

가정집에서 가스폭발 위험성 분석

† 조 영 도 · 김 지 윤 · 김 상 섭

한국가스안전공사 연구개발실

(2001년 1월 20일 접수, 2001년 6월 12일 채택)

Gas Explosion Hazard Analysis in Domestic

Young-Do Jo · Ji-Yun Kim and Sang-sub Kim

R&D Center, Korea Gas Safety Corporation, 332-1, Daeya-dong,
Shihung-shi, Kyunggi-do, 429-712, Korea

(Received 20 January 2001 ; Accepted 12 June 2001)

요 약

가정에서 일어나는 가장 일반적인 사고 중의 하나는 실내 가연성 가스누출에 의한 폭발 사고이다. 이러한 폭발 사고현장의 분석에 의하면 경우에 따라서 누출가스가 실내를 완전히 연소 하한계의 농도로 채울 수 있는 양보다 매우 작은 가연성 가스 양에 의하여 발생할 수 있다. 따라서 폭발이 일어날 수 있는 최소한의 가스 양은 실내 누출된 가스농도의 불균일한 정도에 의존하게 된다. 일반적으로 메탄과 같은 공기보다 가벼운 가스는 천장에서 축적되는 경향이 있고, 프로판의 경우에는 바닥에 축적되는 경향이 있다.

본 논문에서는 매우 작은 양의 가스 누출에서 폭발 위험성 분석을 위한 가우스분포폭발 모델을 제시하였다. 이 모델은 연소한계농도에 기초를 두고, 특정 폭발 압력이 나타날 수 있는 최소한의 가스 누출량을 예측하는데 사용할 수 있다.

가우스모델을 이용하여 분석하면, 가정집에서 누출된 가스의 부피가 실내 부피에 비하여 0.5% 이하에서도 건물이 붕괴되는 폭발사고가 일어날 수 있다. 본 모델은 가스안전기기 개발을 위한 가스폭발 위험성 분석과 가정집에서 폭발사고 원인조사에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract - A leak of fuel gas in partially confined area creates a flammable atmosphere and give rise to an explosion, which is one of the most common accident in domestic. Observations from accident in domestic suggest that some explosions are caused by a quantity of fuel significantly less than lower explosion limit(LEL) amount required to fill the room, which is attributed to inhomogeneous mixing of leaked gas. The minimum amount of leaked gas for explosion is highly dependent on the mixing degree in the area. For lighter gas, such as methane, a high concentration tends to build up in the space from ceiling of room. But heavy gas, such as propane, a high concentration tends to build up in the space from bottom of room.

This paper presents a method for analysing the explosion hazard in a room with very small amount of leaked gas. Based on explosion limit concentration, the gaussian distribution model is used to estimate the minimum amount of leak which yields a specified explosion pressure.

The results demonstrate that catastrophic structural damage can be achieved with a volume of fuel gas which is less than 0.5 percent of the total enclosed volume in domestic. The method will help analyzing hazard to develop new safe device as well as

investigating accident.

Key words : Domestic gas explosion, hazard analysis, gaussian distribution explosion model, explosion model

1. 서 론

최근 가스 사용량의 급증으로 실내에서 가스 누설로 인한 폭발사고는 언론을 통하여 대부분의 사람들이 접하고 있지만, 다행히도 실제 가정집에서 일어나는 연간 가스폭발사고는 약 170,000호당 1건으로 발생률은 크지 않다. 그러나 가스폭발사고는 다른 사고에 비하여 피해규모가 크고 대부분 인명사고를 일으키므로, 가스폭발사고를 예방하기 위하여 실내가스폭발 위험성 분석이 필요하다. 가스폭발에 의한 피해는 폭발과, 파편, 건물의 붕괴에 의한 물리적 효과와 폭발 화염에 의한 열적 효과로 나눌 수 있으며, 가스폭발 피해의 물리적 효과에서 가장 중요한 변수는 폭발압력이다. 폭발압력은 실내의 구조, 창문의 크기, 누출가스의 양, 점화원의 위치 및 종류 등 여러 가지 변수에 영향을 받는다. 그리고 폭발 메커니즘을 살펴보면 폭연과 폭발로 크게 나누어지며, 대부분 가정에서 일어나는 폭발사고는 폭연 메커니즘에 의하여 일어나므로 본 논문에서는 여기에 대해서만 고려하고자 한다.

