

## 선박용 가스엔진의 NO<sub>x</sub> 배출량예측에 관한 연구

장하식<sup>1</sup> · 이지웅<sup>2</sup> · 이강기<sup>3</sup> · 최재성<sup>†</sup>

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

### Prediction of NO<sub>x</sub> emission for marine gas engines

Ha-seek Jang<sup>1</sup> · Ji-woong Lee<sup>2</sup> · Kang-ki Lee<sup>3</sup> · Jae-sung Choi<sup>†</sup>

**요약:** 선박용 디젤엔진에서 천연가스의 사용기술은 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 및 GHG의 배출을 단독으로 크게 삭감할 수 있는 기술이다. 특히 셰일가스의 등장으로 가스의 공급이 확대될 것으로 예상되는 가운데 추진기관용 2행정기관에의 이용이 적극적으로 개발 검토되고 있다. 가스엔진의 출력성능은 디젤기관과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았으며 연료소비율은 약간 개선되는 것으로 보고되고 있다. 그러나 배기특성에 있어서는 연소기술에 따라서 다른 성능을 나타내고 있으며 회박연소기술에 의하여 NO<sub>x</sub> 배출량은 85% 정도의 감축이 가능한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 가스엔진의 연소생성물의 발생량을 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 회박연소의 영향은 물론 예혼합연소와 확산연소에 의한 영향도 시뮬레이션 할 수 있는 기능을 가지고 있다. 이를 위해서 실린더 내 상태변화는 2영역모델(Two-zone model)을 이용하고 열발생을 패턴은 Wiebe 함수를 이용하며, 공연비를 입력데이터로 하여 다양한 연소조건에서의 배기생성물의 발생량 예측을 가능하게 하였다.

**주제어:** 선박용 엔진, 가스엔진, 성능예측, 대기환경오염, 질소산화물 배출

**Abstract:** Natural gas for marine diesel engine is considered as an important and clean source of energy because of simultaneously reducing the emission of NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> and GHG. Especially with a appearance of shale gas, the using of natural gas has been investigated aggressively and expected to expand rapidly. By the reports, gas engine and diesel engine were both in a similar performance in the power aspect, and the SFOC of gas engine was shown a little better than that of diesel engine. But the characteristics of exhaust gas emission were different according to various combustion technologies. And with lean burn technology, the emission of NO<sub>x</sub> could be reduced to 85% lower than that of diesel engine.

In this paper, it was described that a simulation program has been developed to predict NO<sub>x</sub> emission. The developed program is adopted two-zone model and Wiebe function for combustion in cylinder. The effects of premixed and diffusive combustion could be simulated by using the excess air ratio as input data. And it was confirmed that the results of simulation were agreed with the general trends of exhaust gas emission according to various combustion conditions such as lean burn, premixed and diffusive combustion.

**Keywords:** Marine engine, Gas engine, Performance Simulation, Air Pollution, NO<sub>x</sub> emission.

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

<sup>1</sup> Graduate school, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: haseek@nate.com, Tel: 051-410-4875

<sup>2</sup> Korea Institute of Maritime & Fisheries Technology, E-mail: woongsengine@gmail.com, Tel: 051-620-5752

<sup>3</sup> Department of Offshore Plant Management, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: kangkilee@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4266

## 1. 서론

국제해운에 이용되고 있는 선박의 경우 IMO의 해양오염방지조약인 NO<sub>x</sub> TierⅢ의 규제에 대응하기 위해서는 현재의 엔진의 구조를 크게 변경시키지 않으면 안 되는 상황에 놓여있다. SO<sub>x</sub>의 규제에 있어서도 같은 상황이며, 특히 배출지정해역(ECA, Emission Control Area)에서는 규제가 한층 강화되게 된다. 또한, 온실효과가스(GHG, Green House Gas)의 삭감대책에 관한 MARPOL Annex VI의 개정안이 채택되어 2013년 1월 1일부터 적용되고 있으며, 단계적으로 규제가 강화되게 되어 있다. 이러한 탄소배출감축요구는 선박엔진분야의 새로운 기술개발을 자극하였고, 특히 LNG는 청정에너지로서 더욱 관심이 집중되어 LNG 엔진개발의 급속한 발전을 가져왔다.

