

과팽창 초음속제트의 방향 제어를 위한 유체역학적 제어의 동특성 연구

허준영* · 유광희* · 조민경* · 성홍계** · 이 열** · 전영진*** · 조승환***

Analysis of Dynamic Characteristics of Fluidic Thrust Vector Control for the Over-expanded Supersonic Jet

Junyoung Heo* · Kwanghee Yoo* · Hong-Gye Sung** · Yeol Lee** · Youngjin Jeon*** · Seunghwan Cho***

ABSTRACT

The purpose of this research is to investigate the dynamic characteristics of fluidic thrust vector control using the co-flow injection. In previous research, both numerical and experimental approaches for steady state were conducted to investigate operation-parameters and detail flow structure of the fluidic thrust vector control system. Based upon the previous results, numerical unsteady calculation was conducted to analyze the dynamic characteristics of jet up- and down-ward vectoring so that the transition time and the pressure distribution along the wall, and so on were investigated.

초 록

기계적 제어장치를 사용하지 않으면서도 추력방향 제어가 가능한 유체역학적 추력편향제어(Fluidic Thrust Vector Control; FTVC)기법에 대한 연구 논문이다. 2차 유동은 주 유동 흐름과 같은 방향으로 분사하였고, 선행연구를 통해 정상(steady)상태의 수치해석 결과는 실험과 비교·검증하였다. 이를 바탕으로 비정상(unsteady) 수치해석을 수행하였고, 위아래로 제트가 편향이 될 때에 소요되는 시간과 벽면에서의 압력 분포 등을 조사하여 추력벡터의 동특성을 연구하였다.

Key Words: Fluidic Thrust Vector Control(유체역학적 추력방향제어), Over-expansion(과팽창), Dynamic Characteristics(동특성), Response time(응답시간)

1. 서 론

추력방향제어(TVC) 기법은 그 제어방식에 따라 기계적 제어 방법과 유체역학적 제어 방법이 있다(Fig. 1). 기계적 제어 방법은 노즐 내부 혹은 외부에 설치된 플랩을 이용하여 직접적으로 제트 분출 방향을 제어하는 개념인 반면, 유체역학적 제어 방법은 노즐 내부 혹은 외부에 2차

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

** 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** (주) 한 화 구미공장 개발 2부

연락처, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

(secondary) 유동을 분사시켜 주유동의 흐름을 바꾸는 개념이다. 유체역학적 추력방향제어 (Fluidic Thrust Vector Control; FTVC) 기술은 Coanda 효과 및 유동 압력차를 이용한 Co-flow Thrust Vectoring과 Counterflow Thrust Vectoring, 그리고 Shock을 이용한 Shock Vector Fluidic Thrust Vectoring 등으로 분류된다. 유체역학적 제어 방법은 단순한 시스템 구조로 엔진 부피와 중량을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그 예로 USAF와 NASA Langley Research Center가 공동으로 개발한 FLINT(Fluidic Injection Nozzle Technology) 기술로 엔진의 무게당 추력성능을 7-12% 개선할 수 있었고 노즐 수명을 연장하여 따라 비용면에서도 37-53% 절감하였다고 보고되었다.[1] 이와 같이 유체역학적 추력방향제어 기술을 비행체에 적용하기 위하여 미국, 영국을 중심으로 수치/실험적 연구가 진행되고 있다.[2, 3]

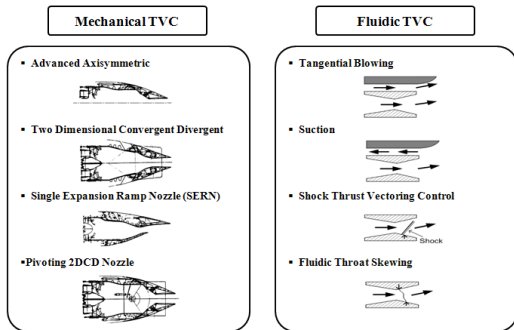


Fig. 1 Two difference methods for thrust vector control

하지만 유체역학적 제어기법을 실용화하기 위하여 고난이도 유체 역학의 이해와 응용이 필요하다. 이를 위하여 초음속 제트유동의 방향을 변화시킬 수 있는 제어유동의 작동범위 및 유동특성해석과 제어유동분사에 따른 제트편향 작동시간에 대한 연구가 수행되어야 한다.

