

LNG 재기화 공정에서 LNG 누출에 따른 화재 및 폭발사고의 피해영향 분석

이윤호^{*†}

* 목포해양대학교 기관·해양경찰학부

Analysis of the Impact of Fire and Explosion Accidents due to LNG Leaks in the LNG Re-gasification Process

Yoon-Ho Lee^{*†}

* Division of Marine Engineering & Coast Guard, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 본 연구에서는 LNG 공급계통시스템의 재기화 공정에서 배관 손상으로 인한 누출사고 발생시 LNG 성분 및 누출공의 크기에 따른 연소특성에 대한 피해범위를 산출하고, 피해영향을 해석하였다. LNG 성분에 따른 연소특성을 확인하기 위하여 7곳의 LNG 산지별 위험도를 확인한 결과 산지별 큰 차이를 보이지 않았으나, LNG 구성성분 중 메탄의 함유량이 많을수록 플래시화재 발생범위 및 증기운 폭발에 의한 과압이 발생하는 위험범위 그리고 제트화재 발생에 의한 열 복사량 피해영향이 다른 산지에 비해 비교적 낮음을 알 수 있었다. 또한 배관 누출공의 크기에 따라 누설, 파공, 파괴 3단계에 나누어 위험 범위 및 폭발에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 플래시화재로 인한 피해영향범위를 계산하고, 이에 따라 LNG 누출시 화재가능 위험범위를 확인했으며, 과압의 영향 및 복사열로부터의 피해범위를 예측할 수 있었다. 이를 통해 LNG 조성 및 배관 누출공의 크기가 화재 및 폭발에 미치는 영향을 예측할 수 있었다.

핵심어 : LNG 누출, 재기화 공정, 플래시화재, 제트화재, 증기운 폭발

Abstract : In this study, one calculated the range of damage to the combustion characteristics according to the composition of LNG and the size of leaking holes, and analyzed the damage effect in case of leakage accidents caused by pipe damage in the re-gasification process for the LNG supply system. In order to confirm the combustion characteristics according to LNG composition, there was no significant difference in the result of risk analysis by LNG-producing areas. However, the higher the methane content of the components, the lower the risk of flash fire, hazardous areas of overpressure due to explosion, and thermal radiation damage caused by jet fire. In addition, one investigated the effect of leakage, holes, and ruptures on the risk range and explosions according to the size of the pipe-leakage hole. Also, the influence of overpressure and the range of damage from radiant heat could be predicted. One confirmed the effect of LNG composition and pipe-leakage size on fire and explosion.

Key Words : LNG leakage, Re-gasification process, Flash fire, Jet fire, Vapor cloud explosion

1. 서 론

LNG(Liquefied Natural Gas)는 대기압 기준 약 -161℃의 끓는점을 가지며(Seo et al., 2017), 액화될 때에는 기체상태의 1/600정도로 부피가 감소하면서 저장의 용이성을 제공한다(Kumar et al., 2011). 또한 LNG를 선박의 연료로 사용하게 되면 전통적으로 사용되어온 해양 오일 연료와 비교했을 때,

산화물의 배출은 90%~95%, 이산화탄소의 배출은 20%~25%(Andersen et al., 2011), 질소산화물의 배출은 85%~90% 정도를 감소시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(Lee, 2015). 이에 따라 최근 산업용 보일러 등의 연료가 병커C유에서 대기 환경 문제 개선 등의 장점을 갖는 LNG로 많이 교체되어 가고 있는 실정이다. 이와 같이 LNG는 저장의 용이성 및 환경 문제 개선 등의 많은 장점을 가지고 있지만 배관에서 LNG가 외부로 누출시 인화성가스이기 때문에 폭발 분위기를 형성하게 되면서 점화원에 의한 화재나 폭발이 발생할 수 있

† yhlee@mmu.ac.kr, 061-240-7274

는 물질 중 하나이기도 하다. 산업안전연구원의 중대산업사고 사례집에 따르면 1973년 미국 뉴욕 주 스테이튼 섬에서 발생한 40명의 사망자를 낸 LNG에 의한 화재·폭발사고를 비롯하여, 선진 40개 국가에서의 화학물질별 중 대형 산업사고 발생건수도 타 물질에 비해 천연 또는 액화가스가 188건으로 가장 높다고 보고되었다(Industrial accident casebook, 2000). 또한 최근 중국의 텐진항 물류창고에서 발생한 화학물질 폭발사고는 1,000여명에 달하는 인명피해가 발생하기도 했다(Kim, 2016). 이와 같이 LNG를 연료로 사용하는 중에도 의도하지 않은 사고가 발생했을 경우 저온 노출에 의한 인명피해와 기기의 손상, 급격한 상 전이에 의한 비등 액체 팽창 증기 폭발(BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions), 화재 및 폭발 등의 위험 요소를 함께 가지고 있다(Lee, 2015).

이와 관련하여 LNG 화재 리스크 평가와 관련하여 다양한 연구들이 수행되고 있다. 관련된 연구를 살펴보면 Jung et al. (1998)은 파이프라인에서의 가스 누출 확산과 폭발 영향평가를 수행함으로써 개방공간에 대하여 확산범위, 복사열 강도를 예측하고 폭발과압이 인체에 미치는 영향에 대한 Probit 분석을 수행하였다. 그리고 Ha(1998)는 메탄 및 LNG 폭발 특성에 관한 연구를 통해 메탄의 폭발한계 온도 의존성과 LNG의 폭발한계 압력 의존성에 대한 새로운 추산식을 제시했다. Dan et al.(2014)은 LNG-FPSO Topside의 LNG 액화공정에서 화재 및 폭발에 관한 정량적 위험 분석을 하였으며, Jo(2017)는 밀폐공간에서 메탄 폭발사고의 최소 가스누출량을 예측하였다. 그리고 Lee(2015)는 액화천연가스 연료 선박의 연료 공급 장치 폭발 잠재 위험 분석을 통해 배관 누출공크기를 3가지 범주로 구분하고, 각 범주에 대한 누출 빈도를 추산하였다.

