

육각형 노심 설계해석을 위한 삼각형 기반 다항식 전개 노달법

Triangle based Polynomial Expansion Nodal Method for Hexagonal Core Design and Analysis

조진영, 조병오, 주한규, 박상윤, 지성균
한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

이 연구에서는 3차원 공간에 대한 고차 다항식 전개법의 단점을 개선하고자 반경방향에 대한 계산법과 축방향에 대한 계산법을 분리하여 반경방향에 대해서는 2차원 공간의 고차다항식 전개법을, 축방향에 대해서는 노달 전개법을 사용하여 각각의 장점을 살리는 삼각형 기반 다항식 전개법(TPEN: Triangle based Polynomial Expansion Nodal method)을 개발하였다. 그리고 이 방법을 육각형을 기반노드로 하며 거시격자 재균형법을 사용하는 MASTER 코드에 이식시켰다. 이를 위해 육각형 노드내 6개 삼각형을 직접 풀어 삼각형 기반 다항식전개법에 의한 노달 해가 육각형 노드를 기반으로 계산되도록 하였으며 육각형 외각의 꼭지점 중성자속항 계산법을 MASTER 코드에서 사용하는 방법을 도입하여 거시격자 재균형법으로부터 갱신된 노달 평균중성자속이 꼭지점중성자속에 효과적으로 반영되도록 하였다. 이 방법은 계산 속도면에서 기존의 HOPEN 방법에 비해 약 2배 빠른 것으로 나타났으며 육각형 노드를 기반노드로 하는 해석함수 전개법과 비슷한 것으로 나타났다. 그리고 계산의 정확도에서도 모든 고유치 벤치마크 문제에서 15 pcm 이내의 고유치 오차를, 1% 이내의 최대 집합체 출력오차를 보였으며 과도문제에도 훌륭히 적용됨을 확인하였다.

ABSTRACT

A triangle based polynomial expansion nodal(TPEN) method is developed which combines the higher order polynomial expansion nodal(HOPEN) method and the nodal expansion method(NEM) such that they are used repectively for the radial and axial direction. This method improves the inefficient point flux computation scheme of the original higher order polynomial expansion nodal method. To implement the TPEN method to the MASTER code which employs the hexagon based coarse mesh rebalancing scheme for acceleration, TPEN method is formulated such that it solves one hexagonal node with 6 triangular nodes and the coupled solution for the 6 triangles is obtained by direct elemination. The point flux calculation scheme of MASTER code used in conjunction with a analytic function expansion nodal(AFEN) method is used with no alternation. This method is applied to various hexagonal eigenvalue benchmark problems and a VVER-1000 rod ejection transient problem. The computational speed of this method was measured to be about 2 times faster than the original HOPEN method and comparable to the AFEN method. This method is also very accurate showing less than 15 pcm of eigenvalue errors and less than 1% maximum assembly power

errors for the all eigenvalue benchmark problems.

1. 서론

3차원 공간에 대한 고차 다항식 전개(HOPEN: Higher Order Polynomial Expansion Nodal)법¹은 프리즘 노드내 중성자속 분포를 노드 평균 중성자속, 3개의 x-, y-, z-모멘트, 5개의 면평균 중성자속, 6개의 꼭지점 중성자속 등 모두 15개의 중성자속항을 사용하여 3차원 함수로 근사한다. 그리고 이들 각각의 중성자속항을 구하기 위하여 노달 중성자 평형식, 3개의 가중 중성자 평형식, 5개의 면평균 중성자류 연속식, 6개의 중성자 누설 균형식을 사용한다. 따라서 3차원 공간에서의 고차다항식 전개법은 각 식에서 관련되는 중성자속 항의 수가 많으며 특히 중성자 누설 균형식에서는 한 꼭지점을 둘러싸는 12개 프리즘 노드의 많은 중성자속항이 연관되어 매우 복잡한 식이 유도되며 계산 능률을 떨어뜨린다.