2. 수치 해법

2.1 지배방정식

압축성을 고려하여 질량, 운동량, 에너지 보존

방정식을 직교좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u_j'' u_i'')}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{E}}{\partial t} + \frac{\partial ((\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p}) \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial (\tilde{u}_i \bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} h'' u_i'')}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

본 연구에서는 벽면에서의 코안다효과와 박리 유동에 대한 적용성이 우수한 Yang & Shih [4]의 $k-\epsilon$ 모델에 Sarkar [5]의 압축성 효과를 추가하여 사용하였다. 이 모델은 벽 근처에서 난류 거동을 Kolmogorov의 시간스케일을 이용하여 표현하는 time-scale-based $k-\epsilon$ 모델이다.

2.2 수치 모델

광범위한 마하수와 세장비가 다양한 격자에 안정적 수치해를 얻기 위하여 예조건 (precondition) 기법을 사용하였다.[6] 예조건 기법은 비정상 Navier-Stokes 방정식에서 유동변수 벡터의 시간 미분항에 인공적인 예조건 행렬을 곱하여 시간전진기법을 이용하여 해를 구하는 방법이다. 또한 낮은 마하수에서 나타나는 압력항의 특이성을 피하기 위해 압력항을 기준압력과 섭동압력으로 분리하였다. 압축성-비압축성의 혼존, 정체속도에서 시동되는 제어유체와 빠른 속도의 주흐름 제트와의 큰 속도 차이는 수치적 수렴성에 악영향을 미치므로 장시간의 계산이 요구된다. 이에 따라 고속 고효율의 계산기법이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 분할된 영역마다 전체의 프로세서에 할당하여 전체 계산 속도를 빠르게 하는 다중블록/다중영역 분할 기법을 적용하였다.

3. 해석 모델

본 연구에서 수행된 FTVC 노즐은 사각노즐이고, 초음속 제트유동 방향을 편향시킬 수 있는 2

개의 제어노즐과 면적비와 편향각을 조절할 수 있는 편향노즐로 구성되어있다. 2차 유동은 주유동과 같은 방향으로 분사되는 Co-flow injection type이고, 이는 2차유동이 분사되는 방향으로 주유동이 편향되는 유체역학적 특성을 이용한 기법이다. 유체역학적 추력방향제어에 따른 작동시간을 관찰하기 위해 비정상상태 이차원 수치해석을 수행하였다. 노즐 편향각은 10도이고, 계산에 사용된 격자구성은 Fig. 2와 같다.

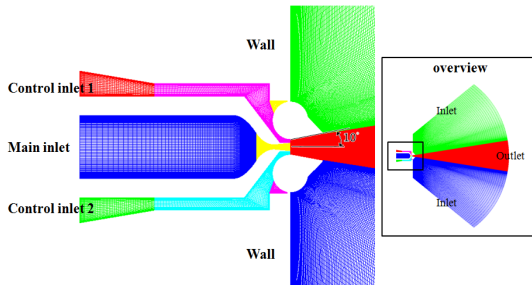


Fig. 2 Computational domain

격자구성 측면에서는 난류의 생성과 소멸, 그리고 벽면과 두 유동의 접촉면에서의 코안다 효과[7]와 박리영역의 유동특성을 정확하게 모사하기 위하여 y^+ 는 약 1.0로 하였다. 계산영역은 총 11개의 블록이며 격자수는 약 15만개로 구성하였다. 주유동 노즐 출구면적은 제어유동 출구면적의 2.4배이다. Figure 3에 나타난 바와 같이 수치해석결과를 실험과 비교·검증되었고, 기존연구를 통하여 다양한 압력비($P_{control}/P_{main}$)에 따른 초음속 제트유동의 편향각 변화특성을 도출하였다.[7, 8, 9]

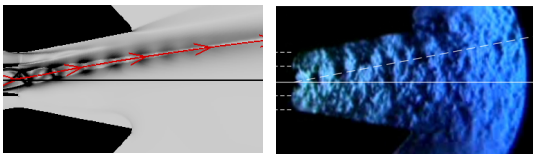


Fig. 3 Comparison of CFD results with the Schlieren image; $P_m=315kPa$, $P_c=150kPa$

주유동은 과팽창 초음속 유동조건을 주었고, 제어유동의 압력을 변화시켰을 때, 주유동이 편

향되는 작동응답특성에 대하여 연구하였다. 압력 조건은 Table 2와 같다.

