

## 선박용 2행정 디젤기관의 성능시뮬레이션 프로그램 개발

최재성<sup>†</sup> · 정찬호<sup>1</sup> · 조권희<sup>2</sup> · 이진욱<sup>2</sup> · 하태범<sup>3</sup> · 김형수<sup>3</sup>

(원고접수일 : 2009년 7월 31일, 원고수정일 : 2009년 10월 7일, 심사완료일 : 2009년 10월 28일)

### Development of Simulation Program of Two-Stroke Marine Diesel Engines

Jae-Sung Choi<sup>†</sup> · Chan-Ho Jeong<sup>1</sup> · Kwon-Hae Cho<sup>2</sup> · Jin-Uk Lee<sup>2</sup> · Tae-Bum Ha<sup>3</sup> · Houg-Soo Kim<sup>3</sup>

**요 약 :** 대기오염 및 지구온난화와 관련하여 디젤기관의 친환경, 고효율에 대한 요구가 선박기관에도 강화되고 있다. 이와 관련하여 많은 새로운 기술들이 연구, 적용되고 있으나, 이들은 주로 신조선에 관심이 집중되어 있다. 선박은 건조된 후 비교적 장기간 이용되기 때문에 이미 운항중인 현존선에 대하여도 이에 관한 연구가 필요하다고 판단되며 이는 주로 엔진성능의 개선에 관한 연구가 될 것이다.

이 논문은 선박용 2행정 디젤기관의 성능을 시뮬레이션 하기위한 프로그램을 개발한 결과를 보고한다. 현존선의 엔진성능은 운전시간의 경과에 따라 열화되어 가기 때문에 엔진의 열화성능을 예측할 수 있도록 한 것이 본 연구에서 개발된 프로그램의 특징이다. 예측결과는 엔진메이커에서 사용하고 있는 TOP-CODE 프로그램의 계산결과와 비교하였으며, 양호한 결과를 보이고 있음을 확인하였다.

**주제어 :** 선박용 디젤엔진, 2행정기관, 성능시뮬레이션, 용적근사모델, 성능열화

**Abstract:** The requirement of high efficiency and low emission for marine diesel engines are being enforced because of air pollution and climate change on the earth. In connection with these, many new technologies are considered. But they are mainly for new building ship. It is necessary to be concerned about the improvement of engine performance for existing ship.

In this paper, the simulation program for performance of marine two-stroke diesel engine was developed to predict the deteriorating performance according to elapsed time for existing ship. The result was compared with the result of the program named TOP-CODE which was used by engine maker and checked to be shown good agreement between them.

**Key words:** Marine Diesel Engine, Two-Stroke Engine, Performance Simulation, Filling & Emptying method, Performance Deterioration

### 1. 서 론

최근 유류가의 급격한 상승으로 선박용 디젤기관은 에너지 절감 및 고효율에 관하여 강한 요구를 받고 있으며, 한편으로 지구온난화 및 대기오염문

제 등의 이유로 대체에너지의 개발과 친환경 기술 개발에 대한 요구가 더욱 강화되고 있다. 이와 관련하여 다양한 대책들이 강구되고 있으나 선박기관의 경우 주로 새로운 기술과 신조선에만 관심이 집

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교, E-mail: jschoi@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4262)

1 한국해양대학교 대학원

2 한국해양대학교

3 (사) 한국선급

중되고 있다. 그러나 선박은 20년 이상 장기간 이용되기 때문에 기존 선박에 대하여서도 깊은 관심을 기울여야할 것으로 생각된다.

