



LNG 저장/수송 시설의 통합 안전 관리 시스템 개발에 관한 연구

†이상호 · 임영섭 · 한종훈

서울대학교 공과대학 화학생명공학부

(2008년 5월 20일 접수, 2008년 6월 10일 수정(1차), 2008년 7월 21일 수정(2차), 2008년 7월 21일 채택)

A Study on Integrated Safety Management System of LNG Storage/Transport Facilities

†Sangho Lee · Youngsub Lim · Chonghun Han

Dept. of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University, Seoul 157-742, Korea

(Received 20. May. 2008, Revised(1st) 10. June. 2008, Revised(2nd) 21. July. 2008, Accepted 21. July. 2008)

요 약

갈수록 성장하고 있는 LNG 산업에 있어서 안전관리는 필수적인 요소로 자리잡아가고 있다. 이에 따라 기존의 LNG 저장/수송 시설에 대한 안전 관리를 보다 발전시킬 수 있는 것이 필요하며 최근 발전된 IT 산업은 LNG 저장/수송 시설에 대한 통합 안전관리 시스템을 가능케 했다. 위험성 평가/분석 기술, 폭발, 누출 및 확산 모델 구축 기술, 실시간 모니터링 및 이상 진단 기술, Data reconciliation을 통한 공정 정보 신뢰성 향상 기술 등을 집약하며 웹 환경을 통하여 구축될 통합 안전관리 시스템은 LNG 산업의 안전성 향상과 향후 기술 수출에 큰 기여를 할 것이다.

Abstract – The safety management of the LNG industry which shows huge growth recently, become an essential element. So the necessity of development for the pre-existing LNG storage/transport facility has been shown up and the improvement of information technology (IT) of these days make it possible to synthesize several models for integrated LNG facility safety management system. This system will contains risk analysis/assessment technology, explosion, leakage and diffusion model construction technology, real-time monitoring and fault diagnosis technology, and reliability progression technology of process information through data reconciliation. The final integrated safety management system will contribute the increase of LNG industry's safety and exportation of technique.

Key words : LNG storage, LNG transport, safety management system

I. 서 론

2008년 5월 현재, 투기 자본 유입과 석유 생산량 한계 이론 등으로 인하여 지속되는 유가의 상승은 배럴당 120달러까지 이르러서 전 세계적으로 석유 자원 위기를 초래하고 있으며 이로 인해 연료용이나 소재로 쓰일 수 있는 모든 석유 제품의 가격이 급격하게 변동하게 되었다. 이 같은 상황에서 액화천연가스(LNG)는 연료용으로 이용되는 석유 자원의 대체재로 이용되기에 부족함이 없는 호환성과 약 70년 이상을 사용할 수 있을 것이라고 추측될 정도로 충분한 매장량으로 주목을 끌고 있다[1]. 따라서 LNG의 이용량은 앞으로도 전 세계적으로 증가할 것으로 예상되는 바, LNG 산업은 향후 지금

보다 더 확대된 시장을 갖게 될 것으로 예측된다.

우리나라 역시도 경제가 발전하고 에너지 사용량이 증가하면서 안정적 에너지 수급을 위해 에너지 수종의 다변화를 꾀하고 있는데 이에 따라서 LNG 사용이 증대되고 있는 현실이다. 도심지역 가정용 연료의 상당 부분을 LNG가 담당하고 있으며 최근에는 차량용 연료로 CNG(Compressed Natural Gas)를 이용하는 등, 점차적으로 수요가 확대되고 있으며 증대되는 LNG 수요에 맞추어 LNG를 저장/수송하는 시설을 더욱 많이 필요로 하게 되었다.

