

## 화학공정 산업에서의 지속가능성과 공정시스템 공학

장남진\* · 단승규\* · 신동일\*\* · 이기백\*\*\* · 윤인섭\*†

\*서울대학교 화학생명공학부  
151-742 서울시 관악구 관악로 1  
\*\*명지대학교 화학공학과  
449-728 경기도 용인시 처인구 명지로 116  
\*\*\*한국교통대학교 화학생명공학과  
380-702 충청북도 충주시 대학로 50  
(2012년 10월 23일 접수, 2012년 11월 15일 채택)

## The Role of Process Systems Engineering for Sustainability in the Chemical Industries

Namjin Jang\*, Seungkyu Dan\*, Dongil Shin\*\*, Gibaek Lee\*\*\* and En Sup Yoon\*†

\*School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea

\*\*Department of Chemical Engineering, Myongji University, 116 Myongji-ro, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi 449-728, Korea

\*\*\*Department of Chemical and Biological Engineering, Korea National University of Transportation,

50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk 380-702, Korea

(Received 23 October 2012; accepted 15 November 2012)

### 요 약

지속가능성이란 사회적, 경제적, 환경적인 영향을 전반적으로 고려하며, 인간의 건강과 생활 증진을 내포하고, 환경 자원의 보호와 경제적 번영을 의미한다. 지속가능성에 대한 심도 있는 이해는 이러한 환경적인 영향에 대한 고려뿐만 아니라 원료 및 자원채취, 이송, 생산 협력의 전반적인 순환을 다루어야 한다. 화학산업의 지속가능한 발전은 화학공정안전의 발전을 통한 상호보완적인 강화없이 이루어지기 어렵다. 이러한 관점에서 화학공정안전은 국제시장에서 경쟁력 강화의 기회라고도 할 수 있다. 화학공정안전의 변화하는 새로운 패러다임은 현존하는 시스템과 생산공정의 기본 디자인을 고려한 총체적 순환 전 과정으로부터 나온다. 이렇게 화학공정안전을 향상시키기 위해서는 관리 시스템을 포함한 정량적 위험성 평가 방법과 다양한 공정안전 데이터 및 지식베이스를 포함한 통합 스마트시스템의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 화학산업안전의 전 과정 순환의 필요성에 대해 언급하였고, 이를 향상시키기 위한 공정안전 신기술에 대해 논의하였다. 변화하는 공정시스템공학에서 사고 없는 지속 가능한 산업의 발전을 위해서는 3 가지의 S, 즉 안전(Safety), 안정(Stability), 안보(Security)의 조합이 적절히 이루어져야 할 것이다.

**Abstract** – Sustainability, in general, means the protection of environmental resources and economic prosperity, with the consideration of the social, economic and environmental effect, as well as human health and the enhancement of life. Profound consideration about sustainability has to handle the overall cycle of feedstock, resource extraction, transportation and production in addition to the environmental effect. Sustainable development of the chemical industries should be carried out complementarily by strengthening the chemical process safety of the industries. In this respect, chemical process safety can be called an opportunity to enhance the compatibility internationally. Changing new paradigm in chemical process safety is formed from the overall life cycle considering basic design of existing systems and production processes. To improve the chemical process safety, the integrated smart system is necessary, comprising various chemical safety database and knowledge base and improved methods of quantitative risk analysis, including management system. This paper discussed the necessity of overall life cycle in chemical process safety and proposed new technology to improve the sustainability. To develop the sustainable industries in process systems engineering, three S, which include Safety, Stability and Security, will have to be combined appropriate.

