

동적 모사를 이용한 에탄 분리탑의 플레어 용량 예측에 관한 연구

박경태^{*†} · 원왕연^{*} · 신동일^{**}

^{*}GS건설 플랜트신사업팀
 110-130 서울특별시 종로구 종로 33 그랑서울
^{**}명지대학교 화학공학과
 449-728 경기도 용인시 처인구 명지로 116

(2014년 3월 30일 접수, 2013년 4월 29일 수정본 접수, 2014년 5월 2일 채택)

Study on the Flare Load Estimation of the Deethanizer using Dynamic Simulation

Kyungtae Park^{*†}, Wangyun Won^{*} and Dongil Shin^{**}

^{*}Plant New Business Team, GS E&C, GRAN SEOUL, 33 Jong-ro, Jongno-gu, Seoul 110-130, Korea

^{**}Department of Chemical Engineering, Myongji University, 116 Myongji-ro, Cheoin-gu, Yongin, Gyeonggi 449-728, Korea
 (Received 30 March 2014; Received in revised form 29 April 2014; accepted 2 May 2014)

요 약

화학 공장에서 플레어 시스템은 공장의 안전에 지대한 영향을 주는 아주 중요한 요소이다. 만약, 플레어 시스템이 필요보다 작게 설계 된다면, 위급 상황 발생 시 끔찍한 사고를 유발할 수 있다. 반면, 플레어 시스템이 필요보다 크게 설계하게 된다면 공장을 건설하는데 드는 비용의 증가를 피할 수가 없게 된다. 따라서, 산업계에서는 적절한 플레어 시스템의 설계를 위해 정확한 플레어 배출량을 예측하고자 오랫동안 노력해왔다. 미국석유협회에서는 플레어 배출량 계산을 위한 가이드라인을 제시하였고, 많은 설계 회사들은 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 방법을 개발하여 플레어 배출량을 예측해 왔다. 하지만, 이러한 방법들은 많은 보수적인 가정들 하에 플레어 배출량을 계산하여 필요보다 크게 설계, 막대한 비용을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 기존 방법들이 가지는 문제들을 해결하기 위해 공정제어가 포함된 동적 모사를 통해 플레어 배출량을 계산하는 새로운 절차를 제시하였고, 이 절차에 따라 에탄 분리탑의 배출량을 성공적으로 예측함으로써 절차의 효용성을 증명하였다.

Abstract – A flare system is a very important system that crucially affects on the process safety in chemical plants. If a flare system is designed too small, it cannot prevent catastrophic accidents of a chemical plant. On the other hand, if a flare system is designed too large, it will waste resources. Therefore, reasonable relief load estimation has been a crucial issue in the industry. American Petroleum Institute (API) suggests basic guidelines for relief load estimation, and a lot of engineering companies have developed their own relief load estimation methods that use an unbalanced heat and material method. However, these methods have to involve lots of conservative assumptions that lead to an overestimation of relief loads. In this study, the new design procedure for a flare system based on dynamic simulation was proposed in order to avoid the overestimation of relief loads. The relief load of a deethanizer process was tested to verify the performance of the proposed design procedure.

Key words: Flare Load Estimation, Dynamic Simulation, Deethanizer, Dynsim

1. 서 론

화학 공장은 유독성의 위험한 물질을 다루는 만큼 항상 화학사고가 발생할 위험에 노출되어 있다[1]. 따라서, 화학 공장은 다양한 장치에 의해 보호되고 있으며, 그 중 플레어 시스템은 화학 공장을 비

정상 상태의 위험으로부터 보호하기 위한 대표적인 물리적 장치이다. 플레어 시스템은 안전밸브, 플레어 배관, 플레어 knock-out drum, 플레어 stack, 버너 등으로 구성되어 있으며 화학공장의 기기에서 발생 가능한 비이상적인 압력 상승을 해소하여 공장을 폭발의 위험으로부터 방지하는 역할을 한다.

플레어 시스템은 설치 시 많은 비용을 필요로 하기 때문에 적절한 플레어 용량을 예측하기 위해 많은 연구들이 있었다. 미국석유협회(American Petroleum Institute)는 플레어 용량을 예측하기 위한 가이드라인을 제시했다[2]. 이 방법은 플레어 용량 예측 방법의 규격화를 시도했다는 점에서 큰 의미가 있지만, 플레어 용량 예측 결과가 보

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: pktcj81@gmail.com

*이 논문은 서울대학교 윤인섭 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수적이며 일관되고 구체적인 플레어 용량 산정 방법을 제시하고 있지 못하다는 점, 상황에 따라 다양한 해석이 가능하다는 단점을 지니고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 산업계에서는 정상상태 열 및 물질 수지식(Steady-State Heat and Material Balance)을 이용하여 플레어 용량을 예측해왔다[3,4]. 이 방법은 비이상적인 압력 상승을 유발할 수 있는 다양한 상황에 따른 일관되고 구체적인 플레어 용량 산정 방법을 제시한다는 점에서 오랫동안 산업계에서 이용되어 왔다.

