

## 이동식 LNG 충전소 정량적 위험성 평가

전은경 · 최영주 · 김필종 · †유철희

한국가스안전공사 가스안전연구원

(2021년 11월 2일 접수, 2021년 12월 14일 수정, 2021년 12월 15일 채택)

## Quantitative Risk Assessment of Mobile LNG Filling Station

Eun-Gyeong Jeon · Young-Joo Choi · Pil-Jong Kim · †Chul-Hee Yu

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

(Received November 2, 2021; Revised December 14, 2021; Accepted December 15, 2021)

### 요약

정부는 국내 미세먼지의 주요 원인 중 하나인 대형화물차의 연료를 경유에서 액화천연가스(LNG) 등의 친환경 연료로 전환하는 정책을 추진하고 있다. 부족한 충전 인프라의 문제점을 해결하고, LNG 연료의 초기 보급을 원활하게 하기 위해 규제자유특구를 통한 이동식충전소 개발과 실증이 진행되고 있다. 본 연구에서는 실증용 이동식충전소의 개발에 앞서 안전한 설계를 위해 정량적 위험성평가 프로그램을 활용하여 주요설비(저장, 충전)에 대한 피해영향범위를 산출하였으며, 가상 시나리오에 대한 개인적/사회적 위험도를 예측하여 위험성 분석을 실시하였다. 위험도 분석 결과, 이동식충전소 실증시설의 위험성은 가용한 범위 내에 있는 것으로 나타났다.

**Abstract** - The government is converting the fuel for trucks, one of the causes of PM in Korea, from diesel to LNG. Mobile LNG station are being developed to solve the problems of insufficient charging infrastructure and facilitate the spread of LNG fuel. In this study, QRA was used to calculate the CA of the facility for a secure design prior to the development of the mobile LNG station and to predict the individual/societal risk the scenario. As a result, the danger of mobile LNG station was in ALARP.

**Key words** : LNG, QRA, Mobile LNG filling station, SAFETI, individual risk, societal or group risk

### I. 서론

정부에서는 대기환경 개선을 위해 ‘미세먼지 관리 종합대책’, ‘탄소 중립’ 등의 미세먼지 저감 대책을 수립하여 추진하고 있다. 이로 인해 친환경 자동차용 연료인 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas)에 대한 중요성이 높아지고 있다.

국립환경과학원의 국가 대기오염물질 배출량 통계를 따르면, 국내 미세먼지 발생량 중 교통부문(도로 이동오염원 약 29%)에서 미세먼지 배출이 가장 높은 것으로 나타났다.[1] 그 중 경유연료의 약 99%를 사용하는 화물자동차가 미세먼지 배출량의 대부분을 차지하는 것으로 분석되었으며, [Fig. 1][2] 에 나타나

었다. 환경부 자료에 의하면, LNG를 연료로 사용하는 화물자동차의 경우 기존 경유 화물자동차 대비 미세먼지 99%, 질소산화물 31%, 이산화탄소 14%의 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.[3]

LNG 연료의 환경적 이점에도 불구하고, 원활한 보급을 위한 고정식 충전소가 현재 6개소에 불과하여 차량의 보급을 위해서는 더 많은 인프라를 구축할 필요가 있다.[4] 인프라 확보를 위해 고정식 충전소 구축을 증가시킬 경우, 고비용-장기간이 소요되는 것과 보급 초기에 화물자동차가 충분하지 않아 저장탱크 내에 증발가스(BOG, Boiled off gas)가 발생하는 등의 문제점을 갖고 있다. 이를 해소하기 위해 LNG 차량 보급 초기에 소규모의 이동이 가능한 이동식 LNG 충전소를 설치하여 수요를 확보하고 점차적으로 고정식 충전소로 변경해 나갈 필요가 있다.

