

Fission Moly 표적 장전에 대한 HANARO 노심 영향도 평가

Characteristics Evaluation on HANARO Core with Fission Moly Target Loading

조동건, 김명현

경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리

요 약

MCNP와 일점 동특성 방정식을 이용하여 Fission Moly 표적이 삽입된 HANARO 노심에 대한 핵특성 분석을 수행하였다. 표적이 삽입된 노심에 대하여 표적이 삽입되지 않은 노심의 출력 및 중성자속 분포를 상호 비교하였다. 분석결과, 표적 삽입으로 인한 노심에의 영향도는 매우 작은 것으로 나타났다. MCNP를 이용하여 산출한 표적에 의한 반응도 변화량인 $0.136\% \Delta \rho$ 를 일점 동특성 방정식의 입력값으로 적용하여 step 형식으로 반응도가 삽입된 경우와 ramp 형식으로 반응도가 삽입된 경우를 가정하여 표적 삽입시 원자로 출력 변화 및 이에 따른 노심 최대 핵연료 온도를 보수적인 가정을 적용하여 사고해석을 수행하였다. 분석 결과, 반응도 삽입으로 인한 사고시 최대 핵연료의 온도가 255°C 이하로서 제한치인 485°C 이하로 유지되었다. 따라서 표적 삽입으로 인한 과도현상시 사고가 유발된다해도 원자로심의 안전성이 위배되지 않음을 확인하였다.

Abstract

Characteristics evaluation on HANARO core with Fission Moly Target loading was performed using MCNP-4B and Point Kinetics Equation. Peaking factor and neutron flux distribution of both core with and without target was compared. The variation of the core by target loading was negligible. Reactivity worth induced by target loading was known to be $0.136\% \Delta \rho$ by MCNP-4B calculation. Thermal power generation rate and maximum fuel temperature to the time was evaluated assuming that reactivity induced accident was occurred. For the reactivity induced accident, reactor safety was assured because maximum fuel temperature maintained below 255°C under the limit of 485°C . Therefore, although reactivity induced accident occurred by target loading, reactor integrity was conserved.

1. 서 론

Fission Moly 표적 설계는 표적의 제조(fabrication) 및 조사(irradiation), 화학처리(chemical process), 상업적 생산목표량, 시장에의 공급 일정(delivery time) 등의 일련의 과정을 반영하여야 한다. 표적 설계를 효율적으로 수행하기 위해서는 표적의 제조성이 좋고, 단위 우라늄당 생성되는 Mo-99의 양을 최대화하기 위해 생성수율(Ci ^{99}Mo /gU)을 높여야 하며, 후처리 화학공정에서의 폐기물을 최소화하여야 한다. 또한 이러한 개념하에 구성된 설계안은 핵적 안전성 및 열수력적 안전성을 만족하여야 하며, 원자로의 안전성을 절대 위배시켜서는 안된다. 그러므로 표적 조사시 필수적으로 수반하는 표적 및 원자로의 핵적·열수력적 안전성 평가는 매우 중요한 항목이다.

지금까지 표적 핵설계 분야에서는 표적 설계를 수행해 오는 과정에서 다음과 같은 연구를 수행한 바 있다. 우선적으로 표적 핵설계 체계로서 MCNP-ORIGEN 전산체계를 제시하고, 이의 적용 타당성에 대한 신뢰도를 면밀히 검토하여 그 신뢰성을 입증하였다. 또한, LEU 및 HEU를 이용하는 Mo-99 생산용 표적 핵설계시 고려해야 할 각 설계인자를 정의하고 이 인자들에 대한 민감도 분석 등을 수행하였다. 여기서 얻어진 민감도 분석결과를 바탕으로 HEU 표적의 경우 전기화학적 도포(electro-deposited)된 표적 설계안을 제시하였으며, 이 설계안이 핵적 안전성, 열수력적 안전성 및 상업적 목표를 만족하고, 폐기물 발생량 및 Mo-99의 생성수율(Ci ^{99}Mo /gU) 측면에서 우수한 효율성을 갖는 표적 설계안임을 확인하였다.

지금까지의 연구에서는 표적의 핵적·열수력적 안전성 측면만이 주로 평가되었으며, 표적 삽입으로 인한 원자로의 안전성에 대해서는 개략적으로만 평가되었다. Mo-99는 반감기가 67시간으로 매우 짧아서 지속적인 생산을 하여야 하므로 대부분의 Fission Moly 생산의 경우에는 Backup 원자로를 병행하여 생산한다. 즉, 원자로 2기를 이용하여 교대로 Mo-99를 생산하므로 원자로를 정지하고 표적을 장전한다. 그러나, HANARO는 다목적 연구로로서 Fission Moly 전용 생산로가 아니므로 원자로를 정지시키고 표적을 삽입하면 다른 실험에 부정적인 영향을 줄 수 있으므로 표적은 원자로 운전중에 삽입될 계획 하에 있다. 그러므로 운전 중에 핵연료가 원자로에 삽입되므로 원자로는 표적 삽입시 과도 현상을 필수적으로 유발하게 되며, 이는 반응도 유발사고의 가능성이 다른 Fission Moly 생산 원자로에 비해 크다 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 우선적으로 Fission Moly 표적 삽입으로 인한 원자로의 영향도를 평가하였다. 평가된 변수로는 표적 삽입으로 인한 출력분포의 변화, 침투 출력치 변화, 중성자속의 변화 등이다. 또한 평가된 노심의 영향도를 바탕으로 운전중 표적삽입으로 인한 원자로 과도현상시 수반될 수 있는 사고를 가정하여 노심의 안전성을 평가하였다.

2. 제안된 HEU 표적 설계안

2.1 OR 조사공 제원

평상시 OR 조사공은 모형핵연료 다발이 장전되어 있으나, 그림 1은 Fission Moly 표적 및 모형핵연료 다발(dummy fuel assembly)이 삽입되지 않은 경우, Fission Moly 표적이 삽입될 OR 조사공의 단면도를 나타낸다.