선박용 디젤기관은 다른 동력기관과 비교하여 열효율이 높기 때문에 지구온난화의 주 원인인 CO<sub>2</sub>의 배출원의 면에서는 비교적 유리한 편이며, 저질 연료를 사용하고 있기 때문에 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 등의 배출저감대책이 중요한 관심대상이 되고 있다. 일반적으로 선박은 세심한 보수유지관리로 그 성능을 유지해가지만 장시간의 운항으로 그 성능은 점점 열화되고 운전조건 또한 변화되기 때문에 운항조건에 최적화된 기관의 운전관리야말로 경제적인 이유로 뿐만 아니라 지구온난화의 관점에서 매우 유익한 대책이 될 수 있다. 따라서 장기간의 운전으로 약화된 선박기관의 현재의 운전상태를 정확히 파악하고 분석, 평가하여 이를 바탕으로 성능을 개선시킬 수 있는 방안을 구체적으로 제시하기 위해서는 그 열화정도를 정량적으로 판단할 필요가 있다.

선박용 디젤기관의 성능을 예측할 수 있는 많은 프로그램들이 이미 개발되어 설계에 활용되고 있다. 필자들은 기존 선박에의 적용을 대상으로 하는 성능예측프로그램을 개발하고자 하였다. 즉, 가능한 한 많은 데이터를 필요로 하지 않으며, 경년변화의 영향을 검토할 수 있는 실용성에 중점을 둔 프로그램을 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 흡배기계통에 용적근사모델(Filling & Emptying methods)을 적용하였으며, 프로그램의 기본적인 사항에 관해서는 준정상모델(Quasi-steady methods)을 적용한 전보[1]에서 이미 언급하였기 때문에 본 논문에서는 변경 또는 추가된 부분에 대하여만 언급하였다. 개발된 프로그램의 계산결과는 엔진제작자가 이미 개발하여 이용하고 있는 시뮬레이션 프로그램(TOP-CODE)의 계산결과와 비교하여 예측결과의 신뢰성을 확인하였다.

따라서 본 연구의 결과로 개발된 성능예측 프로그램은 장시간운전으로 야기되는 성능저하정도를 정량적으로 예측하여 열화요소의 개선에 의한 성능회복정도의 정량적 예측에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 성능시뮬레이션 프로그램

### 2.1 가스교환과정의 모델링

소기과정에서의 실린더내 상태를 정확하게 해석하기 위해서는 배기가스와 유입공기와의 혼합 상태를 실제로 가깝게 묘사하는 것이 중요하다. 소기과정의 모델링에 관하여는 과거 많은 연구결과가 보고되었으며, 단일영역모델(완전혼합소기, 완전층상소기 등)과 다영역모델(3영역모델)로 분류된다. 최근에는 3차원 시뮬레이션 기법이 발달하여 CFD에 의하여 실린더내의 혼합 상태를 자세히 파악할 수 있게 되었으며 이들의 결과는 새로운 엔진의 개발에 유용하게 이용되고 있다.[2-8] 그러나 실용성과 기존 엔진에의 적용 등을 고려할 때 유용하면서도 이용하기에 간편한 예측방법이 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 선박용 대형디젤기관이 유니플로우 소기방식을 채택하고 있음에 유의하여 다음과 같은 방법을 고안하여 계산의 간소화를 꾀하였다. 즉 소기과정에서 실린더로부터 배기측으로 배출되는 가스의 누적총량이 소기포트 열림시기에서의 실린더내 가스량과 같아질 때까지 혼합가스가 배출되는 것으로 하고 혼합상태는 배기밸브를 통하여 유출하는 가스량과의 비율에 따라 혼합정도를 고려하는 혼합계수  $\beta$  를 이용하여 나타낸다. 혼합계수  $\beta$  는 실린더내 가스의 질량비의 함수( $\delta$ )를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\delta_{\theta} = 1 - \Sigma m_{out} / m_{so} \quad (1)$$

$$\beta = f(\delta_{\theta}) \quad (\theta_{so} \leq \theta \leq \theta_{sc}) \quad (2)$$

$$T_{out} = (T_{exho} - T_c) \cdot \beta + T_c \quad (3)$$

여기서  $\Sigma m_{out}$  은 계산시점까지의 유출가스총량이다. 그리고,  $m_{so}$  와  $T_{exho}$  는 소기포트가 열리는 시점에서의 실린더내 가스량 및 온도,  $T_{out}$  는 배출가스의 온도,  $T_c$  는 실린더내 가스의 온도를 나타낸다. 본 연구에서 적용하고 있는 혼합계수  $\beta$  를 이용하면 특별한 경우의 소기영향을 파악할 수 있는 효과적인 방법이 될 수 있다고 판단된다. 즉,

