

## HYPER 시스템 동특성 민감도에 관한 연구

### A Sensitivity Study on Dynamic Response of the HYPER System

김태균, 오세기  
김용희\*, 박원석\*

아주대학교  
경기도 수원시 팔달구 원천동 산 5 번지

\* 한국원자력연구소  
대전 유성구 사서함 105

#### 요약

장수명 핵종 핵변환을 목적으로 가속기 구동 미임계 시스템 HYPER가 개발되고 있다. HYPER 시스템의 미임계도 값과 도플러 계수값이 동특성 변화에 미치는 민감도분석을 수행하였다. 시스템 미임계도 값을 0.97에서 0.98로 증가시켰을 때, 외부 반응도 삽입 등에 대한 시스템의 동적 반응이 약 10% 크게 나타났다. 음의 반응도 계수 영향에 의해 외부 선원강도의 증가가 시스템 출력을 선형적 비례관계로 증가시키지는 않았다. 또한 도플러 계수를 -3.6pcm에서 -1.8pcm으로 변화시켰을 때, 시스템 동적 변화량이 감소함을 알 수 있었다.

#### Abstract

The HYPER(Hybrid Power Extraction) has been being developed for the transmutation of nuclear waste. The system dynamic response to the variation of external reactivity inserted was investigated by changing the degree of system subcriticality and Doppler coefficient. The amount of system dynamic response increased by about 10% when the subcriticality was increased from 0.97 to 0.98. The system power was not linearly proportional to the external neutron source strength because of the reactivity feedback effects. However the non-linearity was very small. The system became less sensitive to the variation of external reactivity inserted and beam power fluctuation when the Doppler coefficient was reduced.

## I. 서론

세계 첫 상용 원전의 운전이후, 원자력 발전은 많은 기술적 진전을 이루어왔다. 하지만 원자력이 가지는 문제점에 대한 논란은 아직까지 끊이지 않고 계속되고 있다. 제기된 많은 문제중에서, 특히, 사용후 핵연료의 처리 방안과 원자로의 안전성에 대한 문제는 언제나 논란의 중심이 있었다. 한국원자력연구소에서는 현재 이러한 두 가지의 문제점을 모두 해결할 수 있는 가속기구동 미임계 원자로 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)를 개념설계하고 있다.

Pb-Bi를 냉각재로 사용하는 HYPER 시스템은 상용 원자력 발전소로부터 방출된 핵폐기물의 연소에 그 목적을 두고있다. 또한 미임계 노심을 적용하여 임계로에 비해 강화된 안전성을 획득하고자 한다. 이러한 미임계 노심 사용은 시스템의 정상상태 유지를 위해 독립적인 외부선원을 필요로 한다. HYPER 시스템은 1GeV의 양성자 선원을 이용하며, 이는 시스템의 거동을 가름하는 중요한 인자이다.

본 연구에서는 외부 반응도 삽입에 대한 HYPER 시스템의 출력 및 온도변화를 살펴보고, 이에 따른 궤환 반응도 효과에 대해 해석하고, 외부선원의 강도변화(빔출력변화)에 따른 시스템의 특성을 분석하고자 한다. 또한 초기 미임계값 크기에 대한 효과와 함께, 도플러계수의 변화에 따른 응답특성을 살펴 시스템의 동적 응답에 영향을 미치는 인자들에 대해 분석을 수행하고자 한다. 이러한 시스템의 동적거동 모사를 위해, 미임계 노심의 일점 동특성 방정식을 적용하였으며, 온도 궤환 효과를 고려하고 시스템의 운전범위를 설정하기 위해, 노심에서 증기발생기를 포함하는 열·에너지 균형 방정식을 사용하였다. 표 1에는 시스템의 해석에 사용된 동특성 인자들을 표시하였다.

