

루버휀 최적 설계 및 최적 모델의 열유동 특성 분석

Louvered Fin Heat Exchanger : Optimal Design and Numerical Investigation of Heat and Flow Characteristics

유기정(Kijung Ryu), 이관수(Kwan-Soo Lee)[†]

한양대학교 기계공학과

School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Republic of Korea

(Received September 25, 2013; revision received October 15, 2013)

Abstract This paper presents a numerical optimization of louvered fins to enhance the JF factor in terms of the design parameters, including the fin pitch, the number of louvers, the louver angle, the fin thickness, and the re-direction louver length. We carried out a parametric study to select the three most important parameters affecting the JF factor, which were the fin pitch, number of louvers, and the louver angle. We optimally designed the louvered fin by using 3rd-order full factorial design, the kriging method, and a micro genetic algorithm. Consequently, the JF factor of the optimum model increased by 16% compared to that of the base model. Moreover, the optimum model reduced the pressure drop by 17% with a comparable heat transfer rate.

Key words Louvered fin(루버휀), Kriging method(크리깅 방법), MGA(Micro Genetic Algorithm), JF factor

[†] Corresponding author, E-mail: ksleehy@hanyang.ac.kr

기호설명

$C_{\mu}, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$: $k-\epsilon$ 난류모델 상수

c_p : 비열 [J/kg $^{\circ}$ C]

f : f 인자

F_d : 휀의 깊이 [mm]

F_p : 휀간 거리 [fpi]

G_k : 난류 운동 에너지 생성항

h : 열전달계수 [W/m 2 °C]

j : j 인자

k : 난류 운동 에너지 [m 2 /s 2]

L_p : 루버간 거리 [mm]

p : 압력 [Pa]

R_L : Re-direction 루버 길이 [mm]

Re : 레이놀즈수 [$u_{in}L_p/\nu$]

T : 온도 [°C]

u : 속도 [m/s]

: 루버개수

ρ : 밀도 [kg/m 3]

μ : 점성계수 [kg/m-s]

μ_t : 난류점성계수 [kg/m-s]

하첨자

a : 열전달 면적

c : 최소 유동 면적

i, j : 방향첨자

1. 서론

루버휀은 plate-fin 열교환기 및 fin-tube 열교환기에 널리 사용되고 있으며, 기하학적 형상에 의해 열전달 면적을 늘릴 뿐만 아니라 각 열마다 열경계층을 새로 생성하여 열전달량을 증가시킨다. 그러나 루버휀은 열교환기 내 압력강하를 증가시키므로 루버휀의 성능 향상은 열전달 증가와 압력강하 감소라는 상반된 물리 현상을 동시에 만족함으로써 이를 수 있다. 따라서 제한된 조건하에서 상반된 물리 현상을 극복하고 루버휀의 성능을 증가시키기 위해 루버휀의 최적화에 대한 연구가 필요하다.

루버휀의 형상을 최적화 하여 성능을 증대시키는 방

그리스 문자

δ : 휀 두께 [mm]

ϵ : 난류 운동에너지 소산률 [m 2 /s 3]

θ : 루버 각도 [°]

법은 Qi et al.⁽¹⁾는 Taguchi 방법을 이용하여 corrugated louvered fin의 인자 영향을 수치적으로 연구하였다. Hsieh and Jang⁽²⁾은 louvered fin-round tube를 수치해석과 Taguchi 법을 이용하여 최적화 하였다. Ameer et al.⁽³⁾는 VG-1 기법을 이용하여 X-shaped louvered fin and tube 열교환기를 최적화 하였으며, Reynolds 수의 영향도 조사하였다. 그러나 위의 연구들은 루버핀 열교환기를 최적화하여 성능 분석만을 하였을 뿐, 기존 모델과 최적 모델의 열 유동 분석을 통해 개선 사항을 알아내지 않았다.

