

정성적, 정량적 기법의 혼합 전략을 통한 화학공정의 이상진단에 관한 연구

A Study on Fault Diagnosis for Chemical Processes Using Hybrid Approach of
Quantitative and Qualitative Method

°오 영 석, 윤 종 한*, 윤 인 섭

서울대학교 화학공학과(Tel: 873-2605; Fax: 884-0530; E-mail: Oyserver@pslab.snu.ac.kr)

*LG 엔지니어링 프로세스팀(Tel: 705-2583; Fax:716-6887)

Abstracts This paper presents a fault detection and diagnosis methodologies based on weighted symptom model and pattern matching between the coming fault propagation trend and the simulated one. At the first step, backward chaining is used to find the possible cause candidates for the faults. The weighted symptom model(WSM) is used to generate those candidates. The weight is determined from dynamic simulation. Using WSMs, the methodology can generate the cause candidates and rank them according to the probability. Secondly, the fault propagation trends identified from the partial or complete sequence of measurements are compared to the standard fault propagation trends stored *a priori*. A pattern matching algorithm based on a number of triangular episodes is used to effectively match those trends. The standard trends have been generated using dynamic simulation and stored *a priori*. The proposed methodology has been illustrated using two case studies and showed satisfactory diagnostic resolution.

Keywords fault diagnosis, pattern matching, weighted symptom model, TE process, dynamic simulation

1. 서론

화학공장은 수많은 기계장치, 압력 또는 비압력 용기, 배관, 측정감지기, 작동기, 제어기, 전기장치, 감시 및 제어 시스템 등으로 구성되어 있으며 이들이 모두 정상적으로 기능 또는 작동하리라는 기대치가 상당히 낮은 편이다. 그러므로 원하는 조업조건을 벗어나 비정상적인 조건에서 공정이 운전됨으로 인한 경제적 손실과 안전 사고 및 환경오염 등을 조기에 방지하기 위한 이상감지 및 이상진단 시스템에 대한 관심이 증가되고 있다[3]. 그러므로 지속적으로 공정의 상태를 감시하고 정보를 체계적으로 정리하여 정확한 공정 정보를 제공하며, 원하는 운전조건에서 조업이 가능하도록 공정을 유지하고, 이상의 발생시 이상의 심각성에 따라 운전의 계속 여부와 운전조건의 변화를 지시하며 적절한 대응조치를 조업자에게 제공하는 조업 지원 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 본 연구의 목적은 비선형도가 심하고 동적인 특성을 가지는 화학공정에 적합한 이상진단을 위하여 공정의 정량적, 정성적인 모델링 혼합한 방법을 통한 진단전략을 수립하는데 있다.

2. 정성적/정량적 이상진단 시스템의 비교

2.1 정성적/정량적 이상진단법의 장단점

정성적 이상진단 시스템이 정량적 이상진단 시스템 보다 대체적으로 비교적 쉽게 구성될 수 있으며 확장이 용이하고 시스템에 대한 이해가 쉬우며 진단시간이 짧아 실시간에 적합하다. 그러나 정량적인 정보를 정성적인 형태로 바꾸는 과정에서 생기는 정보의 손실로 인하여 진단의 선명도가 떨어져서 많은 가짜 해를 제시하며, 시스템의 복잡한 동적 거동을 나타내는 데는 부적합하거나 미흡하다는 단점이 있다.

반면 정량적인 이상진단 시스템 경우는 정성적인 이상진단 시스템에 비해 진단의 선명도가 높으며 동적 거동을 나타내는 데도 유리하나 이상진단의 성능이 공정모델의 유용성과 정확도에 크게 좌우된다. 그러나 공정의 정확한 모델을 세우기가 어렵거나 불가능한 경우가 있을 수 있으며 진단 시스템의 구축에 많은 노력이 필요하고 시스템의 수정이나 확장에도 어려움이 많다. 비선형 모델이 사용될 때는 계산량이 많으며 특히 온라인 모델링은 더 많은 계산이 필요하게 되므로 시스템의 동특성을 묘사하는 것이 힘들고 여러 종류의 이상을 수치적으로 표현하기 난이하다는 단점이 있다

