강한 음향장에 구속된 고압 액적의 연소

김성엽[†] · 신현호[*] · 윤웅섭[**]

Unsteady Vaporization of Burning Droplet at High Pressure Environments With Linear Acoustic Mode

Sungyup Kim, Hyunho Shin and 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 combustion, open-loop experiment of an isolated droplet combustion 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 air. Results show that the operating pressure and driving frequency have an important role in determining the amplitude and phase lag of a combustion response. Mass evaporation rate responding to pressure waves is amplified with increase in pressure due to substantial reduction in latent heat of vaporization. Phase difference between pressure and evaporation rate decreases due to the reduced thermal inertia at high pressure. In addition to this, augmentation of perturbation frequency also enhances amplification of vaporization rate because the time period for the pressure oscillation is much smaller than the liquid thermal inertia time. The phase of evaporation rate shifts backward due to the elevated thermal inertia at high acoustic frequency.

1. 서론

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 액적 기화 특성의 통계적인 결과라 할 수있다. 그러므로 외부 유동 변수의 교란에 대한 액적 연소를 이해하는 것은 연소 불안정을 다루는데 있어서 필수적이다.

선행 연구들이 액적 연소 응답에 관련된 메커니즘을 나타내는 중요한 정보들을 제공했지만, 고압효과에 관련된 많은 기본적인 문제들이 해결되어야 한다.

이에 본 연구는 압력 섭동이 포함된 액적 연소의 응답 모델을 다루었고 다양한 압력과 주파수하에서 수치 실험하였다. 주위 압력 교란에 구속된 고압 환경하에서의 액적 연소의 계산에는 액적 표면에서 기-액 상평형을 이용하는 플래쉬 상평형 방법이 이용되었고 기상과 액상의 과정들을 모의 실험하기 위해서 고압(아임계)에서의 천이적이고 구 대칭 기화 모델이 공식화 되었다. 물성치는 Soave-Redlich-Kwong 상태방정식과 확장된 상당 상태 이론을 이용하여 계산하였다. 액적 연소에 압력 섭동의 효과를 조사하기 위해서, 공기 환경

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

에 노출된 n-펜탄 액적을 사용하였다.

2. 지배 방정식 및 수치 기법

질량, 운동량, 에너지 그리고 기상과 액상의 화학종의 보존 방정식을 기-액 경계 면을 충분히 고려하여 이론적이고 수치적인 방법으로 풀었다. 가정은 다음과 같다. 구 대칭적인 질량과 열확산, 강제 대류, 중력 효과, 점성 소산, 열 복사, 그리고 화학 반응은 무시되었다. 그리고 액적 표면에서의 상평형, Soret 과 Dufour 효과는 무시되었다. 식(1)은 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종 보존 방정식을 벡터 형식으로 표현한 것이다.

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

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

$$S=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ \dot{\omega}_i\end{bmatrix} \tag{2}$$

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 화학 종의 질량 확산은 각각 포리에와 픽의 법칙에 따른다. 편의상 액적 표면의 줄어듦은 임계 면의 움직임으로 표현될 수 있으나 임계상태에 도달하기전에는 평형 상태에 있을 때를 경계 면으로 정의한다. 각 상의 물성치들은 경계조건(온도, 밀도, 화학종 농도포함)으로 작용하기 위해 기-액 경계면에서 연결되어야 한다.

기상과 액상의 결합은 열 역학적 상 평형과 질량과 에너지의 연속성으로부터 이루어진다. 오픈루프(open-loop) 압력파를 모사하기 위해서, 고유벡터가 $p'=\bar{p}\left(1+0.05\sin\omega t\right)$가 되는 것으로 가정한다. 여기서 압력섭동의 크기를 5%로 준 것은 연소실 내부의 압력 섭동의 크기가 5%가 되면 연소 불안정을 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 예 조건화 시키고 이중시간 전진 기법을 활용하여 유동 변수들을 완전히 결합시킨 수치기법을 사용한다.

3. 열 역학적 모델

기-액 상평형은 액적 표면이 임계점에 도달하기 전의 액적 표면의 거동을 결정하는데 결정적으로 작용한다. 상평형 과정은 두 단계로 이루어진다. 첫째, 적절한 상태 방정식을 도입하여 각상을 구성하는 화학 종들의 퓨개시티를 계산한다. 두번째 단계는 각 화학종들의 기상과 액상에서의 퓨개시티가 같아지는 상평형 조건을 결정하는 것이다. 상평형 조건이 결정됨과 동시에 얻어지는 결과들은 기화 잠열, 주위 기상의 액상으로의 용해, 액적 표면에서의 각 화학 종들의 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 있다. 이 식은 기본적인 열역학적 관계로부터 유도되는데 아래와 같이 표현된다.

