

## KALIMER 원자로 출력 제어 특성 분석

### Characteristics of the Reactor Power Control for KALIMER

송순자, 심윤섭  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

KALIMER(Korea Advanced LIquid METal Reactor) 원자로 출력 제어의 특성을 확인하기 위해 긴 지연시간을 갖는 계통의 간이모델을 이용하여 지연시간과 제어 논리와 제어계수간의 상관성에 대한 모의실험을 수행하여 지연시간이 긴 계에 대한 제어 특성을 조사하였다. 이 조사 결과로부터 KALIMER 출력제어의 제어 논리 및 제어 계수를 예비 설정하고 이를 성능분석 코드에 적용하여 KALIMER 설계에서의 출력 제어 특성 조사를 구체화시키고 제어성능을 평가하였다. 평가는 제어설계의 신뢰성을 확보하기 위하여 원자로 선행 모드와 터빈 선행 모드 각각에 대한 평가가 이루어졌다. 평가결과는 두 모드에서 다 온도, 노심 출력 및 유량인자들이 전체적으로 안정된 경향을 보였으며 KALIMER계통 설계개념의 출력 제어성을 확인하고 출력 제어설계를 구체화하였다.

#### Abstract

For the design of the core power control in KALIMER(Korea Advanced LIquid METal Reactor), the control characteristics in a system with a long response delay time were investigated using a simplified model that easily and clearly represents the relationship among the delay time, control logic and response. Based on the investigation results, basic control algorithm was set up and also it was found that the core exit temperature performs much better than the core inlet temperature does as a control measurement parameter. Applying the findings in the simplified model investigation, the control logics and parameter constants were preliminarily determined for KALIMER. The performance of the preliminarily determined logics and values was evaluated for various plant operation transients under the categories of the turbine leading and reactor leading modes and refined. The evaluation results showed that the KALIMER system is satisfactorily controlled. From this, the controllability of the KALIMER system design was confirmed.

## 1. 서론

칼리머(KALIMER)는 소듐을 냉각재로 하는 출력 150MWe의 액체금속로[1]로서 일차계통이 대용량의 소듐 풀(pool)에 설치되는 형식이며 원자로 노심이 있는 일차계통(PHTS: Primary Heat Transfer System), 증기를 발생시키는 증기발생계통(SGS), 그리고 이 일차계통과 증기발생계통을 연결시키는 중간계통(IHTS: Intermediate Heat Transfer System)으로 크게 구성되어 있으며 증기발생계통은 증기 및 급수를 통하여 전통적인 BOP 계통과 연계된다.

원자력연구소에서 KALIMER의 예비 개념설계가 개발되었으며[2] 현재 개발된 개념설계의 보완을 통한 개념설계의 정립이 이루어지고 있다. KALIMER 개념설계의 완성을 위하여 개발되는 계통설계 개념에 대한 제어성의 제시 및 이에 대한 타당성의 제시가 필요로 되고 있으며 본 논문에서는 이러한 필요성에 따라 개발된 계통 설계에 대한 제어 설계 중 원자로 출력 부분의 제어성에 대한 특성을 조사, 설명한다.

KALIMER는 일차계통 전체가 대용량의 풀에 설치됨으로 인하여 열적관성이 기존의 loop 형인 경수로와 비교하여 무척 크게 되며 이로 인하여 원자로 제어 측면에서 새로운 특성을 지니게 된다. 이 논문에서는 이런 새로운 특성 즉, 계의 큰 열적관성이 출력 제어에 미치는 영향을 분석하고 이를 바탕으로 KALIMER 출력제어구현 예비 논리를 설정한다.

큰 열적관성 또는 긴 응답지연시간 영향을 분석하고 이런 계에 적절한 제어 구현논리를 개발하기 위하여 응답시간 장단의 특성을 묘사하는 단순화된 계통에 대한 간이 모형을 설정하여 응답시간의 장단과 제어성 간의 상관성을 파악하고 이 결과를 이용하여 KALIMER의 출력제어 논리 및 작동치를 예비 설정하여 KALIMER 설계 개념의 출력 제어성을 확인한다. 이러한 연구에서 출력 제어는 발전소의 운전 특성상 원자로 선행모드와 터빈 선행모드 각각에 대한 조사를 수행하되 계통 운전 목표치의 변화량은 EPRI ALWR(Advanced Light Water Reactor) 요건을 고려하여 설정하고 제어 과도특성은 KALIMER 계통해석 코드인 LSYS2를 이용하여 해석한다.

