

LNG 시험 플랜트의 정량적 위해도 평가를 위한 화재 및 폭발사고 해석

한용식* · 김명배*** · 도규형** · 김태훈** · 최병일**

*한국기계연구원 에너지플랜트안전연구실

**과학기술연합대학원대학교

Fire and Explosion Analysis for Quantitative Risk Assessment on LNG Test Plant

Yong Shik Han*, Myungbae Kim***, Kyu Hyung Do**, Tae Hoon Kim** and Byungil Choi**

*Department of Plant Safety Technology, Korea Institute of Machinery & Materials

**Korea University of Science and Technology

(Received 22 October 2014, Received in revised form 10 February 2015, Accepted 11 February 2015)

ABSTRACT

Fire and explosion analysis are performed for the quantitative risk assessment on the LNG test plant. From the analysis for a case of fire due to large leakage of LNG from the tank, it is obtained that loss of lives can be occurred within the radius of 60 m from the fire origin. Specially, wind can extend the extent of damage. Because the LNG test plant is not enclosed, the explosion overpressure is less than 6 kPa and the explosion has little effect on the integrity of the LNG test plant.

Key Words : Hazard, Risk, Fire, Explosion, QRA

1. 서론

원유나 가스를 생산하는 플랜트나 원유를 원료로 하는 석유화학 플랜트에는 액상의 가연성이나 유독성 물질이 존재하게 된다. 일반적인 경우 이 물질들은 공정장치(process equipment)나 배관 내에 있으면서 여러 가지 공정을 거치게 된다. 그런데 여러 가지 이유로 이러한 물질이 대기 중으로 누출되면 해당 플랜트는 여러 위험에 직면하게 된다. 기체 상태의 가연성 물질이 분출되면 제트화재(jet fire), flash 화재, fire ball이나 증기운 폭발(vapor cloud explosion)의 원인이 된다. 액체 상태로 누출되면 풀화재(pool fire)와 증발된 가스에 의한 화재 및 폭발의 원인이 된다.

플랜트가 직면하게 되는 이러한 다양한 위험에 대한 정량적인 분석을 정량적 위해도 평가(Quantitative Risk Assessment)라 하며 보통 플랜트의 기본설계 또

는 FEED(Front End Engineering Design) 단계에서 수행된다. 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 발생한 화재 폭발로 인한 대규모의 사망은 여러 가지 문제점을 시사한 바 있다. 보통 석유자원을 생산하는 플랜트에서는 생산 손실의 비중이 높지만, 플랜트의 종류에 따라 재산 손실이 큰 경우도 있다. 이러한 위해도를 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.

† Corresponding Author, mbkim@kimm.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

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 LNG 시험 플랜트에 대한 정량적 위험도 분석을 위한 화재 및 폭발 사고 해석을 수행한다. 이를 위하여 화재 시나리오와 폭발 시나리오를 구성하고 CFD 기법을 이용하여, 화재는 비상용 코드인 FDS(Fire Dynamic Simulator)[3,4]를, 폭발은 상용코드인 FLACS[5]를 이용하여 해석을 수행한 다음 사고피해에 관한 분석을 실시한다.

FDS는 미국의 NIST에서 개발된 CFD 기반의 화재해석 프로그램이다. 난류에 대한 해석기법은 LES(Large Eddy Simulation) 모델을 사용하고 복사열전달에는 narrow band model(RadCal)을, 화재 연소 모델은 혼합분율(Mixture fraction)모델을 사용하고 있

다. FLACS는 난류모델로 표준 k-ε 모델을 사용하며, 폭발은 난류 연소속도를 가지는 화염편의 조합으로 가정한다. 난류연소속도는 다양한 실험 결과를 토대로 한 Bray[6]의 경험식을 사용한다.

FDS나 FLACS가 해석하고자 하는 주요 대상은 대형 빌딩이나 플랜트 설비에서의 화재 폭발 현상으로 해석대상 공간의 크기가 매우 커서 상기한 유동 및 연소 모델을 직접적으로 적용하기 어렵다. 따라서 이들 프로그램은 넓은 그리드에 의한 영향을 보정하기 위해 sub-grid 모델(FDS: Smagorinsky 모델, FLACS: β 모델)을 채용하고 있다.

