(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2008년09월30일
(11) 등록번호 10-0860788
(24) 등록일자 2008년09월23일

(51) Int. Cl.
G21C 3/338 (2006.01) *G21C 3/336* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2007-0049554
(22) 출원일자 2007년05월22일
심사청구일자 2007년05월22일
(56) 선행기술조사문헌
US20050157835 A1
JP20060017718 A
US20060165208 A1
Optimization of Wire-Spacer Fuel Assembly of Liquid Metal reactor", 2005 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2005.12.
전체 청구항 수 : 총 14 항

(73) 특허권자
인하대학교 산학협력단
인천 남구 용현동 253 인하대학교
(72) 발명자
김광용
인천 남구 용현3동 인하대학교 기계공학전공
(74) 대리인
이은철

심사관 : 이용호

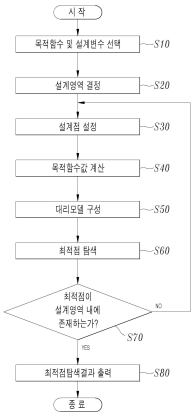
(54) 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법 및그에 의해 제조된 와이어 스페이서

(57) 요 약

본 발명은 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법에 관한 것으로서, (a) 목적 함수 및 설계 변수를 선택하는 단계; (b) 설계 영역을 결정하는 단계; (c) 실험계획법(DOE : Design of Experiments)에 의해 설계점을 설정하는 단계; (d) 상기 (c) 단계에서 설정된 설계점에 대한 상기 (a) 단계의 목적 함수값을 계산하는 단계; (e) 대리 모델(Surrogate model)을 구성하는 단계; (f) 상기 (e) 단계의 대리 모델 상에서 최적점을 탐색하는 단계; 및 (g) 상기 (f) 단계에서 탐색된 최적점이 상기 (b) 단계의 설계 영역 내에 존재하는 경우, 최적점 탐색 결과를 출력하는 단계;를 포함한다.

본 발명에 따르면, 실제의 열수력학적 거동을 정확하게 예측하여 이를 설계에 반영하는 액체금속로 연료봉다발 내의 와이어 스페이서 최적화 설계 방법 및 최적화된 와이어 스페이서를 제공하는 효과가 있다.

대 표 도 - 도1



특허청구의 범위

청구항 1

액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법에 있어서,

(a) 목적 함수 및 설계 변수를 선택하는 단계;

(b) 설계 영역을 결정하는 단계;

(c) 실험계획법(DOE : Design of Experiments)에 의해 설계점을 설정하는 단계;

(d) 상기 (c) 단계에서 설정된 설계점에 대한 상기 (a) 단계의 목적 함수값을 계산하는 단계;

(e) 대리 모델(Surrogate model)을 구성하는 단계;

(f) 상기 (e) 단계의 대리 모델 상에서 최적점을 탐색하는 단계; 및

(g) 상기 (f) 단계에서 탐색된 최적점이 상기 (b) 단계의 설계 영역 내에 존재하는 경우, 최적점 탐색 결과를 출력하는 단계;를 포함하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 (a) 단계의 목적 함수는 다음의 수학식에 의하는 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

$$F = F_N + \omega F_f$$

상기 수학식에서 F_N는 열전달 관련항을 나타내고, F_f는 압력 손실의 역에 해당하는 항을 나타내며, ω는 가중치를 나타낸다.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 수학식의 열전달 관련 항(F_N)은 다음의 수학식에 의하는 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

$$F_N = Nu_a$$

$$Nu_a = \frac{\int_A \frac{Nu}{Nu_s} dA}{A}$$

$$Nu = \frac{q_0 D_e}{k(T_w - T)}$$

$$Nu_s = 4.82 + 0.0185 \mathrm{Re}^{0.827} \mathrm{Pr}^{0.827}$$

상기 수학식에서 Nu는 국지 누셀트(Nusselt) 수를 나타내고, Nu_s는 액체 금속에 대해 일정 열유속 조건에서 원

형관 내의 완전 발달된 난류 유동의 실험식으로부터 구해질 수 있으며, 적분은 연료봉다발의 벽면에 대하여 수행된다.

청구항 4

제 2 항에 있어서,

상기 수학식의 압력 손실의 역에 해당하는 항(F_f)은 다음의 수학식에 의하는 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

$$F_f = 1/F_{friction}$$

$$F_{friction} = \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1/3}$$

$$f = \frac{2\Delta p D_e}{\rho \bar{U}^2 P_t}$$

$$f_0 = 2(2.236 \ln Re - 4.639)^{-2}$$

상기 수학식에서, f_0는 매끄러운 관 내에서 완전 발달된 유동의 마찰 계수이다.

청구항 5

제1 항에 있어서,

상기 (a) 단계에서 선택하는 설계 변수는 연료봉 직경에 대한 와이어 지지장치 직경의 비(D_w/D) 및 연료봉 직경에 대한 연료봉의 중심축 방향 길이의 비(H/D)를 포함하는 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 (b) 단계의 설계 영역은 와이어 지지장치의 하나의 주기(pitch)로 결정하고, 주기 경계 조건을 적용하는 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

청구항 7

제 6 항에 있어서,

상기 주기 경계 조건을 적용하기 위하여 삼차원 정상 상태 비압축성 유동에 대한 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식을 다음의 수학식과 같이 수정하고, 수정된 다음의 수학식을 상기 (d) 단계의 목적 함수값 계산에 적용하는 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right] - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P_p}{\partial x_i} + \beta \delta_{ij} / \rho$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c U_j T_p) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[K \frac{\partial T_p}{\partial x_j}\right] - \rho c \gamma U_j \delta_{ij}$$

$$P(x,y,z) = -\beta z + P_p(x,y,z)$$

$$T(x,y,z) = \gamma z + T_p(x,y,z)$$

상기 수학식에서, $P_p(x, y, z)$ 및 $T_p(x, y, z)$는 냉각재의 유동 방향(z)으로 주기조건을 적용하기 위해 각각 변환된 압력 및 온도를 나타내고, β는 냉각재 유동 방향의 압력 구배를 나타내며, γ는 연료봉다발 내부의 온도 상승률을 나타낸다.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 (c) 단계의 실험계획법은 LHS(Latin Hypercube Sampling)인 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

