

선박용 디젤 엔진에서 Pilot 분사가 연소 및 배기 특성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

배명직¹ · 한동식¹ · 김현규¹ · 장영준² · 송주현² · 전충환[†]

(원고접수일 : 2009년 8월 11일, 원고수정일 : 2009년 10월 6일, 심사완료일 : 2009년 12월 29일)

A Numerical Study on Effects of Pilot Injection on Combustion and Emission Characteristics in a Marine Diesel Engine

Myung-jik Bae¹ · Dong-Sik Han¹ · Young-Jone Chang² · Ju-Hun Song² · Chung-Hwan Jeon[†]

요 약 : 본 논문에서는 박용 디젤엔진에서 NO_x와 Soot의 배출량을 동시에 줄이기 위해 파일럿 분사의 특성을 알아보기 위해서 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과와 압력 선도는 실험 결과와 일치시켜 1.6% 범위의 적은 오차에서 예측함으로써 수치해석의 신뢰성을 검증하였고 총 분사량이 고정된 상태에서 분사시기, 분사휴지 시간, 분사율을 주요 파라미터로 적용하였다. 파일럿 분사시기의 변화는 연료의 자발화와 열발생률에 영향을 주는 것을 결과로부터 알 수 있었다. 결과로부터 분사휴지시간이 10°CA, 분사율이 0.022kg/s인 경우에 실린더의 압력 손실이 없는 범위에서 NO_x와 Soot를 동시에 저감하는 결과를 얻을 수 있었다.

주제어 : 박용디젤 엔진, 파일럿 분사, 분사율, 연소

Abstract: Computational simulation has been carried out to examine the effects of pilot injection to reduce both of NO_x and Soot emissions in a marine diesel engine. For verification of the computational result, calculated cylinder pressure was matched to experimental pressure. In this study, the primary variables were injection timing, dwell time and injection rate while the amount of injection fuel was maintained constant. It was revealed that variation of pilot injection timing affects auto ignition and heat release rate. In the results, both of NO and soot emission were reduced without deterioration of in-cylinder pressure under the condition of 10°CA dwell time and 0.022kg/s injection rate.

Key words: Marine diesel engine, Pilot injection, Injection rate, Combustion

기호 설명			
NO _x	: 질소 산화물	$Pr_{t,s}$: Soot의 Prandtl 수
Soot	: 검댕	ω_v	: Soot의 부피(m ³)
Y_s	: Soot 질량 분율	BTDC	: 상사점 전
ρ_s	: Soot의 밀도(kg/m ³)	ATDC	: 상사점 후
		T_0	: 수치해석 초기 온도(K)

[†] 교신저자(부산대학교 기계공학부, E-mail: chjeon@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3051)

¹ 부산대학교 기계공학과 대학원

² 부산대학교 기계공학부

P_0	: 수치해석 초기 압력(bar)
P_{cyl}	: 실린더 압력(bar)
\dot{m}_f	: 연료 분사율(kg/s)
Dwell time	: 분사휴지 시간(degree)
CA	: Crank angle(degree)
\dot{Q}	: 열방출량(J/s)

1. 서 론

디젤 엔진은 SI 엔진에 비해 높은 열효율과 값싼 연료비 때문에 산업용 및 수송용 동력원으로 많이 쓰이고 있지만 고온 확산연소로 인한 배기가스 특히 NOx와 Soot의 발생이 문제로 되어왔다. 디젤 엔진 연소의 대부분은 연료의 분사시기[1], 노즐의 형상[2]과 분사율에 지배를 받아 이루어지고[3], 대형 디젤엔진에서도 커먼레일 시스템이 도입되어 [4] 엔진회전수와 부하에 관계없이 분사시기, 분사 시간 등을 제어하는 것이 가능해졌다. 그러나 커먼레일 시스템을 적용한 박용 대형 디젤 엔진의 성능 및 배기특성 최적화를 위해서 분사 파라미터 변화에 따른 연소 특성에 관한 연구가 부족한 실정이다.

