(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0165774
(43) 공개일자 2024년11월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21D 3/00 (2006.01) *G06F 30/30* (2020.01)
(52) CPC특허분류
G21D 3/001 (2013.01)
G06F 30/30 (2020.01)
(21) 출원번호 10-2023-0063326
(22) 출원일자 2023년05월16일
심사청구일자 2023년05월16일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
이덕중
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 112동 501-6호
자허 아와이스
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 308동 706호
장재림
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 112동 510-2호
(74) 대리인
김종선, 이형석

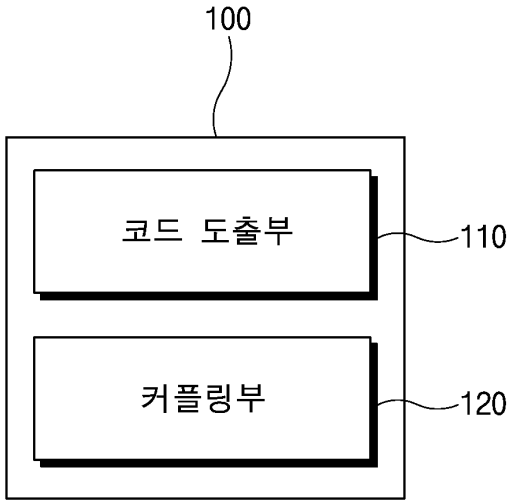
전체 청구항 수 : 총 14 항

(54) 발명의 명칭 **원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치 및 방법**

(57) 요 약

본 발명은 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치 및 방법에 관한 것으로, 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치는 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈로부터 노심해석 전산코드를 도출하고, 열수력 해석 모듈로부터 열수력 해석코드를 도출하며, 핵연료성능 해석 모듈로부터 핵연료성능 해석 코드를 도출하는 코드 도출부 및 상기 노심해석 전산코드, 상기 열수력 해석 코드 및 상기 핵연료성능 해석 코드를 결합하여 모듈간 필요 정보를 상호 제공하는 커플링부를 포함할 수 있다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
Y02E 30/30 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415188004
과제번호	1415188004
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

명 세 서

청구범위

청구항 1

원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치에 있어서.

중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈로부터 노심해석 전산코드를 도출하고, 열수력 해석 모듈로부터 열수력 해석 코드를 도출하며, 핵연료성능 해석 모듈로부터 핵연료성능 해석 코드를 도출하는 코드 도출부; 및

상기 노심해석전산코드, 상기 열수력 해석 코드 및 상기 핵연료성능 해석 코드를 결합하여 모듈간 필요 정보를 상호 제공하는 커플링부를 포함하는 다물리 코드 연계 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 코드 도출부는,

상기 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈로부터 원자력 발전소의 전체 및 분기 별 유량 데이터와 전력 분배 데이터를 포함하는 상기 노심해석 전산코드를 도출하는 것인, 다물리 코드 연계 장치.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 코드 도출부는,

상기 열수력 해석 모듈로부터 상기 열수력 해석 모듈과 이외의 모듈간 데이터 교환을 위한 인터페이스 코드 및 열전달 솔버를 포함하는 상기 열수력 해석 코드를 도출하는 것인, 다물리 코드 연계 장치.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 코드 도출부는,

열전도 데이터를 수집하는 상기 연료성능 모듈로부터 연소 및 과도 계산을 위한 연료봉 분석 프로그래밍 인터페이스 코드 포함하는 상기 연료성능 코드를 도출하는 것인, 다물리 코드 연계 장치.

청구항 5

제2항에 있어서,

상기 커플링부는,

상기 노심해석 전산코드의 전력 분배 데이터를 상기 열수력 해석 모듈 및 핵연료성능 해석 모듈로 제공하는 것인, 다물리 코드 연계 장치.

청구항 6

제3항에 있어서,

상기 커플링부는,

상기 열전달 솔버부터 도출된 감속재 온도 및 감속재 밀도를 상기 중성자 모듈로 제공하고,

상기 열전달 솔버부터 도출된 냉각재 온도를 상기 핵연료성능 해석 모듈로 제공하는 것인, 다물리 코드 연계 장치.

청구항 7

제4항에 있어서,

상기 커플링부는,

상기 핵연료성능 해석 코드로부터 도출된 연료 도플러 온도를 상기 노심해석 전산코드로 제공하고,

상기 핵연료성능 해석 코드로부터 도출된 산화물 온도를 상기 열수력 해석 코드로 제공하는 것인, 다물리 코드 연계 장치.

청구항 8

원자력 발전소의 다물리 코드 연계 방법에 있어서,

(a) 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈로부터 노심해석 전산코드를 도출하고, 열수력 해석 모듈로부터 열수력 해석 코드를 도출하며, 핵연료성능 해석 모듈로부터 핵연료성능 해석 코드를 도출하는 단계; 및

(b) 상기 노심해석 전산코드, 상기, 열수력 해석 코드 및 상기 핵연료성능 해석 코드를 결합하여 모듈간 필요 정보를 상호 제공하는 단계를 포함하는 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 (a) 단계는,

상기 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈로부터 원자력 발전소의 전체 및 분기 별 유량 데이터와 전력 분배 데이터를 포함하는 상기 노심해석 전산코드를 도출하는 것인, 다물리 코드 연계 방법.

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 (a) 단계는,

열수력 해석 모듈로부터 상기 열수력 해석 모듈과 이외의 모듈간 데이터 교환을 위한 인터페이스 코드 및 열전달 솔버를 포함하는 상기 열수력 해석 코드를 도출하는 것인, 다물리 코드 연계 방법.

청구항 11

제8항에 있어서,

상기 (a) 단계는,

열전도 데이터를 수집하는 상기 핵연료성능 해석 모듈로부터 연소 및 과도 계산을 위한 핵연료봉 분석 프로그래밍 인터페이스 코드 포함하는 상기 핵연료성능 해석 코드를 도출하는 것인, 다물리 코드 연계 방법.

청구항 12

제9항에 있어서,

상기 (b) 단계는,

상기 노심해석 전산코드의 전력 분배 데이터를 상기 열수력 해석 코드 및 핵연료성능 해석 코드로 제공하는 것인, 다물리 코드 연계 방법.

청구항 13

제10항에 있어서,

상기 (b) 단계는,

상기 열전달 솔버부터 도출된 감속재 온도 및 감속재 밀도를 상기 노심해석 전산코드로 제공하고,

상기 열전달 솔버부터 도출된 냉각재 온도를 상기 핵연료성능 해석 모듈로 제공하는 것인, 다물리 코드 연계 방법.

청구항 14

제11항에 있어서,

상기 (b) 단계는,

상기 핵연료성능 해석 코드로부터 도출된 연료 도플러 온도를 상기 노심해석전산코드로 제공하고,

상기 핵연료성능 해석 코드로부터 도출된 산화물 온도를 상기 열수력 해석 코드로 제공하는 것인, 다물리 코드 연계 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치 및 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 원자력 발전소의 원자로에서 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 노심해석 전산 (neutronic kinetics) 코드, 열수력 (thermal hydraulics) 해석 코드, 핵연료성능 (fuel performance) 해석 코드는 본질적으로 서로 의존하는 중요한 물리 현상이다. 상기 코드를 포함하는 원자력 발전소의 다양한 벤치마크 데이터를 통해 원자력 발전소의 운영에 필요한 매개변수를 정확하게 모델링하고 검증하는 것은 매우 중요한 사항이다. 종래의 단일 물리 코드를 이용한 모델링은 보수적인 결과를 도출하여 다른 물리 코드가 반영되지 않는 문제점이 존재한다.

선행기술문헌

특허문헌

[0003] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허공보 제10-2514916호(2023년3월3일 등록)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 발명은 서로 다른 물리 코드를 결합하여 원자력 발전소의 안전과 관련된 파라미터에 대하여 정확한 정보를 제공할 수 있는 원자력 발전소의 다물리 코드 결합 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0005] 상기 기술적 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 결합 장치는 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈로부터 노심해석 전산코드를 도출하고, 열수력 해석 모듈로부터 열수력 해석 코드를 도출하며, 핵연료성능 해석 모듈로부터 연료성능 코드를 도출하는 코드 도출부 및 상기 노심해석 전산코드, 상기 열수력 코드 및 상기 핵연료성능 해석 코드를 결합하여 모듈간 필요 정보를 상호 제공하는 커플링부를 포함할 수 있다.

[0006] 또한, 상기 코드 도출부는, 상기 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈로부터 원자력 발전소의 전체 및 분기 별 유량 데이터와 전력 분배 데이터를 포함하는 상기 노심해석 전산코드를 도출할 수 있다.

[0007] 또한, 상기 코드 도출부는, 열수력 해석 모듈로부터 상기 열수력 해석 모듈과 이외의 모듈간 데이터 교환을 위한 인터페이스 코드 및 열전달 솔버를 포함하는 상기 열수력 해석 코드를 도출할 수 있다.

[0008] 또한, 상기 코드 도출부는, 열전도 데이터를 수집하는 상기 핵연료성능 해석 모듈로부터 고갈 및 과도 계산을 위한 연료봉 분석 프로그래밍 인터페이스 코드 포함하는 상기 핵연료성능 해석 코드를 도출할 수 있다.

[0009] 또한, 상기 커플링부는, 상기 노심해석 전산코드의 전력 분배 데이터를 상기 열수력 해석 모듈 및 핵연료성능 해석 모듈로 제공할 수 있다.

[0010] 또한, 상기 커플링부는, 상기 열수력 해석 코드부터 도출된 감속재 온도 및 감속재 밀도를 상기 노심해석 전산코드로 제공하고, 상기 열수력 해석 코드로부터 도출된 냉각재 온도를 상기 핵연료성능 해석 모듈로 제공할 수 있다.

[0011] 또한, 상기 커플링부는, 상기 핵연료성능 해석 코드로부터 도출된 연료 도플러 온도를 상기 노심해석 전산코드로 제공하고, 상기 핵연료 성능 해석 코드로부터 도출된 산화물 온도를 상기 열수력 해석 코드로 제공할 수 있다.

