

Batch 공정의 HAZOP 분석에서 이탈의 전파 방법

옥유영, 허보경, 황규석
 부산대학교 화학공학과

1. 서론

현 산업체에서는 사고를 미연에 방지하기 위해 다양한 위험성 평가기법을 이용하고 있다. 위험과 운전성 분석기법(HAZOP)은 대표적인 정성적 평가기법으로 체계적인 연구가 가능하며 brain-storming에 의한 폭넓은 평가 결과를 얻을 수 있으므로 화학 공장에서 널리 사용된다. 그러나 HAZOP Analysis는 여러 분야의 전문가들이 위험성 평가를 시행하여야 하기 때문에 상당한 비용과 노력, 시간이 필요하고 전문가의 자질과 컨디션이 결과에 영향을 미치므로 객관적인 신뢰도가 떨어지는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 하는 노력으로 HAZOP Analysis 자동화를 위한 연구가 지금까지 활발히 전개되었으나 대부분이 연속 공정에 국한된 것이었다.

회분식 공정의 HAZOP Analysis는 연속 공정의 HAZOP Analysis와는 달리 Time과 Sequence라는 불연속적인 변수들을 고려해야 한다. 회분식 공정의 특징인 Time과 Sequence의 해석은 연속 공정의 HAZOP Analysis 기법으로는 설명될 수 없기에 본 연구에서 이러한 불연속적인 변수들과 상태 변수들의 관계를 제시함으로써 연속 공정의 HAZOP Analysis 기법으로 회분식 공정의 HAZOP Analysis를 시행할 수 있도록 하였다.

2. 공정 지식의 표현

2.1. Topology data의 표현

대상공정의 P&ID를 code화한 data로써, 대상 공정을 중추 node를 중심으로 물질의 종류와 흐름에 따라 unit, arc, valve들로 구성되어 있는 line들로 세분화하

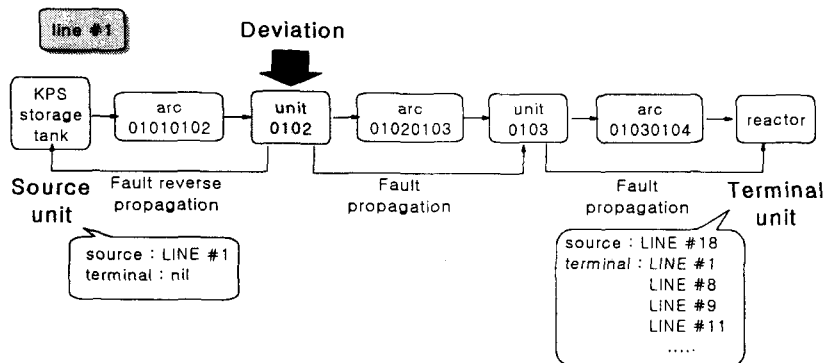


Fig. 1. Process Topology data

였고, 구체화된 장치 정보를 line별로 표현하였다. 중추 node는 3개 이상의 arc가 연결되어 있는 장치나 혼합점·분기점을 말한다.

각 line은 unit, arc, 중추 node로 구성되어 있으며, 각 구성 성분들은 고유의 번호가 있다. unit는 0000으로 명명되는데 처음 두 자리는 line 번호를 나타내고, 나머지 두 자리는 line내의 unit의 위치를 나타낸다.

arc는 00000000으로 8단위로 명명되는데 앞의 네 자리는 inlet unit의 번호를, 나머지 네 자리는 outlet unit의 번호를 나타낸다(Fig. 1).

2.2. Sequence semantic network

Sequence semantic network은 정상 상태에서 각 공정간의 순차적인 인과 관계를 semantic network으로 표현한 것으로 step, node, relation들로 구성되어 있다. 구체적인 일례로 Latex 제조 공정의 Sequence semantic network을 제시하였고(Fig. 2), Relation들의 정의는 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Relations of Sequence semantic network

Relation	Definition
A before B	A step occurs previous to B step
A during B	A step occurs during B step
A overlap B	A step occurs after B step happens to be and A step is completed after B step is completes.
start	step starts.
finish	step finishes.

