

대형공정의 정성적 이상진단을 위한 공정분할전략

이 기 백

충주대학교 공업화학과
(2000년 12월 11일 접수, 2000년 12월 20일 채택)

A Process Decomposition Strategy for Qualitative Fault Diagnosis of Large-scale Processes

Gibaek Lee

*Department of Industrial Chemistry, Chung-Ju National University, 380-702, Korea
(Received 11 December 2000 ; Accepted 20 December 2000)*

요 약

대부분의 화학공정은 매우 크고 복잡하기 때문에 전체 공정에 대한 진단시스템을 만드는 것은 매우 어렵다. 따라서, 대형공정을 몇 개의 부공정으로 분할하여 진단하는 체계적인 방법이 필요하다. 이 논문에서는 이상-결과 트리모델에 기반하여 정성적 이상진단을 위한 공정분할전략을 제안하였다. 분할기준으로 유연한 진단, 지식베이스의 크기축소, 및 복잡한 지식베이스의 일관된 구축을 사용하였다. 부공정간의 인과관계를 연결하기 위해 통로변수를 도입한 다음 오프라인 분석을 통해 통로변수의 이상-결과 트리모델을 구축하였다. 계분할이 없는 경우와 같은 진단결과를 얻을 수 있도록 온라인 진단전략을 수립하였다. 제안된 방법의 유용성을 대형 보일러 공정에 대한 이상진단시스템을 통해 보였다.

Abstract - Due to their size and complexity, it is very difficult to make diagnostic system for the whole chemical processes. Therefore, a systematic approach is required to decompose large-scale process into sub-processes and then diagnose them. This paper suggests a method for the minimization of knowledge base and flexible diagnosis to be used in qualitative fault diagnosis based on Fault-Effect Tree model. The system can be decomposed for flexible diagnosis, size reduction of knowledge base, and consistent construction of complex knowledge base. The new node, gate-variable, is introduced to connect the cause-effect relationships of each sub-process. For on-line diagnosis, off-line analysis is performed to construct Fault-Effect Trees of gate-variables as well as activation conditions of gate-variables. On-line diagnosis strategy is modified to get the same diagnosis result without system decomposition. The proposed method is illustrated with a fault diagnosis system for a large-scale boiler plant.

Key words : Fault Diagnosis, Process Decomposition, Fault-Effect Tree, Boiler Plant

1. 서론

이상진단의 목적이 되는 대부분의 공정은 매우 크고 복잡하다. 이런 크기와 복잡성은 진단시스템의 구축을 매우 어렵게 한다. 따라

서, 공정을 여러 개의 작은 공정으로 분할하고 분할된 공정을 진단하는 체계적인 방법이 필요해진다. 이상진단(fault diagnosis)을 위한 계의 분할(system decomposition)법은 크게 두 가지로 나뉘어진다. 첫 번째는 분할을

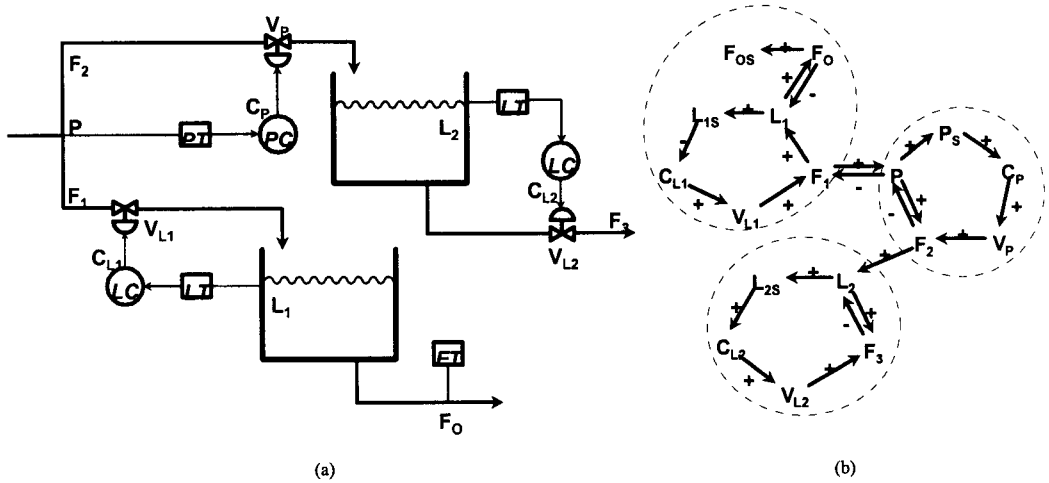


Fig. 1. The process flow diagram and SDG of an example.

