

화학공정의 위험성 평가를 위한 화재 폭발 지수 산정 프로그램의 개발

Development of Fire and Explosion Index Estimation Program for Risk Assessment in Chemical Processes

김기수* · 백종배* · 고재욱* · 노삼규**

Ky-Soo Kim · Jong-Bae Back · Jae-Wook Ko · Sam-Kew Roh

ABSTRACT

Recently, a large amount of flammable or explosive materials have been handled or stored in chemical industries. If the equipments fail or the materials release in consequence of operation errors, fire and explosion could occur to them. Thus, risk assessment using quantification of risks is very important when design of processes and modifications of installed processes are performed.

The purpose of this study is to develop the program for fire and explosion index in order to quantify the expected damage of fire and explosion incidents in chemical plants, to identify equipment that would be likely to contribute to the creation or escalation of an incident, to communicate the potential fire and explosion risk to management and to account of damage cost.

1. 서론

최근 전 세계적으로, 특히 선진국과 개발도상국에서는 산업활동에 기인하는 위험물질과 유해물질의 취급으로부터 인적, 물적 재산 그리고 환경오염에 대한 위험성(risk)이 증대하고 있으며 이러한 위험성을 적절히 평가하고 관리하여야 한다는 인식이 점차 확산되고 있다. 그러나 위험성을 제거 혹

은 완화하기 위한 안전성(safety)의 확보는 그 국가의 사회·경제적 이익과 상충하기도 하는데, 이런 문제점을 해결하기 위하여 위험성을 평가하는데에는 한정된 인적·물적자원의 최적운영과 효율적인 공정관리(process management)를 함께 고려하여야 한다^{1,2)}.

특히 화학공업 기술의 급속한 발전에 따라 고압을 이용하는 공정장치들의 사용 증가와 반응성이 더 높은 물질 및 독성물질의 사용이 증대하고 있어

* 광운대학교 공과대학 화학공학과

** 광운대학교 공과대학 건축공학과

그에 대한 안전 대책이 시급하다고 할 수 있다. 또한 화학공장에서는 가연성(flammability) 물질이나 폭발성(explosive) 물질 같은 위험물질들을 많이 취급하게 되는데 이러한 물질들을 취급하거나 저장할 때 그 설비의 결함이나 취급 부주의 때문에 물질들이 누출 또는 대량으로 방출되어 화재 및 폭발이 발생하게 된다. 그리고 어떤 경우에는 이를 취급하는 장치내의 이상반응으로 폭발이 일어나는 경우도

있다^{3),4)}.

이러한 화재·폭발은 공장내의 근로자 및 설비에 막대한 피해를 초래할 뿐만 아니라 그 강도에 따라 인근 주거지역까지 피해가 미칠 수도 있다. 따라서 예상되는 위험성의 정량화(quantification)를 통한 위험성 분석(risk analysis)은 공정의 설계단계 및 공정의 재배치나 추가 설치시 매우 중요하다⁵⁾.

