

준층류 근사를 이용한 수소-공기 비예혼합화염의 질소산화물 생성예측

김성룡* · 정인석** · 윤영빈***

Numerical Prediction of NOx in the Nonpremixed Hydrogen-Air Flame using the Quasi-Laminar Reaction Modelling

Seong-Lyong Kim, In-Seuck Jeung and Youngbin Yoon

Key Words : NOx, EINOx, turbulence-chemistry interaction, quasi-laminar reaction modelling, global strain rate

Abstract

A Numerical Analysis of NOx production in Hydrogen-Air flame is performed using the quasi-laminar reaction modelling. As results, in low global strain rate region, $U_F/D_F \leq 50,000$, the quasi-laminar reaction modelling reproduces the experimentally observed EINOx half power scaling that the ratio of EINOx and flame residence time, $L_f^3/(D_F^2 U_F)$, is proportional to the square root of global strain rate. Thus, it suggests that turbulence-chemistry interaction has a minor impact on the trend of NOx production in low global strain rate region. However, the quasi-laminar reaction modelling predicts the higher temperature and NOx than experimentally observed. This overprediction may be due to the lack of radiation and quasi-laminar reaction modelling.

	기호설명		line stoichiometric point
EINOx	NOx[g]/H2[kg]	τ_f	Flame residence time defined as $L_f^3/(D_F^2 U_F)$
D_F	Diameter of fuel nozzle	D_F^*	$D_F \times L_{f,exp}/L_f$
U_F	Fuel injection velocity		
$L_{f,exp}$	Experimentally observed visible flame length.		1. 서 론
L_f	Visible flame length of calculation defined as 1.33 times of the distance from nozzle exit to center		

* 서울대학교 항공우주공학과 대학원

** 서울대학교 항공우주공학과

*** 서울대학교 항공우주공학과

수소-공기 난류화염은 화학반응 과정이 탄화수소계열 연료보다 간단하고, 레이놀즈수가 크다면 부력에 의한 효과도 무시할 수 있으며, NOx 생성이 주로 Zeldovich 과정으로 이루어지기 때문에 NO 생성의 모델로 많이 연구되어

왔다. Peters 와 Donnerhack[1]은 평형 반응이라는 가정하에서 여러 연료의 난류 비예혼합 화염에 대한 차원 분석을 수행하여, 부력과 복사 열손실을 무시할 수 있는 고레이놀즈수 난류 화염에서 $EINO_x$ 가 $L_f^3/(D_f^2 U_f)$ 로 정의되는 화염 체류시간(τ_c)에 비례함을 제안하였다. 여기에서 $EINO_x$ 는 단위질량의 연료 연소 시 생성되는 NO_x 질량으로 정의되는데 연료의 종류, 유량, 연소방식, 복사열전달 등의 영향을 받는 NO_x 발생을 서로 비교하기 위하여 많이 사용된다. 그러나 많은 연구자들[2,3]은 실험결과가 Peters 와 Donnerhack 에 의해 제안된 이론에서 벗어난다는 사실을 발견했다. Chen 과 Driscoll[2]은 수소 난류 확산화염에 대한 일련의 실험을 통해, $EINO_x$ 와 화염체류시간의 비($EINO_x/\tau_c$)가 전체 유동변형율(global strain rate, U_f/D_f)의 1/2 승에 비례하는 사실(1/2 비례관계)을 발견하였다.

Chen 과 Kollmann[4]은 확률밀도 함수(Probability Density Function)모델링을 이용한 수치해석을 통해 1/2 비례관계를 확인하였고, 그 원인이 NO 비평형 반응에 기인함을 주장하였다. Schlatter 등[5]은 Lagrange IEM(interaction by exchange with mean)모델을 이용한 수치해석을 통해 위의 1/2 비례관계를 보였으며, 이의 원인이 반응속도가 느린 삼체재결합반응(three body recombination reaction)에 의해 지배되는 라디칼의 농도 수준의 차이에 기인함을 주장하였다. 또한, Sanders 등[6]은 비평형 과정을 고려한 층류화염편 모델(laminar flamelet model)을 이용하여 1/2 비례관계를 포착하였다. Broadwell 과 Lutz[7]는 완전혼합 반응기(perfectly stirred reactor)로 표현되는 균질화학반응(homogeneous reaction)을

사용하여 비예혼합 화염을 완전혼합 영역(uniformly mixed fluid)과 신장화염(strained flame)으로 나타내고 상세화학 반응을 이용하여 1/2 비례관계를 유도하였다. 그리고 Kim 등[8]은 복사열전달을 고려한 assumed joint PDF 를 이용하여 1/2 비례관계를 보였다.

