

초음속노즐 수량 변화에 따른 공기역학적 특성의 연구

이종훈* · 김경련* · 박종호**†

A Study on Aerodynamic Characteristics with the Supersonic Nozzle Quantity

Jong-Hoon Lee*, Kyoung-Ryun Kim**, Jong-Ho Park***†

Key Words : Aerodynamic Characteristic(공기역학적 특성), Multic Nozzle(다중노즐), Under-expanded Pressure Ratio(과소팽창비), De Laval Nozzle(드 라발 노즐), Nozzle Pressure Ratio(압력비)

ABSTRACT

The objective of this paper is to investigate the flow characteristics of the multi nozzle. The configurations of the single, the 3- and the 6-nozzle were selected under Mach number of 2.5. Under-expanded pressure ratio such as 1.2, 1.6 and 2.0 were selected to elucidate interference of the free jet. The flow visualization was carried out with the Schlieren system and a supersonic cold-flow system. Also, the flow characteristics were studied computationally with the density measurements. Reasonable agreement between experimental and theoretic equation has been achieved qualitatively.

1. 서 론

초음속 다중노즐은 유로 출구 부분이 2개 이상의 드 라발 노즐(de Laval Nozzle)로 구성되어 있는 초음속 발생장치로, 동일한 질량유량과 면적비로 설계된 초음속 단일노즐에 비해 추력은 동일하나 노즐의 길이가 줄어들어 비행체의 사거리와 속도를 높일 수 있다.

노즐의 플룸 길이는 노즐 출구 직경에 비례하므로, 단일노즐에 비해 각 노즐의 출구직경이 작은 다중노즐이 플룸 길이를 줄일 수 있다. 이는 휴대용 대전차 미사일에 다중노즐을 적용할 경우, 연소 추진제가 뿜어내는 고온의 배기화염과 후폭풍으로부터 발사자를 안전하게 보호할 수 있다.

이처럼 현재의 초음속 추진기관은 사거리 및 속도의 증대, 후폭풍 길이 저감을 위하여 다중노즐을 사용한다. 하지만, 비행체가 대기압의 감소로 인하여 배압이 낮아지면 각 노즐에서 분사된 자유제트는 서로 간섭을 받는다. 배압이 더욱 낮아지면 자유제트경계면은 서로 충돌하며, 제트 경계면이 서로 맞닿은 점(Shock inflection point)과 노즐 출구 사이

에서는 재순환 영역(Recirculation region)이 발생한다. 이러한 역류(Reject jet)발생은 화염의 열기가 Base-Plate에 전달이 되어 노즐의 파괴를 야기한다⁽¹⁾. 따라서 다중노즐의 설계 시, 배압을 고려하여 자유제트 간의 충돌 및 간섭이 발생하지 않도록 설계하는 것이 중요하다.

초음속 다중노즐은 비슷한 유동장이 형성되는 초음속 다중로켓 연구로 시작되었다. 1961년 Musial 등⁽²⁾은 형상이 다른 4개의 로켓 노즐을 풍동 내에 설치하여 대기압에 대한 연소실 내의 압력비(Nozzle Pressure Ratio, NPR)를 변화시키며 Base-Plate의 온도와 정압을 측정하였다. 이를 통해 NPR이 증가할수록 Base-Plate의 평균 표면온도는 증가하고 평균 정압은 감소하는 사실을 알 수 있었다. 이 외에도 현재까지 발표된 다중노즐의 연구 자료⁽³⁻⁵⁾를 분석한 결과를 보면, 다중노즐에 대한 연구가 대부분 이중노즐 및 사중노즐을 대상으로 하였으며, 특히 Base-Plate의 온도와 정압분포에 집중되어 있다.

초음속 다중노즐은 Base-Plate에서 형성된 온도와 정압 분포도 중요하지만 초음속 노즐의 수량의 변화에 따라 출구

* 충남대학교 기계공학과(Chungnam national university, Dept' of mechanical engineering)

** 충남대학교 기계공학부(Chungnam national university, School of mechanical engineering)

† 교신저자, E-mail : jhpark@cnu.ac.kr

에서 형성된 공기역학적 특성에 대한 연구도 필요하다. 즉, 초음속 다중노즐의 후류에서 형성된 유동(flow-field)장 특성은 연소 추진제가 뿜어내는 고온의 배기화염과 후폭풍으로부터 발사자를 안전하게 보호하기 위해 반드시 필요하다.

