

有毒가스 누출사고 발생시 피해범위 및 대책에 관한 研究^①

吳 東 圭
(서울大 環境大學院)

제 1 장 서 론

1984년 12월 3일 인도 중부 마드야 프라네 시야의 보팔市에서 일어난 유독가스누출사고는 전 세계를 경악시킨 환경재앙이었다. 농약원료인 메틸이소시아네이트 45톤이 약 한시간동안 누출되어 40km²의 피해범위를 형성시킨 이 사고로 2,500여명이 사망하였으며 보팔市의 70萬 주민 가운데 약 20萬명이 유독가스를 들이마신 것으로 매스콰은 보도하였다.

이와 같이 보팔市의 가스누출사고가 막대한 인명피해를 준 근본요인은 누출된 가스가 인체에 치명적인 독성을 가지며 비등점이 낮은 물질로 액화시켜 액체상태로 보관되므로 대기에 노출되면 바로 가스상태로 기화하여 대기중으로 짧은 시간에 널리 확산하는 특성을 가졌기 때문이다. 가스상태로 저장된 물질은 일정 용량의 용기에 저장되는 량이 액화가스보다는 훨씬 적으며 누출사고발생시 누출이 지속됨에 따라 용기의 압력이 떨어지므로 누출속도도 비례하여 떨어진다. 그러나 액화가스의 용기가 파열되어 누출될 경우는 용기내의 압력이 물질의 증기압으로 유지되므로 어느 시간동안 일정 속도로 누출되는 특성을 또한 가지고 있다. 그러

므로 가스용기의 누출사고보다는 액화가스의 용기파열에 의한 누출사고가 보다 큰피해를 야기하게 된다.

최근 우리나라는 화학공업이 급성장하였으며 이러한 유독성액화가스의 생산 및 유통이 급격히 증가하고 있다. 이에 따라 사람의 실수 또는 기계적인 고장에 의해 보팔市 사고와 같은 대형의 유독가스누출사고가 일어날 가능성이 우리주변에서도 높아지고 있는 것이다.

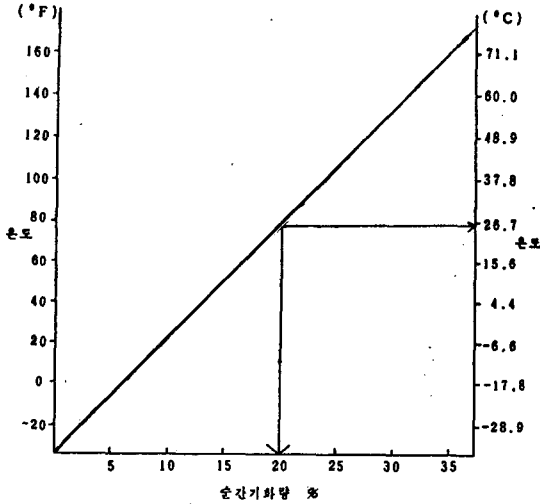
대형가스누출사고가 발생할 경우 막대한 인명피해를 줄이기 위해서는 주민들을 효과적으로 대피시켜야하며 요즘과 같이 인구가 도시로 집중화되어있고 통신수단이 발달되어있는 여건하에서는 신속한 피해범위의 예측이 주요 과제라 할 수 있다.

여기서는 독성가스이며 액화상태로 현재 널리 생산, 유통되고있는 염소를 선택하여 최근 널리 사용하는 대기확산공식을 액화염소누출사고에 적용시켜 봄으로써 피해범위를 도출하고자 한다.

제 2 장 액화염소의 누출특성

액화염소의 용기파열시 보통 두단계로 구분

되어 염소가 누출된다. 처음 단계는 용기내의 액화염소온도에 따라 사분의 일(¼)까지 순간적으로 기화하여 염소구름(Chlorine Cloud)이 형성되어 대기중으로 확산하는 것이고 다음 단계는 남아있는 액화염소가 비점을 유지하면서



〈그림 - 1〉 저장용기 파열시 액화염소 온도와 순간기화량

주위로부터 열을 흡수하는 속도에 따라 거의 일정한 속도로 기화되어 대기중으로 확산하는 것이다. 문헌에 의하면 55톤 탱크파열시 액화염소가 용기안에 있느냐 또는 땅위로 흘러졌느냐에 따라 0.45 - 4.5 kg/sec의 일정한 속도로 기화된다고 한다. 〈그림 - 1〉은 액화염소온도에 따라 용기파열시 순간적으로 기화하는 비율을 나타낸 것이다. 이에 의하면 상온(25°C)에서 20%가 순간적으로 기화함을 알 수 있다.

