



주변 사업장의 화학물질 확산 감지와 대응을 위한 경계면의 센서배치 최적화 및 강건성 분석

조재훈 · 김현승 · 김태옥 · [†]신동일

명지대학교 화학공학과

(2016년 9월 5일 접수, 2016년 10월 24일 수정, 2016년 10월 25일 채택)

Optimal Sensor Placement of Boundaries and Robustness Analysis for Chemical Release Detection and Response of Near Plant

Jaehoon Cho · Hyunseung Kim · Tae-Ok Kim · [†]Dongil Shin

Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

(Received September 5, 2016; Revised October 24, 2016; Accepted October 25, 2016)

요약

최근 화학물질을 사용하는 시설이 증가하면서 동시에 시설의 노후화, 기계적 결함, 인적오류 등으로 화학물질 누출사고 피해가 많아지고 있다. 특히, 산업단지는 군집 특성으로 인해 화학물질 누출사고 발생 시 인근 사업장으로 확산되어 큰 피해로 이어질 가능성이 크다. 이에 따라 화학물질을 취급하는 공정의 누출조건, 환경조건을 반영한 다양한 누출 시나리오를 토대로 빠른 감지와 대응을 위해 경계면의 센서배치 방안을 제시할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 염소가스가 누출되는 경우에 대해 COMSOL를 사용하여 주요 매개변수의 적용으로 실질적인 사고 시나리오를 해석하였다. 그리고 사고 시나리오를 바탕으로, 센서의 감지 확률과 감지시간 등 각 항목마다 중요도를 부여하여 최적 위치가 산출되도록 목적함수를 선정하였다. 또한 예상치 못한 지역의 누출사고에 대해 최적화된 센서배치의 강건성 분석을 통해 본 방안의 타당성을 높였다. 결과적으로, 기존 방식보다 효과적으로 경계면의 센서배치 최적화 방법의 적용 가능성을 확인하였다. 이상의 결과로부터 이동식 센서의 배치방법과 농도 데이터를 기반으로, 누출원의 역추적에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract - Recently, the quantities of chemical material are increasing in chemical industries. At that time, release accident is increasing due to aging of equipment, mechanical failure, human error, etc. and industrial complexes found community properties in a specific area. For that matter, chemical release accident can lead to high probability of large disaster. There is a need to analyze the boundaries optimal sensor placement calculated by selecting release scenarios through release condition and wether condition in a chemical process for release detection and response. This paper is to investigate chlorine release accident scenarios using COMSOL. Through accident scenarios, a numerical calculation is studied to determine optimized sensor placement with weight of detection probability, detection time and concentration. In addition, validity of sensor placement is improved by robustness analysis about unpredicted accident scenarios. Therefore, this verifies our studies can be effectively applicable on any process. As mention above, the result of this study can help to place mobile sensor, to track gas release based concentration data.

Key words : sensor placement, optimization, robustness, chemical release, boundary

[†]Corresponding author: dongil@mju.ac.kr

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

산업단지는 국가의 산업정책을 실현하는 곳으로, 대한민국의 경제발전에 결정적인 기여를 해왔으며, 정부의 직·간접적 지원과 사업장간의 협력 등의 장점이 많다[1]. 이와 같은 산업단지에는 화학물질을 사용하는 시설이 증가하고 있으며, 동시에 시설의 노후화, 기계적 결함, 인적오류 등으로 화학물질 누출사고가 늘고 있다.

유해화학물질 누출사고 발생 시 산업단지는 Fig. 1과 같이 군집 특성을 가지고 있어서 막대한 사회적 비용과 국민 피해가 발생하고 있다. 실제로 여수 산업단지의 한 사업장의 경우에는 화학물질의 누출사고로부터 작업자들을 보호하기 위해 사업장 경계면에 센서를 배치하여 화학물질의 누출을 감시하고 있다[2]. 그러나 현재 화학물질 누출사고의 예방과 대응방안으로, 사업장 내부의 감지센서 설치 관련 지침과 장외영향성평가 등을 실시하고 있다.

