

플러그 밸브의 포트형상 변화에 따른 유동특성 연구

최근우* · 박권종* · 김윤제**

A study on the flow characteristics in a plug valve with various port shapes

G.-W. Choi*, G.-J. Park*, Youn J. Kim**

Key Words: Non-lubricated plug valve(비윤활식 플러그밸브), Discharge coefficient(C_v : 유량계수), Resistance coefficient(K : 저항계수)

ABSTRACT

The functions of the plug valve are the control of flow rate as well closing and opening pipe lines. Analyses on the flow characteristics in plug valve port are required to improve the performance and safety at severe operating conditions such as high-pressure and high-temperature. In this study, numerical analyses are carried out with varying the opening rate (fraction of the full open to close) of the valve and the shapes of valve port: straight, convex, concave and mixed shapes. The parameters influencing the flow characteristics in the valve are the discharge coefficient(C_v) and the resistance coefficient(K). Therefore, the distributions of static pressure, velocity vector and stream lines are investigated, and C_v and K are calculated in each opening rate and shape. In case of full open, the static pressure passed through the valve port has almost been recovered. However, in case of other opening rates, the pressure does not permanently regained due to pressure drop leading to loss. This phenomenon in each shape of the valve shows the different behaviors. Calculation results show that the mixed shape has the best flow attribute.

1. 서 론

플러그(plug) 밸브는 원추형 플러그를 밸브 몸체 속으로 위에서 아래로 삽입하여 플러그를 수평면상에서 회전 작동시킴으로써 유로를 개폐할 수 있는 구조이며, 윤활 구조 또는 밸브 시트 사이의 마찰을 기계적으로 감소시킬 수 있는 구조를 가진 록의 일종이다. 사용유체가 부식성, 유독성이 있어서 누출되어서는 안 되는 공정라인 즉, 석유화학, 발전소 등의 액체 및 화학약품 배관의 유로 개폐를 위하여 사용되는 밸브이기

때문에 제품의 불량으로 인하여 유발되는 피해는 매우 크다고 할 수 있다.

플러그 밸브의 종류는 기밀 유지 방식에 따라 비윤활식 플러그 밸브(라인드, 슬리브 형)와 윤활식 플러그 밸브로 구분된다. 비윤활식 플러그 밸브는 밀봉요소로서 금속 시트, 합성수지 또는 탄성체 슬리브, 전체 또는 부분적인 라이닝이나 코팅 등을 사용하므로 윤활유가 필요하지 않기 때문에 유체오염이 발생하지 않는다. 밸브를 사용하는 동안 슬리브가 이탈이나 단락되는 것을 방지하기 위하여 기계적으로 구속되고, 몸체의 경우도 이탈방지가 가능하다면 라이닝 또는 피복시 접합하거나 기계적으로 구속시키는 방법을 채택한다.⁽¹⁾ Fig. 1은 일반적인 플러그 밸브 및 플러그 스템이며, Fig. 2

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

E-mail : kimyj@me.skku.ac.kr

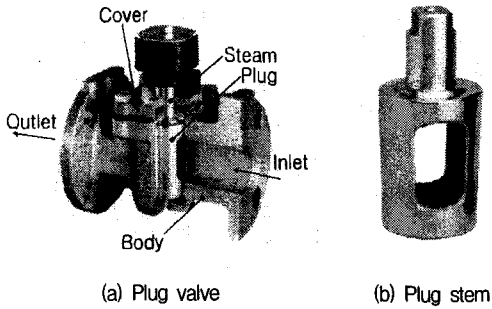


Fig. 1 Plug valve & plug stem

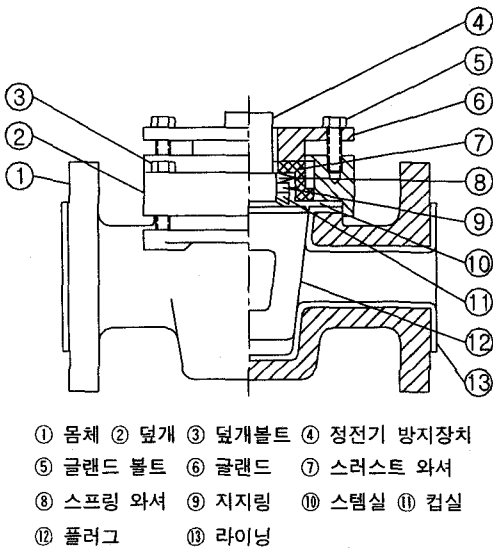


Fig. 2 Non-lubricated plug valve

는 비윤활식 플러그 밸브의 개략도이다.