하지만 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 방법 역시, 비정상상태(Transition State)에서 발생하는 플레어 배출 상황을 정상상태(Steady-State)에서 해석한다는 점에서 한계를 지니고 있다. 플레어 배출 상황이 발생하게 되면 시스템 내부의 온도 및 압력, 그리고 열 및 물질 수지가 모두 시간에 따라 변하게 되지만 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 방법은 시간에 따른 시스템 내부의 변화를 엄밀하게 파악할 수 없는 한계가 있다. 따라서 설계 엔지니어는 시스템 내부의 압력 상승 경향을 정확히 파악하지 못한 채, 플레어 시스템 설계를 진행할 수 밖에 없다.

이를 해결하기 위해 화학 공장의 비정상상태를 모사하기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다. 먼저, Cassata 등은 분리탑의 플레어 용량 예측을 위해 동적 모사(dynamic simulation)를 적용하였다[5]. 그 결과 동적 모사를 이용하여 프로판(Propane) 분리탑의 플레어 용량 예측을 성공적으로 수행할 수 있음을 증명하였다. 또한, Luyben 그리고 Lee 등은 복잡한 화학 공정을 동적 모사를 통해 성공적으로 모사할 수 있음을 증명하였고[6,7], Patel 등은 화학 공장의 디자인 및 설계 그리고 비정상상태의 진단을 위해 동적 모사가 활용될 수 있음을 보여 주었다[8,9]. 마지막으로 Singh 그리고 Xu 등은 동적 모사를 통해 공장의 start-up 및 shut-down시 플레어 발생량을 최소화할 수 있는 방법에 대해 연구를 하였다[10,11]. 이들의 연구에 대해서는 다음 Table 1에 비교 정리하였다.

Table 1에서 확인할 수 있듯이, Cassata 등의 연구는 동적 모사를 이용하여 플레어 용량 예측을 시도했지만, 발생 가능한 다양한 플레어 배출 시나리오에 동적 모사를 수행하지 않았으며, 동적 시뮬레이

션을 위한 모델에 basic process control system (BPCS)이 전혀 반영되지 않아 모델의 정밀도가 떨어진다는 한계를 지닌다. 한편, Luyben은 동적 모사를 이용한 다양한 화학 공장의 모사에 대한 연구에 집중하였고, Lee 등은 동적 모사를 이용한 액화천연가스(LNG) 인수 기지의 운전 전략 최적화에 대한 연구를 수행하였다. Patel 등의 연구는 동적 모사를 이용한 압축기(compressor) 및 에틸렌 생산 공정의 운전 전략 및 설계 검증에 대한 것이다. Singh나 Xu 등의 연구는 동적 모사를 화학 공장 설계에 적용할 수 있도록 framework를 제시하고 이를 통해 공장의 start-up 및 shut-down을 구현하면서 플레어 배출량의 예측을 수행하였다. 하지만, 이 연구는 공장 start-up 및 shut-down시 플레어 배출량을 최소화하기 위한 것에 초점이 맞추어져 있어, 플레어 시스템 전체를 설계하기 위한 플레어 배출량 예측은 수행하지 않았다.

이처럼 그동안의 연구들은 대부분 동적 모사를 이용한 화학 공정의 정밀한 모사와 운전 전략 수립 또는 설계 검증에 초점이 맞추어져 있으며, 플레어 용량 예측에 대한 연구 역시 동적 모사를 이용한 플레어 예측이 가능하다는 수준의 방법론을 제시할 뿐, 플레어 용량 예측에 관한 체계적인 절차를 제시하지 못하고 있다. 따라서, 본 연구는 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 플레어 용량 예측에 관한 체계적인 절차를 제안함으로써 효율적인 플레어 시스템 설계에 도움을 주고자 하였다. 또한, 에탄 분리탑의 플레어 용량 예측을 제안된 절차에 따라 수행함으로써 절차의 효용성을 증명하였다.

2. 플레어 용량 예측 절차

2-1. 미국석유협회의 가이드라인 및 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 기존 방법

Crowl 및 Louvar는 Fig. 1과 같이 플레어 시스템 디자인을 위한 절차를 제시하였다[12].

