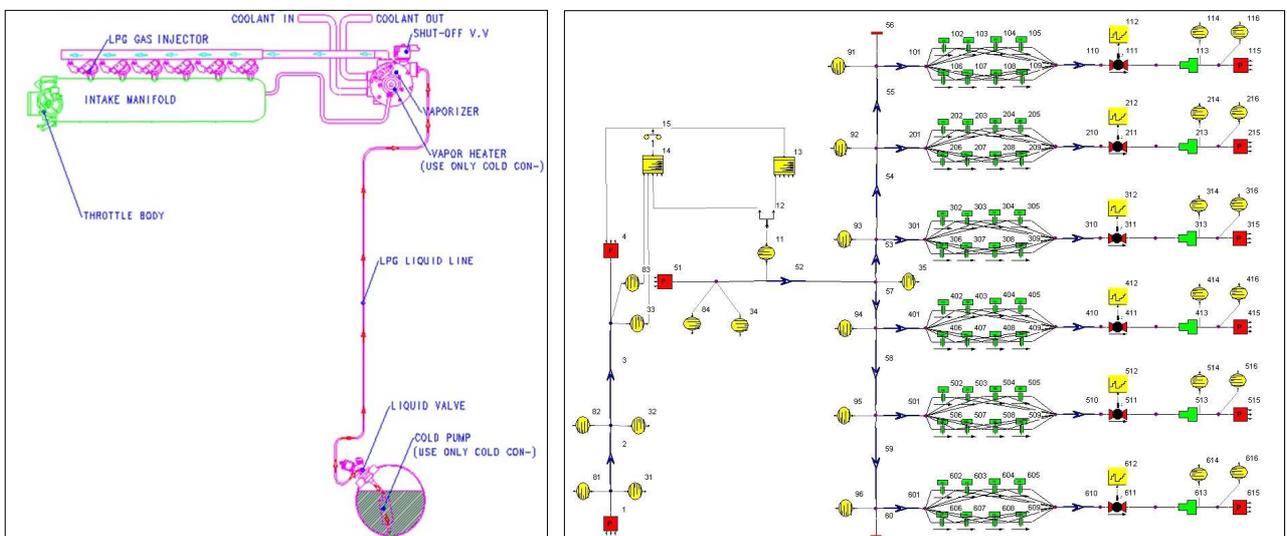


Fig. 1 Analysis model of LPG fuel injection system

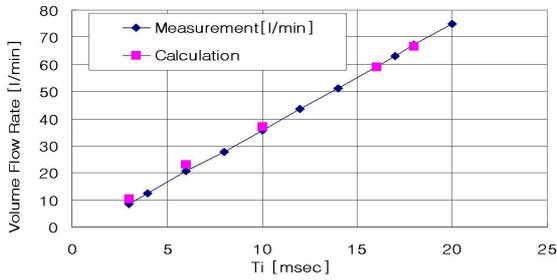


Fig. 2 Comparison between measurement and simulation result for injection flow. Supply pressure to fuel rail $\Delta P=1.3\text{bar}$, supply air flow Temp=20°C

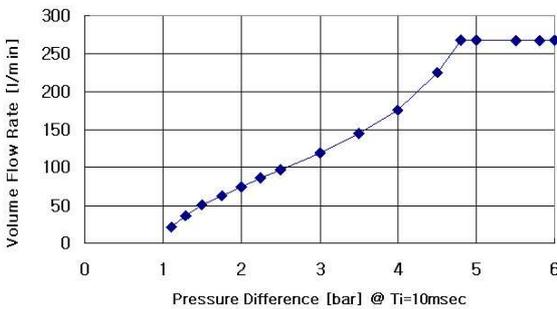


Fig. 3 Variation of volume flow rate due to supply pressure to fuel rail. Supply air flow Temp=20°C

시켜 수행하였으며 해석결과는 인젝션 기간을 3msec - 18msec까지 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.

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 4는 모델링 한 인젝터를 통해 인젝션기간 동안(Ti=18, 10, 3msec) 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 물리적인 현상이다.

