

LNG 추진선의 천연가스 배관에서 누출 시나리오에 따른 피해범위에 관한 연구

이윤호**

* 목포해양대학교 해양경찰학부 교수

A Study on the Damage Range According to Leakage Scenarios in Natural Gas Pipeline of LNG Fueled Ship

Yoon-Ho Lee**

* Professor, Division of Coast Guard, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요약 : 본 연구에서는 LNG 추진선에서 배관의 파손으로 천연가스가 누출되었을 때 누출공의 크기별 플래시 화재, 과압, 복사열에 따른 피해범위를 ALOHA(Areal Location of Hazardous Atmospheres)를 이용하여 산출했다. 그리고 민감도 분석을 위해 환경 변수(풍속, 대기온도, 대기 안정도)와 공정 변수(배관 압력, 배관 길이)로 구분하여 다양한 시나리오별 피해영향범위를 분석했다. 그 결과 환경 변수에 따른 피해범위는 플래시 화재에 의한 피해범위가 가장 컸으며 다음으로 과압, 복사열 순서로 큰 피해범위를 나타냈다. 그리고 공정 변수에 따른 피해범위를 산출한 결과 배관의 압력과 길이, 누출공의 크기와 관계없이 플래시 화재에 의한 피해범위가 가장 컸으며, 환경 변수와 동일하게 과압, 복사열 순서로 높은 피해범위를 보였다. 또한 누출공의 크기가 클수록 환경 변수와 공정 변수가 피해범위에 큰 영향을 주었으며 제트 화재에 의한 피해범위는 환경 변수에 비해 공정 변수에 의한 피해범위가 더 큰 것을 알 수 있었다.

핵심어 : 천연가스, 피해범위, 플래시화재, 과압, 복사열

Abstract : In this study, damages caused by flash fire, overpressure, and thermal radiation based on the sizes of leak holes were evaluated using the areal location of hazardous atmospheres when natural gas leaked owing to the damage of pipeline in a LNG fueled ship. In addition, environmental variables (wind speed, atmospheric temperature, and atmospheric stability) and process variables (pipe pressure and pipe length) were classified to analyze the damage impact ranges caused by various scenarios. From the results, the damage range caused by the environmental variables was the largest, followed by overpressure and thermal radiation. Additionally, for the process variables, regardless of the pressure, length, or size of the leak holes, the damage range attributed to flash fire was the most significant, and the damage range was high in the order of overpressure and thermal radiation, similar to the environmental variables. The larger the size of the leak holes, the higher the values of the environmental and process variables, and the higher the damage range caused by jet fire compared to the environmental variables.

Key Words : Natural gas, Damage range, Flash fire, Overpressure, Thermal radiation

1. 서론

최근 들어 선박의 연료가 벙커C유에서 경제성 및 대기환경 문제 등의 장점을 갖는 LNG(Liquefied Natural Gas)로 교체되어 가고 있다(Lee, 2018). 하지만 선박에서 LNG를 추진 연료로 사용할 때 공정장치의 균열, 파열, 파이프라인의 부식

그리고 펌프나 밸브 플랜지의 마모 등의 여러 가지 경로를 통해 가스가 누출되는 경우 착화원에 의해 화재나 폭발로 발전할 가능성이 존재하며, 이는 선박뿐만 아니라 항만 등 외부에도 막대한 손실을 초래할 수 있다(Lee, 2015). 특히 LNG가 탱크나 배관에서 기화된 상태로 누출되면 대기압 기준 약 -113°C 이하에서는 건조된 공기보다 무거워 극저온의 가스가 지상에 체류하게 되어 화재 및 폭발의 위험성이 있다(NFCQR, 2020).

† yhlee@mmu.ac.kr, 061-240-7209

LNG 누출에 따른 피해사례를 살펴보면 LNG탱크가 만들어진 초기인 1944년 10월 20일, 미국 오하이오주 클리블랜드에서 발생한 LNG누출사고가 발생했는데 대량의 LNG가 시중에 퍼져, 하수구 안에서 폭발·연소하는 등 사망자가 128명이나 발생했다(Kim, 2018). 또한 지난 2010년에는 미국 캘리포니아 주의 산 브루노 시에서 천연가스 파이프의 불량 용접부 파손으로 폭발 사고로 인하여 사망자 8명 부상자 58명이 발생했다(Davidson et al., 2012). 특히 선박에서의 화재·폭발은 바다 위에서 진행되기 때문에 인명피해가 매우 높고, 선박 구조는 전도가 매우 빠른 강재로 되어있어 대부분 선박 전체로 화재가 확산되어 전소될 확률이 크다. 또한 부두에 계류 중인 경우 건물화재와 같이 다른 선박으로 계속 확산되는 대형화재로 일어날 가능성이 높고, 위험물을 적재한 선박일 경우 폭발 시 연쇄폭발의 원인이 될 위험성도 도사리고 있다. 선박 화재·폭발로 인해 기름 유출 사건 등 제2의 환경피해까지 야기할 수도 있다. 이렇듯 선박 화재·폭발 사고는 많은 피해를 일으킬 위험성을 항상 내재하고 있다(You and Chang, 2015).

따라서 많은 연구자들에 의해 LNG 화재에 대한 피해범위 및 위험성 평가와 관련하여 다양한 연구가 수행되고 있다. Bernatik et al.(2011)은 LNG를 대체 연료로 사용할 경우 시나리오별 저장 시설에서의 위험성 평가에 관한 연구를 하였으며, Ha(1998)는 메탄의 폭발한계 온도의존성과 LNG의 폭발한계 압력의존성에 대한 새로운 추산식을 제시했다. Wang et al.(2019)은 LNG의 증기운 폭발에 관한 fireball 특성에 대한 평가를 위해 실험적 연구를 진행하였으며, Yoo et al.(2009)은 LNG, LPG, 가솔린 Station의 사고피해영향평가를 피해예측 시뮬레이터인 PHAST v6.5를 사용하여 비교하였다. 그리고 Dan et al.(2014)은 LNG-FPSO Topside의 LNG 액화공정에서 화재 및 폭발에 관한 정량적 위험 분석을 하였으며, Lee(2018)는 LNG 재기화 공정에서 배관 손상으로 인한 누출사고 발생시 LNG 조성별 연소특성에 대해 배관 누출공 크기에 따라 예측 및 분석을 하였다. 또한 화재 및 폭발사고의 해석에는 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics) 기술이 종종 사용된다. Seok et al.(2013)은 CFD 시뮬레이션을 이용하여 해양플랜트에서 메탄 연소시 화재 및 폭발 예측에 관한 연구를 하였으며, Kang et al.(2013)은 CFD를 활용한 수소-천연가스 혼합연료에 대한 피해영향 분석을 하였다. 그리고 Song(2018)은 CFD를 활용한 석유화학공정의 화재 및 폭발 사고에 대한 피해영향 분석하였으며, Kim(2010)은 CFD를 이용하여 FPSO Topside 화재 시 바람에 의한 열확산 거동특성에 관한 연구를 수행하였다. 이와 같이 천연가스 누출과 관련한 CFD 연구가 수행되어 왔으나 모델링이 복잡하고 해석

에 굉장히 많은 시간이 소요되는 단점을 가지고 있다(Dong et al., 2010; Bubbico et al., 2008).

