



실시간 위험지도 시스템을 위한 위험분석 기법 개발

박상배 · 이창준* · 주유경 · †오정석

한국가스안전공사, *부경대학교 안전공학과 교수
(2020년 4월 6일 접수, 2020년 6월 11일 수정, 2020년 6월 12일 채택)

Developing Risk Analysis Methods for Realtime RiskMAP System

Sang Bae Park · Chang Jun Lee* · Yu Kyoung Joo · †Jeong Seok Oh

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, ChungCheongbuk-do, Korea

**Dept. of Safety Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea*

(Received April 6, 2020; Revised June 11, 2020; Accepted June 12, 2020)

요약

많은 가스 시설들이 노후화 되고 있으므로 사고를 미연에 방지하기 위한 가스시설의 위험분석은 더욱 중요해지고 있다. 특히, 위험을 도출하고 분석하는 것은 복잡한 가스시설을 위한 사고예방과 사고방지에 매우 중요하다. 그러나 여러 가지 상황을 고려해 위험을 도출하고 분석하는 연구가 아직 충분히 이루어지지 않았다. 본 논문은 복잡한 가스 시설에서 구역별로 위험을 도출하고 분석하는 것을 목적으로 한다. 각 구역은 서로 다른 관점의 방법의 위험분석 기법을 적용하여 위험도를 산출하며 구역별 하나의 위험등급으로 통합한다. 위험지도(RiskMAP) 기반 위험분석 시스템은 시설의 상태, 작업 및 주변 현황에 따라 구역의 위험변화를 즉시 사용자에게 알려준다. 본 연구에서 제안된 기법은 소프트웨어적 알고리즘으로 구현되고 본 연구에서 IoT와 GPS와 연계되어 위험지도기반 위험분석 시스템에 적용된다.

Abstract - For preventing accident, the risk analysis about gas facilities has been more important since many gas facilities be superannuated. Especially, deriving and simulating risk is very important for preventing and corresponding accidents by means of specific analysis method in complex gas facilities. However, many studies have been not enough not yet in order to derive and simulate risk considering various situations. This paper aims to propose deriving and analyzing risk method around limited area of complex gas facilities. Our study proposes total risk analysis that is composed four methods with individual point of view. The risk analysis system based on RiskMAP immediately informs users changes of e risk in zones according to the status, work and surrounding conditions of the facility. The proposed methods in this research are implemented as software algorithm and applied to risk analysis system using RiskMAP in conjunction with IoT and GPS.

Key words : risk, analysis, RiskMAP, zone, algorithm

1. 서론

많은 가스 시설들이 노후화 되는 시점에서 사고를

미연에 방지하기 위한 가스 시설의 위험 분석은 더욱 중요해졌다. 대부분의 산업체들은 독성 또는 가연성 물질을 사용하기 때문에 산업체 사고는 사람과 시설에 피해를 입힐 수 있다. 특히, 위험을 도출하고 분석하는 것은 복잡한 가스 시설에서 특정 분석 방법을 사용하여 사고를 예방하고 대응하는 것은 매우 중요하

†Corresponding author:jsoh90@gmail.com

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

다. 그러나 여러 가지 상황을 고려해 위험을 도출하고 분석하기 위한 연구가 아직 충분치 않다[2, 7].

본 논문은 복잡한 가스 시설에서 구역별로 위험을 도출하고 분석하는 방법 목적으로 한다. 각 구역은 서로 다른 관점의 방법의 위험분석 기법을 적용하여 위험도를 산출하며 구역별 하나의 위험등급으로 통합한다. 서로 다른 관점의 위험분석 방법은 다양한 상황을 고려하기 위해 각각 사고 확률, 작업 위험, 예기치 않은 특이한 상황, 시설 상태가 반영하여 설계된다. 위험지도(RiskMAP) 기반 위험 분석 시스템은 시설의 상태, 작업 및 주변 현황에 따라 구역의 위험변화를 즉시 사용자에게 알려준다. 본 연구에서 제안된 기법은 소프트웨어적 알고리즘으로 구현되고 본 연구에서 IoT 와 GPS 와 연계되어 위험지도기반 위험 분석 시스템에 적용된다.

