

## CANDU의 감속재온도제어기 분석

이윤희, 하재홍, 신해근, 김동완, 남상구

한국원자력연구소

### 요 약

CANDU에서 감속재온도제어기는 칼란드리아 출구에서의 감속재온도를 일정하게 유지하기 위한 제어 프로그램이다. 본 연구에서는 감속재온도제어 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 주감속재계통의 동특성모델식을 적용하여 모의실험을 수행하였다. Setback 모의실험에 대하여는 설정온도를 적절히 유지하였으나, Stepback 모의실험에 대하여는 설정온도를 크게 벗어나는 오버슈트를 나타내었다. 되먹임제어기의 PID 파라메타를 최적화하고, 정상상태모델에 근거하여 앞먹임제어기의 설계를 개선함으로써 Stepback 모의실험에서 나타난 오버슈트를 줄일 수 있었다.

### 1. 서 론

CANDU에서는 발전소 컴퓨터를 이용하여 칼란드리아 출구에서의 감속재 온도를 제어하고 있다. 주감속재계통에서 칼란드리아 출구에서의 감속재 온도를 제어 대상으로 선정한 이유는 첫째, 온도 측정에서 공정 출구가 가장 대표적인 측정 위치이고, 둘째, 되먹임제어가 가능하기 때문에 공정이 과도상태일 경우 계통을 적절하게 제어할 수 있으며, 셋째, 감속재 수위 제어를 가능하게 하며, 넷째, Shutdown 동안 감속재 온도를 설정치로 유지할 수 있기 때문이다. 발전소 컴퓨터 내에 프로그램화된 감속재온도제어기는 칼란드리아 출구에서 측정된 감속재 온도를 설정치와 비교한 후, 감속재 열교환기로 유입되는 기기냉각

수의 양을 조절함으로써 칼란드리아 출구에서의 감속재 온도를 69℃로 유지시킨다<sup>(1)(2)</sup>. 열교환기에는 24" 온도제어밸브와 8" 온도제어밸브가 각각 1개씩 설치되어 있으며 이들 밸브의 개도는 컴퓨터에 의해 자동으로 제어된다. 감속재온도제어기는 기본적인 PID 피드백 제어 신호뿐만 아니라 원자로출력 변동에 따라 신속하게 감속재 온도를 조절하기 위해서 원자로출력을 피드포워드 제어 신호로 사용하여 온도제어밸브의 개도를 조절하고 있다. 그림 1은 주감속재계통의 주요 기기 구성을 보여주고 있다.

