2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MCNP 코드와 SCALE 코드시스템을 이용한 KSC-4 수송용기 방사선 차폐 및 핵임계도 안전성 검증

Verification of Radiation Shielding and Criticality Safety for KSC-4 Spent Nuclear Fuel Transport Cask Using MCNP and SCALE Code System

김종경, 김기환, 신창호, 김현대
한양대학교

이두희
한국원자력안전기술원

요 약

KSC-4 사용후핵연료 수송용기는 1990년 한국원자력연구소에서 DOT4.2와 KENO-IV 코드를 이용하여 방사선 차폐 및 핵임계도 안전에 관한 설계를 수행한바 있다[1]. 그러나 KSC-4 수송용기의 기하학적 형태가 정확한 모델링이 어렵고, 계속적인 전산기기의 발달로 점차 정확한 계산이 요구되고 있으며 추후 대용량 수송용기의 설계에 신뢰성 있는 방법을 제시하고자 비교적 실제에 가까운 정밀한 모델링을 통해 보다 정확한 계산을 수행하였다. 본 연구에서는 대표적인 몬테칼로 방법을 사용하는 코드인 MCNP 코드[2]를 이용하여 KSC-4 수송용기의 방사선 차폐계산과 핵임계도 계산을 수행하였고 미국 Nuclear Regulatory Commission(NRC)의 인·허가 코드인 SCALE4.4a-KENO-V.a-코드[3] 를 이용하여 핵임계도에 대한 검증 계산을 수행하였다. 방사선 차폐 계산을 위한 선원항은 SCALE4.4a 코드 시스템에 포함된 ORIGEN-S 코드[4]를 이용하였다. 검증계산결과 방사선 차폐 계산에서는 표면에서의 수송용기 측면방향 최대선량은 0.283mSv/hr, 축방향 최대선량은 0.489mSv/hr이며 2m 지점에서의 측면방향 최대선량은 0.0471mSv.hr, 축방향 최대선량은 0.0207mSv/hr로 국내 원자력 법규와 미국법령집[5], IAEA의 안전운반규정[6](표면: 2mSv/hr, 2m: 0.1mSv/hr)을 만족하였다. 그리고 핵임계도 계산에서는 MCNP 코드에서는 0.93139±0.00074, KENO-V.a 코드에서는 0.9734±0.0016로 계산되었다.

ABSTRACT

Both radiation shielding and criticality safety analysis were already evaluated for KSC-4 Spent Nuclear Fuel Transport Cask using 2-D DOT4.2 and KENO-IV by Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI) in 1990. But because KSC-4 was designed as partly complicated geometry and computing time was greatly reduced through development of a computing system, we purposed to give more accurate information using 3-D modeling for designing the large capacity transport cask. Radiation shielding and criticality safety analysis was evaluated for KSC-4 using Monte Carlo Code, MCNP4B and benchmark calculation for criticality safety analysis was carried through SCALE4.4a, KENO-V.a. Source term for radiation shielding calculation was calculated using SCALE 4.4a, ORIGEN-S. As a result, the maximum dose rates are, under normal transport conditions, 0.283mSv/hr on the cask circumferential surface, 0.489mSv/hr on the cask upper surface, and 0.0471mSv/hr at 2m from the cask circumferential surface, 0.0207mSv/hr at 2m from the cask upper surface. These values satisfy the guidelines prescribed by the Korean Atomic Law, The Code of Federal Regulations(U.S.A.) and the IAEA regulations for safe transport of radioactive materials(2mSv/hr on the cask surface, 0.1mSv/hr at 2m from the cask). The calculated keff is 0.93139±0.00074 by MCNP, 0.9734±0.0016 by KENO-V.a.

1. 서 론

사용후핵연료의 저장 및 운반은 사용후핵연료의 처리 과정에서 매우 중요한 요소이다. 원자력발전소 내의 저장고에서 사용후핵연료의 저장이 가능하지만 그 용량에는 한계가 있으므로 발전소 밖의 별도의 저장고를 필요로 하게 된다. 물론 사용후핵연료의 재처리에도 필연적으로 그 운반이 필요하다. 사용후핵연료는 다양한 동위원소 형태의 많은 양의 방사성 물질을 포함하며 이러한 고준위 방사성 물질의 적절한 차폐를 위해서 복잡한 형태의 운반용기의 설계가 필요하다.

KSC-4 수송용기는 PWR 사용후핵연료 집합체 4기를 장전하여 운송할 수 있는 운반용적을 갖도록 1990년 한국원자력연구소에서 연소도 38,000MWD/MTU과 3년의 냉각기간을 가진 핵연료를 기준으로 하여 방사선 차폐 및 핵임계도에 대한 설계를 하였다. 당시 설계 코드로는 방사선 차폐 계산에 대해 2차원 코드인 DOT4.2를 사용하였고 핵임계도 계산에서는 KENO-IV를 사용하였다.