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

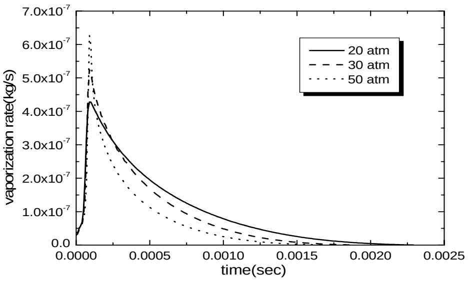
여기서 φ_i 는 화학종 i 의 퓨개시티 계수이고 f_i/x_ip 로 정의된다. n_i 는 화학종 i 의 몰수이고 V 는 시스템의 총 체적이고, Z 는 압축성 인자다.

본 연구에서는 기-액 상 경계 면에서의 평형을 위해 플래쉬 계산 공식과 과정이 사용되었다. 등온 플래쉬 계산 방정식은 전체, 각 화학종의 질량 보존 식을 다르게 표현함으로써 쉽게 얻어질 수있고, 얻어진 방정식은 평형 상수가 쉽게 얻어질 수 있는 단순 평형 분리 공정에 적용가능하다. 그러나 고압 액적의 거동을 다루는데 있어서 그보다 먼저 선행되어야 할 것은 광범위한 유체 역학적 상태에 적용 가능한 통합된 물성 치 계산 방법의 정립이다.

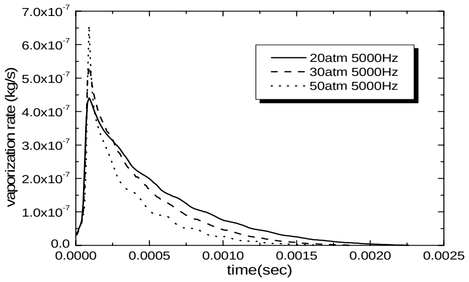
4. 강한 압력 교란에 구속된 고압 액적의 연소 응답

압력 파에 구속된 액적 연소 수치 실험이 행해졌다. 이러한 문제는 다소 비 현실적인 측면이 있지만 압력 교란이 주어졌을 때 액적의 연소 응답에 영향을 주는 다양한 메커니즘을 알 수 있게 해준다. 본 연구에서는 정적인 환경에서 주위 기체가 공기일 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 20, 30, 50 기압이고 주파수는 3000~10000Hz 이다.

주파수의 영향을 조사하기 위해서, 압력 교란에 구속된 n-펜탄 액적의 연소를 주위 평균 압력을 바꿔가며 정적인 상태와 압력 교란이 있는 상태를 비교하였다. Fig.1 은 시간 변화에 대한 기화 율의 변화를 나타낸 것이다. 정적인 상태와 압력 교란이 있을 때 모두 기화 율은 초기에 급격히 증가했다 다시 빨리 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 액적의 점화가 초기에 이루어져서 기상의 급격한 온도 상승으로 인한 열 확산 량의 증가에 기인한다. 또한 기화 량이 최고치에 이른 다음에 다시 감소하는 이유는 액적 반경의 줄어듦으로 인한 표면적의 감소 때문이다. 또한 두 경우 모두 고압으로 갈수록 기화 율의 최고치가 높아지고 최고치에 이른다음 기화 율의 감소되는 속도가 빠른 것을 볼 수 있다. 이는 고압에서의 연소시 더욱 온도가 높기 때문에 액적 표면적이 더 빨리 감소되기 때문이다. 또 Fig.1(b)에서 보듯이 같은 주파수일 때 50 기압에서 기화 율의 섭동 량이 증가했음을 볼 수 있는데 이것은 고압에서 기화 잠열이 더 낮아서 주위 교란에 민감해진 것에 그 원인이 있다.



