



## 유향그래프 분석기법을 이용한 화학공정의 신뢰도흐름도 개발에 관한 연구

†변운섭 · 황규석\*

한국산업안전보건공단 부산지역본부 · \*부산대학교 화공생명공학부  
(2012년 8월 19일 투고, 2012년 12월 24일 수정, 2012년 12월 24일 채택)

## A Study on Reliability Flow Diagram Development of Chemical Process Using Directed Graph Analysis Methodology

†Yoon Sup Byun · Kyu Suk Hwang\*

Busan Regional Office, Korea Occupational Safety & Health Agency, Busan 609-320, Korea  
\*School of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University, Busan  
609-735, Korea

(Received August 19, 2012; Revised December 24, 2012; Accepted December 24, 2012)

### 요약

화학공정을 효율적으로 설계 및 관리하기 위한 도면으로 공정흐름도와 공정배관계장도가 있다. 본 도면들은 공정의 운전조건 및 설비에 대한 정보를 제공하지만 공정이 정상적으로 운전할 신뢰도는 제공하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 유향그래프 분석기법을 이용하여 화학공정의 예방점검·정비주기 및 시점을 결정하기 위한 정보를 제공할 수 있는 신뢰도흐름도를 개발하였다. 유향그래프 분석기법은 화학공정이 정상적으로 작동할 가능성을 평가할 수 있는 기법으로써 노드와 아크를 사용하여 화학공정을 유향그래프로 모델화하고, 이 유향그래프를 순차적으로 해석하여 화학공정의 신뢰도를 평가하는 기법이다. 본 연구에서는 운전시간에 따른 화학공정의 신뢰도를 분석하고, 그 결과를 공정배관계장도에 삽입하여 신뢰도흐름도를 개발하였다. 본 신뢰도흐름도는 화학공정의 기본 도면인 공정흐름도, 공정배관계장도와 마찬가지로 화학공정의 설계, 예방점검 등 설비관리에 효율적으로 이용될 수 있을 것이다.

**Abstract** - There are PFD(Process Flow Diagram) and P&ID(Piping and Instrument Diagram) for designing and managing chemical process efficiently. They provide the operation condition and equipment specifications of chemical process, but they do not provide the reliability of chemical process. Therefore, in this study, Reliability Flow Diagram(RFD) which provide the cycle and time of preventive maintenance has been developed using Directed Graph Analysis methodology. Directed Graph Analysis methodology is capable of assessing the reliability of chemical process. It models chemical process into Directed Graph with nodes and arcs and assesses the reliability of normal operation of chemical process by assessing Directed Graph sequential. In this paper, the chemical process reliability transition according to operation time was assessed. And then, Reliability Flow Diagram has been developed by inserting the result into P&ID. Like PFD and P&ID, Reliability Flow Diagram provide valuable and useful information for the design and management of chemical process.

**Key words** : process flow diagram, piping and instrument diagram, reliability, reliability flow diagram, directed graph analysis methodology, directed graph

†Corresponding author:b97037@kosha.net

## I. 서론

화학공정은 수많은 장치들로 구성되어 있고 매우 복잡한 구조를 가지고 있어 장치의 고장 또는 조업자의 실수로 인해 공정운전조건을 이탈할 경우 대형 재해가 발생할 위험성이 내재되어 있다[1]. 따라서 화학공정은 설계단계에는 공정시스템을 전반적으로 검토하여 가장 적절한 시스템을 구축하고, 운전 중에는 주기적인 예방점검·정비를 실시하여 정상운전 중에 예상하지 못한 공정사고가 발생하지 않도록 하여야 한다.

