

일차원 수송계산을 통한 DeCART 코드의 축방향 확산 해법 개선

Improvement of the Axial Diffusion Solver of DeCART Employing 1-D Transport Solution

김하용, 조진영, 주한규, 이정찬, 장문희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

DeCART 코드는 3차원 중성자 수송방정식을 직접 푸는 대신 횡방향 중성자 누설 연계 2차원 중성자 수송계산과 축방향 중성자 확산계산을 통해 근사적인 3차원 노심의 해를 구한다. 이 논문에서는 이러한 DeCART 코드의 해법에 사용되는 근사방식 중, 중성자 확산계수 및 셀 균질화에 관련된 근사를 고찰하고, 이들 근사에 의한 오차를 줄여주는 방안을 모색한다. 먼저 DeCART 코드에서는 중성자 확산계수를 단순히 수송단면적으로부터 구하는데, 이에 의한 오차를 줄여주기 위한 방안으로 축방향 1-D 중성자 수송계산에 의한 중성자류를 보존하는 확산계수 계산 방법을 제시한다. 셀 균질화에 적용된 근사는 반경방향으로 균질화된 상수들이 축방향 위치에 무관하게 사용된다는 것으로, 이의 효과를 줄여주는 방안으로는 상대적으로 축방향 위치 의존도가 높은 반사체 부근의 평면 크기를 줄여주는 방법을 제시한다. 이들 방법의 개선 효과는 3차원 VENUS-2 MOX 임계실험 문제를 통해 평가한다. 이 평가에 따르면, 노심 k_{eff} 값 보정효과는 확산계수 보정방법이 약 280 pcm 정도로, 셀 균질화 효과는 약 100 pcm 정도로 나타나, 두 방법 모두를 적용한 경우에는 약 380 pcm 정도의 보정효과가 있으나, 출력분포에 대한 영향은 미미한 것으로 나타났다.

Abstract

Instead of the 3-D transport equation, DeCART solves a transverse leakage coupled radial transport and axial diffusion equations to obtain an approximate 3-D transport solution. In this paper, two of the approximations contained in DeCART related with diffusion constants and cell homogenization are examined, and practical improvement schemes are suggested. To overcome the diffusion approximation used in the axial

direction, a current conservation scheme based on the axial 1-D transport solution is introduced. To overcome the cell homogenization effect, a plane height refinement scheme is employed near the axial core/reflector boundary where homogenization constants vary significantly in the axial direction within the plane. These schemes are evaluated by solving the 3-D VENUS-2 MOX core benchmark. The current conservation and plane height refinement schemes bring about 280 pcm and 100 pcm improvement in k-eff, respectively, and about 390 pcm in total, but trivial effects in the power distribution.

1. 서론

DeCART 코드¹는 3차원 중성자 수송방정식을 직접 푸는 대신, 축방향으로의 중성자 누설항을 포함한 2차원 중성자 수송계산과 반경방향으로의 중성자 누설항을 포함한 축방향으로의 중성자 확산계산을 통해 근사적인 3차원 노심의 해를 구한다. 따라서 DeCART 코드의 해법에는 여러 가지 근사들이 포함되어 있다. 이 논문에서는 이러한 근사들 중 DeCART 코드의 해에 중대한 영향을 미치는 몇 가지를 고찰함으로써 이들 근사들에 의한 영향을 줄여주는 방안을 모색한다.

DeCART 코드에 내재된 가장 큰 가정 중의 하나는 축방향에 대해서 중성자 확산 가정을 적용한다는 것이다. 이는 중성자 확산 가정이 어느 정도 잘 적용되는, 축방향으로의 물질적 변화가 적거나, 노심 유효높이가 커서 중성자 누설이 크게 중요하지 않은 문제들에 대해서는 DeCART로부터 구한 해의 정확도가 높으나, 가연성 독봉의 Cutback이나, 제어봉이 삽입된 경우와 같이 축방향으로의 물질적 변화가 심한 경우나, 임계실험 문제와 같이 노심 유효 높이가 작아 축방향으로의 중성자 누설이 해에 중대한 영향을 미치는 경우에는 해의 정확도가 떨어질 수밖에 없다. 따라서 DeCART 코드는 중성자 확산 가정과 관련해서 해의 신뢰도를 높이기 위한 노력이 필수적이라고 할 수 있다.

