

고온용 볼 밸브의 형상 최적화

김남희, 변지훈, 이권희*
동아대학교 기계공학과

Shape Optimization of Ball Valve for High Temperature

Nam-Hee Kim, Ji-Hoon Byeon, Kwon-Hee Lee*

Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 볼밸브는 밸브의 가운데 구멍이 뚫린 구 모양의 볼이 회전에 의해 구멍을 닫거나 열어 밸브를 개폐시킨다. 본 연구에서는 플랜트장치용 고온용 볼밸브에 관한 것으로서, 사용되는 유체는 고온의 스팀을 사용하는 볼밸브이다. 고온의 스팀을 유체로 사용함에 따라 볼밸브에 열응력이 발생하기 때문에 초기모델에서의 열-구조 연성해석을 실시하여 고온용 볼밸브의 구조적 안정성을 검토하였다. 검토한 결과 폴리테트라 플루오르에틸렌 재질의 시트에서 항복응력 이상의 값이 나타나었다. 본 연구에서는 시트의 최적화를 실시하여 항복응력 이내의 구조적 안정성을 찾고자 하였다. 시트의 최적화를 위해 2개의 형상설계 변수를 선정하였고, 최적화 과정 중에 설계요구조건으로 시트의 길이와 두께에 관련하여 기준을 고려하였다. 시트의 응력과 질량을 고려한 30개의 표본점을 만들어 최적화 과정을 진행하였으며, 최적화 기법으로서 크리깅 내삽법을 이용한 메타모델 최적화 방법을 적용하였다. 그 결과 항복응력 이내의 구조적 안정성을 만족하는 시트의 두께와 길이를 찾을 수 있었고, 이에 따른 개도별 유동해석을 실시하여 볼밸브의 성능지표를 나타내는 유량계수 값을 구하여 볼밸브의 성능을 검토하였다.

Abstract The main purpose of the ball valve ball is to be moved by the rotation of the stem when fully open or completely closed. In this study the heat of the initial model, which used a structure interaction analysis technique, tried to examine the structural safety of the high temperature for the ball valve. In the initial model the stress of the exiting sheet was more than the yield strength. We selected two design shapes with variables of length and thickness for the optimization of the sheet. The Kriging interpolation method was applied to a meta-model-based optimization technique. As a result, it was possible to find a thickness and length for the sheet within the yield strength. This was done by measuring the value of the capacity coefficient of the valve and evaluating the performance of the ball valve.

Keywords : Ansys-CFX, Ball Valve, Flow Coefficient, Kriging, Optimization

1. 서론

밸브는 배관 시스템에서 유체의 흐름을 제어하는 기능을 가진 기계적인 장치로, 유체의 차단 및 수송, 유량 제어, 유체방향 전환, 역류방지, 압력제어 및 감압에 사용된다. 또한, 산업 설비의 핵심 부품으로 선박, 정유, 석유화학, 배관 등 유체를 이용한 모든 산업에 널리 이용되고 있다. 산업현장에서 밸브의 내부누설구조의 손상으로

인해 거대 플랜트의 화재사고가 기인되는 경우가 많다. 따라서 밸브는 유체가 주변으로 새어 나가지 않아야 하고, 내부에서 누설이 되지 않아야 한다[1].

볼밸브는 완전 열림 상태에서는 볼밸브의 배관의 안지름과 볼밸브의 유체통과 구멍의 안지름이 같아서 유체 저항이 거의 없어 압력손실이 적은 특징을 갖고 있으며, 유체를 완전차단 하는 목적으로 사용되는 밸브 이므로 밸브 시트의 누설이 되지 않는 것이 중요하다[2].

본 논문은 산업통상부 지정 지혁혁신센터사업(RIC) 고기능성밸브기술지원센터 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kwon Hee Lee(Dong-A Univ.)

Tel: +82-2-200-7683 email: leekh@dau.ac.kr

Received November 11, 2016

Revised December 29, 2016

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

현재까지 볼밸브의 개폐각도에 따른 유동 특성에 대하여 많은 연구가 있었다. 참고문헌 [3]에서는 CFD 해석방법을 이용한 볼밸브의 유량계수 예측에 관하여 연구하였다. 하지만 밸브의 누설에 중요한 시트링에 관한 구조적 안전성을 고려한 최적설계에 관한 연구는 많지 않다.