따라서 본 연구에서는 루버핀 성능을 향상시키기 위해 루버핀의 형상을 최적화 한 후, 최적 모델과 기존 모델의 열 및 유동 특성을 비교한다. 루버핀을 최적화 하기 위해 설계 인자를 선정한 후, 선정한 인자들이 루버핀의 성능에 미치는 영향을 조사한다. 인자 영향도 조사를 통해 루버핀 성능에 영향이 큰 인자로 실험계획법을 진행하며, 근사 모델과 최적화 기법을 이용하여 최적의 루버핀 형상을 제시한다. 또한, 입구 유속을 변화하며 최적의 루버핀 형상과 기존 루버핀의 열 및 유동 특성을 비교하여 개선점을 알아본다.

2. 이론

본 연구에서 해석 대상인 기준 루버핀의 형상은 Fig. 1과 같으며, 그에 따른 치수는 Table 1과 같다. 루버핀은 7단을 적층하였으며, 상부와 하부는 periodic boundary condition을 사용하였다. 루버핀의 설계 인자를 변화하여 루버핀의 성능 변화를 분석한 후, 최적화 기법을 통해 최적의 루버핀 형상을 도출 하였다. 또한, 최적 모델과 기존 모델을 비교하여 차이점을 알아보았다.

2.1 지배 방정식

본 연구에서 해석 대상의 유동 특성을 수치적으로 조사하기 위해 도입한 가정은 다음과 같다.

- (1) 유체의 흐름은 2차원 정상상태, 비압축성 난류 유동이다.
- (2) 작동 유체는 공기이며 물성치는 일정하다.
- (3) 자연대류 및 복사 열전달은 무시한다.

Table 1 Specification of the reference louvered fin

| | |
|-----------------------------------|------|
| Flow depth (F_d , mm) | 25 |
| Fin pitch (F_p , fpi) | 19 |
| Louver angle (θ , °) | 30 |
| Louver pitch (L_p , mm) | 1.2 |
| Number of louvers (#) | 18 |
| Fin thickness (δ , mm) | 0.08 |

해석하고자 하는 유동은 루버핀의 영향이 유동에 지배적이며, 루버핀의 크기와 유체의 유입 속도를 고려하였을 경우 난류 유동이므로 Realizable k- ϵ 난류모델을 사용하였다. 이와 관련된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho f_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 G_k \frac{\epsilon}{k} \quad (4)$$

$$- C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}}$$

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j T) = k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + (\tau_{ij})_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

2.2 데이터 수집

본 연구에서 루버핀의 성능을 비교하기 위해 Yun and Lee⁽⁴⁾에 의해 정의된 JF 를 이용하였다. JF 는 무차원 수로 j 와 f 로 정의 되어 있으며, 루버핀에서 열전달과 압력강하를 동시에 표현한다. 또한, JF 는 값이 클수록 성능이 좋음을 나타낸다. JF 에 대한 정의는 다음과 같다.

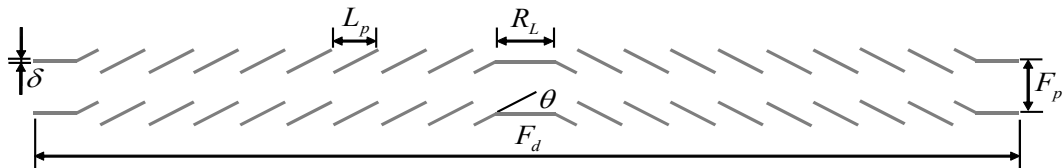


Fig. 1 Definition of geometrical parameters for a louvered fin.

$$JF = \frac{j/j_{ref}}{(f/f_{ref})^{1/3}} \quad (6)$$

여기서, j 와 f 는 Kays and London⁽⁵⁾에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$j = \frac{h_c}{\rho u_c c_p} Pr^{2/3} \quad (7)$$

$$f = \Delta P \frac{A_c}{A_a} \frac{2}{\rho u_c^2} \quad (8)$$

j factor를 정의하기 위해 사용된 h_c 는 열유속(Q)과 logarithmic mean temperature difference(LMTD)로 다음과 같이 표현된다.

$$h_c = \frac{Q}{A_a LMTD} \quad (9)$$

여기서, Q 와 LMTD는 다음과 같다.

$$Q = \rho u_c A_c c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (10)$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_{out} - \Delta T_{in}}{\ln(\Delta T_{out}/\Delta T_{in})} \quad (11)$$

3. 결과 및 고찰

수치 해석을 통해 루버핀의 설계인자가 성능에 미치는 영향을 조사하였으며, 성능의 판단은 JF 수를 이용하였다. 또한, 실험계획법과 최적화 기법을 이용하여 루버핀의 형상을 최적화 하였다.

