2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력 학회

비선형 NEM/ANM 방법에 의한 과도상태 모사

A Performance Test of non-linear NEM/ANM CMFD in LWR core transient.

이은기, 신호철, 우일탁, 류석진, 배성만, 이창섭

한국전력 전력연구원
대전 광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

2군 확산방정식의 해를 빠르고 정확하게 구하기 위한 지속적인 시도는 Nodal Method**를 시초로 다양한 방법론을 개발하게 하였다. 본 논문에서는 이미 개발된 방법론** 2**가지를 조합하여 그 해의 정확성을 살펴보았다. 노심영역을 해석하는 도구로 다군 확장에 제한이 없는** Nodal Expansion Method (NEM)**를, 중성자속 경계조건의 역할을 담당하는 반사체 영역은 보다 정확한 해를 얻도록** Analytic Nodal Method (ANM)**를 사용하고 그 해의 정확성을 살펴본 것이다. 반사체는 중성자원을 포함하지 않으므로** ANM**을 적용하더라도 다군 확장에는 문제가 없다. 최근 가압경수형 원전의 동적 제어봉 제어능 측정을 위해 개발된** 3**차원 노심 동특성 해석코드인** RAST-K**에 동 방법론을 적용하여** 11**가지 노심 과도상태 벤치마크 문제 해석을 수행한 결과 제안된 방법이** NEM**만을 사용한 경우보다 정확한 해를 제공함을 알 수 있었다.**

ABSTRACT

Many sophisticated methodologies to solve the 2-group neutron diffusion equation were developed for last 25 years. In this paper, Nodal Expansion Method (NEM) and Analytic Nodal Method (ANM) were coupled in non-linear coarse mesh finite difference method to get more accurate core power distribution. NEM and ANM were used for core nodes and reflector nodes, respectively. ANM is applied to the reflector area because it can give more precise solution than NEM and there is no fission source in a reflector. It means this combination does not have any limitation to solve a multi-group diffusion equation. The new approach has been adopted in the three-dimensional core transient analysis code, RAST-K, which was developed to simulate the reactor physics test and successfully applied to obtain the dynamic rod worth from the measured excore detector signals. The results of 11 benchmark cases show that the new approach is more accurate than a traditional non-linear NEM only.

I. 서 론

지난 25여년간 많은 연구자들이 2군 중성자 확산방정식의 해를 정확하고 빠르게 구할 수 있는 다양한 방법론들을 개발하여 왔다. 그 결과 핵연료집합체를 하나의 노드로 하더라도 미세격자로 구한 반경방향 출력분포와 수 %의 오차만 갖는 노달해법들이 등장하게 되었다. 초기의 Nodal Expansion Method (NEM)[1]**을 거쳐** Analytic Nodal Method (ANM)[2], Analytic Function Expansion Method (AFEN)[3], Nodal Green's Function Method (NGFM)[4], Green's Function Nodal Expansion Method (GNEM)[5], Spectral Galerkin Coarse-mesh (SGCM)[6], **비선형** ANM[7] **그리고 최근의** Unified nodal method (UNM)[8]**까지 실로 다양한 해석방법론이 개발되었고 핵연료 공급사들도 그들 나름대로의 방법론에 근거한 전산코드,** ANC[9], ROCS[10], SIMULATE[11]**등을 개발하여 원자로 핵설계 전산코드에 적용하기도 했다. 이들 방법론의 개발 역사를 보면 그 목표가 어떻게 변해왔는지를 알 수 있다. 초기엔 전산환경등의 문제로 적당한 계산오차내에서 계산시간을 빠르게 하는 것이 목적이었던 반면** 1990**년대 후반에는**

계산시간보다는 계산오차를 감소시키는 방법들이 주로 연구되었던 것이다. 그러나 계산오차의 감소는 그 해가 노드의 핵적특성과 노심전체의 반응도 특성을 포함해야 비로소 가능했기 때문에 이 시기의 방법론들은 대부분 해석 해를 사용하였다. 다행히 2군 중성자 확산방정식의 경우 해석 해는 때때로 난관에 부딪히기도 했지만 별 어려움 없이 사용될 수 있었다. 그러나 다군 확산방정식의 경우는 해석 해 유도과정에 나타나는 고유값의 복수화를 어떻게 극복할 수 있을 것인가가 하는 문제가 여전히 풀리지 않은 채 남아 있다. 이를 해결하기 위한 시도들이 진행되고 있으나 현재까지 특별한 방법론이 알려진 바는 없다. 다군 확장성만을 살펴보면 NEM이 가장 유리하다. 2 node 문제에서 각 노드의 1차원 중성자속 분포를 몇차의 다항식으로 표현하는 NEM은 군 확장에 따른 행렬차수의 증가를 제외하곤 풀이방법의 난이도가 달라지지 않으며, 어떤 제한을 갖고 있는 것도 아니다. 비록 해석해를 사용하는 경우에 비해 정확도가 떨어짐에도 불구하고 여전히 NEM이 매력적인 것은 바로 이점에 있다.

본 논문은 상기한 바와 같이 다양하게 개발된 노심해석방법론 중 NEM과 ANM을 혼용하고서 그 계산정확성의 향상을 살펴보았다. 혼용의 방법은 다군 확장에 제한이 없도록 하기 위해 노심 노드에는 NEM을 적용하고, 반사체 영역은 ANM을 사용하는 것으로 하였다. 사실 반사체는 노심으로 되돌아 가는 중성자류 정보를 얼마나 정확하게 제공할 것인가의 관점에서만 의미가 있고, 또 구성물질의 단순함과 중성자원 부재라는 사실 때문에 ANM은 가장 적절한 방안이라 할 수 있다.

