

## 가스용기 운반 중 누출된 LPG의 정량적 위험 분석

박기창 · †김병직 · 이근원\*

도요엔지니어링

\*송실대학교 환경·화학공학과

\*\*한국산업안전공단

## A Quantitative Risk Analysis of LPG Leaked During Cylinder Delivery

Ki-Chang Park · B.J. Kim\* and Kuen-Won Lee\*\*

Toyo Engineering Korea Limited.

\*Dept. of Chemical Environmental Engineering, Soongsil University, Korea

\*\*Korea Occupational Safety & Health Agency

### 요 약

LPG는 사용, 저장, 생산 과정뿐만 아니라 이송 중에도 많은 잠재위험(Hazard)을 갖고 있다. 소규모의 수요처일 경우, LPG 용기를 적재한 차량에 의해 지역 사업자에 의하여 배달된다. 만약 도심지역에 가스용기를 적재한 차량에 폭발사고가 발생한다면 주변지역에 재산 피해뿐 아니라 상당한 인명피해를 초래할 것이다. 본 연구에서는 LPG 누출 사례연구를 통하여 가스용기를 이용한 LPG의 운반 중에 사고의 원인이 되는 잠재위험을 확인한 후 사고발생 시나리오를 작성하고 발생 가능성과 피해결과를 예측하는 위험성(risk)의 정량적 분석을 하였다. 본 연구에서는 위험분석 프로그램을 Excel과 Visual Basic으로 프로그래밍 하여, ETA(Event Tree Analysis)법으로 LPG 운반도중 발생할 수 있는 사고의 빈도수를 구한 뒤, 이를 바탕으로 폭발로 인한 피해 범위 및 피해정도를 도출하였다. UVCE의 경우, 가스용기에서 누출되어 증발된 LPG에 대하여 사고현장주변에서 10m 이내에서는 심각한 구조적 손상을 보이며, 150m 이상에서도 우리가 파열되는 심각한 손상확률을 보였다. 그리고 TNT 상당법으로 Probit 결과, 10분간 누출되었을 때 40m 지점에서 유리창의 75%가 깨졌으며, 20m 지점에서 16%, 40m 지점에서는 10%의 구조적 손상을 보였다.

**Abstract** - There exists high hazard when transporting LPG as well as using, storing, and producing. For small scale LPG consumer, retailers deliver LPG to customers via a truck loading many LPG cylinders. Suppose there occurred a accident during LPG cylinder transfer, this could result in serious damages to the life and properties in the near or neighbor of the accident spot. In this regard, we made a quantitative risk analysis to estimate the possible damages and the probability through the identification of accidents causes and the simulation of the possible scenario. In this study, we made the Excel & Visual Basic computer program to perform quantitative LPG accident analysis. The simulation showed the following results. In case of UVCE(Unconfined Vapor Cloud Explosion), the effect within 10m of the accident spot showed very severe structural damages and even the accident can break the window glasses of the area of 150 m apart from accident spot. In case of TNT corresponding probit analysis, after 10 minutes LPG leaking, 75 % window glasses of 40 m distance was expected to be broken. And 16% frames of 20m distance, 10% frames of 40m distance was expected to be collapsed.

**Key words** : LPG, Hazard, Quantitative Risk Analysis

## 1. 서론

LPG는 열량이 높고 깨끗하고, 취급이 간편하며 공해가 적은 가스 연료로서 사용량이 향후에도 지속적으로 증가될 것으로 보인다. 이러한 가스는 발전용을 비롯해서 공장용, 가정용 등으로 광범위하게 사용되며 이에 따른 유통과정 중에 필요한 각종 운반설비, 공급설비, 사용설비 등의 설치가 증가되고 있다. 이와 같은 가스의 사용 확대에 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 폭발 하한값이 낮아 소량이 누출되더라도 점화될 잠재위험(Hazard)이 매우 크다. 이와 같은 잠재위험들은 LPG를 생산, 저장 그리고 사용하는 곳뿐만 아니라 수송 중에도 간과할 수 없다. 가스통들을 제대로 안 묶고 운반하는 차량을 도심에서 보았을 때 사고 위험에 대한 불안감으로 그 차량에서 빨리 멀어지고 싶은 생각을 하게 한다. 최근 들어 사고의 적절한 피해산정 및 합리적 대책 마련의 필요성이 인식되어 LPG 취급에 잠재하고 있는 위험성을 정량화하는 작업에 관심이 증가하고 있다. 이러한 위험의 정량화가 필요한 이유는 정량 분석을 통해 얻은 결과를 근거로 발생 가능한 손실을 예측할 수 있고 이를 통해 사고가 발생했을 경우를 대비한 적절한 대비책을 세워 그 손실규모를 최소화할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 LPG 누출에 의한 위험분석을 용이하게 하기 위한 위험분석 프로그램을 Excel과 Visual Basic으로 프로그래밍 하여, ETA(Event Tree Analysis)법으로 LPG 운반도중 발생할 수 있는 사고의 빈도수를 구한 뒤, 이를 바탕으로 폭발로 인한 피해 범위 및 피해정도를 예측할 수 있는 프로그램을 실행하여 그 결과를 분석·고찰하였다.

