

저장조냉각계통의 신뢰성향상을 위한
제어시스템 구현

◦ 이 철 용 *, 변 기 호 *, 이 상 정 **

* 한국원자력연구소 궁정공학실

**충남대학교 공과대학 전자공학과

The Implementation of Control System for Enhancing
the Reliability of the Cooling System of Pool Storage

◦ Chul Yong Lee *, Kee Hoh Byeon *, Sang Jeong Lee **

* Dept. of Process Eng., KAERI

**Dept. of Electronic Eng., Chungnam National University

ABSTRACT

In this paper, a real-time fault tolerant control system has been designed for the cooling system of the spent fuel pool storage. The fault tolerant control system consists of the fault detection part, the redundant actuator part(main and backup pumps) and the controller implemented on programmable logic controller. This paper considers only the actuator fault whose detection is accomplished using Friedland's separated bias estimation method. This paper also shows the real-time experimental results from which it can be concluded that the designed fault tolerant control system exhibits satisfactory performance.

1. 서 론

시스템 기술이 대규모화되고 복잡해짐에 따라 자연적, 인위적 고장요인에 의해 시스템이 정상적인 동작을 못하는 경우 그 파급효과는 대단히 커질 수 있다. 특히 원자력 발전소나 항공기 산업에 있어서 시스템의 부분적 고장은 많은 인명과 재산 피해를 야기시킨다. 따라서 시스템의 신뢰도와 안전성 향상을 위한 연구가 중요한 과제로

부각되고 있는데, 최근에 디지털 시스템과 발달된 컴퓨터 기술을 이용하여, 시스템의 신뢰성을 향상시키는 연구가 수행되고 있다.

시스템의 신뢰도 향상을 위한 내고장성 제어시스템(FTCS; Fault Tolerant Control System) 방식은 시스템의 구성요소에서 고장이 발생하더라도 원하는 성능을 발휘할 수 있도록 하는 방식으로, 통상 시스템 내부에 중복(Redundancy) 혹은 백업(Back-up) 장치를 구성하여 전체 시스템의 신뢰도를 높인다.

본 논문에서는 원자력발전소의 사용후핵연료 저장조 냉각계통을 대상으로 기존 저장조 외부에 설치된 열교환기를 개량하여, 저장조내에 설치하였을 때 계통 운전시 프로세스(구동기) 고장을 탐지하고, 구동기 고장시에도 백업장치를 자동적으로 동작시키는 실시간(Real time) FTCS를 제안하였다. 또한 실제 실험을 통해서 실시간 FTCS의 타당성을 입증하였다.

2. 저장조 냉각계통의 모델링

그림1은 저장조 냉각계통의 구성도를 보여주고 있는데, 열교환기 자체에 부착된 유도전동기로 웨측 순환수를 순환시키고, 투보측은 냉각순환 펌프에 의해서 냉각수가 순환된다. 내고장성 제어계의 구성이 궁정의 구동장치에 대한 고장진단 및 제어이기 때문에 구동기는 웨측

유도전동기와 튜브측 냉각펌프가 된다. 따라서 구동기의 고장으로 저장조 온도에 영향을 크게 끼치는 열교환기의 튜브출구 냉각수 온도와 웰출구 순환수 온도를 상태변수로 정하였다. 저장조내에 설치된 열교환기의 동적해석은 유체흐름과 온도분포가 복합되어 있어 수학적인 모델링이 매우 복잡하기 때문에 관측된 실험데이터를 사용하는 다음과 같은 실험적인 방법을 사용하였다. 다변수 상태공간 모델의 일반적 형태로 부터 $rx1$ 관측벡터 y_t 와 상태 벡터 X_t 는 (2.1)식과 (2.2)식으로 표현된다.

$$y_t = A_t X_t + v_t \quad (2.1)$$

$$X_t = Q X_{t-1} + w_t \quad (2.2)$$

여기서 A_t 는 $rx1$ 디자인 행렬이고, 관측잡음 v_t ($rx1$) 는 평균값이 $E(v_t) = 0$ 이고, 잡음 covariance는 $R = E(v_t v_t')$ 이다. 또한 Q 는 $p \times p$ 전달(transition) 행렬, w_t 는 $E(w_t) = 0$ 이고 상태잡음 벡터의 잡음 covariance는 $Q = E(w_t w_t')$ 이다.

