

부탄가스 증기운폭발의 피해범위에 영향을 미치는 변수에 관한 고찰

†차 순철 · 추 광호*

기술사사무소 차스텍이앤씨, *SK건설(주)
(2001년 5월 3일 접수, 2001년 6월 22일 채택)

The "Consequence Analysis" of Variables Affecting the Extent of Damage Caused by Butane Vapor Cloud Explosions

Char, Soon-Chul and Choo, Kwang-Ho*

Char's Tech Engineering & Consulting Co., Ltd, *SK Engineering & Construction Co., Ltd
(Received 3 May 2001 ; Accepted 22 June 2001)

요 약

본 연구는 플랜트에서 일반적으로 사용하는 저장탱크에서 Heavy가스의 누출에 의한 증기운폭발사고에 대한 영향평가방법을 제시하고 변수의 최적선택조건을 얻기 위하여 부탄 저장용기의 누출사고에서 증기운폭발에 대한 사고결과를 평가하고 사고결과에 미치는 변수의 영향을 분석하였다. 이 때 증기운폭발에서 지표면과 일정한 높이에서 연속 누출하여 분산되는 경우에 대하여 SuperChems™ Professional Edition을 사용하여 기상변수와 공정 변수들의 변화에 대한 영향을 분석하였다.

실제의 조업조건을 표준조건으로 하여 부탄이 저장탱크에서 15분 동안 누출되는 경우에 대하여 사고결과를 산출하고 해석한 결과 연소하한농도(LFL)의 최대거리가 52m이었고, 증기운폭발에 의한 생성된 과압이 128.2m에서 1 psi를 나타내었다.

부탄저장용기의 누출사고결과에 미치는 변수의 영향 정도는 다소 차이가 있었으나 대기 안정도, 바람속도, 배관의 크기, 관심거리 등이었으며, 이들 변수들의 값의 변화에 따라 사고 결과값의 변화가 크게 나타났으며 관심거리가 짧을수록, 누출공의 크기가 클수록 사고에 미치는 영향이 증가하고, 사고결과에 따른 피해범위가 크게 나타났다. 바람속도가 느릴수록, 대기의 상태가 안정한 상태일수록 연소하한농도에 이르는 거리가 증가하고 사고결과가 크게 나타났으며 사고결과에 미치는 변수들의 영향도 증가하였다. 따라서 부탄과 같은 Heavy가스의 저장용기에서의 누출사고에 의한 사고결과에 영향을 미치는 변수들의 영향분석을 바탕으로 영향평가방법을 제시하고 사고결과에 영향을 미치는 중요변수를 선정하고 변수들의 최적선택조건을 얻기 위하여 적절한 변수 값들을 선택하는 기준을 제시하였고 사고결과를 정확한 방법에 의하여 평가하고 예측할 수 있도록 하였다.

Abstract - This paper presents a "consequence analysis" for vapor cloud explosions caused by heavy gas leakages from commercially used storage tanks at petrochemical plants. Particularly, this paper emphasizes on evaluating the results of various vapor cloud explosion accidents from Butane storage tanks. Also this paper analyses the impact of variables on the accidents in order to acquire the optimum conditions for variables. SuperChems™ Professional Edition was applied to analyse the impact of

†주저자 : scchar@dreamwiz.com

atmospheric and other variables in the situation where vapor cloud continuously disperses from the ground level. Under the assumption that practical operating conditions are selected as a standard condition, and Butane leaks from the storage tank for 15 minutes, the results show that the maximum distance of LFL (Lower Flammable Limit) was 52 meters and overpressure by the vapor cloud explosion was 1 psi at 128.2 meters. It is observed that the impact of the variables on accidental Butane storage tank leakage mainly varied upon atmospheric stability, wind velocity, pipe line size, visible length, etc., and changes in the simulation result occurred as the variables varied. The maximum distance of the LFL (Lower Flammable Limit) increased as the visible length became shorter, the size of the leak became larger, the wind velocity was decreased, and the climatic conditions became more stable. Thus, by analysing the variables that influence the simulation results of explosions of Butane storage tanks containing heavy gases, I am presenting the most appropriate method for "consequence analysis" and the selection of standards for suitable values of variables, to obtain the most optimal conditions for the best results.

