

받음각이 있는 3차원 초음속 흡입구 주위의 유동진동 해석

NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW CHARACTERISTICS AROUND 3-D SUPERSONIC INLET AT VARIOUS ANGLE OF ATTACK

김정민¹, 홍우람², 김종암¹

- 1) 서울대학교 기계항공공학부, 서울 151-742
- 2) 서울대학교 계산과학 협동과정, 서울 151-742

교신 저자: 김종암, chongam@snu.ac.kr

요약

받음각(AOA, angle of attack)이 있는 3차원 초음속 흡입구의 비점성 유동해석을 수행하였다. 받음각은 0° , 3° 의 작은 각과 5° , 7° , 10° 의 높은 받음각이 있는 경우에 대해 계산을 수행하였다. 또한 5개의 받음각에 대해 입출구비를 0.00에서 2.42까지 변화시켜가며 계산을 수행하였다. 입출구비는 입구에서 가장 작은 면적을 가지는 목의 넓이와 출구의 가장 좁은 목 넓이의 비로 정의 하였다. 받음각이 높아짐에 따라 흡입구 내부 벽면에 작용하는 압력 비대칭성과 주진동수 변화의 경향성에 대해 알아보았다. 또한 특정 단면에서 물성치 분포를 관찰하였고 이로 인한 유동패턴을 분석하였다.

서론

램제트엔진은 산화제와 압축기가 불필요하기 때문에 로켓에 비해 높은 효율을 갖는다. 하지만 이러한 장점에도 흡입구에서 충격파간의 상호작용에 의해 복잡한 유동구조가 형성되며 유동진동현상을 야기하기도 한다. 흡입구버즈로 알려진 유동진동은 엔진의 효율을 떨어뜨리고 연소를 실패하게 하거나 구조적 파괴를 일으키기도 한다. 특히 받음각이 있는 경우 압력 비대칭성이 커져 더욱 복잡한 유동구조가 형성된다.

흡입구버즈는 1944년 Oswatitsch가 처음 발견했으며, 이후 실험적, 수치적으로 연구되고 있다[1, 2, 6]. Daily와 Ferri는 각각 버즈의 원인이 외부에서 생성된 속도경계층과 충격파간의 상호작용에 의한 전단층에 있음을 밝혔다 [1, 2].

비행체가 임무를 수행하는 동안 여러 요인에 의해 받음각과 연소압이 변할 수 있고 이는 성능과 직결되므로 받음각과 입출구비에 따른 버즈특성에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 받음각에 따라 흡입구주변에서 발생하는 내·외부 유동진동현상을 살펴보았으며, FFT분석을 통해 압력섭동의 진동특성을 알아보았다.

수치해석 기법

3차원 받음각 비점성 유동장 내에서 비정상유동 해석을 위하여 지배방정식으로 Euler 방정식을 선택하였다. AUSM 계열의 수치기법들은 제어면에서 물성치를 전달시키기 위한 전달 마하수를 정의한다는 특징이 있다. 이러한 전달 마하수는 정확성에 상당한 향상을 가져왔으나, 비 물리적인 진동 현상을 유발하는 문제점이 있다. 이는 제어면에서 마하수의 부호에 따라 좌우 물성치 중 한쪽의 물성치만 전달시키는 형태이기 때문이다. AUSMPW+[4]에서는 양쪽의 물성치를 모두 고려하여 진동현상의 주된 원인을 개선하였다. 시간차분 기법으로는 Yoon[5] 등의 LU-SGS를 사용하였고 2차 정확도의 MUSCL과 Van



그림 1. 실험형상과 축 방향 센서위치

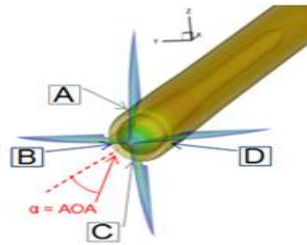


그림 2. 원주방향 센서위치

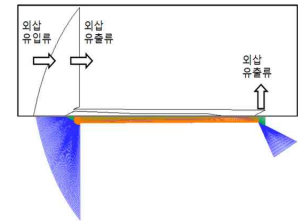


그림 3. 3차원 격자생성과 경계조건

Leer limiter를 사용하였다. 또한 비정상상태 유동해석을 위하여 이중시간 적분법을 적용하였다.

