

강한 압력 교란에 구속된 고압 액적의 천이 기화

김성엽 · 윤웅섭*

Droplet Vaporization in High Pressure Environments with Pressure Oscillations

Sung-Yup Kim, Woong-Sup Yoon

ABSTRACT

A systematic numerical experiment has been conducted to study droplet gasification in high pressure environments with pressure oscillations. The general frame of previous rigorous model[1] is retained but tailored for flash equilibrium calculation of vapor-liquid interfacial thermodynamics. Time-dependent conservation equations of mass, momentum, energy, and species concentrations are formulated in axisymmetric coordinate system for both the droplet interior and ambient gases. In addition, a unified property evaluation scheme based on the fundamental equation of state and empirical methods are used to find fluid thermophysical properties over the entire thermodynamic domain of interest. The governing equations with appropriate physical boundary conditions are numerically time integrated using an implicit finite-difference method with a dual time-stepping technique. A series of calculation have been carried out to investigate the gasification of an isolated n-pentane droplet in a nitrogen gas environment over a wide range of ambient pressures and frequencies. Results show that the mean pressures and frequencies of the ambient gas have strong influences on the characteristics of the droplet gasification. The amplitude of the response increases with increasing pressure, and the magnitude of the vaporization response increases with the frequency.

Key Words : droplet(액적), vaporization(기화), response(연소 응답)

1. 서 론

고체추진제 로켓엔진 또는 램제트의 연소 불안정의 모사에는 전산 유체 역학적 방법들이 광범위하게 사용되는 반면 액체 추진제 로켓 엔진

에서는 그 적용이 많지 않다. 불안정 해석에서 주로 다루는 문제는 에너지의 부여과정과 천이적 유동교란과의 상호작용에 대한 해석이며, 이

연세대학교 대학원 기계공학과 (Yonsei University, Graduate School Dept. of Mechanical Eng.)

* 연세대학교 기계공학과 (Yonsei University, Dept. of Mechanical Eng.)

상호작용들이 정확히 계산되어야 엔진 내에 존재하는 교란의 감쇠 또는 증폭을 정확하게 예측할 수 있다. 고체추진제 로켓에서 열/질량의 부가와 천이적 교란사이의 상대적 위상은 주로 고체상의 열관성에 의해 지배되며, 이에 대한 전산 모사는 실험에 의한 결과와 양호하게 일치하는 천이적 파형을 예측한다. 이에 반하여 액체추진제 로켓 엔진에서 연소 불안정을 유발하는 물리적 과정들은 여러 원인으로부터 발생하므로 이에 대한 모델은 아직도 완전하지 못하다. 액체로켓에서의 연소 불안정의 구체적 메커니즘은 상황에 따라 매번 달라질 수 있으며, 매우 복잡하다. 예를 들어, 액적의 열관성에 의해 야기되는 기화율의 시간지연이 하나의 중요한 불안정 메커니즘 중 하나인 것으로 알려져 있는데, 이는 열관성에 의해 액적의 천이적 기화율이 직접적으로 영향을 받기 때문이다. 유사하게 분사기에 의한 커플링도 액적의 크기에 주기적인 변화를 가져오게 되며, 이와 같은 진동은 미립화와 더불어 연소 불안정의 구동 요인이 될 수 있다. 여기서 액적 기화는 기화율이 지배적인 과정이므로 분무 연소의 특성은 단일 액적의 기화 특성의 통계적인 결과로 볼 수 있다. 따라서 주위 유동의 교란에 대한 단일 액적의 연소 응답을 이해하는 것은 연소 불안정 문제를 다루는데 필수적이다.[2]

이와 같은 동기 부여로 주위 유동의 교란에 대한 액적의 기화와 연소에 관한 체계적인 연구가 Strahle[3], Heidmann과 Wieber[4], Allison과 Faeth[5], Tong 과 Sirignano[6-8]에 의해 연구되었으나 고압 하에서의 아주 많은 기본적인 문제가 해결되지 않은 상태다. 이에 본 연구는 기화과정의 중요한 변수인 압력과 주파수를 바꿔가며 그에 따른 물리적인 특성, 그 중에서 가장 중요한 기화율을 중점적으로 살펴보고 이를 해석한다. 본 연구에서는 기-액상을 별도로 취급하고, 고압 액적 연소의 포괄적인 모델링을 시도하였다. 기상과 액상의 과정들은 고압 환경에서의 구대칭형 액적의 기화를 대상으로 수식화 되었고, 기-액상의 상경계 면에서의 열적화