배관망의 건전성을 배가시키고 밸브 성능을 높이기 위해서는 개도를 변화시켜가면서 밸브의 유량계수(C_v), 저항계수(K), 압력강하에 따른 제반 관계식을 구하는 해석이 수반되어야 하고, 이를 통해 포트 형상 및 밸브 개도등의 변화에 따른 유동특성을 예측하는 것이 필요하다.

플러그 밸브 개발에 있어서 한가지 설계변수의 변경은 예측치 못한 여러 부분에 영향을 미치기 때문에, 유체역학적인 지식기반이 없는 상태에서의 밸브개발은 실험에 의한 시행착오를 거쳐 이루어질 수밖에 없다. 그러므로 유동현상에 대한 종합적인 이해 없이는 많은

개발자금 및 시간의 낭비가 불가피하다. 또한, 해석 결과에 대한 분석능력이 없이는 동일한 실수를 다음 설계시에 반복하게되므로 예산 및 시간의 중복 소요가 이루어지게 된다. 따라서 밸브 내부유동에 대한 종합적인 이해 및 각각의 설계인자들 사이의 상호 연관성을 규명하는 것은 매우 중요한 연구과제라 할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 플러그 밸브 포트의 형상과 개도 변화가 유동특성에 미치는 영향을 고찰하여 적절한 유량계수를 가지면서 손실을 최대한 줄일 수 있는 포트형상을 찾고자 한다.

2. 기초 이론

2.1 지배방정식

정상상태의 난류유동을 해석하기 위한 시간 평균된 지배방정식을 텐서 형태로 표현하면 다음과 같다.

연속 방정식:

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

운동량방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

에너지 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h - F_{h,j} - u_i \tau_{ij}) = 0 \quad (3)$$

여기서 τ_{ij} 는 점성항이고, $F_{h,j}$ 는 에너지 방정식의 확산항으로 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j} \quad (4)$$

$$F_{h,j} = \kappa \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_j h'} \quad (5)$$

본 연구의 유동해석에 사용된 상용코드 CFD-ACE는 다음 식과 같이 레이놀즈 응력을 평균 평형률의 선형 함수로 간주하는 일반화된 Boussinesq 와점성 개념 (generalized Boussinesq eddy viscosity concept)을 사용하고 있다.⁽²⁾

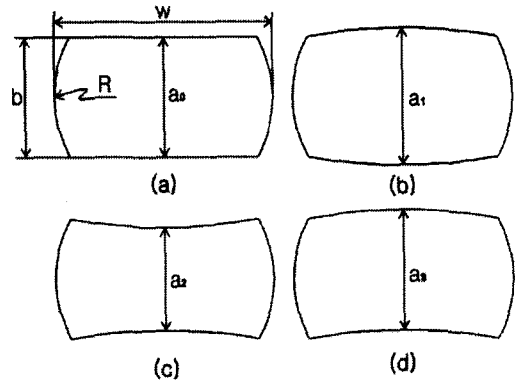
$$-\overline{\rho u_i'' u_j''} = \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \overline{\rho k} \delta_{ij} \quad (6)$$

여기서, μ_t 는 난류 와점성계수 (turbulent eddy viscosity coefficient)이다. μ_t 를 예측하는데 있어서 여러 가지 난류모델이 존재하는데, 본 연구에서는 Launder & Spalding (1974)이 제시한 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.⁽³⁾ 위와 같은 비선형 지배방정식의 해를 구하기 위해 유한체적법 (finite volume method)을 사용하여 이산화하였고, 상류 차분 도식 (upwind scheme)을 이용하였다. 이산화를 통하여 구해진 각각의 변수에 대한 방정식은 SIMPLEC 알고리즘을⁽⁴⁾ 사용하여 계산하였다.

