

## 디젤기관의 연소실내 NO 생성농도 예측에 관한 연구

배병렬\* · 남정길\*\* · 최재성\*\*\*

### A Study on the Calculation of NO Formation in Cylinder for Diesel Engines

B. B. Bae · J. J. Nam · J. S. Choi

**Key words** : Diesel Engines (디젤기관), NOx Formation (질소산화물생성), Exhaust emission (배기배출물), Engine simulation (엔진시뮬레이션), Performance Prediction (성능예측)

#### Abstract

Diesel engine is a major source of the air pollution. In general, the concentrations of these pollutants in diesel engine exhaust differ from values calculated assuming chemical equilibrium. Thus the detailed chemical mechanisms by which these pollutions form and the kinetic of these processes are important in determining emission levels.

In this study, the computer program has been developed to calculate the required thermodynamic properties of combustion products (10 species) for both equilibrium and non-equilibrium in cylinder for diesel engines. Nitric oxide emissions are calculated by using the extended Zeldovich Kinetic mechanism with a steady state assumption for the N concentration and equilibrium values used for H, O, O<sub>2</sub> and OH concentrations.

By the results, it is confirmed that developed simulation program with the NO prediction model is validated against residual mass fraction, combustion index of Wiebe's function, pre-mixed combustion ratio and fuel injection timing.

#### 1. 서 론

내연기관의 배기가스에는 여러 가지 성분이 포

함되어 있으며, 이러한 각 성분의 배출농도는 기관의 종류에 따라 그리고 기관의 운전조건에 따라 다르다. 이들 중 일산화탄소, 탄화수소, 질소산화물

\* 한국해군(원고접수일 : 99년 4월)

\*\* 현대자동차(주) 디젤엔진 설계2팀

\*\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

이 대기오염물질로서 주목받고 있으며, 오염대책도 주로 이들의 저감대책에 초점이 맞추어져 있다. 디젤기관의 경우에는 여기에 매연(soot)이 중요한 대기오염물질로 추가된다. 유해성분의 저감대책은 다각도로 연구개발되어 실용적인 각종 방법이 이용되고 있다. 그러나, 질소산화물과 매연의 저감방법은 서로 상반되기 때문에 효과적으로 동시에 저감시킬수 있는 방법의 개발이 어려운 실정이다. 현재의 단계에서는 질소산화물의 저감방법으로는 연료의 분사시기를 지연시키고, 이에 의한 열효율의 악화를 개선하기 위하여 분사압력을 높이는 방법과 배기가스 재순환 방법을 이용하는 것이 비교적 효과적인 것으로 판단되고 있으며, 국외는 물론 국내에서도 이에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>(1-5)</sup> 또한, 매연저감대책으로는 후처리장치의 일종인 DP(Diesel particulate filter) 장치가 실용화단계에 있다. 배기재순환방법은 기관의 흡기에 배기가스의 일부를 혼입하는 것으로 배기가스 중에 포함되는 질소산화물 및 매연발생량은 배기재순환량에 의하여 크게 영향을 받기 때문에 질소산화물의 농도를 저감시키기 위하여는 배기가스 재순환량이 이들에 미치는 영향을 파악하여 조절할 필요가 있으며, 이를 위하여는 배기가스재순환량에 의한 질소산화물 및 매연발생량의 변화를 예측할 필요가 있다.

그러나, 디젤기관의 연소는 연료의 분사에 의하여 실린더내에 혼합비가 불균일한 혼합기가 다양하게 형성되기 때문에 디젤연소과정중에 생성되는 연소생성물을 정확히 예측하기는 매우 어려운 과제이다. 이를 해석하기 위하여 많은 연구자들이 노력하여 왔으나 많이 인용되고 있는 해석방법으로는 실린더내를 공간적으로 구분하는 방법에 따라 단일영역모델과 다영역모델로 분류할 수 있다. 단일영역모델에는 연료의 분사상태와는 관계없이 실린더내에 시간적 공간적으로 균일한 혼합비의 혼합기가 존재한다고 가정하고, Wiebe의 연소함수를 이용하는 방법과 연소준비기간 즉, 연료의 증발, 혼합과정 등을 고려한 Whitehouse-way 모델 등을 예로 들 수 있다. 다영역모델로는 실린더내를 기연영역과 미연영역으로 구분하는 2영역모델과 공기의 유동을 고려하여 혼합비가 다른 2개 이상

의 영역으로 구분하는 다영역모델을 들 수 있다. 각 계산모델들은 장단점을 가지고 있으며 모델이 복잡할수록 많은 실험계수가 요구되고 있기 때문에 목적에 따라 계산모델을 선택하게 된다.

