

MSRE 실험데이터를 이용한 MATLAB/Simulink 동특성 해석 모델 검증

김학성, 이영준, 오세기
아주대학교

유동핵연료시스템의 가장 큰 특성은 핵연료 자체가 움직이는 것이다. 이로 인해 이론적으로 정상상태가 존재하지 않으며 동적상태를 계산하기 위해서 핵·열수력학적 반응이 고려되어야 한다. 그러나 현재까지의 상용화 혹은 범용화 된 노심 계산코드들은 고체 핵연료를 사용하는 원자로를 대상으로 만들어졌기 때문에 이러한 현상들이 충분히 고려되어지지 않았다. 그러므로 보다 정확한 유동핵연료시스템의 설계 및 안전성 해석을 위해서는 핵·열수력학적 반응이 고려된 코드를 개발할 필요가 있다. 이를 위해 아주대학교에서 개념설계 단계에 있는 AMBIDEXTER 원자로의 상세안전성해석용 다차원동특성 해석 코드인 AMBIKIN2D를 개발하고 있다. 하지만 이 코드를 직접 비교할 수 있는 유동핵연료시스템 전용 코드가 없기 때문에 코드의 타당성 검증을 위해 MSRE 안전성해석을 위한 실험 결과를 통해 간접적으로 증명하고자한다. 본 논문에서는 증명의 첫 번째 단계로 유동핵연료의 특성을 반영한 일점동 특성 방정식을 수립하고 이 식을 통해 계산된 결과와 MSRE 실험결과가 잘 일치함을 보임으로서 추후에 AMBIKIN2D의 계산결과와 비교·검증할 방정식의 유효성을 입증하는데 그 목적이 있다.

MSRE에서 핵연료는 [그림 1]와 같이 노심 안에서 핵분열을 일으킨 후 노심 밖으로 나와 열교환을 한 다음 노심 안으로 재유입된다.

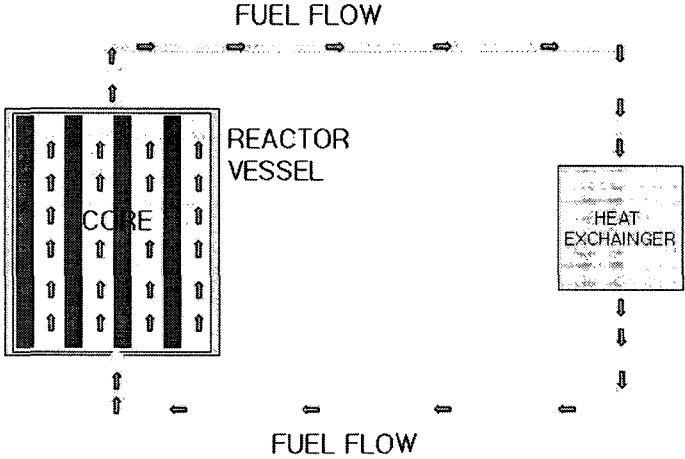


그림 2 핵연료 순환 개념도

위와 같은 특징으로 인해 노심 안에서의 지발중성자 모핵중수는 핵연료 유동에 영향을 받게 된다. 이와 같은 영향을 고려한 일점 동특성 방정식을 다음과 같이 나타내었다.

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

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

여기서 식 (2)의 3항은 단위시간당 노심을 벗어나는 지발중성자 모핵종 수를 나타내며, 식 (2)의 4항은 τ_{LP} 시간 전에 노심을 벗어난 지발중성자 모핵종이 붕괴되지 않고 노심으로 재 유입되는 양을 표현한 것이다. τ_{RX} 와 τ_{LP} 는 정상상태에서 핵연료의 노심통과시간 및 외부 순환 시간을 나타낸 것으로 각각 8.46초와 16.73초이다. 위 방정식에서 사용된 각각의 상 수들은 MSRE 설계데이터를 사용하였으며 이를 [표 1]에 나타내었다.

