

디젤엔진의 운전인자 변화에 따른 엔진의 성능특성에 관한 연구

A Study on Engine Performance Characteristics with Variation of Operating Condition in Diesel Engine

김기복^{1*}

GiBok Kim^{1*}

〈Abstract〉

In this study, It is necessary that we should study on more effective use about reciprocating engines because there are huge increase of air pollution. Diesel Engine is operated by injecting fuel directly to combustion chamber with high pressure. Diesel Engine has greater thermal efficiency and durability than Gasoline Engine. Also, Diesel Engine emitted low harmful exhaust witch caused by Gasoline Engine.

There are many ways to improve of performance and decrease of harmful exhaust by controlling injection timing, changing amount of fuel and engine speed and so on. Especially, development and application of common rail direct injection Engine cause the increase of thermal efficiency by controlling a various of operating conditions. In this study we analyze characteristics of performance by changing a various of operating conditions.

Keywords : Performance characteristics, Engine speed, Engine load, Compression ignition, Specific fuel consumption

^{1*} 정회원, 교신저자, 르노삼성자동차 교육팀장, 공학박사 ^{1*} Corresponding Author, Renault-Samsung Motors Training Team Chief, Co., Ltd. Ph. D.
E-mail: gibok.kim@renault.com

1. 서론

급속도로 진행되는 산업발전으로 인해 공장과 생산 제조업은 하루가 다르게 증가하고 있다. 자동차와 선박 역시 교통수단의 발전과 물류체계의 발전으로 인해 기하급수적으로 증가하고 있다. 이러한 현상은 화석연료의 사용 증가로 이어지며 온실가스 배출량이 급증되어 대기 오염과 기후변화에 심각한 영향을 미치게 된다. 최근에는 대기 환경오염이 심각하여 그 위험성을 실감할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전세계적으로 온실가스와 대기오염을 유발하는 유해가스에 대한 규제가 더욱더 강화되고 있다[1-3]. 온실가스 증가로 심해지는 대기환경의 오염과 지구온난화로 인하여 기존의 내연기관을 좀 더 효율적으로 활용하기 위해서는 보다 적은 양의 연료를 사용하여 좀 더 높은 효율을 낼 수 있는 고효율 엔진이 요구되며, 배기배출물 또한 획기적으로 줄일 수 있는 친환경 엔진의 연구개발이 필요하다[4-5].

대기환경 오염을 줄이기 위해서는 고효율 저공해자동차로 확대 되어야하며, 엔진의 성능을 높이기 위해 고압축비, 마찰감소, 기계효율 저감, 고효율 과급기술, 배기 열 회수 등 열효율이 높은 고효율 엔진 개발 및 유해 배기가스의 배출량을 획기적으로 줄일 수 있는 친환경 저공해자동차의 고효율 엔진 개발이 필요하다[6-7]. 본 논문에서는 디젤엔진의 성능특성에 관한 연구로 엔진회전수 변화, 엔진부하의 변화 등 운전인자 변화에 따른 성능특성을 실험을 통해 진행되었다. 또한 이러한 운전인자의 변화는 엔진의 연소 및 성능특성을 연구하는데 있어서도 중요한 인자로 작용한다[8]. 이를 바탕으로 다양한 운전인자 변화를 통해 엔진의 성능특성을 해석하는 것이 본 연구의 목적이다. 연소특성 및 성능특성 해석 인자로는 연소실 내부의 연소압력의 변화, 열발생율과 질량연소율, 지시

연료소비율, 제동 연료소비율을 해석하였다. 본 연구에서는 4행정 디젤엔진의 운전인자 변화가 연소특성과 엔진의 성능특성에 미치는 영향에 대하여 실험을 통하여 고찰하고자 한다.

2. 실험장치의 구성 및 실험방법

2.1 실험장치 구성

본 실험에 사용한 실험장치의 구성은 수냉식 직렬 4기통 커먼레일(Common rail) 직접분사식 디젤엔진, 고압연료 분사시스템, 엔진동력계, 컨트롤러, 가스분석기, 연소해석장치(DYTEK-5200), 제어장치 ECU(Electronic control unit)로 구성되었다. ECU는 커먼레일 내 압력편차를 최소화 하기 위해 공급되는 연료량을 제어하도록 설계되어 있다. ECU는 각종 센서로부터 들어오는 정보를 종합하여 운전조건에 따라 최적의 연료분사량, 분사압력, 분사시기 및 분사방법을 선택 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 커먼레일 시스템은 고압의 연료를 분사하는 분사기를 기계적이 아니라 전기적으로 제어할 수 있다. 엔진 다이내모미터 시스템의 전체 구성은 제어부분(controller part), 인터페이스 부분(interface part), 엔진동력계 부분(engine dynamometer part), 시스템 관리부분(system management)의 4부분으로 구성하였다.

