

# 염산수용액의 농도별 간이 영향 평가 방법 연구

정유경 · 김병훈 · 허회진 · 유병태 · 신창현 · 윤이 · 윤준현 · 마병철\*

화학물질안전원 · \*전남대학교 화학공학부

(2016. 2. 2. 접수 / 2017. 1. 31. 수정 / 2017. 4. 12. 채택)

## A Study on the Simplified Estimating Method of Off-site Consequence Analysis by Concentration of Hydrochloric Acid

Y.-k. Jung · B. Kim · H. Heo · B. Yoo · C. Sin · Y. Yoon · J. Yoon · B. Ma\*\*

National Institute of Chemical Safety

\*School of Chemical Engineering, Chonnam National University

(Received February 2, 2016 / Revised January 31, 2017 / Accepted April 12, 2017)

**Abstract** : One of the most important elements of the management of chemical accident is threat zone estimation of fires, explosions and toxic gas dispersion based on chemical releases. The threat zone estimation is going to be standard of emergency response for the first defender and base line data of off-site risk assesment (hereinafter referred to as "ORA") and risk management plan (hereinafter referred to as "RMP"). Generally, ALOHA form EPA(U.S.) and Kora(from KOREA MINISTRY OF ENVIRONMENT) has been used for the off-site consequence analysis in Korea. However it is hard to predict accurate consequences rapidly in case of emergency. Hydrochloric acid is a multipurpose raw material used in many industrial applications such as chemical, metal and food industries . It is usually treated in concentrations from 10 ~ 35 %, and release accident have occurred frequently. In this study, we have developed a simplified estimating method and equation to calculate threat zone easily in case of emergency due to release accident of hydrochloric acid.

**Key Words** : hydrochloric acid, simplified estimating method, estimating equation, RMP, ORA

### 1. 서론

2015년 부로 화학물질관리법이 시행되었고 유해화학 물질을 취급하는 사업장은 장외영향평가를 작성하고 그 중, 사고대비물질을 지정수량 이상 취급하는 경우는 위해관리계획서를 추가로 작성해야 한다. 이러한 평가서 · 계획서를 작성할 때는 유해 화학물질의 누출 및 화재 · 폭발로 영향을 줄 수 있는 범위를 사전에 평가하여 취급시설 등의 안전성을 설계단계에서 확보하고 사고 시에는 신속하게 대응하는 방안을 마련하여 인근 주민과 주변 환경의 피해를 최소화 하는 것이 매우 중요하다.

사업장에서는 영향범위 예측을 위하여 환경부 화학물질안전원에서 개발한 KORA(korea off-site risk assesment) 프로그램과 미국환경보호청(environmental protection agency)의 ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres)

프로그램을 주로 활용하고 있다. 그러나 프로그램 매뉴얼 등을 충분히 숙지해야 하고, 다양한 입력변수들로 인해 프로그램 활용에 부담이 있다. 또한, 화학물질안전원 및 합동방재센터 등 지역별 주요 지역비상대응 기관도 비상 대응핸드북(emergency response guidebook)의 제한된 자료로만 사고 대응을 하고 있어 염산 누출 사고 시 누출 양에 따른 영향범위를 판단하여 신속하게 대응하는 것이 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 사고대비물질 중, 유통량이 많으며 다양한 농도로 취급하는 액상 독성물질 염산을 선정하여 누출된 액체표면에서의 발생한 염산증기가 확산되는 영향거리를 간이 산정표, 간이식 그리고 그래프 등으로 쉽게 예측하는 방법을 개발하고자 한다. ALOHA 및 KORA 데이터와 비교하여 식에 의한 간이 표의 신뢰도를 확인하고자 한다.

\* Corresponding Author : Byungchol Ma, Tel : +82-62-530-1815, E-mail : anjeon@jnu.ac.kr  
School of Chemical Engineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구대상 물질선정

액상독성 물질 중 사고가 누출 등의 사고가 가장 빈번하고 유통량이 많은 염산수용액을 대상물질로 선정하였다.

2010년 제4차 화학물질 유통량조사<sup>1)</sup> 결과에 따르면 염산(염화수소 포함)은 전국적으로 1,861개사에서 취급하고 있으며 그 취급량 중 입고량은 6,603,437톤이며 출고량은 연간 6,603,446톤이다. 또한 사용량은 1,434,841톤이며 제조량은 1,362,281톤에 해당한다.

### 2.2. 연구대상 농도범위 및 물성

화학물질관리법의 유독물 및 사고대비물질로 관리되는 염산은 그 농도가 10%(wt%)이상인 경우이다. 또한, 국내에서 35%미만의 염산을 주로 취급하므로 연구대상 농도 범위는 10%에서 35%까지로 제한하였다. 각 농도에서의 염산의 물성은 Table 1과 같다<sup>2-3)</sup>.

