

HSDI 엔진 성능 향상을 위한 연료분사 타겟팅에 관한 수치 해석적 연구

민 세 훈* · 서 현 규**†

* 공주대학교 대학원 기계공학과, ** 공주대학교 기계자동차공학부

Numerical Study on the Fuel Spray Targeting for the Improvement of HSDI Engine Performance

Se Hun Min* and Hyun Kyu Suh**†

* Graduate School of Mechanical Engineering, Kongju Nat'l Univ.,

** Div. of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju Nat'l Univ.

(Received February 11, 2016 ; Revised June 23, 2016 ; Accepted June 24, 2016)

Key Words: ECFM-3Z Combustion Model(ECFM-3Z 연소모델), Fuel Spray Targeting(연료 분사 타겟팅), HSDI Engine(HSDI 엔진), Inclined Spray Angle(분사각도), SMD(Sauter 평균 입경)

초록: 본 연구는 HSDI 디젤 엔진의 연소 성능 향상을 위해 연료 분사 타겟팅의 최적화를 수치 해석적으로 연구하였다. 연구에 적용된 연소모델은 ECFM-3Z모델을 사용하였고, 해석에 필요한 엔진 부하 및 연료의 타겟팅은 분사량, 분사각도, 분사시기를 변경하여 해석한 실린더압력, 열 발생률, 배기 배출물 특성의 결과를 비교 분석하여 연구하였다. 연구결과, 분사시기와 분사각도에 따라 연료가 피스톤 보울 안쪽으로 많이 유입될수록 열 발생률의 증가로 인하여 NO_x는 증가하였고, CO, Soot은 연소성능의 증진으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 분사시기가 진각될수록 균일 혼합기 형성시간이 충분하여 연소성능이 증진되고, 실린더압력은 증가하였다.

Abstract: The objective of this study was to investigate, using a numerical method, the fuel injection targeting for improving the combustion performance in a HSDI diesel engine. In this work, the ECFM-3Z model was applied as the combustion model, and the injection mass, inclined spray angle, and injection timing were varied for the study on the targeting of fuel spray. The results of this work were compared in terms of cylinder pressure, rate of heat release, and exhaust emissions characteristics. It was found that the cylinder pressure increased when the injection timing was advanced, and the rate of heat release increased when more fuel was injected into the piston bowl. In addition, NO_x emission increased owing to the increase in the rate of heat release. On the other hand, CO and soot emissions decreased because of the improvement in combustion performance.

- 기호설명 -

t_{inj} : 분사시기
 P_{inj} : 분사압력
 Θ_{inc} : 분사각도
 m_{inj} : 분사량

1. 서론

진동과 소음이 심한 디젤엔진은 최근 고압 연료분사 및 전자제어장치의 개발로 가솔린 엔진 대비 높은 효율과 저속에서의 높은 토크 성능을 기대할 수 있어 승용 자동차에 적용이 증가하는 추세이다. 하지만, 디젤엔진은 연소 특성상 연소 온도가 높아 NO_x(질소산화물)의 생성량이 증가하고, 자발화(Auto ignition) 연소 특성상 불완전 연

† Corresponding Author, hksuh@kongju.ac.kr

소의 가능성이 높아 인체 및 환경오염에 주범이 되는 Soot과 같은 물질을 많이 배출한다.⁽¹⁾ 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 선행 연구가 진행되어 왔다. Kang 등⁽²⁾과 Roh 등⁽³⁾은 분사전략(Injection strategy)에 따라서 미세 입자를 줄이는 실험적 연구를, Chung 등⁽⁴⁾은 다단 분사 조건에서 분사량 질량비(Injection fuel mass ratio)와 분사시기(Injection timing)에 따라 배기 배출물을 저감하는 연구를 수행하였다. Lee 등⁽⁵⁾은 배기 배출물 저감을 위하여 분사각도(Inclined spray angle)를 변경하여 실험적 연구를 수행하였다. 이와 같은 실험적 연구는 실험에 필요한 실험 장비를 구축하고, 비교 연구를 위한 다른 경우의 조건을 설정하기 위한 비용 및 조건의 제약이 있다.

최근에는 CFD(Computational Fluid Dynamics)의 발달로 인하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 연소 및 배기 배출물에 대한 정확한 해석연구가 가능해졌다. 이에 따라 Su 등⁽⁶⁾과 Gafoor 등⁽⁷⁾은 연소실의 형상(Combustion chamber geometry)을 변경하여 Soot을 저감하는 연구를 수행하였다. 현재에는 다양한 분사전략에 따른 배출물 특성에 대한 수치 해석적인 연구가 활발히 수행되고 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

특히, 최근에는 분사되는 연료의 타겟팅 위치를 조절하여 Soot과 CO를 저감할 수 있다는 연구 결과가 보고되었다.⁽⁸⁾ 분사되는 연료의 타겟팅은 분사시기와 분사각도를 변경하여 제어가 가능하다. 하지만 전술한 바와 같이 실험적인 연구로는 한계가 명확하고, 비교할 수 있는 경우수의 제약이 있는 단점이 있다.

