

파일럿 분사가 저온 디젤 연소에 미치는 영향

한 상 욱 · 배 충 식*

한국과학기술원 기계공학과

Effects of Pilot Injection on Low Temperature Diesel Combustion

Sangwook Han · Choongsik Bae*

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received 27 September 2011 / Revised 10 November 2011 / Accepted 18 November 2011)

Abstract : A direct injection diesel engine with large amount of exhaust gas recirculation was used to investigate low temperature diesel combustion. Pilot injection strategy was adopted in low temperature diesel combustion to reduce high carbon monoxide and hydrocarbon emissions. Combustion characteristics and exhaust emissions of low temperature diesel combustion under different pilot injection timings, pilot injection quantities and injection pressures were analyzed. Retarding pilot injection timing, increasing pilot injection quantity and higher injection pressure advanced main combustion timing and increased peak heat release rate of main combustion. As a result of these strategies, carbon monoxide and hydrocarbon emissions were reduced. Soot emission was slightly increased with retarded pilot injection timing while the effect of pilot injection on nitrogen oxides emission was negligible under low combustion temperature condition. Spatial distribution of fuel from the spray targeting visualization was also investigated to provide more insight into the reason for the reduction in carbon monoxide and hydrocarbon emissions.

Key words : LTC(Low Temperature diesel Combustion, 저온 디젤 연소), EGR(Exhaust Gas Recirculation, 배기가스 재순환), Pilot injection(파일럿 분사), Carbon monoxide(CO, 일산화탄소), Hydrocarbon(HC, 탄화수소)

1. 서 론

일반적으로 디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비하여 압축비가 높아 효율적이며 희박연소를 하기 때문에 연료 소비율이 적어 이산화탄소(CO₂; carbon dioxide) 배출량이 적으며, 불완전연소의 산물인 일산화탄소(CO; carbon monoxide)와 탄화수소(HC; hydrocarbon)의 배출량이 적은 장점을 가지고 있다. 하지만, 고온의 연소 조건에서 발생하는 질소산화물(NO_x: nitrogen oxides)과 연소실 내 국부적으로 농후한 혼합기에서 발생하는 검댕(soot)의 배출량이 많다는 문제점을 가지고 있다. 특히, 디젤 엔진에서 배출되는

NO_x와 Soot이 인체에 미치는 유해함이 밝혀지면서 규제가 더욱 엄격해 지고 있는 실정이다. 이에 대응하기 위하여 DPF(Diesel Particulate Filter), LNT(Lean NO_x Trap)와 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 같은 배기후처리(exhaust aftertreatment) 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 고가의 촉매 사용으로 인해 경제적인 측면에서 생각해 보면 쉬운 대안이 될 수 없다. 따라서, 연소기술 개선에 대한 연구를 통해 유해 배기 배출물을 저감시키고자 하는 노력이 지속되고 있다. 균일 예혼합 압축착화(HCCI; Homogeneous Charge Compression Ignition), 예혼합 압축착화(PCCI; Premixed Charge Compression Ignition) 과 저온 디젤 연소(LTC; Low Temperature Diesel

*Corresponding author, E-mail: csbae@kaist.edu

Combustion) 등의 신연소 기술들이 그 예가 된다.¹⁻³⁾ 이 중 저온 디젤 연소는 다량의 배기가스 재순환 (EGR; Exhaust Gas Recirculation)을 적용하여 연소 온도를 NOx와 Soot이 생성되지 않는 온도 이하로 낮추어 그것들의 생성을 미연에 방지하고자 하는 연소방식으로 예혼합 압축착화에 비해 연소상의 제어가 용이한 장점이 있다.^{4,5)} 하지만 이러한 낮은 연소 온도로 인해 기존 디젤연소에서는 문제시 되지 않았던 HC와 CO의 배출량이 증가한다는 문제점을 안고 있다.^{6,7)}

