

## 선박용 디젤엔진의 NO<sub>x</sub>배출량 예측방법에 관한 연구

김성운<sup>1</sup> · 정균식<sup>2</sup> · 김형수<sup>3</sup> · 최재성<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2014년 3월 19일, 원고수정일 : 2014년 6월 10일, 심사완료일 : 2014년 7월 7일)

### Prediction of NO<sub>x</sub> emission for marine diesel engines of existing ship

Seong-woon Kim<sup>1</sup> · Kyun-sik Jung<sup>2</sup> · Houn-woo Kim<sup>3</sup> · Jae-sung Choi<sup>†</sup>

**요약:** 선박의 운항관리를 효율적으로 하기위한 관점에서 운항중인 선박의 운항관련 정보들의 모니터링에 관한 요구가 증가하고 있다. 주기관의 배기가스 배출물의 배출상태에 관한 모니터링도 그 중 하나이다. 그러나 실제 선박에서 배기 배출물의 배출량을 정확히 그리고 항시 측정한다는 것은 여러 가지 경제적, 기술적으로 어려운 문제가 적지 않기 때문에 운전 상태에 따른 적합한 예측 수단을 이용하는 것이 유용한 방법이 될 수 있다고 판단된다. 본 논문에서는 운항중인 디젤주기관의 실린더 내 압력을 측정하여 열발생율을 구하고, 정확한 연소온도를 구하기 위하여 단일영역모델(one-zone model)을 수정하여 NO 등 연소반응물의 생성량을 예측하기 위한 수정모델(modified one-zone model)에 관하여 언급한다. 이 방법은 단일영역모델의 계산결과를 이용하여 연소영역에서의 연소온도를 파악할 수 있는 방법이다. 또한, 이 방법을 이용하여 연소영역에 있어서의 공기과잉률 변화패턴이 연소영역 온도 및 NO<sub>x</sub> 생성량에 미치는 영향을 조사하고 실측 결과와의 비교를 통하여 연소과정의 공기과잉률의 실제 변화패턴을 추정하였다.

**주제어:** 기존선, 선박용 디젤엔진, 실선 NO<sub>x</sub>모니터링, NO<sub>x</sub>배출예측, 수정단일영역모델

**Abstract:** Monitoring systems of informations for ship performance have become important gradually for economical management of existing ship. Monitoring of NO<sub>x</sub> emission from marine diesel engines is one of them. The measurement of NO<sub>x</sub> emission, however has been many difficulties due to technical and costly problems. A monitoring by prediction method of NO<sub>x</sub> on-board ship according to sailing condition of ship could be an useful method. In this paper, it is discussed about modified method of one-zone model which has been utilized usually for analyzing the combustion process. The modified method is able to calculate the temperature of burned region from the result by one-zone model. Influences which excess air ratio during combustion process affected for the gas temperature and NO<sub>x</sub> emission were investigated. From the results variation of excess air ratio during combustion process could be estimated inversely through the comparison with measurement of NO<sub>x</sub> emission.

**Keywords:** Existing ship, Marine Diesel Engine, NO<sub>x</sub> monitoring on-board Ship, Prediction of NO<sub>x</sub> emission, Modified one-zone model

<sup>†</sup>Corresponding Author: Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: jschoi@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4262

1 Samsung Heavy Industry, E-mail: sw1022.kim@samsung.com, Tel: 055-631-3185

2 Training Ship, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: vikings99@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4474

3 Korea Registers, E-mail: hskim@krs.co.kr Tel: 070-8799-8533

### 1. 서론

최근 지구온난화, 대기오염문제 등의 이유로 대  
 체에너지의 개발 및 고효율 친환경 기술개발에 대  
 한 요구가 더욱 강화되고 있다. 이와 관련하여 다  
 양한 대책들이 강구되고 있으나 선박기관의 경우  
 주로 새로운 기술과 신조선에만 관심이 집중되고  
 있다. 그러나 선박은 20년 이상 장기간 이용되고  
 그 성능은 점점 저하되며 운전조건 또한 변화되기  
 때문에 운항조건에 최적화된 기관의 운전관리야말로  
 매우 유익한 대책이 될 수 있다. 한편, 운항중인  
 선박의 운항관련 정보들을 모니터링 하여 효율적  
 으로 운항 관리를 하고자하는 요구가 증가하고 있  
 으며, 주기관의 배기가스 배출물의 배출상태에 관  
 한 모니터링도 요구되고 있다. 그러나 실제 선박에서  
 배기 배출물의 배출량을 정확히 그리고 항상  
 측정한다는 것은 여러 가지 경제적, 기술적으로 어  
 려운 문제가 적지 않기 때문에 운전 상태에 따른  
 적합한 예측 수단을 이용하는 것이 유용한 방법이  
 될 수 있다고 판단된다.

