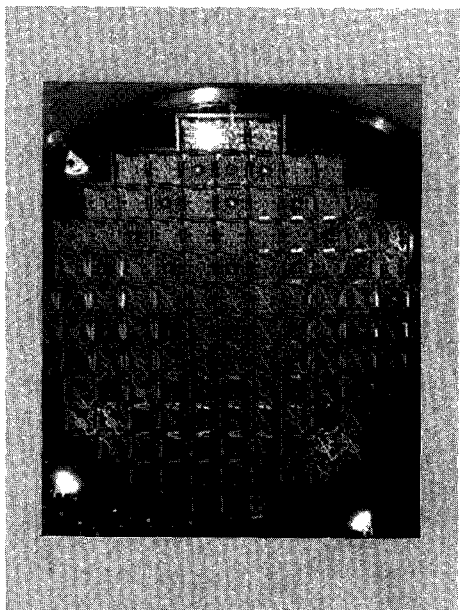


특집 : '94ANS 冬季年次대회 발표 논문



육각형 노심구조를 위한 해석합수展開 Nodal方法과 中性子束 재구성

현대적 Nodal방법은 노심에서 중성자가 어떻게 작용하는가 하는 것을 예측하는데 널리 사용된다.

핵연료 집합체 6각형외에 세모, 마름모꼴로도 가능
UO₂집합체, UO₂+혼합집합체의 노심을 기준

趙 南 振

盧 在 萬

한국과학기술원 교수

서 론

지난 수십 년간 여러 가지의 현대적 노달(Nodal) 방법^{1, 2}을 개발하여 정방형 구조의 경수로 노심에서 중성자 거동을 빠르고 정확하게 예측하는데 널리 사용하여 왔다.

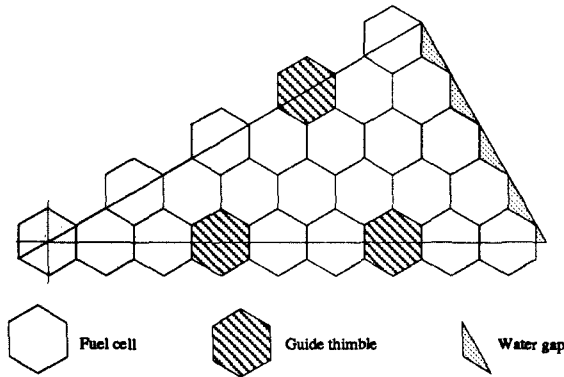
최근 이런 노달방법들을 VVER^{3, 4}, 고전환 경수로 및 고속 중성자로와 같

은 육각형 노심구조에 적용하는데 대한 관심이 고조되고 있다.

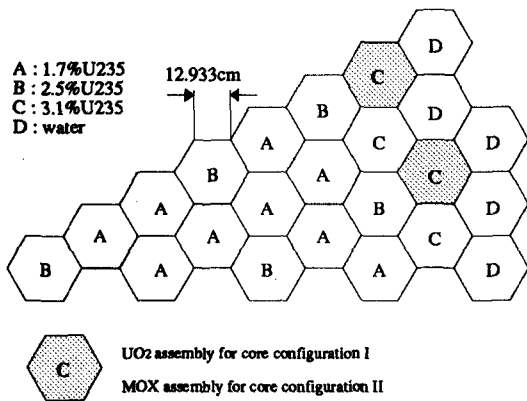
대부분의 이들 현대적 노달방법들은 「노드」사이의 중성자속 연관방정식을 유도할 때 다차원 확산방정식을 횡방향으로 적분하여 일차원 확산방정식으로 만드는 과정을 채택하고 있다.

하지만 이러한 횡방향 적분과정을 사용하면 정방형 노심구조나 육각형

육각형 노심구조 中性子束재구성



(a) 1/12 fuel assembly



(b) 1/12 core

노심구조 모두에서 여러 가지 단점들이 생겨나게 된다. 특히 육각형 노심구조에서는 횡방향 적분과정에서 나타나는 횡방향 누출항이 특이항을 포함하는 등 너무 복잡하게 된다.^{5,6}

해석함수전개 노달방법^{7,8}은 횡방향 적분을 하지 않기 때문에 횡방향 적분에서 파생되는 단점들을 갖지 않는다.

