

건물의 유효누출면적 및 박스모델을 이용한 염소 실내 누출의 위험지역 완화에 관한 연구

곽슬림 · 이은별 · 최영보*

충북대학교 안전공학과

(2018. 9. 4. 접수 / 2018. 9. 17. 수정 / 2018. 10. 3. 채택)

A Study on the Mitigation of Threat Zones for Indoor Chlorine Release using Effective Leakage Areas of Building and Box Model

Sollim Kwak · Eunbyul Lee · Youngbo Choi*

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received September 4, 2018 / Revised September 17, 2018 / Accepted October 3, 2018)

Abstract : It is difficult to determine the outdoor toxic level of hazardous chemicals that are leaked in the building, since there are no efficient ways to calculate how much percentage of the leaked chemicals is released into the outdoor atmosphere. In address to these problems, we propose a reasonable box model that can quantitatively evaluate the mass rate of the indoor chlorine leakage into the outside of the building. The proposed method assumes that the indoor chlorine leakage is fully mixed with the indoor air, and then the mixture of the chlorine and indoor air is exfiltrated into the outside of the building through effective leakage areas of the building. It is found that the exfiltration rate of the mixture of the chlorine and indoor air is strongly dependent on the temperature difference between inside and outside the building than the atmospheric wind speed. As compared with a conventional method that uses a vague mitigation factor, our method is more effective to evaluate the outdoor toxic threat zone of the chlorine that are leaked in the building, because it can consider the degree of airtight of the building in the evaluation of the threat zone.

Key Words : chlorine, indoor leakage, outdoor toxic level, effective leakage areas, exfiltration

1. 서론

화학물질관리법 제23조에 따라 유해화학물질 취급 시설을 설치·운영하려는 자는 장외영향평가를 작성하여 시설의 영향범위를 산정하고 위험도를 계산하여 관리해야 한다. 이를 위해서 사고시나리오별 누출 확산에 의한 피해범위 및 사고빈도, 완화조치 등을 도출하고, 여기에 영향범위 내 주민 수 등을 종합하여 위험도를 최종적으로 계산한다. 또한 피해범위는 대기 중으로 확산되는 유해화학물질의 거리에 따른 농도를 계산하여 산정한다.

그런데 건물이나 창고와 같은 밀폐된 공간 내부에서 유해화학물질이 누출되면, 건물 등이 누출된 유해화학물질을 가두는 보호 장벽의 역할을 할 수 있기 때문에, 실외 대기로 방출되는 유해화학물질의 양과 외부 방출

속도가 크게 줄어들 수 있다.

따라서 국내의 여러 법령과 기술지침들은 실내에 설치된 화학물질 취급시설의 피해범위가 축소되는 것을 반영하기 위해서, 누출량(leakage amount)이나 누출률(leakage rate)에 대한 완화율(mitigation factor) 기준을 제시하고 있다. 예를 들어, 미국 환경보호국(Environment protection agency)의 장외영향평가(Off-site consequence analysis) 기술지침은, 완전히 밀폐된 공간 내부에서 기상의 화학물질이 누출될 경우, 실외 대기로 방출되는 속도가 실제 누출률의 55%에 해당하도록 완화하는 기준을 제시한다¹⁾. 아울러 한국안전보건공단의 최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침(KOSHA GUIDE P-107-2016)에서도, 건물 내부에 설치된 설비에서 누출된 경우에는 누출률의 55%가 외부로 확산되는 것으로 가정한다²⁾. 또한 장외영향평가서의 사고시나리

* Corresponding Author : Youngbo, Choi, Tel : +82-43-261-2458, E-mail : ybc@chungbuk.ac.kr
Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Chungju 28644, Korea

오 선정에 관한 기술지침에서도 출입구 및 창문들이 상시 닫혀 있는 건물 내부에 설치된 설비의 경우, 실제 누출률의 55%를 적용하여, 피해범위를 산정하도록 안내하고 있다³⁾.

그런데 실내 누출에 대한 완화율 기준들은 밀폐된 공간 내부에서 누출된 화학물질이 어떤 경로를 통해 외부 대기로 방출되는지 설명하지 못하며, 피해범위가 얼마나 감소하는지 구체적으로 반영하지 못하는 한계가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서, 본 연구에서는 건물의 유효누출면적, 공기유출현상인 누기(exfiltration) 및 박스모델(box model)를 이용하여, 밀폐된 실내에서 누출된 유해화학물질이 외부 대기로 얼마나 방출되며, 피해범위가 어떻게 달라지는지 계산할 수 있는 새로운 방안을 제안한다.

밀폐된 공간이라고 하더라도, 공간을 구성하는 구조체의 틈새나 개구부의 틈 사이로 외부와 내부의 공기가 지속적으로 교환될 수 있다. 유효누출면적(Effective leakage area)은 이와 같이 건물 내·외부의 공기가 교환

될 수 있는 틈새나 개구부 틈의 유효면적을 의미한다. 그리고 밀폐된 건물 내부에서 외부로 빠져나가는 공기의 부피 속도인 누기율은 건물 내외부의 온도차 및 외부 대기의 풍속에 영향을 받는데^{4,5)}, 본 연구에서는 청주지역의 대기 조건을 이용하여 실온(25℃)으로 유지되는 실내의 누기율을 구체적으로 산정하는 방안을 제시한다. 아울러 실내에서 누출된 화학물질이 외부 대기로 빠져나가는 방출률(release rate)은 박스모델을 이용하여 화학물질의 실내 농도를 계산하고, 이를 누기율에 곱해서 산출하였다.