$\beta = 0.0$ 은 완전혼합소기를,  $\beta = 1.0$ 은 완전 층상 소기를 의미하며, 소기과정의 진행에 따라 혼합계 수를 변화시켜 실제 실린더내 가스의 혼합상태를 근사하여 나타낼 수 있다.

## 2.2 배기리시버의 모델링

각 실린더로부터 배출되는 배기가스는 배기리시 버내의 상태에 밀접하게 영향을 미친다. 배기리시 버내의 압력 및 온도변화를 계산하기 위하여는 전 실린더를 포함하여야 하나 본 연구에서는 실린더로 부터의 배출상태가 모든 실린더에 있어서 동일하고 가정하여 한 실린더만의 계산결과를 배기위상 만을 고려하여 활용함으로써 계산의 간략화를 꾀 하였다.

또한, 배기리시버의 용적은 배기터빈입구의 상태 변화에 직접적으로 영향을 미치고, 그 결과는 터빈 일의 계산에도 영향을 미친다. 따라서 배기리시버 의 체적(Vex)은 실린더의 행정용적(Vh)과 실린더 수(Z)를 고려하여 다음과 같이 나타내었다.

$$VR = Vex/(Vh \cdot Z) \quad (4)$$

과급기 및 기관전체의 성능계산결과가 TOP-CODE의 계산결과와 일치하도록 배기리시버의 용 적 및 터빈노즐의 면적을 적절히 선택하였다.

## 2.3 과급기의 모델링

본 연구에서는 압축기 출구의 상태가 일정하다는 조건으로 취급하고 있기 때문에 계산결과로부터 압 축기 입출구상태를 이용하면 요구되는 압축기의 압 축일을 구할 수 있다. 또한 터빈의 경우 순간 터빈 일을 구하고 이를 한 사이클동안 적분하면 터빈일을 구할 수 있다. 단 터빈효율은 일정한 것으로 취 급한다. 이들 결과로부터 계산조건에서의 요구되는 과급기의 종합효율 $\eta_{tot}$ 를 구할 수 있으며 이로부터 계산결과를 음미할 수 있다.

$$W_c = C_{pa} \cdot G_a \cdot T_a \left\{ \left( \frac{P_b}{P_a} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1 \right\} \quad (5)$$

$$W_t = \int C_{pa} (G_a + G_f) T_t \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{P_a}{P_T} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right\} d\theta \quad (6)$$

$$\eta_{tot} = \eta_c \cdot \eta_t \cdot \eta_m = W_c / W_t \quad (7)$$

여기서  $G_a$  및  $G_f$ 는 각각 공기 및 연료의 유량을, 첨자 a와 b는 각각 대기상태(공기), 압축기 출구상 태, c와 t는 각각 압축기와 터빈을 나타낸다.

## 3. 예측계산결과와 비교 고찰

### 3.1 대상기관 및 계산모델

개발된 프로그램의 신뢰성을 확인하기 위하여 비 교자료가 있는 기관을 계산대상기관으로 선정하였 다. 대상기관은 5S60MCE 디젤기관으로 Turbo Compound System을 채용하고 있으며, 출력조 정(derating)된 기관이다. Table 1에 대상기관 의 사양을 보인다.

Figure 1은 한 실린더만을 대상으로한 계산모델 을 나타낸다. 즉, 실린더 입구측인 급기메니폴드 내의 상태는 사이클 중 일정한 것으로 취급하며, 배기리시버 내의 상태는 사이클 중 변동하며 다실 린더의 영향이 고려된다. 과급기 즉 압축기와 터빈 은 기관입구와 급기메니폴드, 배기리시버와 기관출 구사이에 설치한 오리피스로 모델링 하였다. 또한 계산은 배기밸브가 열리는 시점부터 한 사이클 동 안 이루어지고 계산의 종료는 흡입공기량이 수렴했 을 때 종료하는 것으로 하였다.

