

중형 디젤 엔진의 연료분사노즐 형상에 따른 성능 해석 연구

김기두† · 윤옥현* · 김병석* · 하지수* · 안광현** · 김주태***

(원고접수일 : 2006년 2월 7일, 심사완료일 : 2006년 7월 20일)

Performance Simulation for the Variation of Fuel Injection Nozzle Configurations in Medium Speed Diesel Engine

Ki-Doo Kim† · Wook-Hyun Youn* · Byong-Seok Kim* · Ji-Soo Ha* ·

Kwang-Hean Ahn** · Ju-Tae Kim***

Abstract : The effects of fuel injection nozzle hole on the NOx emission and fuel oil consumption of medium speed diesel engine, HYUNDAI HiMSEN 6H21/32 engine are investigated by engine performance simulation. The results of performance simulation are verified by experimental results of NOx emission, fuel oil consumption, cylinder pressure, and heat release rate according to the variation of the number of fuel injection nozzle hole and engine load. The performance simulations are also carried out to optimize the fuel injection nozzle of 6H21/32 engine in respect to the NOx emission and fuel oil consumption. The engine performance measurements are performed to verify the results of performance simulation and to investigate the effects of fuel injection nozzle on engine performance. The results of measurement indicate that significant NOx reduction can be achieved with minimum deterioration in fuel oil consumption by optimizing the geometry of fuel injection nozzle on 6H21/32 engine.

Key words : Performance simulation(성능해석), Medium speed diesel engine(중형 디젤 엔진), Fuel injection nozzle(연료분사 노즐), NOx(질소산화물), Fuel oil consumption(연료소비율)

1. 서 론

최근, 디젤 엔진은 높은 열효율과 저급의 연료 사용이 가능하고 오랫동안 검증된 시스템으로 여러 분야에 사용되어왔다. 그러나 근래에 환경오염에

대한 인식이 높아지면서 유해 배기가스 오염물 배출에 대한 각종 규제가 점차 강화되고 있다. 선박용 엔진인 경우는 국제적인 협의체인 IMO(International Maritime Organization)에서 질소산화물(NOx)을 규제하고 있으며, 자국내 영

† 책임저자(현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소 엔진연구실), E-mail:kdkim@hhi.co.kr, Tel: 052)230-3227

* 현대중공업 기술개발본부 산업기술연구소 엔진연구실

** 현대중공업 엔진기계사업본부 엔진기술개발부

*** 현대중공업 엔진기계사업본부

해에 대한 규제를 시행하고 있는 국가들도 있다.

디젤 엔진의 NO_x 저감은 연소 공간의 화염 온도 저하와 고온 상태 지속 시간의 단축이 효과적이다. 이에는 연소실 형상, 연료분사계, 흡·배기계 및 운전 조건 등이 관련 인자이나 서로의 상관관계가 복잡하다. 그리고 그 저감 방법이 주로 연료소비율을 악화시키는 조건이어서 NO_x 및 연료소비율을 모두 만족시키기 위해서는 관련 인자의 최적화가 필요하다.

본 연구에서는 NO_x 저감 방법 중, 그 효과가 크나 명확한 경향이 알려져 있지 않은 연료분사 노즐에 대한 연구를 수행하였다. 연료분사 노즐의 홀 지름 및 갯수 등은 연료분사 압력뿐만 아니라 연료 분무의 미립화 및 증발 과정에 많은 영향을 끼친다. 이러한 특징으로 인해 연료분사노즐의 개발은 연료 소비율 및 NO_x를 동시에 저감할 수 있는 방법이다. 또한 연료분사 노즐만을 바꾸는 매우 간단한 방법으로 엔진 성능 개선을 할 수 있는 장점도 있다. ⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ 기존 연구^{(5), (6)}들은 연료분사 노즐에 대한 평가를 3차원 연소 해석을 이용하여 수행하였으나, 본 연구에서는 성능 해석 기술을 이용하였다. 최근의 성능 해석 프로그램은 현상학적인 연소 모델을 도입하여 NO_x 등의 계산이 가능하다.

