



플레어 시스템의 최적 운영방안에 대한 연구

송방언 · †복형준* · 우인성

인천대학교 안전공학과 · *필즈엔지니어링 연구소
(2019년 9월 23일 접수, 2019년 12월 14일 수정, 2019년 12월 15일 채택)

A Study on Optimal Operation for Flare systems

Bang-Un Song · †Hyeong-Jun Bok* · In-Sung Woo

Dept. of Safety Engineering, Graduate School, Incheon national University
*Reserch & Development, PIELDS Engineering

(Received September 23, 2019; Revised December 14, 2019; Accepted December 15, 2019)

요 약

대부분의 정유 및 화학 시설에는 정전 등 갑작스러운 공정 정지 등의 문제로 인한 다량의 가스를 방출해야 하는 비상상황 발생에 대비하여 공정시설의 압력 상승을 완화하기 위해 설계된 플레어 시스템을 가지고 있다. 하지만 플레어 시스템의 불꽃 상승은 가시적 공해로 인한 공장 주변 주민들의 민원을 유발하며, 회사에서는 경제적 손실이 발생하므로 이에 대한 상시 관리가 필요한 상황이다. 본 연구에서는 플레어 시스템의 최적 운영방안을 도출하기 위하여 두 가지 항목에 대해 진단 및 분석을 진행하였다. 첫째, 불꽃 높이 상승 원인을 확인하기 위해 음향누출 측정기를 이용하여 안전밸브 및 압력 조정 밸브에서의 가스 누설을 탐지하였다. 둘째, 불꽃 불안정성 원인 파악을 위해 밀봉 드럼에 대해 CFD 모사 및 모형 제작실험을 통한 맥동 현상 발생을 진단하였으며 밀봉 드럼은 정상이며, 안전밸브의 4.3% 및 압력 조정 밸브의 10%에서 누설을 확인함으로써 비정상적인 불꽃 발생의 원인을 도출하였다. 본 연구결과에서 제시되는 사항은 플레어 시스템을 보유한 모든 회사에 적용이 가능하므로 이를 통한 민원 발생 및 제품 손실의 방지가 기대된다.

Abstract - Most oil refineries and chemical plants have flare systems designed to mitigate pressure rises in process facilities in case of emergencies that require the release of large amounts of gas due to sudden process shutdowns such as power outages. However, the rise of the flame of the flare system causes civil complaints from residents around the factory due to visible pollution, and economic loss occurs in the company, which requires constant management. In this study, two items were diagnosed and analyzed in order to derive the optimal operation method of flare system. First, to detect the cause of the rise in flame height, the acoustic leak detector was used to check gas leaks in safety valves and pressure control valves. Second, to identify the cause of flame instability, the pulsation phenomenon was diagnosed through the CFD simulation and modeling experiments of the sealing drum. By confirming the leak at 4.3% of the safety valve and 10% of the pressure control valve, the cause of abnormal sparking was derived. The information presented in this study can be easily applied to any company that has a flare system, and is expected to prevent complaints and product loss.

Key words : flare system, safety valve, visible pollution, company image, optimal operation

†Corresponding author: bhj@pields.com

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

대부분의 정유시설 및 화학시설에는 정전 등 예기치 못한 공정 이상 상황 발생 시 공정시설의 압력 상승을 완화하기 위해 설계된 플레어 시스템을 가지고 있다. 플레어 시스템은 일반적으로 API(American petroleum institute) Code[1] 및 한국안전보건공단의 KOSHA(Korea occupational safety and health agency) Guide[2]등의 국내외 기술기준을 적용하여 설치되고 있다. 과거 산업화 시대에는 플레어 시스템의 불꽃은 산업화의 상징이며, 공장이 잘 가동되고 있음을 보여주는 것으로 인식되어 왔으나 도시 발달로 인한 주거지역의 확장, 주민들의 주거 환경에 대한 인식의 변화는 외부에서 단연 눈에 띄는 설비인 플레어 스택에서 발생하는 불꽃이 지역 주민들에게는 불안감을 조성하고 민원을 유발하는 요인으로 작용하고 있다. 또한 기업에서는 민원 발생에 의한 기업 이미지 훼손은 물론 플레어 시스템 운영에 필요한 가스량 이상으로 가스가 배출됨에 따라 경제적 손실이 발생하는 문제점을 안고 있다.

