

개량 해석함수 전개 노달법을 이용한 혼합핵연료 노심 분석 코드 개발

Development of MOX Fueled Core Analysis Code Based on the Refined Analytic Function Expansion Nodal Method

유재운, 노재만, 주형국
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

하창주, 박찬오
한전원전연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

혼합핵연료 장전된 노심은 플루토늄 원소의 높은 열중성자 흡수 단면적으로 인해 핵연료집합체 경계면 주변에서 열중성자의 급격한 공간적 천이현상을 갖는다. 이러한 공간적 천이 현상을 좀더 정확하게 계산할 수 있도록 개발된 개량 AFEN방법을 기반으로 혼합핵연료 노심 해석 코드를 개발하였다. 개발된 노심 해석 코드는 기본적인 중성자속 계산 루틴 이외에 연소계산을 위한 연소도 보정 루틴과 비균질 제어봉 모델등을 갖추도록 하였다. 또한 정상상태 해석 뿐만 아니라 제어봉 이탈 사고와 같은 천이계산 기능을 갖추도록 하였다. 이러한 노심 해석 코드를 바탕으로 혼합핵연료가 장전된 NEACRP-L336문제와 현재 상업용으로 운전되는 영광 3,4호기에 대하여 검증 계산을 수행하여 우라늄핵연료를 사용하는 상업용 원전에 대해서는 기존 설계 코드의 정확도를 유지하고 혼합핵연료가 장전된 NEACRP-L336문제에 대해서는 정확도가 향상되었다. 또한 NEACRP C1 문제에 대한 천이계산 결과 기준값과 큰 오차 없이 천이계산 기능이 작동함을 확인하였다.

Abstract

Since the plutonium isotopes have a relatively high thermal neutron absorption cross sections, the spatial thermal neutron transient occurs at the interface between MOX and UO₂ fuel assemblies. In order to predict the spatial thermal neutron transient accurately, the reactor core analysis code, NUREC (Nuclear Reactor Analysis Code), has been developed especially for MOX fueled core analysis based on the refined-AFEN method. In addition to the basic neutron flux calculation module, burnup correction model and heterogeneous control rod model are also incorporated in the NUREC. The NUREC can perform the transient calculation such as rod ejection accident as well as the steady-state calculation. The NUREC was verified against the NEACRP-L336 MOX benchmark problem and the experimental value of YeongKwang Unit 3&4. The accuracy of the calculated results with NUREC was similar to those of design code for YeongKwang Unit 3&4 loaded with only UO₂ fuel and was improved for the NEACRP-L336 MOX benchmark problem. The transient calculation capability of the NUREC was also tested against the NEACRP C1 problem without large discrepancy.

1. 서 론

혼합핵연료가 장전된 노심은 플루토늄 원소가 우라늄에 비해 상대적으로 높은 열중성자 흡수단면적을 가지고 있기 때문에 우라늄핵연료와 혼합핵연료가 노심에 함께 장전될 경우 핵연료 집합체의 경계에서 공간적으로 급격한 열중성자의 천이현상을 보인다. 또한 혼합핵연료 장전 노심은 초기에 Pu, Am, Cm 등 중핵종을 함유하고 있어 기존의 우라늄 핵연료와 다른 연소 특성을 보인다. 따라서 혼합핵연료가 장전된 노심을 해석하기 위해서는 보다 정교한 방법이 필요하게 된다.

본 연구에서 개발된 NUREC(Nuclear Reactor Analysis Code)코드 시스템에서는 기 개발된 개량 해석함수전개노달법(Refined-AFEN: Analytic Function Expansion Nodal)[1]을 주된 방법론으로 사용하였다. 개량 AFEN방법은 기존의 해석함수전개법의 전개함수에서 격자점 중성자속을 제외하고 대신 노드의 경계면의 중성자속 모멘트항을 추가하여 계산 정확도와 코드 이식성을 높인 방법론이다. 개량 AFEN방법을 근간으로 상용화 코드로서 갖추어야 할 기본적인 기능들, 즉 연소도 보정방법과 부분 삽입된 제어봉의 보다 정확한 모델을 위한 비균질 제어봉 모델, 그리고 천이상태 계산방법들을 추가하였다.

기 개발된 코드 시스템을 바탕으로 혼합핵연료가 장전된 검증문제에 적용하여 계산 정확도 향상을 확인하였으며, 현재 상용운전되고 있는 영광3,4호기의 실측 자료에 대해 계산결과를 비교하여 혼합핵연료가 장전된 노심 뿐만 아니라 우라늄핵연료가 장전된 노심에 대해서도 동시에 적용할 수 있음을 확인하였다. 또한 NEACRP 천이상태 검증문제에 적용하여 정상상태 노심해석은 물론 제어봉 이탈 사고와 같은 천이상태 노심해석 능력을 갖추도록 하였다.

