

소규모 LNG 저장시설의 안전거리 기준 연구

오신규* · 조영도**

*호서대학교 기계공학과 · **한국가스안전공사

A Study on Safety Distance for Small Scale LNG Storage facility

Shin-Kyu Oh* · Young-Do Jo**

*Dept. of Mechanical Engineering, Hoseo University, Chungnam, Korea

**Korea Gas Safety Corporation, Chungbuk, Korea

Abstract

In this study safety distance was investigated for small-scale LNG storage facilities in order to provide basic data for safety. The results are as follows; (1) For explosion pressure criteria, current criteria are reasonable, but water spray system should be recommended to LNG storage tank to ensure safety. (2) For criteria based on the results of the quantitative risk assessment, criteria applied to people are 5kW/m^2 for radiation, LFL for dispersion, and 7kPa for explosion pressure. And criteria applied to facility are 37.5 kW/m^2 for radiation and 20 kPa for explosion pressure.

Keywords : Small-Scale LNG Storage, QRA, Criteria, Radiation, Explosion Pressure

1. 서론

고압가스 배관망을 이용하여 공급되는 도시가스는 액화천연가스(LNG : Liquefied Natural Gas, 이하 LNG)를 가압기화한 것으로 배관이 설치되어 있지 못한 지역에서는 도시가스를 사용할 수가 없다. 이에 도서 산간 지역에서는 소규모 LNG 저장시설을 설치하고 LNG를 기화시켜 공장이나 리조트 등의 열원으로 사용하거나 LNG를 가압기화한 후 버스 등에 압축천연가스(CNG : Compressed Natural Gas)로 사용하고 있다. CNG 충전시설외의 소규모 가스 사용시설은 LNG저장탱크에 형성되는 가스의 증발압력으로 운전하기 때문에 소음이 거의 없고 다른 액체 연료에 비해 가격이 싸기 때문에 소규모 LNG 저장시설의 보급이 증가 할 것으로 예상된다.

이런 시설을 안전하게 건설하고 관리할 수 있도록

강제하는 법을 보면, 운전압력에 관계없이 고압가스안전관리법령의 고압가스 저장소 기준을 적용하여 LNG 저장탱크 등을 설치하고 있다.

그러나 LNG의 증발압력을 이용하는 소규모 LNG 저장시설의 경우는 가스압력을 높여주는 LNG 펌프를 사용하지 않는 특성을 감안하여 별도의 법령 즉, 도시가스사업법령의 소규모 LNG 저장탱크 설치 기준을 제정하여 사용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

이에 본 연구에서는 LNG의 증발압력을 이용하여 사용시설에 천연가스를 공급하는 소규모 LNG 저장시설에 대하여 별도의 법령 제정시 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 사고 시 피해규모 등을 예측하고 정량적 위험성평가를 통하여 소규모 LNG 저장시설의 안전성 확보를 위한 안전거리에 대하여 고찰해 보고자 하였다.

†본 연구는 한국가스안전공사의 지원으로 수행되었음.

†Corresponding Author : Shin-Kyu Oh, Mechanical Engineering, Hoseo University

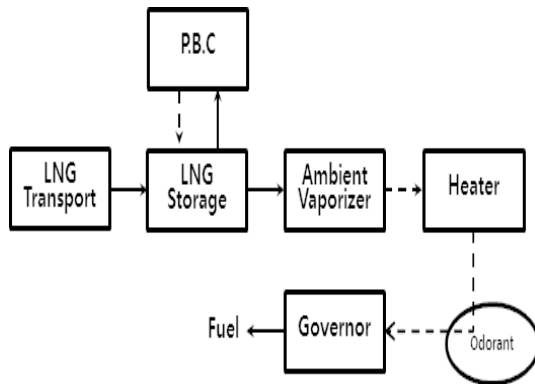
M·P: 011-325-7818, E-mail: shinkyu@hoseo.edu

Received July 14, 2014; Revision Received December 3, 2014; Accepted December 8 2014.

2. 소규모 LNG 저장시설

소규모 LNG 저장시설은 저압으로 운전되는 가스설비이며 주로 산업용 열원이나 리조트 등의 휴양시설에 설치하여 운영되고 있다.