일반적으로 탄화수소가 양론비로 균일하게 혼합되어 있을 때 일정한 부피에서 폭발압력은 10기압 정도이며, 대부분의 건물을 충분히 붕괴될 수 있는 압력이다[1]. 가스운 폭발에서 구조물의 피해정도는 최대압력과 임펄스에 영향을 받지만, 최대압력이 약 0.21기압에서 구조물이 완전히 붕괴된다[2]. 가정집의 가스폭발 사고에서 도달할 수 있는 최대압력은 유리창 또는 문의 파손으로 배기 되는 가스 때문에 완전히 밀폐된 공간으로 계산한 압력보다 매우 낮을 것이다. 그러나 밀폐공간에서 양론비로 가스 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[3].

가스폭발 사고피해 정도는 실내에 있는 구조물, 가스농도분포, 점화원의 위치 등 여러 가지 조건에 영향을 받기 때문에 이러한 것들을 모

두 고려하여 피해정도를 해석하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 가스사고가 일어날 수 있는 가능한 조건 또는 개구부의 크기에 따라 발생할 수 있는 최대 폭발압력을 예측하기 위한 연구들이 진행되어 왔다[4]. 본 논문에서는 실내 가스폭발 피해정도에 따른 최소한의 가스 누출량을 예측하기 위한 새로운 방법을 제공하고자 한다.

지금까지는 가스폭발이 일어나기 위한 최소한의 누출량을 실내의 가스농도가 폭발한계로 균일하게 있는 것으로 가정하여 예측하는 방법이 가장 일반적으로 사용하였다. 이러한 방법을 여기서는 단순히 LFL폭발모델로 표현하였다. LFL폭발모델에서 예측한 최소의 가스 누출량에서 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 불균일성을 고려할 필요가 있다. 밀폐된 공간에서 누출된 가스가 완전히 양론비의 가스운을 형성하여 폭발 후 단일혼합으로 가정하여 폭발압력을 예측하는 방법을 최근 Ogle가 제시하였다[5]. 이 방법을 여기서 단일혼합모델로 표기하였다. 그러나 실제 누출된 가스의 농도분포는 대부분 가우스분포를 가지게 되므로 Ogle가 제시한 방법으로 폭발이 일어날 최소의 가스 누출량을 예측하게 되면 실제보다 과소평가 한 결과를 보여주게 될 것이다[6]. 따라서 본 논문에서는 누출된 가스의 농도를 가우스분포로 가정하여 최소 가스 누출량을 예측하기 위한 방법을 제시하였다.

2. 실 험

실내에서 누출된 가스의 농도분포 특성을 살펴보기 위하여 일본 안전공학협회에서 1971년 발간한 실험보고서의 내용을 살펴보면 다음과 같다[7]. 가로 3m, 세로 3m, 높이 6m인 실내에서 상부 중심부에서 아래 방향으로 메탄을 30분간 누출시켜 밀폐된 실내의 가스농도분포를 측정하였다. 이때 노즐의 직경은 9mm이고, 누

출속도는 12.91m/sec(0.0493m³/min)로 급속히 방출시켰다. 농도측정 위치는 지면으로부터 천장까지 높이 1m간격으로 각 평면에는 중심으로부터 0.5, 1, 1.3m간격으로 하였다. 누출시간에 대한 가스의 농도분포는 비록 가스누출속도가 빠르지만 수평방향으로 거의 일정하고 아래로 갈수록 농도가 낮아지며, 시간에 따라 연소 하한계는 서서히 아래로 이동하였다. 시간에 따른 높이 방향의 농도분포를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Distance(m) from Ceiling of a Specified Concentration with Time.

