(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0059194
(43) 공개일자 2021년05월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 17/00 (2006.01) *G06F 30/00* (2020.01)
(52) CPC특허분류
G21C 17/00 (2013.01)
G06F 30/20 (2020.01)
(21) 출원번호 10-2019-0146311
(22) 출원일자 2019년11월15일
심사청구일자 2019년11월15일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
이덕중
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
이웅희
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인(유한)아이시스

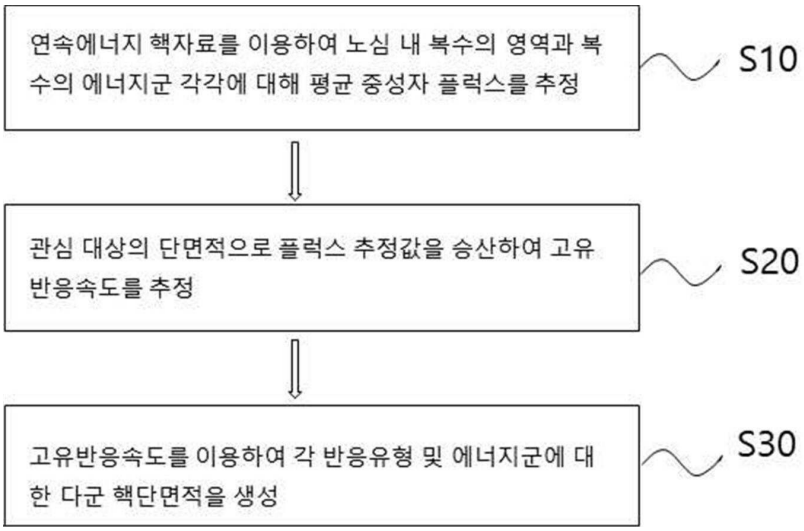
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 **확률론적 방법을 이용한 다군 군정수 생성방법 및 생성장치**

(57) 요 약

본 발명은 연속에너지를 사용하는 몬테카를로 코드를 다군 군정수 계산에 사용하여 다양한 기하학적 구조 모델링에 따르는 복잡성을 처리하는 한편, 다군 근사에 따른 오차를 줄이는 다군 군정수 생성방법 및 장치에 관한 것으로, 연속에너지 핵자료를 이용하여 노심 내 복수의 영역과 복수의 에너지군 각각에 대해 평균 중성자 플럭스를 추정하는 단계;관심 대상의 단면적으로 상기 플럭스 추정값을 승산하여 고유 반응속도를 추정하는 단계; 상기 고유 반응속도를 기초로 각 반응유형 및 에너지군에 대한 다군 핵단면적을 생성하는 단계를 포함하여 구성된다.

대 표 도 - 도4



(72) 발명자

최지원

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

응웬 등 동 카오

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711082281
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	미래형원자로시스템
연구과제명	납냉각 고속로 기술개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2019.01.01 ~ 2019.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

몬테카를로 코드를 이용하여 원자로 노심 내 중성자 수송해석을 위한 다군 군정수를 생성하는 방법으로서,

연속에너지 핵자료를 이용하여 노심 내 복수의 영역과 복수의 에너지군 각각에 대해 평균 중성자 플럭스를 추정하는 단계;

관심 대상의 단면적으로 상기 플럭스 추정값을 승산하여 고유 반응속도를 추정하는 단계;

상기 고유 반응속도를 기초로 각 반응유형 및 에너지군에 대한 다군 핵단면적을 생성하는 단계를 포함하는, 다군 군정수 생성방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 다군 군정수는 중성자속, 다군 핵분열 단면적, 다군 흡수 단면적, 다군 분열 스펙트럼 단면적, 다군 분열 생산 단면적, 다군 수송 단면적, 다군 산란 단면적을 포함하는, 다군 군정수 생성방법.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 노심 내 복수의 영역은 중성자 선원이 존재하는 영역과 중성자 선원이 존재하지 않는 영역에 대해 서로 다른 모델을 사용하여 모델링되는 것을 특징으로 하는, 다군 군정수 생성방법.

청구항 4

제 3 항에 있어서,

상기 중성자 선원이 존재하는 영역은 겉면이 반사체로 둘러싸인 육각형 구조 내에 중성자 선원이 가득찬 2차원 어셈블리 구조로 모델링되고, 상기 중성자 선원이 존재하지 않는 영역은 육각형 구조의 중심에 비핵분열 영역이 위치하고 그 주위를 중성자 선원이 에워싼 2차원 어셈블리 구조로 모델링되는, 다군 군정수 생성방법.

청구항 5

제 1 항 내지 제 4 항 중 어느 한 항에 있어서,

격자 해석코드를 이용하여 상기 다군 핵자료를 기초로 전노심 해석을 수행하는 단계를 더 포함하는, 다군 군정수 생성방법.

청구항 6

연속에너지 핵자료를 포함한 다양한 데이터를 저장하는 저장부;

연속에너지 핵자료를 가지고 몬테카를로 코드를 이용하여 원자로 노심 내 중성자 수송해석을 위한 다군 군정수를 생성하는 프로세서부를 포함하여 다군 군정수 를 생성하는 장치로서,

상기 프로세서부는 상기 연속에너지 핵자료를 이용하여 노심 내 복수의 영역과 복수의 에너지군 각각에 대해 평균 중성자 플럭스를 추정하고, 관심 대상의 단면적으로 상기 플럭스 추정값을 승산하여 고유 반응속도를 추정하여 상기 고유 반응속도를 기초로 각 반응유형 및 에너지군에 대한 다군 핵단면적을 생성하는 것을 특징으로 하는, 다군 군정수 생성장치.

청구항 7

제 6 항에 있어서,

상기 다군 군정수는 중성자속, 다군 핵분열 단면적, 다군 흡수 단면적, 다군 분열 스펙트럼 단면적, 다군 분열 생산 단면적, 다군 수송 단면적, 다군 산란 단면적을 포함하는, 다군 군정수 생성장치.

청구항 8

제 6 항에 있어서,

상기 노심 내 복수의 영역은 중성자 선원이 존재하는 영역과 중성자 선원이 존재하지 않는 영역에 대해 서로 다른 모델로 모델링되는 것을 특징으로 하는, 다군 군정수 생성장치..

청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 중성자 선원이 존재하는 영역은 곁면이 반사체로 둘러싸인 육각형 구조 내에 중성자 선원이 가득찬 2차원 어셈블리 구조로 모델링되고, 상기 중성자 선원이 존재하지 않는 영역은 육각형 구조의 중심에 비핵분열 영역이 위치하고 그 주위를 중성자 선원이 에워싸는 2차원 어셈블리 구조로 모델링되는, 다군 군정수 생성장치.