현실적으로 기존 선박의 엔진성능을 예측하기  
 위해서는 실린더 내 상태 즉 압력을 측정하여 이  
 로부터 열발생율을 구하고 이를 예측계산에 이용  
 하는 방법이 일반적이며, 이러한 방법에 의한 실린  
 더 내 압력변화 등 성능 예측결과는 계측결과와  
 잘 일치하고 있다. 그러나 이 방법은 실린더내의  
 온도를 평균온도로 취급하기 때문에 온도에 민감  
 한 배기배출물의 예측에 적합하지는 않다. NOx 등  
 대기환경오염물질의 발생량을 예측하기 위해서는  
 연소온도의 정확한 파악이 중요하며, 예측방법으  
 로는 2영역모델(two-zone model)의 이용이 불가피  
 하다. 그러나 2영역모델의 경우 연소영역(기연영  
 역)에서의 공기 과잉률이 중요한 인자로 되고 이는

배기성능의 예측결과에도 민감하게 영향을 미  
 치기 때문에 공기 과잉률의 변화를 정확하게  
 파악하는 것이 매우 중요하지만, 이는 매우 어  
 려운 문제이다.

본 논문에서는 운항중인 디젤주기관의 실린더  
 내 압력을 측정하여 열발생율을 구하고, 정확한 연  
 소온도를 구하기 위하여 단일영역모델(one-zone  
 model)을 수정하여 NO 등 연소반응물의 생성량을  
 예측하기 위한 수정모델(modified one-zone  
 model)에 관하여 검토하였다. 즉, 단일영역모델  
 의 계산결과를 이용하여 연소영역에서의 연소  
 온도를 파악할 수 있는 방법을 검토하였다. 또  
 한, 이 방법을 이용하여 연소영역에 있어서의  
 공기과잉률 변화패턴이 연소영역의 가스온도  
 및 NOx 생성량에 미치는 영향을 조사하고 실측  
 결과와의 비교를 통하여 혼합기 형성과정의 공  
 기과잉률의 실제 변화패턴을 고찰하였다.

### 2. 디젤주기관의 성능계측결과 및 고찰

대상엔진의 사양을 Table 1에 보여준다. 대상엔  
 진은 한국해양대학교 실습선 한바다호의 주기관용  
 디젤엔진으로 중유연료 사용시 실린더내 압력과  
 배기가스중의 NOx농도를 계측하였다. 배기가스 샘플  
 플링은 과급기 직전의 온도계의 설치위치에 가스  
 프로브를 설치하여 채취하였다.

Figure 1은 디젤엔진의 각 회전속도에서 계측된  
 실린더 내 압력변화들을 나타내고 있다. NOx 저감을  
 위하여 연료분사시기가 늦게 설정된 것을 실린더 내  
 압력변화로 부터 알 수 있다. Table 2에 NOx 계측결  
 과를 나타냈으며 산소농도도 함께 표시하였다.  
 Figure 2에는 NO만의 계측결과를 나타낸 것이다.

Table 1: Specification of test engine

Item	Specification
Engine type	6L42MC/ME
Number of cylinder	6
Bore × Stroke	420 mm × 1,360 mm
M.C.R.	8,123 BHP / 176rpm
N.C.R.	6,908 BHP / 167rpm
F.O. injection timing	1° BTDC

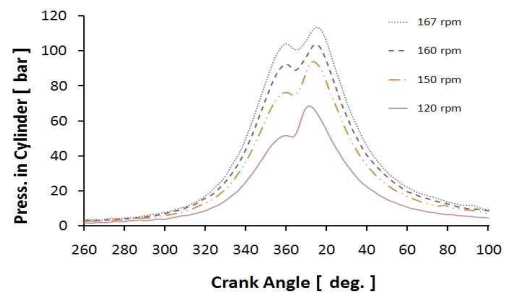
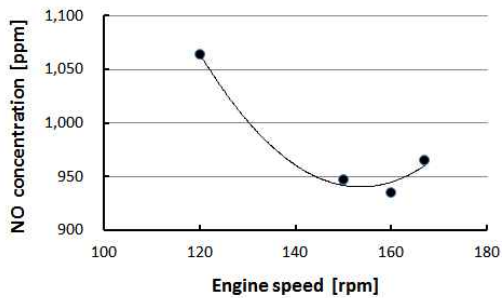


