

부호유향그래프의 분석을 이용한 공정 이상 진단

남동수 · 윤인섭
서울대학교 공과대학 화학공학과

Process Fault Diagnosis using the Analysis of Signed Digraph

Dong Soo Nam, En Sup Yoon
Department of Chemical Engineering, Seoul National University

서론

이상 진단(fault diagnosis)은 대상 공정의 관측 가능한 증상으로부터 공정 교란의 근본 원인을 알아내는 문제이다. 이 조업자의 행위를 지원하기 위해 자동화된 이상진단시스템의 필요성이 대두되어 왔다. 지난 수십 년간 공정시스템에 대해 많은 이상진단방법론이 제시되어 왔는데, 경험기반 방법(experienced-based approach), 관측기/필터(observer/filter), 신경망(neural network), 부호유향그래프(signed digraph)등을 이용한 진단 방법론이 Becraft등[1]에 의해 비교 분석되었다. 부호유향그래프를 이용한 방법론은 필요한 진단 모델이 비교적 쉽게 구성될 수 있고, 원인-인과 관계를 통해 증상과 이상원인의 관계를 도식적으로 볼 수 있으며, 그래프 이론의 풍부한 연구 결과를 이용할 수 있다는 측면에서 많은 연구가 진행되어 왔다. 부호유향그래프를 이용한 이상 진단 방법론은 Iri등[2]에 의해 처음으로 제안된 이후 15여년간 많은 변화된 부호유향그래프 방법이 제시되어 왔으며 (1)부호유향그래프에 미측정 변수를 다룰 수 있는 알고리즘을 이용한 진단 방법[2,3]과 (2)주어진 부호유향그래프를 미리 분석하여 측정 변수만으로 구성된 규칙[4]이나 그래프[5]를 이용한 진단 방법의 두 부류로 나눌 수 있다. 전자는 그 특성상 이해하기 힘들고 온라인 계산량이 미측정 노드의 개수에 지수 함수적 증가를 보여 비효율적이다. 또한 [5]의 경우 온라인 계산량은 줄지만 알고리즘 접근 방법에 비해 진단의 선명성이 감소한다.

본 연구에서는 알고리즘 접근 방법의 복잡성과 비효율성을 극복하고 기존의 부호유향그래프 분석 결과에 비해 간단하고 정보의 손실이 없는 확장된 증상-이상(Extended Symptom Fault Association, ESFA)를 유도하고 이를 이용하여 온라인으로 진단하는 방법을 제안하였다. 또한 큰 대상 공정의 분할 기준과 분할된 대상 공정에 대한 ESFA의 구성과 진단 전략을 제시하였다.

부호유향그래프(Signed Directed Graph, SDG)

SDG는 공정의 정성적인 모델로서 그 노드는 공정상태변수, 정보상황, 고장원인등에 해당하며, 간선은 각 노드 사이의 인과관계를 나타낸다. 노드의 변이 방향을 간선의 부호로 나타내는데, 양부호(+)는 원인-인과 노드가 같은 방향으로, 음부호(-)는 반대 방향으로 변화함을 의미한다. 간선의 모수로서 시간지연, 이상전과확률, 정상상태이득, 조건확률[6,7,8,9]등을 추가하여 진단 성능을 높이고자 하는 노력은, 방법론의 완결성과는 별도로 실제 공정의 경우 이런 모수를 객관적 데이터에 근거하여 설정할 수 있는지에 따라 각 방법론의 적용 가능성이 모색될 수 있을 것이다.