2. 개량 해석함수전개노달법

개량 해석함수전개노달방법은 원래의 중성자속 전개에 횡방향 경사 기저 함수를 추가하여 기존 AFEN 방법을 개량한 것이다. 개량 AFEN 방법에 추가된 기저 함수는 원래 AFEN의 한 방향으로의 해에다 그 방향과 수직인 횡방향으로의 일차함수를 곱한 것들, 예를 들면 $y \sin(kx)$, $z \sin(kx)$ 과 $yz \sin(kx)$ 이다. 이 새로 추가된 함수들도 원래 AFEN 전개 함수와 마찬가지로 중성자 확산 방정식을 만족하며 최종 전개식은 다음과 같다.

$$\hat{\phi}(x,y,z)=$$

$$\begin{aligned} & \cosh(\sqrt{\Lambda}x) \left(A_{000}^x + 2\frac{y}{h_y} A_{010}^x + 2\frac{z}{h_z} A_{001}^x + 4\frac{y}{h_y} \frac{z}{h_z} A_{011}^x \right) + \sinh(\sqrt{\Lambda}x) \left(A_{100}^x + 2\frac{y}{h_y} A_{110}^x + 2\frac{z}{h_z} A_{101}^x + 4\frac{y}{h_y} \frac{z}{h_z} A_{111}^x \right) \\ & + \cosh(\sqrt{\Lambda}y) \left(A_{000}^y + 2\frac{z}{h_z} A_{001}^y + 2\frac{x}{h_x} A_{100}^y + 4\frac{z}{h_z} \frac{x}{h_x} A_{101}^y \right) + \sinh(\sqrt{\Lambda}y) \left(A_{010}^y + 2\frac{z}{h_z} A_{011}^y + 2\frac{x}{h_x} A_{110}^y + 4\frac{z}{h_z} \frac{x}{h_x} A_{111}^y \right) \\ & + \cosh(\sqrt{\Lambda}z) \left(A_{000}^z + 2\frac{x}{h_x} A_{100}^z + 2\frac{y}{h_y} A_{010}^z + 4\frac{x}{h_x} \frac{y}{h_y} A_{110}^z \right) + \sinh(\sqrt{\Lambda}z) \left(A_{001}^z + 2\frac{x}{h_x} A_{101}^z + 2\frac{y}{h_y} A_{011}^z + 4\frac{x}{h_x} \frac{y}{h_y} A_{111}^z \right) \end{aligned}$$

가장 간단한 가중 함수로는 경계면의 중앙에서 부호가 바뀌는 계단 함수 혹은 선형함수를 들 수 있다. 이전의 개량 AFEN방법에서 선형함수를 가중함수로 사용한 경우와는 달리 본 연구에서는 물리적 의미가 명확한 계단 함수를 가중 함수로 사용하였다. 위의 전개식에서 각각의 계수는 노드 표면에서의 중성자속 또는 중성자속 모멘트로 나타낼 수 있으며, 평균 중성자속 모멘트와 노드 경계에서의 부분 중성자류 모멘트에 대한 연속 방정식의 해로부터 구한다. 원래의 AFEN이나 개량 AFEN방법은 노드 경계에서 표면 중성자속 모멘트에 대한 연속 방정식을 풀었으나, 본 연구에서는 이식성과 가속기법 적용을 편리하게 하기 위하여 부분 중성자류와 그 모멘트에 대한 연속 방정식으로 재구성하였다. 예를 들어 3차원 사각형 기하구조에 대해서는 8개의 노드 평균 중성자속 모멘트에 대한 균형 방정식과 육면체의 경계면에서 총 24개의 부분 중성자류 연속 방정식을 풀게 된다.

NUREC코드 시스템의 주된 해석방법론으로 사용되는 개량 AFEN방법은 횡방향 적분을 사용하지 않기 때문에 확산 방정식에서 우변에 횡방향 누출항이 존재 하지 않는다. 따라서 연소도 보정

과 부분 삽입 제어봉 모델, 그리고 천이계산등을 위하여 우변에 비제차 선원(Non-homogeneous Source)를 별도로 둔다. 따라서 개량 AFEN방법은 비제차 선원항에 대한 특이해(Particular solution)를 포함하도록 해를 구하고 이후 언급되는 보정방법 등은 비제차 선원항에 의해 취급된다.

인접핵연료와의 스펙트럼 차이에 의한 노드내의 중성자속 분포 및 출력 분포의 차이는 핵연료의 연소가 진행됨에 따라 연소도 분포의 차이로 나타난다. 따라서 정확한 연소계산을 위해서는 비균질한 연소도 분포를 적절히 보정해주어야 한다. 연소도 보정은 노드 내부의 거시 단면적과 중성자속 분포를 적절한 함수로 전개하여 노드내에서의 총 반응을 보전하도록 노드 평균 단면적을 보정하고 고차항은 비제차 선원항으로 취급한다. 노달 전개법에서는 횡방향 누출항에 고차항을 추가하여 보정하지만 해석함수 전개법과 같이 횡방향 적분을 사용하지 않는 경우 별도의 비제차 선원항을 둔다.