Figure 1: Variation of measured pressure in cylinder according to each rpm

**Table 2:** Mean values of NO & NO2 concentration measured according to engine speed.

	120 rpm	150 rpm	160 rpm	167 rpm
NO (ppm)	1,064	947	935	965
NO2 (ppm)	31	20	19	23
O2 (%)	15.3	15.4	15.1	15.2

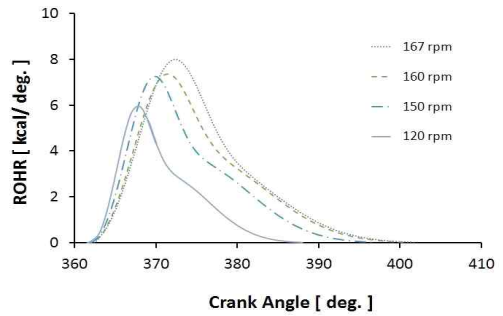


**Figure 2:** Measured results of NO Concentration according to engine speed.

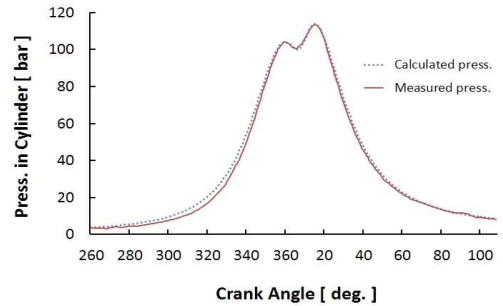
저부하시에 NOx 농도가 증가함을 보이고 있다.

**Figure 3**은 계측한 실린더 내 압력을 이용하여 구한 열발생률(ROHR : Rate of Heat Release) 형태의 변화들을 회전속도별로 나타낸 것이다. **Table 3**은 이들을 정리하여 표로 나타내었다. **Figure 3**과 **Table 3**으로부터 주기관용 디젤엔진의 열발생을 변화의 특징을 알 수 있다. 즉, 전연소기간( $\theta_{dd}$ )은 회전속도가 증가할수록 (부하가 증가할수록) 선형적으로 길어지게 되고, 예혼합연소기간( $\theta_{dp}$ )도 길어지며 그 기간은 전체연소기간의 1/2정도 된다. 그러나 각각의 연소특성지수( $m_p, m_d$ )는 일정하고, 그 비율( $F_p, F_d$ ) 또한 일정하게 된다는 것을 알 수 있다. **Figure 4**는 이렇게 구한 열발생율을 이용하여 실린더 내 압력을 시뮬레이션 한 결과를 비교하여 보여준다. 대체로 잘 일치하고 있는 것으로 판단된다. 압축중간 과정에서 약간의 차이가 보이는 것은 실린더 벽으로의 열손실계산 등에 의한 것으로 판단되며 실용적인 면에서 이용할 수 있다고 판단된다.

### 3. 단일영역모델의 수정



**Figure 3:** Variation of ROHR with each rpm



**Figure 4:** Comparison of cylinder pressure between calculation and measurement at 167 rpm.

**Table 3:** ROHR data for diesel engine used fuel Bunker-A

	120	150	160	167	Remark
$\theta_p$	361.7	362.0	361.5	362.4	Start timing.
$\theta_d$	361.7	362.0	361.5	362.4	Start timing
$\theta_{dp}$	11.0	15	18	20	Comb. duration
$\theta_{dd}$	26.0	35	39	40	Comb. duration.
$m_p$	2.2	2.2	2.2	2.2	Comb. index
$m_d$	1.4	1.4	1.4	1.4	Comb. index
$F_p$	0.35	0.35	0.35	0.35	Comb. fraction
$F_d$	0.65	0.65	0.65	0.65	Comb. fraction

