

자동차 CNG용 고압 레귤레이터의 특성해석에 관한 연구

김병우^{1*}

¹울산대학교 전기공학부

A Study on the Characteristics of High Pressure Regulator for Vehicle CNG

Byeong-Woo Kim^{1*}

¹Department of Electrical Engineering, Ulsan University

요 약 자동차 천연가스의 주행거리를 증가시키기 위해서는 연료용기의 고압이 필요하고 고압의 연료를 적절한 압력으로 저감시키는 기술개발이 요구된다. 본 연구에서는 천연가스 자동차에서 가장 중요한 압력 제어기의 압력특성을 조사하였다. 압력 제어기에서의 히스테리시스, 압력저하 및 제어기의 유량특성을 수학적으로 해석하였다. 또한, 본 논문에서는 CNG 제어기에 대한 새로운 방식의 유압해석 방법을 제시하였다. 마지막으로 실험을 실시하여 실제 동작조건에서 압력 제어기의 수학적 해석의 유용성을 검증하였다.

Abstract To increase the driving distance of a natural gas vehicle, the high pressure of fuel charge is necessary and the development of the device reducing the pressure to suitable pressure for fuel of high pressure. In this study, Pressure characteristics at the pressure regulator, which is very important for gas supply systems for vehicles, are investigated. Numerical simulations are carried out to quantify pressures at regulators for several flow rates and to investigate pressure drop, hysteresis losses at some parts in the pressure regulator. Moreover, this paper presents a new kind of hydraulic simulation which is composed of CNG regulator. Lastly, experiments are carried out to verify the effectiveness of the prosed mathematical simulation with various regulator components as in real working condition.

Key Words : Pressure Regulator, Natural Gas Vehicle, Hydraulic Simulation,

1. 서 론

자동차 CNG 고압 레귤레이터는 CNG 용기와 인젝터 사이에 위치하여 엔진으로 공급되는 연료의 압력을 규정 압력으로 유지시키는 부품이다. 자동차용 CNG 용기 내의 가스 압력 변화, 엔진 부하에 따른 연료 유량 변화 및 주위 온도의 차이에 의한 유량의 변화 등과 같은 다양한 작동조건에 대하여 규정 출구압력을 안정적으로 유지시키는 기능을 담당한다. 고압 레귤레이터는 내부 감압 구조에 따라서 피스톤형과 다이어프램형으로 나누어지고 감압하는 단수에 따라서 1단 감압, 2단 감압, 3단 감압 형태가 있다.[1-3] 일반적으로, 1단 감압 보다는 2단 감압

또는 3단 감압 방식이 출구압력의 변동과 히스테리시스가 적고 적은 유량일 때 미소 압력 제어 측면에서 유리하다.

통상 CNG 인젝터를 사용하는 연료공급 장치에서 인젝터 입구에 요구되는 연료 압력은 7~10 kgf/cm² 범위이며 차량 운행에 요구되는 연료의 유량 및 온도 변화 폭이 크므로 이에 대응하여 인젝터에서 보정해야 하는 유량보정계수가 커짐에 따라 보다 정밀하게 공연비를 제어할 수 있는 전자제어장치가 요구된다.

결국 엔진에서 요구하는 연료 유량의 변동이 커짐에 따라 기계적으로 제어되는 레귤레이터 출구압력이 변동되므로 가능하면 출구압력 변동 폭이 적은 레귤레이터가 필요하므로 히스테리시스 특성이 우수한 다이어프램 방

본 논문은 교육과학기술부 지역혁신인력양성사업 및 지식경제부 전략기술개발사업 일환으로 수행되었음.

*교신저자 : 김병우(bywokim@ulsan.ac.kr)

접수일 11년 09월 19일

수정일 (1차 11년 10월 18일, 2차 11년 11월 21일)

게재확정일 11년 12월 13일

식과 200 kgf/cm²이상의 고압을 한번의 감압 과정에 의해 감압시키는 1단 감압 보다는 1단에서 중압으로 감압하고 2단에서 이를 다시 저압으로 감압시킴으로서 보다 출구압력 변동폭이 적은 2단 감압 방식이 우수한 성능을 나타낸다.