계단 함수 가중법에 의해 중성자속과 단면적을 전개하였다. 이때 전개 항에 나타나는 중성자속 모멘트는 해석함수 전개 노달법의 부분 중성자류 모멘트 연속 방정식으로부터 계산되는 값이지만 단면적 모멘트항은 그 자체가 물리적인 값이 아니기 때문에 직접 계산 될 수 없다. 단지 계단 함수 가중법으로 전개할 경우 중성자속 모멘트와 단면적 모멘트는 각각의 조합으로 물리적인 값으로 변환되는데, 이 값들은 육면체 노드의 한 표면에서의 사분면 평균값이 된다. 즉, 중성자속이나 단면적의 모멘트는 물리적 값이 아니지만 각 모멘트들의 조합으로 물리적 값으로 변환이 가능하다. 이것은 계단 함수 가중법을 사용하는 해석함수 전개 노달법에 국한되며 선형함수 가중법에서는 적용할 수 없다.

그림 1에 도시한 육면체 노드의 사분면에 대해서 각 사분면 평균 중성자속을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\widehat{\phi}_A &= \widehat{\phi}_{x000} + \widehat{\phi}_{x001} + \widehat{\phi}_{x010} + \widehat{\phi}_{x011}, & \widehat{\phi}_B &= \widehat{\phi}_{x000} + \widehat{\phi}_{x001} - \widehat{\phi}_{x010} - \widehat{\phi}_{x011} \\ \widehat{\phi}_C &= \widehat{\phi}_{x000} - \widehat{\phi}_{x001} - \widehat{\phi}_{x010} + \widehat{\phi}_{x011}, & \widehat{\phi}_D &= \widehat{\phi}_{x000} - \widehat{\phi}_{x001} + \widehat{\phi}_{x010} - \widehat{\phi}_{x011}\end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}\widehat{\phi}_{x000} &= \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \phi(x, y, z) dydz \Bigg|_{x=-\frac{1}{2}} \\ \widehat{\phi}_{x010} &= \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_0^{\frac{1}{2}} \phi(x, y, z) dydz - \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_{-\frac{1}{2}}^{\beta} \phi(x, y, z) dydz \Bigg|_{x=-\frac{1}{2}} \\ \widehat{\phi}_{x001} &= \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_0^{\frac{1}{2}} \phi(x, y, z) dzdy - \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_{-\frac{1}{2}}^{\beta} \phi(x, y, z) dzdy \Bigg|_{x=-\frac{1}{2}} \\ \widehat{\phi}_{x011} &= \int_0^{\frac{1}{2}} \int_0^{\frac{1}{2}} \phi(x, y, z) dydz - \int_0^{\frac{1}{2}} \int_{-\frac{1}{2}}^{\beta} \phi(x, y, z) dydz \\ &\quad - \left(\int_{-\frac{1}{2}}^0 \int_0^{\frac{1}{2}} \phi(x, y, z) dydz - \int_{-\frac{1}{2}}^0 \int_{-\frac{1}{2}}^{\beta} \phi(x, y, z) dydz \right) \Bigg|_{x=-\frac{1}{2}}\end{aligned}$$

이러한 원리를 이용하여 단면적 모멘트는 사분면 평균 단면적으로부터 역변환하여 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

$$\widehat{\Sigma}_{x000} = \frac{\widehat{\Sigma}_A + \widehat{\Sigma}_B + \widehat{\Sigma}_C + \widehat{\Sigma}_D}{4}, \quad \widehat{\Sigma}_{x010} = \frac{\widehat{\Sigma}_A - \widehat{\Sigma}_B - \widehat{\Sigma}_C + \widehat{\Sigma}_D}{4}$$

$$\widehat{\Sigma}_{x001} = \frac{\widehat{\Sigma}_A + \widehat{\Sigma}_B - \widehat{\Sigma}_C - \widehat{\Sigma}_D}{4}, \quad \widehat{\Sigma}_{x011} = \frac{\widehat{\Sigma}_A - \widehat{\Sigma}_B + \widehat{\Sigma}_C - \widehat{\Sigma}_D}{4}$$

이때 사분면 평균 단면적은 중성자속 모멘트의 조합으로 계산한 사분면 평균 중성자속으로 표면 출력을 계산하여 해당 연소도의 단면적값을 내삽하여 계산한다. 즉 위와 같은 방법으로 연소도 보정을 할 경우 육면체 노드에 대하여 총 24지점의 연소점으로 연소도 보정을 하는 효과를 얻을 수 있다. 또한 NUREC코드에서는 6개 연소점을 이용한 연소 이력 보정 방법을 그대로 사용할 수 있도록 하였다.