[0012] 상기 기술적 과제를 해결하기 위한 본 발명의 또 다른 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 방법은 (a) 중성자 모듈로부터 노심해석 전산코드를 도출하고, 열수력 해석 모듈로부터 열수력 해석 코드를 도출하며, 핵연료성능 해석 모듈로부터 핵연료성능 해석 코드를 도출하는 단계 및 (b) 상기 노심해석 전산코드, 상기, 열수력 해석 코드 및 상기 핵연료성능 해석 코드를 결합하여 모듈간 필요 정보를 상호 제공하는 단계를 포함할 수 있다.

[0013] 또한, 상기 (a) 단계는, 상기 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈로부터 원자력 발전소의 전체 및 분기 별 유량 데이터와 전력 분배 데이터를 포함하는 상기 노심해석 전산코드를 도출할 수 있다.

[0014] 또한, 상기 (a) 단계는, 열수력 해석 모듈로부터 상기 열수력 해석 모듈과 이외의 모듈간 데이터 교환을 위한 인터페이스 코드 및 열전달 솔버를 포함하는 상기 열수력 해석 코드를 도출할 수 있다.

[0015] 또한, 상기 (a) 단계는, 열전도 데이터를 수집하는 상기 핵연료성능 해석 모듈로부터 고갈 및 과도 계산을 위한 핵연료봉 분석 프로그래밍 인터페이스 코드 포함하는 상기 핵연료성능 해석 코드를 도출할 수 있다.

[0016] 또한, 상기 (b) 단계는, 상기 노심해석 전산코드의 전력 분배 데이터를 상기 열수력 해석 모듈 및 핵연료성능 해석 모듈로 제공할 수 있다.

[0017] 또한, 상기 (b) 단계는, 상기 열수력 해석 코드로부터 도출된 감속재 온도 및 감속재 밀도를 상기 노심해석 전산코드로 제공하고, 상기 열수력 해석 코드부터 도출된 냉각재 온도를 상기 핵연료성능 해석 모듈로 제공할 수 있다.

[0018] 또한, 상기 (b) 단계는, 상기 핵연료성능 해석 코드로부터 도출된 연료 도플러 온도를 상기 노심해석 전산코드로 제공하고, 상기 핵연료성능 해석 코드로부터 도출된 산화물 온도를 상기 열수력 해석 코드로 제공할 수 있다.

발명의 효과

[0019] 상기한 본 발명의 일 실시예에 따르면, 서로 다른 물리 코드를 결합하여 원자력 발전소의 안전과 관련된 파라미터에 대하여 정확한 정보를 제공할 수 있는 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치 및 방법을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0020] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 구성을 도시한 도면이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 코드간 단방향 결합의 예를 도시한 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 코드간 양방향 결합의 예를 도시한 도면이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 동작 흐름을 도시한 도면이다.

도 5 및 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 주기별 연소 결과를 도시한 도면이다.

도 7 및 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 모델링 결과를 도시한 도면이다.

도 9 및 도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 미세모델링 결과를 도시한 도면이다.

도 11 및 도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 1 주기에 따른 고갈 결과를 도시한 도면이다.

도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 2 주기에 따른 고갈 결과를 도시한 도면이다.

도 14는 단방향 및 양방향(MPCORE) 결합을 사용한 가상원자로의 주기 3의 고갈 결과를 도시한다.

도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다중 물리 코드 결합 방법의 흐름을 도시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0021] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시 예를 가질 수 있는 바, 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 상세하게 설명하고자 한다.

[0022] 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0023] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 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.

[0024] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 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 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가진 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0025] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여, 본 발명의 바람직한 실시 예를 보다 상세하게 설명하고자 한다. 본 발명을 설명함에 있어 전체적인 이해를 용이하게 하기 위하여 도면상의 동일한 구성요소에 대해서는 동일한 참조부호를 사용하고 동일한 구성요소에 대해서 중복된 설명은 생략한다.

[0026] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다중 물리 코드 결합 장치의 구성을 도시한 도면이다.

[0027] 도 1을 참조하면, 다물리 코드 결합 장치(100)는 코드 도출부(110) 및 커플링부(120)를 포함할 수 있다. 다물리 코드 결합 장치(100)는 원자력 발전소를 구성하는 다양한 물리 모듈의 데이터 결합 즉, 서로 다른 물리 코드를 결합하기 위한 것으로서, 원자력 발전소의 벤치마크 데이터를 통해 계산 코드가 다양한 파라미터를 모델링할 수 있다.

[0028] 다물리 코드 결합 장치(100)는 원자력 발전소의 대표적인 모듈인 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈, 열수력해석 모듈, 핵연료성능 해석 모듈의 상호간(양방향) 데이터 결합을 통해 원자력 발전소의 다중 물리 및 사이클 분석에 기초한 다중 사이클 고갈 벤치마크(multicycle depletion benchmark) 모델링에 활용될 수 있다. 코드 도출부(110)는 중성자 거동과 핵연료 반응을 모사하는 모듈로부터 노심(neutronic kinetics)해석 전산코드를 도출하고, 열수력 해석 모듈로부터 열수력(thermal hydraulics) 해석 코드를 도출하며, 핵연료성능 해석 모듈로부터 핵연료성능(fuel performance) 해석 코드를 도출할 수 있다.

[0029] 물리 코드인 노심해석 전산코드, 열수력 해석 코드, 핵연료성능 해석 코드의 결합은 원자로의 고갈(depletion) 주기 동안 임계 붕소 농도에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 상기 세 코드의 결합을 통해 온도, 엔탈피, 축/방사형 피크 인자와 같이 원자력 발전소의 안전과 관련된 파라미터에 대하여 정확한 정보를 제공할 수 있다. 후술하겠지만 예시적으로, 연료 연소율이 증가하면 연료와 클래딩 사이의 갭 폭이 감소하여 연료에서 냉각재로 열 전달이 증가한다. 이러한 연료 전도 특성의 변화는 적절한 연료 연소율 의존적 전도 상관관계를 사용해야 하며, 상기 코드들의 결합을 통해 필요한 데이터를 획득할 수 있다.

[0030] 커플링부(120)는 노심해석 전산코드, 열수력 해석 코드 및 핵연료성능 해석 코드를 결합하여 모듈간 필요 정보를 상호 제공할 수 있다. 커플링부(120)는 서로 다른 물리 코드간 결합을 위해 C++ 기반의 결합 프레임워크를 포함하며, 이를 통해 물리 코드간 결합이 이루어질 수 있다. 코드 결합의 원활한 제어를 위해 결합 프레임워크는 사용자가 용이하게 입력 및 출력 처리할 수 있는 인터페이스를 제공할 수 있다.

[0031] 또한, 커플링부(120)는 서로 다른 모듈에 대한 서로 다른 메시 요구 사항을 기반으로 상기 모듈간 데이터 교환을 위한 보간을 수행할 수 있다.

[0032] 구체적으로, 코드 도출부(110)는 상기 중성자 모듈로부터 원자력 발전소의 전체 및 분기 별 유량 데이터와 전력 분배 데이터를 포함하는 상기 중성자 동력학 코드를 도출할 수 있다. 중성자 모듈은 2단계 모델링 접근법에 기초하여 중성자 계산을 수행할 수 있다. 먼저, 1단계는 중성자 모듈에 포함된 코드 중 격자 코드(STREAM)은 연료 어셈블리와 리플렉터의 단면적 연산에 활용될 수 있다. 예시적으로, 연료 재료의 단면적은 540K, 900K 및 1500K이고, 감속재 재료의 단면적은 540K, 565K 및 590K이며, 붕소 농도 값은 0.1, 650, 1300 및 2400ppm으로 상정한다. 격자 코드는 모든 어셈블리의 제어봉 삽입 및 배출에 대한 단면적을 연산할 수 있다. 연소 지점의 온도와 붕소 농도가 0-80 MWd/kg 범위에서 서로 다른 조합의 고온 상태에 대해 28개의 분기 케이스가 생성될 수 있다.

[0033] 중성자 모듈의 포함된 코드 중 STORA 코드는 하나의 XS 파일에서 모든 어셈블리의 그룹 상수, 수 밀도 및 형태 함수를 연결하는데 활용될 수 있다. 또한 노심해석 전산코드는 노드 확산 코드(RAST-K)라 할 수 있으며, 중성자 모듈로부터 원자력 발전소의 전체 및 분기 별 유량 데이터와 전력 분배 데이터를 도출할 수 있을 뿐만 아니라, 원자력 발전소의 전체/분기 코어의 유량 및 전력 분배에 대한 3D 확산 방정식을 연산할 수 있다.

[0034] 노심해석 전산코드는 원자로 주기 분석에 사용될 수 있고, 분석 결과는 벤치마크 결과 또는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 검증된 후 유량 및 전력 프로파일에 적용(허용)될 수 있다. 노심해석 전산코드는 단일 연료 집합체를 1 내지 4개의 노드로 나누고 몬테카를로 코드에서 균일한 단면을 생성할 수 있다. 이후 노드별 전력은 전송 코드에서 생성된 형식 함수를 사용하여 핵연료봉 출력 재구성을 통해 핵연료봉 출력 프로파일을 계산하기 위해 사용될 수 있다.

[0035] 노심해석 전산코드는 핵연료봉 출력(pin power) 재구성을 사용한 통합 노달 방법(Unified Nodal method)을 구현할 수 있다. 또한, 중성자 동력학 코드는 Chebyshev 합리적 근사 방법(Chebyshev rational approximation method)에 기초하여 연소 계산을 위한 Bateman 방정식을 연산할 수 있다.

[0036] 2단계는 노심해석 전산코드에서 제공하는 셔플링 및 로테이션 유틸리티는 의해 다중 사이클 고갈 문제를 분석하는 것에 활용될 수 있다. 독립형 노심해석 전산코드의 연산에서 1차원(1D) 열수력 모델은 냉각재 열전달에 활용되고, 후술하는 FRAPCON 연소 의존 상관관계는 연료, 갭, 클래드 및 산화물 전도도에 활용될 수 있다. 그러나, 열수력 해석 모듈 및 연료성능 모듈의 활용을 위해 노심해석 전산코드에 기초한 열수력 및 연료 전도 기능은 선택적으로 사용될 수 있다.

