(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2018-0120498
(43) 공개일자 2018년11월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 17/00 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G21C 17/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-0054540
(22) 출원일자 2017년04월27일
심사청구일자 2017년04월27일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
최수영
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
이덕중
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(74) 대리인
특허법인 무한

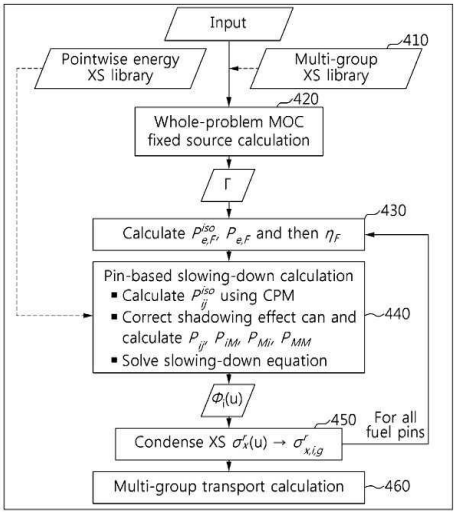
전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 발명의 명칭 **PSM을 이용하는 노심 해석 장치 및 방법**

(57) 요 약

원자로 노심의 유효 핵단면적 계산 방법 및 장치가 제시된다. 보다 구체적으로 핵단면적에 따른 충돌확률 테이블을 생산하고 사용하는 방법이 아닌, 매 에너지마다 붕괴 확률 방법(CPM) 해석기를 사용하여 충돌확률을 계산하여 핵연료 펠렛 내부의 물질 및 온도 분포를 고려하는 유효 핵단면적 계산 방법을 제시한다.

대 표 도 - 도4



명 세 서

청구범위

청구항 1

연속에너지 핵단면적을 생산하고 저장하는 단계;

특성곡선법으로 고정선원 계산을 하고 각 핵연료봉에 대하여 연속에너지 감속 계산을 수행하는 단계;

연속에너지 해를 이용하여 다군 핵단면적으로 축약하는 단계; 및

다군 수송해석을 수행하는 단계

를 포함하는 노심 해석 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 다군 수송해석을 수행하는 단계는,

충돌확률 계산 단계를 더 포함하는 노심 해석 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 다군 수송해석을 수행하는 단계는,

쉐도잉 효과 보정 계수 계산 단계를 더 포함하는 노심 해석 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 충돌확률 계산 단계는 붕괴 확률 방법을 사용하여 계산하는 노심 해석 방법.

청구항 5

제3항에 있어서,

상기 충돌확률 계산 단계는 충돌확률 테이블로부터 보간하여 계산하는 노심 해석 방법.

청구항 6

다군 수송 해석을 수행하는 계산부; 및

연속에너지 핵단면적을 저장하는 저장부

를 포함하고,

상기 계산부는,

상기 연속에너지 핵단면적을 계산하고, 특성곡선법으로 고정선원 계산을 하여 각 핵연료봉에 대하여 연속에너지 감속을 계산하고, 연속에너지 해를 이용하여 다군 핵단면적으로 축약하여 상기 다군 수송 해석을 수행하는

노심 해석 장치.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 계산부는 충돌확률을 계산하여 다군 수송해석을 수행하는 노심 해석 장치.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 계산부는 쉐도잉 효과 보정 계수를 계산하여 다군 수송해석을 수행하는 노심 해석 장치.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 계산부는 붕괴 확률 방법을 사용하여 충돌확률을 계산하는 노심 해석 장치.

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 계산부는 충돌확률 테이블로부터 보간하여 충돌확률을 계산하는 노심 해석 장치.

청구항 11

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항의,

노심 해석 방법을 수행하는 프로그램을 수록한 컴퓨터 판독 가능 기록 매체.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 원자로 노심 해석을 제공하는 장치 및 방법에 연관되며, 보다 특정하게는 노심의 다군 수송해석을 위해 유효 핵단면적에 대한 계산을 제공하는 장치 및 방법에 연관된다.

배 경 기 술

[0002] 종래의 원자로 노심 해석 방법에서는 핵자료를 이용하여 연속에너지 핵단면적을 계산하였으며, 다군 핵단면적 라이브러리를 생산하고 공명처리 함으로써 다군 수송해석을 수행하였다.

[0003] 핵단면적 생산 코드에는 NJOY가 있으며, 중성자 수송해석 코드로는 STREAM, CASMO, PARAGON, DeCART, WIMS, AEGIS 등이 존재한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

[0004] 일실시예에 따르면 연속에너지 핵단면적을 생산하고 저장하는 단계, 특성곡선법을 이용하여 고정선원 계산을 하고 각 핵연료봉에 대하여 연속에너지 감속 계산을 수행하는 단계, 연속에너지 해를 이용하여 다군 핵단면적으로 축약하는 단계 및 다군 수송해석을 수행하는 단계를 포함하는 노심 해석 방법이 개시된다.

[0005] 다른 일실시예에 따르면 상기 다군 수송해석을 수행하는 단계는, 충돌확률 계산 단계를 더 포함할 수 있고, 또한 쉐도잉 효과 보정 계수 계산 단계를 더 포함하는 노심 해석 방법도 제안된다.

[0006] 또 다른 일실시예에 따르면 상기 충돌확률 계산 단계는 붕괴 확률 방법(Collision Probability Method, CPM)을 사용하여 계산할 수 있고, 충돌확률 테이블(Collision Probability Table)로부터 보간(Interpolation)하여 계산하는 방법도 사용될 수 있다.

[0007] 다른 일실시예에 따르면 다군 수송 해석을 수행하는 계산부 및 연속에너지 핵단면적을 저장하는 저장부로 구성되는 노심 해석 장치가 개시된다.

[0008] 상기 계산부는 상기 연속에너지 핵단면적을 계산하고, 특성곡선법으로 고정선원 계산을 하여 각 핵연료봉에 대하여 연속에너지 감속을 계산하고, 연속에너지 해를 이용하여 다군 핵단면적으로 축약하여 상기 다군 수송 해석을 수행하도록 구성될 수 있다.

[0009] 일측에 따르면 상기 계산부는 충돌확률을 계산하여 다군 수송해석을 수행하는 노심 해석 장치도 제안된다.