본 연구에서는 연료분사 노즐 형상 중, 홀 지름 및 갯수에 대한 성능 해석을 통해 중형 디젤 엔진인, 현대 힘센 엔진의 NO_x 저감 방안을 평가하였다. 우선 연료분사 노즐 형상이 바뀐 경우에 대한 실험 결과를 이용하여 성능 해석 검증을 수행하였으며, 이를 바탕으로 NO_x를 저감할 수 있는 연료분사 노즐을 선정하기 위한 성능 해석을 수행하였다. 선정된 연료분사 노즐은 제작 및 실험을 통해 평가되었다.

2. 연료분사 노즐에 따른 성능 해석 검증

2.1 성능 해석 조건

연료분사 노즐에 따른 연소 평가를 위해서 성능 해석 S/W인 AVL사에서 개발한 BOOST를 사용하였으며, 연소 모델은 연료-공기 혼합율에 의해 연소율

이 결정되어지는 AVL MCC(Mixing Controlled Combustion) 모델을 사용하였다. 대상 엔진은 현대 힘센 엔진(모델 6H21/32) 엔진으로, 직분식 연료분사 장치 및 터보차저가 장착되어 있는 중형 디젤 엔진이다. Table 1에 6H21/32 엔진에 대한 주요 사양을 나타내었다. 성능 해석 모델은 6H21/32 엔진에 대해 부하는 50 및 100%, 연료분사 노즐 형상은 홀 개수 8 및 10개인 경우에 대해 작성되었으며, Table 2에 계산에 사용된 연료분사 노즐의 사양을 나타내었다. 연료분사 노즐 홀 지름이 0.32mm, 홀 개수가 10개인 경우를 3210으로 표기한다.

Table 1 Specifications of HYUNDAI HiMSEN 6H21/32 engine

Bore	210mm
Stroke	320mm
Connecting-Rod Length	640mm
BMEP	24.1 bar
Power	160kW/Cyl. at 720rpm