통해 진단범위를 분할된 공정으로 축소하고 축소된 부분에 대해 정밀한 진단을 수행하며 [1, 2, 4], 다른 방법은 분할된 각 공정의 지식베이스를 분리·구축하고, 온라인 진단과정에서는 각 부공정의 결과를 모아서 최종 결과를 얻는 방법이다[5]. 이 연구는 이상-결과 트리모델(Fault-Effect Tree, FET)에 기반한 두 번째 형태의 계분할에 대한 것이다[3].

FET는 부호유향그래프(signed digraph, SDG)에 기반한 방법으로 공정변수간의 인과 관계를 간단하고 이해하기 쉽게 표현할 수 있어 널리 사용되어 온 방법이다. 그러나, 두 가지 가정, 단일이상가정과 유의경로가정은 SDG를 실제공정에서 응용하는데 어려움을 주어왔다. FET는 이상전파경로를 정량적으로 평가함으로써 불확실한 조건을 극복할 수 있었고 단일이상의 진단모델을 이용하여 다중이상(multiple fault)을 진단할 수 있다[3].

이 연구에서는 석유화학공장에서 운전되는 유틸리티 보일러 플랜트를 예제로 사용한다. 이 공정은 급수를 공급하는 급수공급장치, 보일러, 증기를 각 공정에 분배하는 증기분배장치로 구성되며 각 보일러는 보일러 주장치, 공기공급장치, 연료공급장치로 구성된다.

II. 공정분할

공정의 분할은 공정뿐만 아니라 대응되는 SDG의 분할을 의미한다. 예를 들어, Fig. 1 (a)의 작은 공정을 보자. 이 공정은 점선으로

구분된 3개의 부공정으로 분할되었다. 또한, 공정의 분할에 따라 SDG도 Fig. 1 (b)에서 보여지는 것처럼 분할된다. 정성적 이상진단 방법에서의 공정은 다음 장점이 극대화되도록 분할될 수 있다.

① 조업조건변화에 대응할 수 있는 진단: 조업자는 유지/보수 등 여러 가지 이유로 정상조업중에도 공정의 일부분을 조업중지시킬 수 있다. 이와 같이 조업중지된 부분을 진단 시에 온라인으로 제외할 수 있도록 지식베이스를 구축하여야 한다. 이런 공정부분을 오프라인분석에서 미리 분할하여 둬으로써 온라인진단에서 조업조건 변화의 변화를 간단하게 반영할 수 있도록 한다.

② 지식베이스의 크기감소: 이상진단의 대상공정이 매우 크다면 지식베이스가 관리하기 어려울 만큼 커지게 되므로 적당한 위치에서 분할한다. 특히 SDG를 기반으로 하는 진단방법론에서는 계산량과 지식베이스의 크기가 변수의 수에 따라 급격히 증가하므로[6] 적당한 위치에서의 시스템분할이 반드시 요구된다. 시스템이 분할되었다면 이상전파경로는 이상이 포함된 부공정(또는 부시스템, 부계)의 경로만을 포함하게 되므로 지식베이스의 크기가 크게 줄어들게 된다. 또한, 진단시에는 그 부공정내의 경로만 탐색하면 되므로 계산량도 감소하게 된다

③ 공정상호작용이 큰 복잡한 지식베이스의 이해도 증가: 복잡한 상호작용이 있거나 제어논리가 복잡한 공정에서는 진단모델도

복잡해지고 이해하기 어려워진다. 특히 미측정변수를 제거하는 방법론에서는 단순화된 진단모델을 더욱 이해하기 어렵게 한다. 따라서, 이해가 쉬운 진단모델이 되게 하고 이를 통해 지식베이스의 이해 및 보수가 용이하도록 한다.

부시스템간의 인과관계연결을 위해 새로운 정점(node)으로 통로변수(gate-variable)를 사용할 수 있는데 이것은 다른 정점들처럼 부호를 가져야 한다. Fig. 1의 예제에 대해서 Fig. 2에 보이는 바와 같이 F_1 과 P , P 와 F_1 , F_2 와 L_2 사이에 각각 통로변수가 사용된다. 또한, 공정의 부분적 조업정지로 인한 인과관계의 절단을 표현하기 위해 부시스템의 활성화를 나타내는 조건이 통로변수에서 나오는 간선에 포함되어야 한다. 예를 들어, Fig. 2에서 $SA(SS_2)$ 는 부시스템 SS_2 의 활성화를 나타내는 조건이며, 온라인진단에서는 이 조건으로 SS_2 의 조업정지가 간단히 표현된다.

