

대형디젤기관에서 연속재생방식 PM 저감장치장착에 따른 유동 및 성능에 관한 수치해석적 연구

한 영 출^{*1)} · 문 병 철²⁾ · 오 상 기³⁾ · 백 두 성³⁾

국민대학교 기계·자동차공학과¹⁾ · 서울정수기능대학 카일렉트로닉스과²⁾ · 국민대학교 자동차전문대학원³⁾

A Study on Prediction of Flow Characteristics and Performance of a Heavy-Duty Diesel Engine with Continuously Regenerating Method PM Reduction

Youngchool Han^{*1)} · Byungchul Moon²⁾ · Sangki Oh³⁾ · Doosung Baik³⁾

¹⁾The Department of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

²⁾Seoul-Jeongsu Polytechnic College Car-Electronics, Seoul 140-823, Korea

³⁾Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 3 August 2004 / Accepted 25 November 2004)

Abstract : The increasing automobiles continue to cause air-pollution problems worse than ever. In fact, many automobile research are involved in how to reduce exhaust emissions effectively specially in NO_x and PM to comply with stringent emission standards, Euro V. This research emphasized on the development of continuous regeneration DPF technology which was one of promising removing technology of particulate matters because of its comparability and high applicability. In addition, this research discussed on some design points of view through correlation study by comparing the experimental data with computational results by the introduction of commercial codes such as CFD-ACE+ and KIVA-3V. The numerical simulation on the performance of continuous regeneration DPF apparatus and corresponding emission characteristics has been predicted well enough and verified with experimental results. The pressure and average temperatures are decreased to about 2.6% and 1.4% respectively under a full engine load condition mainly due to back pressures raised by diesel particulate filter. Pressure, temperature and heat releasing rates tend to decrease specially at higher engine load, but they are not affected at lower engine load regions.

Key words : Air-pollution(대기오염), NO_x(질소산화물), PM(입자상물질), DPF(디젤매연여과장치)

1. 서론

자동차 사용 대수의 급속한 증가로 인해 대기오염이 날로 심각해지고 있다. 특히 자동차 배기가스는 대기오염에 지대한 영향을 미치고 있어 전 세계적으로 이를 저감하기 위해 많은 연구를 진행하고

있으며, 각 국에서는 디젤차량의 배기가스 중 가장 문제시되는 NO_x 및 PM의 규제를 강화하고 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 대형디젤기관의 입자상물질 제거기술 중 국내 보유기술과의 호환성이 높고 적용 가능성이 유력한 연속재생방식 PM 저감장치에 관한 기관 유동특성 및 성능에 관한 연구로서 연속재생방식 PM 저감장치 장착시의 기관 유동 및 성능특성을 KIVA-3V 코드 및 CFD-ACE+로 예측하여

^{*}To whom correspondence should be addressed.
hanyc@kookmin.ac.kr

실제 실험자료를 통한 수치해석 검증을 수행하고 연속재생방식 PM 저감장치내의 온도 및 압력특성을 파악하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 KIVA-3V를 사용하여 기관연소특성을 파악하여 그 결과값인 열역학적 기본상태량값들을 CFD-ACE+로 형상모델링한 연속재생방식 PM 저감장치의 초기조건으로 입력하여 온도 및 압력특성을 파악하였다. KIVA-3V에서 사용되는 지배방정식들은 보존식의 형태로서 비정상상태의 압축성유체의 유동과 화학반응 및 연료분무를 고려한 식들로 구성되어 있으며,¹⁾ 이들을 격자상에서 각 시간스텝에 대하여 풀어 결과를 내도록 되어있다.²⁾ Table 1과 Fig. 1에는 본 연구에 사용된 부모모델과 흐름도를 나타내었다.

