〈論 文〉

상호작용하의 층류 확산 화염에서 NO의 생성

전 철 균*

(1992년 7월 31일 접수)

Production of NO in Interacting Laminar Diffusion Flames

Chul Kyun Chun

Key Words: Interaction of Flames(화염간 상호작용), NO Production(일산화질소 생성), Laminar Diffusion Flame(층류 확산 화염), Rectangular Nozzle(사각 노즐), Dual Flame(두 화염)

Abstract

In order to find the effect of flame interaction on NO production, dual laminar diffusion flames issuing from two rectangular nozzles were investigated theoretically. Chemical equilibrium model and Zeldovich mechanism were used in numerical model. The effect of four major parameters on NO production were inspected. These parameters are nozzle spacing, Reynolds number, aspect ratio of nozle cross section and velocity of secondary flow. It is found that interaction of flames enhances production of NO. It is also found that multiflames with large spacing, small aspect ratio and strong secondary flow produce less NO.

기 호 설 명

AR	: 노즐 단면 가로세로비	R_{ij}	: 반응률
B	: 노즐 간격	Re	: 레이놀즈수
C_p	: 기체정압비열	T	: 기체 온도
d	: x-방향 노즐 폭(d_1)	u	: x-축 방향 속도
d_2	: y-방향 노즐 폭	v	: y-축 방향 속도
D	: 확산 계수	W_i	: i종 분자량
f	: 혼합 분율	w	: 주유동 속도
g	: 중력 가속도	w_2	: 2차 유동 속도
h	: 기체 엔탈피	w_m	: 평균 연료분출 속도
k	: 기체 열전도 계수	Y_i	: i종 질량 분율
M_{NO}	: NO 질량 유량	μ	: 점성
p	: 압력	ϕ	: 일반 변수
R	: 기체 상수	ρ	: 밀도
		Γ	: 일반 확산 계수

*정회원, 목포대학교 기계공학과

1. 서 론

근접한 상태의 화염들이 서로의 연소 상태에 영향을 미쳐서 각각의 화염이 단일 화염과는 다른 특성을 나타나게 될 때 통상 이 화염들이 상호 작용하에 있다고 말한다. 이러한 상호 작용 하의 화염이 나타내는 가시적 특성은 서로를 향한 "화염의 기울음"과 "화염의 합류" 그리고 "화염 길이 증가" 현상 등이다. 이러한 현상들은 주로 화염으로의 유입이 억제 됨으로써 나타나는 특성으로 설명 된다. 즉, 인접한 화염들은 서로의 공기 유입을 방해 하므로 주위 공기를 유입하려는 화염의 특성에 의하여 화염들은 서로를 향하여 기울게 되고 결과적으로는 하나의 화염으로 합류가 일어난다. 또한 공기 유입율 저하에 따라 연소율이 감소 되므로 연소를 마치는 데 필요한 화염의 길이는 보다 길어 지게 된다. 이때 화염과 화염 사이의 상호 작용 구간에서는 운동량이나 열 등의 전달이 활발해져서 단일 화염의 경우보다 속도나 온도 등이 현저하게 증가한다.

이와 같은 화염간 상호 작용은 특히 다화염 연소기에서 중요한 의미를 갖는다. 넓은 면적을 가열함에 있어서 동일 유량의 연료를 단일 화염으로 형성시키는 것보다는 다수의 화염으로 형성시키는 쪽이 유리한데 이러한 다화염 연소기에서 형성되는 화염들은 각자 독립적일 수 없고 서로 영향을 미치며 연소하고 있다. 이렇게 집단적인 화염군에서의 화염간 상호 작용은 전체 화염의 구조에 큰 영향을 미치고 따라서 연소기의 성능에도 관여하는 중요한 요소가 된다.

연소기의 성능은 주로 열효율의 측면에서 생각되지만 유해성 연소 생성물 배출로 인한 공해의 측면 또한 이에 못지 않게 중요하다. 다화염계에 관한 현재까지의 연구들 [1~7]은 주로 상호 작용하에 있는 화염의 구조적 특성을 파악하기 위한 것들이 대부분으로 화염간 상호 작용이 공해성 물질 생성에 미치는 영향을 규명하고자 하는 연구는 찾아볼 수 없다. 따라서 본 연구는 화염간 상호 작용이 공해성 물질 생성에 미치는 영향을 규명함에 있어 특히 공해 물질인 NO의 생성 및 배출 특성과 상호 작용과의 관련성을 검토하는데 주목적을 두고 있다.

화염간 상호 작용에 관련된 연구들은 다음과 같다. 다화염계의 화염구조에 관한 연구로 두 개의 원형 층류 확산 화염에 관한 Roper[1]의 화염 길이 해석, 이종철[2]의 온도 측정을 통한 상호 작용 연구가 있고, 난류 확산 화염에 관한 연구로는 Putnam and Speich, [3] Thomas et al., [4] Zietz et al.[5] 및 Chigier and Apak[6]등 다화염계 특성에 관한 실험적 연구들이 있으며 최근에는 화염간 상호작용의 정의 및 특성에 대한 김과 전[7]의 이론적 연구 등이 있다. 이밖에 단순 제트에 관해서는 두 개의 2차원 제트에 관한 Tanaka, [8] Eibanna et al.[9]의 연구, 두 개의 원형제트에 관한 Becker and Booth, [10] 岡本哲史[11] 등의 연구가 있다.

