



## 프로비트모델을 통한 밀폐공간에서의 증기운폭발 과압에 의한 인체피해예측

†임사환 · 이종락 · 허용정\*

한국가스안전공사 교수실, \*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과  
(2007년 7월 2일 접수, 2008년 3월 18일 채택)

## A Study on Estimation of Human Damage for Overpressure by Vapor Cloud Explosion in Enclosure Using Probit Model

†Sa Hwan Leem · Jong Rark Lee · Yong Jeong Huh\*

*Institute of Gas Technology Training, Korea Gas Safety Corporation*

*\*School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education*

*(Received July 2, 2007, Accepted March 18, 2008)*

### 요 약

환경친화적인 에너지원으로서 가스의 수요가 날로 급증하고 있다. 또한 가스의 수요와 더불어 가스사용이 늘어나면서 폭발과 화재에 의한 인명피해가 해마다 증가하고 있다. 따라서, 본 연구에 사용된 실험용 부스의 밀폐된 공간에서의 증기운폭발 과압의 피해를 Hopkinson의 삼승근법을 이용하여 계산하고, 인체에 미치는 영향을 프로비트 모델에 적용하여 피해예측을 평가하였다. 그 결과 프로비트 모델에 적용하여 계산하면 3 m 이격된 인체에는 손상가능성이 전혀 없는 0%로 나타났으며, 25 m 이격되면 고막파열 손상가능성이 전혀 없는 것으로 나타났다.

**Abstract** – The demand of gas as an eco-friendly energy source has been increased. With the demand of gas, the use of gas is also increased, so injury and loss of life by the explosion and fire have been increasing every year. Hence the influence on over-pressure caused by Vapor Cloud Explosion in enclosure of experimental booth was calculated by using the Hopkinson's scaling law and damage effect by the accident to a human body was estimated by applying 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 over 3 meters away and that of overpressure to tympanum rupture over 25 meters away from the explosion shows nothing.

**Key words** : Probit Model, VCE(Vapor Cloud Explosion), Over-pressure

### I. 서 론

급속도로 변하는 사회에서 친환경적인 에너지원으로서 가스의 수요는 일반산업체와 가정, 식당 등에서 빠르게 확산되어 우리사회의 중추적인 역할로 대두됨을 Table 1에서 알 수 있다[1].

또한, 가스시설에서 발생한 최근 5년 동안의 사고의 현황은 Table 2와 같이 가정 등에서 많이 발생하였으며, 대부분의 사고는 LP gas에 의한 것이다.

Table 3에 나타난 것처럼 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 위하여 Fig. 1과 같은 실험용 Booth를 만들어서 Booth에서의 폭발시 피해예측을 고찰하고자 하였다.

이전 연구에서는 과압에 의한 안전거리 및 안전성 등

†주저자:gentle@kgs.or.kr

**Table 1.** Consumption of energy.

(Units : 1000 ton)

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



**Fig. 1.** Experimental booth.

**Table 2.** Accident by facility.

(Units : Ea)

Year	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 LPgas Accidents.

(Units : Ea)

Year	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

에 대한 연구를 진행하였다[3-7]. 그러므로 본 연구에서는 폭발에 의한 영향범위 산정을 Scaling 법칙을 사용[8,9]하고, 과압에 의한 인체의 영향은 Probit 모델을 적용하여 평가하였다[10-12].

## II. 폭발이론 및 계산식

가스폭발은 산화제와 혼합된 가연성 가스운의 연소로 인한 급격한 부피팽창 과정으로 정의할 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]. 또한, 가스폭발의 결과는 여러 변수들에 의해 영향을 받으므로 피해정도를 단순히 예측하기는 매우 어려운 실정이다.

따라서 가스폭발의 위험분석과 실제 경험을 바탕으로 폭발사고에 대한 피해예측과 피해최소화 설비를 갖춘 실험이 필요하다.

### 2.1. 폭발이론

가연성 가스가 유출되어 대기중의 공기와 혼합하여 폭발성혼합 가스를 형성하고 이때 방출되는 가스의 단열 팽창에 의한 온도의 저하로 공기와 혼합하여 증기운 형태를 갖는다. 착화원에 의하여 화구(Fire Ball) 형태로 착화 폭발하는 것을 증기운폭발(VCE : Vapor Cloud Explosion)이라 한다.

