



Common Rail 디젤기관에서 연료 분사량 변화에 따른 기관 성능에 관한 실험적 연구

홍상범* · 이봉길

한국폴리텍대학 제주캠퍼스 자동차과

Experimental Research on Functions of Engine in Accordance with the Changes of Injection Quantity of Common Rail Diesel Engine

Sangbeum Hong* · Bonggil Lee

Department of Automotive, Jeju Campus of Korea Polytechnics College, Jeju 63243, Korea
(Received 6 September 2016 / Revised 27 December 2016 / Accepted 10 May 2017)

Abstract : The purpose of this research is to analyze the effects of abnormal combustion to the engine according to the changes in the quantity of the injection fuel of the engine by measuring the internal temperature of the cylinder, changes, and smoke concentration based on the fuel injection quantity injector at the common rail engine of an eco-friendly, electronic control car. It was suggested that the smoke concentration increased after comparing the engines under normal conditions, especially if the injection quantity was less than the standard of the normal injector compared to any other experiment results. If the injection quantity of the injector is compared to the quantity of a substandard one and the quantity that exceeded the standard, the quantity of the one that exceeded the standard is highly recommended in terms of engine performance and environment-friendliness.

Key words : Common rail(커먼레일), Fuel injection(인젝터), Inside temperature of cylinder(실린더 내부온도), Smoke concentration(매연농도)

1. 서론

지금 전 세계는 대기환경 오염에 따른 지구온난화로 인한 자연재해가 세계 곳곳에서 발생함에 따라 기후변화협약의 위력이 점점 강화되고 있고, 화석연료 원유고갈의 우려에 따른 고유가 상황까지 겹치면서 화석연료 사용의 억제되고 있다.

이에 현재 자동차 신기술 발전에 초점은 친환경 자동차 개발에 맞추고 있으며, 이러한 관점에서 기술개발 또한 자동차에서 배출되는 배기가스를 줄이고 연료 소비 향상을 위한 노력들을 하고 있다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 친환경자동차 전자제어 커

먼레일 엔진의 인젝터 연료 분사량 변화에 따른 실린더 내부온도, 매연농도의 변화량을 측정하여 엔진의 연료 분사량 변화에 따른 비정상 연소에 따른 엔진에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 엔진은 국내 H사 제품으로서 4실린더 커먼레일 디젤엔진(Euro-III)을 사용하였으며 그 제원은 아래의 Table 1과 같고, 실험에 사용된 인젝터는 실험조건에 맞게 각각 분사량을 조정하여 사용하였으며, 본 연구에 사용된 커먼레일 인젝터 테스트의 제원은 아래의 Table 2와 같다.

*Corresponding author, E-mail: hongsb@kopo.ac.kr

Table 1 Specification of common rail diesel engine

Item	Specification
Engine model	D-2.0 (Euro-III)
Displacement (cc)	1,991cc
Cylinders	Inline-4
Bore × Stroke	83×92
Valvetrain	SOHC
Compression ratio	17.7:1
Max power (ps/RPM)	125/4,000
Max torque (kg-f/RPM)	29.0/2,000
Idle RPM	750±40
Injection pressure (bar)	1,350
Turbo type	WGT

Table 2 Specification of common rail injector tester

Item	Specification
Mains voltage	230 V
Mains frequency	50 / 60 Hz
Mains fuse	4 A
Outlet voltage	230 V
Power consumption idle	35 W
Power consumption max	320 W
Outer max dimensions W/D/H	500 / 520 / 755 mm
Weight	35 kg
Max. filling volume per tank	1.82 L / 0.48 gal.
Input system pressure	0-10 bar / 0-145 psi
System build-up pressure	0-1,000 bar / 0-14, 503 psi

2.2 실험방법

2.2.1 커먼레일 인젝터 분사량 테스트

인젝터 분사량 테스트는 연료 분사율이 정상인 인젝터(신품)를 사용하여 3가지 분사 조건인 Idle, 예비분사, 주분사 상태에서 인젝터 분사량을 시험하여 그 결과를 표준 인젝터 데이터로 기준을 정하였다.

연료 분사율이 비정상인 인젝터 분사율이 기준대비 기준미만인 경우와, 기준초과의 경우 Calibration shim 두께의 조정으로 Idle, 예비분사, 주분사를 시험하여 비정상 인젝터 데이터로 기준을 정하였다.

