



천연가스 공급시설에 대한 효율적 정량적 위험성 평가를 위한 시스템 구축과 적용

†윤익근 · 오신규 · 서재민* · 임동연* · 윤인섭**
한국가스공사 연구개발원, *세이프티아, **서울대학교 화학생물공학부
(2011년 12월 19일 투고, 2012년 2월 27일 수정, 2월 27일 채택)

A Development of System for Efficient Quantitative Risk Assessment on Natural Gas Supply Facilities

†Ik-Keun Yoon · Shin-Kyu Oh · Jae-Min Seo* · Dong-Yeon Lim* · En-Sup Yoon**
Korea Gas Corporation R&D Division, Aasan 426-790, Korea
*Safetia Co., Ltd., Seoul 137-132, Korea
**Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
(Received December 19, 2011; Revised February 27, 2012; Accepted February 27, 2012)

요 약

천연가스 공급 시설은 가스 소비자에게 사용의 편리성과 동시에 위험성을 제공하기 때문에 매우 까다로운 위험관리 대상이다. 따라서 그 위험을 최대한 낮추면서 가스 공급을 위해서는 합리적 안전 관리 의사 결정 방법이 필요하며 정량적 위험성 평가(QRA)는 그 적합한 도구로 인식되고 있다. 하지만 수백여개에 이르는 가스 공급 시설들에 대하여 QRA 수행하는 것은 전문가 부족과 분석 시간이 오래 소요되는 문제로 인해 효과적으로 이루어지기 어렵다. 이에 본 논문에서는 가스 공급시설에 대하여 QRA를 보다 효율적으로 수행할 수 있는 시스템 체계를 제시하였다. 이 체계의 핵심적 특징은 사고점이라고 지칭한 분석점에 전문가가 사전 분석을 통해 대상 설비(들)에 대한 사고 빈도/결과 분석에 필요한 값을 얻기 위한 질의서와 내부 계산식을 만들어놓고 일반 사용자는 그 점을 지도에 위치시키고 그 내부 질의서에서 요구하는 값을 입력함으로써 QRA가 수행되는 것이다. 궁극적으로 이는 QRA 분석 절차에 있어서 분업화가 가능하다는 아이디어에 기반하여 제시된 것이며 본 논문에서는 실제적 시스템 구축과 적용을 통해 그 체계의 유효성을 확인하였다.

Abstract - While the natural gas supply industry has continuously been growing, its potential hazard has also risen since the natural gas facilities essentially require installations that carry highly flammable and pressurized gas close to the populated areas, posing a serious consequence of significant property damage as well as human casualties in the event of accident. Therefore Quantitative Risk Assessment (QAR) has been recognized as a appropriate method to reduce the risk as far as possible, considering the reality of unachievable zero-risk. However, it is hard to perform effective QRA on hundreds of gas facilities because of insufficient number of expert and long-term analysis. In this paper, we suggest a conceptual QRA system framework to support more efficient risk analysis in gas supply facilities. In this system, the experts make questionnaires and internal calculation formula needed in accident frequency/consequence analysis of the facility through pre-analysis on the point of analysis, called incident point, and general users locate the point on the map and input the value required by the questionnaire to obtain the risk. Ultimately, this is suggested based on the idea that the specialization is available in QRA analysis process and the validity of the system is verified through actual system construction and application.

Key words : quantitative risk assessment, frequency analysis, consequence analysis

†주저자:ikyoon@kogas.or.kr

I. 서론

한국은 천연가스를 LNG 형태로 수입하고 1986년부터 발전 및 도시가스용으로 사용되기 시작하였으며 매년 그 사용량이 평균 18% 성장하고 있고 2008년 기준으로 소비량은 약 1,200 billion cubic feet로서 한국 에너지 소비량 중 14%를 차지하고 있다[1]. 이러한 천연가스 사용이 계속 증가하는 이유는 천연가스의 친환경성과 공급 네트워크 설비 확장으로 인한 편리성 때문이다. 천연가스 공급 네트워크 설비는 크게 2가지로서 가스 전송 배관과 공급기지로 나누어진다. 가스 전송 배관은 일반적으로 매설되며 공급기지는 LNG 인수기지에서 고압으로 송출된 가스를 수요자에게 공급하기 위하여 압력을 제어하거나 비상시 차단을 위한 설비이다.