Table 1 Mathematical model for physical phenomena of KIVA-3V

Physical process	Sub model		
Spray	Standard spray model		
Drop drag	Droplet drag and distortion model		
Droplet breakup	Wave model		
Atomization	TAB model		
Wall impingement	Watkins-Park model		
Combustion	Hybrid model		
	Laminar flame	Arrhenius model	
	Diffusion flame	Eddy breakup model	
Emission	NOx	Extended Zeldovich	
	Soot	Formation	Hiroyasu model
		Extinction	Nagle-Strickland model

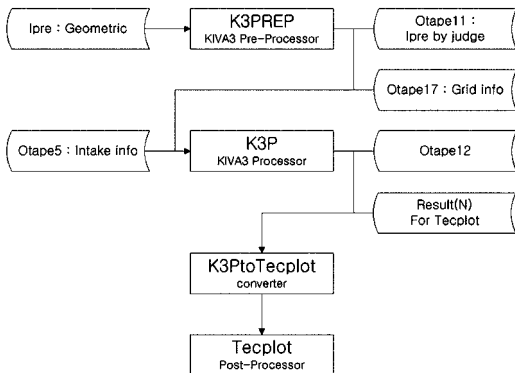


Fig. 1 Configuration of KIVA-3V

연속재생방식 PM 저감장치 내의 압력 및 온도특성을 유체유동 상용 해석 프로그램인 CFD-ACE+를 사용하여 특성을 도출하였다. CFD-ACE+의 지배방정식은 Table 2와 같다.³⁾

Table 2 Equation for physical phenomena of CFD-ACE

Physical process	Equation
Flow	Law of conservation of mass
	Newton's second law
	Navier-stokes equation
Heat transfer	Law of conservation of energy
Turbulence	Standard k-ε

2.2 계산조건

대형디젤기관에서 연속재생방식 PM 저감장치 장착에 따른 기관유동 및 성능예측을 위한 계산조건은 흡기밸브가 닫히는 시점(IVC)부터 시작하며 실린더 내에서 착화되는 시기가 상사점 근처에서 이루어지도록 분사시작 시점을 BTDC 11°로 고정하였다. Table 3은 수치해석을 위한 기관초기조건을 Table 4는 기관의 제원이다.

Table 3 Engine operation condition for analysis

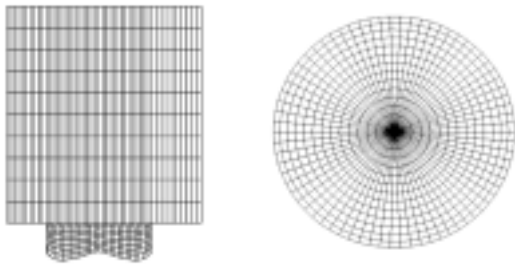
Items	Specifications
Engine speed	1000 ~ 2200(rpm)
Start of injection	-11(deg ATDC)
Injection mode	Velocity table
Spray angle	20.97(deg)
Swirl ratio	2.15
Cylinder wall, piston, head temp.	450(K)
Initial droplet temp.	313(K)

Table 3 Engine specification

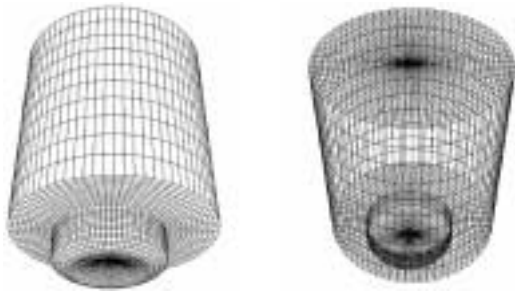
Items	Specifications	
Bore	11.1(cm)	
Stroke	13.9(cm)	
Squish	0.205(cm)	
Connecting rod length	24.66(cm)	
Displacement	8,071(cc)	
Compression ratio	17.2	
Valve open/close	Intake valve open	BTDC 16(deg)
	Intake valve close	ABDC 36(deg)
	Exhaust valve open	BBDC 46(deg)
	Exhaust valve close	ATDC 14(deg)
Injection system	In-line	
Injector nozzle diameter	0.0145(cm)	
Bowl type	Toroidal	

