

압력섭동에 따른 비정상 화염편 응답특성 해석

배준경* · 김용모** · 김성구**

Flamelet Analysis for Transient Response to Pressure Oscillations

Junkyung Bae, Yongmo Kim and Seong-Ku Kim

ABSTRACT

This study has been mainly motivated to numerically investigate the transient flame response to pressure oscillations in the gaseous hydrogen - liquid oxygen flames at supercritical pressures. The present analysis is based on the real-fluid transient flamelet model and the flame field is acoustically perturbed only by the sine-wave oscillations in the frequency range from 1,000 Hz to 5,000 Hz. Based on numerical results, the detailed discussions are made for the flame response characteristics and the transient flamelet response associated with the high-frequency combustion instability in the liquid propellant rocket engines.

Key Words : Combustion instability, Gaseous hydrogen-liquid oxygen flame, Acoustic response, Super critical pressure, Flamelet approach, Real fluid effects

1. 서론

일반적인 연소 불안정 현상은 연소실 내의 압력 변동 폭이 정상연속 압력의 범위를 벗어나 그 변동이 주기성을 갖는 경우를 말한다. 일반적으로 연소실 내의 압력진폭이 정상압력의 10% 이상이면 연소 불안정이 나타난다고 한다. 그러나 엔진 조건에 따라서 3~5%의 압력 변동에 의해서도 연소 불안정이 야기될 수 있다고 한다[1,2]. 이러한 연소 불안정은 급격한 열과 압력 섭동으로 시스템에 심각한 손상을 초래한다. 특히 액체 로켓엔진에서는 연소 시 발생하는 에너지의 밀도가 매우 높고 소산은 적기 때문에 연소불안정이 발생하면 순식간에 회복 불가능한 손상을 야기하게 된다. 초기 대부분의 액체 로켓엔진 개발 사례에서 이와 같은 상황을 경험했고 현재도 새로운 엔진 개발에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 오랜 기간 연구에도 불구하고 연소 불안정은 엔진 공급체계와 인젝터, 추력실의 형상, 연소방식 추진제, 작동 조건 등에 따라 구동메커니즘(열 발생과 압력 섭동의 에너지 결합)이 현저히 다르기 때문에 정확한 규명이 어렵다. 또한 에너지의 결합 경로가 파악되더라도 에너지 소산을 정확히 파악할 수 없다면 연소불안정 발생 여부의 예측은 불가능하게

된다. 따라서 압력 섭동에 대한 화염의 응답 거동을 모델링[3]하는 것이 핵심 과제라 할 수 있다.

일반적으로 액체 로켓엔진은 추진제의 임계압력보다 높은 압력(가스발생기 사이클: 60~120 bar, 예연소 사이클: 120~250 bar)에서 작동하게 된다. 초임계 극저온 액체 분사에 관한 최근의 연구[4-10]에 따르면 액적의 분열, 미립화, 난류와의 상호작용 증발 등 아임계 상태의 분사 과정을 거치지 않고 액상과 기상의 경계가 모호한 밀도가 높은 단상의 유체와 같은 특징을 갖는다고 한다. 이러한 유체의 유동은 난류확산에 의해 지배되고 극도로 높은 밀도구배를 갖고 열역학적 물성치와 수송 물성치가 이상기체와는 상이한 변화를 갖는 것이 특징적이다.

본 연구는 기존의 화염편 모델[11,12]을 수정하여 초임계 조건에 놓인 실제유체의 거동을 고려할 수 있는 비정상 화염편 모델을 개발하여 고주파 연소 불안정을 일으키는 인자들의 복합적인 영향을 고려하는데 앞서 연소실 내의 압력 변동에 따른 화염의 응답특성을 고찰하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 수치 및 물리 모델

본 연구에서는 실제유체 상태방정식 기반의 화염편 모델을 이용하여 Table 1과 같이 LOx(100K)/GH2(300K) 추진제에 정상 압력(60bar, 120bar)의 3~10% 압력 섭동 폭과 1,000~5,000 Hz 영역의 주파수 범위에 대하여 비정상 화염편의 응답을 계산하였다. 화