## II. 이론적 배경

2.1. 비등점 이하의 액체 증발모델링  
저장탱크가 Fig. 1에 나타나 있다. 유체의

액위 보다  $h_L$ 만큼 하부에 구멍이 발생했다고 하면 이 구멍을 통한 액체의 흐름은 기계적 에너지 수지 식에 의하여 표현되며, 비압축성으로 가정한다. 본 연구에서는 LPG cylinder에서 누출될 때 순간적으로 액체 pool를 형성하고, 증발하기 때문에 액체 증발 모델을 사용하였다.

대기압 하에서 비등점 이하인 액체에서의 증발속도는 열전도에 의한 열전달에는 의존하지 않는 것으로 본다. 반면에 증발속도는 질량 전달에 더욱 의존한다. Cremer와 Warner(1982)에 따르면, Pasquill은 증기 확산 계수  $D$ 는 각 물질의 특성값을 사용하고 풍속은 표준높이인 10 m에서 측정된 값을 사용하였고, 대기는 난류이며, 물질 전달 속도는 낮으며, 액체 온도는 증발 공정 동안에는 대기 온도와 같고 일정하며, 액체는 단일물질이며, 고인 액체의 면적은 일정하다고 가정하였다.<sup>[1][2][3][7]</sup>

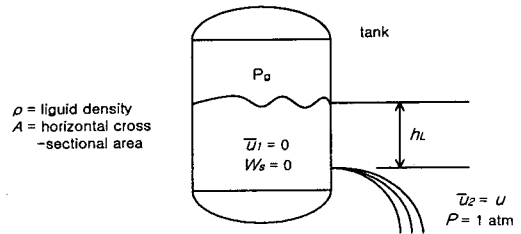


Fig. 1 Release hole of orifice type in tank.

주위온도보다 높은 끓는점을 가진 액체의 누출의 경우, pool이 지면 위에 형성되면서 증기압, pool의 면적 그리고 대기조건에 의하여 일정한 속도로 서서히 증발된다. 서서히 증발되는 pool의 경우에 대해서 대부분의 방출모델들은 pool에서부터 대기로의 물질전달에 의하여 증발이 제한되었다고 가정하였다. 단일성분에 대한 증발속도는 이상기체상태, 충분히 잘 혼합된 액상, 정상상태에서 Fleischer(1980)가 다음과 같이 정의하였다.<sup>[2][3][7]</sup>

$$\dot{M} = \frac{k_g A_p p_s M \cdot W}{R^* T_i} \quad (1)$$

물질전달계수  $k_g$ 를 계산하기 위하여 여기서는 평형판에서의 층류 또는 난류에 근거한 표준 화학공학적인 실험관계식을 사용하였다. Fleischer(1980)는 표준 평형판의 물질전달계수는 pool의 직경에 근거하여 Reynolds 수가 320,000에서 층류와 난류의 전이현상이 일어나는 것으로 가정하고 계산하였다.

$$N_{Sh} = 0.664 N_{Sc}^{1/3} N_{Re}^{1/2} \quad N_{Re} < 320,000 \quad (2)$$

$$N_{Sh} = 0.037 N_{Sc}^{1/3} [N_{Re}^{0.8} - 15200] \quad N_{Re} > 320,000 \quad (3)$$

$$N_{Sh} = \frac{k_g d_p}{D} = f(N_{Sc}, N_{Re}) \quad (4)$$

물질전달계수  $k_g$ 를 계산하기 위한 다른 한 가지 방법은 Sutton(1953)의 연구에 근거한 서서히 증발하는 pool에 대하여 기상학적인 접근법이 있다.<sup>[1][2][3][7]</sup>

$$k_g = 0.00482 N_{Sc}^{0.67} U^{0.78} d_p^{-0.11}$$

## 2.2. 확산

대기 중에 증기운의 분산모델 형태는 연속적인 누출 근원지로부터 방출되는 물질의 정상상태 농도를 나타내는 plum과 고정된 양의 단일 방출로 물질의 일시적인 고농도를 나타내는 puff의 형태로 나눌 수 있다. 가스가 방출하여 공기와 혼합 및 분산되어 가는 과정을 4단계로 구별할 수 있는데,

첫째 단계는 방출속도와 팽창에너지에 의하여 공기와 희석되는 난류단계이고 두 번째 단계는 처음 난류단계와 증기운의 거동이 혼합된 단계이다. 이 단계에서도 방출된 가스는 여전히 공기와 혼합되며, 혼합속도는 초기 난류도에 의하여 결정된다. 세 번째 단계는 공기보다 무거운 가스가 방출될 경우 중력에 의하여 지면으로 가스가 퍼지게 되어 지표면에 도달하게 되면 증기운은 공기보다 무거운 증기운의 거동을 하게 된다. 마지막 단계는 주위공기와 혼합에 의하여 증기운의 밀도가 거의 주위 대기과 비슷하게 되기 때문에 증기운의 부력 또는 압력을 무시할 수 있는 영역으로 주위 대기의 거동에 의하여 공기와 혼합 및 확산이 일어나는

