



LNG/LPG/가솔린 Station의 사고피해영향평가 비교

유진환 · 김범수 · 이현석 · 고의석* · *이기백**

광운대학교, *서라벌고등학교 **충주대학교
(2009년 6월 9일 접수, 2009년 6월 26일 수정, 2009년 6월 26일 채택)

A Study on Consequence Analysis of LNG/LPG/Gasoline Station

Jin Hwan Yoo, Bum Su Kim, Heon Seok Lee, Euy Seok Ko*, *Gi Baek Lee**

Kwangwoon University, *Sorabol High School, **Chungju National University
(Received 9. June. 2009, Revised 26. June. 2009, Accepted 26. June. 2009)

요 약

산업의 발달에 따른 영향으로 에너지수요가 증가함에 따라 국내에는 에너지 산업시설(저장 시설, 고압가스 배관, 충전소, 탱크로리 등)이 전국에 산재하게 되었고 사용하는 에너지의 종류도 과거 한정된 자원이 아닌 다양한 에너지를 사용하게 되었다. 이러한 에너지시설에는 화재, 폭발 및 유독물질 누출 등 중대사고가 발생할 수 있다. 더욱이 국내의 에너지시설은 밀집되어 있어 연쇄적인 사고가 일어날 가능성이 존재한다. 이 연구에서는 기존에 설치 운영되고 있는 LPG(liquefied petroleum gas) 및 가솔린(gasoline) 충전소와 LNG(liquefied natural gas) 충전소에 대한 피해예측을 실시하고 이를 비교 분석 함으로써 국내에서 처음 시도되고 있는 가솔린 주유소 및 LPG/LNG 충전소가 병설되어 설치되는 경우의 안전성을 검토하고자 한다.

Abstract - The advancement of industry have increased domestic energy demands and energy facilities such as storage facility, compressed gas pipe, station, and tank lorry. Also, concern about environment have diversified energy source to clean energy such as LNG. In these major energy facilities, major accident can happen to result in fire, explosion, toxic release and etc. In addition, it may cause chain accidents to the adjacent energy facilities. In this research, safety assessment was performed through the consequence analysis of LPG (liquefied petroleum gas) station, gasoline station and LNG(liquefied natural gas) station. The obtained result will be helpful to make a safety guideline of the LPG/LNG station built adjacent to the gasoline station.

Key words : LNG, LPG, gasoline, consequence analysis, safety assessment

1. 서 론

국내 산업화의 급속한 발달에 따른 영향으로 에너지의 수요가 급증하고 있다. 에너지 수요가 급증함에 따라 에너지 산업시설이 전국에 산재하게 되었고 사용하는 에너지의 종류도 과거 한정되어 사용하던 자원이 아닌 석유파동 및 오염물질의 영향으로 다양한 에너지를 사용하게 되었다. 이

러한 에너지시설에서는 화재, 폭발 및 유독물질 누출 등 중대사고가 발생할 수 있다. 또한 국내의 에너지시설은 산업단지와 도심에 중점으로 밀집되어 있어 연쇄적인 사고를 유발 시킬 수 있는 위험이 존재한다.

다양한 에너지자원 중 LNG는 대표적인 청정에너지로서 난방 및 취사를 위해 가정에서 사용되고 발전소에서 전력 생산을 위해 그 사용이 확대되고 있을 뿐 아니라 최근에는 대기오염 저감을 위하여 저공해 자동차의 개발과 보급이 진행됨에 따라 자

*주저자:glee@cjnu.ac.kr

동차의 연료로도 사용될 예정이다. 이 연구에서는 기존에 자동차의 연료로 사용되고 있는 LPG 및 가솔린과 함께 LNG자동차의 국내 도입을 위하여 필수적인 LNG를 대상으로 충전소 및 충전소에 대한 피해예측을 실시하고 이를 비교 분석한다. 이를 통해 국내에서 처음 시도되고 있는 주유소에 LPG/LNG 충전소를 병설하는 경우 그 위험성의 증가가 정량적으로 어떤 수준인지를 평가하고자 한다.

II. 이론적 배경

2.1. 사고 영향 분석(Consequence Analysis)

2.1.1. 누출 모델(Release Model)

현장의 화학공장에서 발생하는 화재, 폭발 또는 독성 물질 누출사고는 위험물질을 저장, 생산 혹은 공급하는 장치와 파이프라인의 누출로 인해서 발생하게 된다. 이러한 누출 사고의 원인은 저장탱크 또는 공정장치의 균열, 파열, 파이프라인의 부식 그리고 펌프나 밸브 플랜지의 마모와 누출 등의 여러 가지 경로를 통해서 발생할 수 있다. 이때 누출량과 누출 속도는 가연성, 독성 물질의 열적, 물리적 성질과 저장조건 등에 의해서 결정 된다.

