

## 동축류 속도에 따른 프로판 제트의 부상화염 특성에 관한

### 수치해석적 연구

도재일\* · 김길남\* · 천강우\* · 김준홍\*\* · 정석호\*\*\*

## Numerical Study on the Effect of Coflow Jet Velocity on Lifted Flame in Propane Jet

Jae il Doh, Junhong Kim, Kil Nam Kim, Kang Woo Chun, Suk Ho Chung

### ABSTRACT

When the fuel jet velocity is smaller than coflow velocity, the trend of decreasing liftoff height of highly diluted propane lifted flame with coflow velocity is observed experimentally. To investigate the mechanism of decreasing liftoff height with coflow velocity, lifted flames in propane jet has been studied numerically. Using one-step overall reaction mechanism the liftoff heights have been calculated for four cases of coflow velocity. The simulation agrees qualitatively with experimental observation that the liftoff height decreases with coflow velocity. As coflow velocity increases, the streamlines between nozzle and lifted flame diverge in radial direction due to the difference of momentum between coflow jet and fuel jet such that the local flow velocity ahead of lifted flame base decreases resulting in decrease of the liftoff height with coflow velocity.

**Key Words** : laminar lifted flame, coflow velocity, liftoff height

### 기 호 설 명

$V_{co}$  : 동축류 속도

$H_L$  : 화염 부상 높이

$U_0$  : 연료 평균 제트 속도

$U_m$  : 연료 제트 중심축 최대 속도

$X_{F,0}$  : 연료 몰 분율

### 1. 서 론

화염 안정화 메커니즘에 관련하여 층류 부상화염은 널리 연구 되어왔다. 과농, 회박 예혼합 화염 그리고 확산화염이 삼중점에서 공존하는 삼지 화염 구조를 갖고 있는 층류 부상화염은 질소 희

석 및 부분 예혼합과 같은 다양한 효과에 대해서도 연구 되었다.[1-5]. 최근에는 실험적으로 안정화된 화염을 관찰하기 쉽고, 수치적 접근이 용이한 동축류 제트에서 부상화염에 관한 연구가 진행되었으며, 최근 상대적으로 큰 노즐 직경을 사용할 경우 부력이 부상화염의 안정화에 중요한 역할을 한다는 것이 밝혀졌다.[6-8] 동축류 제트의 경우 동축류 속도와 제트의 출구속도의 차이에 의해 상사성이 존재함을 밝혔으며, 동축류의 출구 속도가 제트 속도보다 상대적으로 낮은 영역과 높은 영역에서 동축류 속도 변화에 따른 부상화염의 거동 및 특성이 연구 되었다.[9-10] 상

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

† E-mail : ani3859@snu.ac.kr

Tel) 02 - 880 - 7120

\*\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

대적으로 동축류 속도가 연료 제트속도보다 낮은 영역에서는 동축류 속도의 증가에 따라 부상화염의 높이가 증가하였는 것이 일반적 현상이나, 동축류 속도가 연료 제트속도보다 높은 경우에는 부상화염의 높이가 감소하는 것이 최근 실험적으로 관찰 되었다.[11]

본 연구에서는 직접수치모사법을 통하여 동축류 속도에 따라 과다 희석된 프로판 제트의 부상 특성을 살펴보고, 동축류 속도가 연료 제트 속도보다 높은 영역에서 동축류 속도에 따라 부상화염의 높이가 감소하는 현상에 대한 원인을 규명하고자 한다.

## 2. 수치해법

동축류 부상화염을 모사하기 위하여 원통좌표계에서 시간의존적, 축대칭 지배방정식을 운동량, 화학종, 에너지 방정식에 대해서 해석하였다. 지배방정식은 낮은 Mach 수 근사법[12]을 적용하였고, 시간적분법, 공간차분법은 4차 정확도의 6-단계 Runge-Kutta[13] 기법과 2차 정확도의 중앙 차분기법이 각각 사용되었다. 비균일 격자계로 구성하였고 화염 영역부근에 격자를 집중하였다. 실험과 동일하게 모사하기 위해 노즐 직경을 4.35 mm 로 하였고, 동축류를 구성하는 외부관의 직경은 90 mm 로 하였으며 수직방향으로는 40 mm 의 계산영역을 구성하였다. 그 개략도는 Fig. 1 과 같다. 그리드 수는 256×512 로 최소 그리드 크기는 0.0584 mm, 0.0557 mm 이다.

