

CR-DPF와 Cooled-EGR 적용한 디젤기관 성능해석

문병철*, 오용석⁺, 박귀열⁺⁺, 강금원⁺⁺⁺, 이태영⁺⁺⁺

(논문접수일 2005. 9. 12, 심사완료일 2005. 10. 19)

A Performance Prediction of Diesel Engine with a CR-DPF and Cooled-EGR

Byungchul Moon*, Yongsuk Oh⁺, Kyiyeol Park⁺⁺, Kumwon Kang⁺⁺⁺, Taeyoung Lee⁺⁺⁺

Abstract

Since air pollution has become a globally critical issue and exhaust emissions from automobiles cause a major source of air pollution, many countries including advanced countries have stipulated stringent emission regulations. This research focused on engine performance characteristics with the application of a continuous regeneration diesel particulate filter and EGR together in a heavy duty vehicle, and gives some suggestions on the direction of designing points of view by comparing the experimental data with numerical results which were obtained through KIVA-3V.

Key Words : Filter trap(필터트랩), Continuously regeneration(연속재생), EGR(배기재순환)

1. 서론

최근 세계적으로 급속하게 발전하고 있는 자동차기술 분야의 동향을 볼 때 자동차를 안전하고 편리한 교통수단으로서의 첨단화된 자동차개발이라는 측면과 함께 화석연료가 연소될 때 발생하는 유해 배출가스로부터 지구 생태계 보존과 인간의 생존보호를 위한 대처기술 및 친환경적인 자동차 개발이라는 목표에 직면해 있는 것이 현실이며, 이미 오래전부터 선진국들은 앞을 다투어 대기환경기준을 엄격히 적용하고 있다⁽¹⁾. 저공해 자동차의 개발에 있어서 가솔린차량

보다는 디젤차량에서 나오는 배출가스저감기술이 더욱 어려운 상황이며, 특히 향후 디젤승용차의 상용화로 인한 디젤자동차의 비율이 급속히 확산할 것으로 예상되면서 이에 따른 디젤기관의 사용연료와 연소과정의 특성상 배출되는 주요 배출물질인 PM 및 NOx의 상반관계로 인한 개별적 연구는 많이 진행되어 왔으나 2가지 물질의 동시저감을 위한 저배기 후처리기술의 연구도 더욱 활발해져야 하며 이러한 목적에 맞게 동시저감에 초점이 맞추어져 있다.

따라서 본 연구는 디젤자동차의 배출가스에 대한 EURO IV, V 규제를 효과적으로 만족시킬 수 있는 차세대 기술인

* 거창기능대학 자동차과
+ 교신저자, 거창기능대학 자동차과 (ysoh@kopo.ac.kr)
주소: 670-802 경남 거창군 거창읍 송정리 700
++ 인천기능대학 자동차과
+++ 국민대학교 자동차전문대학원

기존의 디젤산화촉매(DOC)와 디젤입자상물질필터트랩(DPF) 기술을 결합한 연속재생방식 PM여과장치(CR-DPF)기술과 전자제어식 Cooled-EGR기술을 동시 적용하는데 있어서 수치해석을 통하여 적용 전·후의 연소특성(연소압력, 연소온도, 열발생 등)의 변화를 미리 예측해보므로써 실제 적용에 앞서서 장치의 적용 가능성과 기대효과를 예상해 볼 수 있으며, 또한 많은 시간과 경비를 절감하는 효과도 얻을 수 있을 것으로 판단한다⁽²⁾.