2.1.2. 확산 모델(Dispersion Model)

확산모델은 가연성 또는 독성물질이 사고지점에서 공장이나 다른 인근 지역으로부터 증기운을 형성하여 거동하는 현상을 설명하는 모델이다. 이때 가연성 물질의 경우 LFL(Lower Flammable Limit)과 UFL(Upper Flammable Limit), 독성물질은 시간에 따른 농도변화를 예측함으로써 사고결과를 분석하는데 매우 중요하게 사용된다¹⁾.

대표적인 확산 모델인 Gaussian 모델은 주어진 풍속, 풍향에서 누출된 중성 부유 가스의 움직임에 대해 설명한다. 특징은 위험물질의 누출로부터 바

람이 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 있다.

2.1.3. 영향 모델(Effect Model)

화학공장에서 발생하는 사고로는 가연성 물질의 누출로 인한 화재 및 폭발사고와 유독성 물질의 누출로 인한 독성물질 누출사고가 있다. 일반적으로 화재사고는 복사열(Thermal Radiation)에 의한 피해 효과를 가져오며 폭발사고의 경우에는 과압력(Overpressure)과 복사열의 영향을 갖는다. 그리고 독성물질의 영향은 독성물질의 농도와 노출 지속시간의 함수관계로 나타낸다^{2,3)}.

Table 1과 Table 2는 복사열과 과압에 의한 피해 영향을 나타낸 것이다.

2.2. 시나리오 생성

사고피해결과를 예측하기 위하여 작성된 사고 시나리오는 한국산업안전보건공단에서 제시하고 있는 최악의 누출 시나리오 선정 지침⁴⁾에 따라 적용한다. 사고시나리오 생성은 앞장에서 실시한 위험성평가의 결과를 기반으로 하였다.

2.2.1. 용어의 정의

이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

- “끝점” 이라 함은 본 지침에서 주어진 끝점농도, 과압 또는 복사열 등의 수치에 도달하는 임의의 지점을 말한다.
- “냉동액체”라 함은 상온·상압 하에서 가스인 물질을 냉동에 의하여 액체상태로 만든 것을 말한다.
- “최악의 누출 시나리오” 라 함은 누출, 화재

Table 1. Thermal radiation effects.

| Radiation Intensity (kW/m ²) | Damage |
|--|---|
| 4 | Sufficient to cause pain to personnel if unable to reach cover within 20 sec |
| 12.5 | Minimum energy required for piloted ignition of wood, melting of plastic tubing |
| 37.5 | Sufficient to cause damage to process equipment |

Table 2. Overpressure effects.

| Overpressure | | Damage |
|--------------|------|--|
| bar | kPa | |
| 0.0207 | 2.07 | Part damage of the house ceiling, 10% window pane damage |
| 0.138 | 13.8 | Non-reinforced concrete or cinder block walls shattered |
| 0.207 | 20.7 | Rupture of oil storage tank |

또는 폭발을 일으킨 지점으로부터 끝점의 거리가 가장 먼 가상 사고를 말한다.

- “임의 누출 시나리오” 라 함은 최악의 누출 시나리오 이외에 사업장에서 임의로 선정한 가상 사고를 말한다.

2.2.2. 피해결과분석 변수의 결정 방법

- 끝점
 - 사업장 밖에서의 누출 시나리오 분석을 하기 위해서는 다음의 기준에 의하여 끝점을 결정하여야 한다.
 - 폭발인 경우 : 0.07kgf/cm²의 과압이 걸리는 지점
 - 화재인 경우 : 40초 동안 5kw/m² 복사열에 노출되는 지점
 - 누출인 경우 : 누출된 물질의 폭발하한 농도에 이르는 지점
- 풍속 및 대기안정도
 - 최악의 누출 시나리오 분석인 경우에는 초당 1.5m의 풍속으로 하고 대기안정도는 “F”급의 대기안정도를 사용한다.
 - 임의 누출 시나리오 분석인 경우에는 그 지역의 통상 온도 및 습도를 사용한다.
- 누출원의 높이
 - 최악의 누출 시나리오 분석인 경우에는 지표면에서 누출되는 것으로 가정한다.
 - 임의 누출 시나리오 분석인 경우에는 실제 누출되는 높이를 사용한다.
- 지표면 굴곡상태
 - 지표면의 상태는 도시와 시골 지형 중에 선택하여 사용한다.
 - 도시지형은 건물과 나무 등이 많은 지형을, 시골지형은 평판한 지형을 의미한다.
- 누출물질의 온도
 - 냉동액체를 취급하는 경우에는 운전온도를 사용한다.
 - 냉동액체 이외의 액체를 취급하는 경우에는 낮 시간의 최고온도 또는 운전온도 중 큰 수치를 사용한다.