따라서, 본 연구는 HSDI(High Speed Direct Injection; 고속직접분사) 디젤 엔진의 성능 향상 및 배기 배출물 저감을 위하여 분사된 연료의 타겟팅 최적화를 분사량, 분사각도 및 분사시기에 따라 수치 해석적으로 연구하였다. 동시에 연소 및 배기 배출물 특성을 비교하여 최적의 분사조건을 찾는 것을 목표로 하였다.

2. 수치 해석적 연구 방법

2.1 수치 해석적 모델

본 연구에서는 디젤엔진의 연소해석을 위하여 유동 및 연소해석 프로그램(AVL Fire)을 사용하여 해석을 진행하였다. 해석에 필요한 물리, 화학적인 모델은 Ryu 등⁽¹⁰⁾이 보고한 선행연구를 참

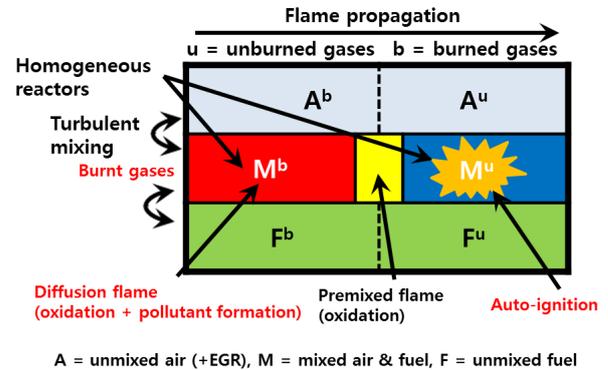


Fig. 1 Schematics of ECFM-3Z model zones

조하여 연구를 수행하였다.

연소모델로 사용한 ECFM-3Z(The 3-Zones Extended Coherent Flame Model; 3영역 확장 코히런트 화염 모델) 모델은 Fig. 1과 같이 공기, 연료, 혼합기 영역인 3개의 혼합공기영역과 연소영역인 2개의 기연(Burned gases) 및 미연(Unburned gases) 영역으로 총 6개의 영역으로 나누어져 있다. 이 모델에서는 12가지의 화학종들(O₂, N₂, CO₂, CO, H₂, H₂O, O, H, N, OH, NO, Fuel)이 고려되며, 연소 지배방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_x}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_x}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \tilde{Y}_x}{\partial x_i} \right) + \bar{\omega}_x \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 \tilde{Y}_x 는 화학종 x 의 평균 질량 분율을 나타내고, μ 와 μ_t 는 층류와 난류에서의 점성계수를 나타낸다. Sc 와 Sc_t 는 층류와 난류에서의 슈미트 수(Schmidt number)를 나타내고 있으며, $\bar{\omega}_x$ 는 연료의 증발과 연소를 유발하는 생성항이다. Fig. 1의 연료 영역(F)과 공기 영역(A)의 혼합되는 정도는 다음 식 (2)의 난류모델 특정시간 스케일(τ_m)에 의하여 결정된다.

$$\tau_m^{-1} = \beta_m \frac{\epsilon}{k} \quad (2)$$

식 (2)에서 ϵ 은 난류 소산율, k 은 난류운동에너지를 나타낸다. 또한, β_m 은 연료와 공기가 혼합되는 혼합량을 결정하는 상수이다. 해석에 적용된 자세한 Sub-model⁽¹¹⁻¹²⁾은 Table 1과 같다.

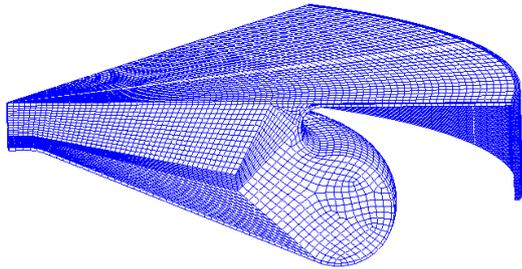
본 연구에서 적용된 엔진은 소형 1,500cc급 커먼레일 디젤엔진을 기반으로 한 단기통 엔진을

Table 1 Sub-model for numerical analysis

Phenomenon	Model
Turbulence	k-zeta-f
Break-up	Wave
Evaporating	Dukowicz
Wall interaction	Walljet1
Combustion	ECFM-3Z
NO _x	Extended Zel'dovich
Soot	Kennedy-Hiroyasu-Magnussen

Table 2 Specifications of test engine

Contents		Specification
Displacement [cc]		1,493
Bore × Stroke [mm]		75 × 84.5
Connecting rod length [mm]		140
Compression ratio		17.8
Initial pressure [MPa]		0.115
Valve timing	IVC (BTDC deg)	128
	EVO (ATDC deg)	172
Nozzle hole diameter [mm]		0.128

**Fig. 2** Geometry of combustion chamber

대상으로 하였으며 주요 제원은 Table 2와 같다.

