

천연가스 개조 승용차에 대한 실험적 연구(2) - 분사 시스템 평가

김형구¹⁾ · 권순태²⁾ · 엄인용³⁾

서울과학기술대학교 NID융합기술대학원¹⁾ · 대림자동차공업 기술연구소 엔진개발팀²⁾ ·
서울과학기술대학교 기계 · 자동차공학과³⁾

Experimental Study on Natural Gas Conversion Vehicle(2) - Evaluation of Injection System

Hyung-Gu Kim¹⁾ · Suntae Kwon²⁾ · Inyong Ohm³⁾

¹⁾Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

²⁾Engine Development Team, Institute of Technology, Daerim Motors, 602 Gongdan-ro, Seongsan-gu, Changwon-si,
Gyeongnam 642-938, Korea

³⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 139-743, Korea
(Received 8 May 2015 / Revised 26 May 2015 / Accepted 8 June 2015)

Abstract : In the previous study, several problems were observed in a NG conversion vehicle, which were fail of air-fuel ratio closed loop control, aggravated fuel economy, increased harmful emission and declined roadability. It was provisionally supposed that the mismatch of injection system with the engine caused these performance deterioration. In this context, the characteristics of fuel injection system of commercial conversion kit for NG were investigated experimentally varying the engine speed, fuel rail pressure and volume. The results are as follows; The injection quantity decreases as the engine speed increases due to the extremely small rail volume of the presenting system and flow rate of No. 2 injector are always lower than that of the other ones regardless of the speed under the dynamic operation condition. Furthermore the existing system does not meet the required fuel quantity for the normal engine operation over 3000 RPM. On the other hands, the large rail volume systems ease and/or eliminate the difference of injection quantity between the injectors according to the speed variation, however, these systems decrease injection flow rate and still cannot supply sufficient fuel. Finally, suitable combination of the higher rail pressure and the larger rail volume might be a solution about these problems.

Key words : NG(천연가스), Gas injection(가스 분사), Sequential injection(순차분사), Fuel rail volume(연료레일 체적), Fuel rail pressure(연료레일 압력)

1. 서론

2009년 이후 승용차량의 천연가스(NG, natural gas) 차량으로의 개조가 허용되어 왔고, 도입초기에는 고유가 등의 영향으로 개조가 활발히 진행되었으나¹⁾ 최근에는 NG 개조의 주된 이유인 유가의 하

락과 차량 성능 및 충전 인프라 문제 등으로 그 실효성에 의문이 제기되고 있다.^{2,3)}

NG의 주성분인 메탄이 가솔린과 LPG에 비해 이산화탄소의 배출이 적은 청정연료이지만, 실제 NG 자동차 보급을 위해 애프터마켓에 공급된 개조 차량을 대상으로 한 보고에서는 이에 부합하지 않게 이산화탄소 발생이 18% 증가한 결과도 있었다.⁴⁾ 또

*Corresponding author, E-mail: iyohm@seoultech.ac.kr

한 본 연구의 이전 연구에서 상용의 개조 키트를 장착한 차량을 시험한 결과, 이산화탄소 배출량은 감소하지 않았고 연비는 모드 주행에서 20% 실 도로 주행에서 16% 정도 악화되었으며 배기 중 CO와 NMHC의 배출이 규제치보다 훨씬 높게 높았다. 또한 가속 성능도 가속도 기준으로 개조 전의 45-76% 수준으로 크게 악화되었다.⁵⁾

한편 연료 분사 시스템은 기관제어의 근간이 되는 시스템으로, 신뢰성 있는 시스템의 구축을 통해 배기 제어 및 연비 향상을 위한 정밀한 공연비 제어가 가능하다. 특히 기체연료를 분사할 때에는 온도 변화에 의해 공급 압력이 일정하게 유지되지 않고,⁶⁾ 비압축성인 액체 연료와 달리 분사유량이 압력 변화에 매우 민감하게 반응한다.⁷⁾ 또한 기관의 속도에 따라 분사유량이 크게 달라지는 경향도 있기 때문에,⁷⁾ 이에 대한 대책도 필요하다.

아울러 NG 자동차는 가솔린에 비해 출력이 부족하고, 산소 센서의 출력 특성 상 공연비 제어와 배기 정화에도 기술적 난제가 있다.⁶⁾

이상과 같이 NG를 승용차용 연료로 사용하기 위해서는 기체 분사의 고유 특성과 NG의 특성을 고려하여 매우 정교한 분사시스템이 요구된다 할 수 있으나, 아직 이에 대한 연구는 미진한 실정이다. 또한, 이전 연구에서 현재 애프터마켓에서 판매되는 개조 키트의 가장 큰 문제점은 연료공급시스템이 NG 연료의 특성에 부합하는 성능을 가지지 못했기 때문인 것으로 결론지었다.⁵⁾

이러한 맥락에서 본 연구에서는 향후 NG 연료의 승용차 적용에 대한 기초 자료를 취득하기 위해 현재 NG 개조차 용으로 애프터마켓에서 상용으로 판매되는 연료분사 시스템의 특성을 파악하고 문제점에 대해 논의하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

NG 개조차의 분사특성을 파악하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 연료량은 수치 환법을 이용하여 측정하였으며, 측정 방법은 다음과 같다. 먼저 진공 펌프를 이용해 실린더의 수위를 일정 수준 이상으로 높인 다음 인젝터 구동기(IC 5160)로 구동 속도와 분사 펄스폭(pulse width) 그리

