

## 강한 압력파동에 구속된 액체 추진제 연소응답의 지배인자

이길용\* · 윤웅섭\*\*

### Controlling Factors of Open-Loop Combustion Response to Acoustic Pressures in Liquid Propellant Rocket Engine

Gilyong, Lee\* · Woongsup, Yoon\*\*

#### ABSTRACT

This paper targets to define controlling factors of pressure-coupled combustion response and estimate their effects on droplet evaporation process. Dynamic characteristics of hydrocarbon propellant vaporization perturbed by acoustic pressure are numerically simulated and analyzed. 1-D droplet model including phase equilibrium between two phases is applied and acoustic wave is expressed by harmonic function. Effects of various design factors and acoustic pressure on combustion response are investigated with parametric studies. Results show that driving frequency of acoustic perturbation and ambient pressure have important roles in determining magnitude and phase of combustion response. On the other hand, other parameters such as gas temperature, initial droplet size and temperature, and amplitude of acoustic wave cause only minor changes to magnitude of combustion response. Resultant changes in phase of heat of vaporization and thermal wave in droplet highly influence magnitude and phase of combustion response.

#### 초 록

본 논문에서는 강한 압력파동에 구속된 액체 추진제 연소응답의 지배인자를 규명하고 비정상 거동 특성을 평가한다. 외부 압력섭동에 의해 교란된 탄화수소 계열 액체 추진제의 비정상 거동을 수치계산하고 연소응답의 관점에서 분석한다. 2상 사이의 평형을 고려한 1차원 액적기화 모델을 적용하고 압력파동은 인위적인 조화함수식으로 설정한다. 외부 기상의 압력과 온도, 액적의 초기 직경과 내부온도, 외부 압력파동의 진폭과 구동 주파수 등 액체 로켓의 주요 설계인자 및 작동변수의 영향을 고찰한다. 본 연구를 통해 외부 압력파동의 구동 주파수와 외부 기상압력은 연소응답의 크기와 위상을 결정하는 지배인자임이 규명된 반면 외부 기상온도, 액적의 초기 직경과 외부온도 및 압력파동의 진폭 등은 연소응답과 약한 상관관계를 갖거나 그 영향이 미미하다. 기화열 섭동의 위상 및 액적표면과 내부의 파동에너지 전파특성이 연소응답의 크기와 위상을 결정한다.

Key Words: Combustion Response (연소응답), Acoustic Wave (음향파동)

\* 연세대학교 대학원 기계공학과 박사과정  
연락처, E-mail: gleekostka@paran.com

\*\* 연세대학교 기계공학과 부교수

향파동과 연료액적의 공명에 의해 발생하며 압력섭동에 감응한 추진제의 연소응답은 불안정 음향모드의 주요 에너지원으로 작용한다. 액체 추진제 연소응답의 크기와 위상은 각각 액적으로부터 음향파동에 전달되는 연소감응에 의한 에너지양과 액적의 열관성에 의해 나타나는 2상 간 파동에너지 전달의 시간지연을 의미한다. 이러한 연소응답의 크기와 위상에 따라 고주파 연소불안정의 구동, 유지 및 감쇠여부가 결정된다. 즉 연소응답의 크기와 위상에 따라 대상 시스템의 안정성 한계 및 동특성이 결정된다. 따라서 음향파동과 분무연소 사이의 공명구조 및 상호감응과정에 대한 연구는 고주파 연소불안정 연구에 있어서 필수불가결한 요소이다.

액체 추진제의 연소응답은 2상간 파동형태의 에너지 전달구조에 지배되는 현상이므로 유동시스템의 해석과는 구분되며 별도의 모델링이 불가피하다. 기존의 실험적 연구, 이론적 연구 [1-2] 및 수치적 연구[3]를 통해 다양한 연소응답 모델이 제시되었다. 이론적인 연구에 기초한 초기 연소응답 모델들은 액적연소이론을 바탕으로 압력섭동에 구속된 추진제의 연소응답을 모델링하였다. Strahle[4]은 대류환경에서의 연소응답모델을 제시하였다. Heidmann 등[5]은 기화현상이 액적연소의 전반적인 거동을 지배한다는 가정에 기초한 모델을 통해 액적과 음향파동의 공명조건을 제시하였다. Allison 등[6]은 특정 주파수 대역에서 연소응답의 정점이 나타난다고 보고하였다. Tong 등[7]은 비정상 기화모델을 정립하였고 연소실의 음향특성과 액적연소과정의 공명이 고주파 연소불안정의 구동메커니즘이라고 주장하였다. Dykema 등[8]은 단순화한 구대칭 모델을 통해 특정 주파수 대역에서 연소응답을 고찰하였다. 전산유체역학의 발달과 관련 현상에 대한 이론이 축적되면서 수치적인 연소응답 모델이 연구되었다. Hsieh 등[9]과 Lafon 등[10]은 고압, 임계압 및 초임계 작동압력 상태에서의 연소응답을 수치적으로 계산하였다. 하지만 관련 세부물리현상들에 대한 이해와 모델링이 현재까지 완전하지 못한 이유로 연소응답

