

# QRA를 이용한 회분식 반응기의 위험특성 조사

강미진 · 이영순\* · 이근원\*\* · 김창은\*\*\*

서울산업대학교부설사고조사연구센터 · 서울산업대학교 안전공학과\*  
한국산업안전공단\*\* · 명지대학교 산업공학과\*\*\*

## 1. 서론

중소규모 사업장의 대부분은 회분식 반응공정을 이용하여 소량 다품종의 제품을 생산한다. 회분식 공정은 연속식 공정에 비해 수동운전의 비율이 높아서 인적오류에 의한 사고발생 가능성이 상대적으로 높으며, 사고 발생 시 인적 피해가 크게 나타날 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 또한 대규모의 사업장에 비해 적절한 위험성평가나 안전관리가 이루어지기 어렵다. 따라서 회분식 공정에서의 위험특성을 구체적으로 규명하고, 이를 바탕으로 회분식 반응기에서의 사고를 예방하기 위한 일반적인 가이드를 제시하고자 한다. 이러한 회분식 공정의 위험성평가와 관련하여 영국 및 미국 화공학회에서는 화학반응 및 회분식 반응공정의 위험성평가 지침을 제시하고 있다.

## 2. 연구내용

회분식 반응공정의 위험특성을 분석하기 위하여 실제 사고사례로부터 주요 사고원인을 찾아내고, 각종 문헌을 통해 회분식 반응공정의 특성을 정리하였으며, 실제 5개 회분식 반응공정을 시범공정으로 선정하여 해당 공정에 대한 위험성 평가를 실시함으로써 잠재위험요인을 도출하였다.

### 가) 사고사례분석

사고사례분석결과에 따르면 주요사고원인은 Table 1, Table 2와 같다.

Table 1 Major causes of the accident history in Korea (1980~2002)<sup>(1)</sup>

Category	Major cause(s)	%
System	Poor management	21.1
	Wrong design	5.5
Process	Wrong material	0.9
	Wrong charge (amount or speed)	0.9
	Side-reaction, runaway reaction	7.3
Operation	Poor skill	1.8
	Poor judgement or conduction	6.4
	Failed to follow instruction	13.8
	Others	5.5
Equipment	Improper safety device(s)	12.8
	No safety system	9.2
	Others	11.0
Others		3.8

Table 2 Major causes of the accident history in UK (1962~1987)<sup>[2]</sup>

Category	Major cause(s)	%
System	Poor management	3.0
	Wrong design/engineering	13.6
Process	Wrong material	14.2
	Wrong charge (amount or speed)	20.1
	Side-reaction, runaway reaction	10.1
Operation	Poor skill	0.6
	Poor judgement or conduction	9.5
	Failed to follow instruction	2.3
Equipment	Loss of control system	8.3
	Equipment fail	7.1
	Others	5.9
Others		5.3

표에서 보듯이 국내의 경우, 인적오류와 부적절한 안전·방호장치에 의한 사고원인이 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 따라서 회분식 공정에서는 설계 및 안전관리 분야에 대한 의식과 관심이 무엇보다 중요함을 알 수 있다. 영국의 경우에는 원료의 첨가오류 등 공정오류에 의한 사고원인이 많은 비중을 차지하고 있는데, 이는 화학반응공정의 특성 상 원료의 종류와 원료주입량에 따라 화학반응의 양상이 달라지기 때문이다. 대부분의 경우 원료주입 등은 수동운전에 의해 이루어지므로 인적오류의 상당수는 공정오류에 포함되기도 한다.

#### 나) 회분식 반응공정의 열화학적 특성 조사

회분식 반응공정의 위험특성은 화학반응에 수반되는 에너지 및 성분의 변화로 인한 온도와 압력 상승으로 나타났다. 이러한 온도·압력의 변화는 바람직하지 못한 부반응 및 과잉반응의 원인으로 작용할 수 있으며, 이 부반응 및 과잉반응은 다시 예상치 못한 에너지 및 성분의 변화를 초래한다. 또한 공정물질의 열적·물리적 특성에 따라 용기 내 가스나 증기의 부피증가를 초래할 수 있다. 이러한 모든 위험성은 결국 반응기 내의 압력증가 뿐 아니라 안전장치를 통해 방출될 가스나 증기양의 증가를 의미하며, 최악의 경우 반응기의 폭발사고로 이어질 수 있음을 시사한다.

#### 다) 5개 시범공정에 대한 위험성 평가

국내에서 사고사례가 비교적 많고 업종별 점유율이 비교적 높은 중소규모 사업장 가운데 5개의 반응공정을 시범공정으로 선정하였으며, 각 공정에 대한 기본적인 특성을 Table 3에 표시하였다. 먼저 HAZOP을 실시함으로써 각 공정별 잠재위험요인을 도출하였다. FTA의 정상사상(Top event)은 과압에 의한 반응기의 폭발을 가정하였다. 도출된 잠재위험요인은 각각의 안전·방호장치와 연결되어 결합수를 구성하게 된다. 각 시범공정의 주요잠재위험요인은 다음과 같다. A, B공정은 반응열은 크지 않으나 반응 중 설비에 설치된 열매 공급배관을 통해 열매가 공급될 경우 과잉 증발에 의한 과압이 형성될 수 있다. C공정의 경우, 흡열반응으로 반응열에 의한 위험성은 없으나 공정물질이 이물질에 의해 오염될 경우 분해반응을 일으킴으로써 가스가 발생하거나 Vent

block에 의한 가스의 축적으로 과압이 형성될 수 있다. D, E공정은 반응열이 매우 크거나 반응속도가 매우 빨라서 반응속도의 조절 및 반응열 제거가 가장 중요시되는 공정이므로 원료주입오류 및 냉각실패의 경우 과압이 형성될 수 있다.