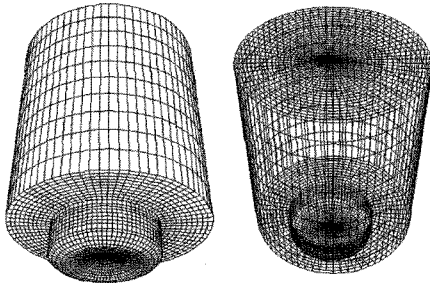
2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 대형디젤기관에 새로운 저감기술인 CR-DPF와 EGR을 동시 적용하는데 있어서 실제 장착하기 전에 미리 수치해석을 통하여 기관의 연소특성을 파악하고자 하였으며, 이때 EGR을 조절은 산소감소량으로 계산하였으며, 격자 형성은 CFD-ACE+로 형상화한 모델을 Fig. 1에 나타내고, 본 수치해석에 사용된 KIVA-3V에 사용된 수학적 모델들은 비정상상태의 압축성유동과 화학반응 및 연료분무를 고려한 식들로 Table 1에 나타내었고 Fig. 2에는 전체적인 흐름도를 나타낸다.

2.2 계산조건

대형디젤기관에 CR-DPF와 EGR을 동시 적용함에 있어서 성능예측을 하기위한 계산조건은 흡기밸브가 닫히는 시점에서 시작하여 실린더 내에서 착화되는 시기가 상사점 근처에서 이루어지도록 분사시작점을 BTDC 11°로 고정하였고 그 밖의 초기작동조건은 Table 2에, 기관제원은 Table 3에 나타내었다.



(a) At crank angle -146° ATDC, view point Z=45
(b) At crank angle 146° ATDC, view point Z=130

Fig. 1 ALE mesh for diesel combustion chamber

Table 1 Sub-model for Physical phenomena⁽³⁾

Physical process	Sub-model	
Atomization	TAB model	
Droplet breakup	Wave model	
Wall impingement	Watkins-Park model	
Combustion	Hybrid model	
	Laminar flame	Arrhenius model
	Diffusion flame	Eddy breakup model

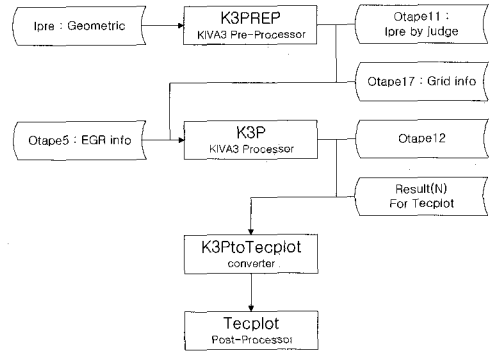


Fig. 2 Configuration of KIVA-3V

Table 2 Engine operating conditions for analysis

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

Table 3 Engine specification

Bore	11.1cm	
Stroke	13.9cm	
Connecting rod length	24.66cm	
Displacement	8.071L	
Compression ratio	17.2	
Valve open/close	Intake valve open	BTDC 16deg
	Intake valve close	ABDC 36deg
	Exhaust valve open	BBDC 46deg
	Exhaust valve close	ATDC 14deg
Bowl type	Toroidal	

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. 아래니우스식에서의 연소율은 온도, 산소농도 및 연료농도에 비례한다. 그리고 모델상수 K_1 은 일반적으로 연소반응을 단일산화반응으로 간주하여 Westbrook와 Dryer⁽⁴⁾에 의하여 얻어진 값들을 사용한다. 이에 대해 Amsden⁽⁵⁾을 비롯한 많은 연구자들에 따르면 K_1 값은 연소초기의 저온연소 속도에 크게 영향을 주는 인자로서 기관 실험결과와의 매칭을 통해서 재조정해야 함을 알 수 있다. 즉, K_1 값이 지나치게 작아지면 급격연소 직전까지의 시간지연이 길어지며, K_1 값이 너무 커지면 연소압력의 최대 값에는 영향을 주지는 않으나 계산시간의 시간증분이 너무 작아져 계산시간이 크게 증가한다고 설명하고 있다⁽⁹⁾. 또한, EBU모델을 제시한 Magnussen과 Hjertager는 EBU모델에서 나타나는 모델상수 A 값은 화염구조에 관계되며 $A=4.0$ 의 값을 도시가스확산화염에 적용하여 좋은 결과를 얻는다. Amsden 등은 A 값의 조정은 화염속도와 화염온도에 직접적인 영향을 주게되므로 실험 결과와의 비교를 통해서 선택하여야 한다고 주장하며 디젤유의 경우 1.0 에서부터 수소연료의 경우 100 사이의 값을 쓰는 것이 바람직함을 제시한다⁽⁶⁾.