본 연구는 볼밸브 시트의 열-구조 연성해석을 실시하여 구조적 안전성을 검토하고, 이에 따른 결과를 이용하여 시트의 형상 최적화를 수행 하고자 한다. 열-구조 연성해석 수행 후 얻은 취약부분에 대하여 얻은 해석결과 값을 재료 물성치의 항복강도를 기준으로 판단하였고, 크리킹 내삽법을 이용한 메타모델의 최적화를 수행하였다. 또한, 형상 최적화가 된 볼밸브의 유량계수를 구하여 볼밸브로서의 기능을 검토하고자 하였다. 유한요소해석을 수행하기 위하여 상용프로그램인 SolidWorks를 이용하여 모델링을 하였으며, 열-구조 연성해석을 수행하기 위하여 Ansys Workbench, 유동해석을 위해 Ansys CFX를 각각 이용하였다.

2. 고온용 볼밸브

2.1 볼밸브의 구조

본 연구에서 사용된 볼밸브는 유체가 흐르는 Body, Cap으로 이루어져 있으며, 유체의 개폐 제어는 볼과 볼을 제어하는 Stem으로 이루어져 있으며, Stem의 회전으로 볼이 회전하는 구조를 가진다. 밸브의 볼과 Body 사이의 마찰을 줄이고 누설을 방지하는 시트가 Body와 Cap 사이에 존재하며, 상용프로그램인 SolidWorks를 이용하여 모델링 하였다.

본 연구에서 사용된 볼밸브는 구경 25mm이며, PTFE 재질을 가지는 시트로 구성된 End Entry 방식을 가진 밸브이다.

Table 1. Property of PTFE

Property	Value
Density (kg/m ³)	2159
Elasticity (MPa)	550
Poisson's Ratio	0.46
Compressive Yield Strength (MPa)	24
Thermal Conductivity (W/m℃)	0.25
Specific Heat (J/kg℃)	0.3
Coeff. Thermal Expansion(/℃)	0.001

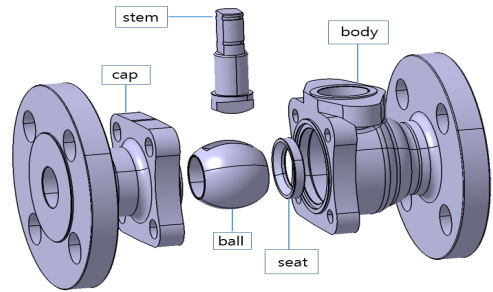


Fig. 1. 3D Model of Ball Valve

2.2 볼밸브의 열-구조 연성해석

열-구조 연성해석을 하기 위해 상용프로그램인 Ansys Workbench를 사용하였다. 유체가 이동하는 관에 밸브의 사용조건인 260℃의 온도를, 밸브 전체에 자연대류 5 W/m²를 경계조건으로 입력하였다. 열 해석을 수행하여 얻은 볼밸브의 온도 분포 결과를 구조해석의 하중조건으로 입력하여 열응력을 확인 하고자 하였다. 연성해석을 수행하기 위한 seat의 유한요소 모델은 Fig.2과 같이 육면체 요소로 모델링 되었으며 나머지 부분은 사면체 요소로 모델링 되었다. 전체 모델에서 절점 90만개 요소 45만개가 사용되었다. 볼트와 너트의 체결 부위를 완전 구속 시키고 사용압력에 따른 응력 이외에 추가로 열에 의한 충격하중이 발생하기 때문에 사용자에게 요청에 따라 기존 설계압력 10bar에 안전율 5를 고려한 50bar를 배관 내부에 적용했다. 열-구조 연성해석 결과 Fig. 3에 PTFE의 재질을 가진 시트에서 최대 폰미세스(von-Mises) 응력을 확인 하였을 때 압축항복강도 값 24MPa의 175% 이상 값인 42MPa이 시트 내부에서 나타나는 것을 볼 수 있었다. 따라서 압축항복강도 값 이하의 응력을 얻기 위해서 형상 최적화를 수행하였다.

