

< 논문 >

이차목을 갖는 환형 분사 초음속 이젝터 이론 해석

김세훈[†] · 진정근* · 권세진**

(2005년 3월 10일 접수, 2005년 11월 9일 심사완료)

Theoretical Analysis of an Annular Injection Supersonic Ejector Equipped with a Second-Throat

Schoon Kim, Jungkun Jin and Sejin Kwon

Key Words : Annular Injection Supersonic Ejector(환형 분사 초음속 이젝터), Aerodynamic Choking(공기역학적 초킹), Funnel-Shaped Shock Wave(깔때기 형상의 충격파)

Abstract

A theoretical analysis of an annular injection supersonic ejector equipped with a second-throat was developed under the assumption that the secondary flow is choked aerodynamically by interaction with primary flow in the mixing chamber. The predicted secondary flow pressure agrees reasonably well with the measurements. Using the analysis, the compression ratio, the secondary flow Mach number, and the location of the choking point were presented in terms of entrainment ratio.

기호설명

A : 단면적
 h : 엔탈피
 L : 길이
 M : 마하수
 m : 유량
 P : 압력
 T : 온도
 v : 속도
 α : 혼합챔버 수축각
 γ : 비열비
 δ : 확장부 팽창각
 θ : 이차원 경사 충격파각

2 : 이차목 입구, 이차목
 e : 이젝터 출구
 f : 초킹면
 i : 혼합챔버 입구
 m : 혼합챔버
 max : 주유동 노즐 출구 외경
 n : 수직 충격파 후류
 P : 주유동 조건
 S : 부유동 조건

하첨자

0 : 정체조건

* 한국과학기술원 대학원 항공우주공학과

** 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

Email : SchoonKim@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3786, FAX : (042)869-3710

1. 서론

초음속 이젝터(ejector)는 냉각 사이클(cycle), 담수 장치, 그리고 터보제트 엔진의 추력증강 장치 등과 같이 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 각각의 응용분야 따라 쓰임새가 다르므로 지금까지 매우 다양한 종류의 이젝터가 개발되었으며 이에 대한 연구가 수행되었다.⁽¹⁻⁷⁾

Fabri 등은 이차원 일정-면적 혼합 초음속 이젝터 내부의 유동장을 다양한 압력비(주유동 전압과 배압의 비) 조건에 따라 가시화 하였고, 여러 작

동 모드로 나누어 해석하였다.^(8,9) Addy 와 Dutton 은 이러한 작동 원리에 대한 이해를 삼차원 그래프로 확장하여 설명하였다.^(10,11) Hedges 와 Hill 은 유한 차분법을 이용하여 이젝터 내부 유동의 속도장을 계산하여 실험과 비교하였다.^(12,13) Emanuel 은 Rayleigh-Pitot formula 를 이용하여 일정-압력 혼합 초음속 이젝터의 정상 상태 작동 성능 최적화에 대한 이론 해석을 수행하였다.⁽¹⁴⁾ Sherif 와 Lear 는 페브리 초킹을 이용하여 냉각 시스템의 이상유동 (two-phase) 및 충격파에 대한 계산을 수행하였다.⁽¹⁵⁾

하지만 지금까지 연구된 대부분의 초음속 이젝터는 주유동을 중앙으로 분사하는 중앙 분사 방법이었다. 하지만 최근 고출력 화학레이저의 압력회복장치 및 고공환경보사장치 등과 같이 부유동의 온도가 매우 높은 경우에 응용되면서 이젝터 내부의 열적 안정성을 확보하기 위하여 주유동을 환형으로 분사하는 환형 분사 이젝터에 대한 연구가 필요하게 되었다. 특히 고출력 화학레이저의 압력회복장치의 경우 부유동의 온도가 1200K 까지 올라가므로 환형 분사 방법은 필수적이다.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾

김^(19,20) 등은 Fig. 1 과 같은 환형 분사 초음속 이젝터의 형상 변수 연구를 수행하여 성능곡선(작동 압력, 작동점출압력 그리고 작동후 부유동 압력)에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 그 결과 작동후 부유동 압력은 주유동 노즐 면적비와 혼합챔버 수축각에 의해 영향을 받지만 후류의 이차목 형상에는 영향을 받지 않았다. 이것은 부유동이 혼합챔버 내부에서 주유동의 전단력에 의해 가속되어 공기역학적으로 초킹(choking)되며 부유동 압력은 이러한 초킹 현상에 의해 결정된다는 것을 말해준다. 본 연구에서는 이러한 실험적 이해를 바탕으로 이차목을 갖는 초음속 이젝터의 작동후 부유동 압력에 대한 이론 해석을 수행하였고 실험과 비교하였다. 또한 같은 해석방법을 이용하여 이젝터의 압축비와 부유동의 마하수 그리고 부유동 초킹의 위치에 대한 계산도 수행하였다.

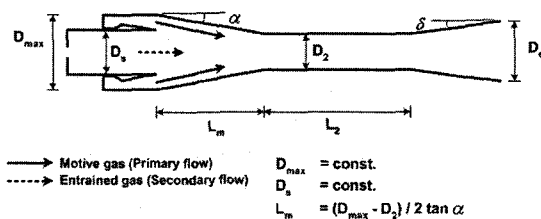


Fig. 1 Schematic of an annular injection supersonic ejector equipped with a second-throat

2. 이론 해석

2.1 가정

서론에서 언급한 바와 같이 본 연구의 이론 해석에서는 부유동이 혼합챔버 내부에서 주유동의 강한 전단력에 의해 공기역학적으로 초킹되고 부유동 압력은 이러한 초킹 조건에 의해 결정된다고 가정하였다. 이와 같은 가정은 이차목 형상 조건이 부유동 압력에 영향을 미치지 않는다는 실험 결과를 자동적으로 만족 시킨다. 부유동이 초킹될 때 까지는 주유동과 부유동 사이에 혼합이 발생하지 않으므로 비혼합 모델(non-mixing model)을 사용하였고, 초킹면과 이차목 사이에서 혼합이 발생하므로 이 영역에서는 혼합 모델(mixing model)을 사용하였다. 또한 두 유동은 이차목 입구에서 완전 혼합된다고 가정하였고, 혼합된 유동은 이차목 후단의 수직 충격파를 통과하여 확장부에서 압력이 더욱 회복되고 대기로 방출된다고 가정하였다. Fig. 2 는 이론해석의 개념도이다.

이론 해석에서 작동 유체는 일차원 완전기체이며 이젝터 내에서 응축되지 않는다고 가정하였다. 이젝터 내부 벽에 의한 마찰은 무시하였고, 단열과정으로 외부와의 열교환은 없다고 가정하였다. 부유동은 등엔트로피 과정으로 가속하여 초킹되므로 초킹면의 마하수(M_{Sf})는 음속이다. 혼합챔버 입구에서 발생하는 깔때기 모양의 경사 충격파는 간단한 계산을 위하여 이차원 경사 충격파로 가정하였고, 이 경사 충격파는 초킹면의 주유동에만 영향을 미친다고 가정하였다.

2.2 비혼합 모델

Fig. 2 의 i-f 영역에서는 주유동과 부유동간의 혼합이 없으므로 비혼합 모델을 사용하였다. 그림에서 초킹면의 프라임(')이 붙은 주유동 변수들은 충격파를 고려하기 전의 상태이고, 프라임이 없는 변수들은 충격파의 영향을 고려한 후의 변수들이다. 주유동과 부유동이 등엔트로피 과정으로 가속할 때 운동량 보존식과 두 유동의 연속 방정식은 다음의 식 (1)-(3)과 같다.