2.2 해석 모델 및 격자계

수치해석영역은 주된 관심사가 되는 밸브를 중심으로 플러그 부분을 대상으로 하였다 (Fig. 1 참조). 밸브내부의 유동 특성을 고찰하기 위하여 플러그 부분을 중심으로 하여 2차원 격자계로 구성하였고, 중간에 플러그 부분을 회전시키면서 격자를 생성하여 개도 변화에 반영하였다. 작동유체로써 상온의 공기를 사용하였으며, 입구 속도는 대기압하에서 1m/s로 하였고, 플러그 내부의 형상은 기존 형상 (Fig. 3(a))을 기준으로 볼록한 형상 (Fig. 3(b)), 오목한 형상 (Fig. 3(c)), 그리고 혼합 형상 (Fig. 3(d))으로 재구성하여 수치해석을 실시하였다 (Figs. 3과 4 참조).

Fig. 3은 밸브내부의 유동을 모사하기 위하여 밸브의 입구로부터 출구까지 4가지 형상에 대한 격자계를 도시한 것이다. Fig. 4(a)는 기존 형상($a_0/a_0=1$)을 2차원 격자로 구성한 것이며, Fig. 4(b)는 볼록한 형상 ($a_1/a_0=8/7$)으로, Fig. 4(c)는 오목한 형상($a_2/a_0=6/7$), 그리고 Fig. 4(d)는 Fig. 4(b)와 4(c)를 겹쳐서 혼합 형상($a_3/a_0=1$)으로 모사하여 격자계를 구성하였다.



$$b = 28, w = 55, R = 27.5, \\ a_0 = 28, a_1 = 32, a_2 = 24, a_3 = 28(\text{mm})$$

Fig. 3 Configuration of various plug ports

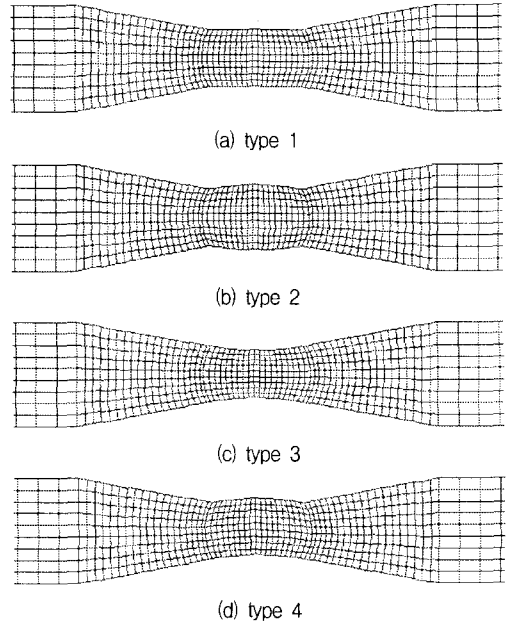


Fig. 4 Grid systems of four different plug ports(60×10)

3. 결과 및 고찰

3.1 기존 형상에 대한 결과

Figs. 5-7에서 기존의 형상에 유량을 일정하게 주고 밸브 개도 변화에 따른 속도와 유선의 흐름과 정압 분

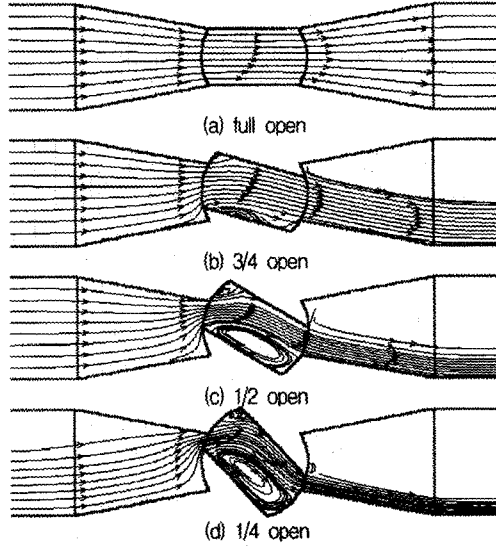


Fig. 5 Stream lines with different opening rates (type 1)

