

동축류 이차유동 분사를 이용한 추력 벡터 제어 방법에서 코안다 플랩의 형상에 따른 작동 특성 연구

김 주 현*

서울대학교 기계항공공학부

유체역학적 추력 방향 제어(Fluidic Thrust Vector Control) 방법 중 하나인 동축류 제어 유동 분사를 이용한 추력 방향 제어(Co-flow Thrust Vector Control)의 작동 특성에 대해서 연구하였다. 이 제어 방법은 점성 유동이 벽면에 부착되어 흐르는 코안다 효과(Coanda Effect)를 이용하여 주 유동을 편향 시키는 방법으로서 그 편향각은 이러한 제어 유동 노즐 출구의 플랩 형상에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서는 출구 플랩 형상을 여러 가지로 바꾸어 가며 주 유동의 전압력 300kPa일 때 제어 유동의 편향각이 포화되는 제어 유동의 전압력을 측정하였다. 그 결과 쉐기형 플랩의 각도가 증가할수록 포화 영역에서의 편향각은 증가하며 그 각은 플랩의 각도와 일치한다. 그러나 각도가 증가할수록 제어 유동이 플랩의 벽면을 지나면서 팽창파에 의해 가속되어 충격파를 발생시키게 되고 이 충격파는 주 유동에게까지 전파되어 주 유동 제트의 속도를 감소시킨다.

Key Words : 코안다 효과(Coanda Effect), 동축류 추력 벡터 제어(Co-flow Fluidic Thrust Vector Control), 코안다 플랩(Coanda Flap), 제트 편향각(Jet Deflection Angle)

1. 서 론

비행체의 정밀성과 고기동성을 위한 방향 제어 시스템에 대한 많은 개발이 이루어지고 있다. 이러한 방향 제어 시스템에는 공력 제어와 추력 방향 제어가 있는데 공력 제어는 비행체의 날개에 부착된 장치로 날개 주변의 유동을 변화시켜 비행체의 방향을 제어하는 방법이다. 하지만 이러한 공력 제어 방법은 고속, 고기동 비행체에는 부적합하여 주로 추력 방향 제어가 사용된다. 추력 방향 제어에는 크게 두 가지가 있는데 기계적 추력 방향 제어와 유체역학적 추력 방향 제어(FTVC)가 있다. 그동안의 비행체 추력 방향 제어 기술에는 플랩, 베인 등을 이용하여 배기 제트의 방향을 제어하거나 노즐 방향을 제어하는 방법이 사용되었는데 이 방법은 신뢰도가 높은 반면 복잡한 시스템 구조로 추진시스템의 전체 중량 및 구동에너지가 증가하며, 레이더에 노출될 가능성이 커져 스텔스 성능에도 악영향을 미친다. 반면에 유체역학적 추력 방향 제어 방법은 기계적 방법보다 제어가 어렵지만 기계적 부품수를 크게 줄임으로서 크기와 부피를 절감할 수 있고, 스텔스 성능에도 매우 유리하기 때문에 최근에는 이러한 유체역학적 추력 방향 제어 방법이 많이 연구되고 있다.

유체역학적 추력 제어 방법은 과거 연구에서 크게 5가지의 방법으로 분류된다. 노즐 내부에 분출된 이차유동은 경사충격파를 발생시켜 노즐 내부 압력장을 변화 시키는 방법(Shock Vector Control)[1], 주 제트 유동과 반대 방향으로 제어 유동

을 흡입하는 방법(Counter-flow Fluidic Thrust Vector Control)[2], 주 제트 유동과 동일한 방향으로 제어 유동을 분사하는 방법(Co-flow Fluidic Thrust Vector Control)[3,4], 이차 유동 분출로 노즐 목의 크기 및 위치를 변화 시키는 방법(Fluidic Throat Skewing Technique)[5], 마지막으로 2개의 노즐 목으로 구성된 방법(Dual Throat Method)[6]이 그것이다. 이 중 Counter-flow를 이용하는 방법과 Co-flow를 이용하는 방법은 코안다 효과(Coanda Effect)를 이용하여 추력 방향을 제어하는 방법이다. 이 중 Counter-flow방법의 경우 제어유동을 흡입하는 과정에서 발생하는 문제 때문에 최근에는 주로 Co-flow를 이용한 방법이 연구되고 있다.[7]

