2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 노심 출구 온도 측정의 디지털 동적 보상 방법

Digital Dynamic Compensation Method of SMART Core Exit Temperature Measurement

김 긍구, 주 한규, 이 기복, 지 성균, 장 문희
한국원자력연구소
대전 유성구 덕진동 150

요 약

SMART 노심 출구 온도 측정시 발생하는 측정 센서의 시간 지연효과와 노심 출구 온도 측정위치 차이에 의한 시간 지연효과를 보상하기 위한 노심 출구 온도 측정값의 디지털 동적 보상 방법을 제안하였다. 제안된 동적 보상 방법은 디지털 필터를 이용한 동적 온도 보상 방법에 중성자 출력 변화를 보상 변수로 첨가한 디지털 동적 보상 방법이다. 모의 계산 결과에 따르면 출력 급증발 및 급감발 등 천이 상태에서 실제 노심출구 온도와 노심출구 온도 측정 보상값의 차이는 디지털 동적 보상을 사용하지 않을 경우와 비교하여 77%이상 줄어 드는 것으로 나타났다. 따라서 SMART 노심 출구 온도 측정에 제안된 방법을 적용할 경우 노심 출구 온도 측정 센서의 시간 지연효과와 측정위치 차이에 의한 시간지연효과를 보상할 수 있는 것으로 판단된다.

Abstract

In order to compensate time delay effect of SMART core exit temperature measurement, a digital dynamic compensation method has been developed. Time delay of SMART core exit temperature measurement caused from the temperature sensor response delay and coolant mixing and transportation. The proposed dynamic compensation method adapts the use of digital filters on the measured core exit temperature and the measured neutron power. Based on the simulation results of SMART power increasing and decreasing transients, the discrepancy between actual core exit temperature and measured core exit temperature can be reduced by 77% through the use of the proposed digital dynamic compensation. It is naturally concluded that the proposed compensation method could compensate the temperature sensor response and coolant mixing and transportation time delay effect.

1. 서론

SMART(System integrated Modular Advanced ReacTor)는 한국원자력연구소에서 향후의 미래 환경에 대비하고 증가 일로의 해수담수화 수요 등 원자력에너지의 비전력분야 활용을 위해 대용량 원자로에 비해 활용성이 다양한 다목적 중소형 원자로로 개발되고 있는 일체형 원자로이다. SMART는 원자로 안전성을 획기적으로 향상시키기 위하여 여러 가지 신개념을 적용하여 개발하고 있다. SMART 제어 및 보호계통에서는 계측제어기기의 안전성과 신뢰성을 제고하기 위하여 디지털 기술을 적용하여 개발하고 있기 때문에 다양한 디지털 기술의 적용이 가능하다.

원자로를 안전하게 운전하려면 핵연료의 냉각이 적절하게 이루어져야 하며 적절한 핵연료의 냉각을 감시 제어하기 위하여 냉각재의 온도 측정이 필수적이다. 특히, 원자로 노심 출구 및 입구 온도 측정값은 원자로 제어계통 및 원자로 보호계통으로 입력되어 원자로 운전 상태를 감시하거나 원자로 이상 상태 발생시 원자로를 안전하게 보호하거나 원자로 운전 제어를 위한 변수로 이용된다.

대부분의 냉각재 온도 측정은 RTD 온도 계측 센서를 통하여 이루어 지고 있으며 온도측정기는 상대적으로 긴 반응 응답 지연시간을 가지고 있어 냉각재 온도 측정기의 시간 지연 효과는 원자로 제어 및 안전 계통에 큰 영향을 미치고 있다. 즉, 냉각재 온도 측정값을 원자로 제어 변수로 사용 시 제어 성능을 저하 시키거나, 보호계통에 사용 시에는 과도한 보수인자를 적용하여 운전 여유도를 감소시키는 작용을 하고 있다. 따라서 온도 측정 계측기의 시간 지연효과를 보상하기 위하여 여러 가지 보상 방법이 제안되었다. Yan 등은 온도 측정 센서의 측정시간 지연효과를 보상하기위한 DCTS(Dynamic Compensated Temperature Sensor) 방법을 개발하여 온도 측정기의 신호를 보상하는 방법을 제안하였으며[(1)], Cahyono 등은 뉴럴네트워크(Neural Network)를 이용한 RTD센서의 동적보상방법을 제안하였다.[(2)] 한국형 표준 원자로의 노심 보호감시계통에서는 디지털 필터를 이용한 온도 보상 방법을 개발하여 사용하고 있다.[(3)] 그러나 이상의 보상방법은 단지 센서의 응답 지연효과만을 보상하기위한 보상 방법으로 SMART의 노심출구 온도 측정과 같이 측정위치 차이에 의한 시간 지연효과와 측정센서에 의한 시간 지연효과가 동시에 발생하는 온도 보상에는 적용이 불가능 하게 된다.

