

# SiCl<sub>4</sub> 누출 시 수막설비의 방재효과에 대한 수치 해석 연구

류태인<sup>1</sup> · 이은미<sup>2</sup> · 김승하<sup>3</sup> · 강성미<sup>4</sup> · 신창현<sup>5</sup> · 조승범<sup>5†</sup>

## A Numerical Study on the Mitigation Effect of Water Curtain for SiCl<sub>4</sub> Toxic Gas Release

Tae In Ryu<sup>1</sup> · Eunmi Lee<sup>2</sup> · Seungha Kim<sup>3</sup> · Seong-mi Kang<sup>4</sup> · Chang-hyun Shin<sup>5</sup> · Seungbum Jo<sup>5†</sup>

### †Corresponding Author

Seungbum Jo

Tel : +82-43-830-4311

E-mail : sebujo@korea.kr

Received : February 2, 2023

Revised : April 23, 2023

Accepted : June 13, 2023

**Abstract** : Silicone tetrachloride (SiCl<sub>4</sub>) leak accidents cause enormous human and environmental damage because it is highly toxic. Some handling facilities use water curtains to reduce the impact range of SiCl<sub>4</sub>. Although the water curtain is known as one of the most efficient technologies for post-release mitigation, its effect on reducing SiCl<sub>4</sub> concentration needs to be investigated scientifically and quantitatively. In this study, three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) was used to investigate the physical and chemical effects of water curtains as a release-mitigation system for SiCl<sub>4</sub>. SiCl<sub>4</sub> is released and dispersed five seconds prior to the operation of the water curtain. Once the water curtain works, the SiCl<sub>4</sub> reacts chemically with the water and its concentration decreases rapidly; it reaches an emergency response planning guidelines level 2 (ERPG-2) of 5 parts per million (ppm) at about 570 m. We observed, however, that the physical effect of water curtains on reducing SiCl<sub>4</sub> concentration is insignificant when the chemical effect is eliminated. These results are crucial since they can be a scientific and quantitative basis for the 'technical guidelines for estimating the accident affected range'. In order to protect the public from chemical accidents, more toxic gas mitigation technologies need to be developed.

**Key Words** : water curtain, CFD, silicon tetrachloride, chemical accident, mitigation

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

## 1. 서론

2015년 6월 전북 군산(주) OOO에서 발생한 사염화규소(SiCl<sub>4</sub>, silicon tetrachloride) 누출 사고는 근로자 1명과 인근 주민 15명의 입원 치료, 1억여 원의 인근지역 농작물 피해를 남겨 클로로실란(chlorosilane)류 화합물의 위험성을 각인시켰다<sup>1)</sup>. 클로로실란류의 대표적인 물질인 사염화규소는 폴리실리콘 제조 등 반도체산업의 필수적인 물질 중 하나이지만<sup>2)</sup>, 강력한 독성을 지녀 노출 지역의 인명·환경피해를 유발할 수 있는 위험성을 가지고 있다<sup>3)</sup>. 특히 사염화규소는 아래의 식 (1)과 같이 물 또는 공기 중의 수분과 쉽게 반응하여 이산화

규소(SiO<sub>2</sub>, silicon dioxide)와 강산성 물질인 염화수소(HCl, hydrogen chloride)를 생성한다<sup>4)</sup>.



염화수소 기체의 증기밀도(vapor density)는 1.27 (air=1)로 공기와 유사한 반면 사염화규소의 증기밀도는 5.9로 공기보다 훨씬 무겁다<sup>5)</sup>. 따라서, 반응물인 사염화규소는 지면으로 확산되어 인명피해를 야기할 수 있어 다량의 물로 사염화규소와 반응생성물인 염화수소를 용해시킬 수 있는 장치가 필요하다<sup>6)</sup>. 사염화규소를 대량으로 취급하는 사업장에서는 수막 설비 설치

<sup>1</sup>화학물질안전원 사고예방심사2과 공업연구사 (Accident Prevention and Assessment Division 2, National Institute of Chemical Safety)

<sup>2</sup>화학물질안전원 사고예방심사1과 전문경력관나군 (Accident Prevention and Assessment Division 1, National Institute of Chemical Safety)

<sup>3</sup>화학물질안전원 사고예방심사1과 보건연구사 (Accident Prevention and Assessment Division 1, National Institute of Chemical Safety)

<sup>4</sup>㈜엔플렉스 유동2팀 대리 (Research 2 Team, Anflux Co., Ltd.)

<sup>5</sup>화학물질안전원 사고예방심사2과 공업연구관 (Accident Prevention and Assessment Division 2, National Institute of Chemical Safety)

**Table 1.** Toxic effect range of water-reactive substances in outdoor facilities(w/, w/o water curtain)

(Unit: meter)	
Water curtain	Range of influence
Without	1000
1-step	500
2-step	300
3-step	100

