(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0065979
(43) 공개일자 2024년05월14일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 17/08 (2006.01) *G06F 17/10* (2006.01)
G06F 30/20 (2020.01)
(52) CPC특허분류
G21C 17/08 (2013.01)
G06F 17/10 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2022-0147369
(22) 출원일자 2022년11월07일
심사청구일자 2022년11월07일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
이덕중
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
박찬오
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
리앤목특허법인

전체 청구항 수 : 총 11 항

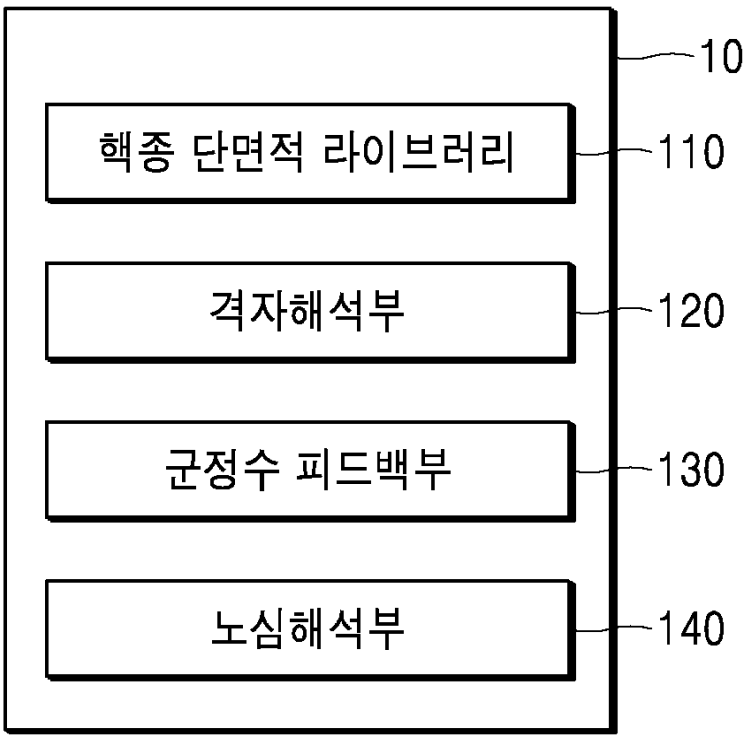
(54) 발명의 명칭 **노심 해석 장치 및 노심 해석 방법**

(57) 요 약

본 발명은 핵종별 단면적 정보를 생성하기 위한 데이터를 포함하는 핵종 단면적 라이브러리, 핵연료 집합체 또는 핵연료봉에 대하여 2차원 수송 해석을 수행하여 평균 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제1다군 군정수 세트, 고온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제2다군 군정수 세트 및 저온의 감속재 환경에서의 연소 효과

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도4



를 반영한 제3다군 군정수 세트를 생성하는 격자해석부 및 원자로 노심을 복수 개의 상부 노드와 복수 개의 하부 노드로 분할하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제2다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 상부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제3다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 하부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하는 군정수 피드백부 및 상기 최종 군정수들을 이용하여 핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 산출하는 노심해석부를 포함하는, 노심 해석 장치 및 노심 해석 방법을 제공한다.

(52) CPC특허분류
G06F 30/20 (2020.01)
Y02E 30/30 (2020.08)

(72) 발명자
박진수
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
조윤기
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
강영석
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711154972
과제번호	2019M2D2A1A03058371
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	원자력기초연구지원사업
연구과제명	원전실설계 적용 가능한 세계 선도형 전노심 수송해석 수치원자로 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

핵종별 단면적 정보를 생성하기 위한 데이터를 포함하는 핵종 단면적 라이브러리;

핵연료 집합체 또는 핵연료봉에 대하여 2차원 수송 해석을 수행하여 평균 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제1다군 군정수 세트, 고온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제2다군 군정수 세트 및 저온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제3다군 군정수 세트를 생성하는 격자해석부; 및

원자로 노심을 복수 개의 상부 노드와 복수 개의 하부 노드로 분할하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제2다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 상부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제3다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 하부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하는 군정수 피드백부; 및

상기 최종 군정수들을 이용하여 핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 산출하는 노심해석부;를 포함하는, 노심 해석 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 평균 감속재 환경은 상기 원자로 노심의 전체 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되고, 상기 고온의 감속재 환경은 상기 복수 개의 상부 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되고, 상기 저온의 감속재 환경은 상기 복수 개의 하부 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되는, 노심 해석 장치.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 격자해석부는 핵종들의 연속적인 에너지를 n 개의 군으로 분할하고,

각 군에 대하여 제1다군 군정수 데이터, 제2다군 군정수 데이터 및 제3다군 군정수 데이터를 생성하고,

상기 제1다군 군정수 데이터, 제2다군 군정수 데이터 및 제3다군 군정수 데이터 각각에 대하여 상기 핵종들의 연속적인 에너지를 m(2≤m≤n) 개의 군으로 축약하여 상기 제1다군 군정수 세트, 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트를 생성하는, 노심 해석 장치.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 군정수 피드백부는 연소도 가중 평균 감속재 온도를 이용하여 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트 각각의 가중치를 결정하고,

상기 연소도 가중 평균 감속재 온도는 아래의 수학식 1에 의하여 산출되고,

[수학식 1]

$$T_{mod,l}^{Hist}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{k}(T_{mod,i} \cdot \Delta BU_i)}{\sum_{i=1}^{k} \Delta BU_i}$$

여기서, $T_{mod,l}^{Hist}(k)$는 l번 노드의 k번째 연소도 스텝에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, $T_{mod,i}$는 상기 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스텝에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, ΔBU_i는 상기 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스텝에서 증가하는 연소도인, 노심 해석 장치.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 군정수 피드백부는 상기 최종 군정수들 각각을 아래의 수학식 2을 이용하여 산출하고,

[수학식 2]

$$XS_{final,l} = \frac{\left|T_{mod}^{ref,0} - T_{mod,l}^{Hist}\right| \cdot XS_{1,l} + \left|T_{mod}^{ref,1} - T_{mod,l}^{Hist}\right| \cdot XS_{0,l}}{\left|T_{mod}^{ref,1} - T_{mod}^{ref,0}\right|}$$

여기서, $XS_{final,l}$ 은 상기 l번 노드의 최종 군정수이고, $T_{mod}^{ref,0}$ 은 상기 제1다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{0,l}$ 은 상기 제1다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고,

상기 l번 노드가 상기 복수 개의 상부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$ 은 상기 제2다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$ 은 상기 제2다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고,

상기 l번 노드가 상기 복수 개의 하부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$ 은 상기 제3다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$ 은 상기 제3다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수인, 노심 해석 장치.

청구항 6

노심 해석 장치를 이용한 노심 해석 방법에 있어서,

핵종 단면적 라이브러리로부터 핵종별 단면적 정보를 생성하기 위한 데이터를 획득하는 단계;

핵연료 집합체 또는 핵연료봉에 대하여 2차원 수송 해석을 수행하여 평균 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제1다군 군정수 세트, 고온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제2다군 군정수 세트 및 저온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계;

원자로 노심을 복수 개의 상부 노드와 복수 개의 하부 노드로 분할하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제2다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 상부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제3다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 하부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하는 단계; 및

상기 최종 군정수들을 이용하여 핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 산출하는 단계;를 포함하는, 노심 해석 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 제1다군 군정수 세트, 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계에서,

상기 평균 감속재 환경은 상기 원자로 노심의 전체 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되고, 상기 고온의 감속재 환경은 상기 복수 개의 상부 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되고, 상기 저온의 감속재 환경은 상기 복수 개의 하부 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되는, 노심 해석 방법.