본 연구에서는 영향범위 산정을 위해 정량적 소프트웨어인 ALOHA(Areal Location of Hazardous Atmospheres) v5.4.7를 사용하였다. ALOHA는 미국 EPA(환경보호청) 및 NOAA(해양 대기국)가 공동 개발한 피해 예측 프로그램으로 피해 예측을 위한 가우스확산 예측이 가능하여 일정 기상 조건에서 누출된 화학물질의 대기 중 확산 예측을 통해 독성, 과압, 복사열, 가연농도 분포 계산이 가능하다(ALOHA, 2013). 또한 CFD에 비해 간단하고 해석 소요시간도 짧아 유용하게 쓰이는 소프트웨어 중 하나이다. 상용 소프트웨어(TRACE, PHAST)보다 정확도가 떨어진다는 단점이 있지만, 매우 고가인 TRACE, PHAST에 비해 ALOHA의 결과도 비교적 신뢰할만한 하다는 여러 문헌이 있다(Hanna et al., 2008; Zhu et al., 2013; Anjana et al., 2015). 이를 통해 선박에서 천연가스가 누출 시 신속하게 대처하고 위험성을 감소시킬 수 있는 다양한 누출 시나리오별 피해영향에 대한 연구를 수행했다.

2. 연구방법

2.1 가정 조건

배관에 파공 등이 발생하여 천연가스가 외부로 누출되는 상황에서 피해 범위를 산출하기 위해서 사전에 미리 가정해야 할 조건들은 다음과 같다.

- 1) 배관내에는 메탄이 흐른다.
- 2) 배관내 유체의 유동은 등온 흐름이다.
- 3) 누출원으로부터 유체는 등엔트로피 팽창을 한다.
- 4) 누출원으로부터 유체는 제트 방출을 한다.
- 5) 누출 시 가연성 증기운을 형성시킨다.
- 6) 누출 시 유체는 대기로 확산된다.

Table 1은 배관에서 천연가스가 누출 시 피해영향 거리를 산출하기 위한 누출 시나리오를 정리한 표이다. 누출 시나리오는 환경 변수와 공정 변수로 구분하였다. 먼저 환경 변수는 풍속, 대기온도, 대기 안정도로 나누어 결과를 비교하였으며, 대기 안정도의 경우 파스킬 안정도를 적용하여 계산했다.

파스킬 안정도는 'A'부터 'F'까지 존재하며 대기 안정도가 중립인 'D'를 기준으로 'A'로 갈수록 대기의 상태가 점점 불안정해지며, 'F'로 갈수록 매우 안정한 상태가 된다. 그리고 공정 변수는 배관내부의 압력과 길이에 따라 피해영향 거리를 산출하였으며, 배관의 관경은 264.6 mm로 실제 LNG선박

Table 1. Variability of environmental dispersion parameters and source release parameters

Variables		Values
Environmental dispersion parameters	Wind speed(m/s)	1~7
	Atmospheric temperature(°C)	-10~40
	Atmospheric stability(-)	A, B, C, D, E, F
Gas release parameters	Pipe inner diameter(mm)	264.6
	Pressure(kPa)	1,000~8,000
	Pipe length(km)	0.1~2.0

Table 2 Definition of hole size applied to simulation

Release Scenario	Hole size(mm)	Comment
Leak	5	Representative of a generic small leak from pipe
Hole	25	Representative of a generic medium leak from pipe
Rupture	Full bore	Representative of a generic catastrophic leak from pipe

에 적용된 환경과 동일하게 적용하였으며(Lee, 2018), 누출량에 따른 피해범위인 끝점을 계산했다. 여기서 끝점은 본 연구에서 설정된 과압 또는 복사열 등의 수치에 도달하는 임의의 지점을 의미한다. 배관에서 가스의 누출량 계산을 위해서는 누출공의 크기 자료가 필요하다. 따라서 누출공의 크기는 미국 화학안전센터(CCPS: Center for Chemical Process Safety)의 화학 공정의 정량적 위험 분석 가이드라인에 따라 선정하였으며 Table 2에 나타내었다(CCPS, 2000).

2.2 피해범위 산출을 위한 기준 설정

누출 시나리오에 따른 피해결과 분석을 위한 주요 위험 수준을 Table 3과 같이 정리하였다. 배관에서 천연가스가 누출시 화재가 발생하지 않고 증기운 형성에 의해 플래시 화재나 과압에 의한 사고가 발생할 수 있으며, 누출시 화재가 발생하게 되면 제트 화재로 인한 복사열에 의한 피해가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 플래시 화재의 영향범위는 화재가 발생할 가능성이 높은 60%의 폭발하한계(LEL: Lower Explosive Limit)인 레벨3의 기준에 끝점을 결정하고 과압의 영향범위는 심각한 부상을 입을 수 있는 압력인 24.13 kPa (Lees, 1980), 복사열에 의한 피해범위는 1분 동안 방치 시 2도 화상을 입을 수 있는 레벨 2의 기준에 의하여 끝점 기준

Table 3. Key hazardous levels of pipeline release of natural gas

Classification	Accidental consequence	Level-3	Level-2	Level-1
No burning	Flash fire (flammable vapor cloud distance)	60 % LEL (26400 ppm)	-	10 % LEL (4400 ppm)
	Blast (overpressure distance)	Destruction of buildings (55.16 kPa)	Serious injury likely (24.13 kPa)	Shatters glass (6.89 kPa)
Burning	Jet fire (thermal radiation distance)	Potentially lethal within 60s (10.0 kW/m ²)	2nd degree burns with 60s (5.0 kW/m ²)	Pain within 60s (2.0 kW/m ²)

을 설정했다(Park, 2014). 그 밖에 시나리오별 피해범위 비교를 위해 기본적으로 선박 내 배관에서 천연가스가 누출된다는 가정하에 대기 안정도는 바람이 거의 없는 안정적인 'E'를 적용했으며, 온도와 습도는 각각 20°C, 50%로 가정했다(Comarova and Mangul, 2008).