## II. 해석 모델링

### II.1 PJA 근사를 이용한 일점 동특성 방정식

시스템의 정확한 동적 거동을 해석하기 위해서는 중성자 수송이론이나 확산 이론을 적용해야 한다. 하지만 다양한 외부 간섭에 대한 시스템의 응답특성을 파악하기 위해, 각각의 경우에 모두 수송이론 또는 확산이론을 적용하는 것은 너무도 많은 시간을 필요로 한다. 따라서 해석 대상 시스템에서 고려할 수 있는 다양한 외부 섭동에 대한 동적 거동을 살펴기 위해 일반적으로 사용되는 방법이 바로 일점 동특성 방정식이다. 일점 동특성 방정식은 중성자 수송이론 또는 확산이론에서 전 공간과 에너지군에 대해, 해석 대상의 중요도를 고려한 미분을 수행하여, 시스템의 동적 거동을 오직 시간만의 함수로 만드는 것이다. 이와 같은 방법으로 시간만의 함수로 구성된 시스템의 일점 동특성 방정식을 해석하기 위한 기준 시간 간격은 일반적으로 즉발 중성자의 생성시간을 따른다. 하지만 HYPER와 같은 고속 중성자 시스템은 즉발 중성자의 생성시간이 매우 짧기 때문에 일점 동특성 방정식을 적용하는 해석도 많은 시간을 요한다.

선행연구에서는 이러한 해석의 시간 제약을 해결하기 위해, PJA근사를 도입하였다. 식 (1)은 일점 동특성 방정식에 앞서 언급한 PJA근사를 적용한 것이다.

$$0 = \left(\frac{\rho(t)-\beta}{\Lambda}\right)P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + \frac{S(t)}{\Lambda} \quad (1)$$

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

식 (1)을 P에 대해 정리한 후 식 (2)에 대입하면, 아래와 같은 C만의 함수로 구성이 된다.

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = a_i C_i + (b_i + d_i) \quad i=1,2,\dots,6 \quad (3)$$

여기서,  $a_i = \left(\frac{\beta_i}{\beta - \rho(t)} - 1\right) \lambda_i$

$$b_i = \frac{\beta_i}{\beta - \rho(t)} \frac{S(t)}{\Lambda},$$

$$d_i = \frac{\beta_i}{\beta - \rho(t)} (\sum \lambda_i C_i - \lambda_i C_i)$$

만약 반응도 함수  $\rho(t)$ 가 주어지면, 식 (3)은  $C_i(t)$ ,  $P(t)$ 에 대해 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$C_i(t) = C_{i,0} + \frac{b_i + d_i}{a_i} = \frac{b_i + d_i}{a_i} [e^{a_i t} - 1] + C_{i,0} e^{a_i t} \quad (4)$$

$$P(t) = \left(\frac{\Lambda}{\rho(t) - \beta}\right) \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + \frac{S(t)}{\rho(t) - \beta} \quad (5)$$

여기서,  $P(t)$  = 전체 출력 [MW<sub>th</sub>]

$C(t)$  = 지발중성자 모핵종의 출력비 [MW<sub>th</sub>]

$S(t)$  = 외부선원의 출력비 [MW<sub>th</sub>]

$\rho(t)$  = 전체 반응도

$\Lambda$  = 즉발중성자 생성시간 [sec]

$\lambda$  = 지발중성자 시간 상수 [sec<sup>-1</sup>]

$\beta$  = 지발중성자 생성비율

식 (1-5)에 사용된 하첨자  $i$  는  $i$  번째 지발중성자 그룹을 나타낸다.

일반적으로 시스템의 전체 출력은 즉발 및 지발 중성자에 의한 출력과 방사붕괴에 의한

출력으로 구성이 된다. 하지만 본 연구에서는 방사붕괴에 의한 출력비가 매우 미미하기 때문에 전체 출력은 오직 즉발 및 지발 중성자에 의한 출력만으로 가정한다.

HYPER 시스템에서 나타나는 전체 반응도의 함수는 다음과 같다.

$$\rho(t) = \rho_0 + \alpha_F \Delta T_F + \alpha_C \Delta T_C + \rho_{ex} \quad (6)$$

여기서,  $\rho_0$  = 정상상태에서의 초기 반응도,

$\alpha_F$  = 핵연료에 의한 온도 계환 상수 [d\_rho/ °C],

$\alpha_C$  = 냉각재에 의한 온도 계환 상수 [d\_rho/ °C],

$\rho_{ex}$  = 외부 반응도 삽입량

## II.2 열 · 에너지 방정식

노심에서 증기발생기를 포함하는 열수력 모델은 다음과 같다.

