

국부적 미시연소에 의한 노드내 스펙트럼 이력구배 효과 보정

조진영, 노재만, 주형국, 정형국, 손동성
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

이 연구의 목적은 혼합핵연료 장전노심에서와 같이 스펙트럼이 상이한 인접핵연료의 영향으로 나타나는 노드내 스펙트럼 이력효과를 보정해 주고자 하는 것이다. 이를 위해 이 연구에서는 노드내 13개 지역에서 국부적 미시연소를 수행하여 스펙트럼 이력이 각각 다른 13개의 독립적인 핵단면적을 구하였고 이로부터 노드내 핵단면적의 분포를 다항식으로 근사하였다. 스펙트럼 이력구배 효과의 보정은 노드내 중성자속 가중평균 핵단면적과 노드내 핵단면적의 분포에 따른 불연속인자로 보정하였다. 이 스펙트럼 이력구배 효과 보정방법을 혼합핵연료와 우라늄핵연료가 Checkerboard 형으로 무한히 장전된 경우에 대하여 검증계산을 수행하여 참조해인 CASMO-3 결과와 비교하였다. 스펙트럼 이력분포가 고려되지 않은 경우는 연소도 40 MWD/kgHM에서 노심 반응도에서 약 0.38%, 봉출력에서 최대 11.2%, 평균 4.3%의 오차를 보였으나 스펙트럼 이력분포를 반영함으로써 노심 반응도에서 0.12%, 봉출력에서 최대 4.9%, 평균 1.3%의 오차를 보였다.

1. 서 론

원자로 노심계산을 위해서는 각 노드별로 여러 핵종의 수밀도와 미시단면적의 곱들의 합으로 표현되는 거시핵단면적을 필요로 한다. 이러한 거시단면적은 일반적으로 경계조건으로 중성자류가 영인 이상적인 조건을 사용한 단일집합체 계산결과를 이용한다. 그러나 실제 노심내에서는 각 핵연료집합체들이 이러한 이상적 조건과는 다른 조건을 가지며 그 결과로 단일집합체 계산에 사용된 스펙트럼과는 상이한 스펙트럼을 갖는다. 이러한 스펙트럼의 차이에 의한 스펙트럼 이력효과는 연소가 진행됨에 따라 커지게 되며 특히 혼합핵연료 장전노심과 같이 핵연료간의 스펙트럼의 차이가 심한 경우 더욱 두드러진다. 따라서 스펙트럼 변화 이력을 제대로 고려해 주지 않으면 노드내의 핵종의 수밀도 예측에 오차가 있게 되며 그 결과로 노드내 거시단면적 오차를 유발하게 된다.

노드내 핵종 수밀도벡터에 대한 스펙트럼 이력효과를 보정하기 위해 일반적으로 사용하는 방법은 미시연소법으로 핵연료집합체내 주요 핵종의 수밀도를 노달 계산의 스펙트럼을

이용해 구한다. 그리고 노드내의 지역별 스펙트럼 분포에 따른 노드내 스펙트럼 이력구배효과를 보정하기 위해 현재는 국부적 거시연소에 의한 연소도 보정법이 사용되고 있다.[1][2] 그러나 국부적 거시연소에 의한 연소도 보정법은 스펙트럼 이력구배에 의한 핵단면적 보정치가 연소도구배에 의한 핵단면적 보정치와 같다는 가정이 포함되어 있어 스펙트럼이력을 정확히 묘사할 수 없다는 단점이 있다.

이 연구에서는 혼합핵연료장전노심에서와 같이 인접핵연료의 스펙트럼 영향이 매우 크며 또한 노드내 스펙트럼이 급격히 변하는 경우의 노드내 스펙트럼 이력효과를 적절히 보정해 주고자 한다. 이를 위해 이 연구에서는 노드내 13개지역에서 국부적 미시연소를 수행하였으며 이로부터 스펙트럼 이력분포를 다항식으로 근사하였다. 스펙트럼이력 분포에 따른 스펙트럼이력효과 보정은 노드내 중성자속 가중평균 핵단면적과 노드내 핵단면적의 비균질에 따른 불연속인자로 보정하였다.

2. 핵단면적 근사

그림 1은 노드내 스펙트럼 이력분포 근사를 위해 필요한 노드내 연소점 및 그 연소점에서의 핵단면적을 나타낸 것이다. 이들은 노드평균 핵단면적 1개, 면평균 핵단면적 4개, 노드 꼭지점에서의 핵단면적 4개와 노드내부점에서의 핵단면적 4개이다. 지역별 핵단면적을 사용하면 노드내 핵단면적을 다음과 같은 Legendre 다항식으로 근사할 수 있다.

$$\Sigma_0^n(\vec{r}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 s_{\omega ij}^n P_i\left(\frac{x}{h}\right) P_j\left(\frac{y}{h}\right) + \sum_{i=3}^4 s_{\omega i0}^n P_i\left(\frac{x}{h}\right) + \sum_{j=3}^4 s_{\omega 0j}^n P_j\left(\frac{y}{h}\right) \quad (1)$$

