

## 메타모델을 이용한 압력방출밸브의 구조안전성 예측

김남희<sup>1</sup>, 이권희<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>동아대학교 기계공학과

### Prediction of the Structural Safety of a Relief Valve Using Metamodel

Nam-Hee Kim<sup>1</sup>, Kwon-Hee Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

**요약** 압력방출밸브는 높은 압력을 조절하여 안정성을 유지하는 기계적 요소로, 압력용기, 증발기, 파이프라인 등 사용되고 있다. 높은 압력이 발생되면 스프링의 탄성력을 사용하여 압력방출밸브의 출구로 유체를 흘려보냄으로써 압력을 낮추게 되고, 정상적인 압력으로 돌아오게 되면 압력방출밸브는 초기상태로 돌아가게 된다. 압력방출밸브는 순조롭게 작동되어지기 위하여 요구되는 구조적 안정성을 만족하도록 설계되어야한다. 본 연구에서는 상업용 소프트웨어 ANSYS/WORKBENCH를 사용하여 압력방출밸브의 유동해석과 구조해석을 수행한 결과 구조적 문제를 발생시킨다는 것을 알 수 있었다. 따라서 구조적 안전성을 만족하는 설계를 수행하고, 설계변수에 따른 구조적 안전성을 예측해보고자 한다.

**Abstract** A relief valve is a mechanical element to keep safety by controlling high pressure. Usually, the high pressure is relieved by using the spring force and letting the fluid to flow from another way out of system. When its normal pressure is reached, the relief valve can return to initial state. The relief valve should be designed for smooth operation and should satisfy the structural safety requirement under operating condition. The commercial software ANSYS/WORKBENCH is utilized for flow and structural analysis. Very high pressure may cause structural problem due to severe stress. The study suggests the design satisfying the structural design requirement

**Keywords** : CFD, Metamodel, Relief Valve, Strength, Structural Analysis

### 1. 서론

밸브는 유체유동 또는 압력 시스템에서 유동 및 압력을 조절하는 장치로, 유체의 차단 및 수송, 유량 제어, 유체 방향 전환, 역류 방지, 압력 제어 및 감압에 사용된다 [1]. 밸브는 산업 설비의 핵심 부품으로 선박, 정유, 석유화학, 배관 등 유체를 이용한 모든 산업에 널리 적용되고 있다. 본 연구에 사용된 압력방출밸브는 발전소나 일반 플랜트 계통 내의 압력용기, 증기 발생장치 그리고 배관 및 부속기기를 설계압력 이상의 과압으로부터 손상 또는 폭발에 따른 물리적, 인적 재해를 예방하기 위한 안전관

련 핵심 설비 요소이다[2]. 압력방출밸브는 장치에 허용되는 최대압력을 미리 설정하여 작동 중에 그 설정압력이상이 되면 개방되어 급속히 압력이 떨어진다. 정상 압력으로 되돌아오면 다시 닫히는 밸브로, 단순 기능을 수행하는 일종의 기계 장치이나, 정확한 작동성과 강한 내구성이 요구되는 매우 세밀한 기기이다. 국내 경우 압력방출밸브는 볼밸브를 제외하고는 실제 선박에 대한 적용 실적이 미흡하고 신뢰성도 부족하여 해외 선주들의 선호도가 매우 낮아 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다. 국내 선박용 밸브 업체는 범용밸브에 대해서 경쟁력을 가지고 있지만 특수목적선 및 해양플랜트 분야의 특수

본 연구는 산업통상자원부 지정 지역혁신센터 사업(RIC) 고기능성밸브기술지원센터 지원으로 수행되었음. 그리고 본 주제를 제 공해 주신 GMT인더스트리의 고장훈 사장과 고윤호 과장께 감사드립니다.

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

Tel: +82-51-200-6981 email: leekh@dau.ac.kr

Received August 17, 2015

Revised September 10, 2015

Accepted September 11, 2015

Published September 30, 2015

제어 밸브에 대해서는 기술력과 경험 부족으로 고전 중 이다. 해외 선진 기업들은 대부분 자체적인 성능시험설 비를 보유하고 있으며, 이를 신제품 개발 및 신뢰성 제고에 활용해 국제적인 경쟁력을 높이는데 주력 중이다. 반면 국내는 압력방출밸브에 대한 연구는 진행되고 있으나 미미한 실정이다[3].

