



회분식 반응기에서 반응폭주에 의한 2-Phase 흐름 파열판 설계 및 적용에 관한 연구

†이형섭 · 윤희창

한국산업안전보건공단 전문기술실
(2017년 3월 9일 접수, 2017년 5월 25일 수정, 2017년 5월 26일 채택)

A Study on the Rupture Disk Design and Application at the Two Phase Flow by Runaway Reaction at Batch Reactor

†Hyung-Sub Lee · Hee-Chang Yun

Professional Eng. Bureau, Korea Occupational Safety & Health (KOSHA) Ulsan 44429, Korea
(Received March 9, 2017; Revised May 25, 2017; Accepted May 26, 2017)

요 약

이 연구의 목적은 회분식 반응기에서 반응폭주에 의하여 2상(기상-액상)에서 적용가능한 파열판의 크기를 설계하는 방안을 제시하는 것이다. 반응폭주의 정의는 제어가 되지 않은 냉각수 투입불가 또는 운전조건의 이탈에 의한 비정상적으로 발열반응을 말한다. 이 결과로 반응기의 온도는 급격히 증가하게 된다. 반응폭주의 원인은 크게 자기과열반응과 지연반응으로 구분한다. 일반적인 안전밸브나 파열판의 내경 크기로는 폭주반응 시에는 적절하게 압력을 해소할 수 없다. 폭주반응 시 반응온도 및 압력이 급격하게 증가하기 때문에 안전밸브로 분출되는 내용물은 2상이다. 이 연구에서는 최근 회분식 반응기의 폭주반응으로 인하여 사고사태의 원인을 분석하고, 2 상으로 분출현상 및 특징을 설정하고, 이에 적절한 파열판의 크기를 설계하여 적용하는 방안을 제시하고자 한다.

Abstract - The purpose of this study is to suggest the rupture disk design(size) and application at the two phase(gas-liquid) flow by runaway reaction at batch reactor. The definition of runaway reaction is abnormally exothermic reaction by the uncontrolled cooling water or deviated operating condition. As a result, the temperature of reactor is rapidly increasing. The causes of runaway reaction are either self-heating reaction or sleeper reaction. General methods of rupture disk size or safety valve are not suitable in the runaway reaction, because of temperature and pressure increasing rapidly in the reactor and the phases of relieving fluid is 2-phase flow. This study case of the reactor incident, the depressurization system such as safety valve and vent installed, however, the system did not relieved the pressure of reactor suitably. The orifice size of the safety valve were designed too small because the size had not been considered the phenomena and character of reaction. The batch reactor design should be considered by referring to the possibility of runaway reaction proposed in this study and the size of rupture disk design method considering 2-phase flow.

Key words : Runaway reaction, Rupture disk, Two phase(2-Phase, Gas-Liquid Phase) flow

†Corresponding author: leehyung@kosha.or.kr
Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

화학공장은 여러 형태의 공정 및 운전(조작) 형태를 가지며, 대부분 물질(또는 원료)의 반응과정을 거쳐 다른 성질의 물질(또는 제품)을 생산하는 과정을 가진다. 이때 반응과정에서 장치의 오류, 작업자의 실수 등으로 인해 미처 예상치 못한 상황에 의해 이상 화학반응 즉 반응폭주의 위험에 빠질 수 있으며, 국내·외 반응 폭주에 의한 사고사례를 어렵지 않게 접할 수 있다. 기본적으로 반응기는 압력용기로서 BPCS (Basic Process Control System)을 갖추어져 있고, 여기에 ESD(Emergency Shut-down System)도 갖추고 있다. 하지만, 앞서 언급한 시스템의 오류가 발생할 가능성과 조치가 미흡할 것을 대비하여 안전밸브 또는 파열판을 설치하여 이상시 반응기를 과압으로부터 보호하고 있다. 이중 급격한 압력상승이 있는 경우에는 안전밸브는 적합하지 않으므로 파열판을 설치한다. 그러나 반응기의 파열판을 설치하더라도, 정확한 배출용량 및 유체의 상(phase)을 추정해야만 반응기에서 발생할 수 있는 압력을 해소하는데 충분한 크기의 파열판을 설치할 수가 있는데 이를 추정하기란 쉽지 않아, 외부화재 또는 최대열유입량 추정에 따른 기상(gas phase)로 가정한 배출용량 산출 및 파열판 크기를 선정하고 있다.

