

액체금속로용 3차원적 연소 해석 코드 개발

양원식, 오형숙

조선대학교

광주광역시 동구 서석동 375

요 약

액체금속로용 2차원적 연소 해석 코드 REBUS-2[1]에 횡방향 적분법 및 다항식 전개법에 기초한 3차원적 육방형 노달 방법을 결합하여, 3차원적 연소 해석 코드 REBUS-K를 개발하였다. REBUS-K는 3차원적 중성자속 분포 계산 및 미시적 연소 계산을 통해 노내 연소 해석을 수행하며, 또한 핵연료 방출/재배치 및 재장전, 재처리, 성형가공 등의 노의 주기 계산을 수행한다. 비평형주기 및 평형주기 해석을 수행하며, 평형주기 해석 시에는 지정된 제한 연소도 및 증배계수를 만족시키는 주기 길이와 장전 농축도를 탐색한다. 개발된 코드의 검증 계산을 450 MWt 액체금속로의 비평형주기 및 평형주기 문제에 대하여 수행하였으며, 계산 결과를 Argonne 연구소의 3차원적 연소 해석 코드 REBUS-3[2]의 결과와 비교하였다. 그 결과 원자로 증배계수, 출력 분포, 증식을, 연소도, 장전 핵연료의 농축도, 주기 길이 등의 연소 특성이 수렴 조건 이내에서 일치하였다.

1. 서 론

노심 연소 해석은 모든 원자로의 노심 및 핵연료 설계와 안전하고 경제적인 운전에 있어서 필수적인 요소이다. 특히 높은 전환율과 폐쇄 핵연료 주기를 특성으로 하는 액체금속로에서는 정확한 노심 연소 계산의 중요성이 매우 크다. 그러나, 현재 국내에서 액체금속로의 연소 해석에 사용하고 있는 2차원적 연소 해석 방법은 연소에 따른 핵종의 수밀도 분포를 정확히 계산하기에는 불충분하다. 따라서, 액체금속로의 연소 특성을 정확히 계산하기 위해서는 3차원적 해석 방법의 개발이 필요하다.

이에 따라, 미국 Argonne 연구소의 2차원적 연소 해석 코드 REBUS-2에 3차원적 노달 방법을 결합하여 3차원적 연소 해석 코드를 개발하였다. 구체적으로, IBM과 CDC 등의 대형 컴퓨터 용으로 개발된 원래의 REBUS-2를 대폭 수정하여 UNIX 버전을 만든 후, 육방형 노달 방법에 의한 3차원적 중성자속 계산 모듈을 개발하여 REBUS-2의 유한 차분법에 의한 2차원적 중성자속 계산 모듈을 대체하였다. 또한, 다른 계산과의 연계 계산을 용이하게 하기 위하여 ARC(Argonne Reactor Computation) 형식[1]의 데이터 세트를 모두 CCCC(Committee on Computer Code Coordination) 형식[3]의 데이터 세트로 대체하고, CCCC 형식의 데이터 세트와 양립하는 반응 단면적 균질화 모듈을 개발하였다.

이 논문에서는, 상기와 같이 개발된 REBUS-K의 방법론, 계산 기능 및 검증 계산 결과를 기술하였다. 먼저 육방형 노달 방법 및 핵연료 주기 해석 방법을 약술한 후, 비평형주기 및 평형주기에 대한 검증 계산 결과를 기술하였다.

2. 해석 방법 및 기능

2.1 육방형 다군 노달 방법

REBUS-K의 육방형 노달 방법은 미국 Argonne 연구소의 중성자 확산 방정식 해결 코드인 DIF3D[4]의 육방형 노달 방법[5]에 기초하였다. 이 방법은 육각기둥 노드 내에서의 중성자 균형 방정식과 경계면에서의 중성자류에 대한 근사식을 이용하여 다군 중성자 확산 방정식을 해결한다. 경계면에서의 중성자류에 대한 근사식은 횡방향 적분법과 다항식 전개법을 이용하여 유도한다.