이러한 화학공정을 효율적으로 설계 및 운전하기 위해 운전 및 설계조건, 설비명세 등의 정보를 도면화한 공정흐름도(Process Flow Diagram, PFD)와 공정배관·계장도(Piping and Instrument Diagram, P&ID)가 있다. 공정흐름도는 공정흐름에 따라 공정개요, 취급 물질명과 물성, 각종 운전조건, 설비의 종류, 공정제어 방법 등에 대한 정보를 제공하는데 각종 설비류의 흐름도, 공정 운전조건 및 취급 물질의 물성치표로 구성되어 있다. 또한 공정배관·계장도는 화학공정에 설치되는 각종 설비, 배관 및 부속품, 계기류, 안전장치, 제어시스템 등에 대한 정보를 제공하기 위해 관련 설비들이 공정흐름에 따라 도면화되어 있다. 따라서 화학공정의 공정흐름도와 공정배관·계장도는 화학공정의 설계 및 건설단계는 물론 시운전, 정상운전 및 비상운전 시에 필요한 기술적 정보를 제공한다.

그런데 본 도면들은 공정의 운전조건 및 설비에 대한 정보는 제공하고 있지만 공정이 정상적으로 운전할 신뢰도는 제공하지 못한다. 따라서 본 도면들은 화학공정에서 발생할 수 있는 고장 등을 사전에 예방하기 위한 예방점검·정비주기 및 시점을 결정하기 위한 정보를 얻을 수 없다.

따라서 본 연구에서는 화학공정의 운전 및 설계조건에 대한 정보를 제공하는 기존 공정흐름도와 공정배관·계장도를 기준으로 운전시간이 경과함에 따라 변하는 화학공정의 신뢰도에 대한 정보를 제공할 수 있는 신뢰도흐름도(Reliabilty Flow Diagram, RFD)를 개발하고자 하였다.

화학공정은 각종 설비가 연속적으로 연결되어 순차적으로 운전되므로 화학공정 전체를 정상적으로 운전하기 위해서는 화학공정의 원료 도입단계에서 최종제품 배출단계까지 전 설비가 그 기능을 유지하여야 한다.

따라서 화학공정의 신뢰도흐름도를 개발하기 위해서는 화학공정 구성요소인 각종 설비의 신뢰도 평가가 선행되어야 하며, 이를 기준으로 전체 화학공

정의 신뢰도 평가가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 유향그래프 분석기법을 이용하여 화학공정의 신뢰도를 평가하였으며, 이를 기준으로 화학공정의 신뢰도흐름도를 개발하였다[1-3].

## II. 신뢰도흐름도 개발 대상공정

화학공정의 신뢰도흐름도 개발 대상공정으로 Olefin Dimerization 공정의 Feed Section을 선정하였다 [2,4,5].

본 공정은 Fig. 1과 같이 약간의 물이 섞여 있는 알켄과 알칸의 혼합물이 중간저장탱크로부터 1 km 떨어진 위치에 있는 Feed Buffer/Settling Tank로 연속적으로 이송된다. 이 혼합물에 섞여 있는 물은 반응기의 촉매에 나쁜 영향을 미치기 때문에 열교환기(Heat Exchanger)를 거치기 전에 Feed Buffer/Settling Tank에서 수작업으로 일정한 간격을 두고 제거한다. 또한 알켄의 전환율을 적정하게 유지하고, 고분자의 과다생성을 방지하기 위해 반응기 내에서의 체류시간을 일정한 범위내로 유지하여야 한다.

본 Feed Section Process는 원료에서 물을 제거한 후 열교환기를 거쳐 일정한 온도, 압력 및 유량으로 반응기에 원료를 공급하는 공정으로 Feed Buffer/Settling Tank로 원료 이송, Feed Buffer/Settling Tank, 반응기로 원료공급 등 3개의 단위공정으로 구분할 수 있다.

Feed Buffer/Settling Tank로 원료를 이송하는 공정에서는 Transfer Pump를 사용하여 원료를 Hydrocarbon 저장탱크에서 1 km 떨어진 Feed Buffer/Settling Tank까지 이송한다. 원료공급량을 확인하기 위해 총유량계(FQ)를 설치하였으며, 이송거리가 1 km 이고 온도가 상승할 경우 고분자가 형성될 수 있어 온도를 확인하기 위해 온도계(TI)가 설치되어 있다. 그리고 Feed Buffer/Settling Tank의 액위에 따라 유량을 조절할 수 있는 액위조절밸브(LV)가 설치되어 있다.

