



(19)대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(51) 。 Int. Cl. G21C 7/00 (2006.01)	(45) 공고일자 (11) 등록번호 (24) 등록일자	2006년11월30일 10-0652977 2006년11월24일
--	-------------------------------------	--

(21) 출원번호 (22) 출원일자 심사청구일자	10-2000-0086791 2000년12월30일 2002년12월30일	(65) 공개번호 (43) 공개일자	10-2001-0062848 2001년07월07일
----------------------------------	---	------------------------	--------------------------------

(30) 우선권주장 09/475,309 1999년12월30일 미국(US)

(73) 특허권자 제너럴 일렉트릭 캄파니
미합중국 뉴욕, 셰넥테디, 윈 리버 로우드

(72) 발명자 러셀윌리엄얼2세
미국노스캐롤라이나주28405월밍톤아보텀드라이브1044

(74) 대리인 김창세

심사관 : 이용호

전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 원자로용 최적 연료 주기 설계 결정 방법, 컴퓨터 시스템, 소프트웨어 시스템, 원자로용 다중 동작 제어 변수 최적화 시스템, 디지털 정보 저장 장치, 컴퓨터 판독가능 매체 및 다중 동작 제어 변수 최적화 방법

(57) 요약

핵 노심(nuclear reactor core)의 기능 및 제어와 연관된 하나 이상의 동작 제어 변수(operational control-variables)에 대한 최선의 가능한 양적인 값들을 결정하여, 하나 이상의 노심 연료 보급 주기(core refueling cycles)에 걸쳐 특정 핵 노심을 동작하기 위한 최적의 연료 주기 설계 및 제어 전략을 식별하는 방법 및 시스템이 제공된다. 시스템은 선택된 노심 제어 변수들에 대한 가상의 경우들에 의해 제안된 상이한 조건들과 제약 조건하에서 노심 동작의 다수의 시뮬레이션들을 동시적으로 수행하기 위해 독립적인 프로세서들의 네트워크를 사용한다. 노심 시뮬레이션들은 노심 주기 기간 동안의 원자로 동작 상태를 반영하는 선택된 성능 파라미터들을 나타내는 출력 데이터를 제공한다. 모든 노심 시뮬레이션들이 완료되면, 각각의 제어 변수 경우에 대한 시뮬레이션 출력 데이터가 누산되어, 정규화되고, 각 제어 변수에 대한 시뮬레이터 경우 데이터를 피팅(fitting)하는 대응하는 2차 다항식들에 맵핑된다. 각각의 다항식을 고유하게 기술하는 계수들이 호스트 프로세서에 의해 연관된 메모리 장치내에 가상 "반응 표면(response surface)"의 유형으로서 기능하는 다차원 데이터 어레이로서 수집된다. 이러한 방식으로, 반응 표면은 많은 제어 변수 경우 시뮬레이션으로부터의 결과 출력 데이터에 대한 사이버-워크스페이스 및 집적소(cyber-workspace and repository)로서 기능한다. 그 다음, 다항식들은 독립 제어 변수 값들의 제한된 범위에 걸쳐 성능 파라미터들에 대한 종속 변수들의 값들을 예측하는 데에 사용된다. 각각의 다항식 예측기(predictor)로부터 예측된 성능 파라미터 값들은 객체 함수(object function)를 이용하여 비교되어, 어떤 특정한 연관된 독립 제어 변수(들)가 최대의 개선을 제공하는지를 결정한다. 그런 다음 식별된 값들을 이용하는 또 다른 노심 시뮬레이션이 수행되어 다항식 예측기들을 확증하고, 시뮬레이션 프로세스로 반응 표면내의 다항식 계수 데이터를 교정한다.

대표도

도 1a

특허청구의 범위

청구항 1.

원자로의 노심 제어 변수에 대한 양적인 값과 관련하여, 원자로(nuclear reactor)를 위한 최적의 연료 주기 설계를 결정하는 방법에 있어서,

- a) 복수의 노심 제어 변수에 대한 선택된 양적인 값에 의해 식별된 다양한 조건 하에서 동작하는 노심의 다중 동시적 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하는 단계와,
- b) 단계 a)에서의 시뮬레이션으로부터 입수한 노심 성능 파라미터의 선택된 양적인 값 - 성능 파라미터에 대한 상기 선택된 양적인 값은 단계 a)의 노심 시뮬레이션으로부터 입수한 값을 포함하되, 상기 제어 변수의 양적인 값에 대해 이산적인 사전결정된 변동이 이루어짐 - 을 2차 다항식으로 맵핑하는 단계와,
- c) 단계 b)에서 전개된 상기 다항식을 이용하여, 제어 변수 값의 사전결정된 범위 전체에 걸쳐 선택된 성능 파라미터에 대한 복수의 양적인 값을 예측하는 단계와,
- d) 객체 함수(objective function)를 이용하여, 단계 c)에서 예측한 성능 파라미터에 대한 상기 복수의 양적인 값을 기반으로, 최적화된 원자로 성능을 가져오는 제어 변수 및 제어 변수에 대한 양적인 값을 결정하는 단계를 포함하는

원자로용 최적 연료 주기 설계 결정 방법.

청구항 2.

제 1 항에 있어서,

- e) 단계 d)에서 결정된 제어 변수에 대한 양적인 값을 이용하여 검증하는(corroborating) 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하는 단계를 더 포함하는

핵 원자로용 최적 연료 주기 설계 결정 방법.

청구항 3.

제 1 항에 있어서,

최적화된 원자로 성능을 가져오는 제어 변수 및 제어 변수에 대한 양적인 값을 결정하는 객체 함수는 단계 d)에서 이용되는 결정하는

핵 원자로용 최적 연료 주기 설계 결정 방법.

청구항 4.

원자로용 다중 동작 제어 변수의 최적화를 위한 컴퓨터 시스템에 있어서,

복수의 노심 제어 변수에 대한 선택된 양적인 값에 의해 식별된 다양한 조건 하에서 동작하는 노심의 다중 동시적 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하는 수단과,

상기 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 입수한 노심 성능 파라미터의 선택된 양적인 값을 2차 다항식에 맵핑하는 수단과,

다항식 계수 값의 관점에서, 상기 2차 다항식을 저장하는 수단과,

상기 다항식과 관련하여 제어 변수 값의 사전결정된 범위 전체에 걸쳐 성능 파라미터에 대한 복수의 양적인 값을 예측하는 수단과,

객체 함수를 기초로 성능 파라미터에 대한 상기 복수의 양적인 값을 평가하여, 최적화된 원자로 성능을 가져오는 제어 변수 및 제어 변수에 대한 양적인 값을 결정하는 수단을 포함하는

컴퓨터 시스템.

청구항 5.

범용 컴퓨터를 제어하여, 원자로용 다중 동작 제어 변수에 대한 제어 변수 최적화 값의 양적인 값을 결정하기 위한 명령 세트를 갖는 소프트웨어 시스템에 있어서,

복수의 기능적 모듈로 형성된 명령의 세트를 포함하되,

상기 기능적 모듈은,

- a) 노심 동작 조건 및 설계 제약 조건과 관련된 주기-특유의(cycle-specific) 입력 데이터를 수용 및 저장하기 위한 컴퓨터 프로그램 명령을 갖는 초기화 모듈과,
- b) 복수의 제어 변수 모듈 - 각각의 제어 변수 모듈은 특정 노심 제어 변수의 사전결정된 양적인 값에 초기화하기 위한 컴퓨터 프로그램 명령을 가짐 - 과,
- c) 노심 시뮬레이션으로부터 입수한 노심 성능 파라미터의 선택된 양적인 값을 2차 다항식 - 상기 다항식은 대응하는 고유의 다항식 계수의 세트의 관점에서 식별됨 - 에 맵핑하기 위한 컴퓨터 프로그램 명령을 갖는 다항식 계수 전개 모듈과,
- d) 객체 함수를 이용하여 다중 제어 변수 및 각 제어 변수에 대한 양적인 값을 평가하여, 상기 다중 제어 변수에 대한 최적화된 값을 결정하기 위한 컴퓨터 프로그램 명령을 갖는 다항식 이용 모듈 - 상기 평가는 상기 다항식으로부터 입수한 성능 파라미터의 예측된 양적인 값을 기초로 함 - 을 포함하는

소프트웨어 시스템.

청구항 6.

제 5 항에 있어서,

노심 시뮬레이션 및 다항식이 생성되는 제어 변수 값의 사전결정된 범위를 변경함으로써 다항식 계수 데이터를 저장 및/또는 수정하기 위한 컴퓨터 프로그램 명령을 갖는 저장/수정 모듈을 더 포함하는

소프트웨어 시스템.

청구항 7.

원자로용 다중 동작 제어 변수의 최적화를 위한 시스템으로서, 하나 이상의 통신 링크를 통해 상호 접속되어 네트워크를 형성는 복수의 컴퓨터 프로세서를 포함하되, 적어도 하나의 프로세서는 연관된 데이터 저장 메모리를 갖는 호스트 프로세서로서 기능하고, 상기 메모리에는 노심 연료 주기 특유의 동작 조건 데이터 및 노심 설계 제약 조건 데이터가 저장되어 있는 시스템에 있어서,

상기 호스트 프로세서는,

- a) 하나 이상의 특정 노심 제어 변수의 사전결정된 양적인 값에 의해 특징지어지는 상이한 조건 하에서 동작하는 노심의 복수의 동시적 컴퓨터 시뮬레이션을 개시하고,
- b) 상기 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 입수한 노심 성능 파라미터의 선택된 양적인 값을 2차 다항식에 맵핑하고,
- c) 상기 다항식을 이용하여 제어 변수 값의 사전결정된 범위 전체에 걸쳐 성능 파라미터에 대한 복수의 양적인 값을 결정하고,
- d) 객체 함수를 기초로 성능 파라미터에 대한 상기 복수의 양적인 값을 평가하여, 최적화된 원자로 성능을 가져오는 대응 제어 변수 및 제어 변수에 대한 양적인 값을 결정하도록 프로그래밍되는

원자로용 다중 동작 제어 변수 최적화 시스템.

청구항 8.

제 7 항에 있어서,

상기 호스트 프로세서는 상기 객체 함수를 통해 결정된 제어 변수에 대한 최적화된 양적인 값을 이용하여, 검증하는 노심 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하도록 더 프로그래밍되는

원자로용 다중 동작 제어 변수 최적화 시스템.

청구항 9.

원자로 동작 시에 이용되는 복수의 제어 변수를 최적화하는 방법의 단계를 수행하기 위해 컴퓨터에 의해 실행가능한 명령의 프로그램을 실제로 구현하되, 컴퓨터에 의해 판독가능한 디지털 정보 저장 장치에 있어서,

상기 방법 단계는,

- a) 복수의 노심 제어 변수에 대한 선택된 양적인 값에 의해 식별된 다양한 조건 하에서 동작하는 노심의 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하는 단계와,
- b) 상기 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 입수한 노심 성능 파라미터의 선택된 양적인 값을 2차 다항식에 맵핑하는 단계와,
- c) 상기 다항식으로부터 제어 변수 값의 사전결정된 범위 전체에 걸쳐 선택된 성능 파라미터에 대한 복수의 양적인 값을 결정하는 단계와,
- d) 선택된 성능 파라미터에 대한 상기 복수의 양적인 값과 객체 함수를 이용하여, 상기 제어 변수 값의 범위 전체에 걸쳐서 제어 변수 및 제어 변수 값의 복수의 이산적 값을 평가함으로써, 상기 제어 변수에 대한 최적화된 양적인 값을 결정하는 단계를 포함하는

디지털 정보 저장 장치.

청구항 10.

원자로에 의한 이용을 위해 복수의 동작 제어 변수를 최적화하기 위한 컴퓨터 프로그램을 포함하는 컴퓨터 판독가능 매체에 있어서,

상기 컴퓨터 프로그램은,

- a) 노심 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 입수한 노심 성능 파라미터의 선택된 양적인 값을 2차 다항식에 맵핑하기 위한 컴퓨터 프로그램 코드 명령과,
- b) 상기 다항식을 이용하여 제어 변수 값의 사전결정된 범위 전체에 걸쳐 성능 파라미터에 대한 복수의 양적인 값을 예측하기 위한 컴퓨터 프로그램 코드 명령과,
- c) 객체 함수를 기초로 성능 파라미터에 대한 상기 복수의 양적인 값을 평가하여, 최적화된 원자로 성능을 가져오는 제어 변수 및 제어 변수의 양적인 값을 결정하는 컴퓨터 프로그램 코드 명령을 포함하는

컴퓨터 판독가능 매체.

청구항 11.

원자로의 동작에 사용하기 위한 다중 동작 제어 변수를 최적화하기 위한 방법으로서,

노심 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 입수한 노심 성능 파라미터의 선택된 양적인 값을 2차 다항식에 맵핑하는 단계와,

상기 다항식을 이용하여 사전결정된 범위의 제어 변수 값 전체에 대해 성능 파라미터에 관한 다수의 양적인 값을 예측하는 단계와,

객체 함수에 따라서 성능 파라미터에 관한 상기 다수의 양적인 값을 평가하여, 최적화된 원자로 성능을 가져오는 제어 변수 및 제어 변수에 대한 어떤 양적인 값을 결정하는 단계를 포함하는

다중 동작 제어 변수 최적화 방법.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 전반적으로는 원자로의 연료 주기(nuclear reactor fuel-cycle) 설계 및 관리에 관한 것으로서, 보다 구체적으로는, 하나 이상의 노심 연료 보급 주기(refueling cycles)에 걸쳐서 원자로의 동작에 관련된 다수의 동작 제어 변수(예를 들면, 연료 조성(fuel composition), 연료 조사량(fuel exposure), 연료 배치(fuel placement), 제어봉 위치결정(control blade positioning) 및 그 밖의 품질 결정 인자)를 고려하는 최적의 노심 설계 및 제어 전략의 결정에 관한 것이다.