$EINO_x$ 1/2 비례관계를 보여주는 수치기법들[4,5,6,7,8]은 공통적으로 삼체재결합 반응의 느린 비평형 효과와 난류-화학반응 상호관계를 고려하였고, 비평형효과가 $EINO_x$ 1/2 비례관계에 영향을 끼친다는 것을 밝혔다. 그러나, 최근까지 난류화염 및 질소산화물 예측에 대한 많은 수치해석이 이루어졌음에도 불구하고 $EINO_x$ 1/2 비례관계를 보여주는 결과는 위의 언급을 제외하고는 드문 형편이다. 또한 $EINO_x$ 1/2 비례관계를 보여주는 결과들도 복사열전달, 부력 등이 $EINO_x$ 1/2 비례관계에 끼치는 영향은 다르게 나타나고 있다. 따라서, 정확한 질소산화물 생성에 대한 이해를 위해서는 더욱 발전되고 정확한 방법이 필요할 것이다.

이에 본 연구에서는 새롭게 질소산화물 발생과정에 대한 연구를 진행하기 보다는 복잡한 유동의 연소현상을 해석하는 데 많이 사용되어온 준층류근사 화학반응모델(quasi-laminar reaction modeling)을 이용하여 수소-공기 화염의 질소산화물 발생의 경향성을 살펴보고 이를 바탕으로 준층류 근사방법을 이용한 질소산화물 연구의 타당성과 한계등을 살펴보고자 한다. 이러한 연구는 복잡한 유동의 연소와 그에 따른 질소산화물의 정확한 예측이 어려운 현재에 있어서 기존의 접근방법에 대한 신뢰성 및 응용에 대한 좋은 기준이 될 것으로 사료된다.

2. 준층류근사 화학반응모델

준층류근사방법이란 연소해석에서 가장 어려운 점으로 알려진 난류와 화학반응 간의 상호작용을 유동의 난류 모델링을 통해 구해진 혼합기와 온도의 평균분포, 혼합기 전달계수를 이용해서 화학반응율을 계산하는 방법이다. 이때, 화학종의 확산계수, 점성계수, 열전도계수 등의 전달계수는 층류 전달계수에 유동의 난류효과로 인한 난류전달계수를 합해서 계산되고 화학반응은 층류와 같은 방식을 취한다. 이와 같은 방식은 계산 격자점에서 혼합기가 완전히 혼합되어 균일한 화학반응을 거치는 것으로 간주되고, 난류-화학반응 상호작용은 격자점 간의 난류 혼합과정으로 나타난다.

따라서 준층류 근사방법은 다른 난류연소 모델링에 비해 화학반응 계산 과정이 간단하기 때문에 정확한 유동해석을 필요로 하는 고속의 압축성 유동 연소현상이나, 엔진과 같은 복잡한 구조 내의 연소과정에 PDF 방법이나 Eddy Breakup 모델 등과 함께 많이 사용되는 방법 중의 하나이다. 그렇지만, 준층류근사 모델은 난류화학 반응에서 중요한 역할을 한다고 알려진 화학종과 온도의 난류섭동에 의한 반응율의 변화를 고려하지 않기 때문에 난류-화학반응의 상호작용이 크게 일어나는 높은 레이놀즈수 난류화염에 적용하기에는 한계가 있다[9].