해석형상 및 조건

그림1은 Nagashima등이 실험한 형상을 대상으로 모델링한 초음속 흡입구 형상이다. Nagashima등은 그림1의 형상을 이용하여 마하수 2.0의 전방류조건에서 충격파 진동에 의한 유동 불안정성실험을 수행하였다[3]. 본 연구에서는 축 방향으로 P1부터 P7까지 위치에서 그림2와 같이 회전방향으로 A, B, C, D위치에서 센서를 설치하고 압력을 측정하였다. 또한 입출구비(Throttling Ratio : 이하 TR.)를 입구면적 A^* 와 출구면적 A^B 의 비로 정의하고($TR. = A^B/A^*$) 변화시켜가며 계산을 수행하였다. 그림3은 참고자료[3]을 참고하여 생성한 약88만개의 격자를 보여주고 있다. 경계조건은 그림3과 같이 초음속 입·출구조건과 벽면에서 slip wall 조건을 부여했다. 자유류의 마하수는 2.0이며, 전체유동장의 초기조건은 해수면고도의 표준대기상태로 가정하였다.

수치해석 결과 및 분석

램제트엔진은 대부분 받음각 10° 이내에서 운용되므로 $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 10^\circ$ 의 받음각에 대해 계산을 수행하였고, 연소압을 모사하는 TR.의 경우 Nagashima가 했던 실험에서와 같은 값으로 변화시키며 계산을 수행했다.

받음각이 없는 경우

그림4는 TR.에 따른 종말충격파가 최전방으로 밀려나왔을 때 위치 보여주고 있다. TR.가 작을수록 유출되는 유량에 비해 유입되는 유량이 많아 내부압력이 더 높다. 따라서 TR.이 작을 경우 더 높은 내부압력을 해소하기위해 충격파가 외부로 더 멀리까지 밀려난다. 그림5는 P3 위치에서 압력섭동 데이터를 FFT분석을 수행하여 TR.에 따른 주진동수 변화를 나타낸 그래프이다. TR.이 증가할수록 주진동수가 감소하는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 TR.가 클 경우 충격파가 외부로 밀려나면서 해소해야 할 압력이 낮기 때문이다. TR.가 0.79 이상에서 발생하는 낮은 진동수의 버즈는 발생하지 않았으며, 이는 낮은 진동수의 버즈는 점성에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