* 한양대학교 기계공학과

** 한국항공우주연구원

† 연락저자, ymkim@hanyang.ac.kr

Table 1. Computational conditions

GH2(300K) / LOx(100K)				
SDR [1/sec]	Equilibrium		Near extinction	
Pressure [bar]	60		120	
Amplitude [%]	3	5	7	10
Frequency [Hz]	1000 ~ 500			

화학평 상태에서 스칼라 소산율은 $1,000 \text{ s}^{-1}$ 으로 동일하게 두었다. 순산소와 수소의 반응이기 때문에 일반적인 탄화수소 계열의 반응보다는 훨씬 큰 스칼라 소산율에 대해서도 충분히 화학평형을 이룰 수 있다(Fig. 5). 소염 근처의 스칼라 소산율 값은 정상상태 화염편 계산을 통하여 결정하였다.

압력 섭동의 영향은 기존의 비정상 화염편 모델 [11,12] 내의 압력 항을 아래 식과 같은 사인파 형태로 강제하여 모델 하였다.

$$p' = p \left(1 + \frac{Amp.}{100} \sin(\omega t) \right) \quad (1)$$

p, p' = pressure[bar]

$Amp.$ = fluctuation amplitude[%]

ω = fluctuation frequency[Hz]

t = time[sec]

또한 초임계 극저온의 실제유체 효과를 고려하기 위하여 열역학적 상태량과 수송물성치에 대하여 Chemkin-II를 바탕으로 이와 같은 형태의 패키지를 직접 구성하여 비정상 화염편 방정식에 필요한 물성치를 계산할 수 있도록 하였다. 열역학적 상태량에 대해서는 SRK(Soave-Redlich -Kwong) 상태방정식 [13,14]을 적용하여 개선하였다. 화학종 및 혼합물의 점성, 열전도 계수와 같은 수송 물성치에 대해서는 Chung, Ely, Hanley 그리고 Takahasi의 모델을 사용하여 초임계 상태의 수송 물성치를 다루었다[15-21].

화학반응에 대해서는 8개 화학종, 20단계의 반응식으로 이루어진 Dryer[22]의 화학반응식을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 화염영역에 따른 응답특성

Fig. 1~2는 화학평형 영역과 소염근처 영역에서 열 방출량과 온도의 시간변화를 나타내고 있다. Fig. 1을 통해서 압력과 열방출의 위상 차이를 쉽게 비교할 수 있다. Fig. 1(a)와 같이 화학평형 영역의 한 주기에 해당하는 비정상 상태 화염의 응답은 같은 압력에 대하여 정상상태 해를 기준으로 두 지점

에 존재하고 이는 압력과 위상차가 있음을 나타낸다. 반면, Fig. 1(b)의 소염근처 영역에서는 정상상태 해를 따라 위상차를 보이지 않는 비정상상태 응답을 보이고 있다. 소염근처 영역(Fig. 2(b))에서 보이는 동상(in-phase)의 열방출 응답특성은 Rayleigh's

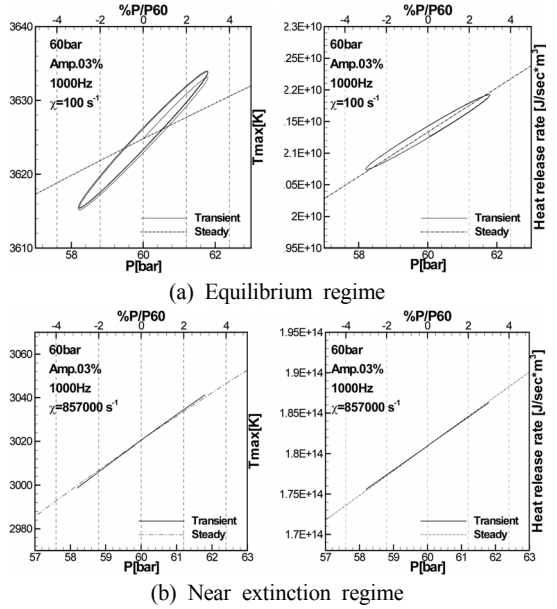


Fig. 1. Periodic trace of transient flamelet solutions of maximum temperature and overall heat release rate fluctuation with respect to the pressure oscillation.