이 방법은 횡방향으로 적분된 일차원 중성자 확산방정식이 아닌 다차원 중성자 확산방정식을 직접 푼다.

즉 어떤 노드의 다차원 확산방정식의 해를 그 노드의

그림 1 :

1/12 핵연료 집합체와

노심구조 I, II

해석함수 전개 Nodal방법의 정확도를 검증하기 위해 풀어본 두개의 노심구조이다.

첫번째 노심은 UO_2 핵연료집합체로만 구성된 것이고 두번째 노심은 UO_2 와 혼합핵연료 집합체를 섞어서 구성한 것이다.

어느 점에서나 확산방정식을 만족하는 비분리 해석함수로 전개하여 푸는 것이다.

이 방법을 먼저 정방형 노심구조에 대하여 성공적으로 적용한 후⁸, 간단한 육각형 노심구조 시험 문제를 해석한 결과를 이미 국제 학술회의에서 발표한 적이 있다.^{9,10}

이 논문에서는 이 방법으로 혼합핵연료 장전을 모사하는 보다 실제적인 비균질 육각형 노심을 분석한 결과를 다룬다.

육각형 노심구조 中性子束재구성

육각형 노심구조의 해석함수 전개 노달방법(AFEN)

노두 n에서의 2군 2차원 중성자 확산방정식은

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

로 주어진다.

이 2군 확산방정식이 다음과 같은 두개의 독립된 편미 방으로 분리될 수 있도록 새로운 변수 $\xi^n(x, y)$ 를

$(R^n)^{-1} \phi^n(x, y)$ 로 정의한다.

$$(2) \nabla^2 \xi_g^n(x, y) - \lambda_g^n \xi_g^n(x, y) = 0, g = 1, 2$$

여기서 행렬 R^n 의 모든 원소들과 λ_g^n 는 k_{eff} 와 그 노드의 균정수로 표현되는 상수이다.

육각형 노드에 대하여 식(2)의 해를 13개의 해석함수로 전개하면

$$(3) \xi_g^n = A_{g0}^n + A_{g1}^n \text{SN} x_2^n x + A_{g2}^n \text{CS} x_2^n x + A_{g3}^n \text{SN} x_2^n y + A_{g4}^n \text{CS} x_2^n y + B_{g1}^n \text{SN} \frac{\sqrt{3}}{2} x_2^n x \text{SN} \frac{1}{2} x_2^n y + B_{g2}^n \text{SN} \frac{\sqrt{3}}{2} x_2^n x \text{CS} \frac{1}{2} x_2^n y$$

$$+ B_{g3}^n \text{CS} \frac{\sqrt{3}}{2} x_2^n x \text{SN} \frac{1}{2} x_2^n y + B_{g4}^n \text{CS} \frac{\sqrt{3}}{2} x_2^n x \text{CS} \frac{1}{2} x_2^n y + C_{g1}^n \text{SN} \frac{1}{2} x_2^n x \text{SN} \frac{\sqrt{3}}{2} x_2^n y + C_{g2}^n \text{SN} \frac{1}{2} x_2^n x \text{CS} \frac{\sqrt{3}}{2} x_2^n y + C_{g3}^n \text{CS} \frac{1}{2} x_2^n x \text{SN} \frac{\sqrt{3}}{2} x_2^n y + C_{g4}^n \text{CS} \frac{1}{2} x_2^n x \text{CS} \frac{\sqrt{3}}{2} x_2^n y$$

이 된다. 여기서 CS(SN)는 λ_g^n 의 부호에 따라 cos 혹은 cosh(sin 혹은 sinh)으로 변하고 x_{g0}^n 는 $|\lambda_g^n|$ 의 제곱근이다.

A_{g0}^n 를 제외한 식(3)의 모든 전개항들은 그 노드의 어떤 점에서도 중성자 확산방정식을 만족한다.

이 예외적인 항 A_{g0}^n 은 노드간 연관방정식을 반복법으로 풀 때 k_{eff} 가 수렴함에 따라 영이 된다.

식(3)의 13개 전개 계수들은 우리가 노달계산에서 미지수로 사용하고자 하는 한개의 노드 평균 중성자속, 여섯개의 경계면 평균 중성자속과 여섯개의 격자점 중성자속으로 표현된다.

그런 다음 노달 계산의 미지수 숫자 만큼 노드간 연관방정식을 만들 수 있다.