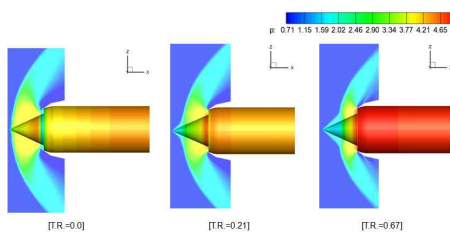


그림 4. TR.에 따른 충격파가 최대로 밀려나왔을 때 위치

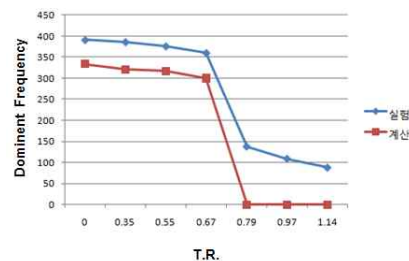


그림 5. P3에서 TR.에 따른 주진동수

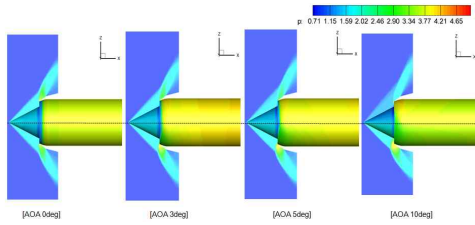


그림 6. 충격파가 최대
후퇴했을 때 AOA에 따른 비대칭성

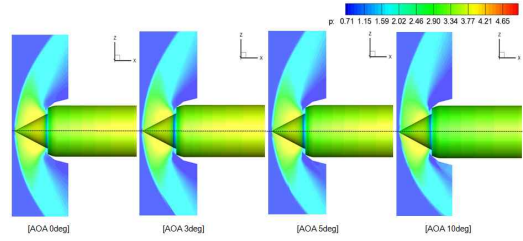


그림 7. 충격파가 최대로 밀려 나왔을
때 AOA에 따른 비대칭성

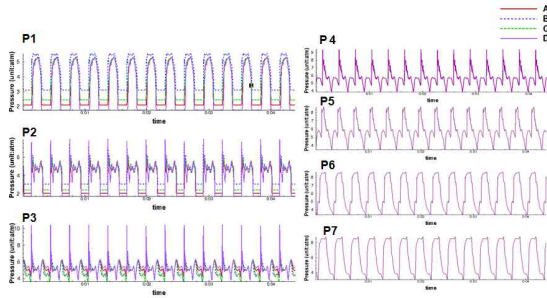


그림 8. 축방향 센서위치에서 압력 섭동
곡선 AOA=10°, TR=0

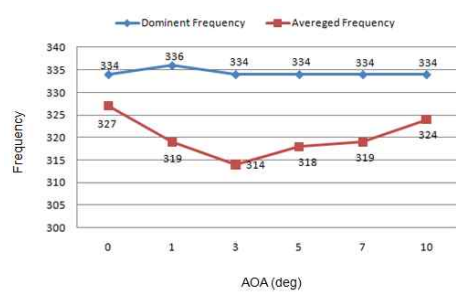


그림 9. P3 위치에서 받음각에
따른 주진동수와 평균진동수 변화

받음각이 있는 경우

받음각이 존재할 경우 더 이상 축대칭이 아니며, 그림12와 그림13과 같이 3차원 유동이 발생한다. 원주방향으로 물성치 구배가 존재하며 구체적인 분포는 다음 문단에서 설명하기로 한다. 그림6과 그림7과 같이 충격파의 상·하 비대칭성을 관찰 할 수 있으며 받음각이 증가할수록 비대칭성이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 강한 경사충격파가 발생하며 경사각이 작은 아래쪽 충격파의 강도가 더 세다. 그림8은 충격파 통과 이후의 물성치 분포 또한 비대칭성이 나타나며 P4위치까지 유지되는 것을 보여주고 있다. 그림9는 P3위치에서 받음각에 따른 진동수 변화를 보여주고 있다. 주진동수와 받음각의 상관관계를 확인 할 수 없었으며 이는 참고자료[3]에서 언급한 내용과도 부합한다.

단면에서 물성치 분포

단면에서 물성치 분포는 비대칭성이 가장 심하게 발생하는 AOA가 10° 인 경우에 대해 살펴보았다. P4에서 P5위치는 diffuser로써 이후 연소부와 만나는 부분이기 때문에 이 위치에서 단면유동을 살펴보았다. 그림11은 시간에 따른 질량 유량을 P4가위치한 단면에서 나타낸 그림이다. 전체적으로 상·하 불균일성이 발생하는 것을 확인 할 수 있으며, 부분적으로 회전하는 유동과 전체적으로 회전하는 유동을 확인 할 수 있다. 부분적으로