이 연구에서는 3차원 공간에 대한 이러한 고차다항식전개법의 단점을 개선하고자 반경방향에 대한 계산법과 축방향에 대한 계산법을 분리하여 반경방향에 대해서는 2차원 공간의 고차다항식 전개법을, 축방향에 대해서는 노달 전개법(NEM: Nodal Expansion Method)²를 사용하여 각각의 장점을 살리는 삼각형 기반 다항식 전개법(TPEN: Triangle based Polynomial Expansion Nodal method)을 개발한다. 그리고 이 방법을 육각형을 기저노드로 하며 거시격자 재균형법을 사용하는 MASTER³ 코드에 이식시키기 위해 하나의 육각형 노드를 구성하는 6개 삼각형 노드에 대한 응답행렬을 구성하여 Gaussian 소거법으로부터 TPEN 방법에 의한 노달 해가 육각형 노드 기준으로 계산되도록 한다. 또한 거시격자 재균형법으로부터 새로이 계산된 육각형 노드의 중성자속으로부터 꼭지점 중성자속을 효과적으로 갱신하기 위해 MASTER 코드에서 사용하는 꼭지점 중성자속 계산법³을 도입하여 꼭지점 중성자속 계산한다.

2. 삼각형 기반 다항식 전개 노달(TPEN)법

3차원 노드 n에서 다군 중성자 확산방정식은 아래와 같이 나타난다.

$$-D_g^n \nabla^2 \phi_g^n(\vec{r}) + \Sigma_{rg}^n \phi_g^n(\vec{r}) = \frac{\chi_g}{k} \sum_g \nu \Sigma_{fg}^n \phi_g^n(\vec{r}) + \sum_g \Sigma_{sg}^n \phi_g^n(\vec{r}). \quad (1)$$

이를 축방향으로 적분하고 축방향으로의 중성자 누설을 중성자원항으로 처리하여 식의 오른쪽으로 이항하면 아래와 같은 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} -D_g^n \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi_g^n(x, y) + \Sigma_{rg}^n \phi_g^n(x, y) \\ = \frac{\chi_g}{k} \sum_g \nu \Sigma_{fg}^n \phi_g^n(x, y) + \sum_g \Sigma_{sg}^n \phi_g^n(x, y) + S_{gz}^n(x, y). \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$\phi_g^n(x, y) = -\frac{1}{h_z^n} \int \phi_g^n(\vec{r}) dz,$$

$$\begin{aligned}
S_{gz}^n(x, y) &= -\frac{1}{h_z^n} \int -D_g^n \frac{\partial^2}{\partial z^2} \phi_g^n(\vec{r}) dz \\
&= -\frac{1}{h_z^n} \{J_{gz}^{n,T}(x, y) - J_{gz}^{n,B}(x, y)\}.
\end{aligned}$$

TPEN 방법에서는 위의 식을 삼각형 노드를 기본노드로 하는 고차 다항식전개법으로 푼다. 위의 식을 풀기 위해서는 축방향 중성자 누설량에 대한 정보가 미리 알려져 있어야 하며 이를 구하기 위한 축방향에 대한 노달계산법이 필요하다. 이를 위해 TPEN에서는 축방향에 대해 노달 전개법(NEM)을 도입한다.

축방향으로의 노달 해를 구하기 위한 1차원 식은 위의 식 (1)을 반경방향에 대해 적분하면 구할 수 있으며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$-D_g^n \frac{\partial^2}{\partial z^2} \phi_g^n(x, y) + \Sigma_{rg}^n \phi_g^n(z) = \frac{\chi_g}{k} \sum_g \nu \Sigma_{fg}^n \phi_g^n(z) + \sum_g \Sigma_{sg} \phi_g^n(z) + S_{gr}^n(z). \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned}
\phi_g^n(z) &= -\frac{1}{A^n} \int \phi_g^n(\vec{r}) d\vec{r} \\
S_{gr}^n(z) &= -\frac{1}{A^n} \int -D_g^n \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi_g^n(\vec{r}) d\vec{r}
\end{aligned}$$

위의 식을 노달 전개법에 의해 풀기 위해서는 횡방향으로의 중성자 누설의 축방향분포를 미리 알아야 한다. 이는 반경방향에 대한 고차다항식 전개법의 노달해로부터 구해진 노드 평균 반경방향 중성자 누설값으로부터 2차 횡방향누설 근사법을 이용해 구할 수 있다.

현 MASTER 코드의 육방형 노심 계산체계는 육각형 노드에 대한 거시격자 재균형법(CMR: Coarse-Mesh Rebalancing method)에 기초하고 있다. 따라서 이 연구에서는 삼각형 기반 다항식 전개법을 MASTER 코드에 이식하기 위해 하나의 육각형 노드를 구성하는 6개 삼각형 노드에 대한 수식체계를 응답행렬로 표현하고 이를 육각형 노드 경계조건으로부터 Gaussian 소거법을 이용하여 직접 구하는 방법을 채택하였으며 2.1절에서 자세히 설명한다. 축방향으로의 중성자 분포 계산은 육각형 노드를 기반으로 하는 노달 전개법을 적용하였으며 이 방법은 기존의 노달 전개법과 같으므로 여기서는 언급하지 않는다.

