

원자력 발전소용 3축 편심 나비형 밸브의 저개도 공동현상에 대한 수치적 연구 및 밸브에 대한 내진해석

장승언* · 조성휘* · 장영운** · 전인수** · 이원희** · 김홍집***†

Numerical Study on Cavitation at Low Opening Degrees and Seismic Analysis for 3-axial Eccentric Butterfly Valve for Nuclear Power Plant

Seung Eon Jang*, Seong Hwi Jo*, Young Woon Jang**,
In Soo Jeon**, Won Hee Lee**, Hong Jip Kim***†

Key Words : CFD(전산유체역학), Cavitation(공동현상), Resonance(공진), Seismic(내진), Structural analysis(구조해석)

ABSTRACT

In this study, a numerical study has been performed on the cavitation and earthquake damage that could occur when a 3-axial eccentric butterfly valve for a nuclear power plant. The diameters of butterfly valves are 101.6 mm and 304.8 mm. In the case of 304.8 mm, numerical analysis has been performed to predict the flow characteristics in the previous study, and it has been verified that negative pressure occurred at 10 and 20 degrees. As a result of the analysis, the negative pressure has been determined to be an error due to the flow rate that cannot flow. However, the inlet pressure in the nuclear power plant is high, so numerical analysis has been additionally performed for cavitation. In addition, structural analysis has been performed to investigate the structural effects of the valves caused by the earthquake. First, the natural frequencies of the valves have been verified, and both the 101.6 mm and 304.8 mm valves have a natural frequency higher than the frequency range of the earthquake. An additional structural analysis has performed to verify the stresses and deformation occurred by the earthquake. As a result of analysis, it is verified that the effect of the valve by the earthquake is insignificantly. Therefore, even if an earthquake occurs, there is no significant effect on the valve controlling the working fluid.

1. 서 론

원자력 발전소는 발전단가가 저렴하여 경제성이 좋고 지속성이 뛰어나다는 장점이 있으며, 2009년 기준 국내 생산 전기의 약 35%를 차지하는 발전방법이다. 그러나 원자력 발전소는 사고 시 방사능 유출 등의 심각한 문제로 인해 자연 재해 등의 위험요소에 대하여 보호되어야 한다.

본 연구에서 사용된 원자력 발전소용 3축 편심 나비형 밸브의 경우 원자력 발전소의 냉각공조계통 혹은 사용 후 연료 계통(spent fuel system; SFS)에 체결된다. 특히, SFS에서는 방사능이 포함된 유체를 제어하고 문제가 발생했을 때,

외부로 유출되지 않도록 기밀을 유지하는 장치이다. 또한 일반적인 나비형 밸브와는 다르게 밸브의 축이 3가지 방향에 대해 편심되어 있어 비교적 기밀유지가 유리하고 디스크와 시트 사이의 간섭량이 적어 작은 크기의 작동기를 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 원자력 발전소에서 위와 같은 중요한 역할을 하는 3축 편심 나비형 밸브에 발생하는 공동현상(cavitation)과 지진에 의한 파손 등에 대한 연구를 수행하고자 하였다.

공동현상은 액체 유동에서 높은 유속 등의 이유로 압력이 급강하하게 되어 기화되는 현상이며, 공동현상에 의해 기화된 기포는 부피증가에 따라 압력이 상승해 기포가 붕괴하게

* 충남대학교 대학원 기계공학과 (Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

** (주)삼신 (Samshin Limited Co., Ltd.)

*** 충남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

† 교신저자, E-mail : khongjip@cnu.ac.kr

되고 이로 인해 소음 및 진동을 발생시켜 기계에 파손, 부식을 일으키는 현상이다. 원자력 발전소에서 공동현상에 의한 밸브의 파손은 매우 심각한 문제를 야기하므로 이에 대한 연구들이 수행되고 있다.^[1]

이형식 등은 볼 밸브 내부의 유동장을 해석하여 볼의 회전 각에 따른 유동 특성 및 공동현상 발생에 대한 수치적 연구를 수행하였으며, 이를 통해 해당 밸브에서는 공동현상이 발생하며 작동조건의 변경이 필요하다고 언급하였다.^[2]

원자력 발전소에 설치된 나비형 밸브는 앞서 언급한대로 파손 및 결함이 발생하면 매우 심각한 문제를 초래하게 된다. 특히 지진에 의해 파손, 변형이 발생하게 되어 문제가 발생할 수 있기에 밸브의 고유진동수 및 지진에 의해 밸브에 발생하는 응력 및 변형률을 예측하여 설계할 필요가 있으며, 이를 위해 많은 연구들이 수행되고 있다.