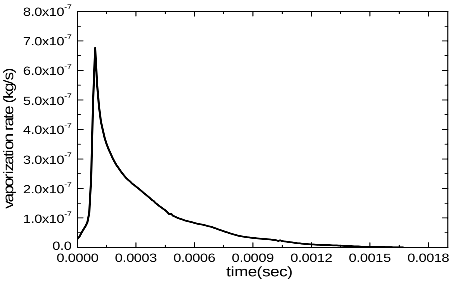
(a) Quiescent environment



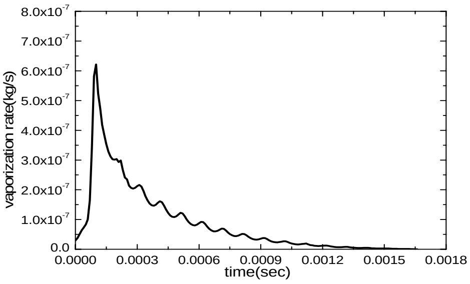
(b) Pressure oscillatory environment

Fig. 1 Comparisons vaporization rate in quiescent environment with that in pressure oscillatory environment

Fig.2 는 주위 압력이 50 기압일 때 시간 변화에 따른 기화 율의 변화를 나타낸 것인데 저 주파일 때와 고 주파일 때를 비교한 것이다. 두 경우 모두 연소 초기의 기화 율이 급격히 변하는 구간에서는 파의 형태가 보이지 않다가 기화 율의 변화가 완만해 지는 구간에 파형이 나타난다. 이것은 연소 초기에는 기화 율이 변하는 속도를 압력 파가 변하는 속도가 따라잡지 못하여 나타난 현상이다. 또한, 주파수가 높을 때 기화 율의 섭동 량이 극명하게 나타나고 증가된 것을 볼 수 있는데, 이것은 주파수가 높아질수록 압력 파의 특성시간(주기)이 액적의 열 관성의 그것보다 매우 작아지기 때문이다. 상 평형은 액적 표면에서 이루어지는데, 액적 표면에서의 온도 변화는 주위 압력 교란의 변화보다 매우 느려서 액적 표면을 구성하는 화학종 조성의 변화가 지배적이 되고, 이것이 기화 율의 섭동 량을 크게 만드는 것이다. 즉, 열 전달과 물질 전달, 그리고 평형 열 역학적 관점에서 볼 때, 주위의 교란에 대한 변화가 열 전달 측면에서 이루어지지 않을 경우, 물질 전달에서 이루어져야 하는 것이다.



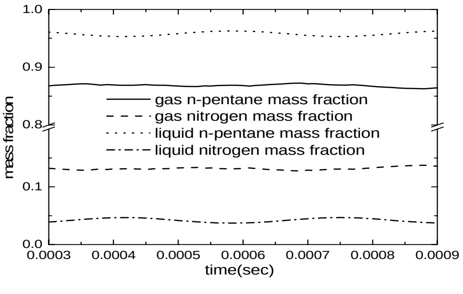
(a) $f = 3000Hz$



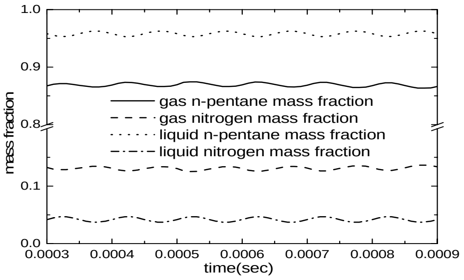
(b) $f = 10000Hz$

Fig. 2 Effects of frequency of pressure oscillation on vaporization rate ,n-pentane/air system ($50atm$)

Fig.3 에서 보듯이 주파수가 높을 때 각 화학 종의 변화의 폭도 커지며, 이것이 기화 율의 섭동량을 크게 하는 결정적인 포텐셜이 된다. 다시 말해서, 주위 압력 교란의 주파수가 높아질수록 기화 율의 섭동 량이 커지는 것은 주위의 교란에 대한 새로운 평형 상태를 찾아가는 지극히 자연스러운 현상인 것이다



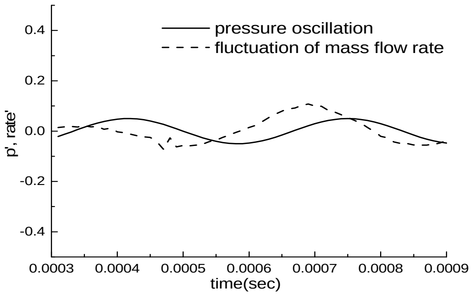
(a) $f = 3000Hz$



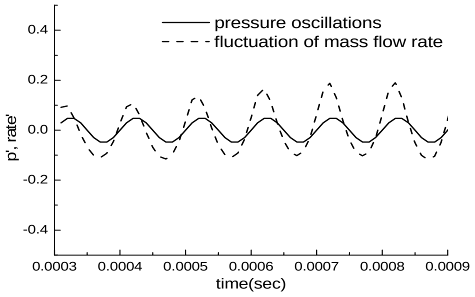
(b) $f = 10000Hz$

Fig. 3 Effects of frequency of pressure oscillation on species mass fraction (n-pentane/air system, $50atm$)