이와 같이 선박 및 해양시스템의 안전 분석 및 리스크 평가와 관련된 연구가 수행되어왔으나, 아직까지 LNG 공급계통시스템에서의 배관 누출에 대한 화재 및 폭발 위험을 비교한 연구는 찾아보기는 쉽지 않으며, 국외에 비해 기술개발에 따른 기초적인 연구도 부족한 실정이다. 그리고 화재 발생 장소가 바다라는 특수성을 고려해볼 때 자체의 소화설비와 인근에 배치된 소화설비 부재 및 공공소방대의 접근이 어려우며, 바람 및 기후 조건 등 자연적 요인에 의한 영향이 크게 작용하여 화재의 확대가 용이하기 때문에 피해를 최소화하기 위해서는 반드시 관련 연구가 필요하다.

이에 따라 본 연구에서는 LNG 공급계통시스템의 재기화 공정에서 LNG 이송 중 배관에서 누출에 의한 화재 및 폭발 발생시 LNG 산지 및 기후 조건, 배관 누출공의 크기에 따른 피해영향범위를 산출하고자 하였다. 그리고 폭발 잠재 위험을 정확하게 분석하고 결과를 비교하기 위해 ALOHA(Areal

Location of Hazardous Atmospheres) 5.4.7 소프트웨어를 활용했다. ALOHA는 약 35년 전에 처음 개발된 이래 최근까지도 지속적인 버전업을 통하여 최신화를 유지하고 있는 화재 및 유독성물질 누출위험결과를 확인할 수 있는 프로그램이다.(ALOHA, 2013) 하지만 기존에 보유하고 있는 가스 데이터베이스에만 의존하고 있기 때문에 성분을 알기 어려운 가스들에 대한 확산거리와 피해범위 등을 예측하기에는 많은 어려움이 있다.(Chemical Safety Agency, 2015) 따라서 온도 및 조건 등에 따라 ASPEN HYSYS Ver.7.3을 통해 물성 값을 얻고, 이를 ALOHA에 대입하여 결과를 비교·분석한 자료를 통해 LNG 공급계통시스템을 갖추고 있는 대표적 설비인 LNG-FSRU(Floating Storage and Re-gasification Unit)나 LNG 연료추진선박, LNG 벙커링 터미널 등에서의 안전성 확보에 도움을 주고자 한다(HYSYS, 2004).

2. LNG 산지별 화재 위험도 분석

2.1 LNG 산지별 조성 특성

Table 1은 GIIGNL(Groupe International des Importateurs de Gaz Naturel Liquefie, 2016)에서 제공한 LNG의 산지별 조성비를 정리한 표이다. 표에서 보이는 바와 같이 원산지별 LNG의 조성비는 원산지별로 조금씩 차이가 나지만 대부분의 경우 주요성분은 메탄, 에탄, 프로판, 부탄, 질소 등의 5개 성분이다. 그 중 트리니다드 지역에서 생산되는 액화천연가스는 메탄이 질량 성분비로 96.9%를 차지하고 있으며, 이를 제외한 나머지 산지에서는 mol 성분비를 기준하여 메탄의 경우 87.6%~91.6%를 나타내고 있다. 그리고 에탄은 2.7%~9.0%, 프로판이 0.3%~3.3%, 부탄이 0.1%~1.6%, 질소가 0.0%~0.6%의 조성비를 나타내고 있으며, 이 중 메탄, 에탄, 프로판의 조성비 합계를 살펴보면 최소 98.1%에서 최대 99.9%를 차지하고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Typical composition of LNG imports by country

Origin	Methane (CH ₄)	Ethane (C ₂ H ₆)	Propane (C ₃ H ₈)	Butane (C ₄ H ₁₀)	Nitrogen (N ₂)
Algeria	87.6	9.0	2.2	0.6	0.6
Australia	89.3	7.1	2.5	1.0	0.1
Malaysia	89.8	5.2	3.3	1.4	0.3
Nigeria	91.6	4.6	2.4	1.3	0.1
Oman	87.7	7.5	3.0	1.6	0.2
Qatar	89.9	6.0	2.2	1.5	0.4
Trinidad & Tobago	96.9	2.7	0.3	0.1	0

LNG 재기화 공정에서 LNG 누출에 따른 화재 및 폭발사고의 피해영향 분석

이에 따라 액화천연가스의 성분 중에서 메탄과 에탄, 프로판을 제외한 기타 성분이 열역학적 물성치에 미치는 영향은 거의 무시될 수 있다고 할 수 있지만 본 연구에서는 최대한 실제상황과 유사하게 모사하기 위하여 모든 성분을 포함하여 계산을 진행했다.

