2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

시공간 중성자 확산방정식의 실시간 해석을 위한 거시격자 유한차분법의 인접면 연계인자 보정

Coarse Mesh Finite Difference Method with Interface Coupling Coefficient Correction for Real Time Analysis of Space-Time Dependent Neutron Diffusion Equation

김하용, 송재승, 주한규, 지성균, 장문희

한국원자력연구소

305-353 대전 유성구 덕진동 150

요　약

고차 노달계산을 통하지 않고 격자 내 제어봉 삽입 정도에 따라 정해진 인접면 연계인자 보정값을 거시격자 유한차분법에 적용하여 2군 3차원 시공간 중성자 확산방정식의 해를 초당 4회의 실시간으로 구할 수 있는 방법을 개발하였다. 영광 원자력 1호기 15주기 노심을 대상으로 이 방법을 적용하여 고차 노달계산을 통한 해석과 비교한 결과, 고온 정적상태의 노심해석에서는 노심 반응도 100 pcm 이내, 반경방향 출력분포 오차 1 % 이내의 정확성을 유지하였고, 노심과 원자로계통을 연계한 과도상태의 해석에서도 거의 유사한 결과를 얻을 수 있음이 확인되었다.

Abstract

A 4-cycle real time analysis methodology was developed to solve 2-group 3-dimensional space-time dependent neutron diffusion equation, using coarse mesh finite difference method with interface coupling coefficient correction. Comparisons with higher order nodal method were performed by steady state and transient analyses of Yonggwang unit 1 cycle 15 reactor. For the steady state core within the typical operating moderator temperature range, the differences of core reactivity and radial power distribution are less than 100 pcm and 1 %, respectively, and no attentive difference was observed in the results of the transient analyses coupled with system calculations.

I. 서론

국내 가압경수로의 실시간 노심 해석은 주로 원전 시뮬레이터나 NPA (Nuclear Plant Analyzer)에 적용되고 있으며 빠른 계산을 위하여 노심출력의 시간에 따른 변화는 점운동방정식을 이용하여 구하고, 노심의 출력분포는 유한차분법(FDM - Finite Difference Method)을 이용하여 정적상태 중성자 확산 방정식의 해를 구한 후 두 결과를 합성하는 방법을 사용하고 있다. 이 방법은 원래 보수적인 해석이 필요한 원자력발전소의 안전해석에 적용하는 방법으로 그 결과의 정확성 보다는 원자로의 각종 과도현상에서 계통과 노심의 변화 추이를 관찰하는 데는 충분히 적용할 수 있으나, 최적 해석결과를 필요로 하는 원전 시뮬레이터 등에서는 원자력발전소의 전체 계통이나 원자로 노심의 실제 반응과 유사한 결과를 얻기 위하여 많은 경험과 노력이 필요한 각종 변수의 조정 작업이 선행되어야 한다. 특히, 노심모델에 있어서 반경방향으로 핵연료집합체를 4개의 격자로 나눈 단위를 기본으로 고차 노달방법론에 의하여 분석되는 설계해석의 결과와 하나의 핵연료집합체를 반경방향 격자단위로 하는 FDM 방법의 결과를 일치시키기 위해서는 다양한 운전조건의 분석을 통하여 3차원 격자별 군정수를 보정하여야 하는데 이는 원전 시뮬레이터에 사용되는 노심모델의 주기별 제공을 현실적으로 불가능 하게 하는 근본적인 요인이 되고 있다.

전산기의 계산속도가 충분히 빠르다면 설계해석에 사용되는 방법과 동일한 노심모델과 방법론으로 노심계산을 수행하고 계통해석과 연계하는 방법을 사용할 수 있는데, 실제로 노심해석코드인 MASTER를 계통해석 코드인 MASRS 와 연계하여 최적 해석결과를 얻고자하는 노력이 수행되었고[1] 최근에는 MASTER를 계통해석코드인 RETRAN과 연계하여 원자로의 과도현상을 해석하는 작업이 수행되고 있다.[2] 국내 가압경수로의 원전 시뮬레이터의 계통해석과 가장 유사한 RETRAN과 연계된 MASTER의 계산에서는 반경방향으로 핵연료집합체를 하나의 격자 단위로 하는 노심모델의 경우 원전 시뮬레이터의 실시간 해석 요건인 시구간 당 0.25 초에 근접하는 계산속도를 얻을 수 있다. 그러나, 이 방법에서는 핵연료집합체를 4개의 격자로 나누어 해석하는 실제 설계결과와 일치하는 결과를 얻기 위하여 연소도 보정법을 사용하여야 하는데 국내 가압경수로 해석코드인 ANC[3] 나 ROCS[4] 코드는 연소도보정에 필요한 경계면의 가상연소도 등의 자료를 제공하지 않으므로 실질적인 적용에는 어려움이 따르고 있다.

이 연구에서는 거시격자 유한차분법(CMFD – Coarse Mesh Finite Difference)[5]을 이용하여 설계해석에서 사용하고 있는 핵연료집합체 당 4개의 반경방향 격자를 유지하고 시구간 당 0.25초의 실시간 계산속도를 확보할 수 있는 방법을 개발하였다. 원래 CMFD 방법은 격자 내 중성자속 분포를 선형으로 가정하는 FDM과는 달리 격자 내 중성자속 분포를 고차함수로 가정하여 구한 인접면 중성자류를 이용하여 노달 연계인자를 보정하고 FDM과 유사한 방법으로 해를 구하는 방법이다. 비선형 해석적 노달방법론(NLANM-Non-Linear Analytic Nodal Method)[6]에서는 해석적 노달방법론(ANM)에 의하여 노달 연계인자 보정값(CNCC - Corrective Nodal Coupling Coefficient)을 구하는데 이 보정값을 미리 준비된 인접면 연계인자 보정값(ICCC - Interface Coupling Coefficient Correction)으로 대치하여 해석적 노달계산 없이 해를 구하면 중성자속 분포의 해를 구하기 위한 반복계산에 필요한 시간을 획기적으로 줄일 수 있다. ICCC는 NLANM으로 미리 생산할 수 있으므로 이론적으로는 각 격자별로 모든 조건에 대한 보정값이 제공될 수 있다면 CMFD 해석결과는 NLANM 결과와 일치하게 되나, 현실적으로는 ICC 보정값에 영향을 주는 인자들의 민감

