

이단계 진단전략을 이용한 대형화학공정의 이상진단에 관한 연구

A Study on Fault Diagnosis of Large Chemical Processes based on Two-Tier Strategy

°오영석, 이병우, 윤인섭

서울대학교 화학공학과(Tel: 02-887-7232; Fax: 02-884-0530; E-mail: oyserver@pslab.snu.ac.kr)

Abstracts This paper presents an efficient fault diagnosis methodology for large chemical processes. The methodology is based on a two-tier strategy. When a fault occurs in a process, a top tier identifies the sector (process part or unit) that may contain the fault(s). Afterwards, a bottom tier or lower level evaluates the suspicious sector. The process modeling methodology based on functionality-behavior relations of process units, is proposed and utilized in the top-tier. This methodology models a target process as sequences of functions and variables and their relations. In the bottom tier, each sector has a dedicated diagnostic module, which is tailored to the available information or models of the sector. For the sectors selected in the top-tier diagnosis, each diagnostic module is executed to identify the actual faults within the sector. The utility of the methodology is illustrated in the diagnosis of the CSTR with heat exchanger.

Keywords two-tier strategy, functionality, behavior, dedicated diagnostic module

1. 서론

화학공장은 수많은 기계장치, 용기, 배관, 측정감지기, 작동기, 제어기, 전기장치, 감시 및 제어 시스템 등으로 구성되어 있으며 이들이 모두 정상적으로 작동하리라는 기대치가 상당히 낮은 편이다. 따라서, 원하는 조업조건을 벗어나 비정상적인 조건에서 공정이 운전됨으로 인한 경제적 손실과 안전사고 및 환경오염 등을 조기에 방지하기 위한 이상감지 및 이상진단 시스템에 대한 관심이 증가되고 있다[2]. 그러므로 지속적으로 공정의 상태를 감시하고 정보를 체계적으로 정리하여 정확한 공정정보를 제공하며, 원하는 운전조건에서 조업이 가능하도록 공정을 유지하고, 이상 발생 시 이상의 심각성에 따라 운전의 계속 여부와 운전조건의 변화를 지시하며 적절한 대응조치를 조업자에게 제공하는 조업 지원 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

지금까지 이상진단방법론으로 전문가시스템, 인공신경망, 부호유향그래프, 관측자/필터를 이용한 방법 등이 제안되어 사용되고 있으며, 많은 경우에 대해서 좋은 결과를 주고 있다[1]. 그러나, 대상공정의 규모가 커질수록 진단지식베이스 구축이나 모델 구성에 있어서 한계점을 보이고 있다. 이러한 문제점을 다루기 위하여 전체공정을 계층적 구조를 통하여 표현하는 방법과 몇 개의 부시스템으로 분할하는 방법이 사용되고 있다. 전자의 경우는 이상전과의 영향을 고려하기 어려우며, 각 계층에서의 공정상태표현이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 후자의 경우, 진단지식베이스나 진단모델 구축을 용이하게 할 수는 있지만, 적용하고 있는 진단법이 지니는 한계점 자체를 해결한 것은 아니다.

따라서, 본 연구에서는 대형화학공정에 적합한 진단전략을 제시하는 것을 목표로 한다. 전체공정을 몇 개의 부시스템으로 나누고, 그 부시스템 중 이상이 있는 곳을 찾아내는 시스템 진단과 이상이 있다고 의심되는 부시스템 내에서 구체적인 이상원인을 찾아내는 상세 진단 단계로 구성된 이단계 진단전략을 제시하고 사용하였다. 제시된 방법을 열교환기가 있는 연속교반조반응기에 적용하여 진단성능을 검증하였다.

2. 이단계 진단전략

본 연구에서 제시한 진단전략을 개념도로 나타내면 그림1과 같다. 대상공정에 어떠한 변화가 발생하였을 경우, 전체 공정을 대상으로 최종 이상원인을 찾아내는 것이 아니라, 이상이 있다고 생각되는 부시스템을 먼저 찾은 다음 그 부시스템 내에서 구체적인 이상원인을 찾게 된다.