하지만 천연가스 공급 네트워크 시설은 소비자에게 사용의 편리성과 위험성을 동시에 부과하기 때문에 매우 까다로운 위험관리 대상이다. 특히 매설된 배관보다는 여러 기기들로 구성된 공급기지의 위험이 높아 보다 어려운 위험관리 대상이 된다. 이것은 공급 네트워크에서 실제 사상자가 발생하는 사고는 배관보다는 밸브나 기타 파트와 깊게 연관되어 있다는 연구 결과[2]와도 부합한다. 또한 도시 확대로 인하여 인접 민간인 거주자가 점차 증가할 가능성이 있다는 점, 그리고 매설된 배관과는 달리 직접 주민들 시야에 있어 상대적으로 높은 위험 관심 대상물이 된다는 점은 공급기지가 매우 어려운 경영 대상임을 알 수 있다.

따라서 사업자가 그 위험도를 보다 객관적이고 정량적으로 평가하는 것은 사업장 안전과 그 사업의 지속성을 보장하는 데 매우 중요한 경영 요소가 되며 그를 위한 정량적 위험성 평가(QRA: Quantitative Risk Assessment)는 세계적으로 인정받는 방법으로써 가치가 크다. 하지만 백여개 이상되는 공급기지들에 대하여 QRA를 적용하는 데 여러 현실적 어려움이 있다. 첫째는 여러 QRA 전문 인력 양성이 어렵다는 것과 둘째는 전문가일지라도 QRA 절차가 복잡하여 많은 시간과 비용이 필요하다는 것이다. 이러한 사항은 주변 인구 환경의 잦은 변화로 인해 사업자에게 보다 빈번하고 다양한 시점에 평가를 요구함에 따라 더욱 더 부담이 되어 QRA를 위험관리 도구로 도입하는 데 어려움을 주게 된다.

이에 본 논문에서는 공급기지들에 대하여 보다 효율적인 QRA 수행을 위한 위험성 평가 시스템 체계를 제안한다. 그리고 그에 기반한 QRA 시스템 구축과 실제 업무에 적용한 결과를 통해 현장에서의 QRA 적용의 어려움을 최소화할 수 있는 유효적 방법으로

서의 타당성을 보이고자 한다. 제안된 QRA 시스템의 핵심적 체계는 사고점이란 이름으로 대변되는 분석점에 전문가가 사전 분석을 통해 사고 빈도와 사고 결과 분석에 필요한 값을 얻기 위한 질의서와 내부 수식을 만들고 일반사용자(안전관리자)는 그 점을 지도에 위치시키고 입력항에 데이터를 넣어 QRA가 수행되는 것을 말한다. 이것은 여러 개의 유사 설비에 대한 QRA를 효율적이고 쉽게 수행하기 위하여 분업과 협업이 필요하다는 아이디어에 기반을 둔 것이다.

본 논문에서 제시한 QRA 시스템 체계는 국가나 기업에서 효과적이고 효율적으로 QRA 수행하는 시스템을 구축하거나 소프트웨어 개발시 응용될 수 있을 것이며 궁극적으로 QRA의 활용성을 높일 것이다. 그리고 연관된 위험 정보 활용 기술 분야도 발전시키는데 기여할 것으로 판단한다.

II. 효율적 정량적 위험성 평가를 위한 시스템 체계 및 구성

2.1. 일반적 QRA 시스템 체계

석유화학 프로세스 산업의 QRA 방법론은 원자력, 항공, 전자 산업에 뿌리를 두고 1980년대 초부터 발전하였고 플랜트의 부지선정부터 설계, 운영 및 보수 정책까지 다양한 의사결정에 관여하고 있다. QRA가 발전한 이유는 1970년대부터 기술은 급속하게 발전하는 반면에 새로운 설계의 안전 측면에 대해서는 경험이 부족하여 그 안전성에 대한 명확한 의사결정의 방법이 필요했기 때문이다[3]. QRA 일반적 절차는 위험요소 확인과 사고 시나리오 수립, 설정된 사고 시나리오에 대한 빈도 분석과 결과 분석, 개인적/사회적 위험도 분석, 위험 감소 방안 수립으로 정리된다. 위험요소를 확인하는 단계에서는 HAZOP과 같은 정성적 평가 기법이 적용될 수 있으며 사고 빈도 분석은 통계 데이터나 FTA (Fault Tree Analysis) 분석 기법 등이 적용된다. 사고 결과 분석은 누출 시나리오에 근거하여 거리별 복사열이나 폭발 압력 피해 규모를 해석하고 사람이나 건물 피해 영향 해석을 포함한다. 사고 빈도와 사고 결과 분석을 이용하여 개인적 위험도나 사회적 위험도가 기하학적인 위치와 연계되어 계산되고 표현된다. 그리고 그 결과와 위험도 기준과 비교하여 높을 경우에는 위험도 감소 방안을 수립하여 안전성을 향상시킨다. 여기서 사고 빈도와 사고 결과/영향 분석을 통합하여 개인적, 사회적 위험도를 구하는 QRA는 그 과정이 매우 복잡하여 물질, 저장용량, 누출 직경, 누출 방향 등으로 대표되는 누출 시나리오와 다양한 기상조건 등이 복합되면 수 계산하는 것은 매우 어렵다. 따라서 이러한