Fig. 3은 아래니우스식의 모델상수 K_1 값을 3×10^{11} 으로 하고, EBU모델의 모델상수 A 를 20으로 할 때 실험결과에 가장 일치함을 알 수 있으며, 이후의 수치해석은 위의 값을 사용한다.

3.2 연소 특성

본 연구에서는 기관운전조건을 대형디젤기관에서 PM 발생량이 가장 많은 기관회전수 1,000rpm에 고정한 상태에서의 부하조건과 연속재생방식 DPF 장착 전·후 및 EGR율의 변화에 따른 연소특성을 고찰한다.

3.2.1 연소압력특성

Fig. 4는 기관회전수 1,000rpm에서 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR 장착에 의한 부하변화에 따른 실린더내 압력 변화 결과이며 참고로 분석을 위하여 그림에서 압력정점부근에서 최상위로부터 아래로 디젤, 디젤+CRDPF, CRDPF+

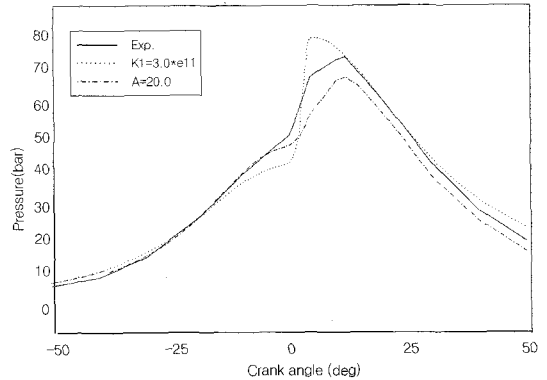


Fig. 3 The effect of model constant K_1 and A on a combustion characteristics

EGR(10-20)순서로 나타났다. Fig. 4에서 같이 연소는 상사점 이전에 시작되고 크랭크 각도 9° 근방에서 최대압력을 나타낸다. 연소압력은 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR장착에 따라 최고압력이 감소하는 경향을 보인다. 즉, 부하가 적어 질수록 연소조건이 과잉공기상태로 되므로 DPF 및 EGR량을 증가하여도 연소에 필요한 공기량이 부족해지지 않기 때문에 장치장착 전후 최고압력의 감소를 폭은 적어진다. 특히 전부하 조건에서는 장치장착에 따른 배압상승으로 인해 연소환경이 나빠져 큰 폭으로 연소압력이 떨어지는 것을 알 수 있다.

3.2.2 연소온도 특성

Fig. 5는 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR 장착에 따른 실린더내의 평균온도곡선을 나타낸다. Fig. 5 또한 Fig. 4의 경우와 같이 순차적으로 분석되며, 저부하로 갈수록 연소실의 평균온도는 낮아지며, 연속재생방식 DPF 및 EGR을 증가에 따라 실린더내의 평균온도도 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 특히, EGR양이 증가할수록 연소실내 불활성 가스성분이 증가하고, 산소농도가 감소하여 연소반응속도가 저하되며 따라서 베이스조건과 비교했을 때 온도감소율이 높게 나타난다. 또한 고부하 영역에서는 최고온도가 크게 감소하고 있으며, 저부하 영역으로 갈수록 온도차는 미소하게 나타난다.