청구항 10

제 6 내지 제 9 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 프로세서부는 격자 해석코드를 이용하여 상기 다군 군정수를 기초로 전노심 해석을 수행하는 것을 특징으로 하는, 다군 군정수 생성장치.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 원자로 노심(reactor core) 기술에 관한 것으로, 보다 구체적으로는 노심 내 중성자 수송해석을 위한 군정수 생성장치 및 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 원자로 노심 해석을 위해서는 일반적으로 확률론적 방법(stochastic method)에 따른 몬테카를로(Monte Carlo) 코드(이하, 'MC 코드') 또는 결정론적 방법(Method of Characteristic)에 따른 코드(이하, 'MOC 코드')가 사용된다. MC 코드는 기하학적 구조 및 중성자 상호작용 시뮬레이션에 정확도가 높은 장점이 있는 반면, 원자로 노심설계 및 해석에 필요한 수준까지 통계적 불확실도를 감소시키기 위해서는 과도하게 많은 중성자 히스토리 모델링을 필요로 하기 때문에 많은 계산비용이 소요되는 단점이 있다.

[0003] 반면, MOC 코드는 계산 요구량이 낮은 반면, 기하학적 구조 및 수송/확산 물리구조의 단순화로 인한 정확도가 낮다. MOC 코드는 에너지 군수가 작은 경우 계산속도가 빠르나, 많은 가정이 들어가고 에너지군 수가 늘어나면 계산효율이 떨어지는 문제가 있다. 또한, 고속원자로와 같이 노심 내 중성자 스펙트럼($1e^{-11 \sim 20.0}$ MeV)이 고속에너지 영역(0.1MeV) 부근에 몰려있는 경우 공명 영역 처리를 위하여 초미세군 에너지(~100,000개)를 계산한 후 다군 핵자료를 생산해야 하므로 MOC를 사용하더라도 계산 효율이 떨어지는 단점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 한국등록특허공보 제10-1439999호

(특허문헌 0002) 한국공개특허공보 제10-2018-0120498호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명은 연속에너지를 사용하는 몬테카를로 코드를 다군 군정수 계산에 사용하여 다양한 기하학적 구조 모델링에 따르는 복잡성을 처리하는 한편, 다군 근사에 따른 오차를 줄이는 다군 군정수 생성방법 및 장치를 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0006] 본 발명의 일실시예에 따르면 연속에너지 핵자료를 이용하여 노심 내 복수의 영역과 복수의 에너지군 각각에 대해 평균 중성자 플럭스를 추정하는 단계; 관심 대상의 단면적으로 상기 플럭스 추정값을 승산하여 고유 반응속도를 추정하는 단계; 상기 고유 반응속도를 기초로 각 반응유형 및 에너지군에 대한 다군 핵단면적을 생성하는 단계를 포함하여 몬테카를로 코드를 이용하여 원자로 노심 내 중성자 수송해석을 위한 다군 군정수를 생성하는 방법이 제안된다.

[0007] 다른 일시예에 따르면, 다군 군정수는 중성자속, 다군 핵분열 단면적, 다군 흡수 단면적, 다군 분열 스펙트럼 단면적, 다군 분열 생산 단면적, 다군 수송 단면적, 다군 산란 단면적을 포함한다.

[0008] 상기 노심 내 복수의 영역은 중성자 선원이 존재하는 영역과 중성자 선원이 존재하지 않는 영역에 대해 서로 다른 모델로 모델링된다. 여기서, 중성자 선원이 존재하는 영역은 겉면이 반사체로 둘러싸인 육각형 구조 내에 중성자 선원이 가득찬 2차원 어셈블리 구조로 모델링되고, 상기 중성자 선원이 존재하지 않는 영역은 육각형 구조의 중심에 비핵분열 영역이 위치하고 그 주위를 중성자 선원이 에워싼 2차원 어셈블리 구조로 모델링될 수 있다.

[0009] 또한, 본 발명은 격자 해석코드를 이용하여 상기 다군 핵자료를 기초로 전노심 해석을 수행하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0010] 다른 일실시예에 따르면, 연속에너지 핵자료를 포함한 다양한 데이터를 저장하는 저장부와 연속에너지 핵자료를 가지고 몬테카를로 코드를 이용하여 원자로 노심 내 중성자 수송해석을 위한 다군 군정수를 생성하는 프로세서부를 포함하여 다군 군정수 를 생성하는 장치로서, 상 프로세서부는 상기 연속에너지 핵자료를 이용하여 노심 내 복수의 영역과 복수의 에너지군 각각에 대해 평균 중성자 플럭스를 추정하고, 관심 대상의 단면적으로 상기 플럭스 추정값을 승산하여 고유 반응속도를 추정하여 상기 고유 반응속도를 기초로 각 반응유형 및 에너지군에 대한 다군 핵단면적을 생성하는 것을 특징으로 하는, 다군 군정수 생성장치가 개시된다.

[0011] 여기서, 다군 군정수는 중성자속, 다군 핵분열 단면적, 다군 흡수 단면적, 다군 분열 스펙트럼 단면적, 다군 분열 생산 단면적, 다군 수송 단면적, 다군 산란 단면적을 포함할 수 있다.

[0012] 그리고, 노심 내 복수의 영역은 중성자 선원이 존재하는 영역과 중성자 선원이 존재하지 않는 영역에 대해 서로 다른 모델로 모델링될 수 있다. 중성자 선원이 존재하는 영역은 겉면이 반사체로 둘러싸인 육각형 구조 내에 중성자 선원이 가득찬 2차원 어셈블리 구조로 모델링되고, 상기 중성자 선원이 존재하지 않는 영역은 육각형 구조의 중심에 비핵분열 영역이 위치하고 그 주위를 중성자 선원이 에워싸는 2차원 어셈블리 구조로 모델링될 수 있다.

[0013] 또한, 본 발명에 따르면 다군 군정수 생성장치의 프로세서부는 격자 해석코드를 이용하여 상기 다군 군정수를 기초로 전노심 해석을 수행할 수 있다.

발명의 효과

[0014] 본 발명에 의하면, 연속에너지를 사용하는 몬테카를로 코드를 다군 군정수 계산에 사용하여 많은 에너지 그룹 및 다양한 기하학적 구조 모델링에 따르는 복잡성을 처리함으로써 계산의 정확도를 높임과 동시에 계산시간을 크게 단축시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0015] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 원자로 노심에 장전된 핵연료봉 구조를 개략적으로 도시한 측면도이다.