현재까지의 국내·외 주요 연구로는 Dandrieux 등[3]이 염소가스의 누출시험을 수행하고, 분산모델의 적용성을 검토하였으며, Jang 등[4]은 Dandrieux 등의 실험결과를 바탕으로, 수막의 최적 위치를 모사하였다. 그리고 고재선[5]은 최근 국내에서 발생한 불산 저장탱크에서 독성가스가 누출 시 HAZOP에 의한 공정 위험도를 산출하고, 누출 시나리오에 대한 사고결과를 분석하였다. 또한 조성현[6]은 실내의 센서배치를 위해 minimax기법을 이용한 센서배치 최적화를 진행하였고, DeFriedn 등[7]은 가스누출이 발생 시 반드시 감지해야 하는 위험 정도에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 Genserik Reniers 등[8]은 여러 사업장의 통합적인 사고예방을 위한 연구를 하였다. 그러나 다른 연구에 비해 상대적으로

외부 확산되는 사고에 관한 피해 유무를 판단하는 시스템 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 사업장 이외 지역으로 확산되는 유해화학물질을 감지 및 감시하기 위해 Fig. 2와 같이 경계면의 센서배치 최적화를 연구하였다. 이를 위해 대기확산모델을 바탕으로, 시나리오별 조건을 적용하여 센서의 감지 확률을 구함으로서 수치적인 계산으로 센서배치 최적화를 결정하는 방법으로 진행하였다. 제시된 최적화 방법은 여러 누출 시나리오를 이용하여 검증을 진행하였고, 모든 사업장에 적합한 경계면의 센서배치 최적화가 가능하도록 하였다. 또한 예상치 못한 누출사고에 본 센서배치 최적화에 대한 강건성 분석을 통해 본 경계면의 센서배치의 타당성을 높이고자 하였다.

II. 이론

위험은 어느 곳이나 존재하므로, 누출사고 발생 전에 위험을 최대한 분석하여 사고의 위험을 줄이는 것이 최선이다. 그러나 모든 위험을 분석한다는 것은 불가능하므로, 어떤 사고의 경우는 사고가 발생하기 전까지 확인을 못하는 경우도 있다. 이와 같은 위험을 파악하기 위해 체크리스트기법, 위험과 운전 분석 기법 등으로 알려져 있는 정성적 및 정량적 위험성 평가를 통해 각 현장의 위험성 분석을 할 수 있다. 즉, 현장의 PFD와 P&ID를 기초로 고정의 위험한 구간을 세부적으로 나누어 사고 시나리오를 선정하고, 위험성 평가를 실시한다. 공정에서 화학물질의 누출빈도와 사고 피해크기를 분석하기 위해 기본적인 적용단위의 개념으로 사용되는 구간은 공정에서 누출이 발생 시 차단용 형성할 수 있는 구간으로 정의한다. 또한 설비와 설비 사이에 차단밸브가 없는 경우에는 전단에 설치된 차단밸브에 의해 구분하고, 유체의 흐름이 없을 경우에는 설비와 설비 사



Fig. 1. Map of Yeosu national industrial complex.

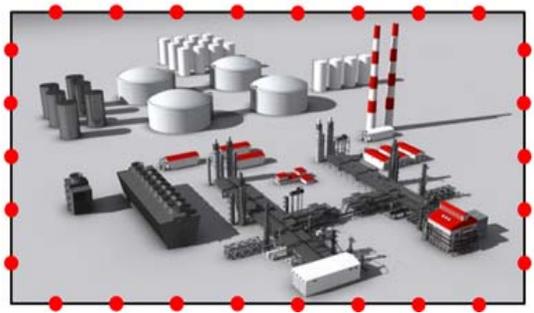


Fig. 2. Optimization example of boundaries sensor placement.

이를 다른 노드로 구분할 수 있다. 그리고 유체의 상태, 누출 조건, 그리고 누출 등도 구간을 정할 때 동시에 고려한다[9].

