

H₂/Air 비에 혼합화염의 화염신장율에 따른 NO 생성경로의 상세해석

김종현* · 황철홍** · 이창언†

(2008년 4월 2일 접수, 2008년 7월 2일 수정, 2008년 7월 4일 심사완료)

Detailed Analysis of NO Formation Routes with Strain Rate in H₂/Air Nonpremixed Flames

Jong-Hyun Kim, Cheol-Hong Hwang and Chang-Eon Lee

Key Words : Hydrogen(수소), NO_x(질소산화물), Nonpremixed Flame(비에 혼합화염), Counterflow Flame(대향류화염)

Abstract

Detailed analysis of NO formation routes and its contributions with strain rate in hydrogen/air flames were numerically investigated. LiG detailed reaction mechanism has been used for calculation, which is compared with experimental data in literature. It shows good agreement with experiment for both temperature and NO mole fraction. Three routes have been found important for NO formation in hydrogen flames. These are the Thermal route, NNH route and N₂O route. Strain rate were varied to discuss the EI_{NO} reduction trend in hydrogen nonpremixed flames, which are analyzed by each NO formation routes. As a result, as the strain rate increase, EI_{NO} decrease sharply until strain rate 100s⁻¹ and decrease slowly until strain rate 310s⁻¹ again, after that EI_{NO} keeps nearly constant. It can be identified that EI_{NO} trend with the strain rate is well explained by a combination of variation of production rate of above Thermal, NNH and N₂O route. Also result of Thermal-Mech. that includes only thermal NO reaction is compared with those of Full-Mech. As a result, it can be identified that there was difference between the two results of calculation. It is attributed to result that Thermal-mech did not consider contributions of NNH and N₂O route. From these result, we can conclude that NO_x emission characteristics of hydrogen nonpremixed flames should consider contributions of above three routes simultaneously.

1. 서론

최근 탄화수소 연료의 연소시 발생하는 다양한 오염물질(CO, UHC, PAHs, Soot etc.) 및 온실가스인 CO₂의 배출문제가 심각하게 대두되면서 이러한

오염물질과 온실가스를 근본적으로 해결할 수 있는 대체 에너지원으로서 H₂ 연료의 연소에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 H₂ 화염은 탄화수소 화염에 비해 매우 고온이며, 이로 인한 NO_x 배출수준은 상당히 높다고 할 수 있다.

일반적으로 탄화수소화염에서의 NO_x 배출은 Thermal, Prompt, Re-burning 그리고 N₂O 경로 등의 복잡한 상호작용에 의하여 생성된다고 알려진 반면, H₂ 화염에서는 탄화수소 화염과는 달리 C 원소가 존재하지 않기 때문에 Thermal NO_x가 주된

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : chelee@inha.ac.kr

Tel: (032) 860-7323 Fax: (032) 868-1716

* 회원, (주)화성테크윈

** 회원, 인하대학교 기계공학과

생성원인이라고 알려져 있다.⁽¹⁾ 그 결과 H₂ 화염에서의 가장 효과적인 NO_x 저감법으로 주위류의 증가 및 선회도의 증가와 같은 화염-유동 상호 작용법이 이용되고 있다. 이러한 방법들은 기본적으로 연료-공기의 혼합증진을 통한 화염길이, 즉 NO_x 생성과 관련된 고온영역의 감소뿐만 아니라, 화염두께의 감소를 초래하여 NO_x 생성을 현저히 감소시키는 역할을 하고 있다. 이와 관련된 연구로서 Drake 등⁽²⁾은 층류 대향류화염에서 화염신장율이 증가하면 화염온도가 감소하며, 이로 인하여 Thermal NO가 감소됨을 보여 주었으며, Chen 등⁽³⁾은 H₂화염에서 주위류를 증가 시키면 NO_x 배출지수를 상당히(최고 1/6배까지) 낮출 수 있음을 보고한 바 있다. 또한 그들은 주위류에 스윌을 추가하면 더 많이 NO_x가 감소됨을 보여 주었다. 한편, 스윌의 계속적인 증가는 결국 국소영역의 혼합을 촉진하여 오히려 NO_x 배출을 증가시키는 결과를 초래할 수 있음도 보여 주었다. 또한 Lee 등⁽⁴⁾은 H₂ 분류 비예혼합화염에서 주위류의 난류강도에 따른 NO_x 배출특성에 관한 연구에서 난류강도의 증가는 혼합을 촉진시켜 화염길이를 감소시키며 또한 화염신장율을 증가 시켜 화염온도를 감소시킴으로서 NO_x 배출이 감소됨을 보고하였다.

최근 H₂ 연소에 대한 관심이 고조 되면서 H₂ 화염에서의 NO_x 상세반응기구에 대한 새로운 연구 결과들이 나오고 있으며,⁽⁵⁻⁷⁾ 이에 따르면 H₂ 화염에서의 NO_x 생성은 Thermal 경로 외에 NNH 및 N₂O 경로에 의해서도 생성됨이 확인되었다. 따라서 실용적인 측면에서 실제 난류제트화염에서 이들 경로의 영향은 복합적으로 나타날 것으로 예상되며, 이에 대한 상세한 이해가 요구되고 있는 실정이다.

