

LNG 화재방호

액화천연가스(LNG)와 액화석유가스(LPG)의 혼합기체는 인화성이 높아, 누출 사고시 화재위험성이 크며, 이를 제어하는데 고풍창포가 가장 선호하는 해결책임을 제시하고 있다.

액화천연가스(LNG)와 액화석유가스(LPG)의 증기는 공기 중에서 매우 인화성이 높은 혼합기체를 형성하며 벌크 저장탱크를 둘러싼 방유제에서의 누출사고는 저온증발가스 화재위험을 갖는다. 이러한 화재위험을 제어하는데 가장 널리 사용되는 방법은 고풍창포를 사용하는 것이다. 저온증발형 액체는 정상적 주위온도와 압력에서는 기체형태이며, LNG는 -164°C 정도의 매우 낮은 온도로 저장된다.

1. 위험성

액화천연가스(LNG)의 성분은 83~99%가 메탄이며, 연소시 동등한 양의 휘발유가 방출하는 열량의 2배에 해당하는 많은 열량($93,000\text{kcal}/\text{m}^3/\text{hr}$)을 단시간 내에 방출한다. 또한 액상의 LNG는 기체상태의 LNG로 되면서 부피가 약 600배 정도 증가한다. 사고로 액상의 LNG가 누출되면 주위로부터 열을 흡수하여 급격히 증발하게 된다.

초기에는 가스가 공기보다 무거우나, 점차 열을 흡수하여 주위온도와 비슷해지면 공기보다 가벼워진다. '공기보다 가벼운' 상태에서 증발하는 가스는 기류나 바람에 의해 이동하며, 매우 낮은 혼합농도(보통 5~15%)에서 발화할 수 있다. 이 가스운의 가장자리가 점화원에 닿게 되면 폭발이 일어나거나, 기화되고 있는 액체 LNG로 빠른 속도로 역화된다. 이런 누출화재위험에 대한 적절한 방호조치가 없다면, 공장이나 주위 시설들이 복사열에 의해 심각한 손상을 받을 것이다.

액화석유가스(LPG)는 프로판과 부탄으로 구성되며 비등점이 LNG보다 높다. 비등점은 프로판이 -42.5°C (1기압)이고, 부탄이 0.5°C 정도 되므로 LNG만큼 빨리 가스로 기화되지는 않는다. 기체 상태에서는 LPG가 항상 공기보다 무겁기 때문에 지표면으로 가라앉는다. 기화된 가스는 아래쪽으로 흘러가 웅덩이, 지하실, 지하터널 등에 모이게 된다. LPG도 발화되면 LNG와 비슷한 열량을 방출한다. LPG의 인화농도범위는 2~9%이며, 가스

운이 지면을 따라 퍼질 수 있어 발화장소는 누출 장소로부터 수 백 미터 떨어진 곳일 수도 있다.

2. 적절한 방호조치는 무엇인가

수동적 방호조치

누출가스를 가둘 수 있도록 저장탱크와 방유제를 설계하는 것이 수동적 방호의 중요한 방법이다. 높은 방유제 벽은 누출된 LNG를 가두어 가스를 안전하게 상부로 흩어지게 한다. 낮은 벽으로 세분화된 방유제와 경사진 측벽의 깊은 고랑은 LNG의 증발 표면적을 최소화시켜준다. 방유제 벽이 낮은 경우 주변 탱크와 공장들을 향한 복사열을 감소시키기 위하여 수막설비의 설치가 필요할 수 있다. 복사효과를 최소화시키기 위하여 탱크상부에 고펡창포를 방출하도록 낮은 방유제 벽 높이만큼 탱크지붕이 되게 일부를 지면 이하에 묻는, 이른바 반매입형 탱크를 설치할 수 있다. 주변 구조물에 대한 열복사를 최소화시키기 위하여 물분무설비를 설치할 수도 있다. 한편, LPG는 주로 구형 또는 원통형 강철용기에 저장되는데, 지표면으로부터 떨어진 상부에 설치하거나 흙을 완전히 덮어 돌우는 형태로 지하에 설치한다. 누출가스를 가두기 위해 방유제를 설치

하기도 하지만 물분무설비를 설치하여 용기를 냉각시킴으로써 팽창증기운폭발(BLEVE)의 위험을 감소시키는 것이 주요한 방호조치가 된다.

