



사전감지를 목표로 한 화학물질 누출 모니터링 시스템 개발 및 구현

조민선 · †조규선* · 김대곤** · 오일환

호서대학교 일반대학원 안전행정공학과 박사과정

*호서대학교 일반대학원 안전행정공학과 교수

**호서대학교 일반대학원 안전행정공학과 박사수료

(2024년 3월 14일 접수, 2024년 7월 2일 수정, 2024년 9월 14일 채택)

Development and Implementation of a Chemical Leak Monitoring System Aimed at Pre-detection

Min-Sun Cho · †Gyu-Sun Cho · Tae-gon Kim · Il-Hwan Oh

Dept. of Safety and Administrative Engineering, Hoseo University

(Received March 14, 2024; Revised July 2, 2024; Accepted September 14, 2024)

요약

2012년 9월에 발생한 구미 불산 누출 사고에서 5명의 근로자가 사망하는 비극이 발생했고 이 사건은 산업안전보건법 개정의 계기가 됐다. 이후, 산업 안전과 화학물질 관리에 대한 법적 규정이 강화됐다. 하지만 환경부에서 발표한 자료에 의하면 과거 8년 화학물질 기인 사고가 총 638건이며, 특히 2019년부터 2022년까지 연간 평균 사고 발생이 73건을 유지하고 있어 담보 상태임을 확인했다. 8년간의 사건은 누출 510건, 폭발 50건, 화재 41건, 기타 37건이 있었으며, 특히 누출 사고가 전체 사고 중 80%를 차지하여 가장 높은 비중을 보였다. 이 중 반도체 및 디스플레이 공장과 같은 장치산업에서는 31건의 누출 사고가 발생했으며, 이러한 사고 중 일부는 사망사고로 이어졌다는 사실이 확인돼 이를 연구 대상으로 선택했다. 장치산업의 증착, 식각과 같은 공정에서 사용되는 물질 중 대다수가 독성을 가진 유해화학물질로 누출 사고의 빈도와 강도가 높은 환경이다. 본 연구는 유해화학물질 계통의 공급과 사용량의 차이를 연구하여 "누출(Leak)" 사전 감지 로직을 적용했고 다음으로 계통별, 설비별 최적 시간을 연구하여 "과충적(overflow)" 사전 감지를 적용했다. 이 연구는 변위의 근원을 추적하는 기술을 연구하여 사전에 취약점을 예측하고 조치를 통해 대형 사고예방을 목적으로 한다.

Abstract - In September 2012, a tragedy occurred in which five workers died in a hydrofluoric acid leak in Gumi, and this incident became an opportunity for the revision of the Occupational Safety and Health Act. However, according to the data released by the Ministry of Environment, a total of 638 accidents caused by chemical substances have been reported over the past eight years, and in particular, 73 accidents have been maintained annually from 2019 to 2022, confirming that it is in a state of stagnation. This study applied "Leak" pre-sensing logic by studying the difference in supply and use of hazardous chemical systems, and then "overflow" pre-sensing was applied by studying the optimal time by system and facility. This study aims to predict vulnerabilities in advance by studying technologies that track the source of change and to prevent large-scale accidents through measures.