육각형 노드에 대한 축방향 NEM 결과로 부터는 육각형 노드에 대한 평균 중성자 누설량만을 계산할 수 있으므로 위의 식 (2)에 필요한 반경방향으로의 중성자 누설분포는 이들 정보를 이용하여 근사하여야 한다. 이 연구에서는 반경방향으로의 중성자 누설분포를, 근사하고자 하는 육각형 노드 및 주위 6개의 육각형 노드의 축방향 평균 중성자 누설량으로부터 근사하며 이로부터 육각형 노드를 구성하는 6개의 삼각형 노드에 대한 평균 중성자 누설량과 중성자 누설량의 x-, y-모멘트 항을 계산한다. 이에 대해서는 2.2절에서 구체적으로 설명한다.

응답행렬에 의한 육각형 노드내 중성자속 분포 계산법은 육각형내 존재하는 6개의 삼각형노드의 평균중성자속 및 x-, y-가중평균 중성자속, 육각형 노드내부에 존재하는 6개의 내부 면평균 중성자속, 육각형내부의 중심점 중성자속 및 육각형 외부로 나가는 부분중성자류를 계산한다. 그리고 이들을 구하기 위해 육각형을 둘러싸는 6개 면에서는 인입 부분중성자류 및 6개 꼭지점에서의 꼭지점 중성자속을 경계조건으로 가정하였다. 6개 면에서의 인입 부분중성자류는 반복 계산법에 의해 갱신되나, 6개 꼭지점에서의 중성자속은 따로 계산되어야 한다. 이 연구에서는 기존의

MASTER 코드에서 사용하는 방법을 사용하였으며 2.3 절에서 간략히 정리하였다.

2.1 육각형 노드에 대한 응답행렬

2차원 공간에서의 고차다항식 전개법은 삼각형노드내 중성자속 분포를 구하기 위해 노달 중성자 평형식, 가중 노달 중성자 평형식, 총 중성자류 연속조건 및 꼭지점에서의 중성자누설 균형식을 사용한다. 삼각형 기반 다항식전개법에서도 고차다항식전개법에서와 동일한 방법으로 노드내 중성자속 분포를 구하므로 총중성자류 연속조건과 꼭지점에서의 중성자 누설 균형식은 동일하다. 그러나 식 (2)에서 나타낸 바와 같이 삼각형 기반 다항식전개법에서 사용하는 2차원 공간에 대한 다군 중성자 확산 방정식은 3차원 공간에 대한 식으로부터 유도된 것이므로 축방향 중성자 누설에 따른 중성자원항을 포함하고 있으며 이로부터 유도된 노달 중성자 평형식과 가중노달 중성자 평형식 또한 축방향 중성자 누설항을 포함한다. 따라서 여기서는 고차다항식 전개법에서 사용하는 식에 추가되는 이들 축방향 중성자 누설에 의한 중성자원 항만을 살펴보기로 한다.

노달 중성자 평형식은 식 (2)를 삼각형노드에 대해 적분함으로써 구해지므로 축방향 중성자 누설에 의한 중성자원 항은 아래와 같이 표현된다.

$$\bar{S}_{gz}^n = \frac{1}{A^n} \int S_g^z(x, y) dA. \quad (4)$$

그리고 x -, y -가중 평형식에서의 축방향 누설에 의한 중성자원항은 아래와 같이 표현된다.

$$w(x, y) = x: \quad \bar{S}_{gzx}^n = \frac{1}{A^n} \frac{2\sqrt{3}}{3h} \int x S_g^z(x, y) dA, \quad (5-a)$$

$$w(x, y) = y: \quad \bar{S}_{gzy}^n = \frac{1}{A^n} \frac{2}{h} \int y S_g^z(x, y) dA. \quad (5-b)$$

따라서 축방향 중성자 누설의 반경방향 분포가 알려지면 식 (4)와 (5)로부터 평균 중성자 누설량과 중성자 누설량의 x -, y -모멘트를 쉽게 구할 수 있다. 축방향 중성자 누설의 반경방향 분포 근사법은 2.2절에서 언급한다.