DeCART 코드의 또다른 특징은 횡방향 중성자 누설 연계방정식을 푼다는 것이다. 즉, 2차원 MOC 계산시에는 축방향으로의 중성자 누설을 중성자원 항으로 처리하여 계산하게 된다. 이때, 평면의 크기가 작아져 축방향으로의 중성자 누설이 2차원 MOC 계산의 중성자원에 중대한 영향을 미치게 되면 연계방정식의 반복계산 수렴 불안정성을 초래하게 된다. 따라서 DeCART 코드에 의해 안정적인 해를 구하기 위해서는 평면의 높이를 크게 하여 횡방향으로의 중성자 누설에 의한 수렴 불안정성 요인을 줄여주어야 한다. 그러나 평면의 높이를 크게 하면, 셀별 균질화시 사용되는 셀 내 구역별 중성자속 분포의 축방향 변화를 고려할 수 없게 되어, 해의 정확도를 떨어뜨리게 된다. 따라서, DeCART 코드는 수렴성이 확보되는 한도 내에서 평면내 축방향으로의 셀별 균질화 상수 변화를 고려하기 위한 노력이 필요하다고 할 수 있다.

이 연구에서는 DeCART 코드의 여러 가정들 중, 이들 두 가정을 고찰하고, 이들에 의

한 영향을 감쇄하는 방안을 모색한다. 이 논문의 제 2절에서는 중성자 확산계수에 기인한 오차를 감쇄하는 방안으로, 중성자 수송효과를 확산계수에 보정하는 중성자류 보존 확산계수 계산 방법을 제시하고, 그 효과를 검토한다. 제 3절에서는 셀 균질화 상수에 의한 계산 불확실도를 고찰하고, 그 영향을 최소화하기 위한 방안을 제시한다. 그리고 제 4장에서는 이들 두 방안을 노심 유효 높이가 50 cm에 불과한 3차원 VENUS-2 MOX 장전 문제²를 풀어, 이 연구에서 제시한 중성자 확산계수 보정방안과 셀 균질화 상수 보정방안의 효과를 검토한다.

2. 중성자 확산계수

DeCART 코드에서는 중성자 확산계수를 P1 근사와 구역별 중성자속 및 구역별 중성자 수송 핵단면적으로부터 아래와 같은 방법으로 구하게 된다.

$$D \approx \frac{1}{3\Sigma_{tr}^i} = \frac{\sum_{r \in i} \phi^r}{\sum_{r \in i} \Sigma_{tr} \phi^r}. \quad (1)$$

여기서 i 는 셀별 균질화 계산이 수행되는 셀 번호를, r 은 셀 i 내 구역을 나타낸다. 중성자 확산계수 계산에는 먼저 셀별 균질화 방법에 의해 수송 핵단면적 균질화가 수행되고, 이로부터 P1 근사에 의한 확산계수가 계산된다.

위의 식(1)과 같은 방법으로 계산된 중성자 확산계수는 축방향 중성자 확산계수에 사용되어 축방향으로의 중성자 누설을 결정하게 된다. 그러나 이와 같은 방법으로 계산된 중성자 확산계수는 축방향으로의 중성자 수송계산의 영향을 고려할 수 없어 P1 근사가 적용되기 어려운 문제에서는 그 정확도가 떨어진다는 단점이 있다. 따라서 이 연구에서는 축방향으로의 1-D 중성자 수송계산을 수행하고 그 효과를 중성자 확산계수에 포함시켜 주는 방법을 도입한다.

만약, 중성자 수송계산에 의해 축방향으로의 중성자류 및 중성자속의 변화량을 구할 수 있다면, 중성자 수송계산의 중성자류를 보존하는 중성자 확산계수는 아래와 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$J^i(z) = -D(z) \nabla \phi^i(z). \quad (2)$$

위의 식을 평면 k 에 대해 축방향으로 적분하면, 아래와 같은 식을 구할 수 있다.

$$\int_{h_z^k} J^i(z) dz = D^{i,k}(\phi^{i,k,T} - \phi^{i,k,B}). \quad (3)$$

위의 식은 축방향으로의 중성자류 분포와 평면 k 의 윗부분 및 아랫부분의 중성자속을 알면, 평면 k 의 축방향 중성자류를 보존하는 중성자 확산계수를 구할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 평면 k 의 축방향으로의 중성자속 및 중성자류 분포를 얼마나 정확하게 구할 것인가가 식 (3)으로부터 중성자 확산계수를 계산하는 데 있어 주요 관점이 된다. 축방향으로의 정확한 중성자속 및 중성자류 분포는 3차원 중성자 수송계산을 수행하면 알 수 있다. 그러나 3차원 중성자 수송계산은 DeCART 코드에서 추구하는 바가 아니기 때문에, 이 연구에서는 축방향으로의 중성자류 및 중성자속 분포를 구하는 근사적인 방법으로 1-D 중성자 수송계산 방법을 도입하기로 한다.

