가변형 음속 이젝터 유동에 관한 수치해석적 연구

이준희† · 최보규* · 김희동**

A Computational Study of a Variable Sonic Ejector Flow

Jun-Hee Lee, Bo-Gyu Choi, and Heuy-Dong Kim

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Sonic Ejector(음속 이젝터), Shock Wave(충격파), Entrainment Ratio(혼입 유량비), Throat Area Ratio(목면적비)

Abstract

A cone cylinder is used to obtain variable operation conditions of a sonic ejector-diffuser system. The cone cylinder is movable to change the ejector area ratio, thus obtaining variable mass flow rates. The present study investigates the effects of ejector throat area ratio and operating pressure ratio on the entrainment of secondary stream. The numerical simulations are based on a fully implicit finite volume scheme of the compressible, Reynolds-Averaged, Navier-Stokes equations. The ejector throat area is varied between 3.94 and 8.05, and the operating pressure ratio is changed from 3.0 to 9.0. The results show that the entrainment ratio and mass flux ratio become more dependent on the ejector throat area ratio, when the pressure operating ratio is low. The total pressure losses produced in the present ejector system increase with the operating pressure ratio and the ejector area ratio, but for a given operating pressure ratio, the losses are not significantly dependent on the ejector area ratio when it is larger than about 5.0.

1. 서 론

이젝터 시스템은 1 차 구동노즐에서 발생하는 제트의 전단작용에 의하여 저압부의 2 차 유동을 흡인하거나 압력상태를 변화시키는 유체기계이다. 일반적으로 이젝터는 1 차 구동노즐, 혼합부, 이젝터목, 디퓨저 등으로 구성[1]되어, 구조가 간단하고 내부에 활동부분을 갖지 않으므로 고장의 요소가 적다. 또, 소규모의 장치로 대용량의 유체를 압축, 수송할 수 있으며, 유지 및 보수가 거의 필요 없는 장점 때문에 현재 V/STOL 항공기의 추력증강[2,3], 고고도 상태 시뮬레이션 장치[4]를 비롯하여 건설기계 및 중장비의 냉각[5], 천연가스 재생[6], 식품제조[7], 소음저감 설비[8-11] 등에 사용되고 있으며, 최근 연료전지에서 수소의 소비량을 절감하는 장치에 사용되고 있다.

† 안동대학교 기계공학과 대학원
E-mail : kimhd@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495
* 동화엔텍㈜ 열유체연구소
** 안동대학교 기계공학부

수소연료전지는 물의 전기분해시 발생하는 수소와 산소의 반응 과정을 역으로 이용하여 전기에너지를 생산하며, 이 때 이젝터는 수소연료전지에서 사용된 수소의 일부를 재생하여 수소 소비량을 저감시키는 역할을 한다. 수소연료전지는 환경오염 및 완전 고갈위기에 처한 석유계 연료를 대신하여 향후, 자동차의 구동에너지로 활용될 것으로 전망되고 있으나, 차량용 에너지원으로서 수소저장용기의 크기와 압력은 제한 받게 되므로 자동차의 주행거리가 매우 제한되는 단점이 있다.

수소연료전지를 동력으로 하는 자동차의 출력은 수소의 소비량에 직접적으로 비례하게 된다. 이 경우, 연료전지로부터 방출되는 수소의 회수량도 출력에 의존하여 변하게 되지만, 통상적인 이젝터 시스템을 사용하는 경우, 이젝터 시스템의 구동노즐과 디퓨저 등의 형상이 고정되어 자동차의 출력 변동에 무관하게 일정량의 수소를 회수하게 되므로 기존의 이젝터 시스템은 연료전지용으로 적합

하지 않다.

현재까지 연료전지의 부하에 따라 수소의 회수량을 조절할 수 있는 이젝터 시스템의 연구개발은 세계적으로 거의 전무한 상태이며, 이러한 이젝터 시스템의 개발은 미래형 자동차의 연료전지 시스템에 필수적인 장치로 활용될 것으로 전망된다.

