

# 다양한 고유유량 특성을 갖는 액체수소용 니들밸브의 디스크 형상 설계

황나규미 · 강효림 · 강정호 · 한승호<sup>†</sup>

동아대학교 기계공학과

## Disk Shape Design of Liquid Hydrogen Needle Valve with Various Inherent Flow Characteristics

NAGYUMI HWANG, HYOLIM KANG, JUNGHO KANG, SEUNGHO HAN<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
shhan85@dau.ac.kr

Received 2 July, 2024  
Revised 15 July, 2024  
Accepted 17 July, 2024

**Abstract** >> Needle valves are instrumentation devices with quick-opening inherent flow characteristics, used in pipelines requiring rapid flow supply immediately upon opening the flow path. For needle valves applied in liquefied hydrogen plants operating in cryogenic environments, it is necessary from the initial design stage to have various inherent flow characteristics in addition to quick-opening, depending on the intended usage. In this study, the inherent flow characteristics of a 1/2" liquid hydrogen needle valve were evaluated through computational fluid dynamics analysis. Disk shapes exhibiting various inherent flow characteristics were proposed by deriving the flow coefficient ( $C_v$ ) according to changes in disk shapes. Among the disk shapes that directly affect the  $C_v$ , the disk length and slope angle were selected, and case studies were conducted with nine parameter combinations. From the results of the normalized  $C_v$  regarding to opening rates, disk lengths and slope angles exhibiting quick-opening, equal-percentage, and linear inherent flow characteristics were determined.

**Key words** : Computational fluid dynamics analysis(전산유체역학), Flow coefficient (유량계수), Inherent flow characteristics(고유유량 특성), Liquid hydrogen needle valve(액화수소 니들밸브)

## 1. 서론

니들밸브(needle valve)는 퀵 오픈링(quick opening) 고유유량 특성을 가지고 있는 계장용 장치로 유로의 개방 즉시 빠른 유량 공급을 요하는 배관계에 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 극저온 환경에서 운용되는 작동유체의

퀵 오픈링 유량 제어를 위하여 액화수소 플랜트에 적용되는 니들밸브의 개발이 이루어지고 있다. 극저온 환경에 적용되는 니들밸브는 구동부의 냉동을 방지하기 위하여 스템(stem)과 본넷(bonnet)의 길이가 긴 연장형(extended) 외부 구조와 조작부(hadle)의 회전에 의하여 스템 하단에 설치된 디스크의 상하 행

정으로 유로를 개폐하는 내부 구조를 갖고 있으며 과도한 냉각 수축 변형으로 인한 구조적 결함을 최소화하기 위하여 단순한 구조로 설계된다.

액체수소용 니들밸브의 단순한 구조 설계는 극저온 환경에서 온도 효과에 의한 밸브의 변형에 대비하기 좋은 장점을 가지고 있다. 이를 활용하여 최근 액체수소용 니들밸브는 유로 개방에 따른 빠른 유량 공급 목적뿐만 아니라 사용 목적에 맞는 다양한 고유유량 특성을 나타낼 수 있도록 유량 특성 성능 개선을 위한 연구가 시도되고 있다. 니들밸브의 고유유량 특성은 유로트림에서 특히 유량에 직접적인 영향을 주는 디스크 형상에 의하여 결정된다<sup>2)</sup>. 디스크 형상과 고유유량 특성의 상관관계와 관련된 연구는 다음과 같다.

Sonawane 등<sup>3)</sup>은 글로브밸브의 디스크와 시트의 형상이 유량 특성에 미치는 영향을 분석하였으며 총 4가지 형상을 적용하여 개방률 20% 단위별로 유량 계수를 산정하고 각각의 형상에 따라 퀵 오픈 및 선형 고유유량 특성이 나타남을 확인하였다. Davis와 Stewart<sup>4)</sup>는 1" 글로브밸브의 디스크와 시트 크기가 상이한 3가지 종류의 밸브에 대한 유량 특성을 분석하였다. 분석 결과 고유유량 특성이 크기가 가장 작은 밸브에서는 선형으로 나타났고 나머지 밸브들에서는 같은 비율로 나타났다. 또한 해석 결과를 검증하기 위한 실험을 수행하여 최대 오차가 11.96%임을 확인하였다. Mahajan과 Jaiswal<sup>5)</sup>은 글로브밸브를 대상으로 3가지의 서로 다른 형상의 디스크에 따른 유량 특성을 분석하였는데 각각의 디스크에 따라 유량의 증가율이 밸브 개방률 대비 선형, 등비율 및 퀵 오픈 특성을 보여주었다.