이상에서 화염이 아닌 단순 제트에 관한 연구[8~11]는 제트 유동장에서의 상호작용 특성만을 보고한 것들이다. 또 복수 화염에 관한 대부분의 연구들[2~6]은 온도 및 조성의 측정을 통하여 화염의 구조적 특성을 파악하려한 것들이다. 또한 Roper[1]는 해석적(analytic) 모델로써 상호작용하 층류 화염의 길이 예측을 시도한 것이며 김과 전[7]은 화염간 상호작용을 정의하고 이에 의거하여 상호작용하 난류 화염의 구조 및 거동을 파악한 것이었다. 이상의 연구중 난류 화염에 관한 연구[3~7]에 비하여 층류 화염에 관한 연구[1,2]는 적다.

이처럼 지금까지의 화염간 상호 작용에 관한 연구는 주로 상호 작용이 화염 구조에 미치는 영향을 규명한 것들로써 화염간 상호 작용이 연소 생성물의 형성에 어떤 영향을 미치는가에 대해서는 검토된 바 없음을 알수 있다. 따라서 본 연구는 화염간 상호작용이 연소생성물 형성에 미치는 영향을 규명하기 위한 작업의 일환으로 대표적 연소 생성 공해물질의 하나인 NO를 택하여 상호작용하의 층류 확산화염에서 NO의 생성이 어떻게 이루어지는가를 검토 하고자 한다. 이를 위하여 기본적 다화염계인 2-화염계를 모사하는 수학적 모델을 수립하고 수치 계산을 통한 이론적 방법을 위주로하여 2개의 층류 확산 화염이 나타내는 상호작용 특성과 화염간 상호작용이 NO형성에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 이론 모델

화염간 상호 작용이 나타나는 가장 기본적인 다화염계를 2-화염계로 보아 Fig. 1과 같이 해석 모델을 채택한다. 즉, 평행하게 놓인 2개의 사각 노

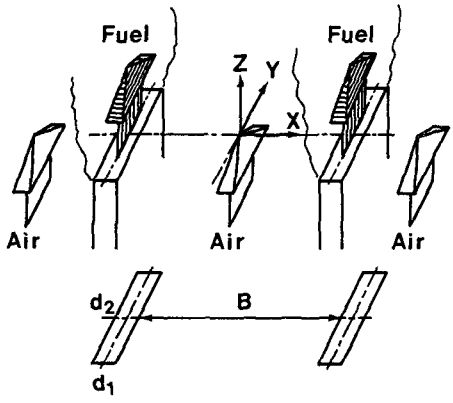

Fig. 1 Two laminar diffusion flames issuing from rectangular nozzles

즐로부터 기체 연료인 프로판(propane)이 분출되어 일정속도로 유동하는 공기 중에서 연소하여 층류 확산 화염을 이루는 경우이다. 노즐단면 가로세로비는 $d_1 : d_2$이다. 적용할 좌표계는 노즐 중심선상 2등분점을 원점으로 하는 직교 좌표계이다. 해석을 위하여 기체는 모두 이상기체(ideal Gas)이며 Soret 및 Dufour 효과는 무시하고 이종간 확산 계수(binary diffusion coefficient)는 모두 동일하며 Fick의 법칙이 성립하고 Lewis수는 1이라 가정한다. 이상의 가정을 적용하여 연소현상을 표현하는 수학적 모델을 구성한다.

(1) 연소 모델

프로판의 연소에는 수많은 화합물과 화학 반응이 관여함이 알려져 있다.[12] 그러나 제한적 여건상 이들을 모두 고려할수는 없으므로 비교적 단순한 연소 모델을 사용한다. 본 연구에서는 연소 모델로 지역 평형 모델(local equilibrium model)을 사용한다. 이것은 연소유동장 내부 어디서나 화학적 평형이 이루어져 있다고 가정 하는 것이다. 따라서 어느 한점에서의 원소 구성비 및 압력으로부터 그 점에서 가능한 화학 평형 상태를 계산해 내어 그점의 조성, 온도, 밀도 및 각종 상태량 등을 구하는 방법이다. 가능한 화학 평형 상태를 계산해 내는 데는 자유 에너지 최소화 기법을 이용한 CEC71 코드[13]를 사용한다. 따라서 원소 구성비를 혼합분율(mixture fraction)로부터 얻기 위하여 혼합분율 보존 방정식을 풀 필요가 생긴다. 또한 엔탈피 보존방정식을 풀고 JANAF표[14]로부터 온도-엔탈피 관계식을 얻어서 온도를 구할수 있다.

(2) NO 생성 모델

NO 생성 모델로는 가장 널리 사용되고 있는 Zeldovich mechanism[15]을 채택 한다. 이에 따라 하나의 방정식이 추가된다. NO에 관한 성분 보존 방정식이다. 이로부터 NO의 농도를 계산하기 위하여 두 가지를 가정한다. 하나는 N의 농도가 정상 상태에 있다고 생각하는 것이고 또하나는 O 농도가 O_2 농도와 평형 상태에 있다고 가정하는 것이다. 이에 따라 NO의 생성율이 다음과 같이 구해지고 이를 이용하여 NO에 관한 성분 보존 방정식을 풀수 있다.

$$\frac{d[NO]}{dt}=R_{f1}[N_2][O]-R_{r1}[NO][N]+R_{f2}[N][O_2]-R_{r2}[N][O] \quad (1)$$

여기서 []는 물농도를 의미하며 필요한 반응률 값들(R_{f1}, R_{r1}, R_{f2}, R_{r2})은 Odger[16]로부터 취한다.