도 2는 고속원자로의 방사상 코어 레이아웃을 개략적으로 도시한 도이다.

도 3a는 본 발명의 일실시예에 따른 활성 노심 영역에 대한 2차원의 연료 서브 어셈블리 모델을 나타내는 도면이고, 도 3b는 활성 노심 영역을 제외한 각 영역에 대한 2차원 슈퍼셀 모델을 나타내는 도면이다.

도 4는 본 발명의 바람직한 일실시예에 따라 제안된 몬테카를로 코드를 이용하여 원자로 노심 내 중성자 수송해

석을 위한 다군 군정수를 생성하는 과정을 도시한 플로우챠트이다.

도 5는 본 발명의 바람직한 일실시예에 의해 생성된 중성자속 및 다군 핵단적의 값(Value)과 각 에너지 그룹에 대한 표준편차(SD), 그리고 서펜트2 코드와 비교한 결과를 요약한 표이다.

도 6a 및 도 6b는 본 발명과 서펜트 2에 의한 방법을 사용하여 생성한 P0 및 P1 산란 및 오차를 나타낸 표이다.

도 7a는 2D 코어의 MCS/PARCS 대 MCS에 대한 정규화된 어셈블리 방사상 전력 분포를 나타내고, 도 7b는 3D 코어의 MCS/PARCS 대 MCS에 대한 정규화된 어셈블리 방사상 전력 분포를 나타낸다.

도 8은 MCS/PARCS 대 MCS에 대한 정규화된 축방향 전력 분포를 도시한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0016] 이하 설명하는 기술은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시례를 가질 수 있는 바, 특정 실시례들을 도면에 예시하고 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 이하 설명하는 기술을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 이하 설명하는 기술의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0017] 제1, 제2, A, B 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 해당 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되지는 않으며, 단지 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 이하 설명하는 기술의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다. 및/또는 이라는 용어는 복수의 관련된 기재된 항목들의 조합 또는 복수의 관련된 기재된 항목들 중의 어느 항목을 포함한다.

[0018] 본 명세서에서 사용되는 용어에서 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 해석되지 않는 한 복수의 표현을 포함하는 것으로 이해되어야 하고, "포함한다" 등의 용어는 설시된 특징, 개수, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 의미하는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 개수, 단계 동작 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0019] 도면에 대한 상세한 설명을 하기에 앞서, 본 명세서에서의 구성부들에 대한 구분은 각 구성부가 담당하는 주기능 별로 구분한 것에 불과함을 명확히 하고자 한다. 즉, 이하에서 설명할 2개 이상의 구성부가 하나의 구성부로 합쳐지거나 또는 하나의 구성부가 보다 세분화된 기능별로 2개 이상으로 분화되어 구비될 수도 있다. 그리고 이하에서 설명할 구성부 각각은 자신이 담당하는 주기능 이외에도 다른 구성부가 담당하는 기능 중 일부 또는 전부의 기능을 추가적으로 수행할 수도 있으며, 구성부 각각이 담당하는 주기능 중 일부 기능이 다른 구성부에 의해 전담되어 수행될 수도 있음은 물론이다.

[0020] 또한, 방법 또는 동작 방법을 수행함에 있어서, 상기 방법을 이루는 각 과정들은 문맥상 명백하게 특정 순서를 기재하지 않은 이상 명기된 순서와 다르게 일어날 수 있다. 즉, 각 과정들은 명기된 순서와 동일하게 일어날 수도 있고 실질적으로 동시에 수행될 수도 있으며 반대의 순서대로 수행될 수도 있다.

[0022] 노심은 원자로 압력용기 내부의 중앙 하단부에 노심지지 구조물로 기계적으로 고정되어 있으며 핵연료집합체는 노심영역에 고정된 격자형 구조물에 배열되어 있다. 노심을 구성하는 주요한 구성체는 핵연료봉(Fuel Rod)을 기계적 구조물로 엮어 놓은 핵연료집합체(Fuel Assembly), 냉각재(Coolant), 감속재(Moderator), 핵연료집합체 내부의 특정 위치에 삽입되어 핵분열을 일으키는 중성자의 수를 조절하는 제어봉(Control Rod) 및 노심영역 바깥으로 누설되는 중성자를 막아 이들을 노심영역으로 되돌아 갈 수 있도록 반사시키는 반사체(Reflector), 노심에 장전되어 있는 핵연료집합체 중 최외각 핵연료집합체를 둘러싼 구조물로 노심전체를 측면에서 지지하는 노심방벽(Core Barrel)이 있다.

[0023] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 원자로 노심에 장전된 핵연료봉 구조를 개략적으로 도시한 측면도이다. 도 1을 참조하면, 핵연료봉은 상부(100), 중간부(200) 및 하부(300)으로 구성된다. 대부분의 원자로 노심은 몇 가지 형태로 그룹화 되는 같은 기하학적 구조의 핵연료집합체와 핵연료봉으로 구성되어 있기 때문에 반복적인 기하학적 묘사가 가능하다. 따라서, 원자로 노심은 상대적으로 쉽고 짧은 시간에 기하학적 구조를 묘사할 수 있다. 핵연료봉의 상부 구조와 하부 구조는 노심 내 지지를 위한 구조물로 핵분열물질이 존재하지 않는 영역이고, 상부 구조와 하부 구조 사이에는 연료핀이 존재한다. 연료핀은 고속 원자로를 위한 원료(금속 연료, 질화연료, 산화연료 등)로 이루어지며, 하부 반사체, 가스 플레넘, 소듐, 활성 노심으로 구성된다. MC 코드를 사용하여 다군

단면적을 생성하기 위해 3차원 육각형 구조의 핵연료 집합체를 아래와 같이 서로 다른 2차원의 기하구조로 모델링한다.

[0024] 도 2는 고속원자로의 방사상 코어 레이아웃을 개략적으로 도시한 도이고, 도 3a는 본 발명의 일실시예에 따른 활성 노심 영역에 대한 2차원의 연료 서브 어셈블리 모델을 나타내는 도면이고, 도 3b는 활성 노심 영역을 제외한 각 영역에 대한 2차원 슈퍼셀 모델을 나타내는 도면이다.

