

## 개선된 중성자 선원 증배법을 이용한 미임계도 평가

윤석균 · 윈나잉 · 김명현<sup>†</sup>

경희대학교 테크노공학대학 원자력공학과

(2006년 12월 22일 접수, 2007년 11월 15일 채택)

## Subcriticality Evaluation Using the Modified Neutron Source Multiplication Method

Seok-Kyun Yoon, WinNaing and Myung-Hyun Kim<sup>†</sup>

Department of Nuclear Engineering, Kyung-Hee University

(Received 22 December 2006, Accepted 15 November 2007)

### 요 약

원자로의 안전성 확보를 위해 재장전 기간 동안 수행되는 노물리 시험에서 제어봉의 반응도가(reactivity worth) 산출을 위해 노심의 임계도를 측정해야 하고, 기동운전 시에도 반응도 사고를 대비하여 미임계도가 감시되어야 한다. 미임계도나 제어봉가 측정을 위한 연구가 국내외적으로 지속되어 왔으며, 최근에는 일본에서 “개선된 중성자 선원 증배법(Modified Neutron Source Multiplication Method, MNSM)”이 제안되어 기존의 중성자 선원 증배법의 한계를 극복하였다. 본 연구에서는 MNSM을 경희대 교육용원자로 AGN-201에 적용하여 미임계도를 계산하고 새로운 방법의 타당성을 평가하였다. MNSM의 적용을 위해 AGN-201 원자로에 적합한 핵자료집과 중성자수송 전산코드인 TRANSX - PARTISN 체계를 구축하였고, 유효증배계수와 중성자속(flux) 분포, 수반 중성자속(adjoint flux) 분포 등을 계산하여 제어봉위치에 따른 보정인자들을 산출하였다. 원자로의 미임계도 측정값은 BF<sub>3</sub> 비례계수관으로 측정된 중성자계수율을 사용하여 확보하였다. 연구 결과로서 MNSM을 사용하여 평가한 미임계도가 전산코드로 계산하여 얻어진 이론적인 미임계도 값에 근접하고 계산된 보정인자도 유효함을 확인하였다.

**주요어** : 미임계도, 연구로, 선원증배법, 보정인자

**Abstract** — To insure nuclear reactor safety, the reactivity of control rods should be calculated by measuring the criticality of reactor core and it is regularly performed during the annual physics test period. Also, the core criticality should be monitored during the start-up operation to avoid reactivity induced accidents. Many research works on control rod reactivity measurement and subcriticality measurement have been accomplished throughout the world for decades and recently a new method named “Modified Neutron Source Multiplication Method (MNSM)” was proposed in Japan which is known to be improved overcoming limitations of traditional Neutron Source Multiplication Method (NSM). In this study, MNSM was tested in calculation of subcriticalities and in evaluation of application validity using the educational reactor in Kyung Hee University, AGN-201. For this study, a revised nuclear data library and a neutron transport code system TRANSX - PARTISN were established. Correction factors for various control rod positions were produced using the k-effective values and the corresponding flux distributions and adjoint flux distributions. Experimental values of the core criticality were obtained using the neutron count rates of the BF<sub>3</sub> proportional

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University  
Tel: 031-201-2562  
E-mail: mhkim@khu.ac.kr

counters. The results showed that the expected reactivity worth of control rods by MNSM agreed well with the theoretical values and the correction factors contributed much for this purpose.

**Key words :** Subcriticality, Research reactor, Source multiplication method, Correction factors

## 1. 서 론

원자로의 설계 및 운영에 있어 안전성 확보는 필수적이며, 노심의 핵적 안전성이 가장 우선되어야 한다. 노심의 핵적 안전성을 유지하기 위해서는 노심의 임계도와 제어봉의 반응도 값이 정확히 예측되어야 한다. 그런데 임계도 값과 반응도 값은 직접적으로 측정이 불가능한 종합적인 인자이므로 다른 계측 값을 통해 이론적으로 예측하며 이를 위해서 전산코드를 이용하여 계산한 값들을 많이 사용한다. 그런데 이런 임계도 예측 방법에서 전산코드로 계산된 값들을 사용하기 위해서는 여러 조건에 대해 측정값과의 비교를 통한 보정이 필요하다.

반응도 측정 방법론에 대해 여러 사람에 의해 오랫동안 다양한 방법들이 제안되어 왔다. 어느 방법이던지 아직 신뢰성이 높지는 않지만 출력운전 중 임계상태 근처의 반응도 값은 큰 오차없이 측정되고 있다. 현재 가압경수형 원자로의 경우, 제어봉가(제어봉 반응도가) 측정은 재장전 작업 중 행해지는 노물리 시험 항목의 하나인데 봉산수의 농도 조절과 제어봉 움직임을 통해 생겨나는 반응도 변화를 비교하는 간접적인 방법으로 측정되고 있다. 이 방법은 높은 봉산수 농도 하에서 행해지므로 많은 시간과 노력의 소모 또 액체폐기물 발생을 야기시킨다. 또한 기준에 제안된 많은 방법들은 미임계의 저출력 조건에서는 측정오차가 매우 큰 것으로 알려져 있다. 신속하고 정확하면서 미임계 상태에서도 반응도를 측정할 방법이 있다면 제어봉가 측정 뿐 아니라 가속기 구동 미임계원자로나 사용후핵연료 저장소 등의 시설에 적용하여 핵적 안전성을 감시하는 수단이 될 수 있을 것이다.

외국에서의 원자로 미임계도 측정 기술은 1950년대부터 소규모 연구로를 대상으로 여러 방법들이 제안되고 실증되었으나 실용화되지는 못하였다. 80년대에는 가속기 구동 미임계로나 임계 실험로를 대상으로 연구가 활발해졌으나, 큰 진전을 보지 못하였다. 또한 상용원자로에 대한 미임계도 측정기술은 제어봉 교체측정법 이외에는 실용화가 되지 못하였으며, 측정 범위가 좁다는 한계를 갖고 있다. 여러 방법에 대한 국내에서의 시도는 아직 초기단계에 있으며 1990년에 TRIGA MARK II 원자로<sup>[1]</sup>, 1996년에 하나로원자로에 대해 정밀 측정을 시도한 바 있다<sup>[2]</sup>. 최근 한국전력기술원(KEPRI)에서 동적 제어봉 제어능 측정방법을 이용하여 중성자 신호 내 잡음 처리기술을 통한 상용원자로에 대한 미임계도 측정연구를 수행하고 개선 중에 있다<sup>[3]</sup>.

본 연구는 최근 일본에서 큰 성과를 보인 '개선된 중성자 선원 증배법'(Modified Neutron Source Multiplication Method, MNSM)<sup>[4]</sup>을 복잡한 소형 원자로에 적용하여 방법론의 실효성을 확인하고, 체계적인 평가 방법론을 수립하여 추후 독자적인 개선을 개발하고자하는 목적을 갖는다. 이 방법은 기존의 중성자 선원 증배법(NSM)<sup>[5]</sup>을 바탕으로 중성자 선원 및 계측기 위치를 고려하는 보정인자를 추출하여 정밀도를 향상시키는 체계적인 방법론이다. 본 방법은 일본 홋카이도 대학에서 제안되었으며, 교토대학교 임계로(KUCA) 및 일본내 가압경수형 원자로에 대하여 적용하여 어느 정도 타당성을 확인한 바 있다. 본 연구는 경희대학교의 교육용 원자로인 AGN-201 원자로<sup>[6]</sup>에 적용하여 그 타당성을 재확인하는데서 출발한다. 그런데 AGN-201은 매우 작고 구성이 복잡하여 오히려 대형 발전로 노심의 문제보다 더 어려운 복잡계 문제이다.

MNSM의 응용을 위해서 AGN-201 원자로에 맞는 핵자료 라이브러리를 생산하였고,  $S_N$  방법을 이용하는 PARTISN 코드를 이용하였다. 다음 장에서는 이론을 소개하고 3장에서는 3개의 보정인자를 정의하고 그 의미를 설명하였다. 4장과 5장에서는 계산 결과를 방법론과 함께 설명하였다.

## 2. 중성자 선원증배법의 이론

### 2-1. 전형적인 중성자 선원 증배법(NSM)

전형적인 NSM<sup>[5]</sup>은 원자로의 미임계도를 평가하는 매우 손쉬운 방법이며 이론식이 복잡하지 않아 제어봉 반응도가를 평가할 때 간편하게 이용될 수 있다. 또한 다른 방법에서 사용하는 입자기속기 등과 같은 고가의 장비들이 필요하지 않으며, 외부 중성자 선원과 중성자 계측기만을 이용하여 측정하므로 경제적으로도 유리한 측면이 많다. 그 외에도 평가하고자 하는 시설 내부에 핵분열 물질 및 중성자 선원이 위치되어 있어 핵임계 안전성 측면에서도 이득이 있다. 하지만 초기에 개발된 전통적인 이 방법은 하나의 정상상태만을 고려하기 때문에 제어봉 삽입·인출과 같은 반응도 변화 시의 미임계도 측정이 불가능하며, 중성자속의 공간적 분포에서 고차모드(higher mode)에 미치는 영향이 고려되지 않으므로 이의 보정이 이루어져야 한다는 단점이 있으며, 이것이 방법 개선의 한계로 되어 왔다. 또한 계측기가 원자로 내 임의의 위치에 놓여 있을 때(예를 들어 감속제

영역에 있을 때) 평가된 미입계도의 결과는 작은 미입계 상태에서만 신뢰성을 보이며, 더 큰 미입계 상태일 수록 그 신뢰성은 낮아진다. 또한 원칙적으로 NSM은 정상상태의 반응도를 측정하는 방법이기 때문에 연속적인 반응도 측정을 할 때나 제어봉 낙하와 같이 노심에 큰 교란이 발생했을 때에는 이러한 효과를 보정하지 않으면 큰 오차를 발생하게 된다.

미입계 상태에 있는 노심의 중성자 계수율(neutron count rate, M)은 중성자 선원과 노심의 유효증배계수로 결정된다. 가령 무한한 원자로에 균일한 세기의 중성자 선원이 분포되어 있다고 가정하면 노심의 유효증배계수와 중성자 선원(neutron source, S) 및 계측기 효율(detector efficiency, ε)은

$$M = \varepsilon(S + k_{eff}S + k_{eff}^2S + k_{eff}^3S + \dots) = \frac{\varepsilon S}{1 - k_{eff}} \quad (1)$$

의 관계성을 갖는다. 하지만 이러한 이상적인 상황은 실제 미입계도 측정에서 항상 적용될 수 없으므로 외부중성자 선원항과 중성자 증배항으로 구분하면,

$$M = \varepsilon S + \varepsilon \left( \frac{k_{eff}}{1 - k_{eff}} \right) S \quad (2)$$

로 표현된다. 식(2)의 우변 첫 번째 항은 외부중성자 선원의 직접적인 분포이며, 두 번째 항은 중성자 재생산 과정을 통한 중성자 증배 항이다. 식(2)를 두 가지 원자로 상태에 대한 중성자 계수율 비로 표현하면

$$\rho_n = \rho_{ref} \left( \frac{M_{ref}}{M_n} \right) \quad (3)$$

와 같은 중성자 선원 증배법(NSM)의 이론식이 된다. 여기서,  $\rho_{ref}$ 는 기준상태에서의 미입계도,  $\rho_n$ 는 n번째 미입계상태에서의 미입계도,  $M_{ref}$ 는 기준상태에서의 중성자계수율, 그리고  $M_n$ 은 n번째 미입계상태에서의 중성자계수율이다.

2-2. 개선된 중성자 선원 증배법(MNSM)

개선된 NSM(MNSM)<sup>[4]</sup>은 노심 내 외부선원의 증폭현상을 이용하여 정상(定常)상태 반응도를 측정하는 방식이며, 두 정상상태에서의 계측기 측정값이 요구되고, 두 값 중 하나는 교정을 위한 기준 상태로 이용된다. 기준상태의 미입계도와 중성자계수율의 연관관계를 통해 특정상태의 미입계도를 평가하는 방식은 전통적인 NSM 방법과 동일하지만 연구용 원자로와 상용 경수로의 경우 노심 내 존재하는 핵연료인 중성자선원항과 자발적으로 중성자를 공급하는 외부 중성자 선원항이 포함되어 있기 때문에 미입계 노심내의 중성자 공간 분포를 계

산할 때에는 기본 모드(fundamental mode)해 뿐만 아니라 고차 모드해도 고려되어야 한다. 본 연구에서 사용한 미입계도 평가 방법론은 중성자계측기로 측정된 중성자계수율로부터 기본모드 효과만을 추출하여 이 값을 기준으로 이론적인 미입계도에 근접하도록 보정인자를 적용한다. 또한 반응도 변화 시 중성자 중요도 함수(importance function)의 교란에 따른 변화를 보정하는 인자와 제어봉 위치변화로 인해 유발되는 왜곡된 중성자속 분포를 보정해주는 인자가 추가되었다. 세 가지 보정인자들은 고유치 문제(eigenvalue problem)와 고정 선원항 문제(fixed source problem)를 이용하여 결정되어진다. 이 방법에서는 미입계도를 기준상태의 미입계도와외의 차이로 평가하기 때문에 기준상태의 미입계도를 미리 알고 있어야 한다. 이 방법의 특성으로서 장점은 제어봉 위치에 따른 보정인자들의 변화를 미리 계산된 보정인자값들을 내삽하여 사용할 수 있다는 점이다. 따라서 다양한 노심 상태에 대해 필요한 보정인자를 쉽게 얻을 수 있다. 반면 이를 위해서는 미리 보정인자들을 평가해 두어야 하는데, 이 평가에는 제어봉 위치별 중성자속(neutron flux) 분포와 수반 중성자속(adjoint flux) 분포를 정확하게 계산할 필요가 있기 때문에 평가 계산에 큰 부담이 된다.

2-2-1. 이론식

본 연구에서 사용된 MNSM의 이론식은 아래와 같다<sup>[8]</sup>.

$$\rho_n = \rho_{ref} \left( \frac{M_{ref}}{M_n} \right) C_n^{ext} C_n^{in} C_n^{sp} \quad (4)$$

NSM과의 차이점은 3개의 보정인자를 적용한다는 것이며,  $C_n^{ext}$ 는 기본모드 추출 보정인자,  $C_n^{in}$ 는 중성자 중요도영역 보정인자 그리고  $C_n^{sp}$ 는 공간분포 보정인자이다.

2-2-2. 유도과정

MNSM에서 사용되는 보정인자들의 정의 식들은 고유치 문제와 고정 선원항 문제를 같이 적용하여 아래와 같이 유도할 수 있다. 외부 중성자 선원항을 갖는 미입계 시스템에 대한 정상상태의 다군 중성자확산방정식은

$$L\phi^s(r) = F\phi^s(r) + S(r) \quad (5)$$

로 표현된다. 여기서, L은 소멸연산자( $= -\nabla \cdot D \nabla + \Sigma_{Ri}$ ), F는 생성연산자( $= \chi_i u \Sigma_{fj}$ ),  $\phi^s$ 는 고정 선원항 문제의 중성자속 그리고 S는 외부 중성자 선원이다.

식(5)를 고유치 문제로 변환한 중성자 확산방정식은

$$L\phi_i^c(r) = \left( \frac{1}{k_i} \right) F\phi_i^c(r), \quad i=1,2,3,\dots \quad (6)$$

이다. 여기서  $k_i$ 는 i번째 고유치(eigenvalue) 그리고  $\phi_i^c$ 는 i번째 고유치에 대한 고유함수이다.

식(6)에 대한 수반(adjoint)식의 형태는

$$L^* \varphi_i^{c*}(\mathbf{r}) = \left(\frac{1}{k_i}\right) F^* \varphi_i^{c*}(\mathbf{r}), \quad i=1,2,3,\dots\infty \quad (7)$$

이다. 여기서  $L^*$ 는 수반식의 소멸연산자,  $F^*$ 는 수반식의 생성연산자 그리고  $\varphi_i^{c*}$ 는  $i$ 번째 고유치에 해당하는 수반 고유함수이다. 또한 식(6)과 식(7)내의 고유함수는

$$\begin{aligned} (\varphi_i^{c*}, F\varphi_j^c) &= 0, \quad i \neq j, \\ &\neq 0, \quad i=j, \end{aligned} \quad (8)$$

의 직교 조건을 만족한다. 여기서,  $(\varphi_i^{c*}, F\varphi_j^c) = \int_V \varphi_i^{c*T}(\mathbf{r}) F\varphi_j^c(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$ 이고  $T$ 는 벡터의 전치(transpose) 표시이다.

식(5)의 고정 선원항 문제의 고유함수는 고유치 문제의 함수로 전개시킬 수 있으며,

$$\varphi^s(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \varphi_i^c(\mathbf{r}) \quad (9)$$

로 표현된다. 여기서,  $A_i$ 는  $i$ 번째 모드에 대한 전개계수이다. 식(9)에 직교조건을 적용하고 전개함수 형태로 표현하면,

$$A_i = \frac{(\varphi_i^{c*}, F\varphi^s)}{(\varphi_i^{c*}, F\varphi_i^c)} \quad (10)$$

이다. 식(5)에 식(10)을 대입하고 식(6), 식(7)과 직교조건 식(8)을 이용하여 전개함수  $A_i$ 를  $i$ 번째 모드의 미입계도에 대한 형태로 표현하면,

$$A_i = \left(\frac{k_i}{1-k_i}\right) \frac{(\varphi_i^{c*}, S)}{(\varphi_i^{c*}, F\varphi_i^c)} = \left(\frac{1}{\rho_i^s}\right) \frac{(\varphi_i^{c*}, S)}{(\varphi_i^{c*}, F\varphi_i^c)} \quad (11)$$

이다. 여기서,  $\rho_i^s$ 는  $i$ 번째 모드에 대한 미입계도이다. 식(5)에 식(11)을 대입하여 고정 선원 중성자속과 미입계도의 관계식으로 표현하면

$$\varphi^s(\mathbf{r}) = \left(\frac{1}{\rho^s}\right) (\varphi_i^{c*}, S) \frac{\varphi_i^c(\mathbf{r})}{(\varphi_i^{c*}, F\varphi_i^c)} + \sum_{i=2}^{\infty} \left(\frac{1}{\rho_i^s}\right) (\varphi_i^{c*}, S) \frac{\varphi_i^c(\mathbf{r})}{(\varphi_i^{c*}, F\varphi_i^c)} \quad (12)$$

이다. 여기서  $\rho^s$ 은  $\rho_i^s$  동일한 의미로 표현하였다.

식(12)의 표현은 고정선원 중성자속으로부터 기본모드 구성요소(식(12)의 우변 첫번째 항)가 추출되어진다면 기본모드  $\rho$ 가 결정되어질 수 있음을 의미한다. 또한 NSM에 의해 기본모드 추출로부터  $\rho$ 가 결정되어진다면 고차모드 성분(예,  $\varphi_2^s, \varphi_3^s$  등)의 영향을 보정하기 위한 인자들이 필요하게 된다.

MNSM에 적용될 중성자계수율(M)은 원자로의 중성자계측기에 의해 측정되며,

$$M = \int_V \varphi^s(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (13)$$

로 표현된다. 또한 중성자 계수율(M)에 포함되어 있는 기본모드 항은

$$M_1 = A_1 \int_V \varphi_1^c(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (14)$$

로 표현된다.

중성자 계수율(M)으로부터의 기본모드 추출에 대하여 추출계수는

$$C_1 = \frac{M_1}{M} = \frac{A_1 \int_V \varphi_1^c(\mathbf{r}) d\mathbf{r}}{\int_V \varphi^s(\mathbf{r}) d\mathbf{r}} = \frac{\int_V \overline{\varphi_1^c}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}}{\int_V \overline{\varphi^s}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}} \quad (15)$$

이다. 여기서,  $\overline{\varphi_1^c}(\mathbf{r})$ 는  $(\varphi_1^c(\mathbf{r})) / (\varphi_1^{c*}, F\varphi_1^c)$ 로서 고유치 문제의 정규화된 중성자속이고,  $\overline{\varphi^s}(\mathbf{r})$ 는  $(\varphi^s(\mathbf{r})) / (\varphi_i^{c*}, F\varphi^s)$ 로서 고정 선원항 문제의 정규화된 중성자속이다.

중성자 계측기로 측정된 중성자 계수율(M)에 포함되어 있는 기본모드 중성자 계수율( $M_1$ )은

$$\begin{aligned} M_1 &= C_1 M = C_1 \int_V \varphi^s(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \int_V A_1 \varphi_1^c(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \\ &= \left(\frac{1}{\rho^s}\right) (\varphi_1^{c*}, S) \int_V \overline{\varphi_1^c}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \end{aligned} \quad (16)$$

이다.

서로 다른 원자로 상태에 대한 중성자 증배( $Q_n$ )를 중성자 계수율로 표현하여 MNSM의 기본 이론식을 유도하면

$$\begin{aligned} Q_n &= \frac{M_n}{M_{ref}} = \frac{M_{1,n}/C_{1,n}}{M_{1,ref}/C_{1,ref}} = \frac{\left(\frac{1}{\rho_n^s}\right) (\varphi_{1,n}^{c*}, S) \int_V \overline{\varphi_{1,n}^c}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} / C_{1,n}}{\left(\frac{1}{\rho_{ref}^s}\right) (\varphi_{1,ref}^{c*}, S) \int_V \overline{\varphi_{1,ref}^c}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} / C_{1,ref}} \\ &= \left(\frac{\rho_{ref}^s}{\rho_n^s}\right) \frac{(\varphi_{1,n}^{c*}, S) \int_V \overline{\varphi_{1,n}^c}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}}{(\varphi_{1,ref}^{c*}, S) \int_V \overline{\varphi_{1,ref}^c}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}} \frac{C_{1,ref}}{C_{1,n}} \end{aligned} \quad (17)$$

을 얻는다. 최종적으로 세 가지 보정인자를 갖는 특정 원자로상태(n)에 대한 미입계도는

$$\rho_n^s = \rho_{ref}^s \frac{M_{ref}}{M_n} C_n^{ext} C_n^{im} C_n^{sp} \quad (18)$$

이다.

### 3. 보정인자 평가 및 의미

#### 3-1. 보정인자 평가 방법

MNSM의 보정인자는 고유치 문제와 고정 선원항 문제의 유도과정을 통해 결정되며, 기본모드 성분 추출을 통해 결정된 미입계도에 세 가지 보정인자를 적용하여

NSM의 오차를 줄인다. 보정인자들은 중성자 고정 선원 향에 의한 고차모드 성분의 효과를 보정하고, 제어봉 삽입 및 인출에 따른 반응도 변화 시 유발되는 중성자속 분포 변화와 중성자 중요도 함수의 변화를 보정하는 역할을 한다. 보정인자 결정에 필요한 중성자속을 구하기 위한 다군 중성자확산방정식은

$$-\nabla \cdot D_g \nabla \phi_{g,i}^c + \sum_{l \neq g} \chi_{lg} \phi_{g,i}^c = \frac{1}{k_i} \chi_{lg} \sum_{g'=1}^G v \Sigma_{fg'} \phi_{g',i}^c + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{gg'} \phi_{g',i}^c, \quad i=1,2,3 \dots \infty \quad (19)$$

$$-\nabla \cdot D_g \nabla \phi_g^s + \sum_{l \neq g} \chi_{lg} \phi_g^s = \chi_{lg} \sum_{g'=1}^G v \Sigma_{fg'} \phi_{g'}^s + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{gg'} \phi_{g'}^s + S \quad (20)$$

이다. 식 (19)는 고유치 문제에 대한 식이며, 식 (20)은 고정 선원향 문제에 대한 식이다. 여기서,  $\phi_g^s$ 는 고유치 문제에 대한 중성자속이고,  $\phi_g^c$ 는 고정 선원향 문제에 대한 중성자속이다.

위의 두 가지 문제를 통해 중성자속(forward neutron flux), 수반 중성자속(adjoint neutron flux), 고정 선원 중성자속(fixed source neutron flux)을 계산할 수 있으며 이 중성자속 정보들을 이용하여 보정인자를 결정하게 된다.

Fig. 1은 각각의 보정인자가 어떠한 중성자속에 의해 결정되는지를 나타낸 것이다. 추출 보정인자( $C_n^{ext}$ )는 고유치 문제와 고정 선원향 문제로 계산된 세 가지 중성자속에 의해 평가되며, 중성자 중요도영역 보정인자는 고유치 문제의 수반 중성자속에 의해 결정된다. 마지막으로 공간분포 보정인자는 고유치 문제의 중성자속과 수반 중성자속에 의해 결정된다.

### 3-2. 보정인자의 의미

#### 3-2-1. 추출 보정인자(extraction correction factor)

추출 보정인자는 기준상태의 기본모드 추출계수와 특

정상상태의 기본모드 추출계수의 비율로 정의되며,

$$C_n^{ext} = \frac{C_{1,ref}}{C_{1,n}} \quad (21)$$

로 표현된다. 여기서,  $C_{1,ref}$ 는 기준 원자로상태의 기본모드 추출계수 그리고  $C_{1,n}$ 는 특정 원자로상태의 기본모드 추출계수이다.

기본모드 추출계수  $C_{1,n}$ 을 알고 있다면 측정된 중성자계수율로부터 기본모드 중성자계수율을  $M_{1,n} = C_{1,n} M_n$ 과 같이 구할 수 있으며, 기본모드 추출계수는

$$C_{1,n} = \frac{\int_V \overline{\phi_{1,n}^c}(r) dr}{\int_V \overline{\phi_1^s}(r) dr} \quad (22)$$

로 표현된다. 여기서,  $\overline{\phi_{1,n}^c}$ 는 총 핵분열 중성자개수로 정규화된 중성자속이며  $\overline{\phi_1^s}$ 은 총 핵분열 중성자 개수로 정규화된 고정 선원향 중성자속이다.

#### 3-2-2. 중성자 중요도영역 보정인자(importance field correction factor)

중성자 중요도영역 보정인자는 기준상태의 중성자 중요도에 의해 가중된 중성자 선원 세기와 특정상태의 대한 중성자 중요도에 의해 가중된 중성자 선원 세기의 비율로 정의되며,

$$C_n^{im} = \frac{\int_V \phi_{1,n}^s(r) S(r) dr}{\int_V \phi_{1,ref}^s(r) S(r) dr} \quad (23)$$

로 표현된다. 여기서  $\phi_{1,n}^s$ 는 고유치 문제로 계산된 기본모드 수반 중성자속 그리고  $S(r)$ 는 위치  $r$ 에서의 중성자 선원 세기이다.

#### 3-2-3. 공간분포 보정인자(spatial correction factor)

공간분포 보정인자는 기준상태의 중성자계수율에 포함된 정규화된 기본모드 성분과 특정상태의 중성자계수율에 포함된 정규화된 기본모드 성분의 비율로 정의되며,

$$C_n^{sp} = \frac{\int_V \overline{\phi_{1,n}^c}(r) dr}{\int_V \overline{\phi_{1,ref}^c}(r) dr} \quad (24)$$

로 표현된다.

## 4. AGN-201 원자로 개요

AGN-201 원자로<sup>16)</sup>는 최대 열출력이 100 mWt인 균질 원자로이며, 노심은 19.5±0.5%의 농축 이산화우라늄 연료입자와 폴리에틸렌을 혼합한 원판들로 구성되어 있다. 직경이 25.6 cm이며, 두께가 다른 원반형 디스크 9장이

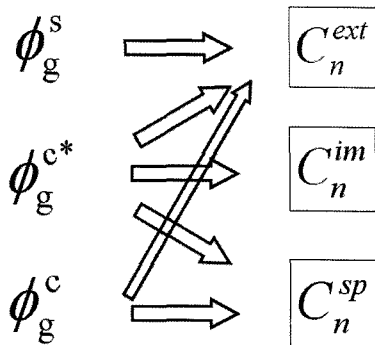


Fig. 1. Neutron fluxes needed for correction factors.

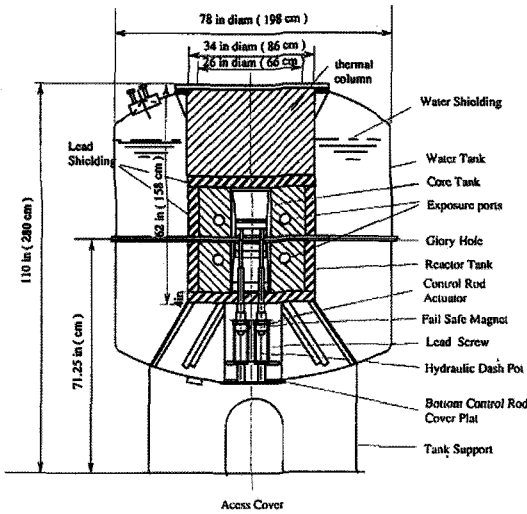


Fig. 2. Cross-sectional view for AGN-201 reactor.

쌓여 원통형 노심을 구성하며, 노심 외부에는 두께 20 cm 흑연반사체, 10 cm 두께의  $\gamma$ 선 차폐체인 납과, 55 cm의 중성자 차폐체인 경수가 채워져 있다. 제어봉은 4개로 서 안전제어봉 1, 2 및 주제어봉과 미세제어봉으로 구성되어 있으며, 제어봉 구성물질은 중성자 흡수 물질이 아니고 핵연료 물질로 만들어져 있다. 제어봉의 인출 동작은 실제로는 노심 삽입이 되며 노심에 핵연료를 삽입하는 효과가 되어 반응도가 증가된다. 노심 중앙에는 수평방향으로 직경이 1인치(=2.54 cm)인 Glory Hole이 판통되며, 노심 밖 흑연반사체 구역에는 4개의 큰 빔포트가 노심을 비껴 관통한다. 두 개의 안전제어봉과 주제어봉은 각각 약 1.25%의 반응도가를 가지며, 미세제어봉은 약 0.3%의 반응도가를 가진다. 중성자속은 납차폐체의 외부 차폐수 탱크에 잠겨 있는 3개의 검출기에 의해 감지된다. 검출기로는 2개의  $BF_3$  이온함과 1개의  $BF_3$  비례계수관으로 구성된다. 검출기들은 각각 대수 전류 측정기, 선형 전류 측정기, 그리고 펄스 증폭기와 연결되어 있고 계수율기(count rate meter)는 제어실내에 위치한다. Fig. 2는 AGN-201 원자로의 단면적을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보듯이 이 원자로심은 매우 복잡하여 중성자속 분포가 크게 변하며, 중성자속 계산의 정확성을 확보하기가 어렵다. 중성자 계측기 반응은 제어봉의 움직임과 선원의 위치에 매우 민감할 수 밖에 없다.

### 5. MNSM을 이용한 미임계도 평가

#### 5-1. 미임계도 평가를 위한 제어봉 위치 결정

AGN-201 원자로의 미임계도 평가를 위해 PARTISN

Table 1. Control rod positions for subcriticality measurement.

Number	Case name	Control rod position	
		Coarse rod	Fine rod
0	C12F00	12 cm	0 cm
1	C09F00	9 cm	0 cm
2	C06F00	6 cm	0 cm
3	C03F00	3 cm	0 cm
4	C00F00	0 cm	0 cm

※ Safety rod #1, #2는 모두 삽입된 상태임.

코드<sup>[9]</sup>로 원자로를 묘사하였다. 이 코드는 3차원 기하학적 구조를 묘사할 수 있으며, MNSM의 보정인자 결정에 필요한 중성자속, 수반 중성자속, 고정 선원항 중성자속의 정보를 계산할 수 있다. PARTISN 코드에 적용될 핵자료 라이브러리는 ZZ-KASHIL 199N<sup>[10]</sup>을 이용하였으며, TRANSX 코드<sup>[11]</sup>를 이용하여 PARTISN 코드 계산에 적합한 ISOTXS 형태의 핵단면적 테이블 파일을 생성하였다. 미임계도 평가를 위해 다섯 가지 경우에 대한 제어봉 위치를 선정하였으며, Table 1은 미임계도를 평가할 제어봉 위치를 나타낸 것이다<sup>[6][8]</sup>.

MNSM은 정상상태의 미임계도를 평가하는 방식이며, 두 정상상태의 계산값과 측정값이 필요하다. MNSM 적용을 위해 기준이 되는 미임계도를 결정해야만 한다. 일반적으로 임계상태에 가깝거나 전통적인 NSM으로 쉽게 결정될 수 있는 미임계도 값을 기준으로 삼으며, 이 미임계도 값을 기준으로 두 정상상태에 대한 중성자계수율을 이용하여 계산하고자 하는 미임계도를 결정하게 된다. 또한 전산코드 계산을 통해 얻어진 이론적인 미임계도 값과 비교하여 얼마만큼의 오차가 발생하는지 분석하고, 보정인자 적용을 통해 이러한 오차를 얼마만큼 줄일 수 있을지 확인하게 된다. MNSM의 특징은 중성자 계수율로부터 기본모드 중성자 계수율만을 추출하여 미임계도를 평가하고, 노심 내 핵연료 및 외부 중성자 선원으로부터 발생하는 고차모드 효과를 추출 보정인자

Table 2. Definition rules of parameter for various control rod position.

Control rod position	$\rho_n$	Neutron fluxes			Neutron count rate
		Forward	Adjoint	Fixed source	
C12F00	$\rho_0$	$\phi_0^c$	$\phi_0^{*c}$	$\phi_0^s$	$M_0$
C09F00	$\rho_1$	$\phi_1^c$	$\phi_1^{*c}$	$\phi_1^s$	$M_1$
C06F00	$\rho_2$	$\phi_2^c$	$\phi_2^{*c}$	$\phi_2^s$	$M_2$
C03F00	$\rho_3$	$\phi_3^c$	$\phi_3^{*c}$	$\phi_3^s$	$M_3$
C00F00	$\rho_4$	$\phi_4^c$	$\phi_4^{*c}$	$\phi_4^s$	$M_4$

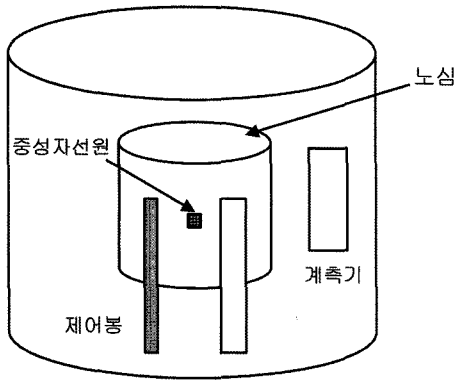


Fig. 3. Source and detector location.

를 통해 개선하는 방식을 가진다. 또한 반응도 삽입, 인출 시 발생하는 중성자 중요도함수 및 기본모드 중성자속 분포의 교란을 중성자 중요도영역 보정인자와 공간분포 보정인자를 통해 보정하여 보다 정확한 미임계도 값을 갖도록 한다.

5-2. 미임계도 평가를 위한 실험절차

MNSM에 적용할 중성자 계수율을 구하기 위해 AGN-201 원자로에 대한 임계도 접근 실험(critical approach experiment)을 수행하였다. 원자로 실험을 통해 제어봉 위치에 따른 중성자 계수율을 측정하였으며, 측정된 값을 이용하여 MNSM에 적용하였다. Fig. 3은 중성자 계

Table 3. Measured neutron count rates by reactor experiments.

Control rod position	Neutron count rate	Neutron multiplication ( $M_0/M_i$ )
C12F00	214 ( $M_0$ )	1.0000 ( $M_0/M_0$ )
C09F00	168 ( $M_1$ )	1.27381 ( $M_0/M_1$ )
C06F00	145 ( $M_2$ )	1.47251 ( $M_0/M_2$ )
C03F00	132 ( $M_3$ )	1.61315 ( $M_0/M_3$ )
C00F00	126 ( $M_4$ )	1.69841 ( $M_0/M_4$ )

수율 측정을 위한 원자로 실험의 배치도이다.

실험 절차를 간략히 설명하면, 먼저 Ra-Be(10 mCi) 선원을 글로리홀(glory hole)에 장전한 후, 수 회에 걸쳐 중성자의 계수율을 측정한다. 주제어봉 삽입전에 측정된 계수율을 기준값( $M_0$ )으로 정하고, 주제어봉을 4 cm씩 장전하며 각 채널의 중성자 계수율( $M_i$ )을 측정한다. Table 3은 임계도달 실험을 통해 얻은 원자로의 제어봉 위치별 중성자 계수율을 나타낸 것이다. 이와 같이 측정된 중성자 계수율을 이용하여 MNSM에 적용되는 각각의 미임계 상태에 대한 중성자 증배값을 구할 수 있다.

5-3. 미임계도 평가

MNSM을 이용한 미임계도는 PARTISN 코드로 계산된 이론적인 미임계도 값을 기준으로 비교 평가하였다. 아래 식은 실제 원자로 실험을 통해 측정된 중성자계수율과 전산코드로 계산된 중성자속을 이용해 결정된 보정인자들이 MNSM 방법에 어떻게 적용되는지를 나타

Table 4. Definition rules of correction factors for MNSM.

Case name	Theoretical reactivity ( $\% \Delta k/k$ )	Neutron count rate	Correction factors			Estimated reactivity ( $\% \Delta k/k$ )
C12F00	$\rho_0^{th}$	$M_0$	1	1	1	
C09F00	$\rho_1^{th}$	$M_1$	$C_1^{ext}$	$C_1^{im}$	$C_1^{sp}$	$\rho_1^{est}$
C06F00	$\rho_2^{th}$	$M_2$	$C_2^{ext}$	$C_2^{im}$	$C_2^{sp}$	$\rho_2^{est}$
C03F00	$\rho_3^{th}$	$M_3$	$C_3^{ext}$	$C_3^{im}$	$C_3^{sp}$	$\rho_3^{est}$
C00F00	$\rho_4^{th}$	$M_4$	$C_4^{ext}$	$C_4^{im}$	$C_4^{sp}$	$\rho_4^{est}$

\* 위첨자 th=theoretical, ext=extraction, im=important field, sp=spatial, est=estimated

Table 5. Factors for evaluating correction factors.

Case	C12F00	C09F00	C06F00	C03F00	C00F00
$(\phi_i^*, S)$	1.7101E-02	1.6590E-02	1.6574E-02	1.6192E-02	1.5860E-02
$A_1$	3.2542E+00	3.0974E+00	3.0562E+00	2.9647E+00	2.9160E+00
$M$	2.7098E+02	2.6145E+02	2.6012E+02	2.5231E+02	2.4642E+02
$M_1$	2.2857E+02	2.1847E+02	2.1618E+02	2.0986E+02	2.0686E+02
$C_1$	8.4349E-01	8.3561E-01	8.3109E-01	8.3174E-01	8.3946E-01
$(\phi_i^*, F\phi^*)$	1.4680E-04	1.4218E-04	1.4077E-04	1.3725E-04	1.3497E-04
$\int_V \phi_i^* dr$	7.0240E+01	7.0531E+01	7.0736E+01	7.0786E+01	7.0939E+01

낸 것이다.

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{M_0}{M_1} C_1^{ext} C_1^{im} C_1^{sp}$$

$$\rho_2 = \rho_0 \frac{M_0}{M_2} C_2^{ext} C_2^{im} C_2^{sp}$$

.....

$$\rho_i = \rho_0 \frac{M_0}{M_i} C_i^{ext} C_i^{im} C_i^{sp}$$

MNSM에 적용할 각종 자료들은 사전에 PARTISN 코드를 이용하여 계산하였으며, 중성자 계수율은 실제 원자로 실험을 통해 얻은 실측치로 정하였다. 다섯 가지 제어봉 위치에 대한 미임계도를 평가하였고, 기준 미임계도는 C12F00로 선정하였다. 보정인자를 구하기 위해서는 여러 가지 계산이 필요하다.

Table 5는 보정인자 결정과정에서 계산된 각 인자들을 나타낸 것이다. 위 표의 계산결과를 바탕으로 추출 보정인자, 중성자 중요도영역 보정인자, 공간분포 보정인자가 결정되어 진다.

Table 6은 각 제어봉 위치에 따라 평가된 보정인자를 나타낸 것이며, Fig. 4는 제어봉 위치에 따른 각각의 보정인자의 변화를 나타낸 것이다. 전산코드 계산을 통해 계산된 보정인자들을 MNSM에 적용하여 미임계도를 평가한 결과를 확인해보면 제어봉 위치에 따라 추출 보정인자와 공간분포 보정인자는 큰 변화를 보이지 않은 반면, 중성자 중요도 영역 보정인자를 비교해보면 C00F00의 경우가 C09F00보다 0.05만큼 작게 평가되었다. 이러한 현상은 AGN-201 원자로의 경우 노심이 작고 제어봉의 위치가 중성자 선원과 가까운 곳에 위치하여 제어봉의 삽입, 인출에 따라 수반 중성자속의 변화가 크게

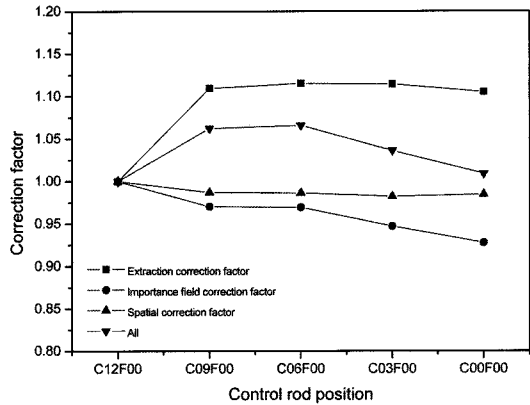


Fig. 4. Variation of correction factors vs. control rod position.

나타난 결과라 판단이 된다. 또한 이에 따른 유효 중성자 선원세기가 증가하여 더 큰 미임계 상태로 갈수록 중성자 중요도영역의 보정이 더 많이 필요하게 된다. 전체적인 보정인자 효과는 1.0보다 크게 평가되었다.

Table 7은 NSM 및 MNSM으로 평가한 미임계도의 보정효과를 비교한 것이다. MNSM을 이용하여 AGN-201 원자로의 미임계도를 평가한 결과, NSM으로 평가된 미임계도는 이론적인 미임계도와 최대 10.34% 차이를 보인다 반면 MNSM으로 평가된 미임계도는 최대 5.20%로 평가되어, 전통적인 NSM에 비해 보정인자를 적용한 MNSM이 약 5% 정도까지 오차를 낮추며 이론적인 미임계도에 더 근접하게 평가함을 확인하였다.

Table 8과 Fig. 5는 각 제어봉 위치에 따른 미분 제어봉가를 비교한 것이다. 기준 제어봉 위치에서 주제어

Table 6. Correction factors for various control rod positions.

Correction factors \ Case	C12F00	C09F00	C06F00	C03F00	C00F00
C <sup>ext</sup>	1	1.1094	1.1149	1.1141	1.1048
C <sup>im</sup>	1	0.9701	0.9692	0.9468	0.9274
C <sup>sp</sup>	1	0.9868	0.9863	0.9820	0.9843
All	1	1.0620	1.0658	1.0358	1.0056

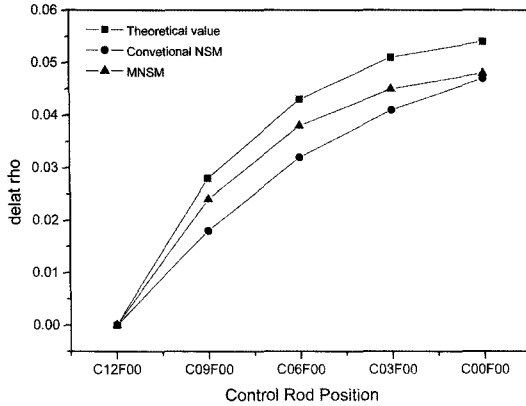
Table 7. Subcriticality of various rod positions estimated by NSM and MNSM.

Case	k-eff	Theoretical ρ (%Δk/k)	M <sub>ref</sub> /M <sub>n</sub>	NSM ρ (%Δk/k)	Error (%)	MNSM ρ (%Δk/k)	Error (%)
C12F00	0.99933	0.06705	1	0.06705	0	0.06705	0
C09F00	0.99905	0.09510	1.27381	0.08541	10.19	0.09071	4.62
C06F00	0.99890	0.11012	1.47251	0.09873	10.34	0.10522	4.45
C03F00	0.99882	0.11814	1.61315	0.10816	8.45	0.11204	5.16
C00F00	0.99879	0.12115	1.69841	0.11388	6.00	0.11485	5.20



**Table 8. Comparison of differential reactivity worth for control rod positions.**

Case	Theoretical	NSM	MNSM
C12F00	0	0	0
C09F00	0.028	0.018	0.024
C06F00	0.043	0.032	0.038
C03F00	0.051	0.041	0.045
C00F00	0.054	0.047	0.048



**Fig. 5. Variation of differential reactivity worth for control rod positions.**

봉이 3 cm씩 인출될 때 전통적인 NSM으로 평가된 제어봉가와 MNSM으로 평가된 제어봉가가 어떻게 변화하는지 분석하였다. 주제어봉의 인출에 따라 제어봉가가 증가폭이 감소하는 이유는 제어봉이 완전히 인출될 부분에서의 물질 조성이 흑연으로 구성되어 있어 핵연료 부분에 미치는 반응도 효과가 작아지기 때문이다.

## 6. 결 론

미입계도를 평가하기 위해 전산코드로 주제어봉의 위치에 따라 세 가지 중성자속을 구하여 보정인자 계산을 수행하였다. 추출 보정인자의 경우 1.0보다 큰 값으로 평가되었으며, 제어봉 위치에 따라 큰 변화폭이 없음을 확인하였다. 공간분포 보정인자의 경우 1.0보다 작은 값으로 평가되었으며, 이 역시 큰 변화가 없음을 확인하였다. 하지만 중성자 중요도영역 보정인자는 더 큰 미입계 상태로 갈수록 더욱 작은 값으로 평가되었으며, 이러한 현상은 수반 중성자속 변화에 따른 유효 중성자 선원세기의 변화가 크기 때문으로 판단된다. 모든 보정인자가 고려되었을 때의 값은 각각의 제어봉 위치에 따라 1.0보다 큰 값으로 보정되었다.

최종적으로 평가된 제어봉 위치별 미입계도는 NSM의

경우 이론적인 미입계도와 약 6~10% 정도의 오차를 보인 반면 MNSM의 경우 이론적인 미입계도와 약 5% 정도의 오차를 보였다. 보정인자가 추가되지 않은 경우와 추가된 경우를 비교해보면 약 1~6% 정도의 오차를 낮추는 보정 효과를 확인하였으며, MNSM으로 평가한 미입계도가 이론적인 미입계도에 더욱 근사하게 평가되는 것을 확인하였다.

## 감 사

이 논문은 산업자원부 대학 전력연구센터 육성·지원 사업과 교육인적자원부 Post BK-21 사업의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 관계 기관께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 서두환 외. "TRIGA Mark-II & -III 원자로 운영", KAERI/MR-166/89, 한국원자력연구소, 1990.
2. Kim, H.; *et al.* "Design characteristics and startup tests of HANARO", J. Nucl. Sci. and Tech., 1996, 33, 527.
3. 이은기 외. "경수로 미입계도 감시 기술개발", 한전전력연구원, 2005.
4. Tsuji, M.; *et al.* "Subcriticality measurement by neutron source multiplication method with a fundamental mode extraction", J. Nucl. Sci. and Tech., 2003, 40, 158.
5. Greenspan, E.; "A generalized source multiplication method", Transaction of the American Nuclear Society, 1971, 14.
6. 이원근. "AGN-201 원자로 실험", 경희대학교, 2005.
7. Naing, W.; *et al.* "The effect of neutron source distribution on subcriticality measurement of pressurized water reactors using the modified neutron source multiplication method", J. Nucl. Sci. and Tech., 2003, 40, 951.
8. Naing, W.; *et al.* "Subcriticality measurement of pressurized water reactors by the modified neutron source multiplication method", J. Nucl. Sci. and Tech., 2003, 40, 983.
9. Alcouffe, R.E.; *et al.* "PARTISN: A time-dependent, parallel neutral particle transport code system", LA-UR-05-3925, Los Alamos National Laboratory, 2005.
10. Gil, C.S. "KASHILL199N: A multi-group library for thermal reactor design and analysis based on ENDF/B-", 한국원자력연구소, 2005.
11. MacFarlane, R.E. "TRANSX 2: A code for interfacing MATXS cross-section libraries to nuclear transport codes", LA-12312-MS, Los Alamos National Laboratory, 1992.