원자로의 노심(core)은 노심의 효율적인 동작을 위한 전략에 영향을 미칠 수 있는 다양한 특성을 갖는 수많은 개별적 인자를 포함한다. 예를 들어, 원자로의 노심은 상이한 특성을 갖는 수많은(예를 들어, 수백 개) 개별적인 연료 어셈블리(집합체)를 갖는다. 이러한 어셈블리는 그러한 연료 집합체 사이의 상호작용이 법규 및 원자로 설계 상의 제약 조건(정부 및 고객에 따라서 특화되는 제약 조건을 포함함)을 모두 충족시켜야 한다. 유사하게, 특정 원자로 발전소에서 노심의 성능을 최적화하기 위한 효과적인 제어 전략을 설계 혹은 개발하고자 한다면, 노심의 반응도와 전반적인 효율성에 영향을 미치는 그 밖

의 제어 가능한 요소 및 인자도 또한 고려되어야 한다. 이러한 "동작 제어 변수"(본 명세서에서는 "독립적 제어 변수"라고도 지칭됨)는, 예를 들어 개별적으로 조정되거나 설정될 수 있는 다양한 물리적 구성 요소 및 제어 가능한 동작 조건을 포함한다. 연료 집합체 "장전" 이외의 제어 변수로는, "노심 유량(core flow)"(즉, 노심을 통과하는 물의 유량(rate of water flow)), "조사량" 및 "반응도"(즉, 집합체의 농축도 차이에서 기인한 노심 내의 연료 집합체들 사이의 상호작용), 및 "봉 패턴"(즉, 노심 내의 제어봉 집합체의 분포 및 축 방향 위치) 등이 있다. 이러한 동작 제어 변수는 각각 그 자체로서 노심의 전체 성능에 무시할 수 없는 효과를 미치는 독립 "제어 변수"를 구성한다. 이 독립 제어 변수가 가정할 수 있는 값의 방대한 수의 가능한 여러 가지의 동작 값 및 그러한 값의 조합 때문에, 기존의 컴퓨터 자원 방법을 이용한다 할지라도, 노심 반응도 및 성능에 대한 모든 개별적인 영향을 분석하여 최적화하고자 시도하는 것은 어려운 도전이며 매우 시간 소비적인 임무이다.

예를 들어, 노심 내에서 가능한 상이한 연료 집합체 배치의 수는 일백 계승(factorial)을 초과할 수 있다. 여러 가지의 수많은 장전 패턴 가능성 중에서, 이러한 특정 원자로 발전소에 필요한 설계 상의 제약 조건을 모두 만족시키는 배치의 비율은 매우 작을 것이다. 또한, 적용가능한 설계상의 제약 조건을 모두 만족시키는 구성 중 실현 가능한 구성의 비율도 매우 작다. 더욱이, 다양한 설계 상의 제약 조건을 만족하는 것 외에도, 연료 집합체 장전 배열 상태가 노심 주기 에너지(즉, 새로운 연료 요소를 노심에 보급해야 할 필요가 있기 전에, 노심이 생성하는 에너지의 양)에 상당한 영향을 미치기 때문에, 노심 주기 에너지를 최적화하는 특정 장전 배열 상태가 선택될 필요가 있다.

필요한 에너지 출력을 보급하고 유지하기 위하여, 노심에는 신선한 연료 집합체가 주기적으로 연료 보급된다. 하나의 연료 보급과 그 다음 연료 보급 사이의 기간은 일반적으로 동작의 "연료 주기" 혹은 "노심 주기"라고 지칭되며, 특정 원자로 발전소에 따라, 12개월 내지 24개월 (전형적으로는 18개월) 정도이다. 연료 보급 시에, 최소 반응 연료의 1/3이 원자로로부터 제거되고 나머지 연료 집합체는 새로운 연료 집합체가 추가되기 전에 재배치되는 것이 일반적이다. 일반적으로, 노심 주기 에너지를 개선하기 위해서는, 보다 높은 반응도의 집합체가 노심 내부 위치에 배치되어야 한다. 그러나, 발전소 특유의 설계 제약 조건을 만족시키면서 그러한 배열을 달성하는 것이 언제나 가능한 것은 아니다. 각 연료 집합체가 다른 집합체에 대해 상이한 여러 위치에 장전될 수 있기 때문에, 각 연료 주기에 대한 노심의 최적의 성능을 가져오는 노심 장전 배열 상태를 결정하는 것은 해결하는 데 매우 긴 시간을 필요로 하는 복잡하고 계산 집약적인(computation-intensive) 최적화 문제점을 제기한다.

노심 주기 동안에, 노심의 과잉 에너지 용량은 초과 반응도 혹은 "열 과잉(hot excess)"이라고 정의되며, 여러 가지 방법으로 제어된다. 한 가지 기법은 새로운 연료에 혼입되는 가연성 반응도 억제제(burnable reactivity inhibitor), 예를 들면, 가돌리나(Gadolinia)를 이용한다. 가연성 억제제의 초기 양은 전형적으로 유틸리티와 NRC에 의해 설정된 설계 제약 조건과 성능 특성에 의해 결정된다. 가연성 억제제는 과잉 반응도를 대부분 제어하지만 전부를 제어하는 것은 아니다. 그 결과, "제어봉 집합체"(본 명세서에서는 또한 "제어봉"이라고도 지칭됨)-원자핵 방출(nuclear emissions)을 흡수함으로써 반응도를 억제함-는 또한 과잉 반응도를 제어하는 데 이용된다. 전형적으로, 노심은 그러한 수많은 제어봉 집합체를 포함하는데 이러한 제어봉 집합체는 선택된 연료 집합체들 사이에 끼워지고 노심 내에서 축 방향으로 배치될 수 있다. 이들 제어봉 집합체는 안전한 원자로 운전 정지(safe shut down)를 보증하며, 동시에 첨두 출력(peaking) 인자를 제어하기 위한 주요 메커니즘을 제공한다.

이용되는 제어봉 집합체의 총 수는 노심의 크기 및 기하학적 형상(geometry)에 따라 변하며, 전형적으로는 50과 150개 사이이다. 제어봉 집합체의 축 방향의 위치(예를 들면, 완전히 삽입된 위치, 완전히 당겨진 위치 또는 이러한 위치의 중간 위치)는 과잉 반응도를 제어하고, 첨두 출력 인자와 같은 다른 동작 제약 조건을 만족시키기 위한 필요성에 기초한다. 각 제어봉 집합체마다, 예를 들어, 25 단 이상의 가능한 축 방향 위치와 25 단의 "조사"(즉, 이용 기간) 단계가 있다. 대칭성 및 임의의 소정 시점에 이용할 수 있는 제어봉 집합체의 수를 감소시키는 그 밖의 요건을 고려하면, 가장 간단한 경우에도 6 백만 가지 이상이 가능한 제어봉 집합체 위치 조합이 있다. 이 가능한 배치 중에서, 적용가능한 설계 및 안전상의 제약 조건을 모두 만족시키는 구성은 작은 비율이며, 이들 중에서 경제적인 배치 비율은 작다. 더욱이, 제어봉 집합체의 축 방향 위치도 또한 임의의 소정 연료 장전 패턴이 달성할 수 있는 노심 주기 에너지에 영향을 미칠 수 있다. 핵 연료 주기 비용을 최소화하기 위해서는 노심 주기 에너지를 최대화 하는 것이 바람직하기 때문에, 최적의 제어봉 집합체 위치를 개발하는 전략은 다른 곤란한 독립 제어 변수 최적화 문제점을 제공하며, 이 문제점은 연료 주기 설계 및 관리 전략을 최적화하고자 할 때 역시 고려되어야 한다.

전통적으로, 노심 장전 상태 및 제어봉 집합체 위치의 결정 및 그 밖의 변수 동작 제어에 대한 최적화 전략을 포함하는 원자로 연료 주기 설계 및 관리는 주로 노심 설계 기술자의 과거 경험에 기초한 "시행 착오(trial and error)"에 근거하여 결정된다. 발전소 동작 조건 변경에 대한 신속한 응답을 필요로 하는 상황 때문에, 노심 설계 기술자는 매우 짧은 기간 내에 200개를 넘는 독립 제어 변수의 값을 특정화하는 어려운 과제에 직면할 수 있다. 예를 들어, 특정의 제안된 노심 장전 배열 상태 또는 제어봉 집합체 위치 배열 상태가 노심 주기 기간 동안 원자로 성능에 미치는 영향은, 통상적으로 개별적인 컴퓨

터 시뮬레이션에 의해 결정된다. 특정의 설계 제약 조건이 확인된 배열 상태에 의해 만족되지 않는다면, 그 배열은 수정되고 다른 컴퓨터 시뮬레이션이 실행된다. 소정의 단일 독립 제어 변수 값의 변화가 초래하는 영향을 평가하는 데에도 비교적 긴 컴퓨터 시뮬레이션 시간이 필요하기 때문에, 이 절차를 이용하여 적절한 연료 주기 설계가 식별되기 전에 몇 주간의 인적 자원 및 컴퓨터 자원이 전형적으로 요구된다. 더욱이, 이와 같은 시행 착오 방안을 이용함으로써, 설계 및 안전상의 제약 조건을 모두 만족하는 연료 주기 설계 배열 상태가 일단 결정되면, 결정된 배열 상태가 사실상 최대 주기 에너지를 제공하지 않을 수도 있는 것으로 결정될 수도 있다. 그러므로, 이러한 시행 착오 과정은 기술자가 노심에 대한 최적의 연료 주기 설계가 결정된 것으로 확일할 때까지 계속되어야 한다. 그러나, 실제로, 기술자의 과거 경험과 일치하지 않는 특정 노심 배열 상태가 노심에서의 실제 최적 연료 주기 설계일 가능성도 매우 높다. 그러나, 그러한 사실상의 최적 노심 배열 상태는 상술한 시행 착오 과정을 통하여 결정되지 않을 수도 있다.

동작 제어 전략 문제점은 일반적으로 각 원자로 발전소에 대해 고유한 것으로서 고려되기 때문에, 기존의 알고리즘도 최적의 동작 제어 전략을 결정하기 위한 실행 가능한 해결책을 제공하지 못하고 있다. 또한, 표준 규칙 세트가 현재 상업적으로 동작하는 여러 가지의 수많은 원자로 발전소 및 원자로 유형의 광범위한 상태 특성에 대해 실제로 적용될 수 없기 때문에, 전문 시스템이 광범위하게 적용되지 못했다. 연료 집합체 장전 배열 상태를 식별하거나 제어봉 집합체 위치 배열 상태를 식별하여 광범위한 원자로에 대한 설계 제약 조건을 최적화하고 만족시키는 데 필요한 시간을 현저하게 감소시킬 수 있는 방법은 거의 개발되지 않았다. 또한, 최적의 제어봉 집합체 위치 배열 상태를 결정하기 위해 광범위한 원자로에 적용 가능한 적어도 하나의 방법이 개발되었는데, 이는 본 발명의 양수인에게 공동 양도되었으며 1998년 8월 4일에 허여된 Jackson의 미국 특허 제 5,790,616 호의 주제이다.

유사한 방법이 최적의 노심 연료 집합체 w 배열 상태를 결정하기 위하여 개발되어 왔다. 예를 들어, 본 발명의 공동 양수인에게 공동 양도되었으며 1999년 1월 13일에 허여된 Fawks, Jr.의 미국 특허 제 5,923,717 호 및 본 발명의 공동 양수인에게 공동 양도되었으며 1998년 8월 4일에 허여된 Fawks, Jr.의 미국 특허 제 5,790,618 호를 참조하기 바란다. 주로, 상술한 방법은 단일의 프로세서 혹은 컴퓨터 시스템을 이용하여 특정 프로그램 루틴을 실행하는데, 이 특정 프로그램 루틴은 연료 집합체 위치 또는 제어봉 집합체 축 방향 위치에 관한 특정 부품 배열/구성 하에서 원자로 동작 조건을 시뮬레이션하며, 그 후 가능한 대안을 계통적으로 또는 확률적으로 평가하는 것에 의해 배열 상태가 최적화된다. 각각의 위치 또는 장소를 분석한 다음에, 무작위의 배열 상태가 생성되어, 결정된 최선의 경우의 배열 상태와 비교된다. 다른 예로서는 비등수형 원자로(boiling water reactor; BWR) 노심 내 연료 관리 최적화를 위한 최근의 방법으로서, FORMAOSA-B라고 호칭되는 3-D 노심 시뮬레이션 컴퓨터 프로그램을 이용한다(B.R.Moore, P.J.Turinski 및 A.A.Karve에 의한 "FORMOSA-B: A BWR Incore Fuel Management Optimization Package", Nuclear Technology, 126, 153(1999)를 참조). FORMAOSA-B 코드의 강화 버전은 "시뮬레이트된 어닐링(simulated annealing)"이라고 호칭되는 확률적 최적화 기술을 이용하여 제한되는 연료 장전 패턴 최적화 능력을 갖는다. (A.A.Karve 와 P.J.Turinski에 의해 "Mathematics and Computation, Reactor Physics and Environmental Analysis in Nuclear Application," published September 1999년 9월에, SENDA EDITORIAL, S.A.에서 발표된 컨퍼런스에 관해 출간된 "Effectiveness of BWR Control Rod Pattern Sampling Capability in the Incore Fuel Management Code FORMOSA-B"라는 제목의 논문 참조.)

불행하게도, 상술한 방법은 한꺼번에 하나, 혹은 단지 몇 개의 운전 제어 변수(예를 들면, 연료 집합체 장전 패턴 혹은 제어봉 집합체 위치)를 최적화하는 데에만 적용 가능하다. 더욱이, 상술한 방법은 연료 집합체 농축, 제어봉 집합체 배열 간격, 노심의 유량, 및 품질과 성능에 있어서 결정적일 수 있는 그 밖의 독립 제어 변수와 같은 그 밖의 중요한 동작 제어 변수의 최적화를 처리하지 못한다. 따라서, 광범위한 원자로 발전소 유형에 대해 광범위하게 적용 가능하고, 모든 고유 동작 및 특정 원자로 발전소의 동작에 관해서 품질 결정적일 수 있는 여러 가지의 수많은 특정 제약 조건 및 고려 사항에 근거하고 최선의 가능한 노심 연료 주기 노심 설계 및 노심 내 연료 관리 전략을 결정할 수 있는 효과적인 최적화 방법 및 장치를 갖는 것이 매우 바람직할 것이다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

본 발명의 실시예는 최적의 연료-주기 설계를 식별하고 동작 관리 전략을 개발하도록, 원자로의 다중 동작 제어 변수를 최적화하는 시스템 및 방법을 제공한다. 일 측면에 있어서, 본 발명은 원자로 시뮬레이션 프로그램을 실행하도록 프로그램된 하나 이상의 컴퓨터를 포함하고, 하나 이상의 연료 보급 주기 동안 노심을 동작시키기 위한 최적의 물리적 구성을 만들어 내는 선택된 제어 변수에 대한 가장 적절한 값을 결정하도록 프로그램된 적어도 하나의 컴퓨터를 갖는 네트워크화된 컴퓨터 시스템이다. 다른 측면에서, 본 발명은 노심의 성능에 영향을 미치는 동작 제어 변수에 대한 최적화된 값을 효율적으로 결정하기 위한 방법으로서, 동작 제어 변수는 연료 집합체 장전, 제어봉 패턴, 노심 유량 등과 같은 원자로의 "제어 가능한" 물리적 측면이며, 그 특성은 특정한 노심의 물리적 구성 및 동작 제약 조건을 정의한다. "탐색(search)" 공간의 크기를 감소시키고자 함에 있어서, 본 발명의 최적화 방법은 무작위적 탐색 기술 또는 규칙 기반 기술 혹은 확률적인 탐색 기술 또는 규칙 기반의 기술에 의존하는 것이 아니라, 최적의 해결책을 위한 결정적이고 철저한 탐색을 수행한다.

