

이중 확산 연소장에서의 오염물질 배출 특성

김종현[†] · 이근오* · 이창언

인하대학교 기계공학과 · 서울산업대학교 안전공학과
(2002. 5. 21. 접수 / 2002. 8. 23. 채택)

Pollutant Emission Characteristics of Double-Concentric Diffusion Flame

Jong-Hyun Kim[†] · Keun-Oh Lee* · Chang-Eon Lee

Department of Mechanical Engineering, Inha University

*Department of Safety Engineering, Seoul National University of Technology

(Received May 21, 2002 / Accepted August 23, 2002)

Abstract : The NO_x emission characteristics of double-concentric diffusion flames and normal diffusion flames fueled with CH₄ were studied. Experimental and numerical investigations were carried out for double-concentric diffusion flame with varying central air flow rate and normal diffusion flame. The Emission indices of NO_x(EINO_x) were measured by chemiluminescent method and calculated by numerical model based on detailed chemistry. From the comparison between double-concentric diffusion flames and normal diffusion flames, the results show that EINO_x of double-concentric diffusion flames are lower than normal diffusion flame, because of Prompt EINO_x was decreased. EINO_x of double-concentric diffusion flames increase with central air flow rate increasing.

Key Words : Double-concentric Diffusion Flame, Normal Diffusion Flame, Central air flow rate, Flame shape, NO_x Emission Index(EINO_x)

1. 서 론

연소는 인류가 사용하는 전 에너지량의 90%를 공급하는 중요한 역할을 담당하고 있으나, 연소시 발생하는 여러 가지 연소생성물(CO₂, Soot, NO_x 등)은 대기 오염 및 지구 생태계의 파괴에 큰 악영향을 미치고 있다. 이에 오염물질 배출문제의 심각성이 국제적으로 중요한 과제로 대두되면서 국제간 협약을 통한 오염물질 배출 규제가 더욱 엄격하게 강화되고 있으며, 이에 따른 오염물질의 저감법 및 대체 연료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 오염물질 중 특히 NO_x(질소산화물)는 인체에 유해할 뿐만 아니라 대기중에서 산성비를 유발하고 광화학 스모그 현상을 일으키는 인자중의 하나이며, 오존파괴 등 심각한 대기오염의 원인이 되는 것으로, 각종 내연기관, 보일러, 연소기 등에서 발생하는 NO_x의 저감은 필수적이라 할 수 있다.

특히 확산 연소장에서는 국소 당량비의 제어가 어려우므로 NO_x의 생성은 유동, 전열, 혼합 등의 물리적 현상과 반응 등의 화학적 현상에 민감하게 영향을 받기 때문에 NO_x 저감을 위해서는 연소장 내부의 물리적 및 화학적 현상에 대한 종합적인 정보가 요구된다.

분류 확산화염에서의 NO_x 생성특성에 관한 연구를 살펴보면, 먼저 연료 제트를 동축 공기 제트 유동이 둘러싸고 있는 형상의 정상확산화염(Normal Diffusion Flame ; NDF)에 대한 연구가 주류를 이루고 있다. Smooke¹⁾ 등은 CH₄ 확산화염에서의 수치해석 연구를 통해 NO_x 발생은 Prompt NO가 지배적임을 지적한바 있으나, 이는 계산시간을 단축하기 위해 N₂를 희석시켜 화염을 작게 한 연구결과로 일반적인 경향이라고 보기는 어렵다. Gabriel²⁾ 등은 Ar과 He를 희석한 H₂ 분류 난류 확산화염에서 연료의 Lewis number가 NO_x 생성 특성에 크게 영향을 미침을 보고하였다.

한편, 중심부의 제트에 연료 대신 공기가 분출

[†]To whom correspondence should be addressed.
kimjh@snut.ac.kr

되고 그 주위를 연료가 둘러싸는 형상의 역확산화염(Inverse Diffusion Flame ; IDF)에 대한 연구가 몇몇 연구자들에 의해 진행되었다. 역확산화염은 화염의 구조적 특징 때문에 매연입자의 생성 및 성장과정을 주로 연구하고 있다. 황준영³⁾은 역확산화염에서 매연입자의 수밀도 및 크기 등을 측정하여 정상확산화염과 마찬가지로 PAH의 농도가 감소하기 시작하는 위치에서 매연이 생성됨을 확인하였다. Partridge⁴⁾ 등은 역확산화염에서 NO 생성과정을 연구하여 넓은 당량비 범위에서 2차공기의 영향을 연구하였다.