또한, 피해범위의 완화 정도를 구체적으로 평가하기 위해서, Fig. 1과 같이 a) 단순 실외 누출의 경우, b) 완화율 기준(실제 누출률의 55%)을 적용한 경우 및 c) 본 연구에서 제안하는 유효누출면적과 박스모델을 이용한 경우의 피해범위를 비교하였다.

2. 연구방법

2.1 대상 화학물질 및 설비

실내에 설치되는 대표적인 화학물질 및 설비로는, 정수 처리장의 염소 취급시설 내부에 설치되는 염소 붐배용기를 들 수 있다. 본 연구에서는 국내 정수 처리장에서 주로 사용되는 1,000 kg 용량의 염소 붐배용기 1개를 대상으로 사고시나리오를 선정하였다. 누출공의 크기는 붐배용기에 연결되는 배관 중 직경이 가장 큰 25 mm⁶⁾로 설정하였다.

대부분의 정수 처리장에 설치된 염소 취급시설은 창문, 셔터, 출입문 등이 구비된 밀폐 구조이다. 또한 일부 염소 취급시설에는 누출된 염소 가스를 중화하여 대기로 방출하는 대기오염 방지시스템이 사용되나, 본 연구에서는 대기오염 방지시설에서 처리되는 제거량은 고려하지 않았다. 염소 취급시설의 일반적인 크기를 고려하여, 실내 높이는 6 m로 고정하고, 실내 바닥 면적을 300, 400 및 500 m²의 3가지 형태로 구분하였다. 또한 염소 취급시설의 실내온도는 상온(25℃)으로 일정하다고 가정하였다.

2.2 누기율

누기(exfiltration)란 건물 구조체의 틈새 등에서 발생하는 극간풍(틈새바람)에 의해 건물 외부로 실내 공기가 유출되는 현상을 의미한다. 누기의 반대 현상으로, 틈새 등을 통해 외부 공기가 건물 내부로 유입되는 침기(infiltration)가 있다. 일반적인 환기(ventilation)와 비교할 때, 누기와 침기는 눈에 보이지 않는 건물 구조체의 균열, 닫힌 환기구나 창의 틈새 등을 통해 의도하지

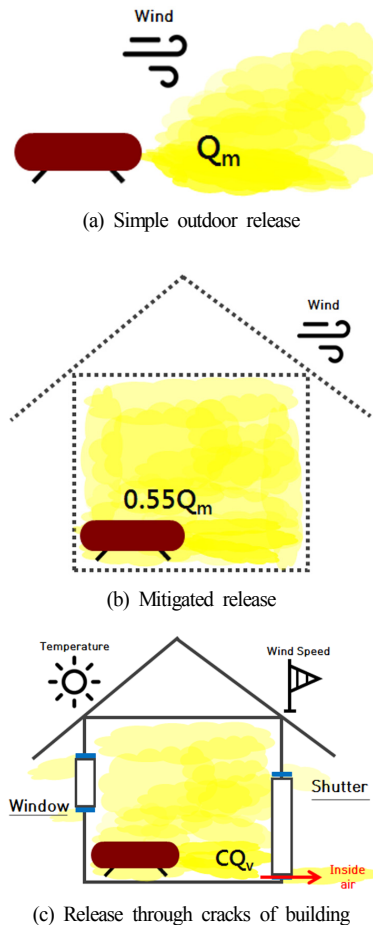


Fig. 1. Schemes for three different release cases.

않게 실내의 공기가 교환되는 현상이다⁷⁾. 따라서 밀폐가 잘 된 건물이라고 하더라도, 균열이나 창의 틈새 등에서 발생하는 누기 및 침기 현상을 통해, 실내의 공기가 지속적으로 교환된다.

한편, 누기와 침기 현상은 건물의 구조, 건물 주변의 환경, 공기 유동의 추진력 등의 많은 변수에 의존하는 비선형 현상이기 때문에⁸⁾, 정확한 누기율(exfiltration rate)과 침기율(infiltration rate)을 계산하는 것이 쉽지 않다. 이에 Sherman 등은 온도와 풍속을 이용하여 공기의 누기율 및 침기율을 계산할 수 있는 근사 기법을 제안하였다⁹⁾. 본 연구에서는 Sherman 등이 제안한 근사식을 활용하여, 건물의 실내외 온도차 및 외부 풍속에 의한 누기율을 각각 구하고, 이를 종합하여 총 누기율을 산정하였다.

2.2.1 실내외 온도차에 의한 누기율

건물의 실내외 온도차에 의한 누기율(Q_s)은 다음 식 (1)과 같이 계산할 수 있다⁹⁾.

$$Q_s = A_c f_s \sqrt{|\Delta T|} \quad (1)$$

식 (1)에서 A_c 는 건물 내외부의 공기 이동 통로가 되는 균열이나 틈새의 유효누출면적(m^2)을 의미하며, ΔT 는 건물의 실내외 온도차($^{\circ}C$)를 나타낸다. 한편 f_s 는 중성대(neutral zone)에 대한 표현식으로, 다음 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$f_s = \frac{1+R/2}{3} \sqrt{\frac{gH_s}{T_i}} \quad (2)$$

식 (2)에서 R 은 건물의 총 표면적과 바닥면적의 관계를 나타내는 변수로서, 건물의 구조와 형태에 따라 다양한 값을 가질 수 있지만 일반적으로 0.5를 R 의 값으로 많이 사용한다⁹⁾. 아울러 식 (2)의 g 는 중력가속도(m/s^2), H_s 는 건물 내부의 높이(m), T_i 는 건물 내부의 온도($^{\circ}C$)를 나타낸다.

식 (1) 및 (2)를 이용하여 온도차에 의한 누기율(Q_s)을 계산하기 위해서는, 유효누출면적(A_c), 건물의 총 표면적과 바닥면적의 관계(R), 중력가속도(g), 건물 내부의 높이(H_s), 건물 내부의 온도(T_i) 및 실내외 온도차(ΔT)를 특정해야 한다.

