

초음속 공기 흡입구 성능설계 기법 연구

변종렬* · 윤현걸* · 임진식*

A Study on the Performance Design Schemes of the Supersonic Air Intakes

Jong-Ryul Byun* · Hyun-Gull Yoon* · Jin-Shik Lim*

ABSTRACT

A study on the performance design schemes of the supersonic air intakes applied to the supersonic air-breathing propulsion system(Ramjet/Scramjet) was conducted and for two kinds of air intakes, the preliminary configuration designs and the performance analysis models were established. For axisymmetric conical air intake and two dimensional rectangular air intake, the performance effects were assessed according to compression angles and shock wave numbers.

초 록

초음속 공기 흡입식 추진시스템(램제트/스크램제트)에 적용되는 공기 흡입구의 성능설계 기법 연구를 수행하여 두 종류의 공기 흡입구에 대한 예비 형상 설계 및 성능해석 모델을 수립하였다. 제시된 모델을 사용하여 축대칭 원추형 공기 흡입구와 2차원 사각형 공기 흡입구의 압축 각도와 충격파 개수에 따른 성능 영향을 평가하였다.

Key Words: Ramjet(램제트), Scramjet(스크램제트), Supersonic Air Intake(초음속 공기 흡입구), Total Pressure Recovery(전압력 회복율), Capture Area Ratio(유량 포획 면적비)

1. 서 론

램제트와 스크램제트 추진시스템과 같은 초음속/극음속 공기 흡입식 추진시스템의 필수적인 구성품인 공기 흡입구는 초음속 유동의 공기를 충격파 시스템을 이용한 유동의 감속과 램압축을 통해 엔진에 요구되는 공기 조건을 공급하는

역할을 수행한다. 일반적으로 초음속 공기 흡입구의 설계 시 주요 고려사항은 흡입공기 압력회복율의 최대화와 함께 안정적인 공기 흐름의 유도와 엔진으로의 적절한 유량을 제공하고, 충격파의 적절한 배치를 통해 wave drag 등 항력을 최소화하는 것이다[1]. 본 연구에서 제시되는 초음속 공기 흡입구 설계 및 해석 기법은 두 종류의 공기 흡입구, 축대칭 원추형(conical)과 2차원 사각형(rectangular) 흡입구 형상에 대하여 설계와 해석을 수행하기 위한 모델로 구성된다. 개발

* 국방과학연구소 1기술연구본부 5부

† 교신저자, E-mail: joy2bjr@gmail.com

된 모델을 이용하여 축대칭 원추형 흡입구와 2차원 사각형 공기 흡입구의 기하학적 형상 설계를 수행하고, 다중 압축 각도와 충격파 개수에 따른 성능 변화 영향을 평가하였다.

2. 설계 및 해석 기법

초음속 공기 흡입구 설계의 주요한 기준은 최대 전압력 회복계수를 제시하는 것으로, 다중 충격파를 이용한 초음속 공기 흡입구는 압축각을 최적화하여 전압력 회복을 및 유량 포획율을 극대화시켜야 한다. 다중 경사충격파에 있어서 최적 계산을 위한 기본적인 해석은 Oswatitsch에 의해 제시된 방법을 사용하였다[2]. Oswatitsch 해석의 핵심은 경사충격파 이론의 수학적인 해법을 바탕으로 n개의 경사 충격파를 지나는 유동의 전압력 비가 최대가 되는 함수의 정의와 해석을 통해 모든 경사 충격파 전방의 마하수 수직 성분값(충격파 강도)이 동일해야 한다는 것이다.

$$\frac{P_{t,s}}{P_{t,\infty}} = \frac{P_{t,s}}{P_{t,1}} = \frac{P_{t,2}}{P_{t,1}} \cdot \frac{P_{t,3}}{P_{t,2}} \dots \frac{P_{t,s}}{P_{t,n}} \quad (1)$$

여기서, $P_{t,2}/P_{t,1} = P_{t,3}/P_{t,2} = \dots = P_{t,s}/P_{t,n}$ 일 때, 즉 $M_1 \sin \beta_1 = M_2 \sin \beta_2 = \dots = M_{n-1} \sin \beta_{n-1}$ 일 때, 최적의 전압력 회복율을 얻을 수 있다.