이에 본 논문에서는 충격파의 구조 및 공기역학적 특성을 파악하기 위해 초음속 다중노즐을 설치하였다. 출구 질량유량 및 노즐 면적비가 동일한 단일, 삼중 및 육중 노즐을 이용하여 과소팽창비의 변화에 따라 유동장의 특성을 파악하였다. 아울러, 유동해석을 통해 초음속 노즐의 방향에 작용한 추력을 측정하여 이론값과 비교하였으며, 다중노즐에서 분사된 자유제트 간에 간섭 및 충돌이 발행하는 여부를 파악하였다.

2. 다중노즐 설계

다중노즐은 면적비가 증가할수록 노즐목에서 출구까지의 길이가 단일노즐에 비해 완만하게 증가한다. 이는 발사체의 속도를 높일수록 발사체의 전체 길이와 중량에서 노즐이 차지하는 비중을 상당히 줄일 수 있다. 하지만, 노즐의 수가 증가할수록 노즐과 노즐 사이의 두께가 얇아져 화염에 의한 침식으로 노즐이 파괴될 수 있다. 그러나 이는 발사 시간에 제한을 두거나 노즐의 재질이나 최적의 노즐 개수를 결정한다면 해결될 수 있다. 이에 본 연구에서는 충격파의 간섭이 서로 받지 않도록 하기 위해 초음속 노즐의 수량의 변화에 따라 공기역학적 특성에 대해 고찰하는 것이다.

노즐의 형상 설계를 위해서는 유동모사에 필요한 노즐 출구 마하수도 중요하지만 노즐의 질량유량 또한 중요한 인자이다. 노즐에서 형성되는 질량유량은 식(1)로부터 계산된다.

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{\gamma}{RT_c} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} A_t p_c \quad (1)$$

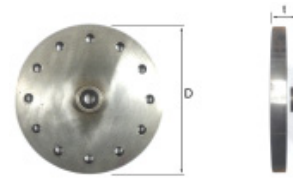
정체실 내의 온도(T_c)가 일정하다고 가정하면, 식(1)로부터 질량유량은 정체실 내의 압력(p_c)과 노즐목에서의 면적(A_t)만의 함수가 된다. 본 실험에서는 정체실 내의 온도를 27°C로 가정하여 질량 유량을 계산하였다.

한편, 노즐 유동에 의한 추력(F_T)은 정체실의 압력과 노즐목의 면적, 그리고 노즐 출구의 확대각으로 인한 손실(C_F)을 고려하여 식(2)로 나타낸다.

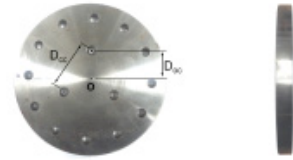
$$F_T = C_F A_t p_c \quad (2)$$

여기서,

$$C_F = \lambda \sqrt{\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_c}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} + \frac{p_e - p_a}{p_c} \epsilon$$



(a) 단일노즐 (t=31.86 mm)



(b) 삼중노즐 (t=20 mm)



(c) 육중노즐 (t=13 mm)

Fig. 1 Experimental model with supersonic nozzle

$$\lambda = (1 + \cos\xi) / 2$$

$$\epsilon = \left\{ \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \right\}^{-1}$$

ξ 는 노즐의 확대각이며, p_a 는 대기압, p_e 는 노즐출구에서의 압력이다.

실험모델은 상기의 식을 적용하여 Fig. 1과 같이 제작되었다. D 는 Base-Plate의 지름, t 는 Base-Plate의 두께를 나타내며, Doc 는 Base-Plate의 원점(o)과 노즐 중심(c)까지의 직선거리, Dec 는 각 노즐 중심 간의 직선거리이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 초음속유동 시험장치

초음속유동 시험장치는 저장용기에 고압의 기체를 압축한 후 분사하는 장치로, Fig. 2와 같이 가압 시스템, 압력 저장용기, 제어밸브, 정체실, 노즐, 측정 장비로 구성되어 있다. 가압시스템은 고압 압축기와 건조기로 구성되어 있으며, 고압 압축기의 최대 토출압력은 343 bar이고, 송출량은 475 l/min이다. 공기를 압축하는 과정에서 수분을 제거해 주지 않을 경우, 수분에 의한 응결입자의 형성으로 유동모사에 오차가 나타난다. 따라서 고압 압축기에 의해 압축된 공기가 냉동식 건조기와 흡착식 건조기를 통해 수분이 제거되도록 하였다.