그러나 이렇게 증가하는 LNG 수요와 규모를 감당할 수 있을 시설의 안전관리 시스템은 갖추어지지 않은 실정이다. 비록 일반적인 LNG의 시설은 그 안정성에 있어서 다른 연료 자원과 비교하여 매우 큰 차이를 보이는 않으나 고압, 저온 상태(일반적으로 1 atm에서

†주저자:creactiveengineer@gmail.com

-163°C 이하에서 액체상태로 존재.)로 존재해야 하는 LNG 연료의 특성과 특히 도심에서 중요한 에너지원으로 소비되고 있는 LNG 수요의 위치적 특성으로 인해 만약 시설 관련 사고 발생시 큰 피해를 야기할 수 있다. 실제로 알제리에서 비교적 최근인 2004년에 LNG 액화 시설의 폭발사고가 일어나 27명의 사망자와 70명의 부상자를 발생시킨 바 있으며 우리나라에서도 지난 '94년 서울 아현동 가스 중간기지에서 폭발 사고가 발생하여 70여 명의 사상자를 내는 등의 여러 심각한 사고 사례가 LNG 산업에 안전에 관한 고려가 반드시 필요하다라는 인식을 가져다 준 바 있다. 따라서 LNG 저장/수송시설의 보다 안전한 운전 및 관리를 도모하고 향후 세계 LNG 산업의 선두에서 기술 수출에 기여할 수 있는 저장 및 수송 시설의 통합 안전 관리 시스템을 개발하는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있겠다.

II. 현황 및 문제점

현재 국내 LNG 저장 수송 시설에서 각 지역별 LNG의 유통과 공급을 맡고 있는 회사들은 수요처의 안전 관리를 담당하여 개별적으로 점검을 하는 방식으로 진행되고 있으며 가스공사는 공급처에서의 안전 관리를 맡고 있다. 점검 방법적인 측면에 있어서 언급하자면, 우리나라에서 LNG를 취급하는 기업들은 일반적으로 LNG 저장/수송시설에서 발생할 수 있는 위험 요소에 대한 평가나 안전성 점검에 있어서 이를 평가할 수 있는 매뉴얼을 만들고 이 매뉴얼을 따라 각 시설에 해당하는 안전 사항을 작업자가 검토하고 안전성을 평가하며 어떤 이상이 발생했을 때 이 이상이 어느 정도로 심각한지, 어떤 대책을 취해야 하는지 등을 매뉴얼을 통해 제공받는데, 대표적으로 가스공사에서 보유하고 있는 EHSQMS를 들 수 있겠다. 이러한 매뉴얼이나 안전 관리 체계는 과거 이것이 갖추어지지 않았을 때에 비해서 LNG 시설의 안전성 향상에 큰 기여를 하였으나, LNG의 관계기관들이 제 각각의 기준으로 안전 관리를 수행하기 때문에 위험 요소를 진단하는 기술이나 위험성의 평가, 이상 판별 등에 있어서 체계성이나 통일성, 명확성, 정량성이 떨어지게 되며 각 점검 주체 간의 상호 데이터 교류나 경험 공유도 힘들게 된다.

안전성 확립의 측면 외에도 고압, 저온 상황에서 진행되는 LNG의 저장 및 수송 과정은 과정 중 발생하는 비유적 손실이 비교적 크기 때문에 외부 열 유입을 최소로 줄이고 온도, 압력 조건을 안정적으로 유지하여 안전성을 도모해야 하는 동시에 각 장치들의 최적화를 통해서 공정의 경제성을 추구하여 중요 에너지 자원인

LNG의 비효율적 낭비를 줄일 필요가 있다. 이에 대한 고려 역시 기존의 안전 관리 체계로는 충분한 검토가 이루어져 있지 않다.

III. 관련 연구 현황

3.1. 국내 개발 진척 상황

현재까지 LNG 시설의 안전 관리 시스템이 비교적 체계적으로 형태를 갖추어 본격적으로 이용되고 있는 것에는 대표적으로 가스공사에서 사용 중인 EHSQMS가 있다. EHSQMS는 Environment, Health, Safety, Quality Management System의 약자로, 공정 친환경성, 보건, 안전성, 품질을 개선하는 경영 시스템을 뜻한다. Fig. 1에서는 가스공사에서 수행하고 있는 EHSQMS의 조직을 나타내고 있다.