Key words : UVCE, UFL, LFL, consequence analysis

제 1 장 서 론

경제가 성장함에 따라 산업시설이 대형화되고 더욱 복잡한 양상을 보이고 있으며, 이러한 산업의 발달은 인류에게 상당한 편리함을 주는 반면에 여러 가지 새로운 형태의 위험을 가져오기도 한다.

중대산업사고는 대부분 화재, 폭발 및 독성 물질의 형태로 발생하는데 본 연구는 폭발, 특히 개방공간 증기운폭발(Unconfined Vapor Cloud Explosion)의 연구에 중점을 두고자 한다.

폭발은 폭발음과 폭발파(blast wave)에 의해 특성화 할 수 있는데[3,8] 폭발압력이 사망의 직접적인 원인이 될 수 있는 경우에는 폭발지역 부근의 작업자만으로 한정되지만 실질적으로 부상과 충격은 폭발이 발생한 장소에서 폭발 그 자체의 충격파(shock wave)에 의해 부상을 당하거나 또는 건물의 붕괴 등에 의해 보다 많은 피해를 일으킨다[4]. 이와 같이 충격파의 영향은 누출물질의 양과 특성, 그리고 증기운의 분산을 제한하는 정도에 따라 주로 의존하기 때문에 폭발시의 압력은 매우 작은 압력에서부터 수백킬로 파스칼(kPa)까지 되기도 하는데, 본 연구에서는 Over Pressure를 1 psig, 3 psig, 5 psig 등으로 구분하여 영향권에 들어오는 거리의 변화를 알아 보도록 하였다.

증기운폭발은 용기 또는 파이프, 건물 등과 같이 밀폐된 공간에서 발생하는 밀폐공간 증기운폭발(confined vapor cloud explosion)과 개방된 공간에서의 폭발인 개방공간 증기운폭발(UVCE : unconfined vapor cloud explosion)로 구분되며, 본 연구에서는 개방공간 증기운폭발(UVCE : unconfined vapor cloud explosion)으로 한정한다.

폭발의 영향을 평가하는데 가장 많이 사용되는 TNT당량모델(TNT Equivalency Model)은 1969년 미국 해군과 공군에서 최초로 개발되어 사용하던 것으로 미국군사기술매뉴얼(US Army Technical Manual TM 5-1300)에 수록되어 있다.[9] 이 TNT당량모델은 누출된 가연성 물질의 연소열을 산출하고 폭발의 연소에너지 동등한 TNT질량과 수율로 환산하여 거리에 따른 과압의 범위를 산출하는 방법으로 사용이 편리하여 현재까지도 널리 사용되고 있다.

제 2 장 이론적 고찰

본 연구에서는 액체로 저장되어 있는 부탄이 대기로 방출되어 발생된 부탄증기가 개방공간 증기운폭발(UVCE)을 일으켜 이에 대한 사고 영향평가를 위하여 누출원 모델로부터 누출량을 각각 산출하고 이에 대한 결과값들을 산출하기 위한 이론을 해석하였다.

분산모델은 화학물질이 사고지점에서 플랜트나 다른 인근지역으로의 풍매전달(airborne transport) 되는 현상을 나타내고 있다. 누출된 물질은 독특한 플럼(plume) 또는 퍼프(puff) 속에서 바람에 의해 멀리 이동된다. 누출된 물질의 최대농도는 누출지점에서 발생하는데 누출지점은 반드시 지표면이 아닐 수도 있다.

누출된 물질은 대기로 분산되어 급격히 혼합되기 때문에 바람이 불어 나가는 쪽으로 멀리 떨어질수록 농도는 낮아진다. 여러 가지의 매개변수가 누출된 물질의 대기분산에 영향을 주게 되는데, 이 매개변수로는 바람 속도, 대기 안정도 (atmospheric stability), 대지조건 (ground condition), 빌딩, 물, 나무 등의 존재 여부, 누출지점의 높이, 누출된 물질의 부력(buoyancy)과 운동량(momentum) 등이 있다.[1,6,8]

용기로부터 가연성 또는 폭발성 증기의 누출은 positive buoyant, neutrally buoyant, 그리고, negative buoyant로 분류할 수 있으며 누출된 물질의 주변에 존재하고 있는 대기와의 밀도 차에 의하여 발생한다.