그림 1은 6개의 삼각형 노드로 구성된 육각형노드를 다항식전개법에 의해 해를 구할 때 필요한 육각형 노드의 경계조건들과 노드내 미지수들을 표시한 것이다. 여기서 x 방향은 표현의 편의상 각 삼각형에 대해 따로이 정의되며 이는 육각형의 중심점에서 육각형 노드의 외부면으로 나가는 방향을 취하였다. 그림 1에서 노드 경계치들은 육각형 노드를 둘러싸는 6개 경계면에서의 인입부분중성자류와 6개 꼭지점에서의 점중성자속항 6개이다. 그리고 노드내 미지수들은 각 삼각형 내에 있는 노드평균중성자속항 6개, x -모멘트 및 y -모멘트 각각 6개, 삼각형 노드사이에 있는 면평균중성자속항 6개와 육각형 노드 외부로 나가는 부분중성자류항 6개, 그리고 육각형 노드 중심에 있는 점중성자속항 1개이다. 따라서 이들 31개의 미지수들을 구하기 위해서는 31개의 식이 필요하다. 이들은 6개의 삼각형 노드내 노달 중성자 평형식, 6개의 x -가중평형식, 6개의 y -가중평형식, 노드내부면에서의 면평균 중성자류 연속관계식 6개, 노드 외부면에서의 6개 인입중성자류 조건 및 노드 중심점에서의 중성자누설 균형식 1개로 구성되어 있다. 이들 모든 수식체계들은 아래와 같은 반응행렬식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_3 & \mathbf{A}_4 \\ \mathbf{0} & \mathbf{X}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{X}_2 & \mathbf{X}_3 & \mathbf{X}_4 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_1 & \mathbf{S}_2 & \mathbf{S}_3 & \mathbf{S}_4 & \mathbf{0} & \mathbf{S}_5 \\ \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{P}_2 & \mathbf{P}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\phi} \\ \tilde{\phi}_x \\ \tilde{\phi}_y \\ \bar{\phi}_s \\ \bar{J}_0 \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{q} \\ \tilde{q}_x \\ \tilde{q}_y \\ \bar{q}_s \\ \bar{q}_j \\ \mathbf{q}_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $\bar{\phi}$, $\tilde{\phi}_x$, $\tilde{\phi}_y$, $\bar{\phi}_s$ 및 \bar{J}_0 는 열의 수가 $6G$ (G 는 에너지군 수)인 열벡터이며 ϕ_c 는 열의 수가 G 인 열벡터이다. 그리고 위의 식에서 반응행렬의 첫 번째 식은 6개 삼각형 노드에 대한 노달 중성자 평형식을 나타내는 것이며 두 번째와 세 번째 식은 x- 및 y-가중평형식을, 네 번째 식은 육각형 노드내부에 있는 6개 면에서의 총 중성자류 연속관계식을, 다섯 번째는 육각형 노드 외각에서의 인입 부분중성자류 조건을, 여섯 번째는 육각형노드 중심에 있는 점에서의 중성자 누설 균형식을 나타내는 것이다.

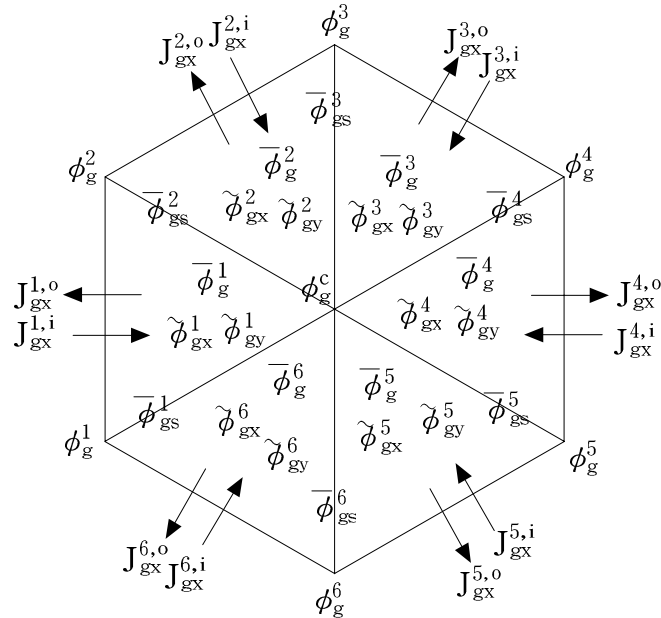


그림 1. 육각형 노드에 대한 TPEN용 미지수 및 경계조건

위의 식 (6)에서 모든 행렬요소들은 육각형 노드내 존재하는 모든 삼각형 노드에 대해 상호 대칭적인 요소를 가지며 예를 들어 \mathbf{S}_1 을 살펴보면 다음과 같다.