2.3 수학적 모델(Mathematical model)

2.3.1 누출량

배관에서 메탄의 누출량을 추정하기 위해서는 먼저 음속 또는 아음속 누출인지를 파악해야한다. 이를 식(1)로부터 구할 수 있다(KOSHA Code P-14, 2000).

$$P_c = P_o \left[\frac{\gamma + 1}{2} \right]^{\gamma/(\gamma - 1)} \quad (1)$$

여기서,

P_c = Critical pressure(kPa)

P_o = Atmospheric pressure(kPa)

γ = Specific heat coefficient(-)

배관내부의 압력이 식(1)에서 얻어진 임계압(P_c)보다 클 경우 음속누출이 되며 임계압보다 낮으면 아음속누출이 된다. 메탄가스의 단열팽창시 비열계수인 γ 를 1.32로 적용하여 식(1)을 계산하면 184 kPa의 임계압을 얻을 수 있다. 이때 배관내부 압력의 변수가 1,000~8,000 kPa까지이므로 임계압인 184 kPa보다 크게 된다. 이에 따라 메탄가스의 속도는 음속 누출에 해당되며 이때 메탄가스의 누출량은 식(2)를 통해 구할 수 있다.

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

여기서,

C_D = Leakage coefficient

P_s = Pipeline pressure(kPa)

A = Leakage area(m²)

g_c = Gravity constant(-)

Mw = Molecular weight(g/mol)

R = Gas constant(-)

T_s = Operating temperature(°C)

2.3.2. 확산 모델(Dispersion Model)

확산모델은 천연가스가 누출원으로부터 향만이나 다른 인근 지역으로부터 증기운을 형성하여 거동하는 현상을 설명하는 모델이다. 이때 폭발하한계(LEL)와 폭발상한계(UEL: Upper Explosive Limit) 그리고 시간에 따른 농도변화를 예측함으로써 피해범위를 분석하는데 매우 중요하게 사용된다. 대표적인 확산 모델인 Gaussian 모델은 주어진 풍속, 풍향에서 누출된 중성 부유 가스의 움직임에 대해 설명한다. 특징은 위험물질의 누출로부터 바람이 부는 방향에서의 농도 거동을 매우 효율적으로 예측할 수 있다는 것이다. 이 Gaussian 모델을 이용하여 위험물질의 연속적인 누출인 Plume 및 순간적인 누출인 Puff 모델에 관한 연구가 이루어지고 있으며 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다(Zhu et al., 2013).

$$c(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} \quad (3)$$

$$\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

여기서,

c = Concentration downwind at location(x,y,z),(kg/m³)

Q = Release rate(kg/s)

x = Downwind distance(m)

y = Crosswind distance(m)

z = Vertical distance(m)

H = Height of source release(m)

σ_y = Horizontal dispersion coefficient(m)

σ_z = Vertical dispersion coefficient(m)

v = Wind speed(m/s)

그리고 수직방향으로 누출이 없을 경우 식(3)에 $z=0$ 을 대입하면 식(4)와 같이 간단하게 나타낼 수 있다(Zhu et al., 2013).

$$c(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (4)$$

$$\left\{ \exp\left[-\frac{(H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

2.3.3. 영향 모델(Effect Model)

배관에서 가연성 물질의 누출 시 화재 및 폭발사고의 가능성이 있다. 배관으로부터 천연가스가 빠르게 누출되며 화재가 발생할 경우 제트 화재(Jet Fire)에 의해 화재사고가 발생하여 복사열(Thermal Radiation)에 의한 피해 효과를 가져오며, 폭발사고의 경우에는 과압(Overpressure)과 복사열의 영향을 갖는다. 그리고 독성물질의 영향은 독성물질의 농도와 노출 지속시간의 함수관계로 나타낸다. 복사열에 의한 피해를 산출하기 위해 화재에 의한 중심 축에서 모든 지점으로의 열유속은 다음 식(5)를 통해 구할 수 있다. 그리고 누출원으로부터 x_i 거리에 있는 지점의 복사열 유속은 식(6)으로 계산할 수 있다. 이에 따라 총 열유속은 모든 지점에서의 복사열의 합과 같으며 다음 식(7)을 통해 계산할 수 있다(Zhu et al., 2013).

$$E = \frac{fQH_c}{n} \quad (5)$$

$$q = \frac{X_p E}{(4\pi x_i^2)} \quad (6)$$

$$q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (7)$$

여기서,

E = Energy of explosion or combustion(J)

H_c = Heat of combustion(J/m³)

f = Combustion efficiency factor(-)

q = Total thermal radiation flux(kW/m²)

q_i = Thermal radiation flux of point i(kW/m²)

X_p = Transmissivity(-)

x_i = Distance from the source(m)

폭발은 천연가스가 대기중으로 누출되었을 때 스파크나 불꽃과 같은 점화원에 의해 발생할 수 있는 잠재된 위험성

중 하나이며, 폭발파(Blast wave) 또는 과압에 의한 피해영향을 주게 된다. 폭발에 의한 피해범위를 산출하기 위해 TNO 폭발 모델식을 사용하였으며, 총 증기운 에너지는 식(8)을 통해 구할 수 있다. 또한 양의 위상이 지속되는 범위는 식(9)로 피해거리의 식(10)으로 산출할 수 있다. 그리고 과압이 미치는 범위는 식(11)을 통해 구할 수 있다(Zhu et al., 2013).

$$E = V_0 H_c \quad (8)$$

$$\bar{t}_p = t_p c_a (P_a/E)^{1/3} \quad (9)$$

$$\bar{R} = R(P_a/E)^{1/3} \quad (10)$$

$$\bar{P}_0 = (P_0 - P_a)/P_a \quad (11)$$

여기서,

V_0 = Volume of a flammable gas(m³)

