

## 대리모델들을 이용한 인쇄형 열교환기의 최적설계

이상문\* · 김광용\*\*†

### Design Optimization of a Printed Circuit Heat Exchanger Using Surrogate Models

Sang-Moon Lee\*, Kwang-Yong Kim\*\*†

*Key Words* : Printed circuit heat exchanger(인쇄형 열교환기), SST model(SST모델), Surrogate model(대리모델), Three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equation(삼차원 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식)

#### ABSTRACT

Shape optimization of a Printed circuit heat exchanger (PCHE) has been performed by using three-dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes (3-D RANS) analysis and surrogate modeling techniques. The objective function is defined as a linear combination of effectiveness of the PCHE term and pressure drop in the cold channels of the PCHE. The cold channel angle and the ellipse aspect ratio of the cold channel are used as design variables for the optimization. Design points are selected through Latin-hypercube sampling. The optimal point is determined through surrogate-based optimization method which uses 3-D RANS analyses at design points. The results of three types of surrogate model are compared each other. The results of the optimizations indicate improved performance in friction loss but low performance in effectiveness than the reference shape.

#### 1. 서론

원자력 발전소 사이클의 주축을 이루고 있던 스팀터빈 사이클에 비해 효율성, 단순성 등의 장점을 가진 가스터빈 사이클에 대한 많은 연구들이 진행되었고, 이를 바탕으로 가스터빈 사이클을 이용한 원자로인 고온가스로나 차세대 원자로, 즉, 제 4세대 원자로의 한 축을 담당하게 되었다. 그러나, 가스터빈 사이클은 작동유체로 스팀에 비해 열용량이 낮은 기체를 사용하고, 고온 고압의 환경에서 운전되기 때문에 기존의 튜브형 열교환기를 사용하게 되면 같은 효율을 얻기 위해 엄청난 크기의 열교환기가 필요하게 된다. 이를 해결하기 위해 가스터빈 사이클에서 사용되는 특별한 열교환기가 필요하게 되는데, 현재 개발 및 사용 중인 열교환기 중의 하나가 HEATRIC사에서 개발한 인쇄형 열교환기(Printed Circuit Heat Exchanger : PCHE)이다.<sup>(1)</sup> PCHE는 Fig. 1과 같이 금속판의 표면에 화학적 에칭을 통해 유로를 생성하고,

각각의 금속판들을 확산접합하여 제작되기 때문에 열교환기의 크기를 효과적으로 줄이는 동시에 매우 높은 열교환효율을 얻을 수 있다.<sup>(2)</sup> 한편, 재료의 성질을 연속적으로 유지할

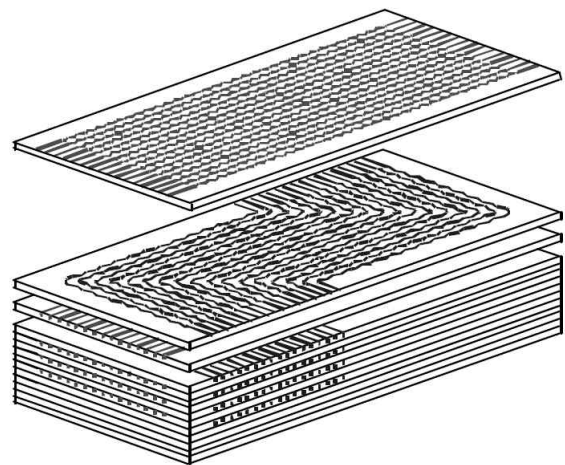


Fig. 1 Plate stacking prior to diffusion bonding [1]

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 인하대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail : kykim@inha.ac.kr

수 있는 확산접합을 통해 제작되어 구조적으로 상당히 안정적이기 때문에 고온 고압의 환경인 가스터빈 사이클의 열교환기로 사용되기 적합하다. 그러나 지그재그 형태의 유로로 구성되어 있어 압력손실이 상당히 크기 때문에 이를 개선하기 위한 노력이 필요하다.

최근 제4세대 원자로 중의 하나로 가스터빈 사이클을 사용하는 고온가스로가 연구되면서 이 사이클을 구성하는 적합한 열교환기로 PCHE가 유력시됨에 따라 이에 대한 많은 연구가 진행되었다. Ngo 등<sup>(3)</sup>은 공동연구를 통해 기존 PCHE 형상에 대한 실험 및 수치해석을 바탕으로 설계 기준을 세우고, S형상의 핀을 가진 새로운 인쇄형 열교환기를 개발하여 기존형상과의 비교를 통해 높은 열교환효율과 낮은 압력 손실을 가짐을 입증하였다. Fra 등<sup>(4)</sup>은 공동 연구를 통해 고온가스로에 적합한 환경 및 설계조건들을 제시하고, 기존형상에 대한 실험결과 및 수치해석 결과를 비교하여 적합한 수치모델을 제시하였다. 또한 이를 바탕으로 고온가스로에서 발생할 수 있는 여러 가지 사고에 대한 시나리오 해석을 수행하여 결과를 분석하고, 고온가스로에 적합한 운전조건들을 제시하였다. Kim 등<sup>(5)</sup>은 GAMMA 코드를 이용한 시스템 해석과 삼차원 수치해석을 이용하여 인쇄형 열교환기의 수치모델을 제시하였고, 다양한 레이놀즈 수 범위에 대한 영향을 분석하여 유로 내부의 열유동 현상을 제시하였다. Kim 등<sup>(6)</sup>은 삼차원 유동해석을 통해 기존형상에 대한 수치모델을 수립하고, 에어포일 형상을 가진 새로운 유로 형상을 개발하여 기존형상과의 비교를 통해 에어포일 형상의 우수성을 밝힌 바 있다.

