

LNG 탱크의 위험도 평가 및 분석

김명배[†] · 도규형

한국기계연구원

(2017년 9월 7일 접수, 2017년 10월 27일 수정, 2017년 10월 31일 채택)

Hazard Evaluation And Analysis For LNG Storage Tank

Myungbae Kim[†] · Kyu Hyung Do

Korea Institute of Machinery & Materials

(Received 7 September 2017, Revised 27 October 2017, Accepted 31 October 2017)

요 약

주요어 : 위험도, 위험도및작동성, 고장체계분석, 위해도, 정량적위해도평가

Abstract - Hazard evaluation and FTA are performed as the first and the second step of QRA for a LNG storage tank. Hazards are identified using HAZOP. Each segment of the system is examined, and we list all possible deviations from normal operating conditions and how they might occur. The consequences on the process are assessed, and the means available to detect and correct the deviations are reviewed. The FTA is carried out to analyse the hazards identified from the HAZOP study. A top event is selected to be release of LNG. Then all combinations of individual failures that can lead to the hazardous event are shown in the logical format of the fault tree system.

Key words : Hazard, HAZOP, FTA, Risk, QRA

1. 서론

플랜트를 설계할 때 그 플랜트가 가질 수 있는 위험을 평가하여 설계에 반영하는 일은 상세설계 전단계인 기본설계나 FEED(Front End Engineering Design) 단계에서 이루어진다. 이 위험을 파악하고 분석해서 평가

하는 일을 정량적위해도평가(QRA, Quantitative Risk Assessment)라고 한다. 이 업무를 수행하기 위하여는 해당 플랜트가 가지는 위해도(Risk)를 먼저 정의해야 한다. 위해도는 플랜트의 특성에 따라 다르게 되지만 보통 인명 손실, 재산손실, 생산차질에 의한 손실 등으로 구분된다.

특히 인명 손실에 대하여는 여러 나라들이 관련 규정을 가지고 있으며, 1988년 해양플랜트 Piper Alpha⁽¹⁾에서 발생된 화재 폭발로 인한 대규모의 사망은 여러

[†]To whom corresponding should be addressed.

TEL : (042)868-7340 E-mail : mbkim@kimm.re.kr

가지 문제점을 시사한 바 있다. 첫째는 기업소유의 재산인 플랜트에서 발생한 문제이지만 대규모의 인명사고가 발생되었기 때문에 사회문제 나아가서는 국가의 문제가 된다는 것이다. 둘째는 플랜트가 감당해야 될 위험도에 대한 정량적인 기준이 필요하다는 것이다. 그 때까지는 대략 ALARP(As Low As Reasonably Practicable)이라는 개념을 적용하여 플랜트의 위험도가 합리적으로 적용 가능한 수준에서 낮아야 한다는 다소 추상적이고 정성적인 개념을 적용하고 있었다. 이 사고 이후 인명사고에 대하여 구체적인 기준이 해양플랜트에 마련되었다.

추가로 정량화 되어야 할 플랜트의 위험도로 재산손실과 생산 손실이 있는데, 보통 석유자원을 생산하는 플랜트에서는 생산손실의 비중이 높다. 플랜트의 종류에 따라 재산 손실이 큰 경우도 있을 것이다. 이러한 위험도를 계산하기 위하여는 대략 3단계의 절차가 필요하다.

1단계에서는 플랜트의 위험요소들을 파악하여 평가하는 것인데 보통 Hazard Identification이라고 한다. 여기에는 What-IF, HAZOP(Hazard and Operability), FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)등 체계화된 많은 방법들이 존재한다⁽²⁾. 위험요소의 평가를 통하여 어떤 기기의 고장 또는 오작동이 사고로 연결될 수 있는지 분석한다. 대부분의 에너지 플랜트에서는 인화성 유체의 누출(Leak or Release)을 사고의 시작으로 간주한다. 따라서 여기에서는 주로 인화성 유체가 누출되는 원인을 분석하고 방지할 수 있는 방법이 모색된다. 보통 이 단계를 플랜트의 안전설계라고 할 수도 있지만, 가장 기초적인 플랜트 안전에 관한 정성적인 설계로 보아야 한다. 플랜트의 안전을 위하여 특정한 안전기기의 부착을 권고할 수 있다.