P_0 = Side-on absolute blast overpressure(kPa)

\bar{P} = Scaled blast overpressure(-)

P_a = Ambient pressure(kPa)

c_a = Ambient velocity of sound(m/s)

t_p = Positive phase duration(s)

R = Fuel-air charge radius(m)

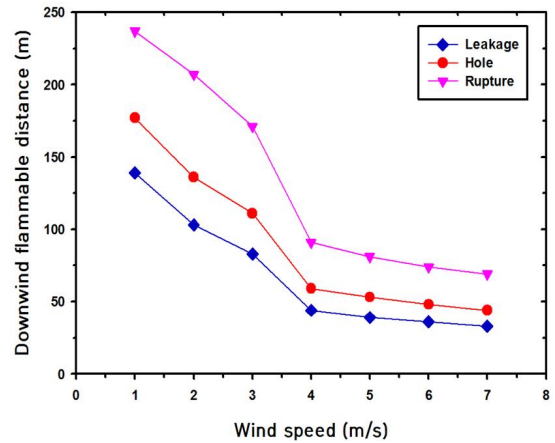
\bar{R} = Scaled distance(-)

3. 결과 및 고찰

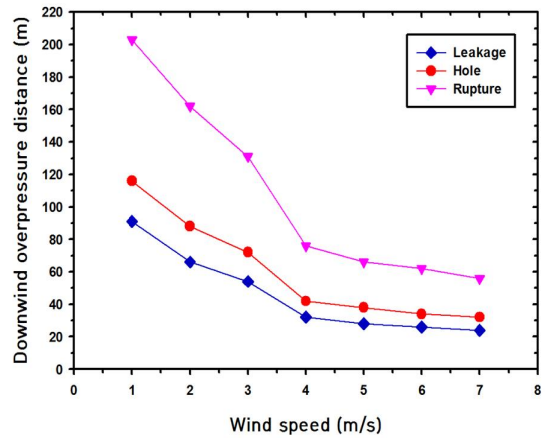
3.1 환경 변수

3.1.1 풍속에 따른 피해범위

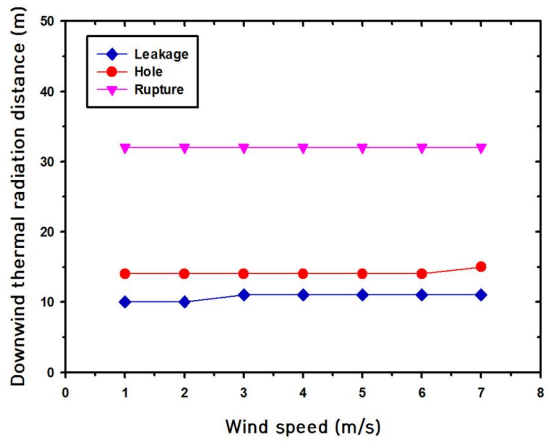
Fig. 1은 대기 풍속 변화에 따른 누출공의 크기별 플래시 화재에 의한 피해범위(a), 과압에 의한 피해범위(b), 복사열에 의한 피해범위(c) 결과를 정리한 그림이다. 그림을 살펴보면 플래시 화재 및 과압에 의한 피해범위는 풍속이 증가할수록 감소하였으며, 특히 3~4 m/s 사이의 풍속에서는 그 피해범위가 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 배관이 완전히 파손된 Rupture 상태를 기준으로 피해범위를 살펴보면 플래시 화재의 영향은 237 m, 과압에 의한 피해영향은 203 m, 복사열에 의한 영향범위는 32 m로 플래시 화재에 의한 피해범위가 가장 컸으며, 복사열에 의한 영향은 플래시 화재 범위의 13.5% 수준이었다. 하지만 대기 풍속이 4 m/s 이상이 되면 플래시 화재의 영향은 91 m, 과압의 경우 76 m로 급격하게 감소하는 것을 알 수 있었으며, 대기 풍속이 1 m/s일 때와 비교하여 피해범위는 각각 38.3%, 37.4% 수준으로 감소하는 추이를 보였다. 이러한 결과는 배관에서 천연가스가



(a)

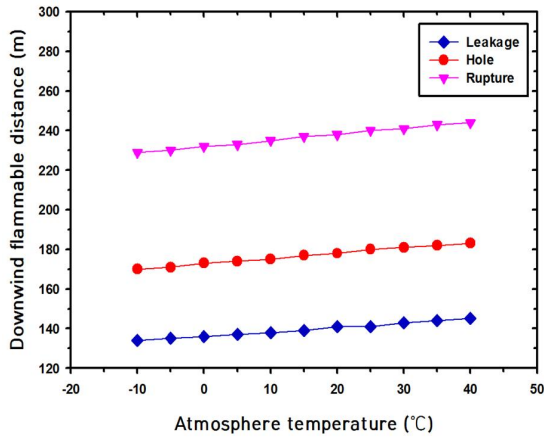


(b)

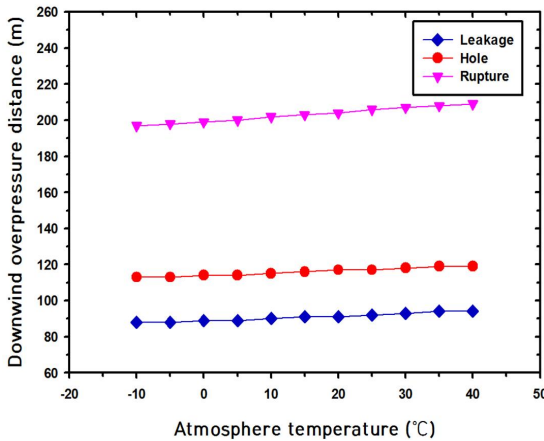


(c)

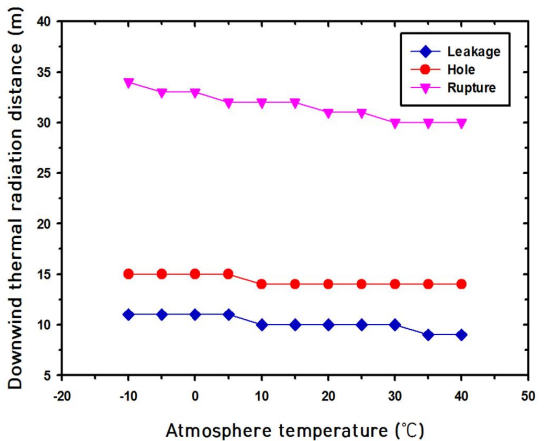
Fig. 1. Damage effect distance according to wind speed of compare in different leakage hole diameter; (a) flammable vapor cloud distance, (b) overpressure distance, (c) thermal radiation distance.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Damage effect distance according to atmospheric temperature of compare in different leakage hole diameter; (a) flammable vapor cloud distance, (b) overpressure distance, (c) thermal radiation distance.

