

# 수소충전소 웹기반 가상교육 시뮬레이터 개발

김은용, 김진경, 이영희, 김은정\*, 김영규\*, 문일  
연세대학교, 한국가스안전공사\*

## Development of Web-based Simulator for Hydrogen Station

Eunyoung Kim, Jinkyung Kim, Eunjung Kim, Younggyu Kim and Il Moon  
Yonsei University, Korea Gas Safety Corporation\*

### 요 약

본 연구에서는 수소 경제의 핵심 인프라 시설인 수소 충전소의 조업자 안전 운전을 위한 교육 및 훈련 프로그램을 구축하였으며, 개발된 프로그램은 크게 수소안전교육 모듈, 수소 충전소 가상체험 모듈, 가상 사고 시나리오 모듈로 구성 되어 있다. 수소안전교육 모듈에서는 수소 사고의 특징과 안전 물성 등의 자료를 수록함으로써 수소에 안전에 대한 이해를 돕도록 하였으며, 가상체험 모듈에서는 충전소의 구성과 용도를 3D Virtual Reality 기술을 도입해 간접 체험할 수 있도록 하였다. 또한 가상사고 모듈에서는 수소 충전소에서 일어날 수 있는 사고에 대한 동적 모사를 수행하여 사고의 전개 과정 및 결과를 체험해 볼 수 있도록 하였다. 이와 함께 사고가 일어났을 경우 신속하고 정확한 대응을 통해 피해를 최소화하기 위한 ERP(Emergency Response Plan)과 SOP(Standard Operating Procedure)를 개발하였다.

주요어 : 수소 충전소, 가상체험, 사고시나리오, 조업자 훈련, 수소 안전

### 1. 서론

화석 연료를 대체 할 에너지원으로 태양광, 풍력, 수소 등 친환경적이고 재생 가능한 에너지가 전 세계적으로

연구 검토 되고 있는 가운데 수소 에너지는 고효율, 무한, 청정 등의 에너지원으로서 갖추어야 필수 조건을 만족하고 있어 차세대 동력원으로 가장 각광받고 있다. 수소의 다양한 효용성

에도 불구하고 수소는 다른 고압가스보다도 강한 폭발성, 넓은 폭발범위, 착화의 용이성, 빠른 화염속도 등의 특성이 있기 때문에 생산(제조), 저장, 운송, 충전 및 이용 등에 있어 안전성의 확보는 매우 중요한 선결과제이다. 이에 미국, 유럽, 일본 등 에너지 선진국에서는 여러 가지 국가사업을 수행하여 차세대 에너지원으로서의 수소안전에 대한 연구개발에 투자하며 치열한 개발 경쟁을 벌이고 있다. 또한 수소 경제의 인프라인 수소 충전소를 설치하여 수소연료전지 자동차의 연료 및 발전 동력으로 사용되고 있다. 현재 국내에서도 시범적으로 6기 정도의 수소 충전소가 설치되어 있으며 운영할 계획에 있지만 사고 발생 시 수소의 폭발 특성상 중대 사고로 이어질 가능성을 배제할 수 없어 인허가를 받는 과정에 많은 어려움을 받고 있다.[2]

따라서 안전한 수소 이용을 위해서는 반드시 위험요소를 고려하여 수소 충전소 설비의 안전 대책을 세워야 하며 만일 누출된다고 해도 폭발 한계에 들어가지 않도록 충분히 환기시키거나 점화 원인을 없애기 위한 대책이 마련되어야 한다. 이와 같이 수소 충전소에서 안전운전을 위해 수소 충전소 조업자의 교육과 훈련을 할 수 있도록 본 논문에서는 수소 충전소의 설비 및 안전장치와 구조를 가상으로 체험할 수 있는 프로그램을 개발하였고 또한

수소 충전소에서 발생할 수 있는 사고에 대해 동적 모사로 사고모사를 하였다. 이를 기반으로 사고가 일어났을 경우 피해를 최소화하기 위한 ERP, SOP를 개발하였다.[4]

## 2. 본론

### 2.1 수소 충전소의 교육

수소 충전소 (hydrogen fueling station)는 연료전지 자동차와 수소 내연기관의 상용화를 위한 인프라 기술로서 연료전지 및 수소 자동차에 수소를 공급하는 시설이다. 수소 충전소는 액체 수소 및 기체 수소를 공장(off-site)에서 제조하여 차량에 의해 운반한 후 연료전지 자동차에 공급하는 방식과 현지(on-site)에서 직접 수소를 제조하여 차량에 수소를 공급하는 방식으로 구분할 수 있다.