Table 1. Properties of Hydrochloric acid

Conc. \ Properties	Boiling point (°C)	Freezing point (°C)	Vapor pressure (mmHg)	Density (kg/m <sup>3</sup> (25 °C))
10%	104.0	-11.0	0.007	1,045.6
15%	107.0	-29.0	0.050	1,070.5
20%	108.3	-57.0	0.320	1,095.7
25%	103.8	-86.0	2.345	1,121.2
30%	90.1	-	15.10	1,146.4
35%	65.6	-33.0	105.3	1,174.0(20°C)
40%	33.1	-	515	1,1980(20°C)

### 2.3. 사고시나리오 선정 및 기상 조건

장외영향평가 및 위해관리계획 제도에서 최악의 사고시나리오는 유해화학물질을 보유한 저장용기 또는 배관 등에서 최대량이 화재·폭발 및 유·누출되어 사람 및 환경에 미치는 영향범위가 최대인 경우를 말하

Table 2. The condition of each scenario

Scenario \ Condition	Worst-Case Scenario	Alternative Scenario
Endpoints	ERPG-2 (20 ppm)	
Wind speed	1.5 m/s	3 m/s
Stability	F	D
Ambient Temperature	25 °C	
Ambient Humidity	50 %	

며 대안의 사고시나리오는 최악의 사고 시나리오보다 현실적으로 발생 가능성이 높고 사람이나 환경에 미치는 영향이 사업장 밖까지 미치는 사고시나리오 중에서 영향범위가 최대인 사고시나리오를 말한다. 각 시나리오의 확산조건 등은 Table 2와 같다<sup>4-5)</sup>.

### 2.4. 사고영향 분석 프로그램 및 구동조건

본 연구에서는 저장탱크 등에서 누출된 염산이 방류벽 내부 또는 바닥에 고이면서 액체표면을 형성하고 이후, 증발되어 사업장 외부로 확산되는 경우를 적용하였다. 영향범위 분석을 위해 ALOHA(5.4.3) 프로그램을 구동하였으며 구동조건은 Table 3과 같다.

Table 3. ALOHA Input Data

Condition	Input Data
Site	DAEJEON, KOREA (Latitude: 36° 23 ' N, Longitude: 127° 21 ' E, Elevation: 71 m)
Measurement Height	10 m above ground
Ground Roughness	Open County / Urban(or Forest)
Cloud Cover	Partly cloudy
Source	Puddle(Pool Area(m <sup>2</sup> )) (Average depth of puddle: 3 m)
Ground type	Concrete

### 2.5. 간이 산정표 항목도출

염산수용액 영향거리 간이 산정표는 수용액 농도와 누출로 형성된 액면의 넓이별로 그 영향범위가 어떻게 나타나는지를 표로 작성하였다. 확산조건은 최악 및 대안의 사고시나리오 조건, 시골(open county)과 도시(urban) 지형 조건으로 하고 각 경우별로 영향거리를 나타내었다.

지표면으로 확산되는 경우의 액면의 크기는 EPA RMP Guide를 참고하여 액체 층이 1 cm정도로 얇게 퍼지면서 형성하는 표면적을 가정하였다<sup>6)</sup>.

### 2.6. 간이식 적용범위 및 도출방법

간이 산정표 결과값을 바탕으로 상관관계식을 도출하였다. 간이식의 정확도 등을 고려하여 수용액의 농도는 20%~35%의 범위, 누출로 형성되는 액면의 넓이는 1 m<sup>2</sup>~500 m<sup>2</sup>로 한정하였다. 간이식 도출을 위하여 간이 산정표에서 구한 농도 및 표면적별 영향거리가 상관관계가 있는지 확인하였고 상관계수(r<sup>2</sup>)가 0.99 이상으로 나타나는 추세선을 적용하여 간이식을 개발하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 면적별 영향범위에 대한 간이 산정표

염산을 취급하는 사업장에서 염산 누출로 액면(pool)을 형성하는 경우는 다음 3가지가 대표적이다. 첫째, 저장탱크에서 누출되어 방류벽 내부에서 액면을 형성하는 경우이고 둘째, 펌프 및 연결배관에서 누출되어 지표면에 액면을 형성하는 경우이며 마지막으로 탱크 로리 연결지점에서 누출되어 트렌치(trench) 등으로 유입되는 경우이다. 이렇게 염산이 누출되어 액면을 형성하면 그 표면으로부터 서서히 증발되면서 대기 중으로 확산된다.

