

〈논문〉 SAE NO. 96370023

대향분출염 화염방식에 의한 NOx 생성저감과 연소특성 연구(Ⅲ)

A Study on NOx Pollutant Reduction and Combustion Characteristics of Impinging-Jet-Flame Combustion Process(Ⅲ)

최 성 만,* 정 인 석,** 조 경 국***
S. M. Choi, I. S. Jeung, K. K. Cho

ABSTRACT

It has been generally accepted that NOx formation increases as the maximum temperature or correspondingly the maximum pressure of a combustion system increases. Recently some exceptional experimental results have been reported that under certain circumstance NOx formation could be reduced while the maximum pressure was increasing by varying the methods of combustion for the same kind of premixed gases. Until now that kind of results have been acquired only for the case of a dual opposed prechamber. But the mechanism has not been clearly understood yet.

3D computer simulation has been tried to clarify the mechanism. For this purpose KIVA-II has been modified and applied to the model combustion chamber with which the same kind of experimental works have been done by the authors. A good agreement with the experimental results was achieved with the spatial and temporal resolution which is hard to be obtained by the experimental methods. And it was observed that for the dual opposed prechamber case the time for the NOx formation, which is non-equilibrium reaction, is shorter than any other case by an appropriate mixing process in the main combustion chamber. The shorter time reduced heat loss through the combustion chamber walls and thereby obtained the higher maximum pressure.

주요기술용어 : NOx, dual opposed prechamber, computer simulation.

Nomenclature

Alphabetic

* 서울대학교 항공우주공학과
** 정희원, 서울대학교 항공우주공학과
*** 정희원, 서울대학교 항공우주공학과(사망)

$A_{pr}T^{E_{pr}}$, $A_{br}T^{E_{br}}$: Pre-exponential factors
 a : Dimensionless quantity used in conjunction with PGS method
 a_{mr} , b_{mr} : Integral stoichiometric coefficients for reaction r
 C_{μ} : Empirical constant with a standard

	value of 0.09
C_p	: Specific heat at constant pressure
C_{pm}	: Specific heat at constant pressure for species m
C_v	: Specific heat at constant volume
D	: Diffusion coefficient
E_{fr}, E_{br}	: Forward and backward activation temperatures
h_m	: Specific enthalpy for species m
$(\Delta h_f^0)_m$: Heat of formation for species m at absolute zero temperature
I	: Unit dyadic tensor
I	: Specific internal energy
I_m	: Specific internal energy for species m
J	: Heat flux vector
K	: Thermal conductivity
K_C^T	: Concentration equilibrium constant
k	: Turbulent kinetic energy
k_{fr}, k_{br}	: Forward and backward reaction coefficients
p	: Fluid pressure
Pr	: Prandtl number
Q^c	: Rate of chemical heat release
Q_r	: Negative of the heat of reaction at absolute zero temperature
R_0	: Universal gas constant
T	: Temperature
t	: Time
\vec{u}	: Fluid velocity vector
W_m	: Molecular weight of species m
<i>Greeks</i>	
ϵ	: Dissipation rate
λ	: Second viscosity coefficient
μ	: First viscosity coefficient
ρ	: Total mass density
ρ_m	: Mass density for species m
$\bar{\rho}$: Viscous stress tensor
$\dot{\omega}_r$: Reaction rate r -th reaction

1. 서 론

대기중의 질소산화물은 광화학적 스모그를 발

생시키고, 산성비의 원인을 제공하며, 성층권의 오존층을 파괴하여 지구 온난화에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다^{1),2)}. 총칭하여 NOx로 불리는 유해 질소산화물의 주종은 NO와 NO₂이다. 대기중의 질소산화물의 주 생성원인은 화석연료(석탄, 석유, 천연가스 등)의 연소에 의한 것이며, 특히 서울의 경우 질소산화물의 주 배출원은 자동차이다³⁾. 또한 선진국(미국, 일본, EU 등)에서의 NOx 배기가스에 대한 법적규제는 한층 엄격해지고 있으며, 미국의 경우 1996년에는 현재의 50%, 2003년에는 현재의 25% 수준까지 NOx의 배기가스 허용치를 제한하려고 계획하고 있다¹⁾.

따라서 자동차의 배기가스에서 NOx이 양을 허용한도치 내로 저감하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 한편 기관의 성능 향상을 위해서는 기관의 연료 경제성에 대한 요구조건, 즉 단위연료소비에 대하여 최대출력을 얻을 수 있어야 한다는 요구조건이 부가된다. 그리고 지구온난화가 기후변동의 주요 쟁점으로 등장하면서 CO₂ 배출량의 저감도 요청되고 있는 실정인데, 이러한 CO₂ 배출량 저감은 기관의 연료 경제성 향상에 대한 요구조건과 밀접한 관계가 있다. 그러나 밀폐연소실 또는 유동시스템에서, 낮은 NOx 생성과 최대출력연소는 서로 상충되는 관계가 있다. 한 예로 배기가스 재순환 시스템의 경우 NOx 생성이 상당히 저감되지만 동시에 HC가 증가하고 엔진출력이 감소되는 단점이 있다⁴⁾.

최대출력과 동시에 낮은 NOx 배출이 가능한 연소시스템이 Miura 등⁵⁾, Fujimoto 등⁶⁾, Yamaguchi⁷⁾, 조경국⁸⁾, Okajima와 Kumagai⁹⁾, 정인석^{10),11)} 등에 의해 실험적으로 연구되었으며, 이 연소시스템은 대향 부연소실 또는 대향 분무 방식에 의하여 연소가 진행되는 것이 그 특징이다. 하지만 이러한 실험적 연구에서, 대향 분출염 연소방식을 도입함으로써 최고압력은 높게 유지하면서 질소산화물의 생성을 저감할 수 있다는 실험결과를 제시하였으나, 이러한 현상을 일으키는 메카니즘에 대한 명확한 규명이 되어 있지는 않다.