누출된 증기가 연속적으로 누출되는 경우에는 식 (1)에 의해 산출한 Ri_0 (Richardson number)가 0.003보다 큰 경우에 heavy gas의 플럼모델을 적용한다.[5,7,12,13]

$$Ri_0 = \frac{g(\rho_i - \rho_a)V}{\rho_a U_{10}^3 d} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, g 는 중력가속도(m/sec^2), ρ_i 는 누출 물질의 밀도(kg/m^3), V 는 부피유속(m^3/sec), U_{10} 은 10m 높이에서 바람속도(m/sec), ρ_a 는 공기의 밀도(kg/m^3), d 는 누출공의 직경(m)이다.

증기의 누출지점에서 일정거리에 도달했을 때의 농도를 구하는 방식은 여러 가지 방법이 있으나, Arthur D. Little, Inc.의 SuperChems 모델에서 연속적인 정상상태에서 누출근원지까지 대지 위 H 높이에서 바람이 일정속도로 x방향으로 움직이는 경우만을 고려하는 경우에는 다음 식 (2)를 사용한다.[1,11]

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\sigma_x \sigma_z U_x \pi} \times \exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left[\exp\left[-0.5\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \exp\left[-0.5\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right] \dots\dots\dots (2)$$

여기서, C 는 일정지점에서의 최대농도(kg/m^3), x 는 바람이 불어가는 방향으로의 거리(m), y 는 바람을 가로지르는 방향으로의 거리(m), z 는 수직방향으로의 거리(m), H 는 누출 높이(m), Q 는 누출물질의 양(kg/sec), σ_x 는 시간의존 분산계수(ax^b), σ_y 는 시간의존 분산계수(ax^b), σ_z 는 시간의존 분산계수(cx^d)로서 분산계수는 Table 2-1을 이용하여 계산할 수 있다.

Table 2-1 Dispersion Coefficient Parameter.

Stability Class	a	b	c	d
Very unstable A	0.527	0.865	0.28	0.90
Unstable B	0.371	0.866	0.23	0.85
Slightly stable C	0.209	0.897	0.22	0.80
Neutral D	0.128	0.905	0.20	0.76
Stable E	0.098	0.902	0.15	0.73
Very stable F	0.065	0.902	0.12	0.67

폭발성 물질을 가지고 실험한 바에 의하면 과압은 TNT상당량과 폭발지점으로부터의 거리를 이용하여 추산할 수 있으며 TNT상당량을 구하는 방법은 아래와 같다.

$$\frac{M_{TNT}}{M_{CLOUD}} = \frac{\Delta H_C}{1155} \times E_f \dots\dots\dots (3)$$

여기서, M_{TNT} 는 TNT 당량(kg), M_{CLOUD} 는 증기운의 무게(kg), ΔH_C 는 증기운의 연소열($kcal/kg$) 그리고 E_f 는 연소효율이다.

연소효율 또는 폭발효율은 이론적으로 계산하여 얻을 수 있는 폭발에너지에 대한 실제로 방출된 에너지의 비를 나타내며, 본 연구에서는 폭발에 참여하는 증기의 양을 대기로 방출된 증기의 총량이 아닌 연소가능한농도와 연소상한농도 사이에 존재하는 증기만이 폭발에 참여하는 것으로 가정하여 연소효율을 1.0으로 산정하였다.

주어진 과압이 영향을 미치는 거리는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$X = 0.3967 \times M_{TNT}^{11.53} \exp[3.5031 - 0.7241 \ln(O_p) + 0.0398 (\ln O_p)^2] \dots\dots\dots (4)$$

여기서, X는 주어진 과압의 영향이 미치는 거리(m), M_{TNT} : TNT 당량(kg)이고, O_p 는 과압(psig)을 나타낸다.

제 3 장 부탄증기 누출사고의 영향평가

3.1. 누출원 모델링 (Source Term Modeling)

본 연구는 울산 화학공업단지 내에 액체 상태로 저장되어 있는 부탄이 저장탱크의 Sampling Point에서 운전원의 밸브조작 실수에 의하여 저장되어 있던 부탄이 Release되어 개방공간 증기운 폭발사고가 발생되었을 때 이에 대한 영향을 평가(Effect Modeling)하였다.

