



암모니아수의 농도별 간이 영향평가 방법 연구

정유경* · 허화진 · 유병태 · 윤 이 · 윤준현 · †마병철

화학물질안전원

(2016년 2월 18일 접수, 2016년 4월 25일 수정, 2016년 4월 26일 채택)

A Study on the Simplified Estimating Method of Off-site Consequence Analysis for Aqueous Ammonia

Yu-kyung Jung* · Hwajin Heo · Byungtae Yoo

Yi Yoon · Junheon Yoon · †Byungchol Ma

National Institute of Chemical Safety, 90 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Rep. of Korea

(Received February 18, 2016; Revised April 25, 2016; Accepted April 26, 2016)

요약

암모니아 수용액은 탈질, 의류의 얼룩제거 등 생활전반에 광범위하게 사용되면서 누출사고도 빈번하게 발생하고 있다. 여기에서는 누출사고 시 비상대응에 필요한 영향범위를 비교적 정확하게 계산할 수 있는 간이 산정표와 산정식을 개발하였다. ALOHA 프로그램을 이용하여 일반적으로 유통되는 암모니아 수용액의 농도(10% ~ 30%)에 따른 영향거리를 액면의 크기(1 m²~500 m²)별로 산정하여 제시하였다.

또한, 농도와 액면의 크기가 영향거리에 미치는 상관관계를 분석하여 해당 값에서 영향거리를 쉽게 계산할 수 있는 산정식을 개발하였다.

Abstract - Aqueous ammonia is widely used in household cleaners, fertilizers and denitrification process. It is usually treated in concentrations from 10 % to 30 %, and release accidents have occurred frequently. In this study, we developed a simplified estimating method and equation to calculate threat zone easily in case of emergency due to release accident of aqueous ammonia. We calculated the consequence distance for toxic end-points of aqueous ammonia(concentration 10 % ~ 30 %) at different puddle areas(1 m² ~ 500 m²) using the ALOHA program. Based on the result, we analyzed the relationship between concentration and puddle area with the threat zone and created the equation.

Key words : aqueous ammonia, simplified estimating method, estimating equation, risk management plan(RMP), off-site risk assessment(ORA)

I. 서론

2015년부터 화학물질관리법이 시행되면서 유해 화학물질을 취급하는 사업장은 장외영향평가서(이하 '평가서'라 한다)를 작성해야 하며 사고대비물질을 지정수량 이상 취급하는 경우는 위해관리계획서

(이하 '계획서'라 한다)를 추가로 작성해야 한다. 평가서와 계획서는 유해화학물질이 누출되거나 화재·폭발이 일어났을 때 영향을 받을 수 있는 범위를 사전에 평가한다. 이러한 평가를 통해서 취급시설의 안전성을 설계단계에서부터 확보하고 사고 상황에서는 인근 주민과 주변 환경의 피해를 최소화하기 위하여 신속하게 대응할 수 있게 한다.

이러한 영향범위 평가에는 상용화된 프로그램이나 화학물질의 유형에 따라 일정거리를 적용하도록

†Corresponding author: anjeon@korea.kr

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

하는 핸드북을 이용하는 방법이 있다. 일반적으로 사업장에서는 환경부 화학물질안전원에서 개발한 KORA(korea off-site risk assessment) 프로그램과 미국환경보호청(EPA)의 ALOHA(areal locations of hazardous atmospheres) 프로그램을 주로 활용하고 있으나 프로그램은 매뉴얼 등을 충분히 숙지해야 하고, 운전조건에 따라 입력변수를 달리해야 하는 부담이 있다. 프로그램 사용이 제한되는 사고 현장의 비상대응 기관은 미국·캐나다 등에서 개발한 비상대응핸드북(ERG, Emergency Response Guidebook)을 사용하는데, 누출량 등의 실제조건을 고려할 수 없으므로 정확하게 영향범위를 평가하는데 한계가 있다. 본 연구는 프로그램이나 기존의 핸드북을 이용하지 않고도 간단하면서도 비교적 정확하게 영향범위를 평가할 수 있는 방법을 개발하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 물질이 누출되었을 때 액체표면(이하 '액면'이라 한다)의 크기를 바탕으로 누출량과 영향범위를 빠르게 추정할 수 있는 간이 산정표 및 간이식 등을 개발하고자 하였다.

