

이젝터 시스템의 설계 및 작동 특성에 관한 연구

남궁혁준* · 한풍규* · 김영수*

Study on the Design and Operation Characteristics of Ejector System

Hyuck-Joon Namkoun* · Poong-Gyoo Han* · Young-Soo Kim*

ABSTRACT

Ejector system can induce the secondary flow or affect the secondary chamber pressure by both shear stress and pressure drop which are generated in the primary jet boundary. Ejectors are widely used in a range of applications such as a turbine-based combined-cycle propulsion system and a high altitude test facility for rocket engine, pressure recovery system, desalination plant and ejector ramjet etc. The primary interest of this study is to set up an configuration and operating conditions for an ejector in the condition of sonic and subsonic. Experimental and theoretical investigation on the sonic and subsonic ejectors with a converging-diverging diffuser was carried out. Numerical simulation was adopted for an optimal geometry design and satisfying the required performance. Also, some ejectors with a various of nozzle throat and mixing chamber diameter were manufactured precisely and tested for the comparison with the calculation results.

초 록

이젝터 시스템은 주유동 제트에 발생되는 전단 응력과 압력차에 의해 흡입 챔버 압력에 영향을 미치거나 이차 흡입 유동을 유도한다. 이젝터는 터빈 기반 복합사이클 추진기관 및 로켓엔진의 고고도 모사 설비, 압력회복장치, 담수화 시스템, 이젝터 램젯시스템과 같이 많은 분야에 적용되어 널리 사용된다. 본 연구에서는 아음속 및 음속 조건에서 작동하는 이젝터의 형상 및 운전 조건을 결정하는 설계 절차를 수립하고자 하였다. 또한, 이론적 방법과 시험적 연구를 통해 축소 확대 디퓨저가 장착된 이젝터의 작동 특성을 파악하였다. 결국, 수치해석을 통해 요구 성능을 만족하는 이젝터의 최적 형상을 결정하였으며 다양한 노즐 목 및 챔버 직경을 변화시킨 이젝터에 대한 성능 시험을 통해 계산 결과를 검증하였다.

Key Words: Ejector (이젝터), Throat Area Ratio (목면적비), Nozzle (노즐)

* 현대로템 기술연구소

1. 서 론

일반적으로 1차 노즐의 작동유체가 증기나 기타 압축성 기체인 경우에 대부분의 이젝터는 초음속 상태로 운전되며, 기존 이러한 초음속 이젝터들은 터빈 기반 복합사이클의 추진기관의 추력증강[1]이나, 로켓엔진의 고고도상태(high altitude)의 모사[2], 로켓 기반 복합사이클 엔진[3] 등에 널리 활용되고 있으며 설계 기법 등 관련 이론적 연구 결과가 많다. 하지만 흡입율이 높고 탈설계점에서 사용 가능한 아음속 및 음속 이젝터 유동에 관한 연구결과는 많지 않으며, 이젝터의 성능평가나 실용적 설계를 위한 연구 자료는 매우 부족한 실정에 있다. 이것은 이젝터가 아음속 상태로 운전되는 경우, 이젝터 내부에서 발생하는 1차유동 및 2차유동의 혼합특성, 배기성능 및 진공성능 등의 이젝터 유동 특성들은 이젝터의 구동압력비에 강하게 의존하게 되므로, 단순한 이론적 수단으로 아음속/음속 이젝터의 성능을 평가하는 것은 용이하지 않기 때문이다. 본 연구에서는 아음속/음속 이젝터 형상 및 성능 설계 Code를 개발하였으며 시험 및 CFD 해석 결과를 통해 오차 보정을 수행하였다. 또한, 1차원 공력 설계 Code를 활용한 이젝터 최적 형상 설계를 수행하였다.

