

액체로켓분사기 해석을 위한 실제유체 기반의 난류연소모델 개발

김성구* · 최환석* · 박태선**

Development of Real-Fluid based Flamelet Modeling for Liquid Rocket Injector

Seong-Ku Kim* · Hwan-Seok Choi** · Tae-Seon Park***

ABSTRACT

Liquid rocket injectors play crucial roles on propulsive performance, combustion stability, and heat transfer characteristics. Nevertheless, their developments have mainly relied on empirical methods and expensive hot-firing tests due to lack of fundamental understanding of high pressure combustion phenomena in the near-injector regions. The present study was motivated by recent efforts to develop reliable modeling of liquid rocket combustion. The turbulent combustion model based on the flamelet concept has been extended to take into account real-fluid behaviors occurred at supercritical pressures, and validated against measurements for a cryogenic nitrogen injection, a non-premixed turbulent jet flame at atmospheric pressure, and a LOx/GH₂ coaxial shear injector at a supercritical pressure.

초 록

액체로켓 분사기는 추진 성능과 연소 안정성, 그리고 열유속 특성을 지배하는 가장 중요한 요소이다. 그러나 분사기 근방에서 일어나는 고압 연소 현상에 대한 근본적인 이해의 부족으로 분사기의 개발 과정은 대부분 경험적 설계방법과 고비용의 연소시험에 의존해 왔다. 본 연구는 액체로켓 연소 모델링과 관련된 최근 연구 동향들을 토대로 시작되었다. 층류화염면 기반의 난류연소모델을 초임계 압력 조건에서 나타나는 실제유체 거동을 고려할 수 있도록 확장하였으며, 극저온 질소분사, 상압 조건하의 난류 제트화염, 그리고 고압의 기체수소/액체산소 동축 분사기에 적용하여 해석모델의 효용성을 확인하였다.

Key Words: Liquid Rocket Injector(액체로켓 분사기), Supercritical Condition(초임계 조건), LOx(액체산소), Real Fluid(실제유체), Flamelet Model(화염면 모델)

1. 서 론

* 한국항공우주연구원 연소기팀

** 경북대학교 기계공학부

연락처, E-mail: kimsk@kari.re.kr

액체로켓 연소기에 있어 분사기는 추진 성능, 연소 안정성 그리고 열전달 특성을 지배하는 핵

심 요소이다. 분사기의 설계는 추진제와 엔진 사이클에 따라 크게 달라지며, 각 나라마다 독자적으로 고유한 설계 기술을 구축해 왔다. 액체로켓 연소기의 고압/고온의 연소 환경과 탄화수소계 연료를 사용하는 경우에 발생하는 과도한 검댕(soot)은 광계측을 이용한 실험적 접근을 어렵게 하고 있다. 따라서 액체로켓 분사기 근방에서 고압 분사와 화염 특성에 대한 근본적인 이해가 부족하므로, 새로운 분사기를 개발하는 데 있어 경험적 설계방법과 다수의 연소시험에 의존하는 기존의 개발 방식은 시행착오에 따른 설계변경과 개발 비용의 증가를 초래하게 된다. 주로 액체산소/기체수소 동축 전단 분사기에 국한되었지만, 2000년도 초반부터 액체로켓 연소에 대한 현상학적 이해를 높일 수 있는 실험적 연구들과 해석 모델을 개발하려는 노력들이 본격적으로 시도되었다. 2006년에는 그동안 여러 연구그룹에서 수행되어 왔던 실험적/해석적 연구결과들이 정리되어 특집호로 출간되었다[1]. 여기에 포함된 대부분의 연구들은 다양한 실험적 증거들을 통해 고압에서의 다상연소현상이 이전까지 아임계 조건에서 통용되던 개념과는 현저히 다른 특성을 갖는다고 밝히고 있다. 먼저 상온의 분위기에 극저온 액체질소를 분사하는 경우에는 분위기 압력이 임계압력 보다 낮을 때 분사된 액주로부터 액적이 분열되는 과정이 뚜렷하게 존재하였으나, 임계압력을 넘어서 고압 조건이 됨에 따라 점차 액상의 경계와 액적들이 사라지고 기상의 난류 제트와 같은 혼합 구조를 보였다. 이와 유사하게 초임계 압력 조건에서 수행된 액체산소/기체수소 동축 전단 분사기의 연소시험에서도 아임계 다상연소에서 단계적으로 일어나는 미립화/증발/혼합/연소와 같은 일련의 현상들 대신에, 급격한 밀도차가 존재하지만 기상의 난류제트 화염에 가까운 화염특성을 나타내었다. 이러한 현상의 주된 이유는 유체가 임계점을 넘어서 초임계 상태가 되면, 명확한 상의 구분이 없어지면서 미립화와 분열과정을 지배하던 표면장력과 증발잠열이 사라지기 때문이다. 케로신/액체산소의 화염 구조에 대한 직접적인 연구결과는 찾아보기 어렵지만, 스크램제트 모델 연소