따라서 본 연구에서는, 3차원 수치모사 방법을

이용하여 대향 부연소실 내 화염전파 과정을 모사함으로써 실험적인 측정이 곤란한 유동장, 온도 및 화학종의 시간적·공간적 분포를 파악하여 NOx 생성저감기구를 이해하고자 한다. 본 연구에서는 KIVA-II¹²⁾ 코드를 적절하게 수정하여 사용하였으며, 수치계산을 위한 연소실 모델은 본 연구그룹에서 실험적인 연구를 수행하여 온 연소실¹⁰⁾로 하였다.

2. 수치 해석

2.1 지배 방정식

난류의 영향을 고려하기 위하여 $k-\epsilon$ 모델을 이용하였으며¹³⁾, 이 난류의 영향은 운동량 방정식과 $k-\epsilon$ 난류 방정식에 나타나 있다.

연속 방정식

단일확산계수 D 를 사용하는 Fick의 법칙을 따른 질량확산으로 가정하면, 화학종 m 에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \tilde{u}) = \nabla \cdot \left[\rho D \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \dot{\rho}_m^c \quad (1)$$

여기서 $\dot{\rho}_m^c$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{\rho}_m^c = W_m \sum_r (b_{mr} - a_{mr}) \dot{\omega}_r \quad (2)$$

식 (1)을 각 화학종에 대해 모두 합하고, 화학 반응을 전후하여 질량변화가 없다고 가정하면, 전체 유체 밀도 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{u}) = 0 \quad (3)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial (\rho \tilde{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{u} \tilde{u})$$

$$= -\frac{1}{a^2} \nabla p - \nabla \cdot \left(\frac{2}{3 \rho k} \right) + \nabla \cdot \bar{\sigma} \quad (4)$$

체력은 무시하였으며, 무차원 계수인 a 는 PGS(Pressure Gradient Scaling) Method¹⁴⁾와 관련되어 사용되는 것이다. PGS Method란 압력이 거의 균일한 낮은 마하수 유동에서 계산효율을 향상시키기 위한 방법이다. 점성응력텐서 $\bar{\sigma}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\sigma} = \mu [\nabla \tilde{u} + (\nabla \tilde{u})^T] + \lambda \nabla \cdot \tilde{u} \bar{I} \quad (5)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial \rho(I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{u} I) = -p \nabla \cdot \tilde{u} - \nabla \cdot \tilde{J} + \rho \epsilon + \dot{Q}_c \quad (6)$$

I 는 화학적 에너지를 포함하지 않은 비내부 에너지이다. 열유량은 열전도와 엔탈피 확산으로 인한 효과의 합으로 구해진다. 즉,

$$\tilde{J} = -K \nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla (\rho_m / \rho) \quad (7)$$

그리고 화학반응에 의한 열량항은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{Q}_c = \sum_r Q_r \dot{\omega}_r \quad (8)$$

$$\text{여기서 } Q_r = \sum_m (a_{mr} - b_{mr}) (\Delta h_f^0)_m$$

$k-\epsilon$ 난류 방정식

다음에 주어진 것과 같이 난류운동에너지 k 와 소산을 ϵ 에 대한 두개의 방정식을 사용한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{u} k) &= -\frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \tilde{u} \\ &+ \bar{\sigma} : \nabla \tilde{u} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_k} \right) \nabla k \right] - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \tilde{u} \epsilon) = & - \left(\frac{2}{3} c_{\epsilon 1} - c_{\epsilon 2} \right) \rho \epsilon \nabla \cdot \tilde{u} \\ & + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr_{\epsilon}} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} [c_{\epsilon 3} \bar{\sigma} \cdot \nabla \tilde{u} - c_{\epsilon 4} \rho \epsilon] \end{aligned} \quad (10)$$

계산에 이용된 상수값은 다음과 같다¹²⁾.

$$C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, C_{\epsilon 3} = -1.0$$

$$Pr_k = 1.0, Pr_{\epsilon} = 1.3$$

상태 관계식

이상적인 혼합기라고 가정하고 다음과 같은 상태관계식을 사용한다.

$$p = R_0 T \sum_m \left(\frac{\rho_m}{W_m} \right) \quad (11)$$

$$I(T) = \sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) I_m(T) \quad (12)$$

$$C_p(T) = \sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) c_{pm}(T) \quad (13)$$

$$h_m(T) = I_m(T) + \frac{R_0 T}{W_m} \quad (14)$$

여기서 $h_m(T)$ 의 값은 JANAF 표¹⁵⁾의 값으로 프로그램 내부에 100K 간격으로 데이터를 저장하고 있다. 따라서, 각 온도에서의 $h_m(T)$ 값은 간단한 선형보간을 통해 구한다. 그리고, $c_{pm}(T)$ 값은 $h_m(T)$ 값을 근간으로 하여 구해진다.

화학반응 관계식

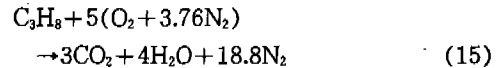
질소산화물의 대부분을 차지하는 일산화질소(NO)의 생성원인을 살펴보면, 첫째 연료자체의 성분에 의한 Fuel NO, 둘째 Zel'dovich에 의해 생성 메커니즘이 알려진 Thermal NO, 셋째, Thermal NO보다 빠른 속도로 형성되는

Prompt NO로 구분된다. 연료의 성분중 질소가 거의 없는 천연가스나 가솔린의 경우, NO의 지배적 생성원인은 Thermal NO로 알려져 있다¹⁶⁾.