모델링 과정에서의 가정 및 단순화에 따른 한계가 분명히 존재한다.

본 연구에서는 펜탄/질소 환경의 2상 시스템을 대상으로 강한 압력파동에 구속된 연료액적 연소응답의 비정상 거동을 수치적으로 해석하고자 한다. 수치기법으로는 상평형 모델링을 위한 플래시 계산법과 예조건화 기법을 적용한다. 다양한 액체로켓의 설계인자 및 작동인자를 대상으로 연소불안정 지배인자를 규명하며 그 영향관계를 밝히고자 한다.

## 2 지배방정식

연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 및 2상 경계면에서의 상평형을 고려한 화학종방정식을 포함하는 1차원 지배방정식 시스템은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial r} + \frac{\partial E}{\partial r} - \frac{\partial E_v}{\partial r} - u_g \frac{\partial Q}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$Q = [\rho, \rho u_r, \rho e_t, \rho Y_i]^T$$

$$E = [\rho u_r, \rho u_r^2 + p, (\rho e_t + p)u_r, \rho u_r Y_i]^T \quad (2)$$

$$E_v = [0, \tau_{rr}, -q_e, -q_m]^T$$

식(1)의 유도를 위해 대류효과, 증력효과, 점성소산, 복사열, 화학반응 등의 영향을 무시한다. 2상간의 경계는 2상 혼합물이 열역학적 평형상태에 있는 지점으로 정의한다. 즉 기액간 상평형점을 액적의 표면으로 하며 이를 기준으로 연료액적의 기화율을 구한다. 기상의 음향파동은  $p' = \bar{p} (1 + \hat{p} \sin \omega t)$ 으로 표현한다. 예조건화를 거쳐 내재적인 2중 시간진진기법을 적용하여 위 지배방정식의 수치해를 구한다.

## 3 연소응답

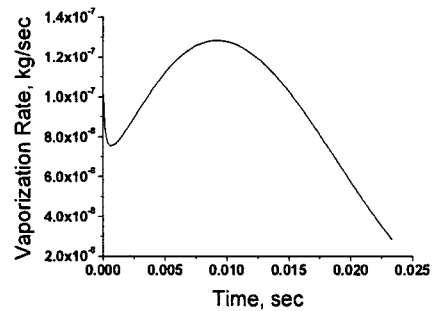
본 연구에서는 해석대상 시스템을 다음과 같이 구성한다. 펜탄 액적 주위 질소가스의 온도는 1500K, 초기 액적온도는 300K, 초기 액적직경은 100micron으로 한다. 외부 압력파동의 초

기 진폭은 주위 압력의 5%로 설정한다. 액상과 기상에 대해서 각각 100개의 격자점을 설정하며 액적과 기상의 경계면 쪽이 조밀하도록 지수적으로 배치한다.

