

OpenMC를 활용한 초소형 이동형 원자로용기 방사화 선원항 평가

윤성준* · 박동규[†] · 서재욱* · 고유빈* · 지성균*

A Study on Radioactive Source-term Evaluation for A Transportable Micro Reactor Using OpenMC

Seong Jun Yoon*, Tongkyu Park[†], Jae Uk Seo*, Yubin Go*, and Sung-Kyun Zee*

(Received 19 November 2024, Revised 5 December 2024, Accepted 10 December 2024)

ABSTRACT

Transportable Micro Reactors (TMRs) harness the advantages of Small Modular Reactors (SMRs) while addressing the need for mobility and transient power supply. These factory-manufactured reactors can be quickly installed and relocated, enhancing their practicality. This study evaluates radiation safety during transportation, focusing on exposure from radioactive sources within the reactor vessel. While significant radiation from fission products in the active core can be effectively shielded by the inner reflector, the induced radiation from surrounding components requires careful assessment to ensure compliance with exposure limits for operators. Given the constraints on the size and weight of the transport container, minimizing fast neutron leakage is crucial. Utilizing OpenMC for depletion calculations, we identify six key isotopes—Cr-51, Fe-59, Mn-54, Mn-56, Co-58, and Co-60—generated during a conservative operational scenario. Our findings indicate that maintaining surface doses below 10 mSv/h requires fast neutron leakage from the inner surface of the reactor vessel to be under 1.0E+8/cm²·sec. Therefore, optimizing core size and reflector thickness is essential for the effective design of TMRs without the need for additional shielding.

Key Words : Transportable micro reactor(초소형 이동형 원자로), Small modular reactor(소형 모듈형 원자로), Molten salt reactor(용융염 원자로), Activation(방사화), radioactive source(방사선원)

1. 서 론

초소형 이동형 원자로(Transportable Micro Reactor)는 소형 모듈형 원자로(Small Modular Reactor)의 장점인 높은 안전성, 유연한 설치, 경제성 개선 및 환경적 이점을 그대로 유지하면서도 이동성과 일시적인 전력 수요에 효과적으로 대응할 수 있는 혁신적인 원자로 개념이다. 이 원자로는 모듈화 설계를 바탕으로 공장에서 제작된 후 원격지로 운반되며, 신속한 설치와 제거가 가능하기 때문에

실용성을 극대화한다. 나아가 설계 수명 내에 공장으로부터 최초 설치장소까지 운반 뿐 아니라 추가적인 현장 이동하여 재가동할 수 있는 확장된 이동형 원자로 개념 또한 연구되고 있는 상황이다.

본 연구에서는 용융염 원자로 시스템을 활용하여 초소형 이동형 원자로 개념을 도출하였으며, 몬테카를로 방법론 기반의 OpenMC를 이용하여 정확한 기하학적 모델링을 통한 이동 중 방사선 안전성 확보 가능성 평가를 목표로 하였다. 이동 중에는 원자로와 펌프를 정지시킬 것이기 때문에 연료 염의 유동 및 출력에 따른 중성자의 영향은 배제할 수 있으며, 유효노심 내부 영역 핵분열 생성물들의 방사선은 두꺼운 내부 반사체에 의해 상당 부분 차폐될 수 있다. 그러나 원자로 용기를 포함한 컨테이너 내

[†] 책임저자, 회원, (주)미래와도전
E-mail : tongkyu@fnctech.com
TEL : (031)8065-5145 FAX : (031)8005-6014

* (주)미래와도전

부 주변 기기들의 방사화로 인해 발생하는 이동 중 선량은 운전자나 작업 종사자의 피폭 선량 제한치^(1,2)를, (운반물 표면, 10 mSv/h) 충족할 수 있는지 평가가 필요하다.

본 연구에서는 컨테이너에 적재하여 이동하는 개념을 고려하기 때문에 전체 시스템의 크기와 무게에 제한이 있으며, 이로 인해 차폐체의 사용이 제한된다. 따라서 이동 시점에서의 기기방사화로 인해 발생하는 방사선 영향을 최소화하기 위해서는 원자로 설계 단계에서부터 유효노심 외부로 누출되는 고속중성자의 수를 최소화하는 설계 방안을 마련해야 한다. 또한, 본래 설계 목적에 따라 전력 수요가 빈번하게 변화하는 운전 환경을 고려한다면 다양한 출력 및 냉각 시간을 고려한 운전 시나리오에서 원자로 용기와 주변 기기의 감마선원을 정확히 계산할 수 있어야 한다.