## 2. KALIMER 출력 제어 구성

KALIMER 출력제어는 PHTS 유량제어, IHTS 유량제어, 급수제어, 증기제어 등과 함께 발전소 제어를 담당하는 요소 중의 하나로서 목표 노심 출력에 따라 또는 목표 냉각재 온도가 구현되도록 다른 제어와 결부되어 노심 출력을 제어하는 기능을 수행한다. 이러한 기능을 수행하는 데 있어서 그 기능의 특성상 원자로 출력변화가 선행되어 제어가 이루어지는 원자로 선행모드와 BOP 측 출력변화가 선행되어 제어가 이루어지는 터빈 선행모드 두가지로 제어의 특성상 나누어 진다.

원자로선행 모드시는 목표출력과 실제 출력간의 차이에 의한 오차에 의해, 터빈선행 모드시는 목표 냉각재 온도와 실제 출구온도간의 차이에 의해 정반응도와 부반응도의 크기를 결정하여 삽입하게 된다. 제어봉은 현재의 노심설계의 특성에 의해 노심 길이 65.7%에서 72.6%의 범위 구간에서 작동되도록 제한된다. 반응도의 변화는 중성자속에 영향을 미쳐 중성자속의 변화량에 따라 열출력증감이 일어나게 하고 이 열출력은 온도 변화를 유발시킨다.

반응도의 제어 대상은 발전소 운전모드에 따라 원자로 선행 모드는 중성자속이 터빈 선행 모드는 노심출구온도가 주 제어 대상 인자가 된다. KALIMER의 유량제어는 전자펌프 (Electro-magnetic pump) 공급 전력의 주파수 및 전압으로 조절하며 PHTS 소듐 유량은 노심의 구성 특성상 출력운전 구간에서 항상 90% 이상의 유량이 확보되도록 목표치가 설정되는 특성을 지니고 있다.

### 3. 간이 시간지연 모델이용 출력 제어 거동 예비 분석

칼리머의 계통 특성으로 인해 노심의 온도가 중간 열교환계통을 통해 증기발생기로 전달되므로 계통의 긴 지연시간이 제어에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 지연효과가 잘 나타나는 단순계의 모형을 세워 이 모형에 대한 분석을 사전에 실시하고 이 결과를 바탕으로 계통 과도해석 코드인 LSYS2에 반영하여 작동치를 예비 설정하였다. 지연효과를 조사하는 데 사용된 간이 모형은 다음 그림1과 같다.

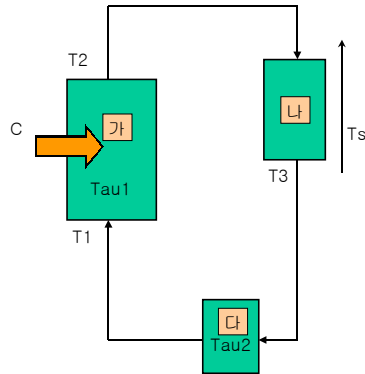


그림 1. 시간지연 특성조사를 위한 모형

여기서 유체는 상자 ‘가’에서 C라는 열의 입력에 의해  $T_1$ 인 유체가  $\tau_1$  시간을 거쳐서  $T_2$ 로 가열되고 상자 ‘나’에서 온도  $T_s$ 인 주변과 열전달이 이루어져  $T_3$ 로 냉각되어 상자 ‘다’를 거쳐 상자 ‘가’로 돌아오는 폐회로이며 상자 ‘가’에서는  $\tau_1$  만큼의 지연이 발생되고 상자 ‘다’에서는  $\tau_2$ 만큼의 지연이 발생된다. 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_2(t) = T_1(t - \tau_1) + C$$

