

고차압 제어용 글로브 밸브 트림 내부의 3차원 유동장 해석

윤준용* · 변성준** · 양재모** · 이도형*

Numerical Analysis of the 3-D Flow Field in a Globe Valve Trim under High Pressure Drop

Joon-Yong Yoon*, Sung-Joon Byun**, Jae-Mo Yang**, Do-Hyung Lee*

Key Words: Cavitation(공동현상), Valve flow coefficient(밸브유량계수), CFD(Computational Fluid Dynamics), Globe valve(글로브 밸브)

ABSTRACT

Numerical analysis of the three dimensional turbulent flow field in a complex valve trim is carried out to confirm the possibility whether this simulation tool can be used as a design tool or not. The simulation of the incompressible flow in a globe valve is performed by using the commercial code. CFD-ACEA utilizes the finite volume approach as a discretization scheme, and the pressure-velocity coupling is made from SIMPLEC algorithm in it. Four flow cases of the control valve are investigated, and the valve flow coefficient for each case is compared with the experimental data. Simulation results show a good agreement with the experiments, and it is observed that the cavitation model improves the simulation results.

1. 서 론

밸브는 배관 내를 흐르는 유체의 유량이나 방향, 압력, 온도 등을 제어하는 유체 기기로서 기본적으로는 개폐(on-off), 교축(throttling), 역지(non-return), 과압방지(overpressure protection)등의 네 가지 기능을 수행한다.⁽¹⁾ 특히 고차압 제어용 밸브는 이중 교축점에서의 교축 기능을 이용하는 밸브로서 높은 차압 상태에서 하에서 운전해야 하는 펌프의 바이패스(by-pass)시스템, 증기블로우다운(blow-down), 히터드레인(heater drain) 등과 같은 렛다운(let-down)시스템에 적용되는 밸브이다. 이러한 고차압 제어용 밸브의 경우 밸브 전·후단

에서의 압력 차이가 매우 크기 때문에 밸브 교축점에서의 압력이 유체의 포화 증기압보다 낮아지게 되면서 이 부분에서 유체는 다소의 기포를 발생시키게 된다. 이렇게 생성되어진 기포가 밸브 후단으로 이동하면서 유체내의 마찰로 인해 유속은 점차로 감소하고, 아울러 압력이 회복됨에 따라 기포가 연속적으로 붕괴된다. 이러한 현상을 공동현상(cavitation)이라 한다. 반면에 압력회복이 지연될 경우 계속적으로 기포와 유체가 함께 흐르는 후래싱(flushing) 현상이 발생한다. 이와 같은 공동현상과 후래싱 현상은 밸브에 치명적인 손상을 주는 것으로 보고되고 있다.⁽²⁾ 공동현상은 기포의 생성과 소멸 현상이지만 매우 짧은 시간 동안 지속적으로 반복되기 때문에 밸브의 소음과 진동은 물론, 기포의 생성, 소멸로 인한 충격으로 밸브 트림에 손상을 가져오게 된다. 또한 후래싱은 교축점에서의 압력이 유체의 증기압 이하로 계속 유지되면서 유체입자를 고속으로

* 한양대학교 기계·정보경영학부

** 한양대 대학원 기계공학과

E-mail : joyoon@hanyang.ac.kr

관로 면에 충돌시키기 때문에 결국 밸브에 심각한 손상을 일으키게 된다. 특히 공동현상은 운전 신뢰성과 경제 수명을 확보하기 위해 반드시 고려해야하는 인자라고⁽³⁾ 할 수 있으며 공동현상을 예측하고 제어하기 위해서는 정확한 유동장 해석과 이를 바탕으로 한 특별한 설계기술이 요구된다고 하겠다.

최근 Hunang, Kim은⁽⁴⁾ 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 버터플라이(butter fly) 밸브에 대해서 밸브 디스크 각도의 변화에 따른 3차원 유동장 해석을 수행하였다. 그러나 일반적으로 압력 강하가 다른 형태의 밸브에 비해 매우 커 고차압 제어용 밸브로 가장 널리 사용되어지고 있는 글로브(Globe)밸브는 밸브자체의 유로가 매우 복잡하기 때문에 내부 유동장에 대한 실험이나 3차원 유동해석 결과는 보고된 바가 없다.