2.2 제안된 이상진단방법

이상진단은 추론 방법론적으로 본다면 전향추론과 후향추론의 두가지로 나눌 수 있다. 전향추론은 이상원인으로부터 증상들의 변화를 추론해 가는 방법이다. 이상원인에 대한 충분한 정보만 주어 진다면 적절한 시스템의 동적모델을 이용하여 전향추론으로 명확한 출력 상태들을 유추해 낼 수 있다. 시스템의 동적 거동이 복잡한 경우에도 이 방법이 비교적 간편하다. 그러나 이상원인에 대한 필요한 정보가 부족한 경우가 대부분이므로 다른 추론방법이 필요하다. 추론방법의 다른 하나는 후향추론으로 증상으로부터 이상의 원인을 유추해 가는 방법으로 시간 향이 반대 방향이므로 시스템의 동적 거동을 직접 적용시킬 수는 없다. 그러므로 본 연구에서는 후향추론에 의해 가설들 즉 이상원인 후보들을 순위와 함께 선정한 후 전향추론에 의해 각 가설들을 차례로 검증한다. 후향추론의 기법으로는 가중 증상 모델(weighted symptom model)을 제안하며, 전향추론의 기법으로는 동적모사 와 패턴매칭 기법을 병행한다.

3. 가중증상모델

3.1 증상트리모델(symptom tree model, STM)

STM은 인과 관계 모델 중 하나로 공정에 위협한 사건을 일으키는 측정 가능한 공정 변수의 증상을 정상 사건으로 하여 이것을 일으키는 모든 이상원인을 한 트리상에 연결한 모델로서, 발생한 증상에 관계되는 이상원인들의 교집합으로부터 이상원인을 찾아낸다.

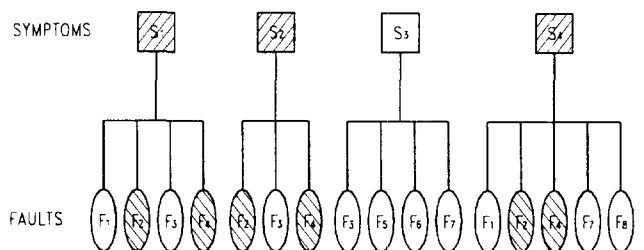


그림 1. 증상트리모델.
Fig. 1. Symptom tree model.

3.2 가중증상모델(weighted symptom model, WSM)

STM의 다른 단점으로는 원인후보들 사이의 순위를 정하지 못한다는 점이다. 즉 어떤 원인후보는 어떠한 증상이 일어났을 경우 다른 후보들 보다 이상의 원인이 될 가능성이 많을 수 있으며, 이를 고려하기 위하여 그림 2처럼 증상과 원인후보간의 가치에 가중치를 주어 STM을 보완한 모델이 WSM이다.

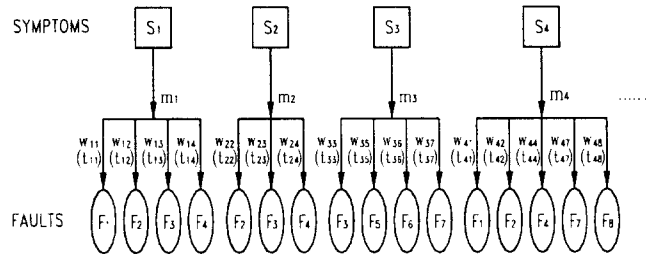


그림 2. 가중증상모델.
Fig. 2. Weighted symptom model.

WSM은 증상과 이상원인후보 사이에 다음과 같은 정보를 포함한다.

- (1) m_i : 증상 발생에 대한 자격값으로, 퍼지집합의 사다리꼴 형태의 함수를 사용한다.
- (2) w_{ij} : S_i 증상이 F_j 원인후보의 선정에 기여하는 기여도로서 가중치라고 정의한다. 항상 나타나는 증상에는 일어난 특정한 이상에 대한 기여도를 더 많이 줌으로써 진단의 선명도를 높일 수 있다. F_j 원인후보에 관계되는 모든 증상의 기여도의 합은 1이다.

w_{ij} 는 그림 3에서 보는 바와 같이 여러 운전조건에서 가중된 이상 F_j 발생시의 동적모사를 하여 나온 통계치로 쉽게 구할 수 있다. 그림 3에서 z_{ik} 는 동적모사에 의한 증상의 크기(r_{ik})와 한계치와의 비이다. w_{ij} 는 다음 식에 의해 구해진다.

$$w_{ij} = (d_k \times f_k \times m_{ik}) / (\sum d_k \times f_k \times m_{ik}) \quad (1)$$

여기에서 아래 첨자 k 는 운전모드를 의미한다. d_k 는 공정의 총 운전시간 중에 k 모드 운전조건으로 운전되는 시간을 %로 나타낸 것이며, f_k 는 k 모드운전시 F_j 이상 발생이 일어날 상대적 확률을 표시한다. WSM을 사용하여 원인후보의 순위결정 및 선정은 다음과 같다.

