



육각형 노심분석을 위한  
반응행렬 형태의 해석함수전개 노달방법

The Response-Matrix Based AFEN Method  
for the Hexagonal Geometry

한국원자력연구소

30 - 40

# 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

이 보고서를 “신형원자로 고유노심기술 개발” 과제의 연구 일환으로 수행한 연구내용의 기술보고서로 제출합니다.

제 목 : 육각형 노심 분석을 위한 반응행렬 형태의 해석함수전개 노달방법  
(Response-Matrix Form AFEN Method for the Hexagonal Geometry)

1998. 3

주 저 자 : 노 재 만 (신형동력로개발단)

공 저 자 : 김 공 구 (신형동력로개발단)

지 성 균 (신형동력로개발단)

주 형 국 (신형동력로개발단)

조 병 오 (신형동력로개발단)

정 형 국 (신형동력로개발단)

조 진 영 (신형동력로개발단)

장 문 희 (신형동력로개발단)

감수위원 : 최 항 복

## 요 약

노달방정식 전개시 횡방향 적분에서 파생되는 단점을 극복하기 위하여 개발한 해석함수전개 노달방법(AFEN:Analytic Function Expansion Nodal)은 사각형 노심뿐만 아니라 육각형 노심의 중성자속 분포를 예측하는데도 매우 유용하다. 일반적으로 육각형 노심 구조에서 노달방법의 정확도는 횡방향 누출 근사에 민감하게 의존한다. 기존 노달방법은 노드 중심선 근처에서 불연속 특성을 보이는 횡방향 누출을 간단한 연속함수로 근사하므로 정확도가 떨어진다. 그러나 해석함수전개 노달방법은 횡방향 누출이 필요하지 않기 때문에 육각형 노심 해석에서도 정확도를 유지할 수 있다.

본 연구에서는 육각형 노심에 대하여 뛰어난 정확도를 보이는 해석함수전개 노달방법을 반응행렬 형태로 변환하였다. 반응행렬 형태로 변환된 해석함수전개 노달방법은 MASTER와 같이 반응 행렬 형태의 노드간 연관방정식을 채택하고 있는 노달 코드에 쉽게 이식할 수 있고 또한 반응행렬 노달법의 장점인 소격격자 재균형 가속법(Coarse Mesh Rebalance Acceleration Method)을 충분히 활용할 수 있다.

반응행렬형태의 해석함수전개 노달방법을 MASTER에 이식하고 2차원 및 3차원 VVER-440 벤치마크 문제를 풀어 검증하였다. 그 결과 집합체출력분포의 오차평균은 0.2% 이내, 유효증배계수 오차는 20pcm 이내로 매우 정확하였으며 계산시간도 소격격자 재균형법으로 가속할 때 8-10배 정도 빠라지는 것으로 나타났다.

## ABSTRACT

The Analytic Function Expansion Nodal (AFEN) method, developed to overcome the limitations caused by the transverse integration, has been used successfully to predict the neutron behavior in the hexagonal core as well as rectangular core. In the hexagonal node, the transverse leakage resulted from the transverse integration has some singular terms such as delta-function and step-functions near the node center line. In most nodal methods using the transverse integration, the accuracy of nodal method is degraded because the transverse leakage is approximated as a smooth function across the node center line by ignoring singular terms. However, the AFEN method in which there is no transverse leakage term in deriving nodal coupling equations keeps good accuracy for hexagonal node.

In this study, the AFEN method which shows excellent accuracy in the hexagonal core analyses is reformulated as a response matrix form. This form of the AFEN method can be implemented easily to nodal codes based on the response matrix method. Therefore, the Coarse Mesh Rebalance (CMR) acceleration technique which is one of main advantages of the response matrix method can be utilized for the AFEN method.

The response matrix based AFEN method has been successfully implemented into the MASTER code and its accuracy and computational efficiency were examined by analyzing the two- and three- dimensional benchmark problem of VVER-440. Based on the results, it can be concluded that the newly formulated AFEN method predicts accurately

the assembly powers (within 0.2% average error) as well as the effective multiplication factor (within 20pcm error). In addition, the CMR acceleration technique is quite efficient in reducing the computation time of the AFEN method by 8 to 10 times.

# 목 차

요 약 .....	ii
Abstract .....	iii
표목차 .....	vi
그림목차 .....	vii
1. 서 론 .....	1
2. 육각형 노심분석을 위한 반응행렬 형태의 해석함수전개 노달방법 .....	6
2.1 노드내 중성자속 분포의 전개 .....	6
2.2 노드간 연관 방정식 .....	10
3. 수치 실험 결과 및 토론 .....	15
4. 결론 .....	18
참고문헌 .....	19

## 표 목 차

표 1. 계산 결과와 계산 시간 비교 .....	17
----------------------------	----

## 그림 목 차

그림 1. 노드 $n$ 의 좌표계 .....	10
그림 2. 노드간 연관방정식 유도를 위한 반경방향 노드 배열 .....	14
그림 3. 2차원 VVER-440 문제의 노심 구조 및 분석 결과 .....	16
그림 4. 3차원 VVER-440 문제의 노심 구조 및 분석 결과 .....	16



## 1. 서론

현대적 노달방법[1,2]은 지난 수십년 동안 사각형 핵연료 집합체를 장전한 경수로 노심의 중성자속 분포를 예측하는데 성공적으로 활용되어 왔다. 최근, 이런 현대적 노달 방법들을 VVER 형태의 원자로[3,4]나 고전환로 혹은 고속중성자로등 육각형 핵연료를 장전한 원자로심에 적용하는 것에 대한 관심이 고조되고 있다.

대부분의 현대적 노달 방법에서는 횡방향 적분을 이용하여 노드간 연관 방정식을 유도한다. 횡방향 적분은 3 차원 중성자 확산방정식을 3 방향 각각에 대해 두 개의 횡방향으로 적분하여 등가인 3 개의 1 차원 중성자 확산 방정식으로 만드는 과정이다. 이 1 차원 확산 방정식들은 횡방향 노드 표면에서의 중성자 누출 분포로 정의되는 횡방향 누출을 통하여 서로 연관되어 있다. 횡방향 적분을 하는 이유는 다차원 중성자 확산방정식 보다 1 차원 중성자 확산 방정식이 훨씬 더 풀기 쉽기 때문이다.