subscript p : premixed combustion  
subscript d : diffusive combustion

실린더 내를 기연영역과 미연영역 두 개의 영역으로 분리 취급하는 두 영역모델(two-zone model)은 연소온도와 공기과잉률에 민감하게 반응하는 NO생성 예측에 적합한 모델이다. 그러나 예측결과는 공기과잉률에 크게 좌우되기 때문에 연소과정 중의 공기과잉률에 관한 정보가 필요하게 된다. 공기과잉률에 관한 정확한 정보를 얻는 것은 매우 어렵기 때문에 실린더내의 압력을 이미 파악하고 있는 경우에는 이 계측결과를 이용하여 연소온도와 공기과잉률 변화에 따른 NO생성량을 역으로 예측할 수 있다. 즉, NO<sub>x</sub> 계측결과와 일치하는 예측결과를 보이는 공기과잉률에 관한 검토가 가능할 것으로 판단된다.

따라서 이미 파악된 실린더 내 압력 상태를 이용하기 위해서 새로운 계산방법인 수정 단일영역 모델(Modified one zone model)을 검토하였다. 수정 단일영역 모델은 기존의 단일영역모델을 이용한 계산결과를 이용하여 구한 실린더내 평균온도를 기연영역과 미연영역으로 분리하여 기연영역의 연소온도를 구하는 방법이다. 연소온도는 공기과잉율에 의하여 영향을 받기 때문에 계측된 실린더내의 압력을 유지하면서 공기과잉율에 따른 NO 생성량을 계산할 수 있는 장점이 있다. 수정 단일영역 모델은 다음과 같은 가정하에서 적용한다.

- 1) 실린더내 가스를 연소영역과 미연소 영역으로 분리하며, 두 영역의 압력은 동일하다.
- 2) 각 영역에서의 가스상태는 균일하며 또한 열적으로는 단열이어서 각각 독립적이다.
- 3) 연소영역에 있어서의 가스량은 연소한 연료 중량 및 연소영역에 유입되는 공기량의 합이며, 그 외는 모두 미연소영역의 가스중량으로 한다.
- 4) 연소영역에서 연소한 연료의 양은 연소압력 계측치로부터 구한 열발생률과 연료의 발열량을 이용하여 계산된 양과 같다.

one-zone model의 경우 실린더내의 기체를 이상 기체로 가정하면 상태방정식과 열역학 제1법칙을 적용하여 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$dT = \left( \frac{dP}{P} + \frac{dV}{V} + \frac{dm}{m} \right) T \quad (1)$$

$$dP = \frac{P}{mC_v T} \left[ dQ - \frac{Ak}{k-1} PdV + d(mh) \right] \quad (2)$$

$$T_c = P_c V_c / R G_c \quad (3)$$

$$T_u = T_0 \left( \frac{P_c}{P_0} \right)^{(k_c-1)/k_c} \quad (4)$$

$$T_b = (G_c C_{vb} T_c - G_u C_{cu} T_u) / G_b C_{vb} \quad (5)$$

여기서,  $T_c$  : 실린더내 평균온도,  $T_u$  : 실린더내 미연가스 온도,  $T_b$  : 실린더내 연소가스 온도, 첨자 0 : 단일영역모델에 의한 앞 단계에서의 상태. 그리고 다음의 관계가 성립한다.

$$G_c C_{vc} T_c = G_u C_{vu} T_u + G_b C_{vb} T_b$$

$$G_c = G_a + G_r + G_f(\theta)$$

$$G_b = (1.0 + \lambda(\theta)L_{th})G_f(\theta)$$

$$G_u = G_c - G_b$$

여기서,  $G_a$  : 흡기공기중량,  $G_b$  : 연소가스중량,  $G_c$  : 실린더내 총가스량,  $G_r$  : 잔류가스량,  $G_f(\theta)$  : 연소연료량,  $\lambda(\theta)$  : 공기과잉률,  $L_{th}$  : 이론공기량.