디스크 형상과 고유유량 특성 관련 연구는 상기한 연구 사례에서 알 수 있듯이 유량이 디스크 형상에 영향을 많이 받게 되는 글로브밸브를 대상으로 대부분 진행되었으며 니들밸브를 대상으로 한 연구는 찾아보기 어렵다. 아울러 디스크 형상을 매개변수화한 형상 최적화 사례 연구도 부족함을 알 수 있다. 따라서 액체수소용 니들밸브의 빠른 유량 공급뿐만 아니라 사용 목적에 따라 적합한 유동 특성을 갖도록 하

는 디스크 형상 설계 사례 연구가 필요하다.

본 연구에서는 액체수소용 1/2" 니들밸브를 대상으로 전산유체해석을 실시하고 디스크 행정거리 변화에 따른 유량계수를 도출하여 고유유량 특성을 확인하였다. 이후 해석 결과를 바탕으로 디스크 형상을 매개변수화한 후 형상 설계 변수의 변화에 따른 유량계수를 도출하여 밸브 사용처에서 요구하는 유량 특성에 알맞은 디스크 형상을 제안하였다. 사례 연구는 디스크 길이와 경사각을 매개변수로 지정한 중심합성 계획법(central composite design, CCD)으로 이루어졌다.

## 2. 니들밸브의 고유유량 특성

### 2.1 개방률에 따른 유량계수

밸브의 개방률에 따른 유량계수의 변화를 고유유량 특성이라 하며 Fig. 1과 같이 크게 3가지로 나눌 수 있다. 퀵 오픈(quick opening)은 낮은 개방률에서 유량이 크게 증가하여 단시간에 최대 유량을 요구하는 밸브에 적합한 고유유량 특성이다. 그리고 선형(linear) 고유유량 특성은 개방률과 유량이 선형적으로 변화하기 때문에 개방률에 따른 안정적인 유량 제어가 필요한 밸브에 적용된다. 한편 등비율(equal percentage)은 개방률에 따라 유량이 일정한 비율로 증가하는 고유유량 특성으로 낮은 개방률에서 정교한 유량 변화가 요구되는 밸브에 적합하다. 고유유량

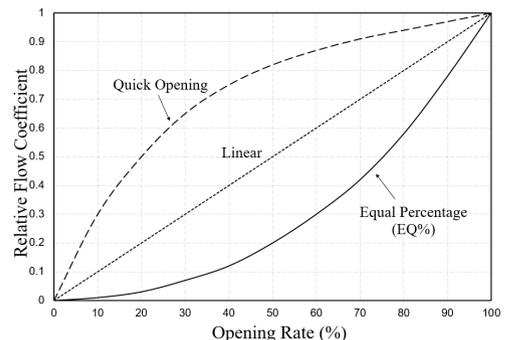


Fig. 1. Three types of inherent flow characteristics

특성은 주로 디스크 형상에 영향을 받으므로 밸브의 사용처에 맞게 적절한 형상 설계안이 요구된다.

