



# 연료 레일 체적이 가스분사 특성에 미치는 영향(1) - 분사 유량

## Effects of Fuel Rail Volume on Gas Injection Characteristics (1) - Injection Quantity

곽윤기\* · 김형구\*\* · 현지혜\*\*\*† · 엄인용\*\*\*\*

Youn-Ki Kwak\*, Hyung-Ku Kim\*\*, Ji-Hye Hyun\*\*\*† and In-Yong Ohm\*\*\*\*

(Received 15 May 2019, Revision received 09 August 2019, Accepted 12 August 2019)

**Abstract:** This study is to investigate the fuel injection characteristics according to fuel injection pressure, injection pulse width and engine speed in a gas fuel supply system. A current conversion kit consisting of 5 cc volume fuel rail and injector is mainly used. In addition, the fuel rails with the volume of 100, 200, and 435 cc are compared to verify the fuel rail volume effect. Compressed air was used as an analogous fuel, and sequential injection was performed using an injector driver that controls injection pulse width. The fuel injection quantity was measured using water transposition method. The injection pressure, injection duration, and engine speed were set in four steps, respectively, considering the actual engine operation. For the most part, the higher the fuel pressure and the longer the injection period, the higher the injection flow. In contrast, the higher the engine speed, the lower fuel quantity. If the natural gas was used as the fuel at 6,000 rpm wide open throttling operating condition of the 2,000 cc 4-cylinder engine, at least 53 cc of single injection per each cylinder was required. The minimum injection quantity should be 5 cc or less for smooth fuel quantity control. At all conditions the minimum injection quantity was much greater than 5 cc. At full load conditions, the fuel injection pressure of 1.5 bar did not meet 53 cc. If the injection pressure was increased, the injection quantity became excessive nonetheless. On the other hand, the volumetric effect was visible only in the very difference such as between 5 and 435 cc. When the volume of the fuel rail was increased, it was advantageous in securing a precise fuel metering characteristic and could satisfy maximum injection requirement. However, the minimum injection requirement was still excessively great.

**Key Words :** Gas injection, Rail volume, Injection pressure, Injection pulse width, Engine speed

---

\*\*\*† 현지혜(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-7633-6190>) \*\*\*† Ji-Hye Hyun(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-7633-6190>)  
 : 대학원생, 서울과학기술대학교 일반대학원 기계공학과 : Graduate student, Department of Mechanical Engineering, The Graduate School, Seoul National University of Science and Technology.  
 E-mail : nk.kyrie@gmail.com, Tel : 02-970-7266

\*곽윤기(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-4790-2980>) E-mail : nk.kyrie@gmail.com, Tel : 02-970-7266  
 : 대학원생, 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과 \*Youn-Ki Kwak(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-4790-2980>)  
 : Graduate student, Department of Energy System Engineering, The Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science and Technology.

\*\*김형구(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7546-0576>) \*\*Hyung-Ku Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7546-0576>)  
 : 스피드메이트 사업부, SK 네트워크 : Department of Speed Mate, SK Networks.

\*\*\*엄인용(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0937-3981>) \*\*\*In-Yong Ohm(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0937-3981>)  
 : 교수, 서울과학기술대학교 기계공학과 : Professor, Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology.

## 1. 서 론

최근 이산화탄소 배출량을 줄이기 위한 방법으로 천연가스(NG, natural gas)가 대체연료로써 주목을 받고 있다.<sup>1-4)</sup> 하지만 천연가스용으로 개조한 차량을 대상으로 한 선행 연구에서 현재 애프터마켓의 상용 개조키트를 장착할 경우 이산화탄소 배출량은 감소하지 않고 오히려 연비가 악화되는 것으로 확인되었다.<sup>5)</sup> 이와 같은 성능 악화는 개조 시스템에 채택된 연료 공급 시스템이 기관에서 요구되는 분사유량을 충분히 공급하지 못하기 때문인 것으로 파악되었다.<sup>6)</sup> 따라서 자동차용 연료로 가스 연료를 사용하기 위해서는 우선적으로 연료 공급 시스템의 최적화가 요구되는데, 가스 연료는 압축성 유체이므로 고려해야 할 요소가 많음과 동시에 이러한 요소들이 비선형적으로 연관되어 있기 때문에<sup>7-9)</sup> 보다 세밀한 조건별 조사를 필요로 한다. 이에 본 연구에서는 기존의 개조 시스템에 적용되는 5 cc 연료레일을 기준으로 하여 연료 압력과 분사 기간, 기관 속도에 따른 분사 유량 특성을 검토하고, 추가적으로 이를 다른 체적과 비교 분석하여 가스 연료 분사 시스템의 개선 방향을 도출하고자 한다.

