

연료레일 압력과 엔진 속도가 가스연료 시스템에 미치는 영향에 관한 연구

곽윤기*

A Study on the Effects of Fuel Rail Pressure and Engine Speed on Gas Fuel System

Youn-Ki Kwak*

요약 이번 연구는 가스 연료의 연료 공급 시스템에서 분사 압력과 엔진 속도에 따른 연료 분사 특성을 확인하였다. 이번 실험에서 연료 레일 압력은 1.5에서 6.0 bar까지 1.5 bar 단위로 증가시키고, 엔진 속도는 1,000 에서 6,000 RPM으로 1000 RPM 간격으로 설정하였다. 실제 엔진 작동을 고려하여 분사 펄스폭은 각각 2.5 ms, 5.0 ms 및 13.0 ms로 설정하였으며, 이는 각각 엔진 주행상태에서 저, 중 및 고 부하 운전조건에 해당한다. 결론적으로 100cc 연료 레일의 경우, 분사 압력 4.5bar에서 가장 우수한 성능을 보였고, 1000 ~ 6000RPM의 엔진 속도에서 엔진 출력을 보장하는 최소 요구 분사량 53 cc을 얻을 수 있다.

Abstract This study is to figure out the fuel injection characteristics according to the injection pressure and engine speed in the fuel supply system for gas fuel. The fuel rail pressure was from 1.5 to 6.0 bar by 1.5 bar increment and engine speed was set 1,000 ~ 6,000 RPM at interval of 1000 RPM. Considering the real engine operation, the injection pulse width was set 2.5ms, 5.0ms, and 13.0ms which correspond low, mid and high load condition respectively. In conclusion, in case of 100cc fuel rail, 4.5 bar of injection pressure showed best performance and the minimum required injection quantity 53cc which guarantees engine output can be obtained in each 1000~ 6000 rpm engine speed.

Key Words : Gas Injection, Injection Period, Rail pressure, Rail volume, Sequential Injection

1. 서론

최근 배기가스 규제 강화와 더불어 환경오염 문제에 대한 대책이 심각하게 대두되고 있는 시점에서 청정에너지인 가스 연료를 사용하고자 하는 다양한 노력이 시도되고 있다.1)2)3)

2009년을 시점으로 CNG(Compressed Natural Gas) 개조가 시작되고 택시업체 일부에서 2012년부터 LPG(Liquid Petroleum Gas) 차량의 NG(Natural Gas) 개조가 시범적으로 시작되어, 소형 기관의 NG 연료 사용이 허용되었다. 이전 연구에 의하면 NG로

차량 개조시 경우 출력저하에 따라 주행 성능과 가속 성능의 저하가 불가피하지만 NG 고유의 고옥탄가 특성을 이용, 점화시기를 적절히 제어하면 출력저하의 폭을 줄일 수 있다. 아울러 시동 및 냉간 운전 상황에서도 정밀한 매핑을 통한 시스템 제어가 요구된다.

중요한 것은 개조 후 연비 및 배기가스가 모두 개조 전보다 악화되었는데4) 이는 가스연료 분사 시스템에 대한 적절한 연구 및 실험사례의 부족이 원인으로 현재 시판되는 연료 레일의 체적과 분사시스템에 적용되는 압력으로는 기관에서 요구 되는 공연비를 충족할 충분한 분사유량을 공급할 수 없다.5)

*Corresponding Author : Department of Automobiles, Seoul Jungsu Campus of Korea Polytechnic(elankwak@kopo.ac.kr)
 Received September 19, 2018 Revised October 04, 2018 Accepted October 15, 2018

따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 개조 시스템보다 연료 레일의 체적과 분사 압력을 증가하여 연료 분사 특성을 확인 하고자 하며, 우선 동급 기술된 기관에서 사용되는 레일과 같은 체적인 100 cc의 연료 레일에 대해 분사특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

연료 레일의 체적과 압력에 따른 기초특성을 파악하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다.