본 실험 표에 인젝터에 기재되어 있는 숫자는 실린더 번호이며 S는 정상인 경우이고, A는 분사율 기준미달인 경우이고, B는 분사율 기준초과이다.

커먼레일 인젝터 분사량 테스트는 Idle, 예비, 주

Table 3 Fuel injection rate according to injector

	Cylinder	Fuel injection rate (cc/sec)		
		S	A	B
Idle	1	0.25	0.15	0.29
	2	0.24	0.16	0.29
	3	0.24	0.17	0.29
	4	0.26	0.17	0.28
Pilot	1	0.28	0.19	0.37
	2	0.27	0.19	0.35
	3	0.26	0.21	0.36
	4	0.26	0.21	0.36
Main	1	0.33	0.26	0.42
	2	0.33	0.23	0.41
	3	0.34	0.24	0.42
	4	0.34	0.23	0.41

분사로 구분하여 측정하였으며, 측정결과는 아래 Table 3이다.

2.2.2 커먼레일 엔진 실린더 내부 온도 측정

커먼레일 엔진 내부의 실린더 온도는 엔진이 열간상태가 되는 냉각수 온도 88±1 °C인 항온 상태, 엔진 오일 온도는 90 °C ~ 100 °C, 흡기온도가 16±1 °C 범위내에서 측정을 실시하였다. 커먼레일 엔진의 실린더 내부 온도와 압력이 높기 때문에 기존의 K-type 열전대로는 측정이 불가능하여, Fig. 1과 같이 별도로 특수제작한 장치를 제작하여 측정하였다.

실린더 내부의 폭발 중심점에는 높은 온도와 압력 때문에 현실적으로 열전대 설치가 불가능하므로 특수 제작한 열전대는 Fig. 2와 같이 기존 엔진의 예열플러그 위치에 장착하였다. 기존 예열플러그 위치에 장착된 열전대는 실린더 내부의 최고 온도를 측정할 수는 없지만, 실린더 내부의 온도를 간접적

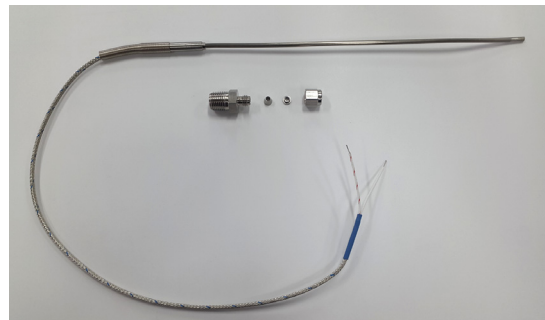


Fig. 1 Thermocouple of cylinder temperature

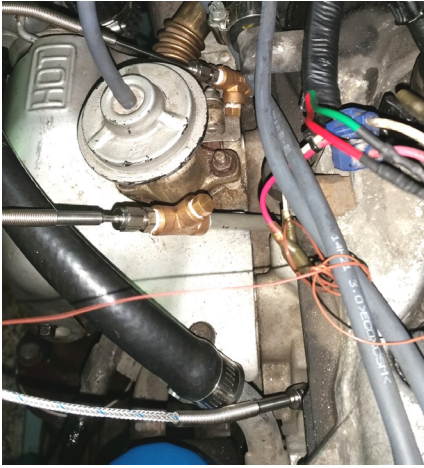


Fig. 2 Thermocouple installed on the preheating plug

으로 측정할 수 있어, 본 연구에 필요한 유용한 온도 데이터를 측정할 수 있었다.

2.2.3 실험장치 개략도

실험 조건은 엔진이 열간 운전이 되는 냉각수 온도 88 ± 1 °C, 엔진 오일온도 90 °C ~ 100 °C 범위에서 실험을 진행하였다. 전체적인 실험장치의 개략도는 다음 Fig. 3과 같다.