본 발명의 예시적인 실시예에 있어서, 수천 개의 성능 파라미터(이러한 파라미터는 다양한 동작 제어 변수의 설정 또는 값에 의존하기 때문에, 본 명세서에서는 "중속" 변수라고도 지칭됨)는 노심 성능을 결정하기 위한 척도로서 이용된다. 이들 "성능 파라미터"는 CPR, SDM, MAPLHGR, MFLPD, HotExcess 등과 같은 노심 성능을 측정하는 데 통상적으로 이용되는 파라미터를 포함하지만, 이러한 파라미터로만 한정되는 것은 아니다. 분석된 성능 파라미터 중 대부분은 공간 및 시간의 존적이며, 예를 들어, MAPLHGR, MFLPD, MCPHGR 등이 있다. 따라서, 본 발명은 수 천개의 그러한 "중속" 변수를 분석할 수 있어야 한다. 이것을 달성하기 위하여, 본 발명의 바람직한 실시예는 복수의 프로세서를 이용하여 하나 이상의 연료 주기에 걸쳐 노심의 동작 상태를 커버하는 별도의 컴퓨터 시뮬레이션을 수행함으로써, 수많은 상이한 제어 변수에 대한 변화가 각각의 성능 파라미터에 의해 측정된 노심의 성능에 어떻게 영향을 미치는지를 판별한다. 바람직하게는, 이들 노심 시뮬레이션은 노심 동작의 3차원(3-D) 물리적 모델링을 수행할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 수행된다(즉, 시뮬레이터 프로그램은 3차원 제어 변수를 처리할 수 있어야 한다).

본 발명의 방법은 비교적 적은 수의 노심 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 2차 다항식에 맵핑함으로써, 필요한 시뮬레이션의 수를 현저하게 감소시키고, 따라서 전체 계산 효율성을 증가시킨다. 다항식은 그 후에 하나 이상의 선택된 제어 변수(즉, 독립 변수)에 대한 양적인 값 혹은 설정값의 선택된 제한 범위(즉, "폭")에 걸쳐 성능 파라미터(즉, 중속 변수)에 대한 양적인 값을 예측하는 데 이용된다. 따라서, 각 다항식 "예측기"에 의해 특정의 제어 변수는 가능한 제어 변수 값의 선택된 범위 혹은 "폭" 이내인 것으로 가정되는 수많은 불연속의 양적인 값에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 실제로 실행하는 데 필요한 처리 시간을 효율적으로 절약한다. 이들 다항식 예측기 각각은 호스트 컴퓨터 메모리 내의 다차원 데이터 어레이에 저장되는 고유한 계수값 세트에 따라서 정의된다. 이러한 방식으로, 데이터 어레이는 노심의 3-D 물리적 모델링에 기초한 여러 가지의 여러 가지의 수많은 시뮬레이션 경우의 결과를 다항식 계수로 정의되는 원자로 성능을 나타내는 다항식의 향으로 목록화(cataloging)하고 분석하기 위한 일종의 가상 "반응 표면"처럼 기능한다.

다항식 예측기를 이용하면, 각 제어 변수의 가능한 값의 폭에 걸쳐서 사전결정된 증분을 갖는 불연속적 제어 변수 값을 위한 성능 파라미터에 대한 양적인 값이 결정된다. 그 후, 각 성능 파라미터에 대한 한계 값을 설정하는 종래의 "객체 함수(objective function)"를 이용하여 각 성능 파라미터 값을 비교함으로써, 노심 성능을 최적화하기 위한 최선의 제어 변수 다항식 예측기 세트가 결정된다. 선택적으로, 특정의 최적화 "분해능(resolution)" 레벨이 선택될 수 있으며, 여기에서는 둘 이상의 제어 변수의 변화의 조합된 영향이 분석된다. 그 예로서, 둘 이상의 성능 파라미터에 대한 예측된 값이 조합되어, 발생 가능성이 있는 것으로 생각되는 노심 시뮬레이션을 나타내는 순 변화(net-change), 혹은 "중첩(superposition)" 값을 생성한다. 그 후, 각 제어 변수에 대해 입수한 최선의 예측 값(들)을 이용하여 확증하는(corroborating) 노심 시뮬레이션이 수행된다. 이것은 다항식 예측기의 확실성을 제공하고, 시뮬레이션 프로세스를 사용하여 반응 표면에 있는 다항식의 계수 데이터를 측정한다.

본 명세서에서 개시한 본 발명의 방법은, 충분한 처리 속도 및 관련 데이터 저장 용량을 갖는 대부분의 임의의 유형의 컴퓨터 네트워크 또는 프로세서의 상호 접속된 시스템을 이용하여 실행될 수 있으며, 임의의 특정 유형의 데이터 프로세서나 네트워크에 한정되는 것으로 의도될 필요는 없다. 더욱이, 하나 이상의 소프트웨어 모듈을 포함하는 본 발명의 소프트웨어 시스템은 하나 이상의 프로세서/컴퓨터 혹은 네트워크화된 컴퓨터 시스템 사이의 전송 및/또는 설치를 위한 컴퓨터 판독가능 매체 상에서 구현될 수 있다. 또한, 본 명세서에서 개시한 방법 및 시스템은 비등수형 원자로(BWR) 및 가압수형원자로(pressurized water reactor: PWR) 모두를 포함하는 상이한 유형의 수많은 원자로 발전소의 연료 주기 설계 및 동작을 최적화하는 데에 적용할 수 있다고 생각된다.

발명의 구성

다음의 설명은 예를 들면, Microsoft Windows 95/NT 환경 하에서 실행되는 최종 사용자 응용으로서 동작될 수 있는 본 발명의 현재의 바람직한 실시예에 관한 것이다. 그러나, 본 발명은 임의의 특정한 컴퓨터 시스템 혹은 임의의 특정한 환경에 한정되지 않는다. 대신에, 당업자라면 본 발명의 시스템 및 방법이 화학적 및 기계적 처리 시뮬레이션 시스템, PWR 시뮬레이션 시스템, BWR 시뮬레이션 시스템 등을 포함하는 임의의 다수의 제어 변수가 중요한 상업/과학적 처리 또는 시스템의 관리 및/또는 최적화를 요구하는 환경에 유리하게 적용될 수 있음을 알 것이다. 더욱이, 본 발명은 UNIX, LINUX, Macintosh, Next Step, Open VMS 등을 포함하는 다양한 서로 다른 플랫폼(platform)상에서 구현될 수 있다. 그러므로, 다음의 예시적인 실시예의 설명은 예시를 목적으로 하며, 본 발명을 제한하기 위한 것은 아니다.

먼저 도 1a를 참조하면, 블록도는 원자로용 다중 동작 제어 변수를 최적화하기 위한 본 발명의 예시적인 시스템의 실시예를 나타낸다. 특정 노심(3)을 정의하는 원자로 발전소 특유의 설계 제약 조건 및 주기 특유의 초기 데이터(1)는 본 발명의 최적화 시스템(2)에 대한 입력 데이터로서 제공된다. 동작 제어 변수(예를 들면, 봉 패턴, 연료 장전 상태, 노심 유량 등)에 대한 최적 값은 원자로의 노심 설계 및 관리에 이용하기 위한 출력으로서 제공된다.

도 1b를 참조하면, 본 발명의 최적화 방법이 구현될 수 있는 예시적인 컴퓨터 네트워크 배열이 도시되어 있다. 복수의 범용 컴퓨터/프로세서(10)가 근거리 통신망(local area network; LAN)(15)에 연결되는데, 이 LAN 자체는 하나 이상의 원격 컴퓨터(21)와의 통신을 위하여 하나 이상의 별개의 공중 또는 사설 액세스 네트워크(들)(20)에 연결될 수 있다. 바람직한 실시예에서, 본 발명의 다수의 제어 변수 최적화 방법은 적어도 하나의 컴퓨터(10) 상에 상주하는 소프트웨어 모듈을 통해 수행된다. 이하에 설명된 바와 같이, 모듈은 컴퓨터(10)와 컴퓨터(10) 사이에 분포되거나, 혹은 LAN(15) 및/또는 네트워크(들)(20)을 통해 통신하는 하나 이상의 컴퓨터(10, 21) 상에 상주할 수 있다.

도 1b에 도시한 바와 같이, 통신 네트워크(15 및/또는 20)는 인터넷과 같은 개방형 네트워크, 또는 LAN이나 WAN(wide area network)과 같은 사설 액세스 네트워크일 수 있다. 범용 컴퓨터(10)는 직접적으로 또는 모듈을 통하여 네트워크(15)에 연결되고, 종래의 I/O 및 사용자 인터페이스 구성 요소(도시되지 않음) 이외에 전용 메모리(12)를 갖거나 갖지 않는 독립 프로세서(11)로 구성된다. 컴퓨터(10)는, 예를 들어, VMS-Alpha 컴퓨터 시스템, 레거시(Legacy) 컴퓨터 시스템, 고속 워크스테이션 또는 고속 IBM 호환 개인용 컴퓨터(데스크-탑 또는 랩탑 Pentium III 프로세서 시스템과 같은 컴퓨터)와 같은 다양한 고속 프로세서 중의 임의의 것일 수 있다. 네트워크(15, 20)를 통한 통신은, 종래 및 기술 독점(proprietary) 프로토콜의 임의의 바람직한 조합을 이용하여 달성될 수 있으며, 이 조합은 예를 들어, TCP/IP 프로토콜과 같은 효율적인 인터-프로세서(inter-processor) 통신을 용이하게 한다.

둘 이상의 컴퓨터(10, 21)(바람직하게는, 원자로의 노심 동작을 시뮬레이션하기 위한 적절한 소프트웨어의 실행을 지원할 수 있는 시스템)은 LAN(15) 및/또는 네트워크(20)와 같은 일부 통신 링크(들)를 통해 연결되어 데이터 파일 및 제어 정보를 교환한다. 예를 들어, GE의 "PANACEA" 3-D 노심 시뮬레이션 프로그램과 같은 대부분의 임의의 통상적인 노심 시뮬레이션 프로그램(또는 프로그램 세트)이 본 발명과 함께 이용될 수 있다. 이러한 유형의 시뮬레이터 프로그램은 노심을 정의하는 3차원 변수를 처리할 수 있다. 선택된 "독립" 원자로 제어 변수(예를 들어, 연료 장전 상태, 붕 패턴, 노심 유량 등)에 대한 값을 포함하는 입력 파일이 입력으로서 제공되고, 선택된 성능 파라미터(즉, CPR, SDM, MAPLHGR, MFLPD 등과 같은 노심 "중속" 변수)에 대한 값을 포함하는 출력 파일을 제공하는데, 이러한 파라미터는 하나 이상의 노심 연료 보급 주기 전체에 걸쳐 복수의 불연속적 간격(즉, 모든 "조사 단계")으로 노심의 상태를 나타낸다.

이제 도 2를 참조하면, 본 발명의 다중 제어 변수 최적화 방법을 수행하기 위한 예시적인 소프트웨어 시스템(200) 내의 기본적 기능 프로세스 및 데이터 흐름이 기술되어 있다. 선택 가능한 "해결" 레벨(이후에 더욱 상세히 설명함), 그 밖의 처리 옵션 및 노심 주기 특유의 입력 데이터 정보와 관련된 정보가 바람직하게는 사용자에게 의해 초기 단계에서 입력된다(도시하지 않음). 주기 특유의 노심 프로파일 입력 파일(201)은, 특정 연료 주기 동안 특정 원자로 발전소에 대해 특유한 노심 특성 및 동작 품질에 중요한 제약 조건을 포함하며, 사용자 입력 정보로부터 구축된다. 이러한 주기 특유의 입력 데이터는 특정 원자로에 대한 초기 "중심점(center-point)" 데이터의 경우를 정의하는 초기 독립 제어 변수 값을 결정하는 데 이용된다. 이 중심점 데이터는 노심 시뮬레이션 프로그램(도시하지 않은 실제 시뮬레이션 프로그램)에 입력 데이터 파일(202)로서 제공된다. 노심 동작 시뮬레이션(207)은 이러한 중심점 데이터를 이용하여 수행된다. 예를 들어, 3차원(3-D) 분석 노심 시뮬레이션은 선택된 "호스트" 컴퓨터(10) 상에서 수행된다. 시뮬레이션 프로세스가 완료되었을 때, 중심점 경우 시뮬레이션 출력 데이터 파일(212)이 생성된다. 그 후, 이 파일로부터의 중심점 경우 시뮬레이션 출력 데이터는 선택된 "호스트" 컴퓨터(10)의 디지털 저장 메모리 내의 다차원 어레이에 저장되고, 서로 다른 제어 변수 값에 대한 원자로 성능 평가를 위한 일종의 가상의 "반응 표면"(219)을 생성하기 위한 기초로서 이용된다.

다음에는, 선택된 동작 제어 변수에 대한 독립 변수 값의 사전결정된 변화에 의해 표현되는 서로 다른 물리적 조건 및 제약 조건 하에서 동작하는 동일 노심의 개별적인 시뮬레이션이 소프트웨어 시스템에 의해 동시에 수행된다. 여러 가지 시뮬레이터 입력 데이터 파일(203-206)이 생성되며, 이들 파일 각각은 선택된 제어 변수 값의 변화를 반영한다. 각 입력 파일은 통신 네트워크(15, 20)를 통해 접속된 하나 이상의 독립 컴퓨터 또는 프로세서(10, 21) 상에 상주하는 독립 노심 시뮬레이터 프로그램 혹은 프로세스(208-211)에 제공된다. 수신된 입력 파일에 있는 값에 기초하여 노심 시뮬레이션을 수행한 후에, 각 시뮬레이터 프로세스는 노심의 중속 변수(예를 들어, CPR, MFLPD, MAPRAT, Hot Excess, SDM)의 결과적인 출력 값을 반영하는 출력 데이터 파일(213-216)을 리턴한다. 일단 독립 변수 경우(208-211) 각각에 대한 노심 시뮬레이션이 모두 완료되면, 시뮬레이터 출력 파일들(213-216)로부터의 데이터는 블록(217)에서 나타난 바와 같이, 예를 들어, 각 데이터 항목을 원래의 "중심점" 경우(212)로부터 획득된 출력 데이터로 나눔으로써 정규화된다.