2.2 LNG 산지별 화재 위험도 비교

LNG 공급계통시스템의 재기화 공정에서 LNG 조성비에 따른 LNG 누출 시 위험도를 확인하기 위해 7곳의 LNG 산지별 성분에 따른 물성 값을 비교 분석했다. 위험도를 분석하기 위해서는 먼저 LNG의 폭발한계(Explosion limit)를 알고 있어야 한다. 폭발한계를 파악하기 위해서는 LNG를 구성하는 성분의 폭발상한계(UEL: Upper Explosive Limit)와 폭발하한계(LEL: Lower Explosive Limit)를 알고 있어야 하는데 여기서 폭발하한계와 폭발상한계 사이의 범위는 연소가 가능한 범위가 된다. 즉, 가스 등 물성의 농도가 일정한 범위 내에 있을 때 폭발현상이 일어나는 것으로 그 농도가 지나치게 낮거나 지나치게 높아도 폭발은 일어나지 않는 범위를 의미한다(KOSHA Code D-22, 2012). 여기서 폭발하한계는 가스 등이 공기 중에서 점화원에 의하여 착화되어 화염이 전파되는 가스 등의 최소농도를 말하며, 반대로 폭발상한계는 가스 등이 공기 중에서 점화원에 의하여 착화되어 화염이 전파되는 가스 등의 최대농도를 말한다. 폭발하한계가 낮은 경우 가스가 조금만 누출되어도 연소나 폭발이 쉽게 일어날 수 있으며, 반대로 폭발하한계가 높을 경우 많은 양의 가스가 누출되어야 연소나 폭발이 일어날 수 있다.

한국산업안전보건공단의 KOSHA CODE D-22에 따르면 가스 등의 혼합물의 폭발하한계는 르샤틀리에 법칙을 이용해 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Kondo et al., 2006).

$$LEL_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{LEL_i}} \quad (1)$$

여기서,

LEL_{mix} : 가스 등 혼합물의 폭발하한계(Vol %)

LEL_i : 가스 등의 성분 중 i 성분의 폭발하한계(Vol %)

y_i : 가스 등의 성분 중 i 성분의 mol 분율

n : 가스 등의 성분의 수

폭발상한계 역시 르샤틀리에 법칙을 이용해 다음 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$UEL_{mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{UEL_i}} \quad (2)$$

여기서,

UEL_{mix} : 가스 등 혼합물의 폭발상한계(Vol %)

UEL_i : 가스 등의 성분 중 i 성분의 폭발상한계(Vol %)

y_i : 가스 등의 성분 중 i 성분의 mol 분율

n : 가스 등의 성분의 수

단, 본 연구에서 르샤틀리에 법칙을 통해 계산된 폭발한계 값은 실험식을 활용한 통계적 추정 값이므로 보다 정확한 데이터를 얻기 위해서는 실험을 통한 정확한 자료의 검증이 반드시 필요하다.

그리고 폭발을 일으키는 가연성가스의 크기를 나타내는 수치인 위험도는 계산된 폭발상한계, 폭발하한계 결과를 이용해 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Hazard = \frac{UEL - LEL}{LEL} \quad (3)$$

Table 2. Results by composition according to the law of Le chatelier

Composition	LEL	UEL	Molecular weight (g/mol)	Hazard
Methane	5	15	16.04	2.0
Ethane	3	12.5	30.07	3.16
Propane	2.1	9.5	44.1	3.52
Butane	1.8	8.4	58.12	3.66
Nitrogen	-	-	28.01	-

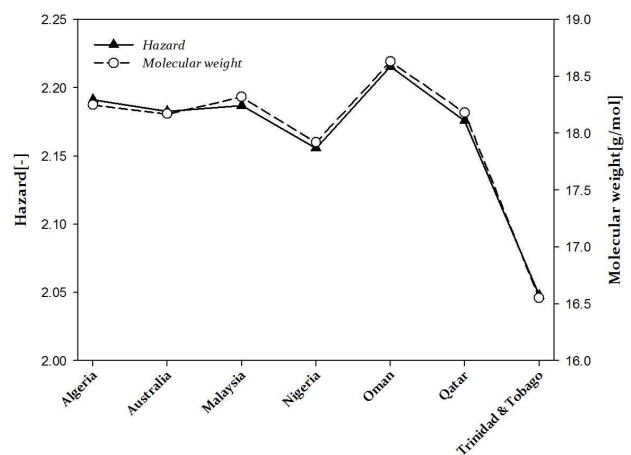


Fig. 1. Comparison of hazard & molecular weight by for the LNGs produced from seven countries.

Table 3. Physical properties of the composition applied to the simulation

Composition/ producing area	Molecular weight (g/mol)	Normal boiling point (°C)	Critical temperature (°C)	Critical pressure (kPa)	Heat capacity (J/kg)	Operating pressure (kPa)	Heat of combustion (J/g)	High calorific value (kcal/kg)	Specific heat ratio
LNG composition									
Methane	16.04	-161.6	-82.45	4,641	3,477	101.3	50,030,000	13,180	1.363
Ethane	30.07	-88.73	32.28	4,884	2,353	101.3	47,510,000	12,330	1.275
Propane	44.1	-42.19	96.75	4,257	2,182	101.3	46,370,000	11,970	1.172
Butane	58.12	-11.66	134.9	3,648	2,145	101.3	45,640,000	11,750	1.119
LNG producing area									
Algeria	18.25	-162.5	-54.93	6,708	3,059	101.3	48,920,000	12,840	1.374
Australia	18.17	-160.7	-55.33	6,779	3,081	101.3	49,300,000	12,940	1.323
Malaysia	18.32	-161.6	-54.71	7,025	3,052	101.3	49,100,000	12,890	1.369
Nigeria	17.92	-161	-58.75	6,657	3,121	101.3	49,360,000	12,960	1.365
Oman	18.63	-161	-50.88	7,218	3,008	101.3	49,100,000	12,880	1.367
Qatar	18.18	-161.9	-56.36	6,842	3,073	101.3	49,070,000	12,880	1.37
Trinidad & Tobago	16.55	-161.2	-74.71	5,178	3,371	101.3	49,870,000	13,120	1.363

식(3)을 보면 폭발하한계와 폭발상한계 사이의 범위가 넓을수록 폭발범위가 넓어서 위험하다고 할 수 있다.

