

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(6), 496-502(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.6.496

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

이젝터 형상/성능 변수에 따른 이젝터 성능 특성에 관한 연구

최지선*, 유이상*, 신동해*, 이희준*, 고영성**

A Study on Ejector Performance Characteristics
by Ejector Geometry/Performance Variables

Ji-Seon Choi*, I-Sang Yu*, Dong-Hae Shin*, Hee-Jun Lee* and Young-Sung Ko**

Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University*,**

ABSTRACT

In this study, experimental and analytical studies were carried out to observe the phenomenon of aerodynamic throat formed according to the primary flow and secondary flow momentum of the ejector. The equilibrium interval of the aerodynamic throat, which is the main variable of the ejector performance, was observed through the experiment using the cold flow experiment and the analysis using FLUENT. Performance characteristics were investigated by the change of the primary flow rate and the throat diameter of the ejector cylinder. As a result, the performance of the standard ejector was confirmed to be within the range of 0.33~1.167(off-design/design) and cylinder throat diameter range of 1~1.17(off-design/design area ratio).

초 록

본 연구에서는 이젝터의 주유동과 부유동의 모멘텀에 따라 형성되는 공기역학적 목에 관한 현상을 관찰하기 위하여 실험, 해석적 연구를 수행하였다. 상온 실험과 상용프로그램인 FLUENT를 이용한 해석을 통하여 주유동의 유량과 이젝터 실린더의 목 직경의 변화에 따른 성능으로 이젝터 성능의 주요 변수인 공기역학적 목의 평형구간을 관찰하였다. 결과적으로 기준 이젝터에서 유량비 변수는 0.33~1.167(탈설계/설계)의 범위, 실린더 목 직경 변수는 1~1.17(탈설계/설계 면적비)의 범위에서 성능 구현이 확인되었다.

Key Words : Ejector(이젝터), Aerodynamic Throat(공기역학적 목), Entrainment Ratio(유량비), Cylinder Throat Diameter(실린더 목 직경)

1. 서 론

액체 로켓 엔진 개발을 위해서는 설계된 고도에서의 성능 검증을 위한 고공 모사 실험은 필수적이다. 지상에서 고고도의 환경을 모사하기 위

한 고고도 모사 설비에는 간단한 기계적 원리에 의해 작동되는 이젝터가 많이 사용되며, 고고도 모사 설비의 저압환경구현을 목적으로 디퓨저 후단에 장착하여 배압을 떨어뜨리는 역할을 한다. Fig. 1은 이젝터의 주요 설계 형상 변수를 보여

† Received : December 21, 2017 Revised : March 19, 2018 Accepted : May 9, 2018

** Corresponding author, E-mail : ysko5@cnu.ac.kr

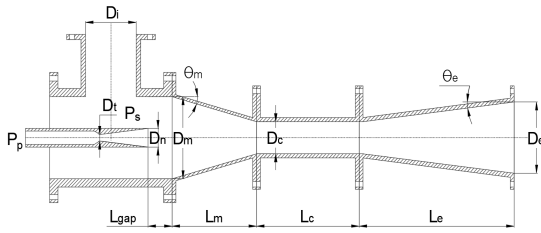


Fig. 1. Design parameter of ejector

주고 있다. 이젝터 설계에서는 유량비(\dot{m}_s/\dot{m}_p), 압축비(P_a/P_s), 팽창비(P_p/P_s)의 관계에 따라 그 형상이 결정이 되며, 주로 목표하는 고도 압력과 이젝터에 흡입되는 유량을 기준으로 설계된다. 유량비는 구동유체인 주유동(\dot{m}_p)과 흡입유체인 부유동(\dot{m}_s)의 비를 나타내며, 압축비는 목표 압력(P_s)과 대기압(P_a)의 비, 팽창비는 목표 압력(P_s)과 구동유체의 노즐 전단 압력(P_p)으로 표현된다. 이젝터의 경우 Fig. 2와 같이 형성되고 공기역학적 목[1] 현상이 나타난다. 이는 혼합되는 영역에서 주유동, 부유동의 압력으로 인하여 일정한 면적과 압력을 가지게 된다. 따라서 Fig. 2와 같이 주유동(A_p)과 부유동(A_s)을 구분 짓는 가상의 경계면(점선)이 형성된다. 공기역학적 목은 많은 변수들에 의하여 종속되는데 주유동과 부유동의 유량, 그리고 실린더 목 직경에 의한 영향이 주된 요인이라고 할 수 있다[2-4].