2. 해석 대상 및 조건

2.1. 해석 대상

이 시험 시설은 LNG 펌프, 밸브 및 열교환기 등에 대한 성능시험을 수행하기 위한 플랜트이며, LNG 저장탱크, 순환 드럼, LNG 펌프 시험 설비 등과 제어실로 구성되어 있다. Fig. 1에 시험시설의 개략도를 나타내었다.

해석공간은 110 m (W) × 110 m (D) × 50 m (H)이고, 화재 및 폭발 해석 모두 폭 1 m 균일 그리드를 사용하였다. 그리드 간격은 해석의 주요 관심사항인 LNG 탱크에서의 복사열유속과 과압(over pressure)의 값에 대한 민감도 평가를 통해 결정되었다.

2.2. 화재 및 폭발 시나리오

사건체계분석 결과 LNG 저장 탱크와 펌프시험 설비에서 누출된 가연성 물질에 의한 화재 및 폭발이 가장 위험하기 때문에 이를 기반으로 하였다. 누출 위치는 LNG가 대량으로 누출될 수 있는 곳으로 LNG 저장탱크와 LNG펌프를 테스트하는 공간이다. 일반적으로 폭발의 피해가 큰 곳은 밀폐된 공간이나 복잡한 구조물로 인하여 설비가 밀집되어 있는 공간 이

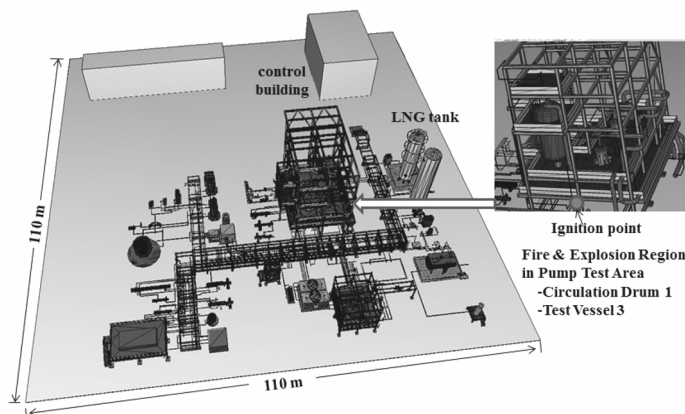


Fig. 1. Layout of the LNG test facility and the ignition location.

다. LNG 탱크는 주변이 막혀있지 않고, 누출시 LNG의 퍼짐을 막기 위한 Dike가 탱크 주변에 설치되어 있다. 따라서 본 해석에서는 대량의 LNG가 보관되는 Circulation Drum과 Pump Test Vessel이 위치하고, 복잡한 배관과 철골 구조물로 폭발시 큰 피해가 예측되는 펌프 시험장소를 화재 및 폭발의 위치로 잡았다.

본 연구에서는 풀화재를 대상으로 하고, 크기는 펌프시험공간 바닥면적 16 m×20 m에 해당하는 310 MW급 화재와 LNG 탱크의 Dike 면적과 같은 10 m×10 m에 해당하는 98 MW급 화재이다.

펌프 시험공간 역시 벽으로 막힌 공간이 아니기 때문에 누출된 LNG가 폭발 가연한계를 가지고 직접 연소되기에는 어려운 구조이다. 그러나 최악의 상황을 해석하기 위하여 펌프시험공간의 2층까지 당량비 1.05의 CH₄ + Air 혼합가스가 존재하는 것으로 삼

았다. 혼합 가스의 전체 부피는 16 m×20 m×7.5 m이다. 점화위치는 설비 공간의 하단부이며 지상으로 부터 3 m 지점으로 하였다.

3. 해석결과

3.1. 화재사고 해석결과

화재사고로 인한 위험 요인을 정량화하기 위하여 화염으로부터 방출되는 복사 열유속이 고려되어 왔다. 사람과 시설에 대한 손상여부를 평가하기 위한 임계 열유속 값은 Table 1과 같다.

해석공간내의 각 물체 표면에서의 총 입사 열유속 (total incident heat flux)과 단면에서의 공간 온도 분포를 Figs. 2~4에 도시하였다.

98 MW와 310 MW 화재는 일반적인 화재와 비교했을 때 매우 큰 화재이다. 그러므로 화재가 발생한 공간은 완전히 파괴된다. Fig. 2로부터 바람이 없는 98 MW 화재의 경우 150℃ 이상의 고온 영역은 인접 설비로까지 확대되지 않으나, 310 MW 화재의 경우는 인접한 공간까지 확대되는 것을 Fig. 3과 4에서 알 수 있다. 바람이 있는 310 MW 화재의 경우에는 인접한 LNG Tank까지 확대됨을 알 수 있다. 인체에 물질이 잡히는 수준의 화상을 유발하는 4 KW/m² 수준의 열복사는, 98 MW 화재의 경우 화점 주변 반경 약 20 m, 310 MW 화재의 경우 화점 주변 반경 약 60 m에 이른다. 특히 바람이 부는 경우 인접한 LNG Tank는 물론 주변 건물에 까지 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

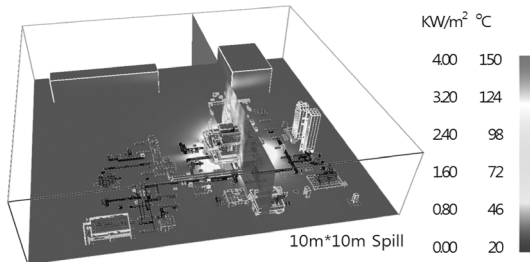


Fig. 2. 98 MW fire with no wind.

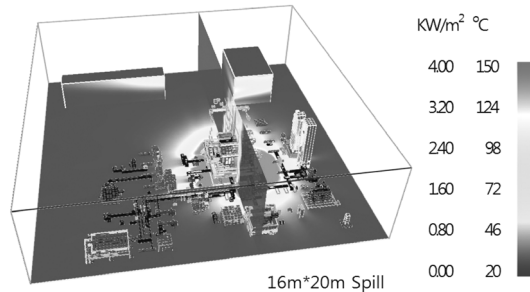


Fig. 3. 310 MW fire with no wind.

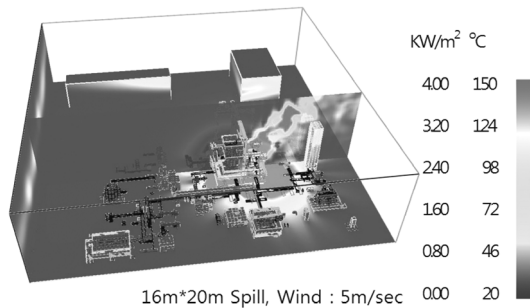
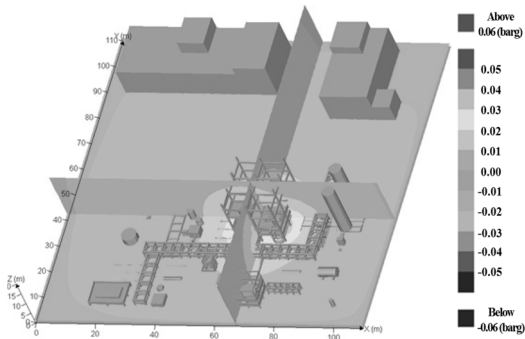


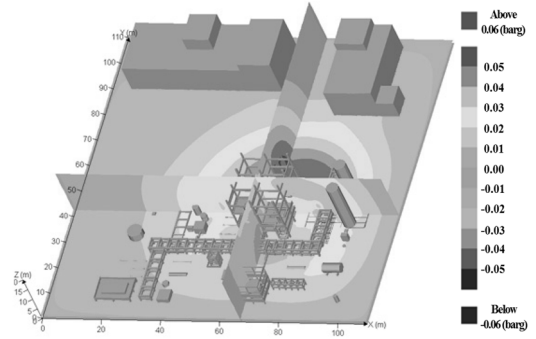
Fig. 4. 310 MW fire with wind velocity of 5 m/sec.