[Figure 1]은 소규모 LNG 저장시설의 가스 흐름도를 나타낸 것이다. LNG 탱크로부터 운반되어져온 LNG는 하역용 호스를 이용하여 LNG 저장탱크에 저장된다. LNG 저장탱크의 LNG는 기화기에서 기화된 후 히터를 거쳐 압력조정기에서 사용압력으로 조정된 후 사용시설로 이송된다. 기화기에서 기화된 NG는 온도가 낮기 때문에 압력 조정기에 영향을 줄 수 있어서 압력조정기 전단에 히터를 설치하여 온도보상용으로 운영된다. 그리고 안전을 위하여 히터와 압력조정기 사이에서 부취제를 주입한다.



[Figure 1] Flow diagram of small scale LNG facility

3. 사고 시나리오

소규모 LNG 저장시설로부터 발생할 수 있는 가스 사고에 대하여 설비 손상의 크기에 따른 사고영향평가를 수행하기 위하여 가스 사고 시나리오를 설정하였다. 최악의 시나리오와 발생 가능한 시나리오를 가정하였으며 두 경우 모두 Purple Book[2]을 참조하였다. 기상 조건의 경우 EN 1473[3]에서는 기온 15℃, 습도 50%, 대기안정도 F, 풍속 2m/s를 사용하도록 권고하고 있다. EN 13645[4]에서는 기온 15℃, 습도 70%, 대기안정도 C, 풍속 5m/s를 사용하도록 권고하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 EN 1473과 EN 13645의 기상 조건으로 분석하였다.

3.1. 최악의 사고 시나리오

(1) 하역 호스 및 라인 파손 : LNG 하역시의 최악의 시나리오는 하역 호스의 파단과 하역 라인의 파단이다. 실제 주입되는 압력은 최대 0.7MPa 정도이나 설계압력이 1.0MPa이기 때문에 이 값을 사용하였다.

(2) 저장탱크 파손 : 저장탱크는 내조와 외조로 구성된 2중벽 구조이며 내조와 외조 사이에는 단열재인 펄라이트가 충전된 진공상태로 유지되어 있다. 이런 형태의 저장탱크는 위험성평가를 기초로 하는 EN 1473과 EN 13645에서는 저장탱크 파손은 고려하고 있지 않다. 그러나 국내 고압가스안전관리법에서는 가스의 저장량에 따른 안전거리를 나타내고 있기 때문에 저장탱크의 파손을 최악의 시나리오로 고려하였다.

(3) P.B.C 인입 배관 파손 : 가스 소비량이 증가하여 저장탱크의 압력이 운전 요구압력보다 낮아질 경우에는 가스의 공급량을 늘려 주어야 한다. 이때에는 LNG 저장탱크의 압력을 높여줘야 하는데 저장탱크에는 압력을 높이는 펌프 등의 설비가 없으나 저장탱크 하부 라인에서 일부를 기화시켜서 저장탱크의 상부로 가스를 보냄으로써 저장탱크의 압력을 높이는 방법을 사용하고 있는데 이 기화장치가 P.B.C (Pressure Build-up Coil)이다. 운전압력은 최대 운전압력보다 낮으나 설계압력을 사용하였다.

(4) 저장탱크 후단~기화기전단 배관 파손 : LNG 저장탱크의 하단부터 기화기까지 LNG가 통과되는 배관의 파손을 가정하였다. 이 배관에는 ESD밸브가 설치되어 있어서 비상 시 LNG를 차단할 수 있도록 되어 있다.

(5) 기화기 파손 : 기화기는 알루미늄 재질로 제작되고 있으며 LNG가 통과되는 배관을 중심으로 주위에 열전달 면적을 크게 하기 위한 핀이 설치되어 있다. LNG가 통과되는 배관은 제작사의 인발 금형에 따라 크기가 다르다. 이 기화기는 핀 중심의 배관이 10개가 파단되는 것을 최악의 시나리오로 설정하였다.

(6) 기화기 후단 배관 파손 : 기화기에서 기체 상태로 변한 천연가스는 기화기에 접촉된 배관을 통하여 소비처로 흘러가게 된다. 이 배관의 설계압력은 1.0MPa이기 때문에 이 값을 사용하였다.

