

반응면기법을 이용한 PBMR 기체냉각형 고온가스로 상층부의 최적설계

이 상 문,¹ 김 광 용^{*2}DESIGN OPTIMIZATION OF UPPER PLENUM OF PBMR
USING RESPONSE SURFACE APPROXIMATIONS.M. Lee¹ and K.Y. Kim^{*2}

Shape optimization of an upper plenum of a PBMR type gas cooled nuclear reactor has been performed by using three-dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) analysis and surrogate modeling technique. The objective function is defined as a linear combination of uniformity of flow distribution in the core and pressure drop in the upper plenum and the core. The ratio of thickness of slot to diameter of rising channels, ratio of height of upper plenum to diameter of rising channels, and ratio of height of the slot at inlet to outlet, are used as design variables for 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 show that the optimum shape represent remarkably improved performance in flow uniformity and friction loss than the reference shape.

Key Words : 기체냉각형 고온가스로(Pebble Bed Modular Reactor), SST 모델(SST Model), 대리모델(Surrogate Model), 삼차원 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식(Three-Dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation)

1. 서 론

최근 저공해 친환경 에너지에 대한 관심이 급증하면서 수소 에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 제4세대 원자로인 페블베드 기체냉각형 원자로(Pebble-Bed Modular Reactor : PBMR)는 수소생산의 수단으로도 관심을 끌고 있는 원자로로서 경수로 등 다른 형태의 원자로에 비해 근본적으로 안전성이 확보되며, 높은 연료연소율에 힘입어 연료주기와 관련하여 유연성이 크고 우수한 열효율을 제공하는 등 우수한 성능으로 인해 차세대 원자로로 손꼽히고 있다. Fig. 1[1]에 나타난 PBMR 원자로 내부 냉각시스템은 브레이턴 사이클(Brayton cycle)을 기반으로 하며 작동유체로 헬륨을 사용한다.

헬륨가스는 환상노심에 540℃, 7 MPa 로 유입되어 중심부(core) 내부의 연료로 사용되는 TRISO(tristructural-isotropic)들을 냉각시킨 후, 같은 압력, 900℃ 로 유출된다. 냉각기체로 화학적으로 안정적인 헬륨을 사용하기 때문에 초고온의 환경이 가능하게 되었으며, 초고온의 열을 바탕으로 미래의 에너지로 각광받는 수소의 생산에도 이용되고 있다.

실제 PBMR이 남아프리카 공화국에 설치되어 운영되기 전 후하여 이에 관련된 많은 연구가 진행된 바 있다. Koster 등 [1]은 PBMR에 대한 열역학적 분석과 함께 경제성, 안정성, 효율 등 앞으로 PBMR의 설계가 추구해야할 방향을 제시하였으며, Viljoen 등[2], Hoffmann과 Rensburg[3] 및 Lee 등[4]은 수치해석을 이용하여 PBMR 중심부의 유동해석 및 열전달 해석 등을 수행함으로써 PBMR의 해석에 있어 수치해석의 중요성을 부각시켰다. Kim과 Lee[5]는 선행 연구인 Ahmad 등[6]의 연구를 바탕으로 PBMR 입구부의 형상 최적화를 통해 상층부로 내 헬륨가스 유동의 균일성을 향상시킬 수 있는 최적형상을 제시한 바 있으며, Kim 등[7]은 VHTR 내부의 유동해석을 통해 상층부의 높이가 클수록 중심부 내부의 유동의 균일성이 향상됨을 밝힌 바 있다. Bore 등[8]은 중심부 내부의 연료

접수일: 2010년 6월 3일, 수정일: 2010년 9월 14일,

게재확정일: 2010년 9월 17일.

1 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 인하대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: kykim@inha.ac.kr

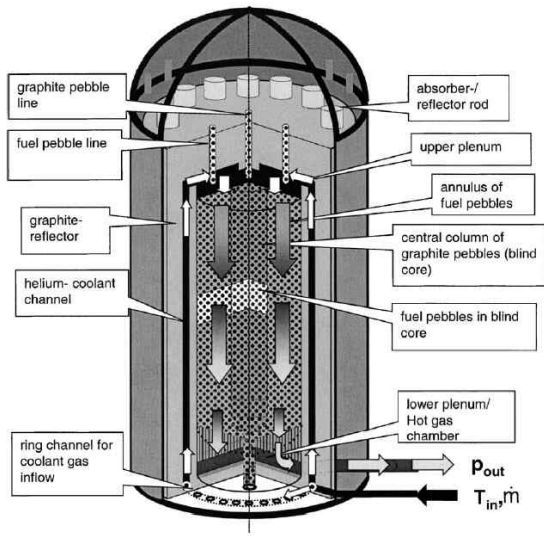


Fig. 1 Annular core of PBMR [1]

주입구의 수를 최적화하여 최고 온도점의 온도를 낮추고 중심부 내부의 온도 범위를 줄인, 열성능이 향상된 운용방법을 제시하였다.