(3) 지배 방정식

유동은 주유동 방향으로 막힘이나 재순환이 없는 포물선형(parabolic) 유동이다. 따라서 주유동 방향의 확산항이 없는 3차원 지배 방정식들이 사용된다. 다음과 같은 일반적 형태의 방정식에 대해 Table 1처럼 지배 방정식들이 정리된다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi)=\frac{\partial}{\partial x}\left[\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}\right]+S \quad (2)$$

Table 1 Governing equations for the system

Equations	ϕ	Γ	S	
Continuity	1	0	0	(3)
Momentum	u	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x}$	(4)
	v	μ	$-\frac{\partial P}{\partial y}$	(5)
	w	μ	$-\frac{\partial P}{\partial z}-\rho g$	(6)
Mixture Fraction	f	ρD	0	(7)
Enthalpy	h	k/C_p	S_h	(8)
Mass Fraction	Y_{NO}	ρD	ω_{NO}	(9)

여기서 S_h는 복사모델에 의하여 결정되며 ω_{NO}는 식(1)에서 얻어진다. 이밖에 이상기체 상태식은 다음과 같다.

$$P=\rho RT\sum_i \frac{Y_i}{W_i},\quad i=O_2, N_2, CO, CO_2, H_2O, C_3H_8 \tag{10}$$

(4) 경계 조건

해석하고자 하는 화염은 동등한 두 개가 서로 마주보고 있는 형상으로써 두 방향으로 대칭성이 있다. 따라서 두 대칭면에서 대칭면 수직속도는 0이고 나머지 변수들은 구배가 0인 경계조건을 적용한다. 노즐 출구 속도는 완전 확립된 사각 덕트유동을 계산하여 그 결과를 사용한다. 노즐 주위의 2차 유동 속도는 균일하게 취한다. 이들을 정리하면 다음과 같다.

1. z=0 일때
   (1) 노즐 출구 : u=0, v=0, w=계산 결과, f=1.0, Y_{NO}=0, h=연료값
   (2) 노즐 주위 : u=0, v=0, w=일정값, f=0.0, Y_{NO}=0, h=대기값
2. x=0 일때

$$u=0,\ \frac{\partial\phi}{\partial x}=0,\quad (\phi=v, w, f, Y_{NO}, h)$$

3. $x\rightarrow\infty$ 일때

$$v=0,\ \frac{\partial u}{\partial x}=0,\ w=\text{일정값},\ f=0,\ Y_{NO}=0,$$

h=대기값

4. y=0 일때

$$v=0,\ \frac{\partial\phi}{\partial y}=0,\quad (\phi=u, w, f, Y_{NO}, h)$$

5. $y\rightarrow\infty$ 일때

$$u=0,\ \frac{\partial v}{\partial y}=0,\ w=\text{일정값},\ f=0,\ Y_{NO}=0,$$

h=대기값

300K에서의 연료 및 공기 물성치는 Raznjevic등[17,18]으로부터 구한다. 점성의 변화는 Benson[19]과 같이 구하며 프란틀수(Pr)는 0.7로 일정하게 한다.

2.2 수치 해석 및 계산

지배 방정식들과 경계 조건들로부터 수치해를 얻기 위해서는 3차원적인 해석체계가 필요하다. 여기에는 주로 Patankar & Spalding,[20] Patankar[21]의 방법을 적용한다. 즉, 지배 방정식들은 검사체적에 대한 적분을 통해 이산화 방정식(discretization equation)으로 유도하고 압력의 해석은 SIMPLE 알고리즘을 응용하되 주유동 방향 압력 구배는 분리 처리하는 3차원 경계층 유동 해석법을 적용하는 것이다. 격자는 불균일 편위격자(staggered grid)를 사용한다. 여기에 Power-Law scheme[21]을 적용하며 TDMA를 사용한 line by line, double sweeping 방법으로 한 x-y평면씩 수렴 시키면서 하류로 진행(marching)하며 계산한다.[20] 계산은 주유동 방향속도(w), 측 방향 속도(u, v), 압력 수정(p')을 계산한 후 속도, 압력을 수정하고 혼합분율(f)을 계산하여 각종 스칼라 량들을 구하는 순으로 진행하며 수렴시까지 전 과정을 반복 한다. 이와 같이 하여 한 x-y평면이 수렴되면 하류로 진행하여 다음 평면을 계산하여 화염 끝에 도달할 때까지 계속한다.

3. 결과 및 고찰

화염간 상호작용이 연소 생성물 NO의 형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 화염간 상호작용에 영향을 미치는 주요 인자로 알려진[7] 노즐 간격, 노즐 출구 유량, 노즐단면의 가로세로비 및 화염 주변 2차 유동 속도를 변수로 삼아 계산을 수행하였다. 단열 화염에 대한 계산 결과를 주로 검토하고 복사 열손실의 영향도 검토 한다.