$$P_{Pi}A_{Pi} + P_{Si}A_{Si} - P'_{Pf}A'_{Pf} - P_{Sf}A_{Sf} = -v_{Pi}(\rho_{Pi}v_{Pi}A_{Pi}) - v_{Si}(\rho_{Si}v_{Si}A_{Si}) + v'_{Pf}(\rho'_{Pf}v'_{Pf}A'_{Pf}) + v_{Sf}(\rho_{Sf}v_{Sf}A_{Sf}) \quad (1)$$

$$m_P = \rho_{Pi}A_{Pi}v_{Pi} = \rho'_{Pf}A'_{Pf}v'_{Pf} \quad (2)$$

$$m_S = \rho_{Si}A_{Si}v_{Si} = \rho_{Sf}A_{Sf}v_{Sf} \quad (3)$$

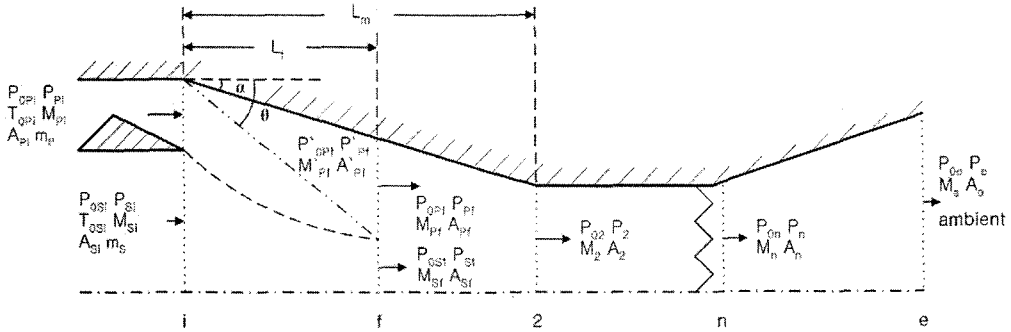


Fig. 2 Schematic of theoretical analysis with notation of variables

여기서, v 는 일차원 속도이고, ρ 는 밀도이다.

위의 세 식에 이상기체방정식, 음속 및 마하수의 정의를 이용하여 초킹면의 주유동 압력(P'_{Pf})을 소거하고 마하수(M'_{Pf})로 정리하면, 아래와 같이 초킹면의 주유동 마하수에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$F_3(M'_{Pf}) = \frac{1}{F_2(M_{Pi})} \cdot \left\{ \frac{P_{Si}}{P_{Pi}} \cdot \frac{A_{Si}}{A_{Pi}} [F_1(M_{Si}) - F_2(M_{Si}) \cdot F_3(M_{Sf})] + F_1(M_{Pi}) \right\} \quad (4)$$

여기서, $F_1(M)$, $F_2(M)$ 그리고 $F_3(M)$ 는 간단한 식의 유도를 위해 아래와 같이 정의되는 기체역학 식이다.

$$F_3(M) \equiv \frac{F_1(M)}{F_2(M)} \equiv \frac{1 + \gamma M^2}{M \left\{ \gamma \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right] \right\}^{1/2}} \quad (5)$$

식 (4)는 주어진 주유동과 부유동의 입구 조건에서, 초킹 조건($M_{Sf} = 1$)과 부유동 압력의 추정으로 풀 수 있다. $F_3(M'_{Pf})$ 이 계산되면 식 (5)의 $(M'_{Pf})^2$ 에 대한 이차방정식을 이용하여 M'_{Pf} 를 구할 수 있다. 단, 주유동은 초음속이므로 $M'_{Pf} > 1$ 인 값을 선택한다. M'_{Pf} 이 계산되면 등엔트로피 관계식을 이용하여 주유동과 부유동의 압력을 구할 수 있다.

초킹면의 주유동 마하수(M_{Pf})와 압력(P_{Pf})을 얻기 위해 이차원 경사 충격파 관계식을 이용한다. 여기서, 충격파의 각도(θ)는 혼합챔버 입구의 주유동 마하수(M_{Pi})와 수축각(α)에 의해 결정된다.

이러한 계산을 반복적으로 수행하여 초킹면의 주유동 압력(P_{Pf})과 부유동 압력(P_{Sf})을 같게 하는 부유동 압력(P_{Si})을 취한다.

