KIGAS Vol. 20, No. 2, pp 66~71, 2016
(Journal of the Korean Institute of Gas)
http://dx.doi.org/10.7842/kigas.2016.20.2.66

화학물질의 누출에서 빠른 감지를 위한 센서 배치 최적화

조재훈 · 김현승 · 김태옥 · †신동일
명지대학교 화학공학과
(2016년 3월 17일 접수, 2016년 4월 27일 수정, 2016년 4월 28일 채택)

Optimal Sensor Placement for Rapid Detecting in Chemical Leak Accident

Jaehoon Cho · Hyunseung Kim · Taeok Kim · †Dongil Shin
Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea
(Received March 17, 2016; Revised April 27, 2016; Accepted April 28, 2016)

요 약

현재 산업단지에는 수많은 센서로부터 얻는 정보를 이용해 누출 발생지역을 감지·감시하고 있다. 그러나 화학물질 누출사고는 꾸준히 발생하고 있으며, 때에 따라 다량의 화학물질이 누출되는 경우에는 큰 피해가 발생하고 있다. 이때 중요하게 작용하는 센서 배치가 현재까지는 과거의 경험을 통하여 그 결정이 이루어지거나, 또는 센서 제작 업체에서 제시하는 가이드를 통하여 설치되고 있다. 따라서 본 연구에서는 화학물질 누출이 일어났을 때 빠른 감지 및 대응을 위해 가장 중요한 요소인 센서 배치 최적화 방법론을 제시하였다. 특히 공정구조에 따른 누출흐름이 미반영된 상태에서 초기 배치 최적화를 위해 센서 개수 최소화 측면과 화학물질감지확률 측면으로 나누어 일반적으로 사용할 수 있는 수식을 제시하였다. 제시된 방법은 간단한 누출 시나리오를 이용하여 검증을 진행하였고, 이를 통해 각 공정의 안전성 목표치를 성취함으로써 안전한 공정 운영이 가능하도록 하였다.

Abstract - Nowadays, a number of sensors which are placed in industrial complex are monitoring areas involving chemical leak and other faults. However, even in the presence of the sensors, chemical leaks, sometimes involving huge amount of chemicals, continuously led to big losses in the industrial complex. In most industries, sensor installation has been performed using past experience or using senor manufacturers' guideline; which leads to poor performance of the installed sensor grid. Therefore, we investigate an optimal placement methodology of point sensors for rapid detention and response when chemical leaks happen. This research suggests a generalized formulation suitable for the optimized decision making of minimizing number of sensors to be placed and increasing the fraction of covered scenarios under assumption of negligible effect of other structures. The proposed method has been verified for suitable performance for simple leak scenario simulations, by achieving the safety objectives and guaranteeing safe process operations.

Key words : sensor placement, optimization, chemical leak, mathematical modeling

I. 서 론

산업단지는 고도의 자본, 기술 집약적 산업으로서 한 국가의 산업화의 잣대로까지 간주될 수 있는 기간산업이다. 그러나 산업단지에서 화학물질 유출사고로 인명피해와 중요한 시설들이 붕괴되는 문제가 발생하고 있다[1]. 예로써 이천에서 가스 누출로 인하여 13명의 인명 피해가 발생하였고, 청주에서도 반도체의 폐염산수용액 가스 누출이 이루어져 18명의 인명 피해가 발생하였다. 이와 같은 사고의 발생률을 감소시키기 위해 여러 방법을 적용하고 있지만

†Corresponding author:dongil@mju.ac.kr
Copyright ⓒ 2016 by The Korean Institute of Gas

사고는 꾸준히 발생하고 있다. 또한 국내에서는 위험물질을 취급하는 위험설비나 재난 취약시설에 대하여 종합적인 관리시스템이 구축되어 있지 않아 위험요소 제거 및 사고 발생시 초기 대응이 어렵다. 센서 배치에는 여러 제약과 제한 조건이 존재하기 때문에 각 조건에 최적화를 진행하고, 각 공정마다 원하는 목표값을 성취하며, 안전한 공정운영이 되어야 한다[2,3].