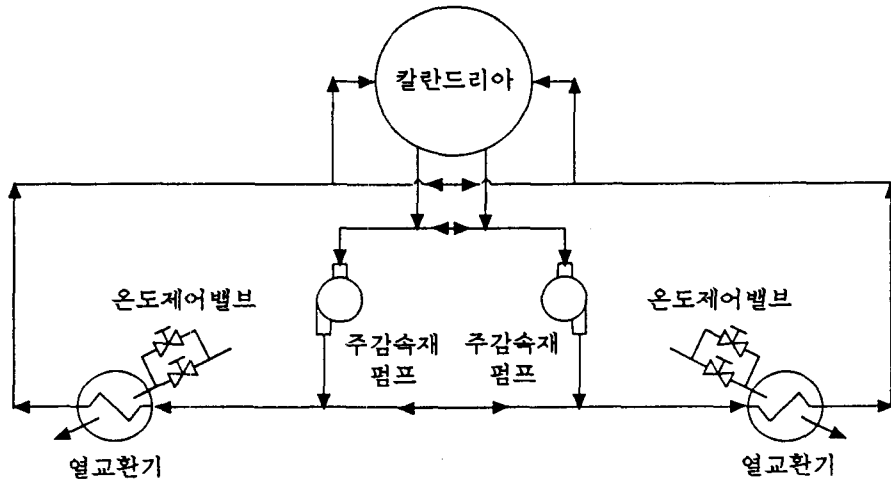


그림 1. 주감속재계통의 주요 기기 구성도

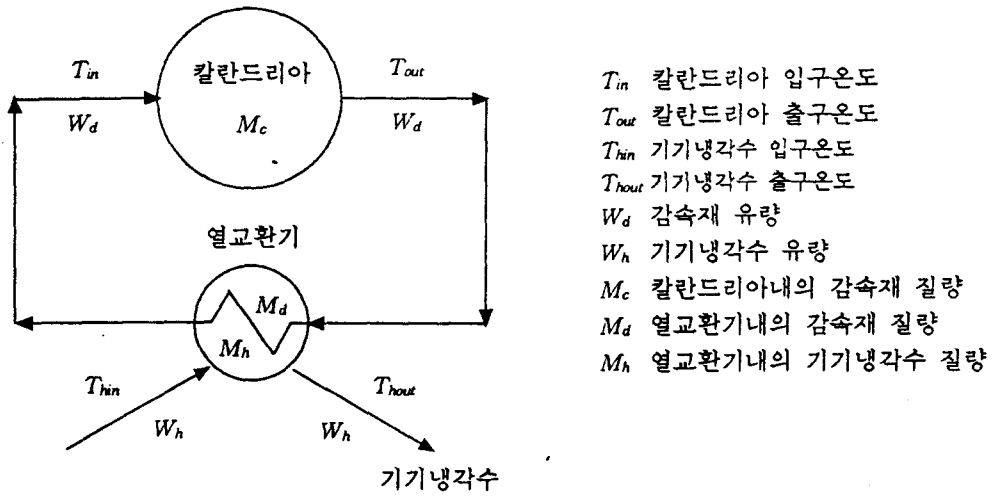
본 논문에서는 주감속재계통의 단순화된 동특성모델식을 적용하여 감속재온도제어기의 특성을 분석하였다. 그리고 최적의 PID 파라메타를 설정하고, 정상상태모델에 근거하여 피드포워드 제어를 개선한 후, 그 결과를 고찰하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 주감속재계통의 동특성모델

그림 2는 모델링을 위해 그림 1의 주감속재 계통을 단순화한 그림이다. 원래의 2개 루프를 1개 루프로 모사 했으므로 열교환기 및 온도제어밸브의 용량은 2배로 계산한다.

일반적으로 모델링의 대상이 되는 대부분의 공정계에서는 유체 온도와 부피가 동시에 변할 수 있다. 따라서 상세한 동특성 모델을 수립하기 위해서는 에너지뿐 아니라 물질수



$T_{in}$  칼란드리아 입구온도  
 $T_{out}$  칼란드리아 출구온도  
 $T_{hin}$  기기냉각수 입구온도  
 $T_{hout}$  기기냉각수 출구온도  
 $W_d$  감속재 유량  
 $W_h$  기기냉각수 유량  
 $M_c$  칼란드리아내의 감속재 질량  
 $M_d$  열교환기내의 감속재 질량  
 $M_h$  열교환기내의 기기냉각수 질량

그림 2. 주감속재 계통의 공정 모델

지식을 함께 고려해야 한다<sup>(4)</sup>. 그러나 본 논문에서는 모델식을 단순화하기 위해서 칼란드리아들 다음과 같이 가정한다.

- 가정 1. 칼란드리아 내부의 온도 변화에 따른 부피 변화는 무시할만하다.
- 가정 2. 칼란드리아로 들어가고 나오는 중수의 유량은 같으며 항상 일정하다.
- 가정 3. 칼란드리아 내부에 있는 중수의 질량은 항상 일정하다.
- 가정 4. 칼란드리아에 들어간 중수는 완전 혼합된다.
- 가정 5. 칼란드리아에서 배출된 중수의 온도는 칼란드리아 내부의 온도와 같다.

