

HCNG 혼합연료의 폭발 위험 특성 분석

강승규[†] · 김영구 · 권정락

한국가스안전공사 가스안전연구원

(2014년 11월 2일 접수, 2014년 12월 10일 수정, 2014년 12월 10일 채택)

Analysis on the Explosion Risk Characteristic of Hydrogen blended Natural Gas

Seung-Kyu Kang · Young-Gu Kim · Jeong-Rak Kwon

Safety Research Division, Korea Gas Safety Corporation

(Received 2 November 2014, Revised 10 December 2014, Accepted 10 December 2014)

요약

본 연구는 시뮬레이션 툴을 이용해 HCNG 연료의 폭발 특성에 대하여 고찰하였다. 충전소의 대량 가스누출로 인한 증기운 폭발과 저장용기 폭발에 의한 피해 범위를 예측하였다. HCNG 충전소에서 증기운 폭발이 발생할 경우 충전소 내부에 50~200kPa의 폭발압력이 형성되었다. 저장용기가 폭발할 경우 수소의 경우 과압이 미치는 거리는 59m, 복사열이 미치는 거리는 75m로 측정되었다. CNG의 경우 과압이 미치는 거리는 89m, 복사열이 미치는 거리는 144m로 예측되었다. 수소와 CNG를 혼합한 30%HCNG의 경우 과압이 미치는 거리는 81m, 복사열이 미치는 거리는 130m로 예측되었다. 폭발과 압 및 복사열이 미치는 피해거리는 CNG가 가장 높게 나타났으며 HCNG는 CNG와 수소의 사이에 위치하였다.

주요어 : 수소-천연가스 혼합연료, 폭발, 위험성평가, 폭발과압, 복사열

Abstract - This study investigated the explosion characteristics of HCNG fuel using a simulation tool. The damage caused by the storage container explosion and vapor cloud explosion in a gas station was predicted. In case of an vapor cloud explosion in the HCNG station, 50~200kPa explosion pressure was predicted inside the station. When the cylinder explosion was occurred, in case of hydrogen, the measured influential distance of overpressure was 59m and radiant heat was 75m. In case of CNG, influential distance of overpressure was 89m and radiant heat was 144m would be estimated. In case of 30% HCNG that was blended with hydrogen and CNG, influential distance of overpressure was 81m and radiant heat was 130m were measured. The damage distance that explosive overpressure and radiant heat influenced CNG was seen as the highest. HCNG that was placed between CNG and hydrogen tended to be seen as more similar with CNG.

Key words : HCNG, Explosion, Risk assessment, Overpressure, Radiant heat

1. 서 론

자동차 배기가스에 의한 대기오염을 줄이기 위하

여 환경부는 시내버스 연료를 경유에서 CNG(압축천연가스)로 전환하였으나 CNG보다 더 친환경적인 수소-천연가스 혼합연료(HCNG)를 시내버스용 연료로 활용하는 방안을 검토하고 있다[1]. 현재 HCNG에 대한 기초기술 연구를 마무리하고 시범사업을 통해 연료에 대한 실증을 수행하는 단계이다.

[†]To whom corresponding should be addressed.

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation
Chungcheongbuk-Do 369-811, Korea
Tel : 043-750-1481 E-mail : skkang@kgs.or.kr

국내에서 수행되는 시범사업은 한국가스공사 인천 수소스테이션 내에 CNG 압축설비 및 HCNG 혼합설비를 추가하여 기존의 수소생산시설과 결합하여 HCNG를 생산하는 방식과 울산 대우버스 공장 내에 HCNG 혼합가스를 튜브트레이러로 공급받아 충전하는 방식으로 시범사업이 진행될 예정이다. 이를 위해 2014년 8월에 HCNG 충전소 특례기준이 고시되었으며, 기존의 충전소에 추가적인 설비를 지상에 설치할 경우 안전거리 확보가 곤란한 경우 구조물의 안전성을 확보하여 캐노피 상부에 설비를 설치할 수 있도록 기준을 마련하였다[2]. 이는 향후 HCNG의 상용화를 대비하여 기존의 CNG 충전인프라를 활용하고자 할 때 설비 구축의 유연성을 확보하기 위한 조치로서 수소연료전지차의 상용화를 위한 수소공급 인프라 확충에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 위험성평가 시뮬레이션 툴을 활용하여 연료의 종류에 따른 충전소의 위험성을 비교 평가하였다. 고압가스 폭발에 따른 위험성을 비교 분석하기 위해 CNG, 수소, 30%HCNG의 연료에 대하여 충전소에서 가스누출에 의한 화재폭발 상황 및 저장용기 폭발에 따른 위험성을 비교하였다. 이는 향후 상업용 HCNG 충전소의 안전기준을 제정하는 데 있어 보호시설 및 설비간의 안전거리를 결정하는데 중요한 기초자료로 활용될 것이다.

