

초저온액화가스의 옥외증기운폭발 방지에 관한 연구

김원국

서울대학교 화학공정신기술연구소

A Study for Protection of Cryogenic Liquefied Gases from Unconfined Vapor Cloud Explosion

1. 서론

초저온으로 저장된 가연성 액화가스가 누출되면 점화시기 및 누출량에 따라 Flame Jet, Pool Fire 및 UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion) 등의 사고가 발생할 수 있게 된다. 이 중에서 사고로 인한 피해 범위가 가장 큰 것이 UVCE이다. 일반적으로 에틸렌이나 메탄과 같이 공기밀도가 낮은 가스는 지상에서 확산되지 않고 대기 중으로 확산되므로 점화원에 노출되지 않아 폭발의 위험성이 매우 적은 편이다. 그러나 초저온 상태로 저장된 이들 액화 가스가 누출되면 기화된 증기가 주위의 지면이나 공기로부터 가열되기 전까지는 공기보다 무거울 수도 있게 되어 대기 중으로 안전하게 확산되지 아니하고 지상으로 퍼져 점화원에 노출되어서 UVCE를 일으킬 수도 있는 것이다. 본 연구에서는 초저온액화가스저장시설을 모델로 이들 액화가스가 대량으로 누출 시 효과적으로 UVCE의 발생을 저지할 수 있는 방법을 연구하였다.

2. 증기운의 밀도

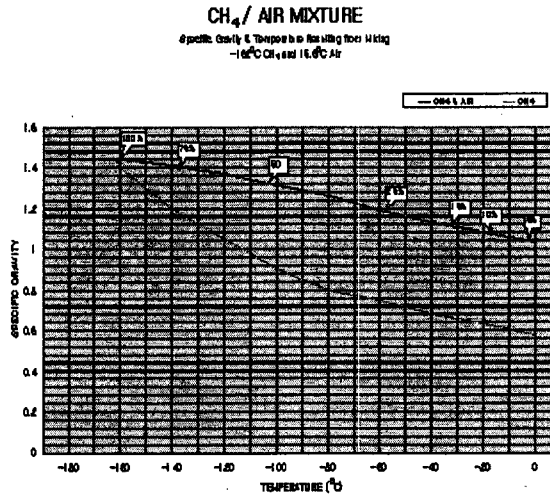
서론에서 언급한 바와 같이 초저온 상태에서 누출된 액화가스로부터 발생된 증기는 밀도가 상온에서 보다 훨씬 높을 수 있다. 연구 대상 가스는 천연가스의 주성분인 메탄을 선정하였고, 메탄의 물리적 특성은 다음과 같다.

- Molecular Weight 16.0g/mol
- Normal Freezing Point 90.7°K(-182°C)
- Normal Boiling Point 111.7°K(-161.5°C)
- Liquid Density 0.425g/cm³(at normal boiling point)

상온에서의 메탄의 증기밀도는 공기의 0.55배이다. 그러나 그림1에서처럼 차가운 액화메탄가스에서 바로 증발된 메탄 증기는 공기보다 1.4배 가까이 무거운 것을 알 수 있다. 이들 차가운 증기

는 -110°C까지 덩혀져야 비로소 공기보다 가볍게 됨을 알 수 있다.

그림1. 온도에 따른 메탄증기 및 메탄/공기 혼합체의 비중



3. 방유제 내에 누출된 액화메탄가스로부터 발생되는 메탄증기발생 모델

방유제 내부 누출된 액화메탄가스로부터 발생되는 증기에 관한 단위면적당 열평형은 다음 식으로 표현된다.

$$Q_e = Q_s + Q_{con} + Q_{rad} + Q_{cool} \quad (1)$$

여기서 q_e [W/m^2] 는 증발에 공급되는 열이고, q_s 는 방유제 바닥에서 전도에 의해 액화메탄가스로 전해지는 열이며, q_{con} [W/m^2] 는 공기에서 대류에 의해 전해지는 열이며, q_{rad} [W/m^2] 는 복사 열, q_{cool} [W/m^2] 는 지속적인 차가운 액화가스의 누출로 인한 풀의 냉각을 표현한다. 단위 증발 열은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_e = m'' h_v \quad (2)$$

여기서 m'' [$kg/(m^2 \cdot s)$] 는 증발량이고, h_v 는 증발열이다. 바닥으로부터 전도에 의해 이동되는 열은 다음과 같이 표현된다.