홍성창 등은 내진 환경 하에서 제어역지밸브의 작동성 및 진동특성을 확인하기 위해 수치해석을 수행하였으며, 이를 통해 향후 피로해석을 위한 준비 및 설계관련 자료로 사용될 수 있을 것이라 언급하였다.^[3]

안준태 등은 버터플라이밸브의 구조 건전성을 평가하기 위해 밸브 단품에 대한 정적내진해석과 배관계통까지 고려한 동적내진해석을 수행하였다.^[4]

본 연구에서는 (주)삼신에서 제공한 원자력 발전소용 직경 304.8 mm 3축 편심 나비형 밸브에 대해 저개도에서 공동현상을 고려한 수치해석과 직경 101.6 mm, 304.8 mm 밸브의 내진해석을 위한 modal 해석과 정적내진해석을 수행하였다.

2. 해석대상

2.1 유동해석

해석 대상은 (주)삼신에서 제공한 직경 304.8 mm 3축 편심 나비형 밸브이며 Fig. 1에 나타난 것처럼 유동방향(①), 유동에 수직인 방향(②) 그리고 밸브 디스크와 시트 사이의 경사(③)로 3축 편심 된 형태의 밸브이다. 해석모델은 유동이 충분히 발달되고 안정화 될 수 있도록 상·하류의 길이를 밸브 직경의 10배(10D)로 설정하였다. 난류 해석을 위한 y^+ 를 고려하여 격자를 생성하였고 복잡한 밸브 디스크 주변(상·하류 1D)을 제외한 부분에 정렬격자를 생성하였으며 밸브 회전축을 따라 좌우가 동일한 형상이기 때문에 해석 시간의 단축을 위해 전체 형상의 절반만을 고려하여 해석을 진행하였고 이를 Fig. 2에 나타내었다. 격자 개수는 270만, 350만, 570만 개를 사용해 격자 민감도 분석을 수행하였다. 압력과 속도의 필드값과 밸브의 형상에만 의존하는 인자이며, 밸브의 특성을 나타낼 수 있는 인자인 유량계수를 비교하였다. 필드값을 비교했을 때 유사한 경향을 확인하였고, 유량계수는 약 0.6% 수준의 차이를 보여 적절한 수렴성과 계산속도가 합리적인

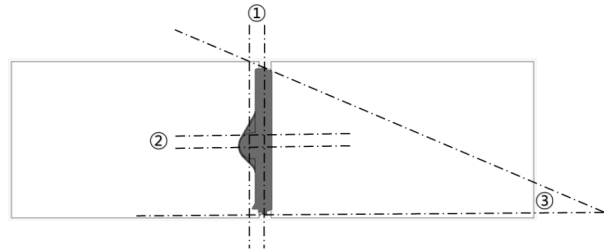


Fig. 1 3-Axis eccentric butterfly valve

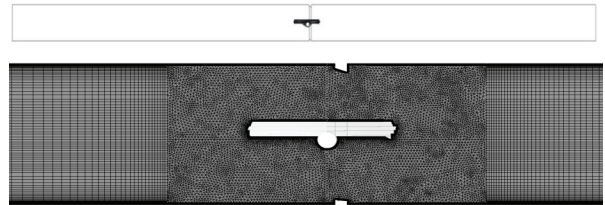


Fig. 2 Grid system of the butterfly valve

Table 1 Computational conditions for fluid analysis

Solver	ANSYS CFX v14.5	
Turbulent model	k-ε	
Working Fluid	Water(isothermal 142.61 °C)	
Valve diameter(<i>D</i>) [mm]	304.8	
	Inlet [kPa]	3185
	\dot{m} [kg/s]	283.88
	Wall	No slip

350만 개의 격자를 사용하였다. 이전 연구에서 다양한 개도의 해석모델에 대해 유량계수, 동수력토크계수 등을 실험결과와 비교하여 계산결과의 신뢰도를 확보하였다. 수치해석에 사용된 해석조건 및 경계조건은 밸브의 설계조건과 같으며 이를 Table 1에 나타내었다.^[5]

2.2 구조해석

밸브 형상 및 재질에 대한 공진주파수와 지진에 의해 밸브에 발생하는 응력 및 변형률을 예측하기 위한 구조해석을 수행하였으며 구조해석에 사용된 밸브 형상을 Fig. 3에 나타내었다.

