



## 정량적 위험성평가기법을 이용한 화학공정 시스템 구축에 관한 연구

†변운섭

울산과학기술대학교 환경화학공학과

(2014년 10월 7일 접수, 2014년 12월 26일 수정, 2014년 12월 27일 채택)

## A Study on the System Design of Chemical Process using Quantitative Risk Assessment Methodology

†Yoon Sup Byun

Department of Environmental & Chemical Industry, Ulsan College, Ulsan 680-808, Korea

(Received October 7, 2014; Revised December 26, 2014; Accepted December 27, 2014)

### 요 약

화학공장은 위험물질을 다량으로 취급하고 있어 안전시스템의 신뢰성을 확보할 수 있도록 시스템을 구축하는 것은 화학공정 설계 시 고려할 기본적인 사항이다. 그러나 화학공정의 안전성을 확보하기 위해 안전시스템의 신뢰성을 지나치게 강조할 경우 상대적으로 생산시스템의 신뢰성은 떨어질 수 있다. 화학공정은 일정한 수준 이상의 안전성을 확보한 상태에서 안전시스템의 신뢰성과 생산시스템의 신뢰성을 균형 있게 유지하는 필요하다. 따라서 본 연구에서는 정량적 데이터를 근거로 화학공정의 안전성과 생산성을 동시에 확보할 수 있는 방안을 제시하고자 화학공장에 널리 사용되고 있는 가열로공정을 선정하여 정량적 위험성평가를 실시하였다. 정량적 위험성평가기법으로는 안전시스템과 생산시스템을 구분하여 각각의 시스템에 대해 신뢰도평가가 가능한 유향그래프 분석기법을 사용하였다. 정량적 위험성평가 결과 가열로공정은 온도감지기(TT)와 압력감지기(PT)를 각각 3개 설치하여 2개가 일정한 값 이상을 나타낼 때 안전시스템이 작동하도록 가열로공정을 구축하는 것이 안전성과 생산성을 동시에 확보할 수 있는 최적의 화학공정 시스템 설계 조건임을 확인하였다.

**Abstract** - To ensure the reliability of the safety system so that handling large quantities of hazardous materials in chemical plant is considered basic information in chemical process design. However, the reliability of the production system may be reduced when the reliability of the safety system emphasized in order to ensure the safety of chemical process. It is necessary to balance the reliability of the production system and reliability of the safety. In this study, a quantitative risk assessment was performed by selecting the furnace process, which is widely used in the chemical plant in order to suggest a way to ensure the safety and productivity of chemical process, based on the quantitative data. Quantitative risk assessment methodology have been used directed graph analysis methodology. It is possible to evaluate the reliability of the safety system and the production system. In this study, the optimum system design requirement to improve the safety and the productivity of the furnace is two-out-of-three logic for TT and PT.

**Key words** : Reliability, Safety System, Production System, Directed Graph Analysis, Quantitative Risk Assessment

†Corresponding author:ysbyun@uc.ac.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

화학공정은 유해·위험물질을 다량으로 취급하고, 수많은 장치들로 구성되어 있는 매우 복잡한 구조이므로 장치의 고장, 조업자의 실수 등으로 인해 정상운전조건을 이탈할 경우 대형 재해가 발생할 위험성이 높기 때문에 설계단계에서부터 안전성을 확보할 수 있도록 시스템을 구축하는 것은 화학공정 시스템 설계 시 고려하여야 할 기본적인 사항이다[1].

그러나 화학공정 시스템 구축시 안전성을 지나치게 강조하여 각종 안전장치를 추가할 경우 상대적으로 화학공정의 운전 효율성은 떨어질 수 있다. 즉, 안전시스템을 과대하게 설치할 경우 안전시스템 고장으로 인해 발생할 수 있는 긴급 운전중지 및 안전시스템 정비·보수를 위한 예방 운전중지로 인해 생산성은 떨어질 수 있다.

따라서 화학공정 설계 시 안전성과 생산성을 동시에 확보할 수 있도록 시스템을 구축하는 것은 매우 중요한 사항이다. 화학공정은 안전시스템의 신뢰성을 일정한 수준 이상으로 유지하면서 생산시스템의 신뢰성을 동시에 확보할 수 있도록 시스템을 구축하여야 한다. 이를 위해서는 화학공정을 구성하는 생산시스템과 안전시스템에 대한 정량적 위험성평가가 선행되어야 한다.