노즐출구 플랩의 각을 고정한 상태에서 주 유동 노즐과 상부 제어 노즐의 전압력을 변화시키며 주 유동의 편향각을 관찰한 연구 결과로부터 노즐 압력비(P_c/P_m)가 클수록 편향각이 커지며, 제어가 가능한 노즐 압력비 구간과 더 이상 편향각이 커지지 않는 포화 구간이 존재한다는 사실을 확인한 바 있다.[8] 또한 동축류의 코안다 효과를 이용한 초음속 제트의 추력편향제어에 관한 실험적 연구의 결과로부터 s/R 이 작을수록 편향각이 커진다는 사실을 확인한 바 있다.[7] 하지만 s/R 에 대한 편향각의 실험 결과만이 주어지지 있을 뿐 노즐 출구 플랩(Coanda Flap)의 형상에 따른 편향각의 변화에 대한 실험은 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 과거의 연구에서 더 나아가 Co-flow Fluidic Thrust Vector Control방법에서 노즐 출구 플랩의 각도

와 형상에 따른 포화 편향각과 노즐 압력비(PR)에 따른 편향각을 수치 해석적 방법으로 연구하였다.

2. 해석 방법

2.1 코안다 플랩(Coanda Flap)의 형상 설정



Fig. 1 Coanda flap geometry spiral(left), wedge(right)

이전 연구 결과에 따르면 쐐기형(Wedge) 코안다 플랩의 경우 포화 영역에서 형상학적 한계로 인해 주유동의 편향각이 큰 변화가 없다. 제어 유동의 압력을 증가 시키면 제어 유동의 속도가 증가하여 제어 노즐 후방 압력이 낮아지면서 이로 인해 제트 유동이 편향되게 된다. 이때 제어 유동의 압력이 일정 수준을 넘어가면 제어 유동 노즐 출구에 충격파가 발생하면서 압력이 급격히 회복되어 포화 영역이 형성된다고 설명하고 있다.[8] 따라서 포화 영역에 이르는 제어 유동 압력을 좀 더 높여 포화 편향각을 높이기 위해서 쐐기형 코안다 플랩의 각도를 10도에서 20도, 30도 까지 변화 시키면서 포화 영역의 변화를 분석한다.

또한 나선형(Spiral) 곡선을 사용할 경우 비교적 일정한 제트 두께를 얻을 수 있어 코안다 효과로 벽면에 붙은 유동이 박리되는 지점을 지연 시킬 수 있다는 Giles 등의 실험 결과가 있다.[9] 코안다 효과로 인한 제어 유동의 벽면 부착 효과가 클수록 주 유동의 편향도 커질 것이라 생각 되므로 나선형 코안다 플랩을 사용했을 때 포화 편향각을 관찰한다. 각도 0도에서 최소 반경 30cm(R1)를 가지고 각도 180도에서 최대 반경 40cm, 50cm, 60cm(R2)를 가지며 곡률 반경이 선형적으로 변하는 나선형 코안다 플랩을 eMEGA의 Cubic Curve기능으로 그려 분석하였다.

2.2 전산 해석 형상 모델링

기존의 실험 결과와의 비교를 위해 주유동과 제어유동의 노즐 조건은 동일하게 하였다. 이전 연구에서는 주유동의 노즐 출구 길이를 기준으로 하여 노즐 출구에서 Ma수 2, Re수 6.3×10^5 이었으므로[7] 주 유동 노즐 출구 높이를 기준 1로 잡고 형상을 모델링 하였다. 주 유동 노즐 출구 높이 1을 기준으로 노즐 목의 높이는 0.5917, 제어 유동 노즐 출구 높이는 0.4167로 주 유동 노즐 출구 높이가 제어 유동 출구 높이

의 2.4배가 되도록 하였다.

2.3 격자 설정 및 시뮬레이션 설정

코안다 효과는 유동의 점성에 의한 현상이므로 노즐 형상의 모든 벽면은 1. Adiabatic Viscous Wall로 설정하였다. 이로 인해 발생하는 벽면에 의한 경계층의 형성을 표현하기 위해서 Ma수 2를 기준으로 경계층의 두께를 계산하여 경계층 내부에는 격자가 적어도 20개 포함되도록 설정하였다. 전체 격자수는 쐐기형의 경우 약 10만개, 나선형의 경우 약 12만개이며 쐐기형의 경우 블록을 10개, 나선형의 경우 블록을 8개로 나누어 한 블록 당 격자수가 25000개가 넘지 않도록 하였다. 노즐의 전압력 조건은 31. Subsonic inflow로 주었으며 주유동 전압력을 300kPa로 고정시키고 제어 유동 전압력을 150kpa, 200kpa, 250kpa로 증가 시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 하부 제어 노즐에는 전압력 조건 대신 1. Adiabatic Viscous Wall 조건을 주었다. Solver는 정렬격자 기반 2차원 압축성 유동 범용 해석 SW (2D_Comp_P)를 사용하였다.

