

研究論文

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. 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 and nozzle pressure ratios(NPR). 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, The control effectiveness of thrust-vector is discussed in terms of the thrust coefficient and the discharge coefficient.

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, 2차 유동의 질량유량과 노즐 압력비를 변화시켰다. 수치해석에서는 2차원, 압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위하여, 유한체 적법을 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 "추력벡터 제어(Thrust Vector Control, TVC)" 기술은 시스템의 기동성과 성능을 좌우하는 중요 기술로서, 과거부터 TVC에 관

접수일 2010. 7. 21, 수정완료일 2010. 9. 13, 게재확정일 2010. 9. 20

* 학생회원, 안동대학교 대학원 기계공학과

** 종신회원, 안동대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

한 많은 연구가 수행되어 왔다.

종래에 수행된 TVC 기술들은 기계적인 방법을 주로 적용하여 왔으며, 이러한 방법은 추진노즐 내부에 플랩(Flap)이나 베인(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 2차 유동을 이용하여, 추진노즐로부터 방출되는 제트기류의 추력벡터를 제어하는 유체공학적인 추력벡터 제어(Fluidic Thrust Vector Control)법이 많은 주목을 받고 있다. 이 방법은 추진노즐 내부에 어떠한 가동 부분도 설치하지 않고, 단지 2차 유동만을 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, 2차 유동의 유량을 조절하여, 추진체의 추력을 제어하는 방법들이 주로 연구되어 왔다. 최근 정 등[5]은 주 노즐외부에 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 추력제어를 할 수 있다는 것을 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 노

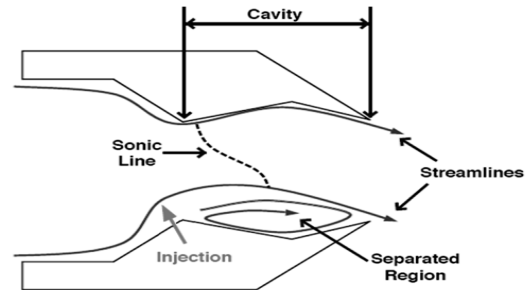


Fig. 1 Sketch of the dual throat fluidic thrust vectoring nozzle

즐의 바로 직전에서 유동을 분사하는 방법을 적용한 TVC의 효율성을 조사하려는 기초적 연구의 일환으로, 2차 유동의 분사가 없는 경우에 대한 연구결과[7]를 바탕으로 수치해석적 연구를 수행하였다.

Figure 1에는 DTN 노즐의 형상과 TVC를 얻는 개념을 도시하였다. DTN은 일반적인 초음속 노즐의 형태인, 축소-확대(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 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 유체공학적인 추력벡터 제어법에 DTN은 기계역학적 개념을 접목한 일종의 하이브리드(Hybrid) TVC법 이라고 할 수 있다.

이러한 TVC법의 경우, 유동이 초크(Choke)하는 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.

본 연구에서는 DTN을 이용한 TVC에 관한 연구의 일환으로, 상류목에 2차 유동을 분사하는

경우에 대하여 수치해석법을 이용하여 DTN의 유동특성을 조사하였으며, 선행 연구의 실험결과 [6]와 비교하였다.

2. 수치해석법

본 연구에서는 DTN을 통하는 기체유동의 특성을 조사하기 위하여, 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하였고, 이를 풀기 위해 유한체적법(Fully Implicit Finite Volume Scheme)을 적용해 수치해석을 수행하였다. 선행연구로, 수치해에 미치는 격자의존성과 수치해석 영역의 영향을 조사하였으며, 또 여러 난류모델을 적용하여 유용한 실험결과와 비교하였다. 그 결과 후술하는 바와 같은 계산영역과 계산 격자를 얻을 수 있었고 계산에는 Fluent 6 프로그램을 사용하였으며, 압축성을 고려한 k- ω 난류모델을 적용하였다.

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, 두 목간의 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 13.36 cm로 고정하였다. 이 경우, 두 노즐의 면적비(A_c/A_t)는 1.0 이다.