이번 실험에서는 연소가 아닌 분사량을 측정하는 실험이므로 안전을 위해 천연가스 대신 압축공기를 사용하여 분사하였다.6) 인젝터는 상용의 가스용 인젝터를 사용 하였고, 인젝터 구동기(IC 5160)을 이용하여 순차분사를 실시 하였다. 연료 레일은 동급 기술된 기관의 100cc 용량의 연료 레일을 사용 하였다. 연료 분사압력은 가스 연료의 일반적인 연료 분사 압력인 1.5 bar부터 6.0 bar 까지 1.5 bar 간격으로 레일의 압력을 증가 시키며 실험을 진행하였다. 기관 속도는 1,000 ~ 6,000 RPM 까지 1,000 RPM 간격으로 순차 분사 (sequential injection) 를 적용하고, 각각의 조건에서의 분사량의 차이를 비교하였다. 연료 분사 기간은 차량 주행 특성을 고려하여, 2.5 ms, 5.0 ms, 13.0 ms 로 저부하, 중부하, 고부하로 나누어 실험을 진행 하였다.5)

연료 분사량의 측정은 먼저 아크릴 실린더에 연결된 진공펌프로 실린더 내의 압력을 낮춰 실린더의 수위를 일정 수준으로 높인 다음 설정된 일정 압력과 분사기간 동안 일정 횟수의 분사를 실시한다. 연료가 분

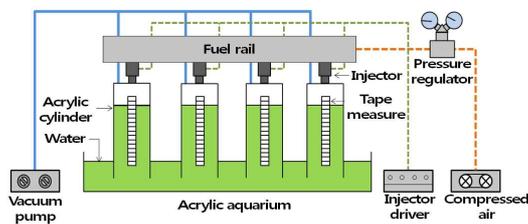
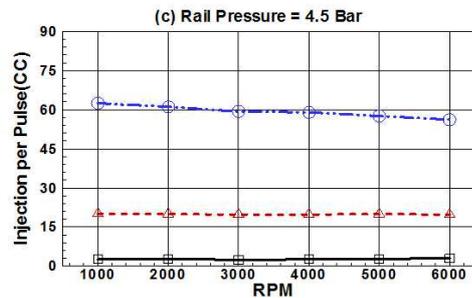
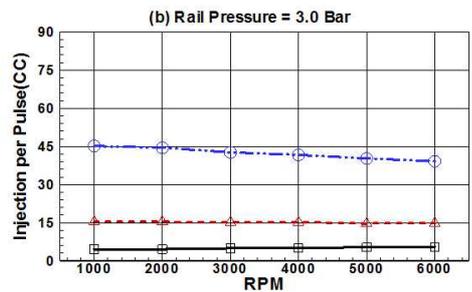
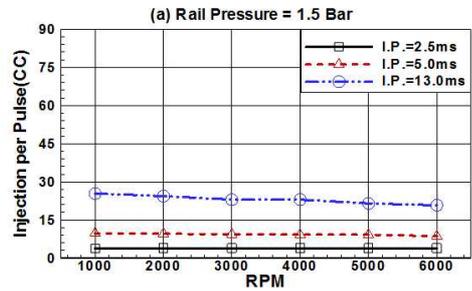


그림 1. 분사량 측정 실험장치
Fig. 1. Schematics injection volume measurement device

사되면 실린더 내의 압력이 증가하여 분사된 양 만큼 수위가 내려간다. 분사 전의 수위를 측정하고 분사 종료 후의 수위를 측정하여 수위 차에 실린더 단면적을 곱하여 분사량을 계산하였다.

분사 기간과 기관 속도에 따라 단위 시간 당 분사량이 달라지므로 속도와 분사 기간을 고려하여 총 분사횟수를 변경하였다. 분사량은 총 분사량을 분사횟수로 나누어 나타내었으므로, 본 연구에서의 분사량은 분사 1회당 분사량을 의미 한다.