$$T_3(t) = T_s + (T_2(t) - T_s)y, y = 1 - \exp(-d)$$

$$T_1(t) = T_3(t - \tau_2)$$

이를 KALIMER의 경우에 적용하면, 상자 ‘가’는 노심, ‘나’는 IHX/IHTS, ‘다’는 PHTS의 잔여 기기에 해당되며  $\tau_1$ 은 노심의 시간지연,  $\tau_2$ 는 PHTS 나머지 유로에서 발생하는 시간지연, C는 노심의 열출력, d는 IHX/SG등의 열교환기기의 성능지수(예: UA)이다. 제어는 다음 그림2에 보인바와 같이 C의 제어를 통하여 계의 온도를 일정량만큼 올리고 내리는 것이 되고 이러한 제어의 특성을 작동치 설정의 사전 작업으로 조사한다.

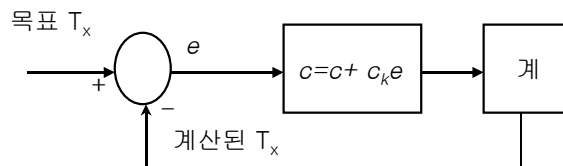


그림 2. 예비분석 계의 제어논리도

온도 제어 대상 변수  $T_x$ 로  $T_1$ 과  $T_2$ 의 사용 효율성을 조사하였다. 두 인자에 대하여 예상되는 상대적 장단점은  $T_1$ 은 계의 온도변화 전체가 반영됨에 비하여  $C$  변화에 대한 응답이 느리다는 단점이 있으며  $T_2$ 는  $T_1$ 과는 반대되는 특성을 지닌다. 조사 결과  $T_1$ ,  $T_2$  모두다 다음 그림3,4와 같이 궁극적으로는 목표치에 도달은 하지만  $T_1$ 경우는 중간과정 중에 매우 심한 진동이 나타나 제어 대상인자로 부적절한 것으로 나타났다. 이로부터 PHTS의 온도제어시의 대상 온도는 노심 입구온도보다는 노심 출구온도로 설정하는 것이 적절할 수 있음을 파악하였다.

