



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0155816
(43) 공개일자 2022년11월24일

- | | |
|--|---|
| <p>(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 $G21C\ 17/06$ (2006.01) $G06F\ 119/08$ (2020.01)
 $G06F\ 30/20$ (2020.01) $G21C\ 3/30$ (2006.01)</p> <p>(52) CPC특허분류
 $G21C\ 17/06$ (2013.01)
 $G06F\ 30/20$ (2020.01)</p> <p>(21) 출원번호 10-2021-0063544
 (22) 출원일자 2021년05월17일
 심사청구일자 2021년05월17일</p> | <p>(71) 출원인
 울산과학기술원
 울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50</p> <p>(72) 발명자
 이덕중
 울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
 김경원
 울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
 (뒷면에 계속)</p> <p>(74) 대리인
 전용준</p> |
|--|---|

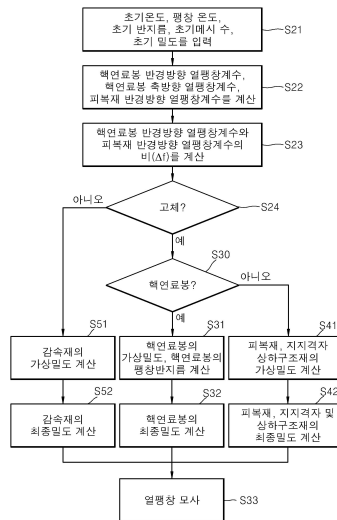
전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 발명의 명칭 **핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법**

(57) 요약

본 발명은, 핵연료집합체의 열팽창 모사시 핵연료집합체를 구성하는 구성요소들 중에서 핵연료봉에 대해서는 열 팽창에 따른 기하구조 크기 변화를 적용하여 모사하고, 나머지 구성요소들에 대해서는 열팽창에 따른 기하구조 크기 변화를 적용하지 않고 열팽창에 따른 밀도만 변화시킨 가상 밀도를 적용하여 모사하는 하이브리드 방법을 사용함으로써, 계산 복잡도와 계산 시간을 최소화시키면서도 보다 정확한 열팽창 모사가 가능한 이점이 있다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

G21C 3/30 (2013.01)

G06F 2119/08 (2020.01)

(72) 발명자

김원경

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

세티아완 빠떠라만

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

이현석

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

명세서

청구범위

청구항 1

핵연료봉, 피복재, 감속재, 지지격자 및 상하 구조재를 포함하는 핵연료 집합체를 균일 등방향 열팽창 모델을 적용하고,

상기 핵연료봉은, 상기 핵연료봉의 반경방향 열팽창에 따른 반경방향 크기 변화와, 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창에 따른 밀도 변화를 이용하여 열팽창을 모사하고,

상기 피복재, 상기 감속재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재는, 상기 피복재의 반경방향 열팽창에 따른 밀도 변화를 이용하여 열팽창을 모사하는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 핵연료봉, 상기 피복재, 상기 감속재 및 상기 지지격자의 각 초기 온도, 팽창 온도, 초기 반지름, 초기 메시 수 및 초기 밀도를 입력하는 단계와,

상기 핵연료봉의 온도 변화에 따른 핵연료봉 반경방향 열팽창계수를 계산하고, 상기 핵연료봉의 노심 평균 온도에 따른 핵연료봉 축방향 열팽창계수를 계산하는 단계와,

상기 피복재의 온도 변화에 따른 피복재 반경방향 열팽창계수를 계산하는 단계와,

상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 계산하는 단계와,

상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 핵연료봉의 반경방향 열팽창시 크기 변화에 따른 팽창 반지름을 계산하는 단계와,

상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창시 밀도변화를 나타내는 상기 핵연료봉의 가상밀도를 계산하는 단계와,

상기 핵연료봉의 가상밀도, 상기 핵연료봉 축방향 열팽창계수, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여, 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창시 상기 핵연료봉의 최종밀도를 계산하는 단계와,

상기 핵연료봉의 팽창 반지름과 상기 최종 밀도에 따라 상기 핵연료봉의 열팽창을 모사하는 단계를 포함하는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

청구항 3

청구항 2에 있어서,

상기 핵연료봉의 가상밀도는 아래 수학적 식 1에 의해 계산되고,

상기 핵연료봉의 최종밀도는 아래 수학적 식 2에 의해 계산되는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

[수학적 식 1]

$$\rho_{vir, fuel} = \rho_0 \frac{1}{f_{radial, clad}^2(T, T_0)}$$

[수학식 2]

$$\rho_{fuel} = \rho_{vir, fuel} \frac{1}{\Delta f^2 f_{axial, fuel}(T_{avg}, T_0)}$$

여기서, $\rho_{vir, fuel}$ 은 핵연료봉의 가상밀도, ρ_0 는 핵연료봉의 초기 밀도, ρ 는 핵연료봉의 최종 밀도, T 는 팽창 온도, T_0 는 초기 온도, $f_{radial, fuel}(T, T_0)$ 는 핵연료봉 반경방향 열팽창계수이고, $f_{axial, fuel}(T_{avg}, T_0)$ 는 핵연료봉 축방향 열팽창계수이고, $f_{radial, clad}(T, T_0)$ 는 피복재 반경방향 열팽창계수이고, Δf 는 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{radial, fuel}(T, T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{radial, clad}(T, T_0)$)의 비이고, T_{avg} 는 핵연료봉의 노심 평균 온도이다.

