

지식 기반 접근법과 Loop 검증을 이용한 부호유향그래프 자동합성에 관한연구

이성근 · 안대명 · 황규석

부산대학교 화학공학과
(1998년 3월 10일 접수, 1998년 3월 31일 채택)

A Study on the Automatic Synthesis of Signed Directed Graph Using Knowledge-based Approach and Loop Verification

Sung-gun Lee · Dae-Myung An and Kyu Suk Hwang

Dept. of Chem. Eng., Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

(Received 10 March 1998; accepted 31 March 1998)

요 약

화학공정 변수간의 관계를 표현하는 방법으로, 지식기반 접근법을 이용하여 부호유향그래프(signed directed graph, SDG)를 자동합성하였다. SDG의 자동합성은 지식베이스를 이용한 추론과정 및 Loop 검증의 두단계를 거쳐 수행된다. 먼저, 공정내 장치를 중심으로 장치간의 결합관계를 Topology로 표현하고, Topology 정보를 이용한 공정 변수관계 표현 및 지식베이스의 공정경향 데이터를 문자 패턴 매칭하여 Primary-SDG를 자동으로 합성한다. 생성된 Primary-SDG를 Loop 검증기의 추론을 통하여 검증, 수정하여 SDG를 자동합성하였다.

Abstract - By knowledge-based approach, the SDG(Signed Directed Graph) is automatically synthesized, which is commonly used to represent the causal effects between process variables. Automatic synthesis of SDG is progressed by two steps : (1)inference step uses knowledge base and (2)verification step uses Loop-Verifier. First, Topology and KnowledgeBase are constructed by using the information on equipment. And then, Primary-SDG is synthesized by Character Pattern Matching between Variable-Relation-Representation generated by using Topology and Variable-Tendency-Data contained in Knowledge Base. Finally, a modified SDG is made after the Primary-SDG is verified by Loop-Verifier.

Key words : Signed directed graph, Automatic synthesis, Hierarchical relation, Pattern matching

1. 서 론

각종 폭발성 가스와 인화성 액체를 대량으로 취급하는 화학플랜트는 특성상 위험을 항상 내포하고 있으므로 적극적인 안전대책이 요구된다.

SDG는 복잡한 화학플랜트에서 운전자가 이상

원인을 진단하기 위한 도구로써 오랫동안 이용되어 왔으며, 이상전파거동을 모델링하기 위해서도 사용되어 왔다.[6] 또한 SDG는 공정변수, 장치이상사이의 명확한 관계를 제시할 수 있으며, Control Loop을 가진 System을 Modeling하는데 적합한 구조적인 방법을 제공한다. 그러나 SDG의 구축은 수작업으로 이루어지므로

[1-5], 화학공정의 대형화, 복잡화에 따라 SDG 작성에 있어서 논리적인 실수의 가능성을 증가시켰으며, 작성에 많은 시간을 소요하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 SDG를 자동으로 합성하는 연구를 수행하였다.

2. SDG 자동합성 시스템의 구성

SDG자동합성시스템은 4개의 Module로 구성되어 있다.(Fig.1)

1) Data를 등록하는 Module

- Topology.Data : 장치간의 결합관계에 관한 정보를 일정한 형식으로 표현한 것으로 장치번호, 장치명, 라인의 위치, 라인의 종류, 입력라인에 영향을 받는 출력라인을 지정하는 부분(Pass)으로 이루어져 있다.

- Variable-Tendency.Data : 화학공정에 일반적으로 존재하는 입력공정변수와 출력공정변수 사이의 관계를 범용적인 Library 형태로 정리한 지식베이스 파일이다.

2) 변수관계 생성기

SDG를 자동으로 합성하기 위해서, 본 연구에서는 먼저 장치를 중심으로 해서 입력라인과 출력라인을 구분한 다음, 입력라인에 관련된 공정변수와 출력라인에 관련된 공정변수사이의 상관관계를 표현하게 된다. 즉, 대상공정의 Topology. Data정보를 이용하여 입출력 변수간의 구체적인 조합을 만들고, 입출력변수간의 관계(+,-,0)는 Variable-Tendency. Data에 저장되어 있는 일반적 상관관계의 Library와 Pattern Matching하여 생성시킨다.