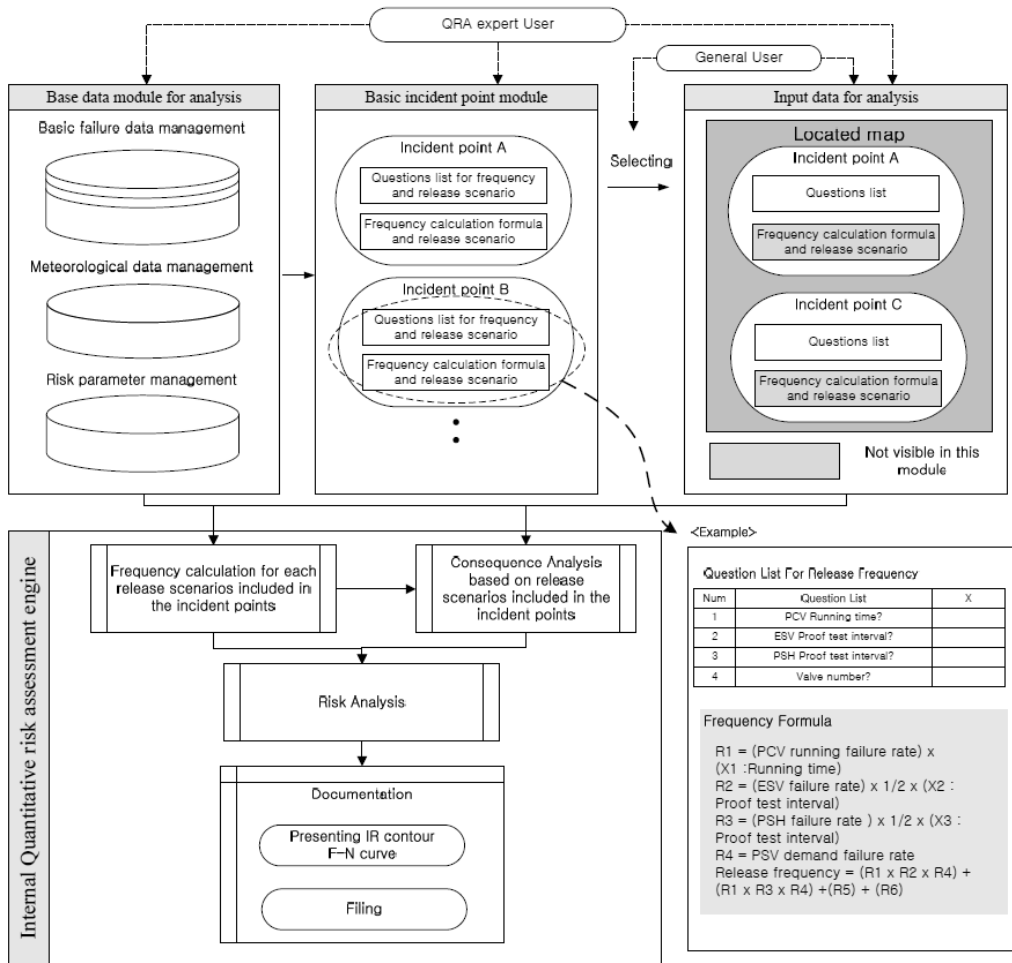


Fig. 1. Suggested conceptual QRA system framework for efficient analysis

QRA를 지원하기 위해 상업적 목적으로 개발된 도구가 전 세계적으로 소수가 있는데 on-shore 플랜트에 대해서 대표적으로는 Phast-Risk와 SHEPHERD, RISKCURVE 가 있다[4]. 이 시스템들에서는 전문가가 선택한 지도상의 한 지점과 관련한 누출 시나리오에 대해서 별도로 수행한 사고 빈도 값을 입력하고 사고 결과 분석에 필요한 저장량, 물질, 압력 등을 설정하면 개인적 위험도와 사회적 위험도가 계산되는 구성이다. 그러나 이러한 기존 QRA 도구들은 모두 QRA 전문가가 사용하는 프로그램으로서 사용자는 QRA를 알지 못하면 사용하기 어렵다. 하지만 QRA에 필요한 여러 단계와 자료를 생각해보면 분석의 분업화와 협력을 통해 수행하는 체계를 고려할 수 있다. 특히 QRA의 시간이 많이 소요되는[7] 빈도 분석은 기

기 및 인간 신뢰도 분석, FTA이나 ETA (Event Tree Analysis)와 같은 다양한 기술적 지식을 요구하는 데 주요 사고 경위에 대해서는 이런 지식을 가진 전문가가 도출하고 빈도 계산에 필요한 설비에 관한 데이터는 일반사용자(안전관리자)의 입력을 받아 빈도 계산이 된다면 효율적인 분석이 가능하다.

본 논문에서는 이와 관련한 아이디어를 기반으로 효율적 QRA를 위한 시스템 설계안을 제시하고 그것을 기반으로 공급기지에 대한 QRA 시스템을 구축하고 적용하였다.

2.2. 천연가스 공급설비에 대한 효율적 QRA 시스템 구조 제안

본 논문에서 효율적 QRA 시스템 체계로서 사고

점(Incident point)이라는 개념을 제시한다. 여기서 사고점이란 빈도 분석과 결과 분석을 위하여 QRA 전문가가 사전 분석을 통하여 질의문과 입력항, 계산식을 만들어놓은 점을 말한다. 이것은 안전관리자들이 전문가가 설정해놓은 사고점을 지도에 위치하고 입력항에 대한 답변을 수행했을 때 QRA 가 완료되는 체계를 위함이다.