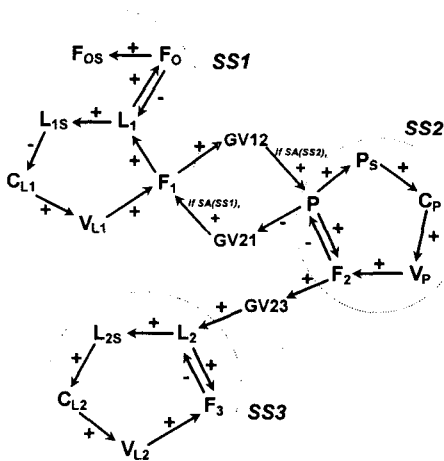


Fig. 2. Sub-processes and gate-variables in the decomposed example.

III. 진단전략

1. 오프라인 분석(off-line analysis)

FET와 계분할을 이용한 진단을 위해 오프라인분석에서 다음 사항을 기존 방법론에 추가한다.

- ① 통로변수로부터의 이상전파경로 탐색:

FET를 이용한 진단모델에서 통로변수는 진입간선으로 연결된 부시스템에서는 하나의 변수클러스터인 증상, 진출간선으로 연결된 부시스템에서는 이상이 된다. 또한, 각각 부호 (+)와 (-)를 가지는 FET를 만들어야 한다. 이상으로서의 통로변수를 꼭대기정점으로 하는 FET는 각 통로변수로부터의 이상전파 경로탐색에 의해 구성된다. 이때, 공정분할로 인해 해당 부시스템에 포함되어 있는 변수클러스터와 통로변수만 FET에 포함된다.

예를 들어, Fig. 3의 공정에서는 2개의 측정변수를 가지는 3개의 변수클러스터와 1개의 측정변수를 가지는 1개의 변수클러스터가 구성되며 각 변수클러스터의 부패턴은 Table 1과 같이 얻어진다. 통로변수들의 FET는 Fig. 4와 같으며 $LV-BH$ 가 부시스템, $SS1$ 에 포함된 수위제어밸브의 증가된 편향을 나타낼 때, $LV-BH$ 의 FET는 Fig. 5 (a)처럼 $SS1$ 에 속한 1개의 통로변수와 2개의 변수클러스터만을 포함하게 된다.

② 통로변수의 기본증상: 통로변수의 활성화를 이상의 활성화에서 사용된 기본증상과 같은 방법을 사용하게 되면 작은 증상의 왜곡현상(symptom variation)에도 통로변수가 활성화되지 않음으로 해서 진단에 실패하게 된다. 따라서, 이 연구에서는 다음과 같은 두 가지 방법을 제시한다. 첫째, 통로변수의 FET에 포함된 모든 부패턴(sub-pattern)의 OR조건을 사용할 수 있다. 그러나, 측정변수의 신뢰도가 높거나 통로변수의 경로가 긴 경우에는 쓸데없는 통로변수를 평가할 가능

Table 1. The sub-patterns for example.

Variable cluster	Subpattern	Qualitative state of measured variables
VC1	VC1-1	(L_{1s} , +), (C_{L1} , +)
	VC1-2	(L_{1s} , +), (C_{L1} , -)
	VC1-3	(L_{1s} , -), (C_{L1} , -)
	VC1-4	(L_{1s} , -), (C_{L1} , +)
VC2	VC2-1	(P_s , +), (C_p , +)
	VC2-2	(P_s , +), (C_p , -)
	VC2-3	(P_s , -), (C_p , -)
	VC2-4	(P_s , -), (C_p , +)
VC3	VC3-1	(L_{2s} , +), (C_{L2} , +)
	VC3-2	(L_{2s} , +), (C_{L2} , -)
	VC3-3	(L_{2s} , -), (C_{L2} , -)
	VC3-4	(L_{2s} , -), (C_{L2} , +)

성이 있으므로 통로변수의 fault-likelihood를 계산하여 일차이상후보를 위한 이상가능성의 최소값과 비교한다. 만약 통로변수의 FET가 다른 통로변수를 포함하고 통로변수간의 경로가 너무 짧은 특별한 경우에는 시스템사용자가 적절히 판단하여 다른 통로변수의 FET에 포함된 부패턴도 계산에 사용할 수 있다.

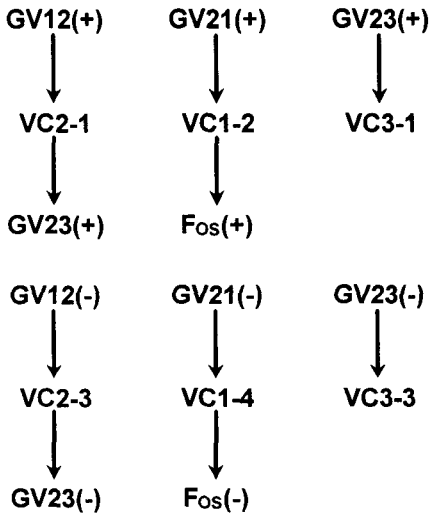


Fig. 3. The FET of gate-variables in the example.