기에 대한 Fang 등의 연구결과[2]에 따르면, 액체 상태의 케로신을 곧바로 분사하는 것보다 예열을 통해 초임계 상태로 바꾼 후 분사하면 비록 연소실 내부에서 압력은 임계압 이하로 떨어지게 되지만 이미 상변화가 수반되는 미립화 과정을 배제할 수 있으므로 혼합 과정은 기상의 특성을 가지게 되고 연소 효율이 향상되었다.

이러한 실험적 연구결과를 통해 최근의 해석적 연구 동향 역시 초임계 연소 현상을 급격한 밀도차를 수반하고 난류 확산이 중요한 혼합 특성을 지배하는 단상(single-phase)의 화염 구조로 이해하고, 이를 바탕으로 해석모델을 개발하는 것으로 모아지고 있다[3-5].

Vigor Yang의 연구그룹은 SRK(Soave-Redlich-Kwong) 상태방정식을 바탕으로, 액체 상태(dense gas)에서 초임계 상태까지를 단상의 일반 유체(general fluid)로 묘사하는 열역학적 모델을 유도하였다[6]. 또한 이를 바탕으로 개발된 예조건화 기법을 밀도기준 알고리즘에 적용하여 액체산소의 고압 증발 특성[6]과 극저온 액체산소의 선회 분사를 해석하였다[7].

고압의 수소/산소 화염은 연소특성속도가 매우 빠르기 때문에 화학평형 모델이 유효할 수 있다. 그러나 메탄이나 케로신 등의 탄화수소계 연료인 경우는 연료 과잉 영역에서 비평형 화학반응의 영향이 분명하게 존재하므로, 상세화학반응식을 고려할 수 있는 난류 연소모델의 개발이 요구된다. 최근 들어 Vigor Yang과 Sébastien Candel 그룹은 공동으로 실제유체 기반의 대항류 확산화염 해석코드[3]를 개발하였으며, LES 해석을 위한 연소모델로 확장하는 연구를 수행 중에 있다. 이와는 별도로 Cutrone 등은 Heinz Pitsch가 개발한 Flamelet 코드(FlameMaster)에 실제유체 모델을 추가하여 동축 전단 분사기의 난류연소 해석에 적용하였다[4].

본 연구는 이상기체 가정을 바탕으로 개발되었던 층류화염편 기반의 난류연소모델[8]을 실제 유체 거동을 고려할 수 있도록 확장하였다. 궁극적인 연구 목표는 케로신/액체산소 동축 와류형 분사기에 있지만, 단계별 검증과정으로 먼저 동축 제트 화염을 위주로 해석모델을 평가하였다.

2. 해석 모델

2.1 실제유체 모델링

고압 조건에서 나타나는 실제유체의 거동을 다루기 위해 아래 식과 같은 SRK (Soave-Redlich-Kwong) 상태방정식[9]을 적용하였다.

$$p = \frac{\rho R_u T}{(M_w - b\rho)} - \frac{a\alpha}{M_w} \frac{\rho^2}{(M_w + b\rho)} \quad (1)$$