Feed Buffer/Settling Tank는 물을 제거하는 공정으로 Feed Buffer/Settling Tank에서 원료가 공기와 접촉하는 것을 차단하고 일정한 압력을 유지하기 위해 질소공급배관과 배출배관이 설치되어 있으며, 각각의 배관에는 Feed Buffer/Settling Tank의 압력에 의해 조절되는 압력조절밸브가 설치되어 있다. 그리고 일정한 간격으로 물을 제거하기 위한 Drain 배관이 설치되어 있다.

반응기로 원료를 공급하는 공정에서는 Feed Pump가 설치되어 있고, 펌프의 안전한 운전을 위해 By-pass Line이 설치되어 있다. By-pass Line에는 펌프의

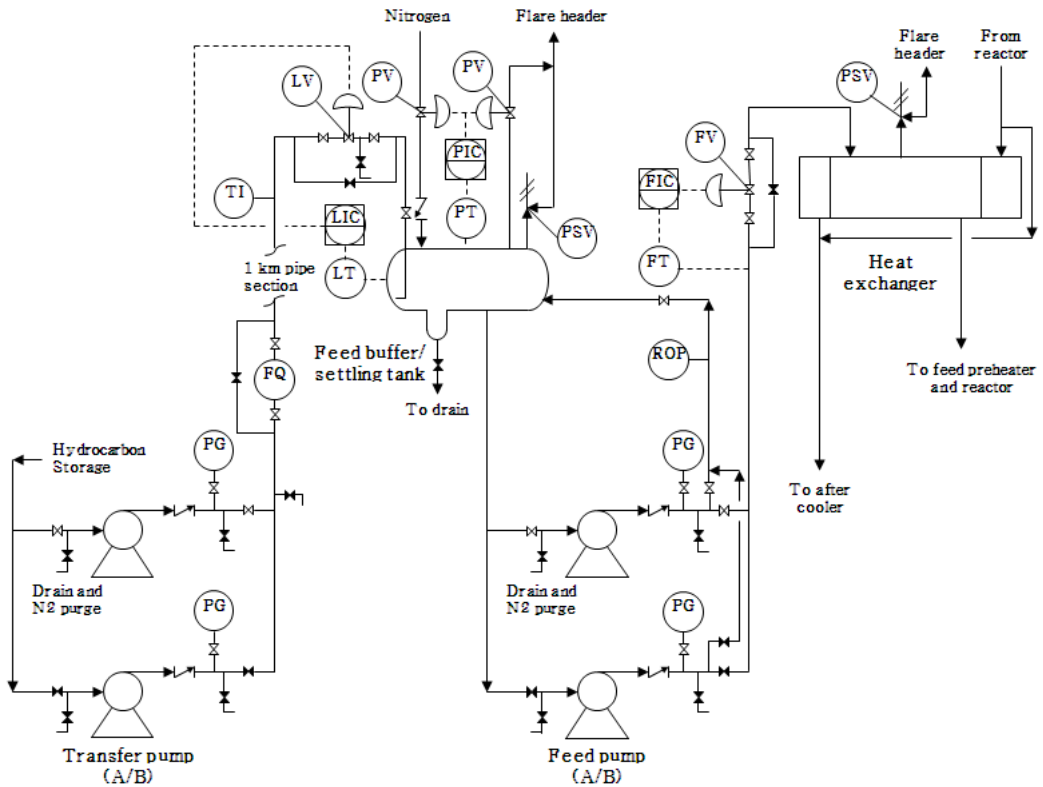


Fig. 1. P&ID of feed section process.