### 3.2 성능영향인자의 비교고찰

많은 인자가 기관성능에 관계하지만 본 연구에서 는 소기과정에 관계하는 인자들에 관하여 이들이 계산결과에 미치는 영향을 비교분석하고, 실제 기 관의 성능예측에 적합한 각 인자들의 적용에 관하 여 고찰하였다. 각 인자들의 영향만을 분석하기 위 하여 계산 시작시의 실린더내 상태를 일정하게 하 여 비교하였다.

Table 1: Specification of test engine

Engine Model		5S60MCE
Bore / Stroke		600 / 2292 mm
MCR (1Cyl.)	BHP/rpm	2040kW/105rpm
	Pme	18.0 bar
	SFOC	170.0 g/kWh
NCR (1Cyl.)	BHP/rpm	1530kW/102rpm
	Pmi	14.3 bar
	SFOC	163.4 g/kWh

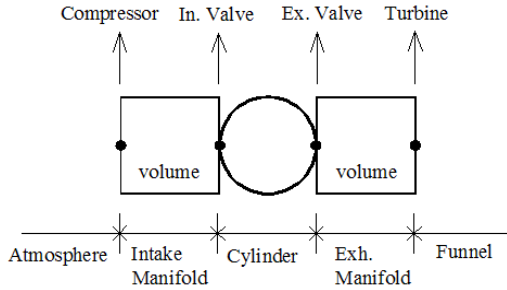


Figure 1: Calculation model of test engine

3.2.1 배기밸브 유량계수의 영향

소기과정에 있어서 실린더내 상태는 흡기포트 및 배기밸브의 유량계수에 영향을 받는다. 그러나 배기밸브의 열림면적이 소기포트의 열림면적 보다도 작기 때문에 배기밸브의 영향이 크게 나타난다. Figure 2는 배기밸브의 유량계수(C<sub>v</sub>)에 의한 영향을 나타낸 것이다. 각 계산조건에서의 유량계수는 다음과 같이 가정하였다. Case 1은 밸브의 유량계수가 밸브의 양정에 관계없이 일정하다고 가정한 경우이며 Case 2 및 Case 3은 밸브의 유량계수가 밸브양정에 따라 변하는 경우이다.

- Case 1 : C<sub>v</sub> = C<sub>DE</sub> (constant)
- Case 2 : if L<sub>v</sub>/D<sub>v</sub> ≤ 0.25, C<sub>v</sub> = 0.3 ~ C<sub>DE</sub>  
if L<sub>v</sub>/D<sub>v</sub> > 0.25, C<sub>v</sub> = C<sub>DE</sub>
- Case 3 : if L<sub>v</sub>/D<sub>v</sub> ≤ 0.25, C<sub>v</sub> = 0.0 ~ C<sub>DE</sub>  
if L<sub>v</sub>/D<sub>v</sub> > 0.25, C<sub>v</sub> = C<sub>DE</sub>

여기서 C<sub>v</sub>:밸브유량계수, L<sub>v</sub>:밸브리프트, D<sub>v</sub>:밸브 직경, C<sub>DE</sub>:최대밸브유량계수 이다.

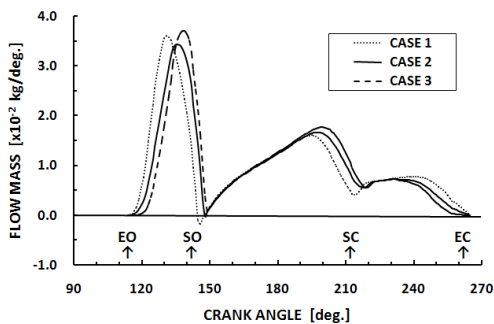


Figure 2: Comparison for the flow coefficient effects of exhaust valve.