필자들은 선박용 대형저속디젤기관에서의 NO 생성농도 및 매연농도를 예측하기 위한 프로그램 개발을 목표로 하고 있다. 디젤기관의 실린더내를 공간적으로 혼합비가 다르고, NO생성농도는 혼합비에 의하여 달라지기 때문에 정확한 예측을 위하여는 이에 대한 고려가 필요하나, NO의 생성메카니즘은 같기 때문에 본 연구에서는 그 초기단계로 단일영역 모델을 적용한 NO 농도의 예측프로그램을 개발하였다.

NO생성농도의 예측계산에는 NO의 반응속도가 다른 가스성분의 반응속도에 비하여 느리기 때문에 정량적 예측결과를 얻기 위하여 비평형계산방법을 사용하였으며, 개발된 프로그램을 이용하여 운전인자에 따른 질소산화물의 농도변화를 예측할 수 있었으며, 그 결과를 보고하고자 한다.

## 2. NO<sub>x</sub>의 생성메카니즘과 예측계산모델

배기중의 NO<sub>x</sub>는 생성요인에 따라서 열(thermal) NO<sub>x</sub>, 연료(fuel) NO<sub>x</sub> 및 신속(prompt) NO<sub>x</sub>로 분류된다.<sup>(6)</sup> 이 중에서 연료 NO<sub>x</sub>는 연료중의 질소분을 기원으로 하고 신속 NO<sub>x</sub>와 열 NO<sub>x</sub>는 공기중의 질소를 기원으로 하고 있다. 연료 NO<sub>x</sub>의 경우 비록 디젤연료가 가솔린연료보다 많은 질소를 포함하고 있지만 현재의 수준은 그렇게 심각하지 않은 편이다. 신속 NO<sub>x</sub>는 탄화수소의 열분해 도중에 CH 및 CH<sub>2</sub>가 생성되어서 이것이 공기중의 질소와 반응하여 HCN, N, NH가 만들어진다. 이렇게 생성된 HCN, N, NH중에서 N은 열 NO<sub>x</sub> 생성반응에 의해 NO가 되고 HCN과 NH는 일련의 반응을 거쳐 NO로 변화되는 것으로 알려져 있다. 대기환경 오염인 NO<sub>x</sub>는 열 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 본 논문에서는 NO에 대해서만 취급하기로 한다.

NO의 생성 과정을 화학적인 측면에서 살펴보면 화학 평형에 도달하기까지의 반응속도를 고려하

Table 1. Rate constants for NO formation mechanism

Reaction	Rate constant(cm <sup>3</sup> /mol s)	Temperature(K)
N + NO ⇒ N <sub>2</sub> + O	$k_1^+ = 7.6 \times 10^{13} \exp(-38000/T)$	2000 - 5000
O + N <sub>2</sub> ⇒ NO + N	$k_1^- = 1.6 \times 10^{13}$	300 - 5000
N + O <sub>2</sub> ⇒ NO + O	$k_2^+ = 6.4 \times 10^4 T \exp(-3150/T)$	300 - 3000
O + NO ⇒ O <sub>2</sub> + N	$k_2^- = 1.5 \times 10^4 T \exp(-19500/T)$	1000 - 3000
N + OH ⇒ NO + H	$k_3^+ = 4.1 \times 10^{13}$	300 - 2500
H + NO ⇒ OH + N	$k_3^- = 2.0 \times 10^{14} \exp(-23650/T)$	2200 - 4500

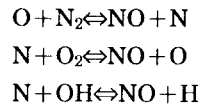
는 비평형 계산법과 반응하면 즉시 평형상태에 도달한다고 가정한 평형 계산법이 있다. 일반적으로 팽창행정 동안의 NO해리는 온도 감소로 인해 매우 느리게 진행되고 NO생성율은 연소율보다 느리게 진행되기 때문에 대부분의 NO는 연소가 완전히 이루어진 다음에 생성되고 NO농도가 평형에 도달되는 시간은 다른 생성물 성분이 평형에 도달되는 시간보다 더 많이 요구된다. 즉, NO는 연소행정에서는 고온이기 때문에 반응속도가 빨라져서 평형농도에 도달되는데 이때의 NO농도는 매우 높고, 팽창 행정에서는 반응 온도가 급격하게 저하하지만 반응 속도가 느려 지기 때문에 평형상태에 도달하지 못하고 동결되어 평형상태의 NO농도보다 상당히 높게 배출된다.

따라서, 평형계산으로부터 구한 결과는 실린더 내의 NO발생 경향을 정성적으로 설명하는 것은 가능하지만 정량적으로 설명하기는 미흡하다. 그러므로 NO를 제외한 다른 가스 성분은 반응 시간이 아주 짧기 때문에 평형계산을 이용할 수 있지만 NO의 반응속도는 연소 속도에 비해 빠르지 못하고 평형에 도달하는 시간이 매우 길어서 비평형으로 계산해야 한다. 따라서 NO생성물 예측은 열역학적 평형계산과 반응속도를 고려한 비평형계산의 두단계로 나누어서 계산하면 NO생성량을 예측할 수 있다.

