유동 안내부 모델링 자동화 및 근사모델을 이용한 자동차용 도어트림의 밸브 게이트 위치 최적화

조 용 수¹⁾ · 박 창 현²⁾ · 표 병 기³⁾ · 이 병 옥³⁾ · 최 동 훈^{*1)}

한양대학교 기계공학과¹⁾ · 피도텍 기술사업팀²⁾ · 아주대학교 기계공학과³⁾

Optimization of Valve Gates Locations Using Automated Runner System Modeling and Metamodels

Yong-Su Joe¹⁾ · Chang-Hyun Park²⁾ · Byung-Gi Pyo³⁾ · Byung-Ohk Rhee³⁾ · Dong-Hoon Choi^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Technical Consulting Team, PIDOTECH Inc., HIT #312, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

(Received 1 August 2013 / Revised 25 October 2013 / Accepted 22 November 2013)

Abstract : Injection pressure is one of factors that influence part quality. In this paper, injection pressure was minimized by optimizing valve gate locations. In order to perform design optimization, MAPS-3DTM (Mold Analysis and Plastic Solution-3D) was used for injection mold analysis and PIAOTM (Process Integration, Automation and Optimization) was used as process integration and design optimization. Also we adapted meta models based on design of experiments for efficiency. By using introduced methodology, we were able to obtain a result so that maximum injection pressure reduced by 28% compared to the initial design. And the validity of the proposed method could also be demonstrated.

Key words : Automotive door trim(자동차용 도어트림), Injection molding(사출성형), Runner system(런너 시스템), Valve gate(밸브 게이트), Pressure(압력), Design of experiments(실험계획법), Metamodel(근사모델), Optimization(최적설계), Evolutionary algorithm(진화알고리즘)

Nomenclature

P : pressure, MPa

$y(x)$: approximate function

$\hat{y}(x)$: predicted response value at untried x

$\hat{\sigma}^2$: estimated sample variance

Subscripts

x : design variable

d_{ij} : distance between two experimental points

R : correlation matrix

$R(x^i, x^j)$: correlation function between x^i and x^j

$\hat{\beta}$: estimated regression coefficient

1. 서론

사출성형은 용융된 수지를 금형 내부로 압입하여 냉각 후 취출하는 플라스틱 제품 성형법이다. 사출 성형 해석 프로그램을 이용하여 사출성형품의 특성 및 성형 불량요인을 사전에 예측함으로써 성형품의 품질을 향상시키기 위한 노력들이 진행되어 왔으며, 해석절차 자동화 및 최적화 기법을 이용한 발전

*Corresponding author, E-mail: dhchoi@hanyang.ac.kr

된 연구들이 수행되고 있다.

그 사례로 불량 요인을 최소화하기 위해 런너 레이아웃,^{1,2)} 냉각채널 레이아웃^{3,4)} 등의 설계 파라미터들을 최적화하는 연구 등이 있다. 또한, 실험계획법을 이용한 적은 횟수의 실험만으로 최선의 설계안을 도출하거나,^{5,6)} 유전알고리즘과 같은 최적화 기법을 이용한 최적설계⁷⁾와 같이 사출성형 해석에 적용할 수 있는 다양한 최적화 방법론에 대한 연구가 진행되었다.

본 연구에서는 사출성형품의 품질에 영향을 미치는 요인 중 하나인 금형 내부에서 발생하는 최대 사출압력을 최소화할 수 있도록 밸브 게이트 위치를 최적화하기 위한 연구를 진행하였다. 사출압력은 제품의 휨과 형체력에 영향을 주는 요인으로서 게이트 위치에 따라 그 크기가 바뀔 수 있는데 게이트 위치가 변경됨으로 인해 금형 내부 수지의 충전 패턴이 달라지면서 사출압력의 크기가 변할 수 있기 때문이다.

해석 절차 자동화를 위해 위치가 변경된 게이트로부터 런너 시스템(runner system)의 유한요소 모델이 자동으로 생성되도록 모델링 절차를 자동화하였다. 또한 1회 해석시간이 비교적 오래 소요되는 해석모델에 대한 설계과정의 효율성을 위해 실험계획법과 근사화기법, 최적화기법으로 이어지는 설계 절차를 적용하였다.

