

<학술논문>

Probit 모델에 의한 증기운폭발 충격파의 인체피해예측

임사환* · 허용정* · 이종락**
(2007년 6월 27일 접수, 2007년 10월 6일 심사완료)

A Study on Estimation of Human Damage for Shock Wave by Vapor Cloud Explosion using Probit Model

Sah Wan Leem, Yong Jeong Huh and Jong Rark Lee

Key Words: Probit Analysis(프로비트 분석), Shock Wave(충격파), VCE(증기운폭발)

Abstract

This paper is on the influence of gas explosion caused by Vapor Cloud Explosion(VCE). Also, it is to understand the influence of the booth for explosion experiment which is installed to let the trainees for legal education which is managed by IGTT(Institute of Gas Technology Training) know the riskiness of explosion. In this study, the influence of explosion shock wave caused by VCE in enclosure was calculated by using the Hopkinson's scaling law and the accident damage was estimated by applying the influence on the adjacent human into the probit model. As a result of the damage estimation conducted by using the probit model, both the damage possibility of explosion overpressure to human 8 meters away and that of shock wave to hurt 15 meters away showed nothing.

기호설명

- H_C : 가연성가스의 연소열(kcal/kg)
- H_{TNT} : TNT의 연소열(1000kcal/kg)
- I_s : Impulse(N sec/m²)
- R : 폭발중심으로부터의 관심거리(m)
- W_C : 가연성가스의 질량(kg)
- W_{TNT} : TNT 상당량(kg)
- Z : 환산거리(m/kg^{1/3})
- x : 이산화탄소 원자수(Number of carbon atoms)
- y : 수소 원자수(Number of hydrogen atoms)
- n : 폭발효율(개방계에서는 1~10%)

1. 서론

가스는 친환경적인 에너지원으로서 산업체와 일반 가정에서 사용이 급속도로 증가하여 국내 에너지 산업의 중추적인 역할로 대두되고 있음을 Table 1에서 알 수 있다.⁽¹⁾

Table 1 Consumption of energy (Units : 1000ton)

	2005	2004	2003	2002	2001
Energy Consumption	229,333	220,238	215,066	208,636	198,409
LNG	29,989	28,351	24,194	23,099	20,787
Oil (LPG)	101,553 (12,240)	100,638 (11,937)	102,380 (11,912)	102,414 (12,272)	100,385 (11,390)
Hydraulic	1,297	1,465	1,722	1,327	1,038
Nuclear	36,695	32,679	32,415	29,776	28,033
Coal	54,791	53,127	51,116	49,096	45,711
Other	5,007	3,977	3,241	2,925	2,456

† 책임저자, 회원, 가스안전교육원 교수실
E-mail : gentle@kgs.or.kr
TEL : (041)629-0615 FAX : (041)522-0522
* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부
** 한국가스안전공사 가스안전교육원

Table 2 Accident by facility (Units : Ea)

	2005	2004	2003	2002	2001
House	(23) [10]	(23) [7]	(23) [12]	(26) [11]	(24) [14]
Restaurant	21	19	16	18	21
First protection	3	2	6	2	3
Factory	3	1	5	6	3
Total	60	52	62	63	65

() : Single House, [] : Cooperation House

Table 3 Form of Accident (Units : Ea)

	2005	2004	2003	2002	2001
Explosion	39(1)[-]	37(3)[5]	49(-)[1]	55(2)[-]	40(3)[6]
Fire	18(2)[2]	15(4)[1]	28(6)[2]	17(1)[3]	33(-)[4]
Leakage	2(7)[-]	5(8)[1]	6(4)[5]	2(15)[2]	3(7)[2]
Rupture	22[3]	21[-]	8[3]	8[3]	15[3]
CO Toxicosis	6(6)	2(6)	1(5)	2(9)	1(8)
Oxygen Deficiency	1	2	-[1]	-	-[2]