유이상 등[2]은 이젝터 성능변수인 유량비, 압축비, 팽창비가 이젝터 성능에 큰 영향을 주며 성능 곡선을 통해 압축비, 팽창비가 결정되면 유량비를 예측할 수 있음을 확인하였다. 최보규 등[5]은 이젝터 목(D_c)에서의 압력값은 이젝터의 작동압력비(P_p/P_a)가 증가함에 따라 감소하다가 최소값을 가지며, 이젝터 목에서 발생하는 유동은 이젝터 작동압력비만의 함수로 되는 것을 확인하였다. 유이상 등[6]은 이젝터 간극에 따라 실험을 수행하여 특성을 비교한 결과, 간극 변화에 따라 압력의 변화가 나타나지만 간극비보다는 성능변수인 유량비가 이젝터 성능에 더 큰 영향을 주는 것으로 확인하였다.

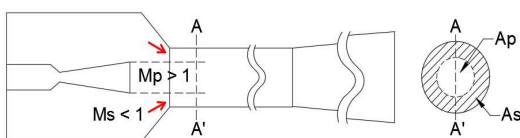


Fig. 2. Definition of aerodynamic throat[1]

선행 연구는 주로 이젝터의 성능변수라 할 수 있는 유량비, 압축비, 팽창비에 대한 연구가 진행되었으나, 주유동/부유동의 모멘텀에 따른 면적, 실린더 목 직경에 대한 면적변화에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 주유동의 유량, 실린더 목의 직경을 임의적으로 변경하여 실린더와 챔버 내의 영향을 관찰하였다. 즉, 공기역학적 목의 영향을 살펴 설계된 이젝터의 운용 범위를 확인하는 연구를 수행하였다.

II. 이젝터 작동 원리 및 설계

2.1 이젝터 작동 원리

이젝터는 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 노즐을 통과한 강한 모멘텀의 주유동이 형성됨에 따라 주변의 유체인 부유동이 유체 점성과 속도 차이에 의해 유도된다. 따라서 유도된 주유동과 부유동이 외부로 배출되며 이젝터 챔버 내부의 압력을 저압으로 모사한다.

2.2 이젝터 설계

이젝터를 설계할 때 constant pressure 혼합 모델과, constant area 혼합 모델이 있다. Constant pressure 혼합 모델은 동일 전압력을 가지는 위치에서 부유동과 주유동이 일정한 면적을 가지고 실린더부에서 혼합된다는 가정을 가지며, constant area 혼합 모델은 일정한 단면적을 가지는 혼합부, 즉 이젝터 실린더부에서 주유동과 부유동이 완전 혼합된다는 가정을 가진다[7]. 본 연구에서는 constant pressure 모델을 적용하여 1-D설계를 하였으며, 이론식과 경험식을 바탕으로 설계하였다. 이젝터의 작동은 주유동의 유입을 통해서

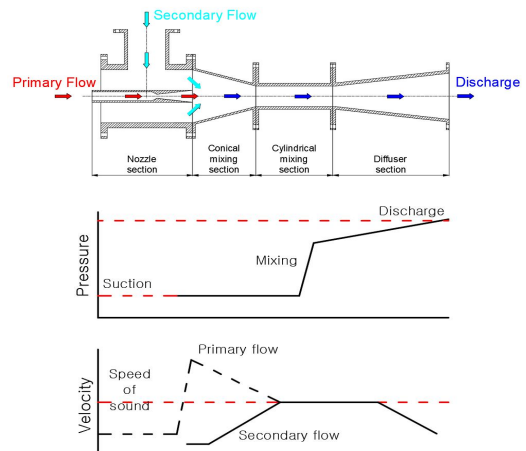


Fig. 3. Basic concept of ejector[1]

