

## 수소경제로의 이행을 위한 안전관리 정책 연구

전대천<sup>†</sup>

한국산업기술대학교

### A Study on Safety Policies for a Transition to a Hydrogen Economy

DAECHUN JUN<sup>†</sup>

Korea Polytechnic University, 237 Sangidae-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, 429-923, Korea

**Abstract** >> Hydrogen, which can be produced from abundant and widely distributed renewable energy resources, seems to be a promising candidate for solving the concerns for improving energy security, urban air pollution, and reducing greenhouse gas emissions. The two primary motivating factors for hydrogen economy are fossil fuel supply limitations and concerns about global warming. But the safety issues associated with hydrogen economy need to be investigated and fully understood before being considered as a future energy source. Limited operating experience with hydrogen energy systems in consumer environments is recognised as a significant barrier to the implementation of hydrogen economy. To prevent unnecessary restrictions on emerging codes, standards and local regulations, safety policies based on real hazards should be developed. This article studies briefly the direct impact-distances from hazard events such as hydrogen release and jet fire, and damage levels from hydrogen gas explosion in a confined space. Based on the direct impact-distances indicated in the accident scenarios and consumer environments in Korea, the safety policies, which are related to hydrogen filling station, hydrogen fuel cell car, portable fuel cell, domestic fuel cells, and hydrogen town, are suggested to implement hydrogen economy. To apply the safety policies and overcome the disadvantages of prescriptive risk management, which is setting guidance in great detail to management well known risk but is not covering unidentified risk, hybrid risk management model is also proposed.

**Key words** : Hydrogen economy(수소경제), Hydrogen jet release(수소 제트 누출), Hydrogen jet fire(수소 제트 화재), Hydrogen explosion(수소 폭발), Safety policy(안전정책), Hybrid risk management model(복합위험관리모델)

#### Nomenclature

$d_{hole}$  : diameter of hole, m

$L_f$  : length of jet fire, m

$P$  : explosion pressure in confined space, bar

$P_o$  : operation pressure of hydrogen, Pa

$P_E$  : maximum explosion pressure, bar

$T_o$  : operation temperature of hydrogen, K

$V$  : total volume of confined space, m<sup>3</sup>

$V'$  : volume of hydrogen-air mixture, m<sup>3</sup>

$x$  : length of hydrogen jet, m

<sup>†</sup>Corresponding author : dcjun@hanmail.net

[ 접수일 : 2014.3.17 수정일 : 2014.4.1 게재확정일 : 2014.4.30 ]

Copyright © 2014 KHNES

## 1. 서 론

지구 온난화 문제를 해결하기 위해 단기적으로는 이산화탄소 포집-저장 기술이 거론되고 있지만, 중장기적으로는 수소에너지를 활용하는 것이 가장 효율적이라고 이미 잘 알려져 있다. 수소에너지의 관련기술은 온실가스 감축의 문제점을 해결할 뿐 만 아니라 도심지 대기오염 문제, 에너지 보안, 그리고 화석에너지 가채량 한계 문제를 해결하기 위한 미래기술로 국가 경쟁력 향상을 위해 선진국에서 수 십 년 전부터 연구개발에 많은 투자를 하고 있다. 수소는 지구에서 가장 풍부한 물질이고 다양한 에너지 자원으로 부터 수소를 생산할 수 있고, 전기와 달리 대량으로 저장이 가능한 무한 순환 청정에너지이다. 또한 수소를 연료로 상용하는 연료전지 자동차는 배출되는 오염물질은 거의 없으므로 도심지 대기환경을 개선하기 위하여 미래의 교통수단으로 고려되고 있다. 수소는 이러한 장점 때문에 미래의 에너지로 활용될 가장 유력한 물질이고, 지구 온난화 문제를 해결하기 위하여 2020년에 수소관련 상품의 상용화를 시작하여 2040년에는 수소경제 실현을 목표로 함으로 2050

년까지 모든 분야에서 이산화탄소의 배출량을 50%에서 80% 의무적 절감목표를 달성하기 위한 물질로 고려되고 있다<sup>1)</sup>. 수송 분야는 타 분야보다 더욱 이산화탄소 절감을 요구하고 있으며, 하이브리드 엔진개발 등의 기술발전에 의한 효율향상으로 이미 이산화탄소 배출의 50%는 절감하였지만, 더욱 감소의 요구를 피할 수 없으며 이에 대한 유일한 방법은 수소 연료전지 자동차이다<sup>2)</sup>. 수소 연료전지 자동차의 가격은 대부분 연료전지와 수소 저장설비의 가격에 크게 의존한다. 자동차용 연료전지의 가격은 현재 50만대 생산기준으로 내연기관에 비하여 가격이 약 2배 정도(60\$/kW)까지 기술개발이 되어 있고, 70MPa으로 저장설비의 가격은 250-350\$/kWh로 미국 에너지부에서 2015년까지 목표로 하는 2\$/kWh와는 기술 수준이 상당히 거리가 있는 실정이다<sup>3)</sup>. 따라서 수소경제로의 이행을 위해서는 더욱더 기술개발 뿐 만 아니라 기존 에너지 산업의 인프라에서 수소 인프라로의 전환에 대한 저장과 에너지 산업계, 즉 에너지 회사, 석유 회사, 그리고 자동차 회사에 미치는 영향을 고려하고 정부차원의 인센티브 및 안전정책이 매우 중요한 역할을 한다.