II. 위험 분석 기법 설계

본 연구는 영역 당 위험을 분석하기 위해 사고 피해 확률, 작업 위험, 예기치 않은 특이 상황 시설 상태에 대한 위험도를 도출하며 각각의 위험도를 통합한다.

사고 피해 확률은 단위지역의 화재, 누출, 폭발에 대한 위험도를 도출하며 사고확률과 피해심각도의 결합으로 위험지수를 구한다. 피해 심각도는 화재, 누출(독성가스), 폭발의 위험도를 예측모델을 통해 복사열량, 폭발 과압, 농도를 각각 산출하며 세 항목 중 가장 위험이 높은 수치를 피해 심각도 수치로 선정한다. 사고확률은 결합수해석(Fault Tree Analysis)을 사용하여 설비의 고장률을 통해 사고확률을 계산하며 이를 실시간화 하기 위해 아래와 같은 구축과정을 가진다. 사고확률 시설의 고장률을 이용하여 OREDA 표준 데이터를 활용하며 데이터베이스화 되어 있다. 예를 들어 기본 설비나 장치(밸브 같은)에 고장률이 표준화되어 제시되어 있으며 이를 바탕으로 부울 대수 연산(논리 곱, 논리합 등)을 수행하여 최종 고장률을 계산하며 이를 사고확률 수치로 선정한다. 최종 위험도는 피해심각도 × 사고확률로 계산한다[2, 3, 4].

작업 위험도는 단위지역에서 시설에 대한 작업자의 작업에 대한 위험도를 수치화하여 표현하는 방법으로 설비 고장률을 판단할 수 있는 결합수해석에 작업자의 작업 실수(휴먼에러) 단말과 속성을 추가하여 도출한다. 즉, 작업 위험지수는 제시된 가이드위드에 따라 데이터베이스화된 작업 실수(휴먼에러) 확률을 결합수해석에 적용함으로써 수행되면 결합수해석의 고유기능인 부울 대수(논리곱, 논리합)를 통해 전체 휴먼에러기반 결합수해석의 정량적 수치를 계산한다.

① 시설을 대상으로 구축된 결합수해석에 작업 실수

(휴먼에러) 내용 및 빈도를 추가하는 형식이다.

- ② 작업자가 취급하는 기기별(밸브, PT, DCS 등)로 해당되는 작업 실수(휴먼에러) 내용 및 빈도를 선택한다.
- ③ 단, 작업 실수(휴먼에러)의 인적오류율(Human Error Probability)은 평소(관련 작업이 없는 경우)에 0으로 할당되며, 작업스케줄과 위치에 따라 빈도가 할당된다.
- ④ 작업 실수(휴먼에러) 내용 및 빈도 값 선택은 제시된 가이드 위드에 따라 첫 번째로 경험에 의거하여 산출된 작업 실수 확률(Human error probabilities derived from experience) 테이블의 인적 오류율을 우선적으로 참조하며 적용 대상이 매할 경우에는 보다 포괄적인 운영에 의한 에러율(Generic rates for operations) 테이블에서 참조한다.
- ⑤ 만약, 적절한 작업 실수에 대한 인적오류율을 찾지 못하였다면 다음의 수식을 이용하여 인적오류율을 새로 산출할 수 있으며 이러한 값은 작업 정보에 따른 빈도 수정 테이블에 저장한다. 이 식에서는 에러 횟수(Bpd) 적용 대상 기기 수(Pdy), 적용기간(yob), 연당 작업 횟수 등이 고려된다[5, 7, 8].

