# 고고도 모사용 Center Body Diffuser에서의 Center Body의 위치에 따른 시동 특성에 관한 연구

박 진* · 이명원* · 이성훈* · 김홍집*†

# A Study on Starting Characteristics of Center Body Diffuser with Various The Location of Center Body for High Altitude Simulation

Jin Park* · Myeongwon Lee* · Seunghun Lee* · Hongjip Kim*†

ABSTRACT

To simulate a high altitude for rocket at sea level, the test facility should provide a sufficiently low pressure environment. Center Body Diffuser(CBD) is those applied for high altitude simulation test facility. To elucidate the flow characteristics of center body diffuser with various the center body location, numerical analyses using ANSYS FLUENT were performed. The result of this study is deemed to be valuable as a data base for the operation of the Center Body Diffuser.

초 록

고고도용 로켓은 지상에서의 대기압에 비하여 매우 낮은 압력조건에서 작동한다. 따라서 고고도용 로켓 실험을 지상에서 구현하기 위해서는 충분히 낮은 압력환경을 조성해 주어야 한다. 이를 위한 고고도 모사용 실험설비 중 하나인 Center Body diffuser를 작동함에 있어서 Center Body의 위치가 진공도와 시동압력에 미치는 영향을 연구하기 위하여 ANSYS FLUENT를 통하여 수치해석을 진행하였다. 본 연구의 결과는 향후 고고도 모사용 Center Body Diffuser를 운용하는데 있어서 실질적인 Data Base로써 가치가 있다고 판단된다.

Key Words: High altitude simulation(고공환경모사), Center Body Diffuser(CBD), Sub-scale Diffuser(축소형 디퓨저)

## 1. 서 론

고고도용 로켓은 작동 고도의 대기압이 지상에서의 대기압에 비하여 매우 낮은 고고도 환경에서 효율적인 추력 발생을 위해 큰 노즐 팽창비를 갖도록 설계된다. 이러한 노즐이 지상에서 실험되면, 노즐 내부에서 유동박리가 발생하여

* 충남대학교 기계공학과
† 교신저자, E-mail: khongjip@cnu.ac.kr

정확한 성능을 검증할 수 없다. 따라서 고고도용 노즐의 정확한 성능 검증을 위해서는 지상시험에서 충분히 낮은 압력환경을 조성해 주어야 한다. 이를 위해 고고도 환경 모사 지상연소 시험장치가 필요하다.

고고도 환경 모사 지상연소 시험장치 중에 Center Body Diffuser(CBD)는 최신 기술 중 하나로 노즐에서 고속, 고압의 유체를 분사하여 그 유체의 강한 모멘텀을 이용하여 노즐을 감싸고 있는 챔버를 진공에 가까운 압력까지 강하시켜 진공상태를 모사하는 디퓨저의 일종이다.[1] CBD의 기본 형상은 Fig.1에서 보이듯이 디퓨저 내부에 구조물인 Center Body(CB)가 들어있는 형태인데, 연소실험 시 CBD에서만 쓰이는 구조물인 CB가 포함된 새로운 냉각 시스템 구축이 되어져야만 한다. 이 문제를 해결하기 위하여 CBD 내부에서의 열유속, 유동의 거동, 온도구배를 알아야만 한다. 그 이전에 기초적인 CBD 연소 실험에서의 유동의 형상, 압력 회복을 예측하기 위하여 상온조건에서의 수치해석 및 축소실험을 수행하여 그에 대한 기초 데이터베이스를 구축하고자 연구를 수행하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 Center body diffuser 해석 방법

수치해석은 Ansys Fleunt v14.5를 사용하였으며 2차원 축대칭으로 해석을 진행하였다. 난류모델은 $k-\omega$ SST model과 $k-\epsilon$ standard model을 사용하였고 작동 유체는 질소를 사용했다. CB의 수축반각은 선행연구를 참고하여 시동압력이 가장 낮다고 알려진 15°로 고정하였다[2]. 연소실 압력은 선행연구[2]를 참고하여 안정적으로 시동되는 영역인 55 bara에서 해석을 진행하였다.