밸브의 개폐를 조절하는 작동기에 대한 하중은 point mass 조건을 부여하여 고려하였으며, 밸브가 파이프에 결합되는 부분에 line fixed 조건을 부여하여 밸브가 파이프에 결합되어 있는 조건을 모사하였다.

먼저, 지진과 밸브의 공진에 대한 예측 및 정적내진해석을 수행하기 위해 밸브의 공진주파수 예측을 위한 modal 해석을 수행하였다. 밸브의 공진주파수가 지진의 주파수 범위인 33 Hz와 겹치지 않아야 공진이 발생하지 않으며 밸브에 대한 정적내진해석이 가능하다.^[4]

modal 해석 결과를 통해 밸브의 공진주파수를 확인한 후, 5G의 지진이 발생했을 때 밸브에 발생하는 응력 및 변형량을 확인하기 위해 정적내진해석을 수행하였다. 정적내진해석에서는 실제 작동 환경을 모사하기 위하여 작동유체에 의해 발생하는 압력 및 모터의 작동 토크를 고려하였으며 각 값의 크기를 Table 2에 나타내었다. 해석 온도의 경우 작동유체와 같은 온도인 142.61°C로 경계조건을 부여하였다. Fig. 4는 각 경계조건의 위치를 나타내었으며, 요크의 윗면에 화살표와 같은 방향으로 토크를, 밸브 디스크와 시트 부분에 유체에 의한 압력을 부여하였다.

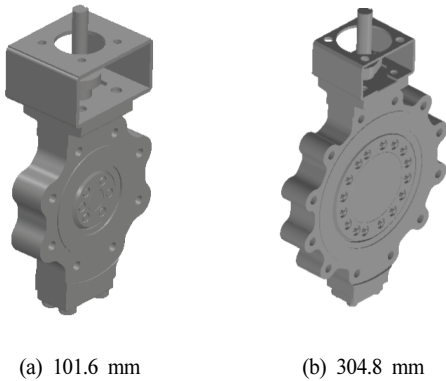


Fig. 3 Geometry configuration of butterfly valves

Table 2 Computational conditions for structure analysis

Solver	ANSYS v14.5	
Isothermal condition	142.61 °C	
valve diameter [mm]	101.6	304.8
actuator mass [kg]	16	22
actuator torque [N·m]	321.7	1873.1
inner pressure [MPa]	1.965	1.965

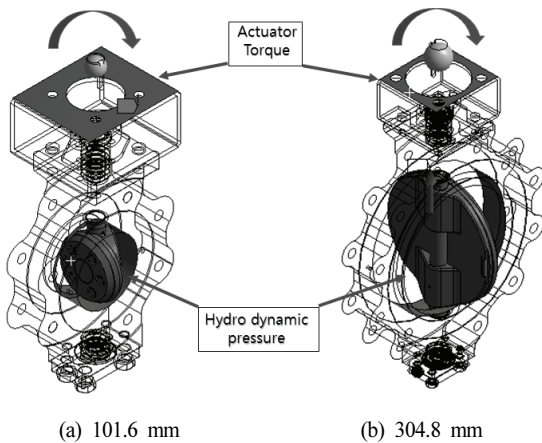


Fig. 4 Boundary condition of butterfly valves

3. 저개도에서의 공동현상

이전 연구에서 12 inch 밸브의 유동특성을 확인하기 위해 설계조건하에서 수치해석을 수행하였다. 그러나 개도 10°, 20° 조건에서 과도하게 낮은 압력을 가지는 영역이 발생하는 것을 확인하였다. 수치해석 결과를 시험결과와 비교해보았을 때, 이는 저개도의 좁은 단면적으로는 설계조건의 과도한 유량이 흐를 수 없기 때문에 발생하는 것으로 여겨진다. 이러한 현상은 공동현상의 발생 가능성이 있음을 의미한다.^[5]

이런 관점에서 저개도에서의 공동현상 발생 여부를 확인하기 위해 Table 3과 같은 조건에서 수치해석을 수행하였다. 개도 10°와 20°의 경우 공동현상이 발생하는 질량유량 조건을 확인하고자 하였으며, 개도 30°와 40°의 경우에는 설계조건에서 밸브가 작동할 때 공동현상 발생 여부를 확인하고자 하였다. 본 해석은 ANSYS CFX의 공동 모델(Rayleigh-Plesset model)을 사용하여 해석을 수행하였다.