3.2.3 열발생을 특성

디젤연소의 일반적인 열발생 형태는 예혼합연소와 확산연소로 이루어지는데 예혼합연소는 착화지연기간 동안에 형성된 가연혼합기가 연소되어 열을 발생한다. 이와 달리 확산연소는 연소열에 의해 증발되는 연료와 공기의 혼합특성에

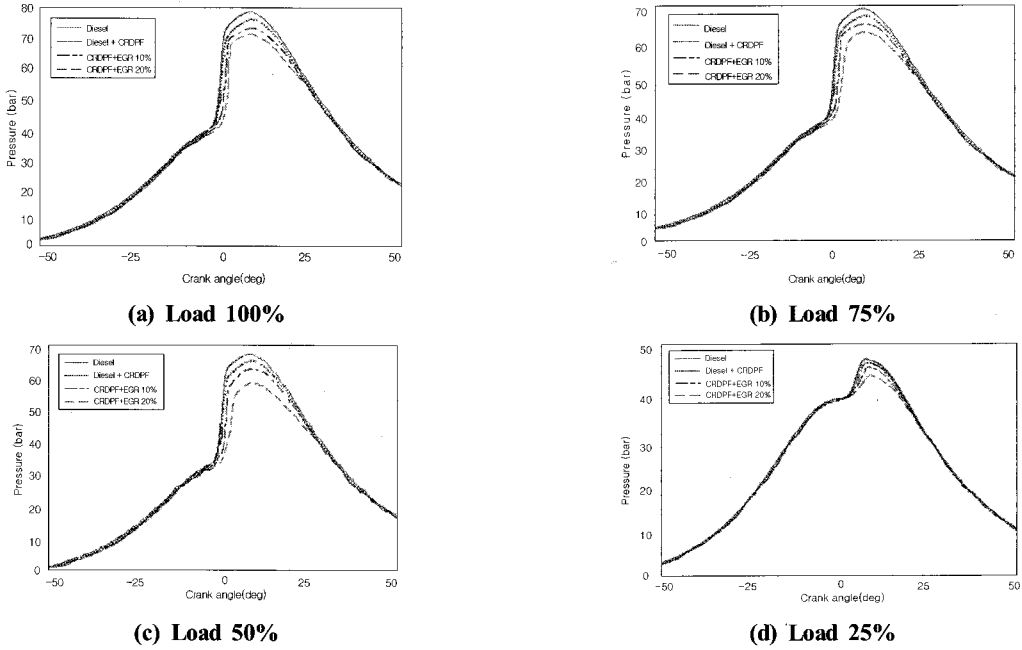


Fig. 4 The effect of CR-DPF and Cooled-EGR on cylinder pressure

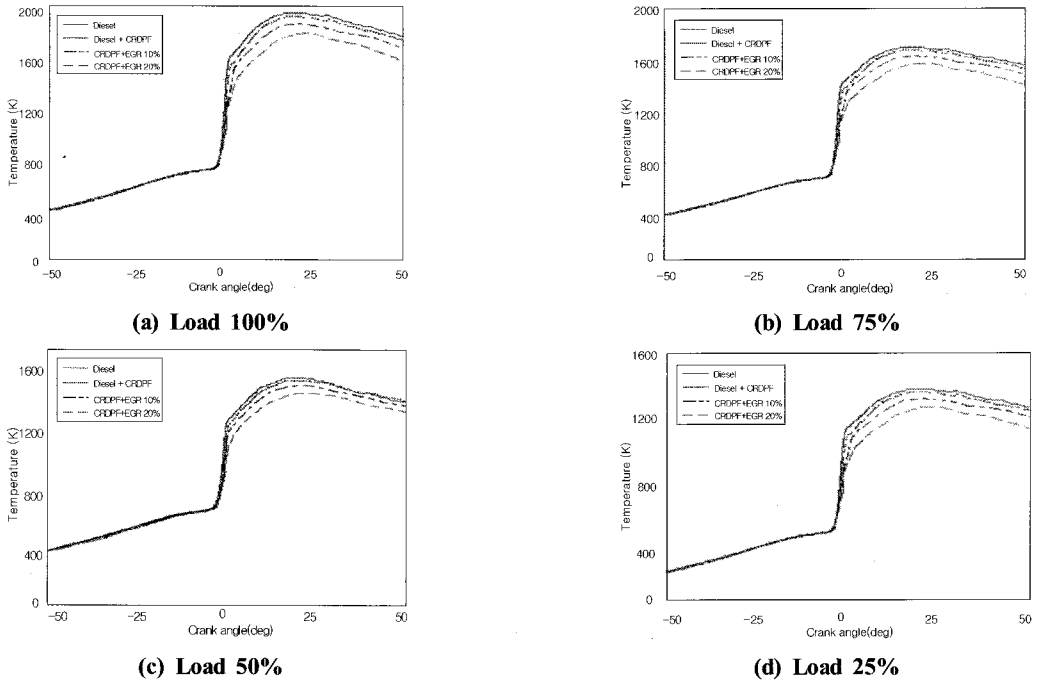


Fig. 5 The effect of CR-DPF and Cooled-EGR on bulk temperature

지배되는 연소특성을 갖는다. 열발생을 특성의 고찰은 기관의 연소를 파악하는데 중요하며, 특히 착화지연기간이 길어지면 예혼합연소기간이 길어지고, 높은 열발생율이 발생하여 NOx의 배출량이 현저히 증가한다. 반대로 확산연소의 비율이 커지면 Soot의 생성이 증가하여 기관의 적절한 연소 특성을 얻기 위해서 예혼합연소기간과 확산연소기간의 비를 적절히 조절하여야 한다. 