다군 확산방정식을 횡방향 적분하여 생성된 에너지군당 4개의 2차 상미분 방정식은 가중잔차법을 이용해 근사적으로 해결한다. 이 때, 육각 평면상의 1차원 중성자속은 구간연속 다항식을 포함한 5개의 기저 함수로 근사되며, 축방향의 1차원 중성자속은 3차 다항식으로 근사된다. 또한, 육각 평면상의 횡방향 누설항은 각 반 노드에서의 평균 횡방향 누설율을 이용한 구간연속 상수 함수로 근사하고, 축방향에 대한 횡방향 누설항은 2차 함수로 근사한다. 최종 식은 중성자속 모멘트 방정식과 각 경계면에서의 부분 중성자류에 대한 반응행렬식으로 표현된다. DIF3D의 노달 방법에서는 반응 행렬식을 유도하는 데 필요한 역행렬을 수치 해법에 의하여 구하나, 본 방법에서는 육각기둥에 대한 대칭 변환의 고유 벡터를 이용하여 해석적으로 구함으로써 정확도와 계산 속도를 개선하였다.

최종 노달 방정식은 통상의 핵분열 중성자원 반복 계산법(Fission Source Iteration)을 이용하여 해결하며, CMR(Coarse-Mesh Rebalance) 방법과 ASE(Asymptotic Source Extrapolation) 방법을 통해 반복 계산의 수렴 속도를 가속화한다. 각 에너지군에 대한 반응 행렬식의 해도 반복 계산법에 의해 구해지며, 축방향으로는 두색 체크판(Red-Black Checkboard) Sweeping 방법이, 육각 평면 방향으로는 사색 체크판(Four-Color Checkboard) Sweeping 방법이 사용된다.

2.2 핵연료 주기 해석 방법

REBUS-K의 핵연료 주기 해석은 3차원적 중성자속 분포 계산 및 미시적 연소 계산을 통한 노내 연소 해석과 핵연료 방출/재배치 및 재장전, 재처리, 성형가공 등의 노외 주기 계산으로 나뉜다. 노내 연소 해석은 전체 연소 시간을 여러 개의 소구간으로 나누고, 각 소구간에 대한 핵종 변환방정식에 소구간 시점과 종점의 평균 중성자속을 사용한다. 이로 인한 소구간 종점에서의 중성자속 및 수밀도 벡터에 대한 비선형 연립방정식은 소구간 종점에서의 수밀도 벡터에 대한 반복 계산을 통해 해결하며, 이 방법은 초기치 문제 해법의 예측자 수정자법에 해당한다. 주어진 중성자속에 대한 핵종 변환방정식은 지수행렬법을 이용하여 해결하며, 변환행렬의 지수 행렬은 축약법(Scaling Technique)에 의해 가속화된 Taylor 급수 방법을 이용하여 계산한다.

주어진 초기 원자로 구성에 대한 단일 연소 주기 해석은, 연소 방정식을 지정된 주기 길이에 대해 해결함으로써 완결된다. 그러나, 다주기 또는 평형주기 해석에서는 연소된 핵연료의 방출,

부분적으로 연소된 핵연료의 재배치, 재처리 및 성형가공, 새로운 핵연료의 장전 등의 노외주기를 고려하여야 한다. 다주기 해석은 주어진 초기 노심 조건 및 각 주기말에서의 핵연료 방출/재배치 및 재장전에 따른 수밀도 벡터의 불연속 조건을 이용하여 재장전 시간 동안의 핵종 붕괴를 포함한 단일 주기 해석을 반복함으로써 완결된다. 이들 단일 주기 및 다주기 문제는 비평형주기 문제라 불리며, 수학적으로 초기치 문제에 해당한다.

평형주기는 고정된 핵연료 관리 방법 및 운전 조건하에서 각 주기가 동일한 노심 상태임을 의미한다. 따라서, 새 장전 핵연료의 구성이 방출 핵연료의 구성과 재처리 및 성형가공 등의 노외 주기 모델에 따라 결정되며, 그 결과 주기초의 수밀도 벡터가 주기말의 수밀도 벡터에 의존하는 두점경계조건 문제로 귀착된다. 또한, 평형주기 해석에는 종종 핵연료의 최대 방출 연소도 및 주기말의 노심 반응도에 대한 제한 조건이 부과되며, 이들 제한 조건을 만족시키기 위하여 새 장전 핵연료의 농축도와 연소주기 길이가 조절된다. 즉, 평형주기 문제는 장전 벡터의 노내 연소를 나타내는 방출 벡터에 대한 식, 방출 벡터의 재처리에 따라 결정되는 장전 벡터에 대한 식 및 상기 두 제한 조건으로 표현된다.

