

Ludwig tube에서 발생하는 응축충격파 거동의 예측

백승철*, 권순범*, 김희동**

*경북대학교 기계공학부, **안동대학교 기계공학부

(E-mail : kimhd@andong.ac.kr)

라발노즐에서 급속하게 팽창하는 습공기 유동의 비평형 응축과 같이 열전달이 포함된 초음속 유동은 지난 40년 동안 상당한 관심을 받아왔다. 일반적으로 초음속 유동장에서의 열 부가과정은 비정상 파동 운동을 수반한다. 응축에 의한 잠열의 방출량이 어느 임계치를 넘으면 유동불안정성이 발생한다. 노즐에서의 유동불안정성은 응축충격파의 운동과 밀접한 관계가 있고, 기기의 소음과 진동문제를 야기한다. 비평형 응축에 의한 노즐유동의 복잡한 주기적 거동을 이해하기 위해 이전의 수많은 연구가 수행되었지만, 응축충격파의 시간 의존적 거동과 응축충격파로 인한 에너지 손실에 대해서는 충분히 밝혀지지 않은 상태이다.

짧은 지속시간을 가지는 초음속 풍동의 일종인 Ludwig 관(혹은 관 풍동)은 노즐 유동에서 응축에 의한 열전달 과정을 연구하기 위해 오랫동안 사용되어왔다. 이 Ludwig 관은 여러 가지 초기온도에서 초기습도와 압력을 변화시킴으로써 유동을 용이하게 제어할 수 있는 장점이 있다.

Matsuo 등은 하류 격막식 Ludwig 관을 사용하여 실험을 수행하여 상류유동 물성치와 노즐의 기하학적 형상으로부터 비정상 주기적 유동의 무차원 주파수를 구하였다. 그러나, 실험적 한계로 인해 Ludwig 관에서의 시간 의존 비평형 응축과 관련된 유동장은 현재까지 자세히 밝혀지지 않은 상태이다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 본 연구에서는 전산유체역학(CFD)을 통해 전체 유동장뿐만 아니라 실험에서 쉽게 밝히지 못한 비정상 유동도 잘 구명하고자 한다. 즉, Ludwig 관에서 비평형 응축과 관련된 유동의 불안정성을 예측하기 위해 2차원, Navier-Stokes 방정식을 사용하여 하류 격막식 Ludwig 관을 해석하였다. 계산에서 액적 성장 방정식은 지배 방정식과 합쳐졌고, 2차 오더 fractional time step의 3차 오더 MUSCL type TVD 한 차분법을 사용하여 수치적으로 풀었다. 또, Baldwin-Lomax 난류모델을 사용하였

다. 계산결과와 하류격막식 Ludwig 관을 사용한 이전의 실험결과를 비교하여 나타내었다. 본 수치계산결과를 Fig. 1로부터 Fig. 3에 나타내었다.

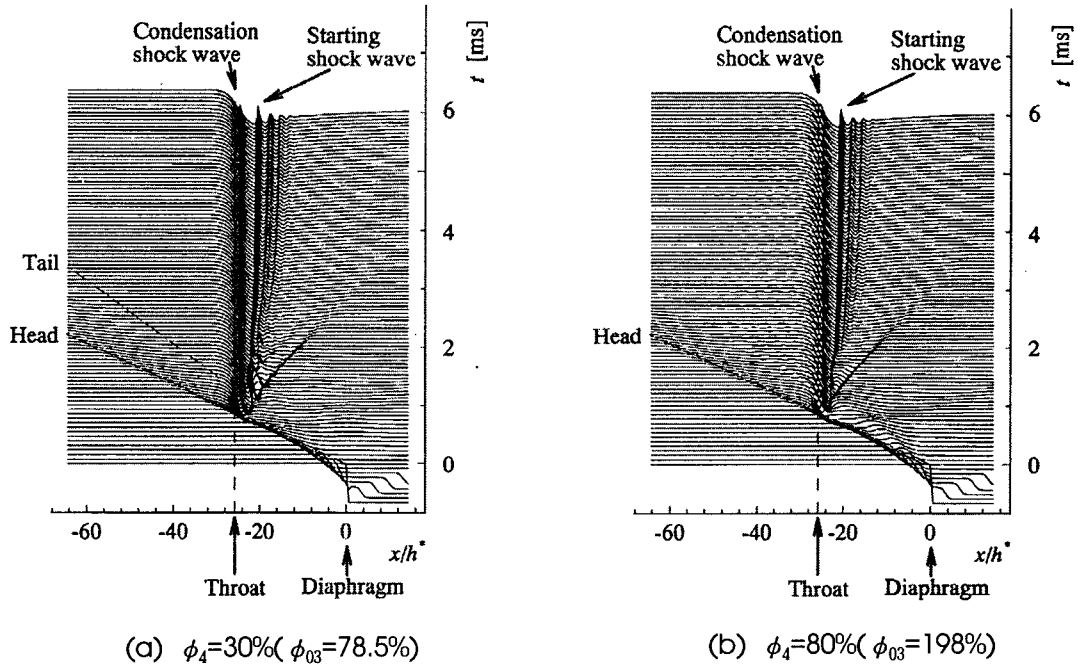


Fig. 1 Wave diagram of the Ludwig tube flow

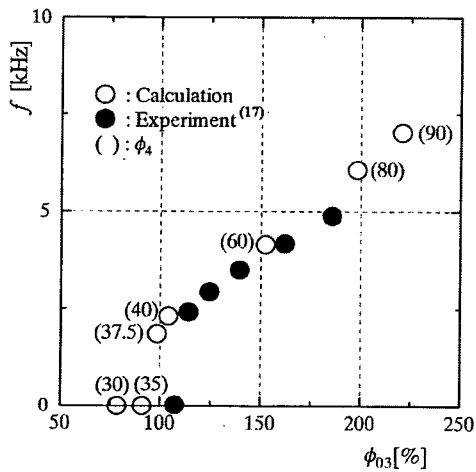


Fig. 2 Relationship the periodic motions of condensation shock wave and initial relative humidity

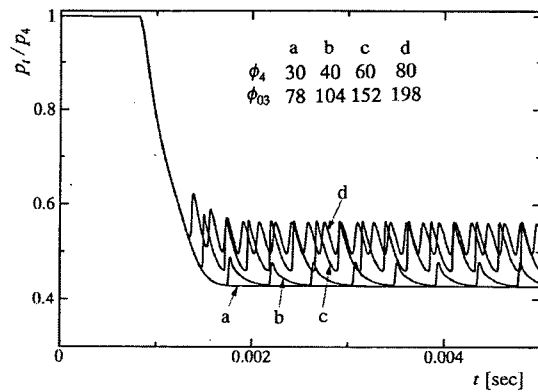


Fig. 3 Time histories of static pressures at nozzle throat