본 연구에서는 정상 가동 중에도 불꽃이 높게 발생하는 원인을 분석하고자 플레어 시스템을 구성하는 시설 중에서 주 배관 (Flare header)에 연결되어 불꽃 형성에 영향을 주는 안전밸브 및 압력조정밸브의 누설 여부를 측정하고, 플레어 스택에서 불꽃의 불안정성에 대한 원인을 파악하기 위하여 밀봉 드럼의 현상을 분석하여 그 결과를 토대로 플레어 시스템의 효율적인 시설운영과 비용 절감 등

최적화 운영방안을 제시하고자 한다.

II. 본론

2.1 개요

(1) 플레어 시스템 구성

플레어 시스템은 일반적으로 안전밸브 등에서 배출되는 가연성 가스를 모아 플레어 스택에서 소각시켜 대기 중으로 방출하는데 필요한 일체의 설비를 플레어 시스템이라 말하며 플레어 헤더(Flare header), 녹아웃 드럼(Knock-out drum), 밀봉 드럼(Water seal drum) 및 플레어 스택(Flare Stack) 등과 같은 설비를 포함한다.

플레어 시스템은 일반적으로 Fig. 1에 나타난 것과 같이 폐가스가 플레어 헤더에서 녹아웃 드럼으로 유입된 후, 이곳에서 가스 내에 포함될 수 있는 액체 성분 등을 제거하여 안전성을 높여주고 가스량을 줄여주게 된다. 액체 성분이 제거된 가스는 밀봉 드럼을 거쳐 플레어 팁에서 연소된다. 플레어 팁은 플레어 스택 최상단에 설치해 토출되는 가스를 연소시켜 주는 장치로서 불꽃은 항상 유지해야 한다. 플레어 시스템은 공정시설에서 발생하는 비정상적인 과압을 안전하게 해소하여 대형화재·폭발사고를 사전에 방지하는 역할을 담당한다.[2]

(2) 안전밸브

안전밸브(Safety valve)는 보일러 및 각종 압력용기에 필수적으로 사용되는 안전장치로서 용기 내

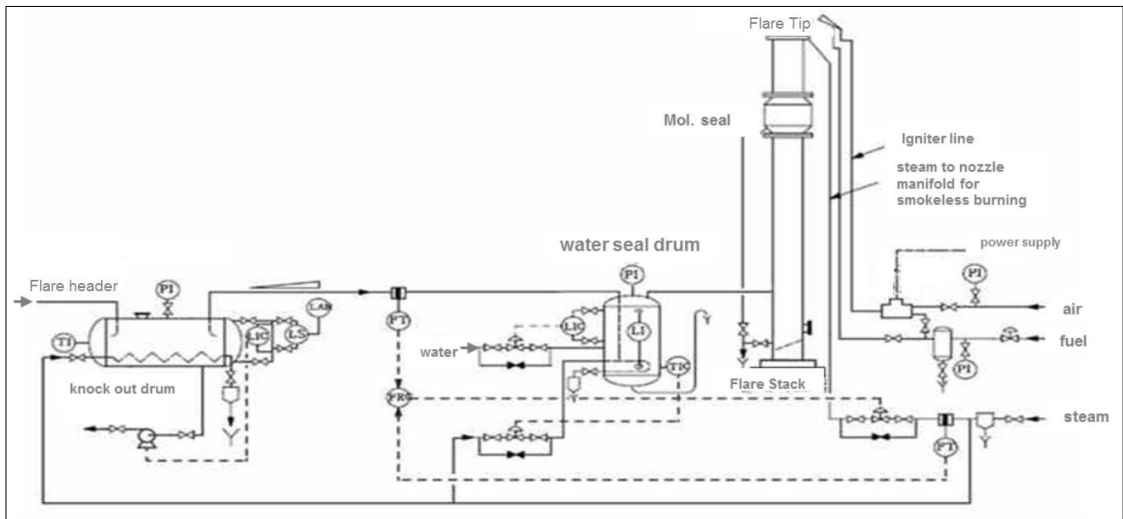


Fig. 1. Typical elevated flare Installation.