이러한 배경하에 본 연구에서는 대향류화염에서 상세반응기구를 이용하여 H₂ 화염에서 주된 NO 생성경로라고 인식되어온 Thermal 경로 외에 NNH 및 N₂O 경로를 검토한 후, H₂ 비예혼합화염에서 화염신장율 증가에 따른 각 생성경로 및 경로별 기여도를 검토하여 H₂ 화염에서 NO_x 생성특성에 대하여 상세히 규명하고자 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 H₂ 비예혼합화염에서 화염신장율 변화에 따른 NO 생성경로의 변화를 상세히 검토하기 위하여 Fig. 1과 같이 노즐간의 거리가 2cm 인 비예혼합 대향류화염을 대상으로 하였다.

정상상태의 축대칭 대향류 유동장은 1차원적 상사해가 존재하며 유동장 내에 형성되는 화염은 평면적인 형태를 갖는다. 이에 대한 연속, 운동량,

에너지, 화학종 보존 및 상태방정식은 다음과 같다.^(8,9)

$$\frac{dU}{dx} = G \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \left[\mu \frac{d}{dx} \left(\frac{G}{\rho} \right) \right] - 2 \frac{d}{dx} \left(\frac{UG}{\rho} \right) + \frac{2G^2}{\rho} + H = 0 \quad (2)$$

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k c_{pk} Y_k V_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \dot{\omega}_k - \frac{\dot{q}_r}{c_p} = 0 \quad (3)$$

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} - \frac{d}{dx} (\rho Y_k V_k) + \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (4)$$

$$P = \rho RT / \bar{W} \quad (5)$$

위 식에서 U 는 축방향 질량유속, H 는 반경방향 압력구배의 고유치(Eigenvalue)로서 다음과 같이 정의된다.

$$U = \rho u / 2 \quad (6)$$

$$H = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (7)$$

여기서 u , v 는 각각 축방향 x 와 반경방향 r 에 대한 속도성분이며, ρ , P , μ , T , λ , R 과 \bar{W} 는 각각 밀도, 압력, 점성계수, 온도, 열전도계수, 기체상수 그리고 평균 분자량을 의미한다. 또한 Y_k , W_k , c_{pk} , h_k 와 $\dot{\omega}_k$ 는 각각 화학종 k 의 질량분율, 분자량, 정압비열, 총엔탈피 및 화학종의 생성율을 나타내며, V_k 는 화학종 k 의 확산속도, \dot{q}_r 은 복사 열손실을 나타낸다. 화학종 k 의 확산속도는 식 (8)에 의해 계산된다.

$$V_k = \frac{1}{X_k \bar{W}} \sum_{j=1}^K W_j D_{kj} \frac{dX_j}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k} \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

여기서, D_{kj} 와 D_k^T 는 각각 다성분 확산계수와 열확산계수를 의미한다.

복사 열손실 효과를 반영하기 위하여 Optically thin model⁽¹⁰⁾을 이용하였으며, H₂ 화염에서 열손실

에 주로 기여하는 것으로 알려진 H_2O 화학종에 대해 고려하였으며, 이때 단위 체적당 복사 열손실은 다음 식에 의해 계산되었다.

$$\dot{q}_r = -4\sigma K_p (T^4 - T_\infty^4) \quad (9)$$

$$K_p = P_{H_2O} K_{H_2O} \quad (10)$$

위 식에서 σ 는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수, T 와 T_∞ 는 각각 국부 온도와 주위 온도를 나타내며, K_p 는 플랑크 평균 흡수계수를 의미한다. 또한 P_k 와 K_k 는 화학종 k 의 분압과 각 가스의 흡수계수를 나타내며, 흡수계수는 온도의 다항식으로 다음과 같이 표현된다.

$$K_k = \sum_{j=0}^5 A_{kj} T^j \quad (k = H_2O) \quad (11)$$

여기서 A_{kj} 는 온도에 따른 각 화학종의 다항식 계수로서 Ju 등⁽¹¹⁾에 의해 사용된 값을 적용하였다.

2.2 반응기구 및 NO 생성경로

NOx에 대한 정확한 수치해석을 하기 위해서는 정확한 상세 반응기구가 필요하다. 최근 H_2 화염에 대한 반응기구가 여러 사람에 의해 실험결과와의 비교를 통하여 검토되었으며, Martin 등⁽¹²⁾의 연구결과 H_2 화염에서의 NOx 예측에는 LiG 반응기구가 적합함을 여러 NOx 반응기구와의 비교-검증을 통하여 확인하였다.

본 연구에 이용된 LiG 반응기구는 23개의 화학종과 119개의 소반응으로 구성된 것으로, LiG 반응기구는 Glarborg 등⁽¹⁴⁾의 NOx 반응기구가 포함된 탄화수소 반응기구에서 C관련 반응들을 제거한 후 Glarborg 등의 H_2 산화반응을 Li 등⁽¹³⁾의 H_2 산화반응으로 대체한 것이다(이후 LiG 반응기구로 표시). 즉 Glarborg 등의 NOx 반응기구에 H_2 연료의 산화과정을 비교적 잘 예측하는 기존의 반응기구를 첨가함으로써 주요 산화과정 즉 화염구조 및 라디칼의 발생량에 큰 변화를 초래하지 않으면서 비교적 타당한 NOx 생성결과를 예측할 수 있다는 것이다.