Dec[5], Kosaka[6] 등에 의해 발표된 선행 연구는 NOx와 Soot 배출물에 영향을 미치는 연소 영역의 온도, 당량비와 디젤분무에 관련된 세부적인 정보를 제공하였다. 적절한 가스 혼합기에 적절한 연료분포는 높은 배기 배출물을 생성하는 연소 조건을 피하기 위하여 필수적이다. 이것은 적절한 분무 전략을 적용함으로써 얻어질 수 있다. 예를 들면 자동차용 소형 디젤 엔진에서는 다만 분사를 이용하여 주분사의 분위기를 변경시킴으로써 착화 및 연소 특성을 바꾸어 배기가스 배출을 줄이는 것이 이미 일반화 되었다. 그리고 낮은 세탄가의 연료를 사용하는 박용 대형 디젤엔진에서 파일럿 분사를 이용해 NOx와 연료 소비율의 상반관계(trade-off) 관계를 개선한 연구결과도 발표되었다[7]. 그러나 이 경우 파일럿 분사로 인해 늘어나는 Soot 배출을 모두 제어하지 못하였다. 또한 Tanaka[8]는 파일럿 분사가 열발생 및 착화지연 측면에서 연소 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이와 같이 파일럿 분사를 적절히 이용함으로써 주분사 시의 착화 지연기간을 줄일 수 있고 초기에

혼합 연소의 양을 제한할 수 있기 때문에 초기 NOx 생성 억제에 적극 활용될 수 있다.

본 연구에서는 상용 Star-CD 코드를 이용하여 해석을 수행하였고, 커먼레일을 이용한 실제 파일럿 분사조건과 유사한 형태의 분사율을 적용하여 연소 특성 및 배기가스에 어떤 영향을 주는지를 알아보았다.

2. 수치 해석

2.1 연소해석 모델

Table 1: The models used in the simulation

Ignition	Shell-auto ignition model
Combustion	Eddy-breakup model
Droplet breakup	Reitz model
Turbulence	k-ε /RNG model
NOx	Zeldovich mechanism
Soot	Mauss model

자발화 착화 모델은 디젤엔진의 연소 초기에 일어나는 착화 현상을 나타내는 모델로서 탄화수소계 연료의 경우 일반적으로 널리 쓰이는 Halstead의 셸(Shell)모델을 사용하였다. 디젤 엔진에서는 예혼합 연소로 시작하여 확산 연소 과정으로 발전하기 때문에 연소 모델은 두 과정을 모두 고려하였다. 연소 해석은 디젤 엔진에 많이 쓰이는 모델 중의 하나인 Magnussen-Patterson이 제안한 Turbulent Eddy Break-Up 모델을 사용하였다. 이 모델은 혼합 속도를 결정하는 난류시간 스케일과 반응 속도에 영향을 주는 연료, 공기, 연소 생성물의 농도 및 온도들이 연소 속도를 결정한다. Table 1에 본 수치해석에서 수행되어진 주요 해석 모델을 간략히 제시하였다.

2.2 NOx 및 Soot 모델

NOx의 생성은 크게 NO와 NO₂가 있지만 엔진에서 주로 발생하는 NO만 고려하였다. 연구에 사용한 모델은 주배출물인 NO의 생성기구는 Thermal NO와 Fuel NO, Prpmt NO가 있지만 수치해석에서는 Thermal NO만 고려하도록 한

다. 생성기구는 Zeldovich mechanism에 의해 지배를 받고 지배식은 다음과 같이 표현할 수 있다.



고온에서 O₂가 2O로 분리되어, 이 산소원자가 공기 중의 질소분자와 반응하여 NO를 생성하고 동시에 질소원자를 생성하며 이것이 다시 공기 중의 산소와 반응하여 NO를 생성한다. Thermal NO_x의 생성은 주로 연소 온도가 높을 때, 연소 영역에서 산소의 농도가 높을 때, 고온영역에서 연소가스의 체류시간이 길 때 많이 발생한다고 알려져 있다.

Soot 생성기구는 Soot의 생성 속도와 연소 속도에 의해 지배를 받는 Mauss 모델을 적용하였다 [9]. 디젤 엔진의 연소과정 중 실린더내에서 고온 및 연료가 농후한 영역에서는 연료가 열분해 되어 여러 종류의 중간 생성물이 생성되며 이들이 서로 반응하여 Soot 입자가 생성되게 된다. Soot의 생성과정은 Soot발생, Soot의 표면성장, 입자간의 합체와 Soot입자의 산화 과정으로 이루어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_s) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_s) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{Pr_{ts}} \frac{\partial Y_s}{\partial x_j} \right) + \rho_s \bar{\omega}_s \quad (4)$$

즉, Y_s 는 Soot 질량 분율이다. Soot 에 대한 Prandtl 수는 1.4 , 밀도는 ρ_s = 1860 kg/m³ 라 가정한다. Soot 체적에 관한 식은 식(5)로부터 표현할 수 있다.