본 연구에서는 연료전지의 출력에 따라 수소의 회수량을 조절할 수 있는 가변형 음속 이젝터 시스템의 유동 특성을 압축성 축대칭 Navier-Stokes 방정식의 수치해법으로 조사하였다. 1 차 구동노즐은 축소형 노즐을 적용하였으며, 이젝터 내부에 전진/후진이 가능한 콘형(cone-type)실린더를 설치하여 1 차 구동노즐과 이젝터의 목단면적을 동시에 변화시켰다. 수치계산에서 공기를 작동유체로 하고, 이젝터 작동압력비를 p_{0p}/p_a=3.0~9.0, 목면적비를 ψ=3.94~8.05 로 하여 목면적비의 변화가 2 차 유량 및 이젝터 내부 유동장에 미치는 영향을 상세히 조사하였다.

2. 수치계산법 및 경계조건

2.1 가변형 음속 이젝터 유동장

Fig. 1 에는 가변형 음속 이젝터의 개략도 및 치수를 나타낸다. 1 차 구동노즐의 출구직경 D_{ne}(=8mm), 노즐 출구단의 두께 h(=0.3mm), 혼합부의 길이 L_m(=25mm), 디퓨저의 길이 L_d(=105mm) 및 이젝터 출구의 직경 D_e(=14.8mm)를 고정시키고, 확대 반각 θ_c(=2.3°)의 콘형 실린더를 이젝터 내부 유동중심의 상/하류로 이동하여 이젝터 목면적비를 ψ=3.94~8.05 에서 변화시켰다. 이 경우, 1 차 구동노즐의 직경 D_p 와 이젝터 목의 직경 D_{th} 는 Table 1 에서와 같이 변한다. 본 연구에서는 1 차 구동노즐의 공급압력 p_{0p} 와 이젝터 배압 p_a 의 비 p_{0p}/p_a 를 이젝터의 작동압력비, 이젝터 목의 단면적 A_{th} 와 1 차 구동노즐의 출구단면적 A_{ne} 의 비 $\psi=A_{th}/A_{ne}$ 를 이젝터 목면적비로 정의하였다.

2.2 수치해석법

본 연구에서는 가변형 이젝터 내부의 유동장을 수치적으로 모사하기 위하여, 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였으며, 지배방정식과 상세한 수치계산법에 대해서는 문헌[12]에 기술되어 있으므로 생략한다. Fig. 2 는 수치계산에 사용된 정렬 격자계를 나타낸 것으로, 약 40,000 개의 격자를 벽면근처 및 1 차 구동노즐 출구 부근과 이젝터 내부에서 강한 전단력 및

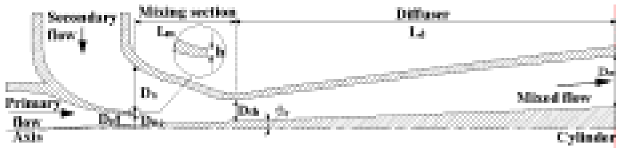


Fig. 1 Schematic diagram of variable sonic ejector system

Table 1 Ejector geometric parameters

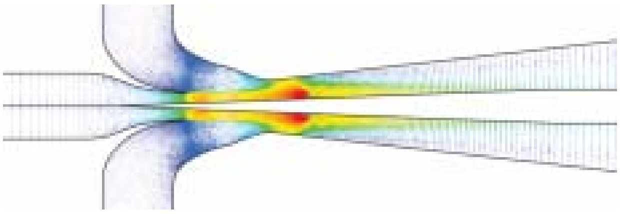
ψ	D_p (mm)	D_{th} (mm)	D_e (mm)
3.94	4	7	14.8
4.58	2	5	14.8
5.12	1.6	4.6	14.8
6.07	1.2	4.2	14.8
8.05	0.8	3.8	14.8

