2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자로 노심 핵특성 분석을 위한 몬테칼로 방법의 적용

Application of Monte Carlo Method to Nuclear Core Characteristic Analysis

김종경, 한치영, 신창호
한양대학교

요 약

대부분의 노심해석 코드들이 사용하는 확산방정식의 노달방법에 의한 원자로 노심 핵특성 분석 대신 몬테칼로 방법을 이용한 원자로 노심 핵특성 분석을 수행하였으며 대상 원자로로는 차세대 원자로를 선정하였다. MCNP4B 코드를 이용하여 차세대 원자로에 대해 정밀한 3차원의 기하학적 모델링을 수행하였으며 CASMO-3 코드로 핵연료집합체의 종류와 연소도에 따라 각각 핵연료 물질조성을 계산하여 MCNP 물질자료로 입력하였다. 또한 노심 내 각 영역의 온도를 고려하여 NJOY 97 코드를 이용 새로운 핵단면적을 생산하여 MCNP 코드에 사용하였다. MCNP 코드 내 KCODE 계산을 통해 차세대 원자로에 대한 MCNP 코드 모델링의 임계도 검증을 수행하였으며 각각의 핵연료봉에 대한 상대출력을 계산하였다. MCNP 코드의 결과로부터 유효증배계수, 노심 상대출력분포, 첨두봉출력치, AO 등의 노심 핵특성 인자들을 계산하였다. MCNP에서 계산된 노심 핵특성 인자들과 기존 노심해석코드 계산결과와의 비교를 통해 MCNP를 이용한 차세대 원자로 노심의 모델링을 검증함으로써 원자로 노심 핵특성 분석에 MCNP 코드를 이용한 몬테칼로 방법의 활용성을 도출할 수 있었다.

ABSTRACT

The nuclear core characteristic analysis for Korean Next Generation Reactor(KNGR) was performed by using Monte Carlo method. MCNP4B code was employed to model the initial core of KNGR on a three-dimensional representation. Material compositions for each type and burnup of fuel assemblies were obtained by using CASMO-3 runs. A new cross section library for different in-vessel core temperatures was generated by NJOY 97 code and used in MCNP code. The criticality benchmark of the modeled KNGR core was carried out through KCODE calculation and the relative powers of each fuel rod were obtained. The nuclear characteristics including the effective multiplication factor, relative power distributions, pin peaking factor, and axial offset(AO) were obtained from the results in KCODE calculation. The comparison between the

results from MCNP calculation and the reference data from KEPCO Nuclear Fuel Company(KNFC) validates the MCNP modeling for KNGR core and leads to the applications of Monte Carlo method to the nuclear core characteristic analysis.

1. 서 론

현재까지 원자로 노심 내에서의 중성자 거동을 해석하는 데는 결정론적 방법(Deterministic Method)이 주로 사용되어 왔다. 이 방법은 핵단면적의 군정수화, 확산이론(Diffusion Theory)의 사용, 한정된 Mesh 크기, 단위 셀의 균질화(Homogenization), 공명자기차폐(Resonance Self-Shielding) 고려 등의 다양한 근사법들을 사용하기 때문에 근본적으로 불확실성을 포함하고 있다. 그러므로 결정론적 방법이 충분한 정확성을 가지고 중성자 거동을 해석하기 위해서는 필수적으로 여러 가지 보정인자들이 필요하며, 결국 목표로 하는 결과를 도출하기까지는 보정을 위한 여러 계산단계가 뒤따르게 된다.

반면에 몬테칼로 방법은 연속에너지 핵단면적 사용, 입자운동방향의 연속적인 취급, 정밀한 3차원의 기하학적 모델링 가능 등으로 실제와 거의 유사한 입자수송을 모사할 수 있으므로 결정론적 방법에서와 같은 근사법들이 요구되지 않으며 한번의 계산으로 정확한 계산결과를 도출할 수 있다. 그러나 몬테칼로 방법은 그 정확성에도 불구하고 통계적/확률적 오차를 믿을 만한 범위까지 줄이기 위해서 많은 전산시간이 소요되어야 하는 단점이 있어, 대규모 상업용 원자로와 같이 매우 복잡하고 규모가 큰 구조에서 몬테칼로 방법의 활용은 상당한 어려움이 있어 왔다. 하지만 보다 실제적인 모사를 통한 정확한 계산결과를 도출하기 위하여 원자로 압력용기의 건전성 평가 등의 연구에서와 같이 대규모 구조에서도 몬테칼로 방법을 점차로 확대 이용하고 있는 추세이다. 특히, 몬테칼로 방법을 이용한 핵임계도 계산은 원자력관련 실험시설의 핵임계도 안전성 평가 및 노심해석 코드를 사용하여 계산된 원자로 노심 출력분포 결과의 검증계산으로도 활용되고 있다. 더욱이 최근에는 전산환경의 급속한 발전으로 인하여 전산시간이 대폭 단축됨에 따라 국·내외적으로 몬테칼로 방법을 이용한 연구가 여러 분야에서 상당히 주목받고 있다.