대부분의 연구들은 밸브의 유동특성에 관하여 연구를 수행하고 있지만, 본 연구에서는 고압에 견뎌야 하는 특수 밸브에 관해 범용으로 사용되기 위하여 과일릿 작동형 압력방출밸브 메인밸브의 구조적인 안전성을 검토하고자 하였다. 압력방출밸브는 변형이 발생하면 실링성이 저하되고 누설이 발생하여 제 기능을 하지 못하게 된다. 본 연구에서는 항복강도를 기준으로 구조적 안전성을 평가하였다. 본 연구에서는 우선 상용소프트웨어 프로그램 ANSYS/WORKBENCH를 사용하여 피스톤의 최대 개방 시 유동흐름을 먼저 파악하기 위하여 유동해석을 수행하였다. 유동해석 수행시 고압으로 인하여 압력방출밸브 내부에 와류현상이 발생하고 급격하게 유체가 흘러나가는 양상을 보였다. 하지만 구조적으로 문제가 발생할 수 있기 때문에 구조해석을 수행할 필요가 있다. 구조해석 수행 시 압력방출 밸브의 노즐에서 항복강도 이상의 응력이 발생하였고, 이어 노즐의 형상을 변형하여 구조적 안정성을 얻고자 하였다. 본 연구에서는 발생하는 응력이 항복강도 이하가 될 수 있도록 노즐의 직경을 설계 변수로 선정하여 해석을 재수행하여 구조적안정성을 확인하였다. 요구 성능을 만족하는 밸브 직경을 찾기 위해서는 수많은 해석이 필요하나, 메타모델을 이용하면 적은 해석으로 요구 성능을 만족하는 최적의 밸브직경을 찾을 수 있다. 본 연구에서는 항복강도와 밸브의 직경을 각각 목적함수와 설계변수로 선정하여 메타모델을 이용한 최적화를 수행하였다.

## 2. 압력방출밸브 유동해석

### 2.1 압력방출밸브 구조

압력방출밸브는 직접작동형과 과일릿 작동형으로 분류할 수 있다. 탱크 내의 압력이 서서히 증가해 갈 때 최초로 스펴이 열리는 시점의 압력을 크래킹압력이라고 하고 압력이 더욱 증가하여 스펴이 완전히 열린 상태의 압력을 최대개방압력이라 부른다. 이 둘의 차이를 압력 오버라이드라 부른다. 직접작동형 압력방출밸브는 압력 오

버라이드가 커서 동적 특성이 좋지 않다. 과일릿 작동형 압력방출밸브는 과일릿 조립체에 연결된 배관을 통하여 탱크 압력이 감지되고, 탱크 압력이 설정압력보다 높으면 과일릿 밸브가 열려 탱크 압력이 피스톤으로 전달된다. 이 때 높아진 압력으로 피스톤이 움직이게 되면 주 포켓을 끌어당기게 되고 입구가 열려 가압 가스를 배출하게 되는데, 직접작동형 밸브의 결함을 해소하기 위해 개발되어 사용되고 있다[4].

본 연구에서 사용된 압력방출밸브는 Fig.1 과 같이 과일릿 작동부와 주 밸브로 구성되어 있는 간접 작동형 압력방출 밸브로, 주 밸브에 대하여 분석을 하였다. 본 연구에서 사용된 주 밸브는 사용된 유체가 흐를 수 있는 유로를 포함한 바디, 바디를 덮고 있는 보닛, 유체의 흐름을 막고 있는 피스톤, 피스톤을 감싸고 있는 가이드 그리고 유체의 흐름을 결정하는 노즐로 Fig.2 과 같이 구성되어 있다. 압력방출밸브는 설정압력 이하일 경우 피스톤이 누르고 있는 힘과 압력방출밸브 아래에서 올라오는 유체가 미치는 힘이 평행하여 Fig.2 (a)와 같이 피스톤이 유체의 흐름을 제어하고 있다. 설정압력 이상이 되면 Fig.2(b)와 같이 피스톤이 상승하게 되고 유체는 유로를 통하여 방출하게 된다.