국내 도시가스사업법 내 도시가스 충전사업에는

†Corresponding author:gusari@kgs.or.kr

Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas



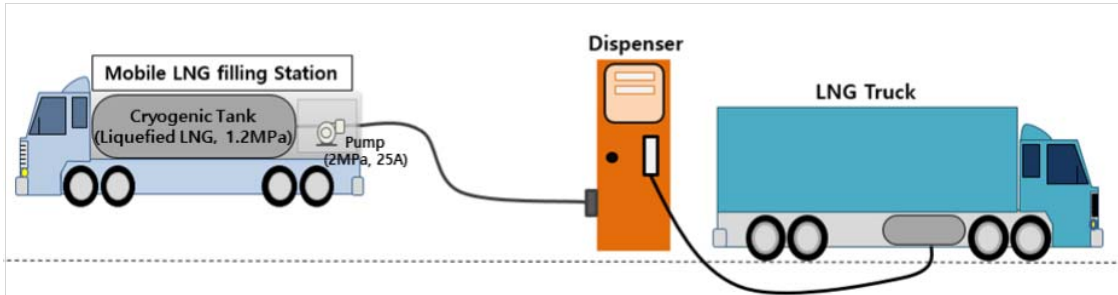


Fig. 3. Standard model of mobile LNG filling station.

설비가 있다. 저장탱크 내조 용량은 20 kL(적재중량 8,000 kg, LNG 비중 0.455 기준), 설계압력은 1.2 MPa, 디스펜서와 펌프, 배관에서 압력은 2 MPa, 관경은 25 mm 이다. 이는 전북규제자유특구 이동식 LNG 충전소 실증으로 구성된 시설내용이며, 이러한 충전소 사양을 Table. 1 에 나타내었다.

### III. 이동식 LNG 충전소 사고시나리오

#### 3.1. 사고시나리오 선정

이동식 LNG 충전소는 국내 최초로 실증을 진행, 개발하는 것이라 사고 이력을 찾을 수 없어 가상 유사한 LNG 설비와 관련된 시나리오를 참고하여 선정하였다.[5-5]

Kang 등[5]은 LNG 저장설비 중 저장탱크 가장 큰 부속 배관의 100 % 파손되는 설계시나리오를 도출하여 위험성평가 방법과 사고영향 범위 분석 방향을 제시하였다. Yoo 등[6]은 로딩암 이탈에 따른 누출과 충전소 site내 저장탱크의 완전 파열에 의한 화재/폭발 발생의 두 가지 시나리오를 제시하여 LNG/LPG/가솔린 충전소에 대한 사고피해영향평가를 비교하였으며, 시나리오에 따른 사고 피해를 예측하였다. Ko 등[7]은 LNG 저장탱크 및 배관에서의 균열, 과압, 파열에 대한 대량누출 사고시나리오를 설정하여 위험성평가를 진행하였고 멤브레인 형태의 저장탱크와 9 %-Ni 저장탱크의 사고빈도를 도출하여 제시하였다. Lee 등[8]은 LNG 저장탱크의 형식인 완전 방호식 탱크와 멤브레인식 탱크의 예상사고와 원인을 제시하여 위험성을 비교하였으며, 위험빈도를 분석하여 LNG 저장탱크의 위험도 수준을 예측하였다.

LNG 설비와 관련된 연구 자료에서 제시하는 잠재 위험요인을 검토하였을 때, LNG 저장탱크 및 배관 파열과 관련된 사고를 바탕으로 이동식 LNG 충전소의 사고시나리오를 선정하였다. 먼저 충전소 주요 설비인 자동차에 고정된 탱크와 배관이 포함된 디스펜서

Table 2. Worst weather condition for QRA [9,10]

Meteorology	For Dispersion Model
Ambient temperature	37.1 °C
Wind speed	1.5 m/s
Stability	Pasquill-Gifford : F

를 중심으로 최악의 시나리오인 파열이 발생하는 조건을 아래와 같이 선정하였다.