그림 1은 1-D 중성자 수송계산을 위한 1-D 모델을 나타낸 것이다. 평면 k 는 여러개의 수송계산용 층으로 나뉘며, 각 층에서의 중성자속은 균일하다고 가정한다. 층별 중성자원은 이전 계산단계에서 구해진 축방향 확산계산의 해를 이용하여 평면내에서 4차 다항식으로 전개한 다음, 이를 각 층에 대해 적분하여 구한다. 층별 중성자원은 에너지군에 대한 반복계산에 의해 수렴시키는 방법도 있으나, 이 연구에서 적용한 확산계산의 해를 이용하여 중성자원을 고정시키는 방법과 비교해 중성자 확산계수에의 영향은 매우 미미한 것으로 조사되었다. 따라서 1-D 중성자 수송계산은 고정선원 문제로부터 축방향 중성자류 및 중성자속 분포를 구하는 데 사용된다.

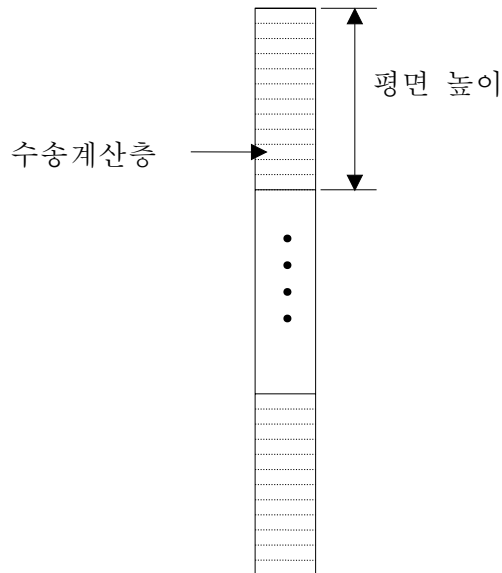


그림 1. 1-D 중성자 수송계산용 모델

그림 2는 노심 유효 높이별, 수송계산용 층의 개수에 따른 k-eff의 차이를 보여준다. 이 그림에서는 수송계산용 층을 50개(층간격: 0.2 cm)로 분할한 경우를 기준으로 하였다. 노심 유효 높이가 300 cm인 경우(30x10 cm)나 100 cm인 경우(10x10 cm)는 평면 1개 전체를 수송계산용 층으로 하여도, 즉 수송계산용 층을 10 cm로 하여 평면높이와 같이 유지하여도 5 pcm 이내의 무시할 만한 오차가 나지만, 유효 높이가 50 cm인 경우(5x10 cm)에는 최소한 5개(층간격: 2 cm) 이상의 수송계산용 층을 사용하여야 층의 개수에 따른 영향이 소멸되며, 1개 층을 사용하는 경우에는 약 25 pcm의 오차가 발생함을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서는 층간격을 0.5 cm 내외로 수송계산용 층간격에 따른 오차발생 요인을 없애기로 한다.