Table 1. Runaway reaction accident cases at Batch reactors

사업장명	발생일	개요	사고원인
○○리서지(주)	2014-08-31	2014. 8. 31, 06:30분경 충남 홍성군 소재, NBBA(Nitro benzene boronic acid, OLED 전자재료) 생산공정 반응기에서 무수초산과 질산(68%)을 투입하여 반응하던 중 이상반응에 의한 과압이 발생하여 반응기 맨홀로 초산증기 누출	반응기에 무수초산 투입조건 미준수
○○케미칼㈜	2014-04-15	2014. 4. 15, 10:27분경 경기도 안산시 소재, 폴리우레탄 수지 제작제 공장 2층 내에 폴리우레탄 제작제 반응기에서 반응온도 제어 실패로 인한 반응폭주가 발생하여, 인화성 반응을 들이 작업장내로 흩어져 나와 폭발분위기를 형성 및 폭발.	반응개시제 과다투입
○○○케미칼	2015-03-17	2015. 3. 17, 21:55분경 여수시 소재, 계면활성제 생산공장 반응기에서 반응열 제어 실패로 인한 폭주반응으로 반응기 폭발 및 화재	운전온도 부적절
㈜○○○	2015-09-04	2015. 9. 4, 10:09분경 충북 청주시 소재, PF(페닐플)단열재 제조공장에서 페닐수지와 파라포름알데히드를 중합반응 중 촉매투입 작업 오류로 인하여 반응기내에서 폭주반응이 일어나면서 반응기가 폭발하여 공정설비 및 공장건물 파손	촉매 투입량 조절 부적절

Table 1.¹⁾과 같이 반응폭주사고 사례를 살펴보면, 사고 반응기들은 모두 과압해소장치(안전밸브 또는 파열판)가 설치되어 있었다. 하지만 일반적인 방법으로 산정한 과압해소장치로는 반응폭주시 발생한 압력을 해소하는데 부족하여, 결국 맨홀 또는 노즐부위로부터 증기가 누출되거나 반응기가 파열되었다. 본 연구에서 반응폭주에 따른 파열판 설계에 대한 기초적인 방법을 연구하여 화학반응기의 안전성을 더욱 향상시키는데 기여하고자 한다.

II 반응폭주의 원인 및 현상

2.1 반응폭주의 정의²⁾

반응폭주는 온도 및 압력이 비정상적으로 상승하는 반응으로, 발열반응이 일어나는 반응기에서 운전 중 냉각실패 등의 운전조건 이탈원인으로 급격한 반응이 진행되어 반응의 제어가 불가능한 경우 반응속도가 지수 함수적으로 증대되어 반응용기 내부의 온도 및 압력이 비정상적으로 상승하여 반응이 과격하게 진행 되는 현상 말한다.

반응온도가 일정한 경우 반응속도는 농도에 따라 변화하나, 온도가 10 °C 증가 할 경우 반응 속도는 거의 2배 증가 하며, 화학반응열에 의한 발열과 방열 수지에 의해 결정된다.

2.2 반응폭주 발생원인^{2,3)}

반응폭주는 자기과열반응과 반응지연에 의해 발생하며 상세 내용은 다음과 같다.

1) 자기 과열 반응(Self-heating Reaction)

발열반응이 일어나는 반응기에서 반응열이 예상값보다 훨씬 높게 생성되는 현상을 말하며 발생요인은 다음과 같다.

- (1) 발열반응을 하는 반응기에 냉각수 공급중단 또는 반응열을 제거하는 시스템의 용량부족 등 냉각(반응열 제어)실패 시
- (2) 작업자 또는 시스템 오류에 의한 스팀/열매체 공급 등 예기치 못한 가열 시
- (3) 과도한 촉매 또는 반응물 투입 시

2) 지연 반응(Sleeper Reaction)

발열반응이 일어나는 반응기에서 반응물을 투입하였으나, 일정시간 반응이 일어나지 않다가 뒤늦게 급격히 반응이 일어나는 현상을 말하며 발생요인은 다음과 같다.

