

HEXFEM 코드의 연소계산 검증

이현철, 김창효
서울대학교

요 약

이 논문에서는 육방형 노심 해석용으로 제작된 코드인 HEXFEM의 연소계산 결과의 정확성을 VVER-1000 연소계산 벤치마크 문제를 통하여 검증하였으며 집합체내 연소도 구배 효과에 따른 오차를 분석하였다. 집합체내 연소도 구배효과를 고려했을 때 집합체내 균일한 연소도를 가정했을 때보다 오차가 현저히 감소하였으며 Cubic Option의 결과는 제어봉이 삽입된 1주기초(BOC1 ARI), 1주기초(BOC1), 1주기말(EOC1), 2주기초(BOC2)에 대해 집합체별 상대출력 오차가 최대 0.4%로 매우 정확한 결과를 얻었고 Quadratic Option의 결과도 최대 2.0%로 비교적 정확한 결과를 얻었다.

1. 서론

최근 육방형 격자구조를 갖는 신형 경수로에 대한 연구와 관련하여 육방형 노심 해석용 전산 코드 제작의 필요성이 대두되었으며 이에 따라 유한요소법에 기반을 둔 다차원 중성자 확산 코드인 HEXFEM¹을 개발하게 되었고 HEXFEM에 연소계산 능력을 추가하였다. 이 논문에서는 M. Knight, P. Hutt, 그리고 I. Lewis에 의해 제안된 VVER-1000 연소계산 벤치마크 문제²를 이용하여 HEXFEM 연소계산의 정확성을 검증하였다.

2. HEXFEM 코드의 연소계산

HEXFEM 코드 연소계산의 입력이 되는 단면적 자료는 집합체 계산 결과로 얻어지는 집합체 종류별 거시적 단면적을 사용하며 노심 계산에 의해서만 정확한 수밀도를 구할 수 있는 수용성 보론, Xe, Sm에 대해서는 미시적 단면적을 사용한다. 각 단면적들은 수용성 보론의 농도, 냉각재 온도, 핵연료 온도, 연소도 등과 같은 핵연료 집합체의 상태 변수들에 관한 함수로 주어진다. 임계 보론의 농도와 각 집합체별 냉각재 온도, 핵연료 온도, Xe과 Sm의 수밀도는 각 연소단계 별로 반복적인 평형상태 노심 계산에 의해 구해지며 연소단계 t 에서의 각 집합체별 연소도는 연소단계 $t-1$ 에서 노심 계산 결과와

연소단계 $t-1$ 과 연소단계 t 사이의 준 평형 연소 가정에 의해 구해진다.

3. 집합체내 연소도 구배효과

HEXFEM 코드에서는 육방형 집합체를 6개의 삼각형(3차원의 경우 프리즘)으로 나누어 계산하는 Coarse Mesh계산을 수행하므로 연소도 구배효과를 고려해주어야만 계산의 정확성을 보장할 수 있다. 연소도 구배효과를 고려해 주기 위해 각 집합체내의 단면적분포를 각 노드 위치에서의 연소도에 해당하는 단면적과 모양함수들을 이용하여 다음과 같은 다항식으로 전개하였다.

$$\Sigma_x^e(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{N_e} \Sigma_{xk}^e \phi_k^e(\mathbf{r}) \quad (1)$$

단, N_e : e 번째 요소의 노드 개수

Σ_{xk}^e : e 번째 요소의 k 번째 노드위치에서의 x 종류 단면적

$\phi_k^e(\mathbf{r})$: e 번째 요소의 k 번째 모양함수 ($\phi_k^e(\mathbf{r}_l) = \delta_{kl}$)

\mathbf{r}_l : l 번째 노드의 위치

(1)식에 의해 표현되는 단면적에 대해 각 요소행렬³의 원소를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (M_g^e)_{ij} &= \int_{\Omega_e} d\Omega \nabla \phi_i^e(\mathbf{r}) \cdot D_g^e(\mathbf{r}) \nabla \phi_j^e(\mathbf{r}) \\ &\quad + \int_{\Omega_e} d\Omega \phi_i^e(\mathbf{r}) \Sigma_{rg}^e(\mathbf{r}) \phi_j^e(\mathbf{r}) + \gamma \int_{\partial\Omega_e} dS \phi_i^e(\mathbf{r}) \phi_j^e(\mathbf{r}) \\ &= \sum_{k=1}^{N_e} D_{gk}^e \int_{\Omega_e} d\Omega \nabla \phi_i^e(\mathbf{r}) \cdot \phi_k^e(\mathbf{r}) \nabla \phi_j^e(\mathbf{r}) \\ &\quad + \sum_{k=1}^{N_e} \Sigma_{rgk}^e \int_{\Omega_e} d\Omega \phi_i^e(\mathbf{r}) \phi_k^e(\mathbf{r}) \phi_j^e(\mathbf{r}) + \gamma \int_{\partial\Omega_e} dS \phi_i^e(\mathbf{r}) \phi_j^e(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$(F_g^e)_{ij} = \int_{\Omega_e} d\Omega \phi_i^e(\mathbf{r}) \nu \Sigma_{fg}^e(\mathbf{r}) \phi_j^e(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{N_e} \nu \Sigma_{fgk}^e \int_{\Omega_e} d\Omega \phi_i^e(\mathbf{r}) \phi_k^e(\mathbf{r}) \phi_j^e(\mathbf{r}) \quad (3)$$