- 시나리오1 : 이동식 LNG 충전 작업장 내에서 적재중량이 8000 kg인 저장탱크 주위에 화재가 발생하였고 국부가열로 LNG 저장탱크가 100 % 완전 파열되어 화재 및 폭발이 일어남
- 시나리오2 : 충전대상 상용차의 충돌로 지상에 고정된 디스펜서가 전도되어 배관이 완전 파열됨

#### 3.2. 주변 환경조건 분석

이동식 LNG 충전소의 정량적 위험성 평가를 위해 점화원 및 주변 환경조건(온도, 점화원, 인구분포, 시설 등)을 설정하였다. 우선 점화원은 충전소에서 발생하는 충격에 의한 불꽃으로 가정하였다. 풍속(1.5 m/s)과 대기안정도(Pasquill-Gifford:F)는 KOSHA GUIDE P-107-2020 (최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침)에 제시된 조건을 참고하였다.[9] 대기온도의 경우 최악의 시나리오 조건으로 설정하기 위해 전북 군산시의 최근 3년간(18~20년도) 온도 중 최고 온도 37.1 °C를 온도 데이터로 설정하였으며, 위험성평가를 위한 기상조건을 Table. 2 에 나타내었다.[10] 또한, 충전소 운영시간(오전 9시~오후 6시)의 주변 건물(사무실, 경비실, 공장 등)에 인구분포를 조사하

**Table 3.** Population conditions

Area	Category	Day	
		Population	Fraction Indoors
Manage Office	Operator	4	0.9
Office	Public	1	0.9
Factory1	Public	20	0.4
Factory2	Public	50	0.4

여 Table. 3 에 나타내었다.

#### IV. 정량적 위험성 평가(QRA)

##### 4.1. 정량적 위험성 평가 개요

본 연구에서는 정량적 위험성 평가를 위해서 PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool)와 SAFETI (Software for the Assessment of Flammable, Explosive and Toxic Impact)를 사용하였다.

PHAST를 활용하여 화재, 폭발 등의 사고에 대한 피해영향 및 범위를 분석하였고 충전소의 주요 설비인 저장, 충전설비의 사고피해 규모를 확인하였다. 그리고 SAFETI는 충전 시설의 잠재적인 위험 확인을 위해 도출된 시나리오를 기반으로 종합적 위험을 확인하였고 사고빈도와 환경조건을 통해 개인적/사회적 위험도를 평가하여 이동식 LNG 충전소의 위험영역을 확인하였다.

이동식 LNG 충전소 저장설비인 자동차에 고정된 탱크는 실제 사업장에서 고정 후 사용되기 때문에 고정된 탱크로 가정하여 수행하였다.

##### 4.2. PHAST를 활용한 피해영향범위 분석 결과

사고시나리오에 따른 LNG 저장탱크와 디스펜서에서 파열이 발생할 때, 복사열과 폭발과압의 영향이 존재한다. 복사열과 폭발과압의 위험기준은 KOSHA GUIDE P-102-2012(사고피해예측 기법에 관한 기술지침)을 참고하였다. [11] 복사열은 인체와 설비에 영향을 끼치는 정도로 폭발과압은 사업장 주위의 시설물(사무실, 화물차 등)을 고려하였으며, 이러한 피해영향을 Table. 4,5 에 각각 나타내었다.

저장탱크와 디스펜서의 파열 시, Fireball 및 Pool Fire 의 영향에 의해 4, 12.5, 37.5 kW/m<sup>2</sup> 복사열이 나타났다. 폭발과압은 0.02, 0.21, 0.7 bar 영향에서 저장탱크는 각각 386.02, 165.93, 83.02 m 으로 디스펜서의 경우, 각각 120.38, 51.7, 25.89 로 피해영향 범위가 나

**Table 4.** The effect of Radiation

Radiation (kW/m <sup>2</sup> )	Effect
4	인체에 영향을 끼치는 최소 에너지
12.5	설비에 영향을 끼치는 최소 에너지
37.5	장비 및 설비가 완전히 손상

**Table 5.** The effect of Overpressure

Overpressure (bar)	Effect
0.02	사무실 유리창이 파열될 정도 압력
0.21	주위 공장 건물이 파손될 정도 압력
0.7	대형 화물차가 전파될 정도의 압력

타났다. 이러한 복사열과 폭발과압의 피해영향 범위 그래프를 정리하여 Fig. 4 에 제시하였다.