그림에서 보면 OR Tube 안쪽 면에 Zircaloy Guide Tube가 그려져 있는데, 이는 운전중 표적 장전(on-power target loading)시, 표적이 안전하게 OR 조사공에 안착할 수 있도록 도와주는 역할을 한다. 개념상 설치한 것이며, 이는 차후에 장치 설계팀과의 협조체제를 통하여 최적화 되어야 할 것이다. 그러나 일부 수정된다 하여도 구조재이므로 원자로에 미치는 영향은 그리 크지 않을 것으로 판단된다. 일단 개념적으로 원자로의 영향도 평가시 OR 조사공의 제원은 그림 1과 같이 유동관 안쪽 면에 5mm 두께의 Zircaloy Tube가 설치되어 있는 것으로 가정하고 계산을 수행

하였다.

2.2 Fission Moly 표적 제원

표적 연료는 93% UO_2 이며, 밀도는 10.96 g/cm^3 이다. 그림 2는 Fission Moly 표적이 삽입된 상태의 OR 조사공 및 표적 단면도이다. 표적은 Tube Type으로 설계되었으며, 그림 1 및 표 1에는 표적의 제원이 비교적 상세하게 제시되어 있다. 표적은 지름 3.175cm, 두께 0.076cm를 갖는 SUS 피복재 안쪽 면에 Recoil Barrier Material로 Ni을 $10\mu\text{m}$ 두께로 도포한 후, 다시 Ni barrier 위에 UO_2 Fuel을 Electro-deposited 시키고 He Backfill gas를 채운 후 밀봉한 형태를 갖는다. 따라서 표적은 SUS 피복재 바깥쪽 면에서만 냉각이 이루어진다. 이 경우 냉각수가 흐르는 공간의 간격은 18.25mm로서 충분한 유로를 형성할 수 있다. 이 설계안은 핵적 안전성, 열수력적 안전성 및 상업적 목표를 만족하고, 폐기물 발생량 및 Mo-99의 생성수율($\text{Ci } ^{99}\text{Mo/gU}$) 측면에서 효율성을 갖는 표적 설계안임을 확인하였으나, 운전중 표적 삽입 장치와의 연계가 완벽하지 않으므로 약간의 보완이 이루어지고 있는 중이다. 그러나 향후 설계안이 약간 변형된다해도 현 설계안의 성능을 크게 벗어나지 않을 것이므로 이 설계안을 바탕으로 산출된 노심의 영향도는 향후 수정된 설계안이 도출되어 다시 노심에의 영향도가 평가된다 하여도 현재 산출된 자료와 거의 차이가 없을 것으로 판단된다.

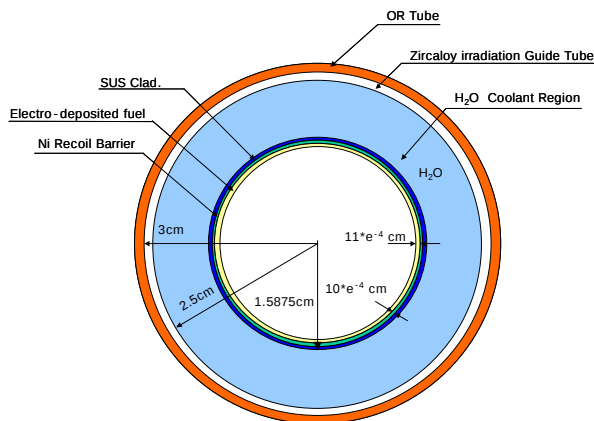


그림 1 Plane-view of OR hole loaded with Moly Target

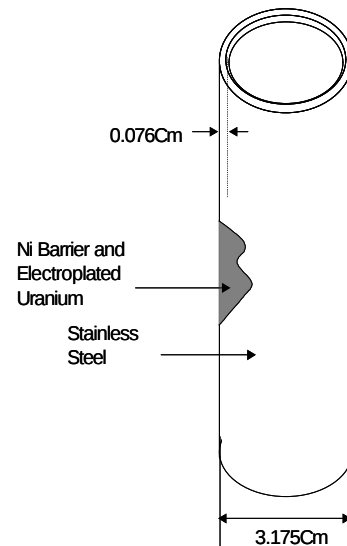


그림 2 Electrodeposited Target

표 1 설계안의 제원

Case #	Axial Length (cm)	Target O.D. (cm)	Thickness (μm)			U Loading (g/target)	Total U Loading in OR 3 & 5 (g)
			Clad.	Recoil Barrier	UO2 Fuel		
4-4	40	3.175	760	10	11	4.04	8.08

3. 노심의 영향도 평가

3.1 전산 코드 및 모델링

표적 삽입으로 인한 노심에의 출력분포 영향을 평가하기 위한 전산 체계로서 MCNP-4B를 사

용하였다. 그림 3은 노심 핵특성 분석을 위한 MCNP 모델링을 나타낸다. HANARO 핵연료심의 평균온도가 약 102℃ 정도이고, 냉각수의 평균온도가 40℃ 정도이므로 이 온도와 일치하는 반응 단면적 라이브러리를 생산하여 특성 분석을 수행하여야 하나, 표적 삽입 유무에 따른 핵특성 차이만이 관건이고, 또한 상온 라이브러리를 사용한다해도 실제 온도와 차이가 크지 않으므로 T=300K에서의 라이브러리를 사용하였다.

HANARO는 독봉을 사용하지 않으며, 초기노심을 위해 특별히 제작된 핵연료도 없다. 따라서 초기노심에는 노심의 반응도 제어능력 및 정지 여유도를 고려하여 Fresh Fuel Assembly를 부분 장전한다. 따라서 초기노심에는 일부가 모형핵연료다발로 장전되어 있다. 연소가 진행됨에 따라 반응도가 떨어지므로 모형핵연료다발을 인출하고 그 위치에 Fresh Fuel Assembly를 장전하는 작업을 반복적으로 수행하므로써 평형노심에 이르게 된다. 그러므로 표적 삽입으로 인한 정확한 노심의 영향도를 평가하여 FSAR의 자료와 비교하기 위해서는 평형노심 상태의 각 핵종에 대한 수밀도가 적용되어야 하나, 사실상 어떤 방법으로 모델링하든 정확한 모델링은 어려우며, 앞서도 언급했듯이 표적 삽입유무에 따른 변화의 평가만이 주요 관심이므로 모든 핵연료는 Fresh Fuel Assembly가 장전되어 있다고 모델링하였다. 그림 3은 OR3 조사공과 OR5 조사공에 Fission Moly 표적이 삽입된 모델을 나타낸다.

