

石油콤비나트의 火災 爆發의 性状**

上原 陽一*

I. 序論

1973년에는 化學工場에 있어서 災殃의 해이었다. 化學工場의 火災나 爆發이 매일 같이 新聞을 떠들썩하게 한 것은 지금까지도 記憶에 새롭다. 事故 原因은 設置되어진 調查 委員會에 의해 계속적으로 解明되어지고 있어 그 全貌가 밝혀지는 날도 가까워지었다고 생각되지만, 이러한 事故를 보면 지금까지 發生 確率은 높지만 火災나 爆發의 規模로서는 적다고 생각되어져 온 Plant 火災가 결코 작은 것만은 아니라는 것이 확실해졌다. 이것은 設備의 大型化에 의한 것으로 생각되어져, 從來의 概念이 반드시 適用되는 것은 아니라는 것을 意味한다.

頻發한 일련의 事故를 볼 때, 工場 周圍에 있는 住宅이나 公共 施設과의 관련이 큰 問題로 되어 附近 住民의 同意가 없으면 操業이 이루어질 수 없는 상황까지 와 있다. 지금까지의 保安 距離 또는 保有 距離는 劃一的으로 定해져서 極端의인 表現을 하면, 市中의 작은工場도, 콤비나트도 같은 取扱을 받고 있다. 그러나 이것은, 常識의으로 보아도 不合理하여 危險度에 따라 필요한 距離를 두어야 할 것이다.

化學工場의 火災를 防止하기 위해서는 取扱되는 危險物, 化學프로세스, 材料와 裝置, 制御System

그리고, 教育과 訓練이 중요하지만, 이러한 면에 대해서는 많은 解說이 되어지고 있기 때문에 本論文에서는 不幸하게 災禍가 發生하였을때 어느 정도의 影響을 周圍에 미치는가하는 觀點으로 부터 化學工場의 安全對策을 다루고자 한다.

災禍의 정도는 危險物의 種類와 量, 設備의 種類와 規模, 異常의 種類와 그 정도에 의하여 差異가 있다. 그러나 비록 確率은 적어도 發生하여 생기는 最大 被害를 豫想하여 對策을 樹立하여 둘 필요가 있다.

災禍에 의한 被害로서는 漏出가스의 擴散, 液體의 퍼짐, 火災으로 부터의 輻射熱, 蒸氣 또는 가스 爆發에 의한 Fire Ball, 爆風壓等이 생각되어진다.

2. 可燃性가스의 漏出과 번짐

化學工場에 있어 火災, 爆發은 可燃物이 漏出하여 일어나는 것이 대다수이다. 漏出은 設計, 材質, 工事 施行의 不良이나 保守의 不完全, 또는 材料의 經年 變化등에 의해 일어나지만, 人爲의 실수에 의해서도 자주 發생한다. 이것은 發火源으로 되는 火氣의 問題와 더불어 중요한 것이다.

化學工場의 設備등으로 부터 漏出된 可燃物은, 液狀이면 防油(液) 堤에 괴이지만, 가스狀의 경우는 空氣 층으로 擴散하여 可燃性가스를 形成한다. 可燃性가스의 번짐은, 漏出이 길게 繼續하고, 동시에 그 速度가 一定하면 正常狀態로 되고, 예를 들면 다음의 Sutton 또는 坂上의 式으로 나타내는 것이 가능하다.

* 요코하마 국립대학 教授

** 本稿는 제9회 學術講演會(1989. 10. 13)에서의 講演內容임.

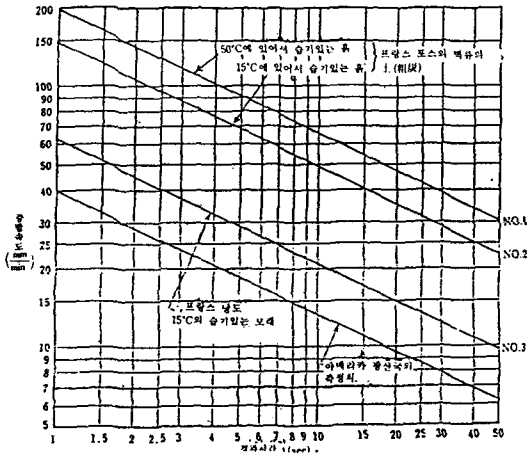


그림 1. 土壤에 流出된 LNG의 蒸發速度 實驗

(1) Sutton의 式

$$C = \frac{Q_{exp}(-y^2/C_y^2 x^{2-n})}{\pi C_y C_z U} \left\{ \exp\left(\frac{-(z-h)^2}{C_z^2 x_{2-n}}\right) + \exp\left(\frac{-(z+h)^2}{C_z^2 x_{2-n}}\right) \right\} \quad (1)$$

단, c 는 가스의 濃度, Q 는 가스放出速度(體積), U 는 風速, h 는 가스放出部の 높이, x 는 風下-方向의 距離, y 는 風橫 方向의 距離, z 는 垂直方向의 距離, 그리고 n, c_y 및 c_z 는 氣象條件에 의해 定해지는 擴散因子로서 표1에 나타내어져 있다.

(2) 坂上의 式

$$C = -\frac{Q}{U} \exp\left(\frac{-y^2}{A}\right) \sqrt{ATC} \exp\left(-\frac{h+z}{B}\right) B > J_0\left(i \frac{z}{B} \sqrt{hz}\right) \quad (2)$$

단, $J_0(ix)$ 는 0 階 第 1種의 變形 Bessel 函數이고, A 및 B 는 다음 式으로 각각 주어진다.