II. 연구방법

2.1. 연구대상 물질선정

본 연구는 탈질 공정 등의 산업현장 뿐만 아니라 의류의 얼룩 제거 등 일상생활에서도 광범위하게 사용되고 있는 암모니아수를 대상으로 하였다. 2010년 유통량조사결과에 따르면 암모니아수는 전국 357개 사업장에서 취급되고 있으며, 유통량은 190,239톤, 사용량은 200,008톤, 제조량은 191,018톤 이었다.^[1] 암모니아수는 취급량이 많은 만큼 누출로 인한 사고도 빈번하게 일어나고 있어 간이 산정표 및 산정식의 활용도가 클 것으로 판단되어 대상물질로 선정하였다.

2.2. 연구대상 농도범위 및 물성

암모니아 농도가 10%(wt%) 이상이면 유독물 및 사고대비물질로서 화학물질관리법의 적용대상이 된다. 여기에 국내 취급되는 암모니아수가 주로 30%미만의 농도를 가지는 것을 고려하여 이번 연구에서는 암모니아수 농도 범위를 10%에서 30%까지로 제한하였다. 각 농도에서의 암모니아수의 물성은 Table 1과 같다.^[2]

2.3. 사고시나리오 선정 및 평가조건

장외영향평가 및 위해관리계획 제도에서 사고시나리오는 최악의 사고시나리오와 대안의 사고시나리오로 구분된다. 최악의 사고시나리오는 유해화학물질을 보유한 저장용기 또는 배관 등에서 최대량이 화재·폭발되거나 유출·누출되어 사람 및 환경에 미치는 영향범위가 최대인 경우를 말한다. 대안의 사고시나리오는 최악의 사고 시나리오보다 현실적으로 발생 가능성이 높고 사람이나 환경에 미치는 영향이 사업장 밖까지 미치는 사고시나리오 중에서 영향범위가 최대인 사고시나리오를 말한다. 각 시나리오의 평가조건 등은 Table 2와 같다.^[3-4]

2.4. 사고영향 분석 프로그램 및 입력인자

액상 독성물질의 확산은 누출된 물질이 액면을 형성하고 액면에서 서서히 증발되는 양에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서도 누출된 암모니아수가 방류벽 내부 또는 바닥에 액면을 형성하고, 서서히 증발되어 증기가 확산되는 경우를 고려하였다. 영향범위 분석을 위해 ALOHA (5.4.3) 프로그램을 사용하였으며 평가조건은 Table 3과 같다. Table 3과 같이 프로그램을 구동할 때 누출원은 액면이며, EPRG-2 값인 150 ppm을 관심농도 기준 값으로 하였다. 지표면의 상태는 시골과 도시지형으로 나누어 최악 및 대안의 사고시나리오 평가조건에서의 영향

Table 1. Properties of aqueous Ammonia

Properties Concentration	Boiling point (°C)	Vapor pressure (kPa)	Density (kg/m ³ (25°C))
10 %	69.4	12.7	956
15 %	58.4	21.5	934
20 %	47.2	35.2	920
25 %	36.2	56.2	910
30 %	25.5	87.5	890

Table 2. The condition of each scenario

Scenario Condition	Worst-case Scenario	Alternative-case Scenario
Endpoints	ERPG-2 (150 ppm)	
Wind speed	1.5 m/s	3 m/s
Stability	F	D
Ambient Temperature	25 °C	
Ambient Humidity	50 %	

거리를 분석하였다. 이때 액면의 크기는 18개구간(1, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500 m²)으로 구분하였다.

2.5. 간이 산정표 개발

암모니아수의 영향거리 간이 산정표는 수용액의 농도와 누출로 형성된 액면의 크기에 따른 영향거리 표로 작성하였다. 확산조건은 최악 및 대안의 사고시

나리오 평가조건으로 하고, 각각에 대해 지면의 거친 정도를 시골과 도시로 구분하여 영향거리를 도출하였다. 이때 액면의 크기는 EPA RMP Guide를 반영하여 액체층이 1 cm정도로 얇게 퍼지면서 액면을 형성한다고 가정하여 산정하였다.^[5]

2.6. 간이식 개발 및 적용

간이 산정표 결과값을 이용하여 상관관계식을 도출하였다. 간이식 도출을 위하여 간이 산정표에서 구한 농도와 액면의 크기가 영향거리에 미치는 상관관계를 분석하였고 신뢰도(R²)가 최소 0.99이상으로 나타나는 추세선을 적용하여 간이식을 개발하였다.

