



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0054591
(43) 공개일자 2025년04월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 17/104 (2006.01) G01B 21/28 (2023.01)
G06F 17/10 (2006.01) G21C 17/06 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G21C 17/104 (2013.01)
G01B 21/28 (2023.02)
(21) 출원번호 10-2023-0138008
(22) 출원일자 2023년10월16일
심사청구일자 2023년10월16일

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

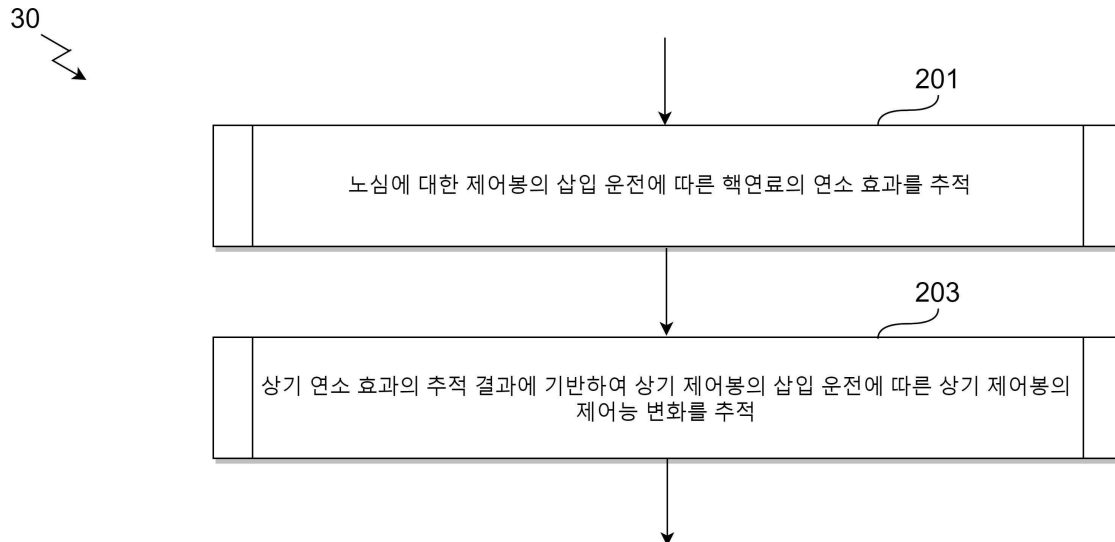
전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 발명의 명칭 원자로 노심 반응 해석 방법 및 그 장치

(57) 요약

다양한 실시 예들에 따르면, 노심에 대한 제어봉의 삽입 운전에 따른 핵연료의 연소 효과를 추적하는 단계; 및 상기 연소 효과의 추적 결과에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 단계;를 포함하는, 원자로 노심 반응 해석 방법 및 그 장치를 제공할 수 있다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

G06F 17/10 (2013.01)

G21C 17/063 (2013.01)

Y02E 30/30 (2020.08)

(72) 발명자

강영석

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

김원경

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

이지현

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415188004
과제번호	RS-2023-00241302
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국에너지기술평가원
연구사업명	에너지인력양성(R&D)
연구과제명	고성능 연산 기반 원전 다물리 해석 혁신연구센터
기 여 율	1/1
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2023.04.01 ~ 2023.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

노심에 대한 제어봉의 삽입 운전에 따른 핵연료의 연소 효과를 추적하는 단계; 및

상기 연소 효과의 추적 결과에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 단계;를 포함하는, 원자로 노심 반응 해석 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 핵연료 연소 효과를 추적하는 단계는, 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 제1 핵반응 단면적 데이터 및 상기 제어봉의 미삽입 운전에 따른 제2 핵반응 단면적 데이터에 기반하여 최종 핵반응 단면적을 결정하는 단계; 및

상기 최종 핵반응 단면적에 기반하여 상기 핵연료 연소 효과를 추적하는 단계;를 포함하는, 원자로 노심 반응 해석 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 최종 핵반응 단면적은, 상기 제1 핵반응 단면적 데이터, 상기 제2 핵반응 단면적 데이터, 및 기 설정된 변수에 기반하여 상기 삽입 이력에 대응하도록 예측한 복합 핵반응 단면적이며,

상기 기 설정된 변수는, 상기 노심에 대하여 설정된 복수의 노드들 각각에 대하여 상기 삽입 이력에 따라 상기 제어봉의 삽입 비율을 누적하여 저장하도록 구성된 변수인, 원자로 노심 반응 해석 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 복수의 노드들은, 상기 노심의 축방향으로 설정된, 원자로 노심 반응 해석 방법.

청구항 5

제3항에 있어서,

상기 기 설정된 변수는, 하기 수학식에 따라서 계산되는, 원자로 노심 반응 해석 방법.

[수학식]

$$h(n) \equiv \frac{\sum_{k=1}^n (f_{rodded}^k \cdot \Delta BU_k)}{\sum_{k=1}^n (\Delta BU_k)}$$

여기서, $h(n)$ 은 삽입 이력 지표 변수, n 은 연소도 스텝의 총 수, k 는 연소도 스텝, f_{rodded}^k 는 보다 작은 번째의 연소도 스텝의 제어봉 삽입 비율, ΔBU_i 는 해당 연소도 스텝에서 증가하는 노드의 연소도

청구항 6

제3항에 있어서,

핵연료의 연소 효과를 추적하는 단계는, 상기 최후 핵반응 단면적에 기반하여 상기 핵연료의 연소 환경 변화, 연소도 변화, 및 반응도 변화 중 적어도 일부를 예측하는, 원자로 노심 반응 해석 방법.

청구항 7

제3항에 있어서,

상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 단계는, 상기 최후 핵반응 단면적에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전 에 따른 상기 제어봉 물질의 핵반응을 예측하는 단계; 및

상기 제어봉 물질의 핵반응을 추적한 결과에 기반하여 상기 제어봉 물질의 수밀도 변화를 추적하는 단계;를 포함하는, 원자로 노심 반응 해석 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 단계는, 상기 수밀도 변화를 추적한 결과에 기반하여 상기 제어봉의 흡수 단면적 변화를 계산하는 단계; 및

상기 제어봉의 흡수 단면적 변화에 기반하여 상기 핵연료의 반응도를 계산하여 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 단계;를 포함하는, 원자로 노심 반응 해석 방법.

청구항 9

제7항에 있어서,

상기 제어봉 물질의 수밀도 변화는, 상기 제어봉의 축방향으로 설정된 복수의 메쉬 구조들 각각에 대하여 예측하는, 원자로 노심 반응 해석 방법.

청구항 10

제어봉의 삽입 운전 또는 상기 제어봉의 미삽입 운전 에 따른 정보를 저장하는 저장부; 및

노심에 대한 제어봉의 삽입 운전 에 따른 핵연료의 연소 효과를 추적하고, 및 상기 연소 효과의 추적 결과에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전 에 따른 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하도록 처리하는 처리부;를 포함하는, 원자로 노심 반응 해석 장치.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 처리부는, 상기 제어봉의 삽입 운전 에 따른 제1 핵반응 단면적 데이터 및 상기 제어봉의 미삽입 운전 에 따른 제2 핵반응 단면적 데이터에 기반하여 최후 핵반응 단면적을 결정하고, 및 상기 최후 핵반응 단면적에 기반하여 상기 핵연료 연소 효과를 추적하는, 원자로 노심 반응 해석 장치.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 처리부는, 상기 최종 핵반응 단면적은, 상기 제1 핵반응 단면적 데이터, 상기 제2 핵반응 단면적 데이터, 및 기 설정된 변수에 기반하여 상기 삽입 이력에 대응하도록 예측한 복합 핵반응 단면적을 상기 최종 핵반응 단면적으로 결정하고,

상기 기 설정된 변수는, 상기 노심에 대하여 설정된 복수의 노드들 각각에 대하여 상기 삽입 이력에 따라 상기 제어봉의 삽입 비율을 누적하여 저장하도록 구성된 변수인, 원자로 노심 반응 해석 장치.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 처리부는, 상기 노심의 축방향으로 설정된 상기 복수의 노드들에 기반하여 상기 기 설정된 변수를 계산하는, 원자로 노심 반응 해석 장치.

청구항 14

제12항에 있어서,

상기 기 설정된 변수는, 하기 수학적식에 따라서 계산되는, 원자로 노심 반응 해석 장치.

[수학적식]

$$h(n) \equiv \frac{\sum_{k=1}^n (f_{rodded}^k \cdot \Delta BU_k)}{\sum_{k=1}^n (\Delta BU_k)}$$

여기서, $h(n)$ 은 삽입 이력 지표 변수, n 은 연소도 스텝의 총 수, k 는 연소도 스텝, f_{rodded}^k 는 보다 작은 번째의 연소도 스텝의 제어봉 삽입 비율, ΔBU_i 는 해당 연소도 스텝에서 증가하는 노드의 연소도

청구항 15

제12항에 있어서,

상기 처리부는, 상기 최종 핵반응 단면적에 기반하여 상기 핵연료의 연소 환경 변화, 연소도 변화, 및 반응도 변화 중 적어도 일부를 예측하고, 원자로 노심 반응 해석 장치.

