

압력파에 교란된 액적내부에서의 에너지 파동 및 반응 메커니즘

이길용* · 윤웅섭**

Thermal Wave Transfer and Combustion Response of Droplet Perturbed by Acoustic Pressure

Gilyong Lee* · Woongsub Yoon**

ABSTRACT

This study targets to investigate thermal wave transfer in a droplet strongly coupled with acoustic pressure and its effects on combustion response. The one-dimensional vaporization model uses SRK equation of state and flash calculation method to obtain more accurate thermophysical properties and compute vapor-liquid equilibrium. Calculations of an n-pentane droplet exposed into a perturbing nitrogen gas is carried out in terms of different ambient gas pressures and wave frequencies. The thermal wave is transferred more effectively at lower frequencies, which results in the decrease in the amplitude of the response.

초 록

본 연구에서는 기상 압력파동에 구속된 액적 내부의 에너지 파동과 연소응답의 상관관계를 고찰하였다. SRK 상태방정식과 Flash 계산법에 기초한 1차원 액적 기화모델로 기상과 액상의 2상 시스템에 대한 수치해석을 수행하였다. n-Pentane 액적과 기체 질소를 대상으로 기상압력과 압력파동 구동주파수에 따른 에너지 파동의 전파특성을 분석하였다. 액적 내부 에너지 파동의 주파수가 낮을수록 액적 내부로의 에너지 전파가 용이하였으며 결과적으로 연소응답의 크기를 감소시키는 요인이 되었다.

Key Words: Thermal Wave(에너지 파동), Combustion Response(연소응답), Acoustic Pressure(압력 섭동), Droplet Vaporization(액적 기화)

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

** 연세대학교 기계공학과

추진시스템의 고주파 연소불안정은 대상 시스템의 성능 및 호환성을 보장하기 위한 필수불가결한 설계인자이다. 고주파 연소불안정은 해당 추진시스템의 형상 및 열역학적 조건에 의해 결정되는 음향장과 추진시스템 내부의 추진제 연소에 의한 에너지 섭동의 상호 되먹임이 그 발생기구로 알려져 있다. 일반적으로 추진시스템에서 불안정한 음향장을 구동시켜 대상 시스템의 기능과 성능에 영향을 미칠만한 고주파 연소불안정을 발생시키는데 필요한 에너지 수준은 극히 낮으며 추진시스템의 특성상 시스템 내부에는 연소에 의해 발생된 고밀도의 에너지원이 존재한다. 더불어 추진시스템은 한정된 형상을 갖고 있으며 일단 불안정한 음향파동이 구동되면 이를 감쇠시킬만한 자연적인 내부 물리현상이 거의 없다. 이런 이유로 대형화 혹은 고성능화하는 추진시스템의 개발과정에서 고주파 연소불안정의 정확한 예측 및 평가는 해당 시스템 개발의 성패를 좌우하는 요인이 되고 있다.

그러나 현재까지의 연소불안정 연구분야의 기술수준으로는 미소진폭의 불안정 음향파동이 증폭되는 선형 불안정성과 일정 진폭 이상의 음향파동에 의해 구동되거나 혹은 시스템 내부 열역학적 변수의 비선형성에 의해 발생하는 비선형 불안정성을 모두 다루기에는 현실적인 한계가 존재한다. 따라서 대부분의 연소불안정 연구는 선형 혹은 자발적 연소불안정성에 한정되며, 이에 따라 이론적인 연소불안정 연구에서는 해석 대상 물리현상의 선형성을 가정하고 이를 근거로 단순화 과정을 거쳐 최종적으로 연소불안정 지배방정식을 선형화된 형태로 유도한다. 이 과정에서 추진제의 연소와 관계된 항들, 즉 연소응답으로 정의되는 항들은 음향변수들의 조합만으로는 표현이 불가능하기 때문에 음향변수에 대해 단일해를 갖는 연소불안정 지배방정식의 유도를 위해서는 필연적으로 연소와 관련된 섭동량에 대한 모델이 필요하다. 물리적으로도 연소응답은 2상간 파동형태의 에너지 전달구조에 지배되는 현상이므로 시스템 내부 유동장의 특성과는 독립적인 관계에 있다.

