

기계적 편향판 설치위치의 변화에 따른 유동특성에 대한 연구

김경련* · 박종호**†

A Study on Flow Characteristics with the Installed Location Change of Mechanical Deflector

Kyoung-Ryun Kim*, Jong-Ho Park**†

Key Words : Pressure Distribution(압력분포), Flow Characteristic(유동특성), Lateral Force(추력)

ABSTRACT

Thrust vector control is the method which generates the side force and roll moment by controlling exhausted gas directly in a rocket nozzle. TVC is classified by mechanical and fluid dynamic methods. Mechanical methods can change the flow direction by several objects installed in a rocket nozzle exhaust such as tapered ramp tabs and jet vane. Fluid dynamic methods control the flight direction with the injection of secondary gaseous flows into the rocket nozzle. The tapered ramp tabs of mechanical methods are used in this paper. They installed at the rear in the rocket nozzle could be freely moved along axial and radial direction on the mounting ring to provide the mass flow rate which is injected from the rocket nozzle. TVC of the tapered ramp tabs has the potential to produce both large axial thrust and high lateral force.

We have conducted the experimental research and flow analysis of ramp tabs to show the performance and the structural integrity of the TVC. The experiments are carried out with the supersonic cold flow system and the schlieren graph. This paper provides to analyze the location of normal shock wave and distribution of surface pressure on the region enclosed by the tapered ramp tabs.

1. 서론

추력방향제어장치는 제트 베인(Jet vane), 제타베타(Jetavator), 2차 분사(Secondary injection), 제트 탭(Jet tabs) 및 램프 탭(Ramp tabs) 등과 같이 다양한 종류가 있다. 해외에서는 램프 탭을 제외하고 상기에서 제시한 추력방향제어장치를 이용하여 많은 연구를 수행한 경험이 있다. 국내에서는 제트 베인을 이용하여 추력방향제어에 대한 연구를 수행한 경험이 있다.

유체역학적 방법에 대한 연구는 2차 가스를 분사시켜 공기역학적 특성 및 추력방향제어의 성능에 대해 수행한 경험이 있다⁽¹⁾. 아울러, 램프 탭을 이용한 연구는 초음속노즐 출구에

대칭적으로 설치하여 충격파구조의 특성을 파악하였다⁽²⁾. 그러나 현재까지 국내에서는 기계적편향판인 램프 탭을 이용하여 실험 및 유동해석에 대한 연구를 수행한 경험은 미미하며 해외에서도 연구를 수행한 경험이 흔하지 않다. 즉, 국내 및 해외에서는 램프 탭 내부에서 형성된 유동하중과, 유동특성에 대해 구체적으로 규명하지 못했다. 이와 같이 램프 탭의 형상, 설치 위치, 유동조건의 변화에 따라 충격파의 구조, 유동 특성 및 압력 분포 등이 상이하므로 본 연구에서는 기계적편향판인 램프 탭을 비대칭적으로 설치하여 램프 탭의 설치위치의 변화에 따라 램프 탭의 내부에서 발생된 공기역학적 특성과 램프 탭에 작용한 유동하중에 대한 연구를 수행하였다. 유동하중은 초음속 노즐 출구로부터 분출된 유동

* 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

이 램프 탭에 충돌하여 일정하게 작용한 정적하중을 분석하였다. 아울러, 램프 탭 내부에서 형성된 충격파의 구조와 램프 탭에 작용한 각 방향의 힘(Fx, Fy, Fz)을 측정하여 비행체의 제어력을 분석하였다.

2. 유동해석

2.1 해석방법

현재 컴퓨터의 처리능력이 급속히 발전함에 따라 전산유체역학은 열유체 기계에서 복잡한 유동현상을 해석하고 설계하는 도구로 자리 잡게 되었다. 이에 따라 전산유체역학을 이용한 유동해석기술이 많은 관심을 불러 일으켜 학계와 산업계에서 다양한 연구가 진행되고 있으며 상업화된 유동해석 프로그램들이 개발되었거나 개발중에 있다.

본 연구에서는 유한체적법의 상용 유동해석 프로그램인 Fluent를 사용하여 추력방향제어의 램프 탭에 영향을 미치는 인자들을 연구하기에 앞서 초음속유동장치에 설치된 노즐유동 분포 및 노즐 출구에서의 유동 특성 규명을 위해 노즐 유동장에 대한 해석을 수행한다.