최근 들어 저온 디젤 연소에서 연소상 제어와 배기 배출물 저감을 위해 다단 분사의 적용이 시도되고 있다. Koci 등은 저온 디젤 연소 조건에서 분할 분사(split injection)를 적용하여 분할 분사되는 연료량과 분사시기에 따른 배기 배출물의 특성에 대한 연구를 수행하였다.⁸⁾ 분사량과 분사시기에 따라 분무도달거리와 운동량속(momentum flux)이 변함으로 인해 실린더 내 연료 분포가 달라져 PM(Particulate Matter) 배출에 미치는 영향이 크다고 밝혔다. Kashdan 등은 중부하 조건에서 좁은 간격의 이단 분사(closely-spaced double injection)를 통하여 열방출률을 제어하였다.⁹⁾ 이를 통하여 소음 감소와 적은 양의 EGR만으로 Soot과 NOx의 동시 저감이 가능하다고 주장하였다. 하지만 저온 디젤 연소에서 문제시 되는 다량의 HC와 CO 배출을 저감시키기 위해 파일릿 분사를 적용한 연구는 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 파일릿 분사가 저온 디젤 연소에 미치는 영향을 살펴보고, 특히 HC와 CO 배출물의 저감 가능성에 대해 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 이용된 엔진의 주요 제원을 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 엔진은 배기량 2696 cc, 압축비 17.5인 5기통 직접 분사식 디젤 엔진으로 실험에 사용된 분사기는 솔레노이드(solenoid) 구동 방식으로 분공 수 7개, 148°의 분사각을 갖는다.

전체적인 실험장치의 구성은 Fig. 1과 같다. 고압의 연료 공급을 위하여 최대 160 MPa까지 고압 분사가 가능한 커먼레일(common-rail) 시스템을 사용하였으며, 연료 분사시기, 분사압력, 분사량 등은

Table 1 Specifications of research engine

Description	Specification
Engine type	5 cylinder diesel
Bore×Stroke (mm)	86.2×92.4
Compression ratio	17.5
Displacement (cc)	2696
Injector type	Solenoid, 7 holes, Injection angle 148°

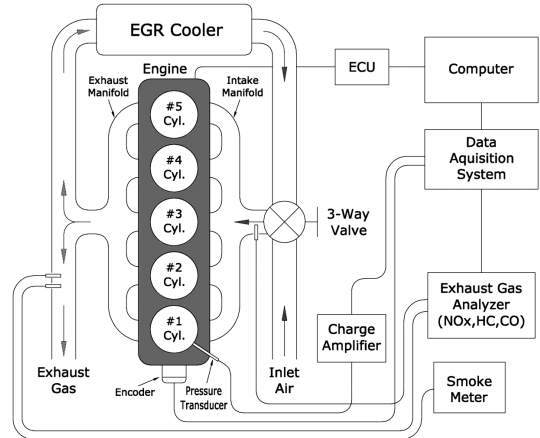


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for engine

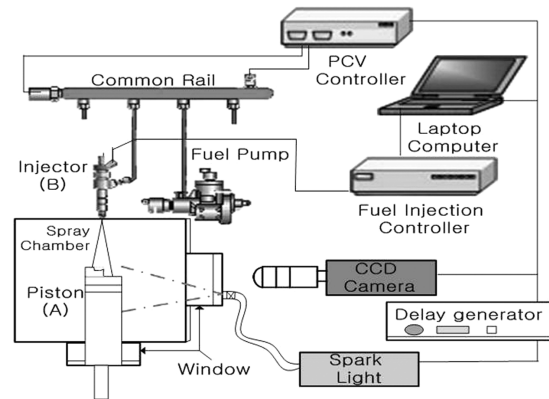


Fig. 2 Schematic diagram of spray measurement devices

programmable ECU(Electronic Control Unit)을 이용하여 제어하였다. 저온 디젤 연소를 구현하기 위하여 필수적인 다량의 cooled EGR을 공급하기 위해 대용량의 EGR 냉각장치를 장착하였다. EGR 유량은 대기 중의 공기가 공기필터(air filter)를 지나 유입되는 신기(fresh air)와 EGR 냉각장치를 지나 유입되는 EGR이 만나는 지점에 설치된 3-Way 밸브의 개도를

