

통계적모델을 이용한 원자로냉각재펌프 밀봉장치 성능감시

Reactor Coolant Pump Seal Monitoring System Using Statistical Modeling Techniques

이송규†·정장규*·배종길**·안상하***

Songkyu Lee, Changkyu Chung, Jongkil Bae and Sangha Ahn

Key Words : empirical model (경험모델), performance monitoring (성능감시), failure estimation (고장예측)

ABSTRACT

This paper presents the equipment condition monitoring technology for the process or the equipment using statistical techniques. The equipment condition monitoring system consists of an empirical model to estimate the expected sensor values of process variables and a diagnose model to detect the abnormal condition and to identify the root source of the problem. The empirical model is constructed by the analysis of historic data. The diagnose model uses the sequential probability ratio test (SPRT) technique. The monitoring system was tested with real operating data acquired from the Reactor Coolant Pump Seal in the Nuclear Power Plant. It can detect the system degradation or failure at the early stage since it is able to catch the subtle deviation of process variables from normal condition.

1. 서론

기기 또는 공정의 운전은 기본적인 물리적 법칙 (질량, 운동량 및 에너지 보존식)에 의해 지배받으며 각 공정변수 값들은 복잡한 관계에 의해 서로 연결된다. 예를 들어 기기의 성능이 저하되거나 고장이 발생되면 물리적으로 시스템 특성이 변화하게 되며 이러한 현상은 기본적인 물리적인 법칙에 의해 설명될 수 있다. 그러나 간단한 시스템에서도 물리적인 방정식이 매우 복잡하기 때문에 공정변수값을 이용하여 수학적 모델로써 기기/공정의 이상상태를 판단하는 것은 매우 어렵다. 본 논문은 운전자료를 분석하여 정상상태에서의 운전상태를 예측할 수 있는 경험모델 (empirical model)을 만들고 이를 이용하여 예측한 값과 실제 운전상태에서 측정된 값과의 잔차 (residual)를 통계

적으로 분석함으로써 기기 상태를 감시하거나 고장 발생을 미리 예측하는 감시시스템의 개발에 대한 것이다. 잔차의 통계적 분석을 통해 기기/공정이 정상적인 경보범위 이내에 있는 경우에도 공정의 미세한 편차 (deviation)를 감지하여 기기의 성능저하나 고장을 기존 감시시스템에 비해 훨씬 먼저 감지할 수 있다. 또한 각 고장모드는 여러 변수에 의해 계산된 잔차들에 대해 고유의 패턴을 가지므로 잔차들의 추세를 분석하여 고장부위를 진단할 수 있다.

해외에서도 이와같은 감시시스템에 대한 연구가 활발히 진행중이며 일부 원자력발전소 기기의 고장예측 및 상태감시에 적용되고 있다 [4]. 또한 미국의 원자력규제위원회 (NRC)에서 원자력발전소 계측기기의 온라인 보정에 적용하기 위한 연구가 진행중이다. 원자로냉각재펌프 밀봉장치와 같은 발전소 안전 및 운전에 중요한 기기의 성능을 감시하고 성능저하를 예측할 수 있다면 기기 고장으로 발생할 수 있는 여러 비정상 상태에 효율적으로 대처하거나 보수 계획을 미리 수립하여 피해 및 비용손실을 최소화할 수 있다. 기존의 감시시스템은 센서를 이용하여 측정되는 공정변수값을 설정된 허용상한치, 또는 허용하한치와 단순히 비교하여 이들 제한치 (setpoint)를 초과할 경우 경보를 발생 시킴으로써 운전원으로 하여금 기기/공정의 이상상태를 알 수 있게 한다(그림1 참조). 원자로냉각재펌프 밀봉장치의

† 이송규; 한국전력기술(주) 원자로설계개발단
E-mail : sklee3@kopec.co.kr
Tel : (042) 485-4570, Fax : (042) 861-4859