#### 4. NO<sub>x</sub> 생성량 예측

디젤엔진의 실린더내에서 NO 생성량을 예측하기 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 연소영역에서의 가스온도와 당량비 즉, 공기과잉률이 중요한 인자가 된다. 계산에 있어서 연소기간 중 공기과잉률  $\lambda$ 는 연소질량분율(누적 열발생량)  $x$ 를 이용하여 다음과 같이 변화한다고 가정하였다.

$$\lambda = (\lambda_e - \lambda_s) \cdot x + \lambda_s$$

여기서,  $\lambda_s$ : 연소시작시의 공기과잉률,  $\lambda_e$ : 연소종료시의 공기과잉률이다.  $\lambda_s$ 은 공급되는 순간연료량과 연소영역에 포함되는 공기량에 의하여 구해지는 값으로 연소영역의 가스상태를 결정하게 되므로 연소과정과 밀접한 관계를 가진다.  $\lambda_e$ 는 연소가 종료되었을 때 기연영역에서의 공기과잉율을 의미한다. 연소종료후의 실린더 내 가스상태를 전

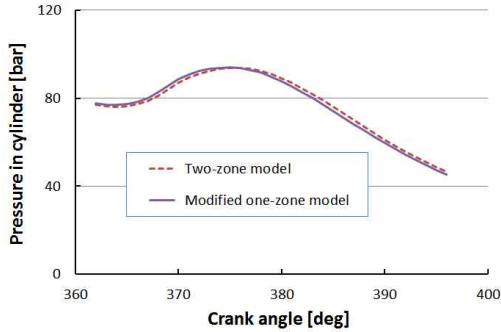


Figure 5: Comparison of calculation results for cylinder pressure between two calculation models

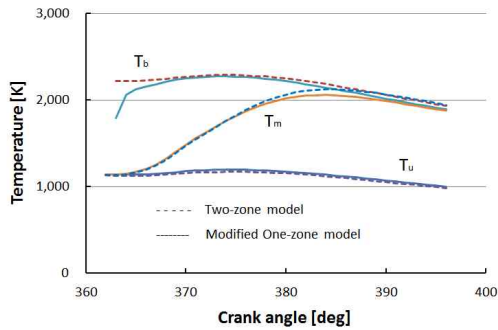


Figure 6: Comparison of calculation results for gas temperature between two calculation models

체적으로 균일하다고 가정한다면 실린더 내의 충전공기량과 총공급연료량에 의하여 계산되는 공기과잉률을 의미하게 된다. 여기서는  $\lambda_s$ 와  $\lambda_c$ 를 적절히 선택하여 NO의 실험계측결과와 일치하는 계산결과를 얻을 수 있는  $\lambda_s$ 과  $\lambda_c$ 를 시행착오 방법으로 구하였다.

Figure 5와 Figure 6은 단일 영역 모델과 2영역 모델을 이용하여 계산한 실린더내 압력과 연소온도( $T_b$ )의 계산결과를 각각 비교하여 나타낸 것이다. Figure 6에서  $T_m$ 은 실린더내 평균온도를 나타낸다.

2영역 모델의 연소과정에 있어서 당량비는 일정한 것으로 하였으며, 계산 결과가 거의 일치하는 평균당량비를 이용하였다. 여기에서는 평균당량비의 역수인 공기과잉률  $\lambda_m$ 로 나타내며, 그 값은 1.7이었다. 두 계산모델에 의한 실린더내의 압력변화

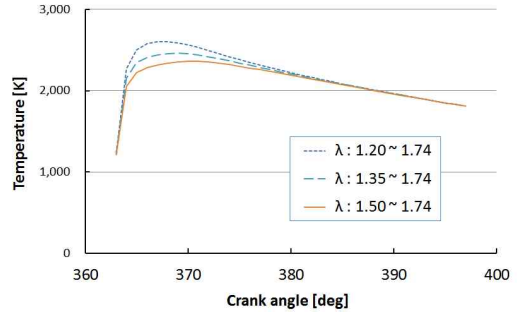


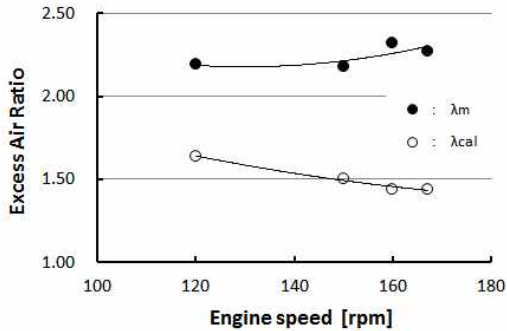
Figure 7: Variations of burned gas temperature for 150 rpm

는 거의 일치하는 결과를 보이고 있다. Figure 6에서 알 수 있는 바와 같이 2영역 모델을 이용하여도 공기과잉율을 적절하게 선택하면 압력 및 온도에 있어서 비교적 잘 일치하는 양호한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 2영역 모델의 경우 기연영역의 초기온도는 2200K정도로 계산되고, 시간경과에 따라 점차 낮아지게 된다. 그러나 단일영역 수정모델의 경우 평균온도의 결과를 두 영역으로 분리하여 나타내는 계산방법의 특성상 기연영역의 온도는 점차 증가하는 형태로 변화하게 된다. 두 계산모델 모두연소온도의 변화추이는 연소초기 일부구간을 제외하고는 비슷한 경향을 나타내고 있다.