누출 시 물질의 확산범위를 연소상한계(UFL, Upper Flammability Limit), 연소하한계(LFL, Lower Flammability Limit). 연소하한계의 50 % (1/2 LFL)의 기준으로 나타내었다. 저장탱크 파열 시, 이동식 LNG 충전소에서 근처 사무실까지 확산범위가 나타났으며, 도로나 근처 공장 등의 시설물에는 누출 확산이 일어나지 않는 것을 확인하였다. 디스펜서의 경우, 충전소 사업장 내에서만 확산범위가 존재하였으며, 근처 공장 사무실에는 영향이 없었다. 이러한 결과를 Fig. 5 에 각각 나타내었다.

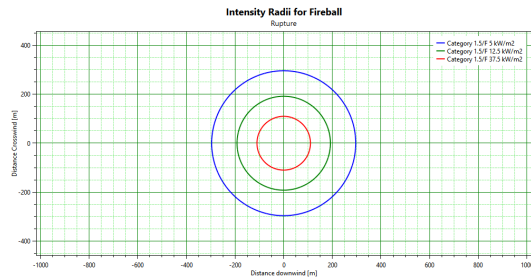
가스 누출 시 점화원이 존재할 경우, 화재 및 폭발이 일어날 수 있어 화재에 대한 대비가 필요하다. 이러한 대비책으로 주요설비(저장, 충전) 등에 방폭이 이루어져야 한다.

##### 4.3. SAFETI를 활용한 개인적/사회적 위험도 분석

###### 4.3.1. 위험도 분석 개요

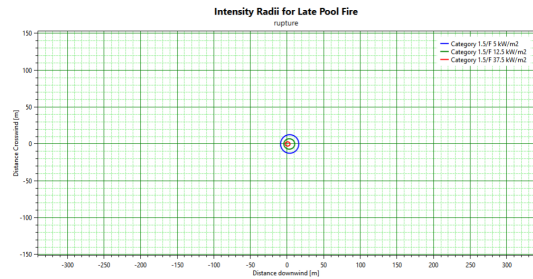
위험도는 사고빈도와 위험성의 곱으로 정의한다. 위험도 분석을 위해선 설비에 대한 사고빈도가 필요하며, 국내에는 LNG 사고빈도 데이터가 없어 미국의 PHMSA(Pipeline and Hazardous Materials Safety Association) 에서 제시하는 IOGP 434-01 (International Association of Oil&Gas Producers)의 LNG 설비별 사고빈도를 참조였고 시나리오에 부합하는 사고빈도만 인용하여 Table. 6 에 나타내었다.[12] 이동식 LNG 충전소의 정량적 위험성 평가 결과를 분석하기 위해 허용기준에 대한 위험도를 파악해야 한다.

## 이동식 LNG 충전소 정량적 위험성 평가



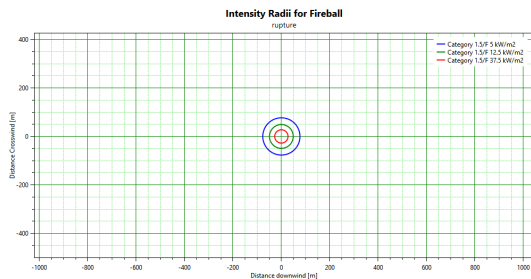
Fireball diameter	98.29 m
5 kW/m <sup>2</sup>	296.10 m
12.5 kW/m <sup>2</sup>	191.86 m
37.5 kW/m <sup>2</sup>	109.86 m

