

Counterflow Concept을 이용한 추력벡터제어에 관한 연구

정성재* · 임채민* · 김희동**

A Study of Thrust Vectoring Control Using Counterflow Concept

Sung-Jae Jung* · Chae-Min Lim* · Heuy-Dong Kim**

ABSTRACT

The thrust vector control using a fluidic counterflow concept is achieved by applying a vacuum to a slot adjacent to a primary jet which is shrouded by a suction collar. The vacuum produces a secondary reverse flowing stream near the primary jet. The shear layers between the two counterflowing streams mix and entrain mass from the surrounding fluid. The presence of the collar inhibits mass entrainment and the flow near the collar accelerates causing a drop in pressure on the collar. For the vacuum asymmetrically applied to one side of the nozzle, the jet will vector toward the low-pressure region. The present study is performed to investigate the effectiveness of thrust vector control using the fluidic counterflow concept. A computational work is carried out using the two-dimensional, compressible Navier-Stokes equations, with several kinds of turbulence models. The computational results are compared with the previous experimental ones. It is found that the present fluidic counterflow concept is a viable method to vector the thrust of a propulsion system.

1. 서 론

최근 2차유동을 이용하여, 추진노즐로부터 방출되는 제트기류의 추력을 제어하는 Fluidic Nozzle Control법이 많은 주목을 받고 있다⁽¹⁻⁷⁾. 구체적으로 추진제트 기류에 반대방향으로 2차유동을 야기 시켜, 추진기류를 편향시키는 counterflow 개념을 이용한 방법이 최근 제안되었다⁽¹⁻⁵⁾. 이 방법은 추진 노즐 출구 한쪽에 진공상태를 만들어 추진기류가 편향되도록 하는 방법으로, 제트유동은 초음속 이젝터와 같은 역할을 한다⁽⁶⁾. 이 경우 진공상태는 2차 역유동을 발생시키게 되므로, 제트기류와 역유동 사이에 강한 전단작용이 발생하게 되며, 또 추진 노즐의 출구에 설치하는 collar는 질량유동의 혼입(entrainment)을 억제할 수 있다. 더욱이 collar 근처의 유동은 Coanda 효과에 의하여,⁽⁹⁾

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 제트의 온도를 낮추는데도 도움이 될 수 있다.

이와 같은 2차 역유동을 이용한 추력제어법에 대해서는 아직까지 많은 연구가 수행되지 않았다. 본 연구에서는 역유동을 이용하는 추력제어법의 유용성을 조사하기 위하여, 수치계산법을 이용하여, 얻어지는 추력제어를 정량적으로 평가하였다. 또 수치계산 결과를 검증하기 위하여 유용한 실험결과와 비교하였으며, counterflow concept을 이용한 추력제어법의 효용성을 검토하였다.

* 국립안동대학교 대학원 기계공학과(Andong Nat. Univ., Grad. of Engineering Sci., Dep. of Mech. Engineering)

** 국립안동대학교 기계공학부(Andong Natational University, School of Mechanical Engineering)

2. 수치해석 및 검사체적 해석

본 연구에서는 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용한 상용코드 Fluent 6를 사용하였다. Fig. 1에는 본 연구에 사용된 2차원 노즐의 상세 형상을 나타내었다. 본 연구에 사용된 2차원 노즐의 형태는 Flamm⁽⁹⁾의 실험에 사용된 노즐을 참고한 것으로, 노즐 출구에서 설계 마하수(design Mach number)는 2.0으로 제작되었다. 그리고 노즐의 폭은 114.3mm로 일정하다. 그리고 계산영역의 크기는 가로방향으로 주노즐 출구높이의 100배, 세로방향으로 90배이며, 격자점의 수는 대략 65000개로 설정하였다. 2차 유로 입구에는 pressure inlet조건을 적용하였으며, 정체압을 101.325kPa에서 68kPa까지 변화 시켰다. 또 주노즐의 하부에 위치한 2차 유로입구에는 대기조건을 적용하였다.