따라서 본 수치해석에서는 질소산화물을 Thermal NO 생성량으로 표시하기로 하며, 본 수치계산에 이용된 화학반응 관계식은 1개의 총괄산화반응식, 느리게 반응하는 3개의 Thermal NO 생성기구, 그리고 매우 빠르게 반응하는 6개의 평형반응식으로 구성되어 있다.

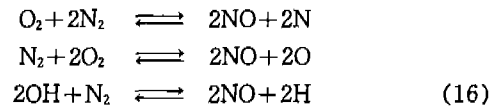
총괄 산화 반응식

연료로 사용한 프로판의 총괄산화반응식은 다음과 같다.



NO 생성 반응식

다음과 같은 3개의 Extended Zeldovich Mechanism¹²⁾을 사용한다.



이 반응들에 대한 반응률은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\omega}_r = k_{fr} \prod_m \left(\frac{\rho_m}{W_m} \right)^{a'_{mr}} - k_{br} \prod_m \left(\frac{\rho_m}{W_m} \right)^{b'_{mr}} \quad (17)$$

여기서 반응차수 a'_{mr} , b'_{mr} 은 경험적인 값이며, 계수 k_{fr} , k_{br} 는 일반적인 Arrhenius 형태로 가정하여 다음과 같이 주어진다.

$$k_{fr} = A_{fr} T^{c_{fr}} \exp\{-E_{fr}/RT\} \quad (18-a)$$

$$k_{br} = A_{br} T^{c_{br}} \exp\{-E_{br}/RT\} \quad (18-b)$$

총괄산화반응식 및 NO 계산에 이용된 상수 값은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Coefficients of Kinetic Reaction¹⁷⁾

Reaction	A (mole,cm ³ ,sec)	ζ	E (KJ/mole)
1 C ₃ H ₈ +5(O ₂ +3.76N ₂) →3CO ₂ +4H ₂ O+18.8N ₂	8.600E11	0	125.46
2 O ₂ +2N ₂ →2N+2NO	1.5587E14	0	561.98
3 O ₂ +2N ₂ →2N+2NO	7.5000E12	0	0
4 2O ₂ +N ₂ →2O+2NO	2.6484E10	1.0	493.76
5 2O ₂ +N ₂ →2O+NO	1.6000E09	1.0	163.52
6 N ₂ +2OH→2H+2NO	2.1230E14	0	473.84
7 N ₂ +2OH→2H+2NO	0.0	0	0

$$K_c^*(T) = \exp\left[A \ln T_A + \frac{B}{T_A} + C + DT_A + ET_A^2\right] \quad (21)$$

여기서 $T_A = \frac{T}{1000}$ (K)

평형계산에 이용된 값들은 Table 2에 나타나 있다.

점성계수

k-ε 난류 모델의 경우 점성계수는 다음과 같이 표시된다.

$$\mu = \mu_{air} + c_\mu k^2 / \epsilon \quad (22)$$

여기서 c_μ는 경험적인 상수로 보통 0.09¹²⁾의 값을 가진다. 여기서 μ_{air}는 Sutherland의 식을 이용하며 다음과 같이 표현된다¹²⁾.

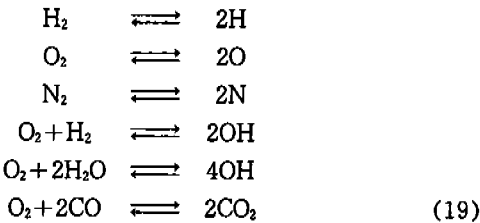
$$\mu_{air} = (1.457 \times 10^{-5}) \times \frac{T^{3/2}}{T+110} \quad (23)$$

Table 2 Coefficients of Equilibrium Reaction¹⁸⁾

Reaction	A	B	C	D	E
1 H ₂ ⇌2H	0.990	-51.791	0.993	-0.343	0.011
2 O ₂ ⇌2O	0.431	-59.655	3.503	-0.340	0.016
3 N ₂ ⇌2N	0.795	-113.261	3.168	-0.444	0.027
4 O ₂ +H ₂ ⇌2OH	-0.653	-9.823	3.930	0.163	-0.014
5 O ₂ +2H ₂ O⇌4OH	1.159	-76.847	8.532	-0.868	0.046
6 O ₂ +2CO⇌2CO ₂	0.981	68.445	-10.594	0.574	-0.0415

평형 반응식

6개의 반응식이 평형반응식으로 사용된다.



평형반응에 대한 반응률은 다음과 같이 주어진다.

$$\prod_m \left(\frac{\rho_m}{W_m}\right)^{b_{mr}-b_{mr}} = K_c^*(T) \quad (20)$$

여기서 K_c^{*}(T)는 농도평형상수로 다음과 같은 형태로 주어진다.

2.2 계산격자 생성 및 화염면 확장변환

계산 격자는 본 연구그룹의 실험적 연구에 사용된 연소실(Fig.1)을 모델로 하여 생성하였으며, 그 계원은 다음과 같다. 반지름 6cm, 두께 4cm인 원형 연소실로서, 전체체적은 452cc이다. 그리고 부연소실의 체적은 67cc로써 주연소실 대 부연소실의 부피비는 14.8%이다. 오리피스 직경은 5mm, 8mm 및 13mm의 3가지 종류이다.

이러한 복잡한 형상에 적합한 격자를 생성하기 위하여 Poisson방정식을 이용하였다. 계산에 이용된 격자의 형상은 Fig.2에 나타나 있다.

