

화재 및 폭발재해의 강도 산정에 관한 비교 연구

A Comparative Study on the Methods of Consequence Estimation in Fire and Explosion Hazards

김 구 회* · 백 중 배* · 고 재 욱*

Ku-Hoi Kim · Jong-Bae Baek · Jae-Wook Ko

ABSTRACT

Many methods to assess hazards caused by the risks increased with the growth of petrochemical industry. The manual of International Atomic Energy Agency which was much more applied to quantitative analysis of the real situation and the CPQRA is introduced to verify the theoretical background of this manual. Than other methods, as a result, we can see that this manual, which is simple to use and requires a little information, shows similar results to those of calculation by numerical formula. Also, the program code of this manual was materialized and if it is possible to obtain adequate parameters to our circumstance, the manual will be quite useful in early risk analysis.

1. 서 론

석유화학산업은 최근 그 규모가 괄목할만한 성장 일로에 있고 이에 따른 사고의 위험성 또한 급격히 증가하고 있다. 기존의 위험성 제어 기술이나 방법은 공장 근로자의 안전성 확보나 재산상의 피해를 줄이는데 목적을 두었으나 최근 재해 및 공해의 사회적 문제화로 인하여 적절한 사고의 피해 산정 및 합리적 대책의 필요성이 증대되고 있다. 따라서 본 연구에서는 화학공장의 공정들과 그 내용물에 대한

화재·폭발의 잠재적 위험성을 정량화하여 재해로 인한 잠재적 손실 가능성을 관리자가 인식하여 예상되는 사고의 강도를 효과적인 방법으로 대처함으로써 그 손실의 규모를 최소화하는데 목적이 있다.

본 연구에서는 두가지 방법에 의한 강도산정에 주안점을 두고 그 방법들을 실제 사고에 적용시켜 비교해 보았다. 첫번째 방법은 CPQRA(Cheical Process Quantitative Risk Anaylsis)의 수식들을 바탕으로 하였으며, 또다른 방법으로는 국제 원자력 기구에서 발표된 중대사고에 대한 위험성 분류와 우선순위화에 대한 연구결과를 응용하였다.

* 광운대학교 공과대학 화학공학과

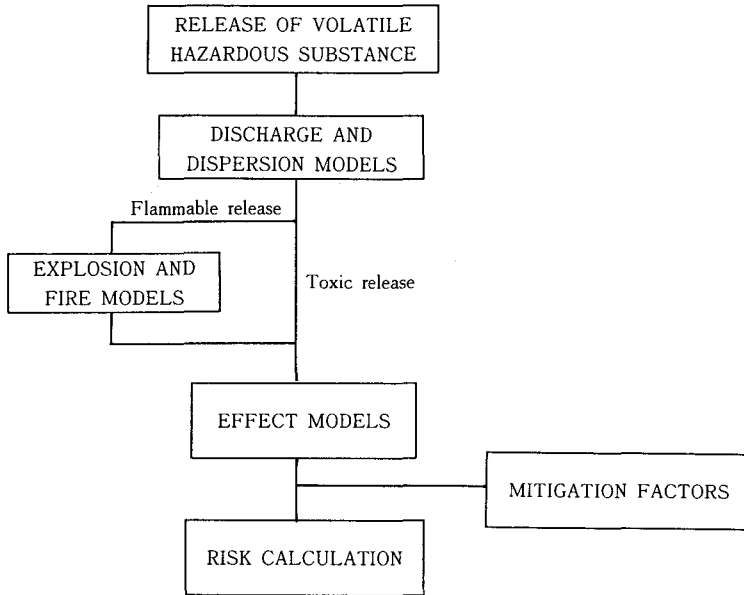


Fig. 1 Overall logic diagram of consequence model

2. CPQRA(Chemical Process Quantitative Risk Analysis)

위험물질들을 저장, 사용하거나 운송등에서 발생할 수 있는 화재·폭발로 인한 재해는 주로 UVCE(Unconfined Vapor Cloud Explosion)와 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)로 크게 구분할 수 있다¹⁾. 이들에 대한 강도(consequence)는 수식들을 이용하여 손실요소를 피해거리로 환산하여 산정할 수 있다.

2.1 UVCE(Unconfined Vapor Cloud Explosion)

용기등의 파손 등으로 인하여 누출된 가연성 기체가 대기중에서 폭발성 cloud를 형성한 후 점화원과 접촉하여 폭발을 일으키는 현상으로 주된 손실 요소는 압력이 된다. 따라서 일반적으로 TNT model을 이용한다²³⁾.

$$W = \frac{\eta M E_c}{E_{cTNT}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, W = equivalent mass of TNT(kg or lb)

M = mass of flammable material released

η = empirical explosion yield(or efficiency)
(ranges from 0.01 to 0.1)

E_c = lower heat of combustion of flammable gas(kJ/kg or Btu/lb)

E_{cTNT} = heat of combustion of TNT
(4437-4765 kJ/kg or 1943-2049 Btu/lb)이다.