여기서

$$P_0(t) = 1,$$

$$P_1(t) = 2t - 1,$$

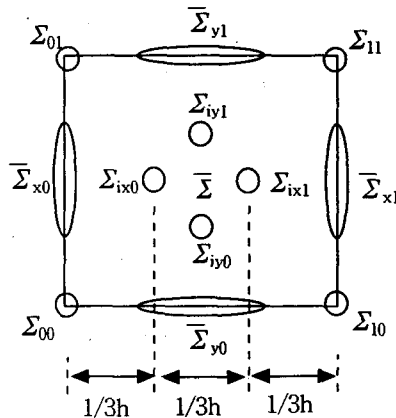


그림 1. 핵단면적근사를 위한 연소점

$$P_2(t) = -6t^2 + 6t - 1,$$

$$P_3(t) = 20t^3 - 30t^2 + 12t - 1,$$

$$P_4(t) = 70t^4 - 140t^3 + 90t^2 - 20t + 1.$$

위의 근사식을 이용하면 그림 1에 나타난 각 핵단면적을 식 (1)의 전개상수로서 나타낼 수 있다. 또한 식 (1)의 전개상수를 그림 1의 각 핵단면적의 함수로서 나타낼 수 있으며 예를 들면 다음과 같다.

$$s_{a01} = \frac{9}{160}(\Sigma_{01} + \Sigma_{11} - \Sigma_{00} - \Sigma_{10}) + \frac{27}{40}(\Sigma_{14} - \Sigma_{13}) + \frac{13}{80}(\bar{\Sigma}_{y1} - \bar{\Sigma}_{y0}) \quad (2)$$

한편, 중성자 확산계수와 중성자 산란단면적은 스펙트럼 이력에 따라 크게 변하지 않으므로 노드내에서의 스펙트럼 이력분포에 크게 영향을 받지 않는다. 따라서 이 연구에서는 중성자 흡수단면적과 핵분열단면적에 대해서만 위와 같이 전개하기로 한다.

3. 노드내 중성자속 가중평균 핵단면적 및 스펙트럼이력구배에 따른 불연속인자

비균질 노드의 경우 중성자속 가중평균 핵단면적은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\Sigma}_a^{FW} = \frac{\int_{V^n} \Sigma(\vec{r}) \phi(\vec{r}) d\vec{r}}{\int_{V^n} \phi(\vec{r}) d\vec{r}} \quad (3)$$

여기서 중성자속 분포는 엄밀한 의미에서 스펙트럼 이력구배를 반영한 노드에 대한 해를 사용하여야 한다. 그러나 스펙트럼 이력구배를 반영한 노드에 대해 해석함수 전개 노달법의 해를 구하기가 어렵기 때문에 대체 방법으로서 미세격자법, 다항식전개법 등이 사용되고 있다. 그러나 미세격자법은 시간이 많이 소요되며 다항식 전개법은 혼합핵연료 사용노심에서는 노드 경계면에서 중성자속 분포오차가 크게 나타난다. 따라서 이 연구에서는 균질노드에 대한 해석함수 전개 노달법의 해를 핵단면적 가중평균을 위해 사용하였으며 그 결과를 다항식전개법에 의한 결과와 비교하였다.

한편, 불연속인자는 스펙트럼 이력구배를 반영한 노드의 노드경계 중성자속과 이로부터 식(3)에 의해 계산된 중성자속 가중평균 핵단면적을 사용한 균질노드의 노드경계 중성자속으로부터 도출된다. 스펙트럼 이력구배를 반영한 노드 및 균질노드의 노드경계 중성자속을 구하기 위해 여기서는 노드내 중성자속분포를 아래와 같은 다항식으로 근사하였다.

$$\phi^n(\vec{r}) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij}^n P_i\left(\frac{x}{h}\right) P_j\left(\frac{y}{h}\right) + \sum_{i=3}^4 a_{i0}^n P_i\left(\frac{x}{h}\right) + \sum_{j=3}^4 a_{0j}^n P_j\left(\frac{y}{h}\right) \quad (4)$$

4. 수치계산 및 결과

위에서 설명한 연소도 구배효과 보정법의 검증을 위해 그림 2와 같이 우라늄핵연료와 혼합핵연료가 Checkerboard 형으로 무한히 장전된 가상노심에 적용하였다. 우라늄 핵연료와 혼합핵연료에 대한 노달노심계산용 핵단면적은 CASMO-3 코드를 이용하여 연소도의 함수로 구성하였으며 이를 이용하여 노달 노심계산을 CASE1, CASE2, CASE3로 나누어 수행하였다. CASE1은 스펙트럼 이력구배효과가 고려되지 않은 경우이며 CASE2는 균질노드의 해석함수전개법의 해를 이용해 중성자속 가중평균 핵단면적을 구한 경우이며 CASE3은 스펙트럼 이력구배를 반영한 노드에 대한 다항식전개법의 해를 이용해 중성자속 가중평균 핵단면적을 구한 경우이다. 참조해는 CASMO-3 Color-Set 계산결과로 하였으며 각 집합체를 17x17로 분할한 미세격자 해석함수전개법의 해를 참고적으로 사용하였다.