$$(S_{gg}^e)_{ij} = \int_{\Omega_e} d\Omega \phi_i^e(\mathbf{r}) \Sigma_{sgg}^e(\mathbf{r}) \phi_j^e(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{N_e} \Sigma_{sggk}^e \int_{\Omega_e} d\Omega \phi_i^e(\mathbf{r}) \phi_k^e(\mathbf{r}) \phi_j^e(\mathbf{r}) \quad (4)$$

4. VVER-1000 연소계산 벤치마크 문제

M. Knight, P. Hutt, 그리고 I. Lewis에 의해 제안된 VVER-1000 연소계산 벤치마크 문제에서는 거시적 단면적이 연소도의 함수로서 주어지며 거시적 흡수 단면적은 수용성 보론의 농도에 대해 선형적으로 변화하는 것으로 되어있다. Xe의 흡수 단면적은 미시단면적으로 주어져 있다.

<그림 1>은 1주기와 2주기 장전모형을 보여준다. 1 주기는 노심은 30° 대칭이고 2

주기 노심은 60° 대칭이다. 경계조건으로 외부 경계에서 총중성자류가 영인 조건이 주어
져 있다.

연소단계는 5, 10, 15일 그리고 9번의 30일(총 300일)로 주어졌다.

5. 검증 계산 결과

M. Knight, P. Hutt, 그리고 I. Lewis는 96 mesh/assembly FDM계산 결과와 384 mesh/assembly FDM계산 결과로부터 Extrapolated Reference Solution을 구하여 제시하였으며 또한 PANTHER 코드의 Rectangular Option과 Conformal Mapping Option에 대해 집합체 상대출력 오차를 분석하였고 Conformal Mapping Option의 붕출력 재구성 결과의 오차도 분석하였다.

이 논문에서는 HEXFEM 코드의 Quadratic Option과 Cubic Option에 대한 결과를 Reference Solution 및 PANTHER 코드의 결과와 비교하였다. <표 1>은 임계봉산농도를 비교한 것이다. PANTHER 코드의 Rectangular Option은 다른 Option들에 비해 큰 오차를 보이고 있으나 나머지 Option들은 비교적 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다. <표 2>는 집합체의 상대출력 오차를 비교한 것이다. 제어봉이 삽입된 1주기초(BOC1ARI)의 경우 PANTHER Rectangular Option은 최대 오차 8.8%의 큰 오차를 보이고 있다. 반면 PANTHER Conformal Mapping Option과 HEXFEM Cubic Option은 매우 정확했다. HEXFEM Quadratic Option도 최대 오차가 2.0%로 비교적 정확한 결과를 보여준다. 1주기초(BOC1)의 경우 모든 Option들이 비교적 정확한 결과를 보이고 있다. HEXFEM Cubic Option은 PANTHER Conformal Mapping보다 더 적은 오차를 보이며 HEXFEM Quadratic Option은 PANTHER Conformal Mapping보다 부정확하지만 PANTHER Rectangular Option보다는 정확한 결과를 보인다. 1주기말(EOC1)의 경우 집합체내 균일한 연소도 분포를 가정한 PANTHER, Rectangular Option을 제외한 모든 Option들이 비교적 정확한 결과를 보이고 있다. 2주기초(BOC2)의 경우 <그림 1>에서 보듯이 1주기에 노심 외곽부분에 장전되어있던 집합체 17과 집합체 17*가 노심 안쪽으로 재배치되어 연소도 구배효과가 크게 나타나게 되어 연소도 구배효과를 고려하지 않은 모든 Option들은 오차가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 연소도 구배효과를 고려한 Option들에서는 오차가 현저히 줄어들음을 볼 수 있다. <그림 2>는 2주기초에서의 출력분포 및 오차를 보여준다. 연소도 구배효과를 고려한 Cubic Option은 최대오차가 0.3%로 모든 Option들 중에서 가장 정확했으며 연소도 구배효과를 고려한 Quadratic Option도 PANTHER Conformal Mapping Option보다는 정확도가 조금 떨어지나 PANTHER, Rectangular Option의 결과보다는 더 정확한 결과를 보이고 있다.