도를 분석하여 실제로 사용할 인자를 제한할 필요가 있다. 이 연구에서는 ICCC를 3차원 격자 위치와 격자 내 제어봉의 삽입 정도에 관한 함수만으로 정의하여 사용하였고 이로 인하여 발생하는 계산결과의 오차를 NLANM을 사용하는 고차 노달방법의 기준계산 결과와 비교하여 그 적용성을 검증하기로 한다. 검증 대상으로는 영광원자력 1호기 15주기[7] 노심을 선정하였으며 노심계산에 사용되는 군정수의 열수력적 궤환을 고려하기 위하여 설계해석 코드인 ANC로부터 일련의 계산으로 제공되는 군정수를 붕산농도, 핵연료온도 및 감속재 밀도 등의 운전조건에 대하여 함수화하여 사용하였다.

II. 인접면 연계인자의 보정

2군 3차원 동특성 중성자 확산방정식에서 한 격자의 중성자 균형방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{v_g}\frac{d\phi_g}{dt} = \begin{cases} (1-\beta)\psi + S_d - L_1 - \Sigma_{r1}\phi_1 \ , & g=1 \\ \Sigma_{12}\phi_1 - L_2 - \Sigma_{r2}\phi_2 \ , & g=2 \end{cases} . \tag{1}$$

여기서, ψ 는 핵분열에 의한 중성자 선원을, S_d 는 지발중성자 선원을 의미하며 나머지 기호는 관례적 표현에 따른다. 이하에서는 수식의 간략한 표현을 위하여 에너지군 부호 g 는 생략하기로 한다. 격자면을 통하여 격자 밖으로 빠져나가는 중성자 누설항은 3차원 격자에서

$$L = \sum_{u=x,y,z} L_u = \sum_{u=x,y,z} \frac{1}{h_u}\left(J_u^r - J_u^\ell\right) \tag{2}$$

로 정의된다. 여기서 h_u 는 격자크기, J_u^ℓ 과 J_u^r 은 격자 좌우면에서의 중성자류(current)를 각각 의미한다.

유한차분법(FDM)에서는 식 (2)의 누설항을 구할 때 격자 내의 중성자속 분포를 선형으로 가정하여 두 격자 인접면에서의 u 방향 중성자류(interface current) $\tilde{J}_u$ 를

$$\tilde{J}_u = -\tilde{D}_u(\phi^r - \phi^\ell) \tag{3}$$

와 같이 계산한다. 여기서, ϕ^ℓ 과 ϕ^r 은 각각 인접면 좌우격자의 평균 중성자속을 의미하며 $\tilde{D}_u$ 는 인접면에서의 u 방향 노달연계인자로 좌우 각 격자의 중성자 확산계수를 D_u^ℓ 및 D_u^r, 격자 크기를 h_u^ℓ 및 h_u^r 이라 하면 다음과 같이 주어진다.

$$\tilde{D}_u = \frac{2D_u^r D_u^\ell}{D_u^r h_u^\ell + D_u^\ell h_u^r} . \tag{4}$$

한편, 거시격자 유한차분(CMFD) 방법에서는 식 (3)의 중성자류를

$$\tilde{J}_u = -\tilde{D}_u(\phi^r - \phi^\ell) - \hat{D}_u(\phi^r + \phi^\ell)\,. \tag{5}$$

와 같이 보정하는데 여기서 $\hat{D}_u$ 는 고차 노달방법을 사용하여 구한 인접면 중성자류 $\tilde{J}_u^H$ 를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\hat{D}_u = \frac{\tilde{J}_u^H + \tilde{D}_u(\phi^r - \phi^\ell)}{\phi^r + \phi^\ell}\,. \tag{6}$$

격자 m 에서 u 방향 중성자 누설항은 식 (2)와 (5)를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_u^m = a_u^\ell \phi^{m-} + a_u \phi^m + a_u^r \phi^{m+}\,. \tag{7}$$

여기서 첨자 $m-$ 와 $m+$ 는 격자 m 좌우의 격자를, 첨자 ℓ 과 r 은 격자 m 의 좌우 면을 각각 의미하며, 상수 a 들은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} a_u^\ell &= -\frac{1}{h_u^m}(\tilde{D}_u^\ell - \hat{D}_u^\ell)\,, \\ a_u &= \frac{1}{h_u}\left[\tilde{D}_u^\ell + \tilde{D}_u^r + \hat{D}_u^\ell - \hat{D}_u^r)\right], \\ a_u^r &= -\frac{1}{h_u^m}(\tilde{D}_u^r + \hat{D}_u^r)\,. \end{aligned} \tag{8}$$

CMFD 방법의 장점은 식 (5)의 중성자류 보정을 통하여 식 (7)과 같이 중성자 누설항을 나타냄으로써 식 (1)의 중성자 균형방정식이 삼선대각(tri-diagonal)행렬로 나타나기 때문에 FDM과 마찬가지로 빠른 외부반복(outer iteration)계산이 가능하다는 것이다. 그러나 식 (6)으로 인접면 연계인자 보정값(이하 ICCC)을 구하는 데에는 여전히 고차 노달방법을 사용하므로 FDM에 비하여 많은 계산시간을 소요하게 된다.