통해 누출된 사업화규소를 다량의 물로 수화반응을 유도하여 사업장 외부 확산을 저지하는 피해 완화 효과를 기대하고 있다<sup>7)</sup>. 이에 따라 환경부 소속기관 화학물질안전원은 ‘사고 영향범위 산정에 관한 기술지침’을 제정하고, 실란류 등 물반응성물질의 독성 영향범위를 수막 설비 유무와 단계에 따라 Table 1과 같이 구분하고 있다<sup>8)</sup>. 물반응성물질 취급사업장이 수막 설비를 갖추고 있을 경우 수막 설비 단계에 따라 사고 시나리오의 영향범위가 감소되고, 이는 ‘화학사고예방관리계획서’의 위험도 산정 과정에 중요한 인자로 작용할 수 있다<sup>9)</sup>. 그러므로 물반응성물질의 수막 설비 효과에 따른 영향범위 감소는 과학적·정량적 검증을 통한 근거 마련이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 영주 (주) 000 사업장의 사업화규소 누출 사고 시나리오와 수막 설비를 참고하여 3차원 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 해석 프로그램 기반의 분석을 시도하였다. CFD 해석은 실제 실험이 불가능한 화학사고와 같은 현상들을 구현<sup>10-12)</sup>하여 피해 영향을 평가하고, 정량적 분석을 통한 대안 마련을 가능하게 해준다.

수막 설비는 화재확산을 위한 방지 시설로 대부분의 연구<sup>13-14)</sup>가 진행되었으며, 최근 유해화학물질 누출 시 수막 설비를 적용함으로써 확산 저감 효과에 관한 시뮬레이션 연구<sup>11)</sup>도 진행되었다. 하지만 수막 설비의 구체적인 인자(외기 풍속, 작동 시간 등)에 대한 연구나

화학반응을 고려한 시뮬레이션은 연구가 부족한 상태이다.

이에 본 연구에서는 CFD 해석 프로그램인 ANSYS FLUENT 2020R1 버전<sup>15)</sup>을 사용하여 수막 설비 유무, 외기 풍속 변화, 수막 설비 단 수, 수막 설비 작동 시간, 사업화규소의 수화반응 등을 고려한 해석을 통해 수막 설비의 피해 저감 효과를 확인하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 형상 및 격자

#### 2.1.1 수막 설비 없는 해석 형상 및 격자

Fig. 1(a)는 수막 설비 없는 해석용 형상을 나타낸 그림이다. 해석영역은 수평 방향 x, 수직 방향 y, 횡 방향 z축으로 각각 6,500 m, 100 m, 1,500 m로 구현하였다. 격자의 크기와 수는 Table 2에 표기되어있는 것처럼, 1,910,743 격자 수로 이루어져 있으며, 누출공 크기 8 inch (20.16 mm)를 고려하여, 최소 격자 크기는 3 mm로 설정되었다. 수막 설치 단 수가 증가하였을 경우, 격자 수를 확대(1단 3,955,186 2단 4,924,613 3단 6,014,311) 적용하였다. 격자 타입은 tetra와 prism으로 구성되어 있으며, 벽면과 수막 설비는 prism격자를 추가하여 해석의 정확도를 확보하였다. x, y, z 방향 속도인 u, v, w 값의 잔차가 10<sup>-6</sup>, SiCl<sub>4</sub> 부피율 잔차는 10<sup>-3</sup> 이하로 수렴하도록 구성되었다. 또한, 격자 민감도 테스트(coarse 1,351,591, medium 1,910,743, fine 2,830,257)를 통해 medium과 fine 격자의 대칭면에서 SiCl<sub>4</sub> 농도 차이가 5% 미만인 것을 확인하였다. 해석 시간 감소를 위해 중간 단계의 격자 수를 선정하였으며, 격자 수 감소를 위해 대칭으로 형상을 작성하였다. Fig. 1(b)는 저장탱크와 누출공 형상을 확대한 그림으로 누출공은 지면으로부터 1 m 높이에 위치해 있으며, 길이 0.4 m, 지름 8 inch로 구성된 파이프 형태로 구현하였다.

**Table 2.** Mesh specification and simulation parameters for water curtain, wind speed, and chemical reaction

Case	Water curtain	Mesh elements	Domain size(x, y, z)	Number of water curtains	Operation time	Wind speed	Chemical reaction
Case 1	Off	1,910,743	6,500 m, 100 m, 1,500 m	-	-	1.5 m/s	
Case 2					5 s	1.5 m/s	
Case 3					5 s	3 m/s	
Case 4		3,955,186		1 stage	5 s	5 m/s	Off
Case 5	On		2,000 m, 70 m, 1,500 m		10 s	1.5 m/s	
Case 6					15 s	1.5 m/s	
Case 7		4,924,613		2 stages	5 s	1.5 m/s	
Case 8		6,014,311		3 stages	5 s	1.5 m/s	
Case 9		3,955,186		1 stage	5 s	1.5 m/s	On

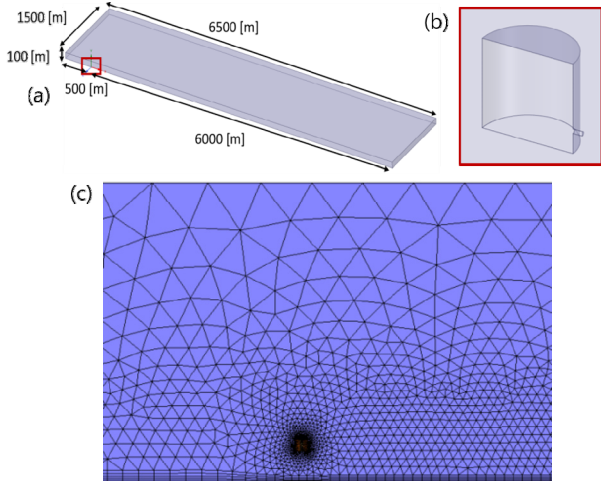


Fig. 1. (a) Iso view of analysis domain without water curtain, (b) Enlarged shape of SiCl<sub>4</sub> storage tank, (c) Mesh around leakage hole without water curtain.

