



밀폐공간에서 메탄 폭발사고의 최소 가스누출량 예측

†조영도

한국가스안전공사

(2017년 7월 05일 접수, 2017년 8월 21일 수정, 2017년 8월 22일 채택)

Estimate Minimum Amount of Methane for Explosion in a Confined Space

†Young-Do Jo

*Korea Gas Safety Corporation, 1390 Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseng-gun,
Chungcheongbuk-do, Korea*

(Received July 5, 2017; Revised August 21, 2017; Accepted August 22, 2017)

요 약

밀폐된 거주공간에서 주성분이 메탄으로 이루어진 천연가스 누출은 가연성 분위기를 형성여 폭발사고로 이어진다. 밀폐공간에서 폭발을 일으키기 위한 최소 메탄 누출량은 혼합정도에 크게 의존한다. 본 논문에서는 가우스분포모델과 폭발실험에 근거하여 폭발 사고가 발생할 수 있는 최소한의 메탄 누출량을 예측하기 위한 방법을 제시하고자 한다. 밀폐공간에서 높이에 따라 가연성가스의 농도분포는 가우스분포를 가지는 것을 가정하여 연소범위에 있는 가스의 최대량을 예측하고, 일정한 부피에서 예측된 가스가 연소되어 단일 또는 등은 혼합과정을 통하여 최종 폭발압력을 예측할 수 있다. 폭발사고에 의한 건물의 피해 정도에 대응하는 최소가스 누출량을 예측할 수 있다. 연구결과 건물 내 밀폐공간에서 아주 적은 양의 메탄가스가 누출되어도 심각한 폭발 사고를 일으킬 수 있다. 이는 안전장치 개발에 있어서 적절한 조치를 취하기 전에 최소허용 가스 누출량을 설정하는 것에 유용하게 사용될 수 있을 뿐 만 아니라 폭발사고 조사에도 활용 될 수 있다.

Abstract - Leaking of natural gas, which is mostly methane, in a confined living space creates flammable atmosphere and gives rise to explosion accident. The minimum amount of leaked methane for explosion is highly dependent on the degree of mixing in the confined space. This paper proposes a method for estimating minimum amount of flammable gas for explosion by using Gaussian distribution explosion model(GDEM) and experimental explosion data. The explosion pressure in the confined space can be estimated by assuming the Gaussian distribution of flammable gas along the height of an enclosure and estimating the maximum amount of gas within flammable limits, combustion of the estimated gas with constant volume and adiabatic or isothermal mixing in the confined space. The predicted minimum gas amount for an explosion is tied to explosion pressure that results in a given building damage level. The result shows that very small amount of methane leaking in the confined space may results in a serious gas explosion accident. This result could be applied not only to setting the leak criteria for developing a gas safety appliance but also to accident investigating of explosion.

Key words : gas explosion, accident investigation, natural gas, confined explosion

†Corresponding author: ydjo@kgs.or.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

지금까지는 가스폭발이 일어나기 위한 최소 누출량은 실내에 폭발하한계 농도로 균일하게 있는 것으로 가정하여 예측한 양을 지금까지 일반적으로 사용하였다. 이러한 예측 방법을 여기서는 단순히 연소하한계(LFL)폭발모델로 표현하였다. LFL폭발모델에서 예측한 최소의 가스누출량에서 폭발로 발생하는 압력은 약 5-6기압 정도에 달한다[1, 2]. 이는 건물이 완전히 붕괴되는 0.21기압보다 매우 높은 압력이다. 실제 가정집에 공급되는 천연가스의 누출에 있어서 주방의 싱크대 등에 의하여 고립된 폭발분위기의 가연성가스운이 형성될 수 있을 뿐만 아니라 실내에 누출된 가스의 불균일성을 고려해야 한다. 따라서 누출된 가연성가스의 고립 또는 불균일성을 고려하여 건물에 피해를 미치는 폭발압력 해석으로 해야 한다.

밀폐공간에서 폭발에 의한 피해를 유발할 수 있는 최소가스 누출량의 예측은 가정집 안전장치인 마이크로미터 개발에서 유량감시에 의한 안전 장치의 값의 기준으로 매우 유용하게 사용할 수 있다. 이에 대한 지금까지 제시된 모델은 누출된 가연성가스가 당량비의 균일한 농도의 고립된 가스운을 형성한 다음 일정 부피에서 폭발한 후 등온팽창과 단열과정에 의하여 혼합되는 모델이 제시되었다[3].