ORIGEN 코드를 통한 연소도, 냉각 시간, 구성 원소의 함량 등에 변화에 따른 구조물 영역에서의 방사화 평가 방법은 1700개에 달하는 핵종을 취급할 수 있는 장점이 있지만, 본 시스템과 같이 위치 및 기하학적 형상에 따른 방사선 환경이 급변하는 시스템의 평가에는 적절하지 않다. 노심에서부터 거리가 증가함에 따라 중성자 속도는 급격히 감소하고 중성자 에너지 스펙트럼 또한 공간에 따라 급변하기 때문에 점선원 및 단일 그룹 단면적을 통한 방사화 평가는 불확도가 상당하다. 때문에 본 연구에서는 노심 주변 구조물의 총 방사능을 정확하게 계산하기 위해, 실질적인 기기 배치 모델링과 다군 스펙트럼 정보를 반영하여 평가할 수 있는 몬테카를로 코드를 활용한 방사화 평가 연구를 수행하였다.

2. 평가방법 및 대상

2.1 OpenMC를 활용한 2-node 연소평가 방법론

용융염 원자로는 핵연료 물질을 지지염과 결합하여 연료 및 냉각재로 사용하기 때문에 다양한 물리·화학적 요건을 충족해야 한다. 연소에 따른 미세한 조성 변화는 핵연료 물질의 용해도 및 용점 등 물질 변화를 초래하며, 이는 핵설계에 중대한 영향을 미치기 때문에 정확한 연소 계산을 통해야만 핵설계에서 검토된 노심 성능을 구현할 수 있다. 뿐만 아니라 고평방능을 가지지만 반감기가 짧아 통상적으로 관심 갖지 않았던 핵종들이 이동 시점에 따라 원자로 안전성 혹은 차폐 등의 핵설계 외의 새로운

관점에서 중요해질 수 있기 때문에 초소형 이동형 열원발생부 설계에 적합한 선원항 평가 방법이 필요하다.

고체 연료 기반 원자로 노심 해석에서는 일반적으로 지발 중성자(Delayed Neutron)가 핵분열 발생 위치에서 그대로 생성된다고 가정하며, 이를 바탕으로 원자로 출력 분포(Power Distribution) 및 중성자 속도 분포(Neutron Flux Distribution)를 계산한다. 실제로 지발 중성자를 방출하는 선행핵들이 이동하지 않고 고체 핵연료 내부에 갇혀 있기 때문에 이러한 가정은 타당했다.

그러나 본 연구의 대상 원자로는 1차 계통 배관 내부를 지속적으로 순환하는 유동 연료(Flowing Fuel) 형태로 운영되므로, 지발 중성자 선행핵의 수밀도를 용융염의 이동 속도에 맞춰 반영하고, 이에 따른 지발 중성자에 의한 출력 분포(Delayed Neutron Source Distribution)를 계산해야 정확한 출력 및 중성자 속도 분포를 얻을 수 있다. 유동이 존재할 경우, 유효노심 입장에서는 노의 루프에 존재하는 연료염이 지속적으로 유입 및 유출되기 때문에 연소 가능한 총 연료염은 유효노심을 포함한 1차계통 내부 전체 영역에 존재하는 연료염으로 반영되어야 한다. 대부분의 핵분열은 반사체로 둘러싸인 유효노심 영역을 통과할 때만 발생할 것이며 두꺼운 반사체를 통과하여 노외 영역으로 누설된 중성자가 야기하는 핵분열의 영향은 미미할 것이다. 이는 반응도 측면에서는 큰 영향을 주지 않지만 안전해석 혹은 차폐해석 관점에서 단반감기 핵종들의 영향이 이동을 고려하지 않은 원자로에서와 상이할 수 있기 때문에 이를 해석할 수 있는 평가방법이 필요한 상황이다.

OpenMC⁽³⁾는 3차원 모델링이 가능하며 영역별 중성자 스펙트럼을 반영한 연소계산을 통해 방사성 물질의 시간에 따른 핵종재고량 변화를 계산할 수 있으며, ENDF 및 ACE와 같은 핵반응 데이터 라이브러리를 활용하여 Python 인터페이스를 통해 사용자 맞춤형 스크립트를 작성하여 연소 시나리오와 핵종 생성을 세밀하게 분석할 수 있다.