- (1) 물질의 혼합 불균형으로 반응물이 축적된 상태에서 일정시간 지난 후에 혼합이 이루어지

는 경우, 고상/액상 혼합 반응 시, 촉매 분할 투입 시

- (2) 교반기 전원 공급 중단 등의 요인에 의한 교반기 미 작동, 낮은 온도에서 반응물 투입 등 원료 투입 시점 오류 시

2.3 반응 폭주시 현상 및 특징^{2,3)}

반응 폭주시 반응기 내부 현상과 반응물을 외부 배출시 유체의 특징은 다음과 같다.

1) 급격한 온도 및 압력 상승

Fig. 1 과 같이 반응기내 급격한 온도 상승으로 반응율(또는 반응속도)이 증가함에 따라 내부 압력은 급증 한다.²⁾

압력을 형성하는 인자는 반응기 내 반응물 또는 생성물의 증기 이거나, 반응 생성물 중에 가스가 발생할 경우 압력을 형성하게 된다.

2) 2상 흐름

액상 반응물의 폭주 반응 조건하에서 파열관 등 방출장치를 개방할 경우 유체의 배출 상태는 거품(Foam)형태로, 액상과 기상이 혼재된 2상 이며, 거품이 유체 흐름의 방해요소가 되므로 가스 단일상(1-phase)으로 산정한 파열관 크기의 4배에서 10배의 크기가 요구 된다.

3) 단일 팽창 과정

반응기내 폭주 반응은 단일 압축 형태와 유사하다. 과압 발생 시 온도는 증가되고, 이 온도의 증가 결과로 반응기내 유체의 현열에 기인한 에너지가 축적된다. 반응기내 액체의 기화열은 파열관 등 방

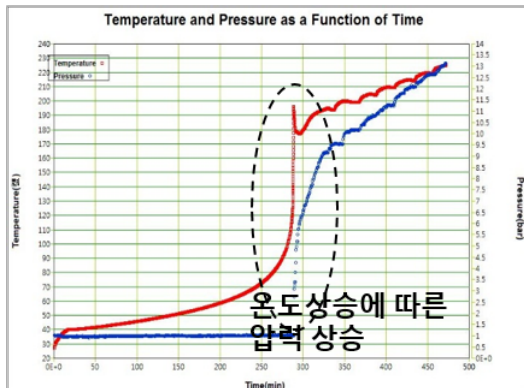


Fig. 1. Example of press. increasing related to temp. increasing.

출장치를 통해 곧바로 방출되고, 발열반응에 기인한 온도 증가율은 완화하게 된다.

2.4 반응폭주에 대비한 방호 대책³⁾

반응 폭주와 같은 위험상황 발생 후의 결과를 축소/완화시키기 위해 다음과 같은 방호대책을 수립하여야 한다.

1) 반응 시스템 봉쇄

반응 폭주 시 발생할 수 있는 최고 온도/압력에 견딜 수 있도록 반응기 설계하는 것을 말한다.

- (1) 반응시스템은 폭주반응에 생성된 최고 압력에도 견딜 수 있도록 설계를 한다.
- (2) 응축기, 충전용기, 계기의 연결부위, 배관, 샘플포인트 등과 같이 반응기에 연결된 모든 장치는 반응에 의해 생성되는 최고 압력에 견딜 수 있도록 설계 한다.
- (3) 반응물 공급 배관의 경우, 반응기 최고 압력이 역류의 원인이 될 수 있는 가능성에 대해서도 고려한다.
- (4) 반응기 최고 압력 산출시 반응물은 100% 전환으로 가정하고, 반응열로부터 발생하는 모든 에너지가 반응물질의 온도 증가(열손실 없음)에 적용 되는 것으로 가정한다.

