2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

DeCART 코드의 삼차원 전노심 수송계산 방법과 성능

Three-Dimensional Whole Core Transport Calculation Method and Performance of the DeCART Code

주한규, 조진영, 김교윤, 김하용, 지성균

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

전노심 중성자 수송해석 코드인 DeCART에 구현된 삼차원 수송계산 방법과 이의 정확성, 실행속도 측면에서의 성능을 소개한다. DeCART에서의 삼차원 중성자속 계산은 중성자속 분포의 반경방향 의존성과 축방향 의존성을 분리하여 처리하는 횡방향 적분방식을 기반으로 한다. 여기서 반경방향 의존성은 정교한 이차원 특성곡선방법(Method of Characteristics)에 의해 결정하는 반면 축방향 의존성은 단순한 일차원 중성자 확산해석 방법을 통해 결정한다. 삼차원 중성자속 분포의 전체적인 균형은 소격격자 유한차분방식에 의해 형성된 중성자 균형방정식의 동시해를 구함으로써 처리한다. 소격격자 유한차분방식은 두 횡방향 계산의 조율을 통해 근사적인 삼차원 전노심 수송 계산을 가능하게 하는 한편, 신속한 수렴성을 달성하는 데 있어 매우 효과적임을 보인다. DeCART에 도입된 근사적 삼차원 전노심 수송계산 방법의 정확성은 C5G7 MOX 비균질 노심 벤치마크 문제를 기반으로 제어봉 삽입시켜 새로이 구성한 시험문제에 대한 DeCART 해와 Monte Carlo 해를 비교함으로써 입증한다.

Abstract

The three-dimensional (3D) transport calculation method implemented in a whole core neutron transport code DeCART is presented and its performance is examined in terms of solution accuracy and execution speed. The 3D flux calculation in DeCART is based on a transverse-integration method in which the radial and axial dependencies are handled separately. The radial dependence is resolved by the elaborated two-dimensional method of characteristics (MOC) whereas the axial dependence is dealt with the simple one-dimensional diffusion model. The global balance of the 3D flux distribution is incorporated by the coarse mesh finite difference (CMFD) formulation. It is shown that the CMFD formulation enables the approximate three-dimensional transport calculation through the transverse-integration, and furthermore it is very effective in achieving rapid convergence. The accuracy of the approximate 3D whole-core transport calculation method is proved by analyzing rodded variations of the C5G7 MOX heterogeneous core benchmark problem for which Monte Carlo solutions are generated as the reference.

1. 서 론

DeCART (Deterministic Core Analysis based on Ray Tracing) 코드[1,2)]는 현행 노심해석에 도입되어 있는 사전 균질화 및 군축약에 의한 한계를 극복하여 계산 결과의 정확도를 제고하고 적용 범위를 확장시킬 목적으로 한국원자력연구소에서 개발하고 있는 전노심 수송해석 코드이다. 이 코드가 구현해야 할 가장 중요한 기능은 노심의 내부 구성물의 상세한 기하구조를 아무런 균질화 과정없이 있는 그대로 모의하는 것이다. 예를 들면, 핵연료 집합체내의 연료봉 및 그 내부의 연료소자, 피복관, 그 사이의 간극등을 명시적으로 계산에 반영하여야 한다. 이러한 비균질 노심에 대한 중성자 수송계산에는 특성곡선 방법(Method of Characteristics, MOC)이 가장 적합한 것으로 알려져 있고 현재 세계적으로 MOC에 기반한 다수의 전노심 코드가 개발 중에 있다. 그러나 MOC를 삼차원 노심 형상에 대해 직접 적용할 경우, 막대한 기억용량 및 계산시간의 요구량으로 인해 실제적인 삼차원 전노심 계산이 불가능하다. 이는 MOC계산을 위해서는 아주 미세한 간격으로 중성자 추적선을 설정해야 하는데 삼차원 계산에는 추적선의 숫자가 천문학적으로 증가하기 때문이다. 따라서, 현실적으로 삼차원 전노심에 대한 중성자 수송해석을 수행하기 위해서는 근사적인 MOC 적용방식을 고안할 필요가 있다.

일반적으로 노심내 연료배치가 축방향으로 보다는 반경방향으로 훨씬 더 심한 비균질도를 초래한다는 점을 감안할 때, 반경방향 방향으로만 정교한 이차원 MOC 방식을 사용하고 축방향으로는 다소 근사적인 해석방식을 사용하는 것이 충분한 타당성이 있다. 이러한 2D/1D 분리 방식은 삼차원 중성자 수송방정식에 대한 횡방향 적분을 통해 유도할 수 있는데, 이 과정에서 횡방향 중성자 누설항이 도입되고 반경 방향(2D)과 축방향 (1D)에 대한 각각의 중성자 균형 방정식은 중성자 누설항을 통해 연계된다. DeCART에는 바로 이러한 횡방향 적분에 기반한 2D/1D 분리 방식을 도입하여 근사적인 삼차원 전노심 계산방식을 구현한다. 2D/1D 분리에 의한 근사적 삼차원 수송해석은 DeCART 뿐만 아니라 최근에 다른 연구자들에[3,4] 의해서도 시도되고 있으나 구체적인 구현방식에서는 다소 차이가 있다. DeCART의 경우, 노심을 다수의 평면으로 분할하고 각 평면별로 MOC를 적용하여 중성자속의 반경방향 의존성을 해석하고, 축방향으로는 각 연료봉 별로 일차원 확산 NEM (Nodal Expansion Method) 계산을 통해 축방향 의존성을 해석하는 방식을 사용한다.