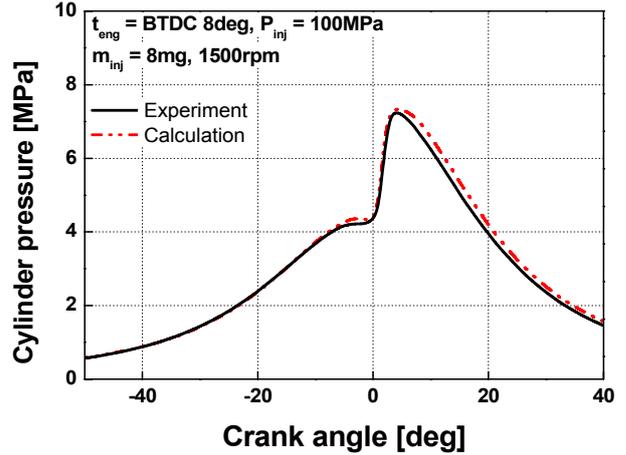
효율적인 수치 해석을 위하여 Fig. 2와 같이 하나의 노즐에서 연소실 내로 연료가 분사되는 영역인 1/6 영역에서만 격자를 생성하여 연구를 수행하였다. 피스톤의 위치가 TDC에서 BDC까지 이동할 때, 90,150개에서 117,480개로 격자의 형태와 개수가 변하는 유동 격자를 생성하여 연구에 적용하였다.

2.2 실험 및 수치 해석 조건

본 연구에서는 HSDI 엔진의 연소 및 배출물 성능 개선을 위하여 연료 분사 인젝터의 분사각도(Inclined spray angle), 분사시기(Injection timing) 및 분사량(Injection mass)의 최적화를 위한 수치 해석적 연구를 수행하였다. 적용한 연료는 AVL Fire내의 Library를 참고하여 Diesel-D1(C₁₃H₂₃)을

Table 3 Numerical analysis conditions

Contents	Conditions
Injection mass [mg/stroke]	6, 8, 10
Injection timing [ATDC deg]	-10, -5, 0, 5, 10
Inclined spray angle [deg]	100, 130, 156
Engine speed [rpm]	1,500

**Fig. 3** The comparison of experimental and numerical results

적용하였다. 자세한 수치 해석 조건은 Table 3과 같다. 해석 결과의 검증을 위한 실험은 분사압력(Injection pressure) 100MPa에서 분사시기, 분사량, 분사각도는 해석 조건과 동일한 조건에서 연구를 수행하였다. 본 해석적 연구를 수행하기 위하여 필요한 분사율 실험결과는 Bosch법⁽¹³⁾을 사용하여 측정 및 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해석의 신뢰성 검증

본 연구에서는 실험을 통해 얻은 결과와 동일한 조건에서의 수치 해석 결과를 비교 분석하여 해석의 신뢰성을 검증하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 실험 및 수치 해석을 통해 얻은 최대 실린더압력(Max. cylinder pressure)의 오차율은 약 1.5% 이내의 높은 신뢰성을 보였다. 반면에 수치 해석에 적용된 sub-model의 특성상 벽면 열전달 및 열손실을 고려하지 못하여 열 발생률(Rate of heat release)은 수치 해석의 결과값이 실험값보다 다소 높게 나타났다. 이와 같은 비교 결과로부터 수치 해석의 신뢰성은 확보되었다고 판단된다.

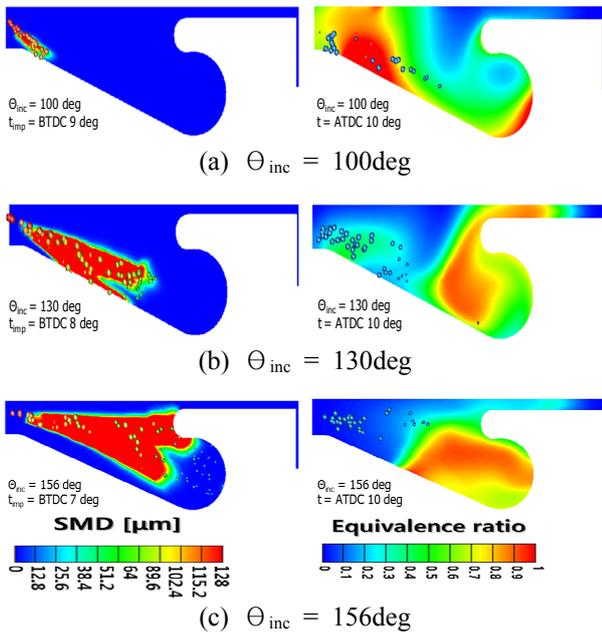


Fig. 4 Comparison of the air-fuel mixture distributions ($m_{inj} = 8\text{mg}$, $t_{inj} = \text{BTDC } 10\text{deg}$)