* 한국전력기술(주) 원자로설계개발단

** 한국수력원자력(주)

*** 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과

건전성을 감시하고 성능저하를 예측하기 위해서 계측된 밀봉주입수의 온도, 압력, 유량 등의 성능 관련 공정변수 자료를 이용하여 경험모델을 만들어 정상운전 상태하에서의 운전 변수들을 통계적인 방법으로 예측하고 운전 중 측정된 값들과 비교함으로써 밀봉장치의 성능상태를 감시할 수 있을 뿐 아니라 공정 변수의 경향을 파악하여 밀봉장치의 성능 저하를 예측할 수 있는 것이다. 본 논문에서 기술하는 감시알고리즘을 원자로냉각재펌프 밀봉장치의 운전자료를 이용하여 실제 현장 적용 가능성을 검토하였으며 그림2에 원자로냉각재펌프 밀봉장치 건전성감시시스템의 개요도를 나타내었다.



그림1. 기존 감시시스템 개요도

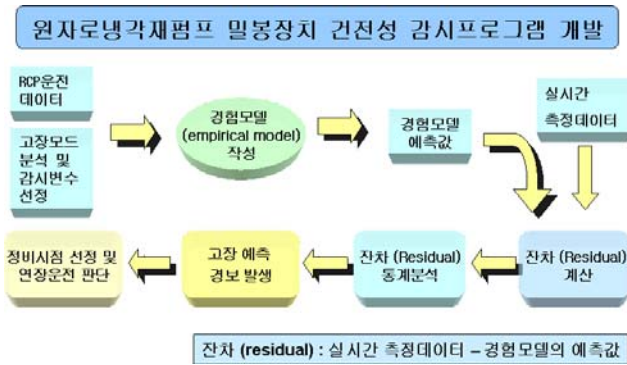


그림2. 통계적모델 감시시스템 개요도

2. 감시시스템 이론

통계적기법을 이용한 본 감시시스템은 신호예측모델과 고장진단모델로 구성되는데 신호예측모델은 정상상태에서의 공정변수값을 예측하기 위하여 과거 정상운전자료를 이용하여 구성된 경험모델이며 고장진단모델은 축차분석(sequential probability ratio test)으로 잔차를 분석하여 기기/공정의 상태를 감시하고 성능저하를 예측하는 모델이다. 기기/공정의 시스템 분석을 통하여 발생가능한 고장에 대해 공정변수들의 거동을 분석하고 고장 별 변수패턴표를 작성하여 감시결과와 비교함으로써 이상상태 발생시 고장 부위를 진단하게 된다.

2.1 신호예측 모델

신호예측모델은 과거의 정상운전자료를 이용하여 정상 상태 하에서의 현재 운전값을 예측하는 모델로 다양한 방법이 사용될 수 있다. 즉, 회귀분석, 시계열분석, neural

network 또는 다른 경험모델링 방법이 사용될 수 있으며 운전자료의 특성을 고려하여 신뢰도가 높고 적용하기에 적절한 방법을 사용할 수 있다. 기기/공정의 상태 및 성능저하를 감시하기 위해 관찰되는 공정변수는 시스템의 기본 설계사항 및 운전원리 등의 분석을 통하여 선정하며 운전 자료를 이용하여 선정된 변수들의 상관관계분석 등의 통계적인 방법을 통하여 최적의 감시변수를 선정한다. 그림3은 OPR1000 (Optimized Power Reactor 1000) 원자로냉각재펌프 밀봉장치의 구조이며 본 감시시스템에서 사용한 변수 및 계측기의 위치를 나타낸다. 예를 들어 첫번째 밀봉재의 기능이 저하되면 CBO 유량 (RCF156)가 증가하고 seal #2 온도 (RCT190) seal #3 CBO 온도 (RCT118)가 상승하고 seal #3 압력 (RCP 153) seal #2 압력 (RCP152)가 증가하리라 예상할 수 있다.