이러한 몬테칼로 방법의 정확성과 향상된 전산환경에 힘입어, 일반적인 노심해석 코드에서 계산된 노심 핵특성 결과를 검증 보완하는 측면에서 몬테칼로 방법의 필요성이 인식되고 있다. 더욱이 대부분의 원자로 노심은 몇 가지 형태로 그룹화 되는 같은 기하학적 구조의 핵연료집합체와 핵연료봉으로 구성되어 있기 때문에 반복적인 기하학적 묘사가 가능하다면 원자로와 같은 규모의 다른 구조물에 비하여 원자로 노심은 상대적으로 쉽고 짧은 시간에 기하학적 구조를 묘사할 수 있는 이점이 있으며 몬테칼로 방법을 이용할 경우 이러한 반복적인 격자 셀 구성이 가능하다. 이에 본 연구에서는 일반적으로 대부분의 노심해석 코드들이 사용하는 확산방정식의 노달방법에 의한 원자로 노심특성 해석 대신 몬테칼로 방법을 이용하여 보다 실제적이고 정밀한 노심 환경을 구현하고 이를 통해 원자로 노심 핵특성 분석을 수행함으로써 몬테칼로 방법에 의한 원자로 노심 핵특성 분석의

정확성 및 그 활용성을 도출하고자 하였다.

2. 노심 핵특성 분석을 위한 대상 원자로

노심 핵특성 분석을 위한 대상 원자로로는 신형경수로 개념으로 현재 국내에서 개발중인 차세대 원자로(KNGR, Korean Next Generation Reactor)를 선정하였다. 차세대 원자로는 약 1450 MWe의 출력을 갖도록 4000 MWt 급으로 설계되었으며 설계수명은 약 60년을 목표로 하고 있다. 차세대 원자로의 주기길이는 18개월과 24개월, 두 가지로 설계를 하고 있으나 본 연구에서는 18개월 주기길이를 갖는 노심을 대상 노심으로 선정하였으며 1주기 노심에 대하여 노심 핵특성 분석을 수행하였다.

차세대 원자로에 대한 몬테칼로 모델링을 위한 자료로서 한전원자력연료주식회사(KNFC, KEPCO Nuclear Fuel Company)로부터는 차세대 원자로 노심의 설계자료를, 한국전력기술주식회사(KOPEC, Korea Power Engineering Company)로부터는 차세대 원자로 노심 외곽구조물의 설계자료를 입수하여 이에 대한 설계사양을 각각 분석하였다.

차세대 원자로 1주기 노심의 제원은 표 1에서 보는 바와 같으며 핵연료집합체 구조는 현재 상업운전중인 영광 3, 4호기의 핵연료집합체 구조와 동일하다. 차세대 원자로 1주기 노심에 사용되는 핵연료집합체의 종류는 핵연료의 농축도와 장전모형 그리고 가연성독봉의 개수와 농축도에 따라 모두 6가지로 표 2에서 보는 바와 같으며 각각의 핵연료집합체에 대한 핵연료봉 및 가연성독봉의 장전모형은 그림 1과 같다. 노심의 장전모형은 그림 2에서 보는 바와 같으며 그림은 전체 노심의 1/8 노심을 나타낸 것으로 모두 38개의 핵연료집합체로 구성되어 있다.

3. 원자로 노심의 MCNP 모델링

3.1 기하학적 모델링

몬테칼로 방법에 의한 차세대 원자로의 노심 핵특성 분석을 위하여 MCNP4B 코드를 사용하였다.

원자로 노심을 구성하고 있는 구조물 등을 실제와 똑같이 묘사하는 것은 사실상 불가능하므로 차세대 원자로의 노심계산 영역에 해당하는 부분에 중점을 두어 기하학적 모델링을 수행하였다. 따라서 핵연료봉 내에서 UO_2 펠렛으로 장전된 핵연료의 높이, 즉 유효높이(Active Height) 영역을 주 계산 영역으로 하여 모델링을 하였다. 원자로 노심의 대칭성을 이용하여 원자로 노심을 원주방향으로 1/8 모델링을 하였고, 축방향으로는 10개의 영역(Segment)으로 모델링 하였다. 이 때 1/8 노심의 대칭면은 MCNP 코드에서 제공되는 반사체 경계(Reflective Boundary)면으로 지정하였다.

차세대 원자로 노심에 대한 정밀한 3차원의 몬테칼로 모델을 구현하기 위해서 핵연료집합체를 이루는 핵연료봉, 가연성독봉, 계측관, 안내관을 모두 앞서 기술한 실제 크기로 묘사하였다. 노심

내에 장전되는 핵연료집합체의 종류는 모두 6가지 이나, 같은 종류의 핵연료집합체라 할지라도 노심 내에서 장전되는 위치가 다르기 때문에 연소도가 달라지게 되고 결국 핵연료의 물질조성은 달라지게 되므로 38 종류(1/8 노심)의 모든 핵연료집합체에 대한 셀을 구성하였다. 여기에 더하여 가연성독봉이 장전되어 있는 핵연료집합체의 경우 상부(또는 하부)와 중심부는 물질조성이 다르므로 이러한 핵연료집합체에 대해서는 추가의 셀을 지정하여 결국 모두 55 종류의 핵연료집합체 셀을 구성하여 노심 핵특성 분석에 사용할 1/8 원자로 노심을 모델링 하였다.

MCNP4B 코드를 사용한 차세대 원자로 1 주기 노심의 모델링 결과를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 그림 3은 1/8 노심의 원주방향 모델링 결과를 나타낸 것으로 각각 노심의 중심부와 외곽부분을 확대한 것이다. 그림 4는 노심의 축방향 모델링 결과를 나타낸 것으로 반사체를 고려한 노심 상부와 하부를 각각 확대한 것이다.

3.2 핵연료 및 기타 구조물의 조성비 계산

노심 핵특성 해석을 위한 원자로 노심의 모델링은 기하학적 구조뿐만 아니라 노심 및 구조물의 물질 조성비를 정확히 입력하는 것이 매우 중요하다.

