

# 가솔린 직접분사식 압축착화 엔진의 가능한 운전영역에 관한 기초실험 연구

차준표\* · 윤성준\* · 이석환\* · 박성욱\*\*†

## A Basic Experimental Study on Potential Operating Range in Gasoline Direct-Injection Compression Ignition (GDICI) Engine

Junepyo Cha\*, Sungjun Yoon\*, Seokhwon Lee\*, Sungwook Park\*\*†

### ABSTRACT

The present work is an experimental investigation on potential operating range using directly injected gasoline fuel in a single-cylinder compression ignition (CI) engine. The objectives of present study were to apply auto-ignited combustion to gasoline fuel and to evaluate potential operating range. In order to auto-ignite gasoline fuel in CI engine, the fuel direct-injection system and the intake air system were modified that a flow rate and temperature of intake air were regulated. The heat-release rate (HRR), net indicated mean effective pressure (IMEP), start of combustion (SOC), and combustion duration were derived from in-cylinder pressure data in a test engine, which has 373.33cc displacement volume and 17.8 compression ratio. The exhaust emission characteristics were obtained emission gas analyzer and smoke meter on the exhaust line system.

**Key Words** : Gasoline, Direct-Injection, Compression-Ignition, Operating range

각 국가에서는 최근의 화두인 환경문제를 해결하고자 전 산업분야에 걸쳐 환경 규제를 강화하고 있으며, 특히 내연기관 분야에서는 배기 규제 뿐만 아니라 에너지 소비 측면에서의 연비 규제 또한 강화하고 있다. 이에 내연기관 분야의 연구자들은 연료 (Fuel), 신연소 기법 (Advanced combustion technology), 후처리 장치 (After-treatment device) 등 내연기관의 전 방위적인 분야에 관하여 많은 연구를 하고 있다[1-3].

이러한 내연기관은 크게 압축착화기관 (Compression ignition engine)과 불꽃점화기관 (Spark ignition engine)으로 나뉠 수 있다. 압축착화기관은 높은 압축비와 높은 세탄가 (Cetane number)를 갖는 연료를 사용하여 자착화 (Auto-ignition) 연소를 한다. 그러므로, 높은 열효율과 희박 연소에 의한 연비 향상의 가능성이 크다. 반면에, 연소실에 직접 분사된 연료의 농후한 영역에서 입자상물질 (Particulate matter, PM)이 발생하며, 자착화 연소에 의하여 급격하게 증가하는 연소 온도 (Combustion temperature)에 의하여 질소산화물 (NOx)이 발생하는 단점을 갖고 있다

[4]. 한편, 불꽃점화기관은 연료와 흡입 공기가 미리 균일하게 혼합된 상태에서 불꽃점화 (spark ignition)에 의한 예혼합 연소 (Premixed combustion)를 기본으로 한다. 화염전파에 의한 연소로 인하여 연소 소음과 진동이 적으며 입자상 물질의 발생이 거의 없고, 높은 엔진회전속도에서도 안정된 연소 제어가 가능하다. 하지만, 화염전파에 의한 연소는 이론공연비 영역에서 가능하기 때문에 희박 연소를 하는 압축착화기관에 비하여 연료 소모율 (Specific fuel consumption, SFC)이 높고, crevice volume에서 미연탄화수소 (Unburned hydrocarbon, UHC)와 일산화탄소 (Carbon monoxide, CO)가 다소 발생하는 단점을 갖는다[5].

이와 같이 서로 다른 연소 방식을 취하고 있는 두 내연기관은 더욱 엄격해지는 규제를 극복하기 위하여 서로의 장점을 취하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 이로 인하여 두 기관의 경계가 점차 모호해지고 있다. Mingi Choi[6] 등은 이러한 연구 분야 중 하나인 가솔린 직접분사식 압축착화 (Gasoline direct-injection compression ignition, GDICI) 연소에 관하여 실험과 해석 연구를 수행하여 디젤 연료와 비교하였다. 그 결과로 디젤 연료와 비교하여 비슷한 연소 특성이 나타났으며 입자상물질이 크게 저감 되었다. 하지만, 가솔린 연료의 경우에 흡입 공기 온도를 2

\* 한양대학교 대학원

\*\* 한양대학교 기계공학부

† 연락처, parks@hanyang.ac.kr

TEL : (02) 2220-0430 FAX : (02) 2220-4588

00°C와 300°C로 제어하여 실험하였다. 이는 가솔린 직접분사식 압축착화 기관에서는 흡입 공기 온도를 제어하는 별도의 장비가 필요함을 의미한다.