따라서 본 연구에서는 공정에 최적의 센서 배치를 통해 누출원을 조기에 감지하고 초기대응을 할 수 있도록 센서 배치 최적화를 하였다. 목적함수 설정을 위하여 시나리오에 적용할 공간을 미세한 격자로 나누어 누출이 이루어질 point와 센서를 설치할 point를 설정해주었고, 이때 센서의 설치는 일반적 방법인 각 장치마다 설치를 기본으로 하였다. 이와 같이 누출 가능성이 높은 곳과 센서 설치 필요성이 높은 위치를 선정한 후 최적의 센서 배치 진행하였다. 그리고 누출원에서 센서까지의 거리, 누출시 센서의 감지시간, 감지확률을 정량적으로 산출하였다. 센서의 설치 수를 한 개부터 최대 가능한 센서 설치까지 증가시키며 분석하고, 이에 따라 감지확률, 감지시간을 각각 분석하였다. 이후 결과를 통하여 감지시간의 최소화, 감지확률의 최대화에 도달하는 최적의 센서 배치를 진행하였다.

Ⅱ. 이 론

누출은 탱크나 파이프의 구멍이나 갈라진 틈 또는 펌프나 벨브, 플랜지의 누출공 등 여러 가지 경로를 통해 유독물질, 가연성물질과 폭발성물질들이 누출되어 큰 사고로 이어지는 경우가 많다. 누출된 화학물질은 독성으로 인한 피해뿐만 아니라 증기운을 형성하여 폭발하는 경우도 있다.

분산모델은 기체상태의 화학물질이 사고지점에서 공장이나 다른 인근지역으로 바람에 전달되는 현상을 설명해 준다. 누출된 후 유독물질은 독특한 plume 또는 puff의 형태로 바람에 의해 멀리 이동한다. 유독물질은 공기로 분산되어 급격히 혼합되기 때문에 농도는 누출원에서 바람에 의해 진행 될수록 저하된다. 여러 가지의 매개변수가 유독물질의 대기 분산에 영향을 주게 된다. 이때의 변수는 바람속도, 대기안정도, 대지조건(빌딩, 물, 나무 등), 누출지점의 높이, 누출된 초기 물질의 부력과 운동량이 있다. 각종 변수들을 통하여 적당한 경계조건과 초기 조건과 함께 분산모델 식을 산출한다. 이러한 모델을 수치적으로 나타내기 위해 많은 모델들이 존재하고 또한 여러 실험적 식으로 표현 된다. 또한 유체의 분산모델을 통하여 정량적으로 유체의 흐름을 예측할 수 있다. 모델식을 이용하여 공간의 구조와 외부조건(풍향, 풍속 등)을 고려한 유체의 흐름에 따른 실질적인 센서 배치가 이루어지면 기존보다 현실적인 센서 배치를 얻을 수 있다[4].

센서 배치는 여러 가지를 고려하게 되고 필수적으로 적용되어야 하는 조건들이 있다[5].

첫 번째, 가스 센서는 누출 가능한 물질의 밀도에 따라 설치 위치를 선정한다. 만약 누출물질 공기보다 무거울 가능성이 높은 지역에는 바닥과 가까운 곳에 센서를 설치한다. 그러나 공기와 같거나 가벼운 밀도를 가진 물질은 천장이나 위쪽으로 센서를 설치한다.

두 번째, 화학물질 중에는 누출되었을 때 증기운을 형성하여 폭발가능성이 있거나, 점화원과 만나 불이 발생할 가능성이 있다. 그러므로 각 물질들을 고려하여 센서를 설치하고 잠재적으로 누출가능성이 있는 지역과 점화원 사이에 센서를 설치한다.

세 번째, 기체는 항상 풍향에 의해 확산 방향이 변하게 된다. 이러한 점을 고려하여 공기 흐름에 따라 가스의 최대농도가 될 만한 지역에 센서를 설치한다.