2.1. 시스템 분할

대상공정이 클 경우에는 시스템을 분할하여 접근하게 된다 [3]. 특히, 대상시스템 내에 여러 종류의 공정 장치가 포함되어 있어서, 각 장치마다 우리가 구할 수 있는 정보의 종류가 다를 경우가 많이 있다. 예를 들어, 어떠한 장치는 상당히 정확한 수학적인 모델을 얻을 수 있는 반면 또 다른 장치는 인과관계 정도만 파악할 수 있는 경우가 있다. 이러한 경우에, 전체적으로 한가지 진단법을 적용하려면 가장 정보의 질이 낮은 쪽으로 모델을 구성할 수밖에 없으며, 따라서 사용 가능한 정보를 잃게 된다. 이러한 정보손실을 최소화 할 수 있도록 같은 혹은 비슷한 수준의 정보를 얻을 수 있는 장치나 유닛을 하나의 부시스템으로 묶고 그 부시스템 내에서만 적용할 수 있는 진단방법을 구축할 수 있다. 시스템 분할 기준으로는 물리적인 장치 혹은 경계를 사용하거나 기능(function)을 사용할 수 있다. 그러나, 기능적으로 분할된 부시스템은 여러 장치들이 기능적으로만 연결되어 있어 각 장치에 대해서 사용 가능한 정보나 모델 등을 고려하지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 P&ID나 PFD에 나타나는 단위장치의 물리적인 경계를 기준으로 시스템을 분할하되, 이웃하는 서로 비슷한 수준의 정보를 가지고 있는 장치는 하나로 묶는다. 이렇게 함으로써 상세진단에서는 추가적인 진단전략 없이 이미 사용 가능한 진단방법을 적용하기만 하면 된다는 장점을 가질 수 있다. 또한, 이러한 기준으로 시스템을 분할할 경우, 분할된 부시스템은 조업자에게 익숙한 장치 혹은 장치군으로 되어 있어서 이해하기가 쉽다.

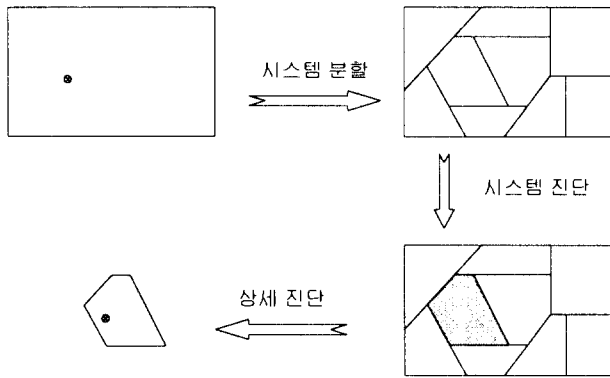


그림 1 이단계 진단전략 개념도

Fig. 1 The conceptual diagram of the two-tier strategy

2.2. 시스템 진단

분할된 부시스템 중 어느 부시스템이 이상을 포함하고 있는지를 찾아내는 단계이다. 이 단계에서는 다음 장에서 설명할 기능과 거동을 중심으로 한 공정장치 혹은 장치군에 대한 모델을 사용하여 추론을 한다.

2.3. 상세 진단

시스템 진단 단계에서 선정된 부시스템에 대해서, 그 부시스템의 전용 진단방법(dedicated diagnostic module)을 이용하여 구체적인 이상원인을 찾아내는 단계이다.

2.4. 추론

본 연구는 시스템 진단에 중점을 두어서 수행하였다. 일단 이상이 있는 부시스템을 찾아내면, 그 부시스템 내에서의 이상진단은 기존의 방법으로 충분하도록 대상시스템을 분할하였기 때문이다. 따라서, 추론 알고리즘은 시스템 진단 단계를 대상으로 하며, 그 과정에 대해서 상세하게 기술한다.