2. 본 론

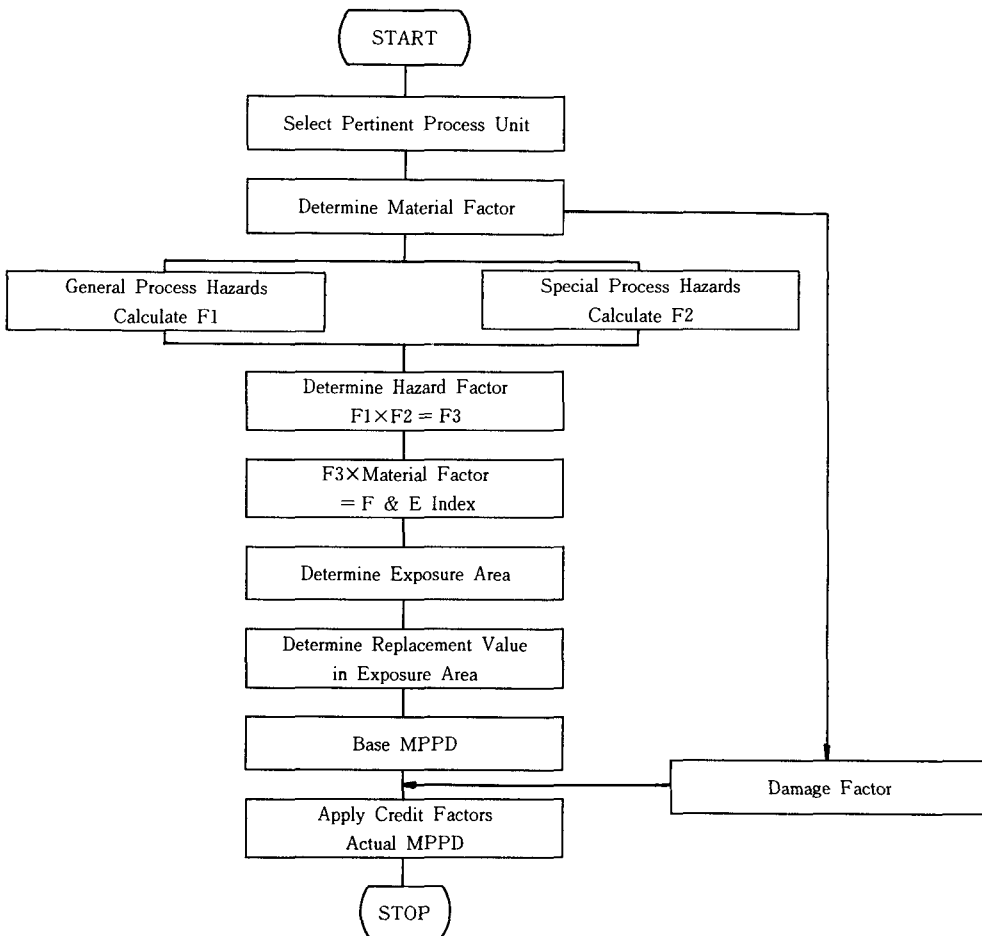


Fig. 1 Procedure for calculating F and EI and its consequence

본 연구에서는 화학공정의 잠재적 화재 및 폭발 사고시 예상되는 손실을 양으로 환산하고 사고를 발생시키거나 증폭시킬 가능성이 있는 장치를 분류

하여 화재 및 폭발에 대한 잠재적인 위험성을 파악하고 그 피해액을 계산할 수 있는 화재·폭발 지수의 산정을 종전의 수작업에서 탈피하여 컴퓨터로

산정할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 아울러 수치와 그래프, 도표 등을 사용하여 공정지역내의 잠재적 손실 가능성을 인식하여 예상되는 사고의 가능성에 효과적인 방법으로 대처함으로써, 그 손실의 규모를 최소화할 수 있도록 하였다.

프로그램의 개발언어는 PASCAL을 사용하였으며 알고리즘은 처리속도의 향상에 초점을 맞춰 작성하였다⁶⁾. Fig. 1은 프로그램의 순서도를 보여 준다.

2.1 화학공장의 위험성 분석 시스템

2.1.1 시스템의 구성

본 시스템은 사용자의 친숙한 접근(user

friendly)을 위해 윈도우(windows)와 풀다운 메뉴(full down menu) 방식을 채택하였고 간략한 화면과 코드(code)화를 통하여 데이터(data)의 입력을 편하게 하였으며 코드는 새로운 항목을 추가하거나 변경할 수 있는 유연성을 갖도록 하였다.

그리고 시스템의 구성은 데이터의 삽입(insert), 수정(update), 검색(inquiry)등을 할 수 있는 데이터관리 루틴(routine)과 재해(hazard)의 가능성을 정량적으로 표현할 수 있는 위험거리 산정 및 손상 규모를 계산할 수 있는 계산 루틴, 그리고 각종 위험지수(penalty)와 보정계수(credit factor)를 입력 및 출력할 수 있는 보고서 작성 루틴등으로 되어 있다.

