

## FTA를 이용한 회분식 반응기의 위험평가

강 미진, 이 영순<sup>1</sup>, 이 근원\*<sup>2</sup>

서울산업대학교부설 사고조사연구센터, 서울산업대학교 안전공학과<sup>1</sup>,  
한국산업안전공단 화학연구실<sup>2</sup>  
(leekw@kosha.net\*)

### Risk Assessment for Batch Reactor using FTA

MeeJin Kang, YoungSoon Lee<sup>1</sup>, KeunWon Lee\*<sup>2</sup>

Research Institute for Accident Investigation attached Seoul National University of Technology,  
Department of Safety Engineering, Seoul National University of Technology<sup>1</sup>,  
Korea Occupational Safety and Healthy Agency<sup>2</sup>  
(leekw@kosha.net\*)

국내 정밀화학분야는 95%정도가 중소규모의 사업장으로, 대부분 다품종 소량 생산의 회분식 반응공정을 채택하고 있다. 회분식 반응기는 연속식 반응기에 비해 조작이 복잡하고, 공정특성상 여러 가지 단위조작 사이의 자동제어가 어려워서 작업장의 수동조작에 의존하는 경우가 많다. 따라서, 회분식 반응기의 오조작이나 이상반응 발생 시 조기 제어 등의 어려움으로 화재, 폭발이나 반응용기의 손상 등 중대산업사고 발생 위험성이 매우 높다. 또한 각종 화학반응, 원료물질 등에 의한 위험성이 연속공정에 비해 높은 반면 그에 대비한 안전대책이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 회분식 반응기의 사고유형별 사고원인을 분석하고, 사고 위험성이 큰 5개 공정을 선정하여 실제 위험성평가를 실시함으로써 회분식 반응공정에서의 위험특성을 파악하고자 한다.

### 1. 회분식 반응기의 사고발생현황 및 시범공정 선정

#### 가. 사고발생 현황 및 원인 분석

국내 화학분야의 사고발생현황을 살펴보면 사업분류 상 유기화학제품제조업과 점착제제조업 등에서 비교적 사고발생건수가 많음을 알 수 있고, 영국에서의 공정별 사고발생분석결과를 살펴보아도 유기화학, 특히 정밀화학이나 중간체 화학물질 제조업에서의 사고발생건수가 많음을 알 수 있다. 또한 반응공정에 관련된 각종 사고의 원인을 분석한 결과, 국내의 경우에는 안전수칙을 지키지 않았거나, 판단 및 조작오류 등에 의한 인적오류가 많았으며, 비방폭형 기기 사용과 같은 설비오류 및 공정에 대한 이해부족으로 오는 공정오류가 많았다.

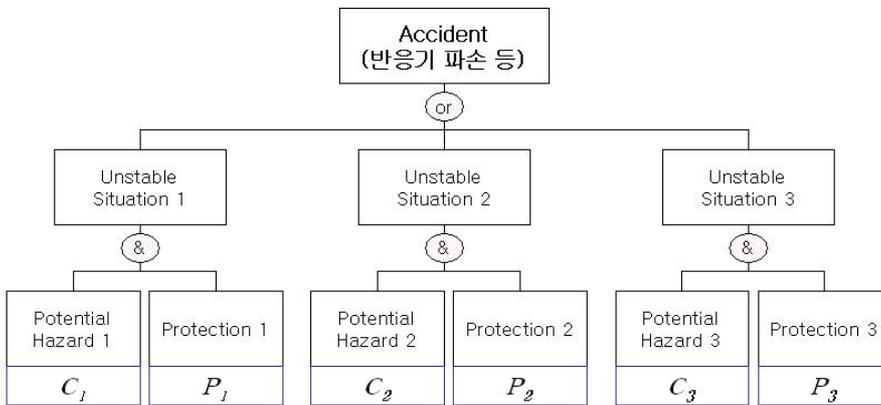
#### 나. 시범공정의 선정

국내 사고발생건수가 비교적 많고, 사업장의 수가 많은 반응공정을 우선 검토한 결과, 점착제 제조공정, 플라스틱첨가제 제조공정 및 농약 제조공정으로 범위를 제한하였다.