노즐 출구의 속도는 완전발달 조건으로 설정하였고, 바깥 동축류의 유속은 균일한 분포로 하였다. 중심축과 바깥 벽면의 경계조건은 화학종, 축방향 속도와 온도에 대해서 Neumann 조건을 사용하였다. 출구 경계 조건을 모사하기 위해 모든 스칼라 변수와 속도 벡터는 대류 경계조건(convective boundary condition)으로 설정하였다.[12]

화학반응은 1차 총체반응  $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$  를 적용하였다. 세부적인 화염구조의 모사에는 제한적이나, 화염에 의한 열유동장의 모사는 가능하므로 정성적인 부상화염 거동의 예측은 가능하다. 1차 총체반응항식은  $\omega = A \exp(-E_a/RT) [F][O]$  으로 가정하였으며, 여기서  $A$ ,  $E_a$ ,  $R$ ,  $[F]$ ,  $[O]$  는 각각 반응속도 상수, 활성화 에너지, 기체상수, 연료의 농도, 산화제의 농도를 표시한다. 프로판의 산화반응시  $E_a$  값은 40.2 kcal/mol이며, 반응속도 상수는 본 계산코드의 반복계산수행을 통해 제트속도  $U_0 = 12$  cm/s, 동축류 속도  $V_{co} = 12$  cm/s 조건에서의 실험측정 부상높이인  $H_L = 12.1$  mm 가 될 수 있는  $A = 2.3 \times 10^{15}$  으로 사용하였다.

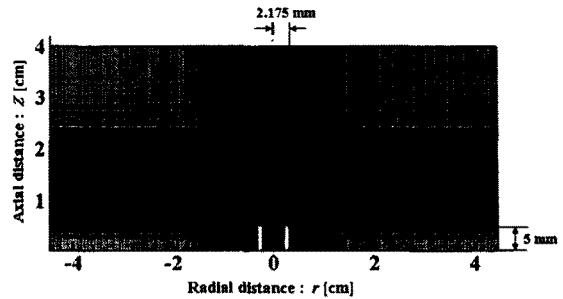


Fig. 1 Computational domain

전달 및 열역학적 물성치들은 CHEMKIN-III 와 TRANSPORT Package 로부터 계산되었다.[14-15]

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 동축류 속도에 따른 프로판 부상화염의 부상 높이 변화

이승재 등[11]의 실험에서  $U_0$  가 30 cm/s 이하인 영역에서 동축류 속도 증가에 따른 부상높이 변화를 Fig. 2 에 나타내었다.  $U_0$  가 24 cm/s 보다 이상인 경우, 화염이 존재하는 영역에서 중심속  $V_{co}$  가 최대 제트속도  $U_m = 2U_0$  보다 항상 작은 경우이어서 동축류 속도 증가에 따라 부상높이가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 그러나  $U_0$  가 20 cm/s 보다 이하인 경우는  $V_{co}$  가  $U_m$  보다 작은 영역에서는 부상높이가 동축류 속도 증가에 따라 증가하지만,  $V_{co}$  가  $U_m$  보다 큰 영역에서는 동축류 속도 증가에 따라 부상높이가 감소한다.

1차 총체반응은 열유동과 화염반응 등의 정성적인 성향은 적절하게 모사할 수 있지만 세부적인 화염 구조를 모사하는 데는 제한적이고, 부상화염내의 삼지화염 구조에서 과농 예혼합화염 지역