추론은 EventList를 중심으로 수행한다. EventList는 대상공정에서 나타난 변수의 변화를 저장하고 있는 공간이다. 대상공정이 커질수록 관측값의 개수는 많아지고, 이 많은 관측값에 동일한 관심을 가지는 것은 비효율적이다. 따라서, 품질이나 안전 등과 관련된 공정 전반에 관한 사항을 나타내는 주요변수와 그외의 변수를 나누어서 모니터링한다. 주요변수의 변화는 EventList의 Key슬롯에 부변수의 변화는 Sub슬롯에 저장을 한다. 진단은 주요변수에 변화가 생긴 경우에 시작한다. 그외에 추론에 사용되는 몇가지 용어를 정의하고 설명한다.

①공정상태: 변수의 변화 여부를 표시하는 것으로, 보통의 정성적인 방법에서 사용하는 정상, 증가, 감소 외에 Shewhart control chart에서 구할 수 있는 증가 경향과 감소 경향을 추가하여 총 5개의 상태를 사용한다.

②기능상태: 다음장에서 설명할 기능의 변화 여부를 표시하는 것으로, 원래보다 더 강한 영향을 주는 것을 나타내는 More, 변화가 없음의 Same, 더 약한 영향을 나타내는 Less가 있다.

③PossiblyWorkingList: 이상진단이 시작되기 전까지는 보통 모든 구성요소가 주어진 역할을 제대로 수행하는 즉, 이상이 없는 상태로 생각을 한다. 시간이 지남에 따라 어느 시점에서 주요변수가 주어진 한계치를 벗어나서 이상진단을 시작하게 된다. 이때 잡음 등의 원인으로 정확한 판단을 내리기는 어려우나 주위의 정황(공정의 변화 경향)을 볼 때 고장이 없다고 생각되는(해석하기에 따라서는 이상이 있을 수 있는 후보 또는 추후에 검증하여야 할 대상으로 생각할 수 있다) 장치의 이름 또는 장치의 기능

과 그것이 정상으로 판단되어지기 위해 필요한 조건을 가지고 있는 리스트이다.

④PossibleFaultList: PossiblyWorkingList와 같은 방식으로 구성되어 있으며, 다만 어떠한 조건만 만족하면 확실한 이상원인이 되는 공정 장치나 공정의 기능을 저장하는 리스트이다.

이상의 정의된 용어를 사용한 추론과정은 그림2와 같다. 기본적으로 선택한 이상후보가 EventList에 저장되어 있는 공정의 변화를 모두 설명할 수 있으면, 그것을 최종 원인으로 제시한다는 전략이다.