2. 사고시나리오 및 모델링

2.1. 위험요소 분석

HCNG 복합충전소를 구성하는 주요설비로는 천연가스배관, CNG 압축기, CNG 저장용기, CNG 디스펜서, 수소 개질기, 수소 압축기, 수소 저장용기, 수소 디스펜서, 고압레귤레이터, 유량조절밸브, HCNG 디

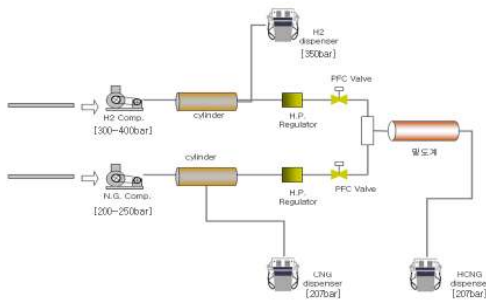


Fig. 1. Diagram of HCNG station facilities

스펜서가 있다[1].

각 설비에 대한 잠재위험성 분석 및 위험성 시나리오 그리고 이에 대한 대책을 살펴보면 아래와 같다.

2.2. 시나리오 분석

위험도를 산출하기 위해서 일반적으로 대상에서 발생할 수 있는 최악의 상황을 고려하며 이를 통해 도출되는 결과는 실제 사고로 인한 결과와 유사하거나 더 높은 결과 값을 보인다. 너무 보수적인 요인만을 고려하면 과도한 위험성을 산정하여 위험도 감소를 위한 과도한 비용을 감수하게 된다. 따라서 안전성을 확보하기 위한 적절하고 타당한 사고시나리오를 작성하여 위험도를 평가하고 위험도를 관리하기 위한 요소를 도출하여 관리하는 것이 필요하다. Fig. 2에 충전소에서 발생할 수 있는 사고 발생 시나리오를 분석하였다. 고압가스를 저장 사용하는 충전소에서 가스가 대량으로 누출되는 경우는 가스배관의 파열, 저

Table 1. Hazard and operability analysis for HCNG refueling station

구분	원인	위험요소
가스배관	·압력조정기 고장 ·외부충격 ·수소취화	·배관압력 상승 ·배관 손상 ·가스누출
CNG 압축기	·안전밸브 고장 ·패킹 및 연결 불량 ·압축기 오버런 ·밸브 오작동	·압력 상승 ·가스 누출 ·압축기 과부하
CNG 저장용기	·외부 충격, 부식 ·압력조절밸브 고장 ·연결배관 파손	·용기의 파손 ·용기 폭발 ·가스 대량 방출
CNG 디스펜서	·호스파열 ·리셉터클 이탈	·가스 대량 방출
수소 개질기	·패킹 및 연결 불량 ·버너 과열	·가스 누출 ·화염발생
수소 압축기	·안전밸브 고장 ·패킹 및 연결 불량 ·패킹재료 손상	·가스 누출
수소 저장용기	·외부 충격, 부식 ·압력조절밸브 고장 ·연결배관 파손	·용기의 파손 ·용기 폭발 ·가스 대량 방출
수소 디스펜서	·릴리프밸브 고장 ·가스검지기 고장 ·호스파열 ·리셉터클 이탈	·배관/장치 파손 ·가스 대량 방출
고압 레귤레이터	·레귤레이터 고장	·혼합비율 불량
유량조절 밸브	·조절밸브 고장	·혼합비율 불량
HCNG 디스펜서	·호스파열 ·가스검지기 고장 ·리셉터클 이탈	·가스 대량 방출

