

# Coflow-Counterflow 개념을 이용한 추력벡터 노즐에서 발생하는 유동특성에 관한 연구

정성재\* · V. R. Sanal Kumar\*\* · 김희동†

A Study of Thrust-Vectoring Nozzle Flow Using Coflow-Counterflow Concept

Sung-Jae Jung, V. R. Sanal Kumar and Heuy-Dong Kim

**Key Words :** Thrust Vector Control(추력벡터 제어), Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Supersonic Jet(초음속 제트), Supersonic Ejector(초음속 이젝터), Compressible Flow(압축성 유동)

## Abstract

Thrust vector control using a coflow-counterflow concept is achieved by suction and blowing through a slot adjacent to a primary jet which is shrouded by a suction collar. In the present study, the flow characteristics of thrust vectoring is investigated using a numerical method. The nozzle has a design Mach number of 2.0, and the operation pressure ratio is varied to obtain various flow features of the nozzle flow. Test conditions are in the range of the nozzle pressure ratio from 6.0 to 10.0, and a suction pressure from 90kPa to 35kPa. Two-dimensional, compressible Navier-Stokes computations are conducted with RNG k- $\epsilon$  turbulence model. The computational results provide an understanding of the detailed physics of the thrust vectoring process. It is found that an increase in the nozzle pressure ratio leads to increased thrust efficiency but reduces the thrust vector angle.

## 1. 서 론

과거 추진노즐로부터 방출되는 제트기류의 추력 제어는 기계적인 방법을 주로 채택하여 왔다. 이러한 방법은 추진노즐로부터 방출되는 제트기류의 편향을 주기 위하여, 플랩이나 베인 또는 가변노즐 등을 이용하는 것으로, 주로 F-15 SMTD, F-18 HARV 등에 성공적으로 적용되었다.<sup>(1-2)</sup> 그러나 이러한 기계적인 추력제어법은 부수적으로 필요로 하는 기계장치로 인해 추진 시스템의 중량을 증가시키고, 시스템을 구조적으로 복잡하게 하여 제작비 및 유지비를 증가시키게 된다. 따라서 이러한 기계적방법의 대안으로 비상체의 시스템성능을 높

이기 위한 여러가지 추력제어법이 활발히 연구되고 있다.

최근 2차 유동을 이용하여, 추진노즐로부터 방출되는 제트기류의 추력을 제어하는 fluidic nozzle control 법이 많은 주목을 받고 있다.<sup>(3-10)</sup> 이 방법은 추진노즐 내부에 어떠한 가동부분도 설치하지 않고, 2차유동만을 이용하여 추진제트의 추력을 조절하게 되므로, 기계적인 추력제어법에 비하여 많은 이점을 가지고 있다.

구체적으로 2차유동을 이용하는 방법으로 주로 추진제트 내부로 2차유동을 분사하는 시스템을 생각할 수 있으나,<sup>(5-6)</sup> 추진 노즐내부로 2차유동을 분사하게 되면, 노즐내부에 경사충격파나 유동의 박리가 발생하게 되어, 큰 추력손실을 야기할 뿐만 아니라, 유동장이 불안정해져 추력의 변동이 발생할 수 있다.

한편 2차유동을 이용하는 다른 방법으로 추진제트 기류에 반대방향으로 2차유동을 야기시켜, 추진기류를 편향시키는 coflow-counterflow 개념을 이용한 방법이 최근 제안되었다.<sup>(7-10)</sup> 이 방법은

