

# VCE에 의한 건물피해에측에 관한 연구

임사환<sup>†</sup> · 이종락 · 허용정<sup>\*</sup>

한국가스안전공사 가스안전교육원 · \*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부  
(2007. 5. 3. 접수 / 2007. 8. 20. 채택)

## A Study on Estimation of Structure Damage caused by VCE

Sa-Hwan Leem<sup>†</sup> · Jong-Rark Lee · Yong-Jeong Huh<sup>\*</sup>

Institute of Gas Technology Training, Korea Gas Safety Corporation

<sup>\*</sup>School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

(Received May 3, 2007 / Accepted August 20, 2007)

**Abstract** : This paper is estimation of structure damage caused by VCE(Vapor Cloud Explosion) in enclosure. As we estimate the influence of damage which occur at gas facility in factory. We can utilize the elementary data of safety distance. In this study, the influence of over-pressure 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 structure 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 structures of 20 meters away and to glass bursting of 80 meters away was nearly zero in open space explosion.

**Key Words** : damage estimation, gas explosion, VCE

### 1. 서 론

산업사회가 발전하면서 점진적으로 변하는 에너지 산업에서 가스의 수요는 Table 1처럼 날로 급증하고 있다<sup>1)</sup>. 최근 5년 동안의 가스시설에서 발생한 사고의 현황은 Table 2와 같으며, 가스사고의 형태별 현황은 Table 3과 같다. 이를 살펴보면 가정집에서 가스폭발로 인한 사고가 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다<sup>2)</sup>.

따라서 가스안전교육원에서는 이러한 공간에서의 누출에 의한 폭발의 위험성을 교육하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험용 booth를 만들어서 피해예측을 고찰하고자 한다. 기존의 연구에서는 과압에 의한 안전거리 및 안전성 등에 대한 연구를 진행하였다<sup>3-7)</sup>. 본 연구에서는 폭발에 의한 영향범위 산정은 Scaling 법칙을 사용<sup>8,9)</sup>하고, 과압에 의한 건물의 영향은 Probit 모델을 적용하여 평가하였다<sup>10-13)</sup>.

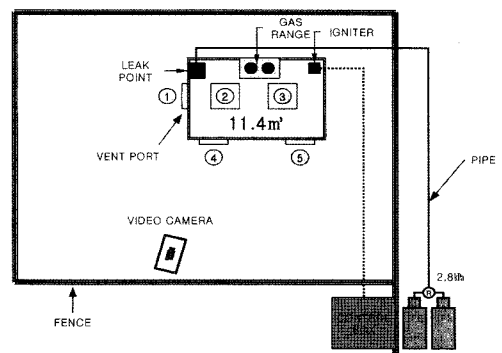


Fig. 1. Illustration of experimental apparatus.

Table 1. Consumption of energy (Units : 1000ton)

Year	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

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
gentle@kgs.or.kr

Table 2. Accident by facility (Units : case)

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

( ) : Single house, [ ] : Apartment

Table 3. Type by LPgas accidents (Units : case)

Year	2001	2002	2003	2004	2005
Explosion	40(3)[6]	55(2)[-]	49(5)[11]	37(3)[5]	39(1)[-]
Fire	33(-)[4]	17(1)[3]	28(6)[2]	15(4)[1]	18(2)[2]
Leakage	3(7)[2]	2(15)[2]	6(4)[5]	5(8)[1]	2(7)[-]
CO Toxicosis	1(8)	2(9)	1(5)	2(6)	6(6)
Oxygen Deficiency	[-2]	-	[-1]	2	1

( ) : City gas, [ ] : High-pressure gas

## 2. 이론적 배경 및 계산식

### 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<sup>14)</sup>.

Fig. 2에서 보여주는 것처럼 연소범위는 초기온도가 증가하면 넓어질 것이다. 초기압력의 변화에 의한 연소범위는 공기중 탄화수소에 대하여 LFL은 그다지 변화가 적으나 UFL은 증가할 것이다<sup>15)</sup>. 이러한 증기운폭발은 BLEVE보다 폭발효율이 적으며, 연소에 너지의 약 20%만 폭발파로 전환된다.