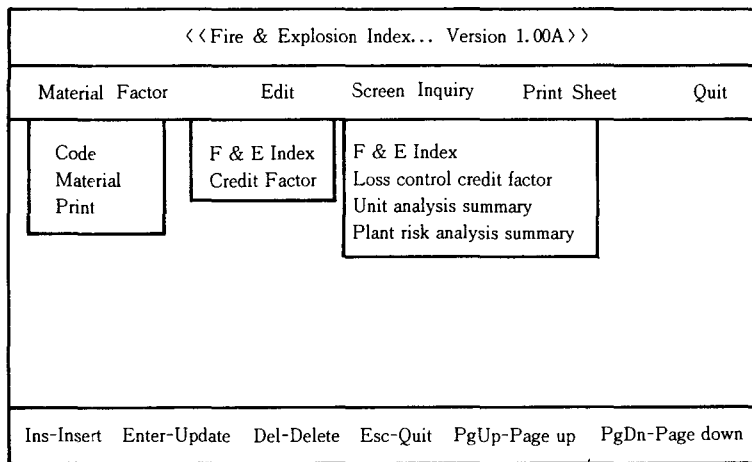


Fig. 2 Composition of system

2.1.2 데이터의 구성

본 연구에서 다음 3가지의 정보를 기본으로 하여 최종 보고서를 작성하도록 구성되어 있다.

1) 물질계수(MF, material factor)

물질계수는 화재·폭발 지수(F&EI)계산과 위험성 분석의 기초 출발수치로서 연소나 화학반응으로 발생하는 화재 및 폭발시의 방출에너지의 측정치이다. 또한 물질계수는 Table 1과 같이 Nf (flamability number)와 Nr(reactivity number)의 조합으로 표현될 수 있다⁷⁾.

2) 위험지수(penalty)

가) 일반공정 위험지수(F1, general process factor)

A. 발열화학반응(0.3~1.25)

B. 흡열화학반응(0.2~0.4)

C. 통로(access)

D. 밀폐 또는 실내 공정단위(0.3~0.9)

E. 물질취급 및 이송 (0.25~0.85)

F. 배출 및 누출 제어(drainage) (0.25~0.5)

나) 특수공정 위험지수(F2, special process factor)

A. 독성물질(0.2~0.8)

B. 대기압 이하의 압력

C. 저온

D. 분진폭발(0.25~2.0)

Table 1 Estimation of material factor

		Adiabatic decomposition temp. T_d K		830 <	830 ~ 935	935 ~ 1010	1010 ~ 1080	> 1080	
		reactivity							
Flash point $^{\circ}C$	H_{cv} kJ·bar/mol	flammability	Nr		0	1	2	3	4
			Nf		0	1	2	3	4
None	$< 4 \cdot 10^{-5}$		0	0	14	24	29	40	40
> 100	$4 \cdot 10^{-5} \sim 2.5$		1	4	14	24	29	40	40
40~200	2.5~40		2	10	14	24	29	40	40
-20~40	40~600		3	16	16	24	29	40	40
< 20	> 600	4	21	21	24	29	40	40	
Material Factor MF									

- E. Relief pressure
- F. 인화범위내 또는 근처에서의 운전(0.25~0.85)
- G. 인화성 물질 및 불안전성 물질의 양
- H. 부식 및 마모
- I. 누출-Joints 및 packing(0.1~1.5)
- J. 연소가열기(fired heater) 사용
- K. Hot oil 교환기 시스템
- L. 회전기기(rotating equipment)
- 3) 보정계수(credit factor)
 - 가) 공정관리(C_1 , process control)
 - A. 비상전원(0.98)
 - B. 냉각(0.97~0.99)
 - C. 폭발제어(0.84~0.98)
 - D. 비상조업중지(0.96~0.99)
 - E. 컴퓨터 제어(0.93~0.99)
 - F. 불활성 가스(0.84~0.98)
 - G. 운전교본 및 절차(0.91~0.99)
 - H. 반응성 화학물질 검토(0.91~0.98)
 - 나) 물질분리(C_2 , material isolation)
 - A. 원격제어밸브(0.96~0.98)
 - B. Dump/Blowdown (0.96~0.98)
 - C. 배출(drainage)(0.91~0.97)
 - D. Interlock(0.98)
 - 다) 방화설비(C_3 , fire protection)
 - A. 누출감지(0.94~0.98)
 - B. 방화벽 구조(0.95~0.98)
 - C. 지하탱크(0.84~0.91)
 - D. 소화수 공급(0.94~0.97)
 - E. 특수 소화설비(0.91)

- F. 스프링클러 시스템(0.74~0.97)
- G. Water curtains(0.97~0.98)
- H. Foam(0.92~0.97)
- I. 소화기 비치(0.95~0.98)
- J. 계기 및 전기선 보호(0.95~0.98)

