

# 고고도 모사용 초음속 디퓨저의 설계인자 및 작동인자에 대한 연구

윤상규\* · 김진곤\* · 성홍계\* · 김용욱\*\* · 오승협\*\*

## Study on Design- and Operating- Parameters of Supersonic Exhaust Diffusers Simulating high Altitude

SangKyu Yoon\* · JinKon Kim\* · HongGye Sung\* · YongWook Kim\*\* · SeungHyup Oh\*\*

### ABSTRACT

A engineering analysis has been conducted to study operating characteristics of a supersonic exhaust diffuser simulating high altitude atmosphere from a flow-developing point of view. Emphasis is placed in the detail flow structure resulting from several design- and operating- parameters of the diffuser such as the area ratios of a exhaust nozzle to the diffuser, the vacuum chamber size, and jet pressure.

### 초 록

고고도 모사용 초음속 디퓨저의 설계 및 작동인자에 대한 영향을 파악하기 위하여 압축성 축소칭 Navier-Stokes 방정식 기반의 two-layer  $k-\epsilon$  난류 수치해석과 실험 결과를 비교 분석하였다. 디퓨저의 설계 및 작동인자인 노즐과 디퓨저의 면적비, 진공챔버의 크기, 제트의 공급압력에 대한 디퓨저내 유동 발달과 디퓨저 작동 특성을 살펴보았다.

Key Words: Supersonic Exhaust Diffuser(초음속 디퓨저), Vacuum Chamber Pressure(진공챔버압력), Diffuser Design Parameters (디퓨저 설계인자), Space Launcher (우주 발사체)

### 1. 서 론

우주발사체와 같이 광범위한 고도 환경 하에서 작동하는 추진기관의 경우 지상 연소시험 시 노즐에서의 유동박리현상 때문에 정확한 추력성능을 검증하는 것이 매우 불확실하다. 따라서 지상에서 고고도 환경을 모사할 수 있는 고고도 모사 실험 장치를 필요로 한다. 고고도 모사 실험

장치에는 이젝터와 초음속 디퓨저가 있는데, 초음속 디퓨저는 매우 간단하게 일정고도를 모사할 수 있다. 초음속 디퓨저는 로켓모터 배기가스의 빠른 제트를 디퓨저 벽면에 살짝 부딪히게 하고, 디퓨저의 통로로 고속으로 분출시킴으로 노즐 주위의 압력을 떨어뜨린다. 이러한 방법만으로도 약 20km의 고도에 해당하는 대기압(약 0.1기압)까지 고도모사가 가능한 것으로 알려져 있다[1,2]. 초음속 디퓨저는 시동을 시키기 위한 별도의 장치가 없으므로 구조가 간단하고, 비교적 저렴하다는 장점을 가지고 있으나, 로켓 배기

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 한국항공우주연구원 추진기관 체계그룹  
연락처, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

가스의 모멘텀 만으로 진공환경을 구현하므로 고도 모사에 한계가 있고, 시동 특성이 모터 작동 환경에 영향을 많이 받는다는 단점이 있다.

본 연구에서는 초음속 디퓨저의 설계인자들이 디퓨저 작동특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수치해석을 수행하였으며, 공급압력과 진공 챔버의 크기, 디퓨저 면적비에 대한 디퓨저 작동 특성을 실험결과와 비교 하였다.

## 2. 수치기법

축대칭 Navier-Stokes 방정식에 Two-layer  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용하였다. 벽면 근처를 제외한 영역에서 높은 레이놀즈수 난류유동에 제안된 standard  $k-\epsilon$  model를, 점성이 지배적인 벽면근처의 영역에서는 one-equation model에 mixing length를 사용하였다.

수치해석 기법은 임의의 형상 계산을 가능하게 하며, 유한 차분 기법에서 발생하는 metric singularity를 피하기 위한 유한체적기법(FVM)을 사용하였다. 비점성 플럭스 계산을 위해 초음속 유동에서 발행하는 강한 shock에도 수치적 진동과 비선형적인 불안정 문제를 해결하기 위하여 total variation diminishing(TVD) scheme을 사용하였으며, 정상상태 계산을 위해 LU-SGS 기법을 적용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 노즐과 디퓨저 면적비의 영향

Figure 1은 시험모델 디퓨저의 개략도이며 디퓨저의 크기는 Table 1과 같다. 디퓨저의 크기는 고정하고, 노즐목 크기가 다른 노즐을 사용하여 노즐과 디퓨저 면적비에 변화를 주었다. 작동유체는 질소( $\gamma=1.4$ )이며, 실험[4]과 같은 조건에서 계산을 수행하였다.