본 논문에서는 위와 같이 수소충전소의 정의뿐만 아니라 종류, 국내외 수소충전소 현황, 수소 충전소의 경제성, 수소 충전소의 안전성과 같은 교육자료 개발을 포함한다. 또한 차세대 에너지로서의 수소 에너지가 차지하는 경제성과 수소가 제조, 수송, 저장, 분배되는 기술, 수소의 안전기술등에 관한 교육 자료개발도 포함된다.

예를 들어 수소 충전소의 정의에서는 탄화수소의 개질반응 및 전기분해 반응을 이용한 수소의 생산 공정으로

부터 원활한 수소 분배와 저장을 위한 수소의 압축공정, 압축시킨 수소를 Cascade 방식에 의해 저장시키는 저장 공정, 저장된 수소를 연료전지자동차로 충전시키는 충전공정까지에 대한 일련의 과정에 대한 교육자료가 다루어져 있다. 또한 수소 충전소의 안전성 교육 자료에서는 사고 시 그 피해를 막기 위한 방폭 장치로서 두께 200mm의 철근으로 설치된 방호벽, 수소의 누출을 감지하는 센서인 수소누출 감지기, 긴급 상황시 수소의 공급을 차단하기 위한 긴급차단장치(Emergency Shutdown Device), 충전 중에 차량의 출발로 인한 사고를 막기 위한 Breakaway 등에 대한 설명을 다루고 있다.

## 2.2 수소 충전소 가상체험 시뮬레이터 개발

본 논문은 가상현실 소프트웨어인 EON Studio를 사용하여 천연가스 스팀개질 방식, LPG 스팀개질 방식, 나프타 스팀개질 방식, 압축수소 수송방식, 전기분해 방식, Kerosene 스팀개질 방식의 국내 및 해외에 존재하는 6가지 유형의 수소 충전소에 대해 가상체험 프로그램을 개발하였다. 수소 충전소 설비(탈황기, 개질기, 수성가스전환기, 수소흡착분리기, 전기분해장치, 압축기, 저장기, 충전기, 파이프, 방출관, 제어실, 연료전지자동차 등) 및 안

전장치(긴급차단장치, 방출관, PLC, 방호벽, Breakaway, 충돌 방지턱, 수소누출감지기 등)을 3D MAX를 통하여 모델링하고 이를 EON studio에 입력하여 최종적으로 웹기반 3D 형태로 시뮬레이터를 개발하였다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 전기분해 방식 수소 충전소 및 Kerosene 스팀개질 방식 수소 충전소의 시뮬레이터 화면을 나타낸다.[3]



Fig. 1 Simulator module of electrolysis type



Fig. 2 Simulator module of kerosene steam reforming type

시뮬레이터 구성은 그림과 같이 직접 체험 가능한 3D가상체험 화면과

주요설비에 대한 텍스트 설명부분, 공정 절차 부분 등으로 GUI를 구성하였다. 또한 Fig. 3 과 같이 충전소의 주요 설비(생산기, 압축기, 저장기, 충전기)에 대해서는 자세한 구성과 설명을 볼 수 있도록 추가적인 이벤트를 구축하였다.