이에 본 연구는 유체와 직접 접촉하며 유체를 제어하는 요소인 트림을 장착한 글로브 밸브에 대해 유동장을 해석하였다. 유동장 해석을 위해 상용 프로그램인 CFD-ACEA코드를 이용하였으며 정상상태, 삼차원, 비압축성 난류 유동으로 가정하고 수치해석을 수행하였다. 그리고 플러그의 개도에 따라 완전히 열린 경우, 75% 열린 경우, 50% 열린 경우, 25% 열린 경우 4가지에 대하여 계산을 수행하였다. 개도가 50%와 25%에서는 공동현상도 고려하여 수치 해석을 실시하였다. 격자 생성은 입구부분, 출구부분, 트림 크게 3부분, 총 40개의 오리피스를 포함한 47개의 영역으로 나누어 정렬 격자로 격자를 생성하였다. 난류모델은 표준 k-ε 모델을 사용하였으며, 압력과 속도의 보정을 위해 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다.

또한 이러한 유동 해석을 통해 얻은 결과의 타당성을 검증하기 위해 밸브의 수송능력을 정량적으로 표시할 수 있는 밸브 유량 계수(valve flow coefficient, C_v)를 구하여 Copes Vulcan사⁽⁵⁾의 유량계수에 대한 실험치와 비교하였다.

2. 수치 해석

본 연구에서 해석 하고자 하는 밸브의 개략도는 Fig. 1과 같다. 오리피스의 직경은 5.4mm 이며, 플러그의 개도에 따라 유체가 통과하는 오리피스의 개수가 달라지게 된다. 플러그가 완전히 열린 경우 밸브 몸체의 입구부분을 통해서 들어온 유체가 트림 내부의 총 40개 오리피스를 통과하게 된다. 75% 열린 경우, 50% 열린 경우, 25% 열린 경우에는 각각 30, 20, 10개의 오리

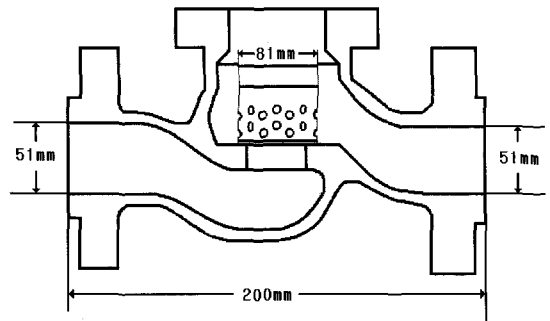


Fig. 1 Schematic diagram of the globe valve

피스를 통과하게 된다. 작동유체는 25 °C 물이고, 입구 지름을 기준으로 한 레이놀즈 수가 440,000 이상인 난류 유동이다.

2.1 지배 방정식

본 연구를 위하여 표준 k-ε 난류 해석 모델을 선택하였다. 이 모델은 Favre-averaged Navier-Stokes 방정식과 난류 에너지 k와 난류 소산율 ε에 관한 두개의 난류수송 미분방정식을 도입한다.

Favre-averaged Navier-Stokes 방정식은 식 (1)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \\ &= \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j}(-\bar{\rho} \tilde{u}_i' \tilde{u}_j') \end{aligned} \quad (1)$$

난류 에너지 수송 방정식은 식 (2)에 나타내었으며, 소산율 수송 방정식은 식 (3)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) \\ &= \rho P_r - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) \\ & C_{\epsilon 1} \frac{\rho P_r \epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

난류 에너지 수송 방정식과 소산율 수송 방정식에서,

μ_t 는 eddy viscosity를 나타내며 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

그리고 생성항 P_r 은 식(5)와 같이 표현된다.

$$P_r = \nu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} k \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \quad (5)$$