네 번째, 가스 센서는 작동 가능한 온도범위가 존재하게 된다. 그리고 가스 또한 특정 온도 이상일 때 발화가 되어 폭발로 이어질 가능성이 높다. 그러므로 온도를 고려하여 센서를 설치한다.

다섯 번째, 센서는 주기적으로 유지 보수를 해주어야 하므로 유지보수 비용, 점검 시간을 절감 할 수 있는 위치로 선정한다.

여섯 번째, 센서도 하나의 전자 장비이기에 물에 의한 부식이 이루어지므로 침수 또는 물과 직접 접촉되는 것으로부터 멀리 설치한다.

일곱 번째, 센서 설치 지역에 많은 먼지가 떠있는 경우 센서의 오작동이 발생된다. 이뿐만 아니라 측정데이터가 실제와 다르게 측정될 가능성이 높다. 그러므로 최대한 먼지가 적게 발생되는 곳에 설치한다. 만약 먼지가 많은 곳에 사용이 된다면 먼지 덮개를 이용하여 센서의 오작동을 사전에 방지한다.

Ⅲ. 센서 배치 최적화를 위한 모델링

최적 센서 배치를 위해서는 공간의 구조에 따라 최적화를 진행하는 방법과 누출이 이루어 졌을 때 유체흐름의 방향에 따라 최적화를 진행하는 방법이 있다. 본 연구에서는 누출이 이루어진 상황에 적절한 대응을 위해 유체흐름을 반영한 센서 배치를 진행하였다.

3.1 목적함수

일반적으로 센서의 설치 개수가 증가 할수록 정확하고 빠른 감지가 가능해진다. 가장 확실한 감지를 보장하기 위해서 가스센서를 무수히 설치함으로서 감지 확률을 극대화 시키는 방법을 생각할 수 있으나, 이는 센서 당 감지 효율저하와 설치 개수의 따른 비용증가를 초래하며, 감지가 중복이 되는 문제점이 발생함으로 적절하지 않다[6]. 그러므로 본 연구에서는 센서 수의 최소화, 설치비용 최소화, 감지시간 최소화, 감지 확률 최대화로 각각 목적함수를 정하였다.

3.1.1 센서 수 최소화를 위한 최적화

센서 배치의 최적화 모델에 대한 목적함수를 식 (1a)와 같이 센서 설치 개수 최소화로 하였다. 제약변수로 식 (1b)처럼 최소 설치 기준으로 제시하여 최소한의 센서 설치가 이루어지도록 하였고 식 (1d)에서 감지확률이 100%인 지점에 설치되도록 하였다. 식 (1c), (1e), (1f)는 각 변수들 간의 관계를 나타내었다.

$$\min \sum_{i \in L} y_i \tag{1a}$$

$$\sum_{i \in L} b_i \geq m \tag{1b}$$

$$x_i \leq b_i \ \forall \ i \in \mathcal{L} \tag{1c}$$

$$\sum_{i \in L} x_i = 1 \tag{1d}$$

$$b_i \in \{0,1\} \ \forall \ i \in L \tag{1e}$$

$$x_i \in \{0,1\} \ \forall \ i \in \mathcal{L} \tag{1f}$$

여기서 i는 설치된 센서위치를 의미하며 y_i는 성분 i의 센서 위치를 센서 개수로 표현한 것이다. $L = \{1,2,3,\ldots,N\}$은 센서 설치 가능 지역을 의미한다. b_i는 binary 변수로 센서 설치여부를 의미하며, m(최소 센서 설치 개수)는 센서 설치가능 지역에서만 설치가 된다. x_i는 성분 i의 최초 감지되는 센서 위치이며, $\mathcal{L}$ 는 누출물질 영향을 받는 센서 위치이다.