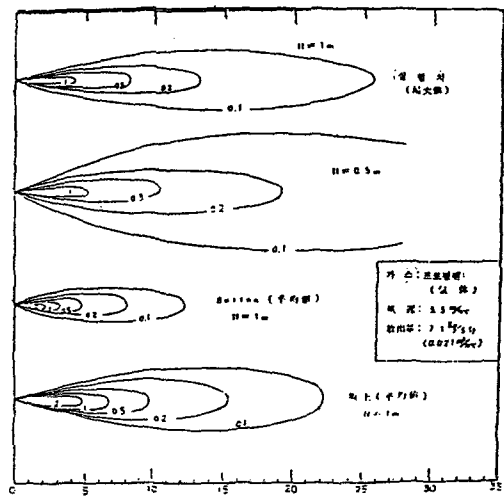
$$A = q_A (\rho_A x + \exp(-\rho_A x) - 1)$$

$$B = q_B (\rho_B x + \exp(-\rho_B x) - 1)$$

q_A, ρ_A 는 風橫 方向, 그리고 q_B, ρ_B 는 垂直方向의 擴散因子로 표2에 나타내어져 있다.

가스의 放出速度, 氣象條件, 風速등을 알 수 있으면, 式(1) 또는 (2)에 의하여 필요한 位置에서의 가스濃度を 알 수 있다. 濃도가 爆發下限界로 감소하기 까지가 危險範圍 이지만, 實際로는 濃度の 時間的 變動이 있기 때문에 下限의 1/2 까지를 危險範圍로 하는 것이 좋다

筆者들이 LPG 에 있어서 가스擴散實驗의 結果와 위의 式을 이용하여 計算한 結果의 比較를 그림1에 나타내었다. 이 結果를 보면,



가연성가스 확산에 있어서 實측치와 계산치의 比較

放出口와 같은 높이에서의 測定値는 坂上의 式이 잘 一致하고 있다. 그러나, Sutton 式도 약 2배를 하면 一致함을 볼 수 있다. 이 原因의 하나로써, 計算式은 모두 平均 濃度を 나타내는 것에 비하여 實測値는 最大 濃度を 나타내는 점에 있다. Katan 에 의하면, Sutton式의 경우에 最大值는 平均値의 2.2배라고 한다. 동시에 그림1 에서 留意해야 할 것은 地上 1m 보다도 地表面 바로 위의 濃도가 높다고 하는 것이다. 이 現象은 ちつそ(窒素) 石油化學(株), 信越化學工業(株)의 事故에 있어서도 보여지고 있고, 有機可燃性가스나 蒸氣의 경우 특히 留意하지 않으면 안된다. 이들 가스는 보통 생각되어지는 것보다 대단히 擴散하는 것이 느리다. 위의 (1) 및 (2) 式은 이러한 現象은 說明하지 않았다.

3. 可燃性液體의 번짐

液體가 漏出된 경우, 防油堤內에 그치지 않고 外部로 流出하면 燃料油面은 擴大되고, 發火의 機會도 많아지며 일단 火災가 發生한 경우에는 規模도 燃料液面의 直徑에 比例하기 때문에 더욱 크게 된다. 漏出한 可燃性液體가 下水 등에 流入하면 확실히 下流에서 火災를 일으킬 두려움이 많고, 地下에 浸水하여 뜻하지 않는 곳으로 부터 滲出하는 것도 있다. 이 漏出이 開放水面에서 일어나면 더욱 被害 面積이 크게 된다. 昭和 39年(1964年)의 新潟 地震에 있어 第1 火災는 Tank 에서만 끝났지만, 第2 火災는 水面에 流出한 가솔린 때문에 300棟의 住宅이 燒失하였다.

4. 火焰으로 부터의 輻射熱

液體 可燃物은 液面上에서 蒸氣와 空氣가 混合하여 燃燒하는, 이른바 擴散燃燒의 形式을 가진다. 이 火災의 特徵은, 燃燒하는 速度가 火災로 부터 주어지는 熱의 供給速度로 정해지기 때문에 자유롭게 변하지 않고, 또 空氣가 들어오는 方向도 液面 때문에 制約을 받는 점에 있다. 火災로 부터 전해지는 輻射에 影響을 미치는 것은 液體의 燃燒速度, 火災의 形態와 크기, 그리고 距離이다.

(1) 燃燒速度

火災의 強度는 우선 燃燒速度로 정해진다. 容器에 들어 있는 液體의 燃燒速度는 보통 液面의 降下速度로 나타내어져, 그림2에 나타낸 것과 같이 容器의 크기에 의하여 상당히 變化한다. 그러나 實際 規模의 것에서는, 速度는 容器徑에 관계없이 一定하게 된다. 이때의 燃燒速度는 實驗적으로,

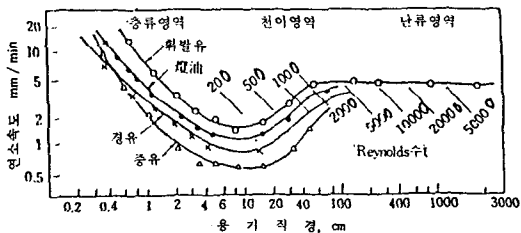


그림2. 石油의 液面燃燒速度

$$V_b = 0.076 \Delta H_c \{ \Delta H_v + \int_{T_b}^{T^*} C_p dT \} \text{ (mm/min)} \quad (3)$$

로 나타내어진다. 단, V_b 는 큰 容器일 경우의 燃燒速度, ΔH_c 는 正味の 燃燒熱, ΔH_v 는 蒸發潛熱, C_p 는 液體의 比熱, T 는 溫度, T_b 는 液體의 沸點이다. 이 實驗式은 液化水素 등을 제외하고 比較적 實驗値와 거의 一致한다. 대부분의 可燃性 液體의 燃燒速度를 표3에 나타내었다.

