

< 기술 논문 >

자동차용 인스트루먼트 패널의 사출압력 최소화를 위한 밸브 게이트 열림 시점 결정

조 성 빈¹⁾ · 박 창 현¹⁾ · 표 병 기²⁾ · 최 동 훈³⁾

한양대학교 기계공학과¹⁾ · 브이엠테크 기술연구소 개발부²⁾ · 한양대학교 최적설계신기술연구센터³⁾

Determination of Valve Gate Open Timing for Minimizing Injection Pressure of an Automotive Instrument Panel

Sung-Bin Cho¹⁾ · Chang-Hyun Park¹⁾ · Byung-Gi Pyo²⁾ · Dong-Hoon Choi³⁾

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

²⁾R&D Center, VMTech Co. Ltd., #7, Kyunghee Lespia Bldg., 1024-15 Yeongtong-dong, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi 433-813, Korea

³⁾The Center of Innovative Design Optimization Technology, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Accepted 29 June 2011 / Revised 7 November 2011 / Received 26 November 2011)

Abstract : Injection pressure, an important factor in filling process, should be minimized to enhance injection molding quality. Injection pressure can be controlled by valve gate open timing. In this work, we decided the valve gate open timing to minimize the injection pressure. To solve this design problem, we integrated MAPS-3D (Mold Analysis and Plastic Solution-3Dimension), a commercial injection molding CAE tool, to PIAO (Process Integration, Automation and Optimization), a commercial PIDO (Process Integration, and Design Optimization) tool using the file parsing method. In order to reduce computational cost, we performed an approximate optimization using meta-models that replaced expensive computer simulations. At first, we carried out DOE (Design of Experiments) using OLHD (Optimal Latin Hypercube Design) available in PIAO. Then, we built Kriging models using the simulation results at the sampling points. Finally, we used micro GA (Genetic Algorithm) available in PIAO. Using the proposed design approach, the injection pressure has been reduced by 13.7% compared to the initial one. This design result clearly shows the validity of the proposed design approach.

Key words : Injection molding(사출성형), Injection pressure(사출압력), Valve gate(밸브 게이트), Instrument panel(인스트루먼트 패널), Design of Experiments(실험계획법), Metamodel(근사모델), Optimization(최적화)

Nomenclature

P_{max} : maximum pressure

P_i : pressure of the i th pressure drop point

1. 서 론

사출금형의 충전 과정에서 밸브 게이트(valve

gate)는 용융된 수지의 주입 시점과 양, 제품 외관에 발생하는 웰드라인(weldline)의 위치를 조절하고, 보압 과정에서는 압의 전달을 조절하는데 사용된다. 충전 과정 중 밸브 게이트가 열리는 시점에서 금형 내부에 압력강하(pressure drop)가 발생하며, 제품의 충격강도 및 형체력(clamping force)에 영향을 주는 주요 공정 조건인 사출압력(injection pressure)은 밸브 게이트 열림 시점 조절을 통해 제어가 가능하

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

다. 따라서 밸브 게이트를 이용한 금형 충전 과정 중 에서 발생하는 최대사출압력을 최소화 할 수 있는 공정기술이 필요하다.

기존연구에서 Spina¹⁾는 핫 런너(hot runner) 시스템에 대해 밸브 게이트 유무에 따른 압력 변화를 비교하였으며, Lee 등²⁾은 게이트 설계자의 지식과 경험을 논리화하고 CAE 프로그램을 통한 성형해석방법을 제시하였다. Lee 등³⁾은 러너와 게이트의 위치 및 직경을 변화시켜 자동차 전면범퍼의 웰드라인 및 사출압력 감소에 대한 연구를 하였다. Cho 등⁴⁾은 자동차용 모터 브라켓(motor bracket)과 PC용 CD 트레이(tray)에 대해 게이트 위치 변경에 따른 CAE 프로그램의 충전해석 절차를 자동화하고, 사출압력을 최소화하는 연구를 수행하였다. 하지만 기존 연구에서는 사출압력 감소를 위해 해석 시간이 오래 걸리는 대형 사출성형품의 충전해석을 수동으로만 진행하거나 해석 시간이 비교적 짧은 제품에 대해서만 설계절차를 자동화하였다. 따라서 대형 사출성형품에 대해서도 해석 및 설계절차를 자동화하여 사출압력을 효율적으로 감소시킬 수 있는 설계방법이 필요하다.