KSC-4 수송용기는 전체적인 사각형 형태이지만 모서리가 둥글게 깎인 형태로 설계되었다. 그러나 DOT4.2나 KENO-IV에서는 이러한 부분에 대한 모델링이 불가능하여 유효체적 또는 차폐체 두께를 기준으로 근사 모델링을 하여 계산이 수행되었다. 최초 설계로부터 10년이 지난 현재에는 전산기기의 발달로 계산시간이 대폭 단축됨에 따라 계산의 정확도에 초점이 맞추어 지고 있는 실정이다. 이에 정밀한 3차원 모델링이 가능한 MCNP 코드를 이용함으로써 보다 정확한 계산을 수행하고자 하였고 핵임계도 계산의 경우 KENO-V.a 코드를 이용하여 검증 계산을 수행하였다.

2. 방사선 차폐 계산

2.1 사용후 핵연료 선원항 계산

핵연료가 원자로에서 중성자에 조사되면 일반적으로 fission products, actinides, activation products의 세가지 그룹으로 형성되며 수송용기 외부에서 계측되는 방사선의 영향을 예측하기 위해서는 사용후핵연료로부터 방출되는 이러한 핵종들에 의한 중성자 및 감마선의 세기와 스펙트럼이 필요하다.

계산에 사용된 ORIGEN-S 코드는 SCALE 코드 시스템에서 모듈로 사용될 수 있도록 원래의 ORIGEN 코드를 부분적으로 수정한 코드로서 방사성 물질의 build-up, decay, processing 계산을 위해 널리

사용되어져 오고 있으며 가장 중요한 역할은 핵분열에 의한 생성물질의 예측이라고 할 수 있다. KSC-4 수송용기는 PWR 사용후핵연료 4기를 장전하여 운반할 수 있는 용적으로 설계되었고 방사선 차폐 계산의 선원항으로 사용될 사용후핵연료의 모델은 고리 3,4호기, 울진 1,2호기에서 사용되는 17×17 핵연료 집합체로서 농축도 3.2w/o, 연소도 38,000MWD/MTU 그리고 3년의 냉각기간을 가진 것으로 가정하였다. 계산에 필요한 핵연료 집합체에 대한 자료는 KSC-4 수송용기 안전성분석 보고서를 참조하였다. ORIGEN-S 코드로부터 얻어진 중성자 및 광자의 스펙트럼은 표 1 과 표 2 에서 나타내었다.

2.2 MCNP4B 코드를 이용한 방사선 차폐 계산

KSC-4 수송용기는 전체적으로 정사각형의 형태이나 감마선 차폐물질인 납부분의 모서리가 수송용기 중앙으로부터 측면방향으로 X, Y 좌표를 가정하였을 때, 각각 19.17cm 떨어진 지점이 중심인 64 ° 의 내각을 가진 부채꼴형태이며 중성자 차폐물질인 레진부분도 모서리가 중심이 각각 17.777 cm 이고 71 ° 의 내각을 가진 부채꼴 형태이다. 이러한 KSC-4수송용기의 기하학적인 형태는 코드에 따라 모델링에 제한을 주게 된다. 따라서 MCNP 코드를 사용한 정밀한 3차원 모델링을 통해 둥근 모서리 부분에 대해서도 정확하게 표현함으로써 모델링에 의한 오차를 상당부분 감소시켰다고 볼 수 있다. 계산을 위한 모델링은 수송용기의 대칭성을 이용하여 수송용기를 측면방향으로 1/4 모델링을 하였고 이 때 1/4 모델링의 대칭면은 MCNP 코드에서 제공되는 반사체 경계(Reflective boundary)면으로 지정하였다. 모든 차폐물질 영역에 대하여 실제 설계 수치와 동일하게 모델링 하였으며 MCNP에 의한 모델링을 그림 1과 그림 2에서 나타내었다. 그림 1은 수송용기의 측면방향 단면을 나타낸 1/4 모델링이며 그림 2는 수송용기의 축방향 단면의 하단부를 확대한 것이다. 계산 결과의 보수성을 위해 수송용기 중앙부위가 물이 없는 Dry Type으로 가정하였다.

