

함정 수직발사대 화염처리장치 형상에 따른 유동특성 연구

Design Study on the Flow Characteristics of a Gas Management System for a Vertical Launching System

양 영 록*

Young-Rok Yang

ABSTRACT

The gas management system for a vertical launching system must be safely managed within a ship. The plenum and uptake are capable of containing and surviving a full-burning restrained firing without loss of gas management integrity. To secure the safety, the pressure characteristics with a supersonic under-expanded jet on a gas management system are numerically investigated using computational fluid dynamics. The results of present analysis and the preliminary design of the gas management system are described in this paper.

Keywords : Gas Management System(화염처리장치), Vertical Launching System(수직발사대), Supersonic Impinging Jet (초음속 충돌 제트)

1. 서 론

함정 수직발사대(VLS : Vertical Launching System)는 함정 내부에 설치되어 유도탄을 수직으로 발사하기 위한 장치이다. 이러한 수직발사대는 함정 내부에 설치되므로 유도탄 발사 시 함정 하부로 배출되는 화염을 안전하게 배출하여야 한다. 또한 화염에 의한 고온 고압의 반복적인 열 충격 하중과 유도탄이 발사관 내부에 구속되어 완전하게 연소하는 탄 구속 발사 시의 열 충격 하중을 지지하여야 한다. 이러한 역할을 담당하는 것이 화염처리장치(GMS : Gas Management System)이다.

* 2013년 3월 8일 접수~2013년 8월 16일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 양영록(yryang@add.re.kr)

화염처리장치를 구성하는 주요 구성품으로 연실(plenum), 연통(uptake)이 있다. 연실은 Fig. 1과 같이 유도탄 하부에서 유도탄을 통해 배출되는 고온 고압의 화염을 지지함과 동시에 연통으로 화염을 유도하는 역할을 수행한다. 연통은 유도탄의 화염을 함정 외부로 배출하는 통로 역할을 수행한다. 따라서 연실과 연통은 고온 고압의 화염에 노출되므로 열보호재로 보호되어야하고 내압을 지지해야한다. 또한 연실과 연통은 외부 충격으로부터 수직발사대를 지지하는 기본 구조물의 역할도 수행해야 한다. 이와 같이 수직발사대의 화염처리장치 설계는 매우 복잡하다^[1~4]. 특히 로켓모터로부터 발생된 고온 고압의 초음속 충돌 제트가 연실 바닥면과 충돌하는 현상인 초음속 충돌 제트에 대한 문제와 초음속 충돌 제트에 의한 삍마(ablation)현상은 화염처리장치 설계에 가장 중요한 이슈 중 하나로 현재에도 많은 연구가 수행되고 있다^[1~7].

본 연구는 이러한 수직발사대 화염처리장치 형상을 설계하기 위하여 1. 고려해야 할 주요 설계 변수를 도출하고 2. CFD를 이용하여 주요 설계 변수에 따른 유동해석을 수행하여 유동특성을 분석하였으며 3. 이를 바탕으로 효율적인 화염처리장치 형상 설계에 대해 기술하였다.

2. 화염처리장치 기본형상 및 해석 방법

함정 수직발사대의 경우 함정에 탑재되어야 함으로 제한된 공간 하에서 설계되어야 한다. 이로 인해 공간적 제약이 발생하게 되고 초음속 제트가 충돌하는 위치 및 화염처리장치 내부 압력이 변화하게 된다. 따라서 화염처리장치 내부에서의 초음속 충돌제트에 대한 이해가 필요하다.

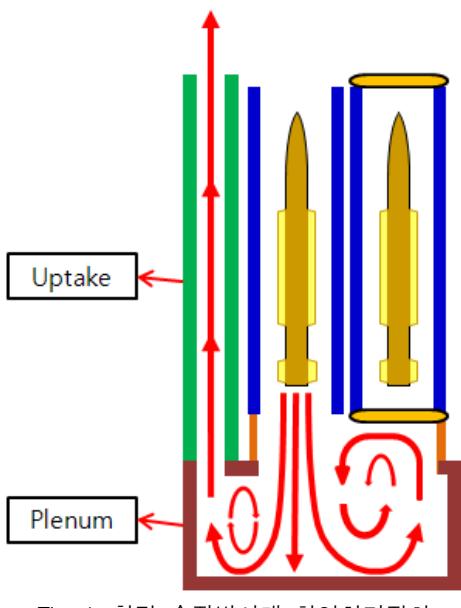


Fig. 1. 함정 수직발사대 화염처리장치

초음속 충돌제트는 두 가지 주요 설계 변수에 의해 형태가 결정된다. 주요 설계 변수 중 하나는 노즐 출구 압력(P_e)과 대기 압력(P_∞)과의 비율인 노즐 압력비(P_e/P_∞)이다. 또 하나는 노즐 출구로부터 평판까지의 거리(H)와 노즐 출구 지름(D_e)의 비율인 거리비(H/D_e)이다. 노즐 압력비는 초음속 제트의 강도 및 형태를 결정하고 거리비는 초음속 충돌제트의 정체 벼블

