

전산유동해석을 이용한 ORIFICE 방출 계수 예측

옥 호 남^{*1}, 김 인 선²

PREDICTION OF THE ORIFICE DISCHARGE COEFFICIENT USING COMPUTATIONAL FLUIDS DYNAMICS

H. Ok^{*1} and I. Kim²

Vent ports are installed on the walls of closed compartments of a launch vehicle to control the pressure drop in the compartments. The ports can be modelled as an orifice, and the accurate prediction of the discharge coefficient of an orifice is essential for the design of vent ports. Experimental methods have been used to determine the discharge coefficients for various shapes of orifices, and extensive databases are available. Wind tunnel tests have been also done to evaluate the effect of interaction between venting outflow and freestream for limited conditions. The goal of the present research is to predict the discharge coefficient of an orifice using CFD and evaluate the accuracy of the method, especially for the orifices exposed to the external flow.

Key Words: 전산유체역학(CFD), 발사체(Launch Vehicle), 오리피스(Orifice), 방출계수(Discharge Coefficient), 격실(Compartment), 배기 포트(Vent Port), 제트 자유류 상호작용(Jet Freestream Interaction)

1. 서 론

발사체(Launch Vehicle)에는 외부 대기와의 공기 흐름이 차단되어 있거나 원활치 않은 격실(Compartment)이 존재하며, 발사체의 고도가 높아짐에 따라 지상 대기압을 유지하는 격실(Compartment) 내부의 공기와 외부 대기압과의 압력차는 점점 더 커지게 된다. 발사체 개발 초기의 소형 발사체에 있어서는 자연적인 공기 누출(Leak)이나 구조적인 간격(Gap) 등을 통해서 저절로 압력 균형이 어느 정도 이루어 졌다. 그러나 대형 발사체의 개발과 더불어 압력차에 의한 격실 벽에 작용하는 과도한 구조 하중 및 이에 따른 부수적인 문제점들이 나타나기 시작하였으며, 이를 방지하기 위해서 격실에 적절한 환기(Vent)가 이루어지도록 하는 것이 일반적인 발사체 설계 기법이다[1]. 격실의 환기는 대부분 적절한 크기의 Vent Hole 을 뚫어 주는 수동적인 방법으로 이루어지며, Vent Hole의 크기 결정에 있어서 압력차에 따른 유량 특성 파악이 필수적이

다.

Vent Hole은 흐름 역류 방지 기능의 채택 여부에 따라 구조의 복잡성 정도가 달라지나, 유동 특성의 파악에 있어서는 단순한 오리피스(Orifice)로 가정하는 것이 일반적이다. Orifice의 유량 특성은 일반적으로 방출계수(Discharge Coefficient)로 나타낸다. 방출계수는 Orifice 전후에 압력차가 작용할 경우 등엔트로피(Isentropic) 유동 관계식을 사용하여 얻은 유량에 대한 실제 유량의 비를 나타내며, 1 보다 작은 값을 갖게 된다. Orifice 형상 및 압력차에 따라 방출계수의 값은 달라지며, 일반적으로 유동이 없는 대기 중으로 배출되는 경우에 대해서는 많은 시험 결과들이 축적되어 있다. 그런데 발사체의 경우 격실 내부의 공기는 Orifice를 통해 아음속, 천음속, 초음속, 그리고 극초음속 외부 유동 속으로 방출되며, 이 경우 방출계수의 값은 달라지게 된다. NASA의 경우도 대형 발사체의 개발이 진행되면서 외부 유동이 있는 경우의 Orifice의 방출계수를 구하기 위한 수많은 시험들을 수행하였으며[3,4], 이렇게 구해진 방출계수를 이용하여 격실 내부의 압력 변화를 예측하였다. 우리나라에서의 발사체 개발에도 탑재물 페어링(Payload Fairing) 내부의 압력을 유지하기 위한 환기 장치의 채택되어 있으며, Vent Device 전후의 압력차에 따른 유량 특