조절함으로써 제어하였다. 3-Way 밸브를 통과한 신기와 EGR의 혼합기는 인터쿨러(intercooler)를 통해 냉각된 후 흡기매니폴드로 유입되었다. 인터쿨러의 냉각 효율을 높이기 위하여 송풍기(blower)를 이용하였다.

엔진의 크랭크축에 엔코더(1800 pulse/revolution)를 장착하여 신호를 얻어내고 그것을 기준으로 실린더 내의 압력 및 배기가스 등을 크랭크 각도에 따라 계측하였다. 실린더 압력은 압전소자(piezoelectric)방식의 압력 센서(Kistler 6056A) 및 전하 증폭기(Kistler 5011)를 이용하여 계측하였고, 계측된 각 데이터는 Data Acquisition System(IOTECH; WaveBook 516E)을 이용하여 PC에 저장하고 분석되었다. 각 실험 조건 별로 매 100 사이클의 엔진 운전을 통해 얻은 압력의 평균값을 이용해 열방출율(HRR; heat release rate)을 계산하였다. 이때 데이터는 디젤엔진에서 일반적으로 사용되는 0.2 CAD(Crank Angle Degree) 간격으로 취득되었다.¹⁰⁾

유해 배출물 중 Soot의 측정에는 스모크 미터(Smoke meter, AVL, 415S)를 이용하였으며 5회 측정 후 평균값을 사용하였다. NO_x, HC, CO, CO₂는 배기가스 분석 장치(MEXA 1500d, HORIBA Ltd.)를 이용하여 측정하였다.

상대적으로 조기 분사되는 파일럿 분사를 적용할 경우, 분사시기에 따라 분사된 연료가 피스톤 상단이나 실린더 벽면에 충돌하게 됨으로써 연소와 배기 배출물에 영향을 미치게 된다. 따라서, 파일럿 분사 시기에 따른 피스톤과의 상대적인 분무의 거동을 살펴보기 위하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 정적 용기 내에서 분무 충돌 가시화 실험을 수행하였으며

광원에 의한 분무의 산란광을 CCD(Charge Coupled Device) 카메라를 이용하여 취득하였다. 노즐 캡(nozzle cap)을 사용하여 나머지 분공을 통한 유동 저항이 없도록 하였으며, 실제 연소실과 동일한 피스톤을 정적용기에 설치하여 위치 조절이 가능하도록 하였다.

모든 실험은 저온 디젤 연소에서는 상대적으로 고속 조건으로 볼 수 있는 2000 rpm 조건에서 수행되었으며, 이는 상대적으로 예혼합 기간이 짧아져 CO와 HC의 발생 문제가 부각되는 조건이라 할 수 있다. 한 사이클 당 공급되는 전체 분사량은 10 mg/stroke으로 고정하였으며, 이는 본 연구에 사용된 엔진의 저부하를 대표하는 조건으로서 고부하 운전에 대한 제한이 있는 저온 디젤 연소의 대표적인 조건이라 할 수 있다. 파일럿 분사량은 분사량 변화의 영향을 살펴보기 위해 2 mg/stroke, 3 mg/stroke와 4 mg/stroke으로 각각 분사하였다. 분사 시기는 주 분사만을 했을 경우 최대 토크가 측정되었던 -20 CAD ATDC(After Top Dead Center)를 주 분사시기로 고정하였고, 파일럿 분사시기는 -30 CAD ATDC에서 -70 CAD ATDC까지 10 CAD 간격으로 변화시키며 수행하였다. 분사압력은 분사압력에 따른 영향을 살펴보기 위하여 해당 부하와 엔진 회전수 조건에서 통용되는 80 MPa과 상대적으로 고압 분사조건인 120 MPa의 분사압력을 선정하였다.