그림1은 제시한 사고점을 기반으로 관련 모듈과 시스템 흐름을 도식화하여 표현한 것이다. 크게 4가지로 구성할 수 있는데 분석을 위한 Base 모듈, 사고점 모듈, 데이터 입력 모듈, 정량적 위험 분석 엔진으로 구성된다. Base 모듈은 입력된 사고점과 연계되어 그 해당 시나리오 빈도를 계산할 때 필요한 기본 고장률 데이터베이스나 기상조건 분율, 점화 확률 등과 같은 정량적 위험 평가와 관련한 데이터 관리 모듈이다. 사고점 모듈은 사전 위험요소 분석을 통해 전문가들이 어느 특정 위치와 연관한 사고 빈도와 결과 분석에 필요한 질의와 수식, 누출 시나리오를 가지고 있는 분석점들이 있는 모듈이다. 입력 모듈은 사용자가 지도를 설정하고 필요한 사고점을 가져다 위치시키고 각 사고점에서 요구하는 데이터를 입력하는 모듈이다. 정량적 위험성 평가 엔진은 선택되어 입력되어진 사고점과 연계하여 빈도 계산, 누출 모델, 확산 모델, 화재 모델 등과 연계하여 영향 평가와 더불어 최종적으로 개인적, 사회적 위험도를 도출하는 내부 모듈이다. 이러한 구조로 인해 사고점이 잘 설계되어 있다면 안전관리자는 보다 쉽게 QRA를 수행할 수 있을 것이다.

III. 제안된 체계에 기반한 QRA 시스템 구축 및 적용과 고찰

3.1. 공급기지에 대한 사고점 설정

공급기지는 LNG 인수기지에서 약 7 ~ 8 MPa 로 송출된 천연가스를 배관 도시가스나 발전사로 공급을 하기 위하여 정압, 차단, 방산 등의 기능을 수행하며 크게 3가지 유형으로서 정압기지, 밸브기지, 블록밸브가 있다. 정압기지는 압력을 낮추는 기능을 수행하며 밸브기지와 블록밸브는 가스 차단 기능을 수행한다. 밸브기지는 향후 정압기지로 변경될 수 있는 규모의 기지로서 단순 블록 밸브와는 차이가 있다. 정압기지의 일반적 PFD (Process Flow Diagram)는 그림2와 같으며 필터, 히터, 정압기와 계량기가 설치되어 있다. 가스 필터는 정압기나 계량기 손상을 방지하기 위하여 이 물질을 여과하는 설비이며 히터는 가스 감압시 발생하는 저온 현상에 의한 설비 손상을 방지하기 위하여 가스를 가열하는 설비