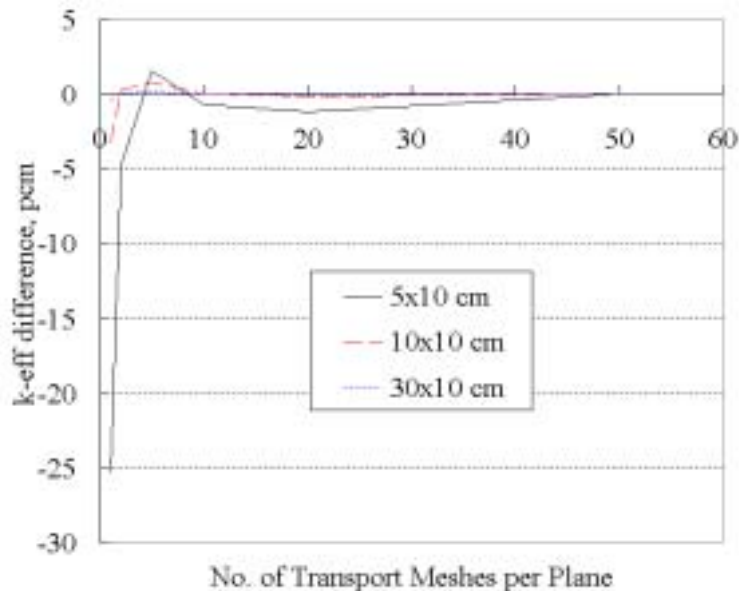


그림 2. 수송계산용 층간격 효과

그림 3은 층간격을 0.5 cm로 고정하고, 중성자 확산계수에 대한 축방향 중성자 수송효과를 노심 유효높이에 따라 나타낸 것이다. 축방향 중성자 수송효과는 식 (3)에 의한 확산계수와 식 (1)에 의한 확산계수를 각각 사용할 경우의 k-eff의 차이로 정량화하였다. 대체로 노심 유효높이가 150 cm 이상인 경우에는 축방향 중성자 수송효과가 매우 미미하여 10 pcm 이하가 됨을 알 수 있으나 노심 유효높이가 작은 경우에는 그 효과가 매우 커서, 노심 높이가 30 cm의 경우에는 700 pcm 이상의 효과가 있음을 알 수 있다. 따라서 DeCART 코드에서는 식 (3)과 같은 중성자 확산계수의 사용이 필수적이라 할 수 있다.

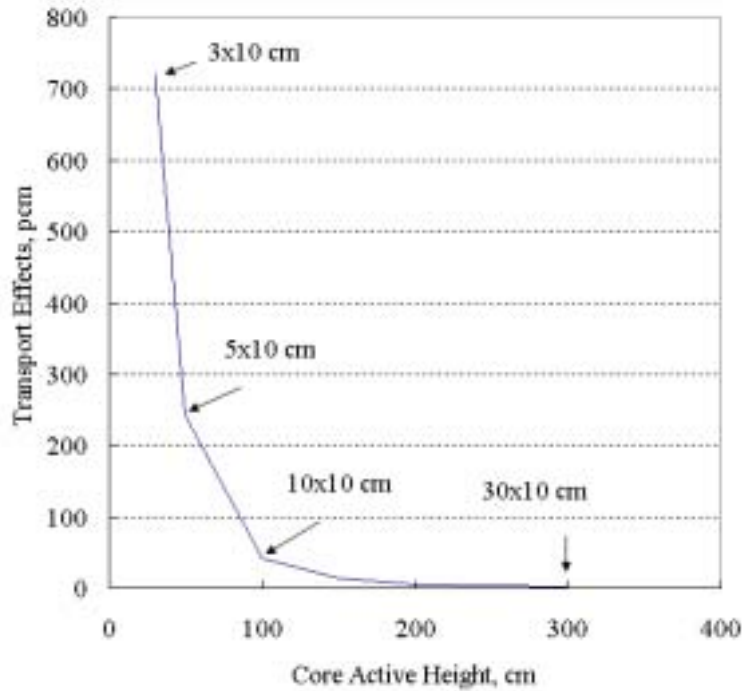


그림 3. 노심유효높이에 따른 확산계수 보정효과

3. 셀 균질화 효과

셀 내 구역별 중성자속 분포는 축방향에 따라 변하게 되며, 따라서 셀 균질화 상수도 축방향 위치에 따라 변하게 된다. 따라서 셀 균질화 상수를 축방향 위치에 무관하게 적용하기 위해서는 축방향으로의 평면의 크기를 작게 하여야 한다. 그러나 평면 크기를 작게 유지하면 과도한 계산시간 뿐만 아니라, 반경방향 해법에 대한 축방향으로의 중성자 누설의 영향이 커져 DeCART 코드와 같이 횡방향 중성자 누설에 의한 반경방향/축방향 연계 방식을 적용하는 해법에는 해의 수렴 불안정성을 초래하게 된다. 따라서 수렴 안정성을 유지하는 범위내에서, 축방향으로의 셀 균질화 상수 변화에 따른 영향을 최소화시키도록 평면의 크기를 적절히 조절하여야 한다.