Fig. 3 Object view of compressor

### 2.3 수소 충전소 가상사고 시뮬레이터 개발

본 논문은 수소충전소에서 일어날 수 있는 사고 시나리오에 대한 다이나믹 시뮬레이션 결과를 상용화된 CFD 툴을 이용하여 나타내었다. 기본 지오메트리는 가상체험공간에서의 수소 충전소 유형을 그대로 가져와 수행하였으며 그 누출 및 폭발 결과 파일은 간단한 시나리오 설명과 함께 동영상 화면으로 나타내어 수소가 누출 및 폭발이 일어났을 경우에 대한 영향 범위 및 농도, 압력에 대한 양상을 쉽게 볼 수 있도록 나타내었다.

#### 2.3.1 가상사고 시나리오

수소 충전소에서는 장치의 오작동, 장치의 부식, 외부적 충격, 조업자의 실수 등의 이유로 인한 누출, 화재 및 폭발과 같은 사고가 발생할 수 있다. 또한 수소가 누출되는 설비에 따라 그 방출 속도, 압력, 온도 등이 다르기 때문에 각 설비에서 일어나는 사고마다 그 피해 범위가 다르게 나타난다.

따라서 개발된 사고 시나리오는 충전기, 방출관, 압축기, 저장기, 파이프, 튜브트레일러와 같은 설비에서 기후 및 누출 방향을 고려하여 약 20가지의 시나리오로 나누었다. 다음은 사고 시나리오에 대한 예를 나타낸다.

scenario	사고 발생점	원인	결과
scenario 1	충전기	차량과 충전기의 충돌	누출, 화재, 폭발
scenario 2	충전기	충전기 호스의 기계적 결함, 잘못된 연결	수소 누출
scenario 3	충전기	호스의 부식	수소 누출
scenario 6	저장기	기계적 결함, 부식으로 인한 탱상 결함	누출
scenario 7	저장기	기계적 결함, 부식으로 인한 탱저 결함	누출
scenario 8	압축기	압력 저하 밸브 미작동, 과압	누출
scenario 9	압축기	압력 저하 밸브 미작동, 파이프에 downstream 아기	수소 누출
scenario 10	방출관	접지가 잘 이루어 지지 않아 전기적 스파크 발생	화재 및 폭발

Table 1. Accident scenario in hydrogen fueling station

#### 2.3.2 사고 시나리오 시뮬레이션 결과

각 누출 사고에 대한 시나리오는 상용화된 공정모사 툴을 이용하여 각 누

출지점에서의 압력, 온도, 대기상태, 부력, k-ε모델 변수 등을 고려하여 분석하였고 시나리오에 의한 결과와 같은 요소에 주된 영향을 받게 되므로 그 외 변수는 이상기체로 가정하여 나타내었다.

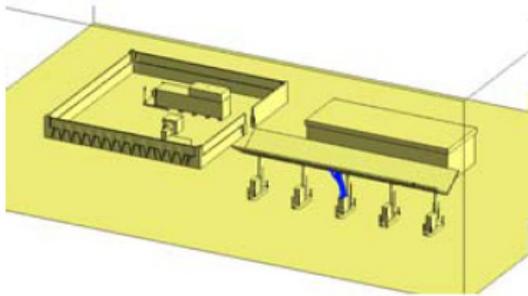


Fig. 4 Leak simulation result in dispenser after 0.1 second

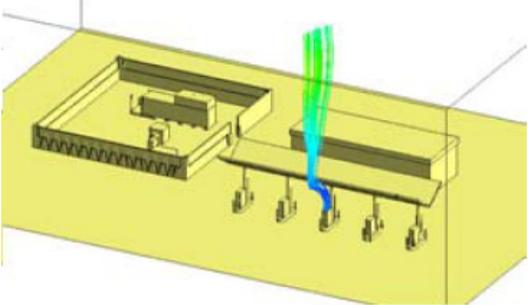


Fig. 5 Leak simulation result in dispenser after 0.8 second

Fig. 4 및 Fig. 5는 충전기에서 누출이 일어나는 사고 시나리오에서 0.1초와 0.8초 후에 수소의 누출 결과를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 또한 밑의 Fig. 6 및 Fig. 7은 0.177초와 0.197초 후에 수소의 폭발 결과를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 보는 바와 같이 수소가 폭발 하면 매우 빠른 속도로 전