청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 핵연료봉의 팽창 반지름은, 아래 수학식 3에 의해 계산되는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

[수학식 3]

$$R = R_0 \times f_{radial, fuel}(T, T_0)$$

청구항 5

청구항 2에 있어서,

상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 피복재의 반경방향 열팽창에 따른 밀도변화를 나타내는 상기 피복재의 가상밀도를 계산하는 단계와,

상기 피복재의 가상밀도, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여, 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 열팽창시 각 최종밀도를 계산하는 단계와,

상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 각 최종밀도에 따라 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 열팽창을 모사하는 단계를 포함하는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 피복재의 가상밀도는 아래 수학식 4에 의해 계산되고,

상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 최종밀도는 아래 수학식 5에 의해 계산되는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

[수학식 4]

$$\rho_{vir, clad} = \rho_0 \frac{1}{f_{radial, clad}^2(T, T_0)}$$

[수학식 5]

$$\rho_{clad} = \frac{\rho_{vir, clad}}{\Delta f}$$

여기서, $\rho_{vir, clad}$ 은 피복재의 가상밀도, ρ_0 는 피복재의 초기 밀도, ρ_{clad} 는 최종 밀도, T 는 팽창 온도, T_0 는 초

기 온도, $f_{\text{radial,clad}}(T, T_0)$ 는 피복재 반경방향 열팽창계수이고, $f_{\text{radial,fuel}}(T, T_0)$ 는 핵연료봉 반경방향 열팽창계수이고, Δf 는 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial,fuel}}(T, T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial,clad}}(T, T_0)$)의 비이다.

청구항 7

청구항 2에 있어서,

상기 감속재는 유체이고,

상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 감속재의 열팽창에 따른 밀도변화를 나타내는 상기 감속재의 가상밀도를 계산하는 단계와,

상기 감속재의 가상밀도, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여 상기 감속재의 최종밀도를 계산하는 단계와,

상기 감속재의 최종밀도에 따라 상기 감속재의 열팽창을 모사하는 단계를 더 포함하는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

청구항 8

청구항 7에 있어서,

상기 감속재의 가상밀도는 아래 수학적 식 6에 의해 계산되고,

상기 감속재의 최종밀도는 아래 수학적 식 7에 의해 계산되는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

[수학적 식 6]

$$\rho_{\text{vir,mod}} = \rho_0 f_{\text{radial,clad}}(T, T_0)$$

[수학적 식 7]

$$\rho_{\text{mod}} = \frac{\rho_{\text{vir,mod}}}{\Delta f}$$

여기서, $\rho_{\text{vir,mod}}$ 은 감속재의 가상밀도, ρ_0 는 감속재의 초기 밀도, ρ_{mod} 는 감속재의 최종 밀도, T 는 팽창 온도, T_0 는 초기 온도, $f_{\text{radial,clad}}(T, T_0)$ 는 피복재 반경방향 열팽창계수이고, $f_{\text{radial,fuel}}(T, T_0)$ 는 핵연료봉 반경방향 열팽창계수이고, Δf 는 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial,fuel}}(T, T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial,clad}}(T, T_0)$)의 비이다.

청구항 9

청구항 5에 있어서,

상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 열팽창에 따른 팽창 반지름은 초기 반지름으로 적용하는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

청구항 10

청구항 2에 있어서,

상기 핵연료봉, 상기 피복재, 상기 감속재 및 상기 지지격자의 열팽창에 따른 최종 메시 수를 각각 계산하고,

상기 최종 메시 수는 아래 수학적 식 6에 의해 계산되는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

[수학식 8]

$$Z = Z_0 f_{axial, fuel}$$

여기서, Z 는 최종 메시 수, Z_0 는 초기 메시 수, $f_{axial, fuel}$ 은 핵연료봉 축방향 열팽창계수이다.

청구항 11

핵연료봉, 피복재, 감속재, 지지격자 및 상하 구조재를 포함하는 핵연료 집합체를 균일 등방향 열팽창 모델을 적용하고,

상기 핵연료봉, 상기 피복재, 상기 감속재 및 상기 지지격자의 각 초기 온도, 팽창 온도, 초기 반지름, 초기 메시 수 및 초기 밀도를 입력하는 단계와;

상기 핵연료봉의 온도 변화에 따른 핵연료봉 반경방향 열팽창계수를 계산하고, 상기 핵연료봉의 노심 평균 온도에 따른 핵연료봉 축방향 열팽창계수를 계산하는 단계와;

상기 피복재의 온도 변화에 따른 피복재 반경방향 열팽창계수를 계산하는 단계와;

상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 계산하는 단계와;

상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 핵연료봉의 반경방향 열팽창시 크기 변화에 따른 팽창 반지름을 계산하는 단계와;

상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창시 밀도변화를 나타내는 상기 핵연료봉의 가상밀도를 계산하는 단계와;

상기 핵연료봉의 가상밀도, 상기 핵연료봉 축방향 열팽창계수, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여, 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창시 상기 핵연료봉의 최종밀도를 계산하는 단계와;

상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 피복재의 반경방향 열팽창시 밀도변화를 나타내는 상기 피복재의 가상밀도를 각각 계산하는 단계와;

상기 피복재의 가상밀도, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여, 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 열팽창시 각 최종밀도를 계산하는 단계와;

상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 감속재의 열팽창시 밀도변화를 나타내는 상기 감속재의 가상밀도를 계산하는 단계와;

상기 감속재의 가상밀도, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여 상기 감속재의 최종밀도를 계산하는 단계와;

상기 핵연료봉의 팽창 반지름과 상기 최종 밀도에 따라 상기 핵연료봉의 열팽창을 모사하고, 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 각 최종밀도에 따라 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 열팽창을 모사하고, 상기 감속재의 최종밀도에 따라 상기 감속재의 열팽창을 모사하는 단계를 포함하는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 핵연료 집합체 중 일부 구성요소에 대해서는 열팽창에 따른 기하구조 크기변화와 밀도 변화를 적용하고, 그 외 나머지 구성요소에 대해서는 열팽창에 따른 밀도 변화를 적용하여 열팽창을 모사하는 하이브리드 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법에 관한 것이다.