3.1 상호 작용하의 층류 확산 화염 특성

상호 작용하의 화염이 나타내는 가시적 특성으로 화염 합류 및 화염 길이 신장을 들 수 있는데[7]

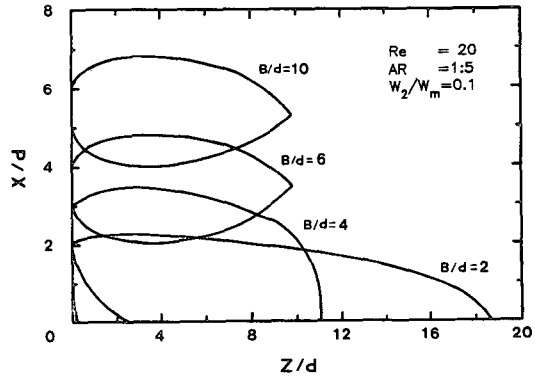

Fig. 2 Flame shapes at center plane for B/d variation

Fig. 2에는 계산된 화염들의 이같은 특성이 잘 나타나 있다. Fig. 2는 노즐출구 레이놀즈수 $Re=20$, 노즐단면 가로세로비 $AR=1:5$, 유동속도비 $W_2/W_m=0.1$인 경우에 무차원 노즐간격 B/d를 2에서부터 10까지 변화 시키면서 각각에 대하여 중심 단면($y=0$)상에 나타난 화염 형상을 비교 도시한 것이다. 두 개의 화염이 대칭성을 갖고 인접하고 있으므로 전체의 반평면만을 도시하였다. 무차원 노즐간격이 6인 경우와 10인 경우는 화염이 짧고 직립해 있으며 크기, 모양등이 거의 같다. 이것은 반대편에 존재하는 또하나의 화염과의 거리가 멀어서 상호 작용이 약하여 독립적인 화염에 가깝다는 것을 시사한다. 그러나 두 화염이 가까워 지면서 $B/d=4$인 경우는 화염이 기울어 두 화염의 일부가 합쳐지면서 화염 길이가 신장되고 있음을 볼수 있고 그보다 더 가까와지면 화염 하부에서부터 두화염이 합류하고 길이는 크게 신장되어 강한 상호작용하에 있음을 보여준다.

김과 전[7]은 모습으로 볼때 독립적인 화염들 사이에도 상호 작용이 존재할수 있으므로 화염간 상호작용을 화염의 외형이 아닌 전달기구(transport mechanisim)상의 특성으로부터 파악해야함을 제시한바 있고 그 방법으로써 중심축상의 변수값 변화를 검색하여 상호작용 특성을 밝힌바 있다. Fig. 3~5는 이같은 견해에 따라 중심축상의 속도, 온도 및 산소 질량분을 변화를 노즐간격 변화에 따라 비교 도시해본 것이다.

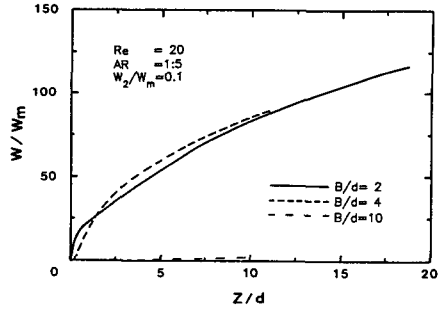

Fig. 3 Variation of axial velocity along centerline

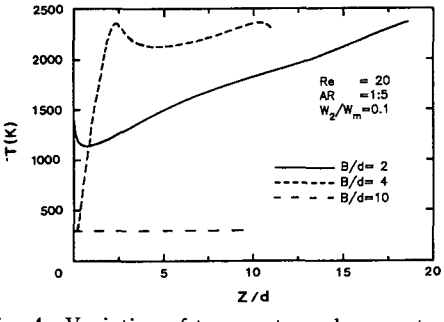

Fig. 4 Variation of temperature along centerline

Fig. 3은 $Re=20$, $AR=1:5$, $W_2/W_m=0.1$인 경우 세가지 노즐 간격에 대해 중심축상 속도 변화를 도시한 것으로 노즐간격이 작아지면서 최초 유동속도($z=0$에서의 2차 유동 속도)로부터 현저한 속도 증가가 보다 하류에서부터 나타나고 있다. 이것은 두 화염이 형성하는 경계층이 중심축 상에서 서로 겹쳐져 서로 영향을 미칠수 있게되어 운동량 전달 기구상의 상호작용이 나타나고 있음을 의미하며 그 상호 작용은 간격이 작을수록 크다는 것을 알수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 경우에 대하여 중심축상 온도 분포를 도시한 것이다. 무차원 노즐간격이 10인 경우에는 온도 변화가 거의 없으나 간격이 작아지면서 온도 증가가 보다 하류에서부터 나타나 열전달기구상의 상호 작용이 커짐을 알수 있다. 그림에 나타난 피크들은 그곳에 화염만이 위치함을 의미한다.

