

고고도 모사를 위한 축소형 디퓨저의 성능 특성에 대한 수치적 연구

정봉구* · 임경진* · 조성휘* · 김홍집**† · 전준수*** · 고영성*** · 김승한**** · 한영민****

A Numerical Study on Performance Characteristics of a Subscale Diffuser for High-Altitude Simulation

Bonggoo Jeong* · Kyungjin Yim* · Seonghwi Jo* · Hongjip Kim**† · Junsoo Jeon*** · Youngsung Ko*** · Seung-han Kim**** · Yeoung-Min Han****

ABSTRACT

Performance characteristics of subscale diffuser for high-altitude simulation have been numerically investigated. The length of diffuser entrance with respect to nozzle exit diameter was changed to 0, 50, 100%, respectively. In addition, flow characteristics have been studied for various length to diameter ratio of secondary throat diffuser. As a result, the shape of plume was contracted for insufficient length of diffuser entrance. Also, if the length to diameter ratio of secondary throat diffuser were less than 7 or 8, mach disk has been formed inside the diffuser.

초 록

고고도 모사를 위한 축소형 디퓨저의 성능특성을 파악하기 위해 수치적 연구를 수행하였다. 입구길이를 노즐 출구직경과 비교해 0%, 50%, 100%로 변화시켰고, 디퓨저 목의 길이는 디퓨저 목의 직경과 비교해 3, 5, 7, 8, 12로 다양화하여 수치해석하고 실제 모사실험 값과 비교하였다. 그 결과 디퓨저의 입구길이가 짧아질수록 plume의 형상은 수축되었다. 또한, 디퓨저의 이차목 길이가 디퓨저 지름의 최소 7~8배보다 작으면 내부에 마하디스크가 형성되어 압력의 급격한 상승을 일으킨다.

Key Words: Subscale diffuser(축소형 디퓨저), Supersonic exhaust diffuser(초음속 디퓨저), High-altitude Simulation(고고도 모사), Plume(플룸), Shock train(충격파 트레인)

1. 서 론

* 충남대학교 기계공학과 연소 및 추진 실험실

** 충남대학교 기계공학과

*** 충남대학교 항공우주공학과

**** 한국항공우주연구원 추진시험팀

† 교신저자, E-mail: khongjip@cnu.ac.kr

우주 발사체의 핵심 주요 요소인 추진기관의 모든 부품들은 대기권과 우주 공간에 걸친 여러 가지 환경하에서 작동하기 때문에, 각 부품의 성

능 및 작동 신뢰도를 작동 환경 하에서 확인하는 것이 필수적이다. 비교적 저고도에서 작동하는 로켓엔진의 경우에는 보통 고고도 환경에서의 실험이 중요하지 않으나, 고고도에서 작동하는 상단 로켓엔진의 경우에는 지상시험을 통해 고고도 환경을 재현해야만 한다.

고고도 환경의 낮은 대기압을 조성하는 방법 중 가장 간단한 것은 로켓 배기가스를 디퓨저관을 통하여 대기중으로 분출함으로써 노즐 출구의 대기압을 고고도 환경의 낮은 압력으로 만들어 주는 것이다[1-3]. Fig. 1은 대표적인 고고도 환경 모사를 위한 초음속 디퓨저이다. 하지만 실제 디퓨저는 각 변수에 따른 유동현상 변화나 shock train 관찰 및 벽면에서의 압력 등을 파악하기 어렵다. 때문에 Fluent등 수치해석 프로그램으로 유동현상을 가시화 시켜서 디퓨저 내부의 유동특성을 살펴볼 수 있다. 본 연구에서는 수치해석 프로그램을 사용하여 디퓨저의 입구길이와 2차목의 길이를 변화시켜 기본형 디퓨저와 비교하여 유동특성을 분석하였다.