청구항 8

제6항에 있어서,

상기 제1다군 군정수 세트, 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계는,

핵종들의 연속적인 에너지를 n 개의 군으로 분할하는 단계;

각 군에 대하여 제1다군 군정수 데이터, 제2다군 군정수 데이터 및 제3다군 군정수 데이터를 생성하는 단계; 및

상기 제1다군 군정수 데이터, 상기 제2다군 군정수 데이터 및 상기 제3다군 군정수 데이터 각각에 대하여 상기 핵종들의 연속적인 에너지를 m(2≤m≤n) 개의 군으로 축약하여 상기 제1다군 군정수 세트, 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계;를 포함하는, 노심 해석 방법.

청구항 9

제6항에 있어서,

상기 최종 군정수들을 산출하는 단계는,

연소도 가중 평균 감속재 온도를 이용하여 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트 각각의 가중치를 결정하는 단계;를 포함하고,

상기 연소도 가중 평균 감속재 온도는 아래의 수학식 1에 의하여 산출되고,

[수학식 1]

$$T_{mod,l}^{Hist}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{k}(T_{mod,i} \cdot \Delta BU_i)}{\sum_{i=1}^{k} \Delta BU_i}$$

여기서, $T_{mod,l}^{Hist}(k)$는 l번 노드의 k번째 연소도 스탭에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, $T_{mod,i}$는 상기 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스탭에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, ΔBU_i는 상기 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스탭에서 증가하는 연소도인, 노심 해석 방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 최종 군정수들 각각은 아래의 수학식 2에 의하여 산출되고,

[수학식 2]

$$XS_{final,l} = \frac{|T_{mod}^{ref,0} - T_{mod,l}^{Hist}| \cdot XS_{1,l} + |T_{mod}^{ref,1} - T_{mod,l}^{Hist}| \cdot XS_{0,l}}{|T_{mod}^{ref,1} - T_{mod}^{ref,0}|}$$

여기서, $XS_{final,l}$은 상기 l번 노드의 최종 군정수이고, $T_{mod}^{ref,0}$은 상기 제1다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{0,l}$은 상기 제1다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고,

상기 l번 노드가 상기 복수 개의 상부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$은 상기 제2다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$은 상기 제2다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고,

상기 l번 노드가 상기 복수 개의 하부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$은 상기 제3다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$은 상기 제3다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수인, 노심 해석 방법.

청구항 11

컴퓨팅 장치를 이용하여 제6항 내지 제10항 중 어느 한 항의 방법을 실행시키기 위하여 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체에 저장된 컴퓨터 프로그램.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 노심 해석 장치 및 노심 해석 방법에 관한 것으로서, 더 상세하게는 축 방향 출력 편차를 보다 정밀하게 예측할 수 있는 노심 해석 장치 및 노심 해석 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 일반적으로 원자력 발전소의 안전하고 효율적인 가동을 위하여 원자로 노심 설계가 수행된다. 원자로 노심 설계는 핵 설계, 연료봉 설계, 기계 설계, 열수력 설계 및 안전 해석을 포함한다.

[0003] 핵 설계는 원자로 노심 해석을 통하여 핵연료 장전 모형을 생성하고, 이를 바탕으로 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 계산한다. 계산된 자료를 바탕으로 이후 연료봉 설계, 기계 설계, 열수력 설계 및 안전 해석이 수행되므로, 다양한 핵연료 장전 모형을 생성하고, 최적의 핵연료 장전 모형이 선정될 때까지 노심의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 반복적으로 계산한다.

[0004] 컴퓨팅 장치의 처리 시간을 감소시키면서도 보다 정밀한 계산 결과를 도출하기 위하여, 2단계 노심 해석 방법이 이용되고 있다. 2단계 노심 해석 방법은 핵연료 집합체(또는 핵연료봉)에 대하여 1단계 계산을 수행하고, 1단계 계산 결과를 이용하여 복수의 핵연료 집합체를 포함하는 원자로 노심에 대한 2단계 계산을 수행한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 그러나 이러한 종래의 노심 해석 방법은 계산 결과 값에 원자로 노심 내의 축 방향 감속재 온도 분포에 따른 핵반응도를 충분히 반영하지 못하는 문제점이 존재하였다.

[0006] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 포함하여 여러 문제점들을 해결하기 위한 것으로서, 축 방향 출력 편차를 보다 정밀하게 예측할 수 있는 노심 해석 장치 및 노심 해석 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다. 그러나 이러한 과제는 예시적인 것으로, 이에 의해 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.

과제의 해결 수단

[0007] 본 발명의 일 관점에 따르면, 핵종별 단면적 정보를 생성하기 위한 데이터를 포함하는 핵종 단면적 라이브러리, 핵연료 집합체 또는 핵연료봉에 대하여 2차원 수송 해석을 수행하여 평균 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제1다군 군정수 세트, 고온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제2다군 군정수 세트 및 저온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제3다군 군정수 세트를 생성하는 격자해석부 및 원자로 노심을 복수 개의 상부 노드와 복수 개의 하부 노드로 분할하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제2다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 상부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제3다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 하부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하는 군정수 피드백부 및 상기 최종 군정수들을 이용하여 핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 산출하는 노심해석부를 포함하는, 노심 해석 장치가 제공된다.

[0008] 일 실시예에서, 상기 평균 감속재 환경은 상기 원자로 노심의 전체 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되고, 상기 고온의 감속재 환경은 상기 복수 개의 상부 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되고, 상기 저온의 감속재 환경은 상기 복수 개의 하부 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용될 수 있다.

[0009] 일 실시예에서, 상기 격자해석부는 핵종들의 연속적인 에너지를 n 개의 군으로 분할하고, 각 군에 대하여 제1다군 군정수 데이터, 제2다군 군정수 데이터 및 제3다군 군정수 데이터를 생성하고, 상기 제1다군 군정수 데이터, 제2다군 군정수 데이터 및 제3다군 군정수 데이터 각각에 대하여 상기 핵종들의 연속적인 에너지를 $m(2 \leq m \leq n)$ 개의 군으로 축약하여 상기 제1다군 군정수 세트, 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트를 생성할 수 있다.

[0010] 일 실시예에서, 상기 군정수 피드백부는 연소도 가중 평균 감속재 온도를 이용하여 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트 각각의 가중치를 결정하고, 상기 연소도 가중 평균 감속재 온도는 아래의 수학식 1에 의하여 산출되고,

[0011] [수학식 1]

[0012] $$T_{mod,l}^{Hist}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{k}(T_{mod,i} \cdot \Delta BU_i)}{\sum_{i=1}^{k} \Delta BU_i}$$

[0013] 여기서, $T_{mod,l}^{Hist}(k)$는 l번 노드의 k번째 연소도 스탭에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, $T_{mod,i}$는 상기 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스탭에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, ΔBU_i는 상기 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스탭에서 증가하는 연소도일 수 있다.

[0014] 일 실시예에서, 상기 군정수 피드백부는 상기 최종 군정수들 각각을 아래의 수학식 2을 이용하여 산출하고,

[0015] [수학식 2]

[0016] $$XS_{final,l} = \frac{\left|T_{mod}^{ref,0} - T_{mod,l}^{Hist}\right| \cdot XS_{1,l} + \left|T_{mod}^{ref,1} - T_{mod,l}^{Hist}\right| \cdot XS_{0,l}}{\left|T_{mod}^{ref,1} - T_{mod}^{ref,0}\right|}$$

[0017] 여기서, $XS_{final,l}$은 상기 l번 노드의 최종 군정수이고, $T_{mod}^{ref,0}$은 상기 제1다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{0,l}$은 상기 제1다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고, 상기 l번 노드가 상기 복수 개의 상부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$은 상기 제2다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$은 상기 제2다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고, 상기 l번 노드가 상기 복수 개의 하부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$은 상기 제3다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$은 상기 제3다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수일 수 있다.