Table 3. ALOHA Input Data

Condition	Inputata
Site	DAEJEON, KOREA (Latitude: 36° 23' N, Longitude: 127° 21' E, Elevation: 71 m)
Measurement Height	10 m above ground
Ground Roughness ¹⁾	Open County / Urban(or Forest)
Cloud Cover	Partly cloudy
Source	Puddle(Pool Area(m ²))
Ground type	Concrete

III. 결과 및 고찰

3.1. 농도에 따른 액면크기별 영향거리 간이 산정표

암모니아수가 누출되어 액면을 형성하는 경우는 다음 3가지가 대표적이다. 첫 번째는 저장탱크에서 누출되어 방류벽 내부에서 액면을 형성하는 경우이고 두 번째는 펌프 및 연결배관에서 누출되어 지표

Table 4. Effect distance values according to pool area and concentration at Worst-case scenario case

(unit : m)

Pool Area (m ²)	Effect distance									
	10 %		15 %		20 %		25 %		30 %	
	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U
1	56	29	77	39	105	54	149	78	265	138
3	94	47	128	66	175	90	249	129	451	235
5	119	60	162	83	222	115	317	164	581	303
7	139	70	190	97	260	135	373	194	687	359
10	164	83	224	115	309	160	444	231	821	431
20	227	115	313	161	433	224	627	326	1,200	614
30	276	139	381	196	529	274	772	401	1,400	755
40	316	160	439	226	612	316	897	465	1,700	873
50	353	179	490	252	686	355	1,000	523	1,900	979
60	386	196	537	276	753	389	1,100	575	2,100	1,100
70	417	211	580	298	816	421	1,200	624	2,200	1,200
80	445	225	621	319	876	452	1,300	670	2,400	1,250
90	472	239	659	338	932	481	1,400	714	2,600	1,300
100	498	252	697	357	985	508	1,500	756	2,700	1,400
200	708	357	1,000	512	1,400	736	2,200	1,100	4,200	2,000
300	876	442	1,300	636	1,800	919	2,800	1,400	5,400	2,500
400	1000	514	1,500	744	2,200	1,100	3,400	1,600	6,500	3,000
500	1200	579	1,700	841	2,500	1,200	4,000	1,900	7,600	3,400

C: Open country, U : Urban

1) 시골은 평탄한 지형 상태를, 도시는 건물과 나무 등이 많은 지형 상태를 의미한다.

면에 액면을 형성하는 경우이다. 세 번째는 탱크로리 주입구에서 누출되어 트렌치 등으로 유입되는 경우가 있다. 암모니아수가 누출되어 액면이 형성되면, 그 표면으로부터 서서히 증발되면서 대기 중으로 확산된다.

열린 공간에서 액체의 증발속도는 식 1과 같이 액면 크기에 비례하는 것을 알 수 있다.⁶⁾

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

- 여기서, Q_m = 액체의 증발속도(kg/s)
- M = 액체의 분자량
- K = 표면적에서의 물질전달계수(m/s)
- A = 액면적(m²)
- R_g = 이상기체 상수
- T_L = 액체의 저장온도
- P^{Sat} = 저장온도에서의 포화증기압

누출로 인해 형성되는 액면의 크기를 18개로 구분하고 ALOHA 프로그램을 사용하여 최악 및 대안의 사고시나리오 평가조건에서 지면의 거친 정도에 따라 영향거리를 각각 도출한 결과는 Table 4-5와 같다. Table 4는 최악의 사고시나리오 평가조건에서 시골과 도시지형의 영향거리를 나타낸 표이며, Table 5는 대안의 사고시나리오 평가조건에서 계산된 결과이다.