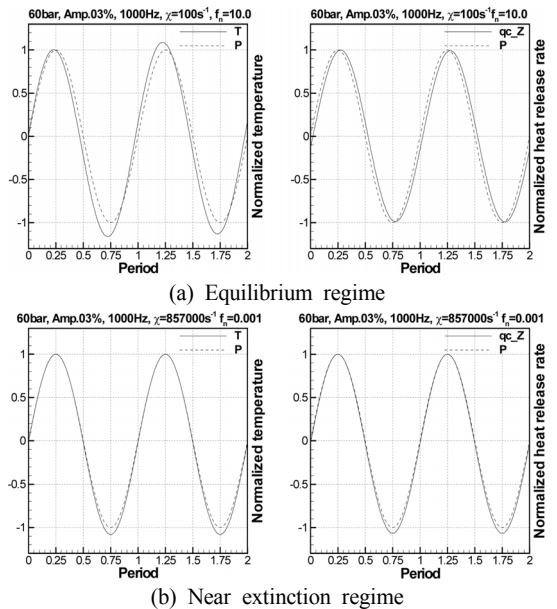


Fig. 2. Normalized fluctuations of the maximum temperature, overall heat release rate and pressure.

기준[23]에 따라 외부 압력섭동을 증폭시키는 요소로 작용할 수 있다. 현 연구에서는 외부 압력섭동의 영향만을 고려하고 있기 때문에 화염응답특성이 음향장에 주는 영향을 직접적으로 확인할 수는 없지만 위와 같은 결과와 기존의 연구 결과[24,25]를 바탕으로 소염근처 화염의 응답특성이 음향장의 증폭에 중요한 역할을 함을 예상할 수 있다.

또한 화학평형 영역에서 압력파의 특성시간인 가진 주파수와 화염구조의 특성시간을 나타내는 스칼라소산율을 식 (2)과 같은 함수관계로 표현하면 Fig. 3과 같은 압력섭동과 열방출 특성의 관계를 관찰할 수 있다.

$$f_n = \frac{f}{\chi} \quad (2)$$

f_n = normalized frequency,

f = it forced frequency[Hz],

χ = scalar dissipation rate[s⁻¹]

가진 주파수와 스칼라소산율을 특성시간의 관점에서 해석해 보면 f_n 값이 1보다 작아질수록, 즉 화

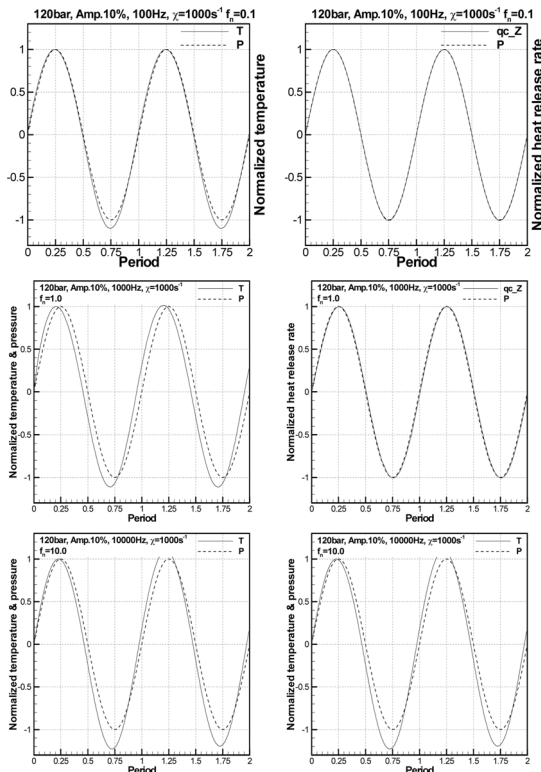


Fig. 3. Normalized fluctuations of the maximum temperature, overall heat release rate and pressure at each normalized frequency, f_n .