NUREC 코드에서는 각 노드의 단면적은 미시 단면적을, 그리고 연소도 보정에는 별도로 준비된 거시 단면적을 사용한다. 이때 연소도 보정을 위해 마지막으로 계산된 거시 단면적은 미시 단면적으로부터 계산된 거시 단면적과 차이를 보이게 된다. 이러한 문제를 해소하기 위하여 거시 단면적은 상대적인 값으로만 사용되며 보정 절차에서 미시 단면적으로부터 계산된 거시 단면적에 곱해서 각각의 단면적 전개 함수의 계수를 계산한다.

NUREC코드 시스템에서는 제어봉이 부분적으로 삽입된 노드에 대해 보다 정확한 계산을 위하여 비균질 제어봉 모델[2]을 사용하고 있다. 비균질 제어봉 모델에서는 제어봉이 부분 삽입된 노드의 중성자속을 다음과 같이 4차 다항식으로 전개하고 비제차 선원항은 2차 다항식으로 전개한다.

$$\phi(\mathbf{z}) = \mathbf{a}_{z0} + \mathbf{a}_{z1} \zeta_1(\mathbf{z}) + \mathbf{a}_{z2} \zeta_2(\mathbf{z}) + \mathbf{a}_{z3} \zeta_3(\mathbf{z}) + \mathbf{a}_{z4} \zeta_4(\mathbf{z}), \quad \mathbf{S}(\mathbf{z}) = \mathbf{b}_{z0} + \mathbf{b}_{z1} \zeta_1(\mathbf{z}) + \mathbf{b}_{z2} \zeta_2(\mathbf{z})$$

여기서,

$$\mathbf{a}_{z1} = \frac{1}{2} (\hat{\phi}_{z1} - \hat{\phi}_{z0}), \quad \mathbf{a}_{z2} = \frac{1}{2} (\hat{\phi}_{z0} + \hat{\phi}_{z1}) - \bar{\phi}$$

$$\mathbf{a}_{z3} = -\frac{4\bar{D}\mathbf{a}_{z1} - \mathbf{h}_a \hat{\mathbf{J}}_{z0} + \mathbf{h}_a \hat{\mathbf{J}}_{z1}}{12\bar{D}},$$

$$\mathbf{a}_{z4} = -\frac{12\bar{D}\mathbf{a}_{z2} + \mathbf{h}_a \hat{\mathbf{J}}_{z0} + \mathbf{h}_a \hat{\mathbf{J}}_{z1}}{12\bar{D}}$$

최종 중성자속에 가장 평균된 제어봉 단면적을 계산하고 나머지 노드 평균 단면적과의 차이는 비제차 선원항의 계수로 보정된다.

$$\bar{\Sigma} = \left(\Sigma_0 + \Delta\Sigma \left(\frac{1}{2} - \mathbf{h} \right) + \frac{\text{RHS0}}{\bar{\phi}} \right)$$

$$\mathbf{b}_{z1} = 3 \left(\left(\Delta\Sigma \left(\frac{1}{2} - \mathbf{h} \right) + \frac{\text{RHS0}}{\bar{\phi}} \right) \left(\frac{\mathbf{a}_{z1}}{3} - \frac{\mathbf{a}_{z3}}{5} \right) - \text{RHS1} \right)$$

$$\mathbf{b}_{z2} = 5 \left(\left(\Delta\Sigma \left(\frac{1}{2} - \mathbf{h} \right) + \frac{\text{RHS0}}{\bar{\phi}} \right) \left(\frac{\bar{\phi}}{2} + \frac{7\mathbf{a}_{z2}}{35} - \frac{3\mathbf{a}_{z4}}{35} \right) - \text{RHS2} \right)$$

윗식에서 RHS0, RHS1, RHS2는 중성자속 전개식에서의 계수와 제어봉 삽입 깊이 \mathbf{h} 의 다항식으로 표현된다.

NUREC코드 시스템에서는 정상상태 및 연소 계산 기능과 함께 제어봉 이탈 사고와 같은 천이 계산이 가능하도록 하였다. 시간 의존 중성자 확산방정식과 Precursor농도는 다음과 같다[2].

$$\frac{1}{v_g} \frac{d\phi_g}{dt} - D_g \nabla^2 \phi_g + \left(\Sigma_{ag} + \sum_{g' > g} \Sigma_{gg'} \right) \phi_g =$$

$$\sum_{g' < g} \Sigma_{gg'} \phi_{g'} + \frac{1}{k_{\text{eff}}} \sum_{g'} \sum_j (1 - \beta^j) \lambda_{pg}^j v \Sigma_{fg'} \phi_{g'} + \sum_i \lambda_{dg}^i \lambda_i C_i + S_{\text{ext},g}$$

$$\frac{dC_i}{dt} + \lambda_i C_i = \frac{1}{k_{\text{eff}}} \sum_{g'} \sum_j \beta_i^j \nu \Sigma_{fg'}^j \phi_{g'}$$