() : City Gas, [] : High-Pressure Gas

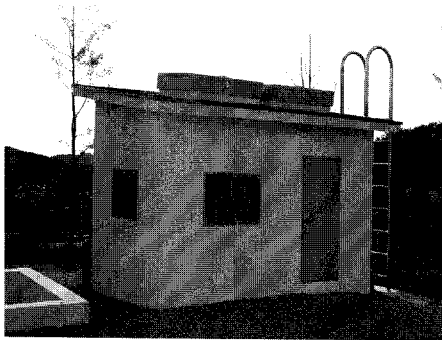


Fig. 1 Experimental booth

최근 5년 동안의 가스시설에서 발생한 사고의 현황은 Table 2와 같으며, 가스사고의 형태별 현황은 Table 3과 같다. 이를 보듯이 가정집에서 가스폭발로 인한 사고가 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.⁽²⁾

하지만 가스 사고는 다양한 원인과 형태에 의해 발생하고 있고 산업체와 가정 등에서 잠재적인 위험요소는 항상 내재하고 있으며, 반복적으로 동일유형의 사고가 발생하고 있는 실정이다.

따라서 가스안전교육원에서는 이러한 공간에서의 누출에 의한 폭발의 위험성을 교육하기 위하

여 Fig. 1과 같은 실험용 Booth를 만들어서 피해예측을 고찰하고자 한다.

이전 연구에서는 과압에 의한 안전거리 및 안전성 등에 대한 연구를 진행하였다.⁽³⁻⁷⁾ 본 연구에서는 기존의 실험에서 실시하지 못한 실제 건물을 구축하여 실험하기 위한 기초연구로 폭발에 의한 영향범위 산정은 Scaling 법칙을 사용^(8,9)하고, 과압에 의한 인체의 영향은 Probit 모델을 적용하여 평가하였다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

2. 이론 계산식

폭발의 정의는 순간적으로 에너지를 방출하여 주위 공기의 밀도, 압력, 속도가 불연속적인 변화가 있는 상태를 말한다. 가스폭발은 산화제와 혼합된 가연성 가스운의 연소과정으로 정의 할 수 있다. 이러한 가스폭발은 밀폐된 공간에서의 폭발과 개방된 공간에서의 폭발로 나눌 수 있으며, 가스폭발에 의하여 형성된 압력은 사람 및 구조물에 피해를 주고, 폭발은 화재 또는 BLEVE와 같은 사고로 발전할 수 있다.⁽¹³⁻¹⁷⁾

가스폭발은 여러 변수들에 매우 민감하게 변함으로 단순히 피해정도를 예측하기는 매우 어려운 실정이다.

따라서 가스폭발의 위험분석과 실제 경험을 바탕으로 폭발사고에 대한 피해최소화 설비를 갖추어야 한다.

2.1 폭발이론

가연성 가스가 유출되어 대기중의 공기와 혼합하여 폭발성인 증기운(Vapor Cloud)을 형성하고 이때 착화원에 의하여 화구(Fire Ball)형태로 착화 폭발하는 것을 증기운폭발(VCE : Vapor Cloud Explosion)이라 한다.

Fig. 2에서 보여주는 것처럼 연소범위는 초기온도가 증가하면 넓어질 것이다. 초기압력의 변화는 공기중 탄화수소에 대하여 LFL은 그다지 변화가 없으나 UFL은 증가할 것이다.⁽¹⁸⁾ 이러한 증기운 폭발은 BLEVE보다 폭발효율이 적으며, 연소에너지의 약 20%만 폭풍파로 전환된다.

또한 Fig. 3에서 보듯이 증기와 공기와의 난류 혼합 또는 방출점으로부터 먼 지점에서의 증기운 점화는 폭발의 충격을 가중시키며, 부상화염은 공기량에 많은 영향을 받는다.^(19,20)

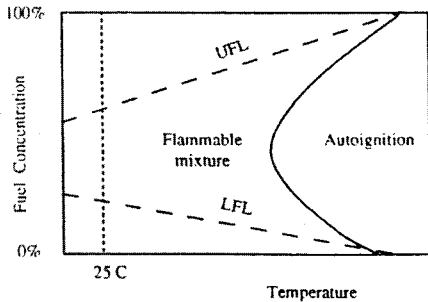


Fig. 2 The effect of temperature on LFL and UFL

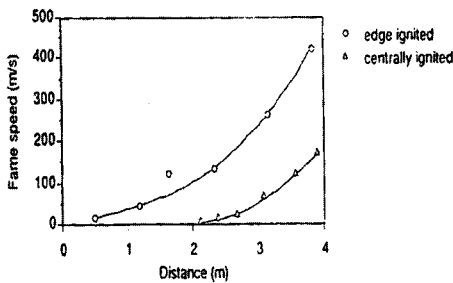


Fig. 3 Flame speed vs. distance for centrally and edge ignited explosions in a double configuration (i.e. solid top plate) with obstacles⁽¹⁹⁾