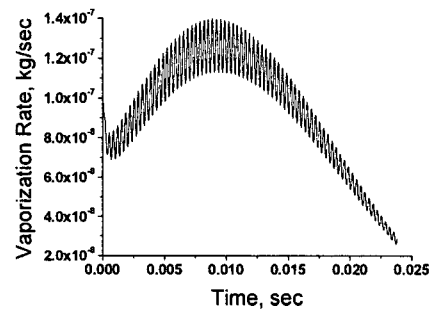
그림1은 강한 압력파동에 구속된 액체 추진제의 연소응답을 수치적으로 계산하는 과정을 설명하기 위한 것이다. 그림1-a)와 b)는 외부 압력섭동의 유무에 따른 액적 기화율의 시간추이이다. 여기서 그림1-a)와 그림1-b)의 DC성분이 일치하지 않는다는 점에 주목해야 한다. 왜냐하면 외부 압력섭동은 액적 기화과정에 있어서 기화율의 섭동성분만을 발생시키는 것이 아니라 기화율이 정점에 이르는 시간을 단축시키기 때문이다. 즉 기상의 압력파동은 액적 기화과정의 특성 자체를 변화시킨다. 따라서 압력섭동에 의한 액적 기화율의 변동량을 정의함에 있어 그림1-b)의 DC성분을 기준으로 할 경우 연소응답은 DC성분에 대해 거의 대칭적으로 나타나지만 이때의 연소응답은 압력섭동에 의한 영향을 왜곡시키는 결과가 된다. 본 연구에서는 그림1-b)와 그림1-a)의 차이를 연소응답으로 정의한다. 이와 같이 정의한 그림1-c)의 연소응답은 중심축에 대해 대칭이 아니며 비섭동상태로부터의 천이량을 의미한다. 그림1-d)는 그림1-a)의 물리량을 기준으로 그림1-c)의 연소응답을 무차원화한 것이다. 본 논문에서는 이와 같은 과정을 거쳐 최종적으로 연소응답을 계산하도록 한다.

그림2는 외부 압력파동에 의한 에너지가 액적 내부에서 온도섭동의 형태로 전파되는 현상을 나타낸 것이다. 액적표면에서 25번째 격자점에 이르면 온도섭동은 거의 나타나지 않는다. 즉 외부의 가진원에 의한 에너지는 액적 표면에서 급속히 감쇠된다. 이것은 액체 추진제의 연소응답이 액적 표면의 물성과 특성에 따라서만 결정된다는 것을 의미한다. 즉 액체 추진제 연소응답은 기액상평형이 이루어지는 영역 부근에서의 2상간 에너지 전달구조에 의해서만 지배된다.

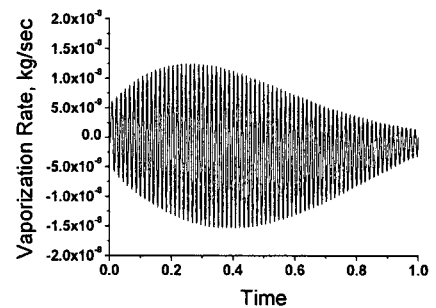
본 논문에서 연소불안정 지배인자의 규명을 위해 대상으로 삼은 로켓엔진의 설계·작동인자는 외부 압력파동의 진폭과 구동주파수, 기상압



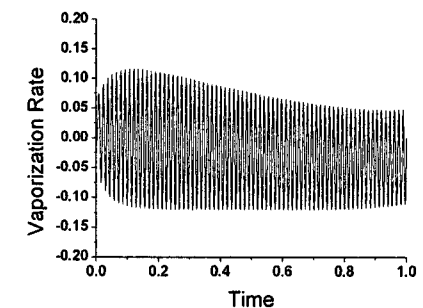
(a) Unperturbed Droplet Vaporization



(b) Perturbed Droplet Vaporization

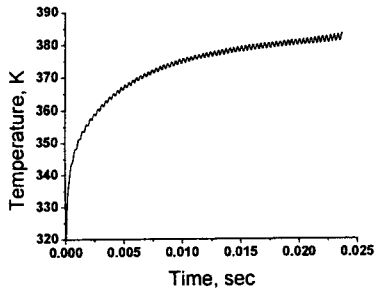


(c) Combustion Response

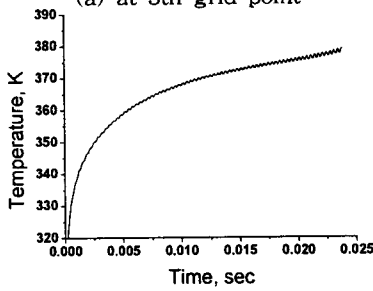


(d) Normalized Combustion Response

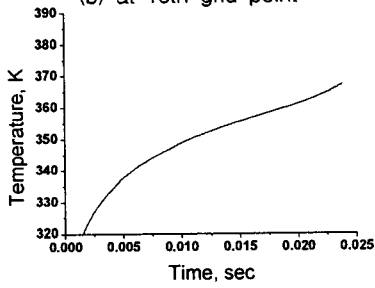
Fig. 1 Calculation of Combustion Response