3.2 혼합기 형성 특성 비교

Fig. 4는 분사량 8mg, 분사시기는 BTDC 10deg의 동일한 조건에서 분사각도에 따른 연료-공기 당량비의 분포특성과 SMD를 나타내었다. 배경의 색이 빨간색에 가까울수록 연료-공기 혼합기가 농후함을 나타내고, 파란색에 가까울수록 혼합기가 희박함을 나타낸다. 분사각도가 100deg 일 때는 좁은 분사각도로 인하여 분사된 연료가 피스톤의 중심 부근에 부딪히고, 농후한 혼합기가 피스톤의 중심 부근에 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 분사각도가 130deg일 때는 분사된 연료가 피스톤의 바닥부분을 따라 피스톤의 보울(Bowl) 안쪽으로 유입되었다. 분사각도가 156deg 일 때는 분사된 많은 양의 연료가 피스톤의 림 부분에 충돌하였다. 분사각도가 좁을수록 분사된 연료가 피스톤에 부딪히는 시점이 빨라지며 넓어질수록 보울 안쪽으로 연료가 많이 유입되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 분사량 및 분사각도에 따른 연소실 내의 전체 SMD의 평균인 Overall SMD(Sauter Mean Diameter)를 비교한 것이다. 비교결과, 분사각도가 넓을수록 큰 SMD를 갖는 것으로 나타났다. 이는 분사각도가 좁을수록 피스톤 벽면의 충돌시간이 빠르고, 벽면에 충돌한 액적들은 해석 특성상 SMD계산에 포함되지 않아 분사각도가 넓을수록 큰 SMD를 가지는 것처럼 보였다. 하지만

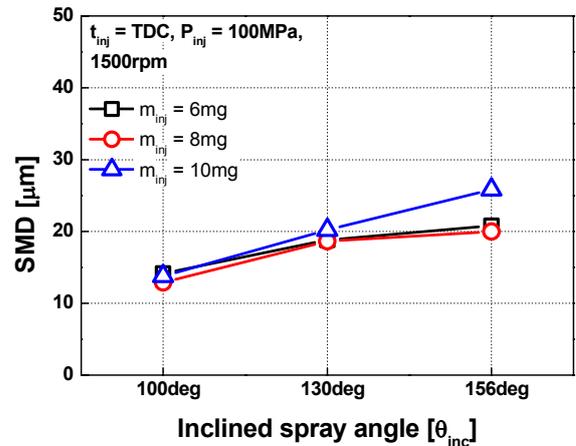
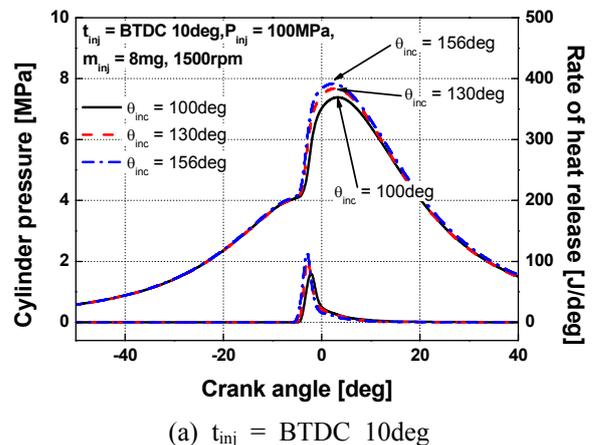
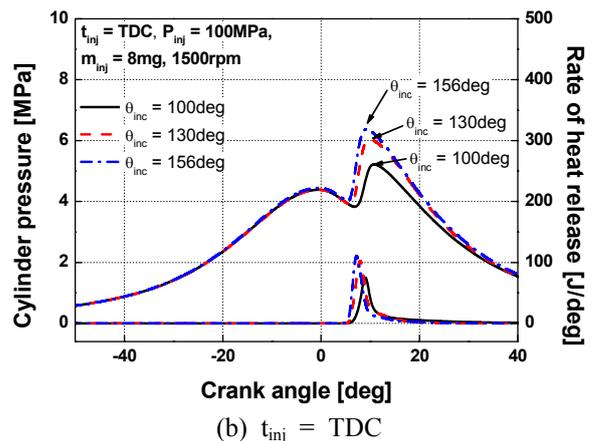