이 중에서 유효누출면적(A_c)을 제외한, 나머지 변수들은 염소 처리시설의 크기와 일반적인 대기조건을 고려하면 쉽게 설정할 수 있다. 구체적으로, 본 연구에서

는 중력가속도(g)를 $9.8 m/s^2$, 건물 내부의 높이(H_s)를 염소 처리시설의 실내 높이와 같은 6 m, R 을 0.5, 건물 내부의 온도(T_i)를 실온($25^{\circ}C$)로 설정하였다. 그리고 실내외 온도차(ΔT)는 청주지역의 월별 평균 대기 조건을 조사하여 계산하였다.

한편 유효누출면적(A_c)은 건물마다 다른 값을 갖기 때문에 이를 계산하는 일반식을 도출하는 것이 쉽지 않다. 대신 실험을 통해 건물의 누기율과 침기율을 측정하여 유효누출면적(A_c)을 간접적으로 계산하거나, 건물의 특정 규격을 이용하여 유효누출면적(A_c)을 대략적으로 추정하는 방법을 사용할 수 있다.

건물의 누기율 및 침기율을 측정하는 방법으로는 블로어 도어 실험법(Blower door test)이 있다. 건물의 출입문이나 창문 등에 블로어 도어를 설치한 후 실내를 가압 또는 감압하여, 실내외 사이에 일정한 압력차가 발생하게 함으로써, 공기의 누기율이나 침기율을 측정할 수 있다. 이 때 연기 발생장치 등을 이용하면 누기나 침기가 발생하는 위치를 육안으로 확인할 수 있다.¹⁰⁾ 또한 균열 등이 많은 건물을 일정 수준으로 감압 또는 가압하기 위해서는, 실내외 사이에 교환되는 공기 유속이 빨라야 하지만, 밀폐율이 우수한 건물은 공기 유속이 느리다는 점을 이용하여¹¹⁾, 유효누출면적(A_c)을 비교할 수 있다.

미국의 Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)는 건물의 바닥면적을 이용하여 유효누출면적(A_c)을 추정할 수 있는 자료를 제공하였다. LBNL은 196 채의 주택을 대상으로 공기의 누기율과 침기율을 측정하여, 유효누출면적(A_c)이 건물 바닥면적의 약 0.00059 ± 0.00038 배(실내 가압의 경우) 또는 0.00056 ± 0.00034 배(실내 감압의 경우)라는 것을 밝혔다¹²⁾.

본 연구에서는 LBNL의 연구 결과를 참고하여, 건물의 바닥면적(A_{floor})에 0.0009를 곱한 값을 유효누출면적(즉, $A_c = 0.0009A_{floor}$)으로 설정하였다.

2.2.2 대기 풍속에 의한 누기율

건물 외부의 대기 풍속에 의한 누기율(Q_w)은 다음 식 (3)과 같이 계산할 수 있다⁹⁾.

$$Q_w = A_c C_{sh} (1-R)^{1/3} U_H \quad (3)$$

식 (3)의 A_c 와 R 은 각각 유효누출면적 및 건물의 총 표면적과 바닥면적의 관계 변수를 의미하며, 식 (1) 및 (2)와 동일하게 설정하였다. 식 (3)의 U_H 는 건물 외부의 대기 풍속(m/s)을 나타내는데, 청주 지역의 대기 조

건을 조사하여, U_H 를 설정하였다.

한편 식 (3)에서 C_{sh} 는 건물의 주변지형을 반영하는 변수이다. 건물 주변에 나무나 다른 건물 등이 많아 대기 풍속의 영향을 덜 받는 경우(Sheltered condition)에는 C_{sh} 를 0.24로 설정하며, 건물 주변에 높은 장애물이 적어 외부 대기에 많이 노출된 경우(Unsheltered condition)에는 C_{sh} 를 0.32로 설정하는 것이 일반적이다⁴⁾.

2.2.3 총 누기울

밀폐된 건물 내부에서 외부로 빠져나가는 공기의 총 누기울(Q_v)은 다음 식 (4)와 같이, 실내의 온도차에 의한 누기울(Q_s)과 대기 풍속에 의한 누기울(Q_w)을 중첩적으로 반영하여 계산하였다⁹⁾.

$$Q_v = \sqrt{Q_s^2 + Q_w^2} \quad (4)$$

이는 공기의 부피 속도를 결정하는 압력 분포가 실내외의 온도차와 대기 풍속에 모두 영향을 받기 때문이다.

2.3 박스모델을 이용한 염소의 실내 농도 및 외부 방출률

밀폐된 건물 내부에서 누출된 화학물질은 i) 실내 공기와 섞이지 않고 곧바로 외부로 방출되거나, ii) 실내 공기에 의해 충분히 희석된 후 서서히 외부로 방출될 수 있다. 그런데 염소 처리시설과 같이 건물이 크고 밀폐율이 우수하면, 누출된 염소가 건물의 틈새에 도달하기 전에 내부 공기와 쉽게 섞일 수 있기 때문에, 직접 외부로 방출되기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 누출된 염소가 실내를 가득 채우면서 내부 공기와 충분히 섞인다고 가정하였다. 그리고 염소가 포함된 실내 공기가 총 누기울의 일정한 속도로 유효누출면적을 통해 빠져나감에 따라, 염소가 서서히 외부로 방출된다고 보았다.

이러한 가정 아래, 염소의 실내 농도 및 외부 방출률은 박스모델을 이용하여 계산하였다. 박스모델은 일정한 속도로 공기가 교환되는 밀폐 공간에서 화학물질의 농도를 계산하는데 널리 사용되는 물질수지(mass balance)에 관한 모델이다^{13,14)}.

