한국에너지공학회(2003년도)
추계 학술발표회 논문집 P117-120

가스폭발 사고 예방을 위한 벤트 속도

조영도, 박교식, 고재욱*
한국가스안전공사 가스안전기술개발원
광운대학교 화학공학과*

Ventilation Rate to prevent Gas Explosion

Young-Do Jo, Kyo-Shik Park, and Jae Wook Ko*
Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation
Dept. Of Chemical Engineering, Kwangwoon University*

서 론

일반적으로 탄화수소가 양론비로 균일하게 혼합되어 있을 때 일정한 부피에서 폭발압력은 10기압 정도이며, 이는 대부분의 건물을 충분히 붕괴할 수 있는 압력이다. 가스운 폭발에서 구조물의 피해정도는 최대압력과 임펄스에 영향을 받지만, 최대압력이 약 0.21기압에서 구조물이 완전히 붕괴되는 것으로 알려져 있다. 밀폐공간의 가스폭발 사고에서 도달할 수 있는 최대압력은 유리창 또는 문의 파손으로 배기 되는 가스 때문에 완전히 밀폐된 공간으로 계산한 압력보다 매우 낮을 것이다. 그러나 밀폐공간에서 양론비의 가스가 폭발하는 경우 건물의 붕괴압력보다 약 50배정도 된다. 따라서 창문이나 문의 면적이 실내공간 부피에 비하여 작은 경우 가스폭발에 의하여 건물이 충분히 붕괴될 뿐만 아니라 건물의 파편이 멀리까지 영향을 미칠 수 있다고 예측하는 것은 타당할 것이다.

가스폭발 사고피해 정도는 밀폐공간 내에 있는 구조물, 가스농도분포, 점화원의 위치 등 여러 가지 조건에 영향을 받기 때문에 이러한 것들을 모두 고려하여 폭발위험을 해석하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 엔지니어링 관점에서 가스폭발사고를 예방하기 위하여 벤트 속도에 대하여 살펴보고자 한다.

이론 및 고찰

지금까지는 가스폭발이 일어나기 위한 최소한의 누출량을 실내의 가스농도가 폭발하한계로 균일하게 있는 것으로 가정하여 예측하는 방법이 가장 일반적으로 사용하였다. 이러한 방법을 여기서는 단순히 LFL폭발모델로 표현하였다. LFL폭발모델에서 예측한 최소의 가스누출량에서 폭발이 일어나도 최악의 경우 폭발압력이 약 5-6기압 정도 되므로 여전히 건물을 완전히 붕괴되는 0.21기압보다 매우 높은 압력이다. 따라서 가스폭발에서 최소의 가스누출량을 예측하기 위하여 실내에 누출된 가스의 불 균일성을 고려할 필요가 있다. 밀폐된 공간에서 누출된 가스가 완전히 양론비의 고립된 가스운을 형성하여 폭발 후 단열혼합으로 가정하여 폭발압력을 예측하는 단열혼합모델과 이를 보완하여 가우스분포 모델이 제시되어 있다[1]. 본 연구에서는 가우스분포모델의 이론적 정립과 이를 이용하여 폭발사고를 방지하기 위한 벤트 속도를 살펴보고자 한다.

단열혼합모델은 가연성 가스의 누출속도가 충분히 커서 주변공기와 혼합되어 양론비로 섞인 가스가 고립되어 있고, 이 고립된 가스가 일정한 부피에서 폭발 최대압까지 상승한 다음 단열 팽창되는 것으로 가정하여 밀폐공간의 폭발압력을 구하는 것이다. 즉 밀폐공간의 부피를 V로하고, 양론비의 농도로 고립된 가스의 부피를 V'로 하면, 폭발 후 최종도달압력은 식 (1)과 같다.

$$P=\frac{1}{V}[P_a(V-V')+P_E V'] \quad (1)$$

여기서 Pa는 대기압이고, P_E는 양론비의 가연성 가스가 일정한 부피에서 폭발할 때 발생하는 압력이다.