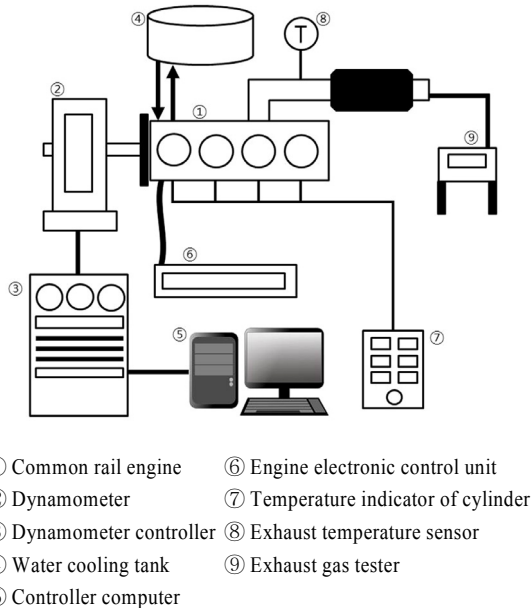


Fig. 3 Scheme of experimental equipment of common rail engine

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정상인젝터가 장착된 엔진 테스트

커먼레일 인젝터가 불량이라는 가정 하에 실험하기 전, 4개의 실린더에 분사량이 정상인 인젝터를 가지고 기본실험을 실시하였다.

S-인젝터를 장착했을 때의 실험결과 값과 A, B 인젝터를 장착했을 때의 값을 비교한다. 측정은 무부하 공회전(Idle시 750 RPM)으로부터 시작하여 2,000 RPM까지 250 RPM씩 증가시키며 5개 모드로 실험을 진행하였다. 이러한 엔진 데이터 검출은 각 회전구간의 엔진상태가 안정화 될 때까지 대기한 후에 측정하였으며, 연속 3회 측정 평균값으로 비교 분석하였다.

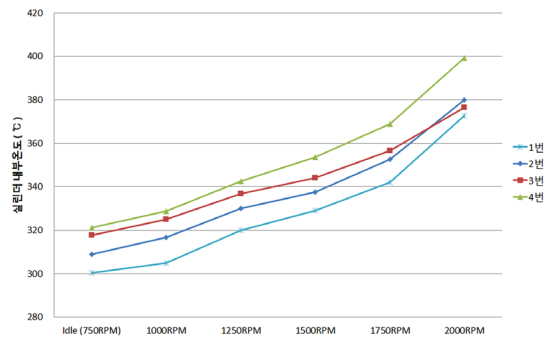


Fig. 4 Internal temperature of cylinder when S-injector installed

Fig. 4는 S-인젝터를 장착했을 때 연소실 내부 온도 측정을 한 결과이다. 여기서 공회전 750 RPM ~ 2000 RPM 구간의 회전수 변화에 따른 연소실 내부 온도 변화를 나타내고 있다. 이와 같이 그래프에 나타난 것처럼 공회전 상태에서부터 회전수가 증가하면 레일압력이 증가함에 따라 분사율이 증가되므로 연소실 내부 온도가 높아짐을 알 수 있다. 또한 1번부터 4번까지 연소실 마다 온도 차이가 나타나고 있으나 회전수가 증가함에 따라 상승하는 온도는 상대적으로 비슷한 경향을 보이고 있다.

3.2 1번 인젝터가 비정상인 엔진 테스트

A, B 인젝터를 설치하기 전에 엔진 ECU가 기존의 S-인젝터의 분사 보정량을 기억하기 때문에, 이러한 분사 보정량을 기억한 상태에서 실험을 진행

하게 되면 엔진 상태가 불안정해질 뿐만 아니라 안정화되기 까지 다소 시간이 오래 걸리기 때문에, 장비를 사용하여 엔진 ECU의 인젝터 보정량 학습값을 소거하여 초기상태로 되돌린 후에 실험을 진행하였다. A, B 인젝터를 설치한 후에는 엔진 ECU가 비정상 인젝터의 분사 보정량을 학습할 수 있도록, 회전수를 변화시키면서 충분히 구동한 후에 측정을 시작하였다.

이 때, 엔진 데이터 측정은 각 회전수 별로 모든 데이터가 안정화 되었을 때 측정을 하였고, 측정 시에는 기본적으로 3회 측정하였으며, 3회 측정값의 평균값으로 결과 값을 비교 분석하였다.

이 후, 그래프에서 S-인젝터로 실험한 결과와의 차이를 알아보기 쉽게 하기 위하여 S-인젝터의 결과는 점선으로, A-인젝터와 B-인젝터의 실험 결과는 실선으로 나타내었다.