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_2 \\ s_2 & s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_2 & s_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_2 & s_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_2 & s_1 \end{bmatrix}$$

이러한 특성으로 인해 식 (6)은 Gaussian-소거법에 의해 해를 쉽게 구할 수 있으며 이 연구에서도 이 방법에 의해 직접 해를 구하는 방식을 채택하였다.

2.2 축방향 중성자 누설 근사

그림 2는 육각형 노드내 축방향 중성자 누설의 반경방향 분포를 구하기 위한 노드와 이 노드를 둘러싸는 6개의 육각형 노드를 나타내고 있다. 육각형 각 노드에서의 축방향 평균 중성자누설값은 축방향에 대한 노달전개법의 해로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\bar{S}_{gz}^n = -\frac{1}{h_z^n} (\bar{J}_{gz}^{n,T} - \bar{J}_{gz}^{n,B}) \quad (7)$$

위의 식으로부터 구해진 그림 2의 7개 육각형 노드에서의 축방향 평균 중성자 누설값을 이용하면 식 (2)의 축방향으로의 중성자 누설의 반경방향 분포는 아래와 같이 근사할 수 있다.

$$S_{gz}^n(x, y) = d_{g0}^n + d_{g1}^n x + d_{g2}^n y + d_{g3}^n x^2 + d_{g4}^n u^2 + d_{g5}^n p^2 + d_{g6}^n xup. \quad (8)$$

여기서

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

$$p = -\frac{1}{2}x + \frac{\sqrt{3}}{2}y.$$

위의 식에 나타나는 전개상수들은 위의 식을 식 (4)에 대입하고 그림 2의 7개 육각형 노드에서의 축방향 평균 중성자 누설값을 이용하면 구할 수 있다.

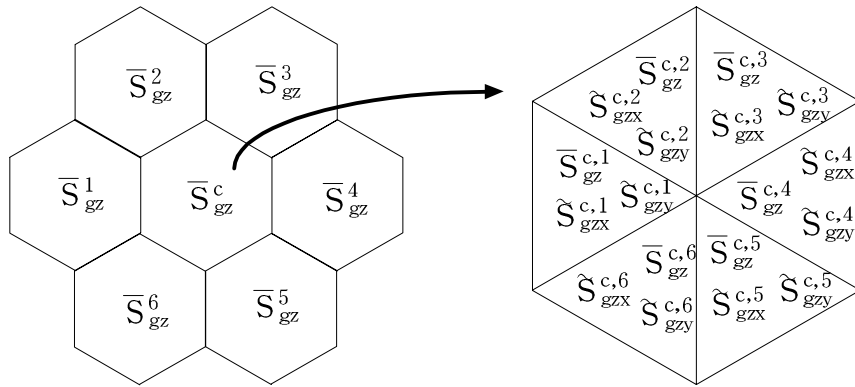


그림 2. 축방향으로의 중성자 누설에 의한 중성자원

TPEN 방법은 삼각형 노드에 기초하고 있으므로 육각형 노드내에 있는 6개의 삼각형 노드에 대한 축방향 평균 중성자 누설량 및 축방향 중성자 누설에 대한 x-, y-모멘트를 모두 계산하여야 한다. 이는 위의 식 (7)을 식 (4)와 식(5)에 대입하여 이를 삼각형 노드에 대해 적분함으로써 구할 수 있다. 예를 들어 그림 2의 육각형 노드 c 내에 있는 삼각형 노드 1에 대해 이들을 나타내면 다

음과 같다.

$$\begin{aligned}
\bar{S}_{gz}^{c,1} &= w_1 \bar{S}_{gz}^c + w_2 \bar{S}_{gz}^1 + w_3 (\bar{S}_{gz}^2 + \bar{S}_{gz}^6) + w_4 (\bar{S}_{gz}^3 + \bar{S}_{gz}^5) + w_5 \bar{S}_{gz}^4, \\
\hat{S}_{gzx}^{c,1} &= w_{x1} \bar{S}_{gz}^c + w_{x2} \bar{S}_{gz}^1 + w_{x3} (\bar{S}_{gz}^2 + \bar{S}_{gz}^6) + w_{x4} (\bar{S}_{gz}^3 + \bar{S}_{gz}^5) + w_{x5} \bar{S}_{gz}^4, \\
\hat{S}_{gzy}^{c,1} &= w_{y1} (\bar{S}_{gz}^2 - \bar{S}_{gz}^6) + w_{y2} (\bar{S}_{gz}^3 - \bar{S}_{gz}^5).
\end{aligned} \tag{8}$$