횡방향 누설을 통해 연계되어 있는 2D/1D 지배 방정식은 교차 반복 계산을 통해 점진적으로 수렴하는 해를 구할 수 있다. 그러나 전 문제 영역에서 전체적인 중성자 균형을 일시에 조절하는 소격격자 유한차분법(Coarse Mesh Finite Difference, CMFD)을 도입할 경우 수렴성을 획기적으로 향상시킬 수 있다.[2] 이런 관점에서 DeCART에서는 삼차원 CMFD틀 안에서 이차원 MOC 계산과 일차원 NEM 계산을 조율하고 결과를 활용하는 방법을 사용한다. 아래 2절에서는 이차원 MOC, 일차원 NEM, 삼차원 CMFD로 구성된 DeCART의 특징적인 근사적 삼차원 전노심 계산 방식을 보다 상세히 설명한다. 이러한 DeCART 계산방식의 타당성 및 효율성 검증을 위해, 제 3절에서는 비균질 노심에 대한 삼차원 수송계산의 벤치마크로서 최근에 구성된 C5G7 MOX문제를 대상으로, 원래의 삼차원 문제와 축방향 비균질성을 높이기 위해 추가적으로 구성한 제어봉 삽입 문제를 분석하고 몬테칼로 정해와 비교한다.

2. 2D MOC와 1D NEM 기반의 3D CMFD 계산 방식

CMFD 방식을 사용하면 등가이론의 동적 구현이 가능해진다.[2] 다시 말하면, 한 비균질 노심에 대해 구해진 정해를 영역별로 균질화한 문제의 해로써 재현할 수 있다는 것이다. 이런 동적 등가

이론의 구현에는 반응률과 누설율을 보존할 수 있도록 영역별 균질화 군정수와 영역 경계면에서의 중성자류 보정계수를 적절히 결정하는 것이 필요하다. 삼차원 영역을 다수의 평면으로 분할하여 2D/1D 분리 방식을 적용할 경우, 2D MOC계산을 통해 단위 봉세포 내부의 비균질성 - 즉, 연료 소자, 간극, 피복관, 냉각재 등 - 그대로 유지한 평면 형상에 대해 비균질해를 구할 수 있고 이로부터 단위 봉세포 내부를 균질화하여 구해진 균질화 군정수를 결정할 수 있다. 이렇게 각 평면에 대해 단위 봉세포별 균질화 군정수를 생산하고 이를 바탕으로 축방향 일차원 계산과 삼차원 CMFD계산을 수행하는 방법이 DeCART에 구현되어 있다. 아래에서는 먼저 이차원 MOC 문제를 형성하고 이의 해로부터 봉세포별 균질화 군정수와 영역 경계면에서의 반경방향 중성자류 보정계수를 구하는 방법으로부터 시작하여 축방향 중성자류 보정계수를 구하기 위한 일차원 NEM 계산 방법, 봉세포 단위로 전체의 출력 분포를 구하기 위한 삼차원 CMFD 계산 방법을 설명한다.

2.1 이차원 MOC 고정 선원 문제

삼차원 노심 영역을 다수의 계산평면으로 분할하고 그 중 k-번째 평면을 상정하자. 이 평면의 높이를 h_k 라 하고 그 평면에 대해 각분할된 (분할각은 첨자 m으로 표시) 삼차원 중성자 수송방정식을 축방향으로 적분하면 다음과 같은 이차원 수송방정식이 구해진다.

$$e_m \frac{\partial \bar{j}_m^k(x,y)}{\partial x} + h_m \frac{\partial \bar{j}_m^k(x,y)}{\partial y} + \Sigma_t^k(x,y)\bar{j}_m^k(x,y) = \overline{Q}_m^k(x,y) - L_{z,k}^m(x,y) \qquad (1)$$

여기서, bar 기호는 평면에서의 축방향 평균임을 나타내는 반면, 축방향 누설항은 아래와 같이 해당평면의 상부(첨자 t) 및 하부(첨자 b) 경계면에서의 각중성자속의 차로써 나타난다.

$$L_{z,k}^m(x,y) = \frac{m_m}{h_k}\left(j_m^{t,k}(x,y) - j_m^{b,k}(x,y)\right) \qquad (2)$$

식 (2)의 축방향 누설항을 미리 알고 있다고 가정하면, 식 (1)은 고정 선원 문제가 된다. 여기서 축방향 중성자 누설항은 각에 대한 의존성을 갖고 있는데 이를 정확히 알 경우 식 (1)의 해는 축방향 평균값에 관한한 원래의 삼차원 각분할 중성자 수송방정식의 해와 동일해 질 수 있다. 그러나 일반적으로 중성자 누설항을 미리 정확히 알 수 없으므로 이 항에 대한 특정한 근사를 도입해야 한다.