플레어 배출 위치의 선정은 공장 설계 초기에 위험성 분석(Risk Analysis) 및 설계 엔지니어의 경험에 의해 이루어진다. 미국의

Table 1. Previous researches regarding dynamic simulation

Authors	Contents of Research	Limitations
Cassata, J. R. et al. (1993)	- Relief load estimation using dynamic simulation for the depropanizer tower	- This research did not consider basic process control system (BPCS) in the dynamic simulation model. - This research did not test the dynamic simulation model under various flare relieving scenarios
Luyben, W. L. (2002)	- Simulate various and complex chemical process using dynamic simulation Including BPCS in dynamic simulation models	- This research did not test the dynamic simulation model for the relief load estimation
Lee, C. J. et al. (2012)	- Simulate Liquefied Natural Gas (LNG) terminals using dynamic simulation - Set up the operational strategy using dynamic simulation	- This research did not test the dynamic simulation model for the relief load estimation
Patel, V. et al. (2007)	- Conduct surge analysis of compressors using dynamic simulation	- This research did not test the dynamic simulation model for the relief load estimation
Patel, V. et al. (2008)	- Simulate the ethylene plant using dynamic simulation	- This research did not test the dynamic simulation model for the relief load estimation
Singh A. et al. (2007)	- Build dynamic simulation model for an olefin plant - Estimate the relief load during start-up/shut-down	- This research did not set up the procedures for the relief load estimation using dynamic simulation - This research did not test the dynamic simulation model under various flare relieving scenarios
Xu, Q. et al. (2009)	- Simulate the liquid fractionation plant using dynamic simulation - Estimate the relief load during start-up - Set-up the overall framework for using dynamic simulation	- This research did not set up the procedures for the relief load estimation using dynamic simulation - This research did not test the dynamic simulation model under various flare relieving scenarios

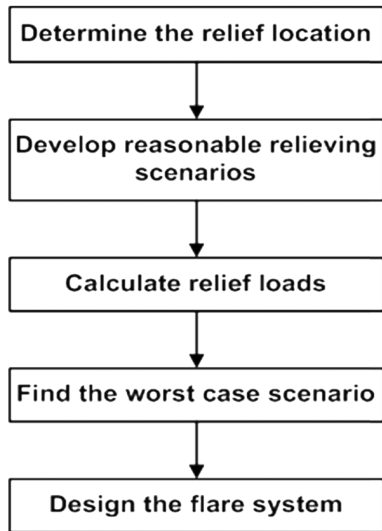


Fig. 1. The design procedures for flare system.

Centre for Chemical Process Safety(CCPs)에서는 화학 공장의 정량적 위험성 분석을 위한 다양한 기법을 제시하고 있으며[13], 이러한 기법들을 활용하여 화학 공장의 잠재적인 위험을 찾아내고 이를 제거하거나 완화할 수 있는 위치에 플레어 배출 장치들을 설치하게 된다.

공장 설계 초기에 선정된 플레어 배출 위치는, 공장 설계가 진행되면서 HAZID(Hazard Identification) 및 HAZOP(Hazard and Operability) 등의 기법을 통해 재검증하므로 플레어 배출 위치가 추가 또는 삭제되기도 한다.

합리적인 플레어 배출 시나리오 선정에서는 다음 사항들이 주요하게 고려되어야 한다.

- 1) 공정 설계 엔지니어(Process Engineer)가 해당 공장 또는 공정에 친숙하며 깊은 지식을 가지고 있어야 함.
- 2) 특정 공정이나 장치에서 비정상상태를 유발할 수 있는 요인을 파악할 수 있는 능력.
- 3) 합리적이고 발생 가능한 시나리오를 전개할 수 있는 능력.

합리적인 플레어 배출 시나리오를 선정하는 작업은 고난이도의 작업으로 매번 발생 가능한 모든 배출 시나리오의 전개에 대해 고려를 하는 것은 공정 설계 엔지니어에게 매우 큰 부담이다. 이를 위해 미국석유협회에서는 API STD 521을 통해 플레어 배출 시나리오에 대해 가이드라인을 제시하고 있으며, 이 가이드라인을 참고로 하면 비교적 쉽게 플레어 배출 시나리오를 선정할 수 있다.

선정된 시나리오에 따른 플레어 배출 용량 계산을 위해서, 산업계에서는 주로 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용해왔으며, 그 식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\sum W_I = \sum W_O$$

$$W_A = \frac{(\sum W_I H_I + \sum Q_I) - (\sum W_O H_O + \sum Q_O)}{L_A} \quad (1)$$

여기서, W_I 는 시스템으로 유입되는 흐름의 유량(kg/hr), W_O 는 시스템 밖으로 유출되는 흐름의 유량(kg/hr), W_A 는 시스템 내부에 축적되는 유량(kg/hr), H_I 는 시스템으로 유입되는 흐름의 엔탈피(Enthalpy, kcal/kg), H_O 는 시스템 밖으로 유출되는 흐름의 엔탈피

(kcal/kg), Q_I 는 시스템으로 유입되는 열량(kcal/hr), Q_O 는 시스템 밖으로 배출되는 열량(kcal/hr) 그리고 L_A 는 시스템 내부의 잠열(kcal/kg)이다.

위에서 언급된 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용하여 플레어 배출 용량을 계산하는 절차는 다음과 같다.

- 1) 주어진 시스템의 정상 상태에 대한 열 및 물질 수지식을 세운다.
- 2) 선정된 시나리오에 의해 유발되는 비정상 상태에 대한 열 및 물질 수지식을 다시 세운다.
- 3) 1) 및 2)에서 세운 열 및 물질 수지식을 비교해 시스템 내부에 축적되는 열량을 계산한다.
- 4) 시스템 내부에 축적된 열량을 시스템 내부의 잠열로 나누어 플레어로 배출될 물질의 양을 계산한다.