### 2.1.2 수막 설비가 있는 해석 형상 및 격자

수평, 수직, 횡 방향은 각각 x, y, z로 수막 설비가 있는 해석영역은 수막 설비로 인한 사염화규소 농도 감소 효과를 고려하여 수막 설비 없는 해석 대비 높이를 100 m에서 70 m로, 영역 길이를 6,500 m에서 2,000 m로 축소하였다. 해석영역 영향도 테스트를 통해 화학 반응을 고려한 경우 SiCl<sub>4</sub> 농도 감소로 인해 필요한 해석 도메인이 1,500 m로 충분한 것을 확인하였다.

Fig. 2는 수막 설비와 저장탱크의 누출공 해석 형상을 표현하였다. 수막 설비 건물은 한 변이 30 m인 정사각형 형태로 1층은 10 m, 2층은 5 m의 높이로 구현하였다. 누출공이 있는 2층 위, 아래는 막혀 있고 저장 탱크는 지름 4 m의 원기둥 형태로 실제 형상을 단순화하여 2층 중앙에 배치되어 있다. 누출공은 2층 바닥으로부터 1 m 위에 길이 0.4 m의 파이프 끝으로 형상을 작성하였다. 파란색 점은 수막 설비가 있는 위치이며, 4.5 m 간격으로 4면 모두 배치하였다.

Fig. 3은 파란색 점 위치에 배치된 수막 설비 분사 노즐 형상을 나타내었다. 실제 수막 설비 노즐 형상을 참고하여 9.7 mm 길이의 정사각형 단면에 95°의 분사

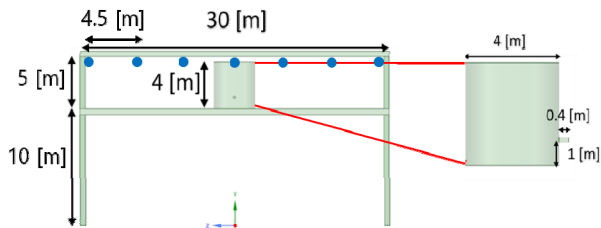


Fig. 2. Analysis of geometry with water curtain and leakage hole.

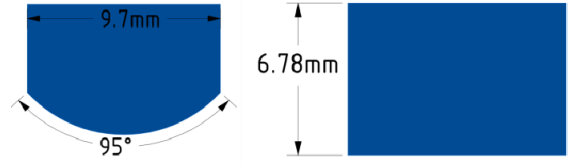


Fig. 3. The nozzle shape of water curtain.

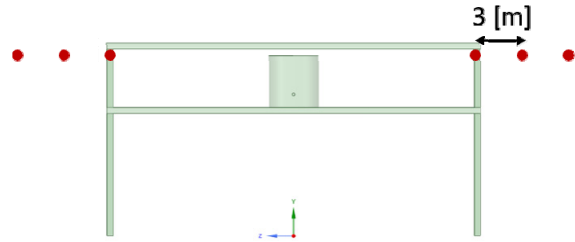


Fig. 4. Geometry for increasing number of water curtains.

각도를 구현하였다.

Fig. 4는 1단, 2단, 3단 수막 설비의 위치를 보여준다. 각 수막 설비는 3 m 간격으로 설치되어 있으며, 동시에 작동되도록 구현되었다.

Fig. 5(a)는 수막 설비가 있는 해석의 전체 격자를 나타낸 그림이며, fig. 5(b), (c)는 대칭 단면에서의 전체 격자와 수막 설비 영역을 확대한 격자를 나타낸 그림이다. 수막 설비의 분무 작동 범위와 사염화규소 누출 지점은 누출공 크기 8 inch (20.16 mm)를 고려하여, 최소 격자 크기 3 mm로 구성되었다.

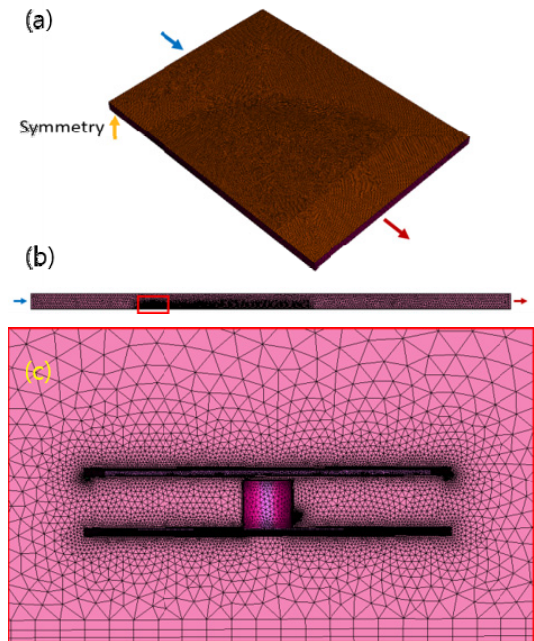


Fig. 5. (a) Iso view of simulation domain with water curtain, (b) Symmetric geometry of water curtain in a streamwise direction, (c) Mesh around leakage hole with water curtain.

