

액체금속로 노심 동특성 분석코드 개발

김영일, 김택겸, 김상지, 김영진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
e-mail: yikim1@nanum.kaeri.re.kr

요 약

FX2-TH 코드는 액체금속로 노심 동특성 분석용 2차원 다군 미시격자 확산코드로 소듐보이드, 핵연료 및 노심 구성물질의 이동, 제어봉 오작동 등에 의해 야기되는 노심 천이상태를 다룰 수 있다. 반응도 계환은 온도 변화에 따른 도플러효과와 냉각제 수밀도 변화를 고려해 주고 있다. 하지만 금속연료가 장전되는 액체금속로의 경우 열팽창에 의한 반응도 계환효과가 크기 때문에 노심 안전성에 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 이를 고려해 주기 위한 모델을 FX2-TH 코드에 도입하였으며 이 코드를 3차원으로 확장하기 위하여 정상상태 노달 확산코드를 개발하였다. 궁극적으로 이 코드는 액체금속로 노심 동특성 분석용 독자코드 개발에 사용될 것이다.

Abstract

FX2-TH is a two-dimensional multigroup fine-mesh diffusion code for the transient analysis of the LMR core and has been designed to treat transients initiated by such mechanism as sodium voiding, motion of fuel and/or structural material, and control rod motion. It takes account of feedback effects from changes in both the fuel temperature and average coolant temperatures through Doppler broadening and change in coolant density, respectively. However, the thermal expansion of the fuel and structural material causes one of the most important reactivity feedback effects on the transient behavior of the LMR core loaded with metallic fuels. This paper describes the thermal reactivity feedback model implemented into the code and the three-dimensional, steady-state nodal diffusion code for the hexagonal-z geometry, which has been developed to serve as a standard neutronics solver of a future

transient code for LMR's.

1. 서론

FX2-TH 코드[1]는 유한차분법을 사용하는 2차원 다균 미시격자 확산코드로 Argonne National Laboratory에서 개발되어 액체금속로 노심 동특성 분석에 사용되던 코드이다. 정상상태에서는 유한차분법을 사용하여 미시격자 확산식을 풀어 중성자속을 계산하고 천이상태에서는 일점 동특성(Point Kinetics) 계산을 수행한다. 이 코드의 경우 2차원 계산만이 가능하다는 제한이 있으나 이미 검증이 된 코드이고 고속로의 경우 경수로에 비해 중성자의 평균 행정거리가 길어 상대적으로 노심이 공간적으로 강하게 연결되어 있기 때문에 노심이 작은 경우 2차원 R-Z 모델을 사용하여도 비교적 정확한 값을 얻을 수 있으므로 현재 한국원자력연구소에서 액체금속로 노심 동특성 분석에 사용되고 있다.

FX2-TH 코드는 제어봉 오작동, 소듐보이드, 냉각재 상실 등에 의한 노심 상태 변화를 예측할 수 있으며 핵연료와 냉각재 온도변화에 따른 단면적 변화와 노심 구성물질의 용융·이동을 고려해 줄 수 있도록 구성되어 있다. 그러나 금속연료가 장전되는 고속로의 경우 열팽창에 의한 반응도 케환효과가 노심 반응도에서 차지하는 비중이 크기 때문에 사고시 노심 안전성에 매우 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 FX2-TH 코드에 열팽창에 의한 반응도 케환효과를 고려해 주는 모델을 도입하였으며 향후 이 코드의 중성자속 계산모듈을 개선하기 위한 목적의 일환으로 그리고 나아가 액체금속로 노심 동특성 분석용 독자코드 개발에 대비 3차원 정상상태 육각형 노달 확산코드를 개발하였다. 노달 방법에는 크게 다차원 노달 확산식을 횡방향으로 적분하여 구한 등가의 일차원 노달 확산식을 푸는 방법[2-4]과 노드 경계조건과 노드 평균 중성자속 등의 노달인자를 다차함수나 해석함수 등으로 대응시키는 방법[5-6]의 두 가지를 들 수 있다. 횡방향 적분을 사용하는 초기의 DIF3D[2]와 HEXNOD[3] 방법은 최근의 ANC-H[4], AFEN[5] 및 HOPEN[6] 방법에 비해 정확도는 떨어지지만 고속로의 경우 그 차이가 작고 또한 동특성 분석시 시간이 많이 소요되는 점 등의 효율적인 측면을 고려하여 우선 이 방법들을 사용하여 코드를 작성하였다.

