

밀폐된 노즐 내부의 초기 압력발달에 대한 수치적 연구

박근홍* · 김형준* · 권세진*

Numerical study of interior pressure development of closed nozzle

Geun-Hong Park* · Hyung-Jun Kim* · Se-Jin Kwon*

ABSTRACT

Numerical analysis of a gaseous jet injected into a closed nozzle was carried out considering the valve operation to simulate the interior pressure development of closed nozzle. Pressure data was obtained through valve operation and we compared numerical analysis with experiment data. Commercial code was used for the present calculation. Numerical results of a pressure development since its start showed good agreement for experiment data of the nozzle operation.

초 록

본 연구에서는 노즐 마개에 의해 출구가 막힌 노즐 내부의 압력 발달을 관찰하기 위하여 밸브 작동을 고려한 수치해석을 수행하였다. 밸브가 작동함에 따라 시간에 대하여 압력값을 실험결과와 비교하였다. 수치해석에는 상용코드가 사용되었으며, 밸브 작동을 고려한 경계조건을 이용한 해석 결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하는 경향을 보여준다.

Key Words: supersonic nozzle(초음속 노즐), pressure development(압력 발달)

1. 서 론

노즐은 기본적으로 초음속 유동을 만들어내는 장치로서 일반적으로 고압의 기체를 분사하게 된다. 이때 노즐 출구는 내부의 기체와 밀도차가 크지 않은 경우가 대부분이라 하겠다. 하지만 노즐 외부 물질의 밀도가 매우 크거나 압력이 대기압보다 높은 조건에서 초음속의 기체

를 분사하는 경우 특수한 환경으로 인해 여러 가지 현상을 고려해야 한다. 노즐은 초기에 출구의 배압을 이기고 작동해야 하며 또한 노즐 내부의 압력이 충분히 발달하지 않은 시점에 내부로 외부의 매질이 유입되어 원래의 설계대로의 성능을 이끌어 낼 수 없는 등의 문제가 있을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 경우 노즐 내부로 외부의 매질이 유입되는 것을 막아 장치의 내부를 보호하기 위해 노즐마개를 사용하기도 한다. 본 연구에서는 고압의 공기를 이용하여 출구가 마개로 막힌 노즐 챔버에 압력을 상승시켜, 고압의 유동이 마개를 깨며 나오

* 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과

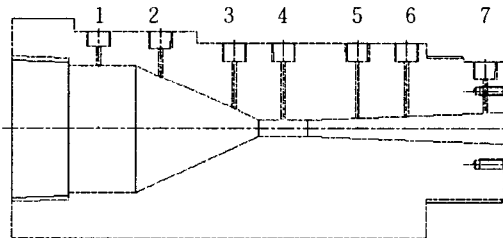
연락처, E-mail: propulse@kaist.ac.kr

는 순간까지의 분사 초기 상태에서 노즐 내부 압력 발달을 관찰하였다. 실험 장치에 사용된 밸브와 노즐을 모델링하여 상용코드로서 해석하였다. 노즐 내부 압력 발달 해석에 있어 중요한 요소가 되는 밸브의 경계조건은 이상기체상태 방정식과 연속방정식을 이용하여 간단한 미분방정식을 풀어서 값을 얻어내었다. 수치해석 결과는 노즐실험에서의 각 위치의 압력결과와 비교하였다.

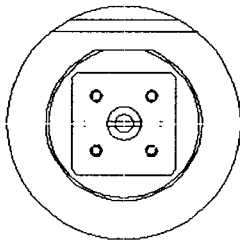
2. 수치적 해석

2.1 실험용 노즐의 모델링

아래그림은 실험에서 사용한 축대칭 노즐의 형태를 보여주고 있다.