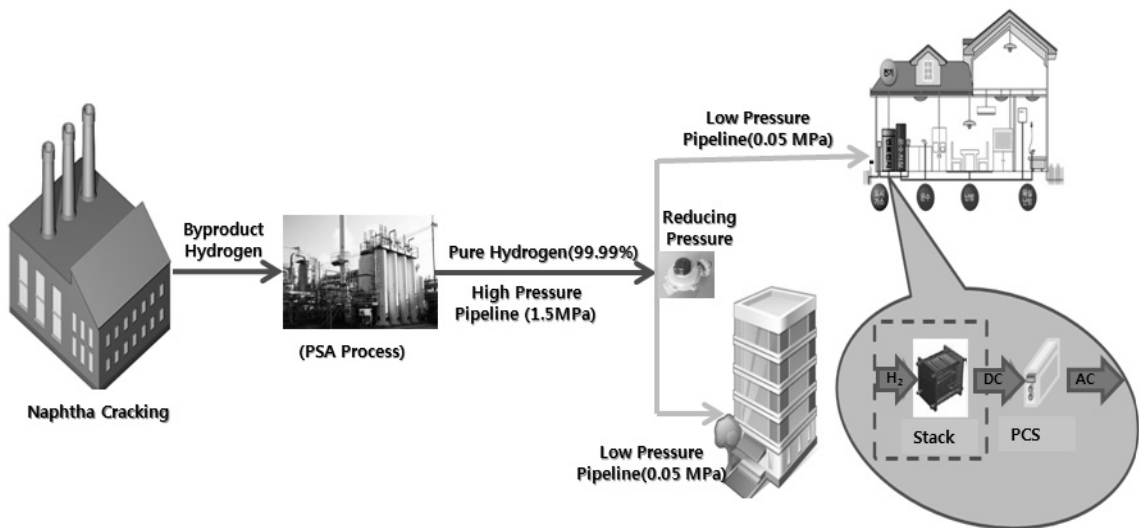


Fig. 1 Overview of Hydrogen Town in Ulsan

가정용 연료전지는 일본 기타규수지역의 스마트 사회 프로젝트의 일환으로 신일본 제철의 수소를 공급 받아 상업용 및 공공시설에 연료전지를 설치하여 시범운영하고 있다. 국내에서는 울산 산업단지에서 발생하는 부생 수소를 이용한 수소타운을 2013년 7월에 준공하여 세계 최대 규모(연료전지 1kW급 140기, 5kW급 9기, 10kW급 1기)로 수소 수송 인프라부터 시작하여 이용까지 시범운영하고 있다. 수소가스 공급은 Fig. 1과 같이 석유화학 공장에서 발생하는 부생 수소를 고 순도로 분리하고, 약 1.5MPa로 주 배관을 통하여 수송하고, 약 0.05MPa으로 감압하여 공급배관으로 건물까지 수송하여 연료전지를 운전한다. 수소타운 시범운영에서는 사고를 예방하기 위하여 압력 경보기, 가스차단밸브, 온도 경보기, 가스 누출 센서와 환풍기, 기기 비정상 작동의 경우 경보 및 자동정지 시스템, 각 시설의 원격 모니터링 및 제어설비와 같은 안전장치를 사용하고 있다.

지금까지 수소관련연구는 수소 생산, 공급, 이용 및 인프라 구축 등 수소에너지 기반구축 시 경제성 분석 연구, 수소 물질 및 연료전지 특성 등 수소연료전지 기초 연구, 수소 제조부터 이용까지 장치개발 연구, 그리고 수소안전 연구가 주를 이루고 있다. 수소 안전연구는 수소충전소, 연료전지, 그리고 수소가스 소비자에서 발생 가능한 고압 수소의 누출, 자연 발화, 폭발, 그리고 제트화재와 같은 사고와 사고에 의한 피해범위 및 피해완화에 대한 이해를 증진시키기 위한 연구를 수행하여 왔다<sup>4)</sup>. 그러나 지금까지 수소의 위험에 대한 연구결과를 바탕으로 수소경제로의 이행에 대한 수소 안전관리 정책은 거의 연구가 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 안전관리와 직접 관련된 누출, 확산, 폭발, 그리고 화재의 피해해석에 대한 간략한 모델들을 도출하고, 수소 연료전지 자동차의 보급에 따른 기반시설인 수소충전소, 수소 이용기기인 가정용 연료전지, 휴대용 연료전지 등의 안전문제를 국

내 환경과 도출한 피해모델을 기반으로 향후 수소 경제로의 전환에 따른 안전관리 정책방향과 이를 적용할 수 있는 위험관리 모델을 제시하고자 한다.

## 2. 수소관련 안전기술

수소경제로 진입하기 위하여 수소 연료전지 등의 기술개발 뿐 만 아니라 사회적 위험을 수용할 수 있는 수준의 안전성 확보가 무엇보다 중요하다. 위험에 대한 사회적 수용성은 수소시설 및 제품의 설계에 있어서 정성적인 위험성 검토와 이용에 있어서 정량적인 해석을 통하여 위험을 검토하여야 한다. 이러한 검토를 하기 위하여 수소의 특성을 고려한 과학적인 위험성 해석이 필요하다. 본 장에서는 수소 시설 및 제품의 안전성 검토에서 고려해야 할 누출, 확산, 폭발 그리고 화재에 대하여 살펴보고자 한다.

### 2.1 수소가스의 누출

수소이용 시설은 대부분 고압의 수소를 이용하므로 수소가스가 누출 될 때에는 작은 홀을 통하여 제트 누출의 양상을 가지게 된다. 이때 누출속도는 저장 압력에 따라서 증가하다가 음속에 달하게 된다. 수소가스가 누출되면 주변의 공기를 빨아들여 누출 지점에서 거리가 멀어짐에 따라 급격히 희석되며 연소하한 이하의 농도에 도달하면 화재나 폭발 위험성은 사라지게 된다. 만약 주변 구조물이 제트 누출에 의하여 형성되는 수소의 연소범위 농도 내에 존재한다면, 구조물 내에 가연범위의 수소가스가 체류하여 화재나 폭발 위험성이 있게 된다. 따라서 제트 누출의 길이는 화재나 폭발 위험성이 사라지는 지점인 연소하한 농도까지 정의할 수 있다. 이 길이는 시설로부터 부지경계까지 안전거리를 설정하는데 한 개의 중요한 요소로 유용하게 활용할 수 있다. 즉 수소가스의 누출에 의하여 폭발농도에 있는 수소가스 체

류를 방지하기 위하여 사업자는 수소제트 누출에 의하여 형성되는 위험거리까지 주변에 구조물이 설치될 수 없도록 부지를 확보하는 것이 필요하다. 이론적으로 제트 누출 길이는 식(1)에 의하여 계산할 수 있다<sup>5)</sup>.

$$x = 10.84d_{hole} \left( \frac{P_0}{T_0} \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서 온도( $T_0$ )는 저장온도이고, 압력( $P_0$ )은 저장압력이고, 직경( $d$ )은 누출 홀의 직경으로 MKS 단위이다. 제트 누출 길이는 위 식에서 볼 수 있듯이 누출 홀의 직경이 클수록, 운전압력이 높을수록 길게 된다.