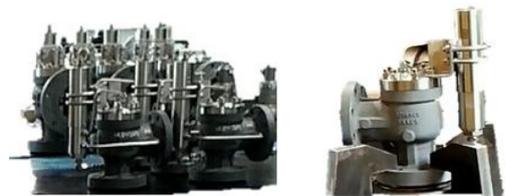


Fig. 1. Relief Valve Model

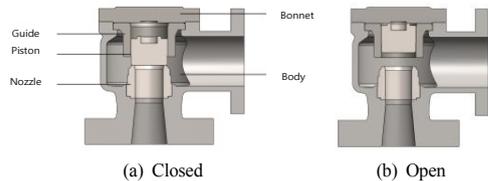


Fig. 2. Cross-section view of Relief Valve

### 2.2 압력방출밸브 유동해석

자연의 모든 현상은 자연을 지배하는 기본법칙을 따라 변천한다. 유체의 흐름도 자연의 한 현상이므로 기본법칙을 따라야 한다. 유체는 중력에 의하여, 그리고 압력 구배가 존재할 때 흐른다. 그리고 흐를 때는 질량과 에너지가 보존되고 에너지는 변화될 때 반드시 방향성을 갖는다. 따라서 3가지 지배방정식에 의해 해석이 가능하다.

다. 해석모델은 다음과 같이 정의한다. 유동은 정상상태, 3차원 유동이다.

밸브와 배관의 벽면은 매끈하다. 난류모델은 아래 식 (1),(2),(3) 연속방정식, 운동량 방정식 그리고 난류모델 방정식의 영향을 받는다. 본 연구에서 사용된 압력방출 밸브는 상용프로그램 Solid Works를 사용하여 3차원 모델링을 생성하였다. 수치해석을 수행하기 위하여 ANSYS CFX를 사용하여 유한요소모델을 생성하였다. 수치해석의 수행 시간을 줄이고 해석의 편리성을 위하여 half 모델을 사용하기 위하여 Fig. 3 과 같이 대칭조건을 사용하였다. 유동해석의 수렴 및 안정성 확보하기 위하여 밸브 입구와 출구를 직경에 비례하여 확장시킨다. 수치해석에 사용된 밸브의 격자는 약 27만개의 노드점을 생성하여 해석에 적용하였고, Table 1에 나타난 경계조건을 해석에 적용하였다. 사용유체는 water을 사용하였고, 난류모델로서는 SST(shear-stress transport) 모델을 적용하였다. 입구조건은 사용압력의 1.6배 안전율을 고려한 250bar의 압력을, 출구조건은 대기압으로 사용하였다. 양쪽대칭면은 Interface를 이용하여 유체의 교류가 이루어지도록 하였고, 벽면에는 No slip조건을 적용하였다.

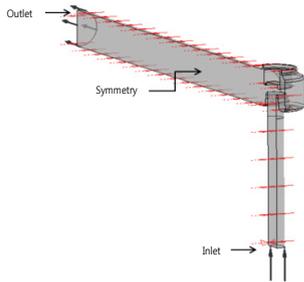


Fig. 3. Fluid analysis Boundary Condition

Table 1. Fluid Analysis Boundary Condition

Boundary Condition	
Fluid	Water
Type	SST
Inlet	250bar
Outlet	0 atm
Interface	Symmetry

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho h_{total})}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h_{total}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{u} \cdot \tau) \quad (3)$$

## 2.2 압력방출밸브 유동해석 결과

Fig.4은 속도분포와 압력분포를 나타내고 있다. Fig.4(a)와 같이 피스톤에서 바다로 빠져나가는 상단부에서 220m/s 이상의 최대속도가 측정되었으며, 유체는 바다에서 빠른 속도로 인하여 회전하며 흘러나가게 된다. Fig.4(b)와 같이 출구 압력과 대기압의 높은 압력차에 의해 발생하는 초음속 유동현상에 의해 250bar 이상의 압력분포가 이루어지는 것으로 판단된다. 높은 압력으로 인하여 바다에서 급격한 압력저하를 난다. 압력방출밸브는 밸브 전 후단의 차압이 크기 때문에 그 결과 밸브목 근처에서 유량이 음속에 의해 제한되는 초경현상이 발생한다[5].