그러나, 이러한 국내외 연구들은 확산접합 인쇄형 열교환기 내 유로에 대한 수치모델의 제시, 특정한 설계조건에서 열교환효율을 증가시키고 압력손실을 줄일 수 있는 새로운 형상을 제시하는 데 초점이 맞추어져 있고 수치최적설계기법을 사용한 성능 향상에 대한 연구는 수행된 바 없다.

삼차원 유동해석을 바탕으로 한 열유동관련 시스템의 최적설계는 최근 그 유용성으로 인해 큰 관심을 모으고 있다. 특히, 다양한 최적화기법 중 대리모델(surrogate model)을 사용한 최적화기법은 경제성과 효율성으로 인해 많은 분야에 걸쳐 연구가 진행된 바 있다. Queipo 등<sup>(7)</sup>은 대리모델을 이용한 최적설계 방법을 제시하고 이를 항공기 엔진 내부의 유동 분석을 통한 최적화를 수행하였으며, Goel 등<sup>(8)</sup>은 대리모델의 신뢰도를 비교하고 각 대리모델들의 신뢰도를 향상시키기 위한 방법을 제시하였다. Kim 등<sup>(9)</sup>은 원심압축기 내부의 유동해석과 대리모델을 접목한 최적설계를 수행하여 향상된 성능의 원심압축기 형상을 제시하였다. Lee와 Kim<sup>(10)</sup>은 최적화기법의 하나인 신경회로망 기법을 사용하여 가스터빈 날개 표면의 휨형상 막냉각 홀이 최적 성능을 낼 수 있는 형상을 도출하였다.

PCHE가 최적의 성능을 내기 위해서는 각 채널을 지나

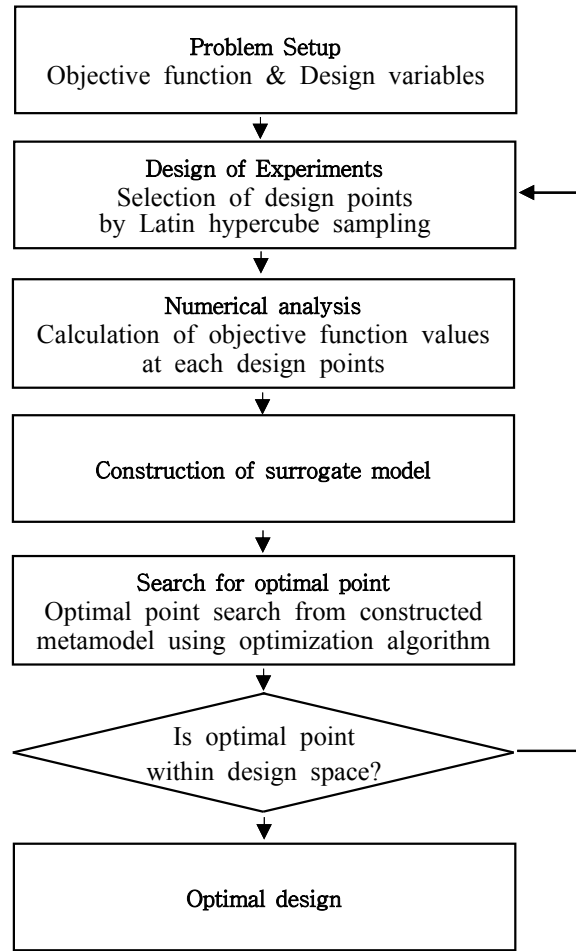


Fig. 2 Flow chart showing optimization procedure

작동유체의 압력강하를 최소화하고, 고온채널과 저온채널 간의 열교환 성능을 최대화 할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 선행 연구인 Lee와 Kim<sup>(11)</sup>에서 구축된 수치모델 및 매개변수 분석결과를 바탕으로 삼차원 RANS해석과 대리모델을 사용한 최적설계기법 (Fig. 2)을 적용하여 PCHE의 유동해석과 최적설계를 수행하였다. 선행 연구를 바탕으로 설계변수를 설정하고 설계영역을 설정하였다. 설계영역을 바탕으로 대리모델들을 사용하여 PCHE의 열교환 성능과 마찰성능을 향상시키기 위한 최적형상을 제시하였다.

