(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0089331
(43) 공개일자 2025년06월18일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 17/06 (2006.01) *G06F 30/20* (2020.01)
G06N 20/00 (2019.01)
(52) CPC특허분류
G21C 17/06 (2013.01)
G06F 30/20 (2020.01)
(21) 출원번호 10-2023-0179138
(22) 출원일자 2023년12월11일
심사청구일자 2023년12월11일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
한국수력원자력 주식회사
경상북도 경주시 문무대왕면 불국로 1655
이엔유 주식회사
대전광역시 유성구 테크노4로 17, 에이606호(관평동, 대덕비즈센터)
(72) 발명자
이덕중
울산광역시 울주군 범서읍 대동길 21, 105동 101호
김한주
울산광역시 남구 봉월로 117, 509호
(74) 대리인
두호특허법인

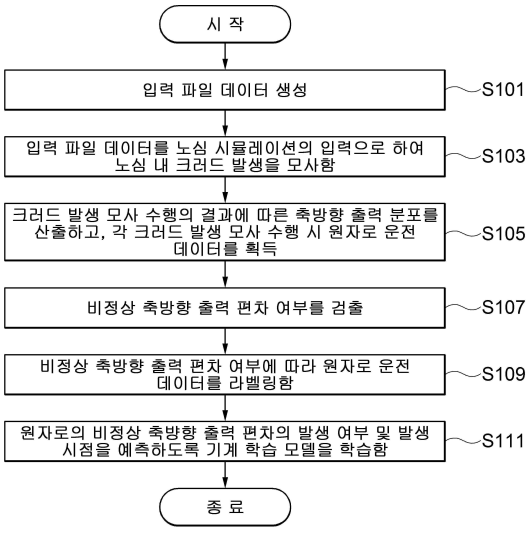
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 **원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법 및 이를 수행하기 위한 컴퓨팅 장치**

(57) 요 약

원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법 및 이를 수행하기 위한 컴퓨팅 장치가 개시된다. 개시되는 일 실시예에 따른 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법은, 하나 이상의 프로세서들, 및 하나 이상의 프로세서들에 의해 실행되는 하나 이상의 프로그램들을 저장하는 메모리를 구비한 컴퓨팅 장치에서 수행되는 방법으로서, 기 설정된 노심 시뮬레이션의 입력으로 사용될 하나 이상의 입력 파일 데이터를 생성하는 단계, 각 입력 파일 데이터를 노심 시뮬레이션의 입력으로 하여 원자로의 노심 내 크러드 발생 모사를 수행하는 단계, 및 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포를 산출하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도2



(52) CPC특허분류
G06N 20/00 (2021.08)
Y02E 30/30 (2020.08)

명 세 서

청구범위

청구항 1

하나 이상의 프로세서들, 및

상기 하나 이상의 프로세서들에 의해 실행되는 하나 이상의 프로그램들을 저장하는 메모리를 구비한 컴퓨팅 장치에서 수행되는 방법으로서,

기 설정된 노심 시뮬레이션의 입력으로 사용될 하나 이상의 입력 파일 데이터를 생성하는 단계;

상기 각 입력 파일 데이터를 상기 노심 시뮬레이션의 입력으로 하여 원자로의 노심 내 크러드(CRUD: Chalk River Unidentified Deposit) 발생 모사를 수행하는 단계; 및

각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포를 산출하는 단계를 포함하는, 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 입력 파일 데이터는,

상기 노심 시뮬레이션에서 크러드(CRUD) 생성과 관련된 인자들에 대한 데이터인, 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법.

청구항 3

청구항 2에 있어서,

상기 입력 파일 데이터를 생성하는 단계는,

크러드 생성량 및 크러드 생성 속도 중 하나 이상이 서로 상이하도록 복수 개의 입력 파일 데이터를 생성하는, 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법.

청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 입력 파일 데이터는,

원자로의 배관 계통의 부식에 의한 크러드 발생 물질의 양, 정화 필터 효율(purification filter efficient), 피복재 표면의 크러드 석출률, 초기 연산 주기에서 재장전 집합체에 의한 크러드 발생 물질의 양, 재장전 핵연료의 크러드 소스 시간 상수, 붕소의 침착 계수, 크러드 내 붕소 침착이 되는 임계 두께, 및 크러드 내 붕소의 이탈률 산출에 사용되는 보정 계수 중 하나 이상을 포함하는, 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법.

청구항 5

청구항 3에 있어서,

상기 크러드 발생 모사를 수행하는 단계는,

상기 노심 시뮬레이션에서 원자로의 실제 운전 주기와 대응하는 연산 주기를 갖고 크러드 발생 모사를

수행하되, 상기 연산 주기에는 복수 개의 타임 스텝이 포함되도록 하는, 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법.

청구항 6

청구항 3에 있어서,

상기 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법은,

각 크러드 발생 모사 수행 시 원자로 운전 데이터를 획득하는 단계; 및

각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포와 기 설정된 기준 축방향 출력 분포를 비교하여 비정상 축방향 출력 편차 여부를 검출하는 단계를 더 포함하는, 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법.

청구항 7

청구항 6에 있어서,

상기 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법은,

상기 비정상 축방향 출력 편차 여부에 따라 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA(Axial Offset Anomaly) 발생 데이터 또는 정상 데이터로 라벨링 하는 단계를 더 포함하는, 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법.

청구항 8

청구항 7에 있어서,

상기 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법은,

상기 AOA 발생 데이터 및 상기 정상 데이터를 학습 데이터로 하여 기계 학습 모델을 학습하는 단계를 더 포함하고,

상기 기계 학습 모델은, 입력되는 원자로 운전 데이터에 기초하여 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부를 예측하도록 학습되는, 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법.

청구항 9

청구항 7에 있어서,

상기 크러드 발생 모사를 수행하는 단계는, 상기 노심 시뮬레이션에서 원자로의 실제 운전 주기와 대응하는 연산 주기를 갖고 크러드 발생 모사를 수행하되, 상기 연산 주기에는 복수 개의 타임 스텝이 포함되도록 하고,

상기 라벨링 하는 단계는,

상기 입력 파일 데이터의 타임 스텝을 기준으로 기 설정된 시간 이내에 비정상 축방향 출력 편차가 발생한 경우, 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA 발생 데이터로 라벨링 하는 단계;

상기 비정상 축방향 출력 편차가 발생된 타임 스텝의 시점을 AOA 발생 시점으로 라벨링 하는 단계; 및

상기 입력 파일 데이터의 타임 스텝을 기준으로 기 설정된 시간 이내에 비정상 축방향 출력 편차가 발생하지 않은 경우, 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 정상 데이터로 라벨링 하는 단계를 포함하는, 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법.

청구항 10

청구항 9에 있어서,

상기 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법은,

상기 라벨링 된 데이터들을 학습 데이터로 하여 기계 학습 모델을 학습하는 단계를 더 포함하고,

상기 기계 학습 모델은, 입력되는 원자로 운전 데이터에 기초하여 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측하도록 학습되는, 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법.

청구항 11

하나 이상의 프로세서들, 및

상기 하나 이상의 프로세서들에 의해 실행되는 하나 이상의 프로그램들을 저장하는 메모리를 구비한 컴퓨팅 장치로서,

기 설정된 노심 시뮬레이션의 입력으로 사용될 하나 이상의 입력 파일 데이터를 생성하는 데이터 생성 모듈; 및

상기 각 입력 파일 데이터를 상기 노심 시뮬레이션의 입력으로 하여 원자로의 노심 내 크러드(CRUD: Chalk River Unidentified Deposit) 발생 모사를 수행하고, 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포를 산출하는 시뮬레이션 모듈을 포함하는, 컴퓨팅 장치.

청구항 12

청구항 11에 있어서,

상기 입력 파일 데이터는,

상기 노심 시뮬레이션에서 크러드(CRUD) 생성과 관련된 인자들에 대한 데이터인, 컴퓨팅 장치.