열린 공간에서의 액체의 증발속도는 식 1과 같이 액면 크기에 비례하는 것을 알 수 있다<sup>7)</sup>.

$$Q_m = \frac{MKAP^{Sat}}{R_g T_L} \text{ (식 1)}$$

여기서,  $Q_m$  = 액체의 증발속도(kg/s)

$M$  = 액체의 분자량

$K$  = 표면적에서의 물질전달계수(m/s)

$A$  = 액체 표면적(m<sup>2</sup>)

$R_g$  = 이상기체 상수

$T_L$  = 액체의 저장온도

$p^{Sat}$  = 저장온도에서의 포화증기압

Table 4. Effect distance values according to pool area and concentration at Worst-case scenario case(unit : m)

Pool Area (m <sup>2</sup> )	Effect distance													
	10%		15%		20%		25%		30%		35%		40%	
	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U
1	*	*	*	*	*	*	19	*	50	25	130	67	321	276
3	*	*	*	*	*	*	30	12	82	41	219	114	551	465
5	*	*	*	*	*	*	38	14	105	53	282	146	693	590
7	*	*	*	*	*	*	45	17	123	62	331	172	817	687
10	*	*	*	*	*	*	53	20	146	73	395	205	959	805
20	*	*	*	*	15	*	72	27	203	102	470	291	1,300	1,100
30	*	*	*	*	18	*	88	32	247	124	571	359	1,500	1,300
40	*	*	*	*	20	*	100	36	284	143	649	417	1,700	1,400
50	*	*	*	*	23	11	111	40	317	160	731	469	1,900	1,600
60	*	*	*	*	25	12	121	43	347	174	800	677	2,100	1,700
70	*	*	*	*	27	13	130	47	375	188	862	723	2,200	1,800
80	*	*	*	*	28	14	139	49	401	201	913	770	2,300	2,000
90	*	*	*	*	30	14	147	52	425	213	974	813	2,500	2,100
100	*	*	11	*	31	15	154	55	448	226	1,000	852	2,600	2,200
200	*	*	15	*	42	21	215	75	640	321	1,400	1,200	3,500	2,900
300	*	*	18	*	51	25	262	91	793	397	1,700	1,400	4,100	3,500
400	*	*	20	11	58	29	301	103	925	462	1,900	1,600	4,600	3,900
500	11	11	23	13	65	32	336	115	1,000	522	2,100	1,700	5,100	4,300

C: Open country, U : Urban

Table 5. Effect distance values according to pool area and concentration at Alternative scenario case(unit : m)

Pool Area (m <sup>2</sup> )	Effect distance														
	10%		15%		20%		25%		30%		35%		40%		
	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	
1	*	*	*	*	*	*	*	*	14	11	38	29	109	81	
3	*	*	*	*	*	*	*	*	24	18	64	49	186	136	
5	*	*	*	*	*	*	*	*	30	22	83	61	241	173	
7	*	*	*	*	*	*	*	11	*	36	27	97	72	286	203
10	*	*	*	*	*	*	*	13	*	42	31	116	85	343	241
20	*	*	*	*	*	*	*	17	*	58	43	163	119	495	337
30	*	*	*	*	*	*	*	20	12	71	52	199	144	616	410
40	*	*	*	*	*	*	*	23	14	81	59	230	164	721	473
50	*	*	*	*	*	*	*	25	15	91	66	257	183	1,200	528
60	*	*	*	*	*	*	*	28	16	99	72	282	200	1,300	578
70	*	*	*	*	*	*	*	30	17	107	77	306	215	1,400	624
80	*	*	*	*	*	*	*	31	18	114	82	327	230	1,500	667
90	*	*	*	*	*	*	*	33	19	121	86	348	243	1,600	708
100	*	*	*	*	*	*	*	34	20	127	91	368	256	1,700	747
200	*	*	*	*	*	12	*	47	27	180	126	532	358	2,400	2,000
300	*	*	*	*	*	14	11	57	33	221	153	664	437	2,800	2,400
400	*	*	11	11	16	13	66	38	255	175	779	504	3,200	2,800	
500	11	11	13	13	18	14	73	41	287	195	883	563	3,600	3,100	

C: Open country, U : Urban

ALOHA 프로그램 구동 시, 누출원(source)은 'Puddle', 관심농도는 ERPG-2 즉, 20 ppm을 입력하여 최악 및 대안의 사고시나리오 조건 및 지형(시골 또는 도시) 조건에서 영향거리를 도출하였다. 이때, 액면의 크기는 18개 구간으로 구분하였으며 그 에 따른 최악의 사고시나리오 조건에서의 영향거리 간이 산정표는 Table 4, 대안의 사고시나리오 조건에서의 간이 산정표는 Table 5와 같이 도출되었다.

위 결과로 부터 염산 수용액의 농도가 높거나 액면의 넓이가 넓을수록 영향거리가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 염산 수용액의 농도와 액면의 크기가 같은 조건인 경우에는 최악의 사고시나리오 평가조건이 대안의 사고시나리오 평가조건보다, 평탄한 시골지형이 도시지형보다 영향거리가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 농도가 높거나 액면이 넓을수록 증기화 되는 양이 증가하고 대기가 안정하고 지면의 상태가 평탄할수록 증기가 멀리 확산되기 때문이다.