삼차원 유동해석을 바탕으로 한 열유동관련 시스템의 최적 설계는 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[9]은 대리모델을 이용한 최적설계 방법을 제시하고 이를 항공기 엔진 내부의 유동 분석을 통한 최적화를 수행하였으며, Goel 등[10]은 대리모델의 신뢰도를 비교하고 각 대리모델들의 신뢰도를 향상시키기 위한 방법을 제시하였다. Kim 등[11]은 원심압축기 내부의 유동해석과 대리모델을 접목한 최적설계를 수행하여 향상된 성능의 원심압축기 형상을 제시하였다.

PBMR이 최적의 성능을 내기 위해서는 중심부 내부의 온도변화 범위를 낮추고 냉각유로를 지나는 헬륨가스의 압력강하를 최소화할 필요가 있는데, 이를 위해선 상층부를 통과하여 중심부에 진입하는 냉각재 유동의 균일성이 확보되어야 한다. 이에 본 연구에서는 선행 연구인 Kim과 Lee[5]의 PBMR 입구부(inlet plenum) 최적설계에 이어 삼차원 RANS 해석과 대리모델의 하나인 반응면기법(response surface approximation)[12]을 사용한 최적설계기법을 적용하여 PBMR 상층부(upper plenum)의 유동해석과 최적설계를 수행하였다. 삼차원 RANS 해석을 통해 원자로 중심부에 유입되는 유동의 균일성과 상층부의 압력강하에 영향을 주는 변수들을 구하여 설계변수로 설정하고 설계영역을 설정하였다. 설계영역을 바

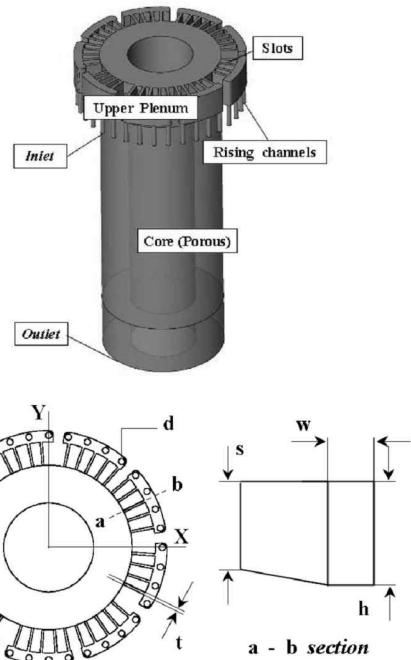


Fig. 2 Geometry of upper plenum of PBMR [14]

탕으로 반응면기법을 사용하여 원자로 중심부 내부의 유동의 균일성과 마찰성능을 향상시키기 위한 상층부의 최적형상을 제시하였다.

2. 수치해석방법

2.1 유동해석 영역 및 경계조건

본 연구에서는 고온가스로 내부의 유동해석을 위해 비정렬 격자계(unstructured grids)를 사용하는 범용 소프트웨어인 ANSYS CFX-11.0[13]을 사용하였다. Fig. 2에 PBMR 상층부의 기준형상에 대한 유동해석영역 및 단면형상을 도시하고 각 부분의 수치를 Table 1에 나타내었다. 냉각기체인 헬륨은 상승유로(rising channels)를 통해 상층부로 유입된 후 슬롯(slot)

Table 1 Values of parameters

Parameter	Value
Rising channels diameter (m)	0.141
Number of rising channels	36
Core inner diameter (m)	2.0
Core outer diameter (m)	3.7
Upper plenum height (m)	0.7
Active core height (m)	11.0

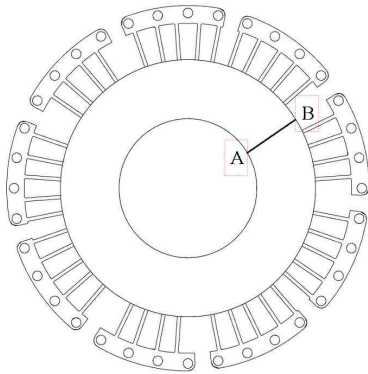
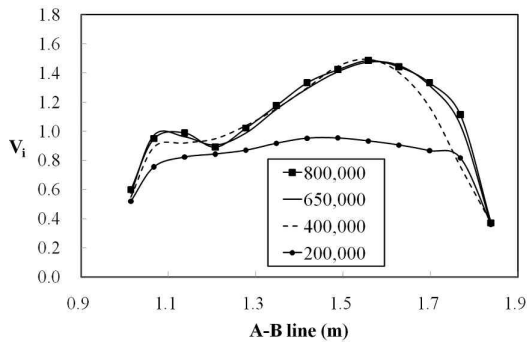


