



## 연료 레일 체적이 가스분사 특성에 미치는 영향(2) - 레일 내부 압력 변동 특성

### Effects of Fuel Rail Volume on Gas Injection Characteristics (2) - In-rail Pressure Fluctuation Characteristics

김형구\* · 현지혜\*\*† · 엄인용\*\*\*  
 Hyung-Ku Kim\*, Ji-Hye Hyun\*\*† and In-Yong Ohm\*\*\*

(Received 15 May 2019, Revision received 13 August 2019, Accepted 13 August 2019)

**Abstract:** This study is to investigate the characteristics of fuel rail pressure fluctuation according to fuel injection pressure, injection pulse width and engine speed in a gas fuel injection system. The fuel rails with the volume of 5, 100, 200, and 435 cc were used. Compressed air was used as an analogous fuel, and injection was controlled using an injector driver. A pressure sensor, a piezo-resistive amplifier, and an oscilloscope were used. The pressure waveform was averaged by measuring 100 times. The injection pressures were set at 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 bar, and the engine speeds were set at 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000 and 6000 rpm and injection periods were 3, 5, 8 and 13 ms. As the engine speed increased and the injection pulse width became longer, the pressure inside the fuel rail decreased drastically and the pulsation phenomenon gradually disappeared. Increased engine speed and injection period started to connect almost continuously in the period of operation of the injector and overlapped each other finally. It was believed that the fuel rail was not supplied with additional fuel enough to recover the pressure due to an increase in injection flow rate than the increase in supply volume of the pressure regulator. Regardless of the volume change, the tendency of the in-rail pressure drop was very constant, but the pressure fluctuation decreased as the volume of the fuel rail increases, contributing to securing the fuel injection stability to some extent. Since the reduction in rail pressure did not ensure the required injection flow rate under full load conditions. Therefore, it is necessary to devise a method for maintaining the pressure inside the rail.

**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  
 E-mail : kyrie@seoultech.ac.kr, Tel : 02-970-7266 Graduate School, Seoul National University of Science and  
 Technology.  
 \*김형구(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7546-0576>) : E-mail : nk.kyrie@gmail.com, Tel : 02-970-7266  
 스피드메이트 사업부, SK 네트워크 \*Hyung-Ku Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7546-0576>)  
 : Department of Speed Mate, SK Networks.  
 \*\*\*엄인용(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0937-3981>) : \*\*\*Inyong 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

천연가스가 이산화탄소 배출량 저감을 목적으로 대체연료로서 주목을 받고 있는 가운데,<sup>1,4)</sup> 현재 애프터마켓의 상용개조키트의 연료 분사 성능에 의구심이 제기되었다.<sup>5,6)</sup> 이에 가스분사 특성을 고려한 분사시스템의 기초 자료 취득을 목적으로 연료 레일 체적 및 압력, 그리고 기관 속도 변화가 기존의 개조시스템에 사용되는 작은 체적의 연료레일의 연료 분사 특성에 미치는 영향에 대해 조사하고 분석하였다. 연료 분사 압력과 분사 기간의 증가가 분사 유량의 증가로 이어지는 지극히 당연한 경향이 관찰되었지만, 그 증가의 추세는 이상적인 경우와는 차이가 있으며 실험 오차의 범위를 훨씬 넘는다.

예를 들어 분사 유량은 분사 기간에 대해 직선적으로 증가하고, 연료 분사 압력과는 비례적 관계를 가져야 한다.<sup>7)</sup> 하지만 실제 실험값은 이러한 이상적인 경우와는 매우 다르다. 이는 사전에 설정한 파라미터가 실제 실험에서 완벽하게 구현되지 않았음을 의미하며, 실험 파라미터 중 사전 설정과의 심각한 차이를 만들 수 있는 요소는 압력 강하의 가능성이 있는 레일의 압력뿐이다. 이에 본 논문에서는 실험 조건에 따라 설정 압력과 실제 레일 압력을 비교하여 대상 연료 레일의 압력 변동 특성을 분석하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 방법