수렴의 판단 기준은 진공 챔버 안의 유동이 더 이상 빠져나가지 않고 재순환하여 진공 챔버의 압력의 변화가 없을 때 수렴했다고 판단하였다.[1]

CBD의 기본 형상은 Fig. 1과 같이 디퓨저 내부에 구조물인 CB(Center Body)가 들어있는 형태의 디퓨저이다. 본 연구에서 해석에 적용한 디퓨저의 사양은 Table. 1과 같다.[2, 3, 5]

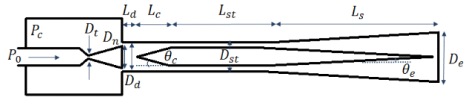


Fig. 1 Schematic model of Center Body Diffuser

Table. 1 Specification of the CBD

| Parameters | | Value |
|---|---|---|
| $D_d$ | Diffuser inlet diameter (mm) | 17.9 |
| $L_d$ | Diffuser inlet length (mm) | 0 |
| $L_{st}$ | Second throat length (mm) | 42.84 |
| $D_{st}$ | Second throat Diameter (mm) | 7.14 |
| $D_e$ | Diffuser outlet Diameter (mm) | 29.6 |
| $L_c$ | Convergence part length (mm) | 20.08 |
| $L_s$ | Divergence part length (mm) | 106.3 |
| $L$ | Diffuser total length (mm) | 169.2 |
| $\theta_c$ | Convergence angle (°) | 15 |
| $\theta_e$ | Divergence angle (°) | 3 |
| $(L/D)_{st}$ | second throat length ratio | 6 |
| $A_n/A_t$ | Nozzle expansion ratio | 44.44 |

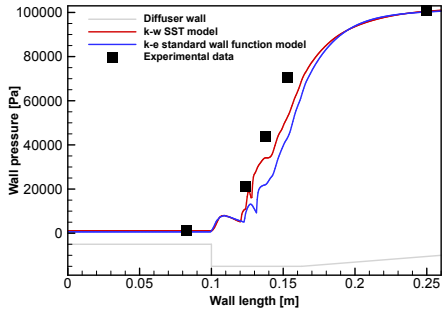


Fig 2. Comparison of k-ω SST model and experimental data along the diffuser wall

Fig. 2는 연소실 압력이 50 bara 일 때의 디퓨저 내벽의 압력 분포를 $k-\omega$ SST model과 $k-\epsilon$ standard model을 사용하여 수치해석한

데이터와 선행연구의 실험에서 측정한 데이터를 비교한 것이다.[6] 디퓨저에서 유동이 빠져나가며 압력이 대기압에 가깝게 회복되는 것을 확인할 수 있고, 실험 데이터와 수치해석 데이터에서 압력회복의 경향성이 일치하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 진행한 수치해석 데이터가 신뢰할 수 있는 데이터라고 판단 할 수 있다.

### 2.2 수치해석 케이스 설정

본 연구에서는 Center body diffuser 운용 시에 CB(Center Body)의 위치가 디퓨저 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수행되었다. 선행연구에서는 $L_b/D_{st}$가 0.28인 지점에 CB를 설치하여 수치해석을 진행하였다. 선행 연구의 결과와 비교하기 위하여 CB의 위치는 노즐 출구에서부터 CB가 위치하는 지점까지의 거리 $L_b$와 2차 목의 직경 $D_{st}$의 비로 무차원화 하여 Table. 2와 같이 케이스를 선정하고 수치해석을 진행하였다.

