

P-01

가연성 액체 탄화수소의 대기 중 확산 및 화재 가능성에 관한 연구

김주석

중앙소방학교 소방과학연구실

A study on flammable hydrocarbon liquid diffuse in the air and possibility of fire

Joo-seok Kim

National Fire Service Academy Fire Science Lab

1. 서론

기존의 화학물질의 저장시설은 일정한 기준에 의해서 안전하게 관리 되고 있고, 화재 발생 시 안전하게 대처할 수 있는 시설로 만들어져 있다. 그러나 현재 불법적으로 유통되고 있는 불법석유류의 경우 안전시설이 갖추어지지 않은 곳에서 취급하다가 누출로 인한 화재 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 사고 중에는 저장 탱크에서 이송 작업 시 가연성 탄화수소가 누출되어 못(pool) 또는 가스 운을 형성하여 정전기, 스파크와 같은 점화원에 노출되었을 때 폭발 또는 화재의 발생으로 강한 복사 열속(Radiation Flux) 와 충격파(Shock wave)를 형성해서 많은 인적 물적 피해를 발생시킨다.

본 연구에서는 안전시설(방호시설)이 없는 저장시설에서 가연성 액체 탄화수소 누출로 인한 분산 특성 및 인화성 증기 발생되는 형태를 전산유체역학프로그램으로 그 위형성을 예측함으로써 실제 사고 시에 발생하는 위험을 알아보고자한다.

2. 이론

2-1 구멍을 통한 액체의 흐름

기계적 에너지 수지식은 흐르는 유체에 대한 여러 가지 에너지 형태를 나타내고 있다.

$$\int \frac{dp}{\rho} + \Delta \left(\frac{u^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta z + F = - \frac{W_s}{m} \quad (1)$$

비압축성 액체의 경우는 밀도가 일정하므로,

$$\int \frac{dP}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (2)$$

그림 1과 와 같이 작은 구멍이 발생하여 액체가 유출되는 공정단위를 고려해보면, 공정 단위 안에 있는 액체의 압력은 유체가 배출 공을 통하여 분출될 때 운동에너지(kinetic energy)로 전환된다. 배출시 유동하는 액체와 누출 벽 사이의 마찰력은 액체의 운동에너지의 일부분을 열에너지로 바꾸며, 그 결과 액체의 속도가 감소된다.

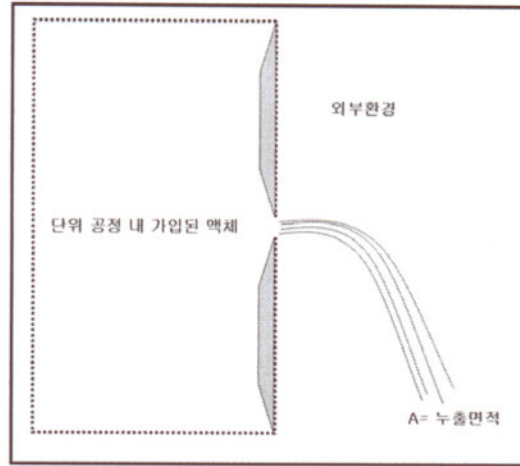


그림1 공정장치에 난 구멍을 통해 유출되는 액체

용기내 압력에 의한 액체의 에너지는 운동에너지와 약간의 구멍 내 마찰흐름손실(frictional flow loss)로 전환된다. 제한된 틈 방출에 있어서 공정장치의 게이지압력(gauge pressure)가 일정하다고 가정한다. 외압이 대기압과 같으므로 $\Delta P = P_g$ 가 된다. 축일(shaft work)은 없으며 공정장치내 유체의 속도는 무시할만하다고 가정한다.

2-2 구멍을 통한 증기의 흐름

흐르는 액체에 대하여 운동에너지 변화는 종종 무시되어지며 물리적 특성(특히 밀도)은 일정하다. 흐르는 기체와 증기에 대하여 이러한 가정은 작은 압력변화 ($P_1/P_2 < 2$)와 낮은 속도($< 0.3 \times$ 기체내 소리의 속도)에서만 타당하다. 기체와 증기가 갖고 있는 에너지는 압력의 형태로 나타나며 기체와 증기가 구멍을 통하여 팽창하거나 빠져나갈 때 에너지가 운동에너지로 변환된다. 밀도 압력 온도는 기체와 증기가 유출될 때 그 변화가 일어난다.