현재까지 실험적 연구와 이론적 연구 그리고 수치적 연구 등을 통해서 액체추진제에 대한 다양한 연소응답 모델이 제시되었다. 초기의 모델들은 액적의 비정상 연소이론에 기초하여 강한 외부 압력섭동에 구속된 액적의 연소응답을 해석하였다. Strahle[1]은 대류환경에서 미소섭동의 영향을 고려한 액체추진제의 연소응답 모델을 제시하였다. Heidmann과 Wieber[2]은 기화과정이 지배적이라는 가정에 바탕을 둔 액적 연소이론에 기초하여 2상간 되먹임 구조의 공명조건을 제시하였다. Allison과 Faeth[3]은 액상 단일추진제의 연소에 대한 연구를 바탕으로 연소응답 모델을 제시하였다. Tong과 Sirignano[4]는 비정상 전달현상에 대한 모델을 정립하였고 불안정 액적 기화현상이 고주파 연소불안정의 주요 발생기구라는 결론을 도출하였다. 이외에도 수치적인 연구방법을 사용하여 Hsieh 등[5]과 Lafon 등[6]은 기존의 이론적 액적 기화연구에서 한계로 지적되어 온 고압효과가 중요한 압력 범위에서의 액적 기화모델을 제시하고 이를 바탕으로 연소응답을 수치적으로 계산하였다. 하지만 위에 언급한 연소응답 모델들은 2상간 전달 현상에 대한 체계적인 이해의 부족 때문에 필연적으로 단순화와 가정에 따르는 한계를 수반하고 있다.

본 연구에서는 n-Pentane 액적과 질소 기체의 2상 시스템을 대상으로 강한 압력파동에 구속된 액적 내부 에너지 파동의 전파특성 고찰을 통해 에너지 파동과 Open-Loop 연소응답의 상호관계를 규명하고자 한다. 특히 2상간 되먹임 구조에서 물리적으로 음향파동으로부터 액상으로의 에너지 전달량에 해당하는 Open-Loop 연소응답의 진폭에 대한 액적 내부 에너지 전달구조의 영향에 주목하고자 한다.

2 수치기법

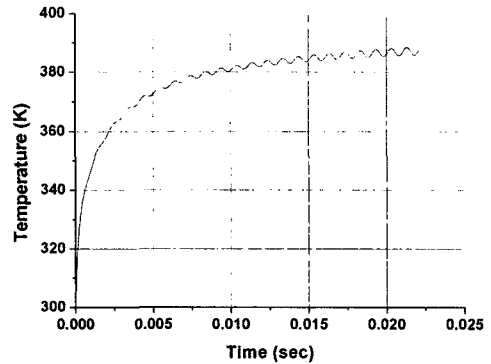
본 연구에서는 기상과 액상의 2상 시스템 해석을 위해 1차원 액적 기화모델[8]을 도입하였다. 수치코드에 Flash 계산법과 SRK 상태방정식

을 채용하여 2상간 상평형 경계 및 관련 물성치를 보다 정확하게 계산하도록 하였으며 궁극적으로는 고압효과를 고려함으로써 추진시스템의 작동압력 범위에 제한이 없는 액적 기화모델을 제시하였다. 액적 기화에 대한 수치해석은 일차적으로 Flash 계산법을 통해 2상간 상평형 경계에서의 열역학적 물성치들을 구한 후 이를 경계조건으로 하여 액상과 기상영역에 대한 수치해를 각각 구하도록 하였다. 액적 기화에 대한 지배방정식 시스템의 유도과정에서 대류효과, 중력의 영향, 점성소산항, 복사에너지 및 화학반응에 의한 항들은 무시하였다. 액상과 기상 각각의 영역에 대해서는 내재적인 2중시간기법과 예조건화기법을 사용하여 열역학적 변수들을 구하였다. 본 연구에서는 Open-Loop 연소응답으로 연구범위를 한정하였으므로 2상간 에너지 되먹임 과정 중 기상에서 액상으로의 에너지 전달과정에만 주목하였으며 이에 따라 외부 기상의 음향파동은 $p' = \bar{p}(1 + \hat{p}\sin\omega t)$ 와 같이 인위적인 조화함수로 설정하였다.

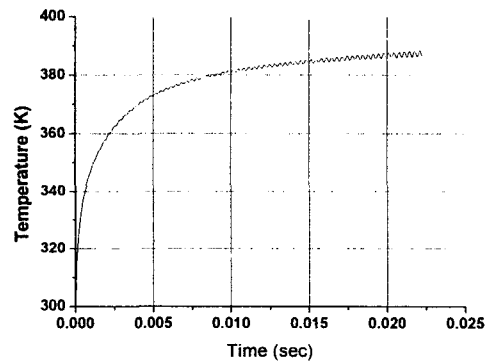
3. 연구결과

본 연구에서는 다음과 같이 해석대상 시스템을 설정하였다. 액상과 기상의 2상 시스템은 300 (K)의 n-Pentane 액적과 1500 (K)의 질소로 구성하였다. 액적의 초기직경은 200 (micron)으로 정하였고 기상 압력파동의 진폭은 기상 평균압력의 5%로 하였다. 기상의 압력과 기상 압력파동의 구동주파수는 각각 15, 30, 45 (atm)과 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 (Hz) 범위의 값으로 하였다. 액상과 기상에 각각 200개의 격자점을 설정하되 액상의 경우에는 균등하게 분포시켰고 기상의 경우에는 기액 경계점에 집중되도록 지수적으로 배치하였다.