[0025] 도 2와 같이, 고속원자로의 방사상 코어 레이아웃은 육각형 구조물의 최외곽에 차폐체로 둘러쌓이고, 차폐체 안쪽에는 노심의 중심 방향으로 반사체와 외부 코어, 그리고 내부 코어가 존재한다. 그리고 내부 코어 및 외부 코어 영역에는 제1차 제어체가 분산 배치되고, 내부 코어 영역에는 제2차 제어체가 배치되어 있다. 외부코어와 내부코어는 방사성 물질에 의해 중성자 확산이 활발하게 이루어지는 영역으로, 도 3a를 참조하면 중성자 선원이 존재하는 영역에 대해서는 반사경계조건을 갖는 연료 서브 어셈블리 단일 2D 모델로 모델링된다. 연료 서브 어셈블리 모델은 겉면이 반사체로 둘러싸인 육각형 구조 내에 중성자 선원이 가득찬 2차원 육각형 기하구조로, 내부 코어가 외부 코어에 비해 핵분열이 활발하게 이루어지므로 내부코어에 대한 연료 서브 어셈블리와 외부 코어에 대한 연료 서브 어셈블리를 생성하여 다군에 대한 중성자속 및 핵단면적을 구한다.

[0026] 한편, 핵분열이 이루어지지 않는 비 연료 영역에 대한 다군 핵단면적 계산은 코어와는 다른 모델링 방법을 적용한다. 도 3b를 참조하면, 냉각재, 반사체, 덕트부, 차폐부 등 노심 내에서 핵분열이 이루어지지 않는 비 연료 영역은 육각형 중심에 비 연료 영역이 위치하고, 노심에서 경험하는 플럭스를 근사하도록 그 주위를 중성자 선원이 둘러싼 육각형 구조의 2차원 슈퍼셀 모델을 사용하여 모델링한다. 슈퍼셀 모델에 의하면 핵단면적 계산시 원자로 노심 내부에서 이루어지는 중성자 확산에 따른 영향이 실질적으로 반영되어 보다 정밀하게 노심을 모사할 수 있다.

[0028] 도 4는 본 발명의 바람직한 일실시예에 따라 제안된 몬테카를로 코드를 이용하여 원자로 노심 내 중성자 수송해석을 위한 다군 군정수를 생성하는 과정을 도시한 플로우챠트이다.

[0029] 먼저, 외부로부터 입력된 연속에너지 핵자료를 이용하여, 입력 소정의 기하학적 영역과 다수의 에너지 범위에 대해 아래의 수학식을 사용하여 중성자 플럭스(ϕ_g)를 구할 수 있다.

[0030]
$$\phi_g = \frac{1}{V}\int_V \int_{E_g}^{E_{g-1}} \phi(r,E)\,dE\,dV \qquad \text{(수학식 1)}$$

[0031] 여기서, $\phi(r,E)$는 공간 및 에너지 의존성 플럭스, V는 플럭스 영역을 평균화하기 위한 볼륨, g는 그룹 인덱스이다.

[0032] 그 후 플럭스 추정값을 관심대상 핵단면적으로 승산함으로써 고유 반응속도(R_x)를 구할 수 있다.

[0033]
$$R_x = \frac{1}{V}\int_V \int_{E_g}^{E_{g-1}} \Sigma_x(r,E)\,\phi(r,E)\,dE\,dV \qquad \text{(수학식 2)}$$

[0034] 소정의 반응유형(x)과 에너지 그룹(g)에 대한 다군 핵단면적은 아래 수학식에 제시된 바와 같이 평균 중성자 플럭스를 고유 반응속도로 나눠 얻을 수 있다.

[0035]
$$\Sigma_{x,g} = \frac{\frac{1}{V}\int_V \int_{E_g}^{E_{g-1}} \Sigma_x(r,E)\,\phi(r,E)\,dE\,dV}{\phi_g} \qquad \text{(수학식 3)}$$

[0036] 한편, 산란 핵단면적은 아래의 수학식에 의해 구할 수 있다. 여기서, 중성자 산란과 관련하여 산란 매트릭스는 스칼라 플럭스에 의해서만 가중된다고 가정한다.

$$\Sigma^{l}_{s,g\to g'} = \frac{\frac{1}{V}\int_{V}\int_{E_g}^{E_{g'}} \Sigma^{l}_{s}(r, E\to E')\phi(r,E)dEdV}{\phi_g}$$

[0037] (수학식 4)

[0038] 여기서 l은 산란순서로서, 또한 l차 르장드르 다항식 계수이다.

[0039] 소정의 에너지 그룹에 대한 수송 핵단면적은 외부 산란 근사법을 사용함으로써 아래의 수학식에 의해 구할 수 있다.

$$\Sigma_{tr,g} = \Sigma_{t,g} - \sum_{g'=1}^{G} \Sigma^{1}_{s,g\to g'}$$

[0040] (수학식 5)

[0041] 여기서 G는 그룹들의 총수이다.

[0042] 상술한 바와 같이 몬테카를로 코드를 이용한 그룹 단면적 생성 알고리즘을 이용하면, 기존의 결정론적 방법과 달리 다수의 에너지군에 대해 보다 빠르고 정확한 다군 핵 단면적을 생성할 수 있다.

[0043] 이하에서는 본 발명의 몬테카를로 방법에 따른 핵단면적 생성코드(이하, "MCS"라 한다)의 성능에 대해 살펴본다. 본 발명의 바람직한 일실시예에 따라 4그룹의 에너지 및 2D 어셈블리 구조에 대한 다군 핵단면적 생성코드의 계산 정확도를 검증하기 위해 소듐 고속 원자로인 ARB-1000에 대해 핀란드의 vtt 연구소에서 개발한 MC 원자로 물리 연소 코드인 서펜트 2(SERPENT 2) 코드로 계산한 다군 핵단면적과 비교하였다. 연속에너지 라이브러리로 ENDF/B-VII.0 라이브러리를 사용하고, 연료 및 기타 재료의 온도는 각각 900K와 600K로 설정하여 계산하였다. ABR-1000 원자로의 연료핀 및 어셈블리 데이터의 값은 아래 [표 1]과 같다.

표 1

[0044]

Parameters	ABR-1000
Pin data	
- Pin material	Metallic fuel
- Cladding material	HT-9
- Pellet radius, cm	0.3236
- Inner radius of cladding, cm	0.3236
- Outer radius of cladding, cm	0.3857
- Pin pitch, cm	0.8966
Assembly data	
- Number of pin	271
- Duct outer pitch, cm	15.8123
- Duct thickness, cm	0.3966
- Assembly pitch, cm	16.2471

[0045] 본 발명의 일실시예에 따른 4그룹 에너지 범위는 아래 [표 2]와 같다.