최악의 사고 시나리오를 정리하면 <Table 1>과 같다.

3.2. 발생 가능한 시나리오

최악의 사고 시나리오 중 기화기를 제외하고 모든 지역 설비의 10% 손상을 발생 가능한 사고 시나리오로 설정하였다. 기화기는 직경 10mm 구멍이 발생한 것으로 가정하였다. 발생 가능한 사고 시나리오를 정리하여 <Table 2>에 나타내었다. OGP(International Association of Oil & Gas Producers) 데이터 [5]에서는 자주 발생하는 누출 직경은 1~3mm가 대부분이다. 그러나 법을 검토하는 것이기 때문에 보수적인 관점에서 Purple Book을 참조하였다.

<Table 1> Worst case scenarios

번호	공정	시나리오	상태	압력(MPa)
1	하역	80mm 하역 호스 파단	LNG	1.0
		50mm 하역 라인 파단		
2	저장탱크	파손		
3	P.B.C 인입배관	20mm 인입 파이프 파단		
4	저장탱크 후단~기화기전단	50mm 파이프 파단		
5	기화기	25mm 파이프 10개 파단	NG	
6	기화기 후단	80mm 파이프 파단		

<Table 2> Possible scenarios

번호	공정	시나리오	상태	압력(MPa)
1	하역	80mm 하역 호스 10% 손상	LNG	1.0
		50mm 하역 라인 10% 손상		
2	저장탱크	파손		
3	P.B.C 인입배관	20mm 인입 파이프 10% 손상		
4	저장탱크 후단~기화기전단	50mm 파이프 10% 손상		
5	기화기	직경 10mm 구멍	NG	
6	기화기 후단	80mm 파이프 10% 손상		

4. 사고영향평가

위의 시나리오를 대상으로 사고영향평가를 실시하였다. LNG 저장탱크 및 기화기에 연결되어 있는 배관은 Vent 파이프 등의 특별한 배관을 제외하면 거의 1m 이하 높이에 설치되어 있다. 그러므로 최악의 사고 시나리오인 배관 파손의 경우에는 누출되는 LNG 또는 NG는 수평충돌 하는 것으로 가정하였으며 기화기는 수직방향 누출로 가정하였다. 사용한 소프트웨어는 Phast-Risk 6.7이다.

4.1. 최악의 사고 시나리오

(1) 하역공정 : LNG 탱크로리와 소규모 LNG 저장 시설과 접촉하는 LNG 하역 호스의 파단 시에는 4.5kW/m²가 미치는 범위는 67m로 분석되었다. 이어지는 하역 라인의 배관 파단 시에는 49m로 분석되었다.

<Table 3> Hazard distance (unloading hose rupture)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	65	67
12.5	54	49
37.5	45	40

<Table 4> Hazard distance (unloading line rupture)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	48	49
12.5	39	37
37.5	33	30

(2) 저장탱크 : LNG 저장탱크는 압력 상승이 주된 파손 원인이다. 그러므로 BLEVE에 의한 압력피해 범위를 산출하였다. 저장용량에 따라 피해범위가 달라지기 때문에 저장량이 30,000kg인 경우를 가정하여 피해 범위를 산출하면 <Table 5>와 같다.

<Table 5> Explosion Pressure distance (LNG Storage : 30,000kg)

Overpressure (bar)	Distance (m)
0.02068 (0.3psi)	100
0.1379 (2psi)	26
0.2068 (3psi)	20

(3) P.B.C 인입 배관 : LNG 저장탱크의 압력을 높이기 위해 사용하는 P.B.C.배관 파단 시 4.5kW/m²가 미치는 범위는 27m로 분석되었다.

<Table 6> Hazard distance
(P.B.C inlet tube rupture)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	24	27
12.5	20	21
37.5	17	17

(4) 저장탱크 후단~기화기전단 : LNG 저장탱크와 기화기를 연결해 주는 배관의 파단 시 4.5kW/m²가 미치는 범위는 49m로 분석되었다.

