

대형 디젤엔진의 NOx 저감을 위한 연료분사노즐 최적화 연구

윤 옥 현* · 김 병 석 · 김 동 훈 · 김 기 두 · 하 지 수

현대중공업 엔진연구소

The Optimization of Fuel Injection Nozzles for the Reduction of NOx Emissions in a Large Diesel Engine

WookHyeon Yoon* · ByungSeok Kim · DongHun Kim · KiDoo Kim · JiSoo Ha

Engine Research Department, Hyundai Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.,
1 Cheonha-Dong, Dong-Gu, Ulsan 682-792, Korea

(Received 8 July 2004 / Accepted 23 September 2004)

Abstract : Numerical simulations and experiments have been carried out to investigate the effect of fuel injection nozzles on the combustion and NOx formation processes in a medium-speed marine diesel engine. Spray visualization experiment was performed in the constant-volume high-pressure chamber to verify the numerical results on the spray characteristics such as spray angle and spray tip penetration. Time-resolved spray behaviors were captured by high-speed digital camera and analyzed to extract the information on the spray parameters. Spray and combustion phenomena were examined numerically using FIRE code. Wave breakup and Zeldovich models were adopted to describe the atomization characteristics and NOx formation processes. Numerical results were verified with experimental data such as cylinder pressure, heat release rate and NOx emission. Finally, the effects of fuel injection nozzles on the engine performance were investigated numerically to find the optimum nozzle parameters such as fuel injection angle, nozzle hole diameter and number of nozzle holes. From this study, the optimum fuel injection nozzle (nozzle hole diameter, 0.32 mm, number of nozzle holes, 8 and fuel injection angle, 148°) was selected to reduce both the fuel consumption and NOx emission. The reason for this selection could be explained from the highest fuel-air mixing in the early phase of injection due to the longest spray tip penetration and the highest heat release rate after 19° ATDC due to the increased injection duration.

Key words : Spray visualization(연료분무가시화), Penetration length(연료침투길이), Spray cone angle(분무원추각), Fuel injection angle(연료분사각도), Nozzle hole diameter(노즐 홀 직경), Number of nozzle holes(노즐 홀 개수)

Nomenclature

a	: liquid jet or blob radius, m	Λ	: wavelength of fastest growing wave, m
r	: drop radius, m	τ	: liquid breakup time, s
W	: relative velocity, m/s	t	: time, s
Ω	: maximum wave growth rate, s ⁻¹	B ₀	: droplet size constant
		B ₁	: breakup time constant

*To whom correspondence should be addressed.
whyoun@hhi.co.kr

1. 서론

세계적으로 내연 기관에 대한 배기가스 오염물질의 규제는 점점 강화되어 엔진 설계 및 제작자에게 가장 중요한 문제가 되고 있다. 선박 및 육상용 내연 발전으로 많이 사용되고 있는 대형 디젤 엔진도 배기가스 오염물질 저감을 위해 많은 연구가 진행되고 있으며¹⁾, 더불어 연료 소비율이 증가되지 않도록 하는 것도 중요하다.

배기가스 오염물질은 주로 연료의 연소에 의해 발생하며, 특히 주요 규제 대상인 질소산화물(NOx)은 연소를 개선함으로써 많은 양을 줄일 수 있다. 이러한 연소 개선을 위한 방법에는 연료분사노즐의 형상, 압축비, 연소실 형상, 흡·배기 밸브 타이밍, 흡기 압력 및 온도 등을 최적화하는 것인데, 이 중, 연료 분사 노즐의 형상을 최적화하는 것이 가장 경제적이고 효과적인 방법이다.²⁾

본 연구에서는 당사의 독자 개발 엔진인 Hyundai HiMSEN 엔진에 대하여 연료 분무 가시화 실험 및 상용 코드를 이용한 3차원 연료 분무, 연소 해석을 수행하여 해석 결과의 신뢰성을 평가하였다. 또한 연소 해석을 통해 연료 분사 노즐의 홀 직경, 개수 및 연료 분사 각도의 변화에 따른 엔진 연소 및 성능 특성을 검토하여 연료 소비율과 NOx 발생량이 최적화되는 노즐 형상을 도출하였다.