Table 2 Specifications of fuel injection nozzle

노즐 명	홀 지름 (mm)	홀 개수	총 면적 (%)
3210	0.32	10	100
3208	0.32	8	80

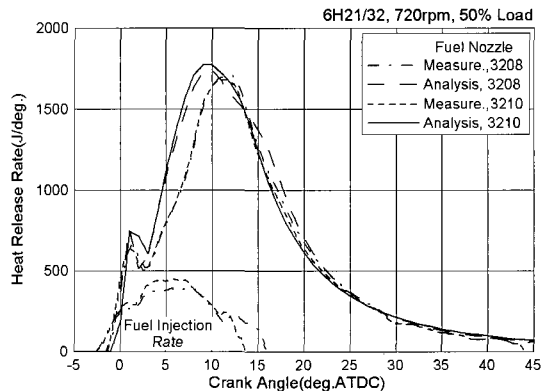


Fig. 1 Heat release rate curves at 50% load

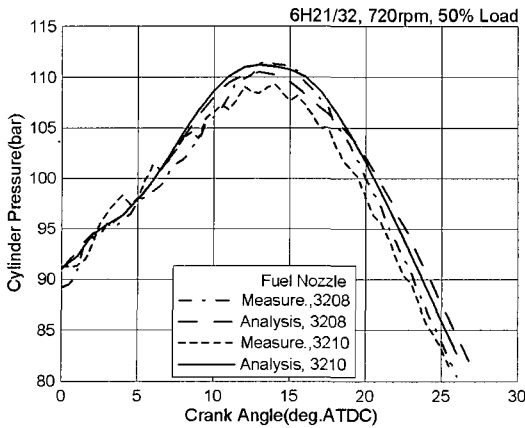


Fig. 2 Cylinder pressure curves at 50% load

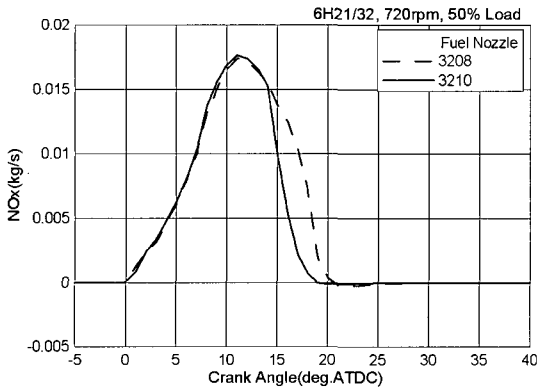


Fig. 3 NOx emission curves at 50% load

2.2 성능 해석 결과

Fig. 1에 50% 부하에서 각 연료분사 노즐에 대한 계산 결과의 열발생율을 실험 결과와 비교하여 나타내었다. 그림과 같이 전체적으로 해석 결과는 실험 결과와 유사하며, 특히 착화 지연에 의한 연소 초기 급격한 연소 상승 및 다소의 하강으로 특징되는 예혼합 연소가 잘 예측되고 있음을 알 수 있다. 연소 Peak 이후에 3208 연료분사 노즐이 다소 높은 연소량을 보인다. 이는 연료분사시스템 실험으로부터 측정된 연료분사율의 그림에서 나타났듯이 크랭크 각 11도 이후의 3208 연료분사 노즐의 연료분사량이 더 많기 때문이다.

Fig. 2에 각 연료분사 노즐에 대한 계산 결과의 연소실 압력을 실험 결과와 비교하여 나타내었다. 그림과 같이 초기 압력 상승 시에는 비슷한 경향을

보이나, 최고 압력 이후에는 3208 연료분사 노즐이 다소 큰 압력을 보이고 있으며, 이러한 경향은 해석 및 실험 결과에서 동일하게 나타나고 있다.

