

스크램제트 엔진 흡입구의 설계 및 3차원 성능해석

강상훈* · 신훈범** · 양수석***

Design Procedures of SCRamjet Engine Intake and Numerical Analysis

Sang Hun Kang* · Hun Bum Shin** · Soo Seok Yang***

ABSTRACT

Model SCRamjet Engine intake is designed for Ground test. The designed Intake provides hot and slow flow with the combustor. Flow separation is controlled by the shock wave segregation based on the Korekegi criteria. With Kantrowitz limit analysis, side wall cut out region is also set for the self start.

초 록

호주의 HyShot Center와의 공동연구를 통한 모델 스크램제트 엔진의 지상시험 수행을 위해 흡입구의 설계를 수행하였다. 본 흡입구는 연소기로 고온, 저속의 유동을 공급하는 방향으로 설계되었으며 Korkegi 관계식에 따라 충격파 결집구간을 분리함으로써 유동 박리현상을 차단하였다. 또한 Kantrowitz 관계식에 근거하여 자발시동이 가능하도록 흡입구 측면의 트임구간을 설정하였다.

Key Words: SCRamjet(스크램제트), Intake design(흡입구 설계), HyShot, Self-Start (자발 시동)

1. 서 론

스크램제트 엔진은 재사용발사체 및 지구촌 1 일 생활권화를 구현할 수 있을 것으로 기대되는 차세대 추진기관이다. 2002년 호주의 HyShot II의 비행 연소시험, 2004년 미국의 X-43A의 비행 시험 및 2006년 HyShot III의 비행 연소 시험 등이 성공적으로 이루어지면서 이에 대한 관심은

전 세계적으로 높아져 가고 있다. 실제로 미국, 영국, 호주, 일본, 독일 등 많은 선진국들이 스크램제트 엔진 관련 연구에 박차를 가하고 있는 실정이다. 이에 발맞춰 한국항공우주연구원은 고속추진기관 관련 핵심기술확보를 위해 수년간 지속적으로 연구해왔으며 호주의 HyShot Center와의 공동연구를 통하여 2007년 자체 설계한 시험용 스크램제트 엔진 모델의 지상시험을 계획하고 있다.

스크램제트 엔진을 포함한 램제트 엔진은 흡입구, 연소기 및 노즐로 이어지는 단순한 구성을 가지고 있어 별도의 압축기, 터빈을 필요로 하지 않으나, 그만큼 한정된 구성품을 가지고

* 한국항공우주연구원 항공추진그룹
연락처, E-mail: aeroksh@kari.re.kr

** 한국항공우주산업

*** 한국항공우주연구원 항공추진그룹

원활한 연소현상 및 추력을 얻어내야한다는 측면에서 보다 높은 차원의 기술이 요구된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 지상시험용 엔진 시험모델에 적용하기 위해 스크램제트 엔진 흡입구의 설계 및 전산해석을 수행하였다.

2. 흡입구의 기본 형상

2.1 설계 요구조건의 설정

스크램제트 엔진 흡입구의 역할은 연소기 내부에서 안정적인 연소가 일어날 수 있도록 적절한 조건의 공기를 공급해 주는 것이다. 따라서 연소기의 요구조건과 흡입구의 요구조건은 서로 상호간의 역할 분담을 고려하여 설정해야 한다. 엔진의 흡입구가 고온, 저속의 공기를 연소기에 공급해 주는 경우, 연소기 내에서의 연소효율이 높아져 연소기 길이를 짧게 가져갈 수 있지만 흡입구에 의한 항력이 크게 발생하는 단점이 있다. 반대로 흡입구에 의한 항력을 줄이면서 고속, 저온의 공기를 연소기에 공급하게 되면 연소기는 공기 및 연료의 혼합을 위한 필수 장치들을 장착해야함은 물론, 충분한 연소효율을 위해 연소기 길이를 길게 설정하여야 한다. 본 연구에서는 전자의 경우를 선택하여 저속, 고온의 공기를 연소기에 공급하도록 설정하였다.

