

대형디젤기관에서 EGR 적용시 연소유동해석

백두성^{1*}

A Study on Combustion Flow Characteristics in A Heavy-Duty Diesel Engine Equipped with EGR

Doo-Sung Baik^{1*}

요 약 배기가스 재순환장치는 디젤엔진에서 질소산화물을 저감시키는 기술로서 알려져 있다. 그러나 시스템 적용 시 연료소비와 입자상물질을 증가시키기 때문에 기술 적용하는데 있어서 상당히 어려움이 있다. 그래서 실린더내의 연소시스템을 고려한 최적의 배기가스순환 비율을 산정하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 논문은 여러 가지의 EGR 율을 변화시키면서 연소와 배기가스에 미치는 영향을 조사했다.

Abstract Even if EGR is known as a technology which dramatically reduces NOx emission, its application is a quite complicate since it affects fuel economy and increase of PM emission. Therefore, it is a very important issue to investigate an optimal EGR rate considering all engine parameters. This research was numerically conducted to predict combustion and emission characteristics with respect to various EGR rates.

Key Words : EGR(Exhaust Gas Recirculation), PM(Particulate Matter), 연소유동해석, KIVA

1. 서 론

자동차에 의한 도시대기오염은 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 가장 시급히 해결하지 않으면 안될 환경 오염 문제로 대두되고 있는 실정이다. 특히, 디젤기관에서 배출되는 배출물의 규제치는 저감기술을 앞서고 있으며 디젤차량의 배출가스 중 질소산화물이 83%의 비중을 차지하고 있는 국내에서는 디젤차량의 질소산화물 규제를 강화하고 있는 현시점에서 디젤차량 점유율이 높은 국내에서는 그 의미가 크다.

지금까지 질소산화물(NOx) 저감에 대한 연구는 많이 진행되어 왔음에도 그 형성 메커니즘에 대한 자료는 적은 편이며, 또한, 이러한 자료들은 경험형태로 얻어지며 실험에 의한 시스템의 적용에 있어서는 많은 변수에 의해 제한 받고 있다. 디젤기관에 있어 주요 배출물질인 NOx와 PM을 줄이기 위한 연구로서 최근 주목받고 있는 기술은 배출가스 재순환 장치로서 전자제어식 EGR장치가 일부 가솔린기관에 장착되고 있으나, 아직 대형디젤자동차에서는 기술개발과 배출가스 저감대책에 관한 연구

활동이 미흡한 실정이다. 국내 대도시의 공기오염에 대형 디젤차가 차지하는 비율은 질소산화물이 50%이상, 입자상물질은 84%이상을 차지하고 있어 이에 대한 대책이 시급함에 따라 본 논문에서는 EGR 장치를 장착한 대형 디젤기관에서의 성능과 유해배출물질의 특성 예측에 관한 연구를 수행하였다. 기존 디젤기관에 EGR을 적용시킨 기관의 성능 및 배출가스에 대한 결과 값을 수치해석 프로그램인 KIVA-3V를 통하여 기관의 연비, 실린더 내 부압력 및 EGR 율에 따른 실린더 내 연소특성 등을 알아 보았으며, EGR 율이 배출가스에 미치는 영향도 파악함으로써 향후 EGR 밸브를 장착하는 대형디젤기관의 기본적인 설계 자료로서 그 방향성을 제시함은 물론 디젤기관으로 인한 대기오염의 저감에 기여하고자 한다.

2. 적용 모델

디젤기관의 연소실에서 일어나는 현상에 대한 물리 모델의 개발 및 개선을 위한 연구들은 디젤기관에서 성능 향상과 배출가스 저감 뿐 만아니라 복잡한 다상 난류 연소 과정을 이해하는데 목적을 두고 있다. 디젤기관의 연

¹한국기술교육대학교 기계정보공학부

*백두성(dsbaik@kut.ac.kr)

소과정을 액체연료 제트의 미립화, 액적분열, 충돌, 흡착, 증발 및 화학반응으로 이루어진 반응 및 생성물 등의 접근방법인 현상학적인 모사로는 기관의 복잡한 물리적인 과정인 연소 현상을 해석하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 디젤기관의 복잡한 연소과정을 해석하기 위해 이차원 및 삼차원 모델을 사용하여, 다상 난류연소 현상에 관한 물리 및 수치 모델을 구성하였다.