3) 일차SDG 생성기

대상공정의 장치에 관한 입출력 변수간의 상관관계가 생성되면, 가로축과 세로축에 모든 공정변수를 나열시켜, 가로축과 세로축이 교차하는 지점에 변수사이의 관계를 표시하여 SDG를 합성한다. 이때 세로축에 있는 공정변수는 원인Node가 되고, 가로축에 있는 공정변수는 결과Node가 된다.

4) Loop 검증기

대상공정에 Feedback Loop이 존재하는 경우, 장치로부터의 출력변수들 사이에 상관관계가 발생하게 되며, 이 경우 상관관계가 표현되지 않는다. 이러한 변수관계는 Loop검증을 통해 탐색하여, 변수간의 관계를 자동생성시킨다. 이렇게 생성된 변수관계는 일차SDG(검증을 하지 않은 SDG)에 추가하여, 최종적인 SDG자동합성이 완료된다.

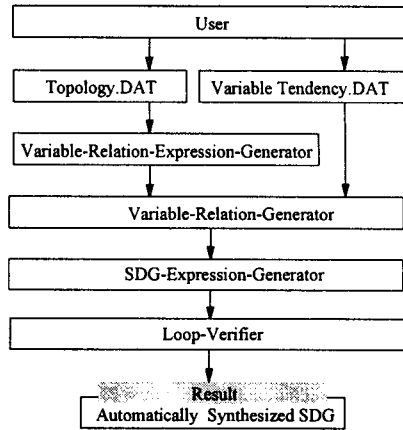


Fig. 1. Automatic Synthesizer of SDG

3. Topology의 표현

3.1. Topology

본 연구에서는 Topology에 공정의 정적인 관계에 관한 정보를 표현하였다. 즉, 흐름을 Liquid, Gas등이 흐르는 물질흐름(Material Flow, M_n)과 신호가 전달되는 정보흐름(Information Flow, S_n)으로 각각 구분하였고, 장치(Equipment)를 E_n 으로 나타내었다. 각각의 흐름의 종류에 따라 Line을 Pipe Line과 Signal Line으로 나누었고, 장치(E1, Fig.2)를 중심으로 Plin(Input Pipe Line)과 Plout(Output Pipe Line), Slin(Input Signal Line)과 Slout(Output Signal Line)으로 세분화하였다.(Table1)

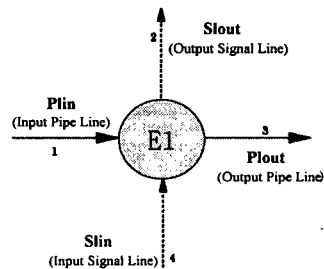


Fig. 2. Relation between Equipment and Line

3.2. 대상공정의 Topology 표현

대상공정(Fig.3)으로 선정한 CSTR은 Reactor(E1), Level Control Valve(E2), Temperature Control Valve(E3), Temperature

Table 1. Classification of line

Line	Line Type		Variable	Mean
	Pipe	Input Pipe Line	Temp Mass	Temperature Mass Flow
Line	Output Pipe Line	Press	Pressure	
Signal	Input Signal Line	Temp Mass Press	Temperature Mass Flow Pressure	
	Output Signal Line	Signal Level	Signal Level	

Sensor(E4), Temperature Controller(E5), Level Sensor(E6), Level Controller(E7) 등의 장치와 Signal Line, Pipe Line으로 구성되어 있다.

대상공정(Fig.3) 중에서 냉각수의 흐름량을 직접적으로 제어하는 TCV(Temperature Control Valve, E3)를 중심으로 TCV에 물질(냉각수)을 흐르게 하는 Plin(4), Plout(5)과 신호를 전달하게 하는 Slin(9)으로 구성되어 있으며, TCV는 신호의 귀착점이므로 Slout이 존재하지 않는다.