Key words: Sustainability, Process Safety, Process System Engineering, Process Life Cycle, Chemical Industries

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: esyoon@pslab.snu.ac.kr

‡ 이 논문은 KAIST 박선원 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

### 1. 서 론

화학산업의 안전관리 제도는 크고 작은 화학사고의 발생과 함께 확립되고 보완되어 왔다. 1974년 영국 Flixborough에서 발생한 파이프 파열 사고는 대표적인 사례이며 이 사고에서 유독물인 사이클로헥산 30톤가량이 증기운을 형성하였고, 이로 인해 100여 명이 사망하거나 부상당했다[15]. 그 결과 이 사고 이후 영국에서는 안전기본법이 제정되었다. 두 번째로 1976년 이탈리아에서 반응기 내의 반응 폭주로 인해 다이옥신 증기운이 형성되고 반경 252 km 이내 지역이 오염되어 700여 명의 사상자를 만든 사고가 있었다. 이 사고는 흔히 Seveso(세베소) 사건으로 불리며, 지금까지 주요 산업재해로 회자되곤 하는데, 이 사고로 인해 유럽연합에서는 Seveso 지침을 제정하였다. 또한 1984년에 인도의 Bhopal 지역에서 미국계 기업 유니언 카바이드의 농약공장에서 스크러버와 플레어시스템의 미작동으로 맹독성 물질인 메틸이소시아염(Methyl isocyanate, MIC) 40톤이 누출되어 수 일만에 수 천명이 사망한 현대의 산업재해가 발생하였고 이로 인해 미국에서는 EPCRA 법을 제정하였다. 이러한 주요 화학사고들로부터 얻은 교훈으로 안전관리 제도가 생겨나고, 전반적인 재난관리, 안전관리의 패러다임이 변화하였다(Table 1 참고).

공정안전의 패러다임 변화는 화학산업의 지속가능성(Sustainability)을 확립하고 발전시키는 방향으로 진행되었다. 여기에서 지속가능성이란 환경적인 영향을 고려하며, 인간의 건강과 생활 증진을 내포하고, 환경자원의 보호와 경제적 발전을 동시에 이루어 내는 것을 의미한다(Fig. 1)[4]. 지속가능성에 대한 최초 개념은 독일인인 Hans Carl von Carlowitz가 1713년에 최초로 제정한 Sylvicultura에서 언급되었다. 이후 환경에 대한 철학적 관점이 대두되었으며, 1992년 리오 کن퍼런스에서 이 개념이 조금 더 명확히 정의되었다. 최근 지속가능성은 사회와 환경 시스템의 질을 높이기 위한 개념으로 자리잡았다.

화학산업에서도 지속 가능한 발전은 지난 20여 년간 화학공정산업 분야의 혁신을 이끄는 대표주자로서 역할을 수행하였다[8]. 또한 지속가능성의 개념은 화학공정산업의 전 과정(Life Cycle)에서 전반적인 화학, 석유 및 가스 산업에 영향을 주었고, 전 세계적으로 석유 화학 및 가스 산업의 지속가능성을 평가하기 위한 각종 조사와 연구가 이루어져 왔다[1,10,13].

본 논문에서는 화학산업에서의 지속가능성의 향상을 위한 우리나라 공정산업의 패러다임 변화에 대해 설명하고, 21세기를 위한 공정안전의 지속 가능한 발전에 대해 논의하고자 한다.

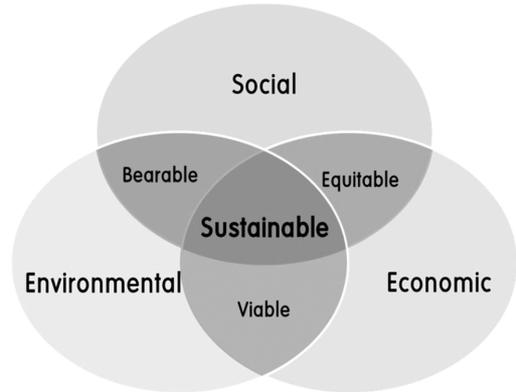


Fig. 1. Three dimensions of sustainable development [16].