기체와 증기배출은 조절방출과 자유팽창 방출로 분류되어 진다. 조절방출의 경우 큰 마찰 손실을 갖으며 작은 틈을 통해서 방출된다. 이 경우 기체압력으로 나타나는 고유 에너지(inherent energy)의 극히 일부가 운동에너지로 전환된다. 자유팽창 방출의 경우 대부분의 압력에너지는 운동에너지로 전환되며 등엔트로피 거동 (Isentropic behavior)의 가정이 타당성을 갖게 된다.

조절방출에 대한 방출모델은 방출구의 물리적 구조에 대한 자세한 정보를 필요로 한다. 그래서 여기서는 이것을 고려하지 않겠다. 자유팽창방출에 대한 방출모델은 구멍의 지름만 필요로 한다.

자유팽창 누출(free expansion leak)은 그림 3.1.6에 나타나 있다. 역학적 에너지 수지식, 식(1)은 압축성 기체와 증기의 흐름에도 적용된다.

유체의 위치에너지(potential energy)는 무시할만하다고 가정하고, 축일도 없다고 가정하고 압축성 기체에 대한 기계적 에너지 수지식을 다시 쓰면

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left(\frac{\overline{u^2}}{2ag_c} \right) + F = 0 \quad (3)$$

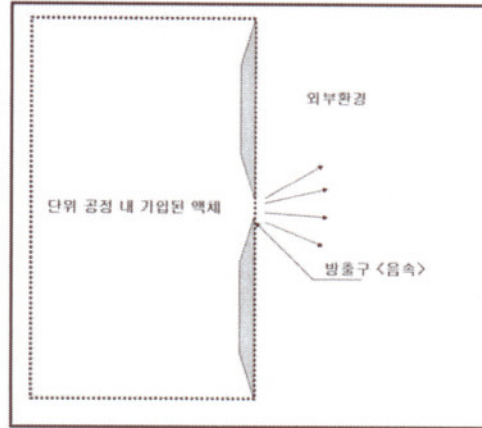


그림 2. 자유팽창 가스누출 (free expansion gas leak)

대기($P_{choked} = 14.7\text{psia}$)로 공기가 누출되는 경우 상류압력이 $14.7/0.528 = 27.8\text{psia}$ (또는 13.1psig)보다 클 경우 흐름은 초크흐름(choked)이 되며 누출은 최대가 된다. 초크흐름(choked flow)이 일어나는 조건은 공장에서 매우 흔하다.

$$(Q_m)_{choked} = C_o A P_o \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_o} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{(\gamma + 1)(\gamma - 1)}} \quad (3)$$

여기서 M 은 빠져 나가는 기체나 증기의 분자량이며 T_o 은 배출전 유체의 온도이며 R_g 는 이상기체 상수이다.

레이놀드수가 30,000(억제되지 않은)보다 큰 값을 갖는 끝이 날카로운 오리피스(Orifice)의 경우 일정한 배출계수, C_o 는 0.6로 같으나 그러나 초크흐름의 경우 배출계수는 하류압력이 감소함에 따라 증가한다. 초크흐름이나 C_o 가 불확실한 경우에는 보편적인 값 1.0을 권장한다.

3. 실험

3-1. 모델링 공간

- 모델링 대상공간은 안전시설이 없는 일반적인 창고.
- 해석 공간크기 : $L \times W \times H$ ($8 \times 8 \times 5\text{m}$)
- 저장탱크형태 : Vertical Vessel Type $L \times D$ ($2 \times 2\text{m}$)
- 최대저장용량 : 6.28m^3 ($\approx 6000\text{ℓ}$)
- 저장물질 : Toluene

3-2 누출시나리오

본 연구는 안전시설이 없는 저장시설에서 위험물질의 누출로 인한 위험성을 알아보기로 하였다. 산업시설 및 실생활에 많은 위험물질을 사용하고 있다. 그중에 불법적으로 유통되고, 많은 화재 사고의 원인이 되는 불법석유류에 사용되는 시너류의 주원료가 되는 물질은 톨루엔이다. 다른 물질보다 인화점(4°C)이 낮고, 위험성의 척도 중에 하나인 폭발상한치와 폭발하한치가 각각 7.1%, 1.2%로 다른 위험성물질 보다 위험성이 높다.

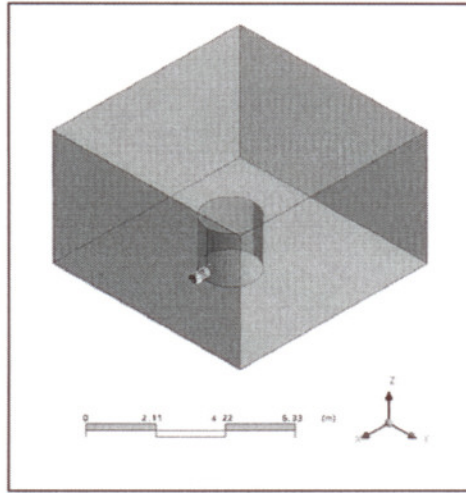


그림 3. 저장 시설 개념도

3-2 실험조건

- 상대습도의 차이에 따른 가연성 증기의 특정 vol% 도달시간.
- 온도의 차이에 따른 가연성 증기의 특정 vol% 도달시간.

