

순차적 2 차 반응표면법을 이용한 열교환기 최적설계

박 경우[†] · 최 동훈^{*} · 이 관수^{*} · 김 양현^{**}

Heat Exchanger Optimization using Progressive Quadratic Response Surface Method

Kyoungwoo Park, Dong-Hoon Choi, Kwan-Soo Lee, and Yang-Hyun Kim

Key Words : Optimal design(최적설계), Heat sink(방열판), Thermal stability(열적안정성), CFD(전산유체역학), PQRSM(순차적 2 차 반응표면법)

Abstract

In this study, the shape of plate-fin type heat sink is numerically optimized to acquire the minimum pressure drop under the required temperature rise. To do this, a new sequential approximate optimization (SAO) is proposed and it is integrated with the computational fluid dynamics (CFD). In thermal/fluid systems for constrained nonlinear optimization problems, three fundamental difficulties such as high cost for function evaluations (i.e., pressure drop and thermal resistance), the absence of design sensitivity information, and the occurrence of numerical noise are confronted. To overcome these problems, the progressive quadratic response surface method (PQRSM), which is one of the sequential approximate optimization algorithms, is proposed and the heat sink is optimized by means of the PQRSM.

1. 서론

전자장비에서 냉각장치로 주로 사용되는 방열판(heat sink)은 시스템 내의 제한된 공간에 설치되며, 열전달 증가와 압력강하 감소라는 서로 상반된 현상을 동시에 만족시킴으로서 성능을 향상시킬 수 있다. 따라서, 방열판의 공학적인 설계는 설계최적화를 통해서 이루어져야 할 것이다.

열/유체시스템의 최적설계 문제는 어려운 과제이며, 동시에 활발하게 수행하여야 할 연구분야이다. 이에 따라 전산유체역학(CFD)과 최적화 기법을 이용한 열/유체시스템의 최적설계가 최근에 활발히 이루어지고 있다⁽¹⁻³⁾. 그러나 열/유체시스템의 해석은 과도한 계산시간을 요구하며, 종종 수치적 노이즈를 수반하기 때문에 최적설계를 위해 근사최적화(approximate optimization) 기법을 이용하게 된다.

설계민감도(design sensitivity)에 대한 해석이 불필요한 함수기반근사(function-based approximation,

FBA)는 근사화를 위해 함수 값만을 요구하므로 근사최적설계에 많이 이용되고 있으며, 대표적으로 반응표면법(surface response method, RSM)을 이용한 근사화가 있다⁽⁴⁾. 반응표면법은 비교적 넓은 범위의 설계영역에 적용되는 전역근사화기법으로, 모델링 및 해석 오차의 누적으로 인한 불안정한 해석결과를 매끄럽게 함으로서 전체적인 해석 결과의 형태를 잘 표현할 수 있다. 그러나 반응표면법은 설계변수의 개수(n)가 증가하면 실험계획법(DOE)에 의한 함수 계산 횟수가 급격히 증가하는 단점이 있다. 따라서, iDOT(최적설계신기술연구센터)에서는 설계변수의 개수가 많더라도 효율적으로 2 차 근사모델을 생성할 수 있는 순차적 2 차 반응표면법(progressive quadratic response surface method, PQRSM)⁽⁵⁾을 개발하여 최적화 문제에 적용하였다.

따라서, 이 연구에서는 CFD 와 PGRSM 을 이용하여 방열판 내의 원하는 온도상승을 만족하면서 압력강하량이 최소가 되는 최적의 설계변수를 구한다. 이때, 열/유동장 해석과 근사최적화과정은 일괄작업(batch-process)으로 수행되며, 얻어진 최적설계값들을 구배기반 최적화기법인 SQP (sequential quadratic programming)에 의한 결과와 비교하여 효율성을 입증하고자 한다.