엔진 및 동력계에는 센서를 장착하여 신호를 관측하였다. 엔진 다이내모미터는 실험용 엔진의 크랭크축으로부터 유니버설 조인트를 통하여 다이내모미터의 로터 축으로 동력이 전달된다. 엔진 다이내모미터의 부하는 제작된 컨트롤러를 제어할 수 있도록 제어단자를 인출하여 연결할 수 있게 하였다. 엔진 다이내모미터부 제어 출력은 전기적

인 신호를 기계적으로 변환시키는 액추에이터와 엔진 동력계로 이루어진다. 동력계 구동기는 토크를 생성한다. 다이내모미터 부하 변화는 제작된 컨트롤러를 사용하였으며, 본 실험장치의 전체적인 구성도는 Fig. 1과 같다.

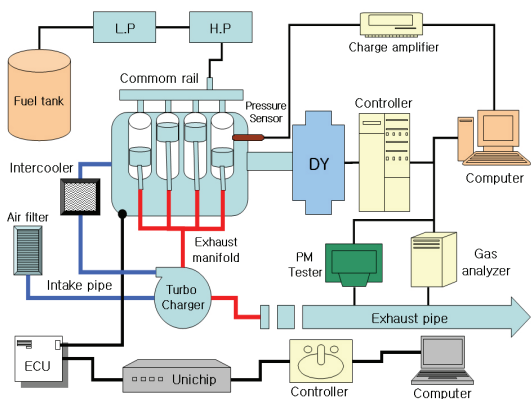


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

실험에 사용된 엔진은 수냉식 4행정 4기통 직접분사식 압축착화 디젤엔진이다. 실험엔진의 냉각수 온도가 일정하게 유지될 수 있도록 수온조절기(thermostat)와 냉각팬을 설치하였다. 실험엔진으로부터 각종 데이터를 얻기 위해 사용된 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 압축착화 디젤엔진의 운전인자 변화에 따른 엔진의 성능특성을 해석하기 위해 실험방법으로는 연료량은 동일한 조건에서 엔진의 회전수, 엔진부하를 운전변수로 설정하고 실험을 수행하였다. 실험 엔진의 회전수와 엔진부하를 변화 시키면서 각 회전수마다 연료 소비율의 변화를

Table 1. Specification of tested engine

Item	Specification
Model	D4EA (CRDI type)
Engine Type	SOHC water cooling CRDI engine four-stroke cycle
Stroke	4
Number of Cylinder	4 cylinders in-line type
Bore × Stroke	83 × 92mm
Displacement	1991cc
Compression Ratio	18.4 : 1
Max. output	Power : 115/4000(ps/rpm) Torque : 26/2000(kg.m/rpm)
Fuel Injection Pump	Bosch Common Rail Direct Injection(controlled by ECU)
Injection Nozzle	Pintle Type
Valve Timing	
IVO	BTDC° 7
IVC	ABDC 43
EVO	BBDC 52
EVC	ATDC° 6

측정하였다. 실험을 하는 동안 수냉식 열교환기를 사용하여 엔진의 윤활유와 냉각수 온도를 일정하게 유지하였고, 차량운행 시와 유사한 냉각효과를 얻기 위해 라디에이터 정면에 냉각팬을 설치하여 온도를 각 실험조건에 따라 일정하게 유지하면서 실험을 진행하였다.

제어장치에서 연료량은 일정한 조건으로 설정하고 엔진 회전수를 1,000 rpm에서 2,000 rpm까지 변화시키면서 실험을 수행하였고, 엔진의 부하 변화는 무부하, 30 %부하, 60 %부하로 운전조건을 변화 하면서 실험을 하였다. 실험 엔진의 부하 설정은 토크가 약 8 kg.m 일 때 30 %부하, 약 16 kg.m 일 때 60 %부하로 설정 하였다. 실험 엔진의 운전인자를 변화 시키면서 데이터를 취득하는 방식으로 실험을 진행하였으며, 실험엔진의 운전변수는 Table 2와 같다.