## 2.2 수소가스의 확산

수소가스는 공기에 비하여 밀도가 약 1/15 밖에 되지 않기 때문에 개방공간에 누출되면 부력에 의하여 상부로 급속히 확산되므로 위험성이 상대적으로 낮은 편이다<sup>6)</sup>. 만약 고압의 수소가 수평 또는 아래 방향으로 누출되는 경우 지면에서 폭발한계 농도를 형성할 수 있으며, 폭발한계 농도범위 안에 있는 수소가스의 총량은 전산유체역학 모델 또는 단순화된 모델을 이용하여 예측할 수 있다<sup>7)</sup>. 개방공간에서 폭발한계 농도범위 안에 있는 수소가스의 총량은 총 가스누출 양에 비하여 매우 작은 양으로 일반적인 폭발 위험성 평가에서 누출된 가스 총량의 3%정도를 잡는다. 그러나 밀폐된 공간에서 수소가스가 누출될 경우 폭발범위 내에 있는 수소가스의 양은 거의 누출된 수소가스의 총량이 된다. 따라서 밀폐공간 또는 반 밀폐공간에서 체류된 수소가스의 폭발 위험성은 개방공간에서 수소폭발 위험성에 비하여 매우 높은 편이다. 밀폐공간에서 수소가스 폭발 위험성을 분석하기 위하여 누출된 수소가스의 확산, 체류, 그리

고 환기에 대한 연구가 최근에 이루어지고 있다<sup>8,9)</sup>. 특히 차고지, 터널, 그리고 가정집과 같은 반 밀폐공간에서 가스누출로 폭발사고는 심각한 피해를 동반할 수 있다. 밀폐공간에서 누출된 수소 가스는 부력에 의하여 상부로 빠르게 올라가고, 수소의 농도는 천정부분에서 가장 높고 아래 방향으로 갈수록 급격히 감소하는 경향을 보인다. 따라서 밀폐공간 또는 반 밀폐공간에서 수소가스를 취급할 때 환기구와 가스센서는 상부에 두는 것이 효율적이다. 실 규모 확산실험에서 바닥면 근방에서 가스농도는 거의 제로이다<sup>10,11)</sup>.

## 2.3 수소가스의 폭발

수소가스는 다른 가연성 가스에 비하여 연소속도가 매우 빠르기 때문에 밀폐공간에서 폭발이 일어날 경우 타 가연성가스에 비하여 일반적으로 피해가 크다<sup>12)</sup>. 그리고 대부분 가연성 가스는 과잉 반응물이 없는 화학 당량비에서 가장 폭발 위험성이 높은 것으로 알려져 있지만, 수소는 화학 당량비 보다 높은 농도에서 가장 위험한 것으로 최근 알려졌다. 즉 수소는 공기 중에서 농도가 30-40%에서 폭발이 일어날 때 가장 위험하다<sup>13)</sup>. 수소는 앞 확산에서 언급하였듯이 밀폐공간에서 심한 불균일 농도 분포를 가지므로, 수소폭발 위험성 해석에서는 반드시 수소의 불균일 농도 분포를 고려하여야 한다. 수소가스는 폭발범위가 매우 넓다. 따라서 누출되어 체류된 수소는 대부분 연소되어 폭발압력 또는 열 발생에 기여하는 것으로 가정하여 폭발사고 피해정도를 예측할 수 있다. 밀폐된 공간 내에서 고립된 가상의 균일농도 분포를 가지는 가연성 가스혼합물이 일정부피에서 연소가 일어나 최대 폭발압력까지 압력이 상승하고, 연소된 가스는 등온 팽창하여 최종 폭발압력에 도달한다는 가정에 의하여 폭발압력은 단순히 다음 식으로 예측할 수 있다<sup>14)</sup>.

**Table 1** Damage Criteria of Explosion

Damage Criteria	Hazard
Minor Damage ( $\Delta P > 3$ kPa)	Significant cosmetic damage to structure. Building repair is possible. Possible minor personnel injury due to glass breakage or scabbing
Moderate Damage ( $\Delta P > 7$ kPa)	Possible deformation of structural members, short of failure. Building may be reusable without repair. Possibly some debris formed. Personnel injury from debris is likely
Major Damage ( $\Delta P > 14$ kPa)	Possible failure of isolated structural members. Partial building collapse. Building cannot be reused and must be replaced. Possible serious injury or fatality of some building occupants
Catastrophic Damage ( $\Delta P > 21$ Kpa)	Complete collapse of structure. Probable serious injury or fatality of all occupants

$$P = \frac{1}{V} [P_a (V - V') + P_E V'] \quad (2)$$

여기서  $V'$ 는 일정한 수소농도로 고립된 혼합가스의 부피,  $V$ 는 밀폐공간의 총 부피,  $P_a$ 는 대기압이고,  $P_E$ 는 혼합가스가 일정한 부피에서 폭발할 때 발생하는 최대압력이다.

폭발압력에 따라 피해정도는 Table 1에 나타내었다<sup>14)</sup>. Table 1에서 볼 수 있듯이 폭발압력이 3kPa에서 유리창 등이 파손되는 경미한 피해를 유발할 수 있고, 7kPa에서 건물의 일부에 손상을 주어 수리하지 않고는 이용할 수 없을 중간정도의 피해를 발생시키고, 14kPa에서는 건물의 일부만이 붕괴할 수 있는 심각한 손상을 발생시키며, 21kPa에서는 건물이 무너질 수 있는 매우 심각한 피해를 동반하게 된다. 따라서 피해정도에 따른 최소 수소가스 체류량을 산출할 수 있다.

## 2.4 수소가스의 화재

수소가스는 점화 에너지가 매우 낮기 때문에 고압으로 누출될 경우 정전기에 의하여 쉽게 점화되어

제트화재를 형성하는 것으로 알려져 있다<sup>15)</sup>. 따라서 고압 수소가스의 누출에 의한 1차적인 위험은 제트 화재에 의한 피해이다. 사고지점 주변시설은 제트화재의 복사열 또는 직접 화염에 접촉하여 사고가 확대되어가는 2차사고 위험이 있다.