2단계에서는 사고의 시작인 사건(Event)의 발생빈도와 사고(화재, 폭발, 누출)의 종류별 발생빈도를 계산한다. 고장체계분석(FTA, Fault Tree Analysis) 방법을 이용하여 플랜트의 각 요소의 고장이 어떻게 인화성 물질의 누출로 귀결되는지를 분석한다. 이 과정에서 각 요소 기기의 고장률 데이터가 필요하며, 이를 기반으로 누출 사건의 발생빈도를 계산하게 된다. 사건체계분석(ETA, Event Tree Analysis)에서는 누출사건이 화재나 폭발과 같은 사고(Accident)로 이어지는 과정을 분석한다. 고장체계분석 결과와 사건체계분석 결과를 연계하면 최종적으로 각 사고의 빈도를 계산할 수 있게 된다.

3단계는 각 사고의 결과(Consequence)로 유발되는 피해의 분석이다. 피해 대상에 따라 손상모델링(Damage modelling)이 필요하고 여러 가지 종류의 공학적 해석이 필요하다. 계산된 사고결과와 2단계에서 계산된 발생빈도를 기반으로 위험도(Risk)를 계산할 수 있다. 보통 인명피해에 대한 위험도는 개인을 기준으로 하는 IR (Individual Risk) 과 집단을 기준으로 하는 F-N (Fatality - frequency) 곡선이 있다. 재산손실이나 생산손실에 관한 위험도는 단위시간당 피해 금액으로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 대상 플랜트를 LNG 저장탱크로 하여 HAZOP 방법을 이용한 위험도 분석과 FTA를 이용하여 도출된 위험도의 평가를 수행하였다. 아직까지 연구가 진행되고 있기 때문에 ETA 부분은 본 연구에 포함되지 않았다.

2. 위험도 분석 및 평가

대상 플랜트인 LNG 저장 탱크의 간략한 PFD(Process Flow Diagram)를 Fig.1에 도시 한다. 전체 플랜트는 LNG 펌프 및 열교환기의 성능을 평가하는 시스템이며, 본 연구의 대상은 그 중 일부인 저장 탱크이다. 따라서 이 탱크의 기능은 적절한 양의 LNG를 펌프를 시험하는 test loop로 보내는 것이다. Test loop에도 탱크 기능을 가지는 circulation drum이 있어 펌프의 성능시험을 수행할 수 있게 된다. 저장탱크내의 가압된 LNG는 밸브 V-2를 통하여 circulation drum까지 이송 된다. 저장탱크의 가압은 열교환기인 build-up vaporizer를 이용하여 LNG를 기화시키므로써 이루어진다. 저장탱크내의 압력을 일정 수준으로 유지하기 위하여 제어밸브 PV-1 및 PV-2가 설치되어 있고, 이들의 개도는 탱크내의 압력을 근거로 제어하는 PC(Pressure Control)에 의해서 조정 된다. 탱크의 액면 높이를 측정하고 경보를 발령하기 위하여 LIA(Level Indication Alarm)가 있으며, 트럭으로부터 LNG를 하역하기 위한 밸브 V-1과 드레인용을 위한 밸브 V-3가 있다. 대상 플랜트가 가지는 위험을 분석하는 위험도 분석은 기본적으로는 정성적인 방법 이다. 여러 가지 방법이 존재하고 있지만 여기에서는 HAZOP 방법을 이용한다. 이 방법의 장점은 타 방법들과 달리 플랜트의 공정 변수(process parameter)인 압력, 온도, 레벨, 농도 등을 검토 대상으로 하는 것이다. 따라서 기기의 종류에 따라 검토 대상 공정변수의 종류가 달라질 수 있다.