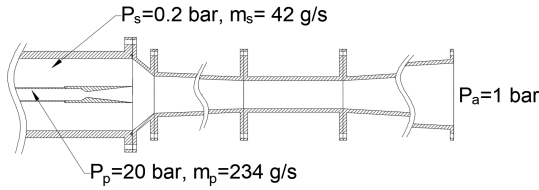


Fig. 4. Design objective of ejector

낮은 압력을 만들게 된다. 이후에 모멘텀을 이용한 부유동이 유입되면서 설계한 저압환경을 조성하게 된다. 이처럼 이젝터의 구동압력과 부유동의 유량이 이젝터의 중요한 설계 변수가 된다. 이렇게 주유동과 부유동의 압력이 정해지면, 그에 따라서 유량비/팽창비/압축비가 결정된다. 이후 설계환경에 맞는 노즐형상을 결정하고, 이젝터를 설계한다. 본 연구에서 주유동과 부유동의 작동유체는 상온의 공기를 사용하였으며, 상온 공기의 물성치를 해석 값에 적용하였다. 이젝터의 설계 목표는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 진공 압력(P_s) 0.2 bar를 구현하는 이젝터이다. 이젝터 후류압은 대기 조건이며 주유동의 전압력(P_p)은 20 bar로 설계하였다. 이젝터는 압축비(P_a/P_s), 팽창비(P_p/P_s), 유량비(m_s/m_p)가 주요 변수이며, 압축비, 팽창비는 앞선 설계 조건에 의해서 각 5, 100으로 선정되었다. 압축비 5와 팽창비 100은 이젝터에서 한계 조건에 가까운 값을 가지 때문에 주유동량에 비하여 부유동량이 작은 유량비 0.18로 계산되었다[8].

2.2.1 이젝터 노즐 설계

이젝터를 구동시키는 주유동은 수축-확산을 가지는 이젝터 노즐에 의하여 유량이 제어된다. Eq. 1을 사용하여 통과하는 유량과 효율(η)을 노즐 목 면적을 결정하게 되며 면적-마하수 관계식인 Eq. 2를 이용하여 출구 면적을 결정한다.

$$\dot{m}_p = \eta P_p A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_p} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (1)$$

$$\frac{A_n}{A_t} = \frac{1}{M_n} \sqrt{\frac{1 + [(\gamma-1)/2] M_n^2}{1 + [(\gamma-1)/2]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}} \quad (2)$$

2.2.2 이젝터 실린더 설계

이젝터 실린더를 설계할 경우 몇 가지 가정을 주어 설계가 진행되었다. 이러한 가정은 이젝터 설계에 있어 일반화된 이론을 바탕으로 가정하였다[9-11].

Table 1. Designed ejector parameter

Parameter		Value
\dot{m}_s/\dot{m}_p	Entrainment ratio	0.18
P_a/P_s	Compression ratio	5
P_p/P_s	Expansion ratio	100
D_t [mm]	Nozzle throat diameter	7.98
ε	Nozzle expansion ratio	8.23
v_e [m/s]	Exit velocity	40
L_{gap}	Gap ratio	0.308
D_c [mm]	Cylinder throat diameter	38.9
L_c [mm]	Cylinder throat length	134.21

- ① 주유동과 부유동은 이젝터 실린더 끝단에서 완전히 혼합된다. ($\dot{m}_m = \dot{m}_p + \dot{m}_s$)
- ② 대기와 만나는 이젝터 확산부에서 혼합유동의 속도를 가정한다.
- ③ 이젝터 실린더를 지나는 혼합유동의 속도는 $M=1$ 이다.
- ④ 이젝터 확산부를 통과하는 혼합유동의 압력손실은 없다.

위의 가정들을 통해 이젝터 실린더의 목 직경을 구할 수 있다. 설계된 이젝터의 주요 수치는 Table 1과 같다.

III. 연구 방법

연구는 성능변수와 형상변수에 따라 해석적 연구와 실험적 연구를 진행하였다. 성능변수인 이젝터 주유동 유량을 변수로 하였고, 형상변수인 이젝터 실린더 목 직경을 변수로 하였다.

3.1 이젝터 연구 변수

이젝터 성능은 유량비와 목 직경 두 변수가 유기적인 관계를 가진다. 하지만, 본 연구에서는 성능 유지 조건을 확인하기 위하여 변수를 분리하여 관찰하였다. 이에 성능변수인 이젝터 주유동 유량을 변화하여 유량비와 주유동 공기역학적 목(A_p)의 면적을 변화하였다. 또한 형상변수인 이젝터 실린더 목 직경, 즉 부유동의 공기역학적 목(A_s)을 변화하였다. 성능변수와 형상변수를 통해 실린더 내부 유동 흐름을 관찰하고 챔버 내 압력 상승 범위를 확인하기 위해 수치해석을 진행하였다. 설계 기준 조건은 유량비 0.18이다.