2. 설계문제 정식화

2.1 사출성형 해석모델

본 연구에서는 최대 사출압력을 최소화할 수 있는 최적의 밸브 게이트의 위치를 구하기 위한 설계 대상으로서 자동차 도어 안쪽에 부착되는 플라스틱 성형품인 자동차용 도어트림(automotive door trim)을 선정하였다.

설계 대상인 도어트림의 해석모델 형상은 Fig. 1과 같다. 도어트림 유한요소모델은 48만개의 절점과 218만개의 유한요소로 구성되며, 충전해석을 수행하기 위한 상용 해석 프로그램으로 MAPS-3D(Mold Analysis and Plastics Solutions-3 Dimension)를 사용하였다.⁸⁾

수지는 PP(Polypropylene, GS-Caltex Corporation,

Fig. 1 Automotive door trim

Grade: Hi-Prene MT62CP)이며, 금형온도와 수지온도, 충전시간은 각각 32.5°C, 215°C, 7초이다.

2.1.1 초기 모델 분석

초기 모델의 충전시간동안 금형내부 사출압력의 변화는 Fig. 2와 같다. 밸브 게이트는 밸브핀을 유압 또는 공압으로 개폐하는 방식이다. 이번 설계에서는 밸브 게이트가 수지가 도달하면서 자동으로 열리도록 설정했으며, 가장 먼저 열리는 게이트는 1번 게이트로 설정했다. 왜냐하면, 수지가 게이트에 도달한 뒤 게이트가 열리게 되면 높은 사출압력이 발생할 수 있기 때문에 사전에 방지하기 위해서 해석 프로그램 상에서 미리 자동으로 열리도록 설정했다. 또한, 수지 도달 이전에 열림 시간을 설정할 수 있지만, 본 연구에서는 게이트 위치가 자동으로 정해짐에 따라 충전 절차 또한 자동으로 이루어지기 때문에 열림 시간을 미리 예측할 수 없다. 그래서 설

Fig. 2 Maximum injection pressure of initial design

계 및 해석 절차 자동화를 설정하는 단계에서 미리 게이트 열림 시간을 위와 같이 정하였다. 사출기의 압력이 작용하는데 걸리는 시간은 이번 설계 문제에서 않았다. 왜냐하면, 본 설계 문제는 금형 내부의 요인만을 고려하는 문제이기 때문에 사출기의 압력 작용 시간과 같은 외부 요인은 고려하지 않았다.

그 결과, 금형내부 사출압력은 아래의 그래프와 같은 변화 나타냈고, 그래프에 표기된 바와 같이 각 밸브 게이트가 열리는 시점에 압력이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 최대 사출압력이 127.1 MPa인 것을 알 수 있는데, 초기 모델의 게이트 위치가 한 쪽으로 치우쳐 금형내부 충전패턴이 고르지 못하기 때문에 게이트의 위치를 변화하여 보다 작은 값의 최대 사출압력을 구할 수 있을 것이다.

2.2 설계문제 정의

2.2.1 설계 요구사항

사출 성형품의 휨과 형체력 등에 영향을 미치는 금형 내부 최대 사출압력은 최소화되어야 한다.

2.2.2 설계변수

게이트 위치는 수지의 유동 패턴을 결정하는 주요 설계 인자이며, 수지 유동 패턴은 금형 내 압력분포와 밀접한 연관이 있다. 따라서 최대 사출압력을 최소화 할 수 있는 설계변수로서 게이트 위치를 선정하였다.

도어 트림의 경우 Fig. 1과 같이 다섯 개의 게이트를 가지는데, 이중에서 Fig. 3과 같이 위치 변화에 따라 수지의 유동에 큰 변화를 주지 않을 것으로 판단되는 Gate 4, Gate 5를 제외한 나머지 Gate 1, Gate 2,

Gate 3의 위치만을 각각 설계변수로 하였다. 설계변수로 선정된 세 개의 게이트들이 위치 할 수 있는 후보 절점 수는 Fig. 3과 같이 각각 17개, 23개, 18개이며, 초기 설계보다 낮은 최대 사출압력을 가지는 게이트 위치를 찾기 위해 각 게이트가 고르게 위치할 수 있도록 게이트 위치 설계영역을 설정하였다. 게이트는 해석 모델의 절점에만 위치 가능하므로 이산변수 형태이다.