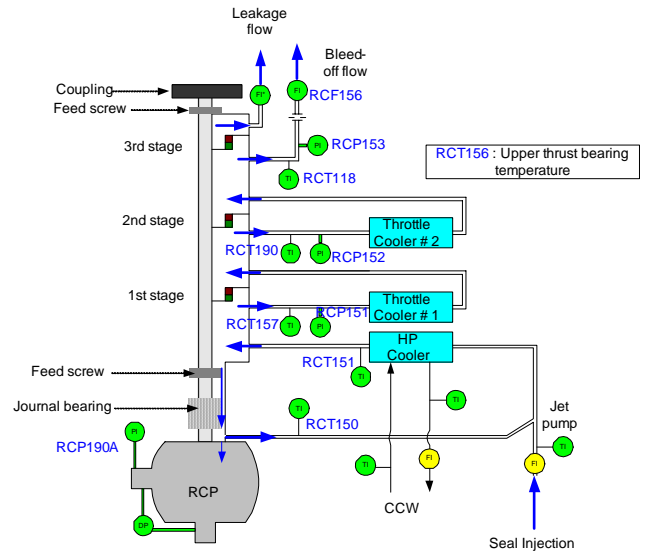


그림3. OPR1000 원자로냉각재펌프 밀봉장치 구조

따라서 이들을 감시하여 관련 변수가 비정상적인 측정치를 나타내면 첫번째 밀봉재가 고장났음을 예측할 수 있다. 이들 측정치가 비정상인지 알 수 있으려면 정상에 경우에 값들이 어떻게 되리라 하는 예측을 할 수 있어야 하는데 이 예측에 사용되는 도구가 경험모델이며 적절한 독립변수를 선정하여 감시변수인 종속변수를 예측하게 된다.

2.2 고장진단모델

고장진단모델은 신호예측모델에서 예측한 정상상태 공정 변수 값과 실제 측정된 값과의 차이(잔차)를 계산하고 그 잔차를 축차분석(sequential probability ratio test)의 통계적인 방법으로 분석하여 시스템의 상태를 판단하게 된다. 고장진단모델에서 사용하는 축차분석기법은 Wald (1948) [1]에 의해 제안되어 통계분야에서 오래전부터 사용되어온 이론으로 미세한 변화에서 시스템의 이상상태를 감지하는데 매우 효과적이므로 고장에 의한 변수의 작은 변화에 대

해 경보를 발생시킴으로써 기기/공정의 고장을 미리 예측한다. 즉, 기기/공정의 상태가 정상이면 잔차는 평균값 (θ) 이 0인 분포를 갖게되며 기기/공정의 상태가 고장에 의해 정상상태에서 벗어나게 되면 잔차는 평균값 (θ)이 0이 아닌 분포를 갖게된다. 추차분석은 잔차가 정상상태의 분포 ($\theta = \theta_0$)를 가지는지 아니면 정상상태에서 벗어난 분포 ($\theta = \theta_1$)를 가지는지 판단을 하게되며 큰 편차를 갖는 한개의 값으로 고장을 판단하지 않고 고장을 판단하기에 충분한 값에 도달할 경우 경보를 발생시키게 된다. 이를 위해 추차분석에서는 false alarm probability (α) 및 missed alarm probability (β)를 사용하게 되며 이 값을 이용하여 정보의 sensitivity를 결정할 수 있다. 따라서 다음과 같은 가설을 검정하게 된다.

$$H_0: \theta = \theta_0$$

$$H_1: \theta = \theta_1$$

측정값이 x_1, x_2, \dots, x_m 일때 확률밀도는 다음과 같다.

$$p_{0m} = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \sigma^m} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m (x_i - \theta_0)^2}, \theta = \theta_0 \text{인 경우}$$

$$p_{1m} = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \sigma^m} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m (x_i - \theta_1)^2}, \theta = \theta_1 \text{인 경우}$$

확률비 p_{1m}/p_{0m} 은 매번 관측될 때마다 계산되며 다음과 같은 조건을 만족하면 계속 관측한다.

$$B < \frac{p_{1m}}{p_{0m}} = \frac{e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum (x_i - \theta_1)^2}}{e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum (x_i - \theta_0)^2}} < A$$