EGR 율은 식 (1)에 나타난 것과 같이 배기 중 CO₂의 분율에 대한 흡기 중 CO₂의 분율의 비로 정의하였으며, 저온 디젤 연소의 대표적인 조건으로 알려져 있는 EGR 율 60% 조건에서 실험이 수행되었으며,⁵⁾ 모든 조건의 COV_{imep}(Coefficient Of Variation in indicated mean effective pressure)는 5% 이하로 연소 안정성이 허용될 만한 수준으로 운전되었다.¹¹⁾

$$EGR(\%) = \frac{[CO_2]_{Intake}}{[CO_2]_{Exhaust}} \times 100 \quad (1)$$

3. 실험 결과

3.1 연소압력 및 열방출률

Fig. 3은 파일럿 분사량이 2 mg/stroke, 분사압력이 80 MPa일 경우, 각기 다른 파일럿 분사시기에 따른 연소 압력과 열방출률을 나타내고 있다. 파일럿

Table 2 Experimental conditions

Description	Specifications
Engine speed (rpm)	2000
Injection quantity (mg/stroke)	main injection : 10
	pilot+main injection : 2+8
	pilot+main injection : 3+7
	pilot+main injection : 4+6
Injection timing (CAD ATDC)	main injection : -20
	pilot injection : -30 ~ -70
Injection pressure (MPa)	80, 120
EGR rate (%)	60

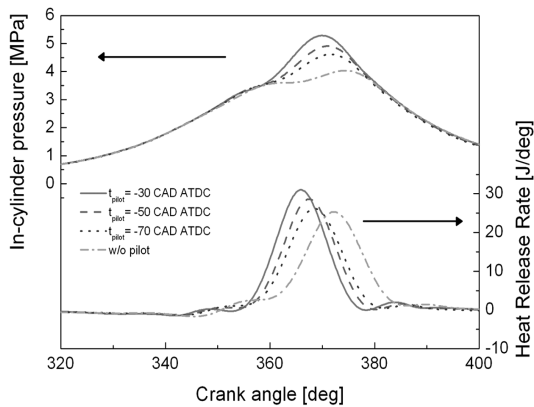


Fig. 3 In-cylinder pressure and heat release rate according to pilot injection timing [Pilot injection quantity = 2 mg/stroke, Injection pressure = 80 MPa]

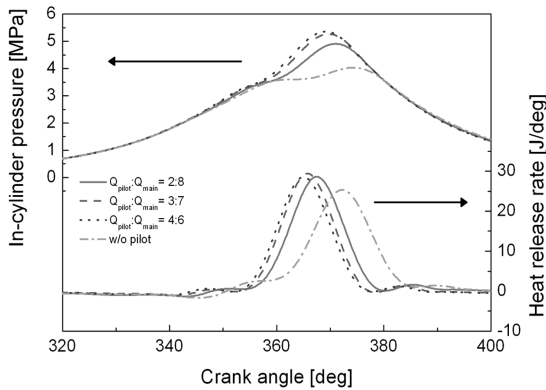


Fig. 4 In-cylinder pressure and heat release rate according to pilot injection quantity [Pilot injection timing = -50 CAD ATDC, Injection pressure = 80 MPa]