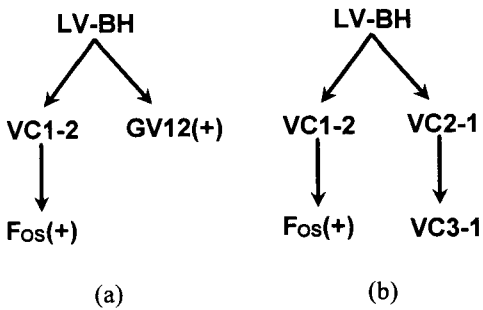


Fig. 4. The FET of LV-BH (a) with decomposition and (b) without decomposition.

2. 온라인 진단(on-line diagnosis)

각 부패턴의 sub-pattern likelihood를 평가하고 이상 뿐 아니라 통로변수도 기본증상을

평가하여 활성화시킨다. 다음 단계에서는 각 이상전과경로를 평가하는데, 분할이 없는 방법과 같은 결과를 얻기 위해서 기존 방법을 다음과 같이 수정하였다.

통로변수에 대한 explained-sub-pattern의 집합, ESP을 이상의 경우와는 달리 다음과 같이 집합으로 저장한다. 일단 각 통로변수에서 부패턴으로의 path-likelihood가 이상→부패턴의 경우와 같은 방법으로 계산되면, 필요한 데이터가 제거되기 때문에 이상→통로변수 경로의 path-likelihood가 계산될 수 없기 때문이다. 따라서, path-likelihood 계산식의 분모와 분자로 다음과 같이 나누어 저장한다. 이 식에서, $D(\llsp, G\gg)$ 와 $N(\llsp, G\gg)$ 는 부패턴→통로변수 경로의 path-likelihood계산식의 분모와 분자를 나타낸다 [3].

$$ESP(G) = \{ (sp, (D(\llsp, G\gg), N(\llsp, G\gg))) \mid sp \text{ is a sub-pattern that can be explained by } G \}$$

$$\llsp, G\gg = \frac{\sum_i^{N_{P_g}} SL_i}{N_{P_g}} \quad (1)$$

FET와 계분할에 기반한 이상진단에서, 이상전과경로는 다음과 같은 4가지의 부경로(sub-path)로 나뉘어진다. (i) 이상→통로변수, (ii) 이상→부패턴, (iii) 통로변수→통로변수, (iv) 통로변수→부패턴. 또한, 이상에서 부패턴의 이상전과경로는 다음과 같은 부경로의 연결들로 구성될 수 있다. (i) 이상→부패턴, (ii) 이상→통로변수, 통로변수→부패턴, (iii) 이상→통로변수, 통로변수→통로변수, 통로변수→부패턴.

계분할이 없는 경우와 같은 결과를 얻기 위해서, 부경로들의 연결은 이상→부패턴의 이상전과경로와 역방향으로 평가되어야 한다. 예를 들어, (iii)의 경우에 이상→통로변수의 부경로는 통로변수→통로변수 또는 통로변수→부패턴의 부경로보다 먼저 평가되어서는 안 된다. 즉, 통로변수→부패턴의 부경로가 이상→통로변수의 부경로보다 앞서 평가되어야 한다. 따라서, 경로평가는 (i)이상→부패턴, (ii) 경로변수→부패턴, (iii)경로변수→경로변수, (iv)이상→통로변수의 순서로 이루어져야 한다. 이를 위해 새로운 속성, 연결된 통로변수의 수(number of connected-gate-

variable, NCG)를 이상과 통로변수에 도입한다.

정의: 연결된 통로변수는 이상 또는 통로변수가 그것의 이상전파경로에서 활성화된 통로변수로 정의된다. 통로변수가 활성화되면 그 통로변수를 FET에 포함하고 있는 이상과 통로변수를 찾아서 NCG를 1 증가시킨다. 예로 Fig. 4(a)에서 GV12(+)가 활성화되면, LV-BH의 NCG가 1이 된다.

부경로의 평가순서는 NCG에 의해 결정된다. 어떤 통로변수 A의 NCG가 0이 되면, 다른 통로변수(B)에서 통로변수 A로 전파되는 부경로를 찾아서 그 부경로를 평가하고 그 결과를 통로변수 B의 ESP에 추가한 다음 B의 NCG를 1 감소시킨다. 이상→통로변수의 모든 부경로에도 같은 방법을 적용시킨다. 이상의 NCG가 0이 되면 fault-likelihood를 계산한다. 또한, 모든 이상의 NCG가 0이 될 때까지 이 단계를 계속한다.