또한 본 연구에서는 H_2 화염에서의 NOx 생성이 Thermal NOx라는 인식의 타당성을 검토하기 위하여 LiG 반응기구중 연료의 산화반응과 Thermal NO 반응만을 포함하는 반응기구인 Thermal 반응기구(이후 Thermal-Mech.)와 모든 반응을 포함하는 Full 반응기구(이후 Full-Mech.)로 분리하여 계산을 수행하였다.

LiG 반응기구의 선정 및 위 접근방법의 타당성에 대한 보다 자세한 내용은 계산결과에서 언급하고자 한다. 또한 NOx의 주요 성분으로서 NO뿐만 아니라 NO_2 역시 중요시 되는 오염물질이다. 그러나 NO_2 는 연료가 희박한 영역에서 발생량이 증가되지만, 대부분 NO와의 반응으로부터 생성되기 때문에 전체 NOx 배출지수에는 영향을 주지 않는다. 따라서 본 연구에서는 NOx 배출특성에 대해 주로 NO의 생성에 초점을 두어 검토하였다. 총 NO 생성량에 대한 각 생성경로의 기여도 및 주요반응은 ROPA(Rate of production analysis)⁽¹⁵⁾와 동일한 방법으로 검토되었으며, 전체 계산영역의 적분값을 이용하여 NO의 생성경로를 도시하였다.

2.3 계산방법

본 연구에서는 Oppdif code⁽¹⁶⁾를 수정하여 계산을 수행하였으며, 열역학 및 전달 물성치의 계산을 위해 각각 Chemkin-II⁽¹⁷⁾와 Transport package⁽¹⁸⁾가 사용되었다. 계산 대상은 Fig. 1과 같이 연료측과 산화제 측의 노즐 간격이 2cm이며, 두 노즐이 마주보고 있는 대향류 비예혼합화염으로서, 연료는 (+x)방향, 산화제는 (-x)방향으로 공급되었다. 이때 연료 및 공기의 유속은 동일하게 하였으며, 유속에 따른 화염신장 효과는 식 (12)와 같은 화염신장율에 의해 정의된다.

$$a = \frac{2(-u_o)}{L} \left[1 + \frac{u_F}{-u_o} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_o}} \right] \quad (12)$$

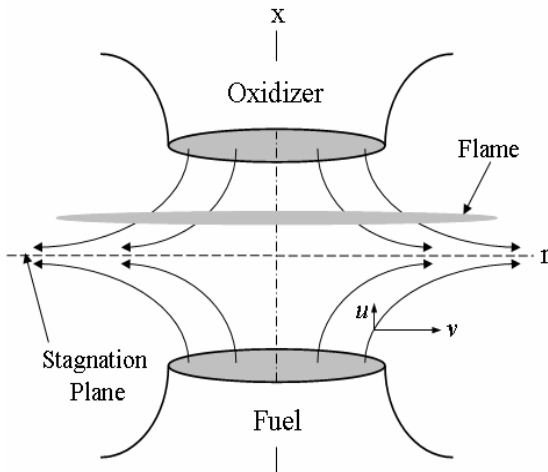


Fig. 1 Schematics of counterflow nonpremixed flame

위 식에서 아래첨자 F 와 o 는 각각 연료 노즐과

산화제 노즐을 의미한다. 본 연구에서 화염신장율은 10s⁻¹에서 590s⁻¹까지 변화 시켜, 화염신장율 변화에 따른 NO_x 생성특성을 생성경로별로 검토하였다.

각 화염에서 NO 생성량을 정량적으로 비교하기 위하여, Takeno 등⁽¹⁹⁾이 제안한 NO 배출지수 (NO Emission index; EI_{NO})를 이용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$EI_{NO} = \left(\int_0^L W_{NO} \dot{\omega}_{NO} dx \right) / \left(- \int_0^L W_{fuel} \dot{\omega}_{fuel} dx \right) \quad (13)$$

3. 결과 및 검토

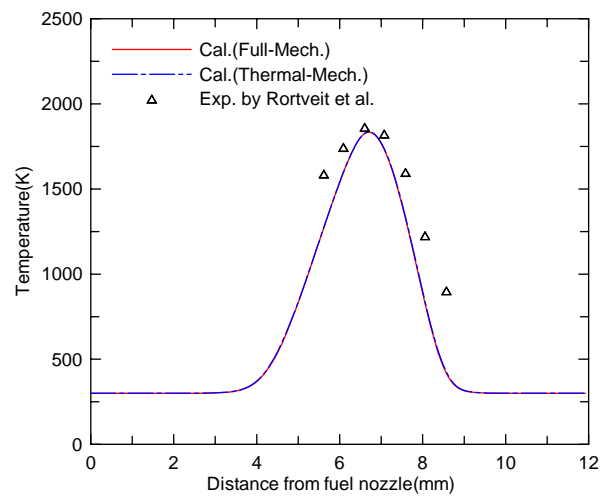
3.1 H₂ 비예혼합화염에 대한 NO_x 반응기구 및 NO 생성경로 검토