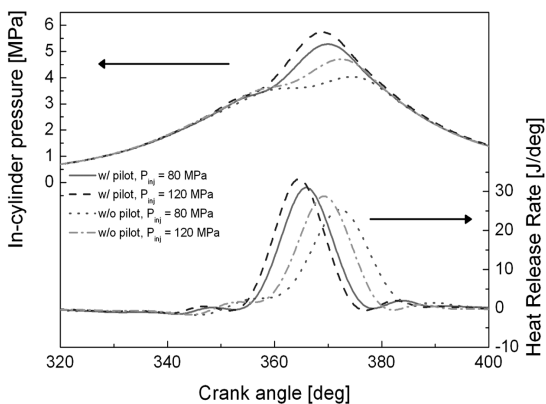


Fig. 5 In-cylinder pressure and heat release rate according to injection pressure [Pilot injection timing = -30 CAD ATDC, Pilot injection quantity = 2 mg/stroke]

분사시기가 지각될수록 주 연소의 시작점을 빠르게 하며, 최고 실린더 압력과 열방출률이 증가하였다. 이른 시기에 파일럿 분사가 될 경우 실린더 내의 낮은 온도와 압력 때문에 상대적으로 균일한 혼합기를 형성할 시간이 길어지게 되기 때문에, 파일럿 분사시기가 진각될 경우 소량 분사된 연료는 희박하고 균일한 혼합기를 형성하게 된다. 이른 시기의 파일럿 분사로 인해 발생하는 과희박 혼합기는 점화가 어렵기 때문에, 주 분사가 일어날 때 연소실의 주변 온도와 압력이 낮은 파일럿 분사시기에 비하여 상대적으로 낮다. 따라서, 이른 파일럿 분사시기에서는 주 연소의 열방출률이 낮으며 연소상이 지각되는 효과를 나타낸다. 하지만, 파일럿 분사를 적용하지 않고 단일 분사만을 한 경우와 비교해 보면 이른 시기의 파일럿 분사를 적용한 경우더라도 연소상이 진각되고 최고 실린더 압력과 열방출률이 높은 것을 확인할 수 있다.

파일럿 분사량이 연소 압력과 열방출률에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 파일럿 분사시기는 -50 CAD ATDC, 분사압력은 80MPa인 조건에서 파일럿 분사량을 2, 3, 4 mg/stroke로 변화시키며 실험하였다. 파일럿 분사량이 증가함에 따라 주 연소의 최고 실린더 압력과 열방출률이 증가하였고, 연소상 또한 진각되었다. 이는 파일럿 분사량이 증가함에 따라 파일럿 분사된 연료의 연소로부터 주 분사된 연료의 연소를 위한 열공급이 많아졌기 때문이다.

마지막으로 분사압력이 연소 압력과 열방출률에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 고압 분사로 인한 분무 미립도와 혼합 특성의 향상으로 인해 최고 연소 압력과 열방출률을 증가시켰으며 연소상을 진각시켰음을 확인할 수 있다. 결과적으로 파일럿 분사시기의 지각과 파일럿 분사량의 증가, 분사압력의 상승이 연소상을 진각시키며, 최고 열방출률을 높게 하는 결과를 나타내었다.

3.2 배기가스 특성

Fig. 6은 파일럿 분사시기, 파일럿 분사량과 분사압력에 따른 CO와 HC의 배출량을 나타내고 있다. 파일럿 분사를 한 경우가 주 분사만을 한 경우에 비하여 HC와 CO가 감소하는 결과를 나타내었다.