표 2

[0046]

No.	Upper E (MeV)	Lower E (MeV)
1	1.41910E+01	1.11090E-01
2	1.11090E-01	1.72230E-03
3	1.72230E-03	2.67030E-05
4	2.67030E-05	1.00000E-11

[0047] 좌측의 번호는 에너지 그룹 번호를 의미하며, 표 안의 수치는 각 그룹에 속하는 에너지 영역의 상한값과 하한값을 나타낸다. 또한 각 그룹별 에너지 크기는 에너지 그룹 1이 가장 높고, 그룹 2 ->그룹 3 -> 그룹 4 순으로 점점 낮아져서, 에너지 그룹 4가 가장 낮은 영역의 에너지를 나타낸다.

[0049] 도 5는 본 발명의 바람직한 일실시예에 의해 생성된 중성자속 및 다군 핵단적의 값(Value)과 각 에너지 그룹에 대한 표준편차(SD), 그리고 서펜트2 코드와 비교한 결과를 요약한 표이다. 각 에너지군별로 생성된 플럭스(Flux), 전체 중성자 단면적(Total), 흡수 단면적(Abs), 핵분열 단면적(NSF), 분열 스펙트럼 단면적(Chi), 수송단면적(Transport)의 값을 서펜트2 코드와의 비교결과, 그룹 4를 제외한 그룹 1,2,3에 대해서는 차(Diff)가 1% 미만으로 본 발명에 의한 솔루션이 서펜트 2의 솔류션과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 한편, 그룹 4에서 파악되는 낮은 에너지 범위에서의 오차는 중성자 부족으로 인한 불확실성 때문이다.

[0050] 도 6a 및 도 6b는 본 발명과 서펜트 2에 의한 방법을 사용하여 생성한 P0와 P1 산란 및 오차를 나타낸 표이다. P0 산란은 같은 방향으로의 산란을 나타내고, P1 산란은 다른 방향으로의 산란을 나타낸다. 표 내 1행의 인덱스는 출발 에너지 그룹을 나타내는 한편, 1열의 인덱스는 도달 에너지 그룹을 나타낸다. 표 5a에 의하면, 그룹 1에서 그룹 1로 산란하는 P0 산란 매트릭스 오차는 0.01이고, 그룹 1에서 그룹 2로 산란하는 P0산란 매트릭스 오차는 0.05이며, 그룹 2에서 그룹 2로 산란하는 P0 산란매트릭스 오차는 0.02이다. 한편, 표 2에 의하면 그룹 1에서 그룹 2로의 P1 산란매트릭스 오차는 -0.01이고, 그룹 1에서 그룹 2로의 P1 산란매트릭스 오차는 0.01, 그룹 1에서 그룹 3으로의 P1 산란 매트릭스 오차는 14.05이다. 본 발명의 바람직한 일실시예에 의해 구한 모든 그룹별 산란 단면적은 고속원자로 어셈블리의 열에너지 범위에서 중성자가 부족한 결과로 인한 그룹 4를 제외하고는 서펜트 2에 의한 산란 단면적과 잘 일치함을 알 수 있다.

[0052] 한편, 본 발명의 바람직한 일실시예에 의하면, 다군 군정수로 노드(nodal) 방법론에 따른 격자해석코드를 사용하는 원자로 노심 시뮬레이터의 입력 데이터로MCS를 이용하여 계산한 다군 핵단면적을 이용할 수 있다. 이를 검증하기 위해 MCS에 의해 생성된 24그룹의 핵단면적 데이터를 사용하여 PARCS 코드로 정상상태 분석을 수행하고, Keff 및 전력 분포를 비교하였다. 여기서 격자해석코드는 PARCS로 한정되지 않고 노드 방법론을 사용하는 코드라면 대체가능하다. 2D 코어에서 MCS/PARCS와 MCS의 정규화된 어셈블리 방사상 전력 분포를 나타낸 도 7a를 참조하면, 전력의 평균 제곱근(RMS)값이 0.85이고, 최대값 1.93, 최소값 -0.97을 갖는다. 3D 코어에서 MCS/PARCS와 MCS의 정규화된 어셈블리 방사상 전력 분포를 나타낸 도 7b를 참조하면, 전력의 평균 제곱근(RMS)값이 1.14이고, 최대값은 2.64, 최소값은 -1.22를 갖는다. 도 8은 MCS/PARCS 대 MCS에 대한 정규화된 축방향 전력 분포를 도시한 그래프로, 좌변은 정규화된 전력을, 우변은 상대오차를 나타내며, 하변은 활성 노심의 높이를 나타낸다. MCS/PARCS와 MCS의 정규화된 전력 분포는 액티브 코어의 높이 전반에 걸쳐 크게 차이가 없으며, 실제 에러율은 4.73%를 넘지 않음을 확인할 수 있다.

[0053] MCS/PARCS 및 MCS에 의한 사이클 시작(BOC) 및 모든 로드 아웃(ARO) 조건에서 2D 및 3D 코어 계산에 대해 MCS만을 사용한 경우 및 MCS와 PARCS를 사용한 경우의 k_{eff} 값과 그 차이는 아래 표 3에 요약되어 있다.

표 3

[0054]