2.3 혼합 모델

Fig. 2의 f-2의 영역에서는 Emanuel의 혼합 모델을 이용하여 이차목 입구의 마하수(M_2)을 아래의 식 (6)과 같이 계산하였다.

$$M_2 = \left\{ \frac{1}{(\gamma - 1)(\beta - 1)} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

여기서 무차원화 식인 β 는 다음의 식 (7)과 같다.

$$\beta = \left(1 + \frac{m_s}{m_p} \right) \cdot \left(1 + \frac{m_s}{m_p} \cdot \frac{h_{0s}}{h_{0p}} \right) \cdot \left\{ \frac{M_{Pf}^2}{M_{Pf}^2 + \frac{2}{\gamma - 1}} \right\}^{1/2} + \frac{m_s}{m_p} \cdot \sqrt{\frac{h_{0s}}{h_{0p}}} \cdot \left\{ \frac{M_{Sf}^2}{M_{Sf}^2 + \frac{2}{\gamma - 1}} \right\}^{-2} \quad (7)$$

M_2 이 구해지면 f-2 영역에서 운동량 보존식을 이용하여 아래 식 (8)과 같이 혼합 유동의 압력(P_2)을 구할 수 있다.

$$P_2 = \frac{P_{Pf} A_{Pf} F_1(M_{Pf}) + P_{Sf} A_{Sf} F_1(M_{Sf})}{A_2 F_1(M_2)} \quad (8)$$

혼합된 유동은 이차목 출구에서 수직 충격파를 통과하므로 충격파 후류의 마하수(M_n)와 압력(P_n)은 수직 충격파 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

그리고 확산부인 n-c 의 구간에서 100%의 효율을 갖는 아음속 디퓨저를 통하여 압력이 더욱 회복된다고 가정하여 이젝터 출구에서의 압력(P_e)를 계산하였다.

3. 결과

본 연구의 이론 해석방법을 이용하여 김^(19,20) 등의 실험과 비교하였다. 평가된 이젝터 형상은 표 1에 자세히 나타내었다. 표에서와 같이 세 가지 주유동 노즐 면적비 조건에서 실험과 비교를 수행하였고, 각각의 면적비에서 주유동 노즐 출구의 마하수와 형상은 Table 2 와 같다.

세 가지 주유동 마하수 조건에서 주유동 전압에 대한 부유동 압력의 결과는 Fig. 3 과 같다. 부유동 유량은 2g/s 으로 고정하였다. 그림에서 이론 해석을 통하여 계산된 부유동 압력이 실험값과 같이 주유동 전압에 선형적으로 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 면적비 변화에 따른 기울기를 잘 예측하였다. 하지만, 모든 조건에서 해석 결과가 실험값에 비해 낮았는데, 이것은 혼합챔버의 수축각에 의해 발생하는 깔때기 모양의 경사 충격파를 보다 강도가 낮은 이차원 경사 충격파로 묘사하였기 때문이다.

Fig. 4 은 주유동 마하수가 4.0 인 경우의 유량비 변화에 따른 부유동 압력 결과이다. 그림에서 실선은 일정한 주유동 유량조건 즉, 일정한 주유동 전압 조건이다. 이것은 형상이 고정되어있는 경우 주유동 유량은 전압력에 의해 결정되기 때문이다. 점선은 일정한 부유동 유량조건이다. 부유동 유량을 증가시키면 실선과 같이 부유동 압력이 서서히

증가한다. 점선의 경우와 같이 주유동 유량이 증가하면 부유동 압력이 증가하는데, 이것은 주유동 전압이 증가하면 혼합챔버 내의 주유동 압력이 증가하기 때문이다. 따라서 부유동 압력은 혼합챔버 내에서 주유동에 의해 결정되므로 함께 증가하게 된다. 주유동 유량 증가에 따른 오차의 증가는 주유동 전압이 증가할수록 깔때기 모양의 충격파 효과 가 커지기 때문이다. 마찬가지로 부유동 유량이 증가하여도 오차가 증가하는데, 이것은 부유동 유량의 증가에 따라 초침면이 변하고 충격파가 주유동에 미치는 영향도 변하기 때문이라 생각된다.