3.1 해석 모델 검증

선정한 난류모델의 타당성을 검증하기 위해 $Re = 250$ 에서 입구온도 21도, 흰의 온도를 45도로 고정한 후 선행연구⁽⁶⁾와 각각의 난류모델의 JF 수를 비교하였다. 결과는 Table 2와 같으며, 난류모델 중 Realizable k- ϵ model의 오차가 가장 작다. 루버핀 주위의 유동에서 3차원 유동의 유무를 판정하기 위해 정상상태 2-D model과 정상상태 3-D model의 결과를 비교하였으며, 결과는 정상상태 3-D model이 2%의 오차로 좋게 나타났다. 그러나 2-D model의 오차 또한 4%로 작게 발생하였으며, 계산시간이 3-D model에 비해 1/20로 짧기 때문에 계산 효율을 위해 본 연구는 2-D model로 진행하였다. 또한, 유동의 진동 여부를 확인하기 위해 2-D 비정상 해석을 진행한 결과 JF 수는 Table 2와 같으며,

Table 2 Comparison of turbulence models with $Re = 250$

| | JF | err.(%) |
|--|------|---------|
| Kim and Bullard ⁽⁶⁾ | 1 | - |
| Standard k- ϵ model ⁽⁷⁾ | 1.14 | 14 |
| RNG k- ϵ model ⁽⁷⁾ | 1.32 | 32 |
| Realizable k- ϵ model ⁽⁸⁾ | 1.04 | 4 |
| Standard k- ω model ⁽⁷⁾ | 0.65 | 35 |
| SST k- ω model ⁽⁹⁾ | 0.65 | 35 |
| 2-D unsteady model (realizable k- ϵ model) | 1.04 | 4 |
| 3-D steady model (realizable k- ϵ model) | 0.98 | 2 |

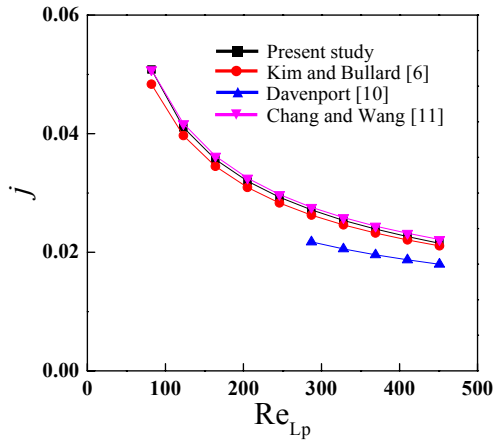
유체의 진동은 나타나지 않았다.

해석 결과의 신뢰성을 제고하기 위해 해석 결과를 선행 연구와 비교하여 검증 하였다. Fig. 2는 수치해석 값을 선행연구들^(6, 10-12)과 비교한 결과이다. 루버핀으로 향하는 공기의 온도를 21도, 흰의 온도를 45도로 고정 하였으며, Re_p 수를 100~500까지 변화하여 루버핀에서 j 값과 f 값을 비교하였다. Fig. 2(a)에서 본 연구의 j 값은 선행연구의 결과와 경향이 일치한다. Fig. 2(b)의 f 값은 선행연구 결과와 경향이 같으며, 가장 최근의 연구결과인 Kim and Bullard⁽⁶⁾의 결과와 잘 맞는다.