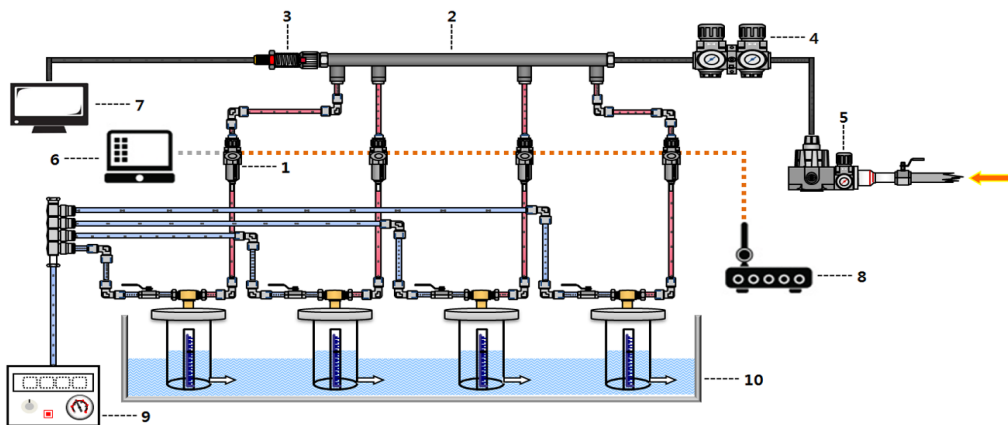
## 2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 장치의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 압력조절기를 사용하여 연료의 공급 압력을 조절하였고, 인젝터 구동드라이버(IC 5160)를 이용하여 순차 분사를 실시하였다. 실험에 사용한 연료레일과 인젝터의 사양을 각각 Table 1과 Table 2에 제시하였다.

천연가스 대신 압축공기를 사용하였으며, 연료 분사량은 수치환산법으로 측정하였다. 진공 펌프를 이용하여 물이 담겨 있는 아크릴 실린더의 내부 압력을 낮춰 수위를 일정 수준으로 높인 후, 실험 조건에 따른 분사를 실시한다. 실린더의 상

Table 1 Specifications of fuel rail

Rail volume(cc)	5	100	200	435
Rail location	Remote		Intake manifold	
Rail diameter(mm)	7.5	20	30	40
Rail length(mm)	120	324	285	350
Feeding	Side		Top	
Figure	Commercial assembly	Gasoline fuel rail	Manufactured gas rail	



1. Injector	2. Fuel Rail	3. Pressure Sensor	4. Pressure Regulator	5. Air Compressor
6. Oscilloscope	7. Piezoresistive Amplifier	8. Injection Control Unit	9. Vacuum Pump	10. Acylic Cylinder

Fig. 1 Schematics of injection quantity measurement device

부가 인젝터의 출구와 연결되어 있기 때문에 분사를 실시하면 실린더 내의 압력이 증가하여 수위가 내려간다. 분사 전의 수위와 분사 종료 후의 수위의 차에 실린더 단면적을 곱하여 분사량을 구하고, 이를 분사회수로 나누어 1회 분사당 분사량을 구한다. 본 연구에서의 분사량은 1회 분사당 분사량을 의미한다.

Table 2 Specifications of injector

Model	BF-320	Genius 1500 Max (Keihin)
Drive	Peak and Hold 4A/1.5A	
Feeding	Side	Top
Pressure(bar)	~3.0	~3.9
Working Temperature(°C)	-40~125	-35~120
Operating Voltage(VDC)	7~15	6.3~16
Coil Resistance	2.2±0.1 Ω at 20°C	1.25±0.06 Ω at 20°C
Coil Inductance	-	3.5±0.4 mH at 20°C
Flow Rate	-	120.1 mm <sup>3</sup> /st at 20°C

Table 3 Condition of test

Speed(RPM)	750, 2000, 3000, 6000
Supply Pressure(bar)	1.5, 3.0, 4.5, 6.0
Injection Pulse Width(ms)	3, 5, 8, 13

실험 조건은 연료 압력, 분사 기간, 기관 속도 조건으로 구분하여 설정하였으며, Table 3에 요약하여 나타내었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

SI 기관의 경우 최대 RPM, 최고 토크의 정격 출력 운전 조건(통상적으로 6000 RPM, WOT)에서 연료분사시스템은 출력을 보장하는 충분한 분사량을 확보하는 것이 중요하다. 4기통 2000 cc(기통당 500 cc) 기관에 천연가스를 연료로 사용하는 경우 정격 출력 운전 조건에서 기통당 1회 분사량은 최소 53 cc를 확보해야 한다.

