

# 화력발전소용 1인치 볼 밸브 유량계수 Cv에 관한 유동해석 및 실험에 관한 연구

강창원\*, 이종섭\*\*, 이치우\*\*\*,#

\*경남과학기술대학교 대학원, \*\*한국승강기대학교 승강기공학부,  
\*\*\*경남과학기술대학교 자동차공학과

## Experiment and Flow Analysis of the Flow Coefficient Cv of a 1 inch Ball Valve for a Thermal Power Plant

Chang-Won Kang\*, Chung-Seob Yi\*\*, Chi-Woo Lee\*\*\*,#

\*Gyeongnam National University of Science and Technology, Graduate School

\*\*Korea Lift Collage, School of Lift Engineering

\*\*\*Gyeongnam National University of Science and Technology, Automotive Engineering

(Received 3 January 2019; received in revised form 5 January 2019; accepted 12 January 2019)

### ABSTRACT

The purpose of this study was to analyze and test the flow rate of a 1-inch ball valve used in a thermal power plant. To identify the flow-rate characteristics, numerical analysis was conducted and an experimental apparatus of the valve flow rate coefficient was used to compare the flow coefficient Cv values. To determine the internal pressure distribution, the sites of opening ball valves and flow fields were investigated. In particular, a smaller the valve opening resulted in a more complicated the flow field of the ball. The valve flow characteristic test showed that the Cv value and flow rate increased with increasing valve-opening rate and the secondary function was performed. The pressure drop increased as the valve opening rate decreased. In addition, the experimental results for the flow analysis are similar to the numerical analysis results.

**Key Words** : Ball Valve(볼밸브), 유량계수(Flow Coefficient), CFD(전산유체역학), Numerical Analysis(수치해석)

### 1. 서 론

화력발전소는 석탄, 중유 등 연료를 이용하여 보일러에서 연소시켜 발생된 고온 고압의 증기를 이용하여 터빈 및 발전기를 회전시켜 열에너지를

전기에너지로 변환시켜 생산된 전기를 전국에 연결된 계통에 연계시킨다. 발전소 운영계통은 복수 및 급수계통, 증기계통, 연료계통, 전원계통 등 복잡한 설비들로 구성되어 있다.

각 계통에서는 유체의 흐름을 제어하는 수천개의 밸브가 사용되고 있으며, 주요밸브에서의 누설이나 마모 등 고장에 의해서 계통의 압력이나 온도가 저하될 수 있다. 보일러에서의 주요밸브는

# Corresponding Author : leecw@gntech.ac.kr

Tel: 82-55-751-3649, Fax: 82-55-751-3643

증기온도를 조절할 때 사용하는 과열저감기(S/H De-SH)나 재열저감기(R/H De-SH) 등의 밸브 제어 불량이나 내부손상에 의한 고장이 발생할 수 있고, 터빈 분야에서는 급수펌프의 밸브에서도 손상에 의한 제어난조나 고장에 의한 출력 감발 현상도 발생하고 있다.

고차압에 사용되는 보일러 노내 Soot를 제거하는 제매기용 증기조절밸브의 오작동이나 내부의 마모나 스템의 손상 등의 고장에 의해서도 계통의 차단에 의한 출력 감발이나 정지까지도 될 수 있는 상태에까지 이를 수 있다. 따라서 밸브 유량특성에 관한 정확한 설계자료가 필요하다.

현재 국내의 밸브에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있으며, 밸브에 대한 구조해석 및 유동해석이 전반적으로 설계단계에서 이루어지고 있다.

수동밸브 및 제어밸브에 대한 유량계수(Cv)에 대한 측정을 통해 현재 제조되는 계장용 밸브에 대한 성능을 확보함으로써 계통 설계시 필요한 자료를 제공하고, 확신함으로써 효과적인 설계와 시스템 신뢰성을 높일 수 있다.