[0018] 본 발명의 다른 일 관점에 따르면, 노심 해석 장치를 이용한 노심 해석 방법에 있어서, 핵종 단면적 라이브러리로부터 핵종별 단면적 정보를 생성하기 위한 데이터를 획득하는 단계, 핵연료 집합체 또는 핵연료봉에 대하여 2차원 수송 해석을 수행하여 평균 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제1다군 군정수 세트, 고온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제2다군 군정수 세트 및 저온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계, 원자로 노심을 복수 개의 상부 노드와 복수 개의 하부 노드로 분할하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제2다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 상부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제3다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 하부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하는 단계 및 상기 최종 군정수들을 이용하여 핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 산출하는 단계를 포함하는, 노심 해석 방법이 제공된다.

[0019] 일 실시예에서, 상기 제1다군 군정수 세트, 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계에서, 상기 평균 감속재 환경은 상기 원자로 노심의 전체 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되고, 상기 고온의 감속재 환경은 상기 복수 개의 상부 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되고, 상기 저온의 감속재 환경은 상기 복수 개의 하부 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용될 수 있다.

[0020] 일 실시예에서, 상기 제1다군 군정수 세트, 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계는, 핵종들의 연속적인 에너지를 n 개의 군으로 분할하는 단계, 각 군에 대하여 제1다군 군정수 데이터, 제2다군 군정수 데이터 및 제3다군 군정수 데이터를 생성하는 단계 및 상기 제1다군 군정수 데이터, 상기 제2다군 군정수 데이터 및 상기 제3다군 군정수 데이터 각각에 대하여 상기 핵종들의 연속적인 에너지를 m(2≤m≤n) 개의 군으로 축약하여 상기 제1다군 군정수 세트, 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계를 포함할 수 있다.

[0021] 일 실시예에서, 상기 최종 군정수들을 산출하는 단계는, 연소도 가중 평균 감속재 온도를 이용하여 상기 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트 각각의 가중치를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 연소도 가중 평균 감속재 온도는 아래의 수학식 1에 의하여 산출되고,

[0022] [수학식 1]

[0023] $$T_{mod,l}^{Hist}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{k}(T_{mod,i} \cdot \Delta BU_i)}{\sum_{i=1}^{k} \Delta BU_i}$$

[0024] 여기서, $T_{mod,l}^{Hist}(k)$는 l번 노드의 k번째 연소도 스탭에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, $T_{mod,i}$는 상기 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스탭에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, ΔBU_i는 상기 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스탭에서 증가하는 연소도일 수 있다.

[0025] 일 실시예에서, 상기 최종 군정수들 각각은 아래의 수학식 2에 의하여 산출되고,

[0026] [수학식 2]

[0027] $$XS_{final,l} = \frac{\left|T_{mod}^{ref,0} - T_{mod,l}^{Hist}\right| \cdot XS_{1,l} + \left|T_{mod}^{ref,1} - T_{mod,l}^{Hist}\right| \cdot XS_{0,l}}{\left|T_{mod}^{ref,1} - T_{mod}^{ref,0}\right|}$$

[0028] 여기서, $XS_{final,l}$은 상기 l번 노드의 최종 군정수이고, $T_{mod}^{ref,0}$은 상기 제1다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{0,l}$은 상기 제1다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고, 상기 l번 노드가 상기 복수 개의 상부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$은 상기 제2다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$은 상기 제2다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고, 상기 l번 노드가 상기 복수 개의 하부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$은 상기 제3다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$은 상기 제3다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수일 수 있다.

[0029] 본 발명의 또 다른 일 관점에 따르면 상술한 노심 해석 방법을 실행시키기 위하여 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체에 저장된 컴퓨터 프로그램이 제공될 수 있다.

[0030] 전술한 것 외의 다른 측면, 특징, 이점이 이하의 도면, 특허청구범위 및 발명의 상세한 설명으로부터 명확해질 것이다.

[0031] 이러한 일반적이고 구체적인 측면이 시스템, 방법, 컴퓨터 프로그램, 또는 어떠한 시스템, 방법, 컴퓨터 프로그램의 조합을 사용하여 실시될 수 있다.

발명의 효과

[0032] 상기한 바와 같이 이루어진 본 발명의 일 실시예에 따르면, 원자로 노심 내의 축 방향 감속재 온도 분포를 반영하여 보다 정확한 노심 해석이 가능한 노심 해석 장치 및 노심 해석 방법을 구현할 수 있다. 물론 이러한 효과에 의해 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.

도면의 간단한 설명

[0033] 도 1은 원자로 노심을 개략적으로 도시하는 평면도이다.

도 2는 원자로 노심을 개략적으로 도시하는 측면도이다.

도 3은 원자로 노심 내의 축 방향 감속재 온도 분포를 도시하는 그래프이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 장치의 구성을 개략적으로 도시하는 블록도이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 방법의 각 단계를 개략적으로 도시하는 순서도이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 방법에 따라 산출한 최종 군정수를 적용하였을 때, 노드 연소도에 따른 거시적 핵분열 단면적을 나타낸 그래프이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 방법에 따라 산출한 최종 군정수를 적용하였을 때, 노드 연소도에 따른 축방향 출력 편차를 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0034] 본 발명은 다양한 변환을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세한 설명에 상세하게 설명하고자 한다. 본 발명의 효과 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시예들을 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예들에 한정되는 것이 아니라 다양한 형태로 구현될 수 있다.

[0035] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들을 상세히 설명하기로 하며, 도면을 참조하여 설명할 때 동일하거나 대응하는 구성 요소는 동일한 도면부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다.

[0036] 본 명세서에서 제1, 제2 등의 용어는 한정적인 의미가 아니라 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소와 구별하는 목적으로 사용되었다.

[0037] 본 명세서에서 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다.

[0038] 본 명세서에서 포함하다 또는 가지다 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 또는 구성요소가 존재함을 의미하는 것이고, 하나 이상의 다른 특징들 또는 구성요소가 부가될 가능성을 미리 배제하는 것은 아니다.

[0039] 본 명세서에서 "A 및/또는 B"은 A이거나, B이거나, A와 B인 경우를 나타낸다. 그리고, "A 및 B 중 적어도 하나"는 A이거나, B이거나, A와 B인 경우를 나타낸다.

[0040] 본 명세서에서 어떤 실시예가 달리 구현 가능한 경우에 특정한 단계의 순서는 설명되는 순서와 다르게 수행될 수도 있다. 예를 들어, 연속하여 설명되는 두 단계가 실질적으로 동시에 수행될 수도 있고, 설명되는 순서와 반대의 순서로 진행될 수 있다.

[0041] 본 명세서에서 "부", "요소", "수단", "구성"과 같은 용어는 넓게 사용될 수 있으며, 본 발명의 구성요소들이 기계적이고 물리적인 구성들로서 한정되는 것은 아니다. 상기 용어는 프로세서 등과 연계하여 소프트웨어의 일련의 처리들(routines)의 의미를 포함할 수 있다.

[0042] 본 명세서에서 연소도(Burnup)는 핵연료에서 발생한 에너지의 단위로, 핵분열 물질이 반응하여 소모된 정도를 나타내는 단위이다. 연소도는 하기 수학식 3과 같이 정의된다.