2.2.3 설계문제 정식화

설계 요구사항과 설계변수를 바탕으로 설계 문제 정식화를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Find} \quad x_1, x_2, x_3 \\ & \text{to minimize} \quad P_{98\%} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 x_1, x_2, x_3 은 각각의 게이트 위치를 의미하며, 목적함수 $P_{98\%}$ 는 충전을 98%에서의 금형 내부 최대 압력을 의미한다. 여기서 98%는 보압으로 전환하는 시점을 뜻한다.

2.3 해석 및 설계절차 자동화

최적설계 위해 상용 PIDO(Process Integration, and Design Optimization)틀인 PIANO(Process Integration, Automation and Optimization)의 파일 파싱(parsing) 기법을 이용하여 런너 시스템의 모델링 절차와 MAPS-3D의 충전해석 절차를 통합하고 자동화하였다.⁹⁾

3. 최적설계

도어트림 해석모델의 1회 충전해석 소요 시간은 CPU- i7 X990 3.33GHz, RAM- 24GB 사양의 컴퓨터에서 5시간이다. 반복 해석 과정이 필요한 최적설계 특성 상 설계 과정의 효율성을 위해 본 연구에서는 근사모델을 기반으로 하는 최적설계를 수행하였다.

근사모델기반 최적설계는 Fig. 4와 같이 세 단계로 진행된다. 첫 번째 단계로 설계기반 및 1회 해석 시간을 고려하여 적절한 실험계획법을 선택하고 이를 이용하여 실험점 생성 후 해석을 수행한다. 두 번째 단계로 입력변수인 게이트 위치와 출력변수인 최대 사출압력과의 관계를 수치적으로 근사화한 근

Fig. 3 Boundary condition of valve gate locations

Fig. 4 Procedure of design optimization

사모델 생성하고 그 정확도를 평가한다. 세 번째 단계로 정확도가 검증된 근사모델과 최적화 기법을 이용하여 최적해를 구하고 근사모델로부터 도출된 최적해를 실제 해석모델에 입력하여 실제 최대 사출압력의 편차를 비교한다.

본 연구에서는 근사모델기반 최적설계를 위해 PIANO에서 제공하는 설계기법들을 이용하였다. 실험계획법으로는 최적라틴방격추출법(Optimal Latin Hypercube Design; OLHD)를 이용하였고, 근사화기법을 이용하여 크리깅 모델(Kriging model)¹⁰⁾을 생성하였으며, 최적화기법으로는 진화알고리즘(Evolutionary Algorithm; EA)^{11,12)}을 사용하였다.

3.1 실험계획법

실험계획법이란 문제에 대한 실험을 어떻게 수행할 것이고, 데이터를 어떻게 얻을 것이며, 어떠한 통계적 분석을 통해서 최소의 실험으로 최대의 정보를 구할 수 있는가에 대해 계획하는 것을 뜻한다. 본 연구에서는 충전 실험계획법 중 하나인 최적라틴방격추출법을 이용하였다.

최적라틴방격추출법은 기존의 충전 실험계획법 중 하나인 라틴방격추출법(Latin Hypercube Design; LHD)가 가지는 단점인 실험점 사이의 높은 상관성이 존재할 가능성을 보완하기 위해 최적계획법과 라틴방격추출법을 결합한 실험계획법이다. 실험점들이 최적의 배치가 되도록 하는 다양한 최적성 조건(optimal criteria)이 있는데, 그 중 실험점 사이의 거리 중 가장 작은 값을 최대화하는 최소거리 최대화 조건(maxmin criteria)을 적용했다.

