수소가스사고의 피해범위

[†]조영도

한국가스안전공사 가스안전연구원 시스템연구부
(2011년 10월 10일 투고, 2012년 2월 25일 수정, 2월 25일 채택)

Hazard Distance from Hydrogen Accidents

[†]Young-Do Jo

Dept. of Gas Safety R&D Center, Korea Gas Safety Corporation
(Received October 10, 2011; Revised February 25, 2012; Accepted February 25, 2012)

요 약

수소가스의 제트 누출에 의한 확산, 화재, 그리고 폭발에 의한 위험 범위를 분석하고, 안전거리 기준을 설정하기 위한 위험거리를 확산, 화재, 그리고 폭발에 대한 단순한 예측 식들을 제시하였다.

관홀에 의한 누출과 같은 소량 수소가스 누출속도에 있어서 피해거리는 제트누출 확산에 의한 피해거리가 제트화재에 의한 피해거리보다 크며, 압력의 제곱근에 그리고 누출 홀의 직경에 비례하고 이는 수 십 미터에 이른다. 배관의 완전 파손 또는 저장 탱크의 큰 홀 발생과 같은 대량의 수소가스 누출속도에서는 제트화재의 피해거리가 개방공간의 가스운 폭발에 의한 피해거리보다 크며, 수 백 미터에 이른다. 수소충전소와 건물과의 최소이격거리 즉 안전거리 설정 기준을 대량 수소가스누출 사고시나리오를 기반으로 한다면, 도심지에 수소충전소는 안전거리 기준을 만족시키기 어려울 것이다. 따라서 대량의 수소가스 누출사고를 안전장치들을 통하여 예방하고, 안전거리 기준을 소량의 수소가스누출사고 기준으로 설정 할 수 있다. 그러나 대량누출 가능성이 있는 경우 학교와 병원 등 인구밀집 건물은 수 백 미터의 안전거리를 유지하여야 한다.

Abstract - An analysis was completed of the hazards distance of hydrogen accidents such as jet release, jet fire, and vapor cloud explosion(VCE) of hydrogen gas, and simplified equations have been proposed to predict the hazard distances to set up safety distance by the gas dispersion, fire, and explosion following hydrogen gas release.

For a small release rate of hydrogen gas, such as from a pine-hole, the hazard distance from jet dispersion is longer than that from jet fire. The hazard distance is directly proportional to the pressure raised to a half power and to the diameter of hole and up to several tens meters. For a large release rate, such as from full bore rupture of a pipeline or a large hole of storage vessel, the hazard distance from a large jet fire is longer than that from unconfined vapor cloud explosion. The hazard distance from the fire may be up to several hundred meters. Hydrogen filling station in urban area is difficult to compliance with the safety distance criterion, if the accident scenario of large hydrogen gas release is basis for setting up the safety distance, which is minimum separation distance between the station and building. Therefore, the accident of large hydrogen gas release must be prevented by using safety devices and the safety distance may be set based on the small release rate of hydrogen gas. But if there are any possibility of large release, populated building, such as school, hospital etc, should be separated several hundred meters.

Key words : hazard distance, hydrogen jet fire, hydrogen jet dispersion, hydrogen explosion, hydrogen filling station, safe distance

[†]주저자: ydjo@kgs.or.kr

I. 서론

지구환경문제에 대한 기후협약에 의하여 탄소세 부과 등으로 선진국에서는 탄소발생을 억제할 수 있는 차세대의 새로운 에너지 순환 시스템으로 수소를 거론하고 있다. 수소는 친환경적 청정기능 특성뿐만 아니라 다양한 에너지원으로부터 제조 가능하므로 에너지 전달 매개체로 가장 적합한 물질로 인식되어 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 수소에너지에 대하여 최근 매우 활발히 연구를 수행하고 있다. 수소는 다른 탄화수소에 비하여 에너지 저장밀도가 낮고 폭발위험성이 높은 단점을 가지고 있는 물질이므로 에너지 매개체로 활용하기 위하여 무엇보다 우선적으로 안전의 문제점이 해결되어야 한다. 즉 수소 생산 장소에서 분산된 사용 장소까지 경제적인 생산·공급·이용 시스템의 안전성확보가 수소를 에너지 매개체로 사용하는데 있어서 우선적으로 검토되어야 할 문제이다. 따라서 수소 생산·수송·이용에 있어서 대부분 고압의 수소가스 상태로 용기에 저장하고 있으며, 이에 대한 위험성 분석과 사고시나리오에 따른 피해정도 해석기술을 개발하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 고압의 수소저장 시설로부터 가스누출속도, 제트누출현상 해석, 제트화제 피해거리, 그리고 대량의 수소 가스누출에 의한 화재 및 피해범위를 살펴보고자 한다. 수소가스의 경우 점화에너지가 매우 낮기 때문에 대량의 가스누출 될 경우 누출 즉시 즉 수분 내 점화되어 폭발 또는 화재가 발생하고, 소량의 가스 누출이 될 경우 점화되지 않을 가능성이 있으므로 제트누출에 의한 수소가스의 농도 분포해석이 필요하다[1]. 이를 통하여 도심지에 설치될 수소 충전소 등의 시설에 대한 안전거리 설정의 개념적 접근방법을 살펴보고자 한다.