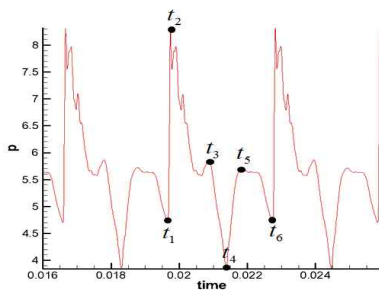


그림 10 P4 A위치에서
압력섭동곡선

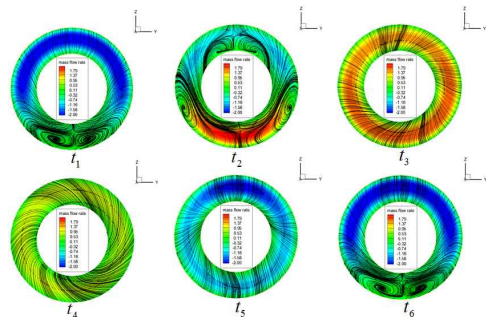


그림 11 P4위치에서 시간에 따른
질량유량 변화

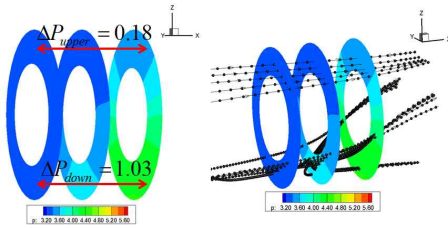


그림 12. P4위치에서 t_1 시간에 부분적으로 회전하는 유동

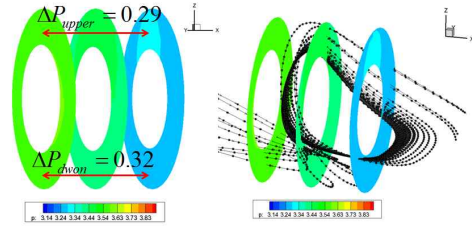


그림 13. P4위치에서 t_4 시간에 전체적으로 회전하는 유동

회전하는 유동이 발생하는 t_1 시간에서 단면을 보면 그림 12와 같다. 역 압력구배가 발생하며 전후 압력차가 단면 상부와 하부에서 큰 차이를 낸다. 단면 아랫부분에서는 안으로 들어오는 유동과 밖으로 나가는 유동이 만나면서 외부에서 유입되는 유동이 단면 위쪽방향으로 들리면서 아래쪽에서만 부분적으로 회전하는 유동이 발생하며 물성치 분포의 비대칭성(18.07%의 distortion)이 크게 나타났다. 그림13은 전체적으로 회전하는 유동이 가장 두드러지게 나타나는 시간에서 유동을 보여주고 있다. 정방향 압력구배가 발생했으며 단면에서 상·하 압력차이가 작게 발생했다. 전방에서 유입되는 대부분의 유동이 단면근처에서 회전하며 정체돼 있는 것을 확인 할 수 있다. 유동이 전체적으로 회전하면서 물성치 분포를 균일하게 하는 효과가 있으며 0.36%의 distortion을 나타냈다.

결론

고속비행체 공기흡입엔진의 흡입구에서 받음각에 의한 유동특성을 알아보기 위해 3차원 비정상 비정상 유동해석을 수행하였다. TR을 변화하며 수행한 계산결과에서는 high frequency buzz 영역에서 주진동수가 실험값과 일정한 차이를 유지하며 실험과 비슷한 경향성을 보였다. AOA가 증가할수록 경사충격파의 비대칭성이 증가했고 이로 인해 유량의 비대칭성이 P4위치까지 발생했다. 압력진동의 한 주기 안에서 전체적으로 회전하는 유동과 부분적으로 회전하는 유동이 있었으며 전체적으로 회전하는 유동이 나타나는 단면에서는 물성치분포가 비교적 균일하게 나타났다.

후기

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국가수리과학연구소의 주요사업 (No. A21001), 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발사업(NSL, National Space Lab, 과제번호 20100028975) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Dailey, C.L., "Supersonic Diffuser Instability," Ph.D Thesis, California Institute of Technology, 1954.
2. Ferri, A., and Nucci, L.M., "The Origin of Aerodynamic Instability of Supersonic Inlets at Subcritical Conditions," NACA RM L5030, 1951.
3. Nagashima, T., Obokata, T., and Asanuma, T., "Experiment of Supersonic Intake Buzz," ISAS Report No. 481, University of Tokyo, May 1972.
4. Kim, K.H., Kim, C., Rho, O.H., "Methods for the Accurate Computations of Hypersonic Flows, PART I : AUSMPW+ Scheme," *Journal of Computational Physics*, Vol.174(1), pp. 38-80, 2001.
5. Yoon, S., Jameson, A., "Lower-Upper Symmetric-Gauss-Seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equations," *AIAA JOURNAL*, Vol.26, No.9, 1988.
6. Hong, W. and Kim, C., "Numerical Study on Supersonic Inlet Buzz under Various Throttling Conditions and Fluid-Structure Interaction," 29th *AIAA Applied Aerodynamics Conference* 27 - 30 June 2011, Honolulu, Hawaii