적 상태량들은 플래시 상평형 방법을 사용하여 구하였다. 기상의 비이상성, 가스의 용해성, 물성치의 변화, 액상과 기상의 평형과 같은 고압 효과는 다 조성 혼합물의 혼합 법칙과 더불어 Soave-Redlich-Kwong 상태방정식을 사용하여 구했다. 본래 불안정 문제를 정확히 다루기 위해서는 주위 압력 교란과 그에 따른 연소 응답의 상호 작용을 고려해야하나 여기에서는 외부의 주기적인 압력 섭동에 구속된 액적의 기화만을 고려하고 압력섭동의 크기는 평균압력의 5%로 한다.

2. 지배 방정식 및 수치 기법

본 연구는 액적이 초임계 상태에 도달하기 전의 아임계 상태를 다루므로 액적의 표면은 잘 정의된 경계를 가지고 있다. 따라서 액적 내부와 외부로 나누어서 공식화하고 액적의 표면에서 상평형, 질량 유량과 열 유량의 연속 조건 등의 조화조건(matching condition)을 이용하여 연결시킨다. 이러한 조화 조건이 만족 되었을 때 표면에서 화학종들의 물분율을 구할 수 있게 되며, 액상과 기상의 경계 조건 들로부터 액적 내부와 외부의 모든 영역에 걸쳐 문제를 풀 수 있게 된다. 체적력, 점성 소산, 복사열전달을 무시한다면 유동장은 아래와 같이 표현할 수 있다.

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

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_r \\ \rho e_i \\ \rho Y_i \end{bmatrix} E = \begin{bmatrix} \rho u_r \\ \rho u_r^2 + p \\ (\rho e_i + p)u_r \\ \rho u_r Y_i \end{bmatrix} E_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{rr} \\ -q_r \\ -q_{mi} \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 ρ , u_r , u_g , p 와 Y_i 는 각각 밀도, 반경 방향 속도, 격자속도, 압력, i 화학종의 질량분율을 각각 의미한다. e_i 는 내부에너지, τ_{rr} 는 수직 응력을 나타낸다. 열과 화학종의 질량 확산은 각각 포리에와 픽의 법칙을 따른다. 식(1)은 유동방정식의 고유치들의 큰 차이와 압력항이

잘 결합되어있지 않으므로 풀기가 매우 어렵다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 식(1)은 예조 건화 기법과 함께 이중시간 전진기법을 사용하여 완전히 결합시킨 내재적인 수치기법을 사용한다.

3. 열역학적 모델링

기-액 경계면에서의 상평형은 임계상태가 발생하기 전의 액적표면 거동을 확인하는데 결정적 역할을 한다. 계산 과정은 대개 두 단계로 이루어진다. 첫 번째로 Soave-Redlich-Kwong 상태 방정식을 사용하여 기상과 액상의 퓨개시티를 계산한다. 두 번째 단계는 각 상에 포함된 각 화학종의 퓨개시티가 같게 되는 열역학적 평형상태를 결정하는 것이다. 액상과 기상의 여러 성분의 평형은 열적,기계적, 상평형을 만족하면 이루어진다 ($T_L = T_v, P_L = P_v, f_{iL} = f_{iV}$). 여기서 아랫첨자 V와 L은 기상과 액상을 나타내고,

f_i 는 각 화학종의 퓨개시티를 나타낸다. 액적 표면에서 각 조성들에 의한 혼합물의 상평형 상태를 결정하는데는 플래쉬 평형기화 방법이 사용되었다[10]. 분리와 혼합 공정에서의 해석을 위해서는 각 상의 평형을 구하여야 하고 최종 혼합물에서의 평형조성의 구성은 평형을 (equivalence ratio)를 사용하여 나타낼 수 있다. 여기서 상평형을 위한 플래쉬 방정식은 전체적 그리고 각 조성물의 상평형 조건으로부터 얻을 수 있다. 등온플래쉬 계산법에서는 Rachford-Rice[11]에 의한 시행 착오법을 사

용하는데 $\sum_i (x_i - y_i) = 0$ 과 같은 질량 보존식을 제한 조건으로 다음의 식이 만족되면 평형상태가 된다.[10]

$$f(L^*) = \sum_i \frac{z_i(1-K_i)}{K_i + L^*(1-K_i)} = 0 \quad (3)$$

여기서 x_i, y_i 와 z_i 는 i 화학종 각상의 몰분율, K_i 는 i 성분의 평형율, L^* 는 액상의 분율을 나타낸다.