Concentration (vol%) \ Time(min)	5.0	4.0	0.2	0.1
10	-	0.5	1.2	2.0
15	-	1.0	2.0	2.8
20	1.0	-	2.1	3.0
25	1.25	-	2.15	4.1
30	1.3	-	2.5	6.0

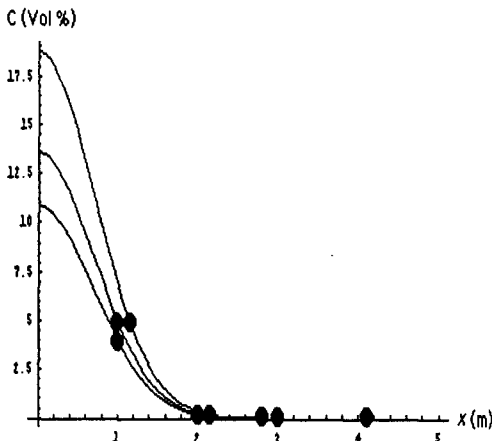


Fig. 1. Concentration(vol%) Profile of Methane with Time.

3. 결과 및 고찰

메탄은 공기에 대한 비중이 0.56이므로 비록

천장에서 가스누출속도를 매우 빠르게 하였음에도 불구하고 위 평면으로 먼저 퍼지게 되어 수평으로 거의 균일한 농도가 되는 것을 실험 결과로부터 알 수 있다. 그러나 수직방향으로는 아래로 갈수록 급격히 농도가 감소한다는 것을 Fig. 1에서 볼 수 있다. 실내 가스농도 분포가 모든 벽면의 영향을 받기 전에는 일정한 경향의 가스농도 분포를 가지게 되며, 이때 가우스분포로 가정하게 되면 아래식으로 표현할 수 있다.

$$C = Ae^{-ax^2} \quad (1)$$

여기서 A, a는 상수고, x는 천장으로부터 거리이다.

Table 2. Change of Constant A with Time.

Time(min)	10	15	20	25	30
A	5.06	10.87	13.58	18.77	27.11

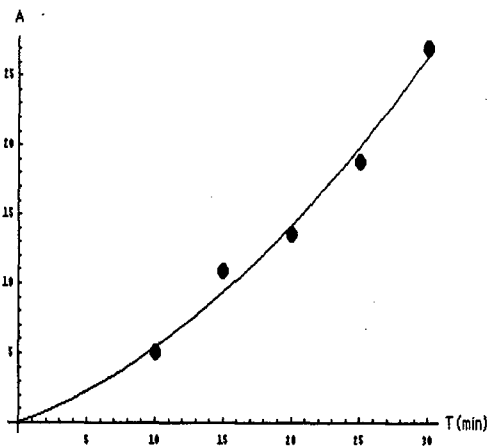


Fig. 2. Change of the Constant A with Time.

Fig. 1의 x축은 실내 천장으로부터 아래 방향으로 거리를 나타내고, y축은 메탄의 부피 퍼센트를 나타내는 것으로 실험 결과로부터 얻은 점들이 식 (1)에 의하여 매우 잘 표현됨을 보여준다. 즉 천장으로부터 아래 방향으로 농도는 정규분포를 가지는 것을 볼 수 있고 시간에 따라 천장에서 가스농도 ($C|_{x=0}=A$)는 증

가함을 알 수 있다. 가스누출 실험결과인 Table 1을 이용하여 시간에 따라 천장의 가스 농도를 나타내는 상수 A를 구하면 Table 2와 같다. 천장에서 가스농도의 변화는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 거의 2차 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 실내가스 농도 분포에 대한 실험식을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C = (0.3720t + 0.0169t^2)e^{-x^2} \quad (2)$$

여기서 t는 시간을 나타낸다.