$$HEP = \frac{Occurrence}{Bpd \times Pdy \times yob} \quad (1)$$

시설 상태 위험도는 시설에 대한 감육(두께가 부식되어 얇아지는 것)이나 피로정도 파악하여 열화정도에 따른 위험도를 파악하는 방법으로 감육모델지수와 균열사용잠재성 지수를 이용한다. 감육모델을 통한 위험지수는 API RP 581 외부 손상인자 외부부식의 Marine/ Cooling Tower Drift Area 경우의 표준 데이터 집합과 Severe 한 경우의 표준 데이터 집합을 데이터베이스화 하여 감육모델을 생성한다. 균열잠재성지수는 피로에 취약한 부위를 상대적으로 균열 발생 위험도를 나타내기 때문에 위험위치를 알려줌으로써 평상시 또는 진단시에 주의 깊게 상태를 파악하여 사고 위험을 예방할 수 있는 방법으로 아래 식이 균열 성장과 관련된 응력(압력)스펙트럼의 위험성을 나타내고, 균열 잠재성지수(CSI)는 유효응력의 합으로 계산하는 식이다. 여기서 유효응력($\Delta \sigma_{eff}$)은 최대응력(σ_{max})과 열림응력(σ_{op})의 차로 정의된다. 최종 위험지수는 감육정도 × 균열잠재성 지수로 계산한다[7].

$$\Delta \sigma_{eff} = \sigma_{max} - \sigma_{op} \quad (2)$$

예기치 않은 특이 상황에 대한 위험도는 주변 환경의 변화(시설 상태의 변화 포함)에 의한 사고 위험성을 데이터 간의 유사도를 이용한 지능형기반 위험지수를 통해 구한다. 지능형기반 위험 지수는 위험기준 데이터와 시설 상태나 주변 환경 변화를 위해 실시간으로 수집된 데이터간의 유사정도 비교를 수행해서 산출되며 비교수식은 최대/최소 정규화를 수행한 유클리디안 수식 또는 변이계수 수식을 사용자가 선택하여 수행한다. 첫 번째 유사도 기법인 유클리디안 수식은 다음과 같이 표현한다. k 는 데이터 속성수를 의미하며, X_1 과 X_2 는 유사도를 구하려는 데이터 집합이며, X_{1k} 와 X_{2k} 는 두 데이터 집합의 k 번째 속성을 의미한다.

$$\sqrt{\sum_{k=1}^n |X_{1k} - X_{2k}|^2} \quad (3)$$

두 번째 유사도 기법인 변이계수 수식은 다음과 같이 표현한다. k 는 데이터 속성수를 의미하며, X_1 과 X_2 는 유사도를 구하려는 데이터 집합이며, X_{1k} 와 X_{2k} 는 두 데이터 집합의 k 번째 속성을 의미한다.

$$\sum_{k=1}^n \frac{|X_{1k} - X_{2k}|}{\left(\frac{X_{1k} + X_{2k}}{2}\right)} \quad (4)$$

위험지수의 통합은 4개의 위험지수를 다음의 식을 통해 통합 위험지수를 계산한다.

$$\frac{X_{1w1} + X_{2w2} + X_{3w3} + X_{4w4}}{w1 + w2 + w3 + w4} \quad (5)$$

이 식에서 X_1 은 CA 기반 위험지수, X_2 는 상태열화 모델기반 위험지수, X_3 는 지능형기반 위험지수, X_4 는 작업 기반 위험지수를 의미하며 $w1$ 은 CA 기반 위험지수를 위한 가중치, $w2$ 는 상태열화모델기반 위험지수를 위한 가중치, $w3$ 는 지능형기반 위험지수 가중치, $w4$ 는 작업 기반 위험지수를 위한 가중치이다. 가중치는 사용자 요구에 따라 다르게 설정될 수 있으나 관련된 항목의 과거의 사고회수, 야차사고 회수, 사고 신고 접수의 건수를 바탕으로 설정될 수 있다.

III. 위험분석 기법 소프트웨어 모듈화

제안된 분석 기법을 소프트웨어에 구동하기 위해서는 소프트웨어적 알고리즘으로 구현해야하며 유사한 역할을 수행하는 알고리즘을 합친 모듈적인 구현

이 요구된다. 첫 번째 모듈인 사고 피해확률 모듈은 화학적 관점 기반의 위험분석 기법으로서 가스 누출, 화재, 폭발에 대한 사고확률과 피해 영향을 계산한다. 본 모듈은 6개의 컴포넌트로 구성되며 Fig 1에서 개략적인 흐름도를 보인다.