현재 국내 밸브업체의 경우 대부분 국제규격(ANSI, API등) 측면에서 설계하여 생산하고 있으며, 기본적인 내압강도나 기밀시험에 주안점을 두고 있을 만큼 구조적인 문제에 많은 비중을 차지하는 반면, 유동특성과 같이 시스템 내부에서 발생하는 여러 설계인자에서 중요한 유량계수와 같은 밸브 성능에 대해 비교적 소극적이거나 선진제품의 Copy 제품일 경우 대부분 별도의 실험을 통해 검증하지 않는 것이 현실이다.

밸브의 조작량을 변화시키는 것으로는 전자밸브, 전동밸브, 공기식 제어밸브, 등이 있고 최근 자동화가 급속히 이루어짐에 따라 밸브의 중요성이 점점 증대되고 있다. 현재 발전소 등 육상플랜트에서 밸브에 대한 역할은 매우 중요하고, 설비가동에 있어 밸브특성에 따른 성능은 다양하다.

제어밸브의 경우 운전특성에 따른 개도 변화로 유량과 압력 등이 제어량에 따라 달라지는 특성으로 운전변수가 발생함에 따라 이에 대한 밸브 자체의 특성을 파악할 필요가 있다<sup>[1-5]</sup>.

본 연구는 계장용으로 많이 사용되고 있는 볼 밸브에 대한 유량계수 Cv를 측정하고, 유동해석 결과

를 비교하고자 한다.

## 2. 유동해석

### 2.1 유동해석 방법

유동해석 결과의 신뢰성 확보를 위해서는 해석 모델의 적절한 모델링과 해석에 적절한 난류모델의 선정, 계산 격자의 신뢰성 확보가 필요하다. 이와 더불어 Solver의 선택 또한 계산 정확도에 미치는 영향이 크기 때문에 상용 S/W는 CD-adapco사의 STAR-CCM+를 사용하여 해석을 수행하였다.

### 2.2 지배방정식

본 연구에서는 볼 밸브 내부를 흐르는 유동을 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정하여 유동해석을 수행하였다. 볼 밸브에서 속도분포 및 압력을 산출하기 위해서 사용된 지배방정식은 아래의 식 (1)에서 (4)와 같이 연속 방정식과 운동량 방정식이며, 난류모델은 이미 산업계에서 타당성을 검증받은  $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + u_t G - \sigma \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\epsilon}{k} (C_1 \mu_t G - C_2 \rho \epsilon) \quad (4)$$

본 연구에 사용된 연속 방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 운동량 방정식은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 난류에너지 방정식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며, 난류에너지 소산방정식은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

### 2.3 수치알고리즘

수치해석 기법으로는 지배방정식에서 압력과 속도의 연결은 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)에 따른 Segregate Flow 알고리즘을 사용하였으며, 본 연구를 위해 적용되는 수치해석 코드인 STAR-CCM은 Cooling Fan을 해석하기 위해 다음과 같은 수치알고리즘으로 계산을 수행하게 된다. 해석결과를 취득하기 위한 수치해석의 환경은 정상상태에서 반복 계산 시 중속 변수들의 수렴 판정은 출구 유량이 변하지 않고 안정적인 값으로 고정된 계산결과가 나타날 때와 정상상태에서 반복 계산 시 중속 변수들의 수렴 판정은 잔차 값이  $10^{-3}$ 이하에 도달하면 수렴 판정의 기준으로 삼았다.

### 2.4 유동해석 대상

유동해석 대상 볼 밸브는 Fig. 1과 같이 1인치 볼 밸브에 대하여 역설계를 수행하여 CATIA V5를 사용하여 3D 모델링하여 유동해석을 수행하였다. 또한, 볼 밸브의 유동해석을 수행하기 위하여 유동장과 관련이 없는 부분은 삭제하여 최종 CFD 모델에 대한 해석변수를 Fig. 2와 같이 생성하였다.

볼 밸브 유동해석을 위해 Fig. 3과 같이 경계조건을 부여하여 수치해석을 진행하였다. 유동해석을 위해 우선 계산도메인의 초기조건은 작동유체인 Water가 100%가 있다고 가정하였다.