그러나, 질소산화물의 생성과정은 다른 반응에 비해 느리게 진행되고, 질소산화물 발생특성시간에 큰 영향을 미친다고 알려진 수소-산소 반응의 삼체

역반응 또한 비교적 느린 속도로 진행되므로[4], 난류섭동이 약한 난류영역에서는 준층류근사 화학반응 모델이 질소산화물 발생의 정성적인 성질을 어느 정도 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

준층류근사 모델을 이용한 질소산화물 발생 예측의 타당성을 검증하기 위하여 Chen 과 Driscoll[2] 및 Driscoll 등[3]의 노즐직경 1.6, 2.6, 3.75mm 에 대한 실험 중 난류-화학반응 작용이 비교적 적을 것으로 예상되는 레이놀즈수 범위의 ($Re < 10,000$) 실험조건을 택하여 계산을 수행하였다. 여기에, 넓은 범위의 유동변형율을 구현하고자 실험에 포함되지 않은 3.0, 4.0, 5.0 mm 노즐직경의 경우도 계산하였다. 그러나 Driscoll 등[3]의 실험 중 노즐직경이 1.6mm 인 경우는 노즐 주위의 지나친 격자밀집으로 인한 수렴성의 저하로 계산에서 제외하였다.

3. 지배방정식 및 수치기법

본 연구에서는 유동과 화학반응을 위해 완전한 축대칭 압축성 보존방정식을 사용하였다. 그러나, 수소-공기화염은 매우 낮은 마하수 영역의 유동이므로 압축성수치기법은 매우 더디게 수렴한다. 이를 개선하고자 예조건화를 이용하여 수렴을 가속시켰다. 예조건화된 지배방정식은 (2-1)과 같다.

$$\Gamma \frac{\partial Q_v}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + H = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + H_v + W \quad (2-1)$$

$$Q_v = \{p \quad u \quad v \quad T \quad Y_1 \quad \dots \quad Y_{NS-1}\} \quad (2-2)$$

$$\Gamma =$$

$$\begin{pmatrix} 1/\varepsilon c^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ u/\varepsilon c^2 & \rho & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ v/\varepsilon c^2 & 0 & \rho & 0 & 0 & \dots & 0 \\ H/\varepsilon c^2 - 1 & \rho u & \rho v & \rho C_p & \rho(h_1 - h_{1s}) & \dots & \rho(h_{m-1} - h_{ms}) \\ Y_1/\varepsilon c^2 & 0 & 0 & 0 & \rho & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m-1}/\varepsilon c^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \rho \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

여기서 x, y 는 축방향과 반경방향을 각각 나타낸다. 또한 Q_v 는 예조건화 방정식의 원시변수 벡터이고, E, F 는 비점성 플럭스 벡터를, E_v, F_v 는 점성항을 나타낸다. H, H_v 그리고 W 는 축대칭 비점성항 및 점성항 그리고 화학반응 생성항을 각각 나타낸다. 예조건화 행렬은 Choi와 Merkle[10]에 의해 제안된 예조건화 행렬을 사용하였으며, 화학반응이 포함된 경우의 독립변수와 예조건화 행렬은 (2-2)와 (2-3)과 같다. 그리고 저마하수 영역에서 특성치의 고른 분포를 위해 사용하는 예조건화 변수 ε 은 아래와 같이 결정된다.

$$\varepsilon = \text{Min}(1, \text{Max}(10^{-10}, M^2)) \quad (2-4)$$

시간 미분항은 Euler 후방 차분을 적용하고 축대칭 점성항을 제외한 모든 플럭스 항은 모두 시간에 대하여 내재적으로 처리하고 시간 적분은 LU 근사화 과정을 거쳐서 이루어진다.

혼합기체의 전달계수는 층류값과 난류값의 산술합으로 나타냈으며, 점성계수와 열전달율의 층류값은 각 화학종의 점성계수와 열전달율을 이용하여 Wilke의 혼합법칙으로부터 구해진다. 혼합기의 확산속도는 Fick's law를 이용하여 계산하였다. 분자량과 표준 생성열은 JANAF Table[11]에서 인용하였으며, 평균분자직경과 특성온도 등은 참고문헌[12]에서 인용하였다. 정압비열을 근사한 다항식에 사용된 계수들은 참고문헌[13]에서 인용하였다.