위 결과에서 암모니아수의 농도가 높거나 액면이 넓을수록 영향거리가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 암모니아수 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 암모니아량이 많아지고 대기가 안정하고 지면의 상태가 평탄할수록 증가가 멀리 확산되기 때문이다.

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

Pool Area (m ²)	Effect distance									
	10 %		15 %		20 %		25 %		30 %	
	C	U	C	U	C	U	C	U	C	U
1	19	14	25	19	34	26	48	36	82	61
3	30	22	41	31	56	42	80	60	138	102
5	38	28	52	39	71	53	101	75	177	129
7	44	33	61	45	83	62	119	88	208	150
10	52	39	72	53	99	73	140	103	248	178
20	72	53	99	73	137	100	196	142	351	246
30	87	64	120	88	166	121	239	171	433	298
40	100	73	138	100	191	138	276	196	503	342
50	111	80	154	111	213	153	308	217	565	381
60	121	88	168	121	233	166	337	237	623	415
70	130	94	181	130	252	179	365	254	677	447
80	139	100	193	138	269	190	390	271	728	477
90	147	105	204	146	285	201	414	286	777	505
100	154	111	215	154	301	211	438	301	823	531
200	216	152	304	212	428	293	631	418	1,200	747
300	265	184	373	257	529	356	786	509	1,500	916
400	306	211	433	294	616	407	921	585	1,800	1,100
500	343	234	487	327	695	454	1,000	653	2,100	1,200

C: Open country, U : Urban

Table 6. Released quantity(kg) and the release rate(kg/s) of aqueous ammonia which are calculated based on pool area

Pool Area (m ²)	Released quantity (kg) (Height of pool = 1 cm)					Release rate (kg/s) (Total release time = 10 min)				
	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %
1	9.6	9.3	9.2	9.1	8.9	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
3	28.7	28.0	27.6	27.3	26.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04
5	47.8	46.7	46.0	45.5	44.5	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07
7	66.9	65.4	64.4	63.7	62.3	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10
10	95.6	93.4	92.0	91.0	89.0	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15
20	191.2	186.8	184.0	182.0	178.0	0.32	0.31	0.31	0.30	0.30
30	286.8	280.2	276.0	273.0	267.0	0.48	0.47	0.46	0.46	0.45
40	382.4	373.6	368.0	364.0	356.0	0.64	0.62	0.61	0.61	0.59
50	478.0	467.0	460.0	455.0	445.0	0.80	0.78	0.77	0.76	0.74
60	573.6	560.4	552.0	546.0	534.0	0.96	0.93	0.92	0.91	0.89
70	669.2	653.8	644.0	637.0	623.0	1.12	1.09	1.07	1.06	1.04
80	764.8	747.2	736.0	728.0	712.0	1.27	1.25	1.23	1.21	1.19
90	860.4	840.6	828.0	819.0	801.0	1.43	1.40	1.38	1.37	1.34
100	956.0	934.0	920.0	910.0	890.0	1.59	1.56	1.53	1.52	1.48
200	1912.0	1868.0	1840.0	1820.0	1780.0	3.19	3.11	3.07	3.03	2.97
300	2868.0	2802.0	2760.0	2730.0	2670.0	4.78	4.67	4.60	4.55	4.45
400	3824.0	3736.0	3680.0	3640.0	3560.0	6.37	6.23	6.13	6.07	5.93
500	4780.0	4670.0	4600.0	4550.0	4450.0	7.97	7.78	7.67	7.58	7.42

3.2. 액면크기를 이용한 누출량누출속도 계산

EPA RMP Guide에 따라 누출된 암모니아수가 1 cm 높이의 액체층을 형성하면서 균일하게 퍼진다고 가정하면, 총 누출량(kg)은 식 2와 같이 계산할 수 있다. 또한 총 누출량에서 누출시간을 나누어주면 누출속도가 된다. 액면크기별 누출량과 누출속도 값은 Table 6에 정리하였다.

$$m = \rho \times s \times h \tag{식 2}$$

여기서, m = 액체의 누출량(kg)
 ρ = 액체의 밀도(kg/m³, 25 °C)
 s = 액체의 표면적(m²)
 h = 액체 층의 높이(0.01 m)

Table 6은 25 °C의 암모니아수가 10분 동안 누출되어 높이 1cm의 액체층을 형성한다고 가정했을 때 액면의 크기에 따른 총 누출량 및 누출속도 값을

보여준다. 예를 들어 15 % 암모니아수가 지표면에서 50 m²의 액면(높이 1 cm)을 형성하였다고 하면 약 467 kg의 암모니아수가 0.78 kg/s의 속도로 누출되었다고 추정할 수 있다.