[†] 한양대학교 최적설계신기술연구센터
E-mail : kwoopark@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-1639 FAX : (02)2291-4070

^{*} 한양대학교 최적설계신기술연구센터

^{**} 조선이공대학 건축환경설비과

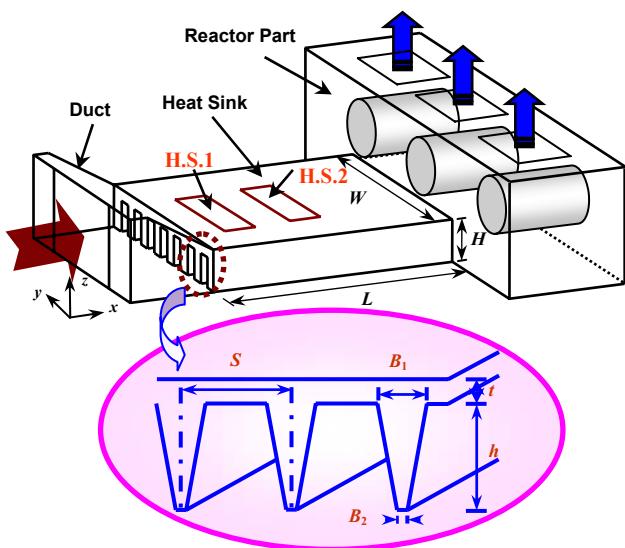


Fig. 1 Overall view of thermal system

2. 최적설계문제의 정의

2.1 해석모델

평판-흰 형 방열판의 최적화를 위해 덕트, 방열판, 그리고 반응부를 해석영역으로 선정하였으며, Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 헨($30 \times 80 \times 80$ mm, 2EA)에 의해 유입되는 저온의 공기(318 K)는 방열판($400 \times 190 \times 60$ mm, $L \times W \times H$)을 지나면서 열을 흡수 한 후 반응부($160 \times 340 \times 150$ mm)의 상부면에 설치된 출구(88×55 mm, 3EA)를 통해 대기로 빠져나간다. 방열판 상부면에는 동일크기(62×122 mm)의 2개의 열원($Q_1 = 348$ W, $Q_2 = 321$ W)에서 전기적인 저항에 의해 열이 발생된다. 또한 Fig. 1의 확대된 그림을 보면, 흰의 폐지(S), 흰의 기저부 폭(B_1), 하부 폭(B_2), 그리고 편의 높이(t)에 의해 방열판 형상이 결정됨을 알 수 있다.

2.2 최적화

제약조건을 갖는 비선형 최적설계문제를 수치적으로 해석하기 위한 수학적인 표현은

$$\text{Find } \mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}^T \quad (1)$$

$$\text{to minimize or maximize } f(\mathbf{x}) \quad (2)$$

$$\text{subject to } g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \text{ for } j = 1, M \quad (3a)$$

$$\mathbf{x}_i^L \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_i^U \text{ for } i = 1, N \quad (3b)$$

이다. 여기서 \mathbf{x} 은 벡터형의 설계변수를, $f(\mathbf{x})$ 는 목적함수를, 그리고 $g_j(\mathbf{x})$ 는 부등호제약조건을 의미한다. \mathbf{x}_i^L 및 \mathbf{x}_i^U 는 설계변수에 대한 하한 및 상한치로서, 설계변수의 범위를 제한한다.

목적함수 및 설계변수 : 방열판 설계시 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 방열판내 온도 상승이 허용된 범위내에 존재하여야 한다는 것이다. 따라서 이 연구에서는 온도상승($\Delta T = T_{\max} - T_{amb}$)을 구속조건으로, 그리고 방열판 입/출구의 압력차이(ΔP)가 최소일 때의 최적설계값을 얻을 수 있으므로, 이를 목적함수로 선정하였다. 또한 설계변수로는 흰의 기저부 폭(B_1)과 하부 폭(B_2), 그리고 편의 두께 (t)를 선택하였다.

3. 수치적 최적화

3.1 순차적 근사최적화(Sequential approximation optimization, SAO)

많은 해석시간을 요구하며, 시스템 해석에 대한 반응이 불연속적이거나 수치적 노이즈를 수반할 때, 또는 설계민감도에 대한 정보가 제공되지 않은 공학 시스템의 최적설계는 근사최적화 기법을 주로 사용한다. 이 연구에서는 이들 중에서, 근사함수의 평활성(smoothness)을 얻을 수 있는 반응표면근사법(RSA)을 이용하여, 설계최적화는 순차적 근사최적화(SAO)를 적용한다.

