

압축가스 유량 제어밸브의 유동특성 연구

김준범^{*1}, 박원규^{*2}, 한명철^{*2}, 정찬희^{*3}, 안재열^{*3}

A study on the flow characteristics of compressed-gas flow rate control valve

J. B. Kim, W. G. Park, M. C. Han, C. H. Jung and J. Y. An

The purpose of this paper is to present essential numerical data of FCV(Flow rate Control Valve) which is used in a projectile ejection system for a underwater vehicle. A commercial CFD code is applied to analyze the 3 dimensional viscous compressible flow field within the FCV as four cases of opening rate, 25, 50, 75, and 100%. The flow coefficient of each cases are mainly calculated. And other characteristics such as the location of shock wave and total temperature distribution are also determined.

Key Words : 유량 제어밸브(Flow rate Control Valve), 개도율(Opening rate), 용량계수(Flow coefficient), 압축성 유동(Compressible flow)

1. 서론

고압의 압축가스를 이용한 수중 방출시스템의 원리는 압축가스 저장탱크 내의 압축가스가 유량 제어밸브를 통하여 발사튜브 내로 사출됨에 따라 발사튜브 내에서 가스가 팽창 및 압축되며 형성된 가스압력에 의하여 수중 운동체를 밖으로 이탈시키는 것으로 비교적 간단하다. 그러나 저장탱크에서 발사튜브에 이르기까지 매우 다양한 유로 요소들로 구성되어 각 부분에 대한 유동마찰과 와류, 유동박리 등에 의한 압력감소를 예측하기 쉽지 않다. 따라서 설계값으로 주어진 수중 운동체의 가속도 및 이탈속도를 도출하기 앞서 각 유로 요소들에 대한 총합 압력감소분의 정확한 계산이 선행되어야 한다. 이러한 시스템 내에서 유량 제어밸브는 총합 압력감소분에 가장 큰 영향을 주는 유로 요소이다.

본 연구에서는 유량 제어밸브 내의 유동특성을 분석하여, 저심도(3m, 10m)에서 전체 시스템의 유동해석을 위한 밸브 개도율에 따른 용량계수와 유량 제어밸브 설계 및 개발을 위한 기타 수치해석 데이터 제공함을 그 목적으로 한다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식 및 수치해석 방법

복잡한 3차원적 형상을 가지고 있는 밸브 내의 점성유동 특성과 이에 따른 와류 영역, 압축파의 존재 및 위치 변화 추이를 고찰하기 위해서 3차원 정상 압축성 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 사용하였다. 일반화 좌표계(ξ, η, ζ)에서의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{E} - \bar{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\bar{F} - \bar{F}_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\bar{G} - \bar{G}_v) = 0 \quad (1)$$

여기서 $\bar{E}, \bar{F}, \bar{G}$ 와 $\bar{E}_v, \bar{F}_v, \bar{G}_v$ 는 각각 ξ, η, ζ 방향의 대류항과 점성항을 나타낸다. 본 연구에는 식

*1 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학부

*2 부산대학교 기계공학부

*3 국방과학연구소

*E-mail : romy4u@pusan.ac.kr

(1)의 지배방정식을 전산 열·유체해석 상용프로그램인 FLUENT를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델[1]을 적용하였다.

2.2 격자생성

Fig. 1은 유량 제어밸브의 3차원 단면으로 밸브의 구조 및 유로를 나타내고 있다. 본 연구에서는 박원규 등[2]의 실험 및 수치해석 결과에 따라 밸브를 완전개방하지 않고 1/4개방을 완전개방으로 가정하였다. 전체 해석 영역을 다중 블록 격자기법을 이용하여 유입구, 메인밸브(Main valve) 그리고 토출구의 3개 영역으로 나누어 비정렬(Unstructured) 격자를 생성하였다. Fig. 2에서는 수치해석에 사용된 격자를 나타내고 있다. 그리고 메인밸브 영역의 스폴(Spool)을 25%씩 점차 개방하여 개도율에 따라 25% 열린 경우, 50% 열린 경우, 75% 열린 경우, 완전히 열린 경우의 4가지에 대해 각각 격자를 생성하였다. Table 1은 각각의 개도율에 따른 생성 격자수를 나타내고 있다.