## 2.2 해석 조건

해석 조건은 Table 2에 표기되어있는 것처럼, 수막 설비 단 수 (0단, 1단, 2단, 3단), 수막 설비 작동 시간 (5 s, 10 s, 15 s), 외기 풍속 (1.5 m/s, 3 m/s, 5 m/s), 화학반응을 고려하여 총 9가지 경우에 대해 시뮬레이션이 수행되었다.

### 2.2.1 수막 설비 해석 조건

해석 대상은 외기 영역 유체인 공기, 수막 설비에서 분사되는 물, 그리고 누출공에서 누출이 되는 사염화규소를 작동 유체로 설정하였다. 사염화규소의 누출 총 체적은 80 m<sup>3</sup>이며 600 s 동안 누출되는 것으로 가정하였다. 사염화규소의 밀도는 영주 (주) OOO 사고 시나리오 내용을 참조하여 58.1 kg/m<sup>3</sup>를 설정하였다. 이는 운전온도가 500°C이고 운전압력이 2 MPa인 조건에서 화학사고 장외영향평가 프로그램인 KORA(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool) ver. 3.0.4<sup>16)</sup>를 기준으로 한 자료이다. 사염화규소의 누출 질량 유량은 다음의 식 (2)로 계산하였다.

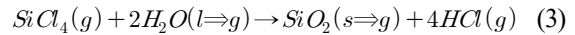
$$\text{누출 질량유량}(kg/s) = \frac{\text{총 누출체적}(m^3) \times \text{밀도}(kg/m^3)}{\text{누출시간}(s)} \quad (2)$$

Transient 해석을 설정하여 8 inch 누출공에서 사염화규소가 600 s 동안 7.7467 kg/s로 유출되는 것으로 사고 시나리오를 설정하였다. 하지만 누출 후 사염화규소의 거동은 상온, 대기압 조건이므로 ANSYS Fluent에서 Incompressible Ideal Gas를 이용하였다. 이때 밀도는 약 6.9 kg/m<sup>3</sup>이다. 수막 설비 분무 각도는 95°이며 오리피스(orifice) 직경은 9.7 mm이다. 수막 설비의 유량은 100 L/min이나 kg/s 단위로 환산하여 1.67 kg/s의 값을 얻었다. 수막 설비는 DPM(Discrete Phase Model) 조건으로 해석하였고 injection type을 surface로 설정하여 노즐에서 물이 분사되게 설정하였다. 수막 설비의 물 입자 크기는 1000 μm 이하<sup>17)</sup>로 지름이 작을수록 표면적이 증가하여 화학반응에 유리하므로, 최악의 조건을 가정하여 1000 μm 입자 크기로 설정하였다. 분사되는 물의 밀도는 998.2 kg/m<sup>3</sup>이고 온도는 300 K이다. 물 분사 면적은 오리피스 면적과 동일하게 하였다. 외기 입구 조건은 화학물질안전원의 ‘사고시나리오 선정 및 위험도 분석에 관한 기술지침<sup>18)</sup>’에 따라 최악의 사고 시나리오를 가정하여 1.5 m/s를 적용하였고, 출구는 대기압 조건으로 설정하였다. 바닥 면은 no slip wall, 대칭면을 제외한 나머지 면은 free slip wall 조건을 설정하였다. 사염화규소 유출이 되는 시간 동안은 시간 간

격을 0.5 s, 유출이 종료된 시간에는 1 s로 시간 간격을 변화하며 해석을 진행하였다.

### 2.2.2 수화반응 해석 조건

수화반응 해석은 사염화규소와 수막 설비에서 분사되는 물과의 반응을 고려한 해석을 진행하였다. 해석 조건은 수막 설비 작동시간 5 s, 외기 풍속 조건 1.5 m/s로 설정하였다. 사염화규소 누출 사고 발생 시 기체 상태의 사염화규소와 액체 상태의 물이 만나 수화반응을 일으키거나 다상 유체 반응 해석의 경우 결과가 발산하는 CFD 해석상의 한계로 인해 화학반응식 (3)과 같이 반응물과 생성물 모두 기체 상태로 가정하여 해석을 진행하였다.



사염화규소와 물이 만나면 수화반응은 빠른 속도로 진행되어 이산화규소와 염화수소를 생성하기 때문에 누출된 사염화규소는 수막 설비에서 분사되는 물에 의해 대부분 제거된다. 하지만 수막 설비의 작동이 누출 후 5 s부터 시작되기 때문에 초기 5 s 동안 누출된 사염화규소는 수막 설비에서 분사되는 물의 영향을 받지 않고 외기를 타고 확산이 되게 된다. 따라서 본 해석에서는 수막 설비 작동 이전에 누출된 사염화규소의 ppm 농도가 확산거리 측정의 기준이 되는 독성물질 끝점농도 ERPG(Emergency Response Planning Guide)-2 기준 값인 5 ppm이 되면 해석을 중지하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 수막 설비 단 수 증가에 따른 농도 변화

Fig. 6은 수막설비 단 수 증가에 따른 대칭면에서의 SiCl<sub>4</sub> 농도 변화를 보여준다. 화학반응을 고려하지 않기 때문에 단 수 증가에 따른 사염화규소 농도 변화는 차이가 없다. 하지만, 단 수가 증가할수록 독성 구름에 대한 물리적인 놀림 현상이 발생하여 대칭면에서의 사염화규소 영역이 가늘어지는 것을 알 수 있다. 2단과 3단 수막 설비의 경우 유사한 물리적 놀림 효과가 발생하였다. 이러한 효과로 Fig. 7과 같이 수직 방향으로 확산은 상대적으로 감소하였으나, 수막 설비의 수평 방향 확산에 대한 물리적인 효과는 크지 않다는 것을 확인할 수 있다. 수막 설비에 의한 확산 저지 효과는 사염화규소의 높은 농도를 바닥에 머물게 하고, 낮은 농도의 사염화규소만 더욱 퍼졌다. 반대로 수막 설비가 없는 해석의 사염화규소의 농도는 전반적으로 높이에 따라 고른 농도 분포가 나타났다.