HANARO는 반응도의 제어를 제어봉을 이용하여 조절하므로 주기초에서 주기말로 변함에 따라 제어봉의 위치도 바뀌게 되고 이는 출력분포에 많은 영향을 끼치게 된다. 따라서 주기초(BOC)에서 주기말(EOC)에 걸쳐 표적 삽입으로 인한 출력분포의 영향도는 변할 수 있다. 이를 고려하기 위해 제어봉의 위치만을 변화시켜 주기초 및 주기말의 표적 삽입으로 인한 노심에의 영향도를 각각 평가하였다. 즉, MCNP의 계산 모델에서 제어봉은 주기초에는 아래쪽에 위치해 있으며, 주기말에는 노심 상부에 치우쳐 있다. 주기초 및 주기말의 제어봉 위치는 현 HANARO의 운전 자료를 근거로 사용하였다.

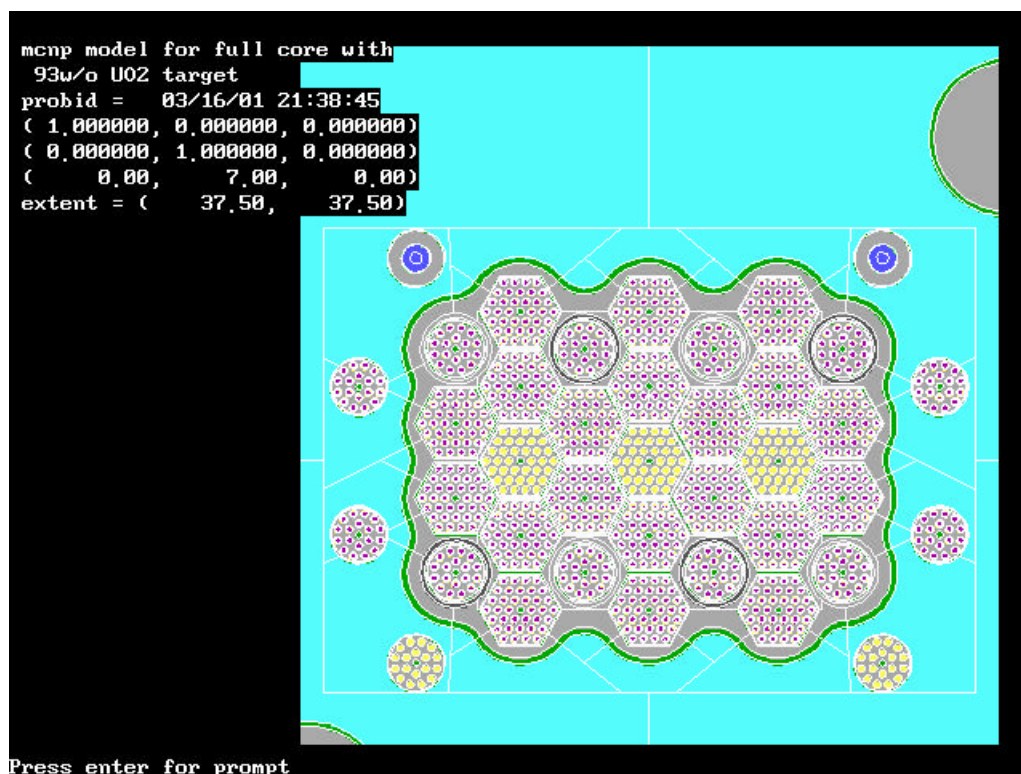


그림 3 HANARO 노심의 MCNP 모델

3.2 출력분포의 변화

원자로에 표적이 삽입되면, 표적 삽입으로 인한 출력분포의 변화가 유발될 수 있다. 본 연구에서는 제어봉의 위치만을 주기초(BOC), 주기말 (EOC)의 임계 제어봉 위치에 놓고 표적이 삽입되었을 시와 표적이 삽입되지 않았을 경우의 출력분포의 변화를 계산하였다.

노심내 핵연료봉 출력분포는 세 개의 상대 출력 인자(F_r , F_z , F_l)의 곱으로 나타낼 수 있다. 핵연료 집합체 i 의 축방향 k 에 있는 핵연료봉 j 의 상대 출력은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_l(i, j, k) = F_r(i) \times F_l(i, j) \times F_z(i, j, k) \quad (3.1)$$

여기서, $F_l(i, j, k)$: 핵연료 집합체 i , 반경방향 j , 축방향 위치 k 의 상대 출력

$F_r(i)$: 핵연료 집합체 출력인자

= (핵연료 집합체 i 의 평균 선출력)/(노심 평균 선출력),

$F_l(i, j)$: 국부 출력인자.

= (핵연료봉 j 의 평균 선출력)/(핵연료 집합체 i 의 평균 선출력),

$F_z(i, j, k)$: 축방향 출력인자

= (핵연료봉 j 에서 축방향 위치 k 의 선출력)/(핵연료봉 j 의 평균 선출력)

을 나타낸다.

위의 출력분포는 노심 최대 상대 선출력으로 정량화 할 수 있으며, 노심 최대 출력 침두값, F_Q 는 식 (3.2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$F_Q = \text{Max}_{on\ i,j,k} [F_l(i, j, k)] \quad (3.2)$$

그림 4 및 5는 임계 제어봉의 위치가 각각 주기초 및 주기말에 위치한 경우의 각 핵연료 집합체의 상대 출력 분포의 값을 나타낸다. 평형노심에서 핵연료봉 단위 길이가 내는 평균 출력은 42.0 kW/m이며 그림에서 제시된 상대출력 값들은 이들에 대해서 규격화된 값들이다. 그림에서 보듯이 표적 삽입으로 인한 변화가 Root Mean Square Error(RMSE)로 1% 정도 차이를 나타내 그 영향은 거의 없다 할 수 있다. MCNP Tally에서 각 핵연료 다발의 통계적 상대오차(statistical relative error)는 0.6% 이하이다.