울산에 위치하고 있는 석유화학공업단지에서 직경이 10m인 액체 부탄 구형 저장탱크에 부탄포화액체 200ton을 포함하고 있다. 저장탱크의 하부에 부착된 길이가 2m이고, Size가 3" 인 Sampling Valve의 Open으로 인하여 누출된 부탄포화액체의 일부가 순간증발하면서 완전히 발달된 2상 흐름 누출로 수평방향으로 대기중으로 분산되었다. 상기 누출은 15분간에 걸쳐 이루어지고 운전원에 의하여 Valve가 Close되었지만 이미 누출된 기체가 미확인 점화원에 의하여 개방공간 증기운폭발사고가 발생되었다.

이에 따른 Explosion Modeling과 Effect Modeling을 아래와 같은 여러 가지 상황에 따른 각기 다른 공정매개변수와 기상매개변수들을 입력하여 그 결과에 따라 영향을 미치는 범위 및 각 매개변수들의 결과를 분석하여 보았다.

이와 같은 방법으로 누출원모델에 의해 산출된 매개변수값을 입력하여 변화시키면서 사용한 입력매개변수 List를 Table 3-1에 각각 나타내었다.

Table 3-1 Values of parameters.

No.	Wind Speed at 10m (m/s)	Relative humidity (%)	Atmosph stability	Release time (sec)	Pipe diameter (inches)	Storage temperature (K)
1	0.5	90	A	1200	1	303
2	1.0	80	B	900	2	293
3	1.5	70	C	600	3	283
4	2.0	60	D	300	4	-
5	2.5	40	E	-	-	-
6	3.0	20	F	-	-	-
7	3.5	10	-	-	-	-
8	4.0	-	-	-	-	-
9	4.5	-	-	-	-	-
10	5.0	-	-	-	-	-

Table 내에 진한 글자로 표기하여진 부분은 실제 조업조건을 나타내며 그 외의 부분들은 사용된 매개변수들의 종류와 변화범위를 나타낸 것이다. 즉, 매개변수로는 바람속도, 상대습도, 대기안정도, 누출시간, 배관 직경, 저장온도로 하였고 각 매개변수들의 변화범위는 실제 화학공장의 운전상황에서 일어날 수 있는 조건을 바탕으로 결정하였다.

본 연구에서 사용된 누출에 대한 “결과영향 분석”을 수행하기 위하여 미 환경청과 미국화학공학회가 공인하는 Arthur D. Little, Inc.의 SuperChems 모델[1,2]을 사용하였다.

3.2. 사고결과의 영향평가

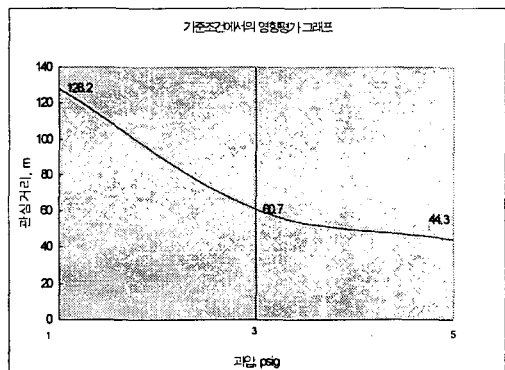
누출된 부탄이 2상흐름을 형성하여 생성된 기체가 연소상한농도와 연소하한농도의 연소범위에서 개방공간 증기운폭발을 발생하여 미리 정하여진 과압을 받게되는 거리 및 연소범위 내의 기체 양, TNT 당량 등을 산출하여 영향평가를 수행하였다.

영향평가 수행결과는 각기 Base condition 즉, 실제 조업조건을 기준으로 하여 Wind velocity를 변화할 경우, Relative humidity를 변화할 경우, Atmospheric stability를 변화할 경우, Release time을 변화할 경우, Pipe diameter를 변화할 경우 및 Storage temperature를 변화할 경우 등으로 하여 그 결과들을 비교, 검토하였다.