3.1.2 비용 최소화를 위한 최적화

목적함수는 식 (2a)와 같이 센서 설치비용 최소화로 하였다. 제약변수로 식 (2b)처럼 최소 설치 기준으로 제시하여 최소한의 센서 설치가 이루어지도록 하였고 식 (2d)에서 감지확률이 100%인 지점에 설치되도록 하였다. 식 (2c), (2e), (2f)는 각 변수들 간의 관계를 나타내었다.

$$\min \sum_{i \in L} y_i C \tag{2a}$$

$$\sum_{i \in L} b_i \geq m \tag{2b}$$

$$x_i \leq b_i \ \forall \ i \in \mathcal{L} \tag{2c}$$

$$\sum_{i \in L} x_i = 1 \tag{2d}$$

$$b_i \in \{0,1\} \ \forall \ i \in L \tag{2e}$$

$$x_i \in \{0,1\} \ \forall \ i \in \mathcal{L} \tag{2f}$$

여기서 C는 센서 설치비용을 의미한다.

3.1.3 감지시간 최소화를 위한 최적화

목적함수는 식 (3a)와 같이 센서 설치의 감지시간 최소화이다. 제약변수로 식 (3b)처럼 최대 설치 기준을 제시하여 무한정 설치되는 것을 방지하였고 식 (3d)에서 감지확률이 100%인 지점에 설치되도록 하였다. 식 (3c), (3e), (3f)는 각 변수들 간의 관계를 나타내었다.

$$\min \sum_{i \in L} y_i t_i \tag{3a}$$

$$\sum_{i \in L} b_i \leq M \tag{3b}$$

$$x_i \leq b_i \ \forall \ i \in \mathcal{L} \tag{3c}$$

$$\sum_{i \in L} x_i = 1 \tag{3d}$$

$$b_i \in \{0,1\} \ \forall \ i \in L \tag{3e}$$

$$x_i \in \{0,1\} \ \forall \ i \in \mathcal{L} \tag{3f}$$

여기서 t_i는 성분 i의 감지시간을 의미하며, M은 최대 센서 개수를 의미한다.

3.1.4 감지확률 최대화를 위한 최적화

목적함수는 식 (4a)와 같이 감지확률 최대화이다. 제약변수로 식 (4b)처럼 최대 설치 기준을 제시하여 무한정 설치되는 것을 방지하였고 식 (4d)에서 감지확률이 100%인 지점에 설치되도록 하였다. 식 (4c), (4e), (4f)는 각 변수들 간의 관계를 나타내었다.

$$\max \sum_{i \in L} y_i P_i \tag{4a}$$

$$\sum_{i \in L} b_i \leq M \tag{4b}$$

$$x_i \le b_i \ \forall \ i \in \mathcal{L} \quad (4c)$$

$$\sum_{i \in L} x_i = 1 \quad (4d)$$

$$b_i \in \{0,1\} \ \forall \ i \in L \quad (4e)$$

$$x_i \in \{0,1\} \ \forall \ i \in \mathcal{L} \quad (4f)$$

여기서 P_i는 성분 i의 감지확률을 의미한다.

3.2 센서 배치 최적화를 위한 플로우차트

최적의 배치설정을 위하여 여러 가지의 조건들을 고려하기 위해 Fig. 1과 같이 flowchart를 제시하였다[9,10]. 첫 번째로 기체 확산 모델을 선정 후 simulation tool을 이용하여 기체 확산 모델링을 진행한다. 이 결과 기체의 양, 폭발가능 범위(증기운 형성), 풍속, 물질의 독성 등 기체의 특성을 분석 할 수 있다.

두 번째, 감지할 누출물질에 따라 다양한 센서 종류와 감지 범위를 정한다.

세 번째, 누출 가능성이 높은 지점을 분석한다. 예를 들어 파이프는 파이프간의 연결 부분에서 누출가능성이 아주 높고 하나의 파이프에서 파열로 인하여 누출될 가능성이 극도로 낮다.

네 번째, 누출 simulation, 센서의 감지 가능한 농도, 누출 가능한 지점을 통해 센서의 배치를 진행한다. 이때 센서 배치는 목적함수에 따라 센서의 위치, 센서의 수가 변한다.

다섯 번째, 최적화 진행결과 하나 이상의 sensor에 의해 감지 여부를 통하여 적용 및 재배치를 실시한다.