여기서 $A = (1 - \beta)/\alpha$, $B = \beta/(1 - \alpha)$ 이다. 따라서 경보 설정치는 α , β 및 θ_1 에 의해 결정되는데 시스템 특성에 따라 다르게 적용되며 [2, 3] 여기서는 $\alpha = 0.01$, $\beta = 0.01$ 을 적용하고 θ_1 값은 각 변수의 표준편차 (σ)의 3배 (3σ)를 사용하였다. 만일 다음과 같은 조건을 만족하면 귀무가설 H_0 를 채택하여 기기가 정상상태에 있으므로 확률비를 0으로 reset한 후 관찰을 계속한다.

$$\frac{e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum (x_i - \theta_1)^2}}{e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum (x_i - \theta_0)^2}} \leq B$$

만일 다음과 같은 조건을 만족하면 대립가설 H_1 을 채택하므로 기기가 고장상태에 있음을 알리기 위해 경보를 발생시키고 reset한 후 관찰을 계속한다.

$$\frac{e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum (x_i - \theta_1)^2}}{e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum (x_i - \theta_0)^2}} \geq A$$

3. 감시시스템 개발 및 검증

3.1 감시시스템 개요

위에서 기술한 모델들은 전산프로그램으로 작성되어 컴퓨터에 설치되며 온라인으로 기기/공정에 설치된 센서로부터 측정값을 제공받아 기기/공정의 상태 및 성능저하에 대한 감시결과를 컴퓨터 화면을 통하여 운전원에게 제공하게 된다. 웹기반의 본 감시시스템은 인트라넷이 설치된 환경에서 서버로 사용될 PC에 프로그램을 설치하여 기기/공정의 상태 및 고장예측 현황을 인트라넷으로 통하여 감시할 수 있도록 하였으며 실행 화면은 그림4와 같다.



그림4. 감시시스템 실행화면

상단의 그래프는 실제측정값과 예측모델에 의한 예측 값을 나타내며 하단의 그래프는 계산된 잔차를 나타낸다. 그래프 상으로는 예측 값의 편차나 잔차의 편차가 크게 나타날 경우에 기기/공정에 이상이 생겼음을 알 수 있는데 추차분석 프로그램은 그래프상으로 확인할 수 없는 잔차 값에서 기기의 이상을 감지하여 경보를 표시하므로 고장 발생여부를 예측한다. 실시간으로 감시할 경우 화면은 정해진 시간 간격으로 update되며 실시간 자료 하나가 들어오고 지나간 자료 하나가 나가는 형태로 구성되며 이상상태가 발생하면 위의 경보표시가 화면에 나타나게 된다. 사용된 신호예측모델은 다변량회귀분석모델로 결정계수 (R^2)가 0.8이상이 되도록 설명변수를 조절하여 모델을 선정하였으며 회귀분석에서 만족하여야 하는 조건들을 고려하여 결정하였다. 또한 종합적으로 경보현황을 볼 수 있는 화면을 프로그램에 제공하여 효과적으로 기기/공정의 상태를 파악할 수 있게 하였다.

3.2 감시시스템 검증

본 감시시스템을 검증하기 위하여 OPR1000의 원자로냉각재펌프 밀봉장치의 운전자료를 이용하였는데, 그림5는 RCT193 (seal #2 온도)에 대한 측정값, 예측값 및 잔차값을 나타낸 그래프로 감시시스템이 변수값을 정확히 예측하고 있으며 잔차는 0.2°C미만임을 알 수 있다.

그림6은 RCP182 (seal #2 압력)에 대한 측정값, 예측값 및 잔차 값을 나타낸 그래프로 감시시스템이 압력변수 값을 정확히 예측하고 있음을 나타내고 있으며 RCP182 1 bar 정도의 변동범위에서 잔차는 0.2 bar (2.9 psi) 미만임을 알 수 있다. 따라서 정상상태에서 관련 변수들이 정상범위에 있다면 압력 RCP182 예측 값에 대한 잔차가 0.2 bar 정도일 것으로 예상되며 이는 밀봉장치에 고장이 발생하여



그림5. RCT193 (Seal #2 온도) 측정값, 예측값 및 잔차

압력이 증가하기 시작하면 잔차값이 커지게 되므로 매우 작은 잔차 값에서 고장을 예측하여 경보를 발생하게 되므로 위의 온도경우와 마찬가지로 밀봉장치에 심각한 고장이 발생하기 전에 고장을 예측할 수 있는 것이다.