Fig. 2에서 보여주는 것처럼 연소범위는 초기온도가 증가하면 넓어지며 초기압력에 의한 영향은 가스에 따라 다르며 LFL은 그다지 변화가 없으며 UFL은 대체로 증가하는 것으로 알려져 있다. 이러한 증기운 폭발은 BLEVE보다 폭발효율이 적으며, 가스폭발의 경우 폭발효율이 40%를 초과할 수 있다. 그러나, 폭발효율의 경우 실험과 많은 증기운폭발 사고에서 관측된 피해로부터 유도되는데 대부분의 주요 증기운폭발 사고

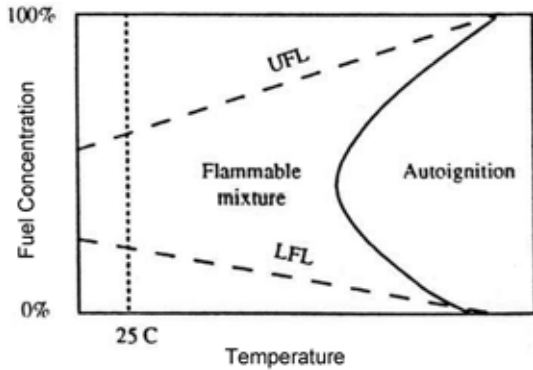


Fig. 2. The effect of temperature on LFL and UFL.

의 경우 폭발효율은 누출된 연료 전량의 연소열에 기초하여 1%~10% 정도로 추정된다[18].

또한, 증기와 공기와의 난류혼합 또는 방출점으로부터 먼지점에서의 증기운점화는 폭발의 충격을 가중시키며, 2007년 김영수 등에 의하면 부상화염은 공기량에 많은 영향을 받음을 알 수 있다[19].

메탄과 프로판의 폭발범위(CH<sub>4</sub> : 4.4~17.0%, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> : 1.7~10.9%)는 대기압하에서의 조건으로 CHEMSAFE [20,21]에서 확인할 수 있다.

가스폭발로 인한 피해범위를 최대로 하기 위하여 가스농도는 양론조성[22,23]에 가깝게 하였으며, 실험공간에서 최대거리로 점화원과 누출원과의 거리는 2.5 m이다. 또한 가스폭발의 강도는 TNT 상당량을 구하는 방법을 채택하였다.

Fig. 3는 TNT 폭발에 의한 피크 과압의 그래프로 폭발 과압으로 인한 피해거리를 산출하는데 활용된다.

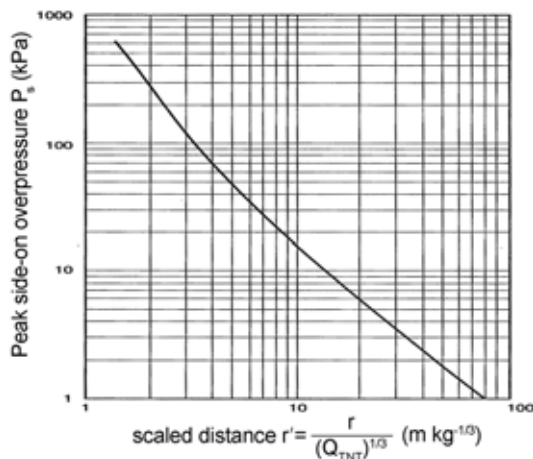
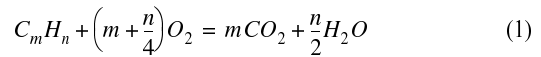


Fig. 3. Peak overpressure by TNT explosion.

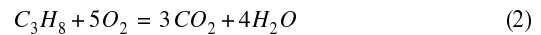
Table 4. Theoretical air demand of LPG combustion.

Ingredient	A Contain volume in 1 Nm <sup>3</sup>	B Oxide equivalent	AB Oxide needed	Theory Air volume
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.008	3	0.024	4.988/0.21 =23.75
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.989	3	4.945	
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.003	6.5	0.019	
Total	1.000		4.988	

탄화수소계 연소방정식은 다음과 같다[24].