고유유량 특성을 도출하기 위해서는 개방률에 따라 유량계수(flow coefficient)를 산출해야 한다. 유량계수는 밸브의 유체 운송 능력을 수치로 표현한 것이며 사용 단위계에 따라  $C_v$  또는  $K_v$ 로 표기된다.  $K_v$ 는 국제단위계로 산출한 유량계수이며 밸브 용어를 정리한 KS B 0100에 의거하여 특정 개방률에서 밸브 차압이 1 bar일 때 작동유체인 5-40°C 물을  $m^3/h$ 로 표시하는 수치로 정의된다.  $K_v$ 는 식 (1)로 계산된다<sup>6)</sup>. 한편  $C_v$ 는 영국 단위계가 사용되고 차압이 1 lbf/in<sup>2</sup>일 때 밸브를 흐르는 60°F 물의 유량을 US gal/min으로 표시한 수치로 정의되며  $K_v$ 에 보정상수 1.167을 곱하여 식 (2)와 같이 변환된다<sup>7)</sup>. 이때  $Q$ 는 유량,  $\Delta P$ 는 밸브의 차압 그리고  $G$ 는 물의 비중인 1을 의미한다.

$$K_v = Q \sqrt{\frac{G}{\Delta P}} \quad (1)$$

$$C_v = 1.167 K_v \quad (2)$$

## 2.2 니들밸브 및 전산유체해석

Fig. 2는 액체수소용 1/2" 니들밸브로 연장형 본넷, 바디, 스템, 핸들 그리고 디스크로 구성되며 시트에 안착되는 디스크는 컵-콘 형상(cup-cone shape)임을 알 수 있다. 연장형 본넷 상부의 조작부에 의한 스템의 상하 행정으로 스템 하부에 연결되어 있는 디

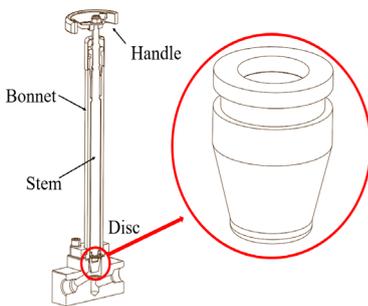


Fig. 2. Cross section view of extended bonnet type needle valve

스크의 행정거리에 따라 개방률이 변화하며 유량이 조절된다.

니들밸브의 고유유량 특성을 파악하기 위해 ANSYS-CFX 2019 R2 프로그램(Ansys, Canonsburg, PA, USA)을 이용한 전산유체해석을 수행하였다.  $C_v$ 를 산출하기 위해 시험 규격 KS B 2101<sup>8)</sup>에 의거하여 15.5°C 물을 작동유체로 하였으며 완전 개방 시 디스크 위치를 행정거리의 100%로 설정하고 행정거리의 0%에서 20%씩 증가시키며 100%까지 총 5개의 개방률에 따른 해석 모델을 만들었다. 해석 전처리 과정에서 해석 모델에 사용된 격자는 테트라 요소가 주로 사용되었으며 벽면과 작동유체의 경계층에 인플레이션 조건을 적용하였다. 개도율이 100%인 격자 모델의 격자수는 210만 개 수준이며 선행 연구에서 진행된 y+와 차압 결과를 고려한 격자 독립성 검정을 통해 선정되었다<sup>9,10)</sup>. 전산유체해석에 적용된 난류 모델은 경계층과 자유표면에서 각각 k- $\omega$  및 k- $\epsilon$  모델로 적용되는 장점을 지닌 k- $\omega$  SST이다<sup>11)</sup>.

니들밸브의  $C_v$  산출을 위한 시험 규격의 조건과 유사하게 밸브 입구단에 작동유체의 질량유량을 적용하고 출구단에 대기압이 작용하도록 하여 전산유체해석을 수행한 후 입구 및 출구단의 차압을 산출하였다<sup>12)</sup>. 이때 차압 측정 위치는 규격에 명시된 바와 같이 입구와 출구에서 각각 지름의 2배 및 6배만큼 떨어진 지점이다. 이후 차압이 6,895 kPa에 도달할 때까지 입구단의 질량유량을 변경하며 시행착오법을 수행하였다. 최종적으로 오차범위 내 차압이 산출되면 해당 차압과 적용된 질량유량을 식 (1)에 대입하여  $C_v$ 를 산정하였다.