Table 4 Safety characteristics derived from explosion regions of important flammable gases in mixtures with air and inert gases*

Flammable gas	Explosion limit (amount of flammable gas in mixture with air)	
	lower mol%	upper mol%
Methane	4.4	17.0
Propane	1.7	10.9

* The values are valid for room temperature and atmospheric pressure.

Table 4는 가연성가스의 폭발범위⁽²¹⁾이며, 대기압하에서의 조건으로 CHEMSAFE⁽²²⁾에서 발췌한 내용이다.

가스폭발로 인한 피해범위를 최대로 하기 위하여 가스농도는 양론조성^(23,24)에 가깝게 하였으며, 점화원과 누출원의 거리도 최대한 멀리하였다. 또한 이를 위하여 가스폭발의 강도를 TNT폭발과 비교하여 TNT 상당량을 구하는 방법을 채택하였다.

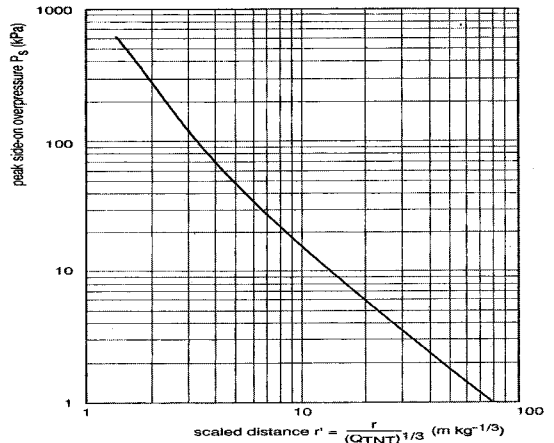
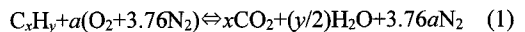


Fig. 4 Peak overpressure by TNT explosion⁽²⁵⁾

탄화수소계 연료의 이론 화학 평형식은 다음과 같다.



여기서, a 는 $a = (x + y/4)$ 와 같이 성립된다.

2.2 TNT 상당량 모델에 의한 계산

TNT 상당량 모델은 연소가능한 가스의 질량을 예측하여 가연성 물질에 대한 연소열을 결정하고, 폭발효율에 대한 값을 결정 TNT 상당질량을 계산한다. 이러한 계산은 식 (2)을 이용하고, 영향 거리는 Hopkinson 환산거리를 통하여 스케일화 될 수 있으며, 식 (3)을 적용한다.

$$W_{TNT} = \frac{\eta \times H_C \times W_C}{H_{TNT}} \quad (2)$$

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (3)$$

2.3 Probit 분석

Probit 분석은 확률을 구하는 것으로 피해 영향분석에 활용하는데, 충격으로 인한 사망예측은 식 (4)을 이용하고, 부상예측은 식 (5)을 이용하였다.

Table 5 Blast damage by overpressure

Overpressure(kPa)	Form of damage
0.14	Disagreeable noise by low frequency(10~15Hz)
0.21	Partial damage of window made of glass
0.28	Big noise and glass is broken
0.69	Small transformed window made of glass is broken
1.03	Glass bursting pressure
2.07	10% of glass window is broken
2.76	Small damage limitation of building
3.45	Big and small window fracture
4.83	House small breakage
6.89	House portion breakage
8.96	Building steel frame flexure
13.79	Weak concrete wall fracture
15.86	Serious structural damage low-level
20.68	Steel frame building flexure
27.58	Oil storage tank explosion
34.47	Wood pillar is crash and explosion of tympanum
41.37	House whole breakage
48.26	Overthrow of freight car
62.05	Whole destruction of freight car
68.95	Whole destruction of building