그림6. RCP182 (Seal #2 입구 압력) 측정값, 예측값 및 잔차

그림7은 밀봉장치의 고장 발생에 대한 조기경보를 위해 측정값, 예측값 그래프 위에 붉은색으로 x 자를 표시하게 하였다. 위 그림은 저출력 상태에서 관련 운전변수들이 정상상태에서 벗어나 운전된 적이 있었는데 그 당시의 자료

를 입력하여 테스트한 것으로 잔차가 5°C인 경우에 경보표시를 하였으며 실제 운전 시에는 잔차의 설정치를 1°C 정도로 하여 훨씬 적은 값에서 경보를 띄우게 할 예정이다.

감시시스템이 변수값을 정확히 예측하고 고장에 대한 경보를 제대로 발생시키는지 확인하기 위하여 정상운전 자료 및 인위적으로 고장을 모사한 자료를 이용하여 감시시스템을 검증하였다. 이는 실제 고장상황에서의 자료와는 다소 다를 것으로 예상되지만 예측값의 지시와 고장을 감시하고 경보를 발생시키는 평가는 가능하리라 판단된다.

감시시스템이 예측 및 경보 기능을 만족하지 못하면 회귀모델에 사용된 변수의 삭제 또는 추가, 회귀모델의 변경, 모델구성에 사용한 참고자료 양의 조절, 자료 취득시간의 조절, 참고자료의 정상운전 여부 등에 대한 검토를 통하여 감시시스템의 정확성을 높여야 한다.

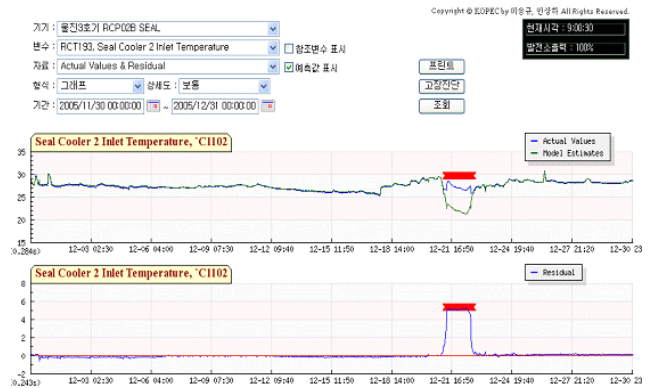


그림7. 감시시스템의 경보 표시

감시시스템 검증을 위해 사용한 자료들은 아래와 같다.

- ① RCP02B 1년간의 자료를 이용하여 생성한 gradual drift 자료
- ② RCP02B 1년간의 자료를 이용하여 생성한 step change 자료
- ③ RCP02B 1년간의 자료에 일정한 값을 추가하여 생성한 자료

그림8은 상기 ①의 자료를 이용한 감시시스템의 구동 결과이다. RCP182의 압력값이 약 89 kgf/cm²에 도달한 뒤부터 경보가 발생되기 시작하였으며 압력값이 지속적으로 상승하므로 경보는 계속 유지된다. 위 그림에서 측정값은 계속 상승하나 예측모델은 다른 정상조건에서의 변수에 의해 RCP182를 예측하므로 정상적인 상태에서의 RCP182값을 나타내게 되고 잔차가 서서히 증가하게 된다. 이때 고장 경보를 위해 적용한 잔차값의 경보설정치는 0.3 kgf/cm² (4.4 psi)이다.