## 2.3 전산유체해석 결과

전산유체해석을 통해 얻은 개방률에 따른 입구단의 질량유량과 식 (1)을 이용하여 계산된  $C_v$ 는 Table 1과 같으며 시행착오법을 통해 입구단과 출구단에 최종적으로 적용된 경계조건은 Table 2에 정리한 바와 같다. Fig. 3은 Table 1의 결과를 도식화한 것으로 개방률에 따른  $C_v$  변화가 전형적인 킥 오프닝 고유

유량 특성을 보여주고 있다. 개방률 구간 20-60%에서  $C_v$ 가 급격하게 증가하며 이후 60%에서 완전 개방 시까지  $C_v$ 는 비교적 낮은 증가폭을 보였다. 특히 개방률 60%와 완전 개방 시의  $C_v$ 의 차이는 1.8% 수준이었다. 해당 결과는 작동유체로 물을 고려한 것이나 액화수소를 적용하더라도 동일한 고유유량 특성이 도출될 것으로 사료된다<sup>13)</sup>.

Fig. 4는 개방률 40%에서 디스크 주변에 나타나는 유동장의 압력과 속도 분포이다. 압력 강하는 Fig. 4(a)와 같이 유로가 개방되는 위치에서 뚜렷하게 나타나며 이는 Fig. 4(b)의 속도 분포 결과에서 알 수 있듯이 디스크 선단에서 작동유체의 급격한 속도 증

가 때문이다. 따라서 니들밸브의 고유유량 특성은 디스크 선단의 형상에 직접적인 영향을 받으며 디스크 선단의 형상 변경을 통해  $C_v$  값을 제어할 수 있다.

### 3. 디스크 형상 설계

#### 3.1 형상 매개변수

니들밸브가 낮은 개도율에서 빠른 유량 공급이 가능한 전형적인 퀵 오프닝 고유유량 특성뿐만 아니라 사용 목적에 따라 적합한 고유유량 특성을 갖도록 디스크 형상 설계를 수행하였다. 니들밸브의 고유유량 특성은 Fig. 4와 같이 디스크 선단의 형상에 직접적인 영향을 받으므로 디스크 선단의 형상을 매개변수화하였으며 이때 유로의 직경은 변경할 수 없으므로 고정값으로 하였다.

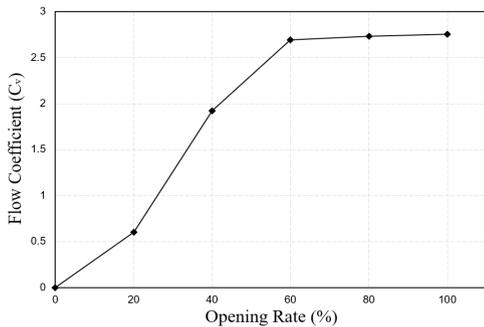
본 연구에서는 Fig. 5와 같이 디스크 선단의 형상 중 디스크 길이(length)와 경사각(angle)을 선정하고 이를 매개변수화하였다. 디스크 길이와 경사각의 범위는 스템의 행정거리에 따른 개방률과 가공 여부를

**Table 1.** Results of flow coefficients regarding to opening rates

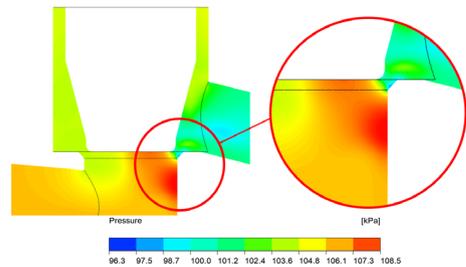
Opening rates (%)	$C_v$
100	2.75
80	2.74
60	2.70
40	1.92
20	0.60

**Table 2.** Boundary conditions applied to inlet and outlet at differential pressure of 6,895 kPa

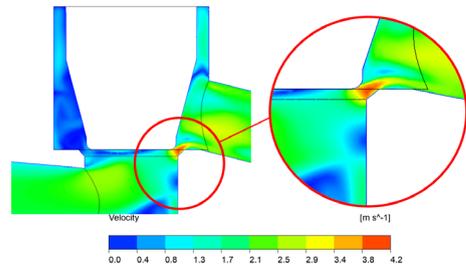
	Opening rates (%)				
	100	80	60	40	20
Mass flow rates at inlet ( $10^{-2}$ kg/s)	17.61	17.44	16.94	12.22	3.81
Outlet pressure (atm)	1				



**Fig. 3.** Flow coefficients regarding to opening rates



(a) Pressure



(b) Velocity

**Fig. 4.** Pressure and velocity distribution at the tip of disk with an opening rate of 40%

고려하여 각각 2.0-9.4 mm 및 0-8°로 설정하였다.