염구조가 갖는 특성시간이 외부 교란의 특성시간보다 짧아지기 때문에 응답지연 시간이 짧거나 일어나지 않고 압력파와 거의 동상으로 열방출이 일어나는 특징을 보이고 있다. 이는 저주파($[10^1 \sim 10^2]$) 영역의 외부 교란으로도 연소 불안정을 야기할 수 있음을 시사한다. 저주파 영역의 연소 불안정은 연소실의 압력변화가 추진제 공급 유량에 영향을 주고 점화과정에 그 효과가 직접적으로 작용하여 연소실 압력에 변화를 주는 순환적인 관계를 갖고 있다. 이러한 종류의 연소 불안정 현상은 엔진시동 시 연소실의 압력을 빠르게 승압함으로써 해결할 수 있다고 알려져 있다.

3.2. 압력 섭동량에 따른 응답특성

압력 섭동 폭을 정상작동 압력의 3%부터 10%까지 주었을 경우 Fig. 4와 같이 그에 상응하는 온도와 열방출량의 섭동을 관찰할 수 있다. 특히 10% 압력 섭동에 대해서는 정상 압력의 -9% 근처에서 온도와

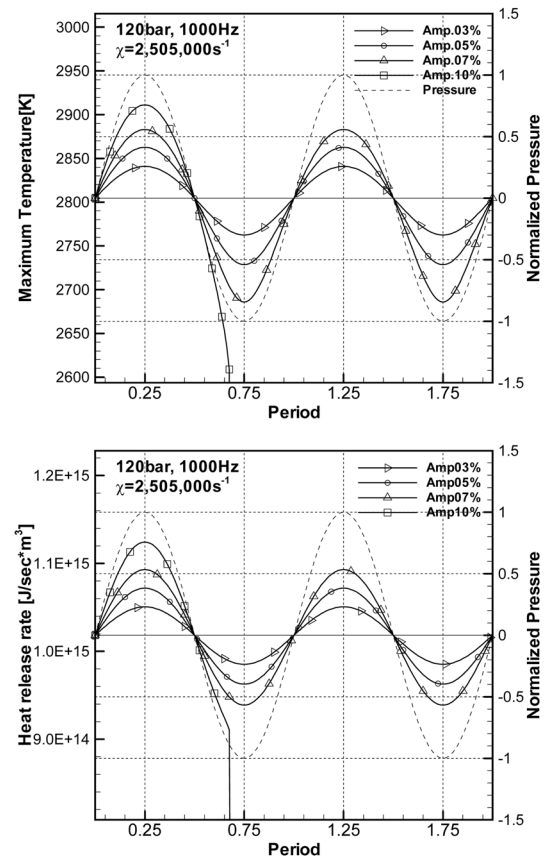


Fig. 4. Temporal variations of temperature and overall heat release rate with respect to the pressure fluctuation at fixed scalar dissipation rate (near-extinction regime).

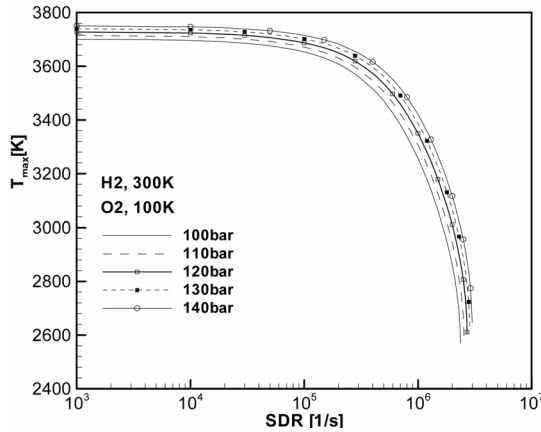


Fig. 5. Upper branches of S-curves for several pressures near extinction.