식(1)-(3)에서 정의된 최적설계문제를 근사화하면 다음과 같이 수식으로 표현할 수 있다.

$$\text{minimize } \tilde{f}(\mathbf{x}) \quad (4)$$

$$\text{subject to: } \tilde{g}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (5)$$

$$\max[\mathbf{x}_L, \mathbf{x}_L^{(k)}] \leq \mathbf{x} \leq \min[\mathbf{x}_U^{(k)}, \mathbf{x}_U] \quad (6)$$

여기서 $\tilde{f}(\mathbf{x})$ 과 $\tilde{g}(\mathbf{x})$ 는 각각 근사화된 목적함수와 제약조건이다. 이때 각 변수에 대한 국소경계값은 신뢰영역 알고리듬(trust region algorithm)을 이용하여 얻어진다. 위의 식(6)의 현재 반복시 설계값, $\mathbf{x}^{(k)}$ 에 대한 추가적인 이동한계($\mathbf{x}_L^{(k)}, \mathbf{x}_U^{(k)}$)는 근사화에 대한 정확도를 확보하기 위해 최적화 과정중, 반복계산시 제공되는 임시 경계값으로 설정된다.

3.2 점진적 2 차 반응표면법(PQRSM)

이 연구에서 제안된 PQRSM은 최적화과정의 초기에는 전역근사화 형태의 모델이지만, 최적화 과정이 진행되면서 국부 근사모델로 정확하게 수렴하는 장점이 있다. PQRSM은 $(2n+1)$ 개의 표본점(sample points)을 선택함으로서 단지 $(2n+1)$ 번의 함수 계산을 이용하여 순수 2 차항까지로 구성된 근사함수를 생성하고, 상호작용을 나타내는 나머지

2 차항 들은 정규화된 준-뉴튼 개선공식을 적용하여 순차적으로 계산됨으로서 추가적인 함수 계산이 필요치 않는 방법이다.

3.2.1 설계점 선택

첫번째 반복 단계에서 각 설계변수 축에서 2 개씩, 중심점에서 한 개씩 모두 $(2n+1)$ 개의 표본 점을 Fig.2 와 같이 선택한다. 각 설계점에 대한 해석을 통해 실제 함수값을 계산한 후 3 점에 대한 2 차 근사모델을 생성한다⁽⁵⁾. 즉, 중심점 (x_0, f_0) 와 i -번째 설계변수의 (x_{i1}, f_{i1}) 과 (x_{i2}, f_{i2}) 이 계산되면, 이에 대한 이차 근사함수, \tilde{f}_i 는 다음의 식으로 구한다.

$$\tilde{f}_i = a_{i0} + a_{i1}x_i + a_{i2}x_i^2 \quad (7)$$

이렇게 생성된 근사모델을 초기 신뢰영역 Γ^1 내에서 최적화를 수행하여 새로운 설계점 \mathbf{x}_1 을 계산한다. 다시 \mathbf{x}_1 에 대해 근사모델의 정확도를 평가한 다음 이에 따라 2 번째 반복 단계를 위한 새로운 신뢰영역 Γ^2 를 Fig.2(b)와 같이 생성한다. 신뢰영역 모델에 의하면, k -반복단계에서 식 (4)-(5)에 대한 국소 최적화 문제는 현재의 설계점 \mathbf{x}^k 주위에서 계산된다. 이때 이동한계(식 6)는 Γ^k 라는 신뢰영역 반경으로 다음과 같이 정의된다.

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^k\|_p \leq \Gamma^k \quad (8)$$

여기서 p norm 은 영역의 형상을 정의하는데, 이 연구에서는 기준의 설계점을 포함하면서 나머지 $(2n)$ 개를 축방향으로 일직선상에 놓아 새로운 설계점을 추출하는 초-정방형(hyper-cubic type) 신뢰영역법을 제안한다.

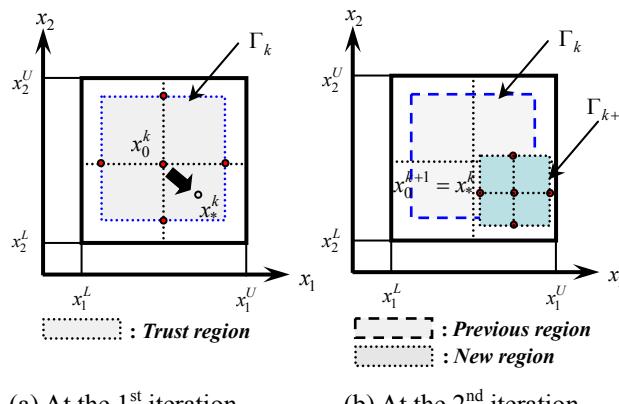


Fig. 2 Design points sampling at first two iterations

순차적 근사최적화 기법인 PQRSM 에서는 근사 목적함수의 변화에 대한 실제 목적함수의 변화비로 정의하는 신뢰영역 반경비(ρ^k)를 이용하여 신뢰영역을 수정한다.

