

2차 순유동과 역유동을 이용한 추력벡터 제어법에 관한 연구

임채민* · 김희동**

A Study of the Thrust Vectoring Control Using Secondary Co- and Counter-Streams

Chae-Min Lim* · Heuy-Dong Kim**

ABSTRACT

Of late, the thrust vectoring control, using fluidic co-flow and counter-flow concepts, has been received much attention since it not only improves the maneuverability of propulsive engine but also reduces an additional material load due to the trailing control wings, which in turn reduce the aerodynamic drag. However, the control effects are not understood well since the flow field involves very complicated flow physics such as shock wave/boundary layer interaction, separation and significant unsteadiness. Existing data are not enough to achieve the effectiveness and usefulness of the thrust vectoring control, and systematic work is required for the purpose of practical applications. In the present study, computational study has been performed to investigate the effects of the thrust vector control using the fluidic co-and counter-flow concepts. The results obtained show that, for a given pressure ratio, the thrust deflection angle has a maximum value at a certain suction flow rate, which is at less than 5% of the mass flow rate of the primary jet. With a longer collar, the same vector angle is achievable with smaller mass flow rate.

초 록

최근에 유체적 순유동과 역유동 개념을 이용한 추력 벡터법은 추진 비행체의 조종성을 향상시키는 것뿐만 아니라 꼬리 날개로 발생하는 공기역학적 항력을 감소시키기 때문에 많은 관심을 받고 있다. 그러나 유체적 추력벡터 제어법은 유동장이 충격파와 경계층의 상호작용, 박리, 강한 비정상성 등과 같은 매우 복잡한 물리현상을 포함하고 있기 때문에 비행체의 설계에 적용하기가 매우 어렵다. 유체적 순유동과 역유동 개념을 이용한 효율적인 추력벡터 제어법을 얻기 위한 지금까지의 연구들이 미비한 실정이며 실제적용을 위해 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 유체적 순유동과 역유동 개념을 이용한 추력벡터 제어법의 제어 효과를 연구하기 위해 수치적 연구가 수행되었다. 주어진 압력비에 대해, 추력편향각은 주제의 5퍼센트 미만의 임의 흡입유량에서 최대값을 가진다. 보다 긴 collar를 적용하는 경우, 같은 편향각은 보다 작은 흡입유량으로 가능하였다.

Key Words: Coanda Effect(Coanda 효과), Coflow(순유동), Counterflow(역유동), Compressible Flow(압축성 유동), Thrust Vectoring Control(추력 제어법), Shock Wave(충격파)

* 안동대학교 기계공학과 대학원

** 안동대학교 기계공학부

연락처, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

성능을 결정하는 중요한 요소 중의 하나이다. 이러한 추력벡터 제어는 비상체의 기동성을 증가시킬 뿐만 아니라, 꼬리 날개 등과 같은 부가적인 장치를 필요로 하지 않기 때문에 공기역학적인 저항을 경감시키는 이점으로 작용하게 된다. 이러한 이유로 과거부터 추력벡터 제어에 관해서는 많은 연구가 수행되어 왔다.[1-3]

최근 2차 유동을 이용하여, 추진노즐로부터 방출되는 제트기류의 추력을 제어하는 Fluidic Nozzle Control법이 많은 주목을 받고 있다.[4-7] 이 방법은 추진노즐 내부에 어떠한 가동부분도 설치하지 않고, 2차 유동만을 이용하여 추진제트의 추력벡터를 조절하기 때문에, 기계적인 추력벡터 제어법에 비하여 많은 이점을 가지고 있다.

구체적으로 2차 유동을 이용하는 방법은 주로 추진제트 내부로 2차 유동을 분사하는 시스템을 생각할 수 있으나, 추진노즐내부로 2차 유동을 분사하게 되면, 노즐내부에 경사충격파나 유동의 박리가 발생하게 되어, 큰 추력손실을 발생시킬 수 있으며, 유동장이 불안정해져 추력의 변동이 발생할 수 있다.

한편 2차 유동을 이용하는 다른 방법으로 추진제트 기류에 반대방향으로 2차 유동을 발생시켜, 추진기류를 편향시키는 역유동(counterflow) 개념을 이용한 방법이 최근 제안되었다. 이 방법은 추진노즐 출구 한쪽에 진공상태를 만들어 추진기류가 편향되도록 하는 방법으로, 제트유동은 초음속 이젝터와 같은 역할을 하게 된다. 이 경우 진공상태는 2차 역유동을 발생시키게 되므로, 제트기류와 역유동 사이에 강한 전단작용이 발생하게 되며, 또 추진노즐의 출구에 설치하는 collar는 질량유동의 혼입(entrainment)을 억제할 수 있다. 더욱이 collar 근처의 유동은 Coanda 효과[8]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 제트의 온도를 낮추는데도 도움이 될 수 있다.