그런데 화학공정의 정량적 위험성평가기법으로 광범위하게 이용되고 있는 FTA(Fault Tree Analysis) 기법은 화학공정에서 발생할 수 있는 사고에 주안점을 두고 화학공정 전체의 안전성을 평가하기 때문에 생산시스템의 신뢰도와 안전시스템의 신뢰도를 구분하여 동시에 평가할 수 없다[1-2].

따라서 본 연구에서는 화학공정의 생산성과 안전성을 동시에 확보할 수 있는 방안을 제시하고자 화학공정이 정상적으로 작동할 수 있는 확률을 평가할 수 있는 유향그래프 분석기법을 사용하였다. 본 기법은 생산시스템의 신뢰도와 생산시스템이 정상운전 조건을 벗어날 경우 작동하는 안전시스템의 신뢰도를 각각 평가할 수 있다[1-4].

본 연구에서는 화학공장에 널리 사용되고, 화재·폭발의 잠재 위험성이 높은 가열로공정을 선정하여 생산시스템과 안전시스템에 대해 각각 정량적 위험성평가를 실시함으로써 유향그래프 분석기법이 화학공정 시스템 설계 시 유용하게 사용할 수 있음을 입증하였다. 또한, 위험성평가 결과 도출된 정량적 데이터를 기준으로 최적의 화학공정 시스템 설계기준으로 제시하였다. 특히, 본 연구에서는 화학공장에 널리 사용하고 있는 가열로공정에 대해 안전성과 생산성을 동시에 확보할 수 있는 시스템 구축 방안을 제시함으로써

기존 가열로공정을 운영하고 있는 화학공정의 경우 운전 효율을 개선할 수 있는 방안으로 활용하고, 신규 가열로공정을 설치할 경우 최적의 설계기준으로 활용할 수 있을 것이다.

## II. 이론적 배경

화학공정은 위험물질을 다량으로 취급하고 있어 사고 발생 시 그 피해의 정도는 매우 크다. 따라서 화학공정에는 다양한 안전시스템이 설치되는데 안전밸브, 파열판 등 기계적 안전장치와 긴급차단밸브를 작동시키는 안전계장시스템이 대표적이다. 일반적으로 화학공정 설계 시 안전밸브, 파열판 등 기계적 안전설비를 최소한의 안전장치로 설치하고 화학공정의 안전성을 향상시키기 위해 안전계장시스템을 추가로 설치하였다. 그러나 최근에는 안전계장시스템의 신뢰성이 향상되면서 안전계장시스템도 안전장치로 인식하고 현재 안전시스템의 신뢰성을 확보하는 방안이 산업현장에서 많이 적용되고 있다. 따라서 본 연구에서 산업현장에서 적용되고 있는 안전계장시스템의 신뢰성을 향상시켜 생산시스템의 신뢰성과 안전시스템의 신뢰성을 동시에 확보하는 방안을 제시하고자 한다.

### 2.1. 압력방출장치

화학공정은 운전 중에 화재, 전원차단, 냉각수 공급 중단, 자동밸브 고장 등으로 인해 배관, 장치 등의 내부 압력이 상승하여 관련 설비가 파열될 수 있다. 따라서 화학공정에는 압력 상승 시 내부 압력을 방출하기 위한 안전밸브, 파열판 등을 설치한다. 그런데 이러한 안전밸브 등은 사용시간이 경과함에 따라 신뢰성이 떨어져 내부 압력 상승 시 제대로 작동하지 않을 수 있다. 따라서 화학공정의 안전성을 향상시키기 위해 안전밸브 등의 고장에 대비해 안전밸브 등을 이중으로 설치할 수 있다. 그러나 안전밸브 등은 정상 운전압력 하에서 고장으로 인해 열릴 수 있으므로 안전밸브 등을 이중으로 설치할 경우 생산의 신뢰성은 떨어질 수 있다. 따라서 안전성과 생산성으로 동시에 확보하기 위해서는 적절한 개수의 안전밸브 등이 설치되어야 한다.