$$\rho^k = \frac{f(\mathbf{x}^k) - f(\mathbf{x}_*^{k+1})}{\tilde{f}(\mathbf{x}^k) - \tilde{f}(\mathbf{x}_*^{k+1})} \quad (9)$$

여기서, \mathbf{x}_*^{k+1} 는 새로운 설계점이다. 만일 ρ^k 가 0 보다 크면 새로운 설계점 $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}_*^{k+1}$ 으로 간주하며, 이때 신뢰영역 반경(Γ^k)은 아래의 식에 따라 수정된다.

$$\Gamma^k = \begin{cases} \gamma_0 \Gamma^{k-1} & \text{if } 0 < \rho^k < \varepsilon_1 \\ \gamma_1 \Gamma^{k-1} & \text{if } \varepsilon_1 < \rho^k < \varepsilon_2 \\ \gamma_2 \Gamma^{k-1} & \text{if } \rho^k \geq \varepsilon_2 \end{cases} \quad (10)$$

여기서,

$$\gamma_0 = 0.25, \gamma_1 = 1, \gamma_2 = \begin{cases} 2 & \text{if } \|\mathbf{x}^* - \mathbf{x}^0\| = \Gamma^k \\ 1 & \text{if } \|\mathbf{x}^* - \mathbf{x}^0\| < \Gamma^k \end{cases} \quad (11)$$

$$\varepsilon_1 = 0.25, \varepsilon_2 = 0.75$$

이다. 특히, PQRSM 은 2 번째 반복단계부터는 생성된 이차 근사모델이 최적화를 위해 직접 사용되지 않고 다음 절에서 설명할 정규화된 준-뉴튼(normalized quasi-Newton)법이 적용되기 시작한다.

3.2.2 점진적 2 차 반응표면 근사화

$(2n+1)$ 개의 설계점을 이용해 근사화된 k -번째 반복 단계에서의 근사식인 식(7)의 1 차 및 2 차 회기계수항을 각각 \mathbf{g}_k 와 \mathbf{D}_k 라 한다. 이 때 k -번째 근사 헤시언(approximate Hessian, \mathbf{B}_k)은 BFGS 식으로 잘 알려진 아래의 준-뉴튼공식에 의해 생성된다.

$$\mathbf{B}_k = \tilde{\mathbf{B}}_{k-1} - \frac{(\tilde{\mathbf{B}}_{k-1}\delta_k)(\tilde{\mathbf{B}}_{k-1}\delta_k)^T}{\delta_k^T \tilde{\mathbf{B}}_{k-1}\delta_k} + \frac{\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \delta_k} \quad (12)$$

여기서, $\delta_k = \mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}$, $\mathbf{y}_k = \mathbf{g}_k - \mathbf{g}_{k-1}$, 그리고 $\mathbf{B}_1 = \mathbf{D}_1$ 이다. 설계점, \mathbf{x}_k 에서 원래 헤시언 \mathbf{D}_k 는 비대각(off-diagonal)요소를 가지지 않지만, 식(12)에 의해 생성된 \mathbf{B}_k 는 비-대각요소를 가지게 된다. 그러나 비교적 작은 설계영역인 Γ^k 에서 \mathbf{D}_k 는 \mathbf{B}_k 보다 더 정확한 대각선 요소를 가지고 있으며, 이러한 특성은 최적화과정이 진행될수록 더욱 현저하게 나타나게 된다. 따라서 \mathbf{B}_k 의 대각성 요소를 \mathbf{D}_k 로 취환하기 위해 다음과 같이 정규화된 근사 헤시언($\tilde{\mathbf{G}}_k$)을 생성한다.

$$\tilde{\mathbf{G}}_k = \mathbf{S}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{S}_k \quad (13)$$