핵연료의 경우 우라늄을 포함한 악티나이드와 핵분열생성물의 함유량 그리고 밀도에 따라 핵임계, 거시핵단면적, 반응률 등의 노심특성이 달라진다. 따라서 차세대 원자로 1주기 노심에 장전되는 모든 핵연료집합체에 대하여 각각 연소도에 따른 CASMO-3 전산코드의 셀 계산을 통해 제논 평형 상태에서의 우라늄과 악티나이드 그리고 핵분열생성물을 고려한 핵연료 내 핵종별 수밀도를 계산하였으며 이를 MCNP4B 코드의 물질자료로 입력하였다.

냉각수 밀도와 냉각수 속에 포함되어 있는 붕소의 양은 임계도에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 차세대 원자로 노심 내 냉각수 온도와 압력을 고려하여 냉각수의 밀도를 직접 계산하였으며 붕소의 농도를 고려하여 냉각수 내 핵종별 수밀도를 계산하였다. 이 때, 냉각수는 원자로의 하부에서 들어와 상부로 이동하므로 축방향으로 냉각수 온도 차이가 생기게 된다. 따라서 냉각수 밀도 계산에서는 냉각수 온도를 노심 내 냉각수의 평균 온도인 310.6 ℃로 가정하였다.

핵연료봉이 핵연료집합체에 장전되고 핵연료집합체가 다시 노심 내에 장전되기 위해서는 여러 가지 구조물들이 필요하게 된다. 하지만 그 구조가 매우 복잡하므로 이러한 구조물을 묘사하기 위한 방법으로 핵연료집합체 구조물과 핵연료집합체 내에 있는 냉각수를 균질화 시켰다. 2절에서 언급하였듯이 차세대 원자로 핵연료집합체의 설계사양은 영광 3, 4호기의 설계사양과 같으므로 핵연료집합체 구조물에 대한 물질자료 계산을 위해 영광 3, 4호기의 핵설계보고서(NDR, Nuclear Design Report)[3]를 참조하였다. 핵연료집합체를 구성하는 10개의 Spacer Grid와 1개의 Bottom Spacer Grid를 핵연료집합체 구조물로서 고려하였으며 각각은 Zicarloy-4 재질의 8.62 kg(0.862 kg × 10)과 Inconel 625 재질의 1.451 kg 이다. 이들 각각에 대한 질량과 밀도를 고려하여 핵종별 수밀도를 계산하였으며 이를 다시 냉각수 내 핵종별 수밀도와 균질화 시켰다.

3.3 핵단면적 자료 생산

MCNP 코드를 사용하여 원자로 노심 핵특성을 분석하기 위해서는 노심 내 환경에 적합한 핵단면적 자료를 사용하여야 핵단면적 자료에서 비롯되는 계산의 불확실성을 없앨 수 있다. 물론 핵단면적 자체에서 비롯되는 불확실성은 여기서는 논외이다. 운전중인 원자로는 고온을 유지하고 있으므로 온도의 영향을 반영한 핵단면적 자료를 생산해야 하는데 핵연료 펠렛, 피복관 및 냉각수의 온도가 모두 다르므로 각각의 온도에서 필요한 핵단면적을 직접 생산하여 MCNP 코드의 입력자료로 사용해야 한다.

온도에 따른 핵종별 핵단면적 자료를 생산하기 위하여 ENDF/B-VI Release 4와 NJOY 97 코드[4]를 사용하여 새로운 핵단면적 자료집을 만들고, 이 핵단면적 자료집을 KNGRXS(KNGR Cross Section)이라고 명명하였다. 이 과정에서 차세대 원자로 노심에 대해서 표 1에서와 같이 핵연료 온도는 평균온도인 701.4 ℃를 사용하였으며 냉각수는 3.2절에서 언급하였듯이 노심 내 평균온도인 310.6 ℃를 사용하였다. 핵연료봉의 피복관 온도는 자료조사를 통하여 339 ℃으로 가정하여 사용하였으며 핵연료봉을 제외한 기타 구조물의 온도는 냉각수 온도와 같은 310.6 ℃로 가정하였다.

4. 원자로 노심 핵특성 분석

4.1 임계도 검증

차세대 원자로에 대한 MCNP 코드 모델링의 임계도를 검증하기 위하여 1 주기 초기노심(BOC, 50 MWD/MTU), ARO, HFP(Hot Full Power), 제논 평형 상태에서 임계도 계산을 수행하였다.

MCNP 코드의 임계도 계산인 KCODE 계산으로 차세대 원자로 1주기 초기노심에 대한 임계도 계산을 수행한 결과, 유효증배계수(k_{eff})가 1.00582 (STD=0.00014)로 계산되어 차세대 원자로에 대한 MCNP 코드 모델링의 타당함을 확인하였다.

4.2 원자로 노심 핵특성 분석

노심 핵특성 분석을 위한 주요인자로는 노심 상대출력분포, 첨두봉출력치(Pin Peaking Factor), AO(Axial Offset)를 선정하였으며 MCNP 코드의 KCODE 실행으로 임계도 계산과 함께 MCNP 코드에서 제공되는 F7 Tally를 사용하여 계산하였다.