2. 연료 분무 가시화 실험 및 해석

2.1 연료 분무 가시화 실험

연료 분무 가시화를 위한 실험 장치와 측정기기의 개략도 및 연료 분사 시스템의 사양을 Fig. 1과 Table 1에 각각 나타내었다.³⁾

분무 영상은 11,200 frames/sec의 고속 카메라를 사용하여 256×256 화소로 얻었고, 이 분무 영상으로부터 연료 침투 길이(penetration length) 및 분무 원추각(spray cone angle)을 도출하였다. 고압실의 압력은 실제 엔진의 연료 분사 조건과 유사한 밀도를 얻기 위하여 1bar에서 40bar까지 10bar씩 증가시키면서 실험을 수행하였고, 40bar일 때의 시간에 따른 분무 영상을 Fig. 2에 도시하였다.

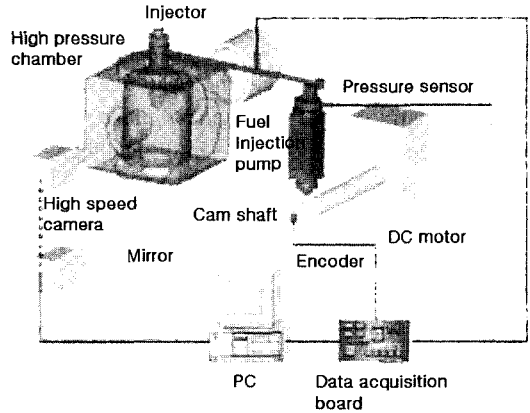


Fig. 1 Schematic diagram of fuel injection and spray visualization system

Table 1 Fuel injection system specifications

Injection system	Cam-driven fuel injection
Injection pressure	Variable(up to 2000bar)
Number of nozzle holes	10
Nozzle hole diameter	0.32mm
Injection angle	143°

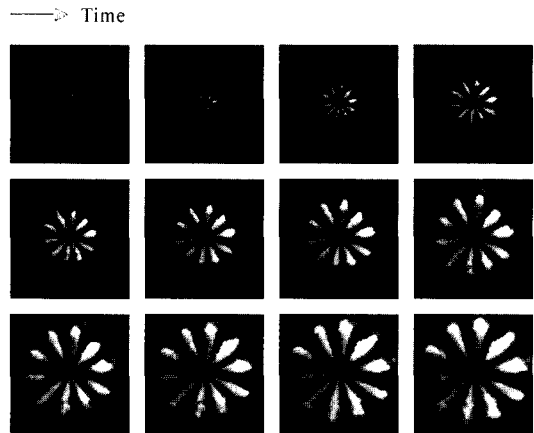


Fig. 2 Sequential images of transient spray

2.2 액적 분열 모델(Droplet Breakup Model)

연료 액적과 주위 기체와의 모멘텀 교환에 기인한 액적분열을 모사하기 위하여 Reitz가 제시한 Wave 분열 모델을 사용하였다.⁴⁾

Rayleigh:

$$r = \min \left[\frac{(3\pi a^2 W / 2\Omega)^{0.33}}{(3a^2 \Lambda / 4)^{0.3}} (B_0 \Lambda > a) \right] \quad (1)$$

Stripping:

$$r = B_0 A \quad (B_0 A \leq a) \quad (2)$$

where $B_0 : 0.61$

그리고 N_0 개의 액적들이 있는 모액적의 시간에 따른 반지름의 변화율은 Reitz와 Diwakar¹³⁾가 표현한대로 다음과 같다.

$$\frac{da}{dt} = -(a - r) / \tau \quad (r \leq a) \quad (3)$$

$$\tau = 3.726 B_1 a / \Lambda \Omega \quad (4)$$

식 (3), (4)의 액적 분열 시간(τ)을 결정하기 위해서는 액적 분열 상수 B_1 의 값을 알아야 한다. 상수 B_1 은 초기 액적 크기, 속도, 난류 및 노즐 형상 등에 영향을 받기 때문에 실험을 통해 결정되어야 하며, 본 연구에서는 연료 분무 가시화 실험을 통해 도출하였다. 실험 조건에 대한 연료 분무 특성을 해석하여, Fig. 3에 연료 침투 길이에 대한 해석 및 실험 결과를 비교하여 나타내었고, 이를 통해 연료 분무 거동에 대한 해석 결과의 신뢰성을 검증하였다.