	λ (Decay Constant(sec) ⁻¹)	β (Delay-Neutron Fraction 10 ⁻⁴),static	β (Delay-Neutron Fraction 10 ⁻⁴), circulation effective
1군	0.0124	2.23	0.52
2군	0.0305	14.57	3.73
3군	0.111	13.07	4.99
4군	0.301	26.23	16.98
5군	1.14	7.66	7.18
6군	3.01	2.80	2.77
계	-	66.61	36.17
Prompt neutron generation time, sec		2.4×10 ⁻⁴	
Temperature coefficients of reactivity, ° F		-4.84×10 ⁻⁵	
Core hight, Cm		200	
Fuel velocity (Cm/sec)		23.64	

[표 1] MSRE 설계 데이터

반응도 삽입 모델은 식 (3)과 같이 외부삽입반응도와 온도반응도를 고려하였다.

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

외부삽입반응도의 경우 MSRE 실험에서 사용된 사인(Sinusoidal)함수를 입력하였다. A는 반응도의 크기를 나타내는 것으로 0.05mk, 0.1mk와 0.2mk의 세 가지에 대해 고려되었으며 ω 는 입력되는 반응도의 각주파수로 0.01rad, 0.02rad, 0.1rad, 0.5rad, 1rad를 사용하였다. 온도반응도는 다음 식 (5)와 같이 기준 출력에 대한 출력변화를 통해 그에 상응하는 반응도를 계산하였다. α_i 는 단위출력변화당 반응도변화계수이며 β_i 는 핵연료와 흑연감속재에서의 열량발생비율이다.

$$\rho_{ext} = A \sin \omega t \dots\dots\dots (4)$$

$$\rho_{temp} = \alpha \beta_i \int_0^T (P_{design} - P) dt \dots\dots\dots (5)$$

위의 모델들을 모의실험하기 위하여 상용화된 수치해석 코드인 MATLAB-SIMULINK를 사용하였으며 구현된 모델을 [그림 2]와 [그림 3]에 나타내었다.

모의실험 방법은 사인형태의 다양한 반응도 삽입과 전원상실사고에 따른 펌프 정지 및 펌프 재기동에 따른 핵연료 유속 변화를 가정하였으며 각 경우에 대해 출력변화비와 위상지연을 계산하여 MSRE 실험결과와 비교하는 것이다. 반응도 삽입의 경우 7.5MW_{th}, 5.0MW_{th}, 2.5MW_{th}, 1.0MW_{th}, 0.465MW_{th}, 0.075MW_{th}의 출력에서 앞서 언급한 여러 크기와 주파수를 가지는 사인함수를 대입하였고 그 결과를 [그림 4]에서 [그림 15]에 나타내었다.

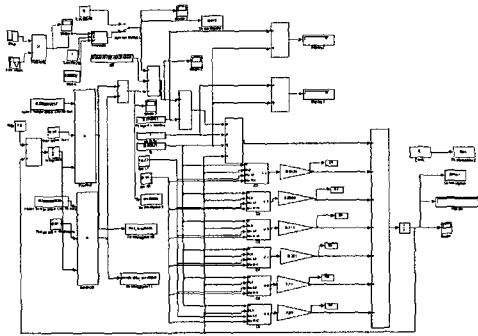


그림 3 MATLAB/SIMULINK 동특성모델

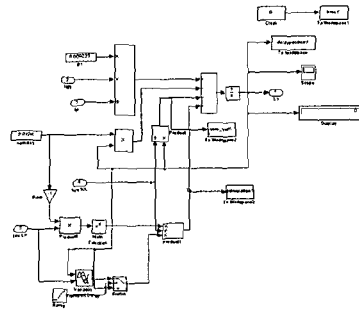


그림 4 MATLAB/SIMULINK 지발증성자 모델

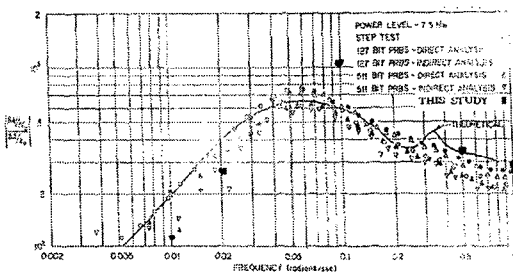


그림 5 반응도 입력주기별 출력변화비 비교(7.5MW)

