

염소·불화수소 탱크로리 누출사고 시 이격거리 산정을 위한 산정표 및 산정식 개발 연구

전병한¹, 김현섭^{2*}, 임상민¹, 이주찬², 이강산³
¹전북대학교 환경공학과, ²원주지방환경청, ³화학물질안전원

A Study on the Development of Calculation Tables and Formulas for Determining Separation Distance in Case of Cl₂ · HF Tank-lorry Leakage

Byeong-Han Jeon¹, Hyun-Sub Kim^{2*}, Sang-Min Lim¹, Joo-Chan Lee², Gang-San Lee³

¹Division of Environmental Engineering, Jeonbuk National University

²Wonju Regional Environmental Office

³National Institute of Chemical Safety

요약 운송차량에 의한 화학사고는 매년 전체 화학사고의 20 %를 차지하지만 영향평가 정보를 알 수 없는 상황이 반복되어 사고대응 과정에서 어려움을 겪게 되는 문제점이 존재한다. 본 연구에서는 국내 사용량이 많고 사고 위험성이 높으며, 최근 7년간 사고 빈도가 높은 염소와 불화수소를 대상으로 탱크로리로 운반하는 과정에서 누출사고가 발생하였을 경우 현장에서 이격거리 산정을 위하여 활용될 수 있는 피해예측범위 산정표 및 산정식을 개발하였다. 화학물질의 누출속도와 기상조건 중 풍속, 온도에 따른 산정표를 조사하였으며, 산정표를 적용하기 힘든 특수한 상황에서는 산정식을 적용할 수 있도록 통계 프로그램 R을 사용하여 산정식을 도출하였다. 유관기관에서는 현장에서 연구에서 도출된 산정표 및 산정식을 활용하면 화학사고 피해 최소화 및 이격거리 설정, 주민대피 결정 등의 의사결정 측면에서 중요한 정보로써 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract Chemical accidents caused by transport vehicles account for 20% of all chemical accidents every year, but there are difficulties in the accident-response process due to repeated situations where the impact assessment information is unknown. In this study, we developed a calculation table and formula for predicting the range of damage for chlorine and hydrogen fluoride, which have a high domestic usage, high risk of accidents, and high accident frequency in the last 7 years. The calculation table is based on the leakage rate, wind speed, and temperature, and the calculation formula was derived using R software for special situations where it is difficult to apply the calculation table. The calculation table and formula could be used on site by related organizations to obtain important information for decision making, which could help in minimizing damage from chemical accidents, setting separation distances, and deciding to evacuate residents.

Keywords : CARIS, Chemical Accident, Chlorine, Hydrogen Fluoride, Tank-lorry.

*Corresponding Author : Hyun-Sub Kim(Wonju Regional Environmental Office)

email: sakao@korea.kr

Received February 25, 2021

Accepted April 2, 2021

Revised March 16, 2021

Published April 30, 2021

1. 서론

화학물질의 누출 등에 의하여 발생하는 화학사고는 본격적으로 통계가 집계되기 시작한 2014년 1월을 기준으로 2020년 8월까지 총 552건이 발생한 것으로 알려져 있다. 연도별로는 2014년 105건, 2015년 113건, 2016년 78건, 2017년 87건, 2018년 66건, 2019년 56건, 2020년 8월까지 46건으로 나타나 전체적으로 감소되는 추세를 보이는 것으로 조사되었다. 그러나 운반차량에 의한 사고는 2014년 22건, 2015년 21건, 2016년 21건, 2017년 19건, 2018년 10건, 2019년 12건, 2020년 10건으로 연간 화학사고 발생 건 수 대비 15~23% 정도를 차지하는 것으로 나타났다[1]. 이러한 결과는 최근 7년간 전체 화학사고 발생 건수가 감소하는 경향을 나타내었지만 사업장 대 사업장 외의 사고 비율은 평균 8:2의 비가 유지 되고 있다는 것을 의미한다. 사업장에서의 유해화학물질 취급에 대한 안전관리는 많은 제도적 장치가 수반되어 화학사고 예방 및 대응에 필요한 영향평가 정보를 쉽게 알 수 있는 반면에 사업장 밖에서 발생하는 운반차량 사고에 대해서는 영향평가 정보를 알 수 없는 상황이 반복되어 사고대응 과정에서 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