Fig. 5는 역시 Fig. 3과 동일한 경우에 대하여 중심축상의 산소 질량분율 변화를 도시한 것으로 노즐간격이 큰 경우는 최초 대기 상태의 값이 유지되지만 간격이 작아지면 산소가 급격 감소함을 볼수 있고 이는 질량전달 기구상의 상호작용 또한 노즐간격이 작을수록 크다는 것을 의미한다.

Fig. 2~5에 나타난 층류 확산 화염의 상호작용 특성을 난류 확산 화염에서의 특성[7]과 비교할때 층류화염은 기울어짐과 길이 신장 효과가 난류화염보다 현저한 것을 알수 있다. 그러나 노즐간격이 작을수록 총체적으로 상호작용(운동량, 열, 질량전달)이 커지는 것은 동일한 경향이다. 이밖에 본문에 자료가 제시되지는 않았으나 레이놀즈수의 변화나 노즐단면 가로세로비 변화에 대해서도 층류화염과 난류화염은 동일한 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다. 즉, 레이놀즈수가 클수록 운동량 전달의 상호작용은 감소하나 열 및 질량 전달의 상호작용은 증가하며 가로세로비가 클수록 모든 전달기구상의 상호작용이 증가하는 경향이 층류 확산 화염에서도 나타난다.

Fig. 6, 7 은 $Re=20$, $B/d=6$, $AR=1:5$, $W_2/$

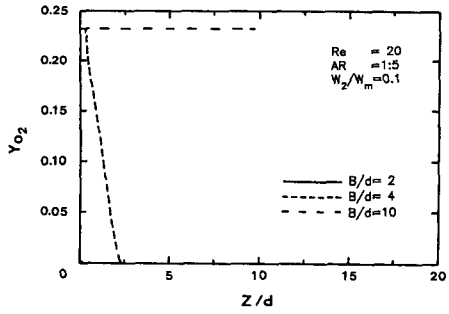

Fig. 5 Variation of Yo_2 along centerline

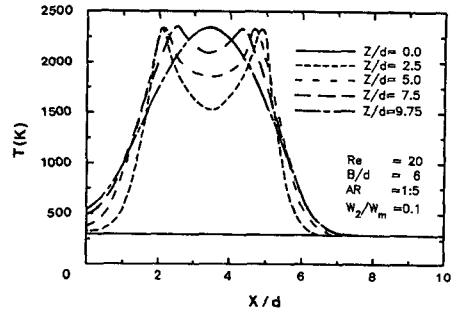

Fig. 6 Profiles of temperature at center plane(y=0)

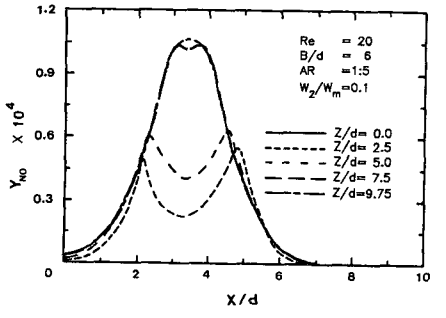

Fig. 7 Profiles of Y_{NO} at center plane(y=0)

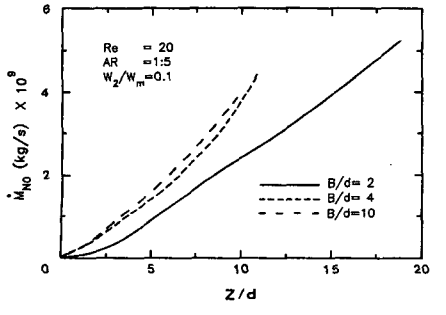

Fig. 8 Effect of nozzle spacing on NO production

$W_m=0.1$인 화염의 경우 온도 및 NO 질량분율 분포가 노즐 출구로부터 화염 끝까지 어떻게 변화하고 있는지 보여준다. 분포상에 나타나는 피크점은 화염면 위치에 해당하며 NO의 생성에 미치는 온도는 지배적 영향을 보여준다. 전체적으로 화염 하부에서 작은 값이던 NO 질량분율은 화염 끝으로 가면서 점점 큰 값을 갖게 되는데 이는 하부에서부터 생성된 NO의 량이 누적되기 때문인 것으로 생각된다. 이때 중심축 부근($x=0$)의 NO값이 그 반대쪽($x=7$)보다 큰 것은 화염간 상호 작용의 결과로 해석된다. 즉 Fig. 6에 나타난 것처럼 화염간 상호작용에 의하여 중심축 부근으로 열전달이 활발해져서 이곳의 온도가 그 반대쪽보다 높기 때문에 이곳에서의 NO 생성이 크고. 따라서 그 반대쪽보다 큰 질량분율 값을 갖는 것으로 분석되나 그 차이는 작다.