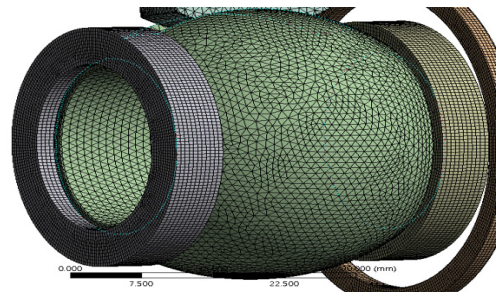


Fig. 2. Finite Element Model of Ball Valve

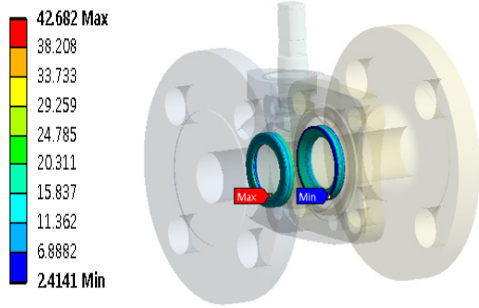


Fig. 3. Stress Result of Seat on Structural Analysis

3. 최적화 기법을 이용한 시트의 형상 최적화

3.1 크리깅 메타모델[4~6]

본 연구에서는 설계변수로 선정된 시트의 두께와 길이를 크리깅 내삽법을 이용하여 발생하는 응력 값과 형상에 따른 질량을 파악하는데 나타내었다. 크리깅 메타모델에서는 전역적 근사화 모델이 다음과 같이 구성된다.

$$y(x) = f(x) + z(x) \quad (1)$$

$y(x)$ 는 실제 함수이며 다항식 $f(x)$ 와 확률 변수 $z(x)$ 로 이루어져있다. 여기서 다항식 $f(x)$ 는 상수로 대체할 수 있는데 이를 식 (2)에 나타내었다.

$$y(x) = \beta + z(x) \quad (2)$$

여기서 β 는 상수이고, $z(x)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 확률변수이다. 상관행렬 및 상관함수는 식(3), (4)와 같이 표현된다. 상관함수의 선택에 따라 크리깅 근사함수의 각 점들 사이에서의 정확도가 결정된다.

$$R(\theta; x^j, x^k) = Corr[z(x^j), z(x^k)] \quad (3)$$

$$R(\theta; x^j, x^k) = \text{Exp}\left[-\sum_{i=1}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2\right] \quad (4)$$

또한 \hat{y} 을 근사 모델의 함수라고 한다면 $y(x)$ 와 \hat{y} 의 평균제곱오차(mean squared error)가 최소가 되도록 하려면 \hat{y} 는 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \hat{\beta}) \mathbf{q} \quad (5)$$

여기서 $\hat{\beta}$ 는 β 의 일반화된 추정치, \mathbf{R}^{-1} 은 상관행렬 \mathbf{R} 의 역행렬, \mathbf{r} 은 상관벡터, \mathbf{y} 는 n_s 개의 표본데이터 벡터이고, \mathbf{q} 는 n_s 개 성분을 갖는 단위벡터이다.

우도함수(likelihood function) L 은 다음 식 (6)과 같이 정의된다.

$$L(\mathbf{y}, \theta, \beta, \sigma^2) = \frac{(2\pi\sigma^2)^{-n_s/2}}{\sqrt{|\mathbf{R}|}} \cdot \text{Exp}\left[-\frac{(\mathbf{y} - \beta\mathbf{q})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \beta\mathbf{q})}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

위 식을 이용하여 구한 β 와 σ^2 의 최대우도 추정치는 식(7), (8)에 나타내었다.

$$\hat{\beta} = (\mathbf{q}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q})^{-1} \mathbf{q}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{y} - \hat{\beta}\mathbf{q})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \hat{\beta}\mathbf{q})}{n_s} \quad (8)$$

같은 방법으로 \mathbf{R} 의 파라미터인 θ 의 추정치는 다음 식 (9)로부터 구해진다.

$$\text{Maximize} - \frac{[n_s \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|\mathbf{R}|]}{2} \quad (9)$$

여기서 $\theta_i (i=1, 2, \dots, n) > 0$ 이다.