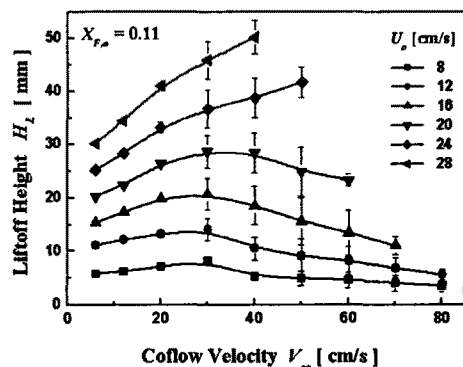


Fig. 2 Liftoff height with coflow velocity at various fuel jet velocities

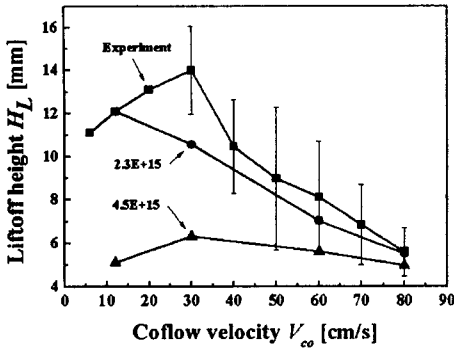


Fig. 3 Liftoff height variation with coflow velocities and collision factor for numerical simulation and experiment

의 전파속도와 반응율이 실제보다 과평가가 되는 경향이 있지만 회박 예혼합화염지역과 삼중점에서 반응율의 특성은 상세화학반응기구를 이용한 결과와 비슷한 결과를 보여준다. 결과적으로 Fig. 2 와 같은 실험적 부상높이 변화 특성을 수치해석적으로 모사하기 위해서 반응속도 상수  $A$  값의 조절을 통한 방법을 사용하였으며 고정된  $A$  값과 동축류 속도  $V_{co}$  에 따른 부상높이 들을 실험 결과와 같이 Fig. 3 에 비교 하였다. 반응속도 상수  $A$  값이  $4.5 \times 10^{15}$  일 때, 실험과 같이 부상높이가 동축류 속도에 따라 증가했다가 감소하는 경향을 보이지만, 최고 위치와 최저 위치의 차이가 1.34mm 로 아주 작다.  $U_0 = 12$  cm/s,  $V_{co} = 12$  cm/s 인 조건에서 실험적인 부상높이  $H_L = 12.1$  mm 를 기준으로 정한 반응속도 상수  $A$  값이  $2.3 \times 10^{15}$  인 경우, 동축류 속도가 증가함에 따라 부상높이가 계속 감소하는 경향을 보이지만 부상 높이차가 6.59mm 정도로 현저하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 계산 코드를 이용하여 동축류 속도에 따른 부상높이 증가와 감소를 모두 모사가 가능하지만 동축류 증가에 따른 부상높이 감소 원인 규명을 위해 높이차가

큰 반응속도 상수  $A$  값이  $2.3 \times 10^{15}$  인 경우를 중심으로 분석 하고자 한다.

이승재 등[11]의 실험에서 상대적으로 동축류 속도가 연료 제트속도 보다 낮은 영역에서는 동축류 속도에 따라 부상높이가 증가하였고, 동축류 속도가 연료 제트속도보다 높은 경우에는 부상높이가 감소하는 실험 결과에서 볼 때, 이러한 현상은 화학 반응의 영향보다는 유동장과 관련된 영향으로 생각되어져 동축류 속도에 따른 냉간 유동장과 반응 유동장의 변화를 살펴보았다.

### 3.2 동축류 속도에 따른 냉간 제트의 특성

동축류 속도 변화에 따른 축 방향 속도와 유선을 Fig. 4 에 모두 같은 수준으로 나타내었다. 동축류 속도가 증가함에 따라서 부상화염과 노즐 사이의 지역에서 축방향 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 동축류 속도와 연료 제트의 속도차는 두 제트 사이의 운동량 차이를 발생시키고, 이로 인해 상대적으로 속도가 낮은 연료 제트의 유선이 동축류 제트 유선방향으로 벌어지는 것을 확인 하였다. 또한 이러한 현상은 동축류 속도가 증가할수록 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 동축류 속도가 80 cm/s 의 경우 유동의 재순환 현상이 발생하면서 노즐 선단의 축방향 속도가 더욱 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다.

동축류 속도 증가와 더불어 화염의 존재가 유동장에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 반응 유동장에서 동축류 속도 증가에 따른 유동장 변화를 살펴 보았다.