그러나, 횡방향 적분을 이용하면 몇 가지 단점이 생겨난다. 첫 번째 단점은 횡방향으로 적분할 때 나타나는 횡방향 적분항을 적절히 근사하여야 하는 것이다. 대부분의 현대적 노달 방법에서는, 이 항을 2 차의 다항식으로 근사한다. 그 다항식의 계수들은 노드 경계면에서 횡방향 누출 그 자체 뿐만 아니라 횡방향 누출의 미분이 연속이라는 조건을 적용하여 노드의 평균 횡방향 누출로 표시된다[1,2]. 이 근사는 서로 다른 물질 경계면 근처에서 일어나는 큰 중성자속 변화를 잘 모사하지 못한다.

두 번째 단점은 노달 계산으로부터 얻은 균질화 중성자속을 이용하여 연료봉별 중성자속을 재구성할 때 생긴다. 횡방향 적분을 이용하는 노달 방법에서 연료봉별 중성자속 재구성에 이용할 수 있는 균질 중성자속은 각 방향의 일차원 중성자속으로 제한된다. 이 때 노드내 균질 중성자속은 먼

저 각 방향별로 분리 가능하다고 가정한 뒤, 횡방향 적분된 일차원 중성자 속을 이용하여 근사될 수 있다. 그러나 이렇게 단순히 중성자속이 방향별로 분리 가능하다고 가정하면 노드내 균질 중성자속을 정확히 예측할 수 없다.

마지막으로 비정방형 노드에 대하여 정의된 중성자 누출항은 정방형 노드 경우와는 달리 상대적으로 깨끗하지 못하고 복잡하다. 이 횡방향 누출항은 델타 함수와 스텝 함수 같은 특이항을 포함하고 있어서 쉽게 취급되지 않는다.[5,6] 정방형 노드에 대하여서는 횡방향 적분이 정의되는 노드의 한변 위에, 그 점의 양쪽에서 인접 집합체가 달라지는 노드 격자점을 포함하고 있지 않으나 육각형 노드에서는 그런 격자점이 존재한다. 따라서 육각형 노드의 횡방향 누출은 이 격자점 주위에서 더 이상 연속이 아니며 이를 연속으로 근사하게 되면 중성자속 분포 예측의 오차가 매우 커진다. 결국 횡방향 적분을 사용하는 육각형 노달 방법에서는 횡방향 누출에 있는 특이항들을 어떻게 취급하느냐가 정확도 유지를 위한 요건이다.

Wagner[5]는 특이항들을 단순히 무시하여 횡방향 누출을 2 차의 다항식으로 전개하고 강제로 횡방향으로 적분된 일차원 중성자 확산방정식을 노드의 중성자 균형 조건을 맞추도록 하여 해를 구하는 육각형 구조의 노달 방법을 제안하였다. 이렇게 하는 것의 장점은 노드간 연관 방정식이 사각형 구조의 노달방법과 완전히 같은 형태가 된다는 것이다. 그렇지만 횡방향 누출에 있는 특이항들을 무시함으로써 필연적으로 이 방법이 노심의 중성자 거동을 예측하는 정확도가 떨어지게 된다.

Chao와 Tsoulfanidis[7]은 횡방향 적분을 하기 전에 등각사상(Conformal Mapping)을 이용하여 육각형 노드를 사각형 노드로 변환하는 방법을 제안하였다. 등각사상을 하면 변환후에도 Laplace 연산자가 변하지 않으므로

사각형 구조에서와 유사한 형태의 노드간 연관 방정식을 얻을 수 있다. 따라서 이 방법도 결과적으로는 이 방법도 사각형 구조에서 나타나는 횡방향 적분의 잇점에 전적으로 의존하고 있다.

사각형 노심 구조[8,9,10]와 육각형 노심 구조[11,12,13]에서 횡방향 적분으로 생기는 단점을 극복하기 위하여 개발된 해석함수 전개노달법은 횡방향으로 적분된 1 차원 중성자 확산 방정식을 풀지 않고 직접 다차원 중성자 확산 방정식을 푼다. 따라서 이 방법은 횡방향 적분으로 인한 생기는 어떤 단점도 갖지 않는다. 이 방법은 횡방향 누출 형태를 가정하지 않기 때문에 육각형 노드에서 정의된 횡방향 누출항에 있는 특이항들을 어떻게 취급하느냐에 따라 생기는 오차를 갖지 않는다.

원래 해석함수 전개노달법은 노드의 평균중성자속, 경계면 중성자속 및 격자점 중성자속을 미지수로 하는 노달 방법으로 개발되었다. 여기에서는 이 방법을 특히 육각형 노심 구조에서 노드 평균중성자속, 경계면에서의 부분중성자류 및 격자점 중성자속을 미지수로 하는 반응행렬 형태의 노달 방법으로 확장하였다. 이런 형태의 해석함수전개 노달법은 중성자속 분포의 노드간 연관 관계를 반응행렬 형태로 표현함으로써 기존의 반응행렬법에 기초한 노달계산 코드에 이식하기가 쉽고 반응행렬 노달법의 장점인 소격격자 재균형 가속법(Coarse Mesh Rebalance Acceleration Method)를 충분히 활용할 수 있다.

여기서 설명할 반응행렬 형태의 해석함수전개 노달법은 노드내 중성자 확산방정식의 해(즉 노드내 균질화 중성자속 분포)를 그 노드의 어떤 점에서 3 차원 중성자 확산방정식을 만족하고, 축방향(z-direction)과 반경 방향(x,y-direction)으로는 분리되지만 반경방향의 두 성분(x와 y)으로는 분리되지 않는 기저 해석함수들로 전개한다. 이 균질 중성자속의 전개는 노드

당 에너지 그룹당 2 개의 축방향, 12개의 반경방향 기저 해석함수와 한 개의 부가적인 상수로 구성된다. 노드간 연관 방정식을 컴퓨터상에서 반복법으로 푸는 과정에서 유효중배계수가 수렴함에 따라 부가적인 상수는 영이 되므로 결국 이 중성자속 전개는 완전히 중성자 확산 방정식을 만족하게 된다. 15 개 전개 상수는 1 개의 노드 평균 중성자속, 2 개의 축방향 경계면 중성자속, 6 개의 반경방향 경계면 중성자속 ,그리고 6 개의 반경방향 격자선 중성자속으로 나타낼 수 있다. 모든 전개 상수들을 15개의 중성자속으로 표현하고 나면 반응행렬 형태의 해석함수전개 노달법에서의 노달 계산 미지수인 노드 평균중성자, 경계면 부분중성자류 및 격자선 중성자속에 대하여 풀리는 노드간 연관 방정식을 만든다. 첫 번째 연관 방정식은 노드 평균 중성자속에 대하여 푸는 노드내 중성자 균형 방정식이다. 두 번째 연관 방정식은 경계면에서 중성자속과 중성자류가 경계면에서의 입사 및 출사 부분중성자류로 나타낼 수 있는 성질을 이용하여 경계면에서 출사 부분중성자류를 입사 부분중성자류와 노드 평균 중성자속 및 격자선 중성자속(특별히 반경 방향의 경우에만 나타남.)으로 표현되는 반응행렬식이다. 이 반응행렬식은 노드의 경계면에서 부분중성자류에 대하여 풀린다. 마지막으로 세 번째 연관 방정식인 반경 방향의 격자선 중성자속에 대한 연관 방정식은 기존에 개발된 격자선 중성자속 계산 방법인 격자점 균형법(CPB : Corner-Point Balance Method)[13]나 순차적 원활화법(MSS : Method of Successive Smoothing)[14] 혹은 그 외의 어떤 방법으로도 얻을 수 있다.