<Table 7> Hazard distance
(tank outlet~vaporizer inlet rupture)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	48	49
12.5	39	37
37.5	33	30

(5) 기화기 : LNG를 NG로 변환시키기 위하여 사용하는 기화기 파손 시 4.5kW/m²가 미치는 범위는 31m로 분석되었다.

<Table 8> Hazard distance
(vaporizer tube rupture)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	24	31
12.5	-	12
37.5	-	-

(6) 기화기 후단 배관 : 기화기와 온도 보상용 히터를 연결해 주는 배관 파단 시 4.5kW/m²가 미치는 범위는 33m로 분석되었다.

Table 9. Hazard distance
(vaporizer outlet tube rupture)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	33	33
12.5	20	19
37.5	13	14

4.2. 발생 가능한 사고 시나리오

(1) 하역공정 : LNG 하역 호스의 10% 파손 시에는 4.5kW/m²가 미치는 범위는 55m로 분석 되었다. 이어지는 하역 라인의 배관 10% 파손 시에는 32m로 분석 되었다.

<Table 10> Hazard distance
(unloading hose leak)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	55	52
12.5	34	35
37.5	-	8

<Table 11> Hazard distance
(unloading line leak)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	32	32
12.5	18	21
37.5	-	3

(2) P.B.C 인입 배관 : P.B.C.배관 10% 파손 시 4.5kW/m²가 미치는 범위는 13m로 분석되었다.

<Table 12> Hazard distance
(P.B.C inlet tube leak)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	13	13
12.5	1	9
37.5	-	-

(3) 저장탱크 후단~기화기전단 : LNG 저장탱크와 기화기를 연결해 주는 배관의 10% 파손 시 4.5kW/m²가 미치는 범위는 32m로 분석되었다.

<Table 13> Hazard distance
(tank outlet~vaporizer inlet leak)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	32	32
12.5	18	21
37.5	-	3

(4) 기화기 : 기화기에 10mm 구멍이 발생할 시 4.5kW/m²가 미치는 범위는 6m로 분석되었다.

<Table 14> Hazard distance
 (vaporizer tube leak)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	6	6
12.5	5	—
37.5	—	—

(5) 기화기 후단 배관 : 기화기와 온도보상용 히터를 연결해 주는 배관의 10% 파손 시 4.5kW/m²가 미치는 범위는 15m로 분석 되었다.

<Table 15> Hazard distance
 (vaporizer outlet tube leak)

Radiation Level (kW/m ²)	Distance (m)	
	2 F	5 C
4.5	15	15
12.5	—	10
37.5	—	—

(6) 벤트 : 안전밸브 등의 작동으로 인한 벤트 시에 방출되는 가스량이 적어 4.5kW/m²의 복사열이 미치지 않는 것으로 분석 되었다.

4.3. 사고영향평가 결과

최악의 사고 시나리오와 발생 가능한 사고 시나리오에 대하여 사고영향평가를 실시하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 최악의 사고 시나리오 : 100m 이상의 안전거리 필요
- (2) 발생 가능한 사고 시나리오 : 55m 이상의 안전거리 필요

이런 결과는 단순히 Purple Book을 참조하여 얻어진 결과이기 때문에 실제 발생빈도가 높은 작은 결함에 의한 결과와는 차이가 있을 수 있다.

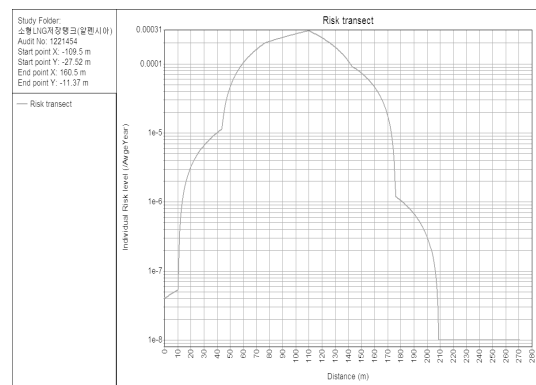
4.4. 정량적 위험성평가(QRA)

소규모 LNG 저장시설을 사용하고 있는 2개 시설에 대해서 QRA를 실시해 보았다. A시설은 30톤 규모의 LNG 저장탱크 3기와 4기의 기화기가 설치되어 있으며 B 시설은 8톤 규모의 LNG 저장탱크 1기와 2기의 기화기가 설치되어 있다.

