

단순화된 증상트리를 이용한 보일러플랜트의 이상진단전략에 대한 연구

이기백, 모경주, 박종복, 어수영, 윤인섭
서울대학교 화학공학과

A Study of the Strategy for Fault Diagnosis of Boiler Plant Using Simplified Symptom Tree

G. B. Lee, K. J. Mo, J. B. Park, S. Y. Eo, E. S. Yoon
Department of Chemical Engineering, Seoul National University

1. 서론

화학공장에서의 보일러는 고압증기를 생산하여 하부생산공정에서의 가열이나 분리에 필요한 열원을 공급하여 주는 유틸리티 시스템으로 생산공정과 밀접한 관계를 가지고 조업되고 있다.

따라서, 보일러의 조업은 생산공정에 직접적인 영향을 주게 되는데 공급되는 증기품질의 변화로 인해 증기를 열원으로 사용하는 생산공정의 제품품질에 영향을 주기도 하고 크게는 보일러의 불안정한 조업으로 인해 생산공정의 조업정지를 야기할 수도 있다.

이와 같이 보일러플랜트에서 발생한 이상은 보일러플랜트뿐만 아니라 연결된 생산공정에 매우 큰 영향을 미치게 되므로 보일러 플랜트에 이상이 발생한 경우에 이상상황을 신속하고 정확하게 판단하여 조업자에게 전달하는 이상진단시스템의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 보일러 플랜트의 이상진단을 위해 단순화된 증상트리(simplified symptom tree)를 사용하여 진단모델을 구성하고 이단계진단전략을 개발하여 적용하였다.

2. 단순화된 증상트리

사용된 진단모델은 증상트리를 단순화하여 구성되는 단순화된 증상트리이다. 증상트리(symptom tree)는 이상트리(fault tree)에 근간을 두고 윤 등[4]에 의하여 제시된 모델로 증상과 원인간의 인과관계를 논리적 부호를 통하여 표현한 그래프모델로서 트리의 꼭대기 노드는 하나의 증상을 나타내고 있으며 말단의 노드는 증상을 일으킬 수 있는 이상원인을 나타낸다. 그림 2.A는 그림 1의 공정[3]에서 액면을 낮게 가리키는 증상인 L_s 에 대해 나타낸 증상트리이다. 그림 1의 공정에 대해서는 4개의 측정변수에 대해 모두 8개의 증상트리가 작성된다.

이렇게 작성된 증상트리를 이용하여 이상을 진단하기 위해 꼭대기 증상이 발생하였을 때 이상후보를 추적하게 되면 결국 이상후보는 증상트리의 말단에 나타나는 이상만으로 제한된다. 따라서, 직접적인 원인만을 트리상에 나타낸 단순화된 증상트리로서 증상트리를 간략하게 할 수 있다[2]. 그림 2.B는 그림 2.A에 나타난 증상트리에 대한 단순화된 증상트리이다.

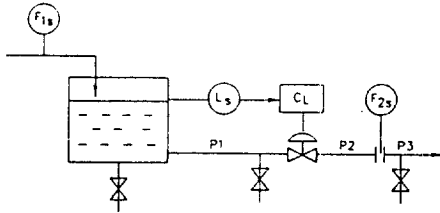


그림 1 buffer tank system

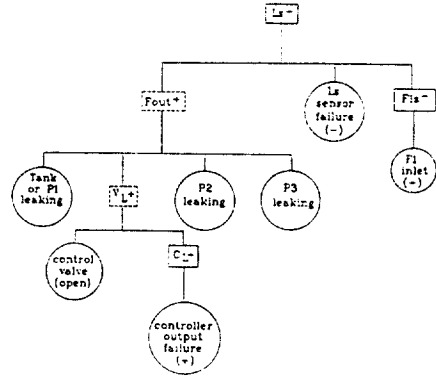


그림 2.A Ls-에 대한 증상트리

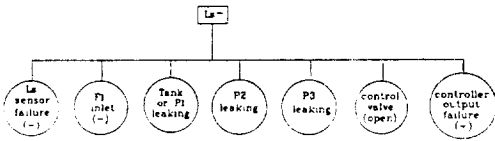


그림 2.B 간략화된 증상트리

3. 진단전략

공정에서 이상이 발생하게 되면 증상이 발생하고 이 증상을 꼭대기노드로 가진 증상트리에서 증상을 일으킬 수 있는 이상후보들을 얻을 수 있다. 증상 i 가 포함하고 있는 이상후보의 집합 S_i 의 원소를 F_i 이라 할 때 이 집합을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i = \{ F_1, F_2, \dots, F_l \}$$

이때 발생한 이상이 하나라는 가정하에서 실제 발생한 이상을 포함하는 집합 SC 는 증상이 발생한 집합 S_i 의 교집합이다[1,2].

$$SC = \{ S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_N \}$$

이것을 그림으로 나타낸 것이 그림 3.A이며 빗금친 부분에 포함되는 이상이 나타난 증상에 대한 이상후보로 제시된다.

본 연구에서는 보일러에서 흔히 나타날 수 있는 외부외란으로 인해 진단을 수행하는 과정에서 교집합이 존재하지 않게 되어 진단이 실패하게 되는 것을 방지하기 위해 동시점에서 발생하지 않는 다중이상에 대한 진단전략을 수립하였다. 시간1에서 얻어진 증상집합, SS_1 에 의해 하나의 이상후보집합, SC_1 이 시간1에서의 진단결과로 제시되고 시간2에서 SS_1 에 포함되어 있지 않은 증상집합, SS_2 가 얻어진다면 SC_1 과의 부합여부를 검사한다. SS_2 가 SC_1 으로 설명되어지지 않으면 SS_2 의 원소인 각 증상이 포함하고 있는 이상후보의 집합에 대한 교집합을 구한다. 이 결과로 얻어진 SC_2 을 SC_1 가 함께 시간 2에서의 진단결과로 제시한다(그림 3.B).

