강한 압력 교란에 구속된 고압 액적의 연소 응답

김 성 엽† · 윤 웅 섭*

Responses of Droplet Evaporation to High-Pressure Oscillations

Sungyup Kim, Woongsup Yoon

Key Words : response(연소 응답), droplet(액적), equation of state(상태 방정식)

Abstract

In order for studying pressure-coupled dynamic responses of droplet vaporization, open-loop experiment of an isolated droplet vaporization exposed to pressure perturbations in stagnant gaseous environment is numerically conducted. Governing equations are solved for flow parameters at gas and liquid phases separately and thermodynamic parameters at the interfacial boundary are matched for problem closure. For high-pressure effects, vapor-liquid interfacial thermodynamics is rigorously treated. A series of parametric calculations in terms of mean pressure level and wave frequencies are carried out employing a n-pentane droplet in stagnant gaseous nitrogen. Results show that wave instability in view of pressure-coupled vaporization response seems more susceptible at higher pressures and higher wave frequencies. Mass evaporation rate responding to pressure waves is amplified with increase in pressure due to substantial reduction in latent heat of vaporization. Augmentation of perturbation frequency also enhances amplification due to the reduction of phase differences between pressure perturbation and surface temperature fluctuation.

1. 서 론

연소 불안정은 많은 고성능 연소기의 발전을 40년 이상 저해시켜왔다. 이 문제는 엔진의 오작동을 일으킬뿐 아니라 때때로 치명적인 결과를 초래하기도 한다. 대부분의 액체 연료 시스템에서는 추진제가 연소실 내부로 분무의 형태로 분사가 된다. 액적 기화는 연소실 내부에서 일어나는 일련의 과정중 가장 느린 과정이므로 분무 연소의 동특성은 각각의 액적의 기화 특성의 통계적인 결과라 할 수있다. 그러므로 외부 유동 변수의 교란에 대한 액적 기화의 응답을 이해하는 것은 연소 불안정을 다루는데 있어서 필수적이다.

선행 연구들이 액적 기화 응답에 관련된 메커니즘을 나타내는 중요한 정보들을 제공했지만, 고압 효과에 관련된 많은 기본적인 문제들이 해결되어야 한다.

이에 본 연구는 압력 섭동이 포함된 액적 기화의 응답 모델을 다루었고 다양한 압력과 주파수하에서 수치 실험하였다. 주위 압력 교란에 구속된 고압 환경하에서의 액적 기화의 계산에는 액적표면에서 기-액 상평형을 이용하는 플래쉬 상평형 방법이 이용되었고 기상과 액상의 과정들을 모의실험하기 위해서 고압(아임계)에서의 천이적이고 구 대칭 기화모델이 공식화 되었다. 물성치는 Soave-Redlich-Kwong 상태방정식과 확장된 상당상태 이론을 이용하여 계산하였다. 액적 기화에 압력 섭동의 효과를 조사하기 위해서, 질소 가스 환경에 노출된 n-펜탄 액적을 사용하였다.

2. 오픈 루프(open-loop) 응답

유체의 유동이 발생했을 때 압력, 속도, 엔트로피의 변화에 의해 파의 변화가 발생한다. 초음속으로 이동하는 고온의 압축성 기체에서는 엔트로피 파가 지배적인 반면에 아음속 유동의 비 압축

† 연세대학교 대학원 기계공학과
E-mail : entropy1999@hanmail.net
TEL : (02)2123-4812 FAX : (02)312-2159
* 연세대학교 기계공학과

성 유체에서는 난류, 회전에 의한 운동들이 불안정한 유체 역학적 파들을 발생시킨다. 그 파들중 음파는 모든 유동 영역에서 선형적이든 비 선형적이든 압력의 변화가 수반된다. 따라서, 본 연구에서는 압력이 결합된 기화 응답이 조사되었다.

그림 1 은 정적인 환경에서 압력이 섭동하는 환경에 갑자기 노출된 기화하는 액적을 나타내고 있다. 이 그림은 전형적인 공명 구조로 봤을 때 문제점이 있다. 왜냐하면 교란이 기상에서 액상으로 일방적으로 가해졌고 그 과정들이 서로 영향을 주지않아서 교란된 열역학적 변수의 효과는 기상의 음향학적 변수들을 바꿀수는 없다. 그러나 이러한 오픈 루프(open-loop) 응답 모델은 기화가 경계면을 정의하는 음향학으로부터 독립될 수 있고 기상에서의 격자 해상도가 덜 문제시되는 장점도 있어서 그결과 이 현상을 다루는데 있어서 기본적인 측면에 더욱 집중할 수 있다.