Fig. 5는 1번 실린더에 A-인젝터(0.24 cc/sec)를 장착했을 때 실린더 내부온도를 측정된 결과로 1번 실린더의 인젝터 분사율이 S-인젝터 보다 낮을 경우에는 엔진 ECU가 인젝터 분사율을 보정하여 분사되는데, 1번 실린더의 인젝터 보정량이 전자적으로 제어할 수 있는 양의 한계치를 벗어나게 되면 다른 2, 3, 4번 실린더의 인젝터도 같이 보정하여 분사하게 된다. 그래프를 보면 1번 실린더와는 다르게 2, 3, 4번 실린더의 온도 기울기가 회전수가 높아질수록 급하게 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한 인젝터 성능으로 볼 때 1번 연소실과 보다 4번 연소실이 열발생 온도가 높은 것은 분사 기간이 길어 ECU가 최대한 수치적으로 보정을 수행하여도 불안전연소 발생한다는 것을 예상할 수 있다. 따라서 4번 실린더의 인젝터는 공회전 구간에서 열발생 온도를 볼 때 조정 심 조정을 필히 해야함을 예상할 수 있다.

Fig. 6은 1번 실린더에 B-인젝터(0.42 cc/sec)를 장착했을 때, 실린더 내부온도를 측정된 결과로 1번 실린더의 인젝터가 S-인젝터에 비해 분사율이 많은 경우도 마찬가지로 전자적으로 인젝터의 분사율을 더 이상 낮게 할 수 없기 때문에 2, 3, 4번 실린더의 인젝터도 분사율을 낮게 함으로써 엔진을 안정화시키게 된다. 또한 특이한 점은 Fig. 5는 엔진이 정상 상태일 때의 Fig. 4와 비교한 결과를 보면, 1번 실린

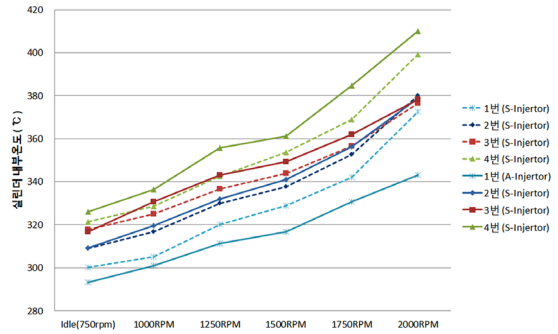


Fig. 5 Internal temperature of cylinder when A-injector installed in the cylinder #1

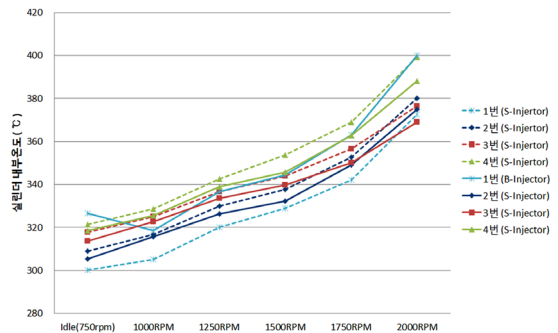


Fig. 6 Internal temperature of cylinder when B-injector installed in the cylinder #1

더의 인젝터 분사율이 낮을 때 1번 실린더 내부 온도는 각 회전 구간에서 조금씩 낮은 반면, Fig. 6에서 나타나듯이 1번 실린더의 내부온도는 공회전시, 2, 3, 4번 실린더의 내부온도보다 높은 모습을 보이고 있다. 이는 공회전시의 분사 보정이 전자적인 것보다 기계적인 공회전 조정심(Idle calibration shim)의 두께의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다.

3.3 모든 인젝터가 비정상인 엔진 테스트

실험 엔진의 모든 인젝터를 규격 미달의 제품을 적용하여 실험 운전하여 보았다. 이것은 실제 차량에서는 거의 나타날 수 없는 상황이지만, 정상적인 인젝터의 엔진 상태와 비교하여 어떤 결과가 나타나는지 알아보기 위한 실험이다.

본 실험에서 인젝터 교환과 함께 엔진헤드에 압축누설을 방지하기 위한 리테이너트(R-nut)의 동와셔를 모두 교체하고 엔진헤드의 인젝터 홀 부분의 이물질들을 완전히 제거하고 실험을 수행하였다. 이

러한 인젝터 동와서는 인젝터 고정용 전용 볼트를 이용하여 설치하는데, 이때 나사 조임에 의한 눌림 하중으로 동와서가 변형되게 된다. 따라서 1회 사용 후 재사용을 하면 연소실 압축압력이 누설되어 기관 열효율 저하로 나타나므로 인젝터 교환 시 동와서 교환은 필수적으로 수행되어야 한다.