청구항 16

제12항에 있어서,

상기 처리부는, 상기 최종 핵반응 단면적에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 상기 제어봉 물질의 핵반응을 예측하고, 및 상기 제어봉 물질의 핵반응을 추적한 결과에 기반하여 상기 제어봉 물질의 수밀도 변화를 추적하는, 원자로 노심 반응 해석 장치.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 처리부는, 상기 수밀도 변화를 추적한 결과에 기반하여 상기 제어봉의 흡수 단면적 변화를 계산하고, 및 상기 제어봉의 흡수 단면적 변화에 기반하여 상기 핵연료의 반응률을 계산하여 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하는, 원자로 노심 반응 해석 장치.

청구항 18

제16항에 있어서,

상기 처리부는, 상기 제어봉의 축방향으로 설정된 복수의 메쉬 구조들 각각에 대하여 상기 제어봉 물질의 수밀도 변화를 예측하는, 원자로 노심 반응 해석 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 개시는, 원자로의 노심 반응을 해석하는 방법 및 그 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 원자로 노심의 반응 해석을 위하여 '격자 해석 코드(lattice physics code)'와 '노달 확산 코드(nodal diffusion code)'의 1단계 코드나 2단계 코드 등 복잡한 계산 기법이 사용된다.

[0003] 2단계 노심 해석 코드는 1단계에서 작은 구조인 핵연료집합체(또는 핵연료)에 대해 정밀한 계산을 수행한 뒤, 2단계 코드를 활용하여 그 구조물들의 집합인 원자로 노심에 대해 거시적인 관점에서 계산을 수행한다.

[0004] 운전 중인 가압 경수로 원자로는 임계 상태를 유지하기 위하여 감속재(냉각재)에 중성자 흡수물질인 붕산을 녹여 잉여반응도를 제어한다. 이때, 대부분의 잉여 반응도는 붕산으로 제어되며, 제어봉은 필요한 경우 삽입 또는 인출되어 잉여 반응도 제어 혹은 사고 시 원자로 노심 섯다운 용으로 이용되고 있다.

[0005] 즉, 일반적으로, 운전 중인 상용 가압 경수로 원전에 제어봉이 원자로 노심에 삽입되어 유의미한 영향을 끼치는 경우는 한정적이며, 이에 따라 제어봉의 삽입 또는 인출에 대한 영향은 고려되고 있지 않는 상황이다. 예를 들어, 노달 확산 코드의 2단계 노심 해석 코드는 노심 해석 시, 제어봉이 노심 내부에 삽입된 시간이 거의 0에 가깝다고 가정하여 제어봉의 연소를 고려하지 않고 있다.

[0006] 하지만, 최근 혁신형 소형 원자로 등의 원전 설계에서, 원전 소형화를 위해 붕산 처리 시설이 필요 없는 무붕산 운전 방식에 대해 논의되고 있다. 무붕산 운전은 기존에 사용하던 감속재에 붕산을 녹이는 방식이 아닌, 핵연료 내에 같이 장전되는 흡수물질의 강화 및 제어봉 삽입으로 잉여 반응도를 제어하는 방식이다.

[0007] 따라서, 무붕산 운전 시, 기존의 원자로 운영 방식과 달리 제어봉이 직접 노심 전체에 영향을 끼치게 되며, 노심 해석에 있어서 제어봉 삽입 운전에 따라 핵연료와 제어봉이 받는 영향을 반영하여 원자로 노심 반응을 해석하기 위한 기술 개발이 필요하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 개시는, 제어봉의 삽입 운전에 따라서 핵연료와 제어봉의 반응을 해석하는 방법 및 그 장치를 제공할 수 있다.

[0009] 다양한 실시 예를 통하여 해결하려는 과제들은 언급한 과제로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0010] 일 실시 예에 따르면, 노심에 대한 제어봉의 삽입 운전에 따른 핵연료의 연소 효과를 추적하는 단계; 및 상기 연소 효과의 추적 결과에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 단

계;를 포함하는, 원자로 노심 반응 해석 방법을 제공할 수 있다.

[0011] 여기서, 상기 핵연료 연소 효과를 추적하는 단계는, 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 제1 핵반응 단면적 데이터 및 상기 제어봉의 미삽입 운전에 따른 제2 핵반응 단면적 데이터에 기반하여 최종 핵반응 단면적을 결정하는 단계; 및 상기 최종 핵반응 단면적에 기반하여 상기 핵연료 연소 효과를 추적하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0012] 여기서, 상기 최종 핵반응 단면적은, 상기 제1 핵반응 단면적 데이터, 상기 제2 핵반응 단면적 데이터, 및 기 설정된 변수에 기반하여 상기 삽입 이력에 대응하도록 예측한 복합 핵반응 단면적이며, 상기 기 설정된 변수는, 상기 노심에 대하여 설정된 복수의 노드들 각각에 대하여 상기 삽입 이력에 따라 상기 제어봉의 삽입 비율을 누적하여 저장하도록 구성된 변수일 수 있다.

[0013] 여기서, 상기 복수의 노드들은, 상기 노심의 축방향으로 설정된 것일 수 있다.

[0014] 여기서, 상기 기 설정된 변수는, 하기 수학식에 따라서 계산되는 것일 수 있다.

[0015] [수학식]

$$h(n) \equiv \frac{\sum_{k=1}^n (f_{rodded}^k \cdot \Delta BU_k)}{\sum_{k=1}^n (\Delta BU_k)}$$

[0016]

[0017] 여기서, $h(n)$ 은 삽입 이력 지표 변수, n 은 연소도 스텝의 총 수, k 는 연소도 스텝, f_{rodded}^k 는 보다 작은 번째의 연소도 스텝의 제어봉 삽입 비율, ΔBU_i 는 해당 연소도 스텝에서 증가하는 노드의 연소도일 수 있다.

[0018] 여기서, 핵연료의 연소 효과를 추적하는 단계는, 상기 최종 핵반응 단면적에 기반하여 상기 핵연료의 연소 환경 변화, 연소도 변화, 및 반응도 변화 중 적어도 일부를 예측할 수 있다.

[0019] 여기서, 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 단계는, 상기 최종 핵반응 단면적에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 상기 제어봉 물질의 핵반응을 예측하는 단계; 및 상기 제어봉 물질의 핵반응을 추적한 결과에 기반하여 상기 제어봉 물질의 수밀도 변화를 추적하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0020] 여기서, 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 단계는, 상기 수밀도 변화를 추적한 결과에 기반하여 상기 제어봉의 흡수 단면적 변화를 계산하는 단계; 및 상기 제어봉의 흡수 단면적 변화에 기반하여 상기 핵연료의 반응률을 계산하여 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0021] 여기서, 상기 제어봉 물질의 수밀도 변화는, 상기 제어봉의 축방향으로 설정된 복수의 메쉬 구조들 각각에 대하여 예측할 수 있다.

[0022] 다른 실시 예에 따르면, 제어봉의 삽입 운전 또는 상기 제어봉의 미삽입 운전에 따른 정보를 저장하는 저장부; 및 노심에 대한 제어봉의 삽입 운전에 따른 핵연료의 연소 효과를 추적하고, 및 상기 연소 효과의 추적 결과에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적하도록 처리하는 처리부;를 포함하는, 원자로 노심 반응 해석 장치를 제공할 수 있다.

[0023] 여기서, 상기 처리부는, 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 제1 핵반응 단면적 데이터 및 상기 제어봉의 미삽입 운전에 따른 제2 핵반응 단면적 데이터에 기반하여 최종 핵반응 단면적을 결정하고, 및 상기 최종 핵반응 단면적에 기반하여 상기 핵연료 연소 효과를 추적할 수 있다.

[0024] 여기서, 상기 처리부는, 상기 최종 핵반응 단면적은, 상기 제1 핵반응 단면적 데이터, 상기 제2 핵반응 단면적 데이터, 및 기 설정된 변수에 기반하여 상기 삽입 이력에 대응하도록 예측한 복합 핵반응 단면적을 상기 최종 핵반응 단면적으로 결정하고, 상기 기 설정된 변수는, 상기 노심에 대하여 설정된 복수의 노드들 각각에 대하여 상기 삽입 이력에 따라 상기 제어봉의 삽입 비율을 누적하여 저장하도록 구성된 변수일 수 있다.

[0025] 여기서, 상기 처리부는, 상기 노심의 축방향으로 설정된 상기 복수의 노드들에 기반하여 상기 기 설정된 변수를 계산할 수 있다.

[0026] 여기서, 상기 기 설정된 변수는, 하기 수학식에 따라서 계산될 수 있다.

[0027] [수학식]

$$h(n) \equiv \frac{\sum_{k=1}^n (f_{rodded}^k \cdot \Delta BU_k)}{\sum_{k=1}^n (\Delta BU_k)}$$

[0028]

[0029] 여기서, $h(n)$ 은 삽입 이력 지표 변수, n 은 연소도 스텝의 총 수, k 는 연소도 스텝, f_{rodded}^k 는 보다 작은 번째의 연소도 스텝의 제어봉 삽입 비율, ΔBU_i 는 해당 연소도 스텝에서 증가하는 노드의 연소도일 수 있다.