운반차량 사고 원인은 과속이나 졸음운전 등의 교통사고나 운반용기의 파손 등으로 인한 운전자 부주의, 적재용기 부식과 노후화에 따른 누출 등의 운반차량 관리소홀로 구분할 수 있으며, 대부분 운전자 부주의에 의해 사고가 발생한다[2]. 국내에서는 운반차량 사고를 미연에 방지하고자 소방청, 산업통상자원부 및 환경부 등 약 9개 관계부처에서 13개에 달하는 관계법령을 통해 위험물의 운반을 관리·감독하고 있다. 대표적인 화학물질 운반 및 운반 관련 주요 법규 현황을 살펴보면 소방청의 「위험물 안전관리법」, 산업통상자원부의 「고압가스안전관리법」, 환경부의 「화학물질관리법」, 경찰청의 「총포·도검·화약류 등 단속법」, 국토교통부의 「위험물철도운반규칙」등이 있다[3]. 화학물질 운반은 한 번의 사고로 인명, 재산 및 환경피해에 막대한 위험을 초래할 수 있어 엄격한 안전관리가 필요하지만, 국내의 경우 도로상 위험물질 운반에 대한 안전관리 규정이 부처별 소관 개별 법률로 분산되어 있고, 특히 도로 운반 중 일어날 수 있는 사고로부터 예방 및 대응과 관련된 법률은 매우 미비한 상태이다[4].

화학물질에 의한 사고를 사회재난으로 인식하게 된 계기는 2012년 9월 구미 불산 누출사고이다. 이 사고를 계기로 기존의 「유해화학물질관리법」이 2015년에 「화학물

질관리법」으로 전면 개정이 되었다. 개정이유에서 「유해화학물질관리법」으로는 화학물질 관리 및 화학사고 대응에 한계가 있으며, 화학물질에 대한 통계조사 및 정보체계를 구축하여 국민의 알권리를 보장하고, 유해화학물질 취급기준 구체화, 화학사고 장외영향평가제도 및 영업허가제 신설 등을 통해 유해화학물질 예방관리체계를 강화하며, 화학사고 발생 시 즉시 신고의무를 부여하고, 현장조정관 파견 및 특별관리지역 지정 등을 통해 화학사고의 신속한 대응체계를 마련하는 한편 화학물질의 체계적인 관리와 화학사고의 예방을 통해 화학물질의 위험으로부터 국민 건강 및 환경을 보호하는 법률로서의 위상을 정립하려는 것이라고 밝히고 있는 바와 같이 동법의 기능은 화학 사고를 대비한 예방관리 체계의 강화, 신속한 대응체계의 구축으로 요약 할 수 있다. 하지만 「화학물질관리법」 도입으로 한정된 지자체의 권한은 유역·지방환경청으로 이관됨에 따라 지자체는 자체적으로 유해화학물질 관련 정보를 입수하기 어려운 실태이며, 이는 사전 현장관리, 사후 초동대응 등 부실로 이어질 개연성이 높아질 수 있다[5,6].

미국과 유럽 등의 경우 화학물질의 물성과 독성, 반응성, 위험성 등 특성을 고려하여 물질을 분류하고, 이에 대한 사고유형별, 물질별 방제지침을 마련하여 초동 대응자가 현장에서 활용하도록 자료를 구축하여 제공하고 있다[7]. 국내에서도 이와 유사하게 화학물질을 운반하려는 경우 사전에 운반물질에 대한 정보가 담긴 운반계획서를 의무적으로 제출하도록 규제하고 있다. 하지만 영향평가에 의한 초기이격거리 및 방호활동거리에 대한 정보가 포함되어 있지 않아 사고발생 우려가 높고 대규모 피해가 예상되는 물질에 대한 체계적인 대응시스템 및 사고 예방, 피해를 최소화하기 위한 정보 관리가 필요한 시점이다[8].

2014년부터 2019년까지 6년간 발생한 유해화학물질 운송차량 사고의 차종을 분석한 결과 탱크로리 차량에 의한 사고가 54.3 %, 탑차 및 원바디 차량을 포함하는 일반트럭에 의한 사고가 37.1 %, 트랙터 및 트레일러에 의한 사고가 8.6 %인 것으로 조사되어 운송차량 사고 중 탱크로리에 의한 사고가 발생 빈도가 가장 높은 것으로 나타났다[9]. 따라서 본 연구에서는 국내 사용량이 많고 사고 위험성 및 사고 발생 빈도가 높은 염소와 불화수소를 대상으로 운반 탱크로리의 화학사고 시 초동대응에 필요한 피해예측범위 산정을 위하여 간이 산정표 정보를 마련하고 화학사고에 의한 피해 최소화 및 방호활동거리 설정, 주민대피 결정 등의 활용에 기여하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 유해화학물질