매개변수화한 디스크 길이와 경사각에 따른 고유유량 특성 변화를 고찰하기 위하여 실험 계획법의 일종인 CCD가 활용되었다. CCD는 최소한의 실험으로 확보한 데이터를 바탕으로 회귀 분석을 실행하여 데이터 간 상호작용을 평가하고 최적 조건을 찾기 위해 사용되는 방법이지만<sup>14)</sup> 본 연구에서는 최소한의 해석을 통해 유의미한 결과를 얻기 위한 목적으로 사용하였다. CCD에 따라 매개변수의 위치를 Fig. 6과 같이 결정하였고 이를 통해 얻어진 총 9가지 매개변수 조합은 Table 3과 같다.

### 3.2 디스크 형상 사례 연구

선정된 총 9가지 매개변수 조합으로 사례 연구가 이루어졌으며 Fig. 7과 같이 개도율에 따라 정규화

시킨  $C_v$  결과가 얻어졌다. 매개변수 조합에 따라 뚜렷한 고유유량 특성 변화가 관찰되었다.

디스크 길이와 경사각이 각각 2 mm와 4°인 case 4의 경우 니들밸브의 전형적인 킥 오프닝 고유유량 특성이 나타났다. 이는 디스크 길이가 짧아 스템 행정길이가 조금만 증가하여도 유로 면적이 급격히 늘어나기 때문으로 사료된다.

Case 7은 디스크 길이와 경사각이 각각 8.32 mm 및 1.17°인 경우로 개방률 20-40% 구간에서  $C_v$ 의 증가율이 낮고 80% 구간 이후  $C_v$ 가 급격하게 증가하는 등비율 고유유량 특성을 보여준다. 이는 상대적으로 긴 디스크 길이 때문에 스템 행정길이의 초기 변화에  $C_v$ 가 둔감하게 증가하기 때문이다. Fig. 8은 대표적으로 개방률 40%에서 디스크 선단에 나타나는 유동장의 압력과 속도 분포이다. 킥 오프닝 고유유량

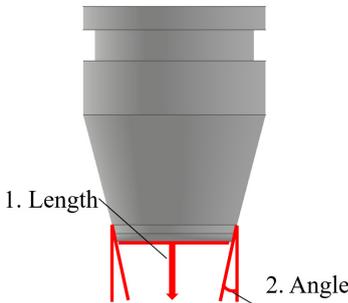


Fig. 5. Two shape parameters at the tip of disk

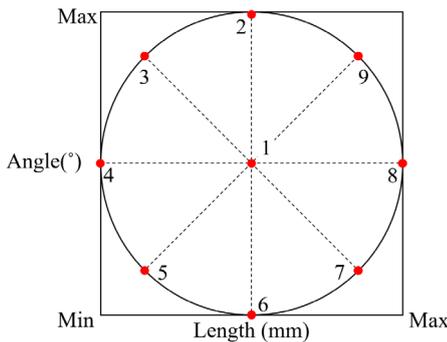


Fig. 6. Location of two shape parameters based on CCD

Table 3. Nine points of two shape parameters based on CCD

Case	Length (mm)	Angle (°)
1	5.7	4
2	5.7	8
3	3.084	6.828
4	2	4
5	3.084	1.172
6	5.7	0
7	8.316	1.172
8	9.4	4
9	8.316	6.828