본 연구에서는 열발생율을 단위시간당 전체연소영역에서 발생하는 순수화학반응에너지의 합으로 정의하여 표현하며, Fig. 6은 연속재생방식 DPF 및 Cooled-EGR 장치에 따른 열발생 곡선을 나타낸다. Fig. 6의 분석을 위해 최고점을 표시하였다.

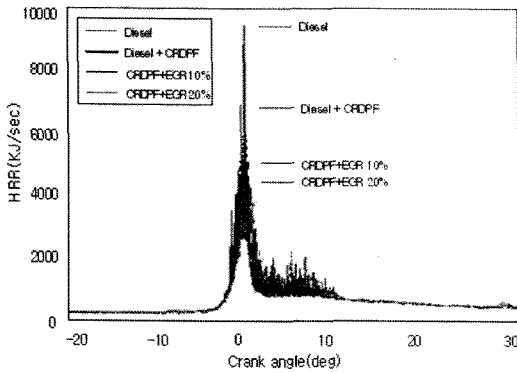
그림에서 보는바와 같이 고부하 운전일수록 연소반응에 참가하는 연료량이 많으므로 열발생율이 크게 나타나며, 연속재생방식 DPF장치에 따른 배압상승과 더불어 EGR에 의한 재순환가스에 포함된 불활성가스 성분이 연소실내에

증가하여 연소반응이 늦어지고, 또한, 전반적인 연소온도 저하로 인해 연소반응이 늦어져서 전체적으로는 열발생율이 감소하는 것으로 나타난다.

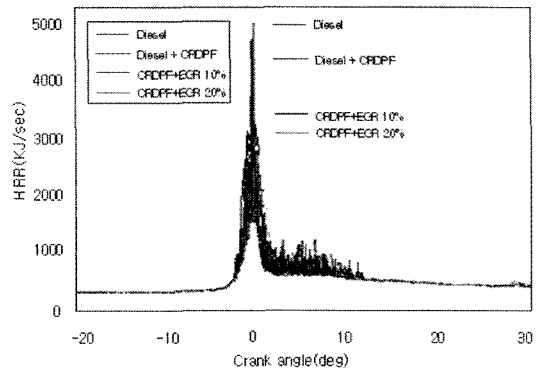
4. 결론

대형디젤기관에서의 배출가스 중 PM 및 NOx을 저감하기 위하여 연속재생방식 DPF와 전자제어식 Cooled-EGR 적용에 대한 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