[0010] 다른 일실시예에 따르면 상기 계산부가 쉐도잉 효과 보정 계수를 계산하여 다군 수송해석을 수행하는 노심 해석 장치가 개시된다.

[0011] 일시시예에 따르면 상기 계산부는 붕괴 확률 방법을 사용하여 충돌확률을 계산할 수 있고, 충돌확률 테이블로부터 보간하여 충돌확률을 계산할 수도 있다.

[0012] 또 다른 일실시예에 따르면 상기 노심 해석 방법 중 어느 하나의, 노심 해석 방법을 수행하는 프로그램을 수록한 컴퓨터 판독 가능 기록 매체도 개시된다.

도면의 간단한 설명

[0013] 도 1은 일실시예에 따른 일반적인 노심 해석 방법의 흐름도를 도시한다.

도 2는 일실시예에 따라 제안되는 노심 해석 방법의 흐름도를 도시한다.

도 3은 일실시예에 따른 PSM 노심 해석 방법의 흐름도이다.

도 4는 일실시예에 따른 PSM-CPM 노심 해석 방법의 흐름도이다.

도 5는 일실시예에 따른 핵연료 펠렛 내부 구조를 도시한다.

도 6은 일실시예에 따라 핵연료 펠렛 내부의 충돌확률을 나타낸 그래프이다.

도 7은 일실시예에 따른 총 단면적당 탈출확률을 나타낸 그래프이다.

도 8은 일실시예에 따른 총 단면적당 쉐도잉 효과 보정계수(Shadowing effect correction factor)를 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0014] 이하에서, 실시예들을 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다. 그러나, 권리범위는 이러한 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

[0015] 아래 설명에서 사용되는 용어는, 연관되는 기술 분야에서 일반적이고 보편적인 것으로 선택되었으나, 기술의 발달 및/또는 변화, 관례, 기술자의 선호 등에 따라 다른 용어가 있을 수 있다. 따라서, 아래 설명에서 사용되는 용어는 기술적 사상을 한정하는 것으로 이해되어서는 안 되며, 실시예들을 설명하기 위한 예시적 용어로 이해되어야 한다.

[0016] 또한 특정한 경우는 출원인이 임의로 선정한 용어도 있으며, 이 경우 해당되는 설명 부분에서 상세한 그 의미를 기재할 것이다. 따라서 아래 설명에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌 그 용어가 가지는 의미와

명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 이해되어야 한다.

[0017] 도 1은 일실시예에 따른 일반적인 노심 해석 방법의 흐름도를 도시한다. 일반적인 노심 해석 방법은, 연속에너지 핵단면적 계산(110) 단계, 연속에너지 감속 계산(120) 단계, 다군 핵단면적 라이브러리 생산(130) 단계, 공명 처리(140) 단계 및 다군 수송 해석(150) 단계로 구성될 수 있다.

[0018] 연속에너지 핵단면적 계산(110) 단계는 주어진 핵자료로부터 핵단면적 생산코드를 이용하여 계산할 수 있다. 이 때 핵단면적 생산 코드로는 NJOY 핵자료 처리 시스템(NJOY Nuclear Data Processing System)이 이용될 수 있다.

[0019] 연속에너지 감속 계산(120) 단계에서는 0-D, 1-D 또는 2-D 의 연속에너지 감속 계산이 수행된다. 0-D는 등가이론 방법에 의한, 1-D 및 2-D는 서브그룹 방법에 의한 연속에너지 감속 계산이다.

[0020] 이어서 다군 핵단면적 라이브러리 생산(130) 단계가 수행된다. 다군 핵단면적은 배경단면적(interpolation factor)에 대한 함수 형태로 저장된다. 상기 배경단면적은 공명 핵종의 자기 차폐된 정도를 나타낸다. 예시적으로 그러나 한정되지 않게 공명 핵종은 원자량 238의 우라늄일 수 있다. 쉽게 말해, 공명 핵종의 자기 차폐된 정도는 희석된 정도를 의미한다.

[0021] 공명 처리(140) 단계는 핵종 간 공명 간섭의 영향을 본다렌코 방법(Bondarenko method)을 이용하여 처리한다. 공명 처리에 이어서 유효 핵단면적을 계산한다. 다군 유효 핵단면적의 계산은 다군 핵단면적 라이브러리를 이용하여 수행한다.

[0022] 마지막으로 다군 수송 해석(transport calculation, 150) 단계이다. 예산된 상기 방식대로 계산되는 유효 핵단면적을 이용하여 다군 수송 해석을 수행하는 단계이다.

[0023] 도 2는 일실시예에 따라 제안되는 노심 해석 방법의 흐름도를 도시한다. 제안되는 노심 해석 방법은 연속에너지 핵단면적 계산(210) 단계, 연속에너지 감속 계산(220) 단계, 다군 핵단면적 축약(230) 단계 및 다군 수송 해석(240) 단계로 구성될 수 있으며, 전체적인 프로세스는 도 1과 유사하다.

[0024] 연속에너지 핵단면적 계산(210) 단계는, 연속에너지 핵단면적을 생산하고 저장하는 단계이다. 주어지는 핵자료로부터 연속에너지 핵단면적을 계산하여 생산하고 저장한다. 핵단면적 생산 코드로는 마찬가지로 NJOY 코드가 사용될 수 있다.

[0025] 제안되는 노심 해석 방법에는 다군 핵단면적 라이브러리의 생산이 필요하지 않고, 보다 간단하게 생산이 가능한 연속에너지 핵단면적의 계산(210) 단계만 존재한다.

[0026] 연료봉(Fuel), 갭(gap), 클래딩(cladding) 및 냉각제(coolant)를 포함하는 단위 셀(cell)에 대하여 충돌확률을 수반하는 연속에너지 수송방정식은 아래의 수학식 1 및 수학식 2와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 1

[0027] $$\sum_{t,i}(u)\emptyset_i(u)V_i = \sum_{j\in F} P_{ji}(u)V_j Q_{s,j}(u) + P_{Mi}(u)V_M Q_{s,M}(u)$$

[0028] 상기 수학식 1은 핵연료 지역에서의 연속에너지 수송방정식이다.