EGR 시스템의 물리적인 현상을 나타내는 EGR모델은 흡입공기 성분의 물분율을 기초로 하였고, 디젤연료 분무의 증발, 공기와와의 혼합, 자발화 및 연소 과정에 영향을 주는 액체 연료의 분무 과정은 연료제트의 미립화 과정과 액적 분열과정을 고려하기 위해 Reitz의 TAB 모델[1]을 사용했다. n-dodecane 계($C_{12}H_{26}$) 연료처럼 분자량이 큰 탄화수소계 연료에 대해서는 과도한 계산량으로 인해 다차원 연소 유동장 해석에 적용이 어렵기 때문에 CHEMKIN모델을 사용하였다. 디젤기관의 점화현상인 자발화에 대해서는 5개 화학종과 8개의 화학반응을 가지는 Shell 점화 모델[2]을 사용하였고, 자발화가 일어난 후 Arrhenius 모델[3]을 사용하였고, kinetic reaction 영향을 받지는 고온 영역에서는 확산에 의한 연소로서 Eddy breakup 모델[4]을 적용하였으며, 배출가스에 대한 모델로는 NOx에 대해서 확장된 Zeldovich NO 모델[5], Smoke에 대해서는 Hiroyasu 생성모델[5], Nagle-Strickland 산화 모델[5]을 이용하여 EGR 시스템을 적용한 대형디젤기관의 해석을 수행했다. 적용된 모델은 표 1에서 요약되었다.

표 1. 물리적인 현상을 위한 수학적인 모델

Physical Process		Sub Model		
Atomization		TAB Model		
Droplet breakup		Wave Model		
Wall impingement		Watkins-Park model		
Hybrid Model				
Combustion		Laminar flame	Arrhenius Model	
		Diffusion flame	Eddy breakup model	
Emissions	NOx	Extended Zeldovich		
		Soot	Formation	Hiroyasu Model
			Extinction	Nagle-Strickland model

계산은 흡기 밸브가 닫히는 시점(IVC)부터 시작되며 실린더 내에서 착화되는 시기가 상사점 근처에서 이루어 지도록 분사시작 시점을 BTDC9°로 고정하였다. 표 2는 해당 기관 제원이다. 그림 1은 피스톤이 상사점에 도달하였을 때의 연소실 계산 격자 구조를 보여 주고 있다.

표 2. 기관 제원

Displacement (litter)	11.051
Bore*Stroke (mm)	123*155
Conn. rod (mm)	275
Compression Ratio	17.1
Valve Timing	IVO ATDC 18 IVC ABDC 34 EVO BBDC 46 EVC BTDC 14
Engine Speed(rpm)	2200

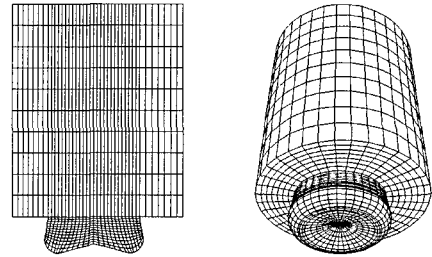


그림 1. 디젤기관의 계산 영역(at the view of BDC)

3. 결과 및 고찰

3.1 EGR 장착에 따른 특성 변화

3.1.1 연소 특성

운전 조건은 기관회전수 2200 rpm 고정된 상태에서 부하 조건과 EGR을 변화에 따른 연소 특성을 고찰하였다. 그림 2는 연소과정이 진행되는 동안의 분무거동을 보여준다. 분무는 시간이 지남에 따라 swirl유동에 의한 영향을 크게 받아 넓게 퍼지고 있으며 3° BTDC에서 보다 TDC에서 분무각이 작아지는 것은 분무 외곽 경계부분에서 연료의 증발현상이 현저히 발생하기 때문이다.

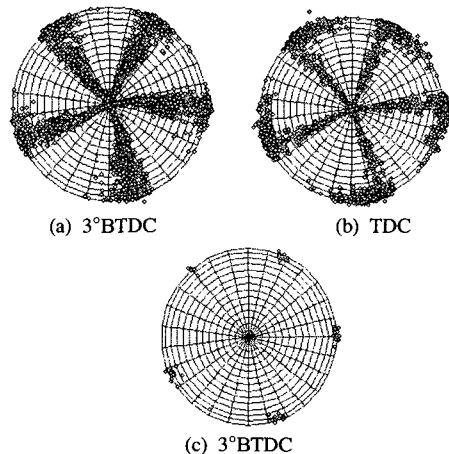


그림 2. 분무 거동시 연소에 미치는 영향(2200rpm, A/F=19.0)