#### 3.2. 액면크기를 이용한 누출량 · 누출속도 계산

EPA RMP Guide에 따라 누출된 염산 수용액이 1 cm 높이의 액체층을 형성하면서 균일하게 퍼진다고 가정하면, 총 누출량(kg)은 식2와 같이 계산할 수 있다. 또한 총 누출량에서 누출시간을 나누어주면 누출속도가

된다. 액면크기별 누출량과 누출속도 값은 Table 6에 정리하였다.

$$m(kg) = \rho(kg/m^3) \times s(m^2) \times h(m) \quad (\text{식 2})$$

- 여기서, m = 액체의 누출량(kg)
- $\rho$  = 액체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>, 25 °C)
- s = 액체의 표면적(m<sup>2</sup>)
- h = 액체 층의 높이(0.01 m)

Table 6는 25 °C의 염산 수용액이 10분 동안 누출되어 높이 1 cm의 액체층을 형성한다고 가정했을 때 액면의 크기에 따른 총 누출량 및 누출속도 값을 보여준다. 예를 들어 30 % 염산 수용액이 지표면에서 높이 1 cm의 50 m<sup>2</sup> 액면을 형성하였다고 하면 약 573 kg의 염산 수용액이 0.96 kg/s의 속도로 누출되었다고 추정할 수 있다.

### 3.3. 염산 영향거리 종합 간이 산정표

Table 4, 5, 6을 종합하여 암모니아수 농도에 따른 액면 크기별 영향거리와 액면 크기에 따른 누출량을 모두 계산할 수 있는 종합 간이 산정표를 Table 7과 같이 작성하였다.

이 종합 간이 산정표를 활용하면 염산농도 및 표면적별 영향거리를 쉽게 알 수 있다. 예를 들어, 35 % 누

출로 약 50 m<sup>2</sup>의 액체 층이 형성되고 액면으로부터 염화수소 증기가 최악의 사고시나리오 조건에서 확산될 경우, 20 ppm의 염화수소가 도달할 수 있는 최대 영향 거리는 시골지형에서는 731 m, 도시지형에서는 469 m 라는 사실을 쉽게 알 수 있다.

Table 6. Release quantity released(kg) and the release rate (kg/s) corresponding to each pool area

Pool Area (m <sup>2</sup> )	Released quantity (kg) (Height of pool = 1 cm)							Release rate (kg/s) (Total release time = 10 min)						
	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
1	10.5	10.7	11.0	11.2	11.5	11.7	12.0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
3	31.4	32.1	32.9	33.6	34.4	35.2	35.9	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
5	52.3	53.5	54.8	56.1	57.3	58.7	59.9	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10
7	73.2	74.9	76.7	78.5	80.2	82.2	83.9	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14
10	104.6	107.0	109.6	112.1	114.6	117.4	119.8	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.20
20	209.1	214.1	219.1	224.2	229.3	234.8	239.6	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38	0.39	0.40
30	313.7	321.1	328.7	336.4	343.9	352.2	359.4	0.52	0.54	0.55	0.56	0.57	0.59	0.60
40	418.2	428.2	438.3	448.5	458.6	469.6	479.2	0.70	0.71	0.73	0.75	0.76	0.78	0.80
50	522.8	535.2	547.9	560.6	573.2	587.0	599.0	0.87	0.89	0.91	0.93	0.96	0.98	1.00
60	627.3	642.3	657.4	672.7	687.8	704.4	718.8	1.05	1.07	1.10	1.12	1.15	1.17	1.20
70	731.9	749.3	767.0	784.9	802.5	821.8	838.6	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.37	1.40
80	836.4	856.4	876.6	897.0	917.1	939.2	958.4	1.39	1.43	1.46	1.49	1.53	1.57	1.60
90	941.0	963.4	986.1	1,009.1	1,031.7	1,056.6	1,078.2	1.57	1.61	1.64	1.68	1.72	1.76	1.80
100	1,045.6	1,070.5	1,095.7	1,121.2	1,146.4	1,174.0	1,198.0	1.74	1.78	1.83	1.87	1.91	1.96	2.00
200	2,091.1	2,141.0	2,191.4	2,242.5	2,292.8	2,348.0	2,396.0	3.49	3.57	3.65	3.74	3.82	3.91	3.99
300	3,136.7	3,211.5	3,287.1	3,363.7	3,439.1	3,522.0	3,594.0	5.23	5.35	5.48	5.61	5.73	5.87	5.99
400	4,182.2	4,282.0	4,382.8	4,485.0	4,585.5	4,696.0	4,792.0	6.97	7.14	7.30	7.47	7.64	7.83	7.99
500	5,227.8	5,352.4	5,478.5	5,606.2	5,731.9	5,870.0	5,990.0	8.71	8.92	9.13	9.34	9.55	9.78	9.98