2. 시범공정에 대한 잠재위험 분석 (HAZOP, FTA)

각 공정별 잠재위험을 도출하기 위하여 회분식 공정에 대한 정성적 위험성평가를 수행하여야 한다. 이를 위하여 운전단계를 구분하고, 각 단계별로 공정의 특성에 따라 HAZOP 기법을 이용한 위험성평가를 수행하게 된다. 회분식 반응공정은 대부분 유사한 운전단계를 갖게 되는데, 이를 정형화하고, 여기에 정성적 위험성평가로 도출된 잠재위험을 적용하면 각 공정별로 다음과 같은 결과를 얻게 된다.

각각의 잠재위험은 <그림 1>과 같이 결함수를 구성하게 되는데, <표 1~5>에서 보여지는 기여도는 각 잠재위험요인에 대한 안전·방호장치를 고려하지 않은 상태의 사고발생확률을 이용하여 (식1)과 같은 방식으로 구한 것이다. 실제 사고발생확률의 정량화는 (식3)과 같은 형태로 계산된다. <그림 1>, (식2) 및 (식3)은 잠재위험요인의 기여도를 설명하기 위하여 결함수구성 및 사고발생확률의 정량화를 매우 단순하고 간단한 형태로 표현한 것으로, 실제 위험성평가에서는 각 항목의 중복 등 여러 변수가 존재한다는 것을 유념하여야 한다.



[그림 1] 잠재위험요인과 안전·방호장치의 결함수 구성 개요도

$$\text{기여도}(\%) = \frac{C_i}{F_0} \times 100 \quad \text{-----} \quad \text{(식 1)}$$

$$F_0 = C_1 + C_2 + C_3 \quad \text{-----} \quad \text{(식 2)}$$

$$F = (C_1 \cdot P_1) + (C_2 \cdot P_2) + (C_3 \cdot P_3) \quad \text{-----} \quad \text{(식 3)}$$

$F_0$  : 안전·방호장치를 고려하지 않은 상태의 사고발생가능성

$F$  : 해당 시나리오(Top Event)의 사고발생가능성

$C_i$  : 잠재위험 i의 발생가능성 (관련 Basic event의 신뢰도계산에 따른 발생가능성)

$P_i$  : 잠재위험 i에 대한 안전·방호장치의 신뢰도 (고장발생 확률)

아래 표에서 접촉제 제조B공정(표 2)은 상압운전조건이며, Vent line에 Valve가 설치되어 있지 않아 valve block으로 인한 압력 상승의 가능성이 없으며, 원료 주입도 Man-hole을 이용하여 1회에 이루어지므로 반응이 진행되는 동안 인적오류에 의한 열매공급밖에 없는 것으로 나타난다.

&lt;표 1&gt; 접착제 제조 A 공정

운전단계	잠재위험요인	기여도
준비	① Vent valve 고장으로 인한 압력 상승	4%
	② 인적오류에 따른 Vent valve block으로 압력 상승	21%
원료 주입	③ 원료 주입 중 열매의 내부누출로 인한 온도 상승	0%
	④ 촉매의 과잉공급으로 반응속도 상승 및 온도 상승	24%
반응	⑤ 반응 중 원료의 내부누출로 인한 과잉반응 및 온도 상승	50%

&lt;표 2&gt; 접착제 제조 B 공정

운전단계	잠재위험요인	기여도
반응	① 반응 중 인적오류에 따른 열매의 공급으로 인한 온도 상승	100%

&lt;표 3&gt; 첨가제 제조 A 공정

운전단계	잠재위험요인	기여도
준비	① 인적오류에 따른 질소의 과잉공급으로 인한 압력 상승	0.09%
원료 주입 및 반응	② 촉매 공급 불충분으로 미반응물이 잔존 (숙성단계 문제)	0.62%
	③ 반응 중 원료공급제어 실패로 인한 압력 상승	0.13%
	④ 교반실패로 미반응물이 잔존 (숙성단계 문제)	0.19%
	⑤ 반응 중 냉각 불량으로 온도상승	97%
	⑥ 반응 중 제어기기 고장에 의한 열매 공급 및 온도 상승	0.02%
숙성	⑦ 미반응물 잔존으로 반응진행 및 압력 상승 (②+④)	-