이다. 정압기는 미리 설정된 압력으로 감압하는 설비로서 도시가스로는 약 0.8 Mpa, 발전사로는 약 3 Mpa 로 감압한다. 밸브 스택은 긴급 상황 발생시 차단 구간내의 가스를 대기중으로 방출하기 위한 설비이다. 일반적으로 정압기는 실내에 설치되어 있으며 필터, 히터, 계량기는 외부 공간에 설치되어 있다.

공급기지에 대한 이러한 구성을 감안하여 총 6개의 사고점을 설정하였다. 그것은 필터설비 사고점, 히터설비 사고점, 정압설비 사고점, 계량설비 사고점, 그리고 밸브기지 및 블록 밸브는 단순하므로 각각 밸브기지 사고점, 블록밸브 사고점 사고점이다. 각 사고점에서 질의 항목을 설정하기 위하여 HAZOP 분석을 수행하고 주요 누출 시나리오를 도출하였다. 그림2는 정압기지의 정압설비 영역에 대한 대규모 누출 시나리오와 그에 관한 질의서를 만든 예를 보이고 있다.

3.2. 공급기지에 대한 웹 기반 QRA 시스템 구축

제안한 체계를 기반으로 하여 공급관리소 QRA 시스템을 웹 기반 시스템으로 구축하였다. 이 시스템은 Visual Studio 2005로 구현이 되었으며 Database는 SQL Server 2005이다. 시스템의 구조도는 그림3에서 보는 바와 같이 전문가와 일반 사용자 메뉴로 구분되어 있고 전문가는 모든 모듈에 접속 가능하다. 일반 사용자는 그림4에서와 같이 설정한 공급기지 지도에서 해당되는 설비 사고점을 선택, 요구하는 데이터를 입력하게 되면 QRA 가 자동화 된다. 전문가 메뉴에서는 누출률 및 고장률 데이터, 공급기지 설정, 차단 시간 등과 같은 정량 분석에 필요한 사항을 설정하게 된다. 적용된 고장률 데이터는 KOGAS(Korea Gas Corporation)에서 자체 구축한 고장률 데이터베이스[5]와 HSE에서 발간한 HSR2001 보고서[6]를 활용하여 도출한 것이다. 사고점은 사용자의 편리성을 위하여 시스템 내재형으로 개발되었다.

가스 누출과 점화에 따른 사고 결과 분석 모델은 CCPS(Center for Chemical Process Safety) Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis의 누출 및 화재·폭발 모델을 사용하였다[7]. 가스 누출량 산정을 위해서는 CCPS Source modeling method를 적용하였고, Jet Fire 복사열 산정은 API 521 model 및 Flash Fire의 경우에는 Light gas dispersion model인 Gaussian Model을 적용하였다. 정압실내 밀폐공간에 가스 누출과 그 점화로 인한 폭발 압력 해석을 위해서는 NFPA 68[8]에서 제시하는 밀폐공간 폭발 모델을 적용하였다. 그리고 화재로 인한 복사열과 폭발로 인한 과압으로 인한 영향 모델은 Eisenberg 모델[7]을 적용하였다.