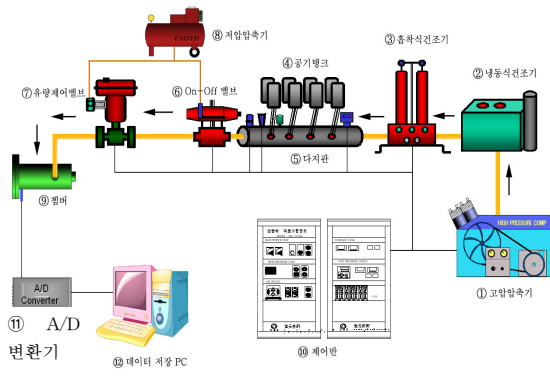


Fig. 2 Schematic diagram of a experimental apparatus

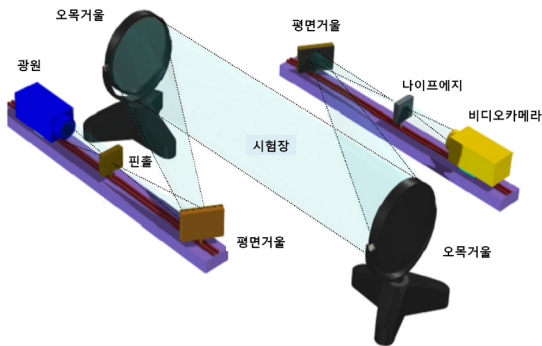


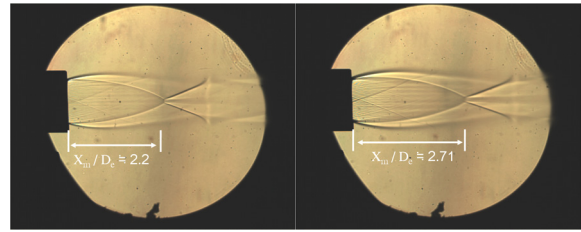
Fig. 3 Schematic diagram of a schlieren system

3.2 유동가시화 장치

초음속 제트의 유동장은 쉐리렌 장치(Schlieren system)를 이용하여 분석하였다. 쉐리렌 장치는 매질에서의 빛의 속도가 밀도에 따라 굴절률이 변하는 원리를 이용하는 것으로, 매질 내에 물리적 영향을 주지 않고 유동체의 밀도 구배 및 유동 패턴을 광학적으로 가시화한다. 장치 구성은 Fig. 3의 개략도와 같이 광원부와 수광부, 집합부로 이루어져 있다. 쉐리렌의 영상을 촬영하기 위하여 REDRAKE사의 MotionPro X3 초고속 카메라를 사용하였다. 본 실험에서는 해상도 1280 × 1024, 초당 100 프레임으로 촬영하였으며 촬영된 영상이 실시간으로 컴퓨터에 저장된다.

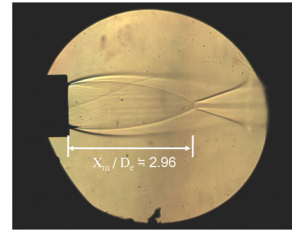
3.3 시험조건

과소 팽창비(Under-expanded pressure ratio, PR)는 노즐 출구에서의 압력(Pe)과 배압(Pb)과의 비로 나타낸다. 일반적으로 미사일 및 로켓 등을 발사할 때, 사용목적에 따라 과소 팽창비는 1.5~2.5 범위의 값을 채택한다. 과소 팽창비가 변하면 노즐 밖의 영역에서 충격파 셀의 길이가 달라지고, 배럴 충격파 강도가 변한다. 따라서 본 연구에서는 과소 팽창비가 1.2, 1.6, 2.0인 경우에 대해 초음속 노즐의 충격파 구조 및 자유제트의 간섭여부에 대해서 비교분석하였다.