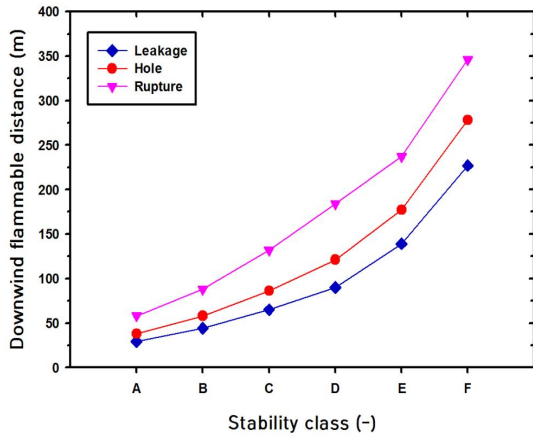
누출할 때 생성되는 증기운을 바람이 밀어주어 증기운의 형성을 방해하기 때문에 풍속이 높을수록 대기는 불안정해지지만 플래시 화재 및 과압에 의한 피해범위가 감소하게 된다. 그리고 복사열에 의한 피해범위를 살펴보면 4 m/s의 풍속에서도 1 m/s와 동일한 32 m의 피해범위를 보였다. 고압의 메탄이 누출 시 주위의 점화원에 의하여 점화되어 불기둥을 이루는 제트 화재를 발생하게 되는데 이때 누출압력으로 인하여 화염이 팽창한 운동량을 가지게 된다(Ko, 2012). 따라서 배관에서 메탄이 보통 풍속보다 훨씬 빠른 제트 속도로 방출되게 되면서 풍속의 영향을 거의 받지 않게 된다.

3.1.2 대기 온도에 따른 피해범위

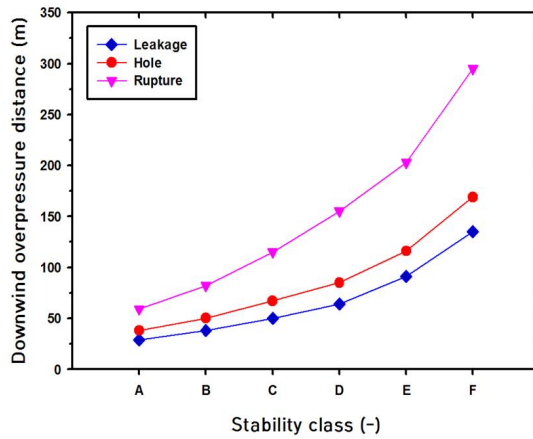
Fig. 2는 대기 온도 변화에 따른 누출공의 크기별 플래시 화재에 의한 피해범위(a), 과압에 의한 피해범위(b), 복사열에 의한 피해범위(c) 결과를 정리한 그림이다. 배관이 완전히 파손된 Rupture 상태를 기준으로 피해범위를 살펴보면 대기 온도 20°C를 기준일 때 플래시 화재 피해범위는 238 m, 과압의 영향은 204 m, 복사열에 의한 피해범위는 31 m로 플래시 화재에 의한 피해범위가 가장 컸으며, 과압의 영향, 복사열에 의한 영향 순서로 큰 피해범위를 보였다. 그리고 플래시 화재 및 과압에 의한 피해범위는 대기 온도가 증가할수록 큰 변화는 없었지만 소폭 증가하는 추이를 보였다. 이는 대기의 온도가 증가하게 되면 대기의 난류를 촉진하기 때문에 피해범위가 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 복사열에 의한 피해범위는 대기의 온도가 증가할수록 플래시 화재와 과압의 피해범위와는 반대로 조금씩 감소하는 것을 확인했다. 이는 식(6)에 따라 대기의 온도가 증가할수록 복사열 유속은 증가하게 되기 때문에 누출원으로부터 피해범위는 플래시 화재나 과압의 피해범위와는 반대로 감소하게 됨을 알 수 있다(Ko, 2012).

3.1.3 대기 안정도에 따른 피해범위

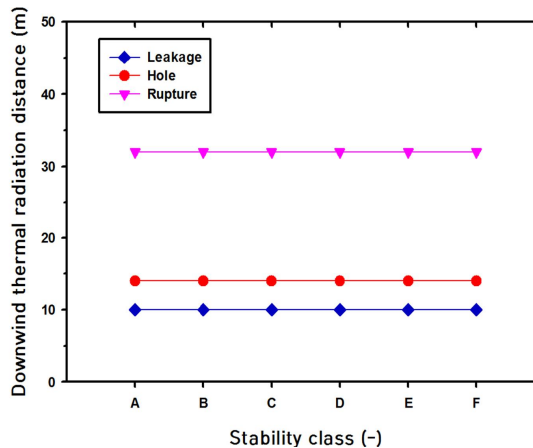
Fig. 3은 대기 안정도 변화에 따른 누출공의 크기별 플래시 화재에 의한 피해범위(a), 과압에 의한 피해범위(b), 복사열에 의한 피해범위(c) 결과를 정리한 그림이다. 그림을 살펴보면 플래시 화재 및 과압에 의한 피해범위는 대기 안정도가 낮은 등급(A)에서 높은 등급(F)으로 갈수록 피해범위가 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 풍속에 따른 피해범위와 마찬가지로 풍속이 강해 대기가 불안정할수록 배관에서 천연가스가 누출 시 생성되는 증기운을 밀어주기 때문에 농도를 낮춰주게 되면서 피해범위가 감소하게 되고, 대기의 안정도가 증가할수록 피해범위가 증가하게 된다. 하지만 복사열에 의한 피해범위는 대기 안정도의 영향에 큰 차이를 보이지 않았다. 배관이 완전히 파손된 Rupture 상태일



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Damage effect distance according to atmospheric stability of compare in different leakage hole diameter; (a) flammable vapor cloud distance, (b) overpressure distance, (c) thermal radiation distance.