포를 도시하였다. 먼저 완전개방시의 유체 유동을 살펴 보면 유선의 흐름 (Fig. 5(a))에서 마치 벤츄리 수로 (venturi flume)형상과 같은 모사된 형상을 통해 유체가 입구로 유입되어 플러그 부분을 지나 출구로 매끄럽게 흘러가는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 6(a)에 도시한 정압분포에서는 플러그의 입구와 출구부분에서 약간의 정체영역으로 인해 압력차이가 발생하지만 손실이 거의 회복됨을 알 수 있다. 플러그를 회전하여 개도 변화를 주어 유동특성을 살펴보면, 이때의 유선 (Figs. 5(b), 5(c), 5(d))을 통해 플러그의 회전으로 인하여 플러그 상류측 아래와 하류측 위 부분에 정체영역이 생성됨을 알 수 있다. 플러그 내부에서도 완전 개방시에는 볼 수 없었던 와류(vortex)가 발생하기 시작하여 유체의 흐름을 방해함을 알 수 있다 (Fig. 5(b)). 유동장의 왜곡으로 인한 정체영역의 발생은 밸브 개도가 줄어들수록 와류(vortex)의 성장으로 인해 더욱 커져 (Fig. 5(c)), 결국 플러그 내부 전체에서 정체현상을 보이고 있다 (Fig. 5(d)). 정압분포 (Figs. 6(b), 6(c), 6(d))에서도 완전 개방시 (Fig. 6(a))와는 달리 개도 변화에 따라 정체영역이 증가하였고, 압력강하 현상이 점차 심화됨을 알 수 있다.

해석 영역 내부에서 와류(vortex)의 성장으로 인해 발생하는 이러한 정체영역은 유체의 흐름을 방해하고 압력강하로 이어져 손실을 발생시키는 주요 요인이 된

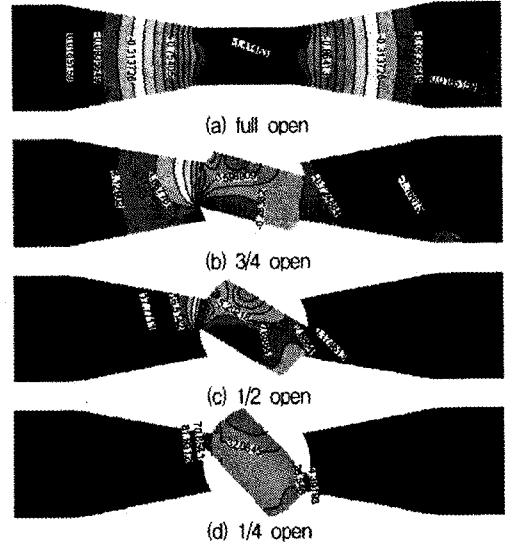


Fig. 6 Contour plots of pressure distribution (type 1)

다. 결국 개도가 줄어들 경우 정체영역을 줄여 손실을 최대한 줄일 수 있는 적합한 플러그 형상을 모사하는 것이 밸브 성능을 높이는 중요한 인자가 됨을 유추할 수 있다.

3.2 Plug Stem 형상 변화에 따른 결과

개도가 변화되었을 때 정체영역을 줄여 손실을 줄이기 위해 기존의 플러그 형상에 변화를 주어 여러가지 형상에 대해 일정유량조건에서의 유동장을 고찰하였다. Fig. 7에 도시한 것처럼 완전 개방시 각 형상에 대한 유동을 보면 비교적 모든 형상에서 매끄럽게 입구로 유입되어 정체영역 없이 플러그 부분을 지나 출구로 빠져나가고 있다. 또한, 손실의 정도를 나타내는 정압분포에서도 정체영역이 발생하는 부위의 차이는 있지만, 압력차이에 의한 손실은 각 형상 모두 곧 회복되었다 (Fig. 8 참조). 단지 주목할 점은 Fig. 9에 도시한 것처럼 오목한 형상(type 3)의 경우 다른 세 가지 형상에 비해 차이를 나타내고 있는데, 그 이유는 모사된 형상 모두가 마치 벤츄리 수로(venturi flume) 형상을 닮은 풀이지만 목(throat)부분의 형상이 타 형상에 비해 조금더 유선에 가깝게 모사되어 그 만큼 유체가 흘러가는데 유리하기 때문이다. 이에 따라 플러그 입·출구 근처에서 발생할 수 있는 정체현상, 다시 말해 돌연 확