### 3.3 동축류 속도에 따른 반응 유동장의 특성

반응속도 상수  $A$  값이  $2.3 \times 10^{15}$  일 때, 동축류 속도 변화에 따른 축방향 속도, 유선 그리고 열

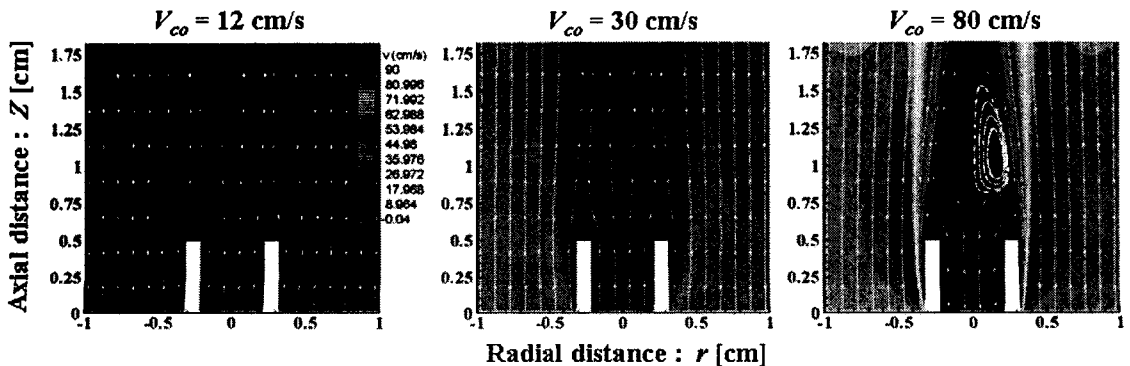


Fig. 4 Axial velocity contours and streamlines of cold flows for  $V_{co} = 12, 30, 80$ cm/s

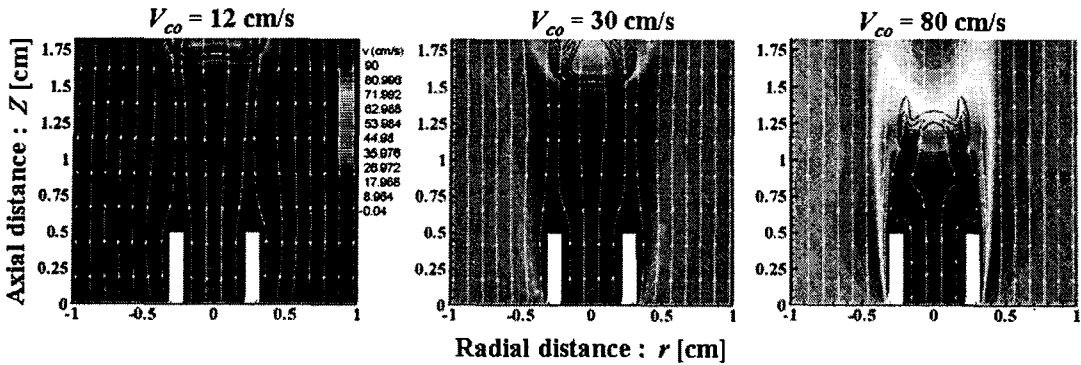


Fig. 5 Axial velocity contours, heat release rate contours and streamline of reacting flow for  $V_{co} = 12, 30, 80$  cm/s

방출률을 Fig. 5 에 나타 내었다. 동축류 속도가 80 cm/s 일때 냉간 유동장에서와 같은 재 순환 현상은 관찰되지 않았다. 이는 화염에 의한 열팽창과 화염 후류와의 밀도차로 인한 부력효과로 생각되어진다. 하지만 노즐 선단에서의 유선은 냉간 유동장과 같이 동축류 속도에 따라 반경방향으로 벌어지는 경향이 뚜렷하게 나타나므로 노즐 선단의 축방향 속도는 냉간 유동장과 같이 동축류 속도가 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 6 에 각각의 동축류 속도에서 각 부상화염의 삼중점의 반경방향 위치만큼 대칭축으로부터 떨어진 지점에서 후류방향에 따른 축방향 속도 성분을 냉간 유동장과 반응 유동장에 대해 도시하였다.

