



CFD를 활용한 수소-천연가스 혼합연료에 대한 피해영향 분석

†강승규 · 방효중 · 조영도

한국가스안전공사 가스안전연구원 안전연구실
(2013년 8월 2일 접수, 2013년 9월 27일 수정, 2013년 9월 27일 채택)

Consequence Analysis of Hydrogen Blended Natural Gas(HCNG) using 3D CFD Simulation

†Seung-Kyu Kang · Hyo-Jung Bang · Young-Do Jo

Safety Research Division, Korea Gas Safety Corporation, Gyeonggi-Do 429-712, Korea
(Received August 2, 2013; Revised September 27, 2013; Accepted September 27, 2013)

요약

본 연구는 3차원 위험성평가 시뮬레이션 툴(FLACS)을 활용하여 연료의 종류에 따른 위험성을 비교 평가하였다. 일반적인 고압가스 충전소 레이아웃을 활용하여 연료를 CNG, 수소, 30%HCNG로 하였을 경우 충전소에서 가스누출에 의한 화재·폭발 상황을 모사하여 피해영향을 비교 분석하였다. 그리고 가스별 누출제트에 의한 피해영향을 평가하였다. 동일한 조건에서 수소, CNG, HCNG가 누출되어 화재폭발이 발생할 경우 수소는 최대과압이 30kPa, HCNG는 3.5kPa 그리고 CNG는 0.4kPa의 과압이 측정되었다. HCNG의 과압이 CNG에 비해 7.75배 높게 측정되었으나, 수소에 비해서는 11.7%에 불과했다. 화염 전파에 있어서 수소는 매우 빠른 화염전파 특성을 가지는 반면 HCNG와 CNG는 수소에 비해 전파속도 및 전파거리에서 비교적 안전한 경향을 보였다. 제트화염에 의한 화염경계거리는 수소가 5.5m, CNG가 3.4m이고 HCNG는 CNG보다 약간 확장된 3.9m로 예측되었다.

Abstract - This study evaluated comparison of the risk according to the type of fuel by three-dimensional simulation tool(FLACS). The consequence analysis of fire explosion and jet-fire was carried out in the layout of a typical high-pressure gas filling stations using CNG, hydrogen and 30%HCNG. Under the same conditions, hydrogen had a 30kPa maximum overpressure, CNG had a 0.4kPa and HCNG had a 3.5kPa. HCNG overpressure was 7.75 times higher than the CNG measurement, but HCNG overpressure was only 11.7% compared to hydrogen. In case of flame propagation, hydrogen had a very fast propagation characteristics. On the other hand, CNG and HCNG flame propagation velocity and distance tended to be relatively safe in comparison to hydrogen. The estimated flame boundary distance by jet-fire of hydrogen was a 5.5m, CNG was a 3.4m and HCNG was a 3.9m.

Key words : hydrogen blended natural gas(HCNG), consequence analysis, explosion, jet fire

1. 서론

지구온난화로 인한 기상이변 등이 전 세계적으로 이슈가 되고 있고, 국제사회는 이에 대한 해법을 찾기 위해 환경규제를 더욱더 강화하는 기조로 기후변화협

약 등을 규제하고 있다. 이에 각국에서는 청정에너지의 개발 및 사용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 새로운 형태의 에너지원의 상용화를 위해서는 공급인프라의 확충이 수반되어야 한다. 에너지 공급 인프라를 구축하는데 있어 필수적으로 요구되는 것이 안전이다. 특히 수소 및 천연가스 등과 같은 가스연료 및 액화석유가스(LPG) 등은 사용의 효율성 제고를 위해 고압상태로 저장 사용되기 때문에 사고발생 시 대

†Corresponding author: skkang@kgs.or.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

형 피해를 유발할 수 있어 위험성평가를 통해 충분한 안전성을 확보하여야 한다.