노드내 중성자속 분포를 특별히 반경 방향의 두 성분으로 분리되지 않는 해석함수로 전개하고 경계면 뿐만 아니라 격자선에서도 중성자속 분포를 제한하는 조건을 적용하기 때문에 이 해석함수 전개 노달방법은 핵적 특성이 매우 다른 핵연료 집합체간의 경계면 뿐만아니라 격자선 근처에서

의 심한 중성자속 분포 변화도 잘 예측한다. 따라서 해석함수전개 노달 방법은 횡방향 적분을 사용하는 다른 노달방법과는 달리 중성자속 재구성에 바로 사용될 수 있는 정확한 노드내 균질화 중성자속을 제공한다.

## 2. 육각형 노심분석을 위한 반응행렬 형태의 해석함수전개 노달방법

### 2.1 노드내 중성자속 분포의 전개

육각형 구조의 해석함수전개 노달방법으로 노드내 균질화 중성자속을 표현하기 위해 먼저 한변의 길이가  $h_x$  이고 높이가  $h_z$ 인 완전히 균질화된 정육각 기둥 노드  $n$  에 대한 3 차원 G 에너지군 정상상태 중성자 확산 방정식을 보자.

$$-D^n \nabla^2 \hat{\phi}^n(x, y, z) + \Sigma^n \hat{\phi}^n(x, y, z) = \frac{1}{k_{eff}} \nu \Sigma_f^n \hat{\phi}^n(x, y, z) \quad (1)$$

여기서 기호  $\hat{\phantom{x}}$ 는 균질화된 노드에서 정의된 물리량을 가리키며 다른 표시들은 일반적인 표준을 따랐다.

횡방향으로 적분된 등가 1 차원 방정식을 푸는 대부분의 현대적 노달 방법과는 달리 해석함수전개 노달방법은 이 3 차원 중성자 확산방정식을 직접 푼다.

먼저  $\lambda_g^n$  를 행렬  $(D^n)^{-1} \{ \Sigma^n - (1/k_{eff}) \nu \Sigma_f^n \}$ 의 고유치로, 또 행렬  $R^n$ 의 각 열을 대응하는 고유벡터로 정의하고 새로운 미지수  $\xi$ 를 다음과 같은 관계식으로 정의하면

$$\hat{\xi}^n(x, y, z) = (R^n)^{-1} \hat{\phi}^n(x, y, z) \quad (2)$$

G 에너지군 중성자 확산방정식은 다음과 같은 G 개의 편미분 방정식으로 바뀐다.

$$\nabla^2 \hat{\xi}_g^n(x, y, z) - \lambda_g^n \hat{\xi}_g^n(x, y, z) = 0, \quad g=1, \dots, G \quad (3)$$

지금부터  $\phi$ 와  $\xi$ 는 서로 완전히 일대일로 대응되기 때문에 두 개 모두 중성자속이라고 부른다. 2 개 이상의 에너지군을 취급할 때 어떤 때는 고유치  $\lambda_g^n$  가 복소수가 될 수도 있다. 만일  $\lambda_g^n$ 가 복소수가 되면 노드간 연관 방정식의 유도에서나 혹은 이 연관 방정식을 컴퓨터를 이용해서 반복적으로 푸는 과정에서 복소수를 취급해야만 하는 번거로움이 있을지도 모른다. 따라서 여기에서는 항상  $\lambda_g^n$ 이 실수인 2개 에너지군까지만 국한하고  $\lambda_g^n$ 이 복소수가 될 수도 있는 3개 이상의 에너지 군에 대한 해석함수전개 노달방법에 대한 자세한 논의는 참고도서[15,16,17]로 미룬다.

편미분 방정식 (3)의 해는

$$\hat{\xi}_g^n(x, y, z) = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} [ A_g(\theta, \varphi) SN x_g^n(x \cos \theta \sin \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \varphi) + B_g(\theta, \varphi) CS x_g^n(x \cos \theta \sin \varphi + y \cos \theta \sin \varphi + z \cos \varphi) ] d\theta d\varphi \quad (4)$$

형태로 표현 된다. 여기서

$$x_g^n = \sqrt{|\lambda_g^n|} \quad , \quad (5)$$

$$SN x_g^n(x \cos \theta \sin \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \varphi) = \begin{cases} \sinh x_g^n(x \cos \theta \sin \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \varphi) & \lambda_g^n > 0 \\ \sin x_g^n(x \cos \theta \sin \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \varphi) & \lambda_g^n < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$CS x_g^n(x \cos \theta \sin \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \varphi) = \begin{cases} \cosh x_g^n(x \cos \theta \sin \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \varphi) & \lambda_g^n > 0 \\ \cos x_g^n(x \cos \theta \sin \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \varphi) & \lambda_g^n < 0 \end{cases} \quad (7)$$

이다.

육각형 구조의 해석함수 전개법에서는 노드당 중성자 에너지군당 반경 방향 균질화 중성자속 분포를 제한하는 경계조건으로 6 개의 경계면 중성자속과 6 개의 격자선 중성자속을 고려하고 있으므로 연속선상의  $\theta$ 중  $0^\circ$

과  $180^\circ$  내에서  $30^\circ$  씩 균등하게 떨어져 있는 6 개의  $\theta$ 만을 선택한다. 또 축방향 균질 중성자속은 반경 방향 균질 중성자속과 완전히 분리되어야 하므로  $0^\circ$  와  $90^\circ$  두 개의  $\varphi$ 를 선택한다. 그러면  $(\cos \theta \sin \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \varphi)$  쌍은

$$(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), \left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}, 0\right), \\ \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}, 0\right), \left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}, 0\right), \left(-\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}, 0\right)$$

이 된다.