본 논문에서는 SMART 노심출구 온도 측정값을 보상하는 새로운 보상방법을 고안하여 SMART의 출력 급증발 및 급감발시 모사계산을 통하여 그 효용성을 입증하였다. 제안된 온도 동적 보상 방법은 디지털 필터를 이용한 동적 온도 보상 방법에 중성자 출력 변화를 보상 변수로 첨가한 동적 보상 방법이다. 2절에서는 SMART 노심출구 온도 측정에 대한 개략적인 설명과 3절에서는 디지털 동적 보상 방법의 고안 및 설계를 설명하고 4절에서는 SMART 모의 계산 결과를 보여주고 있다. 마지막으로 본 논문의 결론을 정리하였다.

2. SMART 노심출구 온도 측정

SMART 노심출구 온도 측정값은 원자로 제어계통과 디지털 노심보호계통 및 노심 감시계통에 입력된다. SMART에서 출력 제어 방식으로 채택한 노심 출구 온도 제어 방식은 원자로 출력에 따라 미리 설정된 노심 출구온도를 유지하도록 원자로 출력을 조절하고 있다.[(4)] 즉, 계측된 노심 출구 온도 측정값의 편차에 따라 제어봉을 삽입/인출하여 노심 출력을 제어한다. 또한 노심 출구 온도 측정값은 디지털 노심 보호계통 및 감시계통으로 입력되어 노심 출력 계산에 사용된다.

일체형 원자로로 설계되는 SMART는 노심 출구온도 측정 센서를 원자로 내부 구조물 설

치 특성으로 인하여 노심 출구에 설치할 수 없다. 따라서 노심 출구온도를 측정하기 위한 온도 측정기는 그림 1에서 보는 바와 같이 증기 발생기 입구에 설치하게 된다. 노심에서 나온 냉각재는 노심 상부 플레넘과 환형공동을 경유하여 주냉각재 펌프로 흡입되어 증기발생기 상부로 토출된다. 이로 인하여 노심 출구 온도 변화는 노심을 떠난 냉각재가 증기발생기 입구까지 도달할 때까지 노심 출구 온도 계측기의 응답이 지연될 수 밖에 없다.

정상 운전 중에는 노심 출구 온도 센서는 실제의 노심 출구 온도 측정값을 제공할 수 있지만 천이상태에서는 온도 측정센서의 응답 지연과 측정위치 차이에 의한 냉각수 전달 지연 효과로 인하여 실제 냉각재 노심 출구 온도와 측정값에는 큰 차이를 보이게 된다. 그림 2는 출력 급감발의 경우 SMART의 노심 출구 온도와 노심 출구 온도 측정값변화를 계통 분석 전산코드인 TASS[5]를 이용하여 계산한 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 노심 출구 온도 측정값은 노심 출구 온도에 비하여 천이상태 중에는 시간 지연 효과로 인하여 최대 2.6ºC의 온도차이를 보여주고 있으며, 상부 플레넘, 환형 공동 등 측정위치 차이에 의한 온도 측정의 시간 지연 상수는 11초를 나타내고 있다.

3. 디지털 동적 보상방법

3.1 노심 출구온도 상태 방정식

노심 출구 온도 측정에서 시간 지연은 노심 출구에서 노심 출구 측정위치까지 냉각재 전달 시간 및 온도 측정센서의 응답 시간으로 구분된다. 그림 3은 노심 출구 온도 측정 센서를 도식적으로 보여주고 있다. 연속 시간계에서의 노심 출구 온도, 노심 출구 측정 위치의 냉각재 온도 및 온도 측정 선서의 측정 값의 상태 방정식은 다음과 같이 간단한 상태 방정식으로 표시 할 수 있다.

$$\frac{dT_h}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \cdot \frac{dN}{dt} \tag{1}$$

$$\frac{dT_s}{dt} = -\frac{1}{\tau_p} \cdot \frac{d}{dt}\left(T_s - T_h\right) \tag{2}$$

$$\frac{dT_m}{dt} = -\frac{1}{\tau_m} \cdot \frac{d}{dt}\left(T_m - T_s\right) \tag{3}$$

여기서 각 변수는 다음과 같다.

T_h: 노심 출구 온도

T_s: 노심 출구 온도를 측정하기 위한 측정센서 위치(증기발생기 입구)의 온도

T_m: 노심 출구 온도 측정값

N: 중성자속 출력

τ_p: 노심 상부 배럴, 주냉각재 펌프, 환형공동의 냉각재 전달 지연 시간 상수

τ_m: 냉각재 온도 측정 기기의 응답 지연에 의한 시간 상수(SMART에서 사용하는 온도측정 센서인 RTD의 경우 8초임).

τ_c: 냉각재 노심 출구 온도와 중성자 출력의 보상 계수(SMART의 정상운전 경우 $0.20°C/\%FP$ 임).