이러한 계산격자로써 화염면을 자세히 모사한다는 것은 많은 난점이 있다. 왜냐하면 대항 부연소실의 경우 격자수는 43×21×15이며, 가장 큰 격자의 한 방향 길이는 약 3mm 정도가 된다. 그런데 탄화수소의 일반적 화염두께는 0.1mm 정도의 크기를 가지므로, 화염면을 충분히 해석하

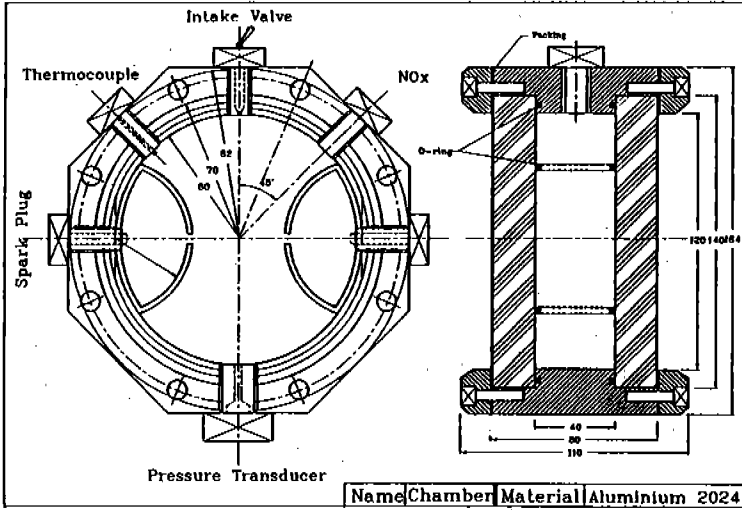
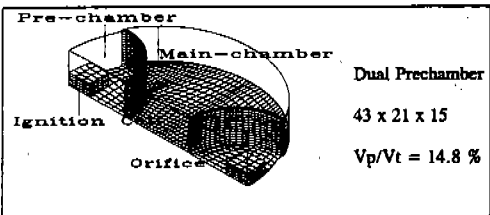
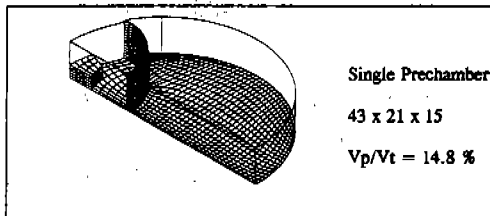
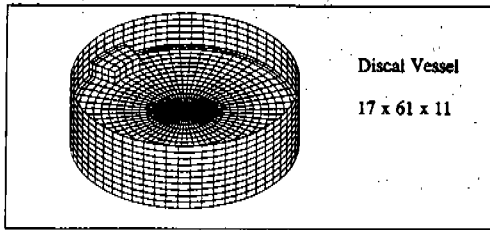


Fig.1 Combustion chamber



기 위해서는 이보다 작은단위의 크기를 가지는 계산격자를 필요로 한다. 하지만 현재까지 이용 가능한 컴퓨터의 용량으로 이렇게 많은 계산격자를 가지고 유동과 동시에 화학반응을 계산하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 계산에서는 Butter와 O'Rourke¹⁹⁾가 제안한 인공 화염면 확장변환을 이용하였다.

$$\beta(T) = \text{Max}(1, \frac{C\Delta^2x}{\delta} \frac{|\Delta T|}{\Delta T}) \quad (24)$$

여기서,

$$C=4, \delta=0.02\text{cm}, \Delta T=2000^\circ\text{K}$$

$\beta(T)$ 는 위의 식에 의해 결정되며, 각 전달계수를 β 배 크게 하고, 화학반응률을 β 배 나누어 주어 화염면에서 발생하는 발생열량을 동등하게 함으로써 인공적인 화염면 확장을 할 수 있는 기법이며, 이때 온도구배는 2차 Polynomial²⁰⁾를 이용하여 계산하였다.

2.3 초기조건 및 경계조건

초기조건

혼합가스 : 프로판 공기 혼합가스 3.8%

초기온도 : 30K, 초기압력 : 대기압

Fig.2 Numerical grid generation of discal vessel, single prechamber and dual prechambers.

경계조건

(1200K)까지 에너지를 다음과 같이 공급한다.

온도 경계조건 : 정온 벽면(300K)