선박용 디젤엔진에서 천연가스의 사용기술은 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 및 GHG의 배출을 단독으로 크게 삭감할 수 있는 기술이다. 특히 셰일가스의 등장으로 가스의 공급이 확대될 것으로 예상되는 가운데 추진기관용 2행정기관에의 이용이 적극적으로 개발 검토되고 있다[1]-[7].

본 연구에서는 가스엔진의 연소생성물의 발생량을 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램을 개발하고자 한다. 즉 배기배출물의 생성에 미치는 희박연소의 영향은 물론 예혼합연소와 확산연소에 의한 영향도 시뮬레이션 할 수 있는 기능을 가진 프로그램을 개발하고자 한다. 본 연구를 통하여 개발된 프로그램은 실린더 내 상태변화는 2영역모델(Two-zone model)을 이용하고 열발생을 패턴은 Wiebe 함수를 이용하며, 다양한 연소조건에서의 배기생성물의 발생량 예측을 가능하게 하기 위해서 공연비는 입력데이터로서 일정하게 또는 변화시킬 수 있게 하였다.

## 2. 가스엔진의 특징

천연가스연료는 LNG 증발가스를 말하며, 자연증발가스(n-BOG)와 강제증발가스(f-BOG)로 분류된다. LNG 탱크 내 액체위의 상부로부터 추출하는 가스를 자연증발가스라 하며, 대부분의 메탄 성분

과 약간의 질소를 포함하고 있고 높은 내폭크성을 가지고 있다. 메탄가(MN, Methane Number)는 대체적으로 MN 100 부근의 값을 나타내고, 저위발열량은 33-35 MJ/Nm<sup>3</sup> 을 보이며 가스엔진의 출력성능은 사용연료의 안티노크성에 따라서 엔진사양(주로 압축비)과 출력이 설정되게 된다[8].

선박용 가스엔진의 이용은 주로 육상용 및 발전기용으로 현재 많이 이용되고 있는 4행정 사이클의 가스엔진과 현재 선박 주기관용 개발완료단계에 있는 2행정 가스엔진으로 크게 분류할 수 있다. 주로 발전기용 이용되고 있는 4행정 가스기관의 연료공급방식은 주로 저압분사로서 급기매니폴드에 연료를 저압으로 분사하는 방식이다. 이 경우 실린더내 혼합기의 혼합상태는 균질급기 즉 예혼합연소에 가까운 상태로 연소가 진행될 것이라고 추정할 수 있다. 최근의 희박연소 기술의 발달과 함께 NO<sub>x</sub> 배출량을 80%정도까지 감소시킬 수 있어서 대체에너지로서만이 아니라 NO<sub>x</sub>의 배출규제 Tier Ⅲ를 만족시킬 수 있는 친환경연료로서 주목을 받게 되었다[9][10].

그러나 선박의 추진기관으로 이용되는 대형 2행정기관의 경우는 복잡한 소기과정 때문에 실린더내에 연료를 분사하는 방식이 이용되며 디젤엔진의 경우와 크기 다르지 않고 연소과정은 확산연소에 의하여 연소가 진행될 것으로 추정할 수 있다. 따라서 가스연료용과 액체연료(MDO 또는 HFO)용의 두 개의 분사밸브를 가지게 되며, 가스연료 운전시에는 액체연료를 압축착화용으로 이용(pilot injection)한다. 또한, 분사압력에 따라 고압분사와 저압분사로 분류될 수 있으며, 저압분사의 경우 현재 개발 중에 있는 것으로 보고되었다. Table 1.은 이들을 정리하여 나타낸 것이다.

가스엔진의 출력성능 즉 최대폭발압력 P<sub>max</sub>와 과급급기압력 P<sub>boost</sub> 등의 경우에는 디젤기관과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았으며 SFOC는 약간 개선되는 것으로 보고하고 있다.[8] 그러나 배기특성에 있어서는 연소기술에 따라 다른 성능을 나타내고 있으며 희박연소의 기술에 의하여 NO<sub>x</sub> 배출량은 85%정도의 감축이 가능한 것으로 알려져 있다.