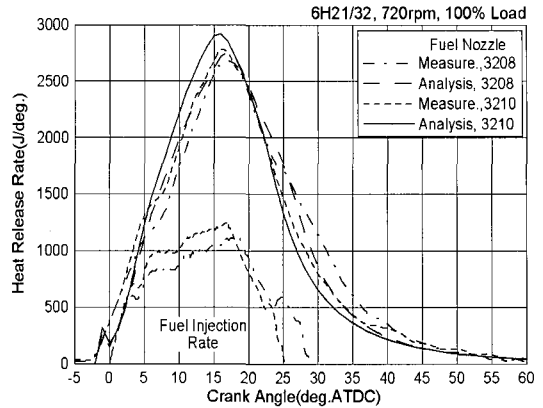


Fig. 4 Heat release rate curves at 100% load

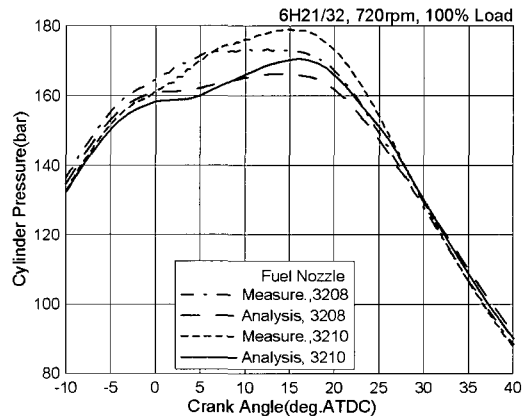


Fig. 5 Cylinder pressure curves at 100% load

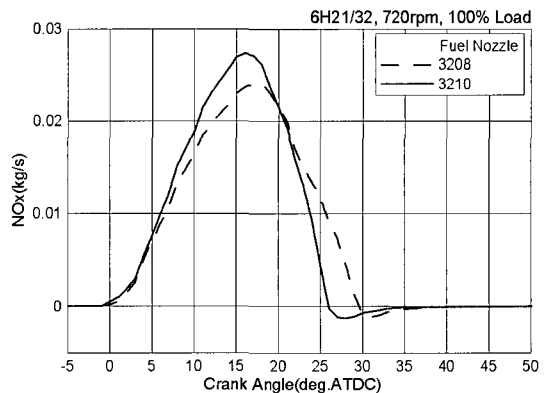


Fig. 6 NOx emission curves at 100% load

Fig. 3에 각 연료분사 노즐에 따른 NOx 발생량을 크랭크 각도에 따라 나타내었다. 초기에는 각 연료분사 노즐에 따라 유사한 경향 및 크기를 보이나, 크랭크 각도 14도 정도 이후에는 3208 노즐이 더 많은 NOx 발생량을 보인다. 이는 Fig. 1에 나타나듯이 크랭크 각도 11도 정도에서 3208 연료노즐에서 분사된 연료량이 3210에 비해 상당히 많으며, 이에 따라 이 시기에 발생된 열발생량이 많은 것에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 4에 각 연료분사 노즐에 따른 100% 부하에서 해석 결과의 열발생율을 실험 결과와 비교하여 나타내었다. 초기 최대 열발생율 이전에는 3210 연료분사 노즐이 3208보다 큰 열발생율을 보이나, 이후에는 3208 연료분사 노즐이 큰 열발생율을 보이는데, 이는 실험 및 해석 결과가 동일한 결과이다.

Fig. 5에 각 연료분사 노즐에 따른 100% 부하에서 해석 결과의 연소실 압력을 실험 결과와 비교하여 나타내었다. 초기 다소 높은 압축 압력으로 3208 연료분사 노즐이 높은 압력을 보이나, 점차 3210 연료분사 노즐이 커져 크랭크 각도 7도 정도 이후에는 3210 연료분사 노즐이 3208 연료분사 노즐 보다 연소실 압력이 크다. 그러나 크랭크 각도 30도 이후에는 반대의 경향을 보이며, 이는 열발생율의 영향이다. 이러한 전체 경향은 실험 및 해석 결과가 유사하며 이에 따라 해석 결과가 타당함을 알 수 있다.

Fig. 6에 각 연료분사 노즐에 따른 100% 부하에서 해석 결과의 NOx 발생량을 나타내었다. 그림과 같이 초기 NOx 발생량은 3210 노즐이 크나 후반에는 3208 노즐이 커서 전체적으로 총 NOx 발생량은 유사하다.

Fig. 7은 각 연료분사 노즐 및 부하에 따른 해석 결과로 연료소비율 및 NOx 발생량을 실험 결과와 비교하여 나타내었으며, 상대적인 경향을 파악하기 위해 50% 부하를 기준으로 변화 폭을 나타내었다. 정성적으로 해석 결과의 연료소비율은 실험 결과와 동일한 결과를 보이며, NOx 발생량도 동일하다. 특히 본 검증의 주요 관점은 50% 부하에서 3210 노즐에 비해 3208 노즐이 과도한 NOx 발생량을 보이는 반면, 100% 부하에서는 비슷한 NOx 발생

량을 보이는 원인을 파악하는 것인데, Fig. 3 및 6에도 나타나듯이 연료분사 특성에 기인한 것임을 알 수 있다. 정량적으로는 부하 변동에 따른 연료소비율에서 3208 연료분사 노즐은 0.1g/kWh의 매우 적은 실험 및 해석 결과의 오차를 보이고 있으며, 3210 연료분사 노즐도 전반적으로 200g/kWh 수준의 연료소비량에 비해 1.2g/kWh의 적은 오차를 보인다. 부하 변동에 따른 NOx 변화율은 3208 및 3210 연료분사 노즐에서 해석결과의 변화율이 실험 결과의 절반 정도이다. 이에 따라 성능 해석을 통한 NOx 발생량의 해석 결과보다 실제 변화량은 두 배 정도 많은 것으로 평가되어야 할 것으로 판단되며, 연소 모델 개선이 필요하다.