연소실내의 질소산화물 생성반응의 종류는 대단히 많다. Eyzat와 Guibet는 NO의 배출농도를 최소로 하는 연소조건을 추정하기 위한 이론적인 수단으로서 N원자와 O원자의 농도는 극히 적어서 NO 생성에 기여하는 영향이 적기 때문에 무시할 수 있다고 하는 Kaufmann의 연구결과를 인용하여 N<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>의 2분자반응에 의한 NO생성만을 고려하였다.<sup>(7)</sup> 이 계산모델은 계산방법이 매우 간단

하고 희박영역에서는 실험결과와 잘 일치하는 것으로 알려져있다.<sup>(8)</sup> 그러나, 최근 가장속도가 빠르고 지배적인 것은 확장 Zeldovich mechanism으로 알려져 있으며, 많은 관련 문헌들에서 인용되고 있다. 따라서, 본 논문에서도 이 모델을 사용하기로 한다.

NO 생성 비평형 계산에 이용된 확장 Zeldovich mechanism은 다음과 같다.<sup>(9)</sup>



확장 Zeldovich mechanism반응식의 속도상수는 Table 1.과 같고 속도 상수는 단지 온도만의 함수로 표시된다.

### 3. 계산방법

#### 3.1. 사이클시뮬레이션

연료에 의해 실린더내로 공급되는 에너지 중 일부는 기계적 일로 변환되고 일부는 실린더로부터 배기가스 형태로 빠져나가며 그 나머지는 열전달에 의해 벽외로 빠져 나간다. 따라서 연소실 가스에 대하여 열역학 제 1법칙을 적용하여 시간에 대한 미분형태를 취하면 다음과 같이된다.

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dQ}{dt} - P \frac{dV}{dt} \tag{1}$$

$$\frac{dQ}{dt} = Q_f \frac{dx}{dt} - P \frac{dQ_l}{dt} \tag{2}$$

여기에서  $dU$  : 내부에너지 변화,  $Q_f$  : 공급연료 발열량,  $Q_l$  : 연소실내의 손실열량,  $x$  : 연소율. 위

식들과 상태방정식을 이용하면 실린더내상태 즉 온도와 압력을 구할 수 있다.

디젤기관의 연소에 있어서는 디젤기관 특유의 연소 초기의 급격한 예혼합연소가 지배적이라 생각되는 초기연소 부분과 비교적 완만한 확산연소가 지배적이라 생각되는 후기연소 부분의 2단계로 연소가 행하여 지는 것이 일반적으로 알려져 있다. 또한, NO<sub>x</sub>의 생성은 연소초기 즉 예혼합연소기에 대부분이 발생하는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 Wiebe의 연소함수를 중첩하여 적용하기로 하였다.<sup>110</sup> 즉, 디젤연소는 예혼합연소 부분과 확산연소 부분으로 구성되고 이 두개의 연소는 착화화 동시시 시작된다고 하는 두가지 가정을 하면 열발생속도의 근사함수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx}{d\theta} = \alpha[MP] + (1-\alpha)[MD] \quad (3)$$

여기서,

$$[MP] = 6.9(mp + 1) \left(\frac{\theta}{\theta_p}\right)^{mp}$$

$$\exp\{-6.9\left(\frac{\theta}{\theta_p}\right)^{mp+1}\}$$

$$[MD] = 6.9(md + 1) \left(\frac{\theta}{\theta_d}\right)^{md}$$

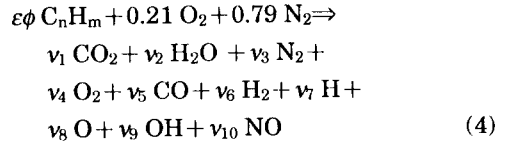
$$\exp\{-6.9\left(\frac{\theta}{\theta_d}\right)^{md+1}\}$$

$\alpha$  : 예혼합연소 및 확산연소의 비율,  
 $mp, md$  : 예혼합연소, 확산연소의 연소특성지수,  
 위 식에서 예혼합연소율  $\alpha$ 와 예혼합 연소기간  $\theta_p$ , 확산연소기간  $\theta_d$ 를 변수로하여 연소과정에 있어서의 열발생형태를 변화시킬 수 있다.

### 3. 2. 평형계산

평형 계산방법은 주어진 온도와 압력하에서 질량보존의 법칙과 평형상수를 이용하여 각 생성물의 몰수를 계산하는 방법이다. 본 연구에서는 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H, O, OH, NO의 10개 성분을 고려하여 계산하였다.<sup>111</sup>

당량비가  $\phi$ 인 디젤연료 C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>가 화학반응을 하면 다음과 같은 반응식으로 표현된다.