일반적으로 실내에 누출된 가스는 양론비로 섞여 고립되어 있는 것이 아니라 대부분의 경우가 일정한 농도 분포를 가지고 있을 것이다. 가벼운 가스의 경우 밀폐공간의 천정에 가장 높은 농도가 형성되고, 무거운 가스의 경우 바닥에 가장 높은 농도가 형성된다. 일반적으로 가스의 농도는 가우스분포를 가지게 되므로 다음 식과 같이 농도분포를 나타낼 수 있다.

$$\overline{C}=\frac{e^{-k(\overline{x})^2}+\sum_{i=1}^{\infty}\left(e^{-k(2i-\overline{x})^2}+e^{-k(2i+\overline{x})^2}\right)}{1+2\sum_{i=1}^{\infty}e^{-4ki^2}} \tag{2}$$

여기서 $\overline{C}$는 무차원으로 밀폐공간에 형성되는 최고 농도로 스케일화된 농도를 나타내고, $\overline{x}$는 밀폐공간의 높이로 나눈 무차원화된 길이를 나타낸다.

그림 1은 메탄가스가 밀폐공간에 부피비로 4% 누출되었을 때 파라미터 k값에 따라서 형성되는 연소범위의 부피 변화를 보여준다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 천정의 가스농도가 연소 상한농도인 15%에 도달할 때 연소범위에 속하는 누출된 가스 분율이 최대가 된다. 이때 누출된 가스 중에서 연소범위에 속하는 가스 분율은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\omega_{\max}=Erf\left[\sqrt{\ln\left(\frac{C_{UFL}}{C_{LFL}}\right)}\right] \tag{3}$$

여기서 Erf는 에라 함수를 나타낸다.

식 (3)을 만족 할 때의 분포함수의 파라미터인 k값은 다음과 같다.

$$k=\pi\left(\frac{C_{UFL}}{2C_{av}}\right)^2 \tag{4}$$

식 (2)로부터 가스농도 분포에 따라 총 가스 누출량에 대한 연소범위에 있는 가스 분율은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\omega \approx Erf\left[Re\left[\sqrt{\ln\left(\frac{C_0}{C_{LFL}}\right)}\right]\right]-Erf\left[Re\left[\sqrt{\ln\left(\frac{C_0}{C_{UFL}}\right)}\right]\right] \tag{5}$$

폭발한계 농도에 있는 부피가 연소되어 단열 팽창하는 것으로 가정하여 폭발최대 압력을 구하는 방법으로 식 (1)을 보정하여 나타내면 다음과 같다.

$$P=P_a(1-\omega\phi)+P_E\omega\phi \tag{6}$$

여기서 ϕ는 밀폐공간의 부피에 대한 누출가스의 부피비율 이다.

가스폭발이 일어나면 폭발 최대압력에 따라 건물 및 인명피해의 정도가 변하게 된다. 폭발압력이 0.03 bar 이상이 되면 유리창이 깨어지는 등 건물에 피해가 발생하게된다. 밀폐공간에서 폭발이 일어나기 위한 최소의 가스 누출양은 식 (3)과 (6)으로 부터 구할 수 있다. 그러나 이와 같이 구한 폭발위험이 있는 최소의 가스 누출양은 매우 극심한 불균일 농도를 가정한 것으로 가스폭발 사고조사 등에 응용하기보다는 가스안전기기 개발에서 허용가스누출양의 기준으로 활용 가능할 것으로 사료된다.

실재 밀폐공간에서 가스 누출이 발생할 경우에 누출조건, 가스의 밀도, 그리고 누출시간 등에 의하여 불균일 정도가 결정된다. 그리고 일반적으로 밀폐공간에서 폭발범위의 가스농도가 형성되는 경우 최대농도에 관계없이 가스폭발 위험이 존재하게된다. 이때 가스폭발을 일으킬 수 있는 최소 가스농도는 식 (4)로부터 구할 수 있다.

$$C_{av}=0.5\sqrt{\frac{\pi}{k}}\,C_{LFL} \tag{7}$$

위 식은 벽의 효과를 무시하고 간략하게 유도한 것이지만, 가우스분포의 파라미터인 k값이 1보다 큰 경우 그림 2에서 볼 수 있듯이 사용할 수 있다.