Fig. 5 는 유량비가 압축비에 미치는 영향이다. 압축비는 배압과 부유동 전압의 비로서 이젝터의 성능을 나타내는 또 하나의 중요한 변수이다. 일반적으로 압축비와 유량비는 반비례하는데, 그림

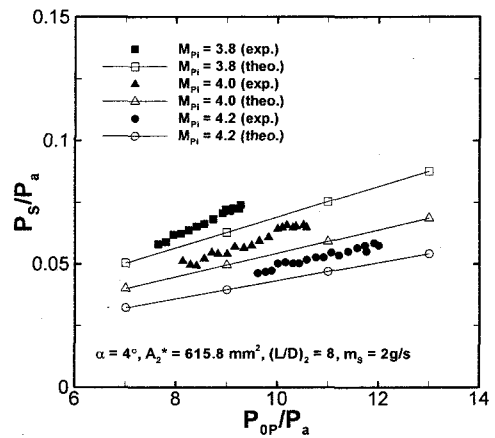


Fig. 3 Performance curves with various primary Mach numbers

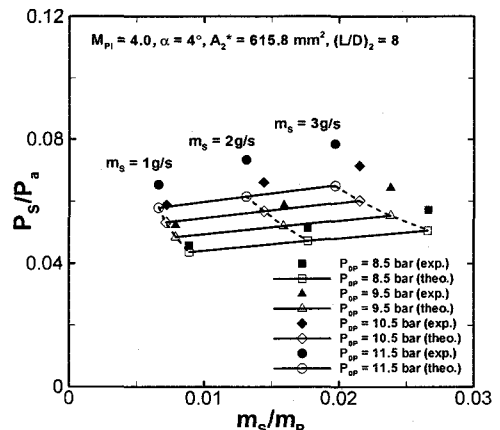


Fig. 4 Secondary flow pressure with entrainment ratio

Table 1 Ejector configurations

주유동 노즐 면적비	8.97, 10.78, 12.95
혼합챔버 수축각, °	4
이차목 단면적, mm ²	615.8
이차목 길이지름비	8
주유동 노즐 출구 외경, mm	44
주유동 노즐 출구 내경, mm	34
이젝터 출구 지름, mm	50
확장부 팽창각, °	5

Table 2 Primary nozzle configurations

주유동 노즐 면적비	8.97	10.78	12.95
노즐 출구 마하수	3.8	4.0	4.2
노즐목 외경, mm	44	44	44
노즐목 내경, mm	43	43.17	43.31