여기에서,  $\epsilon$  : molar fuel-air ratio,  $v_i$  : coefficient of product composition

식(4)의 반응식으로부터 질량보존의 법칙을 이용하여 C, H, O, N에 대한 4개의 방정식과 몰분율  $y_i$ 를 사용한 전체 몰수와의 관계식을 이용하면 모두 5개의 방정식을 유도해 낼 수 있다. 위의 식에서 10종류의 연소생성물의 전 몰수와 각 성분의 몰분율  $y_i$ 가 미지수이므로 모두 11개의 관계식이 필요하나, 식의 수는(구속조건) 5개 밖에 없으므로 다른 6개의 관계식이 요구된다. 따라서, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>가 해리를 일으켜서 CO, H<sub>2</sub>, OH, O, N, NO가 생성되는 화학반응을 가정하여 이 관계를 이용하면 6개의 관계식을 얻을 수 있다. 즉, 위의 해리반응에 있어서 이 반응들이 역반응과 순반응 속도가 균형이 되는 곳에서 평형을 이루는 평형상수(K)를 다음과 같이 구할 수 있다.

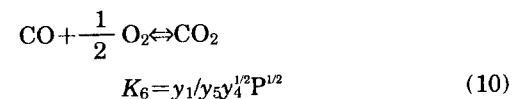
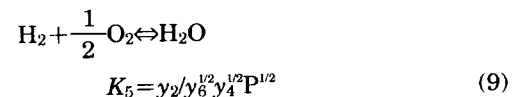
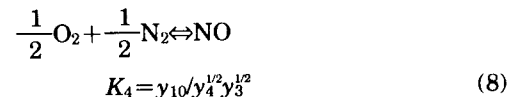
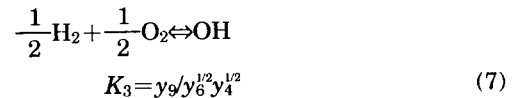
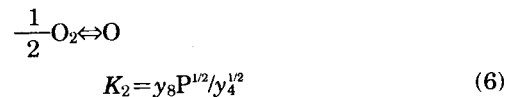
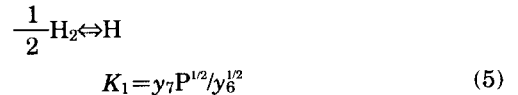


Table 2. Correlation coefficients of equilibrium constants

	A	B	C	D	E
$K_1$	0.432168E+0	0.112464E+5	0.267629E+1	-0.745744E-4	0.242484E-8
$K_2$	0.310805E+0	0.129540E+5	0.232179E+1	-0.738336E-4	0.344645E-8
$K_3$	-0.141784E+0	0.213308E+5	0.853461E+1	-0.355015E-4	-0.310227E-8
$K_4$	0.150879E+0	0.470959E+5	0.646096E+1	-0.272805E-4	0.154444E-8
$K_5$	-0.752364E+0	0.124210E+5	0.260286E+1	-0.259556E-4	0.162287E-8
$K_6$	-0.415302E+0	0.148627E+5	0.475746E+1	-0.124699E-4	0.900227E-8

위 6개의 반응식으로서 11개의 미지수에 대해 11개의 방정식이 되어서 평형상수  $K_1 \sim K_6$ 의 값을 결정하여 11개의 방정식을 풀 수 있다. 평형상수값  $K$ 는 단지 온도만의 함수로 고려할 수 있으며 JANAF Table Data를 수치보간법을 이용하여 구할 수 있는데 여기서는 Olikara 와 Borman<sup>(12)</sup>에 의해 계산된 값을 인용하여 사용하였고 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\log K = A \ln(T/1000) + B/T + C + DT + ET^2$$

여기서 T는 절대온도이며,  $600 < T < 4000K$ 범위에서의 각 계수를 Table 2에 보인다.

### 3.3. NO 생성농도의 비평형계산

확장 Zeldovich mechanism 반응식에서 순반응 속도상수를  $k+$ , 역반응 속도상수를  $k-$ 라 하면 NO와 N 생성율은 다음과 같이 수식화 된다.

$$\begin{aligned} \frac{d[NO]}{dt} = & k_1^+ [O] [N_2] + k_2^+ [N] [O_2] \\ & + k_3^+ [N] [OH] - k_1^- [NO] [N] \\ & - k_2^- [NO] [O] - k_3^- [H] [NO] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[N]}{dt} = & k_1^+ [O] [N_2] + k_2^- [NO] [O] \\ & + k_3^- [NO] [H] - k_1^- [NO] [N] \\ & - k_2^+ [O_2] [N] - k_3^+ [N] [OH] \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, [ ] : 각 성분의 몰 농도(mole/cm<sup>3</sup>)

$k^+$  : 반응 상수(cm<sup>3</sup>/mole · sec)