또한 이중확산화염(Double-concentric Diffusion Flame ; DDF)은 중심부 및 주위공기 제트가 환형 연료 제트를 둘러싸서 내부에는 역확산화염을, 외부에는 정상확산화염을 형성하는 화염이다. Huang⁵⁾ 등은 기하학적 형상은 본 연구와 차이가 있지만 이중확산화염에 대한 연구에서 내부 제트의 유동 특성이 화염에 크게 영향을 미침을 보고하였다. 또한 정중수⁶⁾ 등은 실험을 통하여, 이중확산화염에서 중앙공기 제트의 유동에 따라 화염형상이 크게 변화됨을 가시화 하였다.

그러나 이들 연구의 결과들은 대부분 각각의 화염들에 대한 화염구조 및 NO_x 배출 특성을 연구한 것으로 화염형상 변화에 따른 NO_x 배출특성에 대한 구체적인 비교가 이루어지지 않아 일반적인 결론을 도출하지 못했다.

따라서 본 연구에서는 화염형상이 크게 변화하는 층류 동축 분류 CH₄ 정상확산화염 및 이중확산화염에 대하여 실험 및 수치계산을 수행하여, 각 화염에서의 EINO_x 경향을 비교 분석하여 화염형상 변화에 따른 일반적인 NO_x 배출특성을 도출해 보고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 내경 7.4mm, 13.6 mm, 50mm로 구성된 동축 삼중관 버너에서 형성되는 정상확산화염 및 이중확산화염을 실험 및 계산 대상으로 하였다. 실험 및 계산에서의 유량조건은 Table 1에 나타내었다. 이중확산화염(DDF)은 중심관에 공기유량을 증가시켜 내부에 역확산화염(IDF)과 외부에 정상확산화염(NDF)이 동시에 존재하는 화염으로, 중심관에 해당 연료의 이론공연비 공기유량에 대한 %별로 공기를 공급하고, 환형관에는 CH₄를 공급하였다. 또 외측원관에 공급되는 주위류

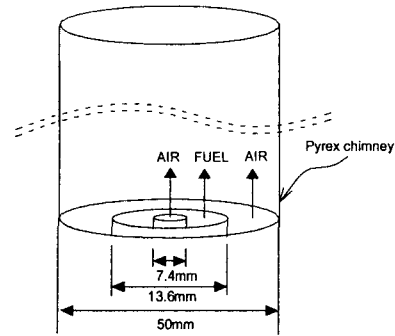


Fig. 1. Triple concentric burner

Table 1. Experimental conditions at nozzle outlet

	중심관	환형관	외측원관
DDF	Air	CH ₄	Air
	15%, 16%, 17%, 18%, 19%, 20% 해당 연료의 이론공연비 공기유량에 대한 %	0.6 L/min	(해당 연료의 이론공연비 공기의 3배유량)-(중앙공기유량)
NDF	CH ₄	Air	Air
	0.6 L/min	해당 연료의 이론공연비 공기의 3배 유량을 같은 유속이 되도록 분배	

는 해당 연료의 이론공연비 공기의 3배 유량에서 중앙공기유량을 빼 것으로 모든 실험 및 계산조건에서 총 당량비를 일정하게 유지하였다.

또한 정상확산화염은 중심관에 CH₄를 공급하고, 환형관 및 외측원관에 해당 연료의 이론공연비 공기의 3배유량을 같은 유속이 되도록 나누어 공급하여 전형적인 정상확산화염을 형성하였다.