위의 가정으로부터 칼란드리아에 축적되는 질량의 변화량이 없으므로 물질수지식을 고려하지 않더라도 계산결과의 정확성은 유지할 수 있다. 또한 위의 가정으로부터 칼란드리아에서 에너지수지식은 다음과 같이 얻어진다.

$$M_c C \frac{dT_{out}}{dt} = Q_c + W_d C (T_{in} - T_{out})$$

칼란드리아에서 사용한 가정들을 열교환기의 튜브측(감속재측)에 적용하고, 감속재와 기기냉각수 사이의 열교환율을  $H_{tr}$ 로 단순화하면 아래의 에너지수지식을 얻을 수 있다.

$$M_d C \frac{dT_{in}}{dt} = W_d C (T_{out} - T_{in}) + H_{tr} [(T_{hin} + T_{hout})/2 - (T_{in} + T_{out})/2]$$

열교환기의 셀축 (기기관각수축)에서는 아래의 에너지수지식을 얻을 수 있다.

$$M_h C \frac{dT_{hout}}{dt} = W_h C (T_{hin} - T_{hout}) + H_{tr} [(T_{in} + T_{out})/2 - (T_{hin} + T_{hout})/2]$$

비선형 미분방정식이므로 수치적분을 수행하면 출력변수  $T_{out}$ 을 유일하게 결정할 수 있다.

## 2.2 CANDU의 감속재온도제어기 및 모의실험 결과<sup>(2)(3)</sup>

온도오차는 아래 식과 같이 설정치와 측정치의 차이로 표현된다.

$$ERR(n) = T_{set} - T_{out}$$

온도제어밸브의 개도 조절을 위한 제어 신호는 아래 식과 같이 표현된다.

$$LIFT(n) = LIFF(n) - [LIFP(n) + LIFI(n) + LIFD(n)]$$

여기서,  $LIFF(n)$ 은 앞먹임제어 성분으로

$$LIFF = 0.325 \times PLIN + 0.1 \text{ 이고, 이 식에서 } PLIN \text{은 선형 원자로출력이다.}$$

$LIFP(n)$ 은 비례제어에 대한 밸브개도성분으로

$$LIFP(n) = K_C \times ERR(n) \text{ 이고, 이 식에서 비례이득은 } K_C = 1/64 \text{ 이다}^{(2)}.$$

$LIFI(n)$ 은 적분제어에 대한 밸브개도성분으로

$$LIFI(n) = LIFI(n-1) + K_C \frac{T_S}{T_I} ERR(n) \text{ 이고, 이 식에서 적분시간은 } T_I = 100 \text{ 초이며}$$

샘플링시간은  $T_S = 2$  초이다<sup>(2)</sup>.

$LIFD(n)$ 은 미분제어에 대한 밸브개도성분으로

$$LIFD(n) = K_C \frac{T_D}{T_S} [0.3ERR(n) + 0.1ERR(n-1) - 0.1ERR(n-2) - 0.3ERR(n-3)]$$

이고, 이 식에서 미분시간은  $T_D = 20$  초이다<sup>(2)</sup>.

적분 제어에 대한 밸브개도성분을  $-1.0 \leq LIFI \leq 1.0$  로 제한하여 와인드업 (Windup) 을 방지한다. 온도제어밸브의 개도 조절을 위한 합성밸브개도 신호를  $0 \leq LIFT \leq 1.0$  으로 제한하여 완전닫힘과 완전열림을 나타낸다.

정상운전시 온도제어밸브의 개도는 아래 식에 의해 결정된다.

$$LIFS(n) = 2.0 \times LIFT(n), \quad LIFB(n) = (LIFT(n) - 0.45) / 0.55$$

여기서,  $LIFS(n)$ 은 8" 온도제어밸브의 개도이고,  $LIFB(n)$ 은 24" 온도제어밸브의 개도이

다. 이들 밸브의 개도를 다음과 같은 제한하여 완전닫힘과 완전열림을 나타낸다.