따라서 국내에서 차량 연료로 보급이 확대되고 있는 LPG, CNG 및 LNG 차량 및 충전소에 대해서 이미 많은 연구자들에 의해 위험성평가가 수행되었으며, 이를 통해 사고피해영향분석이 실시되었다. 고재선 등은 CNG버스와 디젤버스에 대한 잠재적 위험성 분석을 통해 사고시나리오를 구성하고 각각의 연료에 대한 피해영향분석을 비교하고, 안전기준의 허용가능 ALARP 영역을 제안하였다[1]. 진상화 등은 LPG 충전소 설비에 대한 위험도 분석을 통해 위험성 등급을 설정하고, 위험성이 가장 높은 저장탱크의 파열사고에 대한 정량적 위험성 평가를 통해 위험거리를 분석하였다[2]. 임사환 등은 이론적인 접근방법으로 LPG 저장탱크 폭발 시 인체에 치명적인 피해를 미칠 수 있는 한계거리를 예측하였다[3]. 이와 더불어 최근에 새로운 에너지 형태로 부각되고 있는 수소 및 수소혼합연료(HCNG) 그리고 DME-LPG 혼합연료에 대한 피해영향분석이 수행되었다. 박달재 등은 DME-LPG 혼합연료에 대한 Worst Case 사고시나리오를 구성하여 피해영향분석을 실시하였고, DME혼합비율에 따른 상대적 위험성을 고찰하였다[4]. 단승규 등은 DME-LPG 혼합연료와 HCNG연료에 대하여 TNT당량모델, PHAST 및 CFD기반 해석툴(FLACS)을 사용하여 폭발과압에 의한 피해거리를 비교분석하였다[5].

본 연구에서는 최근 강화된 CNG버스의 배기가스 기준을 충족하기 위해 국내 도입이 검토되고 있는 수소-천연가스 혼합연료(HCNG)에 대한 안전성 검토를 위해 기존의 수소 및 CNG와 이를 혼합한 HCNG연료에 대한 사고피해영향분석을 실시하여 위험성을 비교 평가하였다. 위험성 평가를 위해 위험성 시나리오를 구성하여 대상 연료별 폭발과압 및 폭발화염, 그리고 제트화염에 의한 위험성을 비교분석하여 기존의 수소 및 CNG 관련 안전기준을 준용하거나 HCNG 충전인프라 기준을 제정할 때 기초자료로 활용하고자 한다.

II. 시뮬레이션 조건

최근 3차원 CFD 시뮬레이션 툴을 활용한 가스시설의 정량적 피해영향분석 사례가 종종 보고되고 있다 [5-7]. 3D CFD 시뮬레이션 해석 툴은 기존의 이론 및 경험식을 이용한 해석방법에 비해 실제 환경조건을 유사하게 모사할 수 있다는 점에서 보다 신뢰성 있는 분석이 가능한 것으로 평가되고 있다. 이에 본 연구에서도 3차원 위험성평가 시뮬레이션 툴(FLACS)을 활용하여 연료의 종류에 따른 충전소의 위험성을 비교 평가하고자 한다. 현재까지 구체적인 HCNG 충전소

레이아웃이 확정되지 않은 상태이므로 일반적인 고압가스 충전소 레이아웃을 활용하여 연료를 CNG, 수소, 30%HCNG로 하였을 경우, 충전소에서 가스누출 사고에 의한 화재·폭발 및 제트화염 상황을 모사하여 위험성을 비교한다.

2.1. 충전소 화재·폭발 모델

충전소의 화재·폭발 피해영향 분석을 위해 Fig.1 과 같은 일반적인 고압가스 충전소를 모델링하였다. 고압가스 충전소에서 어떤 미상의 원인에 의해 대량의 가스가 누출되어 폭발성 대기가 형성되고, 점화원에 의해 폭발이 발생할 경우 즉, VCE(Vapor Cloud Explosion)가 발생하는 상황을 FLACS를 활용하여 모사한다. 가스조성은 100% 수소, 30% 수소 + 70% CNG, 100% CNG의 경우를 해석하였고, 누출된 가스의 양은 약 5톤으로 이때 폭발성 대기의 영역은 6×5.4×2.5m이며 외기는 바람의 영향이 없는 조건을 사용한다. 점화원의 위치는 디스펜서 사이의 지상으로부터 1.25m 지점이다. 모니터 지점은 충전소 내부 및 외부에 분포하며, 주요 모니터지점(P2, P3, P7, P8)을 Fig.1에 도시하였다. 충전소로부터 가장 외측인 P3, P8은 충전소 외곽선에서 약 5미터 지점이다.