Fig. 2는 본 연구에서 적용될 LiG 반응기구의 타당성을 검토하기 위하여 Rortveit 등⁽²⁰⁾의 실험결과와 LiG 반응기구를 이용한 계산 결과를 비교한 것이다. 실험조건은 N₂를 65% 포함한 희석연료로 화염최고온도가 약 1800K 정도인 저온연소 조건의 경우이다. 계산 결과에는 서론에서 언급한 반응기구 분리법에 따라 Thermal NO 반응만으로 구성된 Thermal-Mech.으로 얻어진 결과도 함께 도시하였다.

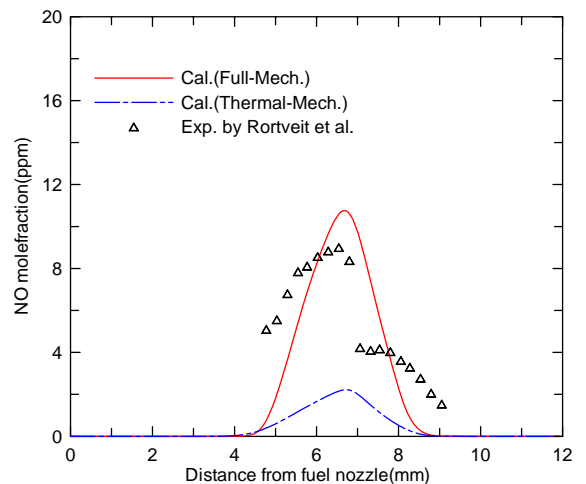
Fig. 2(a)의 온도분포는 Full-Mech.과 Thermal-Mech. 모두 실험 결과를 매우 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig. 2(b)의 NO 농도분포의 경우 Full-Mech.은 고온영역에서 약간 높게 예측하고 있으나, 화염에서의 NO 측정시 샘플링과정에서의 프르브의 화학반응에 의한 NO의 소멸반응을 고려한다면 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 Thermal-Mech.의 경우 NO농도를 낮게 예측하고 있으며, Full-Mech.과 상당한 차이가 발생함을 알 수 있다. 이 결과로부터 H₂ 화염에서의 NO 생성은 Thermal NO에만 의존하지 않음을 잘 알 수 있다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일조건에서의 NO 생성경로를 도시한 것이다. 그림에서 각 소반응에 포함된 화학종의 생성율은 전 계산영역에 대한 적분을 통해 얻어진 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 H₂ 화염에서의 NO 생성은 점선 화살표로 도시한 Thermal 경로 외에, 진한 검은색 화살표로 도시한 NNH(NH포함)경로 및 흰색 화살표로 도시한 N₂O 경로에 의해서도 생성됨을 알 수 있다. 본 계산

조건에서 이 3가지 경로의 기여도는 각각 Thermal 경로(44.9%), NNH경로(29.39%), N₂O 경로(25.8%)이다. 단 NH에 의한 NO 생성의 경우 NNH+O = NH+NO 반응은 다시 NH+O = NO+H로 전환되므로 NH에 의한 생성율은 NNH에 포함 시켰다. 이상으로 본 연구에서 적용하고자 하는 LiG 반응기구는 H₂ 화염의 NO 생성을 합리적으로 잘 예측함을 알 수 있으며, H₂ 화염에서의 NO 생성은 Thermal경로 이외에도, NNH경로 및 N₂O 경로에 의해 상당량이 생성됨을 확인할 수 있었다.



(a) Temperature



(b) NO mole fraction

Fig. 2 Comparison of simulation results of temperature and NO mole fraction with experimental data for H₂ nonpremixed flames (Fuel : H₂ 35%-N₂ 65%, U_{fuel} : 39.311cm/s, U_{air} : 31.735cm/s, L : 12.7mm)