· 물질(Material) Component

- ① 물질 데이터베이스를 이용한 물질 특성계수를 도출한다.

· 용기(Vessel) Component

- ① 대상시설에서 온도, 압력, 용량 등 관리인자들을 수집하여 질량단위로 환산한다.

· 시나리오(Scenario) Component

- ① 대상시설에서 균열, 구멍 등 상태인자를 수집하여 정확한 질량값을 계산한다.

· 소스(Source) Component

- ① 대기인자 정보를 수집하여 누출속도를 계산한다.

· 피해모델(Models)

- ① 누출: 가우시안 플룸 모델, 가우시안 플룸 모델, SLAB 모델을 구현하여 농도를 계산한다.
- ② 화재: Fireball, Jet File, Pool Fire, Flash Fire 모델을 구현하여 화재 종류에 따른 방사열량을 계산한다.
- ③ 폭발: 폭발거리, 폭발과압, 폭발열, 폭발 시간 및 지연 시간 등을 예측하는 모델을 구현하다.

· 표현(Rendering) Component

- ① 누출, 화재, 폭발 거리와 시간에 따른 농도, 방사열량, 과압을 표현한다.

두 번째 모듈인 작업 위험분석 모듈은 인간공학적 관점에서 작업자의 작업 위험도를 수치화하여 f 결함수에 작업 에러율을 더한다. 작업 에러율은 작업 실패

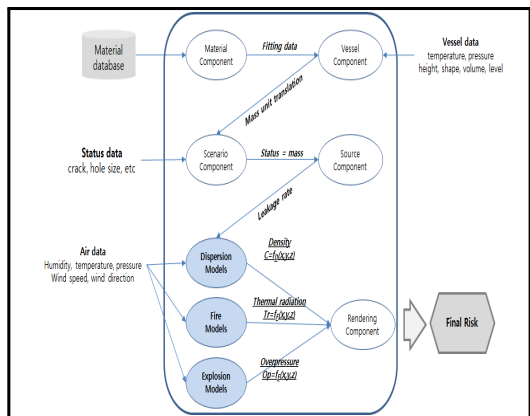


Fig. 1. The data flow of accidents probability.

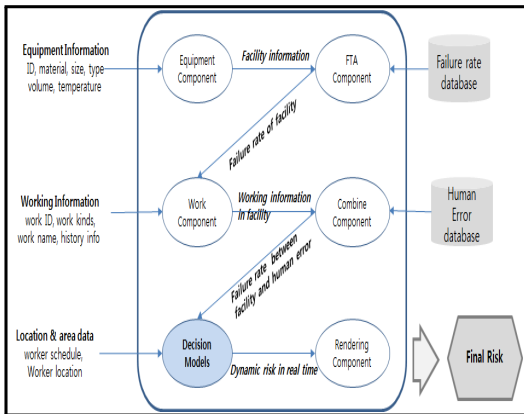


Fig. 2. The data flow of work risk analysis.

내용과 빈도수에 의해 결정된다. 본 모듈은 6개의 컴포넌트로 구성되며 Fig 2에서 개략적인 흐름도를 보인다.

- 장치(Equipment) Component
 - ① 설비, 장치에 대한 세부정보를 읽어 시설 정보를 결합하고 완성한다.
- 결합수해석(FTA) Component
 - ① 시설에 대한 고장률 데이터베이스를 읽어 Fault Tree 를 구성하여 시설에 대한 위험도를 산출한다.
- 작업(Work) Component
 - ① 해당 지역과 설비에서 가능한 작업 정보를 읽고 기존 시설 Fault Tree 에 작업에 대한 작업자 실수율을 산출하여 구성된 Fault Tree 에 첨가한다.
- 병합(Combine) Component
 - ① 시설에 대한 고장률과 작업자에 대한 실수율을 바탕으로 작업에 대한 위험도를 산출한다.
- 결정모델(Decision Model)
 - ① 작업이 발생하는 지역 위치와 향후 작업이 예정된 지역을 중심으로 동적으로 변화하는 위험도를 실시간적으로 결정한다.
- 표현(Rendering) Component
 - ① 사업장(공장)에서 지역별로 구분된 위험도를 표현한다.