연소 불안정을 일으키는 또 다른 중요한 인자인 위상에 주목할 필요가 있다. Fig.4 은 같은 압력(50 기압)일 때 두 주파수 영역에서 시간 변화에 따른 압력과 기화 율의 위상의 변화를 보여주고 있다. 그림에 보여진 시간 영역에서 압력과 기화 율의 위상이 역전된 것을 볼 수 있다. 이것은 고압(50 기압)에서 연소가 일어나는 환경이기 때문에 열확산이 매우 활발해져, 초기의 압력의 위상을 기화 율의 위상이 따라잡은 것으로 추측된다. 또 하나 관찰할 수 있는 것은 고주파의 경우 기화 율의 위상이 저주파의 경우보다 늦어져 위상 차가 거의 없어진 것이다. 이것은 고주파의 경우 액적 표면의 온도를 더 많이 올려 저주파의 경우보다 열이 기화하는데 덜 쓰이기 때문에 기화 율의 위상이 낮아진 것이다.



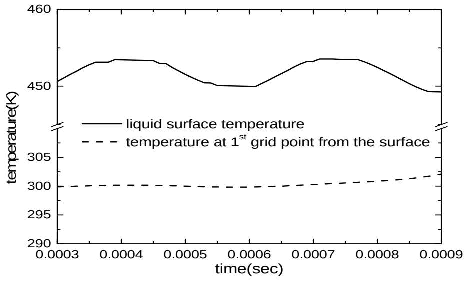
(a) $f = 3000Hz$



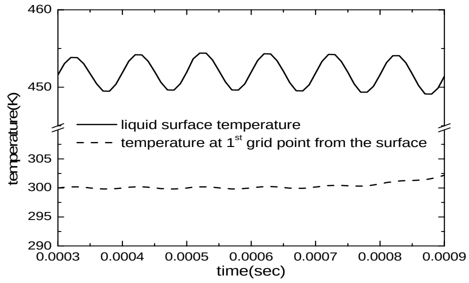
(b) $f = 10000Hz$

Fig. 4 Temporal variations of pressure and droplet vaporization rate fluctuations, n-pentane/air system ($50atm$)

Fig.5 은 액적 표면과 액적 표면에서 안쪽으로 첫 번째 격자 점에서의 온도를 시간에 따라 나타낸 것이다. 액적 안쪽의 온도는 저주파일 때나 고주파일 때나 거의 변화가 없지만, 액적 표면에서의 온도는 고주파일 때 온도 변화가 심한 것을 알 수 있다. 이것은 고주파일 때 액적이 열을 표면만으로 받고 내부로 잘 전달하지 않는다는 것을 의미한다. 또한 액적의 열 관성이 큰 것을 뜻하고, 이는 기화 율의 위상을 늦추는 중요한 인자가 되는 것이다.



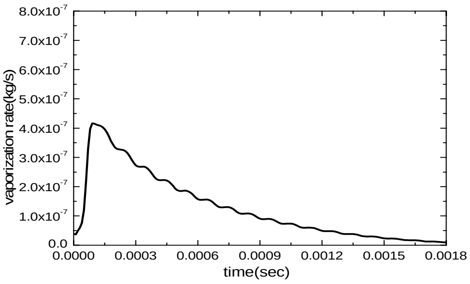
(a) $f = 3000Hz$



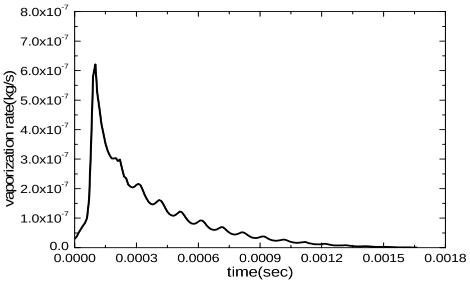
(b) $f = 10000Hz$

Fig. 5 Temporal variations of temperature at two grid point in the liquid, n-pentane/air system ($50atm$)