본론에서는 노심-반사체 경계면에서 중성자류 계산에 방법과 그것이 적용된 전산코드 RAST-K에 관해 간략히 언급하고, 본 방법론의 타당성 검증용 벤치마크 문제들과 해석결과에 대해 논하기로 한다. 주요 관심사는 과도사고 해석시 본 방법론을 적용하였을 때 노심출력예측 정확성의 향상 여부이므로 NEACRP 3-D LWR Core transient 9문제를 포함한 총 11개 과도해석 벤치마크 문제를 택하여 그 결과를 살펴보았다. 결론적으로 NEM/ANM 조합의 비선형 소격격자 차분방정식이 NEM/NEM 보다 정확한 해를 제공할 수 있음을 알 수 있었다.

II. 본 론

가. NEM/ANM 방법론

비선형 소격격자 방법을 적용할 경우 가장 중요한 것은 노드 경계면에서 정확한 순중성자류 (net current) 계산을 통해 보정 확산 계수를 제대로 평가하는 일이다. One node 문제든 two node 문제든 순중성자류를 계산하는 이유는 보정확산계수 때문인데, 통상의 NEM 및 ANM에 근거한 비선형 소격격자 해석 방법론은 이미 잘 알려져 있으므로 본 논문에서는 노심 노드와 반사체 노드 경계에서 중성자 확산 보정 계수를 구하는 방법에 대해서만 논하기로 한다. 통상 NEM과 ANM은 횡방향으로 적분된 다음의 1차원 중성자확산 방정식의 해를 구함에 있어

$$\frac{1}{v_g}\frac{\partial \phi_g(u,t)}{\partial t} - D_g \nabla^2 \phi_g(u) + \Sigma_{tg}\phi_g(u) = -L_g(u) \;\; ; g=1,2, u=x,y,z, \tag{1}$$

노드내 중성자속 분포를 다음과 같이 근사하거나 해석해로 나타낸다.

$$\vec{\phi}^C(u) = \vec{C}_0^C + \vec{C}_1^C h_1(u) + \vec{C}_2^C h_2(u) + \vec{C}_3^C h_3(u) + \vec{C}_4^C h_4(u), \tag{2}$$

$$\vec{\phi}^R(u) = \begin{bmatrix} \cosh\kappa_1^R u' & \sinh\kappa_1^R u' & 0 & 0 \\ R_{21}\cosh\kappa_1^R u' & R_{21}\sinh\kappa_1^R u' & \cosh\kappa_2^R u' & \sinh\kappa_2^R u' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1^R \\ B_1^R \\ A_2^R \\ B_2^R \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$+ \vec{f}_0^R + \vec{f}_1^R h_1(u) + \vec{f}_2^R h_2(u),$$

여기서

$$f_{0g}^{R}=\frac{-\left(L_{0g}^{R}-\frac{12}{a_u^R}\beta_g^R f_{2g}^{R}\right)}{\Sigma_{tg}^{eff}},f_{1g}^{R}=-\frac{L_{1g}^{R}}{\Sigma_{tg}^{eff}},f_{2g}^{R}=-\frac{L_{2g}^{R}}{\Sigma_{tg}^{eff}},R_{21}=\frac{\Sigma_{21}^{R}/D_{2}^{R}}{\kappa_2^{R^2}-\kappa_1^{R^2}},\kappa_g=\sqrt{\frac{\Sigma_{tg}^{eff}}{D_g^R}},$$

$$\Sigma_{tg}^{eff}=\Sigma_{tg}^{R}+\frac{\omega_g^R}{v_g},\frac{1}{v_g}\frac{\partial\phi_g(u,t)}{\partial t}\approx\frac{\omega_g}{v_g}\phi_g(u,t_1),\omega_g^R=\frac{1}{\Delta t}\ln\left(\frac{\bar{\phi}_g^R(t_{n+1})}{\bar{\phi}_g^R(t_n)}\right),$$

이고, 위첨자 C, R은 각각 Core node, Reflector node를 의미하며, 과도상태모사 시 지수함수근사를 도입, 군별 흡수단면적 등은 상기한 바와 같이 시간미분항을 포함하는 유효단면적으로 표현하였다.

비록 노심노드와 반사체 노드를 구별하여 서로 다른 함수를 적용한다 하더라도 노심-반사체 경계면에서 순중성자류를 계산하는 조건은 다를 바가 없다. 계산을 통해 결정해야 할 변수들은 식 (1)의 경우 각 근사함수 계수들이고 식 (2)는 우변 첫번째항의 계수 A^R, B^R 이다. 따라서 우선 기존의 비선형 NEM과 ANM에서와 같이 식 (1)에는 $h_0(u)$, $h_1(u)$, $h_2(u)$함수를 가중함수로하는 가중잔여법을 적용하고 식 (2)는 노드 길이에 대한 평균이 노드 평균 중성자속이 된다는 조건을 사용한다. 상기한 조건에 따라 식 (1)의 경우 계수 $C_0(t)$, $C_2(t)$, $C_4(t)$가 반사체 노드 성질과는 관계없이 결정되고, $C_1(t)$ 과 $C_3(t)$ 의 관계성이 도출된다. 식 (2)의 경우는 계수 A^R가 결정된다. 남은 변수는 $C_1(t)$과 B^R이다. 이 두 변수는 노심-반사체 경계면에서 중성자속 연속조건과 중성자류 연속조건을 도입함으로써 쉽게 얻을 수 있다. 두 조건을 적용하면 각각

$$\begin{bmatrix}C_{11}^{C}\\C_{12}^{C}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}SH_1 & 0\\R_{21}SH_1 & SH_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}B_1^R\\B_2^R\end{bmatrix}=\underline{\underline{\mathbf{FC}}}, \tag{4}$$

$$2\underline{\underline{\mathbf{X}}}_{11}^{c}\mathbf{C}_1^c+\underline{\underline{\mathbf{D}}}^R\begin{bmatrix}\kappa_1^R CH_1 & 0\\R_{21}\kappa_1^R CH_1 & \kappa_2^R CH_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}B_1^R\\B_2^R\end{bmatrix}=\underline{\underline{\mathbf{FJ}}}. \tag{5}$$

