



## 염산 운송차량의 누출공 크기와 누출률 및 영향범위간 상관관계 연구

전병한\*  · 김현섭\*\*† 

\*전북대학교 환경공학과, \*\*원주지방환경청 화학물질관리과

### A Study on the Correlation between Leak Hole Size, Leak Rate, and the Influence Range for Hydrochloric Acid Transport Vehicles

Byeong-Han Jeon\* and Hyun-Sub Kim\*\*†

\*Division of Environmental Engineering, Jeonbuk National University

\*\*Chemicals Management Division, Wonju Regional Environmental Office

#### ABSTRACT

**Objectives:** The correlation between the size of a leak hole, the volume of the leakage, and the range of influence was investigated for a hydrochloric acid tank-lorry.

**Methods:** For the case of a tank-lorry chemical accident, KORA (Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool) was used to predict the leak rate and the range of influence according to the size of the leak hole. The correlation was studied using R.

**Results:** As a result of analyzing the leak rate change according to the leak hole size in a 35% hydrochloric acid tank-lorry, as the size of the leak hole increased from 1 to 100 mm, the leak rate increased from 0.008 to 83.94 kg/sec, following the power function. As a result of calculating the range of influence under conditions ranging from 1 to 100 mm in size and 10 to 60 minutes of leakage time, it was found that the range spanned from a minimum of 5.4 m to a maximum of 307.9 m. As a result of multiple regression analysis using R, the quadratic function model best explained the correlation between the size of the leak hole, the leak time, and the range of influence with an adjusted coefficient of determination of 0.97 and a root mean square error of 22.33.

**Conclusion:** If a correlation database for the size of a leak hole is accumulated for various substances and under various conditions, the amount of leakage and the range of influence can easily be calculated, facilitating field response activities.

**Key words:** Chemical accident, hazardous chemical, influence range, tank-lorry

## I. 서 론

화학사고는 화학물질의 장거리 이동 및 다른 매체로의 전이되는 확산성, 오염 확인이 어려운 비가시성, 유해성, 잔류성, 난분해성 등의 특징으로 인하여 환경에 치명적인 영향을 미치고, 발생유형이 복합적으로 일어나 대량피해로 확대될 가능성이 높은 특징을 가지고

있다.<sup>1)</sup> 과거 발생한 화학 사고를 대상으로 계절별로 발생추이를 살펴보았을 때 주로 기온이 상승하기 시작하는 6월부터 전체적으로 증가 추세를 보이며, 여름철에 사고발생 빈도가 가장 높게 나타나는 것으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup> Lee, et al.(2020) 연구에 따르면 화학사고 피해의 잠재성은 환경 및 지역의 특성에 따라 각기 다른 특징으로 설명될 수 있는 것으로 조사되었다.<sup>3)</sup>

†Corresponding author: †Corresponding author: Chemicals Management Division, Wonju Regional Environmental Office, 65 Ipchun-ro, Wonju-si, Gangwon-do 26461, Republic of Korea, Tel: +82-33-760-6446, Fax: +82-33-765-1325, E-mail: sakao@korea.kr

Received: 15 March 2021, Revised: 19 April 2021, Accepted: 20 April 2021

Kim, et al.(2017) 연구에 따르면 2014년부터 2016년까지 6개 화학제난합동방재센터의 119화학구조센터 출동세부내역을 검토한 결과 유해화학물질 탱크로리 차량에서의 누출·화재 등의 화학사고는 대부분 교통사고에서 기인하여 발생하는 것으로 조사되었다.<sup>1)</sup> Jeong and Lee(2020)는 연구에서 2014년부터 2019년까지 6년간 발생한 유해화학물질 운송차량 사고의 차종을 분석한 결과 탱크로리 차량에 의한 사고가 54.3%, 탑차 및 윙바디 차량을 포함하는 일반트럭에 의한 사고가 37.1%, 트랙터 및 트레일러에 의한 사고가 8.6%인 것으로 조사되어 운송차량 사고 중 탱크로리에 의한 사고가 가장 높은 빈도로 발생하는 사실을 확인하였다.<sup>4)</sup>