3. 지배 방정식 및 수치 기법

질량, 운동량, 에너지 그리고 기상과 액상의 화학종의 보본방정식을 기-액 경계면을 충분히 고려하여 이론적이고 수치적인 방법으로 풀었다. 가정은 다음과 같다. 구대칭적인 질량과 열확산, 강제대류, 중력 효과, 점성 소산, 열복사, 그리고 화학반응은 무시되었다. 그리고 액적 표면에서의 상평형, Soret 과 Dufour 효과는 무시되었다. 식(1)은 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종 보존 방정식을 벡터 형식으로 표현한것이다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial E}{\partial r}-\frac{\partial E_v}{\partial r}-u_g\frac{\partial Q}{\partial r}=0 \tag{1}$$

$$Q=\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u_r\\ \rho e_t\\ \rho Y_1\end{bmatrix} E=\begin{bmatrix}\rho u_r\\ \rho u_r^2+p\\ (\rho e_t+p)u_r\\ \rho u_r Y_i\end{bmatrix} E_v=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{rr}\\ -q_e\\ -q_{m,1}\end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 ρ, u_r, u_g, p 와 Y_i 는 각각 밀도, 반경방향 속도, 격자 이동 속도, 압력, i 화학종의 농도를 각각 나타낸다. e_t 는 전 내부에너지이고 τ_{rr} 은 수직 방향의 힘이다. 열 확산과 화학종의 질량 확산은 각각 포리에와 픽의 법칙에 따른다. 편의상 액적표면의 줄어듦은 임계면의 움직임으로 표현될 수 있으나 임계상태에 도달하기전에는 평형상태에 있을때를 경계면으로 정의한다. 각 상의 물성치들은 경계조건(온도, 밀도, 화학종 농도포함)으로 작용하기 위해 기-액 경계면에서 연결되어야 한다.

기상과 액상의 결합은 열역학적 상평형과 질량과 에너지의 연속성으로부터 이루어진다. 오픈 루프(open-loop) 압력파를 모사하기 위해서, 고유 벡터가 $p'=\bar{p}\left(1+0.05\sin\omega t\right)$ 가 되는 것으로 가정한다. 여기서 압력섭동의 크기를 5%로 준 것은 연소실 내부의 압력 섭동의 크기가 5%가 되면 연소불안정을 일으키는 범위가 된다는 실험적 통계에 근거한다. 식(1)은 유동 방정식의 고유치들의 차가 매우크고 압력항이 떨어져있어 수치적으로 매우 풀기가 어렵다. 이러한 문제를 해결하기위해서 식(1)을 예조건화 시키고 이중시간 전진기법을 활용하여 유동 변수들을 완전히 결합시킨 수치기법을 사용한다.

4. 열역학적 모델

기-액 상평형은 액적 표면이 임계점에 도달하기 전 액적표면의 거동을 결정하는데 결정적으로 작용한다. 상평형 과정은 두 단계로 이루어진다. 첫째, 적절한 상태 방정식을 도입하여 각상을 구성하는 화학종들의 퓨개시티를 계산한다. 두번째 단계는 각 화학종들의 기상과 액상에서의 퓨개시티가 같아지는 상평형 조건을 결정하는 것이다. 상평형 조건이 결정됨과 동시에 얻어지는 결과들은 기화잠열, 주위 기상의 액상으로의 용해, 액적표면에서의 각 화확종들의 농도 등이다. 이런 분석은 표면 장력과 같은 다른 중요한 물성치들을 결정하는데 적용될 수 있다.