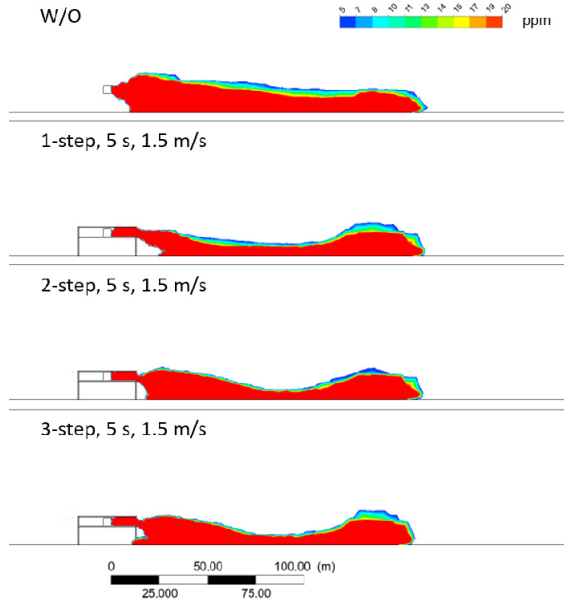


Fig. 6. The SiCl<sub>4</sub> concentration contour for various number of water curtains.

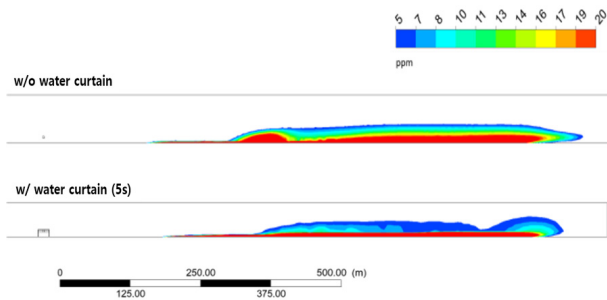


Fig. 7. The comparison of SiCl<sub>4</sub> concentration contour between with and without water curtain at t=15 min.

### 3.2 수막 설비 작동 시간 변화에 따른 농도 변화

Fig. 8은 사염화규소 누출 후 수막 설비 작동 시간 변화 (5 s, 10 s, 15 s)에 따른 농도 변화를 나타낸다. 화학반응을 고려하지 않았을 때는 수막 설비 작동 시간 변화에 따른 농도 변화나 확산 속도에는 차이가 없

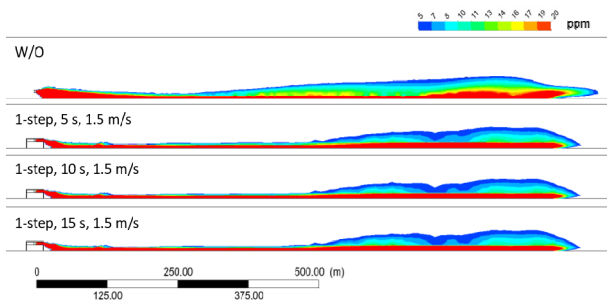


Fig. 8. The SiCl<sub>4</sub> concentration change at various operating times (5 s, 10 s, and 15 s).

나, 수막 설비가 없을 때 대비 사염화규소 농도 확산 범위가 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 효과로 수직 방향으로 확산은 상대적으로 감소하였으나, 수막 설비의 수평 방향 확산에 대한 물리적인 효과는 크지 않다는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 외기 풍속 변화에 따른 SiCl<sub>4</sub> 농도 변화

Fig. 9는 1단 수막 설비의 외기 풍속 변화에 따른 수막 설비 작동 모양을 나타낸다. 외기 풍속이 1.5 m/s에서 3 m/s, 5 m/s로 증가함에 따라 외란 영향이 증가하여 streamline이 바람 방향으로 26°, 38°, 51° 꺾이는 것을 볼 수 있다. 따라서 평균 풍속이 높은 지역에서는 고압 워터 펌프 설치를 고려할 필요가 있다.