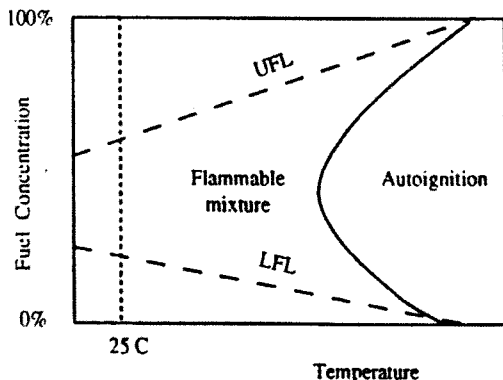


Fig. 2. The effect of temperature on LFL and UFL.

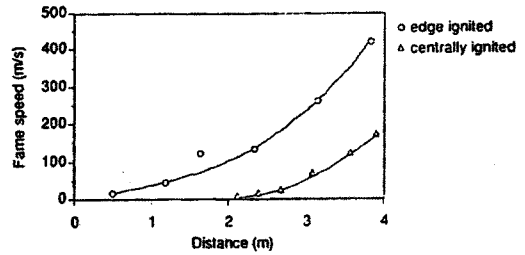


Fig. 3. Flame speed vs. distance for centrally and edge ignited explosions in a double configuration(i.e. solid top plate) with obstacles.

Table 4 Explosion limit of important flammable gases in air\*

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

또한 Fig. 3에서 보듯이 증기와 공기와의 난류 혼합 또는 방출점으로부터 먼 지점에서의 증기운 점화는 폭발의 충격을 가중시킨다<sup>16)</sup>.

Table 4는 대기압 조건에서 가연성가스의 폭발범위<sup>17)</sup>이며 CHEMSAFE<sup>18)</sup>에서 발췌한 내용이다.

가스폭발로 인한 피해범위를 최대로 하기 위하여 가스농도는 양론조성<sup>19)</sup>에 가깝게 하였으며, 점화원과 누출원의 거리도 최대한 멀리하였다<sup>20)</sup>. 또한 이를 위하여 가스폭발의 강도를 TNT폭발과 비교하여 TNT 상당량을 구하는 방법을 채택하였다.

### 2.2. TNT 상당량 계산

$$W_{TNT} = \frac{\eta \times H_C \times W_C}{H_{TNT}} \quad (1)$$

$W_{TNT}$  : TNT 상당량(kg)

$W_C$  : 가연성가스의 질량(kg)

$H_C$  : 가연성가스의 연소열(kcal/kg)

$H_{TNT}$  : TNT의 연소열(1000kcal/kg)

$\eta$  : 폭발효율(개방계에서는 1~10%)

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (2)$$

$Z$  : 환산거리(m/kg<sup>1/3</sup>)

$R$  : 폭발중심으로부터의 관심거리(m)

### 2.3. PROBIT 분석

구조물에 미치는 영향은 아래 식을 이용하였다.

#### 2.3.1. 구조물의 손상

$$Probit = -23.8 + 2.92 \ln(P_s) \quad (3)$$

#### 2.3.2. 유리의 파손

$$Probit = -18.1 + 2.79 \ln(P_s) \quad (4)$$

$P_s$  : 피크과압(Pa)

## 3. 계산결과

최대압력이 발생하는 양론농도는 체적이 11.4m<sup>3</sup> 이므로, CH<sub>4</sub>의 경우는 1083L, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 경우는 456L 이다. 따라서 본 연구에서는 LPG(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)을 누출하여 실험을 실시하였다.

Table 5는 피크과압에 따른 피해형태를 나타낸 것이다.

또한 이를 이용하여 과압에 의한 건물의 피해분석에 대하여 비교·검토하는데 활용하고자 한다.