$$\omega_v = \omega_{v,particle\ inception} + f_v(\omega_{v,surf} - \omega_{v,frag} - \omega_{v,oxid}) \quad (5)$$

2.3 해석 조건 및 모델검증

본 연구에서 수치 해석을 수행한 엔진은 선박의 발전용으로 사용되는 4행정 디젤 엔진이다. 엔진의 주요 사양과 운전 조건은 Table 2에 제시하였다. 압력센서(Kistler, 6061B)는 실험 엔진의 헤드에 설치하였고 크랭크축의 각도 측정을 위한 엔코더는

캠축에 설치하였다. 엔진 연소 해석 장치인 CAS 를 이용하여 얻는 데이터로부터 P-θ선도를 획득할 수 있었다. Figure 1은 실험 장치의 개요를 도시하고 있다.

Table 2 : Engine specifications and operation conditions

Displacement volume per cylinder	4.83 L
Stroke/Bore	1.5
Engine power per cylinder	100 kW
Mean effective pressure	20.7 bar
Intake type	Turbo charger
Number of holes	8 Holes
Start of main injection	BTDC 4°

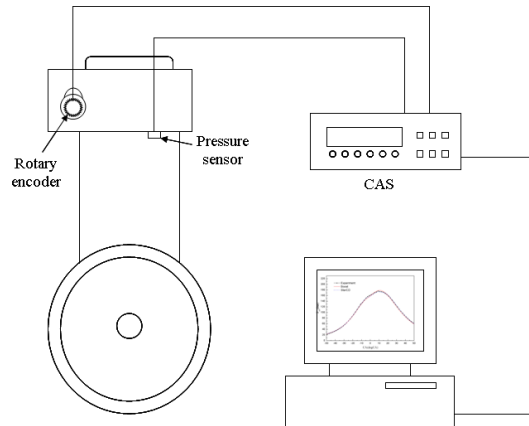


Figure 1: Schematic of the experiment

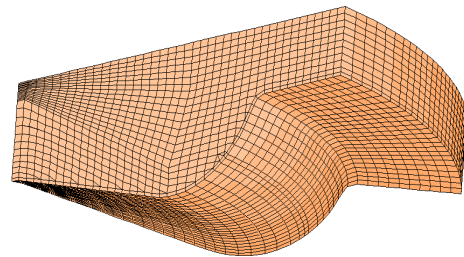


Figure 2: Simulation mesh at TDC

해석에 사용된 전산해석도구는 CD-Adapco사의 Star-CD code를 사용하였고 피스톤의 움직임을 모사하기 위한 이동격자는 esice 엔진 전용 팩키지

를 사용하여 생성하였다. 본 연구에서는 계산의 효율성을 위해서 인젝터의 홀이 8개임을 활용하여 전체 실린더의 1/8의 섹터 모델을 적용하였다. 피스톤의 잘려진 부분은 Cyclic 경계 조건을 적용하여 해석하였다. Fig. 3은 피스톤이 TDC에 위치할 때의 연소실 메시의 형상을 보여준다. 수치 해석의 초기 조건은 피스톤이 BDC에 위치할 때를 기준으로 $T_0 = 348\text{ K}$, $P_0 = 3.77\text{ bar}$ 로 적용하였다. 이 초기 조건은 AVL사의 Boost 프로그램을 이용해 계산된 결과이다.

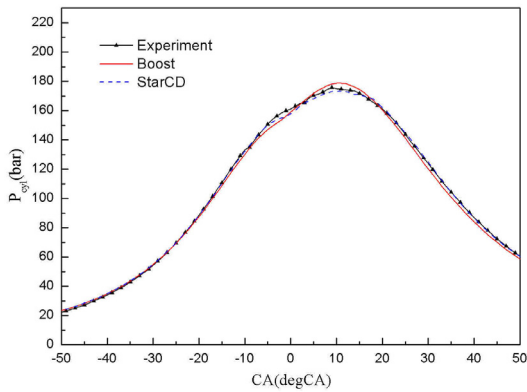


Figure 3: Predicted and measured cylinder pressure

연소 해석 결과의 연소실 압력 데이터를 실험 결과와 비교하여 Figure 3에 나타내었다. 그림과 같이 압축 및 연소 과정에서 Star-CD를 이용한 계산 값과 측정값이 1.6%의 범위 내에서 일치함을 확인하였다.

