



스티렌모노머 폭주반응 시 위험물 비상 배출을 위한 파열판 적정 크기 선정에 관한 연구

김상령 · 류재민 · 최향남 · 현종수* · †변형식**

한국산업안전보건공단, *서울디지털대학교 교수, **한국발전인재개발원
(2024년 1월 3일 접수, 2024년 4월 15일 수정, 2024년 5월 31일 채택)

A Study on the Installation of Rupture Disk for Emergency Discharge of Dangerous Substances in Case of Styrene Monomer Runaway Reaction

Sang Ryung Kim · Jae Min Ryu · Hyang Nam Choi

Jong Su Hyun* · †Hyung Sik Byun**

Korea Occupational Safety and Health Agency, Incheon, 44429, Korea

**Seoul Digital University, Seoul, 07654, Korea*

***Korea Institute of Power Human Resource Development, Daejeon, 35377, Korea*

(Received January 3, 2024; Revised April 15, 2024; Accepted May 31, 2024)

요약

화학 산업에서는 각종 화학제품 생산 중에 폭주반응으로 인해 화재·폭발이 끊임없이 발생하고 있다. 이를 예방하기 위하여 많은 연구가 진행되었으며, 각 물질에 대한 폭주반응의 가능성을 검토하고 이상 반응에 대비한 연동장치를 설치함으로써 화재·폭발에 대비하고 있다. 그러나 법적, 기술적 안전장치에도 불구하고 매년 폭주반응으로 인한 사고는 여전히 발생하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 스티렌모노머 반응기 화재·폭발사고 사례를 바탕으로 폭주반응 시 배출 용량을 실험, 시뮬레이션 및 그래프를 통하여 검토하였다. 일반적으로 계산되는 화재 식과 다르게 급격한 압력 및 온도 증가하는 폭주반응 시에는 단일 상이 아닌 2상(2 Phase)으로 배출되기 때문에 파열판의 크기 역시 증가하여야 하며, 압력용기 상부에 파열판이 설치되기 전 오리엔테이션 조절을 통해 위치 조정이 필요함을 알 수 있었다.

Abstract - In the chemical industry, fires and explosions constantly occur due to runaway reactions during the production of various chemical products. To prevent this, much research has been conducted, and the possibility of runaway reactions for each substance is reviewed and interlocking devices are installed to prepare for adverse reactions to prepare for fires and explosions. However, despite legal and technical safety measures, accidents due to runaway reactions still occur every year. Accordingly, in this study, based on cases of fire and explosion accidents in styrene monomer reactors, the discharge capacity during runaway reactions was examined through experiments and graphs. Unlike the commonly calculated fire equation, in the case of a runaway reaction where pressure and temperature increase rapidly, discharge is made in two phases rather than a single phase, so the size of the rupture disk must also increase, and the orientation must be adjusted before the rupture disk is installed at the top of the pressure vessel. It was found that position adjustment was necessary.

Key words : runaway reaction, 2-phase, rupture disk

†Corresponding author:byun@kiphrd.co.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

1.1 연구배경

중소규모 화학공장에서 주로 사용되는 회분식 반응기는 소량 다품종 또는 파일럿 플랜트(Pilot plant)의 시험 반응에 사용되며 다량의 인화성 액체 등 위험물을 취급하기 때문에 운전원

실수, 설비 노후화 및 설비의 고장 등 문제가 크다. 또한, 반응이 진행되는 과정에서 냉각시스템의 고장으로 인한 반응열의 제어 실패 또는 불순물이 투입되면 폭주반응이 발생할 수 있어 운전 시 특히 주의할 것을 기울여야 한다. 최근 들어 스티렌 모노머 저장탱크 폭발

사고, 이상 물질 투입에 따른 폭주반응 등과 같이 회분식 반응기 취급 중 화재·폭발 사고가 지속적으로 빈번하게 발생하고 있다.