본 연구에서는 대형 사출성형품인 자동차용 인스트루먼트 패널(instrument panel)의 충전해석 절차를 자동화하고 근사모델을 이용한 최적설계를 통해 사출압력을 최소화 할 수 있는 최적의 밸브 게이트 열림 시점을 결정하였다.

2. 사출성형 해석

인스트루먼트 패널의 충전해석을 위해 상용 사출성형 해석프로그램인 MAPS-3D(Mold Analysis and Plastics Solutions-3 Dimension)⁵⁾를 이용하였다. 인스트루먼트 패널의 형상과 압력분포 및 7개의 밸브 게이트 위치는 Fig. 1과 같다. 충전시간(filling time)은 7초이고, Gate0은 충전과정 시작부터 열림 상태이며, 나머지 6개의 밸브 게이트(Gate1~6)는 순차적으로 열리면서 금형 내부를 충전한다. 인스트루먼트 패널 해석모델은 160만개의 유한요소로 구성되었으며, 1회 충전해석 시간은 i7 2.8GHz CPU, 4GB RAM 사양의 컴퓨터에서 약 5시간 40초이다.

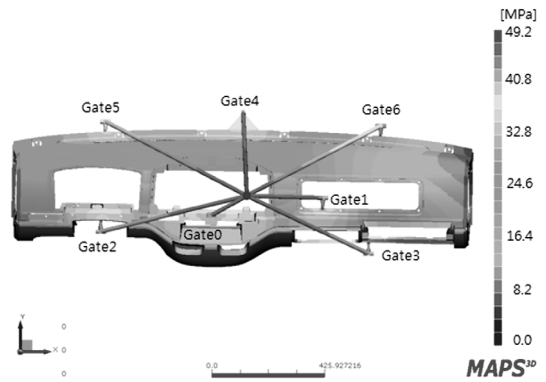


Fig. 1 Pressure distribution of the instrument panel

3. 설계문제 정의

자동차용 인스트루먼트 패널의 설계에 필요한 설계요구사항과 설계변수를 기술하고 이를 바탕으로 설계문제를 정의한다.

3.1 설계 요구사항

최대사출압력을 최소화함에 따라 사출성형품의 충격강도를 증가시키면서 형체력을 감소시킬 수 있다. 초기 해석모델의 금형 내부 압력 변화는 Fig. 2와 같고, 6개 밸브 게이트(Gate1~6) 열림 시점은 열림 시점 자동 설정 기능을 이용하여 결정하였다. 열림 시점 자동 설정 기능은 충전해석에서 수치가 밸브 게이트 입구에 도달할 때 밸브 게이트를 열리게 함으로서 열림 시점을 결정한다.

초기 해석모델의 경우 Fig. 2와 같이 충전이 시작

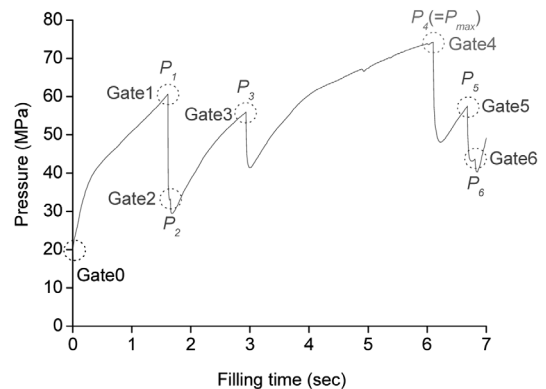


Fig. 2 Pressure change of the initial simulation model by valve gate open

되면 먼저 Gate0이 열리고 Gate 1-2-3-4-5-6이 순차적으로 열린다. 이 때 각 밸브 게이트 열림 시점에서 압력강하가 발생하고 압력강하 시점에서의 압력을 각각 P_1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_5 - P_6 으로 나타내었다. 따라서 압력 강하에 따른 금형 내부의 최대사출압력(P_{max})을 최소화하기 위한 설계요구사항을 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\text{Minimize } P_{max} = \max[P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6]. \quad (1)$$