청구항 9

제 1 항에 있어서,

상기 (d) 단계의 목적 함수값 계산은 삼차원 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) 해석 방법을 사용하여 수행하는 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서,

상기 삼차원 RANS 해석을 위한 난류 모델로는 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하는 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

청구항 11

제 1 항에 있어서,

상기 (e) 단계의 대리 모델은 RBNN(Radial basis neural networks) 모델인 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

청구항 12

제 11 항에 있어서,

상기 RBNN 신경회로망의 전달함수 및 radial basis function은 다음의 수학식에 의하는 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

$$a = radbas(\| w - p \| b)$$

$$radbas(n) = e^{-n^2}$$

상기 수학식에서 b는 바이어스(bias)를 나타내고, w는 뉴런 가중치 벡터를 나타내며, p는 입력 벡터를 나타낸다.

청구항 13

제 1 항에 있어서,

상기 (f) 단계의 최적점 탐색은 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법을 사용하여 수행하는 것을 특징으로 하는 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법.

청구항 14

제 1 항 내지 제 13 항 중 어느 하나의 설계 방법으로 제조된 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서.

명 세 서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

<13> 본 발명은 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법 및 그에 의해 제조된 와이어 스페이서에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 삼차원 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) 해석 및 RBNN(Radial basis neural networks) 기법을 이용한 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 최적화 설계 방법 및 그에 의해 제조된 와이어 스페이서에 관한 것이다.

<14> 와이어 스페이서(wire spacer)는 일반적으로 액체 금속을 냉각재로 사용하는 원자로인 액체금속로(LMR : Liquid Metal Reactor)의 연료봉에 사용되어 왔다. 상기 와이어 스페이서는 연료봉들의 적절한 간격을 유지하는 역할 및 냉각재의 유동을 교란하여 대류 열전달을 촉진하는 역할을 수행한다.

<15> 종래 액체금속로 연료봉다발 내의 냉각재 유동 및 열전달을 해석하기 위한 많은 실험 및 연구들이 있었다. 그 예로서, 19개의 연료봉이 장착된 액체금속로 연료봉다발에 대하여 연료봉다발의 벽면 및 출구 온도를 측정한 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)의 실험, SABRE4, SLTHEN 및 MATRA-LMR 등의 열수력 해석 코드를 사용한 근사적 해석, 액체금속로 연료봉다발 내의 온도 분포를 예측하는 다공체모델(porous body model)을 사용한 수치적 연구 등이 있었다.

<16> 액체금속로 연료봉다발 내 냉각재 유로의 형상은 매우 복잡하기 때문에, 최적화된 연료봉다발 내 와이어 스페이서를 설계하기 위해서는 연료봉다발 내의 열수력학적 현상에 대한 구체적인 정보가 요구된다.

<17> 그러나, 상술한 실험 및 연구들은 정확한 이론적 해석이 아닌, 실험적인 해석이나 근사적인 해석에만 의존하여 열수력학적 정보를 수집하고, 이를 바탕으로 와이어 스페이서를 설계하였기 때문에 최적화 설계와는 거리가 멀다는 문제점이 있었다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

<18> 본 발명의 목적은, 상기 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 정확한 이론적 해석을 바탕으로 한 액체금속로 연료봉다발 내의 와이어 스페이서 최적화 설계 방법 및 최적화된 와이어 스페이서를 제공하는 데 있다.

발명의 구성 및 작용

<19> 본 발명의 구성을 설명하기에 앞서, 본 발명의 기술적 요지와 직접적인 관련이 없는 구성에 대하여는 본 발명의 기술적 요지를 흩뜨리지 않는 범위 내에서 생략하였음을 유의하여야 할 것이다.

<20> 최근 비약적으로 향상되고 있는 컴퓨터의 성능으로 인해 삼차원 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) 해석 및 수치 최적화 기법의 결합을 통한 와이어 스페이서의 설계가 가능해졌다.

<21> 본 발명에서는 계산 시간을 최소화할 수 있는 신경회로망기법(Neural network technique)을 사용하여 최적화 연구를 수행하였으며, 이를 통해 와이어 스페이서의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있었다. 즉, 본 발명에서는

삼차원 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) 해석 및 RBNN 기법을 사용해 와이어 지지장치를 포함하여 7 핀으로 구성되는 액체금속로 연료봉다발의 최적 설계를 수행하였다. 목적 함수는 열전달 및 압력 강하에 관계되는 항들로 구성하였다. 두 가지의 설계 변수가 선택되었고 설계점들은 Latin Hypercube Sampling 방법에 의해 결정되었다.

<22> 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명은, 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법에 관한 것으로서, (a) 목적 함수 및 설계 변수를 선택하는 단계; (b) 설계 영역을 결정하는 단계; (c) 실험계획법(DOE : Design of Experiments)에 의해 설계점을 설정하는 단계; (d) 상기 (c) 단계에서 설정된 설계점에 대한 상기 (a) 단계의 목적 함수값을 계산하는 단계; (e) 대리 모델(Surrogate model)을 구성하는 단계; (f) 상기 (e) 단계의 대리 모델 상에서 최적점을 탐색하는 단계; 및 (g) 상기 (f) 단계에서 탐색된 최적점이 상기 (b) 단계의 설계 영역 내에 존재하는 경우, 최적점 탐색 결과를 출력하는 단계;를 포함한다.

<23> 바람직하게는, 상기 (a) 단계의 목적 함수는 다음의 수학식에 의하는 것을 특징으로 한다.

<24>
$$F = F_N + \omega F_f$$

<25> 또한 바람직하게는, 상기 수학식의 열전달 관련 항(F_N)은 다음의 수학식에 의하는 것을 특징으로 한다.