최악의 시나리오 선정은 플레어 배출 용량 계산을 통해 나온 결과 중 최대 배출 용량을 가지는 시나리오로 선정한다. 최악의 시나리오에서 배출되는 배출 용량을 이용해 안전 밸브, 플레어 배관, 플레어 Knock-out Drum 등 모든 플레어 시스템이 설계되기 때문에 최악의 시나리오 선정에는 많은 주의를 필요로 한다.

공정 설계 엔지니어는 반드시 선정된 최악의 시나리오가 합리적이고 발생 가능한 것인지를 재검토해야 하며, 플레어 배출 용량 계산이 적절한 가정 하에 이루어졌음을 확인하여야 한다. 모든 검증 절차가 끝난 후에는 사업주(Client)의 요구 사항 및 국제 규격에 따라 플레어 시스템을 설계하게 된다.

2-2. 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 플레어 시스템 설계

본 연구에서 새롭게 제안하는 플레어 시스템 설계 절차는 다음 Fig. 2와 같다. 플레어 배출 위치 선정 및 합리적인 플레어 배출 시나리오 선정은 기존의 방법을 유지하고, 플레어 배출 용량 계산 및 최악의 시나리오 선정을 위해 공정제어가 포함된 동적 모사를 활용하는 새로운 절차이다. 기존의 연구들이 start-up시나 임의로 가정한 상황에서 플레어 용량 예측을 수행한 반면, 이 새로운 절차는 발생 가능한 모든 플레어 배출 시나리오를 공정제어가 포함된 동적 모사를 통해 수행하여 최악의 시나리오를 선정하는 방법을 제시하고 있다. 과거에는 이러한 방법이 컴퓨터 및 범용 소프트웨어 성능의 한계로

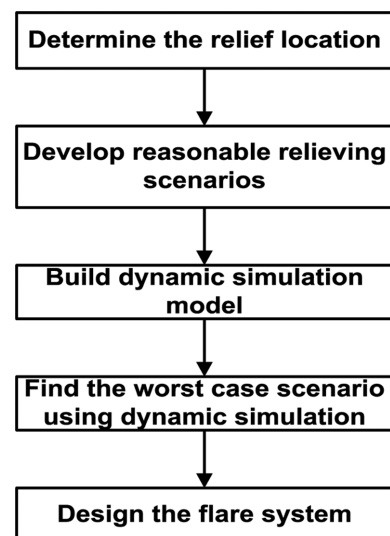


Fig. 2. The new design procedures for flare system using dynamic simulation.

Table 2. Required information with respect to flare system design methods

	Steady-State Heat and Material Balance Method	Dynamic Simulation including BPCS
Process Flow Diagram (PFD)	○	○
Heat and Material Balance	○	○
Equipment Data Sheets	○	○
Instrument Data Sheets	×	○
Piping and Instrument Diagram (P&ID)	Partially	○

인해 불가능하다고 여겨졌지만, 체계적인 접근을 통해 이를 해결할 수 있음을 이번 연구를 통해 증명하고자 하였다.

공정제어가 포함된 동적 모사를 위한 모델을 만들기 위해서는 다양한 설계 자료가 필요하다. 다음 Table 2에 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용할 때와 동적 모델링을 이용할 때 필요한 설계 자료들을 정리해 보았다. Table 2에서 알 수 있듯이 플레어 배출 용량을 계산하기 위해 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용할 때와 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용할 때, 서로 필요한 자료의 수준과 종류는 크게 다르지 않다.

다만, 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 플레어 배출 용량 계산 방법은 쉽게 정형화가 가능하므로, 한 번 정형화된 시스템에 대해서는 초급 엔지니어도 손쉽게 빠르게 플레어 배출 용량을 계산해 낼 수 있다. 그러나 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 플레어 배출 용량 계산 방법은 시스템 모델링에 상당한 숙련을 요하며, 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 방법에 비해 많은 시간이 소모된다.

하지만 공정제어가 포함된 동적 모사를 통한 플레어 배출 용량 계산은 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 방법에 비해 다음과 같은 장점을 가진다.

- 1) 플레어 배출은 비정상상태에서 발생하므로, 이를 모사할 수 있는 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용하는 것이 좀 더 정확한 계산에 도움이 된다.
- 2) 최악의 시나리오 선정을 위해 계산 과정을 검토하는 것이 용이하다.
- 3) 범용 소프트웨어를 이용하므로 플레어 배출 용량 계산 과정에 대한 사업주의 신뢰를 얻기가 쉽다.