여기서 ICCC의 물리적 의미를 고찰해보자. 개념적인 논의를 위하여 두개의 인접한 격자의 크기와 중성자 확산계수가 같다고 가정하면 식 (6)은 식 (4)와 중성자류의 정의에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{D} = \frac{\tilde{D}h_u}{\phi^r + \phi^\ell}\left(\left.\frac{d\phi}{du}\right|_S^H - \frac{\phi^r - \phi^\ell}{h_u}\right). \tag{9}$$

인접면 부근에서 중성자속의 분포가 선형인 경우 인접면에서 중성자속의 미분항은

$$\left.\frac{d\phi}{du}\right|_S^L = \frac{\phi^r - \phi^\ell}{h_u} \tag{10}$$

가 되므로

$$\frac{\hat{D}}{\tilde{D}} = \frac{h_u}{\phi^r + \phi^\ell}\left(\left.\frac{d\phi}{du}\right|_S^H - \left.\frac{d\phi}{du}\right|_S^L\right) \tag{11}$$

와 같이 ICCC는 고차 및 선형으로 각각 계산된 인접면에서의 중성자속 기울기의 차이를 의미하게 된다. 이와 같은 사실을 근거로 하면 $\hat{D}/\tilde{D}$ 는 인접한 두 격자의 중성자속 차이를 유발하는 요인 즉, 군정수의 차이에 따라 결정됨을 알 수 있다.

일반적으로 열수력 궤환을 고려하는 노심의 계산에서 각 격자의 특정 연소도에서의 군정수는 다음과 같이 운전조건의 함수로 정해진다.

$$\begin{aligned} \Sigma &= \Sigma(B_0, T_{f0}, D_{m0}) + \frac{\partial\Sigma}{\partial B}\Delta B + \frac{\partial\Sigma}{\partial\sqrt{T_f}}\Delta\sqrt{T_f} + \frac{\partial\Sigma}{\partial D_m}\Delta D_m \\ &\quad + \Delta\Sigma_{CR}(B_0, T_{f0}, D_{m0}) + \frac{\partial\Delta\Sigma_{CR}}{\partial B}\Delta B + \frac{\partial\Delta\Sigma_{CR}}{\partial\sqrt{T_f}}\Delta\sqrt{T_f} + \frac{\partial\Delta\Sigma_{CR}}{\partial D_m}\Delta D_m \end{aligned}. \tag{12}$$

여기서 B, T_f, 및 D_m 은 붕산농도, 핵연료온도 및 감속재밀도를 의미하며, $\Delta\Sigma_{CR}$ 은 제어봉 삽입에 의한 군정수 변화량을, 밑첨자 0 은 기준상태를 의미한다. 따라서, 군정수와 마찬가지로 ICCC를 미리 계산하여 제공할 수 있다면 과도상태의 노심계산에서 고차 노달계산을 생략할 수 있으므로 대폭적인 계산시간의 절감을 이룰 수 있다. ICCC는 두 격자의 조건에 따라 결정되므로 현실적으로 식 (12)의 미분항으로 나타나는 열수력 궤환에 의한 변화량은 미리 결정하기가 어려우나 열수력 궤환 효과는 노심계산 결과에 있어서 2차적인 효과만을 나타내게 되며 특히 인접면 연계인자의 관점에서 그 영향은 더욱 작다. 따라서, 이 연구에서는 ICCC에 직접적인 영향을 줄 수 있는 격자 내 제어봉 삽입정도에 따라 그 값을 미리 계산하여 표의 형태로 제공함으로써 짧은 시간에 노심계산을 수행할 수 있는 알고리듬을 개발하였다.

두 격자의 인접면을 기준으로 제어봉의 삽입형태는 그림 1과 같이 4가지로 구분되므로 ICCC는 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\hat{D}}{\tilde{D}} = (1-C)\left(\frac{\hat{D}}{\tilde{D}}\right)_0 + C\left(\frac{\hat{D}}{\tilde{D}}\right)_L. \tag{13}$$

여기서 C 는 격자 내 제어봉 삽입분율을, 밑첨자 L 은 인접면을 기준으로 한 제어봉 삽입형태를 의미한다.

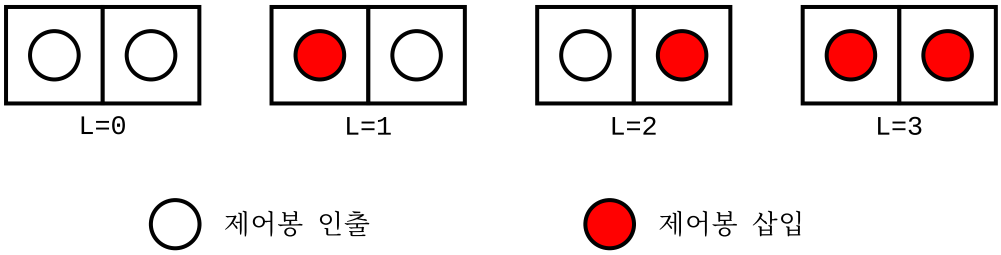

그림 1. 두 격자의 인접면을 기준으로 한 제어봉 삽입형태

ICCC는 3차원 격자의 모든 인접면에 대하여 NLANM의 고차노달방법을 사용하는 거시격자 유한차분법(이하 CMFD_H)으로 산출할 수 있는데, 전제어봉 인출 상황과 순차적인 개별제어군 완전삽입 상황의 계산을 수행하면 노심계산에 필요한 모든 값을 얻을 수 있다. 일반적으로 축방향으로의 ICCC는 노심의 계산결과에 영향을 미치지 않을 정도로 충분히 작은 값이 유지되므로 실제 노심의 계산에서는 반경방향의 인접면 만을 고려하면 된다. 반경방향으로 모든 인접면에 대한 ICCC는 표의 형태로 저장되며 노심 과도현상의 계산에서는 이 자료를 이용한 유한차분 계산만을 수행(이하 CMFD_C)하게 된다.

III. 인접면 연계인자 보정법의 적용성 평가

CMFD_C 방법론의 적용성을 검증하기 위하여 CMFD_H 방법론과의 정적상태 및 과도상태 해석결과를 비교하였다. 대상 노심으로는 영광 원자력 1호기 15주기 연소도 150 MWD/MTU의 노심을 선정하였는데 노심의 형태와 제어봉 배치는 그림 2와 같다.