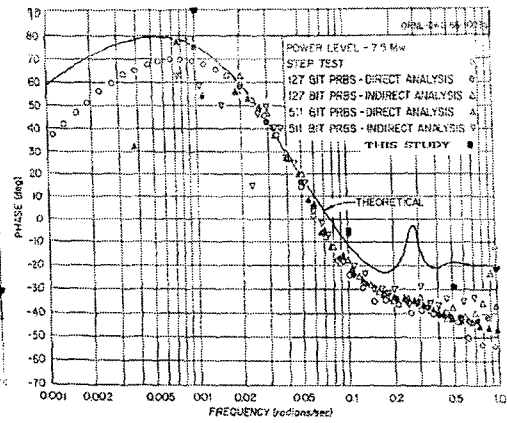


그림 6 반응도 입력주기별 위상지연 비교(7.5MW) THIS STUDY ■

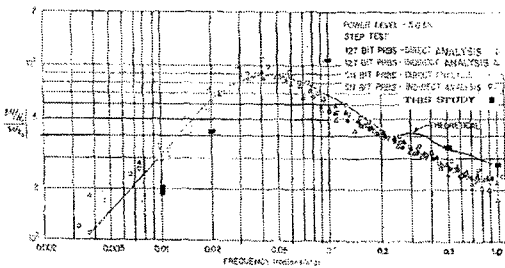


그림 8 반응도 입력주기별 출력변화비 비교 (5.0MW)

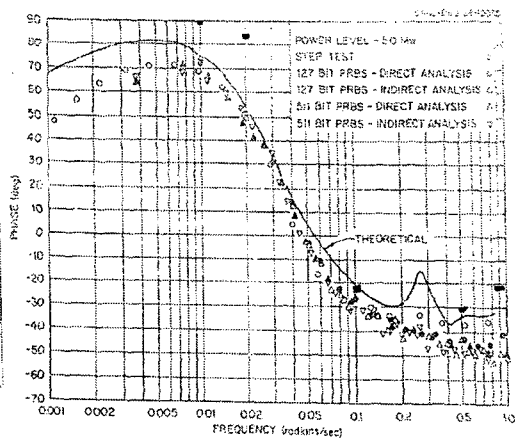


그림 9 반응도 입력주기별 위상지연 비교(5.0MW)

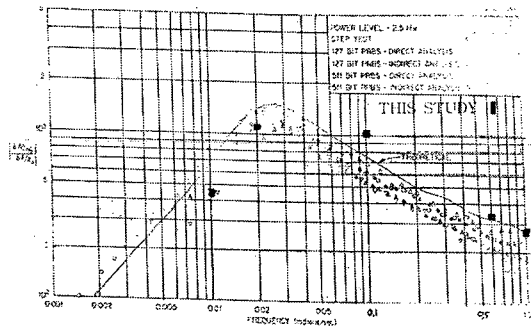


그림 12 반응도 입력주기별 출력변화비 비교(2.5MW)

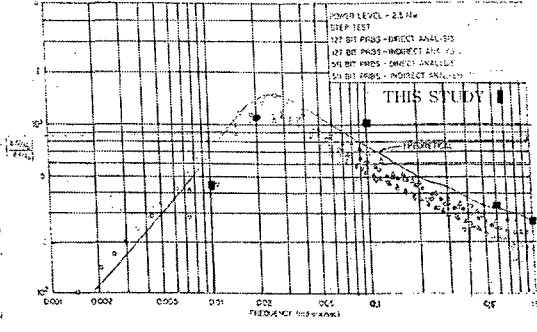


그림 13 반응도 입력주기별 위상지연 비교(2.5MW)

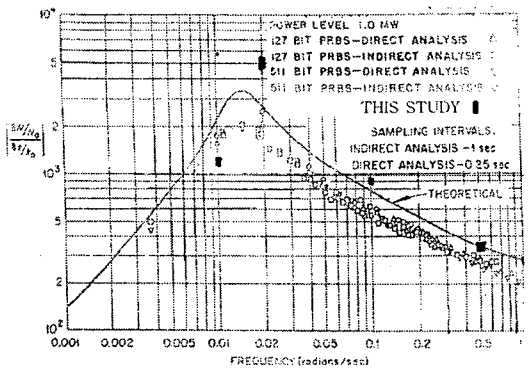


그림 16 반응도 입력주기별 출력변화비 비교 (1.0MW)