(stagnation bubble)의 형태 및 크기를 결정한다^[8~10]. 따라서 본 연구에서는 이를 고려할 수 있도록 Fig. 2와 같이 화염처리장치의 주요 설계 변수를 도출하여 유동 특성을 분석하였다.

화염처리장치에서 압력비에 영향을 주는 설계 변수는 연통의 출구 면적(A_u)과 노즐 목의 면적(A_t)이다. 거리비에 영향을 주는 설계 변수는 노즐 출구로부터 연실 바닥면까지의 거리와 노즐 출구 길이이다. 따라서 연통과 노즐 목의 면적비(A_u/A_t)에 따른 유동특성과 노즐 출구로부터 연실 바닥면까지의 거리비에 따른 유동특성을 각각 분석하였다. 화염처리장치 기본형상은 Fig. 2와 같고 추진기관 연소실 입구 조건은 연소 시 최대 압력 조건을 Table 1과 같이 이용하였다.

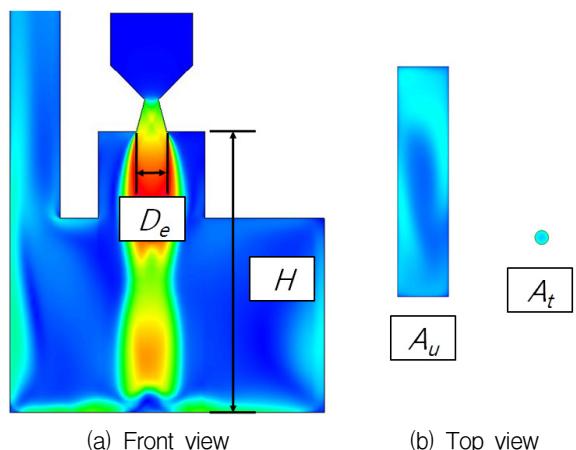


Fig. 2. 화염처리장치 설계 변수

Table 1. 추진기관 연소실 입구조건

| 전압력 (Pa) | 전온도 (K) | 분자량 (g/mol) | 비열비 |
|-------------------|------------|----------------|------|
| 128×10^5 | 3,543 | 29.33 | 1.13 |

3. 수치해석

수치해석에서는 유사 연구^[11]에서 검증된 상용 소프트웨어인 CFD-FASTRAN^[12]을 이용하였다. 지배 방정식은 식 (1)~(3)과 같이 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였으며 정상상태(steady state) 해석을 수행하였다.

