예혼합 압축착화 엔진에서 가솔린-디젤 연료의 연소 및 극미세입자 배출 특성에 관한 실험적 연구

윤승현* · 이두진** · 이창식†

An Experimental Study on the Combustion and Nanoparticle Emission Characteristics of Gasoline-diesel Fuel in a Premixed Charge Compression Ignition Engine

Seung Hyun Yoon, Doo Jin Lee and Chang Sik Lee

Key Words: Premixed charge compression ignition(PCCI, 예혼합 압축착화), Nanoparticle(극미세입자), Soot(매연), Nitrogen oxides(NO_x , 질소산화물)

Abstract

The aim of this work was to investigate the combustion and nanoparticle emission characteristics of premixed charge compression ignition (PCCI) combustion at various test conditions using a single cylinder common-rail diesel engine. In order to create the homogeneity of fuel-air mixture, the premixed fuel (gasoline) was injected into premixing chamber during the intake process and then the diesel fuel was directly injected into the combustion chamber as an ignition source for the gasoline premixture. From these results, it revealed that the ignition delays and combustion durations were gradually prolonged and the peak combustion pressure were increased because diesel fuel was injected early injection timing with the increase of premixed ratio. In addition, as the increase of premixed ratio, total particle number is generally decreased and particle volume also indicated low levels at the direct injection timing from BTDC 20° to TDC. At further advanced injection timing, total particle number and volume were generally increased.

1. 서 론

최근 전 세계적인 화석에너지 소비의 증가는 에너지 수요의 불균형 및 에너지 가격의 불안정을 초래하여 에너지 안보에 중요한 과제가 되고 있다. 또한, 오존층 파괴, 산성비, 소음, 심각한 대기오염을 비롯한 환경문제

에 대한 관심은 날로 증가하고 있으며, 지구 온난화 문제를 해결하고자 이산화탄소(CO_2) 규제 또한 더욱 강화되고 있다^(1,2). 이에 따라, 대기오염의 주요 원인인 자동차의 저배기 기술의 중요성은 더욱 증대되어 세계 각국에서는 배기 배출물 규제에 대응하기 위하여 다양한 연소기술 개발에 관한 연구를 활발히 수행하고 있다. 특히 디젤 엔진의 경우 가솔린 엔진보다 연비가 우수하며, CO_2 배출량이 현저히 적기 때문에 최근 디젤 엔진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^(3,4).

그렇지만, 디젤 엔진에서 배출되는 입자상물질(PM)과 질소산화물(NO_x)은 엔진 시스템의 개량과 후처리 장치에 의한 방법만으로 더욱 강화되는 배기 규제를 만족시키기에는 한계가 있다. 따라서 연소 과정 중 유

(2012년 3월 24일 접수 ~ 2012년 3월 26일 심사완료, 2012년 6월 22일 게재확정)

*영남이공대학교 자동차계열

**한국연구재단

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286

해 배기 배출물 생성 억제가 가능한 예혼합 압축착화 (premixed charge compression ignition, PCCI) 청정연소 기술이 기존의 디젤 연소의 높은 열효율을 유지하면서도 NO_x 와 PM의 동시저감이 가능하기 때문에 유해 배기 배출물에 대한 규제에 대응할 수 있는 기술로 평가되고 있다^(5,6).

본 연구에서는 예혼합 압축착화 엔진의 문제점으로 지적되고 있는 부분, 즉, 엔진의 운전 가능한 영역이 저속, 저부하의 특정 구간에 한정되며 낮은 연소온도로 인한 불완전 연소가스의 배출이 증가하고, 예혼합기의 착화시기 제어의 문제점 등^(7,8)을 해결하기 위하여 기존의 커먼레일 디젤 엔진에 예혼합 연료 공급 장치를 적용하여 연료의 증발특성이 우수한 가솔린 예혼합기를 연소실에 공급한 후, 연소실로 직접 분사되는 디젤 연료를 이용하여 착화시키는 PCCI 엔진 시스템을 적용하였다. 착화원이 되는 디젤 연료의 직분사시기와, 예혼합기와 직분사 연료량을 다양하게 변화 시켜면서 연소 및 배기 특성을 비교 분석하였으며, 이를 기존의 디젤 연소와 비교 분석하였다.

또한, 현재에 디젤 엔진에서 배출되고 있는 미세입자의 개수와는 관계없이 중량단위의 규제만 이루어지고 있으나 최근 연구결과에 따르면 크기가 작은 극미세입자가 인체에 더 유해한 것으로 알려져 있어 향후에는 현재의 중량 단위의 입자상물질의 규제가 아닌 크기별 개수단위의 규제가 강화될 것이다⁽⁹⁾. 따라서 예혼합 압축착화 연소와 운전조건의 변화에 따른 미세입자의 입경분포를 측정하여 극미세입자의 배출물 특성에 미치는 영향 등을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Gasoline-diesel 연료의 예혼합 압축 착화 연소 특성 및 극미세입자 배출 특성을 분석하기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였으며, 배기량 373.6 cc, 고압펌프와 커먼레일 (common-rail) 분사 시스템이 적용된, DOHC 4밸브식의 압축비 17.8인 단기통 직접분사식 디젤엔진을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험용 엔진의 세부 제원은 Table 1과 같다.