세 번째 모듈은 센싱된 데이터 사이에서 유사성을 도출하여 예기치 못한 상황을 인식하는 기법을 구현한다. 즉, 시설의 학습 데이터 모델을 구축하고 실시간 데이터와의 유사도 비교를 통해 정상적인 데이터와 비정상적인 데이터를 구분한다. 특히 본 알고리즘에서는 데이터 편향과 왜곡을 방지하기 위해 데이터 정규화가 적용된다. 본 모듈은 다섯 개의 컴포넌트로 구성되며 Fig 3에서 개략적인 흐름도를 보인다.

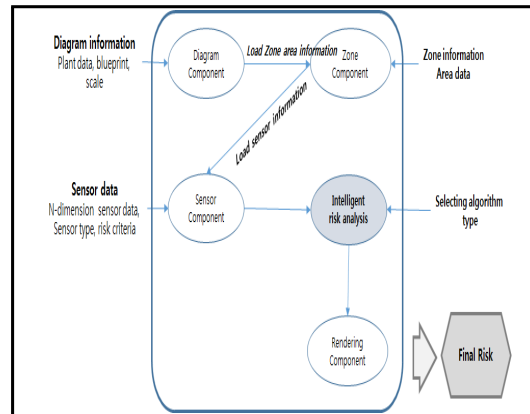


Fig. 3. The data flow of intelligent cognition

- 다이어그램(Diagram) Component
 - ① 사업장 관련 데이터, 사업장 도면, 사업장 축척을 읽어 들여 기본 정보를 제공한다.
- 구역(Zone) Component
 - ① 기본 정보와 지역에 대한 정보를 결합한다.
- 센서(Sensor) Component
 - ① 지역에서 발생할 수 있는 다차원 센서 데이터(압력, 온도, 부식, 습도, 기울기 등), 센서 종류를 실시간으로 읽어 들여 실시간성을 부합한다.
- 지능형 위험분석 모델 (Intelligent Risk Analysis)
 - ① 사용자에 의해 선택할 수 있는 유사도 기법(유클리디안, 변이계수)을 통해 지능형 위험분석을 수행한다.
- 표현(Rendering) Component
 - ① 사업장(공장)에서 지역별로 구분된 위험도를 표현한다.

네 번째 모듈은 시설의 상태 열화를 통해 위험도를 분석한다. 상태 열화의 정도는 두께 모델과 심각성 지수를 통해 결정된다. 두께 모델(thinning model)은 API RP 581 코드의 표준 데이터 집합을 통해 생성되고 균열 심각성 지수(crack severity index)는 균열 성장의 응력 스펙트럼에 대한 위험 정도에 따라 밝혀질 수 있다. 본 모듈은 6개의 컴포넌트로 구성되며 Fig. 4에서 개략적인 흐름도를 보인다.

- 다이어그램(Diagram) Component
 - ① 사업장 관련 데이터, 사업장 도면, 사업장 축척을 읽어 들여 기본 정보를 제공한다.
- 구역(Zone) Component
 - ① 기본 정보와 지역에 대한 정보를 결합한다.
- 센서(Sensor) Component
 - ① 지역에서 발생할 수 있는 다차원 센서 데이터

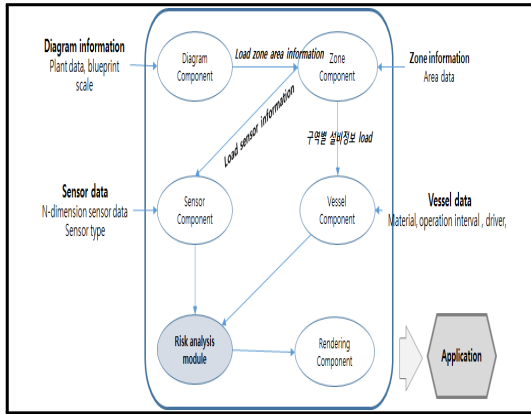


Fig. 4. The data flow of condition deterioration.