여기서, \mathbf{S}_k 는 대각선 행렬이고, \mathbf{S}_k 의 i -번째 요소인 \mathbf{S}_k^{ii} 는 $\mathbf{S}_k^{ii} = \sqrt{|D_k^{ii}|} / \sqrt{|B_k^{ii}|}$ 이다. 또한 $\tilde{\mathbf{G}}_k$ 에서 대각선 요소들의 부호는 \mathbf{D}_k 의 부호로 치환된다. 신뢰영역이 충분히 작거나 또는 잘 선정된 경우, 신뢰영역내에서 일차 및 2 차 회기계수는 중앙차분법으로 근사화된 일/이차 도함수와 거의 동일하게 되며, 따라서 $\tilde{\mathbf{G}}_k$ 는 \mathbf{x}_k 에서의 실제모델의 Hessian과 거의 일치하게 된다. 따라서 식(12)는 다음의 식으로 수정된다.

$$\mathbf{B}_k = \tilde{\mathbf{G}}_{k-1} - \frac{(\tilde{\mathbf{G}}_{k-1} \boldsymbol{\delta}_k)(\tilde{\mathbf{G}}_{k-1} \boldsymbol{\delta}_k)^T}{\boldsymbol{\delta}_k^T \tilde{\mathbf{G}}_{k-1} \boldsymbol{\delta}_k} + \frac{\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \boldsymbol{\delta}_k} \quad (14)$$

이 연구에서는 식(14)를 정규화된 준-뉴튼(normalized quasi-Newton)공식이라 부른다. 따라서, PQRSM에서 사용하는 근사모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{f}(\mathbf{x}_k) &= f(\mathbf{x}_{k-1}^*) + \mathbf{g}_k^T (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}^*) \\ &\quad + \frac{1}{2} (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}^*)^T \tilde{\mathbf{G}}_k (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}^*) \end{aligned} \quad (15)$$

위의 식에서 \mathbf{g}_k^T 는 반응표면법을, $\tilde{\mathbf{G}}_k$ 는 반응표면법과 BFGS 법을 이용하여 구하게 된다.

4. 수치적 절차

평판-환 방열판의 최적 설계값을 얻기 위해서 (1) 목적함수를 계산하는 해석기(analyzer), 즉, 열·유동 해석용 프로그램, (2) 비선형 최적화 문제를 해석하는 최적화기(optimizer) 그리고 (3) 여러 가지 배열과 변수 정의 및 두 프로그램을 제어하는 주-프로그램 등을 사용한다. 일단, 열 및 유동장 해석의 결과로 목적함수가 계산되면, 주-프로그램은 최적화를 수행하기 위해 최적화기를 이용한다. 이 때, 최적화기는 설계변수를 수정할 수 있으며, 수정된 설계변수로 인해 새로운 목적함수들을 필요로 하게 될 때, 주-프로그램으로 돌아가서 해석기를 이용하여 이들을 계산하게 된다. 이 때, 최적화기가 새로운 설계변수를 제안하기 때문에 해석기는 새로운 격자를 생성하여야 한다. 이러한 과정은 최적화가 완전히 종료될 때까지 반복적으로 수행되며, 이상의 모든 과정은 자동화된다.

4.1 열·유동장

작동유체는 일정한 물성치를 갖는 비압축성이고, 유동은 3 차원 난류, 정상상태이다. 해석영역의 대칭성으로 인해 전 영역의 1/2 만을 해석하였다.

Navier-Stokes 식을 시간평균하면, 운동량 및 에너지방정식에 Reynolds 응력항 ($\overline{\rho u' u'}$)과 난류 열유속항 ($\overline{\rho u' t'}$)이 나타나는데, 이 연구에서는 와점성근사를 근사를 이용한 표준 $k-\varepsilon$ 난류모델을 이용하며, 난류모델에 사용된 계수 및 합수는 참고문헌 [6]에 잘 설명되어 있다.

방열판내의 열/유동장 해석은 빠르고 신뢰할 수 있는 상업용 프로그램인 FLUENT⁽⁷⁾를 이용한다. 해석영역을 비균일격자계(총 격자수는 약 130만개)로 나누며, 운동량 방정식에 나타난 압력수정식은 SIMPLE 알고리즘⁽⁸⁾을 적용하였으며, 대류와 확산항은 엑급수법을 이용하여 이산화한다. 방열판 입구에 일정한 유속(1.27m/s)이 선회하면서 유입된다 (2500 RPM). 또한 방열판 하단면의 열원에는 열유속 조건을, 그 외의 영역은 대류경계조건을 부여하였다. 또한 입구에서 $k = 0.01w_m^2$, $\varepsilon = C_\mu^{4/3} k^{3/2} / l$ 로 주었다. 열·유동장에 대한 수렴된 해는 유수의 합과 연속된 종속변수들의 상대오차가 10^{-5} 이하를 동시에 만족하였을 때로 하였다.