자동차 CNG 레귤레이터의 유압 동특성에 대한 기존 연구에서는 레귤레이터 자체의 FEM 모델링을 통하여 유동해석 및 유압 특성 해석을 실시하였다.[4] 이 같은 연구를 통하여 CNG 레귤레이터의 유동 및 유압특성을 해석할 수 있으나 기계적인 구성부품에 대한 동력학적 특성이 반영되지 않았기 때문에 해석의 정확도가 떨어지는 문제가 초래될 수 있다.

또한, 자동차 CNG 레귤레이터와 같은 구동기 해석에서는 구동기 자체의 해석을 실시하였고, 일부에서 시스템 해석을 실시하였으나 동적인 유압 및 유량의 상태를 고려하지 않았기 때문에 해석의 정확성 및 활용성이 저하되었다.[4]

따라서, 본 연구에서는 CNG용 고압 레귤레이터의 유체역학적인 수학적 모델을 구하고 이에 부가하여 역학적인 동력학 모델을 가미한 시뮬레이션을 실시하여 해석모델의 타당성 및 정확성 증대를 도모하였다.

2. CNG 레귤레이터 동특성 해석

밸브를 통한 기체의 흐름은 크게 음속이하의 흐름과 음속이상의 흐름으로 분류할 수 있다. 음속이하의 흐름의 경우, 밸브 이전의 압력을 P_H , 밸브 이후의 압력을 P_L 라고 할 때 $P_H < 1.893P_L$ 이 되면 음속이하가 되고 $P_H \geq 1.893P_L$ 조건이 되어 음속이상의 흐름이 된다. 오리피스를 통과하는 공기의 속도가 음속이하인 경우, 공기의 유량은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \alpha A_2 \sqrt{\frac{2gn}{n-1} P_H v_1 \left\{ 1 - \left(\frac{P_L}{P_H} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right\}} \quad (1)$$

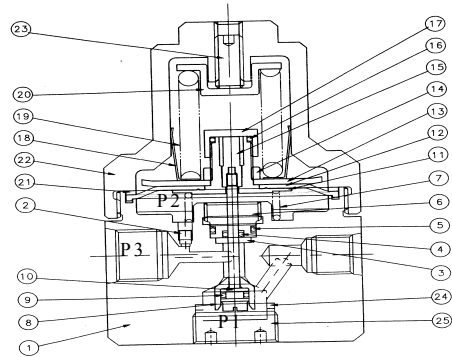
A_2 : 유효 단면적

위의 식에 단열지수 $n=1.4$, 중력가속도 $g=9.8$ [m/s^2]를 대입하고 간단히 정리하면 다음 식 (2)와 같이 된다.

$$Q = 0.37S \sqrt{P_L * (P_H - P_L)} \sqrt{\frac{T_0}{T}} \quad (2)$$

여기서, T_0 : 초기 온도(°C)

T : 최종 온도(°C)



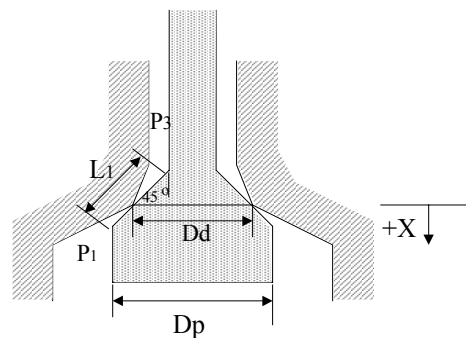
[그림 1] CNG 제어기의 단면도
[Fig. 1] Cross section of CNG regulator

오리피스를 통과하는 공기의 속도가 음속이상이면 오리피스를 통과하는 유속은 음속이 된다. 이 경우 압력 P_H 를 아무리 높여도 유속은 음속이상으로 빨라지지 않는다. 이 경우에 오리피스를 통과하는 유량은 식 (1)에 임계조건인 $P_H/P_L = 1.893$ 을 넣고 단열지수 $n=1.4$, 중력가속도 $g=9.8$ [m/s^2]을 넣고 정리하면 다음 식 (3)과 같이 된다.

$$Q = 0.1854S * P_H \sqrt{\frac{273}{273+t}} \quad [l/s] \quad (3)$$

여기서, S : 단면적(mm²)

Fig. 2는 레귤레이터의 포펫 밸브를 간략하게 나타낸 것이다.