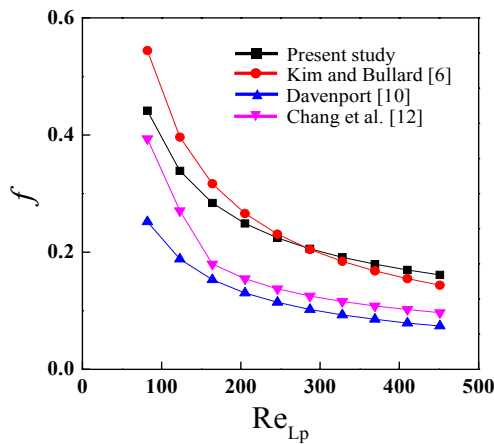
3.2 인자 영향도 분석

루버핀의 형상 최적화를 진행하기 위해 루버핀 설계인자의 영향도를 조사하였다. 본 연구에서 인자 영향도를 분석하기 위해 택한 설계 인자는 fin pitch, number of louver, louver angle, fin thickness 및 re-direction louver length이다. Table 2에서 2차원 모델과 3차원 모델의 JF 수 오차가 작기 때문에 루버핀의 설계인자 중 3차원 형상에서 표현되는 tube pitch, louver height, louver length 및 tube depth는 설계인자에서 제외하였다.

Table 3은 본 연구에서 택한 설계인자와 각 설계인자의 수준이며, 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 fin pitch, number of louver, louver angle은 인자 수준에 따른 JF 값 변동이 10% 전후로 크다. 그러나 fin thickness와 re-direction louver length는 인자 수준에 따른 JF 값 변동이 미약하다. 따라서 최적화를 진행하기 위해 영향이 큰 fin pitch, number of louver, louver angle의 설계 인자를 택하였다.



(a) j factor



(b) f factor

Fig. 2 Validation of results with previous studies.

Table 3 Level of each factor in this study

| Factor(unit) | Level | | |
|---------------------------------------|-------|------|-----|
| | -1 | 0 | 1 |
| Fin pitch, F_p (fpi) | 15 | 17 | 19 |
| Number of Louver, # | 16 | 18 | 20 |
| Louver angle, θ ($^\circ$) | 20 | 25 | 30 |
| Fin thickness, δ (mm) | 0.06 | 0.08 | 0.1 |
| Re-direction louver length, RL (mm) | 1.0 | 1.4 | 1.8 |

3.3 최적화 문제 구성

본 연구에서 택한 설계 인자는 fin pitch, number of louver 및 louver angle 이다. 최적 설계 문제의 목적 함수는 JF 수를 사용하였으며, 설계 인자의 상한과 하한은 일반적으로 통용되는 루버윈 설계 범위 내에서 정

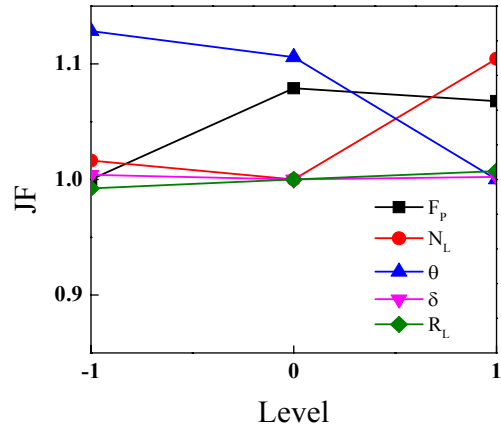


Fig. 3 The results of parametric studies.

하였다. 앞에서 언급한 내용을 종합하여 루버윈의 최적화 문제는 다음과 같이 구성 하였다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && F_p, \#, \theta \\
 &\text{to maximize} && JF \\
 &\text{subject to} && 15 \text{ fpi} \leq F_p \leq 19 \text{ fpi} \\
 &&& 16 \leq \# \leq 20 \\
 &&& 20^\circ \leq \theta \leq 30^\circ
 \end{aligned}$$