계산시간은 흡기밸브가 닫히는 시점(IVC)부터 배기밸브가 열리는 시점(EVO)까지이며, 사용한 연료는 Dodecane(C₁₂H₂₆)이다. 본 연구에 사용한 대형 디젤기관은 Toroidal 보울피스톤형으로서, 제작사의 기관실험결과값을 토대로 PM이 가장 많이 배출되는 1000rpm과 실험에 사용한 기관의 최대도오크 회전수인 1400rpm에서 연속재생방식 PM저감장치 장착에 따른 각 부하(Load)별 배출가스특성을 파악하였다. 또한 연소실내 유동 및 온도 특성을 기관속도 1000~2200rpm까지 변화시키며, 각 부하별로 해석하며, 총 격자수는 약 25000개이다.

본 연구에서 적용한 전처리(K3preP)를 통하여 계산영역에 대한 격자구조를 검사하고, 계산영역은 Fig. 2와 같다.



(a) At crank angle -146°ATDC (b) At crank angle -146°ATDC



(c) At crank angle -146°ATDC (d) At crank angle 146°ATDC

Fig. 2 ALE mesh for diesel combustion chamber

계산이 시작하는 IVC에서의 실린더 안에 존재하는 공기의 온도는 344 K로 균일하다고 가정하며, 연소실 내부에는 스윙 유동(Swirl flow)만이 존재한다고 가정하였다. Bessel 함수를 이용하여 속도 초기조건을 설정하고, 속도의 초기값은 순간 선회 유동 강도(Swirl ratio)를 이용하여 대입한다. 여기서 선회

유동 강도는 강제 선회 유동의 각운동량을 기관 회전수로 나눈 값으로 정의한다.

$$swirl\ ratio = \frac{w_s}{2\pi N/60}$$

여기에서,

$$w_s = \frac{\sum_i m_i [(x_i - x_c)v_i - (y_i - y_c)u_i]}{\sum_i m_i [(x_i - x_c)^2 - (y_i - y_c)^2]}$$

이며, i 는 격자점을 c 는 실린더의 중앙점을 의미한다. 또한, 이 때의 속도 분포는 중심에서 멀어질수록 증가하다가 벽면에서는 마찰의 효과로 감소되어지는 Bessel 함수의 형태로 정의한다.

난류 운동에너지와 소산율의 초기 값으로는 김상호가 사용한 다음의 식을 사용한다.⁴⁾

$$k_{IVC} = 0.165 u^2$$

$$\varepsilon_{IVC} = 0.0545 \frac{u^3}{A^{0.5}}$$

여기서, u 와 A 는 흡입과정 동안의 평균 속도와 평균 열림 면적을 의미한다. 연료는 다섯 방향으로 분사되며 모든 노즐의 분사 방향은 수직 축으로부터 77.5도 방향으로 분사되도록 설계되어 있다. 분사 시작 시점은 ATDC -11°로 고정하였으며 분무의 분사각(Spray angle)은 분사 노즐의 형상과 연료와 가스의 밀도비에 따라 변화하므로 본 연구에서는 Reitz 등이 제시한 실험식을 사용한다.⁵⁾

경계 조건으로서 벽면의 온도는 450K로 일정하다고 가정하였으며, 속도의 벽면 경계 조건은 벽면에 수직인 방향의 속도가 벽면이 움직이는 속도와 같다고 묘사함으로써 피스톤의 움직임에 의한 영향을 고려한다. 벽면에 접선 방향의 속도 성분은 난류 벽법칙을 적용한다. 밀도 및 난류 운동에너지의 벽면 경계조건으로는 벽면에 수직인 방향에 대한 구배가 없다고 가정한다. 또한, 연속재생방식 PM저감장치 장착 전·후의 압력 및 온도값은 측정값과 수치해석 결과값이 거의 일치하여, 배출가스 온도와 압력값을 653.15. K, 3500Pa를 CFD-ACE+의 초기 조건값으로 대입하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연소모델 검증

본 연구에서는 디젤연소현상을 해석하기 위하여 디젤연소를 예혼합연소기간과 확산연소기간으로 나누고 예혼합연소기간의 연소율은 아래니우스식의 형태로 계산하며, 확산연소기간의 연소율은 연료와 공기가 혼합되는 특성에 의해 연소율이 결정되는 EBU(Eddy Breakup Model)을 사용한다. Fig. 3은 아래니우스식의 모델상수 K_1 값을 3×10^{11} 로 하고, EBU모델의 모델상수 A를 20으로 하였을 때 실험결과에 가장 일치함을 알 수 있었으며, 이후의 수치해석은 위의 값을 사용한다.

