

## 안전 · 비용을 고려한 화학공장 위험성 평가 방법에 관한 연구

„김동운, 문 일

연세대학교 화학공학과

### A Study on Risk Analysis Methods in view of Safety and Cost in Chemical Industries

Dongwoon Kim and Il Moon

Department of Chemical Engineering, Yonsei University

#### 서론

많은 화학공장, 특히 독성이나 폭발성이 있는 위험물질을 취급하는 공정에서 사고 위험을 줄이기 위해 공정안전관리를 통한 사고예방전략, 사고 후 피해 최소화 전략, 비상조치 계획 수립 등과 같은 안전활동이 이루어지고 있다. 공정안전관리 수행 후 공정의 안전도 향상에 관한 많은 보고들이 발표되고 있으나 크고 작은 사고는 끊임없이 일어나고 있다. 잘못 선정된 시나리오(Scenario) 혹은 사건(Event)에 대한 평가나 분석은 결과에 대한 의미를 가질 수 없고 시나리오 선정 후 수행되는 많은 절차에 대한 시간과 비용을 소비할 뿐이다.

공정안전관리의 효율을 높이기 위해서는 위험요소확인 후 정량적 위험성 평가, 더 나아가 비상조치계획 등을 위한 최적의 사고시나리오의 선택이 중요하다. 최적의 사고시나리오란 발생가능성이 높은 시나리오, 신뢰성이 높은 시나리오, 위험요소 제거를 위한 투자 후 안전도 향상을 기대할 수 있는 시나리오라 할 수 있다. 기존의 위험성평가 방법은 정성적 위험성 평가 후 확인된 잠재적 사고 시나리오에 대한 잠재적 위험성, 즉 사고빈도, 사고피해크기를 통해 정상사상(Top Event)의 선정이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 안전, 환경에 관한 허용 법적 기준이나 의사결정자의 허용 기준에 따라 Event를 선정에 있어 잠재적 위험성에 관점을 둔 기존의 위험성 평가방법에서 안전, 환경, 경제성 등을 고려한 평가방법을 제시한다.

#### 위험성평가를 위한 시나리오 선정방법

시스템의 안전도 분석을 위한 사고피해분석(CA), 사고빈도분석(FTA) 등의 정량적 위험성 평가는 해석 대상 시스템의 특성이나 목적, 수준에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나 일반적으로 예비위험분석(PHA)이나 HAZOP 등의 정성적 위험성 평가 수행 후 위험요소(Hazards)에 대한 상대적 우선순위로 분석할 사건(Event)을 선정한다. CCPS에서는 Likelihood와 Severity를 각각 5등급, 4등급으로 나누고 RRI(Risk Ranking Index) Matrix에 따라 위험등급이 결정되어 상위등급으로 분류된 사건에 대해 정량적 위험성평가 혹은 비상조치계획 등을 실시한다.

#### 제안된 방법

지금까지 위험성 평가는 공정 설계나 운전 단계에서 위험요소를 찾아내 위험요소를 제거함으로써 안전도를 얼마나 높이느냐의 안전측면만을 강조해왔다. 하지만 실제로 안전도 측면뿐만 아니라 환경, 보건, 경제성 등도 중요한 목적함수가 되며 시나리오 선정 시 이러한 두 개 이상의 목적함수를 동시에 고려해야 한다. 공정위험분석을 위험요소에 대한 확인(identification), 평가(Evaluation), 제어(Control)와 같이 크게 3단계로 분류하면 경제성과 환경, 보건에 관한 고려는 주로 평가단계에서 이루어진다. 본 연구에서는 위험성평가에서 Top Event 선정 시 안전, 환경, 경제성 등 여러 가지 목적함수를 고려하기 위해

후 다목적 최적화기법 중 하나인 Goal Programming을 이용한 방법을 Fig. 1과 같이 제시하였다. 이 방법은 위험성 평가 절차 중 사건선택(Event Selection) 단계에서 Goal Programming이용한 방법을 나타낸다.