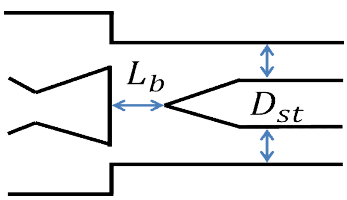


Fig. 2 Location of Center Body

Table. 2 Cases for Numerical study

| | $D_{st}$ [mm] | $(L_b/D_{st})$ |
|---|---|---|
| case #1 | 7.14 | 0 |
| case #2 | | 0.28 |
| case #3 | | 1 |
| case #4 | | 2 |
| case #5 | | 4 |

## 3. 수치해석 결과

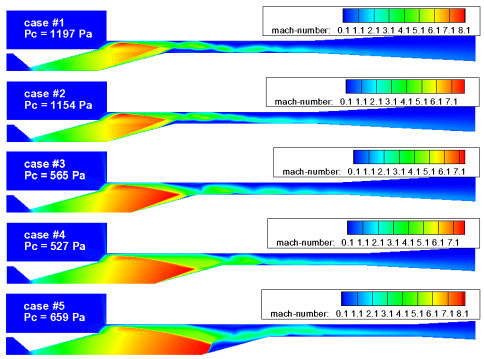


Fig. 3 Mach number contour

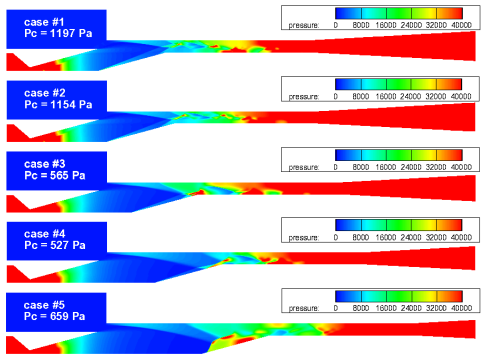


Fig. 4 Pressure contour

Figure. 3과 4는 case#1부터 #5까지의 수치해석 결과의 Mach number contour와 Pressure contour를 보여준다. Mach number contour에서 확인할 수 있듯이 CB가 뒤로 밀려남에 따라 노즐 출구로부터 분사되는 유동의 plume이 후류까지 방해물 없이 형성될 수 있게 된다. 따라서 CB 구조물 상류 영역에 Mach number가 큰 영역의 범위가 늘어나게 되며 CB가 상류에 위치할 경우보다 상대적으로 진공챔버의 압력을 강하시키는 요인인 entrain 현상이 강하게 나타날 수 있다고 판단된다. 그리고 노즐 출구에서 유동이 분사되고 plume이 형성이 되며 plume의 끝단으로 갈수록 Mach number가 커지게 되는데 case#5에서는 CB의 끝부분에 부딪치게 되는 유동의 Mach number가 다른 case에 비하여 상대적으로 커지게되고, 이에 따라 CB 끝부분에서 수직충격파에 가까운 강력한 충격파가 발생하게

된다. CB의 위치가 $2D_{st}$ 밀어진 case#4까지는 발생하지 않던 현상이다. 또 한 가지 특이한 결과는 기존의 CB위치(case#2)에서는 안정적으로 시동되는 범위였던 $P_0 = 55\ bara$ 조건에서 case#3은 시동이 되지 않았다는 것이다. 이는 CB의 위치가 디퓨저의 시동압력에도 영향을 줄 수 있다는 것을 암시한다. 시동된 디퓨저 유동 특성분석을 위해 case#3에서는 $P_0 = 56\ bara$ 로 설정 하고 해석을 진행하였다.

