

LPG 탱크로리 수송중 위험성 평가에 관한 연구

A Study on the Risk Assessment in LPG Transportation by Tank Lorry

이 재 준* · 김 윤 화** · 윤 성 렬** · 엄 성 인** · 백 종 배* · 고 재 욱**
J.J. Lee · Y.H. Kim · S.R. Yoon · S.I Um · J.B. Baek · J.W. Ko
(1997년 8월 25일 접수, 1997년 12월 12일 채택)

ABSTRACT

Demand of LPG and LNG will increase continuously due to high calories, clearness, and convenience for usage. These gases are used widely for power plants, industrial plants, and domestic fuel. But accidents related with gas are increasing in proportion to increment of gas usage. Especially, LPG has high ignitability due to weak dispersion to air and accumulation at low place because LPG is heavier than air. There are many hazards during transportation as well as production, storage, and usage of LPG. Commonly, tank lorry is used for inland transportation of LPG. If tank lorry were to raise leakage incidents and then LPG released during transporting, the accidents cause serious effects on the environment as well as human damage of surrounding area.

In this study, therefore, hazards which cause LPG of tank lorry to leak during transportation were identified and risk of LPG transportation was assessed quantitatively. Also, the result of this study might be a useful measure for predicting damage and preparing safe transportation strategies of LPG tank lorry.

1. 서 론

고열량, 청정성, 사용상의 편의성 등의 이유로 인하여 가스 연료의 사용량은 현재뿐만 아니라

향후에도 계속 증가될 것으로 보인다. 이러한 가스 연료는 발전용을 비롯하여 공장용, 가정용 등으로 사용되며, 이에 따라 유통과정 중에 필요한 각종 운반설비, 공급설비, 사용설비 등의

* 충주산업대학교 안전공학과

** 광운대학교 화학공학과

설치가 증가되고 있다. 한편, 가스 사용량 증가에 비례하여 가스 관련 사고 또한 증가하고 있는 추세이다.

특히 LPG는 LNG와는 달리 공기보다 무거워 누설되면 대기 중으로 쉽게 확산되지 않고 낮은 부분에 고이게 되어 인화 위험성이 매우 크다^{3,6)}.

이러한 잠재위험(hazard)은 LPG를 생산, 저장, 사용하는 곳 뿐만 아니라 수송 중에도 발생 가능한 잠재위험이다. 일반적으로 LPG 내륙 수송의 경우 탱크로리를 이용하여 운반하는데 탱크로리가 도로수송중 사고가 발생, LPG가 누출하여 화재 및 폭발로 이어진다면 인근 지역주민의 인명피해 뿐만 아니라 주위환경에도 커다란 영향을 끼칠 수 있다⁵⁾.

본 연구에서는 탱크로리 주행 중 LPG 누출을 야기할 수 있는 잠재위험을 확인하고, LPG 운송의 위험성을 정량적으로 계산하였다. 따라서, 본 연구의 결과는 LPG 운송에 대한 위험성을 예측하고 안전 수송 전략을 세우는데 도움이 될 것이라고 사료된다.

2. 위험성 평가 방법

LPG 탱크로리가 도로를 주행하는 동안 LPG 누출을 야기할 수 있는 잠재위험은 항상 존재함에도 불구하고 그 위험성은 사고가 발생해야만 확인할 수 있다. 따라서 사고가 발생하기 전에 잠재위험을 확인하여 위험성을 줄이는 적극적인 위험성 평가가 절실히 필요하다.

본 연구에서는 LPG 탱크로리가 어느 특정지역을 통과할 때 누출 가능한 잠재위험을 확인하고 사고전개 과정에 대해 규명하였다. 그리고 사고를 구성하는 사건의 결정과 사건들이 발생할 수 있는 빈도(frequency) 및 강도(consequence)에 대한 분석을 포함하였다. 또한 피해정도를 정량적으로 계산하고 개인적·사회적 위험성^{8,9)}을 평가하여 누출·폭발시에 인명피해 및 주변 환경에 미치는 영향의 심각성을 다루었다.