Oak and Lee(2017)는 화학사고는 인체에 영향 및 폭발 등 단기간에 재난으로 확산될 가능성이 큰 만큼 화학사고에 대한 종합적인 민·관대응체계 형태로 운영될 필요가 있으며 이를 현장에 적용하기 위해서 조례 등을 통한 지원방법을 마련할 것을 제안하고 있다.<sup>5)</sup> Seol, et al.(2015) 유해화학물질 운송차량의 사고대응 가이드라인에 관한 연구에 따르면 현장 사고 대응팀은 사고현장 인명구조, 사고현장 주변 주민에 알림·대피, 현장 통제 등을 포함하는 일관된 목표 전략을 가져야하며 현장 평가 도구(탐지장비, 탱크의 모양, 동식물 영향) 등을 활용하여 사고 현장의 상태를 규명하고 현장에서 활동하는 내내 현장 출입 통제, 누출된 화학물질 방재, 외부로의 확산 방지, 유관기관의 원활한 대응을 위한 교통통제 등을 수행하여야 한다.<sup>6)</sup> 이 때 현장에서 필요한 정보가 피해영향범위 예측정보이며 Lee, et al.(2015)의 연구 따르면 화학물질에 의한 사고에서 피해예측 거리를 예상할 수 있다면 사고대응에 필요한 충분한 양의 방재물자를 예측할 수 있고 올바른 대응방법 선택으로 2차 피해가 발생하는 것을 예방할 수 있는 것으로 나타났다.<sup>7)</sup>

‘화학물질종합정보시스템’의 최근 7년간 발생한 화학사고를 사고원인별로 조사한 결과에 따르면<sup>8)</sup> 총 581건의 화학사고 중 작업자의 부주의에 의한 사고는 220건, 시설관리 미흡에 의한 사고는 233건, 운송차량에 의한 사고는 120건, 기타 8건으로 조사되었다. 운송차량에 의한 사고는 2014년부터 2020년까지 각각 22, 21, 21, 19, 10, 12, 15건 순으로 발생하였다. 운송차량에 의한 사고는 작업자 부주의 및

시설관리 미흡에 의한 사고와는 달리 연도별 사고발생 건수와 증감 폭이 크지 않지만 연간 화학사고의 약 15~27% 정도를 차지하는 등 비중이 작지 않은 사고원인인 것으로 나타났다. 7년간 120건의 운송차량 화학사고 중 가장 빈번하게 사고가 발생한 유해화학물질은 염산으로 알려져 있다. 염산 운송차량에서 총 30건의 화학 사고가 발생하였으며, 황산과 질산 운송차량에서 10건씩 발생하여 그 뒤를 따르고 있다. 따라서 본 연구에서는 유해화학물질 운송차량에 의한 사고 중 가장 발생빈도가 높은 염산 탱크로리 운반차량을 대상으로 하여 누출공의 크기와 누출률 및 피해영향범위간의 상관관계를 조사하고 현장 대응에 적용하는 방안을 제시하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 영향범위 산정 모델링 조건

영향범위 모델링은 화학물질안전원의 장외영향평가서 및 위해관리계획서 작성에 범용적으로 사용되는 KORA (Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool)을 활용하였다. KORA의 확산예측모델은 사고물질이 공기보다 가벼운 가스일 때 가우시안 플룸 모델을 적용하고 무거운 가스일 때는 SLAB모델을 적용한다. 액상물질은 누출과 동시에 액체층을 1 cm 깊이로 형성되는 것을 가정하고, 확산방지 조치가 적절하게 적용되는 경우에는 액상물질 표면적에서 증발되는 속도를 대기 확산 속도로 가정한다. 액체층의 표면적과 증발속도 계산은 Eq. (1)-(2)를 따른다.<sup>9)</sup>

$$A = 0.1 \times \frac{Q_r}{\rho} \quad (1)$$

A: 액체층 표면적(m<sup>2</sup>)