Fig. 2 Computational grid system

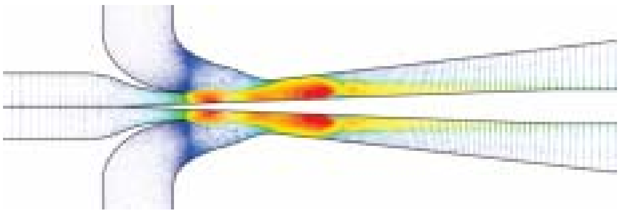
충격파가 발생할 것으로 예상되는 부분에 집중하였다. 본 계산의 경계조건은 1 차 구동노즐 입구에 전압 p_{0p} 를 pressure inlet 으로, 이젝터 입구와 출구에 대기압 조건을 적용하여 pressure outlet 으로 설정하였다. 수치계산에서는 작동압력비를 p_{0p}/p_a=3.0 ~9.0 의 범위에서 변화시켰으며, 또 모든 고체벽면은 단열 no-slip 조건을 적용하였다. 수치계산의 수렴판정을 위하여 질량, 운동량, 에너지, κ 및 ε의 잔차들이 10^{-5} 이하로 되는 경우에 수렴해가 얻어지는 것으로 하였으며, 더욱이 계산영역을 출입하는 질량유동의 imbalance 가 ±0.5% 이하로 되는 경우에 계산이 수렴된 것으로 판정하였다.

3. 결과 및 고찰

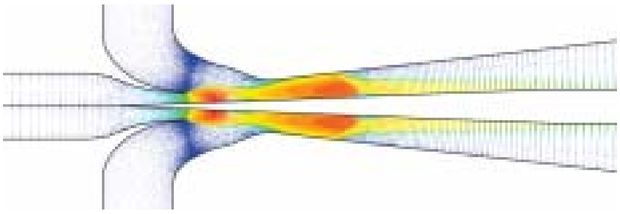
Fig. 3 은 이젝터 내부에 콘형(cone type) cylinder 가 위치한 경우로 ψ=3.96 이며, 이젝터 작동압력비 변화에 대한 이젝터 내부의 유동장 속도벡터를 나타낸다. 그림에서 고압의 압축공기는 1 차 구동노즐을 통과하여 급격히 팽창하며, 이 때 얻어진 운동에너지를 이용하여 2 차측의 공기를 흡인하여 이젝터 출구로 수송한다. p_{0p}/p_a=3.0 인 경우, 노즐 출구에서 경사충격파가 발생하며, 1 차유동에 의하여 2 차유동이 흡인되어 혼합부에서 혼합한다. 그러나 유동은 이젝터목을 통과하여 재가속되어,



(a) p_{0p}/p_a=3.0



(b) p_{0p}/p_a=5.0

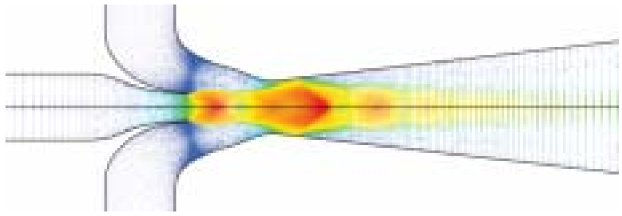


(c) p_{0p}/p_a=7.0

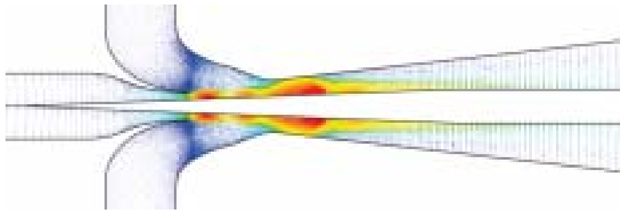
Fig. 3 Velocity vectors for various pressure ratios (ψ=3.96)

이젝터목 하류에 다수의 충격파들이 발생하며, 디퓨저 및 실린더 벽을 따라 발생하는 경계층과 복잡한 상호간섭을 일으킨다. p_{0p}/p_a=5.0 인 경우, 노즐 출구에서 더 강한 경사충격파가 발생하며, 혼합부에서 1 차 유동과 2 차 유동간에 강한 전단층이 발생한다. 또 이젝터목 하류에서 발생하는 경사충격파의 위치는 p_{0p}/p_a=3.0 인 경우에 비하여 하류로 이동하며, 강도도 크다. 이러한 경향은 이젝터 작동압력비가 증가할수록 p_{0p}/p_a=7.0 인 경우에서와 같이, 구동노즐 출구에서 발생하는 경사충격파 및 제트경계의 크기는 더욱 증가하고, 이젝터목의 하류에서 발생하는 경사충격파의 강도는 증가하며, 발생위치는 더욱 하류로 이동한다.