† 안동대학교 기계공학부

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495

\* 안동대학교 대학원 기계공학과

\*\* PRG, Vikram Sarabhai Space Center, India

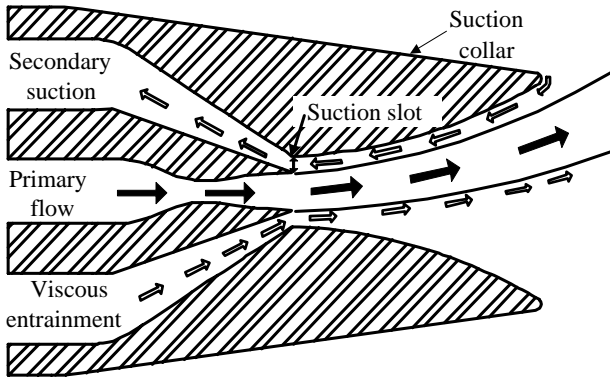


Fig. 1 Coflow-counterflow thrust vectoring concept

Fig. 1 에 도식적으로 나타낸 바와 같이, 추진 노즐 출구 한쪽에 진공상태를 만들어 추진기류가 편향 되도록 하는 방법으로, 제트유동은 초음속 이젝터와 같은 역할을 하게 된다.<sup>(11)</sup> 이 경우 진공상태는 2 차역유동을 발생시키게 되므로, 제트기류와 역유동 사이에 강한 전단작용이 발생하게 되며, 또 추진 노즐의 출구에 설치하는 suction collar 는 질량 유동의 혼입(entrainment)을 억제할 수 있다. 더욱이 suction collar 근처의 유동은 Coanda 효과<sup>(12)</sup>에 의하여, 유동장의 압력을 감소시켜, 제트의 추력을 제어하게 된다. 이러한 방법은 역유동과 제트기류 사이에서 발생하는 강한 전단작용으로 인하여 유동장의 혼합이나 난류강도를 증가시켜, 추력제트에서 발생하는 제트소음을 경감하는데 도움이 될 뿐만 아니라 제트기류의 온도를 낮추는데도 도움이 될 수 있다.

그러나 coflow-counterflow 개념을 이용한 추력 제어법은 주제트가 suction collar 에 부착됨으로 인해 추력벡터 제어에는 한계가 있게 되며, 이와 같은 제트기류의 부착은 압력비를 증가시키는 과정과 감소시키는 과정에서 서로 다르게 나타나, 이력현상(hysteresis)이 발생하게 된다. 이러한 이력현상의 해명은 coflow-counterflow 개념의 유용성에 큰 영향을 미치게 되며, 더욱이 suction collar 와 suction slot 의 크기는 비상체의 중량과 항력에 관련되므로, 추력제어성능을 향상시키기 위해 최적 설계되어야 한다.

최근 Strykowski 등<sup>(3-4)</sup>은 coflow-counterflow 개념을 이용한 추력제어법을 처음으로 제안하였으며, Flamm<sup>(8)</sup>은 넓은 작동조건에서 collar 형상과 suction slot 높이가 노즐성능에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 또 Jung 등<sup>(7)</sup>은 추력편향각을 조사하기 위하여, 노즐형상과 유동조건을 변화시켜, 검사체적 해석을 수행하였다. 또 수치계산법을 적용하여 coflow-counterflow 유동을 적절하게 모사하는 난류모델과 경계조건을 조사하였으며, suction

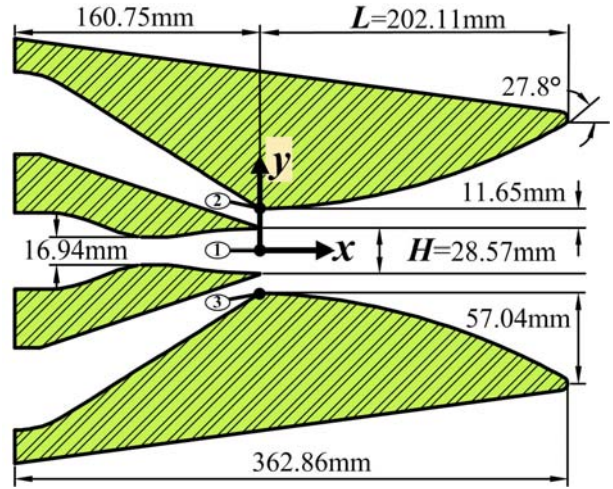


Fig. 2 Details of fluidic nozzle model

slot 압력, 추력편향각( $\delta$ ), 유량비( $w_s/w_p$ )를 예측하였고 실험결과와 비교하였다. 그러나 주제트의 편향에 수반하여 발생하는 복잡한 유동현상과 제트의 부착현상에 대해서는 아직까지 상세히 알려지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 coflow-counterflow 개념을 적용하여 수치계산법을 수행하였으며, 노즐에서 발생하는 복잡한 유동장을 상세하게 조사하고, 노즐작동압력비(NPR)가 추력벡터제어 노즐유동에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 수치해석

본 연구에서는 2 차원 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용한 Fluent 6 를 사용하여 유동장을 모사하였다. 지배방정식의 공간항의 차분에는 upwind scheme, 시간항의 차분에는 4 단계 Runge-Kutta 법을 적용하였다. 본 연구에서 coflow-counterflow 개념을 적용한 노즐의 유동장은 난류 모델에 큰 영향을 받을 수 있으므로, 본 연구에서는 참고문헌(7)의 연구결과에 의해 RNG  $k-\epsilon$  과 non-equilibrium wall function 을 적용하였다.