평형계산 결과  $[NO]_{eq}$ 를 이용하여  $[NO]$ 에 대한 계산을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = \left[ -\frac{[N]}{[N]_{eq}} \frac{[NO]}{[NO]_{eq}} + \frac{[N_2]}{[N_2]_{eq}} \frac{[O]}{[O]_{eq}} \right] R_1$$

$$\begin{aligned} & + \left[ \frac{[N]}{[N]_{eq}} \frac{[O_2]}{[O_2]_{eq}} + \frac{[NO]}{[NO]_{eq}} \frac{[O]}{[O]_{eq}} \right] R_2 \\ & + \left[ -\frac{[N]}{[N]_{eq}} \frac{[OH]}{[OH]_{eq}} + \frac{[NO]}{[NO]_{eq}} \frac{[H]}{[H]_{eq}} \right] R_3 \end{aligned} \quad (13)$$

$$R_1 = k_1^+ [O]_{eq} [N_2]_{eq} = k_1^- [N]_{eq} [NO]_{eq}$$

$$R_2 = k_2^+ [N]_{eq} [O_2]_{eq} = k_2^- [NO]_{eq} [O]_{eq}$$

$$R_3 = k_3^+ [N]_{eq} [OH]_{eq} = k_3^- [NO]_{eq} [H]_{eq}$$

O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H, OH의 반응율은 충분히 빠르므로 평형농도와 비평형 농도와 같다고 가정할 수 있으므로, 식(13)을 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{d[NO]}{dt} = & \left[ -\frac{[N]}{[N]_{eq}} \frac{[NO]}{[NO]_{eq}} + 1 \right] R_1 \\ & + \left[ \frac{[N]}{[N]_{eq}} - \frac{[NO]}{[NO]_{eq}} \right] R_2 \\ & + \left[ \frac{[N]}{[N]_{eq}} - \frac{[NO]}{[NO]_{eq}} \right] R_3 \end{aligned} \quad (14)$$

또한, [N]은 통상 매우 작으므로  $\frac{d[N]}{dt} = 0$  이라고 가정할 수 있으므로 식(14)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{2R_1(1-\beta)}{(1+\beta K)} \quad (15)$$

$$\text{여기서 } \beta = \frac{[NO]}{[NO]_{eq}}, K = \frac{R_1}{R_2 + R_3}$$

방정식 (15)의 해석해를 구하면 NO생성물의 몰 농도를 구할 수 있다.

Fig. 1은 평형 계산 예를 나타낸다. 계산에 이용된 기관(행정×직경 : 100×100mm, 압축비 : 15)은 4행정 디젤기관으로 계산조건은 기관회전수 2000rpm, 당량비 0.7, 연소기간 60deg, 연료분사

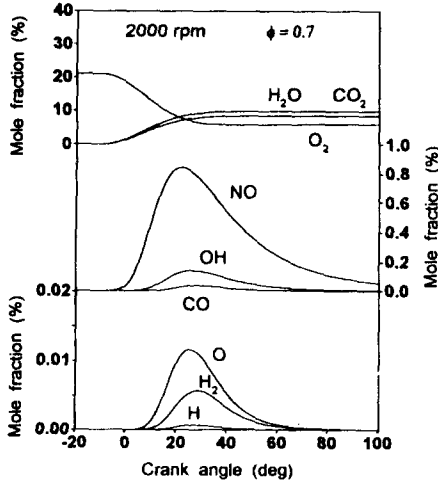


Fig. 1. Mole fractions of gas composition in cylinder as function of crank angle at equilibrium.

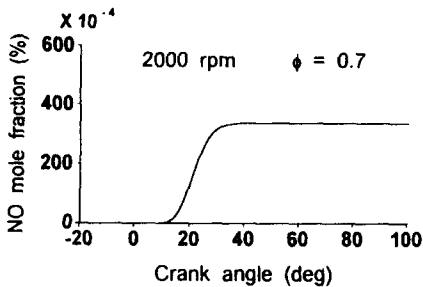


Fig. 2. NO concentration as function of crank angle at non-equilibrium

시기 10 CAdeg BTDC이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 평형계산에 있어서는 팽창과정에서 NO 등 6종류의 성분의 몰분율은 점차 감소하여 거의 소멸되는 것으로 나타난다. Fig. 2는 같은 계산 조건에서 NO 생성농도의 비평형 계산결과를 나타내고 있다. 비평형 계산의 결과에 의하면 팽창과정에 있어서 온도와 압력이 떨어지더라도 일정한 값을 유지하게 되며, 이는 O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO 해리시 역반응 속도와 정반응속도가 같아져서 동결현상이 일어나기 때문으로 알려져 있다.<sup>(13,14)</sup>

NO의 생성에 있어서는 비평형 계산에 있어서 NO가 늦게 생성됨을 알 수 있으며 이는 NO 반응속도가 느리기 때문으로 비평형계산에 의하여 알 수 있는 사항이다. 따라서, 배기로 배출되는 최종

NO 농도는 평형계산결과와 크게 다르기 때문에 NO 생성농도는 비평형 계산에 의하여 예측하여야 함을 알 수 있다.