본 연구에서는 건물 내부로 유입되는 공기와 건물 외부로 빠져나가는 공기의 부피유량은 동일하며, 그 값은 앞서 계산한 총 누기울(Q_v)과 같다고 가정하여, 다음 식 (5)와 같은 물질수지를 구성하였다.

$$V \frac{dC}{dt} = C_{out} Q_v - k C Q_v + Q_m \quad (5)$$

식 (5)에서, V 는 건물의 내부 부피(m^3), C 는 염소의 실내 농도(kg/m^3), t 는 시간(s)을 의미한다. 따라서 $V \frac{dC}{dt}$ 는 실내에서 염소의 질량이 변하는 속도를 나타낸다.

또한 식 (5)의 C_{out} 은 외부 공기에 포함된 염소 농도를 의미하며, $C_{out} Q_v$ 는 건물 내부로 유입되는 염소의 질량유속(mass flow rate)을 나타낸다. 그런데 건물로 유입되는 외부 공기는 일반적으로 염소가 포함되지 않은 깨끗한 상태이기 때문에, C_{out} 와 $C_{out} Q_v$ 가 모두 0이라고 가정할 수 있다.

한편, 식 (5)의 k 는 비이상적 혼합인자(non-ideal mixing factor)를 의미한다. 본 연구에서는 누출된 염소가 실내 공기와 완전히 혼합된다고 가정하였으므로, k 를 1로 설정했다. 그리고 $k C Q_v$ 는 건물 외부로 방출되는 염소의 질량유속, 즉 염소의 외부 방출률(release rate)을 나타낸다.

식 (5)의 Q_m 은 봄베용기에서 누출되는 염소의 질량유속(누출률)을 의미한다. 일반적으로 염소 봄베용기에는 7 bar 이상의 높은 압력으로 염소가 저장되기 때문에 누출률이 상당히 빠르다. 실제로 25 mm 직경의 누출공이 형성되면, 대략 2분 이내의 매우 짧은 시간 안에 봄베에 저장된 1,000 kg의 염소가 모두 누출되는 것으로 계산되었다. 따라서 식 (5)를 계산할 때, 건물 내부 자체를 $1,000/V(kg/m^3)$ 농도의 염소가 저장된 탱크라고 보고, Q_m 을 0으로 가정할 수 있다.

이러한 가정들을 모두 반영하여 식 (5)를 정리하면, 식 (6)과 같다.

$$V \frac{dC}{dt} = -k C Q_v \quad (6)$$

식 (6)을 적분하면, 염소의 실내 농도($C(kg/m^3)$)를 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{k Q_v}{V} t\right) \quad (7)$$

식 (7)에서 C_0 는 누출 직후 염소의 초기 실내 농도를 의미하며, $1,000/V(kg/m^3)$ 와 같다. 한편, ppm 단위의 염소 농도(C_{ppm})는 식 (8)의 전환식을 이용하여 계산하였다.

$$C_{ppm} = C \left(\frac{RT}{PM}\right) \times 10^6 \quad (8)$$

식 (8)에서, C 는 염소 농도(kg/m^3), R 는 기체상수, T 는 절대온도, P 는 절대압력, M 은 염소의 분자량이다.

2.4 독성 피해범위의 계산

미국 환경보호국과 국립해양대기관리국이 공동 개발한 ALOHA(Areal location of hazardous atmospheres) 프로그램(5.4.6 version)을 이용하여¹⁵⁾, Fig. 1에서 설명한 3가지 염소 방출 시나리오에 대한 독성 피해범위를 계산하였다. 염소 가스는 공기보다 밀도가 크기 때문에, Dense gas dispersion model을 사용하여 확산 농도를 평가했다.

Fig. 1의 단순 실외 누출 시나리오(a)를 계산할 때는 Tank source를 이용하였다. 반면 완화를 기준(실제 누출률의 55%)을 적용한 시나리오(b) 및 본 연구의 유효 누출면적을 적용한 시나리오(c)는 Direct source를 이용하여 염소의 외부 방출률을 조절하였다. 피해범위의 끝점 농도는 염소의 ERPG-2 농도인 3 ppm으로 설정하였다. ERPG-2 농도는 거의 모든 개인이 능력의 저하 없이 보호 조치를 취할 수 있고 다른 건강상의 심각한 영향이나 증상을 일으키지 않는 최대 1시간을 버틸 수 있는 공기 중 최대 농도이다¹⁶⁾.

3. 연구결과 및 검토

3.1. 실내외 온도차에 의한 누기율의 계산 결과

염소 처리시설의 실내외 온도차에 의해 발생하는 누기율(Q_s)을 계산하기 위하여, 기상청 자료를 바탕으로 청주 지역의 월별 평균 기온을 조사하였다. 그리고 염소 처리시설의 바닥 면적이 300, 400, 500 m²인 것으로 가정하고, 각각의 바닥면적에 0.0009를 곱한 값을 유효 누출면적(A_e)으로 설정하여 Table 1과 같이 누기율(Q_s)을 계산하였다. Table 1을 참고하면, 건물 바닥면적이 클수록 유효누출면적(A_e)이 증가하며, 온도차에 의한 누기율(Q_s)도 비례적으로 커지는 것을 알 수 있다. 또한 바닥면적이 동일할 경우, 실내외 온도차(ΔT)가 큰 겨울철(1월)이 여름철(8월)에 비해 약 4.9배의 누기율(Q_s)을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

3.2 대기 풍속에 의한 누기율의 계산 결과

청주 지역의 월별 평균 풍속을 조사하고 이를 이용하여, Table 2와 같이 대기 풍속에 의한 누기율(Q_w)을 계산하였다. 이 때, 주변지형(C_{sh})을 고려하기 위해서, 염소 처리시설이 나무 등에 의해 잘 보호되는 경우 (Sheltered condition: S)와 바람에 직접 노출되는 경우 (Unsheltered condition: U)으로 구분하여 계산했다.