$V_{co} = 30, 80$  cm/s 의 경우, 냉간 유동장과 반응 유동장 모두에서 축방향 속도가 감소하는 구간이 나타나고 노즐에서 축방향으로 일정 구간동안은 두 유동장의 축방향 속도가 같은 분포를 보이다가 특정 위치를 지나면서 다른 형태의 분포를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 동축류의 큰

운동량 전달에 의한 냉간 제트의 속도증가를 보다 부상높이 전까지 반응장의 속도증가가 작음을 볼 수 있다. 이는 화염에 의한 열팽창이 화염 앞단의 제트 영역으로의 동축류의 운동량 전달을 방해하는 것으로 판단된다.  $V_{co} = 80$  cm/s 의 경우, 냉간 유동장에서는 재 순환 유동의 효과로 음의 값을 가지던 축방향 속도가 화염의 존재로 인한 밀도차의 영향으로 재 순환 유동이 발생하지 못함으로써 반응 유동장의 축방향 속도가 냉간 유동장의 축방향 속도보다 빠른 값을 가지는 것으로 생각되어진다. 또한 동축류 속도가 상대적으로 높을 경우, 연료 제트와 동축류 제트의 운동량 차이로 인한 축방향 속도 감소 지역이 냉간 유동장과 반응 유동장 모두에서 나타나며 이로 인해 동축류 속도 증가에 따른 부상높이의 감소가 발생하는 것으로 생각되어진다.

4. 결 론

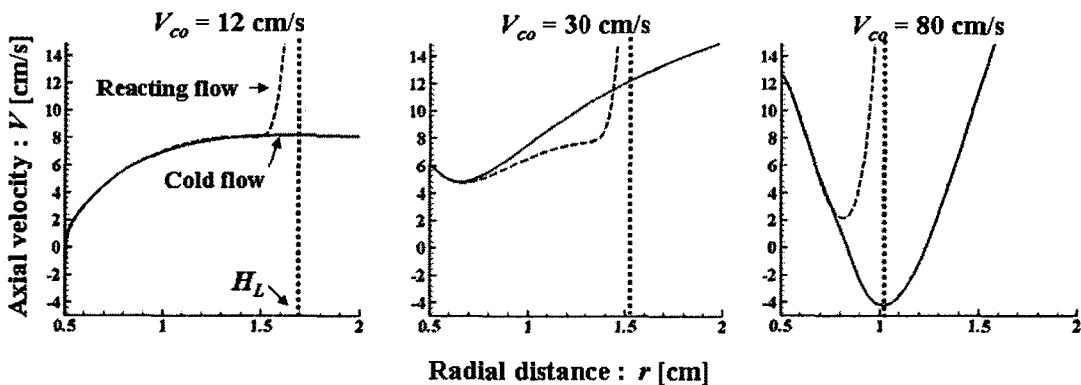


Fig. 6 Liftoff height and axial velocity profiles of reacting flow and cold flow for  $V_{co} = 12, 30, 80$  cm/s

상대적으로 동축류 속도가 연료 제트속도보다 낮은 영역에서는 동축류 곡도의 증가에 따라 부상화염의 높이가 증가하는 것이 일반적 현상이었으나, 동축류 속도가 연료 제트속도보다 높은 경우에는 부상화염의 높이가 감소하는 것이 최근 실험적으로 관찰되었다. 따라서  $V_{\infty}$  가  $U_m$  보다 작을 경우, 동축류 속도 증가에 따른 화염의 부상높이 감소의 메커니즘을 연구하기 위해 동축류 제트에서 질소 과다 희석된 프로판 제트의 부상높이 변화를 수치적으로 살펴보았다.