수학식 2

[0029] $$\sum_{p,M}\emptyset_M(u)V_M = \sum_{i\in F} P_{iM}(u)V_i Q_{s,i}(u) + P_{MM}(u)V_M Q_{s,M}(u)$$

[0030] 상기 수학식 2는 비 핵연료 지역에서의 연속에너지 수송방정식이다. 여기서 핵단면적(∑) 및 부피(V)는 각각 연속에너지 핵단면적 라이브러리와 주어진 문제의 스펙으로 부터 구할 수 있다. 상기 수학식 1 및 2를 풀기 위해서는 충돌확률(P)에 대한 값이 필요하고 상기 충돌확률(P)를 계산하기 위해서는 아래의 단계적 방법을 사용한다.

[0031] 첫 번째 단계는 독립된 핵연료 펠렛 내부의 충돌 확률 계산단계이다. CPM 해석기를 사용하여 독립된 핵연료 펠렛 내부의 충돌확률을 계산한다. 상기 CPM 해석기는 각 지역의 핵단면적을 알면 충돌확률을 계산 가능하다. 상기 방법으로 계산되는 충돌확률을 이용하여 핵단면적에 따른 충돌확률을 표(table)로 만든다. 핵연료 펠렛 내부의 핵단면적이 평평하게 분포한다고 가정하고 계산한다. 다시 말해 넓은 범위의 핵단면적에 대하여 충돌확률을 CPM 방법으로 계산하고, 핵단면적-충돌확률의 표(table)를 생성한다.

[0032] 두 번째 단계는 핵연료 봉 간의 충돌확률 계산 단계이다. 핵연료 봉 간의 충돌확률 계산에는 핵연료 펠렛 내부의 충돌확률 분포를 고려하지 않는다.

[0033] 이 때 등가이론에서 사용하는 칼빅(Carlvik)의 2차 분수 근사식을 사용하여 탈출확률을 계산한다. 상기 칼빅의 2차 분수 근사식을 이용해 계산된 탈출확률은 도 7에서 그래프로 도시한다. MOC 고정선원 계산을 통하여 Γ값을 계산하고, 충돌확률 계산에 사용한다. 에너지 군에 관계 없이 단 한번의 MOC 고정선원 계산을 수행하여 Γ값을 계산한다. 독립된 핵연료의 탈출확률과 어셈블리에 배치된 핵연료의 탈출확률의 비율을 계산하여 쉐도잉 효과 보정계수를 정의한다. 즉, 쉐도잉 효과 보정계수는 핵연료 봉이 독립되어 있을 때와 집합체 내부에 배치되어 있을 때 탈출확률의 변화를 고려하는 인자다.

[0034] 마지막으로 상기 첫 번째와 두 번째 단계의 충돌확률을 조합한다. 첫 번째 단계에서 독립된 핵연료봉 펠렛 내부 소구역의 충돌확률을 계산하였고, 두 번째 단계에서 핵연료봉이 집합체에 있을 때의 영향을 고려하는 인자(쉐도잉 효과 보정계수)를 계산하였다. 마지막 단계에서 상기 두 단계를 조합하여 핵연료봉이 집합체에 있을 때 핵연료봉 간의 영향이 고려되는 펠렛 내부의 충돌확률을 계산할 수 있다.

[0035] 연속에너지 감속 계산(220) 단계는 해석하고자 하는 문제에 포함되는 각각의 핵연료봉에 대하여 연속에너지 감속 계산을 수행하는 단계이다. 보다 구체적으로 MOC(Method of Characteristics) 고정선원(fixed sourse) 계산을 수행하여 핵연료봉 사이의 차폐효과를 고려할 수 있다.

[0036] 연료봉 단위의 연속에너지 감속 계산을 수행함으로써 핵종간 공명 간섭의 영향을 고려할 수 있다. 또한 핵연료봉 내부를 분할하고 감속 계산을 수행하기 때문에 핵연료 내 산란선원(Scattering source) 분포에 대한 고려도 가능하다.

[0037] 기존 등가이론 또는 서브그룹 방법과는 달리 수회의 MOC 고정선원에 대한 계산이 필요하지 않으며, 상기 연속에너지 감속 계산(220) 단계에서는 핵연료에 대한 한번의 MOC 고정선원 계산만이 요구된다.

[0038] 다음으로 다군 핵단면적 축약(230) 단계는 연속에너지 해를 사용하여 다군 핵단면적으로 축약하는 단계이다.

[0039] 마지막으로 다군 수송 해석(240) 단계는 축약되는 다군 핵단면적을 이용하여 수송 해석을 수행하는 단계이다.

[0040] 도 3은 일실시예에 따른 PSM(Pin-Based Slowing down Method) 노심 해석 방법의 흐름도이다. PSM을 이용하는 노심 해석 방법은 다군 단면적 라이브러리 생성(310) 단계, 독립 핀 셀 MOC 고정선원 계산 및 전체 문제 MOC 고정선원 계산(320) 단계, 충돌확률 계산(330) 단계, PSM 계산(340) 단계 핵단면적 응축(350) 단계 및 다군 수송 계산(360) 단계로 이루어진다.

[0041] PSM(Pin-Based Slowing down Method) 방법은 수학식 3 및 수학식 4와 같이 레서지(lethargy) 형태로 작성된 점별 에너지 감속 방정식을 풀기 위해 파생되었다.

수학식 3

[0042]
$$\emptyset_i(u) = \sum_{j\in F} \frac{P_{ij}(u)}{\Sigma_{t,j}(u)} Q_{s,j}(u) + \frac{P_{iM}(u)}{\Sigma_{p,M}} Q_{s,M}(u)$$

수학식 4

[0043]
$$\emptyset_M(u) = \sum_{j\in F} \frac{P_{Mi}(u)}{\Sigma_{t,i}(u)} Q_{s,i}(u) + \frac{P_{MM}(u)}{\Sigma_{p,M}} Q_{s,M}(u)$$

[0044] 여기서 u는 점 별 에너지를 의미하고, F 및 M은 각각 연료와 감속재를 나타낸다. i 및 j는 연료 서브영역을 의미하고, Φ는 플럭스, Q는 탄성 스캐터링 선원(elastic scattering source)을 의미한다. $P_{i,j}$ 는 연료봉 격자 내에서 i로부터 j의 충돌확률을 의미하고, Σ_t 는 총단면적을, $\Sigma_{p,M}$ 은 포텐셜 단면적을 의미한다.