평균 대기 풍속이 빠를수록, 건물이 노출되어 있을수록, 건물의 바닥면적이 클수록, 누기율(Q_w)이 증가하

Table 1. Various exfiltration rates according to the temperature differences between indoor and outdoor of the building

Month	Outdoor Temp. (°C)	Temp. Difference between Indoor & Outdoor (ΔT)	Q_s Exfiltration Rate(m ³ /s)		
			Area of Floor in Building(m ²)		
			300	400	500
1	-0.8	25.8	0.88	1.17	1.46
2	0.8	24.2	0.85	1.13	1.42
3	6.8	18.2	0.74	0.98	1.23
4	14.7	10.3	0.55	0.74	0.92
5	20	5	0.39	0.51	0.64
6	23.4	1.6	0.22	0.29	0.36
7	27.1	2.1	0.25	0.33	0.42
8	26.1	1.1	0.18	0.24	0.30
9	21.5	3.5	0.32	0.43	0.54
10	15.9	9.1	0.52	0.69	0.87
11	6.1	18.9	0.75	1.00	1.25
12	-0.6	25.6	0.87	1.16	1.46

Table 2. Various exfiltration rates according to the average atmospheric wind speeds

Month	Average Atmospheric Wind Speed (m/s)	Q_w Exfiltration Rate(m ³ /s)					
		Area of Floor in Building(m ²)					
		300		400		500	
		S	U	S	U	S	U
1	1.4	0.07	0.10	0.10	0.13	0.12	0.16
2	1.5	0.08	0.10	0.10	0.14	0.13	0.17
3	1.6	0.08	0.11	0.11	0.15	0.14	0.18
4	1.8	0.09	0.12	0.12	0.17	0.15	0.21
5	1.7	0.09	0.12	0.12	0.16	0.15	0.19
6	1.8	0.09	0.12	0.12	0.17	0.15	0.21
7	1.6	0.08	0.11	0.11	0.15	0.14	0.18
8	1.7	0.09	0.12	0.12	0.16	0.15	0.19
9	1.6	0.08	0.11	0.11	0.15	0.14	0.18
10	1.5	0.08	0.10	0.10	0.14	0.13	0.17
11	1.4	0.07	0.10	0.10	0.13	0.12	0.16
12	1.5	0.08	0.10	0.10	0.14	0.13	0.17

S : Sheltered, U : Unsheltered

는 것을 알 수 있다. 다만, 청주 지역의 평균 풍속이 1.4 ~ 1.8 m/s 정도로 월별 차이가 크지 않기 때문에, 계절별 Q_w 의 편차가 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

3.3 총 누기율의 계산 결과

총 누기율(Q_t)은 외부 기온이 가장 높은 8월의 대기 조건(27.1°C 및 1.8 m/s)과 외부 기온이 가장 낮은 1월의 대기 조건(-0.8°C 및 1.4 m/s)을 이용하여 계산하였다.

Table 3. Total exfiltration rates at different atmospheric conditions

Outdoor Temp. (°C)	Average Atmospheric Wind Speed (m/s)	Q_v Total Exfiltration rate(m ³ /s)					
		Area of floor in building(m ²)					
		300		400		500	
		S	U	S	U	S	U
27.1	1.8	0.29	0.31	0.39	0.41	0.49	0.51
-0.8	1.4	0.98	0.98	1.31	1.31	1.64	1.64
13.4	1.6	0.59	0.60	0.79	0.80	0.99	1.00

S : Sheltered, U : Unsheltered

아울러 이들과 비교하기 위하여 연평균 대기 조건(13.4°C 및 1.6 m/s)에 대해서도 총 누기율을 계산하였다. 이때, 건물 주변의 지형조건(C_{sh})도 함께 고려하였다.

Table 3을 참조하면, 총 누기율(Q_v)은 실내외 온도차에 의한 누기율(Q_s)과 유사한 값을 나타낸다. 따라서 실내외 온도차가 대기 풍속보다 총 누기율(Q_v)에 미치는 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. 이를 통해, 실내외 온도차가 큰 겨울철에 실내 누출 사고가 발생하면, 여름보다 더 많은 양의 화학물질이 실외로 방출될 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 바닥면적 및 유효누출면적이 클수록, 건물이 나무 등으로 보호되어지지 않을수록 총 누기율(Q_v)이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.4. 염소의 실내 농도 및 외부 방출률의 계산 결과

실내에 위치한 고압의 염소 봄베용기에서 누출 사고가 발생하면, 순간적(약 2분)으로 전량(1,000 kg)의 염소가 실내에 누출되어 내부 공기와 섞이게 된다. 따라서 누출 직후에는 건물의 내부 자체를 일정한 농도의 염소가 저장된 탱크라고 볼 수 있다.

염소의 누출량과 건물의 실내부피를 이용하여, 누출 직후 염소의 최초 실내 농도(C_0)를 계산하면, Table 4와 같이, 약 10만 ~ 20만 ppm의 높은 농도를 나타낸다. 한편, 건물 내부의 공기와 섞인 염소는 유효누출면적(A_e)을 통해 지속적으로 외부로 방출되기 때문에, 염소의 실내 농도(C)와 외부 방출률(kCQ_v)은 시간에 따라 감소하게 된다.