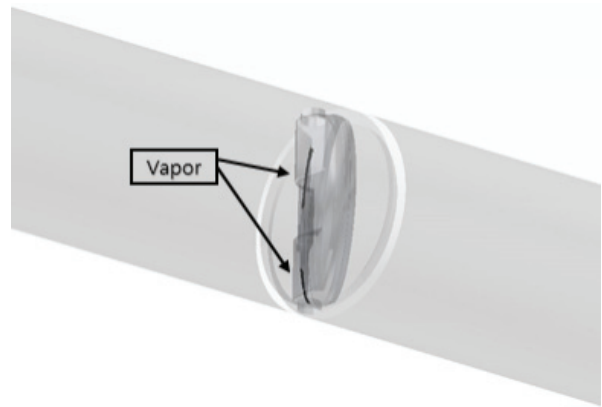
Fig. 5는 가장 낮은 개도인 10°에서 질량유량을 변화시키며 공동현상을 고려한 해석을 수행했을 때 vapor의 volume fraction을 나타낸 그림이다. 시트와 디스크에 의해 유동 단면적이 좁아지는 부분에 공동현상이 발생하는 전형적인 결과를 확인하였다. 또한 100 kg/s의 질량유량에서는 공동현상이 발생하였으나 50 kg/s의 질량유량의 경우 공동현상이 발생하지 않았다. 이는 좁은 단면적으로도 공동현상이 발생하지 않고 충분히 흐를 수 있는 유량조건이 주어졌기 때문이라고 판단된다.

또한 실제 작동조건에서 밸브의 개도에 따른 공동현상 발생 여부를 확인하고자 수치해석을 수행하였다. 작동유체인 물의 온도가 142.61°C이기 때문에 포화압력을 385 kPa로 설정하였다. Fig. 6은 개도 30°, 40°에서 vapor의 volume fraction 나타낸 그림이다. 앞선 해석과 동일하게 시트와 디스크에 의해 유동 단면적이 좁아지는 부분에 공동현상이 발생하였으며, 실제 작동 유량조건에서 개도 30°에서는 공동현상이 발생하지만, 개도 40°부터는 공동현상이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

또한 Fig. 7에 밸브의 개도와 질량유량에 따른 공동현상 발생 여부를 그래프로 나타내었다. 이를 참고하여 실제 원자력 발전소의 냉각공조계통과 SFS에 밸브가 설치될 때 공동현상 여부를 예측할 수 있을 것으로 사료되며, 발생이 예상되는 경우 공동현상을 저감하기 위한 형상 최적화 혹은 다공판 등의 추가적인 구조물 설치가 필요할 것으로 판단된다.^[7,8]

Table 3 Computational conditions for fluid analysis using cavitation model

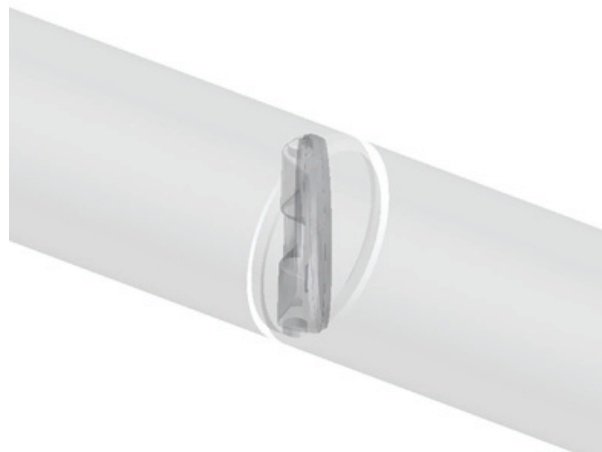
Solver		ANSYS CFX v14.5	
Turbulent model		k-ε	
Working Fluid		Water(isothermal 142.61 °C)	
Valve diameter(<i>D</i>) [mm]		304.8	
Opening degree [°]		10, 20	30, 40
	Inlet [kPa]	3185	3185
	\dot{m} [kg/s]	50, 100(10°) 100, 150, 200 (20°)	283.88
	Wall	No slip	No slip