MCNP 코드에서 제공되는 F7 Tally 값은 아래의 (1)과 같은 식으로 계산된다.

$$F_7 = \frac{r_a}{r_g}\int_V \int_t \int_E H(E) f(r,E,t) dE dt \frac{dV}{V} \tag{1}$$

여기서 r_a는 지정한 셀에서 핵종의 수밀도(atoms/barn-cm)이며 r_g는 지정한 셀의 밀도(g/cm^3) 이다. 그리고 $H(E)$는 Heating Response로서 아래의 (2)와 같은 식으로 표현된다.

$$H(E) = s_f(E) Q \tag{2}$$

여기서 s_f는 미시핵분열단면적(barn)이며 Q는 핵분열 Q값(MeV) 이다. 따라서 F7 Tally에 의해서

계산되는 값의 단위는 MeV/g으로 지정한 셀에서 단위질량당 핵분열에 의해 생성되는 총 에너지를 의미하게 된다. 그러므로 MCNP 코드에 의해서 계산되는 F7 Tally 값은 각 셀의 질량을 곱해준다면 곧바로 각 셀의 열출력으로 환산할 수 있게 된다.

몬테칼로 방법으로 정밀하게 묘사된 노심 환경에서 실제와 거의 유사한 입자모사를 구현할 수 있다는 장점을 이용, 위에서 제시한 노심특성 인자들에 대하여 가장 정확한 값을 도출하기 위해서는, F7 Tally는 핵연료로 지정된 모든 셀에 대하여 계산이 수행되어야 한다. 따라서 1/8로 모델링 된 차세대 원자로 노심에 장전되어 있는 38개의 핵연료집합체 내의 모든 핵연료봉이 F7 Tally를 위한 셀로 지정이 되어야 한다.

이에 본 연구에서는 핵연료로 지정된 모든 셀에 대하여 F7 Tally 계산을 수행하였으며 KCODE에서 총 2,000 주기를 실행하여 각 셀에 대해서는 2%이하의 통계적 오차를 갖는 결과를 도출하였다.

F7 Tally에 의해서 계산되는 많은 값들을 이용하여 노심 핵특성 인자 값을 도출하기 위해서 본 연구에서는 직접 MCNP 후처리 프로그램을 개발하였다. 그림 5는 개발된 후처리 프로그램을 실행시켰을 때 출력되는 결과의 일부분을 보여주고 있다.

후처리 프로그램을 이용하여 계산된 결과 중 1주기 초기노심에 대한 상대출력분포를 한전원자력연료주식회사에서 계산한 초기노심의 상대출력분포와 비교하여 그림 6에 나타내었다. MCNP4B 코드로 계산한 차세대 원자로 초기노심의 상대출력분포는 한전원자력연료주식회사에서 계산한 값에 비해 RMS(Root Mean Square) 오차가 2.53%로 계산되었다. 한전원자력연료주식회사에서 계산한 차세대 원자로 1주기 노심에 대한 노심 상대출력분포는 원자로 노심설계를 위한 원자로 고유의 노심해석코드를 이용한 것으로 볼 때, 본 연구에서 수행한 MCNP 코드 모델링에 의한 차세대 원자로 노심의 모사는 매우 정확하다고 할 수 있다. 아울러 원자로 고유 노심해석코드의 경우 적용대상 원자로의 제한이 있는데 반해 몬테칼로 방법을 이용할 경우 모든 원자로에 적용할 수 있는 장점을 지니고 있다.

첨두봉출력치로는 Fr(Radial Pin Peaking Factor) 값을 계산하였다. 계산된 Fr 값은 1.4359이며 첨두치가 나타난 핵연료집합체는 그림 6에서 28번째에 위치한 B1 형태의 핵연료집합체 이다. 한전원자력연료주식회사에서 최근 계산하여 예상하고 있는 Fr 값은 1.4491로서 본 연구에서 계산한 값과 0.91%의 오차를 보이고 있는 것으로 나타났다. 그러나 첨두치가 나타날 것으로 예상하고 있는 핵연료집합체는 23번째에 위치한 B1 형태의 핵연료집합체로서 본 연구에서 계산한 결과와는 차이를 보이고 있었다. 이는 비록 첨두치 핵연료집합체의 위치가 서로 상이하나 그림 11에서 보듯이 23번과 28번째의 핵연료집합체는 노심반경방향으로 볼 때 거의 같은 거리에 위치하면서 서로 인접하고 있으며 특히 같은 종류의 핵연료집합체임을 감안할 때 이러한 차이는 각각의 사용 코드에서 비롯되는 오차의 범주에 포함된다고 할 수 있다. 그러나 한편으로는, 정밀한 3차원의 노심환경을 구현하고 실제와 거의 유사한 입자모사를 통하여 계산된 MCNP 결과에 보다 많은 신뢰성을 부여한다면 이러한 계산결과의 차이점은 오히려 한전원자력연료주식회사에서 계산한 결과에 대한 검증 및 보완 자료로서 충분히 활용될 수 있을 것이다. 한편, 본 연구에서 계산한 Fr 값은 28번째 핵연료집합체 내의

(1, 6) 핵연료봉에서 나타나는 것으로 계산되었다.

후처리 프로그램을 통해 계산된 AO 값은 0.0327로 나타났으며 이에 대한 비교자료를 확보할 수 없어 계산결과 비교는 생략하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 몬테칼로 방법을 이용하여 원자로 노심특성 해석을 수행하고자 차세대 원자로에 대해 MCNP4B 코드를 이용하여 정밀한 3차원의 몬테칼로 모사를 수행하였다. MCNP 후처리 프로그램을 개발하여 MCNP 코드의 결과로부터 유효증배계수, 노심 출력분포, 첨두봉출력치, AO 등의 노심특성 인자들을 계산하였다. MCNP에서 계산된 결과와 기존 노심해석코드 계산결과와의 비교를 통해 MCNP를 이용한 차세대 원자로 노심의 모델링을 검증함으로써 MCNP를 이용한 몬테칼로 방법의 활용성을 도출할 수 있었다.