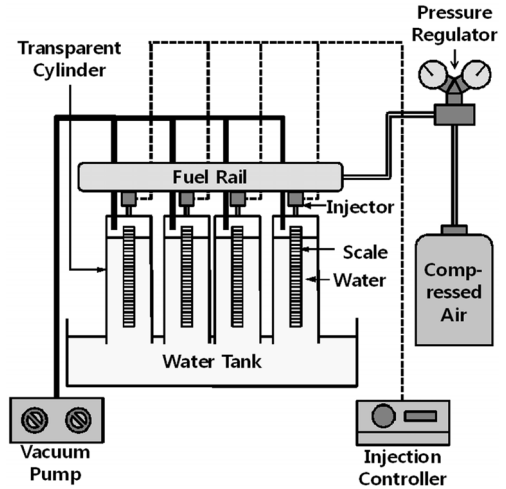


Fig. 1 Schematics of injection flow rate measurement system

Table 1 Specifications of NG injection system and test condition

Injector	
Model name	BF320
Resistance (Ω)	2.2 ± 0.1 at 20°C
Working temperature ($^\circ\text{C}$)	$-40 \sim 125$
Operating voltage (VDC)	$7 \sim 15$
Working pressure (kPa)	$0 \sim 250$
Dimension ($\phi \times h$, mm)	26×81
Weight	0.2 kg
Fuel rail	
Dimension ($\phi \times l$, mm)	7.5×120
Volume (cc)	Original kit
	Alternative
Fuel feeding	Side feeding
Test condition	
Drive	4A/1.5A pick and hold
Speed (RPM)	$600 \sim 6000$
Pressure (bar)	Static
	Dynamic
Injection pulse width (msec)	5

고 분사횟수를 설정하고 분사를 실시하였다. 분사가 종료된 후 수위의 차이를 체적으로 환산하고 이를 분사 횟수로 나누어 1회당 분사유량을 구한다.

분사시스템은 인젝터와 레일이 일체로 제작된 NG 개조 차량에 사용되는 것이고 그 사양과 구동 조건을 Table 1에 제시하였다.

분사 특성은 다음의 세 가지 경우에 대해 파악하

었다. 첫째 연료 레일의 압력을 1.5bar에서 6 bar까지 변화시키며 압력과 구동 속도에 따른 분사유량의 변화를 관찰하였다. 여기서 레일 압력 1.5bar는 실에서 사용되는 조건이다. 둘째, 레일의 압력은 1.5bar로 고정하고 인젝터간 편차를 확인하기 위해 1~4번 인젝터를 구동 속도를 변화시키면서 개별적으로 구동하여 분사유량의 변화를 확인하였다(정적 분사). 마지막으로 레일 압력 1.5bar에서 실제 기관에서 작동하는 상태를 가정하여 구동 속도를 변화시키면서 4개의 인젝터를 순차분사(sequential injection)하였다(동적 분사).

인젝터 구동 펄스폭은 5msec로 고정하였고, 구동 방식은 4A/1.5A 픽앤드홀드(pick and hold) 방식을 적용하였다. 분사유량 측정은 3회를 반복하여 평균을 구하였는데 1회당 200-300회를 연속으로 분사하였기 때문에 총 600-900 분사의 평균이 인젝터 1회 분사 당 분사유량으로 사용되었다.

또한 차량 주행 상태에서도 인젝터의 구동 신호를 포착하여 분사 특성과 비교하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 시스템 특징

NG 개조 차량은 이중연료 시스템이므로 개조 전 차량의 분사시스템을 그대로 유지한 채 부가적으로 NG 시스템을 장착하여야 한다. 따라서 통상적인 분사 위치에 NG용 인젝터를 장착할 수 없으므로 흡기 매니폴드에 흡기 포트와 인접한 부위에 연료 공급 노즐을 장착하고 이를 인젝터와 배관으로 연결하여 연료를 공급한다. 인젝터와 연료 레일은 일체로 조립되어 엔진 룸 내에 장착이 가능한 곳에 위치하므로, 기관에 따라 노즐에서 150-200mm 떨어져 있다. 장착 공간의 제약으로 인젝터와 연료 레일의 전체 크기도 제약을 받아 Fig. 2에 도시되어 있듯이 4개의 인젝터가 매우 근접하여 있고 레일의 체적도 매우 작아 5.3cc에 불과하다. 이러한 구성은 다음과 같은 문제점을 야기할 수 있다.

첫째, 분사된 연료 중 해당 사이클에 바로 유입되는 연료의 비율이 높을수록 공연비 제어의 정밀도를 높일 수 있고, 이것이 순차분사를 실시하는 이유 중의 하나이다. NG 개조 시스템에서는 인젝터와 흡

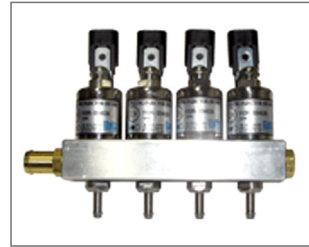


Fig. 2 Injector and fuel rail assembly of NG conversion kit

입 밸브가 상당히 멀리 떨어져 있기 때문에 이러한 측면에서 불리하다. 특히 기관이 과도(transient) 운전 중에 있을 때 더욱 불리한 상황이 발생할 수 있다.

둘째, 레일의 체적이 적어 일정한 분사압력의 유지가 어려울 가능성이 있다. 이 부분은 분사유량 측정 결과를 참고하며 뒤에서 논의하겠다.

3.2 정적 분사 특성

Fig. 3에 레일 압력이 1.5bar일 때 각 인젝터의 구동 속도에 따른 분사유량의 변화를 나타내었다.

먼저 분사 절대량을 도시한 Fig. 3(a)를 보면, 아이들 속도를 상사한 600 RPM에서 분사유량은 평균적으로 13cc 정도이지만 6000 RPM에서는 5cc 근방으로 대폭 감소한다. 그리고 저속에서는 인젝터별로 분사유량의 편차가 상당히 크지만 고속으로 갈수록 절대량의 차이는 감소한다. 추가로 속도에 따른 분사유량의 감소는 직선적이지 않고 3000 RPM까지는 급속히 감소하다 이후 감소 비율이 줄어드는 점근적 형태를 보여주고 있다.

각 운전 속도에서 4개 인젝터의 평균 분사유량에 대한 인젝터의 상대량을 도시한 Fig. 3(b)를 보면, 인젝터 간 그리고 속도에 따라 분사유량의 차이가 크게 나타나고 있다. 속도에 따라 약간의 차이는 관찰되지만 대체로 1, 2번 인젝터의 분사유량이 평균값보다 적고 3, 4번의 분사유량은 많다. 그리고 각 운전 속도에서 인젝터 사이의 편차는 5-10% 정도로 나타나는데, 특히 600과 6000 RPM에서는 10%를 넘고 있다. 이와 같이 인젝터 사이의 분사유량 편차 원인은 인젝터 단품 간의 차이와 레일 압력의 미세한 변화에 의한 것으로 추측된다.

600 RPM에서의 분사유량을 기준으로 속도 변화에 따른 분사유량의 변화를 도시한 Fig. 3(c)에서 관

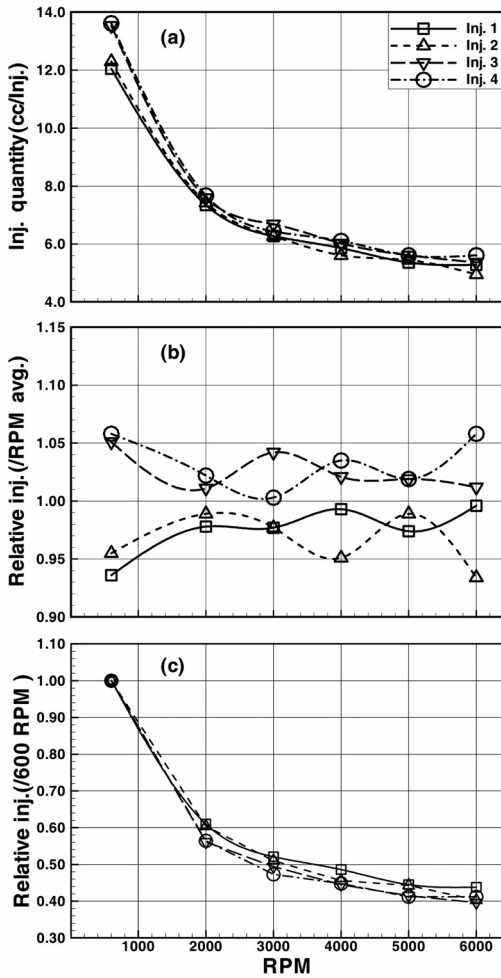


Fig. 3 Static injection characteristics of NG injectors as a function of speed (a) Absolute quantity, (b) Relative injection per 4 injectors average at same speed and (c) Relative injection compared to injection at 600 RPM

찰되는 것은 600RPM에서 6000RPM으로 속도가 10 배 증가하면 분사유량은 60% 정도 감소한다는 것과, 600 RPM에서 분사유량이 많은 3, 4번 인젝터가 속도 증가에 따른 분사유량의 감소가 크다는 것이다.

분사 특성 중, 속도 증가에 따라 분사유량이 감소하고, 그 감소폭이 매우 큰 부분은 동적 분사 결과와 함께 논의하도록 한다.

3.3 동적 분사 특성

Fig. 4는 구동 속도를 변경하면서 4개의 인젝터를 순차 분사하여 분사유량을 측정된 결과이다.

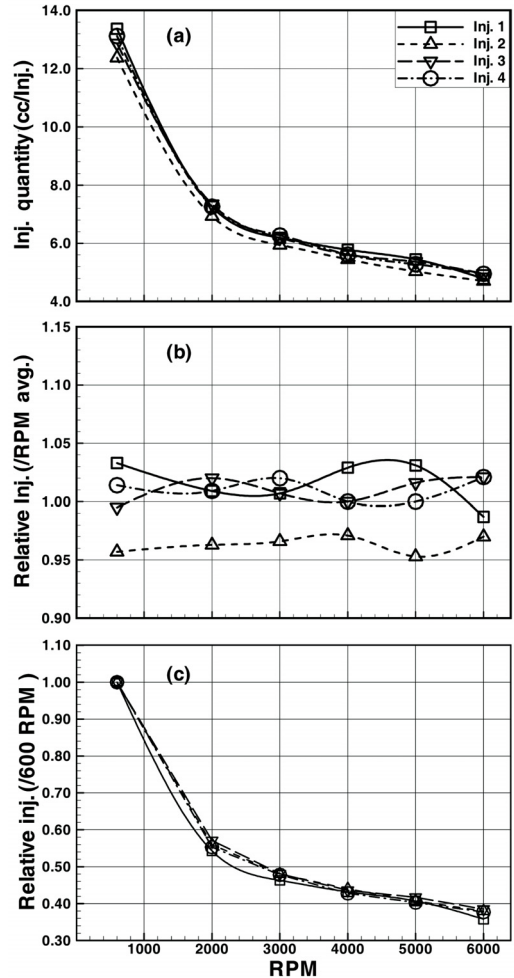


Fig. 4 Dynamic injection characteristics of NG injection system as a function of speed (a) Absolute quantity, (b) Relative injection per 4 injectors average at same speed and (c) Relative injection compared to injection at 600 RPM

동적 분사 특성은 전체적으로 정적 분사 특성과 매우 유사한 특성을 보여주고 인젝터별 그리고 속도 별 분사유량도 크게 차이가 나지 않지만, 세밀히 관찰하면 몇 가지 다른 특성을 발견할 수 있다.

먼저 절대량을 나타낸 Fig. 4(a)를 보면 정적 분사에 비해 1, 2번 인젝터의 분사유량이 소폭 증가하고 반면 3, 4번은 감소하여 인젝터 간 분사유량의 차이가 다소 줄었다. 그러나 4개의 인젝터 중 2번 인젝터의 분사유량이 항상 가장 적게 나타났는데, 이러한 경향은 각 운전속도의 평균값에 대해 개별 인젝터의 상대적인 분사유량을 나타낸 Fig. 4(b)에서 보다

명확히 나타난다. 즉 1, 3, 4만 고려하면 인젝터 사이의 편차는 1-3%로 비교적 적은 반면, 2번 인젝터는 다른 인젝터에 비해 평균적으로 4% 정도 분사유량이 적음을 알 수 있다. 이 현상은 이후 진행된 다른 실험에서도 일관되게 관찰되었는데, 발생 원인에 대해서는 아직 정확한 해석을 내리기 어렵다. 레일 내 압력 분포와 관련이 있다고 추측되지만 보완 실험을 실시한 후 후속연구에서 다루기로 한다.

Fig. 4(c)의 600 RPM에서의 분사유량을 기준으로 속도 변화에 따른 분사유량의 변화를 보면 감소 패턴은 정적 분사보다 인젝터 간의 차이가 줄어들음을 알 수 있다.

추가적으로 정적 분사의 경우 3000 RPM 이후 점근적 감소 경향을 지녀 5000과 6000 RPM에서의 분사유량에 큰 차이가 없으나 동적 분사의 경우 감소의 경향이 직선적이다. 이 결과 6000 RPM에서의 분사유량은 600 RPM에서의 분사유량의 40% 이하이다.

한편, 기관에서 연료시스템의 역할은 전체 운전 영역에 걸쳐 기관의 운전에 요구되는 조건을 만족시킬 수 있는 공기-연료의 혼합기를 대기의 공기와 연료탱크 내의 연료로부터 준비하는 것이다. 통상적인 액체 연료 분사시스템의 경우, 동일한 분사 펄스폭에 대해 분사되는 연료의 양은 운전 속도와 무관하게 거의 일정하다. 따라서 연료 분사유량(또는 펄스폭)은 부하 또는 1사이클 당 흡입 공기량에 의해 결정되므로, 사이클 당 흡입 공기량이 같다면 동일한 공연비를 조성하는데 요구되는 분사 펄스의 폭은 운전 속도의 영향을 받지 않는다. 실제의 경우에도 공기량 센서에 의한 사이클 당 흡입 공기량 측정값이 같은 경우, 속도가 다르더라도 분사 펄스의 폭의 변화는 매우 미세하다. 이러한 미세한 변화도 속도에 따라 분사유량이 변화기 때문에 발생하기 보다는 속도에 따라 흡입관 내의 맥동 등에 기인한 공기량 측정의 오차에 의해 발생한다.

그러나 가스 분사의 경우 정적 및 동적 분사 특성에서 모두 관찰되었듯이 운전 속도 증가에 따라 분사유량이 급속히 감소하고 있다. 이러한 현상의 원인과 이로 인해 발생할 수 있는 문제점을 논의하면 다음과 같다.

우선, 속도 증가에 따라 분사유량이 감소하고, 그

감소폭이 매우 큰 것은 연료 레일의 체적이 충분하지 않기 때문에 발생된 것으로 판단된다.

즉, NG 개조 차량의 연료 레일 체적은 Table 1에 제시된 바와 같이 5.3cc인데 이것은 레일의 압력을 고려하더라도 600 rpm에서 1개 인젝터의 1회 분사유량 13cc와 거의 같다. 따라서 레일에는 1회 분사유량 정도의 연료만 있기 때문에 분사에 의해 압력이 급속히 저하되고, 동시에 압력 조절기를 통한 연료의 추가적인 공급도 충분히 빠르게 일어나지 않기 때문인 것으로 판단된다.

이러한 레일 체적의 영향을 확인하기 위하여 NG 개조 차량의 연료 레일 대신 별도로 체적을 증가시킨 레일을 적용하여 정적 분사 특성을 파악한 결과를 Fig. 5에 제시하였다.

그림에서 알 수 있듯이 레일 체적이 변하면 분사 특성도 변하는데, 레일의 체적이 100cc인 경우 3000RPM 이후 분사유량의 변화가 나타나며 그 변화의 폭도 기존 NG 시스템보다 매우 적다. 아울러 레일 체적이 430cc인 경우 속도에 따른 분사유량의 변화는 관찰되지 않았다.

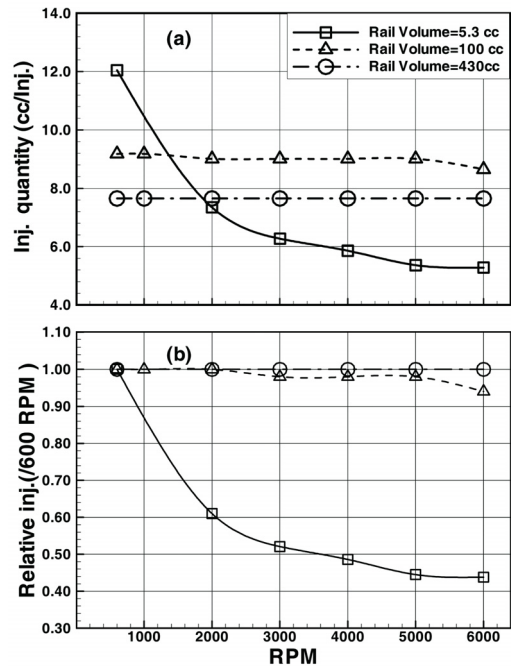


Fig. 5 Static injection characteristics according to rail volume as a function of speed (a) Absolute quantity and (b) Relative injection compared to injection at 600 RPM

결과적으로 레일의 체적이 증가할수록 1회 분사 유량에 비해 레일에 충전된 양이 많기 때문에 속도 증가에 따른 분사유량의 차이(압력)는 극복할 수 있고, 장차 공간 등을 고려할 때 최적화된 체적의 선정이 중요하다고 할 수 있다.

또 다른 중요한 현상은 레일 체적 증가에 따라 속도 변화에 대한 분사유량의 차이는 줄지만 절대 분사유량은 줄어든다. 이 현상 역시 현재로서는 정확한 해석이 어려우므로 이후 연구를 통해 논의하기로 한다.

이상과 같이 레일 체적을 증가시킴으로써 분사 특성을 개선할 수 있다는 것을 논의하였지만, 중요한 것은 현재와 같이 체적이 작은 레일을 사용하는 경우, 분사 특성이 기관의 제어 및 성능에 미치는 영향이고, 다음과 같은 문제점이 예상된다.

첫째, 속도에 따른 분사유량의 편차가 크고 동시에 감소 형태가 직전식이 아니기 때문에 정밀하게 공연비를 제어하기 위해서는 속도 및 부하에 대한 분사유량 맵 데이터를 매우 조밀하게 구성해야 한다. 왜냐하면 분사유량의 제어의 최대값은 기본 설정 값에 따라 달라지므로, 목표하는 유량이 변경 최대값을 벗어나면 제어가 불가능하기 때문이다.

둘째, 특정 인젝터의 분사유량이 다른 것에 비해 현저히 차이가 나는 경우, 공연비 제어를 통해 총 공연비는 제어가 가능할 수 있어도 개별 실린더의 공연비는 이론 공연비를 벗어날 수밖에 없기 때문에 연비와 기관의 안정성은 저하된다. 이를 해결하기 위해서는 개별 실린더 별 공연비 제어를 적용해야 하지만, 개조 시스템에 추가로 적용하는 것은 현실적으로 불가능하다.

마지막으로 가장 중요한 것은 연료 분사유량이 기관에서 요구되는 양의 만족 여부인데, 이에 대해 검토해 보겠다.

시험 대상인 NG 개조차는 배기량 2000cc, 4기통이므로 기통 당 배기량은 500cc가 되고, 전부하에서 $\lambda=0.9$ 정도의 연료 증량을 실시하면 사이클 당 그리고 기통 당 47cc(체적 효율 $\eta_v=0.9$) ~ 53cc(체적 효율 $\eta_v=1.0$)의 연료가 공급되어야 한다. 현재 개조 시스템이 이러한 조건을 만족하는지에 대해 다음과 같이 검토하였다.

분사되는 연료량은 분사 펄스폭이 일정 수준이상이면 펄스폭 증가에 따라 거의 직선적으로 증가한다. 분사 펄스폭이 매우 짧을 때는 인젝터의 니들이 기계적으로 거동하는데 필요한 시간보다 분사 펄스폭이 작기 때문에 분사가 발생하지 않는다. 본 연구에서 개조차 시스템을 대상으로 확인한 결과 레일의 압력에 따라 1.4msec(1.5 bar) ~ 2.5msec(6.0 bar) 이하에서는 분사가 불가능하였다. 예를 들어 레일 압력 1.5bar에서 분사 펄스폭이 5msec인 경우 실제 분사(유효분사) 기간은 3.6 msec이다.

한편 통상적으로 전개(WOT, wide open throttle) 운전의 경우 분사 펄스폭은 13msec 정도인데, NG 개조차 시스템에서 유효분사기간을 고려하면 13msec에서의 분사유량은 5msec에서의 분사유량의 3.2배이다. 13msec에서 분사유량을 측정하여 5msec의 분사유량과 비교한 결과, 조건에 따라 약간의 차이는

Table 2 Estimated injection pulse width for WOT operation according to engine speed

Speed (RPM)	Q_5	Q_1	T_{i1}	T_{i2}	T_c
600	12.9	3.6	14.5	16.2	200.0
2000	7.2	2.0	24.9	27.9	60.0
3000	6.1	1.7	28.9	32.4	40.0
4000	5.6	1.6	31.6	35.4	30.0
5000	5.3	1.5	33.4	37.5	24.0
6000	4.8	1.3	36.3	40.8	20.0

Q_5	Quantity (cc) / 5 msec
Q_1	Quantity (cc) / unit effective period
T_{i1} (msec)	Pulse width needed for WOT ($\eta_v=0.9$)
T_{i2} (msec)	Pulse width needed for WOT ($\eta_v=1.0$)
T_c (msec)	Time duration of 1 cycle

있지만 5msec 대비 13 msec의 분사유량은 2.7 ~ 3.3 배 정도이고 평균적으로 3근방임을 확인하였다. 따라서 유효 분사기간 1msec당 분사유량을 구하여 분사 기간에 따른 분사유량을 근사적으로 예측하여도 충분히 논의를 할 수 있다.