DeCART에서는 축방향 누설항을 축방향에 대한 일차원 NEM 확산 계산 결과로부터 구한다. 이 경우 두 가지의 근사가 초래되는데, 첫째는 누설항의 각의존성이 단순화 된다는 점이고, 두번째는 봉세포내부에서는 누설항의 위치의존성이 무시된다는 점이다. 중성자속의 각의존성에 관한한 확산 계산 결과로부터 얻을 수 있는 정보는 평면 경계면에서의 순중성자류와 중성자속을 사용하여 구한 P_1 근사식 뿐이다. 즉,

$$j_{m,k}^t = \frac{1}{2}f_k^t + \frac{3}{2}m_m J_z^{t,k} \qquad (3)$$

비록 근사적이긴 하더라도 각의존성을 고려하는 한, 식 (2)에 의한 중성자 누설 선원은 비등방성을 갖는다. 따라서 식 (1)의 해를 구하기 위한 이차원 MOC 계산에서는 통상적인 이차원 MOC 계산과는 달리 방위각에 대한 비대칭성을 고려한다.

2.2 균질화 군정수 및 중성자류 보정계수

식 (2)에 대한 이차원 MOC은 그림 1의 좌측에 예시된 바와 같은 실제 형상을 그대로 유지한 채 수행한다. 이 MOC 계산의 결과로서 봉세포 내부에 지정된 각 균일 선원 영역에서의 중성자속뿐만 아니라 각 세포 경계면을 통과하는 평균 순중성자류가 결정되고 이로부터, CMFD 계산과 일차원 NEM 계산에 사용될 균질화 군정수와 중정자류 보정계수를 다음과 같이 구한다.

$$\bar{\Sigma}^{i}_{ag} = \frac{\sum_{l\in i} V^{l}\Sigma^{l}_{ag} f^{l}_{g}}{\bar{f}^{i}_{g} V^{i}} \qquad (4)$$

$$\hat{D}^{i,s}_{g} = -\frac{\bar{J}^{i,s}_{g} + \tilde{D}^{i}_{g}\left(\bar{f}^{i,s}_{g} - \bar{f}^{i}_{g}\right)}{\bar{f}^{i,s}_{g} + \bar{f}^{i}_{g}} \qquad (5)$$

여기서 첨자 l은 i번째 세포에 속한 균일 선원 영역 번호를 말하고 $\tilde{D}$는 균질화된 확산 계수와 세포 크기로만 결정된 중성자류 연계계수, bar 기호로 표시된 값들은 세포 평균값을 지칭한다.

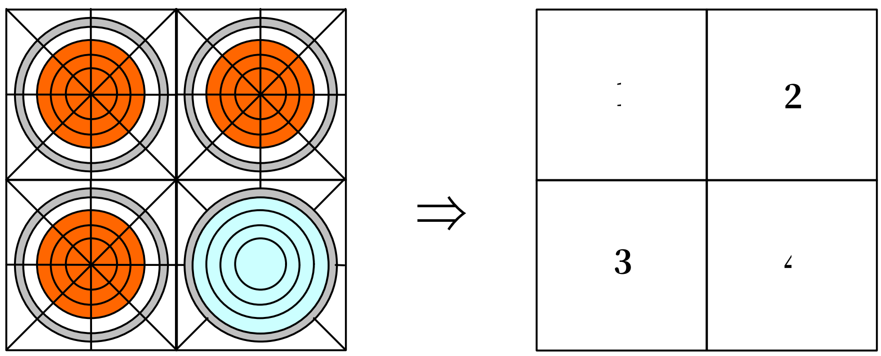

그림 1. MOC 계산용 세포내 격자 구조 및 균질화 세포

식 (4)에 의한 균질화 군정수 및 중성자류 보정계수를 사용하여 CMFD용 중성자 균형 방정식을 구성하여 해를 구할 경우, 세포 평균 중성자속에 관한 MOC 계산과 동일한 결과가 얻어진다.

2.3 일차원 NEM 계산 방법

균질화된 세포격자를 상정하면 한 계산 평면은 사각 기둥의 집합으로 구성된다. 각 사각기둥의 밑면은 한 세포를 이루고 기둥의 높이는 평면의 높이와 동일하다. 이 사각 기둥으로 이루어진 한 계산 격자를 대상으로 삼차원 중성자 확산 방정식을 반경 방향으로 적분하면 반경방향 누설항을 고정 선원으로 하는 축방향의 일차원 중성자 확산방정식이 유도된다. 이때 반경 방향 누설항을 CMFD 계산 결과로부터 결정한다면 각 사각 기둥에 대한 일차원 중성자 확산 방정식은 고정 선원 문제가 된다. 한 연료봉은 사각 기둥이 적층된 형태로 구성되고 사각 기둥의 양 경계면에서는 중성자속 및 중성자류의 연속 조건이 성립되어야 하므로 한 연료봉에 대한 축방향 중성자속 분포는 일련의 사각 기둥에 대한 동시해를 구함으로써 결정할 수 있다. DeCART는 사각 기둥내 축방향 중성자 분포를 통상적인 NEM방식을 적용하여 근사하고 두 연속 조건이외에