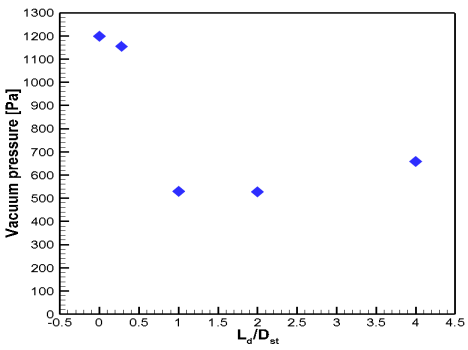


Fig. 5 Vacuum pressure according to location of Center Body

Fig.5 는 CB의 위치에 따른 진공챔버의 압력을 도시한다. x축은 CB의 시작점이 위치하는 지점을, y축은 진공챔버의 압력을 나타낸다. $L_b/D_{st}$가 0에서부터 밀려날수록 진공챔버의 압력은 조금씩 낮아지다가 $L_b/D_{st}$가 0.28 ~ 1 사이에서 진공챔버의 압력이 급격히 감소하는 지점이 있다고 판단된다. 그 이후부터는 $L_b/D_{st}$가 커짐에 따라 진공챔버의 압력이 조금씩 상승한다. $L_b/D_{st}$가 1인 조건인 case#3는 다른 case에 비해 노즐 압력이 1 bar 높게 설정 되었는데 기존에 알려진 바와 같이 디퓨저가 시동된 이후에는 노즐압력이 상승하면 진공챔버의 압력도 조금씩 상승하는 경향을 고려하였을 때, $L_b/D_{st}$가 1 이상일 경우에 CB가 후류에 위치할수록 진공챔버의 압력이 상승하는 경향이 합리적이라고 판단된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 고고도 모사를 위한 Center Body Diffuser에서 CB의 위치에 따른 시동특성, 유동특성을 수치해석을 통하여 분석하였다. CB의 위치에 따라 시동압력이 변하는 것을 확인하였다. 따라서 향후 CB위치에 따른 시동압력의 변화에 대한 연구가 추가적으로 필요하다고 판단된다.

CB의 위치가 노즐출구에서 멀어짐에 따라 진공챔버의 압력은 조금씩 감소하다가 $L_b/D_{st}$가 0.28 ~ 1 사이에서 급격히 떨어지는 구간이 존재한다고 판단하였다. 그 이후인 $L_b/D_{st}$가 1 이상에서는 진공챔버의 압력이 조금씩 증가하는 경향을 보였다.

또한 CB의 위치가 충분히 후류에 위치할 경우 CB의 끝부분에 부딪치는 유동의 Mach number가 매우 커지게 되어서 그 부분에 강력한 충격파가 발생하는 것이 확인되었다.

본 연구의 결과는 고고도 모사용 Center Body Diffuser를 운용함에 있어서 필요한 data base를 형성하는데 도움이 될 것이며, 결론에서 언급되었던 미흡한 부분에 대하여 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

## 참 고 문 헌


1. K. Annamalai a, K. Visvanathan a, V. Sriramulu b, K.A. Bhaskaran “Evaluation of the performance of supersonic exhaust di□user using scaled down models” Experimental Thermal and Fluid Science vol.17, 1998, pp. 217-229
2. 연해인, 유이상, 김완찬, 임지녕, 고영성 “고공환경 모사용 Center Body Diffuser의 시동 특성에 관한 실험적 연구,” 대한기계학회논문집 B권, 제40권, 제2호, 2016.2, pp.93-102
3. 박성현, 박병훈, 임지환, 윤웅섭 “고도모사용 2 차목 초음속 디퓨져 시동특성에 영향을 미

치는 파라미터에 관한 연구" 대한기계학회 2008년도 추계학술대회 논문집, 2008, pp.2642-2647
4. 김태령, 박병용, 김승한, 한영민, "로켓엔진 고공모사용 초음속디퓨저 시동 및 종료 특성과 냉각 효과에 대한 연구" 한국추진공학회 2014년도 추계학술대회 논문집, pp.183-189
5. 김종록, 김재수 "Center-body 디퓨져 형상설계를 위한 수치적 연구" Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers Vol. 18, No. 3, 2014, pp. 34-39
6. 송병철, 김홍집 "고공모사용 Center-body 디퓨져의 형상 변화에 따른 성능 특성에 관한 수치적 연구" 한국추진공학회 2016년도 제47회 추계학술대회 논문집, 2016.12, 68-74