실험 장치는 예혼합 연료와 연소실로 직접 분사되는 연료 공급 제어장치, 연료 압력 제어장치, 냉각수와 윤활유 온도제어 및 공급 장치, 그리고 연소 및 배

Table 1 Specification of high speed camera and light source

Item	Description
Type	DI diesel engine
Bore×Stroke (mm)	75.0 × 84.5
Swept volume (cc)	373.3
Compression ratio	17.8
Combustion chamber type	Reentrant
Fuel injection system	Common-rail
Number of nozzle	6 holes
Nozzle diameter (mm)	0.128
Spray angle	156°

Fig. 1 Schematic of the experimental system

기 분석을 위한 장치로 구성하였으며, 엔진에 공급되는 연료의 압력을 일정하게 유지하며 조절하기 위하여 연료압력 제어장치(TEMS, TDA 1100)를 사용하였다. 커먼레일 인젝터는 별도의 인젝터 드라이버(TEMS, TDA 3300)에 의하여 통전시간을 조절하여 분사량을 제어할 수 있도록 하였으며, 또한 두 인젝터의 분사시기와 분사량을 제어하기 위해 크랭크 각 센서(1800 pulse/rev)와 캠축 위치 센서를 동기화하여 설치하였다. 이들 신호를 이용하여 타이밍 펄스 발생기(timing pulse generator)에서 0.1° 단위로 분사시기의 제어가 가능하도록 하였다. 또한, 배기가스 분석을 위해 soot 측정기(AVL, 415S), NO_x 측정기(Yanaco, BCL-511), HC 및 CO 분석기(Horiba, MEXA-554JK) 등을 사용하였다.

엔진으로 부터 배출되는 극미세입자의 분석을 위해 희석장치인 Raw gas diluter와 SMPS(Scanning mobility

Table 2 Experimental test conditions

Item	Description
Premixed injection fuel	Gasoline
Direct injection fuel	Diesel (ULSD)
Engine speed	1200 rpm
Coolant temperature	343 ± 1 K
Total equivalence ratio	0.43
Direct injection pressure	120 MPa
Direct injection timing	BTDC 40° ~ TDC
Direct injection mass	2 mg ~ 10 mg
Premixed ratio	0.0 ~ 0.8
Premixed injection timing	TDC
Premixed injection pressure	2 MPa

particle counter, CPC(Condensation particle counter)등을 사용하였다. Raw gas diluter는 엔진의 배기관으로부터 배출되는 배기가스를 CPC가 측정 가능한 농도의 가스로 희석 시키고 고온의 조건으로 유지하여 배출가스의 응축을 방지하여 SMPS를 통해 미세입자를 크기별로 분류한 후 CPC를 이용하여 개수를 측정하게 된다. 본 시스템을 이용해, 약 10.4~392.4 nm 범위의 입자상 물질을 측정하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에 사용된 예혼합 연료는 2 MPa의 압력으로 분사되는 가솔린 연료이고, 연소실로 직접 분사되어 착화원을 형성하는 연료는 초저유황 경유(Ultra low sulfur diesel)로 Table 2는 본 연구에 적용된 실험 조건을 나타낸 것이다. 엔진의 회전속도는 1200 rpm으로 일정하게 유지하였고, 엔진의 성능 및 극미세입자 배출 특성을 규명하기 위해서 연료의 총 공급량은 디젤 연료 저위발열량 기준으로 10 mg/cycle($\Phi=0.43$)에 해당하는 연료를 분사 하였으며, 예혼합률의 변화와 연소실 내 직분사 되는 연료의 분사시기를 BTDC 40°에서 TDC까지 변화시켜 실험을 수행하였다. 연소실로 직접 분사되는 초저유황경유와 예혼합 연료로 사용된 가솔린의 비율을 나타내기 위하여 연소실내로 공급되는 각각의 연료 총열량에 대한 예혼합 분사되는 연료의 열량의 비율인 예혼합율(r_p , premixed ratio)를 계산하여 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Gasoline-diesel 예혼합 압축착화 연소 특성

Fig. 2는 동일한 엔진회전속도 1200 rpm과 분사조건(분사압력: 120 MPa, 분사량: 10 mg/cycle($\Phi=0.43$))에서 연소실로 직접 분사되는 디젤 연료의 분사시기를 각각 BTDC 30°와 5°와 변경시킨 경우에, 예혼합율의 변화(0.2~0.8)에 따른 연소 특성을 나타낸 것이다.