[0045] 상기 수학식 3 및 4를 모두 풀어 나온 연속에너지 중성자속를 사용하여 다군으로 핵단면적을 축약하고 계산되는 최종 유효 핵단면적은 수학식 5와 같다.

수학식 5

[0046]
$$\sigma^{r}_{x,i,g} = \frac{\int_{\Delta u_g} \sigma^{r}_{x}(u)\emptyset_i(u)du}{\int_{\Delta u_g} \emptyset_i(u)du}$$

[0047] 이어서, 충돌확률을 알고 있는 경우에, 수학식 3 및 수학식 4는 고에너지의 고정선원(fixed source)으로 풀 수 있다. 점 별 에너지 플럭스가 계산된 후에, 다군 유효 핵단면적이 에너지 축약을 통해 계산된다.

[0048] 원조 PSM 에서 충돌확률은 다음과 같은 두 단계를 통해 계산된다. 첫째는 독립된 핵연료 핀(fuel pin)의 충돌확률 $P^{iso}_{ij}(\Sigma^{*}_{t,F})$ 는 감속 방정식을 풀기 전에 연료의 총단면적의 함수로서 표(table)로 만든다. 여기서 $\Sigma^{*}_{t,F}$ 는 표에서 사용된 총 단면적이다. CPM 또는 MOC(method of characteristics) 수송 해석기를 사용하여 테이블을 생성할 수 있다. 둘째로는 다음과 같이 인접한 연료 핀 및 구조 재료로부터 차폐 효과를 보정하기 위해 쉐도잉 효과 보정 계수(shadowing effect correction factor)를 적용한다.

수학식 6

[0049]
$$P_{i,j}\left(\sum\nolimits_{t,F}(u)\right) = P^{iso}_{t,F}\left(\sum\nolimits_{t,F}(u)\right)\frac{1-n\left(\Sigma_{t,F}(u)\right)\{1-\Sigma_{j\in F}P^{iso}_{ij}(\Sigma_{t,F}(u))\}}{\Sigma_{j\in F}P^{iso}_{ij}(\Sigma_{t,F}(u))}$$

[0050] 여기서 쉐도잉 효과 보정계수 η은 독립된 연료봉 격자에 대한 연료봉의 탈출 확률 비율로 정의된다.

[0051] 원조 PSM 에서 두 단계 전략은 상당한 컴퓨팅 리소스를 필요로 하는 연료 어셈블리나 코어와 같은 큰 지오메트리(geometry)에 대한 충돌 확률을 직접 계산하는 것을 피할 수 있다. 또한 충돌확률 P^{iso}_{ij} 는 감속방정식을 풀기 전에 총단면적의 함수로서 표로 만들어지기 때문에 주어진 에너지 점에 대하여 P^{iso}_{ij} 를 얻는 간단한 보간이 수행된다. $\hat{P}^{iso}_{ij}$ 테이블로부터 보간(interpolation)하여 $\hat{P}^{iso}_{ij}$ 를 구한다. 따라서 두 단계 전략을 사용하여 충돌 확률을 효율적으로 평가할 수 있다.

[0052] 상기 PSM은 충돌확률 계산에서 핵단면적에 따른 충돌확률 테이블 생산시에 연료봉의 모든 부분 영역이 동일한 재료 구성을 가지고 있다고 가정한다. 즉, 점 별 에너지의 총단면적은 연료의 모든 서브영역의 합과 같다. 이러한 가정은 $P^{iso}_{ij}(\Sigma^{*}_{t,F})$ 테이블의 생성에 필요하다. 만약 물질 조성이 서브영역에 의해 달라진다면 충돌확률을 계산하기 위해 다른 방법을 사용해야 한다. 실제로 펠렛 내부에서 물질 분포 또는 온도 분포가 있을 경우 펠렛 내부에서의 핵단면적은 평평하지 않고 오차를 유발할 수 있다. 따라서 총단면적의 평균값을 이용하거나, P^{iso}_{ij} 의 계산에 CPM 방법을 사용하는 것이다. 각 에너지 별 펠렛의 평균 핵단면적을 계산하고, 상기 평균 핵단면적을 사용하여 충돌확률 계산 첫 번째 단계에서 생산한 테이블로부터 충돌확률을 내삽(interpolation)한다. 반면에 충돌확률 테이블을 사용하지 않고 CPM을 사용하는 방법은 도 4에서 상세히 살펴본다.

[0053] 도 4는 일실시예에 따른 PSM-CPM 노심 해석 방법의 흐름도이다. PSM-CPM 방법도 PSM 방법과 마찬가지로 수행될 수 있다. 다만 PSM 계산 과정에서 CPM을 통한 충돌확률 P^{iso}_{ij} 을 계산한다는 점에서 가장 큰 차이점이 존재한다.

[0054] 상기 PSM-CPM 방법은 핵단면적에 따른 충돌확률 테이블을 생산해두고 사용하는 것이 아니라 매 에너지마다 충돌

확률방법(Collision Probability Method, CPM)을 사용하여 충돌확률을 계산한다. 상기 충돌확률방법(CPM)에는 CPM 해석기(CPM solver)가 사용된다. 매 에너지마다 CPM 계산을 하기 때문에 펠렛 내부의 물질분포 및 온도분포를 보다 정확하게 고려할 수 있다.

[0055] PSM-CPM 방법은 다군 핵단면적 라이브러리 생성(410) 단계, 전체 문제 MOC 고정선원 계산(420) 단계, 충돌확률 계산(430) 단계, PSM 계산(440) 단계, 단면적 축약(450) 단계 및 다군 수송해석 단계(460)로 구성될 수 있다.

[0056] 다군 핵단면적 라이브러리 생성(410) 단계와 전체 문제 MOC 고정선원 계산(420) 단계는 PSM 방법과 동일하게 수행될 수 있다.