#### 4. NOx 생성에 영향을 미치는 인자들에 의한 계산결과

개발된 NO생성농도 예측프로그램에 의한 계산 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 기존의 문헌들에 의하여 NOx 의 생성에 영향을 미치는 것으로 보고된 인자들을 변경시켰을 때의 계산결과에 대하여 검토하고자 한다.

##### 4. 1. 잔류가스율에 의한 영향

NOx 배출량의 저감방법으로 EGR법이 채용되고 있음은 이미 앞서서도 언급한 바 있다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 아직 가스교환과정이 포함되어 있지 않기 때문에 압축을 시작하는 하사점에서 실린더 내의 상태(압력, 온도 및 가스조성)를 초기치로 입력하여 계산하고 있다. 따라서 잔류가스율을 이용하면 실린더 내에 남아있는 배기가스량이 연소생성물의 농도에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 실린더내의 연소상태를 해석하는데는 잔류가스나 재순환배기가스는 동일하게 표현되기 때문이다. 잔류가스율(f)은 질량비로 표현하여 다음과 같이 정의 하였다.

$$\text{잔류가스율 } (f) = \frac{\text{잔류가스의 중량 } (m_r)}{\text{실린더내 전가스의 중량 } (m_a + m_r)}$$

여기서 m<sub>a</sub>는 흡입공기중량, m<sub>r</sub>는 잔류가스중량이다.

Fig. 3는 당량비를 일정하게 (φ=0.7) 하고 잔류가스 비율 f만을 변화시킨 경우에 있어서 실린더내 최고압력, 온도, NO의 농도 및 열효율을 나타낸다. 본 연구에 있어서 계산방법은 공기 1몰을 기준으로 하고 있기 때문에, 잔류가스율이 증가하면 혼합기양이 감소하여 상대적으로 공급연료량이 감소하게 된다. 따라서 그림에서 알 수 있는 바와 같이 잔류가스 질량비율 f가 증가 함에 따라 압력 및 온도는 저하하고 그 결과 NO의 농도는 급격히 저하함을 알 수 있다.

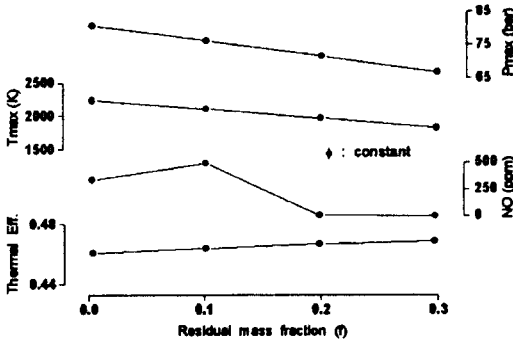


Fig. 3. Calculation results by variation of residual mass fraction. ( $\phi=0.7$ )

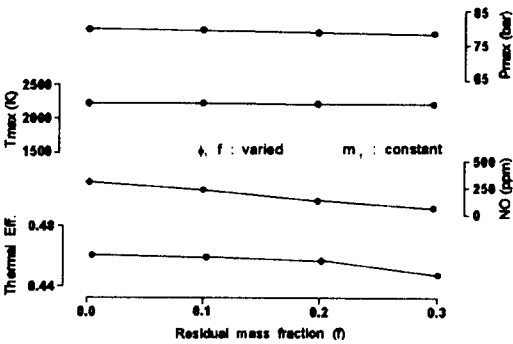


Fig. 4. Calculation results by variation of residual mass fraction. ( $m_r=42.7\text{mg/cyl/cyc}$ )

Fig. 4은 잔류가스율에 의한 영향만을 파악하기 위하여 공급 연료량을 일정하게 ( $m_r=42.7\text{mg/cyl/cyc}$ ) 하고 잔류가스 비율을 변화시킨 경우의 계산결과를 나타내고 있다. 즉, 잔류가스율의 증가에 따라 공급공기량이 감소하며, 당량비는 이에 따라 증가하게 된다. 그럼에서 알 수 있는 바와 같이 공급연료량이 일정하기 때문에 실린더내 가스의 압력과 온도는 거의 변화가 없다. 그러나 NO생성농도에 미치는 영향은 매우 크며 EGR율이 증가할수록 NO의 질량분율이 급격히 저하함을 알 수 있다. 이로부터 NO의 농도에 미치는 EGR율의 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 열발생형태에 의한 영향

