

## PWR 의 가압기 고장진단

박준효\*, 이동훈(부산대 대학원 지능기계공학과), 이석(부산대 기계공학부)

### Failure Diagnosis of Pressurizer in PWR

J. H. Park, D. H. Lee (Intelli. Mecha. Eng. Dept. PNU), S. Lee (Mechanical Eng. School, PNU)

#### ABSTRACT

Safety is very important to operate nuclear power plant. To guarantee the safety, nuclear power plant should be run without trouble. This paper presents the application of a failure diagnosis approach based on discrete event system theory to the pressurizer pressure control system for Pressurized Water Reactor. Also, this paper shows a scheme of failure diagnosis by distributed diagnoser.

**Key Words** : Pressurized Water Reactor (가압식경수로), Pressurizer (가압기), Discrete Event Systems (이산사건시스템), Failure Diagnosis (고장진단), Diagnoser (진단기)

#### 1. 서론

자원이 부족한 우리 나라는 에너지원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이다. 이 같은 상황 속에서 더 많은 에너지원의 확보를 위하여 원자력 발전소를 건설하는 것은 필요할 수도 있다. 그러나 치명적인 원전사고의 예들로서 일반인들은 원전의 건설을 반대하는 입장이 많았었다. 하지만 최근 미국에서는 원자력을 이용한 에너지원의 확보에 대해 정부와 여론이 많이 긍정적으로 바뀌고 있고, 경제적인 이유와 새로운 원전건설의 어려움으로 수명이 다 되어가는 원전들을 20 년정도 더 사용하는 방안을 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 추진중이다. 따라서 국내에도 수명 연장에 대한 의견이 나올 수 있다.

이에 원자력의 이용에 있어서 안전성의 확보를 위하여 빠른 시간내에 고장을 진단해 낼 수 있는 진단기는 꼭 필요하며, 여러가지 기법들 중 전문가 시스템이 가장 많이 적용되고 있다. 그러나 이 기법은 다음과 같은 단점이 있다. 일단 충분한 정보와 지식을 얻으려면 시간이 많이 걸린다는 점과 정당성을 입증하기가 힘들다. [1]

이에 반해 본 논문에서는 최근에 각광을 받고 있는 Discrete Event Systems(DES)를 이용한 고장진단을 Pressurized Water Reactor(PWR)의 가압기 압력조

절 계통에 [1]의 방법을 적용해보려고 한다. 또한 하나의 고장진단기로서 진단하는 것이 어려운 것을, 여러 개로 나누어 고장진단하는 방법을 보여준다.

#### 2. Failure Diagnosis in Discrete-Event Systems

##### 2.1 System Modeling

현대에 이르러 다양한 시스템의 등장으로 인하여 기존의 전통제어 방법으로는 제어하기가 힘들어졌다. 이에 불규칙한 시간 간격으로 일어나는 사건에 의해 구동되는 시스템을 제어하기 위해 이산사건시스템(Discrete-Event Systems, DES)의 부류가 활발히 연구되고 있다. 본 논문에서는 DES의 모델링 도구인 패트리 넷(Petri net)과 오토마타(Automata) 중 모델링이 비교적 쉬운 오토마타를 이용하겠다.

Finite State Automaton(FSA)는 다음과 같은 4개의 구성요소를 가지고 있다.

$$G = (X, \Sigma, \delta, x_0)$$

$X$ 는 state set,  $\Sigma$ 는 event set,  $\delta : X \times \Sigma^* \rightarrow X$ 인 transition function,  $x_0$ 는 초기 state이다. Transition function  $\delta$ 에서  $\Sigma^*$ 는 null event  $\epsilon$ 을 포함하는 event의 string을 나타낸다. 이렇게 구성된 FSA가 생성해 내는 language를  $L(G)$ 로 나타낸다. Event Set은 관측가능한것( $\Sigma_o$ )과 관측불가능한것( $\Sigma_{uo}$ )으로 나뉜다. ( $\Sigma = \Sigma_o \cup \Sigma_{uo}$ )