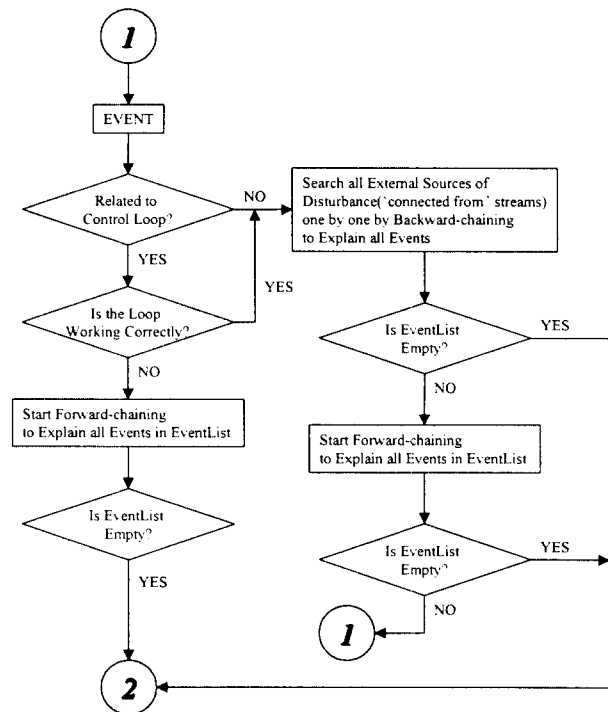
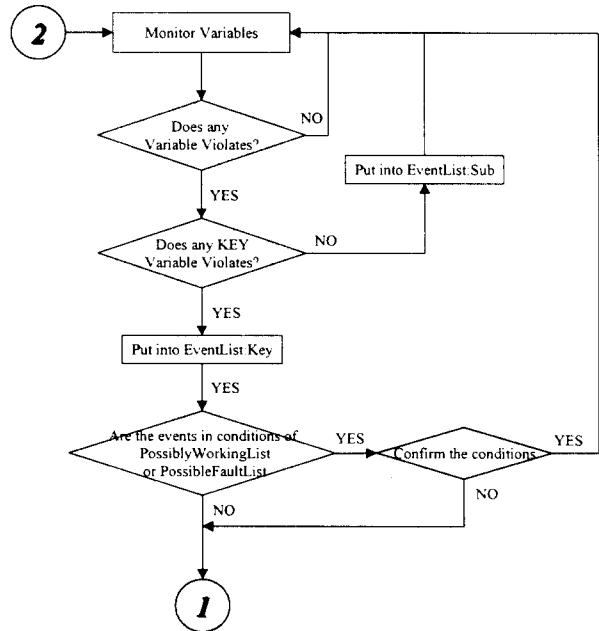


그림 2 추론 알고리즘

Fig. 2 The reasoning algorithm

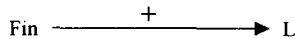
3. 공정 모델링

3.1 기능과 변수의 관계 모델링

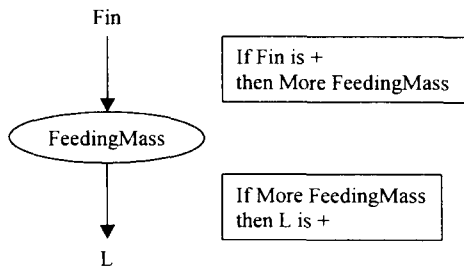
공정에 대한 모델링방법은 크게 대상공정의 거동을 표현하는 방법과 기능을 표현하는 방법으로 나눌 수 있다. 변수들간의 인과 관계나 수학적인 관계에 초점을 둔 거동모델링 방법은 국부적인 변수간의 인과관계에 치중하며, 공장 장치의 상태 자체를 표현하기보다는 공정 상태에서 파생되는 변수들의 결과적인 상태를 나타내는 것이다. 다루어야 할 변수의 개수가 많아질수록 심각한 어려움에 부딪히는 것이 거동모델링 방법이다. 기능모델링의 경우, 대상공정을 구성하는 장치들의 기능에 초점을 두으로써 대형공정을 다룰 수 있는 가능성이 있다. 그러나, 지금 사용되고 있는 Multilevel Flow Modeling이나 Goal Tree-Success Tree와 같은 방법들은 화학공정과 같이 상호작용이 복잡하고 반응이 일어나는 시스템에는 적용하기가 어렵다[4].

따라서, 본 연구에서는 각각의 단점을 극복하기 위하여 기능과 변수와의 관계를 토대로 공정을 모델링한다. 변수의 변화는 어떠한 기능을 매개로 이루어지는 것으로 생각한다. 즉, 개념적으로 어떠한 변수의 변화가 다른 변수에 직접 영향을 미치는 것이 아니라, 그 사이에 있는 기능에 변화를 준다. 그 기능의 변화는 다시 연결되어 있는 변수에 변화된 기능에 해당하는 영향을 주어, 결과적으로 변수의 변화를 야기시키는 것이다.