<26>
$$F_N = Nu_a$$

<27>
$$Nu_a = \frac{\int_A \frac{Nu}{Nu_s} dA}{A}$$

<28>
$$Nu = \frac{q_0 D_e}{k(T_w - T)}$$

<29>
$$Nu_s = 4.82 + 0.0185 \mathrm{Re}^{0.827} \mathrm{Pr}^{0.827}$$

<30> 또한 바람직하게는, 상기 수학식의 압력 손실의 역에 해당하는 항(F_f)은 다음의 수학식에 의하는 것을 특징으로 한다.

<31>
$$F_f = 1 / F_{friction}$$

<32>
$$F_{friction} = \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3}$$

<33>
$$f = \frac{2 \Delta p D_e}{\rho \bar{U}^2 P_t}$$

<34>
$$f_0 = 2(2.236 \ln \mathrm{Re} - 4.639)^{-2}$$

<35> 또한 바람직하게는, 상기 (a) 단계에서 선택하는 설계 변수는 연료봉 직경에 대한 와이어 지지장치 직경의 비(D_w/D) 및 연료봉 직경에 대한 연료봉의 중심축 방향 길이의 비(H/D)를 포함하는 것을 특징으로 한다.

<36> 또한 바람직하게는, 상기 (b) 단계의 설계 영역은 와이어 지지장치의 하나의 주기(pitch)로 결정하고, 주기 경계 조건을 적용하는 것을 특징으로 한다.

<37> 또한 바람직하게는, 상기 주기 경계 조건을 적용하기 위하여 삼차원 정상 상태 비압축성 유동에 대한 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식을 다음의 수학식과 같이 수정하고, 수정된 다음의 수학식을 상기 (d) 단계의 목적 함수값 계산에 적용하는 것을 특징으로 한다.

<38>
$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

<39>
$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right] - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P_p}{\partial x_i} + \beta \delta_{ij} / \rho$$

<40>
$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c U_j T_p) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[K \frac{\partial T_p}{\partial x_j}\right] - \rho c \gamma U_j \delta_{ij}$$

<41>
$$P(x,y,z) = -\beta z + P_p(x,y,z)$$
$$T(x,y,z) = \gamma z + T_p(x,y,z)$$

<42> 또한 바람직하게는, 상기 (c) 단계의 실험계획법은 LHS(Latin Hypercube Sampling)인 것을 특징으로 한다.

<43> 또한 바람직하게는, 상기 (d) 단계의 목적 함수값 계산은 삼차원 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) 해석 방법을 사용하여 수행하는 것을 특징으로 한다.

<44> 또한 바람직하게는, 상기 삼차원 RANS 해석을 위한 난류 모델로는 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하는 것을 특징으로 한다.

<45> 또한 바람직하게는, 상기 (e) 단계의 대리 모델은 RBNN(Radial basis neural networks) 모델인 것을 특징으로 한다.

<46> 또한 바람직하게는, 상기 RBNN 신경회로망의 전달함수 및 radial basis function은 다음의 수학식에 의하는 것을 특징으로 한다.

<47>
$$a = radbas(\| w - p \| b)$$

<48>
$$radbas(n) = e^{-n^2}$$

<49> 그리고 바람직하게는, 상기 (f) 단계의 최적점 탐색은 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법을 사용하여 수행하는 것을 특징으로 한다.

<50> 한편, 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명은 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서에 관한 것으로서, 상기 설계 방법 중 어느 하나의 설계 방법으로 제조된 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서를 포함한다.

<51> 이하, 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 액체금속로 연료봉다발 내 와이어스페이서의 설계 방법에 관한 전체적인 흐름을 도 1 내지 도 4 를 참조하여 상세히 설명한다.

<52> 도 1 은 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법에 관한 전체적인 흐름도이고, 도 2 는 연료봉다발 단면 형상 및 기하하적 변수들에 관한 예시도이며, 도 3 은 연료봉다발 단면의 계산 격자에 관한 예시도이고, 도 4 는 와이어 스페이서 주위의 계산 격자에 관한 예시도이다.

<53> 먼저, 도 1 에 도시된 바와 같이, 목적 함수 및 설계 변수들을 선택한다(S10).

<54> 이하, 상기 S10 단계의 목적 함수 선택에 대하여 상세히 설명한다.

<55> 목적 함수는 열전달 관련항(F_N) 및 압력 손실의 역에 해당하는 항(F_f)을 가중치 ω를 이용하여 결합한 다음의 [수학식 1]과 같은 형태로 정의될 수 있다.

수학식 1

$$F = F_N + \omega F_f$$

<56>

<57> 상기 [수학식 1]에서 가중치 ω는 열전달 관련항 및 압력 손실의 역에 해당하는 항의 상대적 비중에 따라서 결정될 인자이다. 상기 목적 함수의 열전달 관련항은 다음의 [수학식 2]와 같이 정의될 수 있다.

수학식 2

$$F_N = Nu_a$$

<58>

$$Nu_a = \frac{\int_A \frac{Nu}{Nu_s} dA}{A}$$

<59>

$$Nu = \frac{q_0 D_e}{k(T_w - T)}$$

<60>

$$Nu_s = 4.82 + 0.0185 \mathrm{Re}^{0.827} \mathrm{Pr}^{0.827}$$

<61>

<62> 상기 [수학식 2]에서 Nu는 국지 누셀트(Nusselt) 수이다. Nu_s는 액체 금속에 대해 일정 열유속 조건에서 원형관 내의 완전 발달된 난류 유동의 실험식으로부터 구해질 수 있다. 상기 [수학식 2]의 적분은 연료봉다발의 벽면에 대하여 수행된다.

<63> 상기 목적 함수의 압력 손실의 역에 해당하는 항은 다음의 [수학식 3]과 같이 정의될 수 있다.

수학식 3

$$F_f = 1 / F_{friction}$$

<64>

$$F_{friction} = \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3}$$

<65>

$$f = \frac{2\Delta p D_e}{\rho \bar{U}^2 P_t}$$

<66>

$$f_0 = 2(2.236 \ln Re - 4.639)^{-2}$$

<67>

<68> 상기 [수학식 3]에서 f_0 는 매끄러운 관 내에서 완전 발달된 유동의 마찰 계수이다.