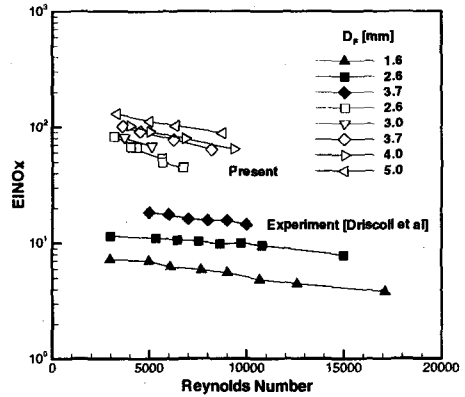


그림 4.1 노즐직경에 따른 EINOx와 레이놀즈수의 상관관계

난류 모델로서는 표준 $k-\varepsilon$ 난류 모델[14]을 사용하였으나, 벽면 점성 효과를 고려하여야 할 경우엔 부분적으로 Chien's $k-\varepsilon$ 모델[15]을 이용하였다. 이때, 혼합기체의 난류 Schmidt 수(Sc_T)와 난류 Prandtl 수(Pr_T)는 일반적으로 1에 가까운 수로 결정되는데, 본 연구에서는 두 값 모두 0.9의 값으로 고정하였다. 화학반응 모델로서 GRI의 11개의 화학종과 28개의 화학반응단계모델을 사용하였으며[16], 화학반응 과정은 완전 비평형 과정을 사용하였다. 본 논문에서 나타내진 않았지만 층류화염에 해석결과를 Gutheil 등[17]의 14 화학종 41 단계의 결과 및 실험과 비교하였을 때 동일한 결과를 나타내었다

또한, 정확한 경계조건을 위하여 연료노즐의 내부 유동을 직접 계산하여 계산영역의 입구조건으로 사용하였다.

4. 결과 및 해석

4.1 레이놀즈수에 따른 EINOx 변화
수치해석 결과 중 레이놀즈수에 따른 EINOx의 변화를 Driscoll 등[3]의 실험결과와 함께 그림 4.1에 나타냈다.

절대값과 기울기에 차이가 있지만 수치 해석 결과는 Driscoll 등의 실험과 동일한 EINO_x 감소현상을 보여준다. 레이놀즈수에 따라 EINO_x가 감소하는 현상은 화염길이의 변화와 그에 따른 화염체적의 변화가 작기 때문에 일어나는 현상으로, 질소산화물 반응영역의 크기가 레이놀즈수에 비례하지 않기 때문에 나타나는 특징이다. 만약 화학반응 과정이 평형과정으로 이루어지면 NO_x 발생량은 화염체적에만 비례하므로 EINO_x는 레이놀즈수에 역비례하나, 실제로는 NO 생성이 비평형 과정이므로 그림 4.1과 같이 EINO_x의 완만한 감소형태로 나타난다.

그러나, 그림 4.1에서 수치결과와 실험이 동일한 경향성을 보임에도 불구하고 수치계산의 EINO_x가 실험에 비하여 약 10 배 정도 크게 나온다. 또한 노즐직경에 대하여 실험에서는 비교적 일정한 기울기로 감소하는데 비하여 수치해석에서는 노즐직경이 작아질수록 급한 기울기로 감소한다는 차이점이 있다. 이 차이점들은 난류모델, 난류-화학반응 상호작용 복사열전달, 화학반응모델 등에서 설명되어야 하는데 $k-\epsilon$ 난류 모델은 다른 수치기법에서도 많이 사용되고 있으며 검증을 거친 화학반응모델을 사용했으므로, 복사열전달과 난류-화학반응 상호작용에서 설명되어야 할 것이다. 그러나, Chen 과 Driscoll[2], Driscoll 등[3]은 화염길이와 NO_x 만을 측정했을 뿐 화염구조와 화학종 및 온도에 대한 자료가 없으므로 Driscoll 등의 실험조건과 비슷하고 화학종, 온도, 난류 섭동 등 상세한 실험결과가 있는 Barlow 와 Carter[18, 19]의 실험을 수치해석하여 복사열전달, 난류-화학반응의 상호작용과 준층류근사 모델과의 차이를 살펴보았

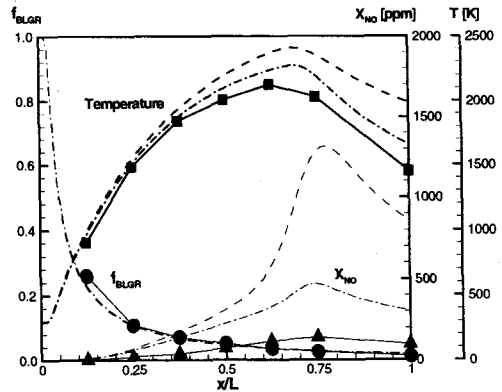


그림 4.2 축방향 혼합분율, NO 물질분율, 온도의 분포도, 점선:복사열전달이 포함되지 않은 수치결과, 일점쇄선:복사열전달이 포함된 수치결과, 실선:Barlow 와 Carter의 실험결과

다.