모든 시뮬레이션 경우의 출력 데이터가 정규화된 후에, 각 독립 제어 변수 경우에 대한 정규화된 데이터는 대응하는 2차 다항식 세트에 맵핑된다. 즉, 연관된 다항식 계수 세트에 의해 각각 특징지어지는 2차 다항식이 일부 제한된 수의 노심 시뮬레이션에서 획득된 시뮬레이션 출력 데이터에 알맞도록 선택된다(예를 들어, 3회의 시뮬레이션이 각 독립 제어 변수를 평가하는 데 바람직하게 이용되며, 이는 중심점 경우 및 두 가지 변동 경우인데, 여기서 특정 제어 변수에 대한 중심점 경우의 양적인 값은 각각 증가 및 감소한다. 그 후, 다항식은 "예측기"로서 이용되어, 각 제어 변수에 대해서 선택된 성능 파

라미터의 양적인 값을 투영한다. 각 다항식을 고유하게 정의하는 계수는, 블록(218)에서 나타난 바와 같이, 2차 다항식을 풀기 위한 종래의 알고리즘 기술을 이용하여, 정규화된 시뮬레이터 출력 데이터로부터 전개된다. 이 정규화된 계수 데이터는, 블록(219)에 나타난 바와 같이, 본 명세서에서 "반응 표면"이라고 정의된 컴퓨터 메모리 영역에 저장된다. 기본적으로, 반응 표면(219)은 제어 변수의 값의 개별적 또는 종합적 변화에 대한 원자로의 종속 변수(성능 파라미터) "반응"을 포함한다. 이와 같이, 반응 표면은 다수의 독립 제어 변수에 대해 여러 가지 경우의 시뮬레이션으로부터 얻은 노심 시뮬레이션 출력 데이터를 저장하기 위한 일종의 사이버-워크스페이스 및 데이터 어레이 저장소의 역할을 한다.

다음, 각 제어 변수에 대한 모든 다항식이 평가되고(220), 최선의 다항식 예측기가 선택된다. 다항식 최적화 및 평가 모듈과 도 7에 대하여 더욱 상세히 설명한 바와 같이, 선택된 최선의 다항식 예측기에 의해 제공된 제어 변수 값을 이용하여 다른 시뮬레이션 프로세스(221)가 수행되어, 수정된 값이 평가된다. 만약, 시뮬레이션의 결과로서, 원자로 성능이 개선된 것으로 나타났다면, 수정된 제어 변수는 초기 중심점 경우에 대한 개선으로서 수용된다. 그 후, 이 새로운 조합의 독립 변수는 새로운 중심점 경우로서 재정의되고, 전체적인 제어 변수 평가 프로세스는 더 이상 현저한 개선을 실현하지 못할 때까지 반복된다(도 2에서 점선으로 표시한 바와 같음). 더 이상의 개선이 획득되지 않는 것으로 결정되면, 반응 표면은 더 작은(더 제한된) 범위의 제어 변수 값을 이용하여 재정의되고 상기 단계는 반복된다. 최적화 프로세스는 전체적으로 제어 변수에 대한 더 이상의 개선이 인식되지 않고, 제어 변수 값의 범위를 더 이상 감소시킬 수 없을 때 본질적으로 완료된 것으로 여겨진다.

도 3에 있어서, 본 발명의 다중 제어 변수 최적화 방법을 수행하기 위한 예시적인 소프트웨어 시스템(300)의 실시예가, 각 모듈에 대한 예시적인 기능적 프로그램 제어 단계를 더욱 상세히 도시하는 별도 첨부부의 도 4-도 8을 참조로 하여, 기능적으로 관련된 부분 또는 "모듈"의 관점에서 도시된다. 소프트웨어 시스템 전체를 포함하는 소프트웨어 시스템(300)의 하나 이상의 모듈은, 컴퓨터 관독가능 매체 상에서 구현되어 하나 이상의 프로세서 또는 네트워크화된 컴퓨터 시스템상의 분배 및 설치의 용이성을 용이하게 한다. 본 명세서에는 기능적으로 관련된 소프트웨어의 다양한 부분이, 별도의 프로세서에 따라서 개별적으로 또는 집합적으로 실행될 수 있는 구성 요소 소프트웨어 모듈의 관점에서 기술되었지만, 본 발명의 소프트웨어 시스템은 반드시 모듈형 구성 요소의 구성으로 제한되는 것은 아니다. 도 3에 나타난 바와 같이, 소프트웨어 시스템(300)의 예시적인 실시예는 반응 표면 초기화 모듈(301), 하나 이상의 제어 변수 모듈(302), 다항식 계수 전개 모듈(303), 다항식 이용 모듈(304), 및 반응 표면 저장/수정 모듈(305)을 포함한다. 소프트웨어 시스템(300) 내에서 기능적으로 관련된 소프트웨어의 모듈형 배열은 특정 응용에 바람직하거나 또는 적절한 여러 가지 제어 변수 모듈(도 5a-도 5e)의 이용 또는 생략을 용이하게 함으로써, 상이한 환경에 대한 소프트웨어 시스템의 전반적인 융통성 및 응용성을 강화시키고, 새로운 면서 상이한 제어 변수 모듈 또는 갱신된 제어 변수 모듈의 추가도 용이하게 한다.

반응 표면 초기화 모듈(301)은, 기본적으로, 소정의 노심에 대한 동작 조건 및 제약 조건을 기술하는 운전자 입력 데이터(예를 들면, 초기 노심 장전, 봉 패턴 등)를 승인하고, 반응 표면(219)을 정규화하기 위한 개시점 또는 "중심점" 시뮬레이션 경우를 생성하기 위한 것이다. 제어 변수 모듈(302)은 각각 예를 들어, 연료 집합체 장전, 제어봉 위치, 노심 유량, 간격 변경 위치, 연료 집합체 특성 등과 같은 특정 유형의 노심 제어 변수와 관계되는 시뮬레이션 경우 데이터를 생성하기 위한 프로그램 제어 단계를 포함한다. 각 독립 제어 변수 유형에 대하여, 수많은 독립 변수 경우가 고려될 수 있다. 더욱이, 특정 제어 변수 모듈에 의해 고려된 각 독립 변수 경우에 대하여, 적어도 2개의 노심 시뮬레이션이 실행되어 반응 데이터가 획득되며, 이 경우 하나의 시뮬레이션은 사전결정된 양만큼 증가한 독립 변수 값과 함께 중심점 시뮬레이션 경우 값을 이용하여 수행되고, 다른 시뮬레이션은 사전결정된 양만큼 감소한 독립 변수 값과 함께 중심점 시뮬레이션 경우 값을 이용하여 수행된다. 특정 제어 변수에 대하여 증가한 시뮬레이션 값과 감소한 시뮬레이션 입력 값 사이의 차이는 제어 변수의 범위 또는 "폭"이라고 지칭되며, 모든 시뮬레이션 경우의 결과는 반응 표면에 저장되기 때문에, 본 명세서에서는 또한 (해당 제어 변수에 대한) 반응 표면의 "폭"이라고 지칭된다. 각 시뮬레이션 경우의 결과는 노심 시뮬레이션 프로세스 내에서 모델링된 모든 동작 성능 파라미터(종속 변수)에 대한 값을 포함한다. 궁극적으로, 반응 표면은 각 독립 변수 경우에 대해 적어도 3개의 노심 시뮬레이션 경우 결과(즉, 특정 제어 변수 모듈에 의해 생성된 중심점 경우 반응 및 2개의 변동 경우 반응)를 포함한다.

제어 변수 모듈(302)은 바람직하게는 LAN에서 단일 컴퓨터/프로세서(10)를 이용하여 순차적으로 실행된다. 특정한 원자로 발전소 특유의 고려 사항을 위해 세밀하게 만들어진 추가의 제어 변수 모듈(도시하지 않음)이 이용될 수 있다. 제어 변수 모듈(302)은 (도 3에서 점선으로 나타난 바와 같이) 임의의 순서대로 실행될 수 있고, 임의의 단일 또는 여러 개의 제어 변수 모듈은 다양한 품질 결정적 고려 사항 및 원하는 원자로 성능의 개선 정도에 따라 이용될 수 있다. 제어 변수 값을 포함하는 시뮬레이터 입력 데이터 파일은 각 제어 변수 모듈에 의해 생성되고, 상주하는 노심 시뮬레이터 프로그램을 갖는 LAN(또는 원격 네트워크(21)) 내의 다른 컴퓨터/프로세서에 제공된다. 일단 시뮬레이션 경우가 프로세서에 의해 완료되면, 그것은 결과 값을 포함하는 시뮬레이터 출력 데이터 파일을 생성하고 그 파일을 반응 표면을 포함하는 컴퓨터로 송신한다. 전형적으로, 노심 시뮬레이션에는 매우 긴 시간이 걸리기 때문에, 이와 같이 분산된 프로세싱 구성은 여러 가지의 수많은 노심 시뮬레이션 경우가 다소라도 동시에 계속되게 함으로써, 노심 시뮬레이션 시에 소비되는 전체 경과 시간을

대폭 단축한다. 대안으로, 여러 가지의 제어 변수 모듈이 LAN이나 WAN 내에서 접속되거나, 또는 다른 통신 링크를 통해 접속되는 상이한 독립 컴퓨터 상에 상주할 수도 있다. 예를 들어, 그러한 실시예에 있어서, 한 컴퓨터 상에 상주하는 반응 표면 초기화 모듈(301)은, LAN을 통해서 그 모듈이 상주하는 다른 컴퓨터에 특정의 소망하는 제어 변수 모듈의 실행을 요구할 수 있고, 그 후 반응 표면으로부터의 중심점 경우의 데이터를 전송한다.

다항식 계수 전개 모듈(303)은 각 독립 변수 경우에 대한 노심 시뮬레이션 결과를 각 성능 파라미터(즉, 동작 "종속" 변수)에 대응하는 고유의 2차 다항식 곡선으로 맵핑하기 위한 프로그램 제어 코드를 포함한다. 각 다항식의 계수 값은 각 다항식이 3회의 시뮬레이션 경우로부터 얻어진 데이터를 그의 대응하는 성능 파라미터에 대해 일치시키도록 결정된다. 다항식 이용 모듈(304)은 각 제어 변수 값에 대한 변화 및 함께 고려되는 제어 변수의 조합에 대한 변화를 조사하여, 어느 변화가 노심 성능에 가장 큰 영향을 미치는지를 결정하기 위한 프로그램 제어 코드를 포함한다. 노심 시뮬레이션을 실행하는 데에는 긴 시간이 소비되기 때문에, 다항식은 (3차원 시뮬레이터 실행과 관련된) 신속한 예측기로서 이용되어, 노심 시뮬레이션을 실행하는 대신에 제어 변수의 입력 폭에 대한 성능 파라미터 값을 결정한다. 성능에 최대 영향을 미치는 제어 변수(들)는 예측되는 성능 파라미터 값을 사전결정된 객체 함수와 반복적으로 비교하는 것에 의해 결정된다. 마지막으로, 저장/수정 모듈(305)은 반응 표면을 저장 및 문서화하고, 정량화된 최적 제어 변수 동작 값을 출력하거나, 또는 대안으로 반응 표면의 "폭"을 감소시킴으로써 결과가 더 개선될 수 있는 것으로 결정되는 경우에, 반응 표면을 수정하기 위한 프로그램 제어 코드를 포함한다(이하에 더욱 상세히 설명됨).

이제 도 4를 참조하면, 흐름도는 반응 표면 초기화 모듈(301)에 의해 수행되는 예시적인 기능적 단계가 도시되어 있다. 처음 몇 개의 초기 단계(401 내지 404)는 기본적으로 초기의 중심점 시뮬레이션 경우를 생성하는 데에 필요한 정보를 획득하여 식별한다. 단계(401)에서, 제어 변수의 초기값 및 초기 반응 표면 폭을 포함하는 주기 특정 노심 동작 조건 데이터(즉, 초기 제어봉 패턴, 초기 노심 장전 배열 상태 등)가 운전자 입력을 통해 특정된다. 단계(402)에서, 획득된 운전자 입력 정보로부터 특정 원자로 발전소의 설계 기초를 형성하는 특정 동작 제약 조건이 결정되며, 그러한 설계 기반 및 제약 조건 정보는 이하에 설명될 대안 솔루션의 상대적 품질을 비교하는 데에 이용되는 "객체 함수"의 평가에 도움을 준다. 또한, 컴퓨터 운전자는 다항식 최적화 및 평가 모듈 및 도 7에 관한 이하의 설명에서 더 상세히 논의될 입력 옵션을 선택할 수 있는데, 입력 옵션은 결합될 것으로 여겨지는 두 개 이상의 제어 변수의 동작 값의 변화가 원자로 성능에 미치는 영향을 조합하여 고려할 수 있게 한다.

단계(403)에서, 최적화 동안 고려될 특정 독립 제어 변수(노심 장전 상태, 봉 패턴, 노심 유량, 간격 교환, 연료 집합체 특성 등)은 획득한 운전자 입력 정보를 기초로 식별된다. 단계(404)에서, 노심 내에서 이용될 연료 집합체가 식별되고, 반응도 값에 따라 분류된다. 그 다음, 단계(405)에서, 중심점 시뮬레이션 경우를 생성하기 위한 노심 시뮬레이션 입력 데이터 파일이 생성되고, 상주하는 (또는 원격의) 노심 시뮬레이션 프로그램에 제공된다. 일단 시뮬레이션이 완료되면, 시뮬레이션의 결과는 시뮬레이션 출력 파일에 리턴된다. 단계(406)에서, 다차원 어레이가 시뮬레이션 "반응 표면"으로서 메모리 내에 생성되고, 시뮬레이션 출력 파일로부터의 데이터가 초기 중심점 경우로서 메모리 내에 저장된다.

그 다음, 하나 이상의 제어 변수 모듈(302)은, 특정 제어 변수에 대한 값의 변화에 대해 시뮬레이션 경우 데이터를 전개하도록 실행된다. 하나 이상의 제어 변수 모듈의 실행은 선택적이다. 필요에 따라 추가의 제어 변수 특정 모듈(본 명세서에는 개시하지 않음)도 포함될 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 개개의 제어 변수 모듈은 단일 프로세서에 의해 순차적으로 실행될 수도 있으며, 또는 LAN이나 WAN 내의 상이한 컴퓨터 상에서 동시에 실행될 수 있다. 각각의 제어 변수 모듈이 실행되면 반응 표면에 더 많은 시뮬레이션 경우 데이터를 추가하게 되어, 이에 따라 본 방법의 정확도 및 본 발명에 의해 달성될 수 있는 잠재적 원자로 성능 최적화가 향상된다.

도 5a를 참조하여, 연료 집합체 장전 상태를 위한 예시적인 제어 변수 모듈에 의해 수행되는 기능적 단계가 먼저 기술된다. 연료 집합체 장전 모듈은 연료 집합체의 위치나 장전 배열 상태의 변화에 의해 야기되는 원자로 성능 파라미터의 변화를 검사한다. 통상적으로, 대부분의 노심은 8할 대칭(octant-symmetric)이며, 이에 따라 노심의 8할 내에 있는 연료 집합체 배열 상태만을 고려하면 된다. 그러나, 8할 대칭이 프로세스에 꼭 필요한 것은 아니다. 단계(501)에서 나타낸 바와 같이, 특정한 원자로에 대한 사전식별된 제약 조건이 주어졌을 때, 연료 집합체 장전 상태의 변화가 허용되는지의 여부가 먼저 결정된다. 만약 연료 집합체 장전 상태 변화가 허용되지 않는다면, 프로그램 제어는 다른 모듈로 전달된다. 만약 연료 집합체 장전 상태 변화가 허용된다면, 블록(502)에 나타낸 바와 같이, 모든 허용가능한 연료 집합체 위치는 각각의 다른 위치에 대하여 단계(503 내지 507)를 반복함으로써 체계적으로 고려된다.