청구항 13

청구항 12에 있어서,

상기 데이터 생성 모듈은,

크러드 생성량 및 크러드 생성 속도 중 하나 이상이 서로 상이하도록 복수 개의 입력 파일 데이터를 생성하는, 컴퓨팅 장치.

청구항 14

청구항 13에 있어서,

상기 시뮬레이션 모듈은,

상기 노심 시뮬레이션에서 원자로의 실제 운전 주기와 대응하는 연산 주기를 갖고 크러드 발생 모사를 수행하되, 상기 연산 주기에는 복수 개의 타임 스텝이 포함되도록 하는, 컴퓨팅 장치.

청구항 15

청구항 13에 있어서,

상기 시뮬레이션 모듈은,

각 크러드 발생 모사 수행 시 원자로 운전 데이터를 획득하고, 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포와 기 설정된 기준 축방향 출력 분포를 비교하여 비정상 축방향 출력 편차 여부를 검출하는, 컴퓨팅

장치.

청구항 16

청구항 15에 있어서,

상기 컴퓨팅 장치는,

상기 비정상 축방향 출력 편차 여부에 따라 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA(Axial Offset Anomaly) 발생 데이터 또는 정상 데이터로 라벨링 하는 라벨링 모듈을 더 포함하는, 컴퓨팅 장치.

청구항 17

청구항 16에 있어서,

상기 컴퓨팅 장치는,

상기 AOA 발생 데이터 및 상기 정상 데이터를 학습 데이터로 하여 기계 학습 모델을 학습하는 예측 모듈을 더 포함하고,

상기 기계 학습 모델은, 입력되는 원자로 운전 데이터에 기초하여 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부를 예측하도록 학습되는, 컴퓨팅 장치.

청구항 18

청구항 16에 있어서,

상기 시뮬레이션 모듈은, 상기 노심 시뮬레이션에서 원자로의 실제 운전 주기와 대응하는 연산 주기를 갖고 크러드 발생 모사를 수행하되, 상기 연산 주기에는 복수 개의 타임 스텝이 포함되도록 하고,

상기 라벨링 모듈은,

상기 입력 파일 데이터의 타임 스텝을 기준으로 기 설정된 시간 이내에 비정상 축방향 출력 편차가 발생한 경우, 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA 발생 데이터로 라벨링 하고, 상기 비정상 축방향 출력 편차가 발생된 타임 스텝의 시점을 AOA 발생 시점으로 라벨링 하며, 상기 입력 파일 데이터의 타임 스텝을 기준으로 기 설정된 시간 이내에 비정상 축방향 출력 편차가 발생하지 않은 경우, 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 정상 데이터로 라벨링 하는, 컴퓨팅 장치.

청구항 19

청구항 18에 있어서,

상기 컴퓨팅 장치는,

상기 라벨링 된 데이터들을 학습 데이터로 하여 기계 학습 모델을 학습하는 예측 모듈을 더 포함하고,

상기 기계 학습 모델은, 입력되는 원자로 운전 데이터에 기초하여 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측하도록 학습되는, 컴퓨팅 장치.

청구항 20

비일시적 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체(non-transitory computer readable storage medium)에 저장된 컴퓨터 프로그램으로서,

상기 컴퓨터 프로그램은 하나 이상의 명령어들을 포함하고, 상기 명령어들은 하나 이상의 프로세서들을 갖는 컴

퓨팅 장치에 의해 실행될 때, 상기 컴퓨팅 장치로 하여금,

기 설정된 노심 시뮬레이션의 입력으로 사용될 하나 이상의 입력 파일 데이터를 생성하는 단계;

상기 각 입력 파일 데이터를 상기 노심 시뮬레이션의 입력으로 하여 원자로의 노심 내 크러드(CRUD: Chalk River Unidentified Deposit) 발생 모사를 수행하는 단계; 및

각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포를 산출하는 단계를 수행하도록 하는, 컴퓨터 프로그램.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명의 실시예는 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 기술과 관련된다.

배 경 기 술

[0003] 일반적으로, 가압경수로형 원전(Pressurized Water Reactor: PWR)은 경제성 제고를 위하여 장주기, 고출력, 및 고연소도 운전이 수행되면서 핵연료 피복관 표면에 부식 생성물인 크러드(CRUD: Chalk River Unidentified Deposit)가 생성된다. 크러드는 원자력 발전소 운전 중 핵 연료봉 피복관에 석출되는 부식 생성물을 말한다. 크러드의 다공성 구조는 리튬 및 붕소와 같은 냉각수에 용해된 이온의 석출을 유도하여 국부적 출력 감소를 야기하여 축방향 출력 편차를 발생시키는 원인이 된다.

[0004] 여기서, 원자로 내 핵연료 집합체 상부와 하부의 출력 분포차 즉, 축방향 출력(Axial Offset: AO)이 예상 출력 분포차와 기 설정된 수준(예를 들어, 3%) 이상의 편차가 나타나는 경우를 비정상 축방향 출력 편차(Axial Offset Anomaly: AOA)라고 정의한다. 비정상 축방향 출력 편차(AOA)가 발생하면, 적절한 정지 여유도 확보를 위해 원전 출력을 감소시켜야 하므로, 경제적 손실이 발생하고 피복관의 건전성 및 원전 안전성을 감소시키는 문제점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) 한국등록특허공보 제10-1642083호(2016.07.22)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명의 실시예는 원자로의 비정상 축방향 출력 편차를 예측할 수 있는 새로운 기법을 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0009] 개시되는 일 실시예에 따른 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법은, 하나 이상의 프로세서들, 및 상기 하나 이상의 프로세서들에 의해 실행되는 하나 이상의 프로그램들을 저장하는 메모리를 구비한 컴퓨팅 장치에서 수행되는 방법으로서, 기 설정된 노심 시뮬레이션의 입력으로 사용될 하나 이상의 입력 파일 데이터를 생성하는 단계; 상기 각 입력 파일 데이터를 상기 노심 시뮬레이션의 입력으로 하여 원자로의 노심 내 크러드(CRUD: Chalk River Unidentified Deposit) 발생 모사를 수행하는 단계; 및 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포를 산출하는 단계를 포함한다.

[0010] 상기 입력 파일 데이터는, 상기 노심 시뮬레이션에서 크러드(CRUD) 생성과 관련된 인자들에 대한 데이터일 수

있다.

[0011] 상기 입력 파일 데이터를 생성하는 단계는, 크러드 생성량 및 크러드 생성 속도 중 하나 이상이 서로 상이하도록 복수 개의 입력 파일 데이터를 생성할 수 있다.

[0012] 상기 입력 파일 데이터는, 원자로의 배관 계통의 부식에 의한 크러드 발생 물질의 양, 정화 필터 효율(purification filter efficient), 피복재 표면의 크러드 석출률, 초기 연산 주기에서 재장전 집합체에 의한 크러드 발생 물질의 양, 재장전 핵연료의 크러드 소스 시간 상수, 붕소의 침착 계수, 크러드 내 붕소 침착이 되는 임계 두께, 및 크러드 내 붕소의 이탈률 산출에 사용되는 보정 계수 중 하나 이상을 포함할 수 있다.

[0013] 상기 크러드 발생 모사를 수행하는 단계는, 상기 노심 시뮬레이션에서 원자로의 실제 운전 주기와 대응하는 연산 주기를 갖고 크러드 발생 모사를 수행하되, 상기 연산 주기에는 복수 개의 타임 스텝이 포함되도록 할 수 있다.