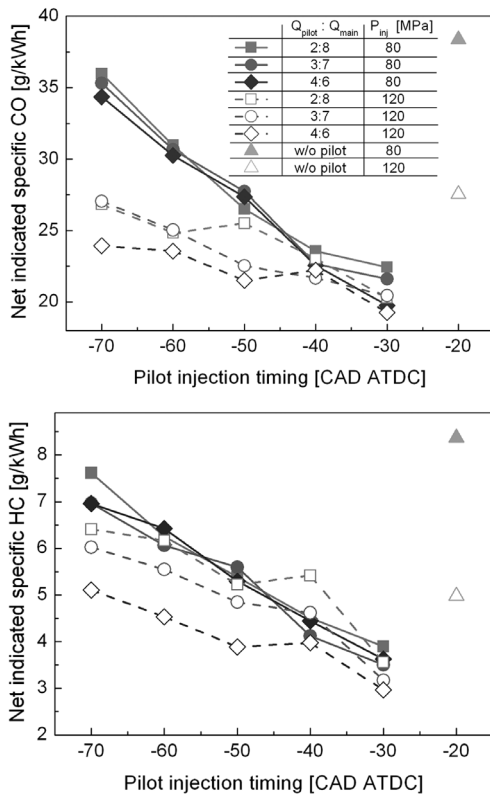


Fig. 6 CO and HC emissions for different pilot injection quantities, pilot injection timings and injection pressures

이는 두 가지 이유로 생각할 수 있다. 파일럿 분사로 인해 주 분사만을 한 경우에 비해 연료-공기 혼합기의 균일도가 향상된 점과 파일럿 분사된 연료의 연소로 인하여 주 분사시기에서 실린더 압력과 온도가 상승하여 주 분사된 연료의 연소가 촉진된 점이 CO와 HC의 배출량을 저감시켰다고 판단된다. 또한 파일럿 분사시기가 지각됨에 따라 HC와 CO의 배출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이른 시기에 파일럿 분사된 연료들은 늦은 시기에 파일럿 분사된 연료와 비교하여 상대적으로 더 긴 예혼합 기간을 가지며, 공간적 분포 또한 주 연소가 일어나는 피스톤 보울(piston bowl) 안쪽 보다는 스퀴시 영역(squish area)이나 틈새 체적(crevice volume)에 위치하게 되므로 소염 효과(quenching effect)가 커져 HC와 CO의 발생량이 증가하게 된다. 하지만 파일럿 분사량을 증가할 경우, 예혼합된 연료량 증가에 의해 더 많은 양의 연료가 소염 영역에 위치하게 되고 그 부분의

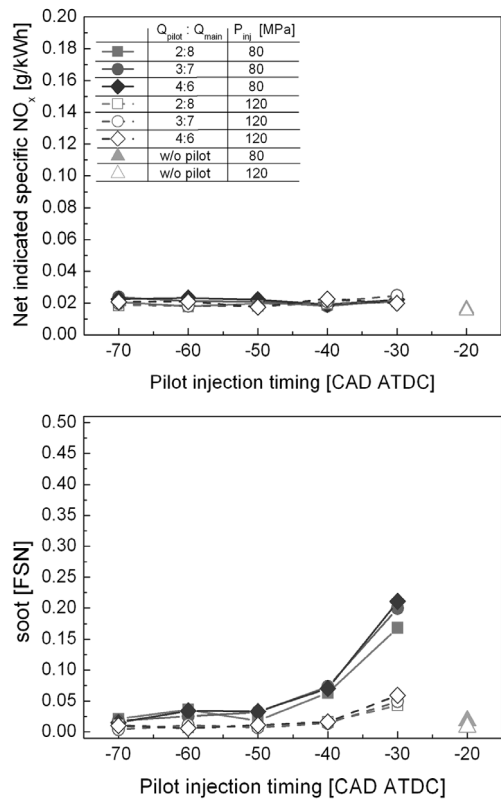


Fig. 7 NOx and soot emissions for different pilot injection quantities, pilot injection timings and injection pressures

연소 온도 상승으로 인해 소염 효과가 감소하여 HC와 CO가 감소하는 것으로 판단된다. 이는 앞선 열방출률 결과(Fig. 4)에서도 확인할 수 있다.

반면 NOx는 Fig. 7과 같이 60%의 EGR 율을 적용한 저온 디젤 연소 조건에서 운전하였기 때문에 파일럿 분사의 영향과 관계없이 낮은 화염 온도로 인하여 0.03 g/kWh 이하의 낮은 양이 배출되었다. 하지만 Soot의 경우 파일럿 분사를 적용하지 않은 조건에서는 Soot 배출이 거의 없었지만, 파일럿 분사시기가 지각될수록 Soot의 배출량이 미세하게 증가하였다. 이는 파일럿 분사시기가 늦은 경우 분사된 연료의 예혼합 시간이 상대적으로 짧아지게 되어 국부적으로 농후한 영역이 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 고압 분사 조건에서는 분무 미립화와 혼합 특성이 향상되기 때문에 파일럿 분사로 인한 Soot 배출량의 증가는 크게 없었다.