초음속 공기 흡입구 설계 및 해석 모델의 입력 자료는 설계 조건(마하수), 흡입구 종류, 총 압축각, 흡입구 면적비등이며, 계산 결과는 흡입구 형상 설계 결과, 마하수에 따른 압력회복계수, 유량 포획 면적비, wave 항력계수 등이다.

2.1 원추형 공기 흡입구(Conical Air Intake)

Figure 1은 원추형 공기 흡입구 형상 설계를 위한 다중 충격파 압축각과 주요 유동 특성치 등을 구성한 것이다. 원추형 흡입구 유동에 대한 Taylor-Maccoll 유동의 해석은 4차 Ruge-Kutta 수치적분 방법을 사용하였다[3].

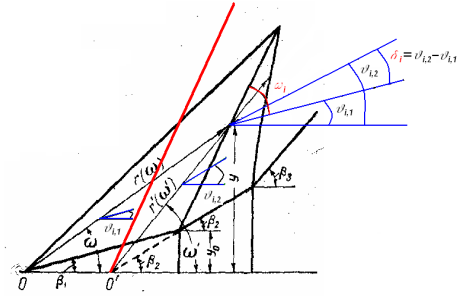


Fig. 1 Design schematics for conical air intake

원추형 흡입구 형상치수 설계 절차는 다음과 같다.

- (1) 주어진 총 압축각도, 기준 마하수, 압축 개수에 대해 동일한 충격파 강도를 가지는 각 원추각도를 결정한다.
- (2) 선정된 각 원추각도에 따른 충격파 각도와 원추 유동각도 등을 결정한다.
- (3) 주어진 원추 각도에서 충격파 관계식을 사용하여 각 원추 좌표를 계산한다.

설계된 원추형 흡입구 형상에 대해 전압력 회복계수, σ_0 와 유량 포획 면적비, ϕ_H , wave drag에 의한 항력계수, C_{xD} 는 아래 식을 사용하여 계산된다.

$$\sigma_0(M, \beta) = \left[\frac{(k+1)M^2 \sin^2 \omega_s}{(k-1)M^2 \sin^2 \omega_s + 2} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

$$\phi_H(M, \omega_s, \beta \Sigma) = 1 - 2\sigma_0(M, \beta \Sigma) \int_0^{\omega_s} \frac{\sin \theta_i}{\sin^2 \omega_i} \frac{q(\lambda_i)}{q(\lambda_H)} d\omega \quad (3)$$

$$C_{xD} = 4\sigma_0(M, \beta \Sigma) \int_0^{\omega_s} \frac{\sin \theta_i}{\sin^2 \omega_i} \frac{q(\lambda_i)}{q(\lambda_H)} \left(1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_H} \cos \theta_i \right) d\omega \quad (4)$$

2.2 사각형 공기 흡입구(Rectangular Air Intake)

Figure 2는 2차원 wedge 형태의 사각형 공기 흡입구 형상 설계를 위한 다중 충격파 압축각과 주요 유동 특성치 등을 구성한 것이다.

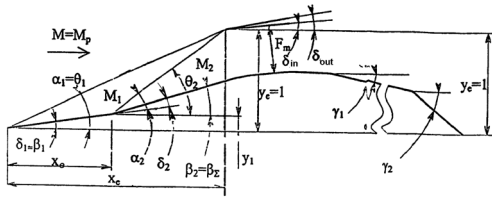


Fig. 2 Design schematics for rectangular air intake

사각형 흡입구 형상치수 설계 절차는 2차원 유동을 고려한다는 점을 제외하고, 원추형 흡입구 설계 절차와 거의 동일하다. 설계된 2차원 wedge형 흡입구 형상에 대해 유량 포획 면적비, ϕ_H , wave drag에 의한 항력계수, C_{xD} 는 아래 식을 사용하여 계산된다.