종래 F. S. Alvi 등[9]이 제안된 역유동 전단층을 이용한 다중축에서의 추력 벡터법에 대하여 실험을 수행하였으며, 제트 편향에 대해 마하수 2까지 비례적이고 연속적인 제어가 가능함을 밝혔다. Schmid 등[10]은 제트 부착 과정을 설명하기 위하여 모델링과 실험을 수행하였다. 그들은 collar truncation 및 pressure release 등의 방법으로 제트

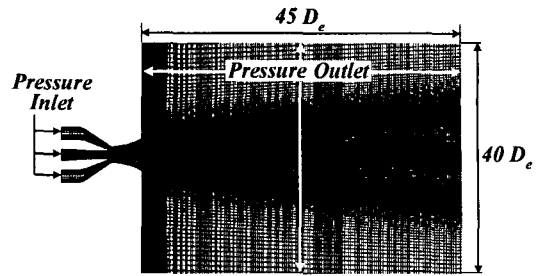


Fig. 1 Computational grid and boundary conditions
부착과정을 피할 수 있다고 제안하였다.

유체적 순유동과 역유동 개념을 이용한 추력벡터 제어법의 효율성과 유용성을 얻기 위한 지금까지의 연구들이 미비한 실정이며 실제적용을 위해 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 유체적 순유동과 역유동 개념을 이용한 추력벡터 제어법의 효율성과 유용성을 연구하기 위해 수치적 연구가 수행되었으며, 종래의 실험결과[11]와 비교하였다.

2. 수치 계산

본 연구는 순유동과 역유동 개념을 이용한 추력벡터 제어법에서 주노즐 출구 근처 및 역유동과 제트 경계면에서 발생하는 전단층과 collar 내부에서 발생하는 복잡한 압축성 유동을 해석하기 위하여 상용 계산 코드(Fluent 6.1)를 사용하였다. 계산에서 사용된 지배 방정식은 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식에 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하여, 유한체적법으로 이산화하였다.

2.1 계산영역 및 경계조건

Fig. 1은 본 연구에서 적용한 수치계산영역 및 경계조건을 나타낸다. 적용된 계산영역의 크기는 세로방향으로 주노즐 출구 수력직경(D_e)의 40배, 가로방향으로 45배이며, 격자점은 약 11만개로 설정하였다. 해의 정확성과 수렴성을 높이기 위해 속도구배가 큰 경계층과 주노즐의 제트와 주노즐 출구 주위 유체간의 전단층에 격자를 집중하였다. Fig. 2는 본 연구에 적용된 노즐의 상세형상을 나타낸다. 주노즐 출구에서 제트 유동방향을 x 로 정의하였다. 본 연구에서 적용된 기하학적 변수는 collar의 곡률반경이다.

수치계산에서 적용한 경계조건은 계산영역의 외부는 일정한 압력으로 유지된다고 가정하여, 대기압 상태로 하였으며, 주노즐의 입구는 전압, 2차

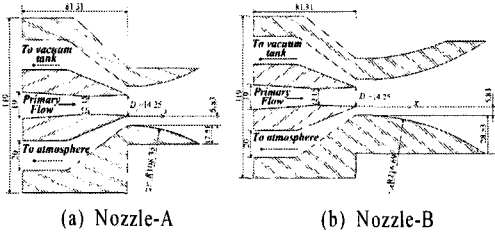


Fig. 2 Nozzle configurations ($M_D = 1.5$)

유로 입구는 압력조건에 따라 유동의 유입과 유출이 일어나므로 정압을 적용하였다. 작동노즐 압력비(NPR_p)는 정체실 압력(p_{op})을 대기압(p_a)로 무차원화하여 나타내었으며, 3.0에서 5.0까지 변화시켰다. 2차 흡입 압력비(NPR_s)는 흡입 정체실 압력(p_{os})을 대기압(p_a)로 무차원화하여 나타내었으며, 0.2에서 1.0까지 변화시켰다. 노즐 입구 전온도(T_{po})와 2차 흡입 유동 전온도(T_{ps})는 297K로 가정하였다. 계산에서는 질량, 운동량, 에너지, 그리고 k 와 ε 의 잔차들이 10^{-5} 이하로 되는 경우, 유동장의 온도와 난류 점성의 분포를 확인하여 해의 수렴을 판단하였다.