Table 1. Pressure conditions

Case	P_{main} (kPa)	$P_{control}$ (kPa)
1	315	120
2	315	150

4. 해석 결과

각각의 압력조건에 대하여, 제어유동이 없는 상태에서 제어유동이 분사되었을 때(method-I)와 주유동이 한쪽으로 편향된 상태에서 반대방향 제어유동을 분사할 때(method-II)의 작동응답시간을 해석하였다. 즉, 제어유동이 분사되는 공간에 제어압력이 없을 때와 있을 때의 작동응답특성 변화에 대하여 연구하였다. Method-I에 대해서 제어압력이 120, 150kPa 일 때 주유동의 편향 변화특성은 Fig. 4와 같다.

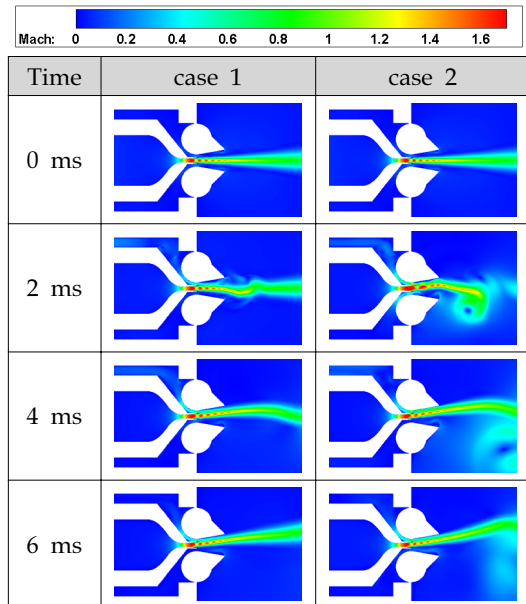


Fig. 4 Jet's transient deflection to co-flow injection at upper side (method-I)

작동응답시간은 속도유동장과 편향노즐 벽면 압력분포를 통하여 판단하였다. Figure 4에 나타

난 바와 같이 제어유동이 없는 상태에서 윗면에서 제어유동을 분사하였을 때, 작동시간은 case 1은 약 6ms, case 2는 약 5ms임을 확인할 수 있었다. Figure 5는 Method-II에 대해서 주유동의 편향 변화특성을 나타낸 것이다. 도출된 작동시간은 case 1은 약 18ms, case 2는 약 16ms이다. 두 경우 모두 제어유동의 압력을 증가하면 추력 벡터의 방향이 바뀌는 시간이 짧아짐을 나타낸다.

Table 2. Response time

Case	Method-I	Method-II
1	10+ ms	40+ ms
2	9+ ms	42+ ms

Method-II에 대해서 주유동이 제어에 따라 작동되었을 때, case 2는 case 1에 비해서, 상대적으로 높은 여압에 의해 기존 제어유동이 장시간 분사됨을 확인할 수 있다. 이러한 여압은 제어 응답시간을 지연시킨다.

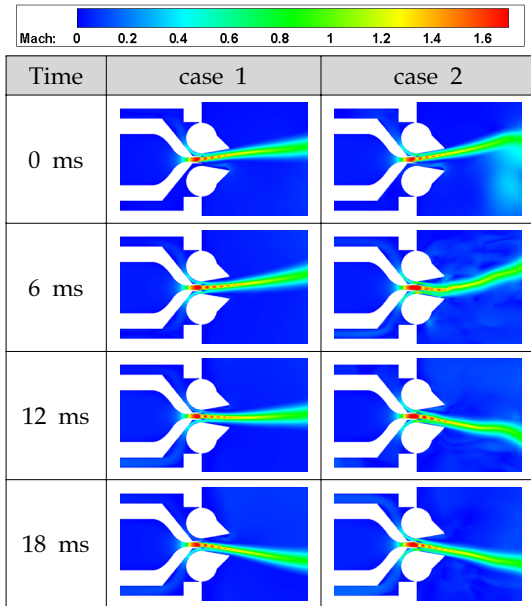
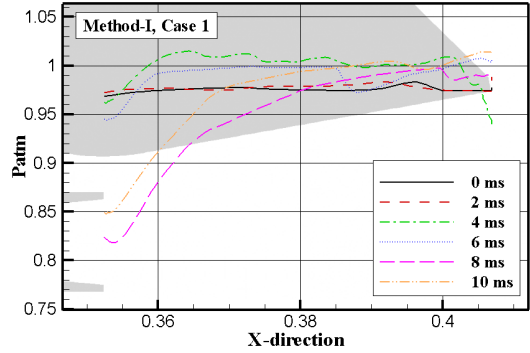