Table 2는 LNG의 성분별 폭발범위와 분자량 그리고 식(3)을 이용해 계산된 가스의 위험도를 보인다. LNG의 구성성분은 일반적으로 메탄, 에탄, 프로판, 부탄, 질소 등이 존재하는데, 질소의 경우 비가연성가스이기 때문에 폭발범위 및 위험도가 존재하지 않는다. Table 2에서 보이는 바와 같이 폭발하한계가 높은 경우 위험도가 낮게 됨을 알 수 있으며, 이는 폭발하한계가 높을수록 플래시 가스 발생범위가 더 적다는 것을 의미하기도 한다(<https://www.mathesongas.com>, 2017). 하지만 현재까지는 ALOHA에 LNG의 물성치가 존재하지 않아 메탄으로만 가정하여 천연가스 폭발에 대한 위험성 평가를 시행했다. 따라서 본 연구에서는 산지별 조성에 따른 물성 값을 ASPEN HYSYS을 통해 산출된 값을 기준으로 시뮬레이션 하였으며, 물성 값을 계산하기 위해 기존의 기체상 태방정식 중 비교적 정확성이 높고 각 성분 간의 상호작용에 대한 관계가 포함되어 있는 Peng-Robinson 식(Nasri et al., 2009)을 사용했다.

Table 3은 화재위험범위를 비교하기 위해 필요한 물성 값을 조성 및 산지별로 정리한 것이다. 보이는 바와 같이 조성에 따라 몰 질량 및 연소열 등 물성 값이 변하는 것을 알 수 있다.

Fig. 1은 산지별 LNG의 위험도 및 분자량을 보인다. 그림에서 보이는 바와 같이 총 7곳의 산지 중 트리니다드가 위험도 및 분자량이 가장 낮았으며, 오만의 위험도 및 분자량이 가장 높았다. 여기서 끓는점이 낮은 탄화수소 즉, 메탄의 함량이 많을수록 분자 구조가 간단하고 크기가 작기 때문에 분자량의 크기가 작다. 여기서 분자량이 작을 경우 LNG의 구성성분 중 메탄의 함유량이 상대적으로 높다는 것을 알 수 있다. 메탄의 경우 다른 탄화수소에 비해 연소속도가 느리고, 최소 발화에너지, 발화점, 폭발하한계 농도가 높은 물리적 특성을 가지고 있기 때문에 메탄의 함유량이 높을수록 상대적으로 위험도가 낮아지게 되는 것이다. 따라서 연소범위를 비교했을 때 산지별 큰 차이를 보이지는 않았으나 메탄의 함유량이 높을수록 화재위험에 대한 위험도는 낮아지게 됨을 알 수 있었다.

3. LNG 재기화 공정에서 배관 손상에 따른 화재 및 폭발사고의 피해영향범위 분석

3.1 분석 조건

배관에서 LNG의 누출량을 추정하기 위해서는 먼저 음속 또는 아음속 누출인지를 파악해야하며, 이는 식(4)로부터 구할 수 있다(KOSHA Code P-14, 2000; Lee, 1994).

LNG 재기화 공정에서 LNG 누출에 따른 화재 및 폭발사고의 피해영향 분석

$$\left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4)$$

여기서,

P = Critical pressure(kPa)

P_s = Operating pressure(kPa)

$$\gamma = \left(\frac{C_p}{C_v}\right) = \text{Specific heat coefficient}$$

임계흐름압력비가 $\frac{P_a}{P_s}$ 압력보다 크므로 음속누출에 해당되고 음속누출에서의 누출량은 식(5)를 통해 구할 수 있다.

$$Q_t = C_D A P_s \sqrt{\frac{\gamma g_c M W}{R T_s} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (5)$$

여기서,

A = Leakage area(m²)

C_D = Leakage coefficient

g_c = Gravity constant

Mw = Molecular weight(g/mol)

P_a = Atmospheric(kPa)

P_s = Operating pressure(kPa)

R = Gas constant

T_s = Operating temperature(°C)

Table 4는 LNG 산지별 조성에 따른 화재로부터 위험도를 비교·분석하기 위해 가정한 조건으로 총 7곳의 산지별 모두 동일한 조건을 적용하였다.

Table 4. Input data from ALOHA simulations

Variables	Values
Material	LNG of different regions (seven countries)
Wind speed	1 m/s
Cloud cover	50 % (partly cloudy)
Ambient temperature	20 °C
Humidity	medium (50 %)
Pasquill stability	E stable
Pipe diameter (Inner Diameter)	264.6 mm
Pipe schedule No.	40
Pressure	101.34 kPa
Pipe length	100 m
Stability class	slightly stable

LNG 관경은 264.6 mm로 실제 LNG선박에 적용된 관경과 동일하게 적용했다. LNG 공급계통시스템을 갖추고 있는 설비 또는 선박은 해상에서 LNG선으로부터 LNG를 공급받거나 육상으로 이송할 때 또는 밸브 조작 실수 등으로 인해 LNG가 누출될 가능성이 있기 때문에 대기압 조건에서 배관내 LNG가 유출된다고 가정하였다. 그리고 파스칼 안정도 등급은 대기상태의 안정성을 나타내는 기준으로써 선박내 배관에서 가스가 누출되는 시나리오를 적용하였기 때문에 바람이 거의 없는 안정적인 Stability class E(Slightly stable)를 적용했다(Comarova and Mangul, 2008).