단계(503)에서는 선택된 위치에서 연료 집합체의 알려진 반응도 값이 사전결정된 값보다 더 큰 값으로 변화된다. 그 후, 새로운 노심 시뮬레이션 입력 파일이 생성되고, 그 입력 파일은 연료 집합체 반응도 값의 변화 및 중심점에 대한 소정의 반응도 값의 차이를 최소화하기 위해, 남은 연료의 섞임(shuffling)을 반영한다. 그 후, 노심 시뮬레이션 입력 파일은, 단계(504)에서 나타낸 바와 같이, 시뮬레이션 프로세싱을 위해 이용가능한 프로세서/컴퓨터(10)로 제공된다. (비록 "봉-감손

형(rod depletion)"을 반영하는 노심 시물레이션 입력 파일은 본 실시예에 있어서 일반적으로 적합한 것으로 의도되지만, 봉-비감손형(non-rod depletion) 시물레이터 입력 파일도 본 방법과 함께 이용될 수 있다.) 제공된 노심 시물레이션의 결과를 기다리지 않고서, 같은 위치에서의 집합체 반응도 값은 단계(505)에서 원래 반응도 값보다 낮은 값으로 변화된다.

다양한 제어 변수 모듈과 관련하여 본 명세서에서 기술된 바와 같이, 특정한 제어 변수 값에 대해 요구되는 증가 및 감소의 합계는 고려되는 특정 제어 변수에 따라 사전결정되고, 제어 변수를 검사하기 위한 값의 범위 또는 "폭"을 정의한다.

그 다음, 단계(506)에서, 변화된 반응도 값을 갖는 새로운 노심 시물레이션 입력 파일이 다시 생성되어, 다른 시물레이션 프로세싱을 위해 임의의 이용가능한 프로세서/컴퓨터(10)로 제공된다. 본 발명의 예시적인 실시예에 있어서, 단계(504, 506)의 시물레이션 경우가 일단 종료되면, (예를 들어, 노심 시물레이션을 수행하는 각 프로세서/컴퓨터에 의해) 각 시물레이션으로부터 얻어진 출력 데이터 파라미터가 중심점에 대해 정규화되고, 다항식에 적용되며, 공통의 반응 표면(219)에 저장될 수 있다. 만약 다른 위치에서의 연료 집합체에 대한 반응도 값의 변화가 시물레이션되지 않았다면, 이전 단계의 노심 시물레이션이 종료되는 것을 기다릴 필요없이, 단계(507)에서 나타난 바와 같이, 새로운 연료 집합체 위치가 선택되고, 모든 허용가능한 집합체 위치가 고려될 때까지 단계들(503-506)이 다시 반복된다. 궁극적으로, 일단 연료 집합체 반응도 변화에 대한 모든 독립 제어 변수 경우가 고려되면, 다른 모듈의 제어 하에서 프로세싱이 계속될 수 있다.

도 5b는 제어봉의 다양한 축 방향 위치를 조사하기 위한 예시적인 제어 변수 모듈에 의해 수행되는 프로그램 제어 단계를 도시한다. 도 5a의 연료 집합체 장전 모듈과 비슷한 방법으로, 각 제어봉에 대한 두 가지 시물레이션 경우가 생성되고, 그 시물레이션 결과는 공통의 반응 표면에 추가된다. 단계(509)에서는, 제어봉 패턴 변화가 원자로에 대한 사전식별된 제약 조건 내에서 허용되는지의 여부가 우선 결정된다. 만약 제어봉 패턴 변화가 허용되지 않는다면, 프로그램 제어는 다른 모듈로 전달된다. 만약 제어봉 패턴 변화가 허용된다면, 단계(510)에서 나타난 바와 같이, 사전결정된 제어봉이 분석을 위해 선택된다. 다음, 단계(511)에서, 선택된 제어봉의 초기 위치 값이 사전결정된 양만큼 증가하는데, 그 증가량은 노심의 물리적 경계 및 특정 사용자 한계를 벗어나지 않는 양만큼이다. 그 후, 단계(512)에서 나타난 바와 같이, 선택된 제어봉의 위치 값을 변화시킨 새로운 노심 시물레이션 입력 파일이 생성되고, 시물레이션 프로세싱을 위해 이용가능한 프로세서/컴퓨터(10)로 제공된다.

단계(513)에서, 동일한 제어봉에 대한 제어봉 위치 값이 단계(511)에서와 같은 원래의 위치보다 작은 값으로 변경된다. 다음으로 단계(514)에서, 위치 값을 변화시킨 새로운 노심 시물레이션 입력 파일이 다시 생성되고, 두 번째 시물레이션 경우를 수행하기 위해 이용가능한 프로세서/컴퓨터(10)로 제공된다. 단계(515)에서 나타난 바와 같이, 그 밖의 제어봉에 대한 위치 값의 변화가 시물레이션된다면, 새로운 제어봉이 선택되고, 모든 제어봉이 고려될 때까지 단계(511-514)가 다시 반복된다. 연료 집합체 장전 모듈에서와 같이, 제어봉 위치 결정 모듈 내에서의 각 단계는 이전 단계의 노심 시물레이션의 결과를 기다릴 필요없이 진행될 수 있다. 마지막으로, 일단 제어봉 위치 변화에 대한 모든 독립 변수 경우가 고려되면, 다른 모듈의 제어 하에서 프로세싱이 계속될 수 있다.

도 5c는 노심 유량의 변화에 따른 반응 표면을 전개하기 위한 예시적인 제어 변수 모듈에 의해 수행되는 프로그램 제어 단계를 도시한다. 도 5a 및 5b의 다른 독립 제어 변수 모듈과 비슷한 방법으로, 각 노심 유량 제어 변수에 대한 두 가지 시물레이션 경우가 전개되고, 그 결과가 공통의 반응 표면에 추가된다. 단계(519)에서, 노심 유량의 변화가 그 원자로에 대한 사전식별된 제약 조건 하에서 허용되는지의 여부가 먼저 결정된다. 만약 노심 유량 변화가 허용되지 않는다면, 프로그램 제어는 다른 모듈로 전달된다. 만약 노심 유량 변화가 허용된다면, 단계(520)에 나타난 바와 같이, 특정 노심 유량 변수가 분석을 위해 선택된다. 그 다음으로 단계(521)에서, 선택된 노심 유량 변수의 초기 중심점 경우 값이 사전결정된 양만큼 증가된다. 그 후, 단계(522)에서 나타난 바와 같이, 선택된 노심 유량의 변수 값만을 변화시킨 새로운 노심 시물레이션 입력 파일이 생성되고, 시물레이션 프로세싱을 위해 이용가능한 프로세서/컴퓨터(10)로 제공된다.

단계(523)에서, 동일한 노심 유량 변수에 대한 노심 유량 값은 단계(521)에서와 비슷한 원래의 값보다 작은 값으로 변화된다. 그 다음으로 단계(524)에서, 노심 유량 값을 변화시킨 새로운 노심 시물레이션 입력 파일이 다시 생성되고, 두 번째 시물레이션 경우를 프로세싱하기 위해 이용가능한 프로세서/컴퓨터로 제공된다. 단계(525)에서 나타난 바와 같이, 만일 그 밖의 노심 유량 변수 제어에 대한 노심 유량 값에 있어서의 변화가 시물레이션되지 않았다면, 다음의 독립 노심 유량 변수가 선택되고, 모든 독립 노심 유량 변수가 고려될 때까지 단계(521-524)가 다시 반복된다. 전술한 다른 제어 변수 모듈과 같이, 이 모듈에서의 각 단계는 이전 단계의 노심 시물레이션이 완료될 때까지 기다릴 필요없이 진행될 수 있다. 마지막으로, 일단 노심 유량 변수에 대한 모든 독립 제어 변수 경우가 고려된 경우, 다른 모듈의 제어 하에서 프로세싱이 계속될 수 있다.

도 5d는 배열 간격의 변화에 따른 반응 표면을 전개하기 위한 예시적인 제어 변수 모듈에 의해 수행되는 프로그램 제어 단계를 도시한다. 다른 제어 변수 모듈과 비슷한 방법으로, 각 연료 집합체에 대한 두 가지 시뮬레이션 경우가 전개되고, 공통의 반응 표면(219)에 추가된다. 단계(529)에서, 원자로에 대한 사전식별된 제약 조건 내에서 배열 간격의 변화가 허용되는지의 여부가 먼저 결정된다. 만약 변화가 허용되지 않는다면, 프로그램 제어는 다른 모듈로 전달된다. 만약 허용된다면, 단계(530)에서 나타낸 바와 같이, 특정 배열 간격이 분석을 위해 선택된다. 그 다음으로 단계(531)에서, 선택된 배열 간격에 대한 초기 중심점 경우의 배열 간격 값이 사용자 지정 양만큼 증가한다. 그 후, 단계(532)에서 나타낸 바와 같이, 선택된 배열 간격 값을 변화시킨 새로운 노심 시뮬레이션 입력 파일이 생성되고, 시뮬레이션 프로세싱을 위해 이용가능한 프로세서/컴퓨터(10)로 제공된다.

단계(533)에서, 동일한 연료 집합체에 대한 배열 간격 값이 단계(531)에서와 비슷한 원래의 값보다 작은 값으로 변화된다. 그 다음으로, 단계(534)에서, 위치 값을 변화시킨 새로운 노심 시뮬레이션 입력 파일이 다시 생성되고, 두 번째 시뮬레이션 프로세싱을 위해 이용가능한 프로세서/컴퓨터로 제공된다. 단계(535)에서 나타낸 바와 같이, 만일 다른 배열 간격 변수에 대한 값의 변화가 시뮬레이션되지 않았다면, 새로운 집합체가 선택되고, 모든 다른 관련된 독립 배열 간격 변수가 고려될 때까지 단계(531-534)가 다시 반복된다. 다른 제어 변수 모듈처럼, 이 모듈의 각 단계는 이전 단계의 노심 시뮬레이션이 완료될 때까지 기다릴 필요없이 진행될 수 있다. 마지막으로, 일단 배열 간격 변수에 대한 모든 독립 제어 변수 경우가 고려되면, 다른 모듈의 제어 하에서 프로세싱이 계속될 수 있다.

도 5a 내지 5d에 도시한 모듈은, 예를 들어, 장전 파라미터, 봉 파라미터, 유량 파라미터, 배열 교환 파라미터 등과 같이 본질적으로 "연속적인" 값을 가질 수 있는 독립 제어 변수를 고찰하기 위한 본 발명의 최적화 방법의 성능을 나타내고 있지만, 본 발명의 방법은 연료 집합체 특성과 같은 "이산적인" 값의 제어 변수의 변화를 고려하는 데에도 역시 이용될 수 있다. 이산적인 값 유형의 제어 변수를 고려하기 위한 예시적인 제어 변수(CV) 모듈이 도 5e에서 예시된 바와 같은 연료 집합체 특성과 연관되어 제시된다.

이제 도 5e를 참조하면, 연료 집합체 특성의 변화에 따른 원자로 시뮬레이션 반응 데이터를 전개하기 위한 예시적 프로그램 제어 단계가 설명되어 있다. 연료 집합체 특성은, 이 예에 있어서, 축 방향 농축도 차이(예를 들어, 축 가돌리늄 함량 변화(axial Gadolinium variations))는 임의의 연료 집합체를 나타낼 수 있다. 이전에 논의된 모듈과 같이, 각 독립 제어 변수들에 대하여 노심 시뮬레이터 경우가 생성되고 실행된다. 각 독립 제어 변수의 완료 시에, 종속 변수 출력 정보가 상대적 중심점에 대하여 정규화된다. 그러나, 반응은 다항식에 맵핑되는 대신에 선형 함수에 맵핑된다. 일단 모든 제어 변수 모듈(323) 및 대응하는 시뮬레이션 경우의 실행이 완료되고 반응 표면(219)이 완료되면, 반응 표면에 저장된 시뮬레이션 경우 데이터는 다항식에 맵핑된다.

도 6은 각 독립 변수 경우에 대한 세 데이터 값(상한, 하한, 중심점 값)에 알맞는 다항식에 각 시뮬레이션 경우를 맵핑하기 위한 다항식 계수를 전개하는 예시적인 기능적 프로그램 제어 변수 제어 단계를 도시한다. 기능적 단계(601)에서, 모든 시뮬레이션 경우는 완료되고, 추후의 프로세싱은 반응 표면이 갱신될 때까지 지연된다. 그 다음으로, 단계(602, 603)에서, 반응 표면이 액세스되고, 제어 변수 모듈(302)에 의해 형성된 시뮬레이션 데이터는 중심점 경우의 데이터에 대해 정규화된다. 그 다음으로, 기능적 단계(604)에서, 각 독립 제어 변수에 대한 세 개의 정규화된 시뮬레이션 경우의 값에 맞는 고유의 2차 다항식을 정의하기 위한 계수가 결정된다. 그러나, 어떤 제어 변수(예를 들어, 연료 집합체 축방향 특성)의 평가는 종종 그 제어 변수에 대해 허용된 폭보다 더 큰 결과를 발생시킬 수 있기 때문에, 이들 유형의 변수에 대한 노심 시뮬레이션 결과는 이산적 일차 평가의 예로서 반응 표면에 저장되고, 다항식에 맵핑되지는 않는다. 마지막으로, 단계(605)에서, 각 다항식에 대한 계수가 저장되고, 다항식 최적화 및 평가 모듈에서 또 다른 프로세싱이 계속된다.

도 7은 다항식 최적화 및 평가 모듈(304)에 대한 예시적인 기능적 프로그램 제어 단계를 도시한다. 이러한 모듈은 어떤 제어 변수 및 값이 원자로의 성능에 가장 중요한 개선을 제공하는지를 결정하기 위해, 각 제어 변수와 관련된 각각의 2차 다항식에 의해 예측된 원자로 성능 파라미터 값을 검사한다. 단계(700, 701)에서, 각 제어 변수 시뮬레이션 경우로부터 전개된 다항식은 반응 표면으로부터 평가되고, 서브그룹으로 분류되며, 제어 변수에 대한 이용가능한 값의 폭에 걸쳐서 성능 파라미터(예를 들면, CPR, MFLPD, MAPLHGR, SDM 등)의 양적인 값을 예측하는 데에 이용된다. 다시 말해서, 제어 변수가 선택되고, 제어 변수의 영향을 받은 각각의 성능 파라미터에 연관된 다항식은 성능 파라미터 값의 세트를 예측하기 위해 이용되는데, 이러한 성능 파라미터 값은 제어 변수의 폭(즉, 사전결정된 허용가능한 값의 범위)에 걸쳐서 선택된 제어 변수들의 값에 있어서의 사전결정된 수의 이산적 변화의 각각에 대한 원자로 성능을 나타낸다. 이러한 프로세스는 모든 독립 제어 변수에 대해 반복된다.