2.3 경계조건

작동 유체는 압축공기를 사용하였다. 입·출구는 각각 압력 입구 조건과 압력 출구 조건을 주었으며, 경계조건으로 박원규 등[2]의 실험 및 수치해석 결과 중 저심도(3m, 10m)의 결과를 사용하였다. 그 외의 영역은 벽면 경계에서 점착조건(No-slip condition)을 주었다.

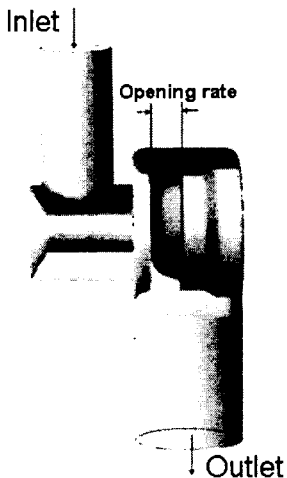


Fig. 1 Geometry of the Flow rate Control Valve

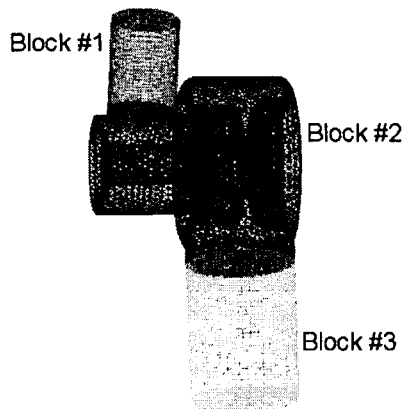


Fig. 2 Grid system of the Flow rate Control Valve

Table 1 The number of cells in each case

Opening rate	Number of cells
25%	293,295
50%	293,707
75%	295,445
100%	294,783

3. 결과 및 고찰

3.1 용량계수

용량계수(C)는 밸브의 수송 능력을 정량적으로 표시하는 매개변수로서 밸브 밸브의 열림도에 대응하는 유량과 압력 손실을 나타내는 규정값[3,4]이다. 밸브의 용량계수가 증가할수록 제어 가능한 유량이 증가하므로 밸브의 선정 시 반드시 고려하여야 하며, 수중 방출시스템의 유동해석에 매우 중요한 매개변수이다. 용량계수에 관한 일반식은 다음과 같이 표현된다.

$$C = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \quad (2)$$

여기서 Q 는 체적 유량, ρ 는 유체의 밀도, Δp 는 입출구의 압력차를 의미한다.

Fig. 3은 수치해석을 통해서 구한 각 심도별, 개도율에 따른 용량계수와 도출한 용량계수를 추종하는 3차식을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 심도의 차이에 따른 오차가 매우 미소함을 알 수 있다. 따라서 동일한 개방 메커니즘을 갖는 두 심도에서는 유량계수에 대한 수심의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