### 2. 공정안전 패러다임 변화와 발전

우리나라의 석유화학산업은 1970년대 정부주도로 개발기를 시작하여 성장기를 지나 90년대의 도약기를 거치면서 생산과 수출량이 급격하게 증가했다. 현재는 화학산업을 주축으로 원유나 가스를 수입가공해서 궁극적으로 석유화학제품이나 자동차, 가전제품 등을 수출하는 산업으로 양상이 바뀌었다. 이처럼 산업이 변화하는 과정에서 화학공정산업에서의 사고도 궤를 같이 하며 따라 안전 관리 방법과 제도도 점진적으로 변화해왔다. 화학산업에서의 중대화학사고는 1995년 공정안전관리제도(Process Safety Management)의 시행으로 현재까지 전반적인 감소 추세를 보이고 있는데, 산업발전 초기에 해

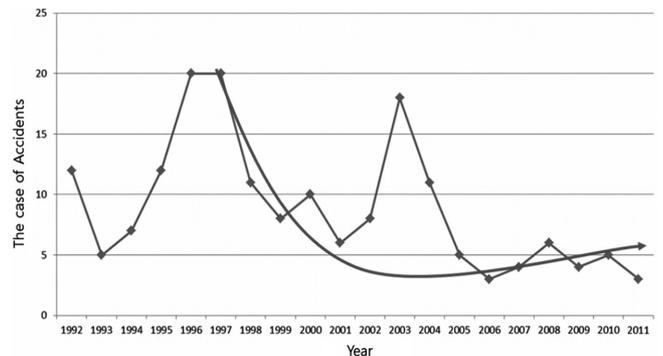


Fig. 2. Recent trend of accidents in Korea.

Table 1. Development of safety management system by chemical accidents

| Chemical accidents   | Revision of related institutions   |
|--|--|
| Vapor cloud explosion at Flixborough, death: 28 (England, 1974)                          | Health and Safety at Work etc. Act (HSWA), England (1974)  |
| Toxic release at Seveso, residents evacuation and land pollution (Italy, 1976)           | Seveso Directive (1982), EU<br>- Control of Industrial Major Accidents Hazard (CIMAH), England (1984)<br>- Seveso Directive II (1996), EU<br>- The Control of Major Accident Hazards (COMAH), England (1999) |
| Toxic release at Bhopal (Union Carbide), death: 2500 (India, 1984)                       | Emergency Planning and Community Right-to-Know Act (EPCRA), USA (1986)<br>- Prior Informed Consent (PIC), (Rotterdam Convention, 1998)   |
| Chemical material spill (Sandoz, fire of warehouse), The Rhine River (Switzerland, 1986) | Basel Convention (1994)  |
| Explosion of polyethylene (Philips), death: 24, injury: 132 (USA, 1989)                  | Including PSM(Code of Federal Regulations, 1910.119), USA(1992)  |
| LPG explosion at Bucheon, death: 1, injury: 96 (Korea, 1998)                             | Comprehensive safety management assessment (LPG facilities) and Safety supply contract (LP gas), Korea   |

마다 대략 10~20건의 사고가 발생하였으나 최근에는 Fig. 2와 같이 연간 3~5건으로 감소하였다. 하지만, 최근에는 화학사고의 발생률이 더 이상 감소하지 못하고 있다.

과거에는 중대화학사고가 개인회사나 오염지역에 한정되어 독립된 것으로 간주되었지만, 현재는 복잡성 및 확장 등 패러다임의 변화로 산업사고가 재난으로 이어지고 이것은 국가의 위기로까지 영향을 미치는 것으로 간주된다. 이러한 패러다임의 변화는 안전에 대해서도 새로운 패러다임을 제시한다. 현재 화학산업안전은 생산 시스템, 제어 시스템, 근로자 삼자 간의 불균형과 부가치 물질의 생산을 위한 위험한 설계와 조업 조건으로 인해 위기에 놓여있다. 또한 새로운 물질과 제품 생산 및 제조 산업에서의 새로운 기술도입에 따른 안전관리 시스템의 한계 또한 문제점으로 조명된다. 산업단지 중심인 국내의 경우 사고 빈도는 낮을지라도 결과나 영향은 매우 치명적으로 평가되기 때문에 많은 변화가 요구된다.