표3. 큰 容器에 있어서 燃燒速度

燃 料	燃燒速度(mm/min)
해 산	7.1
휘 발 유	4.8
벤 젠	6.0
등 유	2.2
중 유	1.3
메 타 놀	2.0
L N G	11.4

(2) 火災의 形狀과 높이

容器徑이 대단히 크면, 炎은 不規則的인 形狀을 나타내지만 원통形에 가깝다. 이 때의 炎의 높이 L 과 容器徑 d 의 비 L/d 는 거의 一定하며 약 1.5이다. 화염의 높이에 대해서는 $L/d=40 F^{1/3}$, (프로판, 가솔린) 또는 $L/d=29^{1/3}$, (천연가스, 메탄) 라고 하는 關係도 얻어지고 있다. 단 F , 은 Froude 數이다.

화염의 溫度는 擴散燃燒등에서 燃燒에 의한 差는 적고, 아무리 높아도 140~1500℃로, 平均 1000℃ 정도로 생각하면 좋다.

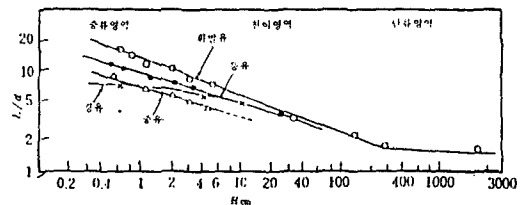


그림3. 石油의 液面燃燒에서의 불꽃의 길이

(3) 火災로 부터의 輻射

火災를 灰色輻射體로 생각하면, 任意의 位置에 있는 點에서 받는 輻射熱은

$$E = \phi \epsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

로 나타내어진다. 여기에서 T 는 炎의 溫度($^{\circ}K$), σ 는 Stefan Boltzman 定數($4.96 \times 10^{-8} \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}$), ϵ 은 輻射率(完全黑體에서는 1), 그리고 ϕ 는 形態係數이다. 여기서 輻射熱散度 $R_f = \epsilon \sigma T^4$ 을 一括하면 式(4)는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$E = \phi R_f \quad (5)$$

이 R_f 는 燃料 特有的의 값을 가지며 實測될 수 있지만, 다음 式으로도 推定 가능하다.

$$R_f = 0.02 V_{\infty} \rho \Delta H_c \quad (6)$$

단, ρ 는 液體의 密度이다. 표4에 주요한 燃料의 輻射 發散度를 나타낸다.

표4-2(a) 불꽃의 액면방향

燃 料	ρ (kg/m ³)	q_c (kcal/kg)	v_{∞} (m/hr)	R_f (kcal/m ² ·hr)
해 산	660	115	0.43	36100
벤 젠	684	117	0.36	45300
가솔린	879	129	0.29	25700

표4-2(b) 불꽃의 수평방향

연 료	용기직경 (cm)	ϵ_f	불꽃온도 ($^{\circ}C$)	R_f (kcal/m ² ·hr)	測定者
해 산	65-600			73000	湯 本 ³⁹⁾
가 솔 린	-			54000	
벤 젠	-			50000	
카우지原油	-			36000	Rasbash ⁴⁰⁾
등 유	-			43000	
경 유	-			36000	
중 유	-			20000	
L P C	-			79300	
알 콜	30	0.066	1218	15900	Rasbash ⁴⁰⁾
가 솔 린	-	0.36	921	36000	
등 유	-	0.37	1026	516000	
벤 젠	-	0.59*	990	73000	
.	-	0.72**	-	89000	

* 點火 2分後 ** 點火 8分後

形態係數 증에서는, 火災의 形態를 直立 원통으로 하고, 受熱面과의 關係가 그림3과 같다고 하면,

다음 式으로 나타내어진다.

$$\phi = \frac{1}{\pi Y} \tan^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{Y^2 - 1}} \right) + \frac{X}{TC} \left[\frac{(A-2Y)}{Y \sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A(Y-1)}}{B(Y+1)} \right) - \frac{1}{Y} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(Y-1)}}{(Y+1)} \right) \right] \quad (7)$$

단, R 은 火災의 半徑, L 은 火災中心으로 부터 受熱部까지의 距離, $X=H/R$, $Y=L/R$, $A=(1+Y^2)+X$, $B=(1-Y^2)+X^2$ 이다.

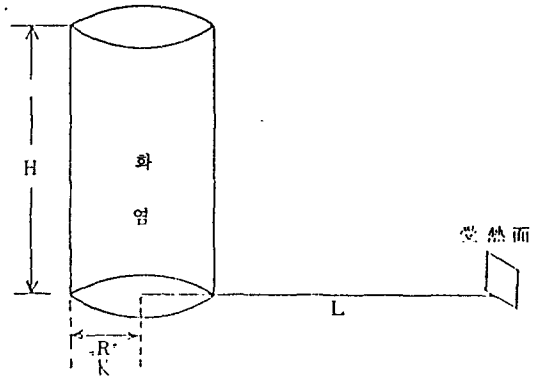


그림4. 불꽃과 수열면의 위치관계

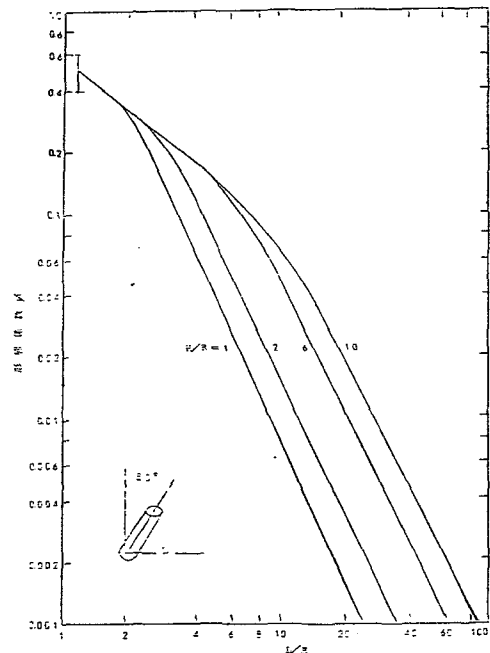


그림5. 경사진 원통에 대한 형태계수(풍하측)

이로서, 표4 및 式(10)을 이용하여 式(5)로부터 輻射熱을 구할 수가 있다.