앞에서 언급한 바와 같이  $NO_x$ 의 생성은 온도에 강하게 의존하기 때문에 두 계산방법에 의한  $NO_x$  생성량의 계산결과는 상당한 차이를 보인다. Figure 7은 150 rpm의 경우 수정단일영역모델을 적용하여 계산된 연소영역의 가스온도를 나타낸 것이다.  $\lambda_c$ 를 1.74로 고정하고  $\lambda_s$ 만을 변화시킨 경우의 계산결과를 비교하여 나타내고 있다. 여기서 공기과잉률 1.74는  $\lambda_m$ 과 거의 같은 값이다. 그럼으로부터 연소영역에서의 공기과잉률의 변화에 따라 연소가스온도는 다르게 나타나며, NO의 계산결과도 당연히 다르게 된다. 즉, 공기과잉률이 클수록 연소가스온도는 감소하고 NO 생성량도 감소한다. Table 4는 대상디젤엔진의 각 회전속도별 공기과잉률 변화에 따른 NO생성량의 계산결과를 보여주고 있다. 2행정 디젤엔진은 주로 확산연소로 판단되기 때문에 연소과정중의 실린더 내 공기과잉률을 변

**Table 4:** Comparison of calculation results of NO concentration according to excess air ratio at 150rpm.

$\lambda_s$	$\lambda_e$	NO [ppm]	$\lambda_s$	$\lambda_e$	NO [ppm]
1.00	1.74	4994	1.00	2.00	4058
1.20	1.74	2437	1.20	2.00	1520
1.35	1.74	954	1.27	2.00	922
1.50	1.74	401	1.50	2.00	207
Measured : 947 ppm					



**Figure 8:** Comparison of excess air ratio  $\lambda_m$  and  $\lambda_{cal}$  for fitting to measurement results.

화하도록 설정하여 계산하였다. 즉  $\lambda_e$ 를 1.74와 2.00으로 가정하고  $\lambda_s$ 를 변화시킨 경우이다. Table 4로부터  $\lambda_e$ 가 일정한 조건에서  $\lambda_s$ 가 증가할수록 NO 생성량은 크게 감소하며, 또한 같은 NO 생성량을 나타내는  $\lambda_s$ 와  $\lambda_e$ 의 조합이 다수 존재할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, NO 생성량의 계측결과와 계산결과가 일치하는 공기과잉률을 구함으로써 실린더내 연소과정 중의 공기과잉률의 변화추이를 역으로 분석, 고찰할 수 있는 방법이 될 수 있다고 판단된다.

Figure 8은 NOx 계측결과와 같은 계산결과를 나타내는 공기과잉률  $\lambda_{cal}$ 을 나타낸 것으로 계산결과의 비교분석을 위해서 연소과정중 공기과잉률은 일정한 것으로 가정한 경우의 결과이다. 그림에는 비교를 위해서 실린더내의 공기과잉률  $\lambda_m$ 을 함께 나타내고 있다. 전체적으로  $\lambda_{cal}$ 이  $\lambda_m$ 보다 작은 값

을 보인다. 이는  $\lambda_m$ 이 실린더내의 평균값을 나타내는 반면에  $\lambda_{cal}$ 은 연소과정 중에 분사에 의하여 형성되는 혼합기의 공기과잉률을 나타내기 때문에 판단된다. 일반적으로 추진용 디젤기관의 경우 부하가 증가할수록 과급효율의 증대로 공기과잉률은 증가하는 경향을 보인다. 그림에서  $\lambda_m$ 의 변화는 이를 잘 나타내고 있다고 판단된다. 그러나 엔진속도가 증가할수록 즉 부하가 증가할수록  $\lambda_{cal}$ 의 변화경향은 반대로 나타나고 있다. 한편, NOx의 계측결과는 저부하시에 비하여 NOx의 발생량이 적게 나타나는 결과를 보이며 이는 연소과정 중에 연소영역에서의 공기과잉률이 낮아지고 있음을 의미한다. 따라서  $\lambda_{cal}$ 의 변화경향은 반대로 나타나고 있으며, 이들의 정량적인 관계에 관하여는 더 많은 자료의 분석고찰이 필요하다고 판단된다. 그러나 동일한 엔진에서는 운전조건에 따른 연소패턴의 변화도 시운전시의 연소패턴과 크게 다르지 않을 것이기 때문에  $\lambda_{cal}$ 을 이용하면 운전 중인 디젤엔진의 NOx 발생량을 직접 계측하지 않고 운전조건에 적합한 발생량을 예측할 수 있는 유용한 방법이 될 것으로 판단된다.