국내 방사선 안전관리등의 기술 기준에 관한 규칙 및 IAEA 방사성 물질 안전운반 규정에 따르면 KSC-4 수송용기가 해당되는 B(U), B(M)형 운반물에 대해 표면에서의 최대선량이 2mSv/hr, 수송용기 표면으로부터 2m떨어진 지점에서의 최대선량이 0.1mSv/hr를 넘지 않도록 규정하고 있다. 따라서 MCNP를 이용한 선량계산에서도 F2 Tally를 이용하여 표면 및 2m지점에서의 선량을 계산하였다. 각각 Tally Segment 카드를 사용하여 축방향으로는 수송용기를 12개의 분할영역로 나누고 측면에서는 표면에서 5개의 분할영역, 2m지점에서 3개의 분할영역으로 나누었다. 그리고 모서리에서는 각각 71 ° 의 내각을 가진 부채꼴 형태에 대해 5 ° 간격으로 14개의 분할영역으로 나누었다. 그림 3과 그림 4는 MCNP 코드에 의한 측정 면을 나타내었다. 그림 3은 수송용기 둘레에 대한 측정 면이고 그림 4는 축방향으로의 측정 면을 나타낸 것이다.

F2 Tally에 의해 얻어진 중성자속을 선량으로 나타내기 위한 환산인자(Flux to Dose Conversion Factor)는 ICRP 74를 이용하였다. 선원항은 ORIGEN-S로부터 얻은 중성자 및 감마선 스펙트럼을 사용하였는데 중성자 선원의 경우 주요 핵종별로 Watt fission spectrum과 Maxwell spectrum을 이용한 연속스펙트럼을 이용하였다.

2.3 MCNP 코드 계산결과

MCNP 코드를 이용한 수송용기 표면 및 2m 지점에서의 방사선 차폐계산 결과를 표 5, 표 6에서 정리하였다. 표면에서의 최대선량은 수송용기 상부에서 0.489mSv/hr이며 2m지점에서의 최대선량은 측면 중앙에서 0.0471mSv/hr로 나타났다. 이는 국내 원자력 법규 및 IAEA의 기준에도 만족하는 값이다. 1990년 수행된 2차원 DOT4.2코드에 의한 차폐 계산과 비교해 볼 때 측면방향에서는 MCNP 코드에 의한 선량이 약간 높은 값을 보이는데 이는 2차원 모델링과 3차원 모델링의 차이에서 기인한 것이다. 수송용기 상· 하부에서는 서로 엇갈린 결과를 보이고 있다. DOT4.2를 이용한 차폐 계산시에는 각 차폐물질에 대해 유효체적에 따라 원통형태로 모델링하였으며 수송용기 하부가 상부보다 감마선 차폐체의 경우 2cm, 중성자 차폐체의 경우 2mm 두꺼운 점을 감안한다면 정밀한 모델링에 의한 차이로 볼 수 있다. 그러나 전체적으로 표면과 2m 지점에서의 선량의 경향은 비슷한 것으로 보인다. 그림 5와 그림 6은 표면과 2m지점에서 수송용기 둘레에 따른 선량 분포를 3차원으로 나타낸 것이다.

3. 핵임계도 계산

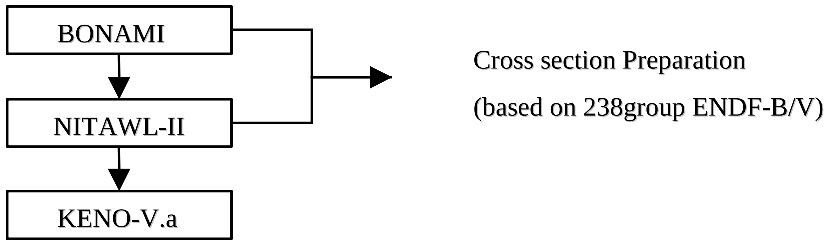
사용후 핵연료 수송용기의 유효증배계수(k_{eff})를 계산하기위해 MCNP KCODE 옵션을 이용하여 계산하고 SCALE4.4a의 CSAS 모듈을 이용한 KENO-V.a코드로 검증계산을 수행하였다. k_{eff} 계산을 위한 핵연료 모델은 1990년 KSC-4 수송용기의 설계에 사용된 핵연료의 모델을 그대로 이용하여 농축도 3.3w/o의 신핵연료를 사용하였으며 계산의 보수성을 위해 수송용기의 내부가 물로 채워진 wet type으로 가정하였다.

3.1 MCNP KCODE 옵션을 이용한 핵임계도 계산

KCODE 옵션은 MCNP 코드에서 k_{eff} 를 결정하기 위해 사용되는 옵션이다. 차폐 계산시와 동일한 기하학적 모델링을 사용하였으며 200cycle의 계산 주기를 두었다. KCODE 옵션에 의한 KSC-4 수송용기의 유효증배계수 k_{eff} = 0.93139±0.00074로 계산 되었다. 그림 8은 KCODE 계산에 의한 cycle에 따른 k_{eff} 값을 나타낸 것이다.