우선 모든 실험점들에 대해 두 지점간의 거리

$d_{ij} = d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|$ 을 모두 계산하고, 거리들을 크기순으로 정렬한 뒤 동일한 값을 가지는 개수 J_{ij} 에 대해서는 d_{ij} 와 짝을 이루도록 아래의 식 (2)와 같이 동일 순서대로 정리한다.

$$\{d_1, d_2, \dots, d_s\}, d_1 < d_2 < \dots < d_s$$

$$\{J_1, J_2, \dots, J_s\} \quad (2)$$

그 후, Morris와 Mitchell³⁾이 제안한 ϕ_p 조건을 적용하는데 그 식은 (3)과 같다.

$$\min. \phi_p = \left[\sum_{i=1}^s J_i d_i^p \right]^{1/p}, p > 0 \quad (3)$$

이때, p 가 충분히 크면 최소거리 최대화 조건과 동일하게 된다.

3.2 근사화 기법

크리깅 기법은 근사모델 기법 중 하나로서 심한 비선형성을 잘 표현할 수 있는 방법이다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 게이트의 위치와 최대사출압력 사이의 관계가 비선형성이 심한 것으로 판단하여 크리깅 모델을 사용하였다.

크리깅 모델은 실험계획법에서의 정보를 바탕으로 구한 전역모델(global model)과 국부편차(localized deviation)를 합하여 식 (4)와 같이 구성한다.

$$y(x) = f(x) + z(x) \quad (4)$$

$y(x)$ 는 알고자 하는 미지의 함수를 의미하고, $f(x)$ 는 설계영역에서의 전역모델로서 주로 다항함수(polynomial function)로 표현된다. 그리고 $z(x)$ 는 전역모델로부터 나온 지역적 편차를 나타내는 것으로 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 응답모델의 불확실성을 나타낸다. 여기서 국부편차 $z(x)$ 의 공분산(covariance)는 다음과 같다.

$$\text{Cov}[Z(x^i), Z(x^j)] = \sigma^2 R[x^i, x^j]$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

식 (5)에서 R 은 상관행렬(correlation matrix)이고, $R(x^i, x^j)$ 는 실험데이터 내의 임의의 두 점 x^i, x^j 사이의 상관함수(correlation function)이다. 상관행렬은 대각요소가 모두 1인 $n \times n$ 의 대칭행렬이다.

새로운 입력 값 x 에 대한 반응 값 $y(x)$ 의 선형 예

측모델을 $\hat{y}(x)$ 라 정의하고, $y(x)$ 와 $\hat{y}(x)$ 의 평균제곱오차(mean squared error)를 최소화하는 과정을 고려하여 $\hat{y}(x)$ 를 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

$$\hat{y}(x) = f^T(x)\hat{\beta} + r^T(x)R^{-1}(y_x - F\hat{\beta}) \quad (6)$$

식 (6)에서 $\hat{\beta}$ 는 회귀계수 β 의 일반화된 최소제곱(generalized least square method) 추정량으로서 $\hat{\beta} = (F^t R^{-1} F)^{-1} F^t R^{-1} y_x$ 로 구한다. 그리고 $r(x)$ 는 식 (7)과 같이 정의한다.

$$r(x) = [R(x, x^1), \dots, R(x, x^n)]^T \quad (7)$$

최종적으로 상관인자인 θ 를 최대 우도추정법(maximum likelihood estimation)을 통해 구하여 가장 적합한 크리깅 모델을 결정한다. 각 데이터에서의 오차가 정규분포를 따른다고 가정하면, 크리깅의 우도함수(likelihood function)는 식 (8)을 최대화하는 문제와 같게 된다.

$$\phi(\theta) = -(n \ln \hat{\sigma}^2 + \ln |R|) \quad (8)$$

3.3 최적화 기법

진화알고리즘^{11,12)}은 실제 진화메커니즘에서 발생하는 요인들을 이용하여 염색체의 진화과정을 묘사한 방법으로, 전역 최적해(global optimum)를 구하기 위해 공학문제에 많이 사용되는 최적화 기법 중

하나이다.

진화알고리즘은 Fig. 5에서 표현된 것과 같이 주로 세 단계로 진행된다. 첫 번째는 개체들의 적합도를 평가하여 순위를 정하고 상위개체를 선택하는 선택(selection) 단계이다. 두 번째는 전체개체와 선택된 개체에서 각각 하나의 부모를 선택하여 자손을 생성하는 재결합(recombination)단계이다. 마지막으로 임의의 개체를 선택하여 임의의 값으로 변화하는 돌연변이(mutation)과정을 거치면서 한 세대를 진행하게 된다. 이와 같은 과정을 수차례 반복하면서 가장 우수한 개체를 구하게 된다.