본 연구에서 변화시킨 파라미터로는 분사율, 분사 시기 및 분사휴지 시간이며 Table 3은 각 경우의 분사시기를 보여준다. 여기서 Dwell time은 파일럿 분사가 종료되고 주분사가 시작되기까지의 시간이다. Case 1, Case 2, Case 3의 경우 주분사 기간을 기계식 분사와 동일하게 한 경우이고 분사 휴지 기간이 각각 3° CA, 10° CA, 20° CA이다. Case 4, Case 5는 NOx의 생성을 줄이기 위해서 주분사 시기를 ATDC 2° CA로 지연시킨 경우이고 분사 휴지 기간이 각각 10° CA, 20° CA이다. 모든 경우에서 분사량이 고정된 상태에서 분사율과 분사 시기만 변경되었다. 분사가 끝나는 시점

은 ATDC 22° CA로 일정하다. Figure 4는 수치 해석이 수행되어진 분사율을 보여준다. 시뮬레이션에서 보다 합리적인 분사율을 적용하기 위해서 커먼레일을 이용해 다단분사 실험을 수행한 선행연구를 참고하였다[10]. 모든 파일럿 분사를 수행한 조건에서 파일럿 분사량은 전체 분사량의 8.12%로 고정시켰다.

Table 3 : The conditions used in the simulation

	Main injection start	Dwell time
Reference	BTDC 4° CA	-
Case 1	BTDC 4° CA	3° CA
Case 2	BTDC 4° CA	10° CA
Case 3	BTDC 4° CA	20° CA
Case 4	ATDC 2° CA	10° CA
Case 5	ATDC 2° CA	20° CA

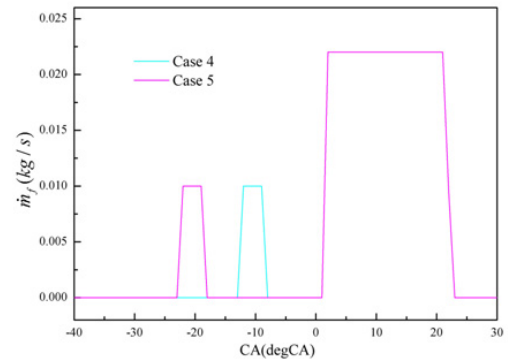
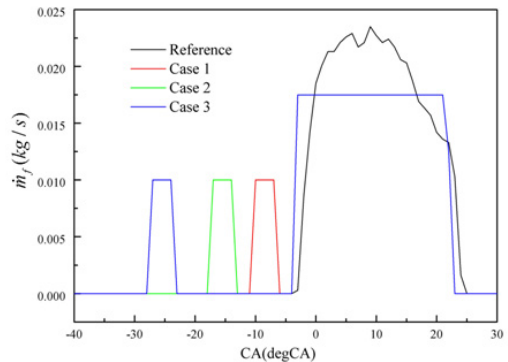


Figure 4: Injection rate and timing for one hole

3. 결과 및 고찰

3.1 연소실 압력 및 열발생률

각 Case에 대한 압력선도와 열발생률의 해석 결과를 Figure 5에 나타내었다. 실린더 내 연소에 의한 압력이 모터링 압력보다 상승되는 시점은 Case 3이 가장 빠르고 Case 5, Case 2, Case 4, Case 1의 순서로 파일럿 분사가 일어나는 순서대로 나타났다. 너무 이른 시점의 파일럿 분사는 압축 행정 시 과도한 압력 상승을 유발하여 엔진의 출력 손실의 결과로 나타나는 것을 결과로부터 알 수 있다. 실린더 최고 압력은 189 bar로 파일럿 분사시기가 가장 빠른 경우인 Case 3에서 발생하였고 이는 기계식 인젝터를 사용하여 주분사만 하는 기존의 최대압력 173 bar보다 9.2% 높았다.