고압 연소의 환경에서는 열역학적 상태량이 압

력, 온도, 그리고 조성에 따라서 급격하게 변화하고 따라서 이것들은 매우 정밀하게 계산되어야 한다. 또한 열역학적 상태량은 일반적으로 불규칙적으로 변화되며, 임계점 부근에서는 온도와 압력 모두에 민감하다. 따라서 초임계 상태의 액적의 거동을 다루기 위해서 갖춰야 하는 전제조건은 그 시스템의 열역학적 상태량과 압축유체부터 희석된 기체까지 모든 유체의 열역학적 상태를 구성하는 성분을 포괄하는 상태량 계산 방법의 정립이다. 다성분 조합을 대상으로 하는 열역학적 상태량과 물질, 열전달을 정의하려면, 액체와 기체의 평형에서의 온도와 압력에 따른 각 조성물의 데이터를 취합하고, 혼합물의 상태량은 혼합법칙에 의해 계산한다. 본 연구에서의 열 물리적 상태량 계산은 Takahasi[9]에 의한 압력 확산 보정을 제외하고는 Hsieh et al[1]의 방법과 동일하다.

4. 주기적인 압력 섭동 환경 하의 고압 액적 기화

고압 하에서 주위 압력 교란에 구속된 단일 액적의 연소 응답을 체계적으로 연구하였으며 Fig.1 에 모델링의 개요를 도시하였다.

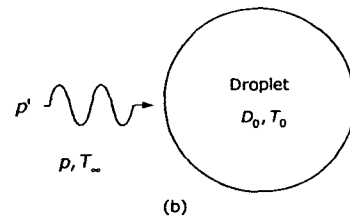
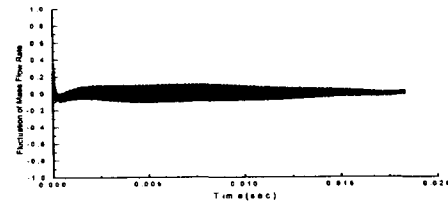


Fig 1. Schematics of a droplet in pressure oscillatory environment

연료 액적은 n-pentane, 주위는 질소로 수치 실험 하였고, 초기 액적의 온도는 300K이고 주위 질소가스의 온도는 1500K이다. 평균 압력은 10,30,50 기압으로 하였다. 액적의 기화 초기에는 큰 온도 구배가 기-액 경계면에 존재하므로 강한 열 유속이 액적내부로 들어간다. 이때 에너지의 일부는 액적을 기화하는데 쓰이게 되고 나머지는 액적의 내부 온도를 높이는 데 사용된다. 그 결과 액적 표면 온도는 점차 증가하고

두 가지의 다른 상황에 직면할 수 있다.(아임계와 초임계). 본 연구는 아임계 모델을 대상으로 했기 때문에 액적 표면은 기체와 액체가 잘 구분되어있으므로 기화율은 표면을 통해 지나가는 질량 유량을 구함으로써 계산하였다.

