



## 장외영향평가 F-N curve 적용에 관한 연구

이동혁 · †유병태\*

한국바스프, \*화학물질안전원

(2018년 8월 29일 접수, 2018년 9월 17일 수정, 2018년 9월 18일 채택)

## A Study on application of F-N curve to OCA

Dong Hyeok Lee · †Byung Tae Yoo\*

BASF, Yeosu 373-15, Korea

\*National Institute of Chemical Safety

(Received August 29, 2018; Revised September 17, 2018; Accepted September 18, 2018)

### 요약

최근 화학공장의 중대산업사고로 인한 인명피해가 발생하면서 화학공장의 안전성에 대한 불신이 높아지고 있다. 또한 한정된 자원과 공간 속에서 생산량의 증가와 원단위의 감소를 위해 설비는 점점 고도화와 대형화되는 추세임으로 이러한 중대산업사고의 위험성은 높아질 수밖에 없다. 이러한 상황속에 장외영향평가 도입으로 정량적위험성평가가 활성화되면서 화학공장에 대한 객관적인 위험성을 평가할 수 있는 초석을 마련하였다. 하지만 현재 장외영향평가는 화재/폭발/누출에 대한 영향범위가 사업장 밖까지 도달하는지를 평가하는데 중점을 두고 있다. 이런 경우 중대산업사고가 인근지역에 미치는 영향은 분석할 수 있지만 사고발생빈도와 사업장 주변 인구밀도에 따른 실제 위험성을 평가하기는 어려울 수 있다. 이 연구에서는 중대산업사고에 대해 끝점만 분석하는 경우와 F-N curve를 적용하는 경우를 비교하는 사례연구를 통해 장외영향평가 F-N curve를 적용하는 것에 대한 타당성을 분석하였다.

**Abstract** - The distrust about chemical plant safety have been increased by occurring the major industrial accidents. Chemical plants have become more and more enlarged and sophisticated to increase production amount and decrease cost. So hazard of industrial accidents also have been increased. In this situation, quantitative risk assessment is activated by introducing OCA(Off-site Consequence Analysis). So it is possible to analyze the objective hazard of chemical plant. Currently OCA focus on the end point of hazardous area by fire/explosion/dispersion. But in this case, it is possible to analyze the industrial accident effect to near the chemical plant but hard to consider the actual hazard by frequency and population density. This study analyzes the validity about application of F-N curve to OCA by compare end point with F-N curve about accident.

**Key words** : OCA(Off-site Consequence Analysis), F-N curve

### 1. 서론

정량적위험성평가는 중대산업사고로 인한 재산 피해, 인명피해를 산정하는 방법으로 평가결과를 공정의 객관적인 위험성 산정, 비상대응훈련, 안전 장치의 보완 등에 활용할 수 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 장외영향평가 도입 이전 화학공장에

서는 정성적위험성평가를 중점적으로 실시하였으며 정량적위험성평가에는 소극적이었다. 장외영향평가는 화학공장이 전체적인 공정을 대상으로 정량적위험성평가를 자발적으로 수행하는데 지대한 역할을 하였다. 현재 장외영향평가는 정량적위험성평가 중 화재, 폭발, 누출에 따른 영향범위(끝점)를 분석하는데 초점을 맞추고 있다. 하지만 보다 명확한 분석을 위해서는 사고가 발생할 수 있는 빈도와 사고로 인한 영향을 받을 수 있는 사람 수를 고려해야 한다.

†Corresponding author: flyduck@korea.kr

Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

## II. 장외영향평가

장외영향평가는 유해화학물질 취급시설을 설치·운영하기 위해 사전에 화학사고 발생으로 사업장 주변지역의 사람이나 환경 등에 미치는 영향을 분석하여 위험도에 따라 안전성 확보방안을 마련함으로써 사고 영향범위가 사업장 밖으로 나가지 못하도록 예방하는 제도이다. 사고 영향범위 분석을 위해 사업장에서 발생할 수 있는 최악, 대안의 시나리오를 선정하고 이에 따른 누출공과 누출량을 계산한 후 화재, 폭발, 누출로 인한 각각의 끝점의 거리를 산정한다. 최악, 대안의 시나리오의 정의와 이에 대한 누출공, 끝점은 아래와 같다[1,2,3].