배경 기술

- [0002] 일반적으로 원자로의 노심 해석은 결정론적 방법에 기반한 STREAM(Steady state and Transient REactor Analysis code with Method of characteristics)코드를 이용하거나 확률론적 방법에 기반한 몬테칼로(MCS, Monte Carlo Simulation) 코드를 이용하고 있다.
- [0003] 이러한 노심 해석시, 고온에 노출된 핵연료 및 구조물들의 열팽창에 의한 기하구조의 변경을 모사할 수 있어야 한다.
- [0004] 종래에는 수백개의 연료봉들과 구조물들로 이루어진 핵연료 집합체를 수백개 이상의 계산 메시(mesh)들로 분할하고, 모든 메시들에 대해 열팽창에 의한 기하구조 변경을 적용해야 하기 때문에, 막대한 계산 자원이 필요하고 해석 시간도 매우 오래 걸리는 문제점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0005] (특허문헌 0001) 한국등록특허 제10-1957016호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0006] 본 발명의 목적은, 핵연료 집합체에 대한 열팽창 모사를 보다 용이하면서도 정확하게 할 수 있는 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법을 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

- [0007] 본 발명에 따른 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법은, 핵연료봉, 피복재, 감속재, 지지격자 및 상하 구조재를 포함하는 핵연료 집합체를 균일 등방향 열팽창 모델을 적용하고, 상기 핵연료봉은, 상기 핵연료봉의 반경방향 열팽창에 따른 반경방향 크기 변화와, 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창에 따른 밀도 변화를 이용하여 열팽창을 모사하고, 상기 피복재, 상기 감속재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재는, 상기 피복재의 반경방향 열팽창에 따른 밀도 변화를 이용하여 열팽창을 모사한다.
- [0008] 상기 핵연료봉, 상기 피복재, 상기 감속재 및 상기 지지격자의 각 초기 온도, 팽창 온도, 초기 반지름, 초기 메시 수 및 초기 밀도를 입력하는 단계와; 상기 핵연료봉의 온도 변화에 따른 핵연료봉 반경방향 열팽창계수를 계산하고, 상기 핵연료봉의 노심 평균 온도에 따른 핵연료봉 축방향 열팽창계수를 계산하는 단계와; 상기 피복재의 온도 변화에 따른 피복재 반경방향 열팽창계수를 계산하는 단계와; 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 계산하는 단계와; 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 핵연료봉의 반경방향 열팽창시 크기 변화에 따른 팽창 반지름을 계산하는 단계와; 상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창시 밀도변화를 나타내는 상기 핵연료봉의 가상밀도를 계산하는 단계와; 상기 핵연료봉의 가상밀도, 상기 핵연료봉 축방향 열팽창계수, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여, 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창시 상기 핵연료봉의 최종밀도를 계산하는 단계와; 상기 핵연료봉의 팽창 반지름과 상기 최종 밀도에 따라 상기 핵연료봉의 열팽창을 모사하는 단계를 포함한다.
- [0009] 상기 핵연료봉의 가상밀도는 아래 수학적 식 1에 의해 계산되고, 상기 핵연료봉의 최종밀도는 아래 수학적 식 2에 의해 계산된다.

- [0010] [수학적 식 1]

$$\rho_{vir, fuel} = \rho_0 \frac{1}{f_{radial, clad}^2(T, T_0)}$$

- [0011]

[0012] [수학식 2]

$$\rho_{fuel} = \rho_{vir, fuel} \frac{1}{\Delta f^2 f_{axial, fuel}(T_{avg}, T_0)}$$

[0013]

[0014] 여기서, $\rho_{vir, fuel}$ 은 핵연료봉의 가상밀도, ρ_0 는 핵연료봉의 초기 밀도, ρ 는 핵연료봉의 최종 밀도, T 는 팽창 온도, T_0 는 초기 온도, $f_{radial, fuel}(T, T_0)$ 는 핵연료봉 반경방향 열팽창계수이고, $f_{axial, fuel}(T_{avg}, T_0)$ 는 핵연료봉 축방향 열팽창계수이고, $f_{radial, clad}(T, T_0)$ 는 피복재 반경방향 열팽창계수이고, Δf 는 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{radial, fuel}(T, T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{radial, clad}(T, T_0)$)의 비이고, T_{avg} 는 핵연료봉의 노심 평균 온도이다.

[0015] 상기 핵연료봉의 팽창 반지름은, 아래 수학식 3에 의해 계산된다.

[0016] [수학식 3]

$$R = R_0 \times f_{radial, fuel}(T, T_0)$$

[0017]

[0018] 상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 피복재의 반경방향 열팽창에 따른 밀도변화를 나타내는 상기 피복재의 가상밀도를 계산하는 단계와, 상기 피복재의 가상밀도, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여, 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 열팽창시 각 최종밀도를 계산하는 단계와, 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 각 최종밀도에 따라 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 열팽창을 모사하는 단계를 포함한다.

[0019] 상기 피복재의 가상밀도는 아래 수학식 4에 의해 계산되고, 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 최종밀도는 아래 수학식 5에 의해 계산된다.

[0020] [수학식 4]

$$\rho_{vir, clad} = \rho_0 \frac{1}{f_{radial, clad}^2(T, T_0)}$$

[0021]

[0022] [수학식 5]

$$\rho_{clad} = \frac{\rho_{vir, clad}}{\Delta f}$$

[0023]

[0024] 여기서, $\rho_{vir, clad}$ 은 피복재의 가상밀도, ρ_0 는 피복재의 초기 밀도, ρ_{clad} 는 최종 밀도, T 는 팽창 온도, T_0 는 초기 온도, $f_{radial, clad}(T, T_0)$ 는 피복재 반경방향 열팽창계수이고, $f_{radial, fuel}(T, T_0)$ 는 핵연료봉 반경방향 열팽창계수이고, Δf 는 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{radial, fuel}(T, T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{radial, clad}(T, T_0)$)의 비이다.

[0025] 상기 감속재는 유체이고, 상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 감속재의 열팽창에 따른 밀도변화를 나타내는 상기 감속재의 가상밀도를 계산하는 단계와, 상기 감속재의 가상밀도, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여 상기 감속재의 최종밀도를 계산하는 단계와, 상기 감속재의 최종밀도에 따라 상기 감속재의 열팽창을 모사하는 단계를 더 포함한다.

[0026] 상기 감속재의 가상밀도는 아래 수학식 6에 의해 계산되고, 상기 감속재의 최종밀도는 아래 수학식 7에 의해 계산된다.