3.2 SCALE4.4a – KENO-Va 코드를 이용한 핵임계도 계산

KENO-Va는 유효증배계수를 구하기 위한 3차원 몬테칼로 코드이다. SCALE4.4a에서는 CSAS [7]모듈을 이용하여 반응단면적 재처리와 KENO-V.a 계산을 수행한다. 이번 계산에서는 CSAS25 모듈을 이용하여 KENO-V.a 코드 계산을 수행하였다. CSAS25의 계산 과정은 다음과 같다.



여기서 BONAMI 와 NITAWL-II 는 Resonance Self Shielding을 고려하여 최초 238 다군반응단면적을 KENO-V.a 코드에서 사용할수 있는 AMPX format library로 처리하는 모듈이다.

KENO-V.a 계산을 위한 모델링은 그림 7과 같이 가정하였다. MCNP 코드만큼 정밀한 모델링은 할 수 없지만 핵연료 집합체에 대한 핵연료봉별 묘사를 하였고 Cavity내의 물의 양도 실제 조건과 거의 동일하게 묘사하였다. KSC-4수송용기 내·외부의 지배적인 구조가 핵연료 집합체 4기가 꽉 찬 정사각형의 구조를 띠고 있으므로 KENO-V.a모델링에서도 정사각형으로 표현하였다. KENO-V.a코드 계산에 따른 유효증배계수 k_{eff} = 0.9734 ± 0.0016로 나타났다. 그림 9는 KENO-V.a에 의한 cycle에 따른 k_{eff} 값을 나타낸 것이다. 표 7에서 KCODE, KENO-V.a에 의한 계산 결과와 1990년 설계당시 계산 결과를 정리하였다.

KCODE와 KENO-V.a에 의한 k_{eff} 계산 결과 약 4%의 차이를 보이고 있다. 이는 모델링의 차이, 다군반응단면적을 사용하는 KENO-V.a코드와 연속반응단면적을 사용하는 MCNP 코드의 차이 그리고 인·허가 코드로 사용되는 SCALE 코드의 보수적인 특성등에 의한 것으로 보인다. 그러나 1990년의 KENO-IV의 계산과는 큰 차이를 보이고 있는데 이는 모델링에서의 차이에 주로 기인한 것으로 보인다. 당시 계산에서는 핵연료 집합체 외곽 구조물에 대해 원형으로 표현함으로써 물의 양이 실제보다 과도하게 모델링 된 것으로 보인다. 당시 모델링과 동일한 형태로 모델링하여 계산을 수행한 결과 당시와 비슷한 값을 얻을 수 있었다. 그림 10은 1990년 설계당시의 수송용기 모델링 형태이다.

5. 결 론

본 연구에서는 정밀한 3차원의 KSC-4 사용후핵연료 수송용기 방사선 차폐 및 핵임계도 계산을 수행하고자 MCNP4B 코드 및 SCALE4.4a 코드 시스템을 이용하여 계산을 수행하였다. MCNP에서 계산된 결과와 기존 계산결과와의 비교를 통해 MCNP를 이용한 사용후핵연료 수송용기의 방사선 안전성을 검증함으로써 특히 기하학적 모델링에 대한 검증도구로서의 그 활용성을 도출할 수 있었다.

본 연구에서 도출된 신뢰성 있는 결과를 바탕으로 3차원 MCNP 코드를 이용한 수송용기 방사선 차폐 및 핵임계 안전성 분석은 앞으로 기존 수송용기 차폐 및 핵임계 안전성 평가코드 결과의 검증 및 보완에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 더욱이 KSC-4 수송용기의 안전성 검증을 수행하는 과정에서 축적된 자료들은 추후 설계될 수송용기의 방사선 안전성 평가 등의 연구에도 직접 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력 안전기술원 및 한국과학재단 지정 우수연구센터인 방사선안전신기술 연구센터의 지원에 의해서 수행되었음.