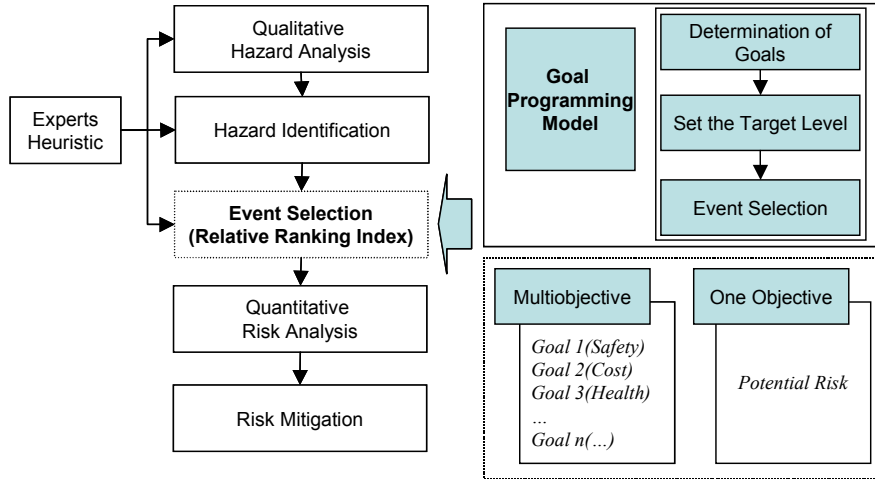


Fig. 1. Goal Programming을 이용한 Event 선정 방법

(1) Goal Programming 모델

Goal Programming에 대한 수학적 표현은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\min \sum_{i=1}^n |f_i(x) - g_i| \quad s.t. \quad X \in F \tag{1}$$

여기서  $g_i$ 는 설정된 Goal에 대한 목표 값을 나타내고 실제함수와 목표 값과의 차를 최소화하는 최적화문제이다. 여기서  $f_i(X) - g_i = d_i^+ - d_i^-$ ,  $d_i^+, d_i^- \geq 0$  와 같이 편차변수(Deviation Variable)를 도입하면 식(1)은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^n (d_i^+ + d_i^-) \\ s.t. \quad & f_i(X) - d_i^+ + d_i^- - g_i = 0, \quad i=1,2,\dots,n, \\ & d_i^+, d_i^- \geq 0, \quad i=1,2,\dots,n, \quad X \in F \end{aligned} \tag{2}$$

편차변수의 합을 최소화하는 최적화문제를 풀고 결정변수(Decision Variable)의 결과로 주어진 문제를 해석 할 수 있다.

(2) 위험성 평가 방법에 도입

Risk관점의 위험성 평가에서 두 개이상의 목적함수를 동시에 고려하는 평가방법을 위해 여기에서는 Goal Programming을 이용하여 위험평가 단계에서 정량적 위험성 평가를 위한 Event선택 방법에 대해 제시한다.

step 0 : 목표(Goal)설정

위험확인 후 Event선정 시 고려할 목표를 설정한다. 각 Event는 이진변수로 정의된 결정변수가 된다.

step 1 : 목표수준(Target Level)설정

각 목표에 대한 목표수준을 설정한다. 여기서 목표 수준은 안전, 환경에 관한 법적 기준이나 비용(Cost) 고려 시 주어진 투자비용에 따라 설정될 수있다.

step 2 : 정규화(Normalization)

편차변수를 최소화하는 문제에서 각 Goal은 단위가 다를 때에는 정규화작업이 필요하다. 여기에서는 전체 식을 목표수준 값으로 나누고 양변에 100을 곱하여 편차변수는 목적함수가 목표 값에 벗어나 있는 정도를 퍼센트 단위로 나타낼 수 있도록 정규화 작업을 한다.

$$\frac{100}{ta_t} f_t(x, y) - p_t + n_t = 100 \quad \text{for } t=1, \dots, i \quad (3)$$

$$p_t = \left(\frac{100}{ta_t}\right) pd_t, \quad n_t = \left(\frac{100}{ta_t}\right) nd_t \quad \text{for } t=1, \dots, i \quad (4)$$

step 4 : 최적화

각 목적함수의 편차변수에 가중치를 곱하여 편차변수의 합을 최소화하는 문제를 푼다. 최적화결과는 이진변수로 정의된 변수 값에 따라 Event의 선택여부를 결정할 수 있다.

$$\min \sum_{i=1}^i a_i p_i \quad (5)$$

step 5 : Event 선택

### 적용 사례

(1) 문제기술

정성적 위험성 평가 후 전문가의 의견과 과거사고 사례를 바탕으로 얻어진 여러 사건에 대해 정량적 위험성 평가를 위해 사건을 선택하는데 있어 사건의 발생빈도, 사고발생 후 피해강도, 안전투자비용, 운전정지시간 등의 4개의 목적함수를 고려하여 가장 적절한 사건을 선택하는 문제이다.