예로서 Fig. 2의 공정에서 이상 LV-BH, 통로변수, GV12(+), GV23(+),이 활성화되었다고 가정하고 다음이 각 부패턴에서 이상과 통로변수로의 부경로를 평가한 결과라고 하자.

$$ESP(LV-BH) = \{(VC1-2, VC1, 0.85), (F_{OS}(+), F_{OS}, 0.7)\}$$

$$ESP(GV12(+)) = \{(VC2-1, VC2, (1, 0.9))\}$$

$$ESP(GV23(+)) = \{(VC3-1, VC3, (1, 0.75))\}$$

GV12(+)과 GV23(+)이 활성화되었으므로, F1의 NCG는 1, GV12(+)는 1, GV23(+)는 0이 된다. 따라서, GV12(+)→GV23(+)의 부경로가 평가되고 평가된 부경로는 GV12(+)의 ESP에 추가되면서 GV12(+)의 NCG는 0이 된다.

$$N(\langle\langle VC3-1, GV12(+)\rangle\rangle) = SL_{VC2-1} + N(\langle\langle VC3-1, GV23(+)\rangle\rangle) = 0.9 + 0.75 = 1.65$$

$$D(\langle\langle VC3-1, GV12(+)\rangle\rangle) = 1 + D(\langle\langle VC3-1, GV23(+)\rangle\rangle) = 2$$

$$ESP(GV12(+)) = \{(VC2-1, VC2, (1, 0.9)), (VC3-1, VC3, (2, 1.65))\}$$

이제, LV-BH→GV12(+)의 부경로가 평가되고 LV-BH의 NCG가 0이 된다.

$$\langle\langle VC2-1, LV-BH \rangle\rangle = \frac{N(\langle\langle VC2-1, GV12(+)\rangle\rangle)}{D(\langle\langle VC2-1, GV12(+)\rangle\rangle)} = 0.9/1 = 0.9$$

같은 방법으로,

$$\langle\langle VC3-1, LV-BH \rangle\rangle = 1.65/2 = 0.825$$

따라서, 다음 결과가 얻어진다.

$$ESP(LV-BH) = \{(F_{OS}(+), F_{OS}, 0.7), (VC1-2, VC1, 0.85), (VC2-1, VC2, 0.9), (VC3-1, 0.825)\}$$

LV-BH가 0이기 때문에 fault-likelihood가 다음과 같이 계산된다.

$$FL_{LV-BH} = (0.7 + 0.85 + 0.9 + 0.825)/4 = 0.819$$

계분할이 없을 때의 LV-BH의 FET는 Fig. 4(b)와 같으며, LV-BH의 ESP는 위와 같다. 따라서, 진단결과가 동일하게 얻어진다.

IV. 예제 및 토론

제안된 방법을 보일러 공정의 이상진단시스템에 적용하였다. 이 방법을 전문가시스템 셸인 G2에서 구현하였으며 이상전파경로는 G2의 규칙(rule)과 프로시저를 사용하여 표현하였다. 시스템의 다른 인자들은 다음과 같다.

- 추정변수의 수: 107
- 제어와 관련된 변수의 수: 51
- 독립센서이상의 수: 156
- 독립센서이상 및 조업자개입을 제외한 이상의 수: 92
- 2개이상의 추정변수를 가진 변수클러스터의 수: 33
- 1개의 추정변수를 가진 변수클러스터의 수: 18
- 제약변수의 수: 12
- 부패턴의 수: 150

공정분할로 인해 12개의 통로변수가 도입되었고 통로변수를 위한 24개의 FET를 구축하였다. Fig. 5에 통로변수→통로변수의 부경로만을 도시하였다. 공정이 분할되지 않았을 때 지식베이스에서 FET를 나타내는 규칙의 수는 2,337개이며 규칙내 항의 수는 19,413개였다. 공정의 분할을 통해 규칙의 수와 항의 수는 각각 658과 1,888로 줄어들었다. 즉, 계분할로 인해 지식베이스의 크기가 약 10%로 줄어들었다.

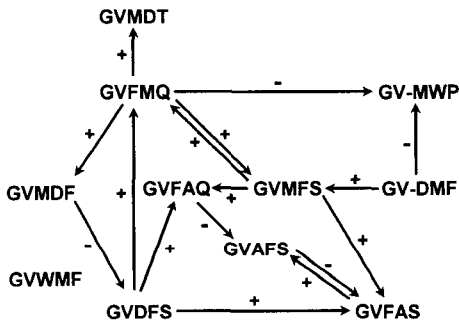


Fig. 5. Sub-paths from gate-variables to gate-variables of boiler plant.