대부분의 화학공장에서는 탱크나 배관의 구멍, 갈라진 튜브, 펌프, 밸브, 플랜지의 새는 구멍 등의 다양한 경로를 통해 화학물질이 누출되며, 이들의 누출에 의해 주로 화재 및 폭발사고가 일어나고 있다. 이때, 일반적으로 누출되는 물질의 상에 따라 액체 누출, 증기 누출, 2상(증기-액체)누출로 구분한다. 특히, 누출량 산출모델에서 한정된 시간동안에 누출되는 경우에는 순간누출(instantaneous release)로 가정하고, 연속적으로 누출되는 경우에는 연속누출(continuous release)로 구분한다. 순간누출에서 누출량은 대부분 용기, 탱크 등이 파열되었을 경우에 이들 저장용기의 저장량으로 가정하고, 연속누출인 경우에는 누출원이 간단히 구해지지 않기 때문에 공정조건에 따라 누출 상을 기상 및 액상의 특정한 누출원 모델을 사용한다. 이때, 저장형태와 누출이나 파열이 일어난 부위 등을 고려하여 용기누출 또는 배관 누출 중 적절한 모델을 선택하여 초기 누출속도를 산출한다. 발생 가능한 누출유형으로는 호스의 균열이나 호스의 끊어짐으로 인한 사고, 접합부, 밸브, 밸브 봉합 불량으로 인한 누출사고, 압력용기 및 펌프의 누출사고, 압력용기의 과충전 및 과압으로 인한 사고, 저장탱크 및 이송용기의 파손으로 인한 누출 등이 있다[10].

화학공장에서 누출된 유해가스의 확산은 바람, 온도와 날씨에 영향을 받으며, 특히 바람은 확산의 방향에 크게 영향을 미치기 때문에 바람의 세기와 방향의 불확실성을 고려한 많은 연구들이 수많은 관심 속에 이루어지고 있다[6]. 따라서 대기확산을 예측하기 위한 대기확산모델은 화학물질이 누출되어 가스 상태로 대기 중에 노출되면 사고지점에서부터 공장이나 인근지역에 미치는 영향을 해석하는 이론이다. 특히, 대기 중으로 확산된 누출물질은 공기와 급격히 혼합되기 때문에 누출지점에서 멀리 떨어질수록 농도는 낮아지게 된다. 이때, 누출물질의 대기 확산에는 여러 매개변수들이 영향을 미치는데, 일반적으로 바람속도, 대기안정도, 대지조건, 누출지점의 높이 등이 있다[11].

III. 경계면의 센서배치 최적화를 위한 모델링

경계면의 센서배치 최적화를 위해서는 공간의 구조와 누출이 이루어 졌을 때 유체흐름의 방향을 고려하여 최적화를 진행해야 한다. 본 연구에서는 각 사업장의 공간의 구조를 고려한 누출발생시 누출물

질의 감지를 위해 유체흐름을 반영한 경계면의 센서 배치 최적화를 진행하였다.

3.1 목적함수

일반적으로 정확한 누출물질을 감지하기 위해 많은 가스센서를 설치함으로써 감지 확률을 높이고, 감지시간을 단축시키는 방법이 있다. 그러나 센서당 감지효율 저하와 센서 수 증가에 따른 비용증가를 초래하는 문제점이 발생하기 때문에 적절하지 않다. 경계면의 센서배치의 특성상 경계면의 넓은 범위를 감지해야 하므로, 많은 센서가 필요하게 되며, 센서 당 감지효율을 높여야 한다.

본 연구에서는 센서배치 최적화 모델에 대한 목적함수를 식 (1a)와 같이 센서 설치위치 j 별 감지시간 중요도, 감지농도 중요도 및 감지시나리오 수의 중요도 각각 합이 최대화가 되도록 하였다. 이때, 식 (1b)는 각 시나리오에 대한 위치 i 별 감지하는 시나리오에 대해 중요도를 곱하여 행렬 N_i 로 표현하였다. 그리고 식 (1c)는 각 시나리오에 대한 위치 i 별 감지 최대 농도의 값에 대해 중요도를 곱하여 행렬 C_i 으로 산출되도록 하였다. 또한 식 (1d)는 각 시나리오에 대한 위치 i 에서 최초 감지시간에 중요도를 곱하여 행렬 T_i 로 산출되도록 하였다. 제약조건으로 모든 시나리오를 감지할 수 있도록 식 (1f)와 같이 감지되는 시나리오의 수 D 는 총 시나리오 수 A 와 같도록 하였다.