밀폐공간에서의 VCE에 의한 과압의 피해예측을 위하여 식 (1)을 적용하여 TNT상당량을 계산하였다. 보편적으로 가정에서 사용되는 CH<sub>4</sub>와 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 폭발에 적용되는 폭발효율은 개방계에서는 0.03을 적용

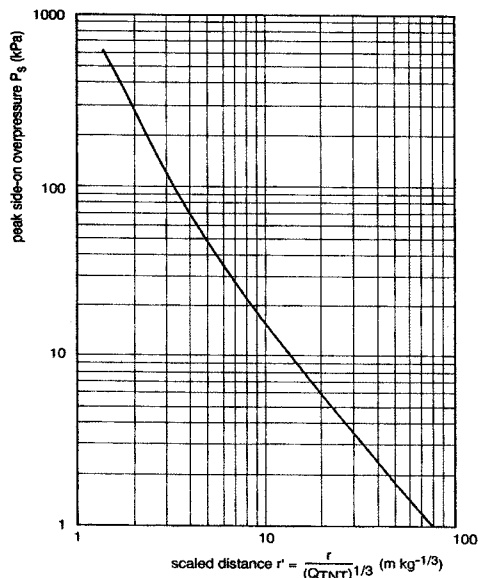


Fig. 4. Peak overpressure by TNT explosion.

Table 5. Damage by blast 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 with distance caused by VCE

Z(m)	R(m)	W <sub>TNT</sub> (kg)	Over pressure(kPa)	X(m)
0.45	1.0	11.24	1500.0	0.74
0.89	2.0		1000.0	0.97
1.34	3.0		740.0	1.17
1.79	4.0		400.0	1.74
2.34	5.0		220.0	2.56
2.68	6.0		175.0	2.97
3.12	7.0		120.0	3.79
3.57	8.0		90.0	4.56
4.02	9.0		68.0	5.46
4.46	10.0		60.0	5.92
6.70	15.0		30.0	9.25
8.93	20.0		18.0	12.85
11.16	25.0		15.0	14.46
13.39	30.0		12.5	16.26
17.85	40.0		7.5	22.60
22.32	50.0		5.3	28.26
33.48	75.0	3.0	40.79	
44.64	100.0	2.15	50.55	
66.95	150.0	1.37	67.59	
89.27	200.0	0.86	91.24	
111.59	250.0	0.69	105.15	
116.05	260.0	0.67	107.16	

\* X(m) : Damage distance

한다<sup>21,22)</sup>. 하지만 본 연구에서는 여러 가지 안전사항을 복합적으로 판단하기 위하여 폭발효율을 1.0으로 적용하였다.

Table 6은 식(1)에서 구한 TNT당량을 이용하여 식 (2)에 적용하여  $W_{TNT}$ 상당량에 해당하는 환산거리를 구한 수치이며, 이를 이용하여 Fig. 4에 적용하여 폭발장소에서의 이격거리별 피크과압을 구한 수치이다. 또한 이러한 수치를 이용하여 과압으로 인한 영향거리를 구하여 보았다.

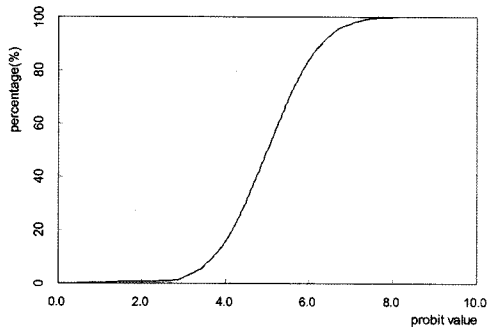


Fig. 5. Relationship with probability value(probit) and percentage.

