

# 다단계 연속후처리를 포함하는 핵주기공정의 핵종농도 동적분포 해석코드 개발(I) - 정상 평형상태 해석모델

오 세 기

아주대학교 에너지학과

Development of a Computer Code for Analyzing Time-dependent  
Nuclides Concentrations in the Multi-stage Continuous HLW  
Processing System (I) - Equilibrium Steady State Model

Se Kee Oh

Department of Energy Studies

Ajou University

## ■ Abstract

원자로 내에서 연소 중인 핵연료나 저장 또는 재처리 중인 사용후핵연료의 성분으로서 시설의 공정설계, 안전성분석 및 차폐설계에 중요한 입력자료가 되는 핵분열생성물질, 방사화생성물 및 악티나이드의 핵종농도와 이에 대응하는 방사능 강도의 기기 별 시간변화율을 해석할 수 있는 코드 개발할 목적으로 MULTISAMS 정상 평형상태 모델을 구현하였다.

MULTISAMS 코드의 반응공정 모델은 서로 연결되어 있으며 내부에 방사성물질의 혼합유체가 순환하는 세 종류의 반응기(원자로, 열교환기 및 화학반응기) 계통에서 자연적 또는 설계에 의해 일어나는 현상으로서; 반응기 간의 물질 흐름; 각 반응기 내에서 방사성 붕괴, 변환, 이동과 중성자 흡수 및 핵분열; 외부로부터 특정 핵종의 유입 혹은 유출을 고려한 시간중속 핵종농도보존방정식 이론에 근거한다.

코드의 유용성 및 신뢰성을 검증하기 위해

현재 개념설계가 진행 중인 AMBIDEXTER 원자력 에너지시스템을 대상으로 ORIGEN2 계산과 비교하였다. 두 코드 간의 입력조건과 배경이론차이점 때문에 절대적 비교가 불가능하므로 단순이론의 중간매개코드로서 SAMS를 이용한 2단계 비교방법을 따랐다. 결론은 MULTISAMS는 ORIGEN2 계산의 수렴치와 근사

하게 일치하면서 ORIGEN2 가 다룰 수 없는 핵주기 연속후처리공정의 정상가동 시 핵종 평형농도를 기기 별로 계산할 수 있다는 장점을 확인하였다

## 1. 서론

1960년대부터 수많은 연구기관과 대학에서 핵연료가 포함하고 있는 핵종농도의 변화를 계산할 수 있는 컴퓨터 코드를 개발하였고 원자로 및 차폐설계, 재처리 공정설계 등에 널리 사용하여왔다. 그러나 대부분의 핵종분석 코드는 상용발전로의 우라늄/플루토늄 고체 혼합산화물 상태의 핵연료에 적합하게 만들어져서

- LWR, HWR, HTGR, LMFBR 의 중성자 스펙트럼에 대해서만 신뢰성 있는 연소 산이 가능하고,

- 사용후핵연료를 포함하는 HLW의 저장, 이송, 처리, 처분시설에서 일어나는 화학 반응 효과를 명시적으로 취급하는데 많은 제약조건이 따른다.

따라서, 방사성물질을 생산, 저장, 처리하는 시설에서 방사능원의 시간적, 공간적 분포특성을 정확하게 예측하여 이 시설의 설계, 운전, 관리기술의 입력자료로 제공되기 위해서는 시설을 구성하는 기기, 계통의 특성 모델이 명시적으로 기술되어야 한다.

본 연구는 방사능원의 생성시설인 원자로와 주요 이동 경로인 1차 열전달계통 및 최종관리시설로서 방사성폐기물처리계통을 포함하는 복합시설이 온라인 또는 오프라인으로 가동될 때 시설에 잔류하는 방사성 물질의 농도분포와 이에 대응하는 방사선 강도의 동특성 해석을 위한 MULTISAMS 코드의 초기조건 평형상태 모델을 개발하는 것이다.

## 2. 본 론

MULTISAMS 코드는 원자로시설과 핵주기시설이 결합된 폐쇄핵연료주기로서 방사성물질의 생성, 소멸, 변환, 분리반응이 함께 고려되는 연속공정을 표준모델로 가정하고 이론을 정립하였다. 따라서 기기 성능 간의 연계성이 매우 높기 때문에 각 기기를 순환하는 방사성 핵종의 성분분포 시간변화율의 상호 종속성이 크므로, 각 구성 기기에서의 단위체적 당 물질수지균형을 기술하는 시간중속핵종농도보존방정식을 하나의 연립미분방정식계로 간략화하였다. 정상상태모델은 이 연립방정식의 시간변화율을 0으로 대치하여 선형방정식계로 변환하면 Gauss-Seidel 수치해법에 의해 쉽게 해를 구할 수 있다.

원자로-열교환기-화학반응기로 구성된 계통 모델의 기기 내 핵종의 생성×소멸반응으로 방사성붕괴, 핵분열분열, 중성자포획, 구조물흡착, 기포내포획 및 재처리화학공정으로 구별하였다. 연결배관은 내부에서 일어나는 반응을 무시하고, 기기 간 연속경계조건으로서의 기능만을 고려하므로 각 기기에서 유입 및 유출되는 유량을 결정하는데 기여한다. 또한 MULTISAMS 이론에서는 특정 핵종을 외부에서 장전할 수 있도록 외부공급율을 별도의 항으로 첨가하였다.