연소가스중의 NO 및 NO_x의 농도는 급속팽창 프루브를 이용하여 반경방향 NO 농도의 상대변화가 ±2% 이내가 되는 충분한 하류지역에서 연소가스를 샘플링하여, 화학발광법을 이용한 질소산 화물 분석기(300-CLD)를 이용하여 측정하였다. 또한 CO는 CO 가스 측정기(KM-9104)를 이용하여 측정하였으며, CO₂의 농도는 유입되는 연료가 완전 연소된다는 조건으로부터 계산된 값을 이용하였다. 배출지수는 식(1) 및 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$EI_i = \frac{1000x_i}{x_{CO_2} + x_{CO}} \times \frac{MW_i}{MW_F} \quad (g/kg) \quad (1)$$

$$EINO_x = EINO \frac{MW_{NO_2}}{MW_{NO}} + EINO_2 \quad (g/kg) \quad (2)$$

3. 수치 계산 방법

본 연구의 수치계산에는 층류 분류화염에 대해 계산이 가능한 CLESLAF Code⁷⁾를 수정하여 사용하였다. 열역학적 물성치 및 화학종의 생성열은 CHEMKIN-II Package⁸⁾로, 전달 물성치는 TRANFIT Package⁹⁾를 이용하여 계산하였다. 또한 축대칭 분류 화염은 경계층 근사가 가능하며, 축방향 확산을 무시한 정상 2차원 포물선형 편미분 방정식으로 근사화 할 수 있다. 여기에 Von Mises의 좌표 변환을 이용하여 x, r 좌표로 이루어진 원통 좌표계를 x, ψ 좌표계로 변환한 후에 총 질량 유량을 이용하여 ψ 좌표를 무차원 유동 함수 ξ 로 변환하면 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

운동량 보존식

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\rho u}{M} \left(\xi \frac{dM}{dx} - \frac{dM_1}{dx} \right) \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{dp}{dx} = -\frac{\rho u}{M^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\rho u r^2 \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) + g(\rho_i - \rho)$$

화학종 보존식

$$\rho u \frac{\partial Y_k}{\partial x} - \frac{\rho u}{M} \left(\xi \frac{dM}{dx} - \frac{dM_1}{dx} \right) \frac{\partial Y_k}{\partial \xi} = \dot{\omega}_k W_k - \frac{\rho u}{M} \frac{\partial}{\partial \xi} (r \rho Y_k V_k) \quad (k=1, \dots, K_g)$$

에너지 보존식

$$\rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\rho u c_p}{M} \left(\xi \frac{dM}{dx} - \frac{dM_1}{dx} \right) \frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{\rho u}{M^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\rho u r^2 \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) - \sum_{k=1}^{K_g} \dot{\omega}_k W_k h_k - \frac{\rho^2 u r}{M} \sum_{k=1}^{K_g} Y_k V_k c_{p,k} \frac{\partial T}{\partial \xi}$$

상태방정식

$$p = \frac{\rho R T}{W}$$

계산에 이용된 반응기구는 49개 화학종과 279개의 가역 반응으로 구성되어 있는 GRI-2.11¹⁰⁾ 반응기구를 이용하였는데, 이 반응기구는 C1, C2 반응 및 Thermal 및 Prompt NOx 반응을 구체적으로 묘사하고 있다. NOx 생성에 미치는 Thermal NO 및 Prompt NO기구의 역할을 분리하여 검토하기 위하여

Nishioka¹¹⁾의 NOx 분리법에 따라 Total NOx를 Thermal NOx와 Prompt NOx로 분리하였다. 본 연구에 이용된 코드 및 계산방법은 기존에 다양한 연소 조건에서 CH₄ 분류화염의 NOx 계산에 적용하여 실험결과와의 비교를 통해 검증된 바 있으므로, 본 코드를 이용하여 정상확산화염 및 이중확산화염의 NOx 배출특성을 살펴보는 것도 타당한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 이후에는 정상확산화염 및 이중확산화염의 NOx 배출특성을 실험 및 계산을 통해 살펴보고, 실험으로 규명하기 어려운 구체적인 원인에 대해서는 수치계산 결과를 이용하여 해석하고자 한다

4. 결과 및 검토

4.1. 실험 결과

Photo. 1은 연료유량 0.6 L/min에 대하여 중심관의 공기유량을 증가시켜 삼중 동심관 버너에서 형성된 이중확산화염 및 동일 유량조건에 대한 정상확산화염을 촬영한 것이다.