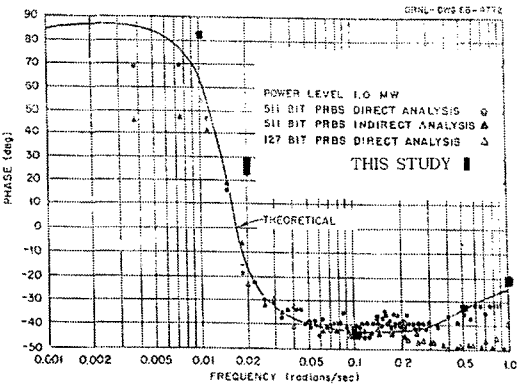


그림 17 반응도 입력주기별 위상지연 비교(1.0MW)

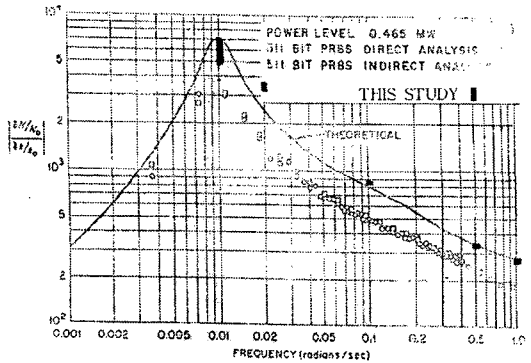


그림 20 반응도 입력주기별 출력변화비 비교 (0.465MW)

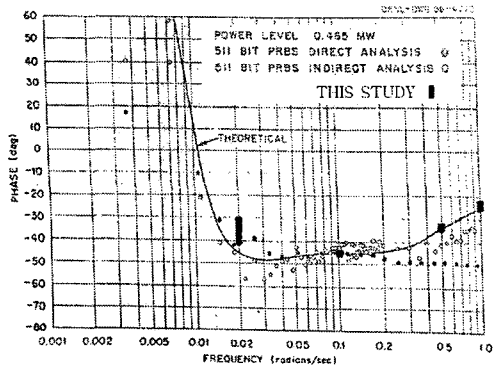


그림 21 반응도 입력주기별 위상지연 비교 (0.465MW)

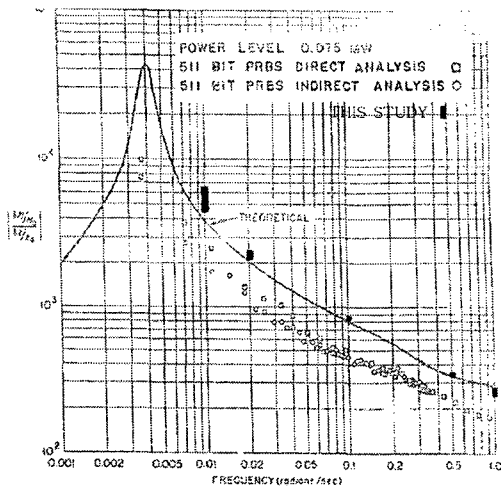


그림 24 반응도 입력주기별 출력변화비 비교 (0.075MW)

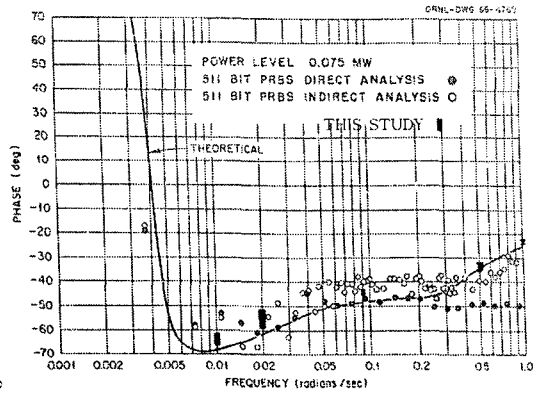


그림 25 반응도 입력주기별 위상지연 비교(0.075MW)

이 그림들은 수정된 일점 동특성 방정식에 사인형태의 반응도 삽입에 따른 출력변화가 MSRE 실험결과나 ORNL에서 이론적으로 계산된 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이때 반응도 입력주기가 짧을수록 잘 일치하며 입력주기가 긴 경우에는 실험결과와 차이가 크게 나는 경향이 있다. 이 같은 현상은 ^{135}Xe 생성 및 소멸에 의한 반응도 변화 및 핵연료 순환에 따른 핵적특성 변화에 따른 반응도 변화에 의한 것으로 판단된다.