노드별 중성자 균형 조건과, 1차 및 2차 모먼트 균형 조건을 적용하여 중성자속 분포를 결정한다. 이 때 설정되는 미지수는 각 노드별 평균 중성자속과 1차 및 2차 평균 중성자속 모먼트, 그리고 노드 경계면에서의 중성자속이지만, 중성자류의 경계조건으로 형성된 최종 연립방정식은 경계면 중성자속만을 미지수로 하고 계수 행렬은 삼중 대각행렬 형태가 되도록 한다. 이 삼중 대각 행렬식은 직접소거법으로 동시해를 구한다. 평면의 높이가 높을 경우, 즉 일차원 노드의 크기가 클 경우 발생할 수 있는 NEM 방식의 오차를 배제하기 위해 DeCART는 일차원 노드를 세분하여 NEM을 방식을 적용할 수 있도록 되어 있다. 이 NEM 확산 계산에 사용할 확산 계수는 식 (4)로부터 구한 수송단면적 (transport cross section)의 역수로부터 결정한다. 일차원 NEM 계산의 최종 결과는 각 평면 경계면에서의 중성자속과 축방향 중성자류로서 이는 CMFD 계산에 사용될 축방향 중성자류 보정계수와 MOC 계산에 사용될 축방향 누설항을 결정하는 데 사용된다.

2.4 삼차원 CMFD 계산 방법

CMFD 계산은 사각 기둥의 형태로 형성된 계산 노드 내 평균 중성자속의 삼차원 분포와 전체 노심에서의 중성자 균형을 고려한 고유치를 결정함을 목적으로 한다. 이 계산에서는 각 계산 노드별 중성자 균형 방정식을 구성하기 위해 다음과 같은 중성자류와 노드 평균 중성자속 관계식을 사용한다.

$$\bar{J}_g^{i,s} = -\tilde{D}_g^{i,s}\left(\bar{f}_g^{i,s} - \bar{f}_g^{i}\right) - \hat{D}_g^{i,s}\left(\bar{f}_g^{i,s} + \bar{f}_g^{i}\right) \tag{6}$$

여기서 $\hat{D}$ 은 반경 방향과 축방향에 대해 각각 이차원 MOC와 일차원 NEM 계산을 통해 결정한 중성자류 보정계수이다. 이와는 별도로 중성자 균형방정식에 사용될 노드의 군정수는 식 (4)로부터 구한다.

이렇게 형성된 CMFD 중성자 균형방정식은 다군 미세 격자 유한 차분에 기반을 둔 선형계를 구성한다. 따라서 이 선형계의 계수행렬은 대각원소 지배성(diagonal dominance)이 취약하므로 효과적인 선형계 해법을 도입할 필요가 있다. 이런 이유로 DeCART에는 BILU3D 선처리 (Preconditioning) 방식을[5] 적용한 Krylov Subspace 방법을 사용한다. 한편, 에너지군 수가 수십군 이상으로 아주 클 경우 다군 미세 격자 문제 자체가 방대한 계산양을 요하므로 DeCART에는 2군 계산을 통해 다군 계산을 가속하는 방식을 사용한다.

CMFD 계산의 결과는 단지 노드 평균 중성자속 분포만을 제공한다. MOC 계산은 각 세포내 균일 선원 영역별로 핵분열 선원과 산란 선원 정보를 입력으로 필요로 하는데 이를 결정하기 위해 이전 MOC 계산에서 결정된 세포내 중성자속 분포의 형상에 CMFD 계산으로부터 새로이 구해진 세포 평균 중성자속과 이전 MOC 계산의 세포 평균 중성자속의 비를 곱하는 방식을 적용한다. 이렇게 선원 정보가 결정된 후 이차원 MOC 계산을 재수행하면 균질화 군정수, 반경방향 중성자류 보정계수, 세포내 중성자속 분포 등이 새로이 결정된다. 이 때 MOC 계산은 각 에너지 군별로 한 두 번만의 선추적 계산만을 통해 완료하여 부분적으로 수렴된 해만을 구하도록 한다. 그림 2는 이 절에서 설명한 DeCART에서의 삼차원 수송 계산 과정을 총괄하여 설명한다.