이제 원래 중성자 확산 방정식 (1)의 해는 14 개의 기저 해석함수들로 전개되었다.  $x_g^n$  가 노심 유효증배계수  $k_{eff}$  에 의존하므로 각각의 기저 함수들도  $k_{eff}$  에 의존한다. 그래서 만일 정확한  $k_{eff}$  값을 알고 있다면 이 중성자속 전개의 개개의 항들은 중성자 확산 방정식 (1)을 정확히 만족한다. 하지만 컴퓨터로 중성자 확산 방정식을 반복적으로 풀기 시작하는 초기 단계에서는 마지막에 수렴할  $k_{eff}$  값을 정확히 알 수 없다. 그러므로 계산 초기 단계에서는 중성자속 전개의 개개의 항들이 중성자 확산 방정식을 만족하지 않을 뿐만 아니라 이 전개의 노드 부피에 대한 적분도 노드의 중성자 균형을 따르지 않는다. 이 문제를 해결하기 위하여 중성자속 전개에 부가적인 상수항  $C_g$ 를 도입하여 중성자속 전개의 노드 부피에 대한 적분이 강제로 노드의 중성자 균형을 만족하도록 한다. 이 부가적인 상수  $C_g$ 는 노심 유효증배계수  $k_{eff}$  가 수렴함에 따라 결국 영이 된다. 따라서 그림 1에서와 같이 육각형 노드를 취급하기 편하게 반경 방향으로 세 종류의 평면 좌표  $(x, y)$ ,  $(u, v)$  및  $(p, q)$ 를 도입하면, 중성자 확산 방정식의 해 (4)는 한정된 숫자의 기저 해석 함수들로 다음과 같이 전개된다.

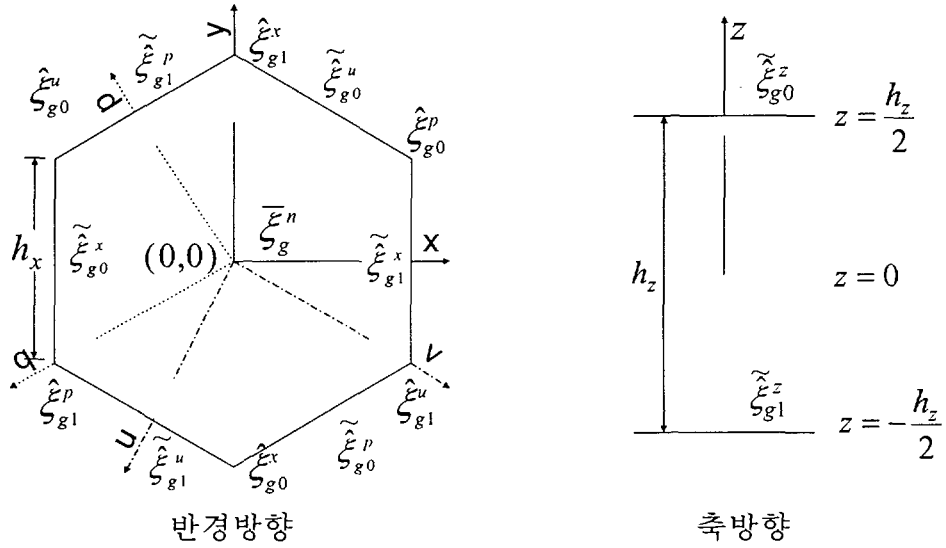


$$\begin{aligned}
\hat{\xi}_g^n(x, y, z) = & C_g + A_{g1}^x SN x_g^n x + A_{g2}^x SN x_g^n y + B_{g1}^x CS x_g^n x + B_{g2}^x CS x_g^n y \\
& + A_{g1}^u SN x_g^n u + A_{g2}^u SN x_g^n v + B_{g1}^u CS x_g^n u + B_{g2}^u CS x_g^n v \\
& + A_{g1}^p SN x_g^n p + A_{g2}^p SN x_g^n q + B_{g1}^p CS x_g^n p + B_{g2}^p CS x_g^n q \\
& + A_{g1}^z SN x_g^n z + B_{g1}^z CS x_g^n z
\end{aligned} \tag{8}$$

이제 식 (8)의 15 개의 계수들을 그림 1에 보인 노드의 평균 중성자속, 2 개의 축방향 경계면 중성자속, 6개의 반경방향 경계면 중성자속과 6개의 반경방향 격자점 중성자속으로 표현한다. 예를 들면  $A_{g1}^x$  과  $A_{g1}^z$  은 다음과 같이 주어지게 된다.

$$\begin{aligned}
A_{g1}^x = & \left\{ \left[ CS \frac{\sqrt{3}}{4} x_g^n h_x \left( 2CS \frac{x_g^n h_x}{4} - 3 \frac{4}{x_g^n h_x} SN \frac{x_g^n h_x}{4} \right) + \frac{4\sqrt{3}}{3x_g^n h_x} CS \frac{x_g^n h_x}{4} SN \frac{\sqrt{3}}{4} x_g^n h_x \right] SN \frac{\sqrt{3}}{4} x_g^n h_x \right\}^{-1} \\
& \times \left\{ CS \frac{x_g^n h_x}{4} \frac{\hat{\xi}_{g1}^x - \hat{\xi}_{g0}^x}{2} - \frac{4}{x_g^n h_x} SN \frac{x_g^n h_x}{4} \frac{\hat{\xi}_{g1}^u + \hat{\xi}_{g0}^p - \hat{\xi}_{g0}^u - \hat{\xi}_{g1}^p}{4} \right. \\
& + \frac{\frac{4\sqrt{3}}{3x_g^n h_x} CS \frac{x_g^n h_x}{4} SN \frac{\sqrt{3}}{4} x_g^n h_x - \frac{4}{x_g^n h_x} SN \frac{x_g^n h_x}{4} CS \frac{\sqrt{3}}{4} x_g^n h_x}{CS \frac{\sqrt{3}}{4} x_g^n h_x - \frac{4\sqrt{3}}{3x_g^n h_x} SN \frac{\sqrt{3}}{4} x_g^n h_x} \\
& \left. \times \frac{\hat{\xi}_{g1}^x + \hat{\xi}_{g1}^u + \hat{\xi}_{g1}^p - \hat{\xi}_{g0}^x - \hat{\xi}_{g0}^u - \hat{\xi}_{g0}^p}{4} \right\}
\end{aligned} \tag{9}$$

$$A_{g1}^z = \frac{\hat{\xi}_{g1}^z - \hat{\xi}_{g0}^z}{2SN \frac{x_g^n h_z}{2}} \tag{10}$$



$$u = -\frac{1}{2}x - \frac{\sqrt{3}}{2}y, \quad v = +\frac{\sqrt{3}}{2}x - \frac{1}{2}y$$

$$p = -\frac{1}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y, \quad q = -\frac{\sqrt{3}}{2}x - \frac{1}{2}y$$