#### 3.1 연료 압력에 따른 분사 유량

Fig. 2는 동일한 기관 속도에서 연료 압력 변화

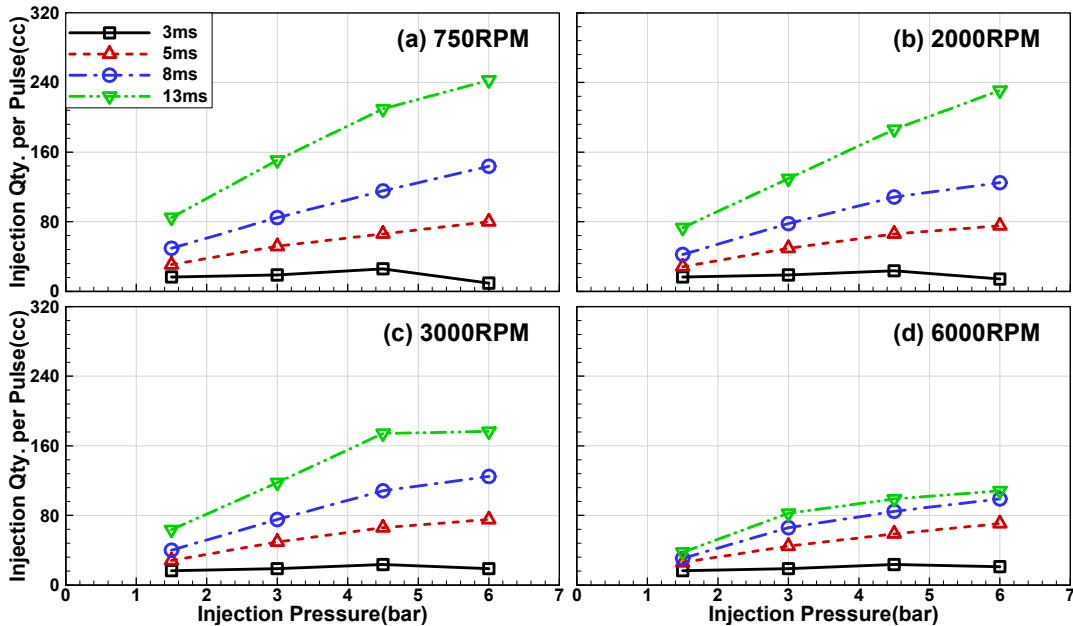


Fig. 2 Injection quantity per pulse as a function of injection pressure(rail volume=5 cc)

에 따른 1회 분사 당분사 유량의 절댓값 변화를 나타낸 그림이다.

분사 기간 3 ms를 제외한 모든 실험 조건에서 연료 압력이 증가함에 따라 분사 유량이 증가하며, 기관 속도가 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 3 ms는 아이들 조건을 상사한 것으로, 모든 기관 속도의 압력 조건에서 1회 분사 요구량 53 cc에 미치지 못한다. 이 외에도 다른 분사 기간 조건과는 다른 경향이 관찰되는데, 4.5 bar까지는 연료 압력이 증가함에 따라 분사 유량이 증가하다가 6.0 bar에서 감소한다. 이는 인젝터 구동과 관련하여 유효 분사 기간의 감소 효과가 압력 증가 효과보다 더 크기 때문이다.<sup>10)</sup> 또한 3 ms는 기관 속도가 증가함에 따라 6.0 bar에서의 절대 분사 유량이 증가하는데, 이 현상은 속도 증가에 따라 더 빠른 간격으로 인젝터에 구동 전류가 인가되었기 때문인 것으로 추측된다.<sup>10)</sup>

분사 기간 13 ms는 기관 속도 3000 rpm의 3.0 bar 이상에서 연료 압력 증가에 따른 분사 유량 증가가 급격히 둔화되는 경향을 나타낸다. 이는 연료레일 내부 압력 변동의 영향으로, 추후 논문

에서 자세히 논의하도록 하겠다.

정격 출력 운전 조건인 6000 rpm에서 기준 가스분사의 가장 낮은 레일 압력 수준인 1.5 bar는 모든 분사 기간이 1회 분사 요구량 53 cc에 부족하였으며, 5 ms는 4.5 bar 이상부터, 8 ms와 13 ms는 3.0 bar 이상부터 1회 분사 요구량을 충족하였다.

### 3.2 분사 기간에 따른 분사 유량

Fig. 3에 동일한 연료 압력에서 분사 기간 변화에 따른 1회 분사당 분사 유량 변화를 도시하였다. 앞서 살펴보았던 바와 마찬가지로, 분사 기간 3 ms는 연료 압력과 및 기관 속도와 관계없이, 또한 연료 압력 1.5 bar에서는 분사 기간 13 ms에서의 3000 rpm 이하 기관 속도 조건을 제외한 모든 조건에서 1회 분사 요구량 53 cc를 충족시키지 못한다.

연료 압력 별로 분사 기간과 분사 유량의 관계를 논의하면 다음과 같다. 연료 압력 1.5 bar에서 750 rpm과 1500 rpm은 모든 분사 기간 구간동안 분사 유량이 직선적으로 증가하며, 3000 rpm과 6000 rpm은 분사 기간 5 ms 이후부터 직선적 증

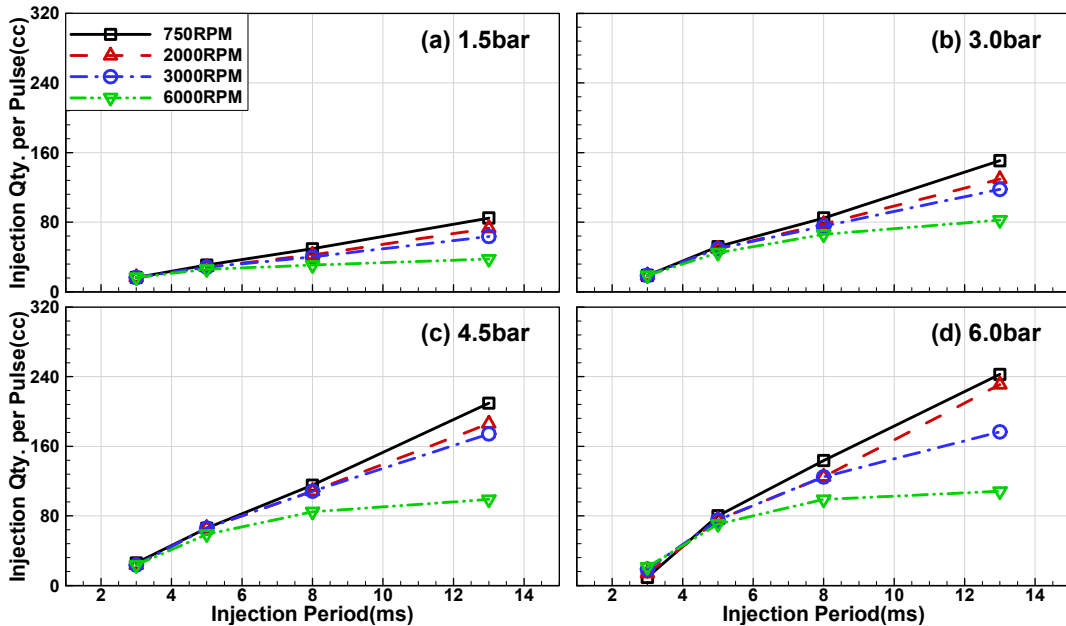


Fig. 3 Injection quantity per pulse as a function of injection period(rail volume=5 cc)

가 경향이 나타난다. 3.0 bar와 4.5 bar에서 3000 rpm 이하의 기관 속도는 5 ms 이후에 분사 기간과 분사 유량에 직선적 관계가 유지되지만, 6000 rpm은 13 ms에서의 증가가 급격히 낮아져 직선적 관계를 가지지 못하고 점근적으로 증가한다. 마지막으로 6.0 bar에서 750 rpm과 1500 rpm의 직선적 관계가 나타나지만, 3000 rpm과 6000 rpm은 다른 연료 압력에 비교하여 8 ms 이후의 기관 속도에 따른 분사 유량의 차이가 크게 벌어진다. 이는 분사 압력 및 기관 속도 증가에 따라 레일 내부 압력이 저하되기 때문인데, 이에 대한 자세한 데이터는 후속 논문을 통해 제시하여 검토하도록 하겠다.

### 3.3 기관 속도에 따른 분사 유량

기관 속도에 대한 분사유량 평가 시에는 전부하 조건에서 요구되는 연료량의 공급이 가능한가, 분사 기간이 일정할 때 운전 조건에 관계없이 일정한 수준의 분사 유량을 유지하는가, 제어 가능한 최소 분사 유량의 수준 등이 검토되어야 한다.

Fig. 4에 동일한 분사 기간에서의 기관 속도에 대한 분사 유량 절댓값 변화를, Fig. 5에는 750

rpm에서의 분사 유량으로 나누어 무차원화한 상대값 변화를 나타내었으며, 분사 기간 별로 검토하면 다음과 같다.

3 ms는 통상적으로 아이들 운전 조건에 해당하며 유량 제어가 가능한 최소 펄스폭이다. 니들 거동이 연료레일 압력에 의해 방해받아 불안정한 제어 특징이 나타나는 6.0 bar를 제외하면, 비교적 일정한 수준의 분사 유량을 모든 기관 속도 구간에서 유지하고 있기 때문에 아이들 운전에서 연료 유량 제어에는 문제가 없다. 반면, 원활한 연료량 제어를 위해 최소 분사 유량은 최대 분사 유량의 10% 이하인 5 cc 이하가 되어야 하는데, 가장 낮은 연료 압력인 1.5 bar에서 분사 유량이 15 cc 이상으로 측정되어 분사 유량이 과도한 것으로 판단된다.