- (1) 모든 증상에 대하여 m_i 를 계산한다.
- (2) m_i 가 0이 아닌 증상을 찾아낸다.
- (3) m_i 가 0이 아닌 증상에 포함된 모든 이상원인 후보에 대하여 식 (2)와 같이 원인후보 가능성 P_j 를 계산한다.

$$P_j = \sum_i (m_i \times w_{ij}) \quad (2)$$

- (4) P_j 가 큰 순으로 2-4 가지 원인후보를 선정하고 순위를 정한다.

증상에는 잔여치, 측정 및 미측정 공정 변수, 잔여치에 대한 CUSUM은 물론이며 경험적인 지식도 포함될 수 있다. 가중치 w_{ij} 는 가상적인 이상상황 하에서 동적모사에 의해 구한 자격값 m_i 로부터 식(1)에 의해 구할 수 있으나, 운전 경험과 지식을 바탕으로 하여 증상과 이상간의 가중치를 정할 수 있다.

이상에서 언급한 WSM의 장점을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 선정된 이상원인 후보의 순위를 결정하여 준다.
- (2) 확률적 해석에 의한 방법이 아닌 실제의 동적모사에 의해 통계적으로 구한 가중치의 사용함으로써 대상 공정에 적합하게 적용될 수 있다.
- (3) 운전 경험과 지식을 바탕으로 하여 증상과 이상간의 가중치를 정할 수 있으므로 경험적 지식이 추가될 수 있다.

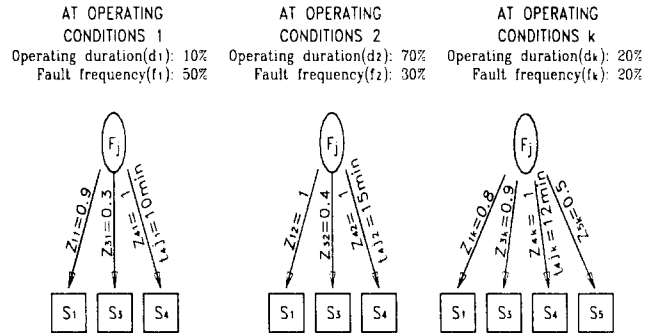


그림 3. w_{ij} 의 계산예
Fig. 3. An illustrated calculation of w_{ij}

4. 패턴매칭에 의한 이상진단

시간에 따라 공정 데이터가 만드는 경향은 조업자에게 과거와 현재 공정의 동적 거동을 포함한 조업 상황을 제공하며, 조업을 최적 상태로 유지하기 위한 기초 자료로 이용된다. 이 경향이 어떤 패턴으로 나타낼 수 있다면 조업자들은 훨씬 쉽게 공정의 조업 상태를 파악, 진단과 제어에도 이용될 수 있다.

4.1 삼각형 에피소드를 이용한 패턴인식

Cheung 등[1]은 공정 변수의 경향을 7개의 삼각형 에피소드들의 패턴을 이용하여 함축적으로 표현하였으며, 유연한 시간 스케일 등을 사용하여 공정 변수의 경향을 잘 구분하였고 강건한 패턴 표현방법임을 보였다. 그의 방법을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 에피소드 및 시간구간을 3 가지의 정성적인 값을 정의하여 변수 x 와 시간 t 의 함수인 정성적 상태인 $QS(x,t)$ 를 나타내었다.

$$QS(x,t) = \langle [x(t)], [\partial x(t)], [\partial^2 x(t)] \rangle \quad (3)$$

- (2) 어떤 시간구간 $(t_i, t_j) \subset [a, b]$ 에서 $QS(x, t)$ 가 일정하면 즉 $[x(t)], [\partial x(t)], [\partial^2 x(t)]$ 가 변하지 않으면, 이 시간구간 (t_i, t_j) 를 시간적 범위(temporal extent)라고 하며 에피소드는 시간적 범위와 정성적 상태 즉 $\langle (t_i, t_j), QS(x, t) \rangle$ 로 표현된다.
- (3) 삼각형 에피소드는 다음과 같이 4 가지 성분에 의해 표현된다. $\langle [\partial^2 x], (t_i, t_j), \langle x(t_i), x'(t_i) \rangle, \langle x(t_j), x'(t_j) \rangle \rangle$

삼각형 에피소드는 그림 4처럼 일곱 개의 기본 패턴으로 구분될 수 있으며 공정 변수의 경향을 이들 패턴을 연속적으로 사용하여 표현할 수 있다.