국내 화학단지의 운용은 기술적 측면에서 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 먼저 사고이력을 관리하는데 있어 사실을 기반으로 하는 투명한 사고 집계가 되지 않고 있으며, 모아진 사고이력 또한 제대로 관리되고 있지 않다. 또 아차사고는 집계에서 누락하는 경우가 있어 사고의 기준을 명확하게 하는 것이 필요하다. 연구소의 지원 또한 미비하여 효율적인 안전, 환경, 보건의 관리를 위해 필수적으로 행해야 하는 안전관련 연구가 미비하다. 또한 중앙·지방 정부의 안전관리 정책의 중복으로 인한 비효율성이 문제가 된다. 이러한 문제점들은 안전조직에 책임과 권한을 부여하여 적극적인 안전관리를 유도하는 것으로 개선될 수 있다.

사업장의 협력업체의 관리를 강화하고, 현장 직원뿐 아니라 협력업체 직원에 대한 안전 교육을 강화하는 것 역시 중요하다. 교육내용을 강화하고 교육 후 평가를 통해 교육내용을 꾸준히 개선하며, 교육결과를 인사사고에 반영하는 것 또한 좋은 방법이 될 것이다[2]. 안전에 관련된 투자의 효율성을 강화하여 안전투자비용을 매출액 대비 1% 이상이 되도록 경영하고, 산업단지 내 사고발생 시 사고처리, 비상대응, 인명구조, 언론대응 등의 임무를 총괄할 조직을 구성하는 것은 좋은 개선방안이 될 것이다. 무엇보다 중요한 것은 투명한 안전관리를 통해 모든 사고발생을 신속, 정확하게 대외적으로 공개해 주변 지역 주민들과의 신뢰를 형성하고, 같은 사고를 반복하지 않고 예방할 수 있는 방안을 관련 업체와 주민들이 협력하여 모색하는 것이다.

또한 최근 산업의 변화 중 가장 큰 부분을 차지하고 있는 것은 지금까지의 육상플랜트(Onshore plant)에서 지구의 70%를 차지하고 있는 바다로, 즉 해양플랜트(Offshore plant)로의 변화이다. 육상플랜트와는 달리 선박 또는 해상에 설치되는 해양플랜트는 좁은 지역이 많은 설비들이 위치하게 되고, 만약의 사고 발생 시 인명 및 설비의 피해가 극대화 될 수 있으므로 오랜기간 유지하기 위해서는 안전관리가 필수적으로 행해져야 보다 산업의 발전에 기여를 하게 될 것이다.

### 3. 지속 가능한 공정안전의 발전

화학산업의 지속가능성을 평가하고, 적용하기 위해서 전 세계적으로 많은 노력이 이루어지고 있다. 대표적으로 미국화학공학회에서는 Fig. 3과 같이 지속가능성 지수를 2007년에 발표하였다. 지속가능성 지수는 지속가능성 실행을 공공적으로 접근이 가능하게 한 자료이며, 화학회사의 전략적 실행(Strategic Commitment), 지속가능성 혁신

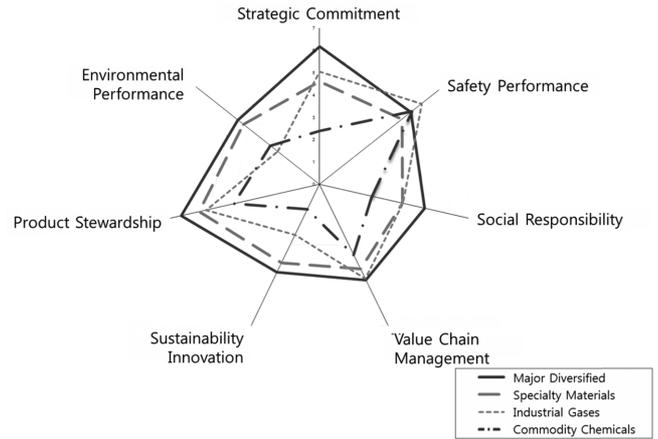


Fig. 3. Index numbers of Sustainability in the chemical industries [3].