당 분야에서 일반적으로 "중첩"이라고 알려진 원리에 근거하여, 상이한 제어 변수에 대해 행해진 복수의 변화가 결합된 순 효과(net effect)는 개별적으로 행해진 개개의 제어 변수 변화의 효과를 합산함으로써 결정될 수 있다. 따라서, 초기화 및

입력 단계에서(즉, 예를 들면, 도 4의 초기화 모듈의 단계(401, 402)에 관해 논의했던 바와 같이, 주기 특유의 입력 및 설계에 기초한 고려 사항이 식별될 때), 본 시스템의 사용자는 함께 결합되어 평가될 하나 이상의 독립 변수에 대한 양적인 동작 값의 변화를 허용하는 입력 옵션으로서 최적화 "분해능(resolution)" 레벨을 선택할 수 있다. 그 결과, 이 옵션이 이전에 선택되었다면, 단계(700)에서는, 선택된 복수의 독립 제어 변수의 모든 조합에 대한 개별적인 다항식 예측 효과가 약식으로 조합되어, 상이한 제어 변수에 대해 동시에 행해진 복수의 변화가 수많은 노심 성능 파라미터 각각에 미치는 순 효과를 양적으로 결정한다. 선택된 분해능 레벨이 높을수록, 더 많은 독립 제어 변수가 조합되고 평가되어, 원자로 성능을 개선하게 될 조합을 검출할 확률이 높아진다. 예를 들어, 선택된 최적화 분해능 레벨 "3"의 경우, 세 개의 상이한 독립 제어 변수 및 고려되는 모든 제어 변수 중 세 개의 제어 변수의 모든 조합에 대한 양적인 값의 변화가 평가될 것이다. 특정 분해능에서 복수의 제어 변수 중 모든 이산적 변화는 각 제어 변수에 연관된 다항식 예측기를 이용하여 검사된다.

더 높은 분해능 레벨이 낮은 분해능 레벨보다 다소 긴 프로세싱 시간을 요구할 수 있지만, 각각의 경우에 대해 실제로 노심의 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하는 것이 아니라 다항식 예측기가 적절히 이용되어 결합되었기 때문에, 총 프로세싱 시간은 종래의 방법보다 상당히 짧아진다. 이러한 방식으로, 본 발명에 따른 방법은, 본 실시예에서 예시된 바와 같이, 본질적으로 포괄적이고 전체적인(global) 최적화 연료 주기 설계를 결정하는 것을 대체로 보증한다. 매우 높은 분해능 레벨은 긴 프로세싱 시간을 필요로 하기 때문에 실용적이지 않을 수 있지만, 특정 분해능 레벨의 선택을 가능하게 하는 본 발명의 성능에 의하면, 시스템 사용자는 달성하고자 하는 진정 절대적인 최적화에 대한 "근접성" 수준으로 선택적으로 정량화할 수 있다.

그 다음, 단계(702)에서, 개개의 제어 변수(즉, "독립" 변수) 또는 제어 변수의 조합에 대해 행해진 각각의 양적인 값의 변화에 대해, "객체 함수" 테스트가 이용되어 그 변화의 상대적인 "가치" 및 "강도"가 성능 파라미터(즉, "종속" 변수) 개선 효과의 측면에서 정량화된다. 객체 함수는, 에너지 추가, 열적 마진 증가 등과 같은 유의한 결과와 연관된 임의의 성능 "신뢰도(credits)"의 통합과, 규정된 설계 상의 한계치에 대한 성능 "위반"의 통합을 통해 일차적으로 결정된 각 성능 파라미터에 대한 특정 제한 값을 설정한다. 예를 들면, SDM, Hot Excess, MFLPD, MAPLHGR 등과 같은 성능 파라미터 각각에 대한 제한 값을 설계하기 위해 사전결정된 승수(multipliers)(즉, 수학적 인수)가 적용되어, 각 파라미터의 정규화 및 상대적인 순위지정(ranking)을 제공한다. 기본적으로, 단계(702)에서, 각각의 예측된 성능 파라미터 값은 종래 기술 및 당 분야의 관례에 따라 만들어진 객체 함수를 이용해 검사되어, 노심 성능을 최적화하기 위한 최선의 제어 변수 다항식 예측기 조합 세트를 결정한다.

단계(703)에서는, 최선의 제어 변수(들) 값이 식별된다. 각각의 다항식 예측기는 특정 제어 변수에 대응하기 때문에, 단계(702)의 객체 함수에 의해 평가된 것으로서, 다항식 예측기가 비교되고, 최선의 제어 변수(들) 값이 결정될 때까지 단계(700-702)가 계속해서 반복된다. 그 다음, 단계(704)에서, 제어 변수 값은 (반복이 있었다면) 이전의 반복으로부터 얻은 값과 비교되어, 어떠한 개선점이 있었는지가 판별된다. 어떠한 개선점도 발견되지 않았다면, 프로세싱은 도 8에 도시된 단계에서 계속된다. 어떠한 개선점이 발견되면, 노심 시뮬레이터 입력 경우가 하나 이상의 제어 변수에 대응하는 선택된 최선의 다항식 예측기(들)로부터의 개선된 값을 이용하여 생성되고, 단계(705)에 나타낸 바와 같이, 노심 시뮬레이션이 실행된다.

다항식의 이용으로, 어떤 변화가 원자로 성능에 개선을 줄 수 있는 지에 대한 신속한 예측이 가능해지지만, 단계(705)에서 노심 시뮬레이션은 시뮬레이션 프로세스와 반응 표면 내의 다항식 계수 데이터 간의 교정을 가능하게 한다. 본질적으로, 이것은 개선된 제어 변수에서의 노심의 동작을 입증하는 "실제"("예측"의 반대) 노심 시뮬레이션 데이터를 제공함으로써 예측된 개선점을 검증하게 해 준다. 단계(706)에서, 단계(705)의 노심 시뮬레이션 결과는 중심점 경우의 노심 시뮬레이션 결과(또는 이전의 최적화 결과)와 비교되어, 노심 성능에 어떠한 개선점이 있는지가 판별되게 한다. 단계(705)의 노심 시뮬레이션으로부터의 결과가 중심점 경우보다 개선된 것을 나타내면, 단계(708)에 나타낸 바와 같이, 개선점은 수용되고 프로세스는 다시 반복된다. 단계(705)에서 노심 시뮬레이션 결과가 개선되지 않은 것으로 판별되면, 대응하는 제어 변수(들)는 "신뢰할 수 없는" 것으로 간주되어, 단계(707)에서와 같이 표시된다. 단계(709)에서의 검사 결과, 일단 신뢰할 수 없는 제어 변수의 수가 사전결정된 수를 초과하면, 다항식에 의한 최적화 및 평가가 중지되고, 프로세싱은 도 8에 도시된 단계에서 계속된다.

도 8은 저장/수정 반응 표면 모듈(305)용의 예시적인 기능적 프로그램 제어 단계를 도시한다. 먼저, 단계(801)에서, 현재의 반응 표면의 "폭" (즉, 조사된 제어 변수 값들의 범위에서의 반응 표면의 폭)이 검사된다. 제어 변수에 대한 시뮬레이션 경우를 생성하는 데에 있어서 CV 모듈에 의해 이용된 값의 사전결정된 범위를 감소시킬 수 있다면, 그 폭은 축소되고, 원래의 중심점 경우의 데이터를 이용하여 새로운 반응 표면이 생성되기 시작된다. 이것은 기능적 단계(802)에서 반응 표면 폭을 감소하는 것으로 지시되어 있다. 이 시점에서, 본 발명의 최적화 프로세스는, 도 4의 진입점 "B"에 나타낸 바와 같이, 하나 이상의 다양한 제어 변수 모듈을 이용하여 이 "새로운" 반응 표면을 다시 생성하기 시작한다. CV 모듈에 의해 이용된 제어 변수 값의 "폭"을 축소시키는 것이 가능하지 않다면, 단계(803, 804)에서 나타낸 바와 같이, 현재의 반응 표면 데이터가 기록(저장)되고, 최적화된 제어 변수 값이 출력된다.

본 발명은 가장 실용적이고 바람직한 실시예일 것으로 현재 고려되는 실시예와 관련하여 설명되었으나, 개시된 실시예로만 제한되는 아니며, 오히려 첨부한 특허 청구 범위의 사상 및 범주 내에 포함되는 다양한 변경 및 등가적인 구성도 포함하는 것으로 의도된다.

발명의 효과

본 발명에 따르면, 노심의 기능 및 제어와 연관된 하나 이상의 동작 제어 변수에 대한 최선의 가능한 양적인 값을 결정하여, 하나 이상의 노심 연료 보급 주기에 걸쳐 특정 노심을 동작시키기 위한 최적의 연료 주기 설계 및 제어 전략을 결정하여 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

도 1a는 핵 원자로에 대한 다수의 동작 제어 변수들의 최적화를 위한 시스템을 도시하는 블록도,

도 1b는 본 발명이 구현될 수 있는 독립 프로세서들의 예시적인 네트워크 배열의 개략도,

도 2는 본 발명의 노심의 다수의 제어 변수 최적화 방법을 구현하기 위한 소프트웨어 시스템의 예시적인 실시예에서 프로세서들 사이의 기본적 데이터 흐름을 도시하는 데이터 흐름도,

도 3은 본 발명의 노심의 다수의 제어 변수 최적화 방법을 구현하기 위한 소프트웨어 시스템의 예시적인 실시예를 도시하는 블록도,

도 4는 본 발명의 예시적인 소프트웨어 실시예에서 반응 표면 초기화 모듈에 의해 수행되는 기능적 프로그램 제어 단계들을 도시하는 흐름도,

도 5a는 본 발명의 예시적인 소프트웨어 실시예에서 연료 집합체 장전 모듈에 의해 수행되는 기능적 프로그램 제어 단계들을 도시하는 흐름도,

도 5b는 본 발명의 예시적인 소프트웨어 실시예에서 제어봉 축방향 위치 모듈에 의해 수행되는 기능적 프로그램 제어 단계들을 도시하는 흐름도,

도 5c는 본 발명의 예시적인 소프트웨어 실시예에서 노심 유량 모듈에 의해 수행되는 기능적 프로그램 제어 단계들을 도시하는 흐름도,

도 5d는 본 발명의 예시적인 소프트웨어 실시예에서 배열 간격 모듈에 의해 수행되는 기능적 프로그램 제어 단계들을 도시하는 흐름도,

도 5e는 본 발명의 예시적인 소프트웨어 실시예에서 연료 집합체 특성 모듈에 의해 수행되는 기능적 프로그램 제어 단계들을 도시하는 흐름도,

도 6은 본 발명의 예시적인 소프트웨어 실시예에서 다항식 계수 전개 모듈에 의해 수행되는 기능적 프로그램 제어 단계들을 도시하는 흐름도,

도 7은 본 발명의 예시적인 소프트웨어 실시예에서 다항식 이용 모듈에 의해 수행되는 기능적 프로그램 제어 단계들을 도시하는 흐름도,

도 8은 본 발명의 예시적인 소프트웨어 실시예에서 반응 표면을 저장 및 수정하기 위한 기능적 프로그램 제어 단계들을 도시하는 흐름도.

도면의 주요 부분에 대한 부호의 설명

1 : 주기 특정 입력 데이터

2 : 최적화 시스템

3 : 노심

10 : 컴퓨터/프로세서

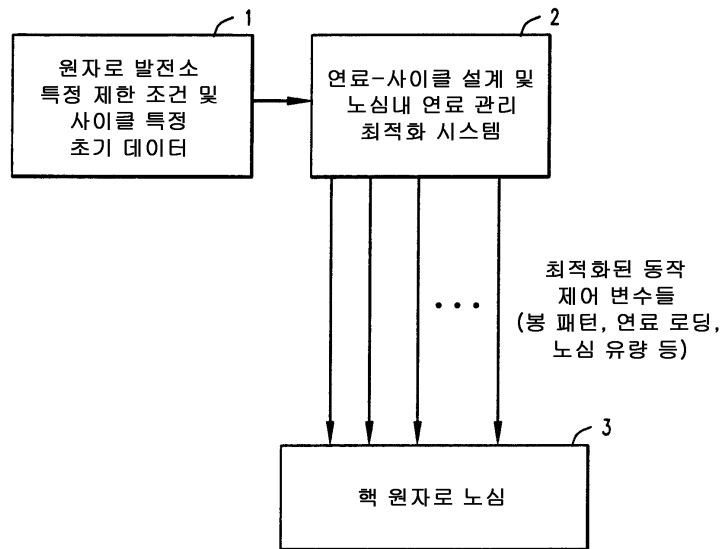
11 : 독립 CPU

12 : 전용 메모리

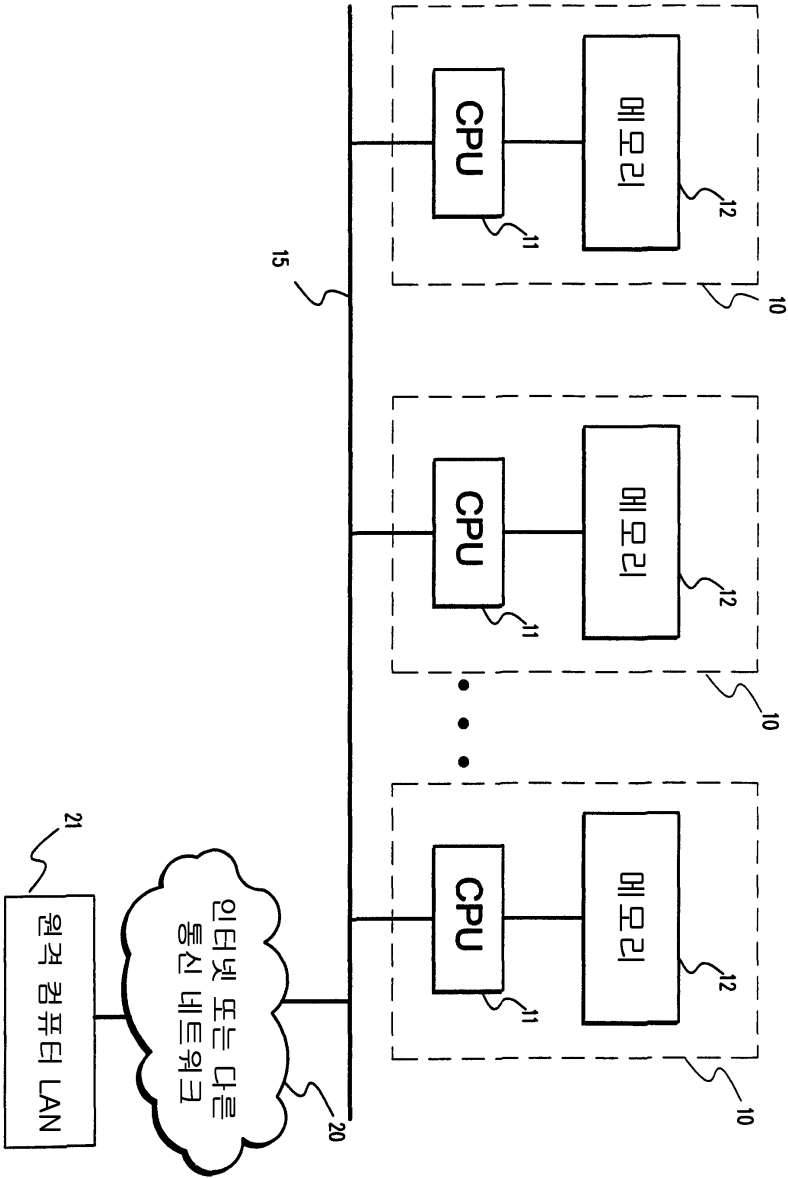
15 : 근거리 통신망(LAN)