1 정회원, 한국항공우주연구원

2 정회원, 한국항공우주연구원

* Corresponding author E-mail: honam@kari.re.kr

성은 시험을 통해 구한다. 그런데 이러한 시험은 국내 시험 설비 및 비용의 제약으로 인해 유동이 없는 대기 중으로의 공기 방출 조건에 대하여 수행되었으며, 외부 유동의 효과는 고려하지 못하고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 참고문헌[3,4]와 같은 외국에서 수행된 시험 결과를 사용하는 것을 고려해 볼 수 있다. 그런데 이와 같은 시험들은 외부 유동이 있는 경우에 대하여 방출계수를 구한 것으로 외부 유동의 효과만을 따로 분리해 내기가 어렵다. 따라서 전산 유동해석(CFD) 기법을 이용하여 외부 유동이 없는 경우의 Orifice 전후의 유량 특성을 먼저 구한 후, 외부 유동이 있는 경우 그 특성이 어떻게 달라지는지를 예측하는 것이 한 가지 대안이 될 수 있을 것이다. 본 연구는 엄청난 계산 시간이 소요되는 전산유동해석을 이용한 본격적인 Database의 구축에 앞서 이러한 접근 방법이 어느 정도 타당한가를 살펴보기 위한 것이다. 외부 유동의 효과가 가장 큰 것으로 알려져 있는 낮은 초음속 조건에서 Orifice에서의 유동이 질식(Choking) 된 경우와 그렇지 않은 두 경우에 대하여 유동장을 해석하고, 그 물리적 특성이 어떻게 달라지는지를 파악하는 것이 본 연구의 주된 목적이다.

2. 계산 결과

Orifice의 형상은 직경 1.905 cm (3/4 inch)인 원형으로 하였으며, 두께 없는 평판에 구멍이 뚫려 있는 것으로 하였다. 이런 형상은 참고문헌[3,4] 등에서 시험 결과가 있기도 하지만, 외부 유동이 없는 경우 축대칭 조건에 해당되어 그 결과를 쉽게 얻을 수 있다는 장점도 있다. 먼저 축대칭 형상에 대하여 조밀한 격자를 사용하고 또한 충분히 계산을 수렴시킨 결과를 구하였다. 동일 형상에 대하여 격자수를 줄이고 3차원 계산을 수행하였으며, 축대칭 결과와 비교함으로써 어느 정도 까지 해를 수렴시켜야 정확한 유량을 얻을 수 있는지를 판단하고자 하였다.

외부 유동은 Orifice 유량 특성이 많이 변할 것으로 예측되는 Mach 수 1.3으로 하였으며, 자유류 압력 1.211×10^4 Pa, 자유류 온도 227.7K, 유동 Reynolds 수는 feet 당 1.5×10^6 으로 하였다. Plenum Chamber의 조건은 Orifice에서 유동 질식(Choking)이 발생하는 경우 및 아닌 경우 두 가지로 하였으며, Table. 1에 조건을 나타내었다. 이 표에서 Case 번호는 참고문헌[3]의 시험 번호를 나타내며, Pressure Ratio는 Plenum Chamber 전압력에 대한 자유류의 압력 비를 나타낸다. 정확히 표시하기 위해서는 전압력 대신 Plenum Chamber에서의 정압을 사용해야 하나 그 값이 거의 같으므로 대부분의 경우 전압력을 그대로 사용한다. 공기의 경우 Plenum Chamber의 전압력에 대한 외부 압력의 비가 0.5283보다 작은 경우

Table. 1 Flow Conditions in Plenum Chamber

Case	Total Pressure (Pa)	Total Temperature (K)	Pressure Ratio
732	1.374×10^4	299.9	0.882
735	2.442×10^4	299.4	0.496

Orifice에서 유동 질식이 발생한다. 축대칭 조건인 경우에는 외부 유동은 나타낼 수 없으며, 3차원 계산의 정확도를 검증하기 위해 축대칭 계산을 수행하였다. 3차원 계산은 먼저 외부 유동이 없는 경우를 가정하여 축대칭 계산 결과와 비교하였다. 다음으로 외부 유동이 있는 경우를 계산하였으며, 앞의 경우와 비교하여 외부 유동이 어떻게 Orifice를 통한 유량 특성에 영향을 미치는지 분석해 보고자 하였다.

2.1 계산 격자 및 기법

먼저 Orifice 및 Plenum Chamber의 중심축을 회전축으로 하는 축대칭 격자를 생성하여 축대칭 계산을 수행하였다. 외부 유동이 있는 경우를 고려하기 위해 가로 세로의 길이가 각각 1.8 m인 풍동 바닥에 Orifice가 장착되었다고 가정하였으며, Orifice는 압력을 조절할 수 있는 실린더 모양의 Plenum Chamber에 연결하였다. Fig. 1에는 Plenum Chamber, Orifice, 그리고 풍동 바닥을 나타내었으며, 축대칭 격자를 기본으로 하여 만들어 3차원 격자가 형성되었음을 알 수 있다.