Q<sub>r</sub>: 누출량(kg)

ρ: 밀도(g/cm<sup>3</sup>)

$$R_E = \frac{1.4 \times U^{0.78} \times M_w^{2/3} \times A \times P_v}{82.05 \times T} \quad (2)$$

R<sub>E</sub>: 증발속도(kg/min)

U: 풍속(m/sec)

M<sub>w</sub>: 분자량

A: 액체층 표면적(m<sup>2</sup>)

P<sub>v</sub>: 증기압(mmHg)

T: 온도(K)

모델링에 적용할 사고시나리오는 ‘사고시나리오 선정에 관한 기술지침’(화학물질안전원 지침 제2018-5호)<sup>10)</sup>에서 현실적으로 발생 가능성이 높고 환경에 미치는 영향이 사업장 밖까지 미치는 영향범위가 최대인 경우를 의미하는 대안의 사고시나리오를 선택하였고 대안의 사고시나리오 기상조건인 풍속 3 m/s, 습도 50%, 온도 25°C, 대기안정도 D를 적용하였다. 그리고 사람과 환경에 영향을 가할 수 있는 대기 중 독성농도 수치가 거리상으로 누출원으로부터 도달하는 지점을 뜻하는 끝점(종말점)은 기술지침의 적용 우선순위에 따라서 미국산업위생학회(AIHA)에서 발표하는 ERPG-2 기준을 사용하였다.

**2. 탱크로리 제원**

탱크로리란 휘발유, 등유, 경유, 중유, 그 밖의 여러 가지 액체를 안전하고 신속하게 운반할 수 있는 탱크가 붙은 트럭을 말한다. 적재하는 탱크의 규격에 대해서는 제한 없이 제작·구입을 허용하고 있지만 자동차관리법의 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 시행규칙에 따르면 탱크로리는 길이 13 m, 너비 2.5 m, 높이 4 m 기준을 초과할 수 없다. 또한 차량의 총중량은 40 ton을 초과하여서는 아니 된다.<sup>11)</sup> 연구에서는 탱크로리의 최대길이, 너비, 높이 허용기준을 고려하여 사고 모델링에 적용할 탱크의 제원을 Fig. 1과 같이 설정하였다.

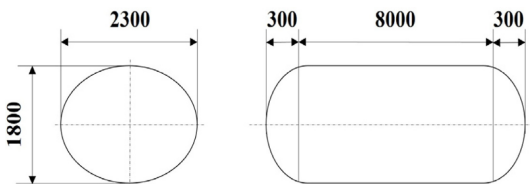


Fig. 1. Specifications of tank-lorry (unit: mm)

**3. 통계프로그램 R**

연구에서는 R을 활용하여 다항회귀분석 및 다중회귀분석을 수행하였으며, 이를 통해 누출공의 크기와 누출률 및 피해영향범위의 상관관계를 조사하고자 하였다. 회귀분석 모델은 1차 함수모델, 2차 함수모델, 거듭제곱 함수모델 중 상관관계를 가장 잘 설명할 수 있는 모델을 알아보하고자 하였다. 다항회귀분석에서는 설명력을 의미하는 결정계수 R<sup>2</sup>을 활용하고, 다중회귀분석에서는 독립변수가 증가함에 따라 함께 증가하는 결정계수 R<sup>2</sup>의 오류를 보완하고자 수정된 결정계수 adj. R<sup>2</sup>을 활용하였다.