여기서

$$\begin{aligned}
w_1 &= 1, \quad w_2 = \frac{83}{540}, \quad w_3 = \frac{17}{540}, \quad w_4 = -\frac{37}{540}, \quad w_5 = -\frac{43}{540}, \\
w_{x1} &= -\frac{1}{54}, \quad w_{x2} = \frac{59}{3240}, \quad w_{x3} = \frac{7}{1620}, \quad w_{x4} = -\frac{1}{324}, \quad w_{x5} = -\frac{7}{3240}, \\
w_{y1} &= \frac{1}{40}, \quad w_{y2} = \frac{1}{360}.
\end{aligned}$$

2.3 꼭지점 중성자속 계산법

그림 3은 꼭지점 중성자속 계산을 위한 하나의 꼭지점과 이를 둘러싸는 3개의 육각형 노드를 나타낸 것이다. 꼭지점에서의 중성자속은 중성자 누설 균형식으로부터 계산되며 이 식을 표현하기 위해서는 각 육각형 노드내부의 중성자속 분포를 알아야 한다. 육각형 노드 내부에서의 중성자속 분포는 육각형 노드평균 중성자속과 육각형 노드를 둘러싸는 6개의 면평균 중성자속, 그리고 6개의 꼭지점 중성자속으로부터 아래와 같이 근사할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\phi_g^n(x, y) &= C_0^n + A_{gx}^n \xi_{10}(x) + B_{gx}^n \xi_{20}(x) + C_{gx}^n \xi_{01}(y) + D_{gx}^n \xi_{02}(y) \\
&\quad + A_{gu}^n \xi_{10}(u) + B_{gu}^n \xi_{20}(u) + C_{gu}^n \xi_{01}(v) + D_{gu}^n \xi_{02}(v) \\
&\quad + A_{gp}^n \xi_{10}(p) + B_{gp}^n \xi_{20}(p) + C_{gp}^n \xi_{01}(q) + D_{gp}^n \xi_{02}(q).
\end{aligned} \tag{9}$$

여기서

$$\xi_{10}(t) = t^3 + t, \quad \xi_{20}(t) = t^4 + t^2, \quad \xi_{01}(t) = t^3 - t, \quad \xi_{02}(t) = t^4 - t^2.$$

그리고 식 (9)의 13개 계수는 육각형 노드의 노드평균 중성자속, 6면의 면평균중성자속, 6개 꼭지점에서의 점중성자속을 사용하면 쉽게 구할 수 있다.

그림 3의 중심점에서의 중성자 누설 균형식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{n=1}^3 L_g^n = 0. \tag{10}$$

위의 식에 식 (9)를 대입하면 그림 3의 중심점에서의 중성자속항 계산을 위한 수식을 얻을 수 있다. 이 수식의 특징은 한 꼭지점에서의 중성자속은 그 점이 속한 평면에 존재하는 다른 노달 미지수들과는 관련이 있으나 다른 평면에 존재하는 노달 미지수들과는 직접적인 관련이 없다는 점이다. 따라서 k 번째 평면에서 이들 꼭지점 중성자속항들을 구하기 위한 중성자 누설 균형식을 꼭지점 중성자속항 이외의 다른 중성자속항들을 오른쪽으로 이항하여 꼭지점 중성자속항들만으로 구성되는 수식체계로 표현할 수 있으며 아래와 같이 나타난다.

$$C_p^k \phi_p^k = Q_p^k. \tag{11}$$

위의 식에서 C_p 는 대각선에 나타나는 행렬요소값이 매우 커서 Gauss-Seidel법에 의한 몇번의 반복계산만으로도 꼭지점 중성자속을 구할 수 있다.

거시격자 재 균형법에서는 재균형 인자로부터 노달 평균 중성자속 및 부분중성자류는 쉽게 갱신할 수 있으나 꼭지점 중성자속항은 쉽지가 않다. 그러나 위의 식 (11)을 사용하면 거시격자 재 균형법으로부터 갱신된 노달 평균 중성자속항 및 면평균 중성자속을 이용하여 꼭지점 중성자속항을 쉽게 갱신할 수 있다.