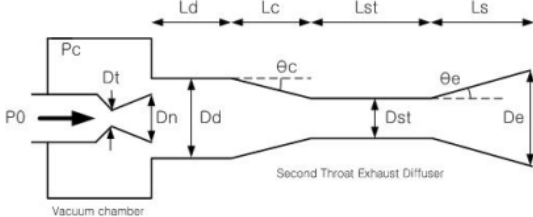


Fig. 1 축소형 디퓨저와 축소형 노즐의 각 부분 명칭

2. 디퓨저의 설계 및 수치해석 방법

고고도 환경을 모사하기 위한 실물형 이차목 디퓨저의 설계 데이터와 국외의 기술적인 자료를 바탕으로 이론식과 추천치를 활용하여 축소형 상온 디퓨저를 설계하였다[4]. 기본형 디퓨저의 명칭과 수치는 Fig. 1과 Table 1에 도시하였다. 본 연구의 축소형 디퓨저는 $A_d/A_{st}=82.4$, $A_d/A_{st}=1.56$, $(L/D)_{st}=8$, $(L/D)_d=1$ 이며 실물형 디퓨저와 비교해 1/5.6의 크기이다. 디퓨저 형상 변화에 따른 유동특성을 살펴보기 위하여 축소형 디퓨저의 형상을 $(L/D)_d=(0, 0.5, 1)$,

$(L/D)_{st}=3, 5, 7, 8, 12$ 로 변화시켰다. 여기서 기본형 디퓨저는 $(L/D)_d=1$, $(L/D)_{st}=8$ 이다.

유동해석은 상용프로그램인 Ansys v13, Fluent를 사용하였으며, 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하였다[3]. 작동유체는 이상적인 N_2 이며, 노즐 입구는 작동압력 조건, 디퓨저 출구는 대기압 조건으로 설정하였다.

Table 1. 축소형 기본형 디퓨저의 부분명칭과 치수

구분		축소형디퓨저
D_d	디퓨저입구직경(mm)	17.9
D_{st}	2차목직경(mm)	14.3
D_e	디퓨저출구직경(mm)	44.6
L_c	축소부길이(mm)	20.4
L_s	확산부길이(mm)	144.4
θ_c	수축각(°)	5
θ_e	확산각(°)	6
D_t	노즐목직경(mm)	1.95
D_n	노즐출구직경(mm)	13
-	노즐수축반각(°)	40
-	노즐확산반각(°)	15

3. 수치해석 결과

3.1 기본형 디퓨저 (baseline diffuser)

Figure 2는 기본형 디퓨저에서 연소기의 압력에 따른 마하수와 압력 분포이다. 실험에 의해 기본형 디퓨저의 시동압은 42.5 bar로 관측되었다[4]. 수치해석 결과도 마찬가지로 40 bar에서는 plume이 디퓨저 내부를 채우지 못하면서 디퓨저가 시동되지 않는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 연소기의 압력이 60 bar인 경우와 비교해 진공챔버의 압력(P_c)이 높으며 디퓨저 내부에서의 shock train 형상[3]이 벽면에 도달하지 못하며 짧게 형성되다 급격하게 압력을 회복하는 모습을 보여준다. 그 결과, 진공챔버의 압력이 충분히 낮아지지 못함으로 인해 고고도 환경을 모사하기에는 부족한 것으로 판단된다.

연소기 압력에 따른 디퓨저의 벽면압력의 변화를 실험결과와 함께 Fig. 3에 도시하였다. 전체적인 경향이 모두 유사하며 시동 조건에 미치

지 못하는 42 bar의 경우 진공챔버의 압력이 고고도 조건과 같이 충분히 낮아지지 않으면서 금방 압력을 회복하는 모습을 보여준다. 디퓨저가 시동된 경우에는 연소기 작동압력이 높아질수록 디퓨저 내부에 초음속으로 유지되는 영역이 넓어지고 아음속으로 변하여 압력이 회복되는 구간이 후류쪽으로 이동한다. 또한, 노즐출구에서의 초음속 유동으로 압력이 급격히 감소함에 따라 진공챔버의 압력(P_c)가 낮아지며 이로 인해 고고도 조건을 모사 할 수 있게 된다[1-3].