특히 반응열은 원자 또는 분자가 결합할 때 열 방출에 의하여 열이 발생하고, 원자 또는 분자가 끊어질 때 에너지가 흡수되어 열이 제거된다. 따라서 우레탄 수지, 아크릴 수지, 스티렌 수지 등 폴리머를 제조하는 회분식 반응기의 경우 반응 시 체인이 계속 결합하기 때문에 반응열이 상당히 높으며 용매 또는 촉매로 사용되는 인화성 물질, 반응성 물질, 분해 온도가 낮은 물질 등 다량의 위험물을 함께 취급함으로써 위험성이 매우 높다. 또한, 냉각 실패, 불순물 유입, 부촉매의

Table 1. Runaway reaction incident at batch reactor

Incident's work places	Date of the Incidents	Incident's Causes
OO Chemicals	2014.4.	Operator's human error : the reactor was operated manually. Reactor temperature was increased rapidly because of omitted open cooling water valve after close steam valve.
OO Research	2014.8.	Reactant (acetic anhydride) must be added consistently into the reactor however, it was input only once by worker.
OO Paints	2014.9.	Stirring velocity was not under control, reaction temp. increased rapidly - Lack of cooling capacity - Reactants (raw materials) were not added properly - Water input into reactor for cooling directly.
OO Chemicals	2015.3.	Abnormal stirring as well as the point heating occurred; the reactor aged, did not transfer heat exchange properly.
OO Houses	2015.9.	The catalyst input valve failed to operate and KOH aqueous solution was added only once in an excessive amount.
OO Chemtech	2016.7.	Reaction temperature was uncontrolled, because the cooling water input valve did not open properly.
OO Chem	2019.5.	Rapid reaction due to input of unknown raw materials during catalyst synthesis reaction experiment.
OOO	2019.8.	Due to insufficient temperature control during the reaction, a runaway reaction occurred and the leaked steam exploded.
OOO	2021.8.	While adding potassium permanganate, the stirrer shaft is twisted and oil seal (ethylene glycol) spills out, causing an explosion due to an abnormal reaction with potassium permanganate.
OOOOOO	2023.6	An accident in which the tank exploded due to an increase in temperature and pressure due to an abnormal reaction in chlorethylene carbonate (CEC) stored in a tank for weighing and temperature raising before being introduced into the reactor.
OOO Industry	2023.10	An accident in which sodium chlorite aqueous solution (24%) storage facility was being transported to a wastewater neutralization tank for regular maintenance work, the neutralization tank exploded and was damaged due to an abnormal reaction with residues inside the neutralization tank, and the sodium chlorite inside leaked into the discharge wall.

미투입, 개시제의 과량 투입, 원료의 투입 비율 실패 등의 원인에 의해 반응기 내 폭주반응 및 이상 과압이 발생 되어 인화성 물질이 순간적으로 외부로 방출되고 대기 중의 공기와 혼합됨으로써 최소 점화 에너지 이상의 점화원에 의해 화재나 폭발이 발생할 수 있다 [1]. 이를 예방하기 위하여 산업안전보건기준에 관한 규칙에 따라 유량계·온도계·압력계 등의 계측장치 및 연동장치를 설치하고, 설정 조건에 도달하는 경우 원재료 공급 차단, 냉각수 또는 부촉매의 긴급 투입 등 여러 가지 방법으로 이상 상태를 방지한다. 또한 공정 운영 중 산소의 쓰임이 활발해지면서 발생가능한 사고를 예방하기 위하여 BPCS(Basic Process Control System) 및 ESD(Emergency Shutdown System)를 갖추고 있다[2].

