

## CNG 충전소 배관시스템용 고압 차단밸브에 대한 내부 유동해석에 관한 연구

### A Study on the Internal Flow Analysis of High-pressure Shut-off Valve for CNG Charging Station Piping System

진도훈<sup>1\*</sup>

Do-Hun Chin<sup>1\*</sup>

#### 〈Abstract〉

CNG, which has recently been attracting attention as an alternative fuel in the transportation field to reduce emissions caused by global warming, is natural gas with abundant reserves and mainly composed of methane. Being in a gaseous state, natural gas requires the compression and liquefaction processes for transportation. Until now, general shut-off valves for liquid and gas piping have been developed in Korea, but there are few studies on shut-off valves for high pressures of about 200 bar. Currently, research on the flow analysis of valves is being actively conducted around the world. However, there are relatively many studies on large valves such as low-pressure valves or shipbuilding and marine, and the safety factor through structural analysis to check the structural integrity of the valve is checked at the design stage. Since it is necessary to have a fast response speed while minimizing pressure and speed loss due to flow change, basic research was conducted on the flow analysis of the valve to secure design data, and the numerical analysis was performed on high-pressure automatic shut-off valves applied to CNG refueling stations. After securing the basic valve shape through reverse engineering for advanced products, we compared the valve flow coefficient Cv coefficient with advanced products. As a result, it was found that the reverse engineering model was at the level of about 60%. However, we compared the Cv coefficient by modifying the reverse engineering model, and the result showed that it was improved to about 96%.

*Keywords : CNG Station, Shut-Off Valve, Numerical Analysis*

---

<sup>1\*</sup> 정회원, 교신저자, 부산가톨릭대학교 산업보건학과, 조교수 <sup>1\*</sup> Dept. of Industrial Health, Catholic University of Pusan  
E-mail: chindh@cup.ac.kr

## 1. 서론

최근 지구 온난화로 인해 배출가스 저감을 위해 수송분야에서 대체연료로 주목받는 CNG는 매장량이 풍부하고, 메탄이 주성분인 천연가스이다. 천연가스는 기체상태이기 때문에 수송을 위해서 압축시켜 액화시키는 과정이 필요하다. 이러한 액화를 통해 부피를 줄여 기체상태에서  $-196^{\circ}\text{C}$ 로 냉각하여 압축시킨 것이 LNG이며, 이를 200bar로 압축시킨 것이 CNG이다.

현재까지 일반적인 액체 및 기체 배관용 차단밸브는 국내에서 개발되었지만 200bar 정도의 고압용 차단밸브에 대한 연구는 거의 진행

되지 못하고 있다. 그 이유는 대부분 소량으로 수입되어 사용되고 있기 때문에 국내 연구는 상대적으로 미흡하다. 반면 해외의 경우 오일 메이저를 중심으로 설비를 공급하는 회사 및 연구기관에서 천연가스 시스템에 사용되는 밸브류에 대한 연구 및 개발은 꾸준히 이루어지고 있으며, TESCO사의 경우 선두적인 위치에서 고압 밸브류에 대한 연구 및 개발을 진행하고 있다.

현재 밸브에 대한 유동해석은 전세계적으로 연구가 활발하게 진행되고 있지만 대부분 저압용 밸브류나 조선해양 등 대형 밸브에 대한 연구가 상대적으로 많이 진행되고 있다. 또한 밸브의 구조 건전성을 확인하기 위한 구조해석을 통한 안전율 등을 설계단계에서 확인하고 있다.

자동 차단밸브는 CNG 충전소 및 기타 고압 배관 시스템에 장착되며, 응답속도는 70ms로 높은 반응 속도를 가지는 밸브이다. 따라서 자동 차단밸브의 경우 높은 응답속도에 따른 차단 성능이 밸브의 가장 핵심적인 성능이라 할 수 있다.

자동차단밸브는 밸브의 입구부로 압력이 들어오면 스템 조립체가 밸브의 축을 기준으로 상-하 이동함으로써 출구부의 압력이 빠져나가는 구조로 되어 있다.