본 연구에서는 연소영역을 유효노심과 외부 루프로 구분하여, 노심 내부의 핵연료 부피(n_i)에 대해서는 아래 수식 (1)과 같이 정적 상태에서 연소 계산을 수행하고, 노외 영역의 연료염 부피(n_o)에 대해서는 출력이 존재하지 않는 붕괴(decay) 계산만 수행한 후, 각 연소 단계마다 부피 비율을 고려하여 혼합(mixing)한 뒤 새로운 연료염 조성을 산출하는 방식으로 연소계산을 아래 수식 (2), (3)과

같이 수행하였다.

$$(n_i^{t+1})^{imp} = B \cdot n_i^t \quad (1)$$

$$n_i^{t+1} = \frac{(n_i^{t+1})^{imp} V_i + n_o^t V_i}{V_i + V_o} \quad (2)$$

$$n_o^{t+1} = \frac{(n_i^{t+1})^{imp} V_o + n_o^t V_o}{V_i + V_o} \quad (3)$$

용융염 순환을 반영한 원자로 연소 계산을 위해, 몬테카를로 코드인 OpenMC를 활용하여 열원 발생부 및 1차측 루프부 구성된 2-노드 연소(Two-node Depletion) 방법⁽⁴⁾을 고안하였다. 일반적인 OpenMC 코드는 정적상태에서 포인트 계산만 가능하므로, 핵연료의 유동을 반영하기 위해 노심 내부와 외부의 연료 조성을 혼합하는 방식을 도입하였다. 우선 연소 시작 시점에서 노심 내부와 외부의 연료 조성이 동일한 상태에서 노심 내부 영역에서만 특정 연소 시점까지 연소계산을 수행한다. 그 후, 다음 단계의 연소계산을 수행하기 전에 노심 내의 영역의 체적비를 고려하여 갱신된 노심 내부 핵연료 조성고 외부 핵연료 조성을 혼합하고, 이를 새로운 노심 내부와 외부의 연료 조성으로 사용한다.

OpenMC에서는 원자로 용기와 같이 핵분열성 물질이 포함되지 않은 물질의 연소 또한 간단한 옵션 수정으로 가능하며, 3819개의 핵종의 연소 라이브러리와 ENDF/B-VII.1 핵반응 단면적 라이브러리를 사용한다. 이를 토대로 매 연소 단계에서 중성자 및 감마선 에너지 스펙트럼을 고려한 원자로 용기의 핵종 조성을 계산하였다.

2.2 평가대상

현재는 초소형 이동형 원자로 방사선안전성 분석 초기 단계이기 때문에 컨테이너 내부의 1차 배관, 펌프, 중간 열교환기 등 다양한 기기의 종합적 영향을 평가하기보다는 원자로 용기의 방사화 평가를 우선적으로 선정하였다. 이를 위해 몬테카를로 기반의 OpenMC를 활용하여 실제 방사선 환경에 근접한 감마선원 평가를 수행하였으며, 대표 핵종 선별과 운전 시간에 따른 주요 핵종의 거동 분석에 초점을 맞추었다.

평가대상으로는 9.46E+8 Joule의 에너지를 생산하며 다중 반사체 개념을 적용한 원자로⁽⁵⁾를 선정하였다. 원자로 형상은 Fig. 1과 같이 여러 겹의 원통형 형상으로 각각

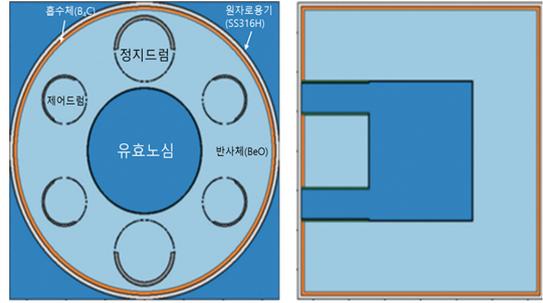


Fig. 1 Cross-sectional views of the conceptual design for a transportable micro reactor: x-y and x-z sections.

유효노심, 반사체, 흡수체가 순차적으로 배치되어 있다. 반응도 제어를 위해 4개의 제어드럼과 2개의 정지드럼이 반사체 내부에 존재하며 각각 메커니즘을 달리하여 제어기기 다양성을 확보하고자 하였다. 제어드럼은 미세 회전 각도 조절을 통해 잉여반응도를 제어 및 임계상태를 유지하는 반면 정지드럼은 on-off 방식으로 긴급상황 발생 시 원자로 정지를 위해 사용된다. 드럼 내부에는 제어패드 형태로 중성자 흡수물질이(B₄C) 180°의 원호 형태로 설계되어 회전 각도에 따라 유효노심 표면에 접근 및 반응도를 조절한다. Fig. 1의 형상은 제어드럼이 모두 밖으로 외회전된 All Drum Out 상태의 배치이며 모든 제어패드가 180°, 내회전 될 경우 가장 높은 제어반응도가를 가지는 All Drum In 상태가 된다.