그러므로 본 연구에서는 흡입 공기 온도가 상대적으로 낮은 대기 온도와 비슷한 상태에서 실험하여 가솔린 직접분사식 압축착화 기관의 운전 가능한 영역에 관하여 연구하였다.

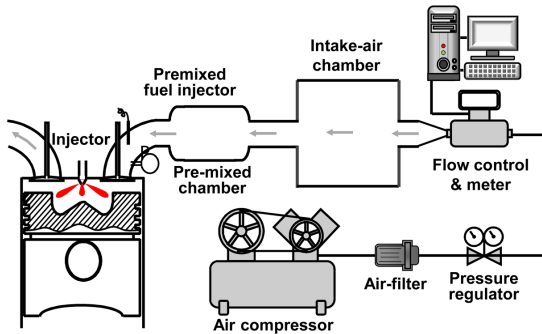


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

이를 위하여 단기통 압축착화 엔진을 구성하였으며 그 주요 제원을 Table 1에 나타내었다. 실험 엔진은 압축비가 17.8:1이고 배기량이 373.3 cc인 커먼레일 시스템을 갖추고 있으며, DC 동력계 (55kW)를 이용하여 엔진의 운전속도를 제어하였다. 분사시스템에서는 가솔린의 낮은 윤활성을 극복하고 고압으로 가압하기 위하여 병렬로 연결된 두 개의 공압펌프 (HSF-300, Haskel)를 이용하였다.

Table 1 Specifications of the test engine

Description	Specification	
Type	Single cylinder DI engine	
Bore×Stroke (mm)	75×84.5	
Displacement volume (cc)	373.3	
Compression ratio	17.8	
Valve type	DOHC 4	
Intake valve	Open	BTDC 8°
	Close	ABDC 52°
Exhaust valve	Open	BBDC 8°
	Close	ATDC 38°
Fuel injection system	Bosch common-rail	
Number of injection hole	6	
Nozzle hole diameter (mm)	0.128	
Spray angle (°)	156	

분사량 (Injection mass)과 분사 타이밍 (Injection timing)을 제어하기 위하여 NI CompactRIO를 기반으로 하여 자체 개발한 ECU를 사용하였다. 이 ECU는 임베디드 컨트롤 (NI-9024, NI)과 재구성이 가능한 임베디드 사시 (NI-9114, NI)와 다양한 입출력 모듈들로 구성되어 있으며, Labview software로 프로그래밍 하였다.

연소해석을 위하여 엔진 헤드에 피에조 압전 소자 방식의 압력센서 (6057A80, Kistler)를 엔진 헤드 glow-plug 위치에 설치하였고, DAQ보드 (PCI-MIO-16E-1, NI)와 Labview 소프트웨어를 사용하여 연소실 내 압력데이터를 실시간으로 취득하였다. 또한, 배기가스 분석을 위하여 Soot의 농도를 측정하는 매연측정기 (Smoke meter-415 S, AVL)와 유해배출가스 농도를 측정하는 배기 분석기 (MEXA-554JK, Horiba)를 이용하였다[7].

Table 2 Operating conditions

Item	Condition
Engine speed (rev./min)	1200
Intake temperature (K)	323 ± 1
Mass flow rate of intake air (kg/h)	12.3
Equivalence ratio	0.5 ~ 0.7
Injection mass (mg/cyc.)	12, 14, 16
Injection pressure (MPa)	70, 100
Injection timing (deg. CA aTDC)	-110 ~ -32
Test fuel	Gasoline

본 연구에서는 가솔린 직접분사식 압축착화엔진에서 안정적인 연소가 가능한 운전영역의 범위를 찾기 위하여 넓은 분사시기 (Injection timing)를 스위프 (sweep)하였으며, 흡입 공기를 323K으로 제어하였다. 자세한 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2는 분사압력과 분사시기에 따라 가솔린 직접분사식 압축착화 연소의 특성 중 대표적인 도시평균유효압력 (Indicated mean effective pressure, IMEP)를 나타낸 것이다. 옥탄가 (Octance number)가 높은 가솔린은 자착화 연소가 어렵기 때문에 농후한 당량비 조건에서 연소를 하기 위하여 12mg, 14mg, 16mg ( $\Phi=0.51, 0.60, 0.69$ )의 분사량으로 실험을 수행하였고, 70MPa, 100MPa의 높은 분사압력으로 분사하였다. 분사압력이 70MPa인 경우에 16mg 이하의 분사량 ( $\Phi<0.69$ )은 연소가 일어나지 않았으며, 70MPa 이하의 분사압력에서는 어떠한 분사량과 분사시기에서 연소가 일어나지 않았다. 하지만, 분사압력이 100MPa로 증가한 경우에는 14mg 이상의 분사량 ( $\Phi>0.60$ )에서 연소가 가능한 결과를 보였다. 또한, 가장 지각된 분사시기가 -32°CA aTDC이며, 이