(a) Axi-symmetric nozzle



(b) Nozzle exit with nozzle block

Fig.1 Schematics of experiment nozzle

Fig.1(a)는 노즐의 단면이며 (b)는 노즐 출구쪽에서 바라본 모습으로 가운데 보이는 사각형 형

태의 아크릴 마개로 노즐 출구를 막은 모습이다. 실험에서는 7군데에서 압력을 측정할 수 있도록 하였으며, 초음속 노즐은 부피 3m³에 최대 20bar까지 가압할 수 있는 고압탱크를 사용하여 작동시켰다.

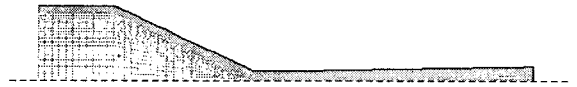


Fig.2 Modeling of experiment nozzle

Fig.2는 수치적 해석을 위한 실험용 노즐의 격자형상을 보여주고 있다. 약 3900개의 격자가 사용되었으며 점선부분은 axi-symmetry 조건을 주어서 해석하였다.

2.2 초기조건과 경계조건

초기에 출구가 마개로 막힌 상태에서 노즐 챔버로 고압의 공기가 유입되기 시작한다. 하지만 밸브를 거쳐서 챔버로 유입되기 때문에 탱크의 고압이 압력과 형태로 전달되는 것이 아니라 밸브가 작동함에 따라 서서히 유량이 증가하고 그에 따라 노즐 내부의 압력이 증가하게 된다. 초기의 노즐 내부의 압력증가와 노즐 내부유동이 마개를 깨고 나가는 순간까지의 짧은 시간에서 실험결과와 비교를 위해서는 경계조건에 대한 고찰이 필수적이다. 본 연구에서는 아래와 같이 경계조건을 계산하였다.

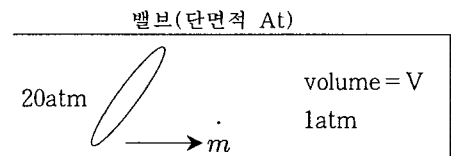


Fig.3 Schematic of boundary condition

위의 그림에서 밸브가 열리기 시작하는 순간부터 노즐내부의 압력이 약 10atm이 될 때 까지 공기는 초킹되어 음속으로 유입된다. 밸브 작동

하여 단면적의 변화가 시간에 따라 $A(t)$ 로 변한다고 가정하면 시간에 따라 밸브를 통해 유입되는 유량은 다음과 같다.

$$\dot{m} = \rho A V = \rho a A(t) \quad a \text{는 음속} \quad - \text{①}$$

또한 여기서 연속 방정식을 생각해 볼 수 있다.

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{C.V} \rho dV + \iint_S \rho V dA$$

위의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$V \frac{\partial \rho}{\partial t} + \dot{m} = 0 \quad - \text{②}$$

여기서 1식을 2식에 대입하게 되면 결국 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho a}{V} A(t) = 0$$

위의 식을 ρ 에 대하여 미분 방정식을 풀게 되면 시간에 따른 밀도의 변화를 알 수 있게 된다.

$$\rho = c \exp^{-\frac{a}{V} \int A(t) dt}$$

상수 c 는 초기조건으로부터 구할 수 있고 노즐의 개폐시간은 밸브의 spec에서 알 수 있으므로, 최종적으로 노즐 출구가 막힌 상태에서 노즐 내부로 공기가 유입될 경우 노즐 내부의 압력 상승은 다음과 같다.

$$P = cRT \exp^{-\frac{a}{V} \int A(t) dt}$$

따라서 위의 식을 시간에 따른 노즐 챔버에서

의 압력조건으로 주고 수치해석을 수행할 수 있다. 노즐 출구는 마개가 막힌 상태에서 벽조건으로 계산을 시작하였으며, 마개가 열리게 되는 시점에서 대기압 조건으로 변화시켜 비정상상태의 해석을 수행하였다.