$$\max \sum_j T_j + C_j + N_j \quad (1a)$$

$$\sum_{a \in A} w_{a,n} \cdot b_{a,i} = N_i \quad \forall i \in I \quad (1b)$$

$$\sum_{a \in A} w_{a,c} \cdot c_{a,i} = C_i \quad \forall i \in I \quad (1c)$$

$$\sum_{a \in A} w_{a,t} \cdot t_{a,i} = T_i \quad \forall i \in I \quad (1d)$$

$$b_{a,i} \in 0,1 \quad \forall i \in I, a \in A \quad (1e)$$

$$c_{a,i} \geq ERPG2 \quad \forall i \in I, a \in A \quad (1f)$$

$$0 < t_{a,i} < M \quad \forall i \in I, a \in A \quad (1g)$$

$$D = A \quad (1h)$$

여기서 i 는 설치 가능한 센서위치를 의미하고, j 는 I 의 위치 중 센서가 설치되는 위치, w_t, w_c, w_n 는 시간, 농도, 감지시나리오 숫자의 가중치, M 은 최대 감지시간, $b_{a,i}$ 는 각 시나리오의 위치 i 별 감지 유무, c_i 은 감지시간 $0 < t_{a,i} < M$ 동안 각 시나리오의 위치 i 별 물질의 농도가 ERPG-2보다 높은 농도 중 최고 농도, 그리고 $t_{a,i}$ 은 감지시간 $0 < t_{a,i} < M$ 동안 각 시나리오의 위치 i 별 최초 감지되는 시간을 의미한다[12].

3.2 경계면의 센서배치를 위한 플로우차트

경계면의 센서배치 최적화를 위해 고려할 조건들을 Fig. 3과 같이 플로우차트(flowchart)로 제시하였다. 즉, 첫 번째로 대상 사업장의 누출이 가능한 부위를 분석한다. 위험성평가를 토대로 분석되는 누출이 가능한 부위를 시나리오의 누출지점으로 지정한다. 두 번째로, 센서를 설치할 사업장의 경계면의 형태를 정의한다. 세 번째는 사업장 지역의 기상데이터를 기상청으로부터 데이터를 불러오게 된다. 기상데이터는 풍향별 평균풍속을 사용한다. 네 번째는 설정된 기초 데이터를 기반으로 시뮬레이션 툴(simulation tool)로 각 사업장의 기체 확산 모델을 통해 시나리오를 산출한다. 다섯 번째는 누출 시나리오, 누출 가능한 지점 등을 통해 센서배치를 진행한다. 이때, 센서배치는 목적함수에 따라 센서위치와 센서의 수가 변한다. 여섯 번째는 최적화 진행결과 하나 이상의 센서에 의해 감지 여부를 통하여 재배치 여부를 판단한다. 일곱 번째는 경계면에서 누출 시나리오의 누출농도가 ERPG-2단계보다 낮게 되면 더 높은 위치에 감지가 되도록 재배치를 실시한다. 그리고 여덟 번째는 예상한 누출 시나리오 이외의 지역에서 누출될 가능성이 있기 때문에 강건성 테스트 이후 센서위치 적용과 재배치를 실시한다[13].

3.3 누출 시나리오

누출 시나리오와 formulation을 통한 센서배치의 적절성을 검증하기 위해 case study를 진행하였다. 이때, 염소가 사용되는 공정의 공간크기는 600×550 m로 설정하였다[14]. 이외 여러 가지의 조건은 Table 1과 같다[15].