본 연구에서 도출된 신뢰성 있는 결과를 바탕으로 몬테칼로 방법을 이용한 원자로 노심 핵특성 분석은 앞으로 기존 노심해석코드 결과의 검증 및 보완에 충분히 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 더욱이 차세대 원자로 노심특성 해석을 수행하는 과정에서 축적된 자료들은 곧바로 차세대 원자로 압력용기 건전성 평가 등의 연구에도 직접 활용될 수 있다.

현재는, 몬테칼로 방법에 의해 계산된 지금까지의 노심 핵특성 인자들 외에도 도출 가능한 반응도 계수, 제어봉가 등의 인자들에 대한 분석도 추가로 수행 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 신형원자로연구센터의 지원에 의해서 수행되었음.

참고 문헌

1. J. F. Breismeister, "MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.
2. Bahadir and D. Knott, "CASMO-4 Benchmarking Against MCNP," CASMO Users Group Meeting, Studsvik of America, Inc., Salt Lake City, Utah, 1995.
3. H. G. Kim, Y. S. Park, B. S. Kim, and S. J. Cho, "The Development of the Advanced Light Water Reactor in Korea—The Korean Next Generation Reactor," SMiRT-15th International Conference, Seoul, Korea, August 15 20, 1999.
4. KAERI, "Nuclear Design Report for Yonnwang Unit 4 Cycle 1," June, 1995.
5. E. MacFarlane and D. W. Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91," LA-12740-M, Los Alamos National Laboratory, 1991.

표 1. 차세대 원자로 노심 제원

Inlet Moderator Temperature	292.2 °C (558 °F)
Average Moderator Temperature	310.6 °C (591 °F)
Average Fuel Temperature	701.4 °C (1294.5 °F)
Active Core Height	381 cm
No. of Fuel Assemblies	241
Lattice in Assemblies	16×16
Effective Core Diameter	365.8 cm
Fuel Assembly Pitch	20.88 cm
Fuel Rod Pitch	1.285 cm
Fuel Rod Diameter	0.826 cm
Clad Inner Diameter	0.843 cm
Clad Outer Diameter	0.970 cm
Pellet Theoretical Density	10.96 g/cm^3
Pellet Density (% Theoretical)	95.25%

표 2. 차세대 원자로 1주기 노심 핵연료집합체 구성

FA Type	No. of FAs	Fuel Rod Enrichment	No. of Fuel Rods per Assembly	No. of BP Rods per Assembly	Gd_2O_3 Weight %
A0	81	1.60	236	-	-
B0	28	3.28	236	-	-
B1	48	3.28/2.78	172/52	12	8
B2	4	3.28/2.78	124/100	12	8
C0	20	3.78/3.28	184/52	-	-
C1	60	3.78/3.28	120/100	16	8