압축성 정상유동에 관한 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 및 상태방정식 등이다.^{(4),(5)}

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

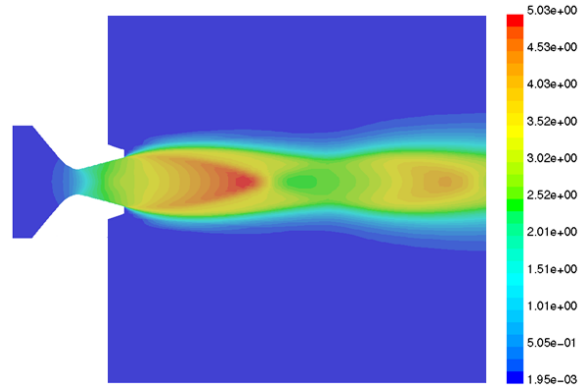
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] = F_i \quad (2)$$

에너지방정식

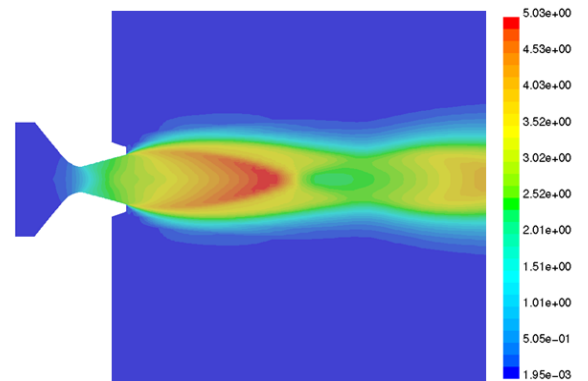
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j e) + \frac{\partial}{\partial x_j}(p u_j) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} \right)_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \mu u_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] - u_i F_i = 0 \quad (3)$$

2.2 해석결과

Fig. 1는 노즐출구 마하수 2.88일 때 과소팽창비 변화에 따라 노즐출구에 형성된 마하수의 선도를 나타내었다. 과소팽창한 제트는 노즐출구에서 압력강하를 위해 형성된 팽창파를 지나면 제트 경계면에서 반사된 압축파들은 서로 중첩되어 파 강도가 더욱 강해져 배럴충격파를 형성한다. 초음속



(a) Underexpansion ratio 1.5



(b) Underexpansion ratio 2.0

Fig. 1 Mach number contour at the nozzle exit with underexpansion ratio variation

노즐 출구에서 분출된 유동장 구조는 마하디스크 및 반사충격파가 형성되었으며, 후류로 향할수록 점성소산에 의해 선명하게 보이지 않은 경향을 나타낸다.

과소팽창비가 1.5와 2.0일 때 노즐출구에 형성된 유동장을 살펴보면, 유동장의 차이는 충격파 셀의 길이가 증가하고 배럴충격파의 길이가 길어져 유동의 가속 구간이 훨씬 크게 나타난다. 노즐유동 마하수는 노즐 출구에서 형성되는 팽창파에 의해 유동의 방향 및 속도가 변화되고 마하디스크 위치까지 가속화 된다. 과소팽창비 1.5인 경우에는 마하수 4.8까지 증가하였으며 과소팽창비 2.0인 경우에는 마하수 5.0까지 증가하였다.

Fig. 2는 초음속 노즐에서 분사된 유동의 마하수와 충격파 구조를 보여주고 있다. 초음속 노즐 출구로부터 발생된 경사충격파는 압축되며, 경사충격파를 통과한 유동의 방향은 중심선으로 향한다. 중심선으로 흐른 유동은 중심선을 통과할 수 없으므로 반사되어 반사충격파를 형성시키며, 반사충격파를 통과한 마하수는 급격히 감소한다. 이 유동은 램프 탭 끝단에서 질식되어 과소팽창되어 하류방향으로 흘러가며, 과소팽창된 유체는 마하수 약 3.5까지 증가한다.