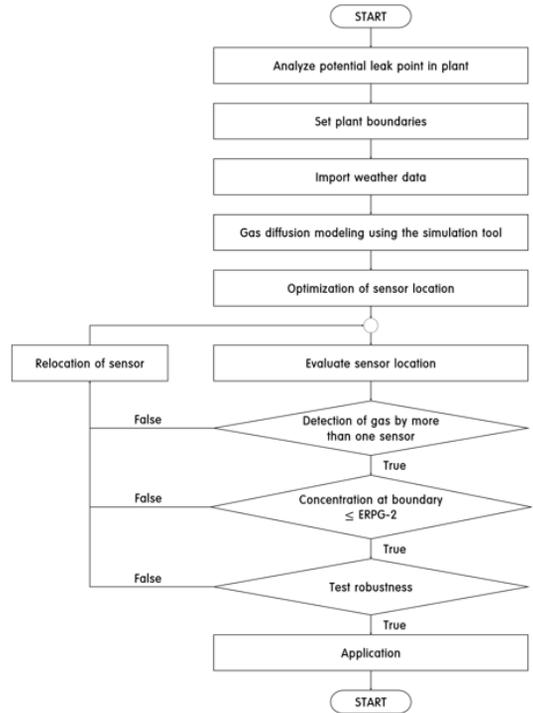


Fig. 3. Flowchart to consider condition of each scenarios.

Table 1. Condition of scenarios

센서 종류	Point
풍속(m/s)	9.64, 8.29, 7.70, 5.32, 2.79, 4.53, 9.11, 5.98
풍향	북, 북동, 동, 동남, 남, 남서, 서, 서북
온도(°C)	25
상대습도(%)	20
물질명	Cl ₂
누출형태	연속누출
누출원의 지름(cm)	15

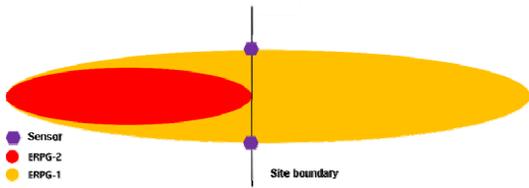


Fig. 4. Sensor placement at light wind.

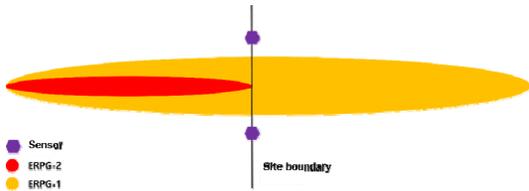


Fig. 5. Sensor placement at high wind.

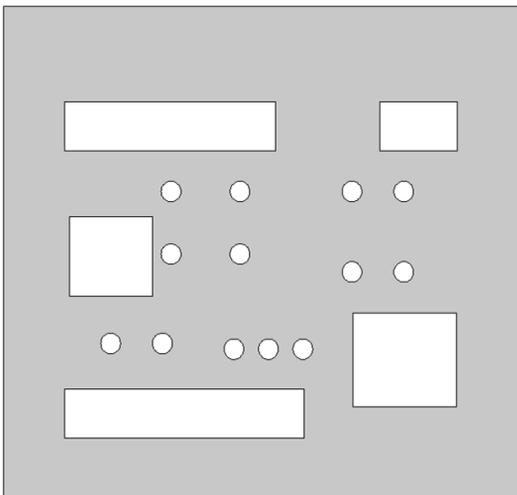


Fig. 6. Geometry of release scenarios.

동일한 양이 누출될 경우 강풍이 약풍보다 확산 폭이 좁기 때문에 Fig. 4와 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 약풍으로 센서 최적화가 진행된 경우에는 강풍일 때 누출물질을 감지하지 못하는 경우가 발생한다. 그러므로 풍속은 사업장의 풍향별 최고 풍속을 이용하였다. 또한 풍향은 동, 서, 남, 북 등 여러 방향이 설정될 수 있으나, 본 연구에서는 8개 방향(북, 북동, 동, 동남, 남, 남서, 서, 서북)으로 설정하였다.

대상공정에서는 Fig. 6에서와 같이 지점 ○에서 Cl₂가 연속적으로 누출되며, 누출원의 지름은 15 cm로 가정하여 시뮬레이션 하였다.

3.4 강건성 분석을 시나리오 조건

경계면의 센서배치 이후 적절한 배치가 이루어졌는지를 확인할 수 있는 강건성 분석을 수행하였다. 이와 같은 강건성 분석을 하는 이유는 여러 사고에서도 볼 수 있듯이 사고 시나리오 이외의 사고형태로 사고가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 강건성 분석에서는 Table 1의 누출조건에서 풍속과 풍향을 Table 2에서와 같이 다르게 설정하였다[16].

