

MATLAB/Simulink 기반 AMBIDEXTER 동특성해석 모델 개발

김학성, 이영준, 오세기
아주대학교

선행 연구에서 타당성이 검증된 핵연료 유동의 특성이 강조된 일점동특성 모델은 기존의 고체 핵연료용 모델에서 나타낼 수 없는 유속에 의한 지발중성자 모핵종 수의 변화 및 유속 변화에 따른 원자로 특성 변화 등을 표현할 수 있게 하였다. 이 식을 현재 아주대학교에서 개념 설계중인 AMBIDEXTER 원자로 상세안전성해석용 다차원 동특성코드인 AMBIKIN2D 코드의 비교-검증용 모델로 정하여 AMBIKIN2D 코드의 타당성을 입증할 자료를 만들고자 한다.

선행연구를 통하여 타당성이 입증된 ‘유동특성이 강화된 일점동특성 방정식’은 식(1), 식(2)과 같으며 본 연구의 대상 시스템인 AMBIDEXTER 원자로에 적용될 것이다.

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{(\rho - \beta_{tot})}{l_p} N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l_p} N(t) - \lambda_i C_i(t) - \frac{C_i(t)}{\tau_{RX}} + \frac{1}{\tau_{RX}} e^{-\lambda_i t} C_i(t - \tau_{LP}) \dots\dots\dots(2)$$

AMBIDEXTER 원자로에 대한 유동특성이 강화된 일점동특성 방정식을 만들기 위한 핵특성 자료는 ENDF/B-IV 라이브러리로부터 얻어졌으며 이로부터 지발중성자 붕괴상수 및 지발중성자 분율 및 즉발중성자 생성 시간이 계산되어져 [표1]에 정리하였다.

[표 1] AMBIDEXTER의 설계 데이터

	λ(Decay Constant(sec) ⁻¹)	β(Delay-Neutron Fraction static 10 ⁻⁴), static
1군	0.0127	1.9
2군	0.03	11
3군	0.0938	7.52
4군	0.277	23.3
5군	0.855	9.37
6군	3.21	4.34
계	-	57.43
Prompt neutron generation time, sec		1.0×10 ⁻³
Temperature coefficients of reactivity, ° F		-4.84×10 ⁻⁵
Core height, Cm		250
Fuel velocity (Cm/sec)		82
Power (MW _{th})		250

핵특성 자료 이외에 핵연료의 온도 반응도계수 와 비열 등의 열수력학적 특성 데이터는 AMBIDEXTER와 성질이 유사한 MSRE의 데이터를 이용하였으며 그의 데이터인 노심 높이,

핵연료의 이동 속도, 출력 등은 AMBIDEXTER 설계 데이터로부터 얻어졌다. 이 때 노심 통과시간인 τ_{RX} 는 AMBIDEXTER 노심 높이와 핵연료 유속으로부터 구하였으나 AMBIDEXTER 원자력 시스템에서 외부순환 부분이 설계되어지지 않은 관계로 외부순환시간인 τ_{LP} 는 MSRE와 유사하다고 가정하여 같은 값을 사용하였다.

위식에서 사용되어진 반응도 모델은 식 (3)과 같이 외부입력 반응도와 온도 반응도로 구성되어져있다.

$$\rho = \rho_{ext} + \rho_{temp} \dots \dots \dots (3)$$

본 연구에서 사용된 외부입력 반응도는 사인(Sinusoidal), 선형증가(Ramp), 일시증가(Step) 형태의 삽입방법이 사용되었으며, 온도 반응도는 식 (3)과 식 (4)처럼 표현되었다. 여기서 온도 반응도 계수는 MSRE의 자료를 사용하였으며, 정상상태 출력에서 변화된 양의 시간 누적 형태로 계산되어진다.

$$\Delta \rho_{T_r} = -1.08757 \times 10^{-5} (\Delta \rho \cdot \Delta t) \dots \dots \dots (4)$$

$$\Delta \rho_{T_m} = -6.204 \times 10^{-7} (\Delta \rho \cdot \Delta t) \dots \dots \dots (5)$$

위 모델들의 계산은 수치해석 코드인 MATLAB/SIMULINK를 사용하였으며 이를 [그림 1]과 [그림2]에 나타내었다.