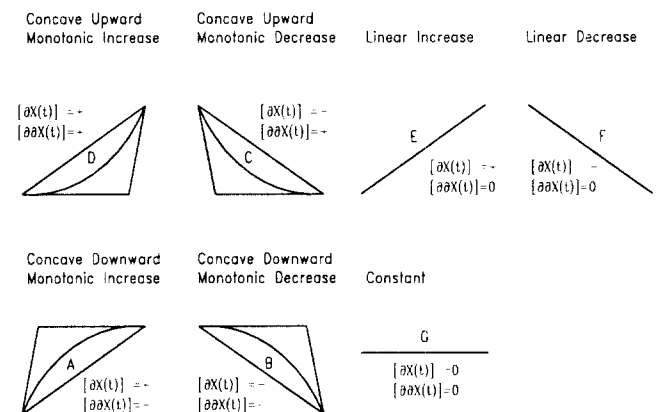


그림 4. 삼각형 에피소드의 형태
Fig. 4. Triangular components - geometrical basis of episodes.

4.2 패턴매칭 방법

3.2 항에 의해 일차적으로 선정된 원인후보에 대하여 순위에 따라 각 후보의 이상이 일어났다고 가정하여 동적모사를 실시하며 모사된 변수 경향들의 패턴, 즉 에피소드들을 구하여 조정된 실측 공정 데이터의 패턴과 비교를 한다. 이때 조정된 실측 데이터의 패턴과 가장 잘 일치하는 패턴을 가진 이상원인 후보를 실제 발생한 이상원인으로 최종 진단한다. 즉, 일차 진단 결과 이상원인 후보의 순위가 결정되면 이들 각 이상후보에 대해 가정된 이상원인의 크기로 동적모사를 하여 조정된 실측치와의 패턴이 가장 잘 일치되거나 잔여치가 가장 적어지도록 피보이치탐색법에 의해 각 이상원인 후보의 이상원인 크기를 유추한다. 이상의 크기가 유추되면 각 후보의 이상원인 크기하에서 모사된 변수의 경향과 조정된 실측치의 경향에 대하여 미리 정해진 일정 구간의 시간 간격에서의 에피소드들을 구하고 이를 비교하여 최종 후보를 선정한다.

5. 연속교반조반응기의 이상진단

5.1 연속교반조반응기 계

이상 모사를 위해 사용된 공정은 Kramer 등[4]이 예제로 사용된 것으로 반응기와 열교환기, 펌프, 제어기, 밸브, 파이프 등으로 구성되어 있다. 반응기는 연속 교반조 반응기로서 1 차 비가역 반응 $A \rightarrow B$ 이 일어난다. 반응기의 온도는 생성물의 일부를 순환시켜 조절하는데, 순환되는 생성물은 열교환기를 통해 냉각된다. 이 공정은 3 개의 되먹임 제어루프가 있는데 모사에 사용된 제어기는 PI 제어기이다. 각 제어기는 반응기의 액위, 생성물의 순환 유량, 반응기의 온도를 각각 제어한다. 이 사례연구를 통하여 본 연구에서 일차 이상진단 방법으로 제시된 WSM 과 기존의 정성적 이상진단 방법론인 증상 트리 모델(STM) 및 확장된 증상과 이상 관계(extended symptom-fault association, ESFA) 모델[5]에 의한 진단결과를 비교함으로써 제안된 가중 증상 모델의 효용성에 대하여 검토하였다.

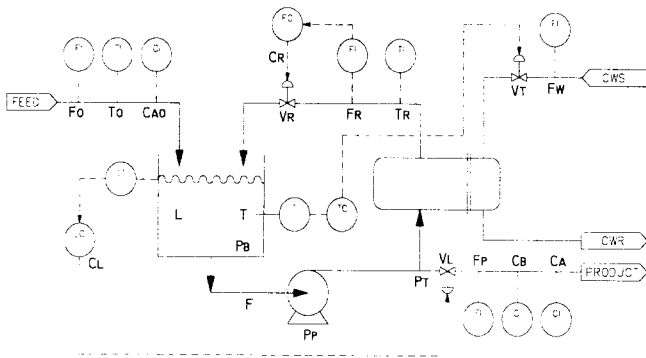


그림 5. 연속교반조반응기 공정도
Fig. 5. Flowsheet of the continuous stirred tank reactor system.