[0030] 여기서, 상기 처리부는, 상기 최후 핵반응 단면적에 기반하여 상기 핵연료의 연소 환경 변화, 연소도 변화, 및 반응도 변화 중 적어도 일부를 예측할 수 있다.

[0031] 여기서, 상기 처리부는, 상기 최후 핵반응 단면적에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 상기 제어봉 물질의 핵반응을 예측하고, 및 상기 제어봉 물질의 핵반응을 추적한 결과에 기반하여 상기 제어봉 물질의 수밀도 변화를 추적할 수 있다.

[0032] 여기서, 상기 처리부는, 상기 수밀도 변화를 추적한 결과에 기반하여 상기 제어봉의 흡수 단면적 변화를 계산하고, 및 상기 제어봉의 흡수 단면적 변화에 기반하여 상기 핵연료의 반응률을 계산하여 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적할 수 있다.

[0033] 여기서, 상기 처리부는, 상기 제어봉의 축방향으로 설정된 복수의 메쉬 구조들 각각에 대하여 상기 제어봉 물질의 수밀도 변화를 예측할 수 있다.

발명의 효과

[0034] 다양한 실시 예에 따르면, 원자로 노심 반응 해석 방법 및 그 장치를 통하여 제어봉의 삽입 운전에 따른 원자로 반응 상태 및 그 변화를 정확하게 예측할 수 있고, 따라서 원자로 반응을 유지하기 위한 제어봉 제어의 정확도를 향상시킬 수 있는 효과가 있다.

[0035] 다양한 실시 예에 따르면, 원자로 노심 반응 해석 방법 및 그 장치를 통하여 감속제에 핵반응 제어 소재를 적용하지 않는 소형 원자로 등의 운영에서 제어봉의 삽입 또는 인출을 정확하게 제어함으로써 원자로 운전 안정성을 향상시킬 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0036] 도 1은 일 실시 예에 따른 노심 반응 해석을 위한 장치의 구성을 개략적으로 도시한 개념도이다.

도 2는 일 실시 예에 따른 장치에서 제어봉 삽입 운전에 따른 노심 반응을 추적하는 동작의 흐름을 도시한 흐름도이다.

도 3은 일 실시 예에 따른 장치에서 제어봉 삽입 운전에 따른 핵연료의 연소 효과를 추적하는 동작의 세부 흐름을 도시하는 흐름도이다.

도 4는 일 실시 예에 따른 장치에서 제어봉 삽입 운전에 따른 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 동작의 세부 흐름을 도시하는 흐름도이다.

도 5는 일 실시 예에 따른 원자로 노심에서 복수의 노드로 구분된 노심 및 제어봉의 위치를 개략적으로 도시한 단면도이다.

도 6에 도시된 바와 같이 제어봉의 삽입 비율의 변화에 따라서 변화될 수 있을 것이다.

도 7은 일 실시 예에 따른 장치에서 연료봉에 대하여 설정한 메쉬 구조에 대하여 개략적으로 도시한 도면이다.

도 8은 일 실시 예에 따른 원자로 노심에서 핵연료 및 복수의 메쉬로 구분된 제어봉의 위치를 개략적으로 도시한 단면도이다.

도 9는 일 실시 예에 따른 제어봉의 삽입 동작에서 연소 시간 경과에 따른 무한증배계수의 변화를 도시하는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0037] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 실시 예들을 상세하게 설명한다. 그러나, 실시 예들에는 다양한 변경이 가해질 수 있어서 특허출원의 권리 범위가 이러한 실시 예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 실시 예들에 대한 모든 변경, 균등물 내지 대체물이 권리 범위에 포함되는 것으로 이해되어야 한다.
- [0038] 실시 예에서 사용한 용어는 단지 설명을 목적으로 사용된 것으로, 한정하려는 의도로 해석되어서는 안 된다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0039] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 실시 예가 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0040] 또한, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 도면 부호에 관계없이 동일한 구성요소는 동일한 참조부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다. 실시 예를 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 실시 예의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.
- [0041] 또한, 실시 예의 구성요소를 설명하는 데 있어서, 제1, 제2, A, B, (a), (b) 등의 용어를 사용할 수 있다. 이러한 용어는 그 구성요소를 다른 구성요소와 구별하기 위한 것일 뿐, 그 용어에 의해 해당 구성요소의 본질이나 차례 또는 순서 등이 한정되지 않는다.
- [0042] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결", "결합" 또는 "접속"된다고 기재된 경우, 그 구성요소는 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되거나 접속될 수 있지만, 각 구성요소 사이에 또 다른 구성요소가 "연결", "결합" 또는 "접속"될 수도 있다고 이해되어야 할 것이다.
- [0043] 또한, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 통신으로 "연결" 또는 "접속"된다고 기재된 경우, 그 구성요소는 그 다른 구성요소에 무선 통신 또는 유선 통신으로 연결되거나 접속될 수 있지만, 각 구성요소 사이에 다른 구성요소가 "연결" 또는 "접속"될 수 있다고 이해되어야 할 것이다.
- [0044] 또한, 실시 예의 구성요소들에 대하여 설명하는 데 있어서, "또는"의 의미는, 구성요소들 각각을 의미할 수 있고, 구성요소들 중 둘 이상을 의미할 수 있고, 구성요소들 모두를 의미할 수도 있다. 예를 들면, "a, b, 또는 c"의 표현은, "a", "b", "c", "a 및 b", "a 및 c", "b 및 c", "a, b, 및 c" 중 어느 하나를 나타내는 것으로 이해되어야 할 것이다.
- [0045] 어느 하나의 실시 예에 포함된 구성요소와, 공통적인 기능을 포함하는 구성요소는, 다른 실시 예에서 동일한 명칭을 사용하여 설명하기로 한다. 반대되는 기재가 없는 이상, 어느 하나의 실시 예에 기재한 설명은 다른 실시 예에도 적용될 수 있으며, 중복되는 범위에서 구체적인 설명은 생략하기로 한다.
- [0046] 장치 또는 장치에서 처리되는 '데이터'는 '정보'의 용어로 표현할 수 있다. 여기서, 정보는 데이터를 포함하는 개념으로 사용될 수 있다.
- [0047] 본 개시는, 원자로 노심 반응 해석 방법 및 그 장치에 관한 것이다. 보다 상세하게 설명하면, 원자로 노심의 반응 해석에 있어서, 제어봉(control rod, CR)의 삽입 또는 인출을 고려하여 노심 반응을 해석하기 위한 방법 및 그 장치에 대한 것이다.
- [0048] 보다 구체적으로 설명하면, 다양한 실시 예에 따르면, 제어봉의 삽입 또는 인출에 따른 영향을 고려하여 노심의 반응에 대한 3차원 해석을 수행하기 위한 방법 및 그 장치를 제공할 수 있다.
- [0049] 이를 위하여, 다양한 실시 예들을 수행함에 있어서, 노달 확산 코드(nodal diffusion code)의 1단계 코드 및 2단계 코드 중 적어도 일부를 수정(변경 또는 변형)하여 적용할 수 있다.
- [0050] 여기서, 원자로 노심 반응은 원자로 가동 중에 발생하는 핵분열, 핵융합, 및 중성자 상호작용 중 적어도 일부 현상을 포함할 수 있다. 이를 위하여, 원자로의 노심은, 핵연료(예: 핵연료를 포함하는 연료봉) 및 제어봉을 포

함하여 구성된 것으로 설명할 수 있다.