식 (2)를 이용하여 시간과 천장으로부터 거리에 따른 농도분포를 Fig. 3과 같이 3차원으로 나타내었다. 가스누출 후 약 9분 경과되면 메탄의 폭발 하한계 농도가 천장에서 형성됨을 볼 수 있고, 시간이 경과함에 따라 점점 아래로 이동함을 알 수 있다. 따라서 LFL모델에서 실내의 농도분포가 균일한 가정은 실내 가스누출 초기에 적용하기 어려울 것으로 사료된다. 식 (2)를 이용하여 연소범위에 있는 부피를 나타내면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 연소범위에 있는 부피는 천장에서 연소 하한계 농도가 형성된 다음 시간에 따라서 점점 증가하다가 다시 연소 상한계농도가 형성된 후 점점 감소함을 볼 수 있다. 즉 9분 정도 지난 후 연소한계농도의 부피가 형성되고, 약 21분 경과 후 연소한계에 있는 부피는 약 9.5m³로 최대치를 형성한 다음 시간에 따라 점점 감소하게 된다. 연소한계에 있는 부피가 최대치 일 때 전체부피에 대한 비율은 약 17.6%정도 된다. 따라서 실험조건에서 가스폭발이 일어난다고 가정하면 약 21분 경과 후 폭발이 일어날 때 최대 폭발압력을 나타낼 수 있으며, 이때 가스 누출량은 약 1m³으로 LFL모델로 계산한 2.7m³에 비하여 작은 값이다. 따라서 LFL모델에 의하여 폭발을 일으키기 위하여 필요한 최소 가스 누출량에 도달하기 전에 폭발이 일어날 수 있을 뿐만 아니라, 폭발에 의하여 발생하는 최대압이 소량의 가스누출에 의하여 일어날 수 있음을 알 수 있다.

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 실내 폭발압력을 구하는 것이다[5]. 즉 실내부피를 V로 하고,

양론비의 농도로 고립된 가스의 부피를 V'로 하면, 폭발 후 최종도달압력은 식 (3)과 같다.

$$P = \frac{1}{V} [P_a(V - V') + P_E V'] \quad (3)$$

여기서 P_a는 대기압이고, P_E는 양론비의 메탄 가스가 일정한 부피에서 폭발할 때 발생하는 압력이다.

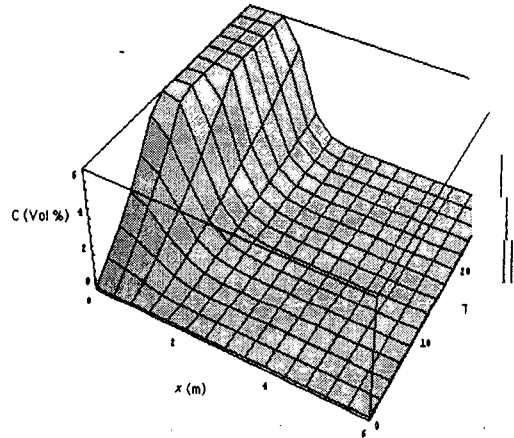


Fig. 3. Concentration Distribution with Time.

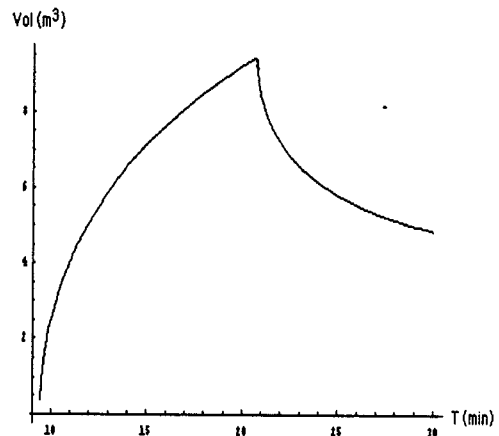


Fig. 4. Enclosure Volume associated within the LFL and ULF.

밀폐공간에서 양론비의 메탄이 폭발할 경우 발생하는 최대압력은 약 8.97기압이다[1]. 따라서 메탄가스의 경우 실내부피에 대한 고립된 양론비의 가스운의 부피 분율에 따른 폭발 후 최대압력은 다음 식과 같다.

$$P_{methane} = 1.01(1 - \Phi) + 8.97\Phi \quad (4)$$

여기서 Φ 는 양론비의 농도로 고립되어 있는 가스운의 분율이다.