### 2.2. 안전계장시스템

(SIS : Safety Instrumented System)

안전계장시스템은 공정이 안전상태를 벗어났을 때 미리 정해진 안전상태가 되게 하는 독립적인 시스템을 말하는데 센서(Sensor), 논리해석기(Logic Solver), 최종설비(Final Element)로 구성되어 있다. 여기서, 센서는 프로세스 상태를 측정하기 위한 장치(Transmitter 등)를 말하며, 논리해석기는 논리기능을 수행하는

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

Node type	Input arc intensity	Shutdown arc intensity	Output arc intensity
OPN	$I(t)$	-	$O(t) = I(t) \cdot \exp(-\lambda_{op} t_{op})$
SBN	$I(t)$	-	$O(t) = I(t) \cdot \exp(-\lambda_{sb} t_{sb})$
BDN	$I(t)$	$S_{sd}(t)$	$O(t) = [I(t) \cdot \exp(-\lambda_{sb} t_{sb})] \cdot [-S_{sd}(t) \cdot P_{sd}]$
AND	$I_1(t), \dots, I_n(t)$	-	$O(t) = \prod_{i=1}^n I_i(t)$
OR	$I_1(t), \dots, I_n(t)$	-	$O(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - I_i(t))$

장치(PLC 등) 그리고 최종설비는 안전한 상태로 만들기 위해 필요한 물리적 작동장치(자동밸브, 긴급차단밸브 등)를 말한다[5].

화학공정 안전에 적용되는 대표적인 SIS는 ESD(Emergency Shutdown System)인데 ESD는 센서가 운전 상태를 지속적으로 감지하여 그 결과를 논리해석기로 전송하고, 논리해석기는 안전운전 상태를 벗어날 경우 화학공정을 긴급 정지시킬 수 있도록 최종설비(긴급차단밸브 등)에게 닫힘 신호를 보내며 최종설비는 그 신호를 받아 닫는 조작을 하게 된다.

따라서 본 연구에서는 화학공정에 설치되는 ESD의 효율적인 구성방법을 제시하고자 안전성과 생산성을 동시에 확보할 수 있는 ESD 구성 방안을 검토하였다.

### 2.3. 정량적 위험성평가기법

본 연구에서는 화학공정의 신뢰도를 평가하기 위해 유향그래프 분석(Directed Graph Analysis)기법을 사용하였다. 본 기법은 아크와 노드로 구성되어 있는 심벌을 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 계산한다. 이 출력아크강도가 각 지점의 신뢰도를 나타내며, 최종 지점의 출력아크강도가 전체 화학공정의 신뢰도를 나타낸다[1,4].

Table 1에서 OPN은 OPeration Node로 운전 중인 설비의 고장으로 인한 신뢰도 변화를 모델링하는데 운전시간( $t_{op}$ )과 운전 중 단위시간당 설비의 고장률( $\lambda_{op}$ )을 필요로 한다. SBN은 StandBy Node를 나타내며, 대기상태에 있는 설비의 고장으로 인한 신뢰도 변화를 모델링하는데 1개의 입력아크강도와 대기시간( $t_{sb}$ )으로부터 출력아크강도를 발생시키며, 대기상태

에서 단위시간당 설비의 고장률( $\lambda_{sb}$ )을 필요로 한다. BDN은 standBy and shutDown Node를 나타내며, 비상시 화학공정을 안전하게 정지시키는 안전시스템의 대기상태에서 정지동작까지를 모델링하는데 운전되지 않은 상태에서의 단위시간당 설비의 고장률( $\lambda_{sb}$ )과 정지신호 시 성공적으로 작동할 확률( $P_{sd}$ )을 필요로 한다. 또한, AND, OR 등은 유향그래프 작성시 논리적인 결함을 위해 정의한 노드로 AND는 모든 입력아크가 존재할 가능성을 나타내며, OR는 모든 입력아크의 합을 나타낸다. 본 노드는 논리적 결함을 위한 노드로 공정배관·계장도에는 존재하지 않으므로 유향그래프 작성시 점선으로 모델링한다[1,4].

## III. 사례연구

### 3.1. 대상공정

화학공정의 안전성과 신뢰성을 동시에 확보하는 방안을 제시하고자 화학공장에 널리 사용되고 있고 가열로공정을 선정하였다. 본 공정의 공정배관·계장도는 Fig. 1과 같고, 피가열유체는 인화성액체이며 연료는 중유를 사용한다[1].