가스공사에서는 '97년 Mobil(현 Exxon-Mobil)사의 EHSMS(Environment, Health & Safety Management System)를 벤치마킹하고 이를 가스공사에 맞도록 수정, 발전시켜 완성하였는데, 이 시스템은 여러 규정 및 인증 절차를(ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001) 통합하여 효율적으로 안전성을 평가하고 개선하도록 하는 것을 목표로 하고 있다. 그러나 EHSQMS는 LNG 시설의 지속적인 관찰을 통한 안전성 평가 및 관리에 초점을 맞추는 것이 아닌 경영에 있어서의 리스크 최소화를 위한 평가에 집중하고 있기 때문에 실시간으로 공정의 정보를 얻고 위험성 여부 및 제어 방법을 제공받는 통합 안전 관리 시스템으로서의 가치를 갖기는 힘들다.

이외에 2005년 경, LNG 산업의 프로세스 통합 정보망 시스템 구축에 관하여 기존에 연구된 바가 있고[2], 같은 해에 LNG 저장 탱크의 제어에 정량적 기법을 이용하여 LNG 탱크에 대한 통합 제어 안전 관리 시스템을 개발하는 연구가 진행된[3] 바 있다. 그 외에는 LNG

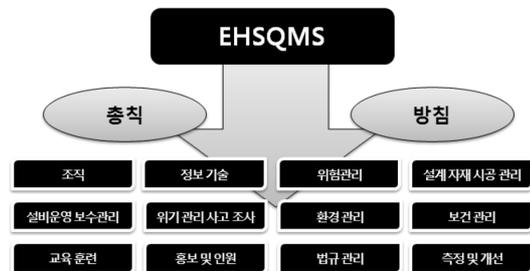


Fig. 1. EHSQMS (Environment, Health, Safety and Quality management system) organization of KOGAS.

에 특화되지는 않았으나 기타 화학 공정 및 에너지 산업에서 안전관리 기술을 개발하여 통합 시스템을 설계하는 목표 하에 공정 장치 이상을 검진하거나 공정에서 사용되는 물질의 위험성을 추산해내며 이상 상황 발생 시의 피해 확산 규모 등을 계산하는 위험성 분석 시스템을 개발하는 등 국내에서도 높은 수준의 개발이 이루어진 것은 아니지만 데이터 베이스 구축이 용이치 못한 환경에서도 비교적 활발하고 다양한 연구를 진행한 바 있다.

3.2. 해외 기술 개발 상황

국외는 대표적으로 미국 AIChE(American Institute of Chemical Engineering)의 공정안전센터(CCPS, Center for Chemical Process Safety)에서 화학공장 혹은 위험 시설물 들에 대해서 사고 분석이나 예방 기법에 대해 연구하고 보급하는 역할을 맡고 있다. 그 중에서도 LNG와 같은 에너지 자원 문제에 있어서는 앞에서 언급한 것처럼 먼저 사고 발생의 원인을 억제하고 피해 발생 시 피해 규모를 최소화 하는 대피 등의 대응과 경제성의 확보를 위한 통합 관리 시스템을 구축하는 연구를 지향하고 있다. 그리고 미국 환경보호국 (EPA-OEM, Environmental Protection Agency - Office of Emergency Management) 에서 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration - Office of Response and Restoration)와 공동으로 화학 산업에서 공정 설계 시 위험성 분석 및 화재 위험성 평가와 피해 예측 등의 안전성 종합 관리 시스템을 구축하기 위해 CAMEO 와 ALOHA, MARPLOT 등의 소프트웨어를 개발하여 공급하고 있다. 캐나다에서는 화재로 인한 피해 규모 산정과 화재 방지 구조 건축 등을 다루기 위해 화재로 인한 재난 관리 연구를 국가 연구소(NRC-IRC, National Research Council - Institute of Research in Construction)에서 진행하고 있으며 유럽 연합 국가들은 에너지 수송망에서 발생한 사고의 데이터 베이스를 공유하고 사고 자료를 축적하는 동시에 약 180종의 유해 위험물에 대해 취급하는 시설물을 위험성 평가 기법을 이용한 법적 기준을 통해 관리하여 안전성을 높이도록 제시하고 있다. 이외에도 국제 노동기구(ILO)에서 중대 산업사고 예방 매뉴얼을 개발하여 UN 산하 국가 들에 산업재해 발생시의 위험도를 최소화 하도록 보급하고 있는 상황이다[4,5].