**III. 결과 및 고찰**

**1. 운송차량 화학사고 피해영향범위 산정**

Table 1은 KORA를 사용하여 운송차량에 의한 화학사고 시 누출공의 크기에 따른 누출률을 예측한 결과이다. 사고 차량은 유해화학물질인 35% 농도의 염산을 수송하던 탱크로리 차량으로써 적재된 탱크에는 25 ton의 염산이 액상상태로 저장되어 있는 것으로 가정하였다. KORA 구동 결과 탱크로리의 누출공이 1 mm에서 100 mm까지 증가함에 따라서 누출률은 0.008 kg/sec에서부터 83.94 kg/sec까지 증가하는 것으로 나타났다. Table 2는 누출공 크기와 누출률 간의 다항회귀분석 결과이다. 회귀분석결과 독립변수인 누출공의 크기와 종속변수인 누출률의 관계를 가장 잘 설명할 수 있는 회귀분석 모델은 Eq. (3)과 같은 거듭제곱함수 모델인 것으로 나타났다.

$$y = A \times x^B \tag{3}$$

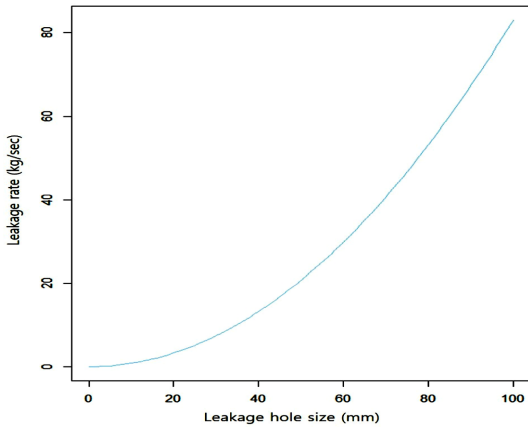
- y: 누출률 (kg/sec)
- x: 누출공의 크기 (mm)
- A: 상수항
- B: 누출공의 크기 비표준화 계수

Table 1. Leak rate as a function of leak hole size change

Leakage hole size (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Leakage rate (kg/sec)	0.008	0.03	0.08	0.13	0.21	0.30	0.41	0.54	0.68	0.84	3.36	7.56	13.43	20.99	30.22	41.13	53.72	67.99	83.94

**Table 2.** Polynomial regression analysis result

A	B	p (t)	p (F)	R <sup>2</sup>
0.0083	2.0027	2e-16	2.2e-16	1.00



**Fig. 2.** Polynomial regression analysis graph

상수항 B는 누출공 크기의 비표준화 계수로써 회귀분석 결과 2.0027의 수치를 나타내었고, 유의수준 p는 0.05 이하로 나타나 B는 통계적으로 유의함을 확인할 수 있었다. 절편인 상수항 A는 0.0083으로 조사되었고, F통계량의 유의수준 p는 0.05 이하로 이 회귀분석 모델이 통계적으로 유의한 모델임을 확인할 수 있었다. 그리고 설명력을 의미하는 결정계수 R<sup>2</sup>은 1.00으로 나타나 모든 독립변수가 종속변수를 설명할 수 있음을 알 수 있었다. 회귀분석을 통하여 확인된 누출공의 크기와 누출물의 관계는 Fig. 2의 그래프를 따르는 것으로 조사되었다. 도출된 누출공 크기와 누출물 간의 상관관계식은 염산 운송차량 사고 시 누출공의 크기 수치를 이용하면 누출물과 누출지속 시간을 통하여 탱크로리에 저장된 물질이 외부로 얼마나 누출되었는지를 확인할 수 있는 자료로써 활용될 수 있을 것이다.