[0027] [수학식 6]

$$\rho_{vir,mod} = \rho_0 f_{radial,clad}(T, T_0)$$

[0028]

[0029] [수학식 7]

$$\rho_{mod} = \frac{\rho_{vir,mod}}{\Delta f}$$

[0030]

[0031] 여기서, $\rho_{vir,mod}$ 은 감속재의 가상밀도, ρ_0 는 감속재의 초기 밀도, ρ_{mod} 는 감속재의 최종 밀도, T 는 팽창 온도, T_0 는 초기 온도, $f_{radial,clad}(T, T_0)$ 는 피복재 반경방향 열팽창계수이고, $f_{radial,fuel}(T, T_0)$ 는 핵연료봉 반경방향 열팽창계수이고, Δf 는 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{radial,fuel}(T, T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{radial,clad}(T, T_0)$)의 비이다.

[0032] 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 열팽창에 따른 팽창 반지름은 초기 반지름으로 적용한다.

[0033] 상기 핵연료봉, 상기 피복재, 상기 감속재 및 상기 지지격자의 열팽창에 따른 최종 메시 수를 각각 계산하고, 상기 최종 메시 수는 아래 수학식 6에 의해 계산된다.

[0034] [수학식 8]

$$Z = Z_0 f_{axial,fuel}$$

[0035]

[0036] 여기서, Z 는 최종 메시 수, Z_0 는 초기 메시 수, $f_{axial,fuel}$ 은 핵연료봉 축방향 열팽창계수이다.

[0037] 본 발명의 다른 측면에 따른 핵연료 집합체의 하이브리드 열팽창 모사 방법을 적용한 원자로 노심 해석 방법은, 핵연료봉, 피복재, 감속재, 지지격자 및 상하 구조재를 포함하는 핵연료 집합체를 균일 등방향 열팽창 모델을 적용하고, 상기 핵연료봉, 상기 피복재, 상기 감속재 및 상기 지지격자의 각 초기 온도, 팽창 온도, 초기 반지름, 초기 메시 수 및 초기 밀도를 입력하는 단계와; 상기 핵연료봉의 온도 변화에 따른 핵연료봉 반경방향 열팽창계수를 계산하고, 상기 핵연료봉의 노심 평균 온도에 따른 핵연료봉 축방향 열팽창계수를 계산하는 단계와; 상기 피복재의 온도 변화에 따른 피복재 반경방향 열팽창계수를 계산하는 단계와; 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 계산하는 단계와; 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 핵연료봉의 반경방향 열팽창시 크기 변화에 따른 팽창 반지름을 계산하는 단계와; 상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창시 밀도변화를 나타내는 상기 핵연료봉의 가상밀도를 계산하는 단계와; 상기 핵연료봉의 가상밀도, 상기 핵연료봉 축방향 열팽창계수, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여, 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창시 상기 핵연료봉의 최종밀도를 계산하는 단계와; 상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 피복재의 반경방향 열팽창시 밀도변화를 나타내는 상기 피복재의 가상밀도를 각각 계산하는 단계와, 상기 피복재의 가상밀도, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여, 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 열팽창시 각 최종밀도를 계산하는 단계와, 상기 피복재 반경방향 열팽창계수를 이용하여 상기 감속재의 열팽창시 밀도변화를 나타내는 상기 감속재의 가상밀도를 계산하는 단계와; 상기 감속재의 가상밀도, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수의 비를 이용하여 상기 감속재의 최종밀도를 계산하는 단계와; 상기 핵연료봉의 팽창 반지름과 상기 최종 밀도에 따라 상기 핵연료봉의 열팽창을 모사하고, 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 각 최종밀도에 따라 상기 피복재, 상기 지지격자 및 상기 상하 구조재의 열팽창을 모사하고, 상기 감속재의 최종밀도에 따라 상기 감속재의 열팽창을 모사하는 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0038] 본 발명은, 핵연료집합체의 열팽창 모사시 핵연료집합체를 구성하는 구성요소들 중에서 핵연료봉에 대해서는 반

경방향 열팽창에 따른 기하구조 크기 변화와 축방향 열팽창에 따른 밀도 변화를 적용하여 모사하고, 나머지 구성요소들에 대해서는 기하구조 크기 변화를 적용하지 않고 열팽창에 따른 밀도 변화를 적용하여 모사하는 하이브리드 방법을 사용함으로써, 계산 복잡도와 계산 시간을 최소화시키면서도 보다 정확한 열팽창 모사가 가능한 이점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0039] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 핵연료 집합체의 축방향 구조를 개략적으로 나타낸 도면이다.

도 2는 본 발명의 실시예에 따른 핵연료 집합체의 반경방향 구조를 개략적으로 나타낸 도면이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 핵연료 집합체의 열팽창 모사를 위한 하이브리드 방법을 개략적으로 나타낸 순서도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0040] 이하, 첨부된 도면을 참조하여, 본 발명의 실시예에 대해 설명하면 다음과 같다.

[0041] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 핵연료 집합체의 축방향 구조를 개략적으로 나타낸 도면이다. 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 핵연료 집합체의 반경방향 구조를 개략적으로 나타낸 도면이다.

[0042] 도 1 및 도 2를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 핵연료 집합체(100)는, 가압 경수로 원자로에 포함된 것으로 예를 들어 설명한다.

[0043] 상기 핵연료 집합체(100)는, 핵연료봉(110), 피복재(120), 감속재(130), 지지격자(140) 및 상하 구조재(150)를 포함한다.

[0044] 상기 핵연료봉(Fuel rod)(110)은, 축방향으로 길이가 길게 배치되고 연료 펠릿을 포함하며, 복수개가 다발로 묶여져 집합체를 이룬다.

[0045] 상기 피복재(Cladding)(120)는, 상기 핵연료봉(110)을 둘러싸도록 구비된다.

[0046] 상기 감속재(130)는, 핵분열의 연쇄반응을 지속시키기 위하여 중성자를 감소시키는 물질이며, 냉각재라고도 하며 유체이다.