II. 누출속도 해석

용기내부 수소가스를 이상기체로 가정하여 누출을 통해 누출될 경우, 시간에 따른 누출속도 변화를 다음식과 같이 유도 할 수 있다.

이상기체의 등 엔트로피 팽창에 대하여 수소 저장상태의 밀도와 온도가 누출순간 압력 변화에 의하여 변하는 관계는 아래식과 같다.

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (1)$$

$$T = T_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2)$$

상기 식에서 아래첨자 0는 초기상태를 나타내고, p 는 압력, T 는 절대 온도를 나타내고 γ 는 비열비를 나타낸다.

저장 상태와 누출 홀에서 누출될 때의 에너지 수지식은 다음과 같다[2].

$$\int_{p_0}^p \frac{\delta p}{\rho} + \frac{1}{2}(u_e^2 - u_0^2) = 0 \quad (3)$$

위 식에서 u 는 가스의 흐름 속도를 나타낸다. 수소저장 상태에서 운동에너지가 없기 때문에 u_0 는 0이 되고, 밀도 식을 위 (1)식에 대입하여 적분하면 아래식과 같이 누출 홀에서 속도를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_e^2 &= 2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left(1 - \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \\ &= 2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left(1 - \frac{T_e}{T_0} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

누출속도를 단순히 마하수(Me)에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$u_e^2 = a_e^2 M_e^2 = M_e^2 \frac{\gamma R T_e}{M w} \quad (5)$$

위 (4)식과 (5)식에서 속도 항을 제거하고 이상기체 법칙을 적용하여 가스누출 직후 온도와 압력을 초기 저장상태의 조건과 마하수로 표현하면 다음과 같다.

$$p_e = p_0 \left(\frac{2}{(\gamma-1)M_e^2 + 2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (6)$$

$$T_e = T_0 \left(\frac{2}{(\gamma-1)M_e^2 + 2} \right) \quad (7)$$

수소가스는 대부분 2기압 이상 고압으로 저장되어 있으므로 가스누출속도는 음속이다. 따라서 마하수를 1로 가정하여 누출속도와 누출 후 상태를 다음과 같이 단순화 할 수 있다.

$$p_e = p_0 \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (8)$$

$$T_e = T_0 \left(\frac{2}{\gamma+1} \right) \quad (9)$$

$$u_e^2 = \frac{\gamma R T_e}{M u} \quad (10)$$

누출 홀을 통하여 질량 누출속도는 가스누출속도에 누출 홀의 단면적과 밀도를 곱하여 구할 수 있다.

$$\dot{m} = \frac{\pi d^2}{4} \rho_e u_e \quad (11)$$

III. 피해범위

3.1. 수소가스 제트누출

수소가스가 누출될 때 누출 스트립 라인을 따라서 누출 홀로부터 거리가 증가할수록 농도는 감소하게 된다. 수소가스의 연소한계 농도는 4%~75%로 알려져 있으며, 만약 연소한계 내에 건물 등이 있는 경우에는 건물 내부로 가연성 수소가스가 침투하여 폭발사고를 유발할 수 있다. 따라서 연소범위 내에 시설물이 있으면 위험하기 때문에 하나의 안전거리 설정의 기준으로 수소 제트누출에 의한 누출방향으로 가스농도 변화를 분석하는 것이 중요하다. 일반적으로 수소가스의 연소 하한농도는 4%로 알려져 있지만, 4%에서 사고발생 가능성이 매우 희박하며 적어도 8%이상의 수소농가가 되어야 폭발사고를 유발할 수 있다. 즉 8%이하의 농도에서는 화염의 전파가 상부로 일어나고 하부로는 전파되지 않기 때문에 급격한 난류를 형성하지 않는 한 폭발사고를 유발하기 어렵다.