기업 중에서는 네덜란드 TNO와 노르웨이의 CMR에서는 안전 사고 특히, 폭발 시에 발생하는 위험 요소에 대해 자사가 개발한 위험성 분석 소프트웨어를 통한 분석을 제공하고 이를 통해 공장 배치에도 이 위험성에 대해 고려하도록 하는 솔루션을 개발, 안전 컨설팅에

이용 중에 있다. 또 DNV Technica의 RMP-Pro98는 기존의 위험 예측뿐 만이 아니라 사고 발생 시 주변 지역에 대한 피해 상황을 예측하고 환경에 미칠 수 있는 영향을 분석하며 비상 대응 조치의 마련을 도와주는 프로그램을 개발한 바 있으며 현재 판매망을 구축 중에 있다. 그리고 기업과 정부가 협력하여 연구를 진행한 사례도 있는데, 영국의 가스공사와 영국 안전 보건청에서 공동으로 가스 수송망의 위험성 평가 프로그램을 개발하여 사용 중에 있다[6].

IV. LNG 저장 수송 시설 통합 안전 관리 시스템 구성안

해외 유수의 업체 및 정부에서는 이처럼 다양한 안전 관리 시스템 구축을 통해 자칫 큰 재난으로 확산될 수 있는 화학 산업 및 에너지 공급망의 사고 발생 예방과 피해 규모 최소화를 목표로 꾸준히 연구를 진행 중이다. 본 연구에서도 향후 변화된 산업 환경과 안전에 대한 보다 체계적인 고려를 위해서 LNG 저장/수송 시설에 대한 통합 안전관리 시스템을 갖추고자 제안한다. 이 통합 안전관리 시스템은 다음과 같이 구성된다.

4.1. 위험성 평가 및 분석 기술

먼저 LNG 통합 안전관리 시스템에서는 세부 연구를 거쳐 설계된 알고리즘에 의해 각 LNG 저장/수송 시설 설비들에 대해 위험성의 평가 작업에 들어가고 각 설비들의 위험성 결과를 토대로 안전사고의 우려가 있는 설비의 우선순위를 매기거나 특정 사고 발생 시에 그 사고와 연계된 위험 요인을 조사하여 위험성을 분석하는 등의 작업을 가능하도록 위험성 평가 및 분석 모델을 갖춘다. 그 형태는 과거 Dow Chemical사에서 제안한 위험성 평가에 대한 순차적 통합 시스템[7,8]과 유사하게 될 것이며 보다 정량적이고 전산화된 프로그램을 통해 사용자가 보다 접근하기 쉽도록 완성될 것이다.

또한 본 시스템의 위험성 평가 및 분석 모델은 국내에서 실행 가능한 수준으로는 아직까지 완성된 바가 없는 LNG 시설의 정량적 위험성 평가에 초점을 맞추게 되어 외국 유수의 프로그램들에 뒤지지 않으면서 LNG 시설 관리에 최적화된 모델을 제공하게 된다. Fig. 2는 과거 Dow사에서 개발한 Risk Review process로, 현재 널리 사용되고 있는 정성적 위험 평가 기법의 대표적 사례라고 할 수 있다. 현재는 이를 기반으로 많은 수정과 보완을 통해 보다 정확하고 높은 수준으로 전개가 되고 있으나, 결과적으로 이 기법 역시도 정성적 위험 평가 기법이 기본적으로 가질 수밖에 없는 문제를 안