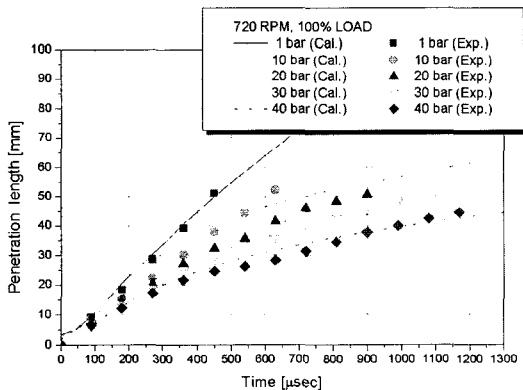


Fig. 3 Comparison of simulated and measured spray tip penetration with the variation of ambient gas density

3. 연소 해석 결과 검증

본 연구의 액적 분무 거동, 연소 및 NOx 발생량 해석에 사용된 모델들은 Table 2에 요약하였고, 사용한 전산해석 도구는 상용 코드인 AVL사의 FIRE S/W를 사용하였다. 해석 대상 엔진은 Hyundai HiMSEN H21/32 엔진이며, 그 사양을 Table 3에 나

Table 2 Submodels used in computational analysis

Physical phenomena	Model
Spray breakup	Wave breakup ⁴⁾
Spray-wall impingement	Senda et al. ⁵⁾
Drop drag	Schiller and Naumann ⁶⁾
Drop evaporation	Dukowicz ⁷⁾
Drop coalescence & collision	Dukowicz ⁸⁾
Ignition	Theobald and Cheng ⁹⁾
Combustion	Eddy breakup ¹⁰⁾
NOx production	Zeldovich ¹¹⁾
Turbulence dispersion	Gosman and Ioannides ¹²⁾

Table 3 Engine specifications

Engine type	Direct injection, turbocharged, 6 cylinder diesel engine
Bore × Stroke	210mm × 320mm
Rated power	160 kW/cyl.
Compression ratio	17
Rated engine speed	720rpm

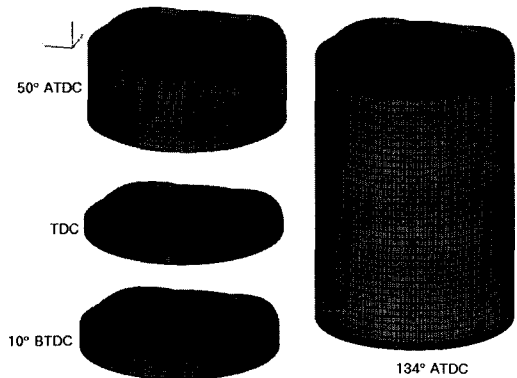


Fig. 4 Computational grids

타내었다.

피스톤의 움직임을 모사하기 위한 이동격자는 Fig. 4에 나타내었고, 해석 구간은 배기 밸브가 닫힌 후(-180° ATDC)부터 열리기 전까지(128° ATDC)이다.

Fig. 5와 Fig. 6에 50, 75 및 100% 부하 시의 실린더 내 압력과 NOx 발생량 해석 결과를 실험 결과와 비교하여 각각 나타내었다. 실린더 내 최고 압력은 실험결과와의 차이가 0.5% 이내로 일치하였으며, NOx 발생량은 약 10.5%의 오차 범위 내에서 실험

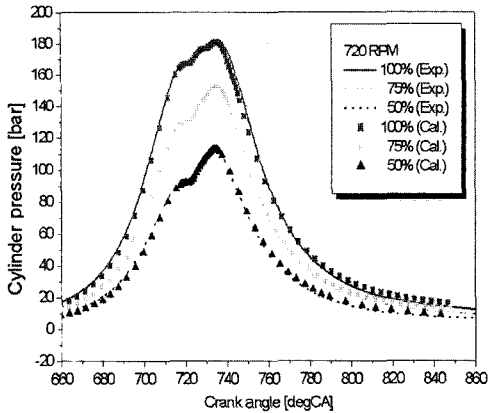


Fig. 5 Predicted and measured cylinder pressure at 50, 75 and 100% load

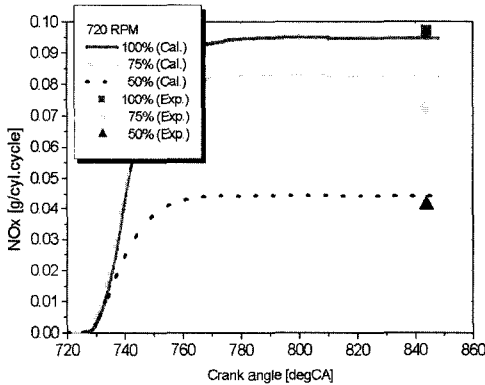


Fig. 6 Predicted and measured NOx production at 50, 75 and 100% load

결과를 예측할 수 있었다. 이러한 결과는 연료 분무 거동을 결정하는 상수(B_1 , 분무 원추각)들을 연료 분무 가시화 실험을 통해 결정함으로써 연소 해석의 신뢰성을 얻을 수 있으며, 연료 소비율 및 NOx 발생량을 평가하여 연소 성능 최적화를 위한 연소 해석이 가능함을 알 수 있다.

