

VOF법을 이용한 수중 제트의 수치해석

박 근 흥^{*1}, 김 형 준^{*2}, 권 세 진^{*3}

Numerical analysis of submerged jet by VOF method

G. H. Park, H. J. Kim and S. J. Kwon

Numerical analysis of a gaseous jet submerged in a liquid environment was carried out using the volume of fluid(VOF) method to simulate the kinematics of the gas-liquid interface. Two nozzle geometries were tested, one for Fanno tube and the other for converging diverging nozzle. Commercial code was used for the present calculation. Transient behavior of a gaseous jet since its start showed periodic nature of the jet, which was also observed in previous measurements.

Key Words: 수중 제트(Submerged jet), Volume Of Fluid(VOF), 제트 불안정성(Jet Instability)

1. 서 론

액상환경으로 유입되는 가스 제트에 대한 연구는 1980년대 이래 활발해 지기 시작했다. 액체 금속을 연료로 사용하는 로켓 추진체에 산화제를 주입하는 인젝터 시스템, 직접 연결 옹축시스템, 가스 용해 시스템, 저장 화학 에너지 추진 시스템(SCEPS), 수중에서 발사하는 미사일의 노즐 등에서 유사한 응용을 찾을 수 있다. 그 밖에 화학 공정에서 이상(two phase) 혼합을 위한 반응조(reactor)에도 응용이 되고 있다. 하지만 현재 응용분야의 다양성에 비해서는 연구의 특수성 때문에 공개된 자료가 부족한 것이 사실이다. 본 연구에서는 수중으로 가스제트가 분사되는 현상의 초기에 있어서 두 상간의 경계면을 Volume Of Fluid(이하 VOF)법을 이용하여 수치적으로 모델링을 하였다. 실제 실험과의 비교를 위한 연계성의 고찰과 수중 분사에 수반되는 제트의 불안정성에 대한 연구로서 수치해석을 수행하였다.[1]

2. 수중 분사 제트

이상 제트 유동은 기상 환경에 액상이 유입되는 분사(spray)와 액상 환경에 가스 제트가 유입되는 두 가지 경우로 대별 할 수 있다. 액상 분사에 대한 연구는 일반 연소기 장치에 많이 이용되므로 일찍부터 그 연구가 활발히 수행되어 온 반면 액상 환경으로 유입되는 가스 제트의 경우는 앞서서도 밝혔듯이 실험적 연구 및 이론적 연구가 많이 이루어지지 않았다. 이러한 액상으로 분사되는 가스 제트에 대한 실험적인 연구는 실험적 접근의 어려움과 응용의 특수성 등으로 인해 국방 관련 연구소에서 주로 행해졌으며 군사적 목적 연구의 특수성으로 공개된 자료가 부족하다.

액상 환경으로 분사되는 가스 제트의 경우는 두 가지 상 사이에서 일어나는 운동량의 교환, 큰 밀도차가 있는 경계면의 발달과 경계면의 불안정성, 두 가지 매질의 밀도차에 기인한 부력 효과 및 섞임 현상, 난류 유동장의 형성과 같은 복잡한 유동장을 형성하므로 이론적인 고찰이 용이하지 않고 광학 측정과 같은 실험적인 접근도 용이하지 않다.[1] Jung(2002)의 실험에서 수중 제트에 대한 실험이 이

*1 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
*2 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
*3 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

루어졌으나 분사 초기의 제트 형상의 가시화나 3차원 노즐에 대한 실험은 이러한 어려움으로 인해 이루어지지 않았다.[1] 본 연구에서는 앞으로의 실험과 수중 분사에 수반되는 현상을 조사하기 위한 전 단계로서 열유체 해석 상용 소프트웨어인 CFD-ACE+를 사용하여 수중 제트를 모사하고자 한다.