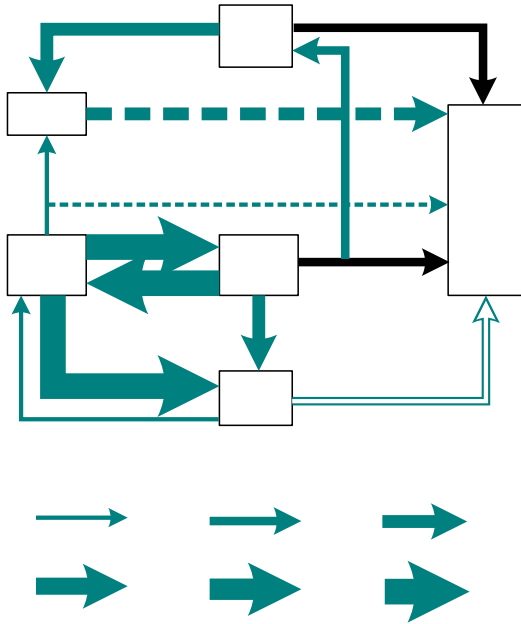


Fig. 3 Reaction path diagram of NO in H₂ nonpremixed flame (H₂ 35%- N₂ 65%),

3.2 H₂ 비예혼합화염에서 화염신장을 변화에 따른 EI_{NO} 경향

Fig. 4는 H₂ 비예혼합화염에서 화염신장을 증가에 따른 EI_{NO} 경향을 검토하기 위하여 순수 H₂ 화염을 대상으로 화염신장을 10s⁻¹에서 590s⁻¹까지 변화 시킨 경우의 Full-Mech. 및 Thermal-Mech. 으로 계산한 EI_{NO} 값 및 각 조건에서의 최고화염온도를 도시한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 H₂ 비예혼합화염에서 화염신장을 변화에 따른 EI_{NO} 경향은 화염신장이 증가함에 따라 화염신장을 100s⁻¹까지 급격히 감소하며, 다시 화염신장을 310s⁻¹까지 완만히 감소한 후 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이와 같은 EI_{NO} 경향은 앞서 언급한 3가지 NO 생성경로의 상호 작용에 의해 영향을 받을 것으로 사료되며, 이에 대해서는 다음의 각 NO 생성경로별 생성물의 변화경향으로 검토하고자 한다. 정량적으로는 화염신장을 100s⁻¹, 310s⁻¹, 590s⁻¹으로 증가함에 따라 EI_{NO}는 화염신장을 10s⁻¹을 기준으로 각각 1/3.5배, 1/11배, 1/23.5배로 감소한다

또한 Thermal NO 반응만으로 구성된 Thermal-Mech.과 Full-Mech.을 이용하여 계산한 EI_{NO} 값을 비교해 보면, 일정 화염신장을 310s⁻¹을 기준으로 낮은 화염신장에서에서는 Thermal-Mech.으로 계산한 EI_{NO} 값이 높고, 높은 화염신장에서에서는 Full-Mech.

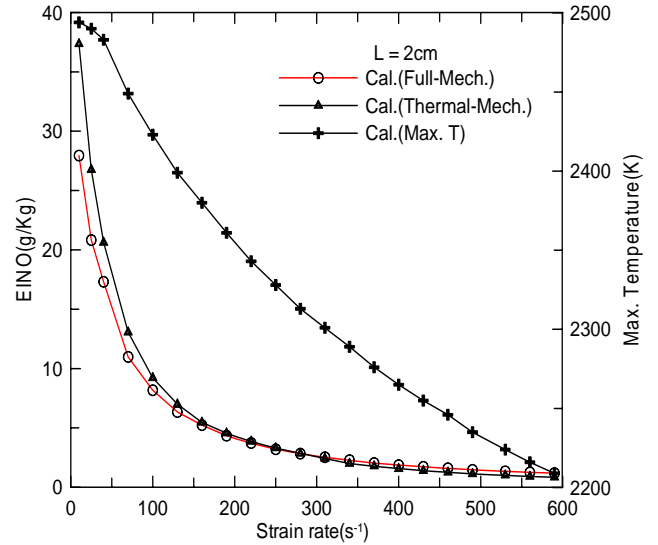
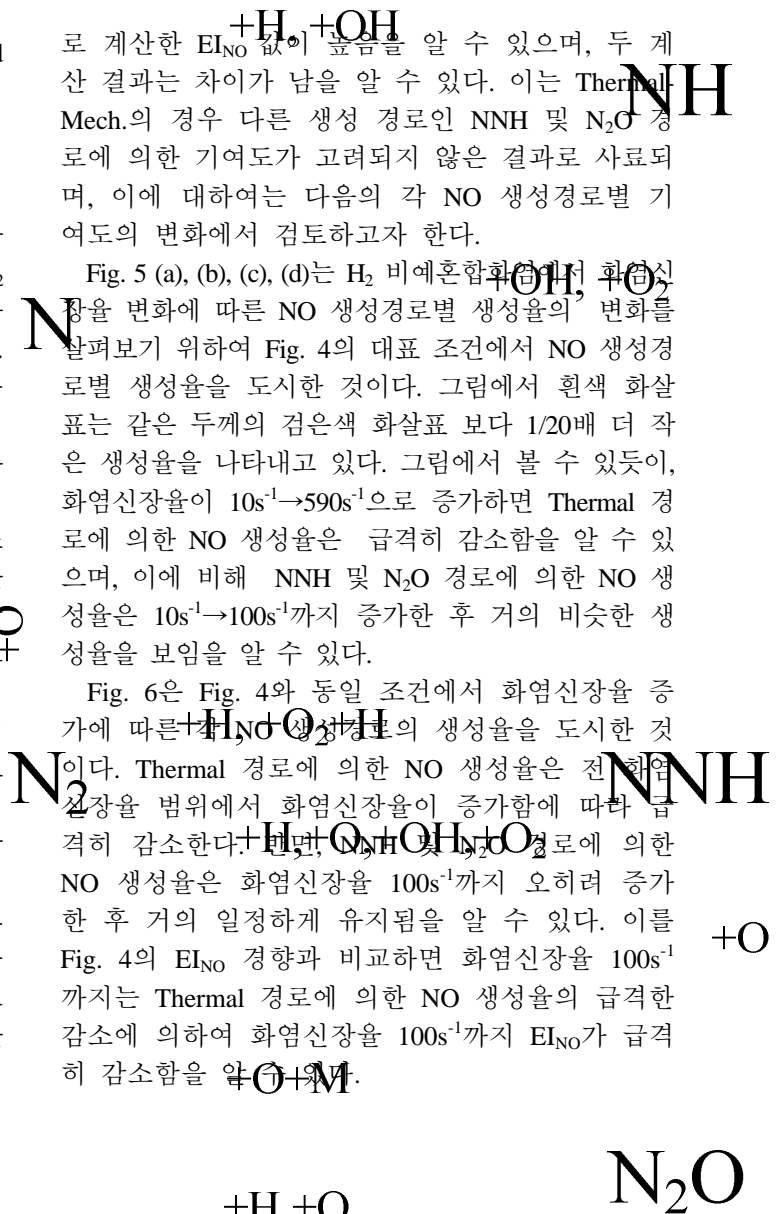