<69> 상기 S10 단계의 설계 변수들은 다음과 같은 방식으로 선택될 수 있다.

<70> 상기 도 2 에 도시된 바와 같이, 연료봉 간의 간격(P)은 연료봉 직경(D), 와이어 지지장치 직경(D_w) 및 상수 c_0 의 합으로 표현될 수 있다. 그리고 연료봉 간격 P와 연료봉과 봉다발 벽면 사이의 거리 W는 같다고 가정한다. 이러한 가정 하에서 두 개의 무차원 변수, 즉 연료봉 직경에 대한 와이어 지지장치 직경의 비(D_w/D) 및 연료봉 직경에 대한 연료봉의 중심축 방향 길이의 비 (H/D)가 설계 변수로 선택된다.

<71> 다음의 표 1 에 상기 설계 변수들에 대한 하한값 및 상한값을 나타내었다.

표 1

<72>

설계 변수	하한값	상한값
D_w/D	0.16	0.31
H/D	8.0	24.0

<73> 다음으로, 설계 영역을 결정한다(S20).

<74> 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 설계 영역은 와이어 지지장치의 하나의 주기(pitch)로 결정하였고, 주기 경계 조건을 사용하였다. 상기 도 2 에 도시된 바와 같이, 상기 와이어 지지장치는 연료봉을 반시계 방향으로 감고 있다. 와이어 스페이서 설계자는 요구되는 설계 정확도 등을 고려하여 설계 영역을 다르게 설정할 수 있다.

<75> 상기 주기 경계 조건을 적용하기 위해 냉각재 유동 방향으로의 운동량 방정식 및 에너지 방정식은 압력의 점진적 감소 및 온도의 점진적 증가를 반영하여 수정되었다. 수정된 삼차원 정상 상태 비압축성 유동에 대한 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식은 다음의 [수학식 4]와 같다.

수학식 4

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

<76>

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right] - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P_p}{\partial x_i} + \beta \delta_{ij} / \rho$$

<77>

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c U_j T_p) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[K \frac{\partial T_p}{\partial x_j}\right] - \rho c \gamma U_j \delta_{ij}$$

<78>

$$P(x,y,z) = -\beta z + P_p(x,y,z)$$
$$T(x,y,z) = \gamma z + T_p(x,y,z)$$

<79>

<80> 상기 [수학식 4]에서 $P_p(x, y, z)$ 및 $T_p(x, y, z)$는 냉각재의 유동 방향(z)으로 주기조건을 적용하기 위해 각각 변환된 압력 및 온도이며, β는 냉각재 유동 방향의 압력 구배이고, γ는 연료봉다발 내부의 온도 상승률이다.

<81> 다음으로, 설계 영역 내에서 설계점을 설정한다(S30).

<82> 이하, 상기 설계점 설정 방식에 대하여 상세히 설명한다.

<83> RBNN(Radial basis neural networks)과 같은 대리 모델(Surrogate model)을 구성하기 위해서는 설계 영역 내에서 설계점을 설정할 필요가 있다. 상기 설계점들을 설정하기 위해 실험계획법(DOE : Design of Experiments))이 사용될 수 있는데, 본 실시예에서는 상기 실험계획법으로서 LHS(Latin Hypercube Sampling)을 사용하였다.

<84> 상기 실험계획법은 제품의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자를 선정하고, 선정한 인자들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 제품의 최적 제조 조건을 경제적으로 찾아내는 기법이다.

<85> 상기 LHS 기법으로 설계점을 설정하기 위하여 m×n 형태의 행렬을 구성하였는 바, m은 설계 변수에 대한 레벨(샘플)의 수이고 n은 설계 변수의 수이다. 상기 LHS 기법에 의하여, 1 부터 m 까지의 레벨을 포함하는 행렬의 n 개 열 각각은 Latin Hypercube를 구성하기 위해 임의로 짝지어진다. 결국, 설계 영역의 모든 부분을 대표하는 설계점들이 설정된다.

<86> 다음으로, 각 설계점에서의 냉각재 유동 해석을 수행한다(S40). 즉, 각 설계점에서의 목적 함수값을 계산한다.

<87> 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 유동 해석에는 삼차원 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) 해석 방법이 사용되었으며, 해석 도구로는 계산 격자가 비정렬 격자로 구성되는 상용 전산유체역학(CFD) 코드인 ANSYS CFX 5.7 이 사용되었다. 상기 비정렬 격자의 예를 도 3 및 도 4 에 나타내었다.

<88> 상기 삼차원 RANS 해석을 위한 난류 모델로는 SST(Shear Stress Transport) 모델이 사용되었다. 상기 SST 모델은 k-ε 모델과 k-ω 모델을 결합한 모델로서, 특히 역압력구배 하에서 박리 현상을 예측하는 데 있어 다른 난류 모델에 비해 우수하다.

<89> 설계 영역의 입구와 출구에서는 주기 경계 조건이 사용되었으며, 연료봉의 벽면에서는 일정 열유속 조건이 적용되었다. 냉각재로는 액체 나트륨(Na)을 상정하였으며, 냉각재의 연료봉 중심축 방향 평균 속도 및 수력 직경을 이용해 계산한 레이놀즈(Reynolds) 수는 60,000이었다.

<90> 다음으로, 상기 유동 해석 결과를 바탕으로 대리 모델(surrogate model)을 구성한다(S50).

<91> 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 대리 모델로는 RBNN(Radial basis neural networks) 모델이 적용되었다. 상기 RBNN은 radial basis transfer function 및 선형 출력으로 구성되는 두 겹의 신경회로망으로서, 함수의 선형성으로 인해 계산 시간을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

<92> 신경회로망은 인간의 뇌신경 세포와 그 결합 구조를 모방하여 만든 전자 회로망이다. 신경회로망의 기본 요소는 뉴런(neuron)인데, 각 뉴런의 출력은 해당 뉴런에 저장되어 있거나 해당 뉴런에 도달하는 국부적인 정보에만 의존한다. 신경회로망의 예측 능력은 가중치에 의해 향상되며. 신경회로망의 훈련은 반복적인 자료 입력에 의해 수행된다.