$$I = I(1 + 5000 \text{ ergs/g/s} \times dt) \quad (25)$$

속도 경계조건 : Law-of-Wall

점화 에너지

3. 계산결과 및 검토

점화방법은 점화격자에 내부에너지를 증가시켜 자발적인 화염전파를 할 수 있는 일정온도

수치계산은 HP 730 워크스테이션에서 계산하

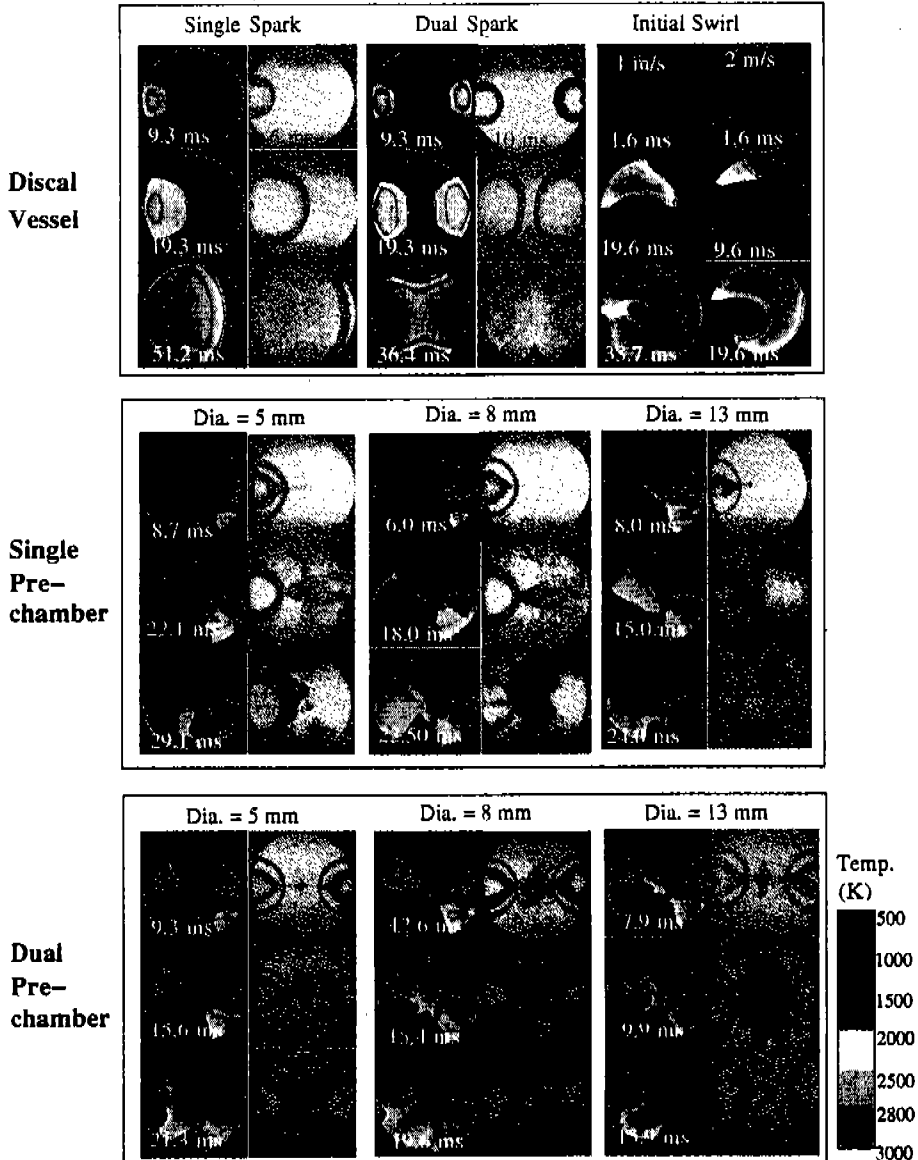


Fig.3 Temperature contours and schlieren photographs.

였으며, 수행시간(CPU Time)은 한 경우당 약 300시간 소요되었으며, 비교를 위하여 슈퍼 컴퓨터(CRAY-YMP: 시스템 공학센터)에서 수행한 결과 약 10시간이 소요되었다.

3.1 화염 전파

연소시간에 따른 온도분포가 Fig.3에 나타나 있다. 실험과의 비교를 위하여 슬리렌 가시화 사진을 오른쪽에 각각 나타내었다. 약 1000K를 표시하고 있는 영역이 화염면으로 대표될 수 있는데, 실험에서 나타난 화염의 형태와 유사한 모양을 유지하며 전파하고 있음을 알 수 있다. 단일 부연소실의 경우 부연소실에서 점화되어 발달한 화염은 오리피스스를 통해 낮은 온도와 빠른 속도를 가진 유동을 반대편 벽면 방향으로 분출하고, 주연소실의 화염은 반대편 벽면에서부터 재점화가 되어 벽면을 따라 전파한다. 특히 직경 13mm인 경우 오리피스스에서 분출한 화염은 반대편 벽면에 도달하기 전 이미 발달하여 미소교란된 층류화염과 같은 형태로 화염이 전파되어 나가고 있다.

대향 부연소실의 경우 부연소실에서 발달한 화염은 주연소실의 중앙부에서 충돌한 후 위쪽 벽면과 주연소실의 중앙부로 전파되어 나간다. 단일 부연소실과 마찬가지로 오리피스 직경이 커짐에 따라 오리피스에서 분출한 화염은 주연소실의 중앙부분에서 성장하여 층류화염과 유사한 형태로 전파해 나간다.

Bretta와 Jarosinski²¹⁾에 의하면 주연소실에서의 화염전파 개시 지연정도에 따라 미소교란 층류화염(Wrinkled Laminar Flame), 짧은 재점화 지연시간을 갖는 난류화염(Turbulent Flame with Short Re-Ignition Delay), 긴 재점화 지연시간을 갖는 난류화염(Turbulent Flame with Long Re-Ignition Delay)의 특징적 3형태로 구분 가능하다. 이러한 화염의 특징이 생성되는 원인으로 Kumagai 등⁹⁾은 오리피스 직경에 따라 대별할 수 있다고 하였다. 즉 이 분류에 의하면 오리피스 직경이 작을수록 주연소실에서는 연쇄반응으로 재점화되어 잘 혼합된 화염이 생성되어 전파하나, 반면 오리피스 직경이 커질수록

오리피스에서 분출속도는 느려지며, 화염전면에서의 지속적인 연소로 미소교란 층류화염으로 전파되는 특성을 가지고 있다. 이러한 화염의 특성은 본 계산에서도 잘 나타나고 있다.

평균 유속의 변화가 화염의 전파에 의하여 어떻게 영향을 주는지 알아보기 위하여 일정한 스월을 주어 보았으며, 스월이 있는 경우 화염은 유동방향을 따라 나선형으로 전파해 나가고 스월 속도가 클수록 화염은 빠르게 전파하였다.