(a) Intensity Radii for Fireball of tank



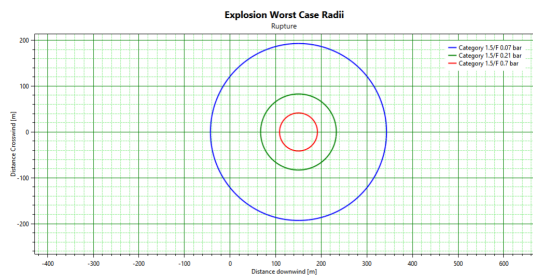
Pool Fire diameter	4.03 m
5 kW/m <sup>2</sup>	12.97 m
12.5 kW/m <sup>2</sup>	10.49 m
37.5 kW/m <sup>2</sup>	4.08 m

(d) Intensity Radii for Late Pool Fire of dispenser



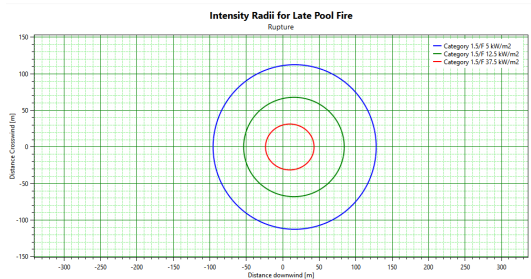
Fireball diameter	27.05 m
5 kW/m <sup>2</sup>	76.87 m
12.5 kW/m <sup>2</sup>	49.13 m
37.5 kW/m <sup>2</sup>	27.55 m

(b) Intensity Radii for Fireball of dispenser



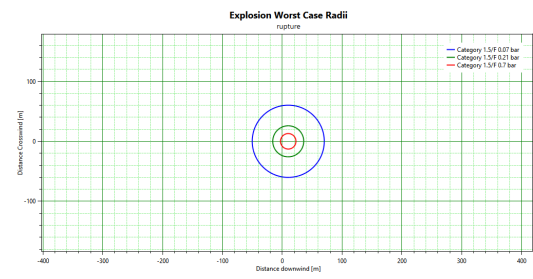
Overpressure Level	Maximum distance	Diameter
0.07 bar	303.01 m	386.02 m
0.21 bar	232.96 m	165.93 m
0.7 bar	191.51 m	83.02 m

(e) Explosion Worst Case Radii of tank



Pool Fire diameter	27.59 m
5 kW/m <sup>2</sup>	128.09 m
12.5 kW/m <sup>2</sup>	84.27 m
37.5 kW/m <sup>2</sup>	42.90 m

(c) Intensity Radii for Late Pool Fire of tank



Overpressure Level	Maximum distance	Diameter
0.07 bar	70.19 m	120.38 m
0.21 bar	35.87 m	51.7 m
0.7 bar	22.94 m	25.89 m