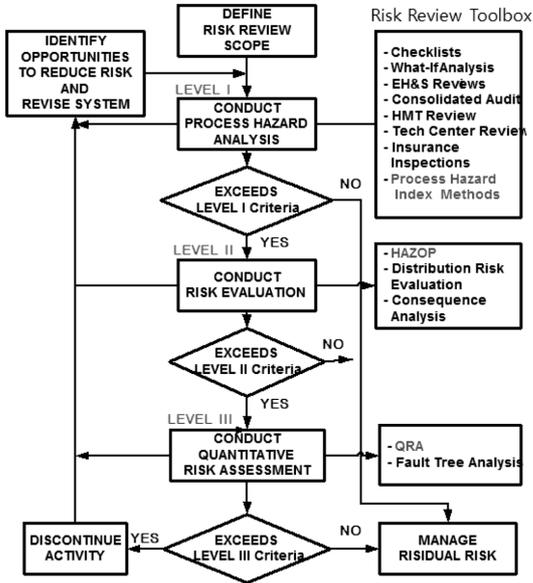


Fig. 2. DOW Risk review process flow chart.

고 있다. 정성적 평가 기법은 지나치게 복잡하고 전문가적이며 환경적 변수를 많이 필요로 하기 때문에 LNG 저장/수송 시설의 평가에는 다소 부적절한 측면이 있다는 것이다. 따라서 LNG 저장/수송 시설에 대한 위험성 평가 및 분석 모델은 단순하면서도 정성적 정량적 평가를 동시에 높은 정확도로 제공하며 User-friendly한 형태를 가져야 할 것이다[10].

4.2. 폭발/누출 사고 모델 해석 기술

본 통합 안전관리 시스템에 들어갈 기술 중의 하나로 폭발/누출 사고 모델 해석 기술이 있는데 특히 LNG 시설에 있어서 이는 매우 중요한 문제이다. 인화성이 높은 에너지 자원인데다 LNG는 약 -160°C 가량의 낮은 온도에서야 비로소 액체로 저장되기 때문에 약간의 온도 상승으로 인해서도 폭발이나 누출의 가능성이 매우 높아지기 때문이다. 현재 상용화 된 범용 폭발 및 누출 사고 모델에 관한 프로그램으로는 EPA의 ALOHA나 DNV 사의 TRACE 등이 있다. Fig. 3에서는 누출 모델 시뮬레이터중의 하나인 EPA에서 제공하는 ALOHA 프로그램을 통해 저장 탱크 안의 LNG (methane)가 대기 중으로 누출됐을 때 어떤 형태로 누출될 것인지를 시뮬레이션한 사례를 나타내고 있다. ALOHA 프로그램에서는 지역적 정보를 입력받아 시뮬레이션에 이용하게 되는데, 미국 외의 지역은 지원하지 않는다. 따라서 우리 나라와 유사한 환경을 가진 도시

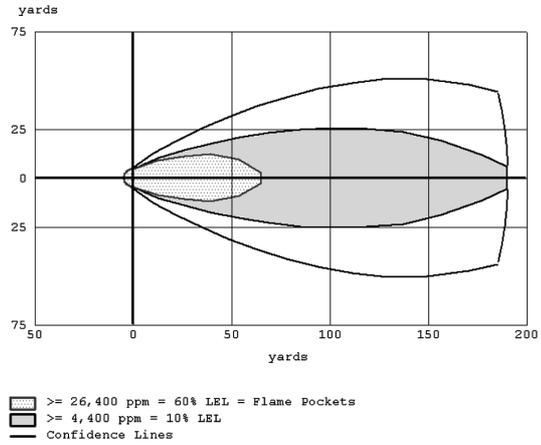


Fig. 3. A case study of flammable area estimation of LNG leakage simulation with ALOHA®.

인 L.A.를 선택하여 시뮬레이션을 진행하였다.