그림 4는 셀 균질화 효과를 평가하기 위한 2차원 모형을 나타낸 것이다. 이 모형은 3차원 핵연료봉 셀의 축방향 단면으로부터 만든 것으로, 핵연료 봉 뿐만 아니라 Gap 및 피복재도 그대로 구현되어 있으며, 또한 실제 노심에 장전되었을 경우를 고려하여 핵연료 셀의 끝부분에는 반사체가 있다. 그리고 이러한 2차원 모형을 DeCART 코드로 계산하기 위해 하나의 격자셀 내부를 그림과 같이 여러 개의 중성자원 균일영역으로 나눈다.

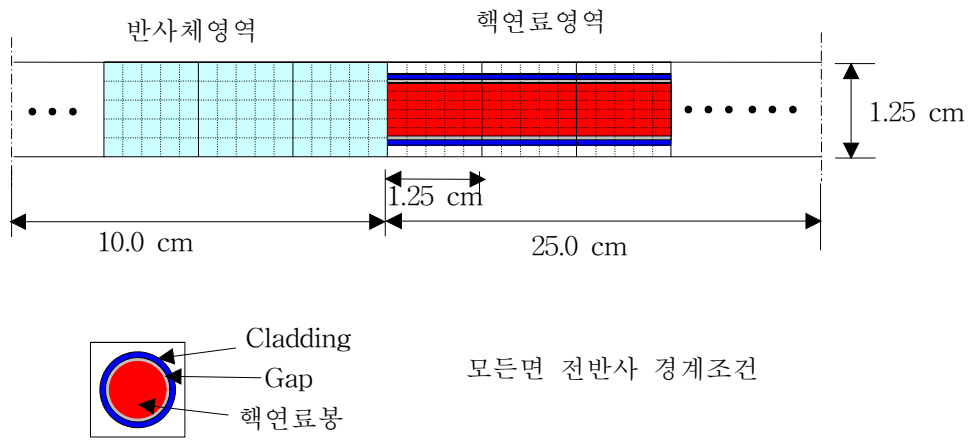


그림 4. 셀 균질화 효과 계산용 2차원 모형

그림 5는 그림 4와 같은 모형으로부터 구해진 셀별 균질화 상수의 변화를 보기 위해, 먼저 한 평면이 10 cm 인 경우를 가정하여, 각 평면의 균질화 상수를 구한 다음, 각 셀별 균질화 상수와 평면 평균 균질화 상수의 차를 각 셀 위치에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 반사체에서 떨어진 셀에서는 에너지 군에 무관하게 셀별 균질화 상수의 변화가 거의 없음을 알 수 있으나, 반사체와 접한 평면에서는 평면 내부에서의 셀별 균질화 상수의 변화가 심하게 나타남을 알 수 있다. 이는, 반사체와 같이 물질 구성이 다른 평면을 접하는 핵연료 평면은 평면 내부에서 위치에 따른 구역별 중성자속 분포가 상당히 다르다는 것을 의미하며, 이와 같은 경우에는 핵연료 평면의 크기를 줄여야 함을 알 수 있다.

그림 6은 셀 균질화 효과가 노심 반응도에 미치는 영향을 분석하기 위해, 반사체를 포함하는 하나의 핵연료 셀을 평면의 크기를 변화시켜가며 구한 DeCART 코드의 결과를 정리한 것이다. 이에 사용된 핵연료봉 셀의 유효 높이는 50 cm 이며, 이를 3개부터 10개까지의 등간격 평면으로 나누어 평면수에 따른 k_{eff} 의 변화를 분석한 것이다. 이에 사용된 기준해로는 수렴 안정성이 확보되는 최소 평면크기인 5 cm로 하여 구한 DeCART 코드의 해로 하였다. 평면의 개수는 8개 이상이 되어야 셀 균질화 효과는 거의 소멸되며, 5개 이하로 사용할 경우에는 50 pcm 이상의 오차를 유발함을 알 수 있다. 이 그림에는 또한 5개의 평면으로 나누되, 평면내 균질화 상수의 변화가 심한 반사체 부근 평면은 평면 크기를 작게(5.5 cm) 유지하고 균질화 상수의 변화가 거의 없는 내부 평면의 크기는 상대적으로 크게(13 cm) 하여 나온 결과도 나타내었다. 이런 경우의 균질화 효과는 그림에서 알 수 있듯이 거의 소멸함을 알 수 있으며, 9개의 균등 평면으로 나눈 경우와 결과가 유사함을 알 수 있다.