5 ms는 실제 차량 운행에서 가장 자주 나타나는 분사 기간 부근이며, 저부하 운전 조건에 해당한다. 연료 압력에 따라 절댓값에 차이는 있지만, 상대값 변화의 차이가 10% 정도로 미미하므로 해당 부하까지는 연료 유량 제어에는 문제가 없다. 하지만 1.5 bar에서의 분사 유량이 30 cc 수준이므로, 이 분사 유량도 3 ms와 마찬가지로 과도하다.

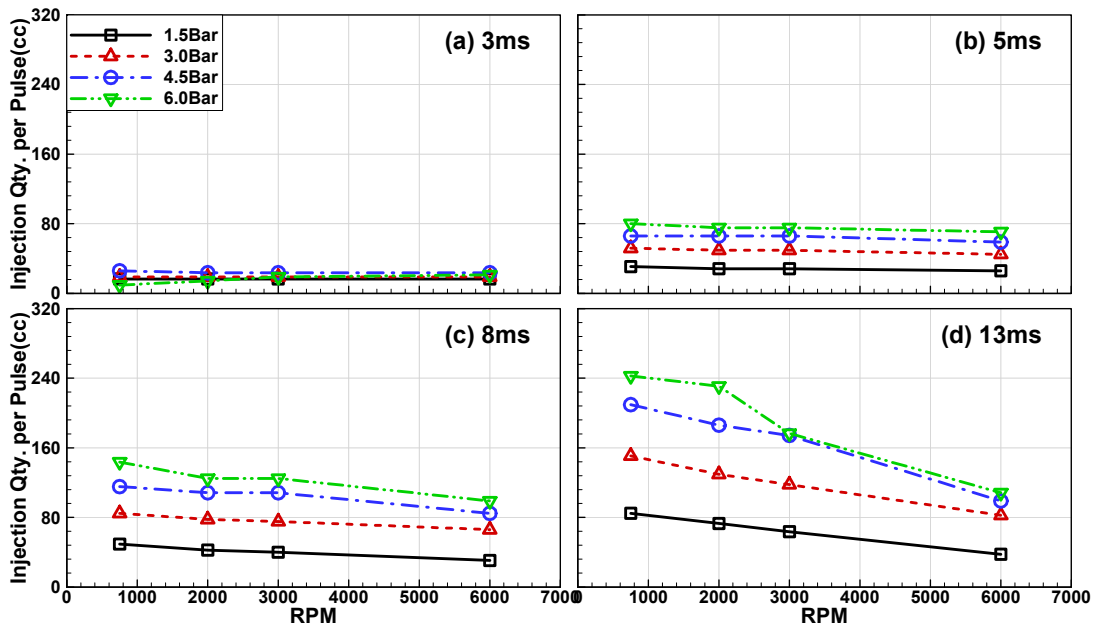


Fig. 4 Injection quantity per pulse as a function of engine speed(rail volume=5 cc)

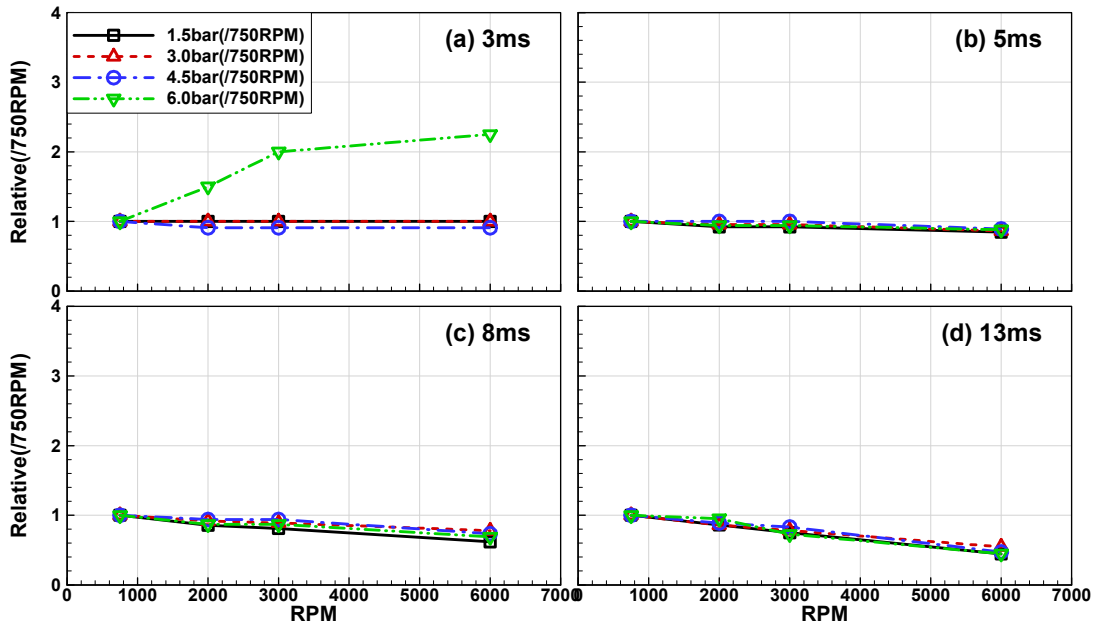


Fig. 5 Relative injection quantity as a function of engine speed(rail volume=5 cc)

이와 같은 과도한 최소 유량으로 인하여 선행 연구에서 저부하 영역의 연비 및 배기 악화가 초래되었다.