[0057] 첫 번째 방법에서, 연료 부분 영역의 전체 단면적은 플럭스-부피 가중치로 공간적으로 균질화된다. 균질화는 간단한 계산이므로 눈에 띄는 계산 부담을 필요로 하지 않는다. 그러나 충돌 확률 결과값은 일정한 점 별 에너지 단면적 가정 때문에 오차가 존재할 수 있다.

[0058] 두 번째 방법에서는 CPM을 P_{ij}^{iso}의 계산에 직접 사용한다. 원통형 형상에 대한 CPM은 잘 정립되어 있다. CPM을 사용하면 정확한 P_{ij}^{iso}를 계산할 수 있다. 그러나 충돌 확률은 CPM 해석기를 사용하여 모든 에너지 점에 대하여 계산되기 때문에 계산 시간이 증가한다. 또한 연료의 서브영역 수가 증가하면 CPM 행렬 방정식을 푸는 데 소요되는 시간은 서브영역 수의 제곱에 비례하여 증가한다. CPM에 의해 계산되는 P_{ij}^{iso}를 사용하여 격자에서 연료의 충돌 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

수학식 7

[0059]
$$P_{ij}(u) = \tilde{P}_{ij}^{iso}(u)\frac{1 - n(\overline{\Sigma_{t,F}(u)})\{1 - \tilde{P}_{ij}^{iso}(u)\}}{\sum_{j\in F}\tilde{P}_{ij}^{iso}(u)}$$

[0060] 여기서 $\tilde{P}_{ij}^{iso}$는 CPM으로 계산되는 독립된 핀의 충돌 확률이다. $\tilde{P}_{ij}^{iso}$는 모든 에너지 점에 대해 CPM에 의해 계산된다. 쉐도우 효과 보정계수는 전체 연료 펠렛(fuel pellet)의 총단면적에 따라 달라 지므로 평균 단면적이 계산에 계속 사용된다. 이 문제는 점 에너지 총단면적의 공간 분포와 관련 있기 때문에 균일하지 않은 온도 및 조성의 경우에 적용하는 데 차이가 없다.

[0061] 도 5는 일실시예에 따른 핵연료 펠렛 내부 구조를 도시한다. 핵연료 펠렛(fuel pellet)은 각 서브영역으로 구분될 수 있다. 예시적으로 i 또는 j가 5인 경우까지만 도시하였으나, 그 이상 서브영역이 존재할 수 있다. 서브영역 중 빗금 부분인 i=3 경우일 때의 충돌확률을 도 6에서 살펴보도록 한다.

[0062] 도 6은 일실시예에 따라 핵연료 펠렛 내부의 충돌확률을 나타낸 그래프이다. 충돌확률 P_{ij}^{iso}는 i=3일 때 j의 값에 따라 변화한다. j=1 일 때(610), j=2 일 때(620), j=3 일 때(630), j=4 일 때(640) 그리고 j=5 일 때(650)를 각각 도시한다. i와 j가 각각 3인 경우 총단면적의 크기가 커질수록 비약적으로 증가한다. 반면에 i=3으로 고정되어 있기 때문에, j가 3으로부터 멀어질수록 충돌확률이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 보다 구체적으로 j=2 또는 j=4의 경우에 충돌확률이 일차적으로 감소하고, j=1 또는 j=5인 경우에 한 단계 더 감소한다.

[0063] j=2 또는 j=4인 경우 총단면적이 $10^{1}(cm^{-1})$보다 큰 영역에서 피크(peak)를 가지고, j=1 또는 j=5인 경우에는 총단면적이 $10^{1}(cm^{-1})$보다 작은 영역에서 피크를 가진다. 도 6에서는 j=5인 경우 까지만 도시하였으나, 그 이상의 경우에는 i=3과 서브영역간 거리가 멀어질수록 마찬가지로 감소하게 된다.

[0064] 도 7은 일실시예에 따른 총 단면적당 탈출확률을 나타낸 그래프이다. 실선은 독립된 핀(Isolated pin)의 탈출확률이고, 1점 쇄선은 격자 내 핀(Pin in lattice)의 탈출확률을 나타낸다.

[0065] 각 핀의 탈출확률 값은 1에서 시작하여 총단면적이 $10^{-1}(cm^{-1})$부근에서 유의미하게 감소하기 시작하고, 총단면적이 $10^{2}(cm^{-1})$일 때 거의 0에 수렴하게 된다.

[0066] 도 8은 일실시예에 따른 총 단면적당 쉐도잉 효과 보정계수(Shadowing effect correction factor)를 나타낸 그

래프이다. 총단면적에 따른 탈출확률이 1부터 0까지 감소하기 때문에 쉐도잉 효과 보정계수가 요구된다.

[0067] 총단면적이 $10^{-1}(cm^{-1})$ 이하인 경우에는 탈출확률이 1이므로 쉐도잉 효과 보정계수는 1이다. 총단면적의 증가에 따라 탈출확률도 감소하고, 탈출확률이 0에 수렴하게 되면 쉐도잉 효과 보정계수는 0.8로 수렴한다. 총단면적의 증가에 따른 탈출확률 그래프의 개형과 유사하게 쉐도잉 효과 보정계수 그래프도 변화한다.

[0068] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPA(field programmable array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른 처리 구성(processing configuration)도 가능하다.