Table 1. Critical heat flux[7]

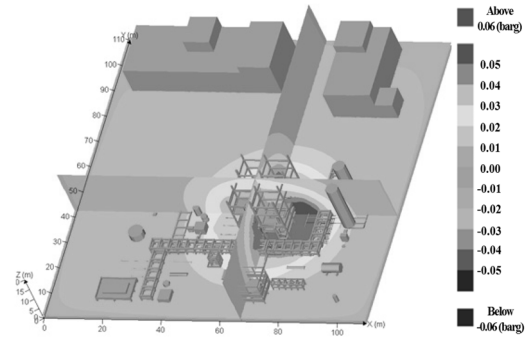
Incident flux (kW/m ²)	Type of damage caused	
	Damage to equipment	Exposure to people
37.5	Damage to process equipment	100% lethality in 1 min 1% lethality in 10 s
25.0	Minimum energy to ignite wood at long exposure without a flame	10% lethality in 1 min Significant injury in 10 s
12.5	Minimum energy to ignite wood with a flame; melts plastic tubing	1% lethality in 1 min First-degree burns in 10 s
4.0		Causes pain if duration is longer than 20 s, but blistering is unlikely
1.6		Causes no discomfort for long exposure



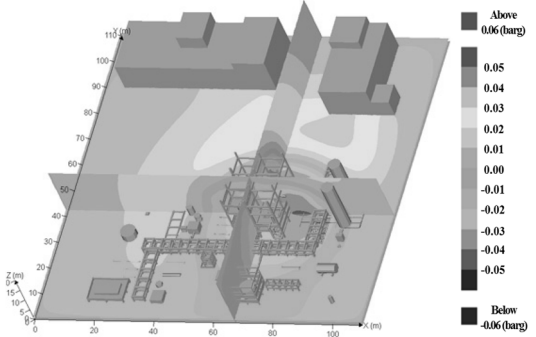
t = 0.925 sec



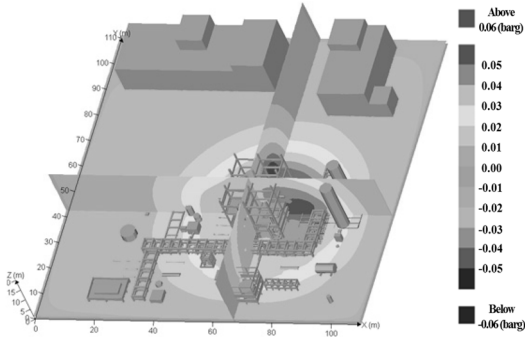
t = 1.054 sec



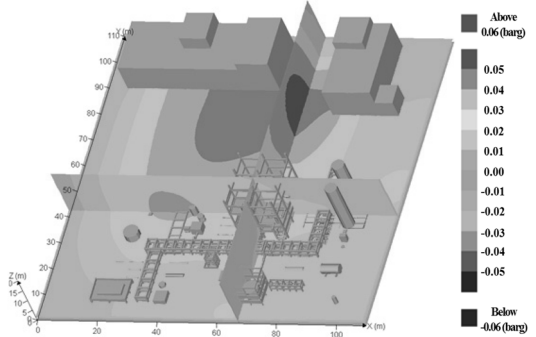
t = 0.985 sec



t = 1.091 sec



t = 1.022 sec



t = 1.250 sec

Fig. 5(a). Propagation of pressure wave with the scale of ± 6 kPa.

Fig. 5(b). Propagation of pressure wave with the scale of ± 6 kPa.

3.2. 증기운 폭발사고 해석결과

폭발사고로 인한 위험 요인을 정량화하기 위하여는 폭발에 의해 방출되는 압력파의 over pressure가 고려되어 왔다. 손상여부를 평가하기 위한 임계값은 Table 2와 같다.