식 (1)에서 구한 TNT 당량에 overpressure에 대한 scaled distance를 곱하여 압력이 미칠 수 있는 real distance를 구한다⁴⁾.

$$RG = Z_G W^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, R_G = real distance
 Z_G = scaled distance이다.

2.2 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) and Fireball

BLEVE는 저장용기의 액체가 갑자기 증발하여 저장용기가 내부압을 견디지 못하여 발생하는 폭발 현상이다. 일반적으로 fireball을 동반하기 때문에

주 손실요소는 thermal radiation이 된다. 이에 관한 수식은 실험치와 경험식으로서 연구자에 따라 조금씩 차이가 있지만, 본 연구에서는 Pitblado, Pietersen과 Hurta의 수식⁵⁾을 바탕으로 하였다. 그리고 target이 받는 thermal radiation을 구하기 위하여 기본 parameter가 이용되는데 이러한 parameter는 다음과 같다.

Peak fireball diameter(m) $D_{max} = 6.48M^{0.325}$ (3)

Fireball duration(s) $t_{BLEVE} = 0.825M^{0.26}$ (4)

Center height of fireball(m) $H_{BLEVE} = 0.75D_{max}$ (5)

여기서, M = mass of flammable liquid(kg)이다.

그리고 target이 받는 thermal radiation은 다음과 같다.

$Q_R = \tau E F_{21}$ (6)

여기서, Q_R = thermal radiation received by a target(kW/m²)

τ = transmissivity(dimensionless)

E = surface emitted flux(kW/m²)

F_{21} = view factor(dimensionless)이다.

τ 는 복사열 전달과 관련된 factor로서 일반적으로는 1을 사용하지만 실제로 방출된 복사열의 20-40% 정도가 대기중에 흡수되므로, 이를 고려하여 Pietersen의 수식을 이용한다.

$\tau = 2.02(P_w X)^{-0.09}$ (7)

여기서, P_w = water partial pressure(Pascal, N/m²)

X = path length, distance from flame surface to target(m)이다.

Fireball 표면에서의 방출되는 heat flux는 다음과 같이 정의되며

$E = \frac{F_{rad} M H_c}{\pi (D_{max})^2 t_{BLEVE}}$ (8)

여기서, H_c = heat of combustion(kJ/kg)

F_{rad} = radiation fraction, typically 0.25-0.40 이다.

Fireball과 target과의 geometric view factor는 다음과 같다.

$F_{21} = \frac{D^2}{4x^2}$ (9)

여기서, D = sphere diameter(m)

x = distance from center to target(m)이다.

이상과 같이 target에 thermal radiation이 미치는 거리는 식 (5), (6), (7), (8), (9)을 결합하여 (10) 식과 같이 정리되며, 거리는 trial and error방법을 사용하여 구한다.

$\frac{Q_R}{E} = \tau F_{21} = 2.02$

$\left[P_w \left(\sqrt{H^2 + x^2} - \frac{D}{2} \right) \right]^{-0.09} \frac{D^2}{4x^2}$ (10)

그리고 UVCE와 BLEVE에서 구해진 피해거리 안에 있는 사람이 100% 사망할 수 있는 강도는 overpressure의 경우 약 4-7Kg/cm²(58.8-99 psi)로 하며, thermal radiation은 시간에 관한 함수이므로 식(11)을 이용하여 probit과 percentage와의 관계에서 probit값을 구하여 결정한다⁶⁾.

$Q_R = \left[10^4 \frac{e^{(Pr+14.9)/2.56}}{t} \right]^{3/4}$ (11)

여기서, Pr = probits

t = duration of explosion

※ 100% 치사일 때의 probit값은 10이다.

3. IAEA(International Atomic Energy Agency) manual

위험성을 정량화하는 방법으로서 증대사고에 대한 위험성 분류와 우선순위화를 하는 것이다. 위험 물질을 취급하는 시설, 물질의 형태와 특성 그리고 취급량만 안다면 각각의 Table을 이용하여 적은 시간과 인력만으로 그 사고의 강도를 간단하게 산정할 수 있다^{1),7)}.

Fig. 2에서와 같이 물질의 형태, 특성 그리고 Activity만 안다면, 이 manual에서 정하는 reference number를 구할 수 있다. 여기서 구해진 reference number와 취급량으로 effect category를 구할 수 있다.