본 연구에서는 실험점간의 최소거리를 최대화시키는 라틴하이퍼큐브 표본방법을 이용하여 n_s 개의 표본점을 생성하였다.

3.2 최적설계 정식화 및 설계과정

구조해석 결과 PTFE 재질의 시트에서 항복강도 이상의 응력이 발생되었다. 본 연구에서는 시트의 길이와 높이를 변경시켜 PTFE 시트의 압축항복강도 이하가 될 수 있도록 하였다. Fig. 4와 같이 높이와 길이에 대한 시트의 설계변수를 선정하고 최적설계를 위한 정식화는 식 (10)-(11)으로 표현된다.

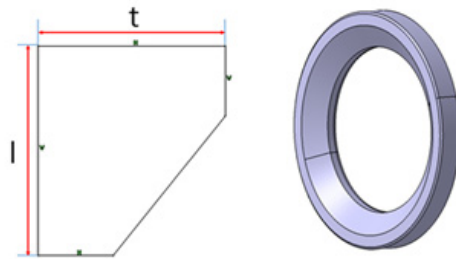


Fig. 4. Design Variable

$$\text{Minimise Weight (kg)} \quad (10)$$

$$\text{Subject to } 4.95 \leq t \leq 6.05 \text{ (mm)}$$

$$4.50 \leq l \leq 6.05 \text{ (mm)}$$

$$\sigma < 24 \text{ (MPa)} \quad (11)$$

본 연구에서는 표본점이 골고루 분포 될 수 있도록 다음과 같은 라틴하이퍼큐브 표본 방법을 이용하였다. 즉, 실험점간의 최소거리를 최대화 시키는 라틴하이퍼 큐브 표본방법을 이용하였다.

라틴하이퍼큐브 방법으로 생성한 $n_s=30$ 개의 표본점을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Analysis Result of the Sample Points Using LHD

Number	t (mm)	l (mm)	σ (MPa)	Weight (kg)
1	5.5	5.28	35.64	4.07
2	4.95	6.04	51.12	4.07
...
29	5.91	5.85	63.51	4.07
30	5.63	5.08	39.91	4.07

크리깅 내삽법을 이용하면 수많은 해석을 수행하지 않고 메타모델을 생성하여 시간을 단축 할 수 있다. Ansys를 이용하여 구한 최적화 형상의 길이는 기존 4.1mm에서 4.5mm로 선정되었고, 두께는 5mm에서 4.95mm로 선정되었으며, Fig.5와 같이 형상 변경한 모델을 해석한 결과 응력은 기존 42.68MPa에서 23.9MPa로 감소한 것을 알 수 있었다. 형상변경으로 인하여 PTFE의 Compression Yield Stress 보다 작은 응력 값을 얻어 구조적 안전성에 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

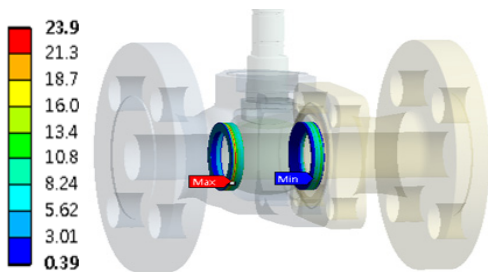


Fig. 5. Structural analysis result of optimized shape

Table 3. Optimization Result

	Initial	Optimization
Mass (kg)	4.07	4.07
Stress (MPa)	42.68	23.9
l (mm)	4.1	4.5
t (mm)	5.0	4.95

3.3 밸브용량 측정

시트의 형상 최적화를 수행하고 밸브의 용량을 측정하여 볼밸브로써의 기능을 검토하고자 하였다. 미국 규격 협회 ANSI의 기준으로 볼밸브의 차압 측정 방법과 용량계수 측정 방법을 근거하여 적용하였다[6]. 상용프로그램인 ANSYS CFX를 사용하였으며, 개폐각도는 Fig. 7과 같이 0°에서 90° 사이에 15° 간격으로 6개의 모델의 유동특성을 파악하였다. 사용유체는 260℃의 증기가 사용되었으며, 볼밸브의 유동 안정화를 위하여 입구, 출구를 각각 직경의 10배, 20배로 확장시켜 4 절점을 가지는 사면체의 유한요소 모델을 생성하였다. 볼밸브 입구에는 10bar의 사용압력을 선정하였고, 출구는 대기압으로 경계조건을 선정하였다.