여기서

$$\underline{\underline{\mathbf{FC}}}=\begin{bmatrix}CH_1 & 0\\R_{21}CH_1 & CH_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A_1^R\\A_2^R\end{bmatrix}+\vec{f}_0^R-\vec{f}_1^R-\vec{f}_2^R-\begin{bmatrix}\bar{\phi}_1^c\\\bar{\phi}_2^c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}C_{21}^c\\C_{22}^c\end{bmatrix},$$

$$\underline{\underline{\mathbf{FJ}}}=6\underline{\underline{\mathbf{b}}}^c\left(\underline{\underline{\mathbf{W}}}_{13}^c\mathbf{S}_1^c+\mathbf{S}_0^c\right)+\underline{\underline{\mathbf{D}}}^R\begin{bmatrix}\kappa_1^R SH_1 & 0\\R_{21}\kappa_1^R SH_1 & \kappa_2^R SH_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A_1^R\\A_2^R\end{bmatrix}+2\underline{\underline{\mathbf{b}}}^R\left(\vec{f}_1^R+3\vec{f}_2^R\right),$$

$$\underline{\underline{\mathbf{X}}}_{11}^{c}=\underline{\beta}\left(1+3\underline{\underline{\mathbf{W}}}_{13}^{C}\underline{\underline{\mathbf{M}}}_{11}^{C}\right),\underline{\underline{\mathbf{W}}}_{13}^{C}=\underline{\underline{\mathbf{M}}}_{13}^{C\,-1},SH_i=\sinh\left[\frac{a\kappa_i^R}{2}\right],CH_i=\cosh\left[\frac{a\kappa_i^R}{2}\right],$$

$$\underline{\underline{\mathbf{M}}}_{13}^{C}=\begin{bmatrix}60\frac{\beta_1^C}{a}+\Sigma_{t1}^{eff,C}-\frac{\nu\Sigma_{t1}^{eff,C}}{k_{eff}} & -\frac{\nu\Sigma_{t1}^{eff,C}}{k_{eff}}\\-\Sigma_{21}^{C} & 60\frac{\beta_2^C}{a}+\Sigma_{t2}^{eff,C}\end{bmatrix}.$$

식 (3)과 (4)를 연립하여 풀면 계수 B^R 을 결정할 수 있고 따라서 노심-반사체 경계면에서 순중성자류는 다음과 같이 기술된다.

$$\mathbf{J}_{Surface}^{R}=-\underline{\underline{\mathbf{D}}}^R\begin{bmatrix}-\kappa_1^R SH_1 & 0\\-R_{21}\kappa_1^R SH_1 & -\kappa_2^R SH_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A_1^R\\A_2^R\end{bmatrix}-\underline{\underline{\mathbf{D}}}^R\begin{bmatrix}\kappa_1^R CH_1 & 0\\R_{21}\kappa_1^R CH_1 & \kappa_2^R CH_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}B_1^R\\B_2^R\end{bmatrix}+2\underline{\underline{\mathbf{b}}}^R\left(\vec{f}_1^R+3\vec{f}_2^R\right). \tag{5}$$

일단 순중성류가 계산되면 보정 확산 계수는 식 (6)으로 표시된다.

$$\tilde{D}_{gu}^{CR}=\frac{-J_{gur}^{C}a_u^C-\hat{D}_{gu}^{CR}\left(\bar{\phi}_g^R-\bar{\phi}_g^C\right)}{\bar{\phi}_g^R+\bar{\phi}_g^C}. \tag{6}$$

나. RAST-K 전산코드

Reactor Analysis code for Steady state and Transient – KEPRI (RAST-K) 전산코드는 NEM, 비선형 NEM/NEM, 비선형 NEM/ANM을 핵적 계산용 solver로 사용하는 3차원 노심 동특성 해석 전산코드이다. 거시핵단면적을 사용한 연소도 계산이 가능하고 노내 핵계측기 신호를 내부 경계 조건으로 출력 분포를 예측하거나, 제어봉 인출 및 삽입과 제논 등의 독물질 변화에 따른 노심출력 변동 모사 등을 수행할 수 있다. 비선형 소격격자 방법론에 맞는 일반적인 노심-반사체 경계조건 개발[12]때도 2가지 경계조건의 과도 해석능 시험을 위해 RAST-K 전산코드가 사용되었다. RAST-K는 열수력 및 도플러온도 궤환효과를 적절히 고려하기 위해 최대 12개의 셸로 핵연료봉을 구분하여 정상/과도상태시 핵연료봉 온도를 계산하는 핵연료봉 열전달 모델을 갖고 있으며, 노드별 열수력 특성을 계산하기 위해 질량, 운동량 및 에너지 보전 방정식과 상태방정식, 그리고 drift flux 모델(기포계수 결정용 모델)을 사용하는 열수력 계산 부함수를 갖고 있다. 제어봉 인출/낙하 사고, 보론 희석사고, 찬물 유입에 따른 반응도 삽입 사고 및 노심압력 변동사고등을 모사할 수 있으며 주어진 출력분포와 압력에 따른 유량 분포 계산도 가능하다. 수반해는 assembly discontinuity factor의 존재 유무에 따라 수학적 수반해와 물리적 수반해를 모두 계산할 수 있으며, 각 노드별 열수력 인자의 특성은 steam table module을 이용해 얻는다. 최근엔 동적 제어봉 제어능 측정용 변수값을 생산할 수 있는 기능이 RAST-K 전산코드에 부가되었다. 이에 따라 노외계측기 반응상수 생산, 제어봉 삽입시 제어봉 위치에 따른 노외 계측기 신호 및 노심 반응도 계산 등의 기능이 추가되었다.