Fig. 1에서 보듯이, 식(1)을 통해 얻은 산소의 밀도-압력-온도의 관계는 NIST 데이터[10]와 비교할 때 공학적으로 만족할 만한 정확도를 보여주고 있다. 식(1)을 바탕으로 한 열역학적 상태량들은 참고문헌[6]에 자세히 유도되어 있으며, 이에 따라 계산한 산소의 정압 비열과 음속은 각각 Fig. 2와 3에 나타내었다. 이상기체의 정압 비열은 압력에 상관없이 일정한 반면, 실제유체의 경우에는 각각의 압력에서 임계온도를 중심으로 매우 큰 변화를 나타내고 있다. 저온 영역에서 음속 역시 이상기체와는 다르게 액상의 존재로 인해 음속값이 현저히 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 온도가 높아짐에 따라 열역학적 상태량들은 점차 이상기체에 가까워지게 된다. 고압 조건하에서의 전달 물성치(점성계수, 열전도율)를 계산하기 위해 Chung 등의 모델[9]을 사용하였으며, Fig. 4에서 보듯이 NIST 데이터와 잘 일치하는 예측결과를 보여주고 있다.

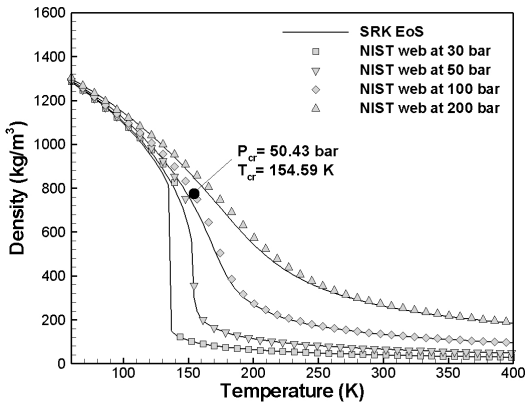


Fig. 1 Density of oxygen

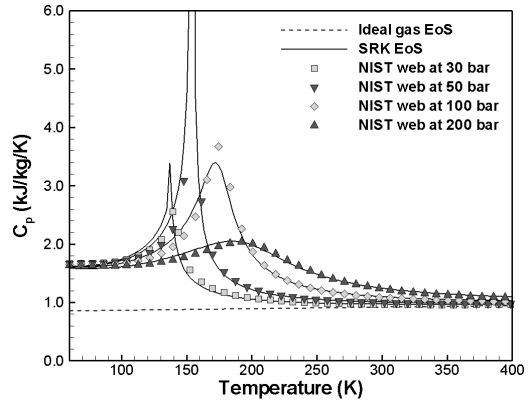


Fig. 2 Constant pressure specific heat of oxygen

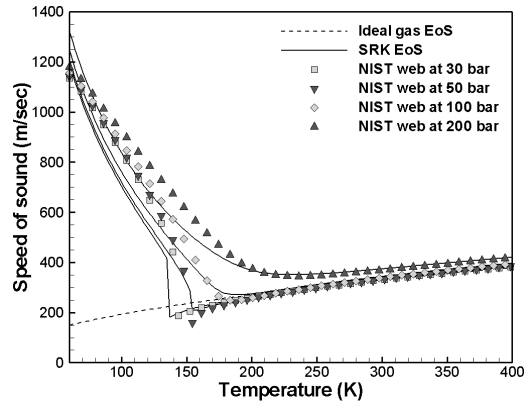


Fig. 3 Sonic velocity of oxygen

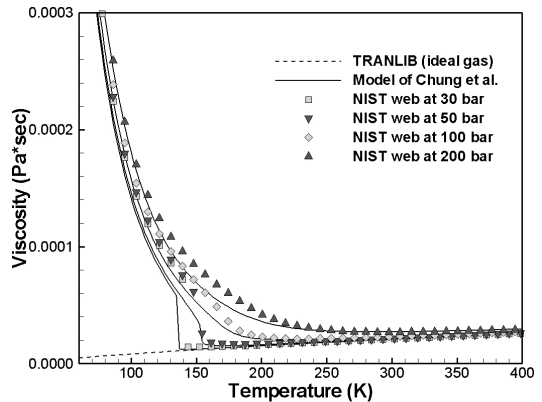


Fig. 4 Viscosity of oxygen

2.2 난류연소 모델

화염편 모델은 난류연소장을 본질적으로 1차원적인 구조를 가지는 층류 화염편들(laminar flamelets)의 집합체로 가정한다. 이때 난류 유동은 화염편들을 신장시키거나 주름지게 함으로서 화염편 내부에서 분자 단위의 물질 및 열 확산을 지배하고 비평형 화학반응에 영향을 미치게 된다. 국소화염구조로서 층류화염편은 대항류 확산화염 해석[3]으로부터 구하거나, Peters 변환에 의해 아래 식과 같이 유도되는 화염편 방정식 [11]을 통해 해석할 수 있다.