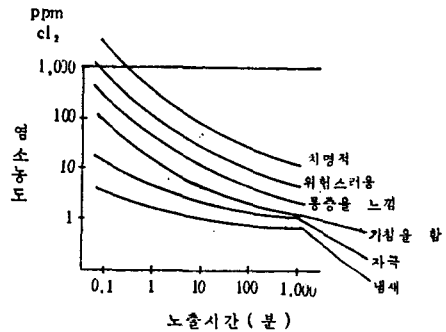
제 3 장 염소가스의 피해등급

염소가스가 인체에 미치는 위해성 정도에 따

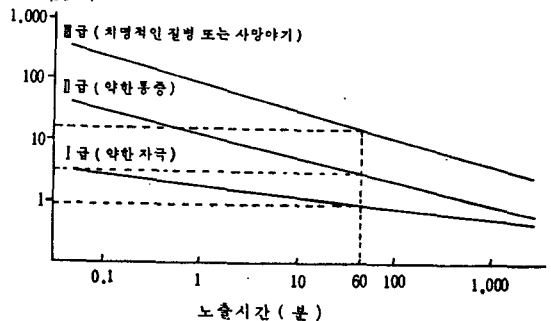
라 〈표 - 1〉과 같이 세가지 등급으로 나눈다.

위해성이 가장 큰 등급을 등급Ⅲ으로 위해성이 가장 작은 등급을 등급Ⅰ로 정하였다. 염소가스가 인체에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 염소농도와 피해영향관계를 알아야 한다.

인체가 염소가스에 노출될 경우 노출시간과 염소농도에 따른 인체에 미치는 영향은 〈그림 - 2〉와 같다. 이것을 〈표 - 1〉의 피해등급과 연결시키기 위하여 세 등급으로 구분하고 대수-대수 그래프에 곡선대신 직선으로 표시하면 〈그림 - 3〉과 같다. 이 그림에서 보면 염소가스 1 ppm 농도에 60분간 노출되면 Ⅰ급의 피해영향을 받으며, 3.5ppm 농도에 60분간 노출되면 Ⅱ급의 피해영향을 받고, 12ppm



〈그림 - 2〉 노출시간 농도에 따라 염소가 인체에 미치는 영향



〈그림 - 3〉 노출시간과 농도에 따라 염소가 인체에 미치는 영향의 등급

〈표 - 1〉 염소의 위해성 정도에 따른 등급(농도기준)

등급	위해성 정도	년간최대허용빈도
Ⅰ	약한자극을 주는 정도의 냄새	약 2회/년
Ⅱ	약한통증을 주지만 지속적인 증상은 아님	0.1회/년
Ⅲ	심한통증을 나타내며 치명적인 질병 또는 사망을 야기함	0.01회/년

농도에 60분간 노출되면 Ⅲ급의 피해영향을 받음을 알 수 있다. 피해영향 직선의 기울기가 매우 완만하므로 피해영향은 노출시간보다 염소 농도에 더 민감함을 뜻한다. 즉 1.2ppm 농도에 10분간 노출되는 것은 1 ppm 농도에 60분간 노출되는 것과 마찬가지로 I급의 피해영향을 받는다.

이와 같은 사실은 앞으로 도출할 피해범위의 계산을 위해 다음과 같이 염소농도에 따라 피해범위의 기준을 정의할 수 있는 합리성을 제 공하여 준다.

- I급 피해범위 : 1ppm (염소농도)
- II급 피해범위 : 3.5ppm (염소농도)
- III급 피해범위 : 12ppm (염소농도)

제 4 장 대기오염물의 확산이론

대기에 배출된 오염물질은 바람, 난류확산, 반응 등에 의해 확산이 이루어 지는데 이때 어느 한 지점 (X,Y,Z)에서의 시간에 따른 농도 변화율은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial X} - V \frac{\partial C}{\partial Y} - W \frac{\partial C}{\partial Z} + E_x \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + E_y \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - KC$$

여기서,

- C : 농도 (M/L³)
- U, V, W : X, Y, Z 방향의 풍속 (L/T)
- E_x, E_y, E_z : X, Y, Z 방향의 확산계수 (L²/T)
- K : 반응속도계수 (T⁻¹)

위의 식은 다음의 가정조건하에 「가우스 모델」에 의해 풀 수 있다.

- ① 모든 확산공간에서 풍향과 풍속이 일정하다.
- ② 상방향의 확산에 제한이 없다.
- ③ 지면에서의 흡수, 반사가 없다.
- ④ 확산계수가 일정하다.
- ⑤ 바람부는 방향으로의 난류확산은 무시한다.
- ⑥ 농도는 시간에 따라 변화하지 않는다. (정상상태)

이러한 경우 상기 식의 해는 간단히 「가우스 확산모델방정식」으로 풀어지는데 오염 배출원을 點源으로 가정하고 地表의 반사를 고려하면 다음 식으로 표시된다.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \left[\exp\left(-\frac{Y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[\frac{-(Z-H)}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[\frac{-(Z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \right]$$

지상농도를 계산하기 위하여는 Z=0이므로 다음 식으로 정리된다.

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z\mu} \exp\left[-\left(\frac{Y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]$$

여기서,

- C : 지상농도, Units/m³
- Q : 오염물질배출속도, Units/sec
- Y : Y방향의 오염물질농도분포에 대한 표준편차 (m)
- Z : Z방향의 오염물질농도분포에 대한 표준편차 (m)
- U : 오염물질 배출지점의 고도 H에서의 풍속 (m/sec)
- H : 오염물질 배출지점의 높이 (m)
- X, Y, Z : 누출지점으로부터 X, Y, Z 방향의 거리

상기 식은 액화염소누출에 있어서 일정한 속도로 누출이 유지되는 연속적 기화에 의해 형성되는 염소의 지상 농도를 계산하는데 적용될 것이다.