LNG 저장탱크는 액체와 기체 가연성 물질을 보관하는 용기이므로 검토 대상인 공정변수는 온도, 압력, 레벨, 농도 이다. 분석결과를 Table 1 과 2에 정리 하였다. 공정변수가 정상적인 값으로부터 변화(deviation)가 있을 때 그 원인(cause), 결과(consequence), 변화를 제어할 조치(safeguards), 추가되는 안전조치(actions) 들이 표의 형태로 정리되어 있다. 각각의 Table에서 *로 표시된 사건은 사건빈도 또는 확률이 매우 낮거나, 그 영향이 크지 않아 차후의 해석에서는 고려되지 않는다. 앞에서 언급한 바와 같이 가연성 물질을 취급하는 플랜트에서의 사고는 대부분 누출로부터 시작된다. 즉, 사고의 시작인 사건(event)으로 볼 수 있다. HAZOP 분석 결과로부터 LNG 누출의 원인이 되는 사건들을

정리할 수 있는데, 상호 독립적인(independent) 사건들만을 모아 이를 기본사건(basic event)으로 정의한다. 이러한 기본사건들로부터 LNG 누출에 이르는 경로를

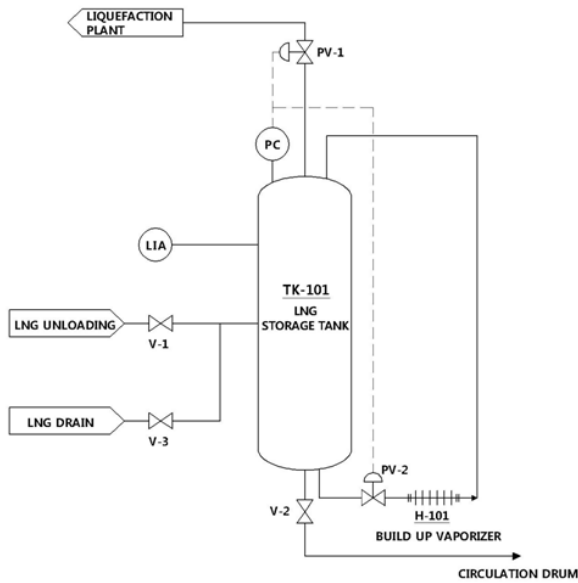


Fig. 1. PFD of the LNG storage tank

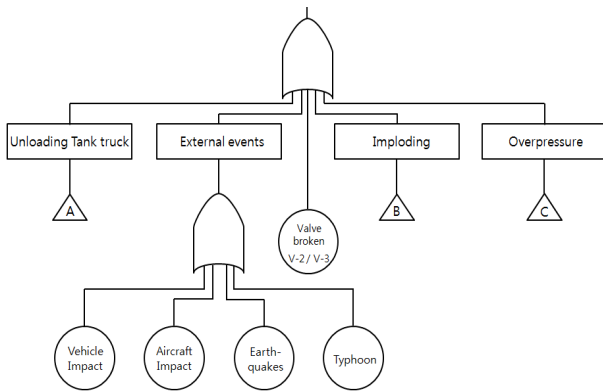


Fig. 2. FTA diagram

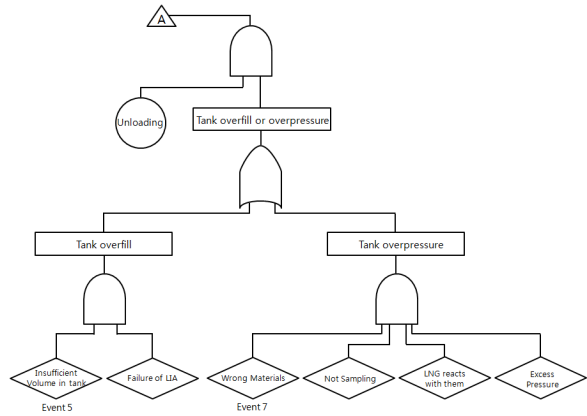


Fig. 3. FTA diagram for unloading tank truck

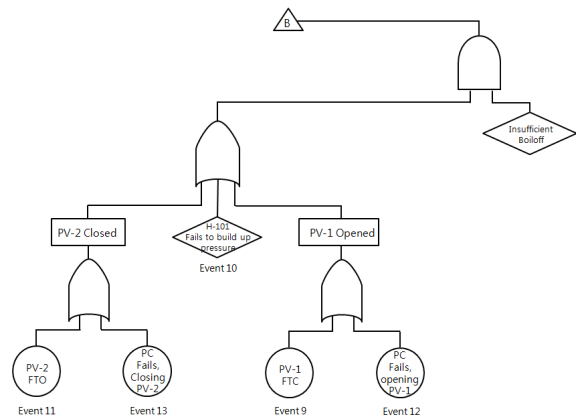


Fig. 4. FTA diagram for tank imploding

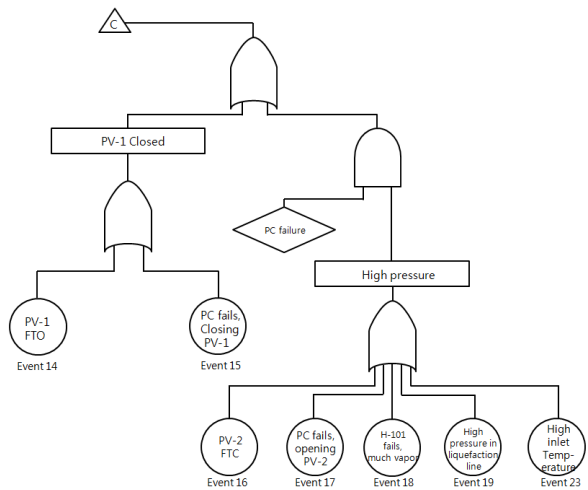


Fig. 5. FTA diagram for tank overpressure

체계적으로 분석하고 누출 발생빈도를 계산하기 위하여 고장체계분석 방법이 사용된다. 분석결과는 Fig.2와 같이 논리구조를 갖는 도표 형식으로 정리된다. 위의 그림에서와 같이 LNG 누출의 주요 원인은 LNG 탱크트럭의 하역, 외부사건, 밸브 V-2/V-3의 파손, 탱크내 저압에 의한 내부 폭발(imploding), 탱크 과압 등이다. 이 5개의 사건들은 누출을 발생시키기 위해서 상호간에 OR의 논리구조를 갖게 된다. 이 사건들은