진단되어야 할 event set(failure event set)을  $\Sigma_f$  이라 하고 우리가 다루고자 하는 고장은 관측되지 않아 고장진단이 쉽게 이루어지지 않는다고 가정한다. 왜냐하면 관측되는 것은 쉽게 고장진단이 가능하기 때문이다. ( $\Sigma_f \subseteq \Sigma_{\omega}$ )

◎ 모델링을 하는 절차는 다음과 같다. [1]

**Step 1.** 시스템 개개의 부분을 FSA 으로 만든다.

**Step 2.** 이러한 FSA 들을 합성시킨다.

**Step 3.** 합성된 FSA 에 센서값을 입력한다.

**Step 4.** event 들에 센서값을 포함한 transition 으로 재구성한다.

## 2.2 Diagnoser

시스템이 다음과 같은 가정 아래에서 고장진단이 이루어진다고 한다.

**가정 1.** FSA G 에 의해 형성된 L 은 blocking state 가 없다. (또는 live 하다.

**가정 2.** unobservable event 로 이루어진 cycle 은 G 에는 존재하지 않는다.

**정의 1.** (Definition 1. [1]) 다음의 조건이 만족될 때 prefix-closed 이고 live language L 은 projection P 와  $\Sigma_f$  의 partition  $\Pi_f$  에 대해 진단가능(diagnosable)하다고 한다.

$$(\forall i \in \Pi_f)(\exists n_i \in \mathbb{N})(\forall s \in \Psi(\Sigma_f))(\forall t \in L/s) (\|t\| \geq n_i \Rightarrow D)$$

여기에서  $\Psi(\Sigma_f) = \{s \in L : s_f \in \Sigma_f\}$  이고 string s 의 마지막 event 를  $s_f$  라 나타내며 L 에 속하는 s 의 postlanguage 를  $L/s = \{t \in \Sigma^* | st \in L\}$  로 정의한다.

Projection P( $P: \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$ )를

$$P(\varepsilon) = \varepsilon$$

$$P(\sigma) = \begin{cases} \varepsilon & \text{if } \sigma \in \Sigma_{\omega} \\ \sigma & \text{if } \sigma \in \Sigma_o \end{cases}$$

$$P(s\sigma) = P(s)P(\sigma), \quad \forall s \in \Sigma^*, \quad \forall \sigma \in \Sigma$$

과 같이 정의하고

$$P_L^{-1}(y) = \{s \in L : P(s) = y\} \text{ 이다.}$$

진단가능성 조건 (diagnosability condition) D 는 다음과 같다. ( $\forall \omega \in P_L^{-1}(P(st))(\Sigma_f \in \omega)$ )

Failure label 의 집합  $\Delta = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$  이라고 정의를 내리고  $\| \Delta \| = m$ , 가능한 label 들의 완전한 집합은  $\Delta = \{N\} \cup 2^{\Delta}$  같이 표현될 수 있다. N 은 정상 상태를 나타내고,  $F_i$  는 failure 의 type 이라고 정의를 내린다.

진단기를 FSA 으로 표현하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$G_d = (Q_d, \Sigma_o, \delta_d, q_0)$$

여기서  $Q_d$  는 고장진단기의 state 이고,  $q_0$  는 초기의 상태로서 집합의 원소의 형태로는  $\{(x_0, \{N\})\}$  라

고 나타낸다.

**정리 1.** (Theorem 1. [1]) 진단기에  $F_f$ -indeterminate cycle 이 존재하지 않는다는 것은 진단기가  $F_f$ -diagnosable 하기 위한 필요충분 조건이다.

증명. [1]의 Chapter 3 의 Theorem 1 참조 ■

◎ Diagnoser 를 구성하는 순서는 다음과 같다.