1.2 연구목적

폭주반응은 다양한 물질에 의하여 다양한 형태로 발생할 수 있다. 그 중에서 스티렌모노머 중합반응 공정의 경우 이상 반응에 의한 폭주반응 발생 가능성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 과거 발생한 스티렌모노머 중합 반응기의 폭주반응 사고에 대한 선행연구를 기본으로 하고자 한다. 안전보건공단 연구원의 선행연구를 통해 확인된 스티렌모노머 중합반응 공정의 폭주반응에 따른 최대온도 상승속도를 이용하여 배출용량을 파악하고 외부화재 발생에 따른 배출용량을 비교 분석하여 문제점을 제시하고, 실제 설치되어야 할 파열판 크기를 알아보고자 한다[3].

1.3 사고사례

회분식 반응기에 취급하는 인화성 물질(위험물)로 인한 폭발사고는 앞서 기술한 바와 같이 매우 위험하다고 할 수 있다. Table. 1에 국내·외에서 발생한 주요 사고 사례를 요약하였다[4][5].

II. 선행연구 및 모델선정

2.1. 폭주반응

중합반응 공정은 대부분 발열반응으로 반응 시 주의를 기울여야 하며, 특히 폴리스티렌 중합 공정은 스티렌모노머의 부가 중합반응 중 온도제어나 개시제 투입량이 적절하지 못하게 된다면 폭주반응으로 진행될 가능성이 커 위험하다. 이러한 공정은 열에 의해 라디칼(Radical)이 생성되는 개시반응, 생성된 라디칼에 모노머가 연속적으로 부가되는 성장반응, 그리고 재결합 등에 의해 성장 라디칼이 활성을 상실하여 반응이 정지되는 종결 반응으로 이루어지며 Fig. 1에 반

응식을 표현하였다. 폭주반응이 발생하여 위험물이 파열판을 통해 배출될 때 유체는 단일 상이 아닌 거품(Foam)을 포함한 2상(2 Phase)가 된다. 거품은 위험물이 파열판으로 배출될 때 쉽게 흐르지 못하도록 방해 역할을 하게 되므로 일반적인 방법으로 파열판을 계산했을 경우보다 큰 크기의 파열판이 설치되어야 한다.

2.2. 사고개요 및 선행연구

폴리스티렌(polystyrene) 제조공정에서 정기보수 후 시운전 중에 중합조의 폭주반응으로 인한 압력상승으로 파열판이 파열되면서 파열판의 토출 배관으로 다량의 유중기가 분출되어 증기운을 형성한 상태에서 증기운 폭발이 발생한 후 화재가 발생이 전 공정으로 전파되어 근로자 8명이 부상을 입고 폴리스티렌 제조공정이 반파되는 사고가 발생하였다. 사고원인은 정비보수기간 응축기 청소(cleaning)작업 후 응축기의 냉각수 측에 들어간 공기 또는 이물질이 완전히 제거하지 않은 상태로 운전하여 냉각수회수배관 최상부에 에어포켓(air pocket) 또는 이물질이 체류하고, 이로 인해 응축기에 냉각수가 원활히 흐르지 못해 중합조의 온도조절 실패로 폭주반응(runaway reaction)

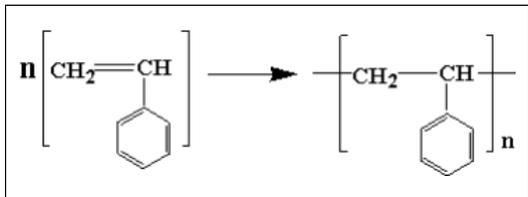


Fig. 1. Styrene monomer polymerization reaction.