Figure 2로부터 유량계수의 영향은 배기분출시와 소기말기 및 그 이후의 배기유량에 나타나고 있음을 알 수 있다. TOP-CODE 와의 비교에 의하여 Case 2의 경우가 좋은 일치를 나타내고 있음이 파악되었다.

3.2.2 혼합계수의 영향

본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 실린더 내 새롭게 유입된 공기와 배기가스의 질량비를 이용하여 표현하는 혼합계수 β 를 가정하여 소기과정에 적용하고, 각각의 경우에 대한 계산결과를 비교 검토함으로써 실제 기관의 소기과정을 예측하는데 필요한 유용한 자료를 얻고자 하였다. 혼합계수 β 는 가스질량비의 함수로 다음과 같은 경우들을 가정하여 적용하였다.

$$\beta = (\delta_\theta)^2 \tag{Eq.A}$$

$$\beta = \sqrt{\delta_\theta} \tag{Eq.B}$$

Figure 3과 4는 혼합계수가 다른 경우의 실린더내 온도와 압력의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 비교를 위하여 완전혼합소기(β = 0.0)와 완전층상소기(β = 1.0)의 경우를 함께 나타내었다. 그림으로부터 혼합계수에 의한 영향을 파악할 수 있다. 즉, 혼합계수의 영향은 가스의 온도변화에는 민감하지만 압력변화에는 덜 민감한 것으로 파악되었다. 또한, 유니플로우 소기방식에 있어서도 상당한 가스의 혼합이 이루어지고 있는 것으로 판단된다. Table 2는 혼합계수에 따른 계산결과와의 비교를 나타낸 것이다. (Eq.A)의 경우가 TOP-CODE에 의한 예측결과와 유사한 결과를 나타내고 있는 것으로 파악되었다.

Table 2: Comparison for calculation results by mixing factor β.

Case	Air mass [kg/cyc.]	Pcomp [bar]	Pmax [bar]	Tmax [K]	Pmi [bar]
TOP-CODE	1.487	122.6	131.0	1741	13.89
β = 0.0	1.364	121.9	129.7	1920	13.50
β = Eq.A	1.494	122.8	130.3	1769	13.54
β = Eq.B	1.779	129.4	136.5	1555	14.02
β = 1.0	2.080	134.3	141.1	1357	14.39

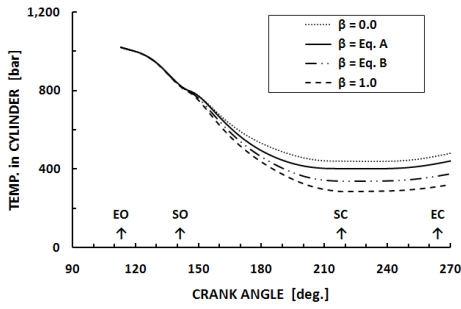


Figure 3: Temperature variations in cylinder by mixing factor  $\beta$ .

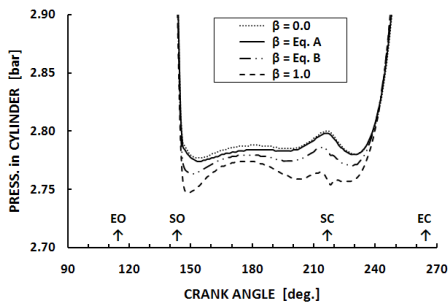


Figure 4: Pressure variations in cylinder by mixing factor  $\beta$ .

3.2.3 배기리시버의 영향

배기리시버의 체적( $V_{ex}$ )은 배기리시버내의 압력 변동에 영향을 미치고 결과적으로 터빈의 팽창일에 영향을 미친다. 따라서 배기리시버의 체적은 급기 압력 등 계산결과에 영향을 미치게 된다. Figure 5는 배기리시버의 체적의 영향을 나타낸 것으로 체적이 증가하면 압력맥동 폭이 감소함을 나타내고 있다. 계산결과와의 비교로부터  $VR = 4.0$  인 경우가 가장 적절한 것으로 판단되었다.