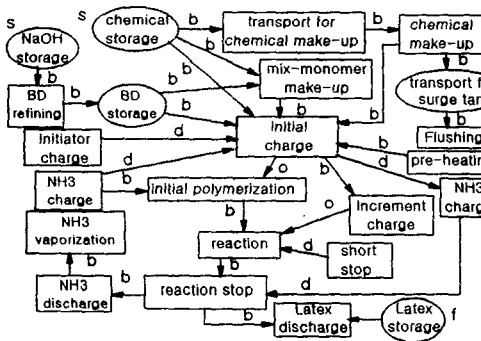


Fig. 2. Sequence network for Latex process

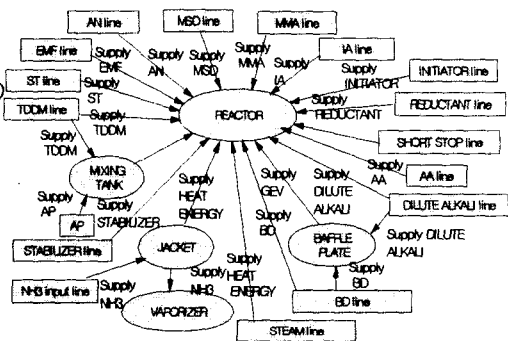


Fig. 3. Functional semantic network of Latex process

2.3. Functional semantic network

Functional semantic network은 정상 상태에서 각 공정간의 기능적인 인과 관계를 semantic network으로 표현한 것으로 중추 node, line, relation들로 구성되어 있다. 구체적인 일례로서 Latex 제조 공정의 Sequence semantic network을 제시하였다(Fig. 3).

2.4. 공정의 장치 recipe

Step에 따른 line별 recipe와 각 Line에 따른 장치 recipe를 matrix로 나타내어 정상 상태에서의 물질의 흐름 여부를 나타낸다. Step에 따른 line별 recipe는 line

의 open, closed 상태를 matrix로 나타낸 것으로, line의 open은 line내에 물질의 흐름이 있음을 나타내고, closed는 line내에 물질의 흐름이 없음을 나타낸다 (Table 2). Line에 따른 장치 recipe는 Topology data에 의해 제시된 line에 속해 있는 세부 장치들의 정상 상태에 관한 정보를 보여준다(Table 3).

Table 2. line recipe (per step)

step \ line	AN	ST	NH3	Latex
AA Charge	O	O	O	C
Reaction	C	C	O	C

Table 3. unit recipe (per line)

line \ unit	U0101	U0102	U0103	U0104
AA open	O	A	O	O
AA closed	C	A	C	O

C : closed/off, O : open/on, A : 어떤 조건하에서 자동으로 closed/open됨.

3. 이탈 전파

Control loop는 그 기능의 특성상 이탈 전파 과정에서 이를 제외한 unit와는 다른 독특한 양상을 보이므로 구분하여 이탈전파 방법을 제시하였다.

3.1. Control loop를 제외한 unit에서의 이탈 전파 방법

이탈의 전파를 위해 공정 변수들을 연속 변수인 상태 변수와 불연속 변수인 Sequence · Time으로 구분한 후, 이러한 변수들을 중심으로 구분하여 각기 다른 방법으로 이탈의 전파를 수행하였다.

3.1.1. 상태 변수의 이탈 전파

간단한 SDG 기법에 의해 도출된 이탈 전파식에 의해 상태 변수의 이탈 전파가 이루어진다.

<Propagation equation>

$$\begin{aligned}
 T &= f(T_{in}) & Q_{out} &= f(L, P, Q_{in}) & (T: \text{temperature, } L: \text{level,} \\
 L &= f(Q_{in}, -Q_{out}) & P_{out} &= f(P) & Q: \text{flow rate,} \\
 P &= f(L, T, P_{in}) & T_{out} &= f(T, T_{in}) \dots & P: \text{pressure ...)}
 \end{aligned}$$

3.1.2. Sequence와 Time의 이탈

Sequence와 Time의 이탈은 먼저 상태 변수로의 이탈 전이가 이루어진 다음 전이된 상태 변수의 이탈을 전파식에 의해 전파시킨다. 공정을 mass의 흐름과 heat의 흐름에 따라 분류한 후, 적합한 전이식을 제시하였다.