고부하 운전 조건에 해당하는 8 ms는 6000 rpm에서의 분사 유량이 750 rpm 대비 60~80% 수준으로 크게 감소한다. 특히 3000 rpm 이후 감소의 폭이 커지는데, 8 ms 분사 기간이 주로 가속 시에 나타나는 것을 고려할 때, 고속 진입 시 정밀한 연료량 제어에 문제가 있을 가능성이 크다.

전부하 운전 조건을 상사하는 13 ms 역시 기관 속도 증가에 따른 분사 유량의 감소가 매우 커서, 750 rpm 대비 6000 rpm의 분사 유량은 40~50% 수준이다. 이와 같은 특성은 정밀한 연료량 제어에 문제가 될 수 있으며, 특히 연료 압력 1.5 bar의 경우 전부하 조건에서의 최대 분사 요구량인 53 cc를 만족시키지 못한다.

### 3.4 레일 체적에 따른 분사 유량

레일 체적이 분사 유량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 6, 7에 각각 분사 기간 5 ms, 13 ms에서의 기관 속도에 따른 분사 유량 변화를 동

일 설정 압력에 대해 5, 100, 200, 435 cc 체적의 연료 레일을 비교하여 도시하였다. 분사 기간 5 ms는 실제 운전에서 가장 자주 나타나는 분사 기간이며, 13 ms는 대표적인 전부하 조건이기 때문에 비교의 대상으로 선정하였다.

먼저 분사 기간 5 ms를 살펴보면, 1.5 bar에서 3.0 bar로 분사 압력이 증가함에 따라 연료 분사 절대량이 연료 레일 체적에 따라 1.7~2.0배까지 크게 증가한다. 이때, 5 cc 레일만 현저히 낮은 수준이 나타나며, 이를 제외한 나머지 레일의 연료 유량은 차이가 크지 않다. 또한 1.5 bar에서는 모든 레일이, 3.0 bar에서는 435 cc를 제외한 세 연료 레일이 6000 rpm에서 최대 분사 요구량 53 cc에 미치지 못하는 것으로 확인되며, 특히 1.5 bar의 경우 연료 레일 체적에 따라 최대 분사 요구량의 48.9~62.2% 수준밖에 분사되지 않는다. 4.5 bar에서는 5 cc 외의 연료 레일은 속도 변화에 따른 차이가 적고 분사 경향도 매우 안정적으로 나타나는데, 이는 연료 분사량 제어에 유리하게 작용할 수 있다.