2. 본 론

본 절에서는 아음속/음속 이젝터의 성능을 평가하기 위해 일차원 기체역학 이론을 이용하여 공력 설계를 수행하였다. 3차원 유동해석 결과와 비교함으로써 아음속/음속 이젝터에 대한 1차원 코드 검증을 수행하였으며 오차에 대해서 1차 노즐의 유량계수, 디퓨저의 손실계수를 도출하여 이론해석의 정확도를 높였다.

2.1 1차원 공력 설계

주유동 (P_{01}) 및 흡입유동 (P_2) 압력비 계산은 식 (1), (2)로 표현된다.

$$\frac{P_{01}}{P_2} = \frac{P_{01}}{P_{02} \times \pi(\lambda_2)} \quad (1)$$

$$\pi(\lambda_1) = \frac{\pi(\lambda_2)}{\Pi_0} \quad (2)$$

여기서 λ_1, λ_2 는 주유동, 흡입유동의 음속에 대한 속도계수이다. 챔버에서의 혼합 시작점 (하첨자 s)에서 $P_1 = P_2$ 이므로 식 (2)를 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\pi(\lambda_{1s}) = \frac{\pi(\lambda_{2s})}{\Pi_0} \quad (3)$$

주유동 및 흡입유동의 질유량비, 압력비, 온도비는 식 (4)에서와 같이 표현하였다.

$$n = \frac{m_2}{m_1} \quad \Pi_0 = \frac{P_{01}}{P_{02}} \quad \theta = \frac{T_{02}}{T_{01}} \quad (4)$$

$\lambda_1 < 1$ 의 경우, $0.528 < \frac{[P_{02} \cdot \pi(\lambda_2)]}{P_{01}}$ 이다.

이때, 속도와 비열비식으로 가스다이나믹 함수를 식 (6)으로 정의할 수 있다.

$$q(\lambda_1) = \lambda_1 \left[\frac{(k_1 + 1)}{2} \right]^{-\lambda_1^2} \cdot \frac{(k_1 - 1)}{2}^{(1/k_1 - 1)} \quad (6)$$

$\lambda_1 \geq 1$ 의 경우, $\lambda_{2s} = 1$ 으로 가정하고 식(7)에서 λ_{1s} 와 $q(\lambda_{1s})$ 값을 도출한다.

$$\pi(\lambda_{1s}) = (1/\Pi_0) \cdot [2/(k_2 + 1)]^{k_2/(k_2 - 1)} \quad (7)$$

$$q(\lambda_2)_{imi} = \Pi_0 n \cdot \theta^{0.5} / \Pi_0 n \cdot \theta^{0.5} + [1/q(\lambda_{1s}) - 1/q(\lambda_1)] \quad (8)$$

식 (8)에서 q_{λ_2} 에 대한 초기 계산을 수행하고 λ_{2imi} 값보다 작은 λ_2 를 선택한다. 여기서 q_{λ_2} 는 식 (9)에서 계산한다.

$$q(\lambda_2) = \lambda_2 \cdot [(k_2 + 1)/2]^{-\lambda_2^2} \cdot (k_2 - 1)/2^{1/k_2 - 1} \quad (9)$$

혼합가스부의 유속 및 압력 계산은 식 (10)~ 식 (13)을 통해 계산하고,

$$k^* = k_2/k_1, \quad C^* = C_2/C_1, \quad k_3 = [k_2 \cdot (1 + n \cdot C^*)] / (k^* + n \cdot C^*) \quad (10)$$

$$B_1 = (1 - 1/k_{12})^{0.5}, \quad B_2 = (1 - 1/k_2^2)^{0.5}, \quad B_3 = (1 - 1/k_3^2)^{0.5} \quad (11)$$

$$Z(\lambda_1) = \lambda_1 + 1/\lambda_1, \quad Z(\lambda_2) = \lambda_2 + 1/\lambda_2 \quad (12)$$

$$Z(\lambda_3) = [B_1 \cdot Z(\lambda_1) + B_2 \cdot n \cdot (C^* \cdot \theta)^{0.5} \cdot Z(\lambda_2)] / B_3 \cdot [(n + 1) \cdot (1 + n \cdot C^* \cdot \theta)]^{0.5} \quad (13)$$