특히 제트화재가 직접 타 시설물을 가열하여 사고가 확대되어 가는 현상을 예방하기 어렵다. 따라서 제트화재의 길이는 이러한 2차사고 위험을 분석하기 위하여 중요하며, 이는 설비간의 최소이격거리를 규정하는데 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 제트화재의 길이는 누출 직경과 저장압력의 증가에 따라 증가하며 식(3)에 의하여 예측 할 수 있다<sup>7,16)</sup>.

$$L_f = 2.017 \left[ \frac{d_{hole}^2 P_0}{\sqrt{T_0}} \right]^{0.312} \quad (3)$$

## 3. 안전관리 정책

안전관리와 같은 규제정책은 수소경제로 진입에 큰 영향을 미칠 수 있다. 안전정책은 과도한 규제에 의하여 각 산업 분야에서의 초기투자 비용에 크게 영향을 미칠 수 있고 반면에 과도한 완화에 의하여 초기투자 비용은 낮지만 사고에 의하여 지불하여야 할 막대한 비용을 유발할 수 있다. 예를 들면, 독일에서 1900년 초 수소의 부력을 이용하여 경제적인 상용 수소 비행선 개발을 활발히 추진하였다. 그러나 1937년 힌덴부르크 비행선이 미국 뉴저지에 정착을 시도할 때 화재 사고로 35명의 사망자를 동반한 97명의 사상자를 낸 사고 이후 수소 비행선 개발이 완전히 중단되었다. 수소 비행선 교훈에서 볼 수 있듯이 수소경제 진입 초기에 안전을 충분히 검토하여 안전관리 정책을 정립하지 않는다면 대형 사고로 수소경제 실현이 매우 어려워 질 수 있을 것이다. 또한 수소시설이 위험한 혐오시설로 간주되어 인근 주민과 갈등을 야기하여 막대한 갈등해소 비용과 수소경

제 실현을 느리게 할 수 있을 것이다. 따라서 수소에 대한 안전은 사회적 위험을 수용할 수 있고 경제활동을 할 수 있는 적절한 사회적 환경에 맞추어 정책을 수립하여야 한다.

안전관리 규제는 수소에너지가 대중화 될 미래를 대비하여 교육을 받지 않은 일반인의 수소이용에 있어서 안전에 중점을 두고 개발하여야 한다. 그러므로 수소의 안전관리 정책은 과거의 사고경험과, 과학적 접근, 그리고 사회적 위험의 수용성에 기반을 두고 수립되어야 한다. 안전관리 정책이 투자와 신기술 개발에 의한 보상을 낮추게 되면 수소산업의 성장을 지연시키게 된다. 이러한 정책의 산업 성장에 대한 부정적 효과는 신기술 개발에 대한 기회를 상실하게 만들 수 있으므로 신중을 기하여야 한다<sup>17)</sup>. 대중연료로서 수소가스의 안전성을 확보하기 위해서는 다음 사항을 고려하여야 한다.

- 1) 수소와 관련된 기존의 고압가스안전관리법 등과 같은 규정들과의 부합화
- 2) 수소안전에 관련된 산·학·연·관에서 지금까지 개발한 결과의 충분한 활용
- 3) 수소 연료전지 자동차의 자유무역을 위한 국제 규제의 부합화
- 4) 시범운행을 통한 안전기준의 적절성에 대한 검토
- 5) 안전규정을 설정하기 위한 정부와 산업계의 공조

국내에서 수소 경제로의 이행을 위해서 기반시설인 수소 충전소 및 수송망 설치에 있어서는 도심지 인구밀집도가 매우 높은 것을 고려하여야 한다. 그리고 국내에서는 승용차가 대부분 건물 지하 주차장에 주차하고, 가정용 연료전지가 세계에서 유일하게 실내에 설치되는 것을 감안하여야 한다. 따라서 여기에서는 국내 수소경제 실현에 있어서 국내환경을 고려하여 사고 피해범위 해석을 바탕으로 수소 충전소, 연료전지 자동차, 휴대용 연료전지, 가정용 연료전

지, 그리고 수소타운에 있어서 안전정책의 나아갈 방향을 제시하고자 한다.

### 3.1 수소 충전소

우리나라의 수소충전소는 2010년도 발표한 그린카 발전 로드맵에 의하면 2020년까지 168개소를 보급목표로 하고 있고, 현재 국내에 16개소 설치되어 있다. 우리나라는 미국 및 유럽과 달리 수도권에 인구밀도가 매우 높고, 기존의 압축천연가스(CNG: Compressed Natural Gas) 충전소와 유사한 규정으로 신규 수소 충전소를 건설할 부지를 선정하기 매우 어려운 실정이다. 현행 고압가스안전관리법에 의한 신규 CNG 충전소 설치 부지는 수도권에서 선정하기 매우 어려운 실정이고, 기존 충전소에 병행하여 설치할 경우에도 설비간의 충분한 안전거리를 유지하기 어렵다. 따라서 수소 충전소 건립에 가장 걸림돌이 되는 규정은 설비간의 최소이격거리와 사업자 부지경계와의 거리이므로 이에 대하여 살펴보고자 한다. 현행 안전관리 규정은 과학적인 사고피해규모 등의 해석적 기술에 근거하기 보다는 해외 기준과 사고의 경험으로부터 규정적으로 안전기준을 설정하고 있다. 안전거리는 크게 다음과 같은 경우를 고려하여 시설의 안전성과 경제성을 감안하여 설정할 수 있다.

- 1) 최악의 사고에 의한 최대 피해거리
- 2) 현실적으로 발생 가능한 사고에 의한 직접적인 피해거리
- 3) 시설의 작업공간을 위한 최소 이격거리

안전거리는 상기 첫 번째의 경우와 같이 최악의 사고에 의한 최대 피해거리로 설정하는 경우 수소가스의 저장량과 압력에 따라서 다소 다르겠지만 수백 미터까지 될 수 있고, 두 번째와 같이 현실적으로 발생 가능한 사고의 위험거리로 선정하는 경우 수

십 미터가 되고, 그리고 마지막으로 작업공간만 고려한다면 수 미터가 될 수 있다<sup>18)</sup>. 그러므로 안전거리는 설정기준에 따라서 수 미터에서 수 백 미터까지 이를 수 있다. 수소 저장용기의 폭발 또는 대구경 고압배관에서 발생하는 화재에 의한 피해거리는 수 백 미터에 이를 수 있다. 이와 같은 사고 시나리오가 거의 발생하지 않게 안전율을 충분히 감안하여 시설을 설계하고 사고에 대한 피해완화 대책을 충분히 고려하여 수소 시설을 설치하는 경우, 현실적으로 가능한 사고시나리오는 플랜지, 배관 부착물 등으로부터 소규모의 누출사고 이므로 안전거리는 수십 미터로 할 수 있다.