3. 실험결과 및 고찰



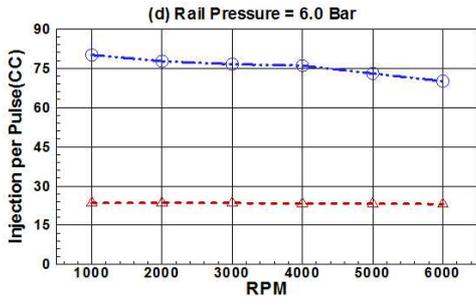


그림 2. 엔진 속도에 따른 펄스당 분사량
 Fig. 2. Injection per pulse as a function of engine speed ($P_r=1.5$ bar, 3.0 bar, 4.5 bar, 6.0 bar)

3.1 기관 속도에 따른 분사량의 변화

Fig. 2에 분사압력과 기관 속도에 따른 분사량의 변화를 알아보았다.

Fig. 2(a)는 분사압력이 1.5 bar 인 경우인데 이 분사 압력에서 측정된 연료 분사량(Injection per Pulse)은 1회 분사요구량 53 cc 에 현저히 미치지 못하는 것을 볼 수 있다. 인젝터 분사기간 2.5 ms 는 변화 폭이 적지만, 5.0 ms 와 13.0 ms 에서 나타나는 것처럼 인젝터 분사기간이 길어질수록 변화폭이 큰 것을 알 수 있다.

인젝터 분사기간 2.5 ms 에는 1,000 RPM 에서 분사량이 4 cc 이며, 6,000 RPM 에서 분사량도 4 cc 로 동일하였다. 인젝터 분사기간 5.0 ms 에는 1000 RPM 에서 분사량 10 cc 이며, 6,000 RPM 에서 분사량은 8 cc 로 1,000 RPM 과 비교하여 2 cc 감소하였다.

인젝터 분사기간 13ms 에는 1,000 RPM 에서 분사량 25.5 cc이며, 6,000 RPM 에서 분사량은 21 cc 로 4.5 cc 감소함에 따라 1,000 RPM 에서의 분사량과 비교하여 분사기간이 길어질수록 변화 폭이 큰 것을 알 수 있다.

2.5 ms 보다 상대적으로 큰 13.0 ms 분사기간 동안 높은 RPM 구간에서의 분사량은 연료 압력과 연료레일 체적의 한계로 인해 1,000 RPM 에 비해 변화의 폭이 큰 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 2(b)에는 분사압력이 3.0 bar 인 경우를 도시하였는데, 분사압력 1.5 bar 와 마찬가지로 3.0 bar 에서 측정된 연료 분사량(Injection per Pulse)은 1회 분

사요구량 53 cc 에 여전히 미치지 못하는 것을 볼 수 있다.

인젝터 분사기간 2.5 ms 는 1,000 RPM 부터 6,000 RPM 까지 인젝터 분사량이 미세 하지만 소량 증가한 반면 5.0 ms 와 13.0 ms 에서는 1,000 RPM 부터 6,000 RPM 까지 인젝터 분사량이 분사기간이 길어 질수록 변화폭인 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 2(c)는 분사압력이 4.5 bar인 경우이며, 분사기간 2.5 ms, 5.0 ms 로 1,000 RPM 부터 6,000 RPM 까지 실험 한 결과 각각의 분사량이 3 cc, 20 cc 로 측정이 되어 최소 1회 분사요구량인 53 cc 에는 역시 부족하였다.