플러그 개도가 50%와 25%인 경우에 대해 공동현상을 해석하였는데 공동현상 해석을 위한 증기 수송 방정식은 식 (6)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} f) = \nabla \cdot (I \vec{V} f) + R_e + R_c \quad (6)$$

혼합 밀도(ρ)와 증기 질량 부분 함수(f)와의 관계는 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\rho} \equiv \frac{f}{\rho_v} + \frac{1-f}{\rho_l} \quad (7)$$

여기서 ρ_v 와 ρ_l 은 증기와 액체 부분의 밀도를 나타낸다. 증기 수송 방정식에서 R_e 는 공기방울(bubble)의 증발 부분(생성과 팽창)을 표시하며 식 (8)과 같이 나타내어진다.

$$R_e = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_{sat} - P}{\rho_l}} (1-f) \quad (8)$$

R_c 는 공기방울의 응축 부분(감소와 파괴)을 표시하며 식 (9)와 같이 나타내어진다.

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P - P_{sat}}{\rho_l}} f \quad (9)$$

여기서 C_e 와 C_c 는 상 변화비 계수(phase change rate coefficient)를 나타내며 σ 는 포화 증기의 표면 장력을 나타낸다. V_{ch} 는 특성(characteristic) 속도로서 국부 난류 강도 k 와 $V_{ch} = \sqrt{k}$ 의 관계를 가진다.

2.2 격자 생성

다중 블록 격자법을 이용하여 입구, 트림(trim), 출구 크게 3개의 영역으로 나누어 정렬(structured) 격자를 이용하여 격자를 생성하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 전체 격자의 형태를 나타내고 있다. Fig. 3은 완전히 열린 경우의 트림 내부와 오리피스스의 격자 형태를 보여주고 있다. 트림 영역의 경우 플러그의 개도에 따라 플러그가 완전히 열린 경우, 75% 열린 경우, 50% 열린 경우, 25% 열린 경우 4가지에 대해 각각 격자를 생성하였다. 각각 경우에 대한 전체 셀 수는 각각 199,000개, 186,000개, 173,000개, 166,000개이며, 가장 유동의 변화가 심하다고 판단되어지는 트림 내부와 오리피스 부분에 격자를 밀집시켰다.

2.3 경계 조건

입구 경계 조건은 Copes-Vulcan사의 2 인치 글로브 밸브의 유량 조건을 사용하여 평균 속도가 8.81m/s가 되도록 완전 발달(fully-developed)된 속도 조건을 주었다.

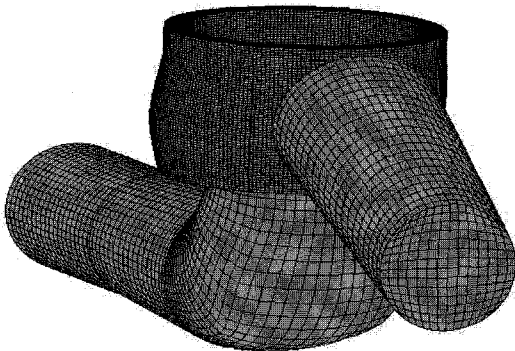


Fig. 2 3-D total grid of the glove valve

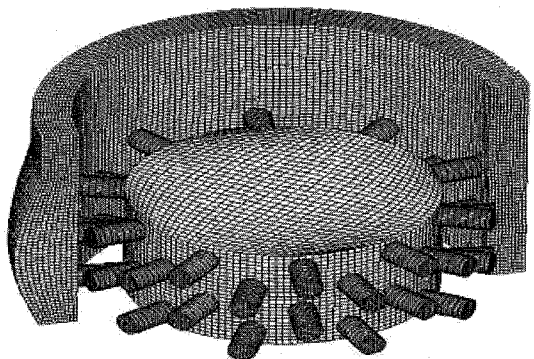


Fig. 3 Grid of the valve trim

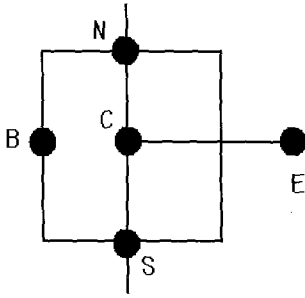


Fig. 4 Boundary Cell

Fig. 4는 경계면을 나타낸다. 점 C를 계산하기 위한 유한체적 방정식은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_C \phi_C = a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S \quad (10)$$