(a) Opening angle 30 °



(a) Mass flow rate 50 kg/s



(b) Opening angle 40 °

Fig. 6 vapor volume fraction at different opening angles



(b) Mass flow rate 100 kg/s

Fig. 5 vapor volume fraction at different mass flow rate in opening angle 10 °

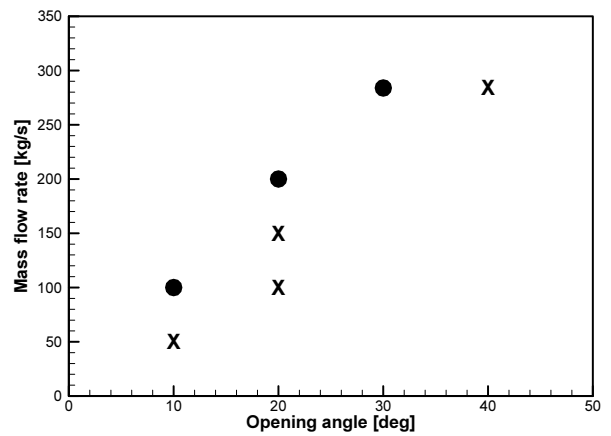


Fig. 7 Possibility of cavitation at various conditions

4. 내진해석

4.1 고유진동수

원자력 발전소용 3축 편심 나비형 밸브의 고유진동수가 지진의 진동수 범위인 33 Hz 내에 들어오게 되면 공진에 의해 밸브가 심각하게 손상될 우려가 있다. 따라서 공진에 의한 손상을 피하기 위하여 modal 해석을 통한 101.6 mm, 304.8 mm 밸브의 고유진동수를 확인하였으며 이를 Table 4 와 5에 나타내었다.^[9]

진동해석에서 가장 취약하다고 할 수 있는 1차, 2차, 3차 모드에 대한 공진주파수를 확인하였다. 해석 결과 각 직경별 밸브의 고유진동수가 지진의 진동범위인 33 Hz보다 큰 것을 확인하여 지진에 의한 공진과는 관계가 없다는 것을 확인하였다. 이를 통해 지진에 의한 공진이 발생하지 않기 때문에 밸브에 대한 정적내진해석을 수행하기 적합하다는 것을 확인하였다.

Table 4 Natural frequency at 101.6 mm valve

mode	0 ° [Hz]	90 ° [Hz]
1	108.1	108.1
2	156.7	156.7
3	235.7	235.7

Table 5 Natural frequency at 304.8 mm valve

mode	0 ° [Hz]	90 ° [Hz]
1	113.9	114.0
2	197.2	197.6
3	263.2	263.2

4.2 정적내진해석

정적내진해석은 내진설계 해석방법 중 정확성이 가장 떨어지지만 공진과 관련이 없는 구조물의 경우 간단한 해석을 통해 내진해석을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 지진에 의해 3축 편심 나비형 밸브에 5G의 하중이 가해질 때 밸브에 발생하는 응력 및 변형률을 예측하고자 정적내진해석을 수행하였다. 실제 밸브가 작동되는 조건을 모사하고자 모터가 밸브에 가하는 토크와 밸브 내부를 흐르는 작동유체에 의한 내압을 고려하여 수치해석을 수행하였다.

각 직경별 0°, 90° 개도의 밸브에 대한 정적내진해석 결과 예측된 최대응력과 이를 통해 계산된 안전계수를 Table 6, 7에 나타내었다. 5G의 지진에 대해서는 모터 고정부인 요크 및 밸브 커버 상단에만 영향이 있는 것을 확인 하였다. 또한

각 직경별 0°, 90° 개도 모두에서 항복응력보다 낮은 최대응력이 발생함을 확인하여 지진에 대해서는 구조적으로 안전하다고 판단하였다.

따라서 실제 원자력 발전소에 본 연구에 사용된 3축 편심 나비형 밸브가 체결되었을 때 지진이 발생하더라도 밸브에 항복응력보다 낮은 최대응력이 발생하기 때문에 구조적으로 안전하고, 냉각공조계통과 SFS에도 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 사료된다.

Table 6 Max stress and safety factor at 101.6 mm valve

	Max Stress[MPa]	Safety factor
0 °	106	2.36
90 °	72	3.47

Table 7 Max stress and safety factor at 304.8 mm valve

	Max Stress[MPa]	Safety factor
0 °	177	1.41
90 °	190	1.32

6. 결 론

밸브가 저개도로 열렸을 때는 작동유체가 흐를 수 있는 단면적이 좁아, 유속이 증가하고, 높은 압력강하로 인해 유체의 압력이 포화압력 이하로 감소하여 기화하는 공동현상이 발생할 가능성이 있다. 따라서 저개도에서 공동현상을 고려한 수치해석을 수행하였으며, 낮은 개도인 10°와 20°에서 질량유량을 변화시켜가며 수치해석을 수행하였다. 해석결과, 100 kg/s의 질량유량에서는 공동현상이 예측이 되었으나, 50 kg/s의 낮은 질량유량에서는 공동현상이 예측되지 않았다. 추가적으로 실제 밸브가 작동하는 조건에서 개도에 따른 공동현상 발생 여부를 확인하고자 개도 30°, 40°에서 수치해석을 수행하였으며, 30°에서는 공동현상이 예측되었으나 40°에서는 공동현상이 예측되지 않았다.