- [0051] 이때, 노심에 대한 운전은 제어봉의 적어도 일부가 삽입된 상태의 삽입 운전과 제어봉이 삽입되지 않은 상태의 미삽입 운전을 구분하여 설명할 수 있다.
- [0052] 일 실시 예에 따르면, 제어봉은, 붕소카바이드(B_4C), 또는 은-인-카드뮴(Ag-In-Cd, AIC)에 기반하는 핵반응 제어 소재(또는 중성자 흡수물질) 중 적어도 일부를 포함하여 구성될 수 있다.
- [0053] 도 1은 일 실시 예에 따른 노심 반응 해석을 위한 장치의 구성을 개략적으로 도시한 개념도이다.
- [0054] 먼저 도 1을 참조하면, 원자로 노심 연소 해석 장치(100)(이하, 장치(100))는 처리부(110), 및 저장부(120)를 포함할 수 있다.
- [0055] 처리부(110)는 적어도 하나의 프로세서(또는 컨트롤러)를 포함하여 구성되며, 적어도 하나의 프로그램(어플리케이션, 툴, 플러그인, 소프트웨어 등, 이하 원자로 관리 프로그램)을 통하여 연결된 적어도 하나의 원자로의 관리와 관련된 제어명령을 처리할 수 있다. 이때, 원자로 관리 프로그램은 장치(100)의 저장부(120) 또는 장치(100)와 연결된 다른 장치의 저장부에 저장될 수 있다.
- [0056] 처리부(110)는, 원자로 관리 프로그램을 통하여 장치(100)와 연결된 적어도 하나의 다른 장치(예: 사용자 장치)와 데이터 처리 또는 처리 결과를 공유할 수 있다.
- [0057] 이하, 다양한 실시 예들에서, 장치(100)가 제어명령에 따른 동작을 수행하는 것은, 장치(100)의 적어도 하나의 제어명령 처리와 관련된 적어도 하나의 프로그램 또는 원자로 관리 프로그램을 통하여 지정된 동작을 수행하는 것으로 이해될 수 있다.
- [0058] 여기서, 제어명령 처리는 장치(100)에 설치된 상기 적어도 하나의 프로그램 또는 원자로 관리 프로그램을 통해서 수행되는 것으로 설명하고 있지만, 이에 한정하지 않고, 저장부(120)에 기 설치된 다른 프로그램 또는 임시 설치 프로그램을 통하여 제공될 수도 있다.
- [0059] 일 실시 예에 따르면, 제어명령 처리는 장치(100)와 연결된 외부 장치에서 무료 또는 유료로 제공되는 데이터베이스의 적어도 일부를 통하여 수행될 수도 있다.
- [0060] 저장부(120)는 장치(100)의 적어도 하나의 구성요소(예: 처리부(110))에 의해 처리되는 다양한 데이터 또는 송수신하는 데이터를 저장할 수 있다. 데이터는, 예를 들어, 제어명령 처리를 위한 프로그램, 프로그램을 통해서 처리된 데이터, 또는 이와 관련된 입력 데이터와 출력 데이터를 포함할 수 있다.
- [0061] 저장부(120)는 제어명령 처리를 위한 인공지능망 알고리즘, 블록체인 알고리즘, 딥러닝 알고리즘, 회귀분석 알고리즘, 및 이와 관련된 메커니즘, 연산자, 언어모델, 빅데이터 중 적어도 일부를 포함하는 알고리즘을 포함할 수 있다.
- [0062] 저장부(120)는 입출력부에 포함된 각각의 요소들을 통해 수신하는 신호를 통하여 지정된 제어 및 동작을 확인하고 처리하기 위한 데이터를 포함할 수 있다.
- [0063] 저장부(120)를 통하여 설명한 동작들은 처리부(110)에 의하여 처리되며, 관련된 동작들을 처리하기 위한 데이터, 처리 중인 데이터, 처리된 데이터, 기 설정된 데이터 등은 데이터베이스로서 저장부(120)에 저장될 수 있다.
- [0064] 저장부(120)는, 원자로의 가동에 있어서 제어봉 삽입 운전에 따라 획득하는 데이터 및/또는 제어봉 미삽입 운전에 따라 획득하는 데이터 중 적어도 일부를 저장할 수 있다. 예를 들면, 저장부(120)는 원자로의 핵반응 상태를 계산하기 위한 다양한 알고리즘, 변수들, 및 이에 기반하여 계산된 결과를 저장할 수 있다.
- [0065] 저장부(120)에 저장된 데이터는 식별된 사용자의 사용자 입력에 기반하여 처리부(110)가 변경, 수정, 삭제하거나, 또는 새로운 데이터를 생성할 수 있다.
- [0066] 저장부(120)는, 휘발성 메모리, 비휘발성 메모리, 또는 이와 같이 컴퓨터 판독 가능한 기록매체를 포함하여 구성될 수 있다. 이때, 컴퓨터 판독 가능한 기록 매체는, 다양한 실시 예들에 기반하여 장치(100)가 동작을 수행하기 위한 컴퓨터 프로그램이 저장될 수 있다.
- [0067] 더하여, 다양한 실시 예에 따르면, 장치(100)는 적어도 하나의 통신부 및 적어도 하나의 센싱부 중 적어도 일부 요소를 더 포함하여 구성될 수 있다. 이때, 통신부 및 센싱부의 구성 중 적어도 일부는 장치(100)의 내부 또는

외부에 형성될 수 있다.

- [0068] 통신부는 장치(100)와 적어도 하나의 다른 장치(예: 서버, 및/또는 원자로 제어 시스템)과의 신호 전달을 위한 적어도 하나의 모듈을 포함하여 구성될 수 있다.
- [0069] 또한, 센싱부는, 원자로의 운전 상태와 관련된 정보를 획득하기 위한 적어도 하나의 센서, 예를 들면, 온도 센서, 압력 센서, 중성자 감지기, 유속 센서, 방사능 감지기, 농도 측정기, 제어봉 위치 센서 등 다양한 센서들 중 적어도 일부를 포함하여 구성될 수 있다.
- [0070] 다양한 실시 예에 따르면 장치(100)는, 원자로의 제어 시스템의 일부로 구성되거나 또는 독립적으로 구성되어 원자로 제어 시스템과 연결될 수 있다. 이하 도면들을 참고하여, 장치(100)의 원자로 노심 반응을 해석하는 동작에 대하여 상세하게 설명한다.
- [0071] 이와 관련하여, 도 2는 일 실시 예에 따른 장치에서 제어봉 삽입 운전에 따른 노심 반응을 추적하는 동작의 흐름을 도시한 흐름도이다. 도 3은 일 실시 예에 따른 장치에서 제어봉 삽입 운전에 따른 핵연료의 연소 효과를 추적하는 동작의 세부 흐름을 도시하는 흐름도이다. 그리고, 도 4는 일 실시 예에 따른 장치에서 제어봉 삽입 운전에 따른 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 동작의 세부 흐름을 도시하는 흐름도이다.
- [0072] 먼저, 도 2에 따르면, 처리부(110)는, 노심에 대한 제어봉의 삽입 운전에 따른 핵연료의 연소 효과(history effect))를 추적(201)하고, 상기 연소 효과의 추적 결과에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적(203)할 수 있다.
- [0073] 여기서, 연소 효과는, 핵연료의 핵분열(또는 핵융합) 반응 또는 중성자 상호작용(또는 중성자에 의한 핵반응)을 발생시키는 연소 환경에 기반하는 반응도 변화로서 표현할 수 있다.
- [0074] 보다 상세하게 설명하면, 연소 효과는, 연소 효과 및 연소도에 따라 반응도의 경향이 달라지는 것으로 표현할 수 있다. 이에 기반하여 처리부(110)는, 제어봉 삽입 운전에 따른 핵연료의 연소 효과를 추적함으로써 원자로 노심의 동작에 대한 정확한 상태를 판단할 수 있다.
- [0075] 도 3을 참고하면, 처리부(110)는, 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 제1 핵반응 단면적(또는 핵연료 단면적, 이하 핵반응 단면적) 데이터 및 상기 제어봉의 미삽입 운전에 따른 제2 핵반응 단면적 데이터에 기반하여 최종 핵반응 단면적을 결정(301)할 수 있다.
- [0076] 다양한 실시 예들에 따르면, 처리부(110)는, 노달 확산 코드의 1단계 코드 및 2단계 코드 중 적어도 일부에 기반하여 최종 핵반응 단면적 계산을 수행할 수 있다.
- [0077] 이때, 처리부(110)는, 다양한 환경 변수들에 기반하여 핵반응 단면적을 계산하며, 처리부(110)는, 제어봉의 삽입 또는 인출에 따라 변화된 연소 효과를 고려하기 위한 환경 변수로서, 기 설정된 변수(이하, 삽입 이력 지표 변수(rodged history index variable))를 적용하여 최종 핵반응 단면적을 계산할 수 있다.
- [0078] 보다 상세하게 설명하면, 처리부(110)는, 상기 삽입 이력에 대응하는 상기 삽입 이력 지표 변수에 기반하여 상기 제1 핵반응 단면적 데이터 및 상기 제2 핵반응 단면적 데이터에 대한 복합 핵반응 단면적을 예측하고 최종 핵반응 단면적으로 피드백(feedback)할 수 있다.
- [0079] 이때, 제1 핵반응 단면적 데이터 및 제2 핵반응 단면적 데이터 중 적어도 일부는, 노심을 구성하는 노드(node) 각각에서의 핵반응 단면적을 포함하여 구성될 수 있다.
- [0080] 여기서, 삽입 이력 지표 변수는, 원자로 내부의 핵연료 연소 상태와 관련된 변수로서 노심을 구성하는 노드 각각에 대하여 상기 노심을 구성하는 복수의 노드들 각각에 대하여 상기 삽입 이력에 따라 상기 제어봉의 삽입 비율을 누적하여 저장하도록 구성된 변수로서, 하기 수학적식(1)에 의하여 정의될 수 있다.

$$h(n) \equiv \frac{\sum_{k=1}^n (f_{rodged}^k \cdot \Delta BU_k)}{\sum_{k=1}^n (\Delta BU_k)} \quad (1)$$

- [0081]
- [0082] (여기서, $h(n)$ 은 삽입 이력 지표 변수, n 은 연소도 스텝의 총 수, k 는 연소도 스텝, f_{rodged}^k 는 보다 작은 번째 연소도 스텝의 제어봉 삽입 비율, ΔBU_i 는 해당 연소도 스텝에서 증가하는 노드의 연소도)