다. 벤치마크 문제 및 계산 결과

제안된 방법의 과도상태 해석능을 알아보기 위해 모두 11가지 벤치마크 문제를 풀어보았다. 대상 벤치마크문제들은 각기 다음과 같다.

- LRA-BWR 3-D benchmark problem [13]
- NEACRP 3-D LWR core transient: fast transient 6 cases [14]
- NEACRP 3-D LWR core transient: slow transient 3 cases [15]
- MSLB Phase II benchmark problem [16]

첫번째 벤치마크 문제는 핵연료봉 온도에 의한 궤환 효과 만을 고려는 LRA-BWR 3-D 문제이다. 노심출력 변동이 중성자 확산 방정식 풀이 방법에만 의존하기 때문에 방법론 비교에 많이 쓰이는 문제이기도 하다. 표 1과 그림 1은 일부 해를 나타낸 것으로 거시지표에 있어 NEM/NEM과 NEM/ANM은 별다른 차이가 없다. 그러나 반경방향 출력분포를 보면 NEM/NEM과 NEM/ANM의 차이가 드러난다. 그림 2는 2-D 반경방향출력분포를 비교한 것으로 참고값에 대한 오차를 나타낸 것이다. NEM/NEM이 NEM/ANM에 비해 노심외곽부분을 과대평가하고 노심 중앙부는 과소평가 하고 있음을 알 수 있다. 이 문제의 경우 RMS 오차는 0.3% 감소하였다. 그리고 이러한 경향은 다른 정상상태 문제에서도 동일하게 관측되었다.

표 2는 NEACRP 3-D LWR 과도문제 총 9개 문제에 대한 결과를 요약한 도표이다. 이 벤치마크 문제는 다양하게 개발된 과도해석 전산코드들의 해석능을 서로 비교함으로써 궁극적으론 동 전산코드들이 적정한 범위내에서 과도사고해석을 수행할 수 있다는 것을 보이기 위하여 만들어진 문제이다. 노심상태에 따라 2가지로 구분되고 또 제어봉 인출속도에 따라서 fast와 slow transient 문제로 구분된다. Fast문제의 경우 반경방향 출력분포 계산능력이 매우 중요하고, slow transient 의 경우는 제어봉이 삽입된 노드의 핵단면적 처리 방법이 전체 계산 결과에 큰 영향을 끼친다. 중성자속 분포 변화가 큰 HZP 과도사고의 경우는 정상상태에 따라 두 방법론의 결과 차이가 확연히 나타난다. 그림 3은 HZP A1 case의 반경방향 출력분포를 서로 비교하여 놓은 것이다. 최대상대오차가 4%가량 되고 NEM/NEM이 역시 노심외곽부분을 상대적으로 과대평가하고 있음을 볼 수 있다. 이 결과 보다 정확하게 반경방향 출력분포를 계산해 낸 NEM/ANM이 첨두 출력 예측 오차를 NEM/NEM 대비 30.6%에서 19.7%로 감소시킬 수 있었던 것으로 판단된다. 4 node/assembly 계산 결과는 NEM/NEM이나 NEM/ANM이 별다른 차이가 없음을 보여준다. 이는 상대적으로 반사체가 많기 때문이다. 노심과 진공사이에 하나의 반사체만 있다면 반사체를 처리하는 방법에 해가 의존하겠지만 2개 이상인 경우 그 의존성은 현격히 떨어질 수 밖에 없다. 각각의 경우 출력변동을 예로 들은 것이 그림 4이다.

HZP, full core로 다루는 C1 case를 살펴보면 각 방법론의 노심출력변동 예측을 잘 알 수 있다.

표 3은 MSLB Phase II사고의 5가지 정상상태 계산과 1개 return to power 사고해석을 다룬 결과를 요약한 것이다. MSLB Phase II 사고는 2-Loop원자로에서 어느 한 loop의 steam generator main steam line의 절단으로 시간에 따라 과냉각된 냉각수가 비대칭적으로 원자로 내부에 유입되면서 일어난다고 가정한다. MTC로 인해 출력은 증가하고, 6.65초 후에 가장 제어봉가가 큰 1개 제어봉다발만을 남기고 모든 제어봉이 낙하함에 따라 원자로 정지를 시도하게 된다. 그러나 원자로 출력은 약 10%까지만 감소하고 그 이후 Power defect로 인한 출력 재상승(return to power)이 발생하게 된다. 과냉각수의 유입은 열수력 경계조건에 해당하므로 시간에 따른 이들 정보는 문제에 이미 주어져 있다. RAST-K 전산코드로 해석한 결과가 표 3과 그림 4이다. 이 문제에 관한한 약 19개의 전산코드 해석 결과들이 주요 인자별로 주어져 있으나 여기서는 노심출력만을 비교하였다. 문제의 성격상 NEM/ANM, NEM/NEM간의 결과 차이는 거의 볼 수 없었다. 이 문제에 있어서는 NEM/NEM이 참고값과 가까운 것으로 나타났다. (표 3 참조) 반경방향 출력분포 차이도 최대 0.4%이내였다. 결과적으로 전체 과도 상태 해석 기간동안 노심출력변동은 차이를 찾아보기 힘들었다. 그림 4는 출력분포를 시간에 따라 나타낸 것으로 NEM/NEM, NEM/ANM이 동일한 결과를 내고 있음을 볼 수 있다.