2.2 위험성의 정량적 평가 및 보고서 작성

2.2.1 위험성의 정량적 평가⁸⁾

화재·폭발 지수의 개발은 화학공장내의 한 단위공정(unit process)을 선택하여 그 공정에서 사용하는 물질의 발열에너지를 기준으로 재해가 발생할 경우 그 단위공정의 중심점으로부터 위험반경을 산정하는데 1차적 목적을 두고 있다. 그러므로 평가(assessment)를 하기 전에 다음과 같은 자료를 준비하여야 한다.

○ 대상 공장의 정확한 공정 배치도

○ 공정 흐름도(process flow chart)

1) 단위공정의 선정

효과적으로 화재·폭발 지수를 산정하려면 논리적으로 판단하여 공장내 어떤 단위공정을 검토해야 할 것인가를 결정한다.

적절한 단위공정의 선정요소는

가) 물질의 화학적 에너지

나) 단위공정내 위험물의 양

다) 자본의 투자밀도(capital density, dollar/ft²)

라) 공정의 압력 및 온도

마) 화재 및 폭발사고를 일으킬 수 있었던 과거의 기록

일반적으로 위와 같은 요소의 정도가 크면 클수

록 관련 단위공정을 평가해야 할 필요성이 증대된다. 그러나 단위공정을 선정하는 명확한 기준이 존재하지 않기 때문에 과거의 운전경험 등을 참조하거나 경험이 많고 숙련된 공정 기술자와 협의하는 것이 최선의 방법이다.

2) 화재·폭발 지수(F&EI, Fire & Explosion Index)의 개발적합한 물질계수(MF)를 결정한 후 아래와 같이 단위공정 위험지수(F3)를 구한다.

$$F1 \times F2 = F3 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, F1; 일반공정 위험지수, F2; 특수공정 위험지수이다.

한편, 단위공정 위험지수(F3)는 8을 넘지 않도록 하며 만약 구해진 F3값이 8을 넘을 경우 그 값은 8로 한다.

단위공정 위험지수(F3)와 물질계수(MF)로서 화재·폭발 지수(F&EI)를 구한다.

$$F3 \times MF = F\&EI \dots\dots\dots (2)$$

이렇게 구해진 화재·폭발 지수는 물질의 가장 위험한 상태에서 얻어진 물질계수(MF)와 가장 위험한 운전상태를 기준으로 하여 계산되었기 때문에 화재 및 폭발 위험 분석이 최악의 경우에 근거를 두고 행하여졌다고 볼 수 있다.

3) 위험성 분석

화재·폭발 지수로부터 (3) 식을 이용하여 단위공정 주위의 위험 노출지역을 구한다. 위험 노출 지역내의 모든 장치의 자산가액((4)식)과 손실지수(Fig. 3)로서 기본 예상 최대손실액(base MPPD, base maximum probable property damage)을 구한다.

$$F\&EI \times 0.84 = \text{Radius of risk area} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{교체비용(자산가액)} = \text{최초투자비} \times 0.82 \times \text{물가 상승율} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{base MPPD} = \text{자산가액} \times \text{손실지수} \dots\dots\dots (5)$$

위에서 구한 기본 예상 최대손실액과 보정계수(credit factor)를 이용하여 실제 예상 최대손실액(actual MPPD)을 구한다.

$$\text{actual MPPD} = \text{base MPPD} \times \text{보정계수} \dots\dots\dots (6)$$

위와 같은 위험분석을 수행하여 기존공정의 재배치나 새로운 공정의 설계과정에서 예상 최대손실액을 감소시키는 조치를 강구할 수 있다. 일반적으로 설계과정에서 가장 효과적인 방법은 장치들간의 이