IV. 결과 및 고찰

누출시나리오는 COMSOL이라는 CFD를 이용하였고, 208개의 누출시나리오를 도출하기 위해 dual hexa-core Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2639 v2(Clock speed of 2.6GHz and 24GB RAM)를 이용하였으며, 총 연산시간은 시나리오당 30분으로 총 104시간이 걸렸다. 도출된 누출 시나리오에서 남풍에 의한 시뮬레이션 결과는 Fig. 7과 같이 바람장이 형성되는 것을 확인할 수 있었고, 바람에 의한 화학물질의 확산은 Fig. 8과 같이 농도장으로 산출된다.

104개의 누출 시나리오를 이용하여 경계면의 센서배치 최적화를 진행한 결과, 모든 시나리오를 감지할 수 있는 제약변수를 만족하였으며, 누출물질이

Table 2. Condition data for robust analysis

풍속(m/s)	9.36, 7.23, 8.14, 3.13, 5.58, 8.68, 8.80, 6.48
풍향	북북동, 동북동, 동남동, 남남동, 남남서, 서남서, 서북서, 북북서
온도(°C)	25
상대습도(%)	20
물질명	Cl ₂
누출형태	연속누출
누출원의 지름(cm)	15

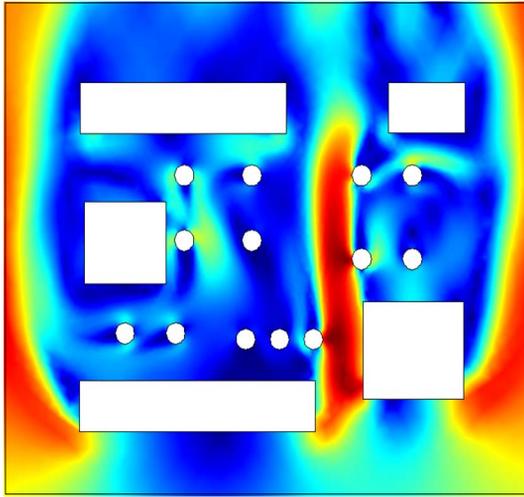


Fig. 7. Wind in target process.

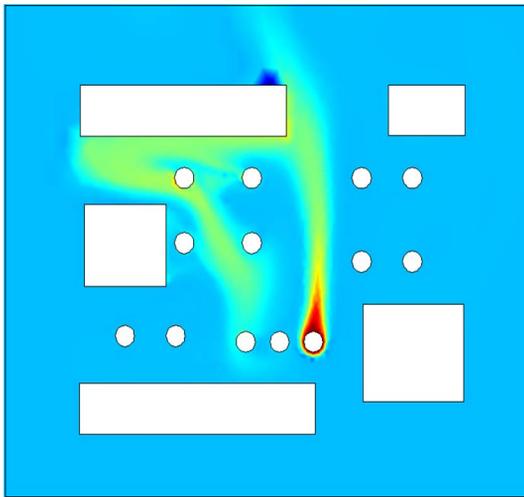


Fig. 8. Concentration in target process.

경계면에 이르는 시간이 있기 때문에 약 180초 이내에서 누출을 감지할 수 있는 센서배치 최적화가 가능하였다. 즉, 경계면에 3개의 센서를 배치하는 경우에는 Fig. 9과 같이 최적화가 이루어졌으며, 이때 평균 감지시간은 173.1초이었다.

그러나 경계면에 배치되는 센서의 수를 증가시키면 평균 감지시간은 다소 감소하여 4개의 센서를 배치하는 경우의 최적 위치는 Fig. 10과 같으며, 이때 평균 감지시간은 169.5초이었다.

또한 5개의 센서를 배치하는 경우에는 Fig. 11과

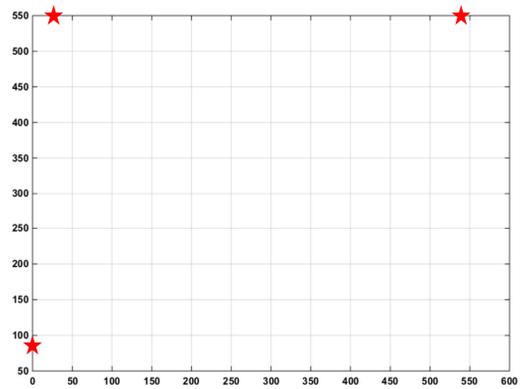


Fig. 9. Locations of three sensors placed by release scenarios in process facility.