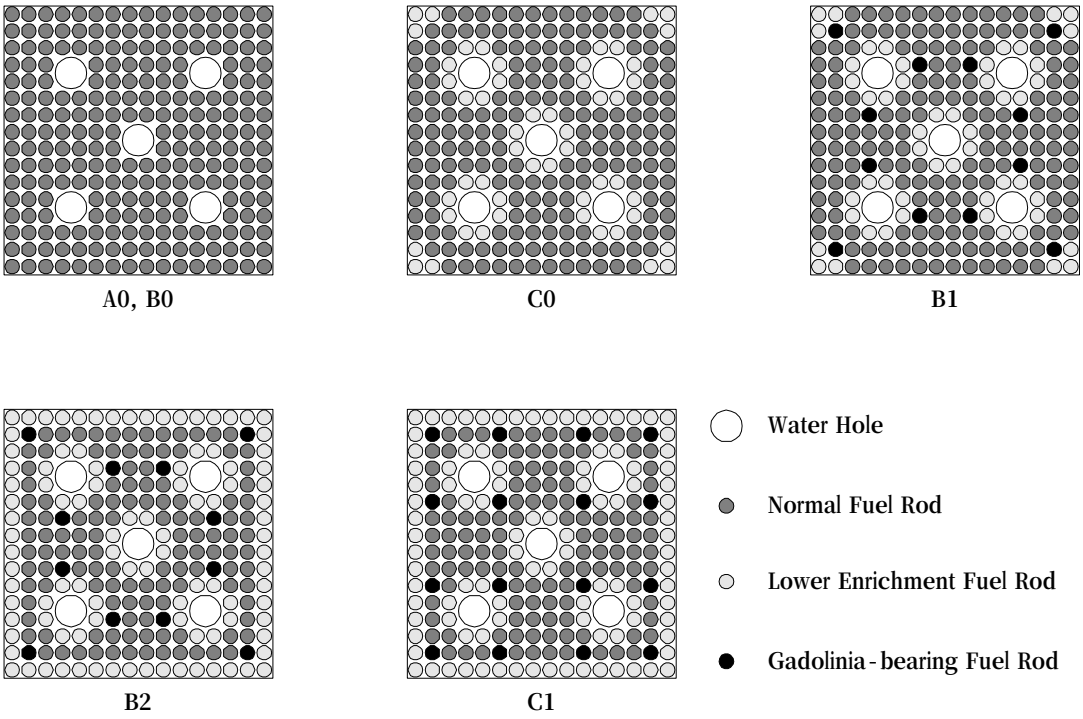


그림 1. 차세대 원자로 1주기 핵연료집합체 종류 및 장전모형

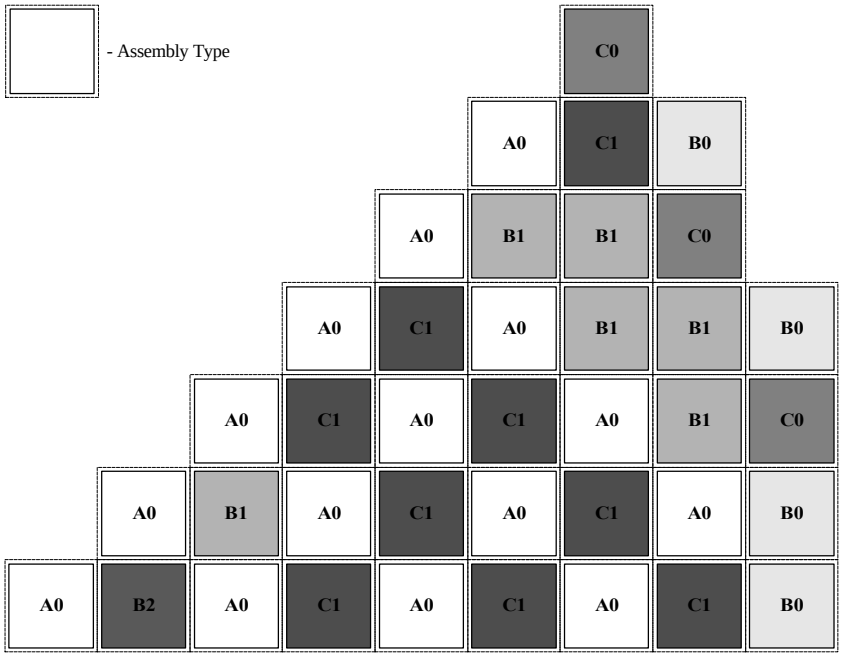
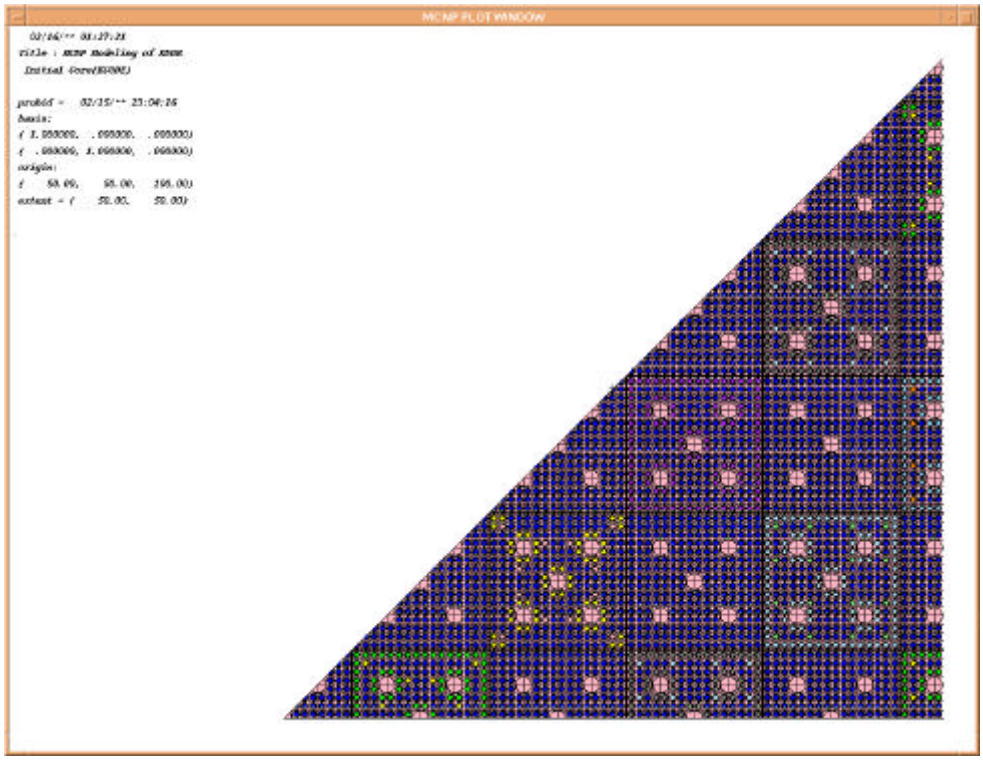