1) 합성된 FSA G 를 Label Propagation Function(LP, Definition 3. [1])을 사용하여 language 를 재구성한다.

2) 합성된 FSA G 와 1)의 LP 로서 Range Function(R, Definition 4. [1])을 사용하여 비결정적인 요소들을 결정적으로 바꾼다.

3) 2)의 과정이 끝난다음 Label Correction Function(LC, Definition 5. [1])을 사용하여 label 들을 수정한다.

4) 마지막으로 구성된 것(진단기)에 정리 1 를 적용하면 진단가능성을 알 수 있다.

## 3. Diagnoser of Pressurizer in PWR

### 3.1 Pressurizer in PWR

높이 9.656m, 원통구경 2.32m 인 원기둥 모양의 압력용기로서 정상운전 동안 냉각재 계통의 압력을 정해진 한도내에서 유지하는 기능을 하며 가압기 내부에는 증기와 액체가 포화상태를 이루고 있다. 정상상태일 때는 가압기 부피의 약 60%가 물이고 40%는 증기이다. 발전소가 과도상태일 때에는 압력의 급격한 변화를 억제하는 기능도 한다.

압력조절은 비례전열기(Proportional Heater), 예비전열기(Backup Heater), 압력방출밸브(Power Operated Relief Valve), 안전방출밸브(Safety Relief Valve) 및 살수밸브(Spray Valve)들의 동작을 조절함으로써 가능하게 한다. 본 논문에서는 안전방출밸브가 사용된다면 먼저 고압력 원자로 정지가 일어나야 하므로 여기까지는 다루지 않는다.

Table 1 은 압력조절시 압력설정치와 그 때의 센서값들을 나타낸다.

Table 1 Pressure Setup and Sensor Value

압력 (psig)	조절 동작	센서값
2335 ~	압력방출밸브개방	PH4
2310 ~ 2335	살수밸브완전개방	PH3
2260 ~ 2310	살수시작	PH2
2250 ~ 2260	비례전열기 Off	PH1
2220 ~ 2250	정상압력	PN
2210 ~ 2220	비례전열기 Full On	PL1
2185 ~ 2210	예비전열기 On	PL2

3.2 DES Modeling

3.2.1 Proportional Heater

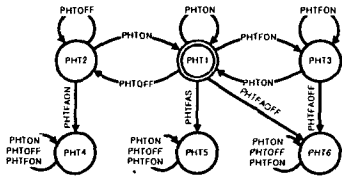


Fig. 1 Proportional Heater

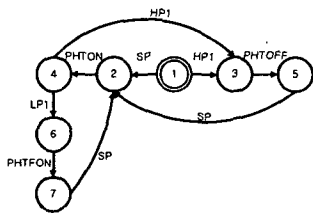


Fig. 2 Controller of Proportional Heater

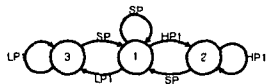


Fig. 3 Proportional Heater Pressure Sensor Value

비례전열기에서는 크게 3 가지의 고장유형을 가지고 있다고 가정하였다. 첫번째는 계속적으로 비례전열기가 작동이 되지 않는것(PHTFAON)이고, 두번째는 꺼지지도 않고 완전히 작동(PHTFON)되지도 않는(PHTFAS)것이며, 마지막으로 계속적으로 완전히 비례전열기가 작동되는 것(PHTFAOFF)이라고 가정하였다. Fig. 1 에서 PHTON 는 비례전열기가 작동하는 것이고, PHTOFF 는 꺼지는 것이며 마지막으로 PHTFON 는 비례전열기를 최대치로 작동시킨 것을 의미한다.