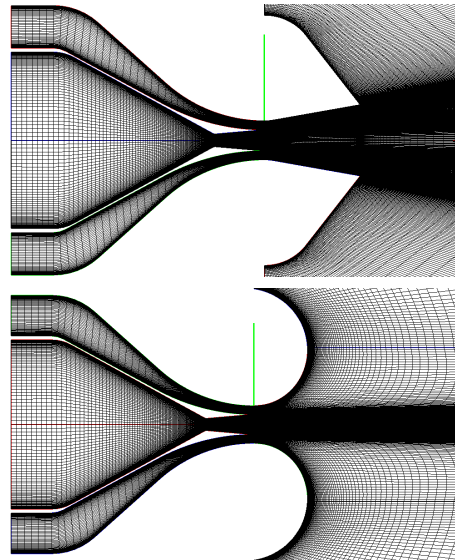


Fig. 2 Grid generation

Steady flow에 대해서 사전 시뮬레이션 결과 이전의 실험 연구 결과와 상반되는 결과를 얻었다. 따라서 unsteady flow에 대해서 사전 시뮬레이션을 더 수행하였으며 이로부터 unsteady flow설정에서도 CFL수가 적어도 0.8이 되어야 올바른 결과로 수렴한다는 사실을 확인했다. 그 외 다른 유동 설정은 다음과 같다.

Table. 1 Flow condition

Flow Type	Ma	Re	Steadiness
Viscous/Turbulent	0.1	31500	Unsteady
Iteration	Time step	Error Tol	CFL
1300~100000	0.2	0.0001	0.8

3. 전산 해석 결과 및 해석

3.1 전산 해석 결과

주 유동의 전압력은 300kPa로 고정하고 제어 유동의 전압력을 150kPa, 200kPa, 250kPa로 바꾸어 가면서 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 각각의 경우에 대해서 편향각을 측정하여 도표로 정리하였다.

Table. 2 Jet Deflection Angle

Flap Angle, °	Pc, kPa	Deflection Angle, °
10	150	10
	200	10
	250	10
20	150	20
	200	20
	250	20
30	150	30
	200	30
	250	30

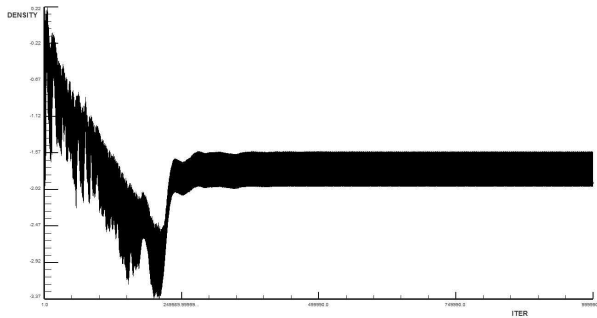
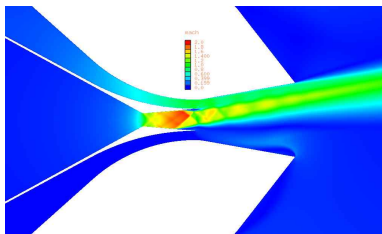
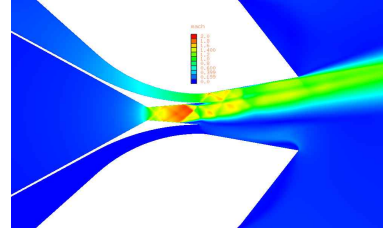


Fig. 3 Density error log

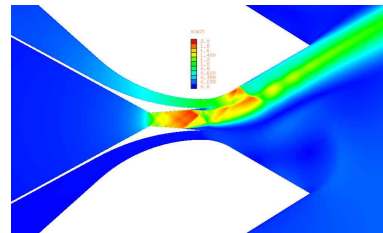


(a) Pc = 150kPa

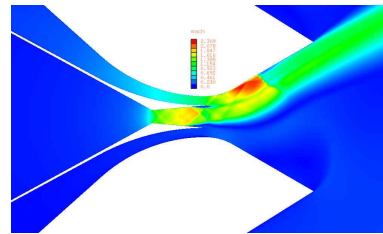


(b) Pc = 250kPa

Fig. 4 Wedge angle 10°



(a) Pc = 150kPa



(b) Pc = 250kPa

Fig. 5 Wedge angle 30°

3.2 결과 해석

전산 해석 결과 세 가지 플랩 각도에서 모두 150kPa에서 포화 영역에 이르렀기 때문에 포화 영역의 변화는 관찰할 수 없었다. 그러나 포화 영역에서의 편향각은 세 가지 경우 모두 플랩의 각도와 일치하였는데, 즉 플랩의 각도가 증가할수록 포화 편향각도 함께 증가하게 된다고 할 수 있다.