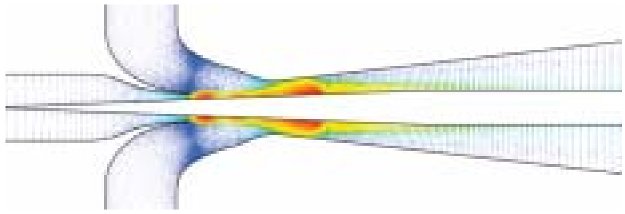
Fig. 4 에는 이젝터 목면적비 $\psi=A_{th}/A_{ne}$ 가 이젝터 유동장에 미치는 영향을 조사하기 위하여 이젝터 작동압력비가 p_{0p}/p_a=5.0 인 경우에 이젝터 목면적비 변화에 대한 속도벡터를 비교하였다. ψ=4.00 의 경우는 cylinder 가 이젝터 내부에 삽입되지 않은 상태로, 축소노즐로부터 방출되는 유동은 2 차 유동과 혼합하면서 이젝터목을 통과한다. 이 때, 목에서 두 혼합유동은 초크하여 경사충격파가



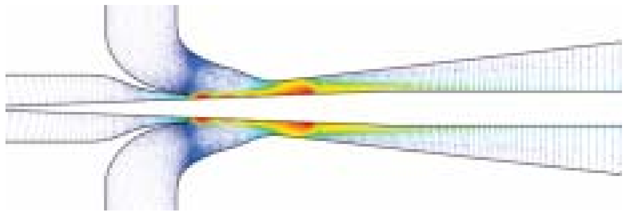
(a) ψ=4.00



(b) ψ=4.58



(c) ψ=5.12



(d) ψ=6.07

Fig. 4 Velocity vectors for various ejector throat area ratios (p_{0p}/p_a=5.0)

발생하며, 경사충격파는 이젝터 중심축에서 정상반사(regular reflection)한다. 따라서 이젝터목을 통과한 유동은 경사충격파에 의하여 감속한 후 디퓨저에서 아음속 유동으로 된다. ψ=4.58 의 경우, 혼합부에서 강한 전단층이 발생하며, 다수의 충격파가 이젝터 목의 하류에서 관찰된다. 이젝터 목면적비가 증가할수록, 혼합부에서 다수의 충격파가 관찰되며 이젝터 목의 하류에서도 다수의 경사충격파가 발생하며, 충격파의 발생위치는 상류로 이동한다. 따라서 동일한 작동압력비에 대하여 이젝터 목면적비의 변화는 혼합부내의 1 차 유동과 2 차 유동간의 혼합특성, 충격파 구조 및 크기에 큰 영향을 미치며, 이젝터목의 유동특성에도 큰 영향을 미친다는것을 알 수 있다.