$$q_s = \lambda_s(T_s - T_l) / \sqrt{\pi a_s t^*} \quad (3)$$

$$t^* = t - t_{start} \quad (4)$$

여기서 λ_s 는 열전도도이며 T_s 는 방유제 바닥의 초기 온도로 T_1 은 액화가스의 온도이다. t^* 는 증발이 진행된 시간을 나타낸다. 공식 (3)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$q_s = F(t^*)\lambda_s(T_s - T_1)/\sqrt{(\pi a_s)} \quad (5)$$

$$F(t^*) = 1/\sqrt{(t^*)} \quad (6)$$

공식 (6)의 시간 factor $F(t^*)$ 는 짧은 시간에서 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$F(t^*) = 1.5 - 0.25t^*, \text{ when } 0 \leq t^* \leq 4 \quad (7)$$

$$= 1/\sqrt{(t^*)}, \text{ when } 4 < t^*$$

공기로부터 대류에 의해 전달되는 열은 다음과 같다.

$$q_{con} = a_{con}(T_a - T_1) \quad (8)$$

$$a_{con} d_{pool}/\lambda_a = 0.036Re^{0.8}Pr^{0.33} \quad (9)$$

$$Re = \rho_a U_w d_{pool} / \mu_a \quad (10)$$

$$Pr = \nu_a / D_a \quad (11)$$

여기서 a_{con} [$W/(m^2 \cdot K)$]는 대류계수이며 $T_a[K]$ 는 공기의 온도이고 T_1 은 액화가스의 온도이다. d_{pool} [m]은 액화가스 풀의 지름이고 λ_a 는 공기의 열전도도이며 Re 는 Reynolds number, Pr 은 Prandtl number이다. ρ_a [kg/m^3]는 공기의 밀도, U_w 는 바람의 characteristic speed, μ_a [$(N \cdot s)/m^2$]는 바람의 dynamic viscosity를 말한다. ν_a [m^2/s]은 바람의 kinematic viscosity이고 D_a [m^2/s]은 공기의 diffusion coefficient이다. 복사열의 이동은 다음과 같다.

$$q_{rad} = (1 - \epsilon_z)q_z + \epsilon_a \sigma T_z^4 - \epsilon_p \sigma T_1^4 \quad (12)$$

ϵ_z 는 Albedo Coefficient (0.11), q_z [W/m^2]는 태양 복사열 ($245.7W/m^2$), ϵ_a 는 주위에서 액화가스 풀로 전달되는 복사열 방출계수를 말한다(0.95로 지정). σ [$w/(m^2 \cdot K^4)$]은 Stefan Boltzmann 상수를 말한다. 액화가스 풀의 냉각은 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$q_{cool} = -\delta_{vl} \rho_{vl} c_{vl} (dT/dt) \quad (13)$$

δ_{vl} [m]은 풀의 깊이, ρ_{vl} [kg/m^3]은 액화가스의 밀도, 그리고 c_{vl} [$J/(kg \cdot K)$]는 액화가스의 비열이다. Numerical simulation에서 pool의 온도는 일정하게 보였고 pool 전체에 대한 열평형이 계산

되었다. 방유제 내의 섬프에 700kg의 액화가스가 누출된 상황으로 가정하였다. 이 누출량은 누출이 감지되고 발브를 잠글 동안 누출된 양을 가정한 것이다.

증발은 액체의 온도 상승으로 인한 비등과 바람이 액체 표면에 부는 것에 의하여 일어난다. 그러나 액체의 온도는 비등점 밑으로 유지된다고 가정하였으므로 바람에 의한 증발만 계산하였다. 바람에 의한 증발은 다음과 같다.

$$m''_{wind} = 2 \times 10^{-3} U_w^{0.78} r_{pool}^{-0.11} M_{vi} \Psi_p / RT_1 \quad (14)$$

$$\Psi_p = P_{tot} \ln(1 + P_w / (P_{tot} - P_w)) \quad (15)$$

여기서 r_{pool} [m] 은 pool의 반지름, M_{vi} [kg/kmol] 은 액체의 분자의 무게, P_{tot} [Pa] 는 전체 압력, P_w [Pa] 는 증기압 분압을 말한다.

4. 모델링결과

방유제 한쪽의 호로 이루어져 있으며, 방유제는 원형으로 반지름이 67m이다. 바람은 2 m/sec 와 3.7 m/sec로 부는 것으로 가정했으며, 바람의 방향은 호의 방향과 직각 그리고 45°로 부는 것으로 가정하였다. 증기운 생성을 최대한으로 억제하기 위한 방호 수단은 다음과 같다.

- 누출된 액화가스 위로 High Expansion Foam 방출
- 방유제 높이를 높여줌(Vapor Curtain 설치)
- 방유제 바닥에 단열재 시공

다음은 모델링을 위한 시나리오 구분이다.