Fig. 4는 100% 부하에서 기관회전수변화에 따른 NO의 배출량을 수치해석과 실험값을 비교한 것으로 전체적으로 예측치가 실험치 보다 저부하영역에서 작게 나타나고 있으며 고부하에서는 크게 나타나고 있다. 이는 실험에서 연속재생방식 PM 저감장치 장착에 따른 배압의 상승으로 인한 연소조건 악화로 온도와 압력의 저하가 원인이 되어 고회전 영역에서 수치해석결과보다 낮은 실험결과가 나타났다. 일반적인 디젤기관은 전부하운전이 미비하고 본 연구에서 사용된 기관의 최대 토오크회전수가 1400rpm인 것을 고려할 때 실험값과 유사한 경향이 나타났다.

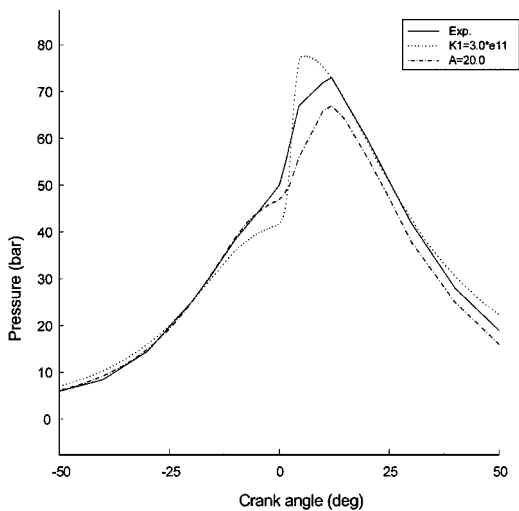


Fig. 3 The effect of model constant K_1 and A on a combustion characteristics

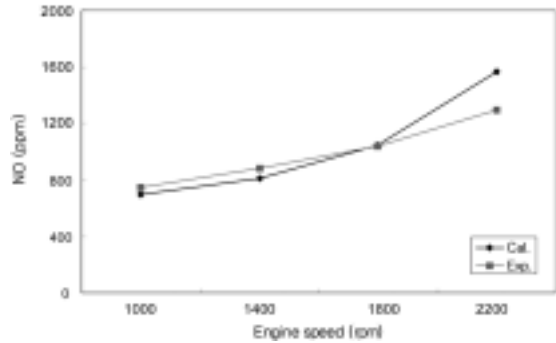


Fig. 4 mission prediction compared with experimental results

3.2 유동 및 연소 특성

3.2.1 연소실내 유동특성

Fig. 5는 크랭크 각도 BTDC 11° 에서의 실린더 내부의 유동장을 나타낸다. 디젤 연소실 내에서 유동의 강화는 공기와 연료의 혼합율을 높여 양호한 연소 특성을 얻을 수 있는 방법이다. 본 연구 대상기관의 경우 나선형 흡기포트를 이용하여 강한 와류(Swirl)를 생성하고 있다.