(a) at 5th grid point



(b) at 10th grid point

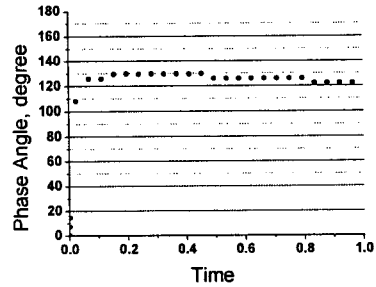


(c) at 25th grid point

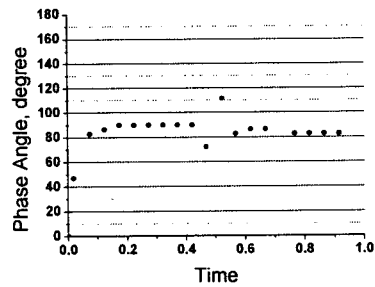
Fig. 2 Damping of Thermal Wave

력, 기상온도, 초기 액적 직경과 내부온도 등이 다. 이 중 연소응답의 위상과 상관관계가 있는 것으로 확인된 설계·작동인자는 기상압력과 압력파동의 구동주파수 뿐이다. 이에 대해서는 그림 3, 4 및 5를 통해 구체적으로 기술한다.

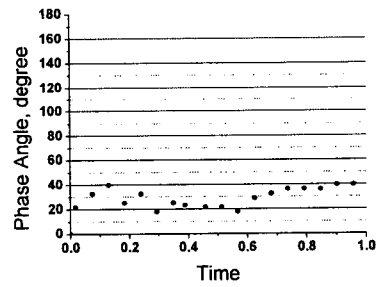
그림 3과 4는 각각 기상압력과 압력파동의 구동주파수에 따른 연소응답의 변화를 도시한 것이다. 기상압력의 증가에 따라 연소응답의 위상은 감소하며 상이위상에서 동이위상으로 변화할 정도로 액적 주위의 기상압력과 연소응답의 위상은 강한 상관관계를 갖는다. 반면 압력파동의 구동주파수와 연소응답의 위상은 상관관계가 있기는 하지만 기상압력의 경우와 비교하면 상관



(a) 15 atm



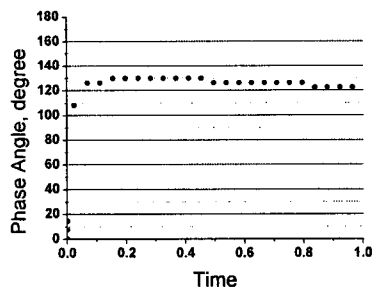
(b) 30 atm



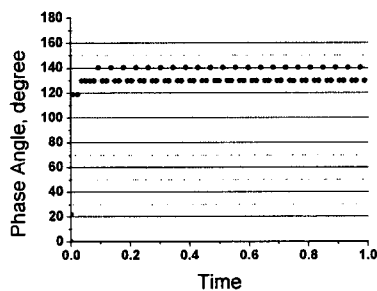
(c) 40 atm

Fig. 3 Phase Shift due to Ambient Pressure

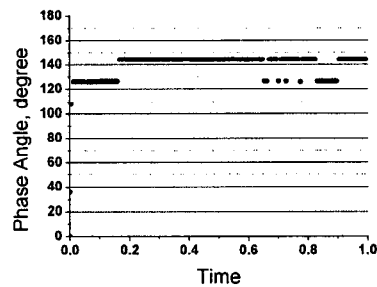
도는 작은 편이다. 고주파 음향파동에 대한 연소응답의 위상이 저주파 음향파동의 경우에 비해 증가하는 경향성을 보인다. 종합하면 연소응답의 위상은 기상압력이 증가할수록 그리고 음향파동의 구동주파수가 저주파일수록 외부 압력 섭동에 대해 작은 값을 갖는다. 이것은 기상압력의 증가에 따라 액적표면 부근 영역의 열역학적 거동이 기상의 음향파동에 보다 민감하게 반응하여 액적의 열관성에 따른 시간지연 효과를 줄이는 것으로 해석되며 궁극적으로는 이 경우 고주파 연소불안정의 구동 및 증폭 가능성이 커



(a) 1000 Hz



(b) 3000 Hz



(c) 5000 Hz

Fig. 4 Phase shift due to Driving Frequency

지는 결과를 갖게 된다.