[0014] 상기 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법은, 각 크러드 발생 모사 수행 시 원자로 운전 데이터를 획득하는 단계; 및 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포와 기 설정된 기준 축방향 출력 분포를 비교하여 비정상 축방향 출력 편차 여부를 검출하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0015] 상기 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법은, 상기 비정상 축방향 출력 편차 여부에 따라 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA(Axial Offset Anomaly) 발생 데이터 또는 정상 데이터로 라벨링 하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0016] 상기 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법은, 상기 AOA 발생 데이터 및 상기 정상 데이터를 학습 데이터로 하여 기계 학습 모델을 학습하는 단계를 더 포함하고, 상기 기계 학습 모델은, 입력되는 원자로 운전 데이터에 기초하여 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부를 예측하도록 학습될 수 있다.

[0017] 상기 크러드 발생 모사를 수행하는 단계는, 상기 노심 시뮬레이션에서 원자로의 실제 운전 주기와 대응하는 연산 주기를 갖고 크러드 발생 모사를 수행하되, 상기 연산 주기에는 복수 개의 타임 스텝이 포함되도록 하고, 상기 라벨링 하는 단계는, 상기 입력 파일 데이터의 타임 스텝을 기준으로 기 설정된 시간 이내에 비정상 축방향 출력 편차가 발생한 경우, 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA 발생 데이터로 라벨링 하는 단계; 상기 비정상 축방향 출력 편차가 발생된 타임 스텝의 시점을 AOA 발생 시점으로 라벨링 하는 단계; 및 상기 입력 파일 데이터의 타임 스텝을 기준으로 기 설정된 시간 이내에 비정상 축방향 출력 편차가 발생하지 않은 경우, 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 정상 데이터로 라벨링 하는 단계를 포함할 수 있다.

[0018] 상기 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 방법은, 상기 라벨링 된 데이터들을 학습 데이터로 하여 기계 학습 모델을 학습하는 단계를 더 포함하고, 상기 기계 학습 모델은, 입력되는 원자로 운전 데이터에 기초하여 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측하도록 학습될 수 있다.

[0019] 개시되는 일 실시예에 따른 컴퓨팅 장치는, 하나 이상의 프로세서들, 및 상기 하나 이상의 프로세서들에 의해 실행되는 하나 이상의 프로그램들을 저장하는 메모리를 구비한 컴퓨팅 장치로서, 기 설정된 노심 시뮬레이션의 입력으로 사용될 하나 이상의 입력 파일 데이터를 생성하는 데이터 생성 모듈; 및 상기 각 입력 파일 데이터를 상기 노심 시뮬레이션의 입력으로 하여 원자로의 노심 내 크러드(CRUD: Chalk River Unidentified Deposit) 발생 모사를 수행하고, 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포를 산출하는 시뮬레이션 모듈을 포함한다.

[0020] 상기 입력 파일 데이터는, 상기 노심 시뮬레이션에서 크러드(CRUD) 생성과 관련된 인자들에 대한 데이터일 수 있다.

[0021] 상기 데이터 생성 모듈은, 크러드 생성량 및 크러드 생성 속도 중 하나 이상이 서로 상이하도록 복수 개의 입력 파일 데이터를 생성할 수 있다.

[0022] 상기 시뮬레이션 모듈은, 상기 노심 시뮬레이션에서 원자로의 실제 운전 주기와 대응하는 연산 주기를 갖고 크러드 발생 모사를 수행하되, 상기 연산 주기에는 복수 개의 타임 스텝이 포함되도록 할 수 있다.

[0023] 상기 시뮬레이션 모듈은, 각 크러드 발생 모사 수행 시 원자로 운전 데이터를 획득하고, 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포와 기 설정된 기준 축방향 출력 분포를 비교하여 비정상 축방향 출력 편차 여부를 검출할 수 있다.

[0024] 상기 컴퓨팅 장치는, 상기 비정상 축방향 출력 편차 여부에 따라 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA(Axial Offset Anomaly) 발생 데이터 또는 정상 데이터로 라벨링 하는 라벨링 모듈을 더 포함할 수 있다.

[0025] 상기 컴퓨팅 장치는, 상기 AOA 발생 데이터 및 상기 정상 데이터를 학습 데이터로 하여 기계 학습 모델을 학습하는 예측 모듈을 더 포함하고, 상기 기계 학습 모델은, 입력되는 원자로 운전 데이터에 기초하여 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부를 예측하도록 학습될 수 있다.

[0026] 상기 시뮬레이션 모듈은, 상기 노심 시뮬레이션에서 원자로의 실제 운전 주기와 대응하는 연산 주기를 갖고 크러드 발생 모사를 수행하되, 상기 연산 주기에는 복수 개의 타임 스텝이 포함되도록 하고, 상기 라벨링 모듈은, 상기 입력 파일 데이터의 타임 스텝을 기준으로 기 설정된 시간 이내에 비정상 축방향 출력 편차가 발생한 경우, 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA 발생 데이터로 라벨링 하고, 상기 비정상 축방향 출력 편차가 발생된 타임 스텝의 시점을 AOA 발생 시점으로 라벨링 하며, 상기 입력 파일 데이터의 타임 스텝을 기준으로 기 설정된 시간 이내에 비정상 축방향 출력 편차가 발생하지 않은 경우, 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 정상 데이터로 라벨링 할 수 있다.

[0027] 상기 컴퓨팅 장치는, 상기 라벨링 된 데이터들을 학습 데이터로 하여 기계 학습 모델을 학습하는 예측 모듈을 더 포함하고, 상기 기계 학습 모델은, 입력되는 원자로 운전 데이터에 기초하여 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측하도록 학습될 수 있다.

발명의 효과

[0029] 개시되는 실시예에 의하면, 기계 학습 기법에 기초하여 원자로의 크러드에 의한 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부를 예측할 수 있을 뿐만 아니라, 비정상 축방향 출력 편차의 발생 시점도 예측함으로써, 비정상 축방향 출력 편차에 대해 조기 대응 및 선제 조치를 할 수 있고, 그로 인해 원자로 운영에 따른 비용을 줄일 수 있게 된다.

도면의 간단한 설명

[0031] 도 1은 예시적인 실시예들에서 사용되기에 적합한 컴퓨팅 장치를 포함하는 컴퓨팅 환경을 예시하여 설명하기 위한 블록도

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 원자로의 비정상 축방향 출력 편차(Axial Offset Anomaly: AOA) 예측 방법을 나타낸 흐름도

도 3은 본 발명의 일 실시예에서 연소(burnup)에 따른 크러드 두께를 나타낸 도면

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 노심의 방사형 출력 분포를 나타낸 도면

도 5는 본 발명의 일 실시예에서 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포와 기 설정된 기준 축방향 출력 분포를 비교한 상태를 나타낸 도면

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 장치의 구성을 나타낸 블록도

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0032] 이하, 도면을 참조하여 본 발명의 구체적인 실시형태를 설명하기로 한다. 이하의 상세한 설명은 본 명세서에서 기술된 방법, 장치 및/또는 시스템에 대한 포괄적인 이해를 돕기 위해 제공된다. 그러나 이는 예시에 불과하며 본 발명은 이에 제한되지 않는다.

[0033] 본 발명의 실시예들을 설명함에 있어서, 본 발명과 관련된 공지기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략하기로 한다. 그리고, 후술되는 용어들은 본 발명에서의 기능을 고려하여 정의된 용어들로서 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 그 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다. 상세한 설명에서 사용되는 용어는 단지 본 발명의 실시예들을 기술하기 위한 것이며, 결코 제한적이어서는 안 된다. 명확하게 달리 사

용되지 않는 한, 단수 형태의 표현은 복수 형태의 의미를 포함한다. 본 설명에서, "포함" 또는 "구비"와 같은 표현은 어떤 특성들, 숫자들, 단계들, 동작들, 요소들, 이들의 일부 또는 조합을 가리키기 위한 것이며, 기술된 것 이외에 하나 또는 그 이상의 다른 특성, 숫자, 단계, 동작, 요소, 이들의 일부 또는 조합의 존재 또는 가능성을 배제하도록 해석되어서는 안 된다.