본 가열로공정은 연료공급시스템, 피가열유체시스템 및 가열로시스템으로 구성되어 있고, 정상적인 운전조건은 피가열유체시스템의 가열로 출구측의 온도, 압력 및 유량을 일정한 값으로 유지하는 것이다.

본 공정의 피가열유체시스템에서 고온의 인화성액체가 누출될 경우 화재·폭발 사고가 발생할 수 있으므로 사고를 예방하기 위해 안전시스템이 설치되어 있다. 안전시스템으로는 피가열유체시스템의 가열로 출구측에 설치되어 있는 온도감지시스템과 안전밸브 그리고 연료공급시스템에 설치되어 있는 압력감지시스템이다. 피가열유체시스템의 가열로 출구측의 온도가 운전조건 이상(HH)이 될 경우 TSHH에 의해 자동

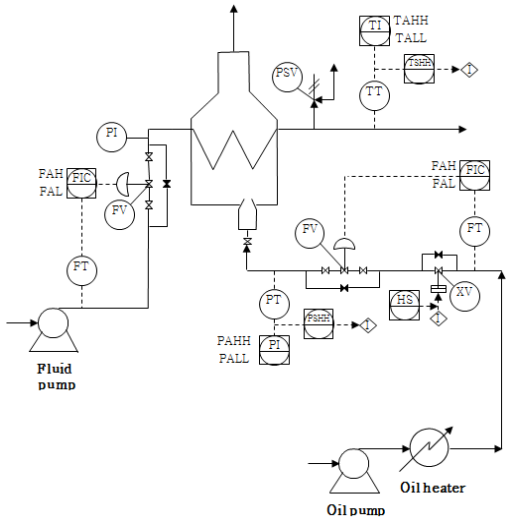


Fig. 1. P&ID of furnace process.

(I, 인터록시스템)으로 긴급차단밸브(XV)를 작동시켜 연료가 투입되는 것을 차단하는 온도감지시스템이 설치되어 있고, 연료공급시스템에는 압력감지시스템을 설치하여 동일한 역할을 수행할 수 있도록 하고 있다. 또한, 피가열유체시스템의 가열로 출구측의 압력이 계속 상승하여 배관이 파열되어 고온의 인화성액체가 누출되는 것을 예방하기 위해 출구측의 압력이 정해진 압력까지 상승할 경우 기계적으로 고온의 인화성액체를 배출시킬 수 있는 안전밸브가 설치되어 있다.

3.2. 안전시스템에 대한 신뢰도평가

본 공정의 피가열유체의 온도가 상승할 경우 플랜지, 밸브 등에서 인화성액체가 누출될 위험성이 있다. 따라서 피가열유체시스템의 온도가 상승하는 원인을 제거하기 위해 연료공급배관에는 긴급차단밸브가 설치되어 있다. 즉, 본 공정은 피가열유체의 온도 및 가열로로 공급되는 연료의 압력을 감지하여 운전온도 또는 압력이 운전조건을 벗어날 경우 자동으로 작동하는 긴급차단밸브가 설치되어 있다. 또한, 피가열유체 배관에는 압력이 일정한 값 이상이 될 경우 작동하는 안전밸브가 설치되어 있다. 즉, 본 공정의 안전시스템으로 온도감지시스템, 압력감지시스템 및 안전밸브가 설치되어 있는데 이런 안전시스템이 정상적으로 작동할 신뢰도를 평가하기 위해 안전시스템을 유향그래프로 모델링하면 Fig. 2와 같다.

본 유향그래프는 수동 정지시스템은 제외하고 자동 정지시스템에 대해서만 모델링한 것인데 만약 수동

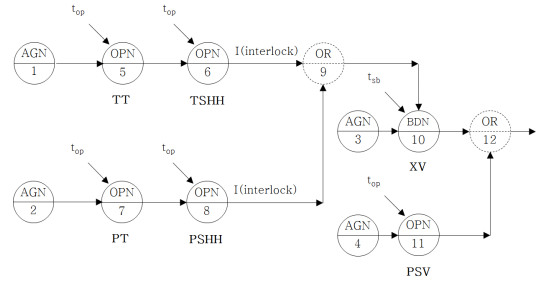


Fig. 2. Directed graph of safety system.