격자의 형성은 상용 격자 형성 프로그램인 Gridgen[5]을 사용하였으며, 3개 Block으로 구성된 750,000개의 육면체 정렬격자이나 비정렬격자로 변환하여 상용 유동 해석 Code인 Fluent[6]로 계산을 수행하였다. Coupled Solver Option을 선택하였으며, 전 유동장을 난류로 가정하고 Spalart-Allmaras 1 방

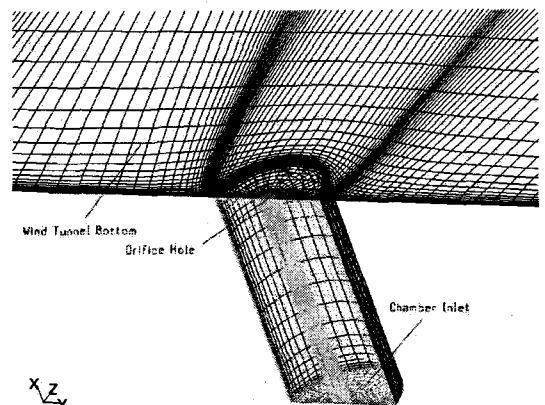


Fig. 1 Surface Grid Including Chamber and Wind Tunnel Floor

정식 모델을 사용하였다. 해의 수렴 정도는 Residual의 저감 정도뿐만 아니라 Orifice를 통한 질량 유량이 일정한 값을 나타는 지로 판단하였으며, Orifice 벽면에 작용하는 공력 계수가 일정한 값을 나타낸 이후에도 한참 더 계산을 수행해야만 유량이 일정한 값을 나타낸다.

2.2 축대칭 계산 결과

먼저 두 가지 경우에 대하여 축대칭 계산을 수행하여 그 결과를 비교해 보았다. Case 732는 유동 질식이 발생하지 않는 경우이며, Case 735는 유동 질식이 발생할 것으로 예상한 것이다. 먼저 회전축을 따라서 Mach 수의 변화를 Fig. 2에 나타내었으며, Case 735의 경우 Mach 수가 1.0에 도달함을 알 수 있다. 그런데 음속의 도달은 Orifice Lip의 위치가 아닌 그 보다 조금 더 하류에서 발생함을 알 수 있으며, 그 이유는 Orifice 출구를 지나서 최소 유동 면적이 발생하는 Vena Contracta 현상에 의한 것임을 Fig. 3에서 알 수 있다. Fig. 3에는 속도 Vector 및 등 Mach 수 선도를 함께 나타내었으며 색깔은 Mach 수를 표시한다. Mach 수가 1이 되는 지점이 Orifice 출구면 후방에 있음을 알 수 있으며, 이후 점성의 영향으로 유속은 서서히 감소한다.

앞에서 말한 Vena Contracta 현상에 의한 실질적인 목 면적 (Throat Area)의 축소와 점성에 의한 Jet 속도 감소에 의해 이론적인 유량에 비해 실제로는 더 작은 유량이 얻어지며, 이 두 유량의 비가 방출계수(Discharge Coefficient)로 나타난다. 참고문헌[7]의 이론적 질량 유량 및 본 계산에서 구한 값을 이용하여 방출계수를 구해보면 Table. 2와 같이 된다. 방출계수는 압력비가 낮아질수록, 즉 압축성의 효과가 커질수록 큰 값을 나타내는 일반적인 경향과 일치된 결과를 볼 수 있으며, 이는 압축성 효과에 의해 Vena Contracta 현상으로 감소된 목 면적 효과를 상쇄하기 때문이다.