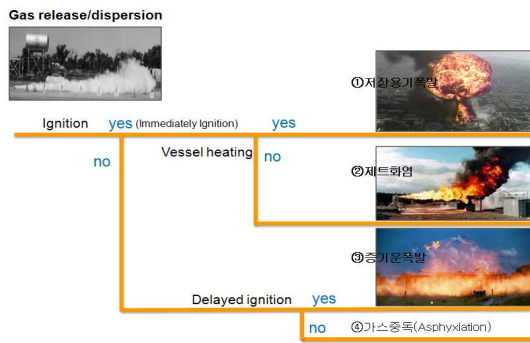


Fig. 2. Event Tree of released gas dispersion and explosion

장용기의 파열 또는 디스펜서의 호스파열 등 사고시나리오를 생각할 수 있다. 이처럼 대량의 고압가스가 누출될 경우 점화원에 의해 즉시 점화되거나 지연점화 되는 경우가 발생하게 된다. 우선 즉시 점화에 의해 고압가스 저장용기가 가열되어 저장용기가 폭발할 경우 Fig. 2의 ①과 같은 Fire ball을 형성하며 대형 폭발이 발생하고 폭발압력 및 복사열에 의한 피해가 발생하게 된다. 반면에 즉시 점화가 발생하였으나 용기 가열이 없이 고압의 가스가 제트를 형성하며 ②제트화염을 형성하는 시나리오를 구성할 수 있다. 이와 같이 고압가스 누출에 의한 즉시 점화로 발생할 수 있는 최악의 시나리오는 저장용기 폭발에 의한 Fire ball 형성 및 제트화염을 고려할 필요가 있다. 그리고 가스가 누출된 후 일정시간 동안 점화가 이루어지지 않다가 가스가 증기운을 형성한 후 점화원에 의해 폭발이 발생하는 ③증기운폭발이 발생할 수 있다. 증기운 폭발의 경우 기상 조건에 따라 가스 확산 양상이 크게 변화하게 되는데 최악의 조건을 고려하여야 하기 때문에 대기가 매우 안정된 상태에서 대기 중으로 가스 확산이 신속하게 이루어지지 않고 충전소 내부에 대량의 가스가 내재하는 상황을 고려하게 된다. 위와 같은 세 가지 상황이 충전소에서 발생할 수 있는 최악의 위험성 시나리오라 볼 수 있으며, 본 연구에서는 연료의 폭발에 의한 특성을 파악하기 위해 증기운 폭발과 저장용기 폭발에 대하여 분석해 보고자 한다.

2.3. 해석 모델링

충전소에서 가스가 대량으로 누출되는 상황을 범용 유동해석 프로그램인 FLUENT[3]을 이용하여 시뮬레이션하기 위해 Fig. 3과 같은 HCNG 복합충전소

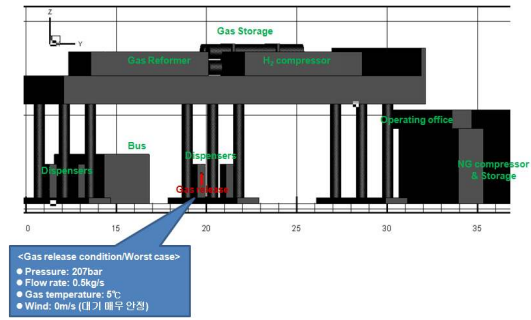


Fig. 3. Modeling for gas dispersion simulation

를 모델링하고, 디스펜서의 충전호스가 파열되어 고압의 가스가 대량으로 누출되는 상황을 모사하였다. 가스누출 압력은 HCNG 충전압력인 207bar로 설정하고 급속충전 시에 디스펜서에서 분출되는 최대 분출량(약 0.5kg/s)이 분출되는 상황을 모사한다. 이 때 대기조건은 바람 등의 영향이 없이 분출가스가 밀도 및 온도차에 의해 자연 확산하여 충전소 내에 최대의 가스가 존치할 수 있는 최악의 상황을 모사하였다.

3. 피해영향분석

3.1. 누출가스의 확산

Fig. 4는 누출된 가스가 누출 경과 시간에 따라 충전소 내부에서 확산되는 형상을 나타낸다. 가스가 누출 확산되는 양상을 살펴보면 분출 초기(1~10초)에는 고압으로 지표면 방향으로 가스가 분출되고 저온(약 5°C)의 가스가 누출되기 때문에 밀도차에 의해 지상 근처에서 가스가 확산 되는 현상을 볼 수 있다. 이후 시간이 경과하면서 대기 중의 공기와 혼합하여 분출가스의 온도가 대기 온도로 상승하게 되면서 공기보다 밀도가 낮아져 가스가 상부로 확산되는 양상을 보이고 있다. 약 1분이 경과되면서 충전소 내부에 분출가스가 가득 확산되게 되고 일부는 캐노피를 타고 대기 중으로 빠져나가는 형태를 보인다. 약 2분이 경과되면 충전소 내부의 가스 확산분포는 정상상태를 유지하게 되고 누출되는 가스와 대기 중으로 빠져나가는 가스의 양이 균형을 이루면서 충전소 내부는 일정량의 누출가스로 유지되게 된다. 이 때 충전소 내부에 잔류하는 가스의 양을 측정해 보니 약 35kg의 HCNG 가스가 잔류하는 것으로 파악되었다. 가스누출 2분경과 후 충전소 내부의 가스 확산 분포에 대해