3.3 누출 시나리오 선정

시나리오를 통하여 formulation을 검증하기 위해 Flacs에서 제공하는 시나리오에 적용하였다[11]. 염소가 사용되는 공정으로 공간의 크기는 20x22.5m로 설정되고 이때 3가지의 가정을 통해 시나리오를 간단히 하였다.

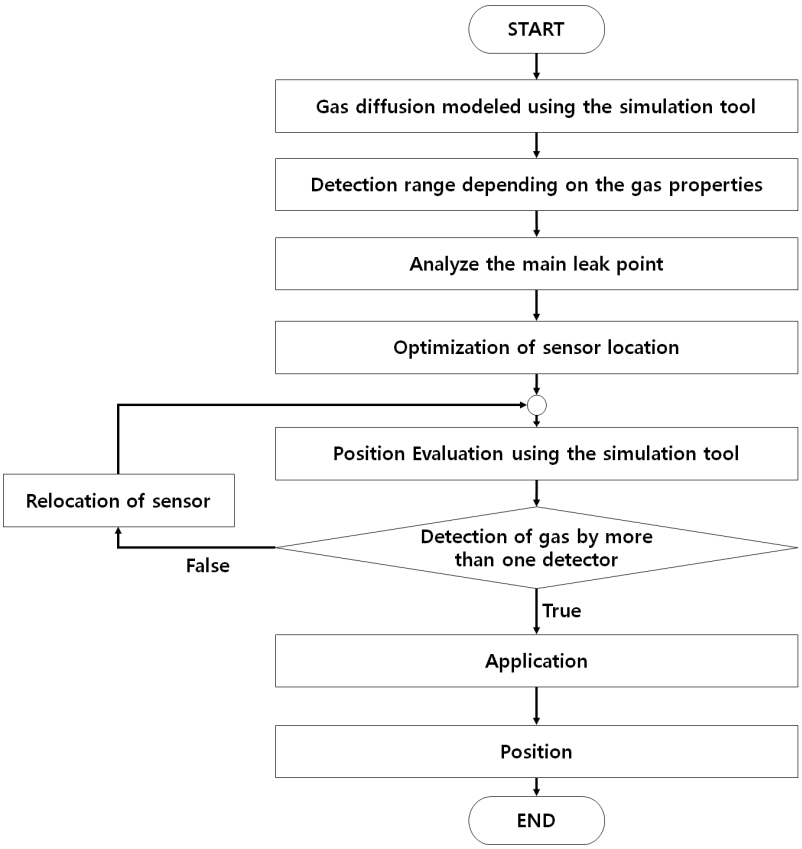

Fig. 1. Flowchart to consider condition of each scenarios.

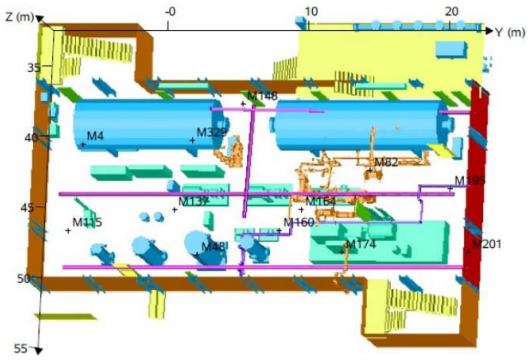

Fig. 2. Geometry of release scenarios.

가정1 : 유체는 좌측 상단 계단에서 우측 하단 계단으로 흐른다.
가정2 : 유체는 구조물에 의한 영향을 받지 않는다. 즉 누출을 구조물에서 일어나지만 구조물이 없는 평면상태로 가정한다.
가정3 : +로 표시된 곳이 센서 설치가 필요한 지역이면서 누출 가능성이 높은 지역이다.

각 점마다 유체흐름을 농도 분포로 나타내어 센서의 감지 확률을 설정하였다. 또한 누출원으로부터 센서간의 거리를 유체의 이동속도로 고려하여 감지시간도 설정하였다. 이를 통해 각 목적함수별 결과값을 산출하였다.