Table. 2 Comparison of Mass Flow Rates

Case	Mass Flow Rate by Theory (kg/s)	Mass Flow Rate by CFD (kg/s)	Discharge Coefficient (K1)
732	6.0717×10^{-3}	3.8240×10^{-3}	0.6298
735	1.6257×10^{-2}	1.2158×10^{-2}	0.7479

2.3 3차원 계산 결과

먼저 외부 유동이 없는 경우에 대하여 계산을 수행하고, 그 결과가 축대칭 계산 결과와 어느 정도 일치하는지를 알아 보고자 하였다. 축대칭 격자에 비하여 Chamber 축 방향 및 반경 방향으로 격자를 약 2/3 가량으로 줄였으나 풍동을 나타내는 Block이 추가되면서 격자수가 750,000개가 되었다. Case 732의 경우는 해가 아직 완전히 수렴된 상태는 아니나 Table. 3에 나타낸 것처럼 두 경우 모두 축대칭과 3차원 계산 결과는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 2.66 GHz Zeon Dual Core Dual Processor 2개를 병렬 연결하여 사용하는 경우 (CPU 개수 8개) 계산 시간이 약 24시간가량 소요되므로 이런 정도로는 Database를 구축하기에는 다소 무리가 따른다. 따라서 격자수를 줄여 가며 계산을 수행하여 정확도와 효율성을 동시에 만족시킬 수 있는 정도의 격자를 찾아야 할 것이다.

다음으로 Mach 수 1.3의 풍동 유동 속으로 Orifice를 통한 공기 방출이 있는 경우를 계산하였다. Case 732의 경우 아직 까지 수렴된 해를 얻지 못하여 (계산상의 어려움 때문이 아닌 단순히 계산 시간이 오래 걸리기 때문임) 그 결과를 나타내지는 못하였다. Table. 3에서 방출계수는 자유류의 효과만을 나타낸 것으로 이론해를 기준으로 하면 Case 735의 경우 그 값은 0.7205에서 0.5356이 된다. 대부분의 풍동 시험의 경우 자유류가 있는 경우 이론해를 기준으로 나타낸 결과(K1×K2에 해당함)만이 있어서 자유류 효과만을 따로 살펴보기가 힘들다. 반면 본 계산의 주된 목적은 K2를 얻기 위한 것으로 국

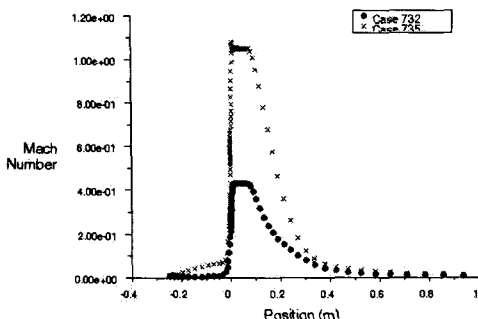


Fig. 2 Comparison of Mach Number Variations Along Axis of Rotation

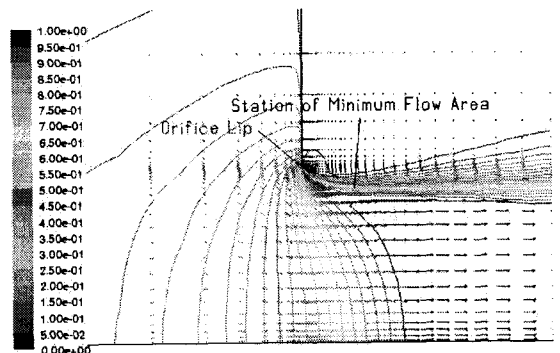


Fig.3 Contour Plot of Mach Number for Case 735

Table. 3 Comparison of Axisymmetric and 3D Results

Case	Axis. (kg/s)	3D, w/o Freestream (kg/s)	3D, w Freestream (kg/s)	Discharge Coeff. (K2)
732	3.8240×10^{-3}	3.9740×10^{-3}		
735	1.2158×10^{-2}	1.2085×10^{-2}	8.7072×10^{-3}	0.7205

내에서 사용 가능한 장비들을 이용하여 자유류 없는 대기 조건에서의 Orifice의 유량 특성이 주어진 경우 K2 값을 사용하여 실제 비행 시의 유량 특성을 얻을 수 있을 것이다.

외부 유동 속도로의 Orifice를 통한 공기 방출은 물리적인로는 제트 자유류 상호작용(Jet Freestream Interaction)과 동일하다. 다만 본 계산의 경우 Orifice를 통한 질량 유량이 동일 면적을 통과하는 외부 유동의 질량 유량에 비하여 상대적으로 작기 때문에 (Case 735의 경우 약 0.5 정도에 해당) 물리적 현상들이 미세하게 나타나는 차이가 있다. Fig. 4에는 대칭면에서의 속도 Vector와 Orifice를 통과하는 유선을 나타내었으며, 그림에서 잘 보이지는 않으나 Jet 바로 후방의 좁은 영역에서 재순환 영역이 미세하게 존재한다. Jet 전방에서의 유동 박리 영역 역시 아주 미세하나마 나타나고 있으며, Jet 전후방의 충격파 역시 미세한 정도로 나타난다.