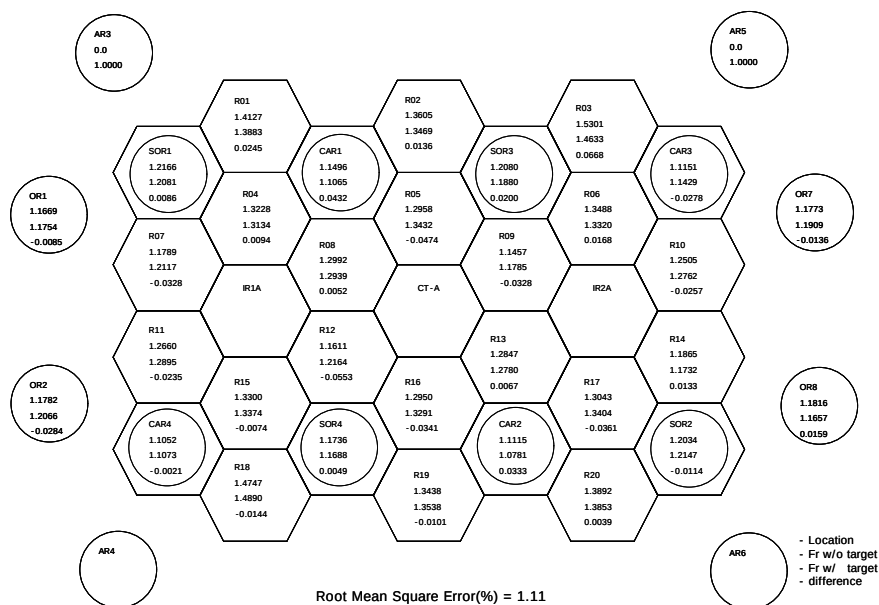


그림 4 주기초 제어봉 위치에서의 핵연료 집합체별 출력분포 변화

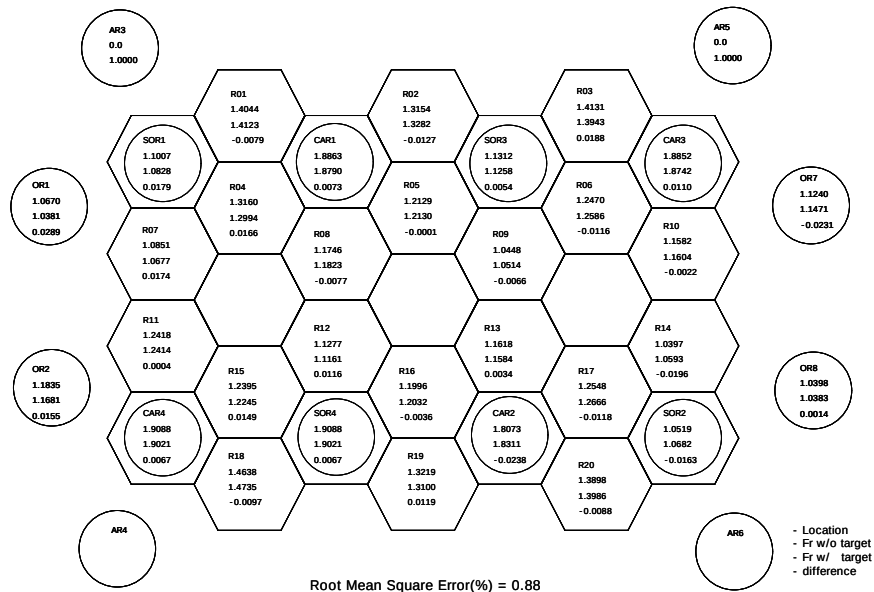


그림 5 주기말 제어봉 위치에서의 핵연료 집합체별 출력분포 변화

그림 6 및 7은 각 핵연료 집합체 내에서의 각 핵연료봉에 대한 반경방향 침두 출력치의 변화를 나타낸다. 핵연료봉의 반경방향 침두 출력치는 각 핵연료 봉에서의 선출력 값을 산출한 후 각 집합체별로 평균 선출력으로 나누어 침두 출력치를 계산하였다. 그림에서 보듯이 표적 삽입으로 인한 영향도는 RMSE가 약 2% 정도로서 크지 않은 것으로 평가되었다. 따라서 로심의 열수력적 안전성은 현 FSAR을 기준으로 거의 변하지 않을 것으로 판단된다. MCNP에서 각 핵연료봉의 통계적 상대오차는 약 2% 정도이다.

핵연료 채널을 따라 축방향으로 침두 출력치를 평가하였으나, 축방향 중성자속 분포에 의한 영향도 또한 거의 없는 것으로 평가되었다.