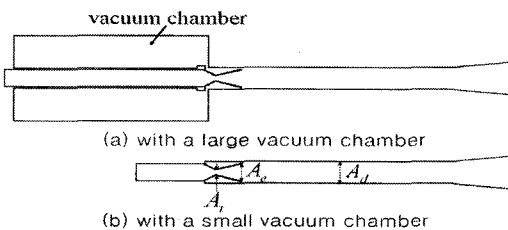


Fig. 1 Schematics of test-model diffusers

Table 1. Dimension of model diffusers

| Vacuum Chamber | $D_t$ | $A_e/A_t$ | $A_d/A_t$ | $L/D$ |
|----------------|-------|-----------|-----------|-------|
| Fig. 1(a)      | 2.8   | 35.02     | 56.25     | 12.38 |
|                | 3.2   | 26.81     | 43.07     |       |
|                | 4.34  | 14.58     | 23.41     |       |
| Fig. 1(b)      | 4.34  | 14.58     | 23.41     |       |

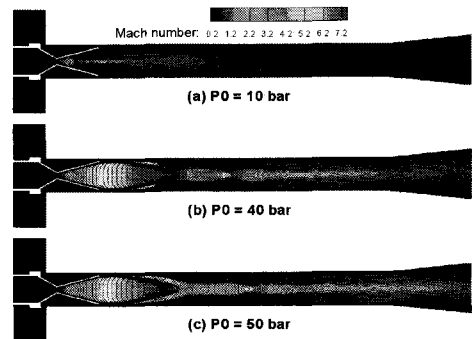


Fig. 2 Mach number contours of diffuser with  $A_d/A_t = 56.25$

Figure 2는 노즐 목이 가장 작은 경우로서 공급압력이 10, 40, 50 기압일 때 각각의 경우에 대한 마하수 분포를 나타낸다. 공급압력이 10 기압일 경우에 배기 제트가 노즐 내부에서 박리되어 디퓨저가 시동되지 못하였으며, 40 기압 일 때 제트가 디퓨저 벽에 부딪히고 디퓨저의 작동이 가능하고, 50 기압에서는 좀 더 강력한 제트의 기류가 발생함을 알 수 있다.

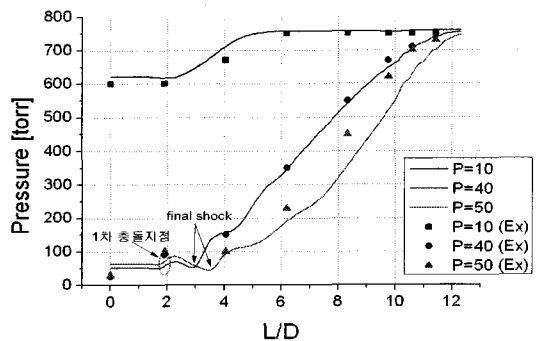


Fig. 3 Pressure distribution along the wall of a diffuser ( $A_d/A_t = 56.25$ )

디퓨저 내부에서의 유동특성을 살펴보기 위하여 디퓨저 벽면의 압력을 도시 하였다. 기호는 실험결과이며 선은 계산결과를 표시한다(Fig. 3). 10 기압에서는 600 torr에서 완만한 압력 상승을 나타내는데, 배기 제트가 디퓨저 벽면에 닿지 못해서 디퓨저가 작동되지 않았음을 의미한다. 40 기압에서는 일차 충돌에 의한 압력 상승이후에 압력 증가가 다소 완만하게 상승됨을 보이고 있는데, 이론 모델[3]에서와 같이 수직 충격파가 전면에서 생성되는 것이 아니라, 일차 충돌후 압력이 상승된 후 일부 면에서 수직 충격파가 생성된 후 제트와 주위 유동과 혼합되어 제트의 유속이 점진적으로 감소되어 압력이 상승되는 것으로 보인다. 50기압으로 증가시키면 40기압에서와 유사한 일차 충돌 현상을 보이고 있으며, 제트의 모멘텀이 40기압 일 때 보다 크므로 일차 충돌 후 압력 상승의 시점이 다소 지연되는 것으로 나타났으며 이는 실험결과와 유사하다.