2.2. 고압가스 누출제트 모델

고압가스 누출사고에서 화재·폭발에 의한 피해와 함께 중요 피해를 가져올 수 있는 것이 제트화염에 의한 피해이다. 이에 대한 영향을 분석하기 위해 Fig.2와 같은 고압가스 누출장치를 모델링하였다. 가스누출 노즐의 직경은 1.0mm로 하고 이때 용기로부터 배출되는 가스의 압력은 동일 조건에서 연료별 특성을 분석하기 위해 207bar로 일정하게 설정하였다. 압력은 자동차용 내압용기 안전 규정에 따른 실제 사용압력

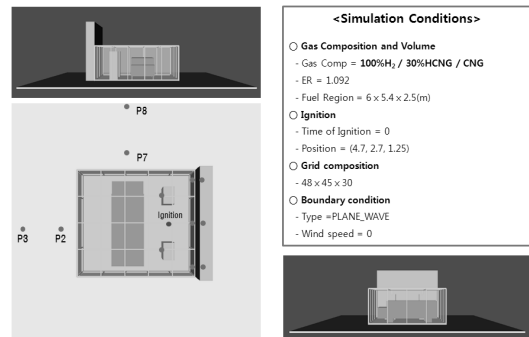


Fig. 1. Layout of high-pressure gas refueling station for FLACS simulation.

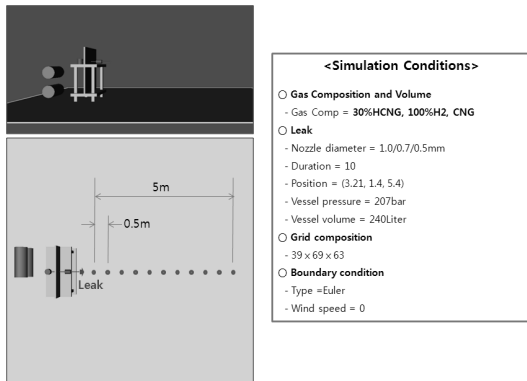


Fig. 2. Layout and simulation conditions of high-pressure gas release jet.

이다[8]. 가스누출은 10s 동안 지속하여 고압가스의 누출특성을 비교 분석하였다. 가스누출 농도를 측정하기 위한 모니터 포인트는 누출지점으로부터 50cm 간격으로 P2~P12까지 배치하였다.

III. 시뮬레이션 결과

3.1. 폭발과압 해석 결과

Fig. 3~6은 각각 CNG, 100%수소, 30%HCNG 연료가 누출되었을 경우 똑 같은 조건에서 폭발 과압이 전파되는 특성을 시뮬레이션한 결과이다. CNG의 경우 최초 폭발이 발생한 후 약 0.373초경에 2차 폭발이 발생하였다. 1차 폭발보다 2차 폭발 시 폭발압력이 더 넓게 분포하는 형태를 보인다. 폭발 시 형성된 최대 과압은 0.004bar(0.4kPa)로서 폭발 과압에 따른 피해영향에 따르면 작은 창문이 금이 갈 정도의 미약한 과압이 형성되었다. 수소 폭발의 경우는 1차 폭발로 종료된 반면, 폭발 과압은 최대 0.3bar(30kPa)로 상당히 높은 과압이 형성되었다. 수소는 연소속도(또는 화염전파속도)가 매우 빠르기 때문에 누출가스가 일시에 화염에 휩싸여 폭발에 기여하고 높은 폭발에너지를 발산하는 것으로 사료된다. 폭발이 진행되는 속도도 0.13초로 CNG의 0.75초에 비해 매우 빠르게 진행되는 것을 볼 수 있다. 수소 폭발에 의한 30kPa의 폭발 과압은 집이 붕괴될 수 있을 정도의 상당한 압력이다. 수소 30%와 CNG 70%를 혼합한 HCNG의 경우 폭발의 형태는 CNG의 경우에서처럼 1차 폭발 이후에 2차 폭발이 수반하는 것을 볼 수 있다. 폭발 과압의 최대 크기는 0.035bar(3.5kPa)로 CNG보다는 7.75배 상승하였으나, 수소에 비해서는 11.7%에 불과한 과압이 형성되었다. HCNG에 의한 과압은 창문이 깨질 정도의 과압이며,

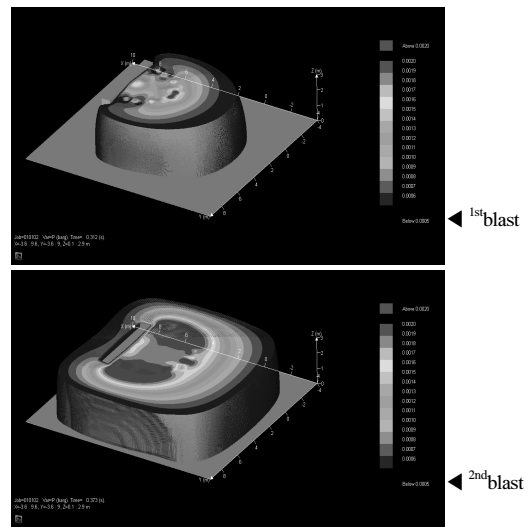


Fig. 3. CNG explosion overpressure distributions.