현재 전 세계적으로 수소 연료전지 자동차의 수소 가스 충전압력은 35MPa과 70Mpa이므로, 수소 충전소는 자동차 충전압력보다 약간 높게 약 40MPa과 75MPa으로 운전하고 있다. 수소 충전소의 운전압력에서 수소가스 누출로 형성되는 제트화재의 길이는 식(3)에 의하여 구할 수 있다.

제트화재의 길이는 Fig. 2와 같이 누출 홀의 크기와 운전압력에 따라 증가하게 된다. 비록 작은 핀 홀에서 고압의 수소누출에 의하여 형성되는 화염길이는 수 십 미터까지 되는 것을 알 수 있다. 제트 화염이 주변설비와 직접 접촉에 의한 2차 사고로 전이되

는 것을 예방하기 위하여 수소 설비간의 최소이격거리를 규정하는 것이 필요하다.

만약 누출된 수소gas가 즉시 점화되지 않을 경우 누출된 수소는 개방공간에서 위험성은 거의 없지만 주변에 구조물이 존재하거나 밀폐된 공간에서 수소 가스 체류에 의한 폭발사고와 같은 2차 사고로 전이될 수 있다. 이와 같은 폭발사고를 예방하기 위해서 충전설비와 충전소 부지경계까지 최소이격거리는 누출시 최소연소한계 농도까지 도달거리로 규정할 수 있으며, 이 거리는 식(1)로 산정할 수 있다. 식(1)에 의하여 계산한 연소 하한농도까지 길이는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 누출 홀의 크기에 비례하고 일반적으로 제트 화재 길이보다 길다.

Fig. 2와 3에서 볼 수 있듯이 고압의 수소 충전소에서 수소가스 누출에 의한 2차 사고로 전이되는 것을 예방하기 위한 최소이격거리는 수 십 미터에 달하기 때문에 복잡한 도심지에 수소 충전소를 건설하기 위해서는 충전소의 근본적인 사고 발생 확률을 허용 가능한 범위로 낮추거나 사고 발생시 피해규모를 완화하기 위한 안전장치를 충분히 갖추는 것을 고려하여야 한다. 이와 같이 근본적인 사고발생 가능성을 낮추는 경우 안전거리는 작업 공간을 확보하기 위한 최소한의 거리로 규정할 수 있을 것으로 사료

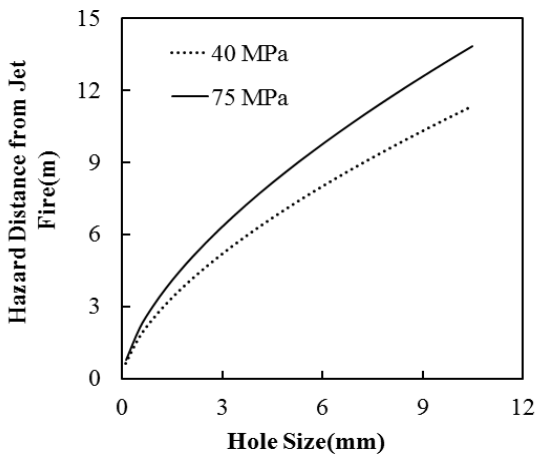


Fig. 2 Hazard distance with hole size due to jet fire

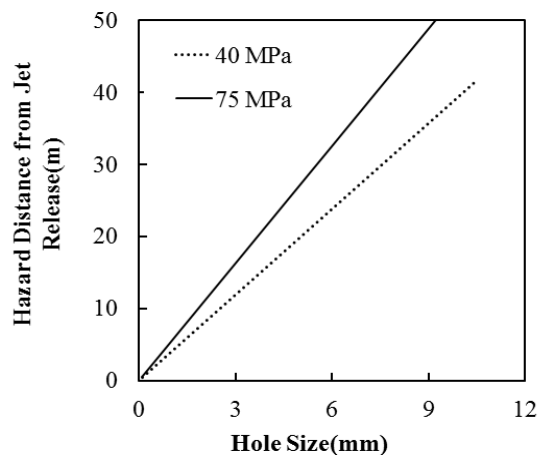


Fig. 3 Hazard distance with hole size due to jet release

된다. 따라서 현행 안전거리는 가연성가스의 저장용량에 기반을 두고 규정적으로 되어 있지만, 수소경제로 진입하기 위해서는 충전소의 안전 설계정도와 사고시 피해완화 안전시설의 설치 정도에 따라서 상기 3가지 안전거리 설정 기준을 탄력적으로 운영하는 것도 고려해 볼 필요가 있는 것으로 사료된다.

### 3.2 수소 연료전지 자동차

국내 자동차의 주차환경은 해외와 달리 수도권에서 대부분의 건물 지하 주차장으로 해외 차고지에 비하여 매우 큰 밀폐공간이다. 지하주차장에서 대량의 수소누출로 폭발사고가 발생할 수 있다. 이러한 사고가 발생하면 수소의 연소특성 때문에 건물이 붕괴되어 막대한 인명과 재산손실을 초래할 수 있다. 지하 주차장과 같은 밀폐된 공간에서 수소 누출로 폭발사고가 발생하는 최악의 경우 고립된 부피의 수소농도는 10%이고 이때 폭발 최대압력( $P_E$ )은 0.43MPa 이므로<sup>13)</sup>, 이를 기준으로 식(2)로부터 계산한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 수소가스의 연소 하한농도는 약 4%이지만, 수소의 불균일 농도분포에 의하여 밀폐공간의 약 0.69%에 해당

하는 적은량의 수소 누출이 건물을 완전히 붕괴될 수 있는 폭발사고를 유발할 수 있음을 알 수 있다.