액적 기화의 과정을 모델링 하는 것은 기-액 경계면을 얼마나 정확히 다루는데 달려있다. 어떤 온도와 압력하에서 기-액 평형은 두상이 공존하는 영역에서의 물성치들을 통해 얻어질 수 있다. 기-액 평형은 열적, 기계적, 그리고 상평형이 이루어졌을때이다($T^V=T^L$, $p^V=p^L$, $\mu_i^V=\mu_i^L$). 여기서 위첨자 V 와 L 은 각각 기상과 액상을 나타내고 μ_i 는 화학종 i 의 케미컬 포텐셜(chemical potential)을 나타낸다. 상평형은 편의상 퓨개시티에 관해서 표현하는게 일반적이다. 케미컬 포텐셜(chemical potential)의 평형은 퓨개시티의 평형($f_i^V=f_i^L$)이 이루어졌을때로 간주한다. 퓨개시티에 관한 보다 효과적인 관계식을 얻기 위해서는 퓨개시티를 온도와 체적에 관해 표현할 필요가 있

다. 이 식은 기본적인 열역학적 관계로부터 유도되는데 아래와 같이 표현된다.

$$R_u T \ln \varphi_i = \int_V^\infty \left[\left(\frac{\partial p}{\partial n_i} \right)_{T,V,n_j} - \frac{R_u T}{V} \right] dV - R_u T \ln Z$$

여기서 φ_i 는 화학종 i 의 퓨개시티 계수이고 $f_i / x_i p$ 로 정의된다. n_i 는 화학종 i 의 몰수이고 V 는 시스템의 총 체적이고, Z 는 압축성 인자다. 본 연구에서는 기-액 상 경계면에서의 평형을 위해 플래쉬 계산 공식과 과정이 사용되었다. 등온 플래쉬 계산 방정식은 전체, 각 화학종의 질량보존식을 다르게 표현함으로써 얻어질 수있고, 얻어진 방정식은 평형상수가 쉽게 얻어질 수 있는 단순 평형 분리 공정에 적용가능하다. 그러나 고압 액적의 거동을 다루는데 있어서 그보다 먼저 선행되어야 할 것은 광범위한 유체 역학적 상태에 적용가능한 통합된 물성치 계산 방법의 정립이다.

5. 강한 압력 교란에 구속된 고압 액적의 연소 응답

모델화된 시스템은 고압의 주위 질소가스 환경에서 강한 압력 교란이 주어졌을 때의 고립된 n-펜탄 액적이다.

모델을 검증하기 위해서, 정적인 환경하에서 두가지 압력일 때 전형적인 탄화 수소계열의 연료를 대상으로 수치 실험하였다. 그림 2 는 두가지 열역학적 환경((a)1 Mpa, 669 K 와 (b) 5 Mpa, 493 K) 하에서 무차원화된 액적 표면적의 줄어듦을 나타내고있고, 실험값과 비교하고 있다. 그림에서 실선으로 나타낸 것은 계산결과이고 사각형으로 나타낸 것은 실험데이타[12]이다. 계산시 중력이나 부력 효과는 배제하였으므로 검증은 미소 중력하에서 사토등[12]에 의해 행해진 실험데이터와 비교하였다. 이 실험에서 초기직경이 0.65~0.8mm 인 n-헵탄 액적이 0.15mm 두께를 갖는 액적을 지지하는 봉에의해 질소 환경에 매달려있다. 그림 2(a)와 2(b)에서 비교적 실험값과 잘 일치하지만 초기에 매우 잘 일치하다가 점점 불일치해지는 것을 볼 수 있다.

압력파에 구속된 액적 기화의 일련의 실험이 행해졌다. 이러한 문제는 다소 비현실적인 측면이 있지만 압력 교란이 주어졌을 때 액적의 기화시 응답에 영향을 주는 다양한 메커니즘을 알 수 있게 해준다. 본 연구에서는 정적인 환경에서 주위 기체가 질소일 때 n-펜탄 액적에 압력 교란을 준 상황을 다루었다. 초기 액적의 직경은 100 μm 이고, 초기 액적의 온도는 300 K , 초기 기상의 온도는 1500 K 이다. 시행 환경은 압력 15, 30, 50 기압이고 주파수는 300~5000Hz 이다.

기화 응답에 영향을 미치는 몇 개의 열역학적 변수들을 분리해내기 위해서 압력교란으로 인한 액적의 압력과 온도의 섭동에관해 살펴보았다. 그림 3 은 기상과 액상의 압력의 시간에 대한 변화를 도시하였다. 그림에서 보여진 바와같이 크기와 위상이 거의 똑같음을 볼 수있다. 그것은 액적 반경보다 압력파의 파장이 월등히 크므로 압력은 시간적으로는 변화하지만 공간적으로는 변화하지 않기 때문에 압력이 연관되어있는 연소 응답을 모사하는데 필수적인 확산 과정이 압력교란과 관계없다고 가정할 수 있다.