Table 6 Overpressure about distance caused by VCE

Z(m)	R(m)	W _{TNT} (kg)	Over Pressure(kPa)	X(m)
1.44	1.0	0.34	620.00	1.31
2.87	2.0		143.00	3.38
4.31	3.0		63.30	5.72
5.75	4.0		38.00	7.94
7.18	5.0		26.00	10.14
8.62	6.0		19.80	12.09
10.06	7.0		16.60	13.54
11.49	8.0		14.00	15.11
12.93	9.0		12.12	16.59
14.37	10.0		10.90	17.76
21.55	15.0		5.55	27.44

2.3.1 충격으로 인한 사망의 경우

$$\text{Probit} = -46.1 + 4.82 \ln(I_s) \quad (4)$$

2.3.2 충격으로 인한 부상의 경우

$$\text{Probit} = -39.1 + 4.45 \ln(I_s) \quad (5)$$

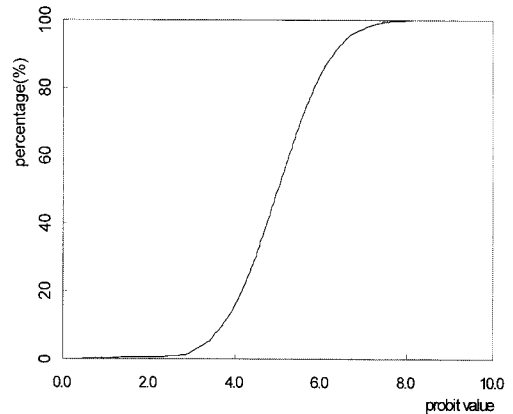


Fig. 5 Relation with probability value(probit) and percent

3. 계산결과

최대압력이 발생하는 양론농도는 체적이 11.4 m³이므로, CH₄의 경우는 1083 l, C₃H₈의 경우는 456 l이다. 따라서 본 연구에서는 LPG(C₃H₈)을 누출하여 교육을 실시하고 있다.

과압의 영향은 Hopkinson의 삼승근법⁽²⁵⁾을 이용하여 계산하고, 피해영향은 Probit 분석으로 계산하였다.

Table 5는 피크과압에 따른 피해형태를 나타낸 것이다.

양론조성에서 폭발로 인한 피해의 규모가 가장 크므로 용량은 식 (1)을 이용하여 계산하였으며, Table 6은 식 (2)에서 구한 TNT당량을 이용하여 식 (3)에 적용하여 W_{TNT}상당량에 해당하는 환산 거리를 구한 수치이다. 또한, 이 수치를 이용하여 Fig. 4에 적용하여 폭발장소에서의 이격거리별 피크과압을 구한 수치이다. 또한 이러한 수치를 이용하여 과압의 영향거리를 구하여 보았다.

밀폐공간에서의 VCE에 의한 과압의 피해예측을 위하여 식 (2)을 적용하여 TNT상당량을 계산하였다. 보편적으로 가정에서 사용되는 CH₄와 C₃H₈의 폭발에 적용되는 폭발효율은 개방계에서는 0.03을 적용한다.⁽²⁶⁾

Fig. 5는 확률값과 백분율과의 관계를 도식화한 것이다. Fig. 5를 이용하여 Probit⁽²⁷⁾분석 계산식에서 구한 수치를 적용하여 거리별로 건축물에 미치는 사고피해를 예측하고자 한다.

Table 7 Damage probability about distance caused by VCE

R(m)	Death probit value	Death probability(%)	Hurt probit value	Hurt probability(%)
1.0	18.187	100%	20.252	100%
2.0	11.116	100%	13.724	100%
3.0	7.188	98.5%	10.098	100%
4.0	4.729	9.3%	7.827	99.8%
5.0	2.899	1.8%	6.138	88.2%
6.0	1.586	0.6%	4.926	47.2%
7.0	0.737	0.3%	4.141	19.6%
8.0	-0.084	0.0%	3.383	5.3%
9.0	-0.779	0.0%	2.742	1.3%
10.0	-1.291	0.0%	2.270	0.8%
15.0	-4.544	0.0%	-0.734	0.0%