3. C5G7 벤치마크와 제어봉 삽입상태 해석

DeCART에 구현된 근사적 삼차원 전노심 수송 계산 방식은 축방향 의존성 처리를 확산 계산을 통해 구현했다는 점에서 취약점을 가질 수 있다. 한편, 효율적인 전노심 계산을 위해 CMFD 방식의 도입을 했지만 이 방식이 얼마나 효율적이고 안정적인가를 평가할 필요가 있다. 이를 위해

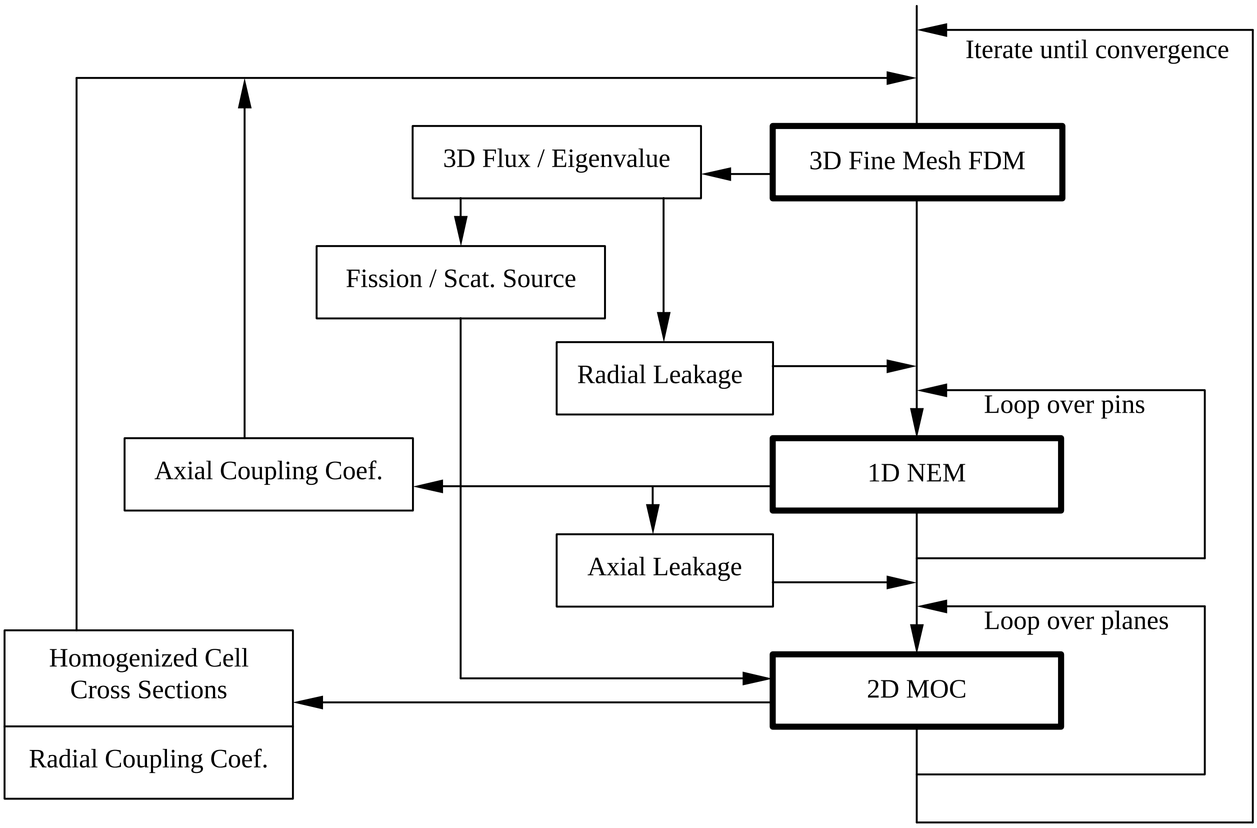

그림 2. DeCART 삼차원 계산 과정

비균질 삼차원 전노심 수송해석 방법 검증용으로 최근에 제시된 C5G7 MOX 벤치마크 문제를[7] 기반으로 DeCART의 성능을 시험하였다. 원래 이 문제는 축방향 비균질성이 거의 나타나지 않은 문제이므로 원 문제와 더불어 제어봉 부분 삽입을 통해 축방향 비균질성을 증가시킨 문제를 해석하였다.

3.1 C5G7 문제와 제어봉 삽입을 통한 변형

C5G7문제는 그림 3과 같이 UO_2 및 MOX 핵연료 집합체로 이루어진 소형노심에 대해 각 조성 물질별로 7군 거시군정수를 지정하여 사전 균질화 과정 없이 중성자속 분포와 고유치를 계산하는 문제이다. 이 문제에 대한 정해는 동일한 7군 군정수를 사용한 MCNP 계산을 통해 구해져 있다. 원래 문제와는 별도로 축방향 비균질성을 증가시키기 위해 우선 노심의 유효높이를 반으로 줄이고, 중앙에 위치한 UO_2집합체에 제어봉을 삽입하여 변형한 노심을 구성했다. 변형된 노심은 유효 노심은 21.42 cm 의 두께를 갖는 9개의 평면으로 이루어 진다. 이 노심에서 각각 상부 4개와 6개의 평면에 (상부 반사체 영역을 포함) 제어봉을 삽입하여 두 가지 제어봉 삽입 형상을 설정하였다. 제어봉의 물질의 군정수는 표1에 주어진 자료를[8] 사용했다. 각 제어봉 삽입 형상에 대한 정해는 역시 MCNP 계산을 통해 직접 생산하였다. MCNP 계산은 1/8 노심을 대상으로 하고 200000 개씩 1000 사이클을 수행하도록 했다.