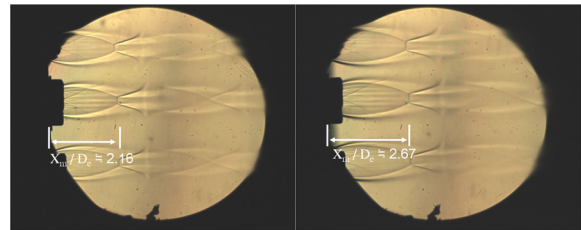
(a) PR 1.2

(b) PR 1.6



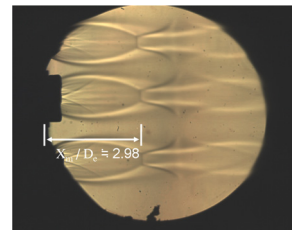
(c) PR 2.0

Fig. 4 Flow-field structure with one nozzle



(a) PR 1.2

(b) PR 1.6



(c) PR 2.0

Fig. 5 Flow-field structure with three nozzles

4. 실험, 유동해석 결과 및 고찰

4.1 유동가시화 분석

Fig. 4는 쉐리렌 장치를 사용하여 촬영한 단일노즐, Fig. 5는 삼중노즐, Fig. 6은 육중노즐의 유동가시화 결과이다. 여기서, 단일노즐은 초음속 노즐 출구에 노즐이 1개 설치된 것이며, 삼중노즐은 3개, 육중노즐은 6개가 설치된 것이다. Fig. 4~6은 자유제트의 전형적인 구조인 팽창파, 제트 경계면, 배럴 충격파, 마하 디스크형상이 잘 나타나 있다. 초음속 노즐 출구를 벗어난 제트의 초기 유동조건은 배기 가스의 압력, 온도, 대기조건 등에 의해 결정되며 제트유동은 자유 전단층을 형성한다. 삼중노즐과 육중노즐은 후방으로 갈수록 충격파 구조가 흐려짐을 볼 수 있다. 이는 초음속 노즐의 하

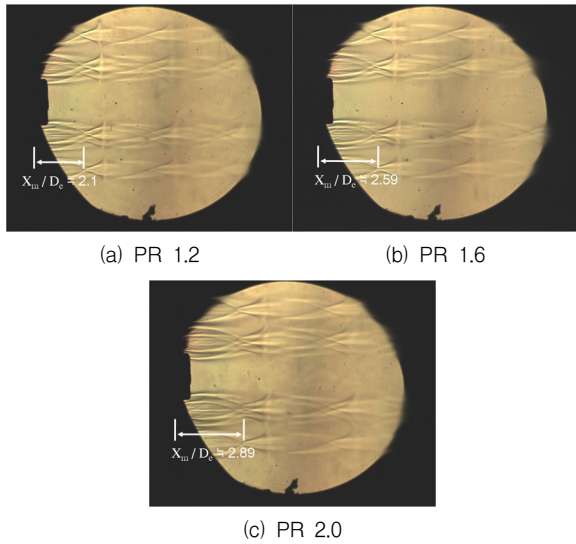


Fig. 6 Flow-field structure with six nozzles

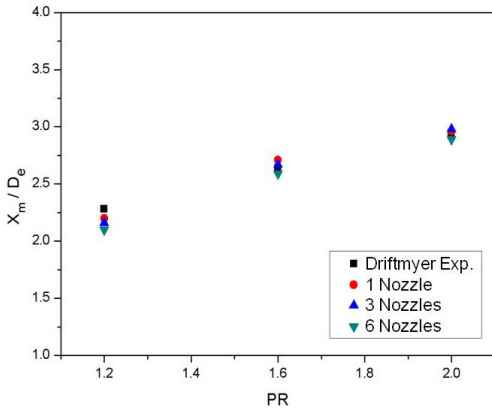


Fig. 7 Comparison between experimental result and Driftmyer experimental correlation with under-expanded pressure ratio

류로 갈수록 난류가 유동의 발달을 지배하기 때문인 것이다. 초음속 노즐의 수량의 증가는 출구에서 유동장의 운동량을 감소시킬 수 있으므로 수직충격파의 위치가 감소함을 볼 수 있다. Fig. 4 과 Fig. 5의 좌측에 보이는 검은 사각형 형상은 결합을 위해 사용된 볼트의 그림자이다.