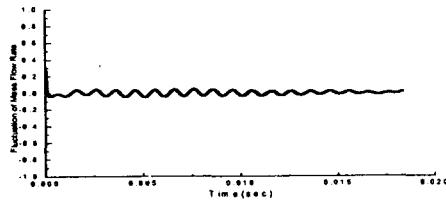
Fig. 2에서 n-pentane 액적의 기화율이 압력을 고정시켜 놓고 주파수를 변화시켰을 때 고주파로 갈수록 기화율의 진폭이 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 높은 주파수의 영역으로 갈수록 압력 섭동의 시간주기가 액적 내부에서 액체의 열관성의 특성시간보다 매우 작아지기 때문에 액적 표면온도의 변화율이 주위 압력의 변화율보다 월등히 느려진다. 상평형은 액적 표면에서 이루어지기 때문에 압력섭동에 따른 액적표면 조성의 변화가 지배적으로 되므로 고주파로 갈수록 기화율의 진폭이 커지게 된다. 또한 압력 섭동에 따른 기화율의 진폭변화가 세 경우 모두 초기에 증가하다 최고점에 이른 다음 감소하는 것을 볼 수 있는데, 초기에 증가하는 것은 기화초기에 액적의 온도를 높이면서 평균 기화량이 증가하기 때문이고 어느 정도 기화한 후 진폭이 감소하는 것은 액적반경의 감소로 표면적이 줄어들었기 때문이다.



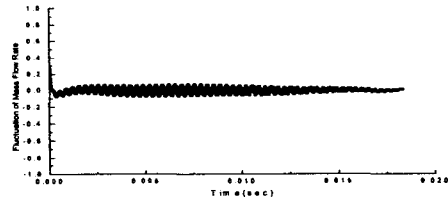
(c)15atm 5000Hz

Fig 2. n-pentane액적의 질소 환경에서 15기압일때 압력 섭동의 주파수 변화에 따른 기화율의 시간에 따른 변화

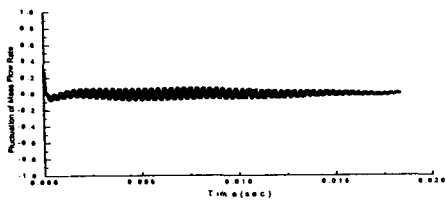
Fig. 3을 보면 주파수를 고정시켰을 때 고압으로 갈수록 압력 섭동에 따른 기화율의 변화 진폭이 커지는 것을 볼 수있다. 이는 모든 압력의존적인 메카니즘(기-액 상평형, 열전달, 물질전달)이 기화과정에 관여하고 있지만 그 중에서 기화율에 가장 지배적인 압력에 의한 기화 잠열의 변화 때문이다. 즉 압력이 높아질수록 기화 잠열이 작아져 기화율의 변화폭이 커지는 것이다. 이러한 현상은 임계점으로 가까이 갈수록 더 심해지는데 그 이유는 임계점근처에서는 작은 교란에도 기화잠열과 수송 물성치들이 매우 민감해지기 때문이다.