3. 결 론

유동이 없는 대기압 환경으로의 방출 조건에서의 Orifice의 방출계수 혹은 질량 유량 특성이 주어진 경우, 외부 유동의 효과에 의해 그 값이 얼마나 변하는지를 전산유동해석을 통해 예측하고자 하는 시도가 계획되어 있다. 본격적인 계산 착수에 앞서 전산유동해석을 통한 Database 구축의 효율성 및 정확성이 어느 정도 확보되는지를 알아볼 필요성에 의해 본 연구가 시도되었다. Orifice 전후의 압력비가 목(Throat)에서의 유동 질식이 발생하는 경우와 그렇지 않은 경우에 해당하는 두 가지 조건에 대하여 먼저 조밀한 격자를 사용하여 축대칭 계산을 수행하였다. 축대칭 계산에는 외부 유동의 효과를 나타낼 수 없으나, 3차원 계산의 정확도를 판단하기 위한 기준으로 그 결과를 사용하였다. 다음으로 750,000 육면체 격자를 사용한 3차원 계산을 수행하였으며, 먼저 외부 유동이 없는 경우의 계산을 수행하여 3차원 계산의 정확도를 검증하였다. 750,000개의 격자를 사용하는 경우 최신 Intel CPU 8개를 병

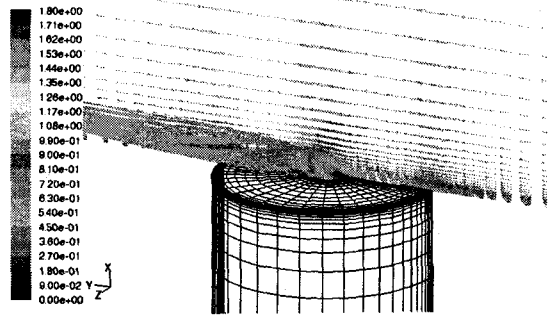


Fig.4 Velocity Vector Plot and Streamlines for Case 735

렬 사용하여도 약 24시간 가량의 계산 시간이 소요되었으며, 이런 정도로는 Database를 구축하기에는 다소 무리가 따른다. 따라서 격자수를 줄여 가며 계산을 수행하여 정확도와 효율성을 동시에 만족시킬 수 있는 정도의 격자를 찾아야 할 것이다. 다음으로 Mach 수 1.3의 외부 유동이 있는 경우에 대하여 3차원 계산을 수행하였으며, 자유류에 의한 유량 특성의 정량적 변화 및 유동장의 정성적 특성을 살펴보았다. 외부 유동이 어떤 물리적 과정을 통하여 Orifice의 질량 유량을 감소 시키는지에 대한 분석이 좀 더 이루어 질 예정이며, 보다 많은 정량적 계산 결과를 확보한 후 외부 유동의 효과를 간략한 보정식으로 나타내기 위한 노력이 뒤따를 것이다.

참고문헌

- [1] "Compartment Venting," NASA SP-8060, *NASA Space Vehicle Design Criteria (Structures)*, NASA, Nov. 1970.
- [2] 옥호남, 김인선, 라승호, 오범석, "발사체 노즈 페어링 벤트 홀 설계," 제 5회 우주발사체기술 심포지움, 2004.
- [3] Walters, W.P., Glasgow, R.M., and Baker, J.M., "Experimental Determination of Generalized Venting Characteristics," *NASA CR-61241*, 1968.
- [4] Ramsey, P.E., "Flow Characteristics of Orifices for Venting Launch Vehicle Compartments," *NASA, Res. Achievements Rev., Vol. 3*, pp 25-34, 1968.
- [5] Gridgen User Manual, Version 15, *Pointwise, Inc.*
- [6] *Fluent 6 User's Guide*, Fluent, Inc.
- [7] 옥호남, 김인선, "다중 Port로 연결된 다중 격실 Vent 해석 기법 개발," 제 4회 한국유체공학회 학술대회, 2006.