따라서 또 다른 열역학적 변수인 온도에 관해 주목할 필요가 있다. 그림 4 는 네개의 위치에서 온도의 시간 변화를 나타내고 있다. 두개는 기상에 위치해있고 나머지 두개는 액상에 있다. (두개는 액적표면에 위치해있는데 하나는 액적의 기상쪽이고 나머지 하나는 액적의 액상쪽이며, 액적중심과 액적으로부터 멀리떨어진 곳이다) 압력 섭동과 일치하여 기상의 온도도 동일 위상으로 변하는 것은 당연한 일이다. 그러나 온도(열 유속)의 섭동이 액적 표면을 지나 액적 내부로 들어갔을때, 파의 크기는 점점 감소하고 액적 중심에서는 다 소진되버린다. 이것으로부터 기화 응답에 영향을 주는 온도의 섭동은 액적 표면 근처에서 주로 일어난다고 볼 수 있고 열전달에 대한 액적 전체의 응답을 가정하는 무한 전도도 모델은 압력이 연관된 액적 기화의 응답의 분석에서는 효과적이지 못하다.

주파수의 영향을 알아보기 위해서, 압력 교란에 구속된 n-펜탄 액적의 기화를 주위 평균 압력이 15 기압일 때 두 주파수(1000, 5000Hz)의 경우 조사하였고, 그 결과가 그림 5 에 나타나 있다. 기화과정에 관련된 메커니즘이 본질적으로 천이적이므로, 압력 섭동은 기화과정과 매우 연관이 되고 기화율에 매우 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서, 액적 기화가 일어나는 상태는 아임계 상태이므로 액적 표면은 잘 정의된 경계면을 가지고 있다. 따라서 기화율은 표면을 통해서 나가는 질량 유량을 계산함으로써 얻어질 수 있다. 그림 5 는 주파수 증가에 따른 기화 응답의 크기를 나타내고있다. 모든 주파수의 영역에서 기화응답은 초기에 증가

하다가 최고치에 이른후 감소되는 것을 볼 수있다. 초기에 증가하는 것은 액적의 예열때문이며 감소되는것은 액적 반경의 줄어듦으로인한 열확산의 특성시간 감소에 기인한다. 주파수가 높아질수록 압력파의 특성시간(주기)는 액적의 열관성의 그것보다 매우 작아진다. 액적 표면에서의 온도 변화는 주위 압력 교란의 변화보다 매우 느려서 기화잠열이 차지하는 에너지는 줄어드는 반면 액적 전체를 데우는데 쓰이는 열은 더욱 많아진다.

그림 6(a)와 (b)는 평균 압력이 15 기압이고 주파수가 각각 1000Hz, 5000Hz 일 때 n-펜탄의 질량 분율을 시간 변화에따라 나타낸 것이다. 그림 6(a)에서, 기상의 질량 분율의 위상과 액상의 질량 분율의 위상이 차이가 남을 알 수 있다. 그러나, 주파수가 증가할 경우(그림 6(b)), 액상과 기상의 질량 분율이 동일 위상으로 움직인다. 명백히, 불안정(혹은 공명)은 압력 교란과 기화 응답이 동일 위상일 때 발생하고, 이것은 간접적으로 파의 불안정은 고주파일 경우 발생할 확률이 높다는 것을 시사한다.

그림 7 은 n-펜탄/질소 시스템에서 저주파와 고주파의 경우 표면 온도와 기화 잠열의 시간 변화를 나타낸 것이다. 압력이 섭동하면, 표면 온도도 액적 표면에서 열 역학적 평형을 이루기위해 섭동한다. 이 표면 온도의 변화로 인해 기화 잠열과 기화율도 바뀐다. 고주파로 갈수록 표면 온도의 섭동량이 작아지게 되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 주파수에 따라 열전달의 방식이 바뀐다는 것을 의미한다. 주파수가 높아질수록 액상으로의 열전달이 액적 전체로 이루어지려는 경향이 나타나며, 그결과 표면 온도의 섭동량이 감소하게 되는 것이다. 반면에 낮은 주파수의 영역에서는 액적이 열을 표면만으로 받으려는 경향이 나타나고 표면온도의 섭동량은 커지는 것을 볼 수 있다.