2 절에서는 열팽창 케환효과 모델에 대하여 간략히 설명하고 소듐보이드 사고에 대한 시험계산 결과를 기술하였다. 3 절에는 3차원 노달 확산코드의 계산흐름과 수치해석 절차 및 검증계산 결과가 수록되어 있으며 마지막 4절은 이 논문을 결론짓고 있다.

2. 열팽창 반응도 케환효과 모델 도입

FX2-TH 코드에서 천이상태 노심계산은 일점 동특성 방법을 사용하여 푸는데 이 방법은 중성자속의 공간 및 에너지 분포 형상(Shape)이 시간에 따라 크게 변하지 않는다고 가정하고 있으나 실

제 이 가정이 적합한 경우는 극히 제한되어 있다. 그러나 노심의 천이상태가 진행되는 중간 중간에 중성자속 분포 형상을 적절히 근사해주면 일점 동특성 방법의 해를 상당히 개선해 줄 수 있다. 이 형상함수(Shape Function)를, 천이상태가 진행되는 동안 일련의 정상상태 계산을 수행하여 구하는 방법을 Adiabatic Method[7]라 하고 일점 동특성 방법과 연계하여 구하는 방법을 Quasistatic Method[8]라 하며 FX2-TH 코드에서는 이를 개선한 방법을 사용하고 있다.

온도변화에 따라 노심 구성물질이 열팽창을 하는 경우 공간중속 중성자속 계산모델에서와 같이 고정된 좌표를 사용하여 이를 모사하는 것이 어렵다. 따라서 현재 열팽창 반응도 궤환효과 모델은 일점 동특성 방법으로 풀 때만 가능하도록 구성되어 있다. 일점 동특성 방법의 식은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \frac{(\rho - \beta)}{\Lambda} + \sum_{i=1}^{n_{precursor}} \lambda_i C_i + S \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i P}{\Lambda} - \lambda_i C_i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

P = power

C_i = i_{th} precursor density

λ_i = decay constant for the i_{th} precursor group

ρ = reactivity feedback

Λ = prompt neutron lifetime

S = source for subcritical initial conditions

β_i = delayed neutron fraction in the i_{th} group ($\beta = \sum_1 \beta_i$)

공간중속 중성자속 계산 결과로부터 식 (1)의 일점 동특성 방법을 푸는데 필요한 계수들이 계산되게 된다. 이때 ρ 는 열팽창에 의한 반응도 궤환효과를 제외한 노심반응도로 여기에 다음의 열팽창에 의한 반응도 궤환효과가 더해지게 된다:

$$\Delta \rho = \sum_i P_i * \Delta T_i + \sum_i Q_i * \Delta T_i^2 + (R_1 * \Delta T_{rod} + R_2 * \Delta T_{rod}^2) + (I * \Delta T_{inlet}) \quad (2)$$

여기서

$\Delta \rho$ = reactivity change from initial steady state

P_i = material linear feedback coefficients

Q_i = material quadratic feedback coefficients

ΔT_i = change in temperature at node i

R_1 = control rod linear feedback coefficients

R_2 = control rod quadratic feedback coefficients

ΔT_{rod} = effective change in core outlet temperature for rod feedback

I = core support feedback coefficients

ΔT_{inlet} = change in core inlet temperature

식 (2)에서 P_i 와 Q_i 에 의한 반응도 제환효과는 핵연료, 피복관, Wrapper와 측관(Bypass) 소동에 대해 정의되며 이들에 의한 영향을 반경방향 채널별로 그리고 각 채널의 축방향 열수력 영역별로 합산하게 된다.