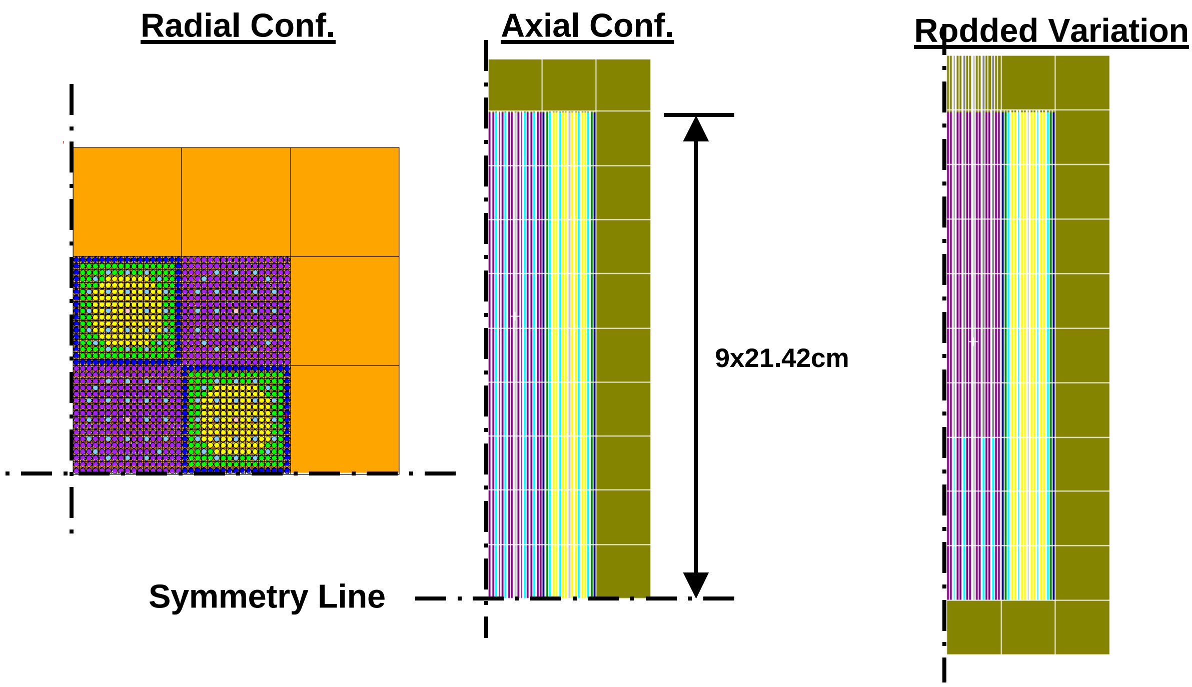

그림 3. C5G7 원 노심 구조와 제어봉 삽입을 통한 변형

표 1. C5G7 제어봉 삽입 변형 문제에 사용된 제어봉 흡수 군정수 및 산란 행렬

Gr.	Abs.	to 1	to 2	to 3	to 4	to 5	to 6	to 7
1	1.70490E-03	1.70563E-01	4.44012E-02	9.83670E-05	1.27786E-07			
2	8.36224E-03		4.71050E-01	6.85480E-04	3.91395E-10			
3	8.37901E-02			8.01859E-01	7.20132E-04			
4	3.97797E-01				5.70752E-01	1.46015E-03		
5	6.98763E-01				6.55562E-05	2.07838E-01	3.81486E-03	3.69760E-09
6	9.29508E-01					1.02427E-03	2.02465E-01	4.75290E-03
7	1.17836E+00						3.53043E-03	6.58597E-01

3.2 계산 결과의 정확도

MOC 계산에서 정확도는 선추적시 사용될 추적선의 방위각 (Polar Angle), 방향각 (Azimuthal Angle), 간격등에 의해 영향을 받는다. C5G7 2차원 문제에 있어서 선추적 인자에 대한 민감도 분석 결과 충분한 정확도를 줄 선추적 인자는 90°당 방위각 및 방향각 수, 각각 4와 8, 추적선간 간격을 0.2 mm로 결정하였다.[6] 이러한 선추적 인자를 사용할 경우 구해진, 이차원 및 삼차원 C5G7 문제에 대한 DeCART의 계산 오차는 표 2에 나타난 바와 같다. 이 결과는 DeCART의 계산 방식이 고유치 측면이나 출력분포 측면에서 매우 우수함을 확인시켜 준다.

표 2. C5G7 문제에 대한 DECART 계산 오차

Case	Eigenvalue Error (Ref.) pcm	Max[1] Pin Power Error,%	RMS Pin Power Error,%
2D	5 (1.18655)	1.84	0.46
3D	4 (1.18381)	1.89	0.50

[1] 축방향으로 적분된 봉출력 분포의 상대 오차

그림 4에는 제어봉 삽입 상태에 대한 DeCART 와 MCNP 결과의 축방향 출력분포가 비교되어 있다. 이 결과는 제어봉 비삽입 상태에서와 동일한 선추적 인자를 사용하고 평면 높이를 21.42cm 로 설정하여 구했다. 일견 이 그림은 아주 심하게 출력 분포가 편향된 상태에서도 DeCART의 결과가 MCNP 결과와 잘 일치하고 있음을 보여준다. 그러나 표 3에 나타난 좀 더 상세한 비교 결과를 보면 DeCART 계산에서 사용된 평면의 두께가 20cm 이상일 경우, 국부적 출력 분포의 오차가 5% 이상이 되어 정확성에 다소 문제가 있음을 알 수 있다.