그런데 바람이 불면 火炎은 기울고, 鉛直方向으로 부터 測定한 火炎의 기울기는, 實驗적으로 다음과 같이 나타내어진다.

$$\tan\theta = 0.721(U^2/D)^{0.558} \quad (8)$$

단, U 는 風速이다. 이 때의 θ 는 數值 計算으로 밖에 구할 수가 없다. 그림4 및 그림5 에 15度 및 30度 기울어진 火炎에 대해서의 計算值를 나타내었다.

거대한 탱크가 防油堤 火災를 일으키고, 風速이 11~12m/sec 일때의 火炎의 形態를 그림6 에, 같은 거대한 탱크가 防油堤內에서 燃燒하였을때 周圍에 미치는 輻射熱을 그림7 에, 그리고 LNG가 한 쪽 400ft 의 防油堤內에서 燃燒할 때의 輻射熱을 그림8 에 나타내었다. 단, 그림7, 8은 바람이 없을 때를 對象으로 한다.

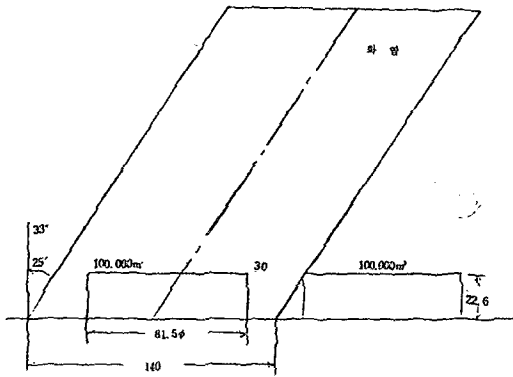


그림6. 10萬 m^3 탱크의 방유제 화재시 화재의 형태과 크기 (풍속 11~12 m)

같은 탱크의 火災에서도 Floating Roof Tank가 燃燒할 때는 輻射熱은 매우 적고, 燃燒하고 있는 테두리의 幅이 탱크 直徑의 10%일 때는 본래의 3%에 불과하다.

(4) 熱的인 安全距離

강한 輻射熱을 받으면 人間은 殺傷되고, 有機物은 發火하며, 金屬 材料의 強度는 低下한다. 먼저 人間の 皮膚에 미치는 影響을 표5에 나타내었다. 人間이 長시간 慢痛으로 견딜 수 있는 輻射熱은

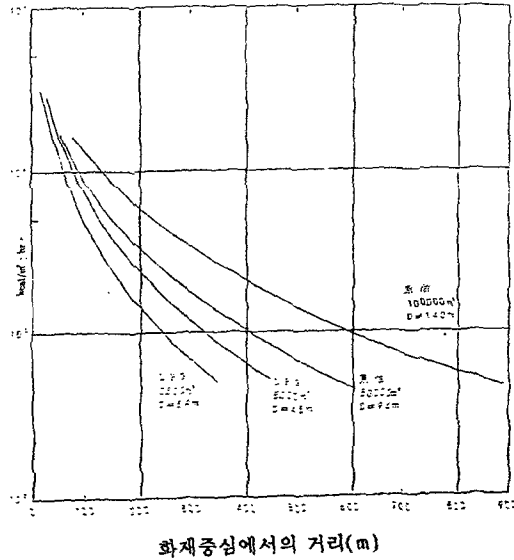


그림7. 방유(백)제 화재에서의 복사열 계산치

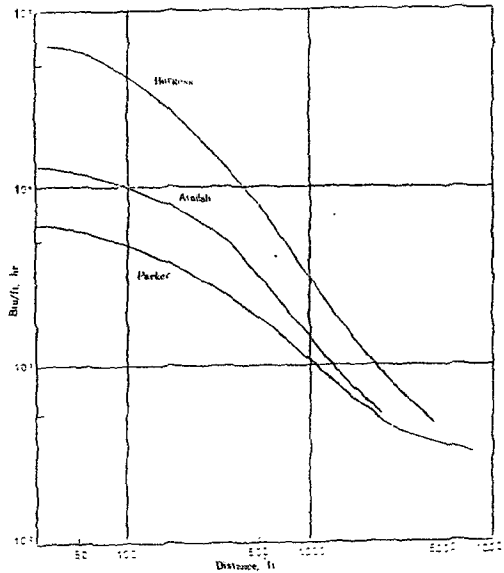


그림8. LPG 防液堤(400ft) 火災에서의 복사열 계산치 (kcal / m 2 · hr 단위로 하는 세로축의 눈금의 숫자를 2.7배로 하면 됨)

1080kcal/m 2 ·hr로 이것은 地表에서 받아들이는 太陽으로 부터의 最大 輻射熱(太陽定數)에 상당한다.

머리, 안면을 포함하여 衣服등으로 가리면 4000kcal/m²hr 까지 견딜 수 있다. 이 정도가 人間에게 본 安全限界이다.