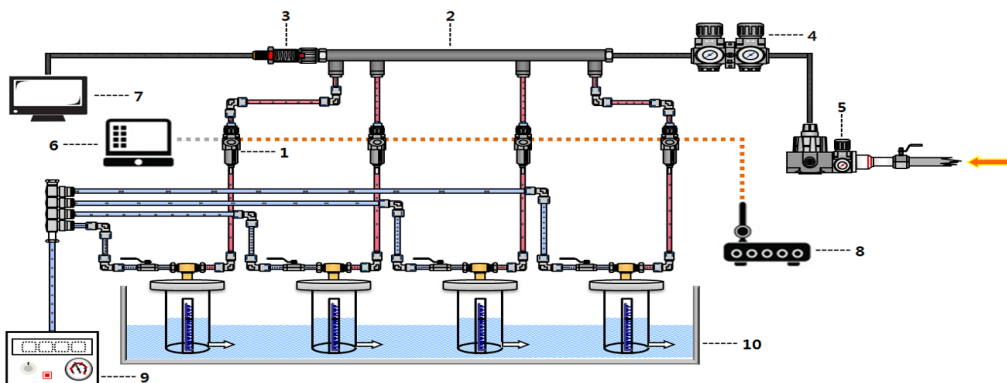
Fig. 1에 실험에 사용된 장치의 개략도를 도시하였다. 압력조절기를 사용하여 연료의 공급 압력을 조절하였고, 인젝터 구동드라이버(IC 5160)를 이용하여 가스분사를 제어하며 순차 분사를 실시하였다. 이전 연구와 동일한 5 cc 연료레일과 인젝터가 장착된 키트를 사용하였으며, 레일 체적 효과 확인을 위해 100, 200, 435 cc 연료 레일을 추가적으로 실험하였다. 각 사양은 이전 논문에 기재하였으므로 생략한다.

Table 1 Specifications of pressure sensor and amplifier

	Pressure Sensor	Piezo-resistive Amplifier
Range	~10 bar	1~9.9 mA
Supply	8~28 VDC	20 VDC
Accuracy	±0.2%	±0.07%
Stability	±0.1%FS	200 ppm/a

Table 2 Specifications of Oscilloscope

Model	Lecroy WaveRunner 44Xi
Maximum Input Voltage	50 Ω, 5 VRMS, 1 MΩ, 400 V
Sensitivity	50 Ω, 2 mV/div~1 V/div
DC Accuracy	±1.0% of full scale
Offset Range	50 Ω, ±1 V
Offset Accuracy	±1.5%
Clock Accuracy	≤5 ppm



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. Acrylic Syylinder

Fig. 1 Schematics of injection quantity measurement device

압력 센서와 데이터 수집장치를 이용하여 연료 레일 내부 압력 변동을 측정하였다. 압전 소자 (Piezo-resistive) 방식의 증폭기를 사용하여 압력 센서로부터 전송된 미세 신호를 증폭 시켰으며, 이 신호를 오실로스코프(Lecroy WaveRunner 44Xi) 로 전송하여 압력 파형을 측정하였다. 압력 파형을 100회 측정하여 그 평균값을 데이터로 사용하였다. Table 1에 압력 센서와 증폭기의 상세 사양을, Table 2에 오실로스코프의 상세 사양을 나타내었다.

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

Table 3 Condition of test

Speed(RPM)	750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000
Supply Pressure(bar)	1.5, 3.0, 4.5, 6.0
Injection Pulse Width(ms)	3, 5, 8, 13

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 기관 속도에 따른 레일 압력

Fig. 2에 압력조절기를 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 bar로 설정하였을 때, 사이클 1회 동안의 실제 레일의 평균 압력 절댓값을 분사 기간에 따라 구분하여 기관 속도에 대해 나타내었다.