3.4 최적설계 결과

본 연구에서는 근사모델을 생성하기에 충분하다고 판단되는 설계변수의 15배수인 45개의 실험점을 생성하여 충전해석을 수행하였다. 근사모델을 생성하기에 앞서 실험계획법을 이용한 해석 결과 중 최대사출압력이 가장 작은 실험값을 초기 모델 해석값과 비교해 보았다. 그 결과, Fig. 6과 같이 초기값 대비 28.2% 감소한 91.2 MPa의 결과를 타나내는 게이트 위치를 구할 수 있었다.

실험계획 결과로 부터 생성된 크리깅 모델과 진화알고리즘을 이용하여 전역 최적해를 구하는 최적설계를 수행하였다. 그 결과, 최대사출압력은 Fig. 7과 같이 초기값 대비 28.2% 감소한 91.2 MPa로 결정

Fig. 5 Evolutionary algorithm process

Fig. 6 The objective function of initial design and OLHD best

Fig. 7 The objective function of optimum design

되었으며, 초기 모델의 게이트 위치와 최적 모델의 게이트 위치를 Fig. 8에 비교하였다. 이 결과는 45개 실험점 중 최대사출압력이 가장 낮은 값과 동일하고, 게이트의 위치 또한 Fig. 8(b)와 동일함을 확인하였다. 초기 모델의 경우, Fig. 8(a)와 같이 Gate 2, Gate 3이 고정된 게이트들이 있는 우측으로 치우쳐있지만 최적설계 결과의 경우 Gate 2, Gate 3이 초기 위치보다 좌측으로 이동한 것을 확인할 수 있다.

이 결과는 Fig. 9의 금형내부 사출압력 변화 그래프를 통해 비교할 수 있는데, 가장 먼저 열리도록 설정한 1번 게이트를 제외한 나머지 4개 게이트의 열림 시간과 순서가 조금씩 변화한 것을 확인할 수 있다. 우선, 초기 모델은 1번 게이트와 가장 가까운 위치에 있는 3번 게이트 사이의 거리가 비교적 멀기 때문에 다음 열림 시점까지 시간이 많이 소요되는 것을 알 수 있다. 첫 번째와 두 번째 게이트 사이의

Fig. 8 Gate locations and pressure distribution

Fig. 9 Maximum cavity pressure of optimum design

유동길이가 길다는 것을 의미하는데, 그만큼 수지가 도달하기 위해 높은 사출압력이 필요하다는 것을 뜻한다. 하지만 최적설계로 구한 게이트 위치에서는 2번, 3번 게이트 위치가 1번 게이트와 보다 가까워지면서 유동 길이를 줄일 수 있었다. 그리고 초기 설계에선 2번 게이트가 가장 늦게 열렸지만 3번 게이트 열림 시점 다음으로 바뀌는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 금형 내부의 충전패턴을 고르게 하

는 밸브 게이트의 위치를 구함으로 인해 게이트 열림 시점 순서가 조금씩 바뀐 것이고, 이러한 결과는 목적 함수인 최대 사출압력을 최소화하는 결과로 이어질 수 있었다.

4. 결 론

금형내부 최대 사출압력을 최소화할 수 있는 밸브 게이트의 위치 결정을 위한 최적설계의 결론은 다음과 같다.

- 1) PIA_{NO}의 파일 파싱기법을 이용하여 사출성형 해석 프로그램인 MAPS-3D의 게이트 위치 이동에 따른 런너 시스템 모델링 절차와 충전해석 절차를 통합하고 자동화 하였다.
- 2) PIA_{NO}에서 제공하는 실험계획법인 최적라틴방격추출법을 이용하여 근사모델을 생성하기 위한 전산실험을 수행하였으며, 실험 결과 중 초기 모델 대비 최대 사출압력을 28.2% 감소시킬 수 있는 게이트의 위치를 확인하였다.
- 3) 실험계획 결과를 바탕으로 크리깅 근사모델을 생성하였고, 진화알고리즘을 이용한 근사모델 최적설계를 수행하였다. 그 결과, 초기 게이트 위치 대비 사출압력을 28.2% 감소시킬 수 있는 최적의 게이트 위치를 구하였다.
- 4) 근사모델 기반 최적설계를 통해 구한 게이트의 최적 위치와 실험계획 결과 중 사출압력이 가장 낮은 게이트의 위치가 동일하였다. 이러한 결과는 최적방격라틴추출법을 이용해 구한 45개의 실험점 중에 최적의 게이트 위치가 포함되어 있었다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서 수행한 실험계획법의 적정성과 최적화 기법의 유용성을 확인할 수 있었다.
- 5) 본 연구에서는 사출 성형품의 품질에 영향을 미치는 금형내부 최대 사출압력을 최소화하기 위한 설계변수로서 게이트의 위치를 선정하였다.