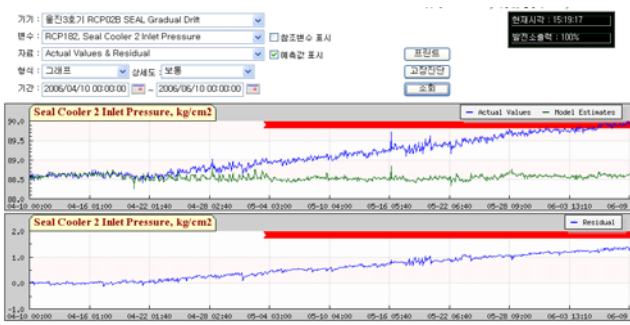


그림8. Gradual drift 자료를 이용한 RCP182 감시결과

그림9는 상기 ②의 자료를 이용하여 감시시스템을 구동한 결과이다. 예측모델에 의해 예측된 RCP182값은 약 88.6 kgf/cm²의 일정한 값을 나타내고 있으며 자료 step change에 의해 압력값이 약 90 kgf/cm²로 상승하는 순간에 경보가 발생하기 시작하였다. 이 경우에서도 경보설정치로 사용된 값은 0.3 kgf/cm² (4.4 psi)으로 잔차값이 1.5 kgf/cm²정도이므로 경보를 즉시 울리게 된다.



그림9. Step change 자료를 이용한 RCP182 감시결과

그림10은 상기 ③의 자료를 이용하여 감시시스템을 구동한 결과이다. 일정한 값 92.5 kgf/cm²로 상승한 측정값을 적용하였을 때도 경보가 즉시 발생되었으며 경보설정치로 사용된 값은 0.3 kgf/cm² (4.4 psi)이다. 위 에서도 역시 예측값은 정상적인 값을 나타내고 있으나 입력 측정값의 증가에 따라 잔차값도 정확히 증가하고 있음을 알 수 있다.



그림10. Constant 고장 자료를 이용한 RCP182 감시결과

기존의 감시시스템은 RCP182 (seal #2 pressure)의 경우 low alarm이 14.1 kg/cm², high alarm이 122.6 kg/cm²으로 정상운전값 87.6 kg/cm²으로 부터 많이 벗어난 경우 경보르 fdnfflrp 되지만 본 감시시스템은 0.3 kg/cm² 정도 벗어날 때 경보를 띄우므로 이상상태 발생 징후를 조기에 감시할 수 있다.

4. 결론

기기/공정의 운전자료를 이용하여 경험모델 (empirical model)을 구성하고 이를 이용하여 성능을 나타내는 변수값을 예측하고 실제 측정값과 차이를 계산하여 차이의 크기 및 추세를 분석함으로써 기기/공정 상태를 감시하고 고장 여부를 판단, 예측할 수 있는 감시시스템을 개발하였다. 성능 감시변수 (중속변수)는 기기 및 공정의 운전 및 고장모드분석을 통하여 선정하였다. 감시시스템의 검증은 발전소의 실제 자료 및 고장을 모사한 자료를 이용하여 수행하였으며 검증결과 기기/공정의 성능 및 고장을 감시하기에 충분히 정확하였다. 본 감시시스템은 네트워크 환경에서 온라인으로 운용되도록 개발되었으며 기존 감시시스템에서는 불가능한 기기/공정의 고장에 대한 조기경보를 제공함으로써 예방정비 및 기기의 불시정지를 예방할 수 있다.

후기

본 연구는 한국수력원자력(주)의 연구용역비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Abraham Wald, 1947, Sequential Analysis, Dover Publications, Inc. New York
- [2] Tze-Thong Chien, Milton B. Adams, A Sequential Failure Detection Technique and its Application, IEEE Transactions on Automatic Control, October 1976
- [3] H. Schoonewelle, T.H.J.J. van der Hagen, and J.E. Hoogenboom, Theoretical and Numerical Investigations into the SPRT Method for Anomaly Detection, Ann. Nucl. Energy Vol.22, No.11, pp 731-742, 1995
- [4] J. Wesley Hines and Dustin Gravey, The Development of a Process and Equipment Monitoring (PEM) Toolbox and Its Application to Sensor Calibration Monitoring, Nuclear Engineering Department, University of Tennessee, Knoxville, TN USA