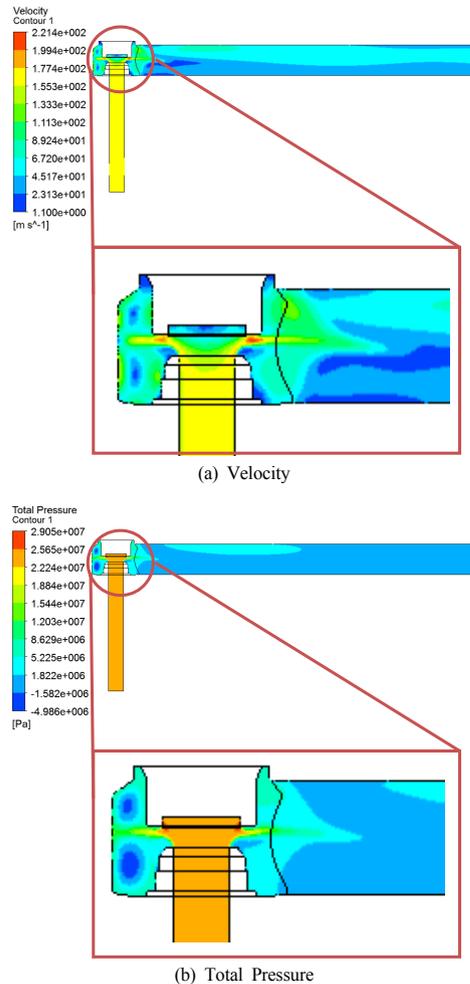


Fig. 4. Fluid Analysis Result(MPa)

### 3. 압력방출밸브 구조해석

#### 3.1 압력방출밸브 구조해석

높은 압력은 구조적으로 문제를 일으킬 수 있기 때문에 본 연구에서는 구조해석을 수행하여 안전성 검토를 하고자 하였다. 보닛은 카본계열 주철 A216 WCB, 바디 가이드, 피스톤 그리고 노즐 부품들은 SS316의 재질로 구성되어 있다. Fig.5 같이 2,616,534개의 노드로 구성된 유한요소해석모델을 구성하였다. 정적구조해석을 수행하기 위한 경계조건을 Fig.6 과 같이 압력방출밸브의 하단은 고정과, 압력방출밸브의 내부에 설계압력의 1.6배 안전율을 고려한 250bar의 압력을 일정하게 분포되도록 설정하였다. 본 연구에서는 항복강도를 기준으로 판단하였다.



Fig. 5. Computational Mesh of Structural Analysis

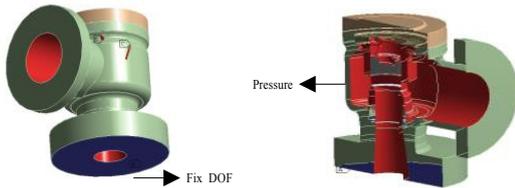


Fig. 6. Boundary Condition of Structural Analysis

#### 3.2 압력방출밸브 구조해석결과

구조해석 수행결과 바디, 보닛, 가이드 그리고 피스톤에서는 항복강도 이하의 응력이 발생하였고, 피스톤과 접촉하는 노즐에서 항복강도 이상의 응력이 발생하였다. 일반적으로 구조물에 응력이 발생하면 영구변형이 남는다. 밸브는 변형이 발생하면 실링성이 저하되고 제 기능을 하지 못하게 되기 때문에 밸브의 안전성평가에서 항복강도를 넘지 않도록 하여야 한다. 구조해석 결과 Table 2 과 같이 응력이 측정 되었다.

Table 2. Result of Structural Analysis (MPa)

Body	Bonnet	Guide	Piston	Nozzle
				
106	58	88	196	378

#### 3.3 노즐형상 변경

압력방출밸브의 구조해석 결과 피스톤과 접촉되는 노즐 상단에서 항복강도 이상의 응력이 발생하였으므로, 항복강도 이하의 응력이 발생될 수 있도록 노즐의 형상을 변경할 필요가 있다. 본 연구에서는 항복강도에 영향을 미치는 설계변수로 Fig.7과 같이 노즐의 내부직경으로 선정하였다. 노즐의 내부 직경을 Table 3과 같이 감소시켜, 앞선 구조해석과 동일한 방법으로 구조해석을 수행하였다. 노즐의 내부직경이 76mm이하일 경우 SS316 재료의 항복강도를 넘지 않는 응력이 발생하였다.