이때 입구부로 들어오는 압력을 밸브 상부의 스프링과 힘의 평형을 유지하면서 요구되는 유량값을 유지하며, 입구측 압력이 낮아질 경우 밸브는 차단된다.

유동 변화에 의한 압력과 속도 손실을 최소화 하면서 빠른 응답속도를 가져야 하기 때문에 밸브의 유동해석이 기초적으로 연구를 진행하여 설계 자료를 확보하고자 한다[1-3].

## 2. 수치해석 방법

본 연구에서는 밸브 내부를 흐르는 유동을 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정한 유동해석을 수행하였다. 배관에서 속도분포 및 압력을 산출하기 위해서 사용된 지배방정식은 연속 방정식과 운동량 방정식이며, 난류모델은 이미 산업계에서 타당성을 검증받은  $k-\epsilon$  모델을 사용하고자 하였다.

수치해석 기법으로는 지배방정식에서 압력과 속도의 연결은 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)에 따른 Segregate Flow 알고리즘을 사용하였으며, 해석결과를 취득하기 위한 수치해석의 환경은 정상상태에서 반복 계산 시 종속변수들의 수렴 판정은 출구 유량이 변하지 않고 안정적인 값으로 고정된 계산결과가 나타날 때와 정상상태에서 반복 계산 시 종속변수들의 수렴 판정은 잔차 값이  $10^{-3}$ 이하에 도달하면 수렴

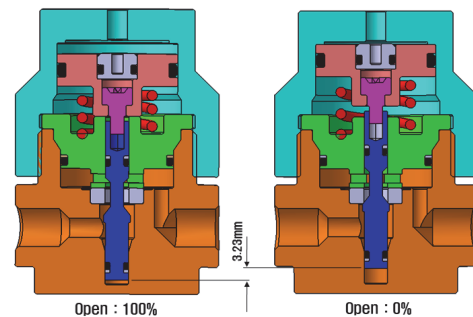


Fig. 1 Configuration of high pressure shut-off valve

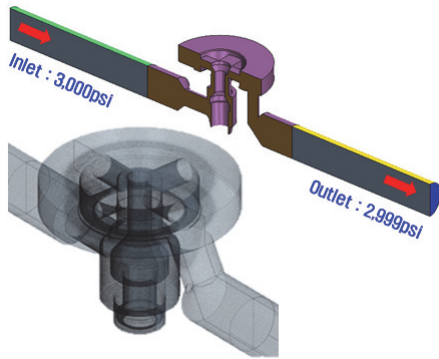


Fig. 2 Boundary conditions and mesh shape

판정의 기준으로 삼았다[4-7].

Fig. 1은 본 수치해석에서 적용되는 고압 자동 차단밸브 내부형상을 나타내고 있으며 밸브 열림 0%와 100%일 경우를 비교한 것이다.

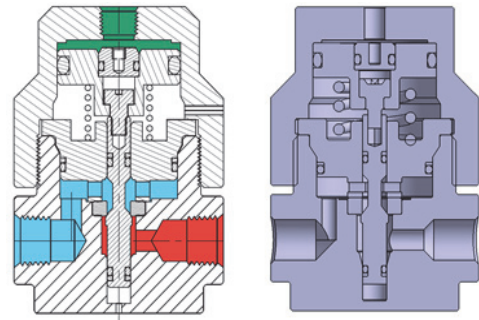
Fig. 2는 경계조건과 Volume mesh의 형상을 나타내고 있다. 경계조건의 경우 입구에서 3,000psi의 압력으로 유입되고, 출구의 경우 2,999psi의 압력으로 토출하는 조건을 부여하였다. 이러한 이유는 밸브의 유량계수 Cv값을 예측하기 위함이다.