그러나, 제안된 방법을 적용한 결과 어떤 경우에는 진단결과를 제시하지 못하였다. 이것은 *GVFMQ*와 *GVMFS*의 양부호 사이클이 형성되기 때문이다. 활성화된 통로변수의 양부호 사이클은 통로변수끼리 연결된 경로에서 처음과 끝의 통로변수가 같으면서 유의 경로로 연결된 것을 말한다. 시스템이 양부호 사이클(이하 사이클이라 함)이 있으면, 사이클내 통로변수의 NCG가 0이 될 수 없기 때문에 진단이 실패하게 된다.

대상공정이 매우 크면, 통로변수의 사이클이 만들어질 수 있고 이때 진단전략의 수정이 요구된다. 예를 들어, Fig. 6과 같이 분할된 공정에서 통로변수→통로변수의 부경로만을 표시한 예를 고려해보자. 이 중에서 *GV23(+)*의 ESP를 정확하게 얻기 위해서는 평가가 *GV45(+)*→*GV52(+)*, *GV45(+)*→*GV57(+)*, *GV34(+)*→*GV45(+)*, *GV23(+)*→*GV34(+)*의 순서로 이루어져야 한다. 또한, 같은 상황이 사이클내의 모든 통로변수에도 적용되어야 한다. 그러나, 각 통로변수의 이상전파경로가 겹쳐지기 때문에 이상진단시스

템에서 이를 구현하는 것이 매우 어려워진다. 이 연구에서는 이를 해결하기 위해 평가횟수가 최소화되는 전략을 제안한다.

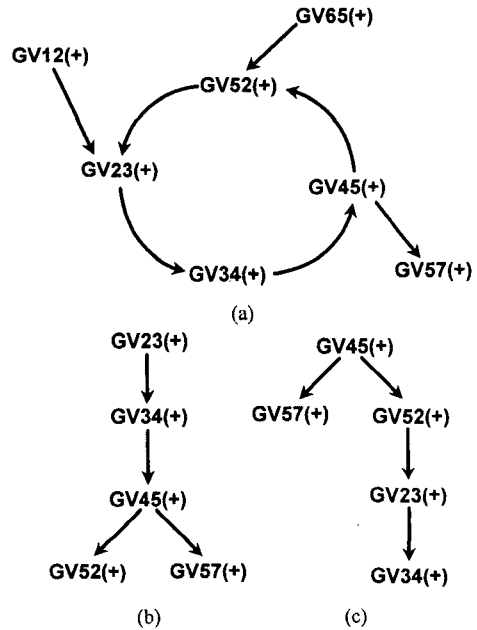


Fig. 6. Example of the plus cycle of gate-variables.

먼저 오프라인 분석에서 지식베이스내의 모든 가능한 사이클을 찾고 사이클내의 부경로의 평가순서를 결정하여야 한다. 온라인진단에서는 사이클의 발생을 감지하기 위해 사이클내의 모든 통로변수가 활성화되었고 사이클내의 모든 통로변수에서 다른 통로변수로의 부경로가 모두 평가되었는지를 판단할 필요가 있다. 이런 판단이 만족되면 앞서의 방법에 의해 평가될 수 있는 경로를 제외한 모든 경로를 강제로 평가한다. 따라서, 오프라인 해석법은 다음과 같다.

- ① 사이클이 형성되었을 때 각 통로변수가 가지는 NCG의 합을 계산하고 사이클의 속성으로 저장한다. 이것은 온라인진단에서 사용된다.
- ② 사이클내에 있는 각 통로변수의 통로변수→통로변수 부경로 리스트를 나열한다.
- ③ 임의의 부경로를 선택한다. 이때 ②의 리스트의 끝에 가장 많이 포함된 부경로를

- 선택하는 것이 좋다.
- ④ 선택된 부경로가 각 경로변수의 부경로 리스트에 있으면, 리스트에서 이 부경로를 삭제하고 선택된 부경로를 부경로평가 순서의 끝에 추가한다.
 - ⑤ 선택된 부경로의 역방향 부경로를 선택한다. 두 개 이상의 역방향 부경로가 존재하면, 부경로평가순서에 포함되어 있지 않은 것을 선택한다.
 - ⑥ 리스트에 포함된 모든 부경로가 삭제될 때까지 ④, ⑤를 반복한다.
 - ⑦ 얻어진 부경로평가순서에서 NCG를 사용하여 자동적으로 평가가 계속될 수 있는 부경로를 조사하여 제외한다. 부경로평가 순서에서 마지막에 위치한 통로변수의 NCG를 1 줄이면 계속해서 평가가 진행될 수 있기 때문이다 (예 참고).