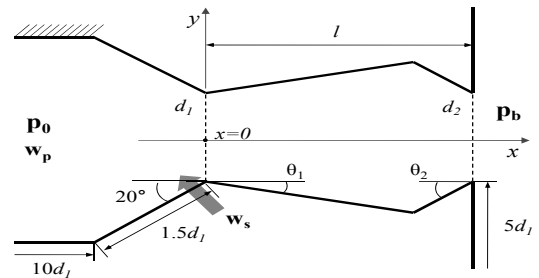
본 연구에서는 노즐 목의 곡률반경을 매우 작게 하여 노즐 목에서 유심팽창파의 발생이 용이하게 하였고, 확대부 형상을 직선적으로 하여 유동의 박리발생을 용이하게 하였다. 이러한 형상은 일반적으로 DTN에서 사용되고 있다.

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. 또 격자의존성의 연구결과와 수치계산에 사용된 격자는 대략 80,000개 이었다.

수치계산의 경계조건으로 노즐 입구에 Pressure Inlet, 계산영역의 외부경계에는 Pressure Outlet, 그리고 노즐 내 2차 유동이 분사되는 경계는 Mass Flow Inlet을 적용하고, 벽면에는 단열 No-slip 조건을 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 가정하였다. 따라서 본 연구에 적용된 노즐 압력비 ($NPR=p_0/p_b$)의 값은 DTN에서 과팽창 및 부족팽



d_2 (cm)	θ_2 (deg)	A_c (cm ²)	A_c/A_t	l (cm)	NPR _D
6.15	30	29.69	1.0	13.36	1.89
Nozzle Pressure Ratio(NPR), $p_0/p_b = 2, 3, 5, 7, 10$					
$w_c/(w_p+w_c) \times 100(\%) = 0, 1, 3, 5, 7, 10 (\%)$					
$d_1 = 6.15$ cm, $A_t = 29.69$ cm ² , $\theta_1 = 10$ deg.					

Fig. 2 Dual throat nozzle configurations

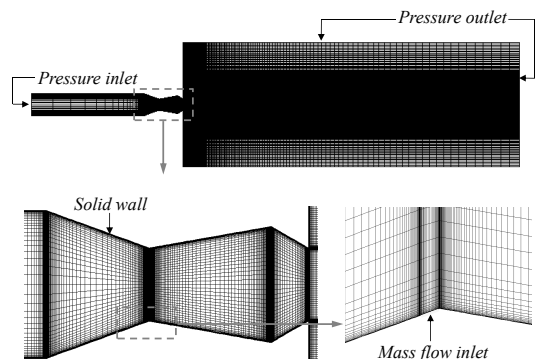


Fig. 3 Computational grid and boundary conditions

창 유동이 얻어질 수 있도록 2.0에서 10.0 범위에서 변화시켰다. 그리고 분사되는 2차 유동의 질량유량은 공급압력만을 변화시켜 전체 유입되는 질량유량의 0%~10%로 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

Figure 4는 노즐목 면적비(A_c/A_t)가 1.0이고 노즐 압력비(NPR)가 2인 경우, 2차 유동의 분사량이 변화할 때 DTN에서 발생하는 유동의 마하수 분포를 나타내었다. 참고로 2차 유동의 분사량은 노즐 입구의 질량유량(w_p)과 2차 유동의 질량유량(w_s)을 이용한 무차원의 값($w_s/(w_p+w_s) \times 100(\%)$)으로 나타내었다. Fig. 4(a)와 같이 2차 유동의 분사가 없으면 추력벡터는 수평이지만, Fig. 4(b)에서 2차 유동의 분사량이 1%이면, 추력벡터 각도는 10° 정도 변화였고, Fig. 4(c)에서 보는 바와 같이 2차 유동의 분사량이 5%이면, 추력벡터 각도는 20° 정도 변화였다. 이는 전술