[0043] [수학식 3]

[0044] $$(\text{연소도}) = \frac{(\text{핵연료에서 발생한 총 에너지})}{(\text{장전된 핵물질의 질량})}$$

[0045] 본 명세서에서 연소도 스탭(Burnup step)은 연속적인 값을 갖는 연소도를 기설정된 구간으로 나눈 것을 의미한다.

[0046] 도면에서는 설명의 편의를 위하여 구성 요소들이 그 크기가 과장 또는 축소될 수 있다. 예컨대, 도면에서 나타난 각 구성의 크기 및 두께는 설명의 편의를 위해 임의로 나타내었으므로, 본 발명이 반드시 도시된 바에 한정되지 않는다.

[0047] 도 1은 원자로 노심을 개략적으로 도시하는 평면도이고, 도 2는 원자로 노심을 개략적으로 도시하는 측면도이다.

[0048] 도 1을 참조하면, 원자로 노심(NC)은 복수 개의 핵연료 집합체(NFA)를 포함할 수 있다. 하나의 핵연료 집합체(NFA)는 수백개의 핵연료봉(NFR) 및 핵연료봉(NFR)들을 지지하는 골격체를 포함할 수 있다. 각각의 핵연료봉(NFR)은 방사성 핵종을 포함할 수 있다.

[0049] 핵연료 집합체(NFA)는 복수의 타입으로 구비될 수 있다. 예컨대, 한국형 원자로 OPR-1000의 경우, 핵연료 집합체(NFA)는 15개 내외의 타입을 가질 수 있으며, 하나의 원자로 노심(NC)은 177개의 핵연료 집합체(NFA)들을 포함할 수 있다.

[0050] 도 2를 참조하면, 원자로 노심(NC)은 제1방향(DR1)으로 연장된 축(AX)을 따라 연장될 수 있다. 본 명세서에서 축 방향은 제1방향(DR1)을 의미한다. 축(AX)을 중심으로, 제1방향(DR1)으로 연장된 복수의 핵연료 집합체(NFA)들이 배치될 수 있다.

[0051] 원자로 노심(NC)은 복수의 노드들을 가질 수 있다. 하나의 노드는 유사한 환경 변수를 갖는 핵연료 집합체(NF

A)의 하위 단위를 의미한다. 원자로 노심(NC)을 상부 노심(NCU)과 하부 노심(NCL)으로 나눌 수 있다. 상부 노심(NCU)은 복수의 상부 노드들을 포함하고, 하부 노심(NCL)은 복수의 하부 노드들을 포함할 수 있다.

[0052] 도 1 및 도 2에는 도시되지 아니하였으나, 원자로 노심(NC)은 핵연료봉(NFR)으로부터 방출되는 고속의 중성자를 열 중성자로 감속시키기 위한 감속재 및 원자로 노심(NC)의 온도를 제어하기 위한 냉각재를 더 포함할 수 있다. 일 실시예에서, 상기 감속재는 고속의 중성자를 수소 원자와 충돌시키기 위한 경수일 수 있다. 이 때, 경수는 원자로의 하단부로 투입되어 상단부에서 방출될 수 있다. 따라서, 원자로 하단부에 위치하는 경수의 온도는 낮고, 상단부에 위치하는 경수의 온도는 높을 수 있다. 따라서, 상부 노심(NCU)은 고온의 감속재 환경에서 연소되며, 하부 노심(NCL)은 저온의 감속재 환경에서 연소될 수 있다. 다시 말해, 상부 노심(NCU)의 연소 환경과 하부 노심(NCL)의 연소 환경은 서로 상이할 수 있다.

[0053] 도 3은 원자로 노심 내의 축 방향 감속재 온도 분포를 도시하는 그래프이다.

[0054] 도 3은 OPR-1000 노형의 신고리 1호기의 노심 내 축 방향 높이에 따른 감속재의 온도 분포 시뮬레이션 결과를 도시하고 있다. 도 2를 참조하여 설명한 바와 같이, 원자로의 하단부로 감속재가 투입되므로, 노심 내 축 방향 높이가 0%인 점에서 감속재는 570 K의 가장 낮은 온도를 갖는다. 노심 내 축 방향 높이가 증가할 수록 감속재의 온도는 증가하여, 노심 내 축 방향 높이가 100%인 점에서 600 K의 가장 높은 온도를 갖는다.

[0055] 노심 내 축 방향에 따른 감속재의 온도 분포는 주기 초(BOC), 주기 중(MOC) 및 주기 말(EOC)에서 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 국내에서 운전 중인 다른 가압경수로 노형의 경우에도 공통적으로 적용될 수 있다.

[0056] 핵연료 온도 및 붕소 농도와 같은 다른 환경 변수들은 원자로 노심의 축 방향으로 뚜렷한 경향을 보이지 않으므로, 감속재의 온도가 원자로 노심의 축 방향 출력에 직접적인 영향을 미치는 것으로 추정할 수 있다.

[0057] 원자로 노심의 평균 감속재 온도(Avg.T)에 대한 기준 계산(basic calculation)을 수행하고, 최저 온도 보다 낮거나 높은 브랜치 온도(Branch T)들에 대한 브랜치 계산(branch calculation)을 수행하여 생성된 하나의 다군 군정수 세트를 노심 해석에 적용할 경우, 상부 노심(NCU)과 하부 노심(NCL)의 감속재 온도 차이를 결과에 반영하기 어렵다.

[0058] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 장치의 구성을 개략적으로 도시하는 블록도이다.

[0059] 도 4를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 장치(10)는 핵종 단면적 라이브러리(110), 격자해석부(120), 군정수 피드백부(130) 및 노심해석부(140)를 포함할 수 있다.

[0060] 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 장치(10)는 적어도 하나 이상의 프로세서(processor)에 해당하거나, 적어도 하나 이상의 프로세서를 포함할 수 있다. 이에 따라, 노심 해석 장치(10)는 마이크로프로세서나 범용 컴퓨터 시스템과 같은 다른 하드웨어 장치에 포함된 형태로 구동될 수 있다.

[0061] 노심 해석 장치(10)가 포함하는 핵종 단면적 라이브러리(110), 격자해석부(120), 군정수 피드백부(130) 및 노심해석부(140)는 기능적인 블록 구성들 및 다양한 처리 단계들로 나타내어질 수 있다. 이러한 기능 블록들은 특정 기능들을 실행하는 다양한 개수의 하드웨어 또는/및 소프트웨어 구성들로 구현될 수 있다. 예를 들어, 핵종 단면적 라이브러리(110), 격자해석부(120), 군정수 피드백부(130) 및/또는 노심해석부(140)는 하나 이상의 마이크로프로세서의 제어 또는 다른 제어 장치에 의해서 다양한 기능들을 실행할 수 있는, 메모리, 프로세싱, 로직(logic), 룩 업 테이블(look-up table) 등과 같은 직접 회로 구성들을 채용할 수 있다. 본 발명의 구성 요소들이 소프트웨어 프로그래밍 또는 소프트웨어 요소들로 실행될 수 있는 것과 유사하게, 본 발명의 구성요소들은 데이터 구조, 프로세스들, 루틴들 또는 다른 프로그래밍 구성들의 조합으로 구현되는 다양한 알고리즘을 포함하여, C, C++, 자바(Java), 어셈블러(assembler) 등과 같은 프로그래밍 또는 스크립팅 언어로 구현될 수 있다.

[0062] 핵종 단면적 라이브러리(110)는 핵종별 상세 중성자 반응의 단면적 정보를 생성하기 위한 데이터를 포함할 수 있다. 본 명세서에서 단면적은 원자핵이 중성자와 반응할 확률을 나타내는 척도로, 단면적이 크다는 것은 원자핵이 중성자와 반응할 확률이 높다는 것을 의미한다.