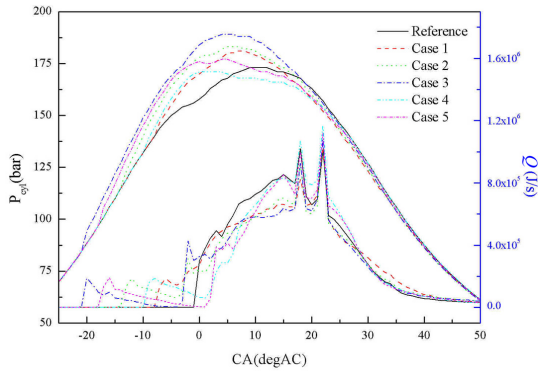


Figure 5: Pressure and heat release rate in cylinder

각 경우 별로 파일럿 분사의 착화지연기간은 파일럿 분사시기가 TDC에 가까울수록 짧아지는 것을 확인하였다. 이는 피스톤이 상사점에 가까울수록 실린더내 압력과 온도가 더 높기 때문이다. Case 1의 경우 ATDC 30°CA 이후에는 열발생률이 높은 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 ATDC20°CA 때의 기체 상태 연료의 농도가 Case 1의 경우에는 기계식 분사나 다른 경우보다 좁은 지역에 분포하여 연소가 상대적으로 느리게 이루어졌기 때문이다. Case 1의 경우 연료의 분포가 좁게 발생한 이유는 상대적으로 낮은 분사압력으로 인해 분무 관통 거리가 짧아지고 이로 인해 연료가 실린더 벽면까지 도달하지 못하였다고 판단된다.

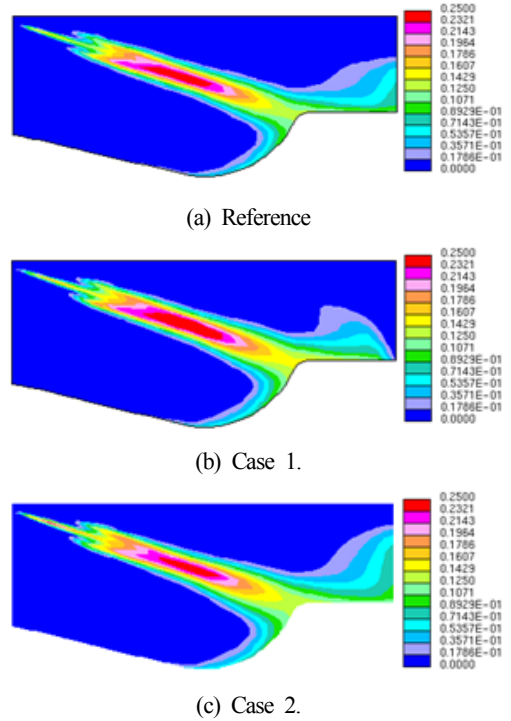


Figure 6: The distribution of fuel concentration at ATDC 20° CA

3.2 NO 및 Soot 생성

Figure 7은 실린더내 NO와 Soot의 생성을 시간변화에 대해 나타낸 결과이다. NO생성 기울기로부터 기계식 단일 분사를 수행하는 것 보다 파일럿 분사를 수행한 모든 Case들이 주연소 기간 동안 NO의 생성률이 낮은 것을 확인하였고 Case 1, Case 2, Case 4는 NO의 최종 생성량도 적은 것을 확인하였다. 특히 Case 4의 경우에는 NO 생성량이 기본 모델인 기계식 분사보다 NO 생성량이 2.8% 줄어든 것을 알 수 있다. 이것은 파일럿 분사를 수행함으로써 전체적인 분사 시기를 기존 보다 지연시킬 수 있었기 때문이라고 판단된다. 파일럿 분사와 단일 분사 엔진 모두의 경우에 분사시기를 지연시키는 것은 디젤엔진에서 NO의 배출을 줄이는 보편적인 방법이다[3],[11].

그리고 Dwell time이 길어짐에 따라서 NO 생성량이 많아지는 경향을 볼 수 있는데 이는 차량용 디젤 엔진에서 파일럿 분사 실험을 수행한 Paolo Carlucci[12]의 결과에서도 유사한 경향을 볼 수

있었다. 이는 Figure 6에서 알 수 있듯이 파일럿 분사 타이밍이 빨라질수록 NO 가 생성될 수 있는 시간이 길어지기 때문이다. Figure 8은 실린더내에 열발생률을 적분하여 나타낸 누적 열발생량을 보여준다. ATDC 5°CA이후부터는 Case 4보다 기계식 분사를 수행하는 경우가 항상 누적 열발생량이 많은 것을 확인 할 수 있는데, 결국 기계식 분사의 경우가 고온에 일찍 노출되어 NO의 발생이 많아지게 되었다고 판단된다.