증상기반 이상 진단

이상 진단을 위한 지식베이스로서 가장 이해하기 쉬운 간단한 형태는 증상과 그 증상을 발생시킬 수 있는 이상원인을 직접적으로 연결한 것이다. 이를 증상-이상관계(SFA)라 부른다. 본 연구에서는 부호유향그래프를 이용하여 간단한 SFA에서 확장된 형태로서 각 원소가 집합의 원소가 되기 위한 조건을 포함하는 확장 SFA(ESFA)를 유도하는데 그 과정은 다음과 같다. (1)대상 공정에 대해 조건간선을 도입하여 부호유향그래프를 작성한다. (2)부호유향그래프의 각 측정노드 n에 대해 Can(n)을 구한다. 집합 Can(n)의 각 원소는 (x_k, σ_k, P, C)의 형태를 가진다. x_k는 노드n을 변이시킬 수 있는 이상원인 노드이며, σ_k는 x_k→...→n의 경로에 있는 모든 간선 부호의 곱이고, 집합 P는 노드조건으로서 그 경로에 속하는 모든 노드의 집합이고(단 n, x_k∉P), 집합 C는 간선조건으로서 그 원소는 그 경로에 속하는 모든 조건의 합집합이다. Can(n)을 구성하기 위해 n을 출발점으로 하여 부호유향그래프의 간선 방향과 반대 방향으로 깊이 우선 탐색 기법으로 다음의 조건이 만족될 때까지 트리 형태로 노드를 추가하며 확장한다.

- ①현재의 노드로 진입하는 간선이 없는 경우
- ②현재의 노드가 이미 경로에 존재하는 경우
- ③현재의 노드로 진입하는 간선의 조건 중에서 [n]=0이 존재하는 경우
- ④현재의 노드가 통로변수(conduit variable)인 경우 (다음절에서 설명됨)

n으로 진입하는 모든 경로를 탐색해 가는 동안, 그 경로에 존재하는 각 노드 x_k에 대해 σ_k, P, C를 결정한다. 부호유향그래프내의 모든 측정노드에 대해 위 과정을 되풀이하여 Can(n)을 구성한다.

ESFA가 구성이 되고, 공정 데이터를 처리하여 부분 패턴이 결정되면 다음 식에 의해 이상원인집합(Fault Candidates Set, FCS)이 구해진다.

$$FCS = \bigcap_{n_j \in S} g(Can(n_j) - Can^-(n_j))$$

where $Can^-(n_j) = \{ (x, \sigma, M, C) \mid M \notin S, \text{ not satisfy } C \}$
 $M = \{ x \mid x \in P \text{ and } x \text{ is measured node} \}$
 $g : (x, \sigma, P, C) \rightarrow f, \text{ name}(f) = xv, v = [n_j] * \sigma$
 $S = \{ x \mid x \text{ is a symptom} \}$

한 예제 공정에 대해 ESFA의 구성 과정과 진단 결과는 다음과 같다. 그림1(a)는 간단한 완충조(buffer tank)계로서 이에 해당하는 부호유향그래프는 그림1(b)와 같다. 간단히 하기 위해 Iri[2]에서와 같이 조건가지를 도입하지 않았다. 이 계의 측정노드가 F₁, F₂, F₃의 3개라 할 때 상응하는 Can(n)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Can(F_1) &= \{ (F_1, +, \emptyset, \emptyset), (V_1, +, \emptyset, \emptyset) \} \\ Can(F_2) &= \{ (F_2, +, \emptyset, \emptyset), (V_2, +, \emptyset, \emptyset) \} \\ Can(F_3) &= \{ (F_3, +, \emptyset, \emptyset), (V_3, +, \emptyset, \emptyset), (L, +, \{V_3\}, \emptyset), (F_2, -, \{L, V_3\}, \emptyset), \\ &\quad (V_2, -, \{F_2, L, V_3\}, \emptyset), (F_1, +, \{L, V_3\}, \emptyset), (V_1, +, \{F_1, L, V_3\}, \emptyset) \} \end{aligned}$$

그림1에서 부분 패턴으로 [F₁]=0, [F₂]=-1, [F₃]=+1이 주어졌을 경우 증상 집합 S = {F₂, F₃}이고 각각의 경우에 집합 연산 g를 취하면

$$\begin{aligned} g(Can(F_2) - Can^-(F_2)) &= \{ F_2, V_2 - \} \\ g(Can(F_3) - Can^-(F_3)) &= \{ F_3, V_3, L, F_2, V_2 - \} \end{aligned}$$

그래서 최종적으로 이상원인집합 FCS는

$$\begin{aligned} FCS &= \bigcap_{n_j \in S} g(Can(n_j) - Can^-(n_j)) \\ &= \{ F_2, V_2 - \} \end{aligned}$$

이상원인은 밸브 V₂가 낮게 고정된 경우와 파이프의 막힘이나 펌프의 고장에

의해 야기될 수 있는 유량 F_2 의 비정상적인 감소로 결론 내릴 수 있다. 이는 Iri 등의 진단 결과와 같은 것이다.