$Z(\lambda_3) \leq 2$ 의 조건을 만족할 때까지 반복 계산하여 λ_3 결정한다. q_{λ_3} 는 식 (14)에서 구할 수 있다.

$$q(\lambda_3) = \lambda_3 \cdot [(k_3 + 1)/2 - \lambda_3^2 \cdot (k_3 - 1)/2]^{1/(k_3 - 1)} \quad (14)$$

$\lambda_2 = 0$ 이 아닌 조건에서 A_1, A_2, A_3 는 식 (15) ~ (17)로 정의된다.

$$A_1 = k_1 \cdot [2/(k_1 + 1)]^{k_1/(k_1 - 1)} \cdot [(k_1 + 1)/(k_1 - 1)]^{0.5} \quad (15)$$

$$A_2 = k_2 \cdot [2/(k_2 + 1)]^{k_2/(k_2 - 1)} \cdot [(k_2 + 1)/(k_2 - 1)]^{0.5} \quad (16)$$

$$A_3 = k_3 \cdot [2/(k_3 + 1)]^{k_3/(k_3 - 1)} \cdot [(k_3 + 1)/(k_3 - 1)]^{0.5} \quad (17)$$

이때 주유동 및 흡입 유동의 면적비 α 는 식 (18)에서 계산된다.

$$\alpha = F_1/F_2 = A_2 \cdot q(\lambda_2)/[A_1 \cdot n \cdot \Pi 0 \cdot q(\lambda_1) \cdot \theta^{0.5}] \quad (18)$$

$$q(\lambda_{1s})_{cr} = [a/(a+1)] \cdot q(\lambda_1) \quad (19)$$

또한 식 (19)를 통해 얻은 $\lambda_{1s,cr}$ 가 $\lambda_{1s} < (\lambda_{1s})_{cr}$ 의 조건을 만족할까지 반복 계산을 수행하게 된다.

$$F_1 = 0.785 \cdot D_1^2, \quad F_1^* = 0.785 \cdot (D_1^*)^2, \quad F_2 = F_1/\alpha \quad (20)$$

$$F_3 = F_1^* + F_2, \quad D_3 = (F_3/0.785)^{0.5}, \quad l_3 = (6 \cdots 8) \cdot D_3 \quad (21)$$

주유동 노즐, 흡입유동 면적, 혼합챔버 형상은 식 (20), (21)에서 계산할 수 있다.

$$T_{03} = [T_{01} \cdot (1 + n \cdot C^* \cdot \theta)] / (1 + n \cdot C^*) \quad (22)$$

식 (22)에서 혼합부에서의 전온도를 구한다.

$$\varepsilon = P_{03}/P_{02} = A_3 \cdot (n+1) \cdot [(1/(C^* \cdot \theta) + n)]^{0.5} \cdot q(\lambda_2)/[A_2 \cdot n \cdot (1+a) \cdot q(\lambda_3)] \quad (23)$$

혼합가스의 압력계수는 식 (23)과 같이 압력비로 정의한다. 디퓨저에서의 압력 계수 값은 식 (24)와 (25)를 통해 계산한다.

$$\xi = [0.04 \cdot (1 - f_2)] / [Re^{0.25} \cdot \sin(\gamma/2)] + 3.2 \cdot [\tan(\gamma/2)] \cdot 1.25 \cdot (1 - f)^2 \quad (24)$$

$$\sigma = 1 - \xi \cdot [k_3/(k_3 + 1)] \cdot \lambda_3^2 [1 - (k_3 - 1)/(k_3 + 1) \cdot \lambda_3^{21/(k_3 - 1)}] \quad (25)$$

결국, 디퓨저 출구에서의 전압력 및 가스다이나믹 함수는 식 (26)에서 계산하고 출구에서의 λ_4 결정한다.