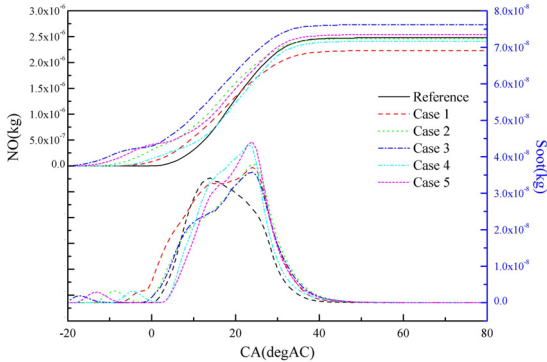


Figure 7: NO and Soot emission in a combustion chamber

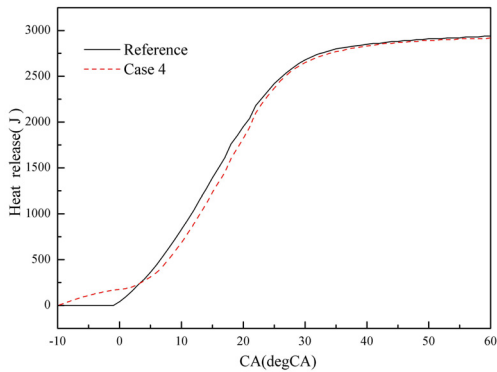
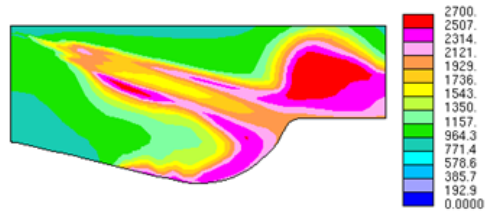
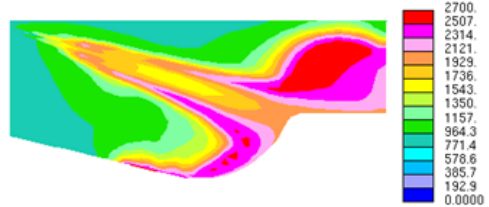


Figure 8: Accumulated heat release in cylinder

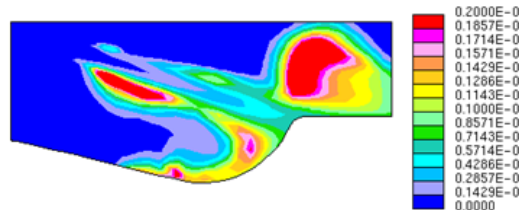
Figure 9는 NO 생성률이 가장 높은 시기인 ATDC 20°CA때의 기계식 분사와 Case 4의 온도와 NO 분포를 보여준다. 기계식 분사를 수행한 경우가 Case 4보다 항상 열 발생량이 많기 때문에 고온 영역이 넓고 비교적 NO 발생도 더 넓은 지역에서 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. Figure 10에서 보여주는 Soot의 배출량을 보면, Case 1



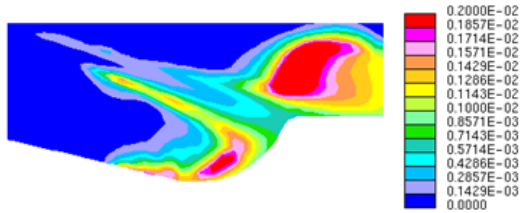
(a) The distribution of temperature ; Ref.



(b) The distribution of temperature ; Case 4



(c) The distribution of NO ; Ref.



(d) The distribution of NO ; Case 4

Figure 9: The distribution of temperature (a), (b) and NO emission (c), (d)at ATDC 20° CA

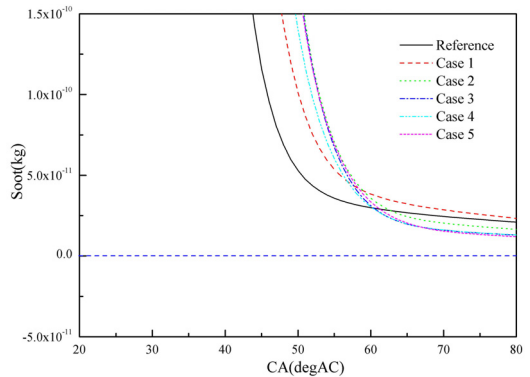


Figure 10: Soot Formation in cylinder

을 제외한 모든 파일럿 분사의 경우에 Soot의 배출이 기계식 분사보다 적은 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 파일럿 분사를 시행하였을 경우 연소 후반에 생성된 soot의 연소가 급격히 일어난 것을 확인 할 수 있다. Figure 11은 ATDC 30°CA일 때 기계식분사와 Case 4의 실린더 온도 분포(a)와 soot 분포(b)를 보여주고 있다. 기계식 분사의 경우보다 Case 4의 경우가 피스톤 보울 영역에서 더 높은 온도 분포를 가진다. Figure 11의 (b)는 확산화염으로 생성된 soot의 분포를 보여주