위 식 중에서 식 (2)와 (3)은 vector 상태 방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b} \cdot u, \tag{4}$$

여기서 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} T_s \\ T_m \end{bmatrix}$, $u = T_h$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_p} & 0 \\ \frac{1}{\tau_m} & -\frac{1}{\tau_m} \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_p} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

SMART에서는 디지털 컴퓨터를 제어, 감시 및 보호 계통 등에 사용함으로 온도 측정 신호는 계측신호주기(sampling period)에 따라 불연속적으로 계통으로 입력된다. 따라서 연속 시간계의 상태 방정식은 계측신호주기에 따른 불연속 시간계 상태 방정식으로 변환하여야 한다. 식(1)을 변환하면 다음과 같다.

$$T_h^{k+1} = T_h^k + \frac{1}{\tau_c} \cdot \left(N^{k+1} - N^k \right) \tag{5}$$

식 (4)를 계측신호주기(T) 동안 적분하여 불연속 시간계 상태 방정식으로 변환하면,[6]

$$\mathbf{x}(k+1) = \tilde{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{x}(k) + \hat{\mathbf{b}} \cdot u(k) \tag{6}$$

여기서 $\tilde{\mathbf{A}} = e^{\mathbf{A}T} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$,

$$\tilde{\mathbf{b}} = \left(\int_0^T e^{\mathbf{A}t} dt \right) \mathbf{b} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix},$$

$$A_{11} = e^{-\frac{T}{\tau_p}}, \ A_{12} = 0, \ A_{21} = \frac{\tau_p}{\tau_p - \tau_m} \cdot \left(e^{-\frac{T}{\tau_p}} - e^{-\frac{T}{\tau_m}} \right), \ A_{22} = e^{-\frac{T}{\tau_m}},$$

$$B_1 = 1 - e^{-\frac{T}{\tau_p}}, \quad B_2 = \frac{\tau_p}{\tau_p - \tau_m} \cdot \left(\tau_p (1 - e^{-\frac{T}{\tau_p}}) - \tau_m (1 - e^{-\frac{T}{\tau_m}}) \right).$$

식 (6)에서 중간 매개변수 T_s 를 정리하면

$$B^* T_h^k = A_1^* T_m^{k+1} + A_2^* T_m^k + A_3^* T_m^{k-1} \tag{7}$$

여기서 $A_1^* = \dfrac{1}{A_{21}}$, $A_2^* = -\dfrac{A_{11} + A_{22}}{A_{21}}$, $A_3^* = \dfrac{A_{11} A_{22}}{A_{21}}$, $B^* = B_1 + B_2$.

식 (7)을 식(5)에 대입하면

$$T_h^{k+1} = (1 - B^*) T_h^k + \frac{1}{\tau_c} \cdot \left(N^{k+1} - N^k \right) + A_1^* T_m^{k+1} + A_2^* T_m^k + A_3^* T_m^{k-1} . \tag{8}$$

3.2 디지털 동적 온도 보상 방법

식(8)을 이용하여 온도 측정값을 디지털 동적 보상할 수 있다. 즉, 증기발생기 입구에서 측정한 노심 출구 온도 측정값과 노심 중성자 출력 측정값을 이용하여 노심 출구 온도 측정에서 발생되는 모든 시간 지연 효과를 보상한 노심 출구 온도 보상 측정값를 얻을 수 있다.

$$T_{comp}^{k+1} = (1 - B^*) T_{comp}^k + \frac{1}{\tau_c} \cdot \left(N^{k+1} - N^k \right) + A_1^* T_m^{k+1} + A_2^* T_m^k + A_3^* T_m^{k-1} . \tag{9}$$

여기서 T_{comp}^k 는 시간 t=kT주기에서 계산된 노심 출구 온도 측정 보상값을 의미한다. 이와 같이 제안된 디지털 동적 보상 방법은 노심출구 온도 측정값 뿐만 아니라 중성자속 출력을 입력으로 사용하여 온도 측정의 시간 보상을 수행하는 것이다. 따라서 제안된 디지털 동적 보상 방법은 측정 센서에 의한 시간 지연효과뿐만 아니라 노심 출구온도 측정위치 차이에 의한 냉각재 전달 시간 지연 효과도 보상할 수 있다.

4. 모의계산 결과

4.1 온도 측정값만 이용한 동적 보상

먼저 KNSP의 노심 감시계통 및 보호계통에서 채택한 디지털 동적 보상방법 즉, 온도 측정값만 사용하는 동적 보상방법을 이용하여 SMART 출력 급 감발의 경우에 노심 출구 온도 측정값 및 보상값을 계산하였고 계산결과를 그림 4에 나타내었다. 온도 측정 계기의 측정 주기는 0.1초로 가정하여 노심 출구 온도 측정값의 동적 보상을 위한 디지털 필터의 계수들은 계산하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 온도 측정값만 이용한 동적 보상은 측정 센서의 응답지연효과를 보상할 수 있지만 측정위치 차이에 의한 냉각재 전달 지연효과를 보상할 수가 없기 때문에 측정온도 보상값도 여전히 실제의 노심 출구 온도와는 큰 차이를 보이고 있다.