일반적으로 예혼합된 가솔린 연료의 연소는 연소실 내의 주변온도와 압력에 많은 영향을 받게 된다. 따라서 예혼합 압축착화 연소에서는 예혼합된 연료의 착화를 촉진할 수 있는 직분사 디젤 연료의 분사시기 변화가 중요한 변수로 작용하고 있다. 직분사시기 BTDC 30°와 5°와 예혼합율(r_p) 0인 경우 기존의 디젤연료의 연소특성과 동일한 형태를 나타내며, 분사시기가 지각된 경우인 5°의 경우 확산연소구간이 길어지는 전형적인 연소특성

(a) Injection timing=BTDC 30°

(b) Injection timing=BTDC 5°

Fig. 2 Effects of premixed fuel ratio and injection timing on the combustion characteristics (1200 rpm)

Fig. 3 Effects of premixed fuel ratio and injection timing on IMEP characteristics (1200 rpm)

을 나타내고 있다. 예혼합 연소의 경우 최고 연소압력은 예혼합율(r_p)이 증가 할수록 높아지고 착화 지연기간이 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 분사시기 BTDC 5°의 경우 예혼합율(r_p)이 증가 할수록 기존의 압축착화 연소특성에서의 확산연소 구간(mixing controlled combustion phase) 중 후연소 구간에 해당하는 열발생율은 감소하는 특성을 보이고 있다.

Fig. 3은 예혼합율과 직분사 연료의 분사시기 변화 따른 연소성능 관계를 나타낸 것이다. 엔진의 출력을 나타낼 수 있는 IMEP(indicated mean effective pressure)는 예혼합율이 증가할수록 대체적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 직분 디젤의 분사시기가 지각됨에 따라 IMEP가 다소 증가하는 것으로 보아 착화원인 디젤 연료를 지각된 시기에 분사하는 것이 예혼합된 가솔린 연료의 연소를 촉진하는 데에 효과적임을 알 수 있다. 이것은 디젤 연료의 분사시기가 지각됨에 따라 예혼합연료의 착화시점에서 연소실의 온도, 압력이 상승하여 예혼합 연료(가솔린)의 연소가 촉진되었기 때문으로 판단된다. 예혼합율(r_p) 0.8과 분사시기 TDC 조건인 경우 IMEP값이 급격히 감소하게 되는데 점분사되는 연료의 양이 작음으로 인한 실화의 영향으로 판단된다.

3.2 Gasoline-diesel 예혼합 압축착화 배기 배출물 특성

Fig. 4는 예혼합율(r_p)과 직분사시기의 변화에 따른 배기배출물 Soot와 NO_x 배출량의 상관관계를 나타낸 것이다.

일반적인 기존디젤 연료의 압축착화 연소에서는 연료

Fig. 4 Effects of premixed fuel ratio and injection timing on the soot and ISNO_x emissions characteristics (1200 rpm)

의 분사시기의 변화에 따라 NO_x와 Soot 배출량의 관계는 trade-off 관계를 가지게 되어 두 배출물의 동시 저감은 상당히 어려운 문제점을 가지고 있다. Fig. 4(a)의 Soot의 경우 직분사시기 BTDC 30° 이상 조기 분사한 조건에서 예혼합율이 증가 할수록 배출량이 현저히 감소하는 결과를 나타내고 있으며, NO_x 배출물의 경우 TDC에서 분사시기가 진각 되는 경우에서 압축행정 중에 급격한 연소가 발생하여 NO_x의 발생량이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있으나, BTDC 25°보다 분사시기가 진각 되면 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 이상의 배기 특성에서 조기분사와 예혼합 연소는 Fig. 3에서와 같이 출력특성은 BTDC 20°에서 TDC까지의 IMEP값에 비하여 다소 감소하는 결과를 보이나 NO_x와 Soot 배출물의 동시저감에 효과가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 5 Effects of premixed fuel ratio and injection timing on the ISHC and ISCO emissions characteristics (1200 rpm)

Fig. 5(a)의 경우 예혼합율(r_p)이 증가하고 직분사 시기가 진각 될수록 ISHC 배출물이 증가하는 특성을 나타내고 있다. ISCO 또한 BTDC 25° 보다 분사시기가 진각된 조건에서도 증가하는 결과를 나타내고 있다. 이러한 원인은 조기 분사의 경우에는 상대적으로 연소실 내의 압력과 밀도가 낮은 상태에서 분사가 이루어지게 되어 벽면부착현상 (wall-wetting)이 다소 발생하게 되며 예혼합된 가솔린 연료가 피스톤 벽면 및 크레비스체적에서 완전 연소되지 않는 영향으로 인하여 이들 불완전 연소 배출 가스는 대체적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