3.3. 암모니아수 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. Table 7을 이용하면 15 % 농도를 가진 암모니아수가 누출되어 약 50 m²의 액면을 형성하고 암모니아 증기가 최악의 사고시나리오 평가 조건에서 확산되는 경우 시골지형에서는 490 m, 도시지형에서는 252 m 까지 영향을 미칠 수 있음을 쉽게 알 수 있다.

3.4. 암모니아수 영향거리 도표

Table 7의 종합 간이 산정표는 액면크기 조건을

Table 7. Total simplified estimate table

Pool Area (m ²)	Release quantity corresponding to the pool area (kg)					Worst-case scenario condition										Alternative scenario condition									
	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	10 %		15 %		20 %		25 %		30 %		10 %		15 %		20 %		25 %		30 %	
	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
1	9.6	9.3	9.2	9.1	8.9	56	29	77	39	105	54	149	78	265	138	19	14	25	19	34	26	48	36	82	61
3	28.7	28.0	27.6	27.3	26.7	94	47	128	66	175	90	249	129	451	235	30	22	41	31	56	42	80	60	138	102
5	47.8	46.7	46.0	45.5	44.5	119	60	162	83	222	115	317	164	581	303	38	28	52	39	71	53	101	75	177	129
7	66.9	65.4	64.4	63.7	62.3	139	70	190	97	260	135	373	194	687	359	44	33	61	45	83	62	119	88	208	150
10	95.6	93.4	92.0	91.0	89.0	164	83	224	115	309	160	444	231	821	431	52	39	72	53	99	73	140	103	248	178
20	191.2	186.8	184.0	182.0	178.0	227	115	313	161	433	224	627	326	1,200	614	72	53	99	73	137	100	196	142	351	246
30	286.8	280.2	276.0	273.0	267.0	276	139	381	196	529	274	772	401	1,400	755	87	64	120	88	166	121	239	171	433	298
40	382.4	373.6	368.0	364.0	356.0	316	160	439	226	612	316	897	465	1,700	873	100	73	138	100	191	138	276	196	503	342
50	478.0	467.0	460.0	455.0	445.0	353	179	490	252	686	355	1,000	523	1,900	979	111	80	154	111	213	153	308	217	565	381
60	573.6	560.4	552.0	546.0	534.0	386	196	537	276	753	389	1,100	575	2,100	1,100	121	88	168	121	233	166	337	237	623	415
70	669.2	653.8	644.0	637.0	623.0	417	211	580	298	816	421	1,200	624	2,200	1,200	130	94	181	130	252	179	365	254	677	447
80	764.8	747.2	736.0	728.0	712.0	445	225	621	319	876	452	1,300	670	2,400	1,250	139	100	193	138	269	190	390	271	728	477
90	860.4	840.6	828.0	819.0	801.0	472	239	659	338	932	481	1,400	714	2,600	1,300	147	105	204	146	285	201	414	286	777	505
100	956.0	934.0	920.0	910.0	890.0	498	252	697	357	985	508	1,500	756	2,700	1,400	154	111	215	154	301	211	438	301	823	531
200	1912.0	1868.0	1840.0	1820.0	1780.0	708	357	1,000	512	1,400	736	2,200	1,100	4,200	2,000	216	152	304	212	428	293	631	418	1,200	747
300	2868.0	2802.0	2760.0	2730.0	2670.0	876	442	1,300	636	1,800	919	2,800	1,400	5,400	2,500	265	184	373	257	529	356	786	509	1,500	916
400	3824.0	3736.0	3680.0	3640.0	3560.0	1000	514	1,500	744	2,200	1,100	3,400	1,600	6,500	3,000	306	211	433	294	616	407	921	585	1,800	1,100
500	4780.0	4670.0	4600.0	4550.0	4450.0	1200	579	1,700	841	2,500	1,200	4,000	1,900	7,600	3,400	343	234	487	327	695	454	1,000	653	2,100	1,200

C: Open country, U : Urban

18개로 제한하였기 때문에 그 외의 액면크기 조건에서의 영향거리와 누출량 추산에는 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 최악과 대안의 사고시나리오(시골지형) 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.