Fig. 3 Grid dependency test [14]

을 통해 원자로 중심부 내부로 유입되어 출구(outlet)를 통해 빠져나간다. 각각의 상승유로를 흐르는 유량, 즉 계산영역의 입구조건은 선행연구[5]의 최적설계 결과를 바탕으로 부여하였으며 헬륨의 온도와 압력은 각각 540°C, 7 MPa 로 주었다. 고온가스로 상층부 내를 흐르는 유량은 약 193 kg/s로 유동은 항상 난류이기 때문에 이에 맞는 난류모델의 선택이 필수적이다. 본 연구에서는 레이놀즈 응력항의 계산을 위해 SST(shear stress transportation)모델[15]이 사용되었다. SST 모델은 k- ω 모델과 k-e모델의 장점을 결합한 모델로서, 일반적으로 k- ω 모델은 벽 근처에서 사용되며, k-e모델은 나머지 영역에서 사용된다. Bardina 등[16]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.

노심 내에 위치한 연료 펄블(fuel pebble)들을 지나는 유동의 개략적인 해석을 위해서 중심부에 대해 Kim 등[7]이 사용한 방법인 다공성 매체(porous medium)의 가정이 사용되었다. 이를 위해 Ball[17]의 연구에서 사용한 경계조건을 바탕으로 중심부를 지나는 헬륨의 압력강하 값을 300 kPa로 설정하였고 다공도(porosity)는 0.4를 주었다. 모든 해석에 있어 고해상

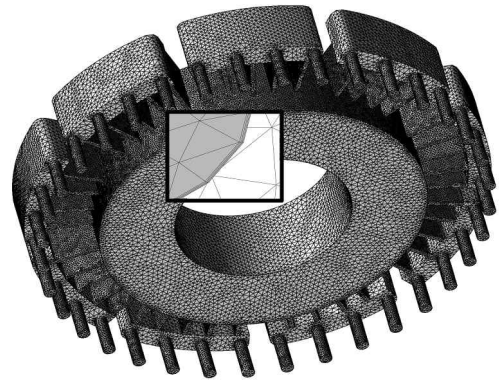


Fig. 4 Grid system in upper plenum

도 수치도식(high resolution scheme)이 지배방정식의 이산화에 사용되었으며, 입구 난류강도는 5%로 가정하였다. 벽 근처 격자는 저레이놀즈수 모델을 적용시키기 위해 y+를 1이하로 유지하였다. Residual reduction factor는 10⁻⁸로 설정하였을 때 만족스러운 결과 값을 얻을 수 있었다. 한 번의 해석을 수행시키기 위해서는 Core2 Quad 2.4GHz CPU를 사용하는 컴퓨터에서 8개 병렬코어를 모두 사용하여 약 18시간의 계산시간이 소요되었다.

2.2 격자의존성 시험

앞서 제시한 기준형상에 대하여 격자의 의존성 시험을 수행하여 격자 의존성을 제거하였다. 격자 의존성 시험의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 V_i 는 다음과 같이 정의되었다.

$$V_i = \frac{v}{v_{avg}} \tag{1}$$

v_{avg} 는 중심부 입구를 지나는 유동의 평균 속도를 나타내며, v 는 중심부 입구를 지나는 국부 유속을 나타낸다. 여기서는 Fig. 3의 선분 A-B 상의 V_i 값을 이용하여 격자의존성 시험을 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 격자수가 650,000개가 될 때 격자 의존성이 사라짐을 알 수 있다. 유동해석영역의 상층부 부분의 격자계를 Fig. 4에 나타내었다. 비정렬 사면체 격자계를 사용하였으며, 벽 근처 속도의 정확한 해석을 위해 벽 근처 격자계는 오면체 프리즘 격자계를 사용하였고, 중심부와 출구 부분은 육면체 격자계를 사용하여 해석을 수행하였다. 격자의존성 시험의 결과를 바탕으로 본 논문에서 수행된 실험점 및 최적점에 대한 계산에서는 620,000~680,000 개의 격자를 사용하였다.