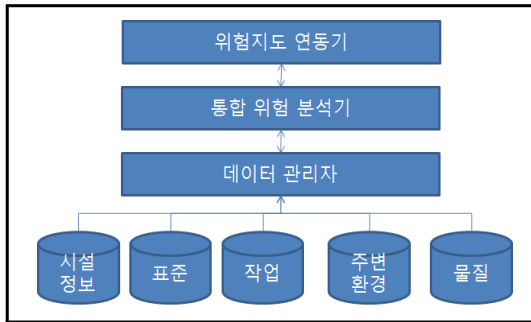


Fig. 5. System Architecture.

(압력, 온도, 부식, 습도, 기울기 등), 센서 종류를 실시간으로 읽어 들여 실시간성을 부합한다.

- 용기(Vessel) Component
 - ① 물질정보, 운전정보 등 시설에 대한 정보를 읽어 들인다.
- 위험분석(Risk Analysis) Module
 - ① 감육모델과 균열잠재성지수를 통해 시설의 상태열화 분석을 수행한다.
- 표현(Rendering) Component
 - ① 사업장(공장)에서 지역별로 구분된 위험도를 표현한다.

IV. 위험지도기반 위험분석 시스템 구현

위험분석 모듈은 위험지도(RiskMAP)과 연동되어 구현되며 Fig 5와 같은 구성을 가진다.

위험지도 연동기는 특화된 가스시설을 여러 개의 단위지역(zone)으로 분할하고 하나의 단위지역에 통합

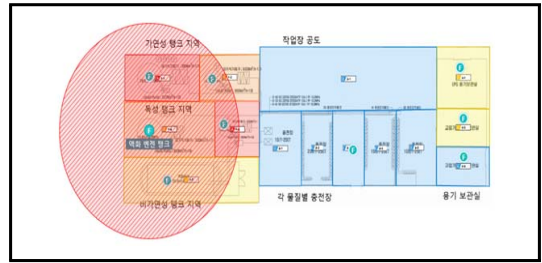


Fig. 6. The assigned risk per zone in facilities.

위험분석기의 결과를 매핑한다. 예를 들어 아래와 같이 14개의 단위지역이 존재하면 14개 지역에 대한 위험분석을 수행해야 하며 신속하고 효율적으로 수행하기 위해 멀티 쓰레드 방식을 이용하여 병렬적으로 수행 가능하다. 위험의 표현은 위험등급과 지수에 따라 색깔로 표시되며 등급과 지수에 대한 색의 표현 기준은 설정에 따라 변경 가능하다. 통합 위험분석기는 앞 장에서 제안된 4가지 위험분석 모듈에 의해 특정 구역에 대한 위험 분석을 개별적으로 수행하고 하나의 통합된 위험도를 생성한다.

데이터 관리자는 위험분석기와 그 세부모듈에서 필요한 데이터를 효율적으로 탐색하고 결합하여 정보형태로 통합위험분석기에 반환하는 역할을 수행한다. 데이터베이스는 필요한 데이터 집합을 저장하고 있으며 그 종류는 다음과 같다.

- 시설정보 DB : 시설번호, 설치일, 사용재질, 저장 총량, 설계온도, 설계압력, 시설크기 등이 축적된다.
- 물질 DB : 사업장 시설에서 활용되는 물질의 식별 (CAS)번호, 물질국문명, 물질 영문명, 물질의 유형, 물질특성, 피해영향, 피해범위 등이 축적된다.
- 작업 DB : 작업명, 작업단계, 수행인원, 사용장비, 작업시간, 작업 지역(zone) 등이 축적된다.
- 주변환경 DB : 사업장 시설과 설비의 주변 환경이나 특성 (대기온도, 대기습도, 풍향, 풍속 등)이 축적된다.
- 표준 데이터 DB: 위험분석을 위해 국제 표준 데이터를 데이터베이스화 한 것으로 시설과 설비의 고장률, 작업의 실수(휴먼에러) 확률, 설비 부식율 등이 저장된다.
- 작업자 DB : 성명, 소속, 신상정보, 작업속련도, 전문분야
- 시설상태 DB: 실시간으로 시설의 상태에 대한 데이터(가스, 압력, 유량, 진동 등)를 축적한다.