이때 중성자속과 Precursor농도를 시간에 대해 지수변환하고 정리하면 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} -D_g \nabla^2 \phi_g + \left(\frac{1 + \omega \Delta t}{v_g \Delta t} + \Sigma_{ag} + \sum_{g' > g} \Sigma_{gg'} \right) \phi_g = \\ \sum_{g' < g} \Sigma_{gg'} \phi_{g'} + \frac{1}{k_{\text{eff}}} \sum_{g'} \sum_j \chi_{ig}^j \nu \Sigma_{fg'}^j \phi_{g'} - \frac{1}{k_{\text{eff}}} \sum_i \sum_{g'} \sum_j \beta^j \chi_{dg}^i \nu \Sigma_{fg'}^j \phi_{g'} \frac{\omega + \lambda_i e^{-\frac{-(\omega + \lambda_i) \Delta t}{\omega + \lambda_i}}}{\omega + \lambda_i} \\ + \sum_i \chi_{dg}^i \lambda_i C_i(t_0) e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{e^{\omega \Delta t}}{v_g \Delta t} \phi_g(t_0) + S_{\text{ext},g} \end{aligned}$$

윗식에 대해서 단면적 부분을 아래와 같이 다시 정의하면,

$$\begin{aligned} \Sigma_{rg}^{\text{trans}} &= \left(\frac{1 + \omega \Delta t}{v_g \Delta t} + \Sigma_{ag} + \sum_{g' > g} \Sigma_{gg'} \right) \\ \Sigma_{pg}^{\text{trans}} &= \frac{1}{k_{\text{eff}}} \sum_{g'} \left(\sum_j \chi_{ig}^j \nu \Sigma_{fg'}^j \phi_{g'} - \sum_i \sum_j \beta^j \chi_{dg}^i \nu \Sigma_{fg'}^j \frac{\omega + \lambda_i e^{-\frac{-(\omega + \lambda_i) \Delta t}{\omega + \lambda_i}}}{\omega + \lambda_i} \right) \end{aligned}$$

최종 시간 의존 중성자 확산방정식은 이전 시간에 계산한 Precursor농도와 중성자속을 고정 선원으로 하고 하나의 비선형 변수를 포함하는 정상상태 중성자 확산 방정식으로 표현된다.

$$-D \nabla^2 \phi_g + \Sigma_{rg}^{\text{trans}} \phi_g = \sum_{g' < g} \Sigma_{gg'} \phi_{g'} + \Sigma_{pg}^{\text{trans}} \phi_{g'} + S_{\text{fixed},g}$$

여기서 고정 천이 선원과 ω 는 다음과 같이 정의된다.

$$S_{\text{fixed},g} = \sum_i \chi_{dg}^i \lambda_i C_i(t_0) e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{e^{\omega \Delta t}}{v_g \Delta t} \phi_g(t_0) + S_{\text{ext},g}$$

$$\omega = \frac{\ln \left(\frac{\sum_g \phi_g^m}{\sum_g \phi_g^{t_0}} \right)}{\Delta t}, \quad \phi_g^{t_0} = \text{group flux at previous time step}$$

결론적으로 천이상태에서의 시간 의존 중성자 확산 방정식은 위와 같은 방식으로 단면적과 고정 천이 선원, 그리고 비선형 변수를 정의함으로써 정상상태 방정식에서의 해법으로 풀 수 있게 된다.

3. 정상상태 노심 검증

혼합핵연료 장전된 NEACRP-L336 C5[3]문제와 현재 상용운전되고 있는 영광 3,4호기를 대상으로 검증계산을 수행하였다. NEACRP-L336 C5 문제는 우라늄핵연료와 혼합핵연료가 번갈아 장전되어있는 노심 장전 모델로 핵연료 집합체 한변의 길이가 21.42 cm이며 노심 외곽에는 같은 길이의 반사체가 있는 2 차원 1/4 노심 모델이다. 본래의 벤치마크 문제에서는 노심 내부 축선상의 집합체 경계에서 반사 경계 조건을, 노심 외곽에서는 Zero Flux 경계 조건을 사용하고 있으나, 현재

NUREC은 Zero Flux 경계 조건을 사용하지 않으므로 NUREC 결과와 비교 대상의 기준 계산 결과는 해석적 노달방법(ANM : Analytic Nodal Method)을 사용하는 PARCS[4] 코드로부터 얻었다. 기준 계산에는 한 개의 집합체를 36 개의 노드로 분할하고 노심 외곽의 경계에서는 진공 경계 조건을 택하였다.