그림 8 은 액적의 기화 응답에 관한 평균 압력의 효과를 보여주고있다. 평균 압력이 증가함에따라 기화율의 섭동량도 커짐을 볼 수 있다. 모든 기화 과정은 이런 전형적인 경향을 보이게 되는데 그것은 바로 가장 중요한 요소인 기화 잠열 때문이다. 즉 상변화에 필요한 에너지가 압력의 증가와함께 감소되기 때문에 고압에서는 기화율이 높아진다. 저압에서는 기화 잠열이 온도만의 함수이나 고압에서는 기화 잠열이 온도뿐만 아니라 압력에 관한 함수이다. 주위 기상의 온도가 충분히 높으면 압력의 상승이 그 시스템을 임계 영역으로 만들고 그에 상응하는 기화 잠열을 매우 크게 감소시킨다. 또한 기화는 온도의 섭동에 더욱 민감해져서 기화율의 섭동량을 크게 만드는 것이다(그림 9).

6. 결 론

압력이 연관된 액적 기화의 응답에 관해 고압효과와 기-액 평형 계산 방법을 이용하여 수치 실험하였다.

계산 결과 평균 압력은 기화 응답에 매우 큰 영향을 주었다. 주위 압력파에 반응하는 기화율은 압력 증가에따른 기화 잠열의 감소로 인하여 압력이 증가함에따라 높아졌다. 또한 주위 압력 교란의 주파수의 상승에 따라서도 기화율이 증가한 것을 볼 수 있는데 이는 압력 교란과 표면온도 섭동간의 위상차가 줄어들었기 때문이다. 고주파일 경우 액상으로의 열전달은 액적전체로 이루어지려는 경향이 나타나며, 낮은 주파수의 영역에서는 액적이 열을 표면만으로 받으려는 경향이 나타나고 표면 온도의 섭동량도 커지게 된다. 압력 교란이 주어졌을 때 압력이 상승하는 구간에서는 기화잠열도 작아져 기화율의 위상도 압력섭동의 위상에 가깝게되고 기화율도 증가한다. 압력이 떨어지는 경우에는 그 반대다. 일반적으로 말해서 압력이 연관된 기화 응답의 측면에서 파의 불안정은 평균압력이 높을때와 고주파에서 발생한다고 볼 수 있다.

참고문헌

(1) K.W.Lee, J.W.Chae, J.Y.Lee and W.S.Yoon, 2003 ,"Analysis of High-Pressue Drop Vaporization with Flash Vapor-Liquid Equilibrium Calculation", Int.Comm. Heat and Mass Transfer, vol.30, No.5 pp.633-641,

(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 Combusiton Institute. 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. and Sirignano. W. A., 1986, "Multicomponent Droplet Vaporization in a High Temperature Gas" Combustion and Flame. Vol.66

pp. 221-235

(7) Tong. A. Y. and Sirignano. W. A., 1986, “Multicomponent Transient Droplet Vaporization : Integral Equation Formulation and Approximate Solution.” Numerical Heat Transfer. Vol.10, pp.253

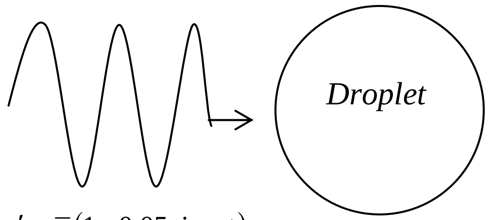
(8) Tong. A. Y. and Sirignano. W. A., 1987, “Vaporization Response of Fuel Droplet in Oscillatory Field.” ASME National Heat Transfer Conference. Paper No.87-HT-58

(9) Takahashi, S. J., 1974, Chem. Eng.(Japan),417

(10) King C.J., 1980, Separation Processes(2^{nd} ed) McGraw-Hill, New York, pp.64-80