[0069] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성요소(component), 물리적 장치, 가상 장치(virtual equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치, 또는 전송되는 신호 파(signal wave)에 영구적으로, 또는 일시적으로 구체화(embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

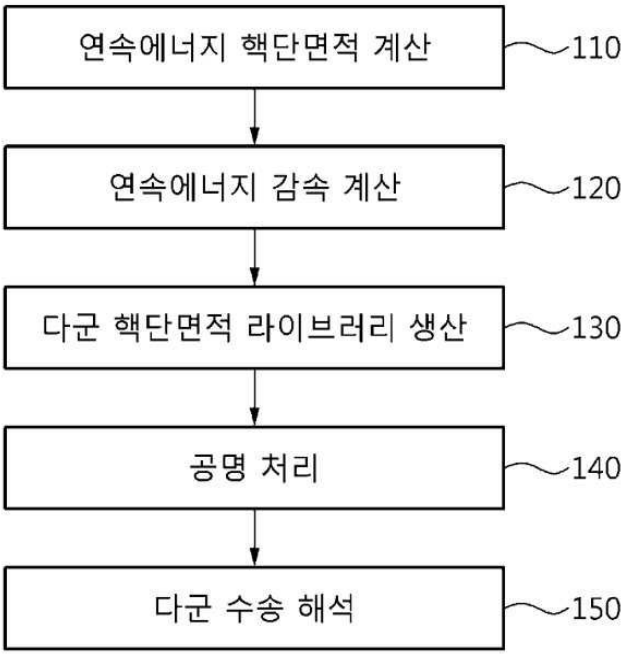
[0070] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic 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 실시예의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

[0071] 실시예들이 비록 한정된 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

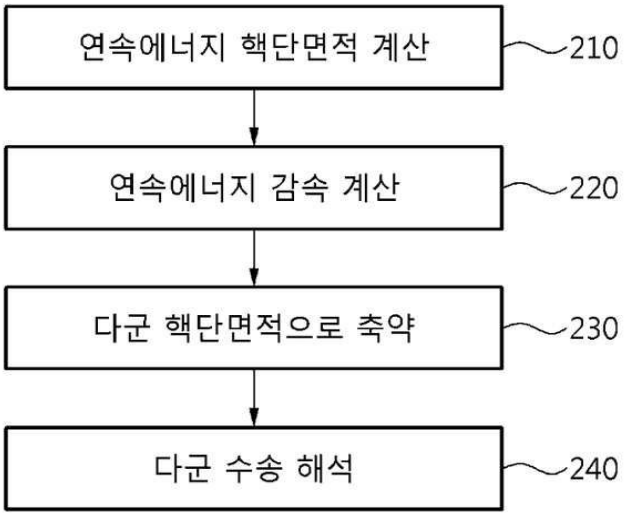
[0072] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