3.2.2 Power Operated Relief Valve (PCV656A)

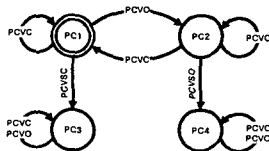


Fig. 4 Power Operated Relief Valve (PCV656A)

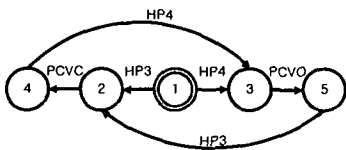


Fig. 5 Controller of PCV656A

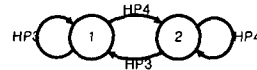


Fig. 6 PCV656A Pressure Sensor Value

압력방출밸브는 두가지의 고장유형을 가지고 있다고 가정하였다. 첫번째는 밸브가 계속적으로 닫혀있는 상태이고(PCVSC), 두번째는 계속적으로 열려있는 상태이다(PCVSO). Fig. 4 에서 PCVC 는 밸브를 닫는다는 의미이고, PCVO 는 밸브를 여는 것을 말한다.

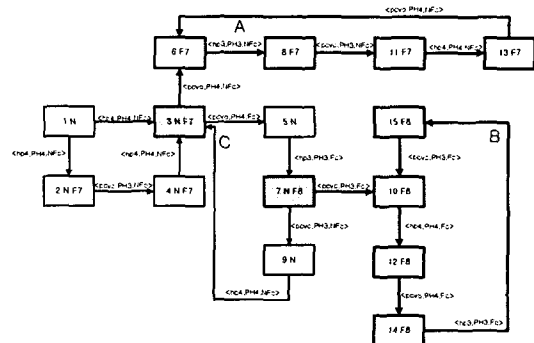
이 외의 예비전열기, 살수밸브는 압력방출밸브와 비례전열기를 모델링하는 것과 비슷하게 할 수 있으므로 생략하겠다.

3.3 Diagnoser

2.2 절에서 고장진단기를 구성하는 순서를 따르던 되는데 본 논문에서는 미시간대학에서 개발한 UMDES-LIB 를 사용하여 진단기를 구성하고 진단 가능한것이지 알아 보았다.

지면 관계상 모든 부분들을 보여줄 수가 없기에 PCV656A 의 진단기를 Fig. 7 에 나타내었다.

Fig. 7 Diagnoser of PCV656A



위 그림을 보면 크게 세 가지의 cycle 이 있는데, C 는 정상상태에서 작동되는 것이고, A(F7)와 B(F8) 는 고장상태로 빠져있는 cycle 이다. 따라서 정리 1 을 적용한다면 Fig. 7 의 진단기는 비결정적인 cycle 이 없으므로 고장진단가능하다.

아래에는 고장유형과 센서값들을 나타낸 표이다. 밸브에 사용된 센서는 유량센서로 Fc 는 유동이 있다는 말이고, NFc 는 그 반대이다.

Table 2 Fault Type and Global Sensor Map

PCVSC	F7	PC2	Fc
PCVSO	F8	PC3	NFc
PC1	NFc	PC4	Fc

### 3.4 Failure Transmitter and Indicator

가압기는 압력에 따라 압력조절을 행하는데, [1]의 논문에서 제시한 방법으로 하나의 진단기를 구성하게 되면 고장진단가능하지 않게 될 가능성이 아주 크다. 왜냐하면 Table 1에서 보는바와 같이 만약 살수밸브가 작동될 때, 비례전열기나, 예비전열기 등은 고장이 난 상태에서 계속적으로 압력을 조절하려고 할 것이다. 이것은  $F_i$ -indeterminate cycle 이 존재한다는 뜻이다. 이에 본 논문에서는 하나의 시스템을 여러 개로 나눈 진단기들을 구성하여 각각의 정보를 관리하는 곳으로 보내어 고장을 진단해 내는 방법을 제시하겠다.

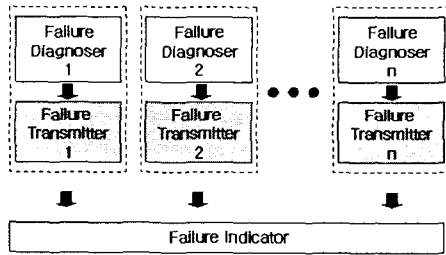


Fig. 8 Failure Transmitter and Indicator

Fig. 8을 보면 고장진단기는 모두 다르게 구성 되어 있고, 서로의 정보 교환은 필요하지가 않다.