$$P_{04} = \sigma \cdot P_{03}, \quad q(\lambda_4) = q(\lambda_3) \cdot f/\sigma \quad (26)$$

식 (27) ~ (29)를 통해 출구에서의 유동 특성 값들을 계산한다.

$$P_4 = P_{04} \cdot \pi(\lambda_4), \quad T_4 = T_{03} \cdot \tau(\lambda_4) \quad (27)$$

$$a_{cr} = 2 \cdot [k_3/(k_3 + 1)] \cdot 9.8 \cdot R_3 \cdot T_{03}^{0.5} \quad (28)$$

$$V_4 = \lambda_4 \times a_{cr} \quad (29)$$

2.1 설계 결과 검증

설계 검증을 위해 수소재순환 이젝터 시험결과와 [4]를 기준으로 이론적 계산 결과와의 비교를 수행하였다. 수소재순환 이젝터의 공급라인에는 수소가 공급되며 흡입 라인에서는 질소 수소의 혼합가스가 가습된 상태로 흡입되고 있다. 그림 1은 1차원 계산 결과와 시험결과를 비교한 그래프이다. 공급 유량 대비 흡입 유량값을 비교한 결과 10%이내의 오차로 비교적 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 이러한 오차는 흡입 및 혼합부

의 형상에 의한 유동 손실값에 의해 발생되게 되므로 3차원 CFD (Computational Fluid Dynamics) 계산을 수행하여 손실값에 대한 보정을 수행하였다.

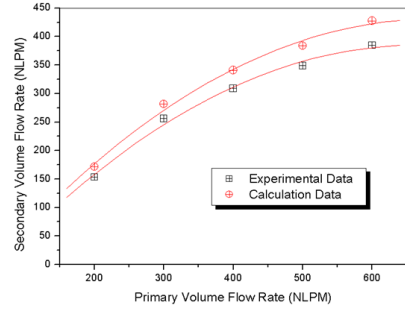


Fig. 1. 이젝터 설계 코드 검증 결과

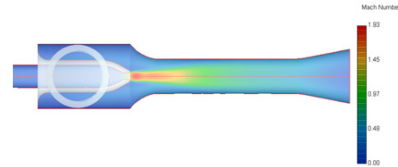


Fig. 2. 마하수 분포

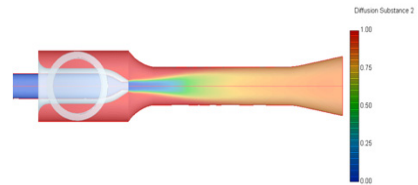


Fig. 3. 수소 혼합가스 Mole Fraction

그림 2~3은 수소 재순환 이젝터 시스템의 마하수 분포 및 수소 혼합가스 Mole Fraction을 보여주고 있다. 고압의 수소가 축소 노즐 (convergent nozzle)로부터 방출되는 경우에, 발생하는 분류의 전단작용에 의해 재순환 흡입관의 저압기체 (혼합 수소)가 이젝터 입구로 흡입되어 1차 유동인 분류와 혼합한다. 1차 유동과 2차 유동의 혼합기체는 이젝터의 목과 단면 믹싱 챔버 부분에서 완전히 혼합된 후, 디퓨저를 통하여 공급된다. 해석 결과로서 질소 수소의 혼합가스의 흡입량에 대한 보정 계수를 설계 Code에 반영하여 계산의 신뢰도를 향상시킬 수 있었다.

2.3 성능 시험

그림 4에서는 이젝터에 대한 혼합가스 흡입 성능을 평가하기 위한 시험장치를 보여주고 있다. 재순환 흡입관으로 흡입되는 수소 및 질소 혼합가스의 가습을 위해서 가습장치 (B1)를 사용하였으며 유량에 따른 100% 가습 상태를 자동적으로 형성시켜준다. 디퓨저 출구의 공급압력 기준으로 흡입관 압력 및 주유동 공급압력 변화에 따른 흡입유량을 측정하여 이젝터 성능을 평가하였다.