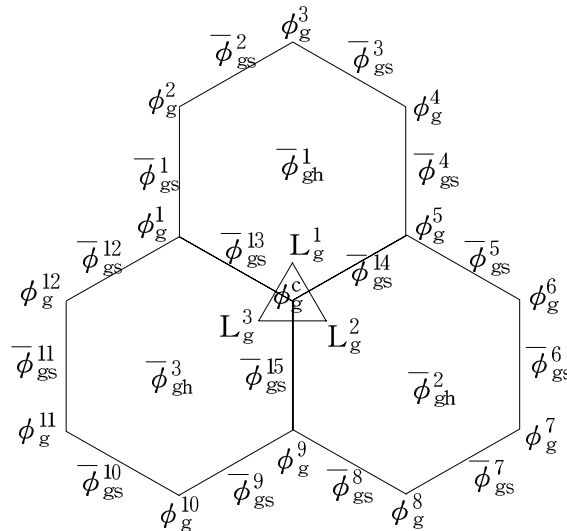


그림 3. 하나의 꼭지점을 둘러싸는 세 육각형 노드의 각 중성자속항

3. 벤치마크 문제 및 계산결과

삼각형 기반 다항식전개법의 성능을 평가하기 위해 이 방법을 MASTER 코드에 이식시켰다. 그리고 MASTER-TPEN을 사용하여 여러 가지 고유치 벤치마크 문제⁴와 VVER-1000 과도해석문제^{5,6}를 풀었으며 계산속도 및 정확도를 고차 다항식전개법(HOPEN) 및 MASTER-AFEN⁷과 비교하였다.

표 1은 고유치 벤치마크 문제에 대한 MASTER-TPEN 방법의 결과를 보여준다. TPEN 방법은 정확도에서 최대 15 pcm이내의 고유치 오차를 보였으며, 노심내 노드 출력에서는 최대 1% 정도의 오차를 보였다. 이를 HOPEN의 결과와 비교해 보면 정확도가 많이 향상되었음을 알 수 있으며 그 정확도가 MASTER-AFEN 결과와 비슷하다. 또한 계산시간은 VVER-440 3차원 문제가 13.9초로 나타났으며, VVER-1000 3차원 문제는 4.3초로 나타나 HOPEN 방법에 비해 약 2배 빠르며 AFEN 방법과 비슷함을 알 수 있다.

VVER-1000 노심의 제어봉 인출 과도해석문제는 총 163개의 핵연료집합체 중 6개의 핵연료집합체에 제어봉이 80% 삽입되어 있고, 또다른 6개의 핵연료집합체에는 제어봉이 완전히 삽입되어 정격출력의 10%로 운전하다가 완전삽입된 제어봉중 3개가 0.1초 사이에 비대칭적으로 노심에서 완전히 인출되는 문제이다. 이 문제는 핵연료집합체의 핵단면적이 핵연료 온도, 냉각재 온도, 수용성 보론양의 함수로 주어져 있으며, 동특성인자, 열수력계산을 위한 노심 입구온도 및 핵연료 온도계산을 위한 자료들이 주어져 있다.

그림 2는 VVER-1000 과도해석문제의 시간에 따른 노심 출력변화를 SAS-DIF3DK 결과와 비교하여 보여준다. 초기 정격출력의 10%이던 노심출력은 제어봉이 인출됨에 따라 증가하여 정격출력의 약 90%까지 증가하다가 노심내 열수력에 의한 음의 반응도 궤환효과에 의해 시간이 지나면서 노심 출력이 감소하여 5초후에는 정격출력의 약 40% 정도로 뒹을 알 수 있다. 또한 이 결과는 SAS-DIF3DK 결과와 비교하여 최대 출력에서 다소 차이가 있을뿐 전체적으로 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다. 또한 TENAR 코드와도 거의 유사함을 알 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 3차원 공간에 대한 고차 다항식 전개법의 단점을 개선하고자 반경방향에 대해서는 2차원 공간의 고차다항식 전개법을, 축방향에 대해서는 노달 전개법을 사용하여 각각의 장점을 살리는 삼각형 기반 다항식 전개법을 개발하였으며 육각형을 기저노드로 하며 거시격자 재균형법을 사용하는 MASTER 코드에 이식시켰다. 이 방법은 계산 속도면에서 기존의 HOPEN 방법에 비해 약 2배 빠른 것으로 나타났으며 육각형 노드를 기저노드로 하는 해석함수 전개법과 비슷한 것으로 나타났다. 그리고 계산의 정확도에서도 모든 고유치 벤치마크 문제에서 15 pcm 이내의 고유치 오차를, 1% 이내의 최대 집합체 출력오차를 보였다. 또한 이 방법은 VVER-1000 제어봉 인출 과도해석문제에도 훌륭히 적용되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. J. Y. Cho and C. H. Kim, "Higher Order Polynomial Expansion Nodal Method for Hexagonal Core Neutronics Analysis," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 25, issue 13, 1021-1031, 1998.
2. H. Finnemann et. al., "Interface Nodal Current Techniques for Multidimensional Reactor Calculations," *Atomkernenergie*, 30, 123, 1977.
4. B. O. Cho, et. al., "Partial Current based AFEN Formulation for Hexagonal-Z Neutronics Solver in MASTER," *International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology*, p469, Long Island, NY, 1998.
4. Y. A. Chao and Y. A. Shatilla, "Conformal Mapping and Hexagonal Nodal Method-II: Implementation in the ANC-H Code," *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 121, 210-225. (1995)
5. L. Podlazov, et. al., *Coupled Neutronic and Thermal-Hydraulic Code Benchmark Activities at the International Nuclear Safety Center*, *International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology*, p469, Long Island, NY, 1998.
6. L. Podlazov, et. al., *An International Nuclear Safety Center Report, Joint Project #2, Phase 2 Task #7D*, 1997.
7. J. M. Noh and N. J. 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, 95, American Nuclear Society(1994).