Table 7. Total simplified estimate table

Pool Area (m <sup>2</sup> )	Release quantity corresponding to the pool area (kg)								Worst-case scenario condition												Alternative scenario condition															
	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	10%		15%		20%		25%		30%		35%		40%		10%		15%		20%		25%		30%		35%		40%		
	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U				
1	10.5	10.7	11.0	11.2	11.5	11.7	12.0	*	*	*	*	*	*	19	*	50	25	130	67	321	276	*	*	*	*	*	*	*	*	*	14	11	38	29	109	81
3	31.4	32.1	32.9	33.6	34.4	35.2	35.9	*	*	*	*	*	*	30	12	82	41	219	114	551	465	*	*	*	*	*	*	*	*	24	18	64	49	186	136	
5	52.3	53.5	54.8	56.1	57.3	58.7	59.9	*	*	*	*	*	*	38	14	105	53	282	146	693	590	*	*	*	*	*	*	*	*	30	22	83	61	241	173	
7	73.2	74.9	76.7	78.5	80.2	82.2	83.9	*	*	*	*	*	*	45	17	123	62	331	172	817	687	*	*	*	*	*	*	11	*	36	27	97	72	286	203	
10	104.6	107.0	109.6	112.1	114.6	117.4	119.8	*	*	*	*	*	*	53	20	146	73	395	205	959	805	*	*	*	*	*	*	13	*	42	31	116	85	343	241	
20	209.1	214.1	219.1	224.2	229.3	234.8	239.6	*	*	*	*	*	15	*	72	27	203	102	470	291	1,300	1,100	*	*	*	*	*	17	*	58	43	163	119	495	337	
30	313.7	321.1	328.7	336.4	343.9	352.2	359.4	*	*	*	*	*	18	*	88	32	247	124	571	359	1,500	1,300	*	*	*	*	*	20	12	71	52	199	144	616	410	
40	418.2	428.2	438.3	448.5	458.6	469.6	479.2	*	*	*	*	*	20	*	100	36	284	143	649	417	1,700	1,400	*	*	*	*	*	23	14	81	59	230	164	721	473	
50	522.8	535.2	547.9	560.6	573.2	587.0	599.0	*	*	*	*	*	23	11	111	40	317	160	731	469	1,900	1,600	*	*	*	*	*	25	15	91	66	257	183	1,200	528	
60	627.3	642.3	657.4	672.7	687.8	704.4	718.8	*	*	*	*	*	25	12	121	43	347	174	800	677	2,100	1,700	*	*	*	*	*	28	16	99	72	282	200	1,300	578	
70	731.9	749.3	767.0	784.9	802.5	821.8	838.6	*	*	*	*	*	27	13	130	47	375	188	862	723	2,200	1,800	*	*	*	*	*	30	17	107	77	306	215	1,400	624	
80	836.4	856.4	876.6	897.0	917.1	939.2	958.4	*	*	*	*	*	28	14	139	49	401	201	913	770	2,300	2,000	*	*	*	*	*	31	18	114	82	327	230	1,500	667	
90	941.0	963.4	986.1	1,009.1	1,031.7	1,056.6	1,078.2	*	*	*	*	*	30	14	147	52	425	213	974	813	2,500	2,100	*	*	*	*	*	33	19	121	86	348	243	1,600	708	
100	1,045.6	1,070.5	1,095.7	1,121.2	1,146.4	1,174.0	1,198.0	*	*	11	*	31	15	154	55	448	226	1,000	852	2,600	2,200	*	*	*	*	*	34	20	127	91	368	256	1,700	747		
200	2,091.1	2,141.0	2,191.4	2,242.5	2,292.8	2,348.0	2,396.0	*	*	15	*	42	21	215	75	640	321	1,400	1,200	3,500	2,900	*	*	*	*	*	12	*	47	27	180	126	532	358	2,400	2,000
300	3,136.7	3,211.5	3,287.1	3,363.7	3,439.1	3,522.0	3,594.0	*	*	18	*	51	25	262	91	793	397	1,700	1,400	4,100	3,500	*	*	*	*	14	11	57	33	221	153	664	437	2,800	2,400	
400	4,182.2	4,282.0	4,382.8	4,485.0	4,585.5	4,696.0	4,792.0	*	*	20	11	58	29	301	103	925	462	1,900	1,600	4,600	3,900	*	*	11	11	16	13	66	38	255	175	779	504	3,200	2,800	
500	5,227.8	5,352.4	5,478.5	5,606.2	5,731.9	5,870.0	5,990.0	11	11	23	13	65	32	336	115	1,000	522	2,100	1,700	5,100	4,300	11	11	13	13	18	14	73	41	287	195	883	563	3,600	3,100	

C: Open country, U : Urban

### 3.4. 염산 영향거리 도표

Table 7의 종합 간이 산정표는 액면크기 조건을 18개로 제한하였기 때문에 그 외의 액면크기 조건에서의 영향거리와 누출량 추산에는 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 시골지형에서의 최악과 대안의 사고시나리오 조건에서 농도별 영향거리 값을 Fig. 1과 Fig. 2로 표현하였다. 이 도표를 활용하면 간이 산정표에 없는 농도나 액면크기에서도 내삽 등을 통해 그 결과 값을 쉽게 예측할 수 있다.