Fig. 5 Effect of inclined spray angle on the SMD



(a) $t_{inj} = \text{BTDC } 10\text{deg}$



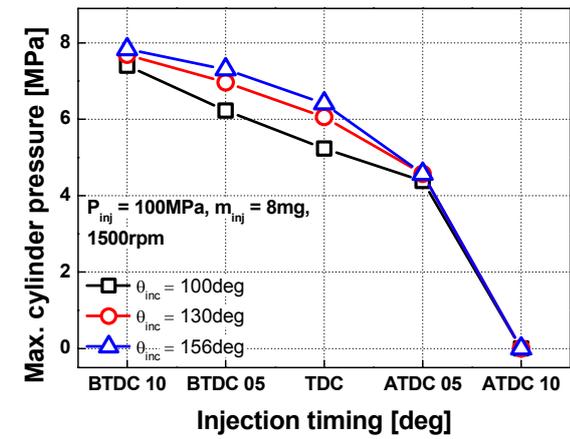
(b) $t_{inj} = \text{TDC}$

Fig. 6 Comparison of the cylinder pressure and rate of heat release at 1,500rpm

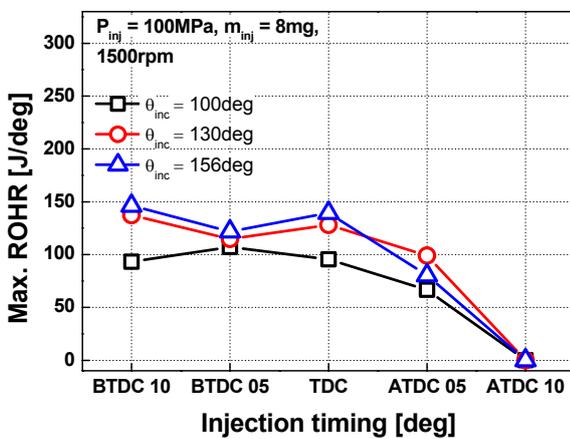
Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 분사각도가 넓을수록 긴 Penetration의 효과로 분사된 연료가 분열 및 미립화 되는 충분한 시간과 거리를 확보하여 실질적인 SMD는 가장 작은 것으로 판단된다.

3.3 연소 특성 비교

Fig. 6은 분사량 8mg, 분사시기 BTDC 10deg와 TDC일 때, 분사각도에 따른 실린더압력과 열 발생률을 나타내었다. 일반적으로 분사각도가 좁아질수록 Fig. 4와 Fig. 5에서 확인하였듯이 분사된 연료의 미립화가 지연되고, 이러한 결과는 분사된 연료들의 흡착(Coalescence)현상을 유발한다. 따라서, 분사각도 100deg와 130deg는 분사각도 156deg보다 낮은 열 발생률과 실린더압력이 발생하였다. Fig. 4에서 분사각도 156deg의 경우 분사된 연료의 대부분이 피스톤 보울 안쪽 깊숙이 골고루 분포하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 분사된 연료가 고온의 피스톤 보울 안쪽으로 많이 분포할수록 피스톤의 온도가 높아지고, 착화 지연기간이 짧아져 연소시간을 충분히 확보할 수 있어 높은 실린더압력과 열 발생률이 발생한다는 선행 연구 결과들^(14,15)과 일치한다.



(a) Max. cylinder pressure



(b) Max. Rate of heat release

Fig. 7 Comparison of the Max. cylinder pressure and Max. rate of heat release at 1,500rpm

Fig. 7은 분사시기에 따른 최대 실린더압력과 최대 열 발생률을 비교한 결과이다. 분사시기가 진각될수록 실린더압력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 분사시기가 진각되면 균일한 혼합기를 형성할 수 있는 시간을 많이 확보할 수 있으며, 연소하는 시간도 충분히 확보할 수 있어 실린더압력이 증가하는 것으로 사료된다. 열 발생률의 경우, 분사시기에 따라서 최대값이 달라짐을 알 수 있었다. 이는 Fig. 4와 Fig. 6의 결과에서 확인하였듯이 분사시기에 따라 피스톤 보울 안쪽으로 유입되는 혼합기량이 달라지며, 보울 안쪽으로 유입되는 연료량이 많아질수록 열 발생률의 최대값이 높아지는 결과이다. 분사시기가 ATDC 10deg일 때는 낮은 온도와 압력으로 인하여 모든 경우에서 실화(Misfire)현상이 나타났다.

3.4 배기 배출물 특성 비교

Fig. 8은 분사각도와 분사시기, 분사량에 따른 CO 배출량을 비교한 것이다. 분사시기가 지각(Retard)될수록 많은 양의 CO를 배출하였다. 이는 분사시기가 늦어질수록 혼합기(Mixture)가 균일하게 형성되는 시간을 충분히 확보하지 못하여 불완전 연소가 발생한 이유로 판단된다. 또한, ATDC 05deg에서 분사되었을 때는 대부분의 경우