고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 Case 4의 경우에 지연된 주분사가 피스톤 크라운 지역에 고온 영역을 형성하여 soot의 연소를 활발하게 하여 최종적으로 배출되는 양을 줄일 수 있었음을 알 수 있다. Table 4와 Figure 12는 각 Case에 대해 NO와 Soot의 배출량의 상관관계를 표시하였다. 그림에서 보여주는 것처럼 파일럿 분사를 수행한 결과 Case 2와 Case 4는 기계식 분사의 경우보다 NOx와 Soot의 배출이 동시에 개선되었음을 확인할 수 있다.

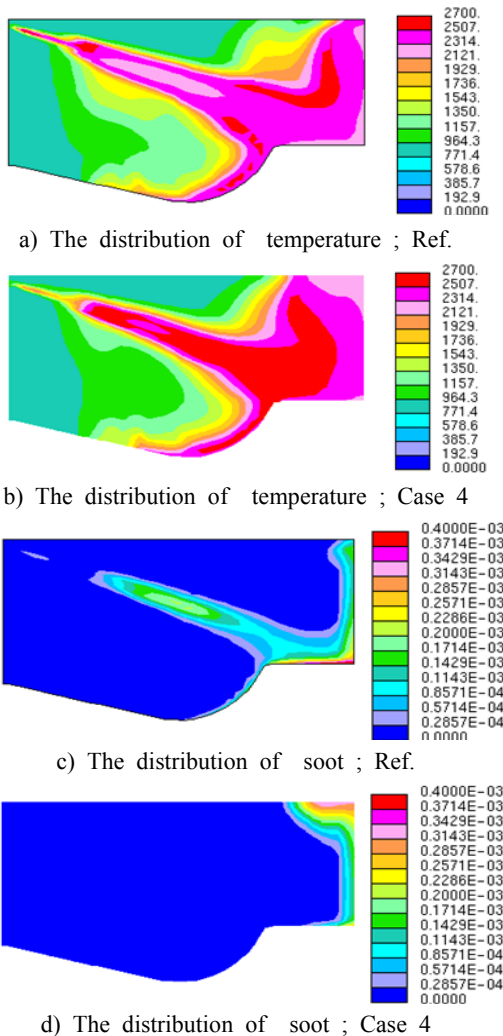


Figure 11: The distribution of temperature (a), (b) and soot emission (c), (d)at ATDC 30° CA

Table 4: The conditions used in the simulation

	NO(kg/cycle)	Soot(kg/cycle)
Reference	2.48×10^{-6}	2.10×10^{-11}
Case 1	2.23×10^{-6}	2.33×10^{-11}
Case 2	2.46×10^{-6}	1.65×10^{-11}
Case 3	2.73×10^{-6}	1.30×10^{-11}
Case 4	2.41×10^{-6}	1.31×10^{-11}
Case 5	2.54×10^{-6}	1.20×10^{-11}

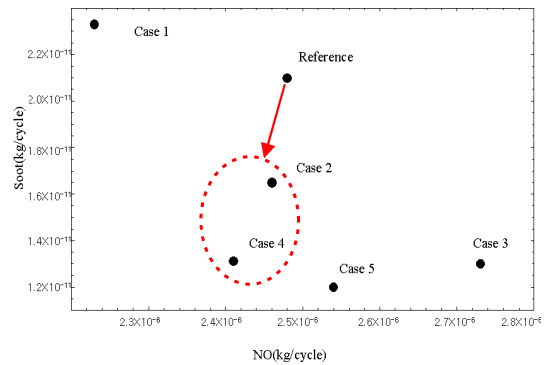


Figure 12: NOx vs. Soot trade-off point

3. 결론

본 연구에서 4행정 박용 대형 디젤 엔진에 대한 3차원 연소 해석을 통해 파일럿분사가 연소 특성 및 배기가스 배출에 어떻게 영향을 미치는지 알아 보았다. 수치해석 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 해석 결과 기계식 단발 분사 조건에서 실험 결과와 비교하여 연소실 최대 압력을 1.6% 범위의 적은 오차에서 예측함으로써 수치해석의 신뢰성을

검증하였다.