## 2. 수치해석기법

본 연구에서는 PCHE 채널 내부의 열유동해석과 채널 사이 고체부분의 열전달 해석을 위해 비정렬 격자계(unstructured grids)를 사용하는 범용 소프트웨어인 ANSYS CFX-11.0<sup>(12)</sup>을 사용하였다. 최적설계를 위해 선행연구<sup>(11)</sup>에서 구축된 수치해석모델을 사용하였다. 수치해석모델은 격자의존성 시험과 실험결과와의 비교를 통한 신뢰도확보 및 계산영역의 설정을 통해 구축되었다. Fig. 3에 수치해석모델의 격자구조를 도시하였다. 전반적으로 비정렬 사면체격자가 사용되었으며

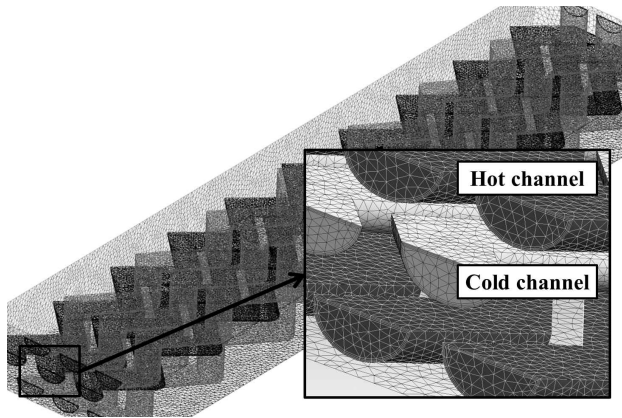


Fig. 3 Grid system of the calculation domain

Table 1 Boundary conditions

Conditions	Values
Cold inlet flow rate (kg/s)	0.0009456
Cold inlet temperature (°C)	123
Cold outlet pressure (kPa)	8312
Hot inlet flow rate (kg/s)	0.0008670
Hot inlet temperature (°C)	138.2
Hot outlet pressure (kPa)	2528

벽근처 난류경계층의 계산을 위해 프리즘 격자가 사용되었다. 계산영역의 길이는 70mm로 설정되었으며 영역은 크게 고온 유로, 저온 유로와 열전달이 진행되는 고체, 세 영역으로 나뉜다. 유로를 흐르는 유동의 해석을 위해 질량보존식, 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식(Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations), 에너지 방정식이 사용되었으며 고체 내 열전달 해석에 열전도 방정식이 사용되었다. 열전도 방정식의 경계조건은 고온 유로와 저온 유로 내벽의 온도를 사용하였으며 고온 유로 및 저온 유로와 고체의 경계면의 격자차이에 의한 수치오차를 줄이기 위해 GGI<sup>(12)</sup> 기법을 적용하였다. 본 연구에서 사용된 수치해석 모델의 경계조건은 선행연구(11)와 같으며 Table 1에 나타내었다.

PCHE의 내부 유동은 고온 유로와 저온 유로의 유동방향이 반대인 대향류(counterflow)로 구성되며 유로의 수력직경(hydraulic diameter)에 기반한 레이놀즈수는 약 152,000 전후로 항상 난류이기 때문에 이에 맞는 난류모델의 선택과 경계층 격자처리가 필요하다. 본 연구에서는 레이놀즈 응력항의 계산을 위해 SST(shear stress transportation)모델<sup>(13)</sup>이 사용되었다. SST 모델은 k- $\omega$ 모델과 k- $\epsilon$ 모델의 장점을 결합한 모델로서, 일반적으로 k- $\omega$ 모델은 벽 근처에서 사용되며, k- $\epsilon$ 모델은 나머지 영역에서 사용된다. Bardina 등<sup>(14)</sup>은 자신들의 연구를 통해 SST모델이 역 압력구배로 인한 유동박리의 예측에 효과적이기 때문에 박리가 수반되는 벽 근처 난류유동해석의 정확성이 타 모델에 비해 높다고 밝힌 바

있다. 벽 근처 격자는 Fig. 3과 같이 프리즘 격자를 사용하였으며  $y^+$ 를 1이하로 유지하여 저 레이놀즈 수 SST모델(low-Reynolds-number SST model)을 사용할 수 있도록 처리하였다.

모든 해석에 있어 고해상도 수치도식(high resolution scheme)이 지배방정식의 이산화에 사용되었으며, 입구 난류강도는 5%로 가정하였다. Residual reduction factor는  $10^{-8}$ 로 설정하였을 때 만족스러운 결과 값을 얻을 수 있었다. 한 번의 해석을 수렴시키기 위해서는 I7 CPU를 사용하는 컴퓨터에서 8개 병렬코어를 모두 사용하여 약 20시간의 계산시간이 소요되었다.

### 3. 최적화기법

Fig. 2에 최적화 과정을 순서도로 표시하였다. 첫 번째 단계로 대리모델의 표면을 이루게 될 목적함수와 설계변수를 선정한다. 목적함수는 연구대상의 성능을 판단하는 지표로 설정되며, 설계변수는 매개변수 분석의 결과를 바탕으로 연구대상의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 설정된다. 두 번째 단계로 설계변수의 영역, 즉, 각각의 설계변수의 최고치와 최소치를 설정하여 설계영역을 구성하며, 실험계획법(design of experiment)을 통해 설계영역을 대표하는 일정 수의 실험점(experimental point)들을 구한다. 다음으로 각 실험점에 대한 유동해석을 통해 목적함수를 구하고, 실험점에서의 설계변수 및 목적함수를 바탕으로 대리모델을 사용하여 자료곡면을 구성한다. 이후 최적화 알고리즘을 통하여 자료곡면 상에서 최적점을 찾고 최적점이 설계영역 내에 존재하게 되면 최적화 과정은 종료된다. 만일 최적점의 위치가 설계영역을 벗어나게 되면 수정된 설계영역을 바탕으로 다시 계산을 수행해야 한다.