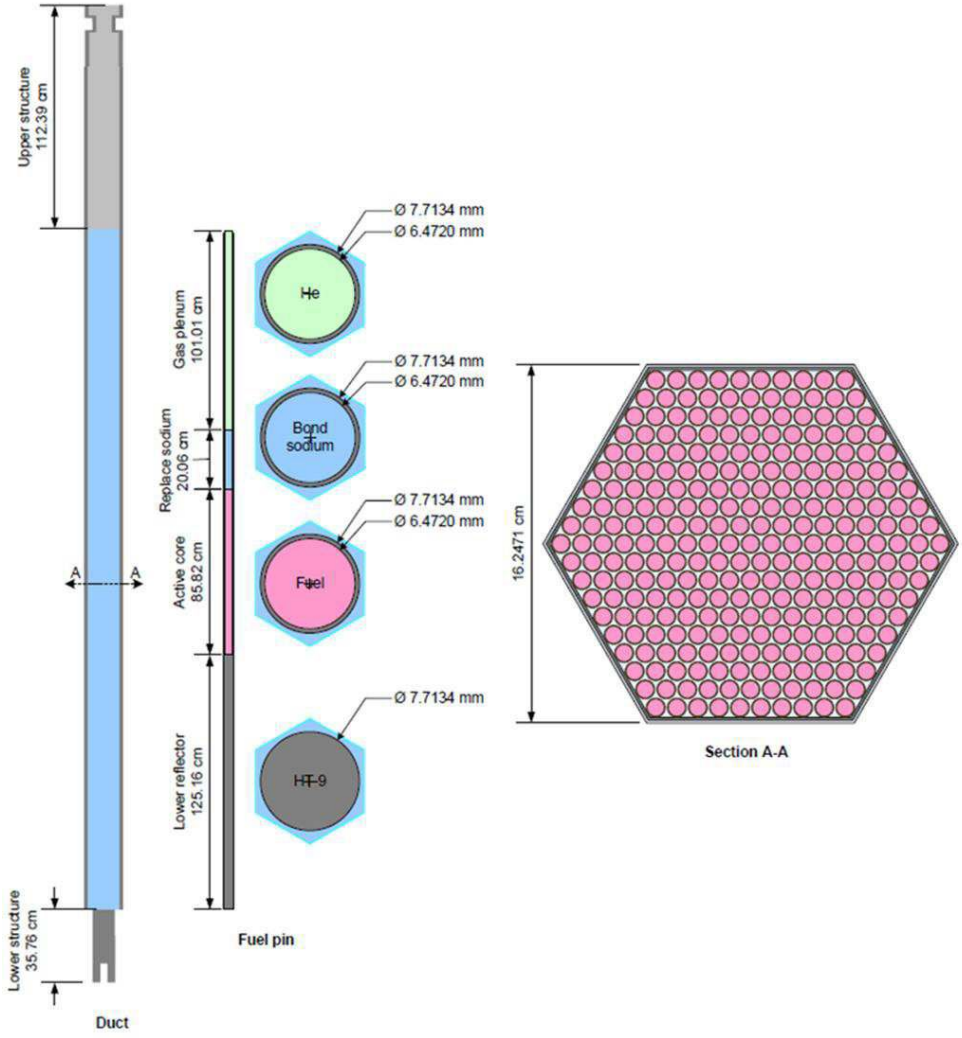
Case	MCS	MCS/ PARCS	Diff. (pcm)
2D core	1.22120±0.00010	1.22129	9
3D core	1.03011±0.00011	1.03104	93

[0055] k_{eff}의 차가 100pcm 미만이고 전력의 평균 제곱근(RMS) 오차가 1.15% 미만이고 최대 오차가 방사상 전력에 대하여 2.5% 미만이고 축방향 전력에 대하여 4.73% 미만이라는 점으로부터, 상당한 일치를 달성하는 것을 알 수 있다.

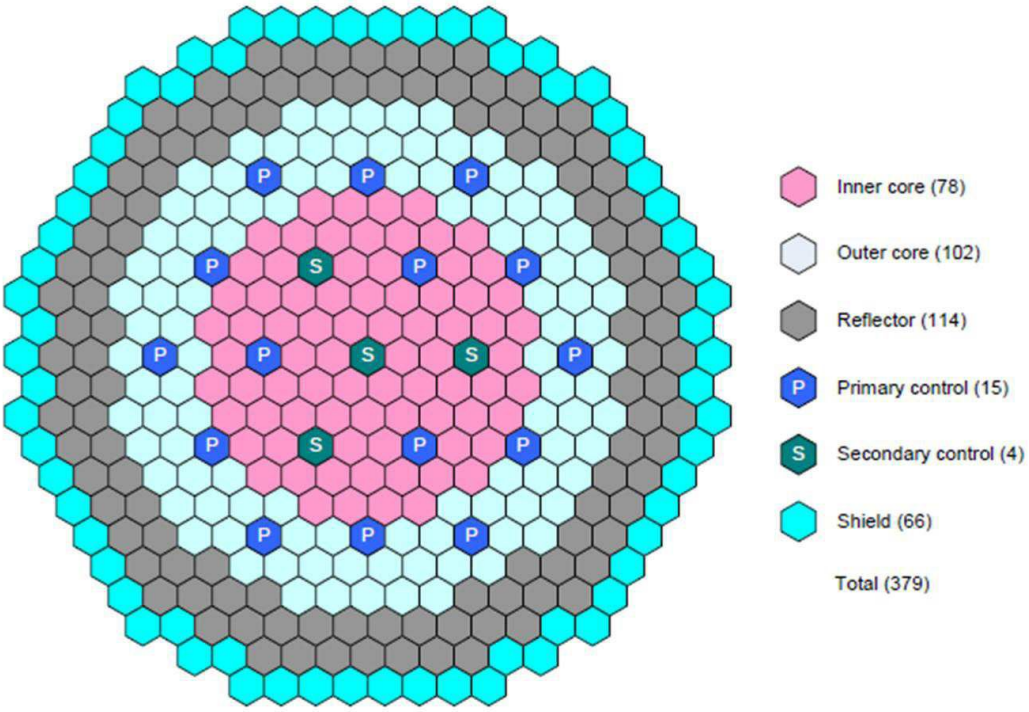
[0057] 본 실시예 및 본 명세서에 첨부된 도면은 전술한 기술에 포함되는 기술적 사상의 일부를 명확하게 나타내고 있는 것에 불과하며, 전술한 기술의 명세서 및 도면에 포함된 기술적 사상의 범위 내에서 당업자가 용이하게 유추할 수 있는 변형 예와 구체적인 실시례는 모두 전술한 기술의 권리범위에 포함되는 것이 자명하다고 할 것이다.