[0034] 이하의 설명에 있어서, 신호 또는 정보의 "전송", "통신", "송신", "수신" 기타 이와 유사한 의미의 용어는 일 구성요소에서 다른 구성요소로 신호 또는 정보가 직접 전달되는 것뿐만이 아니라 다른 구성요소를 거쳐 전달되는 것도 포함한다. 특히 신호 또는 정보를 일 구성요소로 "전송" 또는 "송신"한다는 것은 그 신호 또는 정보의 최종 목적지를 지시하는 것이고 직접적인 목적지를 의미하는 것이 아니다. 이는 신호 또는 정보의 "수신"에 있어서도 동일하다. 또한 본 명세서에 있어서, 2 이상의 데이터 또는 정보가 "관련"된다는 것은 하나의 데이터(또는 정보)를 획득하면, 그에 기초하여 다른 데이터(또는 정보)의 적어도 일부를 획득할 수 있음을 의미한다.

[0035] 한편, 상측, 하측, 일측, 타측 등과 같은 방향성 용어는 개시된 도면들의 배향과 관련하여 사용된다. 본 발명의 실시예의 구성 요소는 다양한 배향으로 위치 설정될 수 있으므로, 방향성 용어는 예시를 목적으로 사용되는 것이지 이를 제한하는 것은 아니다.

[0036] 또한, 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성 요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로 사용될 수 있다. 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성 요소는 제2 구성 요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성 요소도 제1 구성 요소로 명명될 수 있다.

[0038] 도 1은 예시적인 실시예들에서 사용되기에 적합한 컴퓨팅 장치를 포함하는 컴퓨팅 환경(10)을 예시하여 설명하기 위한 블록도이다. 도시된 실시예에서, 각 컴포넌트들은 이하에 기술된 것 이외에 상이한 기능 및 능력을 가질 수 있고, 이하에 기술된 것 이외에도 추가적인 컴포넌트를 포함할 수 있다.

[0039] 도시된 컴퓨팅 환경(10)은 컴퓨팅 장치(12)를 포함한다. 일 실시예에서, 컴퓨팅 장치(12)는 원자로의 비정상 축방향 출력 편차(Axial Offset Anomaly: AOA)를 예측할 수 있는 장치일 수 있다. 컴퓨팅 장치(12)는 원자로의 운전 중 비정상 축방향 출력 편차(AOA)를 예측하도록 마련될 수 있다.

[0040] 컴퓨팅 장치(12)는 적어도 하나의 프로세서(14), 컴퓨터 판독 가능 저장 매체(16) 및 통신 버스(18)를 포함한다. 프로세서(14)는 컴퓨팅 장치(12)로 하여금 앞서 언급된 예시적인 실시예에 따라 동작하도록 할 수 있다. 예컨대, 프로세서(14)는 컴퓨터 판독 가능 저장 매체(16)에 저장된 하나 이상의 프로그램들을 실행할 수 있다. 상기 하나 이상의 프로그램들은 하나 이상의 컴퓨터 실행 가능 명령어를 포함할 수 있으며, 상기 컴퓨터 실행 가능 명령어는 프로세서(14)에 의해 실행되는 경우 컴퓨팅 장치(12)로 하여금 예시적인 실시예에 따른 동작들을 수행하도록 구성될 수 있다.

[0041] 컴퓨터 판독 가능 저장 매체(16)는 컴퓨터 실행 가능 명령어 내지 프로그램 코드, 프로그램 데이터 및/또는 다른 적합한 형태의 정보를 저장하도록 구성된다. 컴퓨터 판독 가능 저장 매체(16)에 저장된 프로그램(20)은 프로세서(14)에 의해 실행 가능한 명령어의 집합을 포함한다. 일 실시예에서, 컴퓨터 판독 가능 저장 매체(16)는 메모리(랜덤 액세스 메모리와 같은 휘발성 메모리, 비휘발성 메모리, 또는 이들의 적절한 조합), 하나 이상의 자기 디스크 저장 디바이스들, 광학 디스크 저장 디바이스들, 플래시 메모리 디바이스들, 그 밖에 컴퓨팅 장치(12)에 의해 액세스되고 원하는 정보를 저장할 수 있는 다른 형태의 저장 매체, 또는 이들의 적합한 조합일 수 있다.

[0042] 통신 버스(18)는 프로세서(14), 컴퓨터 판독 가능 저장 매체(16)를 포함하여 컴퓨팅 장치(12)의 다른 다양한 컴포넌트들을 상호 연결한다.

[0043] 컴퓨팅 장치(12)는 또한 하나 이상의 입출력 장치(24)를 위한 인터페이스를 제공하는 하나 이상의 입출력 인터페이스(22) 및 하나 이상의 네트워크 통신 인터페이스(26)를 포함할 수 있다. 입출력 인터페이스(22) 및 네트워크 통신 인터페이스(26)는 통신 버스(18)에 연결된다. 입출력 장치(24)는 입출력 인터페이스(22)를 통해 컴퓨팅 장치(12)의 다른 컴포넌트들에 연결될 수 있다. 예시적인 입출력 장치(24)는 포인팅 장치(마우스 또는 트랙패드 등), 키보드, 터치 입력 장치(터치패드 또는 터치스크린 등), 음성 또는 소리 입력 장치, 다양한 종류의 센서 장치 및/또는 촬영 장치와 같은 입력 장치, 및/또는 디스플레이 장치, 프린터, 스피커 및/또는 네트워크 카드와 같은 출력 장치를 포함할 수 있다. 예시적인 입출력 장치(24)는 컴퓨팅 장치(12)를 구성하는 일 컴포넌트로서 컴퓨팅 장치(12)의 내부에 포함될 수도 있고, 컴퓨팅 장치(12)와는 구별되는 별개의 장치로 컴퓨팅 장치(12)와

연결될 수도 있다.

[0045] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 원자로의 비정상 축방향 출력 편차(Axial Offset Anomaly: AOA) 예측 방법을 나타낸 흐름도이다. 도시된 흐름도에서는 상기 방법을 복수 개의 단계로 나누어 기재하였으나, 적어도 일부의 단계들은 순서를 바꾸어 수행되거나, 다른 단계와 결합되어 함께 수행되거나, 생략되거나, 세부 단계들로 나뉘어 수행되거나, 또는 도시되지 않은 하나 이상의 단계가 부가되어 수행될 수 있다. 일 실시예에서, 원자로의 정상 상태 운전 중 기계 학습에 기반하여 AOA를 예측하는 방법이 개시될 수 있다.

[0046] 도 2를 참조하면, 컴퓨팅 장치(12)는 기 설정된 노심 시뮬레이션의 입력으로 사용될 입력 파일 데이터를 생성할 수 있다(S 101). 여기서, 노심 시뮬레이션은 원자로의 노심에서 크러드(CRUD)의 발생을 모사하기 위한 시뮬레이션일 수 있다. 그리고, 입력 파일 데이터는 노심 시뮬레이션에서 크러드(CRUD) 생성과 관련된 인자들에 대한 데이터를 의미할 수 있다.

[0047] 하나의 입력 파일 데이터는 복수 개의 크러드 생성 관련 인자들에 대한 데이터를 포함할 수 있다. 이때, 하나의 입력 파일 데이터는 노심 시뮬레이션에서 특정한 크러드 생성량 또는 크러드 생성 속도를 가지도록 하는 크러드 생성 관련 인자들의 데이터를 포함할 수 있다.

[0048] 컴퓨팅 장치(12)는 크러드 생성량 및 크러드 생성 속도 중 하나 이상이 서로 상이하도록 복수 개의 입력 파일 데이터를 생성할 수 있다. 즉, 복수 개의 입력 파일 데이터는 각각 크러드 생성량이 상이하거나 크러드 생성 속도가 상이하도록 하는 크러드 생성 관련 인자들의 데이터일 수 있다. 이 경우, 크러드의 생성량 및 크러드 생성 속도가 상이한 복수 개의 노심 모델(시뮬레이션에서 노심에 크러드를 생성하기 위한 모델)을 생성할 수 있게 된다.