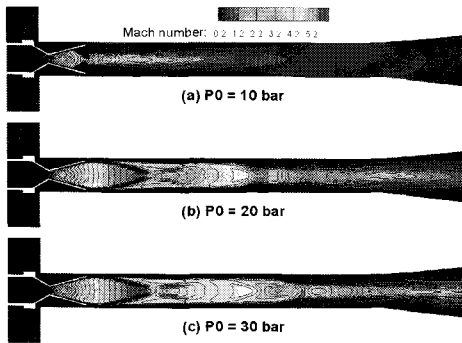


Fig. 4 Mach number contours of diffuser with  $A_d/A_t = 23.41$

노즐목과 디퓨저 면적비( $A_d/A_t$ )의 영향을 살펴 보기 위하여 노즐목의 크기를 증가시켰다 ( $A_t = 4.34 \text{ mm}$ ). 노즐목의 직경을 크게 하면 배기제트의 유량이 증가하고 제트의 모멘텀이 증가하므로, 디퓨저와 일차 충돌시 압력 상승이 크게 나타나고 디퓨저 벽면에서의 압력 증가 시점도 지연되어 면적비가 작은 경우보다 압력이 가파르게 상승하였다(Fig. 4, 5). 노즐 목을 증가시키거나 공급압력을 증가시키에 따라 디퓨저의

작동을 더욱 안정적으로 할 수 있지만, 반면에 hot gas를 방출하는 실제 디퓨저의 경우 제트로 인한 벽면으로의 열전달 상승에 대한 열응력문제를 고려해야 한다.

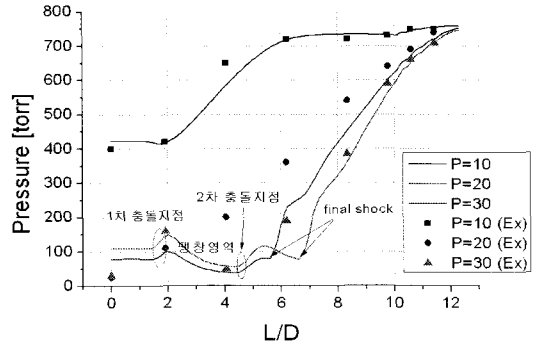


Fig. 5 Pressure distribution along the wall of a diffuser ( $A_d/A_t = 23.41$ )

### 3.2 공급압력에 대한 진공도 변화

공급압력에 대한 진공챔버의 압력 변화를 살펴보기 위하여 Table 1에 표시된 노즐과 디퓨저 면적비가 각각 다른 경우에 대하여 공급압력을 변화시켰다(Fig. 6). 디퓨저가 시동되는 특정압력이 존재함을 알 수 있는데 이는 선행연구 결과와 일치한다[3]. 실험 데이터와 수치 계산결과 모두 시동조건 보다 큰 압력을 제공하더라도 진공챔버 내의 압력에는 변화가 거의 없으므로 디퓨저의 작동특성을 잘 파악하면 경제적인 디퓨저 설계가 가능함을 알 수 있다.