Table 3은 누출시간과 누출공 크기에 따른 대안의 사고시나리오상 영향범위를 나타내었다. 누출시간의 조건은 10~60분 범위에서 10분 간격으로 설정하였으며, 누출공의 조건은 1~10 mm 범위에서는 1 mm 간격으로 설정하였고 10~100 mm 범위에서는 10 mm 간격으로 설정하였다. 탱크로리의 누출공 크기가 30 mm일 때 영향범위는 10~50분간 누출 시 최소 117.9

m에서 최대 290.7 m를 나타냈고 55.2분을 시점으로 전량 방출된 상태로 전환되기 때문에 최대영향범위인 307.9 m를 나타냈다. 누출공 크기가 40 mm일 때는 10~30분 조건에서 영향범위가 최소 161.6 m에서 최대 301.8 m까지 나타났으며 31분을 시점으로 전량 방출 상태가 되었다. 누출공의 크기가 50 mm일 때는 10분 누출 시 305.5 m를 나타냈으며, 19.9분을 기점으로 전량 방출 상태로 전환되었다. 누출공이 60 mm 크기일 때 10분 누출 시 255.4 m, 누출공이 70 mm일 때 305.5 m였으며 각각 13.8분, 10.1분을 기점으로 저장물질이 전량 방출된 상태가 되었다. 누출공 크기가 80, 90, 100 mm인 조건에서는 전량 방출 시점이 각각 7.8, 6.1, 5분으로 모두 10분 이내였으며, 모든 시간 조건에서 최대영향범위인 307.9 m를 나타내는 것으로 조사되었다.

다중회귀분석에서 1차 함수모델은 Eq. (4)의 회귀식으로 설명되며, 2차 함수모델과 거듭제곱 함수모델은 각각 Eq. (5)와 Eq. (6)으로 설명될 수 있다.

$$y = A + Bx_1 + Cx_2 \tag{4}$$

$$y = A + Bx_1 + Cx_2 + Dx_1^2 + Ex_2^2 \tag{5}$$

$$y = A \times x_1^B \times x_2^C \tag{6}$$

y: 영향범위 (m)

x<sub>1</sub>: 누출공의 크기 (mm)

x<sub>2</sub>: 누출시간 (min)

A: 상수항

B, D: 누출공의 크기 비표준화 계수

C, E: 누출시간 비표준화 계수

Table 4는 1차 함수모델, 2차 함수모델, 거듭제곱 함수모델의 회귀분석 결과이다. 1차 함수모델 회귀분석 결과 누출공 크기의 비표준화 계수 B는 3.5545, 누출시간 비표준화 계수 C는 0.9119였으며, 모두 유의수준이 0.05 이하로 나타나 통계적으로 유의미한 수치임을 확인할 수 있었다. 이때의 상수항 A는 5.8229였고, F통계량의 유의수준은 0.05보다 작은 2.2e-16으로 조사되어 1차 함수 회귀분석모델의 통계적 유의성을 확인하였다. 1차 함수모델의 수정된 결정계수는 0.84로써 전체 모집단의 약 84.1%를 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 2차 함수모델의 경우 비표준화 계수 B는 8.8038, C는 2.2274, D는 -0.0584,

**Table 3.** Influence extent of damage estimated from hydrochloric acid (35%) accident modeling (unit: m)

Leakage hole size	Time					
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
1 mm	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	6.6
2 mm	5.7	8.6	11.4	13.6	15.4	17.1
3 mm	9.4	14.5	18.3	21.4	24.1	26.6
4 mm	13.6	20.0	24.9	29.1	32.7	36.0
5 mm	17.5	25.5	31.6	36.8	41.3	45.5
6 mm	21.4	30.9	38.3	44.5	50.0	55.1
7 mm	25.2	36.4	45.0	52.3	58.9	64.8
8 mm	29.1	41.8	51.8	60.2	67.8	74.6
9 mm	32.9	47.3	58.6	68.2	76.8	84.6
10 mm	36.8	52.9	65.5	76.3	85.9	94.7
20 mm	76.3	110.6	137.9	161.6	182.9	202.7
30 mm	117.9	172.5	216.7	255.4	290.7	307.9
40 mm	161.6	238.7	301.8	307.9	307.9	307.9
50 mm	207.4	307.9	307.9	307.9	307.9	307.9
60 mm	255.4	307.9	307.9	307.9	307.9	307.9
70 mm	305.5	307.9	307.9	307.9	307.9	307.9
80 mm	307.9	307.9	307.9	307.9	307.9	307.9
90 mm	307.9	307.9	307.9	307.9	307.9	307.9
100 mm	307.9	307.9	307.9	307.9	307.9	307.9