3.2.1 영향평가

- 기준조건

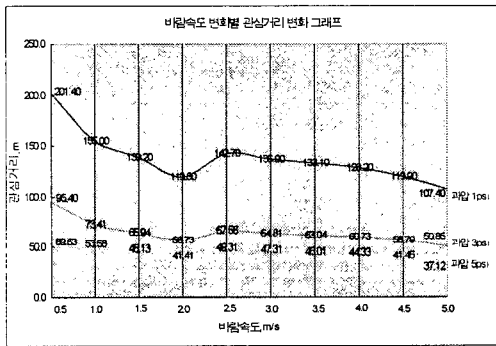
Chemical cloud mass, kg	TNT당량, kg	관심거리, m		
97.43	921.8	1 psi	3 psi	5 psi
과압이 미치는 거리, m		128.2	60.73	44.33



부탄가스 증기운폭발의 피해범위에 영향을 미치는 변수에 관한 고찰

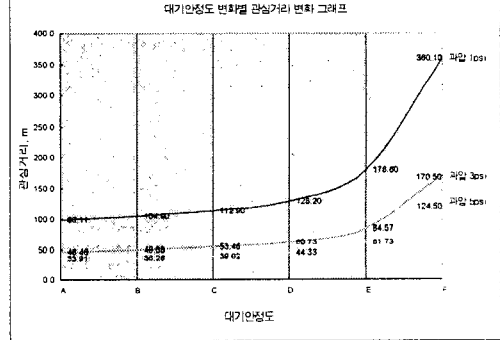
- 바람속도 변화별 관심거리 변화

Case	Wind Speed, m/s	Chemical Cloud Mass, kg	관심거리, m		
			1 psi	3 psi	5 psi
1	0.5	377.69	201.4	95.40	69.63
2	1.0	172.07	155.0	73.41	53.58
3	1.5	124.75	139.2	65.94	48.13
4	2.0	79.44	119.8	56.73	41.41
5	2.5	134.12	142.7	67.56	49.31
6	3.0	118.44	136.9	64.81	47.31
7	3.5	108.96	133.1	63.04	46.01
8	4.0	97.43	128.2	60.73	44.33
9	4.5	79.67	119.9	56.79	41.45
10	5.0	57.21	107.4	50.85	37.12



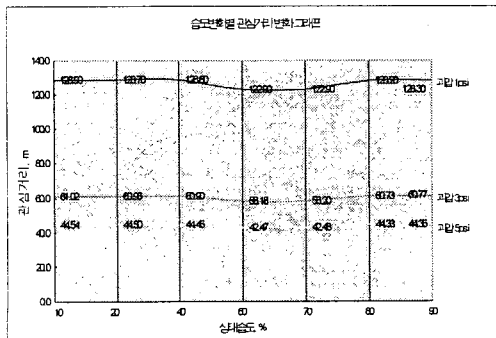
- 대기안정도 변화별 관심거리 변화

Case	대기안정도	Chemical Cloud Mass, kg	관심거리, m		
			1 psi	3 psi	5 psi
1	A	43.63	98.11	46.46	33.91
2	B	53.35	104.9	49.68	36.26
3	C	66.47	112.9	53.46	39.02
4	D	97.43	128.2	60.73	44.33
5	E	263.17	178.6	84.57	61.73
6	F	2156.89	360.1	170.5	124.5



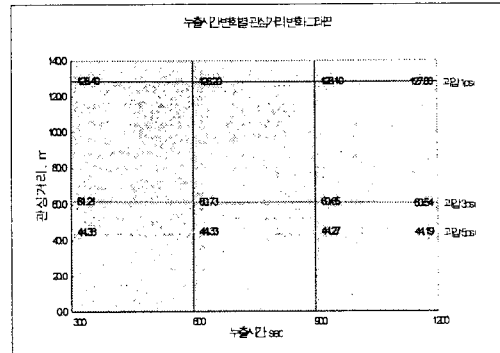
- 대기중의 상대습도 변화별 관심거리 변화

Case	습도	Chemical Cloud Mass, kg	관심거리, m		
			1 psi	3 psi	5 psi
1	10	98.86	128.9	61.02	44.54
2	20	98.57	128.7	60.96	44.5
3	40	98.26	128.6	60.9	44.45
4	60	85.67	122.9	58.18	42.47
5	70	85.75	122.9	58.2	42.48
6	80	97.43	128.2	60.73	44.33
7	90	97.61	128.3	60.77	44.35