Fig. 4는 유동가시화 검증은 노즐 출구로부터 첫 셀의 마하 디스크까지의 거리(X_m)를 노즐출구직경(D_m)과 무차원화하여 Driftmyer가 제안한 경험식과 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Driftmyer의 실험식⁽⁶⁾은 식(3)과 같다.

$$\frac{D_m}{D_e} = \sqrt{\frac{\gamma}{2} PR M_e^2} \quad (3)$$

PR 1.2에서는 본 실험값이 Driftmyer가 제안한 실험식에 의한 값보다 다소 낮게 나타났다. 이는 Driftmyer의 실험값

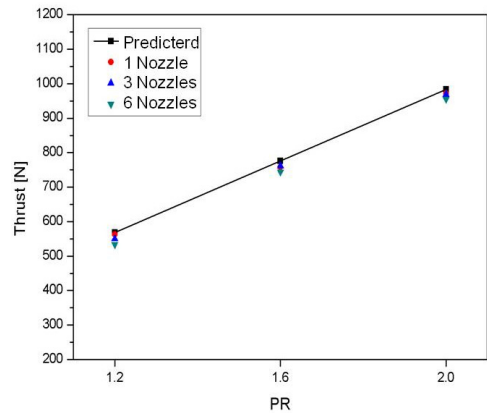


Fig. 8 Comparison between numerical result and theoretic equation with under-expanded pressure ratio

이 PR 1.5 이하에서는 다소 높게 나온다는 연구보고⁽⁷⁾와 부합되는 반면에, PR 1.6 과 2.0에서는 Driftmyer가 제시한 실험값과 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 또한 마하 디스크의 위치가 PR의 증가에 따라 노즐 출구로부터 멀어짐을 알 수 있다.

4.2 추 력

로켓 노즐과 액체 추진기관의 추진 시스템을 설계한 후 이 시스템이 성공적으로 개발하였는지 확인하기 위해서는 성능 시험과 평가 그리고 검증 등이 필요하다. 로켓 노즐 추진기관의 추력은 고온, 고압, 고속으로 분사되는 가스의 반발력이 발생되는데 이에 대한 추력 성능을 위해 유동해석을 수행하였다. Fig. 8은 유동해석과 이론식으로 구한 추력을 비교한 결과를 보여주고 있다. 전체적으로 유동해석의 추력값이 이론식으로 구한 추력보다 다소 낮게 나타나고 있다. 또한, 출구 질량유량 및 면적비가 동일한 단일, 삼중, 육중노즐의 수치모사 추력값은 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

4.3 자유제트의 밀도분포

다중노즐 설계 시 유의할 점은 첫째, 노즐에서 분사된 자유제트 간에 간섭 및 충돌이 발생하지 않도록 하는 것이다. 자유제트의 간섭 및 충돌은 Base-Plate부근에 재순환 영역을 생성하여 고온의 배기화염이 Base-Plate에 전달되어 재료의 파괴를 야기하기 때문이다⁽¹⁾. 또한, 자유제트의 충돌은 소음을 증대하여 인체에 유해한 영향을 미친다. 둘째, 노즐의 사용처 및 사용범위를 고려하여야 한다. 자유제트 간에 간섭이 발생하지 않도록 설계를 하였어도, 고고도(高高度)에서는 배압의 감소로 인하여 간섭이 발생할 수 있기 때문이다.