그림 1 노드 n의 좌표계

## 2.2 노드간 연관 방정식

노드내 중성자속 전개 (8)의 모든 계수를 노드평균 중성자속, 경계면 중성자속과 격자선 중성자속으로 나타내고 나면, 반응행렬 형태의 해석함수 전개 노달법에서의 노달 계산 미지수인 노드 평균중성자, 경계면 부분중성자류 및 격자선 중성자속에 대하여 풀리는 노드간 연관 방정식을 만들어야 한다. 그 중 첫 번째 연관 방정식은 노드 평균 중성자속에 대하여 푸는 노드내 중성자 균형 방정식이다. 반응행렬 형태의 노달법에서의 노드내 중성

자 균형방정식은 쉽게

$$\sum_{s=0,1} \left\{ \frac{2\sqrt{3}}{9h_x} \sum_{d=x,u,b} (j_{so}^d - j_{si}^d) + \frac{1}{h_z} (j_{so}^z - j_{si}^z) \right\} + \Sigma^n \bar{\phi}^n = \frac{1}{k_{eff}} \nu \Sigma_f^n \bar{\phi}^n \quad (11)$$

로 주어진다. 여기서  $j_{so}^d$  와  $j_{si}^d$  는 각각  $d$  방향의  $s$  경계면에서의 출사 및 입사 부분중성자류이다. 널리 알려진 등가이론[18,19]에 따르면 노드 경계에서 균질중성자속이 아니라 균질중성자속에 불연속인자가 곱해진 비균질중성자속이 연속이다. 따라서 균질중성자속에 의존하는 균질부분중성자류도 경계면 양쪽에서 연속이 아니며 비균질중성자속과의 상관식으로 주어지는 비균질 부분중성자류가 연속이다. 위 식을 포함하여 지금부터 유도되는 모든 반응행렬 형태의 노드간 상관방정식에 나타나는 부분중성자류는 비균질중성자류이다.

노드의 경계면에서 부분중성자류에 대하여 풀리는 두 번째 연관 방정식을 얻기 위하여  $\xi_g^n(x, y, z)$ 의 횡방향 적분 경계면 도함수를 반경방향 및 축방향의 경계면에서 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_{g0}^x &= \frac{1}{h_x h_z} \int_{-\frac{h_z}{2}}^{\frac{h_z}{2}} \int_{-\frac{h_x}{2}}^{\frac{h_x}{2}} \frac{\partial \xi_g^n(x, y, z)}{\partial x} dydz \Bigg|_{x=-\frac{\sqrt{3}}{2} h_x} \\ &= (a_{g1}^x + a_{g2}^x) \tilde{\xi}_{g0}^x + (a_{g1}^x - a_{g2}^x) \tilde{\xi}_{g1}^x + (a_{g3}^x + a_{g4}^x) \frac{\tilde{\xi}_{g1}^u + \tilde{\xi}_{g1}^p}{2} \\ &+ (a_{g3}^x - a_{g4}^x) \frac{\tilde{\xi}_{g0}^u + \tilde{\xi}_{g0}^p}{2} + (b_{g1}^x + b_{g2}^x) \frac{\tilde{\xi}_{g0}^u + \tilde{\xi}_{g1}^p}{2} \\ &+ (b_{g1}^x - b_{g2}^x) \frac{\tilde{\xi}_{g1}^u + \tilde{\xi}_{g0}^p}{2} + b_{g3}^x (\tilde{\xi}_{g1}^x + \tilde{\xi}_{g0}^x) - 2(a_{g1}^x + a_{g3}^x + b_{g1}^x + b_{g3}^x) \bar{\xi}_g^x \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_{g0}^z &= \frac{2\sqrt{3}}{9h_x^2} \int_{-\frac{\sqrt{3}}{2} h_x}^{\frac{\sqrt{3}}{2} h_x} \int_{-h_x + \frac{\sqrt{3}}{3} |x|}^{h_x - \frac{\sqrt{3}}{3} |x|} \frac{\partial \xi_g^n(x, y, z)}{\partial x} dydx \Bigg|_{z=-\frac{1}{2} h_z} \\ &= (a_{g1}^z + a_{g2}^z) \tilde{\xi}_{g0}^z + (a_{g1}^z - a_{g2}^z) \tilde{\xi}_{g1}^z - 2a_{g1}^z \bar{\xi}_g^n \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $a_{gs}^d$  과  $b_{gs}^d$  은  $k_{eff}$  와 단면적에 의존하는 상수이다. 그러면 노드의

경계면에서 나가는 방향의 중성자류는

$$\begin{aligned}
 J_0^x &= D^n R^n \tilde{\eta}_0^x \\
 &= D^n \left\{ \langle a_1^x + a_2^x \rangle \tilde{\phi}_0^x + \langle a_1^x - a_2^x \rangle \tilde{\phi}_1^x + \langle a_3^x + a_4^x \rangle \frac{\tilde{\phi}_1^u + \tilde{\phi}_1^p}{2} \right. \\
 &\quad + \langle a_3^x - a_4^x \rangle \frac{\tilde{\phi}_0^u + \tilde{\phi}_0^p}{2} + \langle b_1^x + b_2^x \rangle \frac{\tilde{\phi}_0^u + \tilde{\phi}_1^p}{2} \\
 &\quad \left. + \langle b_1^x - b_2^x \rangle \frac{\tilde{\phi}_1^u + \tilde{\phi}_0^p}{2} + \langle b_3^x \rangle (\tilde{\phi}_1^x + \tilde{\phi}_0^x) - 2 \langle a_1^x + a_3^x + b_1^x + b_3^x \rangle \bar{\phi}^n \right\}
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 J_0^z &= D^n R^n \tilde{\eta}_0^z \\
 &= D^n \left\{ \langle a_1^z + a_2^z \rangle \tilde{\phi}_0^z + \langle a_1^z - a_2^z \rangle \tilde{\phi}_1^z - 2 \langle a_1^z \rangle \bar{\phi}^n \right\}
 \end{aligned} \tag{15}$$

이 된다. 그리고 행렬에 작용하는 연산기호  $\langle \circ \rangle$ 는 유사변환

$$\langle \circ \rangle = (R^n)^{-1} (\circ) R^n \tag{16}$$

을 가리킨다.