**Table 1:** Classification of gas engine for marine use.

| engine type | injection position | injection pressure | combustion | reduction of NO <sub>x</sub> | main use                        | Remark      |
|-------------|--------------------|--------------------|------------|------------------------------|---------------------------------|-------------|
| 4 stroke    | in intake manifold | 5 bar              | premixed   | 80% of diesel                | for generator<br>for propulsion | DF          |
| 2 stroke    | in cylinder        | 350 bar            | diffusive  | 15% of diesel                | for propulsion                  | MTD (ME-GI) |
| 2 stroke    | in cylinder        | 20 bar             | diffusive  | in progress                  | for propulsion                  | Wartsila    |

선박용 가스엔진은 소량의 액체연료유인 파일럿 연료를 직접 실린더내에 분사하여 디젤엔진과 동일한 방법으로 압축착화 시킨 후 파일럿 연료 분사직후에 가스연료를 높은 압력으로 분사하여 연소시킨다. 예혼합 연소구간에서 소량의 파일럿 연료로 인하여 가스엔진이 디젤엔진보다 열발생량이 크고 짧게 발생하고 확산연소구간에서는 가스엔진의 짧은 예혼합 연소구간으로 인하여 디젤엔진이 가스엔진보다 크게 되었다가 1/2구간부터는 비슷하게 되는 것으로 보고되었다[11]. 따라서 디젤엔진의 연소패턴을 수정하여 사용하는 것이 가능하다고 판단된다.

### 3. 가스엔진의 연소생성물 예측방법

#### 3.1 실린더내 연소과정의 모델링

연소과정의 모델링에는 사용목적과 실용성에 따라 단일영역모델(One-zone model)과 2영역모델(Two-zone model)이 주로 이용된다[12]. 왕복동 내연기관의 경우 혼합기 형성이 중요한 문제로 된다. 가솔린엔진의 경우는 공기와 연료가 미리 혼합된 예혼합기가 실린더 내에 공급되기 때문에 실린더 내의 혼합기 상태는 균일한 것으로 간주할 수 있다. 그러나 디젤기관의 경우 연료의 분사로 인해 혼합기 형성과정이 매우 복잡하며 공간적으로 다양하게 형성된다. 그리고 혼합상태 즉 혼합비는 연소속도와 결과적으로 연소온도에 밀접하게 영향을 미친다. 배기배출물의 생성 특히 NO<sub>x</sub>의 생성은 연소과정에 있어 혼합비와 연소온도에 크게 영향을 받기 때문에 NO<sub>x</sub> 생성량의 예측에는 이들의 정확한 예측이 중요하게 된다.

가스엔진의 경우 가스공급방법에 따라 발전기용 4행정사이클 기관의 실린더내에서는 주로 예혼합 연소가 일어날 것으로 예상되고, 추진용 2행정사이클 기관의 경우에는 주로 확산연소가 일어날 것으로 예상할 수 있다. 본 연구에서는 두 경우 모두의 예측계산에 이용할 것을 목적으로 하여 Two-zone model을 이용하기로 한다.

Two-zone model은 실린더 내 가스 상태를 연소된 영역과 미연소영역으로 구분하여 두 영역사이의 불연속성의 경계가 있다고 가정한다. 두 영역에서의 온도 및 가스조성은 다르며, 압력은 같다고 가정한다. 따라서 온도에 크게 영향을 받는 가스의 조성 즉 연소생성물의 계산에 적합하다.

#### 3.2 2영역모델의 기초관계식

Figure 1은 Two zone model에 의한 실린더 내의 가스 상태를 나타낸 개념도이다. 첨자 *u*는 미연소 영역 즉 공기영역을 나타내고, *b*는 연소영역을 나타내며 두 영역사이의 화염면에 의하여 구분된다고 가정한다. *W*는 피스톤에 의한 외부일을 나타내고, *Q<sub>w</sub>*는 실린더 벽을 통한 열손실을 의미한다. 두 영역에서의 압력은 동일하다고 가정하면 두 영역의 상태를 나타내는 변수는 *P*, *v<sub>b</sub>*, *v<sub>u</sub>*, *T<sub>b</sub>*, *T<sub>u</sub>* 모두 5개이며, 5개의 관계식이 요구되고, 각 영역에서의 상태방정식과 열역학 제1법칙을 적용하여 정리하면 필요한 관계식 식(1) - 식(5)를 얻는다.