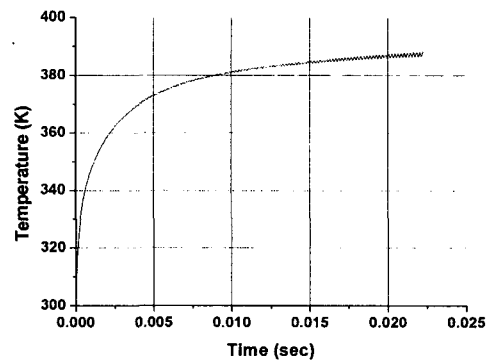
Figure 1은 기상 압력파동 구동주파수 변화에 따른 액적 표면 부근 특장위치에서의 온도변화 추이를 나타낸 것이다. 온도변화량을 시간평균성분(DC)과 섭동성분(AC)으로 구분하면 온도변화



(a) 1000 (Hz)



(b) 3000 (Hz)



(c) 5000 (Hz)

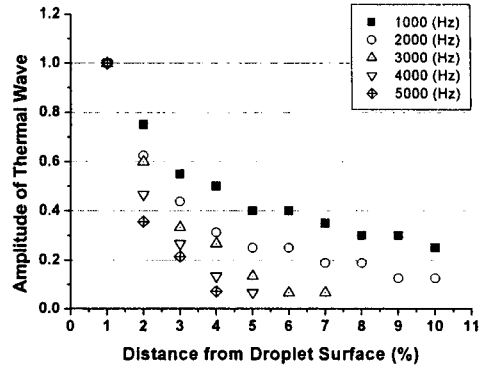
Fig. 1. Droplet Surface Temperature

의 시간평균성분은 압력파동 구동주파수와 무관하게 거의 유사한 값을 갖는 반면 섭동성분은 음향파동 구동주파수의 증가에 따라 그 진폭이

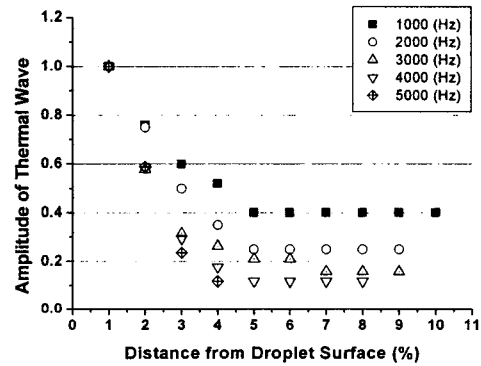
감소하는 경향을 보인다. 음향파동에 의한 섭동의 유무에 관계없이 시간평균성분에 해당하는 비정상 액적 거동은 거의 변화하지 않고 일정하게 유지되므로 기상 음향파동에 의해 액적으로 전달되는 음향에너지는 오로지 에너지 파동 혹은 온도섭동의 형태로만 액적 내부로 전달된다. 따라서 결과적으로 기상에서 액상으로 전달되는 전체 음향에너지는 액적 표면에서의 기화를 섭동을 유발하는데 사용되는 에너지와 액적 내부로 전달되는 에너지 파동에 해당하는 에너지의 합과 같게 된다.

Figure 1에 나타난 에너지 파동의 전달특성을 보다 상세히 고찰하기 위해서 액적 내부 특정 격자점에 대해 구한 온도섭동의 진폭을 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2(a)~(c)의 가로축은 액적 표면으로부터 해당 격자점까지의 거리를 시간에 따라 변화하는 액적 반경의 값으로 나누어 무차원화한 값이고 세로축은 각 지점의 온도섭동 진폭을 액적 표면에서의 온도섭동 진폭으로 나누어 무차원화한 값이다. 외부 기상의 평균압력이 같은 경우끼리 비교해 보면 기상 음향파동 혹은 액적 내부 에너지 파동의 주파수가 낮을수록 그 주파수가 높을 때보다 온도섭동의 진폭이 크게 나타났으며 에너지 파동이 액적 중심부로 보다 더 깊이까지 전달됨을 알 수 있다. 다시 말하면 이는 기상 압력파동 혹은 액적 내부 에너지 파동의 주파수가 낮은 경우에 그 주파수가 높을 때보다 더 많은 에너지가 에너지 파동의 형태로 액적 내부로 더 깊이 전달됨을 의미한다.