이제 평균 압력의 변화에 대한 효과를 알아보기 위해 주파수를 고정시키고 수치 실험한 결과를 살펴보자. Fig.6 에서 볼 수 있듯이, 평균 압력이 높을 때 기화 율의 섭동 량이 커진 것을 볼 수 있는데 이것은 기화를 지배하는 중요한 인자인 기화 잠열이 고압에서 낮고, 변화하는 폭도 커지기 때문이다.(Fig.8(a))



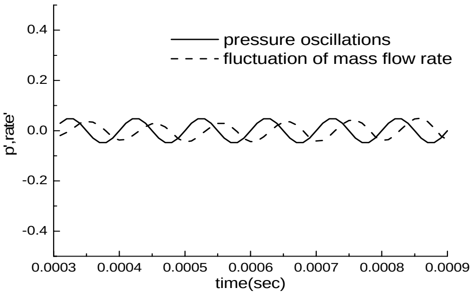
(a) $P_a = 20atm$



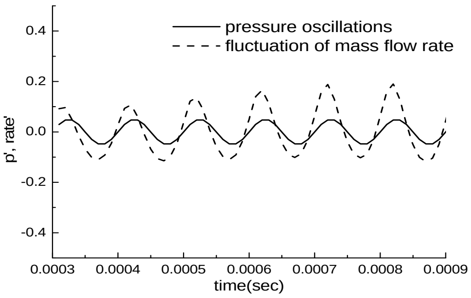
(b) $P_a = 50atm$

Fig. 6 Effect of mean pressure magnitude on vaporization rate (n-pentane/air system, $f = 10000Hz$)

위상의 측면에서 살펴보면 Fig.7 에서 볼 수 있듯이 저압의 경우보다 고압의 경우가 기화 율의 위상이 높아진 것을 확인할 수 있다. 이 현상을 설명하기 위해 다시 한번 액적의 열 관성에 주목한다.



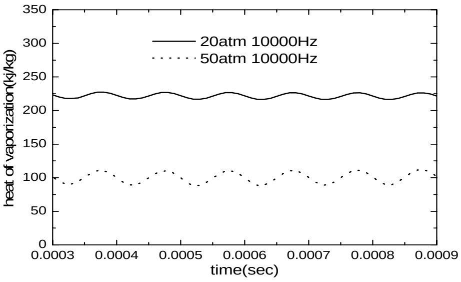
(a) $P_a = 20atm$



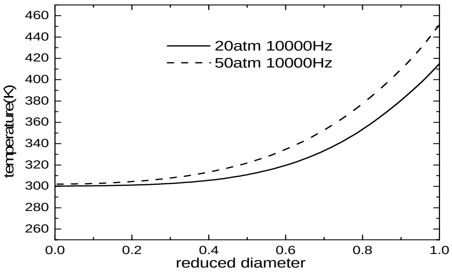
(b) $P_a = 50atm$

Fig. 7 Temporal variations of pressure and droplet vaporization rate fluctuations, n-pentane/air system ($f = 10000Hz$)

Fig.8(b)는 동 시간에서 저압과 고압에서 액적 내부의 온도 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보다시피 고압에서 액적 내부 온도의 구배가 큰 것을 볼 수 있다. 즉 고압의 액적이 열을 내부로 잘 전달 할 수 있는 구조를 갖고 있는 것이다. 그 결과 열 역학적 평형 상태에도 빨리 도달해 기화 율의 위상을 앞 당기는 것이다.



(a) Temporal variations of heat of vaporization in terms of pressure



(b) Temperature profile inside the droplet in terms of pressure at the same time

Fig. 8 Temporal variation of heat of vaporization and temperature profile inside the droplet in terms of pressure

5. 결 론

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

계산 결과 주파수는 연소 응답에 매우 큰 영향을 주었다. 주파수가 높아질수록 기화 율의 섭동량이 커지는데 압력파의 특성시간이 액적의 열관성의 특성 시간보다 월등히 짧은데 그 원인이 있다. 또한 위상도 주파수에 따라 낮아지는데 이는 고주파에서 액적의 열 관성이 커졌기 때문이다.

평균 압력이 연소 응답에 미치는 영향은 고압으로 갈수록 기화 율의 섭동 량이 커지고, 기화 율의 위상을 높인다. 이것은 고압에서의 기화 잠열의 민감성과 고압에서 액적의 열 관성이 감소하는데 기인한다.

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, “Multi-component 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(2nd ed)McGraw-Hill, New York, pp. 64-80