여기서 선형화 된 source 항 S는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = S_U + S_C \phi_C \quad (11)$$

출구 조건은 경계에서 외삽(Extrapolation) 조건을 주어 계산하였다. 속도경계는 압력 식 (12)와 같이 매 반복계산마다 S_U 를 수정한다.

$$S_U = S_U - \rho_p u A \quad (12)$$

운동량과 스칼라방정식은 식 (13)과 같이 S_C 를 수정하여 경계조건 값을 계산한다.

$$S_C = S_C - \rho_p u A \quad (13)$$

여기서 u는 출구 단면과 수직인 방향의 속도이고, A는 출구부의 단면적이다.

오리피스와 트림이 만나는 부분의 격자는 완전히 일치하지 않기 때문에 오리피스 경계면과 트림이 만나는 면은 내삽법(interpolation)을 통해 매 반복계산마다 경계 값을 계산하여 주었다.

2.4 해석기법

본 연구에서는 밸브 내부의 복잡한 3차원 유동장을 해석하기 위해 CFDRC사의 상용유동해석 프로그램인

CFD-ACEA⁽⁶⁾를 사용하였다. CFD-ACEA는 지배방정식들을 유한체적법(FVM)으로 이산화하여 수치계산을 수행하며, 압력과 속도보정을 위해 SIMPLEC 알고리즘을 적용한다. 대류항을 처리하는데 있어서는 초기 20%의 계산과정까지는 비교적 수렴성이 좋은 First-order Upwind Scheme을 사용하였으며, 이후의 계산과정에서는 Second-order Upwind Scheme을 사용하여 계산을 수행하였다.

수렴은 모든 변수가 식 (14)를 만족할 때까지 반복 계산하였다.

$$\sum_n |a_C \phi_C - \sum_k a_k \phi_k - S_C| < e_C \phi_{ref} \quad (14)$$

여기서 n은 point를 나타내며 e_C 의 값을 1×10^{-5} 으로 하여 계산하였으며 1600번 반복 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전체 유동장

Fig. 5는 플러그의 개도에 따른 4가지 경우에 대한 각각의 압력장을 나타낸다. 밸브의 트림영역에서 압력 변화가 다른 영역에 비해 극심함을 잘 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 밸브의 플러그가 완전히 열려있는 상태에서의 압력장을 나타내며, 트림 내부의 40개의 오리피스를 통해서 유체가 흐르기 때문에 다른 경우에 비해 비교적 유체가 잘 흐를 수 있게 되어 압력의 변화가 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다.

또한 Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)는 밸브의 플러그가 75%, 50% 열린 경우에 대한 각각의 압력장을 나타내고 있다. 이러한 2가지의 경우 밸브의 플러그가 완전히 열려있는 경우에 비해 압력의 변화가 더 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는 유체가 통과하는 오리피스의 수가 완전히 열려있는 경우에 비해 작기 때문에 그만큼 유체가 통과하기 어려워지기 때문에 이로 인한 더 큰 압력의 변화를 수반하게 된다. Fig. 5(d)는 밸브의 플러그가 25% 열려있는 경우에 대한 압력장을 나타내고 있다. 이 경우 밸브 트림 내부 10개의 오리피스를 통해 유체가 통과하게 되며, 다른 경우에 비해 밸브 전, 후단의 압력 차이가 가장 크게 나타난다. 출구부에서 국부적으로 압력이 포화증기압 이하로 내려가는 현상을 나타낸다.