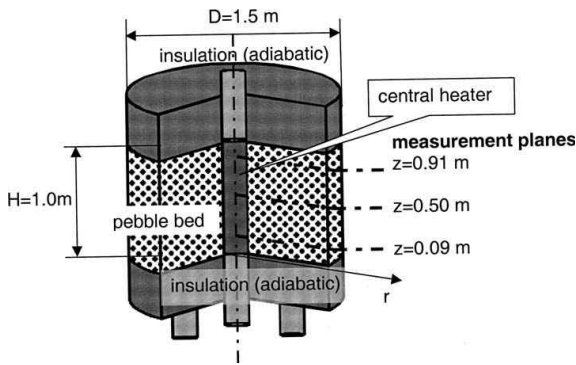


Fig. 5 SANA test rig (dashed lines: measurement planes $z=0.09, 0.50$ and 0.91 m)[18]

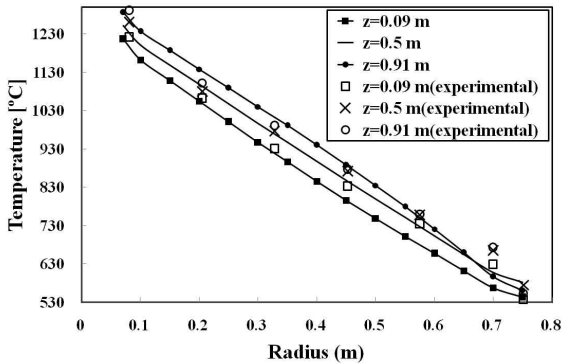


Fig. 6 Results of validation: helium temperature in SANA test rig

2.3 SANA test rig 실험값과의 비교검증

다공성 매체의 해석에 대한 신뢰도 확보를 위해 Fig. 5의 SANA test rig의 실험결과[18]와 삼차원 RANS 해석을 통한 결과를 비교하였다. SANA test rig의 내부유동은 중심부와 내부에 위치한 펠들에서 발생하는 열에 의한 자연대류로 이루어진다. SANA test rig의 계산에 사용된 가정과 경계조건은 다음과 같다[19].

- 1) 모든 벽면에서 유동은 점착조건을 만족한다.
- 2) 유동영역의 상하단부는 단열이다.
- 3) 중심부의 열발생량 : $7.22857 \times 10^4 \text{ W/m}^2$
- 4) 유동영역 바깥쪽의 온도조건
: $T_{\infty}(z) = -187.4z^2 + 205.7z + 520.2 [\text{K}]$

Fig. 5의 펠들(pebble bed) 부분에 대한 격자를 구성하였으며, 각 펠들을 모두 구현하기엔 어려움이 크기 때문에 다공성 매체(porous media)로 가정하여 계산을 수행하였다. 계산 수행을 위해 약 430,000 개의 격자가 사용되었다. SANA

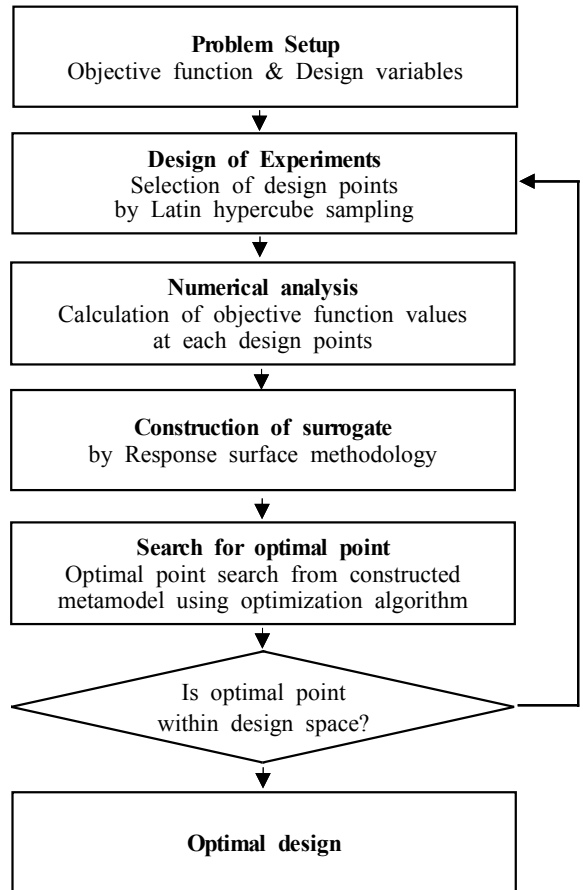


Fig. 7 Flow chart showing optimization procedure

testrig의 높이(z) 0.09 m, 0.50 m, 0.91 m에서 측정된 헬륨의 온도 값을 해석결과와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. SANA test rig의 반경 0.7 m에서의 값이 약간의 차이를 보이고 있으나 다른 부분에서는 실험값과 비교하여 5% 내외의 상대오차를 가짐을 확인할 수 있다. SANA test rig 실험값과의 비교를 통해 구한 다공성 매체에 대한 저항조건들을 실제 모델인 PBMR의 중심부의 계산에 적용하여 연구를 수행하였다.