$$M_f C_f \frac{dT_f}{dt} = P(t) - \frac{1}{R_g} [T_f(t) - T_{cl}(t)] \quad (7-1)$$

$$M_{cl} C_{cl} \frac{dT_{cl}}{dt} = \frac{1}{R_g} [T_f(t) - T_{cl}(t)] - \frac{1}{R_c} [T_{cl}(t) - T_c(t)] \quad (7-2)$$

$$M_c C_c \frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{R_c} [T_{cl}(t) - T_c(t)] - 2W(t) C_c [T_c(t) - T_i(t)] \quad (7-3)$$

$$T_c \cong \frac{T_o + T_i}{2} \quad (7-4)$$

$$M_{ub} C_c \frac{dT_{hi}}{dt} = W(t) C_c [T_o(t - t_n) - T_{hi}(t)] \quad (7-5)$$

$$M_{dn} C_c \frac{dT_i}{dt} = W(t) C_c [T_{ho}(t - t_s) - T_i(t)] \quad (7-6)$$

$$T_{pr} \cong \frac{T_{ho} + T_{hi}}{2} \quad (7-7)$$

$$M_{sg} C_c \frac{dT_{pr}}{dt} = W(t) C_c [T_{hi}(t) - T_{ho}(t)] - hA\Gamma [T_{pr}(t) - T_{sg}(t)] \quad (7-8)$$

여기서,  $P(t)$  = 전체 출력 [MW<sub>th</sub>]

$T(t)$  = 온도 [°C]

$W(t)$  = 냉각재의 유속 [kg/sec]

$M$  = 질량 [kg]

$C$  = 비열 [W · sec/kg · °C]

- $R$  = 열저항 [ $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ]
- $h$  = 열전도 계수 [ $\text{W}/\text{cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ]
- $A$  = 증기발생기의 면적 [ $\text{cm}^2$ ]
- $\Gamma$  = 증기발생기의 열전달 용량
- $t_n$  = 상부 플레넘에서의 시간 지연 [sec]
- $t_s$  = 하부 플레넘에서의 시간 지연 [sec]

식 (7-1~7-8)에서의 하첨자 f, g, cl, c, i, o, hi, ho, pr, sg는 핵연료, 갭, 피복재, 냉각재, 노심 입구, 노심 출구, 열교환기 입구, 열교환기 출구, 열교환기, 그리고 증기발생기를 의미한다.

### III. 결과 및 토의

#### III.1 외부 반응도 삽입

외부 반응도 삽입에 대한 HYPER 시스템의 고유 안전성은 이미 선행 연구를 통해 확인하였다. 본 연구에서는 초기 미임계도에 따른, 반응도 삽입에 대한 시스템의 출력 및 온도 변화를 정량적으로 분석하였다. 사용된 반응도 삽입은 계단형으로 10 센트, 1달러, 5달러이며, 초기 미임계도 설정값은 0.97과 0.98이다.

외부 반응도 10cent 삽입의 경우, 0.97의 미임계도에서는 0.6%, 0.98의 미임계도에서는 1.0%의 출력 증가를 나타내었고 1달러 반응도 삽입의 경우, 0.97에서는 7.96%, 0.98에서는 11.7%의 출력증가를 나타내었다. 5달러의 경우 54.2%(0.97), 87%(0.98)의 출력 증가를 나타내었다. 그림 1, 2는 초기 미임계도 0.97과 0.98에 대한 출력 변화를 도시하였다. 그림 3-4는 반응도 삽입에 따른 핵연료 및 냉각재의 온도변화를 나타낸 것이다. 5달러의 외부 반응도 삽입에서 미임계도 0.97의 경우 690, 485  $^{\circ}\text{C}$ 에서 수렴하였고, 0.98의 경우 770, 520  $^{\circ}\text{C}$ 에서 수렴값을 나타내었다. 반응도삽입에 따른 출력 및 온도의 변화는 초기 미임계도가 높을수록 증가함을 확인하였다.

#### III.2 외부선원 출력천이

미임계 시스템의 출력은 외부 선원의 크기에 의해서 결정된다. 따라서 외부 선원의 변화는 곧바로 노심 출력 변화로 나타난다. 본 장에서는 외부선원의 순간적 정지에 따른 시스템의 출력 및 온도 변화를 살펴보고, 이에 대한 분석을 수행하였다.

먼저 외부선원이 2초의 주기로 1초씩 3번을 정지하는 경우에 대한 HYPER 시스템의 출력 및 온도의 거동을 분석하였다. 그림 5, 6은 HYPER 시스템의 외부선원에 대한 중속도를 보여준다. 외부선원의 정지는 시스템의 출력강하로 즉시 나타났으며, 이와 더불어 그림 7, 8과 같은 급격한 온도 변화를 가져왔다. 초기 미임계도가 0.97인 경우 출력진동에 의해 발생하는 침투 출력은 1.05이었고 0.98의 경우는 1.1을 보였다. 전체적으로 외부선원에 의해서 발생하는 과출력은 시스템의 안전성 측면에서 크게 문제가 되지 않는 것으로 판단되었

다.