$$dP/P + dv_b/v_b = dT_b/T_b \tag{1}$$

$$dP/P + dv_u/v_u = dT_u/T_u \tag{2}$$

$$d(mu)_b = dQ_f - dQ_{wb} - APdV_b - C_{pb} T_b dm_b + dh_a \tag{3}$$

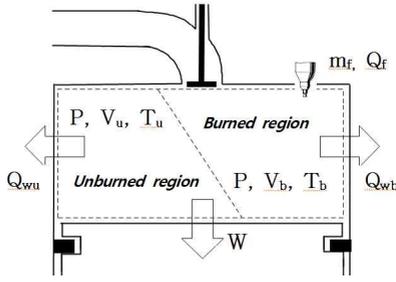


Figure 1: Schematic in cylinder during combustion.

$$d(mu)_u = -dQ_{wu} - APdV_u - C_{pu}T_u dm_{lu} - dh_u \quad (4)$$

$$v = V/m = xv_b + (1-x)v_u \quad (5)$$

열발생률( $dQ_f$ )은 연소질량비율(mass fraction of fuel or accumulated heat addition)  $x$ 의 함수이고, Wiebe 함수를 이용하여 나타낸다. 또한 열발생을 패턴을 실제기관의 패턴에 가깝게 묘사하기 위하여 다음과 같이 double Wiebe function으로 근사한 패턴을 이용한다[13].

$$x = 1 - \exp\left[-6.9\left(\frac{\theta - \theta_s}{\theta_b}\right)^{m+1}\right] \quad (6)$$

$$\frac{dx}{d\theta} = 6.9(m+1)\left(\frac{\theta - \theta_s}{\theta_b}\right)^m \frac{1}{\theta_b} \exp\left[-6.9\left(\frac{\theta - \theta_s}{\theta_b}\right)^{m+1}\right] \quad (7)$$

$$\frac{dx}{d\theta} = \left(\frac{dx}{d\theta}\right)_p + \left(\frac{dx}{d\theta}\right)_d \quad (8)$$

$$dQ_f = Q_f \cdot dx \quad (9)$$

여기서,  $\theta_s$  : 연소시작시기,  $\theta_b$  : 연소기간,  $m$  : 연소지수, 첨자  $p, d$  는 각각 예혼합연소, 확산연소를 의미한다.

연소실벽으로의 열손실량( $dQ_w$ )은 연소영역과 미연소영역에 있어서의 열전달계수를 각각 가스온도에 따라 분리하여 다르게 취급하고, 전열면적은 연소질량비율  $x$ 의 제곱근에 비례하는 것으로 한다 [14]. 즉, 연소실 표면적을  $A$ 라 하면 다음과 같이 된다.

$$dQ_w = dQ_{wb} + dQ_{wu}$$

$$dQ_{wb} = h_b A_b (T_b - T_w)$$

$$dQ_{wu} = h_u A_u (T_u - T_w)$$

$$\text{단, } A_b = Ax^{1/2}, \quad A_u = A(1-x^{1/2}).$$

실린더 벽에 있어서의 열전달계수(Coefficient of Heat transfer)  $h$ 는 Annand가 제안한 식을 이용하여 다음과 같이 구한다[15].

$$h = 0.49 \frac{\sigma}{D} \left(\frac{SnD}{30\nu}\right)^{0.7}$$

여기서  $S, D$  및  $n$ 는 각각 행정, 실린더직경 및 엔진회전수이고,  $\sigma$  와  $\nu$  는 각각 가스의 열전도율과 동점성계수이다.

### 3.3 NO<sub>x</sub> 생성량 계산방법

NO는 공기의 혼입에 의한  $N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO$ 의 반응에 의해 생성될 뿐만 아니라 다른 여러 화학 반응에 의해서도 생성된다. NO<sub>x</sub>를 생성요인에 따라서 thermal NO<sub>x</sub>, fuel NO<sub>x</sub> 및 prompt NO<sub>x</sub>로 분류한다. 이 3가지 NO<sub>x</sub>중에서 fuel NO<sub>x</sub>는 연료중의 질소분을 기원으로 하고 prompt NO<sub>x</sub>와 thermal NO<sub>x</sub>는 공기중의 질소를 기원으로 하고 있다. 이러한 NO<sub>x</sub>중에서 thermal NO<sub>x</sub>가 대부분을 차지하고 이 NO<sub>x</sub>중에서 NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O도 미량 생성되지만 NO가 전체 발생되는 NO<sub>x</sub>의 95%를 차지하므로 여기에서는 NO에 대해서만 취급하기로 한다.

thermal NO는 1800K이상의 고온에서 생성되고 extended Zeldovich mechanism의 지배를 받는다고 알려져 있다. 그리고 NO를 제외한 다른 가스 성분은 반응 시간이 아주 짧기 때문에 평형계산을 이용할 수 있지만 NO의 반응속도는 연소 속도에 비해 무시할 만큼 빠르지 못하고 평형에 도달하는 시간이 매우 길어서 비평형으로 계산해야 한다. 상세한 계산방법에 관하여는 참고문헌에서 상세하게 언급하고 있기 때문에 여기서는 생략하고자 한다 [14][16].