[0049] 여기서, 원자로 냉각 계통(Reactor Coolant System: RCS) 내 크러드 생성은 재장전 핵연료 내 발생, RCS 배관 계통의 부식에 의한 발생, 피복관 표면의 침적, 및 필터 효과에 의한 감소 등에 의해 발생할 수 있다. 이 경우, 일정 시구간 $t' = t_b - t_{b-1} \in [0, \Delta t]$ 에서 원자로 냉각 계통(RCS) 내의 크러드 생성 물질의 양은 하기의 수학식 1로 나타낼 수 있다.

[0050] (수학식 1)

[0051] $$\frac{dC_{CRUD}(t')}{dt'} = \frac{1}{M_{RCS}}\left(S_{CRUD}^{RCS} + S_{CRUD}^{reload}(t') - \sum_{i=1}^{I}\frac{dM_{CRUD,i}(t')}{dt'} - \varepsilon \dot{M}_{letdown} C_{CRUD}(t')\right)$$

[0052] $C_{CRUD}(t')$: 원자로 냉각 계통(RCS) 내 크러드 발생 물질의 농도

[0053] M_{RCS} : 원자로 냉각 계통(RCS) 내 냉각수 질량

[0054] S_{CRUD}^{RCS} : 배관 계통의 부식에 의한 크러드 발생 물질의 양

[0055] S_{CRUD}^{reload} : 재장전 핵연료 내 크러드 발생 물질의 양

[0056] $M_{CRUD,\,i}$: 연산 주기 i에 침적된 크러드 발생 물질의 양

[0057] ε : 정화 필터 효율(purification filter efficient)

[0058] $\dot{M}_{letdown}$: 정화를 위한 RCS 감소 유량

[0059] 원자로의 운전 중 크러드의 생성을 모사하기 위해, 노심 시뮬레이션은 한 주기(싸이클)의 계산을 수행하는데, 연산 주기 i라 함은 i번째 주기의 계산 수행을 의미할 수 있다. 이때, 노심 시뮬레이션의 연산 주기는 실제 대상 원자로의 운전 주기와 대응하도록 마련될 수 있다. 하나의 연산 주기 i에는 복수 개의 타임 스텝(t_b)이 포함된다.

[0060] 여기서, 연산 주기 i에서 크러드의 침적률은 과냉핵비등률(Subcooled Nucleate Boiling: SNB)과 피복재 표면의 크러드 석출률에 기초하여 하기 수학식 2와 같이 나타낼 수 있다.

[0061] (수학식 2)

[0062] $$\frac{dM_{CRUD,i}(t')}{dt'} = C_{CRUD}(t')\overline{R}_{i,b} - K_{erosion}$$

[0063] $\frac{dM_{CRUD,i}(t')}{dt'}$: 시구간 t'의 연산 주기 i에서 크러드의 침적률

[0064] $\overline{R}_{i,b}$: 연산 주기 i에서의 과냉핵비등률

[0065] $K_{erosion}$: 피복재 표면의 크러드 석출률

[0066] 또한, 재장전 핵연료 내 크러드 발생 물질의 양(S_{CRUD}^{reload})은 하기 수학식 3으로 나타낼 수 있다.

[0067] (수학식 3)

[0068] $$S_{CRUD}^{reload}(t') = \lambda_{src} M_{CRUD,b-1}^{reload} \exp(-\lambda_{src} t')$$

[0069] $M_{CRUD,b-1}^{reload}$: 시간 t_{b-1}에서의 재장전 집합체에 의한 크러드 발생 물질의 양

[0070] λ_{src} : 재장전 핵연료의 크러드 소스 시간 상수(CRUD source time constant)

[0071] 한편, 연산 주기 i에서 생성되는 크러드의 두께(τ_{CRUD})는 하기 수학식 4로 나타낼 수 있다.

[0072] (수학식 4)

[0073] $$\tau_{CRUD,i}(t_b) = \sqrt{\frac{M_{CRUD,i}(t_b)}{\pi \rho_{CRUD} \Delta z N_{fuel/node}} + R_{clad}^{\ 2}} - R_{clad}$$

[0074] R_{clad} : 피복관의 외부 반지름

[0075] ρ_{CRUD} : 크러드 밀도

[0076] Δz : 노심의 높이

[0077] $N_{fuel/node}$: 노심 내 연료봉 개수

[0078] 그리고, 연산 주기 i의 평균 붕소(Boron) 수밀도(number density)($N_{B10,i}$)는 하기 수학식 5를 통해 산출할 수 있다.

[0079] (수학식 5)

[0080] $$\frac{dN_{B10,i}(t)}{dt} = \frac{f_{B10} R_i(t) C_{B10}(t)}{V_i} - L_{B10,i}(C_{B10}) - N_{B10,i}(t) \sum_{g=1}^{G} \sigma_{B10,g} \phi_{i,g}(t)$$

[0081] f_{B10} : B-10의 침착 계수(deposition factor)

[0082] $R_i(t)$: 연산 주기 i에서 과냉핵비등률

[0083] $C_{B10}(t)$: 원자로 냉각 계통(RCS) 내 B-10의 농도

[0084] V_i : 연산 주기 i의 부피

[0085] $L_{B10,i}$: B-10의 이탈률(release rate)

[0086] $\sigma_{B10,g}$: B-10의 미세 단면적

[0087] $\phi_{i,g}$: 연산 주기 i에서 에너지 그룹 g에 대한 평균 스칼라 플럭스(average scalar flux)

[0088] 여기서, 크러드 내 붕소 침착은 기 설정된 임계 두께($\tau_{threshold}$) 이상의 두께를 가지는 크러드에서 발생하므로 B-10의 침착 계수(f_{B10})는 하기 수학식 6으로 정의할 수 있다.

[0089] (수학식 6)

[0090]
$$f_{B10} = \begin{cases} f_{B10}^{0} & if\,(\tau_{CRUD} > \tau_{threshold}) \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

[0091] 또한, 크러드 내 B-10의 이탈률($L_{B10,\,i}$)은 원자로 냉각 계통(RCS) 내 B-10의 농도에 기초하여 하기 수학식 7로 정의할 수 있다.

[0092] (수학식 7)

[0093]
$$L_{B10,i} = \begin{cases} L_{B10}^{0} \exp(a_1 \times (\frac{a_2}{C_{B10}} - 1)) & if\ N_{B10,i} > N_{B10,RCS}) \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

[0094] a_1, a_2 : 기 설정되는 보정 계수

[0095] 여기서, 컴퓨팅 장치(12)는 배관 계통의 부식에 의한 크러드 발생 물질의 양(S_{CRUD}^{RCS}), 정화 필터 효율(purification filter efficient)(ε), 피복재 표면의 크러드 석출률($K_{erosion}$), 초기 연산 주기(i=0)에서 재장전 집합체에 의한 크러드 발생 물질의 양($M_{CRUD,0}^{reload}$), 재장전 핵연료의 크러드 소스 시간 상수(λ_{src}), B-10의 침착 계수(f_{B10}), 크러드 내 붕소 침착이 되는 임계 두께($\tau_{threshold}$), 및 보정 계수(a_1, a_2) 중 하나 이상을 포함하여 입력 파일 데이터를 생성할 수 있다.

[0096] 도 3은 본 발명의 일 실시예에서 연소(burnup)에 따른 크러드 두께를 나타낸 도면이다. 도 3을 참조하면, 노심에서 크러드가 연소가 증가함에 따라 점차 누적되는 것을 볼 수 있다. 또한, 노심의 상단부 영역에서 크러드가 주로 발생하는 것을 볼 수 있다. 이에 의하면, 노심의 상단부 영역의 국부출력분포 변화를 감시하여 비정상 축방향 출력 편차를 검출할 수 있음을 알 수 있다.