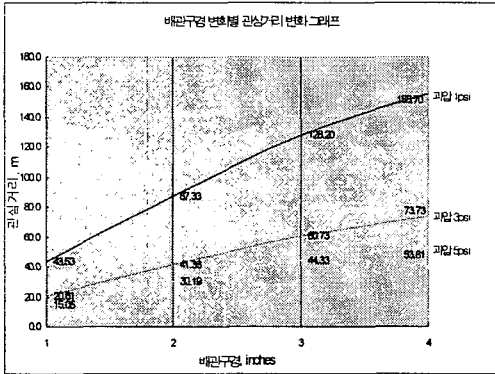
- 누출시간 변화별 관심거리 변화

Case	누출시간, sec	Chemical Cloud Mass, kg	관심거리, m		
			1 psi	3 psi	5 psi
1	300	97.75	128.4	61.21	44.38
2	600	97.43	128.2	60.73	44.33
3	900	97.07	128.1	60.65	44.27
4	1200	96.52	127.8	60.54	44.19



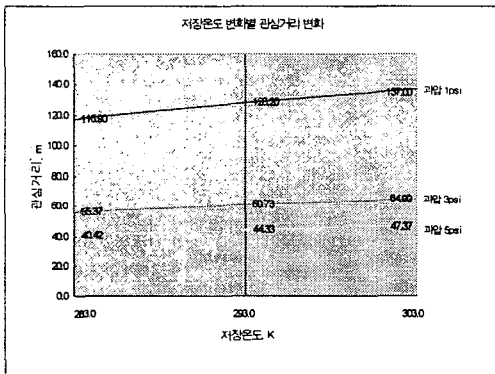
- 배관구경 변화별 관심거리 변화

Case	배관구경, inches	Chemical Cloud Mass, kg	관심거리, m		
			1 psi	3 psi	5 psi
1	1.0	3.81	43.53	20.61	15.05
2	2.0	30.77	87.33	41.36	30.19
3	3.0	97.43	128.2	60.73	44.33
4	4.0	174.34	155.7	73.73	53.81



- 저장온도 변화별 관심거리 변화

Case	저장온도, K	Chemical Cloud Mass, kg	관심거리, m		
			1 psi	3 psi	5 psi
1	283.0	73.86	116.9	55.37	40.42
2	293.0	97.43	128.2	60.73	44.33
3	303.0	118.92	137	64.9	47.37



제 4 장 결 론

부탄가스 누출에 의한 화재 및 폭발사고에 대한 영향평가방법을 제시하고, 매개변수들의 최적선택조건을 얻기 위하여 부탄증기 누출사

고의 형태, 즉 개방공간 증기운폭발(UVCE)에 대한 사고영향을 실제의 조업조건을 기준으로 평가하였으며 이 때 UVCE에서는 지표면과 일정한 높이의 공간에서 연속 누출하는 경우로 적용하였다. 그리고 사고결과에 미치는 매개변수들의 영향과 민감도를 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 바람속도 변화에 따른 관심거리의 거동을 고찰하여 보면, 속도가 증가할수록 연소상한농도(UFL)와 연소하한농도(LFL) 사이의 부탄의 농도가 점차 감소하다가, 바람의 속도가 2.5m/s에서 증가하여 다시 점차적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 바람의 속도가 느릴수록 과압에 미치는 부탄의 양이 증가하고 있는데, 바람의 속도가 빠를수록 농도가 LFL과 UFL이 되는 거리에 도달되는 시간이 짧아져서 과압이 감소되고 또한 누출된 부탄증기의 양이 클수록 과압의 증가 영향이 크기 때문이다. 그리고 바람부는 변화에 따른 관심거리의 변화는 산출한 부탄증기의 양은 377.7kg에서 57.2kg에 이르기까지 상당히 영향이 큰 것으로 나타났다. 바람의 속도가 빠를수록 위험도는 감소한다.

2) 상대습도의 변화를 고찰하여 보면, 상대습도가 감소할수록 연소하한농도(LFL)와 연소상한농도(UFL) 사이의 부탄의 농도가 점차 감소하다가, 상대습도가 40% 이하에서는 매우 작은 범위에서 변화하는데 이것은 복사열이 열투과도에 비례하고 동시에 열투과도가 상대습도의 0.09승에 반비례하기 때문이다.