3.2 노즐 간격의 영향

Fig. 8은 동일 유량, 동일 노즐인 $Re=20$, $AR=1:5$, $W_2/W_m=0.1$의 화염들에 대해 축방향 위치에 따른 NO의 질량 유량 변화를 노즐 간격에 따라 비교 도시한 것이다. NO의 질량 유량은 각 축방향 위치에서 x-y평면 전체에 대한 NO량을 합산하여 구하였다. 동일 연료량과 동일 노즐을 사용하였으므로 그림에서 나타나는 노즐 간격 변화에 따른 NO 유량 변화는 단지 화염간 상호작용의 영향 때문인 것으로 판단할 수 있다. 그림에서 노즐간격이 작을수록 NO 량은 증가가 완만하고 동일 위치에서 간격이 큰 경우보다 작은 값으로 나타나지만 화염이 길기 때문에 긴 곡선으로 나타난다. 노즐 간격이 작을수록 상호작용이 커지는 것은 위에서 밝힌바 있다. 따라서 상호 작용이 커질수록 NO의 생성속도는 작아지는 것을 알수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 경우 화염 끝에서의 NO 질량 유량이 노즐 간격 변화에 따라 달라지는 것을 도시한 것인데 화염으로부터 대기로의 NO 방출량이 나타난 것으로 볼수 있다. 그림으로부터 노즐 간격이 작아서 상호 작용이 클수록 화염 끝 NO 방출량이 큰 것을 알수 있다.

Fig. 8과 9에서 나타난 이같은 현상은 상호작용에 의한 화염 합류와 길이 신장 효과에서 그 원인을 찾을수 있다. Fig. 2에 나타난 화염의 형상은 B/d가 4인 경우 부분적 합류가 일어나고 2인 경우는 거의 전체적인 합류가 일어남을 보이고 있다.

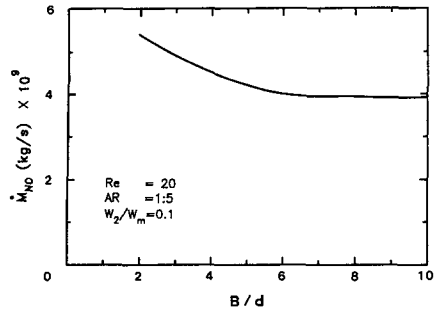

Fig. 9 NO emission at top of flame for B/d variation

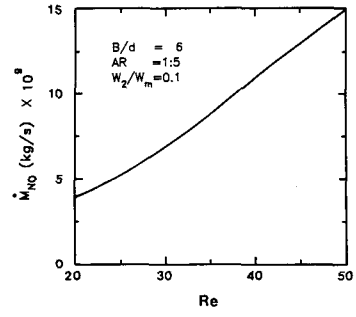

Fig. 11 NO emission at top of flame for Re variation

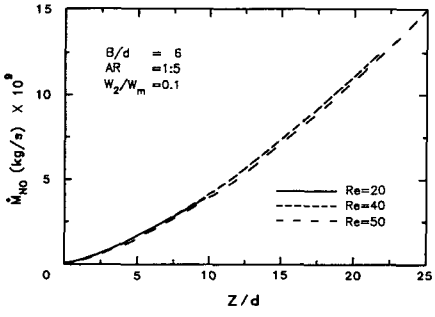

Fig. 10 Effect of Reynolds number on NO production

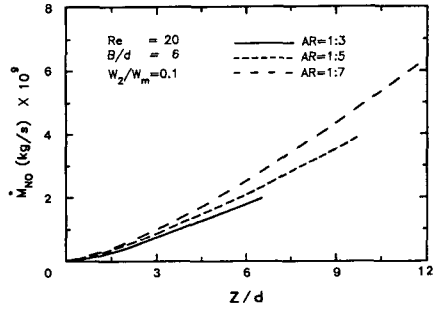

Fig. 12 Effect of aspect ratio on NO production

NO는 고온상태에서 집중적으로 생성되는 물질로 화염면 부근에서의 생성이 지배적인데 화염의 합류는 두개의 화염을 하나의 화염으로 만들면서 겹쳐진 부분만큼 화염면 면적을 감소시킴으로써 화염 단위길이당 화염면 면적을 작게한다. 따라서 고온상태에서 산소와 질소가 반응할수 있는 기회를 감소시켜 Fig. 8과 같은 상호작용 증가에 따른 NO 증가율 감소를 가져오는 것으로 분석 된다. 반면 이처럼 낮은 증가율에도 불구하고 화염 끝에서의 NO량은 Fig. 9와 같이 상호 작용이 클수록 큰 것을 볼수 있는데 이는 화염 길이 신장의 영향으로 해석된다. 즉, 상호작용이 증가할수록 단위 길이당 화염면 면적은 감소하지만 화염이 길어짐에 따라 전 화염면 면적은 증가하고 이에 따라 NO의 화염 끝 방출량이 커지는 것이다.

3.3 연료 유량의 영향

Fig. 10은 연료 유량 증가가 NO 생성에 미치는 영향을 알아보기 위한 것으로 $B/d=6$, $AR=1:5$, $W_2/W_m=0.1$인 경우다. Re 증가에 따른 NO 증가율은 큰 차이를 보이지는 않는다. 다만 연료량 증가에 따라 화염이 길어져 NO의 총량이 커짐을 볼 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10과 동일한 경우 화염 끝에서의 NO 방출량 비교다. 연료량이 증가 할수록 화염의 길이가 길어지므로 방출 총량도 커지고 있다. 그런데 Re=20인 경우에 비해 30이나 40인 경우 연료량은 1.5배, 2배 증가했는데 NO량의 증가는 이보다 크다. 연료량의 증대는 열전달 기구상의 화염간 상호작용을 증대시킴이 보고된바 있는데[7] 이처럼 증대된 열전달 상호작용의 결과가 NO의 증가를 가져온 것으로 보인다. 이것은 또한 동일량의 연료를 단일 화염으로 연소시키는 것 보다는 작은 화염으로 나누어 연소 시키는 것이 NO 생성 억제에 유리함을 의미한다.