한국에서 지금까지 액화석유가스(LPG: Liquefied Petroleum Gas) 자동차와 압축천연가스 자동차가 지하 주차장에 주차하여 왔지만, 다행히 지하 주차장에서 가스폭발 사고는 한 건도 발생하지 않았다. 이는 자동차를 정차하는 경우에 가스저장 용기의 메인 밸브가 자동적으로 폐쇄되고, 가스용기에서부터 누출되는 사고를 방지하기 위하여 용기를 정기적으로 검사한 덕분으로 사료된다. 그러나 대형건물의 지하공간에 수소 누출로 폭발사고가 일어나게 되면 수소가스의 연소특성 때문에 천연가스나 LPG에 비하여 상대적으로 매우 큰 피해를 유발 시킨다<sup>6)</sup>. 따라서 수소 연료전지 자동차의 안전정책에 있어서는 LPG 또는 천연가스 자동차에 비하여 안전장치에 대한 규정을 강화해야 될 뿐 만 아니라, 국내 주차장 환경을 고려하여 해외 규정 보다 더욱 가스 누출감지 시스템에 심려를 기울여야 할 것으로 사료된다. 즉 수소연료전지 자동차는 수소누출감지 차단 시스템의 신뢰성을 규정하는 것이 필요하다.

### 3.3 가정용 연료전지

우리나라 정부는 2008년 그린 홈 백만 호 보급사업의 일환으로 가정용 연료전지를 2020년까지 10만 가구 보급계획이고 현재 1,500대 보급되어 있음으로 안전관리 정책은 보급이 활성화되기 전에 반드시 정립되어야 한다<sup>19,20)</sup>. 가정용 연료전지는 연료로 도시가스 및 LPG에 국한하여 ‘액화석유가스의 안전관리 및 사업법’의 가스용품으로 지정되어 있으며, 도시가스와 LPG로부터 개질기를 통하여 수소를 생산 후 연료전지를 운전하게 된다. 휴대용 연료전지와 같이 직접 수소를 이용하거나 DME 등 다양한 연료를 이용할 수 있는 가정용 연료전지 기술개발이 되고 있으므로 도시가스 및 LPG 이외의 연료를 이용하는 가정용 연료전지는 아직 국내에 법이

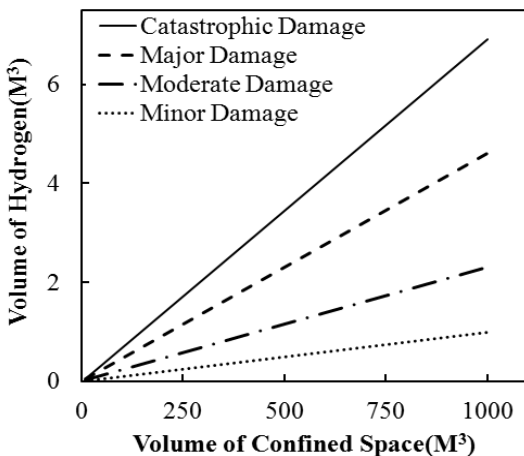


Fig. 4 Minimum hydrogen release in a confined space with damage level



정립되지 않아서 안전 사각지대에 있을 수 있다. 국내 가정용 연료전지는 전 세계적으로 거의 유일하게 실내에 설치하여 시범운영을 하고 있으며, 이에 따라 CO 등의 배기가스 배출문제, 비정상 상태에서의 안전한 정지 등 시스템 안전기준 뿐 만 아니라 설치안전에 대한 고려가 필요한 시점이다. 설치안전 기준은 미국 수송부의 보고서에서 언급 했듯이 연료전지 주변의 가스농도가 연소하한농도의 1/4에서 경보작동 그리고 1/2에서 경보 및 강제배기를 하는 것이 필요하다<sup>21)</sup>. 또한 연료전지 시스템의 안전 성능을 확보하기 위하여 개질기, 스택, 그리고 보조 기기 등의 부품 안전성을 보증하기 위한 인증제도가 필요한 것으로 사료된다.

### 3.4 휴대용 연료전지

휴대용 연료전지는 수소를 연료로 사용하는 방식과 LPG, 부탄, 메탄올 등을 연료로 사용하는 방식이 있다. LPG를 연료로 하는 방식을 제외한 휴대용 연료전지는 국내 가스 관련법에 적용되지 않아 제품 안전관리가 이루어지지 않고 있다. 휴대용 연료전지는 기존의 가정용 연료전지와 달리 이용자의 영향을 크게 받을 수 있고, 다양한 환경에서 이용할 수 있기 때문에 진동 등의 내구성 관련 요소와, fail safe 및 pool proof와 같은 안전성 요소들이 추가적으로 고려해야 할 것으로 사료된다. 따라서 휴대용 연료전지에 대한 안전을 확보하기 위해서는 현재 안전 사각지대로 있는 휴대용 연료전지를 관리 할 수 있는 관련법의 정비가 우선적으로 이루어지고, 이에 따라서 안전 기준은 기존 가정용 연료전지 시스템의 안전기준에 휴대용 연료전지의 이용 특성을 고려하여 보완하면 될 것으로 판단된다. 특히, 초기 연료전지 기동을 위한 배터리 연동, 휴대환경, 휴대용 연료공급 등의 새로운 사안들의 안전기준이 합리적으로 설정되어야 한다.

### 3.5 수소타운

국내 수소타운은 울산산업단지에서 생산되는 부생 수소를 배관으로 가정집까지 공급하여 가정용 연료전지를 운전하는 시범사업으로 운영되고 있다. 여기에서 안전관리는 안전의식이 부족한 각 가정의 불특정 다수에 의하여 수소를 연료로 이용하기 때문에 사용자에게 대한 안전 및 사고시 주변의 피해영향을 검토하여 수립하여야 한다. 에너지원이 고체연료에서 석유, 천연가스, 그리고 수소로 전환됨에 따라 수소는 가까운 미래에 각 가정에서 이용되는 주 에너지로 될 것이다. 그러나 현재 수소타운은 도시가스사업법을 근간으로 안전관리 지침이 임시적으로 적용되고 있는 실정이다. 따라서 저압수소 배관의 재질, 수소품질 및 수소저장 시스템 등 수소연료에 의하여 발생할 수 있는 안전에 있어서 문제점들이 시범운영을 통하여 충분히 검증되고, 이를 바탕으로 수소가스 공급 시스템의 안전관리 기준이 합리적으로 정립되어야 한다.