3.4 최적화

본 연구에서는 3인자 3수준의 full factorial design (FFD)을 통해 실험계획을 수립한 후, Kriging 기법⁽¹³⁾을 이용하여 최적화를 위한 근사모델을 수립하였다. 최적화는 micro genetic algorithm(MGA)⁽¹⁴⁾를 이용하여 최적화 하였으며, Kriging 기법과 MGA는 상용 process integration and design optimization(PIDO) tool인 PIANO (Process Integration, Automation and Optimization)⁽¹⁵⁾을 이용하였다. Table 4는 인자 영향도 분석을 통해 택한 설계인자를 3수준의 FFD로 계획한 실험 계획표 및 각 실험 계획의 JF 결과 값이다. Table 4의 결과를 Kriging 기법을 이용해 근사모델을 형성한 후 MGA를 이용하여 최적화 하였다. MGA를 통한 최적 형상은 $FP = 17$ fpi, $\# = 20$, $\theta = 20^\circ$ 이다. 최적 형상의 JF 값은 기준 모델($FP = 19$ fpi, $\# = 18$, $\theta = 30^\circ$)과 비교하였을 때 16% 증가하였다.

3.5 최적 모델과 기존 모델의 열유동 특성 비교

본 절에서는 최적 형상의 루버윈과 기존 루버윈과의 비교를 통해 최적 형상의 개선점을 알아보았다. Fig. 4는 유속이 1에서 5.5까지 변할 때 최적 모델과 기존 모델의 f 값과 j 값을 보여준다. 그림에서 f 값과 j 값 모두 기

Table 4 Design of experiments a 3rd-order FFD

| Test number | Fin pitch, F_p (fpi) | Number of louver, # | louver angle, Θ (°) | JF |
|-------------|------------------------|---------------------|----------------------------|------|
| 1 | 19 | 16 | 20 | 1.08 |
| 2 | 19 | 16 | 25 | 1.05 |
| 3 | 19 | 16 | 30 | 1.02 |
| 4 | 19 | 18 | 20 | 1.13 |
| 5 | 19 | 18 | 25 | 1.11 |
| 6(ref.) | 19 | 18 | 30 | 1.00 |
| 7 | 19 | 20 | 20 | 1.14 |
| 8 | 19 | 20 | 25 | 1.09 |
| 9 | 19 | 20 | 30 | 1.10 |
| 10 | 17 | 16 | 20 | 1.08 |
| 11 | 17 | 16 | 25 | 1.07 |
| 12 | 17 | 16 | 30 | 0.96 |
| 13 | 17 | 18 | 20 | 1.13 |
| 14 | 17 | 18 | 25 | 1.07 |
| 15 | 17 | 18 | 30 | 1.08 |
| 16 | 17 | 20 | 20 | 1.16 |
| 17 | 17 | 20 | 25 | 1.12 |
| 18 | 17 | 20 | 30 | 1.09 |
| 19 | 15 | 16 | 20 | 1.10 |
| 20 | 15 | 16 | 25 | 1.04 |
| 21 | 15 | 16 | 30 | 1.03 |
| 22 | 15 | 18 | 20 | 1.14 |
| 23 | 15 | 18 | 25 | 1.09 |
| 24 | 15 | 18 | 30 | 1.07 |
| 25 | 15 | 20 | 20 | 1.15 |
| 26 | 15 | 20 | 25 | 1.11 |
| 27 | 15 | 20 | 30 | 1.07 |

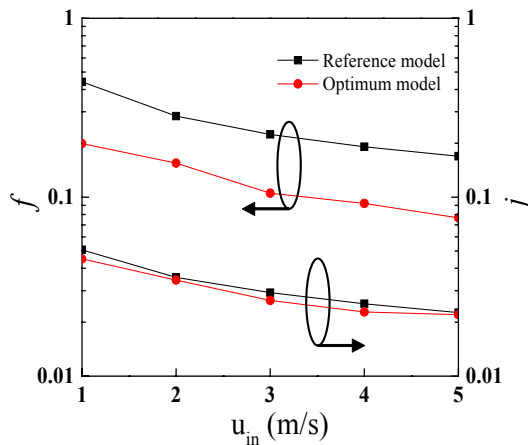


Fig. 4 Comparison of optimal model with reference model.