따라서 실제 원자력 발전소에 본 연구에 사용된 밸브가 체결될 경우 개도 30° 이하에서는 공동현상이 발생할 것으로 예측되기 때문에 이를 저감하기 위해 설계 최적화, 다공판 등의 구조물 추가, 작동조건의 최적화 등이 필요할 것으로 사료된다.

또한 지진에 의한 밸브의 구조적 파손에 대한 예측을 하기 위해 modal 해석과 정적내진해석을 수행하였다.

먼저 밸브의 공진주파수를 예측하여 지진에 의한 공진 발생 여부를 확인하기 위해 modal 해석을 수행하였으며, 해석 결과 직경 101.6 mm와 304.8 mm 밸브 모두 지진의 주파수 범위인 33 Hz보다 큰 공진주파수를 가짐을 확인하였고, 이를 통해 정적내진해석이 적합한 것을 확인하였다.

추가적으로 5G의 지진이 발생하였을 때 밸브에 발생하는 응력 및 변형량을 예측하기 위하여 정적내진해석을 수행하였다. 밸브가 실제 작동하는 조건을 모사하기 위해 작동기의 토크와 밸브 내부를 흐르는 작동유체에 의한 내압을 고려하였으며, 해석 결과 요크 및 밸브 커버 상단에만 변형량과 응력이 나타남을 확인하였다. 또한 각 직경별 0°, 90° 개도 모두에서 항복응력보다 낮은 최대응력이 발생함을 확인하였다.

따라서 실제 원자력 발전소에 본 연구에 사용된 3축 편심 나비형 밸브가 체결되었을 때 5G의 지진이 발생하더라도 밸브 디스크 및 시트에는 영향이 없으며, 밸브 요크 및 커버 상단에도 항복응력보다 낮은 최대응력이 발생하기 때문에 구조적으로 안전하고, 냉각공조계통과 SFS에도 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20161520101470).

References

- (1) H. S. Lee, M. H. Choi, "Review of High Vibration of Multistage Orifice Piping by Cavitation", 2019, Proceedings of the KSFM Summer Annual Meeting, pp. 214-217
- (2) H. S. Lee, G. J. Do, S. H. Lee, 2006, "Flow Analysis in a Ball Valve Subject to Cavitation", The Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Conference, pp.19~24
- (3) S. C. Hong, J. H. Kim, C. S. Song, B. D. Kim, S. K. Kim, H. S. Kim, 2010, "Study on the Seismic Characteristic Analysis of Controlled Closure Check Valve in Nuclear Power Plants", The Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Conference, pp. 287~291
- (4) J. T. Ahn, S. U. Han, K. C. Lee, S. H. Han, 2011, "Structural Safety Analysis of Butterfly Valve for Nuclear Power Plant", The Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Conference, pp. 1381-1386
- (5) S. E. Jang, S. H. Jo, W. H. Lee, I. S. Jeon, Y. W. Jang, H. J. Kim, 2018, "A Numerical Study on Hydrodynamic Torque Generated in 3-Axis Eccentric Butterfly Valves for Nuclear Power Plants", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 5, pp. 28~33
- (6) J. R. Valdes, J. M. Rodriguez, R. Monge, J. C. Pena, T. Putz, 2014, "Numerical Simulation and Experimental Validation of the Cavitating Flow Through a Ball Check Valve", Energy Conversion and Management, Vol. 78, pp.776-786
- (7) B. Y. Kang, D. J. Kim, J. G. Noh, C. H. Choi, "Effect of the Relative Position of Blades between an Inducer and an Impeller on the Performance and Cavitation in a Turbopump", 2018, The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 4, pp. 24-29
- (8) J. S. Kim, H. S. Shim, K. Y. Kim, "Geometric Effects of Orifice-type Multi-stage Trim on Pressure Drop and Cavitation Characteristics of a Control Valve", 2018, The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 3, pp. 35-43
- (9) X. M. Yu, L. W. Zhong, X. X. Yue, 2010, "Numerical Simulation of Vibration Performance for Nuclear Island Radioactive Boron Acid Water Control Valve", 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering