2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

공명이탈단면적 해석적 방법을 사용한 MC²-2 코드의 핵연료집합체 비균질효과 분석 모델 개선

Improvement of The Fuel Assmebly Heterogeneity Analysis Model of MC²-2 Code Using an Analytic Method of Resonance Escape Cross Sections

장진욱, 김상지, 이기복, 김영일
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료집합체의 비균질성을 평가하는데 있어 MC^2-2 코드는 단일 핵연료봉을 모델로 하고 핵연료봉 격자 구조의 쉐도우잉 효과는 Dancoff 보정을 포함하는 Bell 보정인자에 의해서 고려가 된다. 이 모델은 미리 계산된 핵연료집합체의 Bell 보정인자를 필요로하고 덕트와 같은 집합체 내부 구조 물질의 효과를 나타내기에는 부적절하다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 핵연료집합체의 annulus 모델을 제안하고 해석적 공명이탈단면적 계산 방법을 이 모델에 적용하였다. 핵연료집합체 모델의 유용성을 평가하기 위하여 MC^2-2/ONEDANT 코드로 임계계산을 수행하였고 비균질효과를 MCNP의 결과와 비교하였다. 비교 결과 개선된 모델은 기존의 MC^2-2 모델보다 핵연료집합체의 비균질효과를 더욱 정확히 표현할 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract

The MC^2-2 code models a single fuel rod. The shadowing effect due to the lattice geometry of fuel rods is considered using the Bell factor together with the Dancoff correction to evaluate the heterogeneity of a fuel assembly. This model requires a pre-calculated Bell factor of the considered assembly and is inappropriate in representing the effect of other structural materials in the fuel assembly such as a duct. To overcome this drawback the annular model of the fuel assembly is proposed and an analytic method accounting for resonance escape is applied to the model. To evaluate the validity of the fuel assembly model, a criticality calculation was performed using MC^2-2/ONEDANT and heterogeneity effect is compared with that of MCNP. The results obtained show that the improved MC^2-2 herein can represent the heterogeneity of a fuel assembly more accurately than the original one.

1 서론

공명흡수 계산은 단면적 계산의 정확도에 주요한 영향을 미친다. 비균질 격자에서는 더욱 문제가 야기되는데 이를 해결하기 위해서 몬테칼로 방법이 그 해결책이 될 수 있으나 많은 계산시간이 소요된다. 따라서 실제적인 계산에서는 그 보다 더 간단한 방법에 의존하고 있다.

비균질격자의 공명흡수 계산에 사용되는 실제적인 첫번째 방법은 체적항과 표면적항의 흡수를 분리하는 것이다. 체적항은 핵연료 내부에서 공명영역으로 산란된 중성자의 흡수를 나타내는 것이고, 표면적항은 감속재에서 공명영역으로 산란된 중성자가 흡수되고 나서 핵연료로 들어가는 것을 나타내는 것이다. 촘촘히 밀집된 격자에서 핵연료로 들어오는 공명영역의 중성자류(in-current of resonance neutrons)는 인접한 핵연료봉들의 쉐도우잉 효과(shadowing effect)에 의해서 무한 감속재 속의 단일 핵연료로 들어오는 중성자류보다 줄어든다는 것을 Dancoff와 Ginsburg는 밝혔다[1].

이 물리적인 모델에서 Dancoff 효과는 핵연료의 유효표면적(effective surface)의 감소로 해석될 수 있다.

$$S_{eff} = (1-C)S \tag{1}$$

여기서, S_{eff} 는 유효표면적, S는 실제표면적, C는 Dancoff correction을 나타낸다. 이 표기는 다르게 사용될 수도 있는데 통상 Dancoff factor는 $D = 1 - C$ 로 나타낸다.

다음의 방법으로는 충돌확률의 개념에 의한 공명흡수 계산 방법이다. 그리고 비균질 문제는 등가이론에 의해서 균질 문제로 흔히 전환된다. Dancoff 효과는 여기서도 여전히 고려가 되는데, 이 경우 D는 핵연료와 감속재 인접면을 $\cos\theta$ 분포를 가지고 감속재로 들어오는 중성자가 감속재에서 충돌할 확률로 해석된다. 그리고 이 두 정의는 동일한 의미를 가진다.

이러한 모델들은 결국 핵연료봉 하나에 대한 모델을 설정한 후 인접한 핵연료봉의 효과를 Dancoff factor로 나타내는 것으로, Dancoff factor의 정확한 값을 미리 알고 있어야 한다. MC^2-2 코드에서 Dancoff factor는 자체적으로 계산이 된 다음, 다음의 식에 의해서 공명이탈단면적을 계산한다.

$$\Sigma_e^* = \Sigma_e \frac{a_1(1-c)}{1+(a\quad -1)C} \tag{2}$$

여기서, a_1, a_2 는 Bell approximation을 나타낸다. MC^2-2 코드에서는 Bell approximation이 입력자료로 주어져서 Dancoff facor를 보정하는 역할을 한다. 결국 입력자료로 사용될 Bell approximation의 정확도에 따라서 공명이탈단면적의 정확도가 결정된다. 또한 MC^2-2에서 사용하는 모델은 집합체가 무한한 핵연료핀으로 구성되어 있다고 가정한 것으로 핵연료집합체 구성하고 있는 물질을 모두 고려하기에는 적합하지 못하다. 특히 덕트와 같이 핵연료봉을 둘러싸고 있는 집합체 구조 물질의 효과를 나타내기에는 부적절하다.

핵연료봉에 대한 공명이탈단면적을 계산하는 한 방법으로 핵연료봉 내부를 annulus의 영역으로 나누어 등가이론과 blackness의 점근 특성을 이용하여 각 영역에 대한 공명이탈단면적을 계산하는 방법을 Stoker와 Weiss는 제안하였다[2].

본 연구에서는 핵연료집합체의 비균질효과를 적절히 표현하기 위하여 핵연료집합체 내부 물질을 체적가중치를 적용한 여러 개의 annnlus로 재구성한 기하학적 모델을 사용하고, Stoker와 Weiss가 제안한 핵연료봉 annulus의 공명이탈단면적 계산 방법을 확장하여 집합체의 annulus에 대한 공명이탈단면적 계산 방법을 적용함으로써, MC^2-2 코드에서 Bell approximation과 같은 값을 입력으로 사용하지 않고도 계산된 단면적의 정확도를 유지하고자 한다.

2장에서는 공명이탈단면적을 해석적으로 계산하는 방법에 대하여 서술하였는데, 단일 핵연료봉 내부를 여러 개의 annulus 영역으로 나누었을 경우 각 annulus의 공명이탈단면적을 나타내는 방법에 대하여 설명하였고 이를 확장하여 핵연료집합체를 annulus의 형태로 재구성하였을 경우 공명이탈단면적을 표현하는 방법에 대하여 설명하였다. 3장에서는 2장에서 나타낸 핵연료집합체 annulus 영역의 공명이탈단면적 계산 방법을 MC^2-2 코드에 적용하여 그 결과를 MCNP 코드로 계산한 것과 비교하였다. 4장에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대하여 언급하였다.

2 공명이탈단면적 해석적 방법

2.1 핵연료봉 annulus의 공명이탈단면적의 해석적 방법

핵연료집합체의 비균질 문제에 대한 공명이탈단면적을 계산하는 방법에 대하여 알아보기에 앞서, 단일 핵연료봉 내부의 annulus에 대한 공명이탈확률[5, 6]에 대하여 살펴보자. 무한영역의 감속재에 핵연료봉이 하나가 있는 경우, 그 내부의 annulus i에서 핵연료 표면으로의 공명이탈확률은 그 annulus의 first flight blackness $\gamma_i(E)$ 항을 사용하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_{esc}^{i}(E) = \frac{\gamma_i(E)}{\Sigma_{ti}(E)L_i} \tag{3}$$

여기서, $L_i = 4V_i / S_o$ 로 평균코드길이(mean chord length)를 말한다. $\Sigma_{ti}(E)$ 는 핵연료 내부 i 영역의 거시총단면적을 말한다.

두 영역의 blackness는 각각의 blackness의 합으로 표현할 수 있다. 또한 blackness는 무차원의 $\rho = r / R$, $R\Sigma_{tf}$ 의 함수로 표현하는 것이 용이하므로 앞 식의 blacknes는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_i = \gamma(\rho_i, R\Sigma_{tf}) - \gamma(\rho_{i-1}, R\Sigma_{tf}) \tag{4}$$

여기서, R 은 핵연료봉의 반경으로 $\rho_i = r_i / R$ 가 된다.

평균코드길이는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_i = 4V_i / S_o = \frac{4(\pi r_i^2 - \pi r_{i-1}^2)}{2\pi R} = 2R(\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2) \tag{5}$$

앞의 식 (3), (4), (5)를 결합하여, annulus i의 공명이탈확률을 다시 나타내면 다음과 같다.

$$P_{esc}^i(E) = \frac{\gamma(\rho_i, R\Sigma_{tf}) - \gamma(\rho_{i-1}, R\Sigma_{tf})}{2R\Sigma_{tf}(\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2)} \tag{6}$$

핵연료봉 내부 영역의 공명이탈확률을 수식으로 표현하는데 있어서 blackness를 어떤 방법으로 표현하느냐가 관건이 된다. 따라서 공명이탈확률의 점근 특성을 살펴봄으로써 blackness가 어떠한 함수의 특성을 가져야 하는 지 알아보도록 하자. 영역이 나뉘지 않은 solid 형태의 핵연료봉은 Carlvik의 공식으로 표현하면 다음과 같다[4].

$$P_{esc}(x) = \frac{4}{x+2} - \frac{3}{x+3} \tag{7}$$

여기서 $x = L\Sigma_{tf}$ 이다.

영역이 나뉘지 않은 solid 형태의 핵연료봉의 경우 그림 1에서 나타낸 바와 같이 $\Sigma_{tf} \to \infty$ 로 될 경우 blackness는 1이 되어 공명이탈확률은 $1/(\Sigma_{tf} L)$ 점근 특성을 가진다. 영역이 annulus로 나뉘어진 핵연료봉은 $\Sigma_{tf} \to \infty$ 로 될 때 가장 바깥 annulus에서만 blackness가 1이 되어 solid 형태와 동일한 점근 특성을 가지고, 내부 annuli에서는 $\Sigma_{tf} \to \infty$ 로 될 때 blackness는 0으로 점근한다. 내부 annuli의 공명이탈확률은 $1/(\Sigma_{tf} L)$ 보다 빠르게 0으로 점근하는데 이 기울기는 지수함수 형태이다. 또한 핵연료, 감속재, 핵연료의 3 영역의 annulus인 경우에도 감속재와 접한 영역은 외부, 내부 모두

공명이탈확률이 $1/\Sigma_{tf}$ 점근 특성을 보인다. 따라서 공명이탈확률의 점근 특성은 감속재와 접한 영역에서는 $1/\Sigma_{tf}$ 점근 특성을 가지고, 감속재와 접하지 않은 영역에서는 지수함수 형태로 감소하는 점근 특성을 가지는 것으로 일반화 할 수 있다.

핵연료봉 annuli에서 공명이탈확률이 $1/\Sigma_{tf}$ 점근 특성의 전통적인 등가이론을 따르지 않고 두 가지의 점근 특성을 가지는 것을 나타내는 방법으로 Stoker와 Wiess는 다음과 같은 방법을 제안하고 있다. 각각의 확률이 $1/\Sigma_{tf}$ 점근 특성을 가지는 두 확률의 차이로 P_{esc}를 표현하면 $1/\Sigma_{tf}$ 특성을 가지면서도 빠르게 점근하는 특성도 고려가 될 수 있다. 어떤 형태의 균질 영역의 경계점에서의 blackness는 특성함수 $R(x)$로 표현된다고 가정하자. x는 평균자유행정(mean free path)의 단위로 표현되는 경계점에서의 코드길이의 평균값(average chord length)로 $\bar{l}\Sigma_{tf}$의 함수로 표현된다.

원통 내부에서 무차원 반경 ρ 위치의 blackness $\gamma(\rho, R\Sigma_{tf})$를 분수함수 형태의 근사화 하기위해서 그림 2와 같은 반원통의 영역을 살펴보자.

Blackness는 앞에서 설명한대로 두 항의 차이로 나타내면 다음과 같다.

$$\gamma(\rho_i, x) = \gamma_{BC}(\rho_i, x) - \gamma_{AB}(\rho_i, x) \tag{8}$$

여기서, γ_{BC}와 γ_{AB}는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 각각 “OBC”와 “OAB” 영역의 blackness를 나타낸다. $\gamma_{\alpha}(\alpha = AB, BC)$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{\alpha} \approx X(1 - e^{-\bar{l}_{\alpha}\Sigma_{tf}}) \tag{9}$$

여기서 X는 들어오는 중성자가 "OAB" 또는 "OBC" 영역을 보게 될 비율을 나타내는데 단지 ρ에 대한 함수로 $X(\rho) = \rho$로 표현할 수 있다. 그리고 l_{α}는 O 지점에서 표면 α까지의 평균 코드를 나타내는 것으로 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\bar{l}_{\alpha}(\rho) = \frac{2R}{\pi}\left(\sqrt{1-\rho^2} + \frac{1}{\rho}\sin^{-1} \pm \frac{\pi}{2}\rho\right) \tag{10}$$

여기서 “+”는 $\alpha = BC$인 경우이고 “-“는 $\alpha = AB$인 경우를 말한다.

Blackness의 근사식 γ_{α}에서 지수함수 항 $1 - e^{-x}$를 $x/(1+x)$로 단일항의 유리식으로 근사하면, $\gamma(\rho, x)$는 2항의 유리식으로 근사할 수 있다. Blackness를 특성함수를 사용하여 일반화시킨 형태는 다음과 같다.

$$\gamma(\rho, x) \approx X(\rho)R(x) \tag{11}$$

$$R(x) = x\sum_{n}^{N_R} a_n \frac{b_n}{x + b_n} \tag{12}$$

특성함수의 상수 a_n 과 b_n 는 임의의 값으로 $x \to 0$ 일 경우 $R(x)/x \cong P_{esc}(x) \to 1$ 로 되고 $x \to \infty$ 일 경우 $R(x) \to 1$로 점근해야 하고 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\sum_n a_n = 1 \quad \sum_n a_n b_n = 1 \tag{13}$$

이 조건으로 x가 큰 값인 경우 특성함수는

$$R(x \to \infty) = 1 - \frac{1}{x}\sum a_n b_n^2 \tag{14}$$

로 점근한다. 식 (8)과 (14)로부터 $\Sigma_{tf} \to \infty$ 이면 $\gamma(\rho, R\Sigma_{tf})$ 는 $(1/\bar{l}_{AB} - 1/\bar{l}_{BC})/\Sigma_{tf}$ 로 점근한다. 따라서 P_{esc}^i 는 2차식의 특성으로 0으로 점근한다. 내부 annulus에서 공명이탈확률이 지수함수로 감소하는 것에 비해 2차식으로의 근사는 다소 차이가 있으나 2차식으로도 내부 영역의 점근 특성을 잘 따른다.

식 (6)과 (8)에 특성함수 식 (12)를 결합하면 핵연료봉의 annulus i 영역의 공명이탈확률을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{esc}^i(E) = \frac{1}{\Sigma_{t,i}(E)L_i}\left\{\rho_i\left[R(x_{BC}^i) - R(x_{AB}^i)\right] - \rho_{i-1}\left[R(x_{BC}^{i-1}) - R(x_{AB}^{i-1})\right]\right\} \tag{15}$$

그림 3은 식 (15)를 사용하여 핵연료봉을 5개의 annulus로 나누었을 경우 blackness를 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 점근 특성이 핵연료 내부와 바깥 영역에서 구분되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 각 영역의 공명이탈확률을 표시한 것으로 solid 인 경우와 비교해서 바깥 영역은 공명이탈확률이 높고 내부 영역은 공명이탈확률이 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. 그림 5는 각 영역의 공명이탈단면적을 표시 한 것이다.

2.2 핵연료집합체의 공명이탈단면적

핵연료집합체를 여러 개의 annulus로 구성한 경우, 영역 i에서 공명이탈한 중성자가 영역 j에서 충돌할 확률은 식(11)의 blackness 항을 식(15)과 같이 변형하여 얻을 수 있고, 특성함수를 사용하면 식(16)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{esc}^{ij} = \frac{\gamma(\rho_{ij-1}, x_{ij-1}) - \gamma(\rho_{i-1j-1}, x_{i-1j-1})}{2r_{j-1}\Sigma_{tf,i}(\rho_{ij-1}^2 - \rho_{i-1j-1}^2)} - \frac{\gamma(\rho_{ij}, x_{ij}) - \gamma(\rho_{i-1j}, x_{i-1j})}{2r_j\Sigma_{tf,i}(\rho_{ij}^2 - \rho_{i-1j}^2)} \tag{16}$$

특성함수를 사용하면 공명이탈확률은 식(19)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{esc}^{ij} = & \frac{1}{\Sigma_{tf,i}(E)L_{ij-1}}\left\{\rho_{ij-1}\left[R(x_{BC}^{ij-1}) - R(x_{AB}^{ij-1})\right] - \rho_{i-1j-1}\left[R(x_{BC}^{i-1j-1}) - R(x_{AB}^{i-1j-1})\right]\right\} \\ & - \frac{1}{\Sigma_{tf,i}(E)L_{ij}}\left\{\rho_{ij}\left[R(x_{BC}^{ij}) - R(x_{AB}^{ij})\right] - \rho_{i-1j}\left[R(x_{BC}^{i-1j}) - R(x_{AB}^{i-1j})\right]\right\} \end{aligned} \tag{17}$$

여기서 $L_{ij} = 2r_j(\rho_{ij}^2 - \rho_{i-1j}^2)$, $\rho_{ij} = r_i / r_j$ 를 나타낸다.

공명이탈단면적을 적용하는 예로, 2개의 핵연료 영역을 가지는 구조에 대하여 공명이탈단면적을 계산해 보자. 그림 6과 같이 핵연료는 영역 1과 영역 3으로, 감속재는 영역 2와 영역 4로 구성되어 있다. 핵연료 영역 1의 반경 비율은 0.447이다. 감속재 영역 2는 핵연료 영역 1과 3 사이에 위치하고 Δr 의 크기를 가진다. 감속재의 거시단면적은 영역 2와 4 모두 0.5cm^{-1}로 고정되어 있다. 이 경우 핵연료영역 1의 전체 공명이탈확률은 영역 1에서 공명이탈하여 영역 2에서 충돌할 확률(P_{12})과 영역 1에서 공명이탈하여 영역 4에서 충돌할 확률(P_{14})을 합한 것이 된다. 그림 6은 핵연료영역 1과 3의 단면적 변화에 따른 영역 1의 공명이탈단면적의 변화를 도식화 한 것이다. 점선은 바깥쪽 핵연료 영역이 black인 경우로, 영역 1의 전체 공명이탈확률은 P_{12}와 동일하다. 그림 6에서 보는 바와 같이 감속재 영역이 2개인 경우에도 점근특성을 잘 따름을 알 수 있다. 따라서, 핵연료 영역 i 의 공명이탈확률은 i 영역에서 감속재 영역 j 로 갈 수 있는 영역의 합으로 표현할 수 있다.

3 핵연료집합체 비균질효과 비교 계산

핵연료집합체의 공명이탈단면적 해석 모델이 비균질 모델 해석에 정확도를 증진시킬 수 있는 지 확인하기 위하여, 공명이탈단면적 해석 모델을 MC^2-2 코드에 삽입하여 기존 MC^2-2 코드 및 MCNP 코드[5] 결과와 비교계산을 수행하였다.

비균질효과 비교 계산에 사용된 대상은 KALIMER-150[6] 구동핵연료로 제원은 표 1과 같다. 핵연료집합체 비균질모델 구성은 핵연료 슬러그 영역(10개의 annulus)과 피복관과 냉각재로 균질화한 영역(10개의 annulus) 그리고 그 바깥으로 덕트영역과 덕트간의 소듐갭 영역을 두어 총 22개의 annulus로 구성하였다. MC^2-2로 균질모델과 비균질모델의 80군 단면적을 생산한 다음, ONEDANT 코드[7]로 유효증배계수를 계산하여 균질모델과 비균질모델의 유효

증배계수의 차이 Δk 를 비교하였다. 그리고 MCNP 코드로 같은 모델을 구성하여 비교계산을 수행하였다.

표 2와 같이 MCNP로 핵연료집합체를 실제와 동일하게 모델한 경우 Δk 는 0.00290이다. 이에 반해 annulus로 모델을 구성한 경우 MCNP의 Δk 는 0.00385로 나타났다. 기존 MC^2-2 계산은 Bell approximation을 1.0으로 그 값을 모른다고 가정한 가정한 것으로 Δk 는 0.00152이다. 공명이탈단면적 해석 모델을 적용한 개선된 MC^2-2 계산 결과는 Δk 가 0.00207로 개선된 MC^2-2가 MCNP 결과와 Δk 가 더 근접하는 것으로 나타났다.

4 결론 및 향후 연구방향

핵연료집합체의 비균질성을 평가하는데 있어 MC^2-2 코드는 단일 핵연료봉을 모델로 하고 Dancoff 보정을 포함하는 Bell 보정인자에 의해서 핵연료 격자구조에 대한 고려가 이루어진다. 이 모델은 미리 계산된 핵연료집합체의 Bell 보정인자를 필요로하고 덕트와 같은 집합체 내부 구조 물질의 효과를 나타내기에는 부적절하다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 연료집합체 내부물질을 체적가중치를 적용한 여러 개의 annnlus로 재구성한 기하학적 모델을 사용하고, Stoker와 Weiss가 제안한 핵연료봉 annulus의 공명이탈단면적 계산 방법을 확장하여 집합체의 annulus에 대한 공명이탈단면적 해석 방법을 MC^2-2 코드에 적용하였다.

MC^2-2/ONEDANT 코드와 MCNP 코드를 사용하여 KALIMER-150의 구동핵연료의 비균질효과를 Δk 로 비교한 결과, 공명이탈단면적 해석 모델이 포함된 개선된 모델은 기존의 MC^2-2 모델보다 Δk 가 더 근접하는 것으로 나타났다. 핵연료집합체를 체적가중치를 적용한 여러 개의 annulus로 재구성 할 때 표면적의 크기가 달라진 것에 대한 효과가 고려되지 않아 이에 대한 연구를 향후 수행하면 핵연료집합체의 비균질 모델을 보다 실질적으로 표현할 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] I. Carlvik, “The Dancoff Correction in Square and Hexagonal Lattices,” *Nucl. Sci. Eng.* 29, 325-336, 1969.

[2] H. Henryson II, B. J. Toppel, and C. G. Stenberg, "MC^2-2 Code System for Calculating Fast Neutron Spectra and Multigroup Cross-Section," PSR-350 MC2-

2, ANL, 2000.

[3] C. C. Stoker and Z. J. Weiss, “Spatially Dependent Resonance Cross Sections in a Fuel Rod,” *Ann. Nucl. Energy* Vol. 23, No. 9, 765-778, 1996.

[4] R.J.J. Stamm’ler and M.J. Abbate, “Methods of Steady-state Reactor Physics in Nuclear Design,” Academic Press New York, ISBN 0-12663320-7, 1983.

[5] J. F. Briesmeister, et al., "MCNP4C2 - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C," LA-13709-M, 2000.

[6] 김영인, 송훈, 김영균, “Nuclear and Thermal-Hydraulic Design and Analysis of KALIMER Breakeven Equilibrium Core," LMR/CD112-ER-01, KAERI, 2000.

[7] R. E. Alcouffe, et al., "DANTSYS: A DiffusionAccelerated Neutral Particle Transport Code System," LA-12969-M, LANL, 1995.