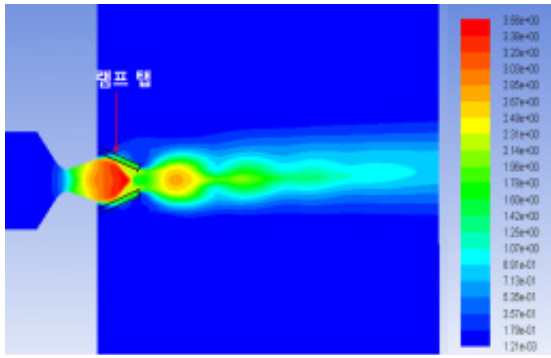


Fig. 2 Mach number contour around ramp tab

3. 실험장치 및 결과

3.1 초음속유동시험장치 및 시험조건

초음속유동시험장치는 저장용기에 고압의 공기를 가압, 저장한 후 On-Off 밸브를 작동시켜 순간적으로 초음속 노즐을 통해 압축공기를 분사시켜 유체의 속도를 급격히 증가시킨다[1]. 본 연구에 사용된 초음속 노즐은 노즐 출구 마하수 $M=2.88$ 을 얻기 위해 노즐목 직경은 23.8 mm, 노즐 출구 직경은 46.3 mm이다. Fig. 3은 온도 27°C일 때 챔버압력과 노즐목에서 형성되는 질량유량의 관계를 나타낸 것으로 챔버압력 5 Mpa에서 약 5.3 kg/s의 질량유량이 발생되며, 챔버압력이 증가함에 따라 질량유량이 선형적으로 증가한다.

노즐에서 형성된 유동은 시험시간 동안 정상, 균일 상태로 유지되어 힘, 압력, 온도 등의 측정시 변화가 없어야 하므로 시험시간의 결정은 유동모사 시험에 있어서 매우 중요한 인자이다.

Fig. 4는 노즐출구 직경 변화에 따라 시험시간을 보여주고 있다. 노즐출구 직경이 증가하면 챔버에 저장된 질량유량은 노즐출구를 통해 많이 방출된다. 이에 따라, 노즐출구의 직경이 감소함에 따라 시험시간은 상대적으로 지연되는 것을 볼 수 있다.

Fig.5는 초음속 노즐 출구에 비대칭적으로 설치된 램프 탭의 형상을 나타내었다. 램프 탭은 그림 5에 나타낸 바와 같이 하우징에 설치되어져 있으며, 수직방향으로 이동함에 따라 초음속 노즐에서 분출된 유동을 변환시킬 수 있다. 즉, 램프 탭의 램프 탭 2번(R2)과 3번(R2)은 초음속 노즐출구에 고정하고 램프 탭의 1번(R1)만 수직방향으로 이동하여 초음속 노즐 배출가스의 유동을 편향시키는 것이다. 여기서 R1, R2는 초음속 노즐 축의 중심을 기준으로 한쪽 방향으로 움직이는 것으로서 반경(Radius)의 기호를 의미한다.