지금까지, 플레어 용량 예측 절차에 대해 논의하였다. 기존의 정상상태 열 및 물질 전달식을 이용한 플레어 용량 예측 절차와 본 연구에서 새롭게 제시한 플레어 용량 예측 절차에 대해 설명하였다. 다음 장에서는 새롭게 제시된 플레어 용량 예측 절차에 따라 에탄 분리탑의 플레어 용량 예측을 수행하였다. 비교를 위해, 기존의 정상상태 열 및 물질 전달식을 이용한 플레어 용량 예측 절차에 따른 플레어 용량 예측 결과도 같이 제시하였다.

3. 에탄 분리탑의 플레어 용량 예측

이번 연구에 사용된 에탄 분리탑의 PFD를 다음 Fig. 3에 나타내었다. 에탄 분리탑은 주로 Natural Gas Liquid (NGL) 회수 공정에서 많이 볼 수 있으며, NGL에서 에탄을 탑 상부로 회수하는 것을 주요 목적으로 한다[14]. 이 연구에서 사용된 분리탑은 분리탑으로 들어오는 에탄의 99 mol% 이상을 탑 상부의 제품으로 회수하는 것을 목표로 디자인 되었다. 분리탑으로 들어오는 유량은 분리탑 전단에 설치된 유량 제어기가 제어하며, 탑 상부로 나가는 제품의 흐름은 overhead receiver의 압력으로 제어한다. 탑 하부로 나가는 제품의 흐름

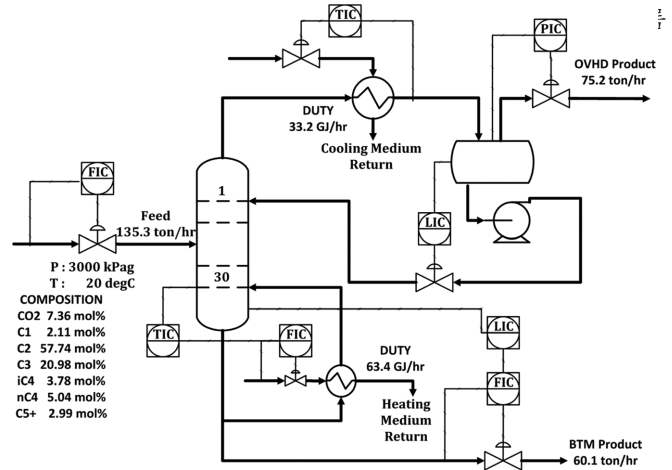


Fig. 3. Process flow diagram for the ethane separation unit.

은 분리탑 sump의 액위와 탑 하부 제품의 유량으로 다단 제어하며, 환류 흐름은 overhead receiver의 액위로 제어한다. Overhead condenser의 cooling medium의 흐름은 overhead condenser 후단의 온도로 제어되며, reboiler로 공급되는 heating medium의 흐름은 탑 내부의 온도 및 heating medium의 유량으로 다단 제어된다.

일반적으로 증류탑에서 플레어 배출 위치는 탑상부이다. 그 이유는 탑 내부 압력 증가의 일차 원인은 탑 내부에 축적되는 열에 의해 탑 하부(Sump) 및 트레이(Tray)의 액체가 기화되면서 부피가 증가하기 때문이다. 따라서, 탑 상부에 압력 밸브를 설치하여 탑 상부의 기체를 제거함으로써 분리탑의 압력 상승을 막는 것이 합리적이고 효과적이다.

에탄 분리탑에서 발생 가능한 플레어 배출 시나리오는 API STD 521에 의거하여 다음 Table 3에 정리하였다. 또한, 해당 시나리오에 의해 시스템이 받는 영향도 같이 정리하였다. Reflux failure의 경우도 발생할 수 있으나, 이번 경우 시스템에 미치는 효과는 Local power failure와 동일하므로 본 연구에서 제외하였다.

에탄 분리탑의 모델링을 위해 사용된 정보들을 Table 4에 정리하였다. 이 정보들은 대부분 P&ID, PFD, 열 및 물질 수지식 그리고 data sheets로부터 얻을 수 있다. Table 3에 나열된 정보 이외에도 각 제어 밸브들의 C_v 값, 제어기 parameter 그리고 장치 높이 등 여러 가지 정보들이 사용되었으나 편의를 위해 Table 4에 나타내지는 않았다.

Fig. 3 및 Table 4에 주어진 정보들을 토대로 공정제어가 포함된 동적 모사를 위한 모델을 구축하였다. 모델 구축은 범용 소프트웨어인 Dynsim 5.0 (Simsci, 미국, 2012)을 이용하였다.