3.4 노즐단면 가로세로비의 영향

Fig. 12는 노즐단면 가로세로비가 NO 생성에 미치는 영향을 알아보기 위한 것으로 $Re=20$, $B/d=6$, $W_2/W_m=0.1$인 경우다. 그림에서 가로세로비가 클수록 NO의 증가율이 크고 총량도 큰것을 알수 있다. 이는 가로세로비가 클수록 상호작용이 커지며 동일 Re수에서 연료량이 많아져 화염폭 및 길이가 증가하는데 원인이 있다.

Fig. 13은 Fig. 12와 동일한 경우 화염 끝 NO 방출량 비교로서 가로세로비 증가에 따라 NO량은 거의 직선적 증가를 보인다. 그러나 연료량 증가율에 비해 (d_1/d_2=7인 경우가 5인 경우보다 1.33배 정도 연료량이 큼) NO량의 증가율이 약간 크며 (1.5배 정도) 이는 큰 가로세로비에서 증대되는 상호작용의 결과로 해석된다. 이것은 또한 가로세로비가 작은 노즐로써 연소시키는 것이 NO 생성 억제에 유리함을 의미한다.

3.5 유동 속도비의 영향

Fig. 14는 2차 유동이 NO 형성에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이며 Re=20, B/d=6, AR=1 : 5인 경우이다. 2차유동의 속도가 증가함에 따라 NO의 량이 미세한 차이지만 약간 작은 값을 갖는 것을 알수있다. 2차 유동의 속도가 증가하는 것은 화염과 화염사이로 보다 많은 공기가 공급된다는 것을 의미하며 따라서 화염과 화염 사이로의 공기 유입이 억제되어 나타나는 화염간 상호작용 현상을 약하게 한다. 그러므로 2차 유동 속도가 커질수록 상호작용이 약해지며 이에 따라 NO의 형성은 억제 된다고 볼수 있다.

Fig. 15는 Fig. 14와 동일한 경우 화염 끝 NO 방출량을 비교한 것으로써 2차 유동 속도 변화에 대한 NO 방출량 변화는 값에 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 미세한 차이로 2차 유동 속도 증가에 따라 NO 방출량은 줄어 드는 것을 볼수 있다. 이 역시 유동 속도 증가에 따라 상호작용이 감소함에 따른 NO 방출량의 감소로 보여진다.

3.6 복사 열전달의 영향

Fig. 16은 복사 열전달을 고려 했을 때의 NO량 예측 결과를 복사열전달이 고려되지 않은 경우와 비교 도시한 것으로 Re=20, B/d=6, AR=1 : 5, W_2/W_m=0.1인 경우이다. 복사 모델로는 열유속 모델(flux model)을 적용하였는데 3차원적인 6-열유속 모델을 직접 적용하기에는 전산 부하가 너무 커서 적절치 못하였으므로 축방향 복사 열전달은 고려치 않고 x-y방향의 복사 열전달만을 고려하여

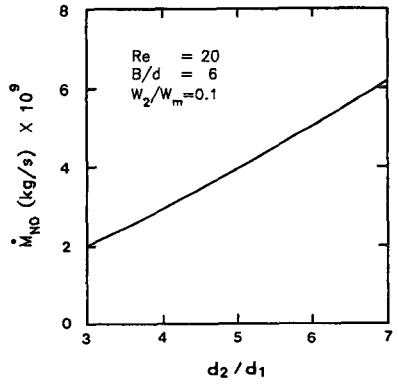

Fig. 13 NO emission at top of flame for AR variation

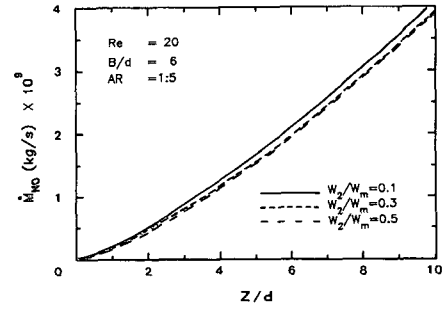

Fig. 14 Effect of secondary flow on NO production

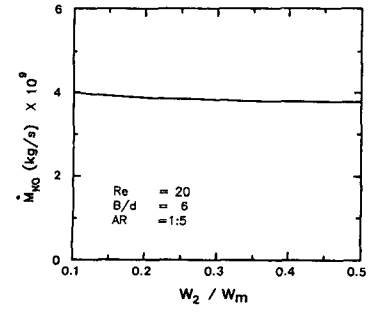

Fig. 15 NO emission at top of flame of W_2/W_m variation

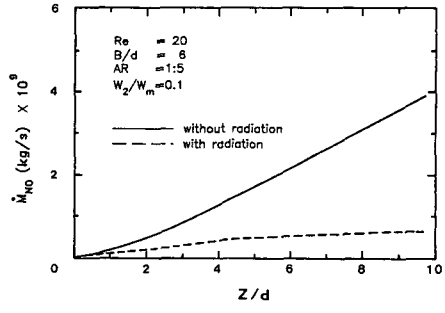

Fig. 16 Effect of thermal radiation on NO production

4-열유속 모델을 적용하였다. 계산 결과 복사 열전달을 고려한 경우 NO 생성량이 단열 화염의 경우보다 작게 나타 났다. 즉, 복사 열전달을 고려했을 때 화염의 온도가 낮아지고 이에 따라 NO의 생성이 저하되는 것으로 볼수 있다.