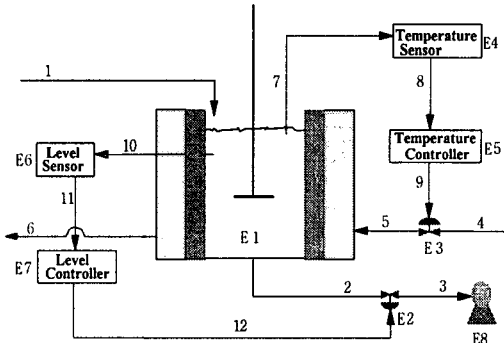


Fig.3. Model Process

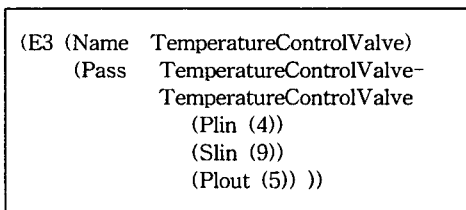


Fig. 4. Topology Representation of Temperature Control Valve

Fig.4에서 Temperature Control Valve의 Pa ss는 모든 입력라인이 Temperature Control

Valve를 통해서 들어오고, 또한 이 입력라인에 영향을 받는 모든 출력라인도 Temperature Control Valve를 통해서 나감을 의미하는 것이다.

즉, 모든 Line이 TCV를 통과한다는 것이며, 이것은 하나의 입력Line이 모든 출력Line에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 그러나 Reactor (E1)의 경우 Jacket으로 둘러싸여 있어서 모든 Line이 Reactor를 통과하는 것이 아니라, Jacket으로도 통과하게 된다. 따라서 하나의 입력라인이 어떤 출력Line에는 영향을 미치고, 어떤 출력Line에는 영향을 미치지 않게 된다. 따라서 Reactor의 경우 4가지의 Pass가 생성된다.(Fig.5)

1) Reactor로 들어와서 Reactor로 나가는 경우 Reactor(Fig.3)로 들어오는 Line은 PipeLine1이고, Reactor에서 나가는 Line은 PipeLine2, SignalLine7, SignalLine10이 있다.

이 경우, PipeLine1이 PipeLine2와 SignalLine 7, SignalLine10에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

2) Reactor로 들어와서 Jacket로 나가는 경우 이 경우는 PipeLine1이 Reactor로 들어오고 PipeLine6이 Jacket에서 나간다.

결국 PipeLine1이 PipeLine6에 영향을 미친다.

3) Jacket로 들어와서 Jacket로 나가는 경우 PipeLine5이 Jacket로 들어오고, PipeLine6이 Jacket에서 나간다. 여기서는 PipeLine5가 PiepLine6에 영향을 미친다.

4) Jacket로 들어와서 Reactor로 나가는 경우 Jacket로 들어오는 Line은 PipeLine5이고 Reactor에서 나가는 Line은 PipeLine2, SignalLine7, SignalLine10이다. 이것은 냉각수가 흐르는 PipeLine5가 PipeLine2, SignalLine7, SignalLine10에 영향을 미친다.

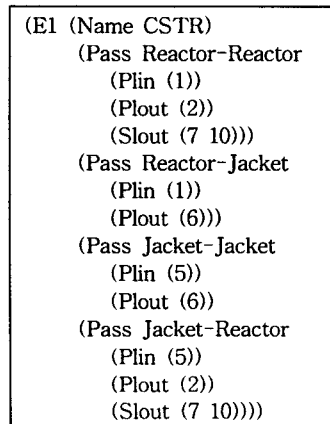


Fig. 5. Topology Representation of CSTR

4. 변수관계의 자동생성

장치를 중심으로 입력변수와 출력변수간의 관계를 자동생성하기 위해서는 먼저 입출력변수간의 구체적인 조합을 자동생성시킨 후, 이를 Variable-Tendency내의 입출력 변수 Pattern의 Library와 문자패턴매칭을 시켜야 한다. 변수간 조합의 자동생성은

- 1) 대상공정의 Topology의 정보를 이용하여
- 2) 각 line들의 입출력 변수간의 모든 조합을 자동생성한다.(Fig.6)