4.2 최적화

신뢰영역 알고리즘을 사용한 PQRSM 모델을 효율적으로 관리하기 위한 수치적인 절차를 Fig. 3에 나타내었다. 수렴조건은 (1) 연속적인 반복사이에 목적함수의 절대편차가 10^{-3} 보다 작고, (2) 구속조건들의 최대 위배량이 10^{-4} 보다 작을 경우이다.

5. 결과 및 고찰

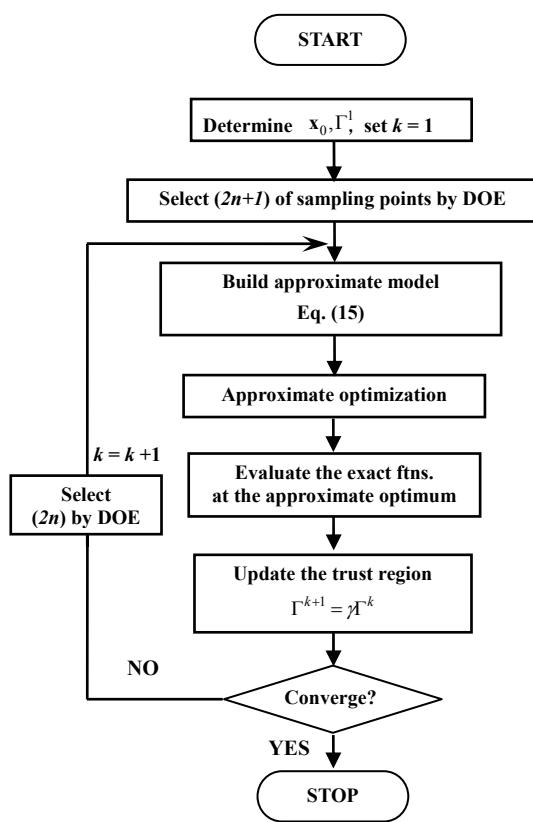
CFD 와 PQRSM 을 이용한 방열판의 최적설계 문제는 다음의 수식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Find} \quad \mathbf{x} &= [B_1, B_2, t]^T \\ \text{to minimize} \quad f(\mathbf{x}) &= \Delta P (= P_{in} - P_{out}) \\ \text{s.t} \quad g_1(\mathbf{x}) &= \Delta T / (33 - 36K) - 1 \geq 0 \\ g_2(\mathbf{x}) &= (B_2 / B_1) - 1 \geq 0 \\ 1.25 \leq B_1 &\leq 6.0 \text{ mm}, 1.25 \leq B_2 \leq 6.0 \text{ mm}, \\ 7.0 \leq t &\leq 25.0 \text{ mm} \end{aligned}$$

또한, 최적설계를 위한 기준모델의 형상은 $B_1 = 2.0$ mm, $B_2 = 1.5$ mm, 그리고 $t = 7.0$ mm 이다.

5.1 매개변수연구

매개변수 연구는 설계변수들이 방열판 성능에

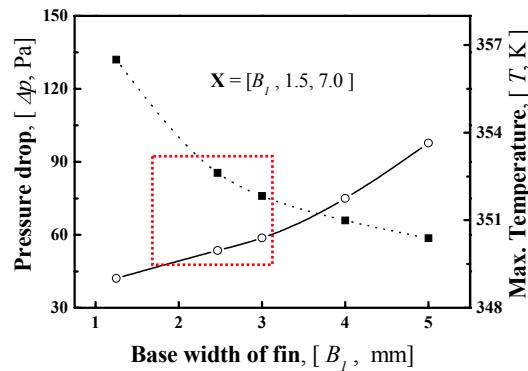
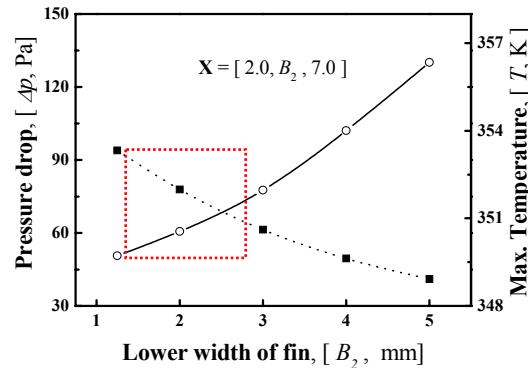
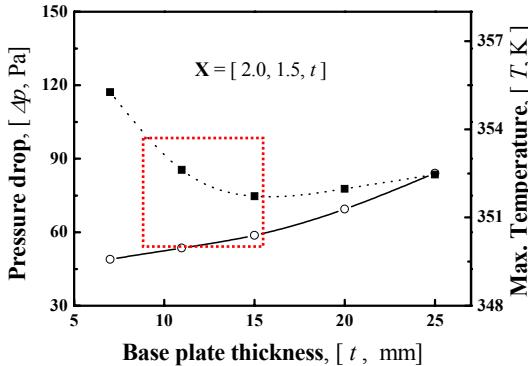
**Fig. 3** Optimization procedure of PQRSM