선형방정식계의 계수행렬 원소값을 구하기 위해 MULTISAMS 는 방사화생성물, 핵분열생성물, 악티나이드로 분류된 총 1006 종의 방사성동위원소를 취급하는데, 이들 핵종의 핵적 물성자료는 3 종의 핵자료 라이브러리로 제공된다. 먼저 붕괴상수 라이브러리는 각 핵종의 반감기, 붕괴모드, 최수가능 열에너지, 자연존재비, 방사성독성 자료를 포함하고, 핵반응단면적 라이브러리는 (n,g), (n,2n), (n,3n), (n,a), (n,p), (n,fission)와 각 핵분열생성물질의 생성분율상수를, 광자데이터 라이브러리는 핵분열생성물질과 악티나이드의 붕괴 당 방출되는 광자의 에너지를 18군으로 세분

하여 제공한다. 기타 열역학적 물성 라이브러리는 필요에 따라 대상 핵종군에 동일한 상수값을 코드에 직접 입력하여 사용하였다.

재처리화학공정은 각 원소의 화학적, 핵적 특성에 따라 불활성기체류, 불활성금속류, 반불활성 금속류, 희토류, 할로젠류, 악티나이드, Pa로 분류하여 고유한 제거율을 적용하므로 반응기의 용량을 모델에 포함하였다.

표 1에 MULTISAMS를 이용하여 열출력 250 MW 용융염원자로인 AMBIDEXTER의 주요 기기에서의 불활성기체류에 대한 핵종농도를 계산하여 ORIGEN2와 비교하였다. 또 표 2에는 이로부터 평가된 각 기기에서의 방사능 강도를 정리하였다.

표에 의하면 단일 기기 모델을 가정하는 ORIGEN2 계산과 MULTISAMS 다단계 모델과의 차이가 계통 내에서 서로 다른 값을 보임을 알 수 있다.

표1. 기기 내에서의 불활성기체 핵종농도

핵종	ORIGEN2	MULTISAMS(#/cc)			SAMS
		원자로	열교환기	화학반응기	
KR-86	2.50E-11	2.47E-11	3.23E-11	5.40E-11	2.25E-11
KR-87	3.86E-11	3.54E-11	4.30E-11	7.07E-11	3.33E-11
KR-88	5.16E-11	4.68E-11	5.43E-11	7.04E-11	4.44E-11
KR-89	5.08E-11	4.46E-11	4.61E-11	4.33E-11	4.24E-11
KR-90	3.65E-11	2.98E-11	2.69E-11	1.61E-11	2.70E-11
XE135	4.17E-11	6.48E-10	7.10E-10	1.02E-11	3.85E-11
XE135M	1.41E-11	7.30E-10	7.37E-10	7.72E-10	1.26E-11
XE136	6.34E-11	6.08E-11	7.24E-11	1.16E-12	5.80E-11
XE137	5.67E-11	5.04E-11	5.50E-11	6.38E-11	4.85E-11
XE138	4.32E-11	3.86E-11	3.99E-11	4.06E-11	3.80E-11

표2. 정상상태에서 그룹별 방사능강도

그룹	정상 상태 방사능강도(Mev/cc · sec)		
	원자로	열교환기	재처리시설
1	4.0403E+09	3.2956E+09	2.3288E+09
2	2.5136E+09	2.0660E+09	1.4758E+09
3	2.9873E+09	2.5468E+09	1.9475E+09
4	5.4913E+09	4.4792E+09	3.1647E+09
5	5.3620E+09	4.3605E+09	3.0755E+09
6	6.2983E+09	5.0117E+09	3.4794E+09
7	3.0828E+10	2.5756E+10	1.9695E+10
8	3.0175E+10	2.6339E+10	2.0921E+10
9	4.6793E+10	3.9848E+10	3.0511E+10
10	1.2440E+11	1.1076E+11	9.3740E+10
11	1.0876E+11	1.0052E+11	8.5702E+10
12	3.2068E+10	2.8290E+10	2.2537E+10
13	2.3162E+10	2.1426E+10	1.8327E+10
14	2.0584E+10	1.8398E+10	1.4562E+10
15	2.5213E+10	2.2364E+10	1.7046E+10
16	2.8931E+10	2.4009E+10	1.5504E+10
17	5.4037E+08	2.8452E+08	4.9941E+07
18	9.5789E+04	3.6303E+04	3.9286E+03

Compositions and Characteristics of Nuclear Materials, Nucl. Tech. Vol. 62, Sept., 1983.

2. 오세기, 정근모, 원성희, 임현진, 조재국, AMBIDEXTER 원자력 보일러 시스템의 노심관리 및 반응도 효과 연구, 과학기술부, 1999.

3. R. C. Robertson, Conceptual Design Study of a Single-fluid Molten-salt Breeder Reactor, ORNL-4541, June 1971.

4. A. G. Croff, R. L. Haese, and N. B. Gove, Updated Decay and Photon Libraries for the ORIGEN Code, ORNL/TM-6055, Oak Ridge National Lab., 1979.

### 3. 결론

혁신형 차세대 원자력에너지시스템의 개발 방향에 맞추어 폐쇄핵연료주기 개념을 수용할 수 있도록 다 단계 연속후처리를 포함하는 핵주기공정의 핵종농도 동적분포 해석 코드로서 MULTISAMS를 개발하고 있다.

본 연구는 동특성 모델의 초기조건을 결정하는 정상 평형상태를 해석하는 부분으로서

열출력 250MW AMBIDEXTER 원자력에너지 시스템의 핵심기기인 원자로-내장열교환기-재처리화학반응기 계통을 시뮬레이션하였으며 기대하는 신뢰성을 확인하였다.

### 4. 참고문헌

1. A. G. Croff, ORIGEN2: A Versatile Computer Code for Calculating Nuclides