

ADS 원자로 HYPER의 동특성 해석

김태규, 오세기
아주대학교
박원석, 김용희
한국원자력연구소

Some Reactor Kinetics Properties of the HYPER system

TaeKyu Kim, SeKee Oh
Department of Energy Studies, Ajou University
Suwon, Kyunggi-Do, Korea
Wonsuk Park, YongHee Kim
KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute)

1. 서론

전 세계적으로 원자력 에너지 사용의 가장 큰 문제는 장반감기 핵종과 핵분열 후 생성물질이 주를 이루는 사용 후 핵연료의 존재이다. 따라서 핵폐기물을 줄이는 방법의 하나로, 핵연료 속의 장반감기 핵종을 단반감기 또는 안정한 핵종으로 변환시키기에 가장 알맞은 중성자를 조사하는 것이다. 이러한 최적의 노심과 조사 중성자를 찾아 핵연료에 조사시켜 장반감기 핵종량을 줄이는 것을 핵변환 기술이라 한다. 이와 더불어 에너지의 생산, 그리고 고유 안전성의 향상이라는 세 가지의 목적을 달성하기 위한 방법 중 하나가 미임계 핵변환 시스템이다. 본 연구는 미임계 핵변환 시스템 HYPER (HYbrid Power Extraction Reactor)의 동특성 해석을 위해 수행되고 있다.

HYPER 시스템은 미임계 원자로와 외부의 독립 중성자원으로 구성되어 있다. 미임계인 노심은 정상상태를 유지하기 위해 부족한 중성자 분을 외부의 중성자원으로부터 공급 받는다. 노심은 항상 미임계를 유지함으로써 반응도 유입과 같은 반응도 사고에 대해 현존하는 임계 원자로보다 넓은 반응도 여유를 가지고 대처할 수 있다. 또한 과도한 반응도 유입 사고 시 외부 중성자원의 정지로 노를 항상 안정한 상태로 유지할 수 있다. 따라서 HYPER 시스템은 현존의 임계 원자로에 비해 핵폐기물의 처리와 함께 큰 고유 안전성을 가지는 장점을 가진다.

2. HYPER Simulation

임계 원자로와 비교한 미임계 원자로의 특징은 외부 중성자원의 존재로 볼 수 있다. 따라서

초기 미임계도의 설정에 따라 원자로 동특성의 차이가 발생하므로, 다양한 미임계도에 대한 분석이 필요하다. 따라서 초기 미임계도를 설정할 수 있고, HYPER 시스템의 특성에 맞는 전산 프로그램을 visual basic을 이용하여 개발하였다.

이 프로그램은 추후 개발을 통해 HYPER 시스템 안전 해석 프로그램으로 사용할 수 있을 것이고, 또한 사용자 그래픽 인터페이스를 지원하여, 보다 높은 신뢰성을 가질 것이다.

3. HYPER 노심 동특성 방정식

HYPER 시스템의 노내 중성자 수밀도 변화는 핵분열에 의한 즉발 중성자와 지발 중성자의 생성 그리고 흡수, 누설에 의한 중성자 수의 감소 마지막으로 외부 중성자 원에서 공급에 의하여 이루어진다. 또한 이 시스템은 항상 노내가 미임계를 유지한다는 것을 고려하여야 한다. 이를 고려한 미임계 원자로의 동특성 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} P(t) + \lambda_i C_i(t) + \frac{q(t)}{\Lambda} \quad \text{----- (1)}$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad \text{----- (2)}$$

$P(t)$: t 시간에서의 출력 [MWth]

$C_i(t)$: t 시간에서의 지발중성자 모핵종에 의한 출력분 [MWth]

$q(t)$: t 시간에서의 외부 중성자 원에 의한 출력분 [MWth]

$\rho(t)$: t 시간에서의 총반응도 [$\Delta k/k$]

β : 지발중성자 생성비율의 총합,

Λ : 즉발중성자 생성 시간 [sec]

λ_i : i 군 지발중성자 모핵종 유효붕괴 상수 [sec⁻¹]

t=0에서 원자로가 정상 상태를 유지하고 있다면, (1),(2)에서 초기 반응도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho(0) = \frac{q(0)}{P(0)} \quad \text{----- (3)}$$