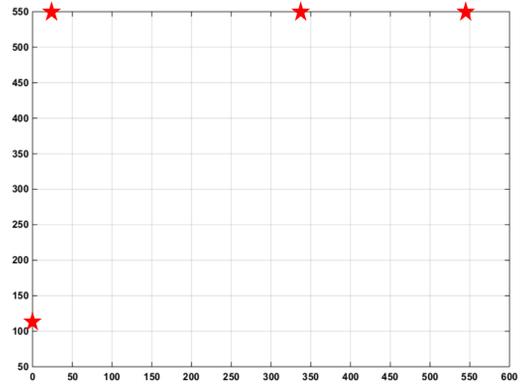


Fig. 10. Locations of four sensors placed by release scenarios in process facility.

같이 센서배치 최적화가 이루어졌으며, 이때 평균 감지시간은 159.9초이었다.

강건성 테스트를 진행한 결과, Fig. 9과 같이 3개의 센서를 최적으로 배치한 경우에는 104개의 누출 시나리오 중 100개 즉, 96.2%의 감지확률을 나타내었으며, Fig. 10과 같이 4개의 센서의 최적 배치에서는 104개의 누출 시나리오 중 103개 즉, 99%의 감지확률을 나타내었다. 또한 Fig. 11과 같이 배치된 5개의 센서에서는 104개의 누출 시나리오 중 104개 즉, 100%의 감지확률을 나타내었다.

따라서 경계면의 최적 센서배치를 통해 누출 시나리오에 대한 감지율이 약 95% 이상을 나타내었기 때문에 현재의 최적 센서배치는 매우 높은 강건성을 가지고 있다고 판단되며, 내부에 설치된 센서와 동시에 감지를 하는 경우에는 거의 모든 누출 시나리

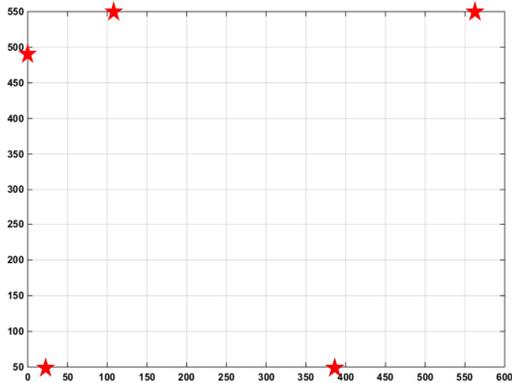


Fig. 11. Locations of five sensors placed by release scenarios in process facility.

오를 감지할 수 있을 것으로 예상된다.

그러나 현재의 대상 시나리오에서는 3~5개의 센서를 이용하여 약 180초 이하의 감지시간을 가질 수 있으나, 사업장 규모와 특성 등에 따라 전기, 통신, 관리실 위치 등을 고려하여 사고발생시 피해비용과 설치비 등의 경제성을 고려할 필요가 있다. 또한 본 연구에서는 2D구조에 의해 공기보다 무거운 가스에 대해 누출 시뮬레이션을 실시하였으나, 기체의 분산 특성과 대기안정도 등을 고려하여 3D구조에서 경계면의 센서배치 최적화에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

V. 결론

본 연구에서는 주변 사업장의 화학물질 누출사고 예방과 대응을 위해 사업장 경계면에서 센서배치 최적화와 강건성 분석을 수행하였다. 이를 위해 104개의 염소가스 누출 시나리오에 대해 CFD를 이용하여 가스분산을 해석하고, 감지시간, 감지율 및 감지농도에 대해 가중치를 부여하여 경계면의 센서배치 최적화를 하였다. 그리고 배치된 센서들의 강건성 분석을 통해 예상하지 못한 사고에 대한 강건성을 분석하였다. 그 결과, 본 대상공정에서는 경계면에 3~5개의 센서를 최적 배치하는 경우에는 약 180초 이하의 평균 감지시간을 나타내었고, 이때 약 95% 이상의 감지율을 나타내었다.