열방출이 주기적 응답에서 급격히 이탈하여 정상응답에 복귀하지 못하고 소멸되는 현상이 나타나고 있다

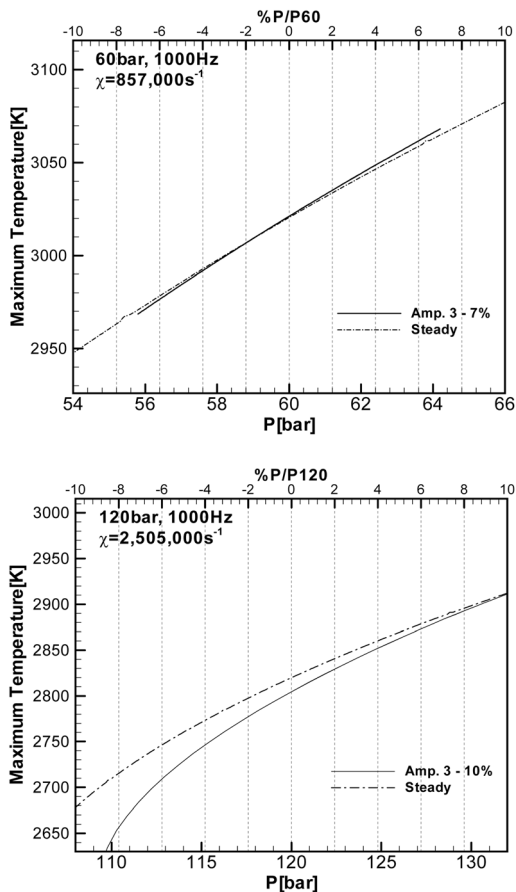


Fig. 6. Variations of temperature and overall heat release rate with respect to the pressure fluctuation at fixed scalar dissipation rate (near-extinction regime).

다. Fig. 5에서 여러 압력에 대한 스칼라소산율을 비교해 보았을 때 압력이 낮아지면 소멸한계에서 스칼라소산율 값이 선형적으로 함께 낮아진다. 또한 소멸한계 근처에서는 스칼라소산율 값에 대한 온도 변화율이 크게 증가한다. 기준이 되는 스칼라소산율이 정상 압력의 -10%(108 bar)에서의 소멸 한계값 임을 감안할 때 정상 압력의 -10% 상태에 도달하기 전에 화염이 소멸되는 것은 소멸한계 근처에서 급격한 온도변화 특성과 압력파와 동상의 열방출 특성이 결합되어 나타나는 결과라 사료된다.

소멸근처 영역에서 두 정상상태 압력(60, 120 bar)에 대하여 비교해보면 온도변화와 열방출 패턴 모두 같은 경향을 보이지만 60 bar와 120 bar에서 그 동특성은 다른 모습을 보인다. Fig. 6을 보면 60 bar에서는 온도와 열방출의 정량적인 값이 해당 압력에서 얻을 수 있는 정상상태의 값과 차이가 나지 않지만 120 bar처럼 압력이 더 높아지면 소멸한계 근처에 스칼라소산율과 온도 변화율의 관계에 의해 기준 압력에서 낮아질수록 정상상태 해와 떨어지는 경향이 나타나고 있다. 이는 액체산소의 임계압력(50.4 bar)보다 높은 초임계 압력 상태로 갈수록 화염편의 비정상 응답 특성이 뚜렷하게 나타난다고 해석할 수 있다.

3.3. 주파수 변화에 따른 응답특성

화학평형 영역에서는 앞서 밝혔듯이 압력파와 위상 차이를 보이고 있고 주파수 변화에 따라서 위상 이동이 일어나고 소멸근처 영역에서는 동상의 응답을 보이고 있다(Fig. 7). 이는 소멸근처 영역의 화염은 모든 영역의 주파수 영역의 압력파와 결합되어 질 가능성이 높고 화학평형 영역은 특정 저주파 영역의 압력파와 상관관계를 갖게 됨을 알 수 있다. 특징적인 것은 화학 평형 영역에서는 주파수 변화에 대한 응답이 비례하는 양상이지만 Fig. 7(b)과 같이 소멸영역 근처에서 주파수 응답은 일정한 범위의 주파수 영역에 대해 특정한 응답특성을 보이고 있다는 점이다. 좀 더 많은 영역의 주파수에 대하여 그 응답 특성을 살펴보면 압력파에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 주파수 대역을 선별할 수 있고 이에 대한 대책을 세울 수 있을 것이라 생각한다.

4. 결론

본 연구에서는 초임계, 극저온 상태의 실제유체 효과를 고려하여 비정상 화염편 모델을 구축하였고 음향섭동에 따른 비정상 응답특성에 대하여 고찰하였다.