Table 2. Process condition related to accident

Item	Specification
Reactor size	3,2000ID x 4,450H (34 m ³)
Operation / Design Condition (Pressure, kgf/cm ²)	(-0.27)/(F.V/3.85)
Operation / Design Condition (Temperature °C)	(144)/(250)
Attached Rupture discharge line (inch)	6
Inhibitor	Ethyl benzene
Process Material/Inhibitor Ratio	About 0.9 : 0.1

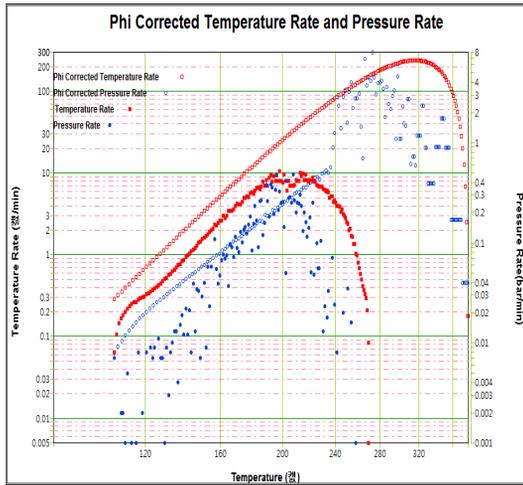


Fig. 2. Experimental result.

Table 3. Maximum temperature rise rate

Experimental items	Result
The maximum temperature rise rate at the saturation temperature of the reactor design pressure	44.6 K/min (0.75 K/s)
The maximum temperature rise rate at the saturation temperature of the maximum allowable working pressure	48.7 K/min (0.81 K/s)

이 발생한 것으로 추정 되었으며, 이때 적절하게 억제제인 에틸벤젠이 투입되지 못한 것으로 알려졌다 [6]. 고분자 물질은 스티렌이 연속적으로 결합해서 만들어지는데, Fig. 1의 반응과 같이 열의 이해 라디칼이 생성되는 개시반응, 생성된 라디칼에 모노머가 연속적으로 부가되는 성장반응, 그리고 재결합 등에 의해 성장 라디칼이 활성을 상실하여 반응이 정지되는 종결 반응으로 이루어지며, 중합 시 발생하는 중합열은 69 KJ/mol이다.

사고와 관련된 공정 조건을 Table. 2에 제시하였다.

산업안전보건연구원에서 실시한 선행연구자료에 따르면 가속 속도 열량계(Accelerating rate calorimeter)를 사용한 결과를 Fig. 2에 제시하였고, 이를 결과로 폭주반응 파열판 계산에 필요한 스티렌모노머 최고 온도상승 속도를 Table. 3에 표현하였다. 가속속도열량계는 단일조건에서 물질의 열안정성을 측정하는 장비로 발열개시온도, 시간에 따른 온도 및 압력의 변화 TMR(time to maximum rate) 등을 측정할 수 있는데, 시료가 투입되는 bomb의 용량은 10 ml이다. 실제 사고 시

Table 4. Process condition

Item	Specification
Factory size	23,000W x 16,000D x 10,000H (mm)
Reactor size	2,000ID x 3,000H (11.5 m ³) 10EA (mm)
Reactor design pressure, Rupture disk set pressure	3bar (g)
Maximum allowable working pressure	5bar (g)
Reactor installation location	Confined
The mass of styrene monomer in reactor	5,600 kg

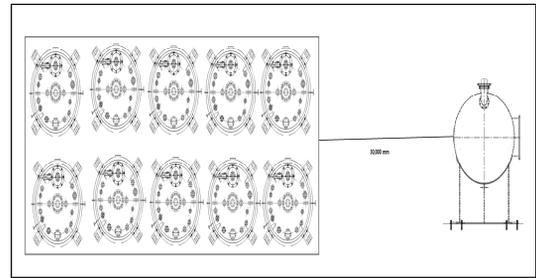


Fig. 3. Factory layout.

추가로 투입되어야 하는 억제제가 미량만 투입되었으므로 최악의 상황을 가정하여 스티렌모노머 5.5 ml를 bomb에 투입한 뒤 상압, 30 ~ 450 °C의 온도범위에서 0.02 °C/min의 발열 Detection sensitivity, 5 °C의 Heat step temperature로 실험조건을 설정하여 실험을 수행하였다.