그림 3은 크랭크각도 3°BTDC에서의 당량비 분포를 나타낸다. 당량비의 분포가 불규칙성을 나타내고 있는 것은 보울 편심에 의한 유동장의 불균일 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

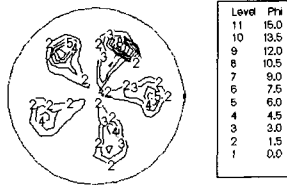
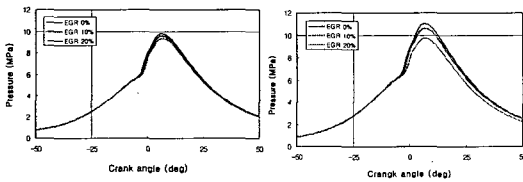


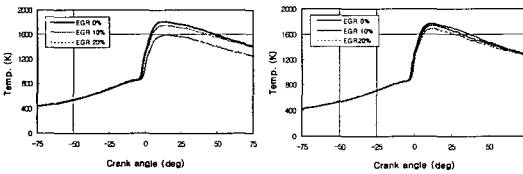
그림 3. 3°BTDC에서의 당량비 등고선 (2200rpm, A/F=19.0)

그림 4는 EGR율에 따른 실린더내의 압력 변화를 나타낸다. EGR율이 증가함에 따라 연소 최고 압력이 감소하는 경향을 보이고 있으며 부하가 작아질수록 최고 압력의 감소율은 작아진다. 그 이유는 부하가 작아질수록 연소 조건이 과잉 공기 상태로 되어 EGR율이 증가하여도 연소에 필요한 산소의 양이 부족하지 않기 때문이다.



(a) Full load (b) 75% load

그림 4. 실린더 압력에 미치는 EGR율 효과 (2200rpm)



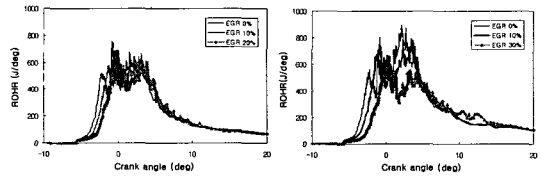
(a) Full load (b) 75% load

그림 5. 실린더 온도에 미치는 EGR율의 효과 (2200rpm)

그림 5는 EGR율에 따른 실린더내의 평균 온도 변화를 나타낸다. 저부하로 갈수록 연소실의 평균온도는 낮아지며 EGR율이 증가함에 따라 실린더내의 평균 온도는 감소하고 있으며, 고부하 영역에서 EGR율에 따라 최고 온도가 크게 감소하고 있으며, 저부하 영역에서의 변화는 작다.

그림 6의 열발생율은 기관의 연소를 특성 짓는데 중요하며 특히 점화지연기간이 길어지면 예혼합연소기간이

길어지고 높은 열발생율이 발생하게 되므로 NOx의 배출량이 현저히 증가한다. 반대로 확산연소의 비율이 커지면 Soot의 생성이 증가하는 특성을 가지므로 기관의 적절한 연소 특성을 얻기 위하여 예혼합연소 기간과 확산연소기간의 비를 적절히 조절하여야 한다.



(a) Full load (b) 75% load

그림 6. 열방출량에 미치는 EGR율 효과 (2200rpm)

3.1.2 배출가스 특성

그림 7은 부하 변화와 EGR율 변화에 따른 NO의 발생량을 나타낸다. EGR율이 높을수록 생성되는 산소의 양은 적어지며 고부하 영역에서 NO 감소율이 크게 나타나고 있다.

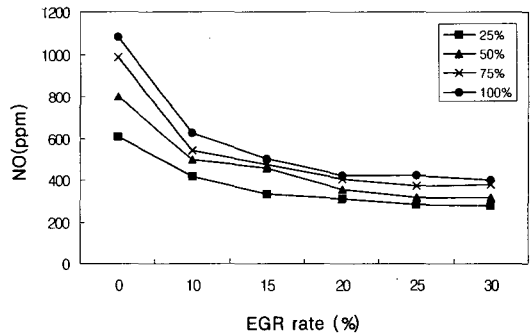
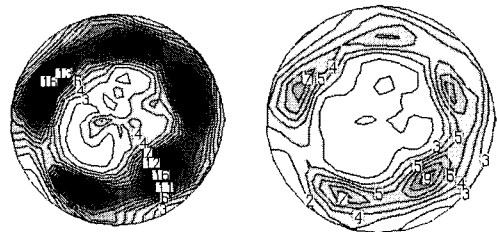
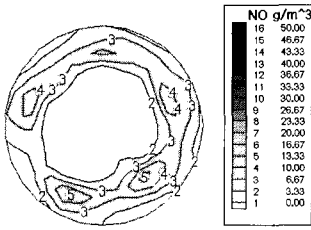