분사압력이 1.5 bar, 3.0 bar 에서 측정된 분사량은 다르게 4.5 bar 에서는 분사기간이 13.0 ms 인 경우에 1000 RPM 부터 6000 RPM 까지 연료 분사량(Injection per Pulse)은 1회 분사요구량 53 cc 에 충족하는 60 ± 3 cc 라는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2(d)에는 분사압력 6.0 bar 의 경우로, 분사기간 2.5 ms 에서는 분사량 측정이 불가 하였다. 인젝터 구동기(IC 5160)에서 인젝터 작동 제어를 했지만, 높은 분사압력이 인젝터 니들 거동에 저항으로 작용하여 작동이 원활하지 못했다.

분사압력 6.0 bar 분사기간 5.0 ms 에서 측정된 분사량은 20 cc 로 분사압력 4.5 bar 와 큰 변화가 없었으며, 분사기간 13.0 ms 에서는 6.0 bar 의 높은 압력으로 인해 4.5 bar 에 비교하여 25 % 증가한 75 ± 4 cc 로 측정되었다.

분사압력 4.5 bar 측정된 분사량과 동일하게 분사기간 13.0 ms 인 경우에 1000 RPM 부터 6000 RPM 까지 연료 분사량(Injection per Pulse)은 1회 분사요구량 53 cc 에 충족하는 75 ± 4 cc 라는 것을 볼 수 있다.

기관 속도에 따른 연료 분사압력과 분사량 및 연료 분사기간, 기관 속도로 구분하여 비교, 분석한 결과 종합적으로 고려 시 100 cc 레일 체적의 경우 차량 주행 특성 중 고부하인 13.0 ms 의 분사기간에서는 연료 분사압력을 4.5 bar 로 분사 하는 것이 가장 유리하며 1,000 ~ 6,000 RPM 각각의 기관 회전속도에서 기관 출력을 보장하는 1회 최소 분사요구량인 53 cc 를 확

보할 수 있는 것으로 확인되었다.

Fig. 3에는 기관 속도에 따른 분사량의 변화를 1,000 RPM 대비 상대량으로 나타내었다.

Fig. 3(a)는 분사압력을 1.5 bar 로 설정한 경우 인데, 분사기간이 2.5 ms 인 경우 상대값이 1 보다 높은 1.05 이지만, 분사기간이 5.0 ms 와 13.0 ms 인 경우에는 각각 0.88 과 0.82 까지 낮아진 것을 볼 수 있다. 이는 연료압력이 낮기 때문에 분사기간 5.0 ms 와 13.0 ms 는 2.5 ms 대비 상대적으로 낮음을 확인 할 수 있다.

분사압력이 3.0 bar 인 Fig. 3(b)에서, 분사 기간이 2.5 ms 인 경우 6,000 RPM 에서는 1.19 로 측정되었는데, 이는 연료 압력이 1.5 bar 의 1.05 대비 0.14 상승한 것을 확인할 수 있다.

분사기간이 5.0 ms 와 13.0 ms 인 경우에는 각각 0.96 과 0.88 로 연료 압력이 1.5 bar 대비 상대적으로 높기 때문에 0.08 과 0.06 상승한 것을 확인할 수 있다.