3.2 실험결과

유동하중은 유체의 유동이 있을 경우 힘의 평균값과 변동

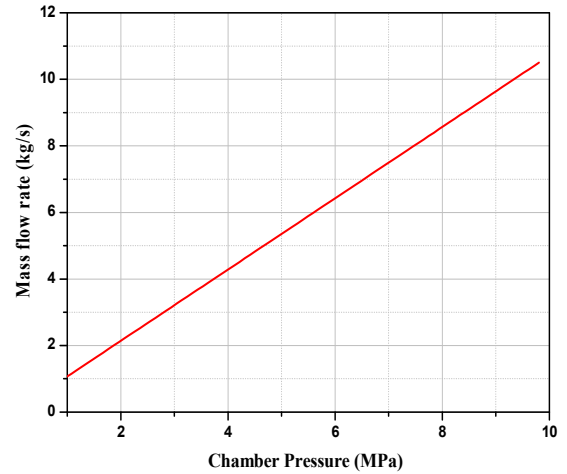


Fig. 3 Mass flow rate with nozzle chamber pressure variation

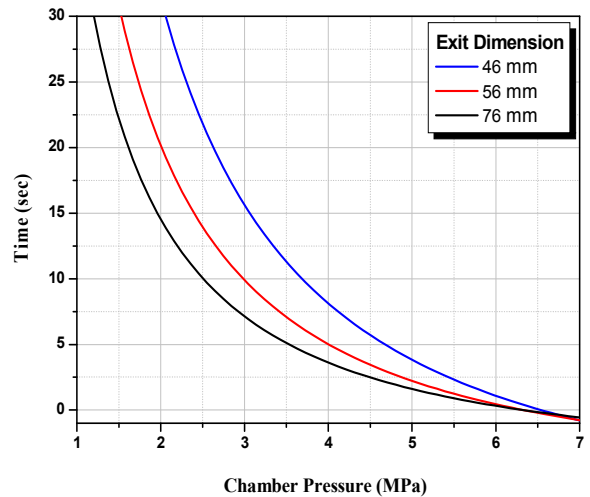


Fig. 4 Test time with nozzle chamber pressure variation

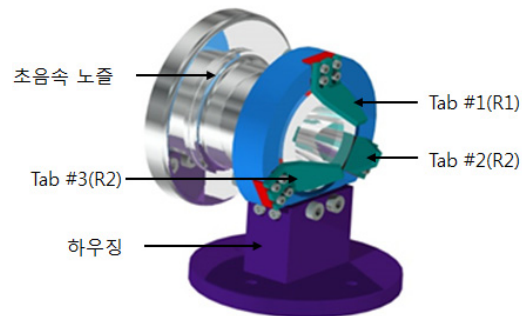
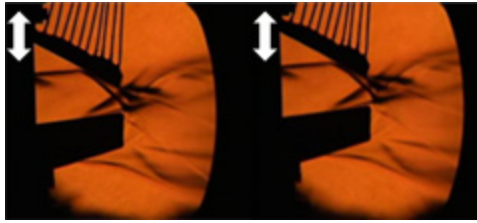
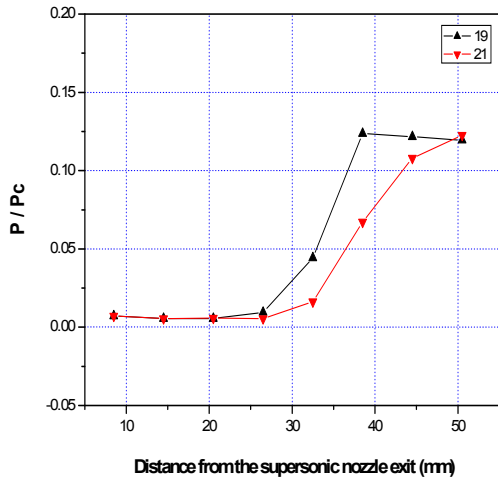


Fig. 5 Ramp tabs installed at the nozzle exit for thrust vector control

분을 이용해서 파악할 수 있다. 본 연구에서는 램프 탭에 작용한 유동하중을 파악하기 위해 램프 탭 표면에서 형성된 표면압력을 분석하였다. 압력을 측정하는 정압튜브는 램프 탭 1번에 8개를 설치하였으며, 정압튜브 번호 순서는 초음속 노즐 출구를 기준으로 수평방향으로 정의하였다. 즉, 초음속 노즐 출구 부근에 설치된 정압튜브 번호는 1번이며, 램프 탭 끝단에 설치한 정압튜브는 8번이다.



(a) Shock configuration with the installed ramp tab location



(b) Surface pressure with the installed ramp tab location

Fig. 6 Shock configuration and surface pressure distribution for ramp tab

Fig. 6는 R1이 수직방향으로 이동됨에 따라 경사충격파 및 유동장 구조를 나타내었으며, 램프 탭 1번이 수직방향(R1)으로 증가할수록 제트 경계면은 확대되었다. 경사충격파는 모두 램프 탭 내부에서 발생되었으며, 램프 탭 1번인 R1이 증가하게 되면 경사충격파의 강도 및 위치, 유동 마하수가 증가하게 되고 제트 경계면 폭이 넓어지기 때문에 경사충격파의 위치는 램프 탭 하류 방향으로 이동한다. 수직방향(R1) 21 mm조건에서 경사충격파는 정압 프로브 7번에서 발생하였다. 램프 탭의 경사각도 증가는 초음속 노즐로부터 분출된 유동을 먼저 차단하기 때문에 제트 경계면은 램프 탭 하단에 부딪힐 가능성이 커진다. 이에 따라 경사충격파를 램프 탭 하단에 발생시킬 필요가 있을 경우에는 경사각도를 증가시키면 된다. 초음속 노즐에서 분사된 일부의 제트 경계면은 램프 탭 끝단의 하류에서 램프 탭을 통과한 유동과 서로 만나 복잡한 그물구조의 충격파를 형성시킨다.