4. 노즐 형상에 따른 연소 해석

4.1 노즐 홀 직경 및 개수에 따른 해석

노즐 홀 직경 및 개수의 변화가 연료 소비율 및 NOx 발생량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 100% 부하시, 5개의 노즐에 대하여 수치 해석을 하였고, 노즐 형상의 효과를 고려하기 위하여 Sarre et al.가 제시한 모델¹⁴⁾을 사용하였으며, Table 4에 노즐

Table 4 Test nozzle configurations

No.	Nozzle Dia. × No. (mm)	Nozzle flow area (mm ²)	Injection duration (ms)	Area change	Max. inj. press. (bar)
1	0.30 × 9	0.6434	7.228	-11.1%	1564
2	0.32 × 8				
3	0.32 × 9	0.7238	6.807	0	1410
4	0.32 × 10	0.8045	6.386	+11.1%	1282
5	0.34 × 9				

사양을 나타내었다.

노즐 #1, #2와 노즐 #4, #5는 노즐 홀 출구 면적이 같기 때문에 각각 동일 연료 분사율 형상을 갖으며, 실린더 내로 분사된 연료량은 동일하기 때문에 노즐 홀 면적의 감소는 연료 분사 압력 및 연료 분사 시간을 증가시킨다.

5개의 노즐에 대한 크랭크 각도에 따른 연료 침투 길이를 Fig. 7에 나타내었다. 노즐 홀 직경을 일정하게 하고 노즐 홀 개수를 증가시켰을 경우, 연료 분사 압력 및 속도의 감소로 인해 노즐 홀 출구에서의 초기 액적 모멘텀이 줄어들기 때문에 연료 침투 길이가 감소한다. 그러나 노즐 홀 개수를 일정하게 하고 노즐 홀 직경을 증가시켰을 경우, 연료 침투 길이는 증가한다. 이는 노즐 홀 출구 면적의 증가로 인한 연료 분사 속도의 감소는 약 4.4%인 반면, 노즐 홀 직경의 증가로 인한 분사된 연료량의 증가는 약 21%이므로, 결국 초기 액적 모멘텀이 증가하기 때문이다. 같은 노즐 홀 면적을 갖는 노즐인 경우, 노즐 홀 직경이 큰 경우가 연료 침투 길이도 더 길다. 이는 2개의 노즐 분사 속도가 같으므로, 노즐 홀 직경이 큰