[0063] 격자해석부(120)는 핵종 단면적 라이브러리(110)로부터 핵종별 단면적 정보를 생성하기 위한 데이터를 로드하여 핵연료 집합체 또는 핵연료봉 각각에 대한 2차원 수송 해석을 수행하여 복수의 군정수들을 포함하는 제1다군 군정수 세트, 제2다군 군정수 세트 및 제3다군 군정수 세트를 생성할 수 있다.

[0064] 핵연료 내부에는 다양한 핵종들이 존재하므로, 각 핵종들에 대하여 연속적인 에너지에 따라 달라지는 단면적을

계산하는 것은 많은 연산 시간을 필요로 하며 컴퓨팅 장치의 자원을 소모할 수 있다. 따라서, 본 발명의 실시예들에 따른 노심 해석 장치(10)의 격자해석부(120)는 핵종들의 에너지를 작은 군(group)으로 분할하고, 해당 군에 속하는 단면적은 동일한 것으로 가정한다. 이 때, 군정수(Group constant)는 에너지 군에 따른 단면적를 포함하는 데이터를 의미한다.

[0065] 일 실시예에서, 핵종들의 연속적인 에너지는 n (1<n)개의 군으로 분할 될 수 있다. 예컨대, 핵종들의 연속적인 에너지는 72 개의 군으로 분할될 수 있으나 본 발명이 이에 한정되는 것은 아니다. 격자해석부(120)는 각 군에 대하여 기설정된 환경 변수를 선정하여 군정수를 산출할 수 있다. 환경 변수는 핵연료 집합체(또는 핵연료봉)의 연소도, 감속재의 온도, 핵연료의 온도 및 붕소 농도를 포함할 수 있다.

[0066] 예컨대, 격자해석부(120)는 연소도 스탭에 따라, 서로 다른 환경 변수를 갖는 28개의 스테이트 포인트(state point)를 설정할 수 있다. 이 중 기준 스테이트 포인트는 전체 원자로 노심의 평균적인 상황을 상정하여 결정될 수 있다. 기준 스테이트 포인트를 이용하여 기준 계산(base calculation)을 수행하고, 산출된 기준 계산값을 토대로 다른 스테이트 포인트들의 브랜치 계산(branch calculation)을 수행할 수 있다. 따라서, 브랜치 계산값들은 기준 계산값의 영향을 받는다.

[0067] 격자해석부(120)는 원자로 노심(NC, 도 2 참조) 전체 노드의 감속재 온도의 평균 값을 적용하여 기준 계산을 수행함으로써, 평균 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제1다군 군정수 데이터를 산출하고, 상부 노심(NCU, 도 2 참조)이 포함하는 복수 개의 상부 노드의 감속재 온도의 평균 값을 적용하여 기준 계산을 수행함으로써, 고온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제2다군 군정수 데이터를 산출하고, 하부 노심(NCL, 도 2 참조)이 포함하는 복수 개의 하부 노드의 감속재 온도의 평균 값을 적용하여 기준 계산을 수행함으로써, 저온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제3다군 군정수 데이터를 산출할 수 있다.

[0068] 격자해석부(120)는 제1다군 군정수 데이터, 제2다군 군정수 데이터 및 제3다군 군정수 데이터 각각을 m(2≤m≤n) 개의 군으로 축약한 제1다군 군정수 세트, 제2다군 군정수 세트 및 제3다군 군정수 세트를 생성할 수 있다.

[0069] 군정수 피드백부(130)는 원자로 노심(NC)을 복수 개로 분할하고, 각각의 노드에 대하여 개별적인 계산 및 노드 사이의 영향을 계산하기 위한 노드별 최종 군정수들을 산출할 수 있다.

[0070] 군정수 피드백부(130)는 원자로 노심(NC)을 상부 노심(NCU)에 위치하는 복수 개의 상부 노드들과, 하부 노심(NCL)에 위치하는 복수 개의 하부 노드들로 나눌 수 있다. 군정수 피드백부(130)는 각 노드의 환경에 따라 적절한 환경 변수를 적용하여 생성된 군정수를 사용하여 노드별 최종 군정수들을 산출할 수 있다. 이 때 노드별 최종 군정수는 아래의 수학식 4에 의하여 산출될 수 있다.

[0071] [수학식 4]

$$\Sigma(S_g, BU_g) = \Sigma_b(S_b, BU_g) + d\Sigma((S_g, BU_g)$$

[0072]

$\Sigma(S_g, BU_g)$ $\Sigma_b(S_b, BU_g)$

[0073] 여기서, 는 노드의 최종 군정수를 나타내고, 는 연소도에 따른 기준 계산값을 나타내고, $d\Sigma((S_g, BU_g)$ 는 연소도 및 다른 환경 변수에 따른 브랜치 계산값의 차이를 나타낸다.

[0074] 군정수 피드백부(130)는 상부 노드들 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하기 위해, 제1다군 군정수 세트와 제2다군 군정수 세트로부터 산출된 기준 계산값 및 브랜치 계산값을 적용할 수 있다. 마찬가지로, 군정수 피드백부(130)는 하부 노드들 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하기 위해, 제1다군 군정수 세트와 제3다군 군정수 세트로부터 산출된 기준 계산값 및 브랜치 계산값을 적용할 수 있다.

[0075] 군정수 피드백부(130)는 각 노드의 연소 경향을 파악하고, 제1다군 군정수 세트와 제2다군 군정수 세트 또는 제3다군 군정수 세트 사이의 적절한 값을 선택하기 위하여, 연소도 가중 평균 감속재 온도((Burnup weighted average moderator temperature)를 도입할 수 있다. 연소도 가중 평균 감속재 온도는 아래의 수학식 1에 의하여 산출될 수 있다.

[0076] [수학식 1]

[0077] $$T_{mod,l}^{Hist}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{k}(T_{mod,i} \cdot \Delta BU_i)}{\sum_{i=1}^{k} \Delta BU_i}$$

[0078] 여기서, $T_{mod,l}^{Hist}(k)$ 는 l번 노드의 k번째 연소도 스탭에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, $T_{mod,i}$ 는 상기 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스탭에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, ΔBU_i 는 상기 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스탭에서 증가하는 연소도이다.

[0079] 군정수 피드백부(130)는 연소도 가중 평균 감속재 온도를 적용하여, 제2다군 군정수 세트 또는 제3다군 군정수 세트의 가중치를 결정할 수 있다. 예컨대, 군정수 피드백부(130)는 어느 하나의 노드의 최종 군정수를 아래의 수학식 2에 의하여 산출할 수 있다.

[0080] [수학식 2]

[0081] $$XS_{final,l} = \frac{\left|T_{mod}^{ref,0} - T_{mod,l}^{Hist}\right| \cdot XS_{1,l} + \left|T_{mod}^{ref,1} - T_{mod,l}^{Hist}\right| \cdot XS_{0,l}}{\left|T_{mod}^{ref,1} - T_{mod}^{ref,0}\right|}$$

[0082] 여기서, $XS_{final,l}$ 은 l번 노드의 최종 군정수이고, $T_{mod}^{ref,0}$ 은 제1다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{0,l}$ 은 제1다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고, l번 노드가 복수 개의 상부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$ 은 제2다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$ 은 상기 제2다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고, 상기 l번 노드가 상기 복수 개의 하부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$ 은 제3다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$ 은 제3다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수일 수 있다.

[0083] 노심해석부(140)는 산출된 노드별 최종 군정수들을 이용하여 1주기 동안 원자로 노심에 대한 거시적인 관점에서 계산을 수행하여 핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 산출할 수 있다.

[0084] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 방법의 각 단계를 개략적으로 도시하는 순서도이다.