[0037] 코드 도출부(110)는 열수력 모듈로부터 열수력 모듈과 이외의 모듈간 데이터 교환을 위한 인터페이스 코드 및 열전달 솔버를 포함하는 열수력 코드를 도출할 수 있다. 열수력 코드는 Coolant boiling in rod arrays-Two Fluid (CTF) 시뮬레이션 코드를 포함할 수 있다. 열수력 코드는 연료봉 사이의 영역인 각 채널 내의 냉각재 흐름을 시뮬레이션하여 원자로 노심의 최종 방열판을 모델링하기 위해 활용될 수 있다. 연료에서 생산된 동력은 간극과 핵연료 피복재를 통해 냉각재로 전달될 수 있다.

[0038] 열수력 해석 코드는 열수력 해석 모듈과 이외의 모듈간 데이터 교환을 위한 인터페이스 코드를 통해 열수력 해석 코드와 외부 코드간의 데이터 교환을 용이하게 수행할 수 있다. 또한 열수력 해석 코드는 채널 중심 코드이며, 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈과 핵연료성능 해석 모듈과 로드 기반으로 데이터를 교환할 수 있다. 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈과 핵연료성능 해석 모듈은 로드/핀 단위로 데이터를 교환하는 반면 열수력 해석 코드는 채널 중심 코드이므로, 따라서, 열수력 해석 코드와 결합할 경우 로드 중심 정보가 사용될 수 있다. 또한, 열유압 코드는 열전달 솔버를 통해 연료성능 코드에 경계 조건으로 냉각재 온도에 대한 정보를 제공할 수 있다.

[0039] 열수력 해석 코드는 병렬 처리를 위한 핵연료 집합체의 수와 동일한 수의 프로세서가 요구되며, 각 프로세서에는 자체 핵연료 집합체에 대한 데이터를 포함할 수 있다. 열수력 해석 코드는 특정 로드에 대한 데이터를 수집하기 위해 "rod_owner" 함수를 사용하여 각 프로세서 정보를 획득할 수 있다. 또한, 열수력 해석 코드는 쿼터 대칭 옵션에 기초하여 쿼터 코어를 모델링할 수 있으므로 병렬로 작동하는 데 필요한 모델링된 핵연료 집합체와 프로세서의 수를 저감할 수 있다. "Get_mirrored_rod" 서브루틴은 대칭선 상에 존재하는 핵연료 집합체에서 모델링되지 않은 로드를 모방하는 모델링된 로드의 인덱스를 획득할 경우 사용될 수 있다.

[0040] 코드 도출부(110)는 열전도 데이터를 수집하는 연료성능 모듈로부터 연소 및 과도 계산을 위한 연료봉 분석 프로그래밍 인터페이스 코드 포함하는 핵연료성능 해석 코드를 도출할 수 있다. 핵연료성능 해석 코드는 연소 의존 상관 관계 및 동적 간격 폭을 사용하여 연료, 피복재 및 산화물 표면의 온도 프로파일을 계산할 수 있다.

[0041] 또한, 핵연료성능 해석 코드는 연소된 연료를 모델링하여 피복재 응력을 산출할 때 사용될 수 있다. 연료성능 코드는 동적 갭 컨덕턴스를 모델링할 뿐만 아니라, 연소에 따른 연료 및 피복재의 열전도도 변화를 모델링할 수 있다. 피복재 표면의 산화물층 형성 역시 핵연료성능 해석 코드에 기초하여 모델링 될 수 있다. 또한, 핵연료성능 해석 코드는 피복재를 균열에 취약하게 만드는 정확한 연료 피복재 수소화물 침전물을 예측하기 위해 활용될 수 있다.

[0042] 핵연료성능 해석 코드는 연료봉 분석 프로그래밍 인터페이스(FRAPI)를 포함하며, FRAPI는 고갈 계산을 위한 FRAPCON 코드와 과도(transient) 해석 계산을 위한 FRAPTRAN 코드를 결합하기 위한 인터페이스 역할을 수행할 수 있다. 핵연료성능 해석 코드는 모든 연소도(burnup) 단계에서 재시작 파일을 작성하고, 일시적 또는 다중 사이클 손실을 위해 재시작 파일을 로딩할 수 있다. 재시작 파일은 모든 연소 단계에서 연소 및 일시적인 계산을 위해 생성될 수 있다. 핵연료 주기 동안 과도한 출력으로 인해 연료 팽창, 피복 크리프, 후프 응력, 연료 균열 등이 발생할 수 있다. 이에, 핵연료성능 해석 코드는 연료 변형 및 펠릿 클래드 기계적 상호 작용을 분석하기 위한 모델을 구축할 수 있다.

[0043] 동적 갭 열전도(dynamic gap heat conductance), 방사형/축방향 열전도 및 열전도의 연소 의존 상관관계는 핵연료성능 해석 코드에게 중요한 요소이다. 핵연료성능 해석 코드는 95%의 이론 밀도에서 UO_2 펠릿의 연료 열전도율을 연소도 정보로 모델링할 수 있다. 연료성능 코드는 자체 고갈 모듈을 포함하므로, 상기 중성자 동력학 코드와 연료성능 코드간의 고갈 정보는 전송되지 않을 수 있다. 또한, 핵연료 집합체의 셔플링 및 로테이션은 핵연료성능 해석 코드에서도 제공될 수 있기 때문에, 전체 로드 수가 모든 프로세서에 동일하게 분배되므로 시간과 메모리 요구량이 크게 감소될 수 있다.

[0044] 노심해석 전산코드, 열수력 해석 코드 및 핵연료성능 해석 코드는 본질적으로 서로 의존적인 성향을 갖는다. 핵분열 단면적, 가연성 물질 흡수 단면적 및 감속재 산란 단면적은 모두 연료 및 감속재 온도에 의존한다. 이러한 온도 의존성은 열수력 해석 코드를 노심해석 전산코드와 결합해야만 도출될 수 있다. 이하에서는 노심해석 전산코드, 열수력 해석 코드 및 핵연료성능 해석 코드간의 단방향 결합 및 양방향 결합에 대해 구체적으로 살펴본다.

[0045] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 코드간 단방향 결합의 예를 도시한 도면이다.

[0046] 커플링부(120)에 의한 모듈간 통신은 모듈 내부적으로 코드를 변경할 필요성없이 데이터 교환이 가능하다. 이를 통해 모듈의 독립성과 재사용 가능성의 이점을 확보할 수 있다. 도 2를 참조하면, 커플링부(120)는 열수력 코드(CTF)와 연료성능 코드(FRAFI)간의 단방향 결합에 기초하여 상호간 필요 정보를 제공할 수 있다. 예시적으로 열수력 해석 코드는 열수력 해석 모듈에 포함된 열수력 해석 코드에 의해 자체적으로 연료 열전도율 상관관계를 획득할 수 있다. 또한, 연료성능 코드는 연료성능 코드에 대한 경계조건(클래드, 냉각재 온도)을 연산하여 냉각재 정보를 생성할 수 있다. 커플링부(120)는 상기 냉각재 정보를 노심해석 전산코드(RASK-K)로 제공할 수 있다.

[0047] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 코드간 양방향 결합의 예를 도시한 도면이다.

[0048] 도 3을 참조하면, 커플링부(120)는 산화물 표면 온도 정보를 핵연료성능 해석 모듈에서 열유압 모듈로 전송할 수 있다. 구체적으로, 핵연료성능 해석 코드는 연료, 연소가 있는 간극 전도성, 산화물 열 장벽 모델링에 특화되어 있으며 특히 다중 사이클 시나리오에 적합할 수 있다. 연소된 핵연료 집합체를 새 노심으로 재편성할 때 연소된 연료봉 매개변수가 재시작 파일을 통해 연료성능 코드로 전송될 수 있다. 열수력 해석 코드는 연료성능 코드에서 예측된 산화물 표면 온도를 사용하므로 재시작 정보를 유지하지 않아도 된다.

[0049] 커플링부(120)는 중성자 동력학 코드의 전력 분배 데이터를 상기 열유압 모듈 및 연료성능 모듈로 제공할 수 있다. 즉, 커플링부(120)는 전력 분배 데이터를 노심해석 전산코드(RASK-K)에서 열수력 해석 코드(CTF) 및 핵연료성능 해석 코드(FRAFI)로 전송할 수 있다. 핵연료성능 해석 모듈은 수집한 열전도 데이터에 기초한 동적 갭 열전도율을 통해 연소 의존 연료 전도를 산출할 수 있다. 또한, 핵연료성능 해석 코드는 도출한 연료 도플러 온도를 커플링부(120)를 통해 노심해석 전산코드로 제공하고, 산화물 온도를 열수력 해석 코드로 제공할 수 있다. 또한, 커플링부(120)는 열전달 솔버부터 도출된 감속재 온도 및 감속재 밀도를 중성자 모듈로 제공할 수 있고, 열전달 솔버부터 도출된 냉각재 온도를 연료성능 모듈로 제공할 수 있다.

[0050] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 동작 흐름을 도시한 도면이다.

[0051] 도 4를 참조하면, 다물리 코드 연계 장치(100)의 구동이 시작되면, 미리 설정된 Python 스크립트에 의해 모든 모듈에 대한 입력파일이 생성될 수 있다. 필요한 경우 입력 파일 정보를 기반으로 재시작 파일이 로딩될 수 있다. 재시작 파일은 이전 사이클이 끝날 때 모든 번업 정보, 숫자 밀도 및 갭 컨덕턴스를 포함할 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이, 노심해석 전산코드(RAST-K)는 유량과 전력 분배를 해결하고 이 전력 분배를 핵연료성능 해석 코드(FRAPI)에 제공할 수 있다. 핵연료성능 해석 코드(FRAPI)는 연료 열전도를 해결하고 산화물 표면 온도를 모듈간 양방향 결합에 의해 열수력 해석 코드(CTF)에 제공할 수 있다. 열수력 해석 코드(CTF)는 모듈간 양방향 결합을 통해 산화층에서 냉각재로의 열 전달을 해결할 수 있다. 단방향 결합에서는 FRAPI에 의해 CTF에 산화물 온도가 제공되지 않으며, CTF는 자체 전도 솔버를 사용하여 냉각재 온도를 계산할 수 있다. 연소된 연료 어셈블리는 두번째 내지 세번째 주기 시작시 갭 폭이 감소하고 갭 컨덕턴스가 높게 나타난다. 이는 신규 연료 어셈블리에 비해 연소된 연료 어셈블리에서 효율적인 열전달을 가능하게 한다.