4.2 준층류근사 모델의 온도 및 화학종 예측

Barlow 와 Carter [18,19]에 대한 수치계산은 Barlow 와 Carter의 여러 실험 중 레이놀즈수 10,000 이고 유동변형율이 약 80,000 인 수소-공기 화염을 택하였다. 계산조건은 직경 16cm의 공기덕트와 1m/s의 주위 공기류, 직경 3.75mm의 연료노즐로 이루어진 단순비예혼합 화염으로 실험조건과 동일하다. 이때 입구조건을 정확성을 위하여 공기관의 상류 5cm부터 계산하였다. 또한, 복사열전달 효과를 보기 위하여 복사열전달을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우로 나누어 수치계산 하였는데 복사열전달에 사용된 모델은 참고문헌[20]에서 인용하였다.

수치계산 결과, 가시화염길이는 복사열전달이 포함되지 않은 경우에는 219D_F, 포함된 경우에는 211D_F로 실험의 180D_F보다 약 13cm 정도 크게 나왔다. 이때 가시화염길이는 Barlow 와

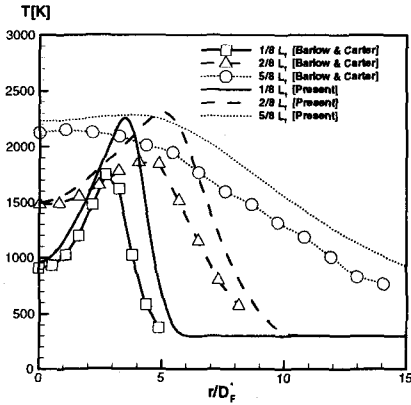


그림 4.3 반경방향 온도분포

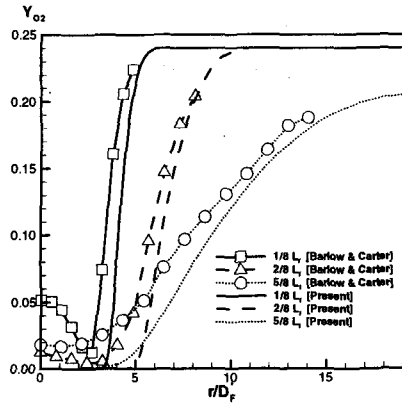


그림 4.4 반경방향 산소질량분율분포

Carter[18]가 실험에서 측정한 바와 같이 중심축에서 이론당량비가 되는 거리의 1.33 배로 정의하였다. 실험과 계산의 화염길이 차이에 대해서는 뒷부분에서 설명하도록 하겠다.

그림 4.2는 Barlow와 Carter의 실험에 대한 수치결과로서 중심축의 혼합분율, NO 물분율과 온도를 화염길이를 무차원화된 중심축에 나타낸 그림이다. 그림 4.2에서 혼합분율 분포는 수치계산과 실험이 일치하지만 최고온도는 수치계산이 실험에 비하여 약 300K 정도 높고, 복사열전달을 포함한 경우에는 약 150K 정도 높다. 따라서 그림 4.1의 EINOx와 4.2의 NOx의 과대예측은 상당부분 복사열전달의 영향임을 알 수 있다. 그러나, 그림 4.2에서 복사열전달을 포함하더라도 온도와 NO 분포가 실험보다 높게 나오므로 복사열전달 외에도 난류-화학반응 상호작용의 온도와 NOx의 과대예측에 대한 영향을 확인할 수 있다. 난류-화학반응 상호작용의 효과는 온도와 화학종의 반경방향 분포에서 명확히 찾을 수 있다.