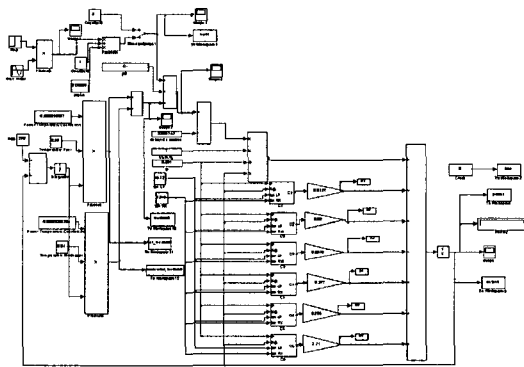


그림 2 MATLAB/SIMULINK 동특성모델

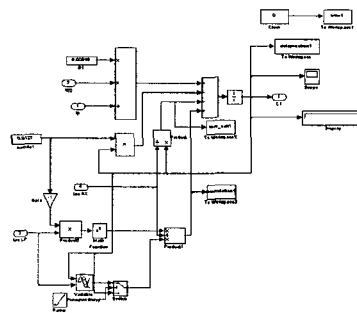


그림 3 MATLAB/SIMULINK 지발중성자 모델

각 반응도가 입력되었을 때 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 위 동특성 방정식을 계산한 결과를 보면 사인형태의 반응도 입력의 경우 [표 2]와 [표 3]처럼 주파수 및 반응도 양에 따른 출력 변화비와 위상지연을 나타내었으며, 선형 및 순간 반응도 입력의 경우 반응도 양에 따른 출력 변화는 그림3과 그림 4와 같이 나타난다. 이는 핵연료 유동에 의해 지발중성자의 노심이탈에 의한 여유반응도가 감소하였으나 어떤 형태의 반응도 삽입에 대해서도 안전성을 가지고 있음을 나타낸다.

$$[\text{표 2}] \text{ AMPLITUDE RATIO } \left(\left| \frac{\delta N / N_0}{\delta k / k_0} \right| \right)$$

주파수(rad/sec) \ 반응도(mk)	0.01	0.1	0.33
0.1	40.12	37.89	39.00
0.5	256.80	255.70	257.89
1	616.31	635.29	672.15

[표 3] PHASE SHIFT (단위: degree)

주파수(rad/sec) \ 반응도(mk)	0.01	0.1	0.33
0.1	90.48	91.03	89.08
0.5	86.30	86.07	83.87
1	18.37	21.65	29.61

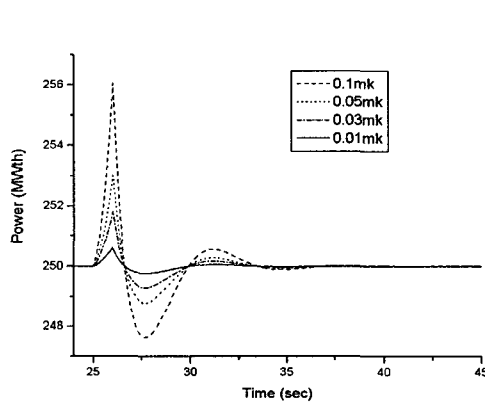


그림 4 선형 반응도 입력에 대한 출력변화

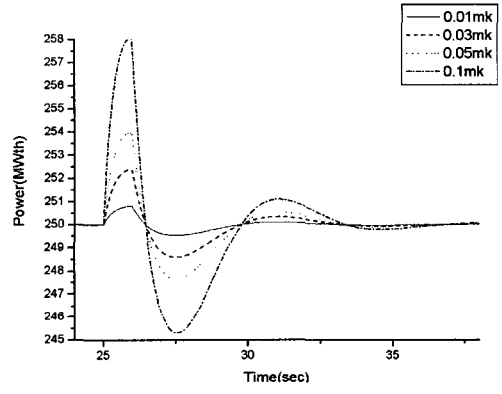


그림 5 순간 반응도 입력에 대한 출력변화

반응도 삽입 외에 전원상실사고해석을 가정한 펌프 정지 및 재기동 시의 핵연료 유속변화에 의해 발생하는 반응도변화를 계산하여 그림5와 그림 6에 나타내었다.

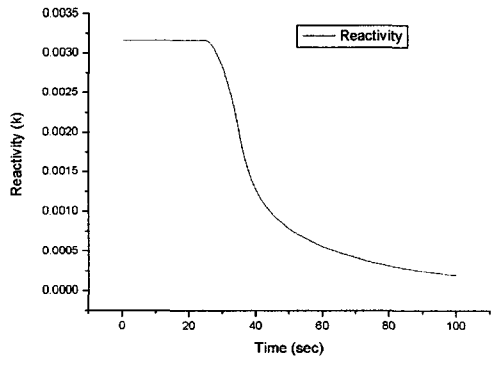


그림 5 펌프 정지시 유속 변화에 따른 반응도 변화

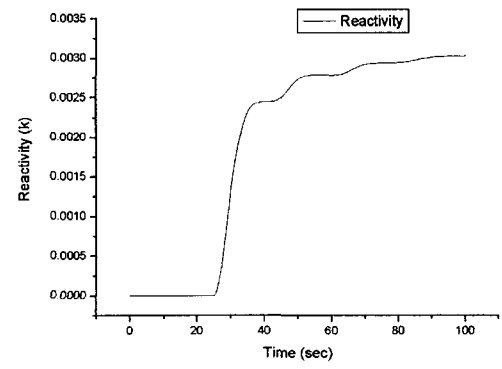


그림 6 펌프 재기동시 유속 변화에 따른 반응도 변화

두 경우 모두 핵연료 유동변화에 따른 지발중성자 모핵중수의 변화에 의한 반응도 변화만을 고려하기 위해 출력을 고정하여 온도 반응도를 배제하였다. 펌프 정지시 유속이 줄어들에 따라 노심을 벗어나는 지발중성자 모핵중수의 양이 줄어들게 되고 이에 따라 노내에서 생성되는 지발중성자 수가 늘어나게 되어 그에 해당하는 양의 반응도가 발생하게 된다. 재기동 의 경우 반대의 현상으로 노심을 이탈하는 지발중성자에 해당하는 음의 반응도가 발생하게 되며 두 경우 모두 반응도의 양은 약 316pcm으로 계산되어졌다. 이 값은 핵분열에 의해 발생하는 전체 지발중성자에 의한 반응도의 약 55%에 해당하는 양으로 핵연료 유동에 의한 지발중성자 이탈율을 나타낸다.

본 연구에 의하면 유동핵연료의 특징에 의해 지발중성자 모핵종이 유실되어 반응도 손실이 발생할지라도 반응도 입력 및 전원상실 사고에서 AMBIDEXTER 시스템의 안전성이 확보됨을 확인할 수 있었다. 또한 선행연구를 통해 모델의 타당성이 검증되었으므로 이 모델로부터 나온 실험 결과들은 유효하다고 판단되므로 본 연구의 실험 결과들은 상세안전성해석용 다차원동특성 해석 코드인 AMBIKIN2D의 타당성 검증을 위한 기준값으로 사용할 계획이다.

참고문헌

- 이영준 외 “순환 용융염 핵연료를 고려한 AMBIDEXTER 원자로 최적화 설계”, 한국원자력 학회, 춘계학술발표회, 2003
- 김학성 외 “MSRE 실험데이터를 이용한 MATLAB/Simulink 동특성해석 모델 검증”, 한국 에너지공학회, 춘계학술발표회, 2006
- T.W.Kerlin, S. J. Ball, "EXPERIMENTAL DYNAMIC ANALYSIS OF THE MOLTEN-SALT REACTOR EXPERIMENT", ORNL, 1966
- J. Krepel, U. Grundmann, "DYN1D-MSR dynamics code for molten salt reactors", Annals of Nuclear Energy 32 (1799-1824), 2005