표준상태의 가스 1 m<sup>3</sup>를 연소시키기 위하여 필요한 최소량의 공기를 이론공기(理論空氣)라 하며, 식 (1)을 이용하여 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) 가스에 대입하여 계산하면 식 (2)와 같다.



LP가스의 이론 공기량의 계산은 Table 4와 같다.

각종 가스의 이론 공기량 비를 산출해보면 발열량 1000 kcal/m<sup>3</sup>당 약 0.9~1.0로 거의 일정한 것으로 알려지고 있다.

## 2.2. TNT상당량 계산

$$W_{TNT} = \frac{\eta \times H_C \times W_C}{H_{TNT}} \quad (3)$$

$W_{TNT}$  : TNT상당량(kg)

$W_C$  : 가연성가스의 질량(kg)

$H_{TNT}$  : TNT의 연소열(kcal/kg)

$H_C$  : 가연성가스의 연소열(kcal/kg)

$\eta$  : 폭발효율

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (4)$$

$Z$  : 환산거리(m/kg<sup>1/3</sup>)

$R$  : 폭발중심으로부터의 관심거리(m)

## 2.3. Probit 분석

### 2.3.1. 폐출혈로 인한 사망

$$\text{Probit} = -77.1 + 6.91 \ln(P_s) \quad (5)$$

2.3.2 고막파열의 경우

$$\text{Probit} = -15.6 + 1.93\ln(P_S) \quad (6)$$

$P_S$  : 피크과압(Pa)

III. 계산결과

Booth의 체적이 11.4 m<sup>3</sup>이므로, 최대압력이 발생하는 각 가스의 양론농도는 메탄(CH<sub>4</sub>)의 경우는 1083 l, 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)의 경우는 456 l이며, 본 연구에서는 LPG(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)를 누출하여 밀폐공간에서 형성된 증기운을 폭발시켜 교육을 실시하는 경우에 대한 것이다.

Table 5는 피크과압에 따른 피해형태를 나타낸 것이다.

이를 이용하여 과압의 영향은 식 (4)의 Hopkinson의 삼승근법을 이용하여 계산하고, 피해영향은 Probit 분석 계산으로 평가시 비교·검토하는데 활용하고자 한다.

Table 5. Blast damage by overpressure.

Overpressure (kPa)	Form of damage
0.14	Disagreeable noise by low frequency (10~15 Hz)
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

양론조성에서 폭발로 인한 피해의 규모가 가장 크므로 용량은 식 (2)을 이용하여 계산하였으며, Table 6은 식(3)에서 구한 TNT당량을 이용하여 식 (4)에 적용하여 W<sub>TNT</sub> 상당량에 해당하는 환산거리를 구한 수치이다. 또한, 이 수치를 이용하여 Fig. 3에 적용하여 폭발

Table 6. Overpressure about distance caused by VCE.

Z (m)	R (m)	W <sub>TNT</sub> (kg)	Over Pressure (kPa)
1.44	1.0	0.34	620.00
2.87	2.0		143.00
4.31	3.0		63.30
5.75	4.0		38.00
7.18	5.0		26.00
8.62	6.0		19.80
10.06	7.0		16.60
11.49	8.0		14.00
12.93	9.0		12.12
14.37	10.0		10.90
21.55	15.0		5.55
28.73	20.0		3.60
35.91	25.0		2.85

Table 7. Damage probability about distance caused by VCE.

R (m)	Lung hemorrhage death probit value	Lung hemorrhage death probability (%)	Tympanum rupture probit value	Tympanum rupture probability (%)
1	15.06	100%	10.141	100%
2	4.926	47.2%	7.310	99.1%
3	-0.71	0.0%	5.737	76.9%
4	-4.23	0.0%	4.753	40.2%
5	-6.85	0.0%	4.020	16.3%
6	-8.74	0.0%	3.494	6.6%
7	-9.95	0.0%	3.154	3.3%
8	-11.13	0.0%	2.825	1.6%
9	-12.13	0.0%	2.547	1.0%
10	-12.86	0.0%	2.342	0.9%
15	-17.53	0.0%	1.040	0.4%
20	-20.52	0.0%	0.204	0.1%
25	-22.13	0.0%	-0.247	0.0%

장소에서의 이격거리별 피크과압을 구한 수치이다. 또한 이러한 수치를 이용하여 과압에 의한 영향거리를 구하여 보았다.