##### (1) 연소특성지수 m에 의한 영향

실린더내 가스의 상태는 연소형태 즉 열발생율에 따라 크게 변한다. 본 연구에서는 앞에서 언급

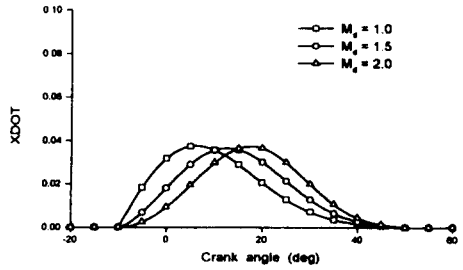


Fig. 5. The effect of combustion index  $m_d$  on the heat release pattern

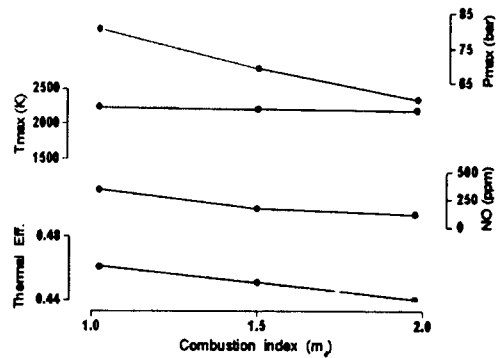


Fig. 6. Calculation results by variation of combustion index  $m_d$

한 바와 같이 분사율 대신에 열발생율 형태를 이용하는 방법을 채택하였으며 열발생율 형태에는 wiebe함수를 이용하였다. Fig. 5는 wiebe의 연소함수인 연소특성지수  $m_d$ 의 변화에 따른 연소함수의 형태를 나타낸 것으로, 연소특성지수  $m_d$ 가 작을수록 초기연소속도가 빠르게 됨을 의미한다.

Fig. 6는 연소특성지수의 변화에 따른 계산결과를 나타낸 것으로  $m_d$ 가 증가함에 따라 연소속도가 늦어지기 때문에 실린더내 가스의 최고압력 및 최고온도가 낮아지고 이에 따라 NO의 발생시기가 늦어지고 농도 또한 저하함을 알 수 있다. 이로부터 연소초기의 NO의 생성량이 중요함을 알 수 있다.

##### (2) 예혼합 연소비율 $\alpha$ 에 의한 영향

디젤기관의 연소는 일반적으로 예혼합연소와 확산연소로 구분될 수 있기 때문에 예혼합연소의 비율에 따른 영향을 조사하였다. Fig. 7은 예혼합 연소비율  $\alpha$ 에 따른 연소함수의 형태를 나타낸다. Fig. 8은 예혼합 연소비율  $\alpha$ 에 따른 계산결과를

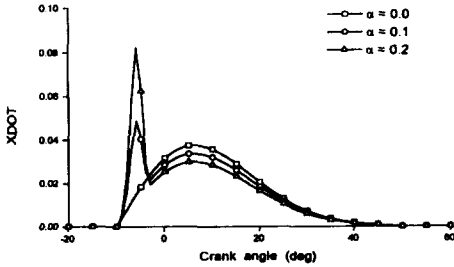


Fig. 7. The effect of pre-mixed combustion ratio  $\alpha$  on the heat release pattern

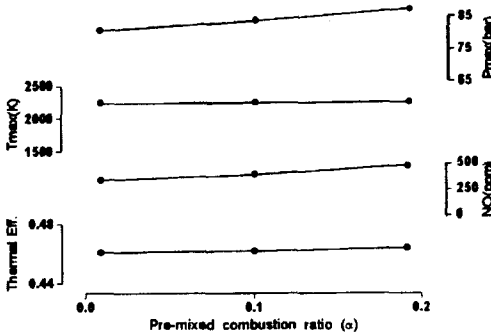


Fig. 8. Calculation results by variation of pre-mixed combustion ratio  $\alpha$

나타낸다. 예혼합연소비율  $\alpha$ 가 크게됨에 따라 초기의 NO생성속도가 빨라지고 이 때문에 최종 NO 농도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 열효율은 증가한다.

이상의 검토 결과로부터 연소형태는 NO의 생성에 크게 영향을 미치며 열효율과는 서로 상반되는 관계에 있음을 알 수 있다.

### 4.3 연료분사시기에 의한 영향

Fig. 9 은 연료분사시기가 NO생성농도에 미치는 영향을 조사한 것이다. 엄밀한 의미에서 분사시기와 열발생시작시기는 착화지연으로 인하여 동일하지 않지만 본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 Wiebe연소함수를 이용하여 열발생시작시기를 분사시기로 표현하였다. 분사시기를 늦춤에 따라 실린더내 최고압력 및 최고온도가 저하하고 NO농도도 저하함을 알 수 있으며, 분사시기의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 열효율도

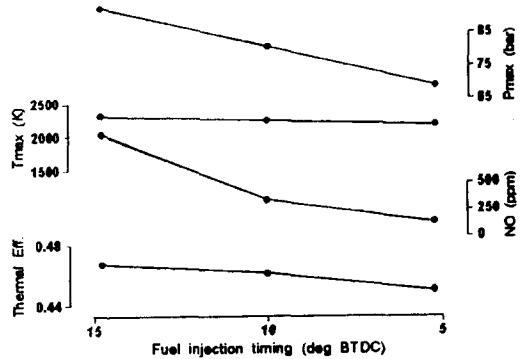


Fig. 9. Calculation results by variation of fuel injection timing.