Table 2. Engine operating condition

Condition	Variation
Engine Speed(rpm)	1,000, 1,500, 2,000
Engine Load(%)	unload, 30, 60
Injection Timing	MBT

3. 실험결과 및 고찰

디젤엔진의 연소 및 성능특성을 해석하는 인자들은 실린더 내의 압력변화, 압력상승율, 열발생율, 질량연소율과 실린더 내의 화염전파 과정과 연소의 변동성 등을 들 수 있다. 실질적으로 연소 반응은 다양한 요소반응(elementary reaction)이 동시에 또는 순차적으로 발생하는 연쇄반응(chain reaction)으로 이루어진다. 실린더 내에서 연소 반응이 일어나는 화염면에서는 여러 활성종과 중간 생성물이 생성되기도 하고 소멸되기도 하는 상당히 복잡한 과정을 통하여 연소반응이 일어난다. Fig. 2는 실린더 내의 연소압력에 관한 그래프이다. 엔진의 부하는 30% 부하 조건에서 실린더 내 압력의 변화를 크랭크 각도에 따라 그래프로 나타낸 것이며, 엔진 회전수는 1,000 rpm, 1,500 rpm, 2,000 rpm으로 500 rpm 단위로 운전조건을 변화시키면서 측정하였다. 실린더 최고압력은 상사점을 지나 ATDC 15° 부근에서 가장 높게 측정이 되었으며 엔진 회전수가 낮을수록 상사점에 근접하게 측정되었다. 또한 엔진 회전수가 높을수록 실린더 내부의 압력이 높아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 엔진부하 30% 조건일 때 엔진회전수 변화에 대하여 열발생율의 변화를 크랭크 각도에 따라 그래프로 나타낸 것이며, 전체적인 그래프 양상은 실린더 압력상승율과 유사하다. 30% 부하 조건에서 엔진의 회전수 변화에 따른 최대 열발생

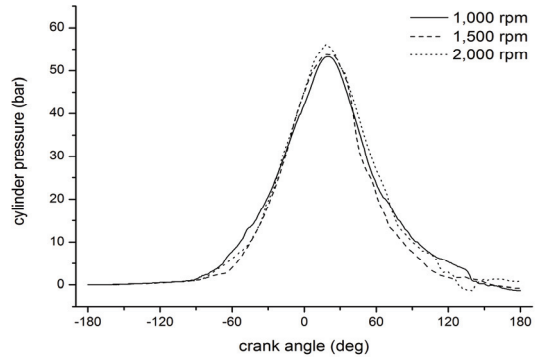


Fig. 2 Cylinder pressure(P)-crank angel(θ) diagram by changing engine speed at engine load 30%

율의 크기는 2,000 rpm에서 가장 높은 것으로 나타났다. 엔진의 회전수가 높을수록 열발생율 상승 구간이 확대된다는 것으로 해석 된다. 30% 엔진부하 조건에서 열발생율은 모든 rpm 영역에서 ATDC 30° 부근에서 가장 높게 측정되었다.

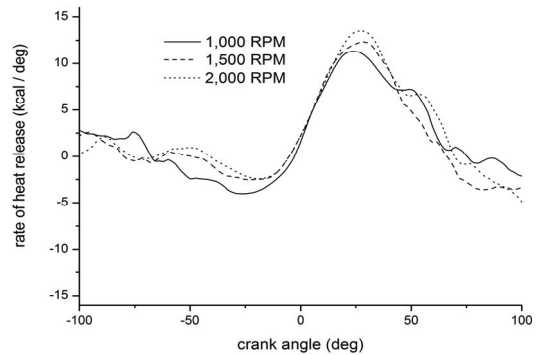


Fig. 3 Rate of heat release($dQ/d\theta$)-crank angel(θ) diagram by changing engine speed at engine load 30%

Fig. 4는 엔진부하 30% 일 때 엔진 회전수 변화에 따른 질량연소율을 그래프로 나타내었다. 엔진의 회전수가 높을수록 질량연소율의 경사가 높은 것은 연료의 질량이 급속히 연소하고 있는 것을 알 수 있으며, 질량연소율은 엔진회전수가

1,500 rpm에서 가장 빠르게 연소하고 있는 것을 확인하였다.