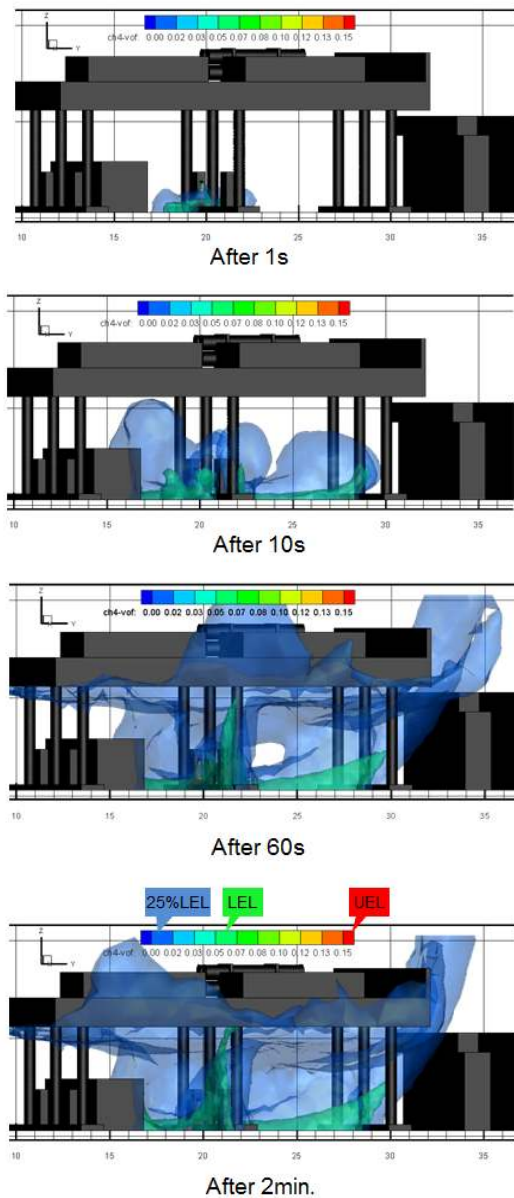


Fig. 4. Simulation results of released gas dispersion

가연(폭발)한계 범위를 표시하였다. 충전소 대부분의 지역이 위험한계 범위인 25%LEL 범위에 들어와 있고, 가연(폭발)하한계(LFL)는 충전소 바닥 근처에 형성되어 있다. 가연(폭발)상한계(UFL)는 가스가 분출되는 디스펜서 주변에 형성되어 있다. 따라서 대량의 가스누출이 발생할 경우 차량 및 사람이 활동하는 범위에 LFL이 존재하고 있어 불상의 점화원에 의해 점화될 위험성이 높다고 볼 수 있다. 이처럼 고압가스가 누출되어 충전소 내부에 증기운이 형성되었을 때 점화원에 의해 점화가 일어나면 대형 화재 및 폭발로

이어질 수 있는 것이다.

3.2. 가스폭발 영향 분석

가스대량 누출에 의한 폭발을 모사하기 위해 가스 누출확산 해석에서 측정된 누출가스량을 토대로 충전소 폭발 시나리오를 해석하였다. 충전소 폭발해석에 사용된 프로그램은 ANSYS AUTODYN[4]을 사용한다. AUTODYN에서의 가스 폭발 시뮬레이션을 위해서 가장 먼저 정의되어야 할 부분이 바로 폭발물의 물질적 특성에 대한 표현이다. AUTODYN의 폭발물의 JWL 물성 알고리즘을 통해 표현한다. 누출확산해석에서 측정된 충전소 내 잔류 가스량 35kg을 TNT 당량법으로 환산하면 약 18.9kg의 TNT에 해당한다. 이와 같은 기초 데이터를 기반으로 ANSYS AUTODYN에 충전소 폭발을 모델링하였다.(Fig. 5) 충전소 중앙에 위치한 구모양이 18.9kg에 해당하는 TNT모델이다. 충전소 구조물은 콘크리트로 모델링하고 버스, 디스펜서 및 저장용기는 steel로 단순화하여 모델링하였다.