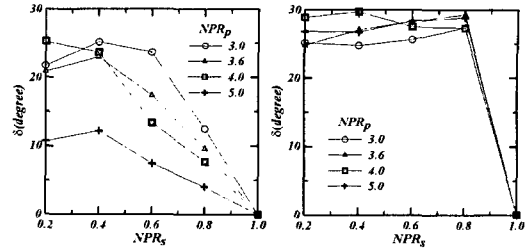
NPR_s 값의 변화에 따른 제트 편향의 이력현상을 해석하기 위해 비정상 계산을 수행하였다. Time step은 1×10^{-3} s로 하였고, NPR_s 값의 변화는 0.2에서 1.0까지 선형적으로 감소하거나 증가한다고 가정하였다. 또한 NPR_s 의 증가나 감소는 각각 4초 동안 주어진다고 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

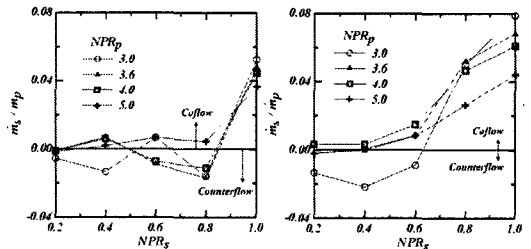
Fig. 3은 NPR_s 값에 따른 추력벡터 편향각(δ)을 나타낸다. 추력벡터 편향각은 다음과 같이 정의된다[12].

$$\delta = \tan^{-1} \left\{ \frac{p_{cx} L}{p_{ne} H} \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_c}{p_{ne}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \right] \right\} \quad (1)$$

여기서, p_{cx} 와 p_{cy} 는 상부 collar에 작용하는 압력이고, p_{ne} 는 주노즐 출구의 압력, L , H , C 는 collar의 길이, 주노즐 출구 높이, collar의 복에서 출구까지의 높이를 각각 의미한다. $NPR_p = 3.0, 3.6, 5.0$ 인 경우, 추력벡터 편향각은 NPR_s 값이 감소함에 따라 증가하며, 최대값을 가진 후 감소한다. 그러나 $NPR_p = 4.0$ 인 경우 추력벡터 편향각은 NPR_s 값이 감소함에 따라 계속 증가한다. $NPR_p = 3.0, 3.6, 5.0$ 인 경우, 추력벡터 편향각이 증가하다가 최대값을 가진 후 감소하는 것은 collar에 부착된 제



(a) Nozzle-A (b) Nozzle-B
Fig. 3 Pitch thrust vector angle



(a) Nozzle-A (b) Nozzle-B

Fig. 4 Relationship between primary mass flow rate and secondary mass flow rate

트 내부에서 발생한 수직충격파가 상부 collar 벽면의 압력을 증가시키기 때문이다. 이에 따른 collar 상/하부 압력차의 감소는 x 축에 수직인 방향의 힘을 감소시키게 된다.

Fig. 4는 NPR_s 값에 따른 상부 slot을 통해 흡입되는 질량유량과 주노즐을 통하여 배출되는 질량유량의 비를 나타낸다. 질량 유량비가 양의 값과 음의 값을 가지는 경우 순유동과 역유동을 각각 나타낸다. Nozzle-A의 $NPR_p = 3.6$ 과 4.0인 경우, NPR_s 값이 감소함에 따라 외부로부터의 혼입과 제트가 편향되지만 collar에 부착되지 않아 역유동이 존재한다. $NPR_s < 0.6$ 인 경우, 제트가 collar 벽면에 부착되고 제트의 큰 운동량 전달로 인하여 흡입되지 않고 제트와 외부로 배출되는 순유동이 발생한다. 한편, $NPR_p = 5.0$ 인 경우, 부족팽창된 주노즐 제트와 제트 주변 정지된 유체간의 상호작용으로 운동량이 전달되어 순유동이 발생한다. Nozzle-B의 $NPR_p = 3.6, 4.0, 5.0$ 인 경우, NPR_s 값이 감소함에 따라 Nozzle-A보다 collar의 길이가 길어 외부로부터의 혼입이 잘 되지 않고, 주제트와 제트 경계면의 정지 유체간의 운동량 전달로 인하여 순유동이 발생한다. Nozzle-A의 $NPR_p = 3.0, NPR_s < 0.6$, 그리고 Nozzle-B의 $NPR_p = 3.0, NPR_s < 0.8$ 인 경우의 역유동은 편향된 제트의 일부가 상부 collar에 충돌한 후 상부 slot을 통해 흡입 정

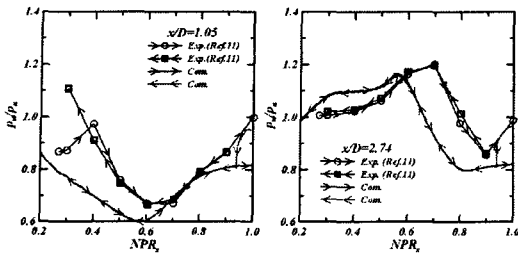


Fig. 5 Hysteresis characteristics for Nozzle-B, ($NPR_p=3.0$)

체실로 유입되어 발생한다.