III 결론

본 논문에서는 반사체 처리 방법만을 기존의 NEM에서 ANM으로 변경하였을 때 얼마나 정확히 중성자속 분포를 계산할 수 있는지를 살펴보았다. 정상상태 및 과도해석을 중심으로 살펴본 결과 1 node/assembly의 경우 NEM/ANM이 보다 정확한 반경방향 출력분포 및 첨두출력등을 제공한다고 생각된다. 4 node/assembly의 경우는 두 노드 해석 결과가 거의 차이가 없으나 정상상태 출력분포 및 과도해석 결과등에서 NEM/ANM이 최소한 같거나 보다 나은 계산결과를 보인다고 생각하며, 따라서 향후 4군 혹은 그 이상의 중성자 확산방정식을 풀어야 하는 경우 현재의 ANM 단점을 극복할 수 있는 방안이 구체적으로 제시되기까지는 NEM/ANM 방법이 NEM/NEM 보다 정확한 해를 제공할 수 있는 대안이 될 것으로 생각된다.

표 1. LRA-BWR 2D/3D 벤치마크 문제 결과 비교

비교항목	2D 결과				3D 결과		
	Shober [17]	IQSBOX [17]	M1	M2	IQSBOX	M1	M2
k_{eff}	0.99636	0.99631	0.996224	0.99637	0.99632	0.99623	0.99638
First peak time (sec)	1.436	1.445	1.450	1.445	0.902	0.899	0.900
First peak power density(W/cc)	5411	5451	5665	5681	6085	5957	6031
First power rebound time(sec)	-	-	-	-	-	0.987	0.992
First rebound power(W/cc)	-	-	-	-	-	112.4	113.1
Second peak power (W/cc)	784	800	859	875	-	375.0	378.6
Power density at 3 sec(W/cc)	96.2	100.0	96.8	97.3	-	69.4	70.2
Nodal peak temp. at 3 sec(K)	1087	1127	1102	1113	3873	3890	3917

M1 = NEM/NEM, M2 = NEM/ANM

0.6118 -0.006 -0.012	0.4403 -0.002 -0.005	0.4131 -0.001 -0.004	0.5119 -0.001 -0.004	0.7901 -0.001 -0.005	1.3844 -0.009 -0.015	1.6599 -0.010 -0.015	1.4807 -0.001 -0.003	0.9239 0.002 0.005
	0.3995 -0.002 -0.005	0.4067 -0.002 -0.004	0.4904 -0.001 -0.004	0.6703 -0.002 -0.005	0.9397 -0.001 -0.004	1.1506 0.000 -0.003	1.2806 0.000 -0.001	0.8669 0.001 0.004
		0.4240 -0.001 -0.004	0.4920 -0.002 -0.004	0.6181 -0.001 -0.004	0.7826 0.000 -0.002	0.9667 0.001 -0.001	1.1726 0.002 0.001	0.8266 0.002 0.005
			0.5524 -0.001 -0.003	0.6782 -0.001 -0.003	0.8434 0.001 -0.001	1.0224 0.002 0.001	1.2211 0.002 0.003	0.8528 0.002 0.007
				0.8643 -0.001 -0.002	1.1521 0.002 0.001	1.3394 0.003 0.003	1.4215 0.002 0.004	0.9324 0.003 0.008
				Shober Shober-NEM/ANM Shober-NEM/NEM	1.8515 -0.006 -0.006	2.0505 -0.005 -0.003	1.6796 0.004 0.008	0.9719 0.006 0.012
				RMS Error 0.4% 0.7%		2.1607 -0.002 0.002	1.6216 0.009 0.015	0.8484 0.007 0.016
							1.3319 0.009 0.023	