시험공간은 밀폐된 곳이 아니기 때문에 점화 후 압력상승이 미미하여, 화염은 메탄의 층류 연소속도인 약 0.4 m/sec 정도의 느린 속도로 전파된다. 그러나 연소에 의한 가스의 팽창과 주변 설비들과의 간섭으로 인한 난류의 증가로 연소속도는 급격히 증가한다. 점화 후 약 0.9초부터 폭발 압력이 외부에 전

Table 2. Critical over pressure[7]

Overpressure (kPa)	Damage Levels
> 83	Total destruction
> 35	Heavy damage
> 17	Moderate damage
>3.5	Minor damage

파되고 그 이후의 폭발 압력파의 전파 모습을 Fig. 5에 나타내었다. 폭발가스의 양이 매우 많음에도 불구하고 공간이 밀폐되어 있지 않기 때문에 폭발 압력은 최고 약 6 kPa에 불과하다. 일반적으로 반 밀

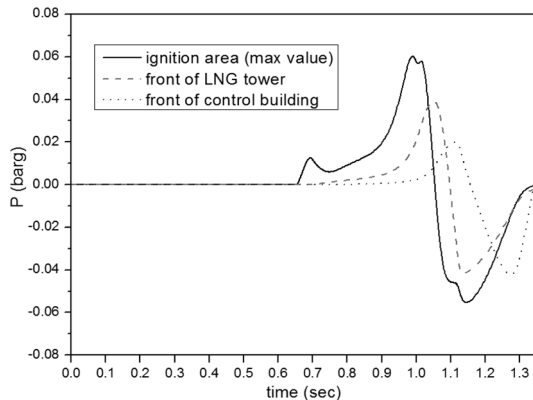


Fig. 6. Pressure wave at several locations (Refer to Fig. 1).

폐된 공간의 폭발의 경우 내부 폭발압력은 100 kPa 을 넘어선다. 따라서 폭발에 의한 손상은 무시할 수 있는 수준이다. Fig. 6은 주요 위치별 압력파의 파형이다.

4. 결론

가연 물질을 다루는 많은 플랜트에서의 일반적인 사고 형태는 누출에 의한 화재 및 폭발 사고이다. 본 연구에서는 LNG 펌프 및 밸브 등의 기기를 성능시험할 수 있는 시험설비에서 발생할 수 있는 화재 및 폭발 사고를 대상으로 하였다. LNG 누출에 의한 풀 화재와 증기운 폭발을 대상으로 하였다.

98 MW 화재의 경우 150°C 이상의 고온 영역은 인접 설비로까지 확대되지 않으나, 310 MW 화재의 경우는 인접한 공간까지 확대되고 있다. 바람이 있는 310 MW 화재의 경우에는 인접한 LNG Tank까지 확대됨을 알 수 있다. 인체에 물집이 잡히는 수준의 화상을 유발하는 4 kW/m² 수준의 열복사는, 98 MW 화재의 경우 화점 주변 반경 약 20 m, 310 MW 화재의 경우 화점 주변 반경 약 60 m에 이른다. 특히 바람이 부는 경우 인접한 LNG Tank는 물론 주변 건물에까지 영향을 미친다.

증기운 폭발에서의 화염은 메탄의 층류 연소속도인 약 0.4 m/sec 정도의 느린 속도로 전파된다. 그러나 연소에 의한 가스의 팽창과 주변 설비들과의 간섭으로 인한 난류의 증가로 연소속도는 급격히 증가한다. 점화 후 약 0.9초부터 폭발 압력이 외부에 전파된다. 폭발가스의 양이 매우 많음에도 불구하고 공간이 밀폐되어 있지 않기 때문에 폭발 압력은 최고 약 6 kPa에 불과하다. 따라서 폭발에 의한 손상은 무시할 수 있는 수준이다.

후기

이 논문은 2014년도 미래창조과학부재원으로 신기술융합형성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014048846).

참고문헌

- [1] Jan Erik Vinnem, Offshore Risk Assessment; 2nd Edition, Springer, 2011, 91-92.
- [2] Center for Chemical Process Safety, Guidelines for hazard evaluation procedures; Third Edition, A JOHN WILEY & SONS, New York, 2008, 71-173.
- [3] K.B. McGrattan (editor), Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010.
- [4] K.B. McGrattan (editor), Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide, NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010
- [5] FLACS v9.1, User's Manual, GexCon AS, 2011
- [6] Bray, K.N.C. (1990). Studies of the turbulent burning velocity, Proc. R. Soc. Lond. A, 431, 315-335.
- [7] Green Book, Methods for the determination of possible damage, CPR 16E, TNO, 1992