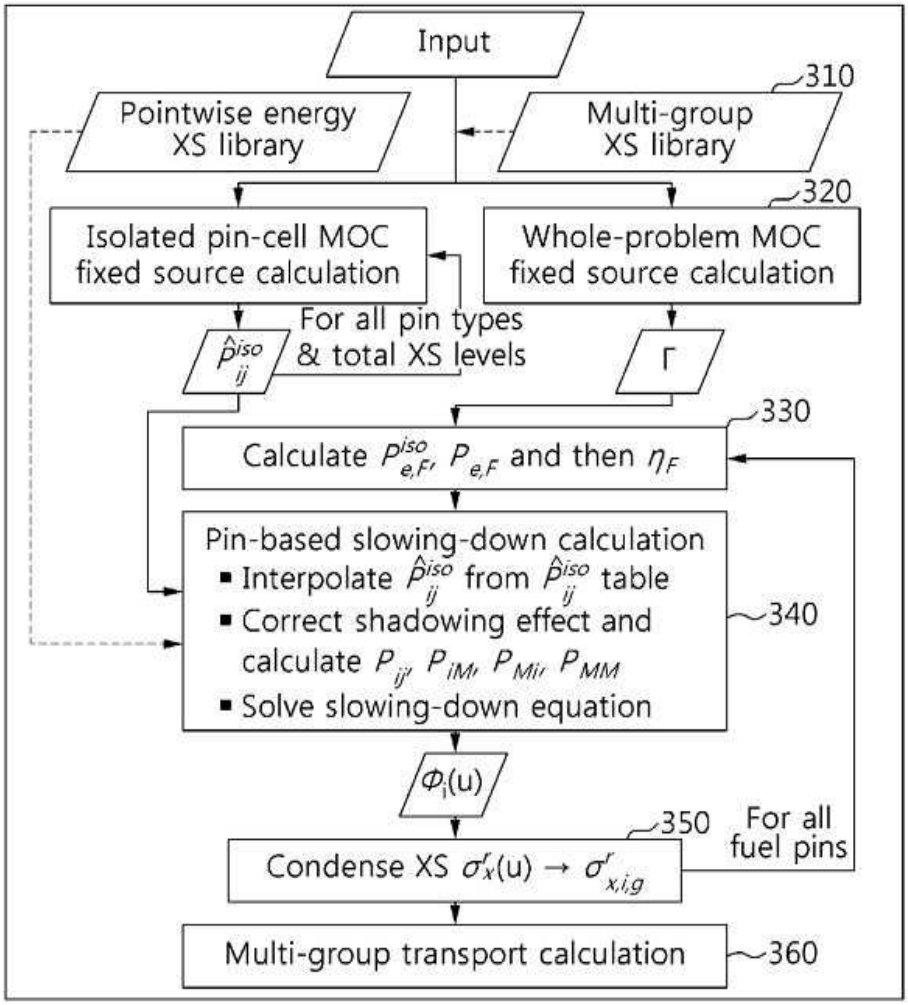
도면1


연속에너지 핵단면적 계산
110
연속에너지 감속 계산
120
다군 핵단면적 라이브러리 생산
130
공명 처리
140
다군 수송 해석
150

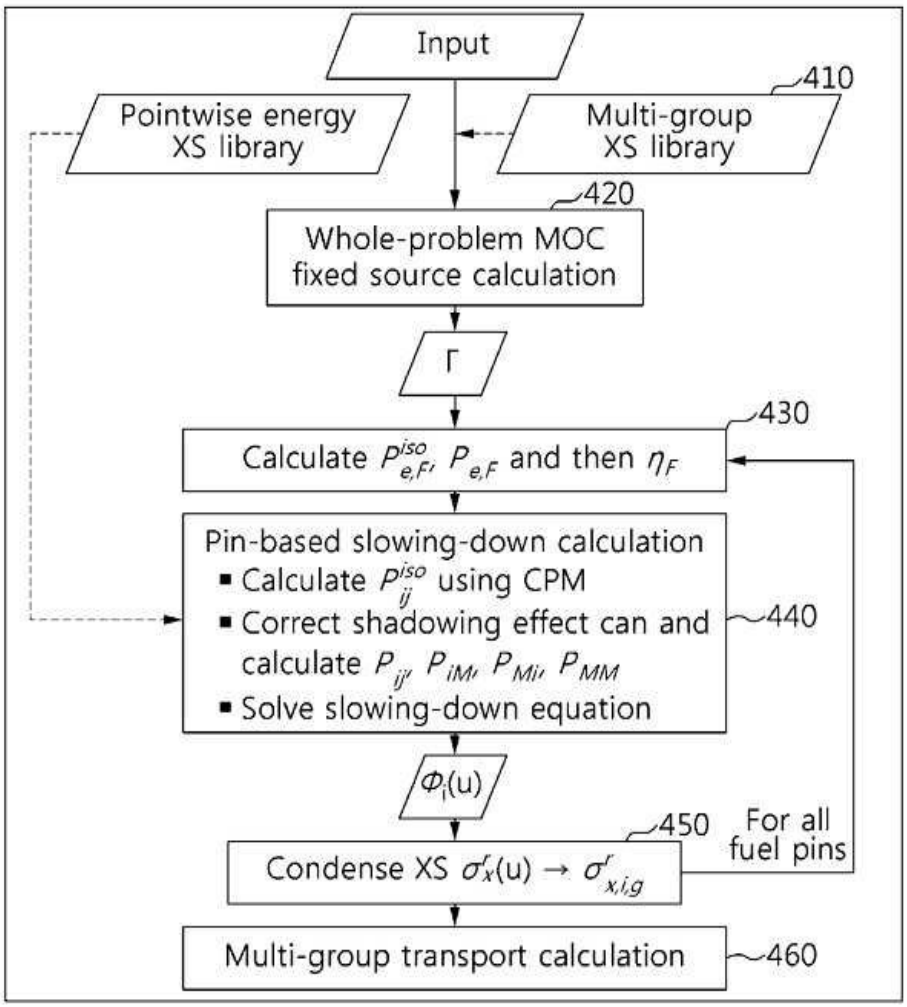
도면2


연속에너지 핵단면적 계산
210
연속에너지 감속 계산
220
다군 핵단면적으로 축약
230
다군 수송 해석
240

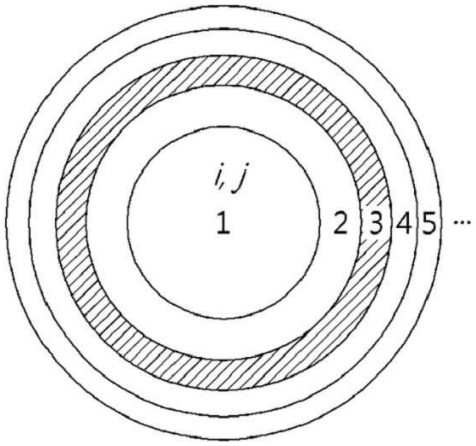
도면3


Input
310
Pointwise energy XS library
Multi-group XS library
320
Isolated pin-cell MOC fixed source calculation
Whole-problem MOC fixed source calculation
For all pin types & total XS levels
$\hat{P}_{ij}^{iso}$
Γ
330
Calculate $P_{e,F}^{iso}$, $P_{e,F}$ and then η_F
Pin-based slowing-down calculation
▪ Interpolate $\hat{P}_{ij}^{iso}$ from $\hat{P}_{ij}^{iso}$ table
▪ Correct shadowing effect and calculate P_{ij}, P_{iM}, P_{Mi}, P_{MM}
▪ Solve slowing-down equation
340
$\Phi_i(u)$
350
For all fuel pins
Condense XS $\sigma_x^r(u) \rightarrow \sigma_{x,i,g}^r$
Multi-group transport calculation
360