선행연구⁶⁾에서는 최대사출압력만을 최소화하는 최적화를 수행하여 최대사출압력을 감소시킬 수 있는 밸브 게이트의 열림 시점을 결정할 수 있었다. 하지만 나머지 일부 압력강하점에서의 압력은 오히려 증가하는 문제점이 발생하여 전체 사출압력량을 감소시키는데 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 최대사출압력을 제외한 나머지 압력강하점에서의 최대값을 초기값의 80% 이하로 감소시키는 것을 목표로 하였다. 먼저 최대사출압력이 발생하는 P_4 를 제외한 이유는 설계 가능 영역에서 다수의 해석을 수행한 결과 모든 경우에서 최대사출압력이 P_4 에서 발생하였고 Gate3과 Gate4의 열림시점 간격이 가장 크기 때문이다. 또한 구속조건의 상한값을 80%로 설정한 이유는 80% 이하로 설정할 경우 Gate3의 열림 시점이 당겨지면서 Gate4와의 열림 시점 간격이 커지게 되고 Gate3의 수치 주입시간이 늘어나면서 목적함수인 최대사출압력이 오히려 커지기 때문이다. 이를 수식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \max [P_1, P_2, P_3, P_5, P_6] \\ \leq 0.8 \times \max [P_1, P_2, P_3, P_5, P_6]_{Initial}. \end{aligned} \quad (2)$$

3.2 설계변수

최대사출압력을 최소화하고 나머지 압력강하점에서의 압력을 제한값 이하로 만들기 위해 충전과정 동안 항상 열림 상태인 Gate0을 제외한 나머지 6개 밸브 게이트의 열림 시점을 설계변수로 선정하였다.

설계변수의 초기값은 Table 1과 같이 MAPS-3D의 밸브 게이트 열림 시점 자동 설정 기능을 통해 결정된 값이다. 설계변수의 하한값은 초기값보다 1초 빠른 시점이지만 Gate4의 하한값만은 초기값보다 3

Table 1 Initial design variable values between the lower and upper bound values

(unit: sec)

Design variable	Lower bound	Initial	Upper bound
x_1 Gate1	0.6	1.613	1.6
x_2 Gate2	0.7	1.655	1.7
x_3 Gate3	1.9	2.934	2.9
x_4 Gate4	3.1	6.101	6.1
x_5 Gate5	5.7	6.684	6.7
x_6 Gate6	5.8	6.809	6.8

초 빠른 시점이다. 그 이유는 Gate4는 Fig. 2에서와 같이 다른 밸브 게이트들과 달리 열림 시점이 앞당겨 질 수 있는 시간적 여유가 많고 열림 시점이 앞당겨 질수록 최대사출압력이 감소하기 때문이다. 설계변수의 상한값은 초기값과 동일한데 그 이유는 상한값이 초기값보다 클 경우 수치가 밸브 게이트 입구 주변에 충전된 상태에서 밸브 게이트가 열리게 되고 이 때 밸브 게이트 입구 근처에서 압력이 높아지기 때문이다. 설계변수의 초기값, 하한값과 상한값은 Table 1과 같다.

3.3 설계문제 정식화

최대사출압력을 최소화하기 위한 설계 문제를 수학적으로 정식화 하면 식 (3)과 같다.

$$\text{Find } x_n, \quad n=1,2,3,\dots,6$$

$$\text{to minimize } P_{max}$$

$$\begin{aligned} \text{subject to } \max [P_1, P_2, P_3, P_5, P_6] \\ \leq 0.8 \times \max [P_1, P_2, P_3, P_5, P_6]_{Initial}. \\ x_n^L \leq x_n \leq x_n^U \end{aligned} \quad (3)$$

4. 사출압력 최소화를 위한 최적설계

인스트루먼트 패널과 같이 해석시간이 비교적 오래 걸리는 대형 사출성형품 해석모델을 반복과정이 필요한 최적설계에 직접 사용할 경우 결과의 정확성은 보장받을 수 있으나 효율성 문제를 야기한다. 따라서 실제 해석모델 대신 정확성이 검증되고 해석시간에 대한 제약이 없는 근사모델을 이용하면 최적설계에서의 효율성 문제를 보완할 수 있다.