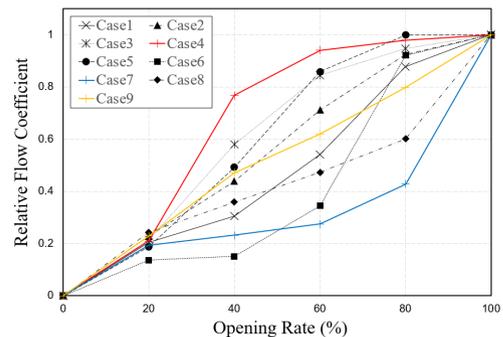


Fig. 7. Results of relative  $C_v$  regarding to opening rate obtained from case studies

특성을 보인 Fig. 4와 다르게 디스크 주변뿐만 아니라 밸브의 입구부터 큰 압력이 발생하며 긴 디스크 길이로 상대적으로 유로가 차단되어 작동유체의 유동이 정체되어 있음을 볼 수 있다.

한편 case 9는 디스크 길이와 경사각이 각각 8.32 mm 및 6.83°로 개방률에 따라  $C_v$ 가 선형적으로 증가하는 양상을 띠는 선형 고유유량 특성이 나타났다. 이는 case 7과 동일한 디스크 길이임에도 경사각이 상대적으로 크기 때문에 동일한 스템 행정길이에 변화에 디스크와 시트 간 간격이 넓어 유로 확대를 통한  $C_v$  증가 때문이다.

니들밸브의 디스크 형상 사례 연구를 통하여 밸브 사용처에서 요구하는 다양한 유량 특성을 충족하는

형상 설계가 가능하였다. 대표적인 퀵 오픈링, 등비율 및 선형 고유유량 특성을 보이는 디스크 길이와 경사각을 정리하면 Table 4와 같다.

### 4. 결론

본 연구에서는 액체수소용 1/2" 니들밸브를 대상으로 전산유체해석을 통한 고유유량 특성을 평가하였으며 상온의 물을 작동유체로 하여 디스크 형상 변화에 따른 유량계수  $C_v$ 를 도출하고 다양한 고유유량 특성을 보이는 디스크 형상을 제안하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 개방률에 따른  $C_v$  변화는 전형적인 퀵 오픈링 고유유량 특성을 보여주었으며 이는 디스크 선단에 나타나는 유동장의 압력과 속도 분포로부터 디스크 선단의 형상에 직접적인 영향을 받는다. 형상 변경을 통해  $C_v$  값을 제어할 수 있다.
- 2) 사용 목적에 따라 적합한 고유유량 특성을 갖도록 디스크 형상 설계를 수행하기 위하여 디스크 선단의 형상 중 디스크 길이와 경사각을 선정하고 이를 매개변수화하였다.
- 3) 매개변수화한 디스크 길이와 경사각에 따른 고유유량 특성 변화를 고찰하기 위하여 CCD가 활용되어 총 9가지 매개변수 조합이 선정되었다.
- 4) 선정된 총 9가지 매개변수 조합으로 사례 연구가 이루어졌으며 개도율에 따라 정규화시킨  $C_v$  결과로부터 퀵 오픈링, 등비율 및 선형 고유유량 특성을 보이는 디스크 길이와 경사각을 구하였다.

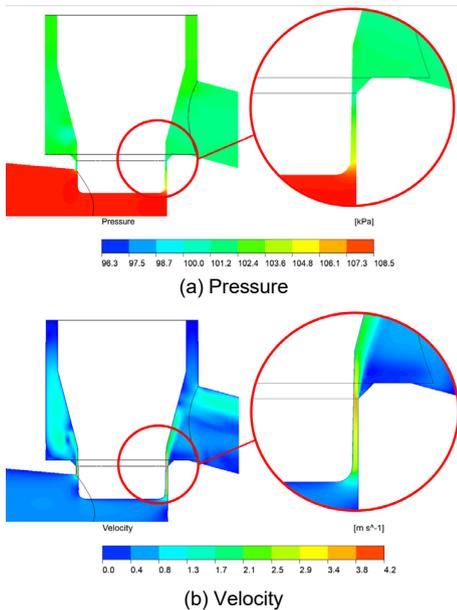


Fig. 8. Pressure and velocity distribution at the tip of disk with an opening rate of 40% in case 7 (equal-percentage)

Table 4. Typical three inherent flow characteristics obtained from case studies

Case	Disk length (mm)	Angle (°)	Inherent flow characteristics
4	2	4	Quick opening
7	8.32	1.17	Equal percentage
9	8.32	6.83	Linear

### 후 기

본 논문은 부산광역시 및 (재)부산테크노파크 BB21 plus 사업으로 지원되었음.