2) 반응 억제

촉매의 활성 및 자유라디칼을 제거하는 물질을 투입하는 것으로 반응 메커니즘을 차단하는 반응 억제제 첨가 시 반응 억제가 가능하다.

3) 긴급 냉각^{5,6)}

반응기의 용량이 충분한 경우 다량의 냉각액을 직접 투입 및 혼합하여 반응물의 온도 감소 또는

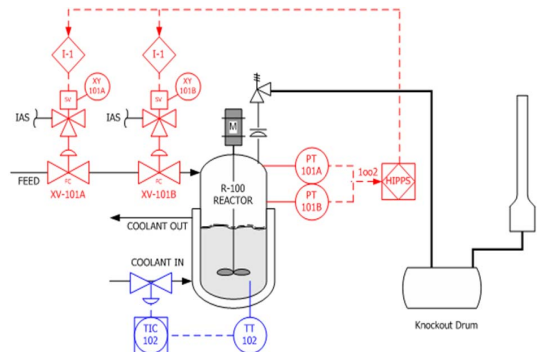


Fig. 2. HIPS for reactor model.

반응물 농도를 희석시켜 반응속도를 제어 할 수 있다. Fig 2. 와 같이 반응기에 신뢰성 확보된 온도센서와 급랭액 및 원료 투입을 긴급 투입할 수 있는 자동밸브의 연동시스템에(Interlock system)의해 작동되는데, 계측기 및 자동밸브류의 신뢰성 향상을 위해 SIS(Safety Instrumented System) 및 HIPS(High Integrity Protection System)를 적용 시 안정성을 더욱 향상시킬 수 있다.

4) 긴급 배출

긴급 냉각과 유사한 방법의 급랭방법으로 반응기의 용량이 불충분한 경우 반응기 내용물을 급랭액이 담긴 용기에 긴급 배출(Dumping)할 수 있다.

5) Emergency Relief(파열판 등) System

파열판이나 안전밸브 또는 벤트 시스템은 반응폭주 시 발생하는 증기 또는 가스로 인한 상승 압력을 제한 한다. 그리고 Relief시 단열팽창으로 인하여 반응물 온도가 완화 될 수 있다.

III 2상 흐름에 대비한 파열판 설계방법

폭주반응을 조절하기 위해서는 발열반응으로 생성되는 모든 열과 함께 거품형상의 반응물을 방출장치에서 제거하여야 한다. 따라서 압력방출장치의 방출면적의 크기는 거품형상(2상)으로 토출되는 양을 만족하여야 한다. 폭주반응을 위한 파열판 크기 산출방법은 매우 복잡하며, 파열판 크기 산출방법은 산출식을 활용하는 방법과 단순화된 도표 활용 방법이 있다.

3.1 외부 화재를 가정한 파열판 설계⁷⁾

대부분의 일반 회분식 반응기의 경우 폭주반응의 위험과 관계없이 반응기 과압 해소를 위해 안전밸브 또는 파열판의 크기를 설계한다. 파열판의 설계는 반응기의 외부 화재를 가정하여 파열판의 직경을 설계한다. 반응물이 액상의 경우 파열판의 크기는 안전밸브 크기와 같이 식 1 에 따라 결정한다. 식 1은 전혀 2상의 흐름과 폭주반응의 특성을 감안하지 않은 외부화재를 가정하여 안전밸브(파열판)의 크기를 정하는 것으로 실제 폭주반응 발생 시 신속히 과압을 해소 할 수 없다.

$$A = \frac{0.1178 Q \sqrt{G}}{K_d K_w K_c K_v \sqrt{(P_1 - P_B)}} \quad (1)$$

여기서,

A : 필요한 오리피스의 면적(mm²)

P₁ : 설정압력+초과압력(barg)

P_B : 배압, barg

Q : 필요분출량(l/min)

G : 운전온도에서의 유체비중

K_c : 결합보정계수(=1, 안전밸브 단독설치 경우)

K_d : 유체의 분출계수(= 0.65)

K_w : 벨로우즈형 안전밸브의 보정계수(=1, 파열판)

K_v : 점도에 대한 보정계수(고점도 물질 = 1)

3.2 2상 흐름을 고려한 파열판 설계^{8,9)}

1) 질량 플럭스(Mass flux) 계산한다.