$$\phi_H = \frac{p_m M_m}{p_0 M_0} \sqrt{\frac{T_0}{T_m} [(1-y_{m-1})\cos\beta_\Sigma - (x_e - x_{m-1})\sin\beta_\Sigma]} \quad (5)$$

$$C_{xD} = \frac{2}{\gamma M_0^2} \left[\sum_{i=1}^{m-1} \frac{P_i}{P_0} (y_i - y_{i-1}) + \frac{P_m}{P_0} (1 - y_{m-1}) - 1 \right] - 2\phi_H - \left(1 - \frac{\lambda_m}{\lambda_0} \cos\beta_\Sigma \right)$$

3. 해석 결과

3.1 원추형 공기 흡입구 해석 결과

Figure 3은 원추형 공기 흡입구의 원추 개수에 따른 전압력 회복을 변화를 보여준다. 원추 개수가 증가할수록, 즉 경사충격파의 개수가 증가할수록 각 충격파가 약한 충격파 강도를 가지게 되어 전압력 회복율이 증가됨을 알 수 있다.

Figure 4, 5, 6은 2개의 원추에 대하여 총 원추 각도에 따른 전압력 회복율, 유량 포획 면적비, wave 항력계수의 변화를 각각 보여준다. 주어진 동일 흡입구 직경을 기준으로 총 원추각도가 증가할수록 충격파 압축률의 증가로 전압력 회복율이 증가하지만, 경사충격파 각도가 증가하여 유량 포획 면적비는 감소하고, 그에 따른 wave 항력계수가 증가하는 경향을 보여준다.

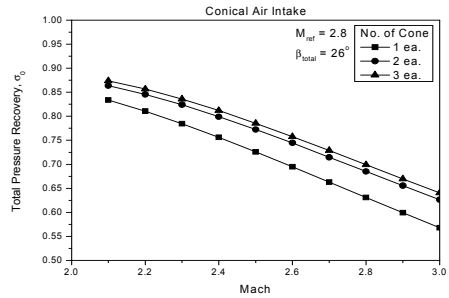


Fig. 3 Total pressure recovery according to No. of cone in conical air intake

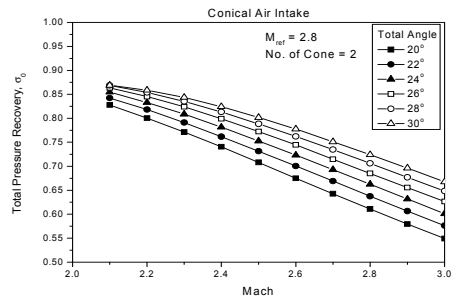


Fig. 4 Total pressure recovery according to total compression angle in conical air intake

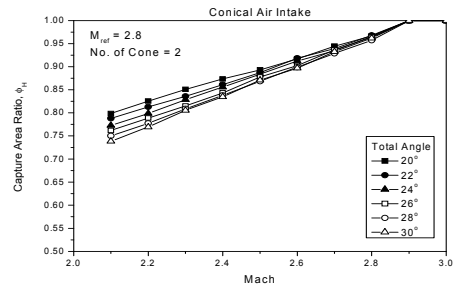


Fig. 5 Capture area ratio according to total compression angle in conical air intake

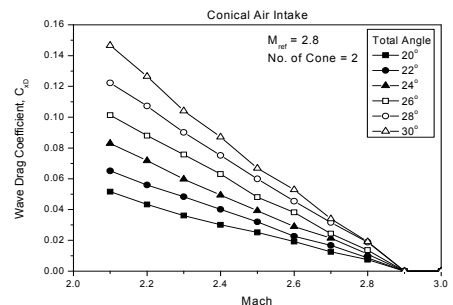


Fig. 6 Wave drag coefficient according to total compression angle in conical air intake

3.2 사각형 공기 흡입구 해석 결과

Figure 7은 사각형 공기 흡입구의 wedge 개수에 따른 전압력 회복율 변화를 보여준다. Fig. 8, 9, 10은 2개의 wedge에 대하여 총 압축각도에 따른 전압력 회복율, 유량 포획 면적비, wave 항력계수의 변화를 각각 보여준다. 해석 결과는 우주형 공기 흡입구 결과와 동일한 경향을 보여주고 있다.