2.1 모델링

본 연구에서는 CFD-ACE+의 VOF모듈을 사용하여 수중 환경을 모델링 하였다. 이 VOF 모듈은 Hirt & Nichols(1981) 그리고 Rider & Kothe, et al.(1995)에 의해 확장된 VOF법에 기초를 두고 있다.[2,3]

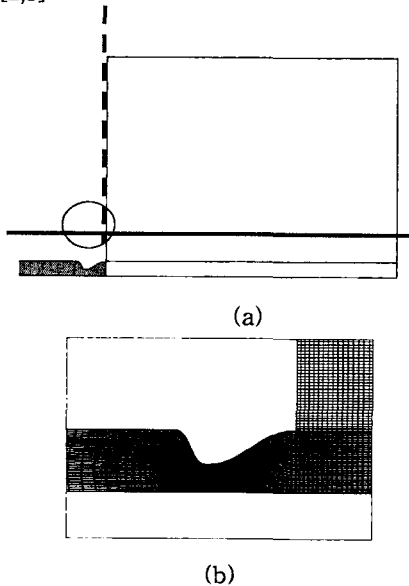


Fig. 1 Computation grid & geometry

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 격자계의 하나로서 축소확대 노즐형태에서의 계산을 위한 것이다. Fig. 1(a)의 노즐 목 부위를 확대한 모습이 Fig. 1(b)이다. 다른 형태의 노즐 계산에서도 위와 같은 격자계를 사용하였으며 노즐부를 제외한 계산영역에서는 55,000개의 격자를 사용하였다. Fig. 1(a)에서 굵은 선으로 표시된 경계에 확대칭 조건을 사용하였다. 또한 점선을 기준으로 색칠이 된 노즐 안쪽은 기체 영역이고 그 반대편은 물이 차있는 것으로 하였다. 실제 실험에서는 마개를 사용할 것이며 마개가 열리는 노즐 내부의 압력은 계산에서 초기조건으로 입력하였다. 경계면 근사로는 Single Line Interface

Construction(SLIC)[4]를 사용하였으며 공간에 대한 풍상차분법(Upwind scheme)과 시간적분은 외재적 방법(explicit)을 사용하였다.

2.2 수중 분사 제트의 해석

본 연구에 사용된 수중 제트 분사 노즐은 Fanno tube와 축소확대 노즐 두 가지이다. 이 두지 형상에 대하여 계산을 수행하였다.

2.2.1 Fanno tube

노즐 반경이 2cm인 Fanno tube 끝단에 절대압 3기압의 pressure inlet 조건을 주었다. 외부 경계면은 pressure outlet 조건으로 절대압 2기압의 수심 10m 환경을 모사하였다.

비정상 상태의 계산으로, auto time step을 사용하였으며 실제 flow time은 약 0.02sec이다.

아래 Fig. 2는 해석 결과의 압력장을 나타낸 것이다.

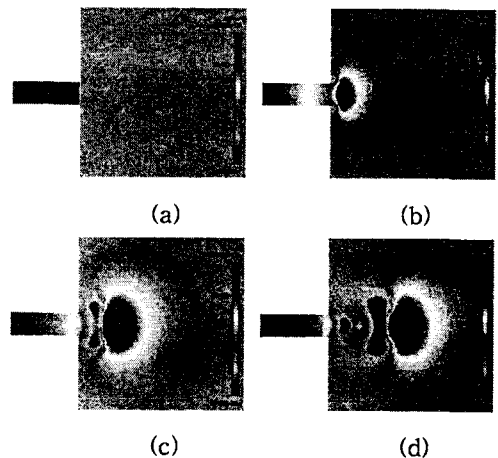


Fig. 2 Pressure contour

결과에서 보면 노즐 출구에서 생성된 고압부가 수중으로 뿔어져 나가면서 그 뒤쪽으로 저압의 파동이 형성되는 것을 볼 수 있다.(Fig. 2(c),(d)) 비정상 상태의 계산결과를 보면 주기적으로 불안정한 파동이 반복되며 압력장에 영향을 주는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 3은 기체-액체 경계면의 형상을 보여주고 있다. 공기와 물 사이의 밀도 차이는 약 1000배의 차이를 보이는데 그로 인해 수중에서 분사되는 제트

가 밀도가 높은 물 속으로 빠르게 침투하며 빠져나가지 못하고 Fig. 3(b),(c) 와 같이 제트의 앞 부분에서 정체되는 모습을 보여주고 있다.