위와같은 상태공간 접근방식에서 제일 먼저하여야 할것은 Q, A, Q, R 을 구하는 모델식별(indentification) 과정이다. 초기값 X_0 과 $w_1, \dots, w_t, v_1, \dots, v_t$ 는 정규분포를 갖는 비상관(uncorrelated) 잡음벡터 변수일때 식(2.3)과 같은 likelihood함수가 최대가 될때까지 각 파라미터를 구하는 최대우도법(maximum likelihood method)을 사용한다.

$$\ln L(Y; \Theta) = -1/2 \sum_{t=1}^T \ln |\Sigma_t| - 1/2 \sum_{t=1}^T e_t' \Sigma_t^{-1} e_t \quad (2.3)$$

$$\text{단 } \Theta = (\Phi, Q, R), \Sigma_t = A_t P_{t-1} A_t' + R, e_t = y_t - A_t X_t$$

위와같은 상태공간 형태에 의한 다변수자기회귀 모델에서 최대우도법 추정에의한 모델링은 널리 알려진 Box 와 Jenkins (1970)[6], [7]의 방법을 이용하였으며, 냉각계통의 실험데이터 상태변수를 침지식 열교환기 튜브출구 냉각수 온도(y_{t1})와 웰출구 순환수온도(y_{t2})값을 이용하여 식 (2.4)과 같이 모델링되었다.

$$\begin{bmatrix} X_{t1} \\ X_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.003 & -0.003 \\ 0.015 & 0.989 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{t-1,1} \\ X_{t-1,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{t1} \\ w_{t2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} y_{t1} \\ y_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{t1} \\ X_{t2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{t1} \\ v_{t2} \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0.059 & 0.012 \\ 0.012 & 0.009 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0.0032 & 0 \\ 0 & 0.001 \end{bmatrix}$$

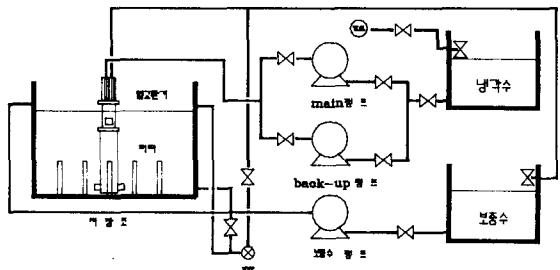


그림 1. 냉각계통 구성도

3. 고장검출

앞에서 구한 (2.4)식은 정상 운전시의 모델식이므로, 고장시 발생되는 바이어스(bias)를 첨가하여야 한다. 구동기 고장시 발생되는 바이어스는 상태방정식에 포함되고, 센서 고장시 발생되는 바이어스는 출력방정식에 포함되어 식(2.5)과 (2.6)로 표현되어진다.

$$X_t = Q X_{t-1} + B_{t-1} b + w_t \quad (2.5)$$

$$y_t = A_t X_t + C_t b + v_t \quad (2.6)$$

여기서 b 는 고장벡터이고, 프로세스내의 고장을 검출할때, 센서측의 고장 벡터 C_t 항은 영으로 둔다. 일반적으로 계통의 상태를 추정하기 위해서 칼만필터(Kalman filter)를 사용한다. 칼만필터는 계통의 동특성과 잡음 모델을 이용하여 계통의 상태를 추정하는것으로 많은 연구가 되어 있으므로 여기서는 간략하게 결과만을 인용한다[5].

$$\tilde{X}(k) = \Phi \tilde{X}(k-1) \quad (2.7)$$

$$\tilde{P}(k) = \Phi \tilde{P}(k) \Phi' + Q(k+1) \quad (2.10)$$

$$K(k) = \tilde{P}(k) A' [A \tilde{P}(k) A' + R(k)]^{-1} \quad (2.8)$$

$$\tilde{P}(k+1) = \tilde{P}(k) - K(k) A \tilde{P}(k) \quad (2.9)$$

$$r(k) = Y(k) - A \tilde{X}(k-1) \quad (2.11)$$

$$\tilde{X}(k) = \tilde{X}(k-1) + K(k) [Y(k) - A \tilde{X}(k-1)] \quad (2.12)$$

위식에서 칼만필터의 innovation $r(k)$ 는 고장시 고장감지의 판단근거를 제공한다. 정상 상태에서는 $r(k)$

값이 대략 영(zero)의 값을 나타내지만, 임의의 임계치를 넘는 고장 발생시 $r(k)$ 값은 크게 증가하고, 실제 상태를 추정하지 못한다. 다음에서 이와같은 단점을 피하고, 고장발생시 고정의 종류와 바이어스 크기를 추정하기 위해서, Friedland의 SBE 기법을 사용한다. 시스템에 바이어스(b)가 존재할때 바이어스를 추정하기 위해서 Friedland의 SBE유도식은 다음과 같다[2],[3].