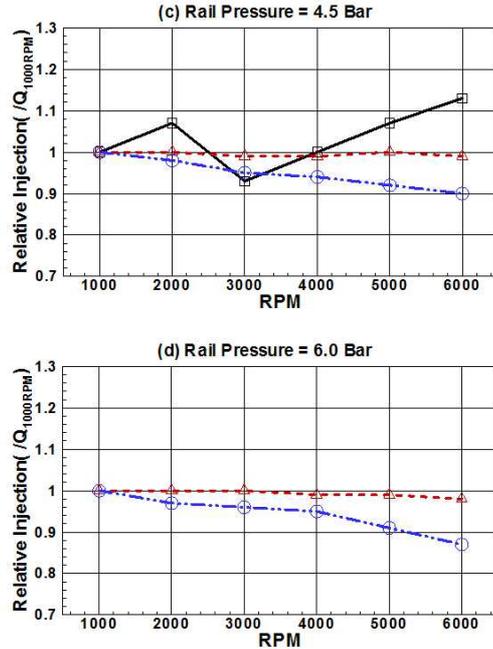
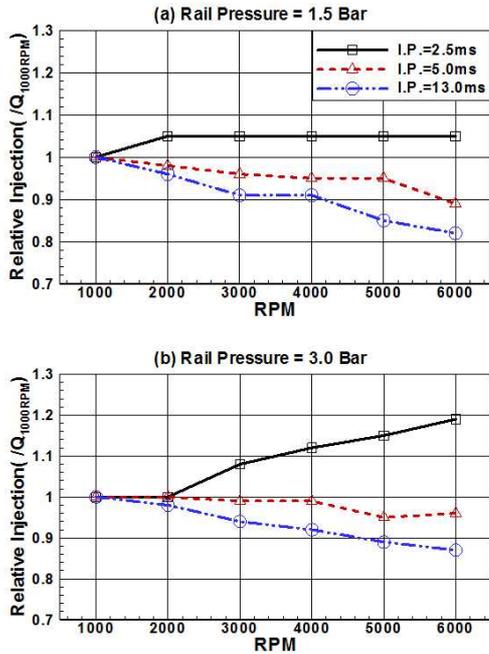


그림 3. 엔진속도에 따른 상대분사량
Fig. 3. Relative Injection as a function of engine speed ($P_r=1.5$ bar, 3.0 bar, 4.5 bar, 6.0 bar)

분사압력이 4.5 bar 인 Fig. 3(c)를 보면, 분사 기간이 2.5 ms 인 경우 6,000 RPM 에서는 1.13 으로 측정되었는데, 이는 연료 압력이 3.0 bar 의 1.19 대비 0.06 하강한 것을 확인할 수 있다. 또한 3,000 RPM 에서는 0.93 까지 하강한 후 다시 상승하는 불규칙적인 선형을 보이고 있다.

분사기간이 5.0 ms 와 13.0 ms 인 경우에는 각각 0.99 과 0.90 로 연료 압력이 3.0 bar 대비 상대적으로 높기 때문에 상대량 또한 0.03 과 0.02 상승한 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 Fig. 3(d)에 분사압력을 6.0 bar의 경우를 도시하였는데, 분사기간이 2.5 ms 의 측정값은 연료압력 6.0 bar 의 높은 압력으로 인해 니들거동에 저항으로 작용하여 측정값이 범위를 벗어나 낮게 나타났다.

분사기간 5.0 ms 과 13.0 ms 는 기관속도에 비례하여 안정적인 흐름을 보여주고 있으며 분사 압력 6.0 bar 에서는 4.5 bar 에서 측정된 값과 비슷한 경향을

보이고 있다.

전체적으로 상대적인 분사량을 보면, 분사 기간이 2.5 ms 짧을 때 기관 속도 증가에 따라 분사량은 오히려 증가하고 있으며, 분사 기간이 5.0 ms, 13.0 ms 인 경우에는 감소한다. 전 구간에서 분사량의 변동은 $\pm 20\%$ 에 달하고 있으며, 이 정도의 분사량 변화는 피드백 제어로 제어가 불가능한 수준이다.

3.2 분사기간에 따른 분사량의 변화

Fig. 4 에 각 속도별로 분사기간 변화에 따른 분사량의 변화를 나타내었다.

전체적으로 분사기간과 분사량 사이에는 직선적 관계가 성립하고 있다. 그리고 6.00 bar 에서는 분사기간 2.5 ms 에서는 분사가 불가능 한데, 그것은 레일 압력이 니들 거동을 방해하여 2.5 ms 이내에 니들이 거동하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 레일 압력에 따라 분사기간과 분사량의 기울기로 유추한 경우, 니들 거동에 필요한 시간은 1.5 bar의 경우 1.0 ms, 3.0 bar 1.5 ms 그리고 4.5 bar 의 경우 2.0 ms로 추정된다.