- [0083] 여기서, 제어봉 삽입 비율 f_{rodded} , 및 노심에 구성되는 복수의 노드와 관련하여 도 5를 참고하여 설명할 수 있다. 도 5는 일 실시 예에 따른 원자로 노심에서 복수의 노드로 구분된 노심 및 제어봉의 위치를 개략적으로 도시한 단면도이다.
- [0084] 도 5를 참고하면, 노드는 노달 확산 코드의 2단계 코드에서 원자로 노심의 3차원 해석을 위해서 구분된 격자로서 핵연료가 장착된 노심(50)의 축방향(51)으로 구분 및 형성될 수 있다. 여기서, 노심(50)의 축방향(51)은, 제어봉이 노심에 삽입 또는 인출되는 방향으로 설정될 수 있다.
- [0085] 이때, 노심의 노드 각각에 대한 제어봉의 삽입 비율(i)은 0 내지 1 사이의 실수값으로 결정될 수 있다. 이때, 1은 100%에 대응되며, 0 내지 1 사이의 삽입 비율에 대한 값은 0 내지 100% 사이의 값으로서 비례적으로 대응될 수 있다.
- [0086] 도 5를 참고하여 보다 상세하게 설명하면, 제어봉(53)이 삽입되는 과정에서 i 에 대한 제어봉의 삽입 비율을 f_{rodded} 로 정의하는 경우, 제1 노드(501)의 경우 제어봉이 일부 삽입된 상태를 $f_{rodded}(i)$ 로 표현하고, 제어봉이 계속 삽입되어 제1 노드(501)가 완전히 채워진 경우를 $f_{rodded}(i+1)$ 로 표현할 수 있다.
- [0087] 이후, 제어봉이 계속 삽입되면 제2 노드(503) 또한 $f_{rodded}(i)$ 의 제어봉 삽입 비율을 가지는 것으로 표현할 수 있다. 이때, 노드 각각에 대하여 제어봉이 일부 삽입된 상태(예: 도 5의 제2 노드(503)))에서 제어봉이 삽입되지 않은 비율은 $1 - f_{rodded}(i)$ 로 표현할 수 있다.
- [0088] 처리부(110)는, 원자로 반응 중에 삽입 이력으로서 제어봉의 삽입 비율 및 삽입 시간에 대한 정보를 수집 및 저장할 수 있다.
- [0089] 다시, 삽입 이력 지표 변수와 관련하여, 삽입 이력 지표 변수는, 노심을 구성하는 노드 각각에 대한 제어봉의 삽입 비율의 누적값으로서, 도 6에 도시된 바와 같이 제어봉의 삽입 비율의 변화에 따라서 변화될 수 있을 것이다.
- [0090] 이때, 삽입 이력 지표 변수는 0 내지 1 사이의 실수값으로 결정될 수 있다.
- [0091] 이후, 처리부(110)는, 제1 핵반응 단면적 데이터, 제2 핵반응 단면적 데이터, 삽입 이력 지표 변수에 기반하여 최종 핵반응 단면적을 결정할 수 있다.
- [0092] 보다 상세하게 설명하면, 처리부(110)는, 하기 수학식(2)에 기반하여 최종 핵반응 단면적을 결정할 수 있다.
- [0093]
$$\sigma_{final} = h(n) \cdot \sigma_{rodded} + (1 - h(n)) \cdot \sigma_{unrodded} \quad (2)$$
- [0094] (여기서, $h(n)$ 는 삽입 이력 지표 변수, σ_{final} 는 최종 핵반응 단면적, σ_{rodded} 는 제어봉의 삽입 운전에 따른 핵반응 단면적, $\sigma_{unrodded}$ 는 제어봉의 미삽입 운전에 따른 핵반응 단면적)
- [0095] 상술한 바에 따르면, 삽입 이력 지표 변수는, 노심의 반응 과정에서 제어봉의 삽입 비율과 노드의 연소도의 상관관계를 고려하여 변화되는 값으로서, 처리부(110)는, 삽입 이력 지표 변수를 적용하여 복합 핵반응 단면적을 계산하며, 이에 기반하여 제어봉의 연소 상태에 따른 변화를 정확하게 추적하고 예측할 수 있다.
- [0096] 여기서, 상술하여 설명한 수학식(1)은, 노달 확산 코드의 1단계 코드에 기반하여, 제어봉의 미삽입 운전에 따른 거시적인 노드 각각에 대한 중성자 흡수물질의 수밀도 합(또는, 노심의 노드 전체에 대한 중성자 흡수물질의 수밀도) (Σ_{nodes})을 계산하기 위한 수학식(3)을 통하여 계산될 수 있다.
- [0097]
$$\Sigma_{nodes} = \Sigma'_{nodes} + N_{CR} \cdot \sigma_{CR} \quad (3)$$
- [0098] (여기서, Σ'_{nodes} 는, 단면적 피드백에서 제어봉 부분의 핵반응 단면적이 제거된 단면적, N_{CR} 은 제어봉의 수, σ_{CR} 는 제어봉 각각의 핵반응 단면적)
- [0099] 여기서, 제어봉 각각의 핵반응 단면적(σ_{CR})은 제어봉(또는 제어봉의 메쉬)이 삽입되어 있는 핵연료 노드의 환경

변수와 제어봉의 연소된 정도를 나타내는 환경 변수($CRDEP$)에 의하여 수학식(4)와 같이 계산될 수 있다.

$$\sigma_{CR} = f(BU, \sqrt{T_{fuel}}, T_{mod}, CRDEP) \quad (4)$$

(여기서, BU 는 연소도, $\sqrt{T_{fuel}}$ 는 핵연료 온도의 제곱근, T_{mod} 는 감속재 온도, $CRDEP$ 는 제어봉의 연소된 정도를 나타내는 환경 변수)

여기서, 제어봉의 연소된 정도를 나타내는 환경 변수($CRDEP$)는, 제어봉 물질의 최초 수밀도($N_{initial}$) 대비 연소된 제어봉 물질의 수밀도($N_{current}$)의 비율로서 제어봉 물질의 수밀도에 기반하여 수학식 (5)와 같이 계산될 수 있다.

$$CRDEP = 1 - \frac{N_{current}}{N_{initial}} \quad (5)$$

수학식(5)에 따르면, 제어봉이 장전된 후 연소되지 않은 경우의 $CRDEP$ 는 0이며, 50% 연소되었을 경우의 $CRDEP$ 는 0.5, 제어봉이 모두 연소되어 제어능을 상실한 경우의 $CRDEP$ 는 1과 같이 비례적으로 계산될 수 있다.

여기서, 제어봉의 메쉬(mesh) 구조 및 제어봉 물질의 수밀도 변화는, 이후 설명하는 제어봉의 메쉬 구조 개념 및 수밀도 변화를 계산하는 동작 중 적어도 일부를 적용하여 결정하는 것일 수 있다.

더하여, 처리부(110)는, 복수의 노드들 각각에 대하여 삽입 이력 지표 변수뿐 아니라 다양한 환경 변수들을 함께 고려하여 복합 핵반응 단면적을 계산할 수 있다. 예를 들면, 처리부(110)는, 연소도, 핵연료 온도(또는 핵연료 온도의 제곱근), 감속재 온도 중 적어도 일부 변수를 더 고려하여 복합 핵반응 단면적을 계산할 수 있다.

다시 도 3으로 돌아가서, 처리부(110)는, 상기 최후 핵반응 단면적에 기반하여 상기 핵연료 연소 효과를 추적(303)할 수 있다.

보다 상세하게 설명하면, 처리부(110)는, 최후 핵반응 단면적(σ_{final}) 값에 기반하여 핵연료의 연소도, 반응도, 및 그 변화를 추정할 수 있다.

즉, 처리부(110)는, 제어봉의 삽입 또는 인출에 대한 핵연료의 연소 효과를 추정하며, 이에 기반하여 핵연료의 연소 환경 변화, 연소도 변화, 반응도 변화, 및 핵반응 변화 중 적어도 일부를 추적할 수 있다.

다시 도 2로 돌아가서, 처리부(110)는, 상기 연소 효과의 추적 결과에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적(203)할 수 있다.

제어봉을 이용하여 원자로의 반응도(또는 잉여 반응도)를 제어함으로써 중성자 흡수 단면적이 높은 핵반응 제어 소재의 수밀도가 감소하며, 따라서 제어봉의 제어능이 변화할 수 있다.

여기서, 처리부(110)는, 상기 최후 핵반응 단면적에 기반하여 상기 제어봉의 삽입 운전에 따른 상기 제어봉 물질의 핵반응을 추적(401)하고, 상기 제어봉 물질의 핵반응을 추적한 결과에 기반하여 상기 제어봉 물질의 수밀도 변화를 추적(403)하며, 상기 수밀도 변화를 추적한 결과에 기반하여 상기 제어봉의 흡수 단면적 변화를 계산(405)하고, 및/또는 상기 제어봉의 흡수 단면적 변화에 기반하여 상기 핵연료의 반응도를 계산하여 상기 제어봉의 제어능 변화를 추적(407)할 수 있다.

제어봉 물질의 핵반응을 추적(401)하는 동작에서, 처리부(110)는, 삽입 이력에 따른 최후 핵반응 단면적에 기반하여 제어봉의 삽입 운전에 따른 핵연료에 대한 핵반응을 추적하며, 핵연료에 대한 핵반응 추적 결과에 기반하여 제어봉 물질의 핵반응을 계산할 수 있다.