3.2 압력선도

Fig.4에 단일점화와 단일 부연소실의 경우에 대한 압력선도가 실험치와 함께 도시되어 있다. 단일 부연소실의 경우, 부연소실이 없는 경우보다 최고압력에 도달하기까지의 연소시간이 단축된다. 또한 오리피스 직경이 증가함에 따라 연소시간이 점차 단축되다 오리피스 직경 13mm인 경우 오히려 연소시간이 길어질 뿐만 아니라 최고압력은 낮아진다. 이로부터 빠르게 화염을 전파시킬 수 있는 적절한 오리피스 직경이 존재함을 알 수 있다.

양측점화 및 대향 부연소실의 경우(Fig.5)와 단일점화 및 단일 부연소실의 경우(Fig.4)의 압

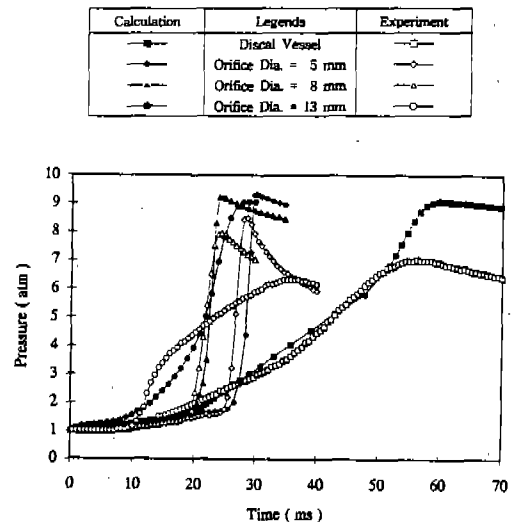


Fig.4 Pressure-time traces varying orifice diameter (single prechamber)

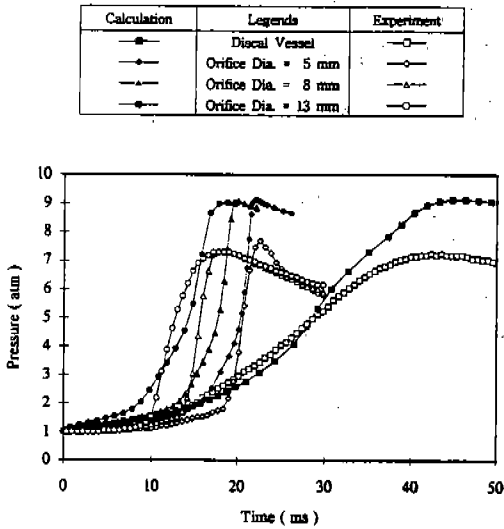


Fig.5 Pressure-time traces varying orifice diameter (dual prechamber)

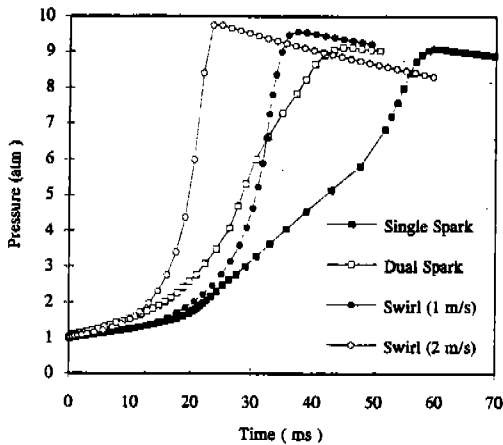


Fig.6 Pressure-time traces varying initial swirl velocity

력변화를 비교하면 최고압력에 도달하는 연소시간이 전자의 경우가 짧다.

그리고 스월이 있는 경우(Fig.6)는 부연소실이 있는 경우보다는 연소시간이 길지만 스월이 없는 경우에 비해 매우 짧은 연소시간을 가지고 있음을 볼 수 있다. Miura 등⁵⁾의 실험결과에서 스월이 200mm/s인 경우 총 연소시간이 45% 정도 감소되었다.

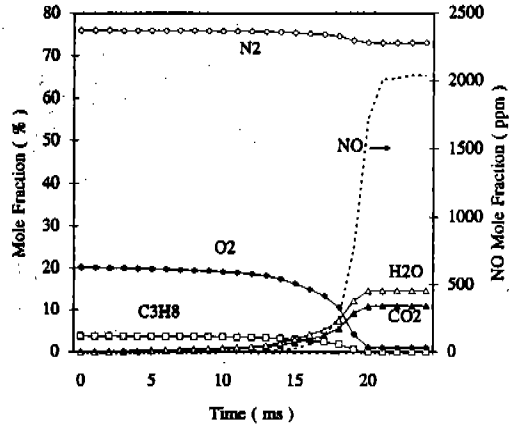


Fig.7 Species mole fraction as a function of time(dual prechamber : orifice diameter = 8mm)

이상의 두가지 경우 모두 연소압력 상승 형태는 실험의 경우와 매우 유사하지만 최고연소압력은 수치계산의 경우가 실험결과보다 항상 높은 값을 보여주고 있는데, 이것은 실험에서는 연소실 벽면으로의 열전달 과정이 매우 복잡하게 일어나지만 수치계산에서는 이와같은 복잡한 열전달 과정을 아주 간단한 모델링으로 대치한 것에 기인한다고 사료된다.

3.3 NO 생성

Fig.7은 오리피스 직경이 8mm인 대향 부연소실에서 점화 후 시간 경과에 따른 각 화학종의 평균농도의 변화를 보인다. NO의 생성량은 압력이 급격히 상승하는 시간(즉 평균온도가 급격히 상승하는 시간)영역에서 급격히 증가함을 알 수 있다.