3.2 산지별 LNG 조성에 따른 피해범위 예측 결과

Fig. 2는 동일한 조건에서 7곳의 산지별 LNG 구성성분에 따른 폭발하한계 범위를 10 % LEL, 60 % LEL, 100 % LEL로 나누어 나타낸 그림이다. 피해영향범위를 살펴보면 LEL 60 % 이상 지역은 플래시화재 발생 위험지역이기 때문에 해당지역 내에 점화원이 없도록 철저히 관리해야 한다(Park, 2014). 산지별 화재로 부터의 피해영향범위를 비교해보면 메탄의 함량이 많은 트리니다드 산지와 메탄의 함량이 가장 적었던 오만 산지를 비교했을 때 메탄의 함량이 많은 트리니다드산지의 LNG의 플래시화재 발생 위험지역이 더 좁았지만 산지별 차이는 크게 없었다.

Fig. 3은 산지별 증기운 폭발(VCE: Vapor Cloud Explosion)에 의한 과압 발생에 따른 피해범위 결과를 보인다. 그리고 Table 5는 과압 발생이 미치는 피해영향을 정리한 표이다. 일반적으로 ALOHA에서 표기되는 압력은 55 kPa, 23.1 kPa, 6.9 kPa로 설정되어 있다. 55 kPa의 압력은 건물을 붕괴시킬 정도의 파괴력을 가지고 있고, 24.1 kPa는 치명적인 인명피해를 야기할 수 있는 압력이다. 마지막으로 6.9 kPa는 유리를 산산조각 낼 정도의 피해를 야기할 수 있는 압력이다. 그림에서 보이는 결과와 같이 7곳의 산지별 LNG 성분에 따라 큰 차이는 보이지 않았지만 트리니다드 산지의 LNG가 나머지 산지에 비해 상대적으로 과압으로부터 영향이 적음을 확인했다. 그리고 7곳의 LNG 산지 모두 누출지점으로부터 최소 250 m 이상 피해있어야 치명적인 부상을 피할 수 있었다.

제트화재(Jet fire)는 배관에서 누출공을 통하여 새어나오는 가연성 액체나 가스가 점화되는 현상으로 제트화재 발생 시 발생하는 열 복사량(Thermal radiation)에 의한 위험우려 구간을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 ALOHA에서 열복사량 위험지역기준으로 기본 제공하는 위험도 기준을 사용하여 결과를 산출했다. 기본 제공 위험도 기준은 각각 2.0 kW/m², 5.0 kW/m², 10.0 kW/m²이다. 복사량 기준을 살펴보면 2.0 kW/m²는 사람이 1분 이내에 고통을 느낄 수 있는 열복사량의 크

Table 5. Levels of damage expected at specific overpressure values (Lees, 1980)

Overpressure (kPa)	Expected damage
3.4-6.9	Windows usually shattered some window frame damage
6.9	Partial demolition of house; made uninhabitable
13.8	Partial collapse of walls and roofs of houses
13.8-20.7	Non-reinforced concrete or cinder block walls shattered
34.5-48.3	Nearly complete destruction of house.
68.9	Probable total destruction of buildings

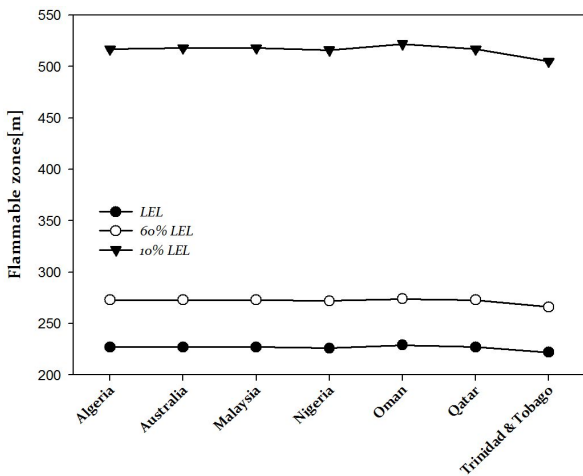


Fig. 2. Comparisons of the flammable zones for the LNGs produced from seven countries.

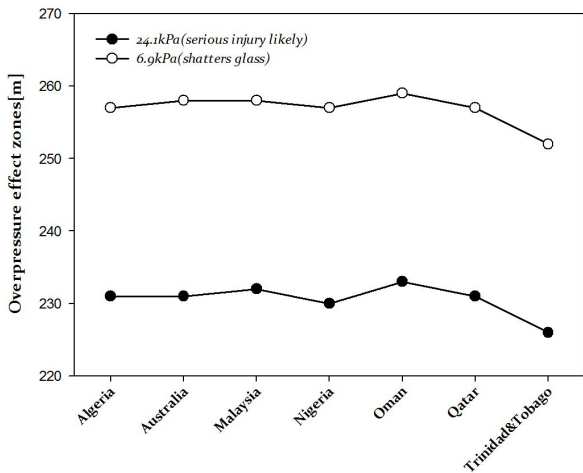


Fig. 3 Comparisons of the overpressure effect zones for the LNGs produced from seven countries.

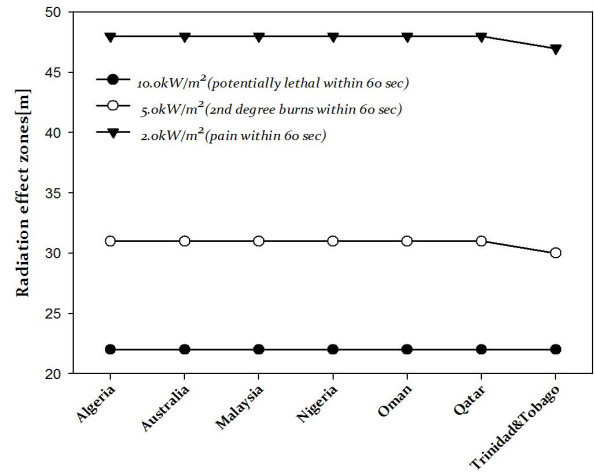


Fig. 4. Comparisons of the radiation effect zones for the LNGs produced from seven countries.