때대기가 가장 안정된 상태인 'F'를 기준으로 피해범위를 살펴보면 플래시 화재 피해범위는 346 m, 과압의 영향은 295 m, 복사열에 의한 피해범위는 32 m로 플래시화재에 의한 피해범위가 가장 컸으며, 과압의 영향, 복사열에 의한 영향 순서로 큰 피해범위를 보였다. 이에 따라 풍속, 대기 온도에 비교하여 가장 큰 피해범위를 보이는 것을 알 수 있다.

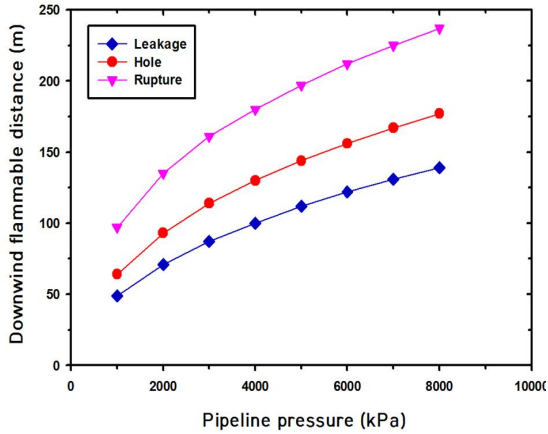
환경 변수에 따른 피해범위를 살펴본 결과 풍속과 대기의 온도, 대기 안정도에 따라 배관의 누설, 과공, 파손 여부와 관계없이 플래시 화재에 의한 피해범위가 가장 큰 것을 알 수 있었고, 과압의 영향, 복사열에 의한 영향 순서로 높은 피해범위를 보이는 것을 확인했다. 또한 배관에서 제트 화재 발생으로 인한 복사열의 피해범위는 대기 온도에 조금의 영향을 보이기는 했으나 환경 변수에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있었다.

3.2 공정 변수

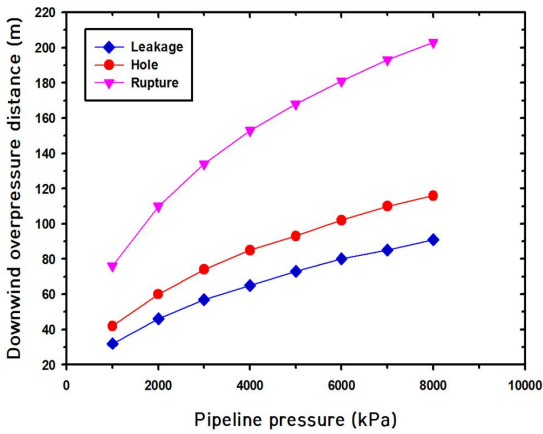
3.2.1. 배관내 압력 변화에 따른 피해범위

Fig. 4는 배관내 천연가스의 압력 변화 따른 누출공의 크기별 플래시 화재에 의한 피해범위(a), 과압에 의한 피해범위(b), 복사열에 의한 피해범위(c) 결과를 정리한 그림이다. 배관이 완전히 파손된 Rupture 상태일 때 배관내 압력이 8,000 kPa를 기준으로 피해범위를 살펴보면 플래시 화재의 피해범위는 237 m, 과압의 영향은 203 m, 복사열에 의한 피해범위는 32 m의 피해 범위를 보였다. 피해범위가 가장 적었던 복사열에 의한 영향 대비하여 플래시 화재의 경우 205 m, 과압의 경우 171 m의 더 큰 피해영향범위를 나타냈다.

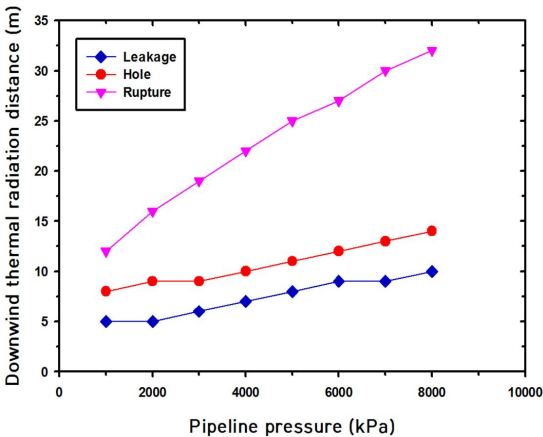
또한 배관내 천연가스의 압력이 증가할수록 플래시 화재, 과압 그리고 복사열에 의한 피해범위는 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 보인 이유는 배관내 압력이 증가할수록 누출공으로부터 방출되는 압력도 비례하여 증가하고 이에 따라 제트 방출량도 증가하기 때문에 피해범위가 증가한 것으로 보인다. 배관내 천연가스의 압력이 1,000 kPa일 때 플래시 화재의 영향, 과압에 의한 영향, 복사열에 의한 피해범위는 각각 97 m, 76 m, 12 m를 나타냈다. 전체 압력범위에서의 피해영향범위를 비교해보면 배관의 압력이 1,000 kPa씩 증가할 때 평균적으로 각각 20 m, 18.1 m, 2.8 m의 피해범위가 증가하였으며, 증가율을 살펴보면 각각 20.6%, 23.9%, 23.8%로 비슷한 증가폭을 보였다. 이에 따라 배관내 천연가스의 압력이 증가할수록 누출공을 통해 방출되는 천연가스의 속도와 압력, 누출량이 증가함에 따라 플래시 화재와 과압, 복사열에 의한 피해범위는 증가하였으며, 그 중 플래시 화재에 의한 피해범위가 가장 컸다. 그리고 배관이 완전히 파손된 Rupture 상태일 때 방출되는 천연가스의 압력과 누출량이 가장 많으므로 누설 및 과공 상태에 비해 가장 큰 피해범위와 증가율을 보이는 것을 확인했다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Damage effect distance according to pipeline pressure of compare in different leakage hole diameter; (a) flammable vapor cloud distance, (b) overpressure distance, (c) thermal radiation distance.