- 1) $M_F=7.6$, $M_C=2.0$ - 유속을 낮추고 온도를 높여 안정된 연소 구현
- 2) 낮은 연소기 입구마하수, 높은 연소기 입구 온도를 위해 4개의 충격파 배치
- 3) 외부 충격파 2개, 내부 충격파 2개로 구성된 혼합압축형 흡입구 적용

이러한 요구 조건을 만족하기 위해 최초로 설정한 기본설계 개념도는 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

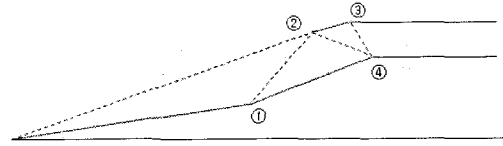


Fig. 1 Schematics of SCRamjet Intake

2.2 썸기 각도 (Wedge Angle)의 설정

기본적으로 최대 전압력 회복율(Maximum Pressure Recovery)을 얻기 위해서는 각 충격파의 세기(Strength)가 동일해야 한다. 즉 흡입구 상의 경사충격파로 유입되는 유동 마하수의 수직성분이 동일해야 하는 것이다[1]. 그러나 Fig. 1 과 같은 형상의 경우에는 흡입구 종단유동의 방향이 자유류의 방향과 동일하게 설정해야하는 제약이 있다. 즉, 각 유동에 대한 압축각도를 $\delta_1 \sim \delta_4$ 로 두면

$$\delta_1 + \delta_2 = \delta_3 + \delta_4 \quad (1)$$

의 식을 만족해야하는 것이다. 따라서 상기 조건들을 만족하면서 최대전압력회복율을 얻기 위해서 본 연구에서는 Parameter Estimation 최적화 기법 중 Levenberg-Marquardt Method를 이용하여 최적의 썸기 각도를 산출하였다[2]. 최적화를 위한 목적함수 F는

$$F = (1-Pr)^2 + (2.0 - Mc)^2 \quad (2)$$

로 표현되며 최적화 계산을 통해 목적함수를 최소화 시키는 압축각 $\delta_1 \sim \delta_4$ 는 다음과 같이 결정되었다.

$$\delta_1 = 12^\circ ; \delta_2 = 15^\circ ; \delta_3 = 12^\circ ; \delta_4 = 15^\circ \quad (3)$$

이 때, 전압력 회복율 $Pr=0.315$ 이며 그때의 연소기 입구 마하수 $M_c = 2.146$ 이다.

2.3 형상의 정립

각각의 압축각이 결정된 이후에는 연소기 입구의 높이만 설정하면 충격파 및 기하학적 관계식에 의해 전체적인 기본 형상을 결정할 수 있다[3]. 연소기 입구 높이를 10 mm로 둔 경우에 흡입구 중요 point들의 좌표는 다음과 같이 결정되었다. 여기서 좌표의 하첨자는 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

$$\begin{aligned}
 (x_1, y_1) &= (601.3495, 127.8208) & (4) \\
 (x_2, y_2) &= (765.9129, 247.3831) \\
 (x_3, y_3) &= (808.9478, 258.9143) \\
 (x_4, y_4) &= (839.0088, 248.9143)
 \end{aligned}$$

3. 흡입구의 형상 수정

3.1 박리 영역의 분석

흡입구상의 썸기(Wedge)에 의해 발생한 충격파는 유동의 압력을 상승시키므로 유동방향에 대해 역압력 구배(Adverse Pressure Gradient)를 형성하게 된다. 따라서 이러한 역압력 구배가 일정치를 넘어서는 경우 유동상에 박리현상(Separation)이 발생하여 정상적인 설계 유로를 방해할 수 있다. Korekegi[4]는 박리현상이 나타날 수 있는 임계 역압력 조건을 유동마하수의 관계식으로 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 p_i/p &= 1+0.3M^2, \quad M < 4.5 & (5) \\
 p_i/p &= 0.17M^{2.5}, \quad M > 4.5
 \end{aligned}$$

이때, p_i 는 충격파 이후 압력, p 는 충격파 이전 압력을 각각 나타낸다. 따라서 상기 식을 만족하는 p_i 보다 높은 압력이 충격파 후단에 형성되는 경우에는 박리현상이 발생하게 된다.

이러한 Korkegi의 관계식을 적용한 결과, 본 설계형상에서는 ④번 꼭지점 전단에서 박리현상이 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 2.에는 본 설계형상에 대한 전산해석 결과를 도시하였다.