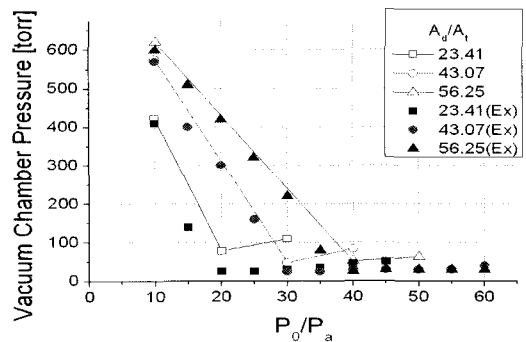


Fig. 6 Variation of vacuum chamber pressure with respect to a jet pressure

### 3.3 진공챔버 크기의 영향

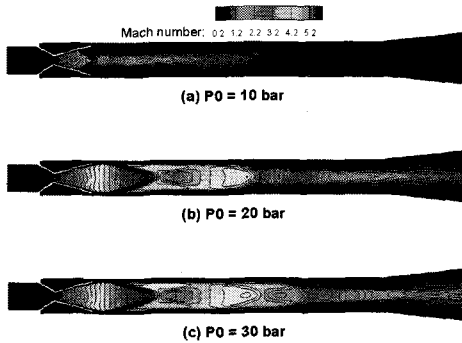


Fig. 7 Mach number contours of diffuser with a small vacuum chamber,  $A_d/A_t = 23.41$

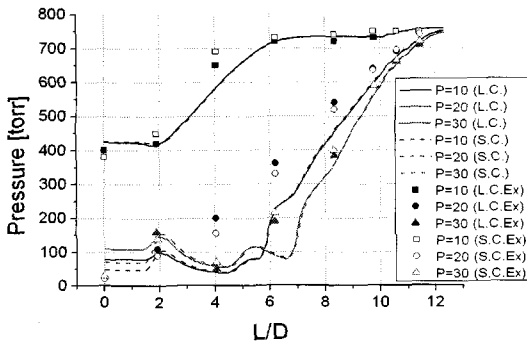


Fig. 8 Comparison of pressure distribution between two diffusers with a small chamber(SC) and a large chamber(LC)

노즐목 직경이 4.34mm 인 경우에 진공챔버의 크기에 따른 디퓨저내 압력 및 작동 특성을 살펴보았다 (Fig. 7, 8). 진공챔버가 작은 경우가 제트로 흡입되어야 하는 공기량이 작으므로 더 낮은 챔버 압력을 제공하고, 보다 빠르게 정상상태에 도달하였다. 공급압력 10기압은 디퓨저 시동 압력보다 낮아 디퓨저 내에서 비교적 완만한 압력 상승을 보이고 있으며, 20기압 이상에서 시동되는 것으로 나타났다. 그러나 제트의 모멘텀의 변화에 대하여 진공챔버의 크기에 대한 영향은 디퓨저 작동특성에 민감하지 않는 것으로 나타났다. 공급압력 20기압일 때 실험값과 계산 값의 오차가 크게 나타났는데, 이는 실험에서 디퓨저가 정상상태에 도달하지 못하였거나, 측정 오차

일 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

디퓨저 설계 및 작동 인자에 대한 디퓨저 작동특성을 연구하기 위하여 축대칭 Navier-Stokes 방정식에 two layer  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용한 수치해석과 실험을 비교 분석하였다.

디퓨저 면적비가 커질수록 요구되는 시동 압력이 커지는 것을 확인하였고, 시동 압력 이상의 압력을 공급하여도 진공도에는 큰 변화가 없다. 또한 노즐목 직경이 커지게 됨에 따라 배기제트의 유량 증가로 인하여 제트 모멘텀이 증가하면 디퓨저 벽면에서의 압력 증가 시점이 지연되어 디퓨저의 작동을 더욱 안정적으로 할 수 있지만, hot gas의 경우 제트로 인한 열응력문제를 고려해야 한다. 진공챔버가 작은 경우가 더 낮은 진공챔버압력을 제공하며, 보다 빠르게 정상상태에 도달하지만 제트의 모멘텀의 변화에 대한 진공챔버의 크기가 디퓨저 작동특성에 민감하지 않는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. C. R. Bartlett, "Why Test Rocket Motors at Simulated Altitude ?," Sverdrup Technology, Inc. AEDC Group.
2. K. Annamalai, K. Visvanathan, V. Sriramulu, K. A. Bhaskaran, "Evaluation of the performance of supersonic exhaust diffuser using scaled down models," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 17, Issue 3, July, 1998, pp.217-229.
3. 윤상규, 김진곤, 성홍계, 김용욱, 오승협, "초음속 디퓨저의 시동특성", 2007춘계학술발표회 논문집, 한국항공우주학회, pp. 984-987.
4. 이양석, 양재준, 고영성, 김유, 김용욱, 오승협, "고공 환경 모사용 디퓨저 설계에 관한 실험적 연구", 우주발사체심포지움, 2007. 2.