연소실 내부에서 공간적인 NO생성 분포를 살펴보기 위해 오리피스 직경 8mm인 경우에 단일 부연소실과 대향 부연소실에 대한 NO 농도분포가 Fig.8에 도시되어 있다. Fig.3의 온도분포와 비교하면 온도가 높은 지역에서 NO의 생성이 많음을 알 수 있다. 또한 단일 부연소실에 비해 대향 부연소실의 경우 NO가 집중적으로 생성되는 지역이 현저히 작다.

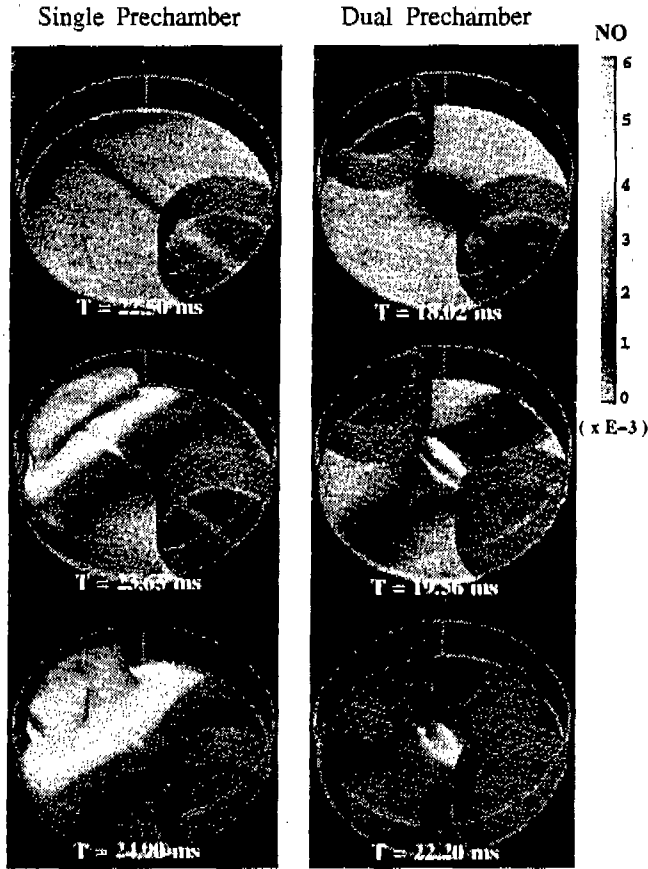


Fig.8 NO mass fraction contours(single and dual prechamber : orifice diameter = 8mm)

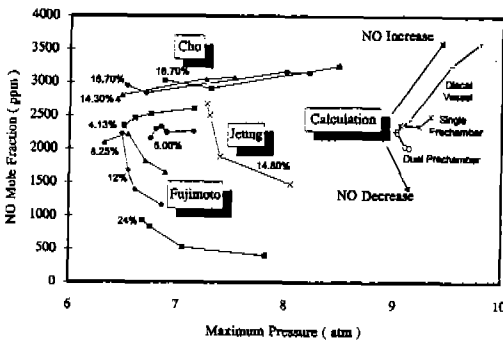


Fig.9 NO mole fraction as a function of maximum pressure compared with experiments

Fig.8에 최고압력과 NO생성량이 표시되어 있으며, 여러 연구자의 실험과 비교를 위하여 대향 부연소실 연소방식에 대한 실험값이 함께 표시되어 있다. 본 계산에서 원형 연소실과 단일 부연소실의 경우 압력이 증가함에 따라 NO 생성은 증가하나, 대향 부연소실의 경우에는 오히려 NO 생성이 감소함을 볼 수 있다. 이것은 Fujimoto⁹⁾, 정인석^{10),11)}의 실험결과와 유사한 경향을 가짐을 알 수 있다.

3.4 속도 분포

Fig.10에 단일 부연소실, 대향 부연소실, 스월을 초기에 준 경우에 대한 속도분포가 나타나 있

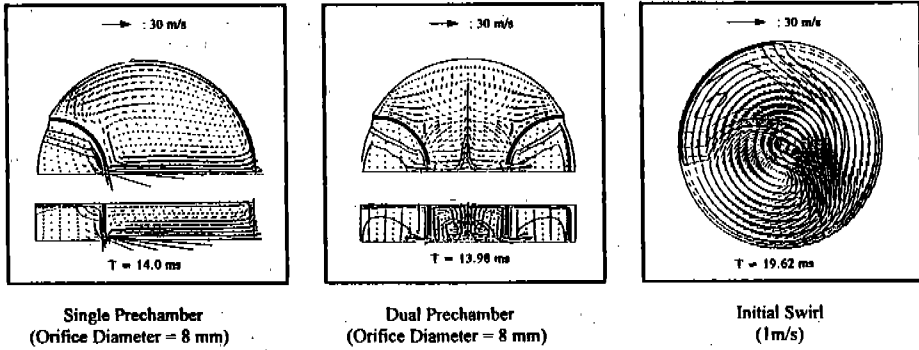


Fig.10 Velocity vector field and isothermal lines(1000, 1500, 2000, 2500, 2800K)

다. 단일 부연소실에 대한 속도분포의 경우 부연소실에서 분출되는 빠른 유동은 벽면을 따라 선회하여, 주연소실 전체에 회전하는 유동장을 형성하고 그 방향은 시간에 따라 거의 일정하다. 대향 부연소실의 경우 단일 부연소실과는 유동의 형태에 상당한 차이가 나며, 주연소실의 중심부근에서 매우 복잡한 유동이 형성되고 있음을 알 수 있다. 주연소실에 스윙을 줄 경우 화염면이 중심을 축으로 하여 나선형으로 회전하고 있고, 초기의 주어진 속도성분으로 인해 더욱 빠른 속도로 화염이 전파해 나간다.