이식된 열평창 반응도 제환효과 모델이 제대로 작동하는 지를 알아보기 위하여 소동보이드 사고의 경우에 대하여 시험계산을 수행하였다. 그림 1은 이 계산에 사용된 R-Z 노심구조를 보여주고 있으며 반경방향으로 12개 채널, 축방향으로 14개의 열수력영역이 사용되었다. 본 노심을 구성하고 있는 물질에 대한 자세한 자료와 열수력 자료 등 계산에 필요한 자료들은 참고문헌 9에 수록되어 있다. 이 사고의 경우 노심 일부분에서 0.1초에 걸쳐 소동보이드가 일어나는 사고로 이로 인하여 사고 초기에 양의 반응도가 주입되어 출력이 증가하게 된다. 그림 2는 시간에 따른 출력 변화를 보여주고 있다. 핵연료 열평창에 의한 반응도 제환효과가 없는 경우 출력이 점점 증가하여 약 0.1초에 최고치 3.6×10^{10} Watt에 도달한 후 핵연료온도가 급격히 상승함에 따라 도플러효과에 의한 부 반응도가 주입되어 노심 반응도가 점점 감소하고 이에 따라 출력이 점점 줄어드는 것을 보여주고 있다. 핵연료 열평창에 대한 선형 제환효과 계수를 -1×10^8 에서 -1×10^6 까지 부 반응도를 점점 증가시켜 가며 계산한 결과 출력첨두치가 점점 낮아짐을 보이고 있다.

3. 3차원 정상상태 육각형 노달 확산코드 개발

노달 방법에는 크게 다차원 노달 확산식을 횡방향으로 적분하여 구한 등가의 일차원 노달확산식을 푸는 방법과 노드 경계조건과 노드 평균 중성자속 등의 노달인자를 다차함수나 해석함수 등으로 대응시키는 방법의 두 가지를 들 수 있다. 이들 방법 중 고속로 노심 동특성 분석시의 효율성 및 정확도를 고려하여 횡방향 적분을 이용하는 DIF3D 방법과 HEXNOD 방법을 사용하여 코드를 작성하였다. DIF3D 방법은 노달확산식을 횡방향에 대하여 적분하여 얻은 1차원 중성자 확산식을 풀기 위하여 1차원 중성자속을 다차함수로 근사하고 있으며 HEXNOD 방법은 1차원 중성자 확산식 전개시 육각형 집합체 구조의 특이점 때문에 횡방향 중성자누출항에 추가로 존재하는 항을 무시하여 사각형 집합체에서와 같은 1차원 중성자 확산식으로 놓고 소스와 횡방향 중성자누출을 2차함수로 근사한 후 해석적으로 푼다.

그림 3은 이 코드의 계산 흐름을 보여주고 있다. 셉루틴 MAIN은 이 코드의 구동 프로그램으로 셉루틴 SOLVES에서는 정상상태 3차원 노달확산식을 풀게 되는데 여기서 외부 반복계산을 수행하

는 셉루틴 OUTER를 부르게 된다. 셉루틴 OUTER에서는 다시 내부 반복계산을 수행하는 셉루틴 INNER와 거시격자 재균형(Coarse-mesh Rebalancing) 계산을 수행하는 셉루틴 CMR을 부른다. 셉루틴 EDIT에서 중성자속 및 출력분포 등의 계산결과를 출력하며 셉루틴 JOBTIM에서는 계산에 소요된 시간에 대한 정보를 출력하게 된다.

노달방정식은 핵분열 소스 반복계산에 의하여 푸는데 수렴속도를 가속화하기 위하여 거시격자 재균형 방법과 점근 외삽법(Asymptotic Extrapolation)을 사용하였다. 각 핵분열 소스 반복계산에서는 주어진 그룹별 소스를 사용 반응행렬식을 풀어 부분중성자류를 계산한 후 중성자속 모멘트를 계산하는 내부 반복계산을 수행하게 된다. 이때 내부 반복계산은 공간적으로 나뉘어 수행되는데 우선 축방향으로 홀수 평면에 대해 계산을 수행하고 난 다음 이 계산결과를 사용하여 짝수 평면에 대해 계산을 수행한다. 각 평면에서의 계산은 이 평면의 각 노드를 다시 몇 가지 색깔로 분류하여(Red-Black Ordering) 계산을 수행한다. DIF3D 방법 계산시 유출 부분중성자류는 반경방향과 축방향으로 나누어 계산하게 되는데 먼저 반경방향에 대해 계산한 후 여기서 얻어진 값을 사용하여 축방향 유출 부분중성자류를 계산하게 된다. 반면 HEXNOD 방법 계산에서는 모든 방향에 대해 한꺼번에 계산한다.

내부 반복계산 다음에는 거시격자 재균형 계산을 수행하게 된다. 다음 수렴조건이 만족되었을 때 외부 반복계산이 끝나게 된다.

$$\begin{aligned} \text{고유치} & : |\lambda^{(n)} - \lambda^{(n-1)}| < \epsilon_1 \\ \text{노드평균 중성자속} & : \max_k \left| \frac{\phi^{k(n)} - \phi^{k(n-1)}}{\phi^{k(n)}} \right| < \epsilon_2 \end{aligned}$$

노달계산으로부터 얻은 중성자속, 부분중성자류와 고유치를 사용하여 각 노드별 체적(V^k)을 곱한 후 거시격자(V^m)별로 여기에 속해 있는 노드에 대해 그리고 모든 에너지 그룹에 대해 합하면 다음과 같은 거시격자에 대한 평형방정식을 얻게 된다.

$$-\sum_l f^{lm} + [\sum_l f^{ml} + A_m] = \frac{1}{\lambda^{(n)}} P^m, \quad m=1, \dots, M \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} A_m &= \sum_{k \in V^m} V^k \sum_{g=1}^G \Sigma_{\text{OG}}^k \phi_g^{k(n)} \\ P^m &= \sum_{k \in V^m} V^k \sum_{g=1}^G \lambda_g \sum_{g'=1}^G \nu \Sigma_{f, g'}^k \phi_{g'}^{k(n)} \\ \Sigma_{\text{OG}}^k &= \Sigma_{r, g}^k - \sum_{g' \neq g} \Sigma_{g'}^k \end{aligned}$$

식 (3)에서 f^{ml} 은 거시격자 영역 m에서 인접한 영역 l로의 중성자누출을 뜻한다. 중성자속과 부분중성자류는 이전 반복계산에서의 핵분열 소스로부터 계산되기 때문에 외부 반복계산이 수렴

되지 않았으면 식 (3)은 성립하지 않는다. 하지만 다음과 같이 재균형된(Rebalanced) 해를 정의해 줌으로써 외부 반복계산의 전체적인 수렴속도를 향상시킬 수 있다:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\phi}_g^{k(n)} &\equiv f_g^m \phi_g^{k(n)} \\ f_g^{m, \text{aux}, k(n)} &\equiv f_g^m f_g^{\text{aux}, k(n)} \end{aligned} \right\} g = 1, \dots, G$$

여기서 f^m 은 재균형인자(Rebalance Factor)로 이를 도입하여 다음과 같은 거시격자 재균형식을 얻게 된다:

$$-\sum_l f^{lm} f^l + [\sum_l f^{ml} + A_m] f^m = \frac{1}{\lambda^{(n)}} P^m f^m, \quad m = 1, \dots, M \quad (4)$$

식 (4)를 재균형인자 f^m 에 대하여 풀게 되며 아울러 고유치도 계산하게 된다.

SNR 벤치마크 문제[10]는 300 MWe의 균질한 4 그룹 액체금속로 모델로 노심은 두 영역으로 나뉘어 있으며 반경방향 블랭킷과 축방향 블랭킷으로 둘러 싸여 있다. 유효 노심 높이는 95 cm이고 축방향 블랭킷 두께는 40 cm이다. 이 모델에는 핏치가 11.2003 cm인 육각형집합체 11개 링이 들어있으며 노심 외곽 경계조건은 진공 경계조건으로 전체 노심에는 18개의 제어봉집합체가 있는데 이중 바깥쪽 6개는 노심과 위쪽 축방향 블랭킷 경계면에 정지해 있으며 나머지 안쪽 12개는 노심 중간까지 삽입되어 있다.

표 1은 DIF3D 방법과 HEXNOD 방법을 사용하여 계산한 결과를 수록하고 있다. DIF3D 방법을 사용한 계산 결과는 참고문헌 10의 계산결과와 정확히 일치하고 있으나 HEXNOD 방법을 사용한 계산 결과는 참고문헌 3에 수록되어 있는 영역별 평균 중성자속 값과 최대 1.6% 차이를 보이고 있으며 중성자 유효증배계수는 64 pcm 적게 예측하고 있다. 이 차이는 횡방향 중성자누출을 2차 함수로 근사하는데 있어 차이가 있기 때문으로 판단된다.

4. 결론

금속연료가 장전되는 액체금속로의 경우 열팽창에 의한 반응도 케환효과가 노심 반응도에서 차지하는 비중이 크기 때문에 사고시 노심 안전성에 매우 중요한 역할을 한다. 액체금속로 노심 동특성 분석용 2차원 미시격자 확산코드 FX2-TH에 열팽창에 의한 반응도 케환효과를 고려해 주는 모델을 도입하였으며 소듐보이드 사고에 대한 시험계산을 통하여 이 모델이 제대로 작동함을 확인하였다.

아울러 FX2-TH 코드를 3차원으로 확장하기 위하여 육각형 집합체용 3차원 정상상태 노달 확산 코드를 개발하였다. 향후 이 코드를 액체금속로 노심 동특성 분석용 독자코드로 발전시킬 계획이며 궁극적으로 동특성 분석코드/시스템 분석코드 통합시스템 개발에 활용할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 대한민국 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. R. A. Shober, T. A. Daly, and D. R. Ferguson, "FX2-TH: A Two-Dimensional Nuclear Reactor Kinetics Code with Thermal-Hydraulic Feedback," ANL-78-97, Argonne National Laboratory (1978).
2. 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 (1983).
3. M. R. Wagner, "Three-Dimensional Nodal Diffusion and Transport Theory Methods for Hexagonal-z Geometry," Nucl. Sci. Eng., **103**, 377-391 (1989).
4. Y. A. Chao and Y. A. Shatilla, "Conformal Mapping and Hexagonal Nodal Methods-II: Implementation in the ANC-H Code," Nucl. Sci. Eng. **121**, 210-225 (1995).
5. N. Z. Cho and J. M. Noh, "Analytic Function Expansion Nodal Method for Hexagonal Geometry," Nucl. Sci. Eng., **121**, 245-253 (1995).
6. J. Y. Cho and C. H. Kim, "Higher Order Polynomial Expansion Nodal Method for Hexagonal Core Neutronics Analysis," Ann. Nucl. Energy, **2b**, 1021-1031 (1998).
7. A. F. Henry, " The Application of Reactor Kinetics to the Analysis of Experiments," Nucl. Sci. Eng. **3**, 58 (1958).
8. D. A. Meneley, et al., " A Kinetics Model for Fast-Reactor Analysis in Two Dimensions," Dynamics of Nuclear Systems, The University of Arizona Press, Tuscon, Arizona (1972).
9. 김영일 외, "액체금속로 노심 동특성 분석체계 구축을 위한 기초 작업," KAERI/TR-1094/98, 한국원자력연구소 (1998).
10. Problem ID:18-A6, ANL Benchmark Problem Book, ANL-7416 Supplement 3 (1985).

표 1. SNR-300 벤치마크 문제에 대한 계산결과
(영역별 평균 중성자속 및 중성자 유효증배계수)

영역	기준치	DIF3D 방법	HEXNOD 방법	Wagner ¹⁾
그룹 1:				
Inner core	4.0569x10 ⁶	-0.25	0.03	-0.05
Outer core	2.4870x10 ⁶	0.61	-0.52	-0.18
Radial blanket	3.0649x10 ⁶	-0.41	1.52	-0.08
Axial blanket	3.6273x10 ⁶	-1.05	0.20	0.02
Control rod	1.2640x10 ⁶	-0.54	-0.04	-0.42
Follower	2.3688x10 ⁶	-0.51	0.14	0.10
그룹 2:				
Inner core	1.9072x10 ⁷	-0.17	0.01	0.03
Outer core	1.0594x10 ⁷	0.18	-0.04	0.02
Radial blanket	2.2209x10 ⁶	0.94	1.15	0.01
Axial blanket	3.4705x10 ⁶	-0.36	-0.17	-0.15
Control rod	6.1898x10 ⁶	-0.50	0.18	-0.23
Follower	1.2375x10 ⁷	-0.11	-0.13	0.00
그룹 3:				
Inner core	1.7579x10 ⁶	-0.13	-0.01	0.04
Outer core	9.2860x10 ⁶	-0.24	0.41	0.24
Radial blanket	3.0960x10 ⁶	1.90	0.93	0.06
Axial blanket	5.2703x10 ⁶	0.12	-0.57	-0.34
Control rod	4.6361x10 ⁶	-1.73	1.00	0.28
Follower	1.3897x10 ⁶	0.69	-0.62	-0.24
그룹 4:				
Inner core	3.2706x10 ⁶	0.16	-0.25	-0.14
Outer core	1.5343x10 ⁶	-0.31	0.71	0.25
Radial blanket	9.0518x10 ⁴	2.60	0.52	0.30
Axial blanket	1.9564x10 ⁶	1.05	-1.00	-0.29
Control rod	5.3702x10 ⁴	-4.43	2.71	1.47
Follower	3.4029x10 ⁶	1.35	-1.32	-0.56
유효증배계수	1.00989	1.01151	1.00974	1.01038
오차(%)	—	0.16	-0.01	0.05