[0097] 다음으로, 컴퓨팅 장치(12)는 각 입력 파일 데이터를 노심 시뮬레이션의 입력으로 하여 노심 내 크러드 발생을 모사할 수 있다(S 103). 여기서, 노심 내 크러드 발생은 수학식 1 내지 수학식 7에 의해 모사할 수 있게 된다.

[0098] 컴퓨팅 장치(12)는 크러드 생성 관련 인자들의 데이터 값이 서로 다른 복수 개의 입력 파일 데이터를 노심 시뮬레이션에 각각 입력함으로써, 노심 내 크러드 생성량 및 크러드 생성 속도가 서로 상이하게 크러드 발생을 모사할 수 있게 된다.

[0099] 다음으로, 컴퓨팅 장치(12)는 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포(Axial Offset 또는 Axial Shape Index)를 산출하고, 각 크러드 발생 모사 수행 시 원자로 운전 데이터를 획득할 수 있다(S 105).

[0100] 여기서, 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포는 노심 시뮬레이션에서 노심에 설치된 계측기(즉, 가상 계측기)(예를 들어, 노심 내부 계측기, 노심 외부 계측기 등)들의 신호에 기초하여 산출할 수 있다. 이때, 가상 계측기는 실제 원자로의 노심에 설치되는 각 계측기의 위치에 대응하여 시뮬레이션 상의 노심에 가상 설치될 수 있다.

[0101] 여기서, 원자로 운전 데이터는 원자로를 운전하는데 필요하거나 원자로 운전 시 사용되는 데이터, 원자로 운전 시 환경 데이터, 및 원자로 운전 시 측정되는 계측기 신호 등을 포함할 수 있다. 예를 들어, 원자로 운전 데이터는 원자로 노심의 출력, 원자로 내 제어봉의 위치, 노심 외 계측기 신호, 노심 내 계측기 신호, 냉각수 온도 등을 포함할 수 있다.

[0102] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 노심의 방사형 출력 분포를 나타낸 도면이다. 도 4를 참조하면, 출력 분포는 코어의 중앙과 가장 자리에서 낮고 코어 주변에서 높다는 것을 확인할 수 있다.

[0103] 다음으로, 컴퓨팅 장치(12)는 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포와 기 설정된 기준 축방향 출력 분포를 비교하여 비정상 축방향 출력 편차 여부를 검출할 수 있다(S 107). 여기서, 기준 축방향 출력 분포는 원자로의 정상 상태에서의 축방향 출력 분포일 수 있다.

[0104] 컴퓨팅 장치(12)는 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포와 기 설정된 기준 축방향 출력 분포의 차이가 기 설정된 임계 범위를 벗어나는 경우, 해당 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포가 비정상 축방향 출력 편차인 것으로 판단할 수 있다.

[0105] 도 5는 본 발명의 일 실시예에서 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포와 기 설정된 기준 축방향 출력 분포를 비교한 상태를 나타낸 도면이다. 도 5를 참조하면, 노심의 상단 부분의 출력이 기준보다 낮게 나타나고 그에 반하여 노심의 하단 부분의 출력은 기준보다 높게 나타나 축방향 출력 편차가 발생하는 것을 볼 수 있다.

[0106] 다음으로, 컴퓨팅 장치(12)는 비정상 축방향 출력 편차 여부에 따라 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 분류(또는 라벨링)할 수 있다(S 109).

[0107] 구체적으로, 컴퓨팅 장치(12)는 비정상 축방향 출력 편차를 발생시킨 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA(Axial Offset Anomaly) 발생 데이터로 분류(또는 라벨링)할 수 있다. 예를 들어, 컴퓨팅 장치(12)는 입력 파일 데이터의 타임 스텝(t_b)을 기준으로 기 설정된 시간(예를 들어, 60일) 이내에 비정상 축방향 출력 편차가 발생한 경우, 컴퓨팅 장치(12)는 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA 발생 데이터로 분류할 수 있다.

[0108] 컴퓨팅 장치(12)는 비정상 축방향 출력 편차가 발생된 시점을 AOA 발생 시점으로 분류할 수 있다. 이를 통해 특정 타임 스텝을 기준으로 어느 정도 시간이 경과한 후 비정상 축방향 출력 편차가 발생하였는지를 확인할 수 있게 된다.

[0109] 또한, 컴퓨팅 장치(12)는 비정상 축방향 출력 편차가 발생되지 않은 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터는 정상 데이터로 분류 할 수 있다. 즉, 입력 파일 데이터의 타임 스텝(t_b)을 기준으로 기 설정된 시간(예를 들어, 60일) 이내에 비정상 축방향 출력 편차가 발생하지 않은 경우, 컴퓨팅 장치(12)는 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 정상 데이터로 분류할 수 있다.

[0110] 여기서, AOA 발생 데이터 및 정상 데이터로 분류된 원자로 운전 데이터들은 후술하는 기계 학습 모델을 학습하는 학습 데이터로 사용될 수 있다. 원자로에서 비정상 축방향 출력 편차가 발생하는 상황의 데이터를 실제 확보하는 것은 안전 및 보안 문제로 어려우나, 개시되는 실시예에서는, 노심 시뮬레이션을 이용하여 학습 데이터를 생성함으로써 기계 학습 모델을 학습할 수 있는 학습 데이터를 충분히 확보할 수 있게 된다.

[0111] 다음으로, 컴퓨팅 장치(12)는 노심 시뮬레이션을 통해 획득한 학습 데이터를 이용하여 기계 학습 모델이 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측하도록 학습할 수 있다(S 111).

[0112] 구체적으로, 컴퓨팅 장치(12)는 AOA 발생 데이터로 분류된 원자로 운전 데이터 및 정상 데이터로 분류된 원자로 운전 데이터를 학습 데이터로 설정하고, 각 학습 데이터를 기계 학습 모델로 입력하여 기계 학습 모델을 학습할 수 있다. 이때, 컴퓨팅 장치(12)는 각 타임 스텝의 원자로 운전 데이터를 기계 학습 모델로 입력할 수 있다. 기계 학습 모델은 입력되는 학습 데이터에 기초하여 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측하도록 마련될 수 있다. 컴퓨팅 장치(12)는 라벨링을 이용한 지도 학습을 통해 기계 학습 모델을 학습할 수 있다.

[0113] 일 실시예에서, 기계 학습 모델은 복수 개가 마련될 수 있다. 컴퓨팅 장치(12)는 복수 개의 기계 학습 모델에 대해 앙상블 학습을 통해 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측하도록 할 수 있다. 예를 들어, 컴퓨팅 장치(12)는 RF(Random Forest) 모델, LGBM(Light Gradient Boosting Machine) 모델, 및 XGBoost(eXtreme Gradient Boosting) 모델을 앙상블 학습하여 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측하도록 할 수 있다. 이때, 컴퓨팅 장치(12)는 결정 트리(decision tree) 알고리즘에 의해 최종 예측을 수행할 수 있다.

[0114] 개시되는 실시예에 의하면, 기계 학습 기법에 기초하여 원자로의 크러드에 의한 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부를 예측할 수 있을 뿐만 아니라, 비정상 축방향 출력 편차의 발생 시점도 예측함으로써, 비정상 축방향

출력 편차에 대해 조기 대응 및 선제 조치를 할 수 있고, 그로 인해 원자로 운영에 따른 비용을 줄일 수 있게 된다.

[0116] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 장치의 구성을 나타낸 블록도이다.

[0117] 도 6을 참조하면, 비정상 축방향 출력 편차 예측 장치(100)는 데이터 생성 모듈(102), 시뮬레이션 모듈(104), 라벨링 모듈(106), 및 예측 모듈(108)을 포함할 수 있다.