그림 5는 Nozzle-B, $NPR_p=3.0$ 인 경우, 두 위치 점인 $x/D=1.05, 2.74$ 에서 NPR_s 값의 변화에 따른 상부 collar 벽면 정압을 측정하여 제트 편향에 대한 이력현상을 나타내었다. 실험결과와 수치결과의 차이는 제한된 폭을 가진 실험노즐을 2차원으로 해석하였기 때문이다. 실험과 수치결과에서 NPR_s 변화에 대한 이력현상이 두드러지게 나타나지 않았다. 실험에서는 $x/D=1.05$ 이고 $NPR_s < 0.4$ 인 경우에 이력현상이 나타나지만, 수치계산은 $NPR_s > 0.95$ 인 경우 이력현상이 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 유체적 순유동과 역유동 개념을 이용한 추력벡터 제어법의 효율성과 유용성을 연구하기 위해 수치적 연구가 수행하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 주어진 NPR_p 에 대하여, NPR_s 가 낮아짐에 따라 추력벡터 각도는 증가한다. 그러나 collar에 부착된 제트내부에 발생하는 수직충격파는 상부 collar 벽면정압을 증가시키고 결과적으로 하부 collar에 작용하는 벽면정압과의 차이를 감소시켜 추력벡터 편향각을 감소시킨다.

2) 주노즐을 통하여 배출되는 질량유량의 5%미만을 2차 유로를 통해 흡입함으로써 순유동이나 역유동을 발생시켜 추력벡터를 편향시킬 수 있다.

3) NPR_s 변화에 따른 제트 편향에 대한 이력현상이 실험결과와 수치계산결과에서 두드러지게 나타나지는 않았다.

참 고 문 헌

1. Bitten, R. and Selmon, J., "Operational benefits of Thrust Vector Control(TVC)", High-Angle-of-Attack Technology, Vol.I, J.R.

Chambers, W.P. Gilbert, and L.T. Nguyen, eds., 1992, NASA CP-3149, Part 2.

2. Herbst, W. B., "Future Fighter Technologies, J. Aircraft", Vol.17, No.8, 1980.

3. Herrick, P. W., "Propulsion Influences on Air Combat", 1985, AIAA-85-1457.

4. Strykowski, P. J., "Countercurrent Mixing Layer: Strategies for Shear-Layer Control", 1993, AIAA 93-3260

5. 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.

6. Flamm, J. D., "Experimental Study of a Nozzle Using Fluidic Counterflow Thrust Vectoring", 1998, AIAA 98-3255.

7. Lim C. M. and Kim, H. D., "A Computational Study of the Fluidic Thrust Vector Control Using Secondary Flow Injection", Proc. KSME Fall Annual Meeting, 2003, pp.496-501.

8. Kim, H. D., Raghunathan S., Setoguchi T. and Matsuo T., "Experimental and Numerical Studies of Supersonic Coanda Wall Jets", 38th Aerospace Sci. Meeting & Exhibit, 2000, AIAA-2000-0814.

9. F. S. Alvi, P. J. Strykowski, A. Krothapalli and D. J. Forliti, "Vectoring Thrust in Multiaxis Using Confined Shear Layers", Journal of Fluids Engineering, Vol.122, March, 2000, pp.3-13.

10. Schmid G. F., Strykowski, P. J., Madruga M., Das D. and Krothapalli A., "Jet Attachment Behavior Using Counterflow Thrust Vectoring", 2000, Proceedings of 13th ONR Propulsion Conference.

11. Lim C. M., Kim H. D., Lee K. H. and T. Setoguchi, "An Experimental Study of the Thrust Vector Control Using Counterflow Concept", Asian Joint Conferences on Propulsion and Power, 2004, pp.832-837.

12 Jeffrey D. Flamm, 1998, "Experimental Study of a Nozzle Using Fluidic Counterflow for Thrust Vectoring", 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA98-3255, pp.1-25.