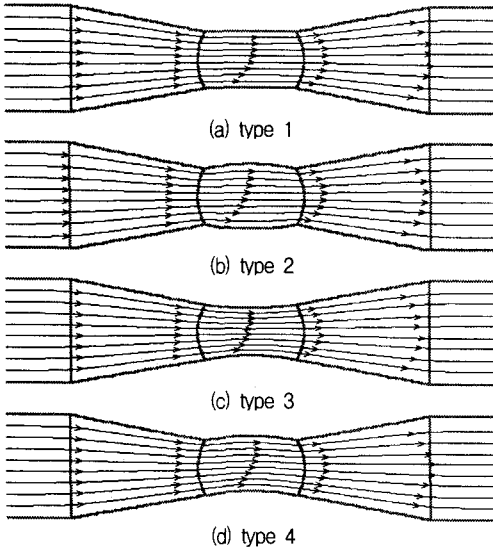


Fig. 7 Stream lines for various port types with full open

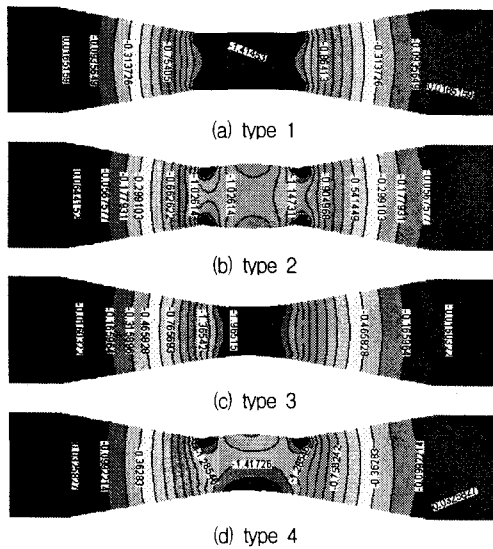


Fig. 8 Pressure contours for various port types with full open

대나 돌연 수축으로 인한 손실을 최대한 줄일 수 있는 것으로 판단된다.

Figs. 10-12에서는 각 형상의 플러그를 회전하여 개도에 변화(1/2 open)를 주어 손실을 발생시키는 주요 요인이 되는 정체영역의 변화를 살펴보았다.

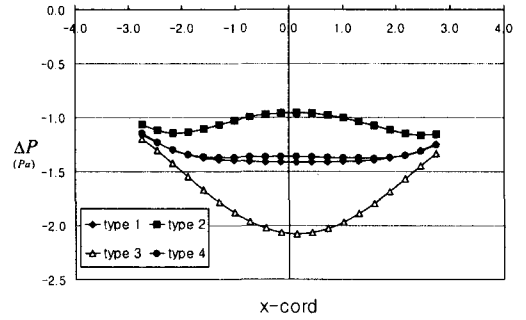


Fig. 9 Pressure drop for different port types with full open

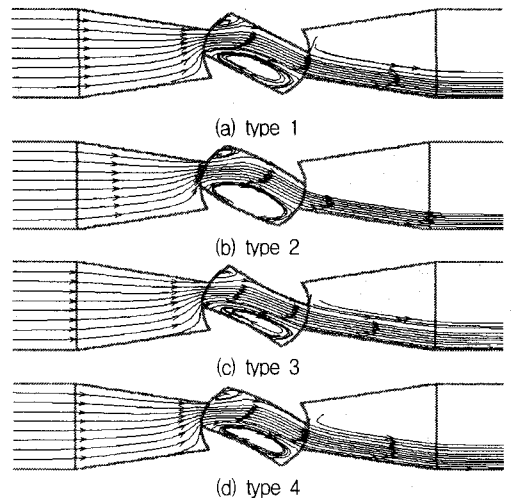


Fig. 10 Stream lines for various port types with 1/2 open

Fig. 10에 도시한 유선의 흐름을 보면 완전히 개방되었을 때에는 볼 수 없었던 회전하는 부분, 즉 와류(vortex)가 형성되어 정체영역이 플러그 내부의 상부와 하부에서 발달하고 있음을 알 수 있고, Fig. 5에서와 같이 개도가 줄어들수록 이 부분은 더욱 급격히 커지는 경향을 나타내었다. 커지는 이러한 와류 형성을 방지하고, 정체영역을 최소화 할 수 있는 플러그 포트 형상을 찾아내기 위해 Fig. 10의 결과를 살펴보면 오목한 형상(Fig. 10(c))일 경우 타 형상에 비해서 유체 흐름을 방해하는 정체영역이 상당히 줄어들었고, 특히 볼록한 형상(Fig. 10(b))에 비해서는 1/3가량 줄어들었음을 알 수 있다. Figs. 11과 12는 개도 변화를 주었을 때 각 형상의 정압분포와 플러그 부분에서의 압력강하를 나타내고 있다.