Fig. 10은 누출 후 5분이 지났을 때, 외기 풍속 변화에 따른 SiCl<sub>4</sub> 확산 속도 차이를 보여준다. 외기 풍속 변화에 의한 사염화규소 확산 방향은 높이 방향의 확산

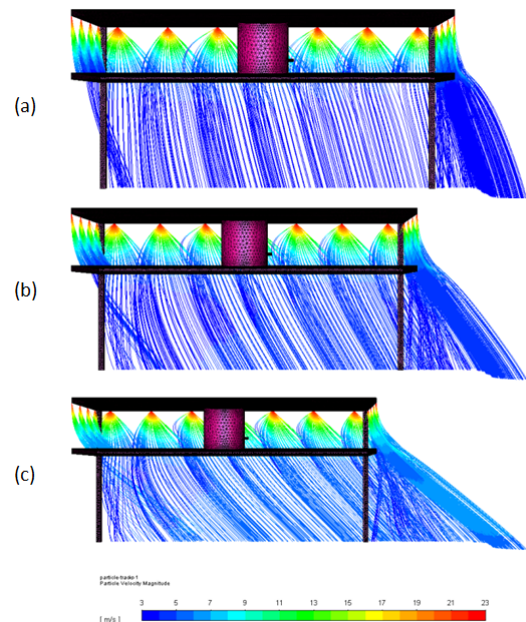


Fig. 9. The streamline of SiCl<sub>4</sub> due to wind velocity change, (a) 1.5 m/s, (b) 3 m/s, (c) 5 m/s.

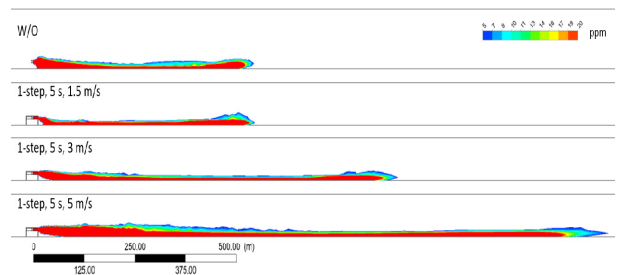


Fig. 10. The SiCl<sub>4</sub> dispersion comparison with various wind velocities (1.5 m/s, 3 m/s, and 5 m/s) at t=5 min.

보다는 유동 방향으로 빠르게 이동하였다. 따라서 농도 차이에 의한 diffusion보다는 바람에 의한 convection의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

### 3.4 사염화규소의 수화반응 고려 농도 변화

사염화규소의 수화반응을 적용한 해석에서는 사염화규소 누출 후 5 s 뒤 수막 설비가 작동하여 가동 전 5 s간 누출된 사염화규소 농도와 이동 거리 해석 결과를 분석하였다.

Fig. 11은 사염화규소 확산을 위에서 아래로 바라본 시점(fig. 11(a))과 대칭면에서 바라본 시점(fig. 11(b))으로 구분하여 나타내었다. 누출된 사염화규소는 수막 설비를 지난 후 누출 모멘텀과 외기 풍속의 영향으로 인해 누출 방향으로 진행한다. 수막 설비가 작동하는 5 s 이후에는 식(1)의 수화반응으로 사염화규소는 사라지게 되고, 5 s 이전에 누출된 사염화규소는 대기 중으로 확산하게 된다. 이로 인해 ERPG(Emergency Response Planning Guide)-2값인 5 ppm 이상 농도를 가진 사염화규소 농도 영역은 누출 시간 540 s, 최대 확산거리 약 570 m에서 마지막으로 관찰되며, 637 s 이후에는 완전히 사라지는 것을 알 수 있다. 또한, 수막설비가 없는 경우 장외영향평가 프로그램인 KORA(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool)를 사용하여 피해 반경을 계산한 결과 6,245 m로 수화반응을 고려했을 때의 최대 확산거리보다 약 10배 높은 결과가 나타났다.

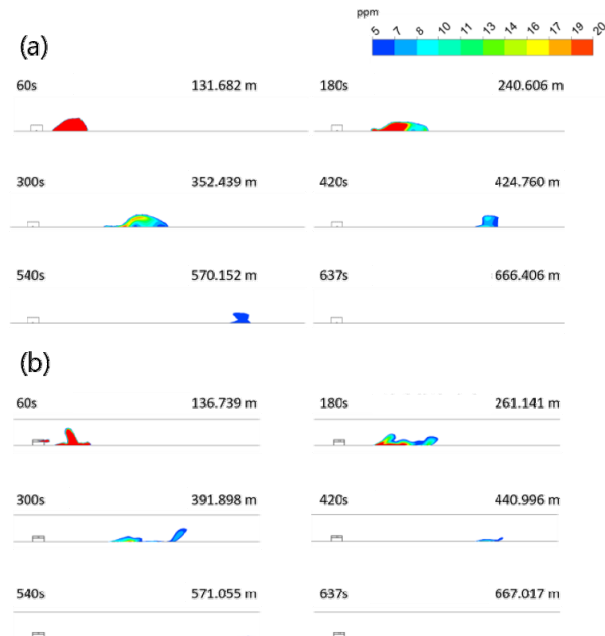


Fig. 11. SiCl<sub>4</sub> concentration contour and maximum dispersion distance(m) with the consideration of chemical reaction (a) top view, (b) side view.

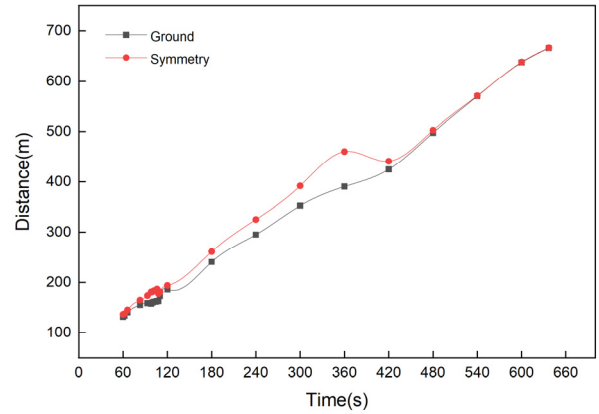


Fig. 12. Horizontal dispersion distance of SiCl<sub>4</sub> at the bottom and symmetric surface.