3. 최적화기법

최적화 과정을 Fig. 7에 순서대로 표시하였다. 우선 목적함수와 설계변수를 선택하고 각각의 설계변수에 대해 설계영역을 결정하게 된다. 본 연구에서는 세 개의 설계변수를 사용하였으므로 설계영역은 삼차원 공간이 된다. 이후 적절한 실험 계획법(design of experiment)을 통하여 설계영역 내에서 실험 점(experimental point)들을 얻게 되며 각 실험점에서 유동해석

을 통해 목적함수를 구한다. 각 실험점에 대하여 구한 목적함수를 대리모델을 사용하여 자료곡면을 구성하고, 최적화 알고리즘을 통하여 찾은 최적점이 설계영역 내에 존재하게 되면 최적화 과정은 종료된다.

3.1 설계변수 및 목적함수

세 개의 설계변수, 슬롯의 폭과 상승유로의 직경의 비(t/d), 상층부의 높이와 상승유로의 직경의 비(h/d), 슬롯의 입구 높이와 출구 높이의 비(s/h)를 선택하여 최적설계를 진행하였다. Table 2는 이들 설계변수의 영역을 보여준다.

목적함수는 중심부 입구를 통과하는 유동의 균일성과 상층부에서의 압력 손실을 동시에 고려하기 위해 가중계수(β)를 이용하여 두 항을 선형적으로 조합하여 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$F = F_p + \beta F_v \tag{2}$$

F_p 는 고온가스로 상층부의 압력 손실을 나타내는 항으로 Fig. 2의 고온가스로 상층부 계산 영역의 입구와 출구의 압력 차이를 입구 상승유로의 평균 동압으로 나눈 무차원 값으로 다음과 같이 정의하였다.

$$F_p = \frac{P_{inlet} - P_{outlet}}{0.5\rho v_{avginlet}^2} \tag{3}$$

여기서 p_{inlet} 및 p_{outlet} 는 각각 계산영역의 입구정압, 출구정압을 나타내며, ρ 와 $v_{avginlet}$ 는 각각 상층부 내 헬륨의 밀도와 상승유로의 속도를 평균한 값을 나타낸다.

두 번째 항인 F_v 는 중심부 입구를 지나는 유동의 균일성을 나타내는 항으로 식 (1)에서 정의한 중심부 입구의 유동분포를 무차원화 한 항 V_i 의 표준편차로 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$F_v = \sqrt{Var[V_i]} \tag{4}$$

가중계수 β 는 유동의 균일성과 압력 손실 사이의 비중을 조절하기 위한 값으로 그 값이 클수록 유동의 균일성이 강조

된 최적형상이 얻어지며, 작을수록 압력 손실의 중요도가 더 큰 최적형상이 얻어지게 된다. 가중계수는 설계자가 결정해야 할 변수이며 시스템의 특성에 따라 다른 값을 가지게 된다. 각각의 F_p , F_v 값들이 작을수록 유동의 균일성이 높고 압력 손실이 낮음을 나타낸다. 즉, 본 연구에서는 목적함수 F 의 값을 최소화하여 최적설계를 진행하였다.

3.2 라틴하이퍼큐브 샘플링(Latin hypercube sampling)

대리 모델(surrogate model)을 이용한 최적화를 위해서는 적당한 실험점이 필요하다. 세 개의 설계변수를 통해 삼차원 공간의 설계영역을 구성하였으며, 이 영역을 대표하는 실험점을 효과적으로 선택하기 위해 실험계획법의 하나인 Latin Hypercube Sampling(LHS)[20]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 기법

반응면기법[21]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 최저값 또는 최고값을 구하여 최적설계에 적용하게 된다. 즉, 실험계획법을 통해 설계영역을 대표하는 실험점이 구해지고, 한정된 수의 실험점에 대한 실험함으로써 설계영역 내의 반응 함수에 대한 모델링을 할 수 있기 때문에 방대한 해석을 필요로 하는 최적설계에 효율적인 방법으로 인정되어 널리 이용되기 시작했다. 물론 많은 수의 실험점을 선택한다면 더욱 정확한 최적설계가 가능하지만 그에 따른 해석비용의 증가를 피할 수 없기 때문에 적절한 수의 실험점을 선택하는 것이 중요하다[10].

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.