또한 effect category로부터 피해거리와 피해면적을 구할 수 있으며, 그 지역의 인구밀도와 correc-

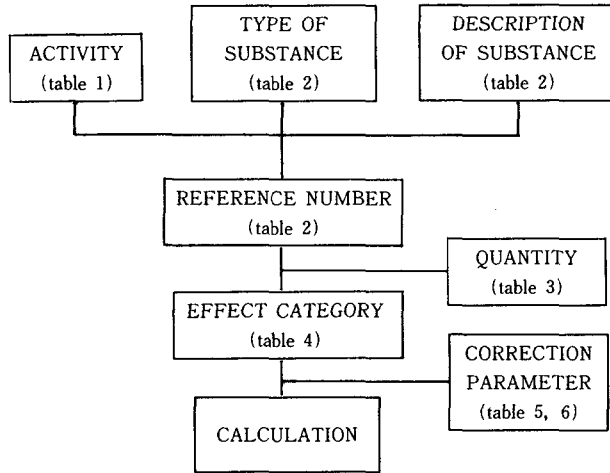


Fig. 2 Logic diagram of IAEA manual

tion parameter를 적용하여 피해 환경내에서의 사망자수를 구할 수 있다.

평가대상이 되는 지역을 결정하고, 설비의 이름, 위치, 형태, 생산물, 저장상태 등에 대하여 Table 1, 2를 이용하여 reference number를 확정한다.

3.1 Activity의 분류

Table 1 Checklist

| Activity | | Most important substances | Reference numbers (Table 1) |
|--------------------------------|--|---------------------------|--------------------------------|
| Fuel storage | deliverry station car station intermediate depot | petrol | 6 |
| | | petrol and LPG | 7 |
| | main storage | petrol | 6 |
| | | LPG | 7, 9 |
| Processing and storage of fuel | refinery | oil | 1, 3 |
| | | petrol | 4, 6 |
| | alkylation process | LPG | 7, 9, 10, 11 |
| | | natural gas | 10, 11 |
| | pipeline | various gases | 13 |
| | | LPG propane | 7 |
| Transport of fuel | water(inland waterways) | hydrogen fluoride | 31 |
| | | LPG, propane | 8 |
| | gas cylinder storage | natural gas | 12 |
| | | petrol | 5 |
| | refinery | oil | 2 |
| | | LPG(by pressure) | 9 |
| alkylation process | LPG(by cooling) | 11 | |
| | pipeline | petrol | 6 |
| | oil | 3 | |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

Table 2 Classification of substances by effect categories.

| Ref. No. | Type of substance | Description of substance | Activity |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|---|
| 1 2 3 4 5 6 | Flammable liquid | Vapour pressure < 0.3 bar at 20°C | Storage with tank pit Pipeline Other |
| | | Vapour pressure ≥ 0.3 bar at 20°C | Storage with tank pit Pipeline Other |
| 7 8 9 10 11 12 13 | Flammable gas | Liquified by pressure | Rail, road, overground storage Pipeline Other |
| | | Liquified by cooling | Storage with tank pit Other |
| | | Under pressure | Pipeline Storage of cylinders(25-100Kg) |
| 14 15 : : | Explosive | In a bulk(causing single explosion) | : : |
| | | In a package(e. g. shell) | |
| · · | · · | · · | · · |

3.2 Effect distance 산정

Reference number와 해당설비에서 다루어지는 물질의 양을 비교하여 Table 3에서 effect category를 확정한다. 또한 Table 4를 이용하여 effect distance 및 effect area를 산정한다.

3.3 Consequence 산정

피해반경과 correction parameter에 관한 수식은 식 (12)와 같고, Ca, s는 사망자수를 의미한다.

$$C_{a,s} = A \times \delta \times f_A \times f_m \dots\dots\dots (12)$$

- 여기서, C_{a,s} = external consequence
- A = affected area
- f_A = area correction factor
- f_m = mitigation correction factor
- δ = population density 이다.

유효지역 대 피해지역의 비를 나타내는 지역분포 보정계수(f_A)는 Table 5를 이용하여 구한다.

그리고 완화보정계수(f_m)는 대피, 피난 등과 같은 사람들에 의해 행하여질 수 있는 완화활동들로서 Table 6을 이용하여 구한다. 예를 들면 독극물인 경우는 대피시간 등이 중요하므로 완화보정계수가 0.15에서 0.1 사이에 있게 되며, 폭발물질인 경우는 1에 해당된다.