수치 해의 수렴판정은 질량, 운동량, 에너지, 그리고  $k$  와  $\epsilon$  의 잔차들이  $10^{-5}$  이하로 되는 경우, 수치 해의 수렴을 판단하였다. 또 계산 영역을 출입하는 질량의 Imbalance 가 거의 0 으로 되는 조건을 추가적인 수렴 해의 판정기준으로 설정하였다.

### 2.1 해석모델

Fig. 2 는 coflow-counterflow 개념을 이용한 추력 벡터노즐의 개략도이다. 본 노즐은 Flamm<sup>(8)</sup>의 실험에 사용된 2 차원 노즐이며, 노즐목 높이가

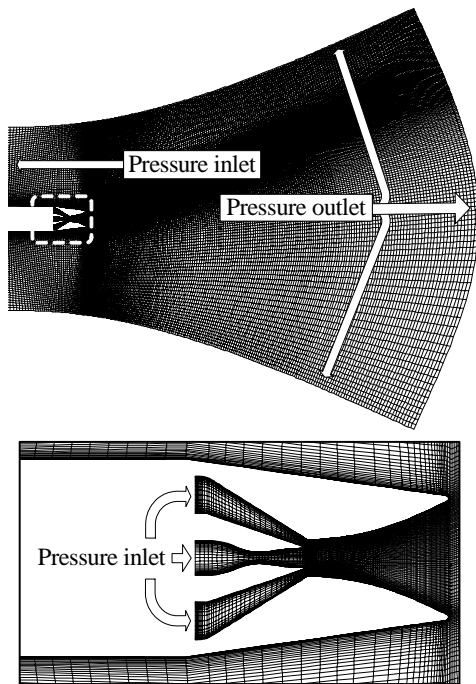


Fig. 3 Computational grid and boundary conditions

16.94mm, 노즐출구 높이( $H$ )가 28.57mm 이며, 설계 마하수(design Mach number)는 2.0 이다. 본 노즐로부터 방출되는 제트유동은 정체실의 압력( $p_o$ )과 배압의 압력비가  $p_o/p_a=7.82$  일 때, 이론적으로 적정 팽창상태에 도달한다. 또 노즐의 폭은 114.3mm 로 일정하며, 2 차유동을 위한 덕트는 주노즐의 상하부에 위치해 있으며, 주노즐 출구의 상하부에 위치한 suction slot 의 높이는 11.65mm 로 주노즐 출구 높이의 약 41%를 차지한다. 또 노즐 출구로부터 길이( $L$ )가 202.11mm 인 suction collar 를 설치하였으며, 끝부분은 27.8°의 각도를 가진다.

## 2.2 계산영역 및 경계조건

Fig. 3 에는 노즐 주위영역의 격자계와 경계조건을 나타내었다. 본 연구에서 적용된 계산영역의 크기는 가로방향으로 주노즐 출구높이의 360 배, 세로방향으로 320 배이며, 격자점의 수는 대략 60000 개로 설정하였다. 본 연구에 사용된 노즐은 NPR(nozzle pressure ratio)과  $p_{os}/p_a$ (주노즐의 상부에 위치한 2 차유로 입구의 정체압( $p_{os}$ )과 배압( $p_a$ )의 비)에 따라 suction collar 내부에는 초음속제트와 2 차유동의 간섭으로 coflow 와 counterflow 가 발생하며, 수치해의 수렴에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 해의 정확성과 수렴성을 높이기 위해 전단층, 큰 속도구배를 가지는 경계층과 주제트 주위에 격자점을 밀집시켰다.