$$\frac{\partial Y_k}{\partial t} = \frac{\chi}{2} \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} + \frac{\dot{\omega}_k}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\chi}{2} \frac{1}{c_p} \frac{\partial^2 h}{\partial Z^2} - \frac{\chi}{2} \frac{1}{c_p} \sum_{k=1}^N h_k \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} - \frac{1}{\rho c_p} \left(\sum_{k=1}^N h_k \dot{\omega}_k - \frac{\partial p}{\partial t} + q_{rad} \right) \quad (3)$$

이때 스칼라소산율(scalar dissipation rate)은 물질 및 열 확산에 의한 비평형 화학반응을 지배하는 중요한 인자로서 아래와 같이 정의된다.

$$\chi = 2D \left(\frac{\partial Z}{\partial x_j} \right)^2 \quad (4)$$

해석결과를 다시 혼합분을 공간으로 사상(mapping)해야 하는 대항류 확산화염과는 달리, 화염편 방정식을 이용하는 해석방법은 훨씬 직접적이고 다양한 형태로 유동해석코드와 결합할 수 있기 때문에 정상상태 연소유동 뿐만이 아니라 자연발화와 화염전파의 비정상 현상이 중요한 디젤분무연소와 같이 폭넓은 연구 분야에 적용되어 왔다[8,11].

본 연구에서는 식(2)와 (3)에 포함된 모든 열역학적 상태량들을 2.1절에서 설명한 바와 같이 SRK 상태방정식을 통해 계산함으로써 실제유체 거동을 고려할 수 있도록 확장하였다. 대부분의 연소해석 코드와 마찬가지로 상세화학반응식을 다루기 위해 Chemkin-II 패키지[12]를 사용하였으며, 본 연구에서는 2.1절의 실제유체 모델링을 Chemkin-II와 쉽게 연동할 수 있는 별도의 서브

루틴 패키지로 구축하여 사용하였다.

식(5)와 같이 액체로켓 추력실에서 노즐 팽창이나 벽면 냉각 등에 인한 엔탈피 손실이나 압력 변화를 고려하기 위해 추가적으로 수정되었으며, 난류 난동성분을 고려한 평균 상태량은 식(2)와 (3)의 정상상태 해에 다중확률밀도함수를 가중하여 적분함으로써 구해진다.

$$\bar{\phi}(\vec{x}, t) = \int_{p_1}^{p_u} \int_0^1 \int_0^\infty \int_0^1 \phi^{SFL}(Z, \chi, \zeta, p) \times \bar{P}(Z, \chi, \zeta, p; \vec{x}, t) dZ d\chi d\zeta dp \quad (5)$$

연소유동 해석을 시작하기 전에 미리 모든 범위에 대해 식(5)의 계산을 수행하여 lookup table을 구축하였다. 따라서 연소유동 해석에서는 복잡한 확률밀도함수의 계산을 반복적으로 수행할 필요가 없고, 다차원 보간(interpolation)만으로 빠르고 손쉽게 필요한 평균값들을 구할 수 있다.

2.3 압력수정방정식

모든 마하수 유동 영역에 적용이 가능하도록 확장된 압력기준알고리즘을 사용하였다. 이때 기존의 압력수정방정식은 실제유체 거동을 고려하여 아래 식과 같이 수정되어야 한다[5].

$$\frac{\beta_p p'}{\Delta t} + \nabla \cdot (\vec{V}^* \beta_p p') - \nabla \cdot (\rho^* D_p \nabla p') = -\nabla \cdot (\rho^* \vec{V}^*) - \frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t} \quad (6)$$

여기서,

$$\beta_p = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{T, Y_k} = \frac{\gamma}{c^2} \quad (7)$$

Fig. 3을 통해 알 수 있듯이, 식(7)은 저온 영역에서 이상기체와는 확연히 다른 실제유체 거동을 반영하지만, 고온의 연소 영역으로 갈수록 점차 이상기체에 사용되어 왔던 기존의 압력수정방정식($\beta_p = 1/RT$)과 동일하게 된다.