Table 3 Samples of Batch reaction Process

Product		Chemical reaction	Remarks
A	Phenolic adhesives	Addition Polymerization	Novolak Process
B	Urethan adhesives	Esterification (Polycondensation)	Polyol + Isocyanate
C	Agricultural chemical	Halogenation	Substitution
D	Plastic additive-A	Alkylation	Ionization
E	Plastic additive-B	Oxidation	

각각의 시범공정에서의 잠재위험요인을 도출한 결과를 종합하여 반응기에서 과압형성을 초래하는 주요원인을 나타내면 Figure 1과 같다. 또한 각 시범공정에 대하여 반응기 폭발을 가정한 사고피해규모예측결과는 Table 4와 같이 나타난다. 여기에서 B, E 공정은 공정설계 상 반응기 내의 과압형성 가능성이 없으므로 제외하였다.

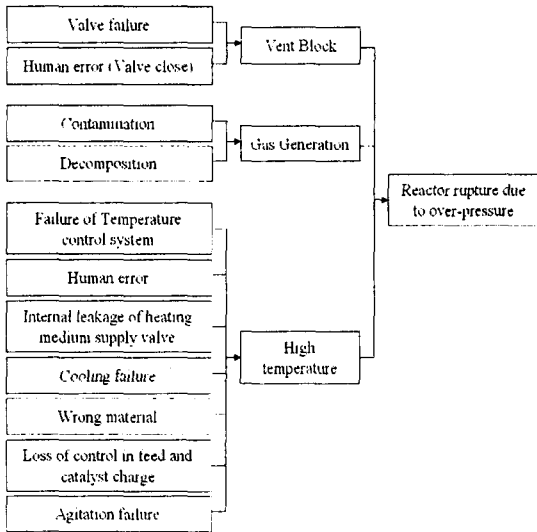


Figure 1 Root cause(s) of over-pressure in reactor

Table 4 Blast effect in reactor explosion for 3 batch reaction processes

과압 (psi)	A 공정	C 공정	D 공정
1.0	36.3 m	30 m (1.45 psi)	309 m
5.0	10.0 m	20 m (2.9 psi)	8.2 m
7.0	8.2 m	10 m (13.1 psi)	6.8 m

### 3. 회분식 반응공정의 위험특성

사고사례 분석결과와 문헌을 통한 열화학적 특성 및 5개 시범공정에 대한 정량적 위험성평가결과들을 종합해 보면, 회분식 반응공정에서의 일반적인 위험특성에 대하여 다음과 같이 요약, 제시할 수 있다.

#### (공정특성)

- ㉠ 에너지의 변화로 인한 온도변화(특히 발열반응에서의 온도상승) 및 성분의 변화로 인한 가스의 생성에 따른 잠재위험
- ㉡ 반응제어실패에 의한 부반응·과잉반응의 발생 가능성
- ㉢ 공정물질의 인화점, 끓는점 및 분해온도와 같은 열안정성에 따른 잠재위험
- ㉣ 공정물질의 반응성에 따른 부반응 형성 가능성

**설비(Equipment)**

- ㉠ 잦은 공정변경으로 인해 설비의 수명예측이 어렵다.
- ㉡ 여러 가지 공정을 수행해야하는 설비에서는 계기의 운전범위 및 정확도가 다르게 요구될 수 있다.
- ㉢ 건물 내 설치되는 경우가 많으므로 누출 시 공정물질의 축적 가능성
- ㉣ 인접설비 사고 시 폭풍파 등에 의한 손상 가능성

**운전(Operation)**

- ㉠ 설비연결오류, 원료주입오류 및 잘못된 원료주입과 같은 인적오류 가능성이 높다.
- ㉡ 잦은 공정변경 및 여러 형태의 공정운전으로 숙련도가 미흡할 수 있다. (계기보정 작업 미숙, 온도·압력 제어에 대한 운전 미숙 및 비상 시 조치 미흡 등)

**4. 결 론**

회분식 반응공정에서의 주요 잠재위험요인 및 위험특성은 잦은 공정변경에 따른 숙련도 저하 및 설비·계기의 실패가능성과 수동운전에 따른 높은 인적오류 가능성 등으로 나타났다. 따라서 회분식 공정의 안전성을 향상시키기 위해서는 공정설계부터 운전 에 이르기까지 보다 적절한 안전대책을 수립하는 등의 다음의 조치가 필요하다. 즉, 사고발생가능성을 줄이기 위해서는 높은 신뢰도의 계기를 사용하거나 적절한 지침서, 철저한 교육훈련 및 유지보수 계획서 등을 마련하는 것이 필요하며, 또한 사고피해를 최소화하기 위해서는 안전방호장치를 적절히 설계하고 비상대응조치계획서를 잘 작성하며 이에 대한 교육과 훈련을 수행하는 것이 필요하다. 가장 기본이 되는 것은 운전공정의 화학반응과 공정물질의 특성을 실험 등의 방법이나 문헌을 통하여 완전히 이해하고 이를 바탕으로 공정을 설계하여 본질적 안전(Inherent safety)을 확보하는 것이다.

**참고문헌**

[1] 한국산업안전공단 (2002), “중대산업사고사례데이터베이스”  
 [2] 영국 화학공학회 (1993), “Chemical Reaction Hazards - A Guide”  
 [3] 미국 화학공학회 (2000), “Guidelines for chemical process quantitative risk analysis”  
 [4] John Farquharson, et al, (2003), “QRA of Chemical Reaction Systems - The State of the Practice”, ABS consulting, Knoxville