<93> 본 실시예에서는 수학 연산용 범용 소프트웨어인 MATLAB(Matrix Laboratory)의 함수 newrb을 사용하여 신경회로망을 구성하였는데, 전달함수는 다음의 [수학식 5]와 같이 주어진다.

수학식 5

<94> $$a = radbas(\| w - p \| b)$$

<95> 상기 [수학식 5]에서 b는 바이어스(bias)이고 w 는 뉴런 가중치 벡터, p 는 입력 벡터이다. radial basis function, 즉 radbas는 다음의 [수학식 6]과 같다.

수학식 6

<96> $$radbas(n) = e^{-n^2}$$

<97> 상기 radial basis function에 대한 선형 모델 f는 N개 기본 함수들의 선형 결합으로 다음의 [수학식 7]과 같다.

수학식 7

$$f(x) = \sum_{j=1}^{N} w_j y_j$$

<98>

<99> 상기 [수학식 7]에서 w_j는 가중치이고 y_j는 기본 함수이다. 만약 훈련 과정에서 기본 함수 및 다른 변수들이 고정된 값을 가지면 선형 모델이며, 기본 함수의 변화가 있다면 비선형 모델이다.

<100> 상기 RBNN 모델의 학습 과정은 다차원 공간에서 훈련 데이터를 가장 잘 맞추는 곡면을 탐색하는 과정을 의미하며, 탐색된 곡면은 최적점 탐색을 위한 자료 곡면이 된다.

<101> 다음으로, 상기 자료 곡면 상에서 최적점을 탐색한다(S60).

<102> 본 실시예에서는 최적점 탐색 방법으로 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법을 사용하였다. 상기 SQP 방법은 비선형적인 해공간을 국소적으로 테일러(Taylor) 전개하여 곡면을 형성하고, 형성한 곡면 상에서 최적해를 구하는 비선형 최적화 알고리즘이다.

<103> 다음으로, 상기 탐색된 최적점이 설계 영역 내에 존재하는지를 판단한다(S70).

<104> 마지막으로, 상기 S70 단계의 판단 결과, 최적점이 설계 영역 내에 존재하는 경우 탐색된 최적점 결과를 출력한다(S80).

<105> 상기 S70 단계의 판단 결과, 최적점이 설계 영역 내에 존재하지 않는 경우 상기 S30 단계로 절차를 이행한다.

<106> 이하, 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 최적 설계 결과에 관해도 5 내지 도 12 를 참조하여 설명한다.

<107> 도 5 는 연료봉다발 내 분할된 부수로에 관한 예시도이고, 도 6 은 계산 격자 의존성 시험의 결과도이며, 도 7 은 19 핀 연료봉다발에서 마찰 계수에 대한 계산 결과와 실험 결과의 비교도이고, 도 8 은 RBNN 모델에 의한 자료 곡면의 모식도이며, 도 9 는 가중치의 변화에 따른 최적 설계 변수의 결과도이고, 도 10 은 부수로 1 에서 연료봉 중심축 방향으로의 국부 누셀트 수에 대한 비교도이며, 도 11 은 기준 형상에서 연료봉 표면의 누셀트 수 분포를 나타내는 모식도이고, 도 12 는 최적 형상에서 연료봉 표면의 누셀트 수 분포를 나타내는 모식도이다.

<108> 먼저, 수치 해석에서 격자 의존성이 없는 해를 얻기 위해 격자 의존성 시험을 수행하였다. 도 5 에 도시된 바와 같이, 연료봉다발의 냉각재 유로를 여러 부수로(subchannel)로 분할하였고 각 부수로를 식별할 수 있는 번호를 부여하였다.

<109> 상기 격자 의존성 시험의 결과를 도 6 에 나타내었는 바, 도 6 의 결과를 바탕으로 8.62×10^5를 최적의 격자수로 결정하였다.

<110> 그리고, 19 핀으로 구성된 연료봉다발에 대하여 수치 해석 결과를 실험값과 비교하여 검증하였다. 도 7 에 도시된 바와 같이, 레이놀즈 수가 67,200인 경우 실험값과 수치 해석 결과에서 마찰 계수의 상대적 차이는 20%보다 작게 나타났다. 이러한 결과는 연료봉다발 부수로의 복잡한 구조를 고려한다면 종래 기술보다 크게 향상된 것이다.

<111> 다음의 표 2 에 가중치로 w=1.0 을 적용한 경우의 최적 설계 결과를 나타내었다. 표 2 의 기준 연료봉 형상은 설계 영역 내에서 임의로 선택한 것이다.

표 2

<112>

	설계 변수		목적 함수			F_{RBNN}	$F_{RBNN}-F_{RANS}$
	D_w/D	H/D	F_N	F_f	F_{RANS}		

기준 형상	0.16	16.0	0.452	0.542	0.994		
최적 형상	0.253	13.4	0.937	0.465	1.402	1.468	0.066

<113> 상기 표 2 에 최적점에서 RBNN 방법에 의해 예측된 목적 함수값과 RANS 해석에 의해 계산된 목적 함수값을 비교하였는 바, 최적 형상에서의 압력 손실은 기준 형상에 비해 미소하게 증가하였으나 열전달 성능은 크게 향상되었음을 알 수 있다. 또한 RBNN 방법은 최적점에서의 목적함수 값을 RANS 해석 결과와 비교하여 4.71%라는 미소한 상대오차로 예측하고 있다.