Arrhenius 반응 속도 상수가  $4.5 \times 10^{15}$  일 경우, 동축류 속도의 증가에 따라 부상높이가 증가했다가 감소하는 영역을 살펴볼 수 있었다. 동축류 속도 증가에 따라 부상높이 감소 현상을 살펴보기 위하여,  $U_0 = 12$  cm/s,  $V_{\infty} = 12$  cm/s 의 실험 결과에 맞춰 Arrhenius 반응 속도 상수  $A$  를  $2.3 \times 10^{15}$  로 하고 냉간 유동장과 반응 유동장을 살펴보았다. 냉간 유동장의 경우 동축류 속도 증가에 따라 노즐 선단에서 유선이 상대적으로 빠른 속도를 가지는 동축류 제트의 유선 방향으로 벌어지는 현상을 볼수있었고,  $V_{\infty} = 80$  cm/s 의 경우 유동의 재순환 현상이 발생하면서 급격한 수직방향 속도의 감소를 보였다. 반응 유동장의 경우, 냉간 유동장과 같이 동축류 속도가 증가할수록 유선이 반경방향으로 벌어지는 현상이 발생하였고, 동축류 속도가 증가할수록 노즐 선단과 부상화염 사이 구간의 축방향 속도 감소가 더욱 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 부상화염과 노즐 사이의 국부적인 속도 감소 영역으로 인해 상대적으로 동축류 제트의 속도가 큰 경우, 동축류 속도 증가에 따른 부상화염의 부상높이 감소가 발생하는 것으로 생각되어 진다.

## 후 기

이 연구는 연소기술센터 (CERC), 서울대 기계항공공학부 BK-21에 의하여 진행되었습니다. 본 연구의 계산자료는 한국과학기술정보연구원의 '제 7차 슈퍼컴퓨팅 응용연구 전략지원 프로그램'을 통해 지원 받았습니다.

## 참고문헌

- [1] Phillips, H., "Flame in a buoyant methane layer," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 10, 1965, pp. 1277-1283.
- [2] Chung, S. H. and Lee, B. J., "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust Flame* Vol. 86, 1991, pp. 62-72
- [3] Lee, B. J. and Chung, S. H., "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust Flame*, Vol. 109, 1997, pp. 160-182.
- [4] Lee, B. J., Cha, M. S., and Chung, S. H., "Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Partially Premixed Jet," *Combust Sci. Technol.* Vol. 127, 1997, pp. 55-70.
- [5] Lee, B. J., Kim, J. S., and Chung, S. H., "Effect of dilution on the liftoff of non-premixed jet flames," *Proc. Combust. Inst.* Vol. 25, 1994, pp. 1175-1181.
- [6] Won, S. H., Chung, S. H., Cha, M. S., and Lee, B. J., "Lifted flame stabilization in developing and developed regions of coflow jets for highly diluted propane," *Proc. Combust. Inst.* Vol. 28, 2000, pp. 2093-2099.
- [7] Won, S. H., Kim, J., Shin, M. K., Chung, S. H., Fujita, O., Mori, T., Choi, J. H., and Ito, K., "Normal and microgravity experiment of oscillation lifted flames in coflow," *Proc. Combust. Inst.* Vol. 29, 2002,
- [8] Kim, J., Won, S. H., Shin, M. K., and Chung, S. H., "Numerical simulation of oscillating lifted flame coflow jets with highly diluted propane," *Proc. Combust. Inst.* Vol. 29, 2002,
- [9] Rajaratnam, N., "Turbulent Jets," *Elsevier Scientific Publishing Company*, 1976.
- [10] Lee, J., Won, S. H., Jin, S. H., Chung, S. H., "Lifted flames in laminar jets of propane in coflow air," *Combust. Flame* Vol. 135, 2003, pp. 449-462.
- [11] 이승재, 김길남, 원상희, 정석호, "동축류 제트에서 동축류 속도에 따른 층류 부상화염의 특성 연구" 제 28회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 2004, pp. 21-26.
- [12] Mahalingam, S., Cantwell, B. J., and Ferziger, J. H., "Non-premixed Combustion: Full Numerical Simulation of A Coflowing Axisymmetric Jet, Inviscid And Viscous Stability Analysis," Report No. TF-43, Thermoscience Division, Stanford University, 1989.
- [13] Kennedy, C.A, Carpenter, M.H., and Lewis, R.M., *App. Num. Math.*, Vol. 35, 2000, pp. 177-219.
- [14] Kee, R. J., Rupley, F. M., and Miller, J. A., "CHEMKIN-II : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of

Gas-phase Chemical Kinetics," Report No. SAND89-8009, Sandia National Laboratories, 1989.

- [15] Kee, R. J., Warnatz, J., and Miller, J. A., "A FORTRAN computer Code Package for the Evaluation of Gas-phase Viscosities, Conductivities and Diffusion Coefficients," Report No. SAND83-8209, Sandia National Laboratories, 1983.