Table 4. Initial Concentration of Chlorine in the building

Mass of leaked chlorine(kg)	Indoor volume of Building (m ³)	Initial Concentration of Chlorine (C_0)
1,000	1,800	0.56 kg/m ³ (191,684 ppm)
	2,400	0.42 kg/m ³ (143,763 ppm)
	3,000	0.33 kg/m ³ (107,822 ppm)

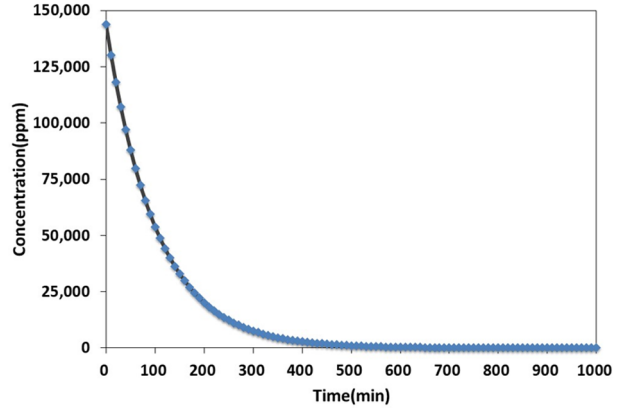


Fig. 2. Concentration of chlorine in the building with the floor area of 2,400 m² at the atmospheric condition of August.

그런데 건물 내부의 부피가 2,400 m³일 때, 8월의 대기 조건에 따른 총 누기율을 적용하여, 염소의 실내농도 변화를 계산한 Fig. 2를 참고하면, 실내농도의 감소가 매우 느리다는 것을 알 수 있다. 구체적으로, 누출 사고의 피해범위를 계산하는 60분이 경과하더라도 염소의 실내 농도는 약 90,000 ppm 이상을 유지한다. 아울러 염소의 실내농도가 노출허용기준인 0.5 ppm까지 저하되는데 무려 1,290분이 소요된다. 이는 건물의 내부 부피에 비해 총 누기량이 매우 작기 때문이며, 건물 부피나 외부 대기 조건이 변하더라도 실내 농도의 감소율은 크게 달라지지 않는다.

따라서 독성의 피해범위를 보수적으로 계산하기 위해서는, 염소의 실내 농도가 60분 동안 최초 농도(C_0)를 유지하며, 염소의 외부 방출률이 kC_0Q_v 로 일정하다고 가정하는 것이 바람직하다.

Table 5는 이와 같이 보수적인 기준을 이용하여 다양한 건물 부피와 대기 조건에 대해, 염소의 외부 방출률(kC_0Q_v)을 계산한 결과이다. Table 5를 참조하면, 실내외 온도차가 클수록 염소의 외부 방출률이 증가하여, 더 많은 양의 염소가 건물 외부로 빠져나간다는 것을 알 수 있다.

한편, 흥미롭게도 염소의 외부 방출률은 건물의 바

Table 5. Release rate of chlorine into outdoor of the building

Outdoor Temp. (°C)	Temp. Difference between Indoor & Outdoor (ΔT)	Average Atmospheric Wind Speed (m/s)	Release Rate of Chlorine into Outdoor of the Building(kg/s)		
			Indoor volume of Building(m ³)		
			1,800	2,400	3,000
27.1	2.1	1.8	0.16	0.16	0.16
-0.8	25.8	1.4	0.55	0.55	0.55
13.4	11.6	1.6	0.33	0.33	0.33

다면적에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 건물의 바닥면적이 증가하여 건물의 내부부피가 커질수록, 염소의 초기 실내농도는 감소하지만, 총 누기량은 커지기 때문이다.

3.5. 독성 피해범위의 계산 결과

Fig. 3~5는 실내에서 누출된 염소가 건물의 유효누출면적을 통해, Table 5에서 계산한 방출률(kC_0Q_v)의 속도로 빠져나갈 때 발생하는 피해범위를 계산한 결과이다. Fig. 3~5에서 중심의 실선은 염소 농도가 ERGP-2에 해당하는 영역을 나타내며, 점선은 바람의 신뢰구간을 의미한다. Fig. 3~5를 참조하면, 염소의 실외 방출률이 커지면 피해범위가 증가하며, 최저 1,000 m에서 최대 2,200 m까지 영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있다.

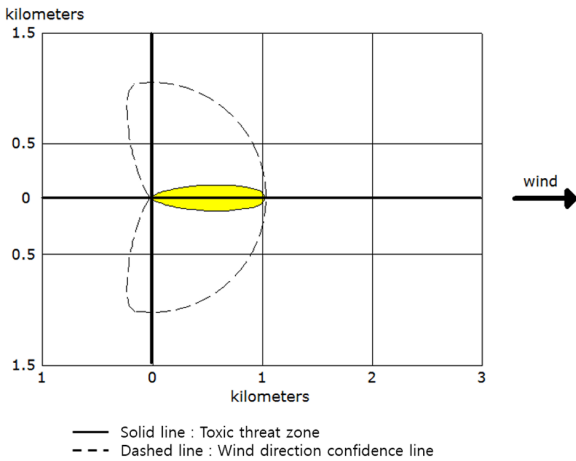


Fig. 3. Toxic threat zone of the chlorine that is released through the cracks of the building at the outdoor temperature of 27.1°C and the wind speed of 1.8 m/s.

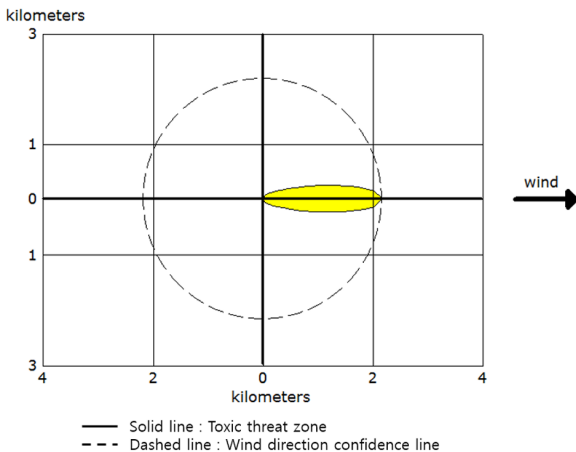


Fig. 4. Toxic threat zone of the chlorine that is released through the cracks of the building at the outdoor temperature of -0.8°C and the wind speed of 1.4 m/s.