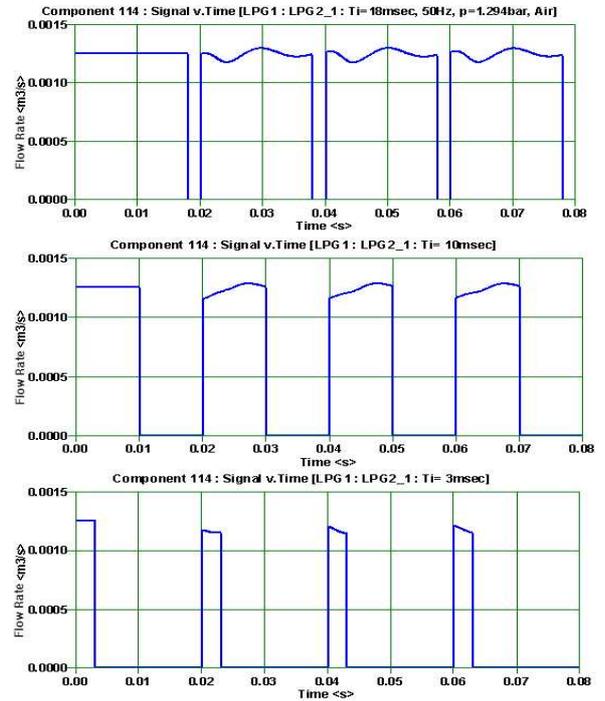


Fig. 4 Transient analysis results of injection flow rate for specified injection duration. signal in Y-axis means volume flow rate

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 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 변동값을 계산한 결과이다. 그림을 살펴보면 베이퍼라이저에서부터 인젝터 전단까지 연결되는 긴 연료공급라인으로 인해 나타나는 느린 주파수 값을 갖는 압력파와 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.

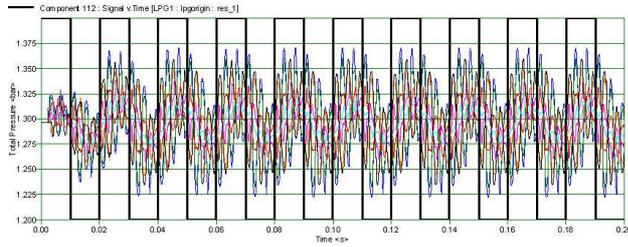


Fig. 5 Transient analysis results of pressure fluctuation in injector rail(ref. Fig. 1 #35, #91 ~ #96). (6000rpm, Ti=10msec)

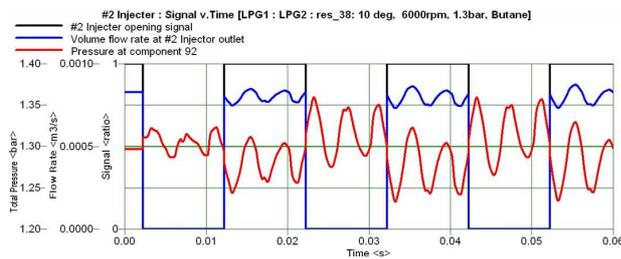


Fig. 6 Transient analysis results of pressure and flow rate fluctuation in injector rail. (6000rpm, Ti=10msec)

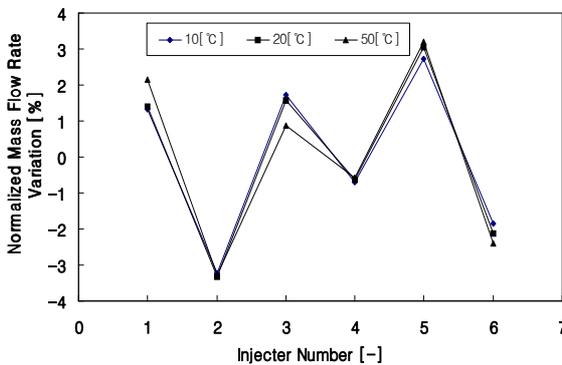


Fig. 7 Variation of normalized mass flow rate of injection fuel in each port as function of supply fuel gas temperature. (6000rpm, Ti=10msec)