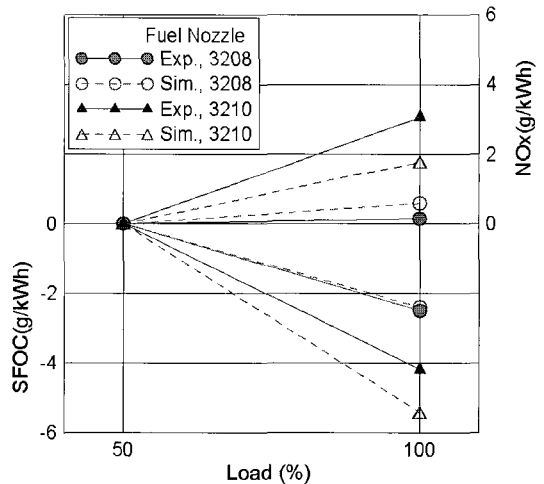


Fig. 7 Comparisons of simulation results with experiment on SFOC and NOx

3. NOx 저감형 연료분사 노즐 선정을 위한 성능 해석

3.1 성능 해석 조건

NOx를 저감하기 위한 연료분사 노즐을 선정하기 위해서 BOOST S/W를 사용한 성능 해석을 수행하였다. 연료분사 노즐은 다음 Table 3과 같이 연료분사 노즐 홀 및 갯수를 변경하여 총 12가지 경우에 대해서 수행하였으며, 해석 대상은 6H21/32 엔진의 720rpm 및 50% 부하 조건이다.

3.2 성능 해석 결과

해석 결과의 연료소비율 및 NOx 발생량 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 전반적으로 NOx가 감소하면 연료소비율이 증가하는 관계를 보이고 있다. NOx 저감 효과는 3610 노즐이 가장 크며 반면 연료소비율의 증대도 크다. 연료소비율의 증가가 최소이며 NOx를 감소시킬 수 있는 노즐은 3211 및 3310 노즐이나 NOx 저감량이 작다. 이들의 중간적인 결과를 보이는 노즐은 3410 및 3212 노즐이다.

연료분사 노즐 개수가 10개를 초과한 경우는 연료분무가 서로 가까워짐 따라 인접한 연료분무가 서로 충돌할 수 있다는 보고⁽⁷⁾에 따라 노즐 홀 개수가 10개 이하이고 NOx를 저감할 것으로 계산된 3310, 3410 및 3610 연료분사 노즐을 최종 선정 및 제작하여 힘센 6H21/32 엔진에서 성능 실험을 수행하였다.

Table 3 Fuel injection nozzles for performance simulation

변경 변수	고정 변수	변경 값
연료분사 노즐 홀 지름	홀 개수	10개 0.28, 0.30, 0.32, 0.33, 0.34, 0.36mm
		11개 0.32, 0.33mm
		12개 0.32, 0.33mm
연료분사 노즐 홀 개수	홀 지름 0.32 mm	8, 9, 10, 11, 12개

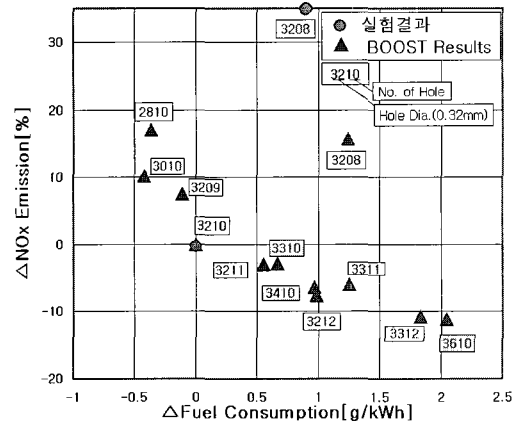


Fig. 8 Performance simulation results with changing fuel injection nozzle

4. 연료분사 노즐에 따른 엔진 성능 측정

힘센 6H21/32 엔진을 이용한 성능 실험은 720 및 900rpm에서 수행되었다. 720rpm인 경우는 3210 및 3410 연료분사 노즐에 대해서 측정 되었으며, 900rpm인 경우는 3210, 3310, 3410 및 3610 연료분사 노즐에 대해서 측정이 되었다.