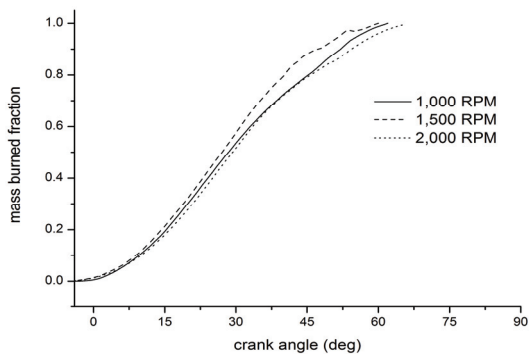


Fig. 4 Mass burned fraction - crank angle diagram by changing engine speed at engine load 30%

Fig. 5는 엔진부하 변화를 무부하에서 60 %부하까지 엔진의 부하 변화에 따른 엔진 회전수별 지시 연료 소비율에 대한 실험결과를 그래프로 나타내었다. 지시 연료 소비율은 엔진부하가 무부하 상태에서 가장 낮게 측정되었고, 엔진의 부하가 클수록 높게 측정이 되었다. 또한 지시 연료 소비율은 엔진의 회전수가 낮을 때 전반적으로 높게 측정되었으며, 엔진의 회전수가 높을수록 낮게 측정되는 경향으로 나타났다. 그러나 모든 엔진부하

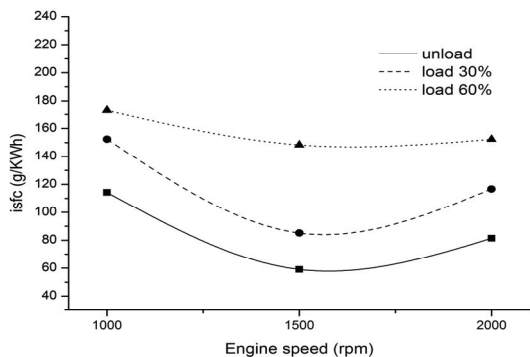


Fig. 5 ISFC - engine speed diagram by changing engine load

에 대해 약 1,600 rpm 지나고 나면 다시 상승하는 것으로 측정이 되었으며, 이는 엔진 회전수가 높아지면 기계적인 마찰력이 증가하여 마찰손실로 인해 지시 연료소비율은 다시 증가한 것으로 해석하였다.

Fig. 6~Fig. 8은 제동 연료 소비율과 지시 연료소비율을 엔진무부하 상태, 30 %엔진부하, 60 %엔진부하 조건에 대하여 실험을 통하여 측정된 데이터를 그래프로 나타내었다. 연료소비율 변화에 대한 그래프는 서로 비슷한 경향으로 나타났다. 또한 제동 연료 소비율의 최저점이 지시 연료 소비율의 저속에서 발생하는 것을 확인하였다.

Fig. 7은 엔진부하 30 %부하 조건일 때 제동 연료 소비율과 지시 연료소비율을 엔진의 회전수 변화에 따른 데이터를 그래프로 나타내었다. 지시 연료 소비율은 약 1,600 rpm을 지나면서 다시 증가 하였으며, 제동 연료 소비율은 약 1,400 rpm을 지나면서 증가하였다. Fig. 8은 엔진부하 60 %부하 조건일 때 엔진의 회전수 변화에 따른 제동 연료소비율과 지시연료소비율에 대하여 측정된 데이터를 그래프로 표시하였다. 엔진의 60 %부하에서도 30 %부하와 비슷한 경향으로 나타났다.