<Transference equation>

① mass의 흐름에 따라 세 step으로 분류한다.

-charging step: $f(s) = f(Q)$

-reaction step: 발열 반응인지 흡열 반응인지에 따라 전이식이 제시된다.

A. 발열반응 : $f(s) = f(T)$

B. 흡열반응 : $f(s) = f(-T)$

-discharging step : $f(s) = f(-L)$

② heat의 흐름에 따라 두 step으로 분류한다.

-heating step : $f(s) = f(T)$

-cooling step : $f(s) = f(-T)$

3.2. control loop에서의 이탈 전파

control loop는 공정에서 이탈을 소멸시키는 역할을 하는 부분이다.

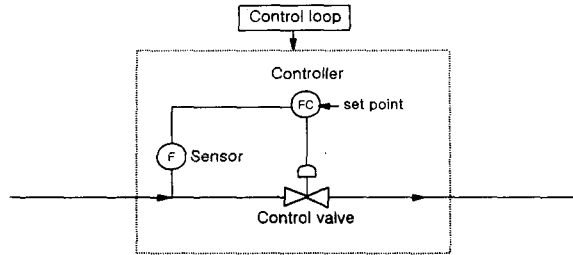


Fig. 4. Feedback flow control system with controlled and manipulated variable flow

먼저 이탈의 전파를 고려하자.

control loop의 이탈은 크게 control loop boundary내에서 이탈이 발생하는 경우와 control loop boundary외에서 이탈이 발생하는 경우로 나누어진다(Fig. 4). control loop는 controller(set point), sensor, control valve, pipe들로 구성되어 있고, control loop boundary내에서의 이탈은 이러한 장치들의 이상으로 인해 발생하고, 이 때의 전파식은 다음과 같다.

<propagation equation in control loop>

- sensor : $f(\text{signal}) = f(Q)$

- controller : $f(\text{signal}) = f(\text{signal})$

- control valve : $f(Q) = f(\text{signal})$

control loop boundary외에서의 장치에서 이탈이 발생하였을 때 control loop는 정상 작동중이라고 가정한다.(이탈은 하나의 unit에만 발생하고, 나머지 unit들은 모두 정상 작동을 한다는 가정 하에 HAZOP Analysis가 행해지기 때문이다.) 그러나 control loop가 정상 작동중이라 하더라도 이탈의 크기로 인해 다음과 같은 두 가지 경우가 발생한다.

A. control 가능 : control loop가 제어 가능한 제어 한계 내의 이탈이 control loop boundary내로 들어오면 control loop는 이러한 이탈을 모두 소멸시킨다. HAZOP Analysis의 목적은 발생 가능한 모든 이탈의 규명에 있으므로 이와 같이 이탈이 소멸할 경우는 고려하지 않는다. 모든 control loop의 최종 제어 장치는 control valve이고, control valve는 valve의 개폐 정도로 유량을 조절함으로써 제어 변수를 제어한다. more 이탈은 아무리 큰 이탈로 control loop내에 전파되어도 valve를 closed함으로써 제어가 가능하므로 more 이탈은 소멸되고 더 이상의 이탈 전파를 행하지 않는다.

B. saturation : 이탈의 크기가 너무 커서 control loop에 의해 제어가 불가능한 경우이다. 이와 같은 경우로 less나 no이탈이 있다. 큰 less나 no이탈은 아무리 valve를 open한다고 할지라도 이탈이 소멸하지 않는다. 이와 같은 경우를 saturation이라 하고, 이러한 경우 그대로 이탈을 전파시킨다.

control loop boundary내의 이탈의 역전파는 전파에서 사용되었던 전파식이 그대로 적용되나, control loop boundary외의 이탈 전파는 control loop가 정상 작동

한다는 가정하에 제시되므로, 전과에서처럼 more이탈은 소멸되고 less나 no이탈만을 고려한다. 이탈의 역전과에서 less나 no이탈이 발생하는 이유는 control loop가 saturation 되었을 때이므로 이탈은 control loop에 영향을 받지 않고 앞 unit로 전과된다.