4.2 노심 중성자 출력과 온도 측정값을 이용한 동적 보상

본 논문에서 제안된 노심 출구 온도 디지털 동적 보상방법은 노심 중성자 출력과 온도 측정값을 이용한 디지털 동적 보상 방법이다. 앞에서와 마찬가지로 온도 측정 계기의 측정 주기를 0.1초로 가정하여 디지털 필터의 계수들은 계산하였다. 계산된 필터 계수를 적용하여 SMART 출력 급 감발의 경우에 적용하여 보상 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서

보는 바와 같이 제안된 디지털 필터에 의한 동적 보상을 거친 측정값은 측정위치에 따른 시간지연효과와 측정센서의 응답 지연효과를 모두 보상하여 온도측정 보상값은 실제 노심출구 온도와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림 6에서는 실제 노심 출구온도와 측정값 또는 디지털 동적 온도 보상값과의 오차를 보여주고 있다. 디지털 동적보상을 거친 최대 측정 오차는 0.6°C로 동적 보상을 거치지 않은 온도 측정값 오차 2.6°C와 비교할 때 최대 오차 크기가 77% 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림 7은 SMART의 출력 급 증발의 경우 노심 출구온도와 측정값 및 동적 보상값 변화를 보여주고 있다. 출력 증발의 경우에도 제안된 동적 보상 방법은 실제 노심출구온도와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 8은 이 경우 최대 온도차이를 보여주고 있다. 동적보상을 거친 온도 측정값의 실제 노심 출구 온도와 최대 오차는 0.5°C 이하로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

SMART 노심 출구온도 측정값의 시간 지연 효과를 보상하기위한 디지털 동적 보상 방법을 제안하였다. 제안된 디지털 동적 보상 방법은 노심출구 온도 측정값 뿐만 아니라 중성자속 출력을 입력으로 사용하여 온도 측정의 시간 보상을 수행하는 것이다. 제안된 디지털 동적 보상 방법은 측정 센서에 의한 시간 지연효과뿐만 아니라 노심 출구온도 측정위치 차이에 의한 시간 지연 효과도 보상할 수 있는 것으로 나타났다.

제안된 디지털 동적온도 보상방법을 SMART의 출력 급증발 및 급감발 천이상태 해석에 적용한 결과 노심출구온도 측정 보상값은 실제 노심 출구온도를 잘 모사하는 것으로 나타났다. 실제 노심출구 온도와 노심출구 온도 측정값의 차이는 디지털 동적 보상을 사용하지 않을 경우와 비교하여 77% 이상 줄어 드는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고 문헌

(1) Wu Yan, et.al “Design of a Dynamic Compensated Temperature Sensor”, Transaction of ANS, Vol. 63, 1991
(2) A. Cahyono, et.al, “Application of Neural Networks to Measurement of Temperature Sensor Response Time”, Transaction of ANS, Vol. 63, 1991
(3) “한국형 표준원전 계통 실무” KAERI/GP-108/96, 한국원자력연구소, 1996
(4) 이두정 외, “SMART 계통 제어 개념”, KAERI/TR-1192, 한국원자력연구소, 1998
(5) 심석구 외, “TASS 코드 특정 기술 주제 보고서, 제 1 권: TASS 코드 기술 보고서,” KAERI/TR-845/97, 1997
(6) Chi Tsong Chen, “Analog and Digital Control System Design: Transfer Function, State Space and Algebraic Methods”, Saunders College Publishing, 1993

