

안전한 경로 선택을 위한 수송 위험성 평가에 관한 연구

임 차 순*, 백 종 배*, 고 재 욱**

* 충주산업대학교 안전공학과

** 광운대학교 화학공학과

I. 서론

열량이 높고 깨끗하여 취급이 간편하며 공해가 없는 가스 연료의 사용량은 현재 뿐만아니라 향후에도 계속 증가될 것으로 보인다. 이러한 가스는 발전용을 비롯해서 공장용, 가정용 등으로 광범위하게 사용되며 이에 따른 유통과정중에 필요한 각종 운반설비, 공급설비, 사용설비 등의 설치가 증가되고 있다.

이와 같은 가스의 사용확대에 따라 증가되고 있는 가스사고 또한 결코 경시할 수 없다. 특히 LPG(liquified petroleum gas)는 공기보다 무거워 누설되면 지면에 깔리고 바람의 속도에 따라 먼 거리까지 이동할 수 있다. 그리고 오목한 곳에 체류하여 폭발성 혼합가스를 형성하는 경향이 높으며 또한 폭발하한계가 낮아 소량이 누출되더라도 점화될 잠재위험(hazard)이 매우 크다. 이같은 잠재위험들은 LPG를 생산, 저장 그리고 사용하는 곳뿐만 아니라 수송중에도 간과할 수 없다. LPG는 탱크로리(tanklorry)를 이용하여 운반하는데 도로에서 수송중 교통사고가 발생한 후 LPG가 누출하여 화재 및 폭발로 이어진다면 인근 지역주민의 인명피해뿐만 아니라 주위환경에도 치명적인 영향을 끼칠 수 있다.

본 연구에서는 LPG탱크로리가 도로를 주행중 LPG가 누출 할 수 있는 잠재위험을 확인하고 누출하여 폭발하였을 때 폭발의 강도를 계산하여 위험성(risk)을 정량적으로 해석하였다. 따라서 본 연구의 결과는 LPG 수송에 대한 위험성을 예측하여 보다 안전한 수송경로 및 방법 등을 선택하는데 객관적이고 정량적인 참고자료로 사용될 것이라고 사료된다.

II. 본 론

1. 위험성 평가 방법

본 연구에서는 LPG탱크로리가 어느 특정지역을 통과할 때를 고려하여 누출 가능한 잠재위험에 대해 확인하고 사고 전개과정에 대해 확인하였다. 그리고 사고를 구성하는 사건의 결정과 이 사건들이 발생할 수 있는 빈도(frequency) 및 강도(consequence)에 대한 분석을 포함하였다. 또한 피해정도를 정량적으로 평가하여 누출·폭발시에 인명피해 및 주변 환경에 미치는 영향의 심각성을 다루었다³⁾.

계략적인 연구 절차는 먼저 탱크로리를 이용한 LPG 수송중 누출 가능한 잠재 위험을 찾아내고 발생할 수 있는 가능성을 정량적으로 분석한다. 본 연구에서는 HAZOP study를 이용하여 LPG 수송중 아무 이상 없이 목적지까지 도달할 수 있는지, 아니면 내부 또는 외부의 영향에 의해 어떻게 일탈현상이 발생하는지에 대한 잠재위험을 찾아내어 기록하고 그의 원인을 파악하였다. 그리고 HAZOP study를 통해 확인된 잠재위험중 높은 사상들(events)을 FTA(Fault Tree Analysis)를 수행하여 LPG 누출발생 빈도를 연역적이고 정량적으로 예측·해석을 하였다. 또한 FTA의 정상사건(top event)인 LPG 탱크로리 수송중 누출 빈도 값을 ETA(Event Tree Analysis)의 초기사건으로 놓고서 연속적인 시간에 따른 사건진행의 구조적 범위를 제시, 이에 따라 발생 가능한 사고빈도를 순차적으로 산정하였다¹⁾.