이에 본 연구에서는 다중노즐 자유제트의 간섭 여부를 고찰하였다. 각 노즐의 자유제트는 후방으로 갈수록 소산으로

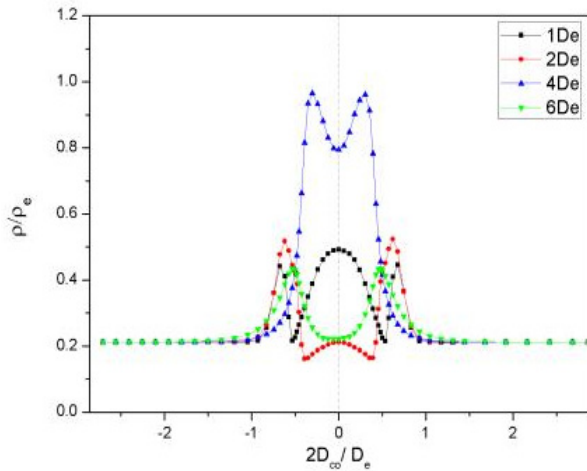


Fig. 9 Comparison of density for three nozzles

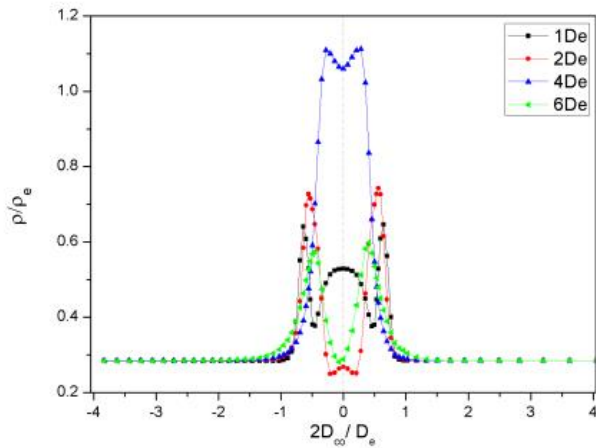


Fig. 10 Comparison of density for six nozzles

인하여 혼합된다. 따라서 간섭여부를 확인하기 위해서는 노즐 출구 근처를 분석 범위로 선정하는 것이 바람직하다.

Fig. 9와 10은 과소팽창비가 2.0일 때 다중노즐에 따른 밀도분포를 나타낸다. 노즐의 중심은 Base-Plate 중심에서 2.86 De에 위치하며 점선으로 나타내었다. x-축은 Base-Plate 중심과 노즐 중심까지 거리의 2배를 노즐출구 지름으로 무차원화 하였으며, y-축은 그 지점에서의 밀도를 노즐 출구의 밀도로 무차원화 하였다. 노즐의 중심이 Base-Plate의 중심으로부터 노즐 출구 지름의 2.86배에 위치한 삼중노즐과 4.04배에 위치한 육중노즐은 유동방향 분석영역으로 선정한 6 De 까지 자유제트 간에 간섭이 발생하지 않는다.

5. 결 론

본 논문에서는 단일, 삼중, 육중노즐을 이용하여 유동가시화 및 유동해석을 통해 얻은 유동장의 특성을 분석하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 노즐의 첫 자유제트 마하 디스크는 과소 팽창비가 증가함에 따라 초음속 노즐 후류방향으로 비례적으로 이동하였으며, 과소팽창비가 2.0 일 때 노즐 출구지름의 약 3.0 배 증가하여 실험식의 상관식과 매우 잘 일치하였다.
- 2) 출구 면적비와 질량유량이 동일한 단일, 삼중, 육중노즐의 추력은 정량적으로 거의 동일한 경향을 보였으며, 상기 추력은 이론식과 매우 잘 일치하였다.
- 3) 노즐의 중심이 Base-Plate의 중심으로부터 노즐 출구 지름의 2.86배에 위치한 삼중노즐과 4.04배에 위치한 육중노즐은 초음속노즐 출구 직경의 6배까지 간섭을 받지 않아 초음속 다중노즐의 후류에서 형성된 유동(flow-field)장 특성은 연소 추진 제가 뽑어내는 고온의 배기화염과 후폭풍으로부터 발사자를 안전하게 보호할 수 있도록 설계되었음을 확인하였다.

References

- (1) Desikan, S. L. N., Muruga, B., Chattopadhyay, S., Jacob, V., Srinivasan, K. and Pandian, S., 2007, "High altitude jets interaction and reverse flow," AIAA 2007- 5506.
- (2) Norman, T. Musial and James, J. Ward, 1961, "Base flow characteristics for several four-clustered rocket configurations at mach numbers from 2.0 to 3.5," NASA TN D-1093.
- (3) Ebrahimi, Houshang, B., Levine, J. and Kawasaki, A., 1997, "Numerical investigation of twin-nozzle rocket plume phenomenology," AIAA 97-0264.
- (4) Greska, B. and Krothapalli, A., 2007, "A comparative study of heated single and equivalent twin jets," AIAA 2007-3634.
- (5) Xiao, Ze-Juan, Cheng, Hui-Er and Zhou, Hong-Ling, 2006, "Plume interaction in parallel multi-thrusters propulsion system and the effect on backflow," AIAA 2006-3599.
- (6) Driftmyer, R. T., 1972, "A correlation of free jet data," AIAA journal, Vol. 10.
- (7) Katanoda, H., Miyazato, Y., Masuda, M. and Matsuo, K., 2000, "Pitot pressures of correctly-expanded and under-expanded free jets from axisymmetric supersonic nozzles," Shock waves, Vol. 10, No. 2, pp. 95~101.