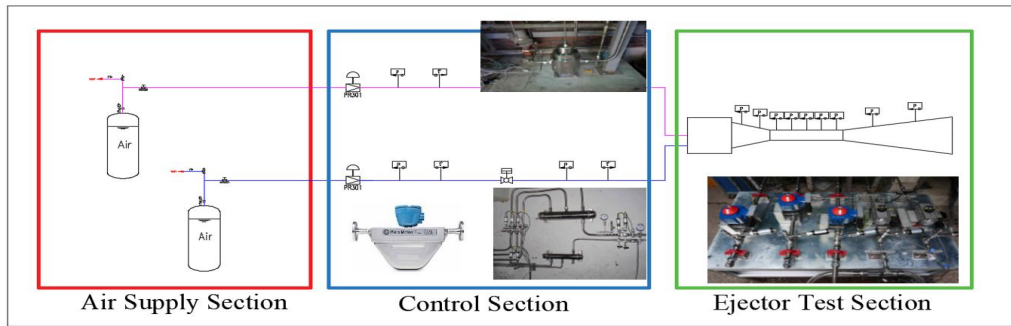


Fig. 5. Schematic of test facility (P&ID)

Table 2. Variable of the study

	Performance parameter	Geometric parameter	
	Entrainment ratio	Cylinder throat diameter	
Design condition	0.18	38.9	
Off-design condition	0.02	38.9	
	0.06		
	0.10		
	0.14		
	0.19		
	0.21		
	0.23		
	0.25	30	
	0.18		34
			36
		42	
		46	
		50	

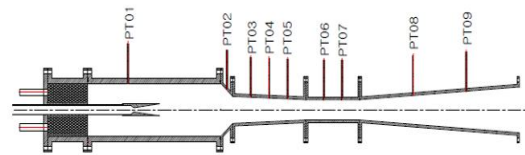


Fig. 6. Design and PT position of ejector

기 공급부, 계측 및 제어부, 시험 스탠드로 구성되어 되어있다. 압력의 경우 레귤레이터로 제어하였고 유량 측정은 에머슨 사의 Micro Motion H-Series 질량 유량계를 통해 유량을 계측하였다. 해당 유량계는 가스의 경우 0.5% 수준의 정확도를 가지며 종단밸브 바로 전단에 위치한다.

제작된 이젝터의 기밀실험을 통해 제작성을 확인하였으며 PLC제어를 통해 실험을 수행하였다. 이젝터 시험 스탠드는 Fig. 5와 같으며 실험장치도는 Fig. 7과 같이 구성되어 시험하였다.

3.3 해석적 방법

전 처리 프로그램은 Gambit 2.4.6을 이용하여 약 40만여 개의 격자를 생성하였으며, 격자수는 격자 민감성 해석을 통하여 최종 선정하였다. 유동해석은 상용 해석 프로그램인 Fluent v16을 이용하여 정상상태의 2차원 축대칭 난류 해석을 수행하였다. 급격한 압력구배를 가지는 유동의 특성

그리고 실린더 목 직경은 38.9mm이다. 기준 조건에서는 추가로 실험도 진행하였으며, 실험과 해석을 통해 실험과 해석에서의 타당성을 파악하였다. Table 2는 본 연구의 변수를 정리한 표이다.

3.2 실험적 방법

상온의 공기를 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 이젝터의 챔버 압력을 비롯한 벽면길이에 따른 압력을 측정하기 위하여 Fig. 6에 표현한 위치에 -0.1~0.3 MPa 범위의 9개의 진공압력센서를 장착하였다. 상온 시험을 위한 장치는 고압공