향후 연구에서는 동일한 설계 문제에 다양한 최적 설계 방법을 적용해서 사출압력을 더욱 최소화할 수 있는 게이트의 위치를 구할 수 있도록 진행할 예정이다. 그리고 런너 밸런싱을 자세히 고려할 수 있도록 게이트 위치뿐만 아니라 런너 직경 등과 같은 인자를 설계변수를 추가하여 최적설계를 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0005530). 이 연구를 위하여 PIA_{NO} 소프트웨어를 제공한 (주)피도텍에 감사드립니다.

References

- 1) S. B. Cho, C. H. Park, B. G. Pyo and D. H. Choi, "Gate Locations Optimization of an Automotive Instrument Panel for Minimizing Cavity Pressure," Journal of the KSPE, Vol.29, No.6, pp.648-653, 2012.
- 2) S. B. Cho, C. H. Park, D. H. Choi, B. G. Pyo and B. O. Rhee, "Valve Gate Optimization for Injection Molding of an Automotive Instrument Panel," ANTEC2012 Proceedings, 2012.
- 3) J. H. Choi, S. H. Choi, D. H. Park, C. H. Park, B. O. Rhee and D. H. Choi, "Design Optimization of an Injection Mold for Minimizing Temperature Deviation," Int. J. Automotive Technology, Vol.13, No.2, pp.273-277, 2012.
- 4) C. H. Park, J. M. Park, J. H. Choi, B. O. Rhee and D. H. Choi, "Multi-objective Optimization of an Injection Mold Cooling Circuit for Uniform Cooling," Transactions of KSAE, Vol.20, No.1, pp.124-130, 2012.
- 5) K. Park, J. H. Ahn and S. R. Choi, "Application of Design of Experiments and Numerical Analysis to Optimal Design for Injection Molding processes of Electrical Parts," The Korean Society of Mechanical Engineers(A), Vol.26, No.7, pp.1348-1356, 2002.
- 6) Y. S. Joe, C. H. Park, B. G. Pyo, B. O. Rhee and D. H. Choi, "Valve Gate Location Optimization of an Automotive Door Trim for Minimizing Pressure," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.2118-2121, 2012.
- 7) W. J. Choi, H. C. Sin and S. W. Kwak, "Optimization of Processing Conditions in Injection Molding Using Genetic Algorithm," The Korean Society of Mechanical Engineers(A), Vol.24, No.10, pp.2543-2551, 2000.
- 8) VM Tech Co. Ltd., Mold Analysis and Plastics

- Solution-3D Dimension-MAPS-3D User's Manual, 2012.
- 9) PIDOTECH Inc., Progress Integration, Automation and Optimization - PIAO User's Manual, 2012.
 - 10) J. Sacks, S. B. Schiller and W. J. Welch, "Designs for Computer Experiments," Technometrics, Vol.31, No.1, pp.41-47, 1989.
 - 11) T. Back, Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolutionary Programming, Genetic Algorithm, Oxford University Press, Oxford, 1996.
 - 12) M. J. Joeng, B. H. Dennis and S. Yoshimura, "Multidimensional Clustering Interpretation and Its Application to Optimization of Coolant Passage of a Turbine Blade," ASME, Vol.127, pp.215-221, 2005.
 - 13) M. D. Morris and T. J. Mitchell, "Exploratory Design for Computational Experiments," Journal of Statistical Planning and Inference, Vol.43, No.3, pp.381-402, 1995.