유효분사기간 1msec당 분사유량을 기준으로 요구되는 분사 펄스폭을 계산하여, 앞에서 언급한 기통 당 사이클 당 전개 운전에서 필요한 펄스폭을 기관 속도별로 계산한 결과를 Table 2에 제시하였다. 이때 계산은 동적 분사 특성에서 측정된 평균값을 기

준으로 하였다.

Table 2에 제시되어 있듯이, 현 개조차에 사용되는 분사 시스템의 경우 4000 RPM 이상에서는 1 사이클 당 소요시간보다 연료 공급에 필요한 펄스폭이 더 길다. 즉 인젝터를 간헐적으로 구동하지 않고 전 사이클 동안 개방하고 있어도 기관에서 요구되는 연료량을 공급하지 못한다.

실제로 이러한 현상은 차량 운전 중에도 관찰이 되었는데, 차량 운전 중에 분사 펄스폭을 측정된 결과 아이들 운전(655RPM)에서 분사 펄스폭은 5msec (20°C)인데 비해 운행 중 3044RPM에서는 펄스폭이 19.1msec(349 CA)가 되었고 4000 RPM 이상에서는 인젝터가 계속 개방되어 있었다. 동시에 공연비 피드 백 제어는 구현되지 않았다.

이를 근거로 추측해 보면 일단 속도 증가에 따라 분사유량이 감소하는 현상에 대한 대책은 1차적으로 개조차 시스템의 연료 분사 맵에 반영되어 있는 것으로 판단된다. 그러나 요구되는 절대량에 대한 고려는 없는데 이는 다음과 같은 것이 원인으로 판단된다.

개조차에 사용되는 분사시스템은 해외에서 LPG/CNG 겸용으로 개발된 시스템을 참조한 것으로 판단되는데, 실제 애프터마켓에서 대부분의 개조는 LPG를 대상으로 한다. 따라서 개조 시스템은 분사유량을 LPG 기준으로 하였기 때문에, NG에 적용할 때 이를 반영하지 않고 맵을 구성하면 정확한 분사유량을 구현하는 것이 불가능하다.

즉 LPG의 주성분인 프로판과 부탄 중 분자량이 작은 프로판으로 가정하여도 NG에 비해 40%의 분사유량이면 충분한데, 이 경우 6000 RPM에서 필요한 분사시간은 15.4 ~ 17.3 msec로 사이클 시간 내에 들어오므로 사용이 가능하다.

결론적으로 기관의 기통 당 배기량이 같은 경우 동일한 분사 용량을 가진 분사 시스템을 LPG와 NG에 동시에 적용할 수 없고, NG 개조의 경우 분사유량이 2-3배 정도 더 큰 시스템을 채택해야 한다.

한편 분사유량의 증대는 반드시 인젝터 용량의 증대에 의해서만 가능한 것이 아니라 연료 공급 압력의 증대를 통해서도 가능하다. 따라서 현 개조 시스템에서 분사 압력을 높인 경우 분사유량의 변화

를 측정하여 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다.

먼저 레일 압력 1.5 ~ 6bar에서 속도에 따른 분사유량의 변화를 나타낸 Fig. 6을 보면, 압력 증가에 의해 분사유량의 증가는 당연한 것이지만 변화의 경향에는 압력에 따라 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

먼저 분사유량을 나타낸 Fig. 6(a)를 보면, 속도에 따른 분사유량의 감소는 압력과 무관하게 거의 일정하고 동시에 압력이 높은 경우(5, 6 bar), 3000 RPM 이상에서 속도 증가에 따른 분사유량의 감소는 나타나지 않는다. 따라서 동일한 압력에서의 분사유량을 모두 평균한 값에 대해 각 운전 속도에서 상대적인 값을 도시한 Fig. 6(b)와 600 RPM 대비 분사유량의 저하를 보여주는 Fig. 6(d)에서 보듯이 압력이 높을수록 속도에 따른 분사유량의 경향이 완화된다. 아울러 동일한 운전 속도 평균값에 대한 압력에 따른 편차를 관찰할 수 있는 Fig. 6(c)를 보면, 6bar의 경우 3000 RPM 이상에서의 분사유량이 600 RPM 분사유량의 70% 수준을 유지하고 있음을 알 수 있다.

동일한 운전 속도에서 압력에 대한 분사유량을 나타낸 Fig. 7(a)에서 분사유량은 압력 상승에 따라 거의 직선적으로 증가함이 관찰되며, 속도와 관계없이 증가의 기울기도 거의 같다. 그러나 동일한 압력에서의 분사유량 평균값에 대한 상대적 양을 운전 속도 별로 도시한 Fig. 7(b)를 보면, 600 RPM의 경우 분사유량은 많지만 압력이 증가할수록 그 증가는 오히려 감소하고 있으며, 2000 RPM에서는 압력과 무관하게 거의 일정하고, 3000 RPM 이상에서는 서서히 증가한다. 이것은 압력이 낮을수록 속도에 따른 분사유량의 편차가 증가하기 때문이다.

동일 속도에서의 평균값에 대한 개별 운전속도에서 분사유량 경향을 나타낸 Fig. 7(c)에서, 압력 증가에 따른 분사유량 증가의 기울기는 3.0 ~ 4.0 bar 사이의 피봇 점을 중심으로 저압에서는 저속일수록 고압에서는 고속일수록 평균 분사유량보다 분사유량이 많음을 알 수 있다.