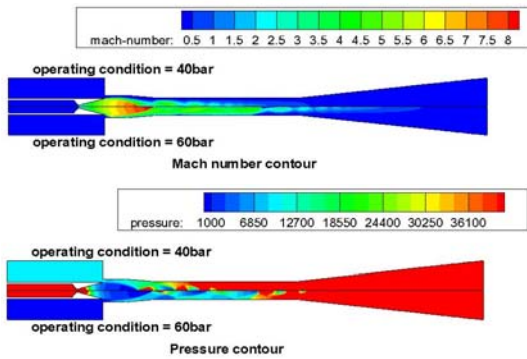


Fig. 2 기본형 디퓨저의 마하수, 압력 분포

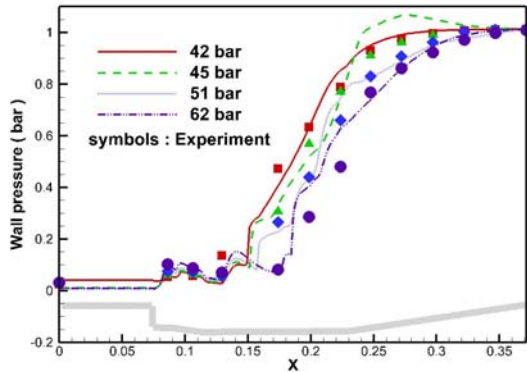


Fig. 3 기본형 디퓨저의 작동압별 벽면압력

3.2 L_d 변화에 따른 유동특성

Figure 4에 L_d 변화에 따른 마하수와 압력 분포를 도시화 하였다. L_d 길이가 줄어들수록 plume의 형상이 기본형 디퓨저에 비해 수축되는 것을 볼 수 있다. 따라서 디퓨저의 L_d 를 줄이게

되면 노즐 출구에서의 plume 모양을 수축시킴으로써 축 방향 속도를 줄이게 되어 추력의 감소를 야기할 것으로 예상된다. 보다 정확한 고고도 모사를 위하여 이러한 현상은 피하는 것이 좋을 것이다.