중성자 확산이론에 따르면 경계면에서의 균질중성자속과 출사 중성자류는 비균질 입사 및 출사 부분중성자류의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$J_s^d = j_{so}^d - j_{si}^d \tag{17}$$

$$\tilde{\phi}_s^d = 2(\hat{F}_s^d)^{-1} \tilde{\eta}_s^d \tag{18}$$

$$= 2(\hat{F}_s^d)^{-1} (j_{so}^d + j_{si}^d)$$

또 방경방향 균질 격자선 중성자속과 비균질 격자 중성자속은

$$\tilde{\phi}_s^d = 2(\mathbf{F}_p^d)^{-1} \phi_p^d \tag{19}$$

의 관계를 갖는다. 여기서  $\hat{F}_s^d$ 는  $d$  방향의  $s$  경계면에서의 불연속인자,  $\mathbf{F}_p^d$ 는  $d$  방향의  $p$  격자선에서 불연속인자인 대각행렬이다.

식 (17), (18)과 (19)을 식 (14)와 (15)에 대입하고 이와 같은 식을 모든 경계면에서 다 만든 뒤 이를 어떤 경계면의 출사 부분중성자류에 대하여 풀어 내면 그 경계면에서의 반응행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
j_{0o}^x &= (t_1^x + t_2^x)j_{0i}^x + (t_1^x - t_2^x)j_{1i}^x + (t_3^x + t_4^x)\frac{j_{1i}^x + j_{1i}^p}{2} \\
&+ (t_3^x - t_4^x)\frac{j_{0i}^x + j_{0i}^p}{2} + (t_1^x + t_2^x)\frac{\phi_0^x + \phi_1^p}{2} \\
&+ (t_1^x - t_2^x)\frac{\phi_1^x + \phi_0^p}{2} + t_3^x\frac{\phi_1^x + \phi_0^x}{2} - \frac{1}{4}(I + 2t_1^x + 2t_3^x + 8t_1^x + 4t_3^x)\bar{\phi}^n \}
\end{aligned} \tag{20}$$

$$j_{0o}^z = (t_1^z + t_2^z - I)j_{0i}^z + (t_1^z - t_2^z)j_{1i}^z - \frac{1}{2}(t_1^z - I)\bar{\phi}^n \tag{21}$$

여기서  $I$  는 단위행렬, 그리고  $t_s^d$  는  $a_s^d$ ,  $b_s^d$ ,  $\hat{F}_s^d$ , 그리고  $F_p^d$  로 표현되는 상수이다.

마지막으로 세 번째 연관 방정식인 반경 방향의 격자선 중성자속에 대한 연관 방정식은 기존에 개발된 격자선 중성자속 계산 방법인, 그림 2에 서 보인 격자점 근처의 작은 삼각형 내의 중성자 누출 균형을 고려하는 격자점 균형법(CPB : Corner-Point Balance Method)[13]나 순차적 원활화법(MSS : Method of Successive Smoothing)[14] 혹은 그 외의 어떤 방법으로도 얻을 수 있다. 이 중 참고도서 [13]에 소개한 단순화한 격자점 균형법이나 순차적 원활화법으로 유도한 반경방향 격자선 중성자속에 대한 연관 방정식은 다음의 형태를 갖는다.

$$\phi_1 = \left[ \sum_{n=1}^M \mathbf{p}_1^n (\mathbf{F}_1^n)^{-1} \right]^{-1} \sum_{n=1}^M \left[ \mathbf{p}_2^n \{ (\hat{\mathbf{F}}_1^n)^{-1} \tilde{\phi}_1 + (\hat{\mathbf{F}}_2^n)^{-1} \tilde{\phi}_2 \} - \mathbf{p}_3^n \bar{\phi}^n \right] \tag{22}$$

여기서 격자선 혹은 경계면에서의 중성자속과 불연속인자에 붙은 아래첨자와 위첨자는 그림 3.1.2의 경계면 및 격자선 정의를 따른다. 또  $\mathbf{p}_1^n$ ,  $\mathbf{p}_2^n$  및  $\mathbf{p}_3^n$  은 각각의 원소들이 단순화한 격자점 균형법인 경우 노드  $n$  의 단면적 자료와  $k_{eff}$  에 의존 하는 상수 행렬이고 순차적 원활화법인 경우 대각 원소가 3, 17/26, 8/26 [14]인 대각행렬이다.

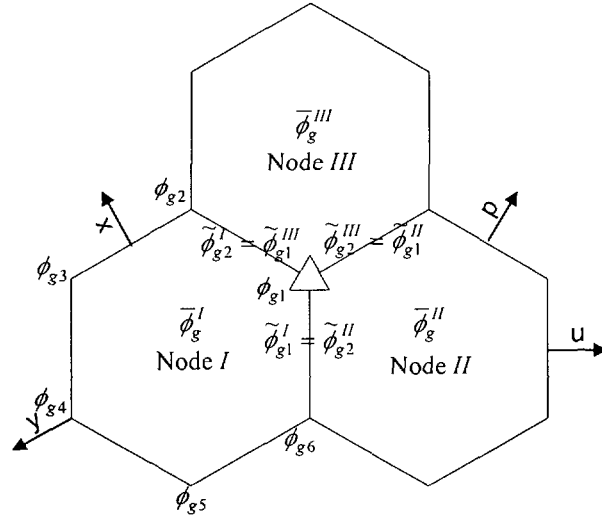


그림 2. 노드간 연관방정식 유도를 위한 반경방향 노드 배열

지금까지 유도한 세 가지 종류의 연관 방정식은 횡방향 누출근사식이 격자선 중성자속으로 바뀐 것을 제외하고는 기존의 횡방향 적분을 하는 반응행렬법의 연관방정식과 같은 형태를 갖는다. 따라서 반응행렬 형태의 해석함수 전개법은 기존의 반응행렬법 노달 계산 방법에서 횡방향 누출항 대신 격자선 중성자속항을 추가함으로써 쉽게 이식된다.

### 3. 수치 실험 결과 및 토론

본 연구에서 개발한 육각형 노심에 대한 반응행렬 형태의 해석함수전개 노달방법을 우리 연구소가 개발한 정방형 노심 분석용 코드인 MASTER에 이식하고 이 방법의 정확도와 소격 격자 재균형법에 의한 가속 능력을 검증하기 위하여 2차원 및 3차원 VVER-440[20] 검증 문제를 풀었다. 주요 검증 결과는 참고도서[21]에 발표될 예정이다.

표 1에 소격격자 재균형법으로 가속했을 때와 가속하지 않았을 때의 계산 시간을 비교하였다. 이 표에서 보면 반응행렬에 기초한 해석함수전개 노달방법은 소격격자 재균형법으로 8-10배 정도 가속되는 것을 알 수 있다. 또 이 표에서는 해석함수전개 노달방법의 노심 출력 및 노심 유효증배계수 예측 능력을 Chao와 Tsoufanidis[7]의 등각사상에 기초한 육각형 노달 방법과 비교하였다. 비교의 기준이 되는 표준해는 DIF3D[22] 계산이다. 비교 결과 노드 격자선 중성자속 계산에서 격자점 균형법(CPB) 보다 정확도가 떨어지는 것으로 알려진 순차적 원활화(MSS)을 사용했음에도 불구하고 해석함수 전개 노달방법이 등각사상법에 비하여 유사하거나 다소 나은 정확도를 보이는 것으로 나타났다.