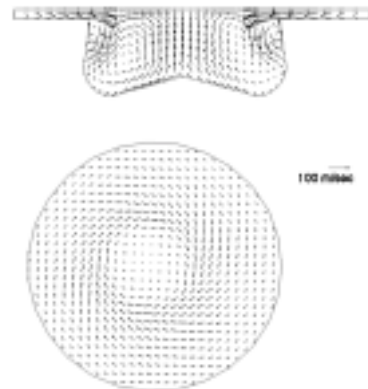
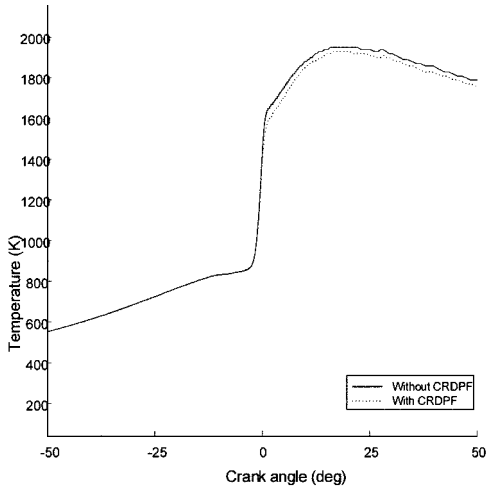


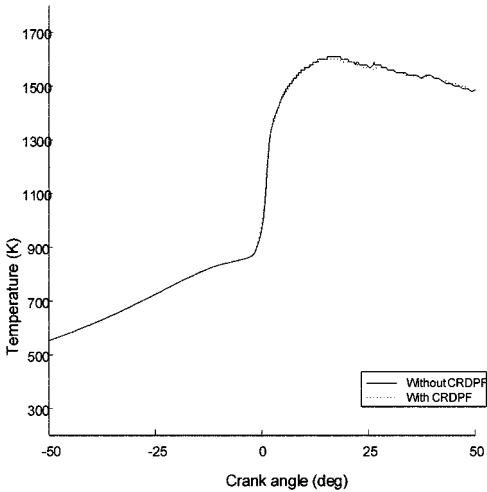
Fig. 5 Velocity vector field at BTDC 11° , 2200rpm (Top view and x-z direction view)

3.2.2 연소실내 온도특성

Fig. 6은 저감장치 장착에 따른 실린더내의 평균 온도곡선을 나타낸 것이다. 저부하로 갈수록 연소실의 평균온도는 낮아지며, 저감장치 장착에 따른 배압상승으로 실린더내의 평균온도는 약 4% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 전부하 영역에서 저감장치 장착에 따라 최고 온도가 크게 감소하고 있으며, 50% 부하 영역으로 갈수록 온도차는 미소하다.



(a) Load 100%



(b) Load 50%

Fig. 6 The effect of CR-DPF on bulk temperature

3.2.3 연속재생방식 PM 저감장치의 성능특성

Fig. 7과 8은 연속재생방식 PM 저감장치내의 온도와 압력특성을 나타낸 그림이다. 초기조건은 KIVA-3V의 수치해석 결과와 실험으로 도출된 배출가스 온도와 압력인 653.15. K, 3500Pa를 대입했으며, 유속은 0.3m/s로 하였다. Johnson Matthey Co.⁶⁾에서 재생온도를 낮추기 위해 전단부에 DOC를 장착하여 NO₂를 산화반응으로 생성하여 CR-DPF의 PM 재생온도를 일반디젤기관의 배기가스온도인 350°C로 낮춤으로서 강제포집재생이 아닌 연속재생이 가능하게 하였다.⁷⁾ Johnson Matthey Co.의 CR-DPF의