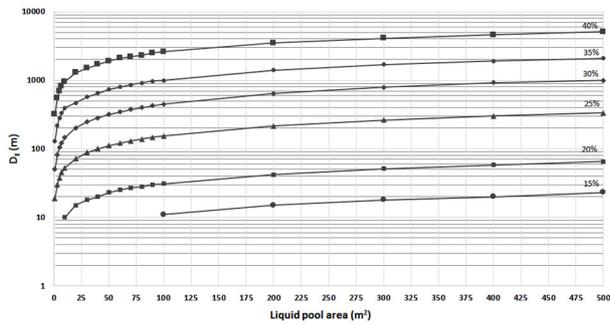


Fig. 1. Total estimating diagram at Worst-case scenario.

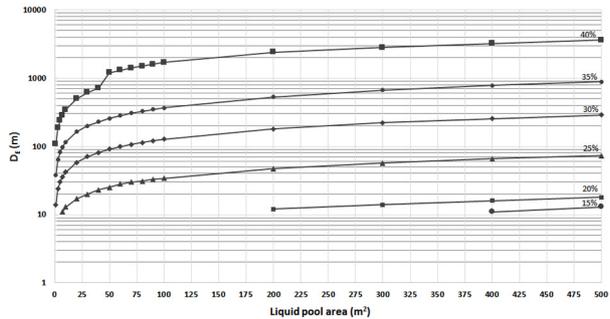


Fig. 2. Total estimating diagram at Alternative scenario.

### 3.5. 농도별 면적과 영향거리의 상관관계

Table 7의 총괄 간이표의 액면크기, 암모니아수의 농도 및 영향거리의 상관관계를 알고자 최악 및 대안의 사고시나리오 조건에서의 농도별 영향거리를 그래프로 확인한 결과 각 농도에서의 영향거리는 식 3과 같이 표면적의 지수함수로 나타났으며 각 농도에서의 상수값은 Table 8과 같음을 확인하였다.

$$D_E = K \times A^B \quad (\text{식 3})$$

여기서,  $D_E$  = 영향거리(m)  
 $K$  = 영향상수  
 $A$  = 표면적( $m^2$ )  
 $B$  = 면적지수

Table 8. Values of 'K' and 'B' factor at each concentration

Conc.	Input Conditions	'K' factor	'B' factor	$r^2$	
20%	Worst-case scenario	Open county	3.87	0.45	0.9992
		Urban	1.80	0.46	0.9986
	Alternative scenario	Open county	1.15	0.44	0.9944
		Urban	0.73	0.48	0.9788
25%	Worst-case scenario	Open county	18.16	0.47	0.9996
		Urban	7.07	0.44	0.9993
	Alternative scenario	Open county	4.54	0.44	0.9987
		Urban	2.67	0.44	0.9983
30%	Worst-case scenario	Open county	47.82	0.49	0.9995
		Urban	23.89	0.49	0.9994
	Alternative scenario	Open county	13.83	0.48	0.9997
		Urban	10.74	0.46	0.9998
35%	Worst-case scenario	Open county	133.61	0.44	0.9979
		Urban	109.43	0.45	0.9980
	Alternative scenario	Open county	36.36	0.50	0.9993
		Urban	28.53	0.47	0.9999

Table 8의 결과는 영향상수 'K' factor는 농도와 사고시나리오별로 크게 달라지나 'B' factor는 0.44~0.50 범위에서 비교적 일정하다는 것을 보여준다. 'K' factor의 사고시나리오와 지형 조건에서의 상관관계식은 Table 9와 같이 나타났다.