(11) Rachford, H.H.Jr., Rice, J.D., 1952, Tech, 4,No.10

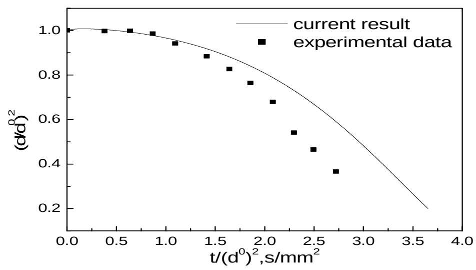
(12) H.Nomura, Y.Ujiie, H.J.Rath, J.Sato, M.Kono, 1996, Proc.Combust. Inst. 26,1267



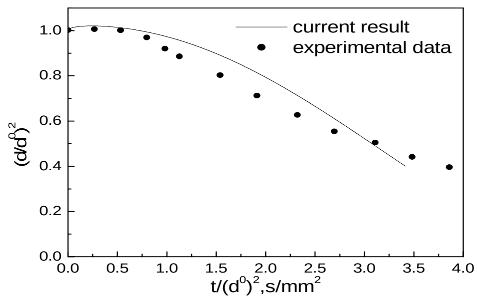
$p' = \bar{p}\left(1 + 0.05\sin\omega t\right)$

P_∞, T_∞

Fig. 1 Schematic of pressure-coupled responses of a droplet stagnant in high-pressure environment



(a) $P_a = 1MPa,\ T_a = 669K$



(b) $P_a = 5MPa,\ T_a = 493K$

Fig. 2 Temporal evolutions of dimensionless d^2 of n-heptane/nitrogen system[12]

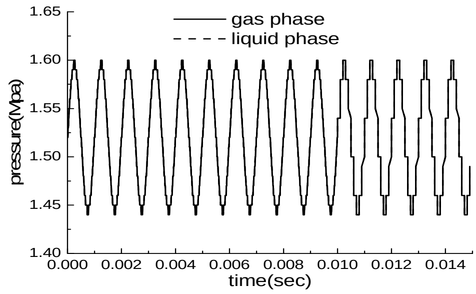


Fig. 3 Temporal evolution of pressures in gas and liquid phases(n-pentane/nitrogen system,15atm1000Hz)

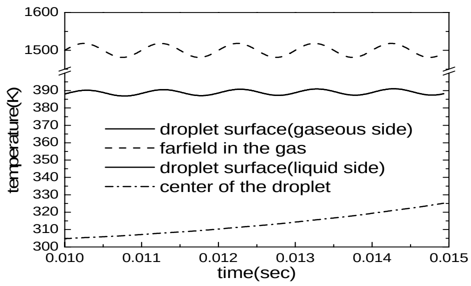
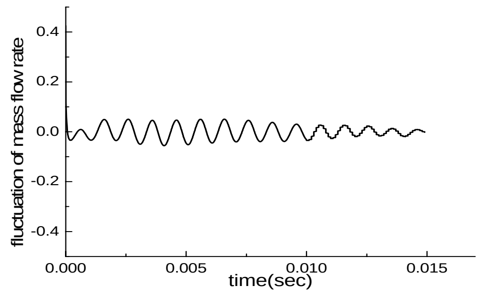
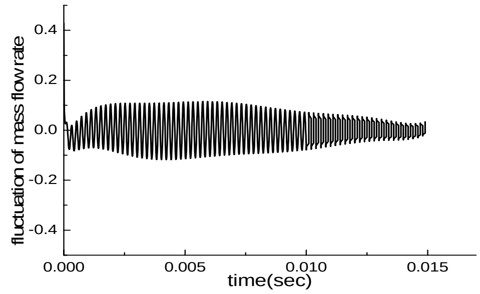


Fig. 4 Temporal variations of temperatures subject to pressure perturbation (n-pentane/nitrogen system, 15atm 1000Hz)

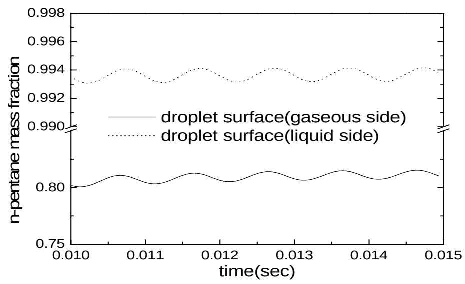


(a) $15atm\ 1000Hz$

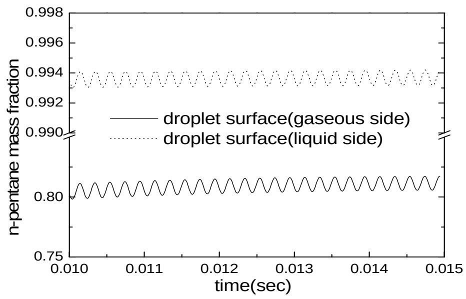


(b) $15atm\ 5000Hz$

Fig. 5 Effects of frequency of pressure perturbation on vaporization rate (n-pentane/nitrogen system)

