

가스폭발사건에서 누출량 계산의 유효성 검토

글 이승훈 서울지방경찰청 과학수사계 화재폭발조사팀



1. 머리말

기존의 가스폭발 조사현장에서 누출된 가스의 양을 확인하기 위해서는 구획실의 채적을 측정하고, 해당 가스의 연소범위를 고려하여 최소 누출량과 최대 누출량을 계산하여 사고가 발생한 구획실에서 누출되었던 가스의 양을 가늠하는 방식을 사용하고 있는데 가스의 밀도를 고려하지 않는다면 사실에서 상당히 벗어난 누출량을 산출할 수 있는 가능성이 있다. 가스는 종류에 따라서 다양한 비중을 가지고 있는데 이 때문에 대기 중에 누출되었을 때에는 수직공간의 위치에 따라서 다양한 혼합비율의 상태로 존재하게 된다.

이 글에서는 가스폭발 현장에서 보이는 여러 가지 법공학적 분석지표들을 통해 기존의 누출가스량을 계산하는 방법이 오류를 범할 수 있다는 점에 대하여 고찰하였다. 유동이 제한적인 공간에 누출된 가스는 공기보다 가벼울 경우 구획실의 상단부 즉 천정에 중점적으로 채류하게 되며, 공기보다 무거운 경우에는 구획실의 하단부 즉 바닥에 중점적으로 채류하게 된다는 사실을 사례를 통해 확인할 수 있었다. 이 점을 고려해 볼 때 가스의 비중에 따라서 높은 곳에서 낮은 곳으로 또는 낮은 곳에서 높은 곳으로 연료과잉 또는 연료부족의 상태로 다양한 공기-연료 혼합비를 가지게 된다는 것을 유추할 수 있으며 이와 같은 논리를 기존의 구획실 내에서 확산폭발이 발생하였을 때 가스의 연소범위만을 고려한 계산을 통해 산출된 누출값이 유의미한 값이라고 볼 수 없고 오히려 현장감식 및 조사에서 혼란을 초래할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 현행 연소범위를 활용한 누출량 계산방법

다양한 가스폭발사고의 현장조사 과정에서 누출된 가스의 비중에 따라서 상단부 중심으로 또는 하단부 중심으로 열적인 효과들이 집중적으로 나타나는 눈에 띄는 특징을 발견할 수 있었으며, 더욱 정확한 가스폭발 사고의 원인 규명을 위해 이러한 특징들을 법공학적 지표로 사용하여 논리적으로 고찰해 보았다.

구획실 내에서 확산폭발이 발생하였을 때 구획실내 누출량을 계산하는 기존방법의 유효성에 대하여 검토하였는데 이 계산방법은 몇몇의 사례와 이론적 검토를 통해 충분히 그 유효성에 대하여 의심할 만한 단편적인 계산방법이었음에도 불구하고 현재까지 그 유효성에 대하여 연구되었던 사례가 없었으며 언제부터인지 모르게 사용되기 시작하여 현재까지 매우 오랜 시간동안 사용되어지고 있다. 이 글을 통해서 폭발현장을 조사하는 조사관들이 이와 관련된 근거없는 통념을 정리하고, 과학적인 시각으로 폭발현장조사에 임할 수 있기를 기대한다.

현재 폭발사고가 발생하였을 때 사고에 기인한 가스의 누출량을 판단하는 방법은 구획실의 체적을 확인한 후 누출이 의심되는 가스의 연소범위를 고려하여 이 공간 내에 혼합되었을 때 폭발이 가능한 최소 누출량과 최대 누출량을 계산하여 구하는 것이다. 예를 들어 실내공간이 100 m³인 공간에서 부탄가스의 누출로 인해 폭발이 발생하였다고 한다면 부탄가스의 누출량을 도출해 내기 위해서 부탄가스의 연소범위인 10.8-8.4 %를 고려하여 이 공간에 누출된 부탄가스의 최대 누출량은 10.8 m³이며 최소 누출량은 8.4 m³로 계산된다. 이러한 계산방법은 연소하한계 미만의 농도나 연소상한계를 초과하는 혼합비율에서는 점화원이 주어진다 고 하여도 폭발이 불가능하기 때문에 사고현장에서 폭발이 발생하였다면 현장에 누출된 가스는 연소범위 내에 존재하였을 것이며 이것을 통해 현장에 누출된 가스의 양의 범위를 계산할 수 있다는 논리에 의한 것으로 지금까지 실무적으로 상당히 신뢰를 받아 왔으며 현장을 조사하는 데 있어서 활용도가 높은 편이었다. 또 이와 같은 논리로 도출된 누출량은 폭발현장에서 폭발의 근원이 되었던 가연성물질을 판단하는 근거로 사용되었던 경우가 종종 있어 왔는데 그 예로 다음과 같은 가상의 사례를 들 수 있다.