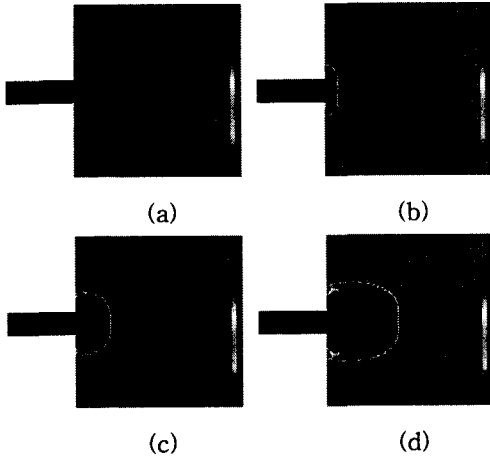


Fig. 3 Free surface shape

2.2.2 축소확대 노즐

노즐 출구 반경이 2cm인 축소확대 노즐 끝단에 절대압 3기압의 pressure inlet 조건을 주었다. 외부 경계면은 pressure outlet 조건으로 절대압 2기압의 수심 10m 환경을 모사하였다. 비정상 상태의 계산으로, auto time step을 사용하였으며 실제 flow time은 약 0.02sec이다.

아래 Fig. 4는 해석 결과의 압력장을 나타낸 것이다.

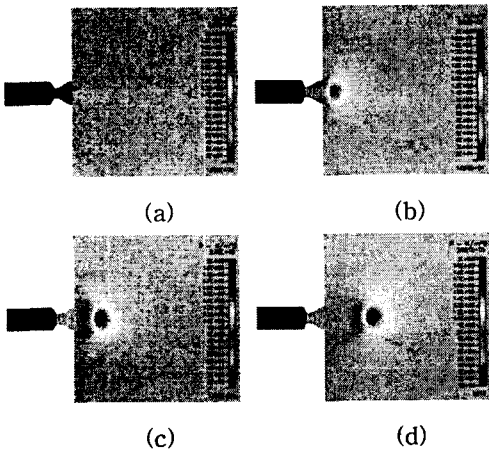


Fig. 4 Pressure contour

앞에서의 Fanno tube와는 다르게 심한 압력 파동은 보이지 않고 있고, 노즐의 목에서 초크가 되어있음을 확인 할 수 있다. 실제 비정상 상태 계산결과에서는 크지 않은 작은 압력 파동이 나타났다. 다음의 Fig. 5는 기체-액체 경계면의 형상을 보여주고 있다. Fanno tube 보다는 제트가 물속으로 잘 침투하여 들어가는데, 이는 축소확대 노즐에서 초크가 되며 유동이 퍼지지 않고 초음속의 코어 형태를 이루며 빠르게 물속으로 침투해 들어가기 때문인 것으로 보인다.