표4-3. 人間の 피부에 미치는 射熱의 影響⁶⁾

曝露時間 (sec)	극도의 통증을 발생 시키는 복사열 (kcal/m ² ·h)	화상으로 피부에 수포가 발생하게 되는 복사열 (kcal/m ² ·h)
	10	5,040
20	2,880	5,470
30	2,410	4,320
60	1,800	

표4-4. 물질 종류별 한계 복사열

物 質	복사강도(kcal/m ² ·h)	
	發火	引火
흑색 레이온 또는 목면의 두꺼운 커튼 板	18,000 21,600	7,200 9,360
風雨에 없애지게 된 페인트가 칠해져 있는 杉板		14,400
흑색 목재	28,800	10,800
아스팔트		12,600
합 板		14,400
표면이 탄화된 목재		1,440~16,920
페인트가 칠해져 있는 목재		14,400~21,600
하드보드		10,800
熱 化性 프라스티크	72,000	
직 물	28,800	
목면 프린트	20,880	10,800

한편, 有機物의 發火限界는 표6에 나타내어져 있다. 여기에서 發火라고 하는 것은 乾燥한 試料가 15分 以內에 發炎燃燒를 시작하는 것을, 引火라고 하는 것은 火炎과 같은 적당한 火源이 동시에 存在할 때의 發火를 말한다. 얇은 杉木板의 경우, 불티가 있으면 2500kcal/m²hr 에서 發火한다고 알려지고 있지만 一般的으로는 4000kcal/m²hr 정도가 妥當하다. 銅材에 대해서는 600℃가 強度面으로의 限界이다.

以上の 것으로 부터, 거대한 탱크의 防油(液)堤 火炎에 대한 安全距離는 最大로, 人間에 대해서는 火炎의 중심으로부터 500~600m, 有機物에 대하여는 250~300m 라고 말할 수 있다.

5. Fire Ball

可燃性가스가 容器로 부터 噴出하고, 外氣와 混

합하여 爆發性 混合氣를 만들어 着火할 경우, 자주 Fire Ball 이라고 불리어지는 거대한 火球가 생긴다. 이 Fire Ball은 出光石油化學의 事故時에 확실히 보여져 話題가 되었다. Fire Ball의 크기는 漏出한 可燃性가스의 種類와 量에 의하여 정해지고, 간단한 計算 Model이 보여지고 있다. 이것은 위와 着火한 爆發性 混合氣(量論比)가 1500℃로 된다고 하는 것이다. 예를 들면, 5000m³의 LPG 탱크가 破壞되어, 그 內容의 1/10量이 단숨에 噴出하여 위의 條件의 Fire Ball을 形成한다고 하면, 直徑 363m의 거대한 火球로 되는 것이 計算 가능하다.

한편, 지금까지의 수많은 實測으로 부터 Fire Ball의 直徑(D)과 繼續時間(t)에 대하여, 다음과 같은 實驗式이 주어지고 있다.

$$D=3.77 W^{0.325}(m) \tag{9}$$

$$t=0.258 W^{0.340}(sec) \tag{10}$$

단, W는 試料와 酸化劑의 合計重量(kg)이다. 여기서 앞의 LPG 5000m³의 1/10量이 噴出한 경우를 計算하면, D=370m, t=35.7秒로 되어 위의 豫測과 거의 一致한다.

이 Fire Ball의 特徵은 火炎의 溫度가 높은 것으로, 보통 탱크 火炎의 溫度가 1000℃ 임에 比較하여 1500℃로 1.5배 높다. 輻射는 火炎溫度의 1000℃ 임에 比較하여 1500℃로 1.5배 높다. 輻射는 火焰溫度의 4乘에 比例하기 때문에 그 차는 크다.

1969年 3月 27日, 미국의 California 플레츠 製油所에서의 直徑 약 400m의 Fire Ball에 대하여 湯本은 (11)式을 이용해서 計算하여 부단의 量으로 390×10³kg을 얻었다. 그는 여기에서 처음에 記述한 方法으로 다시 한번 Fire Ball의 크기를 再檢討하고, 溫度가 1740°K(1470℃)일때 두 方法에서의 값이 一致한다고 하고 있다. 동시에 그는 Fire Ball이 사람과 有機物에 미치는 影響을 檢討하여 대단히 강한 輻射熱이 먼 곳까지 도달한다는 것을 보였다.

出光石油化學(株) 火災에서의 直徑 60m의 Fire Ball에 대하여 井上가 檢討를 하여 溫度를 1800°K로 하면 두 가지 方法에서의 計算이 一致하는 것을 보였다. 以上の 세가지 경우에 대한 檢討로

부터 Fire Ball의 温度는 약 1500℃인 것을 확실하게 하였다.