본 계산영역에 적용한 경계조건으로, 계산영역의 상하부와 우측단면에서는 주노즐로부터 방출되

는 공기가 유출되므로 pressure outlet 조건을 적용하였으며, 좌측단면의 유동은 주유동에 의해 유입되므로 pressure inlet 조건을 적용하였다. 그리고 모든 외부계산 영역은 대기압상태로 유지한다고 가정하였다. 또 주노즐의 입구에는 pressure inlet 조건을 적용하였으며, NPR 은 6.0, 8.0, 10.0 으로 각각 변화시켰다. 주노즐의 상부에 위치한 2 차유로입구 단면에는 pressure inlet 조건을 적용하였으며, 정체압을 대기압 이하로 감소시키면서 계산을 수행하였다. 주노즐 하부에 위치한 2 차유로입구에는 대기조건을 적용하였다. 그리고 모든 벽면에는 no-slip wall 조건을 적용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서, coflow-counterflow 개념을 이용한 노즐유동장의 특성을 조사하기 위하여 식(1)로 정의되는 변수를 이용하였다.

$$\Psi = \frac{p_3 - p_2}{\rho_1 u_1^2} \frac{L}{H} \quad (1)$$

위의 식에서,  $p_3-p_2$  는 상하부 suction slot 에서 정압 차이이며,  $\rho_1 u_1^2 H$  는 제트의 momentum flux 에 의해 발생하는 axial force( $F_a$ )를 나타낸다.

Fig. 4 는 NPR=8.0 인 경우,  $\Psi$ 의 변화에 따른 streamline, 등압력선도 및 등마하수선도이다. 상부 2 차유로 단면에 정체압을 90kPa 에서 35kPa 까지 감소시킨 경우,  $\Psi$ 는 0.075 에서 0.782 까지 변화하였다.  $\Psi=0.075$  인 경우, 제트는 팽창과 압축을 반복하면서 편향된다. 이와 같이 제트가 편향되는 원인은 제트가 노즐출구에서 비대칭적으로 팽창하기 때문이다. 한편 collar 외부에서 유입된 유동은 suction slot 으로 유입되어 counterflow 를 형성한다.  $\Psi=0.488$  인 경우, suction slot 의 압력은 더욱 감소하며, 상부 노즐단에서 발생한 팽창과 제트경계면에서 반사한 압축과가 명확히 관찰된다. 또 주유동은 collar 벽면 근처까지 편향된다.  $\Psi=0.567$  인 경우, 노즐출구에서 유동이 더욱 팽창함에 따라 collar 벽면에 부착된다. 또 제트와 collar 벽면의 경계층의 간섭으로 인해 collar 벽면에서 경사충격과 발생한다.  $\Psi=0.782$  인 경우, 노즐출구로부터 가속된 초음속유동과 suction collar 벽면에 의해 강한 경사충격과 발생하고, 두 번째 경사충격과에 의해 박리가 발생한다. 따라서 제트가 부착된 경우,  $\Psi$ 의 증가는 유동의 박리와 다수의 충격파로 인해 추력효율이 감소할 것으로 예상된다. 한편 2 차유량은 coflow-counterflow 노즐의 성능과 밀접한 관계가 있다, 예를 들어 suction 으로 인해 slot