현재 공개된 가장 최신자료인 2016년 화학물질 통계 조사 결과에 따르면 염소는 연간 취급량이 약 278만 톤으로 33번째로 취급량이 많고 국내의 249개 업체에서 취급중인 것으로 조사되었다. 불화수소는 연간 취급량 19만 톤으로 157번째로 취급량이 많은 물질이며 국내 515개 업체에서 취급하는 것으로 조사되었다[1]. 화학물질관리법상에서 급성독성·폭발성 등이 강하여 화학사고의 발생 가능성이 높거나 화학사고가 발생한 경우에 그 피해 규모가 클 것으로 우려되는 화학물질인 사고대비물질로 한정지면 97종 중 염소는 6번째, 불화수소는 29번째로 많이 취급하는 물질로 조사되었다[10]. 염소와 불화수소의 물리화학적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Physicochemical characteristics of Chlorine and Hydrogen fluoride

Molecular formula	Cl ₂	HF
Vapor density	2.48	1.27
Vapor pressure	5.83×10 ³ mmHg (@ 25 °C)	283 mmHg (@ 20 °C)
Boiling point	-34.04 °C	19.5 °C
NFPA Health	4	4

2.2 피해예측범위 산정 방법

변수에 따른 피해예측범위를 산정하기 위해서 실제 화학사고 대응에 활용되는 화학사고대응정보시스템(Cheical Accident Response Information System, CARIS)으로 영향평가를 시행하였다. 피해예측범위 모델링의 변수는 누출속도, 온도, 풍속을 선정하였다. 누출속도는 1~10 kg/s 범위에서 1 kg/s 단위로 설정하였고, 온도는 -40~40 °C 범위에서 20 °C 단위로 설정하였으며, 풍속은 2~10 m/s 범위에서 2 m/s 단위로 설정하였다. 그 밖의 모델링 결과 산정에 필요한 기상조건인 습도와 대기안정도는 사고시나리오 선정에 관한 기술지침의 대안의 사고 시나리오 분석에 따라 습도 50 %, 대기안정도 D로 설정하였다.

피해예측범위를 결정하기 위한 종말점에 해당하는 끝점(End point)은 화학물질 누출 시 사람이나 환경에 영향을 미칠 수 있는 독성농도에 도달하는 지점을 말하며 사고시나리오 선정에 관한 기술지침의 적용 우선순위에 따라 미국산업위생학회(AIHA)에서 발표하는 ERPG-2 (Emergency Response Planning Guidelines) 수치를 적용하였다. ERPG-2 수치는 사람이 누출물질에 노출되었을 때, 돌이킬 수 없는 심각한 건강 악영향이 예측되는 공기 중 물질 농도로써 염소의 경우 3 ppm, 불화수소의 경우 20 ppm에 해당된다.

Table 2. Calculation table for predicted damage range of chlorine by CARIS

WS (m/s)	2					4					6					8					10				
T (°C)	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40
LR (kg/s)	Predicted damage range (m)																								
1	312	330	347	367	385	181	197	210	221	232	130	140	147	156	167	102	110	117	123	131	84	91	97	102	109
2	518	554	585	612	640	312	330	347	367	385	230	247	262	274	186	181	197	210	221	232	150	161	173	182	195
3	698	737	771	818	858	412	445	470	493	522	312	330	347	367	385	254	269	284	299	314	213	226	241	255	267
4	854	901	942	998	1048	518	554	585	612	640	383	404	424	455	476	312	330	347	367	385	266	281	297	314	328
5	993	1056	1109	1155	1219	610	646	686	720	751	453	480	509	539	567	366	388	407	432	455	312	330	347	367	385
6	1125	1189	1262	1325	1380	697	737	771	817	858	518	554	585	612	640	412	445	470	493	522	354	377	397	414	441
7	1258	1331	1394	1467	1545	769	822	868	909	944	584	615	649	686	719	469	495	529	560	587	396	416	447	471	498
8	1374	1451	1541	1619	1687	854	901	942	998	1048	636	680	717	750	784	518	554	585	612	640	439	467	491	521	550
9	1493	1587	1668	1737	1837	920	975	1034	1085	1130	697	731	771	817	858	569	601	629	668	701	478	509	542	572	598
10	1613	1697	1789	1893	1983	993	1055	1109	1154	1219	747	791	839	881	918	610	646	686	720	751	518	554	585	612	640

T: Temperature WS: Wind speed LR: Leak rate

2.3 다중회귀분석

각각의 독립변수가 종속변수에 유의미한 값인지 확인하고 회귀분석을 통해 상관관계식을 도출하기 위해서 통계프로그램 R을 활용하여 다중회귀분석을 시행하였다. 독립변수는 누출속도, 온도, 풍속으로 선정하였고, 종속변수는 피해예측범위로 선정하였다. 다중회귀분석에서 F통계량으로 회귀분석모델의 적합성을 검증하고 t통계량을 통해 독립변수의 유의수준을 확인하고자 하였으며, R² 수치를 통해 회귀분석모델의 설명력을 알아보려고 하였다.