계략적인 LPG 운송중 위험성 평가에 대한 설명을 하면 다음과 같다. 먼저 탱크로리를 이용한 LPG 운송중 누출 가능한 잠재위험을 찾아내고 발생할 수 있는 가능성을 정량적으로 분석

하여 누출의 위험성을 최소화한다. 이러한 위험 확인에 있어서 경험과 지식이 중요한 구실을 하게 되나 체계적이고 효율적인 방법을 이용하는 것은 위험성 확인 작업을 보다 간단하고 신속하게 실행할 수 있게 한다. 본 연구에서는 HAZOP Study를 이용하여 LPG 운송중 내부 또는 외부의 영향에 의하여 일탈현상을 야기할 수 있는 잠재위험을 찾아내어 기록하고, 그의 원인을 파악하였다. 그리고 HAZOP Study를 통하여 확인된 잠재위험중 사고 발생확률이 높은 사상들을(events) 대상으로 FTA를 수행하여 LPG 누출발생 빈도를 정량적으로 예측 및 해석하였다. 또한 FTA의 정상사건인 LPG 탱크로리 운송중 누출 빈도값을 ETA 초기사건으로 설정하여 연속적인 시간에 따른 사고들의 진행 과정을 논리적으로 파악하였으며, 이에 따라 발생 가능한 사고빈도를 순차적으로 산정하였다.

또한 사고 발생빈도 분석결과 가장 높은 발생빈도를 갖는 결과를 초점으로 강도분석 모델을 이용하여 결과를 산정하고, LPG 탱크로리 수송중에 발생할 위험으로 가정하여 개인적·사회적 위험성을 산정하여 영향범위 및 피해거리를 계산하여 LPG 탱크로리 이동경로에 따른 위험 정도를 비교·분석하였다.

본 연구의 사고 시나리오에서는 발생가능한 LPG 탱크로리 사고에 대한 강도 분석을 하였으며, 산출된 영향범위와 피해거리에 따른 개인적·사회적 위험성을 정량적으로 계산하여 실제 지도에 도식화하였고, LPG 탱크로리의 수송경로에 따라 사고결과를 비교·분석함으로써 본 연구의 타당성을 검증하였다.

3. 사고 시나리오

위험성 산정에 있어서 C시에서 보유하고 있는 LPG 탱크로리의 경우를 적용하였으며, LPG 탱크로리가 서울방향의 도로에서 C시의 남쪽에 위치한 가스 충전소까지 도달하는 경우를 가정하였다. C 시에서 보유하고 있는 LPG 탱크로리는 10톤 용량 3대, 12톤 용량 1대, 15톤 용량 3대, 그리고 20톤 용량 1대로 총 8대이다. 그리고 탱크로리가 목적지인 가스 충전소까지 도달하기

위한 경로는 세가지 경로가 있으며 이들 각각의 위험성을 비교·평가하였다.

3.1 잠재위험 확인

잠재위험 확인(hazard identification) 단계는 정량적 위험성 평가의 기본인 동시에 가장 중요한 단계이다.

Table 1에는 HAZOP Study를 통하여 얻은 LPG 탱크로리의 도로 주행중 발생 가능한 일탈 현상 및 잠재 위험을 간략하게 표현하였다.

Table 1 Hazards in LPG tank lorry transportation

Deviation	Causes	Consequences
Large traffic accident	Driver error Vehicle crash Earthquake	LPG release due to tank leak or rupture pipe leak or rupture valve leak or rupture

다음으로 LPG 탱크로리 수송중 누출 가능성을 정상사상으로 선정하여 발생 빈도를 평가하였다. FTA의 정량적 평가를 위해 과거의 고장률 데이터²⁾를 적용하여 이상 트리를 구축한 결과 LPG 탱크로리 도로 수송중 LPG가 누출될 빈도값은 $1.2 \times 10^{-2}/yr$ 로 나타났다.