그림 1. LRA-BWR 2D 반경방향으로 정규화된 출력분포 비교

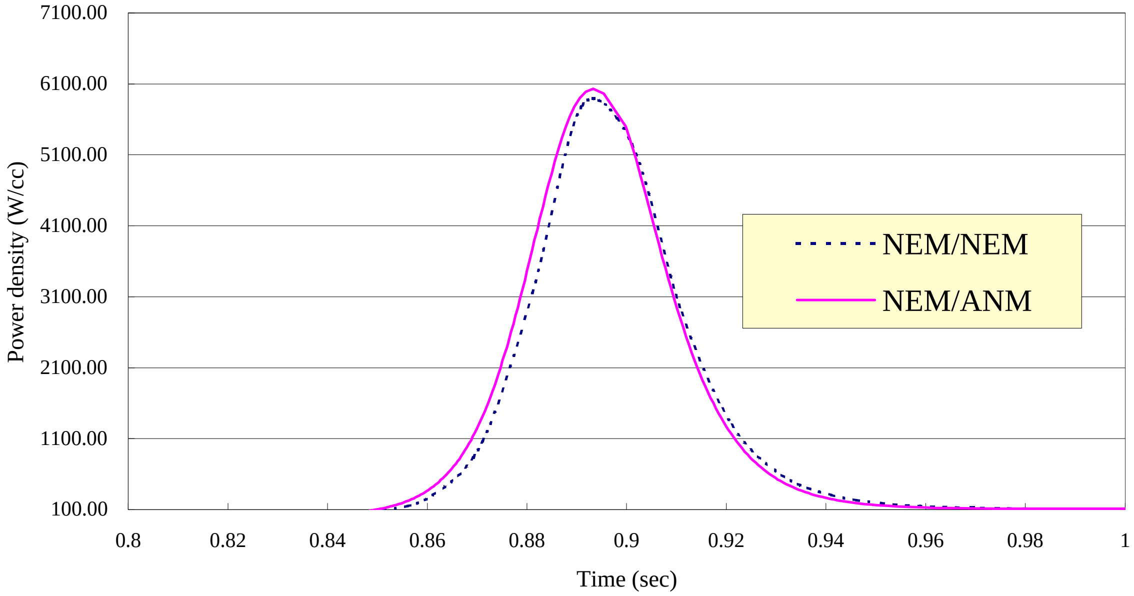

그림 2. LRABWR 3-D 벤치마크 결과 비교

0.97244	1.4903	1.0513	1.7847	1.8002	0.99619	0.3975	0.55189
0.98181	1.5041	1.0603	1.7977	1.8117	1.0009	0.39825	0.55103
0.95	0.92	0.85	0.72	0.63	0.47	0.19	-0.16
	1.812	1.6316	1.8897	1.4098	0.55748	0.56734	0.43935
	1.8282	1.6447	1.9026	1.4177	0.5591	0.56628	0.43413
	0.89	0.80	0.68	0.56	0.29	-0.19	-1.20
		1.0007	1.431	0.72791	0.73469	0.39306	
		1.0075	1.4376	0.72887	0.73133	0.38867	
		0.67	0.46	0.13	-0.46	-1.13	
		NEM/NEM-A	1.4317	1.0257	0.98429	0.56616	
		NEM/ANM-B	1.4326	1.0202	0.96967	0.55028	
		(1- A/B)*100	0.06	-0.54	-1.51	-2.89	
				0.56141	0.70638		
		RMS error : 0.01		0.55303	0.67845		
				-1.52	-4.12		

그림 3. NEACRP HZP A1 case: 반경방향 출력분포 비교

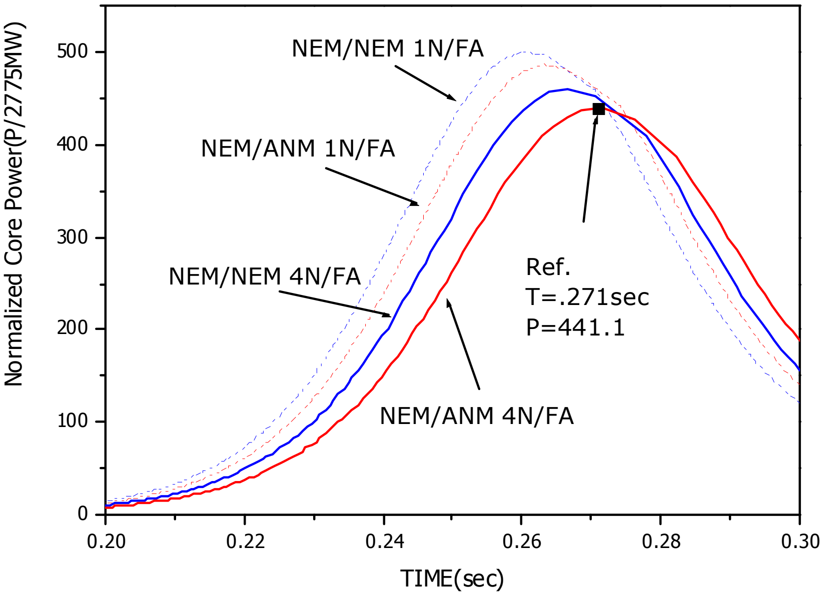

그림 4. NEACRP C1 Case. **시간에 따른 출력변화 비교**

표 3. MSLB Phase II: RAST-K **정상상태 계산 결과 비교**

S.S Parameter	Codes	CASE 0	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
k_{eff}	PANTHER(ref.)*	1.03540	1.03347	1.00496	0.98702	1.00193
	PURDUE/NRC(1)*	1.03550	1.03354	1.00624	0.98745	1.00224
	MASTER*	1.03550	1.03354	1.00509	0.98745	1.00223
	RAST(NEM/ANM)	1.03568	1.03371	1.00492	0.98730	1.00230
	RAST(NEM/NEM)	1.03558	1.03364	1.00487	0.98720	1.00219
F_{XY}	PANTHER(ref.).	1.3630	1.4320	1.3390	5.4310	3.6220
	PURDUE/NRC(1)	1.3628	1.4369	1.5701	5.4476	3.6163
	MASTER	1.3628	1.4370	1.3379	5.4485	3.6187
	RAST(NEM/ANM)	1.3604	1.4360	1.3349	5.4947	3.6434
	RAST(NEM/NEM)	1.3611	1.4340	1.3361	5.4880	3.6410
F_Z	PANTHER(ref.).	2.7200	2.4600	1.0660	2.7960	2.7810
	PURDUE/NRC(1)	2.6732	2.4338	1.1072	2.7410	2.7283
	MASTER	2.6730	2.4334	1.0591	2.7418	2.7284
	RAST(NEM/ANM)	2.6915	2.4537	1.0547	2.7613	2.7480
	RAST(NEM/NEM)	2.6832	2.4459	1.0596	2.7543	2.7404
AO	PANTHER(ref.).	0.75670	0.70060	-0.01570	0.76580	0.76700
	PURDUE/NRC(1)	0.75650	0.69830	0.02920	0.76610	0.76680
	MASTER	0.75660	0.69850	-0.01320	0.76620	0.76680
	RAST(NEM/ANM)	0.76015	0.70280	0.00913	0.77128	0.77129
	RAST(NEM/NEM)	0.75787	0.70047	-0.01292	0.76866	0.76906

❍ J. B. Taylor and K. N. Ivanov, “OECE/NRC PWR MSLB Benchmark Forth Workshop: Analysis of the Second Exercise,” OECD, Paris, Jan.24-25, 2000.