3.3 계산결과와의 비교 (TAP-CODE 결과와 비교)

이상의 검토결과를 활용하여 대상기관의 기관성능을 예측한 결과를 TOP-CODE에 의한 결과와 비교하여 나타낸 것이 Figure 6~8이다. Figure 6은 소기과정에 있어서 실린더내 압력변화를 비교하여 나타낸 것이며, Figure 7은 소기포트 및 배기밸브를 통과하는 가스의 유량에 대한 계산결과와의 비교를 나타내고 있다. 그림으로부터 소기과정 초기에 소기측으로의 역류가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. Figure 8은 배기리시버내

의 압력변동을 비교하여 나타낸 것이다.

이상의 비교들로부터 양자는 비교적 좋은 일치로 보이고 있는 것을 알 수 있다. 소기포트가 닫힌 이후에 있어서 실린더내 압력의 계산 결과가 TOP-CODE 결과보다 약간 높게 나타나고 있고, 배기리시버내의 압력변동에 폭이 약간 작게 나타나고 있으나, 이는 터빈노즐의 면적 또는 유량계수 등 배기계의 영향에 의한 것으로 파악되었다.

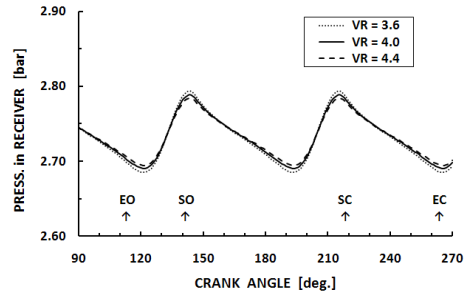


Figure 5: Comparison for the volume effects of exhaust receiver

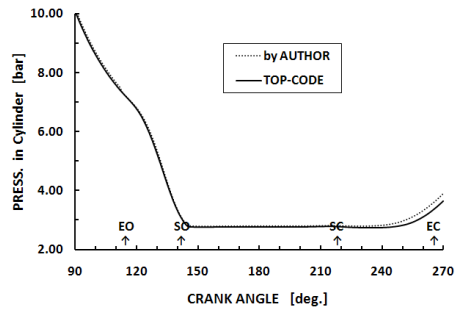


Figure 6: Calculation results of pressure variation in cylinder

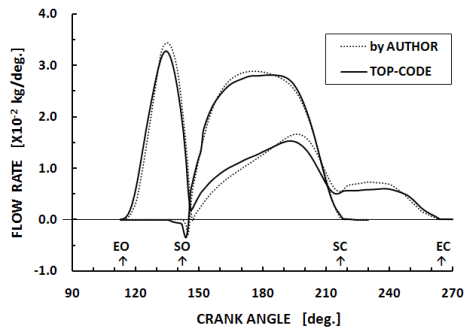


Figure 7: Calculation results of gas flow rate through port and valve

Table 3은 계산결과와 비교를 나타낸 것으로 대체적으로 매우 양호한 계산결과를 보이고 있다. 최고압력 등 연소사이클에 있어서의 약간의 차이는 열발생율의 패턴에 의한 것으로 실제에 접근한 데이터를 이용하면 더욱 좋은 일치를 보일 것으로 판단된다. 계산결과에 있어서 과급기 효율은 계산결과로부터 요구되는 과급기효율을 나타낸 것이다.