(f) Explosion Worst Case Radii of dispenser

**Fig. 4.** Distance downwind to defined radiation levels and overpressure.

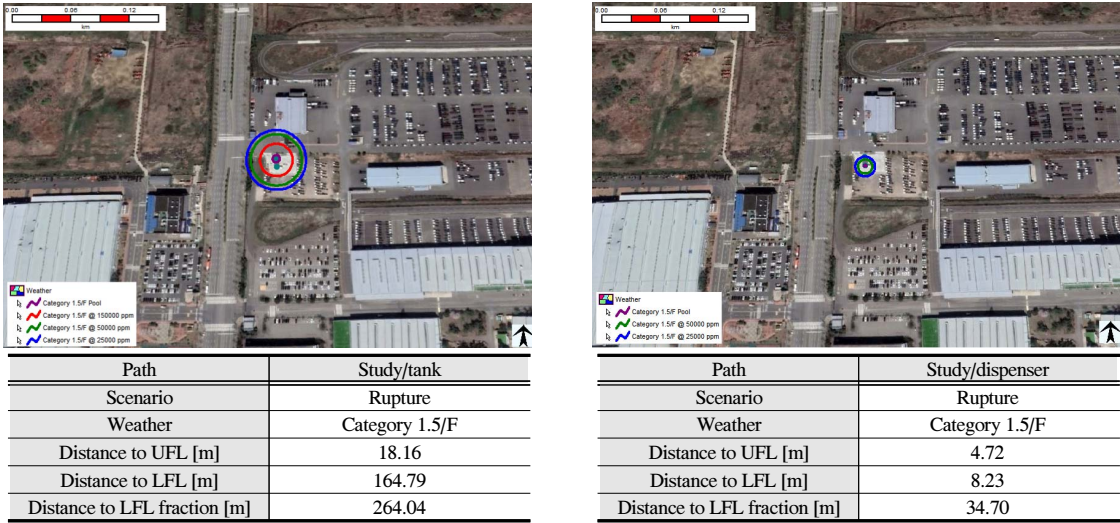


Fig. 5. Distance downwind to defined concentrations.

Table 6. Nominal Failure Rates Specified in the LNG Failure Rate Table From PHMSA.[12]

Equipment	Type of Failure	Nominal Failure Rate per Year of Operation
Process Vessels	Catastrophic Failure (Rupture)	5 x 10 <sup>-6</sup> per vessel
	Release from hole in inner tank with effective diameter of 0.01 m	1 x 10 <sup>-4</sup> per vessel
Piping: d < 50 mm	Catastrophic Rupture	1 x 10 <sup>-6</sup> per metre
	Release from a hole with effective diameter of 25 mm (1")	5 x 10 <sup>-6</sup> per metre

본 연구에서는 UK HSE(Health and Safety Executive)에서 제시한 위험허용기준을 참조하여[Table. 7] [13]에 나타냈다. HSE의 위험허용기준(ALARP, As Low As Reasonably Practicable)은 1×10E-4부터 1×10E-6까지이며, 이를 Fig. 6에 나타내었다. 허용 불가능한 영역의 경우, 작업자는 10E-3/year, 일반인은 10E-4/year이며, 과 설계 되었거나 안전에 문제가 있기 때문에 설계 변경 등으로 위험성을 낮추는 조치를 취하여야 한다.

**4.3.2. 개인적 위험도(IR, Individual Risk) 분석 결과**  
DS/INF 85-Risk Analysis에서 정의하는 개인적 위험도란 위험원과의 거리에 기초하여 개인의 노출되는 위험으로 명시하고 있다.[15]

LNG 충전설비의 개인적 위험도를 분석한 결과 시설로부터 가장 가까이 나타난 범위는 1×10E-6/year이다. 1×10E-6/year 내에 존재하는 작업자, 일반인 등

Table 7. Risk acceptance criteria(UK HSE). [13]

Criteria	Risk of Fatality per year
Unacceptable / Intolerable	> 1×10E <sup>-3</sup>
Maximum tolerable risk for workforce	1×10E <sup>-3</sup>
Maximum tolerable risk for members of the public	1×10E <sup>-4</sup>
ALARP region (workforce)	1×10E <sup>-6</sup> ~ 1×10E <sup>-3</sup>
ALARP region (public)	1×10E <sup>-6</sup> ~ 1×10E <sup>-4</sup>
Broadly Acceptable	< 1×10E <sup>-6</sup>

이 사망할 확률이 1/1000000 이라는 것을 의미한다. Fig. 7의 그래프를 보았을 때, 1×10E-5/year의 영역은

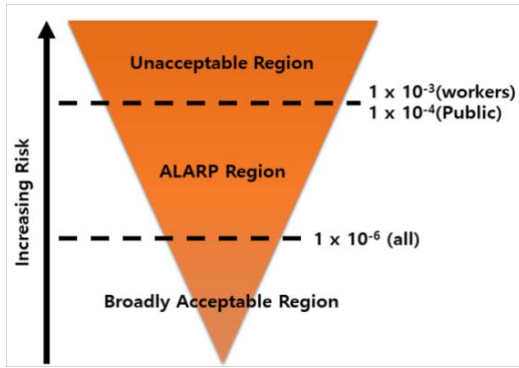


Fig. 6. UK nuclear industry Risk Tolerance Criteria.[14]