유효노심 측면에는 같은 방향으로 입·출구 배관이 모

Table 1 Performance summary table for the target core design

	설계값	비고	
노심 사이즈	유효노심 지름 : 76 cm 유효노심 높이: 76 cm 반사체 두께(BeO) : 35 cm	원통형 형상 (D/H = 1)	
초기 증배계수	1.02495(14)	연료염: KCl-UCl ₃ (19.75 w/o)	
노심무게	8.17톤	원자로용기의 무게 포함	
1차계통 내 연료염 무게 포함 시	10.81톤	노외 루프에 존재하는 연료염 무게 포함	
RV 전단 고속중성자 유입 밀도 [#/cm ² .sec]	1.26E+10	5.01E+9	상하부 평균
		1.63E+10	측면 평균

사되어 있으며 한쪽에서 유입되어 동일한 방향으로 유출 되도록 설계되었다. 입출구 배관영역에서는 전체출력의 5% 미만의 비율의 핵분열이 발생하지만 직경에 따른 고속중성자 누설량, 그에 따른 방사화 및 차폐 영향을 평가하기 위해 모사를 수행한 것이다. Table 1의 결과에서도 상하부 원자로용기 전단면 고속중성자 유입 밀도보다 입출구 배관이 존재하는 측면의 고속중성자 유입 밀도가 3배 가량 높은 것을 확인할 수 있다. 유효노심 지름과 높이는 동일하게 76 cm이며 BeO로 구성된 반사체가 그 외부를 35 cm, B₄C 흡수체 1 cm, SS316H 원자로 용기 1 cm 가 감싸고 있다. 원자로용기를 포함한 노심무게는 8.17톤, 노외루프에 존재하는 연료염을 포함한 전체 무게는 10.81톤, 총 연료염만의 무게는 4톤으로 설계되었다.

현재 고려된 원자로는 운전 주기 중 추가적인 연료공급 없이 최초 1회 장전만으로 설계주기를 달성하기 때문에 고속스펙트럼 기반에도 불구하고 충분한 잉여반응도 확보를 위해 상당 두께의 BeO 반사체가 요구되었다. 기타 반사체 옵션들 대비 Be의 (n,2n) 반응을 통한 반응도 확보 효과가 탁월했기 때문이다. 다만 그로 인해 반사체 영역 내부의 중성자는 대부분 열중성자로 존재하며 내부 반사체 경계면에서는 전체 핵분열의 30% 수준의 열중성자에 의한 핵분열이 발생했다. 반사체 최외곽에는 1 cm 두께의 얇은 B₄C를 배치하여 앞서 감속된 열중성자들을 효과적으로 흡수하여 차폐성능을 향상시키고자 하였다.

이동 중 주요 방사선원항은 원자로용기를 포함한 주변 기기방사화로 야기되는 감마선⁽⁶⁾이기 때문에 방사화 시키기 전 고속중성자를 일차적으로 만나는 반사체 설계가 매우 중요한 역할을 한다. 방출되는 고속중성자를 유효노심으로 반사시키는 역할과 더불어 원자로용기 전단면 및

외부 기기들로 누설되기 전 중성자를 적절히 차폐할 수 있는 성능을 동시에 만족하여야 한다. 반사체와 별도의 차폐체를 원자로 용기 전단면 혹은 후단에 배치할 수도 있지만 컨테이너 적재 제한 무게가 존재하기 때문에 추가적인 차폐체를 충분히 설계할 수 없는 상황이다.

따라서 반사체 성능을 최대한 확보하면서, 가장 보수적인 운전 시나리오에 대한 방사화 평가를 통해 원자로 용기 표면에서의 선량을 산출하고, 10 mSv/hr 미만의 선량을 달성하기 위한 원자로 용기 전단면의 고속 중성자 누설률 제한치를 도출 및 여러 운전 시나리오에 따라 방사화 준위가 어떻게 변화하는지 평가하였다.

3. 평가결과

3.1 입출구 배관설계에 따른 고속중성자 누출량 평가

입출구 배관의 직경 및 형상은 출력, 질량유량, 펌프 출력 등 여러 설계요인에 의해 결정되지만 원자로용기 방사화 측면에서 가장 취약한 부분으로 고려된다. 앞서 언급한 바와 같이 해당 영역에서 출력의 발생은 미미하지만 핵분열에 의해 생성된 고속중성자가 배관을 통해 반사체 영역과 접촉 없이 직접적으로 원자로 용기로 누설되기 때문이다. 특히 현재 평가되고 있는 설계개념에서는 노심의 크기 최소화 및 컨테이너 내부 기기배치의 효율을 고려하여 동일면에 평행하게 입출구 배관이 설계되어 있기 때문에 누설되는 중성자 영향이 과증될 것이다.