외부 교란과 동상의 열방출 특성을 갖는 소멸한계 근처의 화염이 Rayleigh's 기준에 의하여 음향파

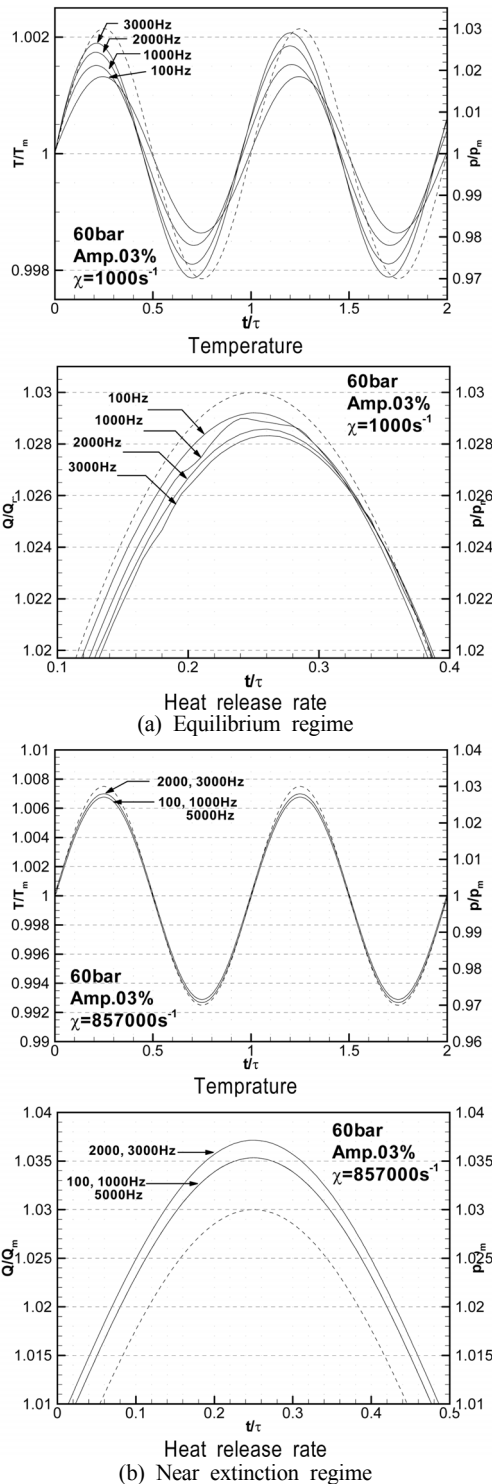


Fig. 7. Temporal variations of normalized temperature and overall heat release rate with respect to the pressure fluctuation at fixed scalar dissipation rate (a) equilibrium regime, (b) near-extinction regime.

진폭에 큰 기여를 할 수 있음을 예상할 수 있다. 또한 소염한계 근처 화염은 주파수에 대한 영향이 선형적으로 나타나지 않고 특정 그룹에 대한 응답으로 나타나는 것을 관찰하였다. 이는 특정 주파수 영역에 대해 압력 섭동과 결합되어 연소불안정을 초래할 수 있음을 예측할 수 있다.

일반적으로 비정상상태 해는 정상상태 해의 일부 분으로 생각할 수 있지만 초고압으로 갈수록 정상상태 해와 멀어지는 결과를 보여주고 이는 실제유체 효과가 고려된 비정상 화염면의 응답특성을 잘 보여주고 있고 압력 변동에 민감하게 반응한다고 볼 수 있다.

수렴성 및 코드 개선 후 유동코드와 결합하면 RANS 또는 LES를 이용한 액체로켓 분사기 해석에 유용하게 활용될 것이다.

후기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab) 으로부터 지원받아 수행 되었습니다(No.20100 028976).