그림 2. 차세대 원자로 1주기 노심 장전모형



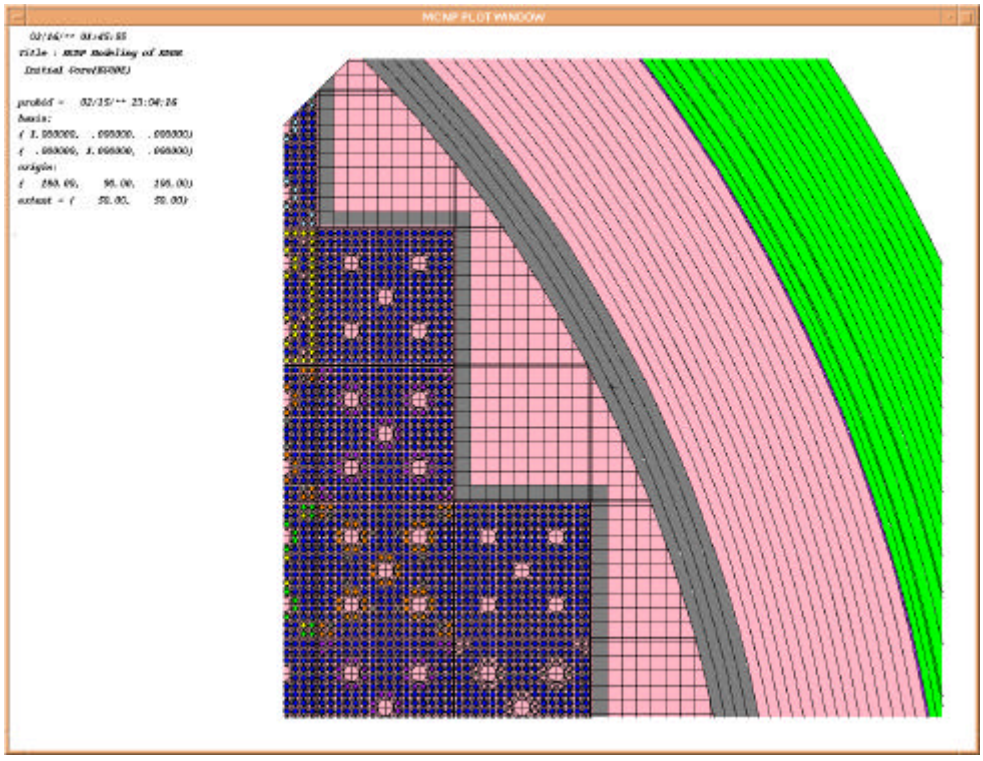
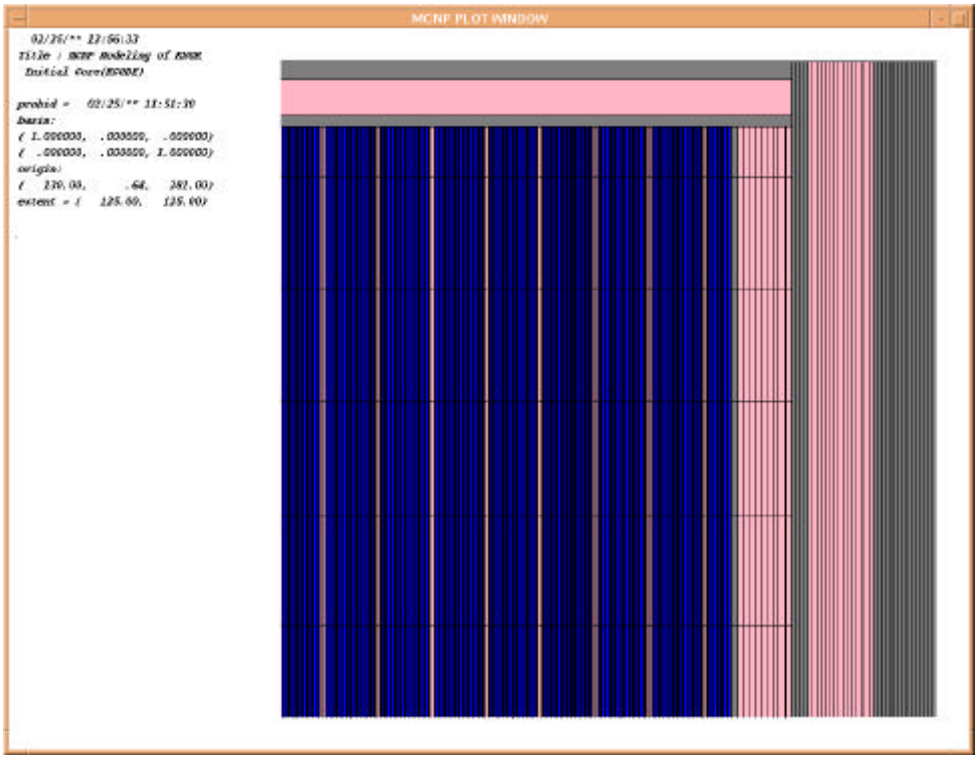


그림 3. 차세대 원자로 1주기 노심의 MCNP 모델링 결과(원주방향)