또한 사고빈도 산정결과 가장 높은 발생빈도를 갖는 결과를 초점으로 강도분석 모델을 이용하여 결과를 산정하고 LPG탱크로리 수송 중에 발생할 위험으로 가정하여 영향범위 및 피해거리를 계산하여 LPG탱크로리 이동경로에 따른 위험정도를 비교·분석하였다^{2),4)}.

2. 사고 시나리오

위험성 산정에 있어서 C시에서 보유하고 있는 LPG탱크로리의 경우를 적용했으며 LPG탱크로리가 서울방향의 도로에서 C시의 남쪽에 위치한 가스충전소까지 도달하는 세 가지 경우를 가정했다. C시에서 보유하고 있는 LPG탱크로리는 10ton용량 3대, 12ton용량 1대, 15ton용량 3대, 20ton용량 1대로 총 8대이다.

1) 잠재위험 확인

잠재위험 확인은 LPG 탱크로리 수송중 위험성 평가에 있어서 정량적 분석의 기본이 된다. 그래서 표 1과 같이 HAZOP study를 통해 LPG탱크로리의 도로 주행중 잠재위험을 확인하였다.

표 1. LPG탱크로리 수송중 HAZOP study를 이용한 잠재위험 확인

Deviations	Causes	Consequences
Large traffic accident	1. 운전자 실수 2. 자동차 충돌 3. 자동차 고장 4. 지진	1. Release of tank leak and rupture 2. Release of pipe leak and rupture 3. Release of valve leak and rupture

2) 위험성 분석

LPG탱크로리 수송중 누출가능성을 정상사상으로 선정하여 발생빈도를 평가하였다. FTA의 정량적 평가를 위해 과거의 고장률 데이터를 적용하여 이상트리를 구축한 결과 LPG탱크로리 도로 수송중 LPG가 누출될 빈도값은 $1.2 \times 10^{-2}/\text{yr}$ 로 나타났다.

마지막으로 FTA의 정상사건인 LPG탱크로리 수송중 누출가능성을 ETA초기 사건으로 놓고서 이에 따라 발생하는 사건들의 순서들을 확인하였다. ETA로 확인된 사건들은 UVCE, BLEVE, Local Thermal Hazard, Flash Fire 등이며 FTA의 누출빈도값을 적용하여 정량적으로 빈도를 산정한 결과는 UVCE가 $5.18 \times 10^{-3}/\text{yr}$ 로 가장 크게 나타났으며, 다음으로 Flash Fire, BLEVE 순으로 나타났다. 그래서 본 사례연구에서는 가장 발생빈도가 높은 UVCE를 토대로 LPG 누출시 사고강도를 평가했으며 위험성 산정에 적용시켰다^{1),2)}.

LPG 탱크로리가 도로 수송중 사고로 탱크가 rupture되어 탱크내 LPG (propane)가 누출되어 UVCE가 발생된 상황을 가정하여 강도분석을 하였다.

UVCE의 가장 일반적인 Decker 등이 묘사한 TNT 모델을 이용하여 LPG탱크로리에서 누출된 LPG의 양을 TNT의 양으로 환산하여 그 값을 과압력에 따른 환산거리에 적용하여 실제 거리를 계산하였다.

그리고, 영국의 보건안전기구 고문위원회(Health and Safety Commission Advisory Committee)와 UN산하기구 IAEA에서 채택한 과압력에 대한 영향을 적용하여 실제 영향 거리를 계산하였다.

표 2. Overpressure에 대한 영향(IAEA와 HSCAC의 규정)

Overpressure(psi)	영 향
0.5	90% 유리창 파괴
0.7	주거용 건물의 규제 한도
4.41	100% 사망
5	50% 외벽붕괴 및 벽면내부에 금
15	건물의 완전 붕괴

그 결과 C시에서 보유하고 있는 각각의 용량의 탱크로리에 따른 피해거리를 산출한 결과는 표 3과 같다.

표 3. LPG탱크로리의 UVCE에 의한 피해 거리

영 향	Overpressure (psi)	피 해 거 리(m)			
		10ton	12ton	15ton	20ton
A	0.5	346	367	396	436
B	0.7	259	276	297	327
C	4.41	69	73	79	87
D	5	65	69	74	82
E	15	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 : 건물 완전 붕괴

3) 위험성 산정

개인적 위험성은 LPG탱크로리가 통과하는 특정 장소를 선택한 후, 위험성 등고선으로 표현된다.

개인적 사망위험에 대한 산정은 다음 절차에 의해 수행하였다. 우선, 폭발지점과 관련하여 개인의 위치를 결정하고 위험성을 평가함에 있어 피해의 정도를 결정하고 폭발 가상 사고 시나리오를 선택한 후, 주어진 폭발에 의해 발생되는 사고의 확률을 산정하였다⁴⁾.

계산절차는 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 지역·특정 방향에서의 사고 빈도를 계산하였다.

본 시나리오에서는 바람이 불지 않는 것으로 가정하였으므로 사고의 피해 각도 θ 는 360° 가 되므로 이 경우 앞에서 구한 UVCE 발생 빈도 5.18×10^3 을 식 (3)에 대입하면 $f_{i,d} = f_i$ 가 된다. 그러므로 LPG 탱크로리가 통과하는 어느 한 지점에서 UVCE가 일어날 빈도는 $5.18 \times 10^3/\text{yr}$ 이 된다. 그리고 또다른 사고는 없는 것으로 간주했기 때문에 사고 범위내에서의 개인적 위험 수치와 어느 한 지점에서 UVCE가 일어날 빈도는 같게 된다.

그러므로 20ton 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 $5.18 \times 10^3/\text{yr}$ 이 된다.

그림 1, 2, 3은 20ton 용량의 LPG 탱크로리가 각각의 경로를 통해 주행할 경우 계산된 구간별 사망자 분포를 나타낸 것이다.

사회적 위험성은 개인적 위험을 계산하는데 필요한 정보뿐만 아니라 시설물 및 주변 인구에 대한 정보도 필요로 한다. 사회적 위험성 산정을 위해서는 기후, 조건, 풍향, 누출원, 종류 등에 따라 세분화된 계산이 필요하다. 현실적으로는 실제 조건에 가장 근접한 값을 갖는 대표적인 기후 조건, 풍향 그리고 인구형태를 이용하였다⁴⁾.

본 사례연구에서의 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.

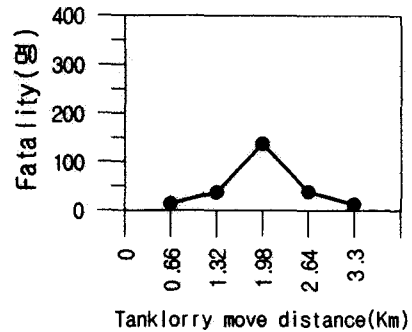
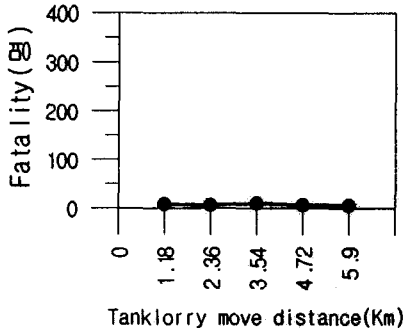


그림 1. 제 I 경로를 경유하여 주행할 경우의 사망자 분포

그림 2. 제 II 경로를 경유하여 주행할 경우의 사망자 분포

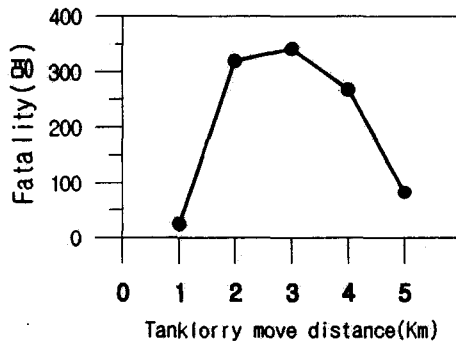


그림 3. 제 III 경로를 경유하여 주행할 경우의 사망자 분포

표 4. 20ton 용량의 LPG 탱크로리 통과시 각 경로당 평균 인구밀도와 이동거리

구 분	평균인구밀도 (명/10,000m ²)	이동 거리 (Km)
제 I 경로	3.12	5.9
제 II 경로	9.45	3.3
제 III 경로	87.2	5

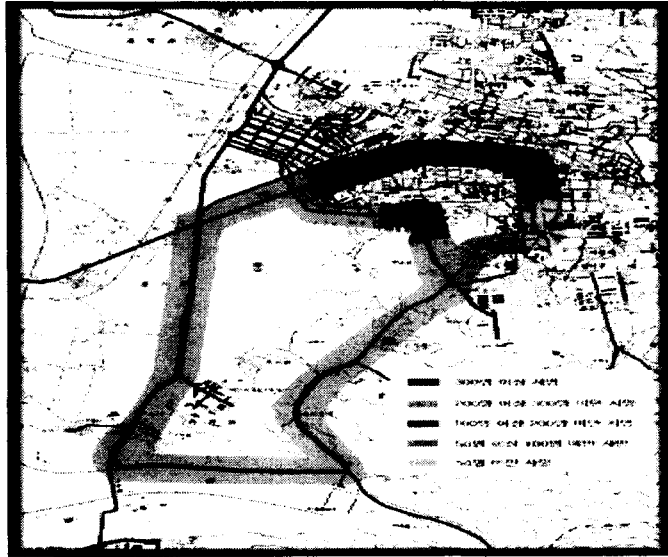


그림 4. 20ton LPG 탱크로리의 모든 경로
통과시 사망자 분포

III. 결 론

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 III경로보다 수송거리가 매우 길다. 그러므로 LPG 탱크로리 내에 잠재하고 있는 위험에 노출되어 있는 시간은 길지만 인구밀집 지역의 외곽도로를 경유하기 때문에 실질적인 위험성은 작게 평가되었다. 제 II경로를 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 III경로를 경유하여 이동할 경우 제 I 경로보다는 거리가 짧고 제 II 경로보다는 길지만 인구 밀도는 다른 경로보다 가장 높은 도심지역을 통과하기 때문에 LPG 탱크로리내에 존재하는 잠재위험에 노출되는

시간도 다소 길뿐만 아니라 사고에 따른 위험성 또한 매우 크게 나타났다.

그러므로 LPG 탱크로리 수송을 위한 경로 결정시에는 수송길이가 짧고 인구 밀도가 낮은 지역이 이상적이지만 본 연구에서 가정된 세 경로에서는 LPG 탱크로리 통과 경로로 제 I 경로를 선택하는 것이 바람직하다.

그래서, LPG 탱크로리 수송에 대한 이동 경로를 선택함에 있어서 사업자가 이러한 위험성을 인식하여 위험성이 높은 지역은 지향하고 안전성이 높은 지역을 이용하도록 운전자에게 교육을 시키는 등 필요한 조치를 취하여야 한다. 또한 관공서에서는 LPG 탱크로리가 도심지역을 통과하지 못하도록 규제하고 인구 밀도가 낮은 우회도로를 이용하도록 유도하여야 한다.

IV. 참 고 문 헌

1. Crowl, D. A. and J. E. Louvar, Chemical Process Safety ;
Fundamental with Application, Prentice-Hall, New Jersey, 1990.
pp.263~367, 413~477.
2. Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis,
AIChE-CCPS, New York, 1989.
3. 고재욱 · 노삼규 · 김진곤, 석유화학단지의 위험성평가 및 주변지역의
토지이용 안전계획, 한국과학재단, 1993.
4. 백종배, 화학공정에서의 정량적 위험성 평가를 위한 기반구조 구축에
관한 연구, 1995.