마지막으로 1.5 bar 분사유량에 대한 상대적인 분사유량을 도시한 Fig. 7(d)를 보면, 압력 증가에 따라 분사유량은 모든 속도에서 압력 증가에 따라 분사유량은 직선적으로 증가하지만, 속도가 빠를수록 증가의 기울기가 더 큼을 알 수 있다. 이는 Fig. 7(a)

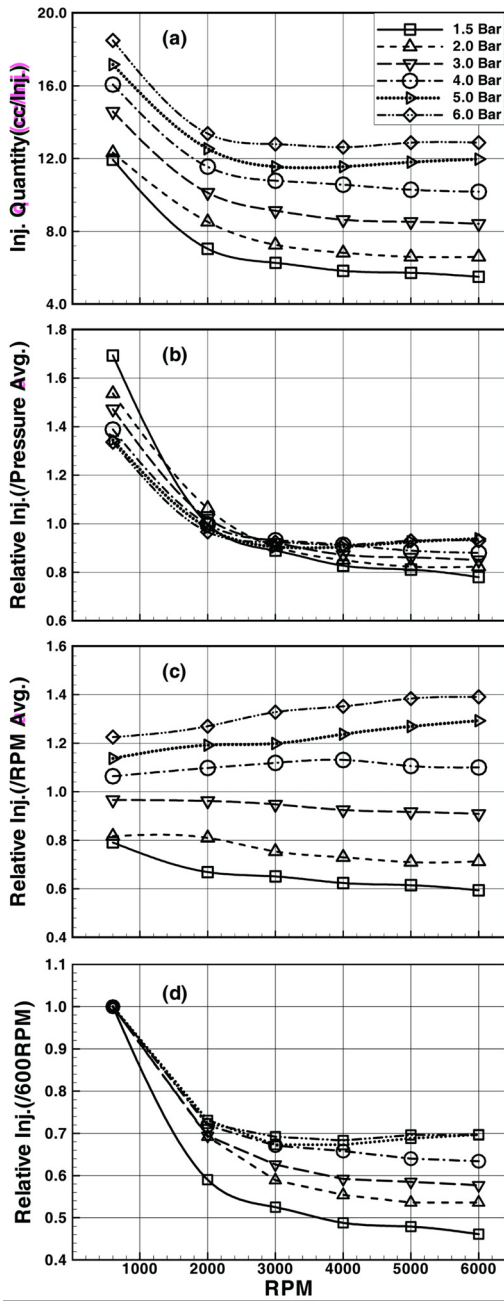


Fig. 6 Static injection characteristics according to rail pressure as a function of speed (a) Absolute quantity and (b) Relative injection per average at same pressure, (c) Relative injection per average at same speed and (d) Relative injection compared to injection at 600 RPM

에서 보듯이 절대량 증가의 기울기가 거의 비슷하므로, 1.5bar에서 분사유량이 적은 고속에서 상대적

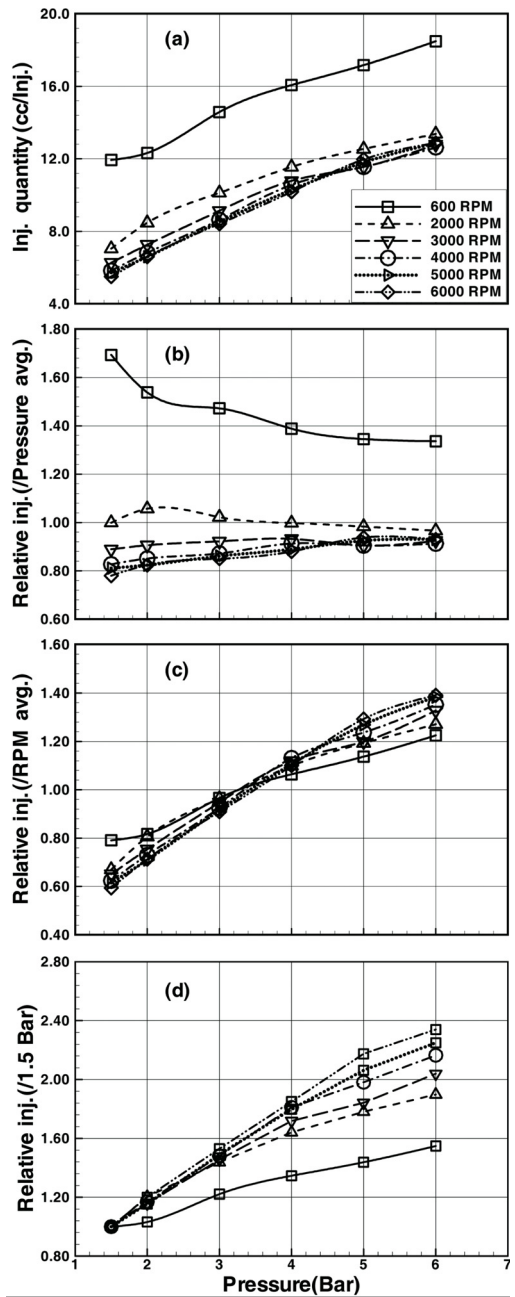


Fig. 7 Static injection characteristics according to speed as a function of rail pressure (a) Absolute quantity and (b) Relative injection per average at same pressure, (c) Relative injection per average at same speed and (d) Relative injection compared to 1.5 bar