다음으로 외부선원의 급작스러운 증가에 대한 해석을 수행하였다. 이 경우는 빔출력이 2 배 증가한 경우를 대상으로 선택하였다. 그림 9, 10은 미임계도에 따른 출력의 변화를 나타내었다. 이 경우에서도 예상과 동일하게 외부선원의 증가는 출력 및 온도에 직접적으로 전달되었다. 그러나 외부 선원의 증가율에 비례하여 시스템 출력의 증가는 나타나지 않았다. 시스템 미임계도 0.97, 0.98에 대해 초기에는 시스템 출력의 1.92와 1.89 배로 증가하였으나, 이후 1.81, 1.75배로 수렴하였다. 이는 온도 계환 효과에 의한 영향으로 분석되었으며, 그림 11, 12에 도시한 온도의 변화에서도 유사한 결과를 발견할 수 있었다.

### III.3 Doppler 계수 변화

마지막으로 수행한 해석은 Doppler 계수 변화에 따른 시스템의 동적 거동 분석이다. TRU 핵연료를 사용하는 가속기 구동 미임계 원자로의 경우 연소도에 따라 Doppler 계수의 차이가 발생한다. 따라서 Doppler 계수를 시스템의 연소도의 함수로 하여 동적 거동 분석이 수행되어야 한다. 본 항에서는 계수값을 기존의  $-3.6\text{pcm}$ 과 이를 50%감소시킨  $-1.8\text{pcm}$ 의 두 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

외부 반응도 삽입 및 외부선원의 크기 변화에  $-3.6\text{pcm}$ 의 계수값을 가지는 경우가 보다 큰 출력 및 온도의 변화를 나타내었다.

## IV. 결론

본 연구에서는 가속기 구동 미임계 원자로인 HYPER 시스템의 노심 설계 인자 변화에 대한 노심의 동특성 민감도 분석을 수행하였다. 선택한 노심설계 인자로는 시스템 미임계도와 핵연료의 온도반응도 계수인 Doppler 계수를 설정하였다. 두 인자들에 대한 노심 동특성 민감도 분석을 위해 먼저 외부반응도 삽입을 통해 초기 미임계도와 핵연료 온도 반응도 계수 변화에 대한 효과를 살펴보았고, 외부선원의 빔출력 증가·감소에 따른 영향을 살펴보았다. 예측된 바와 같이 미임계도값이 임계에 가까워 질수록 동일한 외부 섭동에 대해 노심의 동적 변화가 크게 나타났다. 또한 Doppler 값이 클수록 외부 섭동에 대해 노심의 동적 반응이 크게 나타났다.

## V. Reference

1. T.K. Kim, Y.H. Kim, W.S. Park, "Some Reactor Kinetics Properties of the HYPER system", Proceedings of the Korean Energy Society, May (2000)
2. W.S. Park, etc. "A Study of HYPER System Design", KEARI/TR-1316/99
3. T.K. Kim, J.S. yoon, S.H. Won, H.J. Lim, J. K. Cho, S.K. Oh, "Some Dynamic Properties of AMBIDEXTER", Proceedings of the Korean Energy Society Spring Meeting, 1999
4. Nuclear-Reactor Analysis, MIT Press, A.F. Henry, 1975

5. Nuclear Reactor Theory, Addition-Wesley limited, John R Lamarsh, 1966
6. Introductory Nuclear Reactor Dynamics, ANS, Karl O. Ott, 1985

표 1. HYPER System 설계인자

System Design Parameters			
Gross Design Power, [MW <sub>th</sub> ]	1000	Core Inlet Temperature, [C]	340
Effective Multiplication Factor, $K_{eff}$	0.98	Core Outlet Temperature, [C]	510
Prompt neutron generation Time, [sec]	1.598 E-6	Fuel Specific Heat, [W · sec/kg · C]	336.32
Doppler Coefficient, [d_rho/C]	- 3.6 E-6	Coolant Specific Heat, [W · sec/kg · C]	147.00
Coolant Temp. Coefficient, [d_rho/C]	- 3.24 E-5	Fuel Thermal Resistance, [C/W]	8.25 E-8
Delayed Neutron Data			
Group Number	Decay Constant, $\lambda$ , [sec]	Delayed Neutron Yield Fraction, $\beta$	
1	0.013271	0.081294 E-3	
2	0.030881	0.634322 E-3	
3	0.11337	0.444564 E-3	
4	0.2925	0.902591 E-3	
5	0.85749	0.486306 E-3	
6	2.7297	0.154424 E-3	
Total		2.703501 E-3	