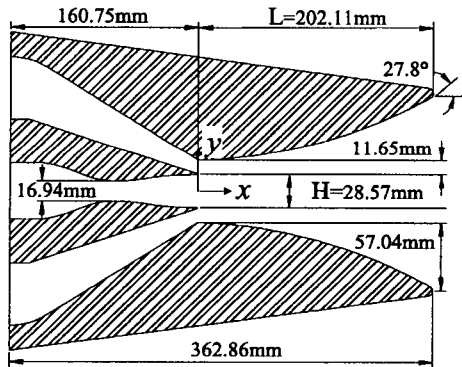


Fig. 1 Details of counterflow nozzle model

본 연구에서 적용된 fluidic counterflow 노즐 유동을 이해하기 위해서 형상변수와 유동조건에 따른 추력편향 성능을 예측하는 방법을 도출해야 한다. 따라서, Hunter와 Wing⁽⁶⁾은 실험 값과 예측된 값 사이에 높은 상관성을 가지는 변수를 도출하기 위해 검사체적해석을 수행하였다. 검사체적 해석을 통해 얻어진 추력편향각(δ_{cv})은 식(1)으로 쓰여진다.

$$\delta_{cv} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1} \frac{L}{H} \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_{01}}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] + \frac{p_2}{p_1} \left[\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{p_{02}}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right] \frac{G}{H} \right]^{-1} \right)$$

$$+ \frac{p_3}{p_1} \left[\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{p_{03}}{p_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right] \frac{G}{H} \quad (1)$$

p_x , p_y 는 suction collar벽면의 압력을 suction collar단면에 대해서 적분하여 평균한 값의 x, y방향의 성분이다. p_2 는 주노즐 상부 slot단면에서 압력이고, p_3 는 주노즐 하부 slot 단면에서 압력을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2에는 계산의 경계조건과 난류모델의 영향을 조사하기 위하여 유용한 실험결과⁽⁹⁾와 수치계산결과를 비교하였다. 그 결과 pressure outlet 경계조건, RNG k-ε 모델과 non-equilibrium벽함수를 적용한 경우가 실험결과를 가장 잘 예측하였다.

Hunter와 Wing⁽⁶⁾의 해석법에 기초하여, counterflow에 의한 이론 추력편향각은 식(2)과 같이 근사 된다.

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

여기서 $\rho_1 u_1^2$ 은 주제트의 단위면적당 momentum flux이다. δ_i 는 2차 압력과 momentum flux의 유입으로 야기된 이론 추력편향각을 나타낸다. 또 Ψ 는 $(p_3 - p_2)L / \rho_1 u_1^2 H$ 이며, 실험 결과와 수치결과를 나타내기 위해 독립변수로 사용된다.

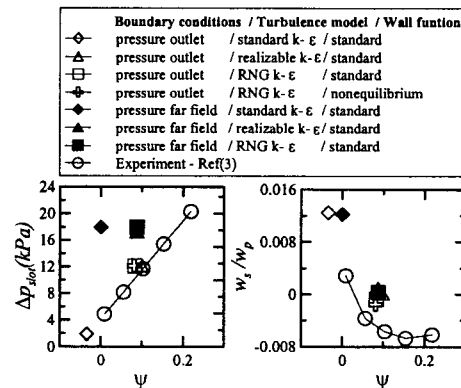


Fig. 2 Effect of computational boundary conditions

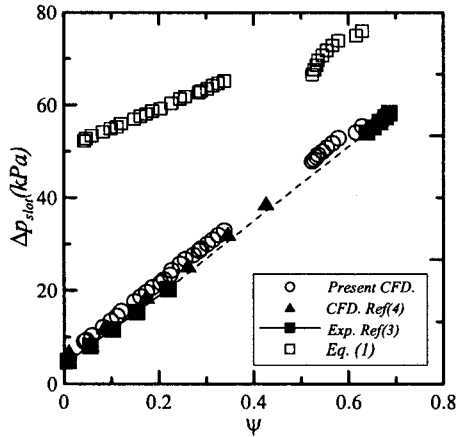


Fig. 3 Suction slot pressure correlation

Fig. 3에는 slot게이지압력 Δp_{slot} 과 Ψ 의 관계를 나타내었다. Δp_{slot} 는 suction slot 게이지압력을 나타낸다. \square 는 검사체적해석으로 얻어진 p_2 를 게이지압력으로 나타내었으며, 실험 값 보다 높은 값을 예측하고 있다. 본 수치계산에서는 $\Psi > 0.52$ 에서 제트부착현상이 나타났다. 그리고 $\circ, \blacktriangle, \blacksquare$ 는 모두 동일한 기호기를 나타내고 있으며, 수치결과는 실험 값을 잘 예측하고 있다.