최소유량이 순환할 수 있도록 ROP(Restriction Orifice Plate)가 설치되어 있다. 또한 원료공급배관에는 유량조절밸브가 설치되어 있고, 반응기에서 발생한 에너지를 회수하기 위해 공급되는 원료(저온)와 반응 생성물(고온)이 에너지 교환을 하는 열교환기가 설치되어 있다. 그리고 Feed Buffer/Setting Tank와 열교환기에는 안전밸브가 설치되어 있다.

### III. 유향그래프 분석기법을 이용한 신뢰도흐름도 개발

#### 3.1. 유향그래프 분석기법

화학공정의 공정흐름도와 비슷한 신뢰도흐름도를 개발하기 위해서는 공정흐름도를 근거로 한 신뢰도평가가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 화학공정의 신뢰도를 평가하기 위해 유향그래프 분석(Directed Graph Analysis, DGA)기법을 사용하였다. 본 기법은 화학공정을 구성하는 각종 요소를 유향그래프로 모델링하므로 공정배관·계장도와 거의 유사한 모델도(유향그래프)를 작성할 수 있는데 공정배관·

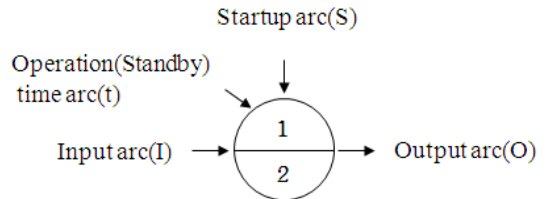


Fig. 2. Symbol of directed graph.

계장도 상의 각종 설비는 노드(Node)로 모델링하고, 배관과 신호선은 아크(Arc)로 모델링한다[1,2].

유향그래프 작성 시 물질흐름, 정보흐름, 각종 설비의 작동특성 등을 표현하기 위하여 Fig. 2와 같은 심벌을 사용하는데 "1"은 노드형식을 나타내고, "2"는 노드번호를 나타낸다. 여기서 노드형식은 작동특성, 논리특성 등을 나타내며, 노드번호는 공정흐름 방향으로 신뢰도 계산순서를 나타낸다.

본 기법은 Input Arc(I), Startup Arc(S), Operation(Standby) Time Arc(t), Output Arc(O) 등 4종류의 아크와 Input Arc, Startup Arc, Operation(Standby) Time Arc로부터 적절한 Output Arc를 발생시

**Table 1.** Output arc intensity equations of each node

Node type	Input arc intensity	Startup arc intensity	Output arc intensity
SBN	$I(t)$	-	$O(t) = I(t) \cdot \exp(-\lambda_{sb}t_{sb})$
OPN	$I(t)$	-	$O(t) = I(t) \cdot \exp(-\lambda_{op}t_{op})$
SSN	$I(t)$	$S_{su}(t)$	$O(t) = [I(t) \cdot \exp(-\lambda_{sb}t_{sb})] \cdot [S_{su}(t) \cdot P_{su}]$
EXN	$I(t)$	-	$O(t) = I(t) \cdot P_s(t)$
AND	$I_1(t), \dots, I_n(t)$	-	$O(t) = \prod_{i=1}^n I_i(t)$
NOT	$I_s(t), I(t)$	-	$O(t) = 1 - \frac{I(t)}{I_s(t)}$
NOR	$I_1(t), \dots, I_n(t)$	-	$O(t) = \sum_{i=1}^n I_i(t)$

키는 노드를 사용하여 공정배관·계장도를 유향그래프로 모델링하고, 본 유향그래프 모델을 기준으로 공정흐름 방향으로 Table 1과 같은 모델식을 사용하여 각 노드의 출력아크(Output Arc)강도를 순차적으로 계산하여 최종적으로 전체 화학공정의 출력아크강도를 계산하는데 이 출력아크강도가 각 지점의 신뢰도를 나타내며, 최종 지점의 출력아크강도가 전체 화학공정의 신뢰도를 나타낸다.