따라서 본 연구에서 제시한 경계면의 센서배치 방법은 드론이나 로봇 탑재와 같이 이동식 센서에서 요구되는 이동경로 최적화 방안 제시 등에 활용이 가능할 것으로 기대한다. 또한 이와 같이 경계면에 설치된 센서는 기존의 고정식 센서와 함께 작동하여

누출원의 역추적이 가능하고, 사고발생 시에는 기존보다 빠른 대응이 가능하여 사고피해를 최소화하는데 크게 도움을 줄 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비 지원(16IFIP-B087592-03)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Choi, J. S., "A Study on the Improvement of Industrial-Environmental Policies for the Development of EIPs in Korea", *Journal of the Korean Urban Management Association*, **15**(1), 87-111, (2002)
- [2] Cho, J. H., Kim, H. S., An, S. H., and Dong, I. S., "Massive CFD simulations of chemical releases and optimal sensor placement for plant boundaries", *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **22**(1), 1223, (2016)
- [3] Dandrieux, A., Dusserre, G., and Ollivier, J., "Small Scale Field Experiments of Chlorine Dispersion", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **15**, 5-10, (2002)
- [4] Jang, S. I., Kim, Y. R., Shin, D. I., Park, K. S., and Kim, T. O., "Assessment of Dispersion Coefficients and Downward Positions of Water Spray for Small Scale Release of Chlorine Gas", *J. of the Korean Institute of Gas*, **19**(1), 51-56, (2015)
- [5] Go, J. S., "Study on the Consequence Effect Analysis & Process Hazard Review at Gas Release from Hydrogen Fluoride Storage Tank", *Journal of the Korea society of Disaster information*, **9**(4), 449-461, (2013)
- [6] Cho, S. H., *A Study On Optimal Sensor location based on Minimax Method With Cost Minimization*, M.S. Thesis, Seoul University, (2014)
- [7] DeFriend, S., Djemek, M., Porter, L., Deshotels, B., and Natvig, B., "A risk - based approach to flammable gas detector spacing", *Journal of Hazardous Materials*, **159**, 142-151, (2008)
- [8] Genserik, R., Senne, C., and Yulia, P., "A game-theory based Multi-plant Collaboration Model (MCM) for cross-plant prevention in a chemical cluster", *Journal of Hazardous Materials*, **209**, 164-176, (2012)
- [9] Han, S. H., *Risk Analysis of Propylene Recovery*

- Unit by Quantitative Risk Assessment*, M.S. Thesis, Myongji University, (2013)
- [10] Kim, Y. R., *Toxic Effect Analysis of Release Accidents of Hydrogen Sulfide in Crude Oil Production Process*, M.S. Thesis, Myongji University, (2016)
- [11] Roy, P. K., Bhatt, A., and Rajagopal, C., "Quantitative risk Assessment for accidental release of titanium tetrachloride in a titanium sponge production plant", *J. of Hazardous Materials*, **102**(2-3), 167-186, (2003)
- [12] Legg, S. W. and Benavides-Serrano, A. J., "A stochastic programming approach for gas detector placement using CFD-based dispersion simulations", *Computers and Chemical Engineering*, **47**, 194-201, (2012)
- [13] Ucinski, D., "Optimal sensor location for parameter estimation of distributed processes", *International Journal of control*, **73**(13), 1235-1248, (2000)
- [14] Miyata, E., and Mori, s., "Optimization of gas detector locations by application of atmospheric dispersion modeling tools", R&D Report, SUMITOMO KAGAKU, v.2011-I, (2011)
- [15] Kim, J. H. and Jung, S. H., "Offsite consequence modeling for HF accidental release scenarios", *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **21**(1), 1176-1179, (2015)
- [16] Kim, Y. S., Lee, S. J., Park, T. K., and Lee, G. B., "Robust leak detection and its localization using interval estimation for water distribution network", *Computers and Chemical Engineering*, **92**, 1-17, (2016)