2.3. 실험 모델 선정

파열판의 배출용량을 계산하기 위해서는 공정조건을 정확히 선정해야 한다. 배출용량 계산은 외부재와 같이 공장 전체가 영향을 미치는 경우와 폭주반응과 같이 1개의 단위 설비가 영향을 미치는 경우가 있다. 따라서 설비 제원 및 설비의 개수, 공장 크기 등을 파악하여야 압력방출장치 선정 시 오류가 발생되지 않는다. 금번 연구 대상은 사고공정과 동일한 폴리스티렌(스티렌모노머의 중합 결과)을 생산하는 회사와 유사한 공정조건을 적용하였고, 이를 Table. 4에 나타내었고, 공장 배치도는 Fig. 3에 제시하였다.

III. 파열판 설계

3.1. 폭주반응 시 2상 파열판 설계(실험)

폭주반응이 발생하여 설정압력에 도달하게 되면 파열판이 개방되고 순간적으로 압력이 감소하게 된다. 이때 내부에 있는 스티렌모노머는 순간적으로 압력이 감소되어 Flashing이 되고, 감소된 압력의 포화온도가 된다. 이때 스티렌모노머는 순간적으로 증발이 되는데, 파열판과 안전밸브가 연속적으로 설치되어 있다면, Flashing 액체의 양과 Clausius-Clapayron 식으로부터 질량 플럭스(G_T)를 (1)과 같이 계산할 수 있다[7][8].

$$G_T = \frac{Q_m}{A} = 0.9\psi \frac{\Delta H_v}{v_{fg}} \sqrt{\frac{g_c}{C_p T_s}} \quad (1)$$

공정 시뮬레이션 Aspen plus V12를 활용하여 Table. 3에 따라 설정 압력에서의 물리화학적 특성을 파악하였다. 이러한 프로그램에서 가장 중요한 것은 물성에 적합한 Physical property를 선정하는 것인데, Methods assistant를 참고로 하여 Soave Redlich kwong (SRK)를 선정하였고, 이를 Fig. 4에 나타내었다.

Aspen plus V12를 활용하여 계산에 필요한 물리화학적 특성을 Table. 5에 제시하였고, 결과적으로 질량 플럭스(G_T)는 $3,175.34 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 가 계산되었다.

폭주반응 시 발생 되는 열방출 속도는 식(2)와 같이 계산한다.

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

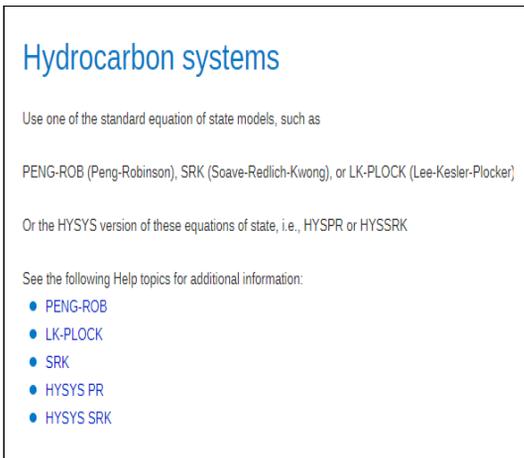


Fig. 4. Methods assistant result.

Aspen plus V12와 Table. 2의 결과를 활용하여 계산에 필요한 물리화학적 특성을 Table. 6에 제시하였고, 결과적으로 열방출 속도(q)는 $1.504 \text{ kJ/kg} \cdot \text{s}$ 가 계산되었다.