[Figure 2]는 A 시설에서의 소규모 LNG 저장설비가 가지는 개인적 위험도 선도이며 단면도는 Figure 3이다.



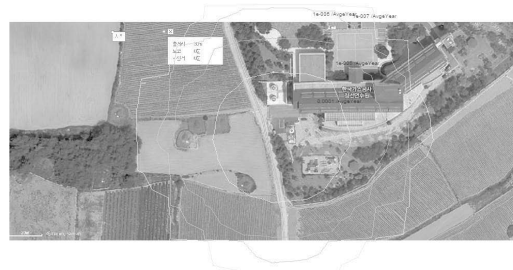
[Figure 2] Individual risk contour of A facility



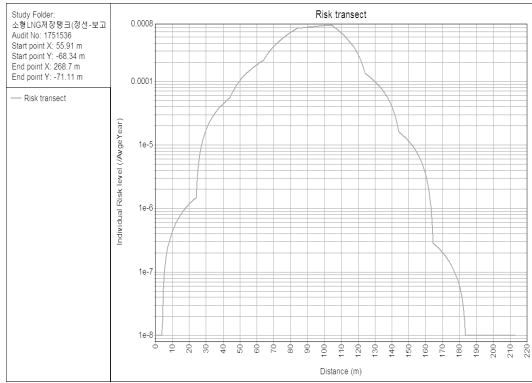
[Figure 3] Individual risk transect of A facility

[Figure 4]는 B 시설에서의 소규모 LNG 저장설비가 가지는 개인적 위험도 선도이며 단면도는 Figure 5이다. 두 시설은 저장용량 및 가스처리 용량에서 차이가 있으나 위험도 선도에서는 큰 차이를 보이고 있지 않다. 그러나 위험도 선도 단면에서는 빈도가 낮은 부분에서 확인한 차이를 보이고 있다. 이는 대규모 사고가 발생할 확률이 낮은 저장탱크 파손과 같은 시나리오가 영향을 미치지 않기 때문이다.

영국의 경우, 일반인에 대한 개인적 위험도 기준이 1E-4/y로 되어 있다. 이 기준을 적용한다면 Figure 3과 [Figure 5]로부터 안전거리는 직경 80m 즉, 반경 40m로 할 수 있을 것이다.



[Figure 4] Individual risk contour of B facility



[Figure 5] Individual risk transect of B facility

[Figure 6]은 LNG 저장탱크의 폭발을 방지하는 살수 설비를 설치할 경우로 가장한 QRA 결과이다.

[Figure 2]와 비교하였을 때 사고빈도가 낮은 영역이 축소된 것을 볼 수 있다. 이는 위에서 언급된 것처럼 대규모 사고가 발생할 확률이 낮은 저장탱크 파손과 같은 시나리오는 위험도가 높은 영역에는 크게 영향을 미치지 못하기 때문으로 판단된다.



[Figure 6] Individual risk contour of A facility (with water spray)

5. 안전거리 검토

안전거리를 검토함에 있어 현재 법에서 제시하고 있는 폭발압력 기준과 세계적으로 활용하고 있는 위험성 평가에 의한 방법에 대하여 검토하였다.

5.1 폭발압력 기준

국내 법의 이격거리 기준은 일본 법에서 가져왔으며 저장 용량 및 1종과 2종으로 구분된 보호시설에 따라 정해진 거리를 사용하고 있다. 이 거리는 폭발압력 12.25kPa을 기준으로 산출되었으며 2종 보호시설과의 이격거리는 1종 보호시설과의 이격거리의 2/3을 취하고 있다. 또한 저장용량에 따라 이격거리가 증가되나 4

만 초과부터는 일정한 값을 가지고 있다.

Phast-Risk 6.7로 저장용량에 따른 폭발압력을 분석하였으며 <Table 16>에 그 결과 값을 나타내었다. 두 값을 비교해 보면 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 약간의 차이가 발생하는 것은 기준 제정 시의 가스의 발열량, 사고 발생시의 가스의 물성치 등이 Phast-Risk 입력값과 차이가 나기 때문으로 판단된다.