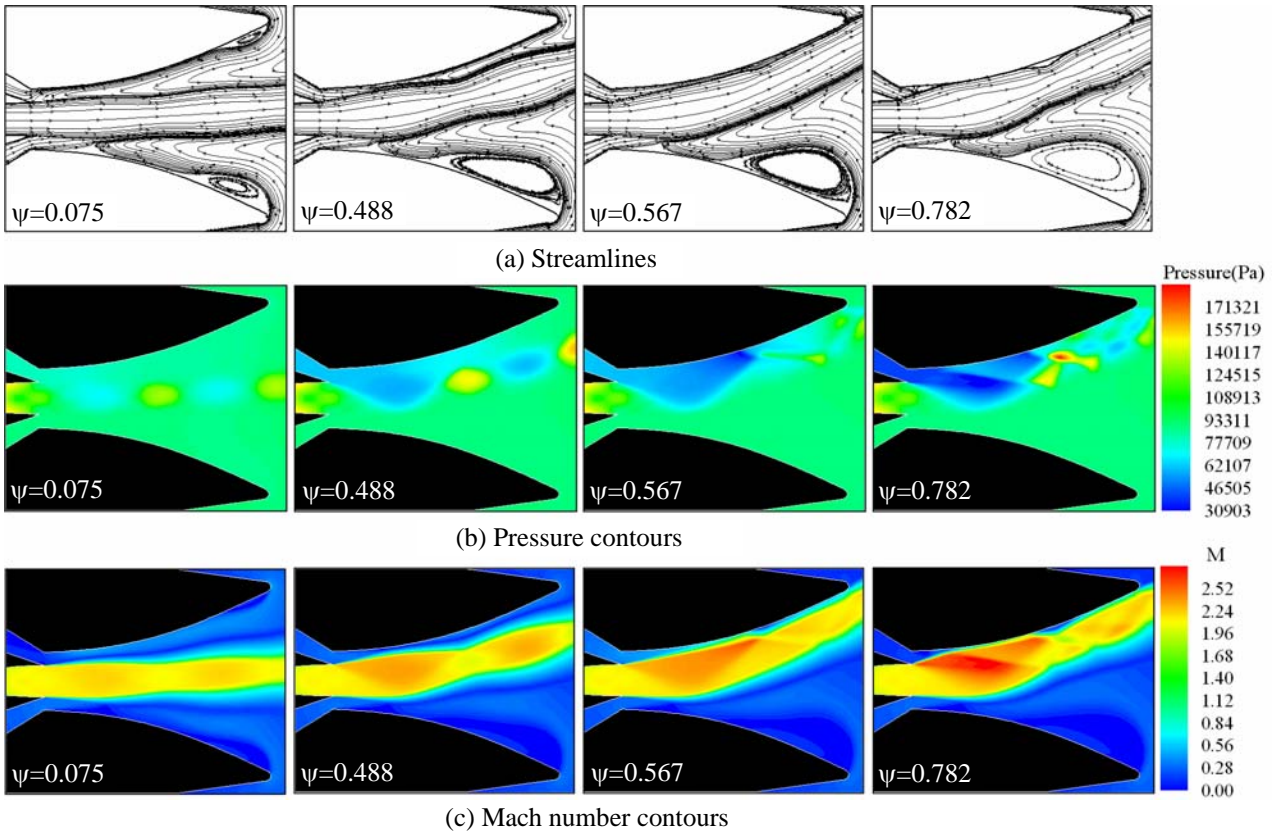


Fig.4 Streamlines, pressure and Mach number contours for NPR=8.0

단면에서 초킹이 발생하여, 유량이 일정하게 되고, suction slot 이후의 유동장은 변하지 않으므로 추력편향성능을 저해하게 된다. 결과적으로  $0.075 < \psi < 0.782$  에서 suction slot의 유동 마하수가 1보다 작으므로 초킹이 발생하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5는 NPR=8.0인 경우,  $\psi$ 의 변화에 따른 suction collar 벽면의 압력분포를 나타낸다.  $x/L$ 은 노즐출구를 원점으로한 거리  $x$ 를 collar 길이  $L$ 로 무차원한 값이며,  $p$ 는 벽면의 압력,  $p_0$ 는 대기압이다.  $\psi < 0.567$ 인 경우,  $x/L$ 가 증가함에 따라 suction collar 벽면에 작용하는 압력은 감소하고, 최소값을 가진 후 증가한다. 이는 노즐출구로부터 편향된 제트가 인접한 벽면에 압력을 감소시키기 때문이다. 한편  $\psi$ 가 증가하면, suction collar 벽면의 압력은 감소한다.  $\psi = 0.567$ 인 경우, 제트는 부착되며, collar 벽면의 압력은 감소하다가  $x/L \approx 0.545$ 에서 급격히 증가한다. 따라서 벽면에서 충격파가 발생함을 알 수 있으며, 충격파 이후에는 collar 끝 부근에서 팽창하기 전까지 비슷한 증가율을 보인다.  $\psi > 0.567$ 인 경우, collar 벽면에서는 다수의 충격파가 발생하며,  $\psi$ 가 증가하면, 충격파의 수와 강도가 증가하며, 충격파의 발생위치가 collar 상부로 이동한다. 이는 suction slot의 압력이 감소하여, 제트의

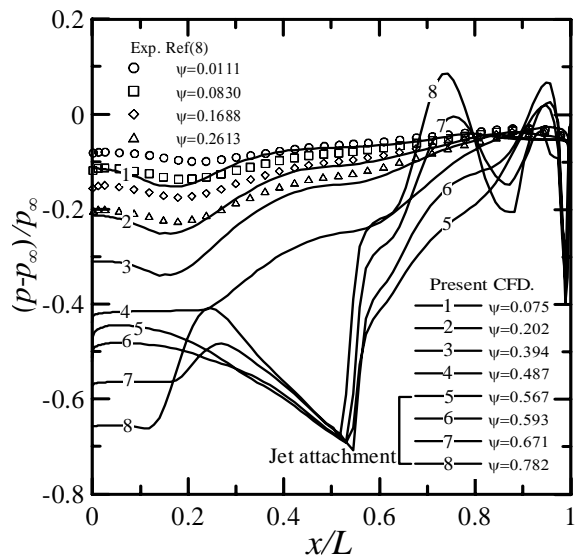


Fig.5 Static pressure distribution on upper collar surface(NPR=8.0)

편향각이 증가하고, 노즐출구 제트의 마하수가 증가하기 때문이다.