Key words : hazardous chemicals, leaks, overflow, detection

†Corresponding author:sun104@samsung.com

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

1.1. 연구 배경 및 목적

장치산업에서의 유해화학물질 누출 사례 중 2020년 3월에 A 업체에서 발생한 것으로 이 사건은 운영 중이던 디스플레이 세정 설비에서 약품 레벨을 조절하는 자동 밸브의 기능 상실로 지속적으로 개방된 현상이 발생했다. 약품이 Overflow 배관을 통해 폐수로 약 7시간 동안 방출됐으며, 폐수의 화학적 산소요구량이 최대 6배까지 상승하는 사고가 발생했다. 두 번째 사례는 2021년 4월에 발생한 B 업체의 사고로 수산화테트라메틸암모늄 400리터가 유출돼, 6명이 부상을 입었고 2명은 의식을 잃는 등 심각한 상황이 발생했다. 현재 시스템에는 Overflow로 인한 문제와 물질이 외부로 유출되는 경우에 대응하기 위해 유출 감지 센서도 도입된 상태다. 해당 센서는 누출이 발생할 경우 알람을 울려 현장에서 조치를 취하도록 설계됐다. 그러나 유출 감지 센서는 물질이 닿아 물리적으로 감지되고 확산된 후 이를 확인할 수 있다는 한계가 있다. 따라서 실제 누출 사건이 발생한 시점보다 시간이 지연될 수밖에 없다. 유출 감지 센서가 동작 전 전조 현상을 감지하고 신속하게 대응하는 것을 목표로 하고 있다. 또한, 누출 사고에 종합적으로 인지, 점검, 조치, 그리고 재발 방지까지의 체계를 확립하여 유사한 사고가 발생하지 않도록 예방하는 데 중점을 두고자 한다.

1.2. 연구 방법

유해화학물질에 대한 변경 사항을 확인하기 위해서는 해당 물질이 시스템을 통해 가공되고, 공급되고, 사용하며, 배출될 때까지의 전 공급 체계 및 사용량 물질수지(Mass Balance)의 체계적인 정리가 선행되어야 한다. 1단계는 정상과 비정상 상태를 명확히 정의하고, 2단계에서는 유출 사례를 기반으로 한 개선 방향성을 수립하고자 한다. 3단계에서는 재발 방지를 목적으로 이상 사례의 발생, 즉시 조치 및 대책을 수립하고 적용해 최종 승인하는 단계로 구성된 관리체계를 구축하려 한다.

II. 선행 연구

2.1. 연구 범위 선정

2012년 9월에 발생한 구미 불산 누출 사고를 고려해 본 연구는 디스플레이 생산 과정 중 화학적 세정을 위해 불산과 물을 혼합하여 산화막을 제거하는 WET 공정을 중점적으로 다룬다. 더불어, 연구 대상으로 선정된 WET 공정을 중심으로, 타 공정에 개선 사항을

공유해 연구 범위를 확장할 것이다.

2.2. 사용 실태 분석

A 업체는 디스플레이 생산에 총 15종의 유해화학 물질을 사용하고 있으며, 건물 내 4개 층에 분포된 배관을 통해 이송된다. 물질 수지(Mass Balance) 분석 결과, 총 37개의 공급 계통과 85대의 설비에서 사용 중이다. 또한 외부에서 공급되는 유해화학물질은 저장 탱크에 축적되며, 펌프를 활용해 배관의 유량계를 거쳐 각 계통으로 중앙 공급된다. 이 중앙 공급 방식은 공급 계통의 플랜지 또는 접합부의 누출로 인해 공급 계통에서 화학물질의 공급량과 사용량 사이에 차이가 발생할 수 있다. 따라서 그림1과 같이 화학물질 양적 변화를 바탕으로 (a) 정상, (b) 비정상 현상을 누출(Leak)로 정의했다.

또한 사용처의 현황 조사 결과, 중앙 공급 방식으로 전달된 화학물질은 해당 생산 장비 내부에 설치된 저장 탱크에 적절한 레벨로 축적되며, 화학물질이 필요한 단계에 도달하면 자체 순환 펌프가 가동돼 제품에 분사된 후, 자유 낙하 방식으로 회수하는 구조다. 따라서, 생산설비의 저장 탱크에 화학물질이 채워질 때 그림2와 같이 자동 개폐 정도 설정시간에 따라 (a) 정상, (b) 비정상 현상을 과축적(Overflow)으로 정의했다.