천연가스 공급시설에 대한 효율적 정량적 위험성 평가를 위한 시스템 구축과 적용

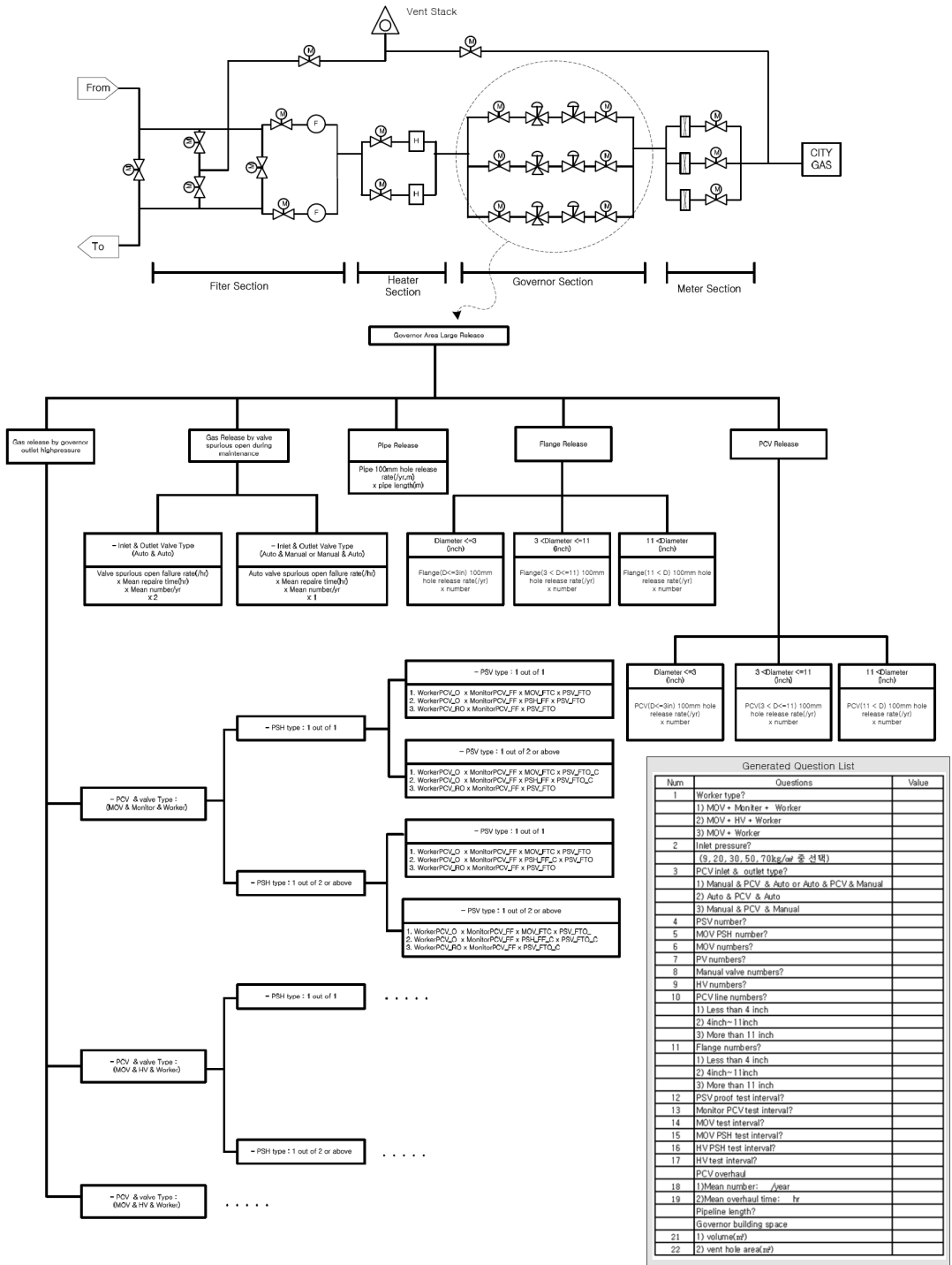


Fig. 2. Generated questions for calculating large release frequency in governor section