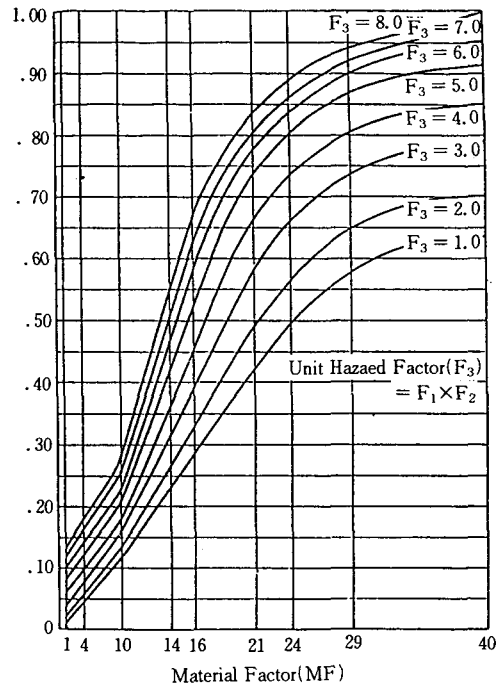


Fig. 3 Estimation of damage factor

격거리를 크게 하거나 위험 노출 지역내의 총자산을 감소시키는 것등이다. 그러나 운전중인 기존공장을 검토할 때에는 장치를 재배치하거나 저장량을 줄인다는 것은 실행하기가 매우 곤란하므로 예상 최대손실액을 현저히 줄이는 것은 한계가 있다.

2.2.2 보고서 작성

화재·폭발 지수를 이용한 위험성 분석의 보고서는 Dow에서 개발한 화재, 폭발지수 양식, 위험 분석종합, 공장 위험 분석 요약등의 보고서를 기초로 하여 작성하도록 되어 있다⁷⁾. 각종 보고서는 이미 구축된 데이터 베이스(data base)와 입력값을 기초로 일목요연하게 사용자에게 전달될 수 있도록 하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 화학공정의 잠재적 화재 및 폭발 사고시 예상 손실을 양으로 환산하고 사고를 발생시키거나 증폭시킬 가능성이 있는 장치를 분류하여 화재 및 폭발의 잠재적인 위험성을 파악하였으며,

이들을 순차적으로 산출하여 종합적인 위험성 평가를 할 수 있는 화재 폭발 지수에 관한 전산코드 시스템을 개발하였다. 본 전산시스템은 안전관리에 미숙한 현장 실무진이라도 친숙하게 적용할 수 있도록 하였으며, 그 결과로서의 보고서는 최고 경영층에까지 참고자료로 활용될 수 있도록 위험성의 정량화 및 정성적 분석에 만전을 기하도록 개발되었다. 아울러 물질계수 및 관련 공정 안전성에 대한 data base적 활용이 가능하도록 하였다.

특히 화학공정의 최대재해에 속하는 화재나 폭발의 모든 관련사항들을 관리면이나 활용면에서 공학적으로 개발된 실무적인 시스템이 되도록 노력했다. 추후 연구과제로는 화재·폭발 지수 산정의 단위공정 선택과 위험지수(penalty)의 결정이 숙련된 전문가의 협조를 요하고 있어 그에 대한 전문 지식 베이스를 인공지능을 이용한 전문가 시스템(expert system)을 구축하여 전반적인 위험분석을 자동화할 프로그램의 개발이 필연적이라 할 수 있다. 또한 일부 위험지수(penalty)들의 정량적 근거에 관한 연구도 병행되어야 할 것으로 사료된다.

그리고 화재·폭발과 더불어 화학공장의 중대재해에 속하는 독성물질의 누출에 대한 정량화 위험지수 개발에도 연구가 지속되어야 한다고 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) Crowl, Daniel A. and Louvar, Joseph F., Chemical Process Safety : Fundamentals with Application, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 308 ~332, 1990.
- 2) Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, AIChE-CCPS, New York, pp. 2~8, 1985.
- 3) Bodurtha, Frank T., Industrial Explosion Prevention and Protection, McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 2~4, 1980.
- 4) Major Hazard Control : A Practical Manual, International Programme on Chemical Safety of UNEP, ILO, WHO(IPCS), Switzerland, pp. 55~69, 1988.
- 5) Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, AIChE-CCPS, New York, pp. 32 ~33, 1989.
- 6) Turbo PASCAL User's Manual, Borland International Inc., 1988.
- 7) Dow's Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide, 6th ed. AIChE, New York, pp. 6~49, 1987.
- 8) Lees, Frank P., Loss Prevention in the Process Industries, Butterworths, London, pp. 149 ~160, pp. 529~530, 1986.