궤환 반응도는 온도에 의한 핵연료의 doppler effect와 핵연료의 void effect로 구성했다. 따라서 전체 반응도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho(t) = \rho_0 + \rho_{feed} + \rho_{control} + \rho_{external} \quad \text{----- (4)}$$

그리고 핵연료와 냉각재의 온도 측정에 사용된 열 유체 역학 모델은 다음과 같다.

$$M_f c_f \frac{dT_f}{dt} = P(t) - \frac{1}{R_g} [T_f(t) - T_{cl}(t)] \quad \text{----- (5)}$$

$$M_{cl} c_{cl} \frac{dT_{cl}}{dt} = \frac{1}{R_g} [T_f(t) - T_{cl}(t)] - \frac{1}{R_c} [T_{cl}(t) - T_c(t)] \quad \text{----- (6)}$$

$$M_c c_c \frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{R_c} [T_{cl}(t) - T_c(t)] - 2W(t) c_c [T_c(t) - T_i] \quad \text{----- (7)}$$

핵연료가 원자로 내에서 붕괴하는 동안에 생성되는 붕괴 열출력은

$$M(\infty, t_s) = A t_s^{-a} \quad \text{----- (8)}$$

$$P_d = 0.005 P_0 [M(\infty, t_s) - M(\infty, t_0 + t_s)] \quad \text{----- (9)}$$

와 같이 포함되며 상수값 A 및 a는 각각

$$A = 12.05, a = 0.0639, \quad 10^{-1} \leq t \leq 101,$$

$$A = 15.31, a = 0.1807, \quad 101 \leq t \leq 1.5 \times 10^2,$$

$$A = 27.43, a = 0.2962, \quad 1.5 \times 10^2 \leq t \leq 8 \times 10^8.$$

그리고, t_s : 운전 정지 시간

t_0 : 운전 시간

$M(\infty, t_s)$: 일정시간 운전 후 t_s 에서 발생하는 분열당 에너지

P_d : 붕괴 열출력

이다.

4. 동특성 해석

4-1. 반응도 유입 시나리오

원자로의 출력과 직접적으로 연계되는 총 반응도는 사고에 의한 외부 반응도 삽입, 온도 제한 효과에 따른 반응도 제한 효과 그리고 제어봉 또는 안전 정지봉의 삽입에 의한 반응도 효과로 이루어 진다. HYPER 시스템은 제어봉 또는 안전 정지봉의 사용을 배제하였다. 하지만 신속한 반응도의 유입에 대한 부(-)의 반응도 효과를 고려할 경우를 위해 반응도의 텀을 위와 같이 설정하였다. 동특성 해석에 사용된 HYPER 시스템의 주요 동특성 변수는 <표1>과 같다.

고려된 반응도의 변화 요인중 외부 반응도 삽입은 노심 내로 양(+)의 반응도가 강제로 유입될 수 있는 경우로서,

- 냉각재의 입력 온도 강하
- 냉각재의 손실 사고
- 외부 중성자원의 비정상적 유입사고

를 가정할 수 있다. 본 연구에서는 170\$/sec의 선형 외부 반응도 삽입과 5\$의 계단 반응도 삽입을 통해 극심한 반응도의 변동에 따른 미임계 HYPER 시스템의 출력 변동을 분석하였고, 예견될 수 있는 사고시의 출력 및 온도 변동 확인을 위해 1mK의 선형 반응도 삽입의 경우를 고려하였다.

4-2 결과 및 분석

본 연구에서는 극심한 반응도 유입 사고에 대한 미임계 원자로 HYPER 시스템의 출력의 변동을 분석하였다. 1000MW급 원자로를 기본으로, 장전 핵연료로는 Pu239 ($\beta_{eff}=2.01mK$)를 사용하였고, 즉발 중성자 생성 시간을 3.46×10^{-7} sec, 냉각재로는 Pb-Bi를 적용하였다.

<그림1>은 0.02sec 동안 170\$/sec의 선형 외부 반응도 삽입에 대한, 다양한 초기 미임계도 설정에 따른 미임계 원자로의 출력 천이 결과를 도시하였다. 미임계도가 15\$인 경우 ($K_{eff}=0.97$)는 선형 반응도 유입에서 단지 1.237배의 출력 증가만을 나타내었다. 이에 비해 미임계도가 1\$ ($K_{eff}=0.99$)의 경우 최고 18,000배의 최고 출력과 함께 빠른 천이를 나타내었다. 원자로의 특성 변수인 e-folding Time을 비교해보면 미임계로와 기존의 임계로에 대한 좀더 명확한 차이를 보여준다. 임계로는 4.23ms를 가지는데 비해, 미임계로는 해석 시간에서 e-folding time을 찾을 수 없었다.