IV. 결과 및 고찰

기존의 센서배치 방법으로 센서 개수를 변화시켜가면서 감지확률 변화를 그래프로 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 센서의 수가 증가할수록 감지확률이 높아진다. 또한 센서 수가 10개에서 약 100%의 감지확률을 보인다. 즉 누출이 일어날 가능성이 높은 지역에 센서가 모두 설치되었을 때 100% 감지가 가능하다는 결과이다.

그러나 최적의 센서 배치를 통해 센서 감지확률을 산출한 결과 Fig. 4 그래프와 같이 단 두 개만의 센서로 100%의 감지확률을 가진다.

감지시간 기준에서는 많은 센서를 설치하여 누출원과 센서간의 거리를 최소화하는 것이 좋다. 센서 수에 따라 감지시간은 Fig. 5와 같이 센서의 수가 증가할수록 감지시간이 감소하는 것을 볼 수 있고 12개 이상부터는 일정한 값을 가지게 된다. 이러한 이유는 감지시간이 최소가 되는 지점에 센서가 모두 설치되었고 더 이상의 센서 설치는 감지시간이 최소가

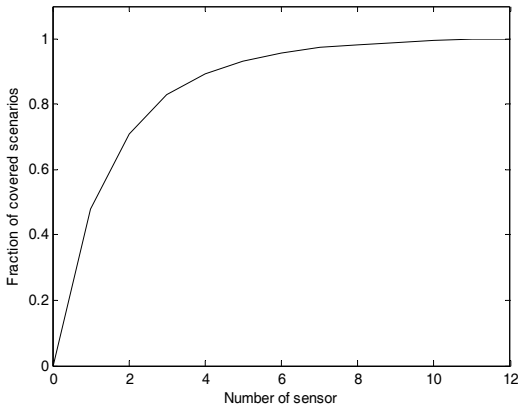

Fig. 3. Detecting fraction of general sensor placement.

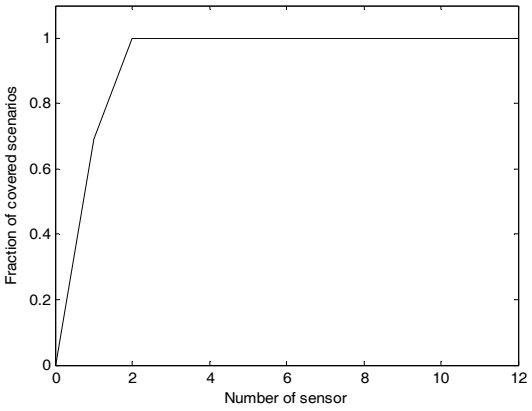

Fig. 4. Detecting fraction of optimal sensor placement.

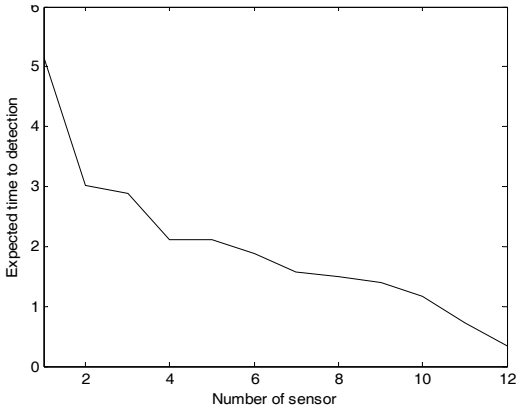

Fig. 5. Expected time of optimal sensor placement.

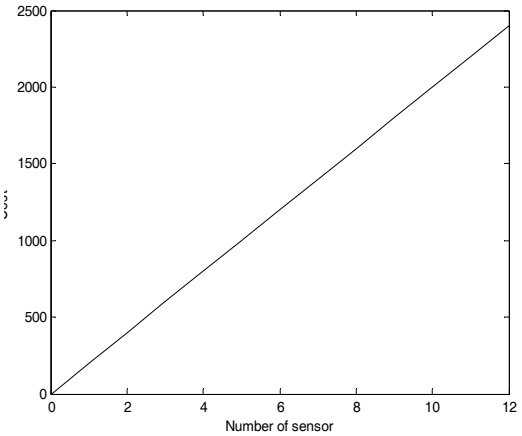

Fig. 6. Cost of optimal sensor placement.