본 연구에서는 앞에서 제시된 모델을 일반화 하여 균일한 임의의 농도로 고립된 가연성 가스운을 형성한 다음 등온 또는 단열과정을 통하여 혼합되는 과정을 거쳐 건물에 피해를 유발할 수 있는 최악의 사고시나리오를 고찰하고, 이에 따라 현재 가정용 연료로 가장 많이 사용되고 있는 메탄에 대하여 건물의 폭발피해정도에 따른 최소 가스누출량을 제시하고자 한다.

II. 밀폐공간에서 폭발모델

밀폐된 공간에서 누출된 가스가 임의의 균일농도로 고립된 가스운을 형성한 다음 폭발 후 혼합 과정으로 가정하여 폭발압력을 예측할 수 있다.

1999년에 밀폐된 공간에서 폭발해석을 위한 가우

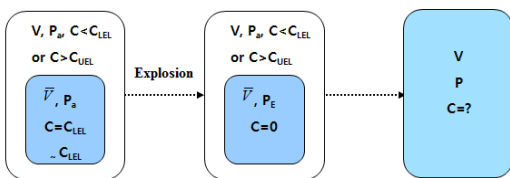


Fig. 1. Explosion model in a confined space.

스분포 폭발해석 모델이 발표되었다[3]. 가우스분포 폭발해석 모델을 확장하고 단순화하여 본 모델은 Fig. 1과 같이 일부 고립된 공간에서 가연성가스의 누출속도가 충분히 커서 주변공기와 혼합되어 임의의 균일농도로 섞인 가스가 밀폐공간 내에 고립되어 있고, 이 고립된 가스가 일정한 부피에서 연소되어 폭발 최대압까지 상승한 다음 연소 가스는 팽창하고 주변 공기는 압축되는 등온과정을 가정하여 밀폐공간의 메탄 가스 폭발압력을 구할 수 있다. 즉 밀폐공간의 부피를 V로하고, 임의의 농도로 고립된 가스의 부피를 V'로 하면, 폭발 후 최종도달압력은 식 (1)과 같다.

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

여기서, V는 밀폐공간 부피, V'는 임의의 고립된 균일농도의 메탄-공기 혼합기체 부피, P_a는 대기압이고, 그리고 P_E는 임의의 메탄농도(C)의 메탄가스가 일정한 부피에서 폭발할 때 발생하는 압력이다. 이와 같이 밀폐공간에서 연소된 가스의 등온팽창으로 가정된 모델을 등온팽창폭발모델로 나타내었다.

등온폭발모델은 연소 후 등온팽창으로 가정하여 최종 폭발압력을 계산할 수 있지만, 실제 현상에서는 외부로부터 열 전달속도와 팽창속도를 고려하면 등온팽창과 단열팽창의 중간정도의 과정을 거쳐 최종압력이 형성될 것으로 예상된다. 극한 조건인 단열팽창과정을 가정한 것을 본 연구에서는 단열팽창폭발 모델로 나타내었다.

단열팽창에서 부피와 압력변화 관계는 식 (1)로부터 다음 관계식이 성립한다[3].

$$\frac{V_0}{V} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \tag{2}$$

여기서 V와 V₀는 임의의 부피와 초기 부피를 나타내고, p와 p₀는 임의의 압력과 초기 압력을 나타낸다. 그리고 γ는 메탄의 비열비를 나타낸다.

최대 폭발압력은 단열팽창 과정의 압력-온도 관계식 (2)를 이용하여 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$V = V' \left(\frac{P_E}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma_b}} + (V - V') \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\gamma_{air}}} \tag{3}$$

여기서 γ_b는 연소가스의 비열비이고 γ_{air}는 공기의 비열비이다.

다음 절에서 메탄이 공기 중에 누출되었을 때 균일한 농도로 가정하여 최대 폭발압력과 불균일 농도를 고려한 등온팽창폭발모델과 단일팽창폭발모델을 살펴보고자 한다.