1) 참고문헌 3

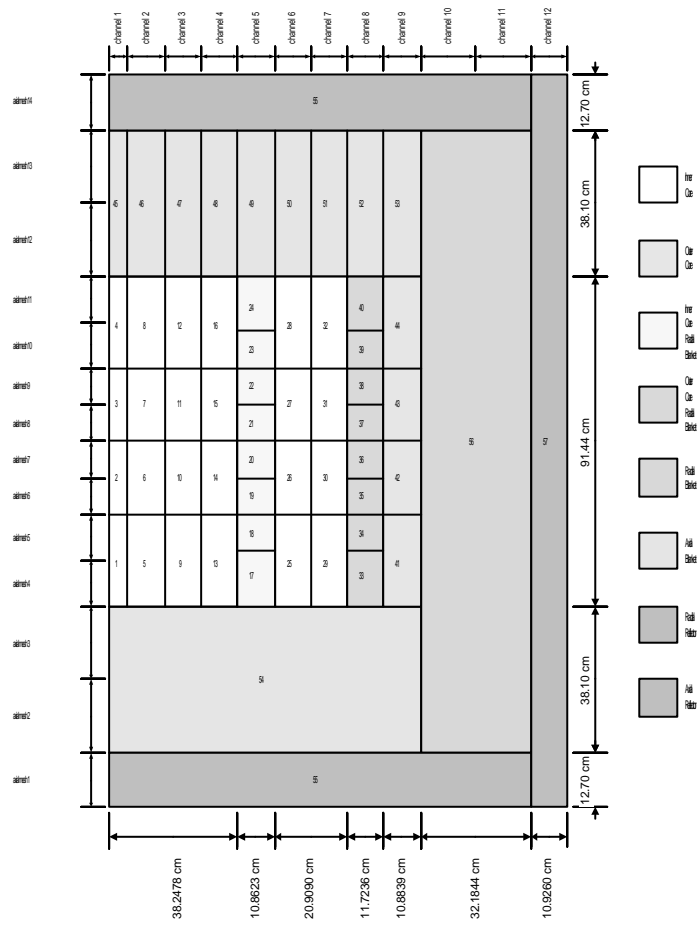


그림 1. R-Z 노심구조

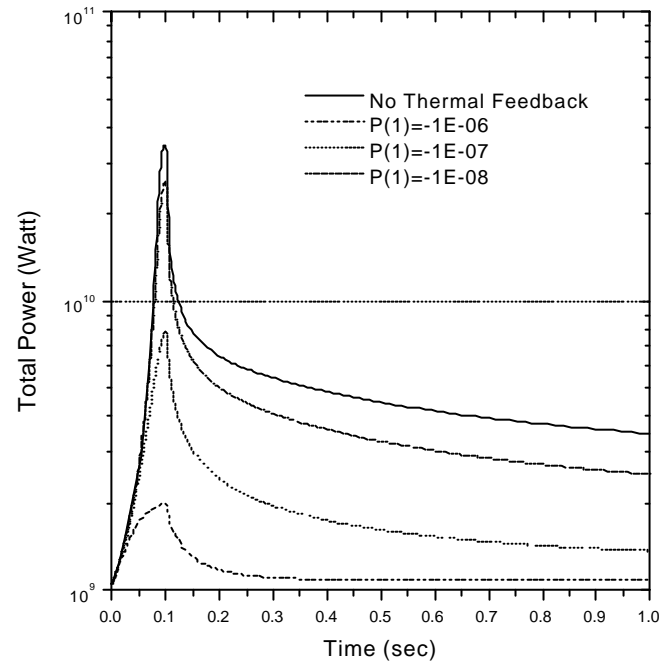