(If (5 Plin Mass) Between (6 Plout Press)) Then (? Sign)
 (If (5 Plin Mass) Between (6 Plout Temp)) Then (? Sign)
 (If (5 Plin Press) Between (6 Plout Mass)) Then (? Sign)
 (If (5 Plin Press) Between (6 Plout Press)) Then (? Sign)

Fig. 6. Example of Variable Relation Expression

4.1. 변수경향 데이터의 Rule

변수경향 데이터(2절 참조)는 장치별 입출력 공정변수사이의 상관관계를 Library형태로 범용화한 일반화된 지식베이스로 If-Then-Rule의 형태로 표현되어 있으며(Fig.9(b)), 대상공정의 Topology와 결합하여 구체적인 장치명, Line의 number, 상관관계값을 가지게 된다.

변수경향데이터의 Rule은 Line의 위치, Line의 종류, Line의 공정변수 그리고 두 변수사이의 경향값을 나타내는 부분으로 이루어져 있다.

변수경향데이터 Rule의 구조는 If부와 Then부로 이루어져 있으며, "(만일((어떤 입력라인의 공정변수)와 (어떤 출력라인의 공정변수)사이의 상관관계가 있다면) 그러면 (두 상태값사이의 관계는 임의의 경향값으로 표현된다)"는 것을 의미한다.

Fig.7에서 <Input Line>에는 Plin과 Slin, <Out put Line>에는 Plout과 Slout <Process Variable>에는 Temp, Press, Mass, Signal, Level, <Relation Between Process Variable>에는 (+) , (-), (0)와 같은 속성값들을 가진다.

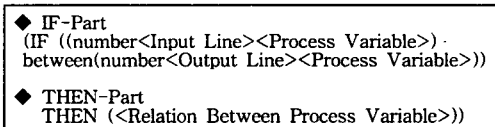


Fig. 7. Rule of Variable Tendency Data

두 변수사이의 경향값 중, (+)는 입력라인의 물리량을 나타내는 한 공정변수와 출력라인의 물리량을 나타내는 한 공정변수가 같은 방향으로 변화함을 뜻하는 것이고, (-)는 반대방향, (0)는 변화가 없음을 의미한다.

5. SDG의 자동합성

수많은 장치들로 조합된 화학플랜트의 Topology와 변수경향 데이터를 효율적으로 관리하기 위해서 화학장치를 기능별로 계층화하였다.(Fig.8)

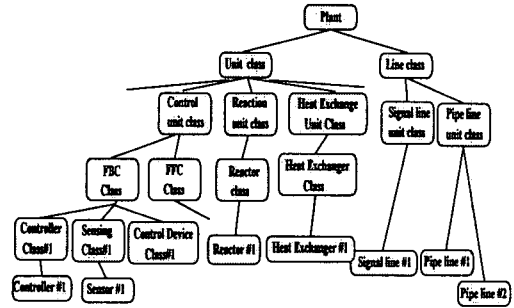


Fig. 8. Hierarchical Relation among Units in Chemical plant

문자패턴매칭은 Topology에 의해서 자동생성된 변수관계 표현(Fig.9(a))과 변수경향 데이터를 각각 구성하고 있는 문자를 비교해서 똑같은 것이 있는지를 찾는 과정이다.

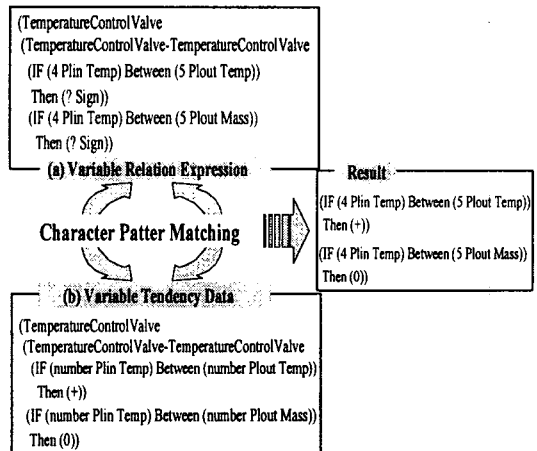


Fig. 9. Automatic Generation of Variable Relation by Pattern Matching

변수경향데이터는 크게 상징문자(Symbolic Character)와 List로 구성되어 있으며, 라인과 공정변수의 속성값들이 상징문자에 해당된다.