Table 9. 'K' factor derivation equation

Scenario/Ground roughness conditions	'K' factor derivation equation	$r^2$	
Worst-case scenario	Open county	$K = (3 \times 10^{-8}) \cdot C^{6.23}$	0.9974
	Urban	$K = (4 \times 10^{-10}) \cdot C^{7.40}$	0.9945
Alternative scenario	Open county	$K = (1 \times 10^{-8}) \cdot C^{6.16}$	1.0000
	Urban	$K = (2 \times 10^{-9}) \cdot C^{6.64}$	0.9971

### 3.6. 염산에 대한 영향거리 예측 간이식 유도

Table 6의 농도 및 표면적별 영향거리와 Table 7의 확산조건에서의 'K' factor를 조합하고 'B'값의 최적화를 통해 각 사고시나리오와 지형조건에서  $1 m^2 \sim 500 m^2$ 의 표면적과 20%~35%의 농도 값으로부터 영향거

Table 10. Derivation of the equation estimating a effect distance

Scenario/Ground roughness conditions	Estimate equation for HCl effect distance(DE)	
Worst-case scenario	Open county	$D_E = (3 \times 10^{-8}) \cdot C^{6.23} \cdot A^{0.496^*}$
	Urban	$D_E = (4 \times 10^{-8}) \cdot C^{7.40} \cdot A^{0.438}$
Alternative scenario	Open county	$D_E = (1 \times 10^{-8}) \cdot C^{6.16} \cdot A^{0.515}$
	Urban	$D_E = (2 \times 10^{-9}) \cdot C^{6.64} \cdot A^{0.438}$

\* 0.46 in case of more than 33%

Table 11. Comparison of the result values between simplified estimating equation and Simplified estimating table

Pool area (m <sup>2</sup> )	Input Conditions		Effect Distance(DE)											
			20 %			25 %			30 %			35 %		
			Equation	Table	%RSD	Equation	Table	%RSD	Equation	Table	%RSD	Equation	Table	%RSD
10	Worst-case scenario	C	*	*	*	<b>48</b>	53	7.0	<b>150</b>	146	1.9	<b>360</b>	395	6.6
		U	*	*	*	<b>24</b>	20	12.9	<b>93</b>	73	17.0	<b>293</b>	205	25.0
	Alternative scenario	C	*	*	*	<b>13</b>	13	0.0	<b>41</b>	42	1.7	<b>106</b>	116	6.4
		U	*	*	*	*	*	*	<b>35</b>	31	8.6	<b>98</b>	85	10.0
50	Worst-case scenario	C	27	23	11.3	<b>107</b>	111	2.6	<b>333</b>	317	3.5	<b>755</b>	731	2.3
		U	<b>9</b>	11	14.1	<b>49</b>	40	14.3	<b>189</b>	160	11.8	<b>592</b>	469	16.4
	Alternative scenario	C	*	*	*	<b>31</b>	25	15.2	<b>94</b>	91	2.3	<b>243</b>	257	4.0
		U	*	*	*	<b>21</b>	15	23.6	<b>71</b>	66	5.2	<b>199</b>	183	5.9
100	Worst-case scenario	C	<b>38</b>	31	14.3	<b>151</b>	154	1.4	<b>469</b>	448	3.2	<b>1,039</b>	1,002	2.6
		U	<b>13</b>	15	10.1	<b>66</b>	55	12.9	<b>256</b>	226	8.8	<b>802</b>	852	4.3
	Alternative scenario	C	*	*	*	<b>44</b>	34	18.1	<b>135</b>	127	4.3	<b>348</b>	368	4.0
		U	*	*	*	<b>29</b>	20	26.0	<b>97</b>	91	4.5	<b>269</b>	256	3.5
200	Worst-case scenario	C	<b>53</b>	42	16.4	<b>213</b>	215	0.7	<b>662</b>	640	2.4	<b>1,429</b>	1,400	1.4
		U	<b>17</b>	21	14.9	<b>90</b>	75	12.9	<b>347</b>	321	5.5	<b>1,086</b>	1,200	7.1
	Alternative scenario	C	<b>16</b>	12	20.2	<b>63</b>	47	20.6	<b>192</b>	180	4.6	<b>497</b>	532	4.8
		U	*	*	*	<b>39</b>	27	25.7	<b>131</b>	126	2.8	<b>364</b>	358	1.2
300	Worst-case scenario	C	<b>65</b>	51	17.1	<b>260</b>	262	0.5	<b>810</b>	793	1.5	<b>1,722</b>	1,700	0.9
		U	<b>21</b>	25	12.3	<b>108</b>	91	12.1	<b>415</b>	397	3.1	<b>1,298</b>	1,400	5.3
	Alternative scenario	C	<b>20</b>	14	25.0	<b>77</b>	57	21.1	<b>237</b>	221	4.9	<b>613</b>	664	5.6
		U	<b>11</b>	11	0.0	<b>47</b>	33	24.7	<b>156</b>	153	1.4	<b>435</b>	437	0.3
400	Worst-case scenario	C	<b>75</b>	58	18.1	<b>300</b>	301	0.2	<b>934</b>	925	0.7	<b>1,966</b>	1,900	2.4
		U	<b>23</b>	29	16.3	<b>122</b>	103	11.9	<b>470</b>	462	1.2	<b>1,472</b>	1,600	5.9
	Alternative scenario	C	<b>20</b>	14	25.0	<b>77</b>	57	21.1	<b>237</b>	221	4.9	<b>613</b>	664	5.6
		U	<b>11</b>	11	0.0	<b>47</b>	33	24.7	<b>156</b>	153	1.4	<b>435</b>	437	0.3
500	Worst-case scenario	C	<b>83</b>	65	17.2	<b>335</b>	336	0.2	<b>1,043</b>	1,000	3.0	<b>2,179</b>	2,100	2.6
		U	<b>26</b>	32	14.6	<b>135</b>	115	11.3	<b>519</b>	522	0.4	<b>1,623</b>	1,700	3.3
	Alternative scenario	C	<b>25</b>	18	23.0	<b>100</b>	73	22.1	<b>287</b>	287	0.0	<b>797</b>	883	7.2
		U	<b>13</b>	14	5.2	<b>58</b>	41	24.3	<b>195</b>	195	0.0	<b>544</b>	563	2.4
Avg.		-	-	14.5	-	-	13.6	-	-	3.9	-	-	5.3	