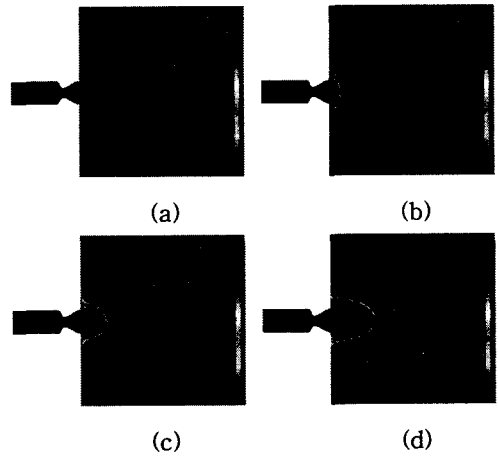


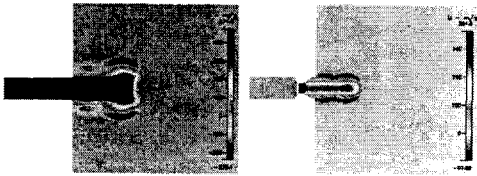
Fig. 5 Free surface shape

하지만 초기에는 Fig. 5(b)처럼 Fanno tube에서와 마찬가지로 제트의 앞부분에서 정체되는 형상을 보이고 있다.

2.3 수중 분사 제트의 불안정성

위의 두 가지 결과에서 정도에는 차이가 있지만 모두 제트가 불안정해 지는 현상을 보였다. 이 불안정성의 요인을 찾아보기 위하여 두 경우의 속도장을 Fig. 6에 나타내었다.

그림에서 보듯이 두 결과 모두 노즐 중심부를 따라 형성된 주 유동 주위로 반대 방향으로 흐르는 속도장이 형성됨을 볼 수 있다. 수중에서 분사되는 제트는 큰 밀도 차이에 따라 옆으로 퍼져나가는 유동이 발생하게 되는데 이때, 주위에 퍼져나간 부분은 밀도 차에 의해 방향이 반대인 reverse flow가 생긴다.



(a) (b)
Fig. 6 Velocity contour

이 reverse flow가 제트의 주 유동에 영향을 주며 두 흐름이 접하게 되는 부분에 Fig. 7에서와 같이 와류(vortex)가 발생하게 된다. 그리고 이러한 와류와 reverse flow에 의한 직접적인 주 유동으로의 충돌이 제트의 중심부에 영향을 주어 중심부의 유동이 진동하는 것으로 보인다.

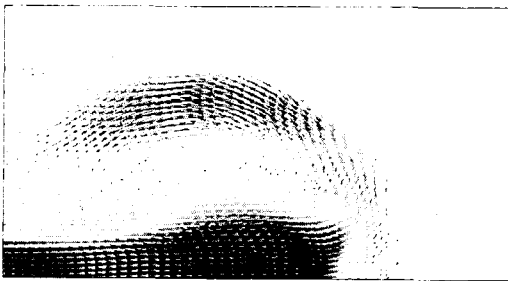
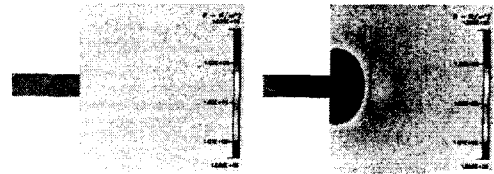


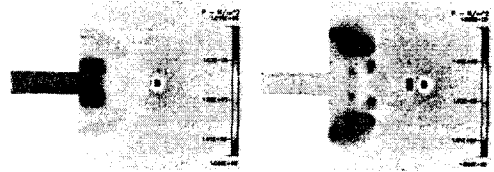
Fig. 7 Vector plot

하지만 앞서서도 언급했듯이 유동이 진동하는 현상은 Fanno tube에서 더 심하게 나타났다. 축소확대 노즐에 비해 유속이 더 빨라서 생기는 현상인 가능성이 있기에 이번에는 축소확대 노즐에서 초크되었을 상태의 유량과 같은 유량을 경계조건으로 주고 계산하여 보았다. 형상은 앞서서와 마찬가지로 노즐의 끝단에 축소확대 노즐과 같은 질량 유량의 inlet조건을 주었다.

위의 결과에서 보면 앞서서의 Fig. 2 Fanno tube 해석 결과와 압력장에 차이가 있어 보이지만 비정상 상태 해석 결과에서는 마찬가지로의 압력 파동 현상이 나타난다. Fig. 9에서는 기체-액체 경계면의 형상을 표시하였다.