Table 2는 직경 15 cm 배관의 고려 여부에 따른 0.1 MeV 이상의 고속 중성자 누설률 변화를 평가한 결과이다. 입출구 배관을 고려하지 않았을 때 대비, 배관을 고려한 경우 원자로 용기 전체 표면에서 평균 고속 중성자 누

Table 2 Evaluation results of fast neutron leakage according to the inlet and outlet pipe design

조건	최외각 RV 상부 평균 누설량	최외각 RV 측면 평균 누설량		최외각 RV 하부 평균 누설량	최외각 RV 표면 평균 누설량
	[#/cm ² ·sec] (E > 0.1 MeV)				
w/o pipe	7.84E+07	1.24E+08		9.72E+07	1.03E+08
With pipe	7.94E+07	8.25E+09	1.05E+12 (Outlet pipe 출구 경계면)	8.35E+07	9.12E+09
			1.07E+12 (Inlet pipe 입구 경계면)		
			4.41E+09 (pipe 제외 RV 측면 경계면)		

설률은 88배 증가하였고, 단위면적 당 상하부 평균 고속 중성자 누설률 대비 측면의 고속 중성자 누설 비율은 약 10배 증가하였다. 측면 입출구 배관 면적에서의 누설률은 배관을 제외한 측면 영역 평균보다 약 238배 높게 평가되었지만 배관 영역에만 추가적인 차폐를 도입한다면 선량을 비교적 쉽게 낮출 수 있는 상태이다. 따라서, 집약적인 기기 배치와 단순한 배관 설계의 이점을 고려했을 때, 수평형 입출구 배관 개념을 최적화를 수행한다면 초소형 이동형 원자로 개념에 유리한 설계개념이 될 수 있음을 확인하였다.

3.2 연소에 따른 원자로용기 방사화 핵종별 재고량 평가

Fig. 2과 Table 3는 발생 가능한 가장 보수적인 운전시나리오를 위해 냉각기간 없이, All Drums Out 및 전출력으로 9.46E+8 Joule, 에너지를 생산한 시점에서의 원자로용기(SS316H, 두께 1 cm) 내부의 방사화 핵종들을 평가한 것이다.

앞선 2-node 방법을 적용한 OpenMC 계산결과 중 감마선량 기여도가 가장 높은 6가지 핵종(Cr51, Fe59, Mn54, Mn56, Co58, Co60)을 선별하여 Effective Full Power Day(EFPD)에 따른 핵종 재고량을 도식화하였다. 상기 핵종들의 생성 매커니즘을 추적해보면 SS316H 조성 중 Fe 원소에서 Cr51, Mn54 핵종들로 주로 변환되고 Ni 원소에서 Co58, Co60 핵종들로 변환되는 것을 알 수 있다.

각각 반감기가 Mn56(2.58시간), Co60(5.27년)으로 다

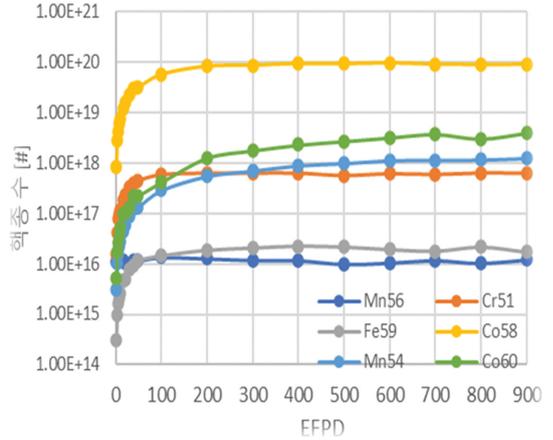


Fig. 2 Inventory variation diagram of radioactive isotopes by depletion

소 차이가 나는데도 불구하고 약 100일 가량 연소되는 동안 방사화 핵종 재고량이 급격히 증가하다 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 가장 높은 기여도를 보이는 핵종은 Co58이며 Co 동위원소들은 단반감기를 가진 다른 핵종에 비해 상대적으로 연소기간에 따라 핵종재고량이 누적되는 경향성을 확인할 수 있다.