4. 재해사례의 적용

4.1 K 시 H 도시가스의 폭발

1992년 K 시 H 도시가스(주)에서 LPG를 주입하기 위하여 이동중이던 탱크로리가 LPG저장탱크와 충돌하였다. 이 때 발생한 스파크가 가스 주입구에서 새어 나온 가스에 인화되어 30t급 가스저장탱크 2기가 3차례에 걸쳐 연쇄 폭발을 일으킨 재해이다. 인적피해는 16명이 중화상(소방관, 주민, 근로자)을 입었고, 재산피해는 약 20억원에 이르렀다. 또한 반경 2.5Km이내 주민 약 2만명이 대피하는 소동을 일으켰다.

LPG저장량을 30ton 기후조건을 20°C, 대기중 수증기 분압을 2810N/m²로 가정하여 강도를 각각 산정하면 다음과 같다.

4.1.1 IAEA manual을 이용한 강도산정

Table 1과 Table 2에서 tank pit을 갖는 LPG저장은 참고번호 7이고, Table 1에서 Fuel storage중에서 LPG의 중간저장은 참고번호 7, 9가 될 수 있다. 마지막으로 Table 2에서 LPG가 flammable gas이고 pressure에 의해 액화되며, 지상 탱크에 저장되므로 참고번호는 7로 결정된다. 30t 탱크 1기가 폭발했으므로 effect category는 C I 이 되고, 따

Table 3 Relation of reference number and quantity

| Ref No. | Quantity(t) | | | | | | |
|---------|-------------|-------|--------|----------|-----------|------------|--------|
| | 5-10 | 10-50 | 50-200 | 200-1000 | 1000-5000 | 5000-10000 | >10000 |
| 1 | - | - | - | AI | BI | BI | CI |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | - | AI | BI | CI | DII | X | X |
| 4 | - | - | - | BI | CII | CII | DII |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | - | BII | CII | DII | EII | X | X |
| 7 | BI | CI | DI | EI | X | X | X |
| 8 | | | | | | | |
| 9 | CIII | CIII | DIII | X | X | X | X |
| 10 | CIII | CIII | DIII | X | X | X | X |
| 11 | - | - | - | BI | CII | CII | DII |
| 12 | - | BII | CII | DII | EII | X | X |
| 13 | CIII | CII | CI | CI | X | X | X |
| 14 | BI | CI | CI | DI | X | X | X |
| 15 | CIII | CII | CI | DI | X | X | X |
| 16 | - | - | - | AII | AII | BII | CIII |
| 17 | - | AIII | AII | BII | CII | CII | CII |
| 18 | - | AIII | BIII | DIII | EIII | FIII | FIII |
| 19 | CIII | DIII | X | X | X | X | X |
| 20 | DIII | EIII | FIII | X | X | X | X |
| • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • |

Symbols : X means the combination of that substance and that amount those not exist in practice; means ignorable effects.

라서 Table 4로부터 피해 거리는 50-100m, 피해지역은 3ha가 된다.

여기에 최종 사망자수까지 구해보면 K 시의 사고지역에 대한 인구밀도는 28.9명/ha이며, 인구분포에 대한 보정계수는 반경내의 거의 모두가 공장지대이므로 Table 5에 의해 $f_A=0.05$ 이 된다.

그러므로 사망자 수는 $0.3(ha) \times 28(명/ha) \times 0.05 \times 1 = 0.42명$ 이 된다.

4.1.2 CPQRA를 이용한 강도산정⁹⁾

CPQRA를 이용한 강도 산정을 해 보면, 폭발량은 30 ton이고, parameter들은 다음과 같다.

식 (3)에서 $D_{max} = 184.7m$, 식 (4)에서 $t_{BLEVE} = 12s$, 식 (5)에서 $H_{BLEVE} = 138.5m$ 가 된다. 대기 습도는 $2,810N/m^2(0.4 psi)$, $F_{rad} = 0.25$ 로 가정한다. (Hymes, 1983; Roberts, 1981) 식 (6)에 의해 $QR = 228 kW/m^2$ 이 되고, 식 (8)에 의해 $E = 270 kW/m^2$ 이 된다. 따라서 식 (10)을 trial and error방법으로 구한 피해거리는 $x = 79.5m$ 가 된다.