유량계수 Cv는 밸브의 개도를 일정하게 하고, 60°F(16°C)의 청수를 밸브 입구, 출구 전후의 차압을 1psi(0.0703kgf/cm<sup>2</sup>)로 유지한 상태로 1부 동안 흐른 유량을 US Gallon/Minute(US Gallon)으로 표시한 계수로 밸브의 특성을 구분 짓는 중요한 설계 인자이며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_v = Q \left( \frac{\Delta p_0}{\Delta p} \times \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} = Q \left( \frac{G}{\Delta p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서 Q는 유량을(gal/min) 나타내며, Δp<sub>0</sub>는 기준차압, Δp는 밸브에서의 차압이며, ρ<sub>0</sub>는 액체의 기준밀도를 나타내며, ρ는 액체 밀도를 나타낸다. 또한 G는 액체의 비중을 나타낸다.

Fig. 3은 개발대상 선진제품인 ‘TESCOM’사의



(a) original (b) revers engineering

Fig. 3 Comparison of original and revers engineering models

모델과 역설계 모델을 비교한 것이다. 선진제품의 밸브 Cv값은 카탈로그에서 0.75를 제시하고 있었다. 따라서 역설계를 통해 개발하고자하는 밸브에 대한 유동해석을 통해 Cv값을 카탈로그 값과 확인하고자 한다.

### 3. 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 4는 밸브 열림율에 따른 스템의 위치를 나

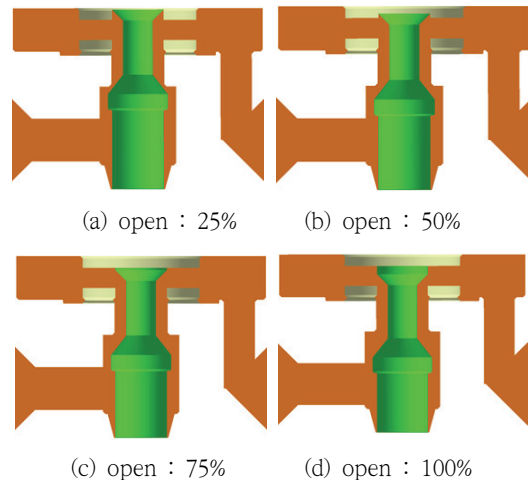


Fig. 4 Comparison of valve opening shape

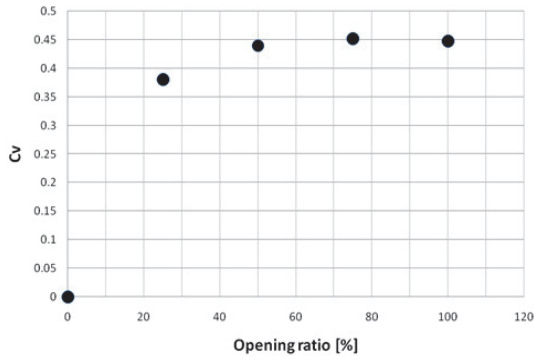


Fig. 5 Result of valve flow coefficient(Cv) for revers engineering model

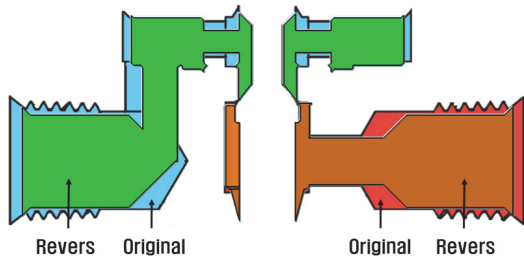


Fig. 6 Comparison of original and revers engineering models about fluid passageway

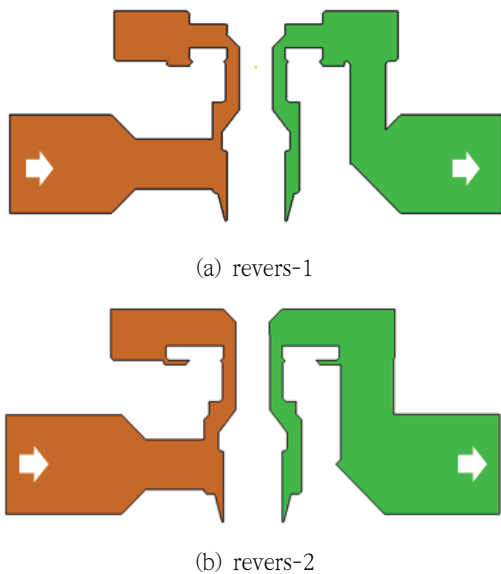


Fig. 7 Comparison of revers model fluid passageway

타내고 있으며, 열림 0%와 100%에서 스템의 행정은 3.23mm이다.