## 3. 유동해석 결과 및 분석

볼 밸브 열림 비율에 따른 유동해석을 수행한 결과 Fig. 4와 같은 압력분포를 확인할 수 있었다. 밸브가 100% 열려있을 경우 밸브에서 저항이 발생하지 않기 때문에 입출구 압력이 약 1psi 발생

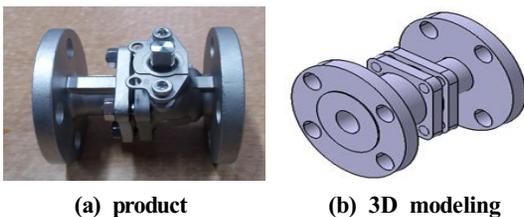


Fig. 1 CFD analysis models

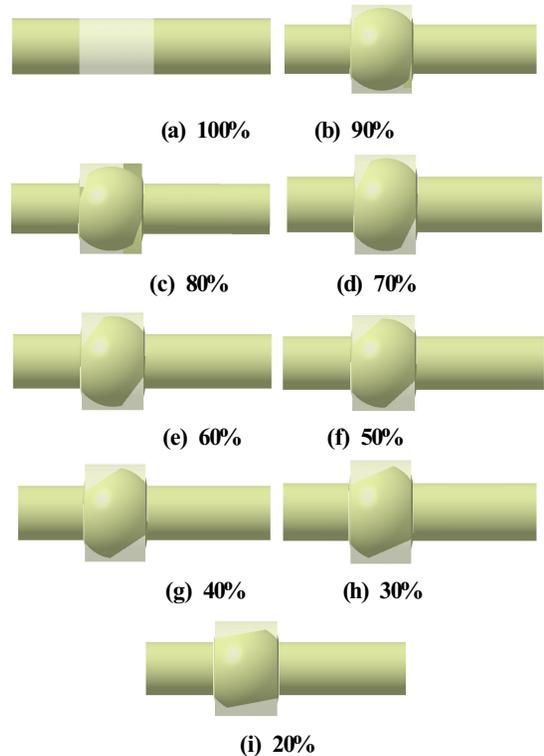


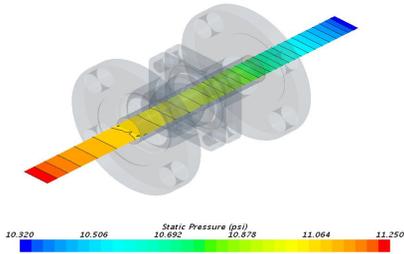
Fig. 2 CFD parameters for valve opening ratio



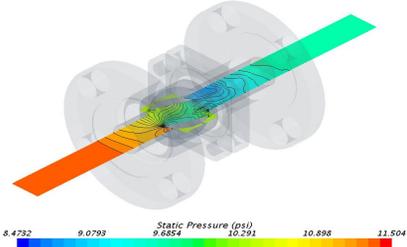
Fig. 3 Boundary conditions

되는 것을 확인할 수 있었다. 반면 밸브가 닫히면서 입구와 출구에서의 압력차가 서서히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 전반적으로 밸브가 닫히면서 압력강하는 2차함수의 형태로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

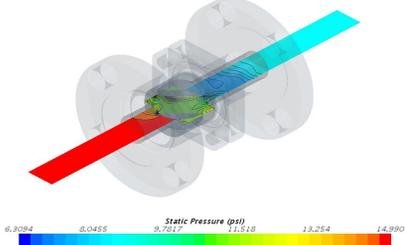
Fig. 5는 밸브 열림량에 따른 속도분포와 유선분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 밸브가 닫히면서 Ball 내부에서 유동이 아주 복잡하게 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었고, 밸브 입구부에서 유속이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 유속의 감소로 인해 압력이 증가하게 되었고, 이러한 압력증가로 인한 밸브 입구와 출구에서의 압력강하가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.



