

# 연료분사 노즐 형상이 선박용 중형 디젤 엔진의 NOx에 미치는 영향 연구

윤옥현<sup>+</sup>·김병석<sup>++</sup>·류승협<sup>+++</sup>·김기두<sup>++++</sup>·하지수<sup>++++</sup>

## Effect of Fuel Nozzle Configuration on the Reduction of NOx Emission in Medium-speed Marine Diesel Engine

Wook-Hyeon Yoon<sup>+</sup>, Byong-Seok Kim<sup>++</sup>, Sung-Hyup Ryu<sup>+++</sup>, Ki-Doo Kim<sup>++++</sup> and Ji-Soo Ha<sup>++++</sup>

**Abstract :** Multi-dimensional combustion analysis and experiment has been carried out to investigate the effects of the injector nozzle hole diameter and number on the NOx formation and fuel consumption in HYUNDAI HiMSEN engine. The behavior of spray and combustion phenomena in diesel engine was examined by FIRE code. Wave breakup and Zeldovich models were adopted to describe the atomization characteristics and NOx formation. Wallfilm model suggested by Mundo, et al. and auto-ignition model suggested by Theobald and Cheng were adopted to investigate the spray-wall interaction characteristics and ignition delay. The information of spray angle and spray tip penetration length was extracted from fuel spray visualization experiment and the fuel injection rate profile was extracted from fuel injection system experiment as an input and verification data for the combustion analysis. Next, the nine different nozzle configurations were simulated to evaluate the effect of injector hole diameter and number on the NOx formation and fuel consumption.

**Key words :** Spray visualization(연료분무가시화), Penetration length(연료침투길이), Spray angle(분무 원추각), Nozzle hole diameter(노즐 홀 지름), Number of nozzle holes(노즐 홀 개수)

### 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 중형 디젤 엔진도 배기가스 오염물질 저감을 위해 많은 연구가 진행되고 있으며<sup>[1]</sup>, 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, 연료분사 노즐의 형상을 최적화하는 것이 가장 경제적이고 효과적인 방법이다<sup>[2]</sup>.

본 연구에서는 당사의 독자 개발 엔진인 HYUNDAI HiMSEN 엔진에 대하여 연료 분무 가시화 실험 및 상용 코드를 이용한 3차원 연료 분무 해석을 수행하여 해석 결과의 신뢰성을 먼저 평가하였다. 또한 연소 해석을 통해 연료 분사 노즐의 홀 지름 및 개수 변화에 따른 엔진 연소 및 성능 특성을 검토하였다.

### 2. 연료분무가시화 실험 및 해석

노즐에 따른 연료분무특성을 규명하고 Reitz가 제시한 Wave 분열 모델<sup>[3]</sup>의 입력조건인 분무 원추각과 액적분열상수( $B_1$ ) 등을 도출하기 위하여 연료분무가시화 실험<sup>[4]</sup>을 수행하였다.

분무 원추각은 Reitz & Bracco<sup>[5]</sup>가 제시한 식을 사용하였고, 본 연구의 실험결과에 맞게  $f(T)$ 를 (1)과 같이 수정하였으며, Fig. 1에 노즐 홀 지름에 따라 측정된 분무 원추각과 비교하여 나타내었다.

$$f(T) = 0.1 + 1.2\sqrt{T} \quad (1)$$

$$T \equiv \frac{\rho_f}{\rho_g} \left( \frac{Re_{f_i}}{We_{f_i}} \right)^2$$

where,  $\rho$  : 밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $Re$  : 레이놀즈 수,  $We$  : 웨버 수  
하첨자 f:연료, g:가스

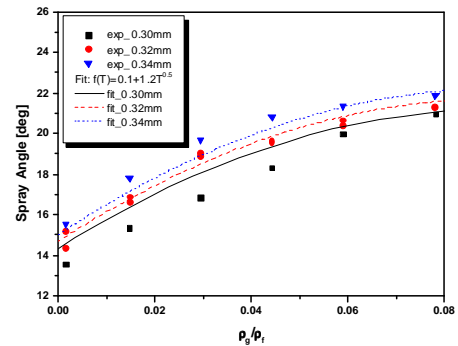


Fig. 1 Comparison of spray angle correlation with the experimental data according to nozzle hole diameter

초기 액적 크기, 속도, 난류 및 노즐 형상 등에 영향을 받는 액적분열상수  $B_1$ 는 (2)와 같이 연소실 내 평균 밀도의 함수로 도출하였고, Fig. 2에 연료침투길이에 대한 해석 및 실험 결과를 비교하였다.

$$B_1 = 1.4239 \times \rho + 0.2093 \quad (2)$$

+ 윤옥현, 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소 엔진연구실, E-mail: whyoun@hhi.co.kr, Tel: (052)230-3227  
 ++ 김병석, 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소 엔진연구실  
 +++ 류승협, 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소 엔진연구실  
 ++++ 김기두, 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소 엔진연구실  
 +++++ 하지수, 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소 엔진연구실