(Sustainability Innovation), 환경 영향력(Environmental Performance), 안전관리능력(Safety Performance), 사회적 책임(Social Responsibility) 과 가치 사슬 관리법(Value Chain Management)을 포함한다. 이러한 지수를 바탕으로 하여 지속가능성을 계산하며, 여러 국가·산업·기업들이 지속가능성을 평가하여 서로 비교한다.

최근 지속가능성은 화학공정산업의 경쟁력을 강화시키는 방향으로 고려되고 있으며, 실제로 화학공정안전이 국제시장에서 경쟁력 강화 방안으로 각광받고 있다. 다음에서는 화학산업안전의 전 과정 순환의 필요성, 그리고 이를 향상시키기 위한 제도의 발전 및 신기술의 적용에 대해 설명하고자 한다.

최근 화학공정안전의 새로운 패러다임은 현존하는 시스템과 생산공정의 기본 디자인을 고려한 전반적인 운전절차의 고려로부터 나온다. 특히 화학공정 안전은 Fig. 4와 같이 석유 및 가스 산업의 라이프 사이클이 고려되어야 한다. 화학공정 안전에는 여러 기술들이 적용되며, 공정 안전은 화학 물질의 안전을 향상시키기 위해서도 연구되어야 한다. 이와 관련 물질 안전 평가표와 공정 안전 평가표, 평가 기준들이 Fig. 5와 같이 복합적으로 활용된다. 게다가 이러한 데이터는 석유와 가스 산업의 지속가능성을 증대시키기 위한 위험과 운전성 분석(Hazard and Operability Study), 결함수 분석(Fault Tree Analysis), 사건수 분석(Event Tree Analysis), 화학 사고 데이터베이스와 같은 방법들의 향상을 위해서도 수집되어야 한다. 이러한 데이터베이스를 이용하여 지능정보화 기술과 접목한 공정 안전 시스템을 구축하여야 한다. 또한 정량적 위험성 평가(Quantitative Risk Analysis)는 공정 전체의 라이프사이클을 평가하기 위한 항목으로 수행되어야 한다.

이와 같이 화학산업의 지속가능성을 향상시키기 위해서는 다양한 안전관리 기술의 개발, 안전관리 제도의 적용, 지속적인 공정의 위험성 평가 방법의 개발과 공정안전관리 데이터베이스를 통합한 스마트 관리시스템의 구축이 필요하다. 다음 절에서 다양한 위험성 평가 방법론과 공정안전관리 데이터베이스의 활용에 대해서 논하고자 한다.

#### 3-1. 화학사고 데이터베이스 구축

안전관리를 위한 규제, 기준, 코드, 관리 시스템은 이탈리아 세베소에서 1976년에 일어난 폭발 사건 이후 체계적으로 정립되어왔다. 기존 화학 사고를 토대로 수집된 데이터는 유관 산업의 화학 물질의 관리 방법으로도 사용될 수 있다. EU와 OECD의 국제기구 내에서는 경험에서 얻어진 지식들을 바탕으로 사고 정보를 공유하고자 하