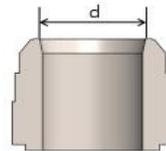


Fig. 7. Design Variable of Nozzle

Table 3. Result of Stress according to Nozzle(MPa)

80mm	78mm	77mm	74mm	72mm	60mm
					
366	318	279	198	168	120

### 4. 메타모델을 이용한 강도 예측

#### 4.1 DACE 모델

크리깅(Kriging)은 관심 있는 지점에서 특성치를 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주위의 값들이 가중선형조합으로 그 값을 예측하는 지구통계적 기법이다. Danny Krige가 이 기법을 광산에 적용하여, 이미 알려진 광맥의 공간적 정보를 이용하여 새로운 광맥을 찾기 위해 사용하면서 그의 이름을 따라 크리깅 기법이라 부르게 되었다. 그 후에 Sacks 등에 의하여 크리깅 메타모델이 공학 분야에 적용되어 사용되면서, 기존의 크리깅모델을

전산실험에 적합하도록 통계적, 수학적으로 정립하여 새로운 형태의 크리깅모델을 제시하였는데, 이것이 바로 현재 최적설계분야에서 사용되고 있는 크리깅 메타모델 즉, DACE 모델이다[6-10]. 본 연구에서는 설계변수로 선정된 노즐의 직경과 구조해석 결과와 유동해석 결과를 크리깅 내삽법을 이용하여 직경에 따른 노즐에 영향을 미치는 응력과 유동흐름을 파악하는데 나타내었다. DACE 모델에서는 전역적 근사화 모델이 다음과 같이 구성된다.

$$y(x) = f(x) + z(x) \tag{4}$$

$y(x)$ 는 실제 함수이며 다항식  $f(x)$ 와 확률 변수  $z(x)$ 로 이루어져있다. 여기서 다항식  $f(x)$ 는 상수로 대체할 수 있는데 이를 식(5)에 나타내었다.

$$y(x) = \beta + z(x) \tag{5}$$

여기서  $\beta$ 는 상수이고,  $z(x)$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 정규분포를 따르는 확률변수이다. 상관행렬 및 상관함수는 식(7), (8)와 같이 표현된다. 상관함수의 선택에 따라 크리깅 근사함수의 각 점들 사이의 정확도가 결정된다.

$$R(\theta; x^j, x^k) = Corr[z(x^j), z(x^k)] \tag{6}$$

$$R(\theta; x^j, x^k) = \text{Exp}\left[-\sum_{i=1}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2\right] \tag{7}$$

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

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(x) \mathbf{R}^{-1}(y - \hat{\beta}) \mathbf{q} \tag{8}$$

여기서  $\hat{\beta}$ 는  $\beta$ 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(9)과 같이 정의된다.

$$L(y, \theta, \beta, \sigma^2) = \frac{(2\pi\sigma^2)^{-n_s/2}}{\sqrt{|\mathbf{R}|}} \cdot \text{Exp}\left[-\frac{(\mathbf{y} - \hat{\beta})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \hat{\beta})}{2\sigma^2}\right] \tag{9}$$

위 식을 이용하여 구한  $\beta$ 와  $\sigma^2$ 의 최대우도 추정치는 식(10), (11)에 나타내었다.

$$\hat{\beta} = (\mathbf{q}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q})^{-1} \mathbf{q}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \tag{10}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{y} - \hat{\beta} \mathbf{q})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \hat{\beta} \mathbf{q})}{n_s} \tag{11}$$

$\theta$ 의 값을 구하기 위해서는 더 복잡한 과정이 요구되는데  $\theta$ 의 최대우도 추정량인  $\hat{\theta}$ 를 구하기 위해서는 아래와 같은 최적화 문제를 해결해야 한다.

$$\text{Maximize} - \frac{[n_s \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|\mathbf{R}|]}{2} \tag{12}$$