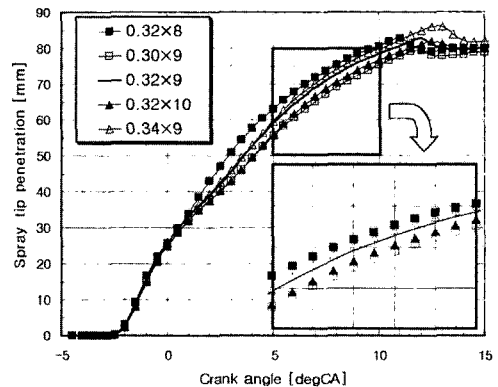


Fig. 7 Simulation results of spray tip penetration

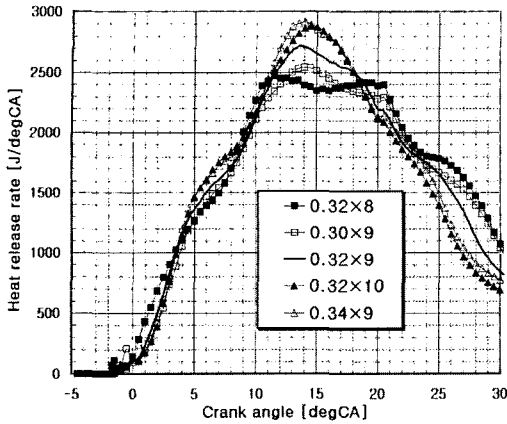


Fig. 8 Heat release rate with different nozzle hole diameter and number

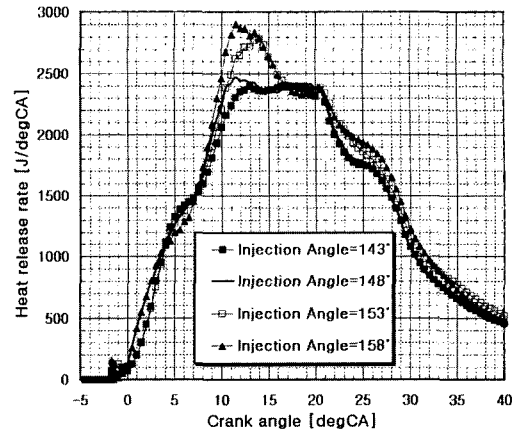


Fig. 9 Heat release rates with different fuel injection angle

경우가 초기 액적 모멘텀이 더 크기 때문이다.

Fig. 8에 연소 해석의 결과로 인한 열발생을 해석 결과를 나타내었다. 노즐 #2의 경우, 열발생율의 최대값이 가장 낮다. 이는 노즐에서 분사된 액적이 피스톤 바울에 가장 먼저 부딪혀서 국부적으로 연료가 농후한 부분이 존재하여 순간적으로 연소가 이루어지지 않기 때문으로 판단된다. 그리고 노즐 홀 직경을 일정하게 하고 노즐 홀 개수를 증가시켰을 경우와 노즐 홀 개수를 일정하게 하고 노즐 홀 직경을 증가시켰을 경우 모두 열발생율의 최대값은 증가함을 알 수 있다.

4.2 연료 분사 각도에 따른 해석

연료 분사 각도의 변화가 연료 소비율 및 NOx 발생량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 100% 부하시, 노즐 #2에 대하여 연료 분사 각도를 143°에서 158°까지 5° 증가시키면서 연소해석을 수행하였다. Fig. 9에서 보듯이, 연료 분사 각도가 증가함에 따라 피스톤 바울에 충돌하기 전까지의 연료 침투 길이가 길어지기 때문에 공기와의 혼합율이 증가하여 열발생율의 최대값이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 10에 연료 분사 노즐의 홀 직경, 개수 및 각도의 변화가 연료 소비율 및 NOx 발생량에 미치는 영향을 정리하여 나타내었다. 연료 분사 각도가 증가할수록 연료 소비율은 감소하는 반면 NOx 발생량은 증가하는데 그 변화폭이 노즐 홀 직경 및 개수의

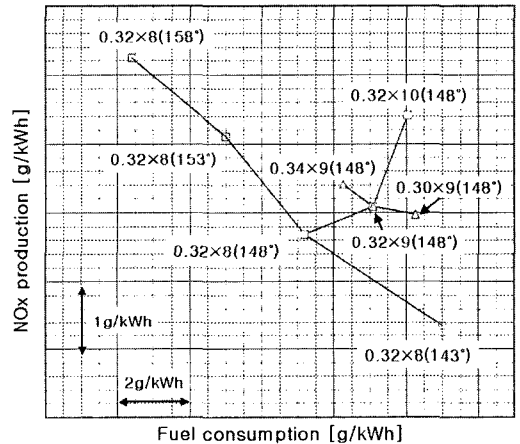


Fig. 10 NOx vs. fuel consumption trade-off curves(the numbers in the brackets means fuel injection angle)

변화에 의한 것보다 매우 큼을 알 수 있다. 이에 따라 연소실 형상에 맞는 연료 분사 각도의 설계가 매우 중요함을 알 수 있다. 그리고 노즐 홀 직경이 증가할수록 연료 소비율은 감소하고 NOx 발생량은 증가하지만 그 변화폭은 상대적으로 작다. 그러나 노즐 홀 개수가 증가할수록 연료 소비율 및 NOx는 증가하고 그 변화폭도 상대적으로 크다.

Fig. 10으로부터 노즐 #2가 연료 소비율 및 NOx 발생량을 고려할 때 연소실 형상에 최적화된 노즐 입을 알 수 있다. 이는 연료 분사 초기에 연료 침투 길이가 가장 길어서 공기와의 혼합율이 증가하고, 연료 분사 기간의 증가로 인해 19° ATDC 이후의 열발생율이 가장 크기 때문이다.