개개의 고장진단기는 고장의 유무를 Failure Transmitter에게 전달하고 Failure Transmitter는 각각의 진단기가 보내고 있는 정보와 가지고 있는 정보를 비교하여 진단기에서 진단할 수 있는 고장인지 판별한 다음 고장의 유형을 Failure Indicator에 보내게 된다. 그러면 Failure Indicator는 고장을 보여준다.

개개의 Failure Transmitter가 진단기의 고장유형을 Failure Indicator에 보낼 때 다음과 같은 논리로 이루어진다.

고장진단기의 상태를 보면 상태들은 지금 상태가 고장이 확실한( $F_i$ -certain) 것과 불확실한 것을( $F_i$ -uncertain) 나타내고 있다. Fig.7을 보면 까맣게 보이는 상자(3N F7)는 지금 고장이 불확실한 상태이고, 6 F7의 상태는 고장이 확실한 상태이다. 따라서 각각의 상태는 고장을 나타내는 부분이 있게 된다. 이러한 사실을 바탕으로 진단기의 현재 상태가 가지고 있는 정보들 중  $A_j$ 는  $F_i$ -certain을 나타내는 label을 가지고 있는 집합이라 하고,  $B_j$ 는  $A_j$  이외의 label을 가지고 있는 집합이라 하자. 그러면 현재 진단기의 상태는  $(A_j \cup B_j)$ 이 될 것이다.  $C_j$ 는  $j$  번째의 진단기가 판별해내는 고장유형을 가지고 있는 집합이라고 하면, Failure Indicator에 보낼 정보  $I_j$ 는 아래의 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$(A_j \cup B_j) \cap C_j = I_j (j=1, 2, \dots, n)$$

### 4. 결론

본 논문에서는 PWR 시스템에서 가압기의 압력 조절부분을 고장진단하는 진단기를 DES 접근법으로 구성하여 보았다. [1] 논문의 방법은 고장진단기 하나로 이루어져 있어, 진단가능한 진단기를 구성하는데 문제가 있었다. 그리하여 진단기를 여러 개로 나누어 구성하고 각각의 정보를 따로 처리하여 고장을 알리는 시스템을 제시하였다.

추후 연구과제로는 [1]의 방법보다 계산복잡도를 줄일 수 있는 [3], [4]의 방법으로 프로그램을 개발하는 것과, 센서의 개수를 최적화하는 기법이 있다.

마지막으로 [5], [6]에서 제시한 분산 고장진단기를 발전시켜 계산 복잡도를 줄이는 방법을 추후 연구과제로 들 수 있다.

### 참고문헌

1. Meera Sampath, "A Discrete Event Systems Approach to Failure Diagnosis," Ph.D. Thesis, The University of Michigan, December 1995.
2. 허성광 외, "원자력발전소 1 차계통 고장진단시스템 구축을 위한 연구(1)," 한국전력공사 기술연구원, 한국전력공사, 1990.
3. Shahin Hashtrudi Zad, "Fault Diagnosis in Discrete Event and Hybrid Systems." Ph.D. Thesis, The University of Toronto, 1999
4. 손형일, 김기웅, 이석, "이산이벤트시스템의 고장진단." 제어 자동화 시스템공학논문지, 제 7 권, 제 5 호, pp. 375-383, 2001.
5. Rami Ismail Debouk, "Failure Diagnosis of Decentralized Discrete Event Systems." Ph.D. Thesis, The University of Michigan, 2000.
6. Rong Su, "Decentralized Fault Diagnosis for Discrete-Event Systems," MA. Thesis, The University of Toronto, April 2000.