미치는 영향을 평가하고, 가장 적합한 최적화 기법을 선택하기 위해 최적화에 앞서 수행된다.

여러 가지 흰의 기저부 및 하부 폭(B_1, B_2)에 대한 압력강하 및 최대 온도를 Fig. 4 와 5 에 각각 나타내었으며, 다른 설계변수들은 기준모델에 대한 것이다. 이때 방열판내 최대온도는 두 번째 열원과 방열판과의 접촉면에서 발생한다. B_1 와 B_2 가 증가할수록 압력강하량은 거의 선형적으로 증가하지만 최대온도는 지수적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 흰의 폭이 증가함에 따라 유동 저항이 커져 압력강하량은 증가하고, 반면에 흰과 흰사이의 유속의 증가로 열경계층 두께가 감소하여 열전달이 증가하기 때문에 최대온도는 감소하게 되는 것이다. 그리고 최대온도와 압력강하량을 동시에 고려하면, B_1 이 대략 2 - 3 mm 사이에서, B_2 는 3mm 이하에서 최적값이 존재할 것이다.

흰 두께 (t) 의 영향을 나타낸 Fig. 6 을 보면, 흰 두께가 증가함에 따라 최대온도는 초기에 감소하지만, $t > 15\text{mm}$ 가 되면 오히려 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 매우 흥미로운 결과로서 최적설계값은 기본적으로 15mm 이하에서 결정될 것으로 예측된다.

이상에서 보듯이, 방열판의 성능에 흰의 폭이 미치는 영향은 매우 크다. 특히, 흰의 두께의 영향

**Fig. 4** Effect of base width of fin (B_1)**Fig. 5** Effect of lower width of fin (B_2)**Fig. 6** Effect of basement thickness (t)

으로부터, 최대온도의 설계변수에 대한 변화는 감소 후 다시 증가하는 등 영역내에 최대와 최소값이 동시에 존재하기 때문에 국소최적화 기법으로 최적의 설계값을 찾기는 어려울 것으로 여겨진다.

5.2 최적설계변수

기준모델에 대한 압력강하량 및 최대온도는 각각 53.23 Pa 과 356.34 K 로 계산되었다. 그러나 주위온도에 대한 온도상승(ΔT)이 38.34 K 가 되어, 이 연구의 방열판 온도상승 한계치인 36 K 를 초과함으로서 열적인 안정성을 확보할 수가 없다.

PQRSM 에 의한 최적설계 결과 및 SQP 법과 비교를 통한 이 방법의 정확성 및 효율성을 규명하

Table 1 Optimal results for PQRSRM

| ΔT [K] | Design variables [mm] | | | ΔP [Pa] |
|----------------|-----------------------|-------|--------|-----------------|
| | B_1 | B_2 | t | |
| 33.0 | 3.037 | 2.024 | 10.905 | 69.63 |
| 34.0 | 2.961 | 1.691 | 11.374 | 57.68 |
| 35.0 | 2.611 | 1.267 | 10.541 | 51.67 |
| 36.0 | 2.256 | 1.250 | 9.355 | 46.22 |

* for baseline geometry, $\Delta T = 38.34$ K, $\Delta P = 53.23$ Pa

Table 2 Optimal results for SQP method

| ΔT [K] | Design variables [mm] | | | ΔP [Pa] |
|----------------|-----------------------|-------|--------|-----------------|
| | B_1 | B_2 | t | |
| 33.0 | 2.903 | 2.348 | 10.491 | 72.95 |
| 34.0 | 2.637 | 1.897 | 10.581 | 58.21 |
| 35.0 | 2.468 | 1.365 | 10.962 | 53.54 |
| 36.0 | 2.179 | 1.250 | 11.042 | 47.68 |