CARIS를 이용한 염소의 피해예측범위 산정에서 독립변수인 물질의 누출속도, 온도, 풍속별 변화에 따른 종속변수 피해예측범위의 결과는 Table 2와 같다. 풍속이 2 m/s인 조건에서 누출속도 및 온도 변화에 따른 피해예측범위는 312~1,983 m, 4 m/s인 조건에서 피해예측범위는 181~1,219 m, 6 m/s인 조건에서 피해예측범위는 130~918 m, 8 m/s인 조건에서 피해예측범위는 102~751 m, 10 m/s인 조건에서 피해예측범위는 84~640 m으로 나타났다. 염소의 누출속도와 피해예측범위의 관계는 누출속도가 증가할수록 피해예측범위도 증가하는 양의 상관관계를 보였으며, 온도와 피해예측범위의 관계 또한 양의 상관관계를 나타냈다. 반면, 풍속과 피해예측범위간의 관계는 풍속이 증가할수록 피해예측범위가 감소하는 음의 상관관계를 나타냈다.

3. 연구결과

3.1 염소와 불화수소의 피해예측범위 산정

Table 3. Calculation table for predicted damage range of Hydrogen fluoride by CARIS

WS (m/s)	2					4					6					8					10				
	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40
T (℃)																									
LR (kg/s)	Predicted damage range (m)																								
1	863	911	959	1005	1051	552	581	610	638	666	430	452	474	495	516	362	380	398	415	432	317	333	348	363	377
2	1385	1468	1550	1630	1710	863	911	959	1005	1051	662	698	734	768	802	552	581	610	638	666	481	506	530	554	578
3	1853	1969	2084	2197	2309	1134	1200	1265	1329	1392	863	911	959	1005	1051	715	754	792	830	867	619	653	685	717	749
4	2297	2444	2590	2735	2879	1385	1468	1550	1630	1710	1046	1107	1166	1225	1281	863	911	959	1005	1051	745	786	826	866	905
5	2723	2903	3081	3258	3433	1623	1723	1821	1918	2014	1219	1291	1362	1431	1500	1001	1059	1115	1171	1225	863	911	959	1005	1051
6	3139	3351	3561	3768	3975	1853	1969	2084	2197	2309	1385	1468	1550	1630	1710	1134	1200	1265	1329	1392	974	1030	1084	1138	1191
7	3549	3791	4032	4273	4510	2077	2209	2340	2469	2597	1545	1639	1732	1824	1914	1261	1336	1409	1482	1553	1081	1144	1206	1266	1326
8	3953	4227	4498	4769	5038	2297	2444	2590	2735	2879	1701	1806	1910	2012	2113	1385	1468	1550	1630	1710	1185	1255	1323	1391	1457
9	4350	4656	4960	5262	5563	2511	2675	2837	3010	3158	1853	1969	2084	2197	2309	1505	1597	1687	1776	1863	1286	1362	1438	1512	1585
10	4746	5083	5418	5751	6083	2723	2903	3081	3258	3433	2003	2130	2256	2379	2501	1623	1723	1821	1918	2014	1385	1468	1550	1630	1710

T: Temperature WS: Wind speed LR: Leak rate

Table 4. Leakage rate according to leakage amount and leakage time

(unit: kg/s)

Leakage (ton)	Leak time (minute)									
	10	20	30	40	50	60	90	120	150	180
1	1.7	0.8	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1
3	5.0	2.5	1.7	1.3	1.0	0.8	0.6	0.4	0.3	0.3
5	8.3	4.2	2.8	2.1	1.7	1.4	0.9	0.7	0.6	0.5
7	11.7	5.8	3.9	2.9	2.3	1.9	1.3	1.0	0.8	0.6
9	15.0	7.5	5.0	3.8	3.0	2.5	1.7	1.3	1.0	0.8
11	18.3	9.2	6.1	4.6	3.7	3.1	2.0	1.5	1.2	1.0
13	21.7	10.8	7.2	5.4	4.3	3.6	2.4	1.8	1.4	1.2
15	25.0	12.5	8.3	6.3	5.0	4.2	2.8	2.1	1.7	1.4
17	28.3	14.2	9.4	7.1	5.7	4.7	3.1	2.4	1.9	1.6
19	31.7	15.8	10.6	7.9	6.3	5.3	3.5	2.6	2.1	1.8
21	35.0	17.5	11.7	8.8	7.0	5.8	3.9	2.9	2.3	1.9
23	38.3	19.2	12.8	9.6	7.7	6.4	4.3	3.2	2.6	2.1
25	41.7	20.8	13.9	10.4	8.3	6.9	4.6	3.5	2.8	2.3

Table 3은 불화수소의 누출속도, 온도, 풍속별 변화에 따른 CARIS의 피해예측범위 결과를 나타내고 있다. 풍속이 2 m/s일 때 불화수소의 피해예측범위는 863~6,083 m, 4 m/s일 때는 552~3,433 m, 6 m/s일 때는 430~2,501 m, 8 m/s일 때는 362~2,014 m, 10 m/s일 때는 317~1,710 m의 범위를 나타내었다. 염소의 피해예측범위 상관관계와 마찬가지로 불화수소의 누출속도와 온도는 종속변수인 피해예측범위와 양의 상관관계를

나타냈으며, 풍속은 피해예측범위와 음의 상관관계를 나타냈다.