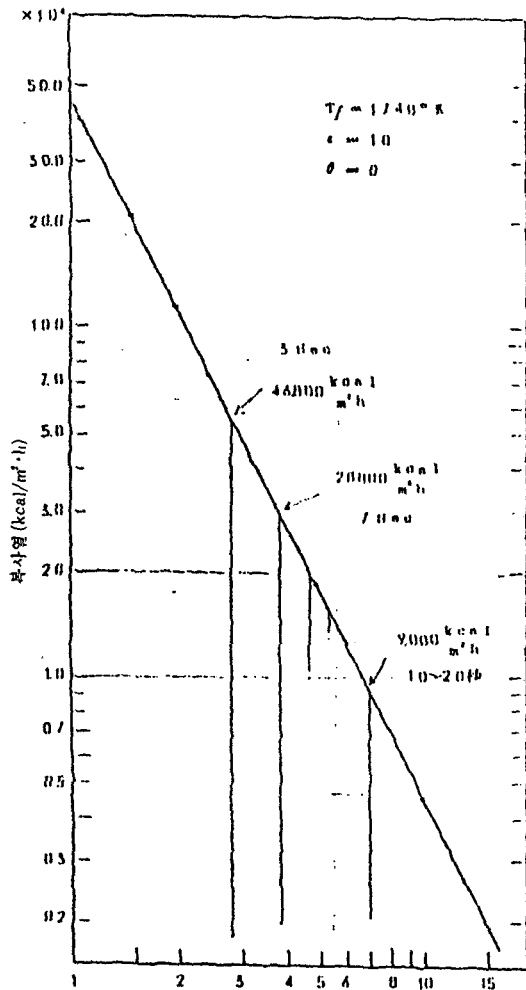


그림4-14. Fire Ball 에서의 복사열의 검토

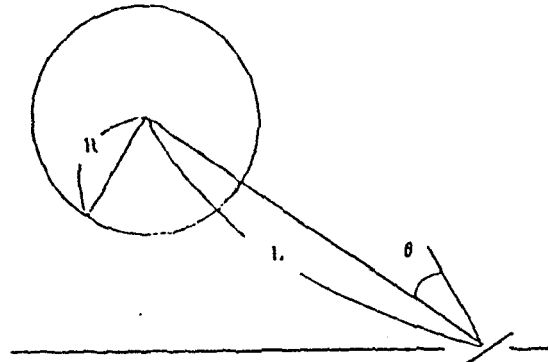
6. 爆風壓

(1) 爆風壓이란?

爆發은 一般的으로 “壓力의 급격한 開放 또는 發生에 의하여, 심한 소리를 내며 膨脹 또는 破壞한다”는 現象을 나타낸다. 爆發에는 核爆發, 物理的 爆發 및 化學的 爆發이 있지만, 여기에서는 LPG로부터의 蒸氣 또는 가스爆發을 다루기 때문에 물론 化學的 爆發이다.

爆發은 또 傳播速度의 差에 의하여 爆發(爆發的

Fire Ball 에서 수열의 위치 관계



$$E = \phi \epsilon \sigma T_f^4$$

$$\phi = \frac{R^2}{l^2} \cos \theta$$

인체피부의 수포	10~20sec	복사열 (kcal/m²·h)
		9000
綿織物 發火	7 Sec	28800
	3 Sec	46800

燃焼)과 Detonation으로 나누어진다. 静止하고 있는 가스중의 傳播速度가 그 가스중의 音速(空氣, 중에서 약 330 m/s)보다 큰 경우를 Detonation이라 하고, 音速 以下의 경우를 爆燃 또는 燃焼라고 한다. Detonation波의 進行은 보통 1000m/s 以上이고, 爆燃으로 부터 Detonation으로의 轉移는 순간적으로 일어난다. 프로판등이 실제로 爆發할 때 전부가 Detonation으로 되는 것은 아니고, 爆燃과 Detonation의 中間形態를 가진다.

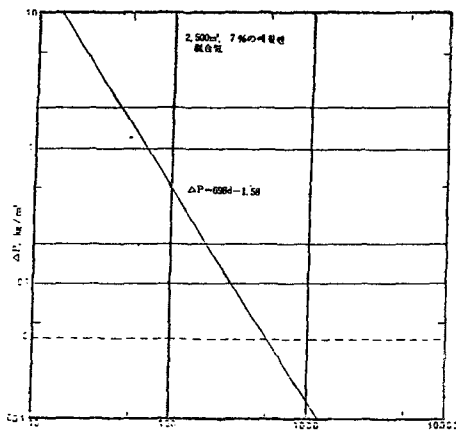
爆發 중에서 爆燃에 의한 效果로 熱風, 火炎, 熱放射등에 의한 火炎 效果, 가스의 膨脹에 의한 破壞와 그것에 의하여 생긴 破片이 튀는 效果, 더우기 爆風에 의하여 유리등을 破壞한다.

한편, Detonation에 의한 것으로서는, 먼저 爆發 그 自體에 의한 破壞 效果가 있고, 近距離는 물론 멀리까지 壓力波를 미쳐 爆風에 의한 影響을 주지만, 反面 火災의 效果는 약하다.

이와 같이, 결국 爆發에 의한 被害의 거의 대부분은 爆風에 의하여 생기고, 人命의 損傷, 裝置의

破壊, 家屋의 破損등을 일으킨다. 爆風은 爆發에 의하여 생기는 高壓가스의 膨脹運動과 衝擊波에 의하여 생기고, 爆源이 가까운 곳에서는 壓力의 振幅이 커지지만, 멀리 떨어질수록 점차 줄어든다.

静止 空氣중에서 爆發이 일어날 때의 理想的인 爆風壓의 모델은 그림9에 나타내었다. 보통 Peak 壓은 絶對壓을 가리키고, Peak過壓이 大氣壓(P_0)으로 上乘되어지는 Peak值이다. 爆發 直後 急上昇한 壓力은, 그 후 時間과 함께 급격히 감소하고, 時間 t_1 에서 減壓으로 되며, t_2 에서 回復한다. 이 t_1 으로 부터 t_2 까지의 壓力을 負의 壓力이라고 한다. 유리창이 爆風을 받아 깨어질때 밖으로 튀어 날아가는 것이 이 負壓에 의한 것이다.



에틸렌 2,500m³가 폭발할 경우의 폭풍압

(2) 爆風壓의 評價法과 計算式의 提示

爆風壓에는 現在 다음과 같은 評價法이 있다.