Fig. 6은 NPR=8.0,  $\psi = 0.394$ 인 경우, coflow-counterflow 개념을 이용한 추력편향 원리를 상세하게 이해하기 위해 유동장의 모식도를 등압력선도에 나타내었다. 2차유로의 suction으로 인해 노

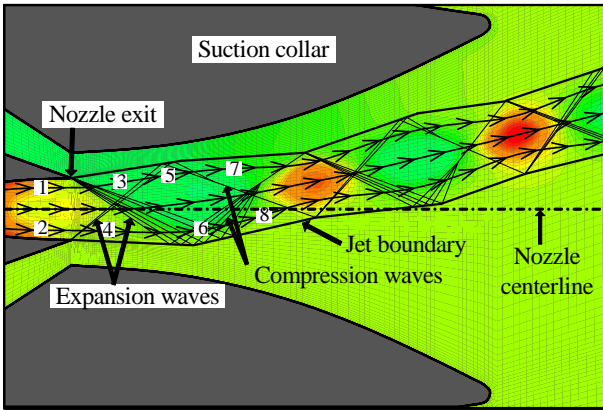


Fig.6 Schematic diagram of thrust vectoring ( $\psi=0.394$ )

즐출구에서 노즐축을 중심으로 배압이 비대칭 적으로 형성되므로 제트가 편향된다. 1→3의 유동은 노즐출구 압력보다 낮은 상부배압으로 발생한 팽창파에 의해 노즐중심축에서 상부로 편향되고, 3→5→7의 유동은 하부노즐단에서 발생한 팽창파와 제트경계에서 반사한 압축파에 의해 제트중심축으로 편향된다. 그리고 2→4의 유동은 팽창파를 지나고 4→6→8의 유동은 상부노즐단에서 발생한 팽창파와 제트경계에서 반사한 압축파에 의해 제트중심축으로 편향된다. 위의 과정을 통해 제트는 노즐중심축을 벗어나게 된다.

Fig. 7은 NPR=6.0, 8.0, 10.0인 경우,  $\psi$ 에 대한 추력편향각( $\delta$ )의 변화를 나타낸다. NPR=6.0,8.0인 경우는 제트부착이 일어나고, NPR=10.0인 경우는 제트부착이 일어나지 않는다. 이는 편향된 제트가 collar 벽면과 간섭으로 발생한 경사충격파에 의해 제트가 벽면에서 이탈되기 때문에 제트 부착이 발생하지 않는다. 제트가 부착되지 않은 경우,  $\psi$ 가 증가하면  $\delta$ 는 증가하며, 제트가 부착된 경우,  $\psi$ 가 증가하면  $\delta$ 는 감소한다. 이것은 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이, 제트가 부착한 후에  $\psi$ 가 증가하면, collar 벽면에서 발생한 충격파의 수와 강도가 증가하여 벽면의 압력이 증가하게 되고, 벽면의 압력 증가는 normal force( $F_n$ )을 감소시키기 때문에 결과적으로 추력편향각이 감소하게 된다. 한편 제트가 부착되지 않은 경우, NPR이 증가하면,  $\delta$ 와  $\delta$ 의 증가율은 감소한다.

Fig. 8은 NPR=6.0, 8.0인 경우,  $\psi$ 에 대한 suction slot의 유량변화를 나타낸다. 종축의  $w_s/w_p$ 는 상부 2차유량( $w_s$ )과 주제트 유량( $w_p$ )비를 나타낸다. 제트가 부착되지 않은 경우,  $\psi$ 가 증가하면,  $w_s/w_p$ 는 감소하며, 극소값을 가진 후에 증가한다. 또 제트가 부착된 경우,  $\psi$ 가 증가하면  $w_s/w_p$ 는 감소한다. NPR이 증가하면,  $w_s/w_p$ 의 최소값은 감소하는 경