밀폐공간에서 VCE에 의한 과압의 피해예측을 위하여 식 (3)을 적용하여 TNT 상당량을 계산하였다. 보편적으로 가정에서 사용되는 CH<sub>4</sub>와 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 폭발에 적용되는 폭발효율은 개방계에서는 0.03을 적용한다[25,26].

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

Fig. 4는 확률값(Probit값)과 백분율과의 관계를 도식화한 것이다. Fig. 4를 이용하여 Probit[27]분석 계산식에서 구한 수치를 적용하여 거리별로 인체에 미치는 사고피해를 예측하였다.

본 연구에서는 과압의 영향에 대하여 Hopkinson의 삼승근법을 이용하여 계산하고, 폭발장소 주변의 인체에 미치는 영향을 Probit 모델에 적용하여 피해예측을 평가하였으며, LPG의 이론연소열 12564 kcal/kg을 적용하여 계산하였다.

Fig. 5는 폭발효율 0.03을 적용하였을 경우 거리에 따른 손상확률을 나타낸 것이며, Fig. 6은 폭발효율 1.0을 적용하여 나타낸 것이다.

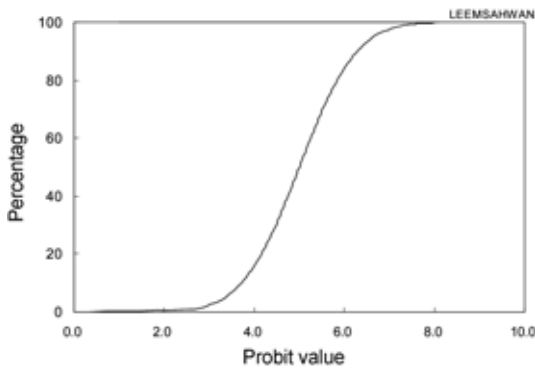


Fig. 4. Relation with probability value (probit) and percent.

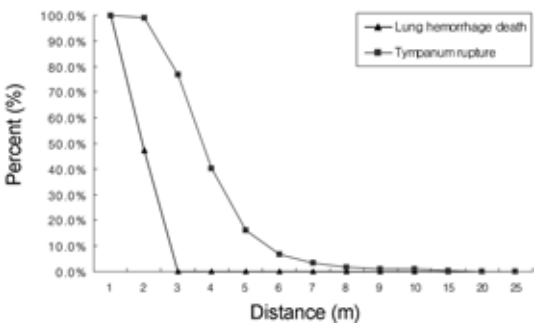


Fig. 5. The distance for damage effect at factor 0.03.

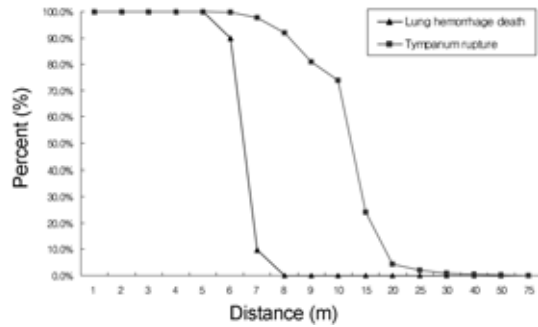


Fig. 6. The distance for damage effect at factor 1.0.

#### IV. 결 론

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

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폭발효율을 0.03으로 적용하였을 경우, 관심거리 3 m부터는 폐출혈로 인한 손상확률은 0%로 나타났으며, 폭발효율을 1.0으로 적용하면 인체에 대한 관심거리가 8 m부터 손상확률이 0%로 나타났다.
- 2) 폭발효율을 0.03으로 적용하였을 경우, 관심거리 25 m부터는 고막파열에 대한 손상확률은 0%로 나타났으며, 폭발효율을 1.0으로 적용하면 인체에 대한 관심거리가 75 m부터 손상확률이 0%로 나타났다.