공정제어가 포함된 동적 모사를 통한 최악의 시나리오 선정은 Table 3에 나열된 시나리오를, 구축된 모델을 이용하여 모사한 뒤, 에탄 분리탑 상부의 압력 밸브를 통해 배출되는 유량을 확인함으로써

Table 3. Flare relief scenarios for the ethane separation unit

Relief Scenario	Effects on the System
Local Power Failure (LPF)	1. If LPF happens, all electric devices will stop. 2. The reflux pump of the ethane separation unit will stop in this case. 3. The cooling medium pump will continue to operate in this case because it locates far away from this unit..
Condenser Duty Loss	1. This scenario can happen in case of the cooling medium pump stop. 2. If the overhead condenser loses its duty, the level of the overhead receiver will keep dropping and finally the reflux pump will stop.
Vapor Outlet Blocked	1. This scenario can happen in case of the failure of the pressure control valve or the blockage of block valves. 2. If the vapor outlet blocked, the internal pressure of the ethane separation tower will rise dramatically since the vapor will accumulate at the top area of the tower.
Abnormal Heat Input	1. This scenario can happen in case of the failure of the control valve at the steam line. 2. If this scenario happens, the reboiler will supply the excess heat into the ethane separation tower and it will cause the internal pressure rise of the tower.

Table 4. Information used for the dynamic simulation

Equipment	Data used for the Dynamic Simulation
Ethane Separation Tower	No. of trays: 30 Diameter of trays: 5 m/6.5 m The total volume of the reboiler and the sump: 171 m ³ Reboiler Duty: 63.4 GJ/hr The set pressure of PSV: 3,600 kPag
Overhead Receiver & Condenser	The volume of overhead receiver: 107 m ³ Condenser Duty: 33.2 GJ/hr The heat transfer area: 400 m ²
Reflux Pump	Performance Curve

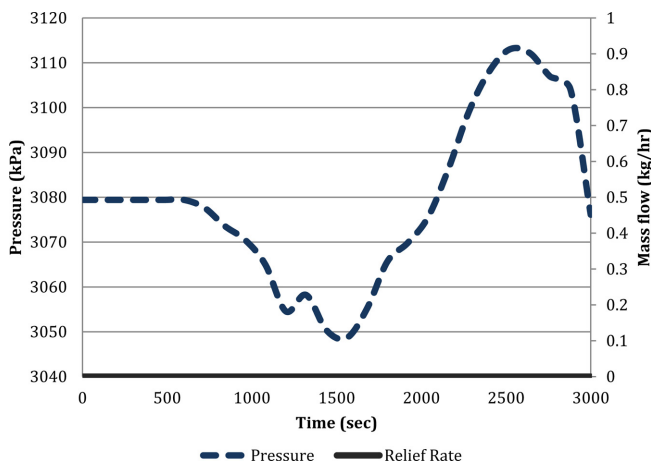


Fig. 4. The flare load estimation result for the local power failure scenario using dynamic simulation.

이루어질 수 있다. 플레어 배출 시나리오의 모사를 위해, 먼저 에탄 분리탑의 모델을 정상 운전 상태로 만들었다. 그 후, Dynsim 5.0에 내장된 시나리오 기능을 이용하여 플레어 배출 시나리오를 구현하였다. 그 결과는 Fig. 4~7에 나타내었다.

LPF 및 condenser duty loss의 경우, 분리탑의 온도 제어기에 의해서 reboiler로 공급되는 증기의 유량이 제어되기 때문에, 해당 시나리오가 발생하더라도 분리탑의 압력이 PSV의 설정값인 3600 kPa를 넘지 않는 것을 Fig. 4 및 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다. Abnormal heat input의 경우에는 시나리오 발생 초기에는 reboiler로 공급되는 증기의 유량이 순간적으로 증가하기 때문에 압력이 급격히 상승하나, 이후 환류 흐름의 증가로 분리탑의 압력이 3120 kPa 정도에서 새로운 평형 상태를 유지하는 것을 Fig. 7을 통해 알 수 있다. 하지만, vapor blocked outlet의 경우는 탑 상부에 vapor가 빠르게 누적되므로 분리

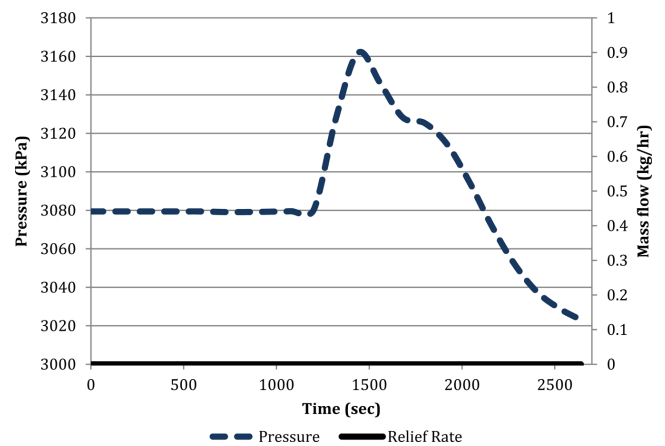


Fig. 5. The flare load estimation result for the condenser duty loss scenario using dynamic simulation.

