

## 글로브 밸브에서의 유동특성에 관한 연구

### A Study on the Fluid Flows Characteristics of Globe Valve

양상민<sup>1</sup>, 박종학<sup>2</sup>, 김동진<sup>3</sup>, 김봉호<sup>1</sup>, 허태영<sup>1</sup>, 신성기<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(주)한빛파워서비스

대전광역시 서구 만년동 386

<sup>2</sup>한국가스공사 연구개발원

인천광역시 연수구 동춘동 973

<sup>3</sup>한국기계연구원

대전광역시 유성구 장동 171

#### 요 약

배관시스템에서 고차압 조절용으로 사용되는 글로브 밸브는 가장 흔히 사용되는 밸브이지만 매우 복잡한 유로형상으로 인해 내부에서의 유동특성을 파악하기 위한 접근이 매우 어려워, 아직까지 이에 대한 연구가 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 유형의 글로브 밸브에 대해 상용 열유체해석 프로그램인 Fluent를 사용하여 밸브 개도(100%, 75%, 50%, 25%)에 따라 유동해석을 수행하였다. 유동해석을 수행한 결과, 개도가 작은 경우에는 플러그에 의해 blockage가 발생하는 목 부분에서 극부적인 급격한 압력강하가 나타남을 알 수 있었다. 또한 본 연구결과의 정확성을 검증할 수 있도록 글로브 밸브의 개도에 따른 유체유동실험을 수행하여 해석결과와 비교하였으며, 비교 결과 실험값과 계산값이 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다.

#### ABSTRACT

Although the globe is the most typical valve to control high pressure drop in piping

system, it is very hard to figure out the characteristics of flow field in the globe valve caused by its complex geometry. So there is very few studies to find out flow characteristics of globe valve. In this study, numerical analysis for flow field in the globe valve is carried out using the Fluent code which is commercial CFD program. Pressure drop through the globe valve is also measured to verify the results come from numerical analysis. Comparing experiment with numerical analysis, two results are very close to each other.

## 1. 서론

고차압 조절용으로 가장 흔히 사용되는 글로브 밸브는 유체가 밸브를 통과하면서 상대적으로 큰 압력강하가 발생되는데, 밸브의 개도에 따라 압력강하뿐만 아니라 유량 변화도 수반된다. 버터플라이 밸브에서의 전산해석이나 유동특성을 알아보기 위한 시도들은 많이 있었지만[1,2], 글로브 밸브는 흔히 사용되면서도 유체가 흐르는 내부유로의 형상이 매우 복잡하기 때문에 밸브를 통과하면서 발생하는 압력강하를 미리 예측하는 것은 매우 어렵고, 또한 밸브내부에서 형성되는 유동도 밸브의 개도에 따라 상당히 복잡하고 다양한 양상을 보이게 된다. 이러한 이유 때문에 아직까지 글로브 밸브의 압력강하 특성을 이용하여 손실계수를 얻기 위한 연구들은 있었지만, 내부에서의 유동특성을 알아보기 위한 시도들은 거의 없었다. 국내에서는 윤준용[3] 등이 유동을 제어하기 위한 트림을 장착한 글로브 밸브에 대해 개도에 따라 3차원 유동장 및 캐비테이션 발생에 대한 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 상용 전산열유체해석용 프로그램인 Fluent를 이용하여 이러한 글로브 밸브에서의 유동장 해석을 수행하여 압력강하 및 유동특성을 알아보고, 이로부터 얻어진 해석결과의 타당성을 검증하기 위해, 동일 조건하에서 밸브에서의 밸브 개도에 따른 유체 유동실험을 수행하여 전산해석 결과와 비교 검토하였다.

## 2. 밸브 유동해석

본 연구에서는 밸브에서의 유동을 정상상태, 비압축성 난류유동으로 가정하여 유동해석을 수행하였으며, 밸브에서 일어나는 3차원적인 유동현상을 해석하기 위해 실제 밸브내부와 동일한 유로형상으로 계산모델을 구현하였다. 밸브에서의 압력강하 및 유동특성은 밸브의 개도에 따라 매우 다른 양상을 보이기 때문에, 밸브의 개도(스트로크 기준)에 따라

100%, 75%, 50%, 25% 4가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 그림 1은 해석에 사용된 밸브의 개략도이다.

## 2. 1. 전산해석기법

밸브에서의 유동을 해석하기 위해서는 다음과 같은 방정식들을 풀어야 한다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( v \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - u_i u_k \right)$$

(2)

이러한 지배방정식을 일반형으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k}) + S_\phi \quad (3)$$

여기서 좌변 항은 대류항이고, 우변의 첫 번째 항은 확산항이며,  $S_\phi$ 는 생성항이다.  $\phi=1$ 인 경우는 연속 방정식을 나타내고,  $\phi=U_i$ 인 경우는 운동량 방정식,  $\phi=T$ 인 경우는 에너지 방정식을 나타내며,  $\phi=k$ 와  $\varepsilon$ 인 경우는 난류 방정식을 나타낸다. 생성항  $S_\phi$ 는 각각의 지배방정식에 대해서 다른 형태로 표시된다.

유한체적법(FVM : Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식 (1)에 대한 차분방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i \phi_i) + S_c \quad (4)$$

범용 열유체해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 차분방정식 (4)의 해를 구하였다. FLUENT는 유동, 열전달, 상변화, 연소 등과 관련된 현상의 수치해석을 위해 개발된 프로그램으로 전처리장치인 GAMBIT 그리고 Solver와 후처리장치인 FLUENT로 구성되어 있다. FLUENT는 유한체적법을 기반으로 한 코드로서 속도 등 벡터량과 압력, 온도 등 스칼라 양을 같은 위치에 저장하는 비교차격자계(non-staggered grid)를 사용하며, 대류항을 계산하기 위한 차분방법들은 1차 상류차분법(First up-wind scheme) 2차 상류차분법(Second up-wind scheme), power-law scheme, 고차 상류차분법인 QUICK scheme을 선택하여 사용할 수 있다. 본 연구에서는 수렴성이 가장 우수한 1차 상류차분법을 사용하였다.

대부분의 해결해야 할 공학적인 문제가 난류현상을 포함하고 있어, 실제에 가까운 유동현상을 모사하고 정확한 결과를 얻기 위해서는 난류모델들이 반드시 도입 되어야 한다. FLUENT에서는 2-equation 모델로서  $k-\varepsilon$  모델을 기본으로 사용하고 RSM(Reynolds Stress Model)과 RNG(Renormalization Group) 모델을 선택적으로 사용할 수 있다. 수치해법은 기본적으로 SIMPLE algorithm을 사용하며 SIMPLEC와 PISO를 선택하여 사용할 수 있다.

$$U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + G_k + G_b - \varepsilon \quad (5)$$

$$U_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1(G_k + G_b) - C_2)$$

(6)

$$G_k = \nu_t \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i}, \quad G_b = \beta g_i \frac{\nu_t}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

계산결과에 대한 수렴판정은 다음의 전영역 잔류항의 총합이  $10^{-3}$  이하가 되는 시점으로 설정하였다.

$$\bar{R} = \frac{\sum_{nodesP} | [ A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + S_C - A_P \phi_P ] |}{\sum_{nodesP} | (A_P \phi_P) |} \leq 10^{-6} \quad (7)$$

## 2. 2. 계산격자 및 경계조건

그림 2에서 보여지는 바와 같이, 4가지 개도(100%, 75%, 50%, 25%)에 따라 육면체, 프리즘, 사면체 요소들로 이루어진 4개의 비정렬(unstructured) 계산격자가 생성되었다. 이들은 각각 188,787개, 195,433개, 240,748개, 245,898개의 셀로 구성되었다. 플러그가 하강함에 따라 목주위의 유로형상 및 유로단면적이 급격히 변화하기 때문에 유동변화 및 밸브에서 발생하는 압력강하 대부분이 이 부근에서 일어난다고 판단되어 많은 격자를 집중하였다.

또한 밸브 하류 쪽에서 발생하는 순환유동이나 backflow가 outlet에서 재유입 되어 계산결과에 영향을 미치지 것을 방지하기 위해, 밸브 하류 쪽 관의 길이를 충분히 길게 (8D) 모델링 하였다. 밸브 상류 역시 어느 정도 발달된 유동이 밸브로 유입되도록 하기 위해 길게 모델링 하였다.

실험결과와의 비교를 위해 실험에서 측정된 밸브의 개도에 따른 질량유량을 Inlet 조건으로 주었으며, 실험조건과 동일하게 작동유체인 물의 상태량( $\rho=998.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu=0.00 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ )을 상온에서의 값으로 설정하였다.

## 3. 해석결과 및 고찰

그림 3은 밸브의 4가지 개도에 따른 내부에서의 압력분포를 보여주고 있다. 개도가 큰 경우에는 밸브를 중심으로 서서히 압력강하가 일어나는 것을 볼 수 있지만, 개도가 작은 경우에는 밸브에서 발생하는 압력강하 대부분이 유동의 blockage가 발생하는 플러그와 목에 의해 좁아진 유로에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 특히 개도 50%와 25%에 대한 압력분포(그림 4 (c),(d))를 보면 좁아진 유로로 인하여 밸브의 상단과 하단이 마치 서로 격리된 부분인 것처럼 큰 압력차를 보이면서 급격한 압력강하를 나타내고 있다. 이러한 급격한 압력강하는 국부적인 포화증기압 이하로의 감소로 인한 캐비테이션 같은 밸브에 부

정적인 영향을 줄 수 있는 유동현상을 일으킬 수 있는 요인이 된다.

개도 50%와 25%에서 급격한 압력강하가 나타나는 목 부근에서의 압력분포를 보면(그림 4), 유로가 가장 좁아진 부분에서 유속이 증가하면서 압력이 감소했다가 목 부분을 통과한 후에는 속도가 감소하면서 다시 압력이 증가하는 것을 볼 수 있다.

플러그 하부에 작용하는 압력은 개도가 큰 경우에는 높지 않지만, 개도가 작은 경우에는 유동의 blockage가 커지면서 하부의 배부분과 동일한 압력이 작용한다.

개도에 따른 밸브내부에서의 유속분포를 그림 5에서 보여주고 있다. 개도 100%와 75%는 목부분을 통과한 유동이 관성에 의해 출구 쪽으로 약간 더 빠른 속도를 보이면서 흐르는 것을 볼 수 있다. 목을 통과한 유동은 플러그에 부딪히면서 밸브상부에 유입되어 플러그 옆면을 타고 출구 쪽으로 흘러간다.

낮은 개도에서 플러그에 의해 유로가 좁아지면, blockage에 의해 밸브하부의 배 부분에서는 유동이 정체된 것처럼 빠른 움직임이 보이지 않지만 플러그 주변의 좁은 유로에서는 매우 빠르게 흐르는 것을 볼 수 있다. 이러한 급격한 유속의 증가는 큰 압력강하를 일으키게 되고 좁아진 유로를 통과한 후에도 과도하게 떨어진 압력이 충분히 회복되지 못하게 되어, 결국은 밸브전체로는 큰 압력강하를 일으키게 된다. 이러한 현상은 유로가 좁아질수록 더욱 커지게 된다.

밸브내부에 형성되는 유동장을 좀 더 잘 이해하기 위해, 유동궤적을 그림 6에서 보여주고 있다. 개도에 따라 밸브하부의 배 부분에 큰 순환유동이 발생되는데, 개도 75%인 경우가 가장 큰 순환유동을 나타내고 있다. 플러그 주변의 유동을 살펴보면, 개도가 큰 경우에는 밸브상부와 플러그 사이의 공간에 순환되는 유동이 잘 나타나지 않지만, 개도가 작아지면(50%, 25%) 이 공간에 강한 순환유동이 발생되고, 좁은 유로를 통과한 유동은 여기서 순환되다가 출구로 나가는 것으로 나타난다. 이렇게 유동이 강하게 순환되다가 출구로 나가게 되면서 나선형의 궤적을 보이게 되는 것으로 미루어 선회류의 성질을 띠는 것으로 생각된다.(그림 6 (c),(d)).

#### 4. 실험결과와의 비교

전산해석으로부터 얻은 결과의 타당성을 확보하기 위한 밸브에서의 압력강하에 대한 해석결과를 실험결과와 비교해 보기 위해서, 계산결과로부터 밸브전단과 후단에서 각각 원주방향으로의 면에 작용하는 평균압력을 계산하였다. 그림 7은 동일한 조건에서의 실험결과와 전산해석결과를 비교한 것이다. 실험결과에 따르면 밸브의 개도가 감소할수록 유

량이 감소하며 압력강하가 증가하는 것을 볼 수 있다. 75%까지는 유량의 감소나 압력강하의 증가가 크지 않지만, 개도 50%부터는 밸브를 통과하는 유량이 급격히 감소하고 압력강하 역시 큰 폭으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

전산해석결과와 실험결과를 비교할 때, 개도 25%를 제외하면 서로 약간의 차이를 보이는 하지만 매우 근접한 값을 보이고 있다. 다른 경우에 비해 개도 25%가 실험결과와 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 모델링 오차, 특히 유동현상과 같은 이유로 발생되었을 것으로 판단되며 향후 상세한 검토가 요구된다.

## 5. 결론

배관 시스템에서 가장 흔히 사용되는 글로브 밸브에 대하여 상용 전산열유체해석 코드를 이용한 유동해석을 수행하였으며, 이 해석결과의 타당성을 알아보기 위해 실험결과와 비교 검토하였다. 실험으로 측정된 밸브 전·후단에서의 압력차와 해석에서 얻어진 결과는 약간의 차이를 갖고 있기는 하지만 비교적 잘 일치하고 있기 때문에 본 해석결과가 타당성을 갖고 있음을 알 수 있다. 다만 개도가 낮은 25%에 대해서는 좀더 심도 있는 연구가 계속 되어야 할 것으로 판단된다. 본 해석결과로부터 얻어진 글로브 밸브내부에서의 유동장에 대한 압력분포, 속도분포, 유동계적등과 같은 해석결과들은 밸브 내부에서의 유동특성을 이해하는데 상당한 기여를 할 것으로 판단된다. 또한 기존에 밸브회사에서 개발한 밸브의 손실계수나 유량계수등과 같은 성능평가를 위한 인자들을 구할 때 실험이 유일한 방법이었지만, 본 연구결과를 고려할 때 전산해석을 통해서도 얻을 수 있다는 것을 보여주고 있다. 이 해석결과를 토대로 밸브에서의 구조적 안정성을 평가하는 해석이 수행될 것이다.

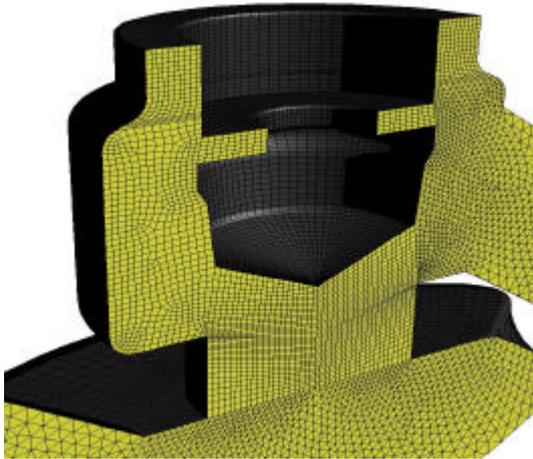
## 참고문헌

- [1] Chendong Huang, Rhyn H. Kim, "Three-dimensional analysis of partially open butterfly valve flows", J. of Fluids Engineering, ASME, Vol. 118, pp.562-568, 1996.
- [2] 박상원, 이상우, "공기조화용 버터플라이 밸브 하류에서의 3차원 유동특성", 대한기계학회논문집 B권, 제 24권 제 2호, pp. 260-269, 2000.
- [3] 윤준용, 변성준, 양재모, 이도형, "고차압 제어용 글로브 밸브 트림 내부의 3차원 유동장 해석", 유체기계저널 제 4권, 제 3호, pp. 14-20, 2001.
- [4] Fluent User's Guide Ver. 5

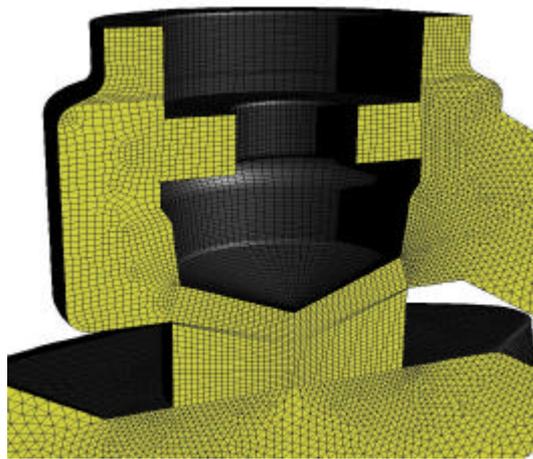


(a) open rate = 100%      (b) open rate = 50%      (c) open rate = 0%

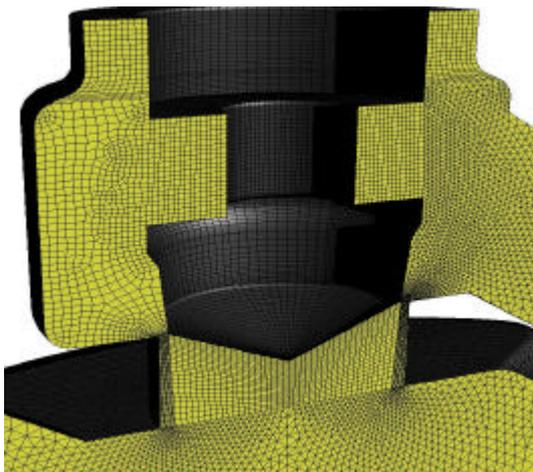
그림 1. Schematic diagram of the glove valve



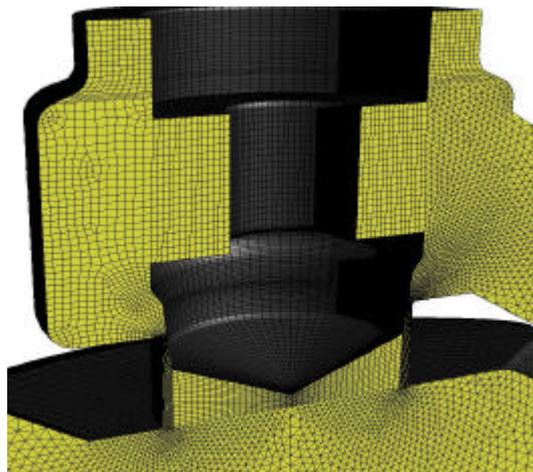
(a) open rate = 100%



(b) open rate = 75%

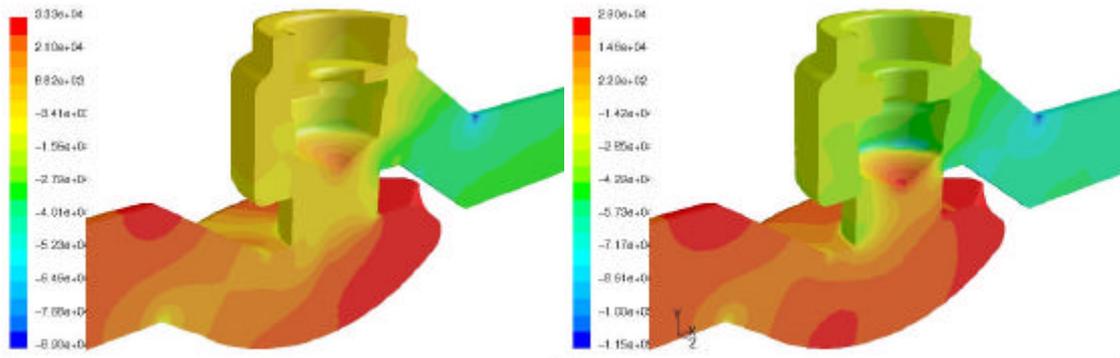


(c) open rate = 50%



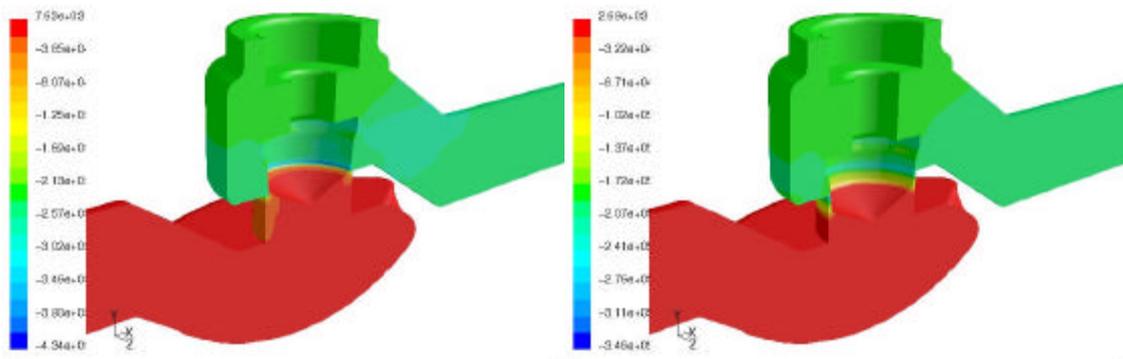
(d) open rate = 25%

그림 2. Computational grids for each cases



(a) open rate = 100%

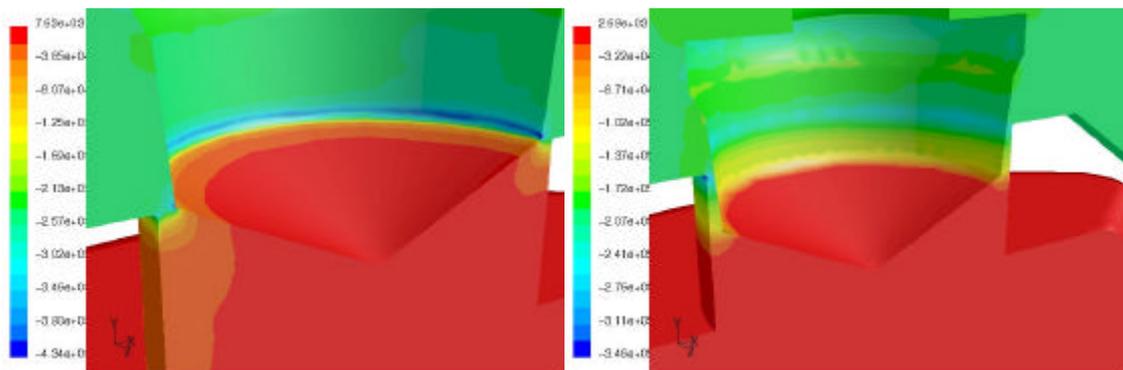
(b) open rate = 75%



(c) open rate = 50%

(d) open rate = 25%

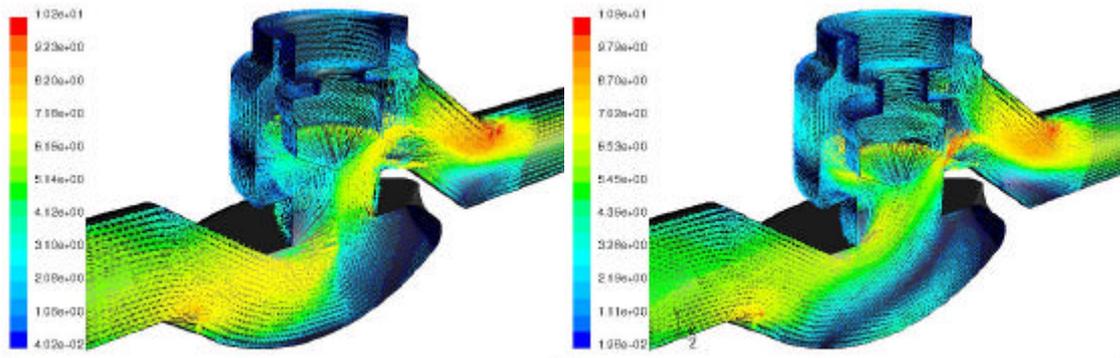
그림 3. Pressure contours with valve opening



(a) open rate = 50%

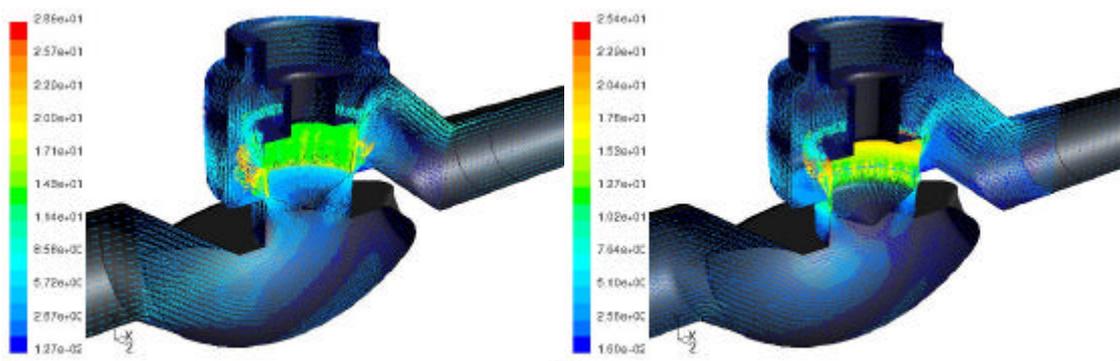
(b) open rate = 25%

그림 4. Detail pressure contours on the valve throat



(a) open rate = 100%

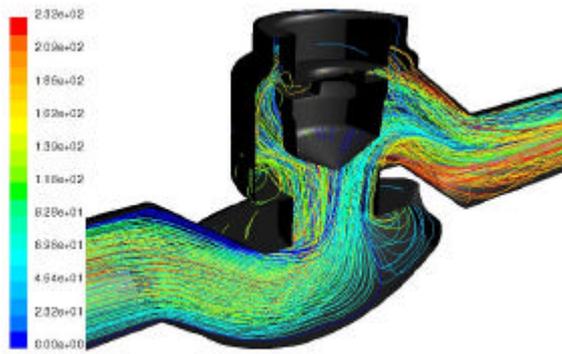
(b) open rate = 75%



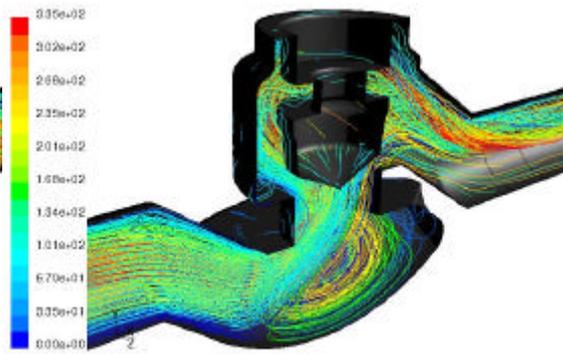
(c) open rate = 50%

(d) open rate = 25%

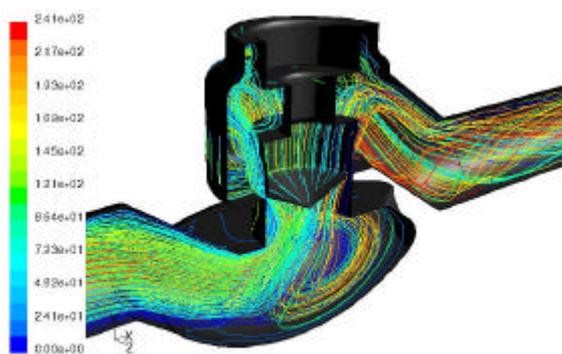
그림 5. Velocity vectors with valve opening



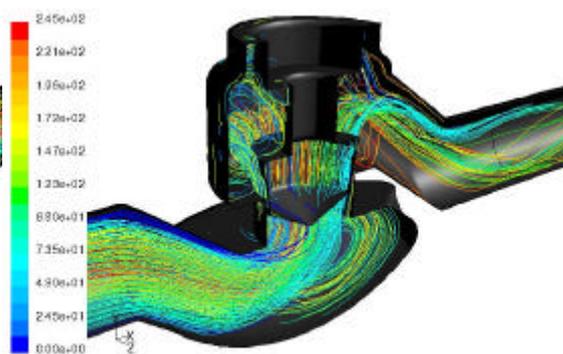
(a) open rate = 100%



(b) open rate = 75%



(c) open rate = 50%



(d) open rate = 25%

그림 6. Flow path line with valve opening

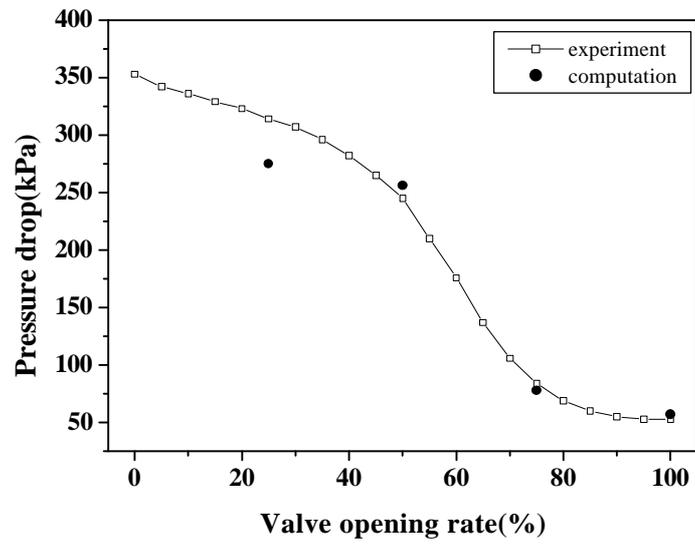


그림 7. Pressure drop with valve opening rate