폭풍압의 전파 및 과압에 의한 구조물의 영향 해석 결과를 Fig. 6, 7에 도시하였다. 가스가 누출되는 디스펜서 주변에서 점화원에 의해 점화가 되고 가스폭발이 발생하는 것으로 가정하였으며, 폭발이 일어나고 폭발 지점으로 부터 폭풍압이 신속하게 주변으로 확산되어 나가는 것을 볼 수 있다. 충전소 내부 및 가까운 근처에서 측정되는 폭발과압은 50~200kPa 정도이다. 폭발과압에 의한 영향 자료를 참조[5,6]하면 이 정도의 폭발과압은 일반 건물을 붕괴 시킬 수 있는 압력으로 충전소 내부에서는 매우 위험한 상황을 연출할 수 있다. 본 시나리오를 통한 폭발해석 결과는 충전소에서 발생할 수 있는 고압가스의 대량 누출상황에서 폭발이 발생할 경우 매우 높은 폭발압이 발생할 수 있고 이로 인해 건물에 치명적인 영향을 미칠 수 있는 것으로 확인 된다. 따라서 주변으로 폭발과압이 전파되는 것을 차단할 수 있는 방호벽이 필요하며 건축물의 설계 시 가스폭발 압력을 견딜 수 있는 구조의 건축물 설계가 반영되어야 한다.

3.3. 저장용기 폭발 해석

위험성 시나리오의 저장용기 폭발에 의한 Fire ball 해석 및 제트화염에 대한 위험성을 평가하기 위해 Phast Risk[7]로 해석을 수행하였다. Phast Risk는 위

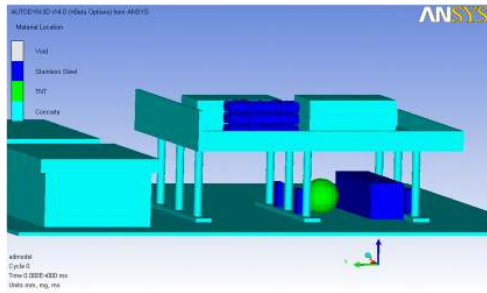


Fig. 5. Modeling for gas explosion

험성 평가 해석에 범용으로 사용되는 툴로서 가스폭발에 의한 폭발압력 및 복사열에 의한 위험거리 산정에 효과적인 시뮬레이션 프로그램이다.

본 연구의 대상이 되는 HCNG 충전소는 CNG와 수소를 혼합하여 사용하는 시스템으로 기존의 CNG 충전소와 수소 충전소가 혼합된 형태이다. 이미 CNG와 수소 충전소에 대하여는 충분한 위험성 평가를 통해 안전거리 및 안전설비 등을 갖추는 기준이 마련되어 있다. 그러므로 HCNG 충전소는 이 두 가지 충전소의 혼합된 형태로서 혼합가스에 의한 위험성이 기존의 단일 가스(CNG, 수소)에 비하여 상대적 위험도가 어느 정도 되는지 평가하여 기준마련에 활용하고자 한다. 우선 위험성 시나리오의 저장용기 폭발에 의한 폭발과압과 Fire ball 형성에 따른 복사열로 인한 위험도를 Phast Risk를 이용하여 평가하였다.

Fig 8은 CNG, 수소 및 HCNG 저장용기가 폭발하였을 경우 폭발압력 및 복사열에 의한 피해거리 계산 결과이다. CNG와 HCNG는 최대 250bar의 압력을 사용하였고, 수소의 경우 350bar의 압력을 사용한다. 저장용기는 고압가스 충전소에서 저장용으로 사용하고 있는 1300리터 용기가 폭발하는 것으로 모델링하였다. 이때 고압의 저장용기에 저장된 가스량은 각각 수소 31kg, CNG 263kg, HCNG 189kg이 해당한다. 저장된 가스량을 TNT당량으로 환산하면 각각 77kg, 162kg, 150kg에 해당 한다. 각각의 가스폭발에 의한 피해정도를 비교하기 위해 폭발과압은 주택의 일부가 파손될 수 있는 1psi(6.89kPa)압력이 미치는 거리, 복사열은 20초 이내에 보호되지 않을 경우 사람이 통증을 일으키며 피부에 손상을 주는 5kW/m²가 미치는 거리를 측정하여 비교하였다. 수소의 경우 과압이 미치는 거리는 59미터, 복사열이 미치는 거리는 75미터로 측정된다. CNG의 경우 과압이 미치는