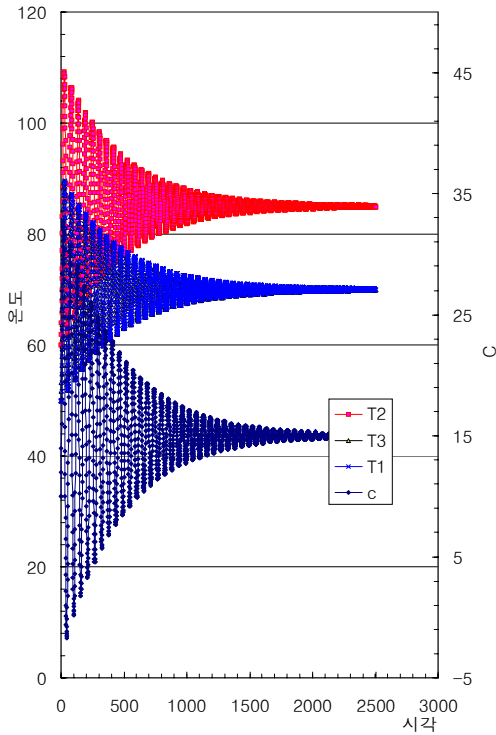


그림 3.  $T_1$ 이  $T_x$ 일 경우의 제어거동

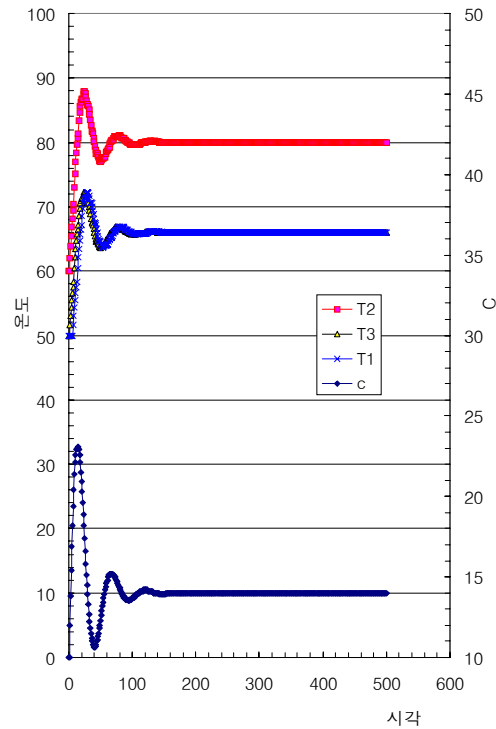


그림 4.  $T_2$ 가  $T_x$ 일 경우의 제어거동

$T_2$ 를 제어 대상 변수  $T_x$ 로 사용하면 비록  $T_1$ 의 경우에 비하여 제어성이 나아지는 것은 사실이나 초기에 온도의 진동이 너무 크다는 문제점이 있다. 따라서 이에 대한 조사를 지연시간과 계의 열전달 특성지수인  $d$  즉  $y$ 에 대한 영향을 조사하였다. 지연시간은 제어 응답 결과의 응답의 속도에 관련되고 열전달 특성지수  $y$ 는 노심에서의 변동에 대한 계의 고유적인 안정성을 나타내는 의미를 지닌다. 상자 '가'에서의 변동폭  $\delta T$ 는 '나'에 와서는  $y \cdot \delta T$ 가 됨으로  $y$ 가 작을수록 계는 더욱 더 고유적인 안정성을 갖게 되는 것으로서는 여러 가지 값의  $y$ 와  $\tau_1, \tau_2$ 에 대한 조사를 수행한 결과의 대표적인 예는 다음 그림5와 6과 같다.

이러한 조사결과  $\tau$ 가 커질수록 제어 안정성이 나빠짐을 확인하여 KALIMER와 같은 대용량의 pool이 계로 구성되는 경우는 이런 큰 지연시간에 대한 별도의 고려가 필요함을 확인할 수 있었다. 본 조사 모형에 해당되는 KALIMER 계통의 인자 값들은 정격운전 조건 경우  $d \approx 0.25$ ,  $c \approx 150$  °C,  $\tau_1 \approx 10$  초,  $\tau_2 \approx 200$  초 정도이었으며 비례제어기 사용으로 비교적 양호한 제어 결과를 얻을 수 있었다. 또한 목표치 변화폭의 증가등에 대비하여 제어 성능을 증진시키기 위한 가능성을 평가하기 위하여 미분항을 추가하여 시험해보았지만 조사 조건내에서는 오히려 성능이 만족스럽지 못하였다. 이러한 조사 결과로부터 KALIMER 계통의 큰 시간 지연에 대하여 비례제어기로서 양호한 제어를 이룰 수 있는 가능성을 확인하였다.