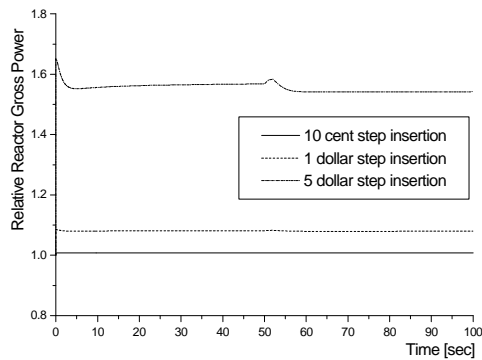


그림 1. 출력변화( $k_{eff}=0.97$ )

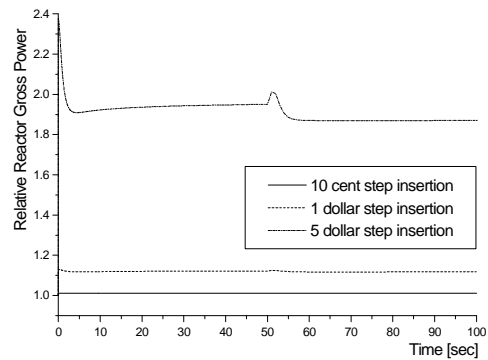


그림 2. 출력변화( $k_{eff}=0.98$ )

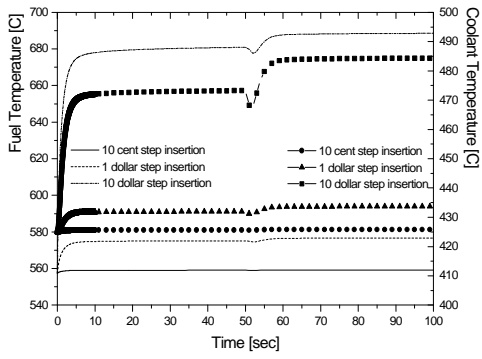


그림 3. 온도변화 ( $k\text{-eff}=0.97$ )

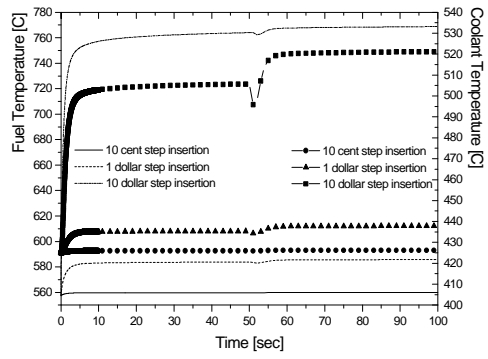


그림 4. 온도변화 ( $k\text{-eff}=0.98$ )

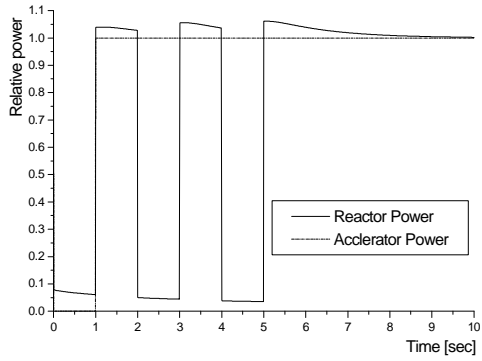


그림 5. 출력진동 ( $k\text{-eff}=0.97$ )

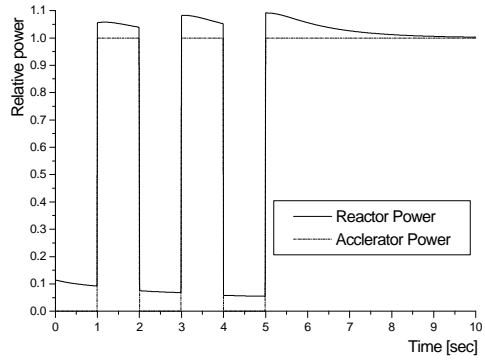


그림 6. 출력진동 ( $k\text{-eff}=0.98$ )