Scenario #	Pool Size	Pool Orientation	Mitigation Measures	Wind Speed [m/s]
100021	small	1		3.7
100022	small	2		3.7
100031	small	1		2.0
100032	small	2		2.0
100041	small	1	High expansion foam at top of pool	3.7
100051	small	1	Wall of dike increased by 10m	3.7
100061	small	1	Thermal conductivity reduced to 10%	3.7

각각의 시나리오별로 생성된 증기의 양은 다음 그래프와 같다.

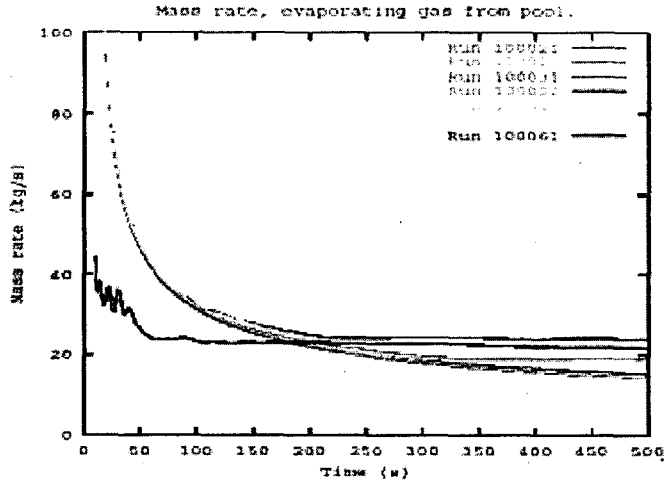


그림2. 증기 발생 Mass Rate

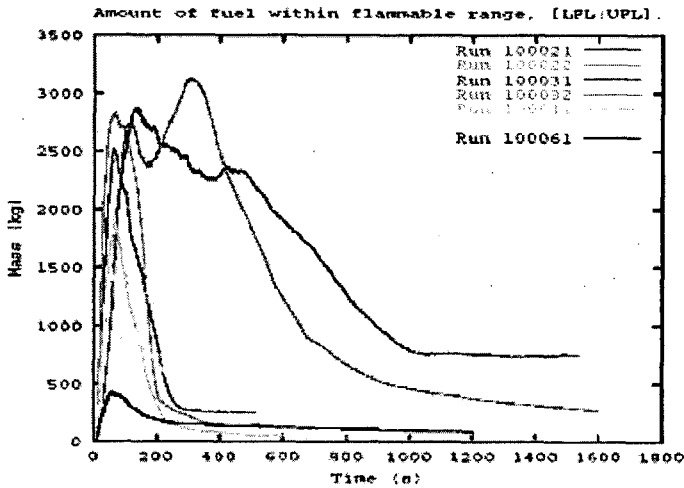


그림3. 폭발분위기 내의 증기량

5. 결론

연구 결과로써 다음과 같은 내용을 발견할 수 있었다:

- 다량으로 누출된 초저온 액화 가스에서 방출되는 증기는 공기보다 무거울 수 있다. 따라서 생성된 증기는 일정 범위까지 바닥에 깔려서 확산되므로 옥외 증기운 폭발 가능성이 있다.

- 증기 생성량은 풍속이 낮을 때, 더 많이 발생하였다.
- 바람의 방향은 호가 같은 방향일 때 보다는 지각일 때 더 증기가 많이 생성하였다(접촉 면적이 더 많아진다).
- High Expansion Foam으로 누출된 액화가스의 표면을 덮는 경우, 72.6%까지 증기 생성량을 억제할 수 있었다. 그러나 증기의 생성이 누출 초기에 이루어짐으로 Foam System은 신속하게 작동되어야 효과를 볼 수 있다.
- 방유제 벽 위에 증기차단벽을 10m 높이로 설치하면 58.7%까지 증기발생량을 줄일 수 있다.
- 방유제 바닥을 단열시공하면(열전도율을 1/10로 낮추면) 16.7%까지 증기발생량을 줄일 수 있다. 다른 방법에 비해서 가장 효과가 좋음.

참고문헌

1. J.P.Lewis, "LNG Properties Data", Liquefied Natural Gas Fire Prevention and Control Course Material
2. Society of Fire Protection Engineers, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3rd Edition
3. Dougal Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", 2nd Edition
4. Bureau of Industrial Safety (TNO), "Methods for the Calculations of Physical Effects Resulting from Releases of Hazardous Materials", CPR 14E, 3rd Edition