예를 들어, 저장 탱크의 수위에 입력스트림의 유량이 미치는 영향은 SDG로 모델링한 것과 중간에 'FeedingMass'란 기능을 넣어서 모델링한 것을 그림3에 나타내었다. 그림3(b)을 보면, Fin과 FeedingMass사이의 관계를 나타내는 규칙과 FeedingMass가 L에 미치는 기능을 나타내는 규칙이 부가되어 있다. 자세히 설명하면, 저장탱크에 대해서 입력스트림의 유량은 물질(material)을 얼마나 공급하는지의 기능을 하고 있다. 이를 'FeedingMass'로 표시하였다. 이 FeedingMass기능은 Fin의 유량에 따라 더 많은 기능(More)을 할 수도 있고, 아니면 더 적은 기능(Less)을 할 수도 있다. 저장 탱크의 입장에서 물질이 많이 공급이 되면(More FeedingMass) 수위가 증가할 것이고, 그 반대의 경우는(Less FeedingMass) 수위가 감소할 것이다.



(a) Part of SDG for storage tank



(b) Part of functional model for storage tank

그림 3 저장탱크에 대한 모델 비교

Fig. 3 Comparison of models for storage tank

제시된 모델링 방법의 가장 큰 장점으로서는 여러 공정장치를 하나로 묶어서 하나의 기능을 하는 장치로 생각을 하여 모델링할 수 있다는 점이다. 그림4를 예로 살펴보자. 공정장치 A(unit A)의 출구스트림을 입력스트림으로 하여 반응을 하는 반응기, 반응물을 분리시키는 분리기, 분리된 미반응물을 열교환을 통하여 다시 반응기로 공급하는 재순환흐름, 분리기의 하단흐름을 다시 공정장치 B에 공급하는 시스템이 있다고 생각하자. 이 시스템에 대한 모델링에 있어서, 반응기, 분리기, 열교환기를 따로 모델링해도 되지만, 이 부분이 아주 큰 전체공정의 작은 일부분이라고 생각한다면, 비효율적인 모델링이 된다. 따라서, 이 부분을 'Reaction'이라는 기능을 담당하는 하나의 공정장치처럼 모델링할 수 있다. 즉, 세 공정장치로 이루어진 부분을 기능적으로 추상화하여 나타낸 것이다. 이렇게 함으로써 대형 화학공정을 독립된 여러개의 기능 장치로 표현하여 간략화 시킬 수 있는 것이다. 이렇게 표시된 시스템에 대해서도 역시 동일한 지식표현을 사용할 수 있으므로, 일관성 있는 처리가 가능하다.

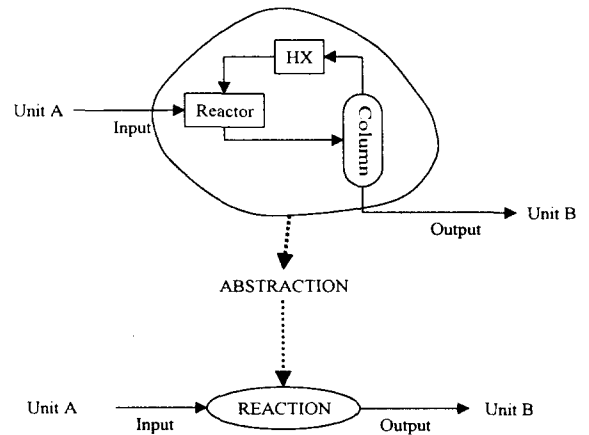


그림 4 공정장치의 기능적 추상화

Fig. 4 Functional abstraction of process units

4. 사례연구

4.1 대상공정

제안된 진단전략을 재순환과 열교환기가 있는 연속교반조 반응기에 적용하였다. 이 공정은 반응기, 열교환기, 펌프, 제어기, 밸브, 파이프로 구성된 반응기시스템으로 1차비가역반응 $A \rightarrow B$ 가 일어난다. 반응기의 온도는 생성물을 일부 재순환시켜 조절되는데, 순환되는 생성물은 열교환기를 통해 냉각된다. 이 공정은 3개의 되먹임 제어루프가 있는데 사용되는 제어기는 PI제어기이다. 각 제어기는 반응기의 액위, 생성물의 순환 유량, 반응기의 온도를 각각 제어한다[5].