## 4. 가스엔진의 NO<sub>x</sub> 발생량 예측

#### 4.1 가상의 가스엔진 데이터작성

개발중에 있는 선박용 가스엔진의 성능을 기존의 디젤엔진의 성능과 비교 분석하여 보고한 문헌 [7][9][11]에 의하면 대상엔진의 디젤 열발생률을 수정하고 보완하여 가상의 가스엔진의 데이터로 사용할 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 기존의 디젤엔진을 가상의 가스엔진으로 계산하기 위해서 계측된 디젤기관의 열발생률 패턴을 수정하여 이용하였다. 프로그램의 검증용 위하여 사용된 대상엔진의 사양을 Table 2에 보여준다. Figure 2에 예측계산에 이용된 엔진회전속도 150 rpm 인 경우에 있어서 가스엔진의 열발생율을 보인다. 열발생률 패턴은 double Weibe function으로 나타내었으며, 총 발생열량은 공급열량(pilot fuel oil 및 가스연료)의 총합과 같게 하였다. 비교를 위하여 디젤엔진의 패턴도 병기하였다.

Table 2: Specifications of the simulated engine used gas fuel.

| Item                 | Specification     |
|----------------------|-------------------|
| Engine type          | 6L42MC/ME         |
| Number of cylinder   | 6                 |
| Bore × Stroke        | 420 mm × 1,360 mm |
| Max. cont. output    | 8,123 BHP/ 176rpm |
| Normal cont. output  | 6,908 BHP/ 167rpm |
| Fuel oil inj. timing | 1° BTDC           |

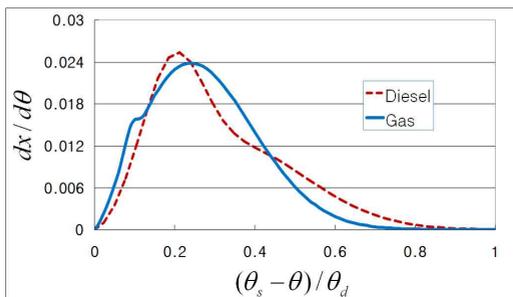


Figure 2: Simulated ROHR with double Wiebe function in case of 150 rpm.

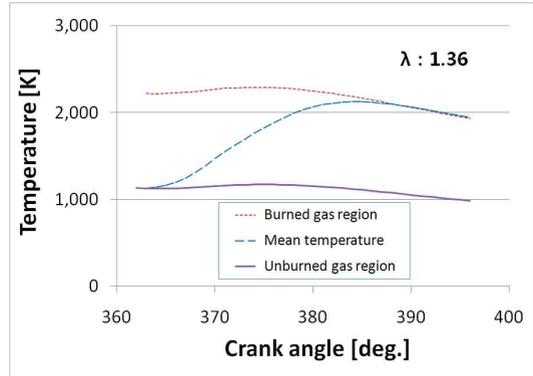


Figure 3: Calculation results for gas temperature of each region.

#### 4.2 예혼합연소의 NO<sub>x</sub> 생성량 예측

발전기용 4행정 가스기관의 경우 희박 예혼합연소에 가까울 것으로 추정되기 때문에 연소기간 동안 당량비가 일정하다고 가정하는 것이 합리적이라고 판단된다.

Figure 3은 연소영역과 미연소영역의 온도 및 실린더 내 평균온도의 계산결과를 함께 나타낸 것이다. 공기과잉률이 연소기간 동안 일정하다고 가정 한 경우( $\lambda=1.36$ )의 계산결과이다. 연소영역에서의 가스온도는 2,200 K ~ 2,000 K 범위에서 변화하고 있고, 미연소영역에서의 가스온도(공기온도)는 1,100 K ~ 1,000 K 범위에서 변화하고 있음을 보이고 있다.