각도가 변함에 따라 Body와 Ball 사이의 유동장이 좁아지므로 조밀한 격자를 부여하여 Fig. 8과같이 유한요소 모델을 생성하였다. 밸브의 용량계수를 구하는 과정이기에 시간을 고려하지 않은 Steady State 유동해석 기법을 사용하였으며, 난류모델은 k- ϵ 과 k- ω 의 장점을 가진 SST 난류모델을 적용하였다. 압력 탭의 위치는 시험구간의 ANSI 배관 치수 기준에 따라 밸브 직경의 2배, 6배로 선정하였다. 차압에 따른 밸브의 용량계수를 구하는 식은 Table.4와 같이 나타나 있다.

유체의 운동은 연속방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{12}$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau \tag{13}$$

전체 에너지 방정식

$$\frac{\partial (\rho h_{total})}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h_{total}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{u} \cdot \tau) \tag{14}$$

에 의하여 지배된다.

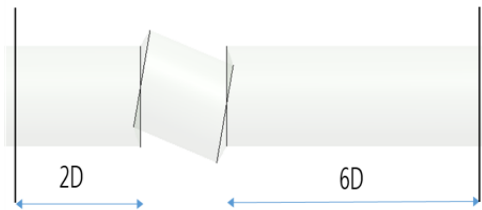


Fig. 6. Measurement Location Constant Value of Ball valve

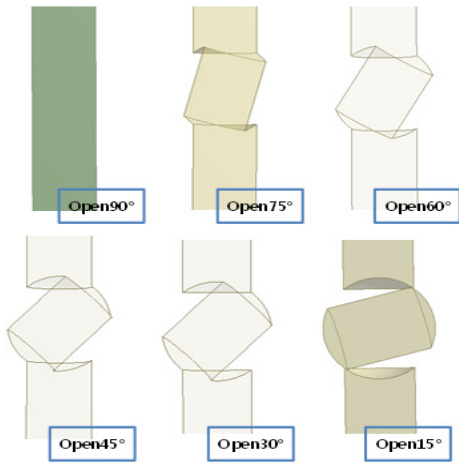


Fig. 7. Form of Ball Valve with Angle

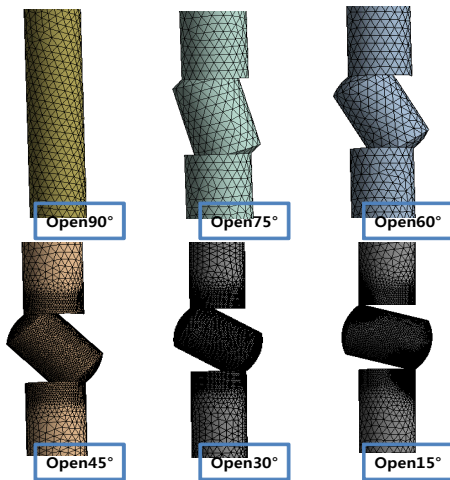


Fig. 8. Finite Element Model of Ball Valve with angle

Table 4. Cv Measuring Table

Fluid	Pressure	
	$P_2 \geq \frac{P_1}{2}$	$P_2 \leq \frac{P_1}{2}$
Liquid	$Cv = 1.17 \times Q_1 \times \sqrt{\frac{G}{\Delta P}}$	
saturated steam	$Cv = \frac{W(1+0.0013t')}{13.7 \times \sqrt{\Delta P(P_1 + P_2)}}$	$Cv = \frac{W(1+0.0013t')}{11.9 \times P_1}$
superheated steam	$Cv = \frac{W}{13.7 \times \sqrt{\Delta P(P_1 + P_2)}}$	$Cv = \frac{W}{11.9 \times P_1}$