이처럼 누출(Leak) 및 과축적(Overflow) 두 가지 유형의 이상 감지를 개발해야 하며, 이렇게 개발된 시스

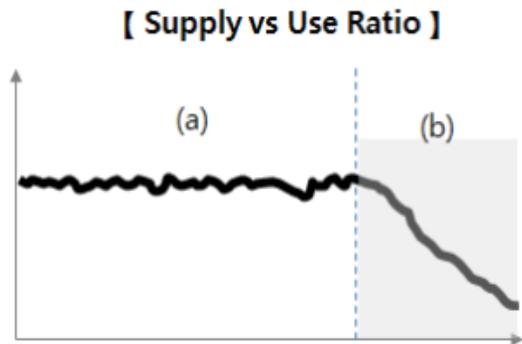


Fig. 1. Quantitative Change in Matter.

(a) Normal : Use ÷ Supply = 1.0 ~ 0.9

When there is a slight change in the supply or usage of a substance.

(b) Abnormal : Use ÷ Supply = 0.8 ~ 0.1

When the amount used appears to be less than the amount supplied.

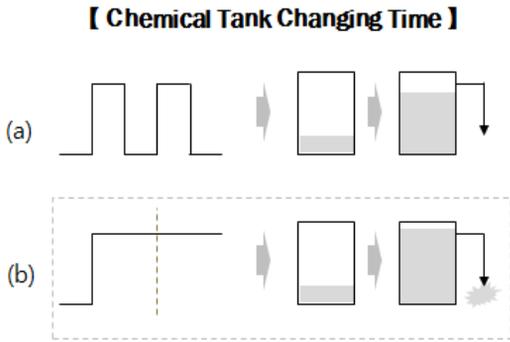


Fig. 2. Changes in automatic valve opening time.

- (a) Normal : Valve On Time Constant. When the ON time of the automatic valve is constant without change.
- (b) Abnormal : Valve On Time Change. When the ON time of the automatic valve increases.

템은 이상 발생 시 빠른 감지를 통해 조치할 수 있는 시간을 확보하고, 담당자에게 신속하게 알릴 수 있는 긴급 시스템이 필요하다는 것을 확인할 수 있다.

III. 연구 및 개발

3.1. 누출(Leak) 이상감지 개발

37개의 공급 계통 및 85대의 사용 설비에 회귀 분석을 진행한 결과, 15개의 계통에서 결정 계수가 0.95로 높게 확인됐다. 이는 화학물질의 공급량과 각 설비의 사용량 관계를 증명한다. 높은 결정 계수는 회귀 모델이 데이터를 효과적으로 설명하고 예측한다는 사실을 시사하며, 이는 해당 15개의 계통이 공급량 및 사용량 간의 관계가 일관적이라는 것을 의미한다. 나머지 22개의 계통에 대한 회귀 분석 결과는 결정 계수가 0.22에서 0.57로 낮게 나타났다. 이는 해당 계통들의 화학물질 공급량과 사용량 간의 관계가 불일치하거나 예측하기 어렵다는 것을 시사한다. 낮은 결정 계수의 원인으로 확인된 정합성 문제에 대한 분석 결과, 첫째는 공급 계통과 설비 연결 정보의 오류였다. 이 경우는 18개의 계통에서 확인됐다. 둘째는 사용 설비에서 유량계의 매개변수가 누락된 경우로, 이는 2개의 계통에서 확인됐다. 셋째는 공급처의 공급량 단위와 사용처의 사용량 단위가 상이한 경우로 2개의 계통에서 확인됐다.

세 가지 원인을 해결한 결과, 그림3과 같이 전체 37개 공급 계통의 결정 계수가 0.94로 향상됐다. 표1에서 나타난 1,939개의 데이터를 분석한 결과 공학 결정 계수의 신뢰기준 0.7 보다 높아 신뢰성이 있음을 확인했다. 이 작업은 약 11개월 동안 진행됐고, 이는 정합성

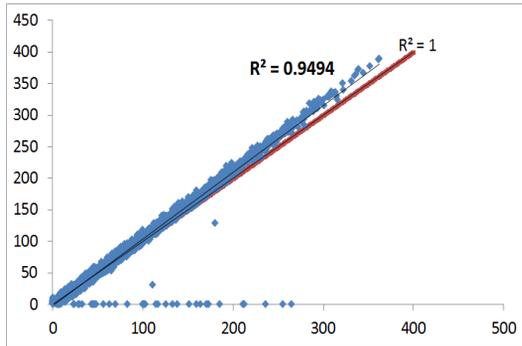


Fig. 3. Regression analysis results graph.