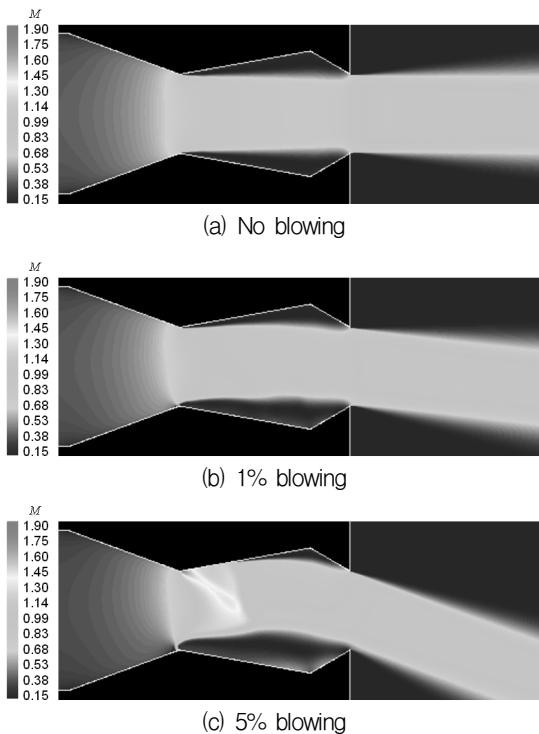


Fig. 4 Predicted Mach number contours (NPR=2)

하는 바와 같이 공동 내에서 발생하는 박리영역에 의해 추력방향이 변한 것이다.

Figure 4(a)에서 상류목에서는 음속에 도달하지 못하고 하류목에서 음속에 도달하였는데, 이는 상류에서 발생한 손실 때문이다. 그리고 Fig. 4(c)에서 2차유동의 분사량이 증가하면 상류목 전방의 압력은 증가하게 되고 이에 따라 상류목에서는 강한 유심팽창과 발생하게 되고 유동은 음속이 된다. 이후, DTN 노즐의 형상으로 인해 감속하기 위해 수직충격과가 형성된다.

Figure 4에서 노즐 출구 이후에 Shock Train 처럼 반복되는 마하수 변동이 있다. 이는 노즐의 압력비에 따라 노즐 출구에서 유동의 형태가 과팽창 상태로 되거나 부족팽창 상태로 될 수 있는데, 이 경우 전형적인 제트 구조는 압축과 팽창(과팽창일 경우), 또는 팽창과 압축(부족팽창일 경우)을 반복하게 되기 때문이다. 즉, 제트 축을 따라 유동의 마하수가 증가/감소 혹은 감소/증

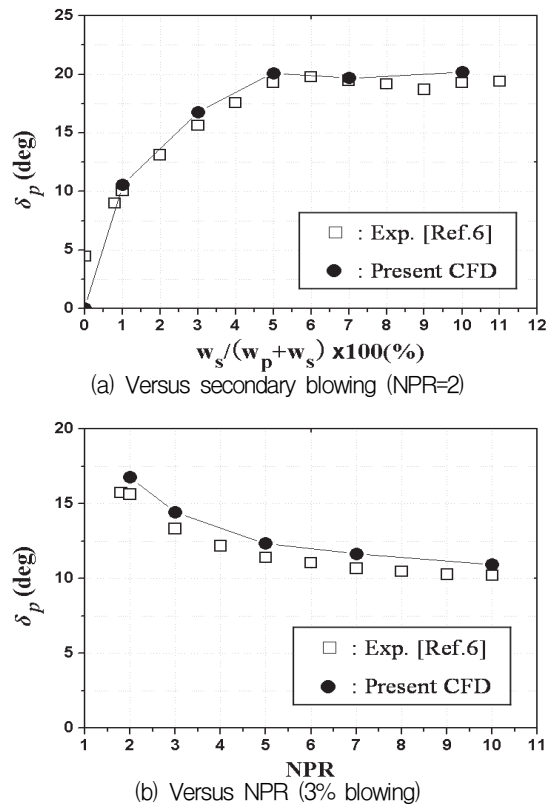


Fig. 5 Variation of the thrust vector angle in DTN

가를 반복하게 되는 형태로 되며, 이는 일반적인 제트에서도 흔히 관찰되는 현상이다.