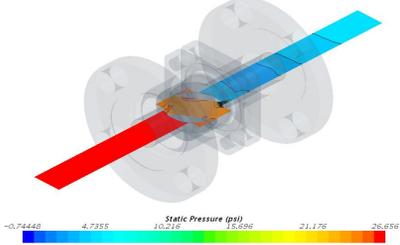
(a) 100% open



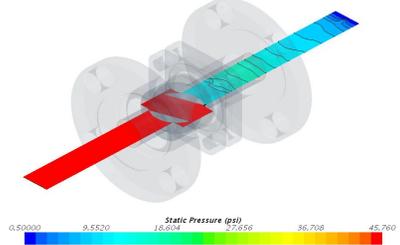
(b) 80% open



(c) 60% open

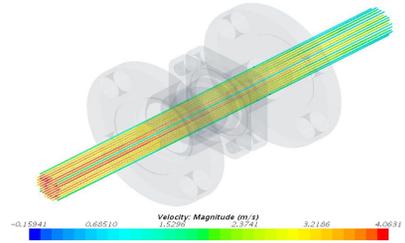


(d) 40% open

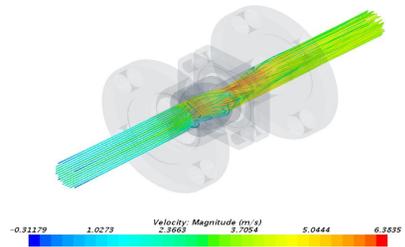


(e) 20% open

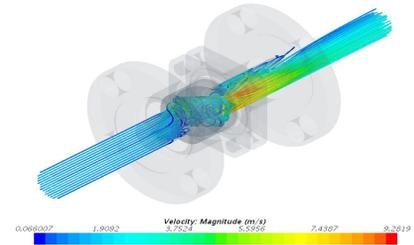
Fig. 4 Results of static pressure distribution



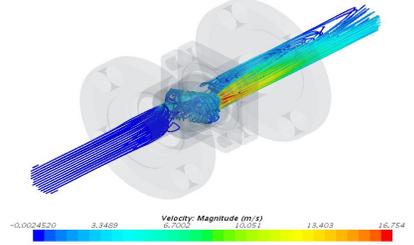
(a) 100% open



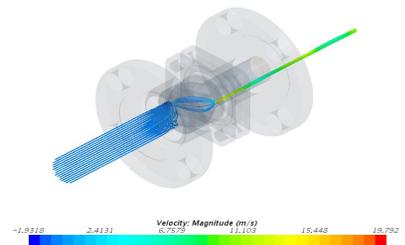
(b) 80% open



(c) 60% open



(d) 40% open



(e) 20% open

Fig. 5 Results of path line with velocity magnitude

## 4. 유량계수 측정

### 4.1 시험장치구성

밸브 유량계수 측정장치의 메인 프레임 사이즈는 W45,000×D2,500×H1,600mm로 제작하였으며, Pipe Size가 1/4", 1/2", 1" 등 다양한 사이즈 측정이 가능하도록 실험장치를 Fig. 6과 같이 구성하였다. 배관의 경우 부식방지를 위해 SUS계열의 소재를 채택하여 제작하였고, 밸브 어댑터를 사용하여 다양한 사이즈에 대응할 수 있도록 설계 반영하였다.

밸브를 시험하기 위해 작동유체인 Water에 대한 공급을 원활히 하기 위하여 폐회로로 순환되는 구조로 제작되었고, 저수조의 사이즈는 W35,000 × D1,500 × H900mm 로 구성하였다.

저수조에서 배관으로 작동유체가 이송될 때 이물질을 제거하기 위하여 필터를 설치하였으며, 저수조는 부식방지를 위해 SUS계열의 소재를 채택하였다. 밸브로 작동유체를 공급하기 위하여 동력 18kW, 유량 341LPM, 양정 65m의 성능을 갖는 입형 다단펌프를 적용하였다. 각종 제어밸브 및 수동밸브에 대한 성능을 시험하기 위해 밸브를 통과하는 유량 및 입구와 출구측의 차압을 측정하여 밸브의 유체압력에 대한 Cv계수를 측정할 수 있도록 하였다.