그림5는 초기 액적 내부온도가 연소응답의 위상에 미치는 영향을 보이고 있다. 그림5에서 초기 액적 내부온도는 300, 310, 320, 330, 340K 등으로 변화함에도 불구하고 연소응답의 위상은 130도로 거의 일정하게 유지된다. 즉 초기 액적 내부온도는 연소응답의 위상과 상관관계가 거의 없다. 그림2에서 확인한 바와 같이 연소응답은 액적표면과 기액상평형 영역의 거동특성에 따라 지배되는데 궁극적으로 상평형점에서의 온도와 액적의 습구온도는 기상압력에 의해 결정되므로

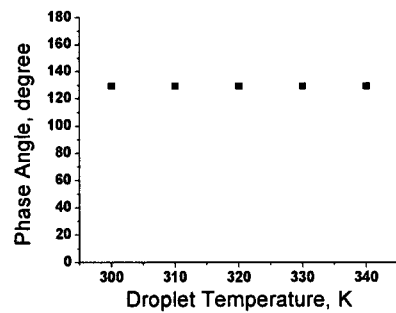


Fig. 5 Phase Shift due to Initial Droplet Temperature

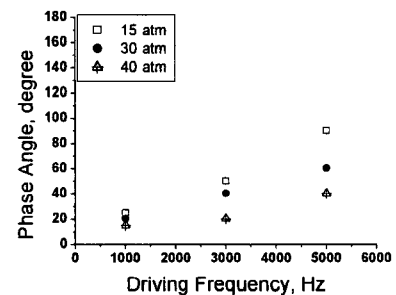
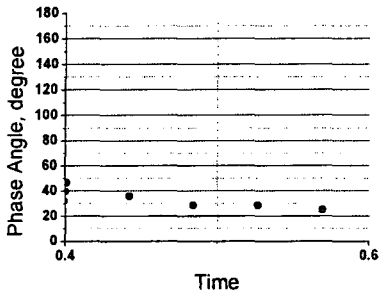


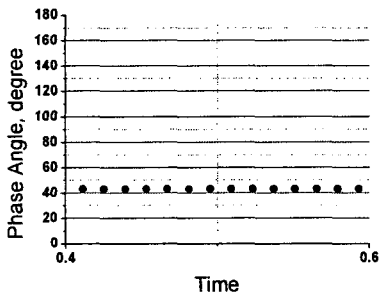
Fig. 6 Heat of Vaporization

초기 액적 내부온도는 액적의 초기 거동에만 다소 영향이 있을 뿐이다. 본 연구에서 연소응답에의 영향을 고찰하기 위해 설정한 다른 변수들 즉 외부 기상온도, 초기 액적직경 및 외부 압력 섭동의 진폭 등의 설계·작동인자들도 초기 액적 내부온도와 같이 연소응답의 위상에 영향이 거의 없다. 모든 경우에 있어 위와 같은 설명이 가능하며 로켓엔진의 설계·작동인자들은 기액상평형 영역 및 액적표면 부근 영역의 물성치 및 거동특성에의 영향 정도에 따라 연소응답과의 상관관계 및 상관도가 결정된다.

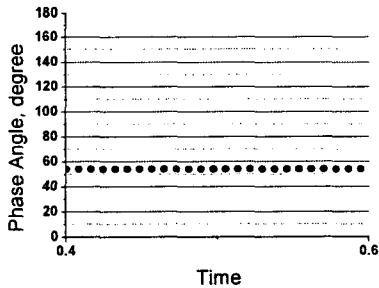
그림6은 기상압력과 압력파동 구동주파수의 변화에 따라 발생하는 외부 압력섭동에 대한 기화열 섭동성분의 위상차이다. 기상압력이 증가할수록 기화열 섭동성분의 위상차가 감소하는 것으로부터 압력증가에 따라 기액 상평형이 이루어지는 액적 표면에서 2상간의 공명현상이 강화됨을 알 수 있다. 압력파동 구동주파수에 대



(a) 1000 Hz



(b) 3000 Hz



(c) 5000 Hz

Fig. 7 Phase of Thermal Wave

해서도 기화열 섭동성분의 위상차가 저주파로 갈수록 감소하는 경향을 보이는데 이 역시 2상 간 공명구조 및 에너지 전달구조의 강화로 해석된다. 다만 압력파동의 구동주파수는 2상 간 공명 및 에너지 전달이 용이하도록 하는 효과만 있는 반면 기상압력의 경우 기화열의 절대값과 액적으로 전달되는 파동에너지의 크기에 직접적으로 영향을 미치므로 그림3과 4에서 보았던 것

처럼 종합적으로는 기상압력이 압력파동의 구동주파수보다 연소응답의 위상을 크게 변화시키는 요인이 된다.

