

'95 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

탄소 피막 핵연료의 균질화 계산

이승기, 김명현

경희대학교

김영진

한국원자력연구소

요 약

이중 또는 삼중으로 탄소 피막된 핵연료 입자를 Graphite 소결체에 채워넣은 핵연료를 설계하고, 이에 대한 핵적 타당성을 검토하고자 하였다. 핵계산 체계로서 CASMO-3가 갖는 Spatial Self-Shielding 효과의 문제, 코드의 계산 방식 문제, 핵자료 결손 문제를 검토한 후 보정 계수를 산출하려 하였다. CASMO-3의 정확도는 MCNP-4A를 통해 검증하였는데, 비균질한 소결체 내부를 균질화 함으로서 야기되는 Spatial Self-Shielding 효과는 임계도의 차이가 거의 없는 것으로 확인되어졌고, 계산 코드의 차이로 인한 효과 또한 무시할 수 있었다. 그러나 CASMO-3의 핵자료에서 탄소와 실리콘의 자료 부족은 임계도 차이가 0.06184정도로 다소 차이가 나기 때문에 보정이 필요함을 확인하였으나 CASMO-3 자체의 유용성에는 문제가 없었다.

1. 서 론

기존 가압경수로 핵연료는 세라믹 형태로 되어 있어 고체 핵연료에 비해 용융점이 높고 고온에서 비교적 안정하여 높은 연소도를 얻을 수 있지만, 핵분열 생성물의 방출이 많아 피복관내에 함유하는 기체상 방사능량이 막대하다. 따라서 피복관이 방사능 누출에 있어서의 일차적이고 가장 중요한 방호벽이 되며 피복관의 파손은 중차대한 결과를 유발한다. 가압경수로의 핵연료에 비해, MHTGR(Modular High Temperature Cooled Reactor)의 핵연료 구성물질로 사용되는 작은 핵연료 입자들을 탄소 Matrix에 채워 넣어 그림 1과 같이 소결체모양으로 만들어 가압경수로의 핵연료로 사용하고자 한다. 새로운 핵연료는 다중방호벽(이중/삼중의 탄소 피막, 핵연 소결체, 피복관)을 형성해 핵분열 생성물이 핵연료봉내에서 이동되는것을 차단시켜 방사선 누출을 최소화할 수 있으므로 안전성을 획기적으로 증진시킬 수 있다.

새로운 핵연료의 핵적 타당성을 검토하기 위한 핵계산을 실시하고자, 2차원 다군수송방정식의 해를 이용하여 핵연료 집합체에 따른 임계도와 균정수를 계산하는 코드인 CASMO-3를 선정하였다. 그러나 새로운 핵연료는 소결체의 내부를 채우는 탄소 피막 핵연료 입자들로 인해 비균질하게 되어 있고, 가압경수로에서 주로 구조재로 사용되는 탄소나 실리콘을 새로운 핵연료로의 구성물질로 사용하였다. 이로 인해 CASMO-3 계산 결과의 신뢰성이 의심을 받게 될 수 밖에 없었다. 따라서 소결체 내부의 비균질성을 충분히 모사할 수 있고 탄소나 실리콘의 충분한 핵자료가 있는 몬테카를로 코드인 MCNP-4A를 선정하여, CASMO-3의 계산 결과를 MCNP-4A와 비교하여 어느정도 신뢰성이 있는지 알아보고 보정이 필요한 경우, CASMO-3의 계산결과를 보정할 방법을 연구해 보고자 하였다.

2. 핵연료 집합체 해석 코드의 한계 및 보정

2.1 MCNP-4A

몬테카를로 방법을 이용하는 MCNP-4A는 난수(Random Number)를 생성하여 중성자, 전자, 광자가 다른 핵종들과 반응하는 모든 거동을 통계적으로 분석하여, 그 자료로서 임계도, 핵단면적등을 계산하는 코드이다. MCNP-4A의 특징을 살펴보면 첫째, 이중 피막된 핵연료 입자로 채워진 소결체 내부를 정확히 모사할 수 있다. 둘째, 모든 중성자들의 거동을 통계하여 그 자료를 가지고 핵적 거동을 계수하는 코드이므로, 계산 과정상에 근사(approximation)가 매우 적고, 반응단면적에 대한 균질화를 하지 않기 때문에 다른 코드에 비해 보다 사실적이다. 셋째, 적절한 입력자료를 줌으로서 사용자가 원하는 많은 결과(임계도, 위치에 따른 중성자속, 핵반응 단면적등)를 얻을 수 있다.