A peak 過壓 $\Delta P_{max} = P_{max} - P_0$

B impulse $I = \int_0^t P(t) dt$ (11)

C energy 密度 $E_f = \frac{1}{\sigma} \int \{P(t)\}^2 dt$

이들 중 어느 것을 이용하는 것이 適當한가를 決定하는 것은 困難하고, 예를 들면, 中心이 높은 小型 트럭을 80% 轉倒시키는 경우는 Impulse가 適當한 地表이지만, 鼓膜 損傷에서는 Peak 過壓이 支配的

이다. 이 例로 부터 알 수 있는 바와 같이, 무엇을 指標로 하는가를 明確하게 하는 것은 어렵지만, 火藥類 中心으로 한 Peak 過壓이 가장 많이 研究되어지고 있기 때문에, 現在로서는 이를 이용하는 것이 많다. 따라서 본 報告에서도 Peak 過壓을 採用하기로 한다.

(3) 爆風壓의 計算式

위에서 說明한 바와 같이 爆風은 進行에 따라서 急速하게 감소하지만, 이때, 爆發 에너지(E) 또는, 爆發物의 重量(W), 距離(R)의 函數로서 Peak 壓 ΔP 의 사이에 Hopkinson의 三乘法則이라고 불리는 關係가 있다. 즉,

$$\Delta P = A (R^3 / \sqrt{W})^\alpha \quad (12)$$

여기에서 A 는 物質에 의해 定해지는 定數, α 는 爆風壓의 감소율의 大략值, 1.6 정도이다. 위 式에 의해 확실해진 바와 같이 爆風壓의 Peak值는 $R / \sqrt[3]{W}$ 의 函數로 되기 때문에, 이를 Scale化 또는 換算距離라 부르고, 보통 λ 로 나타낸다. Scale化 距離와 爆風壓의 關係를 나타낸 것이 그림10 및 11으로 爆發物의 量이 알려지면, 距離 R 에 있어서의 Peak壓은 그림에 의해 쉽게 구할 수 있다.

이 W 는 爆藥類에 대한 것이기 때문에, 可燃性가스에 대하여 適用할때는 補正을 必要로 한다. 왜냐하면 爆藥類는 그 全量이 爆發에 참가하고 Detonation을 일으키지만, 可燃性가스의 경우, 먼저 爆發에 空氣를 必要로 하고 또 全部가 Detonation을 일으키지 않기 때문이다.

補正은 다음과 같이 하여진다. 爆發에너지를 爆藥類와 比較할 必要가 있다. 이것은 放出되는 自由에너지를 比較하는 것이 보통이지만, 計算이 어렵기 때문에 보통은 燃燒熱은 1000kcal/kg이다. 한편 프로판의 燃燒熱은 11,080kcal/kg 이기 때문에, 프로판이 10배 이상 에너지가 큰 것으로 된다. 다음으로 프로판은 通常 液體의 形으로 貯藏되어 있기 때문에, 外部에 나왔다고 하여도 全量이 氣化하여 蒸氣로 될 수는 없다. 氣化率 f 가 定義 되고 있다. 프로판의 경우 $f=0.364(21^\circ C)$ 이다. 또 지금까지의 事故 解析등으로 부터 蒸氣가 爆發에 寄與하는 비율, 즉 爆發係數 ρ 를 定義할 必要가 있다. 프로판

에서는 $\rho=0.08$ 정도이다. 마지막으로 Detonation 을 일으키는 比率이 要求된다. 이것은 TNT를 對象으로 하였을 때, TNT 收率 γ 로서 評價된다. 프로판에서는 $\gamma=0.064$ 정도이다.

以上으로 부터 TNT로 換算되는 可燃性가스의 量 W_{TNT} 는,

$$W_{TNT} = \frac{Wf\gamma Q}{1000}$$

로 나타내어진다. 여기서 限界 Peak壓이 $\Delta P=0.125\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 이라고 하면 그림10로 부터 $\lambda=12$ 로 되기 때문에, 결국 限界距離는

$$R = \lambda^3 \sqrt{W_{TNT}} = 12^3 \sqrt{W_{TNT}} \quad (13)$$

로 計算할 수 있다. 高壓가스의 取縮法, 콤비나트等 保安規制으로 正해진 式

$$X_c = 0.48^3 \sqrt{KW} \quad (14)$$

은 위의 생각에 基礎로 하여 유도된 것이고, K 의 값은 콤비나트等 保安規制 第3條에 의해 正해진 定數로, 프로판에서는 溫度가 $10\sim 40^\circ\text{C}$ 의 範圍에서 327×10^3 의 값을 가진다. 따라서 $\Delta P=0.125\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 의 限界距離를 나타내는 式은 다음과 같다.

$$X_c = 0.48^3 \sqrt{(327 \times 10^3)W} \quad (15)$$

7. 安全을 위한 距離

以上의 方法을 이용하여 不幸하게도 化學 Plant에서 災害가 생겼을 때를 생각한 安全距離의 大략의 概念을 얻을 수 있다. 이와 같이 危險物의 種類와 取扱量, 그 위에 災害의 種類를 토대로하여 안전 거리를 두어야 하며, 劃一的으로 10m, 20m를 들 필요는 없다. 一連의 化學工場 火災에서 住宅과의 距離가 특히 問題로 되었지만, 工場敷地를 選定할 때, 安全을 위한 距離는 당연히 考慮되어야만 한다. 그 때문에서도 위에서 說明한 方法은 유용하다고 생각된다.

또 安全距離를 決定하는 다른 하나의 方法으로

는, 과거의 災害事例의 解析에 의한 方法도 있다. 이것은 앞의 計算結果의 檢討에도 유용하다.

大規模의 石油精製 또는 石油化學工場에 대해 하여지었던 被害 想定은 다음과 같다.