여기서, 제어봉 물질은 핵반응 제어 소재 적어도 일부를 포함하여 구성될 수 있다.

보다 상세하게 설명하면, 처리부(110)는, 삽입 이력 지표 변수를 활용하여 노드 각각에 대한 제어봉 삽입 비율을 고려함으로써 노드 각각에 대한 핵반응을 추정할 수 있다. 처리부(110)는, 노드 각각에 대한 핵반응에 기반하여 노드 각각에 대한 제어봉 물질의 핵반응을 계산할 수 있다.

이후, 제어봉 물질의 수밀도 변화를 추적(403)하는 동작에서, 처리부(110)는, 제어봉 물질의 핵반응 추적 결과에 기반하여 연소 계산을 수행할 수 있다. 예를 들면, 처리부(110)는, 제어봉 물질의 핵반응 결과에 기반하여 핵연료의 상태 변화, 에너지 생산량 변화 중 적어도 일부를 계산할 수 있다.

- [0117] 처리부(110)는, 연소 계산 결과에 기반하여 중성자 생성 및 소멸의 변화를 추적하며, 중성자 생성 및 소멸의 변화에 대한 추적 결과 및 연소 계산 결과에 기반하여 제어봉 물질의 수밀도 변화를 추정할 수 있다.
- [0118] 이때, 처리부(110)는, 핵연료의 노드와 독립적으로 제어봉에 대하여 설정된 메쉬(mesh)의 개념을 적용하여 제어봉 물질의 수밀도 변화를 계산할 수 있다.
- [0119] 이와 관련하여, 도 7은 일 실시 예에 따른 장치에서 연료봉에 대하여 설정한 메쉬 구조에 대하여 개략적으로 도시한 도면이다. 그리고, 도 8은 일 실시 예에 따른 원자로 노심에서 핵연료 및 복수의 메쉬로 구분된 제어봉의 위치를 개략적으로 도시한 단면도이다.
- [0120] 제어봉 삽입 또는 인출에 기반하는 원자로 반응에서, 제어봉은 노심 내부에 위치한 시간에 따라서 연소 정도가 달라지며, 노심에 먼저 삽입되는 제어봉의 일단부에서 제어봉의 타단부 방향으로 연소의 정도에 편차를 가지게 된다.
- [0121] 이러한 편차를 반영하여 제어봉 물질의 수밀도 변화를 계산하기 위하여, 도 7에 도시된 바와 같이, 제어봉(70)은, 축방향(71)을 따라서 j , $j+1$, $j+2$, $j+3$ 등과 같이 복수의 메쉬 구조들로 분할 및 설정된 상태일 수 있다. 여기서, 제어봉(70)의 축방향(71)은, 제어봉(70)이 노심에 삽입 또는 인출되는 방향으로 설정될 수 있다.
- [0122] 이에 기반하여 도 8을 참고하면, 처리부(110)는, 원자로 반응 중에 제어봉(70)을 노심에 삽입하는 정도에 따라서, 핵연료(50)(또는 노심) 방향으로 삽입된 제어봉의 메쉬 구조 각각에 대하여 제어봉 물질의 수밀도 변화를 계산할 수 있다.
- [0123] 보다 상세하게 설명하면, 처리부(110)는, 제어봉의 메쉬 구조들 각각에 대하여 초기 수밀도 및 핵반응에 의하여 수행되는 중성자 생성 및 소멸에 따른 중성자 밸런스의 차이 값에 기반하여 메쉬 구조들 각각에 대한 수밀도 변화를 계산할 수 있다.
- [0124] 처리부(110)는, 메쉬 구조들 각각에 대하여 계산된 수밀도 변화들을 결합하여 제어봉의 수밀도 변화를 계산할 수 있다.
- [0125] 이후, 제어봉의 흡수 단면적 변화를 계산(405)하는 동작에서, 처리부(110)는, 메쉬 구조들 각각에 대한 수밀도 변화에 기반하여 메쉬 구조들 각각에 대한 흡수 단면적 변화를 계산할 수 있다.
- [0126] 보다 상세하게 설명하면, 처리부(110)는, 메쉬 구조들 각각에 대하여 변화 전 흡수 단면적에 수밀도 변화를 반영하여 메쉬 구조들 각각에 대한 흡수 단면적 변화를 계산할 수 있다.
- [0127] 처리부(110)는, 메쉬 구조들 각각에 대하여 계산된 흡수 단면적 변화들을 결합하여 제어봉의 흡수 단면적 변화를 계산할 수 있다.
- [0128] 이후, 제어봉의 제어능 변화를 추적(407)하는 동작에서, 처리부(110)는, 계산된 흡수 단면적 변화에 기반하는 중성자 생성 및 소멸이 제어봉의 기능에 미치는 영향에 기반하여 제어봉의 제어능 변화를 계산할 수 있다.
- [0129] 이때, 처리부(110)는, 제어봉의 메쉬 구조들 각각에 대하여 제어능 변화를 계산하고, 계산된 제어능 변화들을 결합하여 제어봉의 제어능 변화를 계산할 수 있다.
- [0130] 상술한 바와 같이, 처리부(110)는, 원자로 반응 과정에서 제어봉의 삽입 및 인출을 고려하여 핵연료 연소 효과 및 그에 따른 제어봉의 제어능 변화를 추적하며, 이에 기반하여 처리부(110)는, 원자로의 운전 상태 및 운전 상태 변화를 정확하게 모델링할 수 있다.
- [0131] 상술하여 설명한 바와 같이, 핵연료의 연소 효과를 추적하는 동작 또는 제어봉의 제어능 변화를 추적하는 동작을 포함하는 원자로 노심 반응 해석 방법 및 그 세부 동작들의 성능 검증을 위하여 제어봉의 삽입 운전 에 따른 노심(또는 핵연료 집합체)에 대한 연소 계산을 수행할 수 있다.
- [0132] 이때, 반응도를 나타내는 대표적인 결과인 무한증배계수를 비교하였으며, 도 9는 일 실시 예에 따른 제어봉의 삽입 동작에서 연소 시간 경과에 따른 무한증배계수의 변화를 도시하는 그래프이다.
- [0133] 도 9를 참고하여, 기준해 결과에 따르면, 제어봉의 연소에 따라 제어봉의 성능이 감소함으로써 증가하는 무한증배계수를 확인할 수 있다. 이때, 노달 확산 코드의 2단계 코드에 따른 결과에 따르면 제어봉 삽입 운전 에 따른 연소 효과와 제어봉의 연소가 반영되지 않아 기준해 결과와 연소도 증가에 따른 차이를 보이고 있다.
- [0134] 반면, 본 개시에 따른 원자로 노심 반응 해석 방법에 따른 결과는 기준해 결과와 가까운 무한증배계수를 추적하

고 있음을 확인할 수 있다.

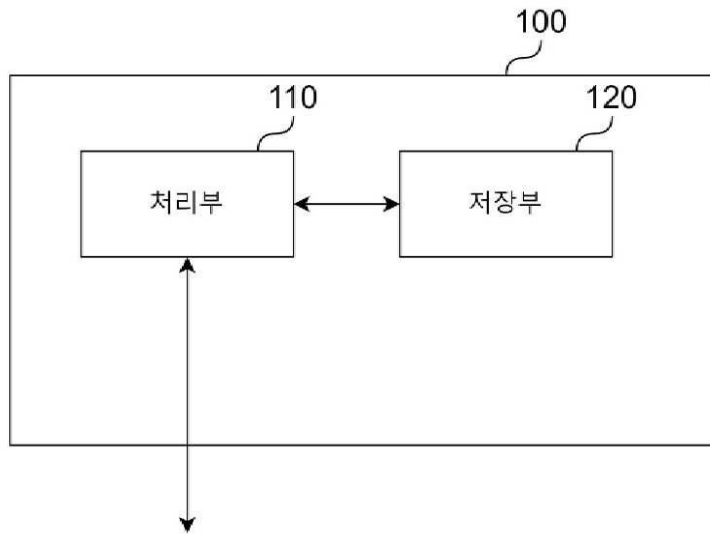
- [0135] 상술하여 설명한 바와 같이, 다양한 실시 예에 따르면, 원자로 노심 반응 해석 방법 및 그 장치를 통하여 제어봉의 삽입 운전예에 따른 원자로 반응 상태 및 그 변화를 정확하게 예측할 수 있고, 따라서 원자로 반응을 유지하기 위한 제어봉 제어의 정확도를 향상시킬 수 있는 효과가 있다.
- [0136] 다양한 실시 예에 따르면, 원자로 노심 반응 해석 방법 및 그 장치를 통하여 감속재에 핵반응 제어 소재를 적용하지 않는 소형 원자로 등의 운영에서 제어봉의 삽입 또는 인출을 정확하게 제어함으로써 원자로 운전 안정성을 향상시킬 수 있는 효과가 있다.
- [0137] 다양한 실시 예에 따르면, 추적의 표현은 예측, 추정, 또는 분석의 의미 중 적어도 일부를 포함할 수 있다. 이에 따라서, 추적의 표현들 중 적어도 일부를 예측, 추정, 또는 분석의 용어로 대체하여 표현할 수 있을 것이다.
- [0138] 상세한 설명에 따르면, 장치(100)가 수행하는 것으로 설명하는 다양한 실시 예의 기능들은 장치(100)의 처리부(110)를 통하여 처리되는 동작으로서, 장치(100) 또는 장치(100)와 연결된 다른 장치의 구성요소들과 유기적으로 연결되어 수행될 수 있다.
- [0139] 이상과 같이 실시 예들이 비록 한정된 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 다양한 실시 예들을 기초로 다양한 기술적 수정 및 변형을 적용할 수 있다.
- [0140] 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.
- [0141] 특히, 흐름도를 참고하여 설명하는 경우, 복수의 단계를 구성하고 단계들을 지정된 순서에 따라서 순차적으로 실행하는 것으로 기재하고 있지만, 반드시 기재된 순서로 한정되는 것은 아니다.
- [0142] 다시 말해, 흐름도에 기재된 단계들 중 적어도 일부를 변경 또는 삭제하여 실행하거나 적어도 하나의 단계를 추가하는 것도 실시 예로서 적용 가능하며, 하나 이상의 단계를 병렬적으로 실행하는 것으로도 실시 예로서 적용 가능할 것이다. 즉, 단계들이 반드시 시계열적인 순서로 동작하는 것으로 한정되지 않으며, 이 또한 본 개시의 실시 예에 포함된다 해야 할 것이다.
- [0143] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시 예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 청구범위의 범위에 속한다 해야 할 것이다.