인 분사유량 증가가 더 크게 나타났기 때문이다. 이상과 같이 레일의 압력을 높임으로써 당연히

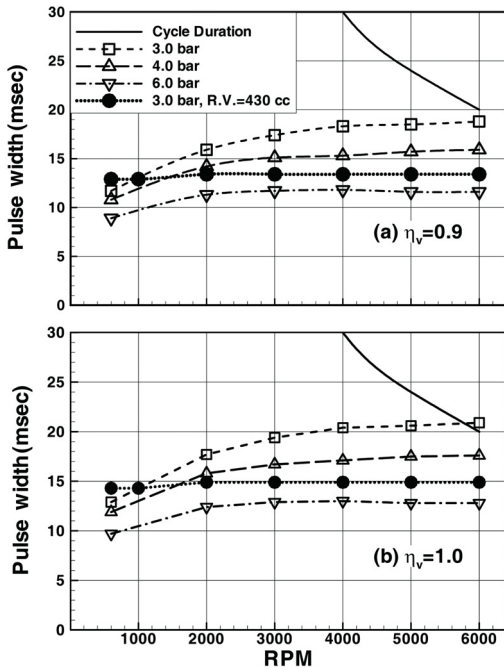


Fig. 8 Estimated injection pulse width for WOT operation as a function of engine speed according to rail pressure

나타나는 분사유량 증대 이외에도 속도 증가에 따른 분사유량 감소의 경향도 상당부분 개선되는 부수적 효과도 동시에 얻을 수 있었다. 여기서도 분사유량 증가 자체보다도 증가된 분사유량이 기관에서 요구되는 양을 만족시키는지의 여부가 중요하므로, 이에 대한 조사 결과를 Fig. 8에 제시하였다.

그림에서 알 수 있듯이 레일 압력이 3 bar 정도이면 기관 전 영역에 걸쳐 요구되는 연료량을 만족시키는 것이 가능하지만, 분사 펄스폭과 실제 분사유량이 정확히 직선적인 관계를 가지는 것은 아니고, 아울러 주행 중 온도 상승 등에 의해 연료의 밀도가 감소하는 경우를 고려하면 이 압력으로 모든 조건을 충분히 만족시킨다고 보기는 어렵다.

압력이 4 bar를 넘어서면 전 운전영역에 걸쳐 분사유량의 확보에는 문제가 없지만, 레일 압력이 높으면 앞서 언급한 바와 같이 니들 작동 시간이 증가하여 유효 분사 기간이 감소하므로, 정밀한 공연비 제어가 요구되는 저부하 영역에서 분사유량의 제어에 문제가 발생할 수 있다.

한편 앞에서 살펴본 바와 같이(Fig. 5) 레일의 체

적을 증가시키면 저속에서의 분사유량은 감소하지만 속도에서 다른 분사유량의 편차가 크게 개선되었다. Fig. 8에 제시되어 있듯이 체적을 증가시키고 압력을 높이면(3.0bar 430cc rail volume), 저속에서 요구되는 펄스폭은 증가(즉 단위 시간당 분사유량은 감소)하지만 펄스폭은 전 체 운전 구간에 걸쳐 큰 변화 없이 유지되는 특성을 보여주고 있다.

결론적으로 레일 압력 증가를 통해 분사 유량을 확보하고 동시에 레일 체적 증가를 통해 펄스폭 당 분사유량의 일관성을 확보하는 것이 바람직하다.

종합하면, NG를 자동차용 연료로 사용하고 분사시스템으로 연료 공급을 하고자 할 때는, 요구되는 연료의 체적이 크다는 특성을 고려하여 분사시스템을 구성해야 하며, 이를 위해 레일 체적과 압력을 동시에 고려하여 최적화하는 것이 중요하다.

4. 결론

NG 개조차에 사용되는 분사시스템의 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동적 및 정적 분사에 관계없이 동일한 분사 펄스폭에 대해 1회 분사 당 분사유량은 속도 증가에 따라 감소하는데, 이 현상은 연료 레일의 체적이 지나치게 작기 때문에 발생한다.
- 2) 동적 분사에서 2번 인젝터의 분사유량이 다른 인젝터에 비해 항상 적다.
- 3) 연료 레일의 체적을 증가시키면 속도 증가에 따른 연료 분사유량의 감소는 개선되거나 발생하지 않는다.
- 4) 현재 개조 시스템에 적용되는 연료 레일 체적과 압력으로는 기관에서 요구되는 분사유량을 충분히 공급할 수 없다.
- 5) 분사유량 확보와 정밀한 연료량 제어를 위해서는 레일의 압력과 레일 체적을 동시에 고려한 최적화가 요구된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) N. Jung, The Energy News, <http://www.energy-news.co.kr>, 2012.
- 2) N. Jung, The Energy News, <http://www.energy-news.co.kr>, 2014.
- 3) M. Choi, The Yeongnamilbo, <http://www.yeongnam.com>, 2014.
- 4) The Korea Transport Institute, Research Report on Invigorating Policy of CNG Taxi Supply, p.53, 2013.
- 5) H. Kim, I. Kim and I. Ohm, "Experimental Study on Natural Gas Conversion Vehicle(1) - Fuel Economy, Emission and Roadability," Transactions of KSAE, Vol.23, No.4, pp.410-419, 2015.
- 6) K. Min, C. L. Myung, C. H. Chang and K. J. Yoon, "Development of HMC's Natural Gas Vehicle," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.187-193, 1994.
- 7) Z. Meng, S. Kwon, S. Choi, C. Park and I. Ohm, "Fuel Injection Characteristics of Gas Fuel according to Fuel-rail Pressure," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.260-261, 2015.