Table 3은 가스엔진의 공기과잉률 변화에 따른 NO배출농도의 계산결과를 나타낸 것이다. Table 3에서  $\lambda=1.10$  인 Case 1-1은 이론 공연비에 가까운 상태에서 연소가 진행된다고 가정한 경우이다.

Case 1-3은 연소과정에서 실제 실린더 내 평균 공기과잉률이 1.45인 것을 고려한 것이다. Case 1-2는 가스엔진의 NO<sub>x</sub> 배출량이 디젤엔진에 비하여 15%, 즉 85%의 저감효과가 있다고 하는 엔진 메이커의 보고[9]를 참고하여 디젤엔진의 NO 배출농도 예측값의 15%에 가까운 NO 예측값을 보이는  $\lambda=1.36$ 의 경우이다.

**Table 3:** Comparison of simulation results of NO concentration according to excess air ratio at 150 rpm.

| Case     | $\lambda$ | SFOC [g/kW/hr] | $P_{max}$ [bar] | $P_{mi}$ [bar] | NO [ppm] | $T_{max}$ [K] | remark         |
|----------|-----------|----------------|-----------------|----------------|----------|---------------|----------------|
| 1-1      | 1.10      | 177.4          | 102.4           | 14.31          | 2180     | 2627          | LNG            |
| 1-2      | 1.36      | 177.4          | 93.8            | 11.96          | 132      | 2288          | Two-zone model |
| 1-3      | 1.45      | 177.4          | 91.8            | 11.36          | 52       | 2207          |                |
| Measured |           | 180.1          | 93.9            | 10.91          | 947      |               | Bunker-A       |

Figure 3과 Table 3.로부터 예혼합 연소에서는 공기과잉률이 클수록 NO생성에 큰 영향을 미치는  $T_{max}$ 가 낮게 되는 것을 알 수 있다. 그리고 공기과잉률이 1.36일 때 디젤엔진의  $P_{max}$  예측값과 가스엔진의  $P_{max}$  예측값이 거의 일치하며, NO의 경우 디젤엔진 예측값의 15%인 132 ppm으로 계산되었다. 이는 가스연료의 경우가 디젤연료의 경우에 비해 85% 저감되는 효과가 있음을[2][4] 고려할 때 가능한 결과로 생각되며 예측계산에 있어서 예혼합연소의 효과를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 또한, 연소실 평균 공기과잉률이 1.45임에도 불구하고 1.36의 경우에서 NO 예측값이 예상치에 가까운 것에 관하여는 CFD 방법을 이용한 실린더 내에서의 혼합기형성 과정에 관한 추가적인 연구와 실제 엔진에서의 실험 등에 의한 확인이 필요한 것으로 판단된다.

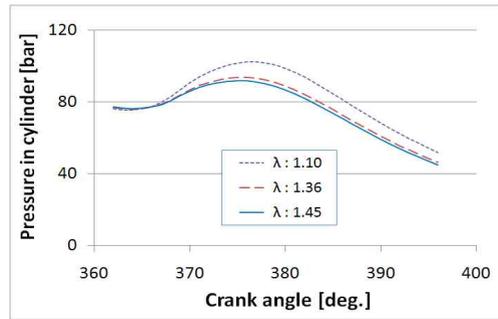
Figure 4는 공기과잉률이 연소기간 동안 일정하다고 가정한 경우의 계산결과를 나타낸 것으로 각각공기과잉률에 따른 연소기간 중 연소영역의 가스온도 변화와 실린더 내 실린더 내 압력변화이다. 공기과잉률이 증가할수록 실린더내 압력과 온도가 낮게 됨을 알 수 있다.

4.3. 확산연소시의 NO<sub>x</sub> 생성량 예측

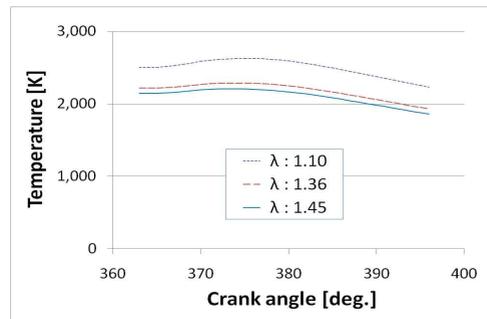
주기관용 2행정 가스기관의 경우 가스연료를 실린더 내에 고압으로 분사하면 혼합기형성은 디젤연소의 경우보다는 빠르게 되겠지만 확산연소에 가까울 것으로 예상된다. 따라서 연소기간 동안에 연소영역에 있어서의 공기과잉율은 변화하는 것으로 설정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 연소기간 중의 공기과잉율의 변화는 연소질량비율  $x$ 를 이용하여 다음과 같이 변화한다고 가정하였다.