그림에서 확인 가능한 바와 같이 분사 기간이 증가할수록 그리고 기관 속도가 증가할수록 레일 압력이 감소하는데, 그 경향을 자세히 논의하면 다음과 같다. 분사 기간 5 ms까지 1.5, 3.0, 4.5 bar는 기관 속도 증가에 따라 직선적으로 감소하다가 8 ms에서 형태의 변화가 생기고 13 ms에서는 점근적 감소 경향을 나타낸다. 6.0 bar는 3 ms에서는 비교적 직선적이지만, 5 ms에서는 제곱근 형태로 감소하다 8 ms에서 감소 경향이 현저하게 변한다. 13 ms에 이르러 2000 rpm까지 직선적으로 감소하지만 이후 점근적으로 감소하는 경향을 나타낸다.

이와 같은 8 ms에서의 감소 경향 변화는 감소 폭으로도 확인이 가능하다. 3 ms에서 속도 증가에 따른 레일 압력이 750 rpm과 비교하여 1.5 bar는

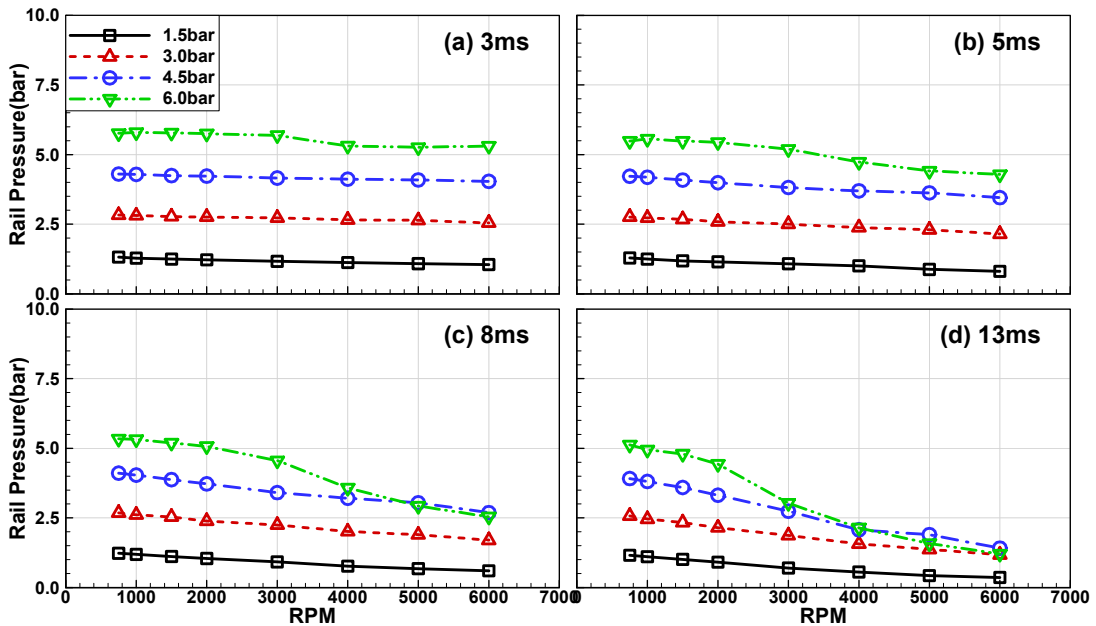


Fig. 2 In-rail pressure as a function of engine speed (rail volume=5 cc)

79.6%, 6.0 bar는 92.1%, 5 ms에서는 각각 62.7%, 78.2% 수준까지 떨어져 1.5 bar가 더 큰 감소폭을 나타내었다. 하지만 8 ms에서는 각각 48.9%, 47.6%로 그 차이가 거의 없어졌으며, 13 ms에서는 31.1%, 23.6%로 6.0 bar의 감소폭이 더 커진다. 이는 3000 rpm의 8 ms부터 기관 속도가 고속으로 갈수록 인젝터의 구동 기간의 간격이 매우 좁아지기 시작하다가 연속적으로 이어지고, 결국에는 Fig. 5에서 확인 가능한 바와 같이 분사 펄스가 서로 겹치기 때문인 것으로 판단된다.<sup>8)</sup>