사진에 나타난 화염형상을 살펴보면, 이중확산화염은 정상확산화염에 비해 화염길이가 짧음을 알 수 있으며 내부에 역확산화염, 외부에 정상확산화염이 동시에 존재함을 관찰할 수 있다. 또한 이중확산화염 범위에서는 중앙공기유량이 증가함에 따라 외부 정상확산화염의 길이는 짧아지고, 내부 역확산화염의 길이는 상대적으로 길어지는 것을 볼 수 있다. 또한 사진으로 나타내지는 않았지만 중앙공기유량을 0%에서부터 서서히 증가함에 따라 최초로 이중확산화염이 형성되는 유량조건은 본 연구의 모든 조건에서 해당 연료의 이론공연비 공기유량의 15% (이하 %는 같은 의미)에서 형성되며 20%까지 이중확산화염의 형상이 유지됨을 관찰하였으며, 이때의 중앙공기와 연료의 유속비는 3.4~4.5 범위이다. 그리고 중앙공기유량이 20% 이상 증가하면 내부 역확산화염이 부상하여 외부 정상확산화염을 관통하는 화염형상을 관찰할 수 있었다.

따라서 삼중 동심관 버너에서 이중확산화염을 형성하기 위한 조건은 중앙공기와 연료의 유속비 또는 해당 연료의 이론공연비 공기유량의 %를 이용할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 1은 연료유량 0.6 L/min에 대한 이중확산화염에서 중앙공기유량 변화에 따른 EINOx 및 동일 연료유량의 정상확산화염에 대한 EINOx를 도시한

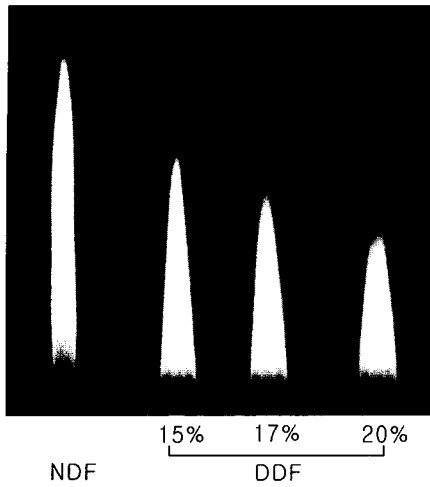


Photo. 1. Flame shape of NDF and DDFs

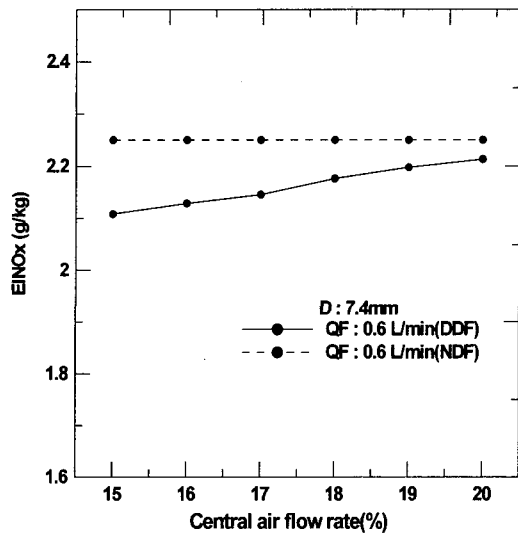


Fig. 1. Measured EINOx of NDF and DDFs with variation of central air flow rate

것이다. 그림에서 알 수 있듯이 이중확산화염에서는 중앙공기유량이 증가함에 따라 EINOx 값이 증가하고 있으며, 이중확산화염의 전 중앙공기유량 범위에서 정상확산화염 보다 EINOx 값이 낮음을 알 수 있다. 그러나 이들 화염에서의 EINOx 경향은 내·외부 화염크기의 상대적인 변화, 온도분포변화, 체류시간의 변화 등 다양한 원인에 의한 것이라 사료되며, 그 원인을 실험결과만으로 분석하기에는 충분하지 않으므로 다음에 기술하는 수치계산 결과를 이용하여 그 원인들을 분석하고자 한다.

4.2. 수치해석 결과

Fig. 2는 Photo. 1과 동일한 조건에서 계산된 정상확산화염 및 이중확산화염의 온도분포를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 화염길이의 변화 및 내부화염의 생성 등 Photo. 1의 경향을 잘 보여주고 있다.