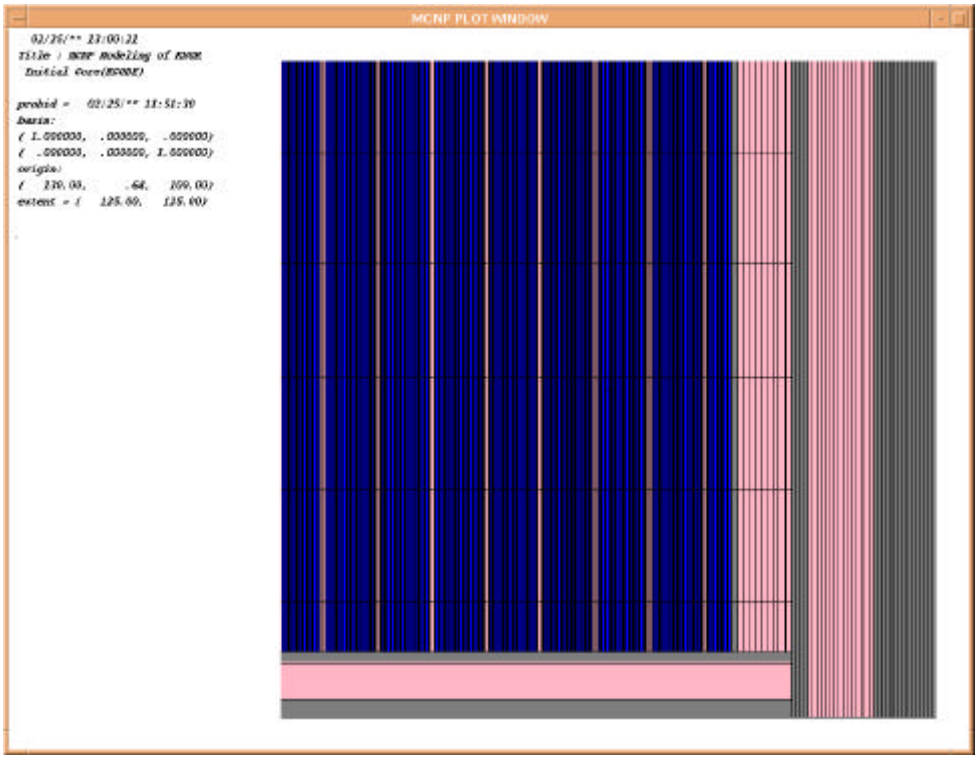


그림 4. 차세대 원자로 1주기 노심의 MCNP 모델링 결과(축방향)

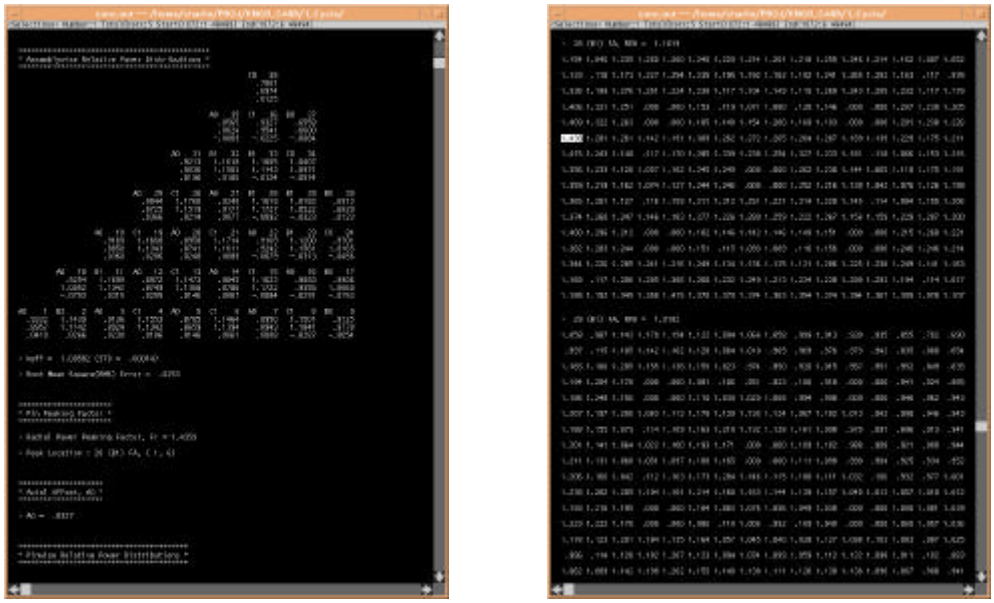


그림 5. MCNP 후처리 프로그램 출력결과 예

AA NN								
XXXXX						C0 38		
XXXXX						0.7061		
X.XXX%						0.6974		
						1.247%		
				A0 35	C1 36	B0 37		
				0.8565	0.9327	0.6558		
				0.8624	0.9541	0.6600		
				-0.684%	-2.243%	-0.636%		
			A0 31	B1 32	B1 33	C0 34		
			0.9213	1.1618	1.1005	1.0407		
			0.9036	1.1503	1.1143	1.0971		
			1.959%	1.000%	-1.238%	-5.141%		
		A0 25	C1 26	A0 27	B1 28	B1 29	B0 30	
		0.9044	1.1766	0.9248	1.1619	1.0182	0.6913	
		0.8725	1.1519	0.9177	1.1727	1.0522	0.6829	
		3.656%	2.144%	0.774%	-0.921%	-3.231%	1.230%	
	A0 18	C1 19	A0 20	C1 21	A0 22	B1 23	C0 24	
	0.9169	1.1668	0.8958	1.1714	0.9169	1.1200	0.9701	
	0.8850	1.1343	0.8741	1.1611	0.9242	1.1561	1.0165	
	3.605%	2.865%	2.483%	0.887%	-0.790%	-3.123%	-4.565%	
A0 10	B1 11	A0 12	C1 13	A0 14	C1 15	A0 16	B0 17	
0.9254	1.1699	0.8972	1.1473	0.8845	1.1623	0.9083	0.9906	
1.0052	1.1342	0.8749	1.1308	0.8786	1.1722	0.9355	1.0060	
-7.939%	3.148%	2.549%	1.459%	0.672%	-0.845%	-2.908%	-1.531%	
A0 1	B0 2	A0 3	C1 4	A0 5	C1 6	A0 7	C1 8	B0 9
0.9332	1.1439	0.9136	1.1553	0.8785	1.1464	0.8950	1.1501	0.9725
0.8957	1.1142	0.8924	1.1342	0.8659	1.1394	0.8943	1.1841	0.9778
4.187%	2.666%	2.376%	1.860%	1.455%	0.614%	0.078%	-2.871%	-0.542%

AA: FA Type NN: FA No.
MCNP
Design
Error(%)*

* Error(%) = (MCNP - Design) / Design × 100

RMS Error(%) = 2.53%

그림 6. 차세대 원자로 1주기 초기노심(BOC, ARO, HFP, Xe Eq.) 상대출력분포