온도와 압력이 증가한 반응물이 파열판을 통해 압력이 감소할 경우, 반응물은 순간증발(flashng)되면서 온도가 하락한다. 플래싱 액체의 양과 Clausius-Clapayron 식으로부터 식 2와 같이 질량 플럭스(G_T)를 계산할 수 있다.

$$G_T = \frac{Q_m}{A} = \frac{\Delta H_v}{v_{fg}} \sqrt{\frac{g_c}{C_p T_s}} \quad (2)$$

파열판 입·출구에 배관이 연결된 경우 이를 보정하기 위해, 상기 식에 0.9를 곱하고, 흐름 보정계수를 적용 시 식 3을 사용한다.

$$G_T = \frac{Q_m}{A} = 0.9\psi \frac{\Delta H_v}{v_{fg}} \sqrt{\frac{g_c}{C_p T_s}} \quad (3)$$

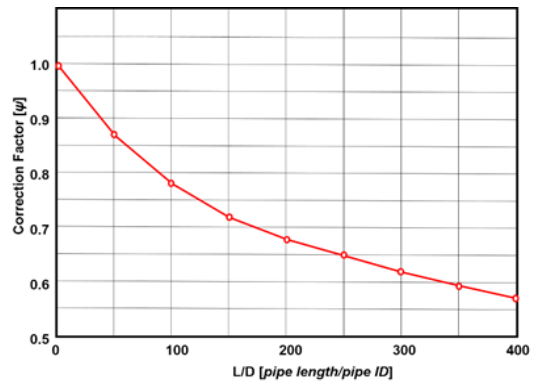


Fig. 3. 2-Phase flow correction coefficient(ψ) on pipe.

여기서, Q_m : 릴리프를 통한 질량흐름(kg/s)
 ΔH_v : 유체의 증발열(kJ/kg)
 A : 개구면적(m^2)
 v_{fg} : Flashing 액체의 비체적(Specific volume) 변화(m^3/kg)
 C_p : 유체의 열용량(kJ/kg K)
 T_s : 설정압력에서의 유체 포화온도(K)
 g_c : 중력단위 환산인자($kgm/s^2, N$)
 ψ : 보정계수

2) 열 유입량 계산은 식 3과 같다.

$$q = \frac{1}{2} C_v \left[\left(\frac{dT}{dt} \right)_s + \left(\frac{dT}{dt} \right)_m \right] \quad (4)$$

여기서,

q : 단위질량당 발열량의 방출속도(kJ/kg s)
 C_v : 일정부피에서 액체의 열용량(kJ/kg K)
 $(dT/dt)_s$: 설정압력에서의 온도 상승($^{\circ}C/s$)
 $(dT/dt)_m$: 최대 전환 압력에서의 온도 상승($^{\circ}C/s$)

상기 데이터 중 온도 상승 데이터는 VSP(Vent Sizing Package) 실험 장치를 통해 확보 할 수 있다.

3) 파열판 내경은 식 5에 따라 정한다.

$$A = \frac{m_0 q}{G_T \left[\sqrt{\frac{V}{m_0} \frac{\Delta H_v}{v_{fg}}} + \sqrt{C_v \Delta T} \right]^2} \quad (5)$$

여기서,

m_0 : 반응기내 물질질량(kg)
 V : 반응기 부피(m^3)
 ΔT : $T_m - T_s$ (K)

3.3 도표법에 의한 파열판 설계⁹⁾

2-Phase 흐름의 반응기의 압력방출에 필요한 파열판 크기를 Fig. 4 도표를 활용하여 구할 수 있다. Fig. 4 에서 Self Heat Rate는 VSP를 통해 확보하여 파열판의 설정압력과 반응물의 질량에 따른 벤트(내경)의 크기를 구할 수 있다. 도표는 반응물 1,000 kg을 기준으로 벤트 크기를 구하며, 여기에 파이프 내 2상 흐름 보정 계수를 적용하여 파열판의 내경을 결정 한다. Fig 4 는 과압 20 % 적용 및 열용량 2,510 J/kg, 포화상태의 물로 가정하고, 방출보정계수 0.5 적용한다. 2상 흐름 파열판 설계로부터 갖는