부호의 설명

- [0144] 100: 장치
- 110: 처리부
- 120: 저장부
- 50: 핵연료
- 70: 제어봉

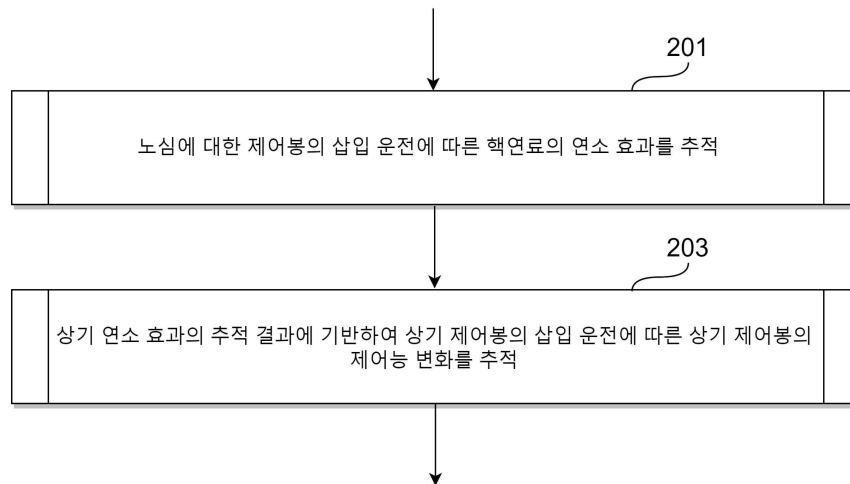
도면

도면1



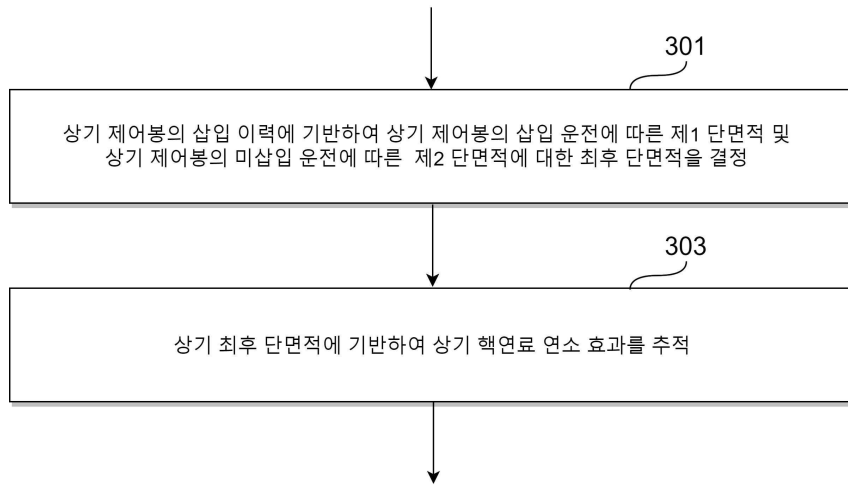
도면2

30 ↘



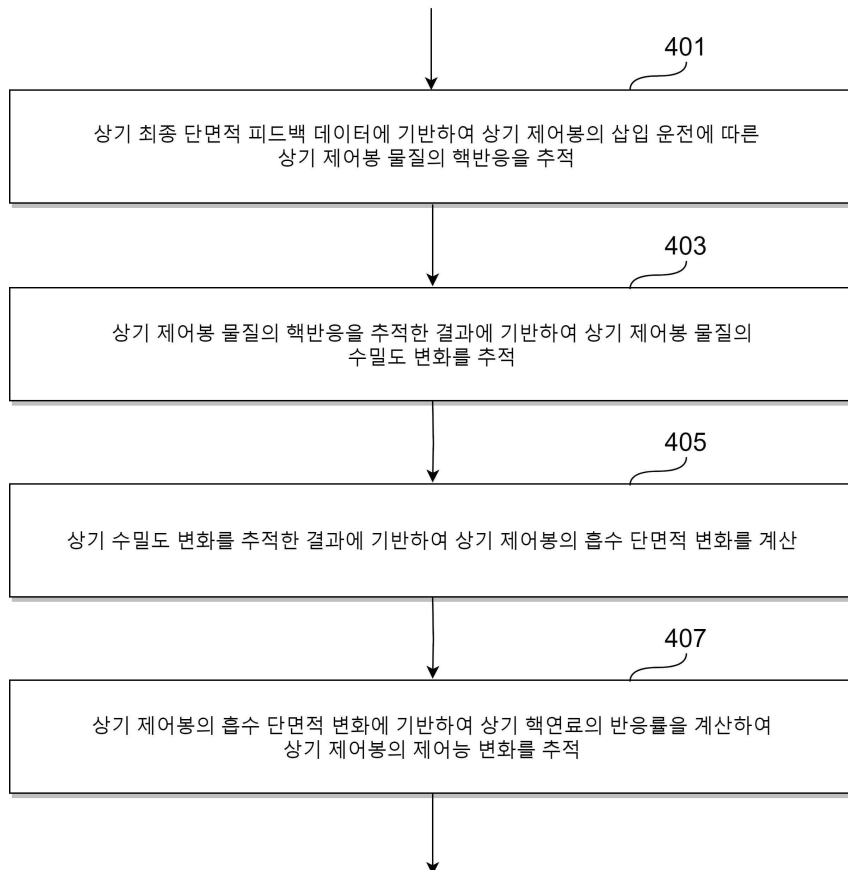
도면3