2.2.3. 최악의 누출량 산정

- 최악의 누출량은 다음 수치 중 큰 것으로 한다.
- 사고시 비상조치가 가능한 범위 내에서 단일

용기에 저장되는 최대량

- 사고시 비상조치가 가능한 범위 내에서 단일 배관계에 보유하고 있는 최대량

III 사례 연구 및 연구 결과

3.1. LNG/LPG/가솔린 충전소

기존에 설치 운영되고 있는 LPG/가솔린 충전소와 LNG충전소에 대한 피해예측을 실시하고 이를 비교 분석 함으로써 국내에서 처음 시도되고 있는 주유소 및 LPG/LNG 충전소가 병설될 경우의 위험성의 증가가 정량적으로 어떤 수준인지를 확인해 보았다. Table 3은 각 연료의 특성을 비교한 것이다.

- 가솔린 : 심각한 화재의 위험이 있고 가솔린 증기는 공기보다 무겁다. 그리고 증기 또는 가스는 원거리의 발화원으로부터 점화되어 순식간에 확산될 수 있다.
- LPG : 심각한 화재의 위험이 있고 심각한 폭발의 위험이 있다. 가스는 공기보다 무겁고 증기 또는 가스는 원거리의 발화원으로부터 점화되어 순식간에 확산될 수 있다. 그리고 용기가 열에 노출되면 파열되거나 폭발할 수도 있으며, 물질의 흐름 또는 교반에 의하여 발화 또는 폭발을 초래할 수 있는 정전기가 발생할 수도 있다.
- LNG : 심각한 화재의 위험이 있으며, 가스는 공기보다 가볍고 증기 또는 가스는 원거리의 발화원으로부터 점화되어 순식간에 확산될 수 있다. 가스/공기의 혼합물은 폭발성이 있다.

Table 3. Physical and chemical natures of LNG/LPG/Gasoline.

| | LNG | LPG | Gasoline |
|--------------------|---|--|------------------------------|
| Phase | Liquified Gas | Liquified Gas | Liquid |
| Boiling Point | -162℃ | -48℃ ~ -1℃ | -204℃ |
| Flash Point | -223℃ | -73℃ | -43℃ |
| LEL | 5.0% | 1.9% | 1.2% |
| UEL | 15% | 9.5% | 7.6% |
| AIT | 537℃ | 450℃ | 456℃ |
| Heat of Combustion | 56000 kJ/kg 10,560 kcal/m ³ | 50000 kJ/kg 24000 Kcal/m ³ | 47,000 kJ/kg 8,300 kcal/L |

3.2. 사고 시나리오 선정

각 3종류의 연료에 대한 피해예측 평가결과를 비교하기 위하여 시나리오를 동일하게 하여 각각의 연료에 대해 피해예측 시뮬레이터(PHAST v6.5)를 사용하여 피해예측을 실시하였다⁵⁾. 시나리오 선정은 'K-PSR을 이용한 LCNG/LNG 충전소에 대한 정성적 위험성 평가'에서 제시한 가능성이 높은 시나리오를 아래와 같이 선정하였다^{6,7)}.

- 시나리오 1 : LNG충전소는 하역작업 중 작업자의 실수나 진동 등으로 인한 로딩암(loading arm) 이탈에 따른 누출시나리오의 가능성이 가장 높음을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서는 LPG(LNG/가솔린) 하역작업 중 탱크로리(10tone)에서 로딩암 이탈로 인하여 3inch 배관을 통하여 LPG(LNG/가솔린)이 누출되었다. 누출된 LPG(LNG/가솔린)화가 되어 화재가 발생함.

- 시나리오 2 : LPG(LNG/가솔린) 충전소 site내에서 충전을 완료한 버스의 저장탱크가 완전과열에 의해 화재·폭발이 일어남.