참고 문헌

1. 강희영 외, "KSC-4 수송용기 안전성 분석 보고서," KAERI/TR-137/89, Korea Atomic Energy Research Institute, 1990.
2. J. F. Breismeister, "MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.
3. L. M. Petrie, N. F. Landers, "KENO V.a: An Improved Monte Carlo Criticality Program with Supergrouping," ORNL/NUREG/CSD-2/R6, Oak Ridge National Laboratory, March, 2000.
4. O. W. Hermann, R. M. Westfall, "ORIGEN-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Buildup and Decay, and Associated Radiation Source Term," ORNL/NUREG/V-2/R6, March 2000.
5. National Archives and Recods Administration, "Packaging and Transportation of Radioactive Materials," Code of Federal Regulations, Title 10, Part 71, 1992.
6. International Atomic Energy Agency, IAEA Safety Standard Series No. ST-1, 1996
7. L. M. Petrie, N. F. Landers, "CSAS: Control Module for Enhanced Criticality Analysis Sequences, " ORNL/NUREG/CSD-2//V2/R6, Oak Ridge National Laboratory, March, 2000.

표 1. Neutron spectrum from 4 PWR Assembly

Nuclide	neutrons/sec
TH232	3.00E-08
U233	2.50E-02
U234	9.80E+02
U235	1.10E+01
U236	2.27E+02
U238	1.89E+02
NP237	3.65E+02
PU238	6.44E+06
PU239	5.06E+05
PU240	8.31E+05
PU241	3.80E+03
PU242	3.23E+03
AM241	1.53E+06
AM242M	6.13E+01
AM243	5.23E+04
CM242	1.28E+06
CM244	8.96E+06
CM245	6.19E+02
CM246	1.69E+02
*PU240	5.52E+06
*CM242	6.40E+06
*CM244	1.17E+09
*CF252	1.50E+06
TOTAL	1.23E+09

* by Spontaneous Fission

표 2. Photon Spectrum from 4 PWR Assembly

Energy(MeV)	Photons/sec
1.00E-02	1.4401E+16
5.00E-02	1.31066E+16
1.00E-01	4.14568E+15
2.00E-01	3.7113E+15
3.00E-01	1.00637E+15
4.00E-01	7.61398E+14
6.00E-01	6.89359E+15
8.00E-01	1.36319E+16
1.00E+00	2.56157E+15
1.33E+00	6.22439E+14
1.66E+00	2.35403E+14
2.00E+00	2.02793E+13
2.50E+00	6.48649E+13
3.00E+00	1.53837E+12
4.00E+00	1.89441E+11
5.00E+00	0.000121995
6.50E+00	3.5151E-05
8.00E+00	4.47115E-06
1.00E+01	5.9667E-07
TOTAL	6.11632E+16