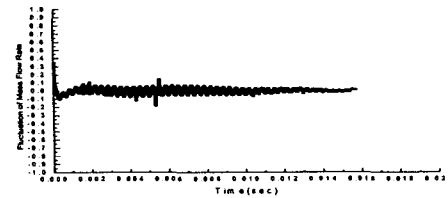
(a)15atm 1000Hz



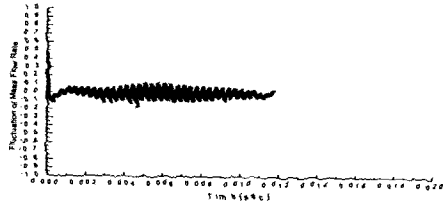
(a) 15atm 3000Hz



(b)15atm 3000Hz



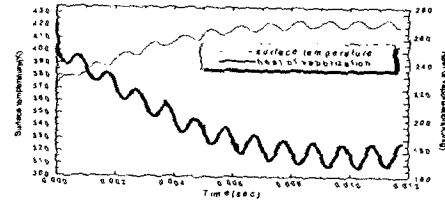
(b) 30atm 3000Hz



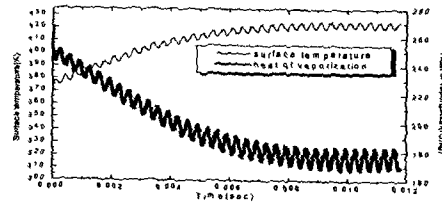
(c) 50atm 3000Hz

Fig. 3. *n*-pentane액적의 질소환경에서 압력 섭동의 주파수가 3000Hz일때 평균 압력의 변화에 따른 기화율의 시간에 따른 변화

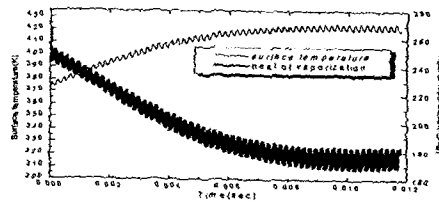
Fig.4에서 보면 전체적으로 압력이 섭동함에 따라 액적 표면 온도와 기화 잠열이 섭동하는 것을 볼 수 있다. 압력이 섭동함에 따라서 표면 온도도 섭동하고 그 결과 표면의 열역학적 평형 상태도 바뀌게 된다. 즉 표면온도가 섭동함에 따라 기화 잠열도 섭동하고 그 결과 기화율도 섭동하게 만드는 원인이 되는 것이다. 또 하나의 중요한 물리적 현상은 액적의 heat-up 과정이 액적의 표면온도섭동의 크기와 위상에 영향을 준다는 것이다. 압력파의 주기가 짧아짐에 따라 액적의 열관성의 특성시간이 짧아지면 액적은 열을 액적표면만으로 받아들이는게 아니라 액적 전체로 받으려는 경향이 나타나게 된다. 그 결과 액적 표면 온도의 섭동 크기를 조금 감소시키는 결과를 초래하며 이것은 Fig.4에서 확인할 수 있다. 반면에 이 표면온도의 섭동과 압력 섭동의 위상은 거의 비슷하다. 반대로 압력파의 주기가 길어지면 액적이 열을 표면만으로 받는 경향이 나타나기 때문에 압력파와 표면온도의 섭동간에 위상차를 발생하게 된다. 그러나 이것이 곧 압력파와 기화율사이의 위상차를 가져온다고 단정 지을순 없다.



(a) 50atm 1000Hz



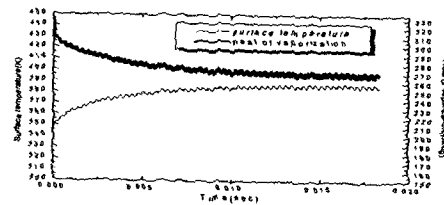
(b) 50atm 3000Hz



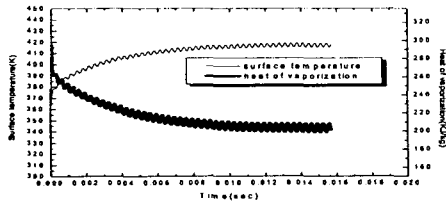
(c) 50atm 5000Hz

Fig 4. $C_5H_{12}-N_2$ 에서 시간에 따른 액적표면 온도와 기화 잠열의 변화

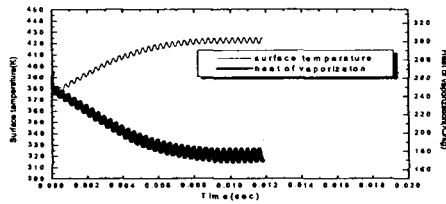
또한 Fig.5에서 보듯이 기-액 경계면에서의 평균온도와 압력이 기화 잠열의 섭동의 진폭을 결정한다. 경계면이 임계점에 가까워질수록 기화 잠열의 진폭의 섭동은 커지게 되고 이는 곧 기화율의 섭동의 진폭을 크게 한다. 종합해 볼 때 경계면에서의 평균 압력과 온도는 연소 응답률에 가장 중요한 영향을 미친다고 해석 할 수 있다.