[0052] 다물리 코드 연계 장치(100)의 효율성을 검증하기 위한 3주기 와트 바 원자로에 대한 핵연료 연소 데이터를 벤치마킹한 결과를 설명한다. 벤치마킹에 사용된 원자력 발전소의 출력이력은 193개의 웨스팅하우스 17 x 17개의 핵연료 집합체로 구성되고, 각 어셈블리는 264개의 연료봉과 25개의 가이드 튜브를 포함하며, 쿼터 코어(노심)를 모델링하여 56개의 핵연료 집합체를 모델링하였다.

[0053] 상기 모델링의 세부적인 사항에 대해 설명한다. 중성자 모듈에는 서로 다른 스페이서 그리드 및 비 스페이스 그리드 단면에 대해 서로 다른 축 메시의 조건이 요구된다. 중성자 모듈은 하나의 핵연료 집합체에 대한 4개의 노드와 54개의 축 노드를 포함하는 3차원 쿼터 코어 모델을 도출하는 연산 과정을 포함할 수 있다.

[0054] 열수력 해석 모듈 및 핵연료성능 해석 모듈은 24개의 축방향(Axial) 메시를 포함하며, 핵연료성능 해석 모듈은 연료 영역을 위한 5개의 방사형 메시와 클래딩 영역을 위한 3개의 방사형 메시를 포함할 수 있다. 핵연료성능 해석 모듈은 동적 갭 컨덕턴스를 모델링할 수 있다. 동적 컨덕턴스는 연소된 연료가 시작부터 높은 컨덕턴스를 갖는 반면 신규 연료는 컨덕턴스가 낮기 때문에 다중 사이클의 경우 특히 중요하게 작용하는 부분이다.

[0055] 도 5 및 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 주기별 연소 결과를 도시한 도면이다.

[0056] 다물리 코드 연계 장치(100)를 통한 다중 주기 연소 시나리오의 셔플링 및 로테이션의 2주기 및 3주기를 가상원자로(VERA)를 통해 검증하였다.

[0057] 도 5의 (a)는 주기 1의 주기 종료(end of cycle, EOC)의 연소도 정보를 나타내고, 도 5의 (b)는 주기 2의 주기 시작(beginning of cycle, BOE)의 연소도 정보를 나타낸다. 도 6의 (a)는 주기 2의 주기 종료의 연소도 정보를 나타내고, 도 6의 (b)는 주기 3의 주기 시작의 연소도 정보를 나타낸다.

[0058] 노심해석 전산코드 및 핵연료성능 해석 코드의 연소도는 코드의 일관성을 위해 별도로 모델링될 수 있다. 이에 핵연료성능 해석 코드의 축 통함 연소도 정보를 3주기 동안 비교하여 다물리 코드 연계 장치(100)의 셔플링 및 로테이션 성능을 검증한다.

[0059] 도 7 및 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 모델링 결과를 도시한 도면이다.

[0060] 앞선 도 5 내지 도 6을 참조하면, 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈 및 핵연료성능 해석 모듈의 셔플링 및 로테이션 기능이 성공적으로 구현된 것을 확인할 수 있다. 또한, 상기 벤치마크를 통해 검증할 중요한 부분은 전력 및 연소도 함수로서 갭 컨덕턴스 값이다. 연소도에 따라 갭 폭이 감소하고, 갭 컨덕턴스가 증가한다. 그러나, 연료 전도성은 연소도에 따라 감소한다. 도 7은 주기 2에 대한 3.7 EFPD(Effective Full Power Day, 유효전출력운전일)에서의 축 통합 연소도 및 선형 전력과 축 통합 갭 전도도를 도시한다. 도 8은 5.1 EFPD에서 주기 3에 대해 연소도 및 전력을 사용한 갭 전도도를 도시한다. 연소된 연료와 신규 연료에 대한 갭 전도도(conductivity)의 증가는 연료성능 코드 의한 재시작 파일 로딩을 통해 확인할 수 있었다.

[0061] 도 9 및 도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 미세모델링 결과를 도시한 도면이다.

[0062] 두번째 주기(주기 2) 및 세번째 주기(주기 3)의 와트 바 원자로는 선택적 연료봉에 IFBA(Integral Fuel Burnable Absorber, 일체형 가연성 독물질) 코팅을 적용하여 BOC에서의 갭 폭을 감소시킬 수 있다. 다물리 코드 연계 장치(100)는 IFBA 코팅 연료 핀을 통해 전도도를 모델링할 수 있다. 구체적으로, IFBA 코팅 핀은 연소 시 내부 가스 압력이 높기 때문에, 핵연료성능 해석 모듈에서 미세 모델링이 가능할 수 있다. 도 9는 BOC2에서 코어의 중심 높이에서 갭 두께 및 IPBA의 상대적 백분율을 도시한다. 신규 연료봉의 갭 폭은 IPBA 코팅에 의해 감소되고, 연소된 연료 핀의 갭 폭 정보는 재시작 파일로부터 로딩될 수 있다. 즉, 모듈간 양방향 결합은 연료 외부의 IFBA 층을 모니터링하면서, 산화물 표면 온도를 제공할 수 있다.

[0063] 주기 3의 일부 어셈블리에는 연료성능 모듈에서 모델링 된 IFBA 핀이 존재한다. IFBA 코팅은 갭 폭을 줄이고 열전도 공정에 영향을 미칠 수 있다. 도 10은 BOC 3에서 코어의 중심 높이의 갭 두께와 IFBA의 상대적 백분율을 도시한다. 연소된 연료의 갭 두께는 재시작 파일에 기초하여 갱신될 수 있다.

[0064] 와트 바 원자로의 고갈은 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치에 의해 3주기에 걸쳐 실행된다. 벤치마크의 결과는 MCS를 사용한 1차원 열수력 해석 모듈로부터 도출된 결과이다. 중성자 모듈의 매개변수 측정 결과와 몬테카를로 시뮬레이션 결과간의 차이는 미세하므로, 중성자 모듈의 매개변수는 MCS를 사용한 1차원 열수력 해석 모듈의 결과와 비교한다.

[0065] 도 11 및 도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 1 주기에 따른 고갈 결과를 도시한 도면이다.

[0066] 도 11 및 도 12는 단방향 및 양방향 결합을 사용한 가상원자로의 주기 1의 고갈 결과를 도시한다. 도 11은 주기 1의 붕소 농도를 나타낸다. 여기서 MPCORE는 다물리 코드 연계 장치(100)에 의한 결과를 의미한다. 도 12는 32 EFPD 및 397.7 EFPD에서 정규화된 전력 프로파일을 나타낸다. 벤치마크의 단방향 결합 결과는 열 유체 코드의 연료 전도도 상관 관계에 연소 효과가 없기 때문에 사이클 전체에서 더 높은 냉각재 온도를 나타낸다. 연료 열전도율이 높을 경우 중성자 모듈 및 열유압 모듈의 커플링(결합)에서 냉각재 온도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 양방향 결합의 붕소 농도 및 전력 프로파일은 MCS/1차원 열유압 모듈의 결과로부터 검증될 수 있다. 중성자 모듈의 파라미터에 대한 양방향 및 단방향 결합의 차이는 매우 적은 것으로 나타났다.

[0067] 열수력 해석 모듈의 연료전도와 대류에 의해 계산된 냉각재 온도는 양방향 결합 냉각재 온도보다 높다. 이 냉각재 온도와 선형 전력에 의해 연료성능 모듈에 대한 전도가 발생될 수 있다.

[0068] 냉각재의 온도가 높을수록 산화물 표면의 온도가 높아진다. 산화물과 냉각재 사이의 온도 차이가 작을수록 열전달을 보상하기 위해 평균 필름 HTC가 더 높게나타난다. 이와 유사하게, 평균 연료 표면 온도와 클래딩 내부 표면 사이의 차이는 단방향 결합에서 작기 때문에 평균 간극 전도도는 단방향 결합에서 더 높게 나타날 수 있다.

[0069] 도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치의 2 주기에 따른 고갈 결과를 도시한 도면이다.

[0070] 도 13은 단방향 및 양방향(MPCORE) 결합을 사용한 가상원자로의 주기 2의 고갈 결과를 도시한다. 도 13은 주기 2의 붕소 농도를 나타낸다. 가상원자로 벤치마크의 단방향 결합 결과는 열수력 해석 코드의 연료 전도율 상관 관계가 연소 효과를 갖지 않기 때문에 사이클 전체에서 더 높은 냉각재 온도를 보인다. 열수력 해석 코드에는 재시작 파일 정보가 없으므로 연료 갭 및 클래드 전도에 대해 모든 연료를 신규 연료로 가정한다. 신규 연료에

는 연료효율 모듈에서 모델링된 일부 어셈블리에 IFBA 핀이 존재한다. 양방향 결합은 연료 전도를 기반으로 상기 IFBA 핀에 적절한 산화물 표면 온도를 사용합니다. 단방향 커플링은 열수력 해석 모듈에 의해 예측된 냉각재 온도를 사용하고, 연료효율 모듈에서 경계조건(boundary condition)으로 사용되는 냉각재 온도를 계산하였다. 연료의 열전도율이 높아질 경우, 열수력 해석 코드와 핵연료성능 해석 코드의 단방향 결합에서 냉각재 온도가 높게 나타난다. 단방향 결합에서 냉각재 온도가 약간 더 높기 때문에 임계 상태를 유지하는 데 더 적은 붕소 농도가 요구된다.

[0071] 도 14는 단방향 및 양방향(MPCORE) 결합을 사용한 가상원자로의 주기 3의 고갈 결과를 도시한다.