Fig. 12는 바닥면과 대칭면에서의 최대 확산거리를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 누출 시작부터 360 s까지는 바닥에 닿지 않고 공중에 떠서 확산하는 사염화규소가 바닥에서 확산되는 사염화규소에 비해 더 멀리 확산되어 확산거리의 차이가 발생하지만, 480 s 이후는 같은 확산거리가 나타났다. 360~420 s 대칭면에서 최대 확산거리가 감소한 이유는 사염화규소와 물과의 반응으로 생성된 염화수소 가스가 확산하면서 대칭면에서의 SiCl<sub>4</sub> 농도가 감소하는 현상이 발생하였기 때문이다. 더 가벼운 염화수소가 독성 가스 구름운에 갇혀 있다가 앞으로 확산하면서 SiCl<sub>4</sub> 농도 분포 영역이 감소하면서 360~420초 사이에 사염화규소 최대 확산거리가 감소하였다.

시간에 따른 사염화규소 농도 최댓값의 경향은 초반에 유출된 사염화규소가 수막 설비의 물과 닿기 전에 높은 농도가 나타나다가 수막에 닿은 후 급격히 농도가

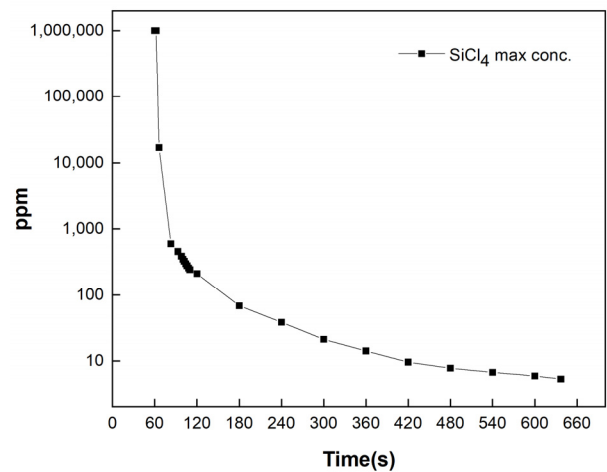


Fig. 13. The change of the maximum concentration of SiCl<sub>4</sub> in time.

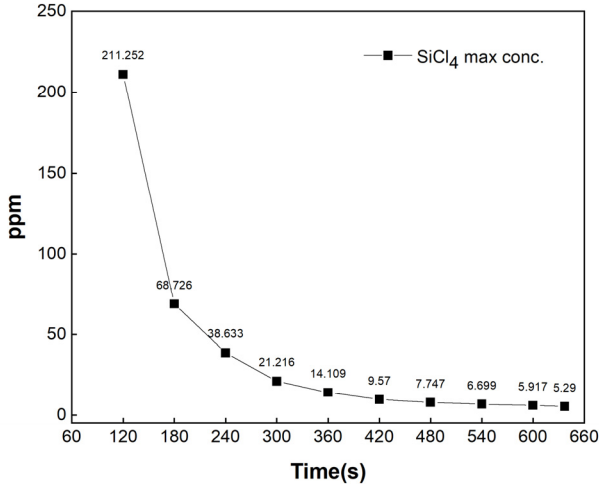


Fig. 14. The change of the maximum concentration of SiCl<sub>4</sub> after 120 s.

낮아지는 것을 확인하였다(Fig. 13). 수막 설비에 의해 제거되는 사염화규소는 농도 측정에 영향을 미치지 않고, 수막 분사 전에 유출된 사염화규소가 시간에 따라 확산되면서 농도가 낮아지는 것을 확인하였다.

Fig. 14는 초기 급격하게 낮아지는 농도 영역을 제외한 시간에 따른 농도 변화를 나타낸 그래프이다. 수막 설비 작동 시작 전 수막 설비를 지나온 사염화규소만의 농도 변화를 확인하기 위해서 그래프의 시작 시간을 120 s로 하였다. 초기에 농도가 급격하게 떨어진 후 시간이 지남에 따라 ERPG(Emergency Response Planning Guide)-2값인 5 ppm에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

클로로실란류 화학사고는 사고 발생 빈도수가 높고 강한 독성으로 인해 인명·환경 피해가 극심하다. 클로로실란류 화합물의 위험성을 인지한 화학물질안전원은 2017년 사고대비물질 28종을 추가 지정하면서 사염화규소를 필두로 클로로실란류 화합물을 대거 포함하였다. 클로로실란류 화합물 취급사업장에서는 수막 설비를 도입하여 누출 사고 영향범위 축소 효과를 기대하고 있으나 ‘사고 영향범위 산정에 관한 기술지침’의 축소 거리의 과학적·정량적 검증이 필요하다. 이를 위해 3차원 열유동 해석 프로그램인 ANSYS FLUENT를 이용하여 3차원 CFD 해석을 수행하였다.

수막 설비 유무 차이 해석을 위한 조건은 외기 풍속 1.5 m/s에 사염화규소가 10 min 동안 7.7467 kg/s로 유출이 되는 조건을 적용하였다. 수막 설비가 없는 조건에서는 확산에 의한 농도 감소는 거의 일어나지 않고

외기를 따라 흘러가는 것을 확인하였다.