그림 4.3과 4.4는 중심축 상의 일정한 위치에서 화염길이의 증가를 고

려한 반경방향 ($D_F^* = D_F \times L_{f,exp} / L_f$)으로 온도 및 산소의 질량분율을 나타낸 그림이다. 각 그림은 모두 복사열전달을 포함한 결과이다. 그림 4.3의 온도분포에서 그림 4.2의 온도 차이가 다시 나타나지만 특히, 노즐 부근의 온도가 실험값과 더 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 이 부분에서 실제와 달리 활발한 화학반응이 집중적으로 일어나고 있다는 것을 암시하는 데, 그림 4.3의 온도분포와 그림 4.4의 산소질량분율 분포를 비교하면 온도 차이가 준충류근사 화학반응 모델에 기인함을 확인할 수 있다.

그림 4.4는 산소의 질량분율의 반경방향 분포로서 전체적인 분포모양은 실험과 계산이 일치하지만 중심축 부근의 산소 질량분율에서 큰 차이를 보이고 있다. 기호가 없는 선으로 표시된 수치계산에는 중심축 근처에서 산소가 없는데 비하여 기호로 표시된 실험 결과에는 중심축에 가까워질수록 산소 질량분율이 크게 나타난다. 이러한 차이는 복사열전달이나 유동의 난류모델링에서 설명될 수 없기 때문에 준충류근사 효과임을 쉽게 판단할 수 있다.

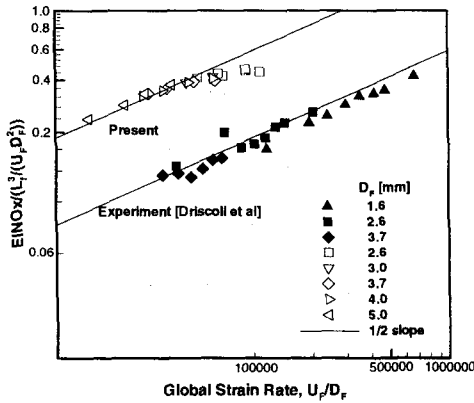


그림 4.5 EINOx/τ_f과 유동변형율과의 1/2 비례관계. 복사열전달은 포함되지 않음

즉, 반응영역으로 들어온 산소의 일부가 반응영역 안쪽의 연료와 혼합되어 예혼합 효과를 불러일으키고 예혼합 효과를 고려하지 않은 준충류근사 모델의 화염길이가 약간 크게 형성되는 것으로 추정된다. 이에 반하여 준충류근사 모델에서는 반응영역의 산소가 모두 화학반응을 하거나 반응영역에 평행하게 흘러가기 때문에, 화학반응에 참여하는 산소 및 수소 화학종이 실제보다 많아져 높은 온도를 야기하는 것으로 사료된다. 따라서 그림 4.1의 EINOx 과대예측은 화염의 준충류근사와 복사열전달을 고려하지 않아서 나타나는 현상으로 판단된다.

4.3 EINOx 1/2 비례관계

그림 4.5는 EINOx/τ_f과 유동변형율과의 관계를 Driscoll 등[3]의 결과와 같이 나타낸 그림으로 EINOx의 과대예측에도 불구하고, 낮은 유동변형율 범위에서 준충류근사 모델이 EINOx 1/2 비례관계를 예측하고 있음을 나타낸다. 이는 난류-화학반응 상호작용을 격자점간의 난류혼합 표현한 준충류근사가 작은 유동변형율 범위에서 타당하다는 것

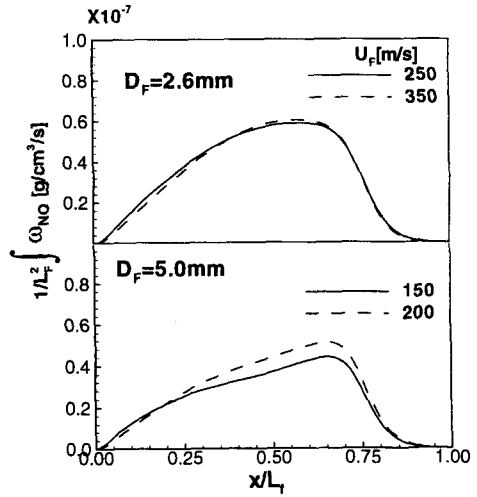


그림 4.6 반경방향으로 적분한 NO 생성율을 화염길이의 제곱으로 정규화한 분포도. 복사열전달은 포함되지 않음.