[0118] 데이터 생성 모듈(102)은 노심 시뮬레이션의 입력으로 사용될 입력 파일 데이터를 생성할 수 있다. 시뮬레이션 모듈(104)은 각 입력 파일 데이터를 기 설정된 노심 시뮬레이션의 입력으로 하여 노심 내 크러드 발생 모사를 수행할 수 있다. 시뮬레이션 모듈(104)은 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포를 산출하고, 각 크러드 발생 모사 수행 시 원자로 운전 데이터를 획득할 수 있다. 시뮬레이션 모듈(104)은 각 크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포와 기 설정된 기준 축방향 출력 분포를 비교하여 비정상 축방향 출력 편차 여부를 검출할 수 있다.

[0119] 라벨링 모듈(106)은 비정상 축방향 출력 편차 여부에 따라 해당 입력 파일 데이터에 대응하는 원자로 운전 데이터를 AOA 발생 데이터 또는 정상 데이터로 분류(또는 라벨링)할 수 있다. 라벨링 모듈(106)은 비정상 축방향 출력 편차가 발생된 시점을 AOA 발생 시점으로 분류할 수 있다.

[0120] 예측 모듈(108)은 하나 이상의 기계 학습 모델(108a)을 포함할 수 있다. 예측 모듈(108)은 노심 시뮬레이션을 통해 획득한 학습 데이터를 이용하여 기계 학습 모델(108a)이 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측하도록 학습할 수 있다. 예측 모듈(108)은 기계 학습 모델(108a)의 학습이 완료된 경우, 원자로의 실제 운전 데이터를 획득하고 이를 기계 학습 모델(108a)에 입력하여 원자로의 비정상 축방향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측할 수 있다.

[0121] 본 명세서에서 모듈이라 함은, 본 발명의 기술적 사상을 수행하기 위한 하드웨어 및 상기 하드웨어를 구동하기 위한 소프트웨어의 기능적, 구조적 결합을 의미할 수 있다. 예컨대, 상기 "모듈"은 소정의 코드와 상기 소정의 코드가 수행되기 위한 하드웨어 리소스의 논리적인 단위를 의미할 수 있으며, 반드시 물리적으로 연결된 코드를 의미하거나, 한 종류의 하드웨어를 의미하는 것은 아니다.

[0123] 이상에서 본 발명의 대표적인 실시예들을 상세하게 설명하였으나, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는 상술한 실시예에 대하여 본 발명의 범주에서 벗어나지 않는 한도 내에서 다양한 변형이 가능함을 이해할 것이다. 그러므로 본 발명의 권리범위는 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 안 되며, 후술하는 특허청구범위뿐만 아니라 이 특허청구범위와 균등한 것들에 의해 정해져야 한다.