[0085] 도 5를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 방법은 핵종 단면적 라이브러리로부터 핵종별 단면적 정보를 획득하는 단계(S10), 제1다군 군정수 세트, 제2다군 군정수 세트 및 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계(S20), 노드별 최종 군정수들을 산출하는 단계(S30), 핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 산출하는 단계(S40)를 포함할 수 있다.

[0086] 핵종별 단면적 정보를 획득하는 단계(S10)에서, 노심 해석 장치는 핵종 단면적 라이브러리로부터 핵종별 단면적 정보를 생성하기 위한 데이터를 획득하는 단계일 수 있다.

[0087] 제1다군 군정수 세트, 제2다군 군정수 세트 및 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계(S20)는 핵종들의 연속적인 에너지를 n 개의 군으로 분할하는 단계, 각 군에 대하여 제1다군 군정수 데이터, 제2다군 군정수 데이터 및 제3다군 군정수 데이터를 생성하는 단계 및 제1다군 군정수 데이터, 제2다군 군정수 데이터 및 제3다군 군정수 데이터 각각에 대하여 상기 핵종들의 연속적인 에너지를 m(2≤m≤n) 개의 군으로 축약하여 제1다군 군정수 세트, 제2다군 군정수 세트 및 제3다군 군정수 세트를 생성하는 단계를 포함할 수 있다. 제1다군 군정수 세트는 핵연료 집합체 또는 핵연료봉에 대하여 2차원 수송 해석을 수행하여 평균 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영하고, 제2다군 군정수 세트는 고온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영하고, 제3다군 군정수 세트는 저온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영할 수 있다.

[0088] 여기서, 평균 감속재 환경은 원자로 노심의 전체 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되고, 고온의 감속재 환

경은 복수 개의 상부 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용되고, 저온의 감속재 환경은 상기 복수 개의 하부 노드의 감속재 온도의 평균 값이 적용될 수 있다.

[0089] 노드별 최종 군정수들을 산출하는 단계(S30)에서 원자로 노심을 복수 개의 상부 노드와 복수 개의 하부 노드로 분할하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제2다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 상부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출하고, 상기 제1다군 군정수 세트와 상기 제3다군 군정수 세트를 기초로 상기 복수 개의 하부 노드 각각에 적용되는 최종 군정수들을 산출할 수 있다.

[0090] 노드별 최종 군정수들을 산출하는 단계(S30)는, 연소도 가중 평균 감속재 온도를 이용하여 제2다군 군정수 세트 및 상기 제3다군 군정수 세트 각각의 가중치를 결정하는 단계를 포함하고, 연소도 가중 평균 감속재 온도는 아래의 수학식 1에 의하여 산출될 수 있다.

[0091] [수학식 1]

[0092]
$$T_{mod,l}^{Hist}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{k}(T_{mod,i} \cdot \Delta BU_i)}{\sum_{i=1}^{k} \Delta BU_i}$$

[0093] 여기서, $T_{mod,l}^{Hist}(k)$는 l번 노드의 k번째 연소도 스탭에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, $T_{mod,i}$는 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스탭에서의 연소도 가중 평균 감속재 온도이고, ΔBU_i는 l번 노드의 i(1≤i<k)번째 연소도 스탭에서 증가하는 연소도일 수 있다.

[0094] 이 후, 최종 군정수들 각각은 아래의 수학식 2에 의하여 산출될 수 있다.

[0095] [수학식 2]

[0096]
$$XS_{final,l} = \frac{|T_{mod}^{ref,0} - T_{mod,l}^{Hist}| \cdot XS_{1,l} + |T_{mod}^{ref,1} - T_{mod,l}^{Hist}| \cdot XS_{0,l}}{|T_{mod}^{ref,1} - T_{mod}^{ref,0}|}$$

[0097] 여기서, $XS_{final,l}$은 l번 노드의 최종 군정수이고, $T_{mod}^{ref,0}$은 제1다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{0,l}$은 제1다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고,

[0098] l번 노드가 복수 개의 상부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$은 제2다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$은 제2다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수이고, l번 노드가 복수 개의 하부 노드들 중 어느 하나일 때, $T_{mod}^{ref,1}$은 제3다군 군정수 세트의 기준 계산 온도이고, $XS_{1,l}$은 제3다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 군정수일 수 있다.

[0099] 핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 산출하는 단계(S40)에서, 산출된 노드별 최종 군정수들을 이용하여 1주기 동안 원자로 노심에 대한 거시적인 관점에서 계산을 수행하여 핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 산출할 수 있다.

[0100] 도 5에 도시된 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 방법은 컴퓨터에서 실행될 수 있는 프로그램으로 작성할 수 있고, 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체를 이용하여 상기 프로그램을 동작시키는 범용 디지털 컴퓨터에서 구현될 수 있다. 상기 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체는 마그네틱 저장매체(예를 들면, 롬, 플로피 디스크, 하드디스크 등), 광학적 판독 매체(예를 들면, 시디롬, 디브이디 등)와 같은 저장매체를 포함한다.

[0101] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 방법에 따라 산출한 최종 군정수를 적용하였을 때, 노드 연소도에 따른 거시적 핵분열 단면적을 나타낸 그래프이다.

[0102] 도 6은 원자로 노심의 상부 노심에 포함되는 어느 하나의 상부 노드의 군정수 피드백 결과로 획득한 2군 핵분열 단면적을 나타낸다. 제1다군 군정수는 평균 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제1다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 값이고, 제2다군 군정수는 고온의 감속재 환경에서의 연소 효과를 반영한 제2다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 값이다. 최종 군정수는 제1다군 군정수 세트 및 연소도 가중 평균 감속재 온도를 이용하여 가중치를 적용한 제2다군 군정수 세트를 이용하여 피드백한 값이다.

[0103] 상기 어느 하나의 상부 노드는 평균 감속재 환경과 고온의 감속재 환경 사이에 위치하는 환경에서 연소되었으므로, 적절한 최종 군정수는 제1다군 군정수와 제2다군 군정수 사이의 값으로 선택되어야 한다. 연소도 가중 평균 감속재 온도는 연소 이력을 저장하는 변수로서, 평균 감속재 환경 및 고온(또는 저온)의 감속재 환경에서의 연소 효과를 어떤 비율로 보상할지 판단하여 적절한 최종 군정수를 산출할 수 있다. 이와 같이 적절한 연소 효과가 반영될 경우 더 정밀한 군정수를 3차원 노달 계산에 반영하여 축 방향 계산 결과의 정확도를 향상시킬 수 있다.

[0104] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 노심 해석 방법에 따라 산출한 최종 군정수를 적용하였을 때, 노드 연소도에 따른 축방향 출력 편차를 나타낸 그래프이다.

[0105] 도 7의 기준해는 고정확 해석 코드(High-fidelity analysis code)를 이용하여 시뮬레이션한 축방향 출력 편차이고, 비교예는 제1다군 군정수들을 이용하여 획득한 축방향 출력 편차이고, 실시예는 본 발명의 일 실시예에 따라 획득된 최종 군정수들을 이용하여 획득한 축방향 출력 편차이다.

[0106] 축방향 출력 편차는 원자로 노심을 축 방향으로 상단부와 하단부로 나누었을 때, 상단부의 출력과 하단부의 출력을 비교하여 어느 정도의 불균형을 갖는지를 확인하기 위한 인자이다. 축방향 출력 편차는 아래의 수학식 5와 같이 정의할 수 있다.