[0047] 상기 지지격자(140)와 상기 상하 구조재(150)는, 상기 복수의 핵연료봉(110)을 지지하기 위한 구조물이다.

[0048] 한편, 상기와 같이 구성된 본 발명의 실시예에 따른 핵연료 집합체의 열팽창 모사를 위한 하이브리드 방법을 설명하면, 다음과 같다.

[0049] 상기와 같이 구성된 핵연료 집합체(100)를 포함한 원자로 노심 해석시, 원자로 노심 모사 프로그램을 이용하여 원자로 운전을 시뮬레이션하는 바, 상기 핵연료 집합체(100)의 열팽창으로 인한 변화를 보다 정확하게 모사해야 한다. 여기서, 상기 원자로 노심 모사 프로그램은, 원자로 노심을 모사할 수 있도록 미리 설정된 프로그램이며, 컴퓨터나 제어부 등에 의해 수행된다.

[0050] 상기 원자로의 노심 해석은 결정론적 방법에 기반한 STREAM(Steady state and Transient REactor Analysis code with Method of characteristics)코드를 이용하거나 확률론적 방법에 기반한 몬테칼로(MCS, Monte Carlo Simulation) 코드를 이용할 수 있다.

[0051] 또한, 본 실시예에서는, 상기 핵연료 집합체(100)를 균일 등방향 열팽창 모델로 모델링하여, 상기 균일 등방향 열팽창 모델에 대한 열팽창을 모사한다.

[0052] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 핵연료 집합체의 열팽창 모사를 위한 하이브리드 방법을 개략적으로 나타낸 순서도이다.

[0053] 도 3을 참조하면, 먼저, 상기 원자로 노심 모사 프로그램에 상기 핵연료집합체(100)의 구성요소들에 대해 미리 설정된 입력값들을 입력한다.(S21)

[0054] 상기 입력값들은, 상기 핵연료봉(110), 상기 피복재(120), 상기 감속재(130) 및 상기 지지격자(140)의 각 초기 온도(T_0)와 팽창 온도(T), 초기 반지름(R_0), 초기 메시 수(Z_0) 및 초기 밀도(ρ_0)를 포함하는 것으로 예를 들어 설명한다.

- [0055] 상기 입력값들이 입력되면, 상기 핵연료집합체(100)의 구성요소들에 대한 열팽창계수를 계산한다.(S22)
- [0056] 상기 열팽창계수는, 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial},\text{fuel}}(T,T_0)$), 핵연료봉 축방향 열팽창계수($f_{\text{axial},\text{fuel}}(T_{\text{avg}},T_0)$), 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial},\text{clad}}(T,T_0)$)를 포함하는 것으로 예를 들어 설명한다.
- [0057] 본 실시예에서는, 상기 감속재(130), 상기 지지격자(140) 및 상기 상하구조재(150)에 대한 열팽창 모사시 상기 피복재(120)에 대한 열팽창계수를 적용하는 것으로 예를 들어 설명한다. 다만, 이에 한정되지 않고, 상기 감속재(130), 상기 지지격자(140) 및 상기 상하구조재(150)에 대한 열팽창계수도 각각 계산하는 것도 물론 가능하다.
- [0058] 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial},\text{fuel}}(T,T_0)$)는 상기 핵연료봉의 초기 온도(T_0)와 팽창 온도(T)에 대한 함수이다. 즉, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial},\text{fuel}}(T,T_0)$)는 상기 핵연료봉의 초기 온도(T_0)와 팽창 온도(T)를 이용하여 계산될 수 있다. 여기서, 팽창 온도(T)는 열팽창이 발생하는 상기 핵연료봉의 현재 온도이다.
- [0059] 상기 핵연료봉 축방향 열팽창계수($f_{\text{axial},\text{fuel}}(T_{\text{avg}},T_0)$)는 상기 핵연료봉의 초기 온도(T_0)와 상기 핵연료봉의 축방향 온도의 평균값(T_{avg})에 대한 함수이다. 즉, 상기 핵연료봉 축방향 열팽창계수($f_{\text{axial},\text{fuel}}(T_{\text{avg}},T_0)$)는 상기 핵연료봉의 초기 온도(T_0)와 상기 핵연료봉의 축방향 온도의 평균값(T_{avg})를 이용하여 계산될 수 있다. 상기 핵연료봉(110)은 축방향으로 구획된 메시들마다 온도값이 모두 다르게 나타나기 때문에, 각 메시들의 팽창 온도값을 평균한 평균값(T_{avg})을 사용한다.
- [0060] 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial},\text{clad}}(T,T_0)$)는 상기 피복재(120)의 초기 온도(T_0)와 팽창 온도(T)에 대한 함수이다. 즉, 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial},\text{clad}}(T,T_0)$)는 상기 피복재(120)의 초기 온도(T_0)와 팽창 온도(T)를 이용하여 계산될 수 있다. 여기서, 팽창 온도(T)는 열팽창이 발생하는 상기 피복재의 현재 온도이다.
- [0061] 다음으로, 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial},\text{fuel}}(T,T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial},\text{clad}}(T,T_0)$)의 비($\Delta f=f_{\text{radial},\text{fuel}}(T,T_0)/f_{\text{radial},\text{clad}}(T,T_0)$)를 계산한다.(S23)
- [0062] 다음으로, 상기 핵연료봉(110)과 상기 피복재(120)에 대한 각각의 열팽창계수가 계산되면, 상기 구성요소의 교체 여부를 판단한다.(S24)
- [0063] 상기 핵연료 집합체(100)를 구성하는 구성요소들 중에서 상기 감속재(130)만 유체이고, 나머지는 상기 핵연료봉(110), 상기 피복재(120)와 상기 지지격자(140)는 고체이다. 후술하는 가상밀도는 고체와 유체에 따라 다르게 계산되어야 하기 때문에, 고체 여부를 판단한다.
- [0064] 상기 고체라고 판단되면, 상기 구성요소가 상기 핵연료봉(110)인지 판단한다.(S24)
- [0065] 상기 구성요소가 상기 핵연료봉(110)이면, 상기 핵연료봉(110)의 반경방향 열팽창에 따른 팽창 반지름(R)과, 상기 핵연료봉(110)의 축방향 열팽창에 따른 상기 핵연료봉(110)의 가상밀도($\rho_{\text{vir},\text{fuel}}$)를 계산한다.(S31)
- [0066] 상기 핵연료봉의 가상밀도($\rho_{\text{vir},\text{fuel}}$)는 아래 수학적 식 1에 의해 계산된다.