〈사례〉

구획실 내에서 누출된 가스가 확산되어 폭발사건이 발생하였다. 이곳에서는 구멍이 뚫린 휴대용 부탄가스 용기 2개가 발견되었다. 이곳 폭발사고에서도 현장의 내부 체적을 고려하여 부탄가스가 누출되었을 때 폭발이 가능한 양을 계산할 수 있었으며 이렇게 최소누출량은 여러 가지 가능성을 판단하는 데에 영향을 미쳤다. 휴대용 부탄가스 용기에서 완전히 누출되었다는 가정하였을 때 그 양이 체적에 비하여 폭발 가능한 최소한의 부탄가스의 누출량을 폭발이 가능한 최소 누출량에 비하여 매우 부족한 상황이 된다면 연소하한계 미만으로 휴대용 부탄가스용기에서 누출된 가스에 의해서만 폭발하였을 가능성은 배제된다. 따라서 별도로 추가된 가연성 가스가 존재하는지 확인하거나 다른 폭발의 원인을 검토해야 하는 상황이 되는데 다른 폭발원인이나 별도의 추가된 가연성가스의 존재가 부정된다면 폭발원인은 미상으로 결론지어질 것이다.

이상의 가상 사례와 같이 연소범위를 고려하여 계산된 누출량은 현장을 조사할 때 직, 간접적으로 많은 영향을 미치게 된다. 실제로 구획실 내에서 가스의 확산폭발에 의한 현장을 조사할 때 이와 같은 방법으로 계산된 누출량은 여러 가지 감식결과를 주장하기 위한 근거로써 거론되며 현장감식보고서에 기재되고 있다.

3. 이론적 검토

위와 같은 방법으로 도출된 누출량에 대한 정확도가 참고할 수 있을 만한 수준인지에 대하여 다음과 같이 기체의 분포와 관련된 이론을 검토하였을 때 불충분하다는 결론을 얻을 수 있다. 연소범위를 사용하여 위와 같은 방법으로 산출된 누출량은 오로지 누출가스의 연소범위만을 고려한 계산이므로 이론적으로만 검토해 보았을 때에도 상당히 큰 오류가 발생할 수 있으며 그 근거로서는 확산에 의한 분포와 비중에 의한 분포를 들 수 있다.

연소범위라는 것은 공기와 가연성 연료가 혼합된 비율에 따라서 점화될 수 있는 농도를 말하며 그 농도의 범위를 연소상한계와 연소하한계로 설명하고 있다. 이 연소범위는 연료가 가지고 있는 고유한 특성이다. 이 특성은 일정 공간 내에 공기와 연료가 균일한 상태로 혼합비율을 유지하고 있다는 전제조건 내에서 연소가 가능한 혼합비율을 말하는 것이다. 따라서 이러한 구획실 내에서 연료가 누출되어 폭발이 발생하였을 때에도 연소범위를 이용해 점화원에 의해서 폭발이 가능한 누출량을 계산하기 위해서는 이 전제 조건을 만족시킨다는 가정 하에 이루어질 수 있을 것인데 실제로 가스가 누출되어 사고가 발생하는 상황에서 내부에 누출된 연료는 다양한 원인에 의해 균일한 분포로 확산되어 있다고 볼 수 없다. John D. Dehaan¹⁾은 그 이유를 기체의 비중에 의한 분포 특성을 거론[1] 하였으며, 필자는 이에 더불어 가스가 배관 등 특정 지점으로부터 누출될 때 발생할 수 있는 확산분포에 대한 이유를 한 가지 더 추가할 수 있을 것으로 생각한다[2].

가. 확산에 의한 분포

확산분포는 확산과정에서 나타나게 되는 기체의 분포상태를 말한다. 누출개소로부터 쏟아져 나오는 가연성 가스가 구획실 내에서 전체적으로 확산되는 과정에 있는 혼합비율을 살펴보면 누출지점은 가스농도 100%로 존재하게 될 것이고, 현재까지 누출된 가스가 확산되지 않은 지점은 가스농도 0%로 존재하게 될 것이다. 즉 확산과정에서 누출량이 많던 적던 간에 측정하는 포인트마다 수많은 혼합비율을 나타낼 수 있다. 누출된 가스가 공간에서 전체적으로 혼합된다면 연소하한계 미만이거나 연소상한계를 초과하는 양이라고 하여도 확산되는 과정에서 일부는 연소범위 내의 비율로 존재할 수 있으며 이곳에 점화원이 주어진다면 폭발이 발생할 수 있다는 것이다. 그러므로 이러한 현장에서 단순히 균일한 분포를 가지고 있다는 것을 가정한 연소범위를 대입하여 최소, 최대 누출량을 구하고 이 값을 활용하는 것은 상당히 큰 오류를 범할 수 있다는 것을 추론할 수 있다.