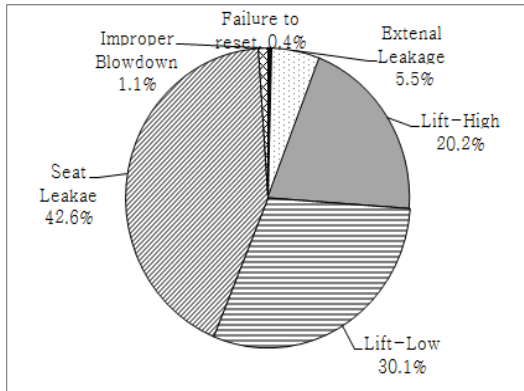


Fig. 2. Overseas safety valve failure modes.

부의 압력이 설계 시 정한 분출 개시 압력보다 상승할 경우 위험한 상황을 방지하기 위하여 밸브가 순간적으로 열리면서 용기 내부의 증기, 가스 등과 같은 압축성 유체를 플레어 스택으로 방출시켜 용기나 계통의 압력을 정상압력 이하로 감압시킴으로써 안전을 확보하는 중요한 역할을 수행한다. 국내 안전밸브 성능검사에 대한 내용이 의무사항으로 규정된 법규는 고압가스안전관리법·산업안전보건법·에너지이용합리화법 등이 있으며, 일반적으로 석유화학단지에는 고압가스안전 관리법과 산업안전보건법의 적용을 받으며 정해진 주기에 따라 정기검사를 실시하도록 하고 있다. 기업에서는 관련 법에서 정하는 정기검사를 하고 성능이 유지되도록 운영하고 있으나, 국내 연구분석 결과[3]에 따르면 여수 산단의 정유 및 석유화학 공장의 6,000개의 안전밸브에 대해 2010년부터 2016년까지 7개년간의 검사자료에 대한 고장률 분석결과 불량률이 75%로 나타났으며 이 중 52.3%가 기밀 불량으로 나타났다.

해외 연구자료[4]에서도 Fig. 2와 같이 안전밸브 시트의 기밀 불량률이 42.6%로 고장률이 가장 높았다. 기밀 불량률의 원인은 공정운전 중 안전밸브의 시트(Seat) 면에 이물질 삽입, 유체에 의한 침식(Erosion) 등에 의해 불량률이 발생 되는 것으로 분석되고 있다.

(3) 밀봉 드럼(Water Seal Drum)

정상적인 상태에서는 안전밸브에서 방출된 가스가 플레어 스택 최상단에 위치한 플레어 팁에서 연소가 되어야 한다. 플레어 스택의 화염이 플레어 시스템으로 거꾸로 전파되는 것을 방지하거나 또는 플레어 헤더에 약간의 진공이 형성되는 경우 플

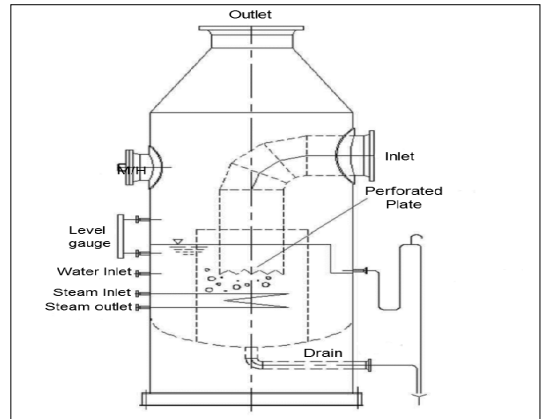


Fig. 3. Vertical water seal drum structure.