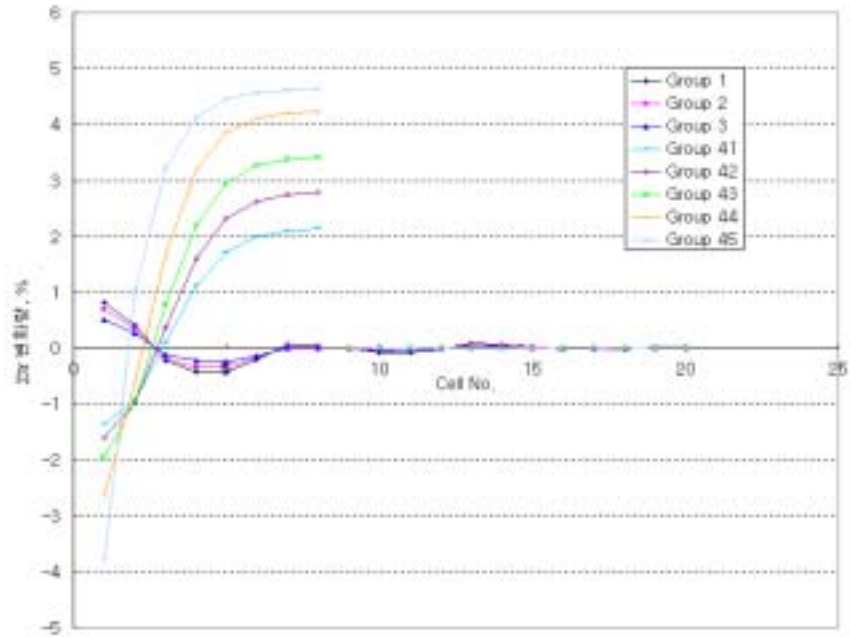


그림 5. 평면내 위치에 따른 수송핵단면적 변화

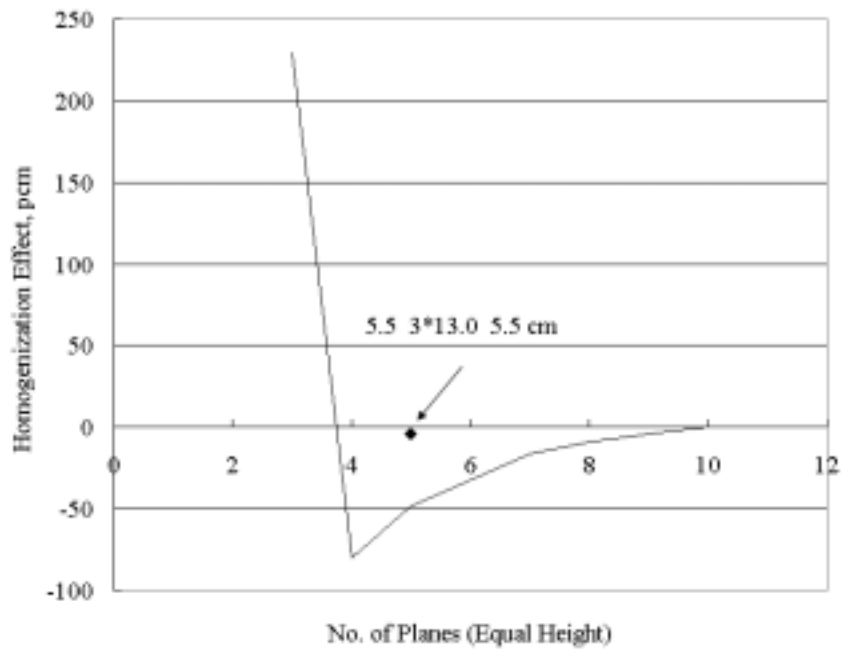


그림 6. 평면수에 따른 셀 균질화 효과

4. 3차원 VENUS 노심 문제

이 절에서는 앞의 제 2절과 3절에서 제시된 현 DeCART 코드 가정들에 의한 오차를 줄여줄 수 있는 방안을 실제 3차원 노심 문제인 VENUS-2 MOX 장전 노심에 적용하여 그 효과를 점검한다. 그림 7은 3차원 VENUS 문제에 대한 DeCART 입력 모델링을 나타낸 것이다. 이 문제는 노심 최 안쪽에 물로 채워진 Central Hole이 있으며, 그 주위는 Inner Baffle이 싸고 있다. 그리고 노심 안쪽 핵연료집합체는 3.3 w/o의 우라늄 핵연료가, 바깥쪽 핵연료집합체에는 4.0 w/o 우라늄 핵연료가 7 층을, MOX 핵연료가 나머지 8층을 형성하고 있다. 노심 최 외각은 노심 안쪽과 같은 물질의 Outer Baffle이 둘러싸고 있으며, 그 외곽은 물로 채워져 있다. 노심의 축방향으로는 50 cm의 핵연료봉을 Plexiglas가 양끝단에서 막고 있으며, 노심 위쪽에는 핵연료봉에서 1.3 cm떨어진 위치에 Intermediate Grid가 자리하고 있다. 핵연료봉의 양 끝단을 제외한 축방향 반사체에 대한 DeCART 모델링은 이들 Intermediate Grid와 물을 균질화하여 적용하였다.