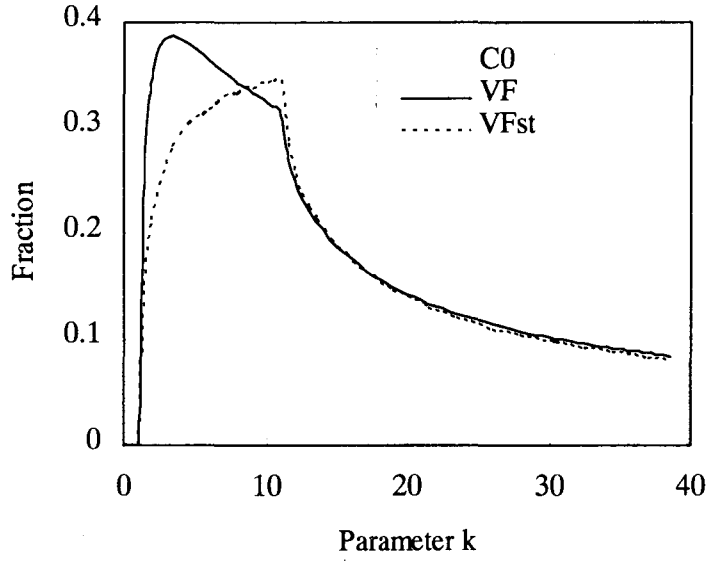

Figure 1. Change of explosion volume fraction with parameter k of the Gaussian distribution

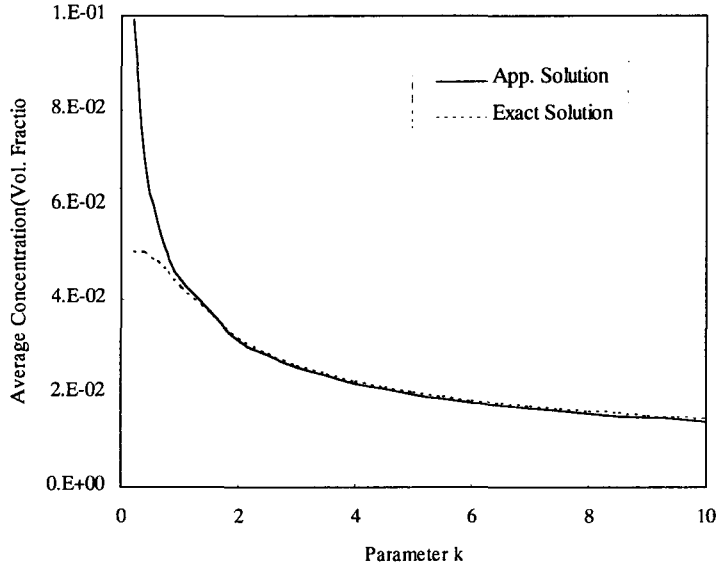

Figure 8. Comparing the approximated solution and exact solution of average concentration for catastrophic damage with methane

대부분의 경우 가우스분포의 파라미터 k값이 10보다 적은 값을 가진다. 실내가스폭발 위험은 최소연소한계농도의 28% 이상이 되면 폭발 위험이 있다. 따라서 안전율을 고려하여 밀폐공간의 환기율은 가스농도가 최소연소한계농도의 10%가 되도록 하는 것이 바람직하다. 빌딩의 자연 환기율은 0.3~2.0/h이므로 최악의 상황을 가정하여 천연가스의 최소누출속도를 구하면 다음과 같다.

$$v_{min} = 2.2 \times 10^{-6} V \quad (8)$$

여기서 V는 건물의 부피를 나타낸다.

결 론

가우스분포모델은 밀폐공간의 가스폭발 현상에서 기존의 LFL모델과 단열혼합모델의 단점을 보완할 수 있고, 또한 밀폐공간에 가스폭발사고를 일으킬 수 있는 최소 가스 누출량을 예측할 수 있다. 가스농도분포에 따라 매우 적은 양의 가스누출이 심각한 폭발사고를 발생시킬 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 밀폐공간에서 폭발사고를 예방하기 위하여 가연성가스 농도를 폭발하한농도의 10% 이하가 되도록 환기하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. Lee, F. P., "Loss Prevention in the Process Industries" 2nd Edition, Volum2 2, Butterworth-Heinemann, Oxford, p. 17/32 and 17/37-38(1996)
2. Center for Chemical Process Safety(CCPS), "Guideline for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosion and Fire" American Institute of Chemical Engineer, New York, p. 40(1996)
3. Jo, Y. D., et. al., "A Study on the Improvement of Simulator for the Effect of Indoor Gas Explosion" KOGAS(1999)
4. Bjerketvedt, D., Bakke, J. R., and Wingerden, K. V., "Gas Explosion Hand Book" J. of hazardous materials 52, 1-150(1997)
5. Jo, Y. D., "A Study on the Minimum Safe Separation Distance from LPG Filling Station" KIGAS Vol. 3, No. 2, July, p. 24(1999)
6. Oh, K. H., Kim, H., Rhie, K. W., Kim, J. B., Lee, S. E., Kim, S. S., and Jo, Y., D., "A study on the pressure behavior of vented gas explosion" 1st conference of association of Korean-Japanese safety engineering society, November 22-24 (1999)