LNG 시설의 폭발/누출 사고 모델 역시 위의 프로그램 랩들과 같이 물질모델, 확산모델, 화재모델 등을 도입하여 LNG 시설의 사고 발생 시의 피해 범위, 피해 산정 등의 추산에 크게 기여할 것이다.

4.3. 실시간 모니터링 및 이상 진단 기술

LNG 저장/수송 시설을 조작하는 데 있어서 중요한 것 중의 하나가 LNG의 상태 유지인데 이를 위해서는 배관망이나 탱크 안의 LNG의 물성에 대한 정확한 파악이 가능해야 한다. 이는 실시간 모니터링 시스템을 통해 이루어지게 되며 이 모니터링 시스템을 거쳐서 나오는 공정의 수많은 데이터들은 이상 진단 기술을 이용해서 공정에 이상 현상이 발생했는지의 유무를 진단해 낼 수 있게 되며 최종적으로 LNG 공급의 안정적 통제를 가능케 한다.

4.4. 데이터 보정 기술

Data reconciliation 기술은 특히 LNG 저장 시설 관리 분야에서 중점적으로 이용될 것이다. Tank에 대해서 위험성 평가를 하기 위해서는 Tank의 압력이나 유량, 온도 등의 다양한 실시간 정보를 받고 이 정보를 통해 위험성을 계산하는 과정이 필요하다. 그런데 이 실시간 정보들이 누적되거나 무작위 성을 지닌 오차 혹은 센서의 오작동 등으로 실제 데이터와 다른 값을 가지게 될 수가 있는데 이 경우 센서를 통한 잘못된 데이터를 수정하여 실제 상황과 다른 위험성 평가를 내리게 될 수 있다. 이로 인해 특정 시설의 상태가 불안정한 상황에 접어들었음에도 불구하고 이를 정확히 잡아내지 못

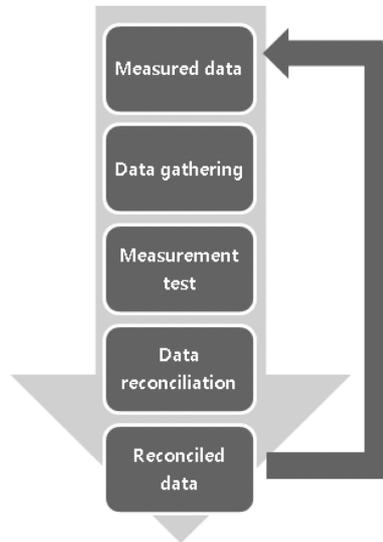


Fig. 4. Data reconciliation procedure.

하고 안정한 상황으로 평가하여 결국 심각한 피해를 야기할 수 있기 때문에 데이터를 재가공하여 신뢰성을 확보하는 것은 반드시 필요한 과정이다[10].

Data reconciliation은 일반적으로 Fig. 4 그림과 같은 과정으로 진행된다. 위의 그림처럼 여러 데이터를 얻고 보정하고자 하는 데이터 부근의 Mass balance와 Energy balance를 통데이터를 비교, 수정하는 과정을 통해 기존 데이터에 신뢰성을 더하는 목적을 달성하는 것을 목표로 한다.

4.5. 통합 안전관리 시스템 설계

최종적인 통합 안전관리 시스템은 위에 해당하는 기술을 연계하여 web-base 환경에서 LNG 시설 관리자가 쉽게 제어 및 분석을 할 수 있는 정보를 제공한다. 각 기술들은 모듈화되어 하나의 소프트웨어 형태로 완성되고 각 모듈의 제어 및 조작은 통합 시스템에서 통제 가능하다. 각 모듈과 통합 시스템의 연계는 Web 환경을 기반으로 하여 이루어지며 이를 통해서 실시간 데이터를 각 세부 모듈로 입력받고 각 모듈은 일련의 과정을 거쳐 결과를 도출해 낸 후 해당 결과를 최종 설비 관리자에게 전달한다. 따라서 각 모듈은 특정 부분에서 이상이 발생했을 시에 이 이상에 관해서 어떻게 대처해야 하는지, 예상 피해 규모는 얼마나 되는지, 그리고 이 이상이 어느 부분으로 확산이 되어 다른 문제를 야기할 지 등에 대해서 기존의 구축된 공정 및 물질 DB를 통해 자료를 얻고 정량화된 수치를 통해 현