Table 2 Design Variables and Design Space

Design variables	Lower limit	Upper limit
t/d	0.355	0.709
h/d	3.54	6.40
s/h	0.70	1.60

4. 결과 및 검토

민감도 분석을 통해 각각의 설계변수가 목적함수에 주는 영향을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 가로축은 각각의 설계

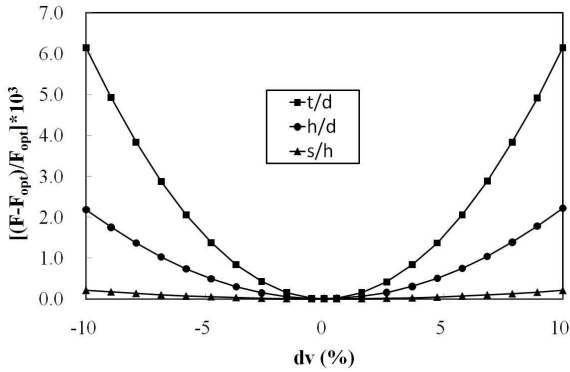
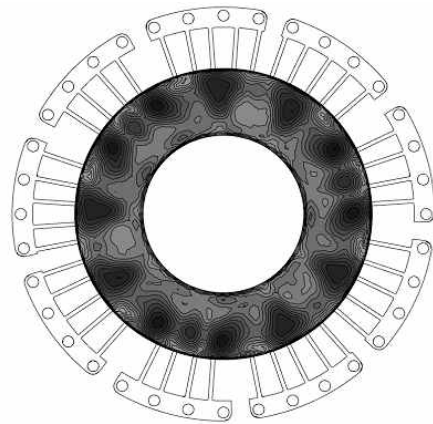


Fig. 8 Sensitivity analysis of objective function for optimal shape ($\beta = 4.0$)

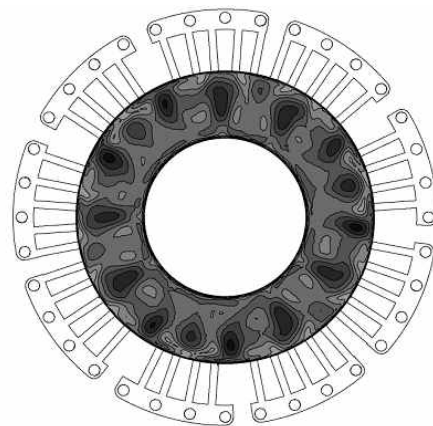
변수들의 값이 최적점으로부터 떨어진 정도를 비율로 나타낸다. 그림을 통해 슬롯의 폭과 상승유로의 직경의 비(t/d), 상층부의 높이와 상승유로의 직경의 비(h/d), 슬롯의 입구 높이와 출구 높이의 비(s/h) 순으로 목적함수가 민감도를 가짐을 알 수 있다.

반응면기법을 사용하여 예측한 최적점, 즉 목적함수의 크기가 가장 작은 점에 대한 설계변수를 바탕으로 형상을 구축한 후 RANS 해석을 통해 최적점에 대한 목적함수를 구하였다. 가중계수 4.0을 이용하여 구한 최적형상에 대한 설계변수 값과 목적함수 값을 기준형상과 비교하여 Table 3에 나타내었다. 최적설계 결과, 최적형상의 마찰 성능 지표인 F_p 값은 기준형상에 비해 32.3% 감소했고, 유동 균일성 지표인 F_v 값은 기준형상에 비해 21.5% 감소하여 결과적으로 최적형상의 목적함수 값은 기준형상에 비해 26.2% 감소하였음을 알 수 있다. 한편 반응면기법에 의해 예측된 목적함수 값은 3.92로 계산 값과 비교하면 약 6.63%의 상대오차를 가짐을 보아 반응면기법이 비교적 정확한 예측을 하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9에 기준형상과 최적형상의 중심부 입구 유량분포를 비교하여 나타내었다. 최적형상과 기준형상의 분포를 살펴보면 기준형상의 경우 최적형상에 비해 V_i 의 분포범위가 넓으며, 최적형상의 경우 평균유속, 즉 V_i 의 값이 1인 영역이 기준형상에 비해 넓음을 확인할 수 있으며, 이로써 적형상의 중심부 입구 유동분포가 기준형상에 비해 더 균일함을 알 수



(a) Reference shape



(b) Optimum shape

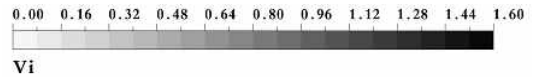


Fig. 9 Flow distribution at the core inlet

있다. 중심부 입구 유동분포에 대한 정량적 비교를 위해 격자의존성 시험에서 사용했던 Fig. 5의 선분 A-B 상에서의 값에 대해 기준형상과 최적형상을 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 최적형상의 경우, 1.6 m 지점에서 기준형상에 비해 값이 0.15 정도 감소하였고, 1.1 m 지점에서 0.1 정도 증가하여, 기준형상에 비해 상대적으로 높은 유동균

Table 3 Results of optimization ($\beta = 4.0$)

	Design variables			F_p	F_v	F	
	t/d	h/d	s/h			RANS	RSA
Reference	0.355	4.965	1.000	2.155	0.707	4.981	-
Optimum	0.659	5.434	0.989	1.459	0.555	3.678	3.922