<그림2>은 선형 반응도 삽입에 따른 온도 변화를 도시하였다. 3\$ 미임계 원자로의 경우 핵연료봉의 온도가 지속적으로 상승함을 관찰 할 수 있었지만, 14\$ 미임계로의 경우는 초기 온도와 거의 일정한 온도를 유지하였다.

<그림3>은 170\$/sec의 선형 반응도 삽입에 대한 임계로와 HYPER 시스템의 출력 및 온도 천이의 비교 그림이다.

<그림4>은 0sec에서 5\$의 계단 반응도 삽입에 대한 미임계 원자로의 출력 천이를 모사하였다. 미임계도가 14\$인 경우는 전출력의 1.4배의 천이후 일정한 출력을 유지하였지만, 5\$ 이하의 원자로는 초임계 상태의 출력 천이를 나타내었다.

<그림5>는 예측 가능한 반응도의 삽입량인 1mk/sec의 선형 반응도 삽입에 대한 미임계로와 임계로의 출력 및 온도의 천이에 대한 그림이다.

이 경우 임계로는 1.3sec에서 e-folding time을 가졌고, HYPER의 경우는 해석 시간내에서 그 값을 가지지 않았다. 온도의 천이를 살펴보면 HYPER와 같은 구성의 임계로는 2.2sec에서 핵연료 용융을 2.3sec에서 피복재 용융을 가졌다.

<그림6>은 1mk/sec의 선형 반응도 삽입에 따른 전체 반응도의 변화를 모사하였다.

5. 결론 및 토의

HYPER 시스템은 미임계 노심의 사용과 독립적인 외부 중성자원의 사용으로 인해 보다 높은 고유 안정성을 보유한다.

<그림1>, <그림3>에서 모사하였듯이 미임계 HYPER 시스템은 임계로에 비해 극심한 반응도의 삽입에 경우 높은 안전성을 보유하고 있다. 또한 <그림5>에서와 같이 예견될 수 있는 반응도의 삽입의 경우 역시 임계의 원자로에 비해 큰 안정성을 나타내었다.

하지만 <그림6>의 경우처럼 HYPER는 전체 반응도에 대한 온도 궤환 효과의 비가 적어 냉각제 유량 손실사고와 같은 열수력 사고의 경우에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 열수력 사고에 대한 정량적인 해석은 수행하지 않았다. 앞으로 냉각제 손실에 대한 출력의 천이에 대한 정량적인 평가가 반응도 삽입의 경우와 결합되어 나타날 경우와 실제적인 중성자원의 고려에 따른 HYPER 시스템의 동특성에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사문

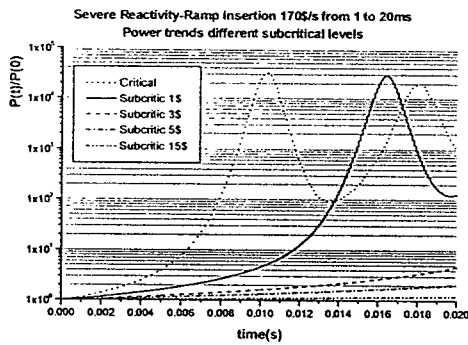
본 연구는 과학 기술부에서 수행하고 있는 중장기 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