제트누출에 대한 누출방향으로 수소가스의 농도 변화는 다음 식으로부터 구할 수 있다[3].

$$C_x = k \frac{d_{hole}}{x} \left(\frac{\rho_{hole}}{\rho_{\infty}} \right)^{1/2} \quad (12)$$

여기서 C_x 는 수소가스의 농도의 질량 분율이고, x 는 누출 홀로부터 누출방향으로 거리, k 는 비례상수, d_{hole} 은 누출 홀의 직경, ρ_{∞} 은 공기의 밀도, ρ_{hole} 은 누출 홀에서 밀도를 나타낸다. 상기 비례상수 k 는 문헌에 발표된 자료를 바탕으로 구할 수 있다.

Table 1은 문헌에 발표된 제트누출에 의한 누출 방향으로 농도 감쇄를 나타내었다[4]. 식 (12)에서 x 축을 질량 가스농도와 y 축을 식 (12)의 오른쪽 무차원 그룹과 비례상수 k 를 5.4로 하여 계산한 자료와 문헌에 발표된 실험 자료를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1

Table 1. Cocentration of hydrogen with axial distance

Concentration (wt%)	$\frac{d_{hole}}{x} \left(\frac{\rho_{hole}}{\rho_{\infty}} \right)^{1/2}$
0.0039	0.001167
0.0071	0.003501
0.0007	0.000278
0.0015	0.000833
0.0040	0.001033
0.0072	0.002067
0.0036	0.000881
0.0049	0.001323
0.0038	0.000993
0.0070	0.001985
0.0007	0.000417
0.0057	0.001471
0.0003	0.000128
0.0008	0.000169
0.0006	0.000256
0.0014	0.000476
0.0008	0.000312
0.0036	0.001081
0.0198	0.00899
0.0010	0.000417
0.0022	0.000833
0.0078	0.002083
0.0072	0.003026
0.0100	0.004035
0.0036	0.001379
0.0315	0.006884
0.0014	0.00077
0.0096	0.002312
0.0019	0.000549
0.0076	0.002013
0.0025	0.000681
0.0253	0.00788
0.0031	0.000842
0.0389	0.011089

Fig. 1. Axial hydrogen concentration of Eq. (12) against experimental data($k=5.4$)

에서 볼 수 있듯이 수소가스의 경우 비례상수는 약 5.4로 할 경우 실험값에 비하여 보수적으로 연소한 계 농도까지 거리를 예측 할 수 있다.

비례상수를 5.4로 하고, 대기조건을 온도는 298K, 압력은 1기압으로 가정하여 상기 (12)식을 정리하면 다음과 같다.

$$C_x = 5.4 \frac{d_{hole}}{x} \left(\frac{2 \times 298 \times P_e}{29 \times T_e} \right)^{1/2} \quad (13)$$

누출 홀에서의 온도 및 압력을 저장수소의 온도와 압력으로 치환하고, 수소의 폭발하한농도에서 수소의 질량 분율은 0.0287이므로, 이 값을 대입하고, 수소의 비열비를 1.4로 가정하는 경우 폭발하한농도까지 거리를 나타내면 다음 식과 같다.

$$x = 10.84 d_{hole} \left(\frac{P_0}{T_0} \right)^{1/2} \quad (14)$$

여기서 온도는 절대온도이고, 압력은 기압(Pa)이고, 누출 홀의 직경은 m단위 이다.

위 식 (14)에서 알 수 있듯이 제트누출에 의한 피해거리는 누출 홀 크기에 직접 비례하고, 수소가스의 저장압력의 제곱근에 비례하고, 수소가스의 저장 절대온도의 제곱근에 반비례한다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 수소가스 사용시설 또는 저장시설에서 편환이 발생하는 경우 제트누출에 의한 안전거리는 사고 시나리오 즉 저장압력과 편환 직경에 따라 수 미터에서 수 십 미터에 이르는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2. Hazard distance from jet hydrogen release.

3.2. 수소가스 제트화염 길이

수소화염의 길이는 가스누출속도, 누출 홀 크기에 영향을 받게 된다. 최근 연구결과에 의하면 수소 가스 화염의 길이는 다음 식으로 예측 할 수 있다 [4].

$$L_f = 54 (\dot{m}_{hole} \cdot d_{hole})^{0.312} \quad (15)$$

여기서 $\dot{m}_{hole}$ 은 누출 홀에서 수소가스의 질량 누출속도를 나타낸다.

