

고고도 환경 모사를 위한 멀티 이젝터 설계

남궁혁준* · 심창열* · 이재호* · 박순상*

Multi-Ejector Design for High Altitude Simulation

Hyuck-Joon Namkoug* · Chang-yol Shim* · Jae-ho Lee* · Sun-sang Park*

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 design procedure on the configuration and operating condition of multi-ejector for the various high altitude simulation.

초 록

이젝터 시스템은 주유동 제트에 발생하는 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 다양한 고고도 환경 모사를 위한 멀티 이젝터의 형상 및 운전 조건을 결정하는 설계 절차를 수립하고자 하였다.

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

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 있다. 일반적인 고고도 환경 모사 시험 설비는 디퓨저형 시험 장치로 추진기관을 진공 챔버 내에 위치시키고 노즐 끝단에 디퓨저를 부가하여 시험 중 디퓨저 효과로 진공 챔버 내의 진공을 유지시키는 시험장치이다. 이러한 장치에서는 노즐과 디퓨저 사이에서 초기 변화와 물성치의 변화에 따른 영향을 최소화하는 초기 안정적인 Start 조건을 얻기 위해서 실제 시험 장치에는 큰 진공 챔버가 이용된다. 본 연구에서는 기존 작동 방식의 단점을 개선하기

* 현대로템 기술연구소

† 교신저자, E-mail: namkoug@hyundai-rotem.co.kr

위해서 진공펌프로써 이젝터를 활용하여 배압을 낮출 수 있는데, 멀티 이젝터를 도입함에 따라 중고도에서 고고도에 이르는 다양한 고도 영역 모사와 효율 극대화된 형상을 도출할 수 있는 설계 절차를 수립하였다.

2. 본 론

본 절에서는 아음속/음속/초음속 이젝터의 성능을 평가하기 위해 일차원 기체역학 이론을 이용하여 공력 설계를 수행하였다. 3차원 유동해석 결과와 비교함으로써 아음속/음속/초음속 이젝터에 대한 1차원 코드 검증을 수행[4]하였으며 오차에 대해서 1차 노즐의 유량계수, 디퓨저의 손실계수를 도출하여 이론해석의 정확도를 높였다.

가. 1차원 공력 설계 (단일 이젝터)

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.

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

$\lambda_1 < 1$ (아음속)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.

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

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

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

$q(\lambda_2)_{ini} = \Pi_0 \cdot n \cdot \theta^{0.5} / \Pi_0 \cdot n \cdot \theta^{0.5} + [1/q(\lambda_{1s}) - 1/q(\lambda_1)]$ (8) 식 (8)에서 q_{λ_2} 에 대한 초기 계산을 수행하고 $\lambda_{2,ini}$ 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.

$$q(\lambda_3) = \lambda_3 \cdot [(k_{3+1})/2 - \lambda_3^2 \cdot (k_3 - 1)/2] / (k_3 - 1) \quad (14)$$

$\lambda_2 = 0$ 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.

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

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

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.

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

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

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

나. 멀티이젝터 설계

현재 단일 이젝터에 대한 연구는 많이 이루어진 상태이나 탈설계점에서의 성능 저하로 운전 영역에 한계를 보이고 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 동일 시험장치에서 단일 이젝터의 병렬 조합을 통해 지상에서의 고도 변경 모사를 최대 효율로 가능토록 하였다.

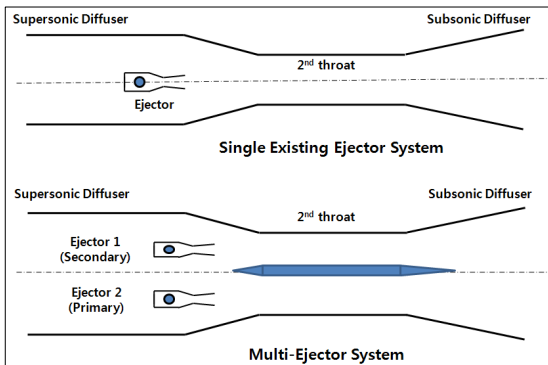


Fig. 1 멀티 이젝터 개념도

Figure 1에서 멀티 이젝터의 개념도를 보여주고 있다. 단일 이젝터 공력 설계를 통해 이젝터 목경계 대비 디퓨저 2차목 직경비와 길이, 이젝터 공급 유량 등을 결정하게 된다. Fig. 2에서와 같이 증유량 (Secondary Ejector), 대유량 이젝터 (Primary Ejector)의 이젝터 성능 곡선과 시험 설비 시스템 곡선을 통해 최대 효율 운전 영역을

결정하고 2개의 이젝터의 조합을 통해 진공 챔버의 압력을 변경할 수 있게 하였다.

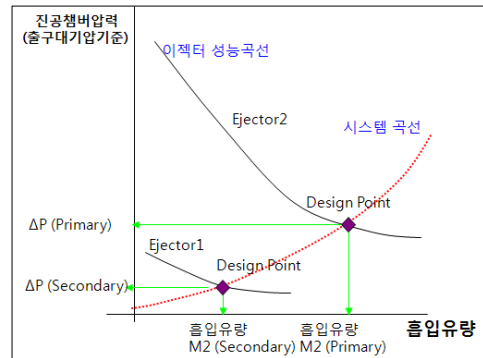


Fig. 2 멀티 이젝터 조합

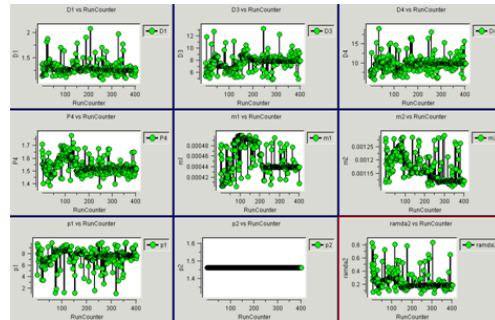


Fig. 3 형상 최적화 및 작동 영역 강건 설계

Figure 3에서는 최대 효율의 이젝터 형상 및 작동안정 영역 산출을 위한 최적화 및 강건 설계를 수행 결과를 보여주고 있다. 목표 고도에 대한 진공도를 얻기 위한 Primary and Secondary Ejector의 작동 조건에 대한 성능맵을 작성하였다. 이를 활용하여 이젝터에 의해 흡입되는 유량을 변화시켜 목표 고도에서의 안정적 Start 조건을 구현할 수 있다.

3. 결 론

본 연구를 통해 아음속/음속/초음속 이젝터에 적용하기 위한 공력 설계 절차를 수립하였으며 흡입 성능을 높여 탈설계점에서도 사용 가능한 멀티 이젝터 설계 기술을 확보하였다. 또한 향후

이젝터의 탈 설계 영역에서의 작동 성능을 정확히 예측함으로써 이젝터 시스템의 효율 향상과 가변 공급 유량 (압력) 시스템 적용을 통해 동일 시험 설비에서의 다양한 고도 영역 모사가 가능할 것이다.

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) 남궁혁준, 한풍규, 김영수, "이젝터 시스템의 설계 및 작동 특성에 관한 연구", 한국추진공학회 2009년도 추계학술대회 논문집