Fig. 5는 역설계를 통해 개발된 모델에 대하여 밸브열림 양에 따른 Cv값을 나타낸 것이다. 밸브가 50% 이상 열림 이후 Cv값이 약 0.45로 거의 최대가 되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 선진제품에 비해 Cv값 0.75에 비해 확연히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 원인을 파악하기 위하여 두 모델의 유동영역을 Fig. 6과 같이 비교한 결과 선진제품과 역설계 모델의 유동통로의 차이가 발생함을 확인할 수 있었다. 특히 역설계 모델의 경우 선진제품에 비해 유로의 단면적이 상대적으로 좁아 유체가 지나가는 통로가 좁아져 유량계수 Cv값이 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 7과 같이 역설계 모델을 수정하여 선진제품과 거의 동일한 수준으로 유동 통로를 확보하여 수치해석을 수행하였다.

Fig. 8과 Fig 9는 역설계 모델에 대한 압력분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 밸브 열림 각도가 증가에 따른 스템이 하강하면서 밸브가 열리게 되고 이 때 밸브 목을 통해 유동이 빠져나가면서 밸브 키퍼로 유입되면서 키퍼 내부에 압력분포가 증가하였고, 다시 출구로 빠져나가면서 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 역설계 모델 -1과 모델-2와 비교하면 밸브 내부에서 유동이 잘 빠져나갈 수 있도록 밸브 스템을 지나 밸브 키퍼의 형상과 출구 통로를 수정한 결과 밸브 키퍼에서의 압력 낮게 분포하여 유동저항이 감소하였음을 확인할 수 있었고, 출구 지점 또한 유동 저항이 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서 밸브 내부에 유동경로를 변경한 역설계 모델-2에서 밸브 내부 유동저항이 저감되고, 유동장이 지나가는 경로를 확대함에 따라 밸브 내부에서 정체되는 유동이 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 10과 Fig. 11은 역설계 모델에 대한 속도 크기 분포를 나타내고 있다. 밸브열림 양에 대한

모델별 속도분포를 살펴보면 밸브 상부에 설치된 커퍼에서 모델-1의 경우 속도분포가 모델-2에 비해 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 커퍼 내부에서 유동이 출구로 잘 빠져나가지 못함에 따

라 정체압이 발생하였기 때문에 속도크기가 낮게 분포하는 것을 알 수 있었다.