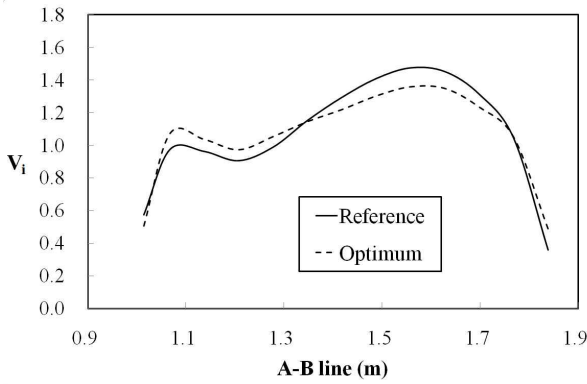


Fig. 10 Velocity parameter variations for the reference and the optimum shapes

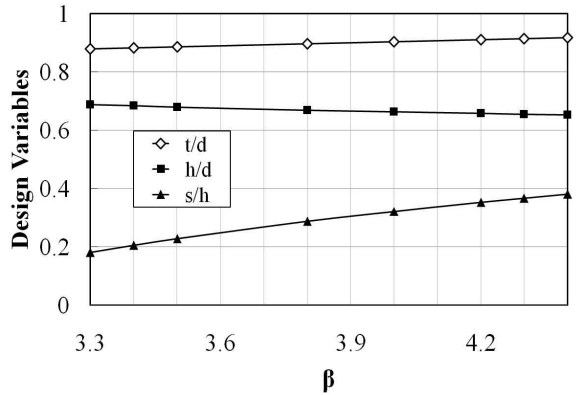
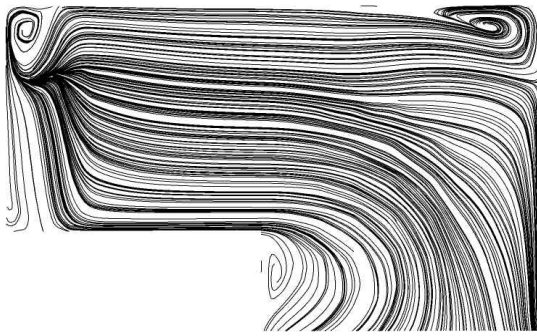
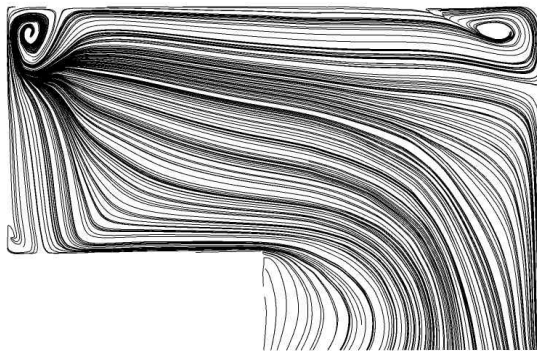


Fig. 12 Variation of optimal design variables with β



(a) Reference shape



(b) Optimum shape

Fig. 11 Streamline in the upper plenum

일성을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 2의 a-b 단면에 대한 기준형상과 최적형상의 유선분포를 나타내고 있다. 기준형상의 경우 슬롯에서 나온 유동이 중심부 입구로 급하게 돌아가면서 중심부 입구 상

단에 발생한 와류가 일종의 유동간섭물로 작용하여 중심부로 유입되는 유동의 균일성을 저하시키는 효과를 가져왔음을 알 수 있다. 반면, 최적형상의 경우 기준형상에 비해 넓은 슬롯의 폭으로 인해 와류의 발생이 크게 완화되어 중심부로 유입되는 유동의 균일성의 향상을 가져왔음을 확인할 수 있다.

한편, 가중계수 β 를 변화시키면 F_p 및 F_v 에 대한 가중치가 다른 최적형상을 얻을 수 있다. Fig. 12에 β 값이 3.3 ~ 4.4인 경우에 대한 최적형상의 설계변수 값의 변화를 나타내었다. 세로축은 설계영역 내에서 각 설계변수의 값을 표준화(normalization)한 값을 나타낸다. β 가 커질수록, 즉, 유동균일성에 대한 가중치가 증가할수록 t/d 와 s/h 는 점차 증가하고, h/d 는 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 삼차원 RANS 해석과 대리모델을 사용한 최적화 기법을 바탕으로 PBMR 기체냉각형 원자로의 중심부로 유입되는 유동의 균일성을 향상시키고 상층부 내 냉각기체의 압력강하를 최소화하기 위한 형상최적설계를 수행하였다. 세 가지의 설계변수와 각 설계점들에서 계산된 목적함수 값을 바탕으로 대리모델을 구축하기 위해 반응면기법이 사용되었다. 목적함수는 중심부 입구로 유입되는 유동의 균일성을 나타내는 항과 상층부 내 압력강하를 나타내는 항을 선형결합하여 정의하였으며, 민감도분석 결과를 통해 세 가지 설계변수 중, 슬롯의 폭과 상층유로 직경의 비가 목적함수에 가장 큰 영향을 줌을 확인할 수 있었다. 반응면기법을 사용하여 예측한 최적점의 목적함수 값과 RANS 해석을 통해 계산된 최적점의 목적함수 값의 비교한 결과, 상대오차가 약 6.63%로 반응면기법에 의한 예측의 정확도가 낮지 않음을 확인할 수 있었다. 최적설계결과 목적함수의 값을 기준치에 비해 약