[0072] 도 14는 단방향 및 양방향(MPCORE) 결합을 사용한 가상원자로의 주기 3의 고갈 결과를 도시한다. 도 14는 주기 3의 붕소 농도를 나타낸다. 주기 3에서는 서로 다른 두 종류의 신규 핵연료 집합체가 사용된다. 주기 3의 농축도는 주기 2 농축도 보다 높다. 주기 3은 블랭킷 연료 영역에서 중공 연료 핀을 사용하는 특징을 가진다. 연료 영역 전체에서는 노심 시작 시 양의 반응성을 추가하지만, 주기 종료 시에는 중앙 보이드 영역이 양의 반응성을 제거한다. 특히, BOC에서 유량 프로파일 피크가 중앙에 밀집되기 때문에, 상부 및 하부 연료 부분을 선형적으로 이루어지려고 하기 때문에, 상기 제거 과정이 필수적이라 할 수 있다. EOC에서 유량은 중심이 하강하면서 상단과 하단으로 분기된다. 상단 및 하단 중공 핀은 프로파일을 재차 평평하게 할 수 있다. 중공 연료 내경은 연료효율 모듈로 제공될 수 있다. 연료효율 모듈은 중공 연료 핀에 대한 연료 열전도를 모델링할 수 있다. 상부 및 하부 중공 연료 핀 부분 역시 농축도가 낮다. 이 주기에 대한 연료효율 모듈의 연료봉 모델링은 선택한 연료 핀에 대해 축 방향으로 다른 매개변수가 요구된다.

[0073] 도 14를 참조하면, 주기 3에 대한 셔플링 및 로테이션에 대한 모델링 결과에 따르면, 단방향 및 양방향 모델링 모두에 대한 붕소 농도 차이가 연소도에 따라 증가되는 것을 확인할 수 있다.

[0074] 열수력 해석 코드는 단순화된 열전도 상관 관계를 사용하기 때문에 단방향 결합이 특정 안전 매개변수를 과대예측하는 것으로 나타날 수 있다. 핵연료성능 해석 코드 및 피복재 특성에 관한 안전 기준을 모델링하기 위해서는 합리적인 상관관계를 사용할 필요가 있다. 열수력 해석 코드의 전도 옵션은 사용되지 않고 피복재 외부 표면 온도는 연료효율 코드에 대한 경계 조건으로 제공될 수 있다.

[0075] 앞서 살펴본 바와 같이, 다물리 코드 연계 장치(100)는 다주기 연소 벤치마크에 활용될 수 있다. 프레임워크의 셔플링 및 로테이션 기능은 와트바 가상원자로의 3주기를 통해 검증되었다. 2단계 뉴트로닉스 코드인 격자 코드(STREAM)와 RAST-K를 통해 노드 평균 전력을 제공한 후, 핀 전력 재구성 프로세스를 수행하였다. 열수력 해석 코드 및 연료효율 모듈을 통해 각 핀에 대한 값을 제공하고, 중성자 모듈(RAST-K)은 노드 평균 값을 노드 전력에 사용할 수 있다.

[0076] 가상원자로에 대한 3주기 벤치마크에 따르면, 주기 3에서 핵연료성능 해석 코드 및 열수력 해석 코드의 두 가지 결합 옵션(단방향 및 양방향 결합)과 비교하였고 그 결과 온도가 증가함에 따라 연료 전도성은 감소하고 간극 전도성이 증가하는 결과를 도출하였다. 또한, 클래딩 수소 농도, 냉각수 온도, 산화물 표면 온도 및 연료 온도와 같은 매개변수에 대한 성능 비교를 수행한 결과, 노심해석 전산코드와 열수력 해석 코드의 결합과 노심해석 전산코드와 핵연료성능 해석 코드의 결합이 단방향과 양방향 두 비교 옵션에서 동일했기 때문에 핵연료 중심선 온도, 선형 출력 및 붕소 농도의 차이가 최소화된 것을 확인할 수 있다. 열수력 해석 모듈 및 연료효율 모듈의 미세 모델링은 노달 코드의 성능을 향상시킨 것을 확인할 수 있다.

[0077] 도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 방법의 흐름을 도시한 도면이다.

[0078] 도 15에 도시된 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 방법은 앞선 도1 내지 도 14를 통해 설명된 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치(100)에 의하여 수행될 수 있다. 따라서 이하 생략된 내용이라고 하더라도 도 1 내지 도 14를 통해 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치(100)에 대하여 설명된 내용은 도 15에도 동일하게 적용될 수 있다.

[0079] 단계 S110에서 코드 도출부(110)는 중성자 모듈로부터 노심(neutronic kinetics)해석 전산코드를 도출하고, 열수력 해석 모듈로부터 열수력(thermal hydraulics) 해석 코드를 도출하며, 핵연료성능 해석 모듈로부터 핵연료성능(fuel performance) 해석 코드를 도출할 수 있다.

[0080] 구체적으로, 코드 도출부(110)는 상기 중성자 모듈로부터 원자력 발전소의 전체 및 분기 별 유량 데이터와 전력분배 데이터를 포함하는 상기 노심해석 전산코드를 도출할 수 있다.

[0081] 또한, 코드 도출부(110)는 열수력 해석 모듈로부터 열수력 해석 모듈과 이외의 모듈간 데이터 교환을 위한 인터

페이스 코드 및 열전달 솔버를 포함하는 열수력 해석 코드를 도출할 수 있다.

[0082] 또한, 코드 도출부(110)는 열전도 데이터를 수집하는 핵연료성능 해석 모듈로부터 연소 및 과도 계산을 위한 연료봉 분석 프로그래밍 인터페이스 코드 포함하는 핵연료성능 해석 코드를 도출할 수 있다.

[0083] 단계 S120에서 커플링부(120)는 노심해석 전산코드, 열수력 해석 코드 및 핵연료성능 해석 코드를 결합하여 모듈간 필요 정보를 상호 제공할 수 있다. 커플링부(120)는 서로 다른 물리 코드간 결합을 위해 C++ 기반의 결합 프레임워크를 포함하며, 이를 통해 다물리 코드간 결합이 이루어질 수 있다. 코드 결합의 원활한 제어를 위해 결합 프레임워크는 사용자가 용이하게 입력 및 출력 처리할 수 있는 인터페이스를 제공할 수 있다.

[0084] 또한, 커플링부(120)는 서로 다른 모듈에 대한 서로 다른 메시 요구 사항을 기반으로 상기 모듈간 데이터 교환을 위한 보간을 수행할 수 있다.

[0085] 또한, 커플링부(120)에 의한 모듈간 통신은 모듈 내부적으로 코드를 변경할 필요성없이 데이터 교환이 가능하다. 커플링부(120)는 열수력 해석 코드(CTF)와 핵연료성능 해석 코드(FRAFI)간의 단방향 결합에 기초하여 상호간 필요 정보를 제공할 수 있다. 커플링부(120)는 상기 냉각재 정보를 노심해석 전산코드(RASK-K)로 제공할 수 있다.

[0086] 또한, 커플링부(120)는 산화물 표면 온도 정보를 핵연료성능 해석 모듈에서 열수력 해석 모듈로 전송할 수 있다. 구체적으로, 핵연료성능 해석 코드는 연료, 연소가 있는 간극 전도성, 산화물 열 장벽 모델링에 특화되어 있으며 특히 다중 사이클 시나리오에 적합할 수 있다. 연소된 핵연료 집합체를 새 노심으로 재편성할 때 연소된 연료봉 매개변수가 재시작 파일을 통해 연료성능 코드로 전송될 수 있다. 열수력 해석 코드는 핵연료성능 해석 코드에서 예측된 산화물 표면 온도를 사용하므로 재시작 정보를 유지하지 않아도 된다.

[0087] 커플링부(120)는 노심해석 전산코드의 전력 분배 데이터를 상기 열수력 해석 코드 및 핵연료성능 해석 코드로 제공할 수 있다. 즉, 커플링부(120)는 전력 분배 데이터를 노심해석 전산코드(RASK-K)에서 열수력 해석 코드(CTF) 및 핵연료성능 해석 코드(FRAFI)로 전송할 수 있다. 핵연료성능 해석 모듈은 수집한 열전도 데이터에 기초한 동적 갭 열전도율을 통해 연소 의존 연료 전도를 산출할 수 있다. 또한, 핵연료성능 해석 모듈은 도출한 연료 도플러 온도를 커플링부(120)를 통해 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈로 제공하고, 산화물 온도를 열수력 해석 코드로 제공할 수 있다. 또한, 커플링부(120)는 열전달 솔버부터 도출된 감속재 온도 및 감속재 밀도를 중성자 거동과 핵분열 반응을 모사하는 모듈로 제공할 수 있고, 열전달 솔버부터 도출된 냉각재 온도를 핵연료성능 해석 모듈로 제공할 수 있다.

[0088] 본 발명의 일 실시 예에 따른, 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 방법은, 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 본 발명을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 상기된 하드웨어 장치는 본 발명의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

[0089] 상술한 실시 예에 설명된 특징, 구조, 효과 등은 본 발명의 적어도 하나의 실시 예에 포함되며, 반드시 하나의 실시 예에 만 한정되는 것은 아니다. 나아가, 각 실시 예에 서 예시된 특징, 구조, 효과 등은 실시예들이 속하는 분야의 통상의 지식을 가지는 자에 의하여 다른 실시예들에 대해서도 조합 또는 변형되어 실시 가능하다.

[0090] 따라서 이러한 조합과 변형에 관계된 내용들은 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다. 또한, 이상에서 실시 예들을 중심으로 설명하였으나 이는 단지 예시일 뿐 본 발명을 한정하는 것이 아니며, 본 발명이 속하는 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 본 실시예의 본질적인 특성을 벗어나지 않는 범위에서 이상에 예시되지 않은 여러 가지의 변형과 응용이 가능함을 알 수 있을 것이다. 예를 들어, 실시 예들에 구체적으로 나타난 각 구성 요소는 변형하여 실시할 수 있는 것이다. 그리고 이러한 변형과 응용에 관계된 차이점들은 첨부한 청구 범위에서 규정하는 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