Fig. 6은 인젝터의 구동신호(#212)와 2번 인젝터 입구 측의 압력변동 값 (#92) 그리고 인젝터를 통해 엔진 쪽으로 빠져나가는 유량 값 (#216)을 함께 그려놓은 그림을 보여주고 있다. 그림에서 명확하게 알 수 있듯이 인젝터로 빠져나가는 유량은 인젝터 입구 측 연료레일에서의 압력 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 연료 레일에 공급되는 연료의 온도 변화에 따라 각각의 인젝터들로부터 분사되는 연료

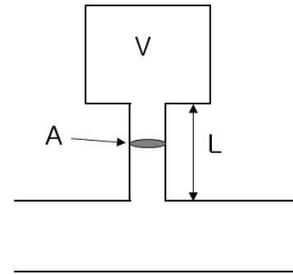


Fig. 8 Helmholtz resonator. (A : area of neck, L : length of neck, V : resonator volume)

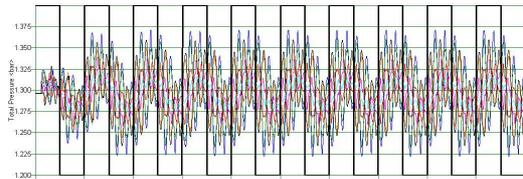
의 질량 유량에 대한 변동량을 정규화 하여 %로 표시한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 공급되는 온도 범위에 큰 영향을 받지 않고 인젝터들 사이에 최대 약 ± 3%의 변동 값을 보여주고 있다. 이러한 원인은 Fig. 5와 Fig. 6에서 설명하였듯이 인젝터가 연결되어 있는 연료 레일내의 연료 압력이 압축성의 특성에 의해 변동하기 때문에 나타나는 물리적인 현상이다. 그러므로 가스인젝션 시스템에서는 이러한 압력변동을 완화시켜줄 수 있는 연료레일의 적절한 설계가 필요함을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 보여준 것과 같이 연료 레일 내 압력의 변동에 의해 발생하는 실린더 간 공급 유량의 차이를 줄여보고자 연료레일에 설치한 헬름홀츠 공진기를 나타낸 그림이다. 일반적으로 헬름홀츠 공진기를 압력이 특정 주파수를 가지고 변동하는 관내에 설치하면 공진기의 목길이(L)와 목단면적(A) 그리고 공진기 부피(V)로부터 아래의 식 (1)과 같이 설정된 특정 주파수대(f_0)의 진동을 흡수하는 역할을 한다 (a : speed of sound).

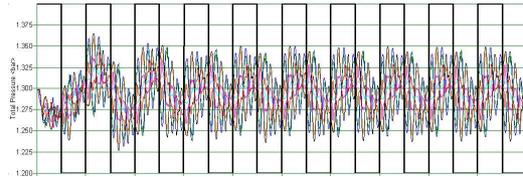
$$f_0 = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{LV}} \quad (1)$$

본 연구에서는 $L=5\text{cm}$, $A=1.54\text{cm}^2$ 의 목을 가지는 헬름홀츠 공진기를 사용하여 연료 레일 내 연료의 압력변동을 최소화 하고자 공진기의 체적을 변경하면서 해석을 수행하였다.

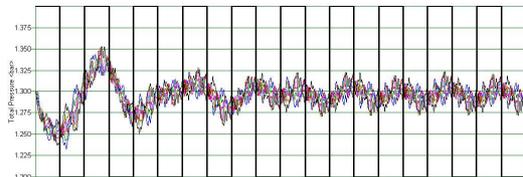
Fig. 9는 헬름홀츠 공진기를 연료 레일 내에 설치하였을 때 레일에서 각 인젝터로 공급되는 위치(Fig. 1, Fig. 10 참조 #35, #91~#96)에서 계산한 연료 레일 내 압력변동 값이다. 먼저 Fig. 9 (b) 경우는 체적(V)이 42.8cm^3 인 공진기를 연료 레일