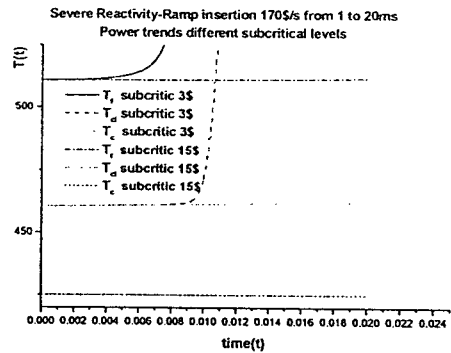
- 1] Won S. Park, etc., "HYPER - A System for Clean Nuclear Energy", Nuclear Engineering and Design, to be published.
- 2] 박원석외 4인 "HYPER 시스템 설계연구", KEARI/TR-1316/99
- 3] 김태규, 윤정선, 원성희, 임현진, 조제국, 오세기, "용융염 핵연료 원자로 AMBIDEXTER의 동특성 해석", 한국 에너지 공학회 춘계학술 발표회 논문집, 1999
- 4] antonio D'Angelo, etc., "SOME CONSIDERATIONS OF REACTIVITY EFFECTS AND SOURCE INTENSITY CONTROL OF ACCELERATOT DRIVEN SYSTEMS", ADTT, 1999
- 5] Karl O. Ott, Robert J. Neuhold, "Nuclear Reactor Dynamics", American Nuclear Society, 1985
- 9] E. E. Lewis, "Nuclear Power Reactor Safety", John Willey & Sons, 1977

| | | | | |
|---------|---------------------|------------------------|------------------------------------|---------|
| | Delay Neutron Yield | Delay Neutron constant | | |
| Total | 2.01E-3 | 4.979 | Initial Power [MWth] | 1000 |
| 1 group | 0.000076 | 0.0129 | Core Inlet Temp. [C] | 310 |
| 2 group | 0.00056 | 0.0311 | Core Outlet Temp. [C] | 540 |
| 3 group | 0.000432 | 0.134 | Steady Keff | 0.97 |
| 4 group | 0.000656 | 0.331 | Prompt Neutron Generation Time [s] | 3.46E-7 |
| 5 group | 0.000206 | 1.23 | Doppler effect | -2.0E-7 |
| 6 group | 0.00008 | 3.21 | Void effect | -2.0E-7 |

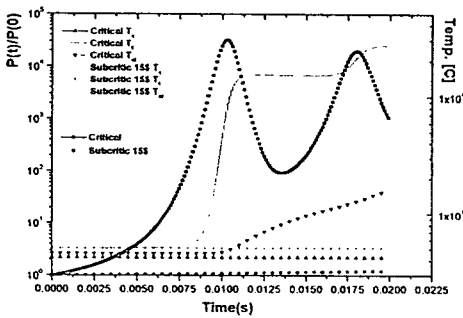
<표1> HYPER 시스템 주요 동특성 상수



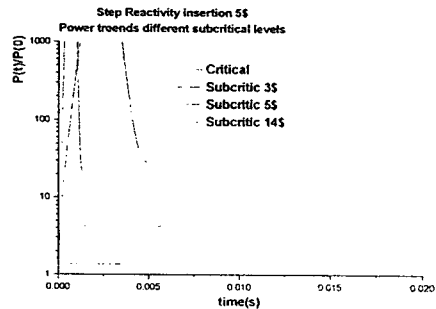
<그림1> 170\$/sec 선형 반응도 유입 시 출력 천이



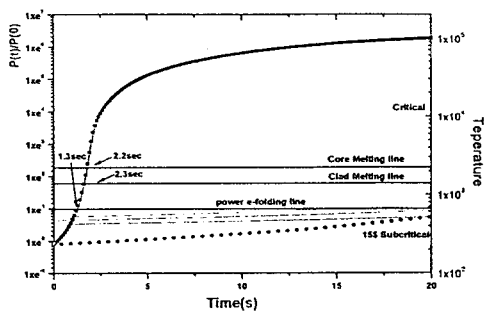
<그림2> 170\$/sec 선형 반응도 유입 시 온도 천이



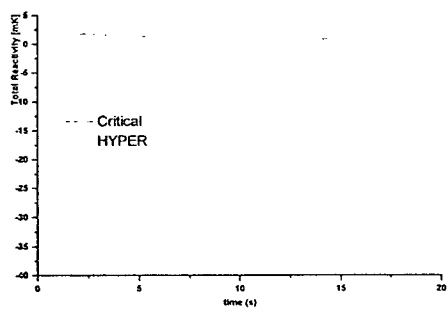
<그림3> 170\$/sec 선형 반응도 유입 시 출력 천이 및 온도 천이



<그림4> 5\$ 스텝 반응도 유입 시 출력 천이



<그림5> 1mk/s 선형 반응도 유입시 HYPER와 임계로의 출력, 온도 천이



<그림6> 1mk/s 선형 반응도 유입시 HYPER와 임계로의 전체 반응도 천이