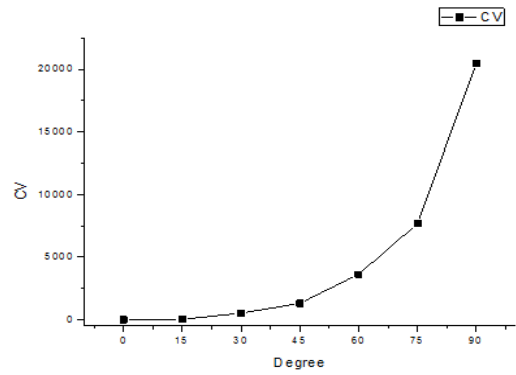


Fig. 9. Cv Graph of Ball Valve

P_1, P_2 의 압력을 구하고 Table 4를 참고하여 Fig. 9과 같이 밸브의 성능을 나타내는 지표인 밸브 용량을 측정하여 개도별로 나타내었다. 유동해석에 대한 결과는 밸브 용량계수를 측정하는 유사 논문과 비교하였을 때 밸브 용량 수치가 유사한 흐름을 나타냄을 알 수 있었다[8].

4. 결론

본 연구에서는 고온용 볼밸브의 시트의 형상 최적화를 수행하고 밸브 용량 계수를 측정하여 밸브로써의 기능을 검토한 결론은 다음과 같다.

1. 안전율 5배를 고려한 열-구조 연성해석 결과 시트의 항복강도 이상의 응력이 발생하였다.
2. 크리깅 기법을 이용한 메타모델 생성과 최적화를 수행하여 시트의 항복강도 이내의 결과 값을 얻었다.
3. 유동해석을 통하여 설계하고자 하는 볼밸브의 유량계수 값을 구하였고, 유사 논문과 비슷한 흐름을 나타내었다. 추후 실험을 통하여 실험 데이터와 비교하고자 한다.

References

- [1] N. H. Kim, "Shape Optimization ball valve for a high temperature" pp. 4-10, Dong-a University, 2015.
- [2] B. K. Choi, "The Valve Primer," Chung Mun Gak, pp. 70-81, 2010.
- [3] H. P. Jeon, D. Y. Kim, J. C. Lee, "CFD Analysis on the Flow Characteristics with Flow Coefficient in a PFA

Lined Ball Valve for Different Opening Degrees," KOREAN SOCIETY FOR FLUID MACHINERY, vol. 17, no. 4, pp. 76-80, Aug. 2014.
DOI: <http://doi.org/10.5293/kfma.2014.17.4.076>

- [4] Guinta A. and Watson L., " A Comparison of Approximation Modeling Techniques: Polynomial Versus Interpolating Models," Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, St. Louis, MO, AIAA, vol. 2, Sept.2-4, pp. 392-440(AIAA-98-4758), 1998.
DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1998-4758>
- [5] K. H. LEE., "Optimization of a Drive-Side Ariba Using Kriging Based Approximation Model," J. of Mechanical Science and Technology, vol. 19, no. 1, pp. 116-126, 2005.
- [6] K. H. LEE., Bang I. K., "Structure Design of Automotive Door Using the Kriging Models," Transactions of the Korean society of Automotive Engineers, vol. 15, no. 1, pp. 146-153, 2007
- [7] ANSI/ISA-75.01.01
- [8] H. P. Jeon, W. S. Lee, C. S. Kim, J. C. Lee, "Prediction of the Flow Coefficient of a PFA Lined Ball Valve Using the CFD Simulation Method," KOREAN SOCIETY FOR FLUID MACHINERY, vol. 19, no. 4, pp. 35-38, Aug. 2016.
DOI: <http://doi.org/10.5293/kfma.2016.19.4.035>

김 남 희(Hee-Nam Kim)

[준회원]



- 2014년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>

기계설계, 최적설계

변 지 훈(Hoon-Ji Byeon)

[준회원]



- 2011년 3월 : 동아대학교 기계공학과 학사과정

<관심분야>

기계설계, 최적설계

이 권 희(Kwon-Hee Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계설계학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계설계학과 (공학박사)
- 1994년 6월 ~ 1999년 2월 : 대우 자동차 선임연구원
- 2002년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

기계설계, 최적설계