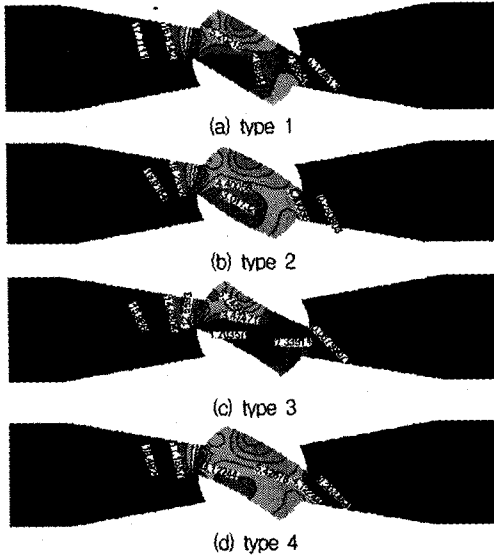


Fig. 11 Pressure contours for various port types with 1/2 open

압력강하 현상은 Fig. 10의 정체영역 크기에 비례한 결과를 낳고 있는데, 정체영역이 가장 작은 오목한 형상이 압력 손실 부분에 있어서도 다른 형상에 비해 그 손실정도가 작은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 통하여 산업현장에서 유로 개폐에 사용되고 있는 비윤활성 플러그 밸브의 성능향상을 위한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유동장의 왜곡으로 인한 정체영역의 발생은 밸브의 개도가 줄어들수록 와류(vortex)의 성장으로 인해 더욱 커져 유체의 흐름을 방해하여 결국 플러그 내부 전체에서 정체현상을 보였다.
- (2) 개도가 줄어들 경우 정체영역을 줄여 손실을 최대한 줄일 수 있는 적합한 플러그 형상을 모사하는 것이 밸브 성능을 높이는 중요한 인자가 됨을 알 수 있었다.

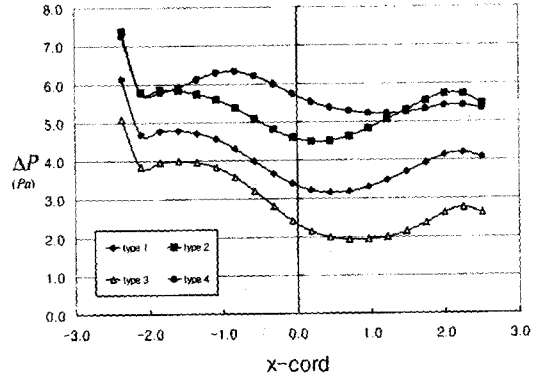


Fig. 12 Pressure drop for different port types with 1/2 open

- (3) 연구 초기에는 볼록한 형상(type 2)이 밸브의 손실을 줄일 수 있는 최적의 포트형상이라고 가정을 하고 시작하였지만, 오목한 형상(type 3)의 밸브가 손실을 최소화하기 더 적합한 형상이라는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 기존의 포트형상에 변화를 주어 손실을 최소로 줄일 수 있는 포트의 기본형상을 개발하였다. 향후 연구에서는 기본형상을 토대로 하여 좀 더 나은 형상에 대한 연구가 요구되고, 실증실험을 통한 검증이 필요할 것이다.

참고 문헌

- (1) API STANDARD 599, Steel and Ductile Iron Plug Valves.
- (2) CFD Research Corporation, 1998, CFD-ACE, Theory Manual-Version 5, CFD Research Corporation.
- (3) Versteeg, H. K. & Malalasekera, M., 1995, An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method, John Wiley & Sons Inc., New York.
- (4) Patankar, S. V., 1980, Theoretical Hydrodynamics 5th ed., Hemisphere, New York.