능동적 방호조치

설계단계부터 LNG 방호설비는 증발하는 가스의 분산과 화재제어라는 두 가지 시나리오 중 하나에 맞게 설계되어야 한다.

이들 두 가지 설비는 다른 적용 방출량, 지속 시간 및 크기를 가지므로 올바른 선택을 하기 위해서는 소요 비용이 중요한 결정인자가 될 것이다. 그러나, LPG는 항상 공기보다 무겁기 때문에 증발하는 가스가 포에 의해 데워지지 않는다. 그래서 방유제 내에서의 화재제어만이 포소화약제를 사용하는 이유가 된다.

화재시나리오의 첫 번째 요구사항은 누출사고를 즉시 확인할 수 있는 적절한 감지설비이다. 또한, 이는 모든 현장의 직원들과 누출사고 비상대응반에게 신속한 경보조치를 하도록 연동되어야 한다. 이 감지설비는 누출가스가 발화되었는지도 확인할 수 있어야 한다. LNG 화재제어, LNG 가스분산 또는 LPG 화재제어의 모든 시나리오에서 소화설비 초기 기동시간이 중요한 요소가 된다.

가스 분산

증발하는 가스의 분산을 효과적으로 도와 누출된 LNG 발화위험을 감소시키기 위해 고펡창포소화설비가 설치될 수 있다. 이는 발화원이 존재할 가능성이 가장 높은 지표면 부근에서의 가스농도를 감소시킨다. 만약 연쇄적 발화가 일어난다면 가스분산 목적으로 설치된 소화설비는 화재를 제어하기에는 역부족임을 인정해야 한다.

화재제어

누출된 LNG가 발화되었을 때 화재를 제어하여 재해적 피해를 방지하기 위해 고펡창포소화설비가 설치될 수 있다. 고펡창포의 두꺼운 발포층은 가스의 연소를 제한하며 주변 공장으로부터의 복사열을 감소시킨다.

3. 기준

NFPA 11A(1994), BS 5306, 6.2절(1989)과 같은 국제기준에서 LNG 위험지역의 방호는 고팽창포소화설비를 권장하지만, LPG에 대해서는 완전소화하지 않도록 하는 경고적 문구를 달았다. 이는 공기보다 무거운 가스가 발포층 아래에서 흘러가 가스운을 형성하거나 재발화할 위험을 갖게 되기 때문이다. 저온증발가스 위험의 복잡성을 인식하고 기준에서는 단위시간당 적용 방출량, 또는 방출시간을 제시하지 않는다. NFPA 11A에서는 적용 방출량을 시험에 의해 정하도록 제안하며, 분석에 의해 정해진 제한시간 내에 복사열의 실질적 감소가 이루어지도록 하고 있다. 초기 기동시간이 화재제어의 중요한 결정요소가 되도록 소화설비의 설계는 개별 현장의 분석에 따라야 한다. 주변 공장시설에 대한 복사열 노출위험도 분석시 고려되어야 한다.

4. 시험데이터

LNG 가스분산 및 LNG 화재제어를 위한 고팽창포의 효율성을 검증하기 위하여 수 년 동안 광범위한 시험이 수행되었으나, LPG에 대해서는 제한적인 시험이 수행되었다. 이들 시험의 대다수에서 화재제어 뿐만 아니라 가스분산에서도 500:1의 발포비율이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 몇몇 시험에서는 화재제어를 위하여 150~300:1의 발포비율을 사용하였는데 화재 속으로의 침투범위가 증가함을 보였다. 그러나 포 용액의 소모율 증가는 추가비용이 들며, 누출가스 쪽으로 더디게 흘러가는 경향이 있다. 300:1의 비율은 낮은 온도에서 저장되지 않는 LPG의

화재제어에 사용되는 보편적인 발포비율이다.

고팽창포소화설비의 전체적 효율성에 영향을 주는 요소는 복잡하며 상호연관성이 있다. 이러한 요소들로는 다음과 같은 것이 있다.

- LNG 및 LPG 누출 규모
- 적용 방출률
- 포 용액(조성성분과 성능이 다양하다)
- 포 흡입률(정확한 배합비율이 일정한 포를 생산하는데 중요하다)
- 발포기(제조기술이 포의 성능에 영향을 준다)
- 포의 유지(크기, 균일성)
- 발포층의 두께
- 설비의 작동속도
- 날씨 조건

이러한 요소들은 소화설비 설계자 또는 설치에 대한 관할기관이 고려해야 할 사항이다.