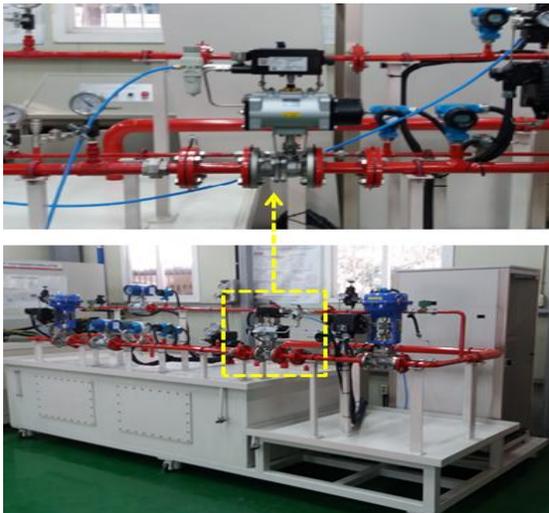


Fig. 6 Experimental setup for Cv measurement

### 4.2 시험결과

유량계수(Flow coefficient : Cv)는 밸브의 사이즈를 결정하기 위해 사용되는 수치이며, 모든 밸브에는 유량계수에 대한 정격사양이 있다. 본 연구에서는 아래의 식 (5)와 같이 일반적으로 가장 많이 사용하는 Cv 계산식을 사용하였다<sup>[6-8]</sup>.

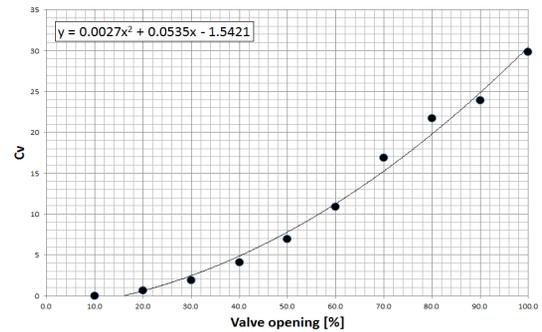


Fig. 7 Distribution of flow coefficient

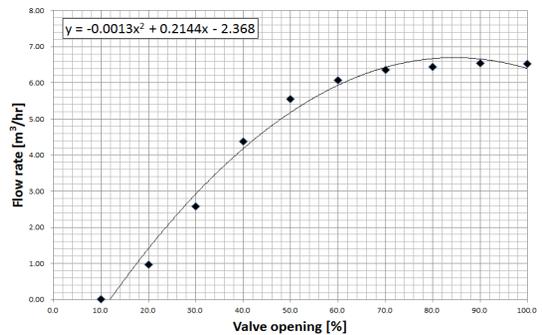


Fig. 8 Distribution of flow rate

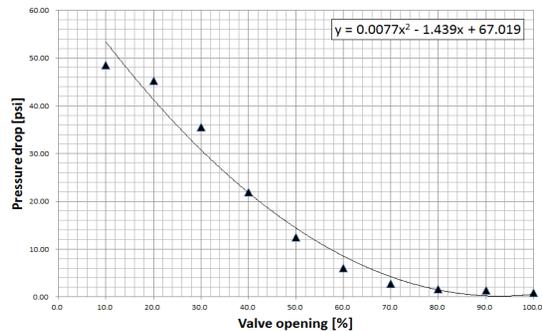


Fig. 9 Distribution of pressure drop

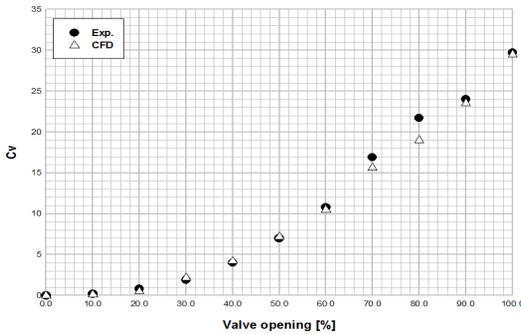


Fig. 10 Comparison of flow coefficient at CFD and Experiment data

$$C_v = Q \sqrt{\frac{S_g}{\Delta P}} \quad (5)$$

여기서 Q는 유량(gpm), S<sub>g</sub>는 비중량 그리고 ΔP는 압력차(psi)를 나타낸다.