III. 메탄 누출에 의한 최대 폭발압력

앞에서 제시한 폭발 모델의 신뢰성 분석은 등온팽창으로 가정한 것의 타당성과 폭발실험 데이터를 이용하여 최악의 폭발피해를 동반할 수 있는 고립된 메탄-공기 혼합 가스의 농도조건을 밝히고자 한다. 20리터 구형 폭발 반응기로 메탄-공기 혼합가스의 폭발실험을 수행하였다. 모든 실험은 상온·상압에서 수행하였으며, 반응기 내부의 연소생성물을 제거하기 위하여 고순도 질소로 여러 번 진공·가압 퍼지 한 다음 고순도 산소 및 고순도 수소 가스를 반응기에 주입하여 원하는 조성을 맞추었다.

폭발 반응기에 혼합가스의 농도는 주입 가스의 분압을 고 정밀도를 갖는 압력측정기를 이용한 피드백 제어를 통하여 혼합가스의 농도오차를 0.1% 이하로 제어할 수 있도록 하였다.

폭발 반응기 중간에 위치하는 길이 10mm의 퓨즈 와이어에 약 10 J의 전기에너지를 순간적으로 공급하여 퓨즈를 승화시켜 가연성 혼합가스에 점화하였다. 메탄가스 용기와 산소가스 용기로 상호 역류하는 것을 방지하기 위하여 역류방지 밸브를 각각 부착하였으며, 또한 폭발사고를 예방하기 위하여 폭발 반응기에 파열판과 안전변을 부착하였다. 폭발최대 압력을

Fig. 2에 나타내었다. 공기중에서 메탄의 최대 폭발압력은 당량비(9.52%)보다 약간 높은 위치에서 형성되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 메탄-공기 혼합가스의 폭발최대 폭발압력은 당량비(9.52%)까지 메탄농도에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 메탄가스의 공기중에서 연소한계 농도는 약 5%에서 15%이지만, 본 논문에서는 폭발피해 정도에 따른 최소 가스누출량에 살펴보기 위한 것으로 최대폭발압력을 형성하는 메탄가스농도(10%) 이하 범위에서만 살펴보았다.

등온팽창폭발모델인 식 (1)에 의하여 계산한 밀폐공간의 폭발압력은 고립된 메탄-공기 혼합가스의 농도에 따라서 변하게 된다. 건물이 완전히 붕괴되는 피해규모를 동반하는 폭발압력인 0.21 기압에 도달하기 위한 최소 메탄가스 누출량은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 고립된 부피의 메탄가스 농도에 따라 크게 변하는 것을 볼 수 있다.

최악의 사고 시나리오는 공기중의 메탄농도 8%인 고립된 혼합가스가 연소되어 최대폭발압력인 7.4기압까지 상승한 다음 등은 팽창하는 시나리오이다. 이때 건물이 완전히 붕괴되는 0.21기압을 형성하기 위한 최소 메탄가스 누출량은 밀폐공간 부피에 비하여 약 0.26%이다. 기존에 제시된 모델은 당량비 즉 9.5%의 메탄농도를 가지는 고립된 혼합가스가 연소 후 8기압으로 상승한 후 등은 팽창하는 것으로 가정하여 계산한 값으로 최소 메탄 누출량은 0.296%이다. 따라서 고립된 혼합가스 중의 메탄가스 농도를 8%로 산출한 건물이 완전히 붕괴할 수 있는 피해를 동반하는 최소 메

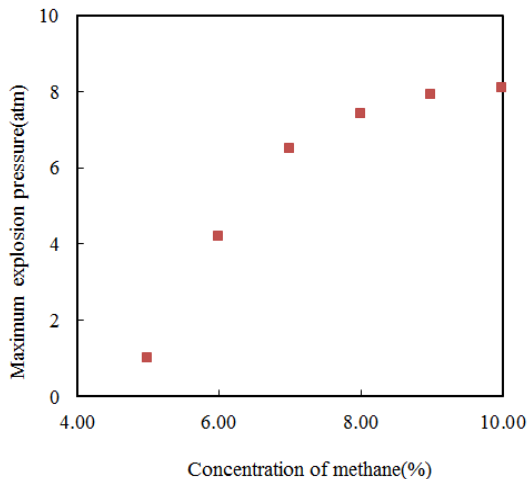


Fig. 2. Maximum explosion pressure of methane in air.