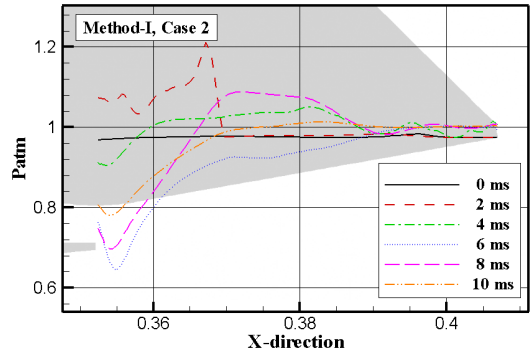
Fig. 5 Jet's transient deflection to co-flow injection at lower side (method-II)

편향노즐 벽면압력분포는 속도 유동장에서 관찰된 응답시간보다 더 긴 시간이 지나야 안정된

압력분포를 나타남을 확인하였다. 이는 제어유동에 의해 발생하는 압력섭동은 주유동이 편향된 후에도 지속적으로 발생하기 때문에, 편향노즐 벽면압력이 정상상태(steady state)의 압력분포로 수렴하는데 긴 시간이 요구되기 때문이다.



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 6 Pressure distribution along the top wall

5. 결 론

초음속 제트유동과 인접한 벽면에 서로 다른 유량의 제어유동을 분사함으로써, 주유동의 흐름 방향을 제어하는 Co-flow 2차 유동 분사에 따른 초음속 과팽창 제트유동의 동적응답특성에 대해 연구하였다. 제어유동에 따른 속도 유동장 변화와 편향노즐 벽면압력분포를 분석하여 작동응답 시간을 도출하였다. 또한 제어시간에 따라 제어 챔버 내부에 여압이 존재함을 알 수 있었고, 이

로 인해 작동응답시간이 지연됨을 확인하였다. 본 연구에서 작동응답시간은 속도 유동장을 기준으로 도출되었고, 향후 다양한 주유동과 제어 유동의 압력비에 따른 응답시간과 벽면에서의 압력진동주기 및 노즐 출구에서의 속도벡터 변화에 대한 연구가 진행될 것이다.

참 고 문 헌

1. Deere K. A., "Summary of Fluidic Thrust Vectoring Research Conducted At NASA Langley Research Center", AIAA 2003-3800, June 2003
2. Kowal, H. J., "Advances in Thrust Vectoring and the Application of Flow-control Technology", Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol.48, no 2, June 2002, pp.145-151
3. Mason, M. S., Crowther, W. J., "Fluidic Thrust Vectoring for Low Observable air vehicles", AIAA 2004-2210
4. Yang, Z., Shih, T. H., "New Time Scale Based Model for Near Wall Turbulence", AIAA Journal, Vol. 31, 1993, pp.1191~1197
5. Sarkar, S., Erlebacher, B., Hussaini, M., and Kreiss, H., "The Analysis and Modeling of Dilatational Terms in Compressible Turbulence", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 227, 1991, pp.473~493
6. Venkateswaran, S., Li, D., Merkle, C. L., "Influence of Stagnation Regions on Preconditioned Solutions at Low Speeds", AIAA 2003-435
7. 허준영, 조민경, 유광희, 전동현, 이 열, 성홍계, 전영진, 조승환, "초음속 과팽창 제트 유동의 추력방향 조종을 위한 유체역학적 제어기법 연구", 한국항공우주학회 추계학술대회, 2008, pp.759-762
8. 전동현, 이 열, 허준영, 성홍계, 전동연, "Coanda 효과를 이용한 추력편향 제어에 관한 실험적 연구", 한국항공우주학회 추계학술대회, 2008, pp.82-85
9. 허준영, 유광희, 조민경, 성홍계, 조승환, "다방향 추력조종을 위한 아음속/초음속 유동의 유체역학적 제어기법 연구", 항공우주무기체계 발전세미나, 2008