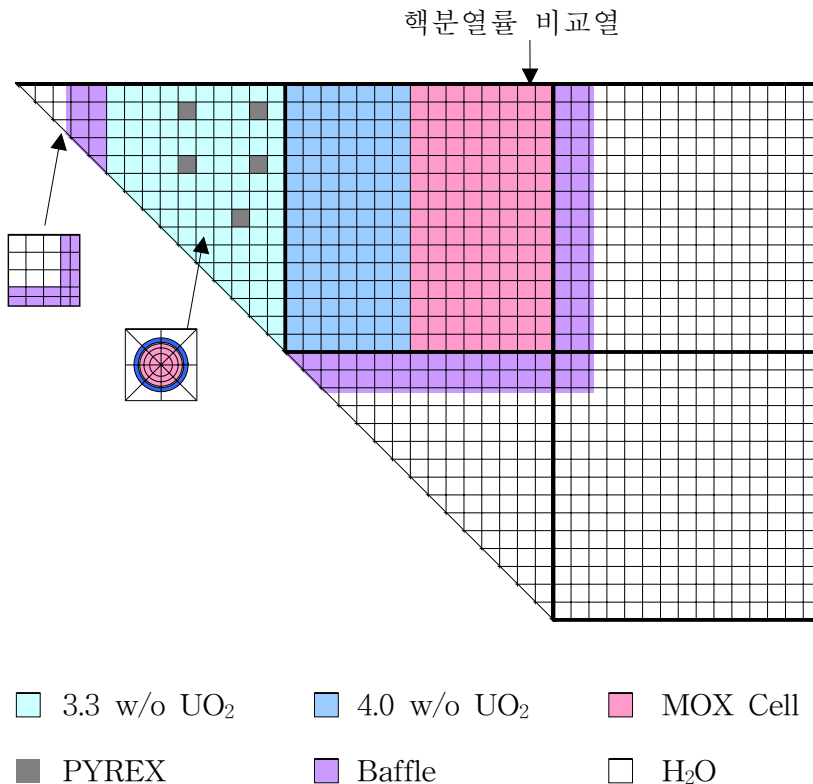


그림 7. 3차원 VENUS-2 MOX 문제의 DeCART 모델링

표 1은 3차원 VENUS 문제에 대한 DeCART 결과를 정리한 것이다. 축방향으로의 중

성자 수송효과 및 셀 균질화 효과를 전혀 고려하지 않고, 축방향으로 50 cm의 핵연료를 5개 평면, 즉 평면당 10 cm로 균일하게 나누어 계산한 경우는 표 1에서 보는 바와 같이 k 값이 0.9936 정도로 나타나 임계치와 약 640 pcm의 오차를 보였다. 그러나 축방향으로의 중성자 수송효과가 고려된 중성자 확산계수를 사용한 경우는 약 280 pcm의 보정효과를 보여 임계치와 약 360 pcm의 오차를 보인다. 그리고 셀 균질화 효과를 어느정도 보정하여, 반사체와 접한 핵연료 평면은 크기를 5.5 cm로 하고, 내부 평면은 3개의 13cm 평면으로 나눈 경우는 약 100 pcm 정도의 보정효과를 보여, 축방향 중성자 수송효과 및 셀 균질화 보정효과를 모두 고려한 경우는 임계치와 약 260 pcm 정도의 차이를 보임을 알 수 있다.