26.2% 감소시킴으로써, 최적설계를 통해 중심부 입구로 유입되는 헬륨 냉각가스의 마찰손실을 줄이고 유동 균일성을 크게 향상시킬 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 2003, Koster, A., Matzner, H.D. and Nicholsi, D.R., "PBMR Design for the Future," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.222, pp.231-245.
- [2] 2006, Viljoen, C.F., Van Rooyen, W.J. and Mtyobile, V., "The Use of CFD in the Design of PBMR Test Facilities," *Proceedings HTR2006: 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, H00000092.
- [3] 2006, Hoffmann, J.E. and Janse van Rensburg, J.J., "Verification and Validation of the CFD Model of the PBMR Reactor," *Proceedings HTR2006: 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, C00000023.
- [4] 2007, Lee, J.J., Park, G.C., Kim, K.Y. and Lee, W.J., "Numerical Treatment of Pebble Contact in the Flow and Heat Transfer Analysis of a Pebble Bed Reactor Core," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.237, pp.2183-2196.
- [5] 2009, Kim, K.Y. and Lee, S.M., "Shape Optimization of Inlet Plenum in a PBMR-Type Gas-Cooled Nuclear Reactor," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.46, No.7, pp.649-652.
- [6] 2007, Ahmad, I., Kim, K.Y., Lee, W.J. and Park, G.C., "Numerical Study on Flow Field in Inlet Plenum of a Pebble-Bed Modular Reactor," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.237, pp.565-574.
- [7] 2008, Kim, M.H., Lim, H.S. and Lee, W.J., "A Thermal-Fluid Assessment of a Cooled-Vessel Concept for a VHTR," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.238, pp.3360-3369.
- [8] 2003, Becker, S. and Lauries, E., "Three-dimensional Numerical Simulation of Flow and Heat Transport in High-Temperature Nuclear Reactors," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.222, pp.189-201.
- [9] 2005, Queipo, N.V., Haftka, R.T., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan, R. and Tucker, P.K., "Surrogate-based Analysis and Optimization," *Progress in Aerospace Science*, Vol.41, pp.1-28.
- [10] 2007, Goel, T., Haftka, R.T., Shyy, W. and Queipo, N.V., "Ensemble of Surrogates," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.33, No.3, pp.199-216.
- [11] 2010, Kim, J.H., Choi, J.H. and Kim, K.Y., "Surrogate Modeling for Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller," *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol.3, No.1, pp.29-38.
- [12] 1999, Myers, R.H., "Response Surface Methodology-Current Status and Future Direction," *Journal of Quality Technology*, Vol.31, No.1, pp.30-44.
- [13] 2006, *CFX-11.0 Solver Theory*, Ansys Inc.
- [14] 2010, Lee, S.M. and Kim, K.Y., "Multi-objective Design Optimization of the Upper Plenum of a PBMR Gas-Cooled Nuclear Reactor," *Nuclear Technology*, accepted for pub.
- [15] 1994, Menter, F.R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol.32, pp.1598-1605.
- [16] 1997, Bardina, J.E., Huang, P.G. and Coakley, T., "Turbulence Modeling Validation," *28th AIAA Fluid Dynamics Conference*, AIAA Paper 1997-2121.
- [17] 2006, Ball, S., "Sensitivity Studies of Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor Postulated Accidents," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.236, pp.454-462.
- [18] 1998, Stöcker, B., "Untersuchungen zur selbsttätigen Nachwärmeführung bei Hochtemperaturreaktoren unter besonderer Berücksichtigung der Naturkonvektion," *Dissertation RWTH Aachen*, Forschungszentrum Jülich, Jül-3504.
- [19] 2008, Visser, C.J., Malan, A.G. and Meyer, J.P., "An Artificial Compressibility Method for Buoyancy-Driven Flow in Heterogeneous Saturated Packed Beds," *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol.18, No.7/8, pp.900-918.
- [20] 1979, McKay, M.D., Beckman, R.J. and Conover, W.J., "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.
- [21] 1995, Myers, R.H. and Montgomery, D.C., *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, INC., New-York.