Fig. 6의 예에서는 $GV23(+)\rightarrow GV34(+)\rightarrow GV45(+)\rightarrow GV52(+)$ 의 사이클이 가능하다. 오프라인분석에서 다음과 같이 이 사이클의 평가순서를 결정한다.

- ① 사이클이 형성되었을 때 각 통로변수가 가지는 NCG의 합은 4이다.
- ② 각 통로변수가 사이클에서 가지는 통로변수→통로변수의 리스트를 작성하면 다음과 같다.
 $GV23(+): \rightarrow GV34(+)\rightarrow GV45(+)\rightarrow GV52(+)$
 $GV34(+): \rightarrow GV45(+)\rightarrow GV52(+)\rightarrow GV23(+)$
 $GV45(+): \rightarrow GV52(+)\rightarrow GV23(+)\rightarrow GV34(+)$
 $GV52(+): \rightarrow GV23(+)\rightarrow GV34(+)\rightarrow GV45(+)$
- ③ $GV45(+)\rightarrow GV52(+)$ 의 부경로를 선택하면 이 부경로가 사이클내의 첫 번째 평가경로가 된다. 이때 $GV23(+)$ 이 이 경로를 가지므로 리스트에서 이 경로를 삭제한다.
 $GV23(+): \rightarrow GV34(+)\rightarrow GV45(+)$
- ④ 이 경로와 역방향으로 연결된 부경로는 $GV34(+)\rightarrow GV45(+)$ 이며 이 경로가 두 번째 평가경로이며 마찬가지로 $GV23(+)$ 와 $GV52(+)$ 의 리스트에서 삭제한다.
 $GV23(+): \rightarrow GV34(+)$
 $GV52(+): \rightarrow GV23(+)\rightarrow GV34(+)$
 얻어진 부경로 평가순서는 다음과 같다.
 $\{GV45(+)\rightarrow GV52(+), GV34(+)\rightarrow GV45(+)\}$
- ⑤ 다음 부경로는 $GV23(+)\rightarrow GV34(+)$ 이며 리스트에서 제거되며 $GV23(+)$ 의 리스트에서 모든 부경로가 제거된다.

- $$\{GV45(+)\rightarrow GV52(+), GV34(+)\rightarrow GV45(+), GV23(+)\rightarrow GV34(+)\}$$
- $$GV34(+): \rightarrow GV45(+)\rightarrow GV52(+)\rightarrow GV23(+)$$
- $$GV45(+): \rightarrow GV52(+)\rightarrow GV23(+)$$
- $$GV52(+): \rightarrow GV23(+)$$
- ⑥ 오프라인 분석 결과는 다음과 같이 얻어진다.
 $\{GV45(+)\rightarrow GV52(+), GV34(+)\rightarrow GV45(+), GV23(+)\rightarrow GV34(+), GV52(+)\rightarrow GV23(+), GV45(+)\rightarrow GV52(+), GV34(+)\rightarrow GV45(+)\}$
 - ⑦ $GV45(+)\rightarrow GV52(+), GV34(+)\rightarrow GV45, GV23(+)\rightarrow GV34(+)$ 의 부경로가 순차적으로 평가되면, NCG를 사용하여 $GV52(+)\rightarrow GV23(+), GV45(+)\rightarrow GV52(+), GV34(+)\rightarrow GV45(+)$ 의 부경로가 평가될 수 있으므로 이 경로들은 제거한다. 따라서, 최종적인 부경로 평가순서는 다음과 같다.
 $\{GV45(+)\rightarrow GV52(+), GV34(+)\rightarrow GV45, GV23(+)\rightarrow GV34(+)\}$

Fig. 6의 통로변수가 모두 활성화되었다고 할 때의 온라인진단순서는 다음과 같다.

- ① 각 통로변수가 가지는 NCG가 계산된다. 이 사이클내의 모든 통로변수의 NCG를 합하여 오프라인 분석에서 얻어진 값과 같으면 이 사이클이 형성된 것으로 판단한다. 합이 4이므로 평가가 시작될 수 있다.
 $GV12(+): 1 \quad GV23(+): 1 \quad GV34(+): 1$
 $GV45(+): 2 \quad GV57(+): 0 \quad GV52(+): 1$
 $GV65(+): 1$
- ② $GV45(+)\rightarrow GV52(+), GV34(+)\rightarrow GV45, GV23(+)\rightarrow GV34(+)$ 의 순으로 강제평가하고 $GV23(+)$ 의 NCG를 1 줄인다. 그러면 $GV23(+)$ 의 NCG가 0이므로 $GV23(+)$ 에서 이상으로의 부경로가 평가될 수 있다. $GV23(+)$ 의 NCG가 0이므로 $GV12(+)\rightarrow GV23(+)$ 의 경로가 평가되고 $GV12(+)$ 의 NCG가 0이 된다. $GV52(+)\rightarrow GV23(+), GV45(+)\rightarrow GV52(+), GGV65(+)\rightarrow GV52(+), GV34(+)\rightarrow GV45(+)$ 의 순서로 평가되고 각 통로변수에서 이상으로의 부경로가 평가된다.