3.3 동일 연소도에서의 출력 및 운전기간 변동에 따른 원자로용기 내 방사화 핵종 재고량 평가

Fig. 3은 원자로용기의 컨테이너 적재 상태를 X-Z 방향 단면으로 도식화한 그림이다. 차량 컨테이너 우측에는 운전석을 가정했기 때문에 운전자의 선량을 최소화하기 위

Table 3 Summary of radioactive isotopes inventory results according to burnup

EFPD (Day)	연소에 따른 핵종별 재고량[#]					
	Mn56	Cr51	Fe59	Co58	Mn54	Co60
1	1.08E+16	1.51E+16	3.02E+14	8.48E+17	3.06E+15	5.28E+15
15	1.17E+16	1.89E+17	4.51E+15	1.18E+19	4.43E+16	9.81E+16
48	1.15E+16	4.43E+17	1.17E+16	3.08E+19	1.32E+17	2.20E+17
100	1.34E+16	5.85E+17	1.45E+16	5.64E+19	2.87E+17	4.13E+17
200	1.27E+16	6.26E+17	1.87E+16	8.19E+19	5.45E+17	1.25E+18
300	1.18E+16	6.27E+17	2.06E+16	8.52E+19	6.96E+17	1.75E+18
400	1.17E+16	6.27E+17	2.25E+16	9.25E+19	8.89E+17	2.27E+18
500	9.93E+15	5.62E+17	2.15E+16	9.13E+19	9.80E+17	2.68E+18
600	1.05E+16	6.11E+17	1.92E+16	9.47E+19	1.12E+18	3.16E+18
700	1.17E+16	5.89E+17	1.78E+16	8.95E+19	1.13E+18	3.71E+18
800	1.04E+16	6.31E+17	2.15E+16	8.78E+19	1.15E+18	3.00E+18
900	1.21E+16	6.26E+17	1.71E+16	8.89E+19	1.23E+18	3.91E+18



Fig. 3 Inventory variation diagram of radioactive isotopes by depletion.

해 좌측 가장자리에 원자로용기가 배치되어 있으며 주변에 기기들은 현재는 생략하여 빈 공간으로 가정하였다. 상하부 보다는 측면이 운전원들의 작업경로에 노출될 확률이 높기 때문에 컨테이너 측면부 중 원자로용기에 가장 근접한 컨테이너 표면에서의 예비 감마선량을 평가하였다.

Table 4의 결과는 동일한 연소도 조건이지만 출력 및 연소시간을 다르게 가정하여 방사화된 원자로용기 조성을 평가하여 주요 핵종별 기여도를 평가한 것이다. 앞선 결과에서 예상보다 주요 감마선원 핵종들의 재고량 수렴 시기가 수십 일 정도로 짧았기 때문에 운전시나리오를 통한 효과적인 선원항 감소를 얻을 수 있는지 평가하였다. 전출력 대비 1/4배 출력으로 운전기간을 4배 증가시킨 경우, 반감기가 짧은 Mn56은 1/4배로 적은 핵종재고량 달성이 가능하였지만 가장 높은 감마선량에 기여하는 Co58 핵종의 경우 반감기, 0.19년의 영향으로 약 10%의 재고량 감소만을 보였다. 앞선 결과에서와 마찬가지로 주요 감마선원 핵종들이 연소 초기 빠르게 생성되고 수렴하는 특성을 지니며 그 중에서도 선량기여도가 높은 감마선원 핵종들이 상대적으로 긴 반감기를 갖기 때문에 출력조절을 고려한 운영시나리오만으로는 감마선량 저감 효과가 크지 않은 것을 알 수 있다. 때문에 표면선량제한치 만족

Table 5 Radioactive evaluation results of preliminary design: Dose constraint requirements satisfied through optimized reflector design

감마선량 기여도 순위	100% 출력운전	50% 출력운전
	7일 운전 + 7일 냉각 시 RV, 핵종 수[#]	14일 운전 시 RV, 핵종 수[#]
Co58	2.83E+18	2.93E+18
Mn54	1.14E+16	1.15E+16
Fe59	5.47E+14	5.79E+14
Cr51	2.21E+16	2.42E+16
Co60	2.87E+16	2.88E+16

을 위해서는 노심크기를 증가시켜 중성자 누설량을 줄이거나 반사체 두께를 증가시켜 누설되는 중성자 수를 낮추는 등의 차폐성능의 향상이 요구되는 상황이다.

Table 5는 냉각시간과 저출력 운전조건에 따른 핵종 재고량 감소 효과를 비교한 표이다. 예상 가능한 대로 반감기가 27.7일로 제일 짧은 Cr51의 경우 냉각기간까지 고려했을 때 50% 출력, 14일 운전의 경우 대비 8.7% 핵종재고량 감소효과를 확인 할 수 있었다. 반감기 71.3일 수준의 Co58까지는 5% 수준의 유의미한 핵종 재고량 감소를 관찰할 수 있지만 Mn54, Co60과 같은 상대적 긴 반감기의 핵종에서는 냉각시간의 기여도가 미미해지는 효과를 알 수 있다.