공정의 분할

대상 공정이 클 경우 $Can(n)$ 이 굉장히 커지면서 지식베이스 구성과 관리 측면에서 효율성이 떨어지게 된다. 그래서 본 연구에서는 대상 공정을 부계(subsystem)와 통로계(conduit system)의 개념을 도입하여 전체 공정을 분할하여 큰 대상 공정에서 지식베이스의 구성과 관리를 쉽게 하고 진단의 효율성을 기하였다.

일반적으로 공정 분할의 기준은 부계간의 상호작용 정도, 부계의 측정 변수의 개수, 기능성의 차이 등이 된다. 이 기준을 적용할 경우 하나의 해가 존재하지 않는다. 분할 작성자에 따라 다른 분할 결과가 나온다. 본 연구에서는 꼭분할기준(must-decompose criteria)과 분할가능기준(may-decompose criteria)으로 나눈다. 대부분의 화학 공정에서는 유지/보수나 제품의 시장 상황 변경의 이유로 조업자가 공정의 일부분을 섰다운 하는 경우가 있다. 정상조업중 섰다운 될 수 있는 부분은 독립된 부계로 다룬다(꼭분할기준). 그 이외는 일반적인 분할 기준에 따라 분할할 수 있다. 예를 들어 큰 용량의 버퍼 탱크가 있는데 이 탱크를 통한 이상전파의 효과는 극히 미미하므로 버퍼 탱크를 경계로 공정을 분할할 수 있다(분할가능기준).

분할된 부계 사이의 관계를 다루기 위해 통로계(conduit system)를 정의하였다. 통로계는 두 부계 사이의 이상전파의 통로 역할을 하는데, 이상이 없는 계로 정의하고 통로변수(conduit variable)들로 구성된다. 통로변수는 유량(또는 압력), 온도, 농도, 제어기 신호등이 될 수 있다. 그림2에 분할된 두 부계와 통로계의 일반적인 관계를 나타내었다.

전체 공정을 분할할 경우 상당하는 부호유향그래프도 적절한 전략에 의해 분할되어야 한다. 부호유향그래프를 분할할 경우 부계의 경계를 가로지르는 간선이 발생하게 되는데 이를 다음의 규칙에 의해 두개로 나눈다. 경계를 가로지르는 간선이 $\langle N_T, N_{H1} \rangle$ $\langle N_T, N_{H2} \rangle$ 인 경우, 꼬리계의 노드로 N_T , 머리계의 노드로 N_{H1} , N_{H2} , 통로노드 X 를 도입하고, 통로노드의 입력 간선의 부호는 +로 하고 출력 간

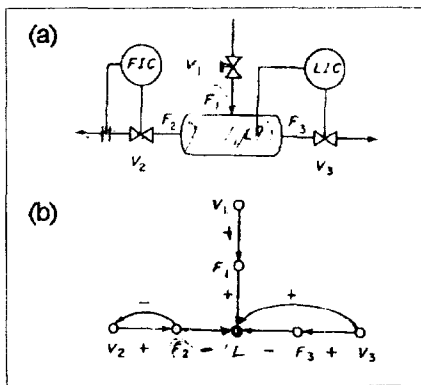


Fig.1 A simple buffer tank system [Iri et al. (1979)]
 (a) Schematic process flow diagram
 (b) Corresponding signed digraph