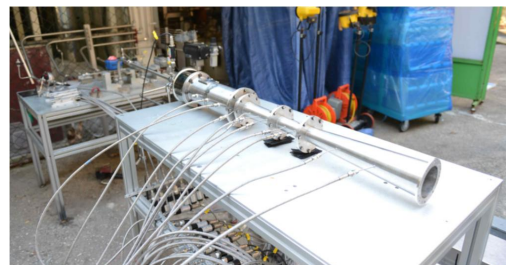


Fig. 7. Ejector test apparatus

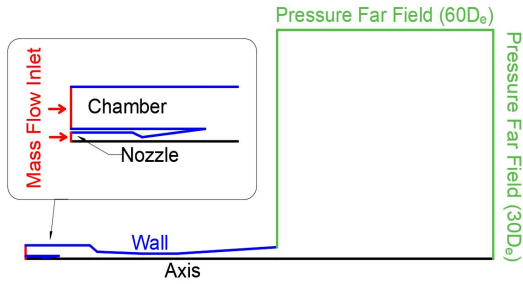


Fig. 8. Boundary Condition

상 density based의 solver를 택하였다. 또한 해석 모델은 선행연구를 토대로 수렴의 안정성과 시간적 효율을 고려하여 k-epsilon을 사용하였으며 standard wall function을 적용하여 벽면의 점성 효과를 보완하였다[12,13]. 경계조건은 Fig. 8에 도시하였으며 주유동, 부유동 입구를 mass flow inlet으로 하여 유량 값을 지정하였고, 외기 조건은 pressure far-field로 하여 대기조건을 모사하였다.

IV. 연구 결과

4.1 수치해석/상온실험 결과

수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 실린더 목 직경은 고정(38.9mm)시킨 채로 유량비 0.1, 0.18, 0.19에 대한 해석/실험을 진행하였다. Fig. 9에는 실험 결과와 같은 조건의 수치해석 결과를 나타내었다. 수치해석결과와 실험 결과의 압력 회복 위치가 동일하여 경향성이 일치하는 것을 확인함으로써 해석의 타당성을 검증하였다. 따라서 적용된 수치해석 모델을 이용하여, 유량비와 실린더 목 직경에 대한 변수 연구를 진행하였다.

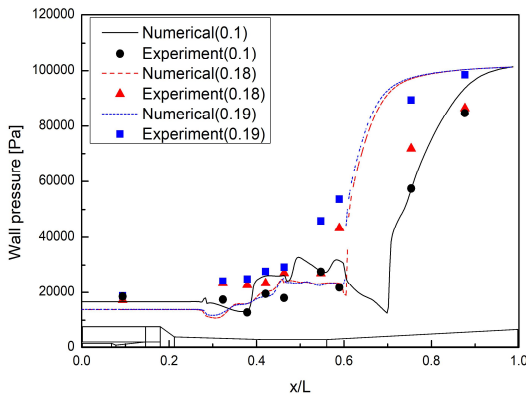


Fig. 9. Wall pressure with entrainment ratio

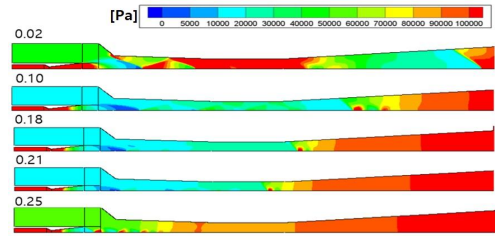


Fig. 10. Absolute pressure of ejector with various mass flow rate

4.2 변수 해석 결과

검증된 수치해석을 토대로, 유량비 변화에 대한 이젝터 성능을 파악하기 위해 내부 유동 해석을 진행하였다. Fig. 10은 압력에 대한 그래프이고 Fig. 11은 마하수에 대한 그래프이며, 공기역학적 목 현상 파악을 위해 대표 케이스를 비교한 것이다. Fig. 12는 유량비의 변화에 따른 진공 압력 그래프이다.

Figures 10~12에서 확인할 수 있듯이 유량비가 설계 유량비(0.18)보다 0.33(탈설계/설계)의 비로 작아지게 되면 주유동의 유량이 증가하여 모델링이 커지는 상태가 되지만 충분한 주유동 모델링은

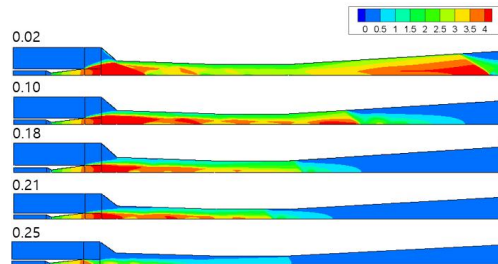


Fig. 11. Mach number of ejector with various mass flow rate.