본 예제는 제안된 모델이 시스템 진단에 잘 사용됨을 입증하기 위하여 선택하였으며, 시스템 분할은 각각 독립된 공정장치별로 분할하였다.

4.2 모델구성

본 대상공정에 대하여 3장에서 제시한 모델링 방법을 이용하여 반응기, 열교환기, 스트림 등에 대한 기능-거동 모델을 구성하였으며, 이 모델들을 시스템 진단단계에서 사용하였다. 그리고, 대상공정을 전체적인 관점에서 모니터링하는데 사용되는 주요변수로서는 반응기 온도(T)와 수위(L), 반응물 농도(CB)를 선택하였으며, 이 변수들에 변화가 생겼을 경우 진단을 수행하였다.

표 2 시간별 각 리스트의 요소
Fig. 2 Elements of each list over time

Time (sec)	EventList	PossiblyWorkingList	PossibleFaultList
135	CT-	-	-
140	T- CL- CR- FP-	Control_T	FW_ic
		Stream6	TR_ic FR_ic
		Control_L	L_dc
		HX	TR_ic FR_ic
145	FW-	Control F	FR ic
		Stream6	TR_ic FR_ic
		Control_L	L_dc
150	FR+ TR+	HX	TR_ic FR_ic
		Control F	FR ic
150	FR+ TR+	Control_L	L_dc
			Reactor
160	L-		CA+ CB- L-
			Reactor
245	CA+ CB-		CA+ CB-
			-

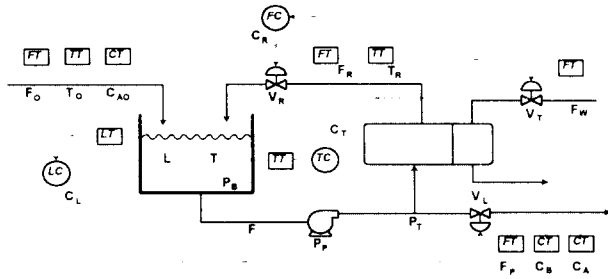


그림 5 CSTR공정 흐름도
Fig. 5 Process flow diagram of the CSTR process

4.3. 진단사례

반응기가 새는 경우에 대한 구체적인 진단과정에 대하여 설명한다. 정상상태 하에서 운전되는 중 시간 100초에 반응기가 새는 경우를 모사하였다. 반응기가 새기 시작하면서 수위(L)가 감소하기 시작한다. 이에 따라, 수위제어기의 출력(CL)이 감소하여 생성물의 유량(FP)이 감소한다. 온도(T)도 함께 감소하여 온도제어기의 출력(CT)이 감소하여 냉각수 유량(FW)을 줄인다. 또한 CA는 증가하고 CB는 감소함을 보이고 있다. 시간별로 발생한 증상을 다음 표1과 같다.

표 1 반응기가 새는 경우 시간에 따른 증상
Table 1 Symptoms over time in case of reactor leakage

Time(s)	135	140	145	150	160	245
Symptom	CT-	CL- CR- FP- T-	FW-	FR+ TR+	L-	CA+ CB-

가장 처음 나타나는 증상은 온도제어기의 출력감소이다. 그러나, 이는 주요변수가 아니므로 EventList의 Sub숫자에 저장하고 계속 모니터링을 진행한다. 140초에 다른 여러 증상과 함께 반응기의 온도감소가 나타났으며, 따라서 진단을 수행한다.