4. 결 론

이상의 논의로부터 화염간 상호작용이 층류확산 화염에서의 NO 생성에 미치는 영향에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 노즐 간격이 작아서 상호작용이 클수록 화염의 NO 생성량은 커진다.

(2) 레이놀즈수가 클수록 열전달 기구상의 상호작용이 커져서 동일 연료량에 대한 화염의 NO 생성량은 커진다.

(3) 노즐의 가로세로비가 클수록 상호작용이 커져서 동일 연료량에· 대한 화염의 NO생성량은 커진다.

(4) 노즐 주변 2차 유동의 속도가 작아서 상호작용이 클수록 화염의 NO생성량은 커진다.

(5) 화염군으로부터의 NO 생성을 줄이려면 상호작용이 약한 상태에서 연소시켜야 한다. 즉, 가로세로비가 작은 노즐을 사용하여 2차 유동 속도를 크게하고 노즐간격이 큰 상태에서 다수 화염으로 나누어 연소시키는 것이 유리하다.

후 기

이 논문은 1990년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 지방대육성 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

(1) Roper, F.G., 1979, "Laminar Diffusion Flame Sizes for Interacting Burners," Combustion and Flame, Vol. 34, pp. 19~27.

(2) 이종철, 1986, "2개의 원형 노즐에서 분출되는 층류 확산 화염의 상호 작용에 대한 연구", 석사학위 논문, 고려대학교.

(3) Putnam, A.A. and Speich, C.F., 1963, "A Model Study of the Interaction of Multiple Turbulent Diffusion Flames," 9th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 867~877.

(4) Thomas, P.HJ., Baldwin, R. and Heselden, J.M., 1965, "Buoyant Diffusion Flames : Some Measurements of Air Entraint, Heat Transfer and Flame Merging," 10th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 983~996.

(5) Zietz, U., Lubben, M., Baumgartel, G. and Fetting, F., 1972, "Flow Phenomena, Mixing and Stability of Enclosed Multijet Turbulent Diffusion flames,", Combustion Science and Technology, Vol. 5, pp. 7~15.

(6) Chigier, N.A., and Apak, G., 1975, "Interaction of Multiple Turbulent Diffusion Flames", Combustion Science and Technology, Vol.10, pp. 219~231.

(7) 김호영, 전철균, 1991, "기체 확산 화염간의 상호 작용", 대한기계학회논문집, 제15권 제1호, pp. 355~365.

(8) Tanaka, E., 1974, "The Interference of Two-Dimensional Parallel jets (2nd Report, Experiments on the Combined Flow of Dual Jet)," Bulletin of the JSME, Vol. 17, No. 109, pp. 920~927.

(9) Elbanna, H. and Sabbagh, J.A., 1987, "Interaction of Two Nonequal Plane Parallel Jets," AIAA, Vol. 25, NO. 1, pp. 12~13.

(10) Becker, H.A., Booth, B.D., 1975, "Mixing in the Interaction Zone of Two Free Jets," AlchE J., Vol. 21, pp. 949~958.

(11) 岡本哲史, 八木田 幹, 波邊 晃, 川村高星, 1984. "二つの平行圓形 亂流噴流の相互作用", 日本機械學會論文集(B編) 50卷 456號(昭59-8)

(12) Dagaut, P., Cathonnet, M., Boettner, J.C. and Gaillard, F., 1987, "Kinetic Modeling of Propane Oxidation," Combustion Science and Technology, Vol. 56, pp. 23~63.

(13) Gordon, S. and McBride, B.J., 1971, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks and Chapman-Jouguet Detonations," NASA, SP-273.

(14) Anon., " JANAF Thermochemical Tables", Dow Chemical Co., Midland, Mich., Dec. 31, 1960 to June 30, 1970.

(15) Peck,R. E. and Samuelsen, G.S., 1976, "Eddy Viscosity Modeling in the Prediction of Turbulent, Backmixed Combustion Performance," 16th Symposium (Int.) on Combustion, Combustion Institute, pp. 1675~1687.

(16) Odgers, J., 1975, "Current Theories of Combustion within Gas Turbine Chambers," 15th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1321~1339.

(17) Raznjevic, K., 1976, "Handbook of Thermodynamic Tables and Charts," Hemisphere Publishing Corporation.

(18) 일본 LPG 협회, 1983, "LPG 기술총람", pp. 1~76.

(19) Benson, R.S., Annand, W.J.D. and Baruah, D. C., 1975, "A Simulation Model Including Intake and Exhaust System for a Single Cylinder Four-Stoke Cycle Spark Ignition Engine," International Journal of Mechanical Science, Vol. 17.

(20) Patankar, S.V. and Spalding, D.B., 1972, "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-dimensional Parabolic Flows," International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp. 1787~1806.

(21) Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," McGraw-Hill Book Company.