[0107] [수학식 5]

[0108]
$$(\text{축방향 출력 편차}) = \frac{(\text{하단부 출력} - \text{상단부 출력})}{(\text{하단부 출력} + \text{상단부 출력})}$$

[0109] 축방향 출력 편차는 원자로의 이상 운행을 감지하기 위한 기준 중의 하나로, 제1다군 군정수들만을 이용하여 획득한 비교예보다, 본 발명의 일 실시예에 따라 획득된 최종 군정수들을 이용하여 획득한 축방향 출력 편차가 연소도 스탭 전 구간에서 기준해에 더 가까운 것을 확인할 수 있다.

[0110] 즉, 본 발명의 실시예들에 따른 노심 해석 방법 및 이를 이용한 노심 해석 장치는 적은 추가 연산 만으로 노드별 최종 군정수를 산출하고, 이를 이용하여 높은 정확도로 핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도 분포 및 반응도 계수를 산출할 수 있다.

[0111] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 당해 기술분야에서 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 것 이다.

부호의 설명

[0112] 10: 노심 해석 장치

110: 핵종 단면적 라이브러리 120: 격자해석부

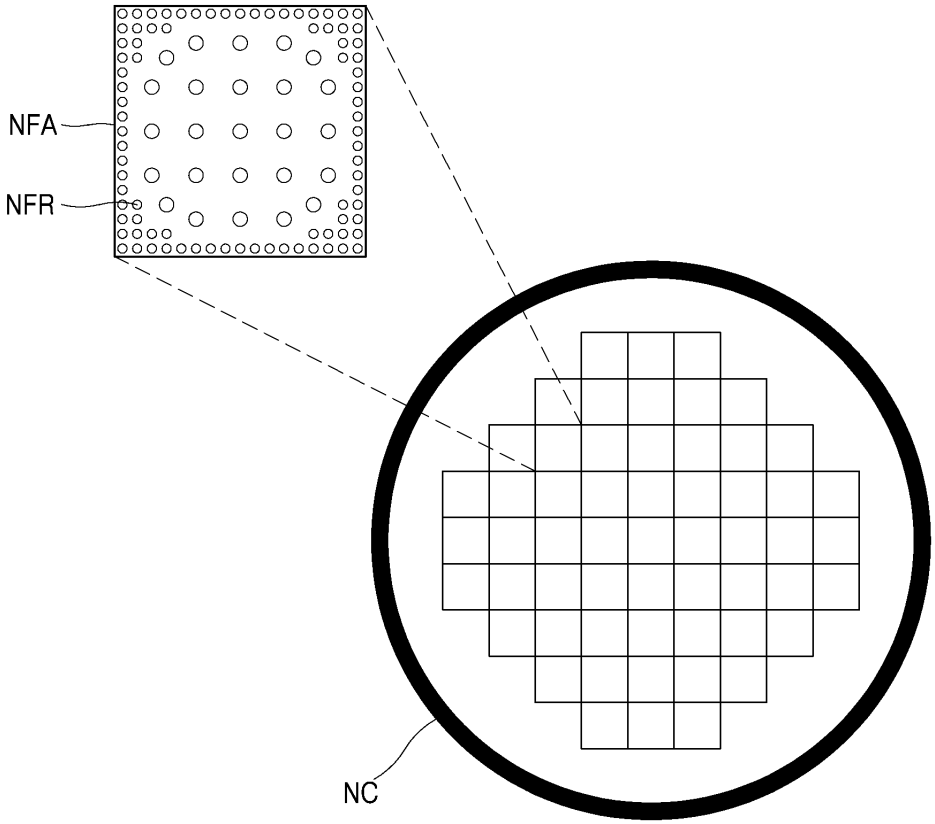
130: 군정수 피드백부 140: 노심해석부

NC: 원자로 노심 NFA: 핵연료 집합체

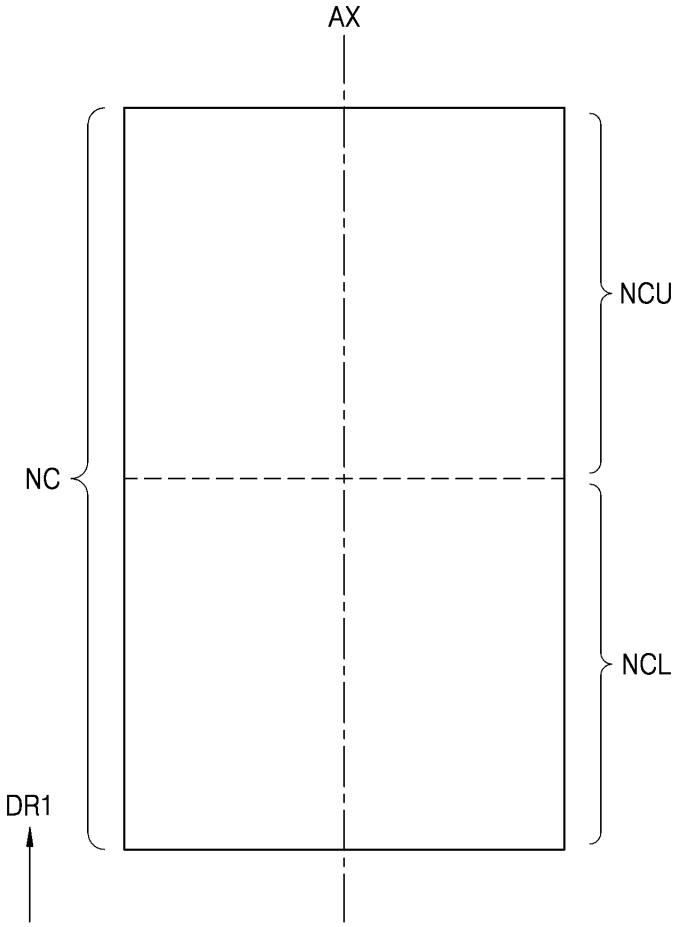
NFR: 핵연료봉

도면

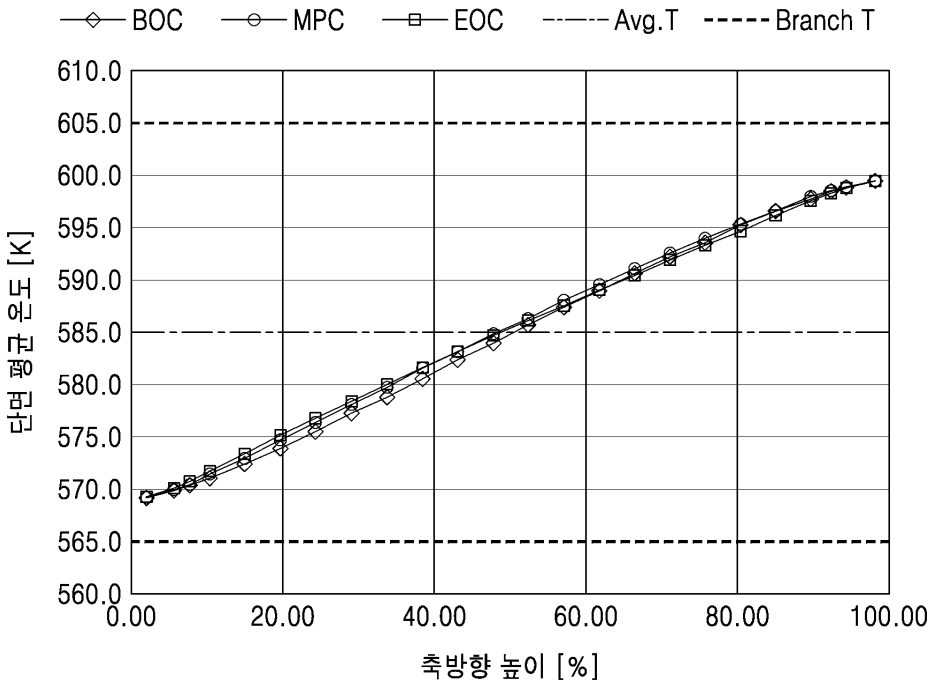
도면1