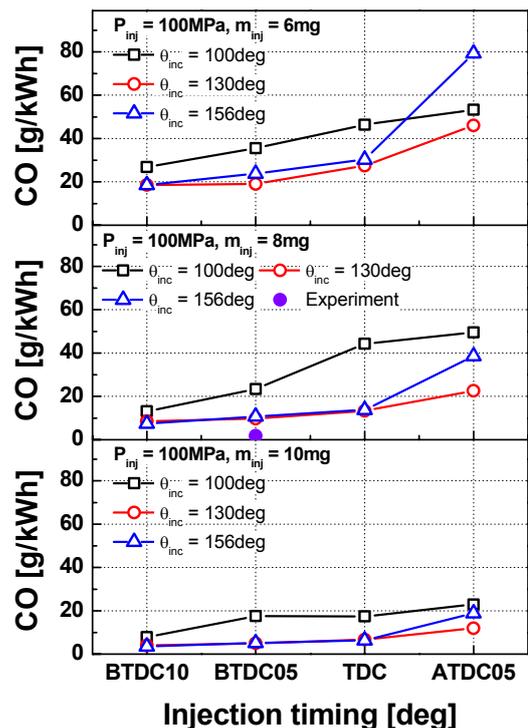


Fig. 8 Comparison of the CO emission at 1,500 rpm

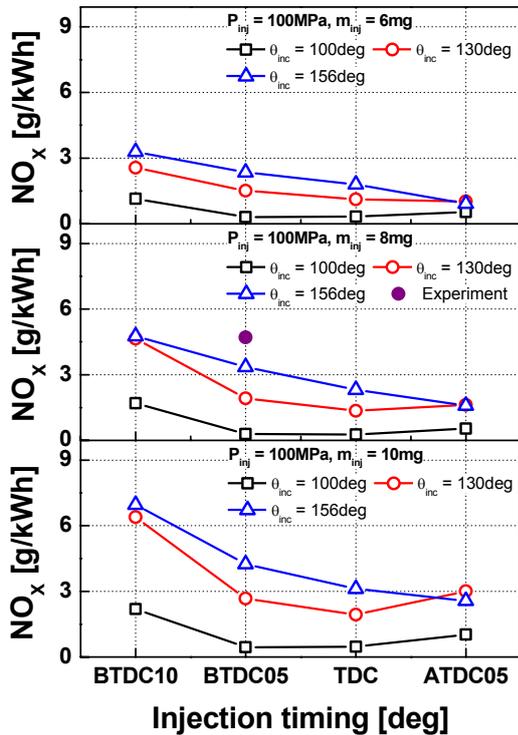


Fig. 9 Comparison of the NO_x emission at 1,500 rpm

CO 발생량이 최대치를 보였다. 이는 피스톤이 하강하고 있을 때 연료가 분사되어 스퀴시 유동 (Squish flow)의 영향이 줄어들고, 그 결과 연료혼합기의 운동량이 감소하여 피스톤 보울 안쪽으로 많이 유입되지 못한 결과로 사료된다. 또한, 분사량이 많아질수록 실린더 내부의 온도가 상승하게 되고,⁽¹⁶⁾ 높아진 온도가 CO의 산화 반응을 촉진하여 CO의 배출량은 줄어든 것으로 나타났다.

분사각도와 분사시기, 분사량에 따른 NO_x 배출 특성을 Fig. 9에 나타내었다. 분사시기가 진각될수록 NO_x 생성에 필요한 충분한 시간이 확보되고, 열 발생률이 증가하여 NO_x의 배출량이 증가하였다. 분사량이 증가할수록 NO_x의 생성에 중요한 인자인 연소 온도의 상승으로 NO_x의 배출량이 증가한 것으로 판단된다. 분사각도가 커질수록 고온의 피스톤 보울 안쪽으로 많은 양의 연료가 유입되는 것을 Fig. 4의 결과에서 확인하였고, 동시에 연소가 활발히 일어나 연소 온도를 상승시켜 NO_x의 배출량이 증가한 것으로 사료된다.

Soot 배출량 비교 결과를 분사각도와 분사시기, 분사량에 따라 Fig. 10에 나타내었다. 분사각도 130deg와 156deg는 Soot 배출량이 매우 적은 것으로 나타난 반면에, 분사각도 100deg의 경우에는 급격하게 많은 Soot 배출량을 보였다. 이는 분