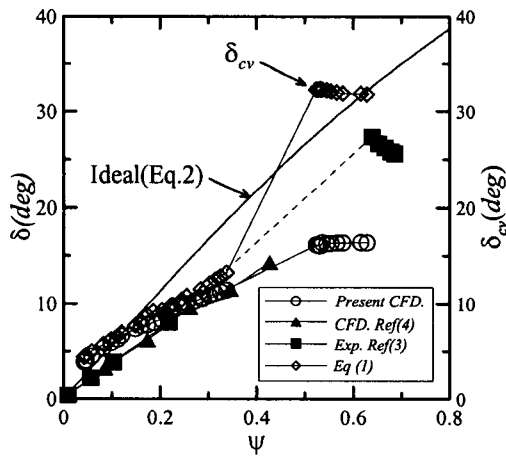


Fig. 4 Thrust vector angle

Fig 4에는 실험과 본 연구에서 얻어진 추력편향각을 나타내었다. 그림에서 이론 값은 실제 추력편향각보다 높으며, 검사체적 해석을 통해 얻어진 δ_{cv} 는 $\Psi < 0.34$ 에서 수치결과 값과 잘 일치 하고있으나, 제트가 부착한 후($\Psi > 0.52$)에는 이론 값보다 높게 나타났다.

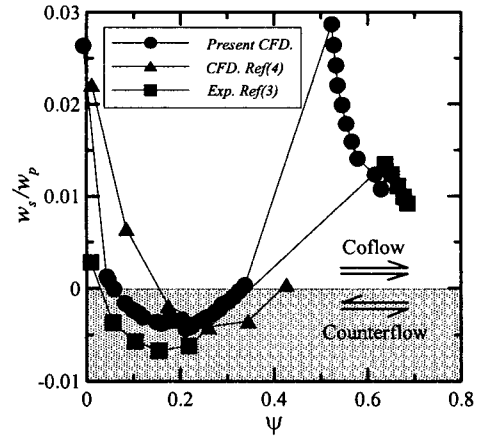


Fig. 5 w_s/w_p vs Ψ

Fig. 5에는 추력제어에 필요한 2차유동의 질량유량과 유동 방향을 평가하기 위해 Ψ 값에 대한 주유동과 2차유동의 mass flow ratio의 비를 나타냈다. 본 수치결과는 $\Psi < 0.34$ 에서 Hunter 등⁽⁴⁾의 수치결과보다 실험 값을 더 잘 예측하고 있으며, 제트의 부착영역($\Psi > 0.52$)에서 Ψ 가 증가함에 따라 w_s/w_p 가 감소하고, $\Psi > 0.61$ 에서는 실험 값과 유사한 값을 나타내고 있다. 더욱이 본 수치결과는 $0.0425 < \Psi < 0.34$ 에서 주유동의 0.5%이하의 mass flow ratio를 예측하였으며, 이는 counterflow를 이용한 추력벡터제어가 아주 낮은 2차 유동의 질량유량을 필요로 함을 알 수 있다.

Fig 6(a,b,c)에는 $0.0425 < \Psi < 0.3377$ 에서 유동장의 속도 벡터를 나타내었다. 그림에서 상, 하부 suction collar벽면을 따라 유동이 유입되면서 suction collar 끝 부분에서 박리가 일어남을 알 수 있다. 그리고 Ψ 가 증가함에 따라 주제트는 편향되고, 상부 suction collar에서 박리영역은 감소하고, 하부 suction collar에서 박리 영역은 증가하고 있다. Fig. 6(a) $\Psi = 0.0425$ 일 때, suction collar 벽면을 따라 외부에서 유입된 유동은 주제트의 entrainment effect에 의해 주제트로 유입된다. 그리고 $\Psi = 0.2106$ 일 때, 외부에서 유입된 유동의 일부는 suction slot 안으로 유입되고, 나머지는 주제트로 유입된다. Fig. 6(c) $\Psi = 0.3377$ 에서 suction slot의 유동은 다시 주제트로 유입된다. 따라서, 본 그림을 통해 Ψ 에 따른 주제트의 편향과정과 속도벡터의 변화를 상세히 알 수 있다.