3.3 Gasoline-diesel 예혼합 압축착화 극미세입자 배출물 특성

Fig. 6은 연소실 내 직분사 연료의 분사시기와 예혼합

Fig. 6 Effects of premixed fuel ratio and injection timing on the total particle number and particle volume characteristics (1200 rpm)

율에 따른 예혼합 압축착화 연소의 극미세입자 총 개수 및 체적변화 특성을 나타낸 것이다. 측정 과정 중 배기가스의 응축을 방지하기 위해 회석온도는 150°C로 유지하였고 주변공기와 배기가스의 회석율은 500:1로 유지하였다. 또한 정확한 극미세입자 개수 및 체적을 측정하기 위하여 운전 조건이 변경 때마다 일정기간 동안 연소를 한 후 안정된 값을 측정하였다.

Fig. 6(a) 경우, 입자크기 10.4~392.4 nm 범위내의 미세입자 총 측정개수를 나타낸 것으로 기존 디젤 연소 ($r_p=0$)가 가장 많은 개수의 미세입자를 배출하고 있으며, 예혼합율이 증가함에 따라 미생입자 총 발생량이 감소함을 나타내고 있다. 특히, 예혼합율(r_p)이 높은 0.6과 0.8의 연소 경우와 매우 낮은 수의 배출 특성을 나타내고 있으며 직분사 연료의 분사시기 변화에 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 총 체적 특성의 경우 총 배출개

수와 마찬가지로 디젤 연소($r_p = 0$)가 가장 높은 체적 특성을 보이며, 예혼합이 증가할수록 체적이 감소하는 결과를 나타내었다.

5. 결 론

본 연구는 Gasoline-diesel 예혼합 압축착화 연소 및 미세입자 배출 특성을 다양한 조건에서 비교 분석하였다. 실험 및 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 예혼합 연소의 경우 최고 연소압력은 예혼합율(r_p)이 증가 할수록 높아지며, 착화지연기간은 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 직접분사시기가 지각되고 예혼합율(r_p)이 증가 할수록 기존의 디젤연소특성에서 후연소구간에 해당하는 열발생율은 감소하는 특성을 보이고 있다.

2. BTDC 25° 이상 진각된 조기분사조건에서 예혼합 연소의 출력특성은 기존 디젤연료의 연소에 비해 다소 감소하는 결과를 나타내고 있으나, NO_x 와 Soot 배출물의 동시 저감하는 특성을 나타내었다.

3. 미세입자 총 발생개수 및 체적 특성의 경우, $r_p = 0$ 가 가장 많은 개수의 미세입자를 배출하고 있으며, 예혼합율이 증가함에 따라 미생입자 총 발생량이 감소함을 나타내고 있다. 특히, 예혼합율이 높은 0.6과 0.8의 연소 경우 매우 낮은 수의 배출 특성을 나타내고 있으며 직접분사하는 연료의 분사시기 변화에 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) B. Y. Xu, L. Y. Qi, W. B. Zhang and S. L. Cai, "Fuel properties and emission characteristics of ethanol-diesel blended on small diesel engine", International Journal of Automotive Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 9~18, 2007.
- (2) A. Mohammadi, T. Ishiyama, T. Kakuta and S. S. Kee, "Fuel injection strategy for clean diesel engine using ethanol blended diesel fuel", SAE 2005-01-1725, 2005.
- (3) C. S. Lee, K. H. Lee and D. S. Kim, "Experimental and numerical study on the combustion characteristics of partially premixed charge compression ignition engine with dual fuel", Fuel, Vol. 82, No. 5, pp. 553~560, 2003.
- (4) J. B. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
- (5) G. D. Neely, S. Ssaki and J. A. Leet, "Experimental investigation of PCCI-DI combustion on emissions in a light-duty diesel engine", SAE 2004-01-0121, 2004.
- (6) M. Christensen and B. Johansson, "Influence of mixture quality on homogeneous charge compression ignition", SAE technical paper 982454, 1998.
- (7) R. H. Stanglmaier and C. E. Roberts, "Homogeneous charge compression ignition(HCCI): benefits, compromises, and future engine applications", SAE technical paper 1999-01-3682, 1999.
- (8) D. J. Lee, M. Y. Kim, H. G. Roh, D. S. Kim, J. H. Lee and C. S. Lee, "Combustion and exhaust characteristics of a common-rail diesel engine with homogeneous charge compression ignition combustion", Spring Conference Proceedings, KSAE, pp. 357~362, 2004.
- (9) D. W. Dockery, A. Pope III, X. Xu, J. D. Spengler, J. H. Ware, M. E. Fay, B. G. Ferris and F. E. Speizer, "An association between air pollution and mortality in six U.S. cities", Journal of Medicine, Vol. 329, pp. 1753~1759.