### References

1. V. Tesař, “Fluid mechanics of needle valves with rounded components part I: configurations and models”, Sensors

- and Actuators A: Physical, Vol. 254, 2017, pp. 101-108, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.11.033>.
2. U. Patel, J. Muchhadia, K. Patel, and V. Advani, "Mathematical method for designing the profile of the plug of horizontal globe valve for required inherent flow characteristics", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 14, No. 5, 2017, pp. 31-40. Retrieved from <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol14-issue5/Version-5/F1405053140.pdf>.
  3. V. J. Sonawane, T. J. Rane, A.D. Monde, R.V. Vajarinkar, and P. C. Gawade, "Design and analysis of globe valve as control valve using CFD software", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 4, 2013, pp. 63-71. Retrieved from <https://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/RDME-Volume4/RDME-40.pdf>.
  4. J. A. Davis and M. Stewart, "Predicting globe control valve performance-part I: CFD modeling", Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, No. 3, 2002, pp. 772-777, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1490108>.
  5. S. Mahajan and N. Jaiswal, "Determining flow coefficient for globe valve with different trim shapes using a CFD tool", International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 7, No. 10, 2018, pp. 166-170. Retrieved from <https://www.ijert.org/research/determining-flow-coefficient-for-globe-valve-with-different-trim-shapes-using-a-cfd-tool-IJERTV7IS100079.pdf>.
  6. Korean Standards Association, "valve terminology (KS B 0100)", Korean Standards Service Network, 2015, pp. 1-73. Retrieved from <https://www.kssn.net/search/stdtdetail.do?itemNo=K001010107513>.
  7. J. H. Moon, "Flow analysis of cryogenic check valve for LNG", Journal of Power System Engineering, Vol. 20, No. 1, 2016, pp. 5-10, doi: <https://doi.org/10.9726/kspe.2016.20.1.005>.
  8. Korean Standards Association, "Test procedures for flow coefficient valves (KS B 2101)", Korean Standards Service Network, 2014, pp. 3-4. Retrieved from <https://oshri.ks.or.kr/search/stdtdetail.do?itemNo=K001010103709>.
  9. N. G. M. Hwang, J. H. Kang, S. H. Han, J. S. Oh, and J. Kwak, "Estimation of flow coefficient and inherent flow characteristics of needle valve for liquefied hydrogen", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 23, No. 2, 2024, pp. 16-22, doi: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2024.23.2.016>.
  10. N. G. M. Hwang and J. H. Kang, "Application of multilayer perceptron to predict the flow coefficient of liquefied hydrogen valve", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 23, No. 3, 2024, pp. 73-81, doi: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2024.23.3.073>.
  11. K. H. Bae, J. H. Park, and S. M. Kang, "A study on the flow characteristics inside a globe valve for ships", Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 32, No. 1, 2008, pp. 110-118. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00951371>.
  12. C. K. Kim, S. M. Lee, and C. M. Jang, "Numerical evaluation of flow nature at the downstream of a ball valve used for gas pipelines with valve opening rates", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 29, No. 4, 2018, pp. 370-377, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.4.370>.
  13. H. L. Kang, H. J. Park, H. S. Hwang, and S. H. Han, "Torque reduction design of a high-pressure ball valve", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 46, No. 4, 2022, pp. 399-405, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2022.46.4.399>.
  14. Y. Laftani, A. Boussaoud, B. Chatib, M. Hachkar, M. E. Makhfouk, and M. Khayar, "Photocatalytic degradation of a diazo-dye in artificial seawater matrix: Optimization of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process on the Ponceau S decolorization by using central composite design", Environmental Engineering Research, Vol. 27, No. 3, 2022, pp. 210002, doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2021.002>.