수학적 식 1

$$\rho_{\text{vir},\text{fuel}} = \rho_0 \frac{1}{f_{\text{radial},\text{clad}}^2(T, T_0)}$$

- [0067]
- [0068] 상기 수학적 식 1에서 $\rho_{\text{vir},\text{fuel}}$ 은 핵연료봉의 가상밀도, ρ_0 는 핵연료봉의 초기 밀도, T 는 핵연료봉의 팽창 온도, T_0 는 핵연료봉의 초기 온도, $f_{\text{radial},\text{clad}}(T,T_0)$ 는 피복재 반경방향 열팽창계수이다.
- [0069] 상기 수학적 식 1을 참조하면, 상기 핵연료봉의 가상밀도($\rho_{\text{vir},\text{fuel}}$)는, 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{\text{radial},\text{clad}}(T,T_0)$)를 이용하여 계산된다.

[0070] 다음으로, 상기 핵연료봉의 가상밀도($\rho_{vir, fuel}$), 상기 핵연료봉 축방향 열팽창계수($f_{axial, fuel}(T_{avg}, T_0)$), 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{radial, fuel}(T, T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{radial, clad}(T, T_0)$)의 비($\Delta f = f_{radial, fuel}(T, T_0) / f_{radial, clad}(T, T_0)$)를 이용하여, 상기 핵연료봉의 축방향 열팽창에 따른 최종밀도(ρ_{fuel})를 계산한다.(S32)

[0071] 상기 핵연료봉의 최종밀도(ρ_{fuel})는 아래 수학적 식 2에 의해 계산된다.

$$\rho_{fuel} = \rho_{vir, fuel} \frac{1}{\Delta f^2 f_{axial, fuel}(T_{avg}, T_0)}$$

[0072]

[0073] 상기 수학적 식 2에서, ρ_{fuel} 는 핵연료봉의 최종 밀도, $\rho_{vir, fuel}$ 은 핵연료봉의 가상밀도, T_{avg} 는 핵연료봉의 노심 평균 온도, T_0 는 핵연료봉의 초기 온도, $f_{axial, fuel}(T_{avg}, T_0)$ 는 핵연료봉 축방향 열팽창계수이고, Δf 는 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{radial, fuel}(T, T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{radial, clad}(T, T_0)$)의 비이다.

[0074] 또한, 상기 핵연료봉의 팽창 반지름(R)은, 아래 수학적 식 3에 의해 계산된다.

$$R = R_0 \times f_{radial, fuel}(T, T_0)$$

[0075]

[0076] 여기서, R은 상기 핵연료봉의 반경방향 열팽창에 따른 팽창 반지름이고, 상기 R_0 는 상기 핵연료봉의 초기 반지름이다.

[0077] 상기 수학적 식 3을 참조하면, 상기 핵연료봉의 팽창 반지름(R)은, 상기 핵연료봉의 초기 반지름(R_0)에 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{fuel}(T, T_0)$)를 곱하여 계산될 수 있다.

[0078] 상기과 같이 상기 핵연료봉의 팽창 반지름(R)과 상기 핵연료봉의 최종 밀도(ρ_{fuel})가 계산되면, 계산된 값을 적용하여 상기 핵연료봉(110)의 열팽창을 모사할 수 있다.(S33)

[0079] 즉, 상기 핵연료봉(110)에 대한 반경방향 열팽창은 반지름 변화에 따른 기하구조 크기 변화를 이용하여 모사하고, 상기 핵연료봉(110)에 대한 축방향 열팽창은 축방향 열팽창에 따른 밀도 변화를 이용하여 모사할 수 있다.

[0080] 상기과 같이, 상기 핵연료봉(110)에 대해 기하구조 크기 변화와 밀도 변화를 모두 고려한 하이브리드 방법을 적용하여 열팽창을 모사함으로써, 계산 시간과 자원이 최소화될 수 있다.

[0081] 한편, 상기 단계(S30)에서 상기 구성요소가 교체되어 상기 핵연료봉(110)이 아닌 경우, 상기 피복재(120), 상기 지지격자(140) 및 상기 상하 구조재(150)에 대한 가상밀도를 계산한다.(S41)

[0082] 본 실시예에서는, 상기 피복재(120), 상기 지지격자(140) 및 상기 상하구조재(150)는 상기 피복재(120)에 대한 가상밀도($\rho_{vir, clad}$)를 적용하는 것으로 예를 들어 설명한다. 상기 피복재의 가상밀도($\rho_{vir, clad}$)는 반경방향에 대해서만 계산한다.

[0083] 상기 피복재의 가상밀도($\rho_{vir, clad}$)는 상기 피복재의 열팽창시 밀도 변화를 나타낸다. 상기 피복재의 가상밀도($\rho_{vir, clad}$)는 아래 수학적 식 4에 의해 계산된다.

수학식 4

$$\rho_{vir,clad} = \rho_0 \frac{1}{f_{radial,clad}^2(T, T_0)}$$

[0084]

[0085] 여기서, $\rho_{vir,clad}$ 은 피복재의 가상밀도, ρ_0 는 피복재의 초기 밀도, T 는 피복재의 팽창 온도, T_0 는 피복재의 초기 온도, $f_{radial,clad}(T, T_0)$ 는 피복재 반경방향 열팽창계수이다.

[0086] 상기 수학식 4를 참조하면, 상기 피복재의 가상밀도($\rho_{vir,clad}$)는 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{radial,clad}(T, T_0)$)를 이용하여 계산된다.