Fig. 9에 힘센 6H21/32 엔진, 720rpm에서 측정된 3210 및 3410 노즐에 대한 NOx 및 연료소비율 변화를 3210 노즐을 기준으로 해석 결과와 비교하여 나타내었다. 그림과 같이 실험 결과의 3410 연료분사 노즐은 16%의 많은 NOx 저감 및 2.6g/kWh의 적은 연료소비율 증가를 보인다. 해석 결과의 3410 연료분사 노즐은 실험 결과와 동일한 경향을 보이나 NOx 저감율은 6.5%, 및 연료소비율 증가폭은 0.95g/kWh로 실험 결과보다 작다. 연료소비율은 총량 값에 비해 1% 내외의 변화율로 큰 차이는 없으나 NOx는 해석 결과가 실험 결과의 절반 정도로 이전 해석 결과와 유사하다.

Fig. 10에 6H21/32 엔진, 900rpm에서 측정된 3210, 3310, 3410 및 3610 연료분사 노즐에 대한 성능 측정 결과를 나타내었다. 연소실 압력은 연료분사 노즐 홀 지름이 커질수록 증가하는 경향이 있으며, 3610 노즐에서 큰 폭의 상승으로 3210 노즐보다 11.9bar 상승하였다. 이는 지름의 증가에 따른 연료분사 노즐 홀 총 단면적 증가로 초기 분사된 연료량이 많아진 것에 기인하는 것으로 판단된다. 연료소비율은 연료분사 노즐 홀 지름이 커짐에 따라 증가하며, 3410 노즐에서 최대 3.1g/kWh 증가되었다. 반면 3610 노즐에서 다소 감소되었다. 연소실 최대 압력이 높아짐에도 연료소비율이 증가하는 것은 노즐 홀 총 면적이 커짐에 따라 연료분사 초기 분사량이 증가하나, 노즐 홀 지름이 커짐에 따라 연료 분무 특성이 다소 악화된 것으로 판단된다. 반면 3610인 경우는 연소실 최대 압력이 많이 커짐에 따라 연료소비율이 크게 악화되지 않았다. NOx 발생량은 노즐 홀 지름이 커질수록 저감되어 3410 노즐인 경우는 3210 보다 11.6% 저감되었다. 반면 3610 노즐은 3410 노즐보다 다소 증가하였으며 이는 높아진 연소실 압력에 기인

한 것으로 판단된다. 배기 가스 온도는 3610 연료 분사 노즐의 경우를 제외하고 큰 차이가 없다. 3610의 경우는 빠른 연소에 기인하는 단축된 연소 기간에 따라 배기가스 온도가 낮다.

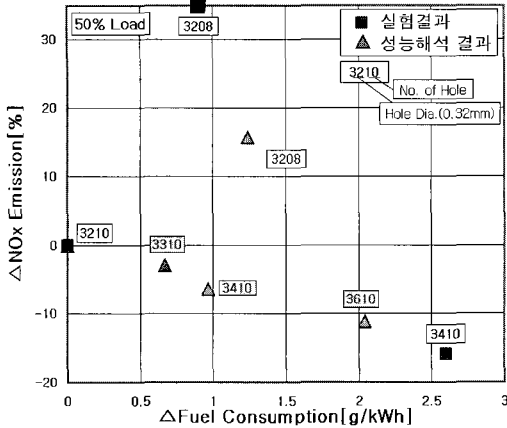


Fig. 9 Comparisons of performance simulation results of SFOC-NOx relation with measurements on 6H21/32 and 720rpm

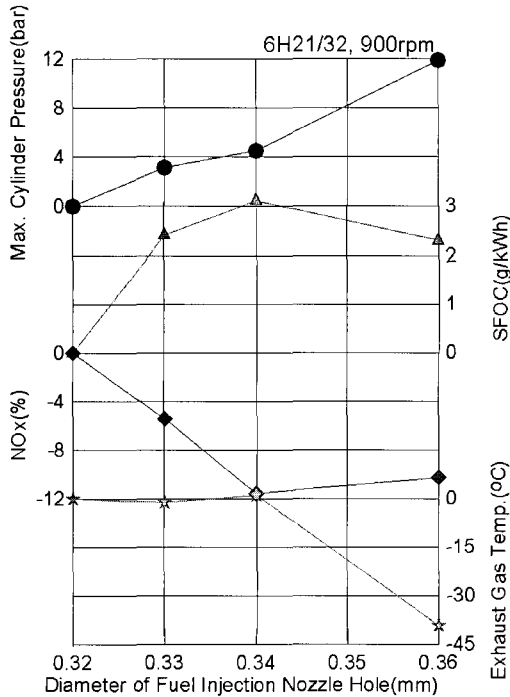


Fig. 10 Experimental results of the variation of engine performance on 6H21/32 and 900rpm