#### 4.1 크리깅보간법을 이용한 예측

메타모델을 생성하기 위해서는 먼저 표본점의 개수를 정의해야 한다. 본 연구에서는 노즐의 직경을 표본점으로 선정하였고 6개로 나누었다. 각 표본점에서의 최대 응력 계산을 위한 유한요소 해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였고, 각 표본점과 각 표본별 최대응력 결과는 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

Table 4. sample point and responses

Case No.	Design variable(mm)	Responses(MPa)
1	82.4	378
2	78	318
3	77	279
4	74	198
5	72	168
6	60	120

Table 5. Response of the metamodel

Case No.	Design variable(mm)	Responses(MPa)
1	80	381.8
2	79	354.9
3	77.5	298.3
4	76	244.5
5	75	217.7
6	73	182.4
7	71	153.8
8	70	140.6
9	66	122.6
10	63	122.2

## 5. 결론

본 연구에서는 압력방출밸브에 고압력의 유체가 흐를 때 220m/s의 최대속도와 전압에 의한 최대 290bar의 압력이 나타나며 급격한 압력강하로 인하여 초킹 현상이 일어나는 압력분포를 확인하였다. 또한 높은 압력에 의하여 구조적 문제가 발생할 수 있기 때문에 구조해석도 수행하였다. 구조적 안정성을 검토하고자 수행된 구조해석에서 항복강도 이상의 응력이 발생되었고, 본 연구에서는 노즐의 형상이 강도에 영향을 주는 인자임을 알 수 있었다. 따라서 노즐의 직경을 설계변수로 선정하여 구조해석을 추가로 수행하였고, 응력은 노즐의 내부직경에 비례하여 감소하였다. 해석 조건 이외의 설계 변수를 고려하기 위하여 메타모델을 사용하고, 76mm일 때 항복강도를 넘지 않는 적절한 직경으로 판단하였다.

## References

- [1] Smith, P., 2004, "Valve Selection Handbook," ELSEVIER, USA, pp. 1-45.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-075067717-2/50001-8>
- [2] Kim, C. S., No, H. S., Kim, G. T., Kim, J. H., Kim, J. S., 2004, "Experience for Development and Capacity Certification of Safety Relief Valves," Korean fluid machinery association, pp. 492-500.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/KFMA.2005.8.3.016>
- [3] 2010.02.15, [http://www.amenews.kr/atc/view.asp?P\\_Index=2534](http://www.amenews.kr/atc/view.asp?P_Index=2534)
- [4] Kil, G. S., Koh, H. S., Kwon, O. S., Han, S. Y., 2013, "The Design and Test Trend of vent relief valve for Launch vehicle", www.kari.re.kr, Vol. 11, No. 2, pp. 136-143.
- [5] Cho, N. K., Shin, D. S., Han, S. Y., Kim, Y. M., 2007, "Analysis of Pressure Relief Valve Considering Interaction between Valve Stem Motion and Flow", 2007 KSPE Spring Conference, pp. 121-127.
- [6] Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, T.J. and Wynn, H.P., 1989, "Design and Analysis of Computer Experiments," Statistical Science, Vol. 4, No. 4, pp. 409-4.5.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1214/ss/1177012413>
- [7] Lee, K.H., 2005, "Optimization of a Driver-Side Aribag Using Kriging Based Approximation Model", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 116-126

- [8] Guinta, A. and Watson, L., 1998, "A Comparison of Approximation Modeling Techniques: Polynomial Versus Interpolation Models", Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, St. Louis, MO, ALAA, Vol. 2, 2-4, pp. 392-550.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.1998-4758>
- [9] Ryu, J.S., Kim, M.S., Cha, K.J., Lee, T.H., and Choi, D.H., 2002, "Kriging Interpolation Methods in Geostatistics and DACE MODEL", KSME International Journal, Vol. 16, No. 5, pp. 619-632.
- [10] Martin, J. and Simpson, T., 2002, "Use of Adaptive Metamodeling for Design Optimization" Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Atlanta, Georgia, AIAA, Sep.4-6, pp. 2167-2175.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2002-5631>

## 이 권 희(Kwon-Hee Lee)

[정회원]



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

<관심분야>

기계설계, 최적설계

## 김 남 희(Nam-Hee Kim)

[준회원]



- 2014년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 석사 재학

<관심분야>

구조해석, 밸브해석