을 보여주고 있다. 그러나, 유동변형율이 커질수록 EINOx/τ_f의 기울기는 점근적으로 0에 접근하는데 EINOx의 과대예측과 마찬가지로 난류-화학반응 상호작용과 복사열전달에서 그 원인을 찾아야 할 것이다.

준충류근사 모델이 직접적인 난류-화학반응 상호작용을 모사하지 않으므로 EINOx 1/2 비례관계가 성립하는 부분과 그렇지 않은 부분의 화염을 살펴봄으로써 그 영향을 유추해볼 수 있다. 그림 4.6은 낮은 유동변형율 범위인 노즐직경 5.0mm와 높은 유동변형율의 지름 2.6mm의 정규화된 NO 생성율 분포로서 각 격자점의 NO 생성율을 반경방향으로 적분하여 다시 화염길이의 제곱으로 나눈 값이다. 따라서 이를 중심축 방향으로 적분하면 NOx/Lr³ ∝ EINOx/(Lr³/UfDf²)이 되고 그림 4.5의 수직축과 같은 물리적 의미를 갖는다. 그림 4.6에 나타난 그래프는 모두 화염끝으로 갈수록 큰 NO 생성량을 보이고 있고 이는 Schlatter 등[5]이 보여준 결과와

유사하다.

그림 4.6의 노즐직경 5.0mm인 경우에는 연료속도가 증가하면서 NO 생성율이 증가하나 노즐직경 2.6mm에서는 거의 변화가 없다. 이 경우가 그림 4.5에서 기울기 0인 부분이고 그림 4.1의 매우 급한 기울기를 갖는 부분이다. 이러한 분포는 평형화학반응을 이용한 결과와 같다. 그러나, Driscoll 등[3]의 실험에서는 그림 4.5에서 보이듯이 1/2 기울기를 유지하고 있다. 그러므로 높은 유동변형을 영역의 NOx 생성예측에 준중류근사 모델의 한계가 있음을 알 수 있다. 그런데, Barlow와 Carter [18,19]는 앞서 언급한 실험에서 온도 및 혼합기의 난류 섭동이 평균값의 약 40%에 이른다는 것을 관찰한 바 있다. 따라서 높은 유동변형을 영역의 1/2 비례관계는 난류-화학반응에 의한 추가적인 반응율의 증가를 고려해야 할 것으로 사료된다.

그에 비하여 그림 4.6의 노즐직경 5.0mm 경우에는 연료속도가 증가할수록 최고값이 커진다. 이는 낮은 유동변형율에서 유동의 난류효과로 인한 혼합촉진과 그에 따른 반응율의 증가가 지배적임을 보여주고 있으며 준중류근사 모델의 타당성을 보여주고 있다. 또한, 그림 4.3에서 보였던 노즐출구 부근의 온도의 과대예측은 이 부분의 NO 생성율이 전체 NO 생성율에서 차지하는 비율이 크지 않기 때문에 EINOx 1/2 비례관계에 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

복사열전달 효과가 EINOx 1/2 비례관계에 미치는 영향은 아직 논란의 여지가 있는 부분이다. Broadwell과 Lutz [7]와 Kim 등[8]은 복사열전달을 포함하지 않은 경우, 1/2 보다 낮은 기울기

가 나타나며 복사열전달을 포함한 경우에 한하여 1/2 기울기를 보여주었다. 그러나, Chen과 Kollmann[4], Schlatter 등 [5] 그리고 Sanders 등[6]은 복사열전달을 포함하지 않은 모델에서 EINOx 1/2 비례관계를 보여주었다. 따라서 화염의 복사효과가 EINOx 1/2 기울기에 미치는 영향은 아직 정확히 밝혀졌다고 볼 수 없으며 정교한 복사열전달 모델이 개발되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

준중류근사 화학반응모델을 이용하여 수소-공기난류 화염을 수치해석한 결과, 준중류근사 모델이 온도 및 질소산화물의 과대예측에도 불구하고 작은 유동변형을 영역에서 EINOx 1/2 비례관계를 예측할 수 있음을 보여주었다. 또한 작은 유동변형을 범위에서는 직접적인 난류-화학반응 상호작용이 질소산화물 발생에 미치는 영향이 작다는 것을 밝혔고 준중류근사 모델을 이용한 질소산화물의 경향성 해석이 물리적으로 타당한 결과를 도출할 수 있음을 밝혔다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구 조성비(ME96-G-04)에 의해 연구되었습니다. 연구지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) N. Peters and S. Donnerhack, "Structure and Similarity of Nitric Oxide Production in Turbulent Diffusion Flames", 18th Symposium (International) on Combustion, 1981, pp. 33-42
- (2) R. H. Chen and J. F. Driscoll, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames",

- 23rd Symposium (International) on Combustion, 1990, pp. 281-288
- (3) J. F. Driscoll, R. H. Chen and Y. Yoon, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames : Effects of Residence Time and Damkoeller Number", *Combustion and Flame*, 1992, Vol.88, pp. 37-49
- (4) J. Y. Chen and W. Kollmann, "PDF Modeling and Analysis of Thermal NO Formation in Turbulent Nonpremixed Hydrogen-Air Jet Flames", *Combustion and Flame*, 1992, Vol.88, pp. 397-412
- (5) M. Schlatter, J. C. Ferreira, M. Flury and J. Gass, "Analysis of Turbulence-Chemistry Interaction with respect to NO Formation in Turbulent Nonpremixed Hydrogen-Air Flames", 26th Symposium (International) on Combustion, 1996, pp. 2215-2222
- (6) J. P. H. Sanders, J. Y. Chen, and I. Gökalp, "Flamelet-Based Modeling of NO Formation in Turbulent Hydrogen Jet Diffusion Flames", *Combustion and Flame*, 1997, Vol.111, pp. 1-15
- (7) J. E. Broadwell and A. E. Lutz, "A Turbulent Jet Chemical Reaction Model: NO_x Production in Jet Flames", *Combustion and Flame*, 1998, Vol.114, pp.319-335
- (8) S.-K. Kim, Y.-M. Kim, K.-Y. Ahn and K. Oh, "Detailed structure and NO_x formation characteristics of turbulent nonpremixed flames", The Second Asia-Pacific Conference on Combustion, 1999, pp.496-499.
- (9) W. Kollmann and J. Y. Chen, "The Interaction of Turbulence and Chemical Kinetics", *Major Research Topics in Combustion*, M. Y. Hussaini, A. Kumar and R. G. Voigt (Eds), Springer-Verlag, 1991, pp. 359-402
- (10) Y. Choi and C. L. Merkle, "The Application of Preconditioning in Viscous Flows", *Journal of Computational Physics*, 1993, Vol.105, pp. 207-223
- (11) D. R. Stull, and H. Prophet, *JANAF Thermodynamic Tables*, 2nd ed., National Bureau of Standards, NSRDS-Rept. 37, June 1971
- (12) W. C. Gardiner, Jr., *Combustion Chemistry*, Springer-Verlag, New York, 1984
- (13) R. B. Bird, *Transport Phenomena*, John Wiley and Sons, New-York, 1960
- (14) D. C. Wilcox, *Turbulence Modelling for CFD*, DCW Industries, 1993
- (15) K. Y. Chien, "Prediction of Channel and Boundary-Layer Flows with a Low Reynolds Number Turbulence Model", *AIAA Journal*, 1982, Vol.20, pp. 33-38
- (16) C. T. Bowman, R. K. Hanson, D. F. Davidson, W. C. Gardiner Jr., V. Lissianski, G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach and M. Goldenberg, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
- (17) E. Gutheil, G. Balakrishnan and F. A. Williams, "Structure and Extinction of Hydrogen Air Diffusion Flames", *Reduced Kinetics Mechanics for Applications in Combustion Systems*, Norberts Peters and Bernd Rogg(Eds.), 1993, pp. 177-195
- (18) R. S. Barlow and C. D. Carter., "Raman /Rayleigh/LIF Measurements of Nitric Oxide Formation in Turbulent Hydrogen Jet Flames", *Combustion and Flame*, 1994, Vol.97, pp.261-280
- (19) R. S. Barlow and C. D. Carter., "Relationship among Nitric Oxide, Temperature, and Mixture Fraction in Hydrogen Jet Flames", *Combustion and Flame*, 1996, Vol.104, pp.288-299
- (20) <http://www.ca.sandia.gov/tdf/Workshop.html>