**Table 1.** Hole size guideline for worst and actual scenario

배관 지름	최악의 누출사고의 누출공 산정기준		대안의 누출사고의 누출공 산정기준	
	인치	기준	인치	기준
0.5	0.5	배관의 단면적	0.5	배관의 단면적
0.75	0.75		0.75	
1	1		1	
1.5	1.5		1	
2	2	2"배관 단면적	1	API 581
3	2		1.2	일정 비율
4	2		1.4	
5	2.2		1.5	
6	2.7	1.6		
8	3.6	배관 단면적 20%	1.8	배관 단면적 20%
10	4.5		2	
12	5.4		2.4	
16	7.2		3.2	
18	8		3.6	
20	8.9		4	
22	9.8		4	
24	10.7		4	
				API 581

- 최악의 사고시나리오: 유해화학물질을 최대량 보유한 저장용기 또는 배관 등에서 화재·폭발 및 유출·누출되어 사람 및 환경에 미치는 영향 범위가 최대인 경우의 사고시나리오
- 대안의 사고시나리오: 최악의 사고 시나리오보다 현실적으로 발생 가능성이 높고 사람이나 환경에 미치는 영향이 사업장 밖까지 미치는 경우의 사고시나리오 중에서 영향범위가 최대인 경우의 시나리오
- 복사열 5kW/m<sup>2</sup>  
: 개인이 방호물 없이 평상복을 착용하고 1분간 노출될 수 있는 복사열
- 과압 1psi  
: 주택의 일부에 복구불가능한 파손을 발생시킬 수 있는 압력
- 독성영향 : ERPG2  
: 피폭자가 1시간동안 독성물질에 노출되어도 건강상에 비가역적이거나 중대한 영향 또는 방호능력에 영향을 주지 않는 공기 중 독성물질의 최고농도

## III. 사회적 위험성(Societal Risk)

중대산업사고는 많은 사람들에게 영향을 줄 수 있다. 사회적 위험성은 이렇게 다수의 사람이 받을 수 있는 위험성을 나타낼 수 있는 척도가 된다. 사회적 위험성은 일반적으로 사고발생빈도와 사고강도(사망자 등)의 조합을 통해 표현되며 일반적으로 F-N curve를 도식하여 나타낸다. F-N curve는 빈도와 강도를 각 축으로 하는 그래프로 강도는 자연수로 빈도는 대수로 나타낸다. 일반적으로 강도의 수가 빈도의 범위를 초과하기 때문에 log scale로 표현한다. F-N curve를 도식화하기 위해서는 아래의 자료가 필요하다.

- 각 사고유형이 발생할 수 있는 빈도
- 각 사고유형에 의한 영향 범위
- 각 사고유형에 따라 영향을 받는 사람 수

위험성평가는 해당 사업장이 얼마나 위험한지와 이 위험성을 수용할 수 있는지 여부를 평가하기 위해 실시한다. 위험성을 수용할 수 없을 경우 안전 조치를 통해 위험성을 감소시킨 후 재평가를 실시하여 다시 수용여부를 검토한다. 위험성을 판단하는

Table 2. Example of Risk matrix[9]

	Risk Matrix			
	Severity			
Probability	S1	S2	S3	S4
P0	A	B	D	E
P1	A/B	B	E	E
P2	B	C	E	F
P3	C	D	F	F
P4	E	F	F	F

Table 3. Example of Risk class[9]