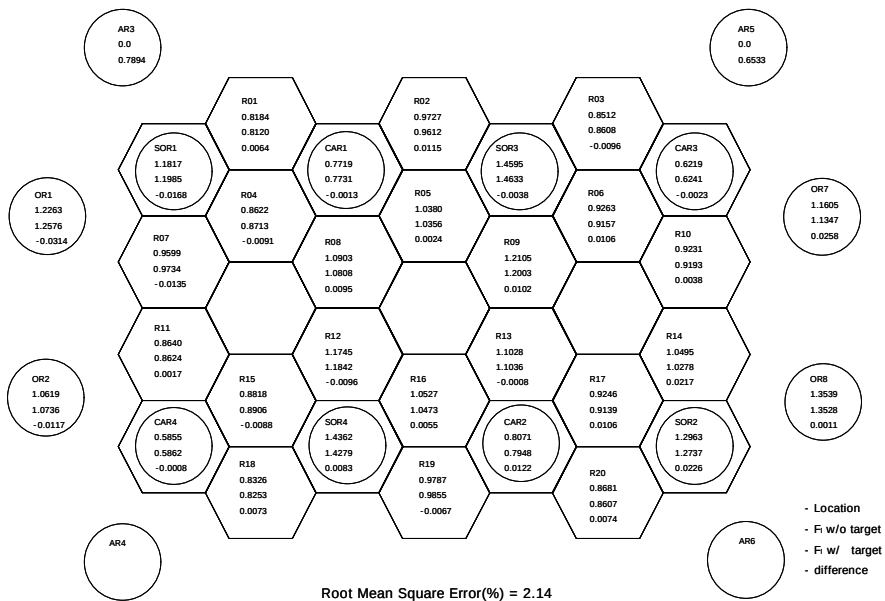


그림 6 주기초 임계 제어봉 위치에서의 각 핵연 집합체별 핵연료봉 침두 출력치

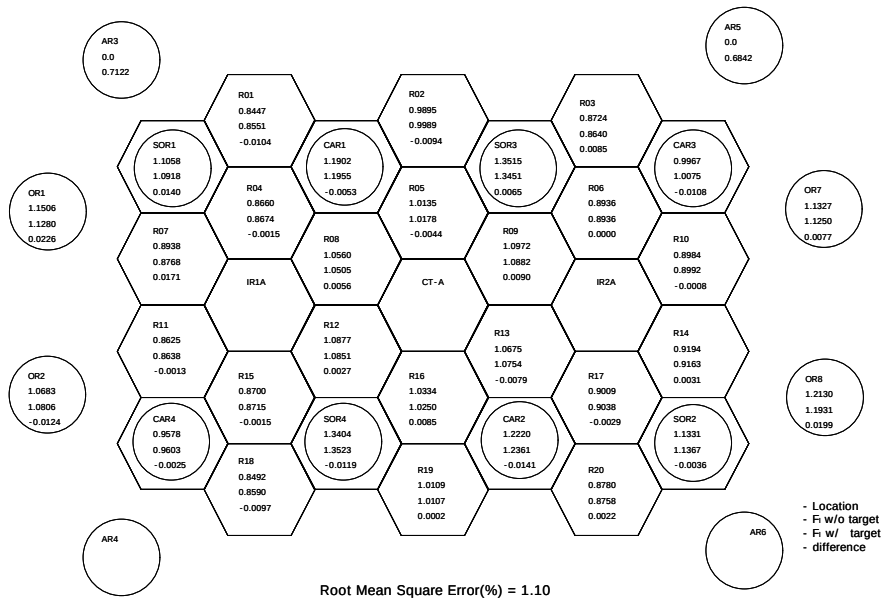


그림 7 주기말 제어봉 위치에서의 각 핵연료 집합체별 핵연료봉
침투 출력치

앞서 언급한 분포는 침투치를 갖는 부위 값만을 표기하였으며, 또한 표적이 삽입된 영역과 상당히 떨어진 부분의 출력분포가 대부분을 차지한다. 그러므로 대부분의 출력분포 값이 변화가 없는 것으로 나타날 수 있다. 따라서, 표적이 위치한 OR 조사공에 가장 근접하여 영향도가 제일 클 것으로 예상되는 핵연료 집합체에서의 표적 삽입으로 인한 중성자속의 변화를 계산하여 보았다. 중성자속 분포가 평가된 핵연료 집합체는 표적과 가장 가까이 위치한 SOR1과 R01 집합체이다. 그림 8에서 표적과 가장 근접한 18봉 핵연료 다발은 SOR1을 나타내며, 표적과 가장 근접한 36봉 핵연료 다발은 R01을 의미한다. 그림 9에는 SOR1 집합체의 중성자속 분포를 나타내기 위한 좌표가 제시되어 있으며, 그림 10에는 36봉 핵연료 집합체의 중성자속 분포를 나타내기 위한 좌표가 표기되어 있다. 주기초 및 주기말에 대한 각각의 중성자속 분포 계산 결과는 표 2 및 표 3에 기재되어 있다. 표에서 보듯이, 가장 근접한 핵연료다발에서도 출력분포의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.



그림 8 Quarter Model

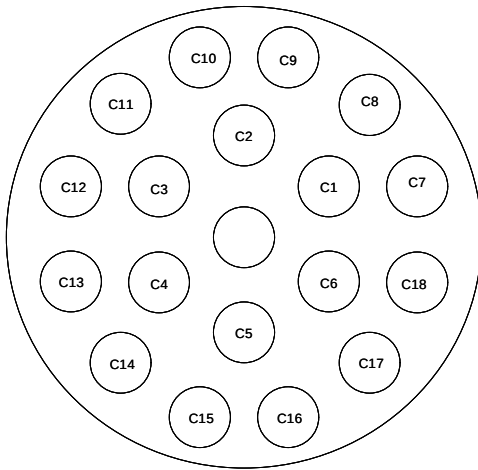


그림 9 SOR1 핵연료 집합체

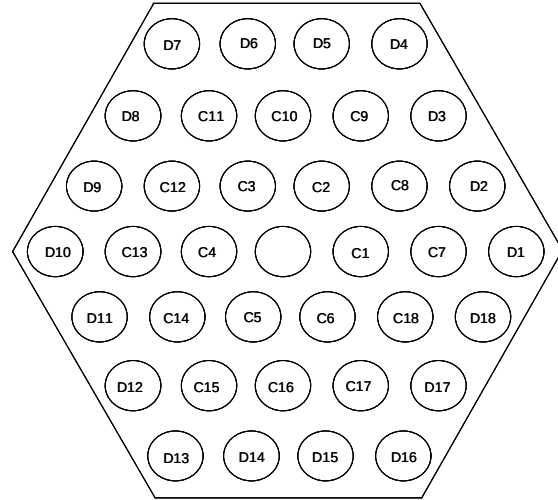


그림 10 R01 핵연료 집합체 좌표

표 2 주기초 R01 및 SOR1 핵연료 다발의 중성자속 분포

	R01 Assembly			SOR1 Assembly		
	with out Target	with Target	difference	with out Target	with Target	difference
C1	7.257E-04	7.556E-04	-0.041	1.018E-03	1.024E-03	-0.006
C2	7.890E-04	7.660E-04	0.029	1.061E-03	1.103E-03	-0.039
C3	8.037E-04	7.944E-04	0.012	1.112E-03	1.129E-03	-0.015
C4	8.029E-04	7.583E-04	0.056	1.092E-03	1.130E-03	-0.035
C5	7.273E-04	7.336E-04	-0.009	1.096E-03	1.056E-03	0.036
C6	7.031E-04	7.000E-04	0.004	1.043E-03	1.098E-03	-0.053
C7	8.745E-04	8.388E-04	0.041	1.210E-03	1.203E-03	0.005
C8	8.559E-04	9.007E-04	-0.052	1.276E-03	1.296E-03	-0.016
C9	1.007E-03	9.771E-04	0.029	1.078E-03	1.419E-03	-0.029
C10	9.542E-04	9.116E-04	0.045	1.470E-03	1.456E-03	0.010
C11	9.868E-04	1.011E-03	-0.025	1.474E-03	1.500E-03	-0.018
C12	9.021E-04	9.132E-04	-0.012	1.546E-03	1.497E-03	0.032
C13	9.637E-04	9.433E-04	0.021	1.508E-03	1.523E-03	-0.010
C14	8.961E-04	8.344E-04	0.069	1.457E-03	1.558E-03	-0.069
C15	8.137E-04	8.386E-04	-0.031	1.361E-03	1.431E-03	-0.051
C16	7.791E-04	7.405E-04	0.050	1.278E-03	1.318E-03	-0.032
C17	7.183E-04	7.293E-04	-0.015	1.246E-03	1.229E-03	0.013
C18	7.172E-04	7.494E-04	-0.045	1.219E-03	1.243E-03	-0.019