**Table 4.** Multiple regression analysis results

		1st	2nd	Power
Intercept	A	5.8229	-56.9597	0.3390
	B	3.5545	8.8038	0.8984
Hole	p(t)	2e-16	2e-16	2e-16
	C	0.9119	2.2274	0.3552
Time	p(t)	1.45e-3	4.3e-4	1.31e-15
	D	-	-0.0584	-
Hole <sup>2</sup>	p(t)	-	2e-16	-
	E	-	-0.0188	-
Time <sup>2</sup>	p(t)	-	3.06e-2	-
	p(F)	2.2e-16	2.2e-16	2.2e-16
adj. R <sup>2</sup>		0.84	0.97	0.96
RMSE		50.23	22.33	68.66

E는 -0.0188였으며 모두 유의수준 0.05 이하로 나타났다. 상수항 A는 -56.9597였고 F통계량의 유의수준은 0.05이하로 나타나 2차 함수 회귀분석 모델

은 통계적으로 유의함을 확인할 수 있었다. 2차함수 모델의 수정된 결정계수는 0.97로써 전체 모집단의 약 96.8%를 설명할 수 있었다. 거듭제곱 함수모델에서는 회귀분석 결과 누출공 크기의 비표준화 계수 B가 0.8984, 누출시간의 비표준화 계수 C가 0.3552였으며 두 계수 모두 유의수준은 0.05 이하로써 통계적으로 유의한 수치로 나타났다. 이 때의 상수항 A는 0.3390였고, F통계량의 유의수준은 0.05로써 거듭제곱 함수모델도 통계적으로 유의한 회귀모델임을 확인하였다. 거듭제곱 함수의 수정된 결정계수는 0.96으로써 모집단의 약 96.33%를 설명할 수 있었다. 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)는 잔차의 제곱합을 산술평균한 값의 제곱근으로써 관측 값의 상호간 편차를 의미한다. 주로 추정값이나 회귀모델을 통해 예측한 수치와 관찰된 수치 간의 차이를 알고자 할 때 사용되는 척도로서 정밀도를 표현하는데 적합하다. 평균 제곱근 오차를 조사한 결과 1차 함수모델은 50.23, 2차 함수모델은 22.33, 거

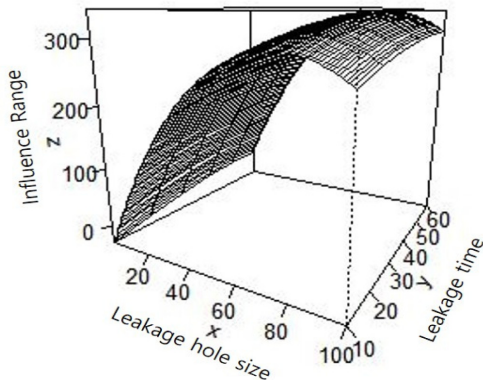


Fig. 3. Multiple regression analysis graph

습제곱 함수모델은 68.66였으며, 2차 함수모델, 1차 함수모델, 거듭제곱 함수모델 순으로 정밀도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 수정된 결정계수와 평균 제곱근 오차 결과를 바탕으로 독립변수인 누출공 크기 및 누출시간과 종속변수 영향범위간의 상관관계를 가장 적절하게 설명할 수 있는 회귀식은 2차 함수 모델 형태의 회귀식인 것으로 확인되었으며, 이때의 상관관계 그래프를 Fig. 3에 나타내었다.