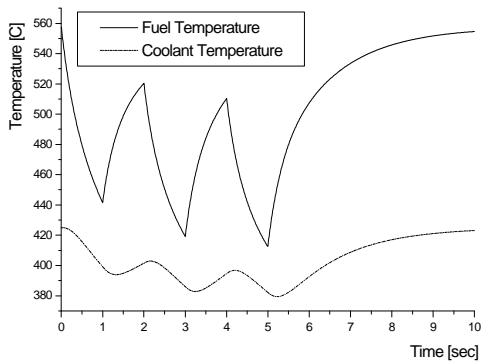


그림 7. 온도진동 ( $k\text{-eff}=0.97$ )

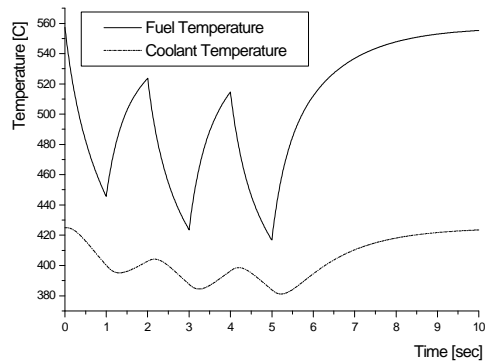


그림 8. 온도진동 ( $k\text{-eff}=0.98$ )



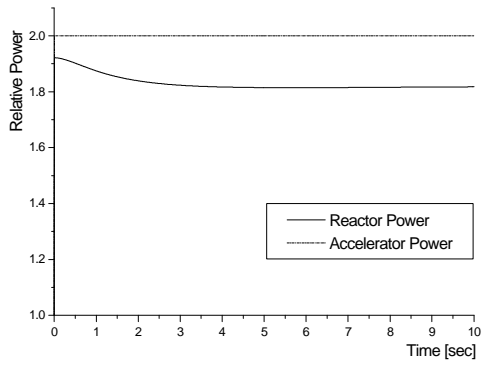


그림 9. 선원크기 증가에 따른 출력증가 (k-eff=0.97)

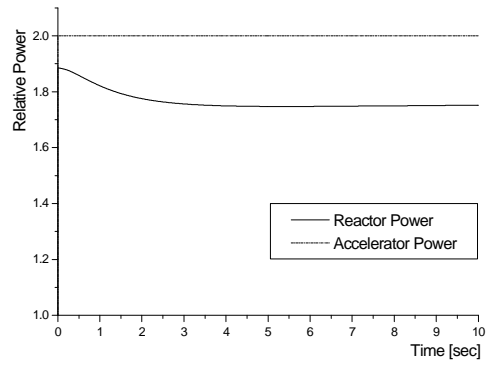


그림 10. 선원크기 증가에 따른 출력증가 (k-eff=0.98)

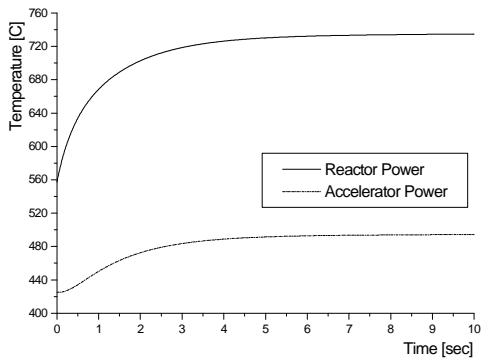


그림 11. 선원크기 증가에 따른 온도증가 (k-eff=0.97)

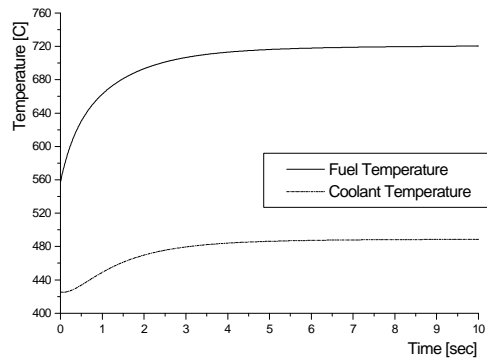


그림 12. 선원크기 증가에 따른 온도증가 (k-eff=0.98)