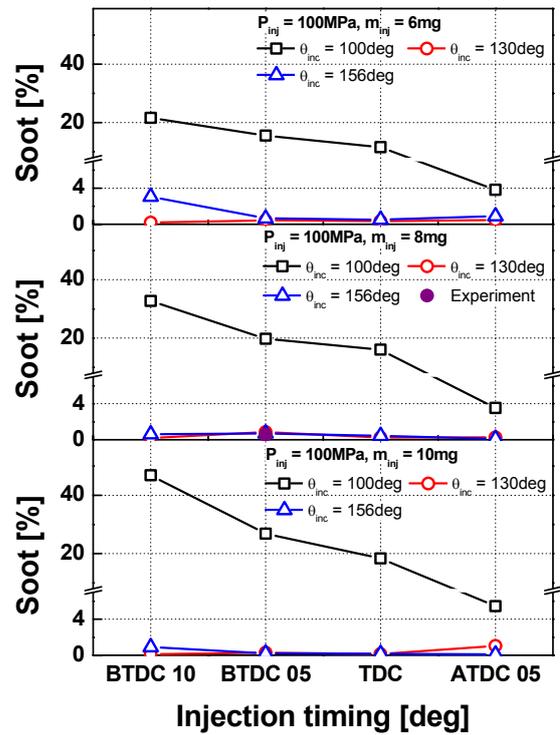


Fig. 10 Comparison of the soot emission at 1,500rpm

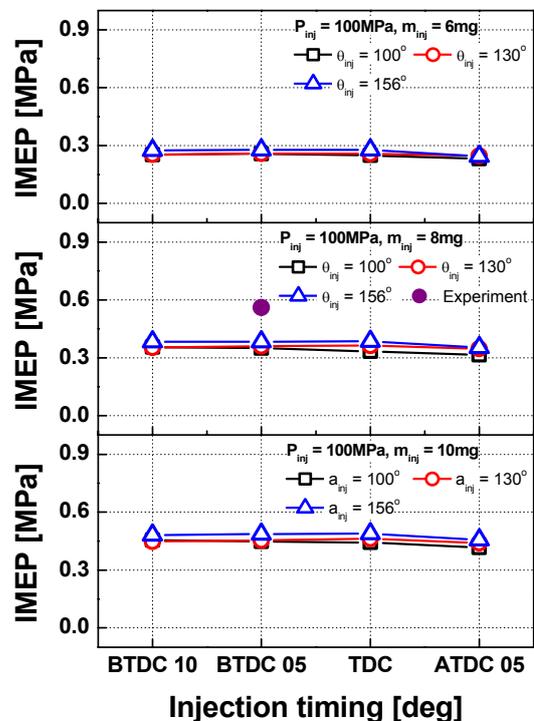


Fig. 11 Effect of inclined spray angle and injection timing on the IMEP at 1,500 rpm

사각도 100deg의 경우 전술한 바와 같이 농후한 혼합기의 형성이 피스톤 중심부근에서 형성이 되어 연소가 불완전해진 결과로 판단된다.

분사각도 130deg와 156deg의 경우, 분사량에 관계없이 Soot 배출량의 차이가 약 0.2~1.0%로 미비하였다. 이는 분사각도 130deg와 156deg에서 분사된 연료가 Lee 등⁽¹⁷⁾이 보고한 바와 같이 피스톤 보울의 엷지부분에서 농후한 혼합기를 형성하도록 타겟팅이 되어 Soot이 적게 배출된 것으로 판단된다.

3.5 평균유효압력(IMEP) 특성 비교

분사시기와 분사각도에 따른 IMEP(평균유효압력; Indicated Mean Effective Pressure)을 Fig. 11에 나타내었다. 분사각도가 넓어질수록 IMEP가 0.02 MPa~0.04MPa 가량 높았고, 분사량이 2mg 증가함에 따라 IMEP가 0.1MPa 높아졌다. 분사시기의 영향은 ATDC 05deg를 제외하고는 없는 것으로 파악되었다. 특히 ATDC 05deg일 때는 약 0.01 MPa에서 0.03MPa 정도 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이는 ATDC 05deg에서 분사할 경우 다른 분사시기와 같은 출력성능을 얻기 위해서는 더욱 많은 분사량을 필요하다는 것을 나타낸다.

4. 결 론

본 논문은 HSDI 디젤엔진의 성능 향상을 위하여 연료 분사 타겟팅 전략을 수치 해석적으로 연구하였다. 본 논문의 결과는 다음과 같다.

(1) 분사각도가 커질수록 피스톤 보울 안쪽으로 유입되는 공기-연료 혼합기의 양이 많아지며, SMD도 긴 도달거리를 가져 충분한 미립화 시간이 확보되어 가장 낮은 분포를 보였다.

(2) 피스톤 보울 안쪽으로 많은 양의 공기-연료 혼합기가 유입되는 분사각도 156deg에서 가장 높은 실린더 압력 및 열 발생률을 나타내었다. 또한, 분사시기가 진각되고, 분사량이 증가할수록 실린더압력이 증가하였다.

(3) 분사각도가 가장 작은 100deg 경우에 가장 많은 양의 CO와 가장 적은 양의 NO_x를 배출하였다. 반면에, 분사시기가 진각되고, 분사량이 증가할수록 실린더 내부 온도의 상승으로 인해 CO의 산화가 촉진되고, NO_x를 생성하는데 충분한 시간으로 인하여 많은 양의 NO_x를 생성하였다.

(4) 작은 분사각도(100deg)로 인하여 균일한 혼합기를 형성하지 못해 가장 많은 양의 Soot을 배출하였고, 분사각도 130deg와 156deg의 경우 Soot의 배출량은 상대적으로 미비하였다.