도면

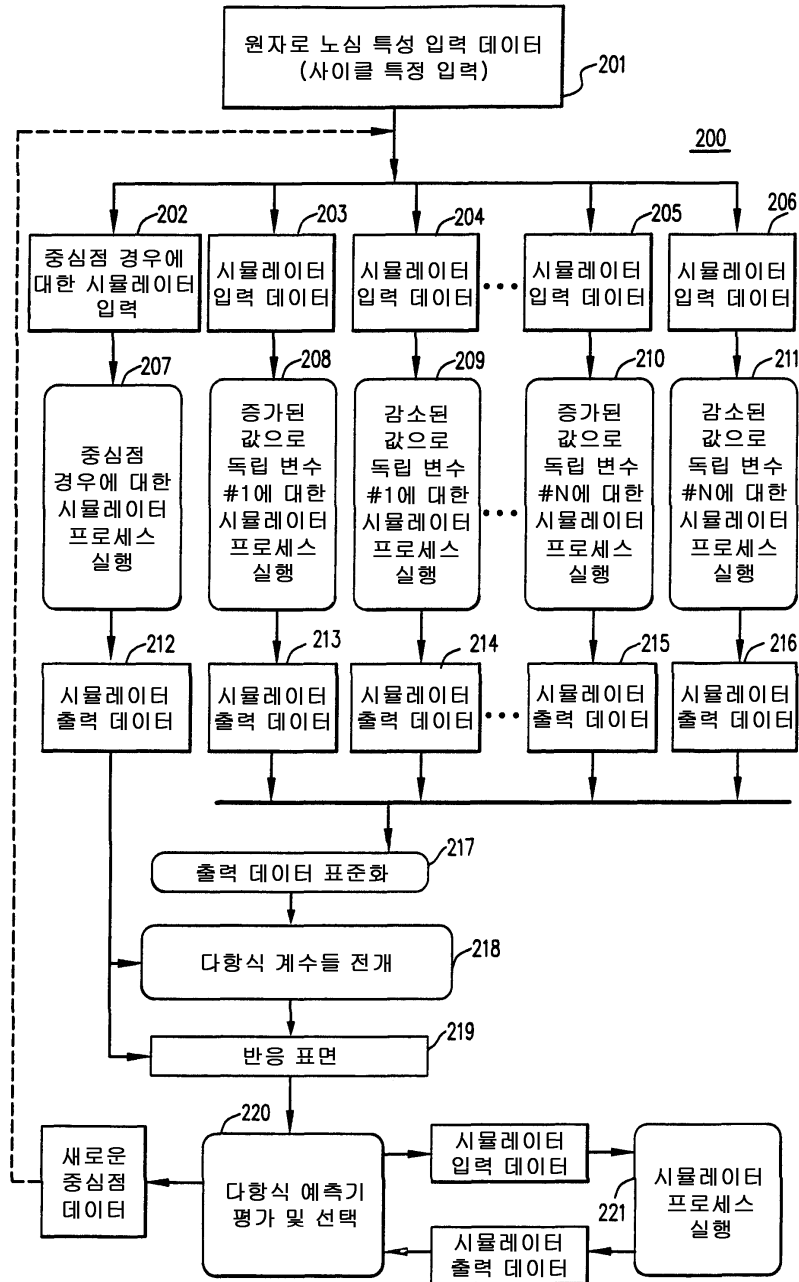
도면1a



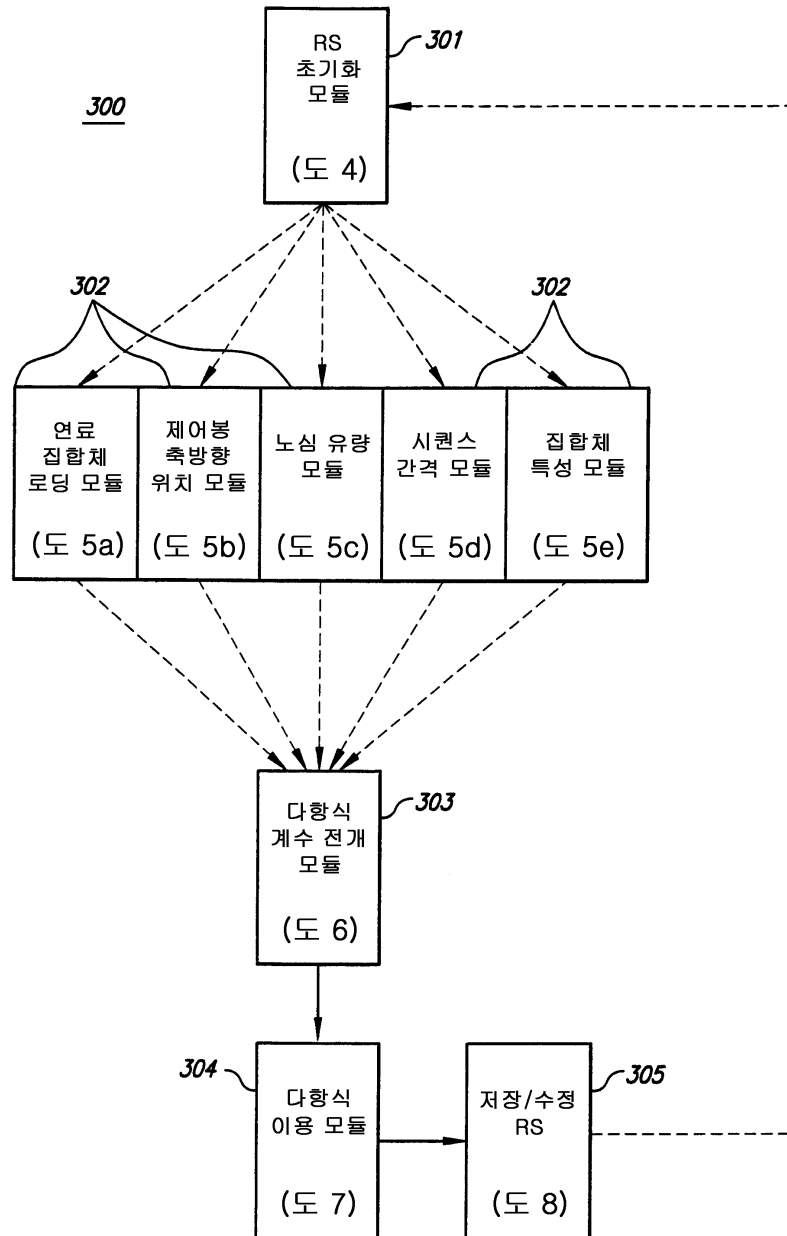
도면1b



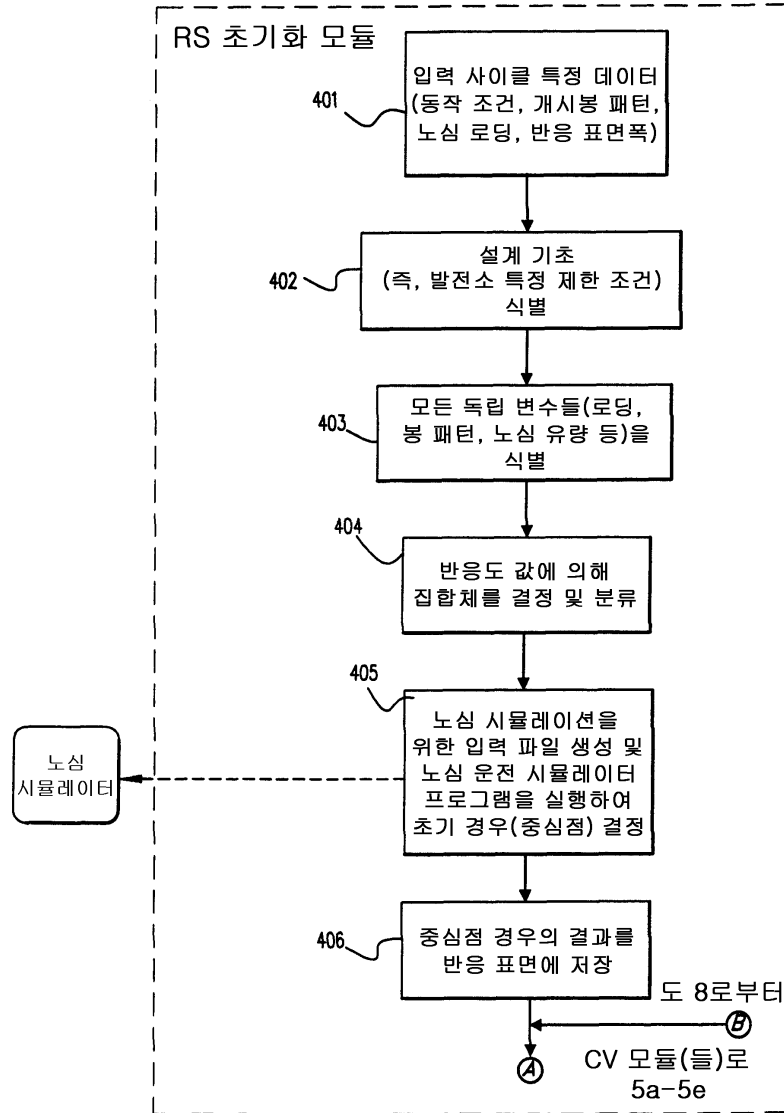
도면2



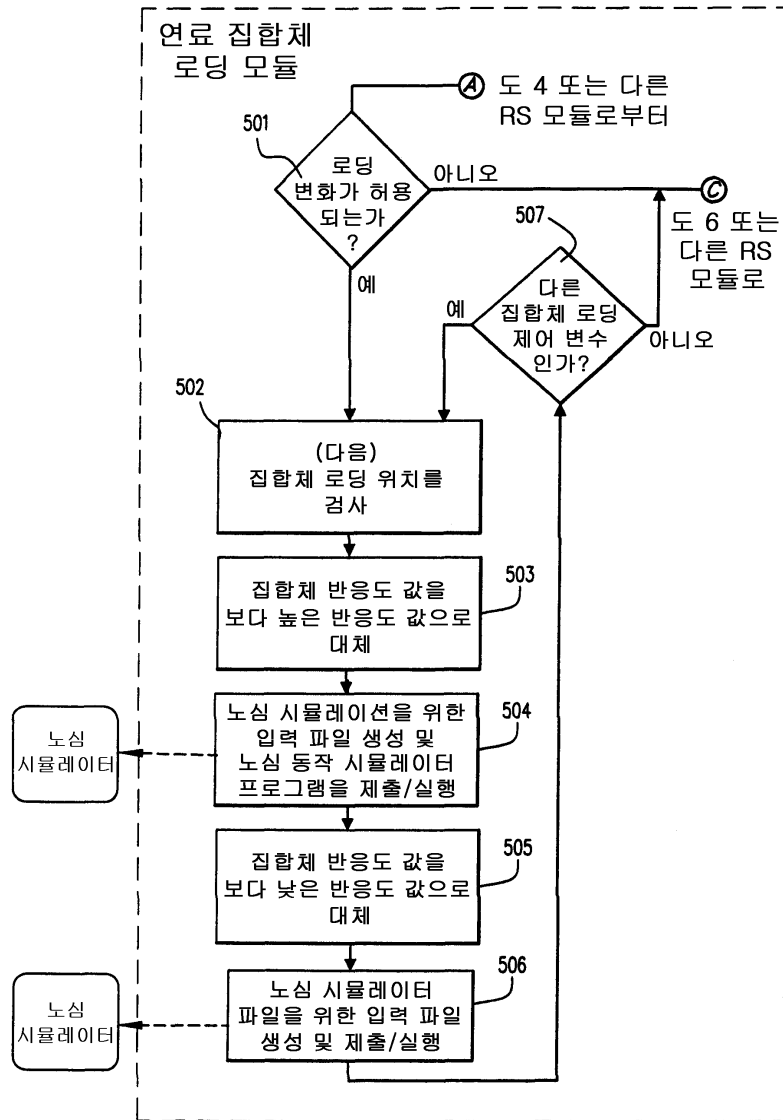
도면3



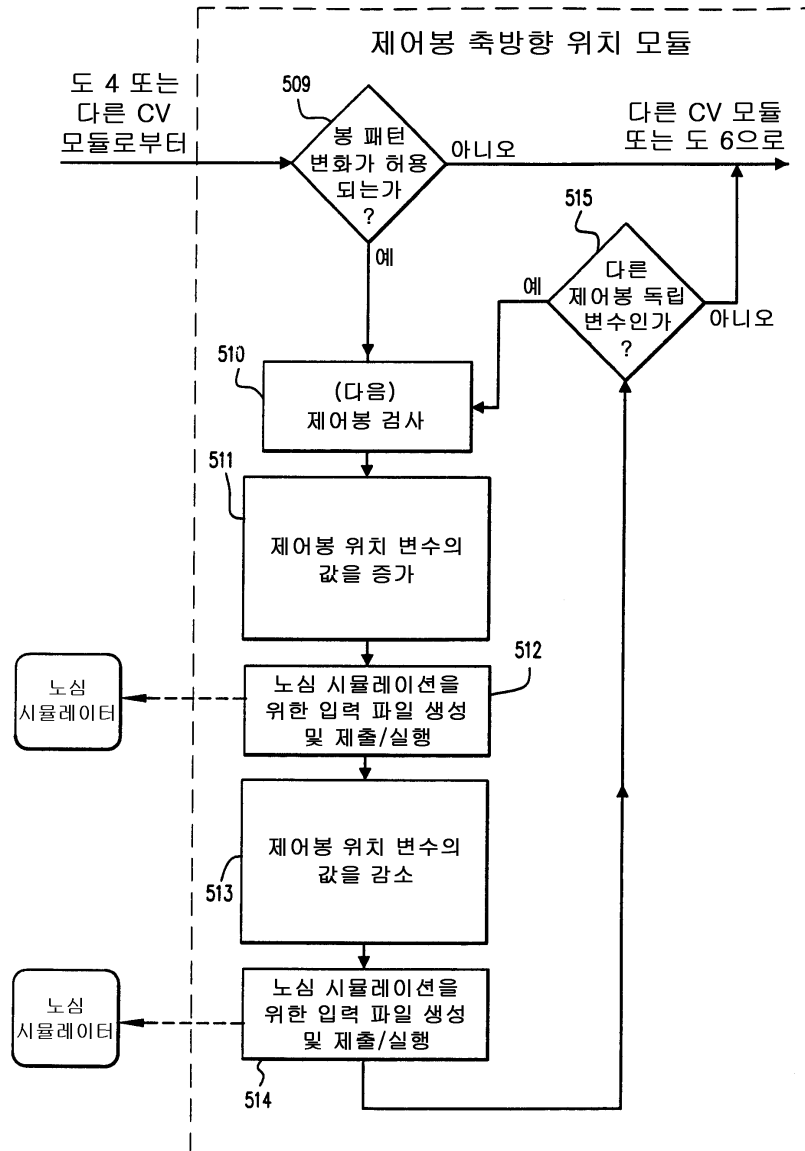
도면4