[그림 2] CNG 제어기의 포펫 밸브
[Fig. 2] Poppet valve of CNG regulator

식 (3)을 사용하여 P_1 과 P_3 의 관계에 따라서 식을 정리하면 $P_1 \geq 1.893P_3$ 의 경우는 음속영역의 흐름으로 식 (4)와 같이 되고

$$Q_{13} = 0.185S(P_1 + 1.033)\sqrt{\frac{273}{273+t}} [m^3/s] \quad (4)$$

여기서, P_1 : 노즐부의 정면 토출 압력(kgf/cm²)
 P_3 : 노즐부의 측면 토출 압력(kgf/cm²)

$P_3 < P_1 < 1.893P_3$ 의 경우는 음속이하 영역으로 식 (5)와 같이 된다.

$$Q_{13} = 0.37S\sqrt{(P_3 + 1.033)(P_1 - P_3)}\sqrt{\frac{273}{273+t}} \quad (5)$$

$P_3 \geq 1.893P_1$ 의 경우에는 P_3 측에서 P_1 측으로 유량이 역류하며 이 경우에는 식 (6)과 같이 된다.

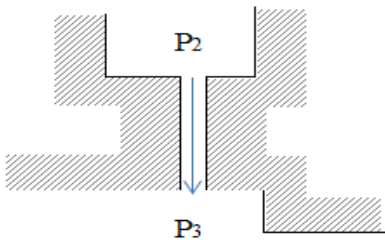
$$Q_{13} = -0.185S(P_3 + 1.033)\sqrt{\frac{273}{273+t}} \quad (6)$$

$P_1 < P_3 < 1.893P_1$ 의 경우에도 유량이 역류하며 식 (7)과 같이 된다.

$$Q_{13} = -0.37S\sqrt{(P_1 + 1.033)(P_3 - P_1)}\sqrt{\frac{273}{273+t}} \quad (7)$$

또한 밸브 개구면적(Open area)은 식 (8)과 같이 된다.

$$A_{13} = \pi x \sin 45^\circ (Dd - x \sin 45^\circ \cos 45^\circ) \quad (8)$$



[그림 3] 출구 밸브의 유동 흐름 방향
 [Fig. 3] Flow direction at outlet port

Fig. 3은 출구 측에서 제어실로 뚫려있는 조그마한 틈을 통한 기체의 흐름을 나타낸 것으로 모세관 유동으로 모델링할 수 있다.

원형 모세관에서의 유량 방정식은 다음 식 (9)로 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{D^2}{32\mu} A \frac{(P_3 - P_2)}{L} [m^3/sec] \quad (9)$$

레귤레이터의 압력은 크게 3 부분으로 나누어 해석을 실시하였다. P_1 은 입구 측면 압력, P_2 는 다이어프램실의 압력, P_3 은 출구 측면 압력으로 정의하였다.

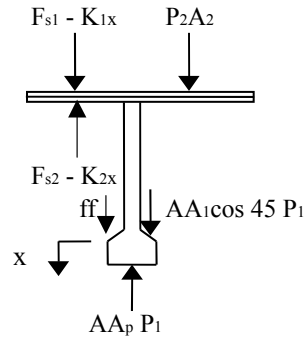
레귤레이터의 압력은 크게 3 부분으로 나누어 해석을 실시하였다. P_1 은 입구 측면 압력, P_2 는 다이어프램실의 압력, P_3 은 출구 측면 압력으로 정한다.

각 부분의 압력은 다음 식 (10)과 같은 연속방정식에 의해서 구해진다. 즉 출입하는 유량의 대수합과 체적의 변화에 따라서 압력이 결정된다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\beta}{V_0} (\sum Q_{in} - \sum Q_{out}) - \frac{dV_0}{dt} \quad (10)$$

여기서, Q_{in} : 노즐부의 정면 토출 압력(kgf/cm²)
 Q_{out} : 노즐부의 측면 토출 압력(kgf/cm²)

밸브의 운동은 Fig. 4와 같이 간략화 할 수 있으며 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 4] 포핏 밸브의 동적 작용력 선도
 [Fig. 4] Dynamic force diagram of poppet valve

$$(F_{S1} - K_1x) - P_2A_2 - (F_{S2} + K_2x) + AA_1 \cos 45^\circ P_1 - AA_p P_1 - ff = M\ddot{x} + B\dot{x} \quad (11)$$

밸브의 운동방정식인 식 (11)은 2차 미분방정식의 형태로 표현되고 연속방정식인 식 (10)은 1차 미분방정식으로 표현되므로 이 미분방정식을 적분 알고리즘⁽⁴⁾(Rungekutta 4th method)을 사용하여 매 시간 적분하여 시간의 변화에 따른 해를 구한다.