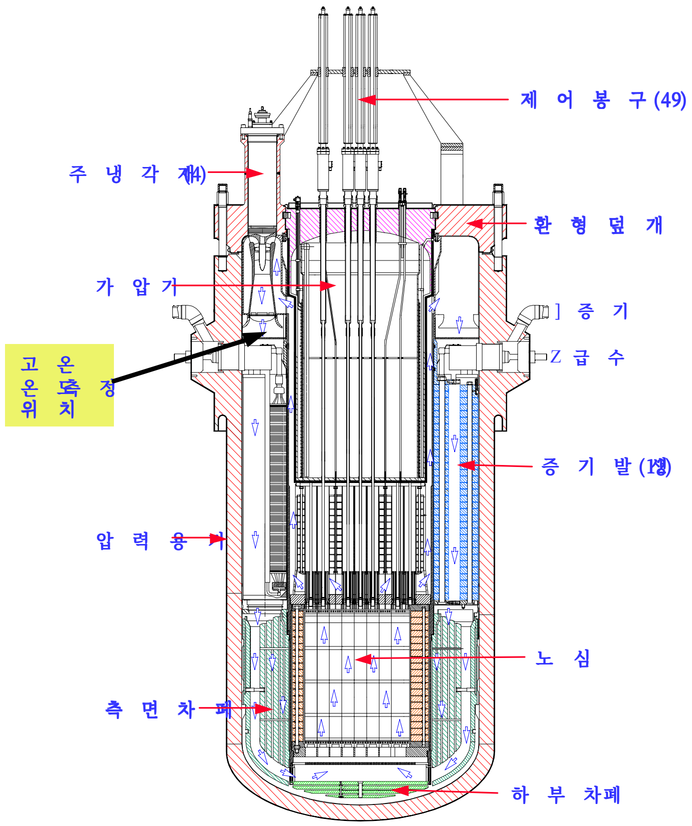

그림 1. SMART 원자로 집합체 및 노심출구 온도 측정 위치

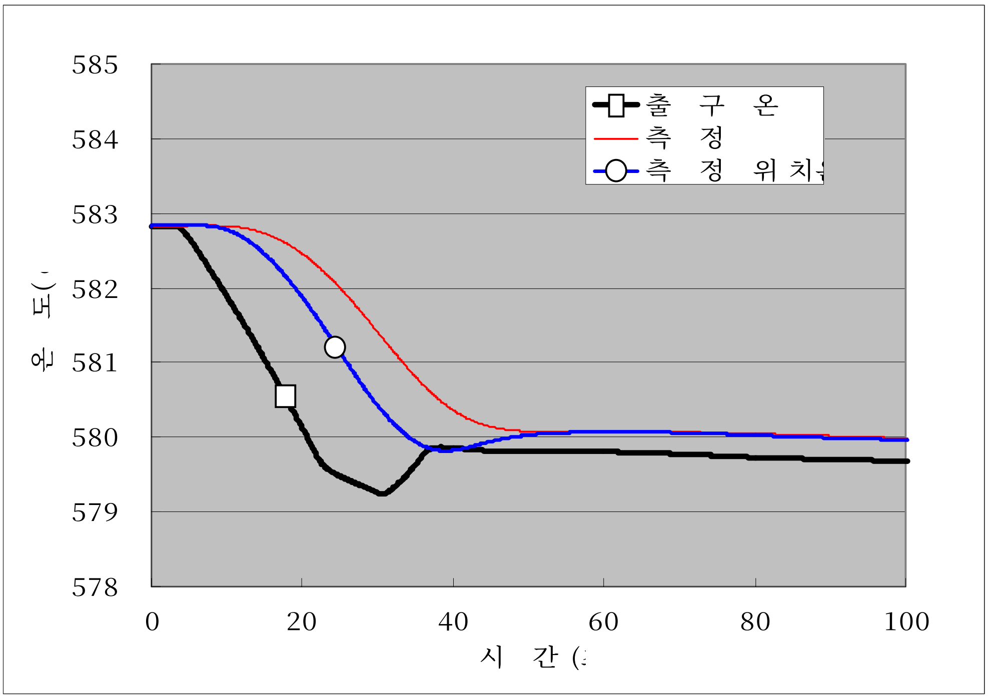

그림 2. 노심출구 온도 변화 및 측정값 변화