증상트리를 통해 진단을 수행할 때는 교집합을 구하는 진단전략의 실패를 방지하기 위해 정상상태의 범위를 크게 잡아 증상의 수를 줄임으로써 진단의 실패를 방지하게 된다[2]. 그러나 이로 인해 진단된 이상후보의 수가 늘어나게 된다. 또한, 증상트리는 이상의 전파경로가 유지되지 않는 경우에도 각각의 증상을 발생시킬 수 있는 이상후보를 제시할 수 있다. 따라서, 이상이 발생하였을 때 같은 증상을 일으킬 수 있는 이상후보가 많아지게 된다.

이와 같이 제시할 이상후보의 수가 늘어나는 것을 막기 위해 이단계진단으로 각 이상후보에 대한 후보검증을 수행한다. 각 이상에 대해 이상발생시 반드시 나타나야하는 조건(sufficient condition)을 구한 다음 이 조건에 대한 만족여부를 확인하여 최종 이상후보로 제시하도록 하였다.

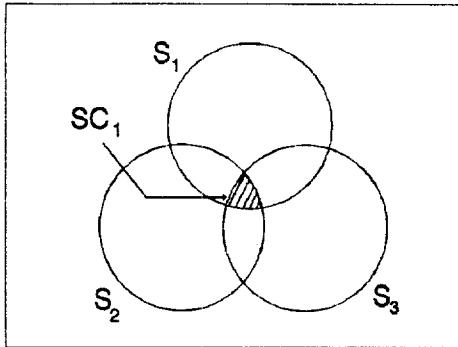


그림 3.A 단일이상시 이상후보제시를 위한 진단전략

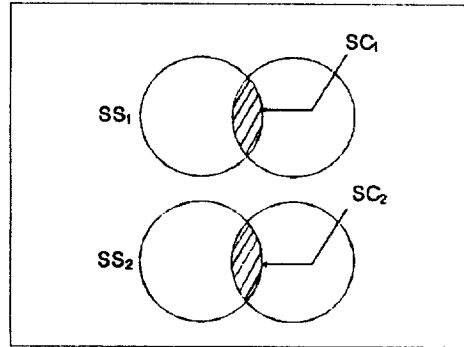


그림 3.B 다중이상시 이상후보제시를 위한 진단전략

4. 적용사례

이 연구의 대상보일러는 수관식 산업용보일러로 정유/석유화학공장의 유틸리티 보일러로 일반적으로 사용되고 있다. 위에서 개발한 진단모델 및 전략을 이용하여 이상진단모듈을 구성하기 위해 현장요구와 사고사례의 분석을 통해 보일러플랜트에서 발생할 수 있는 이상들을 시스템에 포함시켰다. 보일러플랜트에 나타날 수 있는 이상을 중요도에 따라 표1과 같이 세 가지 종류로 구별하였고 이를 다시 특성에 따라 세부적으로 구별하였다. 엄밀한 의미에서의 이상은 장치고장을 말한다.

개발된 시스템의 성능을 평가하기 위해 개발된 진단 모델/전략을 정유공장의 보일러플랜트에 적용하였다. 본 연구에서는 공정변수의 정상상태의 범위, 즉 한계값을 결정하기 위해 정상상태데이터의 표준편차를 이용함으로써 시스템의 실제 적용이 간편하도록 하였다. 1시간의 정상상태데이터를 이용하여 평균과 표준편차를 구하였으며 상한과 하한은 다음 식에서 구해졌다.

$$x_{upper} = \bar{x} + n \times \sigma \quad (n : constant)$$

$$x_{lower} = \bar{x} - n \times \sigma \quad (n : constant)$$

시스템에서 다루는 센서는 194개이며 단순화된 증상트리는 161개 센서에 대해 322개이다. 본 연구에서는 보일러의 각단위장치(보일러플랜트의 주구성단위는 공기공급부, 연료공급부, 급수공급부, 보일러부, 증기배분부이다)에 대해 작성된 부호유향그래프에 기초하여 증상트리를 작성하였으며 이 트리를 간략화하여 단순화된 증상트리를 구성하였다.

얻어진 단순화된 증상트리와 진단전략을 실시간전문가시스템셀인 G2에 구현하였다. 1차진단에서 얻어진 이상후보에 대해 검증을 수행하기 위해서 검증조건을 각 이상의 종류에 따라 분류하였다(표1).

감사

이 연구는 에너지자원기술개발지원센터와 포항공대 지능자동화연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 지원에 감사드립니다.

표 1. 보일러의 이상분류 및 이상후보조건

대분류	소분류	이상후보조건
independent sensor stuck		
external disturbance	physical property change	temperature or pressure
	load change	flow or pressure
equipment malfunction	control sensor bias	
	control sensor stuck	control sensor
	control valve bias	
	control valve stuck	flow or pressure
	leaking	Δ flow
	equipment failure	flow, RPM or pressure

참고문헌

1. 김철진, 오전근, 윤인섭, "증상트리 모델을 이용한 이상진단 전문가 시스템," 화학공학, 28(4), 417(1990)
2. Oh, J. K., Yoon E. S. and Choi B. M., "A Real-Time Operation Aiding Expert System Using the Symptom Tree and the Fault-Consequence Digraph," KACC, 805(1989)
3. O'Shima, E., "Computer Aided Plant Operation," *Computer and Chemical Eng.*, 7, 311(1983)
4. Yoon, E. S., and Han J. H., "Process Failure Detection and Diagnosis Using the Tree Model," *IFAC Workshop on Fault Detection and Safety in Chemical Plants*, Kyoto, 126(1986)