밸브의 파손을 제외하면 기본사건이 아니기 때문에 하위에 여러 사건들을 포함하게 되며, 중간사건(intermediate event)이 된다. 외부사건의 경우 차량 충돌, 항공기 충돌, 지진, 태풍 등 4개의 기본사건으로 구성되며, 4개의 기본사건의 관계는 OR 구조임을 알 수 있다. 다른 중간사건들에 대한 고장체계분석 결과가 Fig.3-5에 HAZOP 분석에서 얻은 기본사건과 함께 표시되어 있다.

Table 1. HAZOP study based on level and concentration

Deviation	Cause	Consequences	Safeguards	Actions/Queries
LEVEL				
Less	*1. Tank runs dry	Low level at circulation drum	LIA	
	2. V-3 open or broken	LNG released	LIA	
	3. V-2 open or broken	LNG released	LIA	
	4. External events	Tank rupture	LIA	External events to cause ruptures?
More	5. Unload too much from tank truck	Tank overfills	LIA	Consider high-high-level shut off
		LNG released		
	*6. Reverse flow from process	Tank overfills	LIA	Consider FSV.
		LNG released		
COMPOSITION				
Other than	7. Wrong materials	Possible reaction		Consider sampling before unloading.
		Possible tank rupture		
As well as	*8. Impurity in LNG	If volatile, possible overpressure		Possible impurities? Suitable unloading connections?