수동적 확산영역이 된다. 또 증기운의 대기중 확산에 영향을 미치는 인자는 풍속, 대기안정도, 표면 거칠기, 누출지점의 높이, 누출된 초기 물질의 부력과 운동량에 있다. 풍속이 증가할수록 가스의 확산은 더욱 가늘고 길어지며, 풍향으로 더욱 빨리 이동되며, 더욱 많은 공기의 양에 의해 보다 빨리 희석된다.<sup>[1][4]</sup>

## 3.3. 개방계 증기운 폭발(UVCE, Unconfined Vapor Cloud Explosion)

액화 가스, 휘발성 가열 액체나 고압가스를 다루는 공정 장치의 한 부분이 파손되면 그 부분으로 내부 물질이 누출된다. 누출된 물질은 증기구름을 형성한다. 이 물질이 가연성 물질이고, 농도가 LEL(Lower Explosive Limit)이하로 희석되기 전에 착화가 되면 여러 조건에 따라서 화재가 일어나거나 UVCE가 발생한다.

화재가 UVCE로 전이되는 요인들 중 지금까지 알려진 것들은 다음과 같다.

- 가연성 물질의 누출량
- 연소 속도
- 방해물(confinement/obstacle)의 존재 여부

(5) UVCE는 폭굉(detonation)보다는 폭연(deflagrations)이 주를 이루며, 대부분의 경우 최대 과압은 15 psi를 넘지 않는 것으로 알려져 있다. UVCE의 영향을 예측하는 모델 중 주로 사용하는 모델에는 TNT모델과 TNO모델이 있다. TNT모델은 가연성 물질에 상응하는 연소열을 가진 TNT의 양을 이용하여 환산 거리를 구한 뒤 이를 이용하여 과압과 해당 거리와의 관계를 구하는 모델이다. 이 모델의 가정 및 사용상 제한점은 다음과 같다.

- 폭발원은 점으로 나타낼 수 있으며, 폭발원과 가까운 위치에서 과압은 높게 예측된다.
- 거리에 따른 과압의 감소는 TNT와 비슷하다고 가정한다.
- 증기운의 흐름은 고려하지 않으며, 지형, 건물, 장애물의 영향은 고려하지 않는다.

TNT 상당량을 구하는 방법은 다음과 같다.

$$W = \frac{\eta M H_c}{H_{c, TNT}} \quad (6)$$

폭발로 인한 폭풍파의 에너지는 증기운을 형성한 물질에서 이론적으로 구한 연소열의 일부분에 해당된다. 분진이나 가스의 폭발은 충격파나 압력파에 의해서 발화원으로부터 반응면을 이동하게 된다. 가연성 물질의 반응이 끝난 후에도 압력파는 그 운동을 계속한다. 폭풍파는 압력파와 계속되는 바람으로 구성되어 있다. 대부분의 피해를 일으키는 것은 폭풍파이다. 폭풍에 의한 피해를 정확히 추정하려면 피크과압(Peak Overpressure)을 적절히 이용하여 얻을 수 있다. TNT와 같은 폭발성 물질을 가지고 폭풍파의 특성을 실험한 것은 잘 알려져 있고, 폭풍파의 특성은 일반적으로 환산거리 Z의 함수로 표시되어 있다. 즉, 과압은 TNT의 상당 질량과 폭발기점으로부터의 거리를 이용하여 추산할 수 있다.<sup>[1][3][4][6]</sup>

실험적으로 유도된 환산법칙(Scaling Law)은 (7)식과 Fig. 2로 나타낼 수 있다.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (7)$$

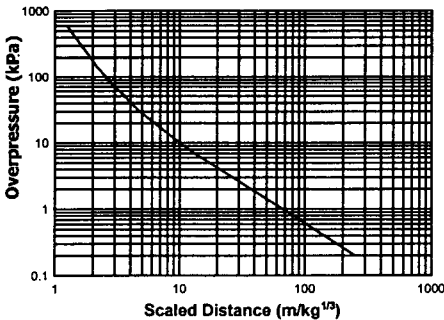


Fig. 2 Overpressure vs. scaled distance.<sup>[1]</sup>

#### 2.4. 영향평가모델

Probit model은 사고의 피해를 예측하는데 사용되는 모델이다. 해당 사고에 대한 확률 변수(Probit)를 이용하여 사고로 인해 피해를 입을 수 있는 백분율을 구하게 된다. Probit을 구하는 식은 다음과 같은 형태를 띈다.

$$Y = K_1 + K_2 \ln V \quad (8)$$

여기서 Y는 Probit,  $K_1$ ,  $K_2$ 는 피해의 종류에 따른 상수, V는 피해의 원인변수를 말한다.