<114> 도 8 에 가중치로 w=1.0 을 적용한 경우 RBNN 방법에 의한 삼차원 자료 곡면을 나타내었다. 도 8 에서 바닥면의 좌표, 즉 D_w/D 및 H/D는 (0,1) 구간에서 무차원화된 설계 변수를 나타낸다. 최적점은 좌표 (0.619, 0.335)에 위치하고 있으며, 이러한 결과로부터 RBNN 방법이 기준 형상에 비해 목적 함수를 명백히 향상시킨 최적 형상을 제시하고 있음을 알 수 있다.

<115> 도 9 에 가중치의 변화에 따른 설계 변수의 최적값들을 나타내었다.

<116> 도 9 에 도시된 바와 같이, 가중치가 증가하면, 즉 설계자가 압력 손실의 감소에 더 비중을 두면 H/D는 증가하는 반면 D_w/D는 감소한다. H/D의 증가에 따라 압력 손실은 감소하기 때문에 H/D의 최적값은 가중치의 증가에 따라 증가하게 된다. D_w/D의 최적값은 가중치가 증가하면 감소하는데, 이는 와이어 지지장치의 직경이 감소되면 압력 손실이 감소하기 때문이다.

<117> 가중치는 도 9 에 도시된 0.5부터 1.5의 범위에서 결정되는 것이 바람직하며, 이때 설계 변수들은 도 9 에 도시된 범위 내에서 최적값을 가지게 된다.

<118> 도 10 에 가중치가 1 인 경우 부수로 1 에서 국부적인 누셀트(Nusselt) 수의 연료봉 중심축 방향 분포에 대한 기준값 및 최적값의 비교 결과를 나타내었다. 연료봉 중심축 방향 거리 Z는 무차원화되어 (0,1) 구간의 값을 가진다. 기준값 및 최적값의 두 경우 모두 Z=0.57 근처에서 최고의 누셀트 수를 가지며, 최적화로 인해 기준 형상에 비해 크게 향상된 누셀트(Nusselt) 수를 확인할 수 있다.

<119> 도 10 에 도시된 바와 같이, 열전달 성능이 전반적으로 향상된 이유는 최적 연료봉다발에서의 유로막힘률(blockage ratio)이 크기 때문이다. 이러한 유로막힘률은 연료봉 중심축 방향으로 투영한 전체 부수로의 면적에 대한 와이어 지지장치의 투영면적의 비로 정의된다. 최적 연료봉다발의 유로막힘률은 기준 형상에 비하여 약 69% 정도 큰 값을 가진다.

<120> 도 11 및 도 12 에 가중치가 1 인 경우 연료봉다발의 중심에 위치한 연료봉의 표면에서 기준 형상 및 최적 형상에 대한 누셀트 수 분포를 나타내었다. 냉각재는 좌측에서 우측으로 유동한다. 도 11 에 도시된 바와 같이, 기준 형상 및 최적 형상 모두에서 열전달은 와이어가 연료봉들 간의 공간을 막는 위치에서 감소함을 알 수 있다.

<121> 이상으로 본 발명의 기술적 사상을 예시하기 위한 바람직한 실시예와 관련하여 설명하고 도시하였지만, 본 발명은 이와 같이 도시되고 설명된 그대로의 구성 및 작용에만 국한되는 것이 아니며, 기술적 사상의 범주를 일탈함이 없이 본 발명에 대해 다수의 변경 및 수정이 가능함을 당업자들은 잘 이해할 수 있을 것이다. 따라서 그러한 모든 적절한 변경 및 수정과 균등물들도 본 발명의 범위에 속하는 것으로 간주되어야 할 것이다.

발명의 효과

<122> 상술한 본 발명에 따르면, 실제의 열수력학적 거동을 정확하게 예측하여 이를 설계에 반영하는 액체금속로 연료봉다발 내의 와이어 스페이서 최적화 설계 방법 및 최적화된 와이어 스페이서를 제공하는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

<1> 도 1 은 액체금속로 연료봉다발 내 와이어 스페이서의 설계 방법에 관한 전체적인 흐름도.

<2> 도 2 는 연료봉다발 단면 형상 및 기하학적 변수들에 관한 예시도.

<3> 도 3 은 연료봉다발 단면의 계산 격자에 관한 예시도.

<4> 도 4 는 와이어 스페이서 주위의 계산 격자에 관한 예시도.

<5> 도 5 는 연료봉다발 내 분할된 부수로에 관한 예시도.

<6> 도 6 은 계산 격자 의존성 시험의 결과도.

<7> 도 7 은 19 핀 연료봉다발에서 마찰 계수에 대한 계산 결과와 실험 결과의 비교도.

<8> 도 8 은 RBNN 모델에 의한 자료 곡면의 모식도.

<9> 도 9 는 가중치의 변화에 따른 최적 설계 변수의 결과도.

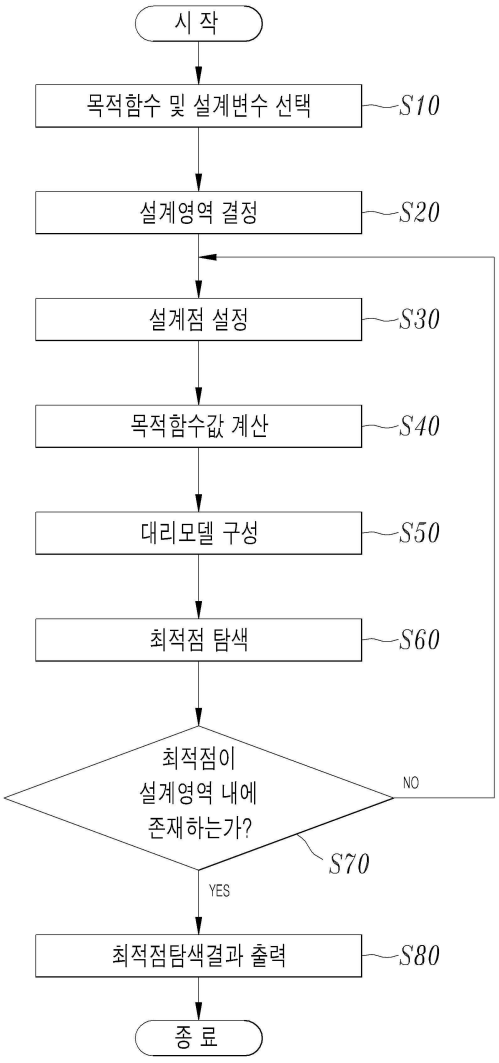
<10> 도 10 은 부수로 1 에서 연료봉 중심축 방향으로의 국부 누셀트 수에 대한 비교도.