4. Case study

Latex 제조 공정은 현 산업체에서 사용되고 있는 전형적인 batch 공정으로, manual에 따라 monomer 및 chemical들을 reactor에 charge하여 batch 유화 중합 반응으로 제품을 생산한다(Fig. 5).

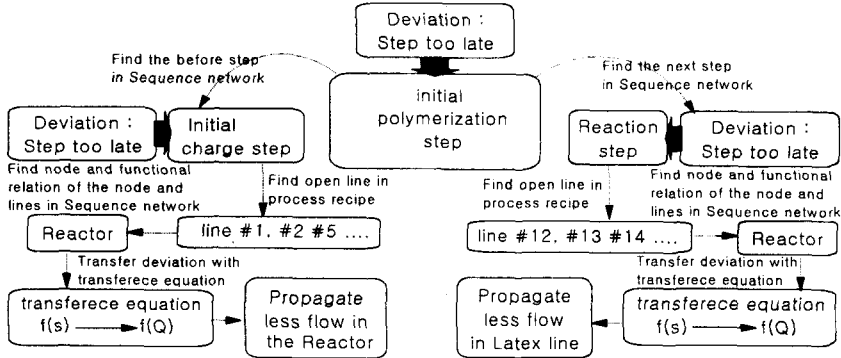


Fig. 5. Instance in Latex process

(in case of 'step too late' deviation in Increment charge step)

AN(Acrylonitrile), ST(styrene), BD(butadiene)와 같은 monomer들과 그 외의 다양한 chemical들이 유화 중합 반응을 위한 물질들로 이용되고, liquid NH₃로 온도를 제어한다. 반응 조건으로 온도는 85℃ 이하, 압력은 5.0kg/cm²G 이하로 유지해야한다.

Table 4. Comparison with actual plant data from HAZOP studies carried out at Latex process(in case of 'step too late' deviation in Increment charge step)

Result (actual plant)		Result(this model)	
Cause	Consequence	Cause	Consequence
No Preheating for increment BD, mix-monomer charged.	increment polymerization reaction is delayed	No Preheating for increment BD & mix-monomer charge. reactor leakage. ...	polymerization reaction is delayed. decreasing in yield. ...

Latex 공정의 Increment charge step에서 'step too late'이라는 이탈이 발생한 경우 공장에서 수행한 HAZOP Analysis 결과와 제시된 model을 적용시켜 수행한 HAZOP Analysis 결과를 비교(Table 4)해 보면 전이식을 적용시켜 수행한 HAZOP Analysis 결과는 실제 공장에서 수행한 HAZOP Analysis 결과를 모두 포함하고 있을 뿐 아니라 장치에 대한 이상 지식도 포함하고 있어 더 많은 이탈의 원인과 결과를 추론할 수 있었다.

5. 결론

1. 공정의 순차적인 인과 관계는 Sequence semantic network으로, 기능적인 인과 관계는 Functional semantic network으로 표현하여 대상 공정의 관계를 제시하였고, 공정의 정상 상태는 시간에 따른 line별 recipe와 line에 따른 장치 recipe로 recipe matrix로 체계적으로 정리하였다.
2. 공정 변수를 Time, Sequence와 상태 변수로 구분한 후, Time과 Sequence의 이탈은 전이식을 적용시켜 상태 변수의 이탈로 전이시킨 후, 상태 변수의 이탈 전파식을 적용하였다. 이로써 회분식 공정 변수의 이탈 전파를 연속식 공정의 이탈 전파와 같은 기법으로 실행할 수 있었다. 상태 변수의 이탈 전파식은 간략화된 SGD 기법을 사용하여 제시하였고, 또한 Control loop와 같은 특정 장치에 적합한 이탈 전파 방법도 제시하였다.
3. Latex 공정 중 일부에 본 model을 적용시켜 본 결과 더 많은 원인과 결과를 유추할 수 있었다.

6. 감사의 글

본 연구는 포항공과대학교 공정산업의 지능자동화 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

7. 참고 문헌

1. "HAZOP Training Manual", Technica Inc. consultants in Engineering and Science, April 29-May 3, 1991.
2. Center for Chemical Process Safety(CCPS), "Guideline for Hazard Evaluation Procedures", AICHE, New York, 1985.