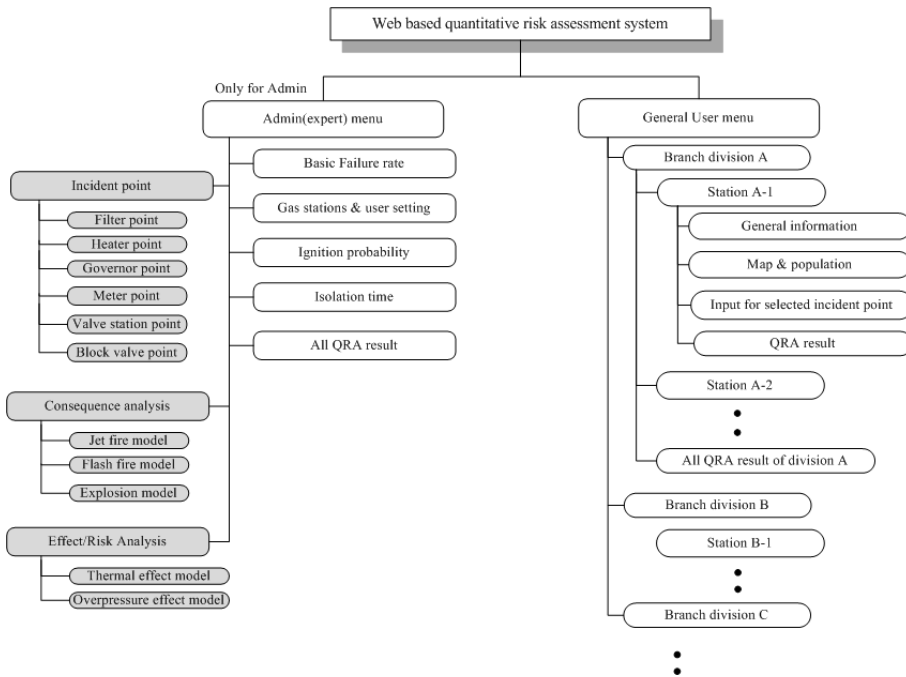


Fig. 3. Overall architecture of developed web based QRA system for gas station

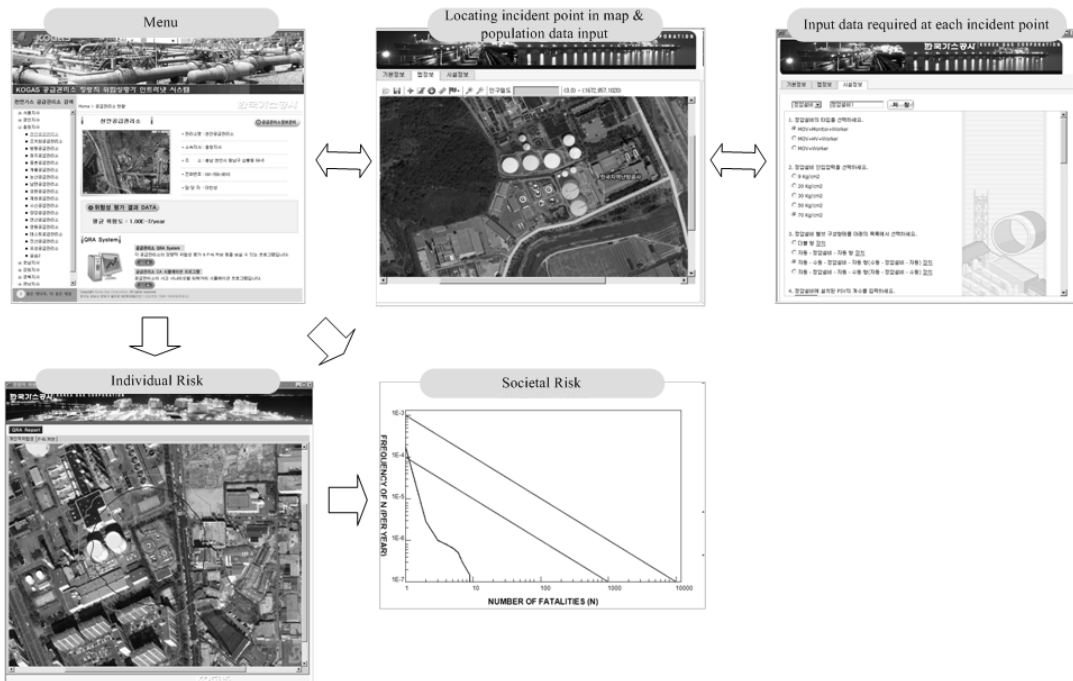


Fig. 4. Main screens of developed web based QRA system for gas stations

3.3. 시스템 적용과 효과/고찰

구축된 QRA 시스템을 공급기지들에 대하여 적용하였다. 분석 대상 공급관리소는 약 153개소이며 이 중 정압기지는 97개, 밸브기지는 52개, 블록 밸브는 4개이다. 이 153개소는 8개 사업소에 의해 관리되므로 각 사업소 안전관리자 8명에게 시스템의 사용법을 3일간 교육하고 현장에 돌아가 각 관할 공급관리소들을 평가토록 하였다. 각 사업소별 담당한 공급기지의 숫자는 다르지만 모두 분석이 마무리 되는데 걸린 소요 시간은 약 4개월 정도이다. 결과적으로 사고점을 설정하는 데 약 6개월이 소요되었으므로 약 10 개월에 걸쳐 QRA 전문가 2명과 안전관리자 8인, 즉 10인이 153 개소를 평가한 것으로 볼 수 있다. 비록 공급관리소들이 유사성이 매우 높다고 하지만 153개소의 공급기지들에 대하여 전문가와 일반 안전관리자들이 협력하여 10 개월에 걸쳐 분석을 완료한 것은 매우 고무적인 사실이며 제안한 QRA 체계가 매우 효율적임을 증명한다. 즉 이러한 시스템이 없을 때 현실적으로 몇몇 전문가가 153개소를 평가하는 것은 현실적으로 어려울 뿐만 아니라 분석 기간을 단축하기 위하여 비용이 높은 QRA 전문가들을 대규모로 투입하는 것도 어려우므로 이 방법은 매우 실용적이며 현실적인 체계라고 할 수 있다.

이 외에 웹기반의 시스템으로 인해 QRA 가 진행이 되는 동안 사용자, 즉 안전관리자와 전문가간에 데이터 입력 및 해석에서 상호간에 편리하게 커뮤니케이션을 할 수 있다는 사항은 부가적으로 얻은 효과이다.

궁극적으로 이런 시스템 체계는 공급관리소 주변의 인구밀도가 변하거나 설비 변경이 있는 경우에 빠르게 QRA 를 재수행하는 것을 가능케 함으로써 계량화된 위험관리 PDCA 사이클을 실현하는 데 매우 효과적인 방법이 될 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 천연가스의 친환경성과 공급 네트워크 설비 확장으로 인하여 그 사용량이 증가하는 천연가스 시설에 대하여 보다 효율적인 정량적 위험 분석을 수행할 수 있는 시스템 체계를 제안하였다. 제안된 체계는 천연가스 공급기지들의 QRA 모델의 유사성을 고려하여 사고점이라는 분석점을 두며 여기에 사고 빈도 분석과 사고 결과 분석에 필요한 질의서와 그 계산식을 설정하고 안전관리자 즉 일반 사용자는 그것을 지도에 위치하고 그 질의에 대한 답을

완성함으로써 QRA 가 완성되는 구조이다.

이 체계에 기반하여 웹 기반의 공급기지 QRA 시스템을 구축하고 153개소에 대하여 적용하였다. 사고점을 설계하는 데 6개월이 소요되고 평가에 4개월이 소요됨으로서 약 10개월에 걸쳐 2명의 QRA 전문가와 8명의 안전관리자가 QRA 를 효율적으로 완료하였다. 이것은 다수의 공급기지들에 대하여 QRA 전문가 인력의 활용을 극대화한 것이다.