<11> 도 11 은 기준 형상에서 연료봉 표면의 누셀트 수 분포를 나타내는 모식도.

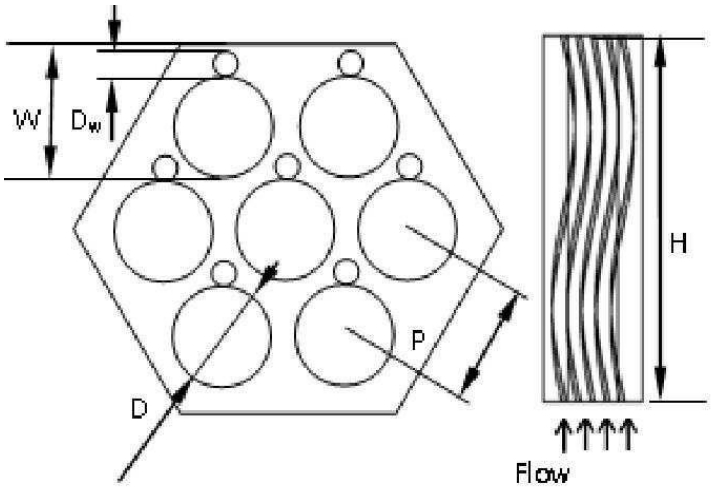
<12> 도 12 는 최적 형상에서 연료봉 표면의 누셀트 수 분포를 나타내는 모식도.