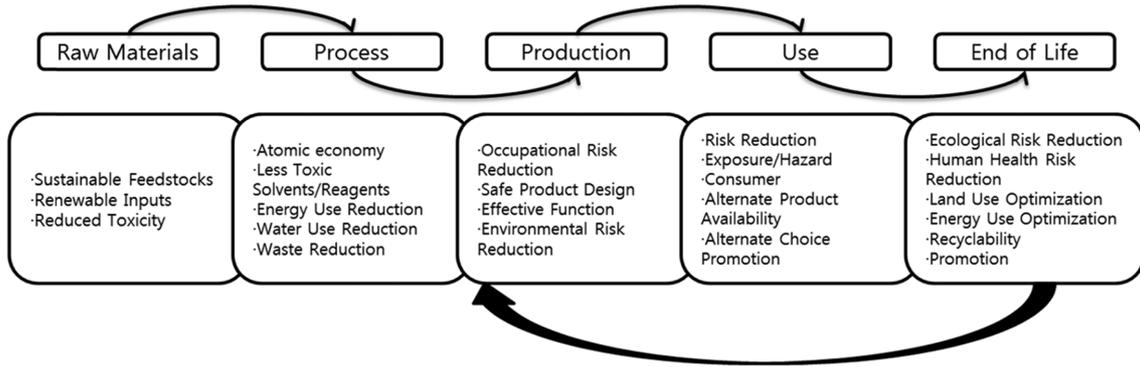


Fig. 4. Scheme of the sustainable chemical process life cycle [5].

| Preliminary studies, R&D  | Discussing concept | Discussing investment   | Basic Design | Placing order               | Detailed Design | Construction                          | Trial operation | Full operation |
|---|--------------------|---|--------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|----------------|
| Material safety assessment  |                    | Process safety assessment (Quantitative risk assessment, HAZOP) |              |                             |                 | Construction safety systems operation |                 |                |
| 1   | 2                  |   |              | Equipment safety assessment |                 | 3                                     | 4               |                |
| Assessment criteria (safety, environment, technology, quality)                    |                    |   |              |                             |                 |                                       |                 |                |
| Expert safety technology check  |                    |   |              |                             |                 |                                       |                 |                |
| Safety inspection, including Process Safety & Disaster Prevention Technology Unit |                    |   |              |                             |                 |                                       |                 |                |

1 Research environment safety assessment  
 2 Product safety assessment  
 3 Pre-trial checks  
 4 Results of trial operation

Fig. 5. Safety engineering activities in the process industries.

며, 조사 보고서와 예방법은 화학공정 데이터베이스를 구축하거나 공공의 협의를 통해 공유되고 있다. 화학 공정의 안전 관리 시스템은 정책 도출에도 적용되는 도구이며 정보의 공유뿐만 아니라 시스템의 성능 향상에도 도움이 된다. 따라서 효율적인 화학 안전 데이터 및 지식베이스 관리기술은 관련된 지식과 시스템, 공정과 더불어 비슷한 사건 사고를 예방하는 효과를 지니게 된다[11,12].

3-2. 위험성의 정량화

위험성의 정량화는 주기적인 분석을 필요로 하며 여기에는 결과 분석 및 사건수 분석과 결합수 분석이 포함된다. 지속가능성에 기반한 개념에서는 기술적인 측면의 향상을 위해 위험의 정량화가 요구되며, 이외에도 경제 및 산업적 요인, 사회적, 문화적 요인의 반영을 필요로 한다. 위험 기준을 포함한 안전성의 고려는 공정설계와 그에 따른 안전관리 기법의 적용이 필요하며, 최신의 공정기술과 석유 및 가스산업에 대한 새로운 기준적용을 따른다[9,17]. 게다가 위험을 정량화하는 것은 실시간 위험성 평가와 맞물려 통합될 수 있으며, 발생 가능한 위험, 위험성 분석과 고장형태 영향분석과도 관련된다. 또한 위험성의 정량화는 기존 석유 및 가스산업에만 적용되는 것이 아니라 LNG/GTL-FPSO와 같은 해양산업에서의 화학공정분야와 같은 새로운 분야에서도 적용된다[14,18].

3-3. 스마트 공정 안전 관리 시스템

현재까지 발전해 온 공정시스템 분야에서 부족한 부분은 공정안

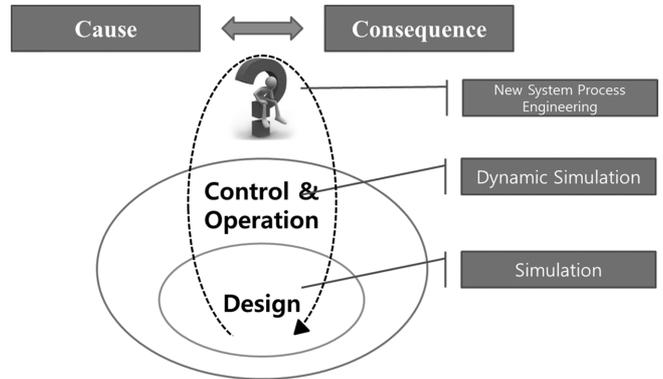


Fig. 6. New system process engineering.