Risk Class	Risk level
A	Extreme, totally unacceptable risk
B	Very big, unacceptable risk
C	Big, unacceptable risk
D	Medium, acceptable risk, which should be further reduced
E	Small, acceptable risk, which may be further reduced
F	Very small, acceptable risk

기준은 Acceptable, ALARP, Unacceptable로 이루어진 risk matrix 등을 통해 표현하며 이는 국가, 업종, 지역에 따라 천차만별이다. Risk matrix는 Table 2,3과 같이 빈도, 강도에 대한 등급을 정하여 표현한다. 이러한 기준에 F-N curve를 도식화 함으로서 위험성의 수용여부를 판단할 수 있다.

#### IV. 사례연구

장외영향평가에 F-N curve를 적용하는 것에 대한 타당성을 분석하기 위하여 아래의 2가지 사업장에 대한 누출사고를 가정하였다.

##### A 사업장

- 규모 : 100m X 100m
- 취급물질 : propane
- 운전압력, 운전온도 : 10bar 30℃
- 누출시나리오 : 2" 배관 파열
- 인구밀도 : 0.02명/m2
- 기후조건 : 대기안정도 F, 풍속 1.5m/s

##### B 사업장

- 규모 : 100m X 100m
- 취급물질 : sulfur dioxide
- 운전압력, 운전온도 : 10bar 30℃
- 누출시나리오 : 2" 배관 파열
- 인구밀도 : 0.01명/m2
- 기후조건 : 대기안정도 F, 풍속 1.5m/s

A 사업장과 B사업장은 규모, 운전조건 등에서 비슷한 조건을 가지고 있지만 취급물질이 가연성과 독성이라는 물성과 인구밀도에서 차이가 있다. 사고영향범위 산정을 위해서는 누출공의 크기/사고 유형에 따른 화재, 폭발, 확산을 고려하지만 이 연구에서는 F-N curve 적용의 타당성을 분석하기 위하여 유형을 단순화 시켜 2"배관의 파열로 인한 누출과 이로 인한 확산과 화재 두 경우만을 고려하였으며 이를 위해 아래의 식을 사용하였다 [4,5].

- 누출량

$$Q = C_d A P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R T_1} \left[ \frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}}$$

- jet fire(복사열)

$$E_r = \frac{2.2 \tau_a R H_c M^{2/3}}{4 \pi X^2}$$

- jet fire(분출 마하수)

$$M_a = 0.1161 \times \frac{W}{P_s \times d^2} \sqrt{\frac{T_s}{r M_s}}$$

- jet fire(화염의 중점)

$$C_{LP} = C_L \left[ \frac{v}{u} \right] \left[ \frac{M}{28.8} \right]$$

$$d_j R = d \left( \frac{v}{u} \right) \left[ \frac{T_a M}{T_s} \right]^{\frac{1}{2}}$$

- dispersion(Pasquill-Gifford model)

$$\begin{aligned} \langle C \rangle (x, y, z) = & \frac{Q_m}{2 \pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \\ & \times \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z - H_r}{\sigma_z} \right)^2 \right] \\ & + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z + H_r}{\sigma_z} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

- Probit

$$P = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

$$Y = k_1 + k_2 \ln V$$

**Table 4.** Pasquill-Gifford Dispersion Coefficients for Plume Dispersion

Stability class	$\sigma_y(m)$
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$
F	$0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$
Stability class	$\sigma_z(m)$
A	$0.20x$
B	$0.12x$
C	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.03x(1+0.0003x)^1$
F	$0.016x(1+0.0003x)^{-1}$

여기서 sulfur dioxide에 대한 probit parameter 는 각각  $k_1=015.67$ ,  $k_2=2.1$ 를 적용하였다[6].