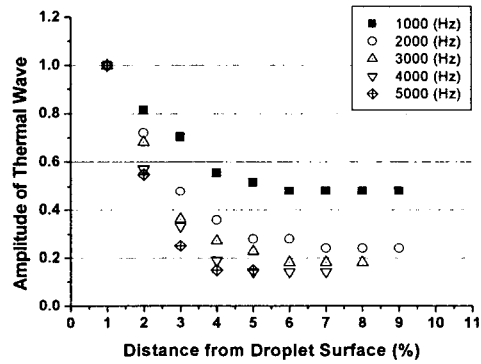
Figure 3은 Fig. 2의 에너지 전달 특성이 액적 기화를 고려한 경우에만 해당하는 것인지를 확인하기 위해서 액적 기화를 배제하고 액적 표면에서 각각 2 (°C)의 동일한 온도섭동을 가하였을 때 액적 내부로의 에너지 파동 전파를 계산한 결과이다. 이 때 액적 내부의 평균온도는 각각 300, 390 (K)으로 일정하게 설정하였다. Fig. 3의 결과로부터 액적의 온도는 에너지 파동의 전달 특성인 열에너지 파동의 감쇠율이나 상대적인 열에너지 파동 전달 영역의 깊이 등과 큰 관계가 없는 것으로 나타났다. 전체적으로 주파수가



(a) 15 (atm)



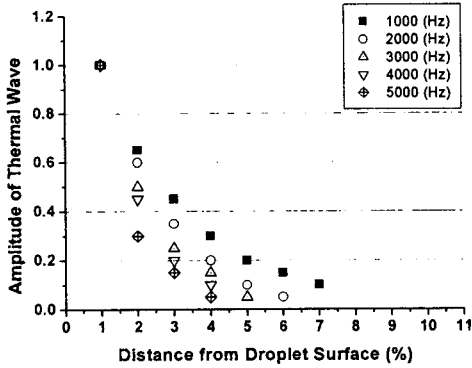
(b) 30 (atm)



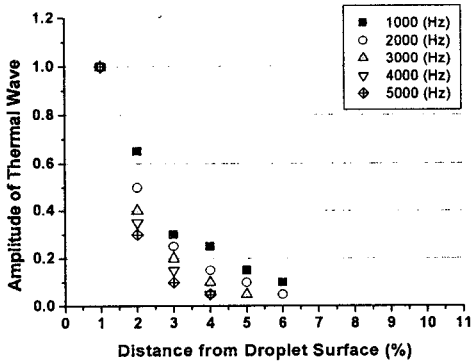
(c) 45 (atm)

Fig. 2. Thermal Wave Transfer

낮은 에너지 파동이 주파수가 높은 에너지 파동보다 덜 감쇠되고 액적 중심방향으로 보다 효과적으로 전달되는 경향을 보였으며 이 점은 액



(a) Droplet Temperature : 300 (K)



(b) Droplet Temperature : 390 (K)
Fig. 3. Thermal Wave Transfer

적 기화를 고려한 경우의 결과와 동일하다. 다만 Fig. 2와 Fig. 3의 상대적인 에너지 파동 전달 영역의 깊이를 비교하였을 때 주파수가 낮은 에너지 파동의 경우(1000, 2000 (Hz)의 경우)에 기화 과정을 고려한 경우와 다소 차이를 보이는 반면 상대적으로 주파수가 높은 에너지 파동의 경우에는 별 다른 차이가 없었다.

Kim[9]이 연구결과에서 보고한 바와 같이 외부 기상 압력파동의 구동주파수와 액적 표면에서의 각종 물성치, 예를 들면 기화열 등의 섭동 진폭은 서로 무관하다. 즉 액적 표면에서 기화열 섭동의 진폭에 영향을 미치는 인자들의 섭동은 압력파동의 주파수와 무관하다. 따라서 액적 표면에서 기화열 섭동의 크기에 영향을 미치는 요인들은 구동주파수에 상관없이 동일하게 유지되