레어 스택으로부터 공기가 빨려 들어가는 것을 방지하기 위하여 플레어 스택 내에 역화 방지 등을 위한 목적으로 밀봉 드럼을 설치한다.

밀봉 드럼에서는 드럼 내부에 물이나 부동액을 채워 가스 입구 배관을 상부에서 수중으로 100~500mm 정도로 넣어 가스를 수중으로 통과시켜 연소장치 즉 플레어 팁으로 이동하게 함으로써 역화를 방지한다. 수직 밀봉 드럼의 구조는 Fig. 3과 같다.[5]

2.2 연구방법

○○정유 공장에 설치된 2개의 플레어 시스템 중 정상 운전 중인 상태임에도 비정상적으로 불꽃이 높은 플레어 시스템 1개를 선정하였다. 공장이 정상 가동 중에는 플레어 스택의 불꽃은 보이지 않아야 한다. 만일 운전상의 문제가 발생하여 불꽃이 발생하여도 일시적인 현상이다. 그러나 정상 운전 상태임에도 지속해서 불꽃이 보이는 현상은 시스템 구성상 가스 방출의 시작점이라고 할 수 있는 안전 밸브와 압력조정밸브 등의 누설이 가장 유력한 원인이라고 판단하였다.

공정 운전자료를 검토하여 플레어 헤더로 연결되는 안전밸브와 압력조정밸브에 대한 누설 여부를 현장 측정을 통하여 분석하였다. 정상 가동 중인 공정에서 안전밸브를 탈착하여 누설 여부를 확인하는 것이 불가능하여 간접 검사방법을 사용하여 누설 여부를 측정하였다. 또한 플레어 팁에서 불꽃이 커졌다 작아졌다 하는 불안정성이 맥동 현상으로 인해 발생할 수 있다는 가정하에 이를 규명하기 위해 플레어 스택 하부의 밀봉 드럼에 대해 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 진행하였으

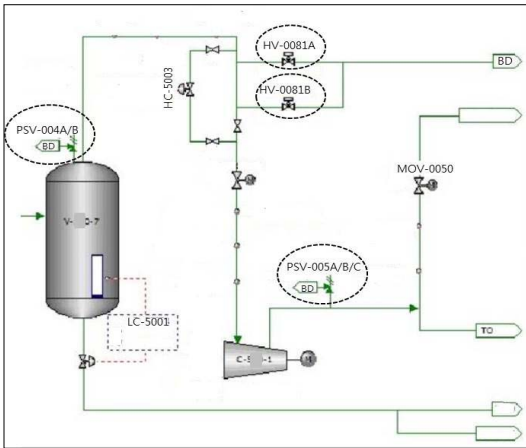


Fig. 4. Example process monitoring graphic.

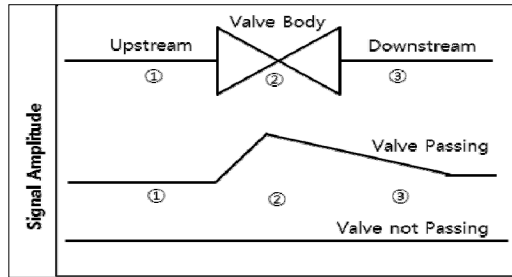
며, 교차 검증을 위해 밀봉 드럼의 모형을 제작하여 실험을 진행하였다.

(1) 안전밸브의 누설측정

연구 대상 플레어 시스템에 대해 Fig. 4와 같이 플레어 스택의 주 배관(Flare Header)으로 연결되는 3개 공정의 공정 도면[6]을 확인하여 안전밸브 231개와 압력조정밸브 37개를 목록화하고 현장 측정을 실시하였다.

주 배관에 연결된 밸브들에 대한 누설측정은 간접 검사방법인 음향 측정법을 사용하였으며 음향 누설 측정기기인 Score Diagnostic사의 Acoustic Leak detector[7]를 사용하였다. 음향 누설측정기의 원리는 안전밸브 내부의 음향을 측정하여 측정결과 값이 Fig. 5와 같은 음향 분포도를 따르는지를 검토하여 누설 여부를 판단하는 방법이다.

(2) 플레어 스택 불꽃의 불안정 원인에 대한 분석이 진행된 정유공장은 불꽃이 안정적이지 못하며 불꽃의 크기가 확 커졌다가 줄어드는 맥동 현상이 보였다. 맥동 현상(Surging)의 원인으로는 밀봉 드럼의 수위가 높을 경우 다공판의 구멍으로 배출되지 않고 가장자리를 통해 배출되면서 유량에 민감하게 불꽃이 형성될 수 있다. 불안정한 불꽃의 원인을 파악하기 위하여 밀봉 드럼의 가스거동에 대해 CFD 분석을 진행하였으며, 교차 검증을 위해 100:1 크기의 밀봉 드럼 모형을 제작하여 물과 CO2를 주입하는 실험을 진행하였으며 실험조건은 Table. 1과 같다.



(a). Signal distribution chart.



(b). Photographs measuring acoustic velocity.

Fig. 5. Method of acoustic velocity measurement.

Table 1. Experimental condition

	Pilot water Seal drum	CFD result
Experimental flow rate, Nm ³ /h	30	3,000
Experimental temperature °C	Normal temperature	25
Experimental pressure, kg/cm ²	3	1

가. 밀봉 드럼의 CFD 해석

Table 1.의 실험 조건에 따라 밀봉 드럼 내부의 Simulation을 구성하였다. 3D 형상은 밀봉 드럼의 설계 자료를 활용하였으며 해석 소프트웨어는 상용프로그램인 Ansys CFX를 사용하였다. 플레어 스택 불꽃의 펄럭거림 같은 불안정한 현상 즉 맥동 현상은 밀봉 드럼 내부에서 다공판(Perforated plate)과 유입되는 가스와의 관계에서 문제가 발생한다는 가정하에 밀봉 드럼 시뮬레이션을 구성하여 진행하였다. 밀봉 드럼 내부의 다공판에 의한 맥동 현상을 확인하기 위하여 초기 수위는 실제 NLL(Normal Liquid Level) 수준으로 설정하였으며

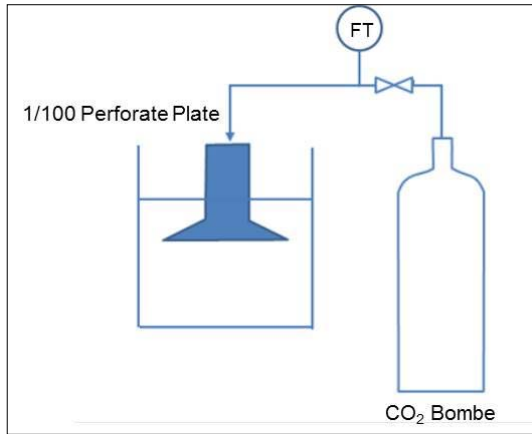


Fig. 6. Water seal drum model diagram.

가스가 유입되는 상황에서 가스 속도분포 및 수위 상승 분포, 밀봉 드럼의 입구와 출구의 현상에 대해 해석하였다.

나. 모형 밀봉 드럼 제작실험

CFD와 교차 검증을 위해 Fig. 6과 같이 100:1의 모형 밀봉 드럼을 축소 제작하여 다공판에 동일하게 1/100의 CO₂를 주입하여 맥동 현상을 일으키는 지를 실험하였다. 밀봉 드럼의 운전 압력은 1kg/cm² 수준이나 다공판에서의 기포 현상을 관찰하기 위해 3kg/cm²의 압력을 가하였다.