The higher the correlation, the closer it is to 1.

Table 1. Regression Analysis Results.

Regression analysis	
multiple correlation coefficient	0.974393941
coefficient of determination	0.949443552
sample	1939

The coefficient of determination is 0.94 and satisfies the engineering standard of 0.7 or higher. (Coefficient of determination confidence standard: Bio 0.95, Engineering 0.7, Social Science 0.3)

Table 2. Leak Sensing Normal & Abnormal Results.

Line	Supply	Σ Use	Result	Detection
A	350	310	0.9	Normal
B	110	100	0.9	Normal
C	100	95	1.0	Normal
D	100	98	1.0	Normal
E	680	198	0.3	Abnormal
F	450	415	0.9	Normal
G	230	222	1.0	Normal
H	170	175	1.0	Normal
I	1256	1198	1.0	Normal
J	1632	1587	1.0	Normal
K	556	510	0.9	Normal

"Line E" was detected as abnormal with usage exceeding supply at 30%.

Table 3. Overflow Sensing Setting Time

Line	Chemical	Use	Set time (sec)
A	HF	CVC01S_CLNU	310
	LCS-1000	STR01F_STRU	310
	FMA-11A	WET01S_WETU	310
	DC-9	INI01S_CLNU	310
B	TMAH	PHTU_DV01	400
	JPT-900	PHTU_AC01_AC01	380
	CD-150DW	PHTU_DV01_DV01	380
	EST-3070	PHTU_AC01_AC01	380
	HMDS	PHT01S_PHTU_DB01	380
C	NMP	PIC03S_COTU_LC01	200
D	OMEC-S19	CLM01D_CLMU	300
	NMP	CLM02D_CLMU	300
	EL-AEA	CLM03D_CLMU	300

The detection time was set according to the characteristics of each line.

문제를 해결하고 데이터의 일관성을 확립하는 작업이 제대로 이뤄졌으며, 더 나은 모델을 정확히 예측한다는 데에 시사점이 있다. 이제 데이터의 품질과 신뢰성이 향상됐으며, 효과적인 운영과 모니터링이 가능할 것으로 판단된다. 다음 단계로 이상 감지 기준선 선정은 계통별 사용량의 특성과 과거 사고를 참조하여 0.9에서 0.1까지 데이터를 기반으로 시험해 본 결과, 0.8이 적합한 것을 알 수 있다. 즉 공급량과 사용량의 차이가 20% 발생 시 누출 기준으로 설정했다. 표2는 “계통 E”의 차이가 71% 발생으로 비정상을 확인한 결과이다. 시스템 기반 변경점에 대한 이상 상황 감지를 위해 기준선 정보를 시스템화해 실시간 이상 감지부터 조치까지 관리체계로 구현했다. 따라서 변경점의 이상 여부를 신속하게 감지하고 조치할 수 있는 효과적인 시스템을 마련했다.

3.2. 과속적 (Overflow) 이상감지 개발

중앙 공급을 통해 제공된 화학물질은 해당 설비의 내부 저장 탱크에 축적되며, 해당 약품은 자체 공급 펌프를 활용해 생산 제품에 스프레이 형태로 분사된다. 저장 탱크의 수위가 감소하면 약품 자동 밸브가 열려 설정된 수위까지 자동으로 채워지는 방식이다. 약