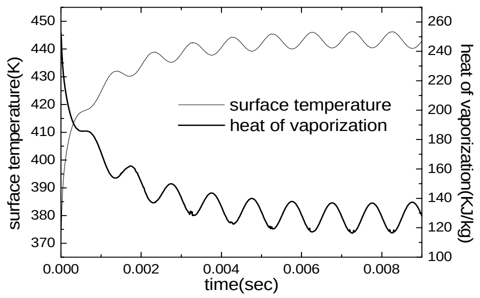


(a) $f = 1000Hz$

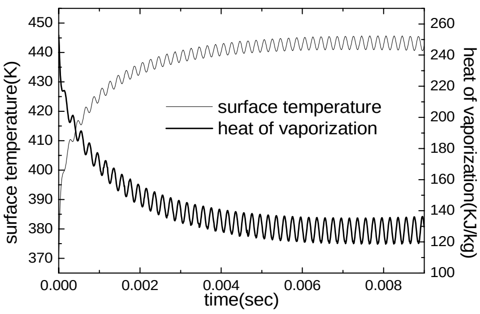


(b) $f = 5000Hz$

Fig. 6 Fluctuation of n-pentane mass fraction in a vicinity of droplet surface, n-pentane/nitrogen system (15atm)

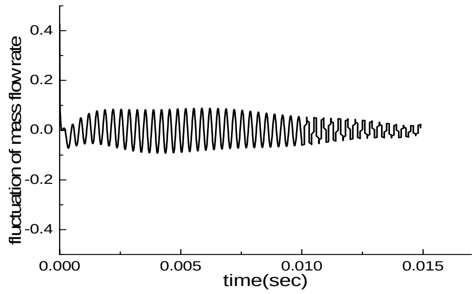


(a) $f = 1000Hz$

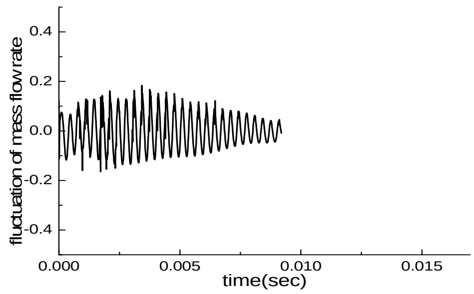


(b) $f = 5000Hz$

Fig. 7 Fluctuation of surface temperature and heat of vaporization in a vicinity of droplet surface, n-pentane/nitrogen system(50atm)

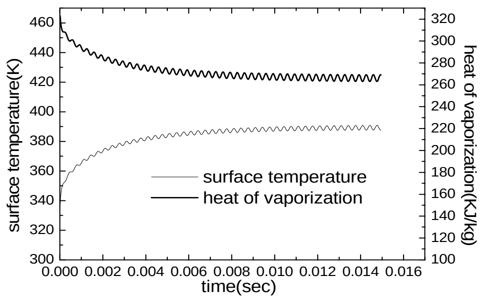


(a) $P_a = 15atm$

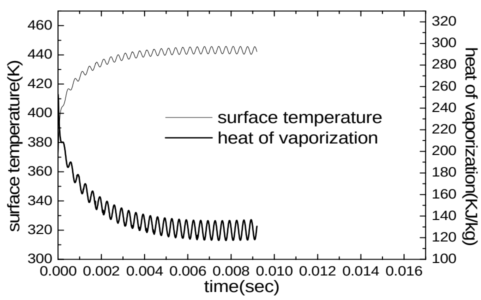


(b) $P_a = 50atm$

Fig. 8 Effects of mean-pressure magnitude on vaporization rate(n-pentane/nitrogen system, $f = 3000Hz$)



(a) $P_a = 15atm$



(b) $P_a = 50atm$

Fig. 9 Fluctuation of surface temperature and heat of vaporization in a vicinity of droplet surface, n-pentane/nitrogen system($f = 3000Hz$)