전이다. Fig. 6과 같이 공정의 전반적인 안전을 위한 초기 디자인 및 제어/운영 중의 원인 및 결과 분석은 다양한 시뮬레이션 및 다이내믹 시뮬레이션을 통해 평가되어 왔다. 하지만 이러한 관리만으로 부족한 부분이 많아 현재에도 안전사고는 상당부분 발생하고 있다.

이러한 부분을 채우기 위하여 새로운 시스템 공정공학이 필요한 시기이다. 현재까지 공정안전에서 부족한 부분에 대한 석유화학 및 가스 산업의 지속가능성을 향상시키기 위해서는 무엇보다도 화학공정 라이프 사이클과 통합한 관리 시스템이 중요하다[6]. 일본에서는 P&ID UI를 바탕으로 하는 공정 정보 및 안전관리 시스템을 개발하

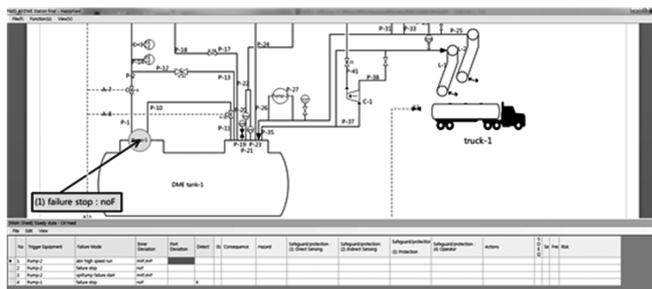


Fig. 7. Database management based on P&ID.

였다[7]. 이는 공정 관리 데이터베이스, 운영 관리 데이터베이스, 안전 정보 데이터베이스 등을 포함한다. 프로그램 내 데이터베이스의 관리는 아래 Fig. 7과 같이 P&ID를 이용한 HAZOP 데이터베이스에 관한 사례연구에서 확인할 수 있다. 이러한 데이터베이스를 이용하여 결합수 분석 및 스마트한 안전 분석과 관리가 가능하게 된다.

지속가능성의 개념적 관점에서 석유·가스 및 관련산업의 안전성을 향상시키기 위해서는 통합된 공정 및 안전관리시스템이 시스템의 전체적인 정보를 제공하여 작동가능성, 관리가능성, 신뢰성을 향상시키게 된다. 이러한 데이터베이스에 기초하여 지속가능성은 공정한 안전 분야와 사회경제학 및 환경적인 측면에서 괄목할만한 도약을 만들어내고 있다.

#### 4. 결 론

석유화학 및 가스 산업에서 안전 및 지속가능성의 증대는 안전한 작업 환경과 사회를 조성하기 위해 필수적인 조건이다. 또한, 안전은 산업현장에 국한되지 않고 사회경제학적이며 환경적인 측면을 고려해야 한다. 본 논문에서는 향상된 안전 기술과 관리 시스템이 좀 더 발전된 지속가능성을 제공해 줄 수 있다는 것을 제시하였다. 과학과 기술의 발전에 따라 지속 가능한 안전은 여러 가지 혜택을 우리에게 안겨줄 것이다. 게다가 화학 공정의 새로운 패러다임은 우리에게 발전된 사고력을 가져다 주며 웰빙 사회를 촉진시켜 줄 것이다. 지속 가능한 안전성을 향상시키기 위해 우리가 고려해야 할 4가지 주요 사항을 정리하면 아래와 같다:

