예혼합 압축 착화 엔진용 고압 인젝터의 분무특성과 분사조건 최적화에 관한 기초 연구

류재덕* · 김형민* · 이기형** · 이창식**

The basic study of spray characteristics and optimal fuel injection for high pressure injector in homogeneous charge compression ignition engine

Jeaduk Ryu, Hyungmin Kim, Kihyung Lee, Changsik Lee

Abstract

The purpose of this study was to investigate the fuel spray characteristics that made most important at an homogeneous air fuel mixture, in a common rail direct injection type HCCI engine. As a study conducted relation which a back pressure and injection pressure are influenced to air fuel mixture characteristics, we tried to offer date even through we select suitable to a HCCI engine running condition of the fuel injection condition.

To accomplish the study, to measure a injection rate of common rail type injector and to visualize and simulate a fuel spray was conducted. From the result of injection rate, a common rail injector was confirmed to appear a initial delay of 0.3msec and a latter period delay of 0.7msec. Therefore, real injection duration was determined by about 0.5msec increasing. From the result of fuel spray, the spray penetration was proportional to 1/4 exponent of atmosphere pressure. An experimental equation was deduced from the spray penetration of spray visualization experiment and the relation of injection duration and penetration was estimated in HCCI engine using an experimental equation.

주요기술용어(Key words): HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition), Spray, Injection rate

1. 서 론

전 세계적으로 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비, 대기오염, 소음등의 환경 문제가 대두됨에 따라 배기가스 저감 및 연비 향상이 자동차 산업의 중요 연구 방향이 되고 있다. 디젤 엔진의 경우 가솔린 엔진에 비하여 열효율 면에서는 장점을 가지고 있으나, 희박 공연비 영역에서 연료 분사가 분위기 조건이 고온, 고압인 압축행정 말기에 직접 분사되므로 착화 지연 동안의 예혼합 연소 기간에서의 급격한 열발생으로 인한 질소산화물(NOx)의 생성과 연료가 분무되는 동안 균일 혼합기 형성이 어려우므로 확산 연소 기간에 공연비가 농후한 영역이 존재하므로 입자상 물질(particulate matter: PM)이 생성되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 강화된 배기규제를 만족시킬 수 있는 청정 연소의 저공해 엔진 기술 개발이 절실히 필요한 실정이다.

* 한양대학교 일반대학원
** 한양대학교 기계공학과

종래로 부터 디젤엔진의 배기가스 문제를 극복하기 위하여 여러 가지 방법이 시도되고 있다. 흡기 포트와 연소실 형상의 최적 설계를 통하여 연료와 공기의 혼합을 촉진시켜 디젤 연소를 개선하는 방법과, EGR, 다단 분사 등의 연소 제어 방법, 산화 촉매 및 희박 NOx 촉매 등을 이용하여 배출가스를 억제하는 후처리 방법 등으로 대별할 수 있다. 이 외에도 초고압 분사와 대체연료를 사용하는 방법 등이 있으나, 아직까지는 강화되고 있는 배출가스 규제기준을 완전히 만족시키지는 못하고 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 연료와 공기가 충분히 혼합할 수 있는 예혼합 연료 분사 시스템을 이용하여 연소실내 희박 균일한 예혼합기를 동시에 착화시키는 연소 방식인 HCCI (Homogeneous Charge Combustion Ignition)가 주목을 받고 있다. HCCI 엔진의 개념은 Noguchi et al 와 Onishi et al 가 Active thermo -atmosphere combustion (ATAC) 이름으로 2행정 기관에 최초로 적용했고,[1,2] Najt et al 가 CFR 4행정 기관에서 HCCI 연소를 적용하였으며, HCCI 연소의 중요한 특성인 저온연소 및 고온연소의 화학반응을 연구하였다.[3] Thring et al 등은 가솔린 연료를 사용하여 SI 방식으로 저부하시에 HCCI 연소를 구현하였다.[4]

그러므로, 본 연구에서는 분사시기에 따른 연소실 압력을 가정한 분위기 압력에 따른 분사율 특성 및 분무특성을 연구함으로써 다단 분사방식의 HCCI 엔진의 균일 혼합기 형성에 최적한 분사시기 및 분사량을 연구하고자 하였다.

2. 실험장치 구성 및 실험방법

2.1 실험장치

2.1.1 분사율 실험 장치

분사율 실험은 HCCI 엔진에서 사용할 인젝터의 연료 분사량에 따른 분사율을 측정하여 실제 분사기간을 추정하므로써, 분사시기의 정확한 제어 및 다단분사인 경우 분사 간격 제어에 필수적인 데이터를 제공하게 된다. Figure. 1 에는 분사율 측정 장치의 개략도를 나타내었다.

분사율 측정은 Zeuch 법을 사용하였고[5], 측정 원리 및 측정에 사용한 식은 아래의 식(1)에 표시 하였다. Zeuch 법에서 분사된 연료의 체적V 는 챔버의 압력 상승율 △P 의 함수이므로 식 (1)을 만족해야 한다.

$$\triangle P = K\left(\frac{V}{V_0}\right) \tag{1}$$

where K : bulk modulus of the fuel

Vo : volume of fuel chamber

그러므로, 연료의 분사율 dV/dt 는 식 (1)을 미분하여 구할 수 있으며, 아래의 식 (2)에 나타내었다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_0}{K}\frac{dP}{dt} \tag{2}$$

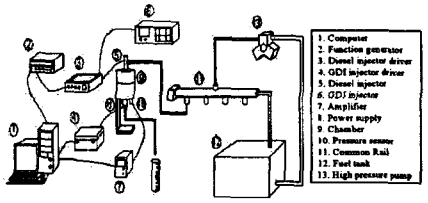


Figure 1 The injection rate experimental apparatus diagram

실험 장치는 Figure 1에 나타낸 바와 같이 크게 5 부분으로 구성되어 있다. 각 구성품은 연료 공급 시스템, 분사신호 발생기, 배출신호 발생기, 데이터 취득 및 제어 시스템, 압력 용기 등으로 분류될 수 있다. 본 실험에 사용한 인젝터는 Bosch 사의 5공 인젝터 (diameter 0.158mm, d/L : 6)를 사용하였다.

2.1.2 분무 가시화 실험 장치 구성

Figure 2는 분무가시화 실험 장치 개략도 및 사진을 나타내었다. 고압 챔버를 사용하여 분위기 압력(5, 10, 15, 20, 25 bar)을 조절하였고, 광원은 연속광원으로 제논등을 사용하였으며, ICCD 카메라를 사용하여 분무형상을 촬영하였다. 인젝터의 제어는 별도의 인젝터 드라이버를 사용하였으며, 카메라와 인젝터 분사 신호의 동기를 위하여 펄스발생기(DG 535)를 사용하였다. 분

무 형상은 고압 챔버 아래에 전반사 미러를 설치하여 ICCD 카메라를 사용하여 분사 화상을 취득하였다.

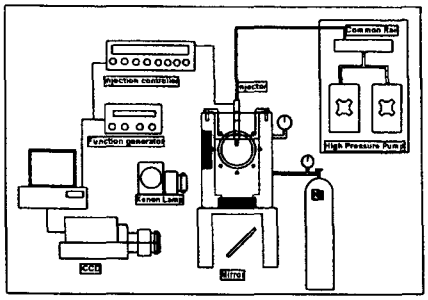


Figure 2 The spray visualization experimental apparatus

2.2 분무 수치해석

커먼레일 인젝터의 분무 수치 해석은 Ricardo 사의 상용 프로그램인 VECTIS 3.6을 사용하여 계산을 수행하였다. 계산영역은 벽면 충돌이 일어나지 않도록 지름 200mm, 높이 200mm 의 원통으로 설정하였다. 수치해석에 사용한 분사속도 및 유량계수는 분사율 실험 결과를 사용하였고, 초기 S.M.D는 nozzle hole 지름으로 가정하여, X-square distribution으로 가정하였다.[6] 분사된 연료의 분열 모델은 Kelvin-Helmhotlz 이론을 사용하였고, 식 (3, 4)에 파동 분열의 wave length 및 frequency를 나타내었다.

$$\Lambda_{KH} = \frac{9.02 r_d (1+0.45Z^{0.5})(1+0.4T^{0.7})}{(1+0.865\,We^{1.67})^{0.6}} \quad (3)$$

$$\Omega_{KH} = \frac{(0.34+0.385\,We^{1.5})}{(1+Z)(1+1.4T^{0.6})}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_d r_d^3}} \quad (4)$$

where r_d : the drop radius

T : Taylor number ($= Z\sqrt{We}$)

Z : Ohnesorge number

($= \sqrt{We}/Re$)

Kelvin-Helmhotlz 의 wave length에 비례하는 것으로 하였다

$$r_{d.stable} = B_0 \Lambda_{KH} \quad (5)$$

$$r_{d.stable} = min\left(\left(\frac{3\pi r_d^2 U_r}{2\Omega_{KH}}\right)^{1/3}, \left(\frac{3r_d^3 \Lambda_{KH}}{4}\right)^{1/3}\right)$$

$$(\Lambda_{KH} \geq r_d, once) \quad (6)$$

액적 life time은 아래의 식 (7)에 나타내었다.

$$\tau_b = \frac{3.78 B_1 r_d}{\Omega_{KH}\Lambda_{KH}} \quad (7)$$

상수 B0 및 B1은 0.6과 10을 사용하였다.[7]

3.실험 결과 및 고찰

3.1 분사율 측정

Figure 3은 전기적인 분사신호에 대한 실제 나타난 분사기간을 보여주고 있다. 본 실험결과에서 분사압력은 100MPa, 분사신호를 1.0msec 로 주었을 경우의 인젝터의 전류값은 0.4msec의 최고 전류(peak current)와 0.6 msec의 지속 전류(hold current)로 나타나며, 분사율은 약 0.3 msec 정도의 분사지연이 존재하고, 0.7msec 기간 동안 신호 종료 후 분사가 존재하게 된다. 이와 같은 경향은 분사기간과 분사압력에는 무관하게 나타나고 있다. 또한, 본 실험은 4개의 동종 인젝터를 사용한 결과이므로 이러한 분사 패턴은 모든 인젝터에서 일반적 경향으로 판단된다.

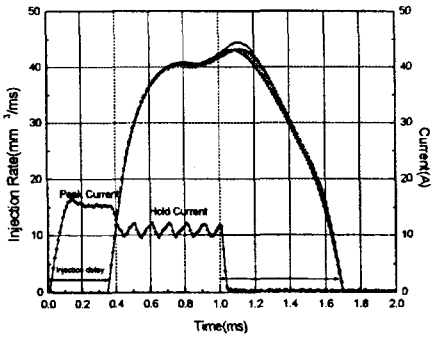
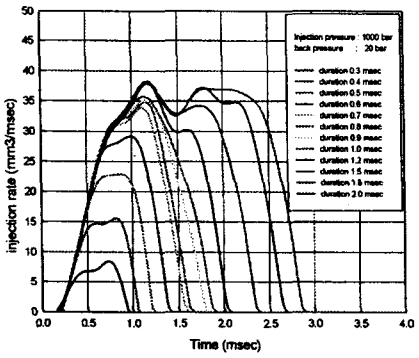
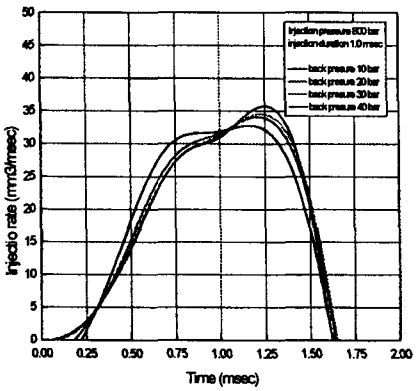


Figure 3. The comparison of injection signal and injection rate



(a) The effect of injection duration



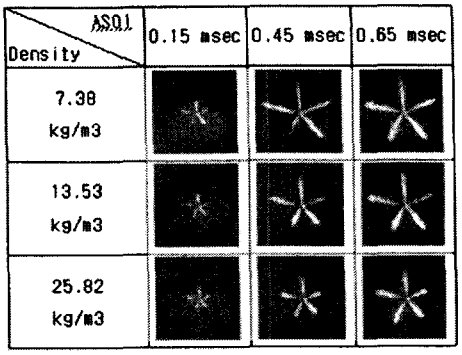
(b) the effect of atmosphere pressure

Figure 4. The result of injection rate

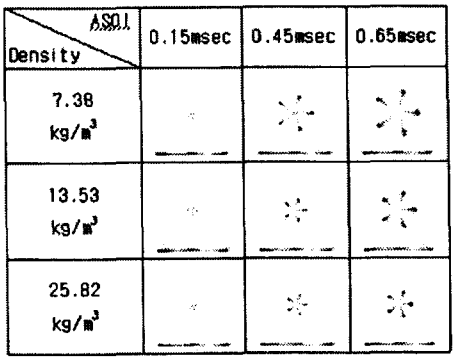
Figure 4는 분사 기간과 분위기 압력에 따른 분사율 측정 결과이다. 이와 같은 분사율 측정 결과에서 인젝터의 유량계수 및 시간에 따른 분사율을 구할 수 있으며, 본 결과를 다음 장의 수치해석 계산에 초기 조건으로 사용하였다.

3.2 분사 조건에 따른 분무 형상 비교

Figure 5, 6은 분위기 압력 및 분사 압력에 따라서 앞장의 분무 가시화 및 수치해석의 방법을 사용하여 분무 거시 형상 및 분무 도달 거리를 비교한 결과이다. 본 그림에 보여진 바와 같이 분위기압력이 증가함에 따라 분무 도달 거리는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 수치해석 결과와 실험에 따른 결과는 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. 분무 도달 거리는 앞장의 분사율 결과와 마찬가지로 분사 시작 시간으로부터 0.2 msec후에 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이와 같은 결과로 부터, 인젝터의 needle이 열리는 시간이 분무 도달거리에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

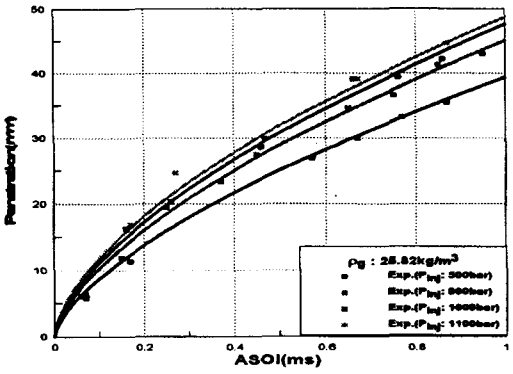


(a) Experimental result (X, Y : 96mm)

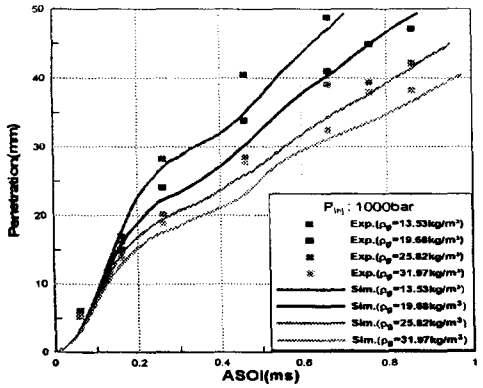


(b) Simulation result (X, Y : 200mm)

Figure 5 Comparison of spray characteristics



(a) The effect of injection pressure



(b) The effect of atmosphere pressure

Figure 6. The characteristics of spray penetration

일반적으로 분무 도달 거리는 분사압력에는 비례하고, 분위기 압력에는 반비례하는 경향을 보이 있으며, Dent et al.[8]은 분무 도달 거리는 분위기 압력의 1/4승에 비례한다고 발표하였고, Hiroyasu et al[9]는 노즐 출구에서 액체 제트의 형태로 분무되는 불완전 분무와 노즐 출구에서 액체 제트가 분무됨과 동시에 분열되는 완전 분무로 구분하고 그 기준을 breakup 길이로 하였다. Jeffrey D. Naber와 Dennis L. Siebers[10]는 Hiroyasu 실험과 비슷하게 무차원 분무 도달 거리 및 시간의 개념을 사용하여 short time limit 와 long time limit 로 구분하여, short time limit 영역에서의 분무 도달 거리는 인젝터의 needle 열리는 시간 및 인젝터의 tip 설계에 영향을 받는 유출 계수에 영향을 받는다고 설명하였다.

그러므로, 본 실험 결과로부터 식 (9), (10)과 같은 분사 압력, 분위기 압력 및 노즐 출구 지름의 함수인 분무 도달 거리의 식을 도출하였다. 식(8)에 나타낸 breakup 시간은 Hiroyasu의 식을 사용한 것이며, breakup 시간을 기준으로 실험식을 구분하였다. 식 (8)로부터 구한 breakup 시간을 본 실험 결과에 적용하여 breakup 길이를 구하였으며, Figure 7에 나타낸 바와 같이 break up 길이는 분사 속도에는 무관하며, 분위기 압력에 반비례하는 경향을 보이고 있으므로 본 실험의 조건은 Hiroyasu가 제안한 완전 분무라고 판단된다.

식 (9), (10)에 보여준 바와 같이 Breakup 시간 이전의 분무 도달 거리는 차압의 1/2승에 비례하고 이후에는 분위기 밀도의 1/4승에 반비례 관계를 갖는다. 앞에서 언급한 바와 같이, breakup 이전의 분무는 연료 및 인젝터 tip의 형상에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있고, 이후에는 완전 분무 형상이므로 인젝터 특성보다는 분위기 조건에 따른 특성이 크게 작용되는 것을 알 수 있다. 식 (9)의 계수 값이 0.2057로 Hiroyasu의 결과보다 적어진 것은 Hiroyasu의 실험에 사용한 인젝터보다 작으므로 나타난 결과로 판단되며, Sieber 가 주장한 바와 같이 유출계수의 영향이 크게 작용하는 것으로 판단된다. 식 (10)의 2.423의 계수 값은 분위기 조건에 따른 영향이 크므로 Hiroyasu의 결과와 비슷한 값이 나타나고 있다. Figure 8은 Dent 및 Hiroyasu의 실험식과 본 실험식으로 계산한 분무도달거리를 비교한 결과이다.

$$t_b = 28.65\frac{\rho_d D}{\sqrt{\rho_a (P_f - P_a)}} \tag{8}$$

$$S = 0.2057\left(2\frac{(P_f - P_a)}{\rho_f}\right)^{1/2} t \qquad (0 < t < t_b) \tag{9}$$

$$S = 2.423\left(\frac{P_f - P_a}{\rho_a}\right)^{1/4} (Dt)^{1/2} \qquad (t > t_b) \tag{10}$$

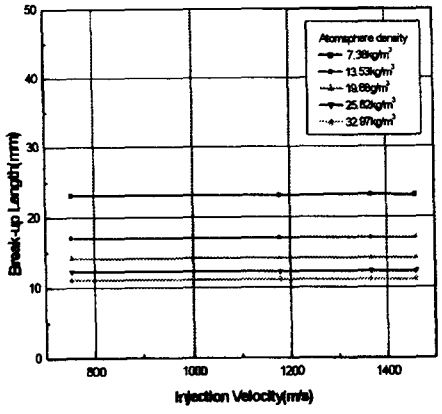


Figure 7. The spray break-up length according to injection velocity

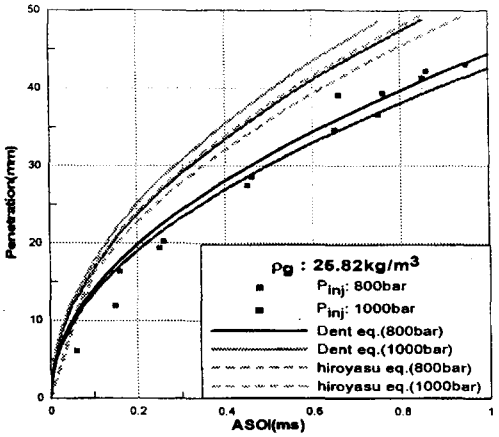
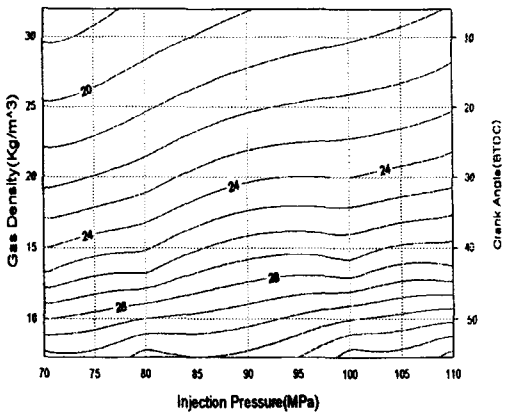
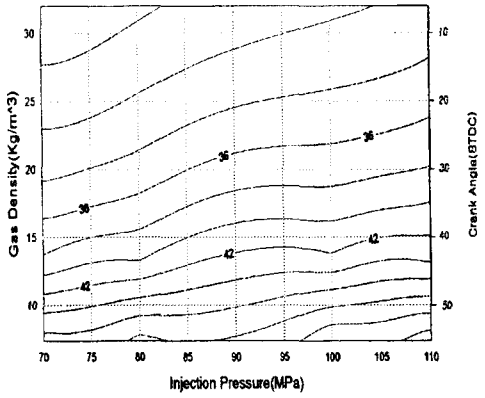


Figure 8. The comparison experimental and Dent's, Hiroyasu's equation

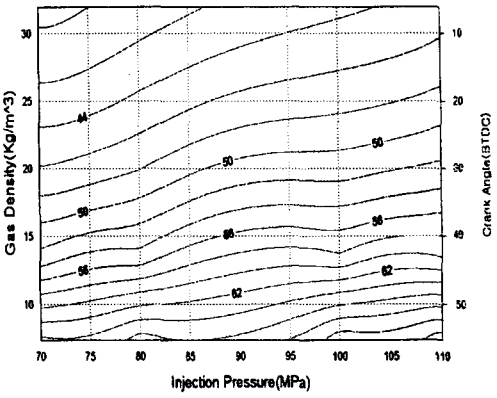
Figure 9는 본 실험으로부터 구한 실험식을 사용하여, 분사 후 0.3 msec, 0.6 msec, 1.0 msec 시간에서 분사 압력과 분위기 압력에 따른 분무 도달거리를 비교한 결과이다. HCCI 운전조건에서 공연비가 농후한 영역인 경우에는 분사기간이 증가하여 분무 도달거리가 증가하게 된다. 그러므로, 공연비가 농후한 영역에서는 다단 분사에 따른 분사기간을 감소시키면, 벽류량을 감소시키면서 압축행정 초기에 분사를 하는 것이 가능할 것으로 판단된다.



(a) 0.3 msec



(b) 0.6 msec



(c) 1.0 msec

Figure 9. The penetration compared with injection duration

4. 결 론

본 연구는 예혼합 압축착화 연소 엔진의 분사조건을 최적화하기 위하여 분부 가시화 및 수치해석을 통하여 얻어진 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

- HCCI 용 커먼레일 인젝터의 분사율 실험 및 분무 가시화와 수치해석을 통하여 HCCI 엔진의 분사압력 및 분위기 압력에 따른 운전 조건에 대한 연소실내의 혼합기 분포 특성을 파악할 수 있었다.

-HCCI 용 인젝터의 분사율 특성은 0.3 msec 정도의 초기 지연과 0.7 msec 의 후기 지연이 존재하는 것을 확인하였고, 실제 분사기간을 추정할

수 있었다.

- 분사조건에 따른 분무 가시화 및 분사율 실험 결과를 초기조건으로 사용한 분무 수치 해석 결과를 비교하여 커먼레일 인젝터에 정량적으로 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.
- 분무 가시화 실험 결과로부터 분무 형상을 기존의 실험식과 비교하여 본 인젝터에 적합한 분무도달거리를 정성적으로 예측할 수 있는 실험식을 도출하였고, 본 연구에서 사용할 엔진의 직경에 적합한 분사 시기 및 분사기간을 추정하였다.

후 기

본 연구는 자동차 부품 연구원의 "예혼합 압축착화 연소 엔진의 기반 및 실용화 기술 개발"에 의해 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Noguchi, M., Tanaka, Y., Tanaka, T., and Takeuchi, Y. "A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion", SAE paper 790840

[2] Onishi, S., Jo. S. H., Shoda, K., Jo., P.D., and Katao, S. "Active thermo- atmosphere combustion (ATAC) - a new combustion process for internal combustion engines", SAE paper 790501

[3] Paul M. Najt and David E. Foster, "Compression-ignited homogeneous charge combustion", SAE paper 830264

[4] Thring R. H., "Homogeneous-charge compression-Ignition (HCCI) engine", SAE paper 892068

[5] Akio Takamura, Takashi Ohta, Susumu Fukushima, Takeyuki Kamimoto, "A study on precise measurement of diesel fuel injection rate", SAE paper 920630

[6] Liu, A. B., Mather, D. and Rolf D. Reitz, "Moleling the effects of fuel spray characteristics on diesel engine combustion and emission", SAE 930072, 1993

[7] Reitz, R. D., "modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays" Atomization and spray Tech. Vol.3, pp.309-337, 1987

[8] Dent, J. C., "A basic-comparisons of various experimental method for studing spray penetration", SAE 710571, 1971

[9] Hiro Hiroyasu, Masataka Arai, "Structure of fuel sprays in diesel engies", SAE 900475, 1990

[10] Jeffrey D. Naber and Dennis L. Siebers, "effect of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays", SAE 960034