4. 결 론

동일한 예혼합기에 대하여, 연소방식을 변화함으로써 연소최고압력을 높이면서 NO_x의 생성이 저감되는 현상의 규명을 위해 KIVA-II 코드를 목적에 맞도록 변형하고 수치계산을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 인공 화염면 확장 변환 기법을 도입하여 유동의 해석만 가능한 정도의 격자수로도 화염면에서의 화학반응 계산이 가능하도록 하였다.
- 2) 본 연구에 적용된 연소기(원형 연소실, 단일 부연소실, 대향 부연소실) 모델에 대한 수치계산과 실험의 결과 비교를 통하여 수치계산 방법에 의해 현상을 적절히 재현할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 연소방식의 변화에 의하여 연소최고압력은 증가

하면서 NO_x의 생성이 저감되는 현상이 확인되었다.

- 3) 실험적인 방법으로 측정이 어려운 연소실 내부의 유동, 온도, 화학종 등의 시간적, 공간적 분포의 파악이 가능하며, 대향 부연소실 방식에 의한 경우 NO의 생성률이 높은 고온의 영역이 단일 부연소실 방식에 비해 작기 때문에 최고압력은 높으면서 NO의 생성이 적음을 알 수 있다.

본 연구의 수행을 통하여 확인된 NO 생성 저감의 상세한 기구는 향후 “대향 분출염 연소방식에 의한 NO_x의 생성저감과 연소특성연구(Ⅳ)”에서 제시하고자 한다.

참 고 문 헌

1. Bowman, C. T., “Control of Combustion Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven by Regulation”, Twenty-fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 859~878, 1992.
2. Garrett, C. W., “On Global Climate Change, Carbon Dioxide, and Fossil Fuel Combustion”, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 18, pp. 369~407, 1992.
3. 김경원, “자동차 연료의 저공해와 기술”, 대한기계학회 92년도 에너지 및 동력공학부문 강연집, pp. 49~61, 1992.

4. Arcoumanis, C., "Internal Combustion Engine", Academic Press, 1988.
5. Miura, S., Tsukamoto, T., Kawagoe, M., Nakaoji, S. and Kaneko, Y., "NOx Fomation with Various combustion Process of Premixed Gas", Mitsubishi Heavy Industries, Technical Review, pp. 1~12, 1979.
6. Fujimoto, S., Kaneko, Y. and Tsuruno, S., "Possibility of Low-NOx and High-Load Combustion in Premixed Gases", Twentieth Symposium(International) on Combustion, pp. 61~66, 1984.
7. Yamaguchi, S., Ohiwa, N., and Hasegawa, T., "Ignition and Burning Process in a Divided Chamber Bomb", Combustion and Flame, Vol. 59, pp. 177~187, 1985.
8. 조경국, 정인석, 정경석, "대향 분출염 연소 방식에 의한 NOx 생성저감과 연소특성연구 (I)", 한국 자동차 공학회지, 제10권, 제1호, pp. 53~62, 1988.
9. Okajima, S., and Kumagai, S., "Experimental Investigation of Soot and NOx Reduction by Impinging Spray Combustion in a Closed Vessel", Twenty-Third Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 275~279, 1990.
10. 정인석, 조경국, "대향 분출염 연소방식에 의한 NOx 생성저감과 연소특성 연구(II)", 한국 자동차 공학회지, 제2권, 제2호, pp. 124~131, 1994.
11. Jeung, I. S., and Cho, K. K., "Experimental Study of NOx Reduction by Impinging -Jet-Flame in a Closed Vessel with Opposed Dual Prechambers", Combustion Technologics for a Clean Environment, M. G. Carvalho et al ed., Gordon and Breach Science Publishers, 1996.(in press)
12. Amsden, A. A., O'Rourke, P. J., and Butler, T. D., "KIVA II : A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays", Los Alamos Scientific Laboratory Report, LA-11560-MS, 1989.
13. Launder, B. E., and Spalding, D. B., "Mathematical Models of Turbulence", Academic press, 1972.
14. Ramshaw, J. D., O'Rourke, P. J., and Stein, L. R., "Pressure Gradient Scaling Method for Fluid Flow with Nearly Uniform Pressure", Journal of Computational Physics, Vol. 58, pp. 361~376, 1985.
15. Stull, D. and Prophet, H., "JANAF Thermo Chemical Tables", 2nd ed., U. S. Department of Commerce/National Bureau of Standards, NSRDS-NBS 37, 1971.
16. Chigier, N., "Energy, Combustion and Environment", McGraw-Hill, pp. 326~337, 1981.
17. Westbrook, C. K. and Dryer, F., "Simplified Reaction Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames", Combustion Science and Technology, Vol. 27, pp. 31~34, 1981.
18. Amsden, A. A., Ramshaw, J. D., O'Rourke, P. J., and Dukowicz, J. K., "KIVA : A Computer Program for Two and Three-Dimensional Fluid Flows with Chemical Reactions and Fuel Sprays", Los Alamos National Laboratory Report, LA-10245-MS, 1985.
19. Butler, T. D., and O'Rourke, P. J., "A Numerical Method for Two Dimensional Unsteady Reacting Flows", Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1503~1515, 1976.
20. Thompson, J. F., "Numericalf Grid Generation", pp. 188~263, 1985.
21. Beretta, G. P., and Jarosinski, J., "Flame Quenching by Turbulence", Combustion and Flame, Vol. 48, pp. 241~249, 1982.