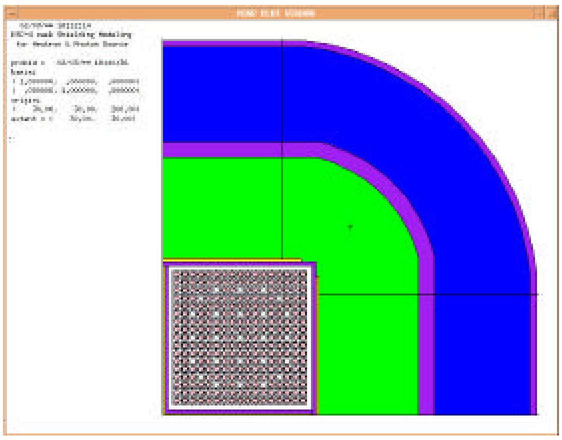


그림 1. MCNP코드에 의한 측면방향 단면

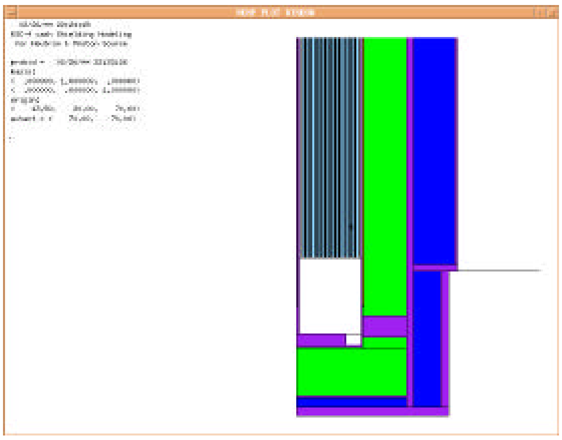


그림 2. MCNP코드에 의한 축방향 단면 하단부

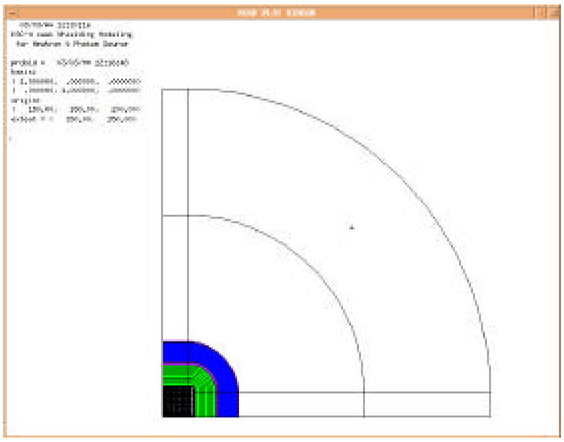


그림 3. KSC-4 둘레 측정 면

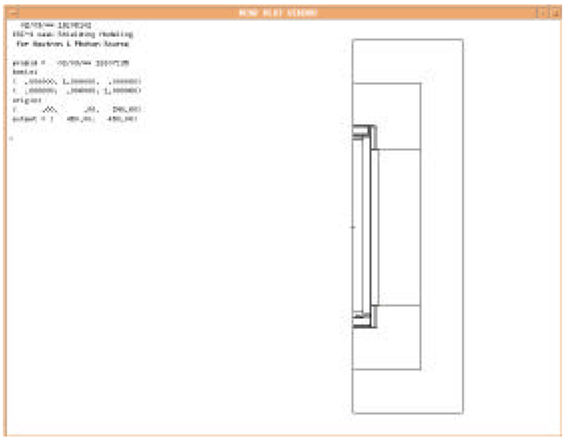


그림. 4 축방향 측정 면

표 3. 중성자 선량환산인자

E(MeV)	*E*/*f*(pSv cm2)
1.00E-09	5.24
1.00E-08	6.55
2.50E-08	7.6
1.00E-07	9.95
2.00E-07	11.2
5.00E-07	12.8
1.00E-06	13.8
2.00E-06	14.5
5.00E-06	15
1.00E-05	15.1
2.00E-05	15.1
5.00E-05	14.8
1.00E-04	14.6
2.00E-04	14.4
5.00E-04	14.2
1.00E-03	14.2
2.00E-03	14.4
5.00E-03	15.7
1.00E-02	18.3
2.00E-02	23.8
3.00E-02	29
5.00E-02	38.5
7.00E-02	47.2
1.00E-01	59.8
1.50E-01	80.2
2.00E-01	99
3.00E-01	133
5.00E-01	188
7.00E-01	231
9.00E-01	267
1.00E+00	282
1.20E+00	310
2.00E+00	383
3.00E+00	432
4.00E+00	458
5.00E+00	474
6.00E+00	483
7.00E+00	490
8.00E+00	494
9.00E+00	497
1.00E+01	499
1.20E+01	499
1.40E+01	496
1.50E+01	494
1.60E+01	491
1.80E+01	486
2.00E+01	480
3.00E+01	458
5.00E+01	437
7.50E+01	429
1.00E+02	429
1.30E+02	432
1.50E+02	438
1.80E+02	445

표 4. 감마선 선량환산인자

E(MeV)	*Ka*/*f*(pGy cm2)	*E*/*Ka*(Sv/Gy)
1.00E-02	7.43	0.00653
1.50E-02	3.12	0.0402
2.00E-02	1.68	0.122
3.00E-02	0.721	0.416
4.00E-02	0.429	0.788
5.00E-02	0.323	1.106
6.00E-02	0.289	1.308
8.00E-02	0.307	1.433
1.00E-01	0.371	1.394
1.50E-01	0.599	1.256
2.00E-01	0.956	1.173
3.00E-01	1.38	1.093
4.00E-01	1.89	1.056
5.00E-01	2.38	1.036
6.00E-01	2.84	1.024
8.00E-01	3.69	1.01
1.00E+00	4.47	1.003
2.00E+00	7.55	0.992
4.00E+00	12.1	0.993
6.00E+00	16.1	0.993
8.00E+00	20.1	0.991
1.00E+01	24	0.99

표 5. 수송용기 표면에서의 최대 선량 계산 결과

(mSv/hr)

	Side		Top		Bottom	
	MCNP	DOT4.2	MCNP	DOT4.2	MCNP	DOT4.2
Neutron	0.052	0.034	0.396	0.206	0.337	0.577
Photon	0.221	0.176	0.093	0.023	0.034	0.044
TOTAL	0.283	0.21	0.489	0.229	0.371	0.621

표 6. 수송용기 표면으로부터 2m지점에서의 최대 선량 계산 결과

(mSv/hr)

	Side		Top		Bottom	
	MCNP	DOT4.2	MCNP	DOT4.2	MCNP	DOT4.2
Neutron	0.007	0.006	0.015	0.021	0.010	0.036
Photon	0.0401	0.037	0.0057	0.005	0.003	0.006
TOTAL	0.0471	0.043	0.0207	0.026	0.013	0.042