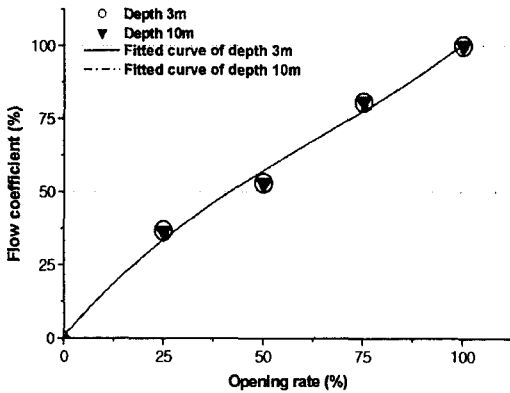


Fig. 3 Flow rate of both 3 & 10m depth

3.2 충격파의 위치

유량 제어밸브가 점차 개방되면서 밸브의 간극 주위 유동은 축소·확대 노즐(Nozzle)에서의 유동과 유사하게 된다. 따라서 압축공기 저장탱크에서 토출되는 유량은 밸브를 지나면서 음속으로 급가속되며, 유속이 음속에 이르게 되면 더 이상 질량유량이 증가하지 않는 질식(Choked)[5,6]이 발생하게 된다. 이러한 질식현상 역시 전체 시스템의 유동해석에 중요한 매개변수가 된다. 또한 배압(Back pressure)이 낮아지며 발생한 충격파는 점차 하류로 전파되며, 이러한 충격파의 이동은 시스템의 배관 및 스펴 형상 설계에 영향을 주게 된다.

Fig. 4와 5는 각 심도별로 25%, 완전개방 두 개도울에서의 충격파의 위치를 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 개방 초기의 수직 충격파가 노즐과 유사한 형상을 갖는 간극의 출구에서 발생하여 스펴면을 따라 경사 충격파로 변화함을 알 수 있다.

3.3 온도 분포

유량제어 밸브의 간극에서 급격한 속도로 토출되는 압축공기에 의해 밸브의 벽면에서는 온도 구배가 발생하게 된다. 이러한 온도 구배는 밸브의 내구성에 큰 영향을 주게 되며, 밸브의 설계 시 재질 선택에 반드시 고려되어야 한다.

Fig. 6과 7은 각 심도별로 25%, 완전개방 두 개도울에서의 유량 제어밸브 표면의 온도 분포를 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 급격한 속도 구배가 존재하는 밸브의 간극과 간극과 인접한 하류 영역에서 상대적으로 큰 온도 강하가 발생함을 관찰

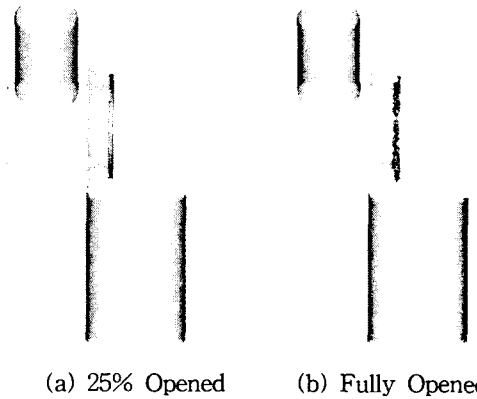


Fig. 4 Location of shock waves at 3m depth

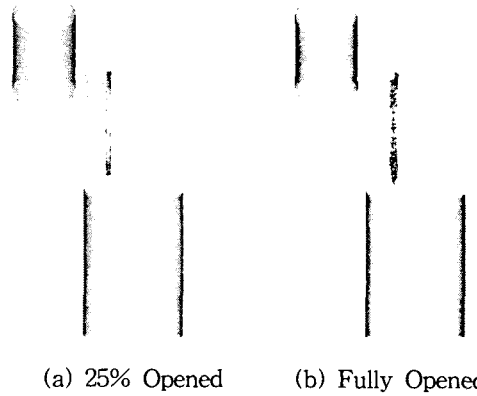
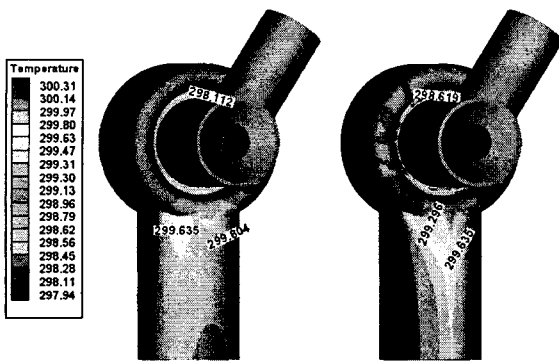


Fig. 5 Location of shock waves at 10m depth

할 수 있다. 그러나 박원규 등[2]의 실험 및 수치해석 결과 중 극저심도(50m)에서 나타나는 급격한 온도 강하는 발생하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 저심도에서의 온도 구배는 밸브의 내구성에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

