

研究論文

이중목 노즐에서 발생하는 초음속유동 특성에 관한 연구

신춘식* · 김희동**†

A Study on the Supersonic Flow Characteristics
Through 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. 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 a fundamental performance of a dual throat nozzle(DTN) at various nozzle pressure ratios(NPR) and throat area ratios. Two-dimensional, axisymmetric, steady, compressible Navier-Stokes equations were solved using a fully implicit finite volume scheme. NPR was varied in the range of NPR from 2.0 to 10.0, at different throat area ratios. The present computational results were validated with some experimental data available. Based upon the present results, the performance of DTN is discussed in terms of the discharge coefficient and thrust efficiency.

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 기초 유동특성을 조사하기 위하여, 수치해석적인 방법을 적용하였으며, 노즐압력비와 노즐목 면적비를 변화시켰다. 수치해석에서는 축대칭, 압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위하여, 유한체 적법을 적용하였다. 그 결과 본 수치해석은 실험결과를 잘 예측하였으며, DTN의 성능을 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 기술

접수일 2010. 7. 9, 수정완료일 2010. 9. 22, 게재확정일 2010. 9. 28

* 학생회원, 안동대학교 대학원 기계공학과

** 종신회원, 안동대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

로서, 과거부터 TVC에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다. 종래에 수행된 TVC 기술들은 기계적인 방법을 주로 적용하여 왔으며, 이러한 방법은 추진노즐 내부에 Flap이나 Vane 등[1, 2]을 설치하거나, 추진노즐 자체를 가변형으로 하여 유압으로 노즐 형상을 변화시키는 것으로, 고기동성이 요구되는 추진체나 비상체에 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[3, 4]은 추진노즐 내부로 2차 유동을 분사하는 방법과 외부에 이젝터를 설치하여, 2차유동의 유량을 조절하여, 추진체의 추력을 제어하는 방법들이 주로 연구되어 왔다. 최근 정 등[5]은 주노즐 외부에 이젝터 형상의 Shroud를 설치하여,

Shroud로부터 2차유동을 주 노즐의 유동방향과 같은 방향으로 발생시켜 제트기류 방향을 변화시키는 경우와, 2차유동의 방향을 기류의 역방향으로 발생시키는 두 방법을 수치해석적 및 실험적으로 조사하였다. 그 결과 2차유동의 유량을 주 유동의 3~5% 미만으로도 효과적으로 추력제어가 가능함을 보고하였다. 그러나 이 방법의 경우, 얻어질 수 있는 추력편향각의 범위가 제한될 뿐만 아니라, 추력손실 등의 문제점이 있었다.

본 연구에서는 이중목 노즐(Dual Throat Nozzle, DTN)의 개념[6]을 이용하여, 상류목 노즐의 바로 직전에서 유동을 분사하는 방법을 적용하는 TVC의 유효성을 조사하기 위하여 기초적 연구를 수행하였다.

Figure 1에는 DTN 노즐의 형상과 TVC를 얻는 개념을 도시하였다[6]. 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, 박리기포(Separation Bubble) 외부의 주 유동에서 원심력이 발생하게 되며, 이러한 원심력에 대응하기 위하여, 노즐 내부 유동에는 비대칭 압력분포가 발생하게 된다. 결국 2차유동과 박리기포에 의한 유효 유로 변경이 압력분포 변화와 Fig. 1에 도시한 바와 같이 추력 방향을 변화시키는 개념으로, 종래에 적용되어 왔던 Fluidic TVC법에 DTN은 Throat Shifting 개념을 접목한 일종의 Hybrid TVC법 이라고 할 수 있다.

이러한 TVC법의 경우, 유동이 초크하는 위치가 상류목과 하류목의 단면적에 따라 달라지게 되며, 어떤 노즐 압력비에서는 하류목 상류에서 충격파가 발생하게 될 뿐만 아니라, 노즐 공동부에서 발생하는 큰 박리영역으로 인하여 추력손실을 초래하게 되므로, DTN의 적절한 형상에 대한 기초적 연구가 필수적이다.

따라서, 본 연구에서는 DTN을 이용한 TVC에서 2차유동 분사(Blowing)의 최적조건을 알기 위해 기본형상에 대한 기초적 연구의 일환으로, 상

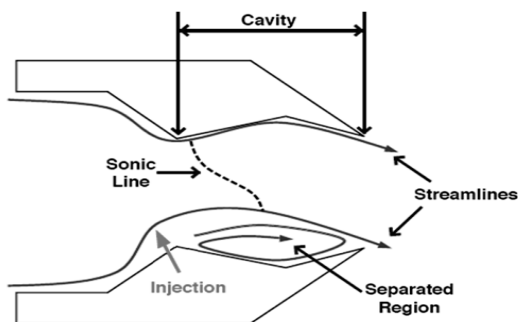


Fig. 1 Sketch of the dual throat fluidic thrust vectoring nozzle[6]

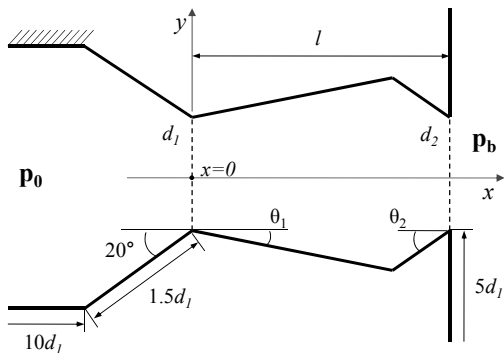
류목에 2차 유동을 분사하지 않은 경우에 대하여 수치해석법을 이용하여 DTN의 유동특성을 조사하였으며, 선행 연구의 실험결과[6]와 비교하였다.

2. 수치해석법

본 연구에서는 DTN을 통하는 기체유동의 특성을 조사하기 위하여, 축대칭 2차원 압축성 Navier-Stokes식을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 계산에는 Fluent 6 프로그램을 사용하였으며, 압축성을 고려한 k- ω 난류모델을 적용하였다.

2.1 DTN 형상

Figure 2에는 본 연구에서 적용된 DTN의 형상을 도식적으로 나타내었다[6]. 노즐의 상류목



Configuration	d_2 (cm)	θ_2 (deg)	A_c (cm ²)	A_c/A_t	l (cm)	NPR_D
A	6.15	30	29.69	1.0	13.36	1.89
B	7.47	20	43.8	1.48	13.36	6
C	8.54	11	57.25	1.93	13.36	10

Nozzle Pressure Ratio(NPR), $p_0/p_b = 2, 3, 5, 7, 10$
 $d_1 = 6.15$ cm, $A_t = 29.69$ cm², $\theta_1 = 10$ deg. for all configurations

Fig. 2 Dual throat nozzle configurations[6]

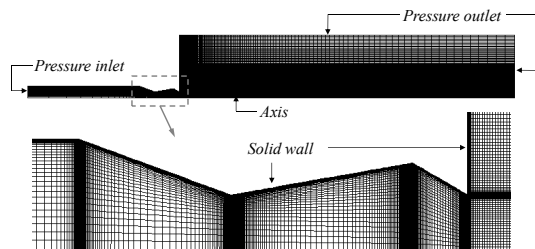


Fig. 3 Computational grid and boundary conditions

과 하류목의 직경을 각각, d_1 과 d_2 로 정의하며, 두 목간의 거리를 l 로 정의하였다. 또 상류목 바로 하류의 확대부의 각도를 θ_1 그리고 하류목 상류의 축소유로의 각도를 θ_2 로 정의하였다. 본 연구에서는 DTN 에 대한 기초연구의 일환으로, 제트유동에 미치는 노즐 상세형상의 영향을 조사하기 위하여, Fig. 2에 도시한 바와 같이, d_1 을 61.5 mm 고정하고 d_2 의 값을 변화시켰으며, 또 θ_1 과 l 을 각각 10 deg 그리고 133.6 mm로 고정하여, θ_2 의 값을 변화시켰다. 이 경우, 두 노즐의 면적비(A_c/A_t)는 1.0, 1.48 그리고 1.93으로 변화하였다.

2.2 계산영역 및 경계조건

Figure 3은 본 수치계산에서 사용된 계산영역과 경계조건을 나타낸다. 계산영역의 크기는 x 방향으로 노즐목(상류목) 직경의 50배, y 방향으로 10배 정도였으며, 이러한 계산영역은 노즐의 압력비(NPR)에 따라 다소 변화하였다. 수치계산에 사용된 격자는 대략 40,000개 이었다.

수치계산의 경계조건으로 노즐 입구에 Pressure Inlet, 그리고 계산영역의 외부경계에는 Pressure Outlet을 적용하였으며, 벽면에는 단열 No-slip조건을 적용하였다. 본 연구에서 Pressure Inlet에는 전압(P_0)과 전온도(T_0)를 적용하였으며, P_0 의 값을 200 kPa에서 1 MPa까지의 영역에서 변화시켰으나, T_0 는 293.15 K로 일정하게 유지하였다. 또 노즐의 배압에 해당하는 Pressure Outlet에는 대기압(P_b)과 대기온도를 가 정하였다. 따라서 본 연구에 적용된 노즐압력비 ($NPR=p_0/p_b$)의 값은 DTN에서 과팽창 및 부족팽창 유동이 얻어질 수 있도록 2.0에서 10.0 범위에서 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

Figure 4에는 A_c/A_t 가 1이고, NPR이 변화하는 경우, 노즐 벽면을 따르는 정압분포를 나타내었다. 그림에서 유동은 노즐입구에서부터 가속하여, 상류목($x/l=0.0$)에서 초크하여 초음속으로 된 후, 상류목 바로 하류에서 압력이 급격히 증가하

고, 유동은 아음속으로 되며, 공동 영역에서 압력은 완만하게 증가하지만, 그 압력증가는 크지 않다. 그 후, 하류목($x/l=1.0$) 바로 상류, 축소유로에서 유동은 재가속하여, 초음속 상태로 노즐 출구로부터 방출한다. 이러한 경향은 실험결과와 본 수치계산의 결과가 잘 일치하지만, 본 수치계산의 결과는 공동부에서 발생하는 압력 값을 약간 과소평가하는 것으로 나타난다.

한편 일차원 기체역학 이론에 의하면, 상류목과 하류목의 면적이 같은 경우, 유동은 상류목에서가 아니라 하류목에서 초크한다. 그러나 벽면 부근에서 발생하는 유동은, 아임계 익형(Subcritical Airfoil)에서 관찰되는 바와 같이 상류목에서 부분적으로 초음속으로 되지만, 상류목 단면 전체에서 유동은 초크하지 않고, 아음속 상태로 된다. 이러한 벽면에서의 압력분포는 실험 값에도 발견되며, 이것은 DTN 내부 유동에서 박리 등의 2차원 현상으로, 1차원 유동이론으로 DTN을 통하는 유동특성을 파악하기가 곤란하다는 것을 의미한다.

또 그림의 벽압력 분포로부터 노즐 출구에서 유동은 음속 상태로 되어, 노즐 출구에서는 NPR에 따라 초음속 제트 형태가 달라진다. 한편 공동부에서 발생하는 유동은 NPR에 따라 다소 영향을 받는 것으로 보이지만, 압력은 NPR이 증가하면 약간 감소하는 경향을 보인다. 그러나 NPR이 3.0 이상으로 되면 공동부에서 발생하는 압력은 NPR에 의존하지 않는 것으로 나타나며, 본 수치계산 결과에서도 유사한 경향을 보인다.

Figure 5와 Fig. 6에는 각각 노즐목 면적비 A_c/A_t 가 각각 1.48과 1.93인 경우, 노즐벽면을 따라 발생하는 정압분포를 나타내었다. 그림에서 유동의 압력은 상류목 직전에서 급격히 감소하여, 초음속 상태로 되며, 공동부에서 발생하는 압력분포는 Fig. 4와는 달리 NPR에 강하게 의존하는 것으로 나타난다. NPR이 비교적 낮은 경우, 노즐내부에는 충격파가 발생하여, 벽면경계층과 간섭하게 되므로, 벽면경계층은 박리한다. 충격파 하류에서 유동은 아음속으로 감속하여, 낮은 NPR을 제외하고 하류목 출구면에서 재차 초음속으로 가속한다. 그러나 NPR 증가에 따라,

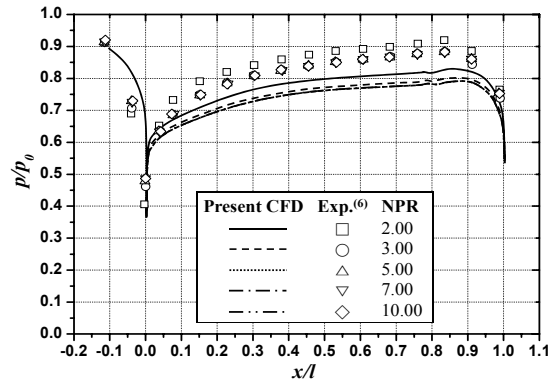


Fig. 4 Predicted and measured static pressure distributions along nozzle wall surface (Configuration A, $A_c/A_t=1.0$)

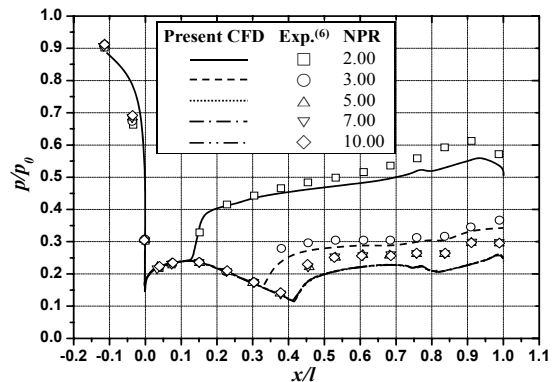


Fig. 5 Predicted and measured static pressure distributions along nozzle wall surface (Configuration B, $A_c/A_t=1.48$)

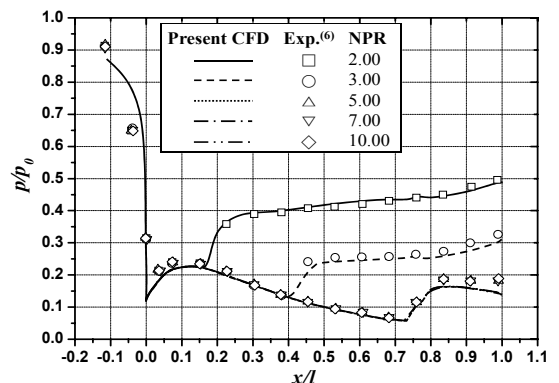


Fig. 6 Predicted and measured static pressure distributions along nozzle wall surface (Configuration C, $A_c/A_t=1.93$)

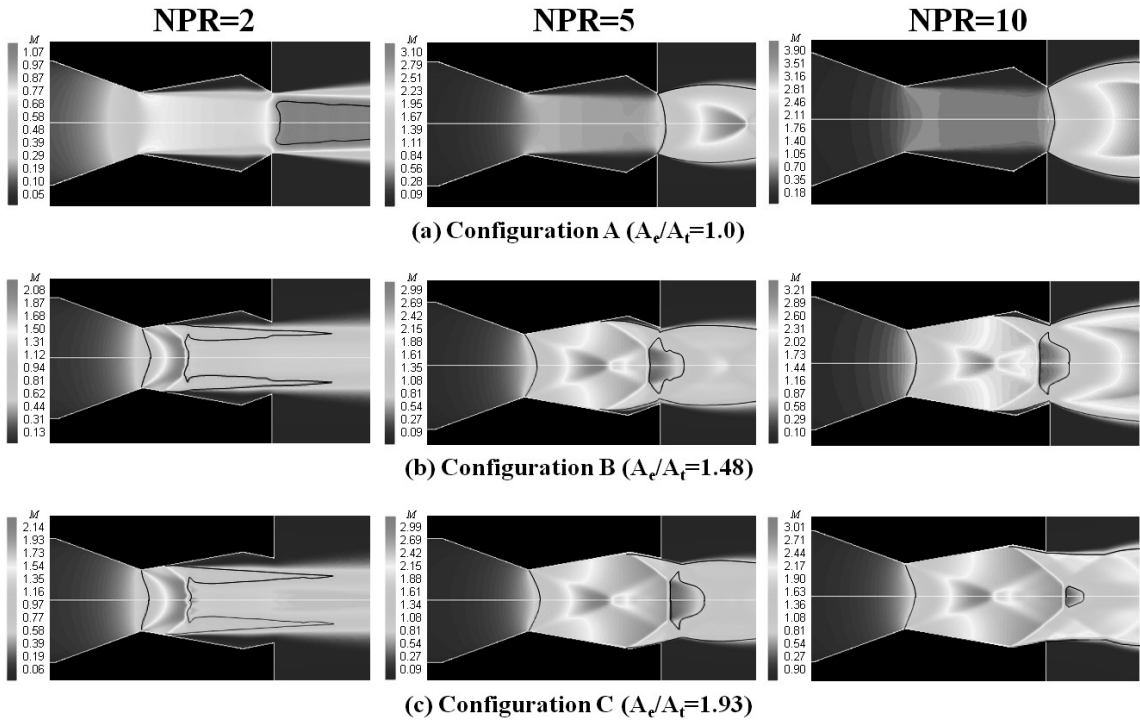


Fig. 7 Predicted Mach number contours

공동부에서 발생하는 충격파는 하류로 이동하며, 그 형태도 일부가 수직충격파에서 경사충격파로 변한다. 따라서 λ -shock 발달에 따른 수직충격파 위치가 하류목 후류에 위치한다. 본 연구의 결과로부터 NPR 증가에 따라 노즐 내 초음속 유동이 차지하는 비율이 증가하고 이에 따른 유동의 박리 및 점성, 난류 영향의 감소에 의해 수치해석 결과의 신뢰성이 증가한다.

Figure 7에는 각각 노즐목 면적비 A_c/A_t 와 NPR이 변화하는 경우, DTN에서 발생하는 유동의 마하수 분포를 나타내었다. Fig. 7(a)의 A_c/A_t 가 1.0인 경우, Fig. 4에서 기술한 바와 같이, 상류목 노즐벽면 근처에서 국소적으로 초음속 유동이 발생하지만, 중심축 부근의 공동영역에서 유동은 아음속 상태로 되며, 공동내부에서는 박리유동이 형성된다. NPR이 2.0인 경우, 하류목 출구에서 유동은 초크(Choke)하여, 출구에서는 마하수가 1.0에 가까운 초음속 제트로 외부로 방출한다. 그러나 NPR이 증가하면, 하류목 상류까지의 유동은 대부분 변화하지 않지만, 노즐 출구

에서 유동은 전형적인 부족팽창 제트(Under-Expanded Jet)로 되며, 제트 내부에는 Barrel형의 충격파가 형성된다. 그리고 이러한 경향은 3차원으로 수치해석이 수행된 참고논문[7]에서도 유사하게 보인다.

한편 A_c/A_t 가 증가하는 경우(Fig. 7(b)와 (c)), DTN 내부의 공동부에서 충격파가 발생하여, NPR 증가에 따라 충격파는 하류로 이동한다. 벽면 경계층의 유동은 충격파에 의하여 박리하며, 충격파가 하류로 이동함에 따라, 박리위치도 함께 하류로 이동하며, Fig. 7(a)에 비하여 박리영역은 크게 감소한다. 여기서 Fig. 7(b)의 경우, NPR이 증가하더라도 노즐 내부에 초음속 유동을 채우지 못하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 NPR 증가에 의해 커진 유량 값이 확산부에 의해 팽창된 상태로 하류목을 지나기에는 면적이 충분하지 않기 때문이다. Fig. 7(c)의 경우, NPR이 증가하면, 공동부에서 박리영역의 거의 사라진다. 이 경우 후술하는 바와 같이, DTN의 추력 손실에 미치는 박리유동의 점성손실은 거의 무

시할 수 있을 정도로 작아지게 되며, DTN 내부에서 발생하는 경사충격파에 의한 압력손실만이 추력에 영향을 미치게 될 것으로 판단된다.

Figure 8에는 NPR이 DTN의 추력계수(C_t)의 값에 미치는 영향을 나타내었으며, 참고로 본 연구에서 C_t 는 등엔트로피 유동으로 가정한 경우에 발생하는 추력에 대한 실제 추력의 비로 정의하였다. 그림으로부터 A_e/A_t 가 1.0인 경우, C_t 는 NPR 증가에 따라 약간 커지다가 NPR=3.0 부근에서 최대값을 가진 후, NPR이 더욱 증가하면 C_t 는 점차 작아진다. 그러나 A_e/A_t 이 1.48과 1.93인 경우에는, C_t 는 NPR 증가에 따라 점차 커지다가 NPR이 매우 커지면, 본 연구에서 제시된 NPR내에서 일정 값으로 접근하는 경향을 보인다. 이것은 전술한 바와 같이, A_e/A_t 이 1.0인 경우에는 DTN 내부에서 유동은 아음속 상태로, 노즐 출구면에서 유동이 초크하며, NPR 증가에 따른 유량 증가를 수용하기 위한 전압력 손실, 유효면적 감소, 마하수 감소 등으로 인해 공동부에서 발생하는 박리영역의 증가로 유동손실이 증가하기 때문이다.

그러나 A_e/A_t 이 증가하면, 유동은 상류목 부근에서 초크하며, DTN 노즐내부에는 충격파가 발생하며, NPR 증가에 따라 충격파의 위치가 하류로 이동하므로, 박리영역의 크기가 줄어들게 된다. 이 경우 Fig. 7(c)에서 관찰되는 바와 같이, 제시된 범위에서는 NPR이 더욱 증가하더라도 DTN 내부에서 발생하는 충격파의 형태는 거의

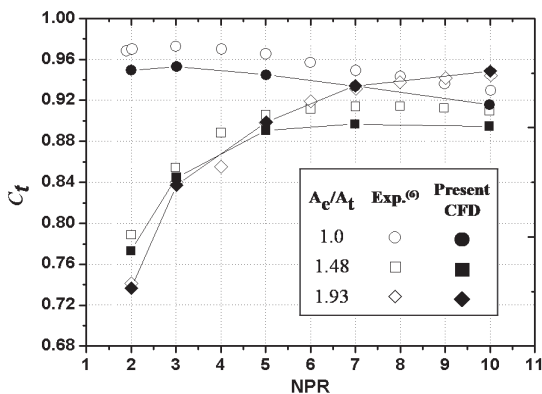


Fig. 8 Variation of the thrust coefficient with NPR

변화하지 않으므로, C_t 는 거의 일정하다.

한편 NPR이 2.0으로 비교적 낮은 경우에 C_t 는 A_e/A_t 가 작은 경우가 더 크며, 제시된 범위에서 NPR이 증가하여, DTN 출구에서 강한 부속팽창 제트류가 형성되는 압력비, 예를 들면 $NPR > 7.0$ 으로 되면, A_e/A_t 가 큰 1.93의 경우가 다른 값에 비하여 C_t 가 크다.

비록 본 연구에서는 NPR이 10 이하로 적용하였지만, NPR이 더욱 증가하고, 상류목과 하류목의 면적비가 상대적으로 작은 경우에는 $A_e/A_t = 1.0$ 에 대한 C_t 에 접근하게 될 것이지만, A_e/A_t 가 큰 경우에 C_t 는 $A_e/A_t = 1.0$ 에 대한 값보다 상당히 크게 될 것으로 예상된다. 본 연구로부터

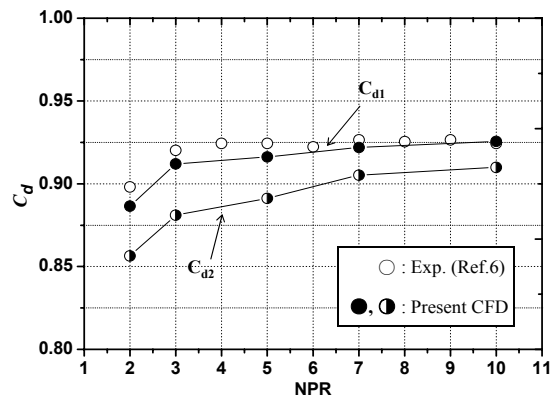


Fig. 9 Variation of the coefficient of discharge in DTN ($A_e/A_t=1.0$)

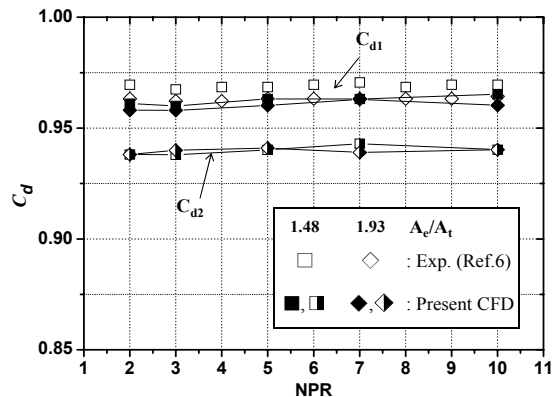


Fig. 10 Variation of the coefficient of discharge in DTN ($A_e/A_t=1.48$ and 1.93)

제시된 범위에서 DTN의 NPR이 낮으면 A_e/A_t 가 작을수록 C_t 는 커지지만, NPR이 높아지면 A_e/A_t 가 클수록 C_t 는 증가한다.

Figure 9에는 A_e/A_t 가 1.0인 경우에 DTN의 상류목과 하류목에서 발생하는 유동의 유출계수(Coefficient of Discharge)값을 각각 C_{d1} 과 C_{d2} 로 정의하여, NPR에 따른 변화를 나타내었다. 상류목에서 발생하는 유동의 C_{d1} 은 실험결과와 본 수치계산의 결과가 잘 일치하였다. NPR이 3 이하의 낮은 범위에서는 NPR 증가에 따라 C_{d1} 은 커지지만 NPR이 3이상인 경우, 더 이상 커지지 않고 일정한 값에 접근한다. 이때의 접근값은 약 0.92이다. 하류목에서 발생하는 유동의 C_{d2} 도 C_{d1} 과 유사한 성향을 보인다.

Figure 10에는 A_e/A_t 가 1.48, 1.93인 경우에 DTN의 상류목과 하류목에서 발생하는 유동의 C_{d1} 과 C_{d2} 로 나타낸다. A_e/A_t 가 1.0인 경우와는 달리 모든 NPR 범위에서 C_{d1} 과 C_{d2} 는 거의 일정하게 나타난다.

한편 Fig. 9와 Fig. 10에 나타난 바와 같이 모든 NPR 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 없는 경우에 대한 수치해석을 수행하여, DTN에서 발생하는 유동특성과 DTN의 추력성능 및 유출계수의 값을 조사하였다. 본 수치계산의 결과, 제시된 범위에서 NPR이 작은 경우에 DTN의 노즐목 면적비가 작은 경우가 큰 경우에 비하여 추력 값이 크지만, NPR이 증가하여, DTN 출구에서 강한 부족팽창 제트류가 형성되는 경우에는 노즐 목면적비가 클수록 추력 값이 증가한다는 것을 알았다. 또 유출계수의 값은 공동부에서 발생하는 압력손실에 의해 하류목이 상류목에 비해 작고, A_e/A_t 가 1.0에서 낮은 NPR의 경우를

제외하고 다른 모든 경우에는 유출계수의 값은 일정한 값에 접근한다.

참 고 문 헌

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. Regeniece, V., Gatlin, D., Kempel, R. and Matheny, N., "The F-18 High Alpha Research Vehicle: A High Angle-of-Attack Testbed Aircraft," NASA TM, 104253, 1992
3. Jung, S. J., Kim, H. D., Ahn, J. M. and Jung, D. H., "Study of the Thrust Vector Control Using a Secondary Flow Injection," Proc. KSPE Spring Annual Meeting, 2002, pp.14-15
4. Green, C. J. and Mc Cullough, M. Jr., "Liquid Injection Thrust Vector Control," AIAA Journal, Vol.1, No.3, 1963, pp.573-578
5. 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, 2003, pp.592-597
6. 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
7. Deere, K. A., Flamm, J. D., Berrier, B. L. and Johnson, S. K., "Computational Study of an Axisymmetric Dual Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle for a Supersonic Aircraft Application," AIAA Paper, 2007-5085, 2007