기이며, 5.0 kW/m²의 경우 사람이 1분 이내에 2도 화상을 입을 수 있는 열복사량을 의미한다. 그리고 10.0 kW/m²는 사람이 1분 이내에 사망할 수 있는 열복사량으로 위험도 기준이 구분되어 있다(Park, 2014).

열 복사량의 위험기준으로는 미국 소방 기술사회(SFPE: Society of Fire Protection Engineers)에서 제공하는 기준이나 영국의 보건 안전 관리국(HSE: Health and Safety Executive)의 기준 등이 있다(Lee, 1994).

Fig. 4는 산지별 제트화재 발생에 의한 열 복사량 피해영향을 보여준다. 산지에 관계없이 LNG가 누출되면 발화원로부터 25 m 범위내로 진입하게 되면 1분내 사망에 이를 수 있게 된다. 그림을 보면 7곳의 LNG 산지별 큰 차이는 보이지 않았지만 오만 지역의 LNG 경우 위험범위가 트리니다드 지역의 LNG에 비해 비교적 더 넓음을 알 수 있다.

3.3 배관내 LNG 누출에 따른 피해영향범위 예측 결과

LNG 공급계통시스템의 재기화 공정에서 LNG를 가스화(Gasification)하기 위해서는 해수 등의 열매체와의 열교환이 반드시 필요하다. 이때 LNG와 열원에 큰 온도차가 발생하게 되며, 열교환기 및 배관 등 손상에 의한 폭발위험성을 배제하기는 어렵다.

따라서 본 연구에서 LNG의 유출원은 가스터빈설비의 배관으로 관의 크기(내경)는 264.6 mm, 배관의 총 길이는 100 m로 가정하였다. LNG의 조성비는 국내 수입량의 40% 이상을 차지하고 있는 카타르 산 LNG 조성을 적용하였다. 여기서 특히 고려할 점은 배관에서 가스누출 시 누출공의 크기이다. 따라서 본 연구에서는 누출공의 크기에 따른 피해영향범위를 계산하기 위하여 누설(Leak), 파공(Hole), 파괴(Rupture)의 3

LNG 재기화 공정에서 LNG 누출에 따른 화재 및 폭발사고의 피해영향 분석

단계 기준으로 나누어 사이즈를 결정했다. 이때 시나리오 설계 시 누출공의 크기에 대해 정해진 기준이 없기 때문에 누설은 1/2인치(12.7 mm), 파공은 2인치(50.8 mm), 파괴는 배관이 완전히 파열된 상태이므로 배관의 지름인 264.6 mm의 값을 각각 적용하였다. 또한 플래시화재의 위험도 기준은 누출기체의 폭발하한계 수치로 설정했다. 본 연구에서는 3 단계의 기준 수치를 각각 45,700 ppm(100 % LEL: 점화원이 있을 경우 플래시화재 발생), 27,420 ppm(60 % LEL = Flame pockets), 4,570 ppm(10 % LEL)로 적용했다(Park, 2014).

Fig. 5는 재기화 시스템에서 LNG 배관에 누설, 파공, 파괴 3가지가 발생할 경우 플래시화재에 의한 피해범위(LEL 100 %)를 예측하였으며, 이 범위는 점화원이 있을 경우 플래시화재가 발생할 수 있는 구역을 의미한다. 그림을 보면 누설이 발생할 경우 화재 발생지점에서 0.031 km²의 면적 범위에 폭발하한 범위가 산정된다. 배관 파공 및 파괴의 경우 폭발하한범위는 각각 0.040 km², 0.041 km²의 면적을 차지하며 화재가능 범위를 갖게 된다. 이를 통해 배관내 파공이 발생하면 배관이 파괴된 효과와 비슷한 플래시화재 피해영향범위를 가지게 됨을 확인했다.

Fig. 6은 재기화 공정에서 LNG 배관에 누설, 파공, 파괴가 발생할 경우 과압에 의한 피해영향범위를 예측하였다. 그림을 보면 배관에서 LNG가 누출시 발화원으로부터 0.028 km²(화재지점으로부터 직선거리 189 m) 지점까지 심각한 부상을 입을 수 있고, 배관의 파공 및 파괴시 약 0.041 km²(화재지점으로부터 직선거리 231 m)의 지점까지 폭발로 인한 과압 발생에 따른 심각한 부상을 입을 수 있음을 확인했다.

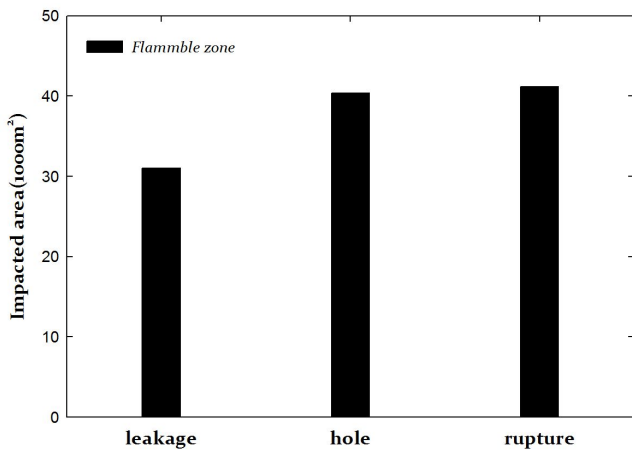


Fig. 5. Comparisons of the Flammable impact zones for the size of pipe leakage hole (leakage size: 12.7 mm, hole size: 50.8 mm, rupture: 264.6 mm).