4.1 해석절차 자동화

본 논문에서 상용 PIDO(Progress Integration and Design Optimization) 툴인 PIANO(Process Integration, Automation and Optimization)⁷⁾의 파일 파싱(parsing) 기법을 이용하여 MAPS-3D 충전해석 절차를 자동화 하였다.

4.2 실험계획법

본 논문에서는 PIANO 에서 제공하는 실험계획법 중 하나인 최적라틴방격추출법(Optimal Latin Hypercube Design)⁸⁾을 이용하였다. 최적라틴방격추출법은 충전성능이 좋지 않을 수 있는 라틴방격추출법(Latin Hypercube Design)⁹⁾을 보완한 실험계획법으로 최적계획법과 라틴방격추출법을 결합한 방법이다. 과도한 실험점을 추출하면 실험점 개수만큼의 많은 수의 해석을 수행해야 하고 실험점을 적게 추출하면 근사모델의 정확성이 감소될 수 있는 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 해석 횟수와 근사모델의 정확성을 고려하여 설계변수의 10 배수인 60개의 실험점을 추출하였다.

4.3 근사모델 생성

근사모델은 설계변수와 반응값과의 관계를 근사화 한다. 본 논문에서는 PIANO에서 제공하는 다양한 근사모델 중 하나인 크리깅(Kriging) 모델을 선정하였다. 크리깅 모델은 밸브 게이트의 열림 시점이 서로 바뀔 때 발생하는 응답값의 비선형적인 거동을 효과적으로 근사화 할 수 있다.

크리깅 모델은 1951년 채광학자인 Krige¹⁰⁾의 연구를 바탕으로 Matheron¹¹⁾에 의해 수학적으로 정립, 발전되었다. 그 후 Sacks¹²⁾에 의해 공학 분야에 적용되었으며, Simpson¹³⁾은 여러 근사모델들과 비교연구를 통해 크리깅 모델이 설계변수가 많고 비선형성이 강한 시스템에서 우수한 예측성능을 보임을 확인하였다.

4.4 최적화 기법

본 논문에서는 최적화기법으로 PIANO 에서 제공하는 마이크로 유전 알고리즘(Micro Genetic Algorithm)¹⁴⁾을 선정하였다. 마이크로 유전 알고리즘은

전역 최적화 기법 중 하나로, 생물의 진화과정을 묘사한 유전연산자들을 가지고 있어 선택 및 재생산, 교배, 돌연변이 등의 과정을 거쳐 전역해를 탐색하게 된다. 또한 이산변수를 효과적으로 다룰 수 있으며, 함수의 민감도를 요구하지 않기 때문에 함수 형태와 상관없이 적용할 수 있다.

4.5 최적설계 결과

크리깅 모델과 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 최적설계를 수행한 결과, 주어진 구속조건을 만족하면서 정상수렴하였다. 최대사출압력은 Fig. 3 과 같이 초기값(74.3 MPa) 대비 12.5% 감소한 65.0 MPa이었다. 하지만 이러한 최대사출압력값은 근사모델로부터 도출된 결과이므로 MAPS-3D를 이용한 실제 해석모델과의 결과 비교가 필요하다. 최적설계변수값을 적용한 실제 해석 결과, 최대사출압력은 초기값 대비 13.7% 감소한 64.1 MPa이었다. 즉, 크리깅 모델과 실제 해석모델과의 상대오차는 1.4%로서 4.3절에서 생성한 근사모델의 정확성이 뛰어난을 알 수 있다.

초기 및 최적 설계변수 값에 따른 금형 내부 압력 변화를 Fig. 4에 비교하였다. 최적화된 모델에서의 최대사출압력은 초기 모델과 같이 Gate4의 열림 시점에서 발생하였다. 구속조건으로 설정된 압력강화점에서의 최대 압력은 초기 모델의 경우 Gate1에서 60.7 MPa이었으며 최적모델에서도 동일한 밸브 게이트에서 약 20% 감소한 48.8 MPa이어서 주어진 구속조건을 만족함을 볼 수 있다.