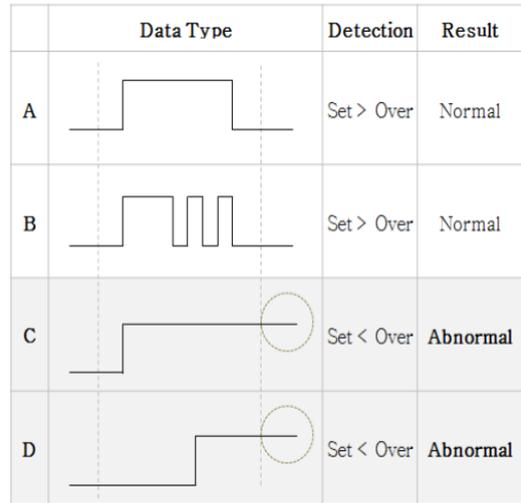


Fig. 4. Overflow Data Type Analysis.

(A/B) Normal : Valve On Set Time Satisfaction Satisfied that the valve closes within the set time.

(C/D) Abnormal : Valve On Set Time Not Satisfied. The valve operates longer than the set time.

품을 채우는 데 걸리는 시간은 공급 계통의 복잡성에 따라 달라진다. 단일 공급 계통의 경우 일반적으로 100초가 소요되며, 2~3개의 복합 계통에서는 150초가 소요된다. 4개 계통의 경우에는 소요 시간이 300초에서 400초까지 증가했다. 이러한 정보는 약품 공급 프로세스의 다양성과 소요 시간의 특성을 나타내며, 생산 시스템의 효율성을 고려할 때 중요한 정보로 활용될 수 있다. 여러 조건에서 테스트한 결과, 이상 감지 기준선을 일반적으로 소요되는 시간 대비 2배로 설정할 때 오차가 가장 적게 나타났다.

이를 토대로 최적화 작업을 진행해, 표3은 계통별, 설비별 약품공급 설정으로, 단일 공급 계통의 경우 200초, 2~3개의 복합 계통은 300초, 4개 이상의 계통은 계통별 소요 시간에 맞게 대상 설비 85대에 대한 설정을 완료했다. 누출 이상 감지와 같이 시스템 기반 변경점에 대한 이상 상황을 감지하도록 기준 정보를 시스템화, 조치까지를 실시간 관리체계로 구현했다. 이를 통해 변경점이 감지되면 신속하게 대응하고 조치해 누출로 이어질 수 있는 위험을 최소화했다.

IV. 결론

유해 화학물질을 사용하는 A사 디스플레이 사업장 37계통에 공급과 사용량 차이가 20% 발생시 “누출

(Leak)" 이상감지 로직을 반영하였고 설비별 약품 공급 시간을 설정하여 설정된 기준 이내 밸브가 동작하지 않으면 "과축적(overflow)" 이상감지 로직도 적용을 완료 했다. 유해 화학물질 누출 전 이상을 감지할 수 있는 관리체계를 구축한 이후, 약 6개월 동안 이상이 감지된 사례는 11건으로 확인됐다. 이 11건 중 10건은 이상감지 설정의 최적화 미흡으로 발생했고, 1건은 약품 탱크 수위 감지 센서 고장으로 과축적(Overflow) 로직의 이상이 감지됐다. 이러한 사례들은 이상감지 설정의 최적화를 통해 계통 특성에 맞는 설정의 중요성을 시사하고, 센서 고장과 같은 기술적 문제에 대해 신속하게 대응해 연구 목적인 화학물질 누출로 인한 사고로 이어지는 현상을 예방할 수 있다.

또한 누출(Leak)과 과축적(Overflow)의 이상 감지를 표준화하고, 이를 기반으로 많은 종류의 유해화학물질을 사용중인 반도체 또는 유사 분야에 적용된다면 유출 사고를 예방하는 데 상당한 효과가 기대된다. 이를 통해 지속 가능한 환경 관리 및 안전한 생산을 위한 효과적인 전략을 마련해 환경 영향 및 안전성을 향상하는 데에 기여할 수 있다. 추후 가상센서를 활용하거나 유량계를 추가 설치하여 데이터 확보를 통한 고도화 작업이 해결해야 할 과제다.