Table 4는 탱크로리 누출사고 시 누출지속시간에 따른 유해화학물질의 누출량을 통하여 누출속도를 구한 표이다. CARIS를 이용하여 작성된 염소와 불화수소의 피해예측범위 산정표는 일반적인 유해화학물질(염소, 불화수소) 운송차량 누출 사고 대부분의 상황에 활용될 수 있으나 짧은 시간에 다량이 누출되어 누출속도가 10 kg/s

Table 5. Predicted damage range of chlorine in extreme situations by CARIS

WS (m/s)	2					4					6					8					10				
T (°C)	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40
LR (kg/s)	Predicted damage range (m)																								
20	2597	2780	2942	3083	3210	1612	1697	1789	1892	1982	1212	1288	1354	1410	1488	993	1055	1109	1154	1219	854	901	942	998	1048
30	3516	3725	3902	4146	4371	2118	2265	2396	2510	2609	1612	1697	1789	1892	1982	1320	1388	1464	1548	1620	1124	1189	1262	1325	1380
40	4342	4599	4824	5139	5415	2597	2779	2941	3082	3208	1972	2076	2188	2316	2429	1612	1697	1789	1892	1982	1373	1450	1540	1618	1687
50	5112	5450	5736	5808	6407	3069	3235	3451	3636	3799	2305	2444	2562	2698	2847	1883	1995	2090	2200	2320	1612	1697	1789	1892	1982

T: Temperature WS: Wind speed LR: Leak rate

Table 6. Predicted damage range of Hydrogen fluoride in extreme situations by CARIS

WS (m/s)	2					4					6					8					10				
T (°C)	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40	-40	-20	0	20	40
LR (kg/s)	Predicted damage range (m)																								
20	8599	9250	9900	10549	11196	4746	5083	5418	5751	6084	3413	3645	3876	4105	4332	2723	2903	3081	3251	3433	2297	2444	2590	2735	2879
30	12376	13345	14310	15276	16238	6688	7182	7675	8165	8656	4746	5083	5418	5751	6084	3751	4009	4266	4521	4775	3139	3351	3561	3768	3975
40	16128	17417	18693	19975	21258	8599	9250	9900	10549	11196	6045	6487	6926	7365	7803	4746	5083	5418	5751	6084	3953	4227	4498	4769	5038
50	19866	21466	23070	24666	26265	10494	11304	12110	12921	13722	7328	7874	8418	8961	9528	5723	6138	6552	6964	7375	4746	5083	5418	5751	6084

T: Temperature WS: Wind speed LR: Leak rate

Table 7. Multiple regression analysis results

	Cl ₂					HF				
	Wind speed (m/s)					Wind speed (m/s)				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
B(LR)	107.5994	64.6201	48.6196	39.7270	34.0707	447.7654	232.0756	160.0434	123.7524	101.8438
B(T)	5.4071	3.2814	2.3879	2.0125	1.7371	22.9268	11.8989	8.2136	6.3325	5.2071
Intercept	560.6651	353.1062	261.5135	212.8744	178.6294	812.3531	640.7897	545.9101	483.8769	438.7474
p-value(t)	<0.001					<0.001				
p-value(F)	<0.05					<0.05				
adj. R ²	0.9842	0.9824	0.9803	0.9811	0.9808	0.9896	0.9895	0.9892	0.9889	0.9885

Table 8. Relative standard deviation comparison verification

Chemical	Cl ₂					HF				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
Average (%)	3.09	3.22	3.41	3.44	3.50	2.19	2.23	2.31	2.39	2.47
Range (%)	0.42 ~6.35	0.05 ~6.71	0.39 ~6.78	0.16 ~7.05	0.05 ~7.04	0.02 ~5.74	0.07 ~5.73	0.08 ~5.73	0.15 ~5.73	0.16 ~5.73

를 넘어가는 특수한 상황에는 적용이 어려운 점이 존재한다. 따라서 이러한 특수한 상황에서의 피해예측범위를 예측하기 위하여 통계프로그램 R의 다중회귀분석을 통한 상관관계식을 도출하였다.

