

액체로켓 엔진 불안정 음향 파동의 비정상 거동 예측

윤웅섭*, 이길용*, 김학규*, 김영목**, 손채훈**

*연세대학교 대학원 기계공학과, **한국항공우주연구원

(e-mail : wsyoon@yonsei.ac.kr)

본 연구는 액체 로켓엔진 불안정 음향파동의 비정상 거동에 대한 직접적·정량적 예측을 위한 새로운 해석방법의 이론적 타당성 입증과 적용예의 제시를 목적으로 한다. 본 연구에서는 유동변수의 모드별 증폭계수를 도입하고 새롭게 정의하였다. 선형 균질 음향장에 대한 파동방정식에 기초하였으며 모드별·변수별 증폭계수에 대한 비선형 상미분방정식 형태의 지배방정식을 유도하였다. 섭동이론을 사용하여 유동변수를 시간에 대한 평균량과 섭동성분으로 구분하였다. 시간에 대한 평균량은 수치적으로 계산하였고 섭동성분은 조화적으로 가정하였다. 시간에 따른 유동변수의 섭동성분은 초기 유동변수의 공간적 분포와 모드별 증폭계수들의 곱의 선형조합으로 설정하였다. 각 유동변수 섭동성분의 초기 분포는 선형 파동방정식의 고유모드에 대한 수치해로 대체하였다. 이것은 단순화한 형상에서의 이론적인 고유값과 고유모드를 사용하고 유동변수 사이의 인위적인 관계식에 기초하여 섭동성분을 가정하는 기존의 해석적 연구방법과 대별된다. 모드별 증폭계수에 대한 상미분방정식 형태의 지배방정식의 수치해로부터 각각의 증폭계수들을 계산하였다. 각 유동변수들의 시간에 따른 변화는 수치적으로 계산된 모드별 증폭계수로부터 직접적으로 구하였다. 시간에 따른 유동변수 섭동성분의 변화에 관한 해석결과와 FFT 방법을 이용하여 불안정 음향파동의 구동주파수, 구동모드, 위상관계 등을 구체적으로 확인하였고 각각의 천이도 계산하였다. 최근까지 해석적 방법론에서 사용된 불합리한 가정들을 배제하는 동시에 순수한 전산유체역학적 방법의 적용과정에서 유발되는 과도한 계산부하 등의 문제를 해결하기 위해 본 연구에서 제시한 수치-이론적 해석방법은 선형 균질 파동방정식과 새롭게 유도한 지배방정식의 수치해에 기초하였다. 연구결과, 이론의 타당성은 수치해와 이론해와의 비교를 통해 명확히 입증되었다. 또한 다양한 작동조건 및 매수개변 변화에 따른 불안정 파동 특성의 변화를

고찰하고 이를 실제 로켓엔진의 고주파 연소불안정 특성 해석에 적용함으로써 제시한 방법론의 구체적인 적용예를 보였다. 해석결과, 불안정 음향파동의 비정상 거동은 정성적으로 기존의 연구결과 및 불안정 관련 이론과 일관된 경향으로 나타났다. 초기 압력섭동량, 압력 및 속도의 연소반응함수, 연소율 및 2상간 상대속도 등의 매개변수에 대한 음향파동의 거동 특성에 대한 예측 결과도 물리적으로 타당한 것으로 평가되었다.