또한 출부지점의 경우 모델-1은 모델-2에 비해 유동통로의 직경이 확대관에서 축소관으로 바뀌어

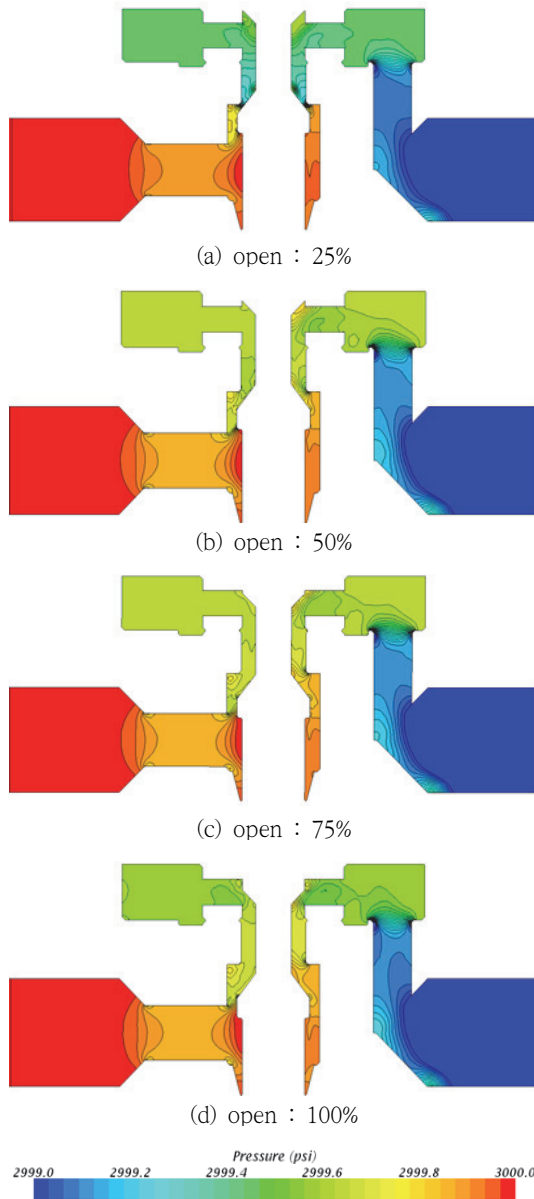


Fig. 8 Comparison of pressure distributions according to valve opening ratio at revers-1

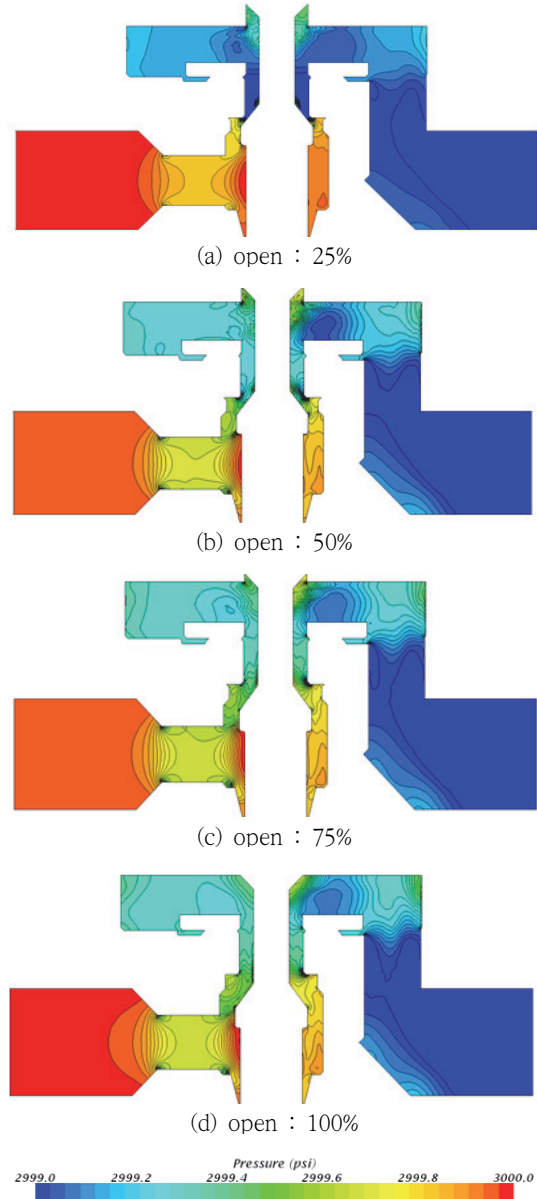


Fig. 9 Comparison of pressure distributions according to valve opening ratio at revers-2

토출되는 형상이기 때문에 밸브 키퍼에서 정체압이 발생하여 속도크기가 낮고 토출관 직경이 좁기 때문에 상대적으로 빠른 속도로 토출됨에 따라 최

종 출구에서 유동장이 밑으로 크게 쓸림현상이 발생함을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 역설계된 밸브를 일부 수정하여 유동통

