

개방공간에서 수소가스 확산거동

조영도, 김지윤, 최경석, 이종락, 고재욱*, 안범중**
한국가스안전공사
광운대학교*
한국산업기술대학교 화학공학과**

Dispersion of Hydrogen Gas in Open Space

Young-Do Jo, Kyo-Shik Park, Kyoung-Suhk Choi, Jongrark Lee, Jae Wook Ko*, Bum Jong Ahn**
Korea Gas Safety Corporation
Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University*
Department of Chemical Engineering, Korea Polytechnic University**

서론

수소가스는 지구환경문제와 화석에너지의 고갈에 대비한 미래의 에너지 전달체로서 세계 각국에서 관심을 가지고 수소관련 개발에 대하여 많은 연구를 추진하고 있다[1]. 수소가스의 이용 시대가 오기 위해서는 무엇보다도 먼저 안전에 대한 충분한 이해와 기존의 연료시스템과 적어도 동등한 안전성을 확보하여야 한다. 지금까지 선진국에서는 수소생산, 저장 및 이용시스템에 대한 연구는 꾸준히 하여 기술이 어느 정도 축적되고 또한 일부 기술은 상업화를 위하여 연구에 박차를 가하고 있다. 그러나 수소의 안전에 대하여 유럽연합을 중심으로 일부 연구가 진행되었지만, 아직 많은 부분에서 밝혀 지지 않은 상태로 수소가스 이용시스템의 막연한 위험을 누구나 인지하고 있다. 이러한 막연한 위험은 소비자로부터 수소이용시스템의 사용을 꺼려하게 하고, 상업화의 저해요인으로 작용하고 있다. 수소가스의 위험을 해석하기 위하여 먼저 가스 누출원을 해석하고 다음으로 수소가스의 확산, 화재 및 폭발을 해석하여야 한다. 누출원 해석에 대해서는 기존의 석유화학 플랜트 위험평가 기술을 응용하여 해석할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 수소가스의 확산에 대해서는 기존에 사용되고 있는 석유화학 플랜트의 위험성평가 소프트웨어를 이용하기 어려울 것으로 사료된다[2]. 즉 지금까지 확산에 대해서는 크게 가벼운 가스와 무거운 가스로 나누고, 가벼운 가스에 대해서는 단순히 가스농도를 가우스분포로 가정하고 부력에 대한 보정이 이루어 지지 않고 있다. 수소가스는 공기에 비하여 매우 가벼운 물질로서 부력에 의한 수소가스의 상승현상을 고려하지 않고 기존의 가우스 분포모형을 이용하여 화재나 폭발위험을 해석하게 되면 실제 나타나는 위험보다 과대평가될 것이다. 지금까지 확산에 대한 연구는 무거운 가스의 거동에 대하여 이루어지고 매우 가벼운 수소와 같은 가스의 확산거동에 대하여 거의 연구가 이루어져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 대기조건을 고려하여 수소가스의 확산거동을 해석하고자 한다.

대기분산모형

연속방출에 있어서 높이방향으로 농도의 표준편차가 혼합층 높이의 1.6배 보다 작을때

($\sigma_z < 1.6H_m$) 아래식을 이용하여 각 지점에서 농도를 근사적으로 계산 할 수 있다[3].

$$\begin{aligned}
 C(x, y, z, H_E) = & \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \\
 & \times \left\{ \exp\left[-0.5\left(\frac{H_E - z}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{H_E + z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \\
 & + \sum_{i=1}^{N_{mix}} \left\{ \exp\left[-0.5\left(\frac{2iH_m + H_E - z}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{2iH_m - H_E - z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right. \\
 & \left. + \exp\left[-0.5\left(\frac{2iH_m - H_E + z}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{2iH_m + H_E + z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

위 식에서 두 번째 항은 가스운이 지표면으로부터 반사되는 것을 고려한 것이고, 합으로 표현된 세 번째 항은 혼합층의 경계면으로부터 반사되는 것을 고려한 것이다. N_{mix} 는 3에서 4 정도이고 적용시 주의할 점은 풍속이 누출 높이에서의 값이다. 따라서 만약 지상 10m높이의 풍속 데이터가 있으면 높이에 따른 풍속 예측식으로 누출 높이의 풍속을 다시 계산하여야 한다.