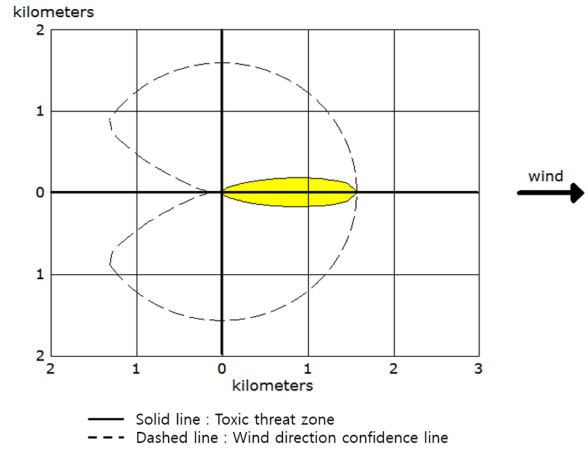


Fig. 5. Toxic threat zone of the chlorine that is released through the cracks of the building at the outdoor temperature of 13.4°C and the wind speed of 1.6 m/s.

Table 6. Comparison of release rates and ERPG-2 endpoints between the three different release cases

Release Cases	Outdoor Temp. (°C)	Average Atmospheric Wind Speed (m/s)	Release Rate (kg/s)	ERPG-2 Endpoint (m)
Simple Outdoor Release	27.1	1.8	12.95	3,300
	-0.8	1.4	8.2	2,800
	13.4	1.6	10.6	3,000
Mitigated Release	27.1	1.8	7.1	3,000
	-0.8	1.4	4.5	2,700
	13.4	1.6	5.8	2,900
Release through cracks of building	27.1	1.8	0.16	1,000
	-0.8	1.4	0.55	2,200
	13.4	1.6	0.33	1,600

Table 6은 청주 지역의 8월 대기 조건(27.1°C 및 1.8 m/s), 1월 대기 조건(-0.8°C 및 1.4 m/s) 및 연평균 대기 조건(13.4°C 및 1.6 m/s)을 이용하여, (a) 단순 외부 방출, (b) 완화율이 적용된 방출, (c) 유효누출면적을 통한 방출의 3가지 시나리오에 대해, 염소의 방출률과 ERPG-2의 끝점거리를 비교한 것이다.

표 6을 참조하면, 단순 외부 방출 시나리오(a)와 완화율(실제 누출률의 55%를 대기 방출률로 사용)이 적용된 방출 시나리오(b)의 경우, 외부 온도 및 대기 풍속이 커질수록 피해범위가 확대되는 것을 알 수 있다. 반면에, 건물 틈새와 같은 유효누출면적을 통해 염소가 외부로 방출되는 시나리오(c)의 경우, 건물 내외부의 온도차이가 클수록 피해범위가 증가하는 것으로 나타났다.

또한 단순 외부 방출 시나리오(a)와 비교할 때, 완화

율이 적용된 방출 시나리오(b)의 피해범위는 약 3.3~9.1% 정도 축소되었다. 구체적으로, 8월 여름철의 경우 피해범위가 9.1% 감소하였으며, 연평균 대기 조건을 적용할 때는 3.3%의 감소효과가 나타났다. 아울러 유효누출면적을 통한 방출 시나리오(c)를 평가한 결과, 단순 외부 방출 시나리오(a)보다, 여름철에는 69.7%, 겨울철에는 21.4%, 연평균 대기 조건에서는 46.7% 감소효과가 나타났다.

이러한 결과들을 종합해 볼 때, 실내 누출 사고에 완화율을 적용할 경우 피해범위가 평균 5.3% 감소하지만, 유효누출면적을 이용하여 실내 누출사고를 현실적으로 평가하면, 피해범위가 평균 45.9%까지 줄어드는 것을 알 수 있다.

한편, 완화율이 적용된 방출 시나리오(b)와 유효누출면적을 이용한 현실적인 방출 시나리오(c)는 염소의 분산모델 및 실외 농도에서도 큰 차이를 보인다. Fig. 6~7은 연평균 대기 조건하에서, 사고발생지점으로부터 풍하방향으로 1,600 m 떨어진 지점에서 관찰한 염소 농

도를 나타낸다. Fig. 6~7에서 붉은 선은 염소의 실외 농도를 나타내며, 파란 점선은 관측 지점에 있는 건물 내부의 염소 농도를 의미한다.

완화율이 적용된 방출 시나리오(b)의 염소 농도를 나타내는 Fig. 6을 참조하면, 염소가 퍼프(puff) 형태로 분산되며, 염소의 농도가 ERPG-2를 크게 상회하는 것을 알 수 있다. 반면, 유효누출면적을 이용한 현실적인 방출 시나리오(c)의 염소 농도를 나타내는 Fig. 7을 참조하면, 염소의 농도가 서서히 증가하여 일정하게 유지되는 플룸(Flume)형태로 분산되며, ERPG-2를 거의 초과하지 않는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 건물의 유효누출면적, 실내 공기의 누기 현상 및 박스모델을 이용하여, 밀폐된 실내에서 누출된 염소의 외부 방출률을 정량적으로 평가할 수 있는 현실적인 방안을 제안하고, 방출률의 차이에 의한 피해범위를 비교하였다.