### 3.2 분사 기간에 따른 레일 압력

사이클 1회 동안의 기관 속도 750 rpm, 5 ms에서의 압력에 대한 조건 별 압력 상대값을 Fig. 3에 설정 압력에 따라 구분하여 분사 기간에 대해 도시하였다. 기관 속도 조건은 최저 속도인 750 rpm, 실제 운전에서 가장 많은 빈도로 나타나는 2000 rpm, 압력 감소 경향의 변화 기점이 되는 3000 rpm, 최고 속도인 6000 rpm으로 선정하여 분석하였다.

전체적으로 기관 속도가 증가할수록 분사 기간

증가에 대해 더 큰 감소폭으로 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 750, 2000, 3000 rpm은 4.5 bar까지 분사 기간 증가에 따라 비교적 직선적으로 감소하지만 6.0 bar에 이르러 그 형태에 변화가 발생한다. 6000 rpm의 경우 모든 설정 압력에서 다른 기관 속도와는 다른 점진적 감소 경향을 보이며, 예외적으로 4.5 bar에서 직선적 감소를 나타낸다.

설정 압력에 따른 압력 감소폭에 대해 특징적인 경향은 확인되지 않지만, 설정 압력 4.5 bar에서 모든 기관 속도 조건이 분사 기간과 비교적 비례적으로 감소한다.

### 3.3 사이클 1회 동안의 레일 압력 변동

Fig. 4, 5에 각각 분사 기간 5 ms와 13 ms에서의 설정 압력 1.5 bar, 6.0 bar의 한 사이클 동안의 레일 압력 측정 결과를 나타내었다. 분사 기간 5 ms는 실제 운전에서 가장 자주 나타나며, 13 ms는 대표적인 전부하 조건이므로 비교의 대상으로 선정하였다. 그림에서 x축과 평행하게 나타낸 직선은 인젝터에 인가한 각 조건에서의 구동 펄스

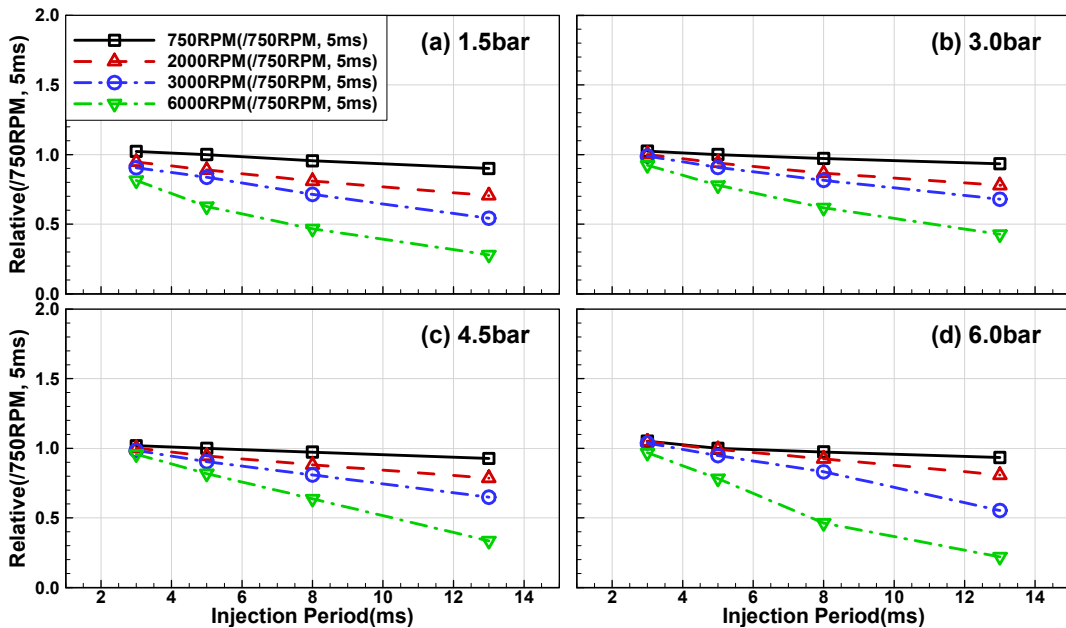


Fig. 3 Relative pressure as a function of injection period (rail volume=5 cc)

폭을 나타낸다.