$$\hat{b}(k) = [I - G(k)S(k)] \hat{b}(k-1) + G(k) r(k) \quad (2.13)$$

$$G(k) = M(k+1)[A(k)V(k) + C(k)]^{-1}R(k)^{-1} \quad (2.14)$$

$$S(k) = AU(k) + C(k) \quad (2.15)$$

$$V(k) = U(k) - K(k)S(k) \quad (2.16)$$

$$E(k) = \tilde{P}(k)A'[A\tilde{P}(k)A' + R(k)]^{-1} \quad (2.17)$$

$$U(k+1) = \Phi A(k)V(k) + B(k) \quad (2.18)$$

$$M^{-1}(k+1) = M^{-1}(k) + S'(k)[A\tilde{P}(k)A' + R(k)]^{-1}S(k) \quad (2.19)$$

여기서 $r(k)$ 는 칼만필터의 innovation이다.

따라서 바이어스 b가 발생시 상태 x의 최적추정치는 바이어스가 없다고 가정하여 칼만필터에 의해 추정한 $\hat{x}(k)$ 값과 SBE 기법에서 구한 바이어스값과 더해져 식(2.20)과 같이 보상된다.

$$\hat{x}(k) = \tilde{x}(k) + V(k)\hat{b}(k) \quad (2.20)$$

계통의 고정유무의 판정은 칼만필터의 innovation으로부터 알수있다. 즉 정상상태에서 $r(k)$ 의 평균값은 거의 영(zero)에 가까운 값을 가지나, 일단 고장이 발생하면 고장의 크기와 계통의 동특성에 따라서 innovation 값이 임계영역을 벗어나게 되는데, 칼만필터의 innovation으로부터 구동되는 SBE기법에 의한 고장판단에 기준이 되는 식은 (2.21)과 같다.

$$\hat{r}(k) = S(k)\hat{b}(k) + r_o \quad (2.21)$$

여기서 r_o 는 계통의 정상운전시 칼만필터의 innovation이다.

식 (2.21)에서와 같이 만일 시간 k에서 고장이 발생하였다면 그 고장난 성분 $\hat{b}(k)$ 에 의해서 $\hat{r}(k)$ 값이 설정된 임계치를 넘어가게 된다. 이와같이 계통의 고장판단에 사용되는 $\hat{r}(k)$ 의 임계값 선정은 고장진단에

있어 중요하다. 즉 $\hat{r}(k)$ 의 임계값을 너무 크게 잡으면 실제 고장 발생시 이 임계값에 도달하는데 시간이 많이 걸리므로 신속한 고장판단을 못하게되며, 반면 임계값을 너무 작게 잡으면 계통의 동특성에 따라서 발생 되는 $\hat{r}(k)$ 값을 고장이라고 판단하므로 오이려 잘못된 고장판단을 하게 된다. 따라서 가장 적절한 $\hat{r}(k)$ 의 임계값 선정은 실제 계통의 정상운전에서부터 발생되는 값을 가지고 구하여야 한다. 또한 과도기간중에는 오버슈트가 포함될 수 있으므로 식 (2.22)과 같이 평균임계값 (MTH;mean threshold)을 사용한다.

$$MTH_i(k) = \sum_{j=k-N+1}^k \hat{r}_i(j) / N, i=1,2,\dots,n \quad (2.22)$$

따라서 $MTH_i(k)$ 가 계통으로부터 적절히 선정된 임계값보다 클때 고장판단을 하게 된다.

4. 서장조 네트워크의 적용

3. 1 PLC와 네트워크

서장조 온도를 제어하는 프로세서는 그림 2 와 같이 2대의 프로세서를 사용한 이중화(duplex)시스템을 구성, 주프로세서의 이상시 대기중인 프로세서로 자동전환하여 시스템의 신뢰성을 향상시킨다.