밀폐된 공간 내부에서 누출된 염소의 외부 방출률은 대기 풍속보다 실내외 온도차에 더 큰 영향을 받는다. 따라서 건물 외부로 방출되는 염소의 양을 줄이기 위해서는 실내외 온도차가 최소화할 수 있도록, 적정 온도로 유지 및 관리하는 것이 필요하다. 한편 염소의 실내 농도는 시간에 따라 감소하지만, 공기의 누기율이 건물 부피에 비해 작을 경우, 염소의 실내 농도 감소율이 매우 느린 것으로 나타났다. 따라서 건물의 내부를 일정한 농도의 염소가 보관된 용기로 취급할 수 있으며, 이를 통해 염소의 외부 방출률 및 피해범위를 간단하게 계산할 수 있다.

아울러 본 연구와 같이 유효누출면적을 이용하여 실내에서 누출된 염소의 피해범위를 평가하면, 일반적인 완화율을 적용하는 것보다 피해범위가 작게 평가되며, 건물의 밀폐정도를 합리적으로 반영할 수 있다.

References

- 1) Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis, 3.1.2 Releases of Toxic Gas in Enclosed Space, EPA, Appendix D, Section D.1.2, 2009.
- 2) KOSHA GUIDE P-107-2016, Technical Guideline for Selecting the Worst and Alternative Leak Scenario, pp. 5, Korea Occupational Safety and Health Agency, 2012.
- 3) Technical Guideline for Selecting the Accident Scenarios, National Institute of Chemical Safety, pp. 5, 2018.
- 4) ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres)

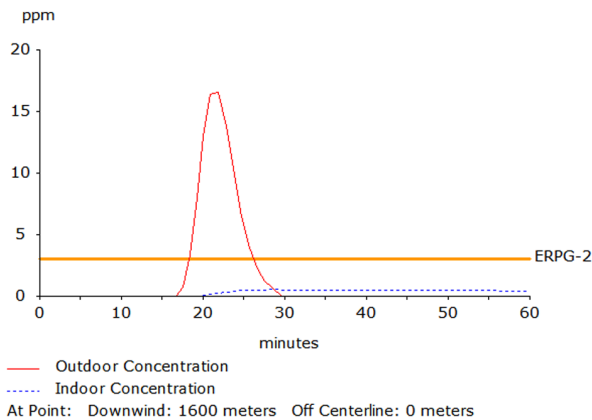


Fig. 6. Chlorine concentrations of the medicated release case at 1,600 m downwind of the central line.

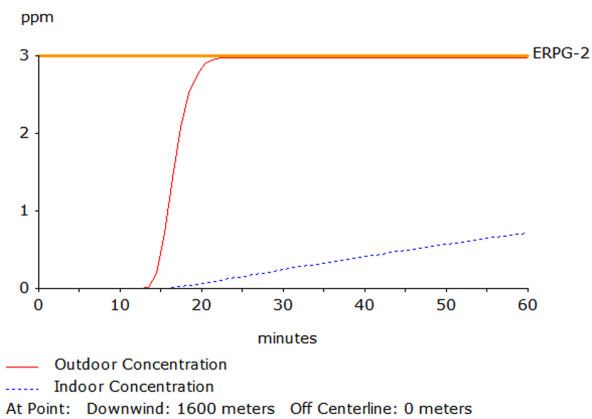


Fig. 7. Chlorine concentrations of the release case through cracks of building at 1,600 m downwind of the central line.

- 5.4.4 Technical Documentation, NOAA, pp. 57-59, 2013.
- 5) R. M. Reynolds, ALOHA 5.0 Theoretical Description, NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration), pp. 84-86, 1992.
 - 6) Y. Kwon, H. Cho and S. Ko, “A Study on the Simulation of Damage Distance in case of Leakage of Chlorine and Ozone Gas in a Water Treatment Plant”, Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 2, pp. 35-40, 2018.
 - 7) K. Kim and D. Choi, “The Principle and Method of Ventilation”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 51, No. 10, pp. 29-32, 2007.
 - 8) M. H. Sherman, “Estimation of Infiltration from Leakage and Climate Indicators”, Energy and Building, pp. 81-26, 1987.
 - 9) M. J. Sherman, “Air Infiltration in Buildings”, Lawrence Berkeley National Laboratory University of California, 1985.
 - 10) H. Shin and J. Jo, “Comparison of Test Conditions of the Fan Pressurization Method in Measuring the Building Airtightness”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 27, No. 8, pp. 279-280, 2011.
 - 11) R. C. Wanyu, W. N. William and N. P. Phillip, “Analyzing a Database of Residential Air Leakage in the United States”, Atmospheric Environment 39, pp. 3445-3446, 2005.
 - 12) M. H. Sherman, and D. J. Wilson and D. E. Kiel, “Variability in Residential Air Leakage”, Lawrence Berkeley National Laboratory, pp. 7-21, 1984.
 - 13) H. Bae, W. Yang, B. Son and D. Kim, “Estimation of Mean Air Exchange Rate and Generation Rate of Nitrogen Dioxide Using Box Model in Residence”, Journal of the Environmental Sciences”, Vol. 13, Issue 7, pp. 645-648, 2004.
 - 14) Cheoljung Yum, “Evaporation Rate of Volatile Material and Mixing Characteristics of Air”, Chungbuk National University, 2017.
 - 15) Y. Kawg, J. Oak, S. Yoon and S. Jung, “A Study on the Safety Distance of Benzene and Acrylonitrile Releases in Accordance with Dike and Hole Size”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 22, No. 1, pp. 18-25, 2018.
 - 16) Finis Cavender, “Development of Emergency Response Planning Guidelines(ERPGs)”, pp. 129, 2008.