REFERENCES

- [1] Lee, S. S., "A study on the necessity of proactive responses and improvement of responsiveness to chemical accidents at business sites", Korea National University of Transportation, Korea, (2018)
- [2] Park, Y. G., "Evaluation of Hazardous Chemical Leakage Accident in Industrial Complex", Kumoh National University of Technology, Korea, (2015)
- [3] Kim, J. S., Kim, J. S., "A Study on the Hazardous Chemical Leakage Evaluation System", Keimyung University, Korea, (2003)
- [4] Choi, J. S., "A study on the effect of the initial response on the damage of hydrofluoric acid leakage accidents in Gumi using system dynamics", Seoul National University of Science and Technology, Korea, (2018)
- [5] Chae, S. W., Seo, J. S., Kim, J. S., "The Development of Real-Time Leak Monitoring System for Management of Hazardous Material Pipeline", *Korean Society of Disaster Information*, 12(2), 122-129, (2016)
- [6] Kim, B. S., Ryu, B. T., Kim, M. S., Jang, C. B., Ko, J. W., "A Study on the Development of Safety Management System for Harmful Chemical Substance Accident", *Korean Journal of Hazardous Materials*, 1(1), 33-38, (2013)
- [7] Lee, T. H., Park, J. D., Lee, S. J., Bang, B. S., Kim, K. P., Kim, M. S., Park, J. S., "Characteristics of chemical substance accident in Korea", *Korean Journal of Hazardous Materials*, 3(1), 37-41, (2015)
- [8] Kim, K. J., Lee, J. S., Yoon, Y. S., Jung, M. S., Yoon, J. H., Seok, K. S., "A study on the characteristics of production and using for acidic chemicals with high accident frequency". *Korean Journal of Hazardous Materials*, 2(1), 1-5, (2014)
- [9] Oak, Y. S., Lee, Y. S., "A Study on Improvement of Legal System for Harmful Chemical Substance Response Management System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 18(4), 216-223, (2017)
- [10] Park, M. N., Kim, C. W., Kim, T. O., Shin, D. I., "Mobile Robot-based Leak Detection and Tracking System for Advanced Response and Training to Hazardous Materials Incidents", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 23(2), 17-27, (2019)
- [11] Ministry of Environment, 반도체 업종 맞춤형 유해 화학물질 취급시설 기준 시행. URL: <https://eiec.kdi.re.kr/policy/materialView.do?num=233352&topic=&pp=20&datecount=&recommend=&pg>, (2022)
- [12] Lee, S.J., "A study on the advancement of safety management for preventing chemical accidents" Korea Myongji University, Korea, (2020)
- [13] Lee, D.J., Song, C. G., "A Study on the Improvement Plan to Prevent Violent Incidents by Domestic Hazardous Chemical Substance", Korea Incheon National University, Korea, (2017)
- [14] Jeong, B.G., "Study of chemical accident initial response based on Consequence Analysis", Korea Pukyong National University, Korea, (2015)
- [15] Park, S.Y., Yim, J.P., "Consideration on Design and Management of Flexible Hose through the Case Study of Chlorine Leak", *Korean Chemical Engineering Research*, 57(3), 351-357, (2019)
- [16] Son, T.E., "Study on Dispersion Model for Initial Consequence Analysis of Chemical Release", Korea Pukyong National University, Korea, (2021)
- [17] Oh, J. S., Hyun, J. I., Bang, H. J. "A Study on Smart Real-time Atmospheric Dispersion System

사전감지를 목표로 한 화학물질 누출 모니터링 시스템 개발 및 구현

- Institute of Gas Safety R&D", Korea Gas Safety Corporation, Korea, (2012)
- [18] Park, N.J., Lee, H.W., Y, H.K., "Implementation of Sensor Controller and Monitoring System Using Film Type", *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, 12(1), 51-57, (2013)