가. 군정수 및 인접면 연계인자 보정값 생산

열수력 궤환을 포함한 노심분석을 위하여 다양한 운전조건에서의 격자별 군정수를 노심설계코드인 ANC로부터 제공받아 식 (12)의 군정수 산출에 필요한 계수를 생산하였다. ANC 에서는 군정수 생산의 기준조건이 영출력 상태이므로 표 1의 다양한 조건에 대한 계산으로부터 격자별 군정수를 추출하여 기본군정수 및 열수력 궤환을 위한 계수 생산에 사용하였다.

표 1의 계산에서는 모든 격자에 대하여 같은 값의 감속재밀도를 지정하기 위하여 무한유량을 가정하였다. 첫번째 계산은 영출력 기준조건에서의 계산으로 이 때 제논은 전출력 평형상태의 분포로 고정시켰으며 이후 모든 계산에서 동일한 분포를 사용하였다. 감속재밀도의 변화는 감속재온도를 변화시키거나 고온상태에서는 감속재온도를 고정시키고 기포분율을 변화시킴으로써

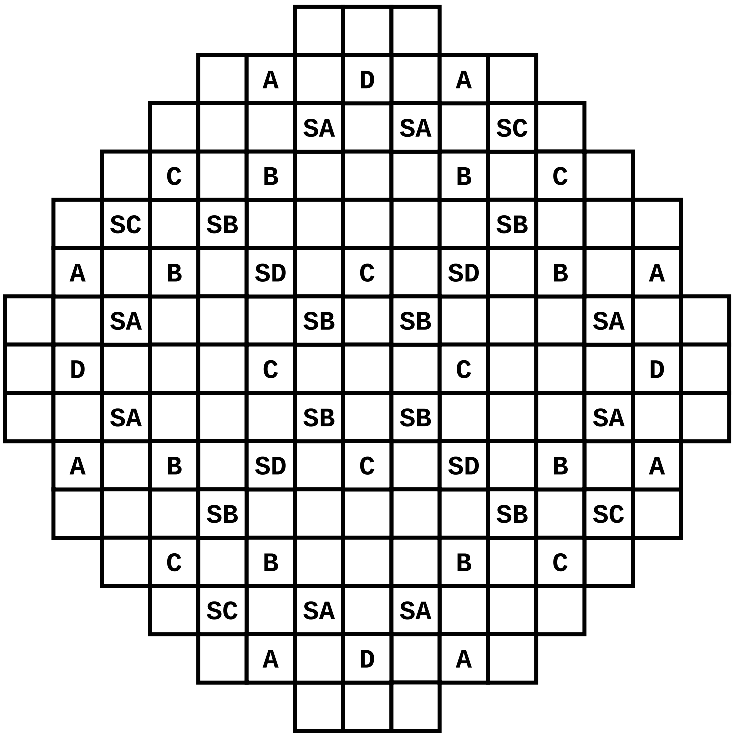

그림 2. 영광 1호기 노심형태 및 제어봉 배치

표 1. 군정수 생산을 위한 ANC 계산

순번	계산 내용	출력 (%)	붕산농도 (ppm)	감속재밀도 (g/cm^3)	감속재온도 (°C)
1	영출력 기준 계산	0	500	0.74335	291.7
2	붕산농도 변화계산 1	0	1000	0.74335	291.7
3	붕산농도 변화계산 2	0	1	0.74335	291.7
4	출력 변화계산 1	100	500	0.74335	291.7
5	출력 변화계산 2	200	500	0.74335	291.7
6	감속재밀도 변화계산 1	0	500	0.59572	320.0
7	감속재밀도 변화계산 2	0	500	0.64768	320.0
8	감속재밀도 변화계산 3	0	500	0.68008	320.0
9	감속재밀도 변화계산 4	0	500	0.81195	250.0
10	감속재밀도 변화계산 5	0	500	0.89646	180.0
11	감속재밀도 변화계산 6	0	500	0.96536	100.0
12	감속재밀도 변화계산 7	0	500	0.99999	27.0

다양한 조건의 군정수를 생산할 수 있도록 하였다. 각 조건에서 제어봉 완전인출과 완전삽입의 계산을 수행하였으며 각 계산에서 제공된 격자별 중성자 단면적과 불연속인자 등의 군정수를 종합하여 식 (12)에 적용될 기본군정수와 열수력궤환 계수를 생산하여 노심계산에 적용하였다.

ICCC는 기준군정수 생산조건에서 제어봉 완전인출과 제어봉 완전삽입 상태의 두가지 계산을 CMFD_H 방법을 적용하여 수행함으로써 구할 수 있으며 CMFD_H 방법에서는 군정수 생산에서 구한 불연속인자가 사용되는 반면 CMFD_C 방법에서는 그 대신 ICCC가 사용된다.

나. 정적상태 노심계산에서의 적용성 평가

CMFD_C 방법에서는 기준군정수 생산조건에서 산출한 ICCC 만을 사용하므로 운전조건의 변화에 의한 계산결과의 오차를 관찰할 필요가 있다. 이 연구에서는 노심의 반응도 오차와 상대출력 1.0 이상인 반경방향 핵연료집합체 출력분포의 최대오차를 분석하기로 한다. 표 2는 군정수 생산에 사용된 여러가지 운전조건에서 CMFD_C 방법과 CMFD_H 방법의 차이를 요약한 것이다. 이 결과를 살펴보면 ICCC가 생산된 영출력 기준계산 조건이나 붕산농도 또는 출력변화 조건에서는 CMFD_C 와 CMFD_H 방법의 차이가 거의 없으며 감속재 밀도변화 조건에서는 기준상태로부터 멀어질수록 오차가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 붕산농도나 출력 즉, 핵연료온도의 변화는 노심의 중성자속 분포에 큰 영향을 주지 않음을 반증하는 것이며 감속재밀도의 변화는 상대적으로 중성자의 스펙트럼에 미치는 영향 이 크고 특히 노심 외곽의 중성자누