분사 기간 13 ms의 1.5 bar를 보면 네 연료 레

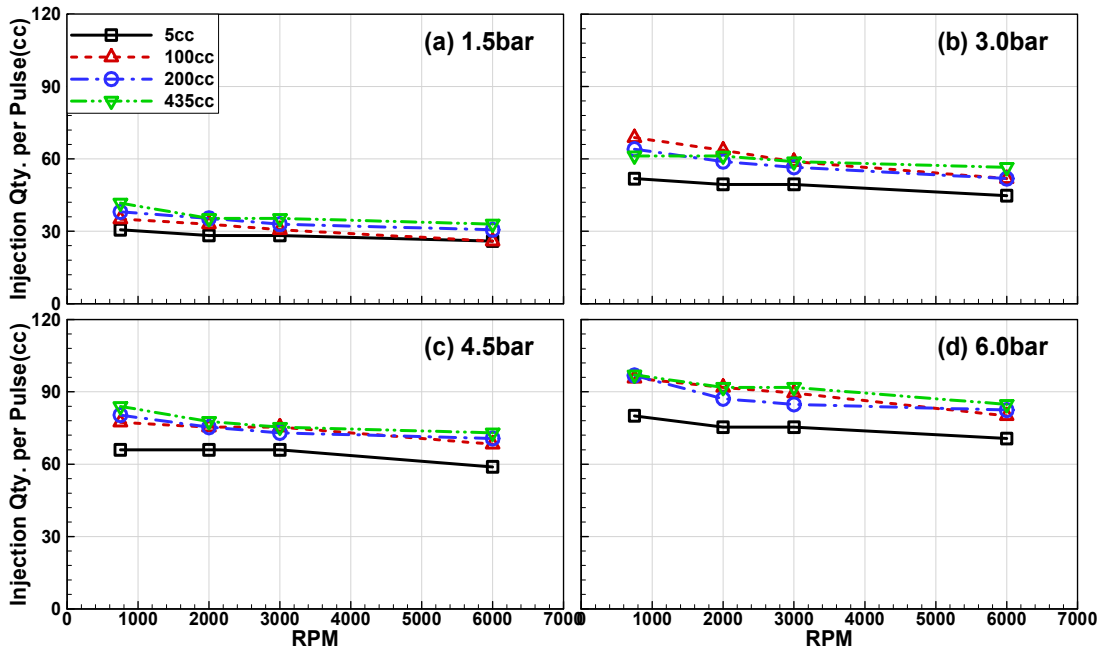


Fig. 6 Injection quantity per pulse as a function of engine speed according to 5 ms injection period (4 rail volumes)

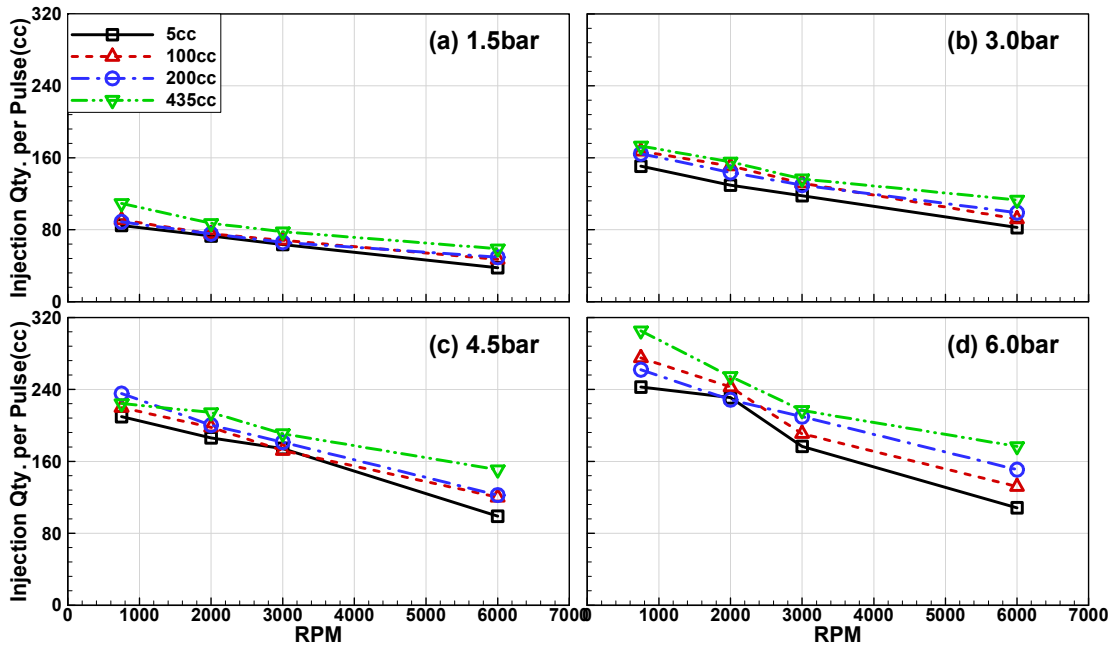


Fig. 7 Injection quantity per pulse as a function of engine speed according to 13 ms injection period (4 rail volumes)

일의 경향이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 특히 435 cc 레일은 6000 rpm에서의 분사 유량이 58.88 cc이므로 최대 분사 요구량을 만족시키고 있다. 3.0 bar 이후부터 5cc 레일은 약간 낮은 수준을, 435 cc는 약간 높은 수준을 나타내지만 분사 기간 5 ms만큼 그 차가 심하지는 않다.

전체적으로 5 cc 레일의 분사 유량이 가장 적게 나타나는데, 이는 앞서 언급한 인젝터 구동 특성이 체적에 의한 효과와 함께 작용한 결과인 것으로 판단된다. 또한 100 cc와 200 cc의 분사 특성은 조건에 따라 조금씩 다르긴 하지만 그 차이가 크지 않고 거의 일치하므로 이 정도의 체적 차이는 분사 유량 및 특성에 크게 영향을 주지 않는다고 보는 것이 적합하다. 결론적으로 연료 레일 체적이 5 cc와 435 cc처럼 매우 크게 차이가 나는 경우에만 분사 특성에 대한 체적 효과가 가시적 변화를 이끌어낼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 현재 애프터마켓에서 개조용으로 판매되는 가스연료 분사시스템에서 연료 분사 유량에 미치는 영향을 확인하기 위해 연료 압력, 분사 기간 및 기관 속도에 변화를 주며 실험하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

일부 예외를 제외하고 연료 압력이 높을수록, 분사 기간이 길어질수록 분사 유량이 증가하며, 기관 속도는 높아질수록 감소한다. 예외적으로, 짧은 분사 기간에서 연료 압력이 크게 높으면 인젝터 니들 거동이 압력에 의해 방해받아 유효 분사 기간이 감소하여 분사 유량이 감소한다. 또한 기관 속도가 고속으로 갈수록 연료 레일 내부 압력에 영향을 받아 분사 기간에 따른 분사 유량의 증가 폭이 둔화되는 경향이 있다.