#### 3.1 설계변수 및 목적함수

Fig. 4에 나타난 형상변수를 이용하여 두 개의 설계변수, 저온유로의 각도( $\theta_c$ ), 저온유로의 단면 타원가로세로비(Ellipse aspect ratio;  $\alpha_c$ )를 선택하여 최적설계를 진행하였다. 타원가로세로비  $\alpha_c$ 는 아래 식과 같이 구해진다.

$$\alpha_c = w_c / 2h_c \tag{1}$$

Table 2에 본 연구에서 사용된 설계영역을 나타내었다. 설계영역은 선행연구(11)의 결과를 바탕으로 구성된다.

목적함수는 저온유로내부의 압력 손실과 고온유로 및 저온유로 간의 열교환효율을 동시에 고려하기 위해서 가중계수( $\beta$ )를 사용하여 압력손실 항( $F_p$ )과 열교환효율 항( $F_t$ )을 선형적으로 조합한 식 (2)와 같이 정의하였다.

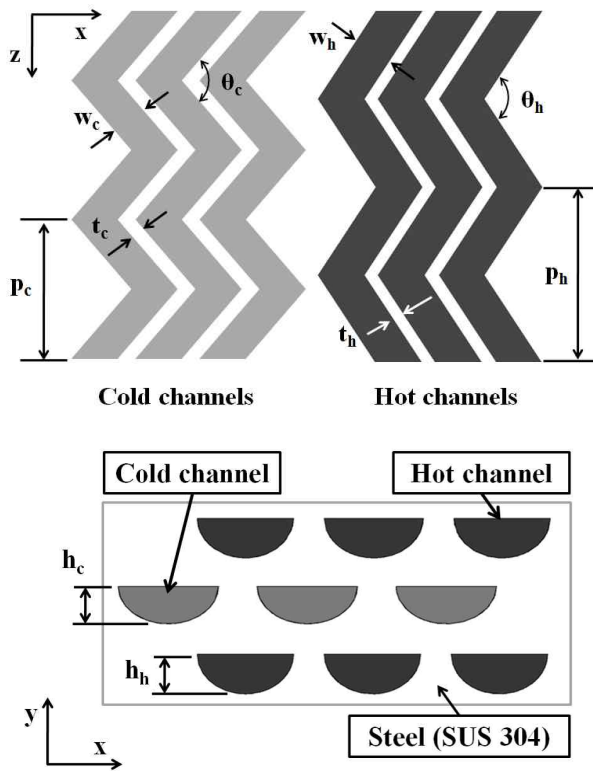


Fig. 4 Geometry of the channels in the zigzag PCHE [11]

Table 2 Design variables and design space

Design variables	Lower limit	Upper limit
$\theta_c$	100	160
$a_c$	0.60	1.60

$$F = F_p + \beta F_t \quad (2)$$

$F_p$ 는 저온유로 내부의 압력손실을 나타내는 항으로 아래 식과 같이 계산영역의 저온유로 입구와 출구의 압력차를 저온유로의 내부 평균 동압으로 나눈 무차원 마찰계수(friction factor)로 정의하였다.

$$F_p = \frac{p_{inlet} - p_{outlet}}{0.5 \rho_{avg} v_{avg}^2} \quad (3)$$

여기서  $p_{inlet}$  및  $p_{outlet}$ 은 각각 저온유로의 입구정압, 출구 정압을 나타내며,  $\rho_{avg}$ 와  $v_{avg}$ 는 각각 작동유체인 초임계 이산화탄소의 저온유로에서의 평균밀도와 평균속도를 나타낸다.

$F_t$ 는 열교환기의 열교환효율을 나타내는 항으로 아래 식과 같이 유용도(effectiveness:  $\eta$ )의 역수로 정의하였다. 즉,  $F_t$  값이 작을수록 열교환효율 혹은 유용도가 좋음을 나타낸다.

$$F_t = \frac{1}{\eta} = \frac{T_{h,inlet} - T_{h,outlet}}{T_{h,inlet} - T_{c,inlet}} \quad (4)$$

가중계수는 최종 도출된 목적함수에 포함되는 열교환효율 항의 상대적 중요도를 나타내는 항으로 그 값이 클수록  $F_t$ 가 강조된 최적형을 얻을 수 있고, 작을수록  $F_p$ 가 강조된 최적형을 얻을 수 있게 된다. 가중계수는 최적설계 수행자가 결정하는 변수로 시스템의 특성에 따라 다른 값을 갖게 된다.  $F_t$ 와  $F_p$  값이 작을수록 각각 PCHE의 유용도가 높고, 채널 내 유동의 압력손실이 작다는 것을 나타낸다. 그러므로, 본 연구에서는 목적함수  $F$ 의 값을 최소화하여 최적설계를 진행하였다.