그림 3과 4에서는 각각 2차원 및 3차원 계산의 집합체 평균 출력을 비교하였다. 기준해는 역시 DIF3D 계산이다. 두 그림을 보면 해석함수전개 노달방법이 집합체 출력분포와 노심 유효증배 계수를 매우 정확하게 예측하는 것을 알 수 있다.





표 1. 계산 결과와 계산 시간 비교

Core Dimension	Solution Method	$k_{eff}$ Error (pcm)	Relative Assembly Power Error (%)		CPU time <sup>a</sup> (sec)
			Maximum	Average	
2D	AFEN	-10	0.25	0.09	0.6(4.8) <sup>c</sup>
	Chao <sup>b</sup>	37	0.82	-	-
3D	AFEN	16	1.10	0.19	5.9(56.1)
	Chao	25	1.00	-	-

a : HP735-125

b : Chao와 Tsoulfanidis[7]의 등각사상법

c : 괄호안은 소격격자 균형법 가속을 하지 않은 경우

#### 4. 결론

현재까지 적용되어온 노달방법들을 검토하여 AFEN방법과 장단점을 비교하였다. 일반적으로 육각형 노심 구조에서 노달방법의 정확도는 횡방향 누출 근사에 민감하게 의존하고 있다. 기존 노달방법은 노드 중심선 근처에서 불연속 특성을 보이는 횡방향 누출항들을 간단한 연속함수로 근사하거나 불연속항을 무시하여 정확도가 떨어지게 된다. 그러나 해석함수전개 노달방법은 횡방향 누출항들이 필요하지 않기 때문에 육각형 노심 해석에서도 정확도를 유지할 수 있다.

본 연구에서는 육각형 노심에 대하여 뛰어난 정확도를 보이는 해석함수전개 노달방법을 반응행렬 형태로 변환하고 우리 연구소의 노심 분석 코드인 MASTER에 이식하였다. VVER-440 벤치마크 문제를 풀어 검증한 결과 새로운 형태의 해석함수전개 노달방법이 노심 출력분포와 유효 증배계수를 매우 정확하게 예측하며 소격격자 재균법으로 충분히 가속됨을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] H. Finnemann, F. Bennewitz, and M. R. Wagner, "Interface Techniques for Multidimensional Reactor Calculations," *Atomkern-energie*, 30, 123 (1977)
- [2] K. S. Smith, "An Analytic Nodal Method for Solving the Two-Group, Multidimensional, Static and Transient Neutron Diffusion Equation," Nuclear Engineering Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1979)
- [3] Y. A. Chao and Y. A. Shatilla, "The Theory of ANC-H : A Hexagonal Nodal Diffusion Code Using Conformal Mapping," Proc. 1994 Topl. Mtg. on Advances in Reactor Physics, Knoxville, Tennessee, April 11-15, 1994, vol.II, p.324, American Nuclear Society (1994)
- [4] M. P. Knight, P. K. Hutt, and I. Lewis, "Comparison of PANTHER Nodal Solutions in Hexagonal-Z Geometry," Proc. 1994 Topl. Mtg. on Advances in Reactor Physics, Knoxville, Tennessee, April 11-15, 1994, vol.II, p.347, American Nuclear Society (1994)
- [5] M. R. Wagner, "Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-Z Geometry," *Nucl. Sci. Eng.*, 103, 377 (1989)
- [6] Y. A. Chao, "Comments on the Treatment of Transverse Leakage in Advanced Nodal Codes for Hexagonal Nodes," *Nucl. Sci. Eng.*, 109, 423 (1991)
- [7] Y. A. Chao and N. Tsoulfanidis, "Application of Conformal Mapping to Nodal Methods for Hexagonal Nodes," Proc. of Joint Int. Conf. on Mathematical Methods and Supercomputing in Nuclear Applications, Karlsruhe, Germany, April 19-23, 1993, Vol.I, p.605, Kernforschungs-zentrum Karlsruhe (1993)

- [8] J. M. Noh and N. Z. Cho, "A New Nodal Method: Approach of Analytic Basis Function Expansion," Proc. of the Korean Nuclear Society Spring Mtg., Kwangju, Korea, May 21-22, 1993, p.13, Korean Nuclear Society (1993)
- [9] J. M. Noh and N. Z. Cho, "A New Diffusion Nodal Method Based on Analytic Basis Function Expansion," Trans. Am. Nucl. Soc., 69, 462 (1993)
- [10] J. M. Noh and N. Z. Cho, "A New Approach of Analytic Basis Function Expansion to Neutron Diffusion Nodal Calculation," Nucl. Sci. Eng., 116, 165 (1994)
- [11] J. M. Noh and N. Z. Cho, "Analytic Function Expansion Nodal Method for Hexagonal Nodes," Proc. 1994 Topl. Mtg. on Advances in Reactor Physics, Knoxville, Tennessee, April 11-15, 1994, vol.I, p.95, American Nuclear Society (1994)
- [12] N. Z. Cho and J. M. Noh, "The AFEN Method for Hexagonal Nodal Calculation and Reconstruction," Trans. Am. Nucl. Soc., 71, 466 (1994)
- [13] N. Z. Cho and J. M. Noh, "Analytic Function Expansion Nodal Method for Hexagonal Geometry," Nucl. Sci. Eng., 121, 245-253 (1995)
- [14] H. Finnemann, R. Böer and J. Hüsken, "Finite Difference Solution of the Flux Reconstruction Problem in Nodal Reactor Analysis," Proc. of Joint Int. Conf. on Mathematical Methods and Supercomputing in Nuclear Applications, Karlsruhe, Germany, April 19-23, 1993, Vol.I, p.533, Kernforschungs-zentrum Karlsruhe (1993)
- [15] N. Z. Cho and J. M. Noh, "Hybrid of AFEN and PEN Methods for Multigroup Diffusion Nodal Calculation," Trans. Am. Nucl. Soc., 73, 438 (1995)
- [16] J. M. Noh and N. Z. Cho, "A Multigroup Diffusion Nodal Scheme