Fig. 4 NO emission indices in H₂ nonpremixed flame according to Strain rate

로 계산한 EI_{NO} 값이 높음을 알 수 있으며, 두 계산 결과는 차이가 남을 알 수 있다. 이는 Thermal-Mech.의 경우 다른 생성 경로인 NNH 및 N₂O 경로에 의한 기여도가 고려되지 않은 결과로 사료되며, 이에 대하여는 다음의 각 NO 생성경로별 기여도의 변화에서 검토하고자 한다.

Fig. 5 (a), (b), (c), (d)는 H₂ 비예혼합화염에서 화염신장을 변화에 따른 NO 생성경로별 생성물의 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 4의 대표 조건에서 NO 생성경로별 생성물을 도시한 것이다. 그림에서 흰색 화살표는 같은 두께의 검은색 화살표 보다 1/20배 더 작은 생성물을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 화염신장이 10s⁻¹→590s⁻¹으로 증가하면 Thermal 경로에 의한 NO 생성물은 급격히 감소함을 알 수 있으며, 이에 비해 NNH 및 N₂O 경로에 의한 NO 생성물은 10s⁻¹→100s⁻¹까지 증가한 후 거의 비슷한 생성물을 보임을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4와 동일 조건에서 화염신장을 증가에 따른 Thermal-Mech.의 생성물을 도시한 것이다. Thermal 경로에 의한 NO 생성물은 전 화염신장 범위에서 화염신장이 증가함에 따라 급격히 감소한다. 반면, NNH 및 N₂O 경로에 의한 NO 생성물은 화염신장을 100s⁻¹까지 오히려 증가한 후 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이를 Fig. 4의 EI_{NO} 경향과 비교하면 화염신장을 100s⁻¹까지는 Thermal 경로에 의한 NO 생성물의 급격한 감소에 의하여 화염신장을 100s⁻¹까지 EI_{NO}가 급격히 감소함을 알 수 있다.