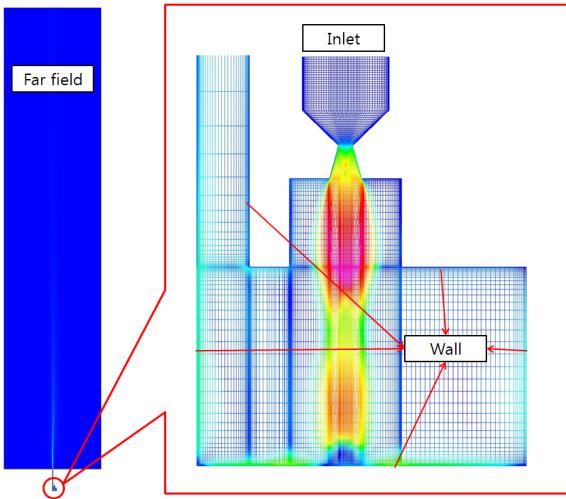


Fig. 3. 격자구성 및 경계조건

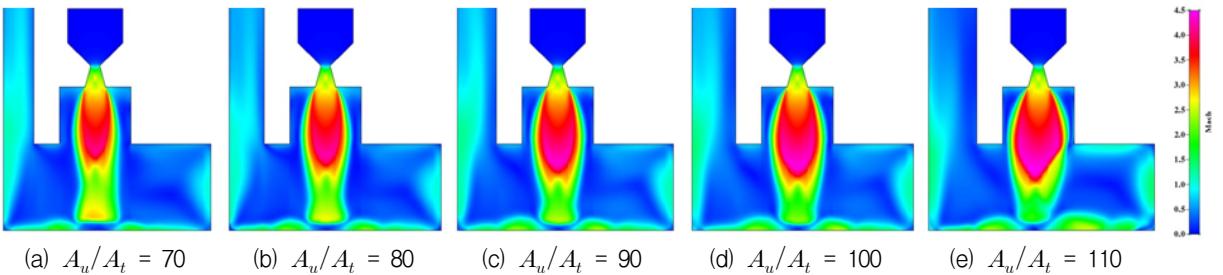
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[- \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) \delta_{ij} + \tau_{ij} \right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_t}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(E_t + p) u_j] \\ = \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j \tau_{ij}) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sum_{s=1}^{n_s} h_s J_{s,j} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

난류모델은 식 (4), (5)와 같이 대수학적 난류모델인 Baldwin-Lomax 모델을 사용하였다.

$$\mu_t = \begin{cases} (\mu_t)_{inner} & \text{for } y \leq y_c \\ (\mu_t)_{outer} & \text{for } y \geq y_c \end{cases} \quad (4)$$

Fig. 4. 면적비에 따른 마하수 변화($H/D_e = 7$)

$$(\mu)_{inner} = \rho l^2 |\vec{\omega}|, \quad (\mu)_{outer} = \rho K F_w F_k(y) \quad (5)$$

수치기법으로 Cell 기반 유한 체적법, 풍상기법(upwind scheme)인 Van Leer's FVS(Flux Vector Splitting)를 사용하였다. 점성모델은 식 (6)과 같이 Sutherland's Law를 사용하였다.

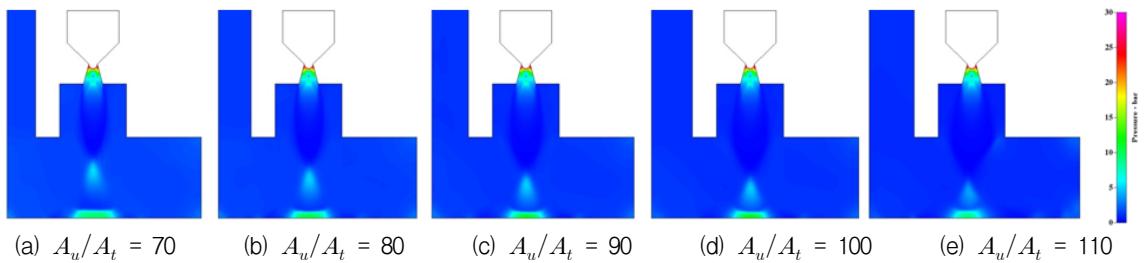
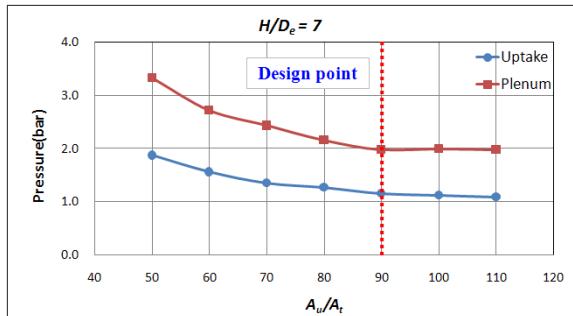
$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + S_i}{T + S_i} \quad (6)$$

격자구성 및 경계조건은 Fig. 3과 같으며 유동의 변화가 큰 곳 및 벽면에 격자를 집중하였다. 총 격자수는 약 160만개이다.

4. 해석 결과 및 유동특성 분석

연통과 노즐 목의 면적비에 따른 유동해석 결과는 Fig. 4, 5와 같다. Fig. 6의 결과에서 확인할 수 있듯이 면적비가 증가함에 따라 연통을 통해 내부의 화염이 원활하게 배출되어 연설 및 연통에 작용하는 압력이 감소하였다. 연설의 내부 압력 변화는 초음속 제트의 압력비에 영향을 미치게 되고 이로 인해 제트 경계면(jet boundary) 및 첫 번째 충격셀(shock cell)의 길이가 변화하였다. 특히, 연설의 압력이 높아지면 Fig. 4와 같이 제트 경계면의 넓이가 줄어들어 첫 번째 충격셀 길이가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 초음속 제트 강도 변화는 정체 버블의 형태 및 크기를 변화시켰다.