Table 2. Reliability data used in safety system

Node		Equipment	Data
No.	Type		
1,2,3,4	AGN	Arc generation node	$O(t \geq 0+) = 1.0$
5	OPN	TT(Temperature Transmitter)	$\lambda_{op} = 8.0E - 7/h$
6	OPN	TSHH(Temperature Switch High High)	$\lambda_{op} = 2.0E - 7/h$
7	OPN	PT(Pressure Transmitter)	$\lambda_{op} = 3.79E - 6/h$
8	OPN	PSHH(Pressure Switch High High)	$\lambda_{op} = 9.47E - 5/h$
9	OR	Logic node	-
10	BDN	Shutoff valve	$\lambda_{cb} = 3.81E - 6/h$ $P_s(t) = 1.0$
11	OPN	Safety valve	$\lambda_{op} = 2.12E - 4/h$
12	OR	Logic node	-

Table 3. Output arc intensity of safety system

Node No.	Time(hour)				
	720	2,160	4,320	6,480	8,760
12	0.99961	0.99684	0.98933	0.97957	0.96819

정지시스템을 고려하고자 할 경우 유향그래프의 해당 부분에 관련 노드를 추가하면 된다.

안전시스템은 온도감지시스템, 압력감지시스템 및 안전밸브 중 1개 이상만 작동하면 되기 때문에 3개의 시스템이 유향그래프에서 노드 9, 12번과 같이 OR gate로 결합되었다. 노드 1, 2, 3, 4번은 운전을 시작할

경우 출력아크강도 “1”을 발생시킨다. 노드 5, 6번은 온도감지시스템을 모델링하고, 노드 7, 8번은 압력감지시스템을 모델링한 것이며 노드 9번은 온도감지시스템 또는 압력감지시스템 중 1개 이상이 작동할 확률을 나타낸다. 노드 10번은 대기상태에 있는 긴급차단밸브를 모델링한 것으로 노드 9번의 출력아크강도가 이 노드의 shutdown arc intensity가 된다. 또한 노드 11번은 안전밸브의 시간경과에 따른 신뢰도를 나타내며, 노드 12는 안전밸브와 긴급차단밸브 중 1개 이상이 작동할 확률을 나타낸다.

안전시스템의 신뢰도평가에 사용된 신뢰도 데이터는 Table 2[1,6]의 같고, 신뢰도 데이터를 근거로 시간결과에 따른 안전시스템의 신뢰도를 평가하면 Table 3과 같다.

### 3.3. 생산시스템에 대한 신뢰도평가

본 생산시스템은 피가열유체를 승온시켜 일정한 온도, 압력 및 유량으로 후속공정에 공급하는 시스템이므로 피가열유체시스템과 피가열유체에 에너지를 공급하는 연료공급시스템으로 구성되어 있다. 따라서 본 공정이 정상적으로 운전될 수 있는 신뢰도를 평가하기 위해 생산시스템을 유향그래프로 모델링 하면 Fig. 3과 같이 된다.

여기서, 공정배관 · 계장도에 있는 각종 Local 계기는 시스템이 정상으로 작동할 신뢰도에는 영향을 미치지 않으므로 유향그래프에서 삭제하였으며, 신뢰도 평가 시 배관 및 차단밸브의 막힘 등은 고려하지 않았다. 다만, 관련 내용을 고려할 경우 유향그래프의 해당되는 위치에 노드를 추가로 삽입하면 된다.

노드 1, 2번은 피가열유체 공급펌프 및 연료공급펌프에 유체의 지속적 공급을 모델링한 것으로 운전을 시작할 경우 항상 “1”로 출력아크강도를 발생시킨다. 노드 3~9, 11, 12번은 운전 중인 요소의 고장을 OPN으로 모델링하고, 노드 10번은 정상운전 중에 고장으로 인해 연료공급을 차단하여 생산시스템의 신뢰도에 영향을 미칠 수 있는 긴급차단밸브를 SBN로 모델링하

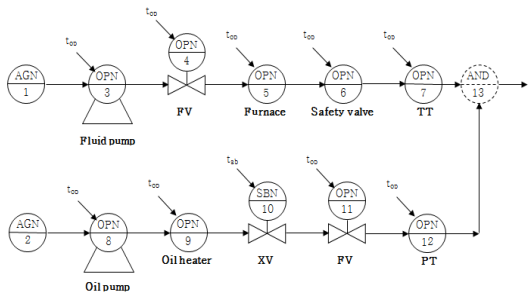


Fig. 3. Directed graph of production system.