* for baseline geometry, $\Delta T = 38.34$ K, $\Delta P = 53.23$ Pa

기 위하여, Table 1 은 PQRSRM 에 의한 최적화 결과를, Table 2 에는 SQP 법에 의한 결과를 각각 나타내었다. 먼저 Table 1 과 2 를 보면, 동일한 온도상승에 대해 서로 다른 최적설계값을 얻었음을 알 수 있다. 이는 PQRSRM 에 의한 결과는 전역최적설계값인 반면, SQP 에 의한 것은 국소최적값이기 때문이다. 또한 모든 온도상승에 대해 최소화할 목적함수인 압력강하량이 이 연구에서 제안한 PQRSRM 에 의한 경우가 보다 낮게 계산되었다. 이는 근사최적화기법인 PQRSRM 이 구배-기반 국소최적화기법인 SQP 법에 비해 보다 우수한 최적설계 결과를 제공하고 있음을 잘 설명하는 것이다. Table 1 에 설명되어 있듯이, 제약조건인 온도상승을 감소시키면 흰의 폭(B_1 과 B_2)은 증가 하며 반대로 핀 두께(t)는 증가 후 다시 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉, 온도상승을 만족시키기 위해 핀의 두께가 커지고, 이로 인해 압력강하가 증가한 것이다. 또한 온도상승과 압력강하량을 기준모델과 비교하였을 때, 이 두 가지 조건이 모두 감소한 $\Delta T = 35$ K 인 경우의 최적설계값을 이 연구에서 고려한 방열판의 최적설계값으로 추천하고자 한다.

열교환기의 열적 성능 향상은 근본적으로 열전달률의 최대화이다. 그러나 열전달 향상은 위한 유동속도의 증가는 필연적으로 압력강하량의 증가를 초래하게 되는데, 이는 핀의 크기를 결정하는 요소로 비용적인 문제를 수반하게 된다. 그러므로 위 두 가지 현상 중 어느 것에 가중을 두느냐는 설계자의 몫이라 할 수 있다.

6. 결론

CFD 와 순차적 근사최적화 기법인 PQRSRM 을 이용하여 평판-흰형 방열판의 최적설계를 수행하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

흰의 두께가 열전달률과 압력강하에서 가장 많은 영향을 미치며, PQRSRM 을 이용하여 훌륭하게 최적설계값을 얻을 수 있었다. 이 연구의 결과로 추천할 수 있는 최적설계값은 원하는 온도상승이 35 K 인 경우로서, $B_1 = 2.611$ mm, $B_2 = 1.267$ mm, 그리고 $t = 10.541$ mm 이다. 또한, 최적 모델은 기준모델에 비하여 온도상승은 약 4K, 압력강하량 역시 0.3 Pa 감소시킴으로서 방열판의 성능을 향상시켰다. 이 연구의 결과는 설계자들이 중요시하는 목적함수 또는 제약조건에 상응하는 최적설계값을 선택하는 데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

후기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적설계신기술연구센터(iDOT)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K. Park, D.H. Choi, K.S. Lee, Optimum design of plate heat exchanger with staggered pin arrays, Numerical Heat Transfer Part A, vol.45, pp.347-361, 2004.
- [2] K. Park, D.H. Choi, and K.S. Lee, Numerical Shape Optimization for High Performance of a Heat Sink with Pin-Fins, Numerical Heat Transfer Part A, in press, 2004.
- [3] K. Park and D.H. Choi, Shape optimization of a plate-fin type heat sink with triangular-shaped vortex generator, KSME International Journal, Sept., 2004.
- [4] J.F. Rodriguez, J.E. Renaud, B.A. Wujek, R.V. Tappeta, Trust region model management in multidisciplinary design optimization, J. of Computational and Applied Mathematics, vol.124, pp.139-154, 2000.
- [5] K.J. Hong, M.S. Kim and D.H. Choi, Efficient Approximation Method for Constructing Quadratic Response Surface Model, KSME Int. Journal, vol.15, no.7, pp.876-888, 2001.
- [6] W. Rodi, Turbulence models and their applications in hydraulics – a state-of-art-of review, Book Publication of International Association for Hydraulic Research, Delft, Netherlands, 1984.
- [7] FLUENT 6 User's Guide, FLUENT Inc., 2003.
- [8] S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, 1980.