5. 결 론

중형 디젤, 현대 힘센 H21/32 엔진의 NOx 저감을 위한 연료분사 노즐을 선정하기 위한 성능 해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연료분사 노즐 변경에 따른 성능 해석 결과는 연료소비율에서 실험 결과와 정성 및 정량적으로 유사한 결과를 얻었으며, NOx는 정성적으로 동일한 결과를 얻었으나, 정량적으로는 차이를 보인다.

2. 성능 해석을 통해 NOx 및 연료소비율에 최적의 연료분사 노즐을 선정하였으며, 실험 결과, 홀 지름 0.34mm의 연료분사 노즐이 기존의 0.32mm 지름의 노즐보다 720rpm에서는 16%, 900rpm에서는 11.6%의 NOx 저감을 보인 반면, 최대 3.1g/kWh의 적은 연료소비율 증가를 보였다.

참고문헌

- [1] N. Watson and M.S. Janota, "Turbocharging the Internal Combustion Engine", Macmillan Press LTD, 1982.
- [2] Heywood, J. B., "Internal Combustion Engines Fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1988.
- [3] H. M. Koegeler, G. Regner, T. Sams and K. Gschweidl, "Using Simulation and Optimization Tools to Decide Engine Design Concepts", SAE 2000-01-1267, 2000.
- [4] Hiroaki Kimura, Satoru Goto, Takahisa Mimura and Katsuhisa Ikawa, "NOx Reduction Study on Four Stroke, Slow Speed Engine for Marine Propulsion Use", ASME 2000.
- [5] Hiroyasu, H. and Kadota, T., "Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emission part 1: Combustion

Modeling", Bulletin of JSME, vol. 26, no. 214, 1983.

- [6] Chmela, F. and Orthaber, G.. "Rate of Heat Release Prediction for Direct Injection Diesel Engines Based on Purely Mixing Controlled Combustion", SAE Detroit, 1999.
- [7] Shusuke Okada and Shunji Hamaoka, "The Development of Very Low Fuel Consumption Medium Speed Diesel Engine", CIMAC 2001.



안광헌 (安光憲)

1960년 1월생. 1983년 경희대학교 기계공학과 졸업(학사). 1985년 홍익대학교 정밀기계공학과 졸업(석사). 1985년 ~1989년 산업자원부 국립공업기술원 재직. 1989년 ~ 현재 현대중공업 엔진기술개발부 재직중.



김주태 (김주태)

1957년 3월생. 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1995년 울산대학교 기계공학과 졸업(석사), 1983년 ~ 현재 현대중공업 엔진기계사업본부 재직중

저 자 소 개



김기두 (金基斗)

1968년 1월생. 1990년 충북대학교 기계공학과 졸업(학사). 1992년 한양대학교 기계공학과 졸업(석사). 1992년 ~ 현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.



윤옥현 (尹旭鉉)

1970년 8월생. 1997년 울산대학교 기계공학과 졸업(학사). 1999년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사). 1999년 ~ 현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.



김병석 (金秉洙)

1972년 2월생. 1998년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사). 2000년 부산대학교 기계공학과 졸업(석사). 2000년 ~ 현재 현대중공업 산업기술연구소 재직중



하지수 (河芝洙)

1960년 6월생. 1983년 서울대학교 항공공학과 졸업(학사). 1985년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(석사). 1991년 한국과학기술원 항공공학과 졸업(박사). 1991년 ~ 현재 현대중공업 산업기술연구소 재직 중.