질량플럭스(G_T)와 열 방출 속도(q) 결과를 바탕으로 폭주반응 시 필요한 파열판 크기를 식(3)으로 계산할 수 있다.

$$A = \frac{m_0 q}{G_T \left[\sqrt{\frac{V \Delta H_v}{m_0 v_{fg}}} + \sqrt{C_v \Delta T} \right]^2} \quad (3)$$

Table 5. Factors required for mass flux calculation

Sign	Meaning
q	Exothermic heat release rate (1.504 kJ/kg · s)
C_v	Liquid heat capacity at constant volume (1.928 kJ/kg·K)
$(dT/dt)_s$	Temperature rise at set pressure (0.75 K/s)
$(dT/dt)_m$	Temperature rise at maximum allowable working pressure (0.81 K/s)

Table 6. Factors required for heat release rate

Sign	Meaning
G_T	Mass flux (3,175.34 kg/m ² ·s)
Q_m	Mass flow through rupture disk (kg/s)
ΔH_v	Heat of evaporation of the fluid (318.2 kJ/kg)
v_{fg}	Change of specific volume of the flashing liquid/Gas (0.0864 m ³ /kg, 0.00143 m ³ /kg)
C_p	Heat capacity of the fluid (2.363 kJ/kg · K)
T_s	Absolute saturation temperature of the fluid at the set pressure (476.62 K)
g_c	Gravitational constant (1 kg·m/s ²)
ψ	Correction factor (assume 1)
q	Exothermic heat release rate (1.504 kJ/kg · s)
C_v	Liquid heat capacity at constant volume (1.928 kJ/kg·K)
$(dT/dt)_s$	Temperature rise at set pressure (0.75 K/s)
$(dT/dt)_m$	Temperature rise at maximum allowable working pressure (0.81 K/s)

앞서 제시된 물리화학적 특성 및 공정조건을 적용하면 파열판의 크기는 0.028 m^2 이 계산되며, 이를 직경으로 변환하면 필요한 파열판의 면적은 0.19 m^2 가 된다. 계산에 적용한 조건을 Table. 7에 제시하였다.

추가적으로 질량플럭스(G_T) $3,175.34 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 를 기준으로 파열판 면적을 곱하고 시간으로 단위환산을 하면 단위시간동안 흐르는 스티렌모노머를 파악할 수 있는데 $320,074 \text{ kg/hr}$ 가 된다.

3.2. 폭주반응 시 2상 파열판 설계(그래프)

폭주반응 시 투입된 스티렌 모노머의 질량은 $5,600 \text{ kg}$ 이며, 가속 속도 열량계를 통해 시험을 실시한 최대

Table 7. Factors required for rupture disk calculation

Sign	Meaning
A	Rupture disk area (0.028 m^2)
M_0	The mass of styrene monomer in reactor ($5,600 \text{ kg}$)
V	Reactor volume (11.5 m^3)
ΔT	$T_m - T_s$

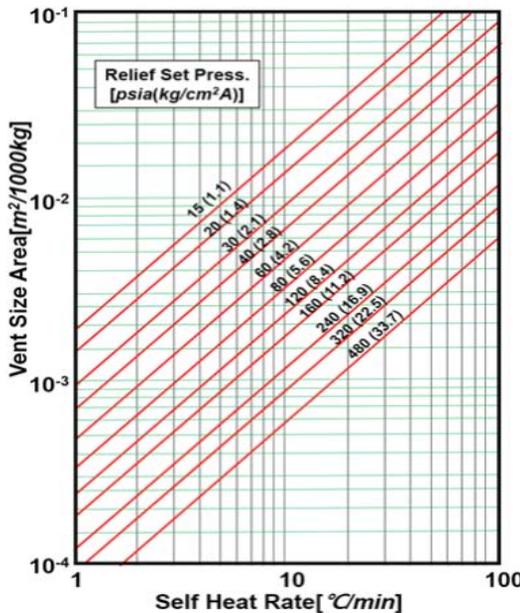


Fig. 5. Charter for design rupture disk on 2-Phase flow.