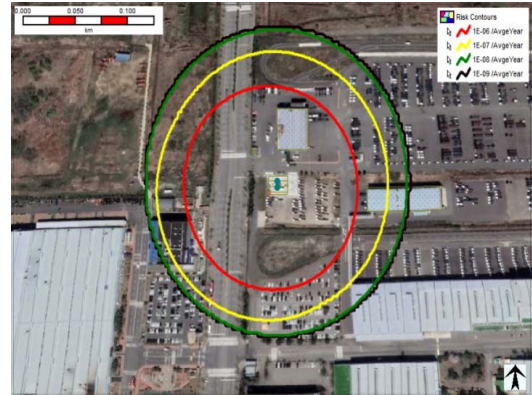


Fig 7. Individual risk assessment.

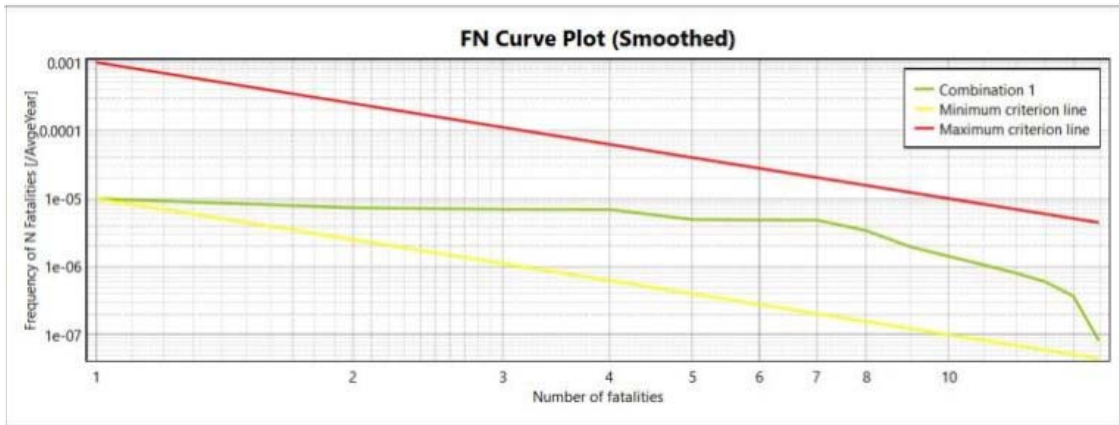


Fig. 8. Societal risk assessment F-N Curve.

보이지 않으며, 이는  $1 \times 10E-6 \leq Y < 1 \times 10E-5$  (Y, 이동식 LNG 충전소 개인적 위험도)의 범위라는 것을 알 수 있다. 즉, 작업자와 일반인의 허용기준인 ALARP (workforce)와 ALARP(public)의 영역에 포함되는 것으로 위험성 허용 기준을 만족한다.

#### 4.3.3. 사회적 위험도(SR, Societal Risk) 분석 결과

사회적 위험은 작업자, 일반인 등 인구분포에서 설정한 한 무리의 사람들이 동시에 사고의 결과에 노출되는 위험을 나타낸다. 이것은 Number of Fatalities와 Frequency of Fatalities의 곱인 F-N curve로 표현할 수 있다. Fig. 8의 이동식 LNG 충전소의 사회적 위험도를 분석한 결과  $1 \times 10E-5$ /year부터 그래프가 시작되며,  $1 \times 10E-5 \geq Y$  (Y, 이동식 LNG 충전소 사회적 위험도)의 범위에 있는 것으로 분석되었다. 이는 Table. 3에서

설정된 인구분포에서 위험에 노출되는 사람들의 사상확률을 나타내며, 인구조건 중 미상의 한 사람이 위험에 노출되어 사망할 확률이  $1 \times 10E-5$ /year, 인구의 수가 늘어날수록 사상확률이 줄어드는 그래프의 모양을 보아 최대 사상확률은  $1/100000$  이라는 것을 알 수 있다. 이는 ALARP(workforce)와 ALARP(public)의 영역에 포함되는 것으로 위험성 허용 기준 범위를 만족한다.