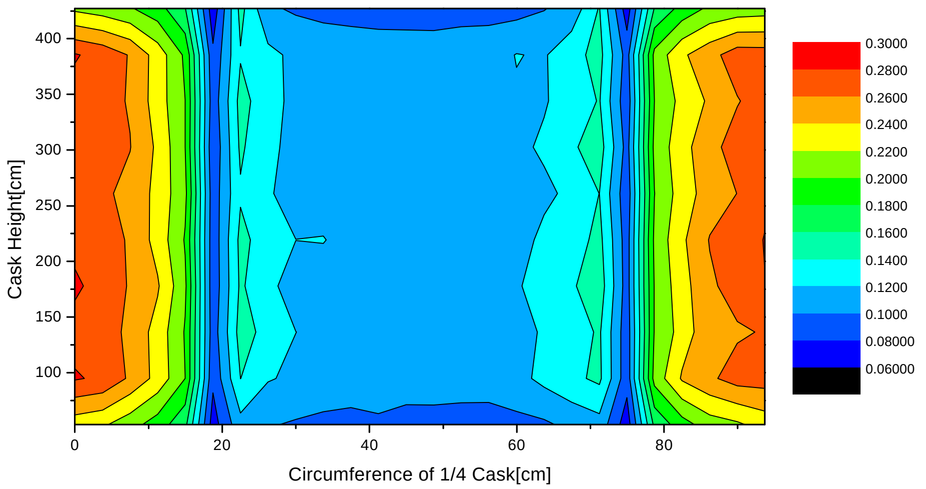


그림 5. KSC-4 표면 둘레에서의 선량분포

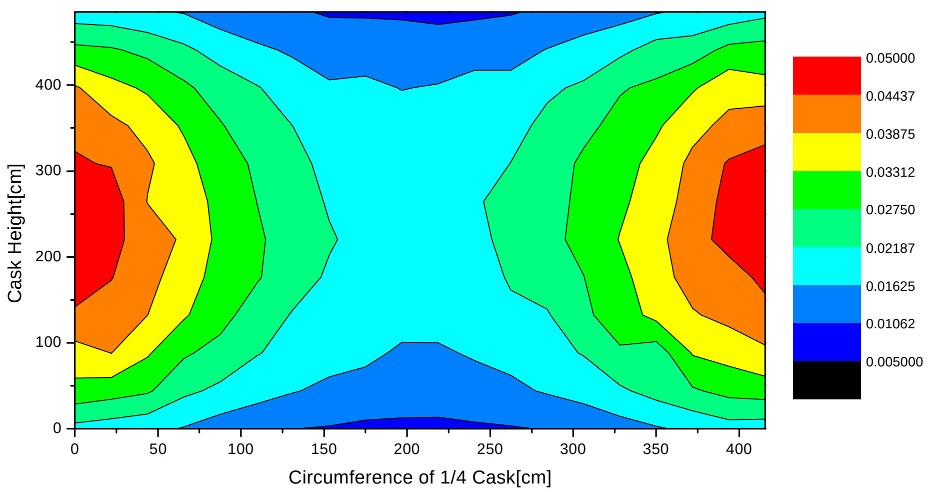


그림 6. KSC-4 둘레에서 2m떨어진 지점에서의 선량분포

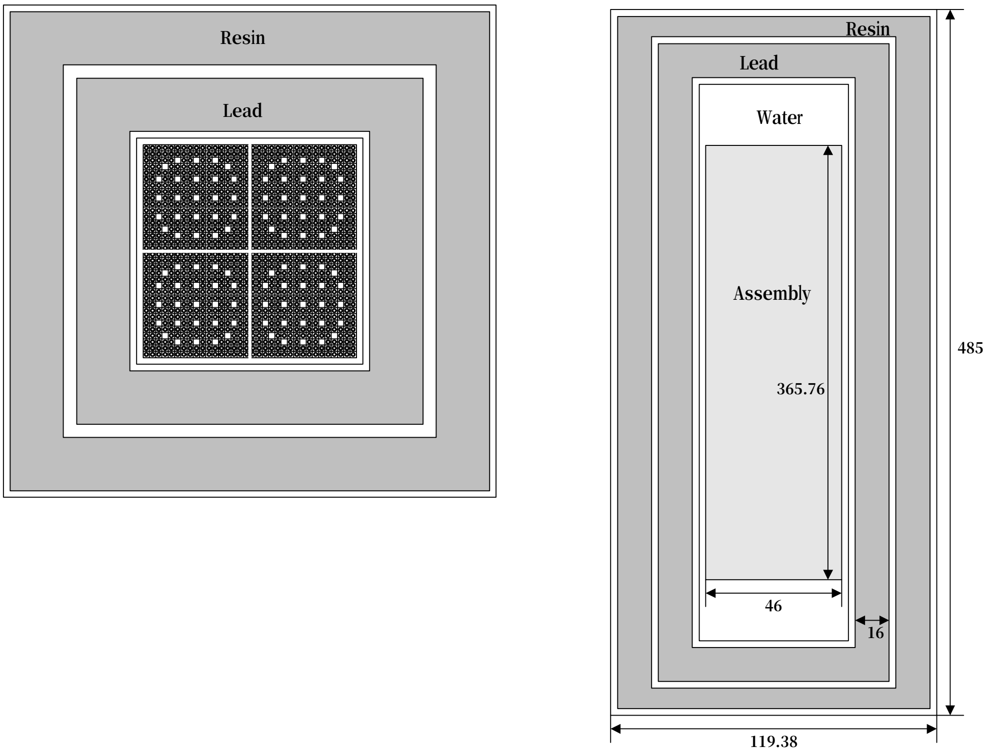
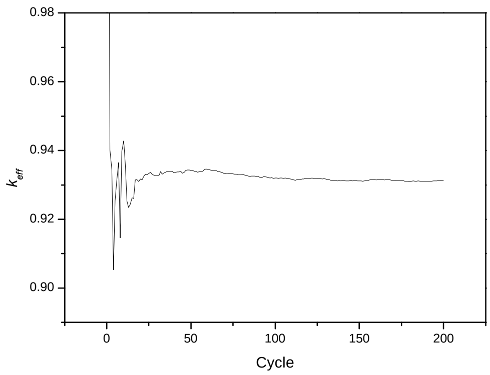


그림 7. KENO-V.a를 이용한 KSC-4 모델링



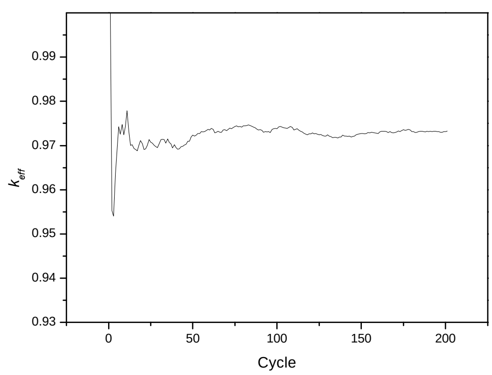