(a) 15atm 3000Hz



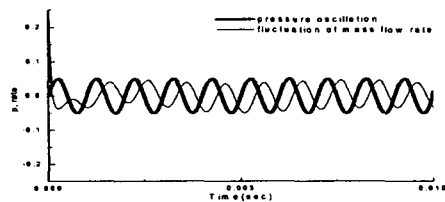
(b) 30atm 3000Hz



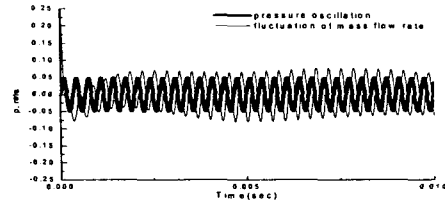
(c) 50atm 3000Hz

Fig.5. $C_5H_{12}-N_2$ 에서 주파수를 3000Hz로 고정시켰을때 압력 변화에 따른 액적 표면 온도와 기화잠열

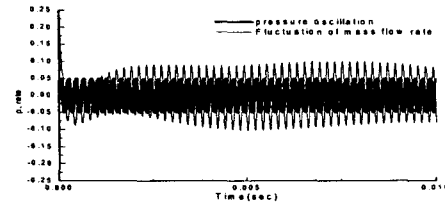
Fig.6에서 압력과 기화율간의 위상차를 보여 주고 있다. 이런 위상차가 발생하는 원인은 액적의 열관성이 주된 원인이다. 즉 압력이 변했을 때 변한 열유속이 액적내부로 들어가서 기화되기까지는 시간 지연이 발생 하는 것이다. 1000Hz와 5000Hz는 위상차가 정확히 일치하였으며 3000Hz에서 위상차가 더 크게 나는 것을 볼 수 있다. 세 경우 모두 out-of-phase로 나타났으며 공명 주파수를 찾아내기 위해 더 많은 경우의 계산이 필요하다.



(a) 15atm 1000Hz



(b) 15atm 3000Hz



(c) 15atm 5000Hz

주파수	1000Hz	3000Hz	5000Hz
위상차	126°	140.4°	126°

Fig6. $C_5H_{12}-N_2$ 의 15atm에서 주파수 변화에 따른 압력섭동과 기화율의 위상차

5. 결론

실제기체 효과를 고려한 Soave-Redlich Kwong 상태 방정식과 플래쉬상평형 계산 방법을 사용하여 다양한 압력과 주파수하에 n-pentane 액적의 기화를 수치 실험하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 같은 압력에서 주파수가 높을수록 기화율의 섭동량이 커지는 것을 알 수 있었다.
- 2) 같은 압력일때 주파수가 낮을수록 표면온도의 섭동량이 커진다.
- 3) 주파수가 같을때 평균압력이 임계점에 가까워질수록 표면온도와 기화잠열의 섭동량이 커지고 이는 곧 기화율의 섭동량이 커지는 것으로 연결된다.
- 4) 액적의 열관성에 의해 압력과 기화율간에 위상차가 발생하며 이는 압력과 주파수에 따라 다르다.

참고 문헌

1. Hsieh. K. C., Shuen. J. S. and Yang. V. "Droplet Vaporization in High-Pressure Environments, I: Near-Critical Conditions." *Combustion Science and Technology*, Vol.76. 1991. pp. 111-132
2. Priem.R.J. and Guentert. D. C. ,1962 "Combustion Instability Limits Determined by a Nonlinear Theory and a One-Dimensional Model." NASA
3. Strahle.W.C.,1965, "Periodic solutions to a Convective Droplet Burning Problem "Proceedings of Tenth Symposium on Combustion. The CombustionInstitute. Pittsburgh.PA.pp. 1315-1325.
4. Heidmann. M.F. and Wieber.P.R., "An Analysis of the Frequency Response Characteristics of Propellant Vaporization." NASA TN D-3749.
5. Allison.C. B. and Faeth. G. M.,1975, "Open-Loop Response of a Burning Liquid Monopropellant." *AIAA Journal*. Vol. 13. October pp. 1287-1294.
6. Tong.A.Y.andSirignano.W.A.,1986, "Multicomponent Droplet Vaporization in a High Temperature Gas." *Combustion and Flame*. Vol. 66. pp.221-235.
7. Tong.A.Y.andSirignano.W.A.,1986, "Multicomponent Transient Droplet Vaporization: Integral Equation Formulation and Approximate Solution." *Numerical Heat Transfer*. Vol. 10. pp. 253-278.
8. Tong. A. Y. and Sirignano. W. A.,1987, "Vaporization Response of Fuel Droplet in Oscillatory Field." *ASME National Heat Transfer Conference*. Paper No. 87-HT-58.
9. Takahashi, S., J. ,1974, *Chem. Eng. (Japan)* :417
10. King,C.J.,1980,*Separation Processes* (2nd ed) McGraw-Hill, New York, p. 64-80
11. Rachford, H.H.Jr., Rice, J.D.,1952, *Tech*,4,No.10.