3.4 냉각시간 고려에 따른 원자로용기 방사화 핵종 재고량 감소 평가

추가로 냉각시간에 따른 주요 핵종 재고량 감소 효과를 평가하기 위해 Table 6의 조건과 같이 7일 운전 및 7일 냉각기간 가정하여 평가를 수행하였다. 예상대로 0.08년 반감기를 가지는 Cr51의 경우, 7일 냉각시간을 고려하면 전후 대비 약 16% 재고량 감소함을 알 수 있으며 마찬가지로

Table 4 Inventory of radioactive isotopes in the reactor vessel based on power level and operational period variations at constant burnup

핵종	반감기 [년]	100% 출력 운전	50% 출력 운전	25% 출력 운전	100% 출력 운전	
		7일 운전 시 RV, 핵종 재고량[#]	14일 운전 시 RV, 핵종 재고량[#]	28일 운전 시 RV, 핵종 재고량[#]	운전 종료 시 RV, 핵종 재고량[#]	감마선량 [mSv/h]
Mn56	0.0003	2.68E+15	1.34E+15	6.71E+14	4.40E+15	75.92
Cr51	0.08	2.63E+16	2.42E+16	2.06E+16	2.52E+17	0.40
Fe59	0.12	6.10E+14	5.79E+14	5.22E+14	8.88E+15	0.27
Co58	0.19	3.03E+18	2.93E+18	2.75E+18	3.74E+19	653.50
Mn54	0.85	1.16E+16	1.15E+16	1.13E+16	5.81E+17	1.91
Co60	5.27	2.88E+16	2.88E+16	2.87E+16	3.71E+18	5.38

Table 6 Reduction of radioactive isotopes inventory in reactor vessel considering cooling time

감마선량 기여도 순위	반감기 [년]	7일_연소	7일_연소- 7일_냉각	7일_연소- 7일_냉각- 7일_연소	7일_연소- 7일_냉각- 7일_연소- 7일_냉각
		핵종수[#]	핵종수[#]	핵종수[#]	핵종수[#]
Co58	0.19	3.03E+18	2.83E+18	5.53E+18	5.17E+18
Mn54	0.85	1.16E+16	1.14E+16	2.21E+16	2.18E+16
Fe59	0.12	6.10E+14	5.47E+14	1.05E+15	9.42E+14
Cr51	0.08	2.63E+16	2.21E+16	3.75E+16	3.15E+16
Co60	5.27	2.88E+16	2.87E+16	4.69E+16	4.68E+16

Table 7 Radioactive evaluation results of preliminary design: Dose constraint requirements satisfied through optimized reflector design

감마선량 기여도 순위	핵종 핵종	Salt-BeO-YH _{1.5} -B ₄ C-RV (34/50/5/5/2.5)			
		운전 종료 시 RV, 핵종 재고량[#]	감마선량 [mSv/h]	Surface current [#/cm ² ·sec]	
2	Mn56	9.18E+13	1.58	7.98E+7 (상하부)	1.33E+8 (측면)
5	Cr51	5.30E+15	0.01		
4	Fe59	6.50E+14	0.02		
1	Co58	2.00E+17	3.49		
3	Mn54	1.97E+17	0.65		
6	Co60	5.13E+15	0.01		

지로 반감기가 짧은 순서대로 Fe59, Co58이 각각 10%, 7%의 재고량 감소를 보였다. 다만 Mn54, Co60에서는 7 일 정도의 짧은 냉각시간을 가지고는 2% 미만의 재고량 감소만을 보였다. 결과적으로 전출력 운전 시나리오 대비, 저출력 혹은 냉각시간을 고려하면 약 10%의 감마선량만이 운전시나리오를 통해 극복 가능한 것으로 평가된다.