[0087] 상기 피복재의 가상밀도($\rho_{vir,clad}$)가 계산되면, 상기 피복재(120), 상기 지지격자(140) 및 상기 상하 구조재(150)의 최종 밀도를 계산한다.(S42)

[0088] 본 실시예에서는, 상기 피복재(120), 상기 지지격자(140) 및 상기 상하구조재(150)는 상기 피복재(120)의 최종밀도(ρ_{clad})를 적용하는 것으로 예를 들어 설명한다

[0089] 상기 피복재의 최종 밀도(ρ_{clad})는 아래 수학식 5에 의해 계산된다.

수학식 5

$$\rho_{clad} = \frac{\rho_{vir,clad}}{\Delta f}$$

[0090]

[0091] 수학식 5에서 ρ_{clad} 은 피복재의 최종 밀도, Δf 는 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{radial,fuel}(T, T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{radial,clad}(T, T_0)$)의 비이다.

[0092] 상기와 같이 상기 피복재의 최종 밀도(ρ_{clad})가 계산되면, 계산된 값을 적용하여 상기 피복재(120), 상기 지지격자(140) 및 상기 상하구조재(150)의 열팽창을 모사할 수 있다.(S33)

[0093] 이 때, 상기 피복재(120), 상기 지지격자(140) 및 상기 상하구조재(150)의 각 팽창 반지름(R)은 각각의 초기 반지름(R_0)과 동일하게 유지된다.

[0094] 즉, 상기 피복재(120), 상기 지지격자(140) 및 상기 상하구조재(150)에 대해서는 열팽창에 따른 크기는 변화시키지 않고, 밀도만 변화시켜 열팽창을 모사한다.

[0095] 한편, 상기 단계(S24)에서 상기 구성요소가 상기 고체가 아니고 유체이면, 상기 감속재(130)(Moderator)의 가상 밀도($\rho_{vir,mod}$)를 계산한다.(S51)

[0096] 상기 감속재(130)의 가상밀도($\rho_{vir,mod}$)는 상기 감속재(130)의 열팽창에 따라 변화된 가상의 밀도이다. 상기 감속재(130)의 가상밀도($\rho_{vir,mod}$)는 반경방향에 대한 밀도 변화만 고려한다.

[0097] 상기 감속재(130)의 가상밀도($\rho_{vir,mod}$)는 아래 수학식 6에 의해 계산된다.

수학식 6

$$\rho_{vir,mod} = \rho_0 f_{radial,clad}(T, T_0)$$

[0098]

[0099] 상기 수학식 6에서, $\rho_{vir,mod}$ 은 감속재의 가상밀도, ρ_0 는 감속재의 초기 밀도, T 는 감속재의 팽창 온도, T_0 는 감속재의 초기 온도, $f_{radial,clad}(T, T_0)$ 는 피복재 반경방향 열팽창계수이다.

[0100] 상기 감속재(130)의 가상밀도($\rho_{vir,mod}$)가 계산되면, 상기 감속재의 최종 밀도(ρ_{mod})를 계산한다.(S52)

[0101] 상기 감속재의 최종 밀도(ρ_{mod})는 아래 수학식 7에 의해 계산된다.

수학식 7

$$\rho_{mod} = \frac{\rho_{vir,mod}}{\Delta f}$$

[0102]

[0103] 상기 수학식 7에서, ρ_{mod} 은 감속재의 최종밀도, $\rho_{vir,mod}$ 은 감속재의 가상밀도, Δf 는 상기 핵연료봉 반경방향 열팽창계수($f_{radial,fuel}(T, T_0)$)와 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{radial,clad}(T, T_0)$)의 비이다.

[0104] 상기과 같이 상기 감속재의 최종 밀도(ρ_{mod})가 계산되면, 계산된 값을 적용하여 상기 감속재(130)의 열팽창을 모사할 수 있다.(S33)

[0105] 이 때, 상기 감속재(130)의 팽창 반지름(R)은 초기 반지름(R_0)과 동일하게 유지된다.

[0106] 즉, 상기 감속재(130)에 대한 열팽창을 모사시에는 상기 감속재(130)의 크기는 변화시키지 않고 상기 감속재(130)의 밀도만 변화시켜 상기 감속재(130)의 열팽창을 모사한다.

[0107] 또한, 상기 핵연료봉(110), 상기 피복재(120), 상기 지지격자(140 및 상기 상하구조재(150)의 최종 메시수(Z)를 계산하여, 열팽창 모사시 적용할 수 있다.

[0108] 상기 최종 메시수(Z)는 아래 수학식 8에 의해 계산된다.

수학식 8

$$Z = Z_0 f_{axial,fuel}$$

[0109]

[0110] 여기서, Z 는 최종 메시 수, Z_0 는 초기 메시 수, $f_{axial,fuel}$ 은 핵연료봉 축방향 열팽창계수이다.

[0111] 또한, 상기 입력과정(S21)에서 상기 핵연료 집합체(100)의 핀-피치(pin-pitch) 초기값(P_0)을 입력하고, 상기 피복재 반경방향 열팽창계수($f_{radial,clad}(T, T_0)$)를 이용하여 열팽창시 핀-피치 값(P)을 계산하여 열팽창 모사시 적용할 수 있다.

[0112] 상기 핀-피치 값은 상기 핵연료 집합체(100)의 가로와 세로 사이즈 비율을 나타낸다.

[0113] 상기 열팽창시 핀-피치 값(P)은 아래 수학식 9에 의해 계산된다.

수학식 9

$$P = \frac{P_0}{f_{radial, clad}}$$

[0114]

[0115] 상기와 같이, 본 발명에서는 상기 핵연료봉(110)의 열팽창 모사시 반경방향 열팽창에 대해서는 반경방향 열팽창에 의한 기하구조 크기 변화를 적용하여 모사하고, 축방향 열팽창에 대해서는 축방향 열팽창에 따른 밀도 변화를 적용하여 모사한다. 즉, 기하구조 크기 변화와 밀도 변화를 고려하여 열팽창을 모사함으로써, 기하구조 크기 변화만을 적용하는 경우에 비해 계산 복잡도와 계산 시간을 줄일 수 있으면서도 열팽창 모사 정확도를 확보할 수 있다.