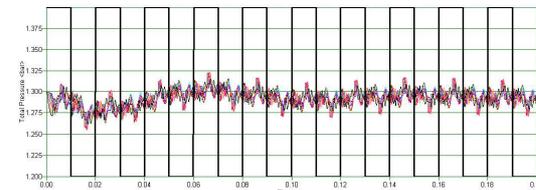
(a) No Helmholtz resonator



(b) One Helmholtz resonator($V= 42.8\text{cm}^3$) at center of rail(#57)



(c) Two Helmholtz resonator($V_1= V_2=42.8\text{cm}^3$) at each side of rail(#55,60)



(d) Two Helmholtz resonator($V_1= 42.8\text{cm}^3$, $V_2= 1069\text{cm}^3$) at each side of rail(#55,60)

Fig. 9 Transient analysis results of pressure fluctuation in injector rail with Helmholtz resonators.(6000rpm, $T_i=10\text{msec}$)

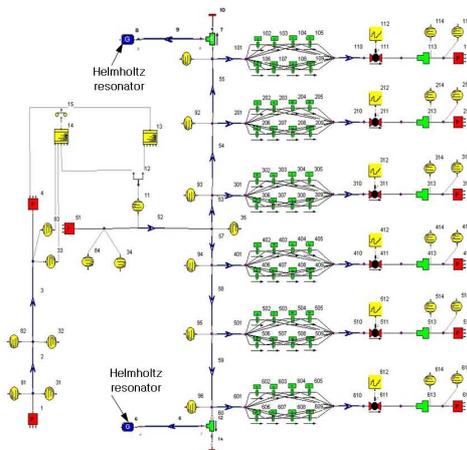


Fig. 10 Analysis model of LPG fuel injection system with 2 Helmholtz resonators

의 중심에 설치하였을 때 압력 변동 값을 계산한 결과 값이다. 공진기를 설치하지 않은 결과 값인

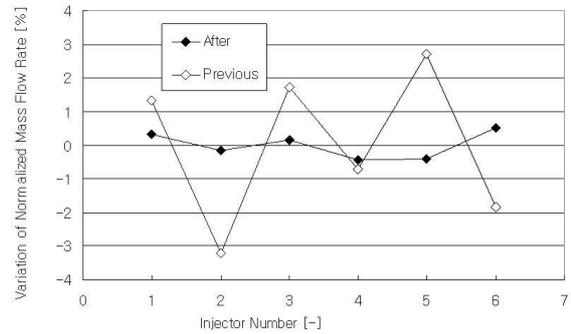


Fig. 11 Effect of installation of Helmholtz resonators on the reduction of variation of mass flow rate in each port. (6000rpm, fuel gas temperature= 20°C , $T_i=10\text{msec}$)

Fig. 9(a)와 비교를 해보면 고주파의 피크 값이 다소간 줄어들었다는 것을 알 수 있다. Fig. 9(c)의 경우는 Fig. 10에 그려 놓은 것처럼 연료 레일의 양 끝에 체적(V)이 42.8cm^3 로 동일한 공진기를 각각 설치한 경우에 계산한 결과 값이다. 공진기를 1개 설치한 값에 비해 연료 가스의 압력 변동 성분 중 고주파 성분이 상당히 큰 값으로 감소한다는 것을 보여준다. Fig. 9(d) 경우는 연료 레일의 양 끝에 체적(V)이 42.8cm^3 과 1069cm^3 인 공진기를 설치하여 계산한 경우의 결과 값이다. 계산 결과를 살펴보면 Fig. 9(c)에서처럼 동일한 체적의 공진기를 2개 설치하는 것에 비해 (1)식에서 예측할 수 있듯이 고주파 및 저주파 성분 모두가 감소한 결과를 준다는 것을 보여준다.