공기와 양론비로 섞여있는 프로판 가스는 일정한 부피에서 폭발할 때 최대 압력이 약 9.51기압이므로, 프로판 가스에 대한 폭발압력 예측식은 다음과 같다.

$$P_{propane} = 1.01(1 - \Phi) + 9.51\Phi \quad (5)$$

프로판과 메탄의 양론비는 각각 4.02 %와 9.47 %이므로 폭발압력을 실내부피에 대하여 가스 누출부피 비율로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{methane} = 1.01 + 84.1\Phi, \quad \Phi \leq 0.0947 \quad (6)$$

$$P_{propane} = 1.01 + 211.4\Phi, \quad \Phi \leq 0.0402 \quad (7)$$

여기서 Φ 는 실내부피에 대한 누출된 가스의 부피이다.

일반적으로 실내에 누출된 가스는 양론비로 섞여 고립되어 있는 것이 아니라 대부분의 경우가 일정한 농도 분포를 가지고 있을 것이다. 따라서 Ogle가 제시한 단일팽창모델로 최소 가스 누출량을 예측하는 경우에는 실제 요구되는 최소 가스 누출량 보다 작게 예측될 것이다. 따라서 누출된 가스의 농도를 가우스분포로 가정하여 총 가스누출 부피에 대한 폭발범위의 농도에 있는 부피비를 식 (1)로부터 나타내면 다음과 같다.

$$\omega = \frac{\int_{x^1_{C_{LFL}}}^{x^1_{C_{UFL}}} dx}{\int_0^{\infty} A e^{-ax^2} dx} \quad (8)$$

여기서 ω 는 가연성가스의 연소범위 부피와 누출된 가스의 부피비이고, C_{LFL} 은 연소 하한계 농도, C_{UFL} 은 연소 상한계농도 이다.

식 (8)을 적분하면 다음과 같다.

$$\omega = \frac{\sqrt{-\ln\left(\frac{C_{LFL}}{A}\right)} - \sqrt{-\ln\left(\frac{C_{UFL}}{A}\right)}}{\frac{AV\pi}{2}} \quad (9)$$

식 (9)은 A의 변화에 따라 증가하게 되고 연소 상한계 농도와 같을 때 최대값이 되며, 이때 부피비는 다음식과 같다.

$$\omega = \frac{2\sqrt{-\ln\left(\frac{C_{LFL}}{C_{UFL}}\right)}}{\sqrt{\pi C_{UFL}}} \quad (9)$$

가우스분포 모델은 폭발한계 농도에 있는 부피가 연소되어 단일 팽창하는 것으로 가정하여 폭발최대 압력을 구하는 방법으로 식 (3)을 보정하여 나타내면 다음과 같다.

$$P = P_a(1 - \omega\Phi) + P_L\omega\Phi \quad (10)$$

가우스분포 모델은 가스의 농도가 모든 벽면의 영향을 받게되면 더 이상 적용되지 않는다. 따라서 가스누출 초기 적용되는 것으로 폭발이 일어날 수 있는 최소한의 가스 누출량을 예측하는데 활용 가능하다.

메탄과 프로판에 대한 가스누출 부피와 폭발한계에 있는 부피비는 Table 4에서 볼 수 있듯이 각각 7.88과 14.59이다. Ogle가 가정한 양론비로 있는 고립된 연소 가능한 부피에 비하여 74%(메탄), 58%(프로판)정도 되는 값이다. 가우스분포 모델로 메탄과 프로판의 폭발 최대압력을 가스 누출량과 실내공간의 부피비로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{methane} = 1.01 + 62.2\Phi \quad (11)$$

$$P_{propane} = 1.01 + 122.6\Phi \quad (12)$$

Table 3. Damage Criteria for Indoor 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 4. Summary of Combustion Data and Volume Ratio for Gas.

Chemical	LFL (Vol. fraction)	UFL (Vol. fraction)	C _{Stoich.} (Vol. fraction)	ω	1/C _{Stoich.}
Methane	0.05	0.15	0.0947	7.88	10.56
Propane	0.021	0.095	0.0402	14.59	24.88

Table 5. Comparison of the Gaussian Distribution Model Against Adiabatic Mixing Model: Volume of Fuel Gas as Percent of Total Enclosed Volume.