특히, 현재 수소가스 누출을 쉽게 인지할 수 있는

**Table 2** The main factors in risk management and control methods

Field	Main factors in risk management	Methods to control the main factors
Filling station	The safety distances of hydrogen accidents	Risk based management
Fuel cell car	Confined explosion in parking space	Improve the reliability of leak detector and shutoff system
Portable fuel cell	Mal-operation of user	Fail safe and pool proof
Domestic fuel cell	Explosion in confined space and integrity of fuel cell	Controlled venting of unignited released gas and certification of the components of domestic fuel cell
Hydrogen distribution	Leak detection and integrity	Quantitative risk assessment and integrity management program

적절한 부취제가 개발되어 있지 않은 실정이고, 시범 운영에서는 부취제를 주입하지 않고 순수한 수소로 운영되고 있으므로 천연가스 이용보다 누출에 의한 화재 및 폭발사고 위험이 더욱 크다고 볼 수 있다. 따라서 수소가스의 누출사고를 예방하고 완화하기 위하여 실내 배관의 안전기준에는 누출감지 차단장치의 신뢰성을 규정하는 것과 실내 가스농도가 일정한 값 이상에서 강제배기 시스템을 갖추는 것이 필요하고, 매설배관의 안전기준에는 선진국에서 운영하고 있는 배관 설치시 정량적 위험성평가 제도와 배관 운영시 배관 건전성 관리 프로그램을 도입하는 것이 필요한 것으로 사료된다.

지금까지 앞에서 논한 안전관리 정책은 각 분야별로 화재 및 폭발 모델과 수소특성으로부터 도출한 안전관리에 중요한 요소와 이를 관리할 수 있는 방법을 제시하는 것으로 Table 2에 요약 정리하였다.

#### 4. 위험관리 모델

앞 장에서 도출한 위험관리에 있어서 주요 요소와 안전관리 방안을 수용할 수 있는 새로운 복합위험관리모델(Hybrid Risk Management Model)을 Fig. 5와 같이 제시하였다.

현재 국내 위험관리는 해외제도 및 사고경험을 바탕으로 업체가 안전을 위해서 지켜야 할 모든 사항을 자세히 기술한 규정적 위험관리 모델(Prescriptive Risk Management Model)을 사용하고 있다. 규정적 위험관리모델의 장점은 모든 안전관리 요소가 가능한 상세히 안전관리 제도에 기술되어 있어 제도의 위반여부를 명확하게 판단할 수 있으므로 규제기관과 업체 간의 분쟁을 최소화 할 수 있다. 그러나 규정적 위험관리는 불확정성, 제한성, 그리고 업체의 안전관리 소극성의 단점을 가지고 있다. 즉 수소의 생산부터 이용까지 포괄할 수 있는 모든 위험과 미래에 인지 가능한 위험을 관리하기 위한 방법을 철저히 하고 상세히 규정하는 것은 거의 불가능하고, 위험관

리를 상황에 적절하게 대응할 수 있는 다양한 방법을 허용하기 보다는 일련의 규정을 정해 놓음으로 안전장치 및 안전기술개발의 의지를 저해할 뿐 만 아니라 IT기술 등 주변기술 발전에 따라 효율적인 안전관리 방안을 개발하여도 적용이 용이하지 않다. 그리고 사고의 교훈과 안전지식의 발달에 의하여 안전관리에 심각한 문제점을 인지하여도 정부에서 적절한 제도개선을 하기 전까지는 업체에서 인지된 문제점을 해결하기 위한 노력을 소극적으로 할 수 있다. 따라서 업체가 규정적 위험관리의 준수여부는 주민들에게 일정한 수준까지 안전을 보장 할 수 있는 제도가 아니다. 이러한 규정적 위험관리 모델의 단점을 보완하고, 사고의 교훈과 새로운 안전지식을 쉽게 업체 자원에 의하여 효율적으로 적용하여 주민이 노출되는 총 위험을 규제하는 정량적 위험관리 모델(Quantitative Risk Management)이 유럽에서 적용하고 있다. 정량적 위험관리 모델은 위험평가를 수행하는 자에 따라서 다소 결과가 변하기 때문에 업체와 규제기관 간의 분쟁이 발생할 가능성이 있지만, 최신 안전기술의 적용이 용이하고, 안전투자가 효율적으로 이루어질 수 있는 장점을 가지고 있다.

현재 국내에서 규정적 위험관리 모델을 기반으로 안전관리가 운영되고 있다. 따라서 안전관리 모델은 수소경제 실현에 있어서 규정적 위험관리 모델의 단

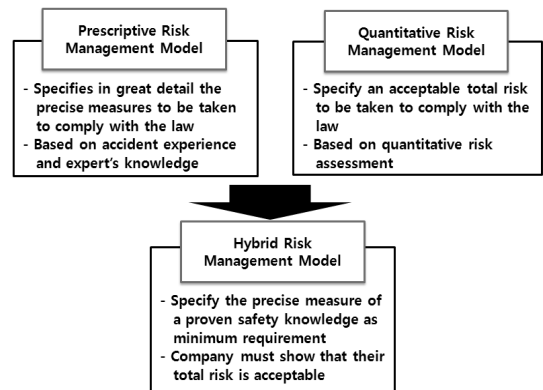


Fig. 5 Risk Management Models

점을 보완하고 안전기술 개발을 촉진하기 위한 정량적 위험관리의 장점을 접목한 복합 위험관리 모델을 적용하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다. 복합 위험관리 모델은 지금까지 명확히 밝혀진 안전지식을 활용하여 최소한의 안전관리 요구사항을 명확히 규정하고, 허용 가능한 총 위험수준을 제도에 규정하는 제도이다. 업체는 자율적으로 안전기술을 시설에 적용하여 총 위험수준을 제도에서 허용하는 위험수준 이하임을 입증하여야 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 수소경제로의 이행에 있어서 안전성을 검토하기 위하여 수소가스 사고에 따른 피해거리와 밀폐공간에서 폭발사고의 피해정도에 따른 수소 최소누출량을 살펴보았다. 수소에 있어서 안전관리에 중요한 요소는 2차 사고를 예방하기 위한 제트 누출 및 화재 피해거리, 사고피해 완화를 위한 수소 누출 감지 및 사고예방시스템, 밀폐공간에서 폭발사고 예방, 그리고 사용자 부주의에 의한 사고예방이다. 안전관리의 중요한 요소들을 기반으로 국내의 가스관련 법과 수소 연료전지의 사용 환경을 고려하여 수소 충전소, 연료전지 자동차, 수송용 연료전지, 가정용 연료전지, 그리고 배관 수송에 대한 안전관리 정책을 개략적으로 제시하였다.