노심길이와 외부 루프의 길이는 고정되어 있으므로 유속이 변하게 되면 노심통과 시간 및 외부순환 시간 또한 변하게 된다. 이를 이용해 펌프 정지 및 재기동 현상을 모델에 반영하였다. 계산 방법은 유속에 관계없이 7.5MW_{th}의 출력을 고정시킴으로서 온도 변화에 따른 반응도 변화를 배제하여 유속변화에 따른 지발중성자 손실에 의한 반응도 변화만을 계산하였다. 계산 결과들은 [그림 16] 과 [그림 17]에 나타내었다.

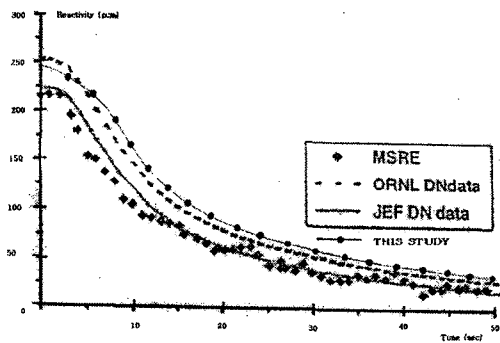


그림 26 MSRE Pump coast-down

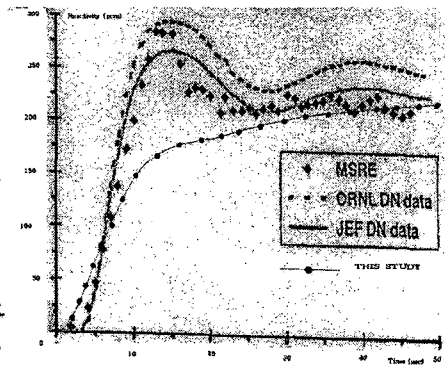


그림 27 MSRE Pump start-up

유속이 줄어들때 따라 유출되는 지발중성자의 수도 줄어들고 그로 인해 잉여 반응도가 생기게 된다. 이때 발생하는 반응도의 크기는 약 200pcm 정도이며 시간에 따른 반응도 변화 경향도 실험결과와 잘 일치함을 보여준다. 그에 반해 펌프 재가동에 의한 유속이 발생할 경우 지발중성자 유출이 생기므로 이때 줄어드는 반응도가 약 200pcm 정도 될 수 있다. 다만 본 연구에서는 펌프의 재가동시 유속의 증가의 비선형성을 고려하지 않아 감쇄효과와는 나타나지 않아 초기 경향이 다르게 보이나 수렴 후의 결과값이 잘 일치하는 것으로 볼 때 충분한 타당성이 있다고 판단된다.

풍부한 실험 자료와 검증 코드가 있는 상용로 설계와 달리 유동핵연료를 사용하는 원자력 시스템을 설계할 때 이에 필요한 코드 개발 및 계산 결과를 검증할 수 있는 참고자료는 드물다. 현재 개념설계 중인 유동핵연료 시스템인 AMBIDEXTER 또한 이 시스템에 적합한 동특성해석코드인 AMBIKIN2D를 개발하여 그 타당성을 검증하고자 하나 이에 적합한 상용화된 코드의 부재로 인해 직접적인 비교가 불가능 하였다. 이를 해결하기 위해 검증용 모델인 유동핵연료시스템의 특성을 반영한 일점동특성모델을 만들고 이 모델의 타당성을 검증한 후에 이를 다시 AMBIKIN2D와 비교하는 방식으로 코드 검증을 수행하려고 한다. 본 연구는 변형된 일점동특성 방정식의 타당성을 증명하는데 목적이 있으며 MSRE실험과 비교분석한 결과 이 모델이 유동핵연료 시스템을 표현하는데 타당성을 지녔다고 판단되어진다. 이 모델은 앞으로 AMBIDEXTER에 적용되어 동적 현상을 계산하는데 수행될 것이며 이 결과는 AMBIKIN2D 코드의 타당성 검증에 사용될 예정이다.

참고문헌

- 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