부호의 설명

[0125] 10 : 컴퓨팅 환경

12 : 컴퓨팅 장치

14 : 프로세서

16 : 컴퓨터 판독 가능 저장 매체

18 : 통신 버스

20 : 프로그램

22 : 입출력 인터페이스

24 : 입출력 장치

26 : 네트워크 통신 인터페이스

100 : 원자로의 비정상 축방향 출력 편차 예측 장치

102 : 데이터 생성 모듈

104 : 시뮬레이션 모듈

106 : 라벨링 모듈

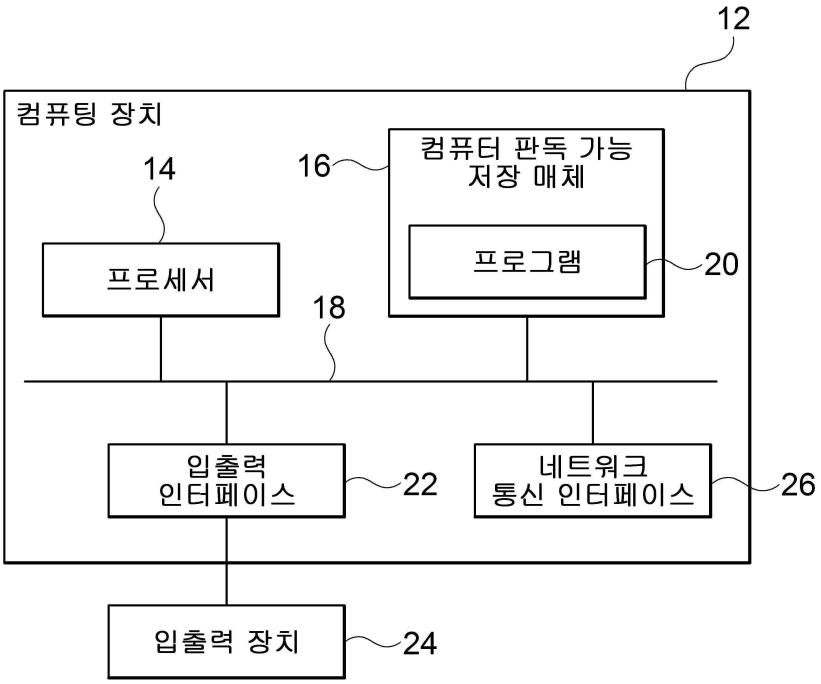
108 : 예측 모듈

108a : 기계 학습 모델

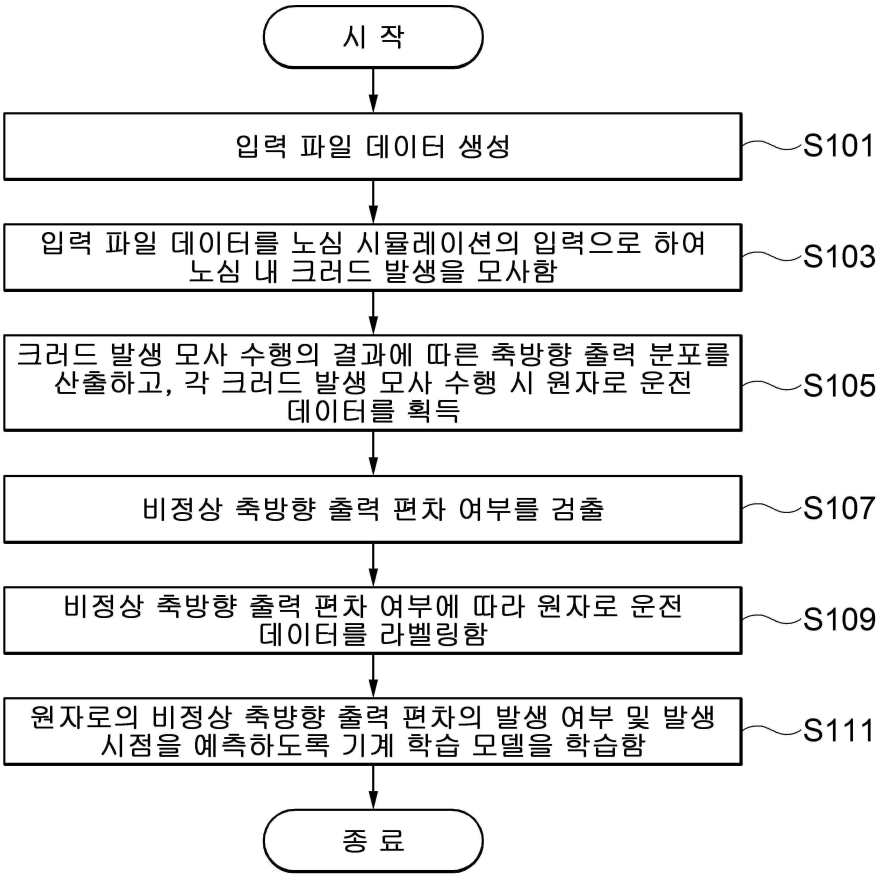
도면

도면1

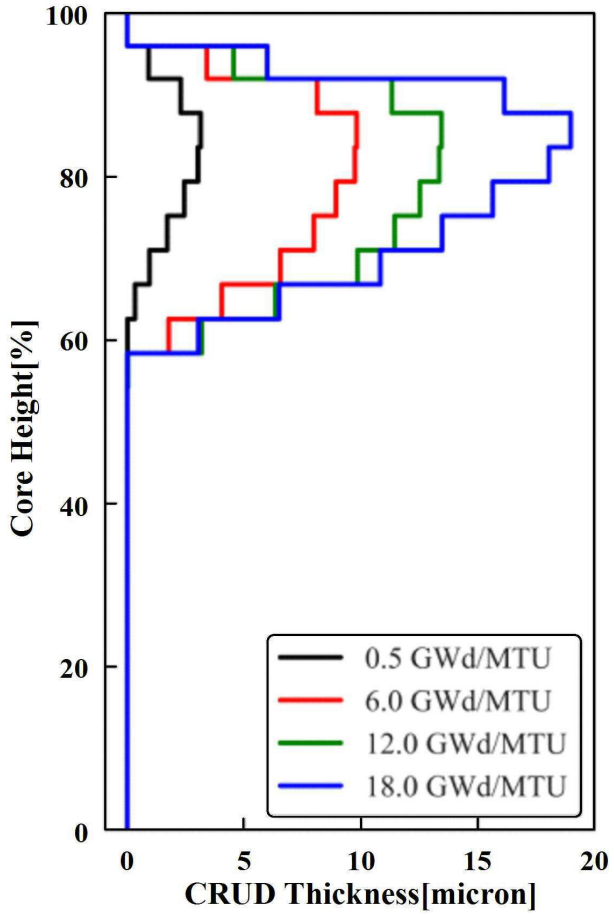
10



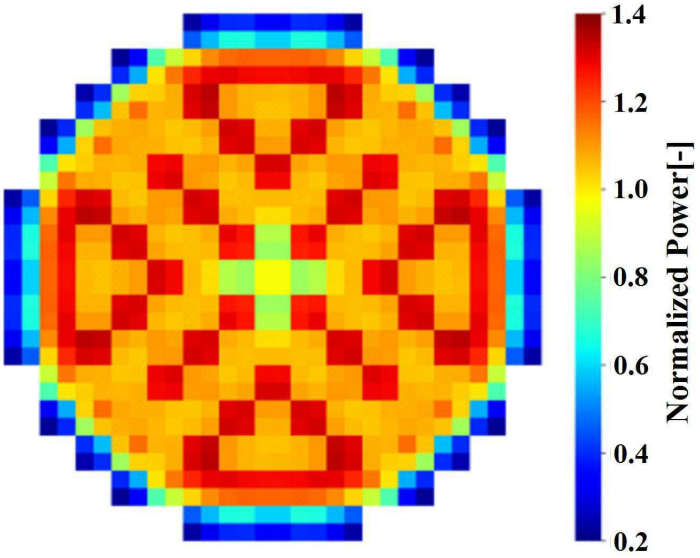
도면2


시 작
입력 파일 데이터 생성
S101
입력 파일 데이터를 노심 시뮬레이션의 입력으로 하여 노심 내 크러드 발생을 모사함
S103
크러드 발생 모사 수행의 결과에 따른 축방향 출력 분포를 산출하고, 각 크러드 발생 모사 수행 시 원자로 운전 데이터를 획득
S105
비정상 축방향 출력 편차 여부를 검출
S107
비정상 축방향 출력 편차 여부에 따라 원자로 운전 데이터를 라벨링함
S109
원자로의 비정상 축뱡향 출력 편차의 발생 여부 및 발생 시점을 예측하도록 기계 학습 모델을 학습함
S111
종 료

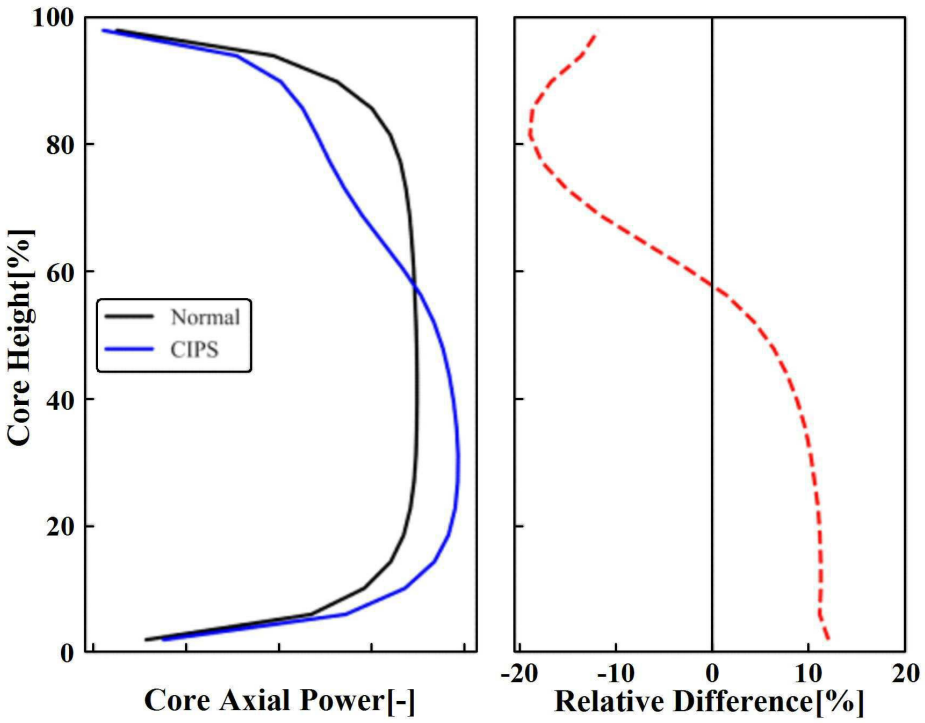
도면3


100
80
60
40
20
0
Core Height[%]
0
5
10
15
20
CRUD Thickness[micron]
0.5 GWd/MTU
6.0 GWd/MTU
12.0 GWd/MTU
18.0 GWd/MTU

도면4

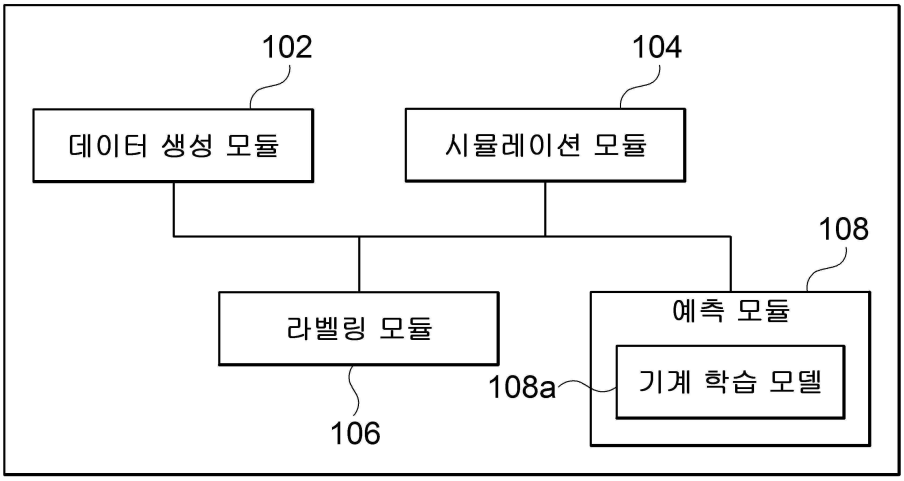

1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
Normalized Power[-]

도면5


100
80
60
40
20
0
Core Height[%]
Normal
CIPS
Core Axial Power[-]
-20
-10
0
10
20
Relative Difference[%]

도면6

100


102
104
데이터 생성 모듈
시뮬레이션 모듈
108
라벨링 모듈
예측 모듈
108a
기계 학습 모델
106