그림7은 액적 내부의 온도섭동과 외부 압력파동의 위상차를 도시한 것이다. 압력파동의 구동주파수가 높을수록 2상 간 에너지 전달의 위상차는 증가한다. 즉 '외부 기상'의 파동에너지가 고주파의 형태로 전달될수록 액적 내부로 파동에너지가 전달되는 위상속도가 감소한다. 따라서 압력파동의 1사이클당 전파되는 파동에너지가 동일하다면 즉 압력파동의 진폭이 동일하고 기상압력이 동일하다면 고주파 압력파동의 경우에 저주파 압력파동의 경우에서보다 액적 표면에서 액적 내부로의 에너지 전파속도가 느리므로 보다 많은 파동에너지가 액적 표면의 물성을 바꾸거나 액적의 기화량을 증가시키는 데 사용된다. 따라서 Lafon 등[10]의 연구에서와 같이 압력파동 구동주파수가 증가함에 따라서 연소응답의 진폭 또한 증가하는 현상이 설명된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 외부 압력파동에 따른 액체 추진제 연소응답의 지배인자 및 특성을 고찰하였다. 연소응답에 의한 발생항의 변화는 외부섭동이 배제된 비정상 액적 기화계산을 기준으로 무차원화하여 계산하였다. 외부 압력섭동에 의한 파동에너지는 액적 표면에서 급격히 감소되었으며 기액 경계면 주위의 물리량 및 거동특성이 연소응답을 지배하였다. 기상압력과 압력파동의 구동주파수는 연소응답을 지배하는 외적요인이었다. 더불어 액적 내부의 파동에너지 전달특성 및 기화열 섭동의 크기와 위상이 연소응답의 크기와 위상을 결정하는 내적요인이었다. 외부 기상온도, 초기 액적직경, 액적온도 및 압력섭동의 진폭 등은 연소응답의 진폭과 약한 상관관계가 있는 반면 연소응답의 위상에는 영향이 없었다.

#### 참 고 문 헌

1. Priem, R., and Heidmann, M., "Propellant Vaporization at a Design Criterion for Rocket-Engine Combustion Chambers," Tech. Rept., NASA TR-67, 1960
2. Culick, F.E.C., "Combustion Instabilities in Liquid-Fueled Propulsion System-An Overview," AGARD Conf. Proceedings No.450, 1988
3. Habiballah, M. and Dubois, I., "Numerical Analysis of Engine Instability," 1st Int. Symposium on Liquid Rocket Combustion Instability, Penn State Univ., University Park, PA, 18-20, 1993
4. Strahle, W.C., "Periodic Solutions to a Convective Droplet Burning Problem," Proceedings of 10th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp.1315-1325, 1965
5. Heidmann, M.F., and Wieber, P.R., "An Analysis of the Frequency Response Characteristics of Propellant Vaporization," NASA TN D-3749
6. Allison, C.B. and Faeth, G.M., "Open-Loop Response of a Burning Liquid Monopropellant," AIAA Journal, Vol.13, pp.1287-1294, 1975
7. Tong, A.Y. and Sirignano, W.A., "Multicomponent Droplet Vaporization in a High Temperature Gas," Comb. and Flame, Vol.66, pp.221-235, 1986
8. Dykema, O.W., "An Engineering Approach to Combustion Instability," Aerospace Corp. Rept. No. TDR-669(6126-22)-1, 1965
9. Hsieh, K.C., Shuen, J.S., and Yang, V., "Droplet Vaporization in High-Pressure Environment I:Near Critical Conditions," Comb. Sci. and Tech., Vol.76, pp.111-132, 1991
10. Lafon, P., Yang, V., and Habiballah, M., AIAA paper 95-2432