표 1. 육방형 노심에 대한 고유치 벤치마크 문제 결과 비교

Problems	Method	Eigenvalue Error(pcm)	Power Error(%)		Computation Time(sec)*
			Max.	Avg.	
IAEA with Reflector ($\alpha=0.5$)	MASTER-TPEN	+15	0.41	0.20	-
	HOPEN	+41	1.02	0.49	
	MASTER-AFEN	-3	0.15	0.08	
IAEA with Reflector ($\alpha=0.125$)	MASTER-TPEN	+10	0.18	0.10	-
	HOPEN	+24	0.48	0.25	
	MASTER-AFEN	-3	0.54	0.10	
IAEA w/o Reflector ($\alpha=0.5$)	MASTER-TPEN	+2	0.12	0.03	-
	HOPEN	+64	2.22	1.00	
	MASTER-AFEN	-6	0.25	0.10	
IAEA w/o Reflector ($\alpha=0.125$)	MASTER-TPEN	-4	0.44	0.06	-
	HOPEN	+31	0.49	0.23	
	MASTER-AFEN	-6	0.35	0.16	
VVER-1000 2D ($\alpha=0.5$)	MASTER-TPEN	-15	0.98	0.29	-
	HOPEN	+30	3.84	1.52	
	MASTER-AFEN	-1	0.58	0.15	
VVER-1000 2D ($\alpha=0.125$)	MASTER-TPEN	-15	0.90	0.20	-
	HOPEN	+22	1.25	0.66	
	MASTER-AFEN	-5	0.52	0.13	
VVER-440 2D	MASTER-TPEN	+0	0.36	0.14	-
	HOPEN	+13	0.61	0.29	
	MASTER-AFEN	-4	0.10	0.03	
Large HWR	MASTER-TPEN	+2	0.20	0.05	-
	HOPEN	+3	0.26	0.09	
	MASTER-AFEN	+3	0.11	0.03	
VVER-1000 3D	MASTER-TPEN	-12	0.99	0.20	4.3
	HOPEN	+5	1.80	0.88	7.5
	MASTER-AFEN	+5	1.15	0.29	4.1
VVER-440 3D	MASTER-TPEN	+4	0.37	0.15	13.9
	HOPEN	+18	2.39	0.61	26.1
	MASTER-AFEN	+8	0.75	0.14	13.8

* 733 MHz PENTIUM-III

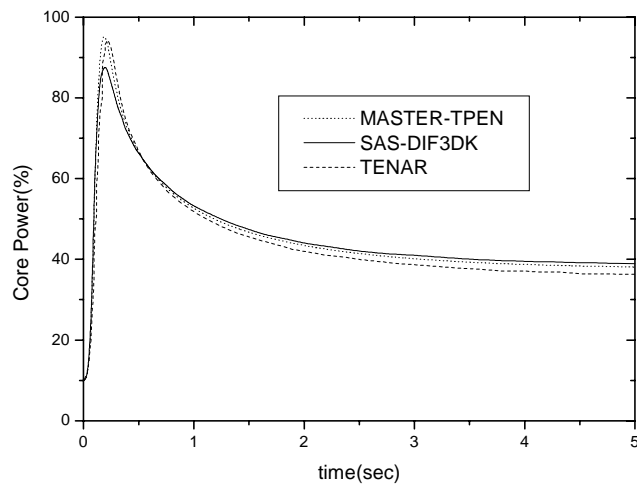


그림 4. VVER-1000 제어봉 인출 과도해석문제의 시간에 따른 노심 출력