나. 비중에 의한 분포

다양한 비중을 가지는 물질의 유체가 혼합되고, 지속적으로 혼합상태가 유지될 정도로 유체의 대류가 활동적이지 않다면 비중에 의해 각 물질들은 안정적인 위치로 이동하게 된다. 이 때 상대적으로 비중이 높은 물질은 낮은 곳으로 가라앉는 것이 안정적이며, 비중이 낮은 물질은 높은 곳으로 떠오르는 것이 안정적인 상태이다. 가스의 확산이 이미 완료된 공간에서도 내부에 충분히 혼합될 정도로 대류가 발생하지 않는다면 혼합된 기체는 각각의 비중에 의해서 수직공간에서 여러 가지 층을 형성하며 분리된다. 이것은 물과 기름을 충분히 교반하였다고 하여도 유체의 대류가 멈춘다면 각 물질의 비중에 의해 층을 이루면서 분리되는 현상을 떠올린다면 이해가 어렵지 않을 것이다. 구획실 내에 누출된 가스가 비중에 의해 분리된다면 수직적인 포인트에 따라서 다양한 혼합비율을 나타내게 될 것이다. 예를 들어 어떠한 기체가 누출되고, 대류의 유동이 정지된다면 누출된 기체는 비중에 따라서 안정적인 위치를 차지하게 되는데 이것이 공기보다 무거운 기체라면 바닥에 가라앉은 상태로 안정을 취하게 된다. 따라서 가장바닥부터 분리의 중심이 되는 층의 윗부분으로 수직적인 여

1) 필자주 : John D. Dehaan은 미국의 화재조사분야에 저명한 학자이며 Kirk's Fire Investigation의 저자로서 이 책은 화재 및 폭발조사분야의 텍스트북으로 거의 완벽에 가까운 내용을 담고 있다는 평가를 받고 있다.

러 위치에서 공기와의 혼합비율을 살펴본다면 비중이 높은 가스의 경우 가장 낮은 곳은 가스의 농도가 가장 높을 것이며, 높은 곳으로 갈수록 점차적으로 가스의 농도는 줄어들고, 공기의 비율이 더욱 크게 나타날 것이다. 반대로 비중이 낮은 기체라면 무거운 기체에 비하여 수직적으로 반전된 위치에서 동일한 특성을 나타낼 것이다. 즉 다양한 혼합비율을 가지게 된다. 비중에 의한 분포를 고려할 때 누출량이 전체 체적의 연소하한계 미만이거나 연소상한계를 초과하는 경우에도 분포특성에 의해 일부는 연소범위 내의 혼합비율로 존재할 수가 있으며, 이곳에 점화원이 주어진다면 폭발은 발생할 수 있다는 것을 추론할 수 있으며, 이 경우에도 확산에 의한 분포 특성과 마찬가지로 단순히 균일한 분포를 가지고 있다는 것을 가정한 연소범위를 대입하여 누출량을 구하고 이 값을 활용하는 것은 상당히 큰 오류를 범할 수 있다는 것을 추론할 수 있다.

4. 사례의 검토

다음 사례는 서울지방경찰청 화재폭발 조사팀이 실제 임장하였던 사건으로 일반적으로 가정에서 난방이나 취사용 연료로 사용하는 LPG와 LNG의 누출에 의한 사고현장을 조사하였던 사례로서 가스의 비중에 따라서 다르게 나타나는 대표적인 양상을 살펴볼 수 있다. 이 두 가지의 가스는 여러 종류의 가스가 혼합되어 있으나 각 가스의 주성분을 이루는 가스가 전체적인 특성을 주도한다. LPG의 주성분인 부탄가스의 비중은 1.93으로 공기보다 무겁고, LNG의 주성분인 메탄가스의 비중은 0.55로 공기보다 가볍다. 따라서 위에서 비중에 의한 분포를 검토하였던 것과 같이 구획실 내에 누출되었을 때 충분히 혼합될 만큼 대류가 왕성하지 않다면 누출된 가스는 수직적 공간에서 안정적인 위치를 차지하게 될 것이다.