기본적으로 분사 기간이 짧을수록, 그리고 기관 속도가 저속일수록 분사 펄스 주기와 잘 일치하고 맥동이 확연히 나타난다. 그러나 분사 기간 및 기관 속도 증가에 의해 펄스 사이의 간격이 좁아지면서 맥동 현상은 점점 소멸하여 레일의 압력 수준이 급격히 저하된다.

기관 속도 별로 압력 변동 특성을 자세히 논의하면 다음과 같다. 750 rpm의 5 ms에서 펄스 폭 사이에 여러 파형이 복합되어 확인된다. 이는 분사에 의해 압력파가 발생되어 말단부 등에서 반

사되고, 다른 인젝터가 발생시킨 압력파와 서로 혼합되어 나타나는 것이다. 13 ms로 분사 기간이 증가하면 이러한 현상이 완화된다. 2000 rpm의 5 ms에서 매우 큰 진폭이 나타나는데, 이는 분사에 의한 압력 강하가 극복되기 전에 빠른 분사에 의해 다른 분사가 이어지기 때문인 것으로 판단된다. 13 ms로 분사 기간이 길어지면 맥동은 있으나 진폭이 감소한다. 3000 rpm은 5 ms까지, 6000 rpm은 5 ms의 1.5 bar에서만 약한 맥동이 확인되지만 다른 조건에서는 거의 소멸하며, 특히 13 ms에서는 설정 압력과 관계없이 3000 rpm은 50% 수준은

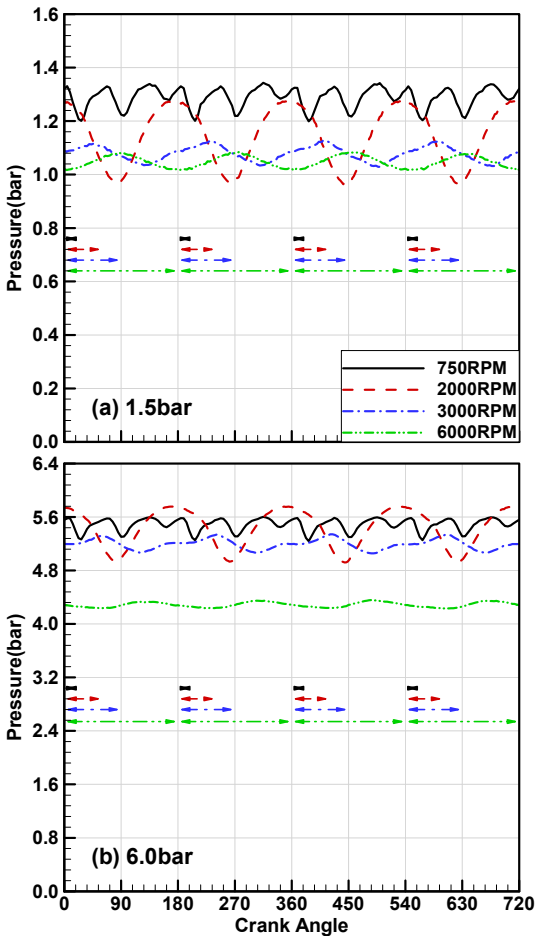


Fig. 4 In-rail pressure fluctuation as a crank angle base according to 5 ms injection pulse width (rail volume=5 cc)