(5) 분사각도가 넓어지고, 분사량이 많아질수록 IMEP가 높게 나타났다. 분사시기의 영향은 ATDC 05deg를 제외하고는 없는 것으로 파악되었다. 이는 같은 조건에서 동일한 출력 성능을 얻기 위해서는 더 많은 분사량이 필요하다는 것을 의미한다.

(6) 엔진부하조건에 따라 Soot배출량이 적고, IMEP가 높은 분사각도 156deg와 분사시기 BTDC 05deg인 분사조건이 본 엔진 최적연료분사 조건으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2014년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(NRF-2014R1A1A1005201)

참고문헌 (References)

- (1) Han, D. S., Lee, B. H., Bae, M. J., Chang, Y. J., Jeon, C. H. and Song, J. H., 2008, "A Numerical Study on the Spray Characteristics of a Marine Diesel Engine of Injection Spray Angle and Hole Diameter," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. Spring Conference*, pp. 572~577.
- (2) Kang, S. H., Lee, S. W. and Eom, D. S., 2014, "The Effect of Fuel Injection Strategy on Combustion and Nano-particle Emissions in a Small Diesel Engine," *Transaction of the KSAE*, Vol. 22, No. 7, pp. 98~106.
- (3) Roh, H. G., Jeon, H. S. and Lee, C. S., 2007, "Effect of Multiple Injection and Injection Pressure on the Combustion and Emission Characteristics in a Passenger Car CRDI Diesel Engine," *Transaction of the KSAE Spring Conference*, pp. 352~357.
- (4) Chung, J. W., Kang, J. H., Kim, N. H. and Kang, W., 2007, "The Effects of Injection Fuel Ratio and Injection Timing on the Emission and Combustion Performances of the Partial Premixed Compression Ignition Combustion Engine Applied with the Split Injection Method," *Transaction of the KSAE Spring Conference*, pp. 358~363.
- (5) Lee, J. W., Jung, Y. J., Jang, J. Y., Park, J. S. and Bae, C. S., 2009, "Effect of the Injector Configuration and EGR on the HCCI Combustion and

- Exhaust Emissions in a Heavy Duty Diesel Engine,” *Transaction of the KSAE Annual Conference*, pp. 352~357.
- (6) Su, L. W., Li, X. R., Zhang, Z. and Liu, F. S., 2014, “Numerical Analysis on the Combustion and Emission Characteristics of Forced Swirl Combustion System for DI Diesel Engines,” *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 86, pp. 20~27.
- (7) Gafoor, A. and Gupta, R., 2015, “Numerical Investigation of Piston Bowl Geometry and Swirl Ratio on Emission from Diesel Engines,” *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 101, pp. 541~551.
- (8) Lee, J. H. and Kim, S. J., 2002, “Modeling the Effects of Injection Conditions and Combustion Chamber Geometry on Emissions in a HSDI Diesel,” *Transactions of the KSAE other Publications*, pp. 2337~2342.
- (9) Maghbouli, A., Yang, W., An, H., Li, J. and Shafee, S., 2015, “Effects of Injection Strategies and Fuel Injector Configuration on Combustion and Emission Characteristics of a D.I. Diesel Engine Fueled by Bio-Diesel,” *Journal of Renewable Energy*, Vol. 76, pp. 687~698.
- (10) Ryu, B. W., Kim, H. J., Lee, J. H. and Lee, C. S., 2008, “Prediction of the Effect of Injection Strategy on the Combustion and Emission Characteristics in a Direct Injection Diesel Engine,” *Transaction of the KSAE 30th Anniversary Conference*, pp. 427~432.
- (11) AVL List GmbH, 2012, “Fire Version 2013 ESE-Diesel (Engine Simulation Environment) Module Manual”.
- (12) AVL GmbH, 2013, “Fire Version 2013 Combustion Module Manual”.
- (13) Bosch, W., 1966, “The Fuel Rate Indicator : A New Measuring Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection,” SAE 660749.
- (14) Kook, S. H., Kong, J. S., Park, S. I., Bae, C. S. and Kim, J. H., 2007, “The Effect of Injection Angle and Nozzle Diameter on HCCI Combustion,” *Transactions of the KSAE*, Vol. 15, No. 2, pp. 1~7.
- (15) Jung, Y. J., Jang, J. Y., Park, J. S., Bae, C. S. and Kim, D. S., 2011, “Reduction of Exhaust Emissions Using Various Injector Configurations in Low Temperature Diesel Combustion,” *Transactions of the KSAE*, Vol. 19, No. 4, pp. 16~23.
- (16) Ladommatos, N., Xiao, Z. and Zhao, H., 2005, “The Effect of Piston Bowl Temperature on Diesel Exhaust Emissions,” *Proceeding IMechE*, Vol. 219, Part D: J. Automobile Engineering.
- (17) Lee, S. S. and Reitz, R. D., 2006, “Spray Targeting to Minimize Soot & CO Formation in Premixed Compression Ignition (PCI) Combustion with a HSDI Diesel Engine,” SAE 2006-01-0918.