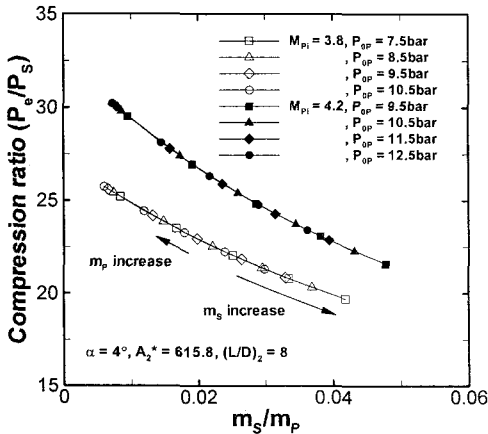


Fig. 5 Compression ratio vs. entrainment ratio

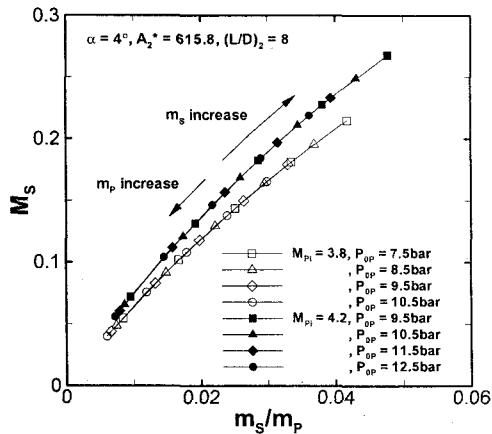


Fig. 6 Secondary flow Mach number vs. entrainment ratio

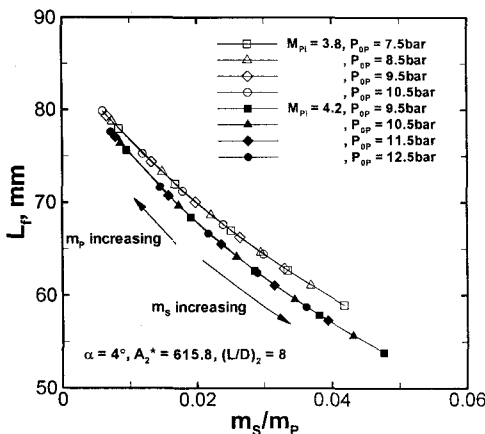


Fig. 7 Distance to choking point vs. entrainment ratio

에서도 같은 경향성을 확인 할 수 있다. 또한 그림에서와 같이 주유동 노즐 면적비를 증가시키면 높은 압축비를 얻을 수 있는데, 이것은 더욱 낮은 부유동 압력을 얻을 수 있기 때문이다.

유량비 변화에 따른 부유동 마하수는 Fig. 6 과 같다. 위에서 언급한 바와 같이 주유동 유량을 증가시키기 위해서는 주유동 전압을 증가시켜야 하므로 부유동 압력이 증가하여 부유동 마하수는 감소한다. 이와 반대로 주유동 노즐 면적비를 증가시키면 압력이 감소하므로 마하수는 증가한다.

Fig. 7 은 유량비 변화가 초킹이 발생하는 위치에 미치는 영향이다. 부유동 유량이 증가하면 초킹되기 위한 필요 면적이 증가하므로 초킹이 빨리 발생하고, 주유동 유량이 증가하면 부유동 압력이 증가하므로 초킹되기 위해 필요한 면적이 감소하므로 초킹이 늦어진다.

4. 결론

환형 분사 초음속 이젝터의 경우 혼합챔버 수축각에 의한 압력 손실을 줄이기 위해 수축각을 줄여야 하므로 중앙 분사 보다 혼합챔버의 길이가 길다. 따라서 이젝터가 초음속으로 작동하면 혼합챔버 내부에서 부유동이 공기역학적으로 초킹된다. 이러한 물리적인 현상을 바탕으로 환형 분사 초음속 이젝터의 작동후 부유동 압력에 대한 이론 해석을 수행하였다. 환형 분사 초음속 이젝터의 이론 해석에서 중요한 것을 혼합챔버 입구에서 발생하는 깔때기 모양의 경사 충격파를 모사하는 방법이다. 본 연구에서는 간단한 계산을 위하여 이차원 경사 충격파 관계식을 이용하였는데, 예상대로 모든 형상 조건에서 조금씩 낮은 압력을 예측하였다. 하지만 대부분의 진공을 위한 환형 분사 초음속 이젝터에서 수축각이 작으므로 큰 문제는 없으리라 예상된다. 보다 정확한 해석을 위하여 깔때기 모양의 경사 충격파에 대한 연구가 수행되어 할 것이고, 이젝터 내부에서의 충격파 구조 및 이가 유동장에 미치는 영향을 보다 잘 모사하는 것이 필요 할 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Sun, Da-Wen and Eames, I. W., 1995, "Recent Developments in the Design Theories and Applications of Ejectors-A Review," *Journal of the Institute of Energy*, June, Vol. 68, pp. 65~79.
- (2) Ashra, E., 1979, "Steam-Jet Refrigeration Equipment," *Equipment Handbook*, Ch. 13, pp.