[사진 1]은 LNG 배관의 결속 오류로 인해 누출된 가스가 체류하던 중 불상의 점화원에 의해 착화되어 폭발이 발생하였다. 위 사진에서 볼 수 있는 것처럼 현장의 벽면 페인트에 남아있는 열변형흔적을 살펴볼 때 주로 천정과 상단부에서 발견되며, 중, 하단부에서는 열변형 흔적이 발견되지 않는다. [사진 2]는 LPG를 취사용 연료로 사용하는 식당에서 주물 버너 밸브조작 오류에 의해 누출된 가스가 체류하던 중 불상의 점화원에 의해 착화되어 폭발이 발생하였다. 현장에서 발견되는 열변형 흔적은 대부분 바닥에 가까운 낮은 지점까지도 발견된다.



[사진 1] LNG 확산 폭발 현장 중, 하단부에서는 열변형 흔적이 발견되지 않는다.

[사진 1]과 [사진 2]에서 열변형 흔적은 흔적이 발견되는 공간이 발견되지 않는 공간에 비하여 더욱 많은 양의 가연성 가스가 체류하고 있었다는 점을 알 수 있는데, 이러한 흔적이 특정 높이에서 수평적인 층을 이루며 위, 아래로 구분된 특징을 보인다. 이는 누출된 가연성 가스가 착화 이전에 층을 이루며 분리되

어 있었다는 것을 증명한다. 이 두 사례의 경우 각 구획실의 창문이나 출입문에 1-2cm의 많은 틈이 있어 외부와 대류가 단절되었다고 볼 수 없을 만큼 밀폐상태를 유지하고 있지 않았음에도 불구하고, 누출된 가스는 비중에 의해 층을 이루며 거의 완벽한 상태로 분리되었다는 것을 알 수 있다.



[사진2] LPG 확산 폭발 현장 열변형 흔적이 낮은 곳에서 주로 발견된다.

물질의 비중과 관련된 일반적인 물리법칙을 고려한다면 LNG의 경우 아래에서 높은 곳으로 갈수록 가스의 농도가 높아졌다는 것을 알 수 있는데, 누출량의 많고 적음을 떠나서 LNG의 비중에 의해서 가장 높은 부위는 연료포화 상태, 산소부족 상태 즉 연소상한계를 초과한 농도로 점화원이 주어진다 하더라도 폭발이 발생하지 않는다. 또 가장 낮은 부위는 연소부족, 산소포화 상태 즉 연소하한계 미만의 농도로 점화원이 주어진다 하더라도 폭발이 발생하지 않는다. 또 이 두 지점 사이에는 무수히 많은 혼합비율을 가지고 있는 수직적인 대역이 존재하며 그 중에는 연소범위내의 혼합비율을 이루는 대역에서는 점화원이 주어질 경우 폭발이 가능할 것이다. 또 공기보다 높은 비중을 가지는 LPG는 위 설명한 LNG와 반전된 수직적 위치에서 그 성격이 나타난다는 것을 알 수 있다.

3. 맺음말

위에서 이론적인 고찰과 사례를 통해 검토하였던 바와 같이 구획실에서 전체 누출량이 체적대비 연소범위를 초과하는 경우나 연소범위 미만인 경우에도 기체의 분포 특성에 의해서 부분적으로 연소범위내의 대역이 존재하며 이곳에 점화원이 주어졌을 때에는 폭발이 가능하다는 결론을 도출하였다. 연소범위 외의 혼합비율에서는 점화원이 발생한다고 하더라도 연소 및 폭발이 발생하지 않는다는 것을 근거로 폭발사고현장의 체적을 대입하여 계산된 최대 누출량과 최소 누출량을 실무에 적용하고 있으나, 이 계산 방법은 가스의 확산과 비중에 의한 분포 특성을 고려하지 않은 것이므로 단편적인 과학에 의존한 계산이라고 볼 수 있으며 실제 구획실에서의 폭발사고에 적용하였을 때 큰 오류를 범할 수 있고 계산된 값이 사실과 근접하다고 볼 만한 과학적인 근거가 없다. 따라서 실제사고에 있어서 이 계산방식을 통한 최소, 최대 누출량의 정확도는 신뢰할 수 없으며 오히려 이 값에 근거하여 폭발의 근원이 된 가연성 가스를 검토한다면 잘못된 감식 및 조사 결과를 도출할 수 있다는 점을 인식하고, 이를 경계해야 할 것으로 사료된다. (㉞)

[참고자료]

- [1] John D. Dehaan, Kirk's Fire Investigation, 6th edition, Pearson Education Inc. pp 78-83. 2007
- [2] 이승훈. 화재조사이론과 실무. 동화기술. p 214. 2009, 이승훈. 화재과학. 동화기술. pp 292-294. 2012