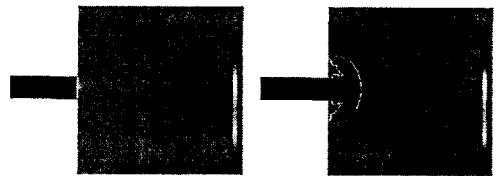


(a) (b)

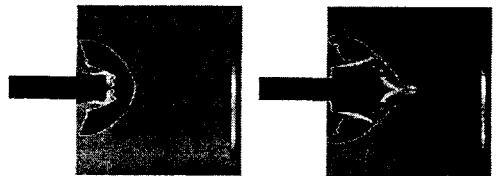


(c) (d)

Fig. 8 Pressure contour



(a) (b)



(c) (d)

Fig. 9 Free surface shape

앞에서의 Fig. 3 Fanno tube의 결과와는 많이 다른 자유 경계면의 형상임을 알 수 있다. 이는 유속이 느려짐에 의해 큰 밀도차를 이기지 못하고 제트의 유동에 변화가 생기는 것으로 보인다. 위의 결과를 자세히 보면 제트의 주 유동이 급격히 축소되고 난 후 다시 횡방향으로 커지는 현상을 보인다.(Fig. 9(c),(d)) 이러한 현상은 Jung(2002) 이나 Surin et al.(1983)의 실험에서도 반복적인 제트의 불

안정성이라 언급한 바 있다[1,5].

이 경우는 속도가 앞의 두 경우와 달리 아음속이라서 큰 운동량으로 물속으로 침투하지 못하고 더 심한 불안정성을 보이는 것으로 보인다. 하지만 앞의 두 경우와 같은 초음속 유동에서도 제트가 어느 정도 더 진행하고 난 후에는 이러한 심한 불안정성을 보이리라 예상된다. 이는 실험도 같이 수행되어야 할 것으로 보이는데 축소확대 노즐보다는 Fanno tube에서 더 큰 압력의 파동을 보이는 것은 Ogden et al.(1992)의 2차원 실험에서는 증명된 바 있다[6]. 이 또한 3차원 실험에서도 나타나는지 실험을 통한 확인이 요구된다.

3. 결 론

본 연구에서는 수중 분사 제트에 대하여 수치해석을 수행하였다. VOF법을 이용하여 수중 환경을 모사할 수 있었으며 수중 제트에 수반되는 현상중의 하나인 제트의 불안정성을 관찰할 수 있었다. Fanno tube와 축소확대 노즐 모두에서 밀도차이에 의한 유동의 불안정성을 관찰할 수 있었으며, Fanno tube 쪽에서 더 심한 불안정성을 보였다. 또한 이러한 불안정성이 밀도차에 의해 주 유동 주위에 형성된 reverse flow에 의한 현상임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 정재권, "2차원 수중 초음속 제트의 가시화 및 불안정성 관찰," 한국과학기술원 석사학위 논문, (2002).
- [2] Hirt, C.W. and Nichols, B.D.."Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *Journal of Computational Physics*, Vol.39,pp.201-225(1981).
- [3] Rider,W.J., Kothe, D.B., Mosso, S.J.,Cerrutti, J.H., and Hochstein, J.I.."Accurate Solution Algorithms for Incompressible Multiphase Fluid Flows," AIAA Paper, 95-0699(1995).
- [4] Noh, W.F. and Woodward, P.R.."SLIC Simple Line Interface Method," In A.I. vande Vooren and P.J. Zandbergen, editors, *Lecture Notes in Physics* 59, pp.330-340(1976).
- [5] V.A.Surin, V.N Evchenko, "Propagation of a gas jet in a liquid," *Journal of Engineering physics*, Vol45,pp.1091-1101(1983)
- [6] T.R Ogden, L.A Panrell, "Shear flow control of gas jets in liquids," AIAA paper, 92-3139 (1992).