Fig. 7은 자동제어 글로브 밸브에 대한 밸브유량계수에 대한 시험 결과 값을 나타내고 있다. 앞서 전술한 자동제어 볼 밸브 시험결과와 같이 밸브 열림량이 증가할수록 유량계수 Cv값이 2차 곡선으로 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 밸브 유량계수에 대한 특성곡선에 대한 2차 함수를 아래의 식과 같이 나타낼 수 있었다. 반면 글로브 밸브의 형상 특성상 볼 밸브에 비해 최대 유량계수 Cv값이 43%에 미치는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 자동제어 글로브 밸브의 오리피스를 지나가는 유량을 측정된 결과이다. 유량계수 Cv와 마찬가지로 밸브 열림량이 증가할수록 유량이 2차 함수 형태를 나타내며 증가하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 볼 밸브에 비해 70%이상 부터는 거의 유사한 유량을 나타내고 있었다.

유량 측정값에서 밸브 열림량이 70% 이상 진행됨에 따라 유량증가가 둔화되는 반면 유량계수 Cv값은 계속 증가하는 원인은 볼 밸브와 마찬가지로 압력강하 값이 밸브 열림량이 증가할수록 낮아지기 때문에 Cv값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 자동제어 글로브 밸브의 입출구단에서의 압력강하를 나타내고 있다. 밸브 열림량이 증

가할수록 압력강하가 낮아지는 것을 확인할 수 있었고, 압력강하 역시 2차 함수 형태로 감소하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 최종 제어밸브에 대한 실험결과와 유동해석 결과를 통해 밸브유량계수 Cv에 대하여 서로 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 밸브 열림량이 증가할수록 Cv값이 2차함수의 형태로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 실험값과 해석값이 아주 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

화력발전소에 적용되는 소형 1인치 볼 밸브에 대한 유동특성을 파악하기 위하여 수치해석과 밸브유량계수 실험장치를 통해 유량계수 Cv 값을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

유동해석을 통해 볼 밸브 열림량에 대한 내부 압력분포 및 유동장을 파악할 수 있었다. 특히, 밸브 열림량이 감소할수록 볼 내부의 유동장이 매우 복잡하게 발생함을 확인할 수 있었다.

밸브유량특성에 관한 실험을 수행한 결과 유량계수 Cv 값과 유량의 경우 밸브 열림량이 증가할수록 2차 함수를 보이며 증가하였고, 압력강하는 반대로 밸브 열림량이 감소할수록 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 밸브 유량계수 Cv의 경우 실험결과와 유동해석 결과가 모두 유사하게 나타남에 따라 연구결과의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

## REFERENCES

1. 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.
2. Lee, J. H. and Sung, J. K., "A Comparative Study on the Improvement of the Performance of Swivel Valve Tube Couplers," Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.

- 9, No. 5, pp. 20-27, 2010.
3. 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.
  4. Ahn, Y. J., Kim, B. J. and Shin, B. R., "Numerical Analysis on Flow Characteristics of High Pressure Drop Control Valve with Anti-Cavitation Trim," Journal of Fluid Machinery, Vol. 10, No. 4, pp. 61-70, 2007.
  5. 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.
  6. 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.
  7. Ahn, H. H., Yi, C. S., "Numerical Analysis of the Internal Flow of Small Quick Coupler at 3,000psi", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15 No. 2, pp.16-21, 2016
  8. Ahn, H. H., Yi, C. S., "A Study on the Breakaway Coupling of Flip-Flap valve type Through Reverse Engineering", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.15 No.4, pp.16-22, 2016.