변수관계 표현은 변수경향 데이터와는 달리 패턴변수(Pattern Variable, "Sign")가 포함되어 있으며, 이를 쉽게 인지하기 위해 "?"와 패턴변수를 List로 묶었고, 패턴변수자리에 경향값들(+, -, 0)중 하나가 들어가게 된다. 이러한 경향값들의 결정은 변수관계표현과 변수경향데이터를 문자패턴 매칭함으로써 결정된다. (Fig.9)

6. SDG의 표현

SDG를 표현하기 위해서는 먼저 입력라인에 관련된 공정변수와 출력라인에 관련된 공정변수를 모두 가로축과 세로축에 나열하고, 공정변수사이의 관계를 나타낸다.(Fig.10)

여기서 세로축과 가로축에는 공정변수와 해당공정변수의 위치를 나타내는 숫자들이 함께 나열되어 있으며, 이것들은 SDG상에서 Node에 해당된다. 세로축은 화살표의 꼬리부분에 있는 변수(원인Node)가 되고, 가로축은 화살표의 머리부분에 있는 변수(결과Node)에 해당된다.

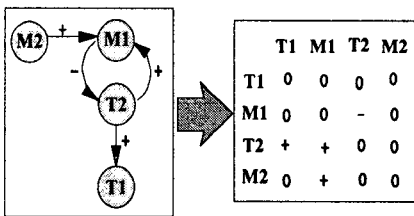


Fig. 10. Representation of SDG

7. SDG상의 Loop 검증

대상공정에 Feedback Loop이 존재하는 경우 단순한 입출력변수간의 Pattern Matching만으로는 변수간의 상관관계가 생성되지 않으며, 이 경우 Loop의 구조를 파악하여 변수간의 상관관계를 생성시켜 주어야한다.

7.1. Control Loop

Control Loop에는 NFBL(Negative FeedBack Loop)과 NFFL(Negative FeedForward Loop)이 있고, Sensor, Controller, Control Valve의 조합으로 구성된다. SDG상에서 NFBL의 구조적인 특징은 같은 Node에서 시작하여 같은

Node에서 끝난다는 것이고, NFFL은 한 Node에서 출발해서 다른 Node에서 끝나며 그 경로가 두 가지 이상이며 한 경로상의 신호(Sign)의 곱과 다른 경로상의 신호의 곱이 다르다는 특징을 가진다.[5]

7.2. Incomplete-NFBL과 Complete-NFBL을 발생시키는 장치의 구조

대상공정(Fig.3)에서 NFBL을 생성시키는 Temperature Control Loop와 NFBL을 생성시키지 못하는 Level Control Loop를 구성하고 있는 장치구성 요소를 비교해 보면, 동일하게 Sensor, Controller, Control Valve를 가지고 있다. 그러나 Control Valve의 Plout와 연결된 장치가 다르다는 것을 알 수 있다. 즉, Temperature Sensor로 들어오는 Slin은 CSTR과 연결되어 있으며, 또한 Temperature

Control Valve의 Plout도 동일하게 CSTR과 연결되어 있음을 알 수 있다. 반면에 NFBL을 생성시키지 못하는 Level Control Loop은 Level Sensor로 들어오는 Slin은 CSTR에 연결되어 있으나, Level

Control Valve의 Plout은 CSTR에 연결되어 있지 않고 Pump와 연결되어 있다.

