

## LPG 탱크로리 위험분석

장우전, 윤재건

한성대학교 산업시스템공학부

### Hazard Analysis of the LPG Tank Lorry

Woo Jung Jang, Jae-Kun Yoon

Hansung University, School of Industrial Systems Engineering

#### 1. 머리말

지난 30년간의 LPG(Liquified Petroleum Gas)자동차의 사용으로 현재 전국에는 600여 곳의 LPG자동차 충전소가 운영되고 있다. LPG자동차의 운행대수에 비하면 충전소의 수가 절대적으로 부족하고, 또한 LPG자동차의 보급확대를 위해서는 충전소 확충이 절대적으로 필수적이다. 그러나 최근의 부천의 가스충전소 폭발사고, 아현동 도시가스 밸브기지 폭발사고와 같은 대형가스 폭발사고의 여파로 충전소 설치 부지확보에 큰 어려움을 겪고있다.

LPG의 육상운송은 거의 모두 tank lorry에 의존하고 있다. 따라서 가스의 사용량이 증대됨에 따라 tank lorry의 운행도 점점 빈번해지고 있다. 고압가스를 운반하는 tank lorry가 과연 다른 자동차의 운행보다 위험한 것인지를 확인하기 위해 tank lorry의 위험요인의 고찰을 시도해 보았다. 그리고 부천의 LPG 충전소 사고에 대해서 탱크로리내 LPG잔량과 위험범위를 산출해 보았다.

탱크로리관련 사고사례를 분석하여 사고유형을 찾아내고, 탱크로리의 운행실태를 직접조사하여 탱크로리관련 사고발생빈도의 예측을 시도하고자 하였다. 탱크로리의 운행상황속에 많은 위험요인이 내재하고 있으나, 실제 사고 발생빈도를 살펴보면 다른 위험활동보다 위험도가 크다고 판단되지 않는다. 그러나 이번 부천의 폭발사고와 같이 발생가능성이 거의 없다고 판단되는 탱크로리의 BLEVE ( Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion )현상이 실제로 일어나는 것을 보면, 보다 근원적인 탱크로리의 안전관리 활동이 요구된다.

#### 2. 탱크로리 사고분석

Table 1 는 교통사고와 사고형태별로 구분한 것이다. 탱크로리에 의한 사고는 3년동안 총 29건으로 그중 교통사고에 의한 사고는 21건으로 탱크로리 사고중 72%를 차지하고 있을만치 교통사고에 의한 사고가 상당히 높다는 것을 알 수 있다. 사고 통계에 의하면 교통사고 21건중 전도에 의한 사고는 13건으로 44.8%, 충돌에 의한 사고는 8건으로 27.2%를 차지하고 있다. 사고 유형별로 교통사고는 전도와 충돌에 의한 사고로 분류할 수 있다.

전도에 의한 사고는 탱크로리 운전자가 과속으로 운행도중 빗길이나 눈길에 미끄러 지면서 전복되는 사고와 급회전시 전복되는 사고이다. 탱크로리는 일반

적으로 다른 차량에 비해 전도되기 쉽다. 트럭이나 승용차는 빈차 상태에서 안전각은 45° 이상이고 탱크로리는 36° 정도로 다른 차량에 비해 10° 정도의 차이가 난다.<sup>2)</sup> 만재된 상태에서 탱크로리가 70km로 운행시 급회전하면 안전각은 30° 정도로 줄어들어 전도되기 쉽다.

Table 1. The tank lorry accident<sup>1)</sup>

연도	사고건수	교통 사고				사고 형태		
		전도	충돌	소계	기타	누설	화재·폭발	기타
95	11	4	3	7	4	4	2	5
96	11	4	4	8	3	4	1	6
97	7	5	1	6	1	2	2	5
계	29	13	8	21	8	10	5	16
구성(%)	100	44.8	27.2	72	28	34	13	55

충돌에 의한 사고는 탱크로리측의 난폭운전에 의한 사고와 반대로 상대방의 난폭운전에 의한 사고 그리고 쌍방에 의한 사고로 나눌수 있다. 일본의 탱크로리 사고 통계를(85~96년) 보면 로리측에 의한 사고는 39건(60.9%) 상대방에 의한 사고는 16건(25%) 쌍방에 의한 사고는 16건(14.1%)로 로리측에 의한 경우가 많다.<sup>2)</sup> 이 것은 과속운전, 난폭운전, 졸음운전에 의한 것으로 탱크로리측의 주의 및 인식의 전환을 필요로 한다.