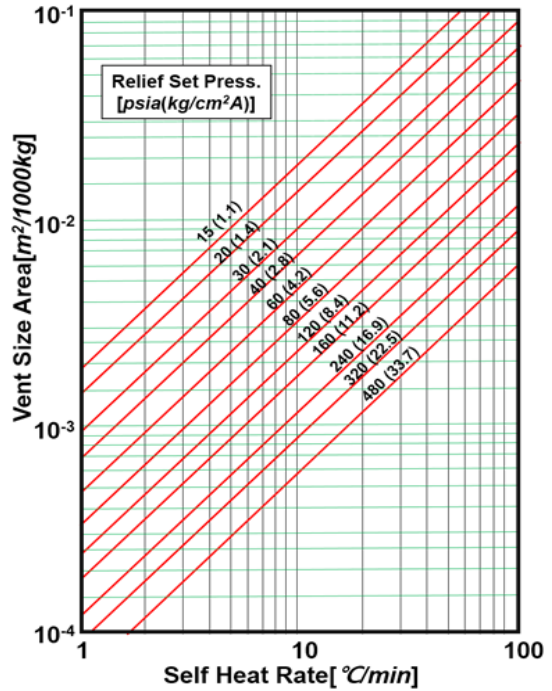


Fig. 4. Charter for design rupture disk on 2-Phase flow.

의미는 적어도 외부화재 등 일반적인 파열판 설계 방법으로부터 결정된 파열판 보다 더 큰 크기의 파열판을 정하는데 있다.

IV. 2상 흐름에 적합한 파열판 적용사례

국내에서 발생한 반응 폭주에 의한 급격한 압력 상승과 부적절한 크기의 안전밸브 설치로 반응기가 파열되는 사고사례를 대상으로, 2상 흐름을 대비한 적절한 파열판 크기(내경) 설계방법을 제시하고자 한다.

4.1 사고개요¹⁰⁾

'15년 9월 PF(Phenol foam) 단열재 제조공장 Table 2 과 같은 중합반응기(10m³)가 폭발하여 공정 설비 및 공장건물 일부가 파손 되는 사고가 발생하였다. Fig 5 와같이 PF제조는 페놀과 파라포름알데하이드를 촉매(수산화칼륨수용액)하에 중합 반응이 이루어진다.

Table 2. Spec. of incident reactor

구분	Shell	Jacket	Inner Coil
용량(m^3)	10	-	-
취급유체	반응물	스팀/냉각수	냉각수
설계압력(MPa)	0.19	0.2	0.3
내경(D, mm)	2000	2100	50
높이(H, mm)	3000	2020	-

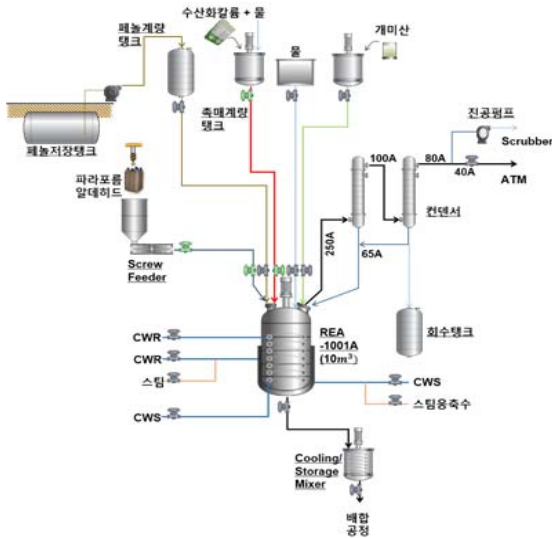


Fig. 5. Schematic drawing of incident reactor.