### 5. 결론

선박은 해양환경의 특성상 운전상태가 항상 변하기 때문에 운항중인 선박으로부터 배출되는 NOx의 배출량을 정확하게 파악하기 위해서는 직접 측정하는 것이 최선이지만 직접 측정하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 운항중인 선박의 NOx 배출량을 예측하는 방법이 유용한 수단이 될 수 있다. 본 연구에서는 실제 운항중인 선박에서 배출되는 NOx의 배출량 예측방법에 관하여 검토하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 선박용 디젤기관의 열발생률의 패턴을 Double Wiebe function로 나타내고 운전상태에 따른 열발생률의 패턴변화를 분석하였다. 그 결과 연소기간은 부하가 증가할수록 증가하고 예혼합연소 구간은 전 구간의 1/2정도 있었으며, 예혼합연소와 확산연소로 분리하였을 때 각각의 연소지수와 비율은 일정하게 나타났다.

(2) 수정단일영역모델은 실린더내의 압력변화를 실제 엔진과 동일하게 유지하면서 같은 운전조건에서의 NO<sub>x</sub> 배출량을 예측할 수 있기 때문에 실선 적용에 유용한 방법으로 판단된다.

(3) 공장시운전시 실린더내의 압력을 파악하고 수정단일영역모델을 이용하여  $\lambda_{cal}$ 에 관한 정보를 미리 파악하면 운항중인 디젤주기관의 운전조건에 따른 NO<sub>x</sub> 발생량을 비교적 정확하게 예측할 수 있다.

(4) 수정단일영역모델을 이용하면  $\lambda_{cal}$ 의 정보로부터 역으로 실린더내의 혼합기 형성의 상태변화를 추정할 수 있는 장점이 있다.

### 참고문헌

- [1] K. Takasaki, H. Tajima, K. Okazaki, D. Yamanish, and S. Kawauchi, "Theoretical background of some measures to reduce NO<sub>x</sub> emission from marine diesel engines", International Symposium of Marine Engineering, 2009.
- [2] Collin R. Ferguson, Internal Combustion Engines - Applied Thermosciences, Jhon Wiley & Sons, pp. 108-133, 1986.
- [3] B. Y. Bae, J. G. Nam, and J. S. Choi, "A study on the calculation of NO formation in cylinder for diesel engines", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 23, no. 4, pp. 543-551, 1999 (in Korean).
- [4] John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamenta, McGraw Book Company, pp. 753-762, 1998.
- [5] J. S. Choi, C. H. Jeong, K. H. Cho, J. K. Lee, T. B. Ha, and H. S. Kim, "Development of simulation program program of two-stroke marine diesel engines", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 1, pp. 62-68, 2010.
- [6] S. J. Jeong, T. H. Kim, and H. S. Jang, "The prediction of performance in two-stroke large marine diesel engine using double-wiebe combustion model", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 23, no. 5, pp. 638-640, 1999 (in Korean).
- [7] M. Ishida, N. Matsumura, H. Ueki, M. Yamaguchi, and Gui-feng Luo, "Diesel dombustion analysis by two-zone model (1st report, comparison between model analysis and experiment)", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 60, no. 573, pp. 325, 1994 (in Japanese).
- [8] M. Ishida, N. Matsumura, H. Ueki, and Zhi-li Chen, "Diesel combustion analysis by two-zone model (2nd report, examination of excess air ratio in burned zone)", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 60, no. 575, pp. 356, 1994 (in Japanese).
- [9] S. W. Kim, A Study on Prediction of NO<sub>x</sub> Emission from Marine Main Diesel Engine for Existing Ship, M.S. Theses, Depart. of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea, 2011 (in Korean).