3.2 R을 이용한 상관관계식 도출

CARIS를 이용한 피해예측범위 결과를 바탕으로 누출 속도가 10 kg/s보다 큰 경우에 활용할 수 있는 상관관계식을 도출하고자 통계프로그램 R을 사용하여 물질별, 풍속별 다중회귀분석을 하였다. Table 5-6은 누출속도를 20~50 kg/s 범위에서 10 kg/s 단위로 설정하여 구한 염소와 불화수소의 피해예측범위 결과를 나타내고 있다.

염소와 불화수소의 피해예측범위와 누출속도, 온도 간의 다중회귀분석 결과는 Table 7과 같다. 분석결과 독립변수 누출속도(LR)의 비표준화 회귀계수(B)는 풍속 2~10 m/s일 때 각각 107.5994, 64.6201, 48.6196, 39.7270, 34.0707로 나타났다. 온도(T)의 비표준화 회귀계수(B)는 풍속별로 5.4071, 3.2814, 2.3879, 2.0125, 1.7371로 나타났다. 모든 비표준화 회귀계수의 t통계량 유의수준(p-value)는 0.001이하로 나타나 독립변수는 모두 통계적으로 유의미한 수치를 나타내어 종속변수인 피해예측범위에 영향을 준다고 말할 수 있었다. 같은 조건에서 상수항은 각각 560.6651, 353.1062, 261.5135, 212.8744, 178.6294였다. 회귀분석모형의 F통계량 유의수준(p-value)는 0.05이하로 나타나 통계적으로 유의하였으며, 염소 다중회귀분석의 설명력(adj.R²)은 각각 98.42%, 98.24%, 98.03%, 98.11%, 98.08%의 설명력을 갖는 것으로 조사되었다. 다중회귀분석을 통해 도출된 염소의 피해예측범위 상관관계식은 식(1)~식(5)와 같다.

$$y_1 = 107.5994LR_1 + 5.4071T + 560.6651 \quad (1)$$

$$y_1 = 64.6201LR_1 + 3.2814T + 353.1062 \quad (2)$$

$$y_1 = 48.6196LR_1 + 2.3879T + 261.5135 \quad (3)$$

$$y_1 = 39.7270LR_1 + 2.0125T + 212.8744 \quad (4)$$

$$y_1 = 34.0707LR_1 + 1.7371T + 178.6294 \quad (5)$$

y₁ : 염소 피해예측범위(m)

LR₁ : 염소 누출 속도(kg/s)

T : 온도(°C)

불화수소의 피해예측범위와 누출속도, 온도의 다중회귀분석 결과 독립변수 누출속도(LR)의 비표준화 회귀계

수(B)는 풍속별로 각각 447.7654, 232.0756, 160.0434, 123.7524, 101.8438이었으며, 온도(T)의 비표준화 회귀계수(B)는 22.9268, 11.8989, 8.2136, 6.3325, 5.2071로 나타났다. 모든 독립변수의 비표준화 회귀계수 t통계량 유의수준(p-value)는 0.001이하로 나타나 통계적으로 모두 유의미한 수치임을 확인할 수 있었다. 풍속별 조건에서 상관관계식의 절편인 상수항은 각각 812.3531, 640.7897, 545.9101, 483.8769, 438.7474로 나타났다. F통계량의 유의수준(p-value)는 0.05이하이므로 회귀분석모형이 통계적으로 유의함을 확인할 수 있었고, 불화수소 다중회귀분석의 설명력(adj.R²)은 각각 98.96%, 98.95%, 98.92%, 98.89%, 98.85%로 조사되었다. 다중회귀분석으로 도출된 불화수소의 피해예측범위 상관관계식은 식(6)~식(10)과 같다.

$$y_2 = 447.7654LR_2 + 22.9268T + 812.3531 \quad (6)$$

$$y_2 = 232.0756LR_2 + 11.8989T + 640.7897 \quad (7)$$

$$y_2 = 160.0434LR_2 + 8.2136T + 545.9101 \quad (8)$$

$$y_2 = 123.7524LR_2 + 6.3325T + 483.8769 \quad (9)$$

$$y_2 = 101.8438LR_2 + 5.2071T + 438.7474 \quad (10)$$

y₂ : 불화수소 피해예측범위(m)

LR₂ : 불화수소 누출 속도(kg/s)

T : 온도(°C)