Table 1에서 SBN을 Standby Node를 나타내며, 대기상태에 있는 요소의 고장으로 인한 신뢰도 변화를 모델링하는데 1개의 입력아크강도(Input Arc, I)와 대기시간( $t_{sb}$ )으로부터 출력아크강도(Output Arc, O)를 발생시키며, 대기상태에서 단위시간당 요소의 고장률( $\lambda_{sb}$ )을 필요로 한다. OPN은 Operation Node로 운전 중인 요소의 고장으로 인한 신뢰도 변화를 모델링하는데 운전시간( $t_{op}$ )과 운전 중 단위시간당 요소의 고장률( $\lambda_{op}$ )을 필요로 한다. SSN (Standby and Startup Node)은 대기상태에 있는 요소의 대기상태에서 기동동작까지를 모델링하는데 대기상태에서의 단위시간당 요소의 고장률( $\lambda_{sb}$ )과 기동신호( $S_{su}$ ) 생성공적으로 작동할 확률( $P_{su}$ )을 필요로 한다. EXN은 Expansion Node로 복잡한 프로세스를 단일 노드로 정의하여 화학공정을 단순한 유향그래프로 모델링할 때 사용하는데 출력아크강도는 프로세스의 정상작동 확률( $P_s$ )를 먼저 계산한 후 입력아크강도와 정상작동확률을 곱하여 계산한다.

또한 AND, NOT, NOR은 유향그래프 작성 시 논리적인 결함을 위해 정의한 노드로 AND는 모든 입

력아크가 존재할 가능성을 나타내며, NOT와 NOR은 Standby Redundant System을 유향그래프로 모델링하기 위해 사용한다. 여기서 NOT는 대기상태에 있는 계통의 입력아크강도를 유향그래프로 모델링하는데 사용하고, 전체시스템의 신뢰도는 NOR로 모델링한다. 본 노드는 공정배관·계장도에는 존재하지 않으므로 유향그래프 작성 시 점선으로 모델링하고,  $I_s$ 는 입력아크가 서로 독립적이지 않고 공유되어 있을 때 입력아크강도가 이중으로 계산되는 것을 방지하기 위해 사용된다[2].

### 3.2. 공정배관·계장도의 유향그래프 모델링

화학공정의 신뢰도를 평가하기 위해 공정배관·계장도를 기준으로 화학공정의 신뢰도에 거의 영향을 주지 않는 Local 계기(PG, TI, FQ), Feed Pump의 By-pass Line, 차단밸브, Drain Valve(탱크에서 물을 제거하는 Drain Valve 제외) 등은 유향그래프에서 생략하고, Fig. 3과 같이 유향그래프로 모델링하였다.

Transfer Pump와 Feed Pump는 Standby Redundant Pump가 설치되어 있으므로 운전 중인 펌프의 신뢰도를 보정하는 NOT와 NOR이 사용되었다. 그리고 일반적으로 배관은 아크로 모델링하는데 원료이송 배관은 1 km나 되고 온도가 상승할 경우 고분자가 형성될 수 있으므로 한 개의 노드(12번)로 모델링하였다. 즉, 배관은 아크로 모델링되지만 본 배관은 공정의 신뢰도에 영향을 줄 수 있으므로 1개의 노드로 모델링하였다.