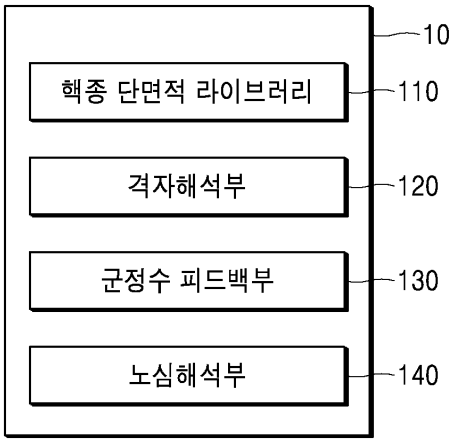
도면2


AX
NCU
NC
NCL
DR1

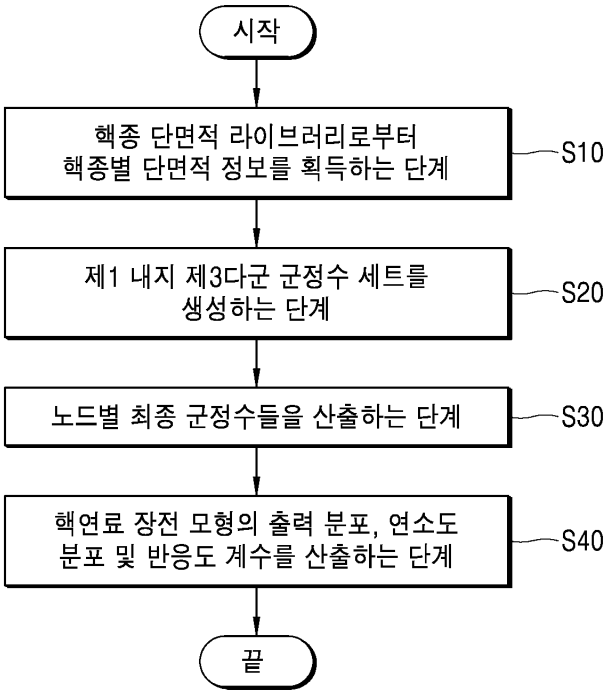
도면3


BOC
MPC
EOC
Avg.T
Branch T
610.0
605.0
600.0
595.0
590.0
585.0
580.0
575.0
570.0
565.0
560.0
단면 평균 온도 [K]
0.00
20.00
40.00
60.00
80.00
100.00
축방향 높이 [%]

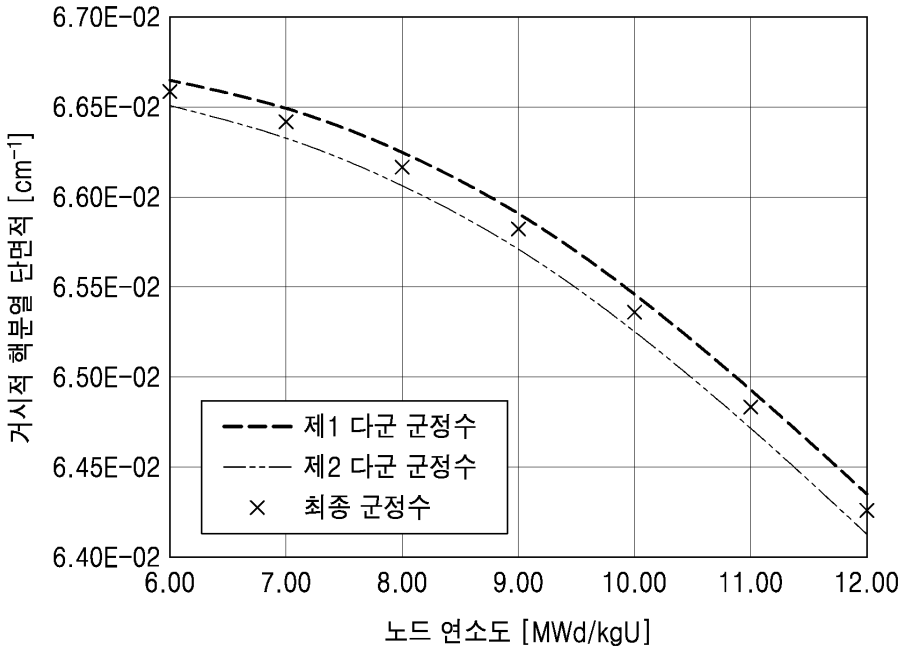
도면4


10
핵종 단면적 라이브러리
110
격자해석부
120
군정수 피드백부
130
노심해석부
140

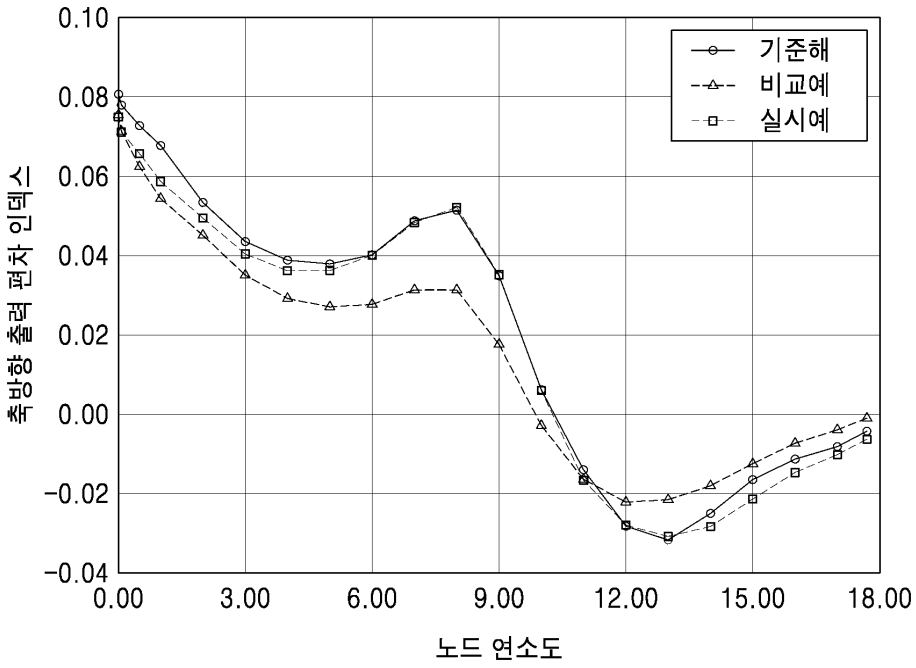
도면5


시작
핵종 단면적 라이브러리로부터
핵종별 단면적 정보를 획득하는 단계
S10
제1 내지 제3다군 군정수 세트를
생성하는 단계
S20
노드별 최종 군정수들을 산출하는 단계
S30
핵연료 장전 모형의 출력 분포, 연소도
분포 및 반응도 계수를 산출하는 단계
S40
끝

도면6


6.70E-02
6.65E-02
6.60E-02
6.55E-02
6.50E-02
6.45E-02
6.40E-02
거시적 핵분열 단면적 [cm-1]
제1 다군 군정수
제2 다군 군정수
최종 군정수
6.00
7.00
8.00
9.00
10.00
11.00
12.00
노드 연소도 [MWd/kgU]

도면7


0.10
0.08
0.06
0.04
0.02
0.00
-0.02
-0.04
축방향 출력 편차 인덱스
기준해
비교예
실시예
0.00
3.00
6.00
9.00
12.00
15.00
18.00
노드 연소도