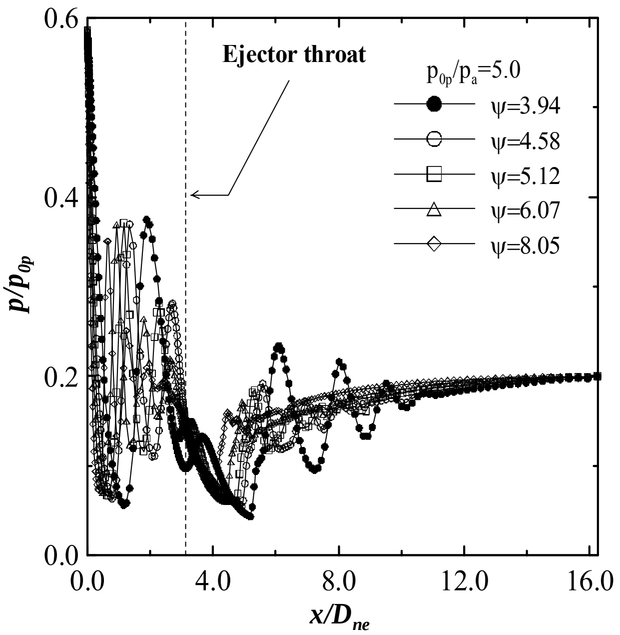


Fig. 5 Static pressure distributions along the cylinder

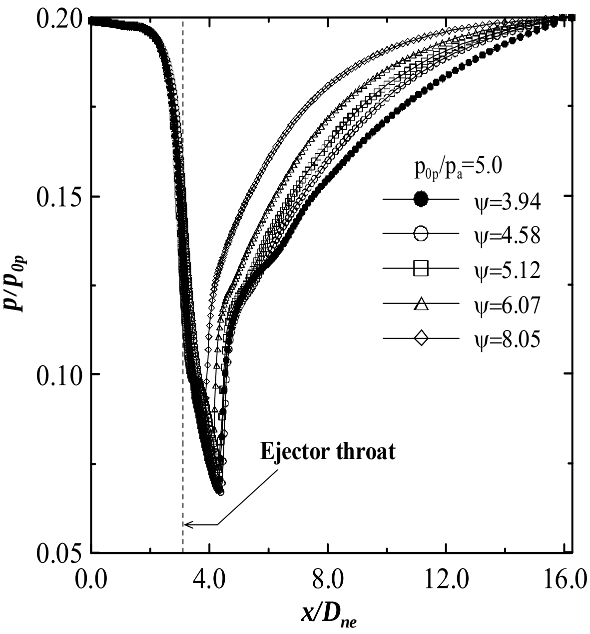


Fig. 6 Static pressure distributions along the ejector wall

Fig. 5 에는 작동압력비가 p_{0p}/p_a=5.0 로 일정하고 이젝터 목면적비를 ψ=3.94~8.05 의 범위에서 변화시킨 경우, cylinder 벽면의 압력 분포를 나타내었다. 그림에서 횡축은 1 차 구동노즐 출구를 원점으로 하는 유동방향의 거리 x 를 노즐출구 직경 D_{ne} 로 무차원화 하였으며, 종축은 cylinder 벽면의 정압을 1 차 구동노즐의 공급압력으로 무차원한 값이다. ψ=3.94 의 경우, 정압은 혼합부에서 급속하게 감소하다가 충격파에 의하여 크게 증가한 후, 이젝터 목의 상류에서 다시 감소한다. 그 후 이젝터 목의 하류에서 어떤 최소값을 가지게 되며, 디퓨저 내에서 발생하는 다수의 충격파에 의하여 압력은 증가와 감소를 반복하게 된다. 이젝터 목면적비가 증가할수록 혼합부에서 발생하는 정압변동은 증가하며, 또 이젝터목 하류에서 정압의 최소값 발생 위치는 상류로 이동하며, 디퓨저에서 발생하는 정압의 진폭은 감소한다. 이것은 동일한 작동압력비에서 이젝터 목면적비가 증가할수록, 1 차유동의 유량이 감소하며, 2 차유동간의 혼합과정에서 다수의 충격파가 실린더 벽 부근에서 발생하기 때문이다.

Fig. 6 에는 이젝터 벽면의 유동특성을 고찰하기 위하여 작동압력비가 p_{0p}/p_a=5.0 이고, 이젝터 목면적비가 ψ=3.94~8.05 의 범위에서 변화하는 경우에 이젝터 벽면의 정압분포를 나타내었다. ψ=3.94 의 경우, 혼합부의 벽면 정압분포는 하류방향으로 갈수록 급격하게 감소하여 x/D_{ne} 4.3 에서 최소값을 가지며, 그 후 디퓨저 벽을 따라 압력이 단조롭게