그림 2는 NUREC에 내장된 각각의 방법론에 따른 유효증배계수와 출력분포의 오차를 보여주고 있으며, 유효증배계수에서 노달전개법이 -48 pcm, 개선된 해석함수전개법이 -9 pcm으로 개량 AFEN방법이 보다 잘 예측하고 있음을 볼 수 있다. 출력분포 오차는 그림에서와 보는 바와 같이 모두 기준치와 대비하여 잘 일치 하고 있다. 집합체 출력의 RMS(Root Mean Square) Error는 개선된 해석함수전개법이 0.22 %, 노달전개법이 0.47 %로 개선된 해석함수전개법이 혼합연료(MOX) 집합체에서의 출력을 상대적으로 잘 예측하고 있음을 볼 수 있다. 또한 집합체 출력 최대오차는 개선된 해석함수전개법이 0.30 %, 노달전개법이 0.72 %로 혼합연료 노심의 집합체 출력분포를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

상용 원자력 발전소에 대한 개선된 해석함수전개법의 검증은 영광 3,4 호기에 대하여 수행되었다. 영광 3 호기 1주기와 영광 4 호기 1주기를 대상으로 노심 연소 계산 및 임계봉산농도의 검증을 수행하였다. 그림 3은 영광 3호기 1주기, 영광 4호기 1주기에 대한 전출력 임계봉산농도를 측정치와 비교한 것으로 측정치와 잘 일치하는 모습을 볼 수 있다.

또한 각 호기의 주기별로 영출력 노물리 시험에서 측정한 임계봉산농도, 제어봉가에 대한 검증을 수행하였다. 표 1은 영광 3 호기 1,2,3,4 주기와 영광 4 호기 1,2,3,4 주기 영출력 노물리 시험에서 측정한 제어봉가에 대해 검증 계산을 수행한 결과이다. 노달전개법에서는 한국표준형 발전소의 설계에 사용되고 있는 bias를 적용한 것이고 개량 해석함수전개법에서는 bias를 적용하지 않았다. 표 1에서 보듯이 개량 해석함수전개법의 결과가 거의 같음을 알 수 있다.

표 2는 영광 3 호기 1,2,3,4 주기와 영광 4 호기 1,2,3,4 호기의 영출력 노물리 시험에서 측정된 전제어봉 인출 상태에서의 임계봉산농도와 비교한 것이다. 노달전개법과 개선된 해석함수전개법이 거의 동일한 결과를 보여주고 있으며, 또한 시험 판정 기준을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다. 표 3은 영광 3호기 1,2,3,4 주기와 영광 4호기 1,2,3,4 주기의 영출력 노물리 시험에서 측정된 기준 제어봉 삽입 상태에서의 임계봉산농도를 보여주고 있다. 1 주기의 기준 제어봉은 Bank B이고, 후속 주기의 기준 제어봉은 Bank 1이다. 예측되어진 임계봉산농도는 개선된 해석함수전개법과 노달전개법이 거의 동일함을 알 수 있다.

4. 천이상태 노심 검증

NEACRP C1[5]문제에 대하여 검증 계산을 수행하였다. NEACRP C1 문제는 모든 제어봉이 완전히 삽입되어 있는 영출력 상태에서 0.1초의 짧은 시간동안 한 군의 제어봉이 완전히 이탈했을때 시간에 따른 노심 거동을 살펴보기 위한 검증문제이다.

그림 4는 제어봉 완전 이탈시 노심의 출력 변화를 기준 결과로 사용된 PANTHER결과[6]와 비교한 것이며 표 4에 주요 결과를 나타내었다. 그림과 표에서 볼 수 있듯이 기준값과 큰 오차없이 일치하는 모습을 볼 수 있다.

5. 결론

혼합연료가 장전된 노심 해석을 위한 NUREC코드 시스템을 개발하였다. NUREC코드 시스템에서 혼합연료 장전 노심과 같이 노드 경계면에서 열중성자의 공간적 천이현상을 보이는 노심에 대해 정확도 향상을 위하여 격자점 중성자속을 전개 함수에서 제외하고 각 경계면에서의 중성자속 모멘트항을 추가하는 개량 AFEN방법론을 사용하도록 하였다. 또한 연소계산과 부분 삽입 제어봉 모델, 그리고 천이계산 능력을 보유하도록 하였다.

개발된 NUREC코드 시스템을 통하여 혼합핵연료가 장전된 NEACRP-L336문제와 상용운전되는 영광 3,4호기 실측치를 바탕으로 검증하였다. 또한 천이계산 능력을 시험해보기위하여 NEACRP C1문제에 대한 계산을 수행하였다. 검증 결과 우라늄 핵연료를 사용하는 영광 3,4호기에 대해서는 기존의 우라늄 노심 해석 코드의 정확도가 유지되었으며, NEACRP-L336문제와 같이 혼합핵연료가 장전된 노심의 경우 기존의 해석기법보다 향상된 결과를 보여주었다. 또한 NEACRP C1 천이계산 결과 큰 오차 없이 NUREC코드 시스템의 천이계산 능력을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기과제 중 “미래형핵연료 노심분석기술 개발” 과제의 일환으로 수행하였다.

