

불안정한 압력파동 섭동에 의한 액체추진제 분무연소 반응

Responses of Burning Liquid Propellant Sprays Perturbed by Unstable Pressure Waves

고 현 · 이길용 · 윤응섭
연 세 대 학 교

액체추진제 로켓엔진 연소실에는 고유모드에 대응하는 음향파동이 내재되며 이러한 음향파동은 연소와의 상호작용을 통하여 불안정한 음향에너지를 공급받아 증폭되며 결국에는 연소불안정 상태에까지 이르게 된다. 이와 같은 불안정한 상태에 이르기 위해서는 연소로부터 되먹임되는 불안정 에너지의 양이 충분히 크고 구동 음향파동에 근접한 위상을 가져야 한다. 이와 같은 구동 메커니즘을 구성하는 상세한 물리적 현상들을 규명하고 예측하기 위한 많은 연구들이 보고되었으며, 이들 중 이론적인 시간 지연 모델을 사용하는 음향적인 방법은 매우 경제적인 반면 연소 현상에 대한 상세한 모사가 생략되어 연소 불안정의 구체적인 원인을 규명하는데 어려움이 있고, 파동 방정식에 의하여 연소실 내부의 파동 에너지 증가를 예측하는 방법은 연소기 내에서의 연소 메커니즘에 대한 고려 없이 연소에 의해 발생하는 에너지만을 포함하는 단점과 선형적인 연소 불안정에만 제한된다는 제한이 있다. 음향장과 커플된 기화반응 모델은 분무액적의 기화 과정이 추진제 연소의 지배과정이라는 가정 하에 연소응답을 기화반응으로 대체하는 방법으로, 역시 단시간 내에 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있으나 기화반응으로부터 음향파동으로의 에너지 되먹임 과정이 배제되어 있어 정확한 결과를 구하기는 어렵다. 이에 대하여 최근에는 전산 모사적인 방법을 사용하는 대규모의 연소장 해석이 가능하여 짐으로써 음향파동에 의한 외란과 에너지 되먹임과정을 모두 포함하여 수치적인 방법을 사용하여 계산하는 액체추진제 로켓엔진의 고주파 연소불안정 해석방법들이 제시되고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 수치적인 연소불안정 해석방법의 하나로 이중시간 전진기법을 이용하는 예조건화 Navier-Stokes 방정식과 액적의 운동을 Lagrangian 운동 방정식으로 표현하는 전산모사적인 방법을 사용하는 연소 불안정 해석방법을 시도하였다. 액적의 기화 모델로는 무한 전도도 모델, 분무모델로는 난류의 영향을 고려하지 않는 DDM 모델을 사용하였으며, 2차원 및 3차원 분무연소장에서의 불안정한 압력파동 섭동에 의한 연소불안정을 고찰하였다. 고주파 연소불안정 메커니즘의 이해를 목적으로 메탄올과 n-decane을 연료로, 산화제로는 공기를 사용하는 원통형의 축대칭형 연소기를 계산하여 불안정한 압력파동에 의하여 외란된 액적들의 기화율과 궤적 변화를 고찰하였다. 또한 보다 실제적인 현상을 모사하기 위하여 haptane-air 추진제 조합을 사용하는 대형 연소기 내부에서의 3차원 분무연소장을 계산하였고, 비선형적으로 가하여진 강한 압력파동에 의하여 외란된 분무연소장의 불안정화를 고찰하였다.

연구 결과, 화염 중심부 고밀도의 액적들이 압력섭동에 강하게 반응하고 이에 따른 기화율의 증가로 인하여 연소가 활성화되는 것으로 나타났다. 또한 연소가 배제된 순수한 액적의 기화는 연소의 불안정화에 거의 영향을 주지 못하며 압력파동에 의해 외란된 액적들의 동적 거동에는 또 다른 고유모드가 발생하는 것으로 나타났다.