연소압력을 추정하기 위하여 모든 실린더의 인젝터를 A-인젝터(0.24 cc/sec)로 장착하여 실린더 내부 온도를 측정 한 결과 회전속도별 온도변동은 미미했다(Fig. 7). 이것은 무부하 상태에서의 실험이기 때문에 기계적인 조정심에 의해 보정량이 줄었다 하더라도 엔진 회전수만 유지할 수 있는 최적 분사율이 분사된다면 크게 조정하지 않는 것으로 예상된다.

하지만, 모든 실린더에 B-인젝터(0.42 cc/sec)를 장착하여 실험한 결과 실린더 별 연소온도의 변동 폭이 크게 나타난다(Fig. 8). 이것은 기계적인 조정심에 의한 분사량 조정이 전자적인 분사 보정량을 상회하기 때문에 전자적으로 보정량을 줄더라도 분사율이 많아지게 되어 실린더 내부 온도가 전체적으로 높아진 것으로 판단된다.

공회전구간부터 2000 RPM 구간일 때 250 RPM 단위로 측정 한 결과 각각 회전속도와 비례하여 연소온도도 높아지는 것은 연소실별 분사시간이 회전속도가 증가함에 따라 분사시간은 줄고, 분사압력이 변동에 따라 분사율 증가로 연계되고 연소되는 연료량이 증가하여 연소실 온도 또한 증가하게 된다. 이와 같이 공회전 상태의 분사압력과 2000 RPM 일 때 분사압력은 최적의 연소상태를 유지하기 위하여 분사시간, 분사압력, 분사시기 등이 엔진운전 상태에 따라 ECU가 보정되므로 최적의 엔진성능을 유지하게 된다.

1개의 인젝터만 분사량을 변화시킨 가정의 실험과는 달리 모든 인젝터가 분사량이 달라지면서 엔진 ECU는 엔진의 부조를 막기 위한 인젝터 분사 보정량 조절을 하게 된다. 모든 인젝터가 정상 인젝터에 비해 분사량이 적었을 때에는 본 실험의 엔진 부하가 크지 않기 때문에 엔진 rpm만 유지된다면 분사 보정량을 크게 조절하지 않고 있는 것으로 판단된다. Fig. 8의 측정값을 보면 이러한 이유 때문에 정

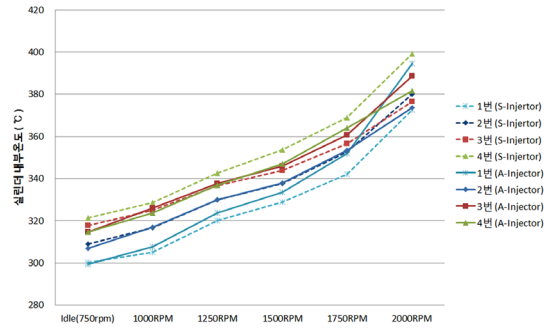


Fig. 7 Internal temperature of cylinder when A-injector installed in the all cylinders

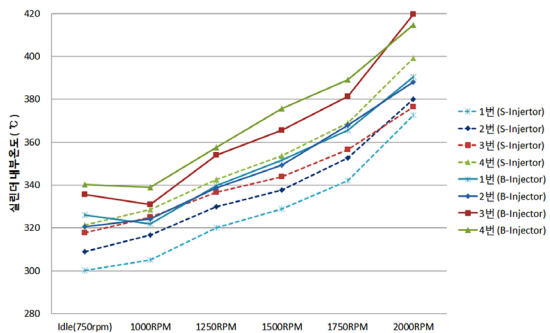


Fig. 8 Internal temperature of cylinder when B-injector installed in the all cylinders

상 엔진의 측정값과 비교하여 실린더 내부 온도가 크게 높아진 것을 볼 수 있다.

앞서 Fig. 6에서도 설명했듯이, Fig. 8에서도 Idle 때의 실린더 온도가 높은 이유는 Idle시에는 전자적인 제어보다도 기계적인 Idle calibration shim의 두께가 영향을 더 미치기 때문인 것으로 판단된다. 또한, Fig. 7의 1번 실린더와 Fig. 8의 3번 실린더의 내부 온도가 rpm이 상승함에 따라서 온도가 급격히 높아지는 모습을 볼 수 있는데, 이는 주분사량이 많을수록 회전수 상승에 따른 분사량이 늘어나게 되어 실린더 내의 온도가 상승하는 결과를 초래하게 된 것으로 판단된다.