5.2 가중증상트리모델의 작성

연속 교반조 반응기 계에서 고려될 수 있는 10 개의 이상 상황을 표 1에 나타내었으며 이에 대해 이상 모사를 행하고 진단을 수행하였다. 먼저 아래와 같은 절차를 통하여 가중 증상 모델을 작성하여야 한다.

- (1) 부호유향그래프로부터 증상 트리를 구성하였다.
- (2) 각 이상에 대하여 가상적인 이상을 여러번 일으켜 각종상의 m_i 값을 구한 후 각이상에 대한 증상의 평균 m_i 값을 구하였다.
- (3) 어떤 이상 j 와 증상 i 간의 가중치 w_{ij} 는 아래식에 의해 구해진다.

$$w_{ij} = m_i / \sum m_i \quad (4)$$

표. 1. 연속교반조반응기계의 이상종류

Table 1. Selected faults for the continuous stirred tank reactor system

No.	Fault	Fault Designation
1	Input pipe partially blocked	IP_BLK
2	Level controller output failed high	LC_FAIL
3	Recycle pipe partially blocked	RP_BLK
4	Input concentration of A high	CAO_HIGH
5	Recycle flow set point high	FCSP_HIGH
6	Fouled heat exchanger	FOULING
7	Deactivated catalyst	CAT_DEAC
8	Temperature control valve stuck high	CV_STUCK
9	Leak flow in reactor	TK_LEAK
10	Malfunction in pump	PUMP_FAIL

5.3 액위제어기 고장에 대한 진단사례

이 경우는 액위 제어기의 출력에 이상이 발생함으로 인하여 액위 제어 밸브가 완전히 열려 외부로 나가는 생성물의 유량이 2.5 kg/sec 서 3.2배 정도 증가한 경우이다. 이상발생 후 2초 뒤에 CL+, FPS+ 에 대한 증상이 동시에 나타났으며 그 후 여러 증상에 대해 m_i 가 0 이 아닌 수치를 보인다.

가중증상모델의 경우는 각 이상에 대하여 아래와 같이 $P_j = \sum (m_i \times w_{ij})$ 를 구하여 P_j 가 큰 순으로 이상원인 후보의 순서를 정한다

표2에서 보는 바와 같이 WSM에 의한 진단의 경우 실제 이상원인인 LC_FAIL(액위 제어기 고장)은 4~6개의 이상원인 후보 중 항상 2순위 원인후보내에 포함되어 있다. 즉 시간 202초와 341초에서 WSM 방법은 실제 이상을 1순위 이상원인 후보로 진단하였으며 204초, 244초, 354초에서는 2순위 이상원인 후보로 진단하였다. 또한 이상원인 후보 갯수로는 202초에서 4개, 204초와 244초에서 5개, 341초와 354초에서 6개를 선정하였다.

STM, ESFA 및 WSM 등의 3가지 진단방법에 의한 진단결과를 평가하여 표3에 나타내었다. ESFA와 WSM 모두 정확성이 1.0으로 진단이 실패한 경우는 없으나 STM의 경우는 평균 진단지수도 상당히 낮을 뿐 아니라 204초 시간대에서는 정확도가 0으로 진단에 실패하였다.

표.2. 제어기출력고장에 대한 각 이상원인후보의 순위
Table 2. Ranking of fault candidates for level controller output failed high

se	202		204		244		341		354	
	Pj	RN K	Pj	RN K	Pj	RN K	Pj	RN K	Pj	RN K
IP_BLK										
LC_FAIL	0.515	1	0.949	2	0.985	2	0.616	1	0.616	2
RP_BLK	0.245	2	0.957	1	0.996	1	0.564	3	0.564	3
CAO_HIGH							0.239	6	0.230	6
FCSP_HIGH	0.126	4	0.358	5	0.358	5	0.358	4	0.358	4
FOULING										
CAT_DEAC							0.614	2	0.844	1
CV_STUCK			0.413	4	0.500	4				
TK_LEAK										
PUMP_FAIL	0.147	3	0.713	3	0.753	3	0.253	5	0.253	5