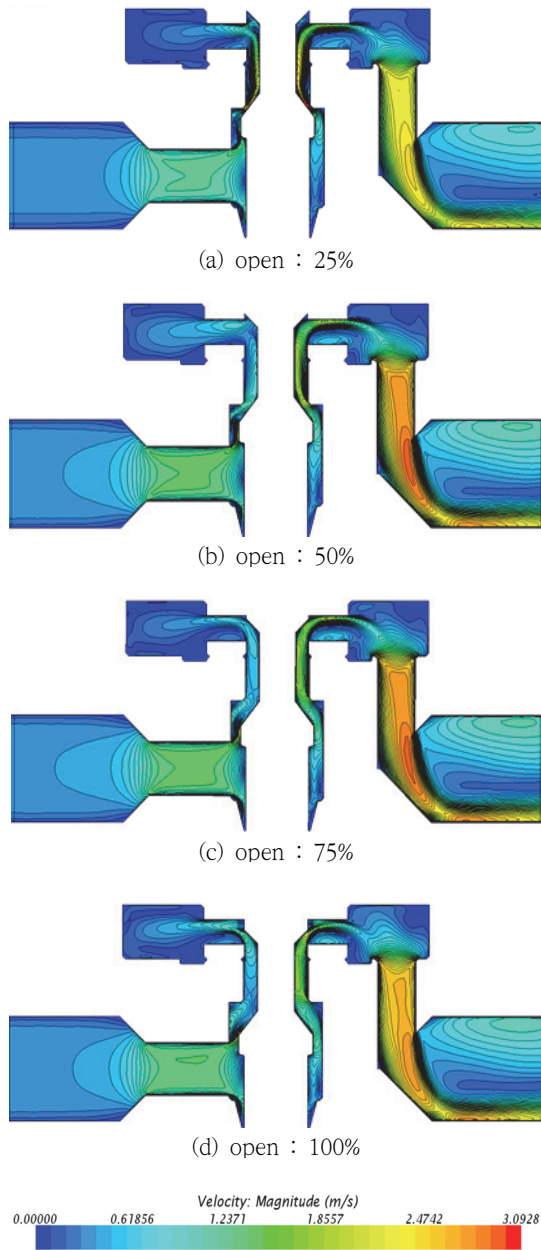


Fig. 10 Comparison of velocity distributions according to valve opening ratio at revers-1