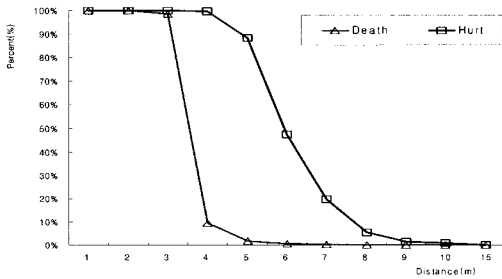


Fig. 6 The distance for damage effect caused by shock wave(factor 0.03)

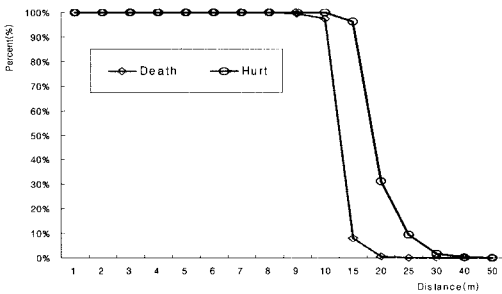


Fig. 7 The distance for damage effect caused by shock wave(factor 1.0)

Table 7은 과압이 미치는 거리별로 인체에 미치는 영향을 Fig. 4에 적용하여 백분율로 나타낸 것이다. Fig. 6은 Table 7을 도식화한 것이다.

본 연구에서는 충격파의 영향에 대하여 Hopkinson의 삼승근법을 이용하여 계산하고, 폭발 장소 주변의 인체에 미치는 영향을 Probit 모델에 적용하여 피해예측을 평가하였으며, LPG의 이론

연소열 12564kcal/kg을 적용하여 계산하였다.

Fig. 6은 폭발효율 0.03을 적용하였을 경우 밀폐된 건축물의 파열로 인한 충격파에 따른 손상 거리에 따른 확률이며, Fig. 7은 기존의 경험식과 이론식에 의한 Fig. 6을 대비하기 위한 최대안전거리 설정을 위하여 폭발효율 1.0을 적용하여 교육생 및 연구원의 위해거리를 산정한 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 이론에 의한 계산결과로 피해영향을 예측하였다. 따라서 실제로 미치는 영향은 연구결과와 동일한 피해가 일어난다고 보기 어려우나 연구에 인용된 계산식은 실험식을 근간으로 하였으므로 피해예측에 충분하다고 할 것이다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 폭발효율을 0.03으로 적용하였을 경우, 관심거리 8m부터는 충격으로 인한 사망확률은 0%로 나타났으며, 폭발효율을 1.0으로 적용하면 인체에 대한 관심거리가 30m부터 사망확률이 0%로 나타났다.

(2) 폭발효율을 0.03으로 적용하였을 경우, 관심거리 15m부터는 충격으로 인한 부상 확률은 0%로 나타났으며, 폭발효율을 1.0으로 적용하면 인체에 대한 관심거리가 50m부터 부상확률이 0%로 나타났다.

추후 화염에 의한 인체에 미치는 피해영향분석과 방출구의 위치에 따른 과압 및 화염의 진행경로와 영향으로 인한 피해예측을 계속 연구하고자 한다.

참고문헌

- (1) Korea Statistical Information System Consumption Data of Energy Source <http://kosis.nso.go.kr>
- (2) Korea Gas Safety Corporation, 2006, "2005 Gas Accident Yearbook," Sun Jin company, pp. 87~172.
- (3) Leem, S. H. and Huh, Y. J., 2006, "A Development of Intelligent Decision System by Safety Distance of GAS Storage Tank," *Journal of Korean Academic Industrial Society*, Vol. 7, No. 4, pp. 721~726.
- (4) Oh, K. H., Kang, Y. O. and Lee, S. E., 2004,