C: Open country, U : Urban

리를 쉽게 산출할 수 있는 간이식을 유도하였고 그 결과는 Table 10과 같다. 간이식의 신뢰도를 높이기 위하여 그 적용범위를 20%~35%로 제한하였다.

위 결과는 염산 액면으로부터 확산된 염산증기가 20 ppm에 도달하는 영향거리(De)는 염산농도(C)의 6~7승에 비례하고 액체 표면적의 0.4~0.6승에 비례하는 것을 알 수 있다.

### 3.7. 간이식 결과값 검증

Table 10의 간이식으로 계산한 값을 Table 7의 간이 산정표를 이용하여 얻은 결과와 비교하여 신뢰성을 검증한 결과를 Table 11에 정리하였다.

간이식을 이용한 결과와 간이 산정표를 이용한 결과의 상대표준편차는 염산의 농도에 따라 4.0%~14.5%로 확인되었다. 따라서 편이에 따라 간이식과 산정표를 상호보완적으로 사용하여 비교적 정확한 영향거리의 예측이 가능함을 확인 하였다.

## 4. 결론

본 연구는 ALOHA 프로그램을 활용하여 10 ~ 40 %의 염산 누출로 형성된 액체층의 표면에서 발생하는 염산증기의 영향범위를 쉽게 예측할 수 있는 간이평가 방법에 대하여 연구하였다. 각 조건에서 표면적별 영향거리 값을 산정하여 총괄 간이 산정표 및 간이도표로 제시하였으며 각 변수 및 결과값의 상관관계를 도출하여 간이식을 개발하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 염산 수용액의 농도가 높고 액면의 크기가 넓을수록 영향거리가 증가하였고 최악의 사고시나리오와 시골지형 조건에서 영향거리가 더 큰 것으로 나타났다.

2) 염산의 농도와 액면의 크기를 알면 총괄 간이 산정표를 활용하여 각 조건에서의 영향거리를 예측할 수 있었으며, 간이 산정표에 포함되어있지 않은 액면의 크기조건에서의 영향거리는 산정식으로 각 예측이 가능하였다.

3) 각 조건에서의 영향거리는 농도와 면적의 지수함수로 나타낼 수 있으며 영향거리는 염산농도(20% ~ 35%)의 6~7승과 액면 크기의 0.4~0.6 승에 비례하는 것을 알 수 있었다.

4) 간이식을 이용한 결과와 간이 산정표를 이용한 결과의 상대표준편차는 약 4%~14.5%로 확인되었으며, 간단한 방법으로 상호보완적으로 사용가능함을 확인하였다.

본 연구결과는 프로그램 또는 복잡한 수식계산 없이도 염산의 농도별 영향범위를 빠르고 간단하게 예측할 수 있어 사고 발생 시 초기 대응과 평가서 및 계획서 작성에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

## References

- 1) Ministry of Environment, 4th Chemical Circulation Survey, 2012.
- 2) NID, Material Safety Data Sheet(MSDS) of Hydrochloric Acid, pp. 8, 2014.
- 3) ROBERT H. PERRY Etc., "PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS Handbook", pp. 2-16, 1999.
- 4) MINISTRY OF ENVIRONMENT Notice 2014-253, "Regulation for Preparation of Off-site Consequence Analysis(2 Definitions)", 2014.
- 5) National Institute of Chemical Safety, "Technical Manual for Accident Scenario Selection", pp. 1-11, 2014.
- 6) US EPA, Risk Management Program Guide for Consequence Analysis(appendix D), 2009.
- 7) DANIEL A. CROWL Etc., "CHEMICAL PROCESS SAFETY(3rd)", pp. 157-158, 2011.
- 8) US EPA, ALOHA User's Manual, 2007.