Damage Level	Methane		Propane	
	Adiabatic Mixing	Gaussian Distribution	Adiabatic Mixing	Gaussian Distribution
Minor	0.035	0.047	0.014	0.024
Moderate	0.083	0.111	0.033	0.056
Major	0.17	0.228	0.066	0.113
Catstrophic	0.25	0.335	0.099	0.169

가스폭발이 일어나면 폭발 최대압력에 따라 건물 및 인명피해의 정도가 변하게 된다. 폭발 압력에 의한 피해정도는 Table 3과 같다[5]. 최악의 경우인 건물의 개구부가 없는 것을 가정하여 각각의 피해정도에 따라 실내공간부피에 대한 가스의 최소 누출량을 구하여 나타내면 Table 5와 같다. Table 5에서 볼 수 있듯이 경미한 사고피해를 일으키는 메탄가스 폭발 조건에서 LFL모델, 단열팽창모델 그리고 가우스분포모델을 살펴보면, 각각 가스의 최소 누출량이 실내공간 부피에 비하여 5%, 0.035%, 그리고 0.047%이다. 그리고 건물이 완전히 붕괴 가능한 조건을 비교하여 보면, 5%, 0.25%, 그리고 0.34%이다. 따라서 LFL모델은 실제보다 15배에서 150배정도 과대 평가되는 것을 볼 수 있고, 단열팽창모델은 약 도시가스의 경우 25%, LP가스의 경우 42%과소 평가되는 것을 볼 수 있다.

가정집에서 경미한 가스폭발 사고가 일어날 수 있는 가스 누출량은 실내 부피에 비례하며, 가스의 농도분포가 불균일할 때 실내 부피에 대한 가스누출 부피비는 도시가스의 경우 0.047%, 액화석유가스의 경우 0.024%이다. 그러나 가스누출속도가 매우 커서 실내의 농도가 균일할 때 기존에 사용하는 LFL모델이 적용되므로 최소 가스누출량이 도시가스의 경우 5% 이고 액화석유가스의 경우 2.1%이다. 따라서 실내가스 폭발은 누출된 가스의 농도가 초기부터 균일하게 혼합되는 경우 실내 부피에 비하여 수%가 누출되어야 하지만, 불균일한 농도를 가질 경우 실내부피에 비하여 0.05% 미만의 가스누출에 의하여서 일어날 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

실내 폭발에서 누출된 가스의 농도분포를 가우스 분포로 가정한 가우스분포 모델은 기존에 사용한 LFL모델로 해석하기 어려운 피해정도에 따라서 최소한의 가스 누출량을 추측하는데 매우 유용하게 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 소량의 가스누출에 의해서도 심각한 가스폭발 사고가 발생할 수 있음을 보여준다. 즉 LFL모델을 이용하여 가스 누출량을 예측한 양보다 매우 적은 누출조건에서 심각한 폭발사고가 일어날 수 있음을 나타낼 수 있고, 또한 가스누출 시간에 따라 최대 폭발압력을 예측할 수 있

다. 따라서 본 연구에서 제시한 가우스분포 모델은 사고조사와 가스안전기기 개발에서 최소의 가스누출 허용량을 결정하는데 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 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, p. 87-92(1999)
- 4) Lee, F. P., "Loss Prevention in the Process Industries" 2nd Edition, Volum2 2, Butterworth-Heinemann, Oxford, p. 17/49(1996)
- 5) Ogle, R. A., "Explosion Hazard Analysis for and Enclosure Partially Filled with a Flammable Gas" Process Safety Progress, Vol. 18, No. 3, p. 170(1999)
- 6) Jo, Y. D., "A Study on the Minimum Safe Separation Distance from LPG Filling Station" KIGAS Vol. 3, No. 2, July, p. 24(1999)
- 7) 安全工學協會, "可燃性ガスの滞留および擴散に関する實驗報告書" p. 35 (1971)