3.5. 농도별 면적과 영향거리의 상관관계

Table 7의 총괄 간이표의 액면크기, 암모니아수의 농도 및 영향거리의 상관관계를 알고자 농도별로 최악 및 대안의 사고시나리오 조건에서의 영향

거리를 그래프로 그려 추세식을 확인한 결과 각 농도에서의 영향거리는 식 3과 같이 액면크기의 지수함수(0.46 ~ 0.54승)로 나타났고 각 농도에서의 상수 값은 Table 8과 같다.

$$D_E = K \times A^B \text{ (식 3)}$$

여기서, D_E = 영향거리(m)
 K = 영향상수
 A = 액면적(m²)
 B = 면적지수

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

Conc.	Input Conditions		‘K’ factor	‘B’ factor	R ²
10 %	Worst-case scenario	Open county	53.89	0.49	0.9989
		Urban	27.48	0.48	0.9993
	Alternative scenario	Open county	17.91	0.47	0.9993
		Urban	13.58	0.46	0.9998
15 %	Worst-case scenario	Open county	72.13	0.50	0.9982
		Urban	37.37	0.49	0.9992
	Alternative scenario	Open county	24.05	0.48	0.9995
		Urban	18.58	0.46	0.9999
20 %	Worst-case scenario	Open county	97.28	0.51	0.9977
		Urban	50.90	0.50	0.9989
	Alternative scenario	Open county	32.43	0.49	0.9993
		Urban	25.30	0.46	0.9998
25 %	Worst-case scenario	Open county	134.44	0.53	0.9965
		Urban	77.00	0.51	0.9984
	Alternative scenario	Open county	45.64	0.49	0.9992
		Urban	37.48	0.47	0.9998
30 %	Worst-case scenario	Open county	241.86	0.54	0.9965
		Urban	132.68	0.51	0.9994
	Alternative scenario	Open county	76.16	0.52	0.9984
		Urban	59.24	0.48	0.9994

* R² = Coefficient of Determination

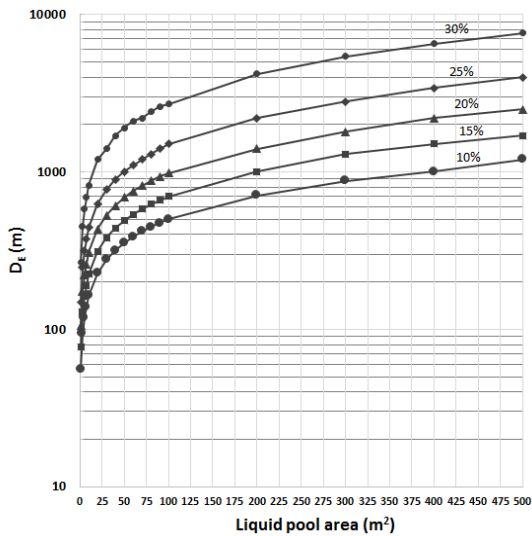


Fig. 1. Total estimating diagram at Worst-case scenario.

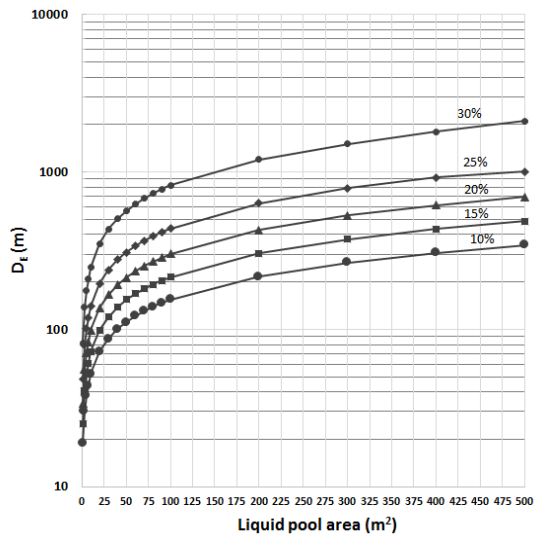


Fig. 2. Total estimating diagram at Alternative-case scenario.