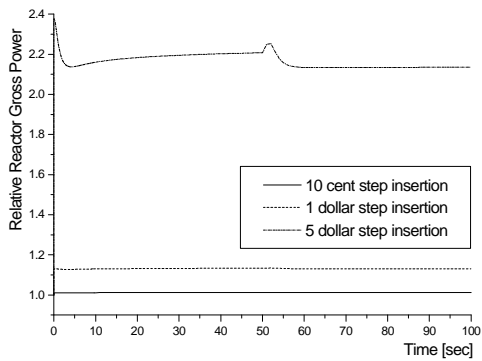


그림 13. 도플러값이 1.8pcm일 때 출력 과도 (k-eff=0.98)

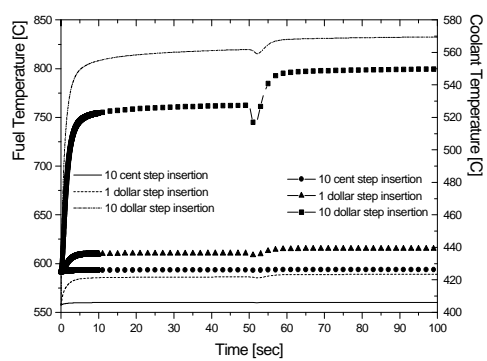


그림 14. 도플러값이 1.8pcm일 때 온도 과도 (k-eff=0.98)

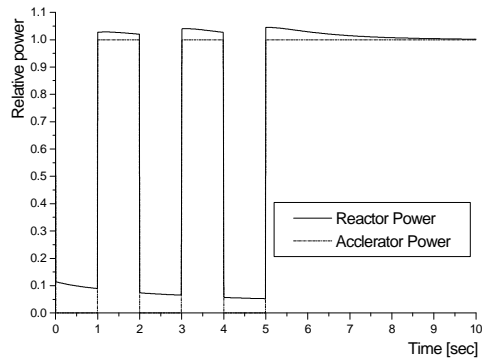


그림 15. 도플러값이 1.8pcm일 때 출력 진동 ( $k\text{-eff}=0.98$ )

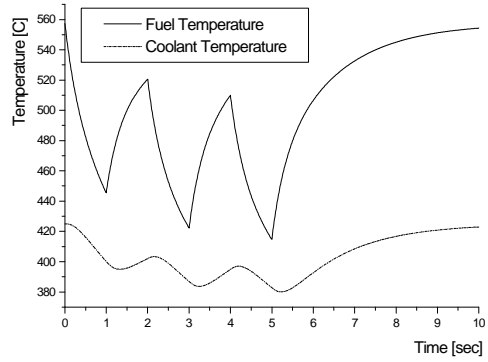


그림 16. 도플러값이 1.8pcm일 때 온도 진동 ( $k\text{-eff}=0.98$ )

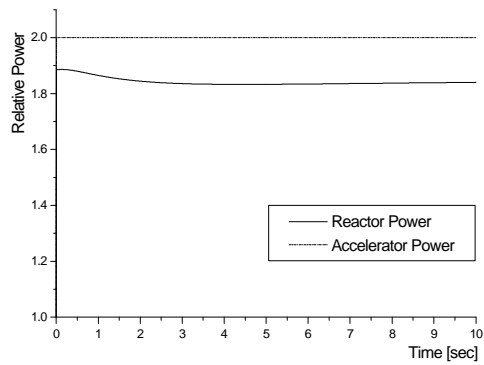


그림 17. 도플러값이 1.8pcm일 때 선원크기 증가에 따른 출력 증가 ( $k\text{-eff}=0.98$ )

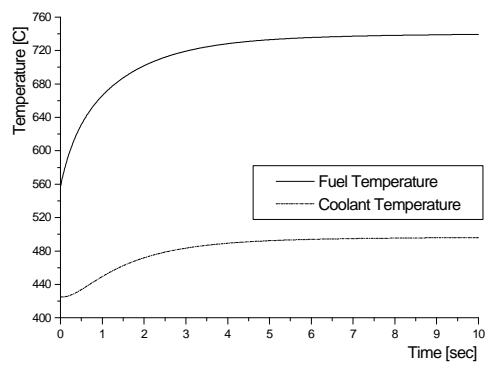


그림 18. 도플러값이 1.8pcm일 때 선원크기 증가에 따른 온도 증가 ( $k\text{-eff}=0.98$ )