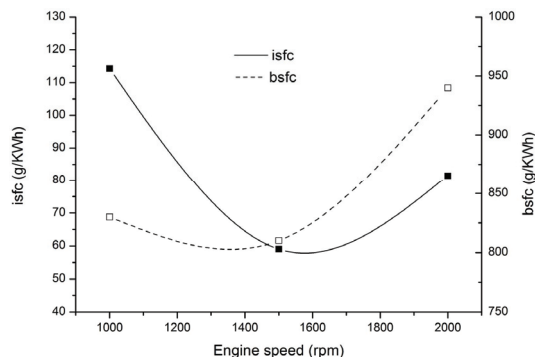


Fig. 6 Effect of BSFC and ISFC with engine speed for engine unload

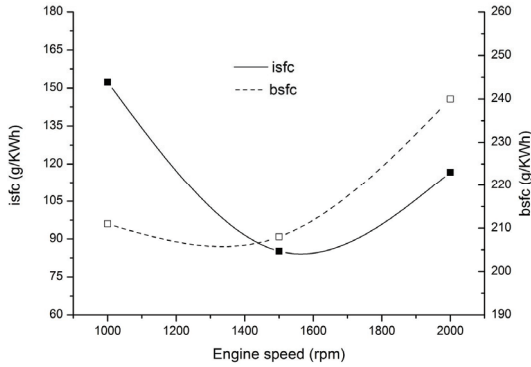


Fig. 7 Effect of BSFC and ISFC with engine speed for engine load 30%

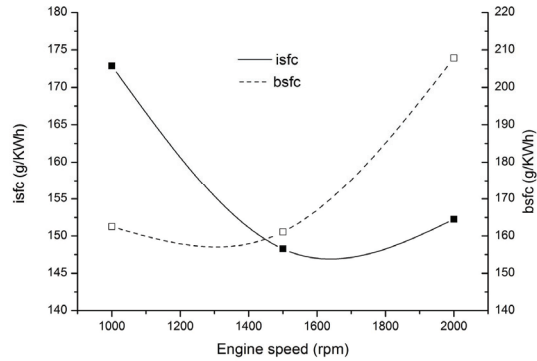


Fig. 8 Effect of BSFC and ISFC with engine speed for engine load 60%

4. 결론

본 연구에서는 4행정 디젤엔진의 연소 및 성능 특성에 영향을 주는 다양한 운전조건의 변화에 대하여 실험을 통하여 해석하였다. 해석 인자로는 실린더 내부의 압력, 열발생율, 질량연소율, 제동 연료소비율 및 지시 연료소비율을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

동일한 연료분사량을 기준으로 엔진 회전수변화와 엔진부하의 정도를 무부하, 30 %부하, 60 %부하로 설정하여 운전조건을 변화시켰을 때 실린더 내부 압력은 상사점을 지나 ATDC 15° 부근에서 가장 높게 측정이 되었으며, 엔진의 회전수가 높을수록 실린더 내부압력 최고치는 높게 측정이 되었다. 열발생율은 ATDC 30° 부근에서 전반적으로 가장 높게 나타났으며, 엔진 회전수가 2,000 rpm에서 가장 높게 측정 되었다. 엔진부하의 모든 구간에서 지시 연료 소비율은 엔진 회전수가 증가 할수록 감소하였으나 약 1,600 rpm 이상부터 다시 증가하는 것을 확인하였다. 제동 연료 소비율은 지시 연료 소비율과 비슷한 경향을 보였으며, 약 1,400 rpm 이상부터 연료소비율은 마찰손실 증가로 다시 증가 하는 것을 확인하였다. 본

연구에서는 엔진의 성능특성을 향상 시킬 수 있는 최적의 운전조건을 파악 하였다.

참고문헌

- [1] C. W. Kim, "Internal Combustion Engineering", Bookshill, (2014).
- [2] G. Borman, "Combustion Engineering", McGrawHill, (2005).
- [3] C. W. Kim, "New Vehicle Engineering", Chongmungak, (2012).
- [4] G. B. Kim, C. W. Kim, C. S. Yoon, "A Study on the Combustion and Performance Characteristics in Compression Ignition CRDI Diesel Engine", KSIC, Vol. 19, No. 1, pp. 31-38, (2016).
- [5] G. B. Kim, I. D. Choi, J. H. Ha, C. W. Kim, "A Study on Combustion and Emission Characteristics in Compression Ignition CRDI Diesel Engine", KSIA, Vol 17, No. 4, pp.234-244, (2014).
- [6] G. B. Kim, C. S. Yoon, C. H. Baek, K. S. Cho, "A Study on the Performance characteristics in 2-Stroke Diesel Engine", KSMTE Annual Spring Conference, pp. 131, (2018).

[7] G. B. Kim, “The Effect of Scavenging pressure on Performance Characteristics in Two-Stroke Diesel Engine”, KSIC, Vol. 21, No. 2, pp. 45-51, (2018).

[8] G. B. Kim, “A Study on Engine Performance characteristics with Scavenging Condition Variation in 2-Stroke Diesel Engine”, KSIC, Vol. 22, No. 3, pp. 259-264, (2019).

(접수: 2020.06.04. 수정: 2020.06.24. 게재확장: 2020.07.03.)