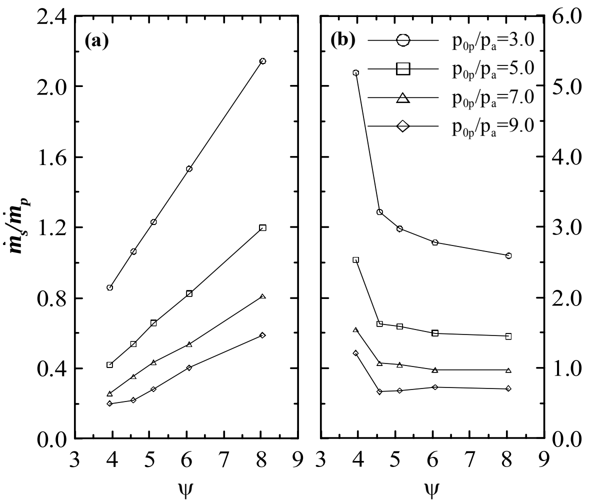
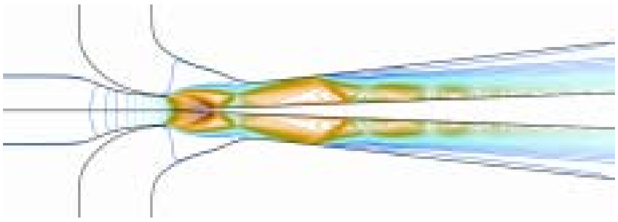


Fig. 7 Relationship between $\dot{m}_s/\dot{m}_p$, G_s/G_p and ψ

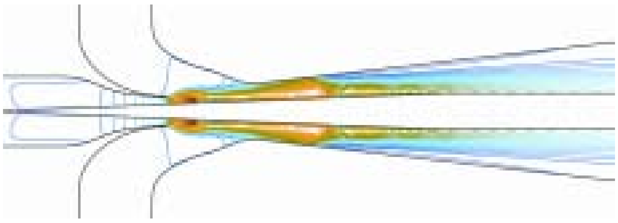
증가한다. 그림에서 혼합부의 벽면 정압분포는 이젝터 목면적비 변화에 거의 무관하지만, 이젝터목 하류에서 발생하는 압력회복 과정은 이젝터 목면적비가 클수록 빠른것으로 나타난다.

Fig. 6 의 결과로부터 혼합부의 유동은 이젝터 벽면부근에서 순압력 구배로 혼합이 발생하고, cylinder 부근에는 복잡한 충격파 시스템 에 의하여 혼합됨을 알 수 있다. 이것은 이젝터 혼합부에서 1 차 유동과 2 차 유동의 혼합이 cylinder 에 의해 발생하는 충격파와 난류경계층의 간섭에 영향을 받기 때문으로 판단된다.

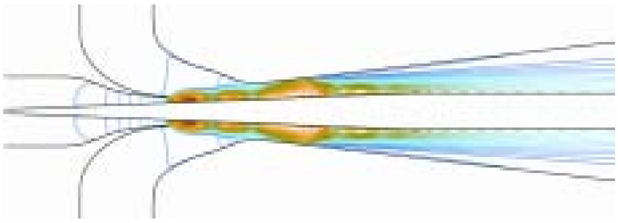
Fig. 7 에는 가변형 음속 이젝터의 성능에



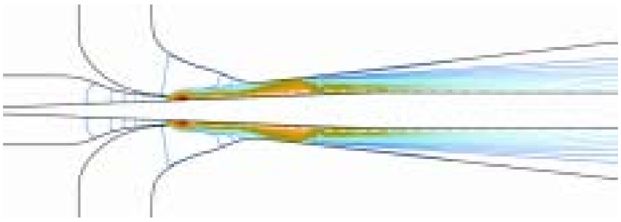
(a) ψ=3.94



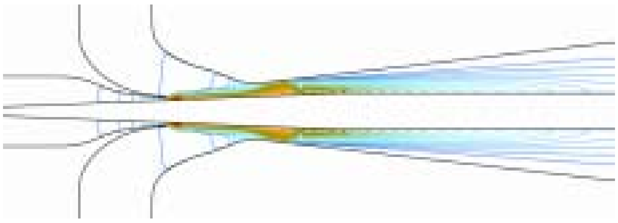
(b) ψ=4.58



(c) ψ=5.12



(d) ψ=6.07



(e) ψ=8.05

Fig. 8 Mach contours for various ejector throat area ratios (p_{0p}/p_a=7.0)