각 그림의 압력선을 비교해 볼 때 밸브가 많이 열

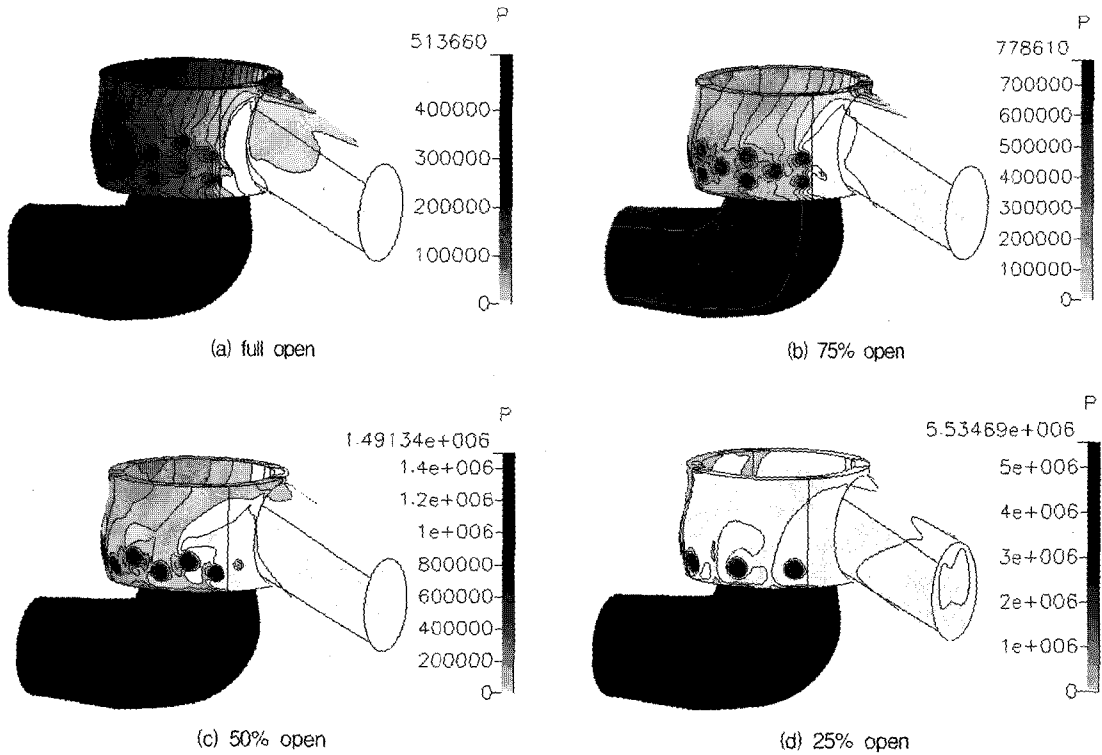


Fig. 5 Pressure contours according to the valve opening

릴수록 출구와 출구 반대쪽의 압력 차가 심하다. 이것은 각각의 트림을 통과하는 유체의 양이 밸브가 많이 열렸을 경우가 밸브가 적게 열렸을 때 보다 차이가 심함을 알 수 있다.

4가지 경우에 대한 밸브 입구와 출구에서의 차압은 각각 62.64 psi(4.32 bar), 96.86 psi(6.68 bar), 191.26 psi(13.19 bar), 731.53 psi(50.45 bar)이며, 이러한 결과에서 볼 수 있듯이 차압의 크기는 오리피스스의 개수에 비례하고 있음을 알 수 있다.

3.2 공동현상 해석

Fig. 6은 플러그 개도가 25%인 경우에 공동현상 영역을 나타내고 있다 플러그 개도가 50%이상인 경우에는 공동현상이 발생하지 않았다. 그림에서 확인할 수 있듯이 유체의 흐름이 트림의 전체 오리피스에 균일하게 흐르지 않고 출구와 가까운 트림 내부 오리피스로 집중되기 때문에 상대적으로 압력이 급격히 낮아져 이 부분에서 공동현상이 발생하여 밸브의 출구부로 진행해 나아가고 있음을 알 수 있다. 그러므로 유체의 흐

름이 활발한 출구부 트림에 오리피스를 추가하는 등의 트림 형상변화나, 출구부 오리피스 직경을 크게 하는 등의 조절을 통해 공동현상을 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 밸브 유량 계수

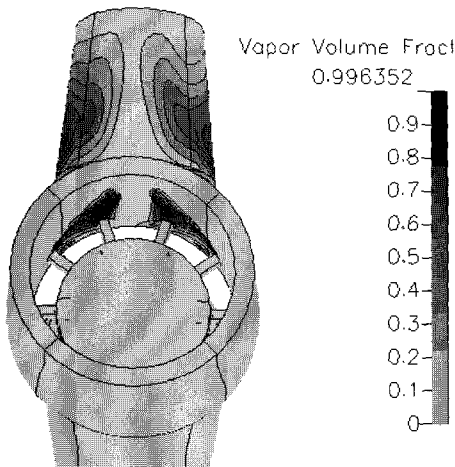
밸브 유량계수(C_v)는 밸브의 수송 능력을 정량적으로 표시하는 매개변수(parameter)로서 밸브 전후의 차압이 1psi에서 1분당 흐르는 유체의 량을 U.S. 갤론(Gallon)으로 표시한 값을 말한다.

즉, 유량계수가 크면 그만큼 제어할 수 있는 유량이 크다고 볼 수 있기 때문에 밸브의 선정에 있어서 반드시 고려해야 하는 중요한 매개변수 중의 하나이다.

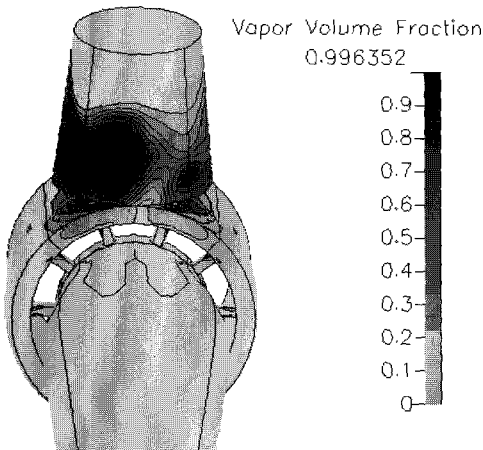
유량계수에 관한 식은 아래의 식 (15)과 같으며, 베르누이(Bernoulli) 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$C_v = \frac{Q}{A} \cdot \sqrt{\frac{G}{\Delta P}} \quad (15)$$

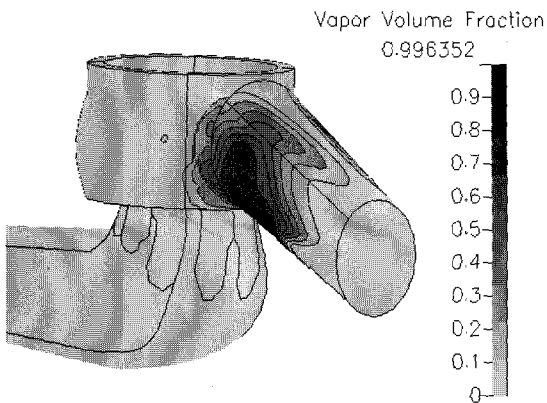
여기에서 Q는 밸브를 통과하는 유량을 나타내며 단위는



(a) top view



(b) bottom view



(c) side view

Fig. 6 Cavitation regions of the 25% valve opening

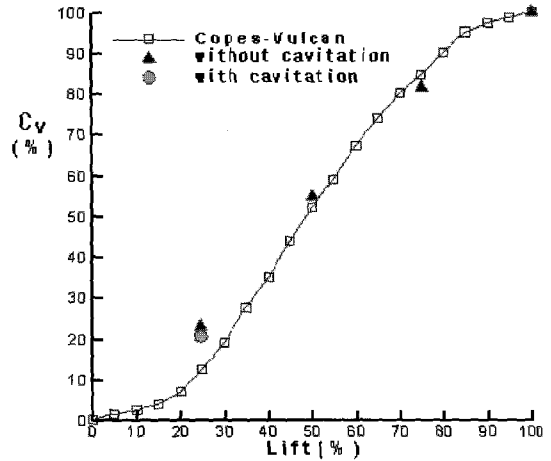


Fig. 7 Valve flow coefficient

gal/min이고 A는 밸브의 단면적이다. 그리고 G는 비중(specific gravity)이며, ΔP 는 입구와 출구의 압력차를 의미한다.