표 2. 군정수 생산 조건에서 CMFD_C 와 CMFD_H 방법의 오차

	노심반응도 차이 (PCM)		출력분포 (P>1.0) 최대차이 (%)	
	ARO	ARI	ARO	ARI
영출력 기준계산	7.1	32.7	0.57	0.86
붕산농도 변화계산 1	3.4	23.7	0.31	0.84
붕산농도 변화계산 2	16.7	50.1	0.90	1.08
출력 변화계산 1	16.3	37.0	0.74	1.07
출력 변화계산 2	16.2	35.7	0.72	1.06
감속재밀도 변화계산 1	-43.4	-99.0	1.88	1.48
감속재밀도 변화계산 2	-25.9	-50.5	1.15	1.31
감속재밀도 변화계산 3	-15.1	-22.5	0.31	1.19
감속재밀도 변화계산 4	36.6	96.4	1.96	1.47
감속재밀도 변화계산 5	88.5	189.1	3.93	3.56
감속재밀도 변화계산 6	155.5	287.6	5.85	3.68
감속재밀도 변화계산 7	202.8	350.7	5.07	4.45

설에 변화를 주기 때문인 것으로 분석된다. 그러나 감속재온도가 250 °C 이상에서는 노심반응도 오차가 100 pcm 이하, 출력분포 오타가 1 % 이하로 작게 나타나고 있으며 그보다 저온 상태에서의 오차도 노심의 설계에서 통상적으로 적용되는 노심반응도 오차 허용범위 500 pcm 과 상대출력분포 오차 5% 의 범위를 크게 벗어나지 않고 있다.

열수력 궤환효과를 포함하는 노심계산에서의 적용성을 확인하기 위하여 전출력 ARO 평형제논 상태의 계산을 수행하였다. CMFD_C 와 CMFD_H 방법의 노심반응도 차이는 1.7 pcm 으로 잘 일치하였으며 그림 3과 4에 반경방향과 축방향 출력분포를 비교하여 나타내었다. 또한, 50% 출력에서 선행제어군인 Bank D 가 50% 삽입된 상태의 계산을 수행하였는데 노심반응도 차이는 3.4 pcm 이었으며 그림 5와 6에 반경방향과 축방향 출력분포를 비교하였다. 모든 경우에서 반경방향 출력분포의 차이는 상대출력 1.0 이상인 핵연료집합체에서 0.5 % 이하로 잘 일치하고 있으며 축방향 출력분포 역시 차이가 거의 나타나지 않고 있다. 영출력 상태의 노심계산은 실제적으로 열수력 궤환의 의미가 없으므로 적어도 고온 영출력 이상의 노심의 해석에서는 두 방법의 차이는 공학적으로 무시할 수 있는 정도에 불과하다.

다. 과도상태 노심계산에서의 적용성 평가

노심의 과도상태는 시공간 중성자 확산방정식의 해를 구함으로써 모사계산이 수행된다. 과도상태의 모사계산에 대한 CMFD_C 방법의 적용성 확인을 위하여 노심 내 군정수의 변화가 가장 큰 과도상황인 제어봉 이탈사고와 제어군 인출사고에 대한 모사계산을 수행하여 CMFD_H 방법의 결과와 비교하였다. 이 두 가지 사고를 분석하기 위해서는 과도상황 중 노심의 출력변화로 인한 원자로계통의 반응이 동시에 분석되어야 하며 계통의 반응으로 인한 노심의 열수력적 환경 변화가 고려되어야 한다. 따라서 노심과 계통의 연계계산을 필요로 하는데 이 연구에서는 계통해석 코드인 RETRAN에 노심해석코드를 Dynamic-link Library (DLL) 기법으로 접목하여 연계계산을 수행하였다. RETRAN의 계통해석에서는 노심을 6개의 1차원 노드로 분할하였으며 계통해석 결과 산출된 노심 내 열수력 조건은 노심계산 결과 산출된 3차원 출력분포를 바탕으로 각 노심계산 격자에 대한 열수력 조건의 분포를 구하는 방법을 사용하였다. 노심계산 결과 산출된 3차원 출력분포는 RETRAN의 1차원 출력분포로 합성되어 제공됨으로써 한 시구간에 대한 노심/계통 연계계산이 완료된다.

제어봉 이탈사고는 영출력 전제어봉 삽입상태로부터 시작되는 사고를 모사하였는데 이탈 제어봉집합체는 Bank SD 중 하나이며 이탈제어봉가는 CMFD_H 및 CMFD_C 로 각각 694.7 pcm 및 692.0 pcm으로 분석되었다. 이는 약 1.14 $ 에 해당하는 반응도이다. 이 계산에서는 0.1초 동안 제어봉이 이탈된다고 가정하였으며 시구간은 0.002초로 분할하여 계산을 수행하였다. 그림 7에 제어봉 이탈사고 중 노심출력 변화를 비교하였는데 CMFD_H 와 CMFD_C에서 최대출력은 각각 78.82 %와 77.14 % 이었으며 최대출력이 발생한 시간은 각각 0.440초와 0.448초이다.