미치는 이젝터 목면적비의 영향을 알아보기 위하여, 작동압력비 p_{0p}/p_a=3.0~9.0 에 대한 혼입 질량유량비 $\dot{m}_s/\dot{m}_p$ 와 질량유속비 G_s/G_p 를 비교하였다. Fig. 7(a)의 종축은 이젝터로 유입하는 2 차유동의 질량유량 $\dot{m}_s$ 을 1 차 구동노즐의 질량유량 $\dot{m}_p$ 으로 무차원한 값이며, 횡축의 값은 이젝터 목면적비를 나타낸다. 또 Fig. 7(b)의 종축은 이젝터로 2 차유동의 질량유속 G_s 를 1 차 구동노즐의 질량유속 G_p 로 무차원한 값이다. Fig. 7(a)에서 작동압력비가 일정한 경우, 이젝터 목면적비가 증가할수록 혼입유량비는 증가하며, 이젝터 목면적비에 대한 혼입유량비의 증가 기울기는 작동압력비가 낮을수록 높게 나타나고 있다. 또, ψ 가 일정한 경우, 작동압력비 p_{0p}/p_a 가 증가할수록 $\dot{m}_s/\dot{m}_p$ 의 값은 감소한다. 이것은 Fig. 3 과 Fig. 4 의 이젝터 유동장 속도벡터 분포로부터 알 수 있듯이, 1 차 유동과 2 차 유동의 혼합유동이 이젝터 목에서 초크하기 때문으로 판단된다. 한편 Fig. 7(b)에서 작동압력비가 일정한 경우, 이젝터 목면적비가 증가할수록 혼입 질량유속비는 감소하여, 이젝터 작동압력비가 더 증가하더라도 혼입 질량유속비는 거의 변화하지 않는다. 또 이젝터 목면적비가 일정한 경우, 작동압력비가 증가할수록 혼입 질량유속비는 감소한다. 이것은 Fig. 8 의 이젝터 유동장 등마하 선도에서 알 수 있는 바와 같이, p_{0p}/p_a=7.0 인 경우, ψ=3.94~4.58 의 구간에서 전단층의 두께가 얇아지지만, ψ=4.58~8.05 의 구간에서 전단층의 두께 변화가 거의 없음에 기인한다.

Fig. 9 에는 각각의 작동압력비 p_{0p}/p_a 와 이젝터 목면적비 ψ에 대하여 가변형 음속 이젝터 내부유동에서 발생하는 압력손실을 비교하였다. 그림에