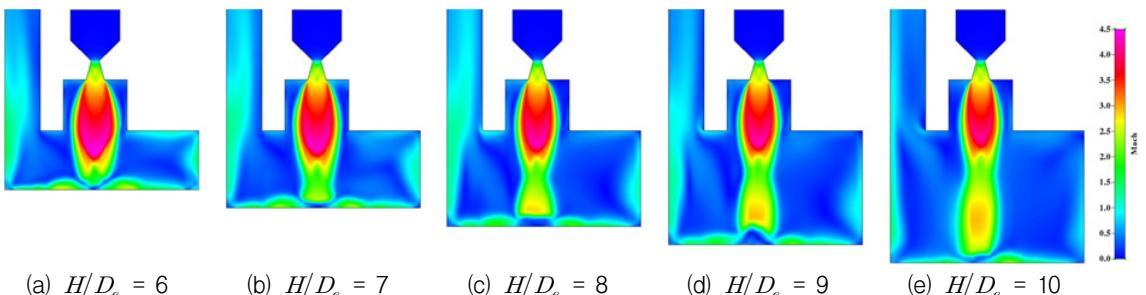
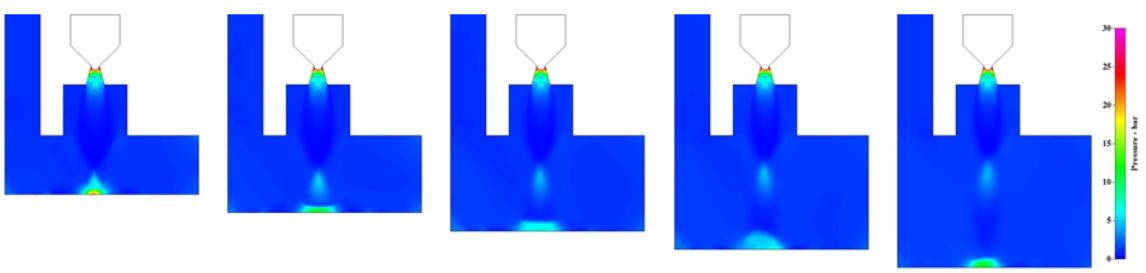
특정 값 이상의 면적비에서 연설에 작용하는 내부 압력이 일정한 것으로 나타났다. 이는 면적비 90 이상에서는 연통이 충분히 넓어, 화염을 원활하게 배출할


 Fig. 5. 면적비에 따른 압력 분포 변화($H/D_e = 7$)

 Fig. 6. 면적비에 따른 연실, 연통 평균 압력 변화($H/D_e = 7$)

수 있었기 때문이다. 따라서 연실의 내부 압력이 다시 증가하기 시작하는 지점의 면적비로 연통면적을 설계하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

노즐 출구로부터 연실 바닥면까지의 거리비에 따른 유동해석 결과는 Fig. 7, 8과 같다. Fig. 9의 결과에서 확인할 수 있듯이 연실 바닥면까지의 거리비는 연실 내부에 작용하는 압력에는 영향을 적게 미쳤다. 따라서 노즐 압력비의 영향을 적게 미쳤고 이로 인해 초음속 제트의 경계면과 첫 번째 충격셀의 길이 변화가 작게 나타났다.

이러한 현상은 초음속 제트의 충격셀과 바닥면의 위


 Fig. 7. 거리비에 따른 마하수 변화($A_u/A_t = 90$)

 Fig. 8. 거리비에 따른 압력 분포 변화($A_u/A_t = 90$)

치와의 관계로 나타나게 되어 거리비는 Fig. 7과 같이 초음속 제트가 충돌하는 위치 및 정체 버블 형태를 결정하게 되었다. 이에 따라 거리비에 따른 연실 바닥면의 최대 압력은 Fig. 10과 같이 변화하였고 특정 충격셀 내의 거리비에서 바닥면 최대압력이 낮아지는 지점이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 결과를 통해 미루어 볼 때 거리비가 증가하여 초음속 제트의 충격셀 개수가 증가한다면 Fig. 10과 같은 압력변화를 반복적으로 보이며 최대 압력이 낮아질 것으로 판단된다. 따라서 한정된 공간 내에서 연실 높이를 결정할 때에는 연실 바닥면의 최대 압력이 최소가 되는 지점의 연실 높이를 선정하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