결과적으로 모든 부경로를 평가하는 순서는 다음과 같다.

- $$GV57(+)\rightarrow GV45(+), GV45(+)\rightarrow GV52(+), GV34(+)\rightarrow GV45(+), GV23(+)\rightarrow GV34(+),$$

$GV12(+)\rightarrow GV23(+)$, $GV52(+)\rightarrow GV23(+)$,
 $GV45(+)\rightarrow GV52(+)$, $GV65(+)\rightarrow GV52(+)$,
 $GV34(+)\rightarrow GV45(+)$

이 방법은 다음과 같이 보일러공정에 적용된다. $GVMQ(+)\rightarrow GVMFS(+)$ 의 사이클이 가능한데 오프라인 분석을 통해 다음과 같이 평가순서를 결정한다.

- ① 사이클 내의 모든 통로변수의 NCG를 합하면 2이다.
- ② 각 통로변수의 통로변수 \rightarrow 통로변수 부정로를 구하면 다음과 같다.

$GVMQ(+):\rightarrow GVMFS(+)$

$GVMFS(-):\rightarrow GVMQ(+)$

- ③ $GVMQ(+)\rightarrow GVMFS(+)$ 의 부정로가 임의로 선택되고 첫 번째 평가될 부정로가 된다. 다음 부정로는 $GVMFS(+)\rightarrow GVMQ(+)$ 의 부정로이다. 따라서, 부정로 평가순서는 다음과 같다.

$\{GVMQ(+)\rightarrow GVMFS(+), GVMFS(+)\rightarrow GVMQ(+)\}$

- ④ $GVMQ(+)\rightarrow GVMFS(+)$ 가 평가되면, $GVMFS(+)\rightarrow GVMQ(+)$ 는 NCG를 사용하며 평가될 수 있으므로 평가순서에서 이 부정로를 제외한다.

$GVMQ$ 와 $GVMFS$ 가 (-)부호를 가질 때도 같은 방법이 사용된다.

제안된 방법을 이용하면 매우 복잡한 사이클도 처리할 수 있다.

V. 결 론

이 연구에서는 대형공정의 이상진단시스템 개발을 용이하게 하기 위해 정성적 이상진단법에 기반한 계분할법을 제안하였다. 계분할을 통해 다음과 같은 이점을 얻을 수 있었다.

- 조업조건 변화에도 유연한 진단
- 지식베이스의 크기 축소
- 복잡한 지식베이스의 이해도 증가
- 지식베이스의 일관되고 신뢰성있는 구축 및 유지

감 사

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음(KRF-99-003-E00446).

사 용 기 호

D : path-likelihood계산식의 분모

ESP : set of explained-subpattern

F : 이상

FL : fault-likelihood

G : 통로변수

N : path-likelihood계산식의 분자

SP : 부패턴

VC : 변수클러스터

참 고 문 헌

- [1] Becraft, W.R., Guo, D.Z., P.L. Lee and R.B. Newel: "Fault Diagnosis Strategies for Chemical Plants : A Review of Competing Technologies", *Proc. on Process Systems Engineering '91*, 2, 12.1-12.15 (1991).
- [2] Finch, F.E. and M.A. Kramer: "Narrowing Diagnostic Focus Using Functional Decomposition", *AIChE J.*, 34, 25-36 (1988).
- [3] Lee, G., B. Lee, E.S. Yoon and C. Han: "Multiple Fault Diagnosis under Uncertain Conditions by the Quantification of Qualitative Relation", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, 988-998 (1999).
- [4] McDowell, M. and J.F. Davis: "Managing Qualitative Simulation in Knowledge-Based Chemical Diagnosis", *AIChE J.*, 37, 569-580 (1991).
- [5] Nam, D.S.: "Fault Diagnosis using the Extended Symptom-Fault Association Model in the Continuous Chemical Processes", Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea (1995).
- [6] Shiozaki, J., H. Matsuyama and E. O'Shima, M. Iri: "An Improved Algorithm for Diagnosis of System Failures in the Chemical Process," *Computers chem. Engng.*, 9, 285-293 (1985).