이 연구의 결과물을 통해 위험 물질 장치 산업에서 향후 효율적이고 효과적인 QRA 시스템을 구축하거나 소프트웨어 개발시 응용할 수 있을 것이다. 또한 QRA 전문 인력의 활용성을 높이고 위험의 계량화를 통한 의사 결정 지원 기술과 위험 정보 활용 기술 분야와 연계한 발전에 기여할 것으로 판단한다.

참고문헌

- [1] Energy Information Administration, *South Korea Energy Data, Statistics and Analysis --Oil, Gas, Electricity, Coal*, <http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=KS>, EIA, (2010)
- [2] Papadakis, G. A., "Major Hazard Pipelines: A Comparative Study of Onshore Transmission Accidents", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **20**, 91-107, (1999)
- [3] Pitblado, R., and Turney, R., *Risk Assessment In The Process Industries*, 2nd ed., Institution of Chemical Engineer, Warwickshire, (2001)
- [4] Lewis, S., "An Overview of Leading Software Tools for QRA", *American Society of Safety Engineers - Middle East Chapter (161) 7th Professional Development Conference & Exhibition*, (2005)
- [5] 한국가스공사, 공급관리소 설비 신뢰도 분석 및 데이터북, 한국가스공사, (2006)
- [6] Health and Safety Executive, *Offshore Hydrocarbon Releases Statistics 2001*, Health and Safety Executive, Merseyside, U.K., (2002)
- [7] American Institute of Chemical Engineers, *2nd ed., Guideline for chemical Process Quantitative Risk Analysis*, American Institute of Chemical Engineers, New York, (2000)
- [8] National Fire Protection Association, *NFPA 68 Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting*, 2007 Ed., National Fire Protection Association, Massachusetts, (2008)