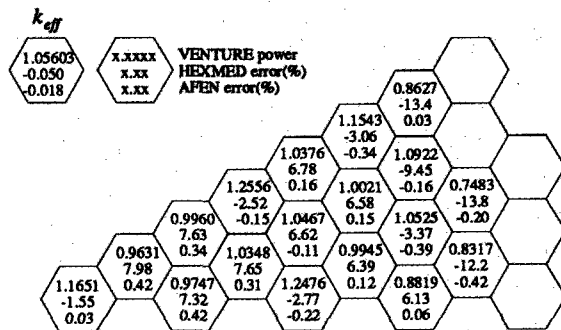
이런 노드간 연관방정식은 (i) 전개된 중성자 확산방정식을 노드의 부피에 대하여 적분하고, (ii) 두 노드의

그림 2 :

노심 구조 I의

집합체별 출력

분포



1. Mesh size of VENTURE calculation : 1352 triangular meshes per assembly
Mesh size of AFEN calculation : 1 mesh per assembly

$$2. \text{Error} = \frac{\text{nodal power} - \text{VENTURE power}}{\text{VENTURE power}} \times 100(\%)$$

경계면에서 중성자류의 연속조건을 적용하고, 그리고 (iii) 세 노드가 서로 공유하는 격자점 근처에서 중성자 누출 균형 조건을 적용함으로써 얻을 수 있다.¹⁰

육각형 노심구조에서는 격자점 중성자속에 대한 중성자 연관방정식은 풀기에 아주 시간이 많이 걸리는 13점 연관식이 된다.

따라서 이 논문에서는 격자점 근처의 각 노드 중성자속을 네개의 해석함수로 새로 전개하고 그 전개 계수를 격자점 주위에 있는 노드의 네개 노달계산 미지수만으로 나타내어 격자점 근처 네 노드의 누출 균형조건을 적용하는 간단하지만 정확한 새로운 연관방정식을 만들었다.

노달계산과 재구성 계산의 결과

해석함수전개 노달방법의 정확도를 검증하기 위하여 그림 1에서 보인 것 처럼 두 개 노심을 풀어 보았다.

그 중 첫번째 노심은 UO_2 핵연료집합체로만 구성된

것이고, 두번째 노심은 UO_2 와 혼합 핵연료집합체를 섞어서 구성한 노심이다.

두 노심 모두 서로 다른 종류의 육각형 세포들이 모인 육각형 비균질 핵연료집합체로 구성되어 있다.

이 비균질 핵연료집합체는 집합체의 바깥에 전반사 경계조건을 주고 단일 집합체를 미세 격자 유한차분법 중성자 확산계산을 하여 균질화하였다.

두 노심 구조에 대한 해석함수전개 노달계산 결과는 미세격자 유한차분법 중성자 확산계산 코드인 VENTURE¹¹결과와 Wagner방법⁵을 사용하는 노달계산 코드인 HEXMED¹² 계산결과와 비교하였다.

그림 2에 첫번째 노심 구조에 대한 계산 결과를 나타내었다.

이 그림을 보면 해석함수 전개 노달방법이 HEXMED에 비해 유효증배계수 뿐만 아니라 집합체 평균출력 분포도 상당히 정확하게 예측하는 것을 알 수 있다.

HEXMED의 계산결과가 굉장히 부정확한 것은 Wagner 방법이 육각형 노드를 횡방향 적분할 때 생기는 횡방향 누출의 특이항을 무시한 것에 기인하는 것으로

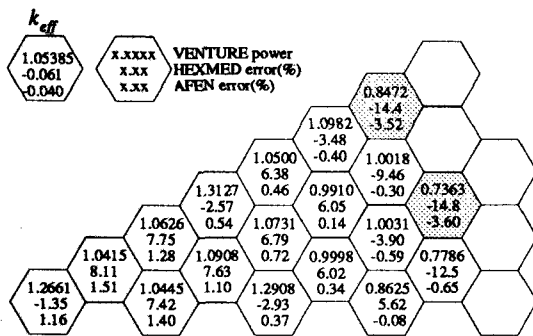


그림 3 :
노심 구조 II의
집합체별 출력
분포

1. Mesh size of VENTURE calculation : 1352 triangular meshes per assembly
Mesh size of AFEN calculation : 1 mesh per assembly
2. Error = $\frac{\text{nodal power} - \text{VENTURE power}}{\text{VENTURE power}} \times 100(\%)$
3. Shaded area denotes a MOX assembly.