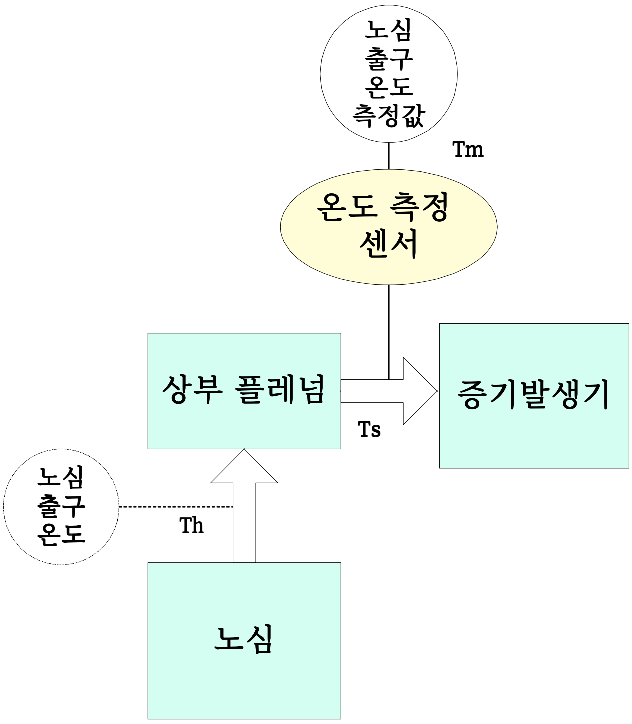

그림 3. SMART 노심출구 온도 측정 장치 개략도

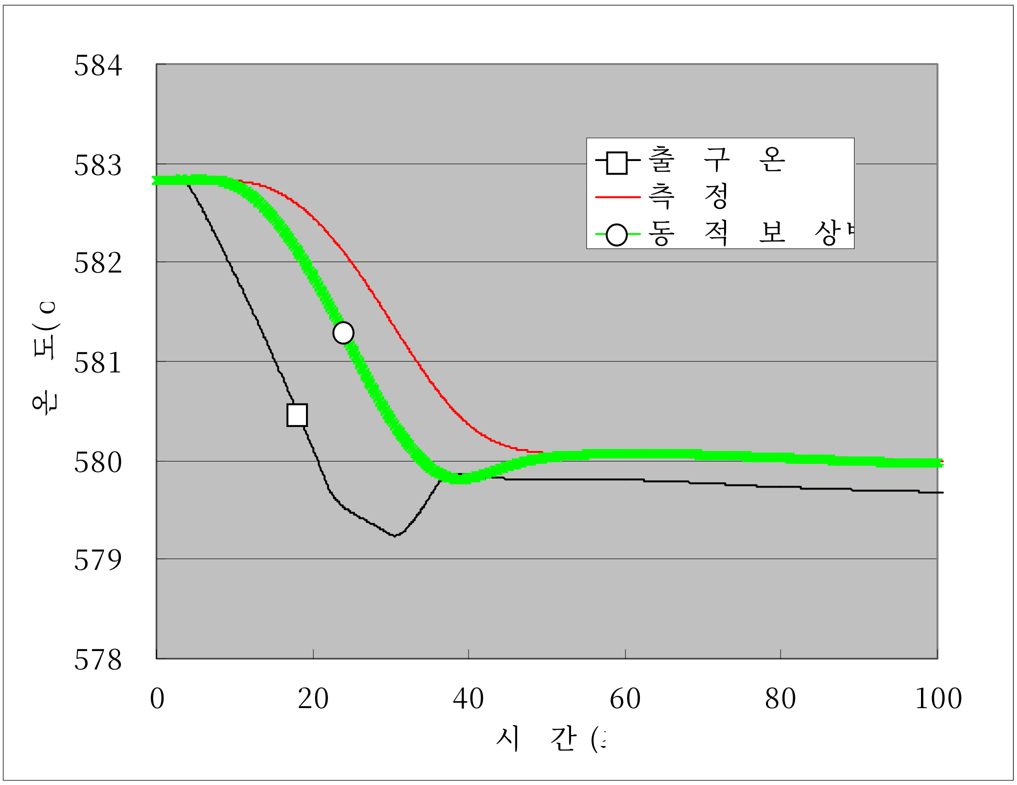

그림 4. 온도 측정값만 이용한 동적 보상 방법 모의계산 결과