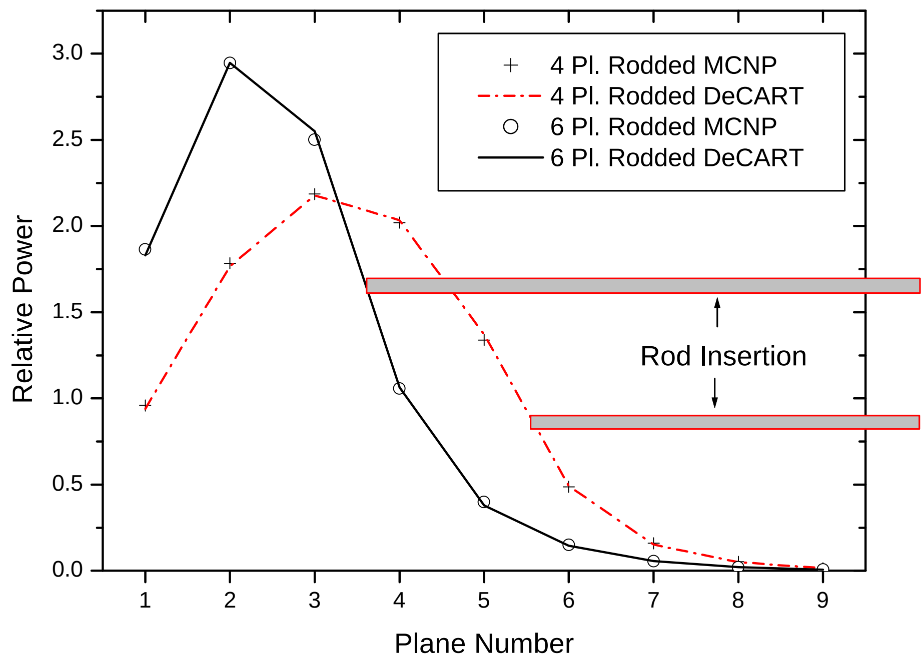

그림 4. 제어봉 삽입시의 노심 축방향 출력분포 비교

두 가지 제어봉 삽입 형상에 대한 계산 결과를 비교하여 보면, 제어봉이 깊게 삽입되어 출력 분포가 심하게 하부로 편향된 상태(축방향 첨두 출력 인자 약 3.0)에 대해서의 오차가 더 큼을 확인할 수 있다. 6개 평면 제어봉 삽입 상태에서, 평면 높이가 21.42 cm 인 경우 오차는 10%를 상회하여 전노심 계산 취지에 부합하지 않는 결과가 나타난다. 그러나 평면 높이를 반으로 줄일 경우 출력 분포의 오차는 상당히 감소하여 최대 3%선이 된다. 반면, 고유치 오차는 약 100 pcm 선으로 다소 증가한다. 평면 높이를 한 번 더 반으로 줄일 경우에는 더 이상 개선 효과가 나타나지 않는다. 이렇게 오차가 더 이상 감소하지 않는 것은 축방향 의존성 처리에 도입된 확산

근사에 의한 오차의 한계에 봉착했기 때문이라고 판단된다. 그러나 그러한 한계에도 불구하고 출력분포가 아주 심하게 편향된 상태(삼차원 첨두 출력인자 약 7.0)에 대해서 고유치 계산오차 약 100 pcm, 출력 밀도 오차 최대 오차 약 4%의 결과는 축방향 확산 근사로 인한 오차가 그리 심각하지 않음을 확인시켜 준다.

표 3. 제어봉 삽입 경우에 대한 DECART 계산 평면 높이에 따른 계산 오차

od Conf. (Reference Eigenvalue)	Plane Thick. cm	Eigenvalue Error pcm	RMS Error,%	Max[1] Abs.	Max Rel. Error,%	3D Pin Peaking Error, %	2D Pin Peaking Error, %
4Pl. Rodded (1.16135)	21.42	-30	2.00	0.102	4.96	1.09	0.26
	10.71	24	0.89	0.048	3.62	0.85	0.45
6 Pl. Rodded (1.13277)	21.42	-47	2.82	0.162	14.1	-0.05	0.11
	10.71	91	1.58	0.099	3.04	0.89	0.92
	5.355	116	1.70	0.096	3.97	1.02	0.93

[1] 노심 내 평균 출력 밀도가 1.0으로 설정된 상태에서의 최대 오차의 절대값

3.3 수렴 성능과 계산 시간

MOC 방식의 구현을 위한 선추적 계산은 추적선의 조밀성으로 인해 막대한 계산시간을 요한다. 따라서, MOC를 사용한 전노심 계산에서는 MOC 계산 횟수를 줄이는 것이 신속한 계산에 필수적이다. 반면, 선추적 계산은 자연적으로 병렬 처리가 가능하기 때문에 대용량 병렬컴퓨터의 활용성을 높일 수 있다. DeCART 코드는 현재 각 평면에 대한 선추적 계산을 병렬로 수행하는 방식으로 병렬처리를 하도록 되어 있다.