그림 7. EGR율에 따른 일산화질소 저감효과 (2200rpm)

그림 8은 2200rpm, 전부하 조건에서 EGR율 변화에 따른 크랭크 각도 5° ATDC에서 실린더 내에 존재하는 NO의 분포를 보여주고 있다.



(a) EGR rate 0% (b) EGR rate 10%



(c) EGR rate 15%

그림 8. EGR율에 따른 일산화질소 등고선(5°ATDC)

그림 9는 EGR율에 따른 각 부하에서의 CO₂ 배출가스 특성을 나타내고 있다. EGR율이 클수록 재순환되는 CO₂ 양이 많아지기 때문에 CO₂의 배출량이 증가하고 부하가 높을수록 연소 반응을 겪는 연료량이 많아지기 때문에 CO₂ 배출량이 증가하고 있다. 따라서 EGR율의 변화에 따라 연소실내의 국부 연소상태는 급격히 변화하며 이에 따라 NO_x 및 Soot의 발생 특성 및 기관 성능은 민감하게 변화하므로 각 운전조건에 맞는 최적 EGR율을 설정하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

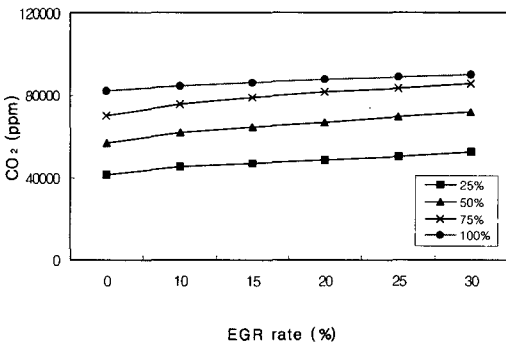


그림 9. EGR율에 따른 CO₂ 배출가스 특성(2200rpm).

4. 결론

배기가스재순환장치에 대한 수치해석을 통하여 EGR 기술이 배출가스 및 기관성능에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) EGR율의 증가에 따라 연소실내 국부연소온도가 급격히 저하됨으로 NO_x가 감소하는 것을 확인하였으며, 이러한 현상은 고부하 운전 조건에서 현저하게 나타남을 알 수 있었다.
- (2) EGR율이 클수록 재순환되는 CO₂의 양의 증가로 배출량이 증가하며, 부하가 높을수록 연소반응을 겪는

- 연료량의 증가로 인해 CO₂가 증가함을 알 수 있었다.
- (3) 본 결과에 따라 EGR율의 변화에 의해 연소실내의 국부 연소상태는 급격히 변화함에 따라서 NO_x 등의 오염물질의 발생특성 및 기관성능은 민감하게 변화하므로 각 운전조건에 맞는 최적 EGR율을 설정하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 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-MS(May), 1989.
- [2] P. J. O'Rourke, A. A. Amsden, "A Particle Numerical Model for Wall Film Dynamics in Port-injected Engines", SAE paper No. 961961, 1996.
- [3] A. Amsden, "KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves", Los Alamos National Lab. report LA-13313-MS (July), 1997.
- [4] Reitz, "A new high pressure droplet vaporization model for diesel engine modeling", SAE952431, pp.165~177, 1995.
- [5] B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", Sixteenth Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1976.
- [6] K. Park and A. P. Watkins, "Assessment and application of a new spray wall impaction model", IMechE C499/044/96, 1996.

백 두 성(Doo-Sung Baik)

[정회원]



- 1983년 2월 : 국민대학교 기계공학과 (공학사)
- 1991년 3월 : Univ. of Cincinnati 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 5월 : Wichita State Univ. 항공우주공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계정보공학부 대우교수

<관심분야>

에너지와 환경, 자동차환경기술, 대체에너지기관, 미세열유체, 항공기추진시스템, 초음속공기역학