위험지도기반 위험분석 시스템은 실제 소형 가스 시설을 대상을 시험환경으로 조성하여 작업자 이동

및 주변 환경의 변화에 따른 시험을 수행한 후 웹 기반 버전으로 구현되었다. 시험환경 가스시설은 액화산소(20.5톤), 액화 알곤(16.4톤), 액화질소(10.9톤), 액화탄소(25톤) 저장탱크와 탄소, 산소, 알곤, 질소 용기 충전장 및 용기 보관실이 존재하는 다양한 가스시설이 존재하는 시설로서 작업자 위치 탐색 및 실시간 모니터링 장비를 장착하여 실증시험을 검증하였다. 본 시험환경의 웹으로 구현된 버전은 Fig. 6에서 보인다. 위험지도 위에서 지역(zone)의 위험도를 확인할 수 있고 동적인 위험에 따라 위험도에 따라 지역의 색이 변경됨을 실시간으로 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문은 복잡한 가스 시설에서 구역별로 위험을 도출하고 분석하는 방법 목적으로 한다. 이를 위해 본 연구는 구역 별 위험을 분석하기 위해 사고 피해 확률, 작업 위험, 예기치 않은 특이 상황 시설 상태에 대한 위험도를 도출하며 각각의 위험도를 통합한다. 사고 피해 확률은 단위지역의 화재, 누출, 폭발에 대한 위험도를 도출하며 사고확률과 피해심각도의 결합으로 위험지수를 구하였다. 시설 상태 위험도는 시설에 대한 감옥이나 피로정도 파악하여 열화정도에 따른 위험도를 파악하는 방법으로 감옥모델지수 와 균열사용잠재성 지수를 이용하였다. 예기치 않은 특이 상황에 대한 위험도는 주변환경의 변화에 의한 사고 위험성을 데이터 간의 유사도를 이용한 지능형기반 위험지수를 통해 구하였고 작업 위험도는 단위지역에서 시설에 대한 작업자의 작업에 대한 위험도를 수치화하여 표현하는 방법으로 설비 고장율을 판단할 수 있는 FTA 에 작업자의 작업 실수(휴먼에러) 단말과 속성을 추가하여 도출하였다.

제안된 분석 기법을 소프트웨어에 구동하기 위해서는 소프트웨어적 알고리즘으로 구현해야하며 유사한 역할을 수행하도록 모듈화하여 사고피해 확률 모듈, 작업 위험 분석 모듈, 지능형 위험분석 모듈, 시설 상태 분석 모듈을 구현하였다. 구현된 4개의 위험분석 모듈을 활용하여 본 연구는 웹기반 위험 분석 시스

템을 개발하였고 소형 가스시설을 시험환경으로 조성하여 실증 후 현장 적용하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역특화산업육성사업(R&D, P0002072)”으로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

- [1] Daniel, A., and Louvar, J. F., *Chemical Risk Analysis: Fundamentals with Application*, Prentice Hall, (1990)
- [2] Oh, J. S., Sung, J. G., and Kwon, J. R., “A Study on Autonomic Decision Method for Smart Gas Environment in Korea”, *Advances in Intelligent and Soft Computing*, 72, 1-9, (2010)
- [3] “Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases”, CCPS
- [4] “Methods for Calculation of Physical Effects”, TNO Yellow Book, (2005)
- [4] “Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications”, Danel A, Crow · Joseph F, Louvar
- [5] Lee, U. Y. and Oh, J. S., “A Study on Natural Gas Dispersion Modeling for Gas Safety Platform Development ”, *International Journal of Control and Automation*, 10(12), 147-164, (2017)
- [6] Oh, J. S., “A Study on Deriving and Simulating Pre-risk on Complex Gas Facilities for Preventing Accidents”, *Communications in Computer and Information Science*, 931, 268-273, (2019)
- [7] Yang, Z., Wang, J. Rochid, M., and Belkacem, O., “Bayesian modeling for human error Probability Analysis in CREAM”, *International Conference on Quality, Reliability, Risk Maintenance, and Safety Engineering*, June, (2011)