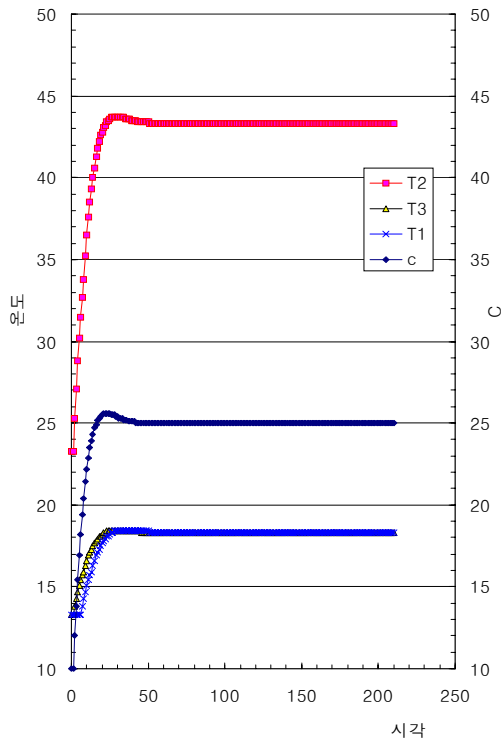


그림 5.  $y=0.25$   $\tau_1=2$ ,  $\tau_2=5$  일 때의 제어특성

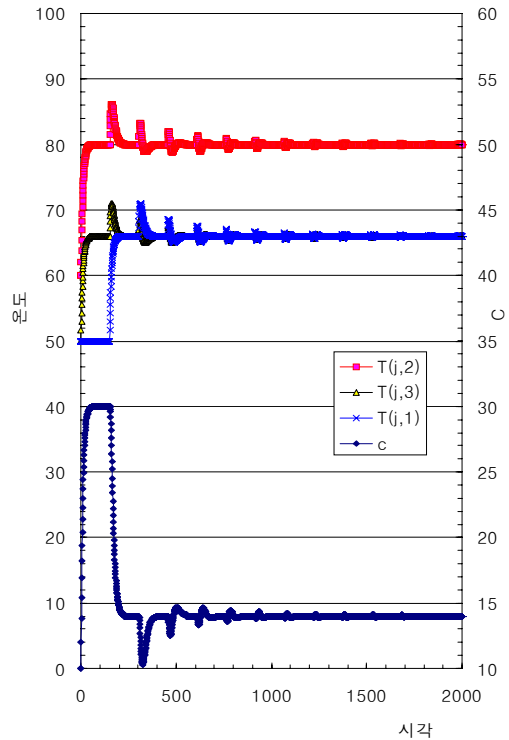


그림 6.  $y=0.25$   $\tau_1=2$ ,  $\tau_2=150$  일 때의 제어특성

#### 4. 출력제어 특성분석

풀형 칼리머의 출력제어 특성을 분석하기 위해 시간지연에 대한 예비계산 결과를 바탕으로 칼리머의 계통고유특성을 반영한 제어논리를 계통성능분석코드(LSYS2)에 적용하여 제어기 작동치를 계산하였다. 계통 성능분석은 LSYS2를 해석도구로 사용하여 이루어지는 데 현 단계에서는 NSSS 거동이 초점이 되고 있고 이에 따라 LSYS2의 모형도 BOP부분은 간이 처리되어 있음을 고려하여 일차적으로 NSSS만 제어 대상이 되는 경우에 대한 작동치를 설정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 노심출력 제어 :
  - 비례제어기의 이득 계수
    - .원자로 선행모드시: 100cent/노심출력 fraction
    - .터빈 선행모드시 : 1cent/ °C
- 유량제어
  - 비례제어기의 이득 계수 : 0.1 Hz/유량 fraction

이러한 작동치를 이용한 결과로서 100% 출력운전에서 10% step 변화 및 2%/분의 ramp 변화에 대한 제어성을 평가 하였던 데 이 변화율은 EPRI ALWR 요건 중 가장 변화 부하가 큰, 주파수 추종 경우의 요건인 분당 2%로 10% 변화[5]를 고려하여 설정하였다. 칼리머의 특성을 반영한 기본 운전 논리인 원자로 선행 모드인 경우는 노심 출력이 주 제어 대상이 되고 터빈 선행모드의 경우는 노심 출구온

도가 주 제어 대상이 된다. 특성 분석을 위해 조사한 경우중에서 10% step 변화로 운전할 경우, 원자로 선행 모드시와 터빈 선행 모드시의 제어논리 및 설정치의 성능결과가 다음 그림 7~10에 제시되어 있다.

이들 그림에서 보면 두 운전 모드에서 다 온도, 유량, 노심 출력 및 노심 인자들이 전체적으로 보아 만족스럽게 제어되고 있음을 알 수 있다. 추가적으로 보완이 필요한 점을 든다면 온도가 주 제어변수가 되는 터빈 선행모드의 경우에는 노심 출구온도에서의 진동을 줄이는 작업이 필요하고 원자로 선행모드의 경우에는 계통온도의 목표치 도달 시간을 단축시키는 작업을 들 수 있다.