3. 실험장치 및 방법

자동차 CNG 레귤레이터의 압력제어 능력과 기밀성을 평가하기 위해서 CNG 레귤레이터 성능 시험기의 설계 및 제작을 수행하였다. 자동차 CNG 레귤레이터 압력특성을 평가하기 위한 Test bench는 가스압축을 위한 1) Air Compressor 2) 압력 제어를 위한 Control Box 3) 정보 취합을 위한 DAQ System 으로 구성하였다. 본 성능 시험기는 입구압력의 영향과 유량변화에 의한 영향을 평가하기 위한 장치이다.

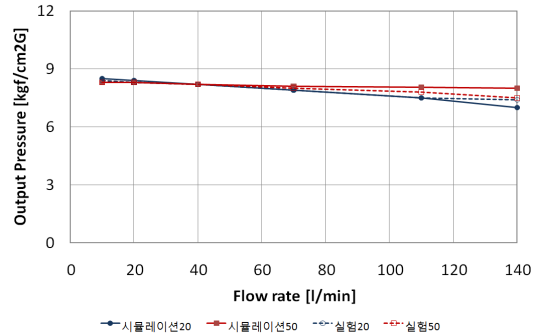
고압 압축기를 이용하여 내용적 약 650 ℓ의 차량용 CNG 실린더 13개에 250 kgf/cm²의 공기를 압축하고, 저압, 중압, 고압의 입력 압력으로 제어할 수 있도록 3방향의 유로를 구성하였다. 레귤레이터의 입구와 출구에 압력센서를 설치하고 이 압력센서와 유량계의 출력 신호를 Data Acquisition 장비에 연결하여 10ms 주기마다 측정 기록하였다. 유량조절 밸브 후단에는 온도센서를 설치하여 감압에 의한 온도 저하를 측정하였다. 레귤레이터 작동성능을 평가하기 위한 실험방법으로서는 드롭 테스트(Drop test), 히스테리시스 테스트를 중심으로 실시하였다.

4. 해석결과 및 고찰

드롭(Drop) 테스트는 입구 압력을 고정하고 유량을 변화시키면서 CNG 레귤레이터의 출구 압력의 변화를 측정하도록 규정되어 있다. Fig. 5, 6은 CNG 레귤레이터의 시뮬레이션과 실험을 통하여 얻은 드롭테스트 결과를 나타낸 것이다. CNG 레귤레이터에 부가되는 유량변화를 최소 10 liter/min에서 140 liter/min 까지 변화시킬 때, 발생하는 압력변화는 10% 내외로 상당히 우수한 특성결과를 확인할 수 있었다. 또한, 자동차 CNG 레귤레이터가 가장 많이 적용되고 있는 10 liter/min에서 80 liter/min 인 경우, 유량변화에 따른 출구압력 변화의 이론과 실험해석의 결과 값이 4%(3.2 kgf/cm²) 이내에 근접하는 결과를 얻을 수 있었다.

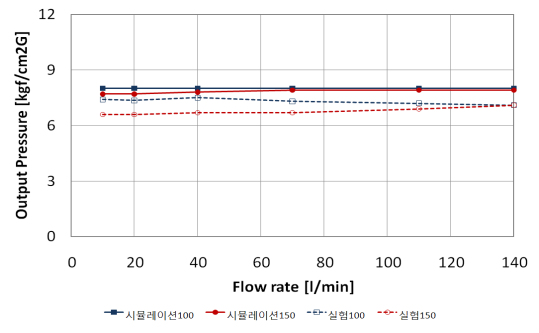
이 같은 현상은 압력 레귤레이터에 작용하는 유체의 유량 및 압력 변화는 물론이고 레귤레이터 자체의 운동방정식을 병행한 부가적인 수학적 모델링을 실시한 것에 기인한다고 사료된다. 이를 통하여, 자동차에서 발생할 수 있는 일정 범위의 유량 변화에 무관하게 레귤레이터의 출구 압력을 유지시킬 수 있음을 확인하였다. 물론, CNG 레귤레이터의 출구 압력은 규정 압력을 항상 일정하게 유지하여 출구압력의 변화가 일정한 것이 가장 이

상적이지만 자동차 성능에 영향을 끼치지 않는 범위 내에서 출구 압력의 변화가 제한적임을 확인할 수 있었다.