Table 4 Effect categories : maximum distance and area of effect

| Effect distance(m) Category | | Effect area category (ha) | | |
|--------------------------------|------------|---------------------------|-----|------|
| | | I | II | III |
| A | 0-25 | 0.2 | 0.1 | 0.02 |
| B | 25-50 | 0.8 | 0.4 | 0.1 |
| C | 50-100 | 3 | 1.5 | 0.3 |
| D | 100-200 | 12 | 6 | 1 |
| E | 200-500 | 80 | 40 | 8 |
| F | 500-1000 | - | - | 30 |
| G | 1000-3000 | - | - | 300 |
| H | 3000-10000 | - | - | 1000 |

Table 5 Distribution factor(f_A)

| Effect area category | Populated fraction(%) of the circular area | | | | |
|----------------------|--|-----|-----|-----|------|
| | 100% | 50% | 20% | 10% | 5% |
| I | 1 | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.05 |
| II | 1 | 1 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |
| III | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Table 6 Correction factor(f_m) for mitigation.

| Substances(References numbers) | Factor |
|--------------------------------|--------|
| Flammables (1-12) | 1 |
| Flammables (13) | 0.1 |
| Explosives (14, 15) | 1 |
| Toxic liquid (16-29, 43-46) | 0.05 |
| Toxic gas (30-34, 40-42) | 0.1 |
| Toxic gas (35-39) | 0.15 |

4.2 영국 Flixborough의 폭발사고

1974년 6월 Cyclohexane의 reactor에서 leak로

인해 방출된 가스가 vapor cloud를 형성하여 발생한 폭발사고이다⁸⁾.

4.2.1 IAEA manual을 이용한 강도산정

Table 1과 Table 2에서 Cyclohexane의 저장은 참고번호 3이고, 50t 탱크 1기가 폭발했으므로 effect category는 B I이 되고, 따라서 Table 4로부터 피해 거리는 25-50m, 피해지역은 0.8ha가 된다.

4.2.2 CPQRA를 이용한 강도산정

CPQRA를 이용한 강도산정을 해보면, 폭발량은 50 ton이고, $\eta = 0.05(0.01-0.1)$ 로 가정⁹⁾하고, Cyclohexane의 연소열은 $E_c = 18,700 \text{ Btu/lb}$, TNT의 연소열은 $E_{cTNT} = 2,000 \text{ Btu/lb}$ 이므로 식 (1)에서 TNT당량은 $W = 51,486 \text{ lb}$ 이 된다.

overpressure로 인한 100% 사망의 경우 4-7kg/cm² 정도의 범위를 가지므로 overpressure와 scaled distance 관계(graph)에 의하여 4kg/m² 일때는 2.4ft/lb^{1/3}, 7kg/cm² 일때는 2.8ft/lb^{1/3} 이 된다.

따라서 식 (2)에 의해 피해거리는 $R_G = 89-104.2 \text{ ft}(27.2-31.7\text{m})$ 이 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 이와같은 위험성을 평가하기 위한 방안으로서 CPQRA와 IAEA manual의 비교분석을 통하여 응용 가능성을 제시하였다. 연구 결과 첫째 적은 정보량만을 사용한 IAEA manual에서 얻어진 피해거리는 실험 및 이론식을 근거로 한 CPQRA의 결과와 매우 유사함을 보였다. 둘째, IAEA manual은 위험성 산정과정의 간편하여 초기 평가에 유용하였다. 셋째, IAEA manual은 societal risk분석에 필요한 100% 치사거리와 인구밀도를 적용하여 강도산정이 가능하였다. 따라서 IAEA manual에 의한 방법은 정량화된 위험성 평가에 상당한 효과가 있을 것으로 비교, 분석되었다. 앞으로 화재·폭발뿐만 아니라 독극물 누출에

대해서도 연구가 필요하며, 우리나라 실정에 맞는 parameter값들이 산출되어야 한다. 또한 사용자들이 손쉽게 위험성 분석을 할 수 있는 전산 code 개발이 요구된다.

본 연구는 한국과학 재단의 연구비 과제번호 : (91-07-00-03)지원에 의하여 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Newyork, 1989.
- 2) Bodurtha, Frank T., Industrial Explosion Prevention and Protection, Mcgraw-Hill, pp. 47~67.
- 3) Lees, Frank P., Loss Prevention in the Process Industries, Butterworths, Vol.1, pp.516~604, 1980.
- 4)安全工學協會編, 爆發, 海文堂, pp.197~232, 1983.
- 5)安全工學協會編, 火災, 海文堂, pp.138~151, 1983.
- 6)Crowl, Doniel A. and Louvar, Joseph F., Chemical Process Safety : Fundamentals with Application, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 35~39, 1990.
- 7)International Atomic Energy Agency, Manual for the Classification and Prioritization of Risk from Major Accidents in Process and Related Industries, pp.6~31, 1991.
- 8)Lees, Frank P., Loss Prevention in the Process Industries, Butterworths, Vol.2, pp.863~881, 1980.
- 9)AIChE, Dows Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide, New York, 1987.