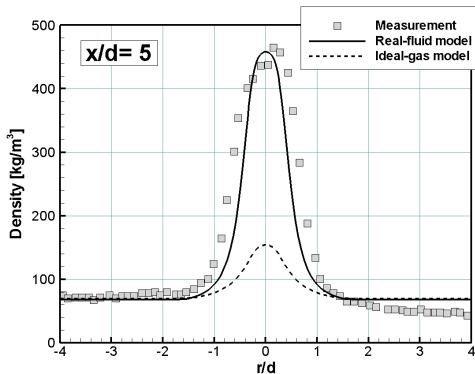
3. 해석 결과

3.1 극저온 질소 분사

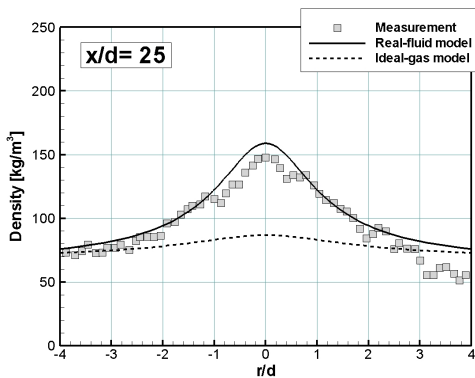
먼저 연소를 수반하지 않을 때 상태방정식의 영향을 평가하기 위해, 압력과 온도가 각각 59.8 bar와 298 K의 초임계 상태인 질소 분위기에 128.7 K의 극저온 액체질소가 분사되는 경우[13]를 해석하였다. Fig. 5에 보듯이, 실제유체 모델을 사용한 경우에 실험에서 측정된 밀도의 반경 방향 분포를 정확히 예측할 수 있었다.

3.2 상압 비예혼합 난류제트 화염

2.2절에서 설명한 실제유체 기반의 난류연소모델을 이용하여 대기압 조건하의 비예혼합 난류제트화염을 해석하였다. CO/H₂/N₂의 혼합 기체가 직경 7.72 mm의 노즐을 통해 45 m/s로 분사되고, 이때 주위 공기 속도는 0.75 m/s이다.



(a) $x/d = 5.0$



(b) $x/d = 25.0$

Fig. 5 Comparison of radial profiles of density for cryogenic N₂ injection at 59.8 bar

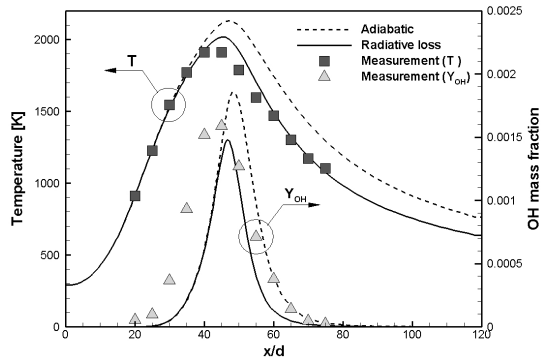


Fig. 6 Comparison of axial profiles of temperature and OH radical for CO/H₂/N₂-air nonpremixed jet flame at atmospheric pressure

Fig. 6은 중심축을 따라 평균 온도와 OH 라디칼의 분포를 비교한 결과이다. 실제유체 모델은 상온/상압의 조건 하에서는 기존의 이상기체 해석[8]과 동일한 예측 결과를 나타내고 있다. 2.2절에서 설명한 것처럼 본 연구에서는 벽면 열전달과 노즐 팽창 등으로 인한 엔탈피 감소를 고려할 수 있도록 연소모델을 확장하였으며, Fig. 6에 볼 수 있듯이 복사 열손실에 의한 비단열 화염 효과를 잘 예측하고 있다.