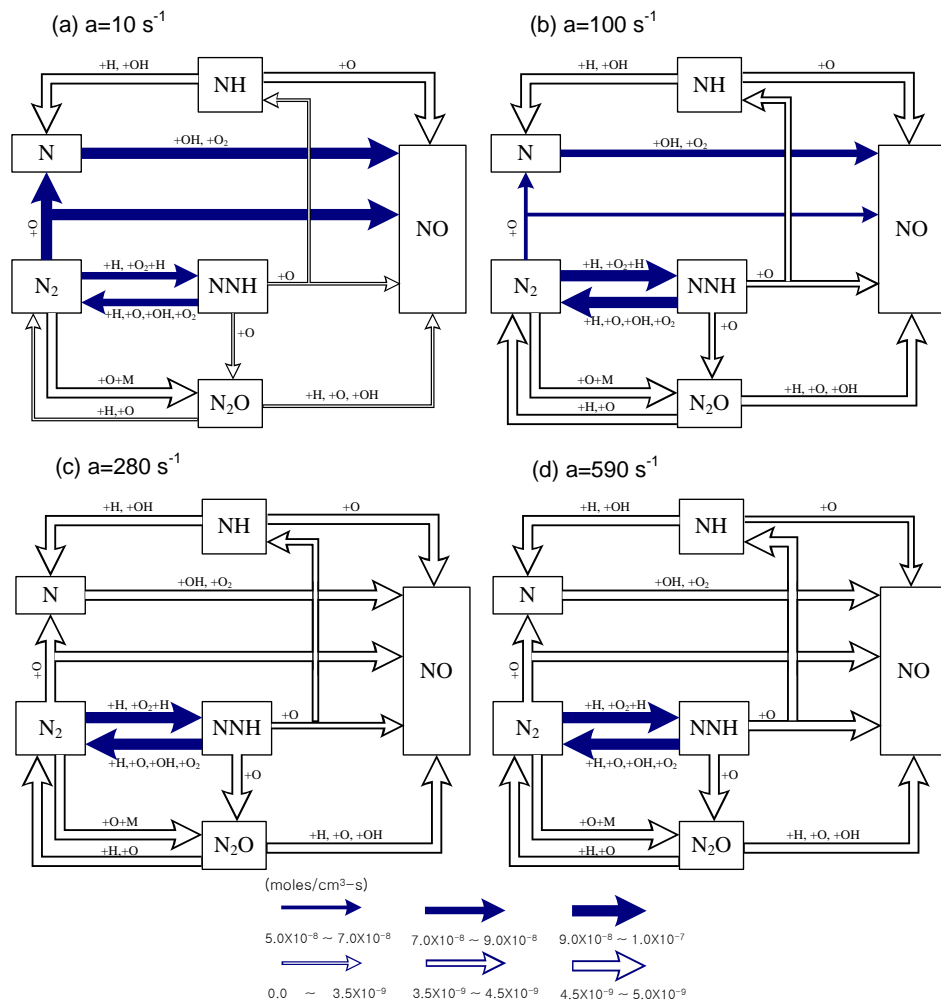


Fig. 5 Reaction path diagram of NO in H₂ nonpremixed flames according to Strain rate

그 이상으로 화염신장율이 증가하면, Thermal NO는 점점 감소하나, NNH 및 N₂O 경로에 의한 NO 생성은 거의 일정하게 유지된다. 이들 결과의 상호작용에 의해 화염신장율 100s⁻¹ 이상에서의 EI_{NO} 경향은 완만히 감소 후 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 4의 대표적인 화염신장율에서 NO 생성경로별 기여도를 도시한 것이다. 화염신장율이 10s⁻¹에서 590s⁻¹으로 증가하면 Thermal 경로의 기여도는 96%에서 67.7%로 감소하며, 반면 NNH는 3.4%에서 18.3%로 증가하며, 또 N₂O 경로의 기여도는 0.7%에서 12%로 증가함을 알 수 있다. 따라서 H₂ 비예혼합화염에서의 NO_x 생성특성을 검토하기 위해서는, Fig. 6의 결과로부터 Thermal NO 이외에도 NNH 및 N₂O 경로에 의한 NO 생성도 반드시 고려되어야 하며, 또 이들 반응경로는 각각의 연소조건에서 기여도가 변화 함이 고려

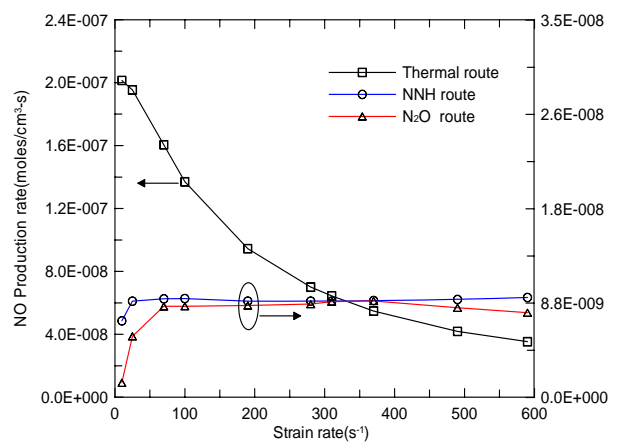


Fig. 6 NO production rate of each routes in H₂ nonpremixed flame according to Strain rate

되어야 함을 알 수 있다.

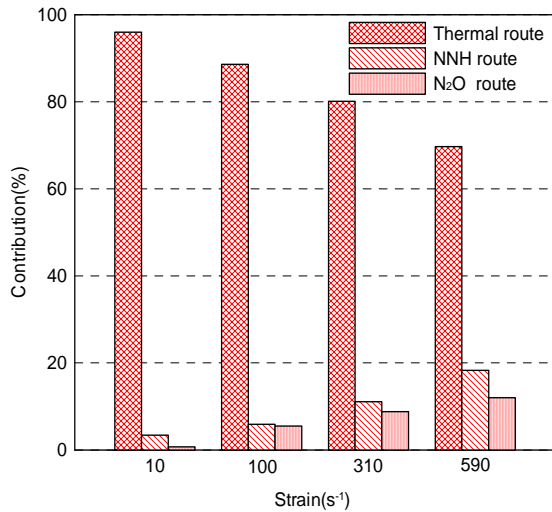


Fig. 7 Relative contribution of each NO formation route in H₂ nonpremixed flame according to Strain rate

4. 결론

H₂/Air 비예혼합화염에서 화염신장을 변화에 따른 NO_x 생성특성에 대한 각 NO 생성경로 및 경로별 기여도를 검토하기 위하여, LiG 상세반응기구를 이용하여 대향류화염에서 수치계산을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) H₂ 비예혼합화염에서 LiG 반응기구가 NO_x 값을 잘 예측함을 확인할 수 있었으며, NO 생성은 Thermal 경로 이외에도 NNH 및 N₂O 경로에 의해서도 상당량 생성됨을 알 수 있었다.