5. 포의 작용

화재제어

누출사고로 발생하는 LNG 가스는 초기에는 저장온도(-164℃)에 가깝고 공기보다 무거워서 누출된 LNG 상부에 차가운 가스운을 형성한다. 즉각적인 조치가 취해지지 않는다면, 공기유동에 의해 가스운은 사방으로 흩어지게 되고 묻어지면서 인화농도에 이르게 된다. LNG 가스운의 표면에서는 공기와 잘 혼합되어 5~14%의 가스농도를 형성하게 되며, 점화원에 닿으면 발화하여 LNG 액체 쪽으로 역화하게 된다.

LNG 가스가 발화하게 되면, 엄청난 복사열이 발생하게 되는데, 그 심각성의 정도는 그 때의

주된 환경적 조건뿐만 아니라 주변 건물, 공장, 현장 직원들로부터 화재가 얼마나 떨어져 있는가에 따라 달라질 수 있다. 화재로부터 상당히 먼 거리에 있는 건물도 위협에 노출될 수 있으며, 공기의 조건이나 바람에 영향을 받아 바람부는 쪽으로 복사열이 엄청나게 증가할 수 있으므로, 반드시 방호조치를 취하여야 한다.

고팽창포를 사용하는 화재제어 메카니즘은 매우 복잡하다. 발포층은 신속하게 만들어져 화재로부터 LNG 액체로의 열전달률을 낮추어야 하며, 초기 증발률을 안정된 상태까지 낮추어야 한다.

500:1의 팽창비는 LNG 누출화재를 제어하기 위해 필요한 시간을 최소화하는데 적합한 것으로 알려져 있다. 불타고 있는 LNG 풀로부터 발산되는 강렬한 복사열에도 불구하고, 500:1 발포층은 포와 LNG 경계층을 급속히 동결시키지만, 이 얼음층은 가벼워서 LNG 표면위로 부상하게 되고, 파괴되거나 가라앉지 않고 수 피트의 발포층을 지지할 만큼 강하다. 또한, 이 경계층 부근에서 발포층을 뚫고 증발하는 저온증발기체를 따라 얼음관이 형성된다. 급속한 포소화약제의 살포는 복사열 수준을 현저히 감소시키며, 포가 더 방출됨에 따라 화염이 포 속으로 사라져 묻히게 된다. 화재제어가 계속되기 위해서는 소강상태의 화염을 덮어주는 시간이 길어져야 한다. LNG 풀이 완전히 증발되어 없어질 때까지 포의 살포가 계속되어야 하며, 증기농도 수준이 정상상태로 되어야 상황이 종료된 것으로 볼 수 있다.

고팽창포는 열과 증발률이 더 강한 LPG에도 유사한 효과를 갖는다. 제어된 연소상태에서는 70%의 열복사선의 감소효과를 얻을 수 있다. 발

포층 내의 수분, 공기 및 가연성기체의 예혼합은 연소효율을 증가시켜 짧은 길이의 깨끗한 불꽃을 형성시킨다. 이러한 조건이 되기 위해서 사용되는 포는 최적의 안정화를 위하여 포의 25% 환원시간이 15분을 초과하여야 한다. LNG의 경우 경계층에서의 포는 표면에 밀도가 낮은 얼음층이 형성된다. 하지만, LPG 화재의 경우 완전 소화시키지 않는 것이 중요한데, 공기보다 무거운 기체가 발포층 아래로 흘러가서 재발화 위험이 있는 낮은 곳에서 가스운을 형성할 수 있기 때문이다.

위험지역 둘레에 설치한 물분무설비는 공기보다 무거운 가스를 잘 분산시키고 공기와 혼합시켜 인화농도 미만으로 되게 도울 수 있다. LNG 관리자도 분말소화설비로 화재를 완전소화하기 보다는 포로 화재제어를 하는 선택이 늘어가고 있다. 이는 가연성가스가 표류하거나 축적되었다가 재발화하여 사람이나 공장에 더 큰 위험을 발생시킬 가능성을 줄이기 위해서이다.