### 3.2 라틴하이퍼큐브 샘플링(Latin hypercube sampling)

최적설계 수행을 위해 설계영역 내 모든 점을 테스트 할 수는 없기 때문에 적당한 실험점을 선택하는 것이 필수적이다. 두 개의 설계변수를 통해 이차원 평면의 설계영역을 구성하고, 설계영역을 대표하는 설계점을 선택하기 위해 실험 계획법의 하나인 라틴하이퍼큐브 샘플링(Latin Hypercube Sampling : LHS)<sup>(15)</sup>을 사용하였다. 이 기법은  $m \times n$ 의 행렬을 구성하며  $m$ 은 각 변수에 대한 레벨의 수(샘플의 수),  $n$ 은 설계변수의 수를 나타낸다. 1부터  $m$ 까지의 레벨을 포함하는 행렬의  $n$ 개의 열 각각은 Latin Hypercube를 구성하기 위해 임의로 짝지어진다. 결국 설계영역의 모든 부분을 대표하는 실험점들이 이 과정을 통하여 얻어진다.

### 3.3 반응면, 크리깅 및 신경회로망 기법

본 연구에서는 PCHE의 최적설계를 위한 대리모델의 구축을 위해 반응면기법, 크리깅 기법, 신경회로망 기법 등 세 가지 대리모델을 사용하였다. 반응면기법(response surface approximation : RSA)<sup>(16)</sup>은 실제 반응함수를 다항함수로 근사하여 모델링하기 위해 물리적 또는 수치적인 실험으로 얻어진 결과들을 이용하는 일련의 수리통계적 기법이다. 임의의 설계영역에서 주어지는 설계변수들로 인해 얻어지는 물리적 또는 수치적 실험 결과를 반응이라 하며, 이 반응의 변화가 반응면을 형성한다. 이렇게 형성된 반응면의 최저 값 또는 최고 값을 구하여 최적설계에 적용하게 된다. 본 연구에서는 반응면 모델을 구축하기 위해 이차다항식을 사용하였다. 이 경우  $k$ 를 설계변수의 수라고 하면, 다항식 계수의 개수는  $(k+1)(k+2)/2$ 가 된다. 일반적으로 다항식의 계수는 실험 데이터로부터 최소자승법을 사용하여 결정한다.

크리깅 모델(kriging model : KRG)<sup>(17)</sup>은 Gauss 상관함수를 사용한 선형 다항식함수를 사용하여 구축되며, 크리깅의 가정 값  $F(x)$ 는 전역모델(global model)  $f(x)$ 와 이탈(departures)  $Z(x)$ 의 합으로 나타난다. 가정 값  $F(x)$ 는 미지의 함수이고, 전역모델  $f(x)$  값은 실험점을 통해 구해진 목적함수의 값을 말하며,  $Z(x)$ 는 평균은 0이지만 공분산(covariance)은 0이 아닌 확률적인 과정의 실현, 즉 국부적인 분산을 나타낸다.

신경회로망 기법(radial basis neural network : RBNN)의 개념은 경험으로부터 배우고 기존 자료로부터 예측하는 인간의 기능을 모사하는 것으로, 뉴런이 신경회로망을 구성하는 기본요소로 사용된다. 신경회로망의 훈련은 정보를 통한 반복에 의해 수행되며, 각 뉴런들의 출력은 저장되었거나 도착하는 국부적 정보에 의존한다. 본 연구에서는 신경회로망을 구성하기 위해 MATLAB<sup>(18)</sup>의 함수 *newrb*를 사용하였다. 신경회로망기법의 세부사항은 참고문헌 10에 설명되었다.

4. 결과 및 검토

반응면기법, 크리깅 기법 및 신경회로망 기법을 사용하여 예측한 최적점, 즉 목적함수의 크기가 가장 작은 점에 대한 설계변수를 바탕으로 형상을 구축한 후 RANS 해석을 통해 최적점에 대한 목적함수를 구하였다. 가중계수 0.021을 이용하여 구한 최적형상에 대한 설계변수 값과 목적함수 값을 기준형상과 비교하여 Table 3에 나타내었다. 가중계수 값은 실험점들에서 구해진 압력손실 항과 유용도 항의 크기를 바탕으로 식(2)의 목적함수 정의에서 두 항의 크기를 유사하게 하는 0.021로 결정하였다. 최적설계 결과, 각각의 대리모델에 의해 예측된 목적함수의 최적값은 2.355 내외로 대체로 일치한 값을 예측함을 확인할 수 있다. 세 가지 대리모델 모두 유용도 측면에서는 기준형상보다 작은 값을 가지지만, 낮은 압력성능으로 인해 기준형상보다 낮은 목적함수를 도출하였음

을 확인할 수 있다. 결국, 가중계수 0.021에 의해 구해진 최적형상들은 기준형상에 비해 4.5%정도 낮은 목적함수  $F$  값을 가진다. 한편, 각각의 대리모델에 의한 예측 값과 예측된 각 형상에 대한 RANS 해석 값은 매우 작은 상대오차를 가져, 세 가지 대리모델에 의한 예측의 정확성이 매우 높음을 확인할 수 있다. 유용도 관련 지표인  $F_t$  값과 마찰성능 지표인  $F_p$  값 역시 각 대리모델마다 차이를 보임을 확인할 수 있다. RSA에 의해 예측된 형상이 RBNN보다 높은 유용도 및 압력 손실을 보이며, KRG에 의해 예측된 형상은 다른 두 대리모델에 의한 예측 값의 중간 값을 가진다. Fig. 5에 기준형상의 설계변수와 세 가지 대리모델에 의해 예측된 최적점들을 각각 나타내었다. 크리깅과 신경회로망 기법은 서로 매우 유사한 최적점을 예측하고 있고, 반응면 기법은 이들과 다소 떨어져 있으나 크게 다르지 않은 최적점을 예측하고 있다.