평형주기 문제를 해결하기 위해서는, 먼저 주어진 장전 수밀도 벡터가 각 주기말에서 동일한 방출 수밀도 벡터를 산출하는 순환평형 상태를 계산한다. 다음, 연소도 제한 조건이 만족되도록 연소 길이를 조절하며 새로운 순환평형 상태를 계산한다. 마지막으로, 반응도 제한 조건이 만족되도록 장전 핵연료의 농축도를 조절하며, 상기한 네 식을 만족하는 연소 시간, 농축도 및 장전 수밀도 벡터를 구한다. 전체 반복 계산 과정에는 수렴을 가속화하기 위해 예비, 중간 및 최종 탐색의 세 탐색 단계를 통하여 평형주기 해에 단계적으로 접근하는 기법이 사용된다.

3. 검증 계산

개발된 3차원적 연소 해석 코드 REBUS-K의 검증 계산을 출력이 450 MWt인 실제적인 액체 금속로 설계[6]에 대하여 수행하였다. 이 원자로로는 U-Pu-Zr의 금속 핵연료를 사용하는 중형 액체금속로로써, 원자로 노심의 평면도 및 R-Z 모델을 그림 1과 2에 각각 보였다. 비평형주기 문제 및 평형주기 문제에 대한 검증 계산이 수행되었으며, 두 문제 모두 3차원 육방형 노심 모델을 사용하였다. 계산된 결과는 Argonne 연구소의 3차원적 연소 해석 코드 REBUS-3[2]의 결과와 비교하였다.

비평형주기 문제는 원자로를 네 연소 주기 동안 연소시키는 문제로, 초기 노심 구성은 연소되지 않은 구동 집합체 및 블랭킷 집합체로 구성된 BOL 노심을 나타낸다. 각 연소 주기의 길이는 475 일이고 주기 사이 재장전 시간은 73 일이다. 표 1은 비평형주기 문제의 각 주기별 증배계수, 증식을 및 핵분열성 물질의 양을 보여준다. 이들 결과는 REBUS-K에 의해 계산된 연소 특성이 REBUS-3의 계산치와 0.05% 이내의 차이로 일치함을 나타낸다. 이 결과는 REBUS-K의 증성자속 계산 및 연소 계산의 정확도가 REBUS-3와 비슷함을 나타낸다. 또한, 각 주기말에서 핵연료 방출, 재배치 및 장전 등의 핵연료 관리가 성공적으로 수행되었음을 시사한다.

평형주기 문제는 상기한 원자로의 평형 운전 조건을 구하는 것이다. 즉, 주어진 핵연료 관리 과정 및 연소도와 원자로 증배계수에 대한 제한 조건에 따라, 원자로의 평형 운전 상태가 달성되도록 장전 물질의 농축도 및 주기 길이를 결정하는 문제이다. 구동 집합체 및 블랭킷 집합체에

대해 $13.0 \pm 0.01\%$ 의 연소도 제한 조건을 부과하였고, 독물질을 제외한 원자로 증배계수가 주기말에서 1.002 ± 0.0001 이 되도록 하였다. 표 2는 평형주기 문제의 장전 핵연료 농축도, 주기 길이, 주기초 및 주기말의 증배계수, 증식율, 핵분열성 물질의 양 및 구역별 연소도를 보여준다. 이 표에서 보인 바와 같이, 장전 핵연료의 농축도 및 주기 길이가 수렴 조건 이내에서 일치하였다. 또한, REBUS-K에 의해 계산된 원자로 증배계수, 증식율, 핵분열성 물질량, 연소도, 출력 분포 등의 연소 특성이 REBUS-3의 계산치와 0.05% 이내의 차이로 일치한다.