#### 참고문헌

- [1] 국가통계포털, <http://www.kosis.kr>
- [2] 한국가스안전공사, “2005 가스사고연감”, (주)오성프린팅, (2006)
- [3] 임사환, 허용정, “가스 저장탱크 안전거리의 지적 결정 시스템 개발”, *한국산학기술학회논문지*, 7(4), 721-726, (2006)
- [4] 오규형, 강연옥, 이성은, “Whirl Fire와 Pool Fire의 화염 거동에 관한 연구”, *한국안전학회지*, 19(3), 45-50, (2004)
- [5] 임사환, 허용정, 최성주, 이종락, 임동연, “부탄 캔 파열로 인한 인체피해예측에 관한 연구”, *한국안전학회지*, 22(3), 98-104, (2007)
- [6] 이병준, 김진현, “메탄 비예혼합 상호작용 화염의 특성”, *대한기계학회논문집 B권*, 29(3), 349-355, (2005)
- [7] 채재우, 김상섭, 조영도, 장기현, “밀폐공간에서 파

- 열면에 따른 가스폭발특성에 관한 연구”, *한국가스학회지*, 7(4), 53-60, (2003)
- [8] Baker, W.E., P.A. Cox, P.S. Wetine, J.J. Kulesz and R.A. Strehlow, “Explosion Hazards Evaluation”, Elsevier Science, (1983)
- [9] Crowl, W.K. “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] Harris, R.J., M.R. Marshall and D.J. Moppett, “The Response of Glass Windows to Explosion Pressure” ICJemE, Symp. Series No. 49, (1977)
- [11] Lees, Frank P. and M.I. Ang, “Safety Cases”, Butterworth & Co. Ltd., (1989)
- [12] Korea Industrial Safety Corporation, “Effecting Method of Accident Damage”, KOSHA CODE P-09-1999, (1999)
- [13] CCPS, “Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire, and BLEVEs”, Center for Chemical Process Safety, AIChE, New York, USA, (1994)
- [14] Wiekema, B.J. “Vapour Cloud Explosion Model”, *J. of Hazardous Materials*, 3, 221-232, (1980)
- [15] Ven den Berg, A.C. “The Multi-Energy Method: A Framework for Vapour Cloud Explosion Blast Prediction”, *J. of Hazards Materials*, 12, 1-10, (1985)
- [16] Baker, Q.A., M.J. Tang, E.A. Scheier and G.J. Silva, “Vapour Cloud Explosion Analysis”, AIChE, 28th Loss Prev. Symp, April, (1994)
- [17] Dag Bjerketvedt, Kees Van Wingerden, Jan Roar Bakke, “Gas Explosion Handbook”, Elsevier Science, pp.40-65, (1997)
- [18] Brasie, W.C. and D.W. Simpson, Symp. Loss Prev. 63rd Meeting AIChE St. Louis, (1968)
- [19] Kim, Y.S., D.R. Lee, M.Y. Ha, Y.C. Chang, C.H. Jeon, S.W. Cho, K.Y. Kang and J.H. Yu, “Flow and Combustion Characteristic in an Array of Multiple Pre-Mixed Methane/Air Flame Jet”, *Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers B*, 31(6), 547-557, (2007)
- [20] Hattwig, M. and H. Steen, “Handbook of Explosion Prevention and Protection”, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp.276-282, (2004)
- [21] CHEMSAFE : Datenbank für bewertete sicherheitstechnische Kenngrößen, erstellt von BAM, Berlin, DECHMA, Frankfurt und PTB, Braunschweig.
- [22] Bjorkhaug, M. “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)
- [23] Sogo, S. and K. Hase, “Study of Blowoff at a Multiple Slit Burner”, Annual Technical Report Digest, 8, (1998)
- [24] 임사환, 허용정, 이종락, 김철진, 박인수, 하태영, 김일우, 최락범, “가스보일러 직관배기통의 길이에 따른 폐가스(CO) 농도 고찰”, *한국가스학회지*, 11(2), 7-11, (2007)
- [25] Truax, Barry(ed), “A Handbook for Acoustic Ecology”, A.R.C. Publication, Vancouver, p.1261, (1978)
- [26] CCPS, “Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis”, CCPS of the AIChE, (1989)
- [27] Finney, D.J. “Probit Analysis”, Cambridge, (1947)