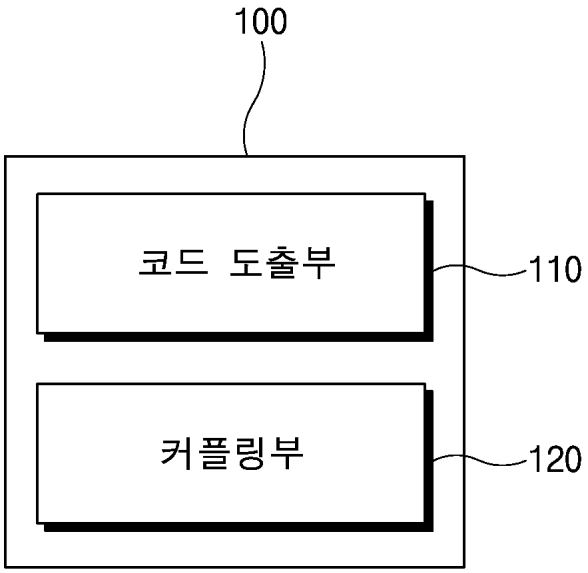
[0091] 100: 원자력 발전소의 다물리 코드 연계 장치

110: 코드 도출부

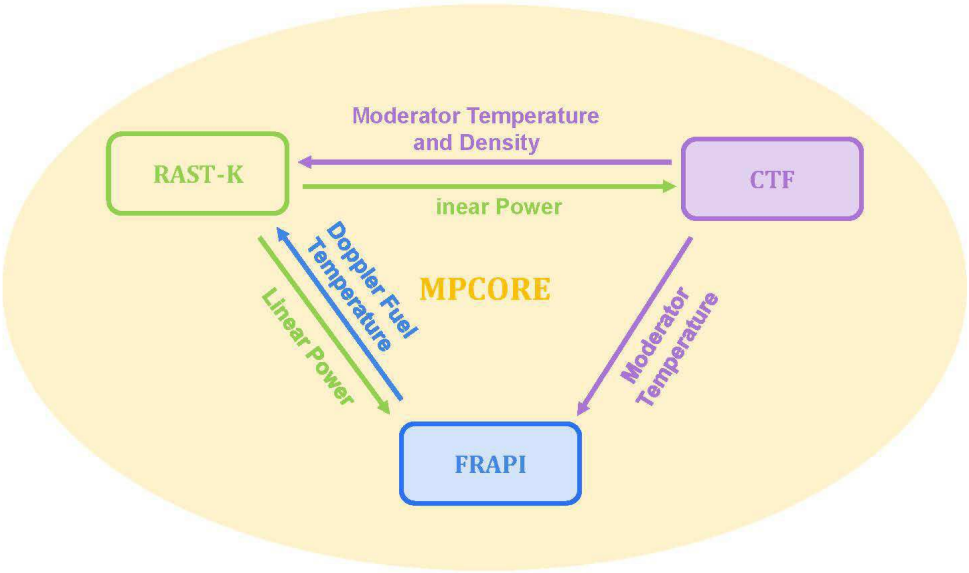
120: 커플링부

도면

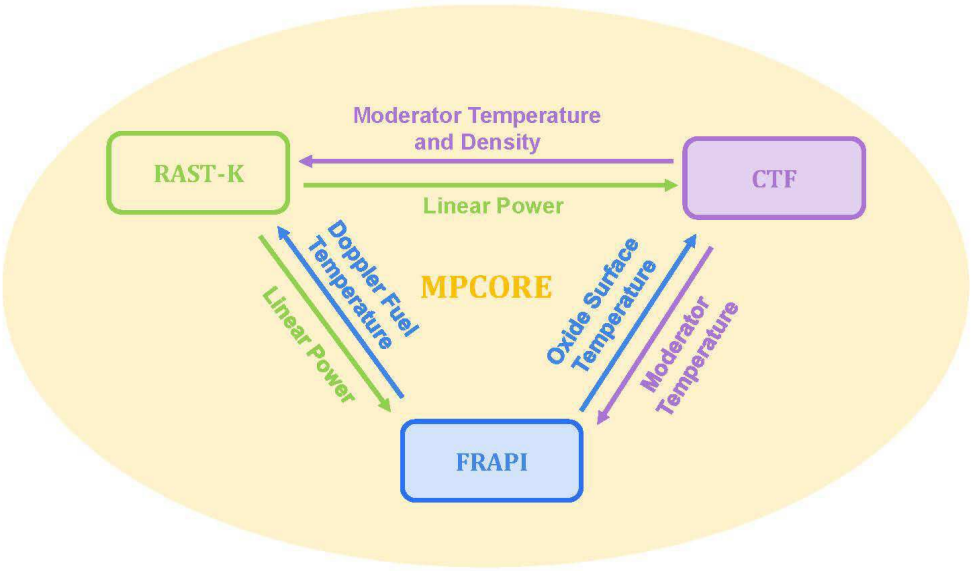
도면1



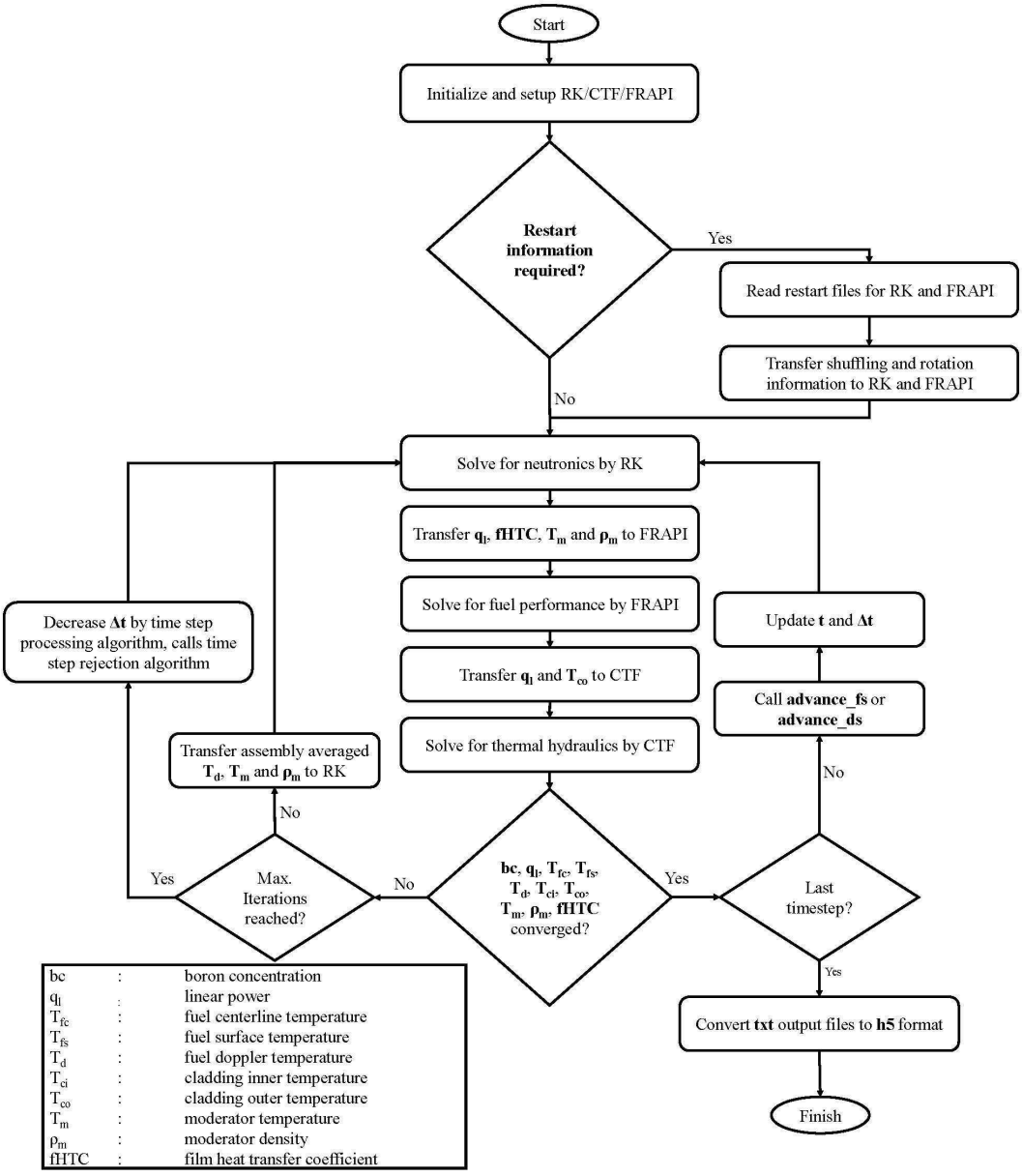
도면2



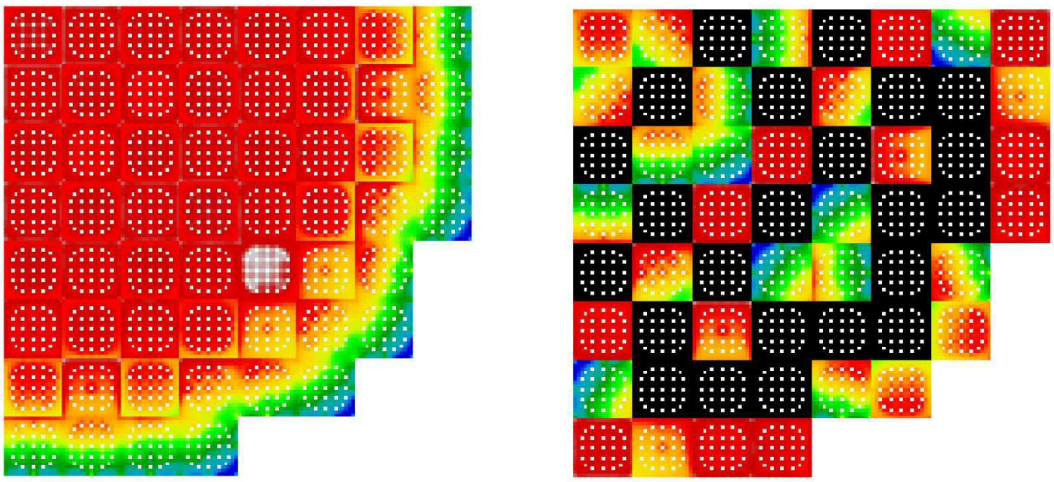
도면3


Moderator Temperature and Density
RAST-K
CTF
Linear Power
Doppler Fuel Temperature
Linear Power
MPCORE
Oxide Surface Temperature
Moderator Temperature
FRAPI