[0116] 또한, 상기 피복재(120), 상기 지지격자(140 및 상기 상하구조재(150)의 열팽창 모사시, 반경방향 열팽창에 따른 밀도 변화를 적용하여 모사함으로써 계산 복잡도와 계산 시간을 줄일 수 있으면서도 열팽창 모사 정확도를 확보할 수 있다.

[0117] 한편, 표 1 및 표 2는 핵연료집합체를 구성하는 구성요소들에 대해 열팽창에 의한 기하구조 크기 변경을 시키는 종래의 방법(Explicit)과 본 발명의 실시예에 따른 하이브리드 방법을 적용한 실험 결과를 비교하여 나타낸다.

[0118] 표 1과 표 2를 참조하면, 종래의 방법과 하이브리드 방법의 결과는 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 1

물질	T [K]			
	기준재 (CZP)	Case 1 - HZP	Case 2 - HFP	Case 3 - HFP
핵연료	300	600	900	1200
감속재	300	600	600	600
구조재	300	600	600	600

[0119]

표 2

방법	Case	k_{eff}^{case}	1σ	$k_{eff}^{case} - k_{eff}^{ref}$ [pcm]	$1\sigma_T$ [pcm]
Explicit	Case 1	0.99498	0.00004	-24	5
	Case 2	0.99453	0.00004	-69	5
	Case 3	0.99399	0.00004	-123	6
Hybrid	Case 1	0.99493	0.00004	-29	5
	Case 2	0.99459	0.00004	-63	5
	Case 3	0.99397	0.00004	-125	5

[0120]

[0121] 표 1에서, Case1-HZP는 Hot Zero Power(고온 영출력) 조건, Case 2-HFP는 Hot Full Power(고온 전출력) 조건, Case 3-HFP는 Hot Full Power(고온 전출력) 조건이며, 각 조건에서 핵연료, 감속재 및 구조재의 온도를 나타낸다.

[0122] 표 2에서, k_{eff} 는 유효 증배계수이고, 1σ 는 유효 증배계수에 대한 표준편차를 나타낸다.

[0123] 표 1 및 표 2를 참조하면, 각 Case에 대한 유효 증배계수의 값이 기존의 방법(Explicit)과 본 발명에 따른 방법(Hybrid)이 거의 유사하다는 것을 알 수 있다.

[0124] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 하이브리드 방법은, 계산 복잡도와 계산 시간은 줄일 수 있으면서도 정확한 모사 결과를 얻을 수 있다.

[0125] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서,

본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

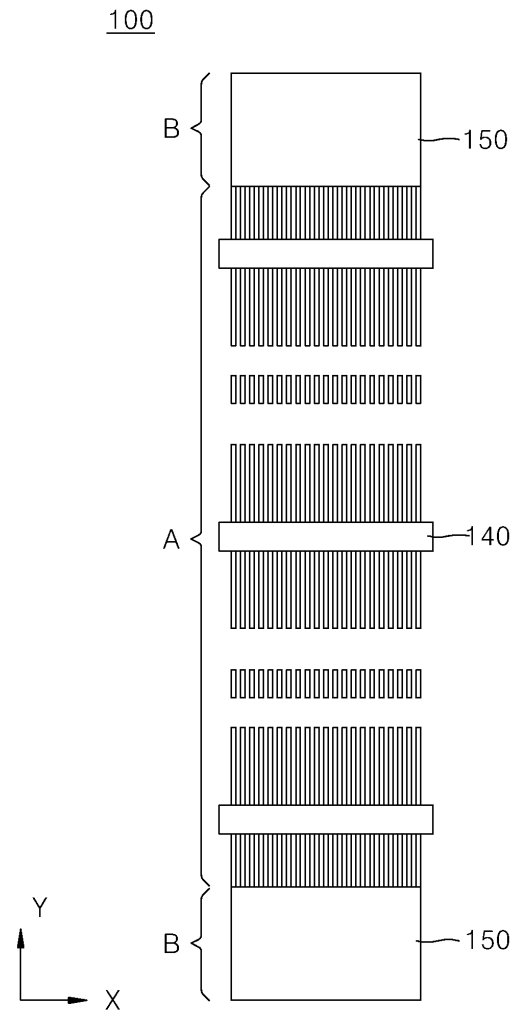
부호의 설명

[0126]

100: 핵연료 집합체	110: 핵연료봉
120: 피복재	130: 감속재
140: 지지격자	150: 상하 구조재

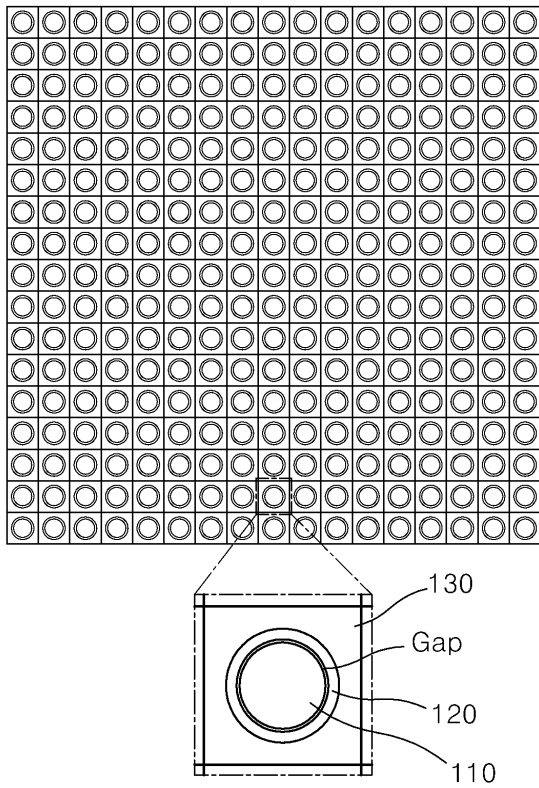
도면

도면1



도면2

100



도면3