육각형 노심구조 中性子束재구성

균질화된 중성자속 분포와 단일 집합체 균질화 계산으로부터 얻은 조형함수를 바로 곱하는 방법으로 각 세포별 출력분포를 재구성하여 그 결과를 그림 4에 요약하였다.

이 그림을 보면 해석함수전개 노달계산으로 얻은 균질화된 중성자속 분포를 바로 사용하여도 노심 전체적으로 정확한 세포별 출력분포를 재구성할 수 있다는 것을 알 수 있다.

혼합핵연료가 장전된 두번째 노심에 대한 해석함수전개 노달계산 결과를 그림 3에 보였다.

해석함수전개 노달계산 결과를 보면 혼합 핵연료집합체 근처에서 HEXMED에 비하여서는 상당히 작아졌지만 여전히 어느 정도의 집합체 평균출력 오차가 나타나 있는 것을 볼 수 있다.

이 오차중의 일부는 UO_2 핵연료집합체와 혼합 핵연료 집합체 경계면에서 생기는 강한 중성자류를 무시하고 전 반사 경계조건(영 중성자류 조건)으로 단일 집합체 균질화 계산을 한 것에 기인하는 것으로 보인다.

향후 확장분야

이 논문의 해석함수전개노달방법은 기존 노달방법과 달리 횡방향 적분을 하지 않기 때문에 취급할 수 있는 핵연료집합체의 기하학적 구조가 자유롭다.

예를들어, 필요하다면 핵연료집합체를 삼각형이나 마름모형으로 모사하기가 용이한 장점이 있다.

이 논문은 미국원자력학회 원자로물리분과위원회의 초청논문으로 조남진 교수가 지난 11월 워싱턴 DC에서 열린 미국원자력학회 연차대회에서 발표한 것을 번역·보완한 것이다.

참고문헌

1. H. Finnemann, F. Bennewitz, and M. R. Wagner, "Interface Techniques for Multidimensional Reactor Calculations", *Atomkernenergie*, 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. 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)
8. 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)
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, "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)
11. D. R. Vondy et al., "VENTURE : A Code Block for Solving Multigroup Neutronic Problems Applying the Finite-Difference Diffusion-Theory Approximation to Neutron Transport-Version II", ORNL-5062/R1, Oak Ridge National Laboratory(1977).
12. S. Merk and H. J. Winter, "HEXMED 2.30 : How to Use", SIEMENS/KWU Internal Report, BT21-1993-E162, S I E M E N S / KWU, Germany(1993).

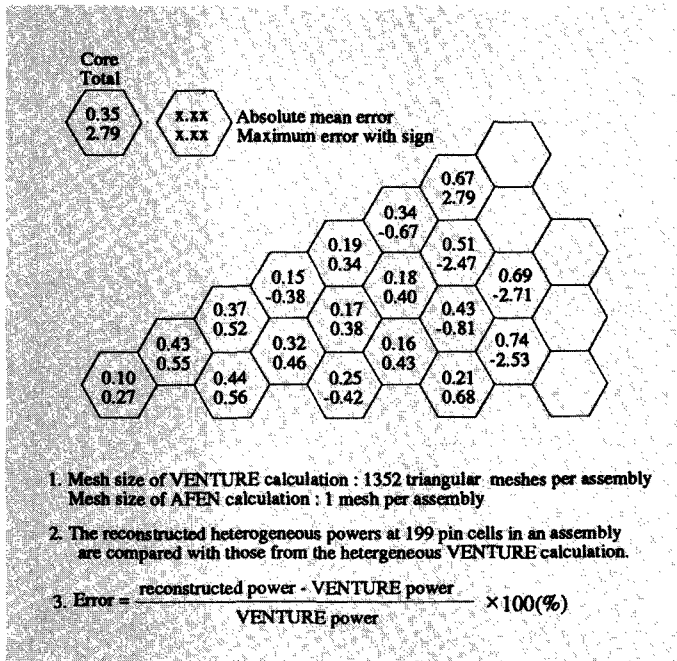


그림 4 :

노심 구조 II 의

연료봉별 출력재구성

결과