노드 1, 2, 3, 4번은 신뢰도 평가를 시작하는 시점

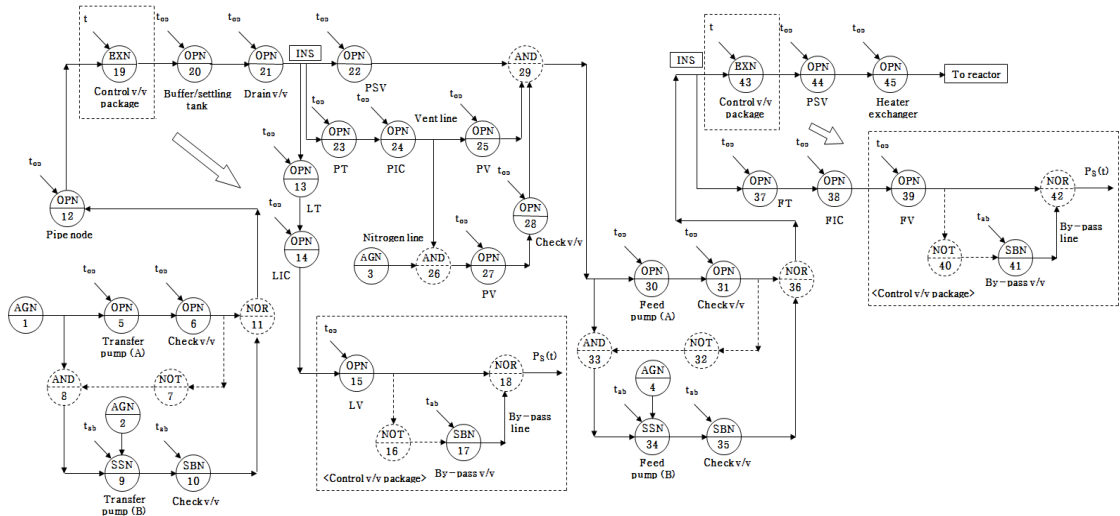


Fig. 3. Directed graph of feed section process.

으로 출력아크강도 “1”을 발생시키며, 노드 7~10번과 노드 32~35번은 각각 Standby Redundant Pump로 운전 중인 펌프의 신뢰도를 보정하는 역할을 하는데 예방점검·정비에 따라 신뢰도가 변할 수 있다. 노드 19, 43번은 By-pass Line이 구축되어 있는 Control Valve Package를 표현한 것으로 EXN로 모델링하였다. By-pass Line은 Control Valve System이 고장날 경우 수동으로 운전이 가능하므로 Control Valve System의 신뢰도를 보정하는 역할을 할 수 있어 NOT와 NOR로 모델링하였다. 그리고 탱크와 열교환기에 설치되어 있는 안전밸브는 고장으로 인해 정상운전 중에 열리는 경우를 OPN로 모델링하였다[2].

### 3.3. 신뢰도 평가

운전시간에 따른 신뢰도 변화를 예측하기 위해 300, 800, 1460(2개월), 4380(6개월), 8760(1년), 17520(2년)시간에서의 신뢰도를 평가하였다. 본 화학공정의 신뢰도 평가에 필요한 신뢰도 데이터는 Table 2와 같이 가정하였다[6,7].

유향그래프 분석기법은 노드순서에 따라 순차적으로 출력아크강도를 계산하여 전체 화학공정의 신뢰도를 계산하는데 각 노드(11, 19, 29, 36, 45번)에 대한 출력아크강도는 Table 3과 같고, 운전시간에 따른 전체 화학공정의 신뢰도 변화는 Fig. 4와 같다.

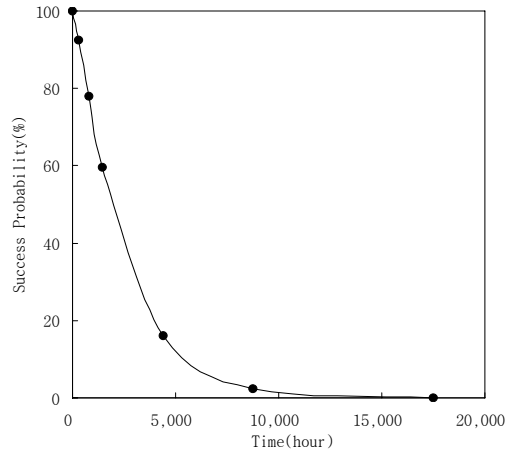
본 화학공정은 운전시간이 경과함에 따라 신뢰도가 급격히 감소하여 1년이 경과하면 신뢰도가 최대 2.37 %로 떨어진다. 따라서 적절한 시점에 공정의 신뢰도를 향상시키기 위한 예방점검·정비가 이루어져야 함을 알 수 있다.