4. 결 론

액체금속로용 2차원적 연소 해석 코드 REBUS-2에 3차원적 육방형 노달 방법을 결합하여, 3차원적 연소 해석 코드 REBUS-K를 개발하였다. 육방형 노달 방법은 Argonne 연구소의 중성자 확산 방정식 해결 코드인 DIF3D의 육방형 노달 방법에 기초하여 개발하였다. 검증 계산을 출력이 450 MWt인 액체금속로 설계의 비평형주기 문제 및 평형주기 문제에 대하여 수행하고, 계산된 결과를 Argonne 연구소의 3차원적 연소 해석 코드 REBUS-3의 결과와 비교하였다. 비평형주기 문제의 경우, 각 주기의 주기초와 주기말의 원자로 증배계수와 출력 분포, 증식율, 연소도, 핵분열성 물질의 양 등이 REBUS-3의 결과와 0.05% 이내의 차이로 일치하였다. 평형주기 문제의 경우에도, 장전 핵연료의 농축도 및 주기 길이가 수렴 조건 이내에서 일치하였다. 이상의 결과는 REBUS-K가 REBUS-3과 비슷한 정확도로 핵연료 주기 계산을 성공적으로 수행할 수 있음을 보여준다.

참고 문헌

1. R. P. Hosteny, "The ARC System Fuel Cycle Analysis Capability, REBUS-2," ANL-7721, Argonne National Laboratory (October 1978).
2. B. J. Toppel, "A User's Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability," ANL-83-2, Argonne National Laboratory (March 1983).
3. R. D. O'Dell, "Standard Interface Files and Procedures for Reactor Physics Codes, Version IV," LA-6941-MS, Los Alamos Scientific Laboratory (September 1977).
4. K. L. Derstine, "DIF3D: A Code to Solve One-, Two-, and Three-Dimensional Finite-Difference Diffusion Theory Problems," ANL-82-64, Argonne National Laboratory (April 1984).
5. R. D. Lawrence, "The DIF3D Nodal Neutronics Option for Two- and Three-Dimensional Diffusion Theory Calculations in Hexagonal Geometry," ANL-83-1, Argonne National Laboratory (March 1983).
6. W. S. Yang, P. J. Finck, and H. Khalil, "Reconstruction of Pin Power and Burnup Characteristics from Nodal Calculations in Hexagonal-Z Geometry," *Nucl. Sci. Eng.*, **111**, 21 (1992).