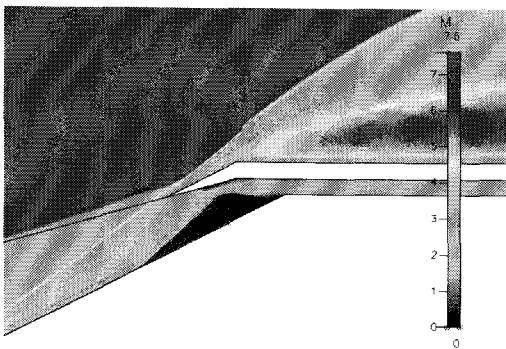


Fig. 2 Separation zone in the intake region

이 때 전산해석은 CFD FASTRAN을 이용하여 수행하였으며 수치해석 기법으로 Roe의 근사 리만해법과 Van Leer Limiter를 이용한 TVD기법 및 외재적 Runge-Kutta 기법을 적용하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 ④번 꼭지점 전단에서 박리현상이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다.

3.2 박리 방지를 위한 설계 수정

유동의 박리현상을 방지하기 위한 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 배출덕트(Bleed duct)를 설치하여 경계층을 제거하고 충격파와 흡입구 벽면과의 충돌(Impingement)를 막는 것이다. 그러나 이 방법은 많은 유량손실을 야기시킬 수 있으므로 본 연구에서는 채택하지 않기로 한다. Swithenbank[5]는 10%의 유량손실이 80%의 추력손실로 이어진다고 주장한 바 있다. 두 번째 방법은 충격파의 분리이다. 본 설계 모델의 ④번 꼭지점은 2개의 충격파가 겹집되는 구간으로서 극심한 압력변화가 발생하는 지점이다. 따라서 Fig. 3과 같이 형상의 변화를 통하여 충격파의 겹집을 회피한다면 박리현상을 막을 수 있다.

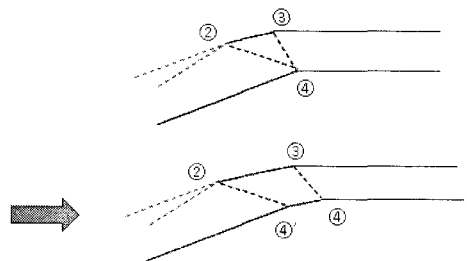


Fig. 3 Concept of Model Revision

이러한 수정사항에 더하여 받음각 $\pm 4^\circ$ 인 경우의 충격파배치에도 정상적으로 작동하기 위한 점을 고려하여 수정한 모델의 좌표는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 (x_1, y_1) &= (601.3, 127.8) & (6) \\
 (x_2, y_2) &= (780.9, 247.4) \\
 (x_3, y_3) &= (843, 264) \\
 (x_4, y_4) &= (854.8, 249.7) \\
 (x_4', y_4') &= (824.8, 241.7)
 \end{aligned}$$

3.3 자발시동 (Self-Start)를 위한 설계 수정

스크램제트엔진을 포함한 램제트 엔진의 경우 연소기의 운전조건에 따라 Thermal choking 등과 같은 요인에 의해서 후방 압력이 높아질 수 있다. 후방압력이 일정 이상 높아지는 경우에는 불시동(Unstart) 현상이 발생할 수 있는데, 이러한 경우 엔진의 재시동을 위해서는 흡입구 자체가 자발 시동이 가능하도록 설계 되거나 흡입구가 가변적으로 변형될 수 있도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 간단한 형상변화만으로 구현할 수 있는 자발시동 흡입구를 채택하였다.

흡입구가 자발시동되기 위해서는 흡입구 Cowli 후 내부압축 영역에서의 압축 정도가 Kantrowitz 한계를 넘지 않아야한다[6].

$$\left(\frac{A_{th}}{A_2}\right)_{Kantrowitz} = M_2 \left[\frac{(\gamma+1)M_2^2}{(\gamma-1)M_2^2 + 2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left[\frac{\gamma+1}{2\gamma M_2^2 - (\gamma-1)} \right]^{\frac{-1}{(\gamma-1)}} \times \left[\frac{1+(\gamma-1)/2 \cdot M_2^2}{(\gamma+1)/2} \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (7)$$

본 설계모델에서의 Kantrowitz 한계 압축비는 0.687~0.701 (받음각 $\pm 4^\circ$)이지만 실제로는 0.5614 정도로 압축되고 있다. 따라서 자발 시동을 위해서는 흡입구 벽면 트임 (Intake wall cut out)을 설정해야한다. 이를 위해 본 연구에서는 다음의 좌표에 해당하는 흡입구 측면에 트임을 두어 자발 시동이 이루어질 수 있도록 설정하였다.

$$(x_a, y_a) = (803.453, 253.428) \quad (8)$$

$$(x_b, y_b) = (808.026, 244.455)$$

5. 최종 흡입구 형상 결정 및 검증

이상의 과정을 통하여 최종적으로 결정된 흡입구의 형상을 Fig. 4에 도시하였다. 이때 흡입구의 너비는 100mm로 두었다. 설계된 모델 형상에 대해 실제적으로 불시동, 박리 등의 현상들은 발생하지 않는지 여부에 대한 검증차원에서 Fluent를 이용한 전산해석을 수행하였다. 이 때 수치해석 기법으로는 Fluent 프로그램 제공하는

Coupled-Implicit Solver를 사용하였으며, k-w SST 모델을 이용하여 난류를 해석하였다.