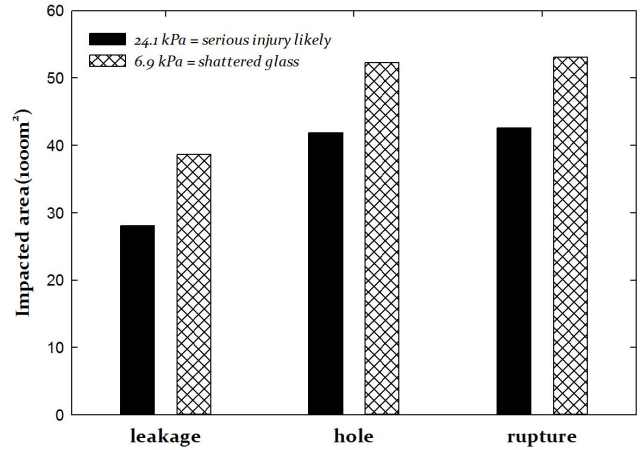


Fig. 6. Comparisons of the Overpressure wave zones for the size of pipe leakage hole (leakage size: 12.7 mm, hole size: 50.8 mm, rupture: 264.6 mm).

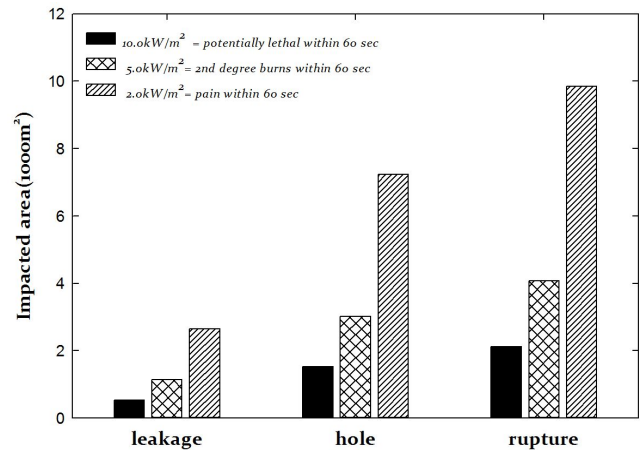


Fig. 7. Comparisons of the Radiation effect zones for the size of pipe leakage hole (leakage size: 12.7 mm, hole size: 50.8 mm, rupture: 264.6 mm).

따라서 LNG 배관 손상에 의해 누설 및 파괴 등이 발생하게 되면 최소 0.028 km²(화재지점에서 직선거리 189 m) 이상을 벗어나야 과압에 의한 피해범위에서 벗어날 수 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7은 재기화 공정에서 LNG 배관에서 제트화재 발생시 누설, 파공, 파괴 3가지 경우로 나누어 피해범위를 계산하고 피해영향범위를 예측한 결과이다. 그림을 보면 누설이 발생할 경우 530 m²(화재지점으로부터 직선거리 13 m)영역 내에서는 1분내 사망에 도달할 수 있게 된다. 화재 발생지점으로부터 약 1,133 m²(화재지점으로부터 직선거리 19 m)내 구역 범위의 경우 1분 이내에 2도 화상을 입을 수 있으며, 배관에 파공이 생기게 되면 화재 발생지점에서 약 1,520 m² 구역 내

에서 1분 이상 방치된다면 자칫 목숨을 잃을 수 있는 위험 영향범위 내로 들어오게 된다. 배관내 과공이 발생한 경우 최소 48 m 이상 피해있어야 복사열로부터의 피해를 예방할 수 있다. 배관이 완전히 파괴되면 화재 발생 지점으로부터 2,100 m² 구역은 1분내 사망에 이를 수 있으며, 약 470 m² 구역까지 2도 화상의 피해를 입을 수 있다. 따라서 배관이 파괴되면 최소 9,850 m² 구역(화재지점으로부터 직선거리 56 m) 이상 피해있어야 복사열로부터 부상을 피할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 LNG 공급계통시스템의 재기화 공정에서 배관 손상으로 인한 누출사고 발생시 LNG 조성별 연소특성에 대해 예측 및 분석을 하였다. 또한 배관 누출공 크기에 따라 누설, 과공, 파괴 3단계에 나누어 위험범위 및 폭발에 미치는 영향에 대한 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. LNG 구성성분 중 메탄의 위험도는 2.0으로 가장 낮았고, 부탄의 경우 3.66으로 가장 높은 수치를 보였다. 이를 통해 LNG 성분 중 메탄의 함유량이 많을수록 낮은 위험도를 갖게 되는 것을 알 수 있었으며, ALOHA 프로그램을 통해 산지별 조성에 따른 화재 위험도 분석 결과 산지에 따라 큰 차이는 보이지는 않았으나, 성분 중 메탄의 함유량이 높은 트리니다드 산지의 LNG가 상대적으로 플래시화재 발생범위 및 증기운 폭발에 의한 고압이 발생하는 위험범위 그리고 제트화재 발생에 의한 열 복사량 피해영향이 낮음을 알 수 있었다. 또한 7개 산지의 LNG 누출시 누출지점으로 부터의 피해범위를 산출함으로써 발화원으로부터 최소 250 m 이상 대피해야만 치명적인 부상을 피할 수 있는 것을 확인했다.