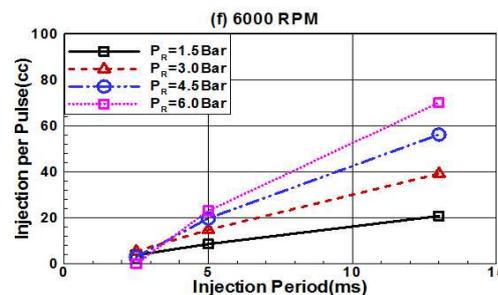
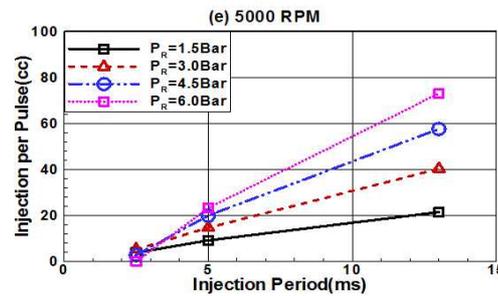
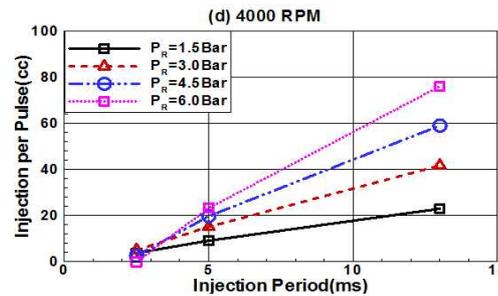
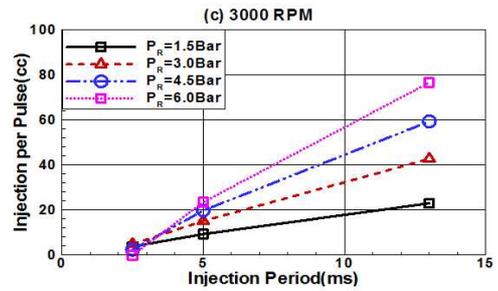
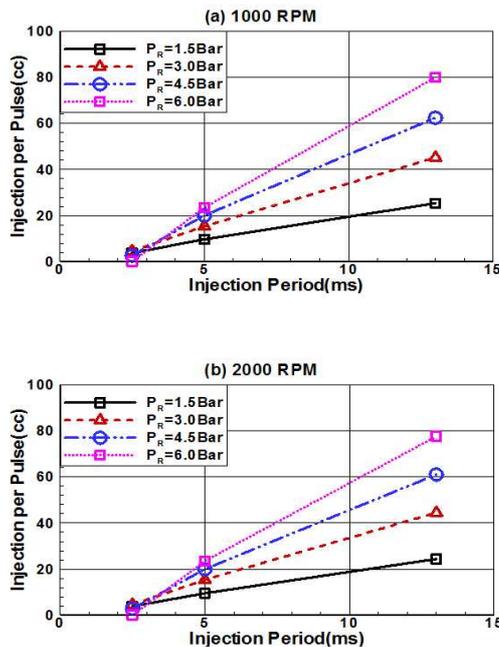


그림 4. 분사기간에 따른 펄스당 분사량
Fig. 4. Injection per pulse as a function of injection period

분사기간이 13.0 ms 연료 분사압력이 4.5 bar, 6.0

bar 로 분사 시 1,000 ~ 6,000 RPM 각각의 기관 회 전속도에서 기관출력을 보장하는 1회 최소 분사 요구 량인 53 cc 를 확보할 수 있는 것을 알 수 있다.

3.3 연료 압력에 따른 분사량의 변화

Fig. 5 에 각 속도별로 분사압력 변화에 따른 분사 량의 변화를 나타내었다.