5. 결론

연료 분무 해석의 신뢰성을 얻기 위해 연료 침투 길이 및 분무 원추각을 연료 분무 가시화 실험을 통하여 도출하였으며, 엔진 성능 실험 결과의 실린더 압력 및 NOx 발생량을 이용하여 3차원 연소 해석 결과를 검증하였다.

Hyundai HiMSEN H21/32 대형 디젤 엔진의 성능 및 NOx 발생량에 최적인 연료 분사 노즐의 형상을 선정하기 위하여 3차원 연소 해석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 연료 분사 각도가 증가함에 따라 피스톤 바울에 충돌하기 전까지의 연료 침투 길이가 길어지기 때문에 공기와의 혼합율이 증가하여 연료 소비율은 감소하는 반면 NOx 발생량은 증가한다.
- 2) 노즐 홀 직경이 증가할수록 연료 소비율은 감소하고 NOx 발생량은 증가하지만 그 변화폭은 상대적으로 작다.
- 3) 노즐 홀 개수가 증가할수록 연료 소비율 및 NOx 발생량은 증가하고 그 변화폭도 상대적으로 크다.
- 4) 같은 노즐 홀 면적을 갖는 노즐인 경우, 노즐 홀 직경이 큰 경우가 연료 침투 길이가 더 길고, 연료 소비율 및 NOx 발생량도 더 낫다
- 5) 100% 부하시, 노즐 홀 직경, 0.32mm, 노즐 홀 개수, 8개, 연료 분사 각도, 148°의 연료 분사 노즐이 연료 소비율 및 NOx 발생량을 고려할 때 연소실 형상에 최적화된 노즐이다.

References

- 1) A. Al-Sened and E. R. Karimi, "Strategies for NOx Reduction on Heavy Duty Engines," CIMAC Congress, Hamburg, pp.272-280, 2001.
- 2) M. A. Patterson, S. C. Kong, G. J. Hampson and R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Fuel Injection Characteristics on Diesel Engine Soot and NOx Emissions," SAE 940523, 1994.
- 3) J. Y. Kim, W. H. Yoon and J. S. Ha, "A Study on the Numerical Prediction of Heat Release Rate and NOx Production in Medium-Speed Marine Diesel Engines," ASME ICED/RTD Fall Technical Conference, Erie, Pennsylvania, pp.137, 2003.
- 4) R. D. Reitz, "Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays," Atomization and Spray Technology, Vol.3, pp.309-33, 1987.
- 5) J. Senda, M. Kobayashi, S. Iwashita and H. Fujimoto, "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," SAE 941894, 1994.
- 6) L. Schiller and A. Z. Naumann, VDI 77, pp.318- 320, 1993.
- 7) J. K. Dukowicz, "Quasi-steady Droplet Change in the Presence of Convection, Informal Report Los Alamos Scientific Laboratory," LA7997-MS.
- 8) J. K. Dukowicz, "A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays," J. Comp. Physics, Vol.35, pp. 229-253, 1980.
- 9) M. A. Theobald and W. K. Cheng, "A Numerical Study of Diesel Ignition," Energy-sources Technology Conference and Exhibition, 87-FE-2, 1987.
- 10) B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," Sixteenth International Symposium on Combustion, 1977.
- 11) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, pp.572-577, McGraw-Hill, 1988.
- 12) A. D. Gosman and E. Ioannides, "Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fueled Combustors," AIAA, pp.81-323, 1981.
- 13) R. D. Reitz and R. Diwakar, "Structure of High-Pressure Fuel Sprays," SAE 870598, 1987.
- 14) C. K. Sarre, S. C. Kong and R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Injector Nozzle Geometry on Diesel Sprays," SAE Technical Paper Series 1999-01-0912, 1999.
- 15) K. S. Cha, W. I. Chung and C. G. Park, "A Study on Spray Behaviors with Variation of Nozzle Diameter in the Diesel Combustion Chamber," Transactions of the KSAE, Vol.8, No.3, pp.18-27, 2000.
- 16) H. C. Yang, Y. K. Choi and H. S. Ryou, "A Numerical Study on the Break-up of the Fuel Spray in Diesel Engine," Transactions of the KSAE, Vol.3, No.6, pp.8-22, 1995.
- 17) Y. H. Chi, J. H. Lee and E. S. Kim, "An Experimental Study on Spray Pattern and Droplet Size Distribution of Diesel Spray," Journal of the KSAE, Vol.14, No.3, pp.102-108, 1992.