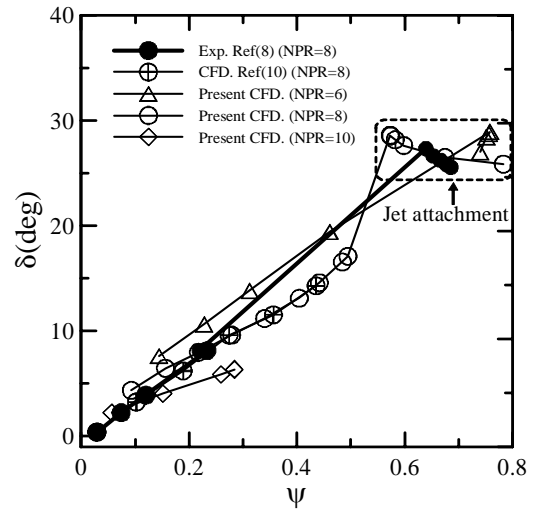


Fig.7 Thrust vector angle

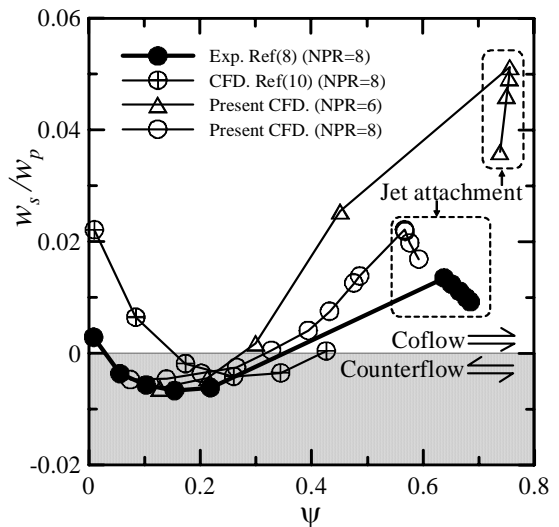


Fig.8  $w_s/w_p$  vs  $\psi$

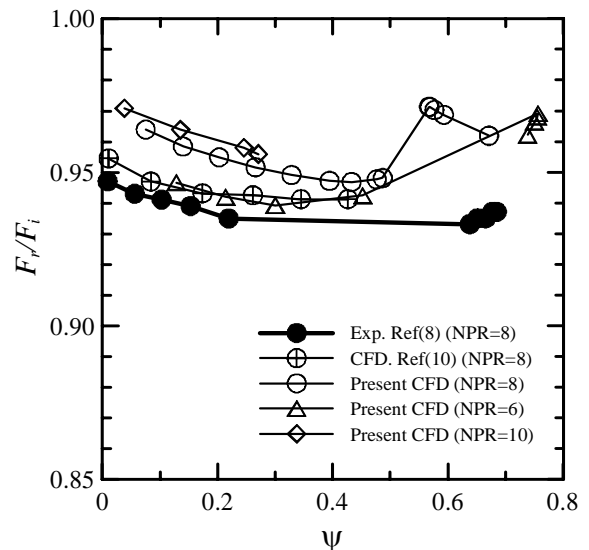


Fig.9 Thrust efficiency comparison

향을 나타내며,  $w_s/w_p$ 의 변화량은 감소한다.

Fig. 9 은 NPR=6.0, 8.0, 10.0 인 경우, 노즐의 추력효율을 나타낸다.  $F_r$ 은 합추력이며,  $F_i$ 는 1 차원 기체역학이론으로 얻어진 이론추력이다.  $F_r$  과  $F_i$ 는 식(2), (3)과 같다.

$$F_r = \sqrt{F_a^2 + F_n^2} \quad (2)$$

$$F_i = W_p \sqrt{\frac{R_j T_{t,j}}{g^2} \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[ 1 - \left( \frac{1}{NPR} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]} \quad (3)$$