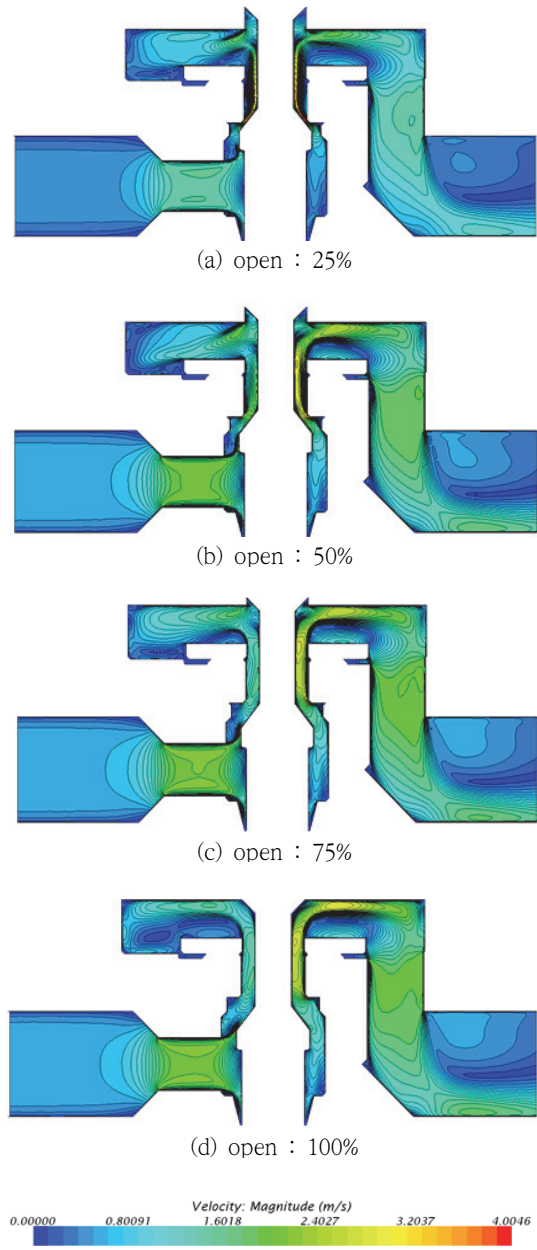


Fig. 11 Comparison of velocity distributions according to valve opening ratio at revers-2

로를 설계변경한 후 밸브 열림율에 따른 유량계수  $C_v$  값을 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이  $C_v$  값이 0.45에서 0.72로 상승된 것을 확인할 수 있었다.

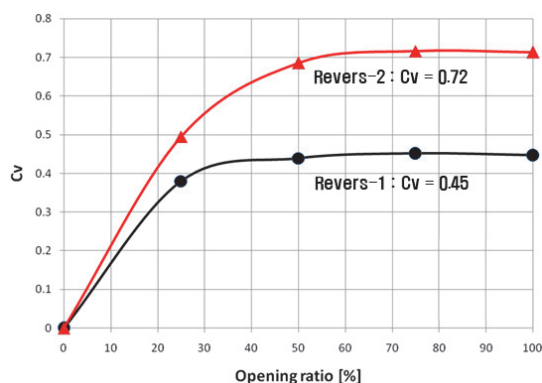


Fig. 12 Comparison of revers model fluid passageway

#### 4. 결론

CNG 충전소에 적용되는 고압 자동 차단밸브에 대한 유동해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

선진제품에 대한 역설계를 통해 기본적인 밸브 형상을 확보한 후 선진제품과 역설계 모델의 밸브 유량계수  $C_v$  계수를 비교한 결과  $C_v$  계수는 역설계 모델이 선진제품의 약 60% 정도의 수준임을 확인할 수 있었다. 그러나 역설계 모델을 수정하여  $C_v$  계수를 비교한 결과 약 96% 수준까지 향상되었음을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2020년도 부산가톨릭대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] Kim. J. W., "Safety Estimation of High Pressure Drop Control Valve for Offshore Structures", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 5, pp.553~558, 2011.
- [2] Jeong. H. S., Nam. J. W., "Experimental Analysis of the Static and Dynamic Characteristics for a Pilot Proportional Pressure Control Valve" Proceedings of KSPE Autumn Conference, Vol. 8, No. 4, pp. 9-16, (2011).
- [3] Kwak. K. M., Cho. J. S., Kim. J. D. and Lee. J. H., "A Study on Flow Coefficient and Flow Characteristics for Butterfly Valve by Numerical Analysis," Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 62-65, (2012).
- [4] Park. S. W., Choi. I. S., Noh. K. C., Ryu. S. P. and Yoon. K. S., "An Experimental Study on Measurement of Flow Coefficient Using the Steady-Flow Test Rig." Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 36, No. 4, pp. 423-429, (2012).
- [5] Byeon. J. U., Kim. C. H., Park. S. H., Lee. M. W., Kang. M. C., "Effects of Flow Rate and Discharge Pressure with Compressing Spring in Non-diaphragm Type Stem of Water Pressure Reducing Valve", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.18 No.5, pp.103-109, (2019).
- [6] Kang. C. W., Yi. C. S., Jang. S. M., Lee. C. W., "A Study of the Measurement of the Flow Coefficient  $C_v$  of a Ball Valve for Instrumentation", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.18 No.3, pp.103-108, (2019).
- [7] Kang. C. W., Yi. C. S., Lee. C. W., "Experiment and Flow Analysis of the Flow Coefficient  $C_v$  of a 1 inch Ball Valve for a Thermal Power Plant", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.18 No.3, pp.109-115, (2019).