그림 2. 소듐보이드 사고시 시간에 따른 출력 변화

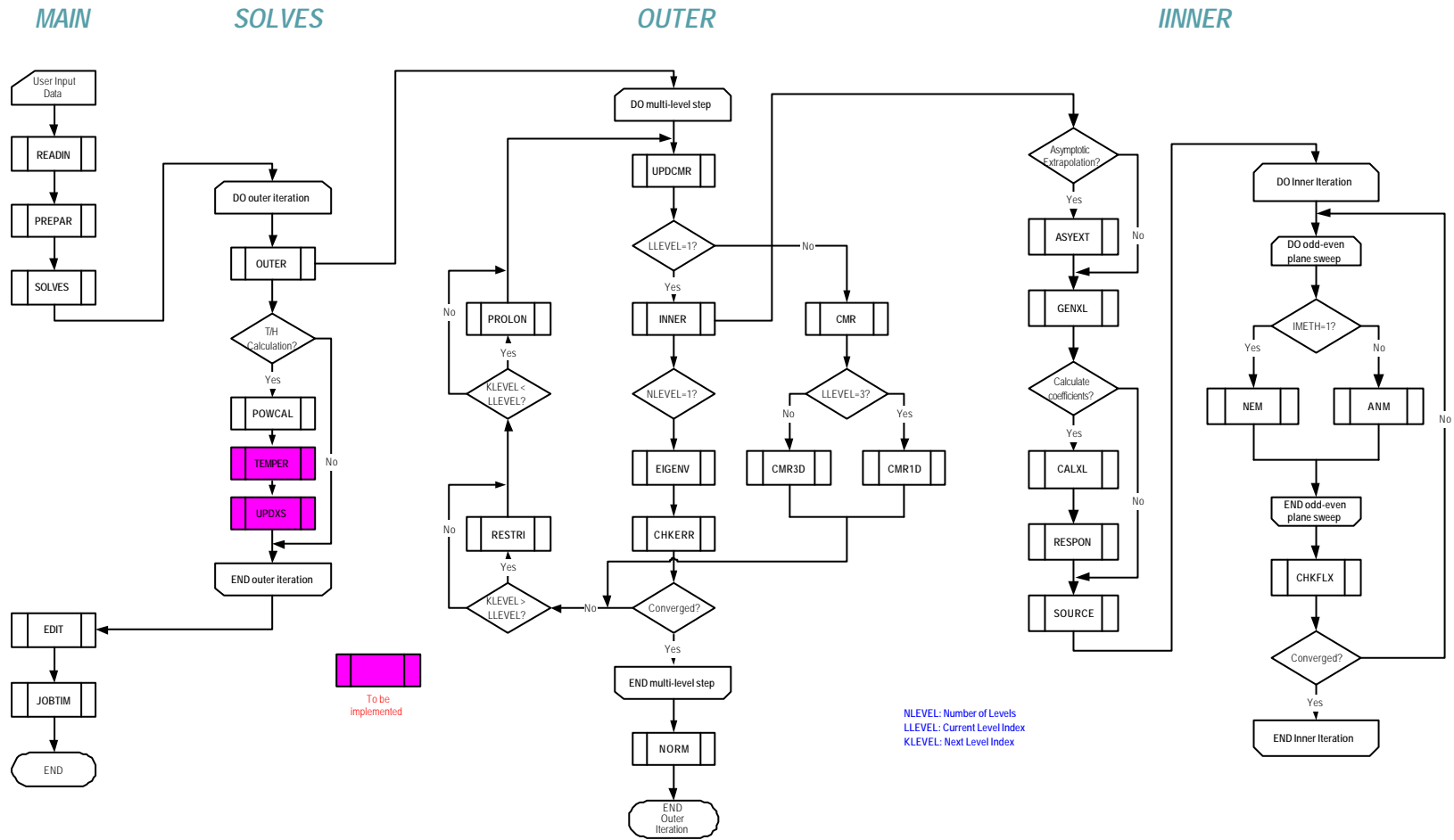


그림 3. 3차원 정상상태 노달 확산코드의 계산흐름