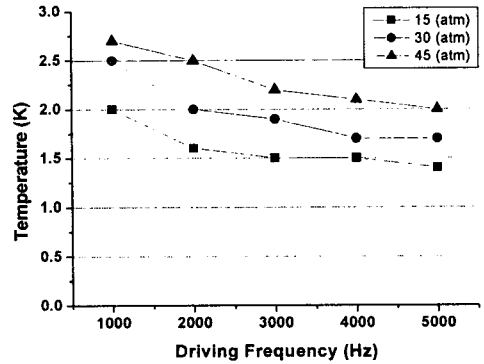


Fig. 4. Initial Amplitude of Thermal Wave

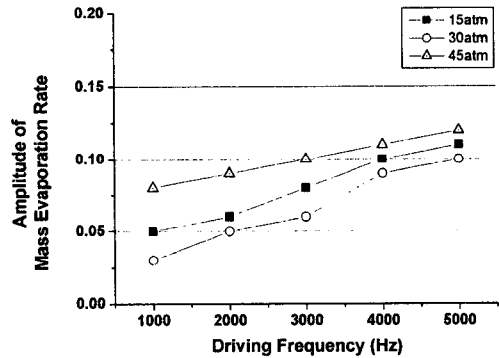


Fig. 5 Magnitude of Combustion Response

므로, 이를 바탕으로 Fig. 1~3에 나타낸 결과를 종합하면 기상 압력파동 혹은 액적 내부 에너지 파동의 구동주파수가 상대적으로 낮은 경우가 상대적으로 주파수가 높은 경우보다 기상에서 액적으로 전달되는 전체 음향에너지 중 액적 내부 에너지 파동의 형태로 전달되는 에너지의 비율이 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 액적 온도 섭동의 초기 진폭을 나타낸 Fig. 4에서도 확인이 가능하다. Fig. 4에서는 상대적으로 에너지 파동의 주파수가 낮은 경우에 동일한 격자 위치에서 온도섭동의 진폭이 더 크게 나타나고 있다. 따라서 역으로 저주파 에너지 파동의 경우가 고주파 에너지 파동의 경우보다 기상에서 전달되는 전체 음향에너지 중 상대적으로 적은 양의 에너지만이 액적 기화열 섭동을 유발하는데 사용된다.

결과적으로 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 외부 기상 압력파동의 구동주파수 혹은 액적 내부 에너지 파동의 주파수가 커짐에 따라 음향파동의 영향을 배제한 상태의 액적 기화율로 무차원화한 기화율 섭동의 진폭, Open-Loop 연소응답의 진폭이 증가하는 경향을 갖는다.

4. 결 론

본 연구에서는 강한 기상 압력섭동에 구속된 액적 내부의 에너지 파동과 연소응답 진폭의 상호관계에 대해 고찰하였다. 압력파동에 의해 액적으로 전달된 기상의 음향에너지는 액적 표면에서의 기화율 섭동과 액적 내부로의 에너지 파동을 유발하였다. 액적 내부 에너지 파동은 주파수가 높을수록 내부에서 빠르게 감쇠되며 액적 기화의 유무에 관계없이 유사한 경향을 보였다. 기상 평균압력이 동일한 경우 액적 표면에서의 물성치 섭동량은 거의 동일한 반면 저주파의 경우 고주파에 비해 액적 내부로의 에너지 전달이 용이하므로 음향파동의 구동주파수가 낮을수록 전체 음향에너지에서 액적 내부 에너지 파동으로 전파되는 에너지의 비율은 증가하고 액적 표면의 기화율 섭동에 영향을 미치는 에너지의 비율은 감소하였다. 따라서 외부 기상 음향파동의 구동주파수가 낮을수록 액적 표면 및 액적 내부 온도섭동의 진폭은 크게 나타는데 반해 기화율 섭동의 진폭과 연소응답의 크기는 감소하였다.

참 고 문 헌

1. 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

2. Heidmann, M.F., and Wieber, P.R., "An Analysis of the Frequency Response Characteristics of Propellant Vaporization," NASA TN D-3749, 1994

3. Allison, C.B. and Faeth, G.M., "Open-Loop Response of a Burning Liquid Monopropellant," AIAA Journal, Vol.13, pp.1287-1294, 1975

4. Tong, A.Y. and Sirignano, W.A., "Oscillatory Vaporization of Fuel Droplets in an Unstable Combustor," J. of Propulsion and Power, Vol.5, No.3, pp.257-261, 1989

5. 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

6. Lafon, P., Yang, V., and Habiballah, M., AIAA paper 95-2432

7. W. Yoon and S. Kim, "Responses of Droplet Evaporation to High-Pressure Oscillations," AIAA-2004-1161

8. 이길용, 윤용섭, "강한 압력파동에 구속된 액체 추진제 연소응답의 지배인자," 한국추진공학회 추계학술대회, 2004

9. 김성엽, "Droplet Vaporization in High Pressure Environments with Pressure Oscillations," 연세대학교 대학원 석사논문, 2003