그림2의 추론 알고리즘에 따라, 반응기의 온도와 관련된 제어기가 있는지 확인한다. 그 결과 반응기 온도-제어출력-냉각수 유량의 제어루프가 있으며, 각 변수의 움직임을 보면 제어기가 올바르게 작동함을 알 수 있다. 단, 냉각수 유량(FW)은 감소경향만을 보이고 있으므로, 이를 PossiblyWorkingList에 저장한다. 이는 추후에 확인작업이 필요함을 뜻한다.

다음으로 외부교란에 의한 가능성을 살펴본다. 그 결과 관찰된 변수변화를 설명할 수 없다. 마지막으로 반응기 내부원인에 의한 가능성을 살펴본다. 그 결과, 관찰된 변화를 모두 설명할 수 있기 때문에, 반응기에 이상이 있다고 결론을 내린다. 표2의 140초를 지시하고 있는 줄에는 여기까지의 진단결과 알 수 있는 각 리스트-EventList, PossiblyWorkingList, PossibleFaultList-의 요소가 표시되어 있다. 145초가 되면, 냉각수 유량이 감소하는 변화가 나타나고 이는 온도제어기와 함께 PossiblyWorkingList의 조건으로 이미 저장되어 있으며, 온도제어기가 올바르게 작동하고 있음을 확인해 주는 변화다. 이미 추론과정 중에 사용했던 가정을 확인(confirm)해주는 변화가 나타난 경우는 더 이상의 새로운 추론은 필요하지 않다. 이러한 방식으로 계속 진단을 수행하여 245초에 반응기의 농도변화가 관측되면서, 반응기 내부에 이상이 있음을 완전히 확인할 수 있다. 계속되는 상세진단에서는 반응기 내부원인 중 반응기가 새는 경우라는 최종적인 결론을 내리게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 대형화학공정에 대한 이상진단방법론으로 이 단계로 구성된 진단전략을 제시하였다. 이단계 진단전략은, 대형 시스템을 전체적으로 하나로 두고 이상진단을 수행하는 것이 아니라, 전체 시스템을 몇 개의 부시스템으로 분할하고, 분할된 부시스템 중 어디에 이상이 있는지를 찾아내는 시스템 진단과 이상을 포함하고 있다고 의심이 되는 부시스템에 가장 적합한 진단방법을 이용하여 구체적인 이상원인을 찾아내는 상세진단으로 구성되어 있다. 시스템 진단 단계에서 이용할 수 있는 이상진단 모델로서 기능과 거동을 동시에 표현한 기능-거동 관계 모델을 제안하여 사용하였다.

제안된 방법의 진단성능을 검토하기 위하여 열교환기가 있는 연속교반조 반응기에 적용하였으며, 시스템 진단의 결과 이상원인을 가지고 있는 부시스템을 잘 찾고 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] W.R. Becraft, D.Z. Guo, P.L. Lee and R.B. Newell. "Fault Diagnosis Strategies for Chemical Plants: A Review of Competing Technologies." *Proc 4th Intl Symp. on Process Systems Engineering*, vol.2, pp.12.1-12.15, 1991.
- [2] Y. Oh, K.J. Mo, J.H. Yoon and E.S. Yoon. "Fault Diagnosis Based on Weighted Symptom Tree and Pattern Matching". *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol.36, pp.2673-2678, 1997.
- [3] E. O'Shima and H. Matsuyama. "Practical Problems in Application of Failure Diagnostic Systems". *Proceedings of 5th International Symposium on Process Systems Engineering*, pp.925-930, 1994.
- [4] B. Riera, E. Cherifi, B. Vilain and P. Millot. "Functional Analysis and Process Supervision". *Proceedings of the Third International Workshop on Functional Modeling of Complex Technical Systems*, pp.81-108, 1995.
- [5] 오영석, 윤종한, 윤인섭. "정성적, 정량적 기법의 혼합 전략을 통한 화학공정의 이상진단에 관한 연구". '96 한국자동제어 학술회의 논문집, 제1권, pp.714-717, 1996.