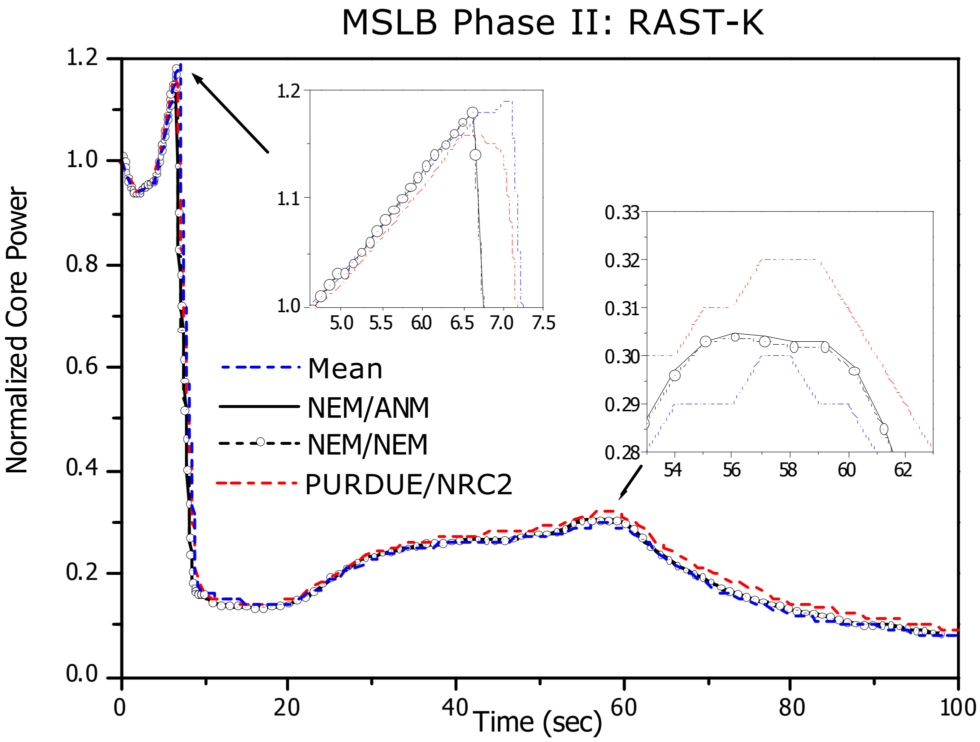

그림 5. MSLB Phase II. **시간에 따른 노심출력변동 비교**

표 2. NEACRP 3-D LWR Core Transient: Summary for FAST & SLOW TRANSIENT

Neutronics Model			Ref.*	NEM1	NEM4	CMFD1	CMFD4	Ref.*	NEM1	NEM4	CMFD1	CMFD4	Ref.*	NEM1	NEM4	CMFD1	CMFD4
Fast Transient at HFP	problem		Case A2					Case B2					Case C2				
	initial state	CSB(ppm)	1156.6	1158.2	1160.9	1154.8	1158.4	1183.8	1197.4	1188.3	1192.0	1185.7	1156.6	1170.0	1160.9	1164.7	1158.4
		3D Nodal Peak(Fq)	2.207	2.241	2.208	2.245	2.210	2.095	2.094	2.098	2.101	2.100	2.207	2.204	2.208	2.210	2.210
	transient state	Peak Time(s)	0.095	0.095	0.095	0.095	0.096	0.100	0.153	0.154	0.147	0.133	0.095	0.124	0.098	0.111	0.122
		Peak Power	1.083	1.082	1.081	1.083	1.082	1.064	1.065	1.064	1.065	1.064	1.073	1.075	1.074	1.075	1.074
	final state	Power	1.036	1.035	1.036	1.036	1.036	1.039	1.040	1.039	1.040	1.039	1.031	1.032	1.031	1.032	1.032
		Max. Centerline Temp.	1679.6	1693.3	1692.4	1698.5	1698.0	1576.1	1568.0	1587.0	1573.0	1590.0	1723.8	1720.0	1740.0	1725.0	1742.0
		Doppler Temp.	555.2	546.2	553.8	546.4	546.4	552.4	551.0	551.0	551.1	551.1	553.9	552.6	552.6	552.7	552.7
		Moderator Temp.	324.9	326.2	324.9	326.2	326.2	325.0	325.1	325.0	325.1	325.0	324.8	324.9	324.8	324.9	324.8
Fast Transient at HZP	problem		Case A1					Case B1					Case C1				
	initial state	CSB(ppm)	561.2	566.3	562.4	565.0	562.0	1248.0	1261.3	1251.9	1254.0	1248.6	1128.3	1140.5	1131.9	1133.8	1129.0
		3D Nodal Peak(Fq)	2.879	2.841	2.867	2.853	2.866	1.933	1.914	1.925	1.923	1.928	2.187	2.172	2.180	2.181	2.181
	transient state	Peak Time(s)	0.538	0.650	0.554	0.607	0.552	0.523	0.504	0.509	0.511	0.520	0.271	0.260	0.267	0.263	0.272
		Peak Power	1.268	.880	1.214	1.018	1.262	2.315	2.654	2.626	2.557	2.450	4.411	5.000	4.606	4.864	4.400
	final state	Power	0.197	0.197	0.198	0.199	0.199	0.320	0.329	0.324	0.329	0.324	0.146	0.152	0.148	0.152	0.148
		Max. Centerline Temp.	679.3	666.5	678.6	675.1	681.1	559.7	567.3	569.2	569.0	567.3	674.2	697.3	703.6	697.4	700.3
		Doppler Temp.	324.9	324.3	325.0	324.9	325.2	350.0	352.2	351.1	352.2	350.8	315.9	317.3	316.4	317.3	316.3
		Moderator Temp.	293.2	293.1	293.3	293.3	293.3	297.7	298.2	298.0	298.1	297.9	291.5	291.8	291.7	291.8	291.6
Slow Transient at HZP	problem		Case A					Case B					Case D				
	initial state	CSB(ppm)	1267.7	1274.1	1265.6	1261.9	1262.6	793.6	797.9	794.3	796.5	793.7	793.6	797.9	794.3	796.5	793.7
		3D Nodal Peak(Fq)	1.880	1.855	1.868	1.881	1.877	2.886	2.860	2.874	2.869	2.873	2.886	2.860	2.874	2.869	2.873
		Radial Power Peak(Fxy)	1.242	1.226	1.235	1.243	1.243	1.912	1.896	1.905	1.906	1.909	1.912	1.896	1.905	1.906	1.909
	transient state	Peak Time(s)	82.14	82.83	82.15	81.15	81.85	34.30	34.53	34.54	34.57	34.41	39.40	39.23	39.57	39.48	39.65
		Peak Power	0.356	0.356	0.356	0.357	0.355	1.348	1.293	1.286	1.208	1.208	0.969	1.095	1.085	1.047	1.039
		Max. Fuel Doppler T.	358.7	358.1	358.3	355.1	358.3	315.2	315.9	328.7	317.2	327.0	312.6	324.7	314.1	314.3	313.9
		Max. Coolant Outlet T.	295.3	298.9	299.0	299.2	299.0	290.5	292.4	296.9	292.6	296.4	290.2	292.0	292.0	292.0	292.0