참고문헌

1. S. W. Woo, N. Z. Cho, and J. M. Noh, "The Analytic Function Expansion Nodal Method Refined with Transverse Gradient Basis Functions and Interface Flux Moments," Nucl. Sci. Eng., 139, 156 (2001)
2. 조병오 외, "MASTER-2.0: Multi-purpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors," 한국원자력 연구소, KAERI/TR-1211/99, 1999.
3. J. C. Lefbvre, J. Mondot and J. P. West, "Benchmark Calculations of Power Distribution within Assemblies," NEACRP-L336, Organization for Economic Cooperation and Development 1991.
4. H.G.Joo, et al., "A Multi-dimensional Two-Group Reactor Kinetics Code Based on the Nonlinear Analytic Nodal Method," PU/NE-97-4, August 1, 1997.
5. Herbert Finnemann and Aldo Galati, "NEACRP 3-D LWR Core Transient Benchmark," NEACRP-L-335, OECD NEA, 1991
6. P.K. Hutt, Nuclear Electric, Berkely, U.K., Letter to H. Finnemann, "Revised PANTHER results for the NEACRP Rod Ejection Benchmark," 1993.

표 1. 영광 3호기, 4호기 제어봉가 비교(영출력)

Plant/ Cycle	Bank	측정값 (pcm)	오차 (NEM)	오차 (NUREC)	Plant/ Cycle	Bank	측정값 (pcm)	오차 (NEM)	오차 (NUREC)
Y3C1	1	927.0	-4.6	-2.7	Y4C1	1	908.6	-2.0	-1.4
	5	370.6	-12.5	-12.5		5	347.6	-6.0	-6.6
	4	523.3	-3.1	-3.8		4	507.1	-2.2	-1.9
	3	746.3	-1.5	-2.7		3	739.5	-1.1	-1.4
	2	820.0	1.2	0.5		2	799.5	3.9	3.4
Y3C2	1	987.4	-0.6	-1.6	Y4C2	1	1016.0	-3.3	-4.0
	5	382.9	1.5	1.2		5	403.1	-3.8	-6.3
	4	413.9	1.8	2.1		4	426.9	-1.6	-1.3
	3	454.5	-0.9	-0.8		3	469.6	-0.6	-0.6
	2	713.9	-2.1	-2.3		2	752.8	-2.3	-2.4
Y3C3	1	876.3	-0.5	-0.6	Y4C3	1	858.3	-1.3	-1.7
	5	227.8	14.2	14.3		5	263.1	-3.2	-3.2
	4	476.2	2.6	2.3		4	516.4	-4.2	-4.1
	3	473.5	3.3	3.8		3	521.0	-1.8	-2.1
	2	659.3	2.5	2.6		2	677.4	-2.1	-2.6
Y3C4	1	671.3	-0.5	-0.6	Y4C4	1	883.0	-3.3	-4.3
	5	413.6	1.3	2.5		5	428.8	-3.4	-3.4
	4	471.6	-1.4	-2.5		4	443.0	-2.4	-2.7
	3	327.5	2.1	2.3		3	336.5	-3.9	-2.8
	2	568.3	-3.1	-3.1		2	614.2	-3.9	-3.1

방 법	Max. Error(%)	RMS Error(%)
NEM	14.2	4.3
NUREC	14.3	4.3

표 2. 영광 3호기, 4호기 영출력 임계봉산농도(전제어봉 인출)

Plant	Cycle	측정치	오차(NUREC)	오차(NEM)
YGN3	1	1117.4	13.2	16.5
	2	1204.4	22.9	21.7
	3	1377.6	17.8	17.5
	4	1596.2	21.3	20.4

Plant	Cycle	측정치	오차(NUREC)	오차(NEM)
YGN4	1	1113.4	10.9	11.7
	2	1181.4	4.1	3.2
	3	1393.8	26.7	26.2
	4	1576.8	7.3	7.0

방 법	Max. Error(ppm)	RMS Error(ppm)
NEM	26.2	17.1
NUREC	26.7	17.4

오차(ppm) = 계산치 - 측정치

표 3. 영광 3호기, 4호기 영출력 임계 봉산농도(기준제어봉 삽입)

Plant	Cycle	측정치	오차(NUREC)	오차(NEM)
YGN3	1	978.5	-88.4	-83.5
	2	1108.0	17.0	22.0
	3	1282.5	11.0	9.5
	4	1512.4	21.6	14.6

Plant	Cycle	측정치	오차(NUREC)	오차(NEM)
YGN4	1	889.0	-8.4	19.6
	2	1077.0	6.4	13.0
	3	1297.9	23.7	10.1
	4	1477.1	1.6	4.9