본 연구를 통해 구축된 세가지 대리모델을 Fig. 6에 나타내었다. 그래프의 x축(Var-1)과 y축(Var-2)은 각각 설계변수  $\theta_c$ 와  $a_c$ 를 설계영역의 크기로 나누어 표준화 한 값을 나타내며 z축은 목적함수  $F$ 의 값을 나타낸다. 점으로 표시한 값은 각각의 대리모델에 의해 구해진 최적점 설계변수의 좌표 및 목적함수를 나타낸다. 세 모델은 곡면의 국부적인 형태만 다르게 나타날 뿐 전반적인 곡면의 형태는 대체로 유사함을 알 수 있다. Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 실험점에 의해 이미 계산된 값이 아닌 설계점을 제외한 빈 공간에 대한 세 가지 대리모델의 예측 알고리즘의 차이로 인해 예측 값의 차이가 발생하지만 대체로 유사한 형상 및 목적함수 값을 도출함을 확인할 수 있다.

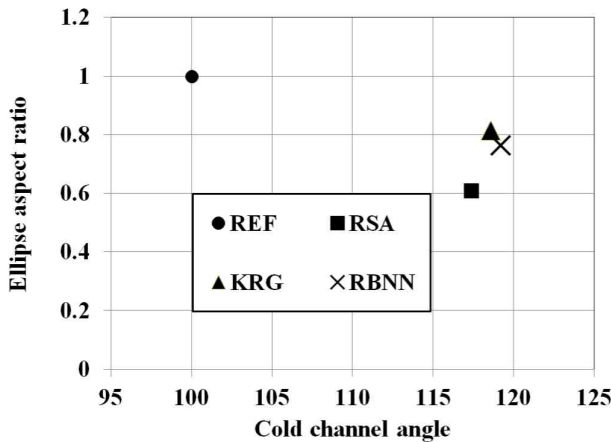


Fig. 5 Design variables distribution

Fig. 7에 두 설계변수가 목적함수에 미치는 영향에 대해 RSA 모델을 사용하여 분석된 결과를 그래프로 나타내었다. 선행연구<sup>(11)</sup>에서는 각각의 변수가 일정한 비중으로 목적함수에 영향을 미침을 확인할 수 있었으나, 두 설계변수를 동시에 변화시켜 형상을 구축할 경우, 최적점 근처에서 Var-1, 즉, 저온유로의 각도가 목적함수에 주는 민감도가 저온유로의 타원가로세로비에 의해 월등히 크음을 알 수 있다.

Fig. 8에 저온유로의 평평한 면에서 0.2 $h_c$  만큼 떨어진 단면에서의 속도벡터 분포를 나타내었다. 그림의 위치는 계산 영역의 중간위치를 나타내며 그림에서 나타난 속도벡터 분포는 구부러진 영역을 두 번 지날 때마다 반복된다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 기준형상의 경우 유로가 굽어지는

Table 3 Results of optimization ( $\beta = 0.021$ )

	Design variables		$F_t$	$F_p$	$F$		relative error
	$\theta_c$	$a_c$			RANS calculated values		
					predicted values		
Reference	100	1.00	2.049	19.88	2.466	-	-
Optimum	RSA	117	2.131	10.66	2.355	2.364	-0.381%
	KRG	118	2.141	10.25	2.356	2.351	0.213%
	RBNN	119	2.147	9.98	2.357	2.346	0.469%