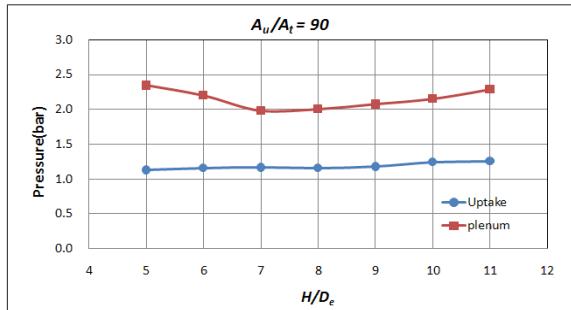


Fig. 9. 거리비에 따른 연실, 연통 내부 압력 변화

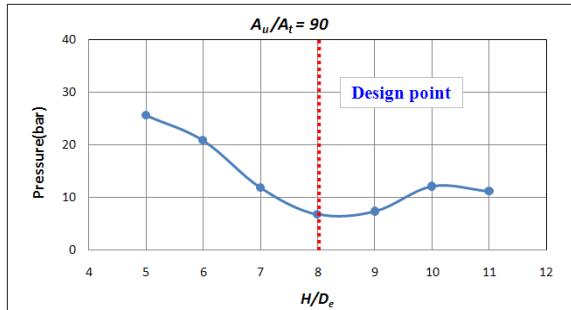
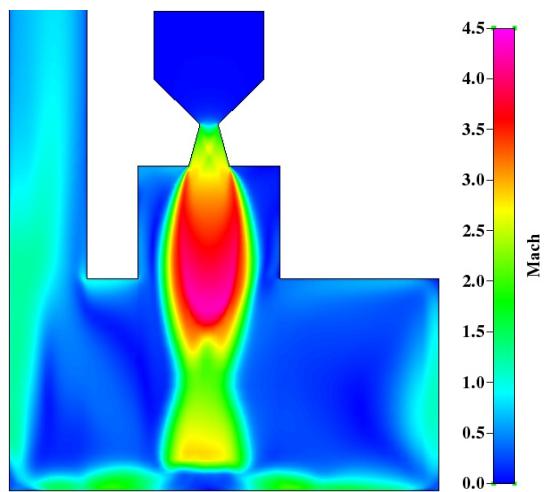
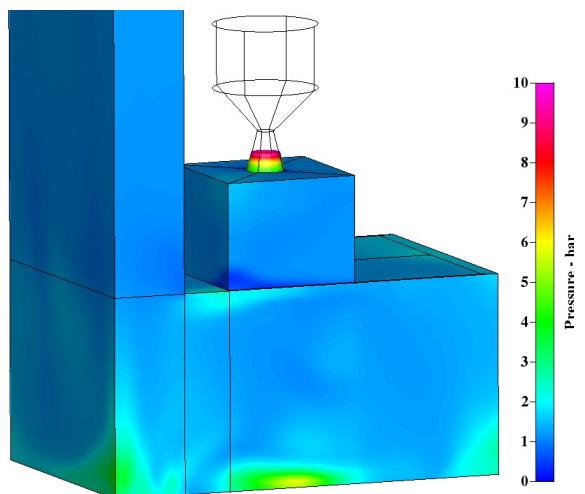


Fig. 10. 거리비에 따른 연실 바닥면 최대 압력 변화

화염처리장치 내부에서의 초음속 충돌제트 유동특성 분석 결과를 바탕으로 화염처리장치 형상설계를 수행하였다. 수직발사대의 화염처리장치는 제한된 공간 내에서 설치되어야 하기 때문에 효율적 형상 설계관점에서 화염처리장치 형상을 결정하였다. 우선 면적비에 따른 유동해석 결과(Fig. 6)를 바탕으로 연실 내부의 압력이 증가하기 시작하는 지점의 연통 면($A_u/A_t = 90$) 선정하여 로켓 화염을 원활하게 배출할 수 있는

최소 연통면적을 결정하였다. 다음으로 삽마량을 최소화하기 위하여 두 번째 충격셀에서 연실 바닥면의 최대 압력이 최소가 되는 지점의 거리($H/D_e = 8$)로 연실 높이를 결정하여 연실 높이를 결정하였다.