- TDU(Thermal Dose Unit)

$$Dose = (I^{4/3}) \times t$$

$$Thermal\ Dose\ Unit = 1(kW/m^2)^{4/3}.s$$

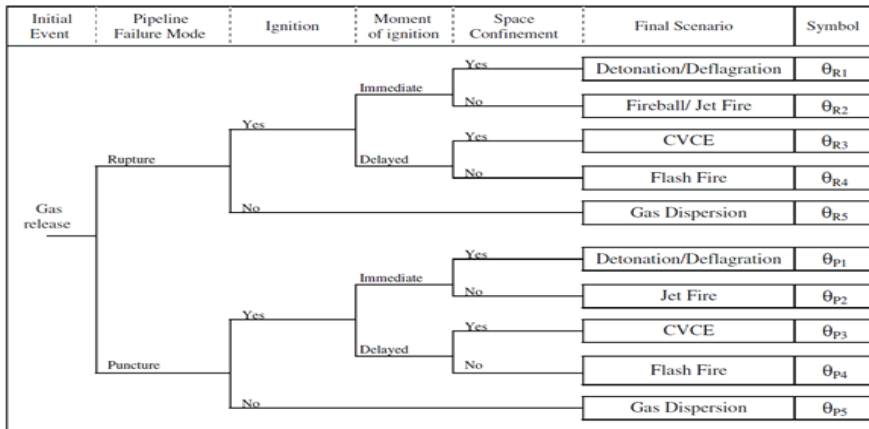
배관 파열 및 점화 확률은 **Table 6.**의 값을 참조하였다[7].

**Table 5.** Thermal dose fatality criteria

TDU	Effect
1000	1% Fatality
2000	50% Fatality
3200	100% Fatality

**Table 6.** Probabilities estimated for the accidental scenarios

Scenario	Probability( $\times 10^{-4}$ )
R1	0.0424
R2	0.8060
R3	0.1960
R4	0.0020
R5	1.7800



**Fig. 1.** event tree for leaks from natural gas pipelines and accident scenarios.

### V. 결 과

Source model, Jet fire model, Dispersion model을 사용하여 sulfur dioxide가 확산하는 거리 및 propane 화재로 인한 복사열이 미치는 거리를 분석하였다. 영향거리는 ERPG2, 5kW/m<sup>2</sup> 및 TDU, Probit model에 따른 1%, 50%, 100% fatality를 기준으로 산정하였다. 각각의 영향거리는 Fig. 2, 3, Table 7, 8 과 같다.

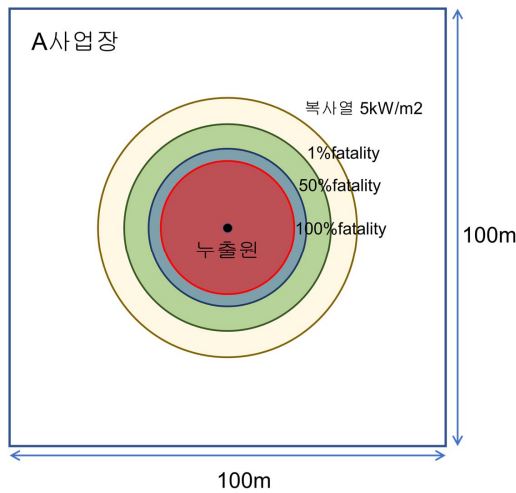


Fig. 2. Fatality by propane jet fire.

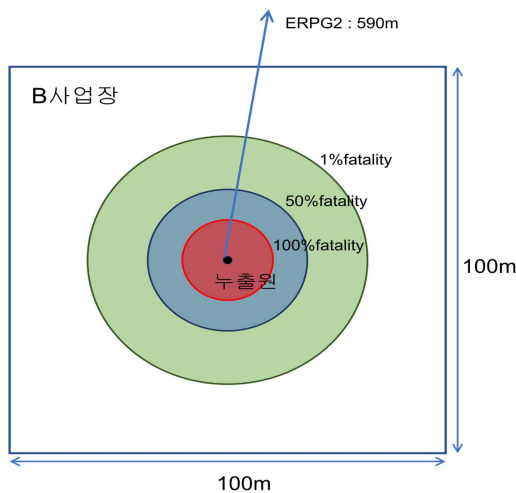


Fig. 3. Fatality by SO<sub>2</sub> dispersion.