7.3. Complete-NFBL의 자동 생성 알고리즘

Incomplete-NFBL에서 인과관계가 생성되지 않는 변수들은 조절변수(Manipulated Variable)와 제어변수(Controlled Variable)사이의 관계이다. Incomplete-NFBL에서 제어변수(L10)의 위치는 Sensor출력신호(S11)의 Input(원인)에 위치해 있고, 조절변수(M3)의 위치는 Controller출력신호의 Output(결과)에 놓여있음을 알 수 있다.(Fig.11)

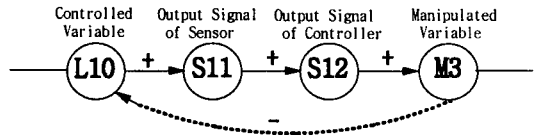


Fig. 11. SDG of Incomplete-NFBL

제어 변수와 조절변수를 Search하기 위해서는 Topology에서 Sensor와 Controller들을 찾은 후, Sensor의 Output Line Number와 Controller의 Output Line Number를 저장하고, 동일한 Number를 Primary-SDG(검증을 하지 않은 SDG)에서 검색한다. 그 결과 검색된 Sensor출력신호의 화살표 역방향에 있는 Node

를 찾음으로써 제어변수가 Search된다. 또한 Controller 출력신호의 화살표 방향에 있는 Node를 찾음으로써, 조절변수가 Search된다.

이렇게 조절변수와 제어변수를 Search한 후, 이 조절변수와 제어변수의 관계가 존재하는 지를 Primary-SDG에서 확인한다. 만약 조절변수와 제어변수사이의 관계가 존재하지 않는 경우에는 NFBL에서 Incomplete-Loop가 발생한 경우이며, 이때 두 변수 사이에 Negative(-)관계를 자동생성시킨다.

이러한 일련의 과정에 의해 생성된 변수관계를 Primary-SDG에 추가함으로써 최종적인 SDG가 자동으로 합성된다.(Fig.12) 결과적으로 대상공정에 대해서 SDG를 합성해 보면, Fig.12에서 보는바와 같이 처음 SDG에는 M3와 L10 간의 상관관계가 변화없음(0)으로 표현되었으나 Loop검증 후, 반대 방향으로 변화하는(-)관계가 생성되었음을 볼 수 있다.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	S8	S9	S11	S12	L10
T1	0	+	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T2	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T5	0	+	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M1	0	+	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+
M2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
M4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0
M5	0	-	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
M6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0
S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+
S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0

Fig. 12. Automatically Synthesized SDG for CSTR(Fig.3)

8. 결론 및 고찰

본 연구에서는 Fault Diagnosis와 이상전과 거동의 모델링에 널리 사용되는 SDG를 자동으로 합성하기 위한 방법론과 자동합성기를 개발하였으며, 이를 위해

- 1) Topology와 변수경향 데이터의 구축 및 표현 방법을 제시하였으며,
- 2) 문자패턴매칭을 이용하여 공정변수사이의 상관관계를 자동 생성시키는 방법론을 제안하였고,

3) 생성된 공정변수사이의 상관관계를 검증함으로써, 불완전한 Loop를 완전한Loop로 전환하는 방법을 제시하였다.

이렇게 제안된 방법들을 검증하기위해, Level Control과 Temperature Control을 가지고 있는 CSTR을 대상공정(Fig.3)으로 선정하여 SDG를 자동합성하였으며, 그 결과 만족할 만한 결과를 얻었다. (Fig.12)

더 나아가 실제 공장의 이상진단을 위해 SDG자동합성기를 사용할 경우에는 최종적인 전문가의 검증이 필요할 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 한국과학재단 지정 우수 연구센터인 공정산업의 지능자동화 연구센터의 연구비 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Powers,G.J. and Tompkins,F.C., AIChE 20(2), 376(1974)
2. Lapp,S.A., Powers,G.J., IEEE Trans. Reliab., 4, 2(1977)
3. Iri,M., Aoki,K., O'Shima,E.m, and Matsuyama, H., Comput. Chem. Eng.,3, 489(1979)
4. Allen,D.J., Ind. Eng. Chem. Fundam., 23, 175(1984)
5. Andrews,J.D. and Morgan,J.M. Reliab. Eng., 14, 85(1986)
6. Kramer,M.A., Palowitch,B.L., AIChE 33(7), 1067(1987)
7. Winstons,P.H.,and Horn,B.K.P., Addison Wesley, 3, 353(1989)
8. Chang,C.C. and Yu,C.C., Ind. Eng.Chem. Res., 29, 1290(1990)