였다. 그리고 노드 4, 10, 11번은 계장시스템으로 1개의 노드로 정의하였다. 노드 6번은 안전밸브가 운전 중에 고장으로 인해 열릴 경우를 모델링한 것이며, 노드 7, 12번 온도감지기와 압력감지기의 오작동으로 인해 긴급차단밸브가 작동하는 것을 모델링한 것인데 안전밸브 및 감지기 설치가 생산시스템의 신뢰도를 감소시킬 수 있음을 보여 주고 있다.

Fig. 3의 유향그래프 모델로부터 생산시스템의 시간경과에 따른 신뢰도 변화는 Table 4와 같고, 신뢰도 평가 시 사용된 신뢰도 데이터는 Table 5와 같다[1,6].

여기서, 온도 및 압력감지기, 긴급차단밸브, 안전밸브 등의 고장률이 Table 2와 상이하다. 이는 안전시스템에서는 안전장치가 작동하여야 할 시점에 감지기 미감지, 긴급차단밸브 미작동(닫히지 않음), 안전밸브 미작동(열리지 않음) 확률을 나타내고, 생산시스템의 신뢰도평가는 정상운전 중에 고장으로 인해 감지기 오지시, 긴급차단밸브 닫힘, 안전밸브 열림 등의 확률을 나타내기 때문이다.

Table 4. Success probability of production system

Node No.	Time(hour)				
	720	2,160	4,320	6,480	8,760
13	0.97557	0.92849	0.86209	0.80044	0.74015

Table 5. Reliability data used production system

Node		Equipment	Data
No.	Type		
1,2	AGN	Arc generation node	$O(t \geq 0+) = 1.0$
3	OPN	Fluid pump	$\lambda_{op} = 7.1E - 6 / h$
4	OPN	Flow control valve	$\lambda_{op} = 2.90E - 6 / h$
5	OPN	Furnace	$\lambda_{op} = 1.41E - 6 / h$
6	OPN	Safety valve	$\lambda_{op} = 1.68E - 6 / h$
7	OPN	TT	$\lambda_{op} = 1.16E - 6 / h$
8	OPN	Oil pump	$\lambda_{op} = 7.0E - 6 / h$
9	OPN	Oil heater	$\lambda_{op} = 5.60E - 7 / h$
10	SDN	Shutoff valve	$\lambda_{sb} = 9.17E - 6 / h$
11	OPN	Flow control valve	$\lambda_{op} = 2.90E - 6 / h$
12	OPN	PT	$\lambda_{op} = 4.70E - 7 / h$
13	AND	Logic node	-

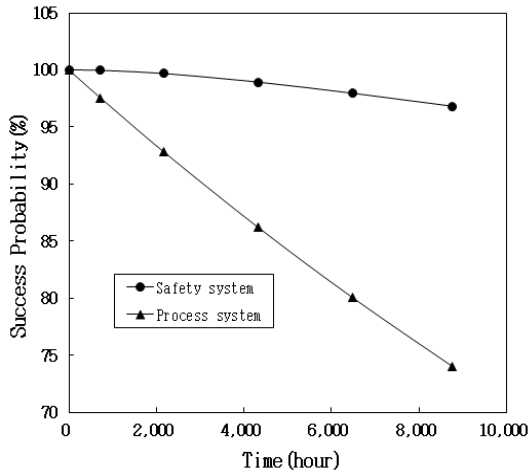


Fig. 4. Success probability of furnace process.

### 3.4. 안전시스템과 생산시스템의 신뢰도 비교

가열로공정의 안전시스템과 생산시스템의 신뢰도를 비교하면 Fig. 4와 같은데 안전시스템의 신뢰도는 상대적으로 높은 반면 생산시스템의 신뢰도는 운전시간이 경과함에 따라 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 안전시스템은 온도감지시스템, 압력감지시스템 및 안전밸브가 병렬시스템인데 비해 생산시스템은 직렬로 연결되어 있기 때문이다.

따라서 안전시스템의 신뢰도를 유지하면서 생산시스템의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 생산시스템의 신뢰도 감소에 영향을 주는 안전설비의 신뢰도를 개선하는 것이 필요하다.