표 3 주기말 R01 및 SOR1 핵연료 다발의 중성자속 분포

	R01 Assembly			SOR1 Assembly		
	with out Target	with Target	difference	with out Target	with Target	difference
C1	7.797E-04	8.335E-04	-0.069	9.566E-04	9.489E-04	0.008
C2	8.256E-04	8.273E-04	-0.002	9.979E-04	9.969E-04	0.001
C3	7.684E-04	7.842E-04	-0.021	1.042E-03	9.714E-04	0.068
C4	7.605E-04	7.686E-04	-0.011	1.054E-03	1.038E-03	0.015
C5	7.309E-04	7.511E-04	-0.028	9.886E-04	9.518E-04	0.037
C6	7.295E-04	7.606E-04	-0.043	9.401E-04	9.486E-04	-0.009
C7	1.017E-03	1.040E-03	-0.023	1.203E-03	1.134E-03	0.057
C8	9.549E-04	9.497E-04	0.005	1.177E-03	1.223E-03	-0.039
C9	1.033E-03	1.016E-03	0.016	1.289E-03	1.291E-03	-0.002
C10	9.041E-04	9.497E-04	-0.051	1.386E-03	1.359E-03	0.020
C11	9.159E-04	9.756E-04	-0.065	1.397E-03	1.372E-03	0.018
C12	8.348E-04	8.930E-04	-0.070	1.429E-03	1.396E-03	0.023
C13	9.391E-04	8.781E-04	0.065	1.433E-03	1.388E-03	0.031
C14	7.852E-04	8.361E-04	-0.065	1.351E-03	1.349E-03	0.001
C15	8.031E-04	8.278E-04	-0.031	1.250E-03	1.214E-03	0.028
C16	7.670E-04	7.649E-04	0.003	1.173E-03	1.196E-03	-0.020
C17	8.594E-04	8.723E-04	-0.015	1.181E-03	1.186E-03	-0.004
C18	8.401E-04	8.566E-04	-0.020	1.153E-03	1.171E-03	-0.016

4. 표적 장전시 반응도 사고해석

4.1 해석모델 및 가정

앞서 서론에서도 언급하였듯이 HANARO 원자로는 Fission Moly 생산시 Backup Supply System이 없으므로 원자로 운전중에 표적이 삽입되어야 한다. 이는 표적 삽입시 필수적으로 과도 현상이 유발됨을 의미하며, 따라서 반응도 사고의 유발 가능성은 다른 Fission Moly 생산 원자로에 비해 높다 할 수 있다. 따라서 반응도 삽입으로 인한 사고해석을 수행하였다.

하나로 안전성 분석 보고서를 살펴보면 원자로에 어떤 섭동이 주어질 때 이에 대한 노심의 거동을 평가하기 위해 일점 동특성 방정식(point kinetics equation)을 이용하여 분석하였다, 앞서 표적 삽입으로 인한 노심에의 중성자속 영향도를 평가한 결과, 표적 삽입으로 인한 노심에의 영향은 거의 없는 것으로 평가되었다. 따라서 운전중 Fission Moly 표적이 삽입될 때의 원자로 거동을 평가하기 위해 마찬가지로 일점 동특성 방정식을 적용하여 해석할 수 있다.

본 연구에서는 6개의 선행핵 그룹을 갖는 일점 동특성 방정식을 모델로 평가하였으며, 보수성을 위하여 열수력적 반응도 궤환효과는 없다고 가정하고 시간에 따른 노심 평균 출력값의 변화를 평가하였다. 과도현상 분석을 수행하기 위한 동특성 변수로는 반응도가(reactivity), 중성자 평균수명, 지발중성자 유효 생성율 및 지발 중성자 모핵종의 유효 붕괴상수들이 필요하다. 이 동특성 변수는 표적이 삽입되어도 노심에의 영향도가 없으므로, 하나로 안전성 분석 보고서의 자료를 인용

하였으며, 표적 삽입으로 인한 반응도가(reactivity worth)는 MCNP-4B를 이용하여 산출한 값을 적용하였다. 주기초에서의 MCNP-4B를 통하여 평가된 표적 삽입으로 인한 반응도가(reactivity worth)는 $0.085 \pm 0.025\% \Delta \rho$ 이었으며, 따라서 95% 신뢰도(2σ)를 적용하여 반응도가는 $0.136\% \Delta \rho$ 로 산정하였다. 이 값은 표 4에서 제시하는 하나로의 유효 지발중성자 분율을 적용하면 주기초에서 0.183 dollar가 된다.

표 4는 평형노심에서의 중성자 평균수명 및 지발 중성자 유효분율을 나타내며, 표 5는 평형노심에서의 지발중성자 모핵종의 유효 붕괴상수를 나타낸다.