3) 대기조건(ground condition)은 표면에서의 역학적 혼합과 높이에 따라 바람 유풍에 영향을 준다. 호수나 개방된 영역이 혼합 효과를 줄이는 반면 나무와 빌딩은 혼합을 증가시킨다. 가장 불안정한 대기안정도인 A에서 점차 안정한 상태인 F까지의 변화를 고찰하여 보면, 가장 안정한 상태인 F에서 연소하한농도(LFL)와 연소상한농도(UFL) 사이의 폭발에 참여하는 부탄증기의 양이 가장 많았으며, 불안정한 상태 일수록 폭발에 참여하는 부탄증기의 양이 감소하고 있다. 이것은 대기의 상태가 안정할수록 부탄증기의 분산이 어렵고 대기의 상태가 불안정할수록 부탄증기가 대기로 쉽게 분산되어 위험도가 감소하는 것을 알 수 있었다.

4) Sample pipe에서 누출되는 시간을 1200sec에서 300sec까지의 변화를 고찰하여 보면, 누출 시간 변화에 따른 관심거리는 그 영향이 상당히 미미한 것을 알 수 있었다. 이 것은 이미 누출된 부탄증기가 대기에서 이미 균등하게 분산되어 LFL과 UFL 구간에서 거의 비슷한 부탄증기의 농도를 보이기 때문이다.

5) Sample pipe diameter size를 1" 에서 4"까지의 변화를 고찰하여 보면, 배관 구경의 크기가 증가할수록 누출되는 부탄의 증기양이 급격히 증가하여 배관구경 변화별 관심거리의 영향이 상당히 큰 것을 알 수 있었다. 이 것은 이미 초기에 순간적으로 누출된 부탄증기의 양이 많으므로 대기에서 분산되어 LFL과 UFL 구간에서 부탄증기의 농도가 밀집되는 것을 보이기 때문이다.

6) 저장온도의 변화에 따른 관심거리 변화를 고찰하여 보면, 저장온도가 높을수록 누출되는 부탄증기의 양이 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 자체 증기압의 상승에 따라 대기압력과의 차이를 증가시켜 저장온도가 증가할수록 누출되는 부탄의 증기양이 급격히 증가하여 그 영향이 크다. 이 것은 이미 초기에 순간적으로 누출된 부탄증기의 양이 많으므로 대기에서 분산되어 LFL과 UFL 구간에서 부탄증기의 농도가 밀집되는 것을 보이기 때문이다.

참 고 문 헌

1. Arthur D. Little, Inc., SuperChems™, Professional Edition Version 2.0 : Advanced Consequence (1993)
2. Arthur D. Little, Inc., SuperChems™, Professional Edition Version 2.0 : User Guide, August (1996)
3. Baker W. E., Explosion Hazards and Evaluation, Fundamental Studies in Engineering, Oxford, New York (1983)
4. Bodurtha, F. T., International Explosion Prevention and Protection, McGraw-Hill, New York (1980)
5. Britter, R. E., and McQuaid, J., Workbook on the Dispersion of Dense Gases, Health and Safety Executive(HSE), No. 17, U. K. (1988)
6. Center for Chemical Process Safety(CCPs), Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis : Chapter 2. Consequence Analysis, AIChE, New York, p. 59~184 (1989)
7. Consequence Assessment and Mitigation : Center for Chemical Process Safety of AIChE
8. Crowl D. A. and Louvar J. F., Chemical Process Safety : Fundamental with Applications, Prantice-Hall Inc., New York (1990)
9. Crowl W. K., Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Technical Manual TM 5-1300, U. S. Army, Navy, and Air Force, U. S. Government Printing Office, Washington D.C. (1969)
10. Frank P. Lees, Loss Prevention in the Process Industries, London : Butterworths. (1986)
11. G. A. Melhem, Advanced Consequence Analysis : Emission, Dispersion, Fire, and Explosion Dynamics, Arthur D. Little, Inc. August (1995)
12. Hoot T. G., Meroney R. N., and Peterka J. A., Wind Tunnel Tests of Negative Buoyant Plumes, EPA-650/3-74-003(NTIS PB 231590), The Fluid Dynamics and Diffusion, Laboratory of Colorado State University and Environmental Protection Agency, October (1973)
13. Process Safety Institute and JBF Associates Inc., Consequence Assessment and Mitigation, American Institute of Chemical Engineers(AIChE), New York (1994)