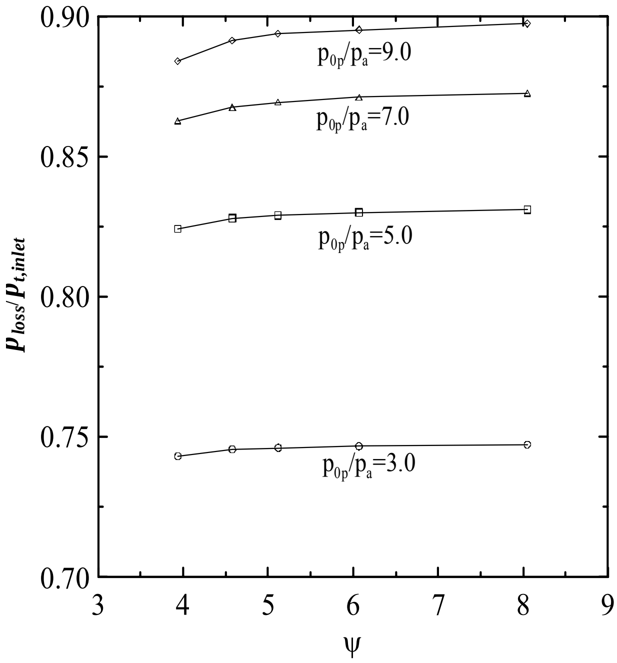


Fig. 9 Relationship between $p_{loss}/p_{t,inlet}$ and ψ

서 이젝터 출구에서 발생하는 압력손실 p_{loss} 는 1 차 구동노즐 입구 전압 $p_{01,inlet}$ 와 2 차흡인유동의 전압 $p_{02,inlet}$ 의 합을 $p_{t,inlet}(=p_{01,inlet}+p_{02,inlet})$로 나타내었으며, p_{loss} 는 $p_{t,inlet}-p_{t,outlet}$ 로 얻어진다. 여기에서 $p_{t,outlet}$는 이젝터 출구에서 발생하는 평균전압을 의미한다. 그림에서 이젝터 작동압 력비에 대한 이젝터 출구의 압력손실 $p_{loss}/p_{t,inlet}$ 는 이젝터 목면적비가 커질수록 증가지만, 이젝터 목면적비가 일정값 이상으로 되면, 압력손실 $p_{loss}/p_{t,inlet}$ 는 더 이상 증가하지않고 일정한 값을 갖게 된다. 또 그림으로부터 작동압력비 p_{0p}/p_a 가 증가할수록 $p_{loss}/p_{t,inlet}$ 에 미치는 이젝터 목면적비 ψ의 영향은 증가한다. 이것은 작동압력비가 증가할수록 이젝터 내부에서 발생하는 충격파와 경계층의 간섭현상 등이 강해져 큰 압력손실을 일으키게 되기 때문이며, 이젝터 목면적비가 증가할수록 Fig. 8 의 유동장 등마하수 선도에서 보는 바와 같이 1 차 구동노즐로부터 방출되는 유동의 팽창이 억제되어 유동 혼합에 영향을 미치기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차용 수소연료전지에 사용되는 가변형 음속 이젝터의 유동 특성에 관한 기초적 연구를 수행하였다. 압축성 축대칭 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용한 수치해법으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 작동압력비가 일정한 경우, 이젝터 목면적비가 증가할수록 혼합부에서 충격파의 개수는 증가하고 강도는 약해진다.

(2) 혼합부에서 이젝터 벽면에서의 유동은 순압력 구배에서 혼합이 발생하고, cylinder 부근의 유동은 복잡한 충격파 시스템에 의하여 혼합된다.

(3) 혼입유량비 및 혼입질량유속비는 작동압력비가 낮을수록 이젝터 목면적비의 영향을 많이 받는다.

(4) 일정한 작동압력비에 대하여 이젝터 목면적비가 증가할수록 이젝터 출구의 압력손실은 증가하다가 일정한 값을 갖게 된다.

후 기

이 논문은 2003 년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

(1) Keenan, J. H., Neumann, E. P., and Lustwerk, F., 1950, "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 17, No. 3, pp. 299~309.

(2) Alperin, M. and Wu, J. J., 1983, "Thrust Augmenting Ejector, Part 2," *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 12, pp. 1698~1706.

(3) Yang, T. T., Ntone, F., Jiang, T., and Pitts, D. R., 1985, "An Investigation of High Performance, Short Thrust Augmenting Ejectors," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 23~30.

(4) Quinn, B., 1976, "Ejector Performance at High Temperatures and Pressures," *Journal Aircraft*, Vol. 13, No. 12, pp. 948~954.

(5) Lim, J. W. and Lee, S. H., 2000, "Engine Room Cooling System Using Jet Pump," KSME Spring Annual Meeting, Vol. B, pp. 162~167.

(6) Dutton, J. C. and Carroll, B. F., 1983, "Optimized Ejector-Diffuser Design Procedure for Natural Gas Vapor Recovery," *Trans. of ASME, Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 105, pp. 388~393.

(7) Nagahiro, J., Iwamoto, J., and Higuchi, K., 1992, "Experiments for Fine Air Bubble Production in Liuids Using Ejectors," *Trans. American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 35, No. 5, pp. 1581~1590.

(8) Viets, H., Campbell, J. R., and Korkan, K. D., 1981, "Acoustic Interactions in Ejectors," AIAA Paper 81-2045, Oct.

(9) Aiken, T. N., 1973, "Aerodynamics and Noise Measurements on a Quasi-Two-Dimensional Augmentor Wing Model with Lose-Type Nozzles," NASA TMX-62237. Sept.

(10) Middleton, D., 1963, "The Noise of Ejector," Peport and Memoranda, No. 3389.

(11) Quinn, B., 1977, "Interaction between Screech Tones and Ejector Performance," *Journal of Aircraft*, Vol. 14, No. 5, pp. 467~473.

(12) Choi, B. G., Lee, Y. K., Kim. H. D., and Kim, D. J., 2000, "Computations of the Supersonic Ejector Flows with the Second Throat," *KSME Journal*, Vol. 24, No. 8 pp. 1123~1138.