

## 매듭그린함수법과 단일관로모형에 의한 가압경수로의 로심동특성계산

서철, 장영원, 허일문

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《수력을 위주로 하면서 화력에 의한 전력생산을 합리적으로 배합하고 원자력발전의 비중을 높이며 다양한 자연에너지원천을 적극 리용하여 국가적인 에너지수요를 자체로 충족시켜야 합니다.》

원자로로심에서의 빠른 과도과정을 정확히 예측하는것은 원자로의 설계와 과학적인 관리운영에서 중요한 의의를 가지므로 이에 대한 연구[1-4]가 활발히 진행되고있다.

론문에서는 노이만경계조건을 가진 매듭그린함수법과 단일관로모형에 기초하여 가압경수로의 3차원로심동특성을 해석하는 수치계산체계를 확립하고 정확성을 검증하였다.

### 1. 노이만경계조건을 가진 매듭그린함수법의 기본방정식계

비정상문제에 관한 노이만경계조건을 가진 매듭그린함수법의 기본방정식계에서 시간 미분에 대하여 음계차근사를 실시하면 가로적분뿔의 전개결수에 관한 방정식과 정미중성자흐름결합방정식, 매듭평형방정식, 지연중성자선행행에 관한 방정식은 각각 다음과 같다.

$$\left\{ [A_u]^k + \frac{1}{v_g \Delta t} [G_{gu}^{uu, t_{j+1}}]^k \right\} \Phi_{gu}^k(t_{j+1}) = [G_{gu}^{uu, t_{j+1}}]^k [Q_{gu}^k(t_{j+1}) - L_{gu}^k(t_{j+1})] - \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & - [G_{gu}^{u+, t_{j+1}}]^k J_{gu}^k(a_u^k, t_{j+1}) + [G_{gu}^{u-, t_{j+1}}]^k J_{gu}^k(-a_u^k, t_{j+1}) + \frac{1}{v_g \Delta t} [G_{gu}^{uu, t_{j+1}}]^k \Phi_{gu}^k(t_j) \\ & f_{gu+}^{k, t_{j+1}} T_{gu}^{k, t_{j+1}} J_{gu}^{k-1}(a_u^{k-1}, t_{j+1}) - (f_{gu+}^{k, t_{j+1}} R_{gu}^{k, t_{j+1}} + f_{gu-}^{k+1, t_{j+1}} R_{gu}^{k+1, t_{j+1}}) J_{gu}^k(a_u^k, t_{j+1}) + \\ & + f_{gu-}^{k+1, t_{j+1}} T_{gu}^{k+1, t_{j+1}} J_{gu}^{k+1}(a_u^{k+1}, t_{j+1}) = \\ & = f_{gu-}^{k+1, t_{j+1}} \sum_{n=0}^2 \left[ -\frac{1}{v_g \Delta t} \Phi_{gun}^k(t_{j+1}) + Q_{gun}^k(t_{j+1}) - L_{gun}^k(t_{j+1}) \right] [G_{gu}^{u-}]_n^{k+1, t_{j+1}} + \\ & + f_{gu-}^{k+1, t_{j+1}} \sum_{n=0}^2 \frac{1}{v_g \Delta t} \Phi_{gun}^k(t_j) [G_{gu}^{u-}]_n^{k+1, t_{j+1}} - f_{gu+}^{k, t_{j+1}} \sum_{n=0}^2 \frac{1}{v_g \Delta t} \Phi_{gun}^k(t_j) [G_{gu}^{u+}]_n^{k, t_{j+1}} - \\ & - f_{gu+}^{k, t_{j+1}} \sum_{n=0}^2 \left[ -\frac{1}{v_g \Delta t} \Phi_{gun}^k(t_{j+1}) + Q_{gun}^k(t_{j+1}) - L_{gun}^k(t_{j+1}) \right] [G_{gu}^{u+}]_n^{k, t_{j+1}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_{u=x, y, z} \frac{1}{2a_u^k} [J_{gu}^k(a_u^k, t_{j+1}) - J_{gu}^k(-a_u^k, t_{j+1})] + \left[ \Sigma_{t, g}^k(t_{j+1}) + \frac{1}{v_g \Delta t} \right] \bar{\Phi}_g^k(t_{j+1}) = \frac{1}{v_g \Delta t} \bar{\Phi}_g^k(t_j) + \bar{Q}_g^k(t_{j+1}) \quad (3)$$

$$C_{iu}^k(t_{j+1}) = \frac{\beta_i}{\lambda_i} \left\{ \left[ 1 - \frac{1 - \exp(-\lambda_i \Delta t)}{\lambda_i \Delta t} \right] \sum_{g=1}^G (v \Sigma_f)_{fg}^k(t_{j+1}) \Phi_{gu}^k(t_{j+1}) + \right. \\ \left. + \left[ \frac{1 - \exp(-\lambda_i \Delta t)}{\lambda_i \Delta t} - \exp(-\lambda_i \Delta t) \right] \sum_{g=1}^G (v \Sigma_f)_{fg}^k(t_j) \Phi_{gu}^k(t_j) \right\} + C_{iu}^k(t_j) \exp(-\lambda_i \Delta t) \quad (4)$$