201 ↘

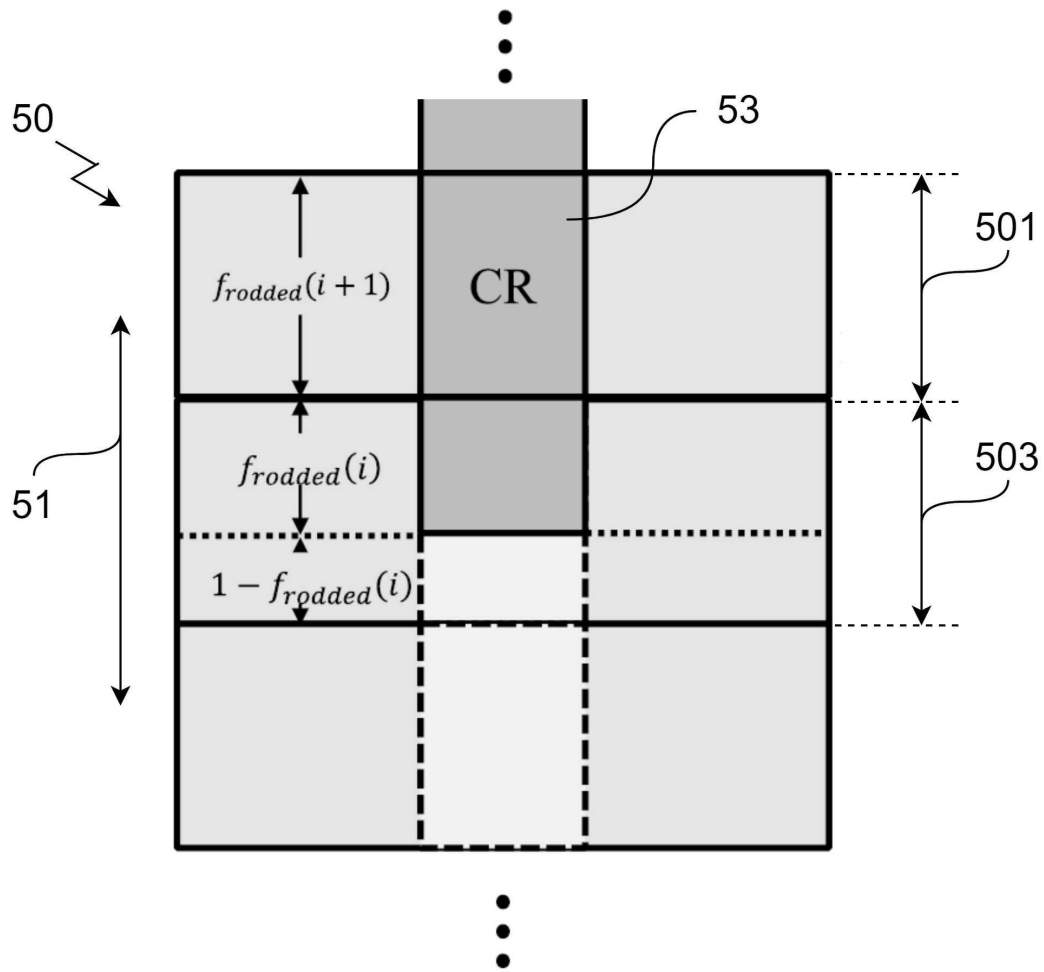


도면4

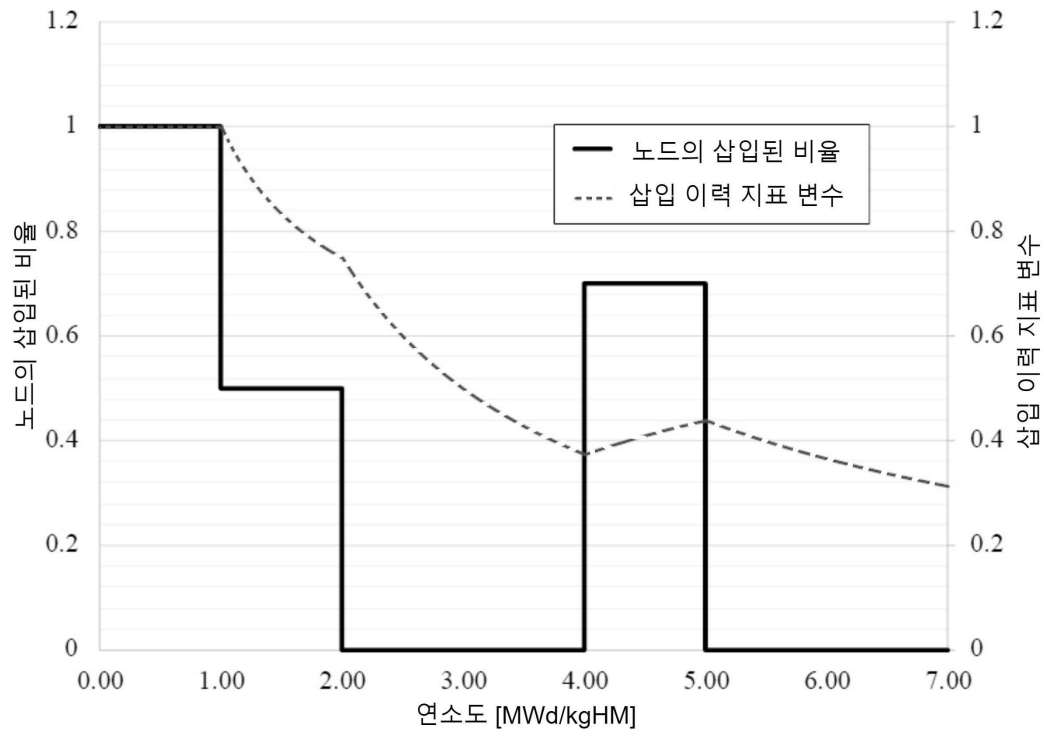
203 ↘



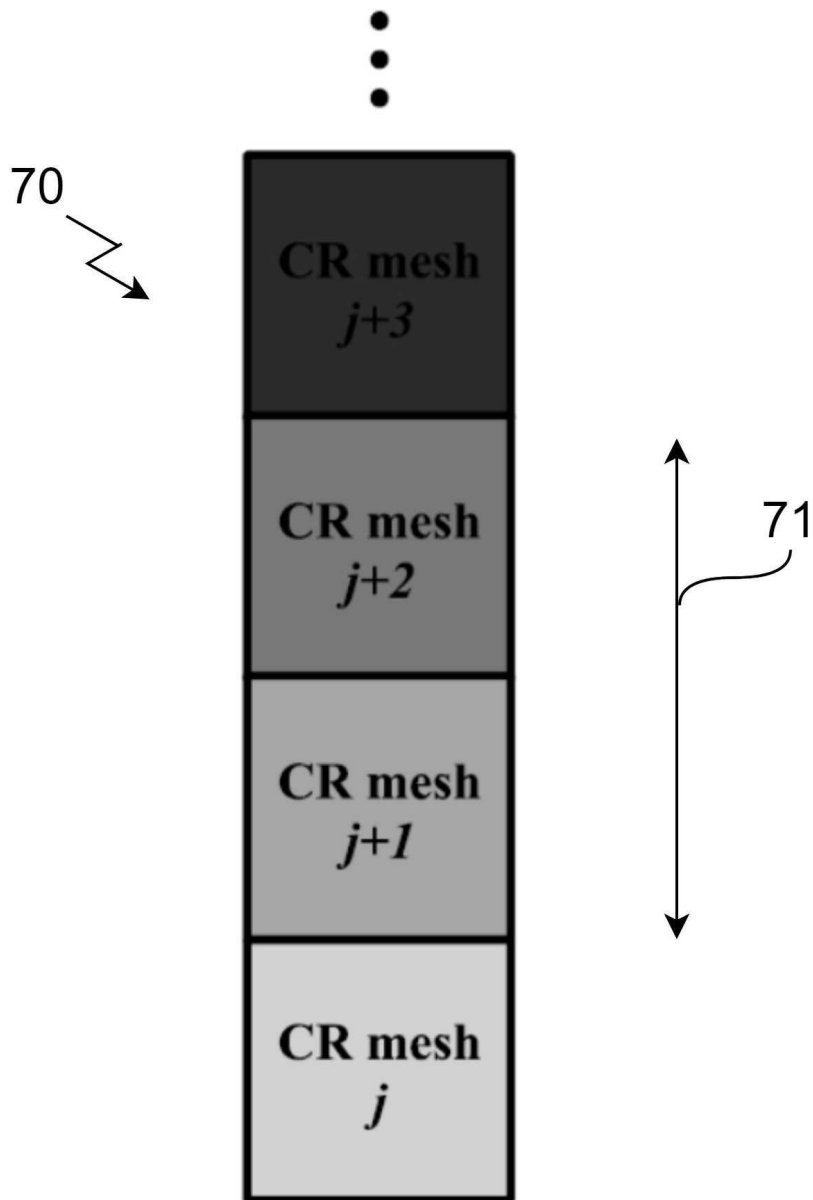
도면5



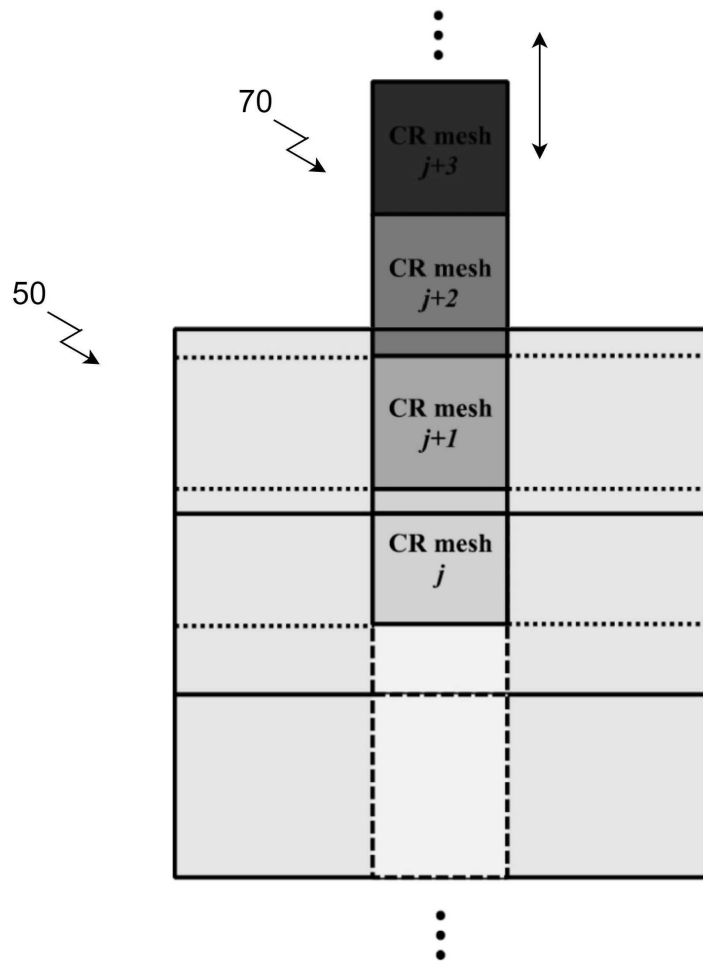
도면6



도면7



도면8



도면9