도면4

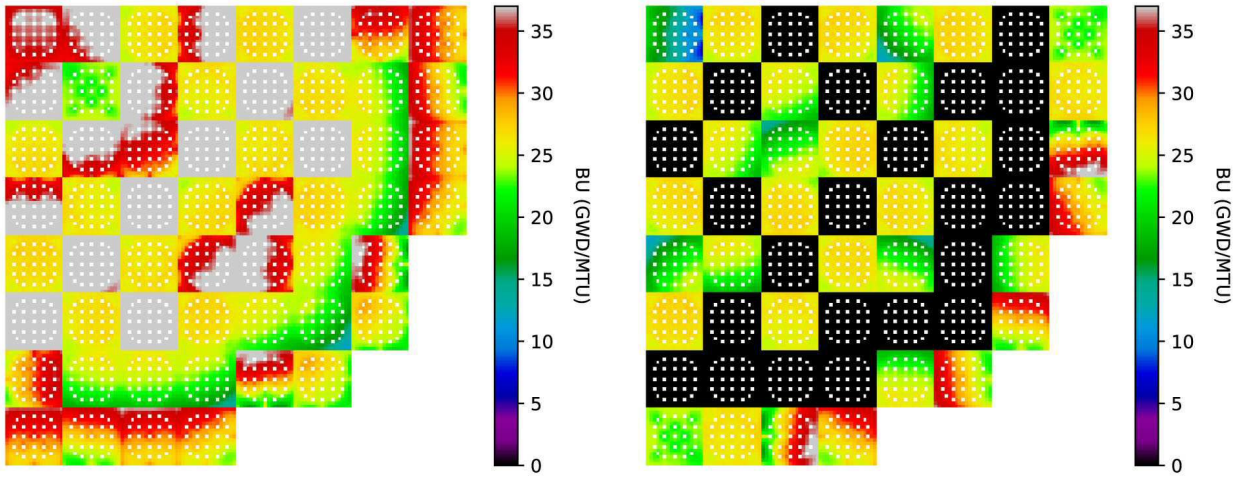

Start
Initialize and setup RK/CTF/FRAPI
Restart information required?
Yes
Read restart files for RK and FRAPI
Transfer shuffling and rotation information to RK and FRAPI
No
Solve for neutronics by RK
Transfer q_l, fHTC, T_m and ρ_m to FRAPI
Solve for fuel performance by FRAPI
Transfer q_l and T_{co} to CTF
Solve for thermal hydraulics by CTF
bc, q_l, T_{fc}, T_{fs}, T_d, T_{ci}, T_{co}, T_m, ρ_m, fHTC converged?
No
Max. Iterations reached?
Yes
Decrease Δt by time step processing algorithm, calls time step rejection algorithm
No
Transfer assembly averaged T_d, T_m and ρ_m to RK
Yes
Last timestep?
No
Call advance_fs or advance_ds
Update t and Δt
Yes
Convert txt output files to h5 format
Finish
bc : boron concentration
q_l : linear power
T_{fc} : fuel centerline temperature
T_{fs} : fuel surface temperature
T_d : fuel doppler temperature
T_{ci} : cladding inner temperature
T_{co} : cladding outer temperature
T_m : moderator temperature
ρ_m : moderator density
fHTC : film heat transfer coefficient

도면5



(a)　　(b)

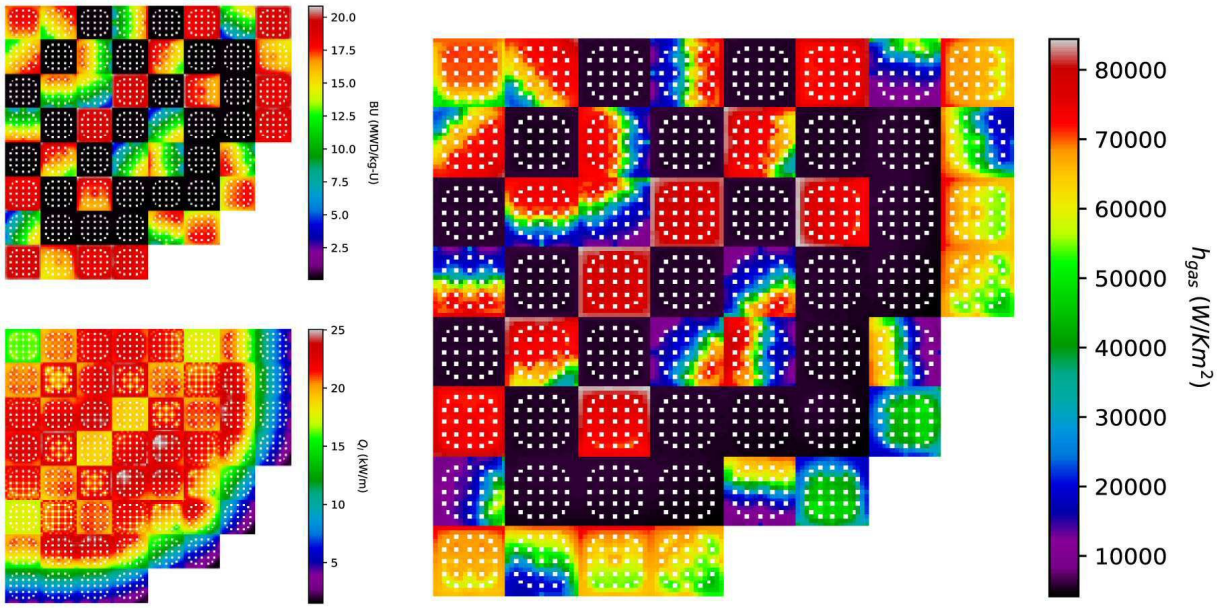
도면6



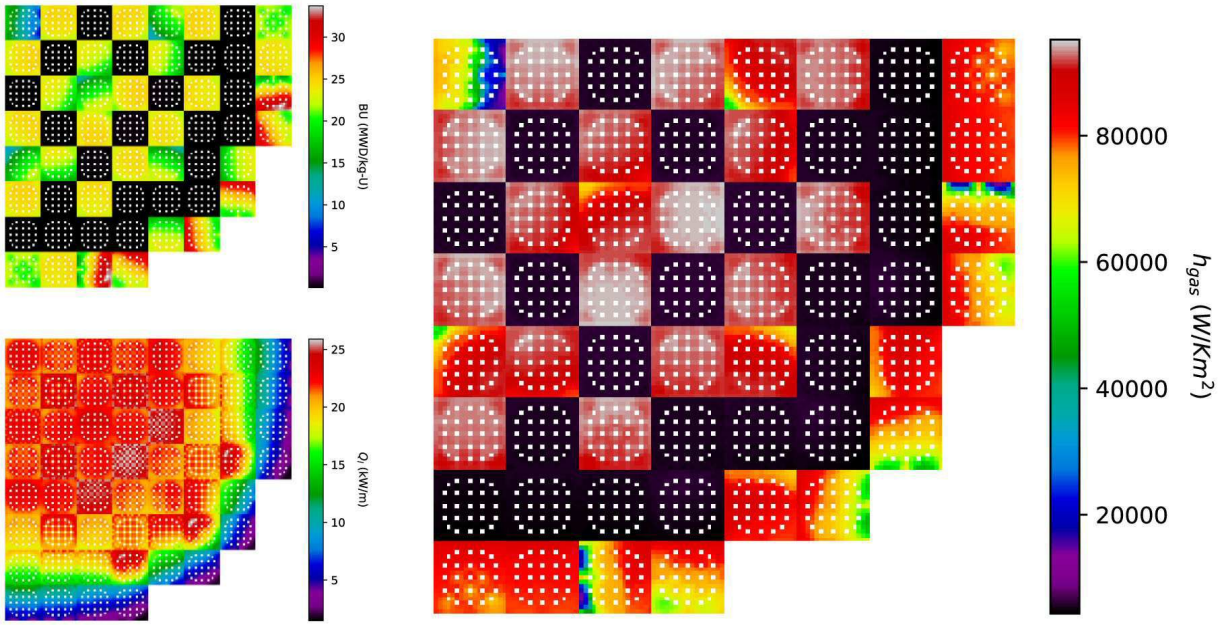
EOC Cycle 2　　BOC Cycle 3

(a)　　(b)

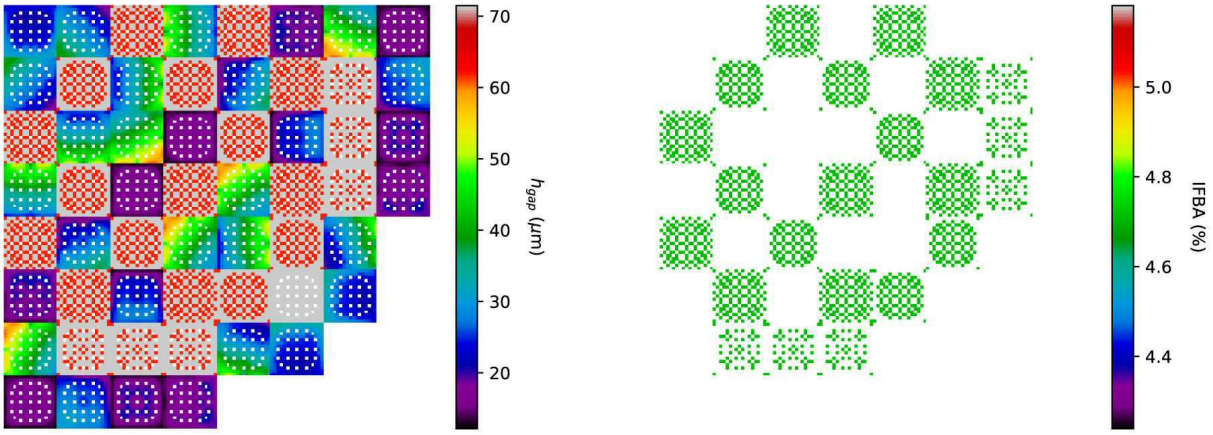
도면7


20.0
17.5
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
BU (MWD/kg-U)
25
20
15
10
5
Q' (kW/m)
80000
70000
60000
50000
40000
30000
20000
10000
h_{gas} (W/Km^2)