Table 2. The reliability data used in feed section

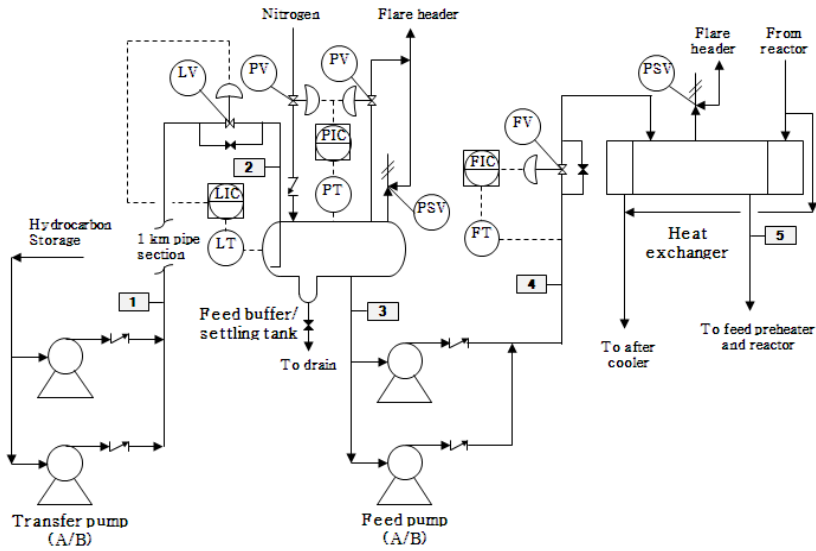
Equipments	Data
Transfer/feed pump	$\lambda_{op} = 1.04E-4/h$
	$\lambda_{sb} = 7.75E-4/h$
	$P_{su} = 1.0$
Check valve	$\lambda_{op} = 4.0E-6/h$ $\lambda_{sb} = 6.0E-6/h$
Pipe	$\lambda_{op} = 1.80E-5/h$
LT	$\lambda_{op} = 2.32E-6/h$
LIC	$\lambda_{op} = 9.01E-10/h$
Control valve(LV,PV,FV)	$\lambda_{op} = 2.9E-6/h$
By-pass valve	$\lambda_{sb} = 3.50E-6/h$
Buffer/settling tank	$\lambda_{op} = 2.0E-6/h$
Drain valve of tank	$\lambda_{op} = 1.70E-4/h$
Safety valve	$\lambda_{op} = 1.68E-6/h$
PT	$\lambda_{op} = 3.79E-6/h$
PIC	$\lambda_{op} = 9.48E-10/h$
FT	$\lambda_{op} = 1.59E-6/h$
FIC	$\lambda_{op} = 9.0E-10/h$
Heater exchanger	$\lambda_{op} = 5.6E-7/h$

**Table 3.** Output arc intensity of feed section process

Node No.	Time(hour)					
	300	800	1,460	4,380	8,760	17,520
1,2,3,4	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
11	0.99334	0.96154	0.90077	0.63542	0.38891	0.15075
19	0.98799	0.94778	0.87737	0.58705	0.33173	0.10940
29	0.93295	0.81344	0.66380	0.25423	0.06222	0.00385
36	0.92674	0.78216	0.59792	0.16155	0.02420	0.00058
45	0.92612	0.78075	0.59595	0.15992	0.02370	0.00056



**Fig. 4.** Success probability of feed section process.



Stream No. Time (hour)	1	2	3	4	5
300	0.99334	0.98799	0.93295	0.92674	0.92612
800	0.96154	0.94778	0.81344	0.78216	0.78075
1,460	0.90077	0.87737	0.66380	0.59792	0.59595
4,380	0.63542	0.58705	0.25423	0.16155	0.15992
8,760	0.38891	0.33173	0.06222	0.02420	0.02370
17,520	0.15075	0.10940	0.00385	0.00058	0.00056

**Fig. 5.** Reliability flow diagram of feed section process.

### 3.4. 신뢰도흐름도 개발

본 연구에서 사용한 유향그래프 분석기법은 공정 흐름을 나타내는 공정배관·계장도를 그대로 유향그래프로 모델링하므로 유향그래프 모델에서 예측한 신뢰도 데이터를 신뢰도흐름도 개발 시 그대로 사용할 수 있다. 즉, 공정배관·계장도에서 화학공정의 신뢰도에 거의 영향을 주지 않은 Local 계기, 차단밸브 등을 삭제하고, 본 도면에 신뢰도 평가결과를 표로 삽입하여 신뢰도흐름도를 개발할 수 있다.