제어봉 이탈사고와 같이 노심의 출력 변화가 급격한 경우 원자로계통 반응의 노심 열수력적 조건에 대한 영향은 상대적으로 미약하다. 따라서 계통의 영향이 잘 나타나는 과도현상인 제어군 인출사고에 대한 분석을 수행하였다. 사고의 초기조건은 1 % 의 노심출력에서 제어군 D, C 가 완전히 삽입되고 제어군 B가 50 % 삽입된 상황이며 제어군은 50 %의 중첩으로 연계되어 초

0.904 0.903 0.1	1.215 1.213 0.2	1.049 1.047 0.1	1.258 1.260 -0.1	1.035 1.035 0.0	1.206 1.210 -0.3	0.782 0.783 -0.1	0.451 0.454 -0.7
	0.961 0.959 0.1	1.234 1.229 0.4	1.279 1.277 0.2	1.291 1.293 -0.2	1.265 1.264 0.1	1.222 1.216 0.4	0.345 0.345 0.0
		1.273 1.270 0.2	1.328 1.330 -0.2	1.248 1.247 0.1	1.167 1.173 -0.5	1.010 1.007 0.3	
			1.080 1.084 -0.4	0.808 0.810 -0.2	0.332 0.333 -0.2		
				0.315 0.314 0.1			CMFD_C CMFD_H % 차이

그림 3. 전출력 ARO 평형제논 상태의 반경방향 출력분포 비교

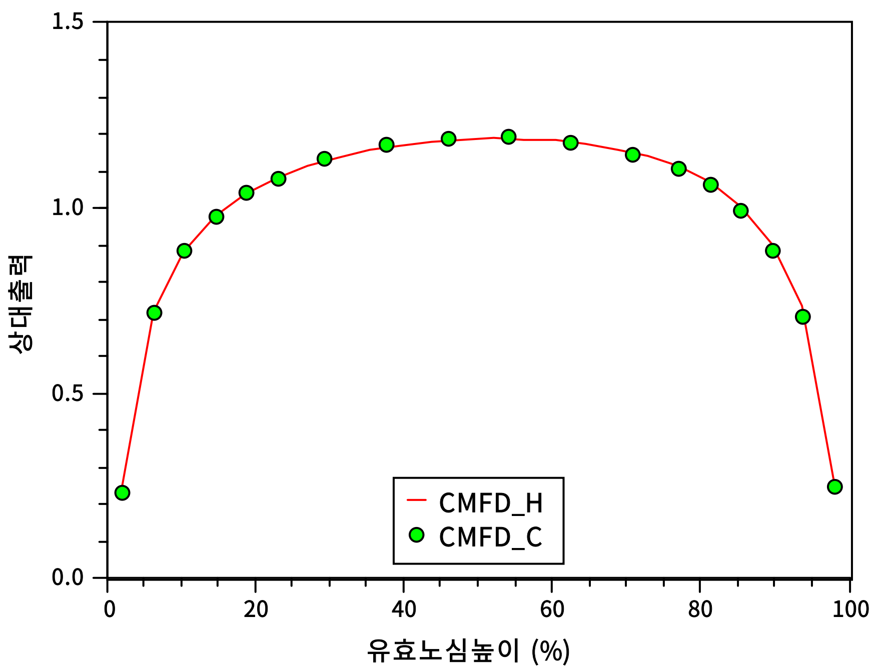

그림 4. 전출력 ARO 평형제논 상태의 축방향 출력분포 비교

0.926 0.924 0.2	1.256 1.257 -0.1	1.082 1.079 0.3	1.299 1.302 -0.2	1.035 1.035 0.2	1.143 1.148 -0.5	0.576 0.577 -0.2	0.366 0.366 -0.0
	0.988 0.985 0.3	1.284 1.280 0.3	1.330 1.327 0.2	1.315 1.319 -0.3	1.239 1.239 0.0	1.132 1.127 0.4	0.298 0.297 0.1
		1.334 1.331 0.2	1.389 1.393 -0.3	1.285 1.284 0.1	1.170 1.177 -0.5	0.980 0.978 0.3	
			1.110 1.114 -0.4	0.808 0.809 -0.1	0.320 0.319 0.2		
				0.309 0.308 0.4			CMFD_C CMFD_H % 차이