(2) 모델

- 결정변수(Decision Variable)

여러 개의 목적함수의 목표 값을 만족시키는 Event를 선택하기 위해 각 Event에 대한 선택여부를 이진변수로 정의한다.

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{if a } i\text{th event is selected} \\ 0 & \text{otherwise } (i=1,2,\dots,N) \end{cases} \quad (6)$$

- 목표값(Goals)

Goal 1 안전투자비용의 최소화

$$\sum_{i=1}^N y_i c_i + nd_1 - pd_1 = ta_1 \quad (7)$$

여기서  $C_i$ 는 각 Event에 대한 투자비용을 말하고  $nd_1$ ,  $pd_1$ 는 목표값  $ta_1$ 에 대한 목적함수의 편차변수를 나타낸다.  $N$ 은 사건의 총수를 나타내고  $i$ 는 시나리오 번호를 나타낸다.

Goal 2 피해 강도의 최소화

$$\sum_{i=1}^N S_i - \sum_{i=1}^N y_i S_i + nd_2 - pd_2 = ta_2 \quad (8)$$

$S_i$ 는 해당되는 사건이 사고로 이어졌을 때 노출되는 피해강도를 나타낸다. 목표수준은 공정에 노출정도의 허용기준에 따라 설정된다.

Goal 3 운전정지시간의 최소화

$$\sum_{i=1}^N y_i N_i + n d_4 - p d_4 = t a_4 \quad (9)$$

위험요소제거를 위한 공정 운전정지시간은  $N_i$ 로 나타내고 목표수준은 공정운전계획에 따라 설정된다.

Goal 4 목표 빈도수치 이하의 사고발생확률을 갖는 사건의 최소화

$$\sum_{i=1}^N F_i + n d_4 - p d_4 = t a_4 \quad (10)$$

$$F_i = \sum_i y_i - \sum_i (y_i \cdot e_i) \quad (11)$$

목표수준  $t a_4$ 는 선택된 사건의 빈도 중 목표 빈도 수치 이하의 사건에 대한 개수로 설정되고  $F_i$ 는 선택된 사건 중 목표수치 이상의 빈도를 갖는 사건의 총합으로 목표수치 이하의 빈도를 갖는 사건에 대해 이진변수  $e_i$ 로 정의하고 식(11)과 같이 정의된다.

Fig. 2는 총30개 사건에 대해 4개의 목적함수에 대한 목표수준에 만족하는 최적화 결과 중 안전투자비용과 피해강도에 관한 그래프이다.

Table 1. Top Event 선택에 관한 최적화 결과

	Case					
	1	2	3	4	5	6
TA1	43,380	43,380	43,380	43,380	43,380	43,380
TA2	6,097	6,097	6,097	6,097	6,097	6,097
TA3	372	372	372	372	372	372
TA4	1	1	1	1	1	1
Total Cost	43,400	46,200	51,800	64,600	68,500	83,000
Total Risk	12,913	7,921	7,160	6,104	6,097	6,103
Number of scenario	9	10	11	12	13	13
Total Non-OP Time	372	461	497	538	586	586
Selected Scenario	2	1	1	1	1	1
	5	2	2	2	2	2
	6	3	3	3	3	3
	9	4	4	4	4	4
	11	5	5	5	5	5
	13	6	6	6	6	6
	15	9	8	7	7	7
	22	10	9	8	9	9
	24	13	10	9	12	12
		21	13	12	13	13
			21	13	15	15
				15	19	19
					20	20

## 결론

본 연구에서는 잠재적 위험도(Potential Risk)관점의 위험성 평가방법에서 안전, 환경, 비용 등 여러 가지 목적을 고려하여 접근하는 새로운 관점의 위험성 평가 방법을 제시하였다. 공정위험관리 수행 시 시작단계에서 위험도 이외에 여러 가지를 목표(Goals)를 고려하여 수행한다면 효과적인 공정관리가 이루어질지만 이러한 작업수행을 위해서는 많은 비용과 시간을 요구한다. 기존의 위험성 평가 방법에서 사건선택(Event Selection)단계에서 이러한 사항을 고려하여 사건을 선택하게 된다면 효과적인 공정위험관리가 이루어 질 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. Mehrdad Tamiz, Dylan Jones, Carlos Romero, Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art, European Journal of Operational Research 111 (1998) 569-581.