(2) H₂ 비예혼합화염에서 EI_{NO}는 스트레일을 증가에 따라 급속히 감소한다. 정량적으로는 화염신장을 100s⁻¹, 310s⁻¹, 590s⁻¹으로 증가함에 따라 EI_{NO}는 화염신장을 10s⁻¹을 기준으로 각각 1/3.5, 1/11, 1/23.5 배로 감소한다.

(3) 화염신장을 증가에 따른 EI_{NO} 감소 경향은 화염신장을 100s⁻¹까지는 급격히 감소하나 그 이후에서는 완만히 감소하여 일정치에 접근한다. 그 이유로는 Thermal NO 생성율은 화염신장을 에 비례하여 감소하는 반면, NNH 및 N₂O 경로에 의한 NO 생성율은 화염신장을 100s⁻¹까지 증가한 후 일정하게 유지되는 상호 대립적인 특성에 의한 것임을 알 수 있었다.

(4) H₂ 비예혼합화염에서의 NO_x 생성특성을 검토하기 위해서는, Thermal NO 이외에도 NNH 및 N₂O 경로에 의한 NO 생성도 반드시 고려되어야 하며, 또 이들 반응경로는 각각의 연소조건에서 그 기여도가 달라진다.

후 기

본 연구는 2007년 에너지관리공단 에너지·자원 기술개발 사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Peters, N., Donnerhack, S., 1981, "Structure and Similarity of Nitric Oxide Production in Turbulent Diffusion Flames," *Proc Combust Inst*, Vol. 18, pp. 33-42.
- (2) Drake, M. C., Blint, R. J., 1991, "Relative Importance of Nitric Oxide Formation Mechanisms in Laminar Opposed-flow Diffusion Flames," *Combust Flame*, Vol. 83, pp.185~203.
- (3) Chen, R. H., Driscoll, J. F., 1990, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames : Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameters," *Proc. Combust Inst*, Vol. 23, pp.281-8.
- (4) Lee, C. E., Hwang, C. H., Lee, S. R., 2007, "The Effect of Turbulence Intensity of Ambient Air Flow on NO_x Emissions in H₂/air Nonpremixed Jet Flames," *Proc. Int. J. of Hydrogen Energy*.
- (5) Bozzelli, J. W., Dean, A. M., 1995, "O+NNH : a Possible New Route for NO_x Formation in Flames," *Int J Chem Kinet*, Vol. 27, pp. 1097-109.
- (6) Haworth, N. L., Mackie, J. C., Bacskey, G. B., 2003, "An Ab Initio Quantum Chemical and Kinetic Study of the NNH+O Reaction Potential Energy Surface: How Important is This Route to NO in Combustion?," *J Phys Chem A*, Vol. 107, pp. 6792-803.
- (7) Konnov, A. A., De Ruyck, J., 2001, "Temperature-dependent Rate Constant for the Reaction NNH+O→NH₂," *Combust Flame*, Vol. 125, pp. 1258-64.
- (8) Kee, R. J., Miller, J. A., Evans, G. H. and Dixon-Lewis, G., 1988, "A Computational Model of the Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane-Air Flame," *Proc. Combustion Inst.*, Vol. 22, pp. 1479~1494.
- (9) Lutz, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1994, "A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames," *SAND 96-8243*.
- (10) Tien, C. L., 1968, "Thermal Radiation Properties of Gases", *Advances in Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 253-32.
- (11) Ju, Y., Guo, H., Maruta, K. and Liu, F., 1997, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames," *J. Fluid Mech.*, Vol. 342, pp. 315~334.
- (12) Martin, S., Kjell, E.R., 2007, "A study of NO_x Formation in Hydrogen Flames," *International J of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 3572-585.
- (13) Li, J., Zhao, Z., Kazakov, A., Dryer FL, 2004, "An Updated Comprehensive Kinetic Model of Hydrogen," *Int J Chem Kinet* Vol. 36, pp. 566-75.
- (14) Glaborg, P., Alzueta, M.U., Dam-Johansen, K.,

- Miller, J.A., 1998, "Kinetic Modeling of Hydrocarbon/nitric Oxide Interactions in a Flow Reactor," *Combust Flame* Vol. 115, pp. 1~27.
- (15) Turanyi, T., Kinalc Homepage, <http://www.chem.leeds.ac.uk/Combustion/kinalc.html>.
- (16) Lutz, A. E., Kee, R. J., Grcar, J. F. and Rupley, F. M., 1997, "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames," *SAND 96-8243*.
- (17) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," *SAND89-8009B*.
- (18) Kee, R. J., Dixon-Lewis, Warnatz, G. J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1994, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multi-Component Transport," *SAND86-8246*.
- (19) Takeno, T. and Nishioka, M., 1993, "Species Conservation and Emission Indices for Flames Described by Similarity Solutions," *Comb. Flame*, Vol. 92, pp. 465-448.
- (20) Rortveit, G. J., Hustad, J. E., Li, S. C., Williams, F. A., 2002, "Effects of Diluents on NO_x Formation in Hydrogen Counterflow Flames", *Combustion and Flames*, Vol. 130, pp. 48-61