3.4 매연 농도

Fig. 9는 1번 실린더에 A-인젝터(0.24 cc/sec)와 B-인젝터(0.42 cc/sec)를 장착했을 때, 매연 농도를 측정한 결과로 앞서 언급했듯이 1번 실린더의 인젝터 분사율이 낮은 경우에 다른 인젝터들은 분사율이

증가되기 때문에 정상일 때보다 농후한 분위기 속에서 연소하게 된다. 그러므로 매연 또한 증가 되어 매연 검출량이 정상일 때와 비교해서 높아지게 된다.

이러한 사실을 토대로 엔진에 인젝터가 불량일 생길 경우에는 매연이 정상상태의 엔진에 비해 높아짐을 알 수 있다. 이는, 보통 실제 차량에서 본 실험의 가정과 같이 단일 인젝터의 분사율이 낮을 경우가 대다수이기 때문에, 실제 자동차 점검, 정비 시에 매연이 과대 배출 된다면 연료계통 중에 인젝터의 불량이나 하나의 원인이 될 수 있다. 이와 같이 분사율이 0.24 cc/sec일 때 매연농도를 살펴보면, 매연 농도가 회전수 증가에 따라 급격히 상승하는 형태를 볼 수 있다. 이는 비정상 인젝터로 인하여 분사시간이 과다한 것으로서, 단위시간당 분사량이 높아져 연소 기간내 완전연소가 이루어지지 않은 것이 원인이라 할 수 있다. 또한 무부하 아이들 상태에서 이 정도로 매연농도가 높으면, 부하상태의 연소로 운전되었을 때는 연료소비량 증가와 열효율 감소로 이어 질 수 있다고 예상된다.

반대로, 1번 실린더에 B-인젝터(0.42 cc/sec)를 장착하여, 1번 실린더의 인젝터 분사율이 많은 경우에는 2, 3, 4번 실린더의 인젝터 역시 분사율을 줄이지만, 1번 실린더의 인젝터 분사율이 정상상태의 인젝터 분사율보다 많게 되므로 정상 엔진의 매연 농도보다는 조금 짙어지는 결과를 보이게 되었다.

실제 차량에서는 인젝터의 분사율이 많아지는 경우는 거의 찾아볼 수 없기 때문에 Fig. 9의 측정값은 활용하기가 어렵지만, 환경 측면에서 보면, 인젝터의 분사율은 적은 편보다 많은 편이 유리하다고 판단된다.

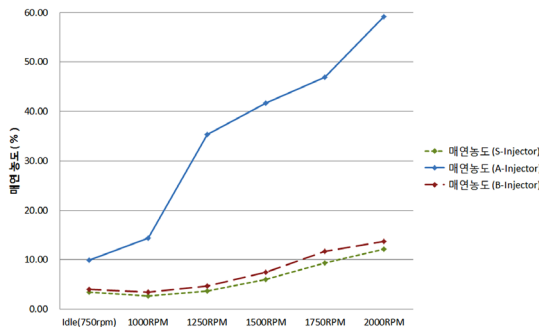


Fig. 9 Exhaust gas emission quantity when B-injector installed in the cylinder #1

3.5 커먼레일 압력 및 흡입공기량

Fig. 10, Fig. 11은 정상상태의 엔진과 1번실린더에 A인젝터 및 B인젝터, 모든 실린더에 A, B 인젝터를 설치하였을 때의 커먼레일 압력과 흡입공기량이다.

커먼레일 압력과 실린더당 흡입공기량이 실험조건별로 차이가 나지 않았다. 이것으로 보아 A, B 인젝터의 분사량의 차이가 매연 농도를 변화하게 하는 것으로 예상된다.