2. 수치해석 결과로부터 파일럿 분사를 수행한 모든 경우에 주연소 기간 동안 NO의 생성률이 단발분사보다 낮은 것을 확인하였고, 파일럿 분사 시기가 빨라질수록 NO의 생성량이 많아지는 것을 확인하였다.

3. 파일럿 분사를 수행하면 주분사의 점화 지연 시간이 짧기 때문에 실린더의 압력 손실이 없는 범위에서 주분사 타이밍을 지연시킬 수 있기 때문에 NOx의 생성을 줄일 수 있는 것을 확인하였다.

4. 파일럿 분사의 수행으로, 특히 분사율이 높고 휴지 기간이 10°CA인 Case 4의 경우 실린더 압력 손실을 최소화 하면서 NO와 Soot 발생을 동시에 줄일 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 BK21 사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 임재근, 최순열, "선박용 디젤기관의 연료분사 시기가 배기배출물 특성에 미치는 영향," 한국박용기관학회지, vol. 26, no. 3, pp.307~312. 2002.
- [2] 윤옥현, 김기두, 하지수, "대형 디젤 엔진의 연료 분사 노즐 형상이 NOx 발생량 및 연료소비율에 미치는 영향 연구," 한국박용기관학회지, vol. 28, no. 7, pp.1123~1130. 2004.
- [3] John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill.
- [4] Bert Buchholz, Roland Pittermann, Mathias Niendorf, "Measures to reduce smoke and particulate emissions from marine diesel engines using compact common rail injectors," CIMAC Conference paper 2007, paper no. 129, 2007.
- [5] Dec J.E., "A Conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging," SAE paper 97073.
- [6] Kosaka H., T. Aizawa, T. Kamimoto, "Two-dimensional imaging of ignition and soot formation processes in a diesel flame," International Journal of Engine Research, 6(1)pp.21-42, 2005.
- [7] Masahiro Ishida, Shuhei Izumi, Fumitsugu Yoshizu, Hideo Suetsugu, "The effect of pilot injection on low cetane fuel combustion in Diesel engine," CIMAC Conference paper 1995, paper no. 129, 1995.
- [8] T. Tanaka, A. Ando and K. Ishizaka, "Study on pilot injection of DI diesel engine using common-rail injection system," JSAE Review vol.23, pp. 297-302, 2002.
- [9] Karlsson, A., Magnusson, I., Balthasar, M., and Mauss, "Simulation of soot formation under Diesel engine conditions using a detailed kinetic soot model", SAE Technical Paper Series 981022.
- [10] Tobias Husberg, Ingemar Denbratt and Anders Karlsson, "Analysis of Advanced Multiple Injection Strategies in a Heavy-Duty Diesel Engine Using Optical Measurements and CFD-Simulations," SAE paper 2008-01-1328.
- [11] Robert C. Yu, Syed M. Shahed, "Effects of injection timing and exhaust gas recirculation on emissions from a D.I. diesel engine," SAE paper 811234.
- [12] Paolo Carlucci, "Effects of Pilot Injection Parameters on Combustion for Common Rail Diesel Engines," SAE paper 2003-01-0700.

저 자 소 개



배명직(裴明稷)

2007년 영남대학교 기계공학과 졸업(학사), 현재 부산대학교 기계공학과 대학원 재학 중



전충환(全忠煥)

1985년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1987년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사), 1994년 부산대학교 졸업(박사), 2003~현재 부산대학교 기계공학부 교수



한동식(韓東植)

2007년 동명정보대학교 기계공학과 졸업(학사), 2008년 부산대학교 기계공학과 대학원 졸업(석사), 현재 부산대학교 기계공학과 대학원 재학 중



김현규(金鉉珪)

1989년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1992년 부산대학교 기계공학과 대학원 졸업(석사), 1998. 부산대학교 기계공학과 수료(박사)



장영준(張英俊)

1975년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1977년 부산대학교 대학원 졸업(석사), 1986년 동경공업대학교 졸업(박사), 1978~현재 부산대학교 기계공학부 교수



송주헌(宋周憲)

1991년 서울대학교 항공공학과 졸업(학사), 1996년 서울대학교 항공공학과 졸업(석사), 2005년 펜실베이니아 주립대학교 졸업(박사), 2008~현재 부산대학교 기계공학부 조교수