4.2 사고 발생 과정¹⁰⁾

사고는 Fig. 6 과 같이 촉매 투입 오류에 의한 지연반응으로 반응폭주가 발생하였다.

사고당시 운전자가 정해진 순서와 양만큼 폐놀을 넣고 촉매(수산화칼륨 수용액)를 투입 후, 반응물을 승온(80 °C) 하였어야 하나, 촉매 투입설비의 고장으로 촉매를 정해진 양의 30 %가량이 투입되지 않고, 촉매계량탱크에 남아 있게 되었다. 하지만, 운전자가 이를 인지하지 못한 상태에서 반응기 승온 이후 곧바로 파라포름알데하이드 투입을 시작하였다. 파라포름알데하이드 투입 2시간 지난 후 운전자가 촉매계량탱크에 촉매잔량이 있음을 인지하게 되어, 남은 촉매를 반응기에 투입하였다. 이후 반응기 온도가 급증하여 물을 긴급 투입하였음에도 온도는 지속 증가하면서 반응기 내부에서 발생하는 증기가 반응기 상부 벤트노즐과 안전밸브를

정상운전시

사고발생시

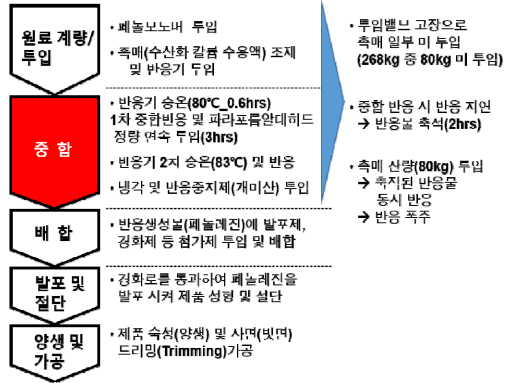


Fig. 6. Sequence of reaction and incident step.

통해 배출되었으나, 반응기 내부 압력은 지속 증가하여 반응기가 파열되었다.

4.3 사고 공정 파열판 설계

이 사고에서 반응폭주 예방을 위해 Batch Sequence 보완, 냉각시스템을 보완하여야 하며, 적절한 크기의 파열판 설치 적용을 검토한다.

1) 외부 화재에 의한 파열판 크기 설계

기존에 사고 전에 반응기에 설치하였던 안전밸브(파열판)의 크기(내경)은, 식 1에 따라 해당 반응기에 외부화재가 발생한 것을 가정하여 파열판 크기를 설계하면, 2,028 mm²로 내경 50 mm(50A) 이상인 파열판이 필요하다.

2) 2상 흐름을 고려한 파열판 크기 설계

사고 당시 온도상승시점과 사고발생시점을 통해 Self Heat Rate가 31 °C/min 으로 확인 되고, Table 3의 정보를 토대로 열 유입량을 산출식 4에 따라 산출하면, 1.36 kJ/kg.s 이 된다.

질량 플럭스는 식 3에 따라 산출하면, 2,280 kg/m².s 가 된다. 이를 반영하여 식 5에 따라 파열판의 크기(단면적)을 설계하면, 0.121375 m² 이 된다.

위 계산결과에서 사고 반응기는 원형의 파열판을 설치했을 경우 내경 0.393 m(약 400A) 이상인 파열판이 필요하다.

3) 도표법에 의한 파열판 크기 설계

Fig. 4 도표에 따라 파열판 size를 확인하면, x축의 Self Heat Rate 31 °C/min 지점과 파열판 설정 압력 1.84 kg/cm² G 지점이 만나는 점으로부터 y

Table 3. Information of rupture disk design (sizing)

구분	Data	비고
반응기 부피(V)	11.4 m^3	경관부피 포함
반응물 질량(m_0)	7,500 kg	
설정온도(T_s)	223 $^{\circ}C$	파열판 설정압력하의 포화온도
최대온도(T_m)	229 $^{\circ}C$	
설정압력(P_s)	1.84 kg/cm^2G	파열판 설정압력
최대압력(P_m)	2.20 kg/cm^2G	
가열속도(q)	1.36 $kJ/kg s$	
비체적변화(v_{fg})	0.155 m^3/kg	
열용량(C_p)	2.64 $kJ/kg K$	
열용량(C_v)	2.64 kJ/cm^2G	
증발열(H_v)	448.41 kJ/kg	

축의 1000 kg 당 파열판 크기는 0.023 m^2 임을 알 수 있다. 따라서

$$1 \times 0.023 \div 1000 \times 7500 = 0.1725 m^2$$

원형의 파열판의 경우 내경 0.468 m(약 500A) 이상인 파열판이 필요하다.