그러나 MCNP-4A도 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 첫째, 현재 연소 이력 계산이 되지 않으므로 핵설계 코드로 사용할 수 없다. 둘째, 중성자의 거동을 모두 모사해야 하므로 많은 계산시간을 필요로 한다. 셋째, 온도에 따른 탄소, 실리콘의 핵자료는 가압경수로의 운전조건을 모사할 수 없는 상온의 핵자료밖에 없다. 따라서 이 코드는 CASMO-3의 결과를 검증하는 수단으로 사용하였다.

2.2 CASMO-3

CASMO-3는 전형적인 가압경수로의 정입방형 격자를 가진 핵연료 cell을 모사한 후 2차원 다군수송 방정식의 해를 이용하여 핵연료 집합체의 연소에 따른 임계도, 균정수, 반응을 공간분포, 연료봉 핵종 연소등을 계산하는 코드이며, 상업용 가압경수로 핵연료의 설계에 사용될 수 있도록 많이 보정되어 있는 코드이다. 따라서 탄소 피막 핵연료와 같은 비표준 핵연료에 대해 계산할 때 오차가 많을 수 있다고 보았다. 새로운 핵연료 소결체의 내부에는 탄소 피막 핵연료 입자들로 채워져 있어, 이러한 비균질성을 모사하는것이 불가능하다. 따라서 탄소를 충전된 핵연료 소결체내의 핵연료 입자들은 소결체의 부피에 대해 균질하게 분포되어 있다고 가정해야만 한다. 다시 말하면, UCO 핵연료 입

자, SiC 박막, 탄소 박막 그리고 탄소 충전물에 있는 우라늄, 탄소, 실리콘, 산소가 그들의 부피비에 따라 소결체내에 균질하게 섞여 있다고 가정하는 것이다. 그리고 가압경수로에서 구조재의 역할을 하던 탄소나 실리콘을 새로운 핵연료 구성물질로 사용함에 따른 핵자료가 불충분하고, 온도에 따른 핵자료를 기존 가압 경수로의 운전온도 조건과 상이한 300°C 내지 600°C의 핵자료만 가지고 있다.

3. 보정 인자 계산

3.1 Spatial Self-Shielding 효과

CASMO-3는 새로운 핵연료 소결체 내부에 HCP로 조밀하게 쌓여 있는 탄소 피막 핵연료 입자들을 그들의 부피비에 따라 균질화하여 계산을 함으로 인해 야기되는 Spatial Self-Shielding 효과가 얼마만큼 계산 결과에 영향을 미치는지 알기 위해서 MCNP-4A와 비교 계산을 수행하였다. 계산 모델은 소결체의 조건을 만족하는 Unit Cell을 구성하여, 균질화 시켰을 경우와 비균질성을 모사한 경우를 MCNP-4A를 사용하여 계산을 수행하였다.

Unit Cell을 계산하기 전에 핵연료 입자 하나를 탄소를 충전된 정육면체속에 넣은 경우(그림 2)와, 균질화 시킨 경우(그림 3)를 MCNP-4A로 모사한 후 임계도 계산을 하여 비교하였다. 계산 결과, 표 1에서 보는 것처럼 임계도는 0.0022정도 차이가 났지만 MCNP-4A 표준편차의 범위내에 있으므로 이 효과는 거의 무시해도 좋다고 할 수 있다. 앞에서 수행한 계산을 바탕으로 Unit Cell(그림 4)과 이를 균질화시킨 Unit cell(그림 5)을 MCNP-4A로 계산을 한 후 그들의 임계도를 비교하였다. 계산 결과, 표 1에서 보는 것처럼 두 계산의 임계도가 0.00022 정도로서 표준편차보다 작으므로 탄소 피막층에 의한 Spatial Self-Shielding 효과는 거의 존재하지 않는다고 할 수 있다. 굳이 이러한 임계도의 차이에 대한 원인을 분석해 보면, 핵연료 입자들의 크기가 열 중성자의 평균자유행정거리(mean free path)에 비해 훨씬 작으므로 이 효과가 매우 작아짐을 알수 있었다.

3.2 계산 코드의 차이에 대한 효과

MCNP-4A 계산 결과를 CASMO-3에 보정하고자 할 때 두 코드의 계산 방식에 의한 차이가 얼마만큼 존재하는지 파악하고자 비교 계산을 수행하였다. 계산 모델은 소결체로 국한시켜 그 내부의 핵연료 입자들에 대한 중성자의 거동을 파악하여 계산코드의 차이에 대한 효과의 존재 여부를 우선적으로 검토하고, Coolant에 의한 감속(Slowing Down)효과와 온도에 따른 효과는 차후에 고려해야 할 것이다. 그러나 CASMO-3의 입력 자료에는 Coolant 영역을 요구하는 제약 조건으로 인해 새롭게 구성한 모델은 그림 6에서 보는 것과 같다. 그리고 표 2에서 보는 것처럼 H₂O의 밀도를 낮추어 이 영역이 마치 void인것 처럼 하여 coolant에 의한 영향이 없을 것이라고 가정하고, 순수 소결체와 coolant 영역의 밀도가 10⁻⁶cm³인 소결체를 MCNP-4A로 임계도 계산을 하였다. 계산 결과, MCNP-4A의 표준편차의 범위내에 들어가는 0.00122의 차이를 보여 앞의 가정을 증명해 주었다.