도면

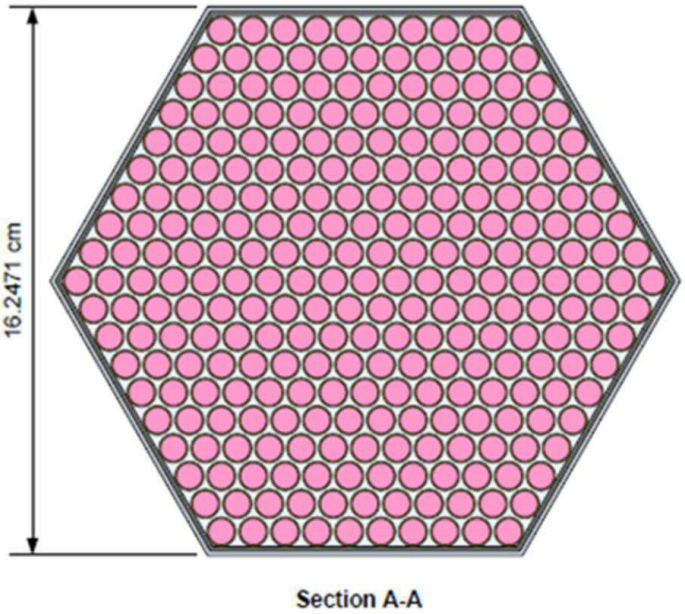
도면1



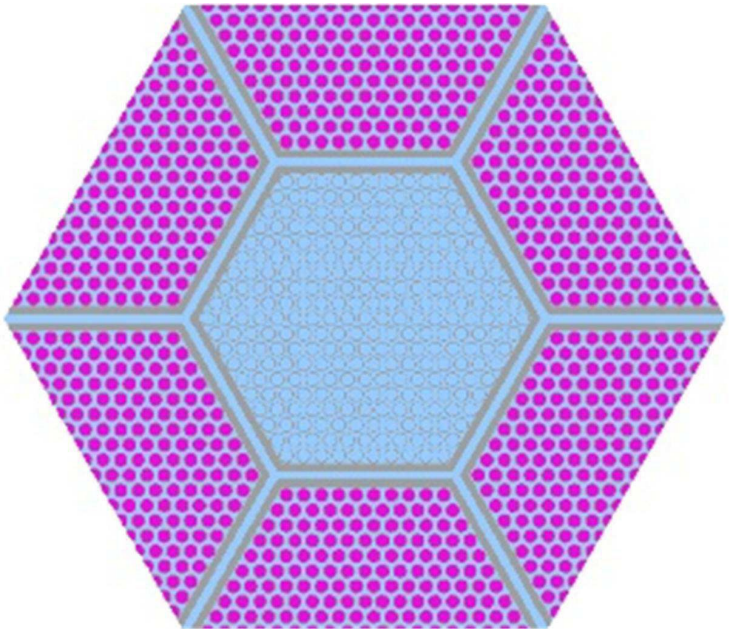
도면2


P
S
Inner core (78)
Outer core (102)
Reflector (114)
Primary control (15)
Secondary control (4)
Shield (66)
Total (379)

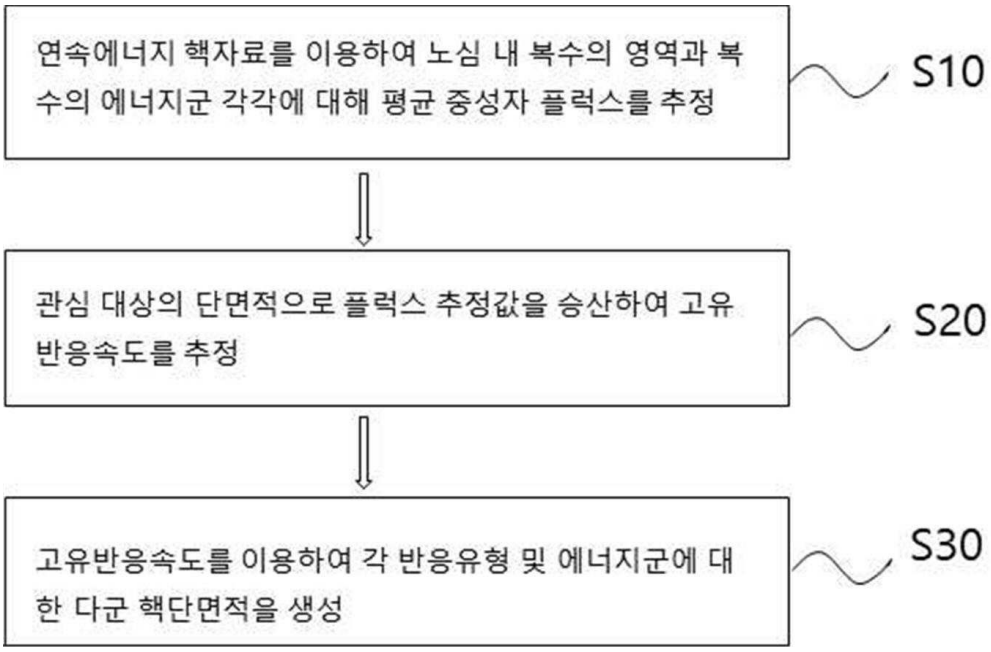
도면3a


16.2471 cm
Section A-A

도면3b



도면4


연속에너지 핵자료를 이용하여 노심 내 복수의 영역과 복수의 에너지군 각각에 대해 평균 중성자 플럭스를 추정
S10
관심 대상의 단면적으로 플럭스 추정값을 승산하여 고유반응속도를 추정
S20
고유반응속도를 이용하여 각 반응유형 및 에너지군에 대한 다군 핵단면적을 생성
S30

도면5

Parameter	G	MCS		Diff. vs. SERPENT 2 (%)	
		Value	SD (%)	Value	SD
Flux	1	1.18E+02	7.46E-03	0.22	0.01
	2	6.53E+01	1.08E-02	0.21	0.01
	3	1.12E+00	7.46E-02	0.29	0.11
	4	3.03E-06	2.74E+01	-11.31	45.63
Total	1	2.08E-01	1.21E-03	0.00	0.00
	2	3.02E-01	2.11E-03	0.02	0.00
	3	3.91E-01	6.40E-03	-0.01	0.02
	4	5.51E-02	2.34E+01	-93.11	24.38
Abs[a]	1	4.39E-03	2.95E-03	0.02	0.01
	2	6.93E-03	3.85E-03	0.02	0.01
	3	2.67E-02	2.50E-02	-0.03	0.05
	4	2.51E-02	3.90E+01	-90.54	44.04
NSF[b]	1	8.79E-03	5.06E-03	0.01	0.01
	2	6.62E-03	2.05E-03	0.02	0.01
	3	2.13E-02	2.64E-02	-0.07	0.06
	4	3.29E-02	5.92E+01	-91.47	64.77
Chi[c]	1	9.85E-01	1.90E-03	0.00	0.00
	2	1.46E-02	1.28E-01	0.24	0.18
	3	2.87E-05	3.04E+00	-0.09	4.30
	4	5.01E-08	7.06E+01	-44.60	97.40
Transport	1	1.71E-01	2.72E-03	0.01	0.00
	2	2.89E-01	2.73E-03	0.02	0.00
	3	3.87E-01	1.00E-02	-0.01	0.02
	4	2.21E-02	2.24E+01	-97.33	25.31