혼합층의 높이는 직접 측정할 수 없고 고도에 따른 온도변화로 측정하고 있다. 이는 흐림 정도, 시각, 풍속 등에 의존하며 오전의 경우 400-700미터 정도 이고 오후가 되면 800-2000미터 정도 된다. 일반적으로 수소가스가 누출되어 위험을 해석하기 위해서는 지표면 근처에서의 폭발농도범위까지의 확산거동이 중요하게 되므로 오염물질 방출에 의한 확산해석에서 다루는 것처럼 누출원에서 아주 저 농도의 원거리 해석은 의미가 없다. 따라서 수소가스의 폭발범위는 4%에서 75%이므로 지표면 근방에서 누출원으로부터 근거리에서 관심을 가지게 되면, 혼합층의 높이를 아주 높은 것으로 가정을 할 수 있으므로 혼합층의 효과를 무시하게 되면 위식은 다음과 같이 단순화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 C(x, y, z, H_E) = & \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \\
 & \times \left\{ \exp\left[-0.5\left(\frac{H_E - z}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-0.5\left(\frac{H_E + z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (2)
 \end{aligned}$$

지표면에서 최대농도인 중심선에서의 풍하 방향으로 거리에 따른 농도는 다음식과 같다.

$$C(x, 0, 0; H_E) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-0.5\left(\frac{H_E}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (3)$$

위식에서 분산계수(표준편차)는 누출점으로 부터 거리의 함수이므로 농도는 거리의 함수이다. 식 3의 경우 수소가스의 가벼운 부력에 의하여 농도 중심선이 위쪽으로 상승하는 현상을 고려하고 있지 않다. 수소가스의 경우 실험에 의하여 상온 상압의 조건에서 초당 1.2-9미터 상승하는 것을 NASA에서 실험에 의하여 밝혔다[4]. 수소가스의 상승속도는 공기와의 부력 차에 비례하게 되므로 NASA의 실험결과를 부력에 선형적으로 변하는 것을 고려하여 높이상승속도를 다음 식으로 보정 할 수 있다.

$$h_{corr} = \int_0^t 9C_{max} dt \quad (4)$$

위 식에서 수소가스의 농도는 시간과 기상조건에 따라 변하게 되므로 식 (2)와 동시에 해석하여야 한다. 그리고 수소가스의 최대농도가 되는 지점은 풍하거리를 나타내는 x축 길이에 따라 부력에 의한 상승효과 때문에 고도가 변하게 된다. 따라서 매순간 부력에 의하여 높이 상승효과를 가상의 누출원으로 보정하여 식 (2)와 (3)을 사용 할 수 있다.

$$H_E = H_{E,0} + h_{corr} \quad (5)$$

식 (5)에 의한 누출원 높이 보정 후 풍하방향으로 최대 가스농도는 식 (3)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{max}(x,0,H_E;H_E) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \left(1 + \exp \left[-2 \left(\frac{H_E}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right) \quad (6)$$