이 밀도에서 CASMO-3와 MCNP-4A의 임계도 계산 결과 0.06184 정도의 차이를 보인다. 이러한 임계도의 차이가 계산코드의 차이에 대한 효과로 생긴다고는 말할 수 없는데, 그 이유는 CASMO-3 코드가 탄소와 실리콘의 불충분한 핵자료를 가지고 있기 때문에, 핵자료 결손 효과 또는 계산 코드의 차이에 대한 효과인지는 구분할 수가 없다. 따라서 계산 코드의 차이에 대한 효과는 다음 절의 핵자료 결손 효과와 비교를 하면서 검토하기로 한다.

3.3 핵자료 결손 효과

앞절에서 언급한 것처럼 핵자료 결손 효과에 대한 모델(그림 6)은 계산 코드의 차이에 대한 효과의 존재여부를 알기 위하여 구성된 모델과 동일하다. 이 모델로서 탄소나 실리콘의 불충분한 핵자료를 가지고 수행한 CASMO-3의 계산결과에 대한 정확도를 평가하는 동시에 계산 코드의 차이에 대한 효과를 파악하고자 이 계산을 수행하였다. 두 효과가 어떠한 영향을 미치는가를 파악하기 위한 계산 방법으로는 표 3에서 보는 것처럼 각 단계별로 탄소와 실리콘을 농축도 19.8w/o를 가진 우라늄으로 대체하여 두 코드의 임계도를 비교하였다. 계산 결과, 탄소와 실리콘을 모두 우라늄으로 대체하였을 경우에 CASMO-3와 MCNP-4A의 임계도는 0.00002 정도의 아주 작은 차이를 보였다. 이로 인해 계산 코드의 차이에 대한 효과는 거의 없는 반면에, CASMO-3의 탄소나 실리콘에 대한 핵자료를 보정할 필요성이 있음을 알았다.

3.4 보정 방법

CASMO-3 계산 결과를 보정 하기 위한 방법은, CASMO-3의 임계도를 MCNP-4A의 임계도와 비교를 하여 서로간의 관계를 나타내는 보정상수를 사용하여 CASMO-3 코드의 임계도를 결정하는 계산과정을 수정함으로써 보정을 하는 것이다. 그러나 정확히 어떠한 핵종의 어떠한 핵 단면적에서 차이가 나는지 알 수 없기 때문에, CASMO-3의 계산 과정중 군 축약을 하는 과정에서 12군 또는 2군 핵 단면적에 보정을 하여 보다 더 정확한 임계도 값을 구하는 방법이 있다.

4. 결 론

탄소 피막 핵연료에 대해 CASMO-3로 계산할 때 Spatial Self-Shielding 효과 보정은 필요 없으며, MCNP-4A와 비교할 때 CASMO-3도 매우 정확한 결과를 보임을 알았다. 그러나 CASMO-3의 불충분한 핵자료를 가진 탄소와 실리콘을 핵연료 구성물질로 사용함으로써 인한 핵자료 결손 효과는 보정을 반드시 필요로 함을 알았다. 위의 계산은 CASMO-3의 정확도를 위해 핵연료와 coolant 모두 상온의 가정하에서 임계도를 계산하였다. 그러므로 상온에서의 Spatial Self-Shielding 효과와 계산 코드간의 차이에 대한 효과는 거의 없지만, 실제 원자로 운전조건에 대한 온도하에서 계산을 수행할 시에도 보정이 필요 없을지는 모른다.

참고 문헌

1. Yi Hak-Chae, seminar presentation materials, General Atomics, 1994.
2. "CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program User's Manual," STUDEVIK/NFA -89/3, 1991.
3. M.M. El-Wakil, "Nuclear Energy Conversion," ANS, 1978.
4. E.E.Lewis, "Nuclear Power Reactor Safety," New York, 1977.
5. F.J. Rahn, "A Guide to Nuclear Power Technology," John Wiley & Sons, 1984.
6. R.V.Moore, "The Design of Gas-Cooled Graphite Moderated Reactor," UKAEA, 1963.
7. Personal Communication with General Atomics, 1994.
8. "A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Manual," Los Alamos National Lab., 1993.
9. C.R.Barret, W.D.Nix, and A.S.Teleman, "The Principles of Engineering Materials," 1973.
10. M.H.Kim, "The Use of MHTGR Coated Fuel Particles for PWR Fuel Pellet," Korea Nuclear Society Autumn Meeting, 1994.