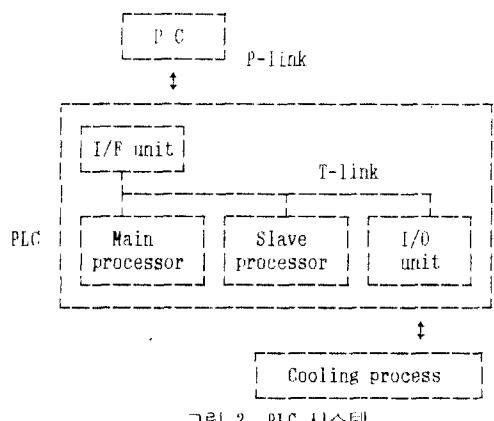


그림 2. PLC 시스템

계통의 정상운전중 식 (2.22)에 의해서 구동기 고장이 판단이되면 대처방안으로 백업장치가 제어를 담당하는 FTCS의 전체구조는 그림3과 같다. 만일 주구 동기 고장이 발생하면 PC는 내고장제어를 위한 제어 신호를 PLC에

보내주어 백업구동기를 작동시켜 고장시에도 신속히 FTCS에 의해 연속 운전을 험으로써 계통의 신뢰성을 향상 시킨다.

사진1,2는 저장조 냉각계통의 실험장치로서 저장조 물의 양은 약2톤가량이고, 열원으로서 각 2kw의 히터 10개(총 20kw)를 설치하였다. 또한 냉각수 펌프의 유량은 정상운전시 평균 15 liter/min 정도이다. 저장조 온도제어는 표면 온도를 기준으로, 설정된 온도(40°C)에 따라서 열교환기의 유도전동기(1/2 HP)를 고속, 중속 및 저속으로 동작시키고 40°C 이하일때는 정지하도록 속도를 제어하는데, PLC 아날로그 출력 유닛으로부터 4 ~ 20mA의 제어전류가 인버터에 인가되어 유도전동기를 제어한다.

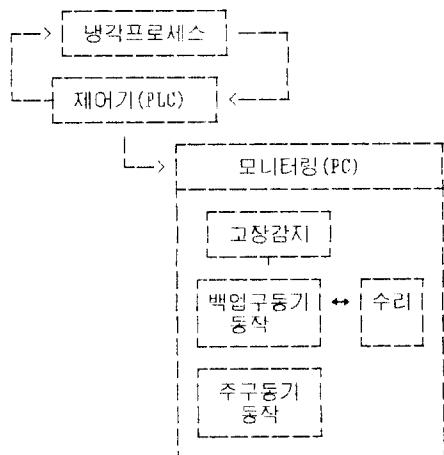


그림3. PTCS 진행선도

3.2 SBE의 $\hat{\tau}_t(k)$ 에 의한 고장감지 및 내고장성제어

그림5는 (2.4)의 모델로부터 샘플링 시간을 3초로 하고, SBE의 $\hat{\tau}_t(k)$ 평균임계값을 1로 하였을 때, FTCS과정을 보여준다. 즉 2.5분에서 인위적으로 주펌프 고장을 발생시켰을 때, 약 35초 후에 $\hat{\tau}_t(k)$ 평균임계값이 1의 값을 넘어가게 되어 백업펌프로 스위칭되었다. 또한 바이어스값이 보상된 최적 상태추정값은 실제값과 아주 가깝게 일치하였다. 그리고 9.3분에서 고장난 주 펌프의 수리가 되지 않았음에도 불구하고 백업펌프에서 스위칭하도록 PC에서 잘못된 회복신호를 인위적으로

보내주었을 때, 다시 백업펌프로 자동으로 스위칭되는 과정을 보여준다. 그리고 그림6에 모니터링을 포함한 내고장성제어를 위한 알고리즘 흐름도를 나타내었다.

5. 결론

본 논문에서는 사용후핵연료 저장조 냉각계통의 안전하고 효율적인 운전을 위해 일부 구동기 고장시 이를 검출하고, 대응조치로서 백업 구동기를 동작시키는 내고장성 제어시스템(FTCS)을 구현하였다. 실제로 저장조 냉각계통의 실험 결과 SBE의 바이어스 추정기는 계통의 고장양상에 상관없이 빠른 시간내에 고장을 검출하고, 정확한 내고장성제어를 수행하였다. 또한 칼만필터의 상태추정 오차도 보상되어 실제값에 아주 가깝게 추정하였다. 따라서 상태와 바이어스를 분리하여 추정하는 SBE 방법에 의한 고장진단을 실시간 고장진단에 적합하였고, FTCS구현에 의해 계통의 신뢰성 향상을 증진시킬 수 있었다.