식 (1)–(4)는 중성자의 공간동특성해석을 위한 닫힌 방정식계를 이룬다.

## 2. 단일관로모형에 의한 열수력동특성계산모형

열수력동특성계산에서 1개의 연료집합체를 연료심과 외피, 랭각재(감속재)로 구성된 하나의 평균화된 원기둥관로로 등가시키는 단일관로모형을 적용하였다. 또한 랭각재를 비압축성단상류체로 보고 관로들사이의 가로흐름은 없다고 가정하였다.

### 1) 연료봉에서 반경방향온도분포계산

연료봉은 반경방향에서 연료심과 간극, 외피의 3개 층으로 구성된다.

연료심에서 반경방향의 비정상열전도방정식과 그 경계조건은 다음과 같다.

$$\rho_f C_f(r, t) \frac{\partial T_f(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda_f(r, t) r \frac{\partial T_f(r, t)}{\partial r} \right] + q_v(t) \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial T_f}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (6)$$

$$-\lambda_f \left. \frac{\partial T_f}{\partial r} \right|_{r=r_f} = h_g(T_{f,s} - T_{c,in}) \quad (7)$$

여기서  $T_f$ ,  $\rho_f$ ,  $\lambda_f$ ,  $C_f$ ,  $q_v$ ,  $r_f$ ,  $T_{f,s}$ ,  $h_g$ ,  $T_{c,in}$ 은 각각 연료심의 온도, 밀도, 열전도도, 비열, 발열밀도, 반경, 연료심바깥겉면온도, 연료심과 외피사이의 열전달계수, 외피아낙겉면온도이다. 류사한 방법으로 연료봉외피에 대한 방정식을 얻는다. 이 방정식들을 반경방향요소구역에서 적분하고 공간미분을 계차비로 넘긴다. 그리고 시간미분에 관하여 음계차근사를 실시하여 수치계산을 위한 방정식을 얻는다.

### 2) 랭각재의 축방향온도분포계산

관로에서 랭각재의 에네르기보존방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T_m(z, t)}{\partial t} + w(z, t) \frac{\partial T_m(z, t)}{\partial z} = \frac{f_m q_l(z, t) + 2\pi r_{c,out} h_m(z, t) [T_{c,out}(z, t) - T_m(z, t)]}{\rho_m(z, t) C_m(z, t) A_m} \quad (8)$$

여기서  $w$ ,  $\rho_m$ ,  $C_m$ ,  $A_m$ ,  $q_l$ ,  $f_m$ ,  $T_m$ ,  $h_m$ 은 각각 랭각재의 흐름속도, 밀도, 비열, 랭각통로차름면적, 통로의 선출력밀도, 랭각재에서의 출력방출몫, 랭각재의 온도, 열전달계수이다. 그리고  $r_{c,out}$ 와  $T_{c,out}$ 는 각각 외피의 바깥반경과 바깥겉면온도이다.

식 (8)에서 공간미분에 관하여 중심계차, 시간미분에 관하여 음계차근사를 실시하면 수치풀이를 위한 방정식이 얻어진다.

### 3. 3차원로심공간동특성계산결과

계산모형을 검증하기 위하여 가압경수로의 3차원로심과도과정에 대한 기준문제 NEACRP-L-335의 결과[5]와 비교하였다. 이 기준문제는 초기에 림계상태에 있던 로심으로부터 조종봉집합체가 탈출할 때 일어나는 사고정황을 분석한것이다. 여기에는 조종봉들의 배치와 섭동위치, 출력준위에 따라 6가지 문제(A1, A2, B1, B2, C1, C2)가 있다.

A2, B2문제에 관하여 정상상태(정격출력 2 775MW)와 과도과정의 몇가지 주목하는 량들에 대한 계산결과는 표 1, 2와 같다. 표에서 보는바와 같이 정상상태에서 림계봉소농도와 연료봉중심최대온도, 조종봉인출반응도를 비롯한 파라메터의 계산결과가 기준값과 잘 일치한다. 과도상태인 경우 B2문제의 최대출력도달시간이 얼마간 차이난다.

표 1. A2와 B2문제에 대한 정상상태의 계산결과

문제	구분	림계봉소농도 /( $\cdot 10^{-4}\%$ )	출력불 균일결수	연료봉중심 최대온도/ $^{\circ}\text{C}$	연료평균 온도/ $^{\circ}\text{C}$	조종봉탈출 반응도/( $\cdot 10^{-3}\%$ )
A2	기준값	1 160.6	2.221	1 671.9	541.6	89.5
	계산값	1 161.8	2.166	1 679.1	552.3	90.9
B2	기준값	1 189.4	2.109	1 576.6	543.7	99.1
	계산값	1 187.0	2.028	1 576.0	550.5	99.2

표 2. A2와 B2문제에 대한 과도과정의 계산결과

문제	구분	상대 출력	최대출력 도달시간/s	5s후 연료봉중심 최대온도/ $^{\circ}\text{C}$	5s후 연료 평균온도/ $^{\circ}\text{C}$	5s후 랭각재출구 평균온도/ $^{\circ}\text{C}$	5s후 상대출력
A2	기준값	1.080	0.1	1 691.8	554.6	324.6	1.035
	계산값	1.089	0.1	1 703.9	557.5	325.2	1.033
B2	기준값	1.063	0.12	1 588.1	552.0	324.7	1.038
	계산값	1.080	0.09	1 593.5	556.8	325.5	1.044

A2문제에서  $t=0\text{s}$  (정상상태)와  $t=0.1\text{s}$  일 때  $z$ 축에 관하여 평균한 규격화된 출력분포는 그림과 같다. 그림에서 보는바와 같이 정상상태에서 조종봉이 삽입되어있던 로심중심위치의 출력준위가 주변에 비하여 현저히 낮았으나 조종봉인출후에는 주변과 대등한 준위로 높아졌다.

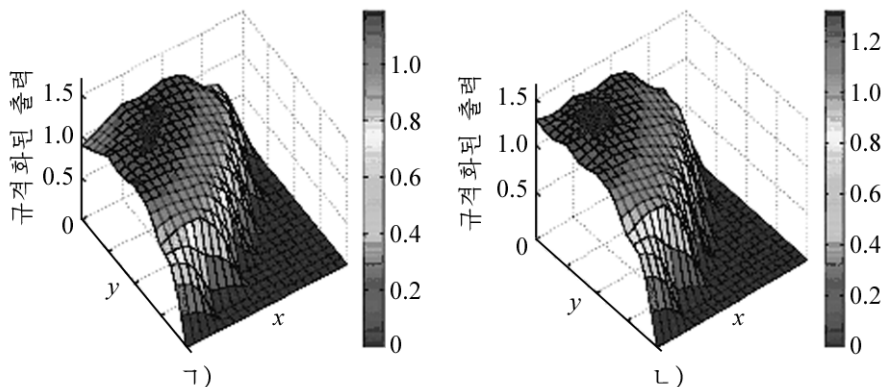


그림. A2문제에서 규격화된 출력분포

ㄱ)  $t=0\text{s}$  (정상상태), ㄴ)  $t=0.1\text{s}$

## 맺는 말

노이만경계조건을 가진 매듭그린함수법에 의한 3차원중성자동특성방정식의 구체적인 수치풀이모형을 작성하고 단일관로모형에 의한 열수력동특성계산모형과 결합하여 가압경수로의 3차원로심동특성계산코드를 개발하였다. 가압경수로의 3차원로심과도과정에 대한 수치계산결과는 선행연구결과와 잘 일치하였다.

## 참고 문헌

- [1] A. Nahla Abdallah; Annals of Nuclear Energy, 28, 89, 2016.
- [2] Yun Cai et al.; Annals of Nuclear Energy, 150, 84, 2016.
- [3] P. F. Wang et al.; Annals of Nuclear Energy, 62, 208, 2013.
- [4] K. Obaidurrahman et al.; Nuclear Engineering and Technology, 42, 3, 259, 2010.
- [5] H. Finnemann; Results of LWR core transient benchmarks, NEA/NSC/DOC(93)25, 3, 1993.

주체108(2019)년 6월 5일 원고접수

## The Spatial Kinetics Calculation of PWR Core Based on Nodal Green's Function Method and the Single Channel Model

*So Chol, Jang Yong Won and Ho Il Mun*

In this paper, we proposed a numerical method to perform the coupled 3D neutron kinetics/thermal-hydraulics calculations for the PWR core, and verified its accuracy by comparison with results of the benchmark problem.

Key words: NGFM, single channel model