따라서 Olefin Dimerization의 Feed Section Process에 대한 신뢰도흐름도는 Fig. 1의 공정배관·계장도에서 Local 계기(PG, TI, FQ), Feed Pump를 보호하기 위한 By-pass Line, 차단밸브, Drain Valve 등을 삭제하여 도면을 단순화하고, 본 도면의 배관 상부에 Stream No.을 표기하고 유향그래프 분석기법에서 예측한 신뢰도 데이터인 Table 3을 도면 하부에 삽입하여 Fig. 5와 같은 신뢰도흐름도를 개발하였다.

## IV. 결론

화학공정을 효율적으로 설계 및 관리하기 위한 도면으로 공정흐름도와 공정배관·계장도가 있다. 본 도면들은 공정의 운전조건 및 설비에 대한 정보를 제공하지만 공정이 정상적으로 운전할 가능성은 제공하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 화학공정의 예방점검·정비주기 및 시점을 결정하기 위한 정보를 제공할 수 있는 신뢰도흐름도를 개발하였다.

본 연구에서 개발한 신뢰도흐름도는 운전시간에 따른 해당 지점의 신뢰도 정보를 제공하므로 화학공정의 신뢰도를 확보하여 공정의 안전성을 확보하는 방법을 제공한다. 즉, 기존공정에는 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안을 제공하고, 신규공정에는 정량적 데이터를 근거로 시스템의 구조를 설계할 수 있는 정보를 제공한다.

따라서 신뢰도흐름도는 화학공정의 기본 도면인 공정흐름도와 공정배관·계장도와 함께 화학공정의 설계와 공정 및 설비관리에 효율적으로 이용될 수 있을 것이다. 즉, 본 신뢰도흐름도가 제공하는 정

량적 데이터를 근거로 시스템의 구조를 설계할 수 있고, 예방점검·정비 주기와 시점을 결정할 수 있어 화학공정의 사고예방은 물론 불필요한 예방점검·정비를 줄일 수 있어 생산성 향상에도 기여할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] Byun, Y. S., An, D. M., Lee, H. S., Shin, D. I., Kim, Y. H. and Hwang, K. S., "The development of System Reliability Assessment Methodology Using Directed Graph", *HWAHAK KONGHAK*, **41**(3), 286-291, (2003)
- [2] Byun, Y. S., *A Study on Development of the Directed Graph Analysis Methodology for Chemical Process Reliability Assessment*, Ph. D. Dissertation, Pusan National Univ., Busan, Korea, (2010)
- [3] Byun, Y. S., An, D. M. and Hwang, K. S., "A Comparative Study on Safety Analysis Methodology of Chemical Process", *Journal of KIIS*, **18**(2), 64-72, (2003)
- [4] Korea Occupation Safety & Health Agency, *Process Safety Report Writing and Evaluation*, Occupational Safety and Health Training Institute, (2008)
- [5] Matsuoka, T., "An Application of the GO-FLOW Methodology-Hazard and Operability Analyses of Olefin Plant-", *Proceedings of the 4th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management*, **1**, 431(1998)
- [6] Matsuoka, T. and Kobayash, M., "The GO-FLOW reliability analysis methodology-analysis of common cause failure with uncertainty", *Nucl. Engng Des.*, **175**, 205-214, (1997)
- [7] Hwang, K. S., Park, N. H., An, D. M. and Park, C. I., *Development of Risk Analysis Method for Equipment Operation*, Korea Occupation Safety & Health Agency, (2003)