3.3 액체산소/기체수소 동축 전단 분사기

현재까지는 고압의 액체로켓 연소 조건에서 해석모델의 검증에 적용할 수 있는 구체적인 측정 데이터가 존재하지 않는다. 따라서 이전의 해석적 연구들과 마찬가지로, RCM-3로 불리는 단일 분사기 연소시험[13]을 해석대상으로 선정하였다. RCM-3는 액체산소/액체수소 엔진에 일반적으로 적용되는 동축 전단 분사기를 대상으로 중앙에는 85 K의 극저온 액체산소가 4.35 m/s로 분사되고 바깥 쪽 환형 유로를 통해서 287 K의 기체수소가 236 m/s로 분사된다. 이때 연소실의 압력과 혼합비는 각각 60 bar와 1.43이다. 실제유체 기반의 해석결과는 Fig. 7과 같이 이상기체 해석에서는 나타나지 않는 특이한 화염 형태를 보여주고 있으며, 이는 실험적으로 나타난 OH 라디칼의 분포[13]는 물론 이전의 해석결과들[4,5]과도 정성적으로 유사하게 나타났다.

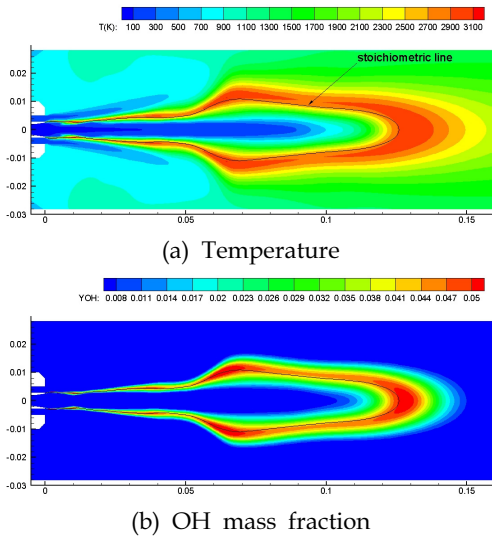


Fig. 7 Predicted distributions of temperature and OH radical for LO_x/GH₂ coaxial shear injector

4. 결 론

액체로켓 분사기의 고압 연소 현상을 해석하기 위해, 실제유체 기반의 난류연소모델을 개발하였으며 동축 제트 화염을 위주로 해석모델의 적용성을 평가하였다. 그러나 국내에서 개발되고 있는 케로신/액체산소 동축 와류형 분사기에 적용하기 위해서는 고탄화수소 연료의 고압 연소 현상과 동축 선회 유동에 대해 지속적인 해석모델 개발이 필요하며, 이를 뒷받침할 수 있는 실험적 연구도 함께 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Oefelein, J. C. and Yang, V. (eds.), "Supercritical Fluid Transport and Combustion," Combustion Science and Technology, Vol. 178 (special issue), 2006
2. Ribert, G., Zong, N., Yang, V., Pons, L., Darabiha, N. and Candel, S., "Counterflow diffusion flames of general fluids: Oxygen/

hydrogen mixtures," Combustion and Flame, Vol. 154, 2008, pp.319-330

3. Cutrone, L. et al., "A RANS flamelet-progress-variable method for computing reacting flows of real-gas mixtures," Computers & Fluids, Vol. 39, 2010, pp.485-498
4. Cheng, G. C. and Farmer R., "Real Fluid Modeling of Multiphase Flows in Liquid Rocket Engine Combustors," Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, 2006, pp.1373-1381
5. Fan, X. et al., "Investigation of Vaporized Kerosene Injection and Combustion in a Supersonic Model Combustor," Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, 2006, pp.103-110
6. Meng, H. and Yang, V., "A unified treatment of general fluid thermodynamics and its application to a preconditioning scheme," Journal of Computational Physics, Vol. 189, 2003, pp.277-304
7. Zong, N. and Yang, V., "Cryogenic fluid dynamics of pressure swirl injectors at supercritical conditions," Physics of Fluids, Vol. 20, 2008, pp.1-14
8. 김성구, Studies on Detailed Structure and NO_x Formation of Turbulent Nonpremixed Flames using Flamelet Models, 한양대학교 박사학위논문, 2001
9. Reid, R. C. et al., Properties of Gases and Liquids, 4th ed., McGraw-Hill, 1987
10. <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid>
11. Peters, N., Turbulent Combustion, Cambridge University Press, 2000
12. Kee, R. J. et al., Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics, Technical Report, Sandia National Lab., USA, 1992
13. Proceedings of the 2nd International Workshop on Rocket Combustion Modeling, DLR, Lampoldshausen, Germany, 2001