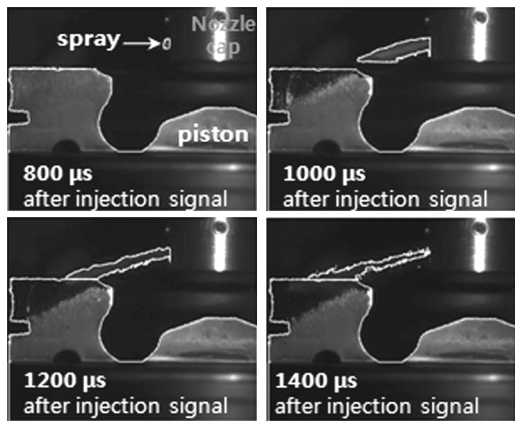
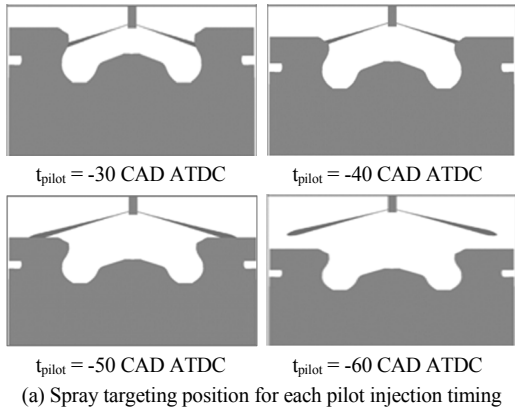


Fig. 8 Effect of pilot injection timing on spray targeting position ($Q_{inj} = 3$ mg/stroke, $P_{inj} = 80$ MPa)

3.3 분무 충돌

앞서 파일럿 분사시기에 따라 연소 및 배기 특성이 달라지게 됨을 분사된 연료의 연소실 내 위치 및 그에 따른 혼합기 분포의 변화의 결과로 설명하였으며, 이의 규명을 위해 분무가시화 실험이 수행되었다. Fig. 8(a)는 실험에서 사용된 분사기의 분무 방향과 파일럿 분사시기별 피스톤 위치를 도시한 것으로, 파일럿 분사시기가 -50 CAD ATDC 이전인 경우는 틈새체적으로 연료가 유입될 가능성이 큰 반면, -40 CAD ATDC에서는 분무가 피스톤 보울 입구를 향하는 것을 예측할 수 있다. Fig. 8(b)는 파일럿 분사시기가 -50 CAD ATDC인 경우의 연료의 거시적 분무유동을 가압 정적 용기에서 가시화한 결과이며 이미지 하단에 분사 신호가 인가된 후 시간을

나타내었다. 즉, 파일럿 분사시기가 진각될수록 분무의 공간적 분포가 주 연소가 일어나는 피스톤 보울 안쪽 보다는 스퀴시 영역이나 틈새 체적에 위치하게 되어 CO와 HC와 같은 불완전 연소 생성물의 발생량을 증가시킬 수 있다는 것을 설명할 수 있다.