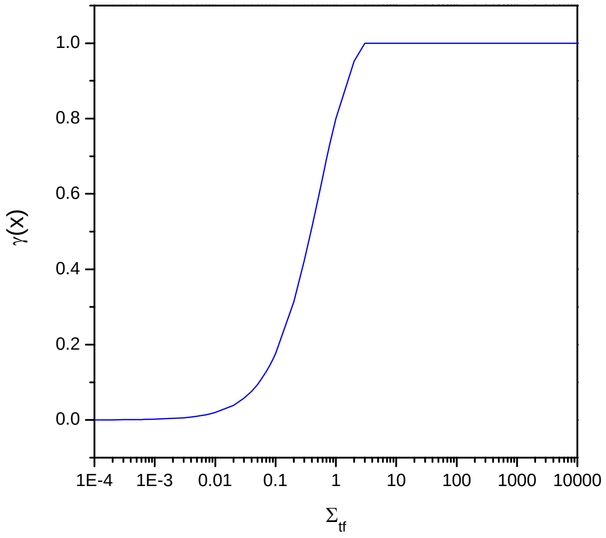

그림 1 Solid 핵연료봉에서의 blackness

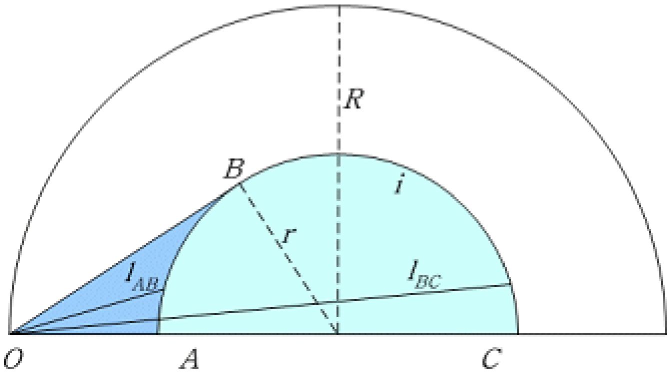

그림 2 Half cylinder에서 평균코드길이

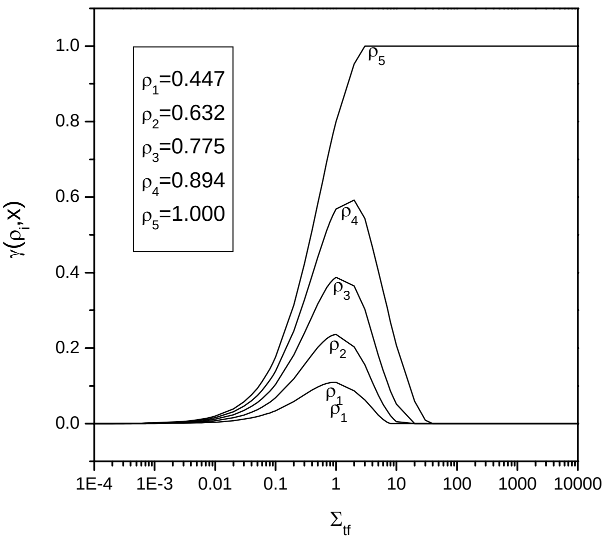

그림 3 핵연료봉 annulus의 blackness $\gamma(\rho, x)$

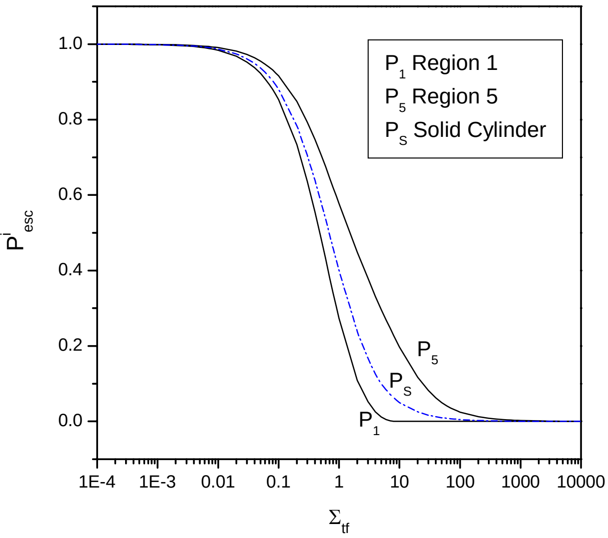

그림 4 핵연료봉 annulus의 공명이탈확률

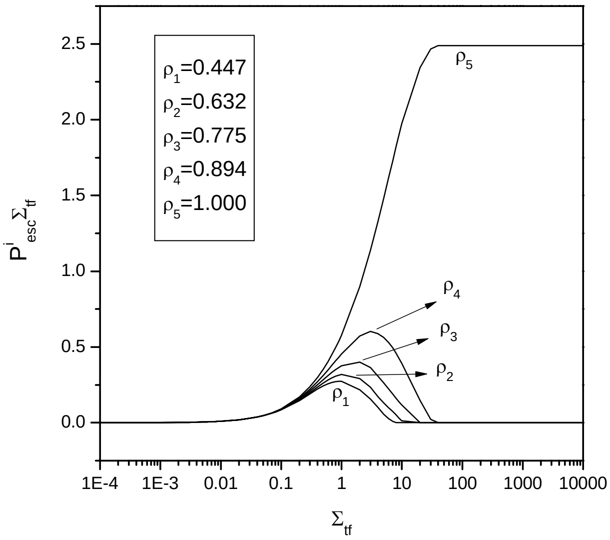

그림 5 핵연료봉 annulus의 공명이탈단면적

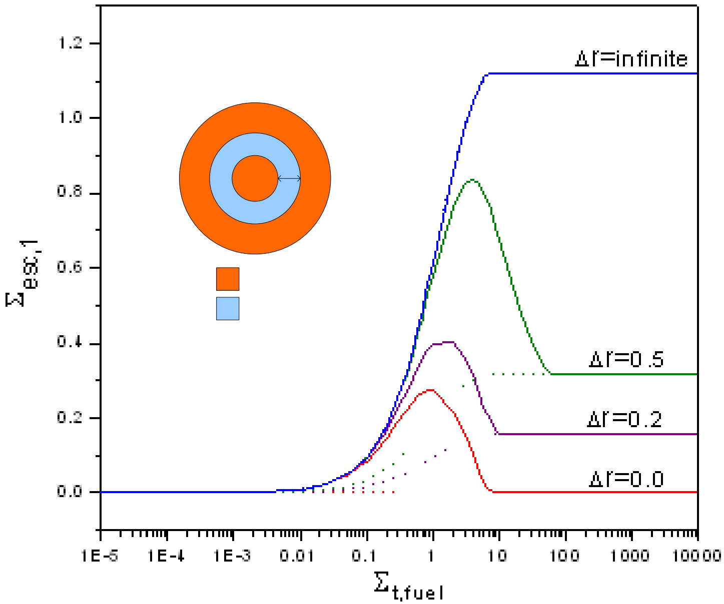

그림 6 단면적 변화에 따른 핵연료영역 1의 공명이탈단면적

표 1 KALIMER 구동핵연료 제원

ASSEMBLY DATA	
Number of Pins per Assemby	271
Fuel smeared density (%)	75.0%
Duct Material	HT9
Duct Wall Thickness (cm)	0.37
Duct Outer Flat to Flat (cm)	15.7
Duct Inner Flat to Flat (cm)	14.96
Active Length (cm)	100.00
Fuel Element Length (cm)	346.68
Gap Distance between Ducts (cm)	0.40
Assembly Lattice Pitch (cm)	16.10
Assembly Area (cm^2)	224.482
PIN DATA	
Fuel Type	U-Pu-10%Zr
Fuel Fabrication Density (%TD)	100.0
Cladding Material	HT9
Pin Overall Length (cm)	346.8
Pin Outer Diameter (cm)	0.74
Pin Inner Diameter (cm)	0.63
Cladding Thickness (cm)	0.055
Fuel Slug Diameter (cm)	0.546
Fuel Cladding Gap (cm)	0.042
Pin Pitch (cm)	0.89
Pin P/D Ration	1.203
Wire Wrap Diameter (cm)	0.14
Wire Wrap Pitch (cm)	20.49
Bond	Na

표 2 비균질효과 비교계산

	MCNP (Real 모델)	MCNP (Annulus 모델)	MC^2-$2^{\dagger}$/ ONEDANT (기존)	MC^2-2/ ONEDANT (개선)
비균질모델	1.72184, 0.00048	1.72279, 0.00054	1.71186	1.71241
균질모델	1.71894, 0.00058	1.71894, 0.00058	1.71034	1.71034
Δk	0.00290	0.00385	0.00152	0.00207

†Bell factor = 1.0