$$0 \leq LIFS \leq 1.0, \quad 0 \leq LIFB \leq 1.0$$

이제 주감속재계통의 공정모델식을 적용하여 CANDU의 감속재온도제어기 성능을 평가한다. 그림 3은 처음 100초 동안은 원자로출력을 100% 전출력으로 유지하다가 Setback을 수행한 결과를 보여준다. Setback으로 인하여 출력이 60% 출력까지 감발 (0.1% 출력/초) 된 후 10분내에 원자로 출력을 다시 100% 출력까지 상승 (0.1% 출력/초) 시키는 경우를 시뮬레이션 하였다. Setback시험 결과, 8" 온도제어밸브만으로 칼란드리아 출구에서의 감속재 온도가 설정치 근처에서 유지되고 있음을 알 수 있다.

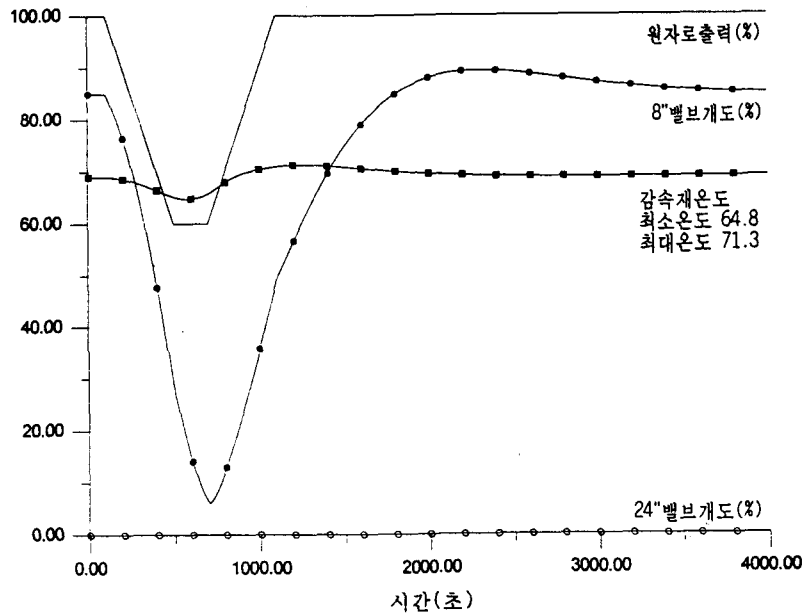


그림 3. CANDU의 감속재온도제어기를 사용한 Setback 모의실험

그림 4는 원자로출력이 Stepback으로 인하여 갑자기 0% 출력으로 떨어진 후 30분내에 원자로 출력을 60% 출력까지 상승시키는 경우를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 원자로출력이 0% 출력으로 떨어지면 감속재 온도가 함께 낮아지고 이 온도는 매우 천천히 증가한다. 또한 감속재 온도가 86℃에 이르기까지 온도제어밸브가 작동하지 않고 있다. 온도제어밸브가 뒤늦게 동작하게 된 이유는 다음과 같다. 원자로 출력이 0% 출력으로 떨어짐으로 인하여 감속재 온도는 오랜시간동안 설정온도보다 낮아지

고, 이것이 제어기의 적분제어성분을 크게 증가시킨다. 이렇게 증가된 적분항 때문에 온도 제어밸브는 그림 4와 같은 오버슈트를 일으킨다.