## V. 결론

본 연구에서는 정량적 위험성 평가 프로그램(PHAST/SAFETI)을 활용하여 실증용 거점형 이동식 LNG 충전소의 주요설비에 대한 피해영향범위를 산출하였으며, 가상 시나리오에 대한 개인적/사회적 위험도를

예측하여 위험성을 분석하였다. 위험성 평가 결과, 이동식 LNG 충전소 실증시설의 위험성은 가용한 범위 내(ALARP)에 있는 것으로 나타났다. 다만, 피해영향범위 산출에 대한 위험감소방안도 필요하지만, 정량적 위험성평가 프로그램에서 가정요소가 들어간 부분이 있고, 현재 운영 중인 충전소 시설을 완벽하게 구현할 수 없으므로 추가적인 안전 확보를 위하여 실시간 모니터링과 신원확인시스템 등을 적용하여 운영 중에 있으므로 안전한 사용이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구 내용은 중소벤처기업부 규제자유특구 혁신사업의 일환으로 수행 중인 “전북 친환경 자동차 규제자유특구 이동식 LNG 충전소 실증(과제번호 P0012425)”의 지원으로 진행되었으며, 지원에 감사드립니다.

### REFERENCES

- [1] NIER., *PM(Particulate Matter) Emission*, <http://www.airemiss.nier.go.kr>,(2017)
- [2] NIER., *Air Pollutant Emission Statistics*, <http://www.airemiss.nier.go.kr>,(2017)
- [3] Han, J. S., *LNG truck supply feasibility assessment*, KEI, pp 10-12,(2019)
- [4] Lee, S. S., Supply of large LNG vehicles without PM in Jeonbuk special zone of freedom of regulation press release, MSS, pp 1-4,(2020)
- [5] Kang, M. J., et al, *A study on Systematic Risk Assessment Method for LNG Storage Facilities*, KIGAS, (2009)
- [6] Yoo, J. H., et al, *A study on Consequence Analysis of LNG/LPG/Gasoline Station*, KIGAS, (2009)
- [7] Ko, J. S., et al, *Risk Assessment of LNG Storage Tanks*, CHERIC, (2003)
- [8] Lee, S. R., et al, *The comparative risk assessment of LNG tank designs using FTA*, KIGAS, (2012)
- [9] Kwon, H. M., *The technical Guidance on the selection of worst-case and alternative leak scenario*, KOSHA GUIDE P-107-2020, pp 3, (2020)
- [10] Korea Meteorological Administration, <https://www.weather.go.kr>, (2018-2020)
- [11] Kim, K. Y., *The technical Guidelines on Accident Damage Prediction Techniques*, KOSHA GUIDE P-102-2012, 8-14, (2012)
- [12] PHMSA, *Risk Assessment Data Directory Process Release Frequencies*, IOGP 434-01, 43-44, (2019)
- [13] Kwon, D. H., *The Analysis on Quantitative Risk Assessment of the Package Type H<sub>2</sub> Station using Hy-KoRAM and PHAST/SAFETI*, Korean Society for Energy, 7-8, (2020)
- [14] *UK nuclear industry Risk Tolerance Criteria*, <https://www.railssa.com/tolerability-risk>
- [15] Nijs, J. D., *Acceptance criteria in Denmark and the EU*, Environmental Project No. 1269 2009, 11, (2009)