식 (8), (9), (10), 그리고 (11)을 이용하여 가스의 질량누출 속도를 가스의 저장조건으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$\dot{m} = \frac{\pi d^2 P_0}{4} \sqrt{\frac{\gamma M_w}{R T_0} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (16)$$

위 질량누출속도를 식 (15)에 대입하여 화염의 길이를 구하면 다음식과 같다.

$$L_f = 54 \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\gamma M_w}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right]^{0.312} \left[\frac{d^2 P_0}{\sqrt{T_0}} \right]^{0.312} \quad (17)$$

식 (17)에 비열비를 1.4, 기체상수를 0.082, 그리고 분자량을 2로 대입하여 수소가스 누출에 의한 제트 화재의 길이를 단순한 수식으로 나타내면 다음과 같다.

Fig. 3. Hazard distance from jet fire of hydrogen gas in air.

$$L_f = 73.22 \left[\frac{d^2 P_0}{\sqrt{T_0}} \right]^{0.312} \quad (18)$$

298 K에 저장되어 있는 수소가스가 핀홀에서 누출되어 점화될 때 제트화재의 길이를 핀홀의 크기와 저장압력에 대하여 나타내면 Fig. 3과 같다.

수소가스 누출에 의한 연소하한 농도까지의 거리와 수소제트화재의 길이를 비교하면 Fig. 4에 나타난 것과 같다.

식 (14)와 식 (18)을 비교하여 보면 압력 증가에 따른 피해거리의 증가 폭이 제트화재의 경우가 연소하한 농도까지 거리보다 급속히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 수소시설의 핀홀에 의한 피해거리는 항상 제트 화재에 의한 피해거리 보다 제트누출에 의한 연소 하한계 농도까지 도달하는 거리가 크다. 따라서 수소가스 시설의 핀홀 발생에 의한 피해거리는 연소하한 농도까지 거리로 예측할 수 있다.

3.3. 대형 수소가스 화재 피해범위

저장시설의 배관 등의 완전 파손에 의하여 대량의 수소가스 누출에 의한 화재피해거리는 수 백 미터에 이르므로 예측 식을 단순화하기 위하여 화재원을 점으로 해석하여 다음식과 같이 피해거리를 산출할 수 있다. 화재의 피해거리는 사람이 30초간 복사열을 받았을 때 1%사망 확률을 갖는 거리 또는 30분간 복사열을 받았을 때 목조건물이 점화되는 거리인 복사열 강도가 15 kW/m^2 인 거리를 나타낸다[5].

$$r_{fire} = 0.24d \sqrt{p_0} \quad (19)$$

Fig. 4. Comparing the hazard distance from jet release and jet fire of hydrogen.

Fig. 5. Hazard distance from large fire of hydrogen.

여기서 d 는 누출 홀의 크기로 단위는 m이고, P_0 는 수소가스 저장 압력으로 단위는 Pa이다.

수소가스의 대량누출에 의한 화재 피해범위는 식 (19)에서 볼 수 있듯이 압력의 제곱근에 비례하고 누출 홀의 직경에 비례하며, Fig. 5.에서 볼 수 있듯이 그 피해거리는 수 백 미터에 달한다. 따라서 수소시설의 배관 등이 완전 파손되어 점화되면 그 피해가 매우 큰 것을 알 수 있다.

3.4. 폭발 피해범위

고압의 저장수소가 개방공간에 순간적으로 누출되어 큰 가스폭발 분위기의 가스운을 형성하여 폭발

Fig. 6. Hazard distance from VCE of hydrogen.

사고가 발생할 수 있다. 개방공간에서 가스누출 수소에 의하여 형성되는 폭발농도 범위에 있는 가스운의 크기는 초기 10초 동안 난류 누출에 의하여 증가하다가 시간에 따라서 일정한 양으로 감소하게 된다. 따라서 10초간 수소가스 누출량을 기준으로 TNT상당량을 산출하고, 수소가스운의 폭발에 의한 최대 폭발압력 해석을 통하여 건물이 붕괴하는 21.3kPa의 거리를 구하면 다음식과 같다[5].

$$r_{\text{expl}} = 1.58d^{\frac{2}{3}}p_0^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

위 식에서 볼 수 있듯이 수소가스 저장 압력의 1/3 승에 비례하고, 누출 홀의 2/3승에 비례하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 폭발 피해도 화재 피해와 마찬가지로 피해거리가 조건에 따라서 수 백 미터에 이르는 것을 볼 수 있다. 고압으로 저장된 수소가스의 경우 화재 피해와 비교하면 대부분 폭발피해 범위가 작다는 것을 알 수 있다. 핀홀 등에 의한 소량의 가스 누출시 폭발하한농도까지 거리를 나타내는 식 (14)와 대형화재의 피해거리를 나타내는 식 (19)를 비교하여 보면 항상 식 (14)로 계산한 피해거리가 크다는 것을 알 수 있다.