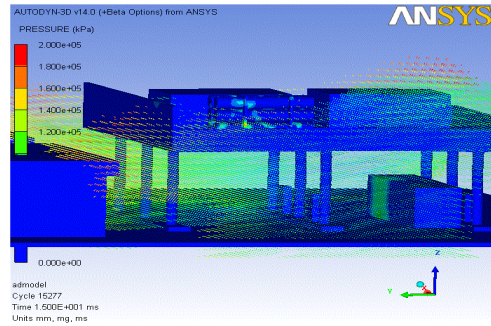


Fig. 6. Propagation of explosion pressure

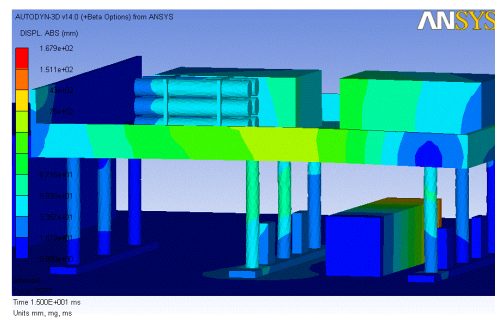


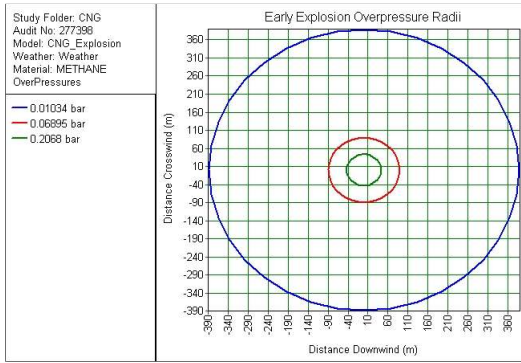
Fig. 7. Displacement by explosion pressure

거리는 89미터, 복사열이 미치는 거리는 144미터로 예측되었다. 수소와 CNG를 혼합한 30%HCNG의 경우 과압이 미치는 거리는 81미터, 복사열이 미치는 거리는 130미터로 측정된다. 동일한 사이즈의 저장용기에 압력이 수소는 350bar, CNG와 HCNG는 250bar로 저장된 상태에서 용기 폭발이 발생할 경우 폭발과압 및 복사열이 미치는 피해거리는 CNG가 가장 높게 나타났으며 HCNG는 CNG와 수소의 사이에 위치하는데 수소 보다는 CNG에 가까운 경향을 보이고 있다.

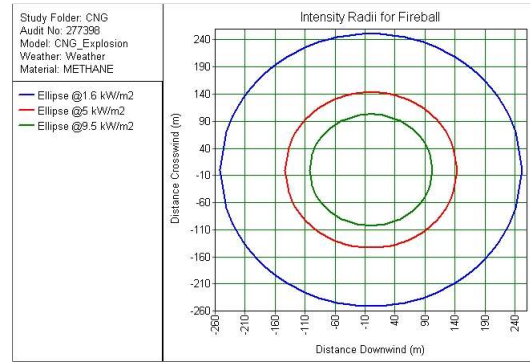
4. 결론

본 연구는 천연가스에 수소를 혼합한 HCNG 연료의 폭발특성에 대하여 살펴보았다. 위험 시나리오는 충전소에서 대량의 가스가 누출되어 확산된 후 점화에 의한 증기운 폭발과 고압가스 저장용기의 폭발 상황에 대하여 분석하였다.