앞선 결과를 토대로 Table 7과 같이 최초 원자로용기 표면의 선량 제한치(10 mSv/hr) 달성을 위해 용기 표면 평균 고속중성자 누설률을 1.0E+8/cm²·sec 만족하도록 유효노심 반경 34 cm, 반사체 50 cm, 차폐체 5 cm 설계 하면 목표성능을 만족하는 것을 확인 할 수 있다. 근본적인 방사화량을 줄이기 위해서는 반사체 두께 증가가 불가 피했으며 그로 인한 잉여반응도에 해당하는 만큼 노심 크기를 줄여 기존 제거기의 추가적인 설계변경 없이 목표 성능을 달성할 수 있도록 하였다. 9.46E+8 Joule 생산시 점을 가정할 경우, Table 7의 결과와 같으며 주요 핵종 6 개의 총 감마선량의 합은 5.76 mSv/h로 평가되었다. 해당 조건에서 원자로용기 전단면의 고속중성자 누설량의 경우 1.0E+8/cm²·sec 미만을 만족할 경우, 원자로용기 방사화를 통한 선량은 추가 차폐체 설치 없이 운영기간 중 항

시 이동이 가능하다는 것을 알 수 있다. 다만 위 계산에서는 원자로용기만을 평가 대상으로 하였기 때문에 배관 및 주변기기에서 야기되는 감마선량을 추가 고려한다면 부분적으로 부가 차폐체의 사용이 필요할 것이다.

4. 결 론

영구정지 후 방사선량을 평가하는 것이 아닌 운전기간 중 초소형 이동형 용융염원자로 용기를 포함한 구조물의 방사화 평가를 목적으로 OpenMC를 활용하여 실제적인 기하구조 모사 및 중성자, 감마선 스펙트럼을 반영한 연소계산을 수행하였다. 원자로용기를 우선적 평가대상으로 선정하고 가장 보수적인 운전시나리오에서 생성되는 주요 감마선원 핵종을 분석 및 거동을 평가하였다. 실제 선량에 기여하는 핵종은 Cr51, Fe59, Mn54, Mn56, Co58, Co60의 6가지로 선별되며 각각 반감기에 관계없이 초기 100일 운전기간 동안 급격히 재고량이 증가하다 이후 수렴하여 연소기간 내에 일정한 재고량을 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 반감기가 비교적 짧은 Cr51, Fe59, Co58 들은 저출력 및 냉각시간을 고려한 운전시나리오를 적용

하여 약 10%의 재고량 감소가 가능했지만 그 외의 핵종에서는 영향이 미미했으며 현실적인 운영시나리오를 가정한다 해도 눈에 띄는 재고량 감소는 불가능했다. 추후 보다 정확한 계산을 위해서 임계상태의 제어드럼 위치로 위치시킨 후 연소계산을 수행하고 연료염 뿐만 아니라 제어패드, 반사체를 연소물질로 포함하여 운전 시기 별 중성자 스펙트럼 변화를 반영한 평가를 수행할 예정이다.

원자로용기 전단면 고속중성자 누출량을 $1.0E+8$ neutrons/cm²·sec 미만으로 설계할 경우, 전 운전 기간 동안 원자로용기 표면선량을 10 mSv/h 미만으로 제한할 수 있음을 확인하였다. 그러나 위 수치는 보수적인 가정을 적용한 원자로용기만의 감마선량을 평가결과이며 주변기기 방사화에 의한 영향을 추가 고려해야 한다. 따라서 다양한 운전시나리오 및 설계여유도 확보 측면에서는 추가적인 차폐체 없이 이동 가능한 초소형 원자로 개념을 위해서는 원자로설계 단계에서부터 방사화 기준을 만족할 수 있는 반사체 및 노심 최적화 설계가 고려되어야 한다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(21-107-

F00-018(KRIT-CT-22-017), 차세대 다목적 고출력 전력생산기술(열원공급모듈 설계기술)).

참고문헌

- (1) Presidential Decree No. 2017 27972, Enforcement Decree of the Nuclear Safety Act, Republic of Korea.
- (2) NSSC, Notice No. 2019-7, 2019, Nuclear Safety and Security Commission, Republic of Korea.
- (3) Romano, P. K., Horelik, N. E., Herman, B. R., Nelson, A. G., Forget, B., and Kord-Smith, A., 2015, "OpenMC: A State-of-the-art Monte Carlo Code for Research and Development," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 82, pp. 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.048>.
- (4) Seo, J. U., Yoon, S. J., and Park, T. K., 2022. "A Study on the Depletion behavior of Molten Salt Reactor with OpenMC Code," *Trans of the KNS*, Changwon, Oct. 20-21.
- (5) Yoon, S. J., Seo, J. U., Zee, S. K., Park, T. K., and Kim, S. J., 2023, "Multi-layer Shielding Design for Small Sized Molten Salt Fast Reactor," *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants*, Gyeongju, Apr. 23-27.
- (6) Chung, K. W., Yoon, S. J., Park, T. K., and Cho, J. S., 2023, "Shielding Considerations for a Transportable Microreactor," *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants*, Gyeongju, Apr. 23-27.