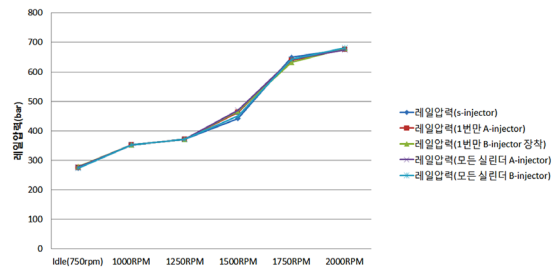


Fig. 10 Common rail pressure by experiment conditions

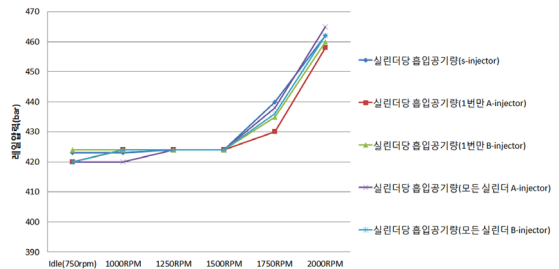


Fig. 11 Each cylinder intake air quantity by experiment conditions

4. 결론

본 연구에서는 커먼레일 디젤 엔진에서 인젝터 분사율 변화에 따른 엔진 연소실 내부온도, 배출가스 온도, 연료소비량 및 매연농도를 측정하여 엔진에 미치는 영향을 조사하고 엔진성능이 환경오염에 영향을 줄 수 있는 부분을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 인젝터 분사율이 정상 규격(0.34 cc/sec)의 엔진과 비교하여 한 개의 인젝터 분사량이 정상 규격 대비 미만(0.24 cc/sec)일 경우에 매연 농도가 높게 나타났다. 정상 규격의 엔진에서 최대 매연 농도가 2000 RPM에서 12.5 %인데 반해 한 개의 인젝터

분사량이 0.24 cc/sec 경우 최대 매연 농도가 2000 RPM에서 매연 농도가 59.2 %로 정상 규격의 엔진 보다 46.8 % 높게 배출되었다.

둘째, 한 개의 인젝터 분사율이 정상 규격 대비 미만(0.24 cc/sec)인 경우에는 한 개의 인젝터 분사율을 보정해주기 위해 ECU가 정상 인젝터인 나머지 3개의 인젝터의 분사율을 늘리게 되면서 많은 연료가 연소실로 분사되어 연소실 온도가 상승하게 되는데 이러한 상태로 오랜 시간 엔진을 구동하게 되면, 엔진 부작용(엔진부조, 출력 및 연비불량, 매연발생, 연소실 온도상승에 따른 열손상 발생, 노킹발생 및 이로 인한 엔진내부 부품 손상, 인젝터 수명단축)이 발생할 것으로 예상된다.

셋째, 한 개의 인젝터의 분사율이 0.24 cc/sec 또는 0.42 cc/sec일 경우, ECU는 엔진 부조를 막고 기준 회전속도를 유지하기 위하여 나머지 인젝터의 분사율을 보정한다. 그러나 4개의 인젝터가 연료 분사율이 큰 편차 없이 동일하게 분사율이 적거나 많은 경우에는 ECU는 기준 회전속도를 유지하기 때문에 인젝터 분사율을 크게 보정 실시하지 않는 것으로 예상된다.

넷째, 커먼레일 디젤 엔진 ECU는 인젝터의 분사 보정을 분사시간으로 조절하므로 인젝터의 분사율이 0.24 cc/sec와 0.42 cc/sec인 경우를 비교하면, 인젝터의 분사율이 0.24 cc/sec인 경우보다는 0.42 cc/sec인 경우가 엔진의 성능 및 환경적인 측면에 있어서 유리하게 작용할 것으로 예상된다.

References

- 1) S. M. Yang, Y. J. Lee and Y. K. Kim, "Effects of Pilot Injection on the Performance and Emission Characteristics of DME DI Engines Using Common Rail Fuel Injection System," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.482-487, 2002.
- 2) H. S. Kim, J. H. Won and T. Y. Chung, "An Experimental Study on the Reduction of Diesel Emission Using Low Temperature Plasma Apparatus," Transactions of KSAE, Vol.8, No.5, pp.12-19, 2000.
- 3) T. J. Kim and H. H. Cho, "Study of Emission Gas Composition According to Injector Type in a Common Rail Engine using Biodiesel Fuel," KSAE14-H0005, pp.7-10, 2014.
- 4) Y. C. Han, M. D. Eom, J. H. Ryu, Y. S. Oh and S. K. Oh, "A Study on Characteristic of Performance and Exhaust Emission in Heavy-Duty Diesel Engine Equipped with EGR," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.242-247, 1999.
- 5) Y. S. Oh, K. S. Moon, K. B. Kim and Y. C. Han, "The Development on Prediction of CNG Catalytic Converter," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.353- 358, 1998.
- 6) S. H. Bang and C. S. Lee, "Effect of Nozzle Geometry on the Spray Characteristics of Common-rail Diesel Injector," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.392-397, 2003.