4. 결 론

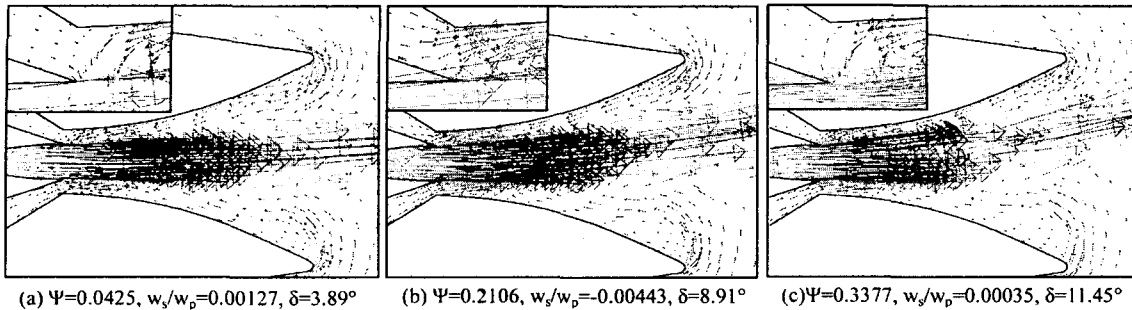


Fig. 6 Velocity vector contours

본 연구에서는 수치계산법을 이용하여, counterflow유동을 이용하는 추력제어법의 유동특성을 조사하였으며, 위 계산으로 얻어진 결과를 정량적으로 평가하였다. 또 수치계산 결과를 검증하기 위하여 유용한 실험결과와 비교하였으며, 2차 역유동을 이용한 추력제어법의 효율성을 검토하였다. 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 연구에서는 counterflow 노즐의 작동특성을 이해하기 위해, 검사체적 해석법을 적용하여 형상변수와 유동조건에 따른 추력편향 성능을 조사하였다. 그 결과 검사체적 해석법은 제트가 collar에 부착되지 않는 경우에 추력편향각을 잘 예측하였다.

본 수치계산 결과는 suction slot 압력, 추력편향각, 이차 유량비에서 유용한 실험결과를 정량적으로 잘 예측하였으며, suction collar벽면의 압력은 정성적으로 잘 일치하였다.

counterflow를 이용한 추력제어법은 주유동의 0.5% 이하의 미소 질량유량으로 추력방향을 제어할 수 있다. 따라서 counterflow를 이용한 추력제어법은 높은 효율성을 가진다.

후기

본 논문은 2003년도 두뇌한국 21 사업에 의해 지원됨.

참고문헌

1. Strykowski, P. J., and Krothapalli, A., "The Countercurrent Mixing Layer: Strategies for Shear-Layer Control," AIAA 93-3260, 1993
2. Strykowski, P. J., Krothapalli, A. and Wishart, D., "Enhancement of Mixing in High-Speed Heated Jets Using a Counterflow Nozzle," AIAA J., Vol.31, No.11 1993
3. Flamm, J. D., "Experimental Study of a Nozzle Using Fluidic Counterflow Thrust Vectoring," AIAA 98-3255, 1998
4. Hunter, C. A. and Deere, K. A., "Computational Investigation of Fluidic Counterflow Thrust Vectoring," AIAA 99-2669, 1999
5. Hunter, C. and Wing, D., "Counterflow Thrust Vectoring Control Volume Similarity Analysis," NASA Langley Research Center White Paper, 1995
6. 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
7. Green, C. J. and McCullough, M. Jr, "Liquid Injection Thrust Vector Control," AIAA J., Vol.1, No.3, 1963, pp.573-578
8. Kim, H. D., Lee, Y. G., "Numerical Simulation of the Supersonic Flows in the Second Throat Ejector-Diffuser Systems," J. Thermal Science, Vol.8, No.4, 1999, pp.214-222
9. Kim, H.D., Raghunathan, S., Setoguchi, T. and Matsuo, T., "Experimental and Numerical Studies of Supersonic Coanda Wall Jets," 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA-2000-0814, 2000