

이중목 노즐을 이용한 추력벡터 제어에 관한 기초적 연구

신춘식* · 김희동**

A Fundamental Study of Thrust-Vector Control Using a Dual Throat Nozzle

Choon Sik Shin* · Heuy Dong Kim**

ABSTRACT

Dual throat nozzle(DTN) is recently attracting much attention as a new concept of the thrust vectoring technique of propulsion jet. This DTN is designed with two throats, an upstream minimum and a downstream minimum at the nozzle exit, with a cavity in between the upstream throat and exit. In the present study, a computational work has been carried out to analyze the performance of a dual throat nozzle(DTN) at various mass flow rate of secondary flow. Two-dimensional, steady, compressible Navier-Stokes equations were solved using a fully implicit finite volume scheme. The present computational results were validated with some experimental data available. Based upon the present results, Thrust-vector control using a DTN is discussed in terms of the thrust coefficient and the coefficient of discharge.

초 록

최근 이중목 노즐(Dual Throat Nozzle, DTN)을 사용하여 추진체의 추력을 제어하는 방법이 많은 주목을 받고 있다. 이중목 노즐은 공동을 사이에 두고 두 개의 노즐 목을 가지도록 설계된다. 본 연구에서는 DTN의 유동특성을 조사하기 위하여, 수치해석적인 방법을 적용하였으며, 2차유동의 질량 유량을 변화시켰다. 수치해석에서는 2차원, 압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위하여, 유한체적법을 적용하였다. 그 결과 본 수치해석은 실험결과를 잘 예측하였으며, DTN을 이용한 추력벡터 제어는 추력계수와 유출계수의 향으로 상세하게 설명하였다.

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Dual Throat Nozzle(이중목 노즐), Thrust-Vector Control(추력벡터 제어), Shock Wave(충격파), Supersonic Flow(초음속 유동)

1. 서 론

일반적으로 추진엔진의 노즐로부터 방출되는 고속기류의 추력방향을 제어하여, 추진체의 비행

경로를 변화시키는 "추력벡터제어(Thrust Vectoring Control, TVC)" 기술은 시스템의 기동성(Maneuverability)과 성능을 좌우하는 중요 기술로서, 과거부터 TVC에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다.

종래에 수행된 TVC 기술들은 기계적인 방법을 주로 적용하여 왔으며, 이러한 방법은 추진노즐 내부에 Flap이나 Vane 등[1]을 설치하거나,

* 안동대학교 대학원 기계공학과

** 안동대학교 기계공학과

연락처, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

추진노즐 자체를 가변형으로 하여 유압으로 노즐 형상을 변화시키는 것으로, 고기동성이 요구되는 추진체에 성공적으로 적용되어 왔다. 그러나 이러한 기계적인 방법에는 부수적으로 필요로 하는 기계장치로 인해 추진 시스템의 중량을 증가시킬 뿐만 아니라, 시스템을 구조적으로 복잡하게 하고, 제작비 등을 증가시키게 된다. 또 경우에 따라서 기계적 구동장치의 추가로, 레이더에 쉽게 포착되는 문제점들이 지적되어 왔다.

최근 2차유동(Secondary flow)을 이용하여, 추진노즐로부터 방출되는 제트기류의 추력벡터를 제어하는 Fluidic Thrust Vector Control법이 많은 주목을 받고 있다. 이 방법은 추진노즐 내부에 어떠한 가동 부분도 설치하지 않고, 단지 2차유동만을 이용하여 추진제트의 추력벡터를 조절하게 되므로, 기계적인 추력벡터 제어법에 비하여 많은 이점을 가지고 있다.

이와 같은 2차 유동을 이용한 추력벡터 제어법[2]은 추진노즐 내부로 2차 유동을 분사하는 방법과 외부에 이젝터를 설치하여, 2차유동의 유량을 조절하여, 추진체의 추력을 제어하는 방법들이 주로 연구되어 왔다. 최근 정 등[3]은 주노즐외부에 이젝터 형상의 Shroud 를 설치하여, Shroud 로부터 2차유동을 주 노즐의 유동방향과 같은 방향으로 발생시켜 제트기류 방향을 변화시키는 경우와, 2차유동의 방향을 기류의 역방향으로 발생시키는 두 방법을 수치해석적 및 실험적으로 조사하였다.