그림 5. 50 % 출력 Bank D 50 % 삽입 평형제논 상태의 반경방향 출력분포 비교

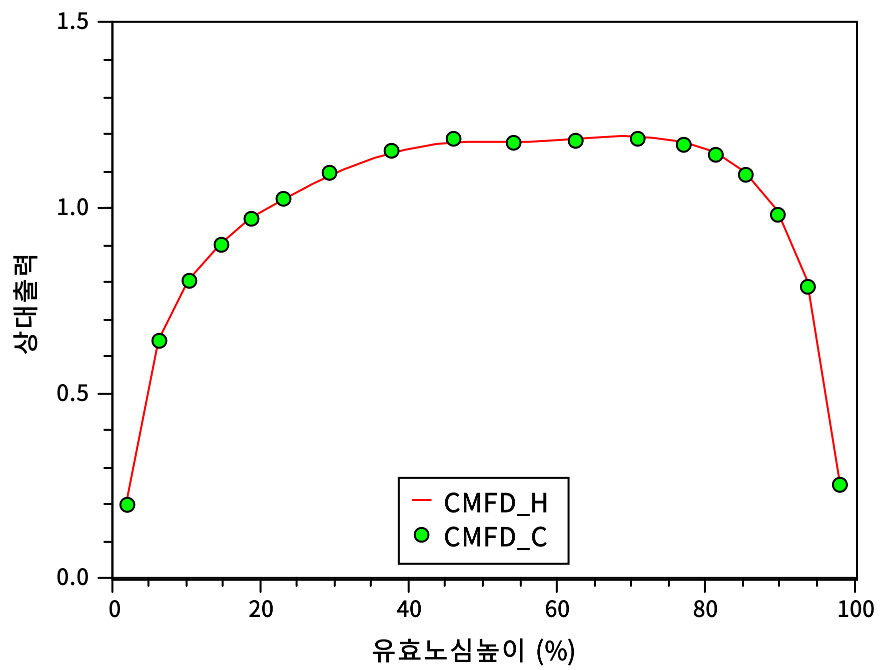

그림 6. 50 % 출력 Bank D 50 % 삽입 평형제논 상태의 축방향 출력분포 비교

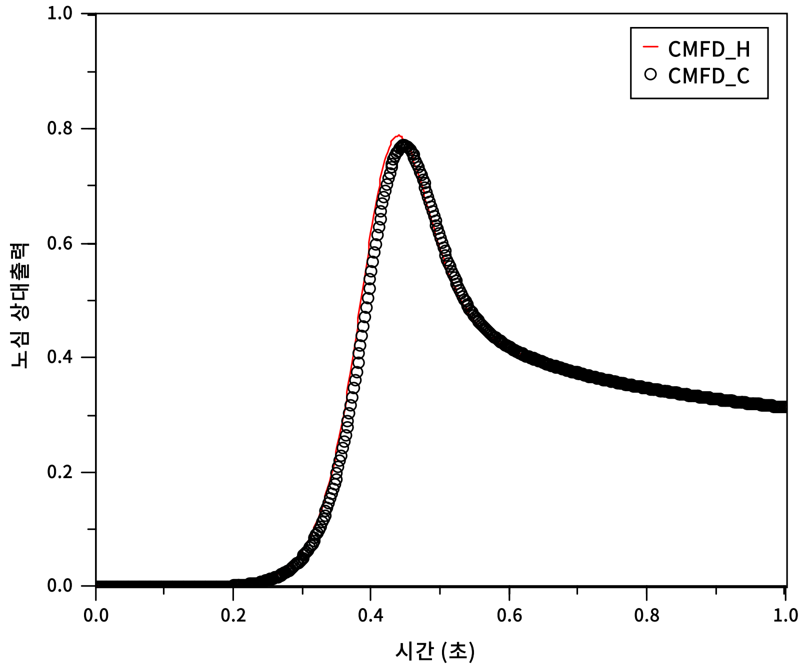

그림 7. 제어봉 이탈사고 중 노심출력 변화

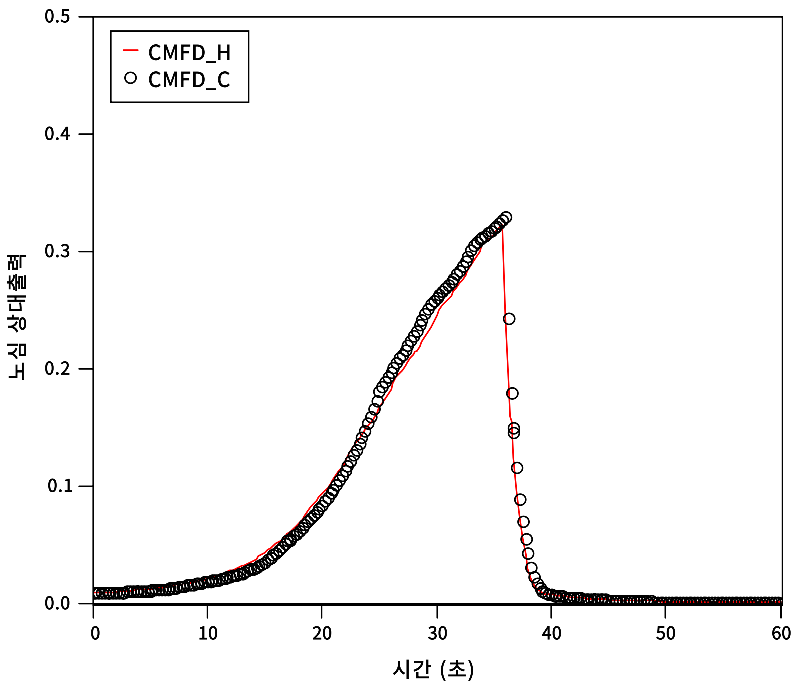

그림 8. 제어군 인출사고 중 노심출력 변화

당 약 1.8 cm의 속도로 인출된다. 시구간은 실시간 해석의 일반적인 요건인 0.25초로 분할하였다. 그림 8은 사고 중 노심의 출력변화를 나타낸 것이다. 노심/계통을 연계한 분석에서 CMFD_H 및 CMFD_C 각각에 대하여 33.75초 및 34.00 초에서 가압기 고압력에 의한 원자로정지 신호가 발생하였으며 실제 제어봉의 낙하는 35.75 초와 36.00초에 각각 시작되었다. 제어봉 낙하 직전의 출력은 각각 32.41% 와 33.01 % 를 나타내고 있다. 이와 같이 대표적인 원자로 과도상태를 계통해석과 연계하여 분석한 결과 CMFD_C 방법의 ICCC를 사용한 근사기법은 해석결과에 미치는 영향이 거의 없음이 확인되었다.

제어봉 이탈사고와 같이 미세한 시구간 분할이 불가피한 과도현상의 해석을 제외하고 일반적인 실시간 해석요건은 초당 4회의 계산속도 확보이다. 그런데 노심해석에 있어서 시구간 당 계산시간에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 중성자속 분포 및 변화된 노심출력의 수렴을 위한 반복계산 횟수이다. 이 반복계산 횟수는 시구간 당 노심계산의 격자별 군정수 변화량에 좌우되므로 실시간 해석기능의 확보 여부는 시간당 격자별 군정수 변화가 가장 큰 과도현상을 대상으로 분석되어야 한다. 이 연구에서는 제어봉 이탈사고를 제외하고 가장 급격한 군정수 변화를 일으키는 조건인 전출력 운전 중 전 제어봉이 낙하되는 원자로정지 순간의 과도현상을 분석하였다. 그림 9는 CMFD_H와 CMFD_C 방법의 결과를 비교한 것인데 0.25초의 시구간이 원자로 정지와 같이 비교적 빠른 과도현상을 제대로 모사할 수 있는지를 확인하기 위하여 CMFD_H 방법을 사용하여 시구간을 0.05초로 분할한 계산의 결과를 함께 나타내었다. 이 분석 결과 0.25초의 시구간 분할에 의한 계산은 0.05초 시구간에 의한 계산과 동일한 결과를 나타내고 있으며, CMFD_C에 의한 계산결과도 제어봉 낙하 초기의 미세한 차이를 제외하면 전체적으로 해석 결과에 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 표 3은 CMFD_H 와 CMFD_C 방법의 계산시간을 비교한 것으로 10초 동안의 계산 중 가장 오래 걸린 시구간의 자료이다. 이 결과에서 CMFD_C 방법이 중성자속 및 출력변화 수렴계산에서 약 4.7 배 빠른 것으로 나타났고, 열수력 계산이나 제어봉삽입 및 열수력 궤환에 의한 격자별 군정수 계산 등 모든 계산 작업을 합한 시구간 계산에서 약 3배 빠른 효과를 얻고 있으며 실시간 요건인 0.25초 이내의 계산이 가능함을 알 수 있다.