그림 8. KCODE 에 의한 k_{eff} cycle

그림 9. KENO-V.a에 의한 k_{eff} cycle

표 7. k_{eff} 계산결과

	k_{eff}
KCODE	0.93139±0.00074
KENO-V.a	0.9734 ± 0.0016
KENO-IV(1990년)	0.84345 ± 0.0041
KENO-V.a(1990년 모델)	0.8637 ± 0.0017

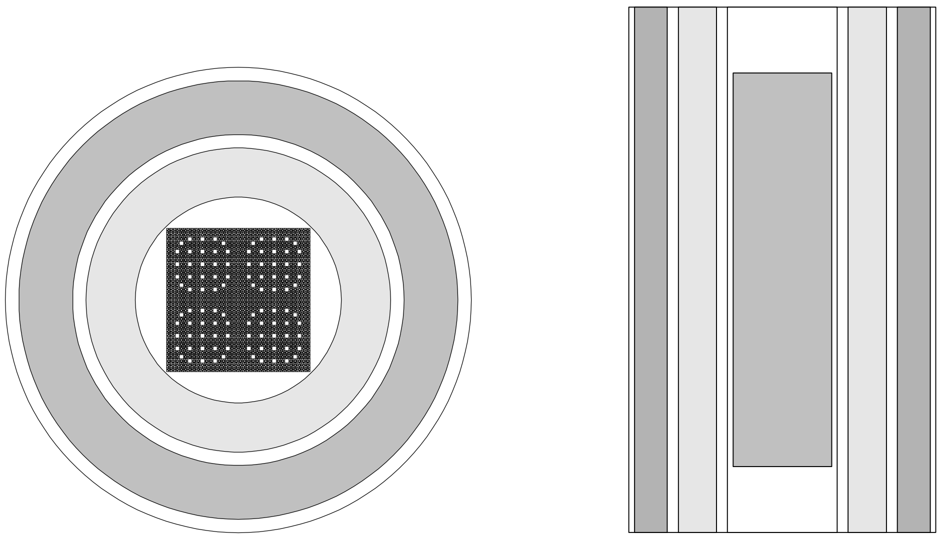


그림 10. 1990년 수행된 KENO-IV를 이용한 KSC-4 모델링