(1) 大爆發이 일어나도 爆風壓 등에 의하여 死亡하는 것은 爆源으로부터 수십 m의 範圍에 限定되어 지고 있다. 미국의 Cleveland의 LNG 流出 事故과 같이, 可燃性이 下水溝를 거쳐 住居地域으로 流出되면 많은 住民이 골탕을 먹지만, 대부분의 경우 爆發에 의해 死亡하는 것은 그 工場의 従業員들이다. 液化가스나 가솔린과 같은 可燃性은 下水溝나 共同溝에 絶대로 流入시켜서는 안된다.

(2) 1000kl 以上の 可燃物이 爆發하는 경우에는, 直徑 수백 m의 Fire Ball이 생기고, 附近 住民에게 火傷을 입히며, 800m보다 먼 곳의 木造家屋도 破壞 가능하다. 따라서 大量의 可燃物에 의한 爆發 危險이 있을 때에는 1km 以上 떨어진 곳으로 避難하지 않으면 안된다.

(3) 大爆發에 의하여 破片이 튀어 도달하는 最大 距離는 2km, 爆風에 의하여 창문의 유리등이 損傷을 받는 最大 距離는 2km 이다. 따라서 絶對 安全距離는 2km 이다.

(4) 原油 등의 거대한 Tank Yard 에서 火災가 일어나면 2週間 以上 계속하여 타는 경우가 있다. 이것은 防災活動에 止장을 줄 뿐만 아니라, 먼 곳에서 바라보는 市民에게 대단한 不安을 준다. 또 爆風壓 때문에 상점가의 Show Window가 破壞되어 略奪을 誘發하게 될 것이다.

이와 같이 過去의 災害例로부터 본 대규모 工場에서의 安全距離는 2km로 앞의 計算値와는 상당한 差異가 있다. 이는 爆風壓에 의한 被害에 있어서 計算에 의한 豫測이 어렵다는 것을 意味하지만, 반면, 現實의 爆發이 計算에서 사용하였던 Model과 같은가 라고 하는 點에서도 問題가 있다. 이以外에 대해서는 現實과 對應하여 보아 거의 妥當하다고 볼 수 있다. 前述한 바와 같이 例는 대규모의 化學工場에 대한 것이고, 安全距離는 危險物의 量에 대하여 決定되어진다는 것을 잊어서는 안된다.

8. 災害防止 對策

주어진 紙數에 限度가 있기 때문에 충분한 것은 말할 수 없지만, 化學工場으로 부터의 災害를 防止하기에는 火災나 爆發이 일어나지 않도록 하는 것이 가장 중요하다. 그렇기 위해서는 化學 Process의 安全設計, 信賴할 수 있는 材料의 使用과 完전한 工事, 制御 System의 完備, 끊임없는 保守點檢과 整備 그리고 細心한 注意를 기울여 행하여지는 操作이 要求된다. 또, 이러한 우수한 System도 그것을 사용하는 사람에 의하여 쓸모가 있고, 쓸모가 없는 것으로 변한다. 따라서, 教育, 訓練에 의하여 內容을 완전히 習得한 사람이 무엇보다도 필요하다.

또, 이 만큼 注意를 기울였어도 만일 事故가 發生하였을 때를 위해 빠른 探知와 그것에 의한 긴급 遮斷 System이 절대 必要하고 Flow Down System과 Flow Stock에 가연물의 유도를 행하여 事故場所를 局限化하는 것과 동시에 初期 消化 System과 延燒防止의 裝置를 整備하여, 災害가 擴大되는 것을 防止하지 않으면 안된다. 특히, 可燃性가스의 번짐은 被害面積을 크게 하고, 可燃性 液體의 下水溝나 水面으로의 流出이 생각지도 않은 場所에서의 被害를 초래하기 때문에, 局限化, 延燒阻止에 충분한 措置를 하여야만 한다. 그리고 마지막으로 火災를 완전히 消化 가능할 정도의 設備, 資材를 가지고 있지 않으면 안된다.

9. 結論

化學工業은 앞으로,

- (1) 高温, 高壓反應을 이용하는 위험한 Process의 增加
- (2) 生産量의 增大에 의한 數地 여유의 不足
- (3) 省力火, 集中化, 自動化에 의한 長點과 직접, 간접 損害의 增加라고 하는 短點
- (4) 高温, 高壓을 위한 運轉 技術의 복잡함
- (5) 可燃物 取扱量의 增大에 의한 火災, 爆發時의 被害範圍 增大
- (6) 技術의 進歩에 대한 被害 豫防技術 및 制御의 늦어짐
- (7) 集中化, 自動化에 따른 人員의 감소
- (8) 충분한 技術 經驗을 갖지 않은 狀態에서의 製作과 運轉
- (9) 作業員 教育의 困難
- (10) 最大 生産量에서의 長期間 操業
- (11) 建設 期間中의 品質, 作業管理
- (12) 流通 가격의 低下를 위한 危險物의 積荷運送의 增加

等, 安全操業에 대하여 障害로 되는 많은 중요한 問題를 갖고 있다. 이들 중, 여기에서는 (5)에 대하여 특히 敘述하여 왔지만, 앞에서 말한 여러 對策 중, 무엇보다도 충분한 距離를 두는 것이 중요한 解決策이라 할 수 있다. 특히 住宅을 化學工場으로 부터 멀리 떨어지게 하는 것이 Process의 安全에 있어서 여러가지 이야기를 하는 것보다도, 사람들에게 安心감, 安全감을 갖게 한다. 化學工場의 安全은 原點으로 돌아와, 化學 Process 그 自體의 決定, 數地의 選定으로 부터 시작해야만 할 것이다.