DeCART의 대표적 수렴 성능과 계산 시간은 표 4에 나타나 있다. 이 표에 나타난 대로 DeCART에서의 MOC 계산 횟수는 대략 10회이다. MOC 계산 횟수는 출력 분포의 편향 정도가 줄어 들면 감소하고 표6의 경우는 비교적 편향이 심한 경우의 예이므로 거의 모든 경우 MOC 계산 횟수는 10회 이내로 유지된다. 이렇게 MOC 계산 횟수가 감소하는 것은 CMFD 방식의 효과성에 기인한다. 그러나 CMFD 계산 자체에 걸린 시간은 전체 계산시간에 비해 아주 경미하므로, CMFD 계산 모듈을 병렬처리화 하지 않고 선추적 모듈의 병렬 처리만으로도 85% 이상의 효율을 가지고 Speedup을 달성할 수 있다.

표 4. 6 평면 제어봉 삽입 문제에 대한 DECART 계산 시간 및 모듈별 계산 횟수

		2G CMFD	MG CMFD	NEM	MOC	총합
계산 횟수		75	50	10	10	
CPU[1] 수 및 시간 (초)	1	38.4	75.5	54.5	22149	22338
	11	40.3	75.5	55.0	2184	2377
Speedup		-	-	-	9.8	9.4

[1] 1.8 GHz Pentium 4

4. 결론

DeCART의 코드에는 효율적인 삼차원 전노심 수송계산을 위해 이차원 MOC와 일차원 NEM 계산 커널에 기반한 CMFD 계산 방식이 구현되어 있다. 이 방식에서 이차원 MOC 계산은 각 계산 평면별로 봉세포에 대한 균질화 군정수 및 반경 방향 중성자류 보정 인자를 생산해 주고, 일차원 NEM 계산은 축방향 중성자류 보정 인자를 생산해 주는 반면, 최종 삼차원 출력 분포와 및 고유치는 삼차원 CMFD 계산을 통해 구해진다는 특징이 있다. 반경 방향과 축방향 의존성의 이러한 분리 처리에도 불구하고 DeCART 삼차원 전노심 계산은 안정적이고 신속하게 수렴한다. CMFD 방식의 가장 큰 장점은 수렴에 필요한 MOC 계산 횟수를 약 10회 내외로 대폭 감소시켜 주는 데 있다. 정확성에 관한한 축방향 비균질성에 따라 정확도가 변하는 경향이 있지만 제어봉 삽입으로 아주 심하게 편향된 출력 분포를 갖는 노심에서도 국부 출력 분포의 예측에 있어서 약 3% 내외의 오차가 발생하는 것으로 판단할 때, 실제적 노심 해석에는 문제가 없다고 보인다. 정확성을 제고하기 위해서는 축방향 확산 계산 모듈을 수송 계산 모듈로 대체할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부가 수행하고 있는 선진기술확보사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. J. Y. Cho et al., “Cell Based CMFD Formulation for Acceleration of Whole-core Method of Characteristics Calculation, ” Journal of the Korean Nuclear Society., Vol. 34. No. 3, 2002.
2. H.G.Joo et al., “Dynamic Implementation of the Equivalence Theory in the Heterogeneous Whole Core Transport Calculation, ” PHYSOR 2002, Seoul, Korea, Oct. 7-10, 2002.
3. N. Z. Cho, G. S. Lee and C. J. Park, “Fusion of Method of Characteristics and Nodal Method for 3-D Whole Core Transport Calculation, ” *Trans. Am. Nucl. Soc.,* 86, 322 (2002).
4. T. Takeda, *et al.,* “Development of 3-D FBR Heterogeneous Core Calculation Method based on Characteristics Method,” *Proc. Kor. Nucl. Soc.Reac. Phys. 3-rd Joint Korea Japan Session*, Kwangju, Korea, May 2002.
5. H. G. Joo and T. J. Downar, ”An Incomplete Domain Decomposition Preconditioning Method for Nonlinear Nodal Kinetics Calculation, ” *Nucl. Sci. Eng.,* 123, 403-414 (1996)
6. J. Y. Cho et al., “Three-Dimensional Heterogeneous Whole Core Transport Calculation Employing Planar MOC Solutions,” Transaction Am. Nucl. Soc., Nov. 17-21, 2002.(to be published)
7. E. E. Lewis, *et al.,* “Benchmark Specification for Deterministic 2-D/3-D MOX fuel Assembly Transport Calculations without Spatial Homogenization (C5G7MOX),” NEA/NSC/DOC(2001)4.
8. M. A. Smith, “Monte Carlo Solution to the C5G7MOX Benchmark Problem,” June 2002, *to be published by OECD NEA.*
9. M. A. Smith, Argonne National Lab, Personal Communication, July 3, 2002.