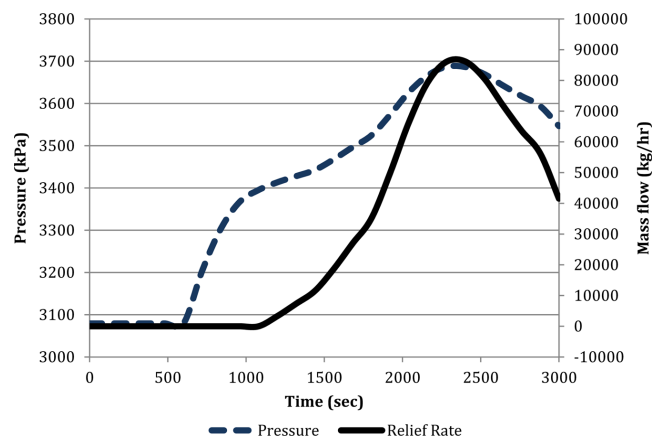


Fig. 6. The flare load estimation result for the vapor outlet blocked scenario using dynamic simulation.

탑의 압력이 급격히 상승, 결국 PSV를 통해 vapor가 relief가 된다. Vapor가 충분히 relief가 되면, 분리탑의 온도 제어기가 reboiler로 공급되는 증기의 유량을 줄이는 방향으로 작동하게 되므로 분리탑의 압력이 서서히 감소함을 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

정상상태 및 몇 물질 수치식을 이용한 방법과 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 방법의 차이를 명확히 하기 위해 각각의 결과 값을 Table 5에 나타내었다. 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 플레어 용량 예측 결과, 최악의 시나리오는 Vapor Outlet Blocked이며

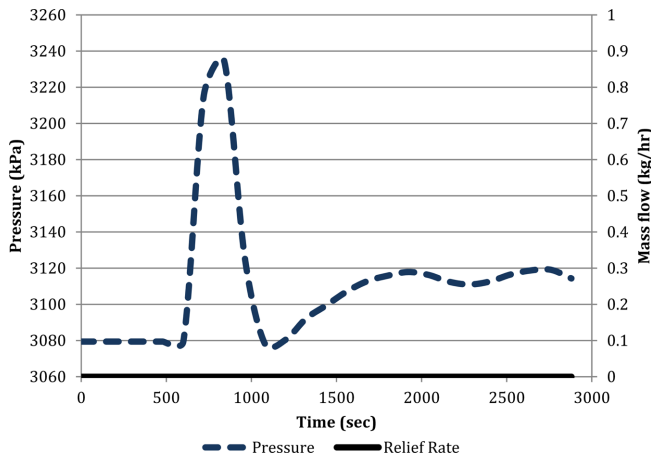


Fig. 7. The flare load estimation result for the abnormal heat input scenario using dynamic simulation.

Table 5. Results summary with respect to flare load estimation methods

Relief Scenario	Dynamic Simulation	The heat and material balance
Local Power Failure	0 kg/hr	198,300 kg/hr
Condenser Duty Loss	0 kg/hr	157,674 kg/hr
Vapor Outlet Blocked	86,195 kg/hr	90,925 kg/hr
Abnormal Heat Input	0 kg/hr	51,600 kg/hr

플레어 배출량은 86,195 kg/hr이다. 나머지 시나리오에서는 에탄 분리탑의 압력은 상승했지만, 플레어 배출이 이루어지지는 않았다. 반면, 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 플레어 용량 예측에서 최악의 시나리오는 LPP이며, 플레어 배출량은 198,300 kg/hr이다.

Table 5를 통해, 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용하여 플레어 배출량을 계산한 결과가 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 결과보다 훨씬 큰 계산 값이 나왔음을 알 수 있다. 그 이유는 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 방법에는 많은 보수적인 가정들이 이용되기 때문이다. 예를 들면, 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 계산에서는 제어 시스템의 동작은 플레어 배출량 계산 시 고려하지 않는다. 따라서, 분리탑 내부의 온도가 상승해도 reboiler를 통한 열의 공급은 그대로 유지된다고 가정하기 때문에 플레어 배출량이 많이 계산될 수 밖에 없다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 사용되던 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 플레어 시스템 디자인 절차 대신, 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 새로운 플레어 시스템 디자인 절차를 제안하였고, 절차의 효용성을 검증하기 위해 에탄 분리탑의 플레어 배출량 예측을 제안된 디자인 절차에 따라 수행하였다. 그 결과 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용하여 플레어 배출 시나리오에 따른 플레어 배출량 예측을 성공적으로 수행할 수 있음을 증명하였다. 그뿐만 아니라, 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 플레어 배출량 예측이 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 기존의 방법보다 더 적은 예측값을 나타냄을 알 수 있었다.

그 이유는 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 플레어 배출량 예측이 기존에는 반영하지 못하는 제어 시스템의 동작 및 분리탑 내부의 운전 조건 변화 등 다양한 인자를 고려할 수 있기 때문이다. 플

레어 배출은 기본적으로 비정상상태에서 발생하는 현상이다. 따라서, 비정상상태를 모사할 수 있는 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용하여 플레어 배출량을 예측하는 것이 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 기존의 방법보다 더 정확할 수 밖에 없다.

