

연소실 내부 비선형 파동의 불안정 증폭

이길용, 윤웅섭

연세대학교 기계공학과

(E-mail : koala33@nownuri.net)

액체 추진제 로켓 엔진의 연소 불안정은 주요 설계인자이며 로켓 엔진 개발의 주된 장애요인이다. 하지만 연소 불안정은 구동 메커니즘 및 연소와 관련된 물리 현상에 대한 연구 부족으로 주로 경험적 방법 혹은 시행착오를 거쳐 해결해 왔다. 이론적 방법은 수식화 과정과 그 적용에 있어 불합리한 가정과 근사화 과정을 사용하기 때문에 치명적인 한계를 갖는다. 그리고 수치적 방법은 연소 불안정 관련 현상의 세부 모델링 과정에 문제가 있다.

이론적 해석 방법은 다수의 연구 그룹에서 사용해 왔다. 이론적 방법은 주로 주파수 영역으로 표현한 지배 방정식과 연소 반응 개념을 적용한 특정 음향 모델에 기초하였다. Crocco는 감용 시간 지연과 압력 간섭 지수를 도입하였다. Mitchell은 Crocco의 시간 지연 모델을 수치적인 방법으로 확장시켰다. Culick은 유동 변수의 비정상 증폭의 연구를 위해 일반적인 음향 모델을 제시하였다. Culick은 파동 방정식에 기초하고 섭동 이론과 각 변수의 공간에 대한 조화적 분포 가정을 적용하여 선형 및 비선형 해석을 위한 지배 방정식을 유도하였다. 그러나 Culick은 연소 불안정의 되먹임 과정을 완전히 고려하지 못했으며 내부 열원에 의한 음향장의 변화에만 주목하였다. Yang 등은 Culick의 이론을 음향 고유 모드와 한계 사이클 존재에 관한 연구에 적용하였다. 이론적 해석 방법들은 불안정 현상에 대한 기본적인 특성 해석 결과를 제시하는 반면 지나치게 단순한 연소 모델, 유동 변수 분포의 불합리한 설정, 특정 모드로의 분해 등의 문제로 지배 방정식의 유도 및 그 적용 등에 있어서 치명적인 한계를 갖는다.

수치 계산에 기초한 수치적 방법은 연소 불안정의 구동 메커니즘 및 세부 연소 과정의 모델링에 중점을 둔다. T'ien과 Sirignano는 액적의 열관성에 따른 시간 지연을 주요 불안정 메커니즘으로 제안하였다. Habiballah 등은 2차원 Navier-Stokes

방정식을 사용하여 수치적 모델의 타당성을 입증하였다. Dubois와 Habiballah는 이 모델을 통해 수동 제어 기기가 안정성에 미치는 영향을 연구하였다. Liang 등은 세부 연소 과정에 대한 발전된 모델을 제시하였다. Litchford와 Jeng 및 Kim 등은 2차원 환경 연소기 모델을 사용하여 다양한 작동 조건과 분무 연소의 영향을 연구하였다. Yoon과 Chung은 ECI(Entropy Controlled Instability) 이론을 제안하고 난류, 비선형 현상 및 엔트로피 변화가 연소 불안정에 미치는 영향을 연구하였다. 수치적 방법의 타당성은 시뮬레이션의 정확도와 계산 능력에 의해 결정된다. 하지만 대다수의 수치적 연구들은 간략화한 모델과 형상에 한정적으로 적용되고 공통적으로 비정상 시뮬레이션을 위해 과도한 수치 계산이 필요하다.

본 연구에서는 증폭 계수 개념과 이에 대한 지배 방정식의 유도를 통해 새로운 불안정 해석 기법을 제안하였다. 해석 기법을 다양한 시스템에 적용하여 이론적 타당성을 입증하고 연소 불안정 및 연소실 내부 비선형 파동 연구의 기초를 확립하였다. 밀도, 속도 성분, 압력 등의 증폭 계수에 대한 상미분 방정식 형태의 지배 방정식은 섭동 이론 등을 사용하여 기상의 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도하였다. 지배 방정식에 사용되는 모든 변수와 관련 물성치는 이론해 혹은 정상 및 비정상 상태의 수치해를 이용하였다. 증폭 계수에 대한 지배 방정식에 수치적인 시뮬레이션의 결과를 적용하여 비선형 파동의 불안정 증폭을 연구하였다. 수치해를 사용하여 불합리한 변수 분포 가정 등 이론적 방법의 가정과 한계를 극복하고 정상상태 및 특성 시간의 비정상 수치해만을 이용하여 과도한 계산 부하에 따른 수치적 문제 해결의 가능성을 제시하였다. 각 증폭 계수의 상호 관계와 시간에 따른 변화를 기초로 해석 대상 시스템의 전체적인 불안정 특성을 연구하였으며 특정 시스템에 대한 증폭 계수의 선형 및 비선형 거동 특성도 연구하였다.