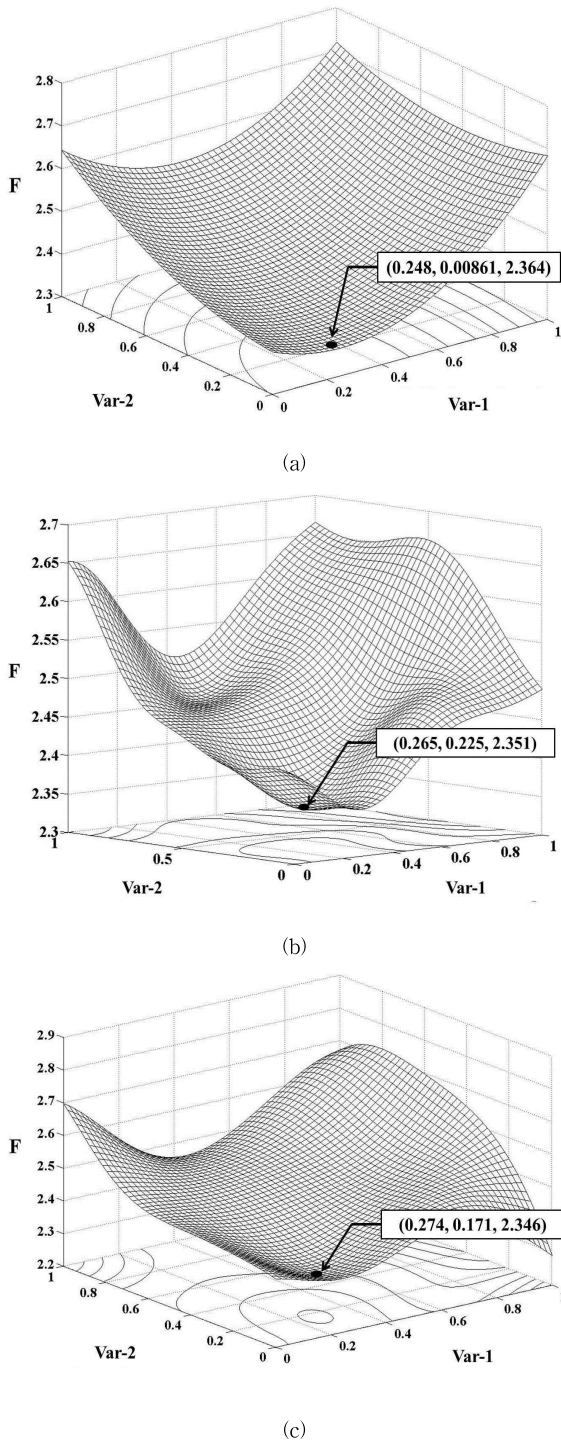


Fig. 6 3D plot of surrogate models :  
(a) RSA, (b) KRG, (c) RBNN

곳 이후의 벽면에서 강한 유동박리 현상이 발생함을 확인 할 수 있다. 반면, 각각의 최적형상의 경우 박리 영역이 기준형상에 비해 매우 작으며, 이로 인해 유로의 마찰성능에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있다. 유동박리 영역은 열전달 성능, 즉, 유용도가 낮아지는 영향을 유발한다. 그러나 본 연구에서는 유로의 타원가로세로비에 의해 국부적인 유로의 속도

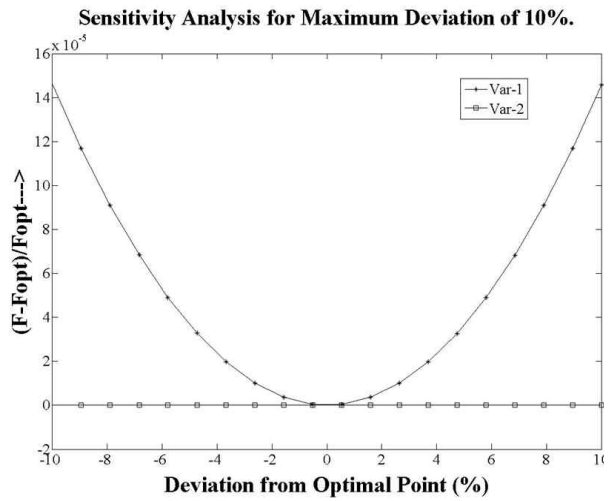


Fig. 7 Sensitivity analysis using RSA

감소 및 유로의 타원가로세로비가 낮아짐에 따라 고온유로와 저온유로가 가까운 면의 감소에 따른 열전달 성능의 저하로 인해 기준형상보다 최적형상의 경우 낮은 유용도를 도출했음을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 삼차원 RANS 해석과 대리모델을 사용한 최적화 기법을 바탕으로 PCHE의 형상최적설계를 수행하였다. 두 가지의 설계변수와 각 설계점들에서 계산된 목적함수 값을 바탕으로 대리모델을 구축하기 위해 세 가지 대리모델을 사용하였으며 그 결과 값들을 비교하였다. 목적함수는 저온유로내부의 압력 손실과 고온유로 및 저온유로 간의 열교환효율을 동시에 고려하기 위해서 압력손실 항과 열교환효율 항을 선형적으로 조합하여 정의하였다. 세 가지 대리모델을 사용하여 단일목적함수 최적설계를 수행한 결과, 상대오차가 약 0.5% 이내로 대리모델에 의한 예측의 정확도가 매우 높음을 확인할 수 있었다. 최적설계결과 목적함수의 값이 기준형상에 비해 약 4.5% 낮아진 최적값을 도출하였다. 이 목적함수의 감소는 주로 압력손실의 감소로 인해 발생하였고, 열교환효율은 오히려 감소하였다. 그러므로, 향후 목적함수를 이루는 두 항, 즉 열교환효율 및 압력강하를 독립된 목적함수로 설정하여 다중목적 최적설계를 수행함으로써 보다 실용적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