달되며 그 압력의 영향에 의해 주변에 큰 충격을 가하게 한다. 하지만 또한 수소는 누출 시 부력작용에 의해 위로 빠르게 확산된다. 따라서 누출 사고가 일어났을 경우 환기 시설, 누출 감지, 긴급차단시설, 전원 차단시설 등이 잘 이루어져있다면 수소가 공기 중에 빠르게 확산되어 화재 및 폭발로 가는 대형 사고를 막을 수 있으므로 그 사고 피해영향을 크게 줄일 수 있다. [1]

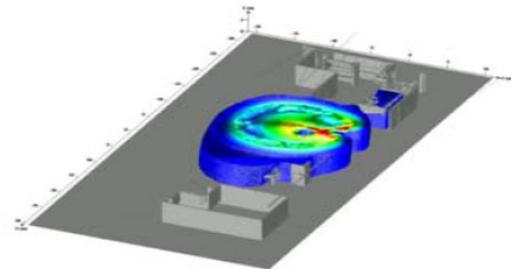


Fig. 5 explosion simulation result in dispenser after 0.177 second

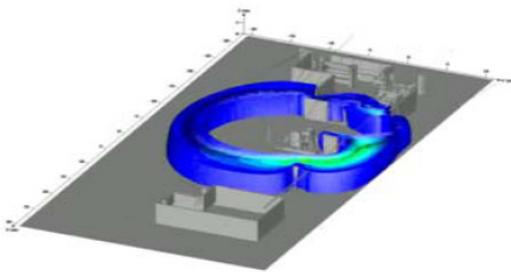


Fig. 6 explosion simulation result in dispenser after 0.194 second

#### 2.4 사고대응대책(ERP) 및 표준운전절차(SOP) 개발

수소 충전소 가상체험 모듈 및 가상 사고 시나리오 모듈 구축을 통하여 수소 충전소에서 안전운전을 하기 위한 표준운전절차 및 사고대응대책을 개발하였다. 사고대응대책은 크게 단지 누출만 일어났을 경우와 누출 후 화재로 이어졌을 경우로 나누어 그 대책을 수립하였다. 개발 내용은 사고 발생시 대응 절차 체계 및 사고 후 복구 과정을 각 부서와 그에 따른 임무를 부여하여 체계적으로 구성하였다. 표준운전절차에서는 충전소의 안전운전을 위해 수소의 생산부터 충전기로의 수송까지의 공정상태, 절차, 운전법등의 표준 가이드를 구축하였다.

### 3. 결론

본 연구에서는 조업자가 수소 충전소를 가상체험 함으로써 충전소 시설 및 안전장치에 대해 미리 체험 할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 또한 수소 충전소에서 일어날 수 있는 20가지의 시나리오를 개발하여 동적 모사를 통해 그 결과와 영향을 평가 하였다.

본 개발을 통해 수소 충전소의 조업자는 충전소를 가상체험해 봄으로서 안전운전에 대한 교육 및 훈련을 할 수 있다. 또한 일반인들에게도 수소경제의 인프라인 수소 충전소에 대한 홍보를 할 수 있으며 추가로 구축된 수소 및 수소 충전소 교육자료를 통해 수소의 안전성에 대한 교육 효과를 가

져올 수 있다.

### 참고문헌

- [1] Molkov, V. and Makarov, D., "Large Eddy Simulation of Hydrogen-Air Explosion at Elevated Temperature", *Advances in Chemical Physics*, 23, No.8, pp. 25-36., (2004)
- [2] 김종수, 이광원, "수소안전기술의 동향", 수소에너지정보 제 2호, 고효율 수소에너지 제조, 저장, 이용기술 개발 사업단, (2004)
- [3] Marshall Miller, "Hydrogen Fueling Stations", *Institute of Transportation Studies*, (2005)
- [4] 21C 프론티어 수소에너지 기술개발 사업단, "수소에너지", 도서출판 아진, (2005)