되는 지점 이외 지역에 설치가 되기 때문이다.

마지막으로 센서 설치 수 증가에 따라 비용 그래프는 Fig. 6과 같다. 센서의 설치 개수가 늘어날수록 가스 감지확률은 증가하지만 경제적 측면에서 비효율적이고 센서의 설치비용이 증가하는 결과를 초래한다. 또한 설치비용은 설치 지역에 따라 변화하도록 적용하여 최적 값이 되도록 한다.

V. 결 론

적절한 감지시간으로 고려해야 할 사항은 시나리오의 구조물이 폭발, 화재 등으로부터 견딜 수 있는 시간, 화학물질 누출 시 작업자가 피해를 입기 전 저농도 화학물질 유출상황에 안전하게 대피 할 수 있는 시간 등이 있다. 또한 받아들일 수 있을 만큼의 충분한 감지시간인가를 판별하는 것도 중요하다. 이런 문제점을 풀기 위해 여러 방법 중 하나의 방법으로 증기운 형성 이전 가스를 감지하는 것이다. 가스폭발은 일정 농도를 가진 기체가 모여 증기운을 형성 후 폭발이 이루어지기 때문이다. 그러므로 증기운을 형성되기 이전에 가스를 감지가 되는 위치, 시간 등을 고려하면 보다 안전하고 센서 최적 배치에 도움이 될 것이다. 최종적으로 이외의 여러 영향을 고려하여 각 공정에 최적화된 센서를 설치가 이루어진다면 각 기업체 추구하거나 법률에 제시된 기준치를 만족하는 안전한 공정 운용이 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국민안전처 사회재난안전기술개발사업의 일부로 '유해화학물질 효과적 대응을 위한 방재기술연구' 과제[NEMA-인적_2014-41]의 지원을 받아 수행되었기에 감사드립니다.

REFERENCES

[1] Park, M. N., *A Comparative Study on Models and Simulation Systems of Accidental Gas Explosion*, M.S. Thesis, Myongji University, (2005)

[2] Sam, M., *Lees' Process Safety Essentials:Hazard Identification, Assessment and control*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, Amsterdam, (2014)

[3] Jack, C., *Hazardous Gas Monitors: A Practical Guide to Selection, Operation and Applications*, 1st ed., McGraw-Hill, New York, (2000)

[4] Daniel, A. C. and Joseph, F. L., *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*, 3rd ed., Prentice Hall PTR, Boston, (2011)

[5] Vid, Y., *Gas Detection Handbook*, 15th ed., MSA The Safety Company, (2007)

[6] Cho, S. H., *A Study On Optimal Sensor lacation based on Minimax Method With Cost Minimization*, M.S. Thesis, Seoul University, (2014)

[7] Legg, S. W. and Benavides-Serrano, A. J., "A stochastic programming approach for gas detector placement using CFD-based despersion simulations", *Computers and Chemical Engineering*, **47**, 194-201, (2012)

[8] Benavides-Serrano, A. J. and Mannan, M. S., "A quantitative assessment on the placement practices of gas detectors in the process industries", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **35**, 339-351, (2014)

[9] Ucinski and Dariusz, "Optimal sensor location for parameter estimation of distributed processes", *International Journal of control*, **73**(13), 1235-1248, (2000)

[10] Cevriye, G., "Chemical agent detector placement methodology", *Applied Mathematics and Computation*, **195**(2), 542-557, (2008)

[11] Scott, D., Olav, R. H., Filippo, G., and Are, B., "Using CFD to Analyze Gas Detector Placement in Process Facilities", Mary Kay O'Connor Process Safety Center Symposium 2011, International Process Safety Symposium 2011, (2011)