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

여기서,  $\lambda_s$ 와  $\lambda_e$ 는 각각 연소초기 및 종료시의 공기과잉율이다. 또한, 가상 가스엔진의 연료소비를 및 NO<sub>x</sub> 배출농도는 앞에서 언급한 바와 같이 디젤엔진의 예측결과를 참고하여 설정하였다. 즉, 연료소비율은 디젤엔진보다 2.7 g/kW/hr 개선된 130.4 g/ps/hr로 그리고 NO 배출농도는 디젤엔진의 75%인 약 710 ppm로 예상된다[7].



(a) Pressure in cylinder



(b) Temperature in burned region

**Figure 4:** Comparison of calculation results for cylinder pressure according to constant excess air ratio

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

| Case     | $\lambda_s$ | $\lambda_e$ | SFOC<br>[g/kW/hr] | $P_{max}$<br>[bar] | $P_{mi}$ [bar] | NO<br>[ppm] | $T_{max}$<br>[K] | remark                            |
|----------|-------------|-------------|-------------------|--------------------|----------------|-------------|------------------|-----------------------------------|
| 2-1      | 1.10        | 1.42        | 177.4             | 98.0               | 12.87          | 1151        | 2496             | Gas fuel<br><br>Two-zone<br>model |
| 2-2      | 1.13        | 1.50        | 177.4             | 96.5               | 12.20          | 728         | 2442             |                                   |
| 2-3      | 1.04        | 2.00        | 177.4             | 95.4               | 11.04          | 735         | 2470             |                                   |
| Measured |             |             | 180.1             | 93.9               | 10.91          | 947         |                  | Bunker-A                          |

Figure 4로부터 알 수 있는 바와 같이 실린더 내 압력과 연소영역에서의 가스온도는 공기과잉률에 따라 크게 다른 결과를 보인다.

Table 4는 공기과잉율이 변화하는 경우의 계산결과를 비교하여 나타낸 것이다. Case 2-1은 공기과잉율의 변화가 이론 공연비에 가까운 1.1에서 시작하여 연소종료 시에는 실린더 내 평균 공기과잉율인 1.42상태로 되는 경우를 가정하는 것이다. 또한 Case 2-2 및 Case 2-3은 각각  $\lambda_e$ 를 1.5 및 2.0으로 가정하고 NO의 예측계산결과가 디젤엔진 계측값의 75%와 가까운 계산결과를 주도록  $\lambda_s$ 를 시행착오 방법으로 결정된 경우이다.

Table 4로부터 알 수 있는 바와 같이 Case 2-1의 경우와 Case 2-2의 경우는 연소온도에 있어서 비슷한 계산결과를 보이고 있으나 NO 생성량에 있어서는 차이를 보인다. Case 2-2의 경우와 Case 2-3의 경우에는 NO 생성량에 있어서는 큰 차이가 없으나  $P_{mi}$ 의 결과는 차이가 있다. 또한 같은 NO 예측계산의 결과를 나타내는 공기과잉률의 변화폭이 더욱 크게 됨을 알 수 있다.  $NO_x$  생성량의 예측에 있어서 같은 계산결과를 주는 공기과잉률의 변화는 많이 있을 수 있기 때문에, 이들 중에서 어느 경우가 정확한 것인지는 더 많은 연구검토와 분석고찰이 요구된다. 따라서 보다 정밀한 예측을 위하여서는 선박용 가스엔진의 실측 데이터를 바탕으로 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 가스엔진의 개발에 필요한 가스엔진의 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 연소

과정은 질소산화물 등 배기배출물의 예측을 위해서 two zone model을 적용하고, 파일럿 분사에 의한 착화과정 및 예혼합 연소과정은 열발생률 패턴을 double Wiebe function로 나타내어 이용하였다. 시뮬레이션은 현재 운항중인 선박의 주기관용 2행정 디젤엔진을 가스엔진으로 가상하여 연료를 증유에서 가스로 변경하였을 때 이미 보고되어 있는 실험결과들과 비교, 고찰함으로써 개발된 프로그램의 신뢰도를 확인하였다.