Table 7. Damage probability with distance caused by VCE

R(m)	Structure damage probit value	Structure damage probability(%)	Glass bursting probit value	Glass bursting probability(%)
1.0	17.725	100.0%	21.577	100.0%
2.0	16.541	100.0%	20.445	100.0%
3.0	15.662	100.0%	19.605	100.0%
4.0	13.866	100.0%	17.889	100.0%
5.0	12.120	100.0%	16.221	100.0%
6.0	11.452	100.0%	15.582	100.0%
7.0	10.350	100.0%	14.530	100.0%
8.0	9.510	100.0%	13.727	100.0%
9.0	8.692	100.0%	12.945	100.0%
10.0	8.326	100.0%	12.596	100.0%
15.0	6.302	90.4%	10.662	100.0%
20.0	4.811	42.5%	9.237	100.0%
25.0	4.278	23.6%	8.728	100.0%
30.0	3.746	10.1%	8.219	100.0%
40.0	2.254	0.8%	6.794	96.2%
50.0	1.240	0.0%	5.826	79.5%
75.0	-0.421	0.0%	4.238	22.3%
100.0	-1.394	0.0%	3.308	4.5%
150.0	-2.710	0.0%	2.051	0.8%
200.0	-4.070	0.0%	0.752	0.3%
250.0	-4.713	0.0%	0.137	0.1%
260.0	-4.799	0.0%	0.055	0.0%

Fig. 5는 확률값(Probit value)과 백분율과의 관계를 도식화한 것이다. Fig. 4를 이용하여 Probit 분석<sup>23)</sup> 계산식에서 구한 수치를 적용하여 거리별로 건축물에 미치는 사고피해를 예측하고자 한다.

Table 7은 과압이 미치는 거리별로 건축물에 미치는 영향을 Fig. 5에 적용하여 백분율로 나타낸 것이다.

본 연구에서는 과압의 영향에 대하여 Hopkinson의 삼승근법을 이용하여 계산하고, 폭발장소 주변의 건축물에 미치는 영향을 Probit 모델에 적용하여 피해예측을 평가하였으며, LPG의 이론연소열 12,564 kcal/kg을 적용하여 계산하였다.

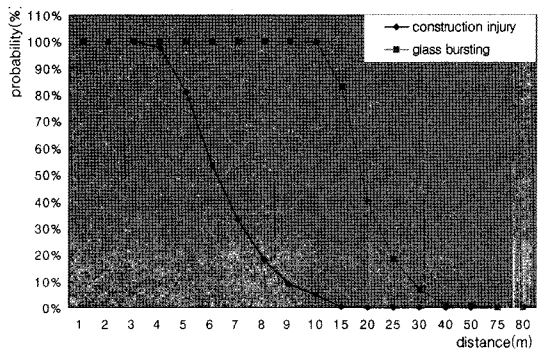


Fig. 6. The distance for damage effect at factor 0,03.

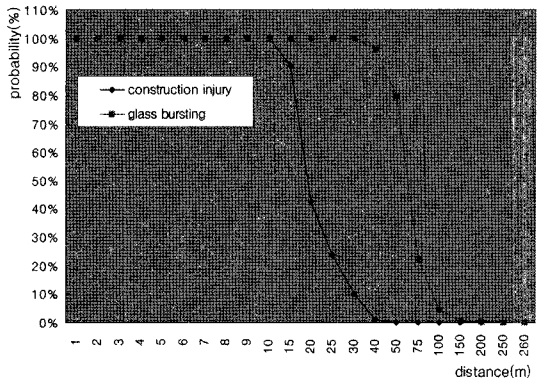


Fig. 7. The distance for damage effect at factor 1,0.

Fig. 6은 폭발효율 0.03을 적용하였을 경우 거리에 따른 손상확률이며, Fig. 7은 폭발효율 1.0을 적용한 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 폭발효율을 100% 적용하여 이론

에 의한 계산결과로 피해영향을 예측하였다. 따라서 실제적으로 미치는 영향은 연구결과와 동일한 피해가 일어난다고 보기 어려우며 피해영향은 본 연구 결과보다 작게 나타날 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 구조물에 대한 손상확률은 폭발효율을 0.03으로 적용하였을 경우 관심거리 20m부터, 폭발효율을 1.0으로 적용하면 관심거리 50m부터 0%로 나타났다.