2.3 이산화와 난류모델

본 해석에서는 공간에 대한 1차 풍상 차분법을 사용하였다. 난류모델로는 2-방정식 모델의 대표적인 $k-\epsilon$ 표준형 난류모델을 사용하였다. 제한된 적용성에도 불구하고 $k-\epsilon$ 난류모델은 모델 자체가 단순하면서도 예측성능이 뛰어나고, 또한 경제성 및 수치 안정성면에서 우수하기 때문에 공학적인 난류유동장 예측에 널리 이용되고 있다.

3. 노즐 실험과의 비교

3.1 노즐내부의 압력 발달의 관찰

본 연구에서는 노즐 출구가 막힌 상태에서의 압력 발달에 초점을 맞추었다. 우선 위에서 유도한 입구 압력 조건과 실험결과를 비교하였다.

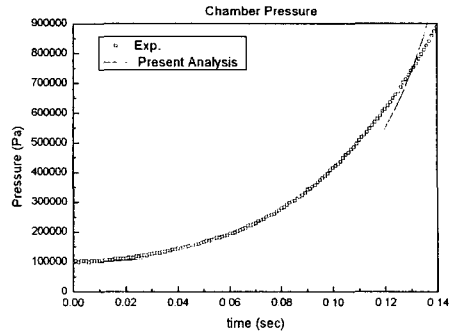


Fig.4 Chamber pressure history

실험결과와 계산결과와 아주 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 위의 결과를 노즐의 챔버에서

의 시간에 따른 압력변화 경계조건으로 하여 상용코드인 Fluent로 노즐 출구의 마개가 깨지는 순간까지 계산을 수행하였다.

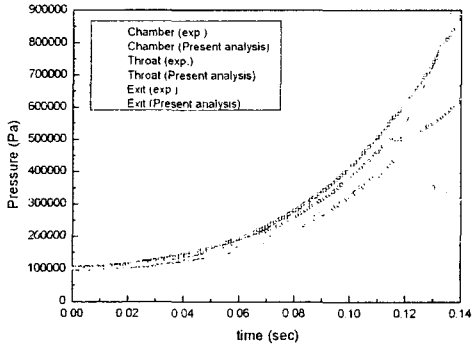


Fig.5 Nozzle pressure history

위의 실험 결과는 대기 중에서의 실험 결과로서 노즐의 마개가 깨지는 순간에서의 노즐 챔버, 목, 출구에서의 압력변화를 보여주고 있다. 계산결과가 약간의 차이를 보이는데 그 이유는 노즐 마개가 아크릴로 제작되어 깨어지기 전에 약간의 변형이 있을 수 있고, 또 깨어지고 난 후 노즐출구와 깨어지고 남은 부분 사이에 고무링으로 인한 단차가 생겨서 발생하는 차이로 보인다. 짧은 시간 간격에서의 결과임을 감안 한다면 비교적 경향을 잘 예측하는 것으로 볼 수 있다.

4. 결론

노즐 출구가 막힌 상태에서의 노즐 내부 압력 발달에 대한 경계조건을 간단한 미분 방정식으로부터 유도해내었으며, 이 결과를 이용하여 노즐 마개가 깨어지는 순간까지의 내부 압력을 비정상상태의 수치해석을 통하여 계산하였다. 수치해석 결과는 실험결과와 잘 일치함을 확인하였으며, 이러한 밸브입구조건의 가정이 해석에 있어 타당한 방법임을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 정재권, "2차원 수중 초음속 제트의 가시화 및 불안정성 관찰," 한국과학기술원 석사학위 논문, 2002
2. Denis G. Zill and Michael R. Cullen, *Advanced Engineering Mathematics*, Jones and Bartlett, 2000.
3. E. Loth and G.M. Faeth, "Structure of underexpanded round air jets submerged in water", *Int. J. Multiphase flow*, 1989
4. V.A.Surin, V.N Evchenko, "Propagation of a gas jet in a liquid," *Journal of Engineeringphysics*, Vol45,pp.1091-1101, 1983
5. T.R Ogden, L.A Panrell, "Shear flow control of gas jets in liquids," *AIAA paper*, 92-3139, 1992