폭발의 경우는 Eisenberg가 핵폭발 자료에

근거하여 다음의 Probit식을 제안하였다.<sup>[1][3][4][6]</sup>

① 폐출혈로 인한 사망 :

$$Probit = -77.1 + 6.91 \ln P$$

② 고막 파열 :  $Probit = -15.6 + 1.93 \ln P$

③ 구조물 손상 :  $Probit = -23.8 + 2.92 \ln P$

④ 유리파손 :  $Probit = -18.1 + 2.79 \ln P$

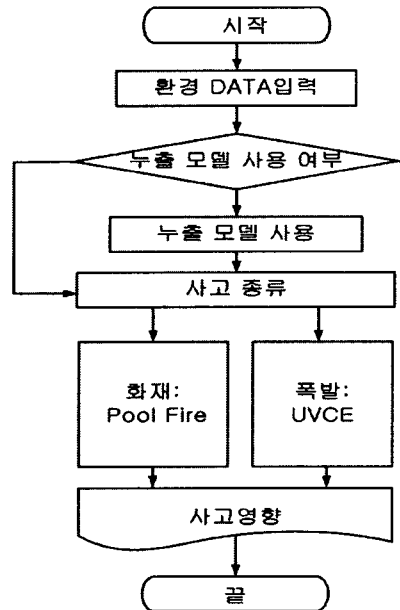


Fig. 3 Flowchart of the developed program.

#### 2.5. 프로그램개발

사고의 정량 분석을 위한 프로그램의 흐름도는 Fig. 3에 나타나 있다. 프로그램은 Microsoft의 Visual Basic 6.0과 Microsoft Excel 2000을 사용하여 작성하였다. 프로그램은 LPG의 물성 및 누출원 모델, 대기 환경을 입력하는 부분과 증발모델 부분, 화재-폭발을 다루는 부분으로 구성하였다. 먼저 저장물질의 물성과 대기 환경에 관련된 data를 입력하고 누출량을 구할 누출모델에 대한 정보를 입력하여 누출량을 구한다. 누출량을 알고 있어 사고 모델식에 직접입력할 경우에는 직접입력을 선택하고 사고의 종류를 선택한다. 폭발의 경우는 UVCE의 피해를 예측할 수 있도록 프로그램을 작성하였다. UVCE는 TNT 당량모델을

사용하여, 필요한 자료값을 입력하면 해당하는 과압이나 손실의 가능성에 해당하는 거리를 출력할 수 있도록 하였다.

### III. 사례 연구

가정용 또는 업소용으로 사용되는 LPG 용기를 적재한 차량이 운행중이다. 가스용기는 중형트럭 적재함에 적재되어있고, 규정된 충전압으로 LPG가 충전되어 있으나, 적재함에 있는 가스용기들이 제대로 묶여있지 않았다. 사고로 인하여, 차량이 전복되면서, 제대로 고정되어지지 않은 가스용기들이 사고지점에서 넘어져 밸브 또는 용기의 누출과 파열로 용기 안의 LPG가 누출되기 시작하였다. 또한 사고빈도 산정결과 가장 높은 발생빈도를 갖는 결과를 중심으로 강도분석 모델을 이용하여 결과를 산정하고, LPG 용기 운송 중에 발생할 위험도를 가정하여 영향범위 및 피해거리를 계산하여 LPG 용기 적재차량의 경로에 따른 위험정도를 비교·분석하였다.

#### 3.1. 위험성 평가방법

LPG의 위험성 평가방법은 가스용기 이송 중 누출 가능한 잠재위험을 찾아내고 발생할 수 있는 가능성을 정량적으로 분석한다. 기존의 HAZOP 연구를 이용하여 LPG 이송 중 아무 이상 없이 목적지까지 도달할 수 있는지 아니면 내부 또는 외부의 영향에 의해 어떻게 일탈현상이 발생하는지에 대한 잠재위험을 찾아내어 기록하고 그의 원인을 파악하였다. 그리고 확인된 잠재위험 중 높은 사상(events)과 기존의 FTA(Fault Tree Analysis)자료를 이용하여 LPG 누출발생 빈도를 ETA의 초기사건으로 놓고서 연속적인 시간에 따른 사건진행의 구조적 범위를 제시, 이에 따라 발생 가능한 사고빈도를 순차적으로 산정하였다. 또한 사고빈도 산정결과 가장 높은 발생빈도를 갖는 결과를 초점으로 가스용기 누출 실험 자료와 프로그램을 이용하여 결과를 산정하고, LPG 용기 이송 중에 발생할 수 있는 위험으로 가정하여 영향범위 및 피해거리를 계산하여 이송 중에 특정지역을 경유할 때의 위험정도를 비교·분석하였다.<sup>[1][3][5][6]</sup>

#### 3.2. 잠재위험확인

잠재위험확인 은 LPG 용기 이송 중 위험성

평가에 있어서 정량적 분석의 기본이 된다. HAZOP 연구를 통해 Table. 1과 같이 LPG 가스용기의 이송 중 잠재위험을 확인하였다. LPG 용기 이송 중 교통사고로 인한 누출 가능성을 정상사상으로 선정하여 발생빈도를 평가하였다. 과거의 FTA 데이터를 적용하여 ETA 초기사건으로 놓고서 이에 따라 발생하는 사건들의 순서들을 확인하였다.(Fig. 4 참조) LPG 용기에서 압축되어 있는 가연성 물질이 대량으로 누출하게 된 경우에 발생할 수 있는 사고에 대한 ETA를 실시한 예이다. Table 2는 LPG의 누출로 인하여 발생할 수 있는 사고결과를 예측하기 위하여 각각의 사건에 대한 빈도/확률을 나타낸 예이다. ETA로 확인된 사건들은 UVCE, BLEVE, Local Thermal Hazard, Flash Fire 등이며 FTA의 누출빈도값을 적용하여 정량적으로 빈도를 산정한 결과 UVCE가  $45.6 \times 10^{-6}/yr$ 로 가장 크게 나타났으며, 다음으로 Flash Fire, BLEVE 순으로 나타났다. 그래서 본 사례연구에서는 가장 발생빈도가 높은 UVCE를 토대로 LPG 가스용기 누출 시 사고 강도를 평가했으며 위험성 산정에 적용시켰다.<sup>[1][3][5][6]</sup>

Table 3. Causes and Consequences of Explosion Accidents during LPG transportation.

Deviation	Causes	Consequences
교통 사고	1. 운전자 실수 2. 자동차 충돌 3. 자동차 고장 4. 자연재해	1. Release from valve failure 2. Release from cylinder failure

Table 2. ETA Basic Data.

Event	Frequency or probability	Source of data
A. 압축된 LPG의 대량누출	$1.0 \times 10^{-4}/yr$	FTA
B. 탱크에서 즉시 점화	0.1	전문가의견
C. 바람방향이 주민거주지역임	0.15	기상자료
D. 주민거주지역근처에서 지연된 점화	0.9	전문가의견
E. UVCE 발생 (플래쉬화재와 비교하여)	0.5	과거사례
F. 제트화염이 탱크에 접촉	0.2	탱크배치도

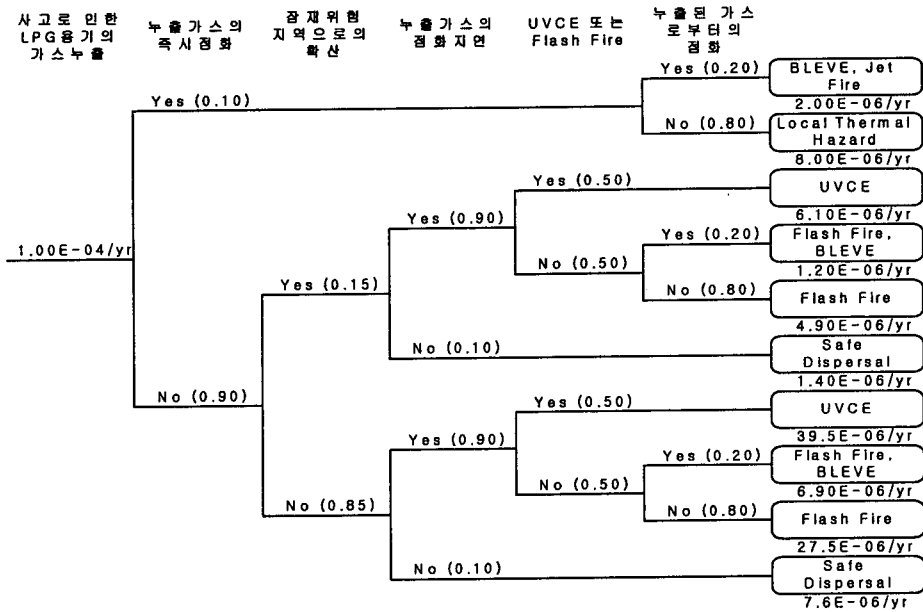


Fig. 4 ETA for LPG leakage accident.<sup>[3]</sup>

### 3.3. 정량적 위험성 분석

Fig. 5은 풍속에 의한 농도변화를 보여주는 것으로 풍속의 변화가 1m/s일 때와 6m/s일 때 풍속이 빠를 때보다 풍속이 1m/s로 느릴 때 방출된 가스는 공기와의 완전한 혼합을 보이면서 확산됨을 알 수 있다. 대기안정도는 공기의 수직혼합과 관계가 있는데 낮에는 고도가 증가할수록 감소하며, 밤에는 덜 감소하고, 다양한 지표면의 상황은 고도에 따른 풍속에 영향을 미친다. Fig. 6는 대기안정도 등급이 A일 때 초기 누출가스는 공기와의 급속한 혼합을 보이며 확산되고 대기안정도가 F일 때는 초기농도가 상대적으로 낮은 값을 갖는다. 표면 거칠기는 Fig. 7에서도 알 수 있듯이 지면 거칠기가 작을수록 거리에 따른 농도값이 커짐을 알 수 있는데 이것은 대기로 확산될 때, 장애물이 없을수록 더 멀리까지 확산됨을 보여준다. 누출 지점의 높이는 지표면의 농도에 영향을 미치는데 누출 지점의 높이가 높을수록 대기의 농도는 감소한다. 그리고 누출된 물질의 부력과 운동량은 누출의 효과적인 고도의 변화를 가져오는데 이러한 요소들에 의하여 누출된 가스가 확산되어 가는 특성을 갖는다.<sup>[5]</sup>

LPG 용기 이송 중 교통사고로 가스용기가 파열되며, LPG(propane)가 누출되어 개방계 증기운폭발(UVCE)이 발생된 상황을 가정하여 본 연구에서 작성된 프로그램을 실행하였다. UVCE의 가장 일반적인 TNT 모델을 이용하여 LPG 용기에서 누출된 LPG의 양을 TNT 당량으로 환산하여 그 값을 과압력에 따른 환산거리에 적용하여 실제 거리를 계산하였다. 그리고 과압으로 인한 영향을 적용하여 실제 영향 거리를 계산하였다. 그 결과 LPG 용기 이송 중의 누출된 LPG의 양을 시간에 따라 피해거리를 모사한 결과는 Table 3와 같으며, Fig. 8~Fig. 13는 시간의 증가에 따른 거리와 과압과의 관계를 나타낸 그래프이다. 과압은 거리에 따라 TNT의 폭발량과 유사하게 감소하며 시간에 따라 증기 발생량이 증가하며 LPG의 확산으로 과압이 증가함을 알 수 있고 누출 현장 부근의 첩골구조물의 변형이 발생할 수 있으며 용기나 구조물을 파열시킬 수 있고, 그 결과 넓은 지역에 작은 파편들을 발산시키며 이러한 파편이나 비산물은 사람에게 큰 상해를 주고 구조물이나 공정장치에 손상을 준다는 것을 추정할 수 있다.

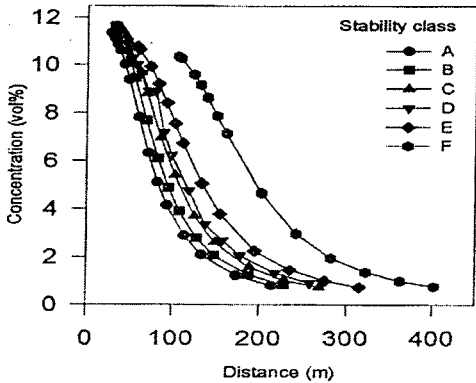


Fig. 5 The variation of concentration by the wind speed for LPG.<sup>[5]</sup>

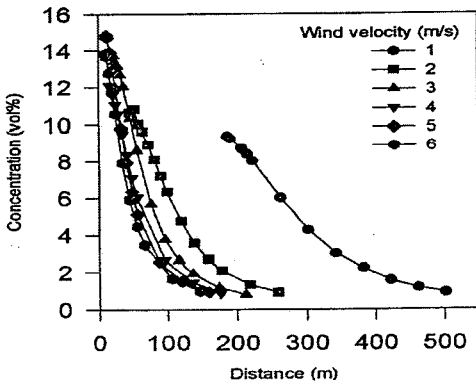


Fig. 6 The variation of concentration by the stability class for LPG.<sup>[5]</sup>

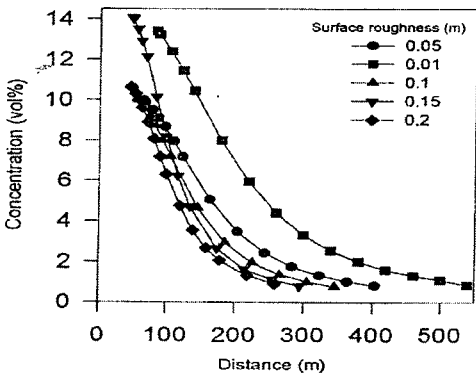


Fig. 7 The variation of concentration by the surface roughness for LPG.<sup>[5]</sup>

Table 3. Damage distance with leakage time by UVCE.

영향	Overpressure (psig)	피해거리 (m)		
		10분	20분	30분
A	0.3	27.8	38.1	43.3
B	0.5	19.1	25.0	27.5
C	0.7	16.2	19.1	21.3
D	1.0	11.9	15.5	17.8

- A : 심각한 손상이 발생할 확률 95%
- B : 크고 작은 창 부서짐
- C : 가옥 소파
- D : 가옥 부분 파괴

모든 이동경로를 통해 본 LPG 용기 적재 차량의 위험성 평가 결과, 유동인구밀도에 따른 인명피해 분포가 유동적이며, 150m 이상에서도 유리파손의 피해가 있었으며, 50m 이내 구조물 손상과 고막 파열의 경우가 발생하였고, 식당과 시장주변의 경우, 시간대별로 피해 범위가 다양하게 나타났으며, factor에 따른 다양한 분석이 가능하였다. 주로 인명피해와 함께 자산피해확률이 95%이상 되었으며, 주택가의 경우, 폭발 현장의 자산피해확률 (유리창 파손과 주차된 차량의 파손, 가옥 부분 파괴)이 가장 높게 나타났으며, 인구밀도에 따른 인명피해현상이 발생하였다.

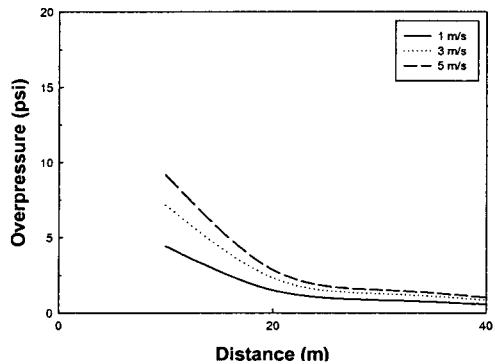


Fig. 8 Distance vs. overpressure with three different wind speed for 10min. (@25°C).

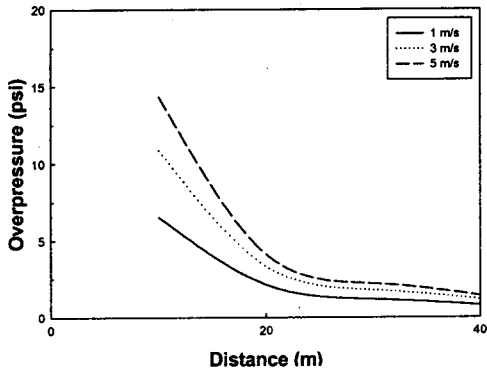


Fig. 9 Distance vs. overpressure with three different windspeed for 20min. (@25°C).

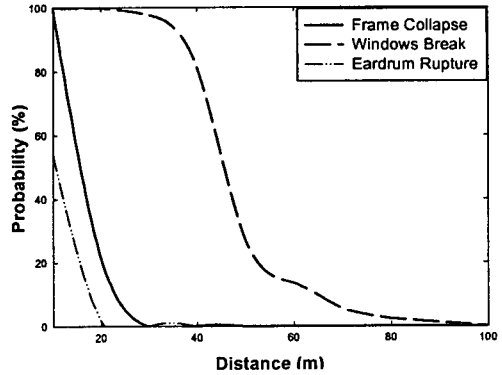


Fig. 12 Distance vs. Probability(%) for 20 min. (@ 1m/s)

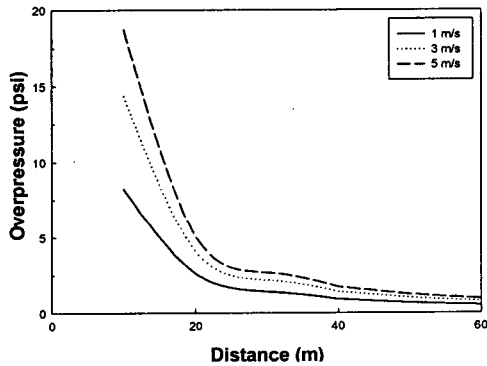


Fig. 10 Distance vs. overpressure with three different windspeed for 30min. (@25°C).

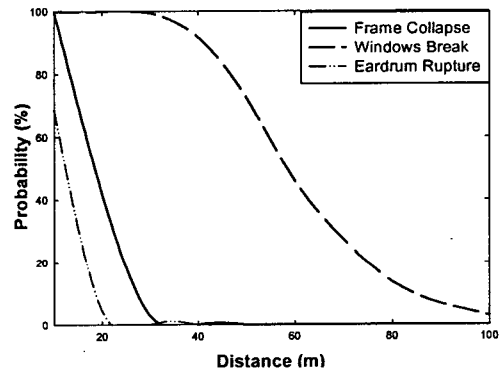


Fig. 13 Distance vs. Probability(%) for 30 min. (@ 1m/s).

#### IV. 결론

본 연구에서는 경제적, 시간적 이유로 정량적 위험성 평가를 수행하기 어려운 작업현장에서 폭발(UVCE) 사고에 의한 피해예측을 수행·분석하여 정량평가를 실시하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) UVCE의 경우, 가스용기에서 누출되어 증발된 LPG에 대하여 사고현장주변에서 10m 이내에서는 심각한 구조적 손상을 보이며, 150m 이상에서도 유리가 파열되는 심각한 손상확률을 보였다.
- (2) Probit 분석의 경우, 10분간 누출되었을 때 40m 지점에서 창 75%가 깨졌으며, 20m 지점에서 16%, 40m 지점에서는 10%이하의 구조적 손상을 보였다.

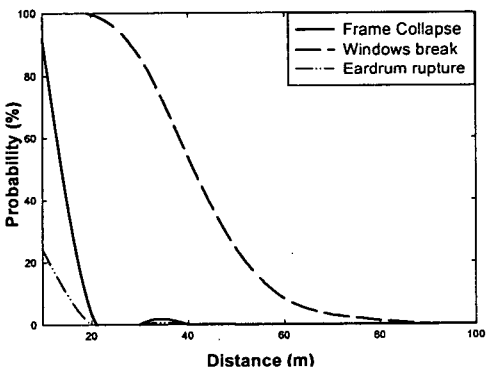


Fig. 11 Distance vs. Probability(%) for 10 min. (@ 1m/s).



(3) 본 연구의 정량적 분석 결과는 도심 내 LPG 용기 이송 안전 수칙 강화를 위한 기본 자료로 활용 될 수 있다.

### 참 고 문 헌

### 사 용 기 호

$\dot{M}$	: 대기로의 증발방출속도 (kg/s)
$k_g$	: 물질전달상수 (m/s)
$A_p$	: 유효 pool의 면적 (m <sup>2</sup> )
$p_s$	: 온도T에서의 물질의 증기압 (N/m <sup>2</sup> )
$M.W$	: 분자량 (kg/kgmol)
$R^*$	: 기체상수 (8.31 J/molK)
$T_i$	: 기-액 계면에서의 온도(K)
$N_{Sh}$	: Sherwood 수
$d_p$	: 유효 pool의 직경 (m)
$D$	: 물질의 확산계수 (m <sup>2</sup> /s)
$N_{Sc}$	: Schmidt 수 (=동점도/물질의 확산계수)
$N_{Re}$	: Reynolds 수
$U$	: 10 m 높이에서 풍속(m/s)
$\dot{m}$	: 액 표면 위에서 연소속도(kg/m <sup>2</sup> ·s)
$H_c$	: 액체의 순 연소열(J/kg)
$C_p$	: 액면을 형성하는 액체의 비열(J/kg·K)
$\Delta H_v$	: 액체의 증발잠열(J/kg)
$T_a$	: 주위온도(K)
$T_b$	: 액체의 비점(K)
$\rho_{air}$	: 공기의 밀도(kg/m <sup>3</sup> )
$g$	: 중력가속도, 9.81(m/s <sup>2</sup> )
$W$	: TNT의 상당질량 (kg)
$\eta$	: 경험적 폭발 효율, (0.01~0.2)
$M$	: 누출된 가연성 물질의 질량 (Btu)
$H_c$	: 가연성 물질의 순연소열 (Btu/lb <sub>m</sub> )
$H_{c,TNT}$	: TNT의 연소열 (2000Btu/lb <sub>m</sub> )
$Z$	: 환산거리(m/kg <sup>1/3</sup> )
$R$	: 폭발물로부터의 반경(m)
$t$	: 노출시간(s)
$P$	: 최대 과압(N/m <sup>2</sup> )

### 감사의 글

본 연구는 숭실대학교 2002 년도 교내 연구비 지원으로 이루어 졌습니다.

1. Crowl, D.A., Louvar, J.F., *Chemical Process Safety Fundamentals with Application*, Prentice-Hall, New-Jersey, 1990.
2. Center For Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models*, AIChE-CCPS, New York, 1996.
3. 유철진, 주종대, 조지훈, "화학공정 위험성 평가Ⅲ", 한국산업안전공단, (1998).
4. 임지환, "LP가스방출에 따른 피해영향 비교 평가에 관한 연구(폭발을 중심으로)", 석사학위논문, 한양대학교, 1998.
5. 백중배, "LPG Tanklorry 운송시 정량적 위험성 평가", 충주대학교, (1996).
6. 박기창, "화학공장에서의 BTX 누출에 의한 화재·폭발 영향 평가", 석사학위논문, 숭실대학교, 2000.
7. Keun-won, Lee, "A Methodology for Accessing Risk from Released Hydrocarbon in an Enclosed Area", J. of Loss Prevention in the Process Industries, 15(1), pp.11~17, 2002
8. Cussler, E.L., *Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems*, 2nd ed., Cambridge University Press, London, 1997.
9. McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. *Unit Operation of Chemical Engineering*, 5th ed., McGraw-Hill, 1993.
10. Himmelblau, D.M., *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 6th ed., Prentice-Hall, New-Jersey, 1996.
11. Perry, R.H., Green, D., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6th ed., McGraw-Hill, 1984.
12. 이경덕, 신창섭, "LPG 누출시 피해거리 및 폭발영향에 관한 연구", 한국산업안전학회지, 14(2), (1999).