마지막으로 FTA의 정상사건인 LPG 탱크로리의 수송중 누출 가능성을 ETA의 초기사건으로 놓고서 이에 따라 발생하는 사건들의 순서들을 확인하였다. ETA로 확인된 사건들은 UVCE, BLEVE, Local Thermal Hazard, Flash Fire 등이며, FTA의 누출 빈도값을 적용하여 정량적으로 빈도를 산정한 결과는 UVCE가 $5.18 \times 10^{-3}/yr$ ^{8,9)}로 가장 크게 나타났으며, 다음으로 Flash Fire, BLEVE 순으로 나타났다. 따라서 본 사례 연구에서는 가장 발생빈도가 높으며 사고 발생시 큰 위험성을 내포하고 있는 UVCE를 토대로 LPG 누출시 사고 강도를 평가했으며 개인적·사회적 위험성 산정에 적용시켰다.

3.2 강도 분석

LPG 탱크로리가 도로 수송중 사고로 탱크가 파열되어 탱크내 LPG가 누출되어 UVCE가 발생된 상황을 가정하여 강도분석을 하였다.

UVCE의 가장 일반적인 TNT 모델을 이용하

여 LPG 탱크로리에서 누출된 LPG의 양을 TNT 당량¹⁾으로 환산하여 그 값을 과압력에 따른 환산거리에 적용하여 실제 거리를 계산하였다.

$$W = \frac{\eta M E_C}{E_{C, TNT}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, W = equivalent mass of TNT (kg)

M = mass of flammable material release (kg)

η = empirical explosion yield (0.03)

E_C = lower heat of combustion of flammable gas (46360 kJ/kg)

E_{CTNT} = heat of combustion of TNT (4437~4765 J/kg)이다.

$$R = Z W^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, R = real distance (m)

Z = scaled distance (m)이다.

여기서, 영국의 보건안전기구 고문 위원회(Health and Safety Commission Advisory Committee)와 UN 산하기구 IAEA에서 채택한 과압력에 대한 영향을 적용하여 실제 영향 거리를 계산하였다.

Table 2 Effects for Overpressure¹⁴⁾

Overpressure (psi)	Effects
0.5	90% breakage of windows
0.7	Limited minor structural damage
4.4	100 % fatality
5.0	50 % destruction of buildings
15.0	Total destruction of buildings

* IAEA와 HSCAC의 규정에 의함.

그 결과 C 시에서 보유하고 있는 각각의 용량의 탱크로리에 따른 피해거리를 산출한 결과는 Table 3과 같다.

3.3 개인적 위험성

개인적 위험성은 위험원 근처에 있는 사람에 대한 위험성을 말하며 사건 빈도 또는 증상의 빈도로 표현하며, 이때 중요한 사항은 개인적 위험성은 사람과 장소를 특정화 한다는 것이다. 개인적 위험성은 개인적 위험성에 대한 지역적 변화를 고려하여 LPG 탱크로리가 통과하는 특

정 장소를 선택한 후, 잠재위험이 있는 주변의 지리적 위치에 따른 개인적 위험성의 변화를 더욱 세밀하게 나타내기 위하여 위험성 등고선(risk contour)으로 표현된다. 이것은 입지선정과 완충지대의 정도와 같은 문제를 해결하기에 유용하다^{8,9)}.

Table 3 LPG 탱크로리의 UVCE에 의한 피해거리

영향	과압력	피해거리 (m)			
		10 톤	12 톤	15 톤	20 톤
A	0.5	346	367	396	436
B	0.7	259	276	297	327
C	4.4	69	73	79	87
D	5.0	65	69	74	82
E	15.0	36	38	41	45

A : 90% 유리창 파괴
 B : 주거용 건물의 제한 한계
 C : 100% 사망
 D : 50% 건물 외벽 붕괴 및 내부에 금이 감
 E : 건물의 완전 붕괴

위험성은 인근 주민에게 영향을 미치는 사고의 발생 가능성을 나타낸다. 이것은 보통 일반 대중 위험성으로부터 계산할 수 있으며 개인적 사망 위험에 대한 산정은 다음 절차에 의해 수행한다. 우선, 폭발지점과 관련하여 개인의 위치를 결정하고 위험성을 평가함에 있어 피해의 정도를 결정하고 폭발 가상 사고 시나리오를 선택한 후, 주어진 폭발에 의해 발생하는 사고의 확률을 산정한다.

계산 절차는 먼저 가장 큰 피해 반경을 갖는 사고를 선택하여 피해지역과 같은 반경으로 원을 그린 후 그 중에서 풍향에 영향을 받을 수 있는 지역을 선정한다. 그래서, 특정 지역과 특정 방향에서의 사고 빈도를 식(3)으로 계산할 수 있다.

$$f_{i,d} = (\theta_i/360) \dots\dots\dots (3)$$

본 시나리오에서는 폭발(UVCE)에 의한 피해 영향을 계산하였으므로 사고의 피해 각도 θ 는 360° 가 된다^{7,8)}. 이 경우 앞에서 구한 UVCE 발생 빈도 5.18×10^{-3} 을 식(3)에 대입하면 $f_{i,d} = f_i$ 가 된다. 따라서 LPG 탱크로리가 통과하는 어느 한 지점에서 UVCE가 일어날 빈도는 $5.18 \times 10^{-3}/yr$ 가 된다. 본 연구에서는 도로 지형 및 유

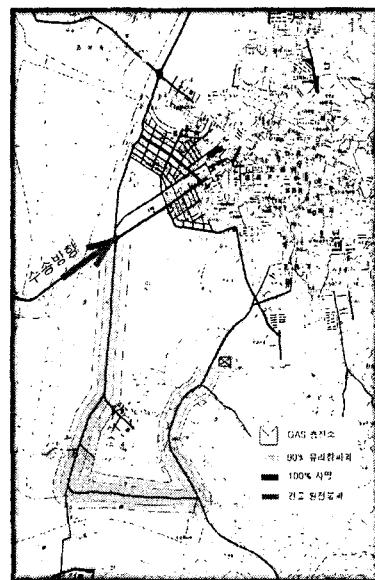
형, 교통 혼잡도 등에 의한 차량사고 발생확률을 고려하지 않았기 때문에, 모든 경로에서의 UVCE 발생 확률은 동일하다는 가정하에 계산하였다^{8,9)}.

그러므로 20톤 용량의 LPG 탱크로리가 각각의 경로를 통해 운행중 폭발하여 UVCE가 발생했을 경우 그 폭발 장소에서 436m 떨어진 곳까지 유리창이 90% 깨질 확률, 폭발한 장소에서 반경 87m 내부에 있는 사람 100% 사망할 확률, 그리고 45m 안에서 건물이 완전히 붕괴될 확률은 각각 $5.18 \times 10^{-3}/yr$ 가 된다.

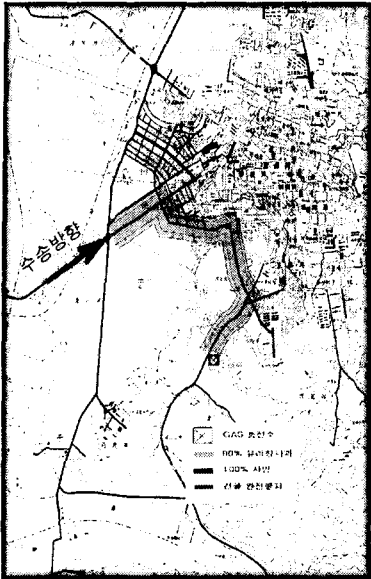
Fig. 1은 20톤 용량의 LPG 탱크로리가 각각의 경로를 통해 주행할 경우 계산된 개인적 위험성을 도식화한 것이다.

3.4 사회적 위험성

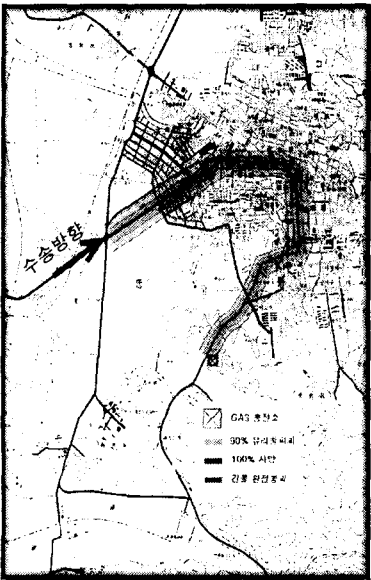
사회적 위험성은 사고로 인해 피해를 입을 수 있는 사람의 수로 정의할 수 있으며 강도는 사망자수로 표현한다. 그리고, 사회적 위험성 계산은 개인적 위험성을 계산하는데 필요한 정보 뿐만 아니라 시설물 및 주변인구에 대한 정보도 필요로 한다. 사회적 위험성 산정을 위해서는 기후, 조건, 풍향, 누출원, 종류 등에 따라 세분화



(a) Route I



(b) Route II



(c) Route III

Fig. 1 Estimated effect zone for 3 routes of LPG transportation

된 계산이 필요하다. 현실적으로는 실제 조건에 가장 근접한 값을 갖는 대표적인 기후조건, 풍향 그리고 인구형태를 이용한다^{1,7,8,9)}.

본 사례연구의 사회적 위험성 평가에서는 C시를 경유하여 가스 충전소까지 수송하는 LPG 탱크로리의 위험성에 대해서 계산하였다. 위험성 산정 절차는 각각의 경로를 가정하여 위험성을 계산하고 인구가 밀집된 지역과 희박한 지역을 통과할 때 나타날 수 있는 사망자수에 대해서 이동 경로에 따른 피해 지역내의 사망자수의 함수로 나타냈다.

Table 4는 20톤 용량의 LPG 탱크로리가 각 경로를 통과할 때 각 경로당 평균 인구밀도와 평균 사망자수를 나타낸 것이다.

Table 4 Average population density and average fatality for 3 routes of LPG tank(20 ton) lorry transportation

Transportation Routes	Avr. population density (people/10 ⁴ m ²)	Avr. fatalities (people)
Route I	3.12	7
Route II	9.45	47
Route III	87.2	207

Table 4에서 알 수 있듯이 제 I 경로보다는 제 II 경로가, 제 II 경로보다는 제 III 경로가 사망자수가 많다는 것을 알 수 있다.

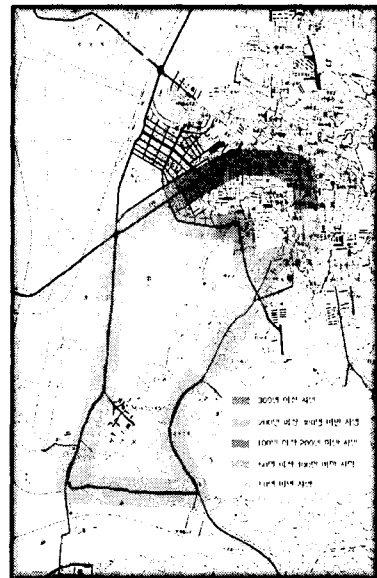


Fig. 2 Fatality distribution contour for 3 routes of LPG tank lorry(20 ton) transportation

Fig. 2는 20톤 용량의 LPG 탱크로리가 주행 중에 UVCE가 발생하였을 때의 각 경로당 사망자수 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 제 I 경로는 인구밀도가 희박한 지역으로 사망자 분포가 모두 50명 미만으로 표시되었지만 실제로 그 보다 훨씬 적은 7명의 평균 사망자수가 계산되었다. 제 II 경로의 경우 제 I 경로보다는 사망자수가 높게 나타났으나 제 III 경로보다는 적게 나타났다. 제 III 경로는 평균 사망자수가 207명으로 다른 두 경로보다 월등히 높게 나타났다. 그 이유는 도심지를 통과하는 경로이며 인구밀도가 매우 높기 때문이다.

4. 결론

모든 이동경로를 통해 본 LPG 탱크로리의 위험성 평가 결과 $I < II < III$ 의 순으로 산정되었으며, 인구밀도에 따른 사망자 분포도 증가하였다. 본 연구의 시나리오에서 C시의 경우에서, 채택한 각 경로당 위험성을 비교하여 보면 제 I 경로를 경유하여 이동할 경우 제 II와 III 경로보다 수송거리가 매우 길다. 그러므로 LPG 탱크로리 내에 잠재하고 있는 위험에 노출되어 있는 시간은 길지만 인구밀집 지역의 외곽도로를 경유하기 때문에 실질적인 위험성은 작게 평가되었다. 제 II 경로를 경유하여 이동할 경우 다른 이동 경로에 비해 거리는 매우 짧기 때문에 LPG 탱크로리 내에 존재하는 잠재위험에 대한 노출시간은 다른 경로에 비해 짧지만 제 I 경로보다는 인구밀도가 높아 사고시 사망자수가 높아 위험성은 비교적 높은 편이다. 마지막으로 제 III 경로를 경유하여 이동할 경우 제 I 경로보다는 거리가 짧고 제 II 경로보다는 길지만 인구 밀도는 다른 경로보다 가장 높은 도심지역을 통과하기 때문에 LPG 탱크로리 내에 존재하는 잠재위험에 노출되는 시간도 다소 길뿐만 아니라 사고에 따른 위험성 또한 매우 크게 나타났다.

따라서 LPG 탱크로리 수송을 위한 경로 결정시 수송거리가 짧고 인구밀도가 낮은 지역이 이상적이지만 본 연구에서 가정된 세 경로에서는 LPG 탱크로리 통과 경로로 제 I 경로를 선택하는 것이 바람직하다.

결론적으로 LPG 탱크로리 수송에 대한 이동 경로를 선택함에 있어서 사업자가 이러한 위험성을 인식하여 위험성이 높은 지역은 지향학 안전성이 높은 지역을 이용하도록 운전자에게 교육을 시키는 등 필요한 조치를 취하여야 한다. 또한 관공서에서는 LPG 탱크로리가 도심지역을 통과하지 못하도록 규제하고 인구밀도가 낮은 우회도로를 이용하도록 유도하여야겠다.

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(과제번호: 96-0602-01-01-3) 지원과 광운대학교 신기술 연구소 연구비 지원에 의하여 수행하였으므로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) Center for Chemical Process Safety, "Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE, New York, 1989.
- 2) Center for Chemical Process Safety, "Guideline for Process Equipment Reliability Data with Data Table", AIChE, New York, 1989.
- 3) Crowl, D. A. and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Application", Prentice-Hall, New Jersey, 1990.
- 4) International Atomic Energy Agency, "Manual for the Classification and Prioritization of Risk from Major Accident in Process and Related Industries, 1991.
- 5) Leon N. Moses and Dan Lindstrom, "Transportation of Hazardous Materials", Kluwer Academic Publishers, 1993.
- 6) "고압가스 운반차량 안전운행 요령(탱크로리를 중심으로)", 한국가스안전공사, 1990.
- 7) 고재욱의 6명, "독성물질 사용저장시설에 대한 개인적 위험성 산정에 관한 연구", 한국산업안전학회지, Vol. 12, No. 1, 1997.
- 8) 고재욱의 2명, "화학공장 주변지역에 미치는 위험성 평가방법에 관한 연구", 한국산업안전학회지, Vol. 10, No. 1, 1995.
- 9) 백종배, "화학공정에서의 정량적 위험성 평

이재준,김윤화,윤성렬,엄성인,백종배,고재욱

가를 위한 기반구조 구축에 관한 연구”, 광운대학교, 1995.