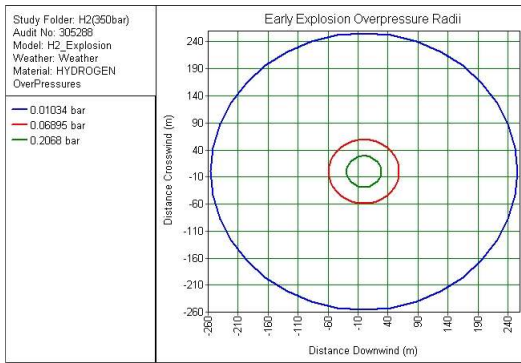
- (1) HCNG 충전소에서 디스펜서 호스의 파열에 의한 대량의 가스누출 시 약 35kg의 가스가 충전소 내에 존재할 수 있으며 이를 TNT로 환산하면 약 18.9kg에 해당한다. 누출가스의 폭발로



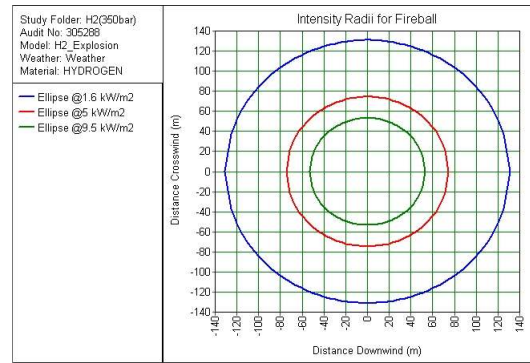
Explosion pressure of CNG explosion



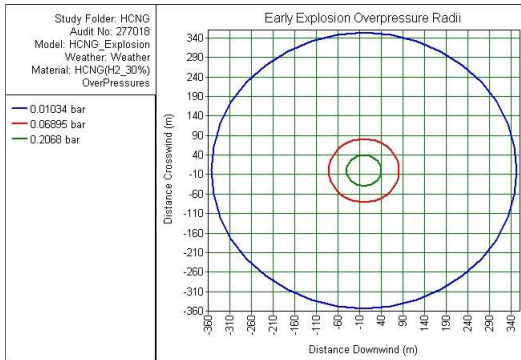
Radiant heat area of CNG explosion



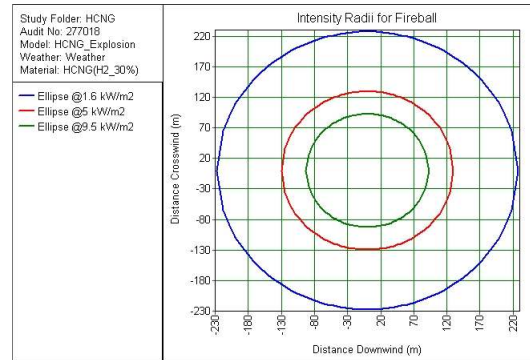
Explosion pressure of H₂ explosion



Radiant heat area of H₂ explosion



Explosion pressure of HCNG explosion



Radiant heat area of HCNG explosion

Fig. 8. Risk area of gas cylinder explosion

인해 충전소 내부에는 약 50~200kPa의 폭발 과압이 형성될 수 있다.

- (2) 동일한 사이즈의 저장용기에 압력이 수소는 350bar, CNG와 HCNG는 250bar로 저장된 상태에서 용기 폭발이 발생할 경우 수소의 경우 과압이 미치는 거리는 59m, 복사열이 미치는 거리는 75m로 측정된다. CNG의 경우 과압이 미치는 거리는 89m, 복사열이 미치는 거리는 144m로 예측되었다. 수소와 CNG를 혼합한

30%HCNG의 경우 과압이 미치는 거리는 81m, 복사열이 미치는 거리는 130m로 측정된다. 폭발과압 및 복사열이 미치는 피해거리는 CNG가 가장 높게 나타났으며 HCNG는 CNG와 수소의 사이에 위치하였다.

감사의 글

본 연구는 환경부 친환경자동차기술개발사업단(글

로별탐환경기술개발사업, 2011~2016년)의 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 가사를 드립니다.

References

1. 한국가스공사, CNG충전소를 이용한 HCNG 인프라 구축 타당성 연구, 한국가스공사 연구개발원 연구보고서 25-1-2-09, 2011.
2. 산업통상자원부, HCNG자동차 연구개발용 HCNG자동차충전소의 시설,기술,검사에 관한 특례기준, 산업통상자원부고시제2014-141호, 2014.
3. FLUENT 14.5 User's Guide, ANSYS Inc., 2013.
4. Ansys AUTODYN User's Manual, ANSYS Inc., 2013.
5. Clancey, V.J, "Diagnostic features of explosion damage", 6th Int. Mtg of Forensic Sciences, Edinburgh, 1972.
6. 한국산업안전보건공단, 사고 피해예측 기법에 관한 기술지침, KOSHA GUIDE P-102-2012, 2012.
7. Phast Risk Software Package Description, DNV, 2013.