2) 유리에 대한 손상확률은 폭발효율을 0.03으로 적용하였을 경우 관심거리 80m부터, 폭발효율을 1.0으로 적용하면 관심거리 260m부터 0%로 나타났다.

이러한 모든 결과는 이론에 근거하였다. 물론 연구에 인용된 계산식은 실험식을 근간으로 하였으므로 피해예측에 충분하다고 할 것이다. 피해한계거리보다 이격된 곳에서의 사고피해는 발생하지 않을 것으로 판단한다.

추후 화염의 거동에 의한 건축물에 미치는 피해영향분석과 과압 및 화염에 의한 인체에 미치는 피해영향을 계속 연구코자 한다.

### 참고문헌

- 1) Korea Statistical Information System Consumption data of Energy source. <http://kosis.nso.go.kr>
- 2) Korea Gas Safety Corporation, "2005 Gas Accident Yearbook", O-Sung Printing, pp. 25~287, 2006.
- 3) S.H. Leem and Y.J. Huh, "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, 2006.
- 4) K.H. Oh, Y.O. Kang and S.E. Lee, "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, 2004.
- 5) S.H. Leem, Y.J. Huh, S.J. Choi, J.R. Lee and D. Y. Lim, "A Study on Estimation of Human Damage Caused by Rupture of Butane Can", J. of the Korean Society of Safety, Vol. 22, No. 3, pp. 98~104, 2005.
- 6) B.J. Lee and J.H. Kim, "Characteristics of Methane Non-Premixed Multiple Jet Flames", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 29, No. 3, pp. 349~355, 2005.
- 7) J.O. Chae, S.S. Kim, Y.D. Jo and G.H. Jang, "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, 2003.
- 8) W.E. Baker, P.A. Cox, P.S. Wetine, J.J. Kulesz and R.A. Strehlow, "Explosion Hazards Evaluation", Elsevier Science, 1983.
- 9) W.K. Crowl, "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., 1969.
- 10) CCPS, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire and BLEVE", AIChE, New York, 1994.
- 11) R.J. Harris, M.R. Marshall and D.J. Moppett, "The Response of Glass Windows to Explosion Pressure", Symp. Series No. 49. ICJemE, 1977.
- 12) Frank P and Lees, M.I. Ang, "Safety Cases", Butterworth & Co. Ltd., 1989.
- 13) Korea Industrial Safety Corporation, "Effecting Method of Accident Damage", KOSHA CODE P-09-1999, 1999.
- 14) CCPS, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire and BLEVE", AIChE, New York, 1994.
- 15) H.P. Niepenberg von, Rick Oppenberg, 1978, "Zusammenstellung sicherheitstechnischer Daten zur Vermeidung von Explosionen in Feuerraumen, (Ger)", Industrieferung 11.
- 16) C.J.M. van Wingerden. J.P. Zeeuwen, "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, 1986.
- 17) Hattwig, M., Steen, H., "Handbook of Explosion Prevention and Protection", Wilet-VCH verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 276~282, 2004.
- 18) CHEMSAFE : Datenbank für bewertete sicherheitstechnische Kenngrößen, erstellt von BAM, Berlin, DECHMA, Frankfurt und PTB, Braunschweig.
- 19) M. Bjorkhaug, "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, 1988.
- 20) HC.J.M. van Wingerden. J.P. Zeeuwen, "Explosion in pipe-rack-like obstacle array", 10th International

- Colloquium of Explosion and Reactive Systems. 1985. Berkeley, California. AIAA Progress and in astronautics and aeronautics. 106, 1986.
- 21) Truax, Barry(ed), "A Handbook for Acoustic Ecology", Vancouver, A.R.C. Publication, p. 1261, 1978.
- 22) BCCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", CCPS of the AIChE, 1989.
- 23) Finney, D. J. "Probit Analysis", Cambridge, 1947.