[그림 5] CNG 제어기의 압력저하 결과(20/50kg_f/cm²)

[Fig. 5] Drop results of CNG regulator(Inlet pressure (20/50kg_f/cm²))



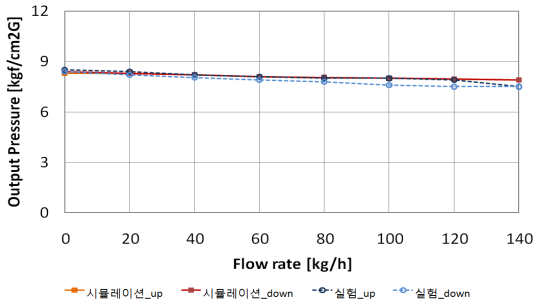
[그림 6] CNG 제어기의 압력 저하 결과 (100/150kg_f/cm²)

[Fig. 6] Drop results of CNG regulator(Inlet pressure (100/150kg_f/cm²))

히스테리시스 테스트의 목적은 엔진의 부하 변동에 따른 연료 유량의 변화가 레귤레이터 출구압력에 미치는 영향을 파악하는 것이다. 입구 압력을 고정시킨 상태에서 유량을 0 ℓ/min에서 140 ℓ/min까지 증가시킨 후 다시 0 ℓ/min까지 감소시키면서 출구 압력을 측정하였다. Fig. 7은 입구 압력이 50 kgf/cm²의 경우의 히스테리시스 테스트 결과이고, Fig. 8은 입구 압력이 100 kgf/cm²경우의 히스테리시스에 대한 시뮬레이션과 실험 결과를 비교한 것이다.

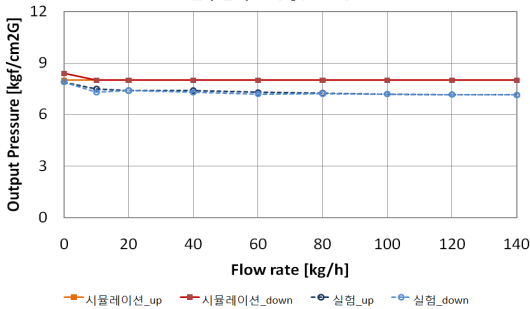
입구 압력이 50 kgf/cm²인 경우에는 시뮬레이션의 결과와 실험의 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 입구 압력이 100 kgf/cm²으로 증가하게 되면 기구적 마찰력, 유동력 등이 증가하게 되므로 실험의 결과가 약 0.6-1

kgf/cm² 정도 작게 나타남을 알 수 있다. 이 같은 현상은 CNG 레귤레이터의 수학적 모델링 단계에서 유동력과 마찰력에 대한 수학적 모델이 삽입되지 않은 것에 기인하는 현상이다. 이 같은 압력변화는 해석결과의 오차가 작고 자동차 시스템에 미치는 영향이 작기 때문에 시스템 문제로 연계되지는 않을 것이다.



[그림 7] CNG 제어기의 히스테리시스 압력변화 결과 (입구 압력 50kg_f/cm²)

[Fig. 7] Hysteresis results of regulator(In case of inlet pressure:50kg_f/cm²)



[그림 8] CNG 제어기의 히스테리시스 압력변화 결과 (입구 압력 100kg_f/cm²)

[Fig. 8] Hysteresis results of CNG regulator(In case of inlet pressure:100kg_f/cm²)

입구 압력이 50 kgf/cm²일 때에는 100 kgf/cm²일 때 비해서 히스테리시스 오차가 0.3-0.4 kgf/cm² 발생되나 이 정도는 레귤레이터의 성능에 거의 영향을 미치지 않는 크기이다. 따라서 본 연구에서 제작된 레귤레이터의 히스테리시스 특성은 기존 레귤레이터에 비하여 성능이 우수함을 확인하였다.