* M. P. Knight and P. Bryce," Derivation of a Refined PANTHER Solutions to the NEACRP PWR rod-Ejection Transients," Joint Int'l Conf. on Mathmatical Methods and Supercomputing for Nuclear Applications, Saratoga Springs, NY, October 5-9, 1997, p. 302.

참고문헌

[1] H. Finnemann, F. Bennewitz and M. R. Wagner, “Interface Current Techniques for Multidimensional Reactor Calculations,” *Atomkernenergie*, **30**, 123-128 (1977).

[2] K. S. Smith, "An Analytic Nodal Mehtod for Solving the Two-Group, Multidimensional, Static and Transient Neutron Diffusion Equations," *Thesis for M.S.*, MIT (March 1979)

[3] R. D. Lawrence and J. J. Dorning, "A Nodal Green's Function Method for Multidimensional Neutron Diffusion Calculations," *Nucl. Sci. Eng*. **76**, 218-231 (1980)

[4] 노재만, “원자로 노심설계를 위한 해석함수 전개 노달방법,” 박사학위논문, 한국과학기술원 (1995)

[5] W. Shen, Z. Xie and B. Yin, "The Green's Function Nodal Expansion Method for Light Water Reactor Diffusion Calculations," *Nucl. Sci. Eng*., **121**, 130 - 135 (1995).

[6] H. W. Cheng and N. Z. Cho, "A Spectral-Galerkin Coarse-Mesh Approach To Solving The Two-Dimensional Multigroup Diffusion Equations," *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 24., No.11, pp. 883-900, 1997.

[7] H. G. Joo, D. Barber, G. Jiang, T. Downar, "PARCS : A Multi-Dimensional Two-Group Reactor Kinetics Code Based on the Nonlinear Analytic Nodal Method," PU/NE-98-26, Purdue University, September 1998.

[8] H. C. Lee and C. H. Kim, “Unified Nodal Method for Solution to the Space-Time Kinetics Problems,” *Inter. Meeting on Math. Method for Nuclear Applications*, Sep. 9-13, Salt Lake, Utah, USA. (2001)

[9] Y. S. Liu, et al., “ANC – A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code,” WCAP-10966-NP-A, December, 1985.

[10] “ The ROCS and DIT Computer Codes for Nuclear Design, ” CENPSD-266-P-A, *Combustion Engineering*, Inc. (1983).

[11] K. S. Smith and T. J. Cronin, “SIMULATE-3 Methodology,” STUDSVIK/SOA-92/02 (1992)

[12] 이은기 등, “NEM 기반의 비선형 유한차분법에 적용한 노심-반사체 경계조건의 과도상태 모사 능력 평가,” ‘99 추계학술발표회, p54, 한국원자력학회, 서울. (Oct. 1999)

[13] “Benchmark Problem Book,” ANL-7416, Suppl. II, Argonne National Laboratory (1977).

[14] H. Finnenmann, and A. Galati, “NEACRRP 3-D LWR Core Transient Benchmark,” NEACRP-L-335 (Rev.1), Nuclear Energy Agency, Jan. 1992.

[15] R. Fraikin, "PWR Benchmark on Uncontrolled Rods Withdrawal at Zero Power," NEA/NSC/DOC(96)20 (Sep. 1997)

[16] K. N. Ivanov, T. M. Beam, A. J. Baratta, A. Irani and N. Trikouros, “PWR Main Steam Line Break (MSLB) Benchmark,” NEA/NSC/DOC(99)8, (April. 1999)

[17] R.A.Shober, “A Nodal Method for Solving Transient Few Group Neutron Diffusion Equation,” ANL-78-51, Argonne National Lab. June 1978.