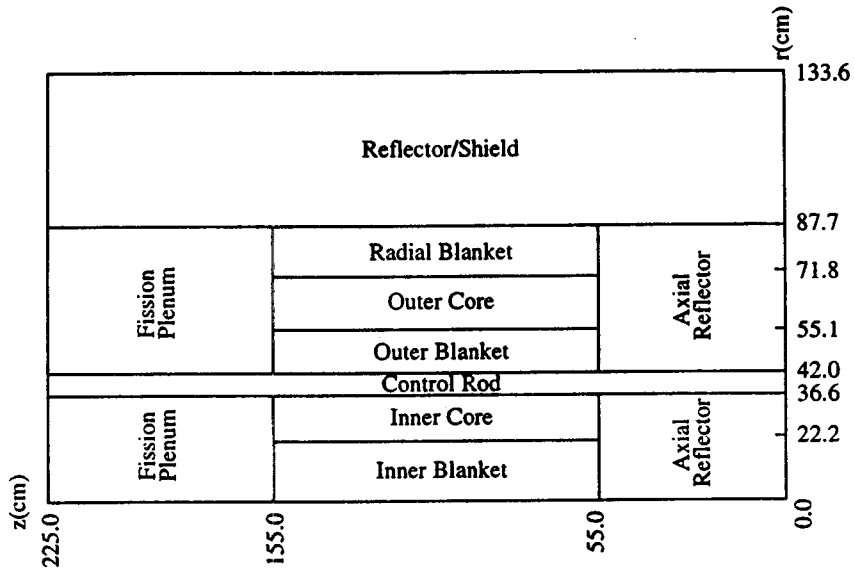


그림 2 450 MWt 액체금속로 노심의 R-Z 모델

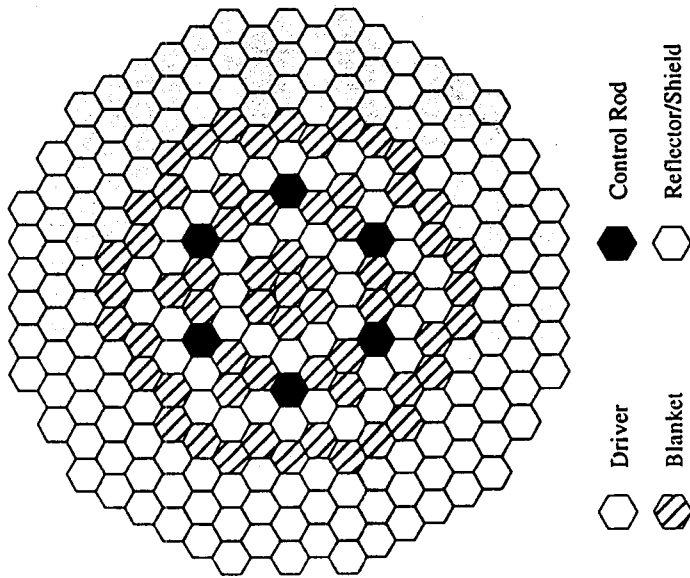


그림 1 450 MWt 액체금속로 노심의 평면도

표. 1 비평형주기 문제의 증식율, 증배계수 및 핵분열성 물질의 양

물리량	주 기	REBUS-K	REBUS-2	상대오차 (%)	
증식율	1	1.02842	1.02842	-	
	2	1.01625	1.01625	-	
	3	1.04461	1.04461	-	
	4	1.02613	1.02613	-	
증배계수 (k_{eff})	1	BOC	1.051443	1.051442	1.0×10^{-4}
		EOC	1.028521	1.028521	-
	2	BOC	1.037329	1.037327	1.9×10^{-4}
		EOC	1.016620	1.016620	-
	3	BOC	1.009351	1.009351	-
		EOC	0.994733	0.994733	-
	4	BOC	1.027437	1.027437	-
		EOC	1.009654	1.009654	-
핵분열성 물질의 양 (Kg)	1	BOC	160.401	160.472	-0.05
		EOC	161.417	161.488	-0.04
	2	BOC	161.231	161.302	-0.04
		EOC	161.814	161.886	-0.04
	3	BOC	160.742	160.813	-0.04
		EOC	162.320	162.392	-0.04
	4	BOC	161.371	161.442	-0.04
		EOC	162.302	162.374	-0.04

* BOC : 주기초; EOC : 주기말

표. 2. 평형주기 문제의 주요 연소 특성

물리량		REBUS-K	REBUS-3	상대오차 (%)	
장전 핵연료 농축도 (%)		32.4902	32.4904	$- 6.1 \times 10^{-4}$	
주기 길이 (일)		473.0	473.0	-	
증식율		1.20552	1.20552	-	
증배계수 (k_{eff})	BOEC	1.0017956	1.0017973	$- 1.7 \times 10^{-4}$	
	EOEC	1.0019999	1.0020020	$- 2.1 \times 10^{-4}$	
핵분열성 물질의 양 (Kg)	BOEC	170.151	170.227	-0.045	
	EOEC	177.208	177.287	-0.045	
평균 연소도 (MWD/MT)	내부 노심	BOEC	55,955	55,930	0.045
		EOEC	107,110	107,060	0.047
	외부 노심	BOEC	39,175	39,158	0.043
		EOEC	75,890	75,897	0.044
	내부 블랭킷	BOEC	9,015	9,011	0.044
		EOEC	20,655	20,646	0.044
	외부 블랭킷	BOEC	3,788	3,786	0.045
		EOEC	13,601	13,595	0.044
반경방향 블랭킷	BOEC	3,997	3,995	0.045	
	EOEC	7,597	7,593	0.045	

* 농축도 : Pu 체적 / (U 체적 + Pu 체적)

BOEC : 평형주기의 주기초; EOEC : 평형주기의 주기말