3.3. 사고피해영향 비교

시나리오 1에서 발생 가능한 사고의 유형은 Jet Fire(LNG, LPG) 및 Pool Fire(LPG, 가솔린)이고 LPG(LNG/가솔린)가 누출되어 Jet Fire(Pool Fire)가 발생 하였을 때 거리에 따른 복사열의 강도를 비교하였다. 시나리오 2에서 발생 가능한 사고의 유형은 Fireball과 압력파에 의한 사고피해이다. Fireball에 의한 복사열의 강도는 압력파에 의한 사고의 피해보다 미비하므로 압력파에 의한 피해를 비교하였다.

(1) Maximum concentration

탱크로리 하역작업 중 로딩암의 이탈로 인하여 LNG(LPG/가솔린)가 누출되었을 시 거리에 따른 농도분포를 살펴보면 위 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3과

Table 4. The maximum distance to flammable limit.

| Flammable Limit | Averaging time(s) | Distance(m) | | |
|-----------------|-------------------|-------------|----------|-----|
| | | LPG | Gasoline | LNG |
| UFL | 18.75 | 31 | 20 | 43 |
| LFL | 18.75 | 189 | 205 | 189 |
| 1/2 LFL | 18.75 | 487 | 331 | 426 |

같고, 최대 도달거리는 Table 4와 같다. 연소 가능 농도의 최대 도달거리는 LPG > LNG > 가솔린 순으로 나타났으며 연소 가능 농도의 범위 또한 LPG > LNG > 가솔린 순으로 나타났다.

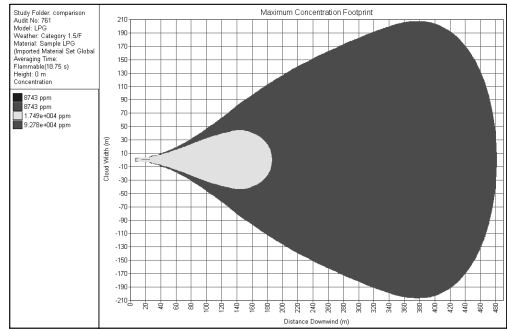


Fig. 1. The maximum concentration vs distance for the leakage of LPG.

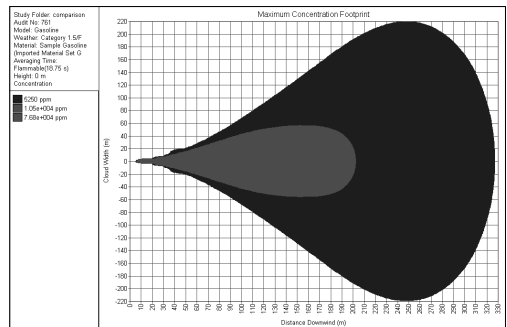


Fig. 2. The maximum concentration vs distance for the leakage of gasoline.

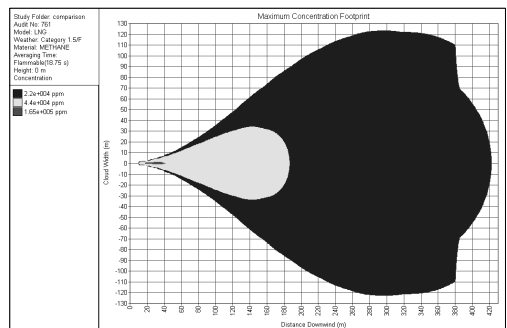


Fig. 3. The maximum concentration vs distance for the leakage of LNG.

(2) Jet Fire Effects

탱크로리 하역작업 중 로딩암의 이탈로 인하여 LNG가 누출되어 점화되었을 시 Jet Fire에 의한 거리에 따른 복사열의 크기는 아래 Fig. 4, Fig. 5와 같고, 최대 도달거리는 Table 5와 같다. 관심 복사열의 최대 도달거리를 비교해보면 4kW/m^2 일 때 $\text{LPG} > \text{LNG}$, 12.5kW/m^2 일 때 $\text{LNG} > \text{LPG}$, 37.5kW/m^2 일 때 $\text{LNG} > \text{LPG}$ 으로 나타났다.

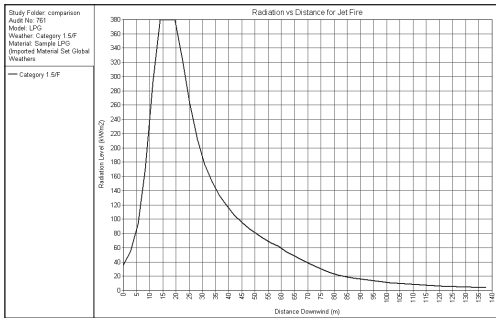


Fig. 4. The radiation vs distance for the jet fire of LPG.