표.3. 제어기출력고장에 대한 이상진단 결과
Table 3. Diagnosis results for level controller output failed high

time (sec)	STM			ESFA			WSM		
	accur-acy	precis-ion	perfor Index	accur-acy	precis-ion	perfor index	accur-acy	*precis-ion	*perfor. index
202	1.0	0.444	0.444	1.0	0.83	0.83	1.0	1.0/67	1.0/67
204	0.	0.444	0.	1.0	0.87	0.87	1.0	.88/56	.88/56
244	1.0	0.444	0.444	1.0	0.78	0.78	1.0	.88/56	.88/56
341	1.0	0.444	0.444	1.0	0.84	0.84	1.0	.88/44	.88/44
358	1.0	0.444	0.444	1.0	0.84	0.84	1.0	.88/44	.88/44
avg.		0.356			0.83			*0.93/0.53	

6. TE 공정의 이상진단

6.1 TE 공정의 개요

Eastman Chemical Company의 공정 제어 연구 팀이 실제 공정인 TE 공정을 대상으로 하여 제어 기술의 개발, 연구 및 평가를 하였고 본 연구에서는 이 공정을 대상으로 이상진단을 수행하였다. TE 공정은 그림 6에서 보는 바와 같이 반응기, 스트리퍼, 기액 분리기, 압축기 및 환류가 있는 공정이다.

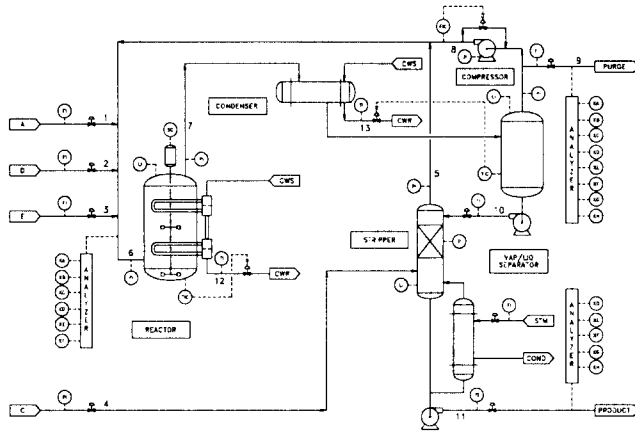


그림 6. TE 공정도

Fig. 6. Flowsheet of Tennessee Eastman Challenge Process

6.2 TE 공정의 이상진단

이상진단을 위해 사용된 공정의 측정변수는 총 23 개이며, 측정된 실제 공정 데이터는 확장된 칼만 필터에 의해 조정되며, 모사된 데이터와 비교하여 이상진단에 사용하였다.

이상원인 후보로는 표 4와 같이 TE 공정의 각스트림별 성분 및 공정에 비슷한 영향을 주는 13개 경우를 선정하였다.

표 4. TE 공정의 이상종류
Table 4. Selected faults for TE Challenge Process

No.	Fault	Designation
1	A feed loss (stream 1)	IDV1-
2	A feed (stream 1), control valve stuck high	IDV1+
3	D feed (stream 2), control valve stuck low	IDV2-
4	D feed (stream 2), control valve stuck high	IDV2+
5	E feed (stream 3), control valve stuck low	IDV3-
6	E feed (stream 3), control valve stuck high	IDV3+
7	C header pressure loss—reduced availability (stream 4)	IDV4-
8	C header (stream 4), control valve stuck high	IDV4+
9	Reaction kinetics. No.1 reaction rate slow drift	IDV5
10	A/C feed ratio low (stream 4), B composition constant	IDV6
11	B composition high (stream 4), A/C feed ratio constant	IDV7
12	Purge gas (stream 9), control valve stuck low	IDV8-
13	Purge gas (stream 9), control valve stuck high	IDV8+

6.3 이상진단의 결과

공정의 운전조건들이 정상상태로 유지되고 있는 상황에서 13가지 종류의 단일 이상이 발생하였을 경우, 4개의 시간대에 대하여 이상진단을 하였으며 사례연구에 대한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 정상상태에서 발생한 13가지 종류의 단일 이상발생에 대하여 WSM에 의한 일차진단을 실시한 결과, 52회의 진단 회수 중에 92.3%인 48회의 경우 실제 이상원인을 1순위 원인후보로 진단하였다. 이상원인 후보 순위 기준의 평균 진단지수는

98.7로 높은 진단 선명도를 보였다.