표 4 중성자 평균수명 및 지발중성자 유효분율

지발 중성자 군번호	주기초	주기말
1	0.000278	0.000272
2	0.001575	0.001550
3	0.001394	0.001369
4	0.002996	0.002939
5	0.000959	0.000942
6	0.000200	0.000197
β_{eff}	0.007411	0.007269
중성자수명 Λ (sec)	0.09625×10^{-4}	1.128700×10^{-4}

표 5 지발중성자 모핵종의 유효붕괴상수

지발 중성자 군번호	주기초	주기말
1	0.01273	0.01273
2	0.03172	0.03171
3	0.11675	0.11688
4	0.31237	0.31257
5	1.39967	1.39947
6	3.86301	3.85817

4.2 시간에 따른 노심의 출력 및 최대 핵연료 온도 계산 결과

Fission Moly 삽입에 따른 노심의 거동 분석은 두 가지 경우에 대해 평가되었다. 첫 번째 경우는 반응도 삽입시 온도회환 효과 및 제어봉 자동 보상이 없고 원자로 보호 계통(reactor protection system) 만이 작동한다는 가정 하에 step 형식으로 반응도가 삽입되는 경우에 대한 사고해석을 수행하였다. 두 번째 경우는 역시 온도회환 효과 및 제어봉 자동 보상이 없으며, slow transient를 가정하여 ramp 형식으로 반응도가 삽입되는 경우에 대해 사고해석을 수행하였다.

Ramp 형식으로 반응도가 삽입되는 경우에 반응도는 $\rho(t) = \gamma t$ 로 변한다고 가정하였으며, 여기서 γ 는 반응도 삽입률, t 는 시간을 나타낸다. 본 연구에서 원자로보호계통은 122% 출력에서 정지 신호가 발생하며, 하나로 안전성 분석 보고서에서는 정지신호가 발생한 후 정지봉은 0.34초 이

내에 작동하는 것으로 되어 있으나, 보수성을 위하여 0.5초 후에 정지봉이 작동하기 시작하여 로심 바닥까지 완전히 삽입되는 시간은 정지봉 작동후 1.08초로 설정하여 해석하였다.

그림 11은 fast transient를 가정한 step 형식의 반응도 삽입시 시간에 따른 노심 평균 출력 값의 변화를 나타내며, 그림 12는 slow transient를 가정하여 γ 값이 0.00311 dollar/sec 인 경우 시간에 따른 출력값의 변화를 나타낸다. 주기초 및 주기말의 유효 지발중성자 분율 값이 다르므로 주기초 주기말에 대해 각각 평가하였다.

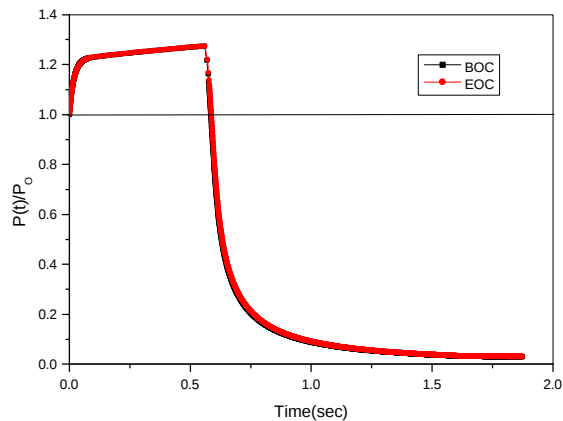


그림 11 Step Reactivity Insertion에 의한
시간에 따른 로심 평균 출력값 변화

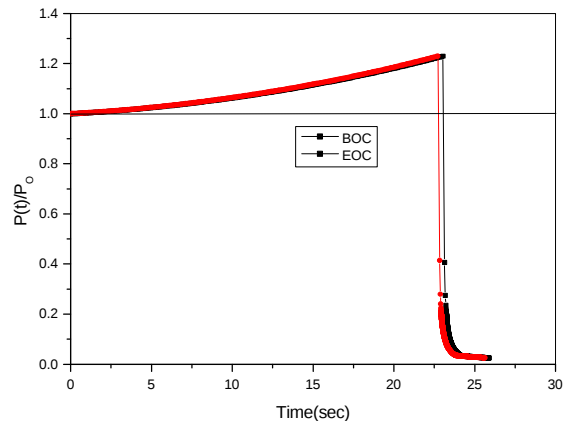


그림 12 Ramp Reactivity Insertion에 의한
시간에 따른 상대 출력 분포 변화

계산된 시간에 따른 노심 평균 출력 값을 바탕으로 노심에서의 핵연료 최대 온도를 계산하고 이를 제한치와 비교하여 건전성이 확보되는 지에 대해 평가하였다. 하나로 핵연료의 온도 제한치는 정상운전시에 350℃를 넘지 않으며, 과도현상시는 485℃이하가 되어야 한다. 임계 열속비(CHFR) 관점에서는 TPTH(Two Pump Two Heat Exchanger) 운전시 36봉 핵연료 수로에서는 1.97, 18봉 핵연료 수로에서는 1.81을 제한치로 삼고 있다.

본 연구에서 노심 최대 출력 침투치로 2.85를 적용하여 핵연료의 건전성을 평가하였다. 핵연료의 과도현상시 온도계산은 HEATING7.2를 이용하여 해석하였다. 그림 13은 step 형식의 반응도가 삽입된 경우에 대한 BOC 및 EOC에서의 시간에 따른 노심의 최대 핵연료 온도 값의 변화를 나타내며, 그림 14는 BOC 및 EOC에서의 시간에 따른 노심의 최대 피복재 온도 변화를 나타낸다. 온도 계산결과, 노심에서의 최대 핵연료 온도는 255℃로서 제한치인 485℃ 이하로 유지되어 핵연료의 건전성이 확인되었다. 그림 15는 ramp 형식의 반응도가 삽입된 경우에 대한 BOC 및 EOC에서의 시간에 따른 노심의 최대 핵연료 온도 값의 변화를 나타내며, 그림 16은 BOC 및 EOC에서의 시간에 따른 노심의 최대 피복재 온도 변화를 나타낸다. 이 경우에 대해서도 최대 핵연료 온도는 249℃로서 안전성이 확보됨을 확인되었다. 피복재의 온도에 대해서도 모든 경우에 대해서 최대 온도가 145℃ 이하로서 ONB 발생온도인 146.57℃ 이하로 유지되어 사고를 가정하더라도 ONB까지도 유발되지 않는 것으로 평가되었다.