본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Two zone model을 적용한 연소생성물의 발생량을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 예혼합연소, 회박연소 및 확산연소에 의한 영향을 예측할 수 있게 하였다.

(2) 발전기용 4행정 가스엔진의 회박 예혼합연소의 경우에 적용하여  $NO_x$  발생량이 85% 정도 감소되는 계산결과를 확인하였다.

(3) 주기관용 2행정 가스엔진의 확산연소의 경우에 적용하여  $NO_x$  발생량이 25% 정도 감소되는 계산결과를 확인하였다.

(4) 계산결과를 통하여 4행정 가스엔진의 경우인 회박 예혼합 연소와 2행정 가스엔진의 경우인 확산연소의 경우에 관한 시뮬레이션이 가능함을 확인함으로써 본 시뮬레이션 프로그램의 신뢰성과 유용성이 확인되었다.

정량적 예측을 위하여는 혼합기 형성과정에 관한 더 많은 데이터의 확보가 필요하며, 향후 과제로 신뢰성과 실용성을 높이고 정밀한 예측을 하기 위해서는 선박용 가스엔진 실측데이터를 이용한 연구가 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

- [1] L. M. Nerheim and R. Nordrik, "Bergen gas engine developments", Proceedings of 24th CIMAC International Congress on Combustion Engines, no. 71, 2004.
- [2] B. Thijssen, "Dual-fuel-electric LNG carrier propulsion", The Royal Institution of Naval Architects from their Design and Operation of Gas Carriers Conference, 2004.
- [3] A. Tsunoda, K. Horimoto, Y. Osaka, M. Ogawa, and T. Noguchi, "Further development of advanced gas engine KU30GA (MACH-30G)", Proceedings of 24th CIMAC International Congress on Combustion Engines, no. 71, 2004.
- [4] K. Tanaka, Y. Matsushita, T. Fujiwaka, and T. Noguchi, "Development of the lean burn miller cycle gas engine", Proceedings of 24th CIMAC International Congress on Combustion Engines, no. 71, 2004.
- [5] G. Herdin and F. Gruber, "Miller cycle - efficiency potentials for gas engines", Proceedings of 24th CIMAC International Congress on Combustion Engines, no. 71, 2004.
- [6] D. Y. Jung, J. S. Kim, J. T. Kim, E. S. Kim, and A. S. Carter, "Development of high efficient gas engine H35/40G", Proceedings of 24th CIMAC International Congress on Combustion Engines, no. 71, 2004.
- [7] L. R. Juliussen, M. J. Kryger, and A. Andreasen, "Man B&W Me-Gi engines. recent research and results", Proceedings of International Symposium of Marine Engineering, 2011.
- [8] N. Kagiwata and O. Hanashima, "Gas engine and its lubrication - unresolved phenomena in lubrication and their Claifications(2)", Journal of Japan Institute of Marine Engineering, vol. 42, no. 3, pp. 109-118, 2007. (in Japanese).
- [9] K. Yamanaka, S. Nishioka, Y. Shiraga, and S. Nakai, "Development of pre-chamber spark plug for gas engine", Proceedings of 24th CIMAC International Congress on Combustion Engines, no. 71, 2004.
- [10] L. Haraldson, "LNG as a fuel for environmentally friendly shipping retrofit perspective", 33rd Motorship Propulsion & Emissions Conference Copenhagen, 2011.
- [11] K. Takasaki, "Observations on the development and practical application of marine gas engines", ClassNK TECHNICAL BULLETIN, 2012.
- [12] J. I. Ramos, Internal Combustion Engine Modeling, New York, Hemisphere, 1989.
- [13] 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).
- [14] C. R. Ferguson, Internal Combustion Engines Applied Thermosciences, Singapore, Jhon Wiley & Sons, 1986.
- [15] W. J. D. Annand, "Heat transfer in the cylinders of reciprocating internal combustion engines", Proceedings of Institute Mechanical Engineering, vol. 177, no. 36, p. 973, 1963.
- [16] 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).
- [17] S. W. Kim, A Study on Prediction of NOx 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).