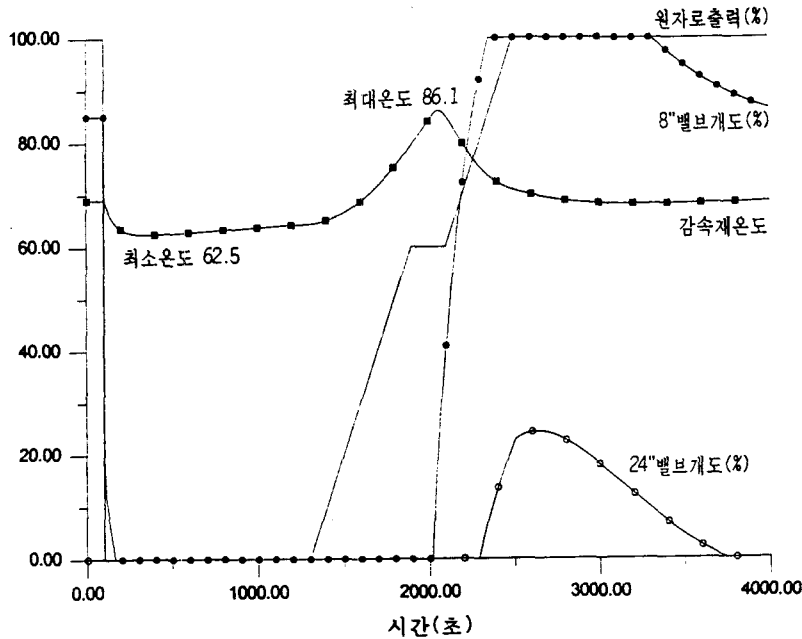


그림 4. CANDU의 감속재온도제어기를 사용한 Stepback 모의실험

### 2.3 개선된 감속재온도제어기 및 모의실험 결과

2.2절에 기술한바와 같이 CANDU의 감속재온도제어기는 되먹임제어기와 앞먹임제어기로 구성되어 있다. 이 방법의 장점은 앞먹임제어기가 원자로출력 변화에 대해서 예측적인 제어작용을 줄 뿐만아니라 되먹임제어기의 안정성에 영향을 주지 않고 독립적으로 조율이 가능하다는 점이다<sup>(4)</sup>. 따라서 본 논문에서는 Cohen과 Coon<sup>(5)</sup>이 개발한 1/4 감쇄비응답 (Quarter-Decay Ratio Response) 조율방식을 사용하여 되먹임제어기의 PID 파라메타를 적절히 설정하고 최적화한 후, 독립적으로 앞먹임제어기를 정상상태모델식에 근거하여 재설계 하였다. 정상상태모델식은 2.1절에서 제시한 동특성모델식의 좌변을 0으로 둔 것이다. 기존의 CANDU에서는 앞먹임제어신호를 선형 원자로출력의 비례관계로 직접 계산하도록 설계되어있다. 그러나 본 논문에서는 임의의 선형 원자로출력에서 정상상태를 만족하기 위해 필요한 기기냉각수 유량을 정상상태모델식으로부터 예상한 후, 이 유량에 비례하는 밸브개도신호를 앞먹임제어신호로 사용하였다.