### 후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 “다중현상 CFD연구센터(ERC)”의 과제로 수행된 연구임(No.20090083510).



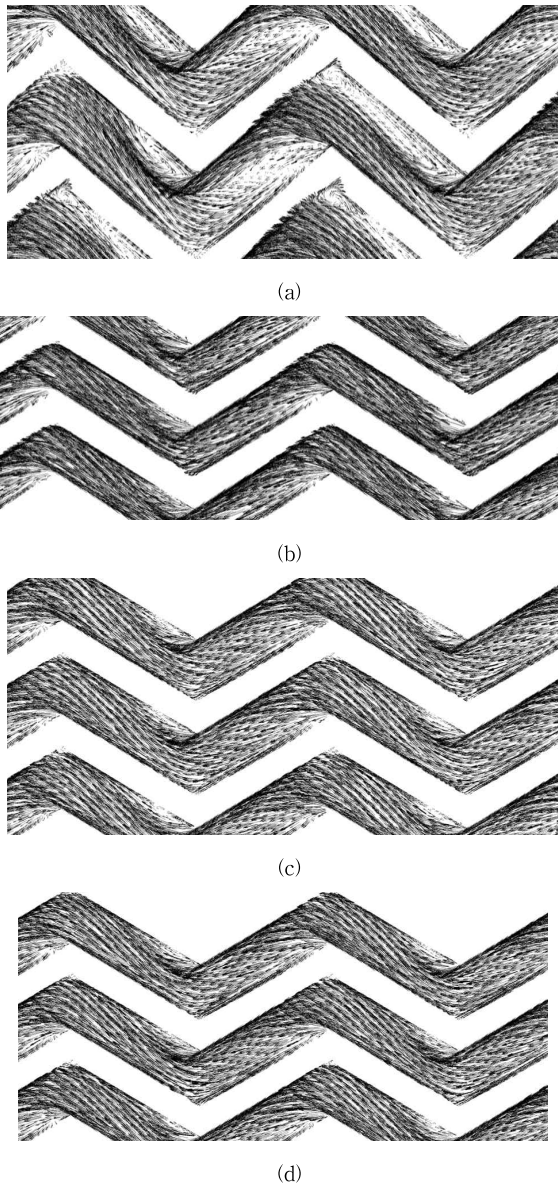


Fig. 8 Velocity vector fields in the cold channels  
(0.2hc away from the flat wall) :  
(a) REF, (b) RSA, (c) KRG, (d) RBNN

### 참고문헌

- (1) Dewson, S. J., Grady, C., 2003, HEATRIC Workshop at MIT, Cambridge, MA, U.S.A., October 2nd.
- (2) McCormack, D., 2001. "The Application of Printed Circuit Heat Exchanger Technology in the Pebble Bed Modular Reactor Demonstration Plant," Proceedings of ASME Turbo Expo 2001, Louisiana, 2001-GT-0473.
- (3) Ngo, L., Kato, Y., Nikitin, K. and Tsuzuki, N., 2006, "New Printed Circuit Heat Exchanger with S-shaped Fins for Hot water Supplier," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 30, No. 8, pp. 811~819.
- (4) Pra, F., Tochon, P., Mauget, C., Fokkens, J. and Willemsen, S., 2008. "Promising designs of compact heat exchangers for modular HTRs using the Brayton cycle," Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, pp. 3160~3173.
- (5) Kim, I. H., No, H. C., Lee, J. I. and Jeon, B. G., 2010, "Thermal-hydraulic Behavior in a Deteriorated Turbulent Heat Transfer for a Gas-Cooled Reactor," Nuclear Engineering and Design, Vol. 240, pp. 783~795.
- (6) Kim, D. E., Kim, M. H., Cha, J. E. and Kim, S. O., 2008, "Numerical Investigation on Thermal-Hydraulic Performance of New Printed Circuit Heat Exchanger Model," Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, pp. 3269~3276.
- (7) Queipo, N. V., Haftka, R. T., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan, R. and Tucker, P. K., 2005, "Surrogate-based Analysis and Optimization," Progress in Aerospace Science, Vol. 41, pp. 1~28.
- (8) Goel, T., Haftka, R. T., Shyy, W. and Queipo, N. V., 2007, "Ensemble of Surrogates," Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 33, No. 3, pp. 199~216.
- (9) Kim, J. H., Choi, J. H. and Kim, K. Y., 2010. "Surrogate Modeling for Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller," International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 29~38.
- (10) 이기돈, 김광용, 2009, "헤파형상 막냉각홀의 신경회로망 기법을 이용한 최적설계," 유체기계저널, 제 12권, 제 4호, pp. 44~53.
- (11) Lee, S. M. and Kim, K. Y., 2011, "Numerical Study of Thermal-hydraulic Performance in a Zigzag Printed Circuit Heat Exchanger," Nuclear Engineering and Design, in press.
- (12) CFX-11.0 Solver Theory, 2006, Ansys Inc.
- (13) Menter, F. R., 1994. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598~1605.
- (14) Bardina, J. E., Huang, P. G., Coakley, T., 1997, "Turbulence Modeling Validation," 28th AIAA Fluid Dynamics Conference, June 29-July 2, Snow Village, Colorado, USA, AIAA Paper 1997~2121.
- (15) Mckay, M. D., Beckman, R. J. and Conover, W. J., 1979, "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code," Technometrics, Vol. 21, pp. 239~245.
- (16) Myers, R.H. and Montgomery, D. C., 1995, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, INC., New-York.
- (17) Sacks, J. W., Welch, J., Mitchell, T. J. and Wynn, H. P.,

1989, "Design and analysis of computer experiments,"  
Statistical Sci., Vol. 4, No. 4, pp. 409~435.

(18) MATLAB, The Language of Technical Computing,  
Release 2008a. The MathWorks Inc.