A 사업장의 경우 복사열 5kW/m<sup>2</sup>의 영향이 미치는 끝점은 29.7m로 2" 배관 파열에 의한 사고는 장외로 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 이에 반해 B 사업장의 경우 sulfur dioxide 확산으로 인해 ERPG2 농도가 미치는 거리는 590m로 장외로 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. ERPG2는 1시간동안 노출되어도 비가역적인 영향을 미치지 않는 농도이기 때문에 fatality를 일으킬 수 있는 농도와 비교해볼 때 매우 낮은 농도라고 할 수 있다. 따라서 확산의 특성상 ERPG2농도를 끝점으로 분석하면 영향범위가 대부분 장외로 넘어갈 수밖에 없다.

두 사고로 인한 F-N curve 분석을 위해 아래의 criterion을 참조하였다.

Table 7. Fatality by propane jet fire

끝점 기준	영향거리	사망자 수
1 % fatality	23.7m	0.147명
50 % fatality	18.1m	2.936명
100 % fatality	15.3m	14.70명
5kW/m <sup>2</sup>	29.7m	-

Table 8. Fatality by SO<sub>2</sub> dispersion

끝점 기준	영향거리	사망자 수
1 % fatality	32.1m	0.218명
50 % fatality	18.3m	3.56명
100 % fatality	10.4m	3.39명
ERPG2	590m	-

Table 9. F-N curve criteria

Zone	Frequency	Fatality
Acceptable	~0.001	0~10
AIARP	0.001~0.1	10~20
Unacceptable	0.1~	20~

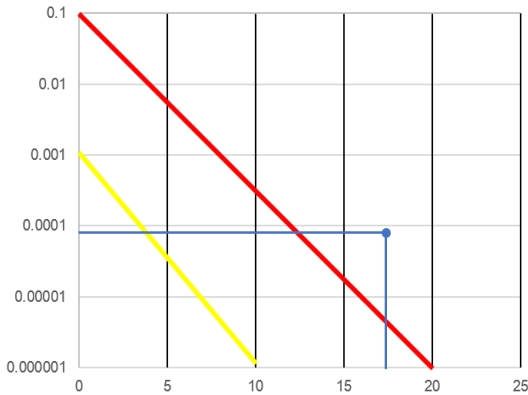


Fig. 4. F-N curve for propane jet fire.

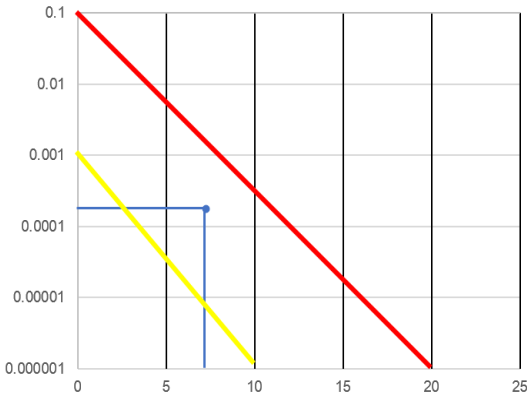


Fig. 5. F-N curve for SO2 dispersion.

A 사업장은 높은 인구밀도로 인해 사망자 수가 높기 때문에 F-N curve가 unacceptable zone에 위치하는 것을 볼 수 있다. 반면 B 사업장은 A 사업장에 비해 사고의 발생 빈도가 높고 fatality zone (1, 50, 100%)이 더 넓은에도 불구하고 낮은 인구밀도로 인해 F-N curve가 ALARP zone에 위치한다. 이는 해당 사업장의 위험성은 끝점이 장외를 벗어나는지 보다 해당 사업장의 특성, 주변 조건이 더 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.