그림 8은 DeCART 코드가 계산한 각 핀셀별 핵분열률을 타 코드의 결과와 비교한 것이다. 참고문헌 2에는 이 문제에 대한 핀셀별 핵분열률 실험치가 있으며 또한 계산치와의 비(C/E)가 각 코드별로 보고되어 있다. 그림 8은 이들 중 비교적 오차가 큰 노심 경계부분(그림 7 참조)에서의 C/E 값을 y-축에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 대부분의 코드들이 실험치에 비해 높게 출력을 예측하고 있으며, 그 정도는 6~8% 정도이다. DeCART 코드의 결과도 타 코드들의 경향과 거의 유사하게 나타나, VENUS-2 문제를 잘 풀고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 DeCART 코드에 내재되어 있는 축방향 확산해법에 관련한 근사 중, 중성자 확산계수 및 셀 균질화와 관련된 근사를 보정하는 방안을 제시하였다. 즉, 중성자 확산계수에 의한 오차를 줄여주기 위한 방안으로는 축방향 1-D 중성자 수송계산에 의한 중성자류 보존 확산계수 계산 방법을, 셀 균질화에 의한 효과를 줄여주는 방안으로는 상대적으로 축방향 위치 의존도가 높은 반사체 부근의 평면 크기를 줄여주는 방법을 제시하였다. 이들 방안들은 노심 유효높이가 50 cm인 3차원 VENUS-2 MOX 장전노심에서 총 390 pcm의 k -eff 보정효과를 보였으며, 셀별 핵분열률에서는 영향이 거의 없는 것으로 나타나, 그 효과가 우수하다고 판명되었다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부가 수행하고 있는 원자력연구기반확충사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. J. Y. Cho, *et al.*, "Three-Dimensional Heterogeneous Whole Core Transport calculation Employing Planar MOC Solution," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **87**, 234, 2002.

2. Blind Benchmark on the 3-D VENUS MOX Core Measurements," OECD/NEA report, NEA/SEN/NSC/WPPR(2001)1, 2001.

표 1. 3-D VENUS-2 MOX 노심에 대한 DeCART 코드의 계산 결과

CASE	k-eff
DeCART	0.99359
확산계수를 보정	0.99643
확산계수 및 셀균질화 효과 보정	0.99742

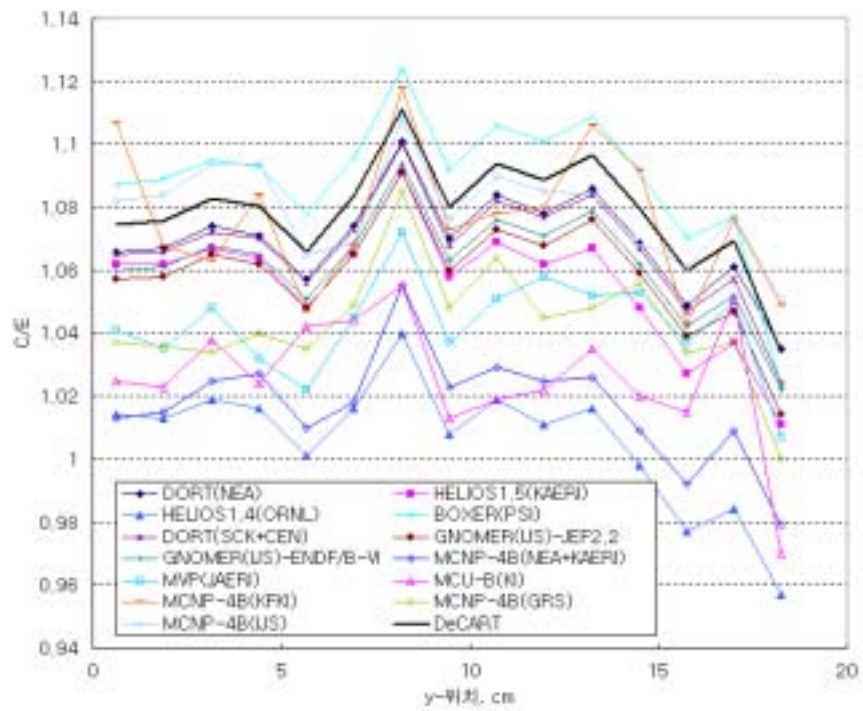


그림 8. 29번째 열(x = 35.91 cm)에서의 y값에 따른 C/E 값 비교