2.3 연구결과

(1) 안전밸브 누설측정 결과

현장에 설치된 측정 대상 안전밸브 및 압력조정밸브에 대해 음향측정법을 사용하여 측정한 결과는 Table. 2와 Table. 3과 같은 결과가 나왔다. 플래어 헤더 배관으로 연결되어 운영 중인 안전밸브 231개 중 누설되는 안전밸브는 4.3%인 10개가 발견되었으며 용기의 압력이 급격히 상승하는 경우 압력을 조절하기 위해 설치된 압력조정밸브(Pressure Control Valve & On-off Valve)는 37개 중 10%인 4개에서 누설이 발견되었다. 공정별로 보면 C 공정의 압력밸브가 7.5%, 압력조정밸브가 15%로 누설률이 가장 높았다. 3개 공정 중 C 공정이 타 공정에 운전 압력이 높고 Heavy 한 유체를 취급하는 것에 기인한 것으로 추정되며, 압력밸브 및 압력조정밸브에서 누설된 가스가 플래어 스택의 가스 유량을 증가시켜 불꽃을 비정상적으로 높게 만드는 주요 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

Table 2. Result of valve measurement

Process	A	B	C	Total
Number of unit	8	9	10	27
Number of PSV	60	118	53	231
Passing	1	5	4	10
Others valve	3	8	26	37
Passing	0	0	4	4

Table 3. List of passing valve

Valve no	size (inch)	Signal Level(dB) [in/valve/out]
PSV-A1-03	1	22/30/26
PSV-B1-06	3	22/26/24
PSV-B1-08	1 1/2	20/25/23
PSV-B2-32	8	18/22/20
PSV-B6-03	1	22/26/24
PSV-B9-02	4	16/22/18
PSV-C5-04	1 1/2	12/21/18
PSV-C8-01	3	12/22/18
PSV-C10-61	4	12/20/16
PSV-C10-63	4	12/21/18
HV-C2-01	12	35/45/43
PV-C2-02	6	50/59/56
PV-C3-21	2	21/35/27
PV-C3-10	1	15/18/19

(2) 밀봉 드럼의 CFD 해석 및 모형실험 결과
가. CFD 해석결과

가스 속도분포는 Fig. 7과 같이 입구에서 가스가 유입되어 다공판을 통해 출구로 배출 되는 가스의 유선을 나타내었으며, 오른쪽 그림과 같이 수직단면에서의 속도분포를 contour로 나타냈다. 입구에서 속도가 4m/s 근처인데 비해 cone을 통해 빠져나가는 유속이 큰 영역이 확인되었다. 이것은 출구 근처의 다공판을 통해 가스가 배출되는 것을 볼 수 있다.

수위 상승 분포는 Fig. 8과 같이 수직 단면에서 가스와 물의 분포를 나타내었다. 가스는 빨간색, 물

은 청색이며 색깔이 변하는 부분이 가스물 계면이다. 유수면은 cone 모양의 다공판을 통해 배출되는 가스에 의해 입구 파이프 근처의 자유 수면이 상승한 모양을 나타내고 있으며, 거의 좌우 대칭인 모양으로 나타난다. Isometric view로 나타낸 상태에서 90도인 부분도 같은 패턴이 나타나는 것을 볼 수 있다.

밀봉 드럼 내부의 물의 수위에 따른 가스 분포는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 초기 수위인 NLL(Normal Liquid Level) 선을 기준으로 5cm 단위로 나타냈다. 파이프 주위에는 공기가 충전되어 있어 적색으로 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 그 바깥으로 동심원 모양으로 초록색 분포를 보이는 부분은 가스물 혼재되어 있는 영역이며 5cm와 10cm 아래 단면에서 물이 올라온 영역이 청색의 동심원을 나타내고 있다. 초기 수위인 NLL에서 15cm 이하인 영역에서는 다공판 안에는 가스가 차 있고 바깥