(2) 일차진단의 각 시간대별 1, 2순위 원인후보에 대하여 동적모사와 패턴매칭에 의한 이차진단을 실시하여 최종적으로 이상원인을 진단하였다. 일차진단의 선명도를 높이거나 이차진단의 대상 원인후보의 수를 증가시켜 실제 원인이 이차진단의 진단 대상 후보에 포함되도록 한다면 동적모사 및 패턴매칭에 의한 이차진단의 결과는 IDV5 이상이 일어났을 경우 0-0.5 시간대에서만 실제 이상이 2순위 원인후보로 선정되며 52회의 진단횟수의 98%인 나머지 51회는 모두 실제 원인이 이상원인으로 진단됨을 알 수 있다. 이때의 평균 진단지수는 99.84로 일차진단에 비해 진단의 선명도가 높으며 동적모사 및 패턴매칭에 의한 이차진단은 WSM의 진단결과를 보완해 준다.

7. 결론

화학공정에 적합하며 기존 이상진단 시스템이 가지는 공통적인 단점을 보완할 수 있는 이상진단 시스템을 개발하기 위하여 본 연구에서는 일차적으로 후향추론에 의해 이상원인 후보의 선정 및 필요한 정보를 추출한 후, 전향추론에 의해 이상원인 후보를 순위대로 검증 하는 이단계의 진단전략을 제시하였다. 연속 교반조 반응기 계와 TE 공정을 대상으로 하여 사례연구를 하였으며 이러한 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 일차 이상진단을 위하여 정성적 접근법인 증상 트리 모델(STM)을 수정한 가중 증상 모델(WSM)을 제안하였다. 이 모델은 STM 모델의 증상과 이상간 가지에 가중치를 부여하며, 가중치는 공정 운전의 경험치 또는 공정모델을 이용한 동적모사에 의하여 구함으로써 STM이 가지는 많은 이상원인 후보의 수를 줄일 수 있었으며 진단의 선명도를 높였다. WSM에 의한 일차진단을 수행하여 이상원인 후보의 순위를 결정할 수 있으며 연속 교반조 반응기 계에 대한 사례연구 결과, 다른 정성적 모델이 진단에 실패하는 경우에 대해서도 WSM에 의한 진단은 3순위 내의 이상원인 후보들 중에 실제 이상이 모두 포함되어 있었다. 또한 WSM은 한 증상이 초기에 나타났다가 사라지고 또 다른 증상이 서서히 점차적으로 나타나는 경우와 같이 각 증상의 발생되는 시점이 틀리는 경우라도 지속적인 진단을 할 수 있다.
- (2) 실 공정의 데이터를 이용한 실질적인 이상진단 방법론을 개발하기 위하여 TE 공정을 사례연구 대상으로 선정하였으며 공정에 대한 가정과 모델식을 이용하여 작성한 프로그램은 정상상태에 대한 공정의 모사를 정확하게 수행하였으나 동적인 상태에서는 측정변수의 실측치와 조정된 값 및 모사된 값이 서로 편차를 보였다. 동적모사 및 패턴매칭을 이용한 진단방법은 이러한 모델식의 부정확성에도 불구하고 WSM의 진단결과를 보완해주며 높은 진단의 선명도를 보였다.

참고문헌

- [1] J.T.Y. Cheung and G. Stephanopoulos, "Representation of Process Trends - Part I. A Formal Representation Framework," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 14, pp.495-510, 1990.
- [2] J.J. Downs and E.F. Vogel, "A plant-wide Industrial Process Control," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 17, pp.245-355, 1993.
- [3] K.S. Kang, H.G. Kim, S.H. Chang, H.K. Jeong and S.D. Park, "Development of an Integrated Operator Decision Aid Support System in Nuclear Power Plants," *Proceedings of '93 Korea/Japan Joint Conference on Expert Systems*, Seoul, Korea, Feb., pp.761-777, 1993.
- [4] M.A. Kramer, "Malfunction Diagnosis Using Quantitative Models with Non-Boolean Reasoning in Expert Systems," *AIChE J.*, vol. 33, pp.130-140, 1987.
- [5] 남동수, "확장된 증상과 이상 관계 모델을 이용한 연속 화학공정에서의 이상진단에 관한 연구," 박사학위논문, 서울대학교 화학공학과, 1995.