유량 제어는 원자로 선행 모드나 터빈 선행 모드의 경우에 둘 다 약 50초만에 목표치에 안정적으로 도달하는데 향후 설계 및 계통분석의 진전에 따라 유량제어의 신속성이 요구되면 설계된 구현논리의 기본설계를 사용하여 응답성을 높일 수 있다. 또한 터빈선행 모드인 경우에 그림 '나'에서 400초 부근까지 진동을 보이는 곡선 중 위쪽 곡선은 노심 출력이고 아래쪽 곡선은 삽입 반응도를 나타내고 있다. 삽입반응도의 곡선을 보면 제어봉의 삽입 및 인출의 움직임이 반복적으로 이루어지기는 하나 그 회수가 비교적 작아 제어봉 구동기구의 기계적 건전성 확보에 그다지 큰 영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 판단된다. ramp 출력변화의 경우는 그림 7~10 경우의 step 출력 변화 경우에 비하여 훨씬 더 양호한 제어 성능을 보였다

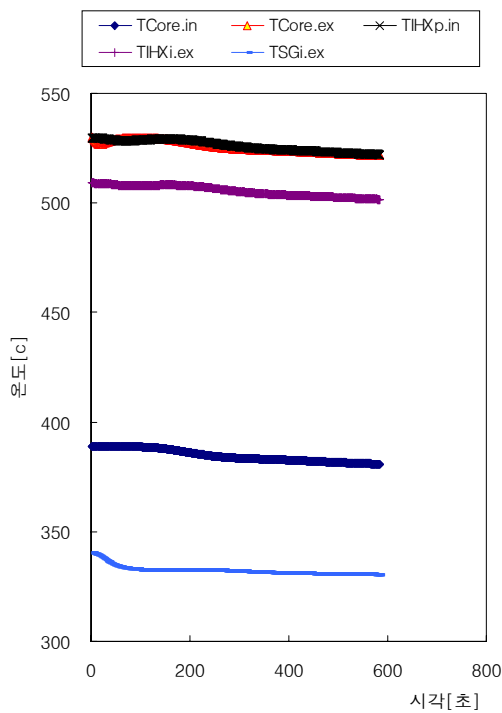


그림 7. 원자로 선행모드시의 제어특성  
가. 계통온도 변화

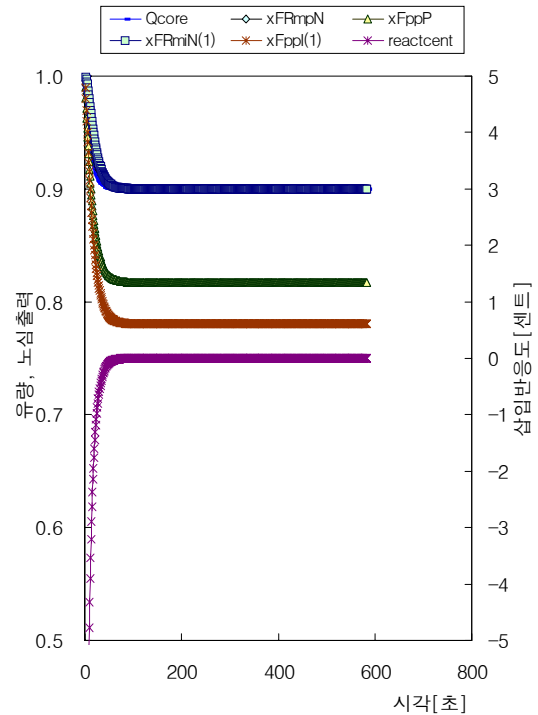


그림 8. 원자로 선행모드시의 제어 특성  
나. 유량 및 노심인자 변화

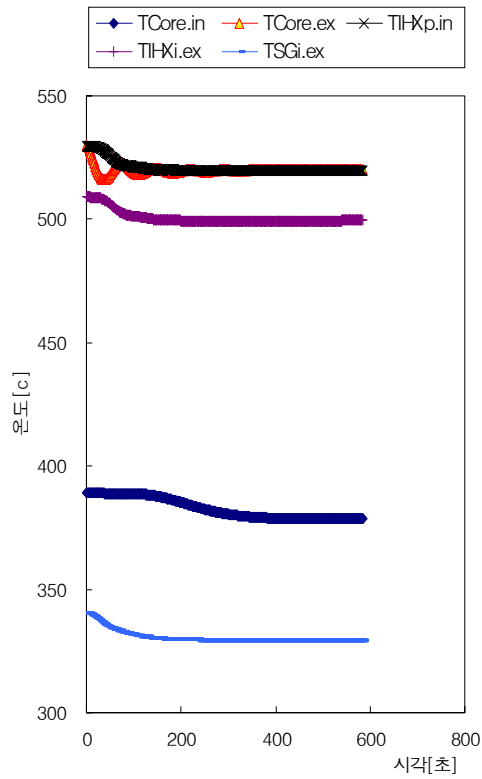


그림 9. 터빈 선행모드시의 제어특성  
가. 계통온도 변화

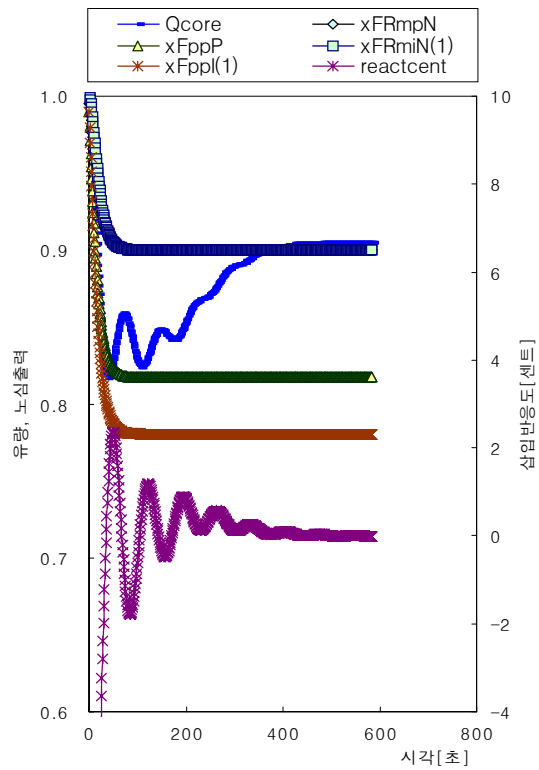


그림 10. 터빈 선행모드시의 제어 특성  
나. 유량 및 노심인자 변화