존 모델이 크게 나타난다. 그러나 최적 모델과 기존 모델의 j 값 차이는 작은 반면, f 값의 차이는 크게 나타

난다. 따라서 최적 모델은 기존 모델에 비해 열전달량이 미약하게 감소하지만 압력강하량이 크게 감소하기 때문에 JF 값에서 16% 증가를 보인다.

4. 결론

본 연구는 루버핀의 설계 인자가 루버핀의 성능에 미치는 영향을 조사한 후, 최적화 기법을 이용하여 최적의 루버핀을 제안하였다. 또한, 최적의 루버핀과 기존의 루버핀과의 비교를 통해 최적 형상의 개선점을 알아보았다.

- (1) 루버핀의 설계 인자 중 영향이 큰 것은 fin pitch, number of louver 및 louver angle이다.
- (2) MGA를 통해 얻은 최적 루버핀의 설계 인자는 $FP = 17$ fpi, $\# = 20$, $\Theta = 20^\circ$ 이다.
- (3) 최적 루버핀은 기존 루버핀에 비해 JF 값이 16% 향상되었다.
- (4) 최적 루버핀은 기존 루버핀과 비교하였을 때 압력 강하량은 줄어들며, 열전달량은 유지된다.

Reference

1. Qi, Z. G., Chen, J. P., and Chen, Z. J., 2007, Parametric study on the performance of a heat exchanger with corrugated louvered fins, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 539-544.
2. Hsieh, C. T. and Jang, J. Y., 2012, Parametric study and optimization of louver finned-tube heat exchangers by Taguchi method, Applied Thermal Engineering, Vol. 42, pp. 101-110.
3. Ameel, B., Degroote, j., T'Joel, C., Jaeger, P. D., Huisseune, H., Schampheleire, S. D., Vierendeels, J., and Paepe, M. D., 2013, Optimization of X-shaped louvered fin and tube heat exchangers while maintaining the physical meaning of the performance evaluation criterion, Applied Thermal Engineering, Vol. 58, pp. 136-145.
4. Yun, J. Y. and Lee, K. S., 2000, Influence of design parameters on the heat transfer and flow friction characteristics of the heat transfer with slit fins, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 2529-2539.
5. Kays, W. M. and London, A. L., 1950, Heat transfer and flow friction characteristics of some compact heat exchanger surfaces-part I : test system and procedure, Transactions of the ASME, Vol. 72, pp. 1075-1085.
6. Kim, M. H. and Bullard, C. W., 2002, Air-side thermal hydraulic performance of multi-louvered fin alu-

- minum heat exchanger, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 25, pp. 390-400.
7. David, C. W., 2004, *Turbulence Modeling*, DCW Industries.
 8. Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., and Zhu, J., 1995, A new k-epsilon eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows : model development and validation, *Computers and Fluids*, Vol. 24, pp. 227-238.
 9. Kim, M. S. and Lee, K. S., 2010, The thermoflow characteristics of an oscillatory flow in offset-strip fins, *Numerical Heat Transfer Part A*, Vol. 58, pp. 835-851.
 10. Davenport, C. J., 1983, Correlation for heat transfer and friction characteristics of louvered fin, *AIChE Symposium Series*, Vol. 79, pp. 19-27.
 11. Chang, Y. J. and Wang, C. C., 1997, A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 533-544.
 12. Chang, Y. J., Hsu, K. C., Lin, Y. T., and Wang, C. C., 2000, A generalized friction correlation for louver fin geometry, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 2237-2243.
 13. Simpson, T. W., Mauery, T. M., Korte, J. J., and Mistree, F., 2001, Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization, *AIAA Journal*, Vol. 39, pp. 2233-2241.
 14. Krishnakumar, K., 1989, Micro genetic algorithms for stationary and non-stationary function optimization, *Intelligent Control and Adaptive Systems*, Vol. 1196, pp. 289-296.
 15. PIAAnO(Process Integration, Automation and Optimization), 2011, User's manual, Version 3.3, Framax Inc.