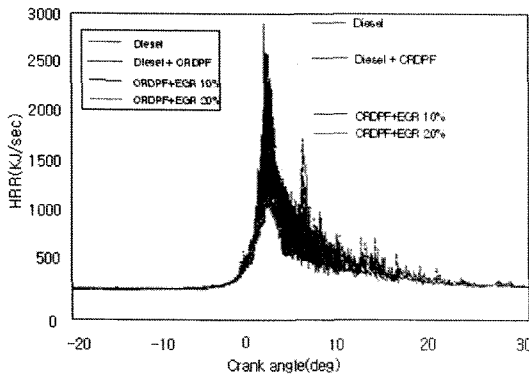
- (1) 대형디젤기관에서 연속재생방식 DPF와 전자제어식 Cooled-EGR 적용에 따른 기관성능에 대한 예측프로그램을 작성하고, 연소모델검증을 통하여 타당성을 확인하였다.
- (2) 연소는 상사점 이전에 시작되고 크랭크 각도 9° 근방에



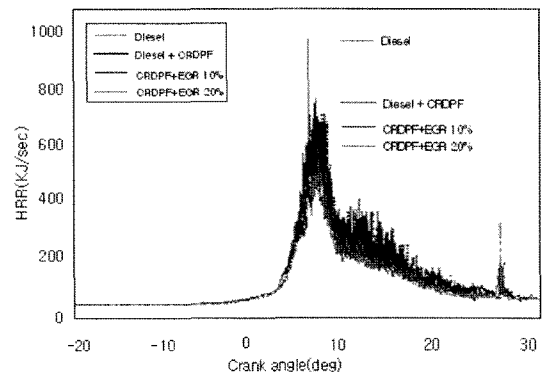
(a) Load 100%



(b) Load 75%



(c) Load 50%



(d) Load 25%

Fig. 6 The effect of CR-DPF and Cooled-EGR on heat release rate

서 최대압력을 나타내고 연소압력은 연속재생방식 DPF와 Cooled-EGR장착에 따라 최고압력이 감소하는 경향을 보이며, 특히 진부하 조건에서는 장치장착에 따른 배압상승으로 인해 연소환경이 나빠져 큰 폭으로 연소압력이 떨어지는 것을 알 수 있다.

- (3) 온도 특성에서는 저부하로 갈수록 연소실의 평균온도는 낮아지며, 연속재생방식 DPF 및 EGR을 증가에 따라 실린더내의 평균온도도 낮아지는 것을 확인할 수 있다.
- (4) 고부하 운전일수록 연소반응에 첨가하는 연료량이 많아 지므로 열발생율이 크게 나타나며, 전체적으로는 열발생율이 감소하는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Han, Y. C., Rha, W. Y., Oh, Y. S., Moon, B. C., Park, B. K., and Park, K. Y., 2001, "A Study on NOx and Smoke by Exhaust Gas Measuring Method of Light-Duty Engine," *Journal of the KSMTE*, Vol. 10, No. 3, pp. 7~12.
- (2) Yeo, G. K., 2002, "Trends of Automotive Catalysts Technologies for Low Emission Vehicle," *Journal of the KSAE*, Vol. 24, No. 1, pp. 28~32.
- (3) Oh, S. K., Baik, D. S., Moon, B. C., Han, Y. C., and Lee, J. S., 2004, "Study on Performance and Exhaust Emissions for a Heavy-Duty Diesel Engine with a CR- DPF," *JSAE Annual Congress*, No. 28-04, pp.5~10.
- (4) Meintjes, K., 1998, "Hidden-Line Removal for viewing Three-Dimensional Surfaces and Objects," *General Motors Research Laboratories*, Research Publication GMR-5343.
- (5) Amsden, 1999, "Kiva-3v, release 2: improvements to kiva-3v," *Los Alamos National Laboratory report LA-13608-MS*, pp. 6~10.
- (6) Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H., 1976, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," *Sixteenth Symposium(International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh.