



## LPG 누출시 피해거리 및 폭발영향에 관한 연구

### A Study on the Damaging Distance and the Explosion Effect by the LPG Release

이 경 덕\* · 신 창 섭\*

Kyoung-Duck Lee · Chang-Sub Shin

(1999년 2월 11일 접수, 1999년 4월 1일 채택)

#### ABSTRACT

The release of gas from the LPG storage tank by the rupture or leakage can occur explosion and this causes serious damage to people and structures.

In this study, the explosion effect and damaging distance were measured for the LPG cloud explosion to perform the quantitative risk assessment for the PSM, and the effective parameters on the explosion were found. The gas dispersion and mass contaminant in the explosion limits were calculated by using DEGADIS, and it was converted to TNT equivalency and damaging distance.

As a result, the wind speed was the most effective parameter on the diffusion rate and TNT equivalency, and the damaging distance were increased with decrease of wind speed and surface roughness.

#### 1. 서 론

가스 및 유류 취급시설은 시스템이 복잡한 장치산업이며, 대규모 생산활동과 경제활동을 가능하게 하는 귀중한 에너지를 공급한다. 이들 시설은 여러 가지 복잡한 공정으로 구성되어 있으며, 다량의 가연성·독성물질을 사용·저장하고

있다. 이 시설들에서 취급되고 있는 대부분의 물질은 유체상태의 위험성 물질이고, 누출시 화재·폭발 및 독성 피해를 일으킬 가능성이 높다. 대형의 생산·저장시설에서 사고가 발생하는 경우 막대한 인명 및 경제적손실과 함께 인근지역 사회에까지 지대한 영향을 미칠 수 있다. 그러나 사고발생시 영향이 크에도 불구하고 지금까지

\* 충북대학교 안전공학과

이러한 사고에 대한 적절한 위험성을 평가하기 위한 기법이 개발되어 있지 않은 실정이다.

중대사고를 경험한 유럽국가들과 구미에서는 화학공장에 대한 안전성을 확보하기 위하여 노력하였다. 유럽연합이 Seveso 지침을 발표하였으며, 그 주요내용은 특정화학물질을 취급하는 산업에 대하여 안전보고서 제출, 위험의 고지, 긴급 상황발생시 대책의 확립, 주민들에게 정보를 공개할 것을 요구하였고, 유럽의 각국은 이 지침에 기초하여 법의 정비를 시도하였다. 그리고 1984년 지하저장탱크에 저장된 약 22톤 정도의 메칠이소시아네이트(MIC)가 누출된 인도의 Bophal 사고는 미국에서의 화학공장 주변의 지역주민 및 환경의 안전에 대한 관심을 고조시켰다. 또한 OSHA는 Process Safety Management of Highly Hazardous Chemical이라는 법을 확정하여 실시하였으며, AIChE 산하에 CCPS를 설치하여 화학공장의 사고 예방 기법을 연구·보급하고 있다. 한편 UN의 산하기구인 국제노동기구(ILO)에서는 중대산업사고 예방을 위하여 Major Hazard Control System에 대한 국제조약을 가맹국들에게 체결하게 하고 있다.

1976년 일본에서는 별도의 특별법인 콤비나트법을 제정하여 특별방지 지역을 지정하고 인근 지역과의 완충지역설치, 공장내 장치의 규제, 방재 본부의 설치, 사업장의 방재체제 구축 등을 규정하여 중대산업사고 발생 가능성이 큰 석유화학공장에 대하여 보다 효율적인 관리 및 운영을 해오고 있다.

이들 외에도 여러 국가들이 공정안전관리를 수행하고 있으며, 핵심부분은 가상 사고시나리오로부터 구축된 정량적 위험성 평가라고 말할 수 있다.

한편, 국내에서도 1989년 럭키 여천공장에서 ABS 폭발사고, 1991년 페놀누출사고, 1994년 아현동 가스공급 중간기지에서 LPG 누출로 인한 화재·폭발사고와 1995년 염산탱크의 폭발사고와 같은 누출로 인한 폭발사고의 발생으로 인해 공정안전관리에 대한 관심이 고조되고 있다.

따라서 본 연구에서는 위험성 평가를 수행하기 위한 기반을 마련하기 위해 LPG를 취급하는 대형 저장시설의 가스 누출시 확산으로 인한 피

해범위와 폭발영향정도를 산정하는데 목적이 있다.

저장시설에서 LPG의 대기 누출시 풍속, 대기안정도, 지표면의 특성등과 같은 대기조건에 따른 가연성 물질의 대기확산 과정을 모사하고, 거리에 따른 농도변화와 대기중으로 누출 후 LPG 증기운의 폭발범위사이의 총방출량을 산정하였다.

또한 폭발시 공정 및 인근지역에 미치는 피해범위를 과압에 따른 스케일화된 거리와 TNT 상당량으로 환산하여 피해범위와 폭발영향의 정도를 분석하여, 가연성 물질을 취급하는 공정시설간 이격거리에 대한 안전기준치 산정을 위한 기반을 마련하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 누출 및 확산모델

파이프라인 또는 저장탱크의 파손에 의하여 내부의 물질이 누출될 경우 누출속도는 유체 및 열역학적 해석식으로 표현이 가능하며, 가압탱크로부터의 누출물질의 상태에 따라 액체, 기체-액체, 기체로 나눌 수 있는데 본 연구에서는 이상기체, 단열과정과 유체의 마찰을 무시하며, 기체상태의 누출을 대상으로 모사하였다.

누출모델을 통하여 얻는 가연성 증기의 누출속도, 누출물질의 물리적·화학적 특성을 가연성 증기가 사고지점에서 공장이나 다른 인근지역으로 바람에 의해 확산되는 과정을 모사하고, 확산후 지면에서의 농도값과 폭발범위사이의 총방출량을 산정하기 위하여 분산모델에 적용하게 된다<sup>1)</sup>.

일반적으로 증기운의 대기중 확산은 풍속, 대기안정도, 표면거칠기, 누출지점의 높이와 누출된 초기물질의 부력과 운동량등에 의해 영향을 받는다<sup>2)</sup>.

이때 공기보다 무거운 가스운의 형성<sup>3,4)</sup>은 공기보다 무거운 분자량을 갖는 물질의 누출 또는 공기보다 분자량이 작더라도 냉각된 물질의 누출 등에 의해 형성되며, 지표면위에 평평한 증기운을 형성한 뒤 중력에 의하여 지면으로 가라

았으며 옆으로 퍼져나가게 된다. 이런 현상은 시간이 경과함에 따라 주위 공기의 혼합에 의하여 밀도차가 점점 줄어들게 되어 중력의 효과를 무시할 수 있을 때 다시 수동적 확산형태로 전환되며 이때는 주위 바람에 의해 더욱 표면이 넓어지게 된다.

본 연구에서는 대기확산과정에 대하여 Spicer와 Haven에 의해 개발된 프로그램인 DEGA-DIS<sup>5,6,7</sup>를 이용하여 공기보다 무거운 압축저장된 프로판 가스의 대기확산과정에 대하여 모사하고자 한다.

위험성 물질의 대기확산은 바람의 속도와 태양광선의 양에 의존되는 안정도 등급과 대기의 조건과 누출지점으로부터 바람부는 방향으로의 거리의 함수인 Pasquill-Gifford 분산계수를 이용한 Gaussian 방정식<sup>2)</sup>에 대한 해석식은 식(1)과 같다.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \dots\dots\dots (1)$$

여기서 Q는 음속이상의 누출로 방출되는 LPG의 방출속도(kg/s)이며,  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 는 수평·수직 분산 계수, U는 풍속(m/s), y와 z는 수평·수직거리(m)이다.

## 2.2 피해영향평가

대기중으로 누출된 가연성가스가 점화원과 접촉하여 발생하는 증기운폭발에 의한 피해는 인접한 공장이나 경우에 따라서는 상당히 떨어진 거리에 있는 건물과 사람에게도 영향을 미친다. 이때 인명 및 재산상 손실의 주요원인은 충격파에 의한 과압이 된다<sup>8,9)</sup>.

이런 과압으로 인한 피해를 Derker, Barker, Lee<sup>10,11,12)</sup> 등은 폭발범위사이의 총방출량을 이용하여 모든 폭발의 기준이 되는 TNT상당량으로 환산하였으며, 폭발 중심으로부터 고려하는 지점까지의 거리를 이용하여 피해거리를 산정하였다.

이때 TNT상당량<sup>6,11,13)</sup>은 LPG가 폭발할 때 내는 에너지와 동일한 에너지를 방출하는 TNT의

중량을 나타내며, 이론식은 (2)와 같다.

$$W = \frac{\eta M E_c}{E_{cTNT}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 W는 TNT의 상당량(kg), M은 폭발범위사이의 총방출량(kg),  $\eta$ 는 폭발효율(-),  $E_c$ 는 가연성물질의 연소열(kJ/kg)이며  $E_{cTNT}$ 는 TNT의 연소열(4647.6 kJ/kg)이다.

주어진 과압에서의 환산거리와 과압에 대한 관계를 미육군에서 사용하는 스케일화된 거리와 과압에 대한 관계를 식(3)과 같이 나타내었다.

$$X = W^{1/3} \exp [3.5031 - 0.7241 \ln(P) + 0.0398 (\ln P)^2] \dots\dots\dots (3)$$

여기서 X는 주어진 과압에서의 거리(m)이며, P는 폭발시의 과압이다.

고려하고자 하는 손상의 형태를 식(2)에서 구한 TNT 상당량을 이용하여 Table 1과 같이 과압을 결정하였다. 이중 특정과압과 TNT 상당량을 이용하여 폭발 중심으로부터의 반경을 결정한 후 환산거리<sup>11,13,14)</sup>를 식(4)를 이용해 구하였다.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 Z는 스케일화된 거리(m/kg<sup>1/3</sup>), R은 폭발중심으로부터의 거리(m)이며 W는 TNT상당량(kg)이다.

스케일화된 거리와 폭발시 손상의 형태에 따른 과압을 기준으로 손상이 미치는 거리를 예측할 수 있는데 피해영향을 평가하기 위하여 폭발시 과압을 기준으로 손상의 형태를 4가지로 구분하였다.

이때 과압으로 인한 손상의 형태를 Table 1과 같이 나타내었다.

Table 1 Explosion overpressure damage estimates<sup>2)</sup>

Pressure (psig)	Damage
0.3	safe distance, 10% window glass broken
0.7	minor damage to house structures
2.3	lower limit of serious structural damage
5~7	nearly complete destruction of house

### 3. 모사방법

본 연구는 LPG 저장탱크에서 누출 후 확산으로 인한 위험범위를 추정하는 것이 목적이다. 대기중 기화된 LPG의 확산시 점화원의 존재로 인해 폭발이 일어나는 경우를 대상으로 모사하였다. 여기서 LPG는 Propane과 Butane의 혼합물이지만 Propane이 97% 이상을 차지함으로 LPG를 Propane으로 가정하였다.

LPG 누출로 인한 증기운폭발의 위험범위를 도출하기 위해서는 여러인자를 고려해야 하는데, 본 연구에서는 평균기상조건이 기온 11.9℃, 풍속 1.81m/s, 대기안정도 등급 A와 상대습도 65.25%인 국내 어느 도시에 풍속, 표면 거칠기, LPG방출량에 변화를 주어 지면에서의 거리별 농도변화를 나타내었다.

각각의 조건을 변화시키면서 결과를 도출한 후 각 조건에 따른 농도분포와 폭발범위 사이의 방출량과 비교하여 위험범위에 대한 분포 특성을 분석하였다.

누출된 LPG가 대기중에 확산되었을 때 각 조건에 따른 풍하거리별 지상의 농도분포와 폭발범위사이의 총방출량을 계산하였으며, 이를 TNT 상당량으로 환산하여 폭발시 발생하는 과압을 기준으로 손상의 형태별 영향범위를 산정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 지표에서의 거리별 농도변화

가연성 물질의 대기확산에 영향을 주는 인자는 표면 거칠기, 풍속, 안정도 등급이며, Spicer 등<sup>14)</sup>은 방출량의 변화에 따라 지표에서의 농도값은 선형적으로 증가한다고 하였다. 본 연구에서는 대기조건과 누출량이 지표면에서의 농도값과 확산거리에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 1에서 Fig. 3은 분석대상 저장탱크의 조건인 지상 50cm에서 방출된 LPG를 대상지역의 환경 조건인 평균풍속 2m/s, 온도 13℃, 안정도 A, 방출량 10 kg/s, 표면 거칠기 0.3m를 기준으로 일부 인자의 변화에 따른 농도값을 분석하였는데 일반적으로 방출원으로부터의 거리가 멀어

질수록 지면에서의 농도가 급격히 감소하다가 차츰 완만해지는 것을 알 수 있다.

표면 거칠기의 변화에 따른 지면에서의 농도값을 나타낸 Fig. 1은 지표면의 거칠기가 증가할수록 확산거리가 짧아지는 것을 알 수 있다. 모든 농도는 거리가 멀어짐에 따라 첫 부분에서 급격히 증가하다가 감소하였는데 이것은 Jet로 방출된 LPG가 Pool을 형성하면서 고이게 되어 다시 확산을 일으키기 때문이다.

방출량의 변화에 따른 거리별 농도는 Fig. 2와 같으며 방출량이 증가함에 따라 확산거리와 농도값이 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 3은 풍속의 변화에 따른 지표에서의 농도변화를 나타내고 있으며, 풍속이 증가하면 대기중의 공기와의 희석속도가 증가하여 누출된 물질의 확산거리와 농도값이 감소한다는 것을 알 수 있다. 한 예로, 풍속이 1m/s인 경우는 6 m/s 보다 대기중의 확산속도와 희석속도가 느려지므로 확산거리가 증가하고, 농도값도 증가한다는 것을 알 수 있다.

LPG가 대기중으로 누출·확산하였을 경우 확산거리와 농도는 풍속과 표면 거칠기에 반비례하고, 누출량에 비례한다는 것을 알 수 있다.

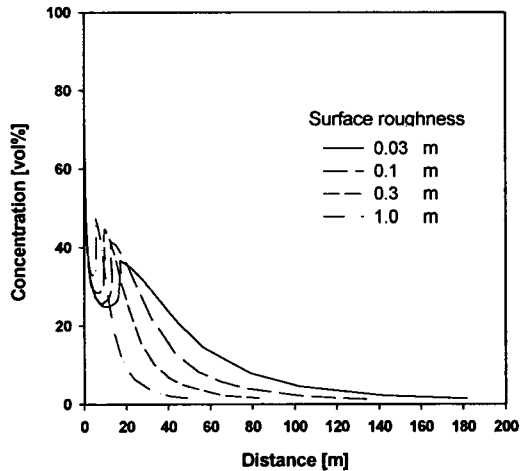


Fig. 1 The effect of surface roughness on the LPG concentration at ground by distance from the source

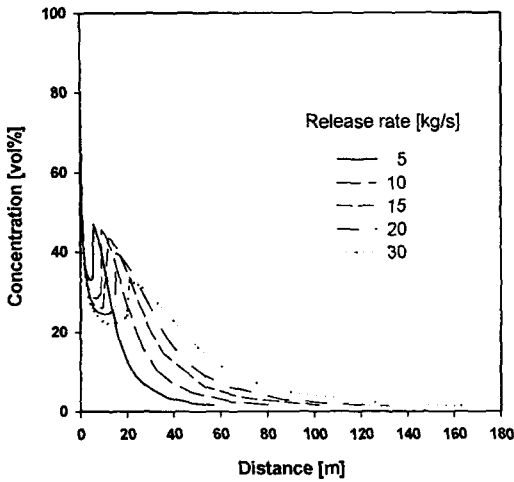


Fig. 2 The effect of release rate on the LPG concentration at ground by distance from the source

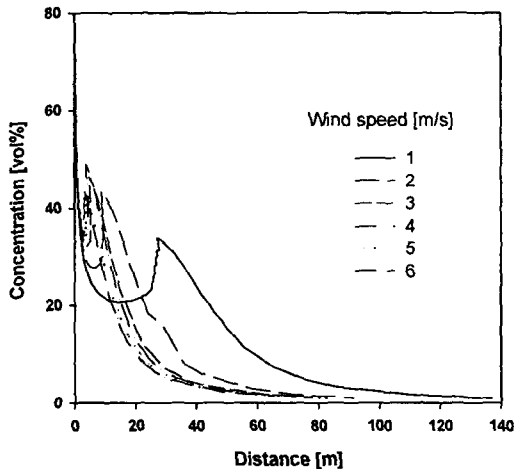


Fig. 3 The effect of wind speed on the LPG concentration at ground by distance from the source

#### 4.2 대기조건에 따른 손상형태별 피해거리

대기확산에 의한 폭발범위 사이의 총방출량은 대기조건과 방출량에 따라 변한다. Spicer등<sup>14)</sup>은 대기조건에 따라 폭발범위 사이의 가연성물질의 양이 풍속의 증가에 따라 비례적으로 증가한다고 보고하였다.

본 연구는 지면에서 대기조건에 따라 누출·확산된 LPG가 점화원과의 접촉에 의해 일어나

는 증기운폭발로 인한 피해거리를 예측하기 위해 폭발범위 사이의 방출량 변화를 모사하였으며, 이를 TNT상당량으로 환산하여 손상의 형태에 따른 피해거리를 예측하였다.

Fig. 4는 풍속, 표면 거칠기, 온도를 무차원시켰을 때 폭발범위 사이의 총방출량에 대한 영향 정도를 나타내고 있다. 여기서 풍속, 표면 거칠기, 기온 등 각 인자의 범위는 대상 도시에서의 최대값과 최소값을 기준으로 한 것으로 폭발위력이 주는 영향의 크기를 비교하고자 한 것이다. 이때 풍속이 폭발범위 사이의 방출량에 가장 큰 영향인자임을 알 수 있으며 특히 풍속이 느린 경우 그 영향이 크게 나타났다. 또한 표면 거칠기의 경우도 크기가 작은 경우 폭발범위 사이의 방출량에 큰 영향을 주었으며, 기온의 영향이 가장 작았다.

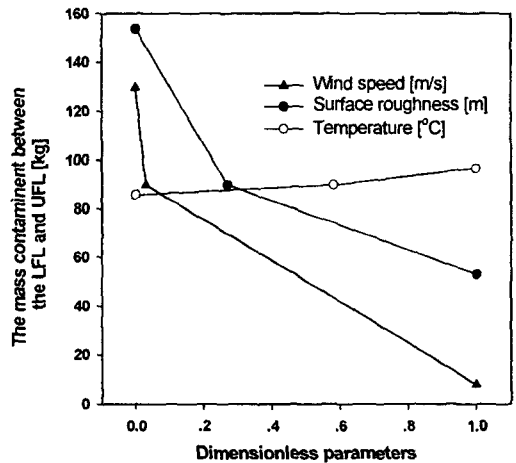


Fig. 4 The effect of atmospheric condition on the mass between the LFL and UFL at ground

Fig. 5는 표면 거칠기의 변화에 따른 폭발범위 사이의 방출량을 TNT상당량으로 환산하여 나타낸 것이다. 이때 표면 거칠기가 증가할수록 TNT상당량은 감소하였으며, 이것은 표면 거칠기의 증가로 인해 LPG의 확산이 방해받아 폭발범위 사이의 방출량이 감소하며, 이로 인해 10% 유리가 파괴될 수 있는 피해거리가 짧아진다는 것을 알 수 있다.

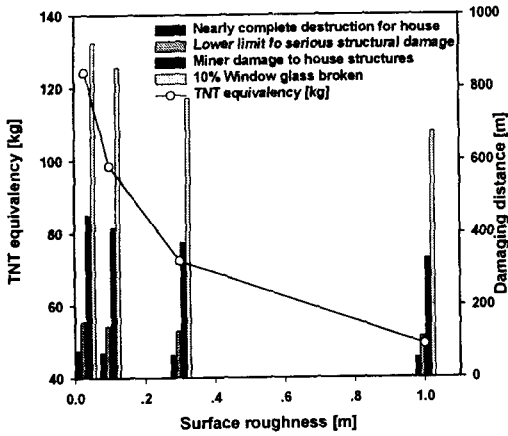


Fig. 5 The effect of surface roughness on the TNT equivalency and the damage distance

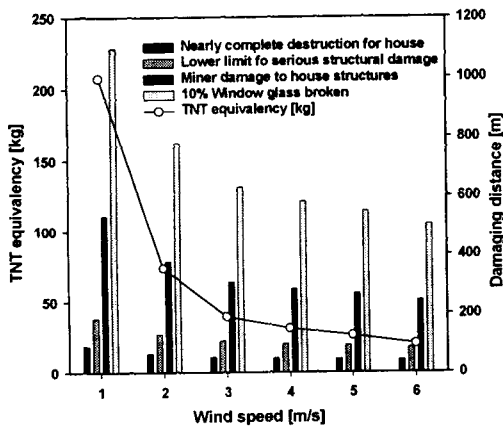


Fig. 6 The effect of wind speed on the TNT equivalency and the damage distance

Fig. 6은 풍속이 1m/s 씩 증가함에 따른 LPG의 TNT상당량과 손상의 형태에 따른 피해거리를 나타낸 것이다. 이때 풍속의 증가는 대기중 공기와와의 희석과 확산속도를 증가시켜 폭발농도 범위의 LPG양을 감소시키고 있다. 이로 인해 폭발시 TNT상당량은 1m/s에서 207.56 kg, 2 m/s에서 73.81 kg, 6 m/s에서는 20.16 kg으로 풍속의 증가에 따른 TNT상당량의 감소를 보였으며, 손상의 형태에 따른 피해거리는 Fig. 6에 나타난 것과 같이 풍속이 빨라질 때 감소하였다.

Fig. 7은 방출량 변화에 따른 TNT상당량의

변화와 피해거리와의 관계를 나타낸 것으로 방출량이 2배 증가함에 따라 TNT상당량은 2.8배 증가하였으며, 이로 인한 과압의 증가로 각 손상의 형태에 따른 피해거리는 1.5배 증가하였다.

Fig. 8은 누출후 대기조건의 변화에 따른 스케일화된 거리와 위험거리와의 관계를 나타낸 것이며, 여기서 위험거리는 유리창이 10% 파괴될 확률을 가진 거리이다. 방출온도가 스케일화된 거리에 미치는 영향이 가장 작았으며, 풍속이 가장 큰 영향을 주었다.

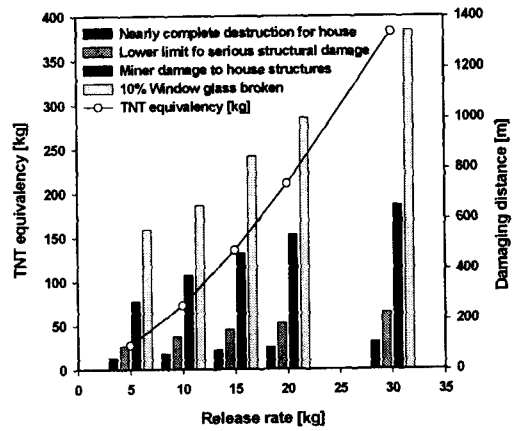


Fig. 7 The effect of release rate on the TNT equivalency and the damage distance

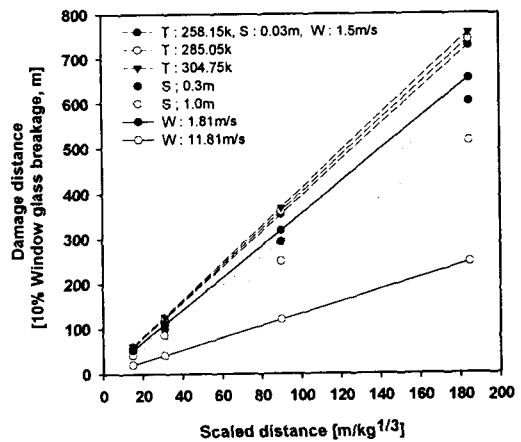


Fig. 8 The variation of damaging distance by the atmospheric conditions [Release rate : 5 kg/s, RH : 50%]

## 5. 결 론

LPG의 대기확산과 폭발 영향을 해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 누출후 폭발범위 사이의 방출량을 스케일화 된 거리로 환산하여 위험거리를 측정한 결과 대기확산과 위험거리에 가장 큰 영향을 미치는 대기조건은 풍속의 변화이다.
- 2) 풍속, 표면 거칠기, 온도를 무차원화 시켰을 때 확산거리와 일정지점에서의 농도값은 풍속과 표면 거칠기에 반비례하며, 누출량에 비례하지만, 대기온도에 따른 영향은 거의 없다.
- 3) 건물의 완전한 파괴를 일으킬 수 있는 위험거리는 풍속이 1m/s 증가할 때마다 위험거리는 약 10%씩 감소한다.
- 4) 풍속과 표면 거칠기가 증가함에 따라 대기확산으로 인한 피해거리는 회석속도와 장애물의 영향에 의해 짧아지며, 방출량에 따라서는 증가한다.

## 참 고 문 헌

- 1) Crowl, D.A. and Louvar, J.F., "Chemical Process Safety:Application", Prantice-Hall, New Jersory, 1990.
- 2) "Guidline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE-CCPS, New York, 1987.
- 3) Hanna, S.R. and Drivas, P.J., "Guideline for use of Vapor Cloud Dispersion Models", AIChE-CCPS, 1987.
- 4) Blackmore et al., "Heavy Gas Dispersion Model", Journal of Hazardous Materials. Vol. 6, pp.1~10, 1982.
- 5) Spicer, T.O. and Havens, J.A., "User's Guide for the DEGADIS 2.1 Dense Gas Dispersion Model", Enviromental Protection Agency, Report EPA-450/4-89-019, 1989.
- 6) Spicer, T.O., "Implementation of DEGADIS V2.1 on a Personal Computer", American Petroleum Institute, 1990.
- 7) Van Aerde, M. Stewart, A. and Saccomanno, F., "Estimating the Impact of LPG. Spill during Transportating Accidents", Journal of Hazardous Materals. Vol. 20, pp. 375~392, 1988.
- 8) Roberts, A.F. and Pritchard, D.O., "Blast effects from unconfined vapor cloud explosion", Journal of Occupational Accident. Vol. 3, pp. 231~247, 1982.
- 9) "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion Flash Fires, and BLEVEs", AIChE-CCPS, 1994.
- 10) Barker, W.E. et al., "Explosion Hazard and Evaluation", Elsevier Amsterdam, 1983.
- 11) Van den Berg, A.C., "The Multi-Energy method- a Framework for vapor cloud explosion blast prediction", Journal of Hazardous Materials. Vol. 2, pp. 1~10, 1995.
- 12) Frank P. Lees., "Loss Prevention in the Process Industries Hazard Indentification, Assessment and Control", Vol. I, Butterworths, 1980.
- 13) "Workbook of Test cases for Vapor Cloud Source Dispersion Models", AIChE-CCPS, 1989.
- 14) Spicer, T.O. and Havens, J.A., "Application of Dispersion Models to Flammable Cloud Analyses", Journal of Hazardous Materals, Vol. 49, pp.115~124, 1996.