## 5. 결론

열적관성이 큰 계통 특성에 의해 발생하는 출력제어시의 긴 응답시간의 처리문제를 간이 시간지연 모델을 개발하여 빠른 계산으로 신속하게 거동을 확인하고 이의 해결방법을 찾을 수 있는 방법을 설정하였다. 열적관성이 큰 계통의 간이 모델에서 성능을 확인한 출력제어 논리를 과도해석 코드인 LSYS2에 적용하고 LSYS2에서 원자로 선행모드인 경우와 터빈 선행모드의 경우에서 칼리머 계통의 성능을 확인하였다. 성능은 100%출력에서 10%감소운전을 할 경우에 주 제어인자인 계통온도의 변화와 유량 및 노심 인자의 추이가 만족스럽게 제어되고 있음을 확인하여 개발된 KALIMER 계통 설계의 제어성을 확인하였다. 또한 이 연구를 통하여 KALIMER의 원자로 출력 제어의 특성을 분석하고 제어 구현논리 및 작동치를 예비적으로 설정하였으며 이를 통하여 KALIMER 형의 원자로 계통에 대한 제어설계 기본 체제를 구축하였다.

## Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업 일환으로 수행되었음

## 참고문헌

- [1] KALIMER Design Concept Report, KAERI, 1997
- [2] KAERI/TR-1636/2000, KALIMER Preliminary Conceptual Design Report, KAERI, Aug. 2000.
- [3] KAERI/RR-2024/99, 유체 및 계측 제어 계통 설계 기술 개발, 액체금속로 설계 기술개발, KAERI, May 2000
- [4] B.A. Ogunnaike, W.H. Ray, "Process dynamics, modeling and control", Oxford University Press, 1994
- [5] EPRI, Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document, Vol II, Chapt.1, Sect.3.4.2.1, 1992