그림 3은 연소도에 따른 CASMO-3 코드의 노심 반응도 및 CASE1, CASE2, CASE3의 반응도 오차를 나타낸 것이다. CASMO-3 결과와 비교할 때 CASE1은 연소도 40 MWD/kgHM에서 약 0.38%의 반응도차를 보이며 CASE2 및 CASE3은 약 0.17%, 0.12%의 반응도차를 보여 CASE3의 경우가 가장 오차가 작게 나타났다. 그러나 미세격자 계산결과 비교해 볼 때는 CASE2의 결과가 약 0.05%의 오차를 보여 가장 오차가 작게 나타났다. 그림 4는 연소도 40 MWD/kgHM에서 집합체별 상대출력오차를 비교한 것이다. CASE1, CASE2, CASE3 모든 경우에서 매우 유사한 결과를 보였으며 미세격자 계산과 비교할 때 CASE2와 CASE3가 CASE1 보다 미세하나마 오차가 작음을 알 수 있다. 그림 5는 연소도 40MWD/kgHM에서의 집합체내 봉출력을 비교한 것이다. CASE1의 경우 최대 봉출력오차가 11.2%, 평균 오차가 4.3 % 로 나타났으며 CASE2 및 CASE3은 최대 봉출력오차가 4.9%, 평균오차가 1.3% 로 나타나 스펙트럼 이력구배 효과를 보정함으로써 최대오차에서는 약 2.3배, 평균오차에서는 3.3배정도 향상되었음을 알 수 있다.

이 연구에서는 특히 혼합핵연료 장전노심에서 두드러지는 스펙트럼 이력 구배효과와 보정모델을 CASE2, CASE3로 제시하였다. 노심 반응도 측면에서는 CASMO-3와 비교할 때 CASE3가 우수하게 나타났으나 미세격자 계산과 비교할 때에는 CASE2가 우수하게 나타났다. 집합체 출력과 봉출력측면에서는 CASE2와 CASE3가 유사한 결과를 보였다. CASE2와 CASE3 방법의 우수성을 검증하기 위해서는 다양한 문제에 적용해 그 결과를 검토해 보아야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. MASTER- α Methodology Manual, KAERI/TR-686/96.
2. J. M. Noh and N. Z. Cho, "Intranodal Burnup Gradient Correction in Analytic Function Expansion Nodal (AFEN) Method," Proc. Intl. Conf. on Mathematics and Computations, Reactor Physics and Environmental Analyses, Portland, Oregon, April 30 - May 4, 1995, vol. II, p.1435, American Nuclear Society (1995).

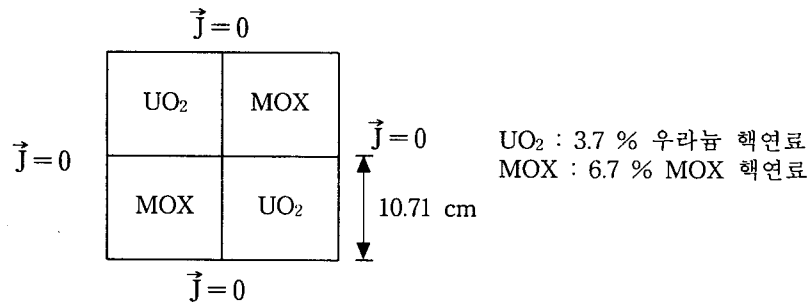


그림 2. 혼합핵연료 장전 노심

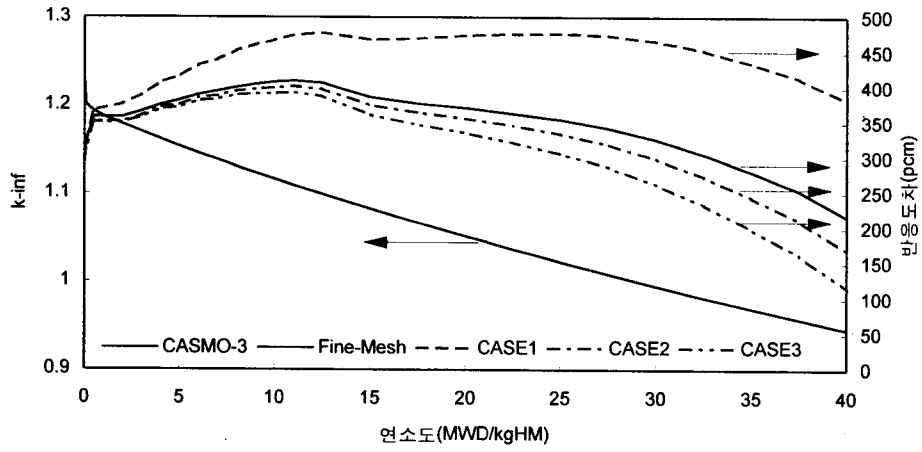


그림 3. 노심 반응도 및 반응도 오차

0.925	1.075	CASMO-3
0.931	1.069	Fine-Mesh
0.929	1.071	CASE1
0.930	1.070	CASE2
0.930	1.070	CASE3

그림 4. 연소도 40 MWD/kgHM에서의 집합체 상대출력