Table 9. Derivation of the equation estimating a effect distance

Scenario/Ground roughness conditions		Estimate equation for NH ₄ OH effect distance(D _E)
Worst-case scenario	Open county	$D_E = (29.1e^{(0.062 \times C)}) \cdot A^{0.510^*}$
	Urban	$D_E = (14.4e^{(0.064 \times C)}) \cdot A^{0.496^{**}}$
Alternative scenario	Open county	$D_E = (9.5e^{(0.062 \times C)}) \cdot A^{0.486^{***}}$
	Urban	$D_E = (7.1e^{-(0.064 \times C)}) \cdot A^{0.467}$

* 0.527 in case of more than 23%, **0.520 in case of more than 23%, ***0.502 in case of more than 23%

Table 10. Comparison of the result values between Simplified estimating equation and Simplified estimating table

Pool area (m ²)	Input Conditions		Effect Distance(D _E)											
			10 %			15 %			20 %			25 %		
			Equation	Table	% RSD	Equation	Table	% RSD	Equation	Table	% RSD	Equation	Table	% RSD
10	Worst-case scenario	Open county	174	164	4.18	237	224	3.99	323	309	3.13	462	444	2.81
		Urban	86	83	2.51	118	115	1.82	162	160	0.88	236	231	1.51
	Alternative scenario	Open county	54	52	2.67	74	72	1.94	101	99	1.41	143	140	1.50
		Urban	39	39	0.00	54	53	1.32	75	73	1.91	103	103	0.00
50	Worst-case scenario	Open county	393	353	7.58	536	490	6.34	731	686	4.49	1,078	1,000	5.31
		Urban	190	179	4.22	262	252	2.75	361	355	1.19	545	523	2.91
	Alternative scenario	Open county	119	111	4.92	162	154	3.58	220	213	2.29	320	308	2.70
		Urban	84	80	3.45	115	111	2.50	159	153	2.72	219	217	0.65
100	Worst-case scenario	Open county	559	498	8.16	762	697	6.30	1,039	985	3.77	1,554	1,550	0.18
		Urban	268	252	4.35	369	357	2.34	508	508	0.00	782	756	2.39
	Alternative scenario	Open county	166	154	5.30	226	215	3.53	309	301	1.85	453	438	2.38
		Urban	116	111	3.12	159	154	2.26	219	211	2.63	302	301	0.23
200	Worst-case scenario	Open county	794	708	8.10	1,083	1,000	5.64	1,447	1,400	2.33	2,239	2,200	1.24
		Urban	378	357	4.04	521	512	1.23	717	736	1.85	1,121	1,100	1.34
	Alternative scenario	Open county	233	216	5.35	317	304	2.96	432	428	0.66	642	631	1.22
		Urban	160	152	3.63	220	212	2.62	303	293	2.37	418	418	0.00
300	Worst-case scenario	Open county	976	876	7.64	1,330	1,300	1.61	1,814	1,800	0.55	2,722	2,800	2.00
		Urban	462	442	3.13	637	636	0.11	877	919	3.31	1,385	1,400	0.76
	Alternative scenario	Open county	283	265	4.65	386	373	2.42	527	529	0.27	787	786	0.09
		Urban	193	184	3.38	266	257	2.43	366	356	1.96	505	509	0.56
400	Worst-case scenario	Open county	1,129	1,000	8.57	1,539	1,500	1.81	2,099	2,200	3.32	3,266	3,400	2.84
		Urban	533	514	2.57	734	744	0.96	1,011	1,100	5.96	1,608	1,600	0.35
	Alternative scenario	Open county	326	306	4.48	444	433	1.77	606	616	1.16	909	921	0.93
		Urban	221	211	3.27	304	294	2.36	419	407	2.05	577	585	0.97
500	Worst-case scenario	Open county	1,264	1,200	3.67	1,724	1,700	0.99	2,350	2,500	4.37	3,628	4,000	6.90
		Urban	596	579	2.05	820	841	1.79	1,130	1,200	4.25	1,806	1,900	3.59
	Alternative scenario	Open county	363	343	4.01	495	487	1.15	675	695	2.06	1,017	1,000	1.19
		Urban	245	234	3.25	338	327	2.34	465	454	1.69	641	653	1.31
Avg.			-	-	4.37	-	-	2.53	-	-	2.30	--	-	1.71