EIGA [6] 기준에 의하면 사람에게 피해를 미치지 않는 폭발압력은 2kPa이며 위해 값은 7kPa로 하고 있다. <Table 17>에 EIGA 기준으로 계산한 결과를 나타내었다. 폭발압력을 기준으로 하더라도 현재의 12.25kPa 보다는 하향 조정할 필요성이 있다고 판단된다.

그러나 저장탱크가 폭발하는 것을 방지하는 설비를 설치할 경우에는 현 기준을 유지하는 것이 바람직하다. 왜냐하면 현 기준에 의해 사용 중인 설비가 있고 현 기준이 국내법으로 정착되어 있기 때문에 안전성 향상을 위한 안전거리의 확대 보다는 안전설비의 보강이 더 바람직하기 때문이다.

<Table 16> Comparison between current criteria and calculated distances

저장능력	제1종 보호시설(현)	제1종 보호시설(계산치)
1만 이하	17m	19m
1만 초과 2만 이하	21m	24m
2만 초과 3만 이하	24m	27m
3만 초과 4만 이하	27m	30m
4만 초과 5만 이하	30m	32m
5만 초과	30m	34m

<Table 17> Safety distance based on EIGA method

저장능력	폭발압력	
	2kPa	7kPa
1만 이하	70m	26m
1만 초과 2만 이하	88m	33m
2만 초과 3만 이하	100m	38m
3만 초과 4만 이하	111m	41m
4만 초과 5만 이하	119m	44m
5만 초과	126m	47m

5.2 위험성평가 기준

LNG 저장탱크의 용량 기준이 아니라 사고 시나리오에 의한 설비의 위험성을 평가하고 이에 따른 안전거리를 산출하는 방법이다.

EIGA의 기준처럼 사람과 설비에 대한 위험성평가 기준을 정하고 위험성평가를 실시하여 안전거리를 산정하는 것이 타당할 것으로 판단되며 위험성평가 기준을 <Table 18>의 값과 같이 제안한다.

6. 결론

소규모 LNG 저장설비에 대한 안전성평가를 실시하고 안전거리에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

<Table 18> Criteria based on QRA

	복사열 및 가연한계	폭발
사람	□□ - 5 kW/m ² - LFL	7 kPa (1psi)
설비	37.5 kW/m ²	□20 kPa (3psi)

(1) 폭발압 기준 (현 법규)

- 현재의 법체계를 흔들지 않고 그대로 적용하는 것이 무방하다
- 안전성 확보를 위하여 LNG 저장탱크 보호를 위한 살수설비 구축이 필요하다.
- 향후 국제화에 부합하기 위한 법 개정 작업이 있을 경우, 사람에 대한 폭발피해 압력(7 kPa) 적용을 적극 검토

(2) 위험성평가 기준

- 사람과 설비에 각각 적용하는 기준을 제정하되 사람에게는 복사열은 5 kW/m², 가연한계는 LFL, 폭발압력은 7kPa을, 설비는 복사열은 37.5 kW/m², 폭발압력은 20 kPa 적용

7. References

- [1] CPR 18E, Guideline for quantitative risk assessment, 'Purple book', RVIM
- [2] BS EN 473, Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of onshore installations, (2007)
- [3] BS EN 13645, Installations and equipment for liquefied natural gas - Design of onshore installations with a storage capacity between

5 t and 200 t, (2002)

- [4] OGP, Risk Assessment Data Directory, Report No. 434 - 1, March (2010)
- [5] IGC Doc 75/07/E, Determination of safety distances, Revision of Doc 75/01/rev, European Industrial Gases Association

저자 소개

오신규



인하대학교 대학원 기계공학과에서 박사 취득
 관심분야 : LNG 소형저장시스템, 가스설비 위험성평가, 환경재해평가 등

주소 : 충남 아산시 배방읍 호서로 79번길 20, 호서대학교 기계공학과

조영도



한국과학기술원 화학공학과에서 박사 취득
 관심분야 : LNG 소형저장시스템 CCS 연구개발 수소에너지기술개발 위험성평가

주소 : 인천광역시 남구 주안로 108 경향플라자 12층, 한국가스안전공사