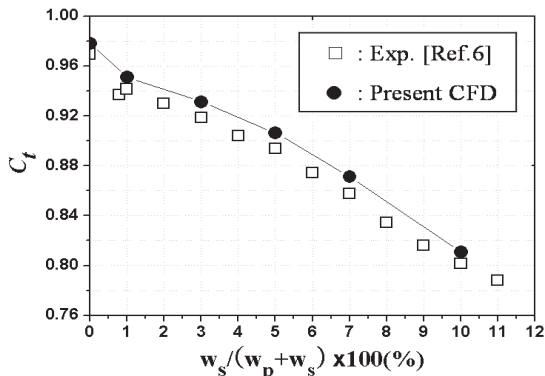
Figure 5(a)는 NPR이 2이고 2차 유동의 분사량이 변화하는 경우, DTN의 추력벡터 각도(δ_p)를 나타내었다. 그림에서 δ_p 는 2차 유동의 분사량이 증가함에 따라 커지다가 2차 유동의 분사량이 5% 일 때, 최대값을 가지고 이후 더욱 증가하면, 일정한 값으로 접근하는 경향을 보인다. 이런 경향은 공동 내에서 발생하는 박리영역의 크기에 기인한다.

Figure 5(b)는 2차 유동의 분사량이 3%이고, NPR이 변화할 때, DTN의 추력벡터 각도(δ_p)를 나타내었다. δ_p 는 NPR이 증가함에 따라 점차적으로 감소하였다. 이는 NPR이 증가할수록 주유동과 2차 유동의 간섭으로 발생하는 공동내 박리영역의 크기가 점차적으로 감소하기 때문이다. 한편

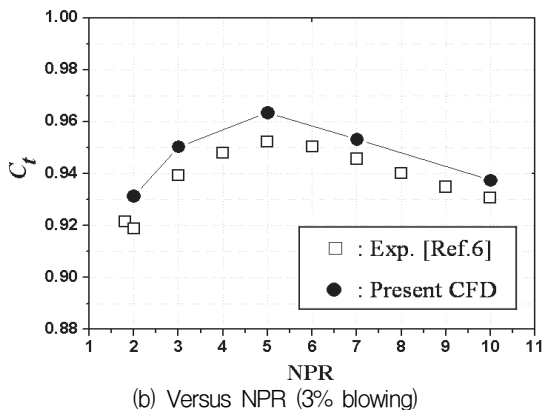
δ_p 의 감소폭은 NPR이 증가할수록 점차적으로 감소하여 높은 압력비에서는 일정한 값에 접근한다.

Figure 6(a)는 NPR이 2인 경우, 2차 유동의 분사량이 DTN의 추력계수(C_t)에 미치는 영향을 나타내었으며, 참고로 본 연구에서 C_t 는 등엔트로피 유동으로 가정한 경우에 발생하는 추력에 대한 실제 추력의 비로 정의하였다. 그림에서 2차 유동의 분사량이 증가함에 따라 C_t 는 점차 감소한다. 공동부에서 발생하는 박리영역의 증가로 유동손실도 증가하기 때문이다. 하지만 2차 유동의 분사량이 5% 이상인 경우, 박리영역의 크기는 증가하지 않지만, 2차 유동과 주유동의 간섭으로 생기는 충격파에 의해 압력손실이 발생하고 그만큼 C_t 가 감소한다.

Figure 6(b)는 2차 유동의 분사량이 3%인 경우, NPR이 C_t 에 미치는 영향을 나타내었다. 그

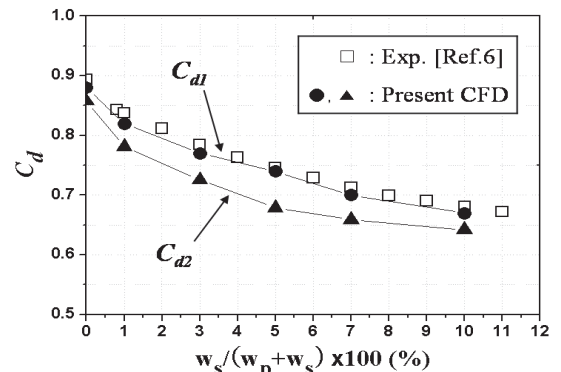


(a) Versus secondary blowing (NPR=2)

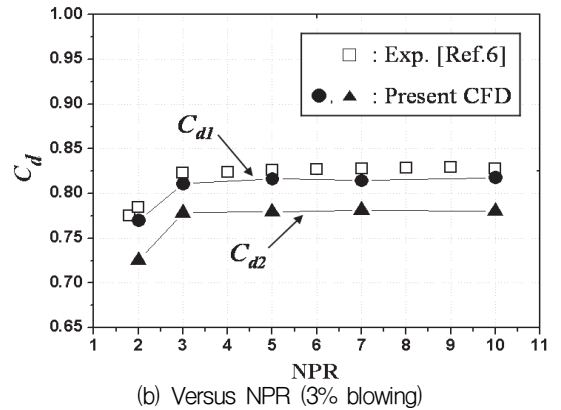


(b) Versus NPR (3% blowing)

Fig. 6 Variation of the thrust coefficient in DTN



(a) Versus secondary blowing (NPR=2)



(b) Versus NPR (3% blowing)

Fig. 7 Variation of the coefficient of discharge in DTN

림에 나타난 바와 같이 NPR이 증가함에 따라 C_i 의 값도 커지다가 NPR이 5가 되면 C_i 는 최대 값을 가지고, 이후에는 NPR이 증가할수록 C_i 값은 점차 감소한다.

Figure 7(a), (b)는 DTN의 상류목과 하류목에서 발생하는 유동의 유출계수(The Discharge Coefficient)값을 각각 C_{d1} 과 C_{d2} 로 정의하여, NPR에 따른 변화를 나타내었다. 상류목에서 발생하는 유동의 C_{d1} 값은 실험결과와 본 수치계산의 결과가 잘 일치하였다. Fig. 7(a)에서 NPR이 2인 경우, 2차 유동의 분사량이 증가함에 따라 C_{d1} 값은 점차 감소한다. 이는 주유동과 반대 방향으로 분사되는 2차 유동에 의해서 발생하는 손실 때문이다.

Figure 7(b)에서는 2차 유동의 분사량이 3%일 때, NPR에 따른 C_i 의 값이다. 여기서 C_i 값은 NPR이 2에서 3으로 변화할 때는 증가하지만, 이후에는 변화없이 일정한 값에 접근한다. 한편 Fig. 7(a)와 (b)에서 모든 2차 유동의 분사량 범위에 대하여 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, 2차 유동의 분사가 있는 경우에 대한 수치해석을 수행하여, DTN에서 발생하는 유동특성과 DTN의 추력계수 및 유출계수의 값을 조사하였다.

본 수치계산의 결과, 2차 유동의 분사량이 전체 유입되는 질량유량의 5%~6%까지 증가할 때는 추력벡터 각도가 크게 증가하지만 2차 유동의 분사량이 그 이상이 되면 일정한 값에 접근하며, 2차 유동의 질량유량이 증가하면 추력계수와 유출계수는 감소하였다.

2차 유동의 분사량을 3%로 고정한 경우, NPR이 증가할수록 추력벡터의 각도는 감소하였지만,

그 감소폭은 점차 낮아졌다. 그리고 추력계수의 값은 NPR이 증가할수록 커지다가 NPR이 5일 때, 최대값을 가지고 이후 추력계수의 값은 점차 작아지며, 유출계수의 값은 NPR이 3보다 커지면 일정한 값에 접근하였다.

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. Regeniee, 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. 정성재, 김희동, 안재문, 정동호, "Study of the Thrust Vector Control Using a Secondary Flow Injection," 한국추진공학회 추계학술대회 발표논문집, 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. 정성재, Sanal Kumar, V. R., 김희동, "A Study of Thrust-Vectoring Nozzle Flow Using Coflow-Counterflow Concept," 대한기계학회 추계학술대회 발표논문집, 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. 신춘식, 김희동, "이중목 노즐에서 발생하는 초음속유동 특성에 관한 연구," 한국추진공학회지, 제14권 5호, 2010, pp.1-7