화학반응을 고려하지 않은 수막 설비 해석은 수막 설비가 없는 경우보다 수직 방향으로 확산이 많이 발생하지 않고 확산거리 차이는 없음을 확인할 수 있다. 하지만 1단 수막 설비의 수화반응을 고려한 해석은 실제 현상과 유사하게 사염화규소와 물이 급격히 반응하여 누출된 사염화규소가 대부분 사라지는 것을 확인하였다. 수막 설비 작동 전 초기 5 s간 누출된 사염화규소는 급격히 농도가 감소하면서 이동 후 약 570 m 지점에서 ERPG-2 기준값인 5 ppm에 도달하는 것을 확인하였다. 2015년 군산 (주) OOO 사염화규소 누출에 의한 환경 영향 조사에서 500 m 반경 내 식물 피해가 확인된 것은 본 연구의 시뮬레이션 결과를 뒷받침할 수 있다<sup>19)</sup>. 또한, 암모니아의 경우 워터 커튼 적용 시 미적용 대비 영향 거리가 9,000 m에서 920 m로 약 10배 감소하는 기존 연구 결과는 본 연구의 사염화규소 화학 반응 해석 결과와 유사한 결과를 보여준다<sup>20)</sup>.

본 연구의 결과로 도출된 수화 반응을 고려한 1단 수막 설비의 최대 영향 범위가 570 m인 것은 ‘사고 영향범위 산정에 관한 기술지침’ 값의 500 m인 것과 유사하게 나타났으며, 이는 사고시나리오 지침의 과학적·정량적 근거가 될 수 있을 것이라 기대한다. 또한, 수막 설비 설치 시, 외기 조건, 작동 시간 및 설비 단수와 같은 인자들에 대한 가이드라인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### References

- 1) Ministry of Environment, “Chemical Accident Investigation Team Impact Investigation Result Report”, 2015.
- 2) G. C. White, “The Handbook of Chlorination”(2nd Ed), 1986.
- 3) Cameo Chemicals, “<https://cameochemicals.noaa.gov/>”, Retrieved on 12.07.2022.
- 4) S. K. Ignatov, P. G. Sennikov, Alexey G. Razuvaev, L. A. Chuprov, O. Schrems and B. S. Ault, “Theoretical Study of the Reaction Mechanism and Role of Water Clusters in the Gas-Phase Hydrolysis of SiCl<sub>4</sub>”, J. Phys. Chem. A, Vol. 107, No. 41, pp. 8705-8713, 2003.
- 5) National Institute of Chemical Safety, “Key Info Guide for Accident Preparedness Substances”, 2022.
- 6) J. Woo, C. Shin, “A Study on the Damage Range of Chemical Leakage in Polysilicon Manufacturing Process”, J. Korean Institute of Gas, Vol. 22, No. 4, pp. 55-62, 2018.
- 7) P. D. Moskowitz, V. M. Fthenakis, L. D. Hamilton, P. Kalb

- and J. C. Lee, *New Risks: Issues and Management*, 1990.
- 8) National Institute of Chemical Safety, *Technical Guidelines for Estimating the Accident Affected Range*, 2021
  - 9) National Institute of Chemical Safety, *Manual of Plans for Prevention and Management of Chemical Accidents*, 2021
  - 10) W. S. Cho and E. S. Kim, “An Estimation of the Consequence Analysis for Asphyxiation Accident in Confined Space using CFD”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol.33, No. 5, pp 28-34, 2018
  - 11) D. S. Min, S. Choi, E. Oh, J. Lee, C. Lee, K. Choi and S. Jung, “Numerical Modelling for Effect of Water Curtain in Mitigating Toxic Gas Release”, *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 63, 103972, 2020.
  - 12) J.-H. Back, H.-J. Lee and C. B. Jang, “A Methodology for Determination of the Safety Distance in Chemical Plants using CFD Modeling”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 31, No. 3, pp. 162-167, 2016.
  - 13) K. -J. Kim, D.-W. Song and S. -K. Lee, “A Study on Performance of Water Curtain Nozzles for Protection of Wooden Cultural Properties from Forest Fire”, *J. Korea Inst. Fire Sci. Eng.*, Vol. 26, No. 3, pp. 8-13, 2012.
  - 14) J.-U. Choi and S.-W. Cho, “The Water Curtain Installation Guideline for Fire Spread Prevention in Market”, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 28, No. 7, pp. 269-274, 2016.
  - 15) *Fluent user’s guide, 2020R1 help system*, Ansys, Inc., 2021.
  - 16) National Institute of Chemical Safety, “KORA(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool)”, 2021.
  - 17) National Institute of Chemical Safety, “Technical Guidelines for Accident Scenario Selection and Risk Analysis”, 2021.
  - 18) C. J. Lee, “Principle and Development of Water Spray Fire Extinguishing System”, *Fire Protection Technology*, Serial No.32, pp. 38-47, 2002.
  - 19) Ministry of Environment, “Report on Impact Assessment of Silicon Tetrachloride Leak Chemical Accident by OCI Co. in Gunsan city”, 2015.
  - 20) Center for Chemical Process Safety, “Guidelines for Postrelease Mitigation Technology in the Chemical Process Industry”, 1997.