대형 LNG 누출화재에 대한 높은 수준의 화재방호조치가 요구될 때 고팽창포소화설비는 물분무소화설비보다 더 큰 비용절감효과를 줄 수 있다. 물분무소화설비의 수막방호조치는 상당한 방수량과 높은 급수압에도 불구하고, 고팽창포소화설비보다 복사열을 감소시키는데 덜 효과적이다. 이는 특히 고팽창포소화설비에서 요구되는 방수량과 펌프용량이 현저히 작으므로 초기 설치비용 면에서 중요한 고려사항이 된다. 사용비용은 포소화설비가 더 많이 들 수 있으나, 예상되는 사용 경우가 극히 제한적이고, 필요한 효율성 면에서 훨씬 우월하다.

가스 분산

모든 LNG 누출사고가 초기에 발화되지는 않는다. 관리자들은 일단 화재가 발생하였을 때 신속한 조치가 취해지지 않으면 재해적 사고가 된다는 시설의 특수성을 인식하고 있다. 이 때 고팽창포소화설비는 LNG 증기가스를 발화원으로 부터 떨어뜨려 분산시키는데 효과적이다.

500:1 팽창비의 포는 LNG 저장탱크 주변의 방유제 벽 구역을 덮어버림으로써 가스의 발화위험을 낮춘다. 포는 저온증발 액체의 표면을 덮어 LNG 가스가 발포층을 통과하여 올라갈 수 있도록 데워줄 수 있는 충분한 수분을 제공한다. 이 부력효과는 지표면 부근의 가연성기체 표류 가능성을 줄여주고, 대기로의 LNG 가스 분산을 돕는다.

고팽창포는 공기보다 무거운 LPG 가스를 분산시키지는 못할 것이다. 고팽창 발포층(300~500:1) 아래의 LPG 가스의 제어된 연소는 LPG를 태워 없애는 효과적인 방법이 된다.

6. 개발 방향

고팽창포소화설비가 효과적으로 성능을 발휘하기 위해서는 500:1 발포기가 방유제벽 선단 또는 펌프 피트 선단에 설치되어 있어야 LNG 누출을 신속하게 포로 덮을 수 있다. 포 이동시간의 지연 때문에 발포기는 방유제로부터 멀리 떨어져 있어서는 안 된다. 포 이동시간의 지연은 LNG 위에서의 포의 효과적 존재시간을 줄이고 포에서 수분이 배수되어 LNG 증발률을 증가시키는 원인이 된다.

경험에 의하면 단순한 흡입식 또는 망을 통한 송출식 발포기는 약한 바람에 의해서도 쉽게 공

기흡입이 약해져 흡입구를 통한 송출효과가 현저히 떨어진다. 포 용액의 유량이 일정할 때 공기유량이 변화하는 것은 포의 팽창비에 직접적인 영향을 주어 팽창비가 일정치 못한 비효율적인 포가 발생하게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 일정한 공기유량을 제공하는 강제공기송출 기술에는 수력구동 터빈과 특수한 공기팬이 요구된다. LNG 화재의 복사열을 견디기 위해서는 적절한 발포기를 설계하고 제조하는데 특별한 주의가 필요하다. LNG 화재용 발포기는 NFPA 11A에 제시된 화재시험 요구사항을 만족하여야 한다. 이에는 헵탄을 연소시키면서 5분간 직접 불꽃을 대는 시험을 거쳐 발포기가 만족스러운 작동을 하여야 한다. 이 화재강도는 LNG에 의한 높은 복사열 수준을 반영한 것이다.

7. 결론

고팽창포소화설비는 LNG/LPG 화재위험에 대응하고 LNG 가스의 분산에 가장 믿을만하고 선호되는 해결책이다. 이 분야의 지식이나 시험은 많지 않으며, LNG 및 LPG의 위험특성 때문에 시험에 많은 제한을 받고 있다. 시험을 수행하는 데는 안전관점에서의 어려움과 시험용 누출을 모니터링하는 비용에 대한 어려움이 있다. 더구나 이런 문제를 이해하는데 실질적 업무를 담당하고 효과적 해결책을 연구하는 LNG 및 LPG 전문가는 전 세계에 걸쳐 소수의 기관에 집중되어 있다는 것이다. ㉞

- APF(2003.9)

- 번역: 기술지원부 과장 강영은