### 3.5. 생산시스템의 신뢰도 향상 방안

본 연구에서는 안전시스템의 신뢰도를 확보하면서 생산시스템의 신뢰도를 향상시키는 방안을 도출하기 위해 가열로공정에 안전설비를 추가로 설치하는 경우에 대해 신뢰도를 평가하였다.

본 가열로공정에서 안전시스템의 신뢰도에 영향을 주는 안전설비로는 안전밸브, 온도감지기(TT) 및 압력감지기(PT)가 있다. 안전밸브를 2개 설치하는 경우와 온도 및 압력감지기를 각각 3개(3개 중 2개가 일정한 값 이상일 경우 긴급차단밸브 작동) 설치하는 경우에 대해 안전시스템 및 생산시스템의 신뢰도평가는 유향그래프 모델 Fig. 2과 Fig. 3의 해당되는 위치에 관련 노드를 추가하여 평가하였다. 그 결과는 Table 6과 같고, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 5 ~ Fig. 7과 같다.

Fig. 5는 안전밸브를 추가로 설치할 경우 안전 및 생산시스템의 신뢰도 변화를 나타낸 것인데 안전시스템의 신뢰도는 향상되지만 생산시스템의 신뢰도는 떨어

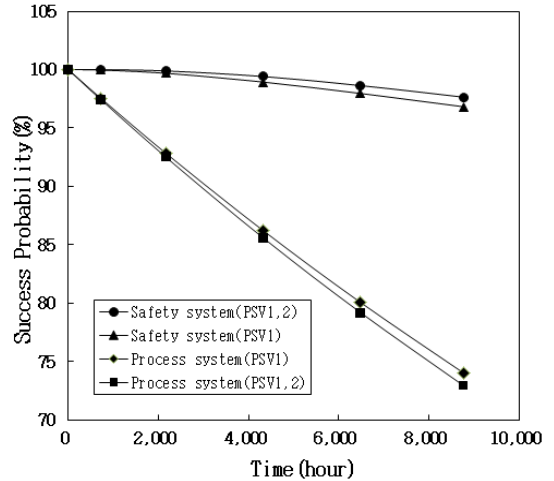


Fig. 5. Success probability of furnace process according to safety valve.

Table 6. Success probability of process and safety system

Safety Equipment	System	Time(hour)				
		720	2,160	4,320	6,480	8,760
PSV1, PSV2	Safety	0.99995	0.99889	0.99410	0.98631	0.97643
	Process	0.97439	0.92513	0.85586	0.79178	0.72933
TT1, TT2, TT3	Safety	0.99961	0.99696	0.99003	0.98134	0.97147
	Process	0.98562	0.95731	0.91541	0.87367	0.82951
TT1~3, PT1~3	Safety	0.99961	0.99696	0.99004	0.98135	0.97149
	Process	0.99997	0.99921	0.99440	0.98320	0.96335

짐으로 생산시스템의 신뢰도를 향상시키기 위해 안전밸브를 추가로 설치하는 것은 바람직하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6은 온도감지기를 3개 설치하는 경우 안전시스템과 생산시스템의 신뢰도 변화를 나타낸 것인데 온도감지기를 3개 설치할 경우 안전시스템의 신뢰도는 조금 상승하는 반면 생산시스템의 신뢰도가 크게 향상됨을 알 수 있다.

또한, Fig. 7은 온도감지기 및 압력감지기를 각각 3개 설치하였을 경우 생산시스템의 신뢰도를 나타낸 것인데 생산시스템의 신뢰도는 압력감지기 1개와 온도감지기 3개를 설치한 경우에 비해 크게 향상됨을 알 수 있다. 이에 비해 안전시스템의 신뢰도는 Table 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 거의 변화지 않은 것으로

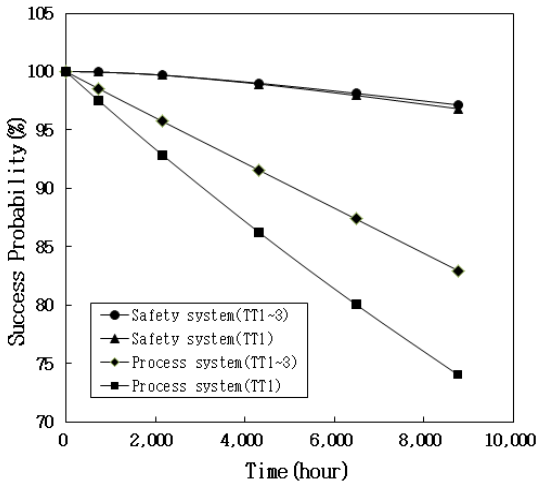


Fig. 6. Success probability of furnace process according to TT.