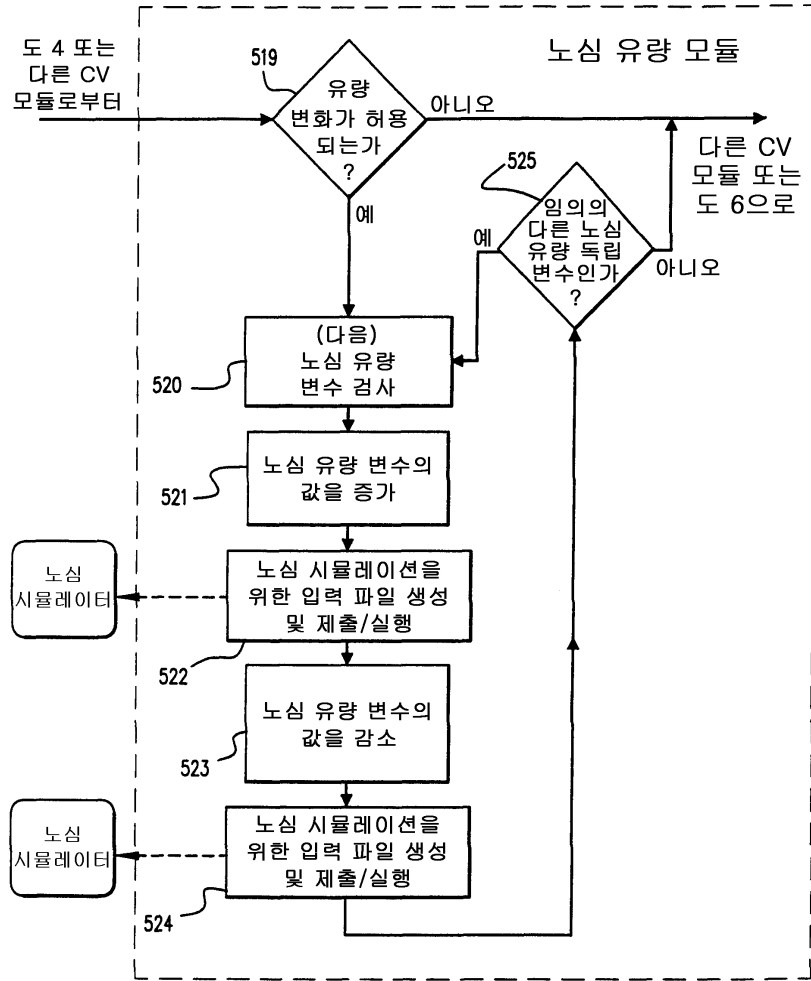
도면5a



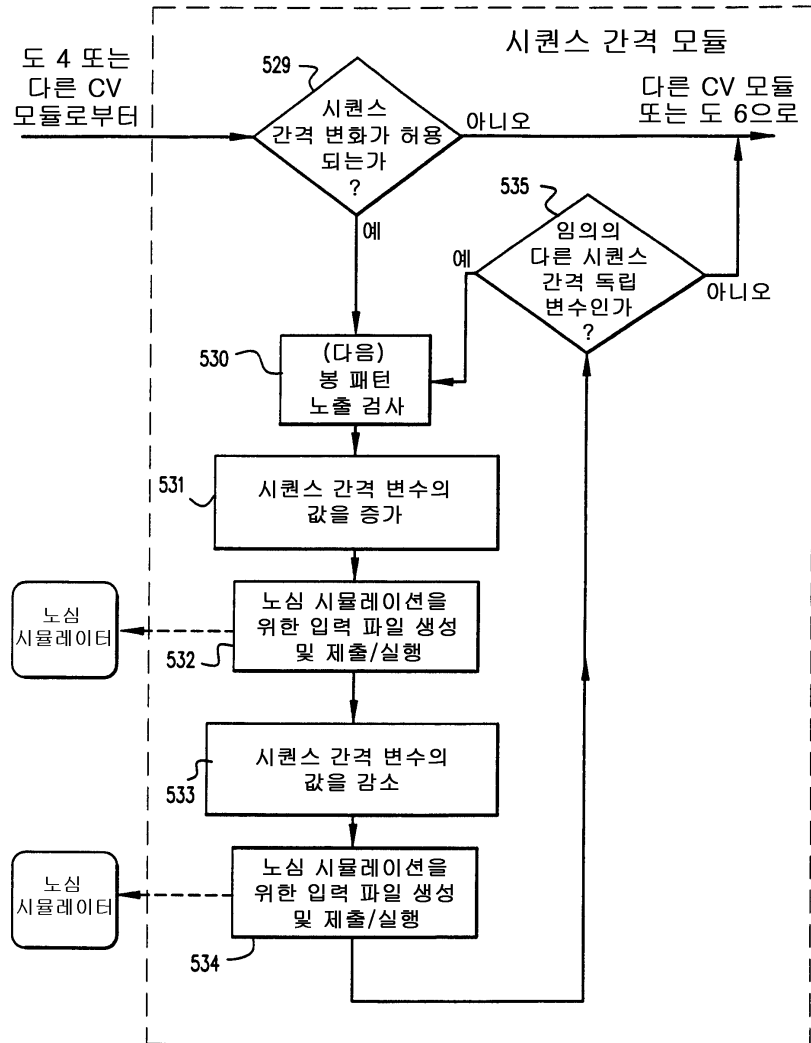
도면5b



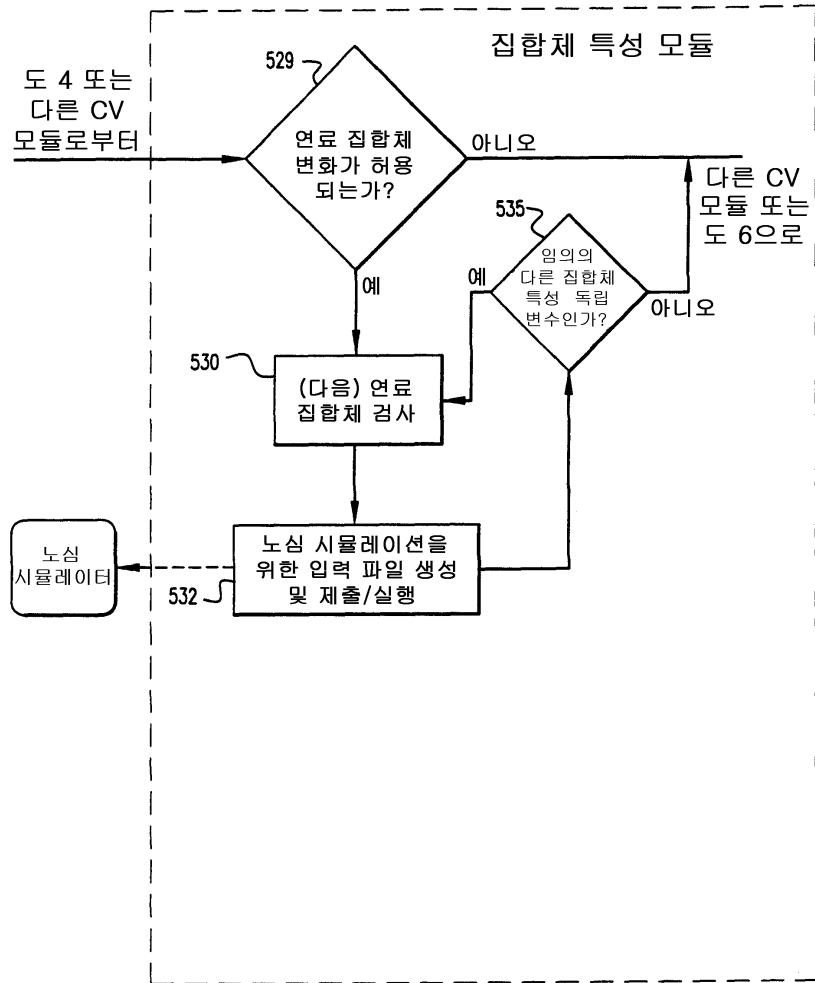
도면5c



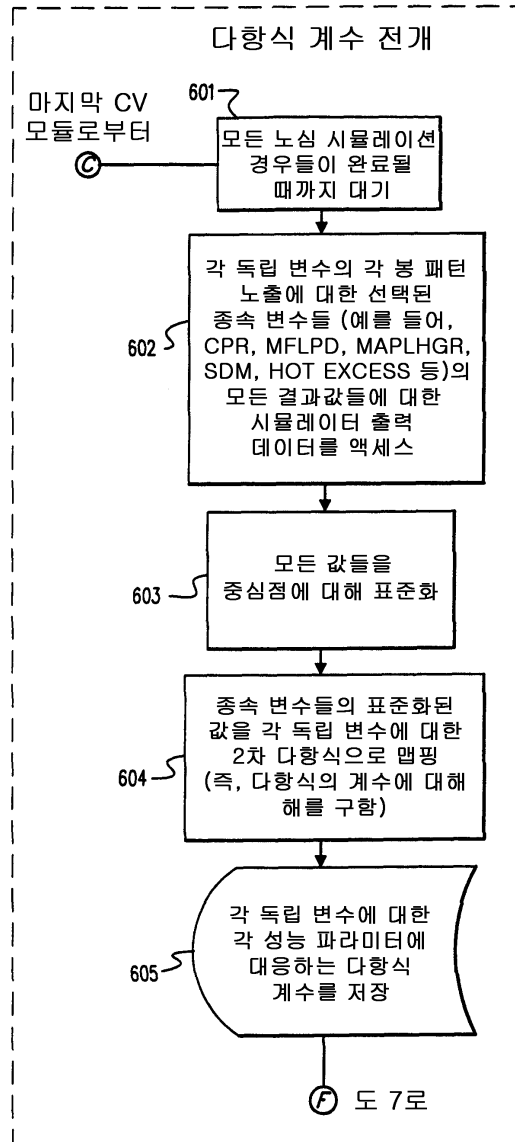
도면5d



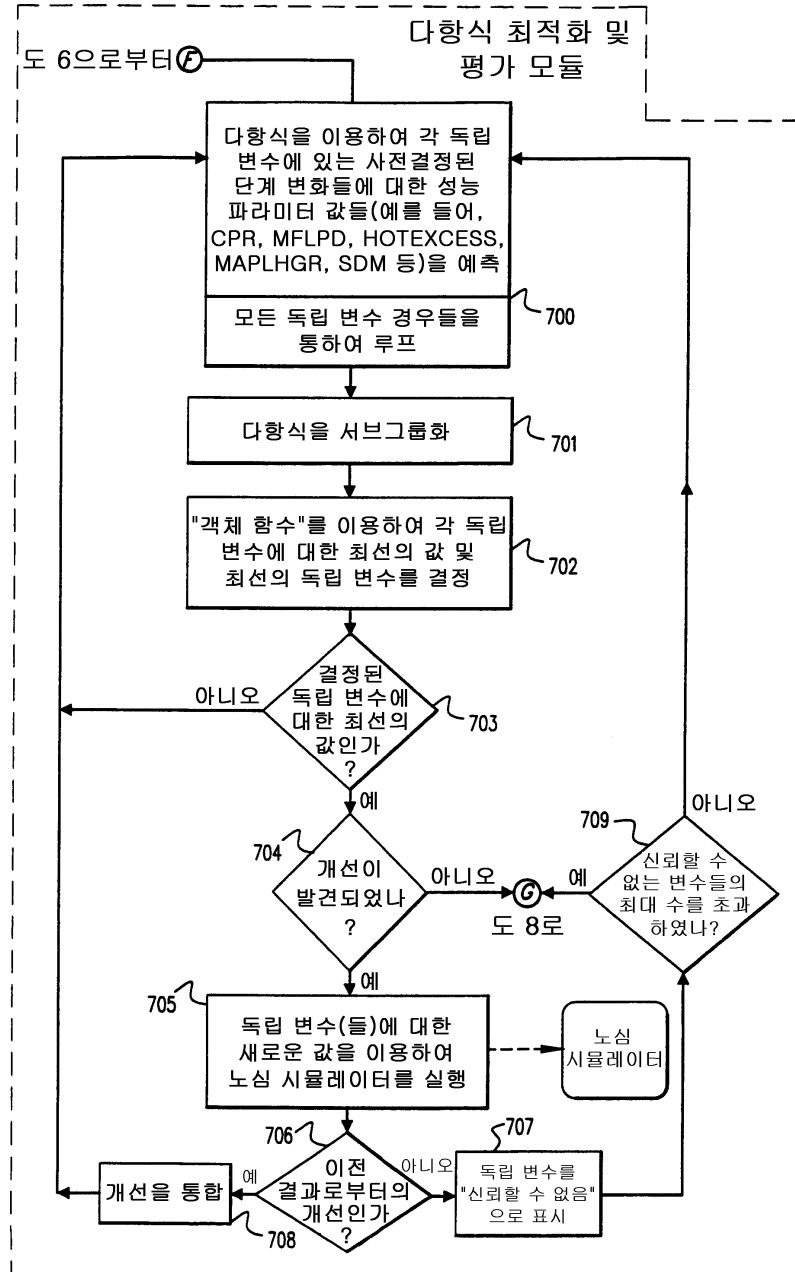
도면5e



도면6



도면7



도면8