다중회귀분석으로 도출된 염소와 불화수소의 피해예측범위 상관관계식(식(1)~식(10))을 동일한 조건에서 CARIS를 활용하여 구한 피해예측범위 결과와 비교검증하기 위하여 상대표준편차(RSD, relative standard deviation)를 조사하였다. 상대표준편차는 표준편차를 평균값으로 나눈 값으로써 보통 퍼센트(%)로 표현하며 정밀도의 지표로서 사용된다. 누출속도가 10kg/s를 초과하는 조건에서 상대표준편차를 분석한 결과를 Table 8에 나타내었다. 염소의 경우 식(1)의 상대표준편차 평균은 3.09%, 범위는 0.42~6.35%, 식(2)의 상대표준편차 평균은 3.22%, 범위는 0.05~6.71%, 식(3)의 상대표준편차 평균은 3.41%, 범위는 0.39~6.78%, 식(4)의 상대표준편차 평균은 3.44%, 범위는 0.16~7.05%, 식(5)의 상대표준편차 평균은 3.50%, 범위는 0.05~7.04%로 조사되었다. 불화수소의 경우에는 식(6)의 상대표준편차 평균이 2.19%, 범위는 0.02~5.74%였으며, 식(7)의 상대표준편차 평균이 2.23%, 범위는 0.07~5.73%, 식(8)의

상대표준편차 평균이 2.31 %, 범위는 0.08~5.73 %, 식(9)의 상대표준편차 평균이 2.39 %, 범위는 0.15~5.73 %, 식(10)의 상대표준편차 평균이 2.47 %, 범위는 0.16~5.73 %인 것으로 나타났다.

3.3 산정표 및 상관관계식을 현장에 활용

화학물질 누출에 의한 사고에서 신속한 현장 오염도 측정을 통해 경계구역 선정 및 주민대피 알람이 최대한 빠른 시간 안에 이루어져야 하지만 사고 초기 현장의 한정된 정보만으로 일련의 상황을 판단해야 하는 어려움이 존재한다. 또한 전국의 주요산업단지과 수계를 중심으로 위치하며 14개소에 불과한 화학사고 대응 주체인 환경청 및 화학재난합동방재센터가 상황에 따라서 도로상 어디서든 발생할 수 있는 운송차량의 사고지점까지 도달하는 데에는 많은 시간이 소요되기도 한다. 피해영향거리 산정을 위하여 CARIS를 구동하는데 있어서는 사고 시설의 제원 등 현장 상세정보가 동반되어야 정상 범주의 결과를 얻을 수 있으나 사업장과 달리 운송차량은 영향평가에 대한 규제가 없어 상세한 정보를 입수하기까지 시간이 지체되는 것이 현 실정이다. 따라서 화학물질, 시설정보 등을 고려하여 얻은 영향범위 data sheet는 CARIS를 활용할 수 없는 상황이거나 구동에 필요한 정보가 부족한 상황에서도 현장 대응에 활용될 수 있는 자료로써 가치를 가지고 있다.

유해화학물질인 염소와 불화수소를 운반하는 탱크로리 차량에서 누출사고가 발생하였을 경우 피해예측범위를 구하기 위해서는 다음과 같은 현장 상황을 고려하여야 한다. 사고현장에서 측정된 누출속도의 범위가 10 kg/s 이하이며, 온도는 -40~40 °C 범위이고, 풍속이 0~10 m/s 범위 안에 있는 경우에 염소의 피해예측범위는 산정표 Table 2를 활용하여 구할 수 있으며, 누출속도의 범위가 10 kg/s 초과 50 kg/s 이하인 경우에는 조건에 따라 상관관계식(1)~(5)를 적용하여 피해예측범위를 구할 수 있다. 불화수소의 피해예측범위는 동일 기상조건에서 누출속도 범위가 10 kg/s 이하인 경우에는 산정표 Table 3을 활용하여 구할 수 있으며, 누출속도가 10 kg/s를 초과하고 50 kg/s 이하인 조건에서는 상관관계식(6)~(10)을 적용하여 영향범위를 예측할 수 있다. 상황에 따라 산정표에서 독립변수가 선정된 수치 이외의 값을 가지는 경우에는 사이값 등을 활용하여 해당 조건의 피해예측범위를 추정할 수 있다. 그리고 현장에서 누출속도의 값을 알 수 없을 때 Table 4를 활용하면 누출시간 대비 일반적인 탱크로리 용량 기준인 25 ton 차량에 누출량을 기준으로 한 누출속도를 쉽게 추정할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 사용량과 사고발생 빈도가 높은 염소와 불화수소를 대상으로 탱크로리로 운송 과정 중 누출된 상황에서 활용될 수 있는 피해예측범위 산정표와 상관관계식을 도출하였다.