Table 2. HAZOP study based on pressure

Deviation	Cause	Consequences	Safeguards	Actions/Queries
PRESSURE				
Less	9. PV-1 fails to close	Tank implodes	PC	Consider vacuum-break valve.
		LNG released		
	10. H-101 fails to build up pressure	Tank implodes	PC	Consider PAL.
		LNG released		
	11. PV-2 fails to open	Tank implodes	PC	Consider PAL.
		LNG released		
	12. PC fails, opening PV-1	Tank implodes	PC	Consider PAL.
		LNG released		
	13. PC fails, closing PV-2	Tank implodes	PC	Consider PAL.
		LNG released		
More	14. PV-1 fails to open	Tank rupture/Release	PC	Consider PSV.
	15. PC fails, closing PV-1	Tank rupture/Release	PC	Consider PAH.
	16. PV-2 fails to close	Tank rupture/Release	PC	Consider PAH.
	17. PC fails, opening PV-2	Tank rupture/Release	PC	Consider PAH.
	18. H-101 fails, much vapor	Tank rupture/Release	PC	Consider PAH.
	19. High pressure in Liquefaction line	LNG released	PC	Consider PSV.
	*20. Volatile impurity in feed	LNG released	PC	Consider PAH.

Table 3. HAZOP study based on temperature

Deviation	Cause	Consequences	Safeguards	Actions/Queries
Temperature				
Less	*21. Inlet temperature is colder than normal	Possible vacuum		Temperature limits of tank?
		Thermal stress on tank		
	*22. Low tank pressure	Possible vacuum		
		Thermal stress on tank		
More	23. Inlet temperature is hotter than normal	LNG released	PC	Consider PAH.
		Thermal stress on tank		
	*24. External fire	Tank fails	Fire protection	Fire protection capabilities?
		LNG released		

3. 결론

LNG 저장탱크에 대한 위험도를 HAZOP 방법을 이용하여 분석하였다. 분석결과 24개의 사건들을 도출하여 사건의 결과, 안전조치에 대한 내용을 정리하였다. 이 사건들로부터 보편적인 플랜트 사고의 시작인 누출의 원인이 되는 기본사건 17개를 도출 하였다. 이러한 기본사건들로부터 누출에 이르는 과정을 체계화시키기 위하여 고장체계분석을 수행하였다. 그 결과 누출의 원인이 5개의 중간사건으로 구성된다는 것을 알 수 있었다. 사실 이 중간사건은 분석자의 의도에 따라 달라지기 때문에 논리적으로 가장 타당한 체계를 구성하는 것이 원칙이다. 이러한 분석체계로부터 사고체계가 확립되고, 사고해석에 필요한 사고 시나리오가 구성되기 때문에 가능한한 명료하고, 기본사건들의 중복을 배제할 수 있는 체계가 필요하다. 여기에서 구성된 고장체계분석을 이용하여 누출의 발생빈도를 계산하기 위하여는 각 사건의 발생빈도를 우선 계산하여야 한다. 기본사건의 경우에는 보통 고장률(failure rate)이 주어지며, 이로부터 중간사건의 발생빈도를 계산하게 된다.

후기

본 연구는 지식경제부 연구사업의 일환으로 산업기술연구회의 지원을 받아 수행 중인 “대형기계설비 안전기술 개발” 연구사업의 결과이며 관련 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Jan Erik Vinnem, 2011, "Offshore Risk Assessment; 2nd Edition", Springer, pp.91.
2. Center for Chemical Process Safety, 2008, "Guidelines for hazard evaluation procedures; Third Edition", A JOHN WILEY & SONS, New York, pp.71-173.