## 2. 고찰

유해화학물질 운송 차량의 전도, 전복, 장치의 손상 등에 의해 발생하는 화학사고 형태는 사고발생 이전에 공간적으로 사고 발생지점을 특정할 수가 없어 화학사고 발생 시 사고원점의 특성에 따라 대응 방법의 난이도 편차가 크게 나타나고 인근 수질·대기·토양 등 생태계에 무방비로 확산될 수 있는 여지를 가지고 있다. 또한 운송차량 사고는 도로가 있는 곳이면 어디든지 발생할 수 있기 때문에 전체 14개소에 불과한 화학사고 대응기관인 유역·지방환경청 및 화학재난합동방재센터가 사고지점까지 도달하는데 많은 출동시간이 소요되는 경우도 발생하게 된다. 한국교통안전공단에서 운용하고 있는 위험물질 운송 안전관리 시스템(Hazardous Material Transportation Safety)은 실시간으로 운송차량의 차량 정보, 운전자 정보, 운행시간, 운행경로, 사고위치 등을 파악할 수 있도록 차량에 통합단말기를 부착하여 컨트롤타워인 한국교통안전공단 상황실에서 관제할 수 있도록 하고 있다. 이미 유럽의 GOOD-ROUTE나 싱가포르의

HTVTS 같은 국외의 운송차량 실시간 모니터링 시스템이 사고 예방측면에서 효과를 보인만큼 우리나라에서도 위험물질 운송 안전관리 시스템의 확대적용을 통한 사고인지나 신고 개선부분의 기대효과가 나타나기까지는 시간문제일 뿐이다. 다만 이와 같은 실시간 모니터링 체계 개선과 더불어 사고의 비상대응계획 측면에서의 발전도 함께 이루어져야 할 것이다.

사고의 신고 및 인지 후 대응과정에서 있어서 현장 상황 파악과 더불어 중요한 점은 경계구역을 설정하는 일이다. 그리고 사고대응을 위하여 경계구역을 설정할 때 현장 상황에 따른 사고시나리오 적용으로 피해영향범위를 모델링하는 과정이 필요하고 피해영향범위 산출을 위해서는 사고 물질의 누출량 정보 입수가 수반되어야 한다. 하지만 유해화학물질 운송 차량사고에서 누출량을 사고 초기에 추정할 수 없는 몇 가지 이유가 존재한다. 첫 번째 이유는 인명피해의 발생이다. 운전자의 운전부주의로 인한 차량의 전도·전복의 형태로 사고가 발생하는 경우에는 운전자의 인명피해를 동반하고 이로 인하여 차량 및 운반물질에 대한 정확한 정보를 알고 있는 사람으로부터 정보를 입수하지 못하게 된다. 두 번째 이유는 주변 환경으로의 확산이다. 사업장의 방류벽과 같이 사고 물질이 주변 환경에 흡수되지 않는 경우라면 사고 물질이 차지하고 있는 면적과 쌓인 높이를 통하여 누출량을 추정할 수가 있다. 하지만 주변 수계나 토양으로 확산되거나 우수관로 등으로 유입된 경우에는 누출량 정보를 파악하기가 어렵다. 따라서 연구에서와 같이 누출공의 크기에 대한 상관관계 DB를 축적한다면 누출물과 사고 진행시간을 통해 누출량을 산정할 수 있고 산정표 또는 상관관계식을 통하여 이때의 영향범위도 수월하게 산출할 수 있으며, 결과적으로 신속한 경계구역 선정으로 인명대피 및 현장대응 활동에도 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 탱크로리의 누출공 크기에 대한 누출률 및 피해영향범위 상관관계를 통하여 보다 빠른 예측 및 경계구역 선정을 하는 것에 목적을 두고 있다. 하지만 기술지침에 따른 현실적으로 사고 발생 가능성이 높은 대안의 사고시나리오만을 기반으로 하고 있다는 점은 한계점으로 나타난다. 따라서 누출공 이외에 피해영향범위를 산출하는데 있어서 영향을 미치는 인자인 현장의 지리적 조건(지형, 고도, 도로 환경 등), 기상 조건(강수, 강우, 기온, 풍속, 대