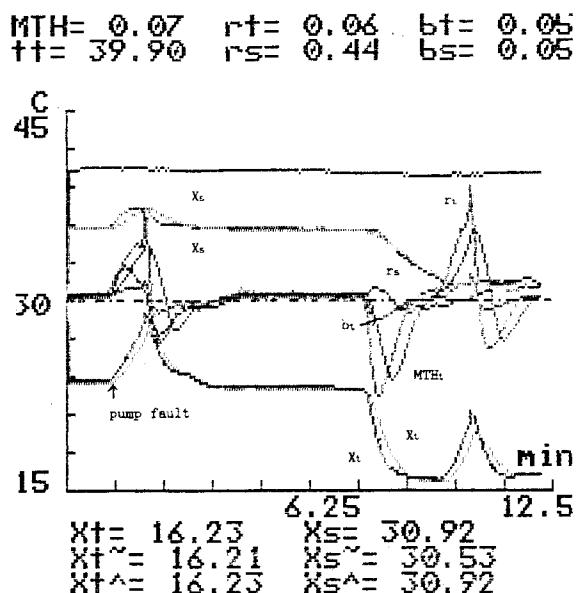


그림5. SBR기법에 의한 내고장성제어 실험결과

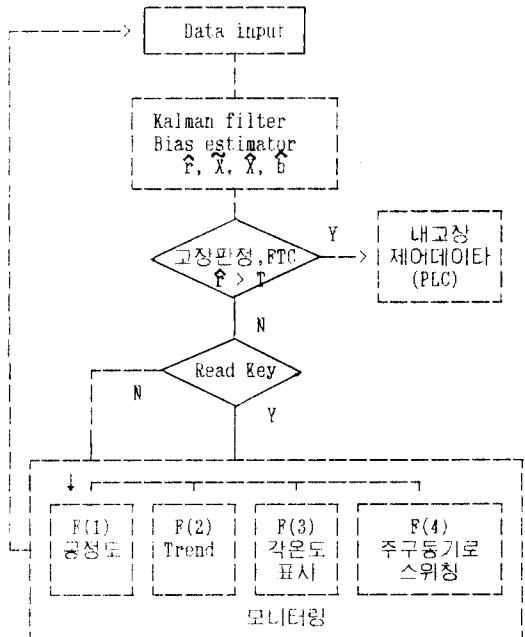


그림 6. 냉각계통의 내고장성 제어 알고리즘 흐름도

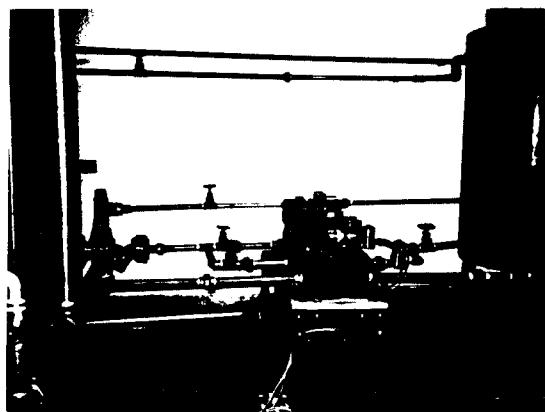


사진 1, 2. 저장조 냉각계통 실험장치

참 고 문 헌

- [1] B.Friedland, "Treatment of bias in recursive filtering," IEEE Trans.Automat.Contr., vol.AC-14, No.4, pp.359- 367, 1969.
- [2] B.Friedland, "Recursive filtering in the presence of biases with irreducible uncertainty," IEEE Trans. Automat.Contr., vol.AC-21, No.3, pp.789-790, 1976.
- [3] B.Friedland, "Notes on separate-biasestimation," IEEE Trans.Automat.Contr., vol.AC-23, No.4, pp.735-738, 1978.
- [4] 천희경외3인, "PWR기압기의 계측장치 고장진단에 관한 연구," 전기학회논문집, 제36권제6호, pp.678-684, 1987.
- [5] Harold W.Sorenson, Kalman Filtering:Theory and Application, IEEE PRESS, 1985.
- [6] H.Shumway, Applied Statistical Time Series Analysis ,Prentice-Hall International, Inc, 1988.
- [7] Box and Jenkins, Time Series Analysis, Prentice-Hall International, Inc, 1976