윤상훈[7] 등은 포화 영역이 생기는 이유는 제어 유동에서 발생한 충격파로 압력 복원이 일어나 더 이상 주 유동과의 압력차가 유지 되지 않기 때문에 편향이 되지 않는다고 설명하였다. 그러나 각도를 증가시키면서 관찰한 결과 제어 유동에서 발생한 충격파는 주 유동에게까지 전파되어 제어 유동의 압력 복원뿐만 아니라 주 유동의 압력 복원까지 일으켜 충격파를 지나도 주 유동의 압력이 제어 유동의 압력보다 크게 된다. 따라서 충격파가 발생함으로써 인해 오히려 편향이 더 잘 일어나게 되는 것이다.

또한 플랩 각도를 증가시켜 본 결과 제어 유동의 유동 박

리는 관찰되지 않았지만 급격한 팽창으로 인해 수직 충격파가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 플랩 각도 30도, 제어 유동 압력 250kPa인 경우의 Ma수 Contour를 보면 주 유동은 초기에 플랩 각도보다 더 많이 꺾이는 것으로 보이는데 수직 충격파를 지나면서 아음속으로 감속된 제어유동의 압력으로 인해 다시 플랩과 평행하게 진행하게 되는 것으로 보인다.

편향각의 측면에서 보자면 플랩의 각도를 증가 시킬수록 유리하지만 제어 유동의 팽창으로 인한 충격파의 발생이 주 유동에까지 전파되어 주유동의 속도를 감소시키므로 추력 면에서 불리하다. 따라서 편향각 외에도 여러 가지 조건을 고려하여 최적의 코안다 플랩을 설계해야 할 것이다.

4. 결론

코안다 플랩의 각도를 증가 시킬수록 포화 영역에서의 제트 편향각은 증가한다. 그러나 코안다 플랩의 형상적 한계로 인해서 코안다 플랩의 각도 이상으로 편향각이 증가할 수 없다.

노즐 출구를 통과한 제어 유동은 플랩을 따라 진행하면서 팽창하기 시작하여 일정 수준이 넘어가면 충격파를 발생시키면서 압력이 복원된다. 이때 발생한 충격파는 주 유동에 까지 전파되어 주 유동의 압력 또한 복원시킨다. 각도와 제어 유동의 전압력에 따라서 충격파 이후의 제어 유동과 주 유동 압력의 대소가 달라지는데 이는 편향각이 플랩의 각도와 동일해 지는 방향으로 작용하는 것으로 보인다.

또한 플랩의 각도가 증가할수록 제어 유동의 충격파가 강해져 주 유동의 속도가 감소한다. 이는 추력면에서 불리하게 작용할 수 있다. 따라서 최적의 노즐 설계를 위해서는 편향각 뿐만 아니라 여러 가지 조건을 함께 고려하여 코안다 플랩의 형상을 결정 해야 할 것이다.

후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0020557)

References

[1] 2000, Deere, K.A., "Computational Investigation of the Aerodynamic Effects on Fluidic Thrust Vectoring," AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, p.3598.

[2] 1996, Strykowski, P.J., "Counterflow Thrust Vectoring of Supersonic Jets," Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, p.115.

[3] 2009, Heo, J.Y., Yoo, K.H., Lee, Y., Sung, H.G., Cho, S.H., Jeon, Y.J., "Fluidic Thrust Vector Control of Supersonic Jet Using Co-flow Injection," AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, p.5174.

[4] 2004, Mason, M.S, Crowther, W.J., "Fluidic Thrust Vectoring for Low Observable Air Vehicles," AIAA Flow Control Conference, p.2210.

[5] 2001, Yagle, P.J., Miller, D.N., Gimm, K.B., Hamstra, J.W., "Demonstration of Fluidic Throat Skewing for Thrust Vectoring in Structurally Fixed Nozzles," *ASME Journal*, Vol.123.

[6] 2006, Flamm, J.D., Deere, K.A., Berrier, B.L., Johnson, S.K., "Design Enhancements of the Two-Dimensional, Dual Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle Concept," AIAA Flow Control Conference, p.3701.

[7] 2012, 윤상훈, 전동현, 허준영, 성홍계, 이열, "동축류의 코안다 효과를 이용한 초음속 제트의 추력편향제어에 관한 실험적 연구," *한국항공우주학회지*, Vol.40, p.928-930.

[8] 2011, 허준영, 전동현, 이열, 성홍계, "동축류 이차유동 분사를 이용한 초음속 과팽창 제트유동의 유체역학적 추력 방향제어 작동특성 연구," *한국항공우주학회지*, Vol.39, p.419-421.

[9] 1966, Giles, J.A., Hays, A.P., Sawyer, R.A., "turbulent Wall Jets on Logarithmic Spiral Surface," *The Aeronautical Quarterly*, pp.201-215.