초음속 유동이 램프 탭 내부로 유입되면 램프 탭의 하류로 갈수록 유체의 속도는 빨라진다. 반면, 표면압력은 램프 탭의 상류로부터 멀어질수록 미미하게 감소되다가 경사충격파가 형성된 지점에서 급격히 증가한다. 경사충격파는 초음속 노즐 출구로부터 약 25~35 mm 떨어진 위치에서 발생하였다. 램프 탭의 경사각도가 증가할 경우 램프 탭의 표면압력은 상

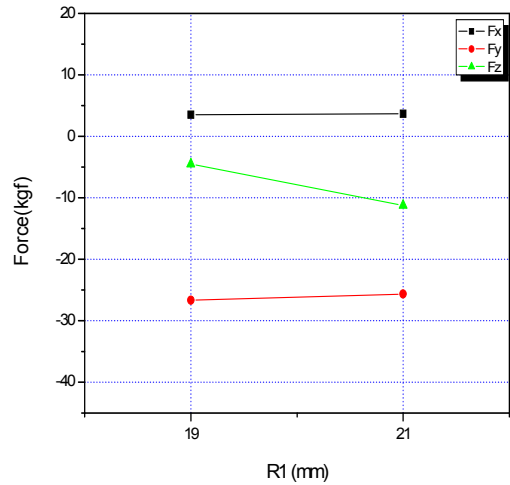


Fig. 7 Three directional force with the installed ramp tab location

대적으로 커지기 때문에 유동하중을 증가시킨다. 따라서, 램프 탭의 경사각도 증가는 비행체의 추력크기를 증가시킬 수 있으므로 추력방향제어하는데 이로운 장점을 지니고 있다.

Fig. 7는 과소팽창비 1.5의 초음속 제트 중에 램프 탭을 비대칭적으로 3개 설치하였을 때 6분력 로드셀로부터 측정된 X, Y, Z 각 방향에 작용한 힘의 분포를 나타낸 것이다. 초음속 노즐 유동 방향인 Y방향의 힘은 램프 탭 1, 2, 3번을 수직방향으로 감소함에 따라 항력은 증가한다. 이는 초음속 노즐 중심선에 가까워지면 면적비가 증가하여 상대적으로 Y 방향의 항력도 증가한다. 여기서, 면적비는 특정 교차 지점에서 총 램프 탭 면적에 대해 개방된 램프 탭 면적의 비로 정의된다. 면적비가 증가하면 기계적편향판인 램프 탭이 초음속 노즐에서 분출된 유동을 가로 막기 때문에 상대적으로 Y 방향의 힘도 크게 증가한다. 면적비의 증가는 램프 탭의 모두가 초음속 노즐 중심선으로 가까워지는 것이다. 이에 따라, 초음속 노즐에서 분출된 유동은 완전히 팽창하지 못한 상태에서 램프 탭에 부딪치므로 양력방향인 Z방향에 작용한 힘은 면적비가 증가함에 따라 감소하는 반비례 현상이 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 초음속 노즐출구(설계 마하수 2.88)에 비대칭적으로 설치된 기계적편향판인 램프 탭 내부에서 형성된 유동하중(표면압력), 유동장 구조, 비행체의 제어력에 대한 분석을 수행하였다. 비대칭적으로 설치된 램프 탭의 내부에서 형성된 유동장 구조인 경사충격파, 마하디스크 및 전단층 등은 대칭적으로 설치된 경우의 결과와 유사한 현상을 나타냈다. 그러나, 유동하중 및 제어력은 대칭적으로 설치된 경우에 비해 증가함을 보였다. 이는 비대칭적으로 설치된 램프 탭은 추력방향제어 및 추력의 크기를 쉽게 제어할 수 있

다는 결론을 도출할 수 있었다. 이에 본 연구의 결과는 기계적 편향판을 비행체의 후단에 설치하고자 할 때 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- (1) Kim, Kyoung. Ryun., 2003, "A study on the characteristic injected vertically into a supersonic flow," Chung-nam national university Master degree thesis.
- (2) Kim, K. R., Ko, J. M., and Park, J. H. (2007). "An study on the ramp tabs for thrust vector control symmetrically installed at the supersonic nozzle exit," Journal of Fluid Machinery, Vol. 10, No. 6, pp. 32~37.
- (3) Wilcox, D. E., Weir, Jr. A., Nicholls, J. A. and Dunlap R., 1957, "Location of Mach Discs and Diamonds in Supersonic Air Jets," Journal of the Aeronautical Sciences, Feb. pp. 150~152.
- (4) FLUENT user's guide, Fluent Inc.
- (5) Frank M.White., 1991, "Viscous fluid flow", McGraw-Hill.Inc. pp. 61~73.
- (6) Seiner, J. M., and Norum, T. D., 1980, "Aerodynamic aspects of shock containing jet plumes," AIAA Paper 80-0965.
- (7) Buckley, Jr., F. I., 1975, "Mach disc location in Jets in Co-Flowing Airstreams," Technical Note, AIAA Journal 13. pp. 105~106.