순간적 기화에 의해 형성되는 염소의 지상농도계산에는 난류확산과정 (eddy diffusion process)의 통계학적 개념에 기초를 둔 다음의 사튼공식 (Sutton's Equation)을 적용하고자 한다.

$$C = \frac{2M}{\sqrt{\pi^3} C_x C_y C_z (Ut)^{3(2-n)/2}} \exp\left[\frac{-1}{(Ut)^{2-n}} \left(\frac{X^2}{C_x^2} + \frac{Y^2}{C_y^2} + \frac{Z^2}{C_z^2}\right)\right]$$

여기서,

C : X,Y,Z 지점에서 t 시간 후의 농도

M : 초기 (t = 0, X=Y=Z=0)의 누출량

Ci : i 방향의 확산계수

U : X 방향의 평균풍속

t : 누출 후의 경과시간

n : 확산인수

X : 가스구름의 중심으로부터 풍향 방향 (X 방향)으로의 거리

Y : 가스구름의 중심으로부터 풍향에 직각인 수평거리

Z : 가스구름의 중심으로부터 X와 Y에 수직인 거리

확산계수 Ci의 값은 <표-2>와 같다.

제 5 장 기상조건의 결정

1. 대기안정도의 결정

오염물의 대기확산에 의한 농도분포를 계산하기 위하여는 「가우스확산 모델방정식」이나 「사톤공식」에서 대기 안정도의 함수인 σ_y, σ_z, Ci 의 값을 구하기 위하여 대기 안정도를 우선적으로 알아야 한다. 대기 안정도는 대기의 열역학적 구조를 나타내는 지표로서 대기 온도의 고도(高度)에 따른 실제체감율과 건조단열체감율을 비교하여 정의된다.

Pasquill은 <표-3>과 같이 대기안정도의 등급을 설정하였다.

<표-4>는 기상상태에 따라 대기안정도를 분류하는 방법으로 Turner가 제시하였다.

<표-2> Sutton식의 난류 확산계수

배출원높이 (ft)	기온체감율이클때 n=0.2		기온체감율이작거나없을때 n=0.25		보통정도의기온역전 n=0.33		기온역전이클때 n=0.5	
	Cy	Cz	Cy	Cz	Cy	Cz	Cy	Cz
0	0.42	0.24	0.24	0.14	0.15	0.09	0.12	0.07
33	0.42	0.24	0.24	0.14	0.15	0.09	0.12	0.07
82		0.24		0.14		0.090		0.070
100		0.23		0.13		0.085		0.065
150		0.21		0.12		0.075		0.060
200		0.19		0.11		0.070		0.055
250		0.18		0.10		0.065		0.050
300		0.16		0.09		0.055		0.045
350		0.13		0.07		0.045		0.035

* Air Pollution Part A Analysis JOE O. LEDBETTER p.106.

<표-3> Pasquill에 의한 대기안정도 등급

안정도등급	안정상태
A	극히 불안정 (extremely unstable)
B	비교적 불안정 (moderately unstable)
C	약간 불안정 (slightly unstable)
DD	중립(낮) (neutral - day)
DN	중립(밤) (neutral - night)
E	약간 안정 (slightly stable)
F	비교적 안정 (moderately stable)

* User's Guide "Texas Episodic Model" p.5.

Pasquill의 안정도등급과 <표-2>의 확산인수 n 과의 관계는 다음 <표-5>와 같이 설정하였다.

<표-4> 기상상태에 따른 대기 안정도 분류

10 m 고도에 서의 풍속 (m/sec)	밤 태양복사의 강도			낮 구름이 덮인 정도	
	강 (1)	중 (2)	약 (3)	4/8 이상 덮인 경우(4)	3/8 이하 덮인 경우
< 2	A	A - B	B	E	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

* AIR POLLUTION Its Origin and Control p.122.

<표-5> 안정도 등급과 Sutton공식의 확산인수 n 관계설정

Pasquill 안정도	확산인수 (n)
A	0.20
B	0.20
C	0.25
D	0.25
E	0.33
F	0.50

* AIR POLLUTION Its Origin and Control p.90.
KENNETH WARK/CECIL F.WARNER

2. 풍속의 결정

지표가까운 대기층에서의 풍속은 高度가 높아질수록 증가한다. 대부분의 관측소에서는 지상 10 m 높이에서의 풍속을 측정하며 이 풍속을 地表수준풍속이라 한다. 「가우스확산 모델 방정식」에 적용할 풍속 U 는 배출원높이(여기서는 누출지점의 높이)에서의 풍속이어야 하는데 배출원의 높이가 10 m 이하일때는 대기 안정도보다 地表의 형태가 풍속에 큰 영향을 미치므로 보통 10 m 높이의 풍속을 사용한다.

<다음호에 계속>

♣ 환경속에 사는 우리
보전하고 보호받자. ♣