Fig. 5에는 받음각 영(zero)인 경우에 3차원 해석 결과 중 흡입구 너비방향 대칭면에서의 압력 및 마하수 분포도를 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 충격파를 포함한 유동이 무리없이 배치되어 흡입구가 정상적으로 작동하고 있음을 확인할 수 있다.

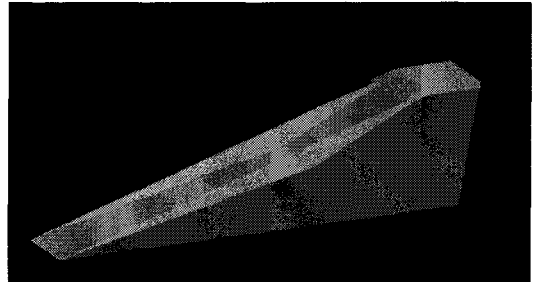


Fig. 4 Designed SCRamjet Intake Model

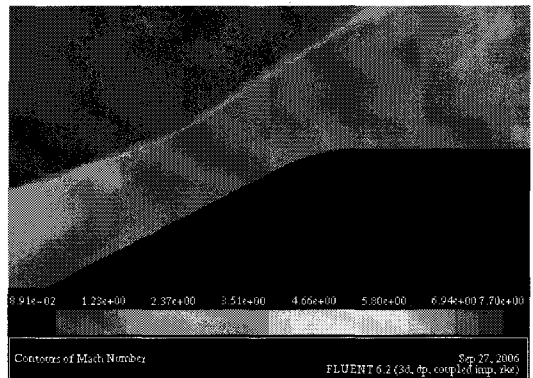
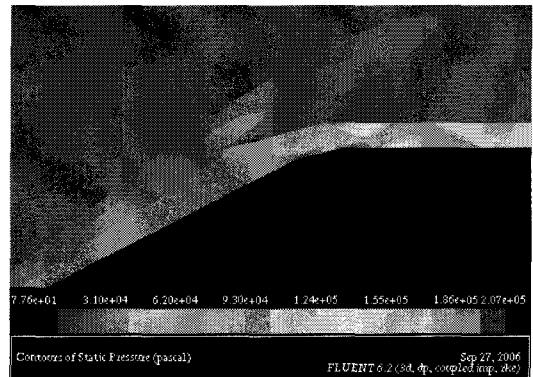


Fig. 5 Pressure (UP) and Mach (Down) contour at the central surface (AOA = 0°)

6. 결 론

본 연구를 통하여 시험용 스크램제트 엔진의 흡입구를 설계하였다. 설계된 흡입구는 자유류를 고온 저속으로 압축하여 연소기에 공급하는 방향으로 설정하였으며, 박리현상을 방지하고 자발 시동을 구현할 수 있도록 설정하였다. 설계한 흡입구는 전산해석을 통하여 이상 유무를 재확인하였다. 이후에는 설계 흡입구 Nose cone의 Bluntness 설정 및 연소기 설계모델과의 상호작용 분석 등을 통하여 시험용 스크램제트 엔진 모델을 완성할 계획이다.

참 고 문 헌

1. Seddon, J., Intake Aerodynamics, AIAA Education Series, AIAA, Washington, DC, 1985
2. Ozisik, M. N., Inverse Heat Transfer, Taylor & Francis, New York, 2000
3. 강상훈, 이양지, 양수석, "스크램제트 엔진 흡입구의 기본 설계 연구," 한국추진공학회지, 제9권, 제3호, 2005, pp.38-48
4. Korkegi, R. H., "Comparison of shock-induced two- and three-dimensional incipient turbulent separation," AIAA Journal, Vol. 13, No. 4, 1975, pp. 593-604
5. Swithenbank, J., "Hypersonic air-breathing propulsion," Progresses in Aeronautical Sciences, Vol. 8, 1966, pp. 229-294.
6. Zarchan, P., Scramjet Propulsion, Progress in Astronautics and Aeronautics, vol. 189, 2000