- "A Study on the Flame Behavior of Whirl Fire and Pool Fire," *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 19, No. 3, pp. 45~50.
- (5) Leem, S. H., Choi, I. W. and Lim, D. Y., 2005, "A Study on Estimation of Overpressure Damage Caused by Rupture of Butane Can(volume : 34g)," *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 9, No. 2, pp. 8~15.
- (6) Lee, B. J. and Kim, J. H., 2005, "Characteristics of Methane Non-Premixed Multiple Jet Flames," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 29, No. 2, pp. 349~355.
- (7) Chae, J. O., Kim, S. S., Jo, Y. D. and Jang, G. H., 2003, "A study on the Characteristics of Gas Explosion with Vent Area," *Journal of the Korea Institute of Gas*, Vol.7, No. 4, pp. 53~60.
- (8) Baker, W. E., Cox, P. A., Wetine, P. S., Kulesz, J. J. and Strehlow, R. A., 1983, "Explosion Hazards Evaluation," *Elsevier Science*.
- (9) Crowl, W. K., 1969, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Technical Manual TM 5-1300," U.S. Army, Navy and Air Force, *U.S. Government Printing Office*, Washington D.C.
- (10) Harris, R. J., Marshall, M. R. and Moppett, D. J., 1977, "The Response of Glass Windows to Explosion Pressure," *ICJemE*, Symp. Series No. 49.
- (11) Lees, Frank P. and Ang, M.I., 1989, "Safety Cases," *Butterworth & Co. Ltd.*
- (12) Korea Industrial Safety Corporation, 1999, "Effecting Method of Accident Damage," KOSHA CODE P-09-1999.
- (13) CCPS, 1994, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire, and BLEVEs," Center for Chemical Process Safety, *AICHE*, New York, USA.
- (14) Wiekema, B. J., 1980, "Vapour Cloud Explosion Model," *J. of Hazardous Materials*, Vol. 3, pp. 221~232.
- (15) Ven den Berg, A. C., 1985, "The Multi-Energy Method: a Framework for Vapour Cloud Explosion Blast Prediction," *J. of Hazards Materials*, Vol. 12, pp. 1~10.
- (16) Baker, Q. A., Tang, M. J., Scheier, E. A. and Silva, G. J., 1994, "Vapour Cloud Explosion Analysis," *AICHE*, 28th Loss Prev. Symp, April.
- (17) Dag Bjerketvedt, Kees Van Wingerden, Jan Roar Bakke, 1997, "Gas Explosion Handbook," *Elsevier Science*, pp. 40~65.
- (18) Niepenberg von, H.P. and Rick Oppenberg, 1978, "Zusammenstellung Sicherheitstechnischer Daten Zur Vermeidung Von Explosionen in Feuerraumen, (Ger)," *Industriefeuerung* 11.
- (19) C.J.M. Van Wingerden, J. P. Zeeuwen, 1986, "Explosions in Pipe-rack-like Obstacle Array," 10th International Colloquium of Explosion and Reactive Systems. 1985. Berkeley. California. *AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics*. 106.
- (20) Kim, Y. S., Lee, D. R., Ha, M. Y., Chang, Y. J., Jeon, C. H., Cho, S. W., Kang, K. Y. and Yu, J. H., 2007, "Flow and Combustion Characteristic in an Array of Multiple Pre-Mixed Methane/Air Flame Jet," *Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 31, No. 6, pp. 547~557.
- (21) Hattwig, M., Steen, H., 2004, "Handbook of Explosion Prevention and Protection," *Wiley-VCH verlag GmbH & Co. KGaA*, pp. 276~282.
- (22) CHEMSAFE : Datenbank Fur Bewertete Sicherheitstechnische Kenngrößen, Erstellt Von BAM, Berlin, DECHMA, Frankfurt und PTB, Braunschweig.
- (23) Bjorkhaug, M., 1988, "Large-scale Investigation of Turbulent Explosion Properties for Hydrogen-air and Some Hydrocarbon-air Mixtures," CMI Report No. 25110-2. *Chr. Michelsen Institute. Bergen. Norway*.
- (24) Sogo, S. and Hase, K., 1998, "Study of Blowoff at a Multiple Slit Burner," *Annual technical report digest*, Vol. 8.
- (25) Truax, Barry(ed), 1978, "A Handbook for Acoustic Ecology," *A.R.C. Publication*, Vancouver, p. 1261.
- (26) CCPS, 1989, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis," *CCPS of the AIChE*.
- (27) Finney, D. J. 1947, "Probit Analysis," Cambridge.