본 연구에서는 이중목 노즐(Dual Throat Nozzle, DTN)의 개념[4]을 이용하여, 상류목 노즐의 바로 직전에서 유동을 분사하는 방법을 적

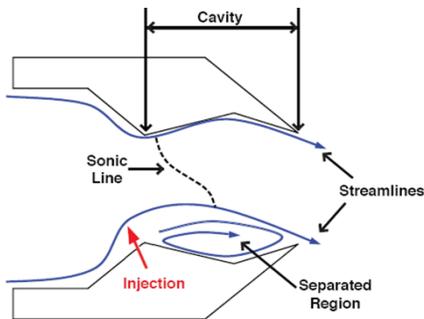


Fig. 1 Sketch of the dual throat fluidic thrust vectoring nozzle

용하여 TVC의 유효성을 조사하려는 기초적 연구의 일환으로, 수치해석적 연구를 수행하였다.

Figure 1에는 DTN 노즐의 형상과 TVC를 얻는 개념을 도시하였다. DTN은 일반적인 초음속 노즐의 형태인, Convergent-Divergent(CD) 노즐의 끝단에 축소형의 노즐을 부착시키면, 상류목과 하류목 사이에 일종의 공동(Cavity)이 형성된다. 이 경우, 상류목 바로 직전에서 유동을 분사하면, 분사구 바로 하류, 공동에서 큰 박리영역이 형성되므로, 박리포(Separation Bubble) 외부의 주 유동에서 원심력이 발생하게 되며, 이러한 원심력에 대응하기 위하여, 노즐 내부 유동에는 비대칭 압력분포가 발생하게 된다. 이로 인하여, Fig.1에 도시한 바와 같이 추력방향을 변화시키는 개념으로, 종래에 적용되어 왔던 Fluidic Thrust Vector Control법에 DTN은 Gas-dynamics 개념을 접목한 일종의 Hybrid TVC법이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 DTN을 이용한 TVC에 관한 연구의 일환으로, 상류목에 2차유동을 분사(Blowing)하는 경우에 대하여 수치해석법을 이용하여 DTN의 유동특성을 조사하였으며, 선행 연구의 실험결과[4]와 비교하였다.

2. 수치해석

본 연구에서는 DTN을 통하는 기체유동의 특성을 조사하기 위하여, 2차원 압축성 Navier-Stokes 식을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 선행연구로, 수치해에 미치는 격자의존성과 수치해석 영역의 영향을 조사하였으며, 또 여러 난류모델을 적용하여 유용한 실험결과와 비교하였다. 그 결과 후술하는 바와 같은 계산영역과 계산격자를 얻을 수 있었으며, 압축성을 고려한 $k-\omega$ 난류모델이 가장 잘 실험결과를 예측하는 것으로 판단되었다.

2.1 DTN 형상

Figure 2에는 본 연구에서 적용된 DTN의 형상을 도식적으로 나타내었다. 노즐의 상류목과 하류목의 직경을 각각, d_1 과 d_2 로 정의하며, 두목간의 거리를 l 로 정의하였다. 또 상류목 바로

하류의 확대부의 각도를 θ_1 그리고 하류목 상류의 축소유로의 각도를 θ_2 로 정의하였다. θ_1 과 θ_2 , l 을 각각 10 deg, 30 deg 그리고 133.6 mm로 고정하였다. 이 경우, 두 노즐의 면적비(A_e/A_i)는 1.0 이다.

2.2 계산영역 및 경계조건

Figure 3은 본 수치계산에서 사용된 계산영역과 경계조건을 나타낸다. 계산영역의 크기는 x방향으로 노즐목(상류목) 직경의 50배, y방향으로 10배 정도였으며, 격자의존성의 연구결과 수치계산에 사용된 격자는 대략 80,000개 이었다.

수치계산의 경계조건으로 노즐 입구에 Pressure Inlet, 계산영역의 외부경계에는 Pressure Outlet, 그리고 노즐 내 2차유동이 분사되는 경계는 Mass Flow Inlet을 적용하고, 벽면에는 단일 No-slip조건을 적용하였다. 본 연구에서 Pressure Inlet에는 전압(P_0)과 전온도(T_0)를 적용하였으며, P_0 의 값을 200 kPa, T_0 는 293.15 K로 일정하게 유지하였다. 또 노즐의 배압에 해당하는 Pressure Outlet에는 대기압(p_b)과 대기온도를 가정하였다. 따라서 본 연구에 적용된 노즐 압력비($NPR=p_0/p_b$)의 값은 2.0으로 고정하였다.

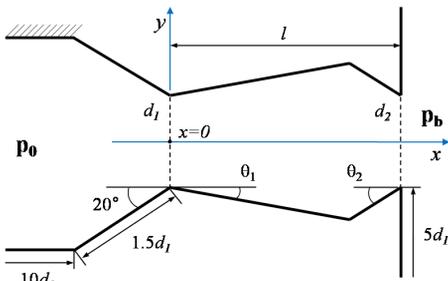


Fig. 2 Dual throat nozzle configurations

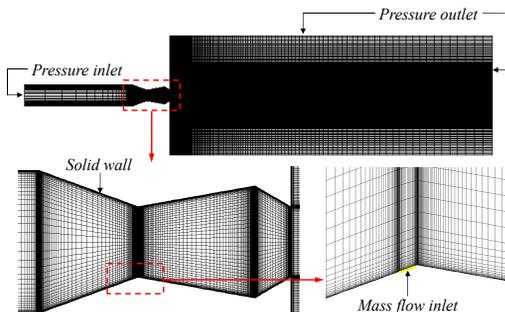


Fig. 3 Computational grid and boundary conditions

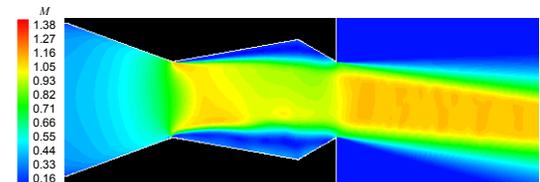
그리고 분사되는 2차유동의 질량유량은 전체 유입되는 질량유량의 0%~10%로 변화시켜주었다.

3. 결과 및 고찰

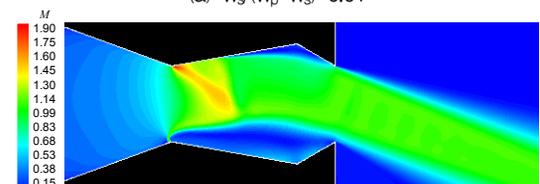
Figure 4는 노즐목 면적비(A_e/A_i)가 1.0이고 NPR이 2인 경우, 2차유동의 질량유량이 변화할 때 DTN에서 발생하는 유동의 마하수 분포를 나타내었다. 참고로 2차유동의 질량유량은 노즐 입구의 질량유량(w_p)과 2차유동의 질량유량(w_s)을 이용한 무차원의 값($w_s/(w_p+w_s)$)으로 나타내었다. 그림(a)에서 $w_s/(w_p+w_s)$ 값이 0.01이면, 추력벡터 각도는 10°정도 변화였고, 그림(b)에서 보는 바와 같이 $w_s/(w_p+w_s)$ 값이 0.05이면, 추력벡터 각도는 20°정도 변화였다. 이는 전술하는 바와 같이 공동 내에서 발생하는 박리영역에 의해 추력방향이 변화였다.

Figure 5에는 2차유동의 질량유량이 변화하는 경우, DTN의 추력벡터 각도(δ_p)를 나타내었다. 그림에서 δ_p 는 $w_s/(w_p+w_s)$ 이 증가함에 따라 커지다가 $w_s/(w_p+w_s)=0.05$ 부근에서 최대값을 가진 후, $w_s/(w_p+w_s)$ 이 더욱 증가하면, 일정한 값으로 접근하는 경향을 보인다. 이런 경향은 공동 내에서 발생하는 박리영역의 크기에 기인한다.

Figure 6에는 2차유동의 질량유량이 DTN의 추력계수(C_t)에 미치는 영향을 나타내었으며, 참고로 본 연구에서는 C_t 는 등엔트로피 유동으로 가정한 경우에 발생하는 추력에 대한 실제 추력의 비로 정의하였다. 그림에서 $w_s/(w_p+w_s)$ 이 증



(a) $w_s/(w_p+w_s)=0.01$



(b) $w_s/(w_p+w_s)=0.05$

Fig. 4 Predicted Mach number contours (NPR=2)

가함에 따라 C_t 는 점차 감소한다. 공동부에서 발생하는 박리영역의 증가로 유동손실도 증가하기 때문이다. 하지만 $w_s/(w_p+w_s)=0.05$ 이상인 경우, 박리영역의 크기는 증가하지 않지만, 2차유동과 주유동의 간섭으로 생기는 충격파에 의해 압력 손실이 발생하고 그만큼 C_t 가 감소한다.

Figure 7은 DTN의 상류목에서 발생하는 유동의 유출계수 값을 C_{d1} 로 정의하여 2차유동의 질량유량에 따른 변화를 나타내었다. C_{d1} 값은 실

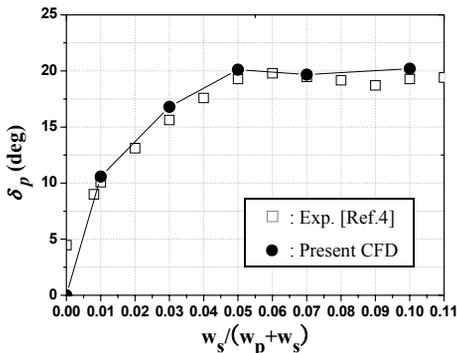


Fig. 5 Variation of the thrust vector angle in DTN

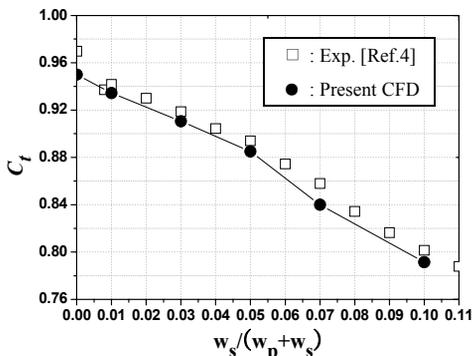


Fig. 6 Variation of the thrust coefficient in DTN

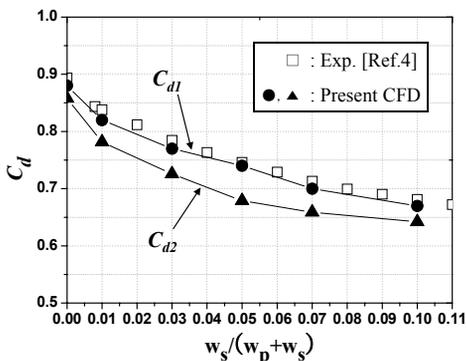


Fig. 7 Variation of the coefficient of discharge in DTN

험결과와 본 수치계산의 결과가 잘 일치하였다. $w_s/(w_p+w_s)$ 이 증가함에 따라 C_{d1} 값은 점차 감소한다. 이는 주유동과 반대방향으로 분사되는 2차유동에 의한 압력손실에 기인한다. 한편, Fig.7을 살펴보면 모든 $w_s/(w_p+w_s)$ 범위에서 C_{d1} 은 C_{d2} 보다 큰 값을 가지는데, 이는 상류목과 하류목 사이의 공동부에서 발생하는 박리에 의한 압력손실에 기인한다.

4. 결 론

본 연구에서는 DTN을 이용한 추력제어 연구의 일환으로, 2차유동의 분사(Blowing)가 있는 경우에 대한 수치해석을 수행하여, DTN에서 발생하는 유동특성과 DTN의 추력벡터 각도, 추력계수 및 유출계수의 값을 조사하였다. 본 수치계산 결과, 2차유동의 질량유량이 전체 유입되는 질량유량의 5%~6%까지 증가할 때는 추력벡터 각도가 크게 증가하지만 2차유동의 질량유량이 그 이상이 되면 일정한 값에 접근하고 있다. 한편, 2차유동의 질량유량이 증가하면 추력계수와 유출계수는 감소하였다.

참고 문헌

1. Bursey, R. and Dickinson, R., "Flight Test Results of the F-15 SMTD Thrust Vectoring/Thrust Reversing Exhaust Nozzle," AIAA Paper, 90-1906, 1990.
2. Green, C. J. and McCullough, M. Jr., "Liquid Injection Thrust Vector Control," AIAA Journal, Vol.1, No.3, pp.573~578, 1963.
3. Jung, S. J., Kumar, V. R. S. and Kim, H. D., "A Study of Thrust-Vectoring Nozzle Flow Using Coflow-Counterflow Concept," Proc. KSME Fall Conference, pp.592~597, 2003.
4. Flamm, J. D., Deere, K. A., Mason, M. L., Berrier, B. L. and Johnson, S. K., "Experimental Study of an Axisymmetric Dual Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle for Supersonic Aircraft Application," AIAA Paper, 2007-5084, 2007.