6. 결론 및 향후 연구 과제

2주기초의 결과에서 보듯이 연소도 구배효과를 고려함으로써 집합체내 균일한 연소

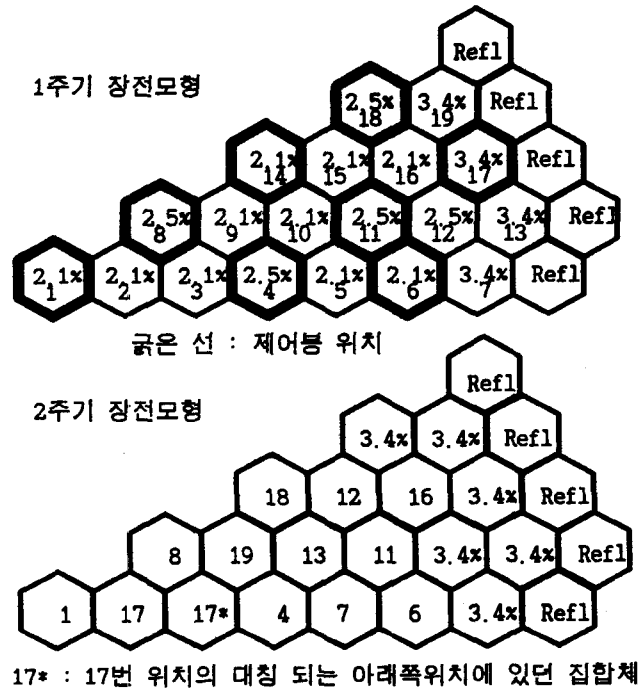
도 분포를 가정한 경우보다 훨씬 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

HEXFEM 코드는 정확한 연소계산을 수행할 수 있으며 특히 Cubic Option의 경우 PANTHER Conformal Mapping Option보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있었다. Quadratic Option의 경우 PANTHER Conformal Mapping Option에 비해서는 정확도가 떨어지나 PANTHER Rectangular Option에 비해서는 훨씬 정확한 결과를 얻었다.

그러나 붕출력 재구성 결과는 아직 HEXFEM 코드에서 구현되지 않았으므로 비교할 수 없었다. 또한 이 문제에서는 온도효과는 무시되었으므로 HEXFEM코드의 온도효과 고려방법에 대해 검증할 수는 없었다. HEXFEM 코드의 완전한 검증을 위해서는 이 부분에 대한 추가적인 검증계산이 반드시 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Hyun Chul Lee, Chang Hyo Kim, Won Sik Yang, "Finite Element Diffusion Theory Method for Hexagonal-z Geometry," Trans. Am. Nucl. Soc., 73, 180-183 (1995)
2. M. Knight, P. Hutt, and I. Lewis, "Comparison of PANTHER Nodal Solutions in Hexagonal-z Geometry," Nuclear Science and Engineering, 121, 254-263 (1995)
3. 김창효 외, "신형 원자로 노심 분석 전산체계 개발," 연차보고서, 한국원자력연구소. (1995)