온도 상승속도는 Table. 2와 같이 반응기의 설정압력에서 29.5 K/min 이다. 폭주반응 시에는 순간적인 과압이 발생하므로 압력방출장치의 종류 중 파열판을 설치하도록 산업안전보건법에서 제도화되어 있는데 Table. 3의 파열판 설정압력과 Table. 2의 가속 속도계 실험 결과 중 최대온도 상승속도를 반영하면 Fig. 5와 같이 2상 흐름의 파열판 선정의 그래프 내용과 같이 약 $0.018 \text{ m}^2/1000 \text{ kg}$ 으로 선정된다.

이를 반응물 전체 질량 $5,600 \text{ kg}$ 으로 적용하면 필요한 파열판의 크기는 0.101 m^2 가 되는데 Fig. 5가 방출보정 계수 0.5를 포함한 그래프이므로 이를 보정하면 최종 파열판의 크기는 0.051 m^2 , 직경 0.253 m 로 결정한다.

Fig. 5와 같은 그래프를 활용하기 전에 주의할 기울어 야 하는데, 기본적으로 20%의 과압이 발생한다는 조건과 낮은 점도에 초크흐름이며, 난류일 때를 가정하고 제작된 그래프이므로 선정 시 이러한 점을 충분히 고려한 뒤 보수적으로 선정해야 한다.

3.3. Open pool fire 시 파열판 크기 선정

단일 상 배출의 가장 큰 배출용량이 되는 케이스는 Open pool fire이고 대규모 사업장을 제외한 일반규모 사업장은 화재안전기준(NFSC) 소화 용수가 최소기준인 30분만 확보하고 있으며, 공정 조건으로 제시한 Fig. 3에 구획된 실내에 반응기가 설치되어 있으므로 Power factor는 1을 적용하고 환경인자(F)는 최악의 조건을 고려하여 1로 가정하여 계산하였다. 이를 식 (4)에 제시하였다[9][10].

$$Q = 70,900 \cdot F \cdot A'^{0.82} \quad (4)$$

계산된 결과 값($1,809,368 \text{ kcal/hr}$)을 화재 시 증발에 필요한 잠열(76 kcal/kg)로 나누면 Open pool fire의 소요 분출량이 $23,807.5 \text{ kg/hr}$ 로 계산된다. 계산에 필요한 함수를 Table. 8에 제시하였다.

소요분출량이 계산되면 식(5)를 사용하여 파열판 면적을 계산할 수 있다[11].

$$A_0 = \frac{W}{C\lambda P} \sqrt{\frac{T_s Z}{M}} \quad (5)$$

Table 8. Factors required for open pool fire calculation

Sign	Meaning
A'	Area of reactor + piping area (10% of the reactor area) (25.52 m^2)
λ	latent heat of vaporization of the styrene monomer (76 kcal/kg)

Aspen plus V12를 활용하여 물리화학적 특성을 도출하여 계산될 결과 필요한 파열판의 면적은 0.007232 m² 이고, 이를 직경으로 변환하면 0.096 m이다. 파열판 형태에 따른 계수(α)는 어떻게 파열판을 설치하는가에 따라 다른데 가장 보수적인 계산이 되도록 0.68을 적용하였다. 계산에 필요한 함수를 Table. 9에 제시하였다.

IV. 결론 및 제언

본 연구에서는 폭주반응이 발생된 사고사례를 기본으로 하여 유사하게 공정을 결정하고 실제 폭주반응이 발생하였을 경우 적절한 파열판 크기를 검토해 보았다. 일반적으로 인화성 액체인 스티렌모노머를 취급하는 경우의 Open pool fire 계산 시 필요한 파열판의 크기는 0.096 m로 폭주반응 시 과압해소를 위한 크기에는 턱없이 부족함을 알 수 있었다. 실제로 폭주

반응이 발생하면 단일 상이 아닌 2상(2 Phase) 상태가 되기 때문에 일반적인 방법에 비해 더욱 큰 크기가 필요하다. 실험을 통해 계산된 파열판의 크기는 실제로 1.98배 큰 크기가 계산되었고, 그래프를 통해 계산된 파열판의 크기는 2.64배 큰 크기가 계산되었다. 따라서 폭주반응이 발생할 가능성이 있는 반응기를 설치할 경우에는 Open pool fire 뿐 아니라 다른 과압의 경우도 고려하여야 하며, 이에 따라 반응기의 발주 전 Nozzle orientation 등을 고려하여 적절한 크기의 파열판이 설치될 수 있도록 설계단계에서부터 반영이 되어야 한다. 결과적으로 연구를 통해 검토된 Open pool fire, 실험, 그래프를 통해 계산된 파열판의 크기는 Table. 10과 같다.