[a]Absorption, [b]Fission production, [c]Fission spectrum

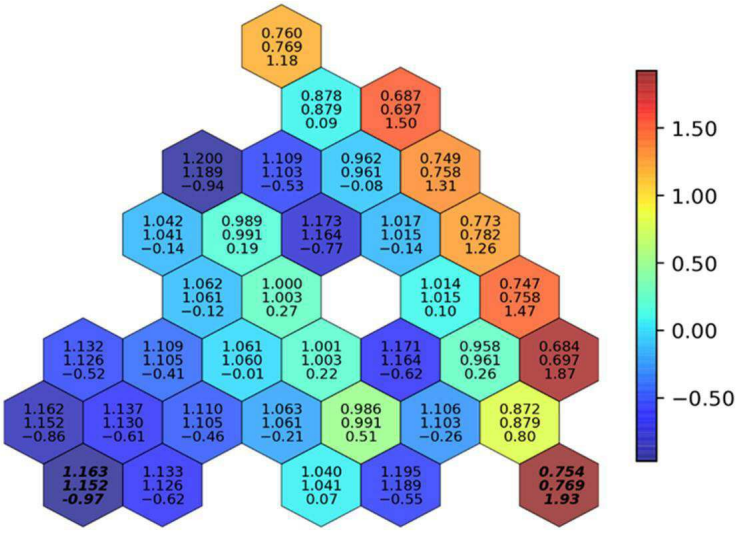
도면6a

Error (%)	1	2	3	4
1	0.01	--	--	--
2	0.05	0.02	--	--
3	-2.65	0.14	-0.02	--
4	-62.01	152.98	26.76	-95.27
SD (%)	**1**	**2**	**3**	**4**
1	0.00	--	--	--
2	0.02	0.00	--	--
3	3.07	0.09	0.03	--
4	62.96	75.01	51.58	28.60

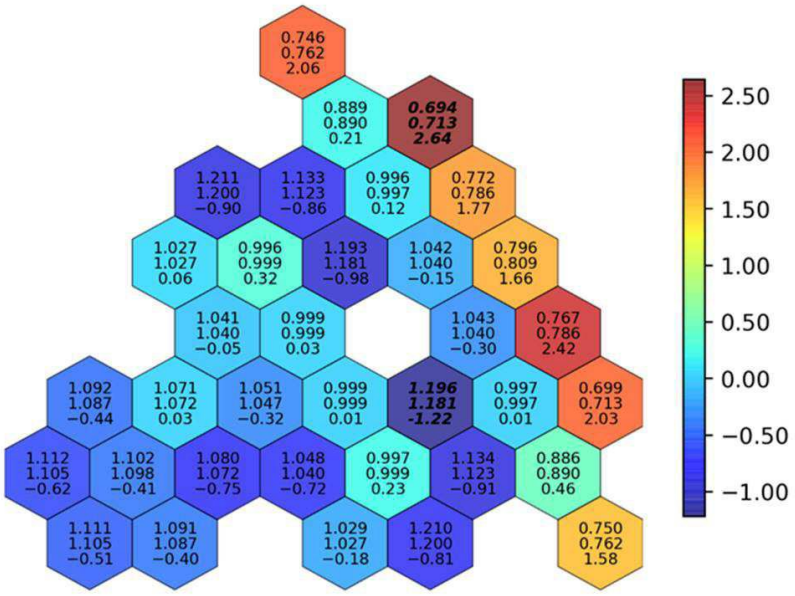
도면6b

Error (%)	1	2	3	4
1	-0.01	--	--	--
2	0.01	0.02	--	--
3	14.05	0.11	-0.44	--
4	-117.12	-101.91	214.67	-103.86
SD (%)	**1**	**2**	**3**	**4**
1	0.02	--	--	--
2	0.09	0.05	--	--
3	23.63	0.19	1.26	--
4	115.76	5681.69	107.31	166.93

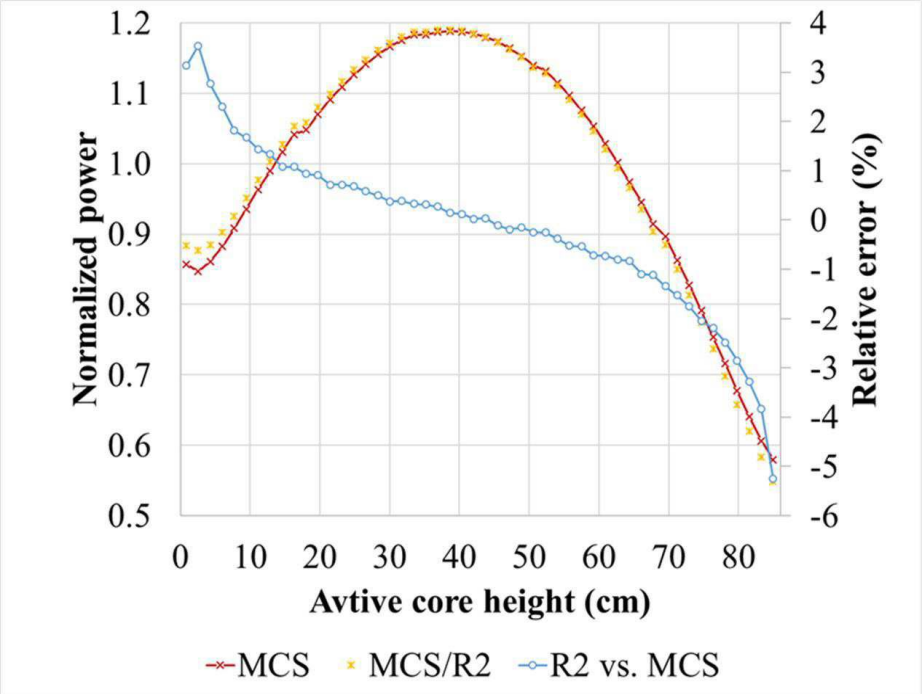
도면7a



도면7b


0.746
0.762
2.06
0.889
0.890
0.21
0.694
0.713
2.64
1.211
1.200
−0.90
1.133
1.123
−0.86
0.996
0.997
0.12
0.772
0.786
1.77
1.027
1.027
0.06
0.996
0.999
0.32
1.193
1.181
−0.98
1.042
1.040
−0.15
0.796
0.809
1.66
1.041
1.040
−0.05
0.999
0.999
0.03
1.043
1.040
−0.30
0.767
0.786
2.42
1.092
1.087
−0.44
1.071
1.072
0.03
1.051
1.047
−0.32
0.999
0.999
0.01
1.196
1.181
-1.22
0.997
0.997
0.01
0.699
0.713
2.03
1.112
1.105
−0.62
1.102
1.098
−0.41
1.080
1.072
−0.75
1.048
1.040
−0.72
0.997
0.999
0.23
1.134
1.123
−0.91
0.886
0.890
0.46
1.111
1.105
−0.51
1.091
1.087
−0.40
1.029
1.027
−0.18
1.210
1.200
−0.81
0.750
0.762
1.58
2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
0.00
−0.50
−1.00

도면8


Normalized power
Relative error (%)
Avtive core height (cm)
MCS
MCS/R2
R2 vs. MCS