방 법	Max. Error(ppm)	RMS Error(ppm)
NEM	-83.5	32.5
NUREC*	-88.4	34.2

오차(ppm) = 계산치 - 측정치

표 4. NEACRP C1문제에 대한 계산결과

	NUREC	PANTHER
Critical boron concentration at steady-state	1125.88	1128.29
Ejected rod worth(pcm)	945.18	949.09
Maximum power (%)	470.36	441.12
Time at maximum power(sec)	0.277	0.273
Power at 5 sec	15.6	14.60

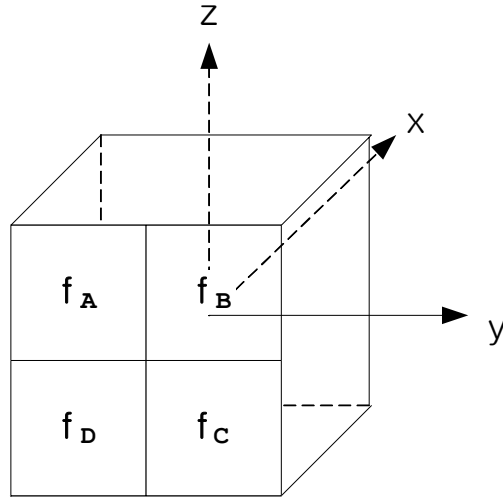


그림 1. 육면체 노드 구조

	유효증배계수	오차(<i>pcm</i>)
REFERENCE	0.93816	-
NEM(4Box/assem)	0.93768	-48
NUREC(1Box/assem)	0.93807	-9

UX	PX	R	1.3568	1.0831	R
			0.722	-0.415	
			0.302	-0.212	
PX	UX	R	1.0831	0.4770	R
			-0.415	-0.168	
			-0.212	-0.105	
R	R	R	R	R	R

UX : 우라늄 핵연료

PX : 혼합 핵연료

R : 반사체

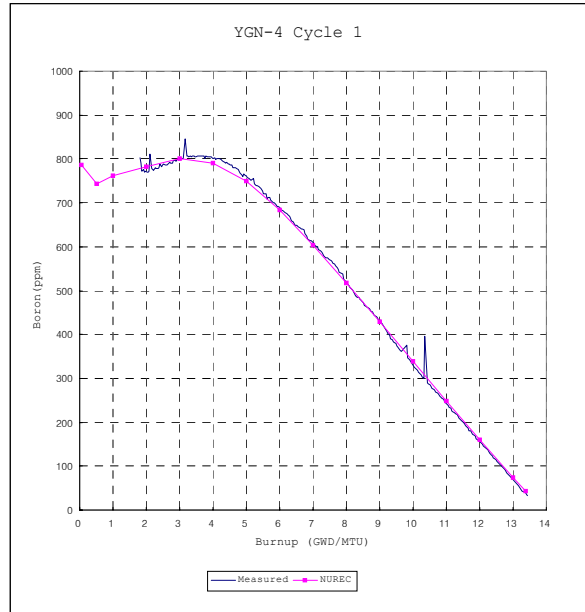
Ref. Power

NEM (%Diff)

NUREC(%Diff)

$$\% \text{ Diff} = (\text{Calculated Value} - \text{Reference}) / \text{Reference} * 100$$

그림 2. NEACRP L336 C5 문제 계산 결과



(1) 영광 3호기 1주기 임계붕산농도 계산 결과 (2) 영광 4호기 1주기 임계붕산농도 계산 결과

그림 3. 영광 3,4호기 1주기에 대한 임계 붕산 농도

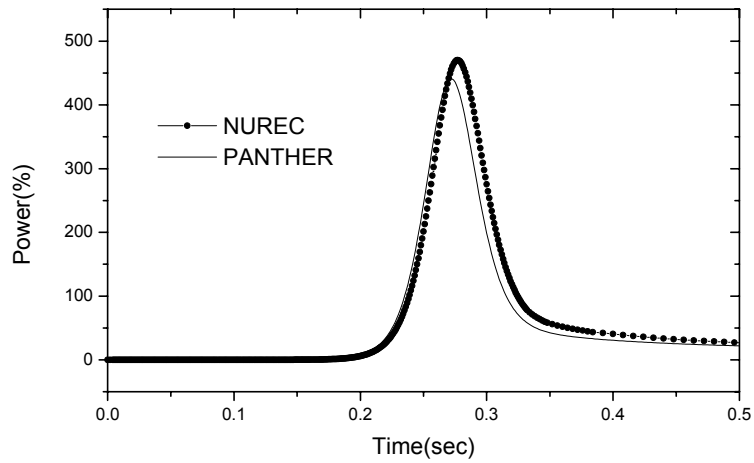


그림 4. NEACRP C1 문제에 대한 시간에 따른 출력 변화