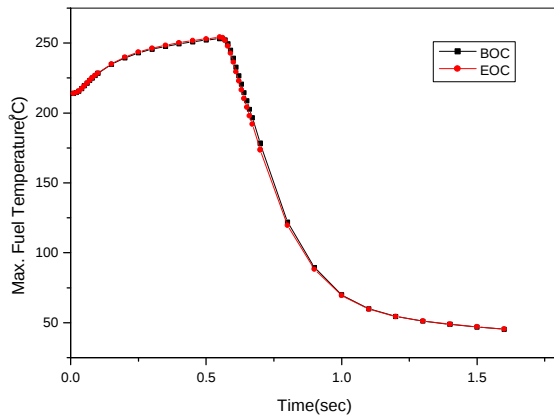


그림 13 Step Reactivity Insertion에 의한
시간에 따른 최대 핵연료 온도 변화

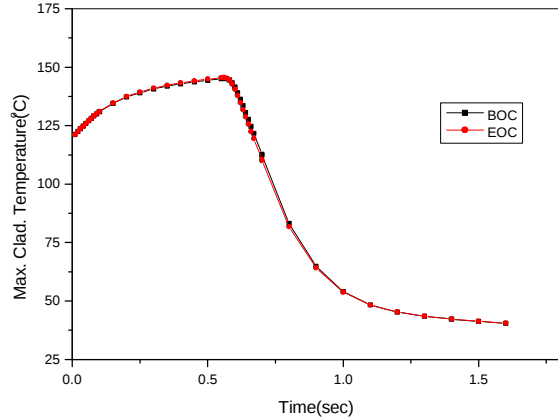


그림 14 Step Reactivity Insertion에 의한
시간에 따른 최대 피복재 온도 변화

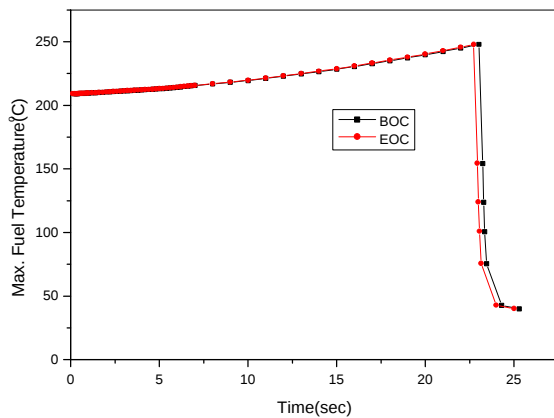


그림 15 Ramp Reactivity Insertion에 의한
시간에 따른 최대 핵연료 온도 변화

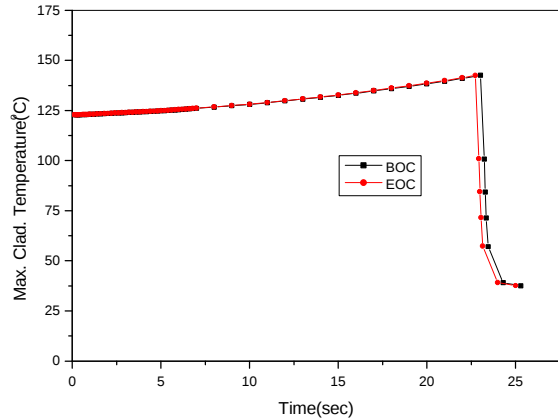


그림 16 Ramp Reactivity Insertion에 의한
시간에 따른 최대 피복재 온도 변화

5. 결 론

MCNP 코드와 일점 동특성 방정식을 이용하여 Fission Moly 표적이 삽입된 노심에 대한 특성 분석을 수행하였다. 표적이 삽입된 노심에 대하여 표적이 삽입되지 않았을 경우와 비교하여 침투 출력치 및 중성자속 분포를 상호 비교하여 변화량을 추정하여 노심에 대한 표적의 영향도를 평가하였다. 계산 결과, 침투 출력치의 변화 및 표적 삽입으로 인한 중성자속의 변화는 없는 것으로 나타나 영향도는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 일점 동특성 방정식을 적용하여 step 형식으로 반응도가 삽입된 경우와 ramp 형식으로 반응도가 삽입된 경우를 가정하여 표적 삽입시 원자로의 사고해석을 수행하였다. 표적 삽입으로 인한 반응도는 MCNP-4B를 이용하여 산출하였으며, 산출된 반응도는 $0.136\% \Delta \rho$ 인 것으로 평가되었다. 이 값을 일점 동특성 방정식의 입력값으로 적용하여 사고해석을 수행한 결과, step 형식으로 반응도가 삽입된 경우에는 핵연료의 온도가 최대 255°C 정도로서 제한치인 485°C 이하로 유지되므로 원자로심의 안전성이 입증되었으며, ramp 형식으로 반응도가 삽입된 경우에 대해서도 최대 핵연료 온도가 249°C로서 제한치를 충분히 만족하였다. 피복재의 건전성에 대해서도 온도계산을 수행한 결과, 최대 145°C로서 제한치인 146.57°C 이하로 유지되어 사고시 ONB까지도 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

따라서, Fission Moly 표적 삽입으로 인한 반응도 사고가 유발된다 해도 원자로심의 건전성은 위배되지 않는 것으로 나타났다.

Acknowledgements

본 연구는 '00년도 한국원자력연구소 위탁연구과제로 수행되었음을 밝히며, 자료를 제공해주신 박진호 박사님과 손동성 박사님의 도움에 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCE

1. J. F. Briesmeister, "MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.
2. 하나로 안전성 분석 보고서, KAERI/TR-710/96, 한국 원자력연구소, 1996.
3. 김학노, "MCNP를 이용한 다목적 연구로의 핵설계에 대한 검증 연구," KAERI/책임-30/94, 한국원자력연구소, 1994.
4. Dong-Keun Cho, Myung-Hyun Kim, Dong-Sung Sohn, "Nuclear Design Methodology of Fission Moly Target for Research Reactor," Journal of the Korean Nuclear Society, Vol.31, Number 4, pp.365-374, (1999)
5. G. L. Hofman, T. C. Wiencek, E. L. Wood, J. L. Snelgrove, "Development of ⁹⁹Mo Isotope Production Targets Employing Uranium Metal Foils," *Trans. Am. Nucl. Sci.* 77, pp. 100-101, November, (1997)
6. M. Necati Özisik, "Heat Transfer : A Basic Approach," New York : McGraw-Hill, (1985)
7. 김명현 외, "하나로에서의 UN(Uranium Nitride)를 이용한 Mo-99 생산용 표적의 핵적 타당성 연구," KAERI/CM-381/99, 한국원자력연구소, 1999.