도면

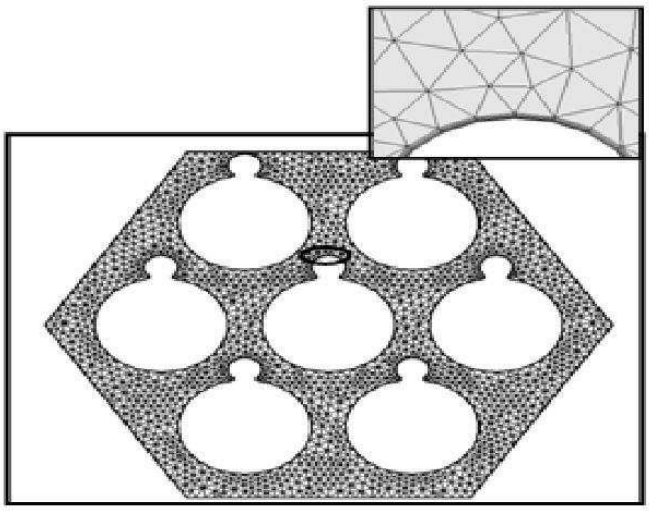
도면1



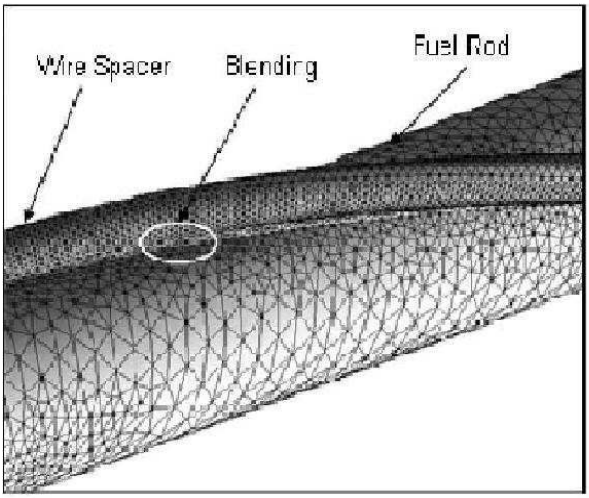
도면2



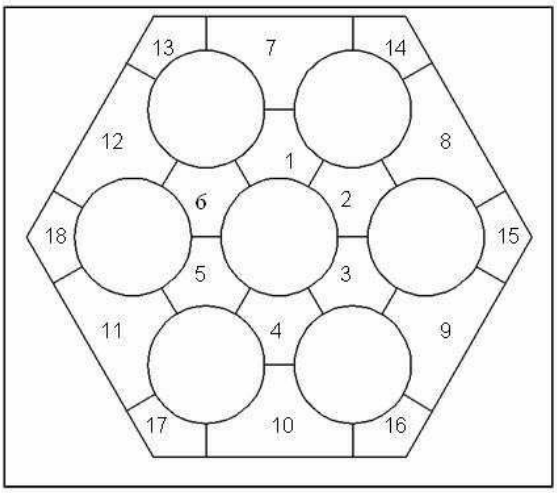
도면3



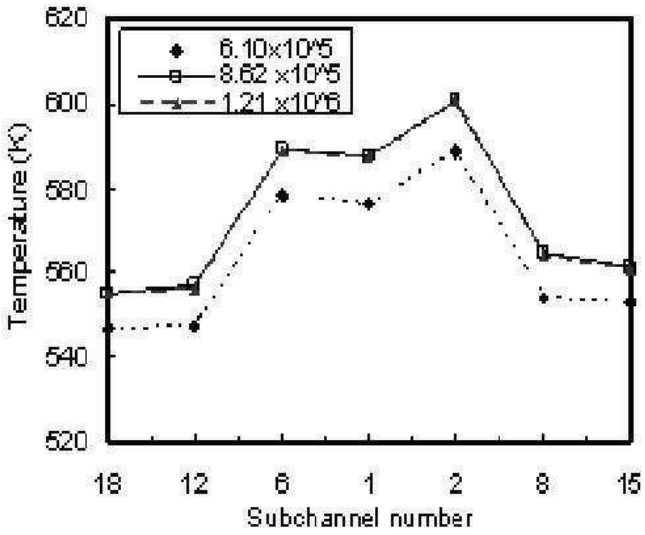
도면4


Wire Spacer
Blending
Fuel Rod

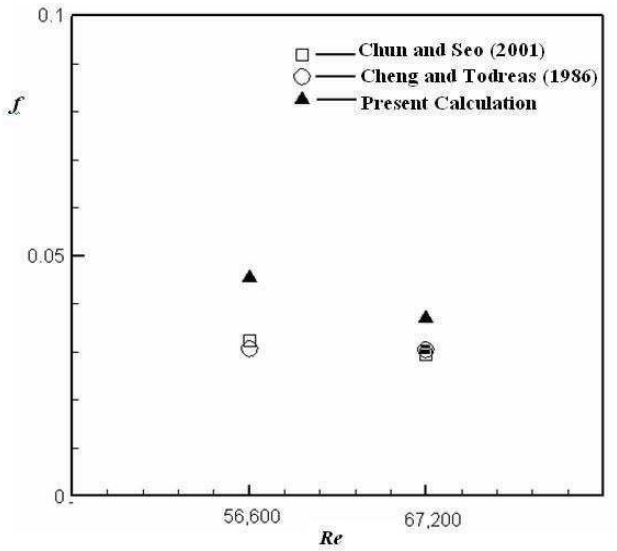
도면5


13
7
14
12
8
1
6
2
18
15
5
3
11
4
9
17
10
16

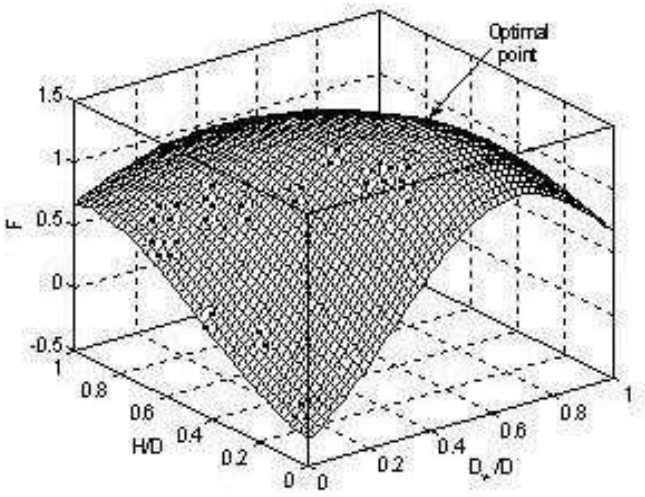
도면6


6.10×10^5
8.62 ×10^5
1.21 ×10^6
Temperature (K)
620
600
580
560
540
520
18
12
6
1
2
8
15
Subchannel number

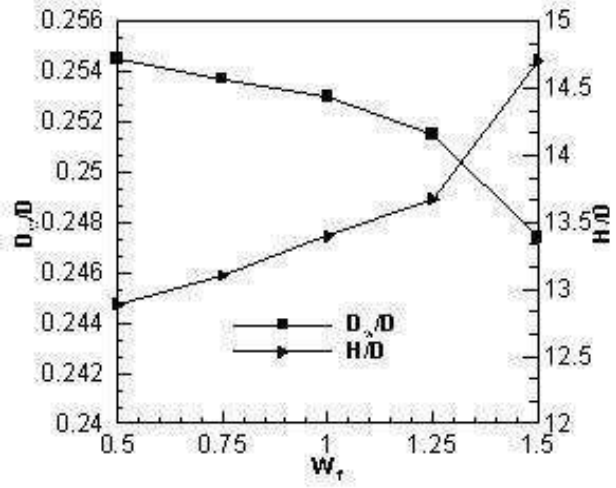
도면7


Chun and Seo (2001)
Cheng and Todreas (1986)
Present Calculation
f
0.1
0.05
0
56,600
67,200
Re

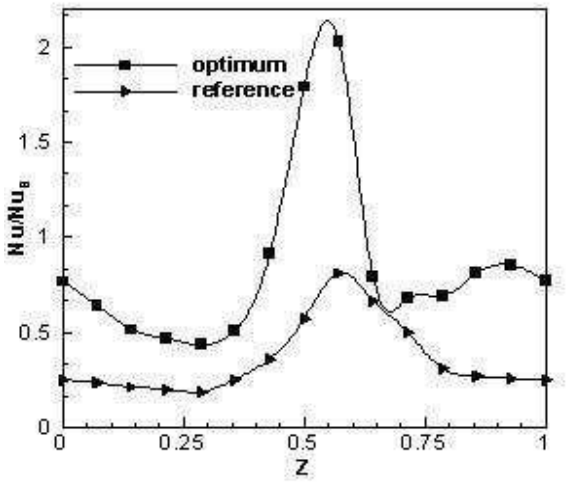
도면8


Optimal point
F
1.5
1
0.5
0
-0.5
H/D
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
D_s/D

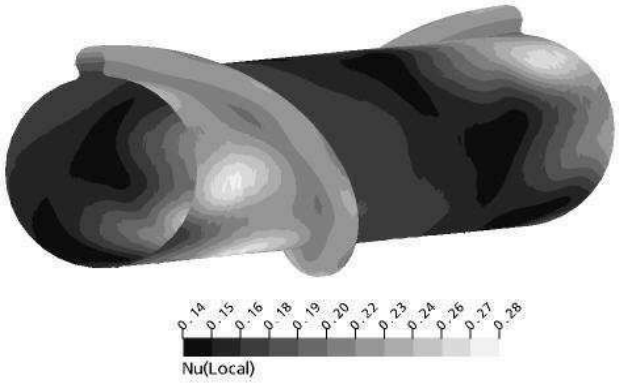
도면9


D_s/D
H/D
0.256
0.254
0.252
0.25
0.248
0.246
0.244
0.242
0.24
15
14.5
14
13.5
13
12.5
12
0.5
0.75
1
1.25
1.5
W_t

도면10



도면11



도면12