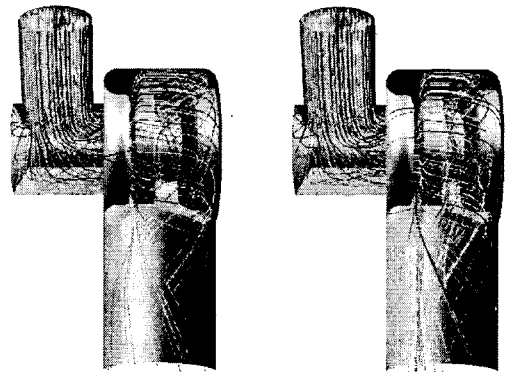
3.4 유선 분포

Fig. 8은 3m 심도의 25%, 완전개방 두 개도울에 대한 해석영역 내 유선을 나타내고 있다. 상부 유입관으로부터 유입된 공기는 스펴 주위를 감싸면서 밸브 간극을 통해 유입되며, 밸브 간극을 통한 공기는 유출관을 빠져 나가기 전에 밸브 후미부의 공간에서 매우 강한 와류를 형성하고 있음을 확인할 수 있다 그리고 개도율이 증가할수록 유입 유량이 증가하게 됨으로 밸브 후미부의 유동에서 점차 강한 와류가 형성되고 있음을 파악할 수 있다. 10m 심도와 나머지



(a) 25% Opened (b) Fully Opened

Fig. 6 Temperature distribution at 3m depth



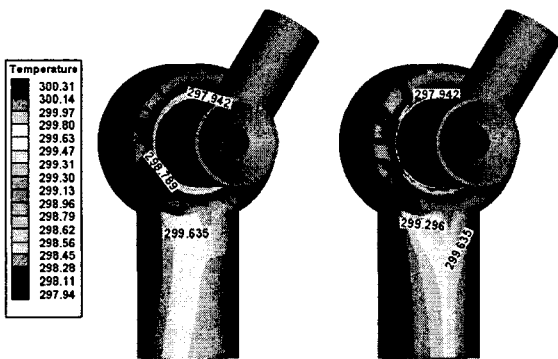
(a) 25% Opened (b) Fully Opened

Fig. 8 Streamline at 3m depth

(3) 유량 제어밸브의 표면 온도 분포를 가시화하여, 저심도에서의 온도 구배는 밸브 내구성에 큰 영향을 주지 않음을 검증하였다.

참고문헌

[1] B.E.Lauder, D.B.Spalding, "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3:269-289, (1974).
 [2] 박원규, 한명철, 김준범, 구대정, "압축가스 방출 유량 제어기법 연구(I)," 국방과학연구소 (2003).
 [3] KS B 0100, "밸브 용어", 한국표준협회, (2003).
 [4] KS B 2101, "밸브의 용량 계수 시험 방법", 한국표준협회, (2003).
 [5] J.D.Anderson,Jr., "*Modern Compressible Flow*," McGraw-Hill Publishing Company, Singapore, (1990), p.172.
 [6] James E.A. John, "*Gas Dynamics*," Allyn and Bacon, INC., U.S.A., (1984), p.49-57.



(a) 25% Opened (b) Fully Opened

Fig. 7 Temperature distribution at 10m depth

지 개도율에 대한 유선 역시 유동 현상이 매우 유사하여 여기서는 생략하였다.

4. 결 론

본 연구는 유량 제어밸브 내부의 점성유동을 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 전산 해석하였으며, 3차원 정상상태 압축성 유동 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험에 의존해야만 했던 용량계수를 전산해석을 통해 구할 수 있게 되어 전체 시스템 유동해석에 중요한 데이터를 제공하였다.

(2) 밸브의 간극에서 발생한 충격파의 위치를 가시화하여 시스템 배관 및 스폴 형상 설계에 중요한 데이터를 제공하였다.