### VI. 결론

장외영향평가 F-N curve 적용에 대한 타당성을 분석하기 위하여 사례연구를 통해 확산, 복사열에 대한 끝점을 분석하였고 빈도, 사망자 수 적용을 통한 F-N curve를 도식화하여 위험도를 분석하였

다. 사례연구와 같이 끝점이 장외를 벗어나더라도 F-N curve 상의 위험도는 ALARP zone 아래에 위치할 수 있으며 반대로 끝점이 장외를 벗어나지 않더라도 F-N curve 상에서는 위험도가 unacceptable zone에 위치할 수 있음을 확인하였다.

장외영향평가 끝점 기준인 복사열 5kW/m<sup>2</sup>, 과압 1psi, 독성영향 ERPG2는 인체에 영향을 미치기에 낮은 강도이다. 따라서 대부분의 화학사고를 정량화하면 장외를 벗어날 수 있으며 특히 독성물질의 확산의 경우 이러한 경향이 더욱 크게 나타난다. 하지만 사례연구와 같이 끝점의 장외영향 여부가 해당 사업장의 위험도와 반드시 연결된다고 보기는 어렵다. 최악의 화학사고 중 하나로 꼽히는 인도 보팔사고도 사고 규모 자체가 큰 것이 하나의 원인이지만 해당 사업장 주변의 인구밀도가 높았던 것이 사고 피해를 증가시키는 주요 원인이라고 볼 수 있다. 따라서 객관적인 위험도를 분석하기 위해서는 해당사업장의 특성, 지리적 조건 등 여러 요인을 함께 분석해야 한다.

장외영향평가는 사고영향분석을 보편화 시키는데 지대한 역할을 하였다. 이제 화학공장에서 사고영향 분석이 더 이상 새로운 위험성평가 기법이 아니다. 하지만 더 나아가 사고영향분석에 빈도, 인구밀도 등 사업장의 특성을 반영하여 F-N curve와 같이 종합적인 정량적위험성평가를 실시하여 위험도를 분석하고 이에 대한 방호조치를 적용한다면 보다 안전한 사업장을 만들 수 있을 것이다.

### 사용기호

- $C_0$  : discharge coefficient
- A : hole area
- $P_0$  : initial pressure
- M : molecular weight
- $R_g$  : ideal gas constant
- $T_0$  : initial temperature
- $\gamma$  : heat capacity ratio
- P : probit value
- $P_{choked}$  : choked pressure
- d : diameter
- x, y, z : coordination
- RH : relative humidity
- $T_a$  : ambient temperature
- $E_r$  : heat radiation
- $H_c$  : entergy of combustion of fuel
- $\eta$  : fraction of energy converted to radiation
- mb : mass flow rate of fuel

## REFERENCES

- [1] "P-102-2012 사고 피해예측 기법에 관한 기술 지침", KOSHA guide, 2012
- [2] "P-107-2016 최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 지침", KOSHA guide, 2016
- [3] "화학물질안전원 지침 제2014-1호 사고시나리오 선정에 관한 기술지침", 화학물질안전원, 2014
- [4] "Chemical Process Safety fundamentals with applications, 3th, PRENICE HALL, 2011
- [5] Y.D. Jo, B.J. Ahn, "Analysis of hazard areas associated with high - pressure natural - gas pipelines", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 15(3), 179-188
- [6] "Methods of approximation and determination of human vulnerability for offshore major accident hazard assessment", HSE, (2017)
- [7] Anderson J, Brito "A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory", European Journal of Operational Research, (200), 812 - 821, (2010)
- [8] "Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, Center for Chemical Process Safety", 2th, AIChE/CCPS, (2000)
- [9] "G-P-PRS 002 Safety, Health and Environmental Protection (SHE) at Planning and Construction of Process Plants", rev1, BASF, (2010)