- in Rectangular and Hexagonal Geometries : Hybrid of AFEN and PEN Methods,” Proc. of Int. Conf. on the Physics of Reactors, PHYSOR96, Mito, Japan, September 16-20, 1996, vol. 1, p. A-53, Japan Atomic Energy Research Institute (1993)
- [17] J. M. Noh, L. Pogosbekyan, Y. J. Kim, and H. K. Joo, “A General Approach to Multigroup Extension of Analytic Function Expansion Nodal Method based on Matrix Function Theory,” Proc. of Joint Int. Conf. on Mathematical Methods and Supercomputing in Nuclear Applications, Saratoga, New York, October 6-10, 1997, vol. 1, p. 144, American Nuclear Society (1997)
- [18] K. Koebke, “A New Approach to Homogenization and Group Condensation,” Proc. Specialists’ Mtg. Homogenization Methods in Reactor Physics, Lugano, Switzerland, November 13-15, 1978, IAEA-TECDOC-231, p. 303, International Atomic Energy Agency (1978)
- [19] K. S. Smith, “Spatial Homogenization Methods for Light Water Reactor Analysis,” Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1980)
- [20] F. Seidel, W. Mai, H. Wochenfuss, and U. Grundmann, “2-D and 3-D Diffusion Calculations for the VVER-440 Core Model,” presented at 13th Symp. on Physics of VVER, Curtea de Agres, Romania, October (1984)
- [21] Byung-Oh Cho, Jae-Man Noh, Chang-Ho Lee, Jae-Seung Song and Quun S. Zee, “Partial Current Based AFEN Formulation for Hexagonal-z Neutronics Solver in MASTER,” to appear in Proc. of Int. Conf. on the Physics of Nuclear Science and Technology, Long Island, New York, October 5-8, 1998, American Nuclear Society (1998)
- [22] K. L. Derstine, “DIF3D: A Code to Solve One-, Two-, and Three-dimensional Finite Difference Diffusion Theory Problems,” Report ANL-82-64, Argonne National Laboratory (1984)

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-1022/98					
제목/부제	육각형 노심분석을 위한 반응행렬 형태의 해석함수전개 노달방법				
연구책임자 및 부서명 (AR, TR일 경우 주저자)	노재만 (신형원자로 고유노심기술개발)				
연구자 및 부서명	김궁구, 지성균, 주형국, 조병오, 정형국, 조진영, 장문희 (신형원자로 고유노심기술개발)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	1998. 3.
페이지	21 p.	도표	있음( V ), 없음( )	크기	26 Cm
참고사항	원자력 연구개발 중장기 과제				
비밀여부	공개( V ), 대외비( ), _ 급비밀	보고서종류	기술보고서		
연구위탁기관		계약번호			
초록 (15-20줄 내외)	<p>노달방정식 전개시 횡방향 적분에서 파생되는 단점을 극복하기 위하여 개발한 해석함수전개 노달방법 (AFEN: Analytic Function Expansion Nodal)은 사각형 노심뿐만 아니라 육각형 노심의 중성자속 분포를 예측하는데도 매우 유용하다.</p> <p>일반적으로 육각형 노심 구조에서 노달방법의 정확도는 횡방향 누출 근사에 민감하다. 기존 노달방법은 노드 중심선 근처에서 불연속 특성을 보이는 횡방향 누출을 간단한 연속함수로 근사하므로 정확도가 떨어진다. 그러나 해석함수전개 노달방법은 횡방향 누출이 필요하지 않기 때문에 육각형 노심 해석에서도 정확도를 유지할 수 있다.</p> <p>본 연구에서는 육각형 노심에 대하여 뛰어난 정확도를 보이는 해석함수 전개 노달방법을 반응행렬 형태로 변환하였다. 반응행렬 형태로 변환된 해석함수전개 노달방법은 MASTER와 같이 반응행렬 형태의 노드간 연관 방정식을 채택하고 있는 노달 코드에 쉽게 이식할 수 있고 또한 반응행렬 노달법의 장점인 소격격자 재균형 가속법(Coarse Mesh Rebalance Acceleration Method)을 충분히 활용할 수 있다.</p> <p>반응행렬형태의 해석함수전개 노달방법을 MASTER에 이식하고 2차원 및 3차원 VVER-440 벤치마크 문제를 풀어 검증하였다. 그 결과 집합체출력분포의 오차평균은 0.2% 이내, 유효증배계수 오차는 20pcm 이내로 매우 정확하였으며 계산시간도 소격격자 재균형법으로 가속할 때 8-10배 정도 빠라지는 것으로 나타났다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	해석함수전개 노달방법, 반응행렬법, 육각형 노심, 소격격자 균형법				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/TR-1022/98					
Title/ Subtitle		The Response-Matrix Based AFEN Method for the Hexagonal Geometry			
Project Manager and Dept. (or Main Author)		Noh, Jae-Man (Development of Inherent Technologies for Advanced PWR Core)			
Researchers and Department		Kim, Keung-Koo ; Kim, Keung-Koo ; Zee, Sung-Quun ; Joo, Hyung-Kook ; Cho, Byung-Oh ; Jeong, Hyung-Guk ; Cho, Jin-Young (Development of Inherent Technologies for Advanced PWR Core)			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	1998. 3.
Page	21 p.	Ill. & Tab.	Yes( V ), No ( )	Size	26 Cm.
Note	Mid-to-Long-Term Nuclear R&D Plan				
Classified	Open( V ), Restricted( ), ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract(15-20 Lines)		<p>The Analytic Function Expansion Nodal (AFEN) method, developed to overcome the limitations caused by the transverse integration, has been used successfully to predict the neutron behavior in the hexagonal core as well as rectangular core. In the hexagonal node, the transverse leakage resulted from the transverse integration has some singular terms such as delta-function and step-functions near the node center line. In most nodal methods using the transverse integration, the accuracy of nodal method is degraded because the transverse leakage is approximated as a smooth function across the node center line by ignoring singular terms. However, the AFEN method in which there is no transverse leakage term in deriving nodal coupling equations keeps good accuracy for hexagonal node.</p> <p>In this study, the AFEN method which shows excellent accuracy in the hexagonal core analyses is reformulated as a response matrix form. This form of the AFEN method can be implemented easily to nodal codes based on the response matrix method. Therefore, the Coarse Mesh Rebalance (CMR) acceleration technique which is one of main advantages of the response matrix method can be utilized for the AFEN method.</p> <p>The response matrix based AFEN method has been successfully implemented into the MASTER code and its accuracy and computational efficiency were examined by analyzing the two- and three- dimensional benchmark problem of VVER-440. Based on the results, it can be concluded that the newly formulated AFEN method predicts accurately the assembly powers (within 0.2% average error) as well as the effective multiplication factor (within 20 pcm error). In addition, the CMR acceleration technique is quite efficient in reducing the computation time of the AFEN method by 8 to 10 times.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		AFEN, Response Matrix, Hexagonal Geometry, CMR			