분사 압력이 1.5 bar, 3.0 bar 인 경우 기관 속도 1,000 ~ 6,000 RPM 에서는 53 cc 확보가 안 되며, 그 림에서 판단하는 경우 4.0 bar 이상에서 분사량 확보 가 가능하다. 그러나 기관 운전 중 변동량 등을 고려할 때 5.0 bar 이상의 압력확보가 요구 된다.

기관 속도에 관계없이 분사량 변화의 경향은 유사 하다. 특히 분사 기간 2.5 ms 인 경우 1.5 bar, 3.0 bar 까지는 상승곡선이지만 4.5 bar 부터 분사량이 하강하 기 시작하였으며, 인젝터 드라이버의 제어에도 불구하고 6.0 bar 에는 분사가 이루어지지 않는다. 결국 높은 분사 압력으로 인해 니들이 거동함에 있어 저항으로 작용한 것이다.

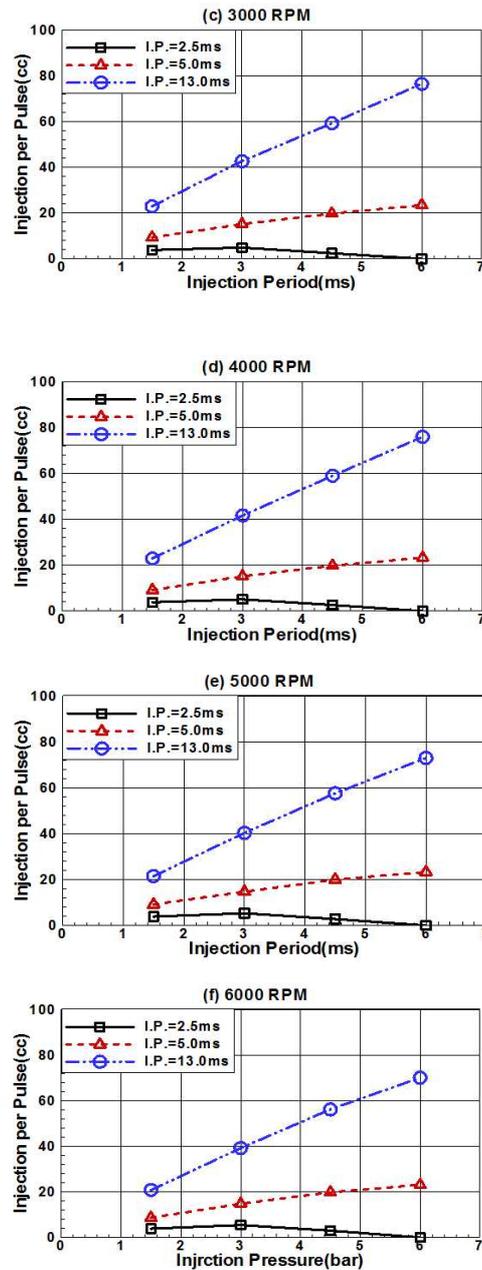
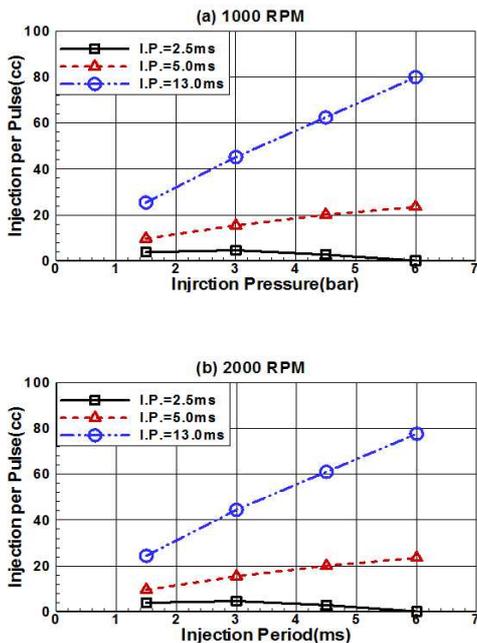