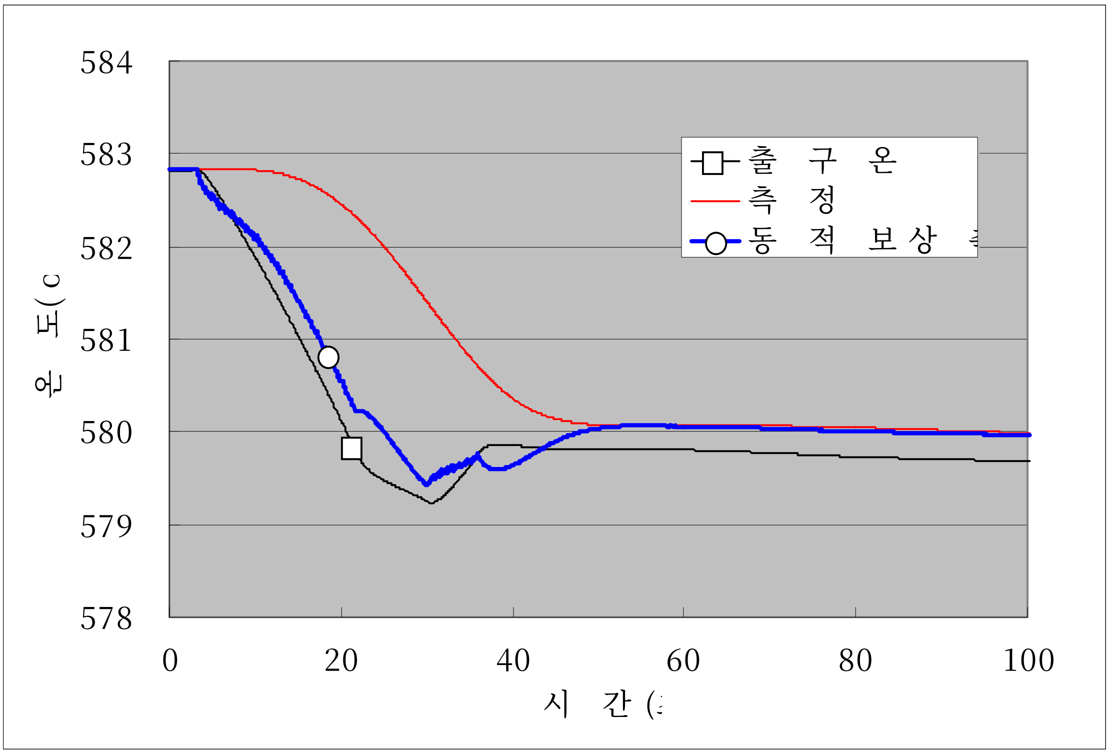

그림 5. 출력 급감발시 디지털 동적 보상에 의한 노심출구 온도

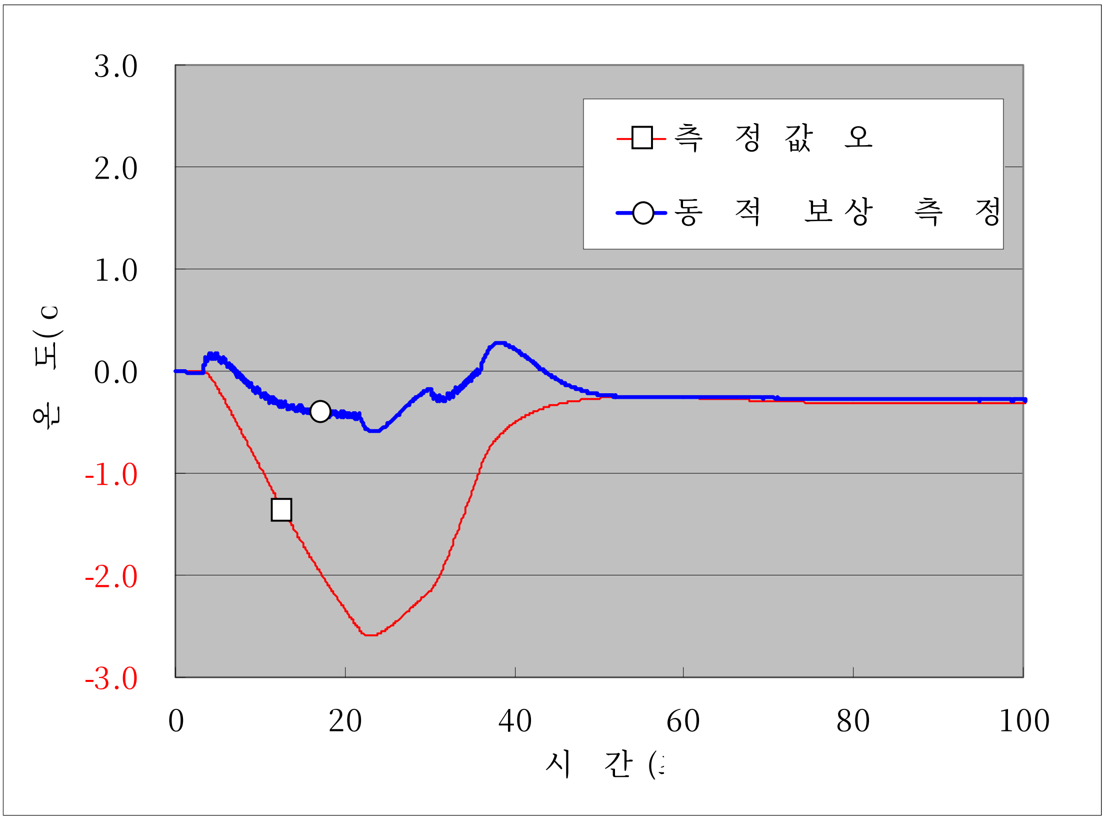

그림 6. 출력 급감발시 디지털 동적 보상에 의한 노심출구 온도 오차 및 측정값 오차