표 1. Spatial Self-Shielding 효과 계산

CASE	임계도(MCNP-4A)	계산 시간(분)
정육면체속에 핵연료입자가 1개 존재	1.33694 ± 0.00159	2976.68
정육면체속에 있는 핵연료를 균질화	1.33474 ± 0.00130	728.38
HCP packing Unit Cell	1.35148 ± 0.00165	5518.52
균질화한 Unit Cell	1.35126 ± 0.00124	354.78

표 2. Coolant 밀도 변화에 따른 임계도 계산

coolant 밀도	임계도(CASMO-3)	임계도(MCNP-4A)
1.0	1.69649	1.72114 ± 0.00175
0.8	1.67332	1.70831 ± 0.00193
0.6	1.63678	1.66958 ± 0.00178
0.4	1.57714	1.61207 ± 0.00153
0.2	1.47668	1.50666 ± 0.00179
1.0E-2	1.38636	1.33648 ± 0.00141
1.0E-3	1.38890	1.33000 ± 0.00132
1.0E-4	1.38899	1.32698 ± 0.00120
1.0E-5	1.38899	1.32918 ± 0.00127
1.0E-6	1.38899	1.32715 ± 0.00126

1.32837 ± 0.00139 (소결체)

표 3. Library 결손효과 검증

CASE	임계도(CASMO-3)	임계도(MCNP-4A)
불충분한 핵자료를 사용한 경우	1.38899	1.32715 ± 0.00126
탄소가 없는 경우	1.50331	1.46733 ± 0.00144
실리콘이 없는 경우	1.37231	1.31944 ± 0.00121
탄소와 실리콘이 모두 없는 경우	1.54914	1.54912 ± 0.00143

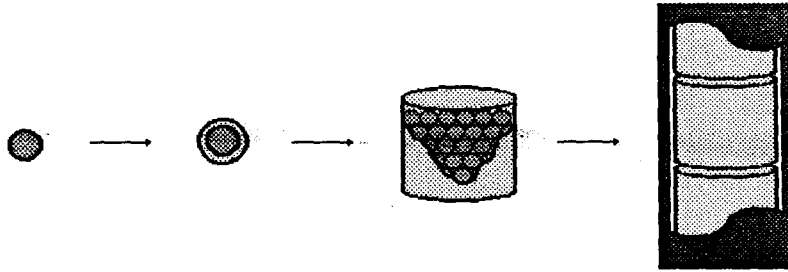


그림 1. 새로운 핵연료의 제조 공정

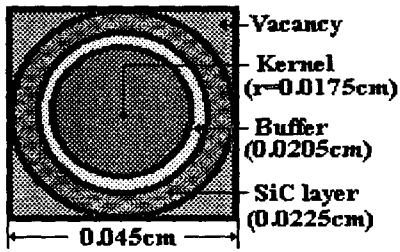


그림 2. 탄소에 충전된 정육면체속에 핵연료 입자가 하나 들어있는 경우

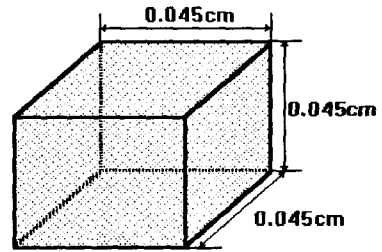


그림 3. 정육면체의 탄소충진물과 핵연료 입자를 균질화한 경우

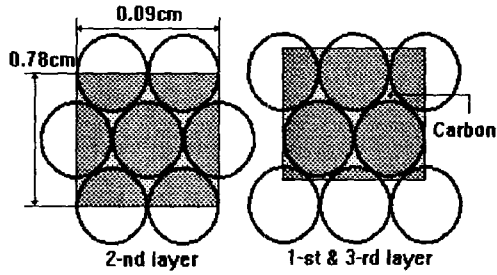


그림 4. Unit Cell

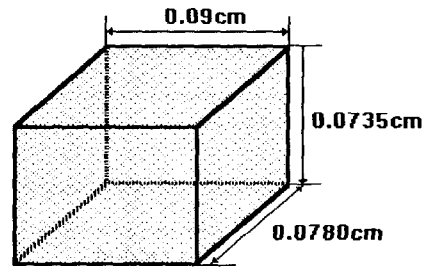


그림 5. 균질화한 Unit Cell

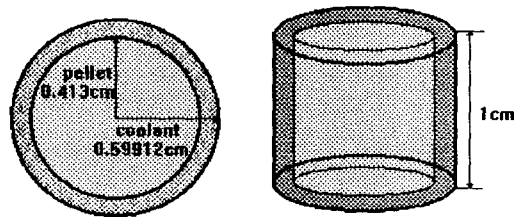


그림 6. 소결체 계산 모델