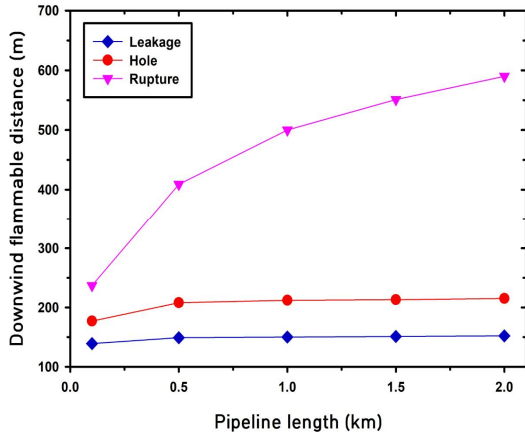
3.2.2. 배관의 길이 변화에 따른 피해범위

Fig. 5는 배관의 길이 변화에 따른 누출공의 크기별 플래시 화재에 의한 피해범위(a), 과압에 의한 피해범위(b), 복사열에 의한 피해범위(c) 결과를 정리한 그림이다. 배관의 길이가 길어질수록 플래시 화재, 과압 그리고 복사열에 의한 피해범위는 더 커졌으나 배관내 압력변화에 따른 피해범위와는 달리 배관의 길이가 증가할수록 구간별 증가율은 점점 감소하는 것을 알 수 있었다. 배관의 길이에 따라 피해범위가 증가하는 이유는 배관의 누출공을 통해 천연가스가 방출될 때 배관의 길이가 길어질수록 누출되는 천연가스의 양이 증가하기 때문이다. 또한 배관에서 천연가스가 방출되면 바람방향으로 기둥모양의 가스가 누적된 후 방출되기 때문에 배관의 길이와 천연가스의 방출량은 비례하지는 않는 것을 알 수 있다. 배관이 완전히 파손된 Rupture 상태를 기준으로 0.1~1.0 km, 1.0~2.0 km로 구간을 나누어 피해범위를 살펴보면 플래시 화재의 영향은 0.1 km일 때 237 m, 1.0 km일 때 500 m로 263 m가 증가하였으며, 2.0 km에서는 590 m로 90 m의 피해범위가 증가하였다. 이를 증가율로 비교해보면 0.1~1.0 km 구간에서는 110.9%가 증가하였으나 1.0~2.0 km 구간에서는 증가율이 18%로 0.1~1.0 km 대비 92.9%의 증가율이 감소함을 알 수 있다.

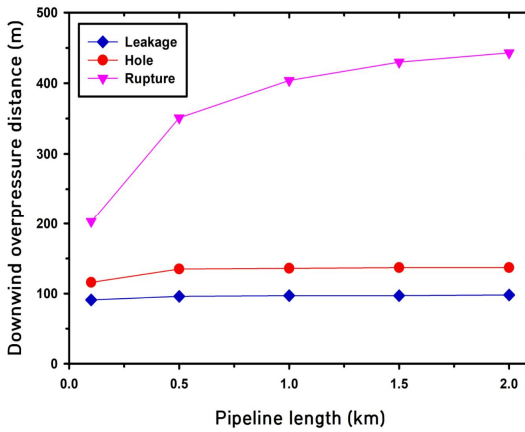
다음은 과압으로 인한 피해범위를 살펴보면 0.1 km일 때 203 m, 1.0 km일 때 404 m로 201 m가 증가하였으며, 2.0 km에서는 443 m로 39 m의 피해범위가 증가하였다. 이러한 결과를 증가율로 비교해보면 0.1~1.0 km 구간에서는 96.1%가 증가하였으나 1.0~2.0 km 구간에서는 증가율이 9.6%로 0.1~1.0 km 대비 86.5%의 증가율이 감소함을 알 수 있다.

복사열에 의한 피해범위의 경우 배관의 길이가 증가함에 따라 피해범위는 비선형적인 증가폭을 보였지만 플래시 화재나 과압에 의한 영향과 비교하여 일정한 간격의 배관 거리에 대한 복사열에 따른 피해범위의 증가율은 점점 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 5의 (c)를 살펴보면 0.1 km일 때 32 m, 1.0 km일 때 48 m로 16 m가 증가하였으며, 2.0 km에서는 49 m로 1 m의 피해범위가 증가하였다. 이를 증가율로 비교해보면 0.1~1.0 km 구간에서는 50%가 증가하였으나 1.0~2.0 km 구간에서는 증가율이 2.1%로 0.1~1.0 km 대비 47.9%의 증가율이 감소함을 알 수 있다. 이러한 이유는 플래시 화재나 과압에 의한 피해범위와 마찬가지로 배관 길이가 증가하여 누출되는 양은 증가하였으나 누출된 천연가스가 바로 확산되지 못하고 배관 주변에 기둥모양으로 누적된 후 방출되기 때문에 0.1~1.0 km 대비 1.0~2.0 km 구간에서 증가율이 감소되었다. 그리고 Rupture 상태일 때 배관의 길이가 길어질수록 방출되는 천연가스의 누출량이 동시에 증가하게 되므로 누설 및 과공 상태에 비해 가장 큰 피해범위와 증가율을 보였다. 특히 공정 변수에 따른 피해범위는 누출공을 통해 방

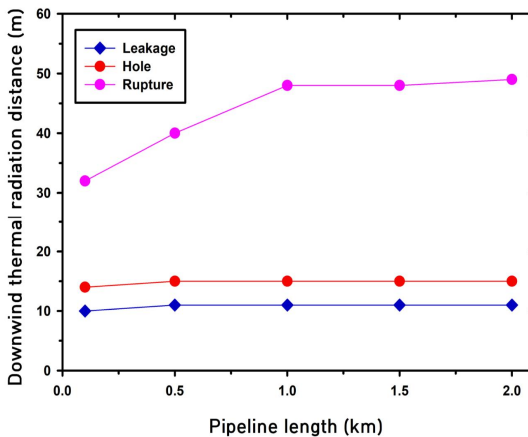
LNG 추진선의 천연가스 배관에서 누출 시나리오에 따른 피해범위에 관한 연구



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Damage effect distance according to pipeline length stability of compare in different leakage hole diameter; (a) flammable vapor cloud distance, (b) overpressure distance, (c) thermal radiation distance.

출되는 천연가스의 누출량에 따라 각각 다른 피해범위를 보였으며, 배관에서 천연가스의 압력이 증가할수록 피해범위는 거의 선형적으로 증가하고, 배관 길이가 길어질수록 피해범위는 압력이 증가했을 때보다 비교적 비선형적으로 증가했다.