1. CARIS를 활용한 염소와 불화수소의 피해예측범위 산정표 조사 결과 독립변수 풍속, 온도, 누출속도의 조건에 따라 염소는 최대 1,983 m, 불화수소는 최대 6,083 m의 피해예측범위를 나타냈다.
2. 사고물질의 누출속도가 10 kg/s를 초과하는 극단적인 상황에서의 피해예측범위는 통계프로그램 R을 활용하여 상관관계식을 도출하였다. 다중회귀분석모형의 F통계량 유의수준은 <0.05였으며, 모든 독립변수의 t통계량 유의수준은 <0.001로 통계적으로 유의하였다. 염소의 다중회귀분석에서 adj.R²는 98.03~98.42 %, 상대표준편차의 평균은 3.09~3.50 %이었고, 불화수소의 경우 adj.R²는 98.85~98.96 %, 상대표준편차 평균은 2.19~2.47 %로 나타났다.
3. 유관기관에서는 초동대응에 필요한 피해예측범위 산정을 위하여 간이 산정표 정보 및 상관관계식을 활용하면 화학사고에 의한 피해 최소화 및 방호활동거리 설정, 주민대피 결정 등의 의사결정 측면에서 중요한 정보로써 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] National Institute of Chemical Safety, Chemical integrated Information system, Available From : <https://icis.me.go.kr> (accessed Jan. 10, 2021)
- [2] S. B. Kim, S. J. Lee, S. K. Jeong, M. H. Lim, Y. G. Song, E. S. Ahn, H. Y. Jeong, N. J. Kim, H. J. Lee, S. W. Choi, "A Study on Investigation Procedure of Chemical Spill by Vehicle Transporting Chemicals", *Journal of Korea Society of Disaster Information*, vol. 13, no. 1, pp. 1-5, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.15683/kosdi.2017.03.31.1>
- [3] B. W. Lee, "A Design for Safety Management of Dangerous Goods Transportation", *Korean Journal of Hazardous Materials*, vol. 4, no. 2, pp. 61-68, 2016.
- [4] S. B. Ahn, "Hazardous materials transportation in Korea : problems, implications, and strategies", The Korea Transport Institute, 1998, pp. 170.
- [5] Y. S. Oak, Y. S. Lee, "A Study on Improvement of Legal System for Harmful Chemical Substance Response Management System", *Korea Academy Industrial*

Cooperation Society, vol. 18, no. 4, pp. 216-223, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.4.216>

- [6] Ministry of Environment, "Chemicals Control Act", 2015. Available From : <http://www.law.go.kr> (accessed Jan. 10, 2021)
- [7] Y. S. Yoon, "Development of Chemical Accident Response Information Sheets for Hydrogen Chloride", *Korean Journal of Hazardous Materials*, vol. 5, no. 1, pp. 26-34, 2017.
- [8] B. H. Jeon, H. S. Kim, "Improvement on Accident Statistic Analysis and Response of Hazardous Chemical Transport Vehicle", *Journal of the Society of Disaster Information*, vol. 14, no. 1, pp. 59-64, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.15683/kosdi.2018.03.31.59>
- [9] J. U. Jeong, "Analysis on the Characteristics of Hazardous Chemical Transport Vehicle Accidents in Korea", *Journal of the Society of Disaster Information*, vol. 16, no. 2, pp. 310-317, 2020. DOI: <http://doi.org/10.15683/kosid.2020.06.30.310>
- [10] Ministry of Environment, "Toxic Chemicals Control Act", 2015. Available From : <http://www.law.go.kr> (accessed Jan. 10, 2021)

전 병 한(Byeong-Han Jeon)

[정회원]



- 2016년 2월 : 아주대학교 환경공학 (석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 환경공학과 (박사과정)
- 2017년 12월 ~ 현재 : 화학물질안전원 화학안전관리위원

<관심분야>

환경공학, 안전공학

김 현 섭(Hyun-Sub Kim)

[정회원]



- 2016년 8월 : 아주대학교 환경안전공학과 (석사)
- 2021년 2월 : 한국산업기술대학교 생명화학공학과 (박사)
- 2016년 1월 ~ 2018년 8월 : 한강유역환경청 화학안전관리위원
- 2018년 9월 ~ 현재 : 원주지방환경청 공업연구사

<관심분야>

환경공학, 화학공학, 안전공학

임 상 민(Sang-Min Lim)

[정회원]



- 2014년 2월 : 수원대학교 건축공학과 (학사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 환경공학과 (석사과정)
- 2018년 8월 ~ 현재 : 화학물질안전원 전문경력관 나군

<관심분야>

환경공학, 건축공학

이 주 찬(Joo-Chan Lee)

[정회원]



- 2019년 2월 : 연세대학교 환경공학과 (석사)
- 2019년 2월 ~ 현재 : 원주지방환경청 화학안전관리위원

<관심분야>

환경공학, 화학공학

이 강 산(Gang-San Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 강원대학교 환경공학과 (석사)
- 2017년 3월 ~ 2019년 1월 : 국립환경과학원 전문위원
- 2019년 1월 ~ 현재 : 화학물질안전원 전문경력관 나군

<관심분야>

환경공학, 안전공학