&lt;표 4&gt; 첨가제 제조 B 공정

운전단계	잠재위험요인	기여도
준비	① 인적오류에 의한 잘못된 원료 준비	35%
원료 주입	② 고농도의 원료 주입으로 온도 상승	25.8%
반응	③ 외부 열교환기 실패에 따른 온도 상승	3.7%
	④ 온도제어기기 고장에 의한 온도 상승	5%
	⑤ 외부 열교환 흐름실패에 따른 온도 상승	9.8%
	⑥ 냉매 공급 실패에 의한 온도 상승	9.8%
	⑦ 교반실패에 의한 온도 상승	10.7%

&lt;표 5&gt; 농약 제조 공정

운전단계	잠재위험요인	기여도
준비	① 인적오류에 따른 Vent valve block으로 압력 상승	99.98%
반응	② 반응기 내 수분 유입에 따라 부반응에 의한 가스발생 및 압력 상승	0.02%

첨가제 제조 B공정(표 4)에서는 반응 시 온도의 제어가 매우 중요한 공정임을 알 수 있으며, 실제로 이 공정은 온도상승에 대한 각종 경고 및 비상정지 시스템이 잘 갖추어져 있으며, 기본적인 제어시스템도 비교적 신뢰도가 높은 것으로 나타난다. 따라서 상대적으로 준비단계에서의 원료주입오류가 높은 기여도를 나타낸다.

농약 제조공정(표 5)의 경우에는 흡열반응이므로 열매의 공급으로 인한 반응의 안전상 이상은 발생하지 않는다. 다만 원료의 물리적, 열역학적 특성에 따라 분해온도에 도달하지 않도록 하여야 하는데, 이 공정의 경우에는 열매의 최대공급온도를 고려하더라도 분해온도에 도달하지 않으므로 잠재위험가능성에서 배제되었다. 단지, 반응기에 설치된 공정수 공급배관의 내부누출로 인하여 수분이 혼입될 경우, 원료 중 한가지와 반응하여 기체성분을 생성하게 되며, 이로 인하여 압력이 상승할 위험이 있다. 또 한가지의 압력 상승원인은 Vent valve의 고장이나 인적오류로 인한 밸브잠금이다. <표 1~5>로부터 회분식 공정에서의 운전단계별 주요 잠재위험을 알 수 있었다.

### 3. 결론

회분식 공정에서의 각 운전단계별 잠재위험요인을 정리한 결과를 살펴보면, 인적오류에 의한 잠재위험은 준비단계에서 많이 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다. 원료주입이나 반응 단계에서 가장 중요한 요소는 온도제어가 잘 이루어지고 있는가 하는 점과 원료의 주입이 정상적으로 이행되고 있는가 하는 점이다. 결함수분석을 이용하여 <표 2~6>에 나타난 각각의 잠재위험발생가능성을 정량화한 결과에 따르면 경고시스템이나 안전 및 방호, 비상정지시스템을 고려할 경우 사고발생가능성이 약 1/10에서 1/100만큼 감소되는데, 제어시스템과 경고시스템이 동일한 계기로 이루어질 경우 경고시스템에 의한 사고발생가능성의 감소는 매우 미약하게 나타난다.

이러한 결과를 종합해볼 때 공정의 준비단계에 대한 운전원의 교육, 훈련과 준비단계에 대한 확인 및 감독이 요구되며, 각 운전 단계에 대하여 자동시스템이 갖추어져 있는 경우에는 신뢰성이 높은 기기를 사용하고, 각 기기에 대한 점검을 매 Batch마다 수행함으로써 각 기기의 신뢰도를 향상시키고, 모든 제어시스템은 경고시스템과 별도로 구성함으로써 회분식 공정에서의 사고발생가능성을 감소시킬 수 있다.

#### <참고문헌>

1. John Varton and Richard Rogers, "Chemical Reaction Hazards: A Guide", 1993, IChemE, UK
2. CCPS, "Guidelines for Process Safety in Batch Reaction Systems", 1999, AIChE, US
3. John Farquharson, et al, "QRA of Chemical Reaction Systems - The State of the Practice", January, 2003, ABS Consulting, US
4. Perter M. Silverberg, "Avoiding runaway reactions - Risk analysis is an important tool for thermal safety", June, 2002, Chemical Engineering.
5. CEPPO, "How to prevent runaway reactions: Case study for Phenol-formaldehyde reaction hazards", August, 1999, EPA, US