은 물이 차 있어 동심원 모양으로 나타났다. NLL에서 20cm 아래의 단면으로 벽면의 수위가 다소 낮으므로 벽면 근처에 가스의 분포가 남아있고, 다공판과 벽면 사이에 물이 충전되어 있는 동심원 모양을 확인할 수 있다. NLL에서 25cm 아래의 단면은 다공판 내부의 cone 영역에서도 공기의 분포가 거의 없으며, 입구로 들어온 가스가 다공판의 상부를 통해 모두 배출되므로 이 이하로는 가스가 침투하지 못하는 것으로 판단된다. 밀봉 드럼에 대해 CFD 해석 결과 유입되는 가스의 유속이 빠르지 않고, 다공판에 의해 걸리므로 동심원 모양으로 다공판의 상부를 통해 배출되며, 편심된 분포가 보이지 않았다. 가스는 대부분 다공판의 상부를 통과하는 것으로 파악되었으며, 하부영역은 대부분 물에 잠겨있어 가스가 통과하지 않는 것으로 보여 진다.

나. 모형 밀봉 드럼 제작실험 결과
실험 조건으로 (압력 3kg/cm²) CO₂ 가스 주입을

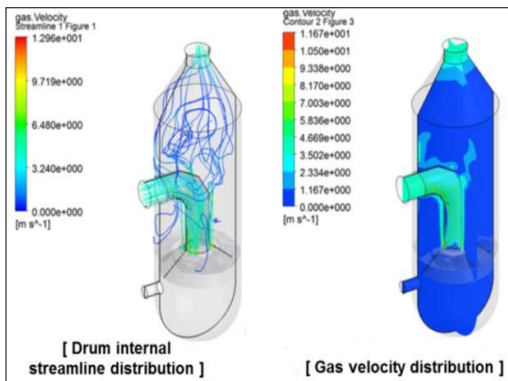


Fig. 7. Gas velocity contour in seal drum.

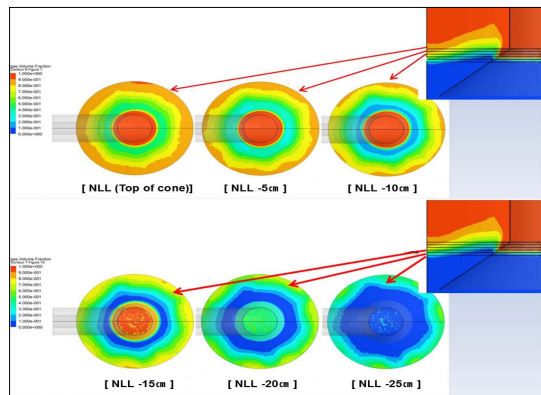


Fig. 9. Result of analysis for water seal drum (height variation).

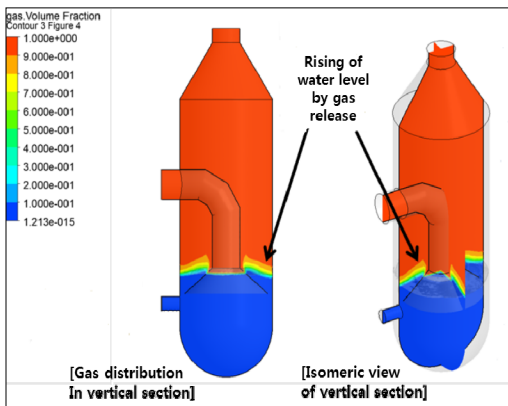


Fig. 8. Rising of water level distribution.



Fig. 10. Model experiment for water seal drum.