모든 조건에서 최소 분사 유량이 과도한 것으로 확인된다. 저부하 조건에서 현재의 가스연료 분사시스템에서 가장 낮은 연료 분사 압력인 1.5 bar는 1회 분사요구량을 충족시키지 못하며, 이를 해결하기 위해 연료 압력을 높일 경우 최소 분사 유량 및 저부하 영역 분사 유량이 더욱 과

도하게 된다. 이러한 분사 특성은 고부하 조건에서는 출력 부족 또는 이상 연소에 의한 기관의 손상을, 저부하 조건에서는 기관의 부조를 유발할 수 있다.

연료 레일의 체적을 증가시키면 기관 속도 증가에 따른 유량 감소 특성은 개선되어 정밀한 연료 계량 특성 확보에 유리하며, 최대 분사 요구량도 만족시킬 수 있다. 하지만 여전히 최소 유량 및 저부하 영역 분사 유량도 함께 증가하여 과도해지는 문제가 발생하기 때문에 연료 레일 체적 증가가 가스분사시스템이 갖고 있는 여러 문제를 동시에 해결할 수 있는 해결책은 아닌 것으로 판단된다.

#### Author contributions

Y. K. Kwak; Conceptualization. H. K. Kime; Investigation. J. H. Hyun; Project administration. I. Y. Ohm; Supervision.

#### References

1. H. Cho and B. He, 2007, "Spark Ignition Natural Gas Engines-A review", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 6, pp. 608-618. (DOI:10.1016/j.enconman.2006.05.023)
2. J. O. Han, Y. C. Kim and Y. C. Lee, 2017, "Fuel Consumption and CO<sub>2</sub> Characteristics of HCNG Bus", *KIGAS*, Vol. 21, No. 2, pp. 20-25. (DOI:10.7842/kigas.2017.21.2.20)
3. H. J. Kim and H. K. Lee, 2015, "Experimental Study of Emission Characteristics for CNG Passenger Car", *KIGAS* Vol. 19, No. 6, pp. 34-39. (DOI:10.7842/kigas.2015.19.6.34)
4. D. H. Ha, J. M. Jin, S. I. Hwang, J. K. Yeom and S. S. Chung, 2012, "Diagnosis of the Combustion Characteristics of Spark Ignition Engine with Compressed Natural Gas(CNG) Injection Type", *Journal of the Korean Society*



- for Power System Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 5-12.
5. H. G. Kim, I. O. Kim and I. Y. Ohm, 2015, "Experimental Study on Natural Gas Conversion Vehicle(1) - Fuel Economy, Emission and Roadability", Transactions of KSAE, Vol. 23, No. 4, pp. 410-419.  
(DOI:10.7467/KSAE.2015.23.4.410)
  6. H. G. Kim, S. T. Kwon and I. Y. Ohm, 2015, "Experimental Study on Natural Gas Conversion Vehicle(2) - Evaluation of Injection System", Transactions of KSAE, Vol. 23, No. 4, pp. 444-453. (DOI:10.7467/KSAE.2015.23.4.444)
  7. K. Min, C. L. Myung, C. H. Chang and K. J. Yoon, 1994, "Development of HMC's Natural Gas Vehicle", KSAE Fall Conference Proceedings, pp. 187-193.
  8. S. T. Kwon, S. J. Choi, J. H. Hyun, C. J. Park and I. Y. Ohm, 2014, "Fuel Injection Characteristics of Gas Fuel according to Fuel-rail Volume", KSAE Spring Conference Proceedings, pp. 364-365.
  9. S. T. Kwon, S. J. Choi, J. H. Hyun, C. J. Park, Z. Meng, S. T. Kwon, S. J. Choi, C. J. Park and I. Y. Ohm, 2014, "Fuel Injection Characteristics of Gas Fuel according to Fuel-rail Pressure", KSAE Annual Conference Proceedings, pp. 260-261.
  10. S. T. Kwon, S. J. Choi, J. H. Hyun, C. J. Park and H. K. Kim, 2016, "Effects of Rail Volume and Pressure, Operating Speed on Fuel Injection Characteristics in Gas Injection System of Internal Combustion Engine", Ph D. Dissertation, Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, Seoul.