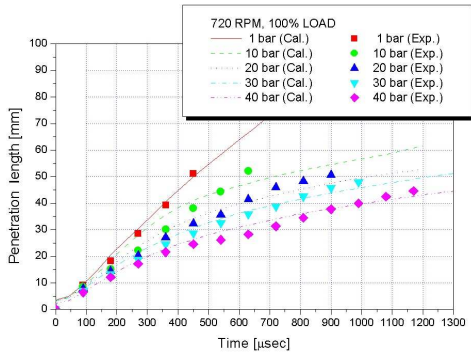


Fig. 2 Comparison of simulated and measured spray tip penetration with the variation of ambient gas density

### 3. 연료 분사 노즐 형상에 따른 연소 해석

연료 분사 노즐 홀 지름 및 개수의 변화가 NOx 발생량 및 연료 소비율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 50% 부하 시, 9개의 노즐에 대하여 연소해석을 수행하였고, 노즐 형상의 효과를 고려하기 위하여 Sarre et al.가 제시한 모델<sup>[6]</sup>을 사용하였으며, Table 1에 노즐 형상을 정리하여 나타내었다.

Table 1 Tested nozzle configurations

	Nozzle Dia. X No. [mm]	Nozzle exit area [mm <sup>2</sup> ]	Area change [%]	Injection duration [ms]
Diameter of nozzle hole	0.28 X 10	0.6158	-23.44	4.3982
	0.30 X 10	0.7069	-12.11	4.0741
	0.34 X 10	0.9079	+12.89	3.6111
	0.36 X 10	1.0179	+26.56	3.5185
Ref.	0.32 X 10	0.8042	0(ref.)	3.75
Number of nozzle hole	0.32 X 08	0.6434	-20.00	4.3519
	0.32 X 09	0.7238	-10.00	4.0278
	0.32 X 11	0.8847	+10.00	3.6574
	0.32 X 12	0.9651	+20.00	3.5185

NOx 저감을 위한 노즐 형상 연구에 사용된 전산해석 도구는 상용 코드인 FIRE S/W이고, 해석 대상 엔진인 Hyundai HiMSEN 엔진의 사양을 Table 2에 나타내었다

Table 2 Tested engine specifications

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

연료 분사 노즐의 홀 지름 및 개수의 변화가 연료소비율 및 NOx 발생량에 미치는 영향을 정리하여 Fig. 3에 나타내었다.

노즐 홀 지름 및 개수가 증가할수록 연료소비율은 증가하고 NOx 발생량은 감소하고 있음을 알 수 있는데, 이는 노즐 홀 출구에서의 연료 분사 속도가 감소하여 상대적으로 미립화가 덜 진행되고 그로 인해 연료-공기 혼합율이 감소하여 연소실 최고 압력 및 온도를 떨어뜨리기 때문이다.

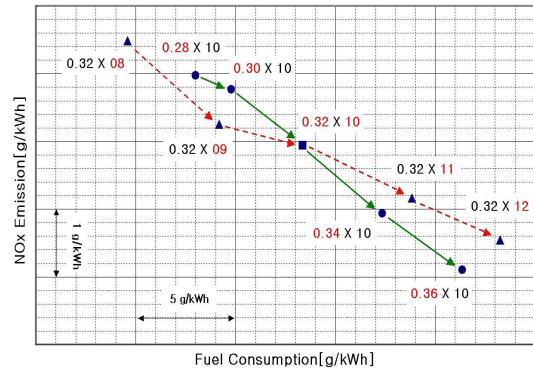


Fig. 3 NOx vs. fuel consumption trade-off curve at the -2.6° ATDC SOI, 50% load

### 4. 결론

Hyundai HiMSEN 엔진의 연료 분사 노즐이 연료 소비율 및 NOx 발생량에 미치는 영향을 평가하기 위해 3차원 연소해석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 노즐 홀 지름 및 개수가 증가할수록 연료 소비율은 증가하고 NOx 발생량은 감소하였다.
2. 노즐 홀 출구에서의 연료 분사 속도의 감소는 액적 분열 시간을 증가시키고 그로 인해 연료-공기 혼합율이 감소하여 연료 소비율은 증가하고 NOx 발생량은 감소하였다.
3. 연료분사 노즐 홀 지름을 바꾸는 것이 개수를 바꾸는 것보다 NOx 개선에 효과적이다.

### 참고문헌

- [1] A. Al-Sened and E. R. Karimi, "Strategies for NOx Reduction on Heavy Duty Engine", 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", SAE940523, 1994.
- [3] R. D. Reitz, "Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays", Atomization and Spray Technology, Vol. 3, pp. 309-33, 1987.
- [4] 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 Engine", ASME ICED/RTD Fall Conference, Erie, Pennsylvania, pp. 137, 2003.
- [5] R. D. Reitz and F. B. Bracco, "On the Dependence of Spray Angle and Other Spray Parameters on Nozzle Design and Operating Conditions", SAE790494, 1979.
- [6] 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.