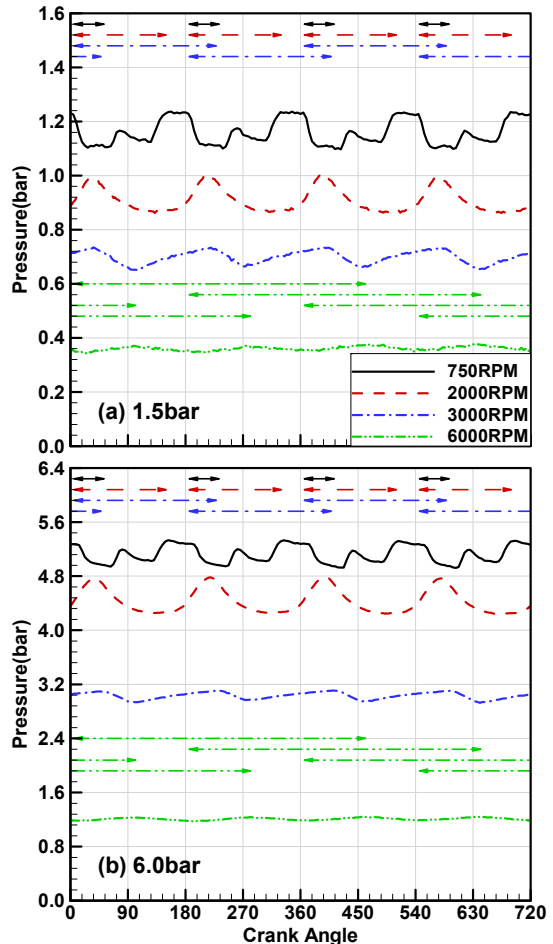


Fig. 5 In-rail pressure fluctuation as a crank angle base according to 13 ms injection pulse width (rail volume=5 cc)

로, 6000 rpm은 20~40% 수준으로 압력 수준이 저하된다.

### 3.4 레일 체적에 따른 레일 압력

레일 체적이 레일 내부 압력 변동에 미치는 영향을 비교하기 위해 Fig. 6, 7에 각각 압력조절기

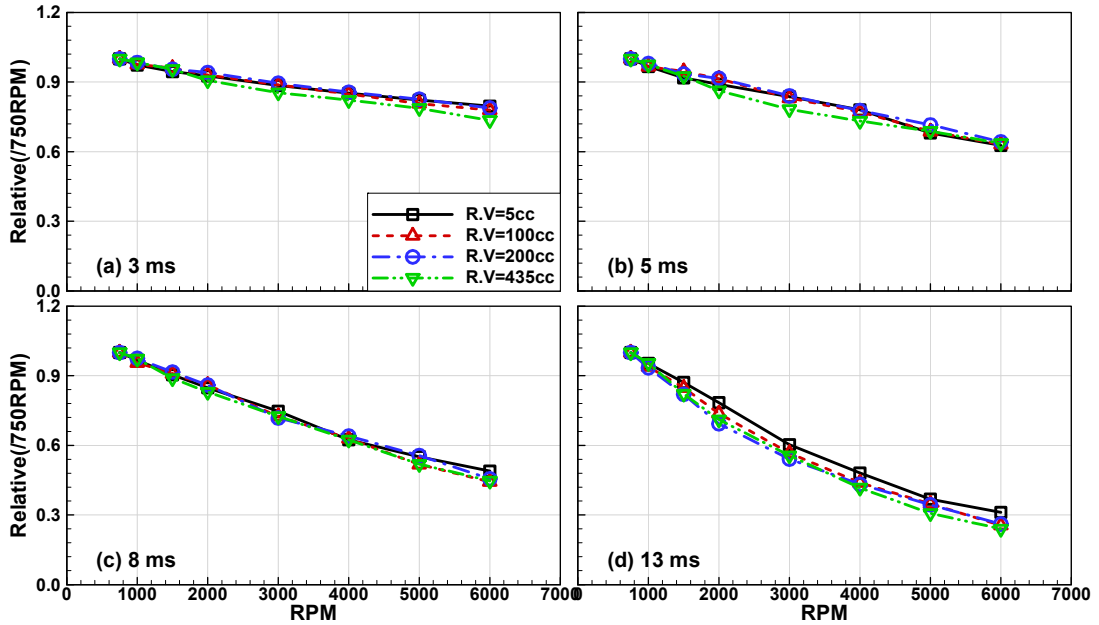


Fig. 6 Relative pressure as a function of engine speed according to 1.5 bar injection pressure (4 rail volumes)