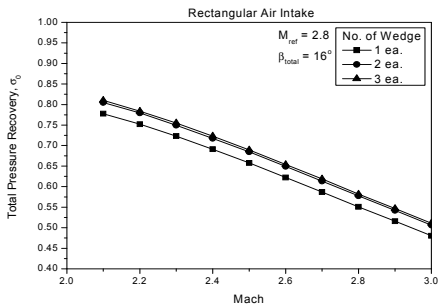


Fig. 7 Total pressure recovery according to No. of wedge in rectangular air intake

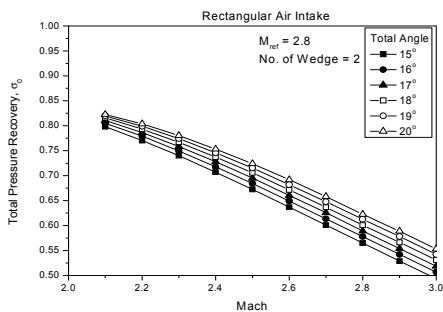


Fig. 8 Total pressure recovery according to total compression angle in rectangular air intake

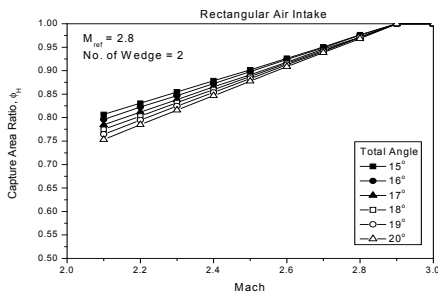


Fig. 9 Capture area ratio according to total compression angle in rectangular air intake

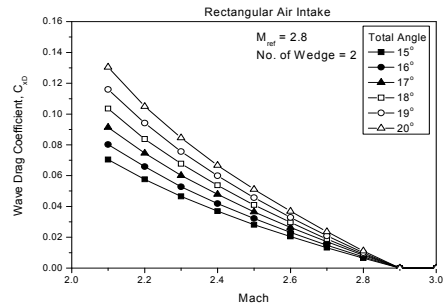


Fig. 10 Wave drag coefficient according to total compression angle in rectangular air intake

4. 결 론

본 연구를 통해 수립된 초음속 공기 흡입구 모델을 확대칭 원추형 공기 흡입구와 2차원 사각형 공기 흡입구의 압축 각도와 충격파 개수에 따른 성능 영향을 평가하였다. 두 종류의 공기 흡입구 모두 충격파 개수, 즉 원추 또는 썰기 수가 증가함에 따라 전압력 회복율은 증가함을 보여주었으며, 총 압축각도의 증가에 따라 경사충격파 각도의 증가로 인해 전압력 회복율은 증가하지만, 유량 포획 면적비가 감소하고, wave 항력이 증가함을 알 수 있었다. 따라서 설계된 전체 추진시스템에서 요구되는 초음속 공기 흡입구의 성능 특성치를 고려하여 적절한 충격파 개수와 총 압축각도를 선정하여야 하겠다.

참고 문헌

1. Mahoney, John J., "Inlets for supersonic missiles," AIAA education series, 1990
2. Hermann, R., "Supersonic inlet diffusers and introduction to internal aerodynamics," Minneapolis-Honeywell Regulator Co. Aeronautical Division, 1956
3. Hoffman, J. D., Zucrow, M. J., "Gas dynamics," Wiley, 1976