Fig. 11은 Fig. 9(a)와 같이 공진기를 설치하지 않았을 때와 Fig. 9(d)와 같이 연료 레일의 양 끝에 체적(V)이 42.8cm^3 과 1069cm^3 인 공진기를 설치한 후에 인젝터를 통해 각 실린더로 공급되는 연료의 분배특성을 계산한 결과 값이다. 그림을 살펴보면 공진기를 설치 할 경우 인젝터들 사이의 연료 분배 편차가 약 $\pm 0.5\%$ 로 급격하게 완화됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 기체연료 분사방식 LPG 엔진의 연비 향상 및 배기가스 규제 대비를 위해 실린더 간 정밀 유량제어를 달성하기 위한 연구의 일환으로 수행하였다. 운전중 가스 형태로 공급되는 LPG 연료 공급시스템의 관로 내에서는 가스의 압축 특성으로 인해 압력 변동이 발생하게 되며 이로 인해 압력의 차에 의해 연료의 공급이 결정되는 가스 인젝터의

유량공급 특성에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 가스의 압축 특성에 의한 운전 중 실린더 간 유량 분배 특성을 규명하고자 상용 유로 망 해석 프로그램을 사용하여 연료 시스템에 대한 유동해석을 수행하였다. 그리고 유량 분배 특성의 개선안으로 기존의 연료 공급 시스템의 관로 내에서 발생하는 가스압력 변동을 최소화하기 위한 대안으로 헬름홀츠 공진기(Helmholtz resonator)를 설계하였으며, 공진기를 연료 레일 내에 적절하게 설치할 경우 압력 변동이 현저히 줄어들어 실린더 간 유량 분배 특성이 현저하게 향상된 결과를 준다는 것을 확인하였다. 이러한 일련의 연구에 대한 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 주어진 해석 시스템의 경우 6000rpm에서 각각의 인젝터들로부터 분사되는 연료의 질량 유량에 대한 변동량은 공급 온도에는 큰 영향을 받지 않으며, 인젝터들 사이에 최대 약 $\pm 3\%$ 의 변동 값을 보여준다.

(2) 연료 레일의 양 끝단에 체적(V)이 42.8cm^3 과 1069cm^3 인 헬름홀츠 공진기를 설치할 경우 인젝터들 사이의 연료 분배 편차가 약 $\pm 0.5\%$ 로 급격하게 완화된다.

참고문헌

- (1) Gerini, A., Monnier, G. and Bonetto, R., 1996, "Ultra Low Emissions Vehicle Using LPG Engine Fuel," *SAE961079*.
- (2) Kim, W., Lee, J. and Jang, C., 2000, "A study on the Combustion Characteristics and the Control on the Fuel Flow Rate of LPG Intake Port Injection Engine," *KSAE*, Vol. 8, No. 6, pp. 31~39.
- (3) Lim, M. C., Choi, S. W., Myung, C. L., Park, S., Park, J. N. and Kim, S. K., 2006, "The Study of Performance and Engine Application Characteristic of Turbine Type LPi Fuel Pump with LPG Composition Rate," *Spring Conference Proceedings of KSAE*, pp.1891~1896.
- (4) Myung, C. L., Kwak, H. and Park, S., 2006, "Development on Enhanced Leaked Fuel Recirculation Device of LPLi Engine to Satisfy SULEV Standard," *IJAT*, Vol.7, No.4, pp.407~413.
- (5) Pan, C. P., Li, M. C. and Hussain, S. F., 1998, "Fuel Pressure Control for gaseous Fuel Injection Systems," *SAE981397*.
- (6) Lutz, B. R., Stanglmaier, R. H., Matthews, R. D. Cohen, J. T. and Wicker, R., 1998, "The Effects of Fuel Composition, System Design, and Operating Conditions on In-System Vaporization and Hot Start of a Liquid-Phase LPG Injection System," *SAE981388*.
- (7) Oh, J. E., Han, K. H. and Lee, Y. Y., 1999, "Optimum Specification and Location of the Helmholtz Resonator for the Intake System in a Vehicle," *KSAE*, Vol. 7, No. 2, pp. 210~216
- (8) Lee, Y. K., Kweon, Y. H., Shin, H. D. and Aoki, T., 2004, "Numerical Simulations of an Unsteady Shock Wave Propagating into Helmholtz Resonator," *KSME Spring Conference*.