위식에서,  $R_j$ 는 기체상수,  $T_{t,j}$ 는 제트의 전온도,  $g$ 는 중력가속도이다. 본 수치결과에서 NPR=8.0 인 경우,  $\psi$ 가 증가하면  $F_r/F_i$ 는 감소하며, 최소값을 가진 후 증가하고, 제트가 부착된 후 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 제트가 부착된 경우, 수치결과는 실험결과와 반대경향을 나타내고 있다. NPR이 증가하면,  $F_r/F_i$ 는 전체적으로 증가한다. 수치결과는 실험값보다 높은 값을 예측하고 있으나 비슷한 경향을 나타내며, 또 coflow-counterflow 개념을 이용한 추력제어법은 0.93 이상의 높은 추력효율을 가진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 coflow-counterflow 개념을 적용하여, 수치계산법을 수행하였으며, 노즐에서 발생하는 복잡한 유동장을 상세하게 조사하고, 노즐작동 압력비(NPR)가 추력벡터제어 노즐유동에 미치는 영향을 조사하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 노즐로부터 방출된 제트의 편향 과정을 상세하게 조사하였으며, 그 결과 노즐에서 방출된 제트는 노즐상하부의 배압차로 비대칭적인 팽창, 압축을 반복하면서 편향된다.
2. 노즐벽면의 압력은  $\psi$ 가 증가하면 감소하며, 제트가 부착된 경우,  $\psi$ 가 증가하면 collar 벽면의 충격파의 수와 강도가 증가하며, 충격파의 발생위치가 collar 상부로 이동한다. 이는 suction slot의 압력이 감소하여, 제트의 편향각이 증가하고, 노즐출구 제트의 마하수가 증가하기 때문이다.
3. 추력편향각은  $\psi$ 가 증가하면 증가하며, 제트가 부착된 경우,  $\psi$ 가 증가하면  $\delta$ 는 감소한다. 이는 제트가 부착한 후에  $\psi$ 가 증가하면, 다수의 충격파로 인해 벽면의 압력이 증가하게 되고, 벽면의 압력 증가는 normal force( $F_n$ )을 감소시키기 때문이다.

4. 노즐 압력비가 증가하면, 추력편향각과 추력편향각의 증가율은 감소한다. 그리고 2 차유량( $w_s$ )과 주제트 유량( $w_p$ )비의 최소값과, 변화량은 감소하며, 노즐의 추력효율은 증가한다.

#### 후기

본 논문은 2003년도 BK21 사업에 의해 지원되었음.

#### 참고문헌

- (1) Bursey, R. and Dickinson, R., 1990, "Flight Test Results of the F-15 SMTD Thrust Vectoring/Thrust Reversing Exhaust Nozzle," AIAA-90-1906.
- (2) Regenie, V., Gatlin, D., Kempel, R., Matheny, N., 1992, "The F-18 High Alpha Research Vehicle: A High Angle-of-Attack Testbed Aircraft," NASA TM-104253.
- (3) Strykowski, P. J., and Krothapalli, A., 1993, "The Countercurrent Mixing Layer: Strategies for Shear-Layer Control," AIAA 93-3260.
- (4) Strykowski, P. J., Krothapalli, A. and Wishart, D., 1993, "Enhancement of Mixing in High-Speed Heated Jets Using a Counterflow Nozzle," *AIAA J.*, Vol.31, No.11.
- (5) Jung, S. J., Kim, H. D., Ahn, J. M. and Jung, D. H., 2002, "Study of the Thrust Vector Control Using a Secondary Flow Injection," Proc. KSPE Spring Annual Meeting, pp.14-15.
- (6) Green, C. J. and McCullough, M. Jr, 1963, "Liquid Injection Thrust Vector Control," *AIAA J.*, Vol.1, No.3 pp. 573-578.
- (7) Jung, S. J., Lim, C. M., Kim, H. D., 2003, "A Study of Jet Attachment Analysis in Fluidic Counterflow Thrust-Vectoring Nozzle," Proc. KSME Spring Annual Meeting, pp.1948-1953.
- (8) Flamm, J. D., 1998, "Experimental Study of a Nozzle Using Fluidic Counterflow Thrust Vectoring," AIAA 98-3255.
- (9) Hunter, C. and Wing, D., 1995, "Counterflow Thrust Vectoring: Control Volume Similarity Analysis," NASA Langley Research Center White Paper.
- (10) Hunter, C. A. and Deere, K. A., 1999, "Computational Investigation of Fluidic Counterflow Thrust Vectoring," AIAA 99-2669.
- (11) Kim, H. D., Lee, Y. G., 1999, "Numerical Simulation of the Supersonic Flows in the Second Throat Ejector-Diffuser Systems," *J. Thermal Science*,
- (12) Kim, H.D., Raghunathan, S., Setoguchi, T. and Matsuo, T., 2000, "Experimental and Numerical Studies of Supersonic Coanda Wall Jets," 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA-2000-0814.