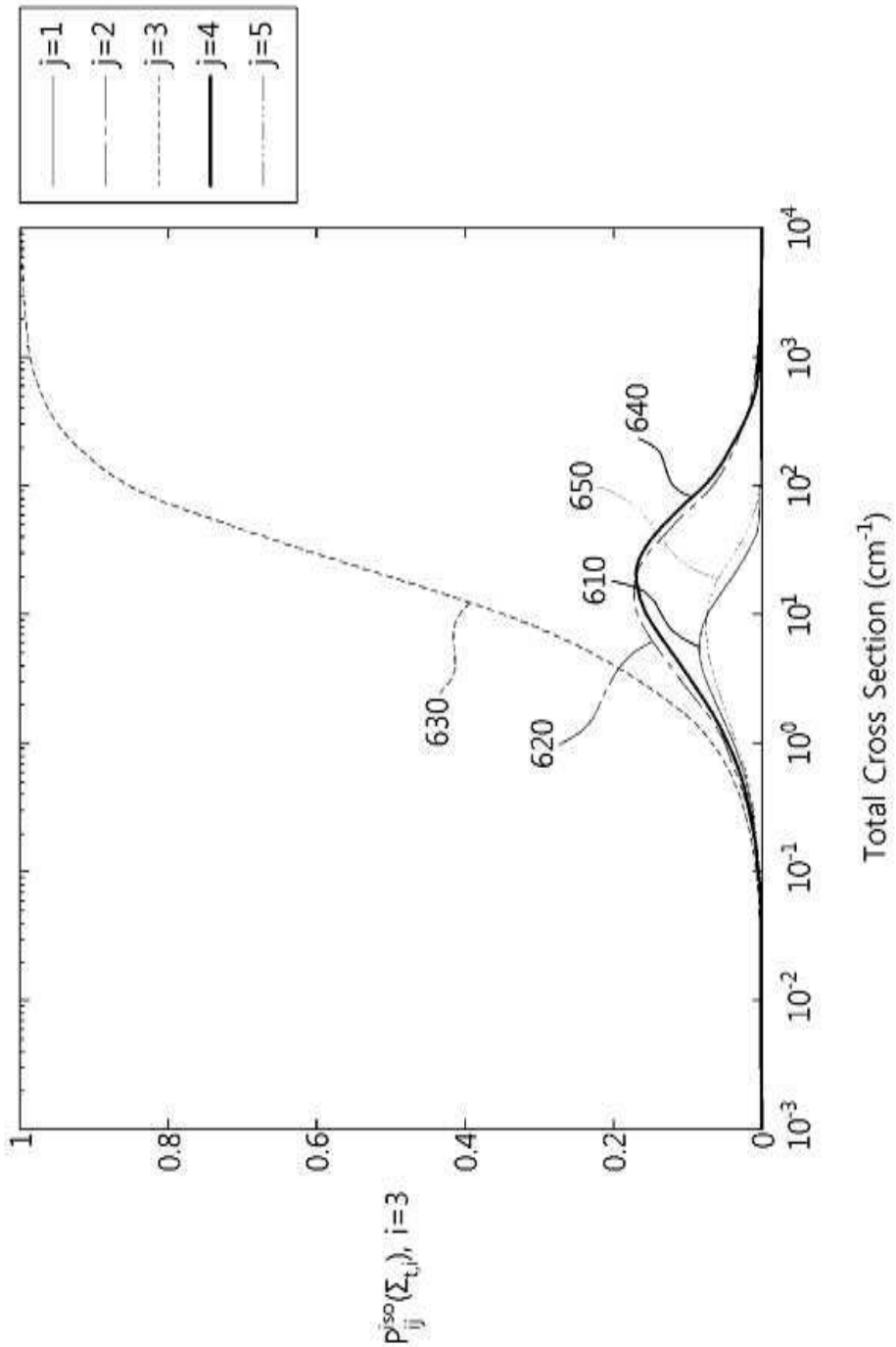
도면4


Input
Pointwise energy XS library
Multi-group XS library
410
Whole-problem MOC fixed source calculation
420
Γ
Calculate $P^{iso}_{e,F}$, $P_{e,F}$ and then η_F
430
Pin-based slowing-down calculation
Calculate P^{iso}_{ij} using CPM
Correct shadowing effect can and calculate P_{ij}, P_{iM}, P_{Mi}, P_{MM}
Solve slowing-down equation
440
$\Phi_i(u)$
Condense XS $\sigma^r_x(u) \rightarrow \sigma^r_{x,i,g}$
450
For all fuel pins
Multi-group transport calculation
460

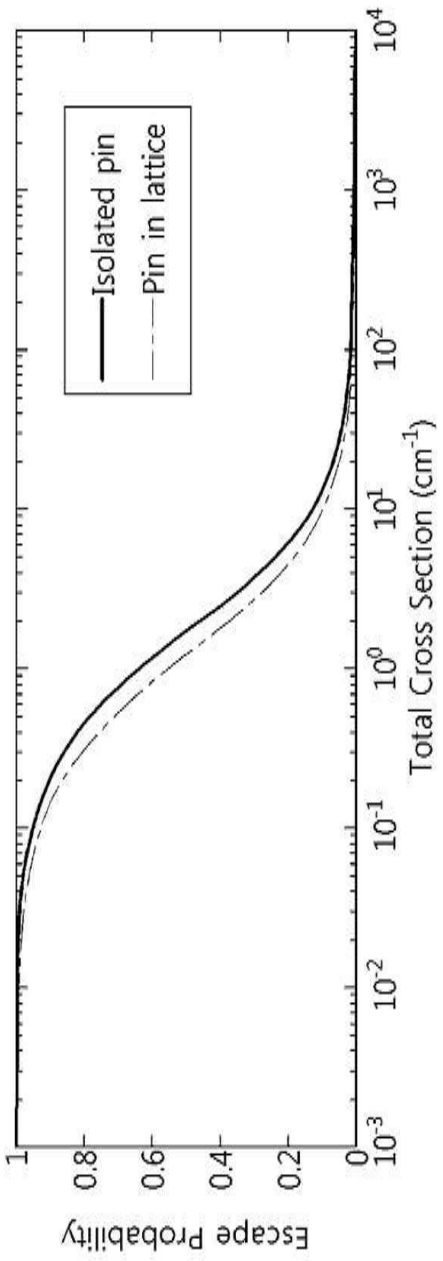
도면5


i, j
1
2
3
4
5
...

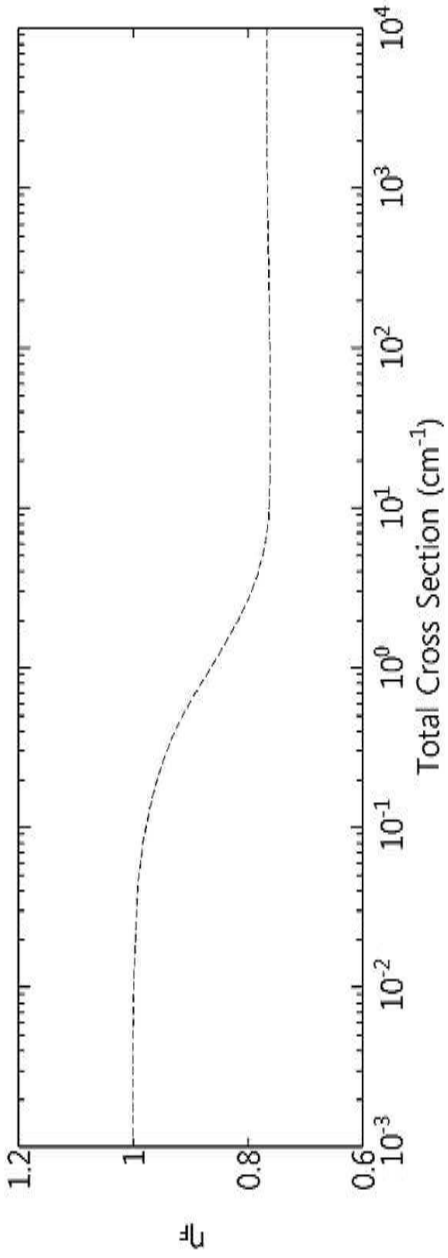
도면6


j=1
j=2
j=3
j=4
j=5
630
620
610
650
640
$P_{ij}^{iso}(\Sigma_{t,i})$, i=3
Total Cross Section (cm^{-1})

도면7


Isolated pin
Pin in lattice
Escape Probability
Total Cross Section (cm-1)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
10-3
10-2
10-1
100
101
102
103
104

도면8


1.2
1
0.8
0.6
T_F
10^{-3}
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
Total Cross Section (cm^{-1})