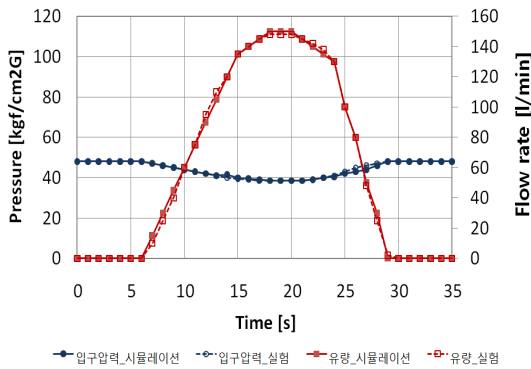
또한, 입구 압력을 고정시킨 상태에서 유량을 0 l/min에서 140 l/min까지 증가시킨 후 다시 0 l/min까지 감소시키면서 입구 압력과 출구 압력의 변화를 함께 살펴보았다. Fig. 9, 10는 입구 압력이 50

kgf/cm² 일 때의 입구에서 발생하는 압력과 출구에서 발생하는 압력의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 11, 12는 입구 압력이 100 kgf/cm²인 경우, 입구에서 발생하는 압력과 출구에서 발생하는 압력의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 11은 입구압력이 100 kgf/cm²인 경우, 입구에서 발생하는 압력의 변화를 나타낸 것이고 Fig. 12는 입구압력이 100 kgf/cm² 일 때의 출구에서 발생하는 압력의 변화를 나타낸 것이다.

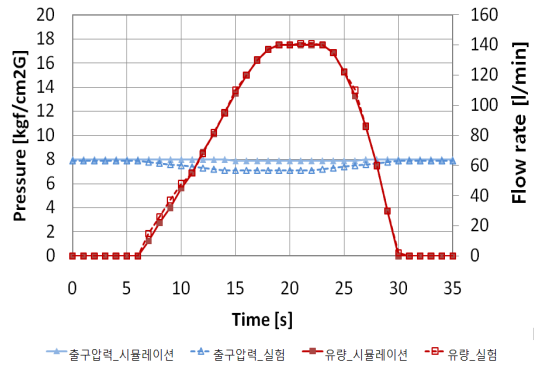
Fig. 9와 Fig. 11에서와 같이 입구 압력이 50 kgf/cm², 100 kgf/cm²로 작용할 때, 입구에서 발생하는 압력 변화는 유량이 증가함에 따라서 약 10 kgf/cm² 정도 감소하는 것을 알 수 있었다. 이것은 입구 압력을 공급하는 봄베의 용량이 상대적으로 적어서 갑자기 많은 유량을 송출하게 되면 봄베 입구의 압력이 순간적으로 저하되는 현상에 기인할 것이다. 따라서, 본 연구의 대상인 CNG 레귤레이터의 자체의 문제가 아닌 실험 장치의 특성이기 때문에 본 연구에서는 큰 고려 대상이 아닐 것이다. 또한, 입구 압력이 일정 시간이 경과하게 되면 원래 상태인 50 kgf/cm², 100 kgf/cm²로 복구되고 있기 때문에 실험 방법에 의한 오차보다는 일시적인 현상에 기인하는 것이다.

Fig. 10는 입구 압력 50 kgf/cm² 일 때, 출구 압력 변화를 Fig. 12는 입구 압력 100 kgf/cm² 일 때, 출구 압력의 변화를 고찰한 것이다. 작용 압력이 고압일 때, 출구 압력의 변화가 저압의 경우보다 오차가 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 같은 현상은 위에서 설명한 것과 같이 시뮬레이션 모델의 마찰손실이 고려되지 않았기 때문이라 사료된다. 한편, 공급 유량이 0에서 150 l/min으로 증가시켰다가 다시 0 kgf/cm²로 감소시킬 때 출구 압력의 변동이 대체적으로 목표 압력인 8 kgf/cm²를 지속적으로 유지하였다. 따라서, 본 연구의 CNG 레귤레이터의 특성은 매우 양호하고 유량의 변동에 따라서 출구 압력이 크게 변화되지 않으면서 효과적인 제어가 가능함을 확인하였다.

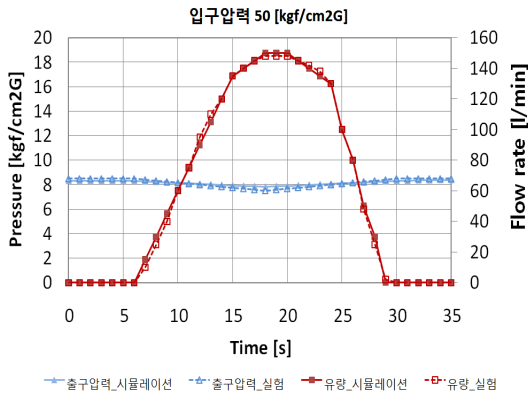
그리고, 본 연구를 통해 얻은 CNG 레귤레이터의 해석 모델이 실제의 CNG 레귤레이터의 특성을 정확하게 추종하였다. 따라서, 본 해석 모델을 통하여 구현된 수학적 모델을 활용하여 다양한 설계 파라미터들을 가변하게 되면 최적의 특성을 갖는 CNG 레귤레이터 개발에 활용할 수 있을 것이다.