확산 거동 해석

시골에서 맑은 날 초당 10m³의 수소가스가 지면에서 연속 누출되는 것을 가정하여 위식들을 이용하여 최대농도의 변화와 높이를 대기 안전도와 풍속에 대하여 살펴보았다. 수소가스는 공기보다 가볍기 때문에 누출 후 부력에 의하여 최대농도가 되는 중심선은 누출원으로 부터 멀어질수록 고도가 증가하다가 일정한 값에 수렴하게 되는 것을 그림 1과 2에서 볼 수 있다. 대기안전도 분류에서 A는 매우 불안정하고, D는 중립이고, G는 매우 안정한 상태이다. 중심선의 고도는 대기안전도와 풍속에 크게 영향을 받으며, 대기가 안정할수록 중심선의 고도는 누출원으로부터 멀어질수록 높아짐을 알 수 있었다. 즉 대기안전도가 증가하게 되면 상하 혼합효과가 줄어들게 되고, 이에 따라 누출된 수소가스는 대기중으로 확산되는 속도가 줄어들고 높은 농도를 유지하게 됨으로 고도가 증가하는 것으로 사료된다. 또한 풍속에 의하여 중심선의 고도는 급격히 감소함을 알 수 있었다. 이는 부력의 에너지와 바람에 의한 운동 에너지의 상관관계에 의하여 형성되는 것이다. 무거운 가스의 확산거동에서 바람에 의한 운동에너지가 부력에 의한 에너지보다 매우 크게 되면 일반적인 가우스분포 모델을 적용하는 것과 마찬가지로 수소가스 확산 거동에서도 운동에너지가 부력에너지보다 매우 크게 되는 부력을 무시하고 일반적인 가우스분포모델을 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 대기가 매우 불안정하고 풍속이 초속 10미터 인 경우 중심선의 최대 높이는 약 3이고,

대기가 안정하고 풍속이 초속 3미터인 경우에는 중심선의 최대높이는 약 70미터 인 것을 알 수 있다. 지면 근방에 점화원이 있는 것을 고려하게 되면, 대기가 불안정하고 풍속이 높은 대기조건에서 수소누출 후 폭발에 대한 위험이 높은 것을 알 수 있었다.

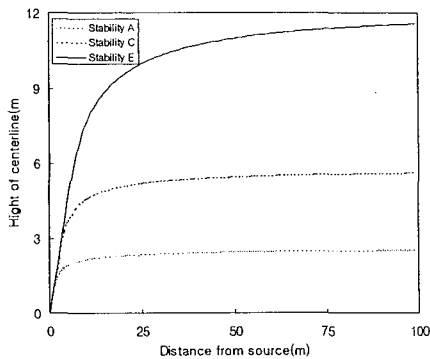


Fig. 1. Hight of centerline with distance from source(PG, U=10m/s)

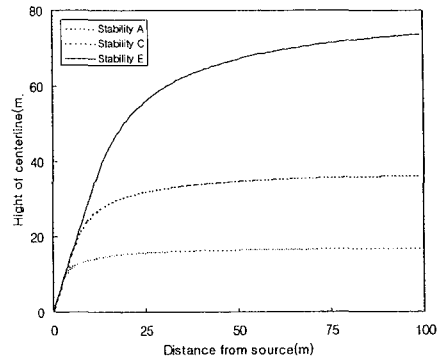


Fig. 2. Hight of centerline with distance from source(PG, U=3 m/s)

결론

대기안정도와 풍속의 변화에 따라 수소가스의 대기확산 확산거동을 살펴보면 대기가 안정하고 풍속이 느릴수록 누출된 수소가스는 하늘 방향으로 멀리까지 확산되어 감을 볼 수 있었다. 또한 수소가스의 부력에 의하여 누출지점으로부터 수 미터만 떨어지게 되면 지면에서의 가스농도는 연소하한범위 이하가 된다. 수소가스의 점화에너지가 타 연료에 비하여 매우 낮지만 누출원 가까이 점화원이 없고, 주변에 고층건물이 없으면 수소가스 누출에 의한 화재·폭발 위험성은 거의 없는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Venetsanos A.G., T. Huld, P. Adams, and J.G. Bartzis, "Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment" *Journal of Hazardous Materials*, **A105**, 1-25, (2003)
2. Schmidt D., U. Krause, and U. Schmidtchen, "Numerical simulation of hydrogen gas releases between buildings", *International Journal of Hydrogen Energy*, **13** 479-488, (1999)
3. Crowl, D. A., and J. L. Louvar, *Chemical Process Safety Fundamentals with Applications*, 2nd ed., New Jersey: Prentice-Hall. 235-265, (2002)
4. National Aeronautics and Space Administration. Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems: Guideline for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation, Office of Safety and Mission Assurance, Washington, 2-21, (1997)