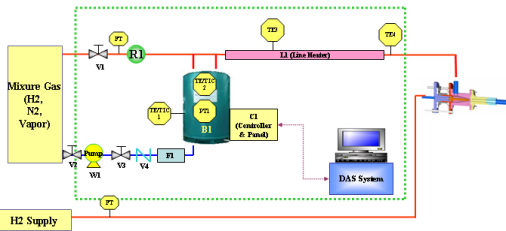


Fig. 4. 이젝터 시험 장치 스킴

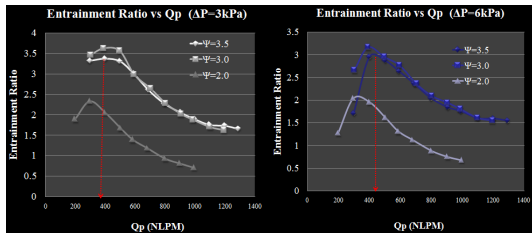


Fig. 5. 공급유량에 대한 흡입율 비교(고유량 용)

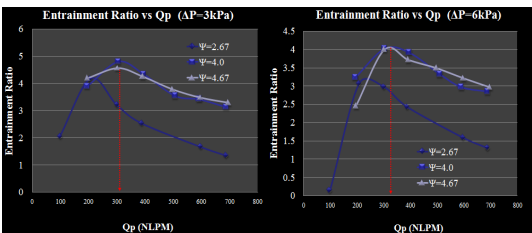


Fig. 6. 공급유량에 대한 흡입율 비교(저유량 용)

그림 5, 6에서는 주유동의 수소 공급유량 (600NLPM) 기준으로 고유량 및 저유량용 이젝터의 노즐 목에 대한 혼합부 직경비 (ψ)를 변화시켰을 때 공급 수소 유량에 대한 흡입율을 변화를 보여주고 있다. 결국 수소재순환 이젝터의 최대 성능을 위한 ψ 값을 도출하였다. 출구와 흡입부의 차압이 클수록 최대 흡입율은 감소하였으

며 최대 흡입율을 위한 수소 공급유량을 결정할 수 있었다. 저유량용 이젝터는 노즐목 직경의 감소로 인해 흡입율은 증가하고 있으며 유속 증가로 인해 최대 흡입율을 위한 ψ 값도 상승함을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구를 통해 아음속/음속 이젝터에 적용하기 위한 공력 설계 Code를 개발하였으며 시험 및 CFD 해석 결과를 통해 검증하였다. 흡입량에 대한 보정 계수값을 가지고 이론적 계산 신뢰도를 높일 수 있었다. 결국, 흡입율이 높고 탈설계점에서도 사용 가능한 아음속 및 음속 이젝터 설계 기술을 확보하였다. 또한 향후 이젝터의 탈설계 영역에서의 작동 성능을 정확히 예측함으로써 이젝터 시스템의 효율 향상과 작동 영역 확대가 가능할 것이며 멀티 또는 듀얼 이젝터 및 가변 공급 유량/압력 시스템 적용을 통해 고효율 이젝터 개발을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Georgiadis, N. J., Walker, J.F., and Trefny, C. J., "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, 1998.
2. Goethert, B. H., "High altitude and space simulation testing," ARS Journal, Vol. 32. No. 12, 1962, pp. 872-882
3. Olds, J., "Options for flight testing rocket-based combined-cycle engines," AIAA 96-2688, 1996, Lade Buena Vista, FL, USA
4. 문중훈, 장석영, 전성복, 남궁 혁준, 홍창욱, 김영수, "연료전자자동차용 수소공급시스템 부품 및 설계 기술 개발", 2007 친환경연료 전자자동차핵심부품및시스템기술개발 Work Shop 논문집