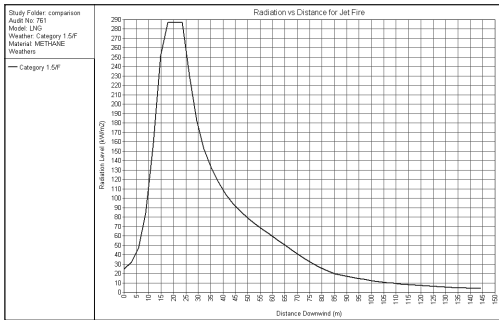


Fig. 5. The radiation vs distance for the jet fire of LNG.

Table 5. The radiation effects : jet fire.

| Radiation level (kW/m ²) | Distance(m) | | |
|--------------------------------------|-------------|----------|-----|
| | LPG | Gasoline | LNG |
| 4 | 138 | - | 115 |
| 12.5 | 97 | - | 100 |
| 37.5 | 71 | - | 72 |

(3) Pool Fire Effects

Fig. 6, Fig. 7 pool fire가 발생했을 시 거리에 따른 복사열의 강도를 보여주고 있다. LNG의 경우 위 가상시나리오의 경우에 pool이 형성되지 않아 pool fire가 발생하지 않는다. pool fire가 발생한다면 Table 6에서 보듯이 LPG에 의한 피해가 가솔린에 의한 피해보다 크게 나타났다. LPG의 pool이 가솔린의 pool보다 작게 나타났지만 발열량의 차이 때문에 LPG가 크게 나타났다.

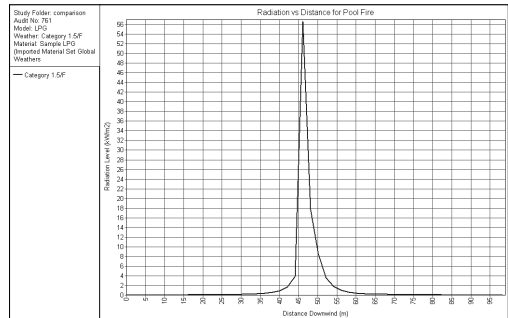


Fig. 6. The radiation vs distance for the pool fire of LPG.

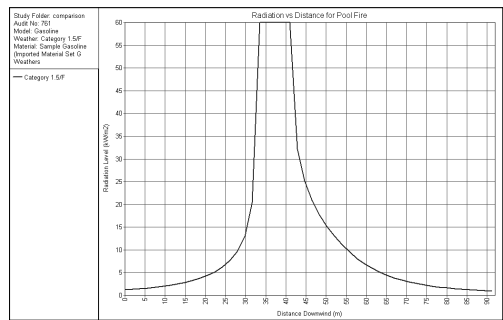


Fig. 7. The radiation vs distance for the pool fire of gasoline.

Table 6. The radiation effects : early pool fire.

| Radiation level (kW/m ²) | Distance(m) | | | Materials | Maximum Pool Radius(m) |
|--------------------------------------|-------------|----------|-----|-----------|------------------------|
| | LPG | Gasoline | LNG | | |
| 4 | 52 | 66 | - | LPG | 1 |
| 12.5 | 49 | 53 | - | Gasoline | 13 |
| 37.5 | 48 | 42 | - | LNG | - |

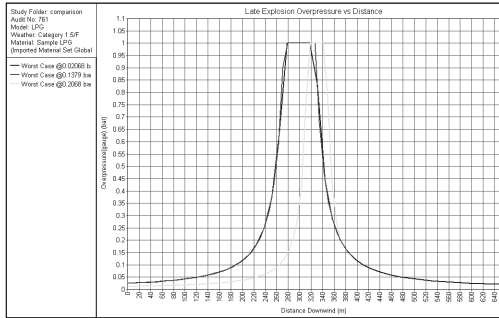


Fig. 8. The explosion overpressure vs distance for LPG.

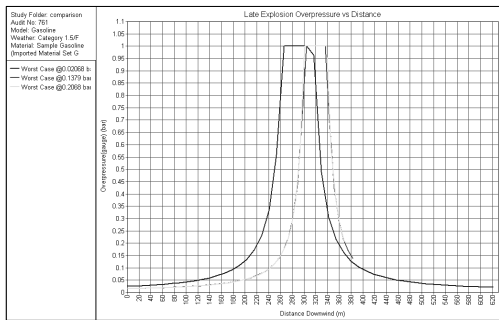


Fig. 9. The explosion overpressure vs distance for Gasoline.

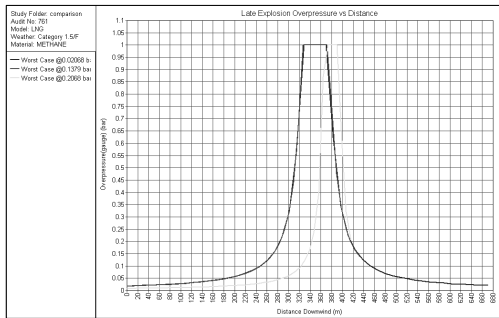


Fig. 10. The explosion overpressure vs distance for LNG.

(4) Explosion Effects

폭발에 의한 과압(overpressure)의 영향을 살펴 보면 위 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10,와 같다. 폭발로 인한 피해 범위는 Table 7과 같다. 3가지 연료에 대한 피해반경을 비교해보면 LNG > LPG > 가솔린 순으로 나타났고, 이는 저장압력과 비례관계에 있음을 보여주고 있다.

Table 7. The explosion effects : late ignition.

| Overpressure (bar) | Distance(m) | | |
|--------------------|-------------|----------|-----|
| | LPG | Gasoline | LNG |
| 0.027 | 648 | 621 | 670 |
| 0.138 | 390 | 383 | 433 |
| 0.27 | 371 | 369 | 416 |

IV. 결론

산업단지 및 도심의 발달로 국내의 에너지시설은 밀집하게 되었으며, 대도시의 대기오염이 날로 심각해짐에 따라 이를 줄이기 위한 저공해 자동차의 개발과 보급이 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 LNG를 이용한 자동차의 보급이 점점 증가함에 따라 LNG자동차의 국내 보급을 위한 충전소 설치는 필수적이다. 기존에 사용하고 있는 자동차의 연료인 LPG, 가솔린 및 LNG의 사고피해영향을 비교한 결과 Thermal Effect의 경우에 Jet fire(LNG > LPG)의 영향 거리가 Pool fire(LPG>가솔린)의 영향 거리보다 크음을 알 수 있다. 또한 overpressure의 경우 저장압력에 비례 하므로 그 피해범위는 LNG > LPG > 가솔린의 순이었다. 각각의 연료에 대한 피해 정도는 차이가 낮지만, 3가지 연료의 피해 정도는 모두 매우 크게 나타났다. 만약 에너지시설의 밀집지역에 충전소를 설치하거나 LPG/LNG/가솔린의 병설 충전소를 설치한다면 어느 한곳에서 사고가 발생할 경우 연쇄작용에 의해 피해가 더 커질 것으로 예상된다. 따라서 각 충전 설비간의 이격거리를 조정하고 각 설비 간에 방호벽을 설치하여 피해를 최소화시킬 수 있는 대책을 마련해야 한다.

이 연구는 각각의 연료에 대한 피해 정도를 보여 줌으로써 충전소에 대한 위험성평가를 통해 주유소/충전소의 안전성에 대하여 확인하였고 향후 설치·보급 될 충전소 병설 시 필요한 기준마련을 위한 기초자료로서 기여하리라 판단된다. 또한 보건 및 환경적인 측면에서의 위험성에 따른 비용 효과에 관하여 보다 심도 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] CCPS, *Guideline for Use of Vapor Cloud Dispersion Model*, AIChE, New York, (1989)

- [2] CCPS, *Guideline for Hazard Evaluation Procedures, Third Edition*, AIChE, New York, (1989)
- [3] Crowl, D. A. and J. F. Louvar, *Chemical Process Safety Fundamentals with Applications, Second Edition*, Prentice-Hall, New Jersey, (2002)
- [4] KOSHA-Code P-73, Korea Occupational Safety & Health Agency, (2001)
- [5] Quantitative Risk Assessment PHAST, Managing Risk DNV
- [6] Jae Min Lee, Jin Hwan Yoo, Jae Wook Ko, “*Qualitative Hazard Analysis for LNG Gas Station Using K-PSR Method*”, KIGAS, 10(4), pp 63~69 (2006)
- [7] Jin Hwan Yoo, Bum Su Kim, Heon Seok Lee, Min Seop Kim, Jae Wook Ko, “*A Study on Quantitative Risk Presentation of LNG Station*”, KIGAS, 13(1), pp 61~67 (2009)