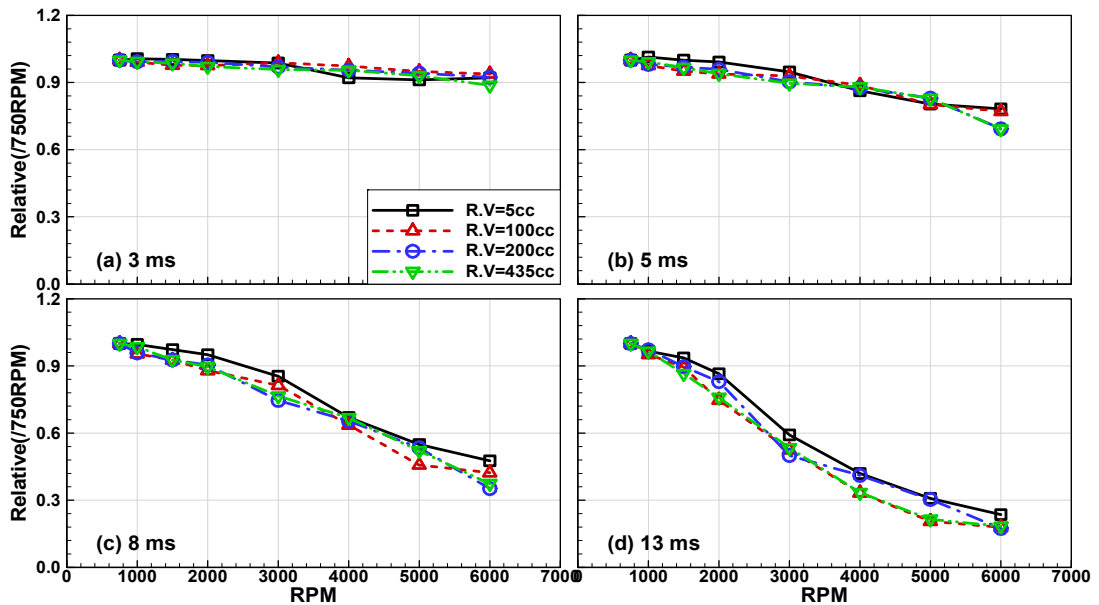


Fig. 7 Relative pressure as a function of engine speed according to 6.0 bar injection pressure (4 rail volumes)

의 설정압력이 1.5, 6.0 bar일 때, 사이클 1회 동안의 기관 속도 750 rpm에서의 압력에 대한 상대값을 분사 기간에 따라 구분하여 기관 속도에 대해 5, 100, 200, 435 cc 체적의 연료 레일을 비교하여 나타내었다.

먼저 Fig. 6의 1.5 bar를 살펴보면, 모든 체적의 연료 레일의 속도에 따른 레일 내부 압력 변동이 분사 기간과 관계없이 매우 잘 일치하는 경향을 나타낸다. 또한 앞서 논의하였던 5 cc 레일과 동일한 압력 감소 경향이 나타난다. Fig. 7의 6.0 bar에서도 1.5 bar와 마찬가지로 모든 체적의 레일이 분사 기간과 관계없이 압력 감소 경향이 매우 잘 일치하는 것을 동일하지만, 13 ms 분사기간에서

연료 레일 체적에 따른 차이가 관찰된다. 다만, 체적에 따른 경향이 일정하지 않기 때문에, 이 조건에서의 분사 유량이 가장 많아 레일 체적 별로 분사 유량과 공급량의 관계가 다르기 때문인 것으로 추측할 수 있을 뿐, 정확한 원인을 제시하기엔 어려움이 있다. 레일 체적의 변화가 맥동에 미치는 영향을 비교하기 위하여 Fig. 8에 설정 압력 1.5 bar에서, 동일 운전 속도, 동일 분사 기간에서의 체적에 따른 레일 내부 압력 변동을 크랭크 각 변화에 대해 도시하였다.