- 289~291.
- (3) Bowrey, R. G., Dang, V. B. and Sergeant, G. D., 1986, "An Energy Model to Minimize Energy Consumption in a Low-Temperature Operation Steam Ejector-Cooling System," *J. Inst. Energy*, Vol. 45, pp. 45~48.
 - (4) Decker, L. O., 1993, "Consider the Cold Facts About Steam-Jet Vacuum Cooling," *Chem. Eng. Progress*, Vol. 89, No. 1, pp. 74~77.
 - (5) Georgiadis, N. J., Walker, J. F. and Trefny, C. J., 1998, "Parametric Study of the Ejector Process Within a Turbine-Based Combined-Cycle Propulsion System," *AIAA 36th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, January 12~15.
 - (6) Amin, S. M. and Garris, C. A., 1995, "Experimental Investigation of a Nonsteady Flow Thrust Augmenter," *AIAA/ASME/SAE/ASEE 31st Joint Propulsion Conference*, San Diego, California, July 10~12, AIAA Paper 95-2902.
 - (7) Drummond, C. K., 1988, "A Control Volume Method for Analysis of Unsteady Thrust Augmenting Ejector Flows," NASA-CR-182203, November.
 - (8) Fabri, J. and Siestrunk, R., 1958, "Supersonic Air Ejectors," In *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 5, H.L. Dryden and Th. von Karman (editors), Academic Press, New York, pp. 1~33.
 - (9) Fabri, J. and Paulon, J., 1958, "Theory and Experiments on Supersonic Air-to-Air Ejectors," NACA-TM-1410.
 - (10) Addy, A. L., Dutton, J. C. and Mikkelsen, C. D., 1981, "Supersonic Ejector-Diffuser Theory and Experiments," Report No. UILU-ENG-82-4001, Dept. Mech. and Ind. Eng. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois USA, August.
 - (11) Dutton, J. C., Mikkelsen, C. D. and Addy, A. L., 1982, "A Theoretical and Experimental Investigation of The Constant Area, Supersonic-Supersonic Ejector," *AIAA J.* Vol. 20, No. 10, pp. 1392~1400.
 - (12) Hedges, K. R. and Hill, P. G., 1974, "Compressible Flow Ejectors. Part I - Development of a Finite-Difference Flow Model," *J. Fluids Eng., Trans ASME*, Vol. 96, pp. 272~281.
 - (13) Hedges, K. R. and Hill, P. G., 1974, "Compressible Flow Ejectors. Part II - Flow Field Measurements and Analysis," *J. Fluids Eng., Trans ASME*, Vol. 96, pp. 282~288.
 - (14) Emanuel, G., 1976, "Optimum Performance for a Single-Stage Gaseous Ejector," *AIAA J.*, Vol. 14, No. 9, pp. 1292~1296.
 - (15) Lear, W. E., Sherif, S. A. and Steadham, J. M., 2000, "Design Considerations of Jet Pumps with Supersonic Two-Phase Flow and Shocks For Refrigeration and Thermal Management Applications," *Int. J. Energy Res.*, Vol. 24, pp. 1373~1389.
 - (16) Boreisho, A. S., Khailov, V. M., Malkov, V. M. and Savin, A. V., 2000, "Pressure Recovery System for High Power Gas Flow Chemical Laser," *XIII International symposium on gas flow & Chemical lasers - High power laser conference*, edited by SPIE, Florence, Italy, pp. 401~405.
 - (17) Malkov, V. M., Boreisho, A. S., Savin, A. V., Kiselev, I. A. and Orlov, A. E., 2000, "Choice of Working Parameters of Pressure Recovery Systems for High-Power Gas Flow Chemical Lasers," *XIII International symposium on gas flow & Chemical lasers - High power laser conference*, edited by SPIE, Florence, Italy, pp. 419~422.
 - (18) Kim, S., Jin, J., Kwon, H. and Kwon, S., 2004, "Development of a Rational Design Procedure of Pressure Recovery System for HPCL," *XV International symposium on gas flow & Chemical lasers - High power laser conference*, edited by SPIE, Prague, Czech Republic, pp. 149~154.
 - (19) Kim, S. and Kwon, S., 2003, "Development of Ejector System for Chemical Lasers Operating (I)-Design Parameter Study of Supersonic Ejector for Chemical Lasers Operating," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 27, No. 12, pp. 1673 ~ 1680.
 - (20) Kim, S., Jin, J. and Kwon, S., 2004, "Development of Ejector System for Chemical Lasers Operating (II)-Optimal Design of the Second-Throat Type Annular Supersonic Ejector," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28, No. 10, pp. 1231 ~ 1237.
 - (21) Mikkelsen, C. D., Sandberg, M. R. and Addy, A. L., 1976, "Theoretical And Experimental Analysis of The Constant-Area, Supersonic-Supersonic Ejector," U. S. Army Research Office, Grant Number DAHC 04-75-G-0046, and Dep. of Mechanical & Industrial Eng., Uni. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois 61801.