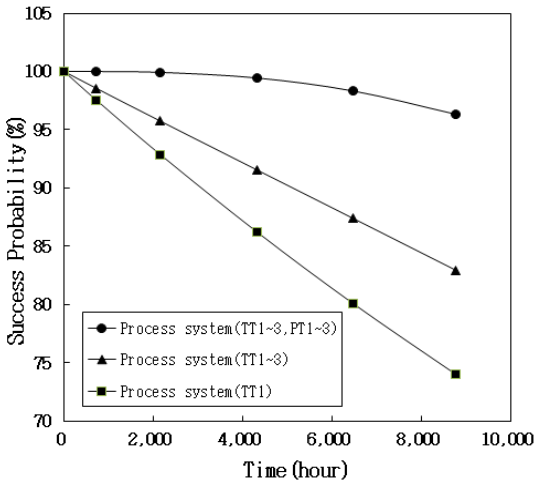


Fig. 7. Success probability of furnace process according to TT and PT.

나타났다.

따라서 가열로공정 설계 시 온도감지기 및 압력감지기를 각각 3개 설치하여 2개 이상이 일정한 값 이상일 경우 가열로공정을 정지하도록 안전시스템을 구성하는 것이 안전시스템의 신뢰성과 생산시스템의 신뢰성을 동시에 확보할 수 있는 최적의 시스템 설계 조건임을 알 수 있다.

#### IV. 결론

안전시스템과 생산시스템의 신뢰성을 동시에 확보할 수 있는 화학공정을 구축하기 위해서는 화학공정의 안전시스템과 생산시스템에 대한 정량적 위험성평가가 선행되어야 하며, 도출된 정량적 데이터를 근거로 화학공정 시스템을 구축하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 유향그래프 분석기법을 이용하여 화학공정의 안전시스템과 생산시스템에 대해 정량적 위험성평가를 실시하였으며, 화학공정 시스템 구축을 위한 정량적 위험성평가기법으로 유향그래프 분석기법이 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다. 또한, 정량적 위험성평가 결과 도출된 데이터를 근거로 최적의 화학공정 시스템 구축 방안을 제시하였다.

화학공장에서 널리 사용되고 있는 가열로공정의 안전성과 생산성을 동시에 확보할 수 있는 방안은 온도감지기와 압력감지기를 각각 3개 설치하여 2개 이상이 일정한 값 이상을 나타낼 때 긴급차단밸브가 작동하도록 안전시스템을 구축하는 것이며, 이 경우 온도감지기 및 압력감지기를 1개 설치하였을 경우에 비해 안전시스템의 신뢰도(96.82% → 97.15%)는 거의 변화가 없는 반면 생산시스템의 신뢰도(74% → 96%)는 크게 향상되어 안전성과 생산성을 동시에 확보할 수 있는 최적의 시스템 설계임을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구에서 제시된 연구결과를 실제 화학공정에 적용하면 화학공정의 안전성은 물론 생산성도 동시에 확보할 수 있는 화학공정 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2014년 울산과대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] 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)
- [2] Byun, Y. S., An, D. M. and Hwang, K. S., "A Comparative Study on Safety Analysis Methodology of Chemical Process", *Journal of the KIIS*, **18**(2), 64-72, (2003)
- [3] Byun, Y. S. and Hwang, K. S., "A Study on Reliability Flow Diagram Development of Chemical Process Using Directed Graph Analysis

- Methodology", *Journal of KIGAS*, **16**(6), 41-47, (2012)
- [4] 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)
- [5] Kwon, H. M., Park, H. C., Chun, Y. W. and Park, J. H., "Towards the Application of Safety Integrity Level for Improving Process Safety", *Journal of the KOSOS*, **27**(5), 64-69, (2012)
- [6] 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)