4. 결과 및 토론

4-1 상대습도 변화에 따른 누출 시간 변화

인화성액체의 누출로 발생하는 마찰과 외부의 온도와 낮은 인화점 및 상대 증발도에 의해 액체를 유출시켰을 때 발생하는 증기의 이동속도를 알아보았다. 계절에 따른 습도 변화를 알아보기 위해서 약 30%부터 90%까지의 조건 변화를 주었다. 외부변수를 최소화하기 위해서 온도조건은 상온(298K)으로 고정시키고 외부와의 공기 이동이 원만하지 않은 상태, 즉 무창층일때의 공간의 상대습도 변화를 통해서 폭발하한계에 도달하는 시간을 비교하였다.

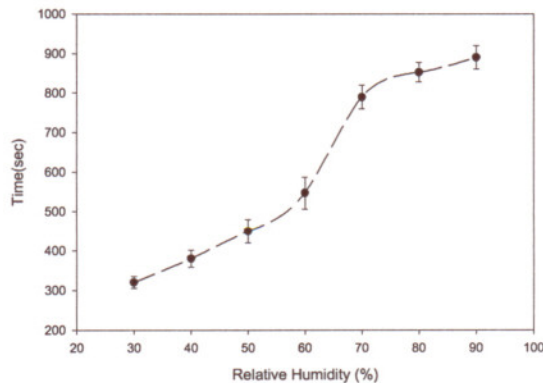


그림 4. 상대 습도에 변화에 따른 폭발하한치(이론값) 도달시간
상대습도가 올라감에 따라서 폭발하한치에 도달하는 시간이 길어진다. 상대습도 60%

이상에서는 도달시간이 증가하는데, 이것은 상대습도가 높아짐에 따라서 증발속도가 떨어지고 높은 상대습도로 인해서 폭발하한치에 도달하는 시간이 길어짐을 알 수 있었다. 여기서 시간은 상대적인 것으로 프로그램상의 조건에 의해서 나온 결과라서 실제상황에서는 차이가 있을 것이다.

4-2 온도 변화에 따른 누출 시간 변화

저장탱크 외부의 온도에 따라서도 폭발하한치에 도달하는 시간이 달라질 것이다. 인화성액체의 경우 인화점과 증발 속도에 따라서 폭발하한치에 도달하는 시간이 달라질 것이다.

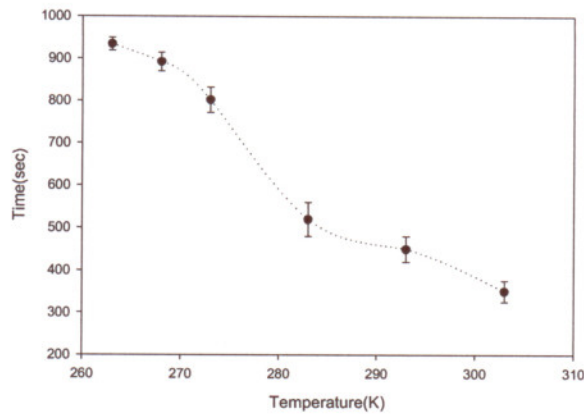


그림 5. 외부 온도 변화에 따른 폭발하한치(이론값) 도달시간
톨루엔의 인화점은 약 4℃이다. 외부온도가 톨루엔의 인화점이상으로 올렸을때 도달시간이 급격하게 증가했으나, 더 높은 온도에서는 도달시간의 변화가 인화점 전후보다 변화량이 크지 않았다. 이것은 인화성액체에서 인화점이 위험성을 증가 시키는 요소로 위험성물질의 판단 시 중요한 물성으로 향후 신규 위험물질의 발생 시 인화점을 측정함으로써 그 물질의 위험성을 판단 할 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

1. OCTAVE LEVENSPIEL, engineering Flow and heat exchange (New York:Plenum press, 1984)
2. WARREN L. McCABE, JULIAN C. SMITH, and PETER HARRIOTT, Unit Operations of Chemical Engineering (NEW York:McGraw-Hill Book Company, 1985)
3. 이수경외 4인, 화학안전공학, 대영사 1994