한 저하함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 연소가스의 조성을 계산하기 위한 프로그램을 개발하였으며, 특히 NO농도의 예측을 위하여 비평형계산을 시도하였다. 또한, NO 생성에 영향을 미치는 인자들에 대해 고찰하고 이들과 기관 제성능과의 관계를 비교, 검토하였다. 본 시뮬레이션계산에 의한 예측결과는 지금까지 보고된 다른 연구결과들과 비교하여 정성적으로 일치하는 경향을 나타내고 있다. 따라서, 본 연구 결과로 NO발생농도를 예측할 수 있는 프로그램이 개발되었다고 생각된다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 디젤엔진에서 연소실내에 생성되는 NO생성물을 예측할 수 있는 수법을 확립하여 이들을 전산 프로그램화하였다.
- (2) EGR율이 증가할수록, 분사시기가 늦어질수록 NO생성농도는 감소하나, 열효율은 저하하여 NO생성농도와 열효율은 서로 상반된 관계에 있음을 확인하였다.
- (3) 열발생을 형태에 따른 NO생성특성은 예혼합연소비율에 의해 크게 좌우되며 연소기간과 연소가스온도 지속시간에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

이후 실험결과 또는 다른 연구결과와의 비교 등을 위하여는 연소모델의 설정, 다영역모델의 채택



등에 관한 계속적인 연구가 필요하다고 생각된다.

**참고문헌**

1. C. Arcoumanis and C.S. Jou, "Measurement and Prediction of transient NOx emissions in DI diesel engines," IMechE. 1992.
2. H. Hiraki and J.M. Rife., "Performance and NOx Model of a Direct Injection Stratified Charge Engine," SAE Paper 800050, pp.336, 1980.
3. G.A. Lavoie and P.N. Blumberg, "A Fundamental Model for Predicting Fuel Consumption, NOx and HC Emissions of the Conventional Spark-Ignited Engine", Combustion Science Technology, Vol 21, pp.225, 1980.
4. 배명환, 하정호, "스크러버형 EGR시스템 디젤기관의 배기배출물특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제22권 제4호, pp.481, 1998.
5. 박권하외 2인, "물혼합연료 및 EGR의 조합에 의한 디젤기관의 질소산화물과 매연미립자 동시저감기술에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제21권 제4호, pp.356, 1997.
6. Noel De Nevers, "Air Pollution Control Engineering", McGraw-Hill, pp.378, 1995.
7. P. Eyzat, J.C. Guibet, "A New Look at Nitrogen Oxides Formation in Internal Combustion Engines", SAE Paper No. 680124, pp.481, 1968
8. 吉田正武, "火花點火機關における排氣組成の計算", 內燃機關, Vol. 11, No. 129, pp.27, 1972
9. J.B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, pp.567, 1988.
10. N. Miyamoto, et al., "Description and Analysis of Diesel Engine rate of Combustion and Performance Using Wiebe's Functions", SAE Paper 850107, 1985

11. C.R. Ferguson, "Internal Combustion Engines" John Wiley & Sons, pp.121, 1986.
12. C. Olikara and G.L. Borman, "A Computer Program for Calculating Properties of Equilibrium Combustion Products with Some Application to I.C. Engines", SAE Paper No. 750468, 1975.
13. H.K. Newhall, E.S. Starkman, "Direct Spectroscopics Determination of Nitric Oxide in Reciprocating Engine Cylinders", SAE Paper No. 670122, 1967.
14. 龍下利男, "火花點火機關における排氣組成の計算", 內燃機關, Vol. 11, No. 129, pp.35, 1972

**저 자 소 개**



**배병환(裵秉煥)**

1966년 5월생. 1989년 3월 해군사관학교 졸업, 1996년 2월 한국해양대학교 대학원 기관공학과 석사과정졸업. 1989년~현재 한국해군



**남정길(南廷吉)**

1962년 7월생. 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1991년 2월 동대학원 석사과정졸업. 1999년 2월 동대학원 박사과정 졸업. 1992년~현재 (주)현대자동차



**최재성(崔在星)**

1952년 5월생. 1974년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1976년 한국해양대학교 대학원 기관 공학과 석사과정수로. 1986년 일본경도대학 대학원 기계공학과 박사과정수로. 1974년~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수. 당학회 총무이사