통해 Fig. 10과 같이 모형실험을 실시한 결과 맥동 현상을 일으킬만한 유동의 급격한 변화나, 실험 전 가정했던 주입된 가스가 다공판의 범위를 넘어서는 현상도 발생하지 않았다. 따라서 축소모형 실험 결과에 비추어볼 때 밀봉 드럼의 형상에 의해서 맥동 현상이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

III. 결론

본 연구는 플레어 스택의 불꽃의 불안정성의 원인을 파악하여 정상 운전 중에 높은 불꽃이 발생되지 않도록 플레어 시스템의 최적 운영방안을 모색하고자 하였다. 안전밸브의 누설 여부를 측정할 결과 측정 대상 231개 중 4.3%인 10개에서 누설이 발견되었고 압력조정밸브는 37개 중 10%인 4개에서 누설이 발견되었다. 또한 플레어 스택 불꽃의 불안정성에 대해 밀봉드럼의 맥동현상이 의심되어 밀봉드럼에 대한 CFD와 모형제작 시험을 진행한 결과 맥동 현상은 해당되지 않은 것으로 해석되었다.

결론적으로 정상 운전 중인 공정에서 플레어 스택의 불꽃의 크기가 확 커졌다가 줄어드는 현상은 안전밸브 및 압력조정밸브에서 누설된 가스가 플레어 스택의 유량을 증가시키고, 누설되는 가스의 양이 일정하지 않아 fluctuation이 발생하는 것으로 판단되었다. 본 연구를 통하여 플레어 시스템의 운영을 최적화하기 위하여 다음과 같이 제시하고자 한다.

1) 안전밸브는 누설 가능성이 항상 존재하므로 산업안전보건법 등 관련 법에서 정하는 검사 주기에 따라 실시하는 탈착을 통한 정기검사 외에 공정 운전 중에 간접 검사방법 등을 통한 일상 점검이 반드시 필요하다.

2) 안전밸브에 대한 측정결과 특정 공정에서 누설률이 높게 나온 것은 취급 물질에 따라 안전밸브의 불량 빈도가 높을 수 있으므로 안전밸브에 불량을 발생시킬 가능성이 높은 물질을 취급하는 용기에 설치되는 안전밸브에 대해서는 Dual Type으로 설치하여 공정 운전 중에도 수리가 가능토록 하는 것이 바람직하다.

3) 밀봉 드럼의 수위가 높을 경우에 가스가 다공판을 통하여 배출되지 않고, 가장자리를 통해 배

출됨으로써 가스의 방출량이 많을 경우에는 불꽃이 외부로 크게 올라가고, 방출량이 크게 줄어들 때는 내부로 들어가서 타는 내부 연소를 반복하게 되며 플레어 탑이 열화에 의해 손상되는 맥동 현상이 발생할 수 있으므로 밀봉 드럼의 철저한 수위 관리가 필요하다.

본 연구는 1개의 플레어 시스템에 대하여 수행하였으나 연구결과에서 제시되는 사항은 플레어 시스템을 보유한 모든 공장에 해당된다고 볼 수 있으며 플레어 시스템의 최적 운영을 통해 지역 주민들의 불안감을 해소시키고, 기업 이미지 훼손 방지 및 제품 손실 방지를 통한 경제적 가치 창출에도 효과가 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] API RP 520, "Sizing, Selection and Installation of Pressure Relieving Device in Refineries", American Petroleum Institute, USA, (2014)
- [2] KOSHA Guide D-32-2017, "Technical specification for the design and installation of a back-fire Prevention Facility", Korea Occupational Safety & Health Agency, Republic of Korea, (2017)
- [3] Jang, Y. R., Kim, J. H., Kim, S. H., Kwak, Y. H., "The necessity of Introducing the In-service Test based on Analysis of Performance Test Result of Pressure Safety Valve, Journal of the Korea Institute of Gas, 21(6), 19-21, (2017)
- [4] Choi, D. S., "Research on Tools and Analysis Techniques Performance Evaluation of Safety Valves in Nuclear Plants". Ajou University, P. 9 (2017).
- [5] KOSHA Guide D-61-2017 "Technical specification for the design and installation of a back-fire Prevention Facility", Korea Occupational Safety & Health Agency, Republic of Korea, (2017)
- [6] Incheon Petrochemical LTD, "Process Monitoring System"
- [7] Image from <http://midasvalvediagnostics.com/>, Score Diagnostic Limited