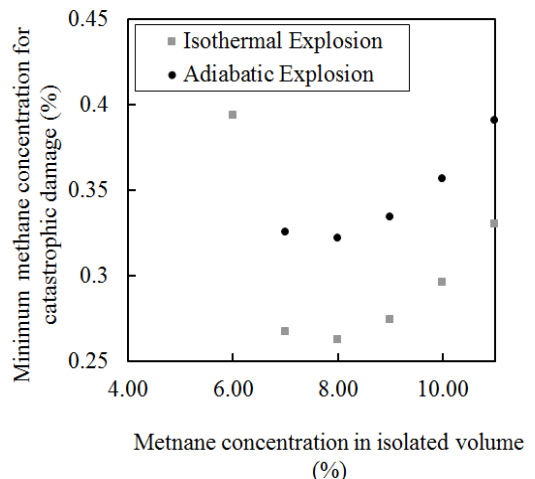


Fig. 3. Minimum methane concentration for catastrophic damage.

탄가스 누출량은 메탄농도 9.5%로 하여 계산한 것이 비하여 약 14% 적은 값이 된다. 기존연구에서 밀폐공간에서 최대 폭발압력을 예측하기 위하여 당량비의 메탄가스 농도기준으로 계산한 것으로 제시되어 있지만, 최악의 고립된 메탄가스 농도를 기준으로 계산하는 것이 더욱 바람직 할 것으로 사료된다.

따라서 최악의 시나리오는 고립된 메탄가스 농도 8%의 가연성 분위기가 폭발한 후 등온팽창하는 것으로 기준에 발표된 모델에 비하여 보수적이고 안전정책을 수립하는데 더욱 유용할 것으로 사료된다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 건물이 붕괴 될 수 있는 폭발을 동반하기 위한 최소 메탄가스 누출량은 단일폭발로 계산한 값이 등온폭발로 계산한 값에 비하여 약 20%정도 많은 값을 나타낸다.

메탄가스가 거실 또는 밀폐공간에 누출 및 폭발로 피해규모에 따른 누출량 예측은 공기 중에 메탄농도가 8%인 고립된 가연성 혼합가스 운의 연소 후 등온팽창을 가정하여 건물붕괴 압력에 해당하는 최소 누출량을 계산하기 위한 가장 보수적인 시나리오이다. 안전에 대한 기준설정 등 정책방향을 결정하기 위해서는 실현 가능한 가장 보수적으로 해석하여야 하므로 본 연구에서 제시한 모델은 안전정책을 결정하기에 적절한 모델로 사료된다.

IV. 폭발피해 해석

폭발압력에 따라 피해정도는 Table 1.에 나타내었다. Table 1.에서 볼 수 있듯이 폭발압력이 0.03 기압에서 유리창 등이 파손되는 경미한 피해를 유발할 수 있고, 0.07 기압에서 건물의 일부에 손상을 주어 수리하지 않고는 이용할 수 없을 중간정도의 피해를 발생시키고, 0.14 기압에서는 건물의 일부가 붕괴할 수 있는 심각한 손상을 발생시키며, 0.21 기압에서는 건물이 무너질 수 있는 매우 심각한 피해를 동반하게 된다 [3]. 협소한 거주공간의 특성상 화재에 매우 취약성을 가지고 있는 것으로 나타나고 있다 [4].

식 (1)을 이용하여 피해규모에 따른 밀폐공간의 부피와 메탄가스의 최소 누출량의 상관관계를 Fig. 4에 나타내었고, 최소가스 누출량을 Table 2에 나타내었다. 폭발피해규모에 따른 메탄가스의 최소 누출량은 Table 2에서 볼 수 있듯이 당량비의 메탄농도에서 폭발압력을 기준으로 계산하는 경우 유리창 등이 파손되는 경미한 피해는 메탄의 누출량이 0.037%, 건물의 일부에 손상을 주어 수리하지 않고는 이용할 수 없을 중간정도의 피해는 메탄의 누출량이 0.088%, 건물의 일부가 붕괴할 수 있는 심각한 손상을 발생시키는 피해는 메탄의 누출량이 0.184%, 건물이 무너질 수 있