1. 공정 안전 기술의 발달
2. 공정 안전 기술의 국제 표준화
3. 관련 지역(Global, local, industry sector) 간의 긴밀한 협력
4. 안전 기술에 대한 지속적인 노력

마지막으로 산업의 많은 부분에서 기존 육상산업과 더불어 해양 산업에도 관심을 갖고 개발을 하는데, 변화하는 산업에서 사고 없는 지속가능한 산업의 발전을 위해서는 3가지의 S, 즉 안전(Safety), 안정(Stability), 안보(Security)의 조합이 잘 이루어져야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. Center for Chemical Process Safety, *Inherent Safer Chemical Process: A Life Cycle Approach*, Second Edition, Wiley & Son, Inc., 2009.

2. Shin, D. and Venkatasubramanian, V., "Intelligent Tutoring System Framework for Operator Training for Diagnostic Problem Solving," *Comput. Chem. Eng.*, **20**(2), 1365-1370 (1996).
3. Schuster, D., "Benchmarking Sustainability," *CEP*, June 2007).
4. Allen, D. T. and Shonnard, D. R., *Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes*, Prentice-Hall Inc., 2002.
5. "Framework for an EPA Chemical Safety for Sustainability," *US Environmental Protection Agency*, 2011
6. Seo, J., "Status of Safety Software," *Proceedings of Korea Association of Professional Safety Engineers Workshop*, 2011
7. Kawamura, K., Naka, Y., Fuchino, T., Aoyama, A. and Takagi, N., "Hazop Support System and Its Use for Operation," *18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 2008.
8. Park, K., Shin, D., Lee, G. and Yoon, E. S., "Cost of Energy Analysis of Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Power Plant with Respect to CO<sub>2</sub> Capture Ratio Under Climate Change Scenarios," *Korean J. Chem. Eng.*, **29**(9), 1129-1134(2012).
9. Park, K., Koo, J., Shin, D., Lee, C. and Yoon, E. S., "Optimal Multi-floor Plant Layout with Consideration of Safety Distance Based on Mathematical Programming and Modified Consequence Analysis," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(4), 1009-1018(2011).
10. Jang, N., *A Study on the Inherent Safety for Sustainable Process Design Based on Fuzzy Logic*, Ph. D. Thesis, Seoul National University, 2012.
11. Jang, N., Koo, J., Shin, D., Jo, M. S., Yoon, Y. and Yoon, E. S., "Development of Chemical Accident Database: Considerations, Accident Trend Analysis and Suggestions," *Korean J. Chem. Eng.*, **29**(1), 36-41(2012).
12. Jang, N., Han, K., Koo, J., Yoon, Y., Yong, J., Yoon, E. S., "Development of Chemical Accident Classification Codes and Tool for Management in Process Industries," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **42**(10), 742-757(2009).
13. Jang, N., Shin, M., Choi, S. and Yoon, E. S., "Dynamic Simulation and Optimization of the Operation of Boil-off Gas Compressors in a Liquefied Natural Gas Gasification Plant," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(5), 1166-1171(2011).
14. Dan, S., Park, K., Kim, T. and D. Shin, "Explosion Simulations for the Quantitative Risk Analysis of New Energy Filling Stations," *Journal of the Korean Institute of Gas*, **15**(1), 60-67(2011).
15. Kletz, T., *What Went Wrong? Case Histories of Process Plant Disasters*, Fourth Edition, Gulf Professional Publishing(1999).
16. Adams, W. M., "The Future of Sustainability: Re-thinking Environment and Development in the Twenty-first Century," Report of the IUCN Renowned Thinkers Meeting, 2006.
17. So, W., Kim, Y., Lee, C., Shin, D. and E. S. Yoon, "Optimal Layout of Additional Facilities for Minimization of Domino Effects Based on Worst-case Scenarios," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(3), 656-666(2011).
18. Kim, Y., So, W., Shin, D. and Yoon, E. S., "Safety Distance Analysis of Dimethylether Filling Stations Using a Modified Individual Risk Assessment Method," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(6), 1322-1330(2011).