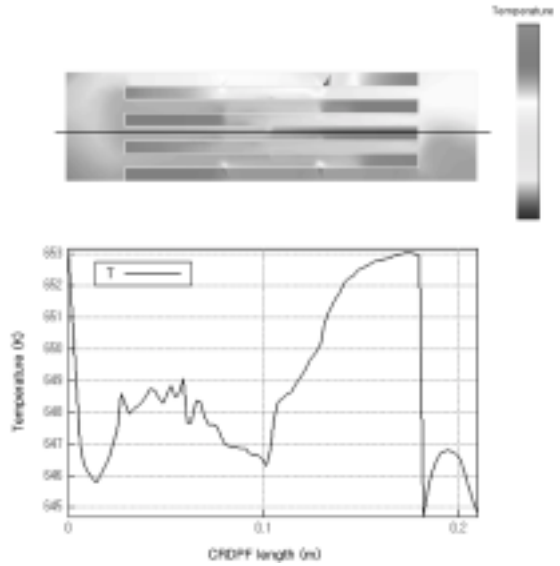


Fig. 7 Profile of CR-DPF temperature

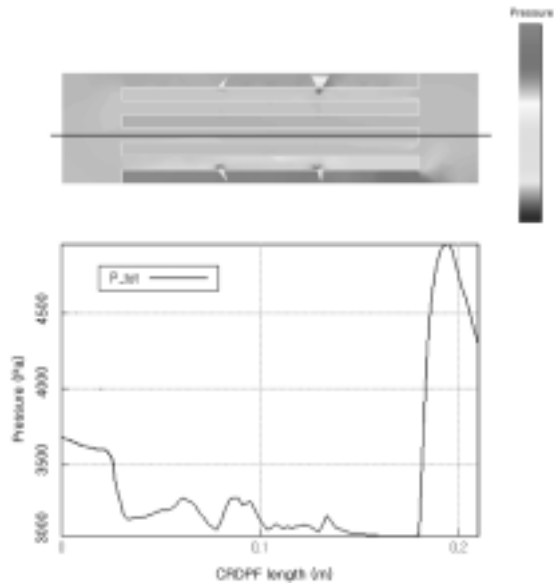


Fig. 8 Profile of CR-DPF pressure

재생온도를 고려했을 때 그림에서 나타난 온도와 압력곡선 결과값도 이와 유사한 것을 알 수 있다.

4. 결론

대형디젤기관에서 배출되는 배출가스 중 PM 저감을 위한 연속재생방식 PM 저감장치에 대한 수치

해석을 통한 유동 및 성능특성에 미치는 영향을 연구하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대형디젤기관에서 연속재생방식 PM 저감장치 장착에 따른 기관성능 및 유동특성 등에 대한 예측 프로그램을 개발하고, 기관실험결과와 비교·검토하여 프로그램의 타당성을 검증하였다.
- 2) 연속재생방식 PM 저감장치 장착에 따른 연소실 내 온도특성은 장착후가 장착전에 비해 약 4% 정도 감소함을 알 수 있었다. 이로부터 저감장치장착이 기관연소에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.
- 3) 연속재생방식 PM 저감장치의 연속재생을 위해서는 배기가스온도가 350℃ 영역에서 유지되어야만 원활한 연속재생이 이루어짐을 수치해석을 통하여 확인하였다.
- 4) 향후, 일반적인 CR-DPF의 구조가 재생온도를 낮추기 위해 전단부에 DOC를 장착한 형식인 점을 고려할 때 DOC에 의한 유동 및 압력특성변화를 고려한 수치해석이 필요하다.

후 기

본 논문은 2004년도 두뇌한국 BK21사업에 의하여 지원되었음.

References

- 1) H. S. Kim, "Modeling of Liquid Droplet Atomization and Spray Wall Impingement of Diesel Sprays," Journal of KSME, Vol.23, No.1, pp.69-81, 1999.
- 2) A. A. Amsden, P. J. O'Rourke, T. D. Bulter, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los Alamos National Laboratory Report LA-11560-MA (May), 1989.
- 3) CFD-ACE Manual Version 6.4, CFD Research Corporation, 1998.
- 4) R. D. Reitz and R. Diwakar, "Structure of High-Pressure Fuel Spray," SAE 870598, 1987.
- 5) K. Meintjes, "Hidden-Line Removal for Viewing Three-Dimensional Surfaces and Objects," General Motors Research Laboratories, Research Publication GMR-5343, 1988.
- 6) C. A. Maloney, "Sulphate Production Over The CRT: What Fuel Sulfur Level Is Required To Enable The EU 4 and EU 5 PM Standard To Be Met?," SAE 2000-01-1875, 2000.
- 7) B. C. Choi, J. W. Jeong, "State of the Art of the Advanced After-treatment Technology for Zero Emission Gasoline Vehicles," Journal of KSAE, Vol.24, No.1, p.20, 2002.