4) 파열판 크기 비교 및 현장적용

외부화재의 경우를 가정하여 파열판 크기를 결정하는 것에 비해 2상 흐름을 고려한 경우 내경이 약 8배 크고, 도표법에 의한 경우는 약 10배 이상 큰 것으로 나타난다. 도표법에서 가정하는 물성과 실제 물성의 차이 등을 고려하여 2상 흐름에 의한 산출식에 의한 파열판 설계 결과를 Fig. 7 과 같이 사고 반응기(A)에 400A 파열판을 설치하고, 다른 반응기(B)에는 300A 2개를 설치하였다.

V 결론

본 연구는 반응폭주 발생 원인과 현상, 그리고 사고사례를 통해 반응폭주 시 방호대책인 파열판 설계 방안 및 적용사례를 제시 하였다.

반응폭주시 온도·압력의 급상승 및 2상 흐름형태의 배출이 이루어지므로 일반적인 회분식 반응기의 과압 해소를 위한 파열판 크기(내경) 설계 방법으로는 적절하지 않다. 외부화재의 경우를 가정하여 반응기에 설치할 파열판 내경을 결정하는 것에 비해, 2상 흐름을 고려한 경우 내경이 약 8배 크고, 도표법에 의한 경우는 약 10배 이상 큰 것으로 나

Incident reactor(A) Another reactor(B)



Fig. 7. The photo. of installed rupture disk on batch reactors.

타난다. 다만 도표법은 화학물질 물성의 차이 등을 고려할 경우 2상 흐름을 고려하여 정하는 것이 적절하다. 따라서, 회분식 반응기 설계 시 발열반응 등 반응폭주 가능성이 있는 경우에는 외부화재 등 일반적인 과압 경우만을 고려해서는 안 된다. 본 연구에서 제시한 바와 같이 반응폭주 가능성과 2상 흐름을 고려한 파열판 설계방법을 참조하여 반응기에 설치할 파열판의 내경을 설계하여야 할 것이다.

REFERENCES

- (1) KOSHA, *Chemical accident statistics*, 2014, 2015 and 2016.
- (2) Francis Stoessel, *Thermal Safety of Chemical Processes Risk Assessment and Process Design* pp. 61-75, WILEY-VCH, 2008
- (3) *Chemical reaction hazards and the risk of thermal runaway* 2-3, INDG254 HSE, 2014
- (4) KOSHA Guide P-67, *Technical guide for thermal risk assessment for protection of runaway reaction*, KOSHA, 2012
- (5) Chun, Y. W *The Study of VOC Treatment Facility Risk Mitigation with Safety Instrument System*, PP. 86-88, 2012
- (6) Francis Stoessel, *Planning Protection Measures against Runaway Reactions using Criticality Classes*, Process Safety and Environmental Protection No. 87, PP105-112, 2009
- (7) KOSHA Guide D-26, *Technical guide for design of safety valve size of chemical process*, KOSHA, 2012
- (8) AIChE, *Emergency Relief System Design Using DIERS Technology* pp. 399-400, 1992

- (9) Daniel A. Crowl and Joseph F Louvar, *Chemical Process Safety Fundamentals with Applications*, Dong Hwa Technology Publishing Co. 2nd Edition, pp . 398-406, 2013.
- (10) KOSHA Guide P-65, *Technical guide for design of rupture disk size against runaway reaction*, KOSHA, 2012
- (11) Hee-Chang Yun, *Investigation report of LG000 incident*, KOSHA, 2015.