IV. 결론

기준 조건에서 미리 계산된 인접면 연계인자 보정값(ICCC)을 거시격자 유한차분법에 적용하여 초당 4회의 시공간 중성자확산 방정식의 실시간 계산이 가능한 방법론을 개발하였다. 이 연구에서는 3차원 격자의 제어봉 삽입정도에 따라 ICCC를 결정하였는데 영광 1호기 15주기 노심을 대상으로 한 분석에서 고온 정적상태의 노심계산에서는 고차 노달방법을 사용하여 보정값을 계산하는 방식과 결과의 차이가 노심반응도 100 pcm, 반경방향 출력분포 1% 이내로 잘 일치하였다. 상온상태 노심의 경우 정적상태에서 350 pcm 정도의 노심반응도 오차를 유발하게 되나 노심의 해석에서 통상적으로 적용되는 오차 한계인 500 pcm 이내이며, 반경방향 출력분포 역시 통상적인 오차 한계인 5% 정도의 차이를 나타내고 있다. 노심/계통 연계 분석이 포함된 과도상태의 해석에서는 주목할만한 차이가 없음이 확인되었다.

원전 시뮬레이터나 NPA 등에 사용되는 기존의 실시간 해석방법론은 점운동방정식과 유한차분법에 의한 정적상태 계산결과를 합성하는 방식을 사용하며 설계결과와 실시간 해석결과를 일

치시키기 위한 인자의 조정작업을 필요로 하게 된다. 이 연구에서 개발된 인접면 연계인자 보정법은 시공간 중성자 확산방정식의 해를 직접 구하는 방식으로 노심계산을 수행하고 기본적으로 노심설계와 동일한 격자 구조와 노심해석 방법론을 유지하게 되므로 각종 인자의 조정 없이도 과도현상의 모사계산에 충분히 정확한 결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 과학기술부가 수행하고 있는 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었다. 이 연구에서 사용한 영광 1호기 15주기 군정수 자료는 한국원전연료주식회사에서 제공하였다.

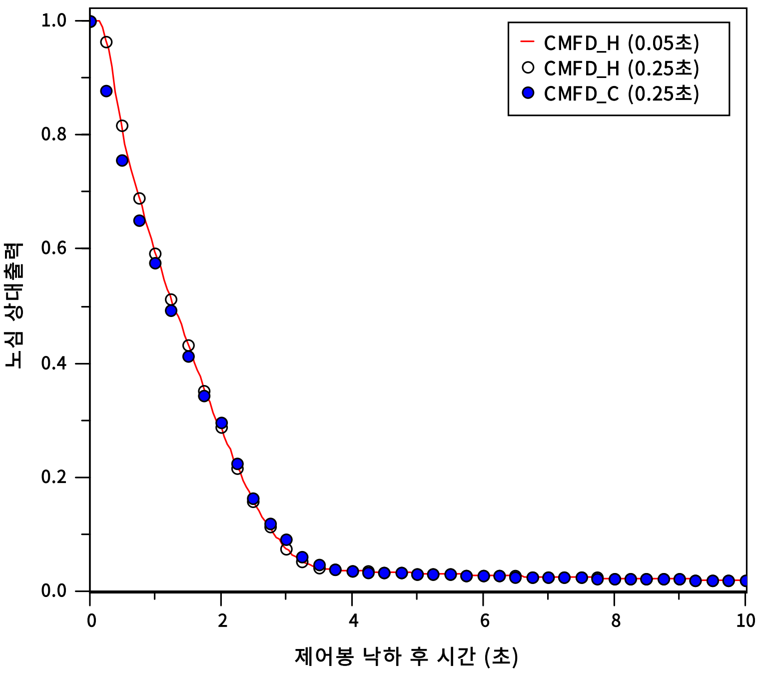

그림 9. 원자로 정지 상황 중 노심출력 변화 비교

표 3. 최대시간이 소요된 시구간에서의 계산시간 비교

방법론	열수력계산	군정수계산	중성자 수렴계산	총 계산시간
CMFD_H	**0.016**	**0.062**	**0.438**	**0.516**
CMFD_C	**0.016**	**0.062**	**0.094**	**0.172**

(주) Intel Pentium IV 3 GHz CPU 사용, 시간 단위 : 초

참고문헌

1. J.J. Jeong et al., “MARS/MASTER Solution to OECD Main Steam Line Break Benchmark Exercise III,” *J. Korean Nucl. Soc.*, 32, 214 (2000).

2. 지성균 외, “RETRAN-MASTER-TORC 기반의 통합코드체계 개발 및 검증,” KAERI/TR-2292/2002.

3. T.Q. Nguyen et al., “Qualification of the PHOENIX-P/ANC Nuclear Design System for Pressurized Water Reactor Cores,” WCAP-11596-P-A (1988).

4. “User’s Manual for ROCS,” CE-CES-4 Rev. 11-P (1996).

5. T. M. Sutton and B. N. Aviles, “Diffusion Theory Methods for Spatial Kinetics Calculations,” *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 30, No. 2, pp. 119-182 (1996).

6. H.G. Joo et al., “PARCS, A Multi-Dimensional Two-Group Reactor Kinetics Code Based on the Nonlinear Analytic Nodal Method,” PU/NE-98-26 (1998).

7. D.I. Chang et al., “The Nuclear Design and Core Physics Characteristics of the Yonggwang Nuclear Power Plant Unit 1 Cycle 15,” KNF-Y1C15-03010 (2003).