그림 5. 분사압력에 따른 펄스당 분사량
Fig. 5. Injection per pulse as a function of injection pressure

4. 결론

본 연구는 가스 연료 분사시스템에서 레일 압력과 운전속도가 연료 분사에 미치는 영향을 실험하기 위해 일반적인 연료 분사 압력과 기관속도 및 연료 분사기간을 변경하여 시험 하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 100 cc 레일 체적의 경우 차량 주행 특성 중 고부하인 13.0ms의 분사기간에서는 연료 분사 압력이 4.5 bar 로 분사 시 가장 우수하며, 1,000 ~ 6,000 RPM 각각의 기관 회전속도에서 기관출력을 보장하는 1회 최소 분사요구량인 53 cc에 충족 하는 60±3 cc 로 확인할 수 있었다.

2) 분사 압력 4.5 bar 분사 기간 2.5 ms 구간에는 기관 속도에 따라 분사량의 변동이 일정하지 않고 불규칙적이며, 분사량의 변동은 ±20% 이다. 이런 경우 피드백 제어로는 제어가 불가능한 수준이다.

3) 분사 기간이 2.5 ms 로 짧을 때 기관 속도 증가에 따라 분사량은 오히려 증가하는 반면 분사 기간 5.0 ms, 13.0 ms 인 경우에는 감소한다. 분사기간이 2.5 ms 보다 상대적으로 큰 13.0 ms 에서는 연료 압력과 연료레일 체적의 한계로 인해 6,000 RPM 구간에서 1,000 RPM 에 비해 변화의 폭이 크다.

4) 연료 분사 압력 6.0 bar 분사기간 2.5 ms 에서는 높은 분사압력으로 인해 니들이 거동함에 있어 저항으로 작용하여, 오히려 분사량이 급격히 감소한다.

5) 100cc의 체적을 가진 연료 분사 레일에서는 분사 유량 확보와 분사 안정을 위해 기통 당 분사 압력 4.5 bar 이상이 필요하다.

이번 연구에서는 100cc의 체적을 가진 연료 레일에 관한 유의미한 결과를 도출하였다. 개조 엔진의 안정된 시스템 제어를 위해서는 연료 레일의 체적을 더욱 증가시켰을 때의 연료분사 특성에 관한 실험과 실제 연소에 따른 출력 및 배기가스에 대한 논의가 향후 필요하다.

REFERENCES

[1] C. H. Chang, K. Min, C. L. Myung and K. J. Yoon, "Development of Hyundai MPI CNG(Compressed Natural Gas) Engine," 1993 KSAE Fall Conference Proceedings, pp 546-554, 1993.

[2] K. Min, C. L. Myung, C. H. Chang and K. J. Yoon, "Development of HMC's Natural Gas Vehicle," 1994 KSAE Fall Conference Proceedings, pp 187-193, 1994.

[3] Gihun Lim, Sungwon Lee, Cheolwoong Park, Young Choi and Changgi Kim "A Study on the Characteristics of Power Output for Hydrogen-Natural Gas Blend Fueled Engine with Compression Ratio Change," 2012 KSAE Spring Conference Proceedings, pp 121~123, 2012

[4] Hyung-Gu Kim, Inok Kim and Inyong 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

[5] Hyung-Gu Kim, Inok Kim and Inyong Ohm, "Experimental Study on Natural Gas Conversion Vehicle(1) - Fuel Economy, Emission and Roadability," Transactions of KSAE Vol. 23, No. 4, pp.444~453, 2015

[6] Ohm, I. Y., "Internal Combustion Engine", A-jin, Seoul, pp50~57, 2006

저자약력

곽 윤 기(Youn-Ki Kwak)

[중심회원]



- 2008년 8월 : 한국기술교육대학교 산업대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한국폴리텍 대학 자동차과 교수

<관심분야>

신호처리 및 시스템