최대사출압력이 발생하는 Gate4의 열림 시점에

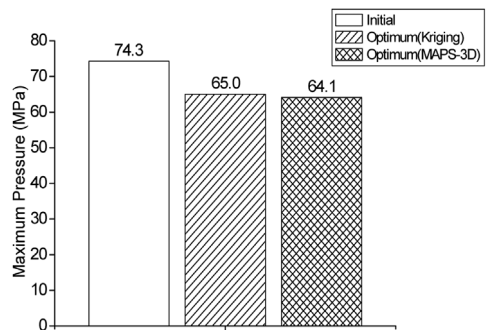


Fig. 3 Approximate and exact optimum values of the objective function compared to the initial objective

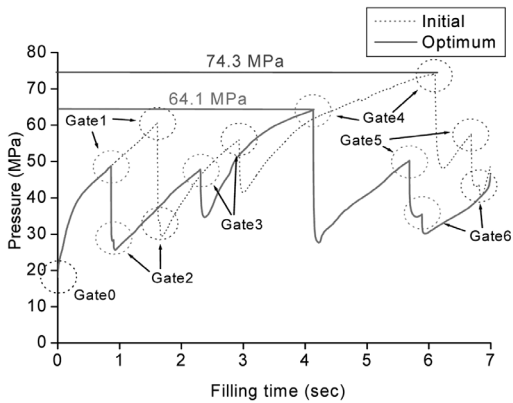


Fig. 4 Comparison of pressure curve of the initial and optimum designs

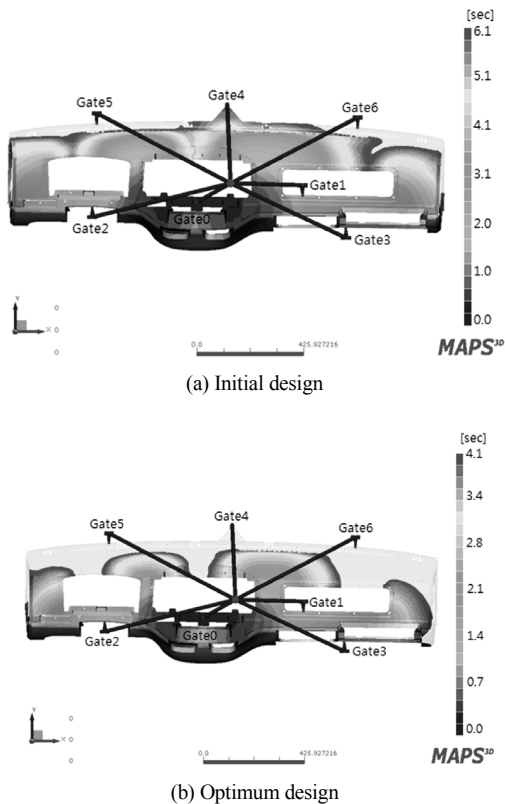


Fig. 5 Comparison of flow patterns of the initial and optimum designs at the Gate4 open

다른 수지 충전패턴을 Fig. 5에서 비교하였다. 초기 모델의 경우 Fig. 5(a)와 같이 유동선단이 6.1초경에 Gate4에 도달하며, 이때 Gate4는 수지를 주입한다. 하지만 최적모델의 경우 Fig. 5(b)와 같이 유동선단

Table 2 Optimum design variable values along with the initial, lower, and upper bound values

(unit: sec)

Design variable	Lower bound	Initial	Optimum	Upper bound
x ₁ Gate1	0.6	1.6	0.8	1.6
x ₂ Gate2	0.7	1.7	0.9	1.7
x ₃ Gate3	1.9	2.9	2.3	2.9
x ₄ Gate4	3.1	6.1	4.1	6.1
x ₅ Gate5	5.7	6.7	5.7	6.7
x ₆ Gate6	5.8	6.8	5.9	6.8

이 Gate4에 도달하지 않은 상태에서 Gate4는 수지를 주입한다. 이를 통해 최대사출압력을 감소시키기 위해서는 밸브 게이트의 열림 시점이 유동선단이 도착하기 이전으로 설정되어야 함을 알 수 있다.

설계변수의 초기값과 최적값을 Table 2에 비교하였으며, 두 결과 모두 Gate1-2-3-4-5-6의 순서로 열리는 것을 알 수 있다.

5. 결론

자동차용 인스트루먼트 패널의 최대사출압력 최소화를 위한 근사화 기반 최적설계 결과는 다음과 같다.