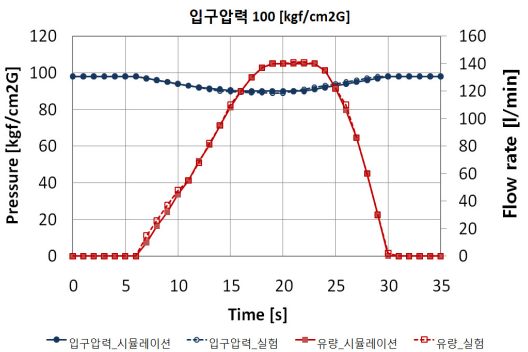
[그림 9] 입구 압력의 변화(입구압력 : 50kg_f/cm² 인 경우)
 [Fig. 9] Variation of inlet pressure(In case of inlet pressure:50kg_f/cm²)



[그림 12] 출구 압력의 변화(입구압력 : 100kg_f/cm² 인 경우)
 [Fig. 12] Variation of outlet pressure(In case of inlet pressure:100kg_f/cm²)



[그림 10] 출구 압력의 변화(입구압력 : 50kg_f/cm² 인 경우)
 [Fig. 10] Variation of outlet pressure(In case of inlet pressure:50kg_f/cm²)



[그림 11] 입구 압력의 변화(입구압력 : 100kg_f/cm² 인 경우)
 [Fig. 11] Variation of inlet pressure(In case of inlet pressure:100kg_f/cm²)

5. 결론

본 연구에서는 자동차 CNG 엔진에 일반적으로 적용되고 있는 압력 레귤레이터에 대한 수학적 모델링과 성능예측을 통하여 정확한 제품설계의 가능성을 검증하는 것으로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 자동차 CNG 유압 레귤레이터에 대한 유량 방정식 및 밸브 동력학 해석을 실시하였다. 이를 통하여, 기존에 관행적으로 실시되었던 경험적 바탕의 시행착오 방법을 탈피하여 설계단계에서 부터 압력 동특성을 예측할 수 있는 방법을 제시할 수 있었다.
- (2) CNG 압력 레귤레이터에 작용하는 유체의 유량 및 압력 변화는 물론이고 레귤레이터 자체의 운동방정식을 병행하여 해석을 실시함으로써, 최소 10 liter/min에서 최대 80 liter/min의 유량변화 상태에서 CNG 공급 압력변화에 대한 이론과 실험해석의 오차가 4%(3.2 kgf/cm²) 이내 에 근접하는 결과를 얻었다.
- (3) 또한, 자동차 CNG 레귤레이터의 히스테리시스 특성이 0.3-0.4 kgf/cm²로서 자동차 엔진시동 시와 같은 순간적인 천이영역에서 일정한 압력 제어 가능성을 확인하였다.

향후에는 본 자동차 CNG 레귤레이터 하드웨어에 대한 성능해석을 근간으로 하여 이의 성능을 극대화할 수 있는 제어방법에 대한 연구를 실시하고자 한다.

References

- [1] M. S. Kwon, "Trend of Korea Automotive technology," KSME, 42(9), pp125-130, 2002.
- [2] T. Muto., "Fundamental Study of Power Match Control of Hydraulic Power System," Bulletin of the JSME, Vol. 61, No. 586, pp.206-211, 1995.
- [3] Control Valve Handbook, 3rd Edition, pp. 65-72, 2001.
- [4] K. Kim, J. D. Jang, "Analysis of Dynamic Characteristics of Pressure Control System in Automatic Transmission," PKSAE, pp. 766-771, 2009.
- [5] H. J. Tae, H. M. Kim, H. W. Lee, "Numerical Analysis of Dynamic Behavior in a Variable Pressure Solenoid Valve," TKSAAE, pp. 70-76, 2003.

김 병 우(Byeong-Woo Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 한양대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
- 1990년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과 (석사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과 (박사)
- 1994년 9월 ~ 2006년 8월 : 자동차부품연구원 전장시스템실장
- 2006년 9월 ~ 현재 : 울산대학교 전기공학부 교수

<관심분야>

지능형 자동차, 텔레매틱스, 자동차 전자제어