Fig. 3은 연료유량 0.6 L/min에 대하여 Fig. 2의 실험결과와 동일한 조건에 대한 수치계산결과를 도시한 것이다. 그림에서 Total EINOx는 실험결과와 EINOx와 동일한 것이며, Thermal EINOx 및 Prompt EINOx는 앞의 수치계산 방법에서 언급한 NOx 분리법으로 구한 Thermal NOx 및 Prompt NOx의 배출지수이다. 먼저 Fig. 3의 Total EINOx를 Fig. 1의 실험결과와 비교해 보면 계산결과는 정량적인 측면에서는 실험치 보다 약 2~3배 높게 예측하고 있다. 이러한 정량적인 차이는 계산에서 복사효과를 고려하지 않은 점과 NOx 반응기구의 정량적 예측능의 한계 및 Parabolic 방정식을 이용한 수치해법에서 노즐 근처의 인위적인 착화 등에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 정상확산화염 및 이중확산화염에서의 중앙공기유량 변화에 따른 EINOx 경향은 실험결과를 정성적으로 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서 수치계산 결과를 이용하여 실험결과에서 분석할 수 없는 여러 가지 NOx 생성특성을 상세히 분석해 보는 것은 충분히 의미가 있다고 할 수 있다.

Fig. 3에서 이중확산화염과 정상확산화염의 EINOx 경향을 반응기구별로 살펴보면, 이중확산화염은 정상확산화염 보다 Thermal EINOx는 약간 높은 값을 나타내나, Prompt EINOx의 경우 오히려 더 큰

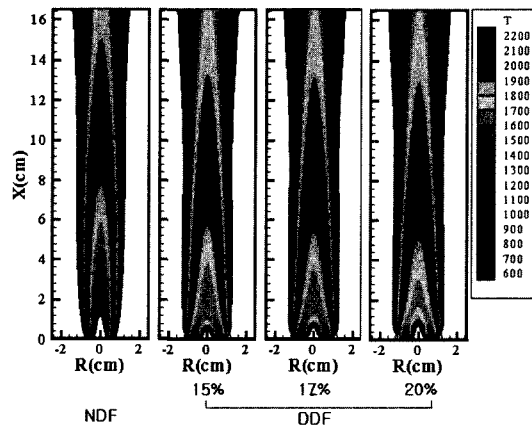


Fig. 2. Computed temperature isopleths of NDF and DDFs

폭으로 낮은 값을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 정상확산화염에 비해 낮은 이중확산화염의 Total EINOx 경향은 이 Prompt EINOx의 감소 경향으로 설명할 수 있다. 이 Prompt EINOx의 경향은 Fig. 5에서 상세히 설명하겠다.

또한 이중확산화염들에서는 중앙공기유량이 증가함에 따라 EINOx 값이 증가함을 알 수 있는데, 이는 Prompt EINOx 값은 중앙공기유량 변화에 대해 거의 일정한 데 비해 Thermal EINOx는 증가함을 알 수 있다. 따라서 이중확산화염에서 중앙공기유량 변화에 따른 Total EINOx 경향은 Thermal EINOx 증가 경향으로 설명 할 수 있다.

다음 그림들은 Fig. 3의 각 경향들을 상세히 알아보기 위하여 도시한 것이다.

먼저, Fig. 4(a), (b)는 중앙공기유량 20%-이중확산화염 및 정상확산화염에 대하여 $x=0.4\text{cm}$ 단면에서 NO 생성율과 관련성이 높은 온도 및 OH 및 CH Radical 농도를 도시한 것이다. 두 화염 모두 Thermal NO 생성율은 화염대의 온도 최고치 보다 다소 공기측으로 분포하며, 이 Thermal NO 생성영역은 가스 온도가 1850K 이상이면서 동시에 높은 농도의 OH Radical이 존재하는 영역과 일치한다. 또한 Prompt NO 생성율은 두 화염 모두 온도 최고치 부근에서 생성 및 소멸이 동시에 존재하며, 연료의 산화과정에서 발생하는 CH Radical 농도의 최고치를 기준으로 공기측에는 생성영역이, 연료측에는 소멸영역이 존재함을 알 수 있다. 또한 그림으로 나타내지는 않았지만 CH Radical 농도분포는 화염면의 좁은영역

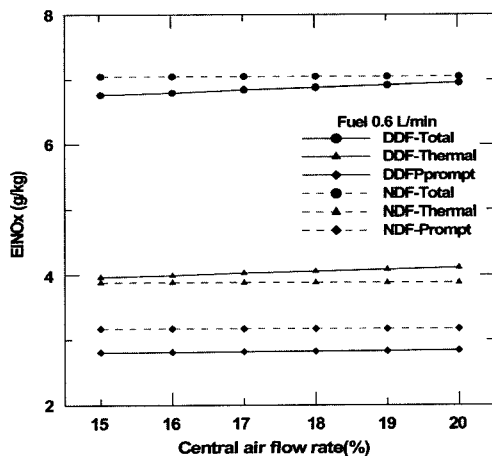


Fig. 3. Computed EINOx of NDF and DDFs with variation of central air flow rate

을 따라 분포하며, 화염상류에서 고농도로 분포함을 알 수 있었다.

Fig. 5는 Fig. 3의 Prompt EINOx의 경향을 상세히 알아보기 위하여 20%-이중확산화염 및 정상확산화염의 여러 단면에서 NO 생성율을 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 이중확산화염에서는 CH Radical이 고농도로 분포하는 화염상류에서 2개의 화염면에서 소멸영역이 존재하며, 정상확산화염은 1개의 화염면에서 소멸영역이 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 원인으로 Fig. 3에서 도시한 이중확산화염의 Prompt EINOx 값이 정상확산화염에 비해 낮은 값을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 3과 동일한 조건에 대하여 Thermal EINOx 경향을 설명할 수 있는 중심축 상에서의 최고 온도 및 1850K 이상의 영역을 통과하는데 걸리는 시간 즉, 고온 체류 시간을 도시한 것이다. 이중확산화염에서는 중앙공기유량이 증가함에 따라 체류 시간 및 온도가 증가함을 알 수 있으며, 내부화염의 온도 증가가 현저함을 알 수 있다. 이와 같은 원인으로 Fig. 3에 도시한 이중확산화염의 Thermal EINOx 경향을 설명할 수 있다.

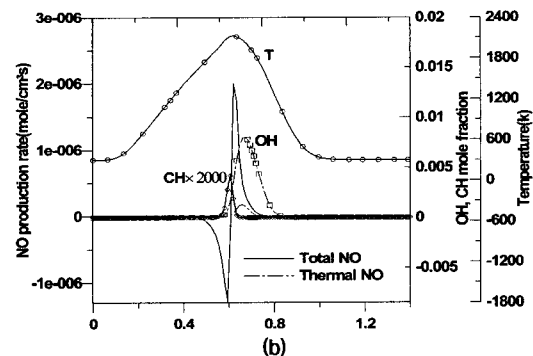
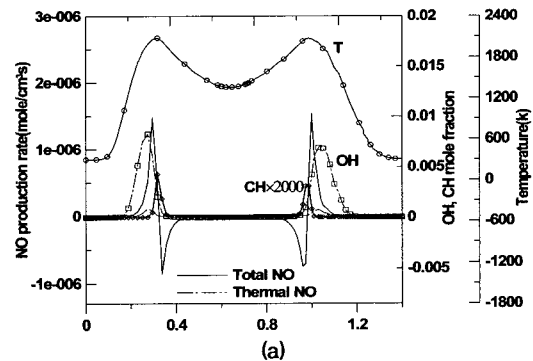


Fig. 4. Radial profile of DDF and NDF ($x=0.4\text{cm}$)

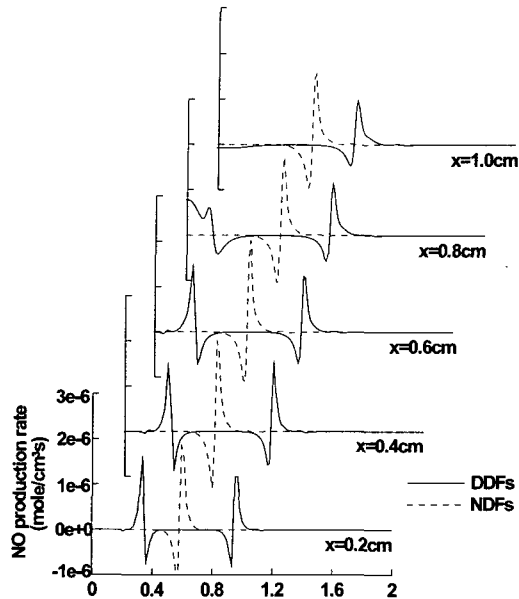


Fig. 5. Radial profile of DDFs and NDFs NO production rates at selected axial location

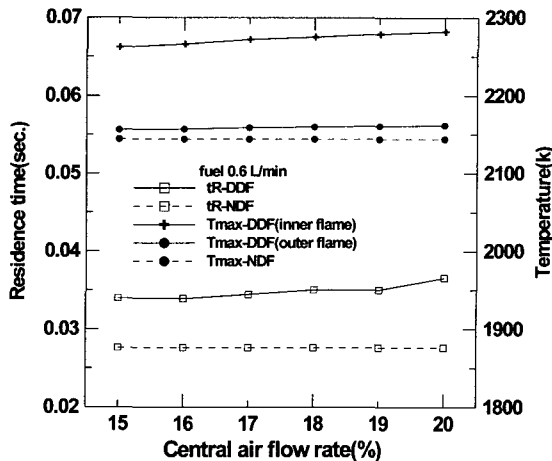


Fig. 6. The residence time and maximum temperature on centerline of DDF and NDF

5. 결론

층류 동축 분류 CH₄ 정상확산화염 및 중앙공기 유량 변화에 따른 이중확산화염을 대상으로 실험 및 수치계산을 통해 NO_x 배출특성을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 삼중 동심관 버너에서 이중확산화염을 형성하

기 위한 조건은 중앙공기와 연료의 유속비 또는 해당연료의 이론공연비 공기유량의 %를 이용할 수 있음을 알았다.

2. 이중확산화염의 Total EINO_x 값이 정상확산화염 보다 다소 낮음을 알 수 있으며, 이는 이중확산화염의 경우 Thermal EINO_x 값은 약간 증가하나, 2개 화염면에서 Prompt NO 소멸영역이 존재하여 그보다 더 큰 폭으로 Prompt EINO_x 값이 감소하기 때문이다.

3. 이중확산화염들에서의 Total EINO_x 경향은 중앙공기유량이 증가함에 따라 Total EINO_x 값이 증가함을 알 수 있으며, 이는 Prompt EINO_x 값은 거의 일정한데 비해 내부화염의 크기 및 온도 증가로 Thermal EINO_x 값이 증가하기 때문이다.

참고문헌

- 1) M. D. Smooke, Y. Xu, R. M. Zurn, P. Lin, J. H. Frank and M. B. Long, "Computational and Experimental Study of OH and CH Radicals in Axisymmetric Laminar Diffusion Flames," 24th Symposium(Internat.) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 813-821, 1992.
- 2) Raymond Gabriel, Jose E. Navedo and Ruy-Hung Chen, "Effects of Fuel Lewis Number on Nitric Oxide Emission of Diluted H₂ Turbulent Jet Diffusion Flames," Combustion and Flame, Vol. 121, pp. 525-534, 2000.
- 3) 황준영, "확산화염의 매연특성에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 1995.
- 4) W. P. Partridge and N. M. Laurendeau, "Nitric Oxide Formation by Inverse Diffusion Flames in Staged-Air Burners," Fuel, Vol. 74, No. 10, pp. 1424-1430, 1995.
- 5) R. F. Huang, J. T. Yang and P. C. Lee, "Flame and Flow Characteristics of Double Concentric Jets," Combustion and Flame, Vol. 108, pp. 9-23, 1997.
- 6) 정중수, 이교우, "이중 동축 확산화염의 형상 및 배출 특성," 한국연소학회지, Vol. 4, No. 1, 1999.
- 7) M. E. Coltrin, H. K. Moffat, R. J. Kee and F. M. Rupley, "CRESLAF(Version 4.0) : A Fortran Program For Modeling Laminar, Chemically Reacting, Boundary-Layer Flow in Cylindrical or Planar

- Channels,” Sandia Report SAND 98- 0478, 1993.
- 8) R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, “Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics,” Sandia Report SAND 89-8009B, 1989.
- 9) R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin and J. A. Miller, “A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties,” Sandia Report SAND86-8246, 1986.
- 10) GRIMECH 2.11, available from www.gri.org
- 11) M. Nishioka, S. Nakagawa, Y. Ishikawa and T. Takeno, “No Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame,” Combustion and Flame, Vol. 98, pp. 127-138, 1994.