수소의 경우 점화 에너지가 매우 작기 때문에 대량의 가스가 누출되는 경우 점화되어 화재나 폭발이 발생할 가능성이 매우 높고[1], 핀홀 등에 의하여 소량의 가스가 누출된 경우 누출된 가스에 즉시 점화되지 않을 수 있다. 따라서 수소가스의 피해범위를 산출할 때 핀홀 등에 의한 피해거리는 식 (14)로부터 예측할 수 있고, 배관 완전파손 등의 대량의 수소가

스가 누출 될 경우 식 (19)로 피해거리를 예측 할 수 있다.

충전소와 같이 도심지에 설치되어야 하는 시설의 경우 대량의 가스누출 사고시나리오를 가정하여 안전거리를 설정하게 되면 수백 미터에 달하므로 현실성이 없게 된다. 이와 같이 도심지에 설치되는 충전소의 경우 대량의 수소가스 누출을 예방하기 위한 안전장치 또는 시스템 설계가 근본적으로 이루어진 다음 핀홀 등의 소량누출 시나리오에 의한 안전거리 설정이 바람직 할 것으로 사료된다. 그러나 안전장치와 시스템이 대량의 가스누출을 근본적으로 예방할 수 없는 경우에서 사고 발생 가능성을 가능한 낮추고 학교, 병원 등의 1종 보호시설은 충분한 안전거리를 유지하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 고압의 수소저장 시설로부터 가스누출속도, 제트누출현상 해석, 제트화재 피해거리, 그리고 대량의 수소 가스누출에 의한 화재 및 피해범위를 살펴보았다.

핀홀 등 소량의 가스누출이 발생할 경우 화재, 폭발, 그리고 제트누출에 의한 연소하한농도까지 거리를 비교하여 보면, 제트누출에 의한 연소하한농도까지 거리가 가장 크게 나타난다. 따라서 고압의 수소 시설로부터 소량의 가스누출이 발생할 경우 피해거리는 수 십 미터에 이를 수 있으며, 시설의 운전압력의 제곱근에 비례하는 것을 알 수 있다. 그리고 대량의 가스 누출이 발생하여 화재 또는 폭발이 발생할 때 피해범위는 폭발에 비하여 화재 피해범위가 큰 것을 알 수 있었다. 수소시설의 배관 완전파손 등 대량의 수소가스가 누출 될 경우 피해거리가 수 백 미터에 달 할 수 있다. 따라서 수소 충전소와 같이 도심지에 설치되어야 하는 시설의 경우 배관 완전파손 등의 대량의 가스누출 사고시나리오를 가정하여 안전거리를 설정하는 것은 현실성이 없게 된다. 도심지에 설치되는 수소가스 충전소의 경우 대량의 수소가스 누출을 예방하기 위한 안전장치 또는 시스템 설계가 근본적으로 이루어져 위험발생 빈도가 허용수준이 될 수 있게 한 다음, 연결부 또는 핀홀 등에서 발생하는 소량누출 시나리오에 근거하여 충전소의 안전거리 설정이 바람직 할 것으로 사료된다. 그러나 대량의 가스누출을 근본적으로 예방 할 수 없는 경우에는 학교, 병원 등의 1종 보호시설과는 화재피해 범위인 수 백 미터까지 충분한 안전거리를 유지하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Crowl, D. A. and Jo, Y-D., "The hazards and risk of hydrogen" *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **20**, 158-164, (2007)
- [2] Jo Y-D. and Ahn B.J., "A simple model for the release rate of hazardous gas from a hole on high pressure pipeline", *J. of Hazardous Materials*, **97(1-3)**, 31-46, (2003)
- [3] Jo Y-D. and Ahn B.J., "Analysis of Hazard Area Associated with High Pressure Natural Gas Pipeline", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **15**, 179-188, (2002)
- [4] Saffers, J.-B. Molokov, V. V., "Towards hydrogen safety engineering for reacting and non-reacting hydrogen releases", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **xx**, 1-7, (2011)
- [5] Jo Y-D. and Ahn B.J., "Analysis of Hazard Area Associated with Hydrogen Gas Transmission Pipelines", *International Journal of Hydrogen Energy* **31(14)** 2122-2130, (2006)