- 1) 상용 사출성형해석 프로그램인 MAPS-3D를 이용한 충전해석 절차를 정립하고, 상용 PIDO 툴인 PIAAnO의 파일 파싱 기법을 이용하여 해석 및 설계 절차를 자동화 하였다.
- 2) 최적라틴방격추출법을 이용하여 실험계획을 수행하였으며, 설계변수와 반응값의 관계를 크리깅 모델을 이용하여 근사화 하였다.
- 3) 크리깅 모델과 마이크로 유전 알고리즘을 사용하여 최적설계를 수행하였으며, 주어진 구속조건을 만족하면서 정상 수렴 하였다. 최대사출압력은 초기값 대비 13.7% 감소한 64.1 MPa이었으며, 이를 통해 최대사출압력을 최소화 할 수 있는 밸브 게이트 열림 시점을 결정할 수 있었다.

밸브 게이트는 용융된 수지의 주입 시점과 양을 결정하는 것 이외에 웰드라인의 발생 위치 조절을 주요 목적으로 한다. 또한 게이트 위치는 웰드라인 발생에 영향을 미치는 주요 설계인자이다. 따라서 향후에는 최대사출압력 최소화를 위해 웰드라인 발생을 고려한 밸브 게이트의 열림 시점과 위치를 설계변수로 하는 최적설계를 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0016701)에 의해 지원되었으며, 이 연구를 위하여 PIDO 툴인 PIAAnO 소프트웨어를 제공한 (주)피도텍에 감사드립니다.

References

- 1) R. Spina, "Injection Moulding of Automotive Components: Comparison between Hot Systems for a Case Study," J. Mater. Process. Technology, Vols.155, 156, pp.1497-1504, 2004.
- 2) C. W. Lee and Y. J. Hur, "Intelligent Design System for Gate and Runner in Injection Molding," Journal of the KSPE, Vol.18, No.9, pp.192-203, 2001.
- 3) H. S. Lee, Y. S. Kim, H. K. Lee and G. E. Yang, "Injection Molding Analysis of Automobile Front Bumper Fascia Using CAE," Fall Conference Proceedings, KSAE, Vol.3, pp.1147-1152, 2004.
- 4) S. B. Cho, C. H. Park, B. G. Pyo, B. O. Rhee and D. H. Choi, "Optimization of Gate Location in Injection Molding Parts Using Micro GA," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.1946-1949, 2011.
- 5) Mold Analysis and Plastics Solution-3 Dimension, MAPS-3D User's Manual, VMTech Co. Ltd., 2011.
- 6) C. H. Park, S. B. Cho, B. G. Pyo and D. H. Choi, "Optimization of Sequential Valve Gating Molding for an Automotive Instrument Panel," CAE and Applied Mechanics Division of Spring Conferences Proceedings, KSME, pp.37-38, 2011.
- 7) Process Integration, Automation and Optimization -PIAnO User's Manual, PIDOTECH Inc., 2011.
- 8) J. S. Park, "Optimal Latin-hypercube Designs for Computer Experiments," J. Statist. Plann. Inference, Vol.39, No.1, pp.95-111, 1994.
- 9) M. D. McKay, R. J. Beckman and W. J. Conover, "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code," Technometrics, Vol.21, No.2, pp.239-245, 1979.
- 10) D. G. Krige, "A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand," J. of the Chem., Metalland Mining Soc. of South-Africa, Vol.52, No.6, pp.119-139, 1951.
- 11) G. Matheron, "Principles of Geostatistics Economic Geology," Economic Geology, Vol.58, No.8, pp.1246-1266, 1963.
- 12) J. Sacks, W. J. Welch, T. J. Mitchell and H. P. Wynn, "Design and Analysis of Computer Experiments," Statistical Science, Vol.4, No.4, pp.409-435, 1989.
- 13) T. W. Simpson, T. M. Mauery, J. J. Korte and F. Mistee, "Comparisons of Response Surface and Kriging Models for Multidisciplinary Design Optimization," Proc. 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis & Optimization, AIAA, Vol.1, pp.381-391, 1998.
- 14) K. Krishnakumar, "Micro-genetic Algorithms for Stationary and Non-stationary Function Optimization," Intelligent Control and Adaptive Systems, Vol.1196, pp.289-296, 1989.