Table 1 에서 탱크로리 누설에 의한 사고는 95~97년 사이에 총 10건으로 34%를 누설에 의한 화재·폭발 사고는 3건으로 13%를 차지하고 있다. 최근 12년간(1985~1996년) 일본에서의 탱크로리로 부터의 고압가스 누설사고가 총 35건이 발생하였다.<sup>2)</sup> 일본의 '96년 3월말 현재 LP가스 탱크로리의 운행대수로 4603대로 집계되고 있다. 우리나라의 LP가스 탱크로리의 수가 약 830여대가 운행되고 있으며, 최근 3년간(1995~1997년) 총 11건의 누설사고가 있었다. 일본의 탱크로리 수가 우리나라보다 5.5배 정도가 많은데도 불구하고 누출에 의한 사고는 년당 3건에 불과하다. 우리나라는 년당 4건의 사고가 발생하고 있다. 누설 사고유형별로 살펴보면 다음과 같다.

- 1) LPG 탱크로리가 운행 도중 빗길이나 눈길에 미끄러 지면서 Slip Tube 액면계의 파손으로 가스가 누설되는 사고.
- 2) 충전 작업후 과충전으로 안전 밸브가 작동하여 가스가 누설되는 사고.
- 3) 충전호스의 노후로 인해 Y형 밸브의 연결부위에 있는 로리호스가 파열되어 가스가 누설되는 사고.

Table 2. The Damage and Accident rank<sup>1)</sup>

연도	사망	중상·경상	사고 등급			
			1급	2급	3급	4급
95	1	6	0	2	4	5
96	1	3	0	0	9	2
97	0	2	0	0	6	1
계	2	11	0	2	19	8

국내의 가스사고의 피해와 사고등급은 Table 2 과 같다. 사고등급은 한국가스

안전공사의 사고등급판별기준에 따른 것으로 그기준은 Table 3 와 같다.

Table 3. The gas accident grade<sup>1)</sup>

등급	피해 등급
A급	사망자 5명 이상, 사망 및 중상 10명 이상, 부상 30명 이상 또는 물적피해액이 3억 원이상인 사고.
B급	사망자 1명이상, 중상 2명 이상 9명 이하, 부상 6명 이상 29명 이하 또는 물적피해액이 5천만원 이상 3억원 미만인 사고.
C급	A급, B급을 제외한 인적·물적피해가 있는 사고.
D급	인적·물적피해가 없는 가스누설사고.

### 3. 탱크로리의 사고빈도

LPG탱크로리의 사고 빈도를 살펴보기 위해서 서울의 주요 LPG 충전소, 인천의 LPG저장 및 탱크로리 충전기지, LPG 탱크로리 용역업체를 방문하여 탱크로리의 운행실태(총운행거리, 왕복 횟수, 충전능력 등)를 조사하여 정리 하였다. 총 40대의 탱크로리의 운행실태를 조사한 바는 Table 4 와 같은 결과를 얻었다.

Table 4. The average running condition of LPG tank lorry.

1년간 평균 운행거리	1일 운행시간	1일 왕복횟수	1달 왕복 횟수	평균 속도	충전능력
88,000km	7.66	1.95	53.60	65km/h	12.16ton

LPG탱크로리의 최근 3년간 평균등록대수는 832대이다. 1년 평균운행거리가 88,600km이므로 3년동안의 총운행거리는  $2.21 \times 10^8$ km 이다. 3년동안 LPG탱크로리의 사고건수가 총 23건이므로 사고발생빈도는  $23 / 2.21 \times 10^8 = 1.04 \times 10^{-7}$ 회/km이다.

즉 탱크로리의 사고를 재해통계에 많이 이용되는 FAR(Fatal Accident Rate) 값을 구해보았다.

$$FAR = (2 \times 10^8) / (832 \times \frac{7.66 \text{ 시간}}{1 \text{ 일}} \times \frac{300 \text{ 일}}{1 \text{ 년}} \times 3 \text{ 년}) = 35$$

Table 5. Fatality statistics for common nonindustrial activities<sup>3)</sup>

Activity	FAR (Deaths/10 <sup>8</sup> hours)	Fatality Rate (Deaths per person per year)
<b>Voluntary activity</b>		
Staying at Home	3	
Travelling by		$17 \times 10^{-3}$
car	57	
bicycle	96	
air	240	
motorcycle	660	
Canoeing	1000	
Rock Climbing	4000	$4 \times 10^{-3}$
Smoking(20 cigarettes/day)		$500 \times 10^{-3}$
<b>LPG Tank lorry</b>	<b>35</b>	<b><math>0.8 \times 10^{-3}</math></b>

Table 5 에 다른 활동과의 FAR값을 비교하여 보았다. 여기서의 2명의 사망사고는 교통사고에 의한 탱크로리 운전자 이다. 그러므로 탱크로리운전에 의한 사

망 가능성은 다른 활동에 비해 낮은 편이다.

#### 4. 탱크로리 재해분석

부천의 가스폭발사고는 15톤 탱크로리에 외부화재가 발생하여 탱크내 압력을 상승시켜 BLEVE현상을 일으킨 사고이다. 부천의 LPG 충전소 사고사례를 통해서 탱크로리에 얼마만큼의 양이 BLEVE 현상을 일으켰는지 fire ball의 지름과 fire ball의 지속시간의 측정으로 탱크로리내 LPG의 양을 추정할수 있다. CPQRA(Chemical Process Quantitative Risk Analysis)의 fire ball 모델식과 ICI(Imperial Chemical Industries)의 fire ball 모델식을 이용하여 산출하였다.

화구(Fire Ball)의 최대직경 = 100m

화구의 지속시간 = 6 sec

$$I) \text{ 화구(Fire Ball)의 최대직경 } D_{\max}(m) = 6.48 M^{0.325}$$

$$\text{화구의 지속시간 } t_{\text{BLEVE}}(s) = 0.825 M^{0.26}$$

M : 액화 저장된 가연성 물질의 양(kg)

$$II) \text{ 화구(Fire Ball)의 최대직경 } D_{\max}(m) = 5.8M^{0.33}$$

$$\text{화구의 지속시간 } t_{\text{BLEVE}}(s) = 0.45 M^{0.33} \quad (M < 30,000 \text{ kg})$$

M : 액화 저장된 가연성 물질의 양(kg)

I)식과 II)식의 계산된 결과를 가지고 부천의 LPG 탱크로리내 저장된 양이 2,000 ~ 5,500 kg 이라는 것을 예상할수 있다. 탱크로리내 약 4톤이 BLEVE을 일으켰다는 가정하에 50%의 치명적 위험범위를 산출해 보았다.

$$r_{50} = 22 t^{0.379} M^{0.432}$$

$$t = 6.3 \text{ sec}$$

$$M = 2.5 \text{ TON}$$

$$r_{50} = \text{최고 } 50\% \text{ 까지 치명적인 위험 범위 (m)}$$

4톤을 저장한 탱크로리에서 BLEVE 현상 발생시 반경 80m 정도안에 들어오는 사람은 치명적인 사고를 당할수 있다.

부천의 LPG 충전소의 사고 진행상황을 살펴보면 가스안전공사의 안전검사가 끝나고 탱크로리가 충전소로 들어온 시간이 13시 30분 경이다. 충전후 20분 후인 14시경에 초기누출이 있었다. 14시 14분경에는 어떤 점화원에 의해서 화재가 발생했고 14시 23분경 탱크로리가 10분 간격으로 연쇄 폭발했다. 사고당시 15톤 탱크로리에는 부탄 12톤 가량이 충전되어 있었다. 그리고 15톤 탱크로리에서 지하 저장탱크로 이송하는데 걸리는 시간은 약 2시간 정도이다. 안전공사의 안전검사가 끝나고 20분 가량 충전후 초기누출이 있었다고 추측할수 있다. 그러면 탱크로리내에 남아 있는 양이 9~10톤 사이라는 것을 추정할수 있다. BLEVE 현상발생 시 탱크로리내 양이 4톤 정도로 추정한다면 누출된 양은 5톤 정도이다. 누출이 일어난지후 부터 BLEVE 현상까지 누출된 시간은 20분 가량이다. 누출량 산출모델로 누출부위의 지름을 산출해 보았다.

$$W = C A \sqrt{2 ( P_1 - P_2 ) } \rho \text{ (kg/s)}$$

C : 누출계수(0.6) : 탱크기준

A : 누출원의 상당면적(  $\frac{\pi d^2}{4}$  )

P<sub>1</sub> : 탱크 내 압력( 3.98 x 10<sup>5</sup> Pa)

P<sub>2</sub> : 대기 압력( 1.01325 x 10<sup>5</sup> Pa)

ρ : LPG의 밀도 584 kg/m<sup>3</sup>

위의 식으로 탱크로리내 누출부위의 지름이 2.2cm정도이면 5톤의 양이 20분정도에 누출될수 있다.

### 5. 문제점 및 고찰

탱크로리에 설치되는 안전장치에는 화재나 과충전 등에 의해 탱크 내압이 규정이상으로 상승되었을 경우 작동하여 탱크내압의 상승을 방지하는 안전밸브와 액화가스 이입 또는 이송작업중에 배관 또는 호스등이 파손되거나 화재 등 긴급사태가 발생시 액가스의 유출을 차단하는 긴급차단장치, 탱크로리에 이충전호스가 연결되어 있는 상태에서 엔진의 시동을 막는 리미트스위치가 있다.

Table 6 에 서울지역 충전소의 저장탱크용량을 보이고 있다. 저장탱크에 가스를 충전하는 경우 가스의 양이 저장탱크 내용적의 90%를 넘지 아니하도록 되어 있다. 그러므로 서울의 1일 저장능력은 약 680톤 이다. 한편 1일 부탄 사용량은 1420톤<sup>5)</sup> 정도 이다. 따라서 사용량이 저장능력의 배가 넘는다. 저장탱크의 용량이 부족한 상태에서 충전소의 LPG가스 판매량은 날로 증가되어 결국 1일 판매량이 저장탱크 용량보다 더 커지게 되었다. 심한 경우 10톤의 저장탱크를 갖고 있는 충전소의 하루 판매량이 30톤이 넘는다. 이런 경우 탱크로리가 저장탱크로 사용될 수밖에 없다. 따라서 탱크로리와 저장탱크가 많은시간 연결호스로 계속되어 있는 상황에서 용기 및 자동차 충전을 실시하고 있다. 결국 이러한 위험요인이 충전소화재시의 탱크로리폭발과 같은 사고를 발생시킨다.

Table 6. The storage tank capacity for LPGstation<sup>4)</sup>

분	10톤	15톤	20톤	50톤
주거	27	7	2	0
준주거	1	0	0	0
상업	10	1	0	0
준공업	4	2	0	0
자연녹지	2	1	1	0
녹지	1	0	0	0
자연	0	0	0	2
합계	450톤	165톤	60톤	100
총저장능력	775톤			

Table 7 은 저장설비 및 충전설비의 안전거리 기준이다. 안전거리 산정기준에는 1종 보호 시설과 2종 보호시설 사이에는 12m에서 최대 30m까지 안전거리를 유지하도록 되어 있다. 다만 지하 저장탱크인 경우에는 1/2을 유지할수 있도록 되어 있다. 탱크로리를 저장탱크화 사용하는 경우에는 탱크로리도 지상저장탱크로 간주하여 안전거리를 확보하여야 한다. 또한 지상저장탱크와 같이 탱크로리

주정차지역에 살수장치와 긴급차단장치를 설치하는 것이 타당하다고 생각된다.

Table 7. Safety distance of the LPG storage facility<sup>6)</sup>

저장능력	제1종 보호시설	제2종 보호시설
10톤 이하	17m	12m
10톤 초과 20톤 이하	21m	14m
20톤 초과 30톤 이하	24m	16m
30톤 초과 40톤 이하	27m	18m
40톤 초과	30m	20m

Table 8 를 보면 LPG탱크로리의 수는 점점 줄어들고 10~20톤 사이의 탱크로리가 차지하고 있는 비중은 점점 증가하고 있다. 즉 탱크로리의 용량이 점점 대형화되는 추세이다.

Table 8. LPG Tank lorry<sup>7)</sup>

연도	95				96				97			
	10톤 이하	10~20톤 이하	20톤 초과	계	10톤 이하	10~20톤 이하	20톤 초과	계	10톤 이하	10~20톤 이하	20톤 초과	계
서울	90	34	0	124	81	27	0	108	75	33	0	109
서울외 지역	496	225	0	721	477	255	0	732	357	345	1	702
계	586	259	0	845	558	282	0	840	432	378	1	811
구성(%)	69.3	30.7	0	100	66.4	33.6	0	100	53.27	46.61	0.12	100

#### 참고문헌

1. “가스사고연감”, 한국가스안전공사, 1995, 1996, 1997.
2. “일본의 최근 12년간 탱크로리 관련사고분석”, ‘97년 가스안전 9월호, 1997
3. Daniel A. Crowl / Joseph F. Louvar. “Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications”, Prentice-Hall, 1990.
4. “고압가스업소통계집”, 한국가스안전공사, 1996.
5. “에너지 통계 시스템”, 에너지 경제 연구원, 1996.
6. “고압가스 안전관리법”, 구민사, 1996.
7. “고압가스통계집”, 한국가스안전공사, 1995, 1996, 1997.
8. “’96년도 검사업무 지도확인 결과 및 대책”, 한국가스안전공사, 1997.
9. “사고예방논문집”, 삼성화재 위험관리연구소, 1998.
10. “가스사고편람집”, 한국가스안전공사, 1997.
11. AIChE-CCPS, “Guidline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis”, New York, 1987.
12. “가스시설의 정량적 위험평가”, 한국가스안전공사, 1998.
13. 윤재건, 장우정, “탱크로리의 위험요인 고찰”, 추계학술발표회 논문집, 한국가스학회, pp 375~380, 1998.