연구의 결과 폭주반응이 발생했을 경우 필요한 파열판의 크기는 최소 0.19 m로 계산되었다. 단, 2-phase가 발생할 경우 내부 위험물의 원활한 배출에 방해받을 수 있으므로 반응기의 Nozzle orientation이 가능하다면 이를 고려한 0.253 m의 파열판을 설치하는 것을 권장한다.

위의 결론 및 제언에 제시한 기준을 스티렌모노머 중합반응과 같이 폭주반응이 발생할 수 있는 공정에 적용한다면 동일 사고 예방에 충분히 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

REFERENCES

- [1] Kim, W. S., and Lee, K. W., "Hazard Evaluation of Runaway Reaction in Deboronation Process Using H2O2 in DIET Synthesis of Pharmaceutical Raw Material", *KIGAS*, 22-4, 49-54, (2018)
- [2] Lee, H. S., and Yoon, H. C., "A Study on the Rupture Disk Design and Application at the Two Phase Flow by Runaway Reaction at Batch Reactor", *KIGAS*, 21-3, 1-8, (2017)
- [3] OSHIRI, "Thermal risk assessment of polystyrene polymerization process", KOSHA, (2012)
- [4] Lee, D. J., Kim, S.R., Kim, S.G., Park, H. S., Lee, J. W., "A study on Preventive Measures for Fire and Explosion Accidents During Acetic Acid Handling in Manufacturing the Semiconductor Material", *KIGAS*, 27-2, 65-70, (2023)
- [5] Lee, D. J., "A Study on the Safety Design Criteria for Emergency Discharge for Hazardous Substances in the Runaway Reaction of Polystyrene Polymerization Process", 49-51, Soongsil university, (2018)
- [6] KOSHA, "Vapor cloud explosion & fire accident

Table 9. Factors required for open pool fire rupture disk size

Sign	Meaning
A ₀	Rupture disk area (7,232 mm ²)
W	Required capacity (23,807.5 kg/h)
C	$3.948 \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}}$, k = heat capacity coefficient (1.0683)
α	Coefficient depending on the shape of the rupture disk installation nozzle (0.68)
P	Rupture disk set pressure(abs) (4.01325bar)
T _s	Absolute saturation temperature of the fluid at the set pressure (476.62 K)
Z	Compressibility factor (0.905)
M	Molecular weight (104.2 kg/kgmol)

Table 10. Study result summary

Case	Ruptrue disk size
Open pool fire	0.096 m
Runaway reaction (Experiment)	0.19 m
Runaway reaction (Graph)	0.253 m

- Major accident news letter”, KOSHA-CCPS-201102, (2011)
- [7] AIChE, “*Emergency Relief System Design Using DIERS Technology*”, 399-400, (1992)
- [8] Daniel A. Crowl and Joseph F Louvar, “*Chemical Process Safety Fundamentals with Applications*”, Dong Hwa Technology Publishing Co. 2nd Edition, 398-406, (2013)
- [9] API521, “*Pressure-relieving and Depressuring Systems*”, 39-50, (2014)
- [10] KOSHA GUIDE D-18, “*Technical guidelines for calculating and installing the discharge capacity of process safety valves*”, KOSHA, (2020)
- [11] KOSHA Guide D-50, *Technical guide for design of rupture disk size estimation and Installation*, KOSHA, (2012)