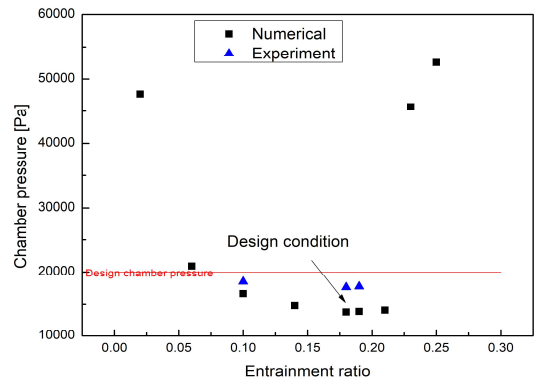


Fig. 12. Chamber pressure with various entrainment ratio

로 부유동의 공기역학적 목(A_s)이 유지됨을 확인할 수 있다. 하지만 일정 유량비가 넘어가면 부유동이 흡입하는 공간을 막아 압력을 형성하지 못한다. 또한 유량비가 설계 유량비(0.18)보다 1.167(탈설계/설계)의 비로 커지게 되면 주유동의 모멘텀 감소로 인하여 부유동을 흡입하는 성능이 떨어져 목표 성능을 구현하지 못하는 것을 확인하였다.

이젝터의 공기역학적 목은 유량비 뿐만 아니라 이젝터의 실린더 목 직경의 영향을 받을 수 있으므로, 이를 확인한 해석은 Figs. 13~15로 표현하였다. Figs. 13, 14는 각각 절대 압력과 마하수에 대한 대표 케이스를 비교한 그래프이며, Fig. 15는 실린더 목 직경의 변화에 따른 진공압력 그래프이다. 이젝터의 주유동과 부유동 유량을 고정된 채 실린더 목 직경을 변수로 하여 해석한 절대 압력에 대한 결과를 Fig. 15에 도시하였다. 주유동의 유동면적은 그대로인 상태에서 실린더 목 직경이 설계 값보다 1.17(탈설계/설계 면적비)의 비로 커지게 되면 부유동의 공기역학적 목(A_s) 면적이 유지될 수 없기 때문에 배압의 영향을 받아 상승하는 것을 확인하였다. 이는 Fig. 14를 통해서도 확인 가능하며, Fig. 14는 실린더 목 직경에 따라 대표적인 경우를 마하수 분포로 비교한 것이다. 실린더 목 직경이 작아져 부유동의 공기

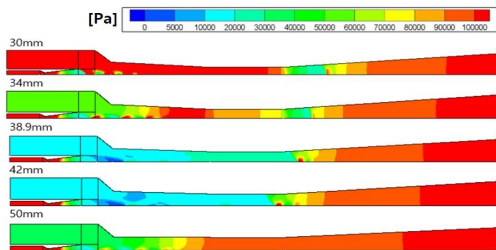


Fig. 13. Absolute pressure of ejector with various cylinder diameters

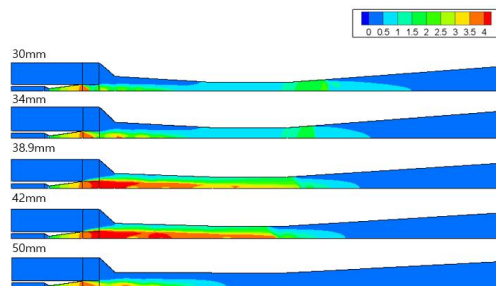


Fig. 14. Mach number of ejector with various cylinder diameters

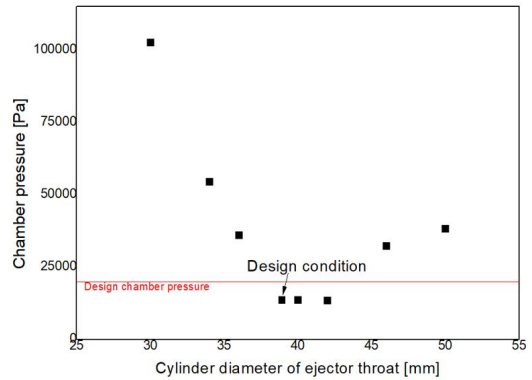


Fig. 15. Chamber pressure with various cylinder diameters

역학적 목(A_s)가 확보되지 못하게 되면, 공기역학적 목 면적 대비 부유동 유량이 증가하여 챔버 압력이 상승하게 됨을 확인하였다. 유량비 변수와는 달리 탈설계점에 따라 내부 유동의 변화가 큰 것을 확인하였다.