아이들 조건에 해당하는 750 rpm에서 레일의 체적이 작을수록 맥동의 진폭이 증가하는 동시에 형태도 복잡해진다. 5 cc 레일의 압력 변동 차는 0.13 bar로 가장 크고, 100 cc 레일은 0.08 bar, 200 cc는 0.05 bar, 435 cc는 0.02 bar 정도로 거의 맥동이 없는 수준이다. 2000 rpm에서도 5 cc 레일은 약 0.3 bar의 압력 변동 차를 보이며 압력 저하도 매우 가파르지만, 체적이 증가할수록 그 변동 폭이 점차 작아지는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

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

- 1) 기관 속도가 증가할수록, 그리고 분사 기간이 길어질수록 연료 레일 내부 압력이 큰 폭으로 감소하며, 맥동 현상이 점차 소멸된다.
- 2) 이는 기관 속도 및 분사 기간 증가로 인젝터의 구동 기간의 거의 연속적으로 연결되기 시작하여 끝내는 서로 겹치게 되면서 압력 조절기의 공급량 증가보다 분사 유량이 증가하여 압력이 회복될 만큼 연료 레일에 연료가 추가로 공급되지 못하는 것이 원인으로 판단된다.
- 3) 또한 체적 변화와 관계없이 레일 내부 압력 저하 경향은 매우 일정하게 나타나지만, 연료 레일의 체적이 증가할수록 압력 변동이 감소하여 연료 분사 안정성의 확보에 어느 정도 기여한다.

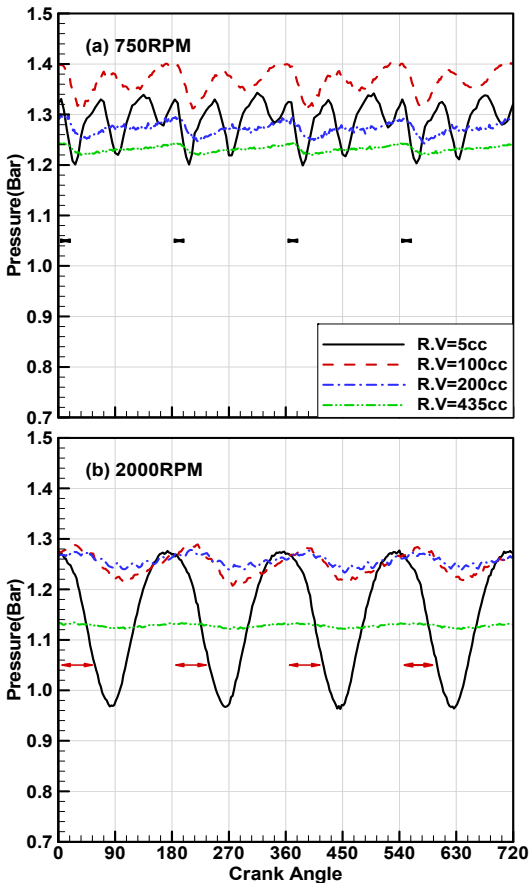


Fig. 8 In-rail pressure fluctuation as a crank angle base according to 5 ms injection pulse width (4 rail volumes)

4) 레일 압력 감소는 전부하 조건에서 필요한 만큼의 분사 유량을 확보하지 못하는 원인이 되므로, 레일 내부 압력 유지에 대한 방법을 강구해야 할 필요가 있다.

### Author contributions

H. K. Kim; 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. J. B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, USA, pp. 294-301.
8. 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.