기안정도 등), 차량 상태(보관온도, 보관압력, 누출부위 등)에 대한 세부 조건별 상관관계 연구를 통하여 추후 대안의 사고시나리오 조건뿐만 아니라 보다 다양한 사고 조건에서의 피해영향범위를 예측할 수 있도록 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

#### IV. 결 론

1. 유해화학물질인 염산 35%를 대상으로 탱크로리의 누출공 크기에 따른 누출률 변화를 분석한 결과 누출공의 크기가 1 mm에서 100 mm까지 증가함에 따라서 0.008 kg/sec에서 83.94 kg/sec 누출률이 증가하였으며, 회귀분석결과 누출공의 크기와 누출률의 관계는  $y = A \times x^B$  의 식을 따르는 것으로 조사되었다.

2. 누출공의 크기 1~100 mm, 누출시간 10~60분 범위의 조건에서 영향범위를 산출한 결과 최소 5.4 m에서 최대 307.9 m의 범위를 나타내는 것으로 조사되었으며, 각각의 조건에서 산출된 영향범위 산정표는 사고대응 현장에서 누출공의 크기 정보와 누출시간 정보만으로도 경계구역을 선정하는데 활용될 수 있다.

3. 누출공의 크기 및 누출시간과 영향범위 간의 상관관계를 분석하기 위하여 R을 활용한 다중회귀분석결과 2차 함수 모델형식이 수정된 결정계수 0.97, 평균 제곱근 오차 22.33으로 상관관계를 가장 잘 설명할 수 있는 것으로 나타났다.

#### References

1. Kim SY, Cho CH, Lee EK. Studies on the chemical accidents of Korea by the Statistics and case review. *Korean Journal of Hazardous Materials*. 2017; 5(1): 50-58.
2. Kim HS, Jeon BH. Development plan of accident scenario modeling based on seasonal weather con-

- ditions -Focus on Chlorine leakage accident-. *Journal of the Korea Academia-Industrial*. 2017; 18(10): 733-738.
3. Lee SH, Ryu YE, Kim KR, Back JI, Kim HH, Ban YU. The analysis and classification of urban types for potential damage from hazardous chemical accidents using factor and cluster analysis. *J Environ Health Sci*. 2020; 46(6): 726-734.
4. Jeong JW, Lee SJ. Analysis on the characteristics of hazardous chemical transport vehicle accidents in Korea. *Journal of the Society of Disaster Information*. 2020; 16(2): 310-317.
5. Oak YS, Lee YS. A Study on improvement of legal system for harmful chemical substance response management system. *Journal of the Korea Academia-Industrial*. 2017; 18(4): 216-223.
6. Seol JW, Yong JW, Chae CK, Tae CH, Ko J W. A Study on accident response guidelines for hazardous materials (HAZMAT) transport vehicle. *Journal of the Korean Institute of Gas*. 2015; 19(5): 87-97.
7. Lee HJ, Han SH, Chae CK, Yong JW, Tae C H, Ko JW. Development of accident response program for hazardous material(HAZMAT) transport vehicles. *Journal of the Korean Institute of Gas*. 2015; 19(5): 61-68.
8. National Institute of Chemical Safety. Chemical integrated Information system: <https://icis.me.go.kr> [accessed 1 March 2021].
9. Jeon BH, Kim HS. A study on the derivation method of damage range to determine reaction in trichlorosilane leak accidents. *J. Korean Soc. Hazard Mitig*. 2021; 21(1): 291-300.
10. National Institute of Chemical Safety. Technical Guidelines for the Selection of Accident Scenarios: National Institute of Chemical Safety; 2018. p.45.
11. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. Vehicle Management Act: <http://www.law.go.kr> [accessed 1 March 2021].

#### <저자정보>

전병한(대학원생), 김현섭(공업연구사)