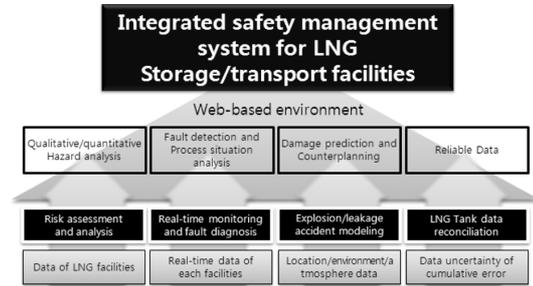


Fig. 5. Development of integrated LNG safety management system.

재 LNG 설비의 상황이 안전 범위 안에 있는지를 출력하여 관리자에 경고 혹은 즉각적인 대응책 제시 등의 정보를 제공한다. 관리자는 이 정보들을 통해서 현재 LNG 저장/수송시설이 성공적으로 제어되고 있는지를 판별하며 이것이 원활치 않을 때에는 능동적으로 on-line 제어를 통해 설비 시스템을 안정화 시킨다.

V. 결 론

위와 같은 연구를 통해 LNG 저장/수송 시설에 대해서 설계 단계에서도 시설의 위험성을 평가할 수 있으며 공정 각 단계의 위험도를 평가하여 우선 순위를 매기고 폭발 및 누출 등의 사고 발생 시에 피해 규모 혹은 확산 상황을 예측하고 이에 따라 대처 방안을 마련할 수 있고 위험 요소 등의 여러 공정 데이터를 일련의 보정 과정을 통해서 신뢰성 있는 데이터로 가공하여 실시간으로 LNG 공정의 이상 현황을 파악하여 진단할 수 있는 통합 안전 관리 시스템을 제안한다. LNG 저장 수송 시설 통합 안전 관리 시스템은 앞에서 언급한 여러 기능들을 한데 모아서 사용자가 알기 쉽고 보다 사고 발생 가능성을 감소시키며 사고 상황에 빠르게 대처할 수 있도록 정보를 제공할 것이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 에너지기술혁신 프로그램의 일환으로 수행되었습니다(“차세대 에너지안전 첨단관리 시스템 구축” 연구단, 세부과제번호: 2007-M-CC23-P-05-1-000).

참고문헌

[1] BP Statistical Review of World Energy, British

- Petroleum, (2007)
- [2] 김청균, “LNG 산업의 프로세스 통합 정보망 시스템에 관한 연구”, *KIGAS*, **6**(1), 59-65, (2005)
 - [3] 김청균, “LNG 저장탱크의 통합제어 안전관리 시스템에 관한 연구”, *KIGAS*, **9**(1), 44-50, (2005)
 - [4] Cutter, S.L. *American Hazardscapes: The Regionalization of Hazards and Disasters*, Joseph Henry Press, (2001)
 - [5] 박교식, 윤인섭, “정 안전공학”, 청문각, (2007)
 - [6] Gibson, N. “Hazards XII: European Advances in Process Safety”, Institution of Chemical Engineers, (1994)
 - [7] American Institute of Chemical Engineers, 1987, “DOW’s Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide”, American Institute of Chemical Engineers, (1987)
 - [8] American Institute of Chemical Engineers, 1994. “DOW’s Chemical Exposure Index Guide”, American Institute of Chemical Engineers, 1st ed., (1994)
 - [9] Tixier, J., G. Dusserrea, O. Salvib and D. Gastonb, “Review of 62 Risk Analysis Methodologies of Industrial Plants”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **15**(4), 291-303, (2002)
 - [10] Crowe, C.M. “Data Reconciliation - Progress and Challenges”, *Journal of Process Control*, **6**(2-3), 89-98, (1996)