수소 충전소의 안전거리는 2차 사고를 예방하기 위한 거리는 수 십 미터에 이르는 것을 알 수 있었다. 안전거리를 확보하기 어려운 수도권과 같은 도심지에서는 충전소에서 발생할 수 있는 사고의 확률이 사회적으로 수용 가능한 수준으로 낮추어서 안전거리를 “작업공간을 위한 최소 이격거리”인 수 미터로 설정할 수 있도록 위험을 기반으로 한 안전관리 제도도입이 필요하다.

수소 연료전지 자동차와 가정용 연료전지에서는 밀폐공간에서 수소누출 사고 위험이 크기 때문에 부

품의 신뢰성과 수소누출감지 차단 시스템의 신뢰성이 중요하고, 밀폐공간에 체류하는 수소를 강제배기할 수 있는 시스템을 신중히 검토하여야 한다.

휴대용 연료전지는 이동에 의한 진동과 이용자 부주의 사고를 고려하여 내구성과 fail safe와 fool proof와 같은 안전기능을 신중히 검토하여야 한다.

수소에는 부취제가 포함되어 있지 않으므로 실내 배관의 안전기준에는 누출감지 차단장치의 신뢰성과 강제배기 시스템에 대한 규정이 필요하고, 매설배관의 안전기준에는 정량적 위험성평가 제도와 배관 건전성 관리 프로그램을 도입하는 것이 필요한 것으로 사료된다.

수소경제에 대한 안전관리는 여기서 제시된 안전관리 정책을 수용하고 기존의 규정적 위험관리의 단점을 보완하기 위한 새로운 안전관리 모형이 필요하고, 이를 위해 복합 위험관리모형을 제시하였다.

본 연구에서 검토한 수소경제로의 이행에 따른 안전관리 정책의 정립과 수소안전 기술의 이해는 사고 예방 뿐만 아니라 수소충전소와 같은 기반시설 업체와 주변 주민과의 갈등을 어느 정도 해소함으로써 수소기반시설의 보급을 활성화하고 수소경제의 실현을 앞당기는데 도움이 될 것으로 사료된다.

## References

1. Intergovernmental Panel on Climate Change Group Intergovernmental (IPCC), Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Summary for Policy makers. 10th Session of Working Group I (WGI), Paris, February, 2007, /http://www.ipcc.ch.
2. International Energy Agency (IEA), Transport, Energy and CO<sub>2</sub> : Moving Toward Substantiality. IEA/OECD, Paris, 2009, pp. 34-41.
3. N. Bento, “Is Carbon Lock-in Blocking Investments in the Hydrogen Economy? A Survey of Actors’ Strategies”, Energy Policy, Vol. 38, 2010, p. 7189.

4. M. Royle, and D. Willoughby, "The Safety of the Future Hydrogen Economy", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 89, 2011, p. 452.
5. Y. D. Jo, "Hazard Distance from Hydrogen Accidents", *KIGAS*, Vol. 16, 2012, p. 15.
6. F. Ganci, A. Carpignano, N. Mattei, and M. N. Carcassi, "Hydrogen Release and Atmospheric Dispersion: Experimental Studies and Comparison with Parametric Simulations", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 36, 2011, p. 2445.
7. P. Middha, O. R. Hansen, and I. E. Storvik, "Validation of CFD-model for hydrogen dispersion", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 22, 2009, p. 1034.
8. K. Matsuura, M. I. Nakano, and J. Ishimoto, "Forced Ventilation for Sensing-Based Risk Mitigation of Leaking Hydrogen in a Partially Open Space", *Int. J. of Hydrogen Energy* Vol. 35, 2010, p. 4776.
9. K. Matsuura, M. I. Nakano, and J. Ishimoto, "Sensing-Based Risk Mitigation Control of Hydrogen Dispersion and Accumulation in a Partially Open Space with Low-Height Openings by Forced Ventilation", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, p. 1972.
10. C. D. Barley, and K. Gawlik, "Buoyancy-Driven Ventilation of Hydrogen from Buildings: Laboratory Test and Model Validation", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 34, 2009, p. 5592.
11. K. Matsuura, M. Nakano, and J. Ishimoto, "Acceleration of Hydrogen Forced Ventilation after Leakage Ceases in a Partially Open Space", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, p. 7940.
12. D. A. Crowl, and Y. D. Jo, "The Hazards and Risk of Hydrogen", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 20, 2007, p. 158.
13. Y. D. Jo, and D. A. Crowl, "Explosion Characteristics of Hydrogen-Air Mixtures in a Spherical Vessel", *Process Safety Progress*, Vol. 29, No. 3, 2010, p. 216.
14. Y. D. Jo, and K. S. Park, "Minimum Amount of Flammable Gas for Explosion with Confined Space", *Process Safety Progress*, Vol. 17, 2004, p. 321.
15. T. Imamura, T. Mogi, and Y. Wada, "Control of the Ignition Possibility of Hydrogen by Electrostatic Discharge at a Ventilation Duct Outlet", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 34, 2009, p. 2815.
16. T. Mogi, and S. Horiguchi, "Experimental Study on the Hazards of High-Pressure Hydrogen Jet Diffusion Flames", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 22, 2009, p. 45.
17. N. Crafts, "Regulation and productivity performance", Draft paper for Oxford review of economic policy, University of Warwick, 2006, pp. 1-23
18. L. Jeffrey, "Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Refueling Stations", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 34, 2009, p. 5838.
19. J. D. Kim, and D. R. Park, "Status and Perspective of Residential Fuel Cell System", *Prospectives of Industrial Chemistry*, Vol. 14, No. 2, 2011, p. 26.
20. J. W. Lee, and Y. G. Kim, "Stationary Fuel Cell System Safety", *Prospectives of Industrial Chemistry*, Vol. 14, No. 2, 2011, p. 1.
21. J. M. Simon, S. Brady, D. Lowell, and M. Quant, "Guideline for Use of Hydrogen Fuel in Commercial Vehicles", U.S. Department of Transportation, 2007, pp. 30-60.