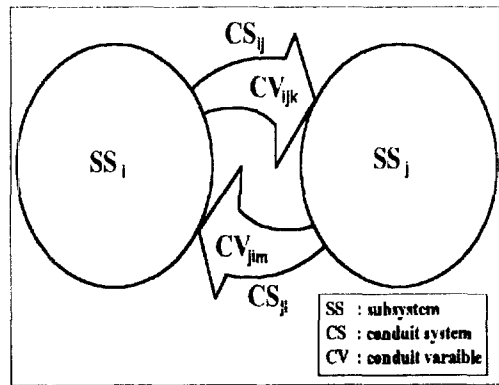


Fig.2 Schematic diagram of subsystem and conduit system

선의 부호를 원래 간선의 조건을 포함한 부호로 한다. 통로계내의 통로노드의 갯수는 경계를 가로지르는 간선의 꼬리노드 개수만큼 도입한다. 이는 통로변수를 하나만 도입할 경우 기존의 인과관계 이외에 가짜 인과관계가 발생할 수 있기 때문이다. 이와 같은 분할 전략에 의해 구성된 부계와 통로계에 대해서는 앞절에서 제시한 방법에 의해 ESFA를 구성할 때 $Can(n)$ 에서 측정변수 n 이외에 통로변수 CV 에 대해서도 $Can(CV)$ 를 구한다. 이렇게 구성된 $Can(n)$ 은 다음과 같은 특징을 가진다.

- ① $Can(n)$ 의 구성 원소 중에서 노드조건 집합 P 는 해당 부계의 노드만을 포함한다.
- ② $Can(n)$ 의 구성 원소 중에서 간선조건 집합 C 는 해당 부계의 제어 변수나 제어 모드의 정보만을 포함하지 않고 여러 부계에 속하는 정보를 포함할 수 있다.
- ③ 머리 부계 SS_j 의 $Can(n)$ 의 구성 원소 중에서 x_k 는 통로계 CS_j 의 통로변수를 포함하지 않는다.
- ④ 통로계 CS_j 의 $Can(CV_{ijk})$ 의 구성 원소 중에서 x_k 는 SS_i 와 통로계 CS_j 의 통로변수만을 포함한다.

두 개 이상의 부계에서 증상이 발생한 경우 기본적인 진단 전략은 증상이 발생한 각 부계에서 FCS 를 구한 다음 그것의 교집합을 구하는 것이다. 이때 각 부계의 FCS 의 원소 중에서 통로변수 X 가 존재할 경우에는 이를 처리하는 전략이 필요하다.

부계 SS_j 에서 FCS 를 구할 경우 FCS 의 원소로 나타날 수 있는 통로변수는 통로계 CS_j 의 노드이다. 이때는 CV_{ijk} 의 노드조건 P 를 가지고 온다. 특성④에 의해 통로변수 CV_{ijk} 의 $Can(CV_{ijk})$ 의 x_k 는 노드조건 P 의 검사 없이 간선조건만을 검사하여 그 부계의 FCS 의 구성 원소 여부를 결정한다. 이때 나타날 수 있는 $Can(CV_{ijk})$ 의 x_k 는 SS_i 의 노드이외에 통로계 CS_m 의 노드를 포함할 수 있는데 이때는 노드조건 P 와 간선조건 C 를 모두 검사하여 FCS 의 구성 원소 여부를 결정한다. 검사 기준은

$$\{x_k \mid (x_k, \sigma_k, P, C) \in Can(CV_{ikm}), m=1, \dots, mm, x_k \notin P, C \text{ satisfy condition}\}$$

감사

본 연구는 한국과학재단지정 우수 연구센터인 공정산업의 지능자동화연구센터와 호남정유 기술연구소의 연구비 지원에 이루어진 것으로 연구비를 지원해주신데 대해 감사드립니다.

참고문헌

1. Becraft, W.R. et al.: *Proc. of PSE'91*, II12.1(1991)
2. Iri, M. et al.: *Comput. Chem. Eng.*, **3**, 489(1979)
3. Shiozaki, J. et al.: *Comput. Chem. Eng.*, **9**, 285 (1985)
4. Kramer, M. A. and Palowitch Jr., B. L.: *AIChE J.*, **33**, 1067(1987)
5. Mohindra, S. and Clark, P.A.: *Comput. Chem. Eng.*, **17**, 193(1993)
6. Yu, C. C. and Lee, C.: *AIChE J.*, **37**, 617(1991)
7. Tsuge, Y. et al.: *Proc. of PSE'85*, **1**, 133(1991)
8. Rojas-Guzman, C. and Kramer, M.A.: *Proc. of PSE'94*, **2**, 947 (1994)
9. Kokawa, M., Miyazaki, S. and Shingai, S.: *Automatica* **19**, 729(1983)