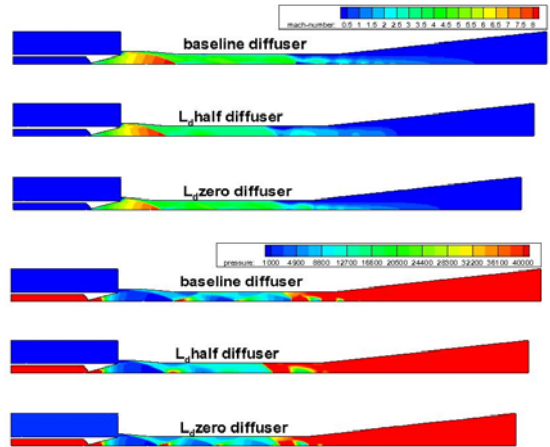


Fig. 4 L_d 변화에 따른 마하수와 압력 분포

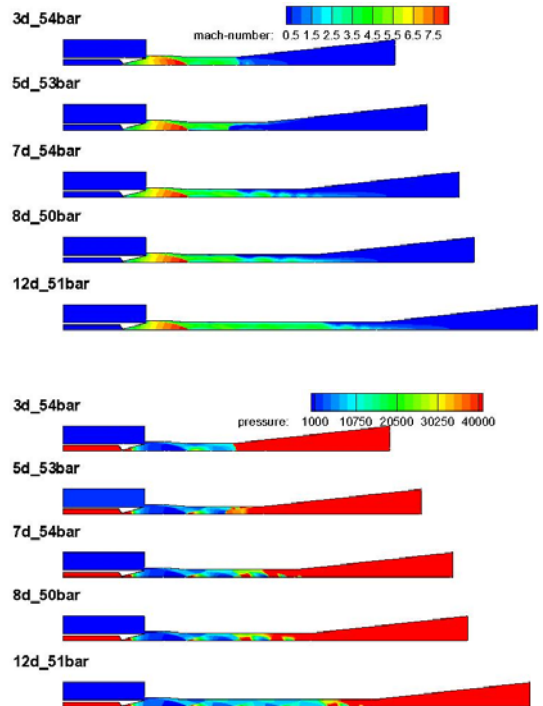


Fig. 5 L_{st} 길이에 따른 마하수와 압력 분포

3.3 L_{st} 변화에 따른 유동특성

Figure 5는 디퓨저 목의 길이 변화에 따른 마하수와 압력 분포를 도시화한 것이다. $(L/D)_{st}=3$, 5 인 디퓨저의 경우, 디퓨저 내부 이차목에서 마하디스크가 생긴 것을 관찰할 수 있다. 일반적으로 마하디스크가 발생하면 급격한 압력 상승으로 인하여 진동과 소음을 야기하므로 가급적 피하는 것이 좋다. 따라서 L_{st} 의 길이는 마하디스크(Mach disk)의 영향을 고려해 최소 $(L/D)_{st}=8$ 이상으로 하는 것이 좋을 것이다.

Figure 6은 연소기압 50 bar 근처에서의 L_{st} 길이에 따른 벽면압력의 변화를 나타낸 것이다. $(L/D)_{st}=3, 5, 7, 8$ 모두 비슷한 위치에서 압력이 회복되지만 $(L/D)_{st}=3, 5$ 의 경우 급격하게 압력이 회복되는 것을 볼 수 있다.

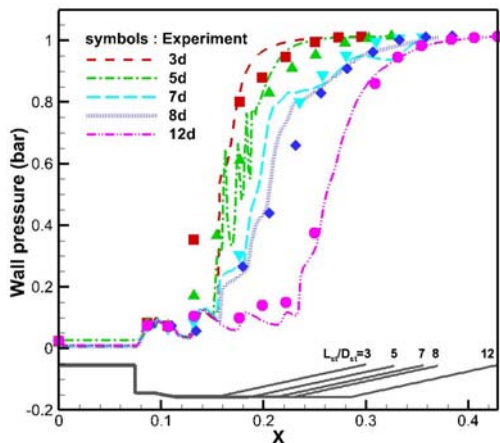


Fig. 6 L_{st} 변화에 따른 벽면압력의 변화

4. 결론

축소형 디퓨저의 유동특성을 수치적으로 살펴보았다. 기본형 디퓨저의 경우 고고도 환경을 모사할 수 있는 최소의 작동압을 수치해석을 통해 확인할 수 있었다. 또한 연소기의 작동압이 증가함에 따라 디퓨저 내부에서 초음속영역의 영역이 넓어지고 아음속으로 압력이 회복되는 지점이 뒤로 밀려나는 현상을 관찰할 수 있었다. L_d 의 경우, 그 길이가 짧아질수록 기본형 디

퓨저에 비해 plume 형상이 충분히 발달하지 못하는 것을 관찰할 수 있었으며, 이는 추력의 감소를 야기할 것으로 예상된다. L_{st} 의 경우, 마하디스크 생성과 연관이 있었으며, L_{st} 가 기본형 디퓨저 보다 짧아지면 디퓨저 내부에서 마하디스크가 생성되는 것을 관찰할 수 있었다. 이로써 이차목 디퓨저의 설계기준을 수치적으로 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 인재양성형 학연협력강화사업의 기술 지원을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. John T. pazos , Crag A. Chandler , and Nickey G. Raines , "The E-3 Test Facility at Sennis Space Center: Research and Development Testing for Cryogenic and Storable Propellant Combustion Systems", 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 2-5 Aug. 2009
2. Hong-Gye Sung, Hyo-Won Yeom, Sangkyu Yoon, Seong-Jin Kim, and Jingon Kim, "Investigation of Rocket Exhaust diffuser for Altitude Simulation", JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol. 26, No. 2, 2010, pp. 240-247.
3. Kazuyasu Matsuo, Yoshiaki Miyazato, Heuy-Dong Kim, "Shock Train and Pseudo-shock Phenomena in Internal Gas Flows", Progress in Aerospace Sciences, Vol. 35, 1999, pp. 33-100.
4. Ansys 13 Fluent User's Guide