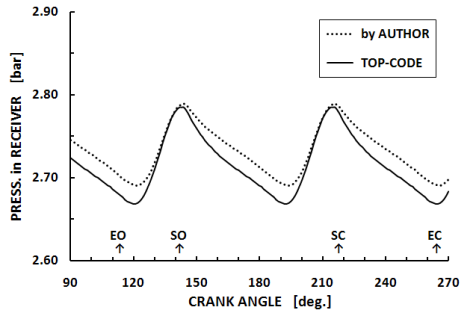


Figure 8: Calculation results of pressure variation in exhaust receiver

Table 3: Comparison for calculation results between TOP-CODE's and Author's

Case	Air mass (kg/cyc.)	Ps (bar)	Pcomp (bar)	Pmax (bar)	Tmax (K)	TC-EF F. (%)	Pmi (bar)
TAP-CODE	1.487	2.80	122.6	131.0	1741	64.0	13.89
AUTHOR	1.485	2.80	122.8	130.1	1775	62.5	13.54

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실선의 성능악화를 예측할 수 있는 방법을 개발 제시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 기관의 운전시간 경과에 따른 성능변화와 개선효과를 정량적으로 파악하기 위해서 본 연구에서 개발된 프로그램이 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 배기리시버의 상태계산에 있어서 한 실린더만의 계산결과를 이용하여 다실린더 기관의 효과를 고려할 수 있는 방법을 개발하였다.

(3) 밸브리프트가 작은 경우 밸브유량계수의 취급이 중요하다.

(4) 유니플로우 소기방식에서도 상당한 가스의 혼합이 이루어지고 있는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 (사)한국선급의 지원으로 수행된 연구 결과임.

#### 참고문헌

- [1] J.S. Choi et al., "An investigation on the performance improvement of marine diesel engines for existing ship", Proceedings of 3rd PAAMES and AMEC2008, pp. 923-927, 2008.
- [2] R.S. Benson and N.D. Whitehouse, Internal Combustion Engines, Pergamon Press, pp. 203, 1979.
- [3] N.P. Kyrtatos and I. Koumbarelis, "A Three-Zone Scavenging Model for Two-Stroke Uniflow Engines", Transactions of ASME, vol.110, pp. 531-537, July 1988.
- [4] A. Carapanayotis and M. Salcudean, "Mathematical modeling of the scavenging process in a two-stroke diesel engine", Transactions of ASME, vol. 110, pp. 538-546, July 1988.
- [5] J.I. Ramos, "Internal Combustion Engine Modeling", Hemisphere Publishing Co., pp. 384, 1989.
- [6] 고대권, 최재성, "2행정사이클 디젤기관의 가스 교환과정 시뮬레이션", 한국박용기관학회지 제 18권, 제2호 pp. 228-236, 1994.
- [7] 고대권, 최재성, "저속 2행정디젤기관의 소기특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제19권, 제3호 pp. 202-210, 1995.
- [8] MAN B&W DIESEL A/S, "Process Development", Conference Paper (Meeting of Licensees), 2006.

## 저 자 소 개



### 최재성(崔在星)

1974년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업(공학사), 1976년 한국해양대학교 대학원(공학석사), 1986년 일본 Kyoto Univ. 대학원(공학박사), 2009. 8. 현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수.



### 김형수(金亨洙)

1997년 목포해양대학교 기관공학부 졸업(공학사), 2002년 한국해양대학교 기관공학부 졸업(공학석사), 2006년 일본 Kobe Univ. 해양기계 에너지공학 졸업(공학박사), 2009. 8. 현재 (사) 한국선급 기술연구소 선임 연구원



### 정찬호(鄭燦皓)

2005년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업(공학사), 2005-2008년 (주)범진상운 기관사, 2009. 8. 현재 한국해양대학교 대학원.



### 조권회(趙權回)

1979년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수



### 이진욱(李鎭旭)

1992년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업(공학사), 2007년 한국해양대학교 대학원(공학석사), 1992-1997년 한진해운(주) 기관사, 1998-2009년 한국해양대학교 실습선, 현재 한국해양대학교 부교수



### 하태범(河太凡)

1986년 서울대학교 조선해양공학 졸업(공학사), 1998년 서울대학교 해양공학 졸업(공학석사), 2000년 U.K. Strathclyde Univ. 조선해양공학 졸업(공학박사), 2009. 8. 현재 (사) 한국선급 기술연구소 소장