플레어 배출 상황 발생 시, 제어기의 동작이 어떻게 이루어질지 알 수 없던 과거에는 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 방법이 매우 유용했음이 틀림없다. 하지만, 지금은 컴퓨터 및 공정제어가 포함된 동적 모사 기술의 발전으로 플레어 배출 상황 발생 시 제어기의 동작이 어떻게 이루어질지 예측할 수 있다. 연구 결과에서 보듯이, 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 플레어 배출량 계산 결과, 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 결과에 비해 약 57% 가량 줄어든 값을 얻을 수 있었다.

결국, 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 플레어 배출량 계산은 설계 엔지니어가 기존에는 고려할 수 없던 많은 요소들을 계산에 반영함으로써 좀 더 합리적이고 정교한 결과 값을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 비록 정상상태 열 및 물질 수지식을 이용한 방법에 비해 시간 소모는 많으나, 그 결과로 불필요하게 플레어 시스템이 커지는 것을 막는다면 이는 경제적으로 훨씬 이득이 될 수 있다. 다행스럽게도 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 플레어 배출량 계산에 대해서 미국석유협회도 API STD 521을 통해 그 가능성을 인정하고 있다. 비록, 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 플레어 시스템 설계가 시간 소모가 기존 방법에 비해 크고 모델링에 숙련된 인력이 필요하다는 단점이 있지만, 본 연구 결과에서 보듯이 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용하여 플레어 배출량 계산 결과를 줄일 수 있는 여지가 많다.

하지만 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 본 연구의 결과는 실험 등을 통해 충분히 검증된 뒤에 설계에 적용되어야 한다. 앞에서 언급하였듯이, 플레어 시스템은 화학 공장의 사고를 막을 수 있는 대표적인 물리적 보호 장치로 화학 공장의 안전에 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 공정제어가 포함된 동적 모사를 이용한 결과만을 가지고 플레어 시스템을 지나치게 작게 설계한다면, 해당 공정의 안전에 큰 지장을 초래할 수 있다. 그러므로 본 연구의 내용을 실험으로 뒷받침할 수 있는 후속 연구가 이루어진다면, 그 결과는 공정 설계 엔지니어에게 매우 유용할 것이다.

감 사

이 논문은 서울대학교 화학생물공학부 윤인섭 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. 그 동안 후학 양성을 위해서 노고를 아끼지 않으신 교수님의 은혜에 감사 드립니다.

References

1. Jang, N., Dan, S., Shin, D., Lee, G. and Yoon, E. S., "The Role of Process Systems Engineering for Sustainability in the Chemical Industries," *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**(2), 221-225(2013).
2. API, *Pressure-relieving and Depressuring Systems*, 5th ed., API Publishing Services, Washington, D. C.(2008).
3. Mofrad, S. R., "Tower Pressure Relief Calculation," *Hydrocarbon Processing*, **87**(9), 149-159(2008).
4. Smith, D. and Burgess, J., "Relief Valve and Flare Action Items: What Plant Engineers Should Know," *Hydrocarbon Processing*,

- 91(11), 41-46(2012).
5. Cassata, J. R., Dasgupta, S. and Gandhi, S. L., "Modeling of Tower Relief Dynamics," *Hydrocarbon Processing*, **72**(10), 71-76(1993).
6. Luyben, W. L., *Plantwide dynamic simulators in chemical processing and control*, Marcel Dekker, Inc., New York, NY(2002).
7. Lee, C. J., Lim, Y. and Han, C., "Operational Strategy to Minimize Operating Costs in Liquefied Natural Gas Receiving Terminals Using Dynamic Simulation," *Korean J. Chem. Eng.*, **29**(4), 444-451(2012).
8. Patel, V., Feng, J., Dasgupta, S., Ramdoss, P. and Wu, J., "Application of Dynamic Simulation in the Design, Operation, and Troubleshooting of Compressor System," The thirty-sixth turbomachinery symposium, September, Houston, TX(2007).
9. Patel, V., Feng, J., Dasgupta, S. and Kramer, J., "Use of Dynamic Simulation in the Design of Ethylene Plants," The 20th Ethylene Producers' Conference, April, New Orleans, LA(2008).
10. Singh, A., Li, K., Lou, H. H., Hopper, J. R., Golwala, H., Ghumare, S. and Kelly, T., "Flare Minimisation Via Dynamic Simulation," *Int. J. Environment and Pollution*, **29**, 19-29(2007).
11. Xu, Q., Yang, X., Liu, C., Li, K., Lou, H. H. and Gossage, J. L., "Chemical Plant Flare Minimization via Plantwide Dynamic Simulation," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48**, 3505-3512(2009).
12. Crwol, D. A. and Louvar, J. F., *Chemical process safety : Fundamentals with applications*, 2nd ed., Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ(2004).
13. CCPS, *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*, 2nd ed., American Institute of Chemical Engineers, New York, NY(2000).
14. GPSA, *Engineering Data Book*, 12th ed., Gas Processors Suppliers Association, Tulsa, OK(2004).