Table 1. Damage criteria for gas explosion

Damage Criteria	Hazard
Minor Damage ($\Delta P > 0.03$ bar)	Significant cosmetic damage to structure. Building repair is possible. Possible minor personnel injury due to glass breakage or scabbing
Moderate Damage ($\Delta P > 0.07$ bar)	Possible deformation of structural members, short of failure. Building may be reusable without repair. Possibly some debris formed. Personnel injury from debris is likely
Major Damage ($\Delta P > 0.14$ bar)	Possible failure of isolated structural members. Partial building collapse. Building can not be reused and must be replaced. Possible serious injury or fatality of some building occupants
Catastrophic Damage ($\Delta P > 0.21$ bar)	Complete collapse of structure. Probable serious injury or fatality of all occupants

Table 2. Minimum natural gas concentration with damage level

Uniform Concentration for Estimation (%)		Gaussian Distribution Model				LEL Explosion model
		Minor	Moderate	Major	Catastrophic	
9.52	Adiabatic	0.047	0.11	0.23	0.34	5.0
	Isothermal	0.038	0.089	0.19	0.277	
8	Adiabatic	0.046	0.108	0.226	0.334	
	Isothermal	0.037	0.088	0.184	0.272	

는 매우 심각한 피해는 메탄의 누출량이 0.272%로, 일반적으로 알려져 있는 메탄가스의 최소폭발농도 5% 보다 매우 적은량에서 심각한 손상을 입히는 폭발사고를 일으킬 수 있음을 알 수 있다.

그리고 메탄농도 8%의 폭발압력을 기준으로 하는 경우에는 당량비를 기준으로 하는 것에 비하여 약 20%정도 적은 량에서 동일한 피해를 동반할 수 있는 것을 볼 수 있다.

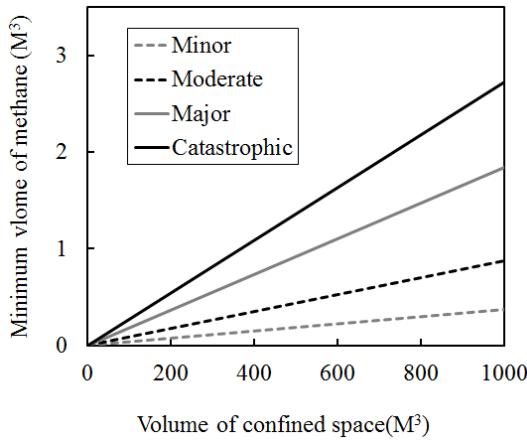


Fig. 4. Minimum amount of methane in a confined space with damage level.

밀폐공간의 부피에 따라서 폭발피해 심각도에 따른 메탄가스 누출량을 Fig. 4를 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 이때 구한 최소 메탄가스 누출량은 매우 보수적으로 계산한 결과로 누출량이 그래프에서 구한 값 이하에서는 사고 가능성이 매우 희박함을 나타낸다.

따라서 사고조사에서 사고발생 가능성을 배제하기 위한 조건으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 메탄누출 감지-차단 시스템과 같은 안전장치의 작동 시간을 규정하기 위한 기준의 근거자료로 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

V. 결론

밀폐된 공간에서 폭발사고를 일으키기 위한 최소 메탄 누출량의 산출방법을 가우스분포모델과 폭발실험에 기반하여 제시하였다. 가장 보수적인 폭발사고

시나리오는 메탄농도가 8%인 고립된 가연성 혼합 가스 운의 연소 후 등온팽창하여 평형 폭발압력을 형성하는 것이다. 상기의 시나리오를 가정하여 건물의 피해정도에 따른 메탄가스의 최소 누출량을 밀폐공간의 부피에 따라 나타내었다. 따라서 밀폐공간의 부피에 따른 피해정도를 고려하여 안전장치가 작동하기 까지 허용 가능한 메탄가스 누출량을 쉽게 예측할 수 있다.

밀폐공간에서 연소하한 농도에 해당하는 가스누출량에 비하여 매우 적은 양의 메탄가스가 누출되어도 심각한 폭발사고를 일으킬 수 있다.

본 연구 결과는 안전장치 개발에 있어서 적절한 조치를 취하기 전에 최소허용 가스 누출량을 설정하는 것에 유용하게 사용될 수 있을 뿐만 아니라 폭발사고 조사에도 활용 될 수 있다.

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] Lee C., Oh S., Yoo J., Kim J., Cho A., and Cho Y., "Analysis on the Charactrisitics of Occupancy Prediction and the Fire Hazard in Narrow Dwelling Space", Journal of the Korea Society of Disaster Information, 12(4), 342-349(2016)