4. 결론

본 연구에서는 LNG 추진선내 천연가스 배관의 파손으로 인해 가스의 누출이나 화재 및 폭발이 발생했을 때 환경 변수와 공정 변수에 따라 누출공의 크기별 피해범위를 산출하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 환경 변수에 따른 피해범위는 플래시 화재에 의한 피해범위가 가장 큰 것을 알 수 있었고, 다음으로 과압, 복사열 순서로 큰 피해범위를 보였다. 그리고 제트 화재 발생으로 인한 복사열의 피해범위는 대기 온도에 조금의 영향을 주었으나 풍속과 대기 안정도가 피해범위에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

2) 공정 변수에 따른 피해범위를 살펴본 결과 배관의 압력과 길이, 누출공의 크기와 관계없이 플래시 화재에 의한 피해범위가 가장 큰 것을 알 수 있었으며, 다음으로 과압, 복사열 순서로 큰 피해범위를 보였다. 그리고 환경 변수와 비교하여 풍속, 대기온도, 대기 안정도에 영향을 거의 받지 않았던 복사열의 피해범위는 공정 변수에 비교적 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 플래시 화재나 과압, 복사열에 의한 피해영향범위가 비교적 더 큰 것을 확인했다.

3) 본 연구 결과를 통해 LNG를 취급하는 선박에서 병커링 또는 천연가스 이송 등의 문제로 육상에 근접해있어야 할 경우 배관 플랜지 및 밸브 등에서 발생하는 대량누출 시나리오에 근거하여 선박의 안전거리를 설정하는 것이 바람직할 것으로 사료되며, 향후에는 화재 및 폭발의 연쇄적 반응인 도미노 효과(Domino effect)를 고려한 연구가 추가되어 진행된다면 2차 피해를 예방하는 등에 충분한 활용가치가 있을 것으로 판단된다.

References

[1] ALOHA(2013), ALOHA Technical documentation. Nov. 2013.
 [2] Anjana, N. S., A. Amarnath, S. V. Chithra, M. V. Harindranathan Nair, and K. J. Subin(2015), Population Vulnerability Assessment around a LPG Storage and Distribution Facility near Cochin using ALOHA And GIS, International Journal of Engineering Science Invention, Vol. 4, No. 6, pp. 23-31.

- [3] Bernatik, A., P. Senovsky, and M. Pitt(2011), LNG as a potential alternative fuel e Safety and security of storage facilities, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24 pp. 19-24.
- [4] Bubbico, R. and B. Mazzarotta(2008), Accidental Release of Toxic Chemicals: Influence of the Main Input Parameters on Consequence Calculation, *Journal of Hazardous Materials* 151, p. 394.
- [5] CCPS(2000), Centre for Chemical Process Safety, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, American Institute of Chemical Engineers, New York, 2nd Edition.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Davidson, R. A., J. Kendra, S. Li, L. C. Long, D. A. McEntire, C. Scawthorn, and J. Kelly(2012), San Bruno California, Gas Pipeline Explosion and Fire, Disaster Research Center.
- [9] Dong, G., L. Xue, Y. Yang, and J. T. Yang(2010), Evaluation of Hazard Range for the Natural Gas Jet Released from a High-pressure Pipeline: A Computational Parametric Study, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 23, p. 522.
- [10] Ha, D. M.(1998), A Study on the Characteristics of Methane and LNG Explosion, The Korean Society of safety, Proceeding of Autumn Conference.
- [11] Hanna, S.(2008), Comparison of Six Widely-Used Dense Gas Dispersion Models for Three Recent Chlorine Railcar Accidents, *Process Safety Progress*, Vol. 27, No. 3, pp. 248-259.
- [12] Kang, S. K., H. J. Bang, and Y. D. Jo(2013), Consequence Analysis of Hydrogen Blended Natural Gas(HCNG) using 3D CFD Simulation, *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 17, No. 5, pp. 15-21.
- [13] Kim, H. C.(2018), Professor Kim Hae-chang's Energy Conversion Story, International newspaper, (Accessed 8 Jan. 2020).
- [14] Kim, S. H.(2010), Thermal Diffusion Characteristics of FPSO Topsides under Fire considering Wind Effects, University The National University of Pusan Master Thesis.
- [15] Ko, J. S.(2012), Study on Probabilistic Analysis for Fire-Explosion Accidents of LPG Vaporizer with Jet Fire, *J. Kor. Inst. Fire Sci. Eng.*, Vol. 26, No. 4, 2012, pp. 31-41.
- [16] KOSHA Code P-14(2000), Technical Guidelines for Leakage Source Modeling, Korea Occupational Safety and Health Agency.
- [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. H.(2018), Analysis of the Impact of Fire and Explosion Accidents due to LNG Leaks in the LNG Re-gasification Process, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 24, No. 6, pp. 825-833.
- [19] Lees, F. P.(1980), *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*, Butterworths.
- [20] Park, S. H.(2014), A study on the fire risk assessment of natural gas power plant, The University of Seoul Master Thesis.
- [21] Seok, J., S. M. Jeong, J. C. Park, and J. K. Paik(2013), CFD Simulation of Methane Combustion for Estimation of Fire and Explosion in Offshore Plant, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 27 No. 2, pp. 59-68.
- [22] Song, I. H.(2018), Analysis of the impact of fire and explosion on petrochemical process using CFD, University The National University of Pusan Master Thesis.
- [23] Wang, K., Y. He, Z. Liu, and X. Qian(2019), Experimental study on optimization models for evaluation of fireball characteristics and thermal hazards induced by LNG vapor Cloud explosions based on colorimetric thermometry, *Journal of Hazardous Materials* 366, pp. 282-292.
- [24] Yoo, J. H., B. S. Kim, H. S., E. S. Ko, and G. B. Lee(2009), A Study on Consequence Analysis of LNG/LPG/Gasoline Station, *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 13, No. 3.
- [25] You, J. S. and Y. J. Chang(2015), Study on the Ship Fire Analysis According to Explosion Hazard, *Fire Sci. Eng.*, Vol. 29, No 1, pp. 80-86.
- [26] Zhu, H., Z. Mao, Q. Wang, and J. Sun(2013a), The influences of key factors on the consequences following the natural gas leakage from pipeline, *International Association for Fire Safety Science, Procedia Engineering*, Vol. 62, pp. 592-601.

Received : 2020. 04. 08.

Revised : 2020. 05. 29. (1st)

: 2020. 06. 15. (2nd)

Accepted : 2020. 06. 26.