4. 결론

5기통 직접 분사식 디젤엔진에서 다량의 EGR을 이용하는 저온 디젤 연소의 문제점으로 지적되고 있는 CO와 HC의 배출량을 감소시키기 위하여 파일럿 분사를 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 파일럿 분사를 적용한 경우, 주 분사만을 한 경우에 비하여 점화지연이 짧아졌으며, 파일럿 분사시기의 지각, 파일럿 분사량의 증가, 분사압력의 상승은 연소상을 더욱 진각시키며 최고 열방출률을 높게 하는 결과를 나타내었다.
- 2) 파일럿 분사로 인해 연료-공기 혼합기의 균일도가 향상되고, 파일럿 분사된 연료의 연소로 인하여 주 분사시기에서 실린더 압력과 온도가 상승하여 주 분사된 연료의 연소가 촉진됨으로써 CO와 HC의 배출량이 감소하였다. 특히, 파일럿 분사시기의 지각, 파일럿 분사량의 증가와 고압 분사가 CO와 HC의 저감에 더욱 효과적인 것으로 나타났다.
- 3) NOx와 soot은 파일럿 분사에 의한 영향에 관계없이 저온 연소로 인해 적게 배출되었다. 하지만, soot의 경우에는 파일럿 분사시기가 지각됨에 따라 예혼합기 형성 시간이 짧아져 미세하게 증가하였다.
- 4) 분무 충돌 가시화를 통해 파일럿 분사시기가 -50 CAD ATDC 이전인 경우에는 틈새체적으로 연료가 유입될 가능성이 크다는 것을 확인하였다. 이를 통해 파일럿 분사시기가 진각될수록 CO와 HC의 배출량이 증가하는 것을 설명할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원 아래 “하이브리드 용 엔진 시스템 기반 기술 개발” 과제으로써 수행되었으며, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) J. E. Dec, "Advanced Compression-Ignition Engines - Understanding the In-cylinder Processes," Proceedings of the Combustion Institute, Vol.32, No.2, pp.2727-2742, 2009.
- 2) M. Yao, Z. Zheng and H. Liu, "Progress and Recent Trends in Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) Engines," Progress in Energy and Combustion Science, Vol.35, No.5, pp.398-437, 2009.
- 3) S. Gan, H. K. Ng and K. M. Pang, "Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) Combustion: Implementation and Effects on Pollutants in Direct Injection Diesel Engines," Applied Energy, Vol.88, No.3, pp.559-567, 2011.
- 4) K. Akihama, A. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki and A. M. Dean, "Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature," SAE 2001-01-0655, 2001.
- 5) S. Kook, C. Bae, P. C. Miles, D. Choi and L. M. Pickett, "The Influence of Charge Dilution and Injection Timing on Low-temperature Diesel Combustion and Emissions," SAE 2005-01-3837, 2005.
- 6) S. Han, E. Shim, J. Jang, J. Park, C. Bae, J. Park and H. Kim, "Operating Range of Low Temperature Diesel Combustion with Supercharging," SAE 2009-01-1440, 2009.
- 7) E. Shim, S. Han, J. Jang, J. Park and C. Bae, "Expansion of Operating Range and Reduction of Engine out Emission in Low Temperature Diesel Combustion with Boosting," Transactions of KSAE, Vol.17, No.5, pp.31-38, 2009.
- 8) C. P. Koci, Y. Ra, R. Krieger, M. Andrie, D. E. Foster, R. M. Siewert and R. P. Durrett, "Multiple-event Fuel Injection Investigations in a Highly-dilute Diesel Low Temperature Combustion Regime," SAE 2009-01-0925, 2009.
- 9) J. T. Kashdan, P. Anselmi and B. Walter, "Advanced Injection Strategies for Controlling Low-temperature Diesel Combustion and Emissions," SAE 2009-01-1962, 2009.
- 10) H. Zhao and N. Ladommatos, Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics, SAE, Warrendale, p.73, 2001.
- 11) J. B. Green, N. Domingo, J. M. E. Storey, R. M. Wagner, J. S. Armfield, L. Bromberg, D. R. Cohn, A. Rabinovich and N. Alexeev, "Experimental Evaluation of SI Engine Operation Supplemented by Hydrogen Rich Gas from a Compact Plasma Boosted Reformer," SAE 2000-01-2206, 2000.