이는 실린더 목 직경이 고정된 경우 유량비 변화는 이젝터 성능을 유지할 수 있는 범위는 0.33~1.167(유량비 탈설계/설계 비)로 크다. 반면에 유량비가 고정된 경우에서 이젝터 실린더 목 직경의 변화는 1~1.17(실린더 목 직경 탈설계/설계 비)로 이젝터 성능을 구현하는데 유량비 변화에 비해 제한적이라고 할 수 있다. 즉, 이젝터 설계 시 실린더 목 직경과 유량비 변수는 성능을 구현하는 주요 설계변수이며 그 중 실린더 목 직경이 더 중요한 설계 변수임을 확인했다.

V. 결 론

본 연구에서는 해석과 실험을 통하여 유량비와 실린더 목 직경에 따른 이젝터의 성능을 확인하였다. 두 변수 모두 주유동과 부유동의 압력이 일치하는 곳에서 일정한 면적을 가지고 실린더 목을 통과하는 공기역학적 목에 영향을 주는 것을 확인하였다.

유량비와 실린더 목 직경의 변수는 설계점에서 벗어나 공기역학적 목이 확보되지 못하면 챔버 압력을 구현하는데 한계가 생기게 된다. 유량비 변수와 실린더 목 직경 변수는 각각 0.33~1.167(탈설계/설계)과 1~1.17(탈설계/설계 면적비)의 범위에서 성능이 구현됨을 확인하였다.

실린더 목 직경과 주유동 유량의 변수를 통해 주유동의 면적보다 부유동이 흡입되는 면적이 이

젝터 성능을 구현해내는 주된 변수임을 확인하였으며, 추후 설계된 이젝터의 성능 범위를 확인하여 운용하는데 참고자료로 활용될 것이다.

References

- 1) Kumar, N. S., and Ooi, K. T., "One Dimensional Model of an Ejector with Special Attention to Fanno Flow within the Mixing Chamber," *Applied Thermal Engineering*, 2014, pp. 226-235.
- 2) Yu, I. S., Kim, T. W., Kim, M. S., Ko, Y. S., and Kim, S. J., "A Study on Design and Performance of an Ejector Using Cold Gas," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 19, No. 2, 2015, pp. 38-45.
- 3) Yoon, S. K., Sung, H. G., and Shin, W. S., "Study on Design Parameters of Supersonic Ejectors," *SASE Spring conference*, Republic of Korea, 2018, pp. 1-4.
- 4) Yoon, S. K., Sung, H. G., and Shin, W. S., "Study on Design Parameters of Supersonic Ejectors," *SASE Spring conference*, Republic of Korea, 2008, pp. 1-4.
- 5) Choi, B. G., Kim, H. D., Lee, J. H., and Kim, D. J., "An Experimental Study of the Subsonic/Supersonic Steam Ejectors," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 4, No. 4, 2000, pp. 1-8.
- 6) Yu, I. S., Jeon, J. S., Ko, Y. S., Kim, Y., Kim, S. J., Han, Y. M., and Kim, S. H., "A Study on Performance of an Ejector according to Entrance Gap using Cold Gas," *KSPE Spring Conference*, Busan, Republic of Korea, May 2013, pp. 378-381.
- 7) Chaqing, L., "Gas Ejector Modeling For Design and Analysis," Ph. D Thesis, Texas A&M University, 2008.
- 8) Sokolov, E. Ya., and Singer, N. M., "Jet Devices, Jet Devices," 1970.
- 9) Addy, A. L., Dutton, J. C., and Mikkelsen, C. D., "Supersonic ejector-diffuser theory and experimentants," Report No. UILU-ENG-82-4001, Dept. Mech. and Ind. Eng. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois USA, August 1981.
- 10) Fabri, J., and Siestrunk R., "Supersonic Air Ejectors," *Advances in Applied Mechanics*, Vol. V, 1958, pp. 1-34.
- 11) Keenan, J. H., and Neumann, E. P., "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment," *J. Applied Mechanics*, Trans ASME, 72, 1950, pp. 299-309.
- 12) Ansys'16 Fluent User's Guide.
- 13) Jeong, B. G., Kim, H. J., Jeon, J. S., Ko, Y. S., and Han, Y. M., "Performance Characteristics Under Non-Reacting Condition with Respect to Length of a Subscale Diffuser for High-Altitude Simulation," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 38, No. 4, 2014, pp. 321-328.