Fig. 11, 12는 선정된 형상의 화염처리장치 유동해석 결과이다. 마하수 분포에서 볼 수 있듯이 노즐을 통해 나온 초음속 제트가 연실 바닥면에 충돌하고 연통을 통해 원활하게 배출되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 초음속 충돌제트의 정체 버블이 넓게 형성되어 연실 바닥면의 최대 압력이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11. 마하수 분포($A_u/A_t = 90$, $H/D_e = 8$)Fig. 12. 압력 분포($A_u/A_t = 90$, $H/D_e = 8$)

5. 결 론

본 논문에서는 함정 수직발사대 화염처리장치 형상 설계에 대해 연구하였다. 이를 위해 화염처리장치 설계 시에 고려해야 할 주요 설계 변수를 도출하였다. 주요 설계 변수는 연통과 노즐 목의 면적비와 노즐 출구로부터 평판까지의 거리와 노즐 출구 지름의 비율인 거리비로 나타났다. 따라서 각 주요 설계 변수에 따른 유동해석을 수행하여 결과를 분석하였다.

면적비는 초음속 제트의 노즐 압력비에 영향을 주어 초음속 제트의 강도 및 정체 버블의 형태를 변화시키는 것을 확인할 수 있었다. 거리비는 노즐 압력비에 영향을 적게 미쳤으며 초음속 제트의 충격셀과 바닥면의 위치와의 관계에 의해 정체 버블의 형태 및 크기를 변화시키는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 효율적인 화염처리를 위해서는 적절한 면적비와 거리비의 분석이 필요함을 확인할 수 있었다. 이러한 초음속 충돌 제트 유동특성을 바탕으로 판단해 볼 때 효율적인 화염처리를 위해서는 적절한 면적비와 거리비의 설정이 필요함을 확인할 수 있었다.

References

- [1] Yagla, J. J. and Anderson, L. P. Jr., "Internal Ballistics and Missile Launch Environment for the Vertical Launching System", AIAA and ASME, Joint Thermophysics, Fluids, Plasma and Heat Transfer Conference, 3rd, St. Louis, MO, June 7~11, 1982.
- [2] York, B. J., Sinha, N., Dash, S. M., Anderson, L. and Gominho, L., "Navier-Stokes Simulation of Plume/Vertical Launching System Interaction Flow Fields", AIAA, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 30th, Reno, NV, Jan. 6~9, 1992.
- [3] Lee, K. S. and Hong, S. K., "Supersonic Jet Impingement Navier-Stokes Computations for Vertical Launching System Design Applications", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 41, No. 5, pp. 735~744, 2004.
- [4] 홍승규, 이광섭, 성웅제, "초음속 노즐과 벽면 충돌제트의 유동특성", 한국군사과학기술학회지, 제4권, 제2호, pp. 256~262, 2001.
- [5] Miller, M. J., Koo, J. H., Siebenshuh, J. R., Wilson, D. and Beckley, D., "Development of a Scaled Ducted Launcher for Ablative Testing", AIAA, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 33rd, Reno, NV, January 9~12, 1995.
- [6] Koo, J. H., Ho, D. W. H. and Ezekoye, O. A., "A Review of Numerical and Experimental Characterization of Thermal Protection Materials-Part I. Numerical Modeling", AIAA/ASME/ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit, 42nd, Sacramento, California, July 9~12, 2006.
- [7] Koo, J. H., Ho, D. W. H., Bruns, M. C. and Ezekoye, O. A., "A Review of Numerical and Experimental Characterization of Thermal Protection Materials-Part II. Properties Characterization", AIAA/ASME/ASEE/AHS/ASC, Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 48th, Honolulu, Hawaii, April 23~26, 2007.
- [8] Ginzberg, I. P., Semiletenko, B. G., Terpigorev, V. S. and Iskov, V. N., "Some Singularities of Supersonic Underexpanded Jet Interaction with a Plane Obstacle", Journal of Engineering Physics, Vol. 19, pp. 1081~1084, 1973.
- [9] Kalghatgi, G. T. and Hunt, B. L., "The Occurrence of Stagnation Bubbles in Supersonic Jet Impingement Flows", Aeronautical Quarterly, Vol. 27, pp. 169~185, 1976.
- [10] Inman, J. A., Danehy, P. M., Nowak, R. J. and Alderfer, D. W., "The Effect of Impingement on Transitional Behavior in Underexpanded Jets", AIAA, Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 47th, Orlando, Florida, January 5~8, 2009.
- [11] Lee, K. S., Lee, J. G., Hong, S. K. and Ahan, C. S., "Numerical Simulations of the Supersonic Jet Impingement in a Confined Plenum of Vertical Launching System", Korea Society for Computational Fluids Engineering Parallel CFD 2006, pp. 301~305, 2006.
- [12] 2011, ESI CFD, Inc., CFD-FASTRAN User's Manual-Version 2011, Cummings Research Park, pp. 97~125, 2011.