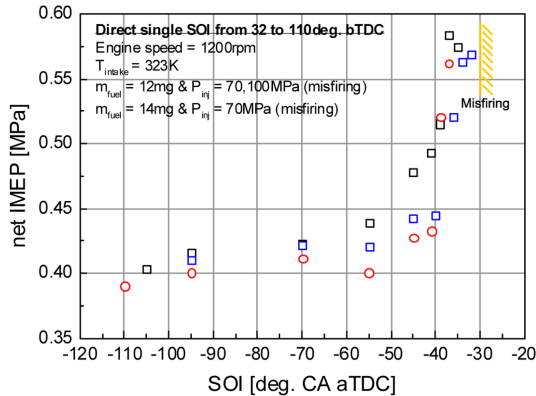
때의 연소 시작점 (Start of combustion, SOC)은  $2.4^{\circ}\text{CA aTDC}$ 이다. 즉, 착화지연기간 (Ignition delay)이 약  $34^{\circ}\text{CA}$ 이며, 더욱 진각된 분사시기의 착화지연기간이 더욱 길다. 이는 가솔린 직접분사식 압축착화 연소는 예혼합 압축착화 (Homogeneous charge compression ignition, HCCI) 연소와 매우 비슷한 연소 미케니즘 (Combustion mechanism)을 갖는 것으로 판단된다.

## 후 기

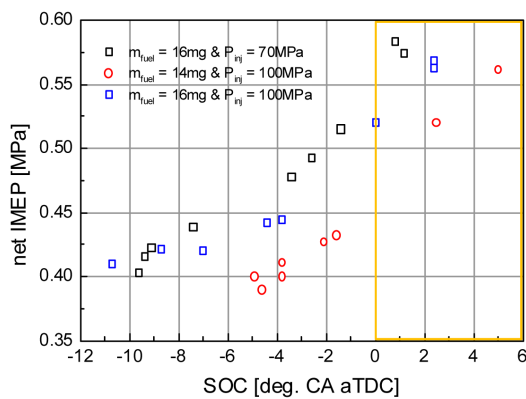
본 연구는 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 중견연구자지원사업 (2012R1A2A2A01046859)의 지원을 받아 수행되었음.

## 참고 문헌

- [1] J. E. Dec, "Advanced compression-ignition engines - understanding the in-cylinder processes", Proceedings of the Combustion Institute 32 (2009) 2727-2742.
- [2] S. Park and C. L. Myung, "Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engine: A Review", International Journal of Automotive Technology 13 (2012) 9-22.
- [3] J. Wang, Y. Ji, Z. He, M. Crocker, M. Dearth, R. W. McCabe, "A non-NH<sub>3</sub> pathway for NO<sub>x</sub> conversion in coupled LNT-SCR systems", Applied Catalysis B: Environmental 111-112 (2012) 562-570.
- [4] J. E. Dec, "A Computational Study of the Effects of Low Fuel Loading and EGR on Heat Release Rates and Combustion Limits in HCCI Engines", SAE Tech. Paper (2002) 2002-01-1309.
- [5] Alex C. Alkidas, "Combustion advancements in gasoline engine", Energy Conversion and Management 48(2007), pp. 2751-2761.
- [6] Mingi Choi, Junepyo Cha, Seokjoo kwon and Sungwook Park, "Numerical and experimental study of combustion and emission characteristics in gasoline direct-injection compression ignition engines using intake preheating", Proc. IMechE Part D: J. Automobile Engineering 227(4), pp. 459-471, 2013.
- [7] Junepyo Cha, Seung Hyun Yoon, Mun Soo Chon, Chang Sik Lee, "Combustion and nano-particulate emissions characteristics of a compression ignition engine fueled with oxygenated blending fuel", Transactions of KSAE, vol. 17, No. 5, pp. 61-66, 2009.



(a) Start of injection timing



(b) Start of combustion

**Fig. 2** Effects of the injection pressure and timing on the combustion characteristics

또한, Fig. 2(b)에서 보듯이 연소 시작점이 TD C 이후와 그 근처에서 일어나는 경우에 안정적인 연소 특성을 보인다. 이는 운전 가능한 분사시기 영역이 좁은 특성을 나타낸다. 반면에, 70MPa의 분사압력에서는 상대적으로 분사시기 영역이 100MPa 분사압력의 경우보다 넓어진 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 결과를 통하여 가솔린 직접분사식 압축착화 연소는 연료의 분사압력과 분사시기에 민감한 것으로 판단된다. 이에 더 자세한 parametric study가 필요할 것으로 사료된다.