3.6. 영향거리 예측 간이식 유도

식 3에서 영향거리는 영향상수와 액면크기 지수 함수에 비례하고 있음을 알 수 있다. 각 농도에 따른 영향상수(K)를 사고시나리오 평가조건별, 지표면의 상태별로 도표를 그려 추세를 분석함으로써 암모니아수 농도와 액면크기만 입력하면 간단하게 영향거리를 산출할 수 있는 간이식을 Table 9와 같이 유도하였다. 간이식의 정확도를 높이기 위하여 적용범위를 10% ~ 25%로 제한하였다.

유도결과를 보면 각 조건에서 영향상수(K)는 농도의 지수함수이며, 영향거리(D_E)는 영향상수와 액면의 크기의 약 0.5승에 비례하는 것을 알 수 있다.

3.7. 간이식 결과값 검증

Table 9의 간이식으로 계산한 값을 table 7의 간이 산정표를 이용하여 얻은 결과와 비교하여 신뢰성을 검증한 결과를 Table 10에 정리하였다.

간이식을 이용한 결과와 간이 산정표를 이용한 결과의 상대표준편차는 암모니아수의 농도에 따라 1.71% ~ 4.37%로 확인되었다. 따라서 편이에 따라 간이식과 산정표를 상호보완적으로 사용하여 비교적 정확한 영향거리의 예측이 가능함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구는 ALOHA 프로그램을 활용하여 암모니아수의 농도별(10% ~ 30%) 영향범위를 누출로 형성된 액면의 크기로 쉽게 예측할 수 있는 간이평가 방법에 대하여 연구하였다. 각 조건에서 액면의 크기별 영향거리 값을 도출하여 종합 간이 산정표와 간이도표를 제시하였고, 간이 산정표를 이용하여 간이식을 개발하였다. 그 결과는 정리하면 다음과 같다.

(1) 암모니아수의 농도가 높고 액면의 크기가 넓을수록 영향거리는 증가하였고, 농도와 액면의 크기가 동일한 조건인 경우에는 최악의 사고시나리오 평가조건 및 시골지형에서 영향거리가 더 큰 것으로 나타났다.

(2) 암모니아수의 농도와 액면의 크기를 알면 간이 산정표를 활용하여 각 조건에서의 영향거리를 예측할 수 있었으며, 간이 산정표에 포함되어 있지 않은 액면의 크기조건에서는 영향거리 도표로 예측이 가능하였다. 정확도 등을 고려했을 때 간이식 적용이 가능한 수용액의 농도는 10% ~ 25%로 나타났다.

(3) 각 농도에서의 영향거리는 암모니아수 농도의 지수함수로 나타나며, 액면의 크기의 약 0.46 ~ 0.51승에 비례하는 것을 알 수 있었다.

(4) 간이식을 이용한 결과와 간이 산정표를 이용한 결과의 상대표준편차는 평균 2.73%로 나타났으며, 간단한 방법으로 비교적 정확한 영향거리를 예측할 수 있었다.

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

REFERENCES

- [1] 환경부, "제4차 화학물질유통량 조사", (2012)
- [2] ROBERT H. PERRY 등, "PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS handbook(2-87)", (1999)
- [3] 환경부 고시 제2014-253호, "장외영향평가서 작성 등에 관한 규정(제2조 정의)",(2014)
- [4] 화학물질안전원, "사고시나리오 선정에 관한 기술 지침", 1~11, (2014)
- [5] EPA, "Risk Management Program Guide for Consequence Analysis"(appendix D), (2009)
- [6] DANIEL A. CROWL 등, "CHEMICAL PROCESS SAFETY"(3rd), 157~158, (2011)
- [7] EPA, "ALOHA User's manual", 2007