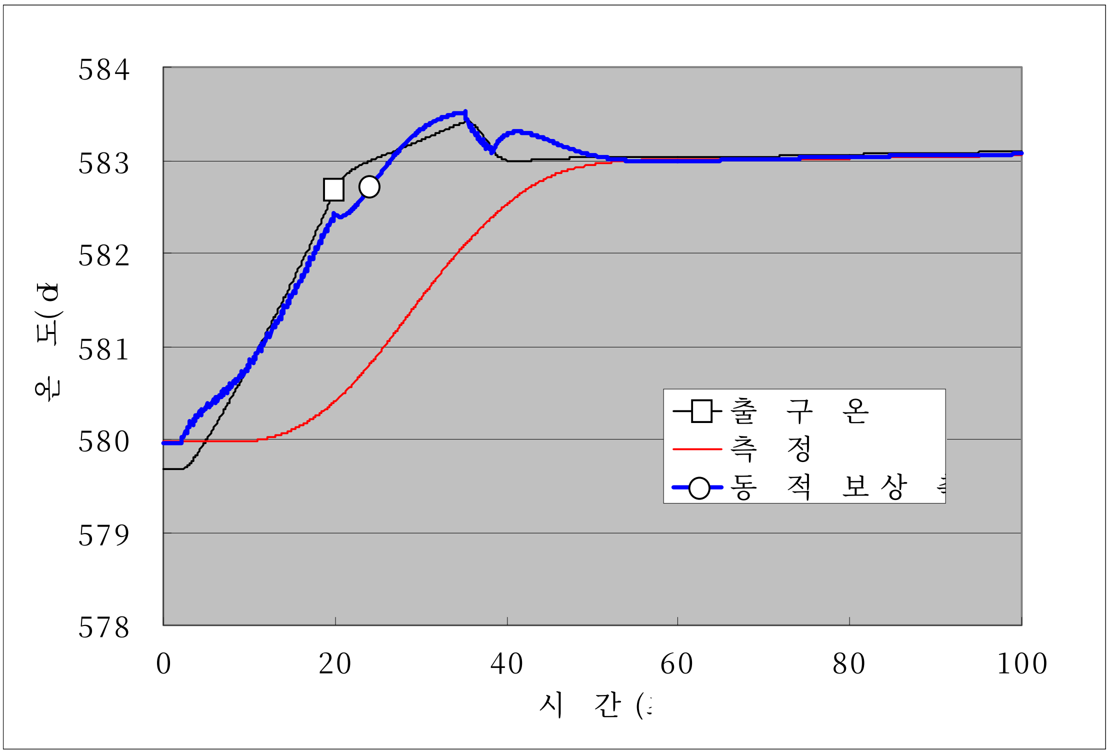

그림 7. 출력 급증발시 디지털 동적 보상에 의한 노심출구 온도

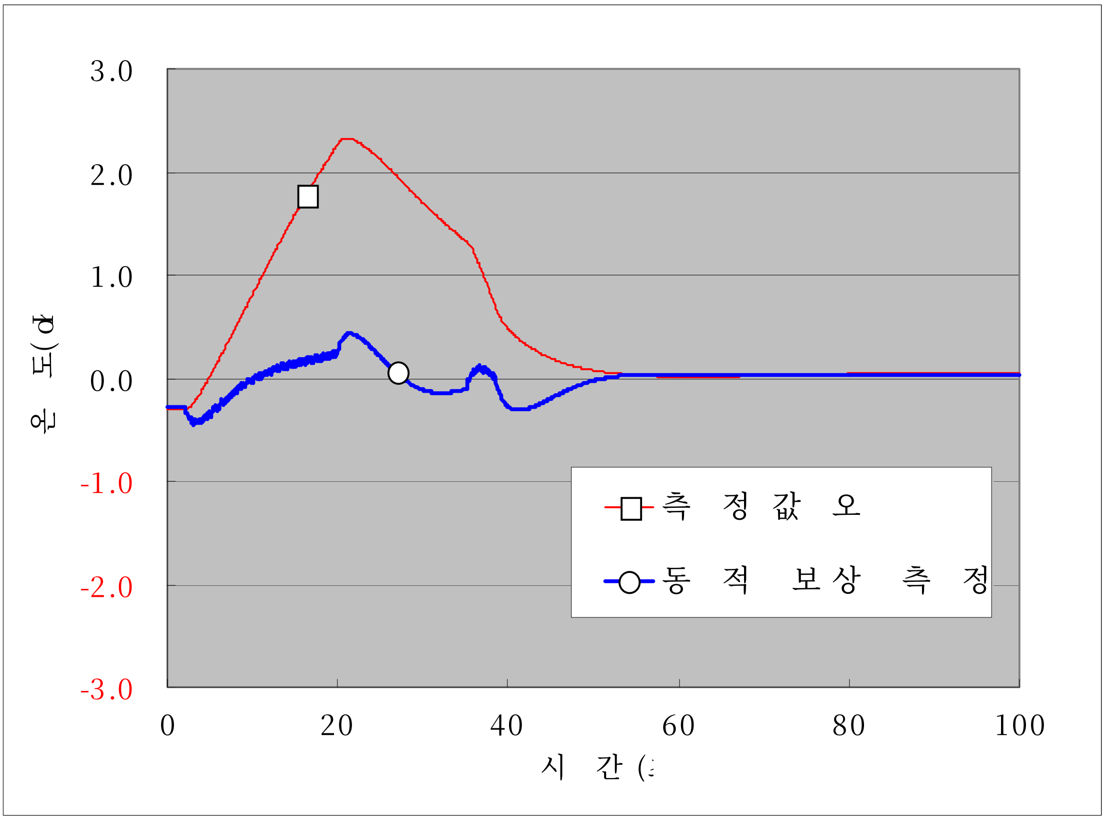

그림 8. 출력 급증발시 디지털 동적 보상에 의한 노심출구 온도 오차 및 측정값 오차