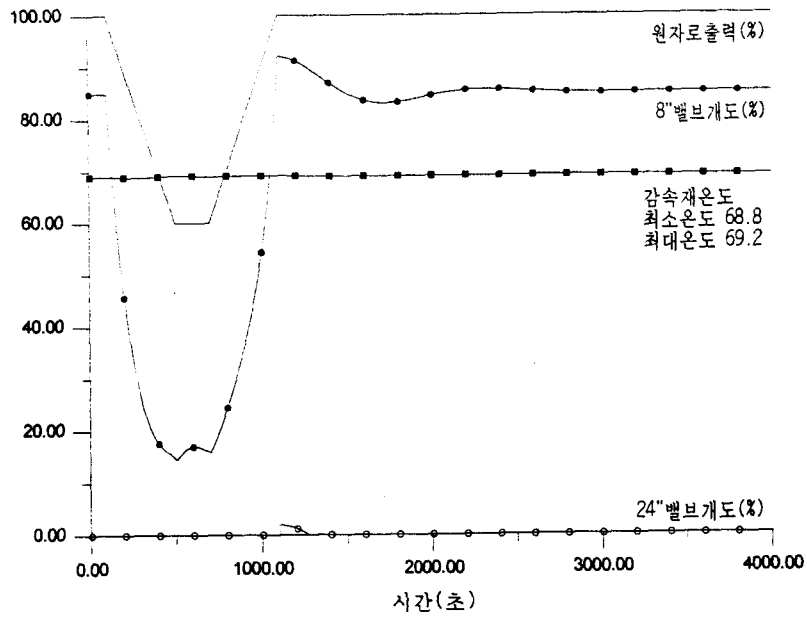


그림 5. 개선된 감속재온도제어기를 사용한 Setback 모의실험

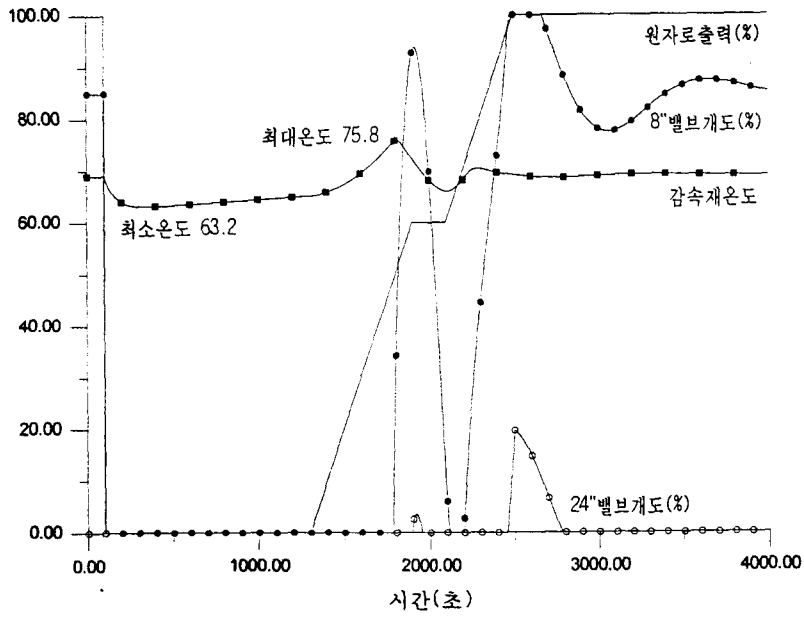


그림 6. 개선된 감속재온도제어기를 사용한 Stepback 모의실험

개선된 감속재온도제어기를 사용하여 모의실험을 수행한 결과, Setback 모의실험에 대하여는 그림 5에서와 같이 거의 설정치를 유지하고 있으며, Stepback 모의실험에 대하여는 온도 상승을 75.8℃까지 억제시킬 수 있었다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 주감속재계통의 동특성모델식을 적용하여 CANDU 감속재온도제어기의 모의실험을 수행하였다. 1/4 감쇄비응답 조율방식을 사용하여 되먹임제어기의 PID 파라메타를 개선하고, 정상상태모델에 근거하여 앞먹임제어기의 설계를 개선함으로써 CANDU 감속재온도제어기의 모의실험에서 나타난 오버슈트를 해소할 수 있었다. 앞먹임제어기는 되먹임제어기의 안정성에 영향을 주지 않으므로 독립적으로 조율을 수행하였다. 본 연구 결과를 토대로 냉각재상실사고나 전원상실사고 등을 고려한 좀더 정확한 모델링을 얻는다면 CANDU 감속재온도제어기의 설계 개선을 도모할 수 있을것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. C.T. Brooks, etc., "Main Moderator System", 86-32110/63210-DM-000, Rev.0, 1992.
2. H.S. Yim, etc., "Moderator Temperature Control", 86-63210-PS-121, Rev.0, 1992.
3. M. Cormier, "Input Data to MODSTBOIL MOD 1.0", 86-03500-AR-001, Rev.0, 1991.
4. D.E. Seborg, T.F. Edgar and D.A. Mellichamp, "Process Dynamics and Control", John Wiley & Sons, 1989.
5. G.H. Cohen and G.A. Coon, "Theoretical Considerations of Retarded Control", Trans. ASME 75, 827 (1953).