본 연구에서는 공동현상 모델을 사용하지 않은 경우 밸브 플러그 개도에 따른 네 가지 경우에 대한 각각의 밸브 유량계수와 공동현상이 발생한 플러그 개도 25%에 대해 밸브 유량 계수를 계산하였다. Fig. 7은 Copes-Vulcan사에서 측정된 유량계수에 대한 데이터와 본 연구에서 수치 해석을 통해서 구한 데이터와의 비교를 나타내고 있다. 그림에서 가로축은 밸브 플러그의 개도를 나타내고, 세로축은 밸브가 완전 열렸을 때의 유량계수를 100%로 하여 개도에 따른 유량계수를 %로 나타낸 값이다. 또한 그림에서의 실선은 Copes-Vulcan사에서 측정된 밸브 유량계수에 대한 실험 데이터를 나타내고 있으며, 삼각형 기호는 공동현상을 고려하지 않은 경우의 밸브 유량계수를 나타낸다. 그리고 원형 기호는 공동현상을 고려한 경우에 대한 밸브 유량계수를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 밸브의 개도가 25%인 경우를 제외한 나머지 경우 실험 값과 5% 이내 오차 범위에서 일치하는 결과를 나타내고 있다.

공동현상 해석을 통해 얻은 결과가 그렇지 않은 경우보다 개선된 결과를 보이는 것을 통해 플러그 개도가 25%인 경우 오차가 큰 이유는 공동현상의 발생으로 압력 차와 유량의 해석이 잘 이루어지지 않았기 때문이다. 공동현상에 대한 정확한 해석이 이루어진다면 실험결과와 일치하는 해석 결과를 얻을 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구는 트림을 포함하는 글로브 밸브 내부의 유동을 상용 프로그램인 CFD-ACEA를 이용하여 해석하였으며, 3차원 유동해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 밸브의 플러그 개도가 25% 경우에만 공동현상이 감지되었으며, 50% 이상인 경우는 공동현상이 발생하지 않았다.
- 2) 플러그 개도에 따라 C_v 를 계산한 결과 25%를 제외한 세 가지 경우는 실험 결과와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 공동현상을 고려하여 수치해석을 수행한 결과 공동현상을 고려하지 않았을 때 보다 20% 개선된 C_v 값을 얻을 수 있었다. 그러므로 밸브 설계시 공동현상 해석은 고려되어야 하며 공동현상에 대해 정확한 해석이 필요하다.
- 3) 본 연구의 해석 결과를 분석해 볼 때, 그 동안 실험에 의존하여 얻어진 유량계수 특성곡선(C_v 분포)을 computer simulation을 통하여 구할 수 있다는 가능성을 보여주었다는데 큰 의의가 있다.

후 기

본 연구는 경기도 산·학·연 컨소시엄 연구과제로 수행되었으며, 키밸브기술(주)와 공동으로 연구되었다.

참고문헌

- (1) 배윤영, 1993, 유체 계통의 성능 최적화를 위한 펌프와 밸브의 선정, 한국원자력연구소 기술 현황 분석 보고서, KAERI/AR-371/93.
- (2) Les Driskell, 1983, Control-valve Selection and Sizing, Instrument Society of America.
- (3) J. Paul Tullis, 1988, "Cavitation Damage Characteristics of Valves", ASME, Pressure Vessel and Piping Conference, 88-PVP-22.
- (4) Chendong Huang, Rhyn H. Kim, 1996, "Three-Dimensional Analysis of Partially Open Butterfly Valve Flows", Journal of Fluids Engineering, ASME, Vol.118, pp. 562~568.
- (5) Control valve metric specification, 1995. Copes-Vulcan Inc.
- (6) CFD-ACE User Manual, Version 6.2, 2000, CFDRC.