참고문헌

- [1] CPIA Publication 247, "Guidelines for Combustion Stability Specifications and Verification procedures for Liquid-Propellant Rocket Engines."
- [2] Hartje, David T., Reardon, Frederick H., "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability", NASA SP-194, 1972
- [3] F. Nicoud, L.Benoit, C. Sensiau, T. Poinsot, "Acoustic Modes in Combustors with Complex Impedances and Multidimensional Active Flames", AIAA Journal, Vol. 45, No. 2, 2007, pp. 426-441
- [4] J. Telaar, G. Schneider, J. Hussong and W. Mayer, "Cryogenic jet injection: Description of test case RCM 1", Proceedings 2nd International Workshop on Rocket Combustion Modeling, Lampoldshausen, Germany, 2001, pp. 25-27
- [5] M. Oswald and M. M. Micci, "Spreading angle and centerline variation of density of supercritical nitrogen jets", Atomization and Sprays, Vol. 12, No. 1-3, 2002, pp. 91-106
- [6] W. Mayer, J. Telaar, R. Branam, G. Schneider and J. Hussong, "Raman measurement of cryogenic injection at supercritical pressure", Heat and Mass Transfer, Vol. 39, 2003, pp. 709-719
- [7] R. Branam and W. Mayer, "Characterisation of

- Cryogenic Injection at Supercritical pressure”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 3, 2003, pp. 342-355
- [8] M. Oswald, J. J. Smith, R. Branam, J. Hussong, A. Shick, B. Chehroudi and D. Talley, “Injection of Fluids into Supercritical Environments”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 178, 2006, pp. 49-100
- [9] S. Candel, M. Juniper, G. Singla, P. Scoufflaire and C. Rolon, “Structure and dynamics of cryogenic flames at supercritical pressure”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 178, 2006, pp. 161-192
- [10] M. Juniper, “Structure et stabilisation des flammes cryotechniques”, Ph.D. thesis, Ecole Centrale de Paris, 2001
- [11] S.K. Kim, “Studies on Detailed Structure and NOx Formation of Turbulent Nonpremixed Flames Using Flamelet Models”, PhD dissertation, Hanyang Univ., 2001
- [12] S.K. Kim, Y.M. Kim, “Assessment of the Eulerian Particle Flamelet Model for Nonpremixed turbulent Jet Flames”, *Combustion and Flame* Vol. 154, 2008, pp. 232-247
- [13] G. Soave, *Chemical Engineering Science* 37, 1972, pp. 1197-1203
- [14] M.S. Graboski and T.E. Daubert, *Ind. Engineering Chemical Process* 17, 1978, pp. 443-450
- [15] A. Congiunti, C. Bruno and E. Giacomazzi, “Supercritical combustion properties”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA-0478*, 2003
- [16] L. Pons, N. Darabiha, S. Candel, G. Ribert and V. Yang, “Mass transfer and combustion in trans-critical non-premixed counterflows”, *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 13, 2009, pp. 57-81
- [17] T. Chung, M. Ajlan, L. Lee and K. Starling, “Generalized multi parameter correlation for non-polar and polar fluid transport properties”, *Ind. Engineering Chemistry Res.*, Vol. 27, 1988, pp. 671-679
- [18] J. Ely and H. Hanley, “Prediction of transport properties 1, Viscosity of fluids and mixtures”, *Ind. Engineering Chemistry*, Vol. 20, 1981, pp. 323-332
- [19] J. Ely and H. Hanley, “Prediction of transport properties 2, Thermal conductivity of pure fluids and mixtures”, *Ind. Engineering Chemistry*, Vol. 22, 1983, pp. 90-97
- [20] E. N. Fuller, P. D. Schettler and J. C. Giddings, *J. Physical Chemistry* Vol. 58, No. 5, 1966, pp. 18
- [21] S. Takahashi, “Preparation of a generalized chart for the diffusion coefficient of gases at high pressure”, *J. Chemical Engineering (Japan)*, Vol. 7, 1974, pp. 417-420
- [22] Li, J., Zhao, Z., Kazakov, A., and Dryer, F.L. “An Updated Comprehensive Kinetic Model for H₂ Combustion”, Fall Technical Meeting of the Eastern States Section of the Combustion Institute, Penn State University, University Park, PA, October 26-29, 2003
- [23] J. W. S. Rayleigh, “The Theory of Sound”, Vol. 2, Dover, New York, 1945, p. 226
- [24] H.G. Im, C.K. Law J.S. Kim, and F.A. Williams, “Response of counterflow diffusion flames to oscillating strain rates”, *Combustion and Flame*, Vol. 100, 1995, pp. 21-30
- [25] J.S. Kim, and F.A. Williams, “Contribution of strained diffusion flames to acoustic pressure response”, *Combustion and Flame*, Vol. 98, 1994, pp. 279-299