2. 재기화 공정의 배관에서 LNG가 누설, 과공, 파괴되었을 경우 화재 및 폭발에 따른 피해영향범위를 확인하기 위해 관의 크기가 264.6mm, 총 길이가 100 m인 배관에서 누설은 1/2인치(12.7 mm), 과공은 2인치(50.8 mm), 파괴는 배관의 크기와 동일한 264.6 mm의 수치를 적용하여 그 결과를 비교 분석하였다. 우선 플래시화재에 의한 피해범위(LEL 100%)를 분석한 결과 누설발생 시 화재 발생지점에서 약 0.031 km²의 면적 범위내, 과공 및 파괴의 경우 폭발하한범위는 각각 0.040 km², 0.041 km²의 면적을 차지하며 화재가능 범위를 갖게 되었다. 또한 과압에 의한 피해범위를 예측한 결과 LNG 배관 손상에 의해 누설 및 파괴 등이 발생하게 되면 최소 0.028 km², 화재지점에서 직선거리 189 m 이상을 벗어나야 과압에 의한 피해영향범위에서 벗어날 수 있게 된다. 제트화재 발생시 배관이 파괴되면 최소 9,850 m² 구역(화재지점으

로부터 직선거리 56 m) 이상 피해있어야 복사열로부터 부상을 피할 수 있음을 확인했다.

이러한 결과는 르샤틀리에 법칙을 기준으로 산정한 위험도의 결과와 어느 정도 일치함을 확인하였다. 하지만 ALOHA를 통해 얻은 결과는 비교적 단순한 상황 및 환경에만 적용할 수 있는 한계가 있기 때문에 반드시 안전성검증에 사용되는 다른 방법들과 더불어 안전 수준을 재차 검토하여 예상되는 사고에 대한 대비책을 세우는 것이 리스크 저감 차원에서 중요할 것으로 사료된다.

References

- [1] ALOHA(2013), ALOHA TECHNICAL DOCUMENTATION, November 2013.
- [2] Andersen, M. L., N. B. Clausen and P. C. Sames(2011), Costs and Benefits of LNG as Ship Fuel for Container Vessels, Germanischer Lloyd and MAN.
- [3] Chemical Safety Agency(2015), ALOHA User Guide.
- [4] Comarova, Z. and S. Mangul(2008), Simulation of Emission Dispersion as the Method of Air Quality Management, in Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment, Springer, pp. 403-408.
- [5] Dan, S. K., C. J. Lee, J. P. Park, D. G. Shin and E. S. Yoon(2014), Quantitative risk analysis of fire and explosion on the top-side LNG-liquefaction process of LNG-FPSO, Process Safety and Environmental Protection 92, pp. 430-441.
- [6] Groupe International des Importateurs de Gaz Naturel Liquefie (2016), <http://www.giignl.org/> (Accessed Jan 6, 2018).
- [7] Ha, D. M.(1998), A Study on the Characteristics of Methane and LNG Explosion, The Korean Society of safety, Proceeding of Autumn Conference.
- [8] HYSYS(2004), Aspen HYSYS Operation Guide (1,2).
- [9] Industrial accident casebook(2000), industrial safety research institute, safety field - technology Resources, Researchers 2000-4-488.
- [10] Jo, Y. D.(2017), Estimate Minimum Amount of Methane for Explosion in a Confined Space, Journal of the Korean Institute of Gas Vol. 21, No. 4, pp. 1-5.
- [11] Jung, I. G., S. B. Yoo, S. K. Lee and L. H. Kim(1998), Assessment of Gas Release Dispersion and Explosion in Pipeline, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 2, No. 2, pp. 61-69.
- [12] Kim, H. M.(2016), A Study on the development of a

comprehensive safety evaluation techniques LNG terminal facilities, Incheon National University Graduate Doctoral Thesis.

- [13] Kondo, S., K. Takizawa, A. Takahashi and Tokuhashi, K. (2006), Extended Le Chatelier's Formula for Carbon Dioxide Dilution Effect on Flammability Limits, *Journal of Hazardous Materials*, A138.
- [14] KOSHA Code D-22(2012), Technical Guidance on the Explosion Limit Estimation of Combustible Gas and Vapor Mixtures, Korea Occupational Safety and Health Agency.
- [15] KOSHA Code P-14(2000), Technical Guidelines for Leakage Source Modeling, Korea Occupational Safety and Health Agency.
- [16] Kumar, S., H. T. Kwon, K. H. Choi, W. S. Lim, J. H. Cho, K. J. Tak and I. Moon(2011), LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development, *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 4264-4273.
- [17] Lee, S. I.(2015), Estimation of explosion risk potential in fuel gas supply systems for LNG fuelled ships, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 39, No. 9 pp. 918-922.
- [18] Lee, Y. S.(1994), *Chemical Safety Engineering*, pp. 101-106.
- [19] Lees, F. P.(1980), *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*, Butterworths.
- [20] <https://www.mathesongas.com>(2017), Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors (LEL/UEL) (Accessed 22 Dec. 2017).
- [21] Park, S. H.(2014), A study on the fire risk assessment of natural gas power plant", The University of Seoul Master Thesis.
- [22] Seo, S. W., B. S. Chu, Y. Y. Noh, W. H. Jang, S. I. Lee, Y. T. Seo and D. J. Chang(2017), An economic evaluation of operating expenditures for LNG fuel gas supply systems onboard ocean-going ships considering availability, *Ships and Offshore Structures*, [Online] Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/17445302.2014.984389/> (Accessed 22 Jul. 2017).

Received : 2018. 07. 16.

Revised : 2018. 10. 04.

Accepted : 2018. 10. 26.