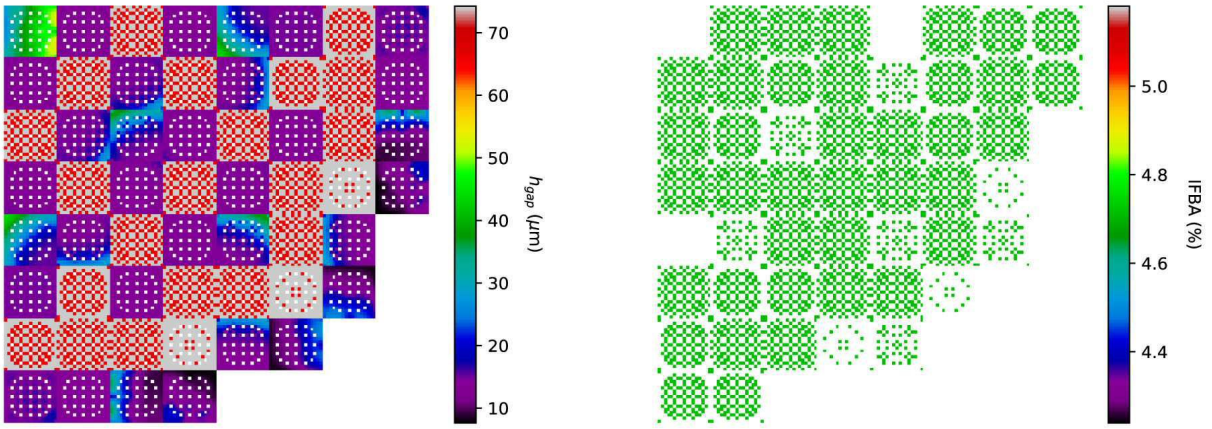
도면8


30
25
20
15
10
5
BU (MWD/kg-U)
25
20
15
10
5
Q' (kW/m)
80000
60000
40000
20000
h_{gas} (W/Km^2)

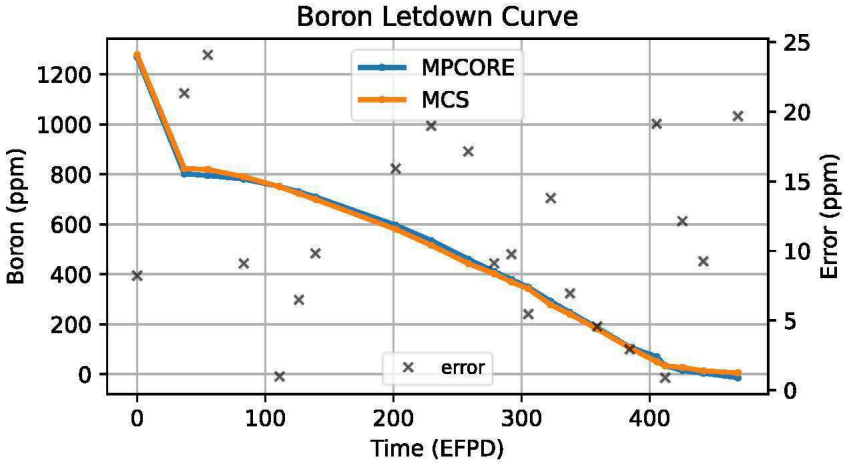
도면9



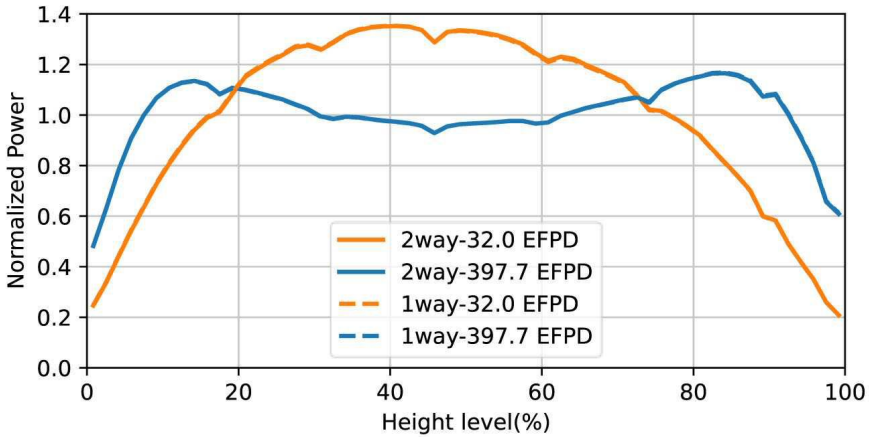
도면10



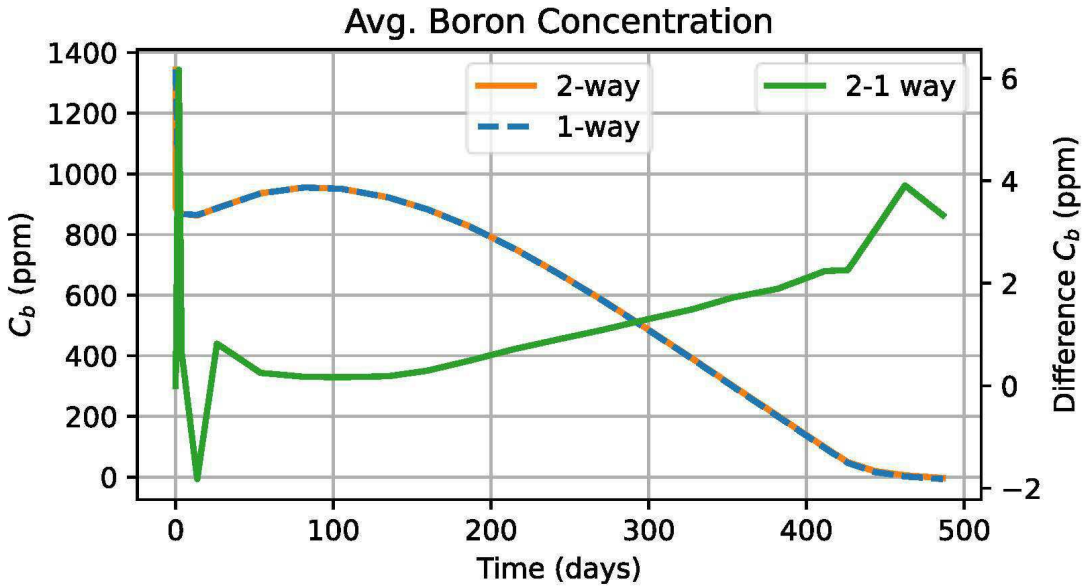
도면11



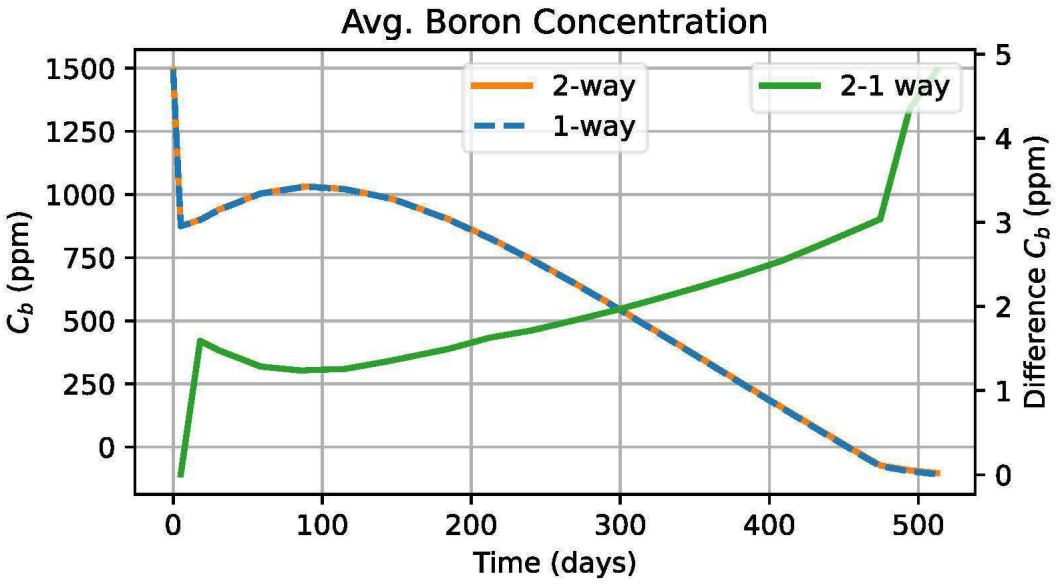
도면12


Normalized Power
Height level(%)
2way-32.0 EFPD
2way-397.7 EFPD
1way-32.0 EFPD
1way-397.7 EFPD

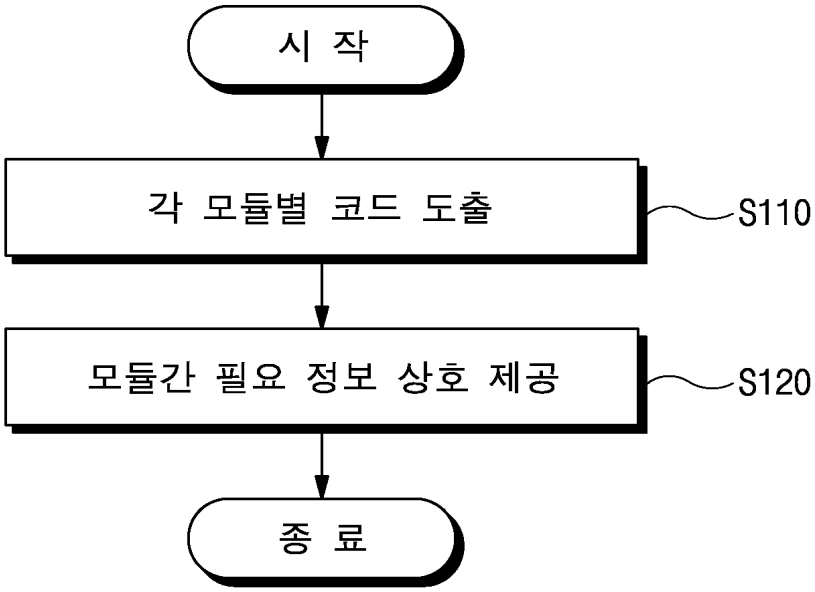
도면13


Avg. Boron Concentration
2-way
1-way
2-1 way
C_b (ppm)
Difference C_b (ppm)
Time (days)

도면14


Avg. Boron Concentration
2-way
1-way
2-1 way
C_b (ppm)
Difference C_b (ppm)
Time (days)
1500
1250
1000
750
500
250
0
5
4
3
2
1
0
0
100
200
300
400
500

도면15


시 작
각 모듈별 코드 도출
S110
모듈간 필요 정보 상호 제공
S120
종 료