<그림 1> VVER-1000 1주기 및 2주기 장전모형

<표 1> 임계 붕산 농도 비교*

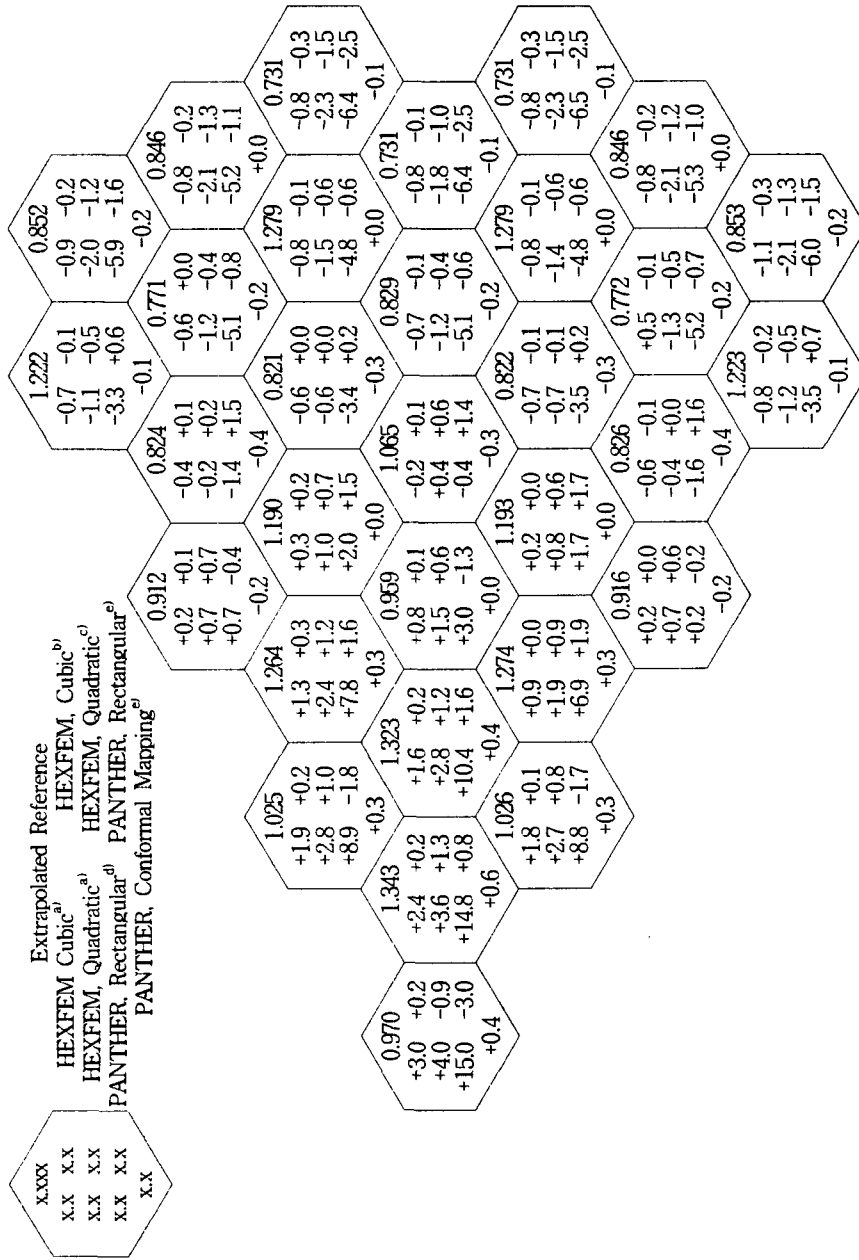
	BOC1 ARI No Xe	BOC1	EOC1	BOC2
FDM, Hexagonal	1082	1373	206	1323
FDM, 6 Mesh/Assembly	761	1278	89	1098
FDM, 24 Mesh/Assembly	717	1268	65	1080
FDM, 96 Mesh/Assembly	702	1265	57	1076
FDM, 384 Mesh/Assembly	696	1264	54	1075
PANTHER, Rectangular ^{a)}	722	1264	76	1077
PANTHER, Rectangular ^{b)}	722	1264	49	1080
PANTHER, Conformal mapping ^{b)}	695	1264	53	1077
HEXFEM, Cubic ^{c)}	694	1264	58	1074
HEXFEM, Cubic ^{d)}	694	1264	53	1075
HEXFEM, Quadratic ^{c)}	688	1263	56	1074
HEXFEM, Quadratic ^{e)}	688	1263	51	1074

- * In parts per million (ppm)
a) Flat burnup in Hexagon
b) Within-node burnup in Hexagon
c) Flat burnup in Triangle
d) Cubic burnup in Triangle
e) Quadratic burnup in Triangle

<표 2> 집합체별 상대출력 오차**

	BOC1 ARI No Xe		BOC1		EOC1		BOC2	
	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS	Max	RMS
FDM, Hexagonal	172.7	73.4	95.9	44.9	28.5	10.6	115.9	64.2
FDM, 6 Mesh/Assembly	25.2	12.9	15.0	7.3	7.3	2.8	23.6	14.1
FDM, 24 Mesh/Assembly	7.2	3.8	4.5	2.2	2.5	0.9	7.0	4.1
FDM, 96 Mesh/Assembly	2.1	1.1	1.4	0.7	0.7	0.3	2.0	1.1
FDM, 384 Mesh/Assembly	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.5	0.3
PANTHER, Rectangular ^{a)}	8.8	5.3	1.3	0.6	3.6	1.7	15.0	6.0
PANTHER, Rectangular ^{b)}	8.8	5.3	1.3	0.6	1.3	0.7	3.0	1.4
PANTHER, Conformal mapping ^{b)}	0.3	0.2	0.6	0.3	0.7	0.4	0.7	0.3
HEXFEM, Cubic ^{c)}	0.4	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	3.0	1.2
HEXFEM, Cubic ^{d)}	0.4	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2
HEXFEM, Quadratic ^{c)}	2.0	0.9	0.9	0.4	0.3	0.2	4.0	2.0
HEXFEM, Quadratic ^{e)}	2.0	0.9	0.9	0.4	0.9	0.4	1.5	0.8

** In percent (%)



<그림 2> 2주기초에서의 집합체별 상대출력 오차