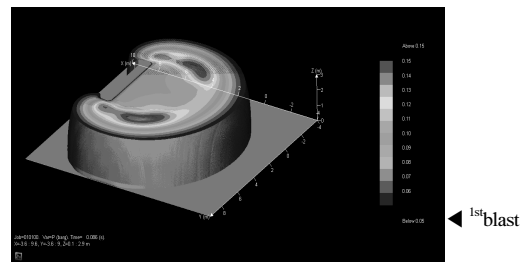


Fig. 4. H₂ explosion overpressure distributions.

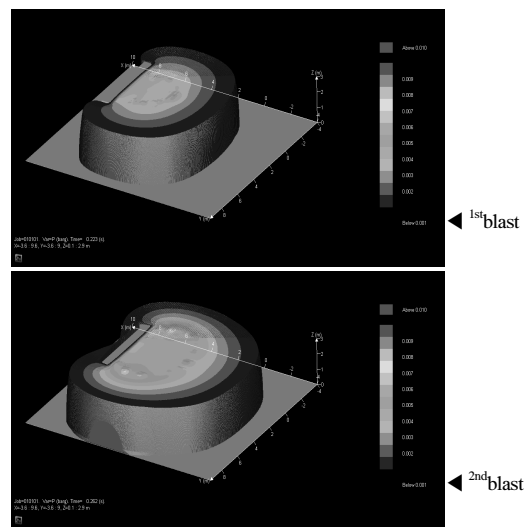


Fig. 5. HCNG explosion overpressure distributions.

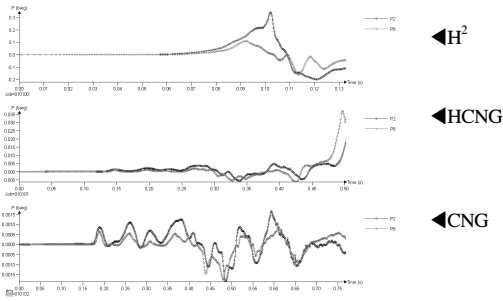


Fig. 6. Overpressure profiles at the monitor points.

폭발 진행 속도는 약 0.5초로 CNG보다는 약간 빠른 진행속도를 보이고 있다.

3.2. 폭발화염 해석 결과

Fig.7~8은 폭발 화염의 분포를 나타낸다. 화염의 분포 형태는 세 가지 연료가 유사한 형태를 보이고 있지만, 화염의 전파속도나 전파거리에서는 차이를 보인다. Fig.8의 모니터 지점별 시간에 따른 화염분포 그래프에서 이를 확인할 수 있다. 화염이 전파되는 속도를 비교하기 위해 충전소 외곽선에 접해있는 모니터지점 P2, P7 지점에서 화염특성을 보게 되면, 수소의 경우 P2에 화염이 도달하는데 소요되는 시간은 0.10초이고 P7은 0.09초에 화염이 도달하였다. CNG의 경우는 P2가 0.42초, P7이 0.45초에 도달하였으며 HCNG는 P2가 0.28초, P7이 0.31초경에 화염이 도달하였다. 충전소 외곽선에서 약 5미터 이격되어 있는 P3, P8의 경우는 수소 폭발의 경우 각각 0.11초, 0.12초 후에 화염이 도달하였으나, CNG와 HCNG의 경우는 이 지점까지 화염이 도달하지 않았다.

연료에 따른 충전소 화재·폭발에 의한 위험성에 대한 정량적 평가를 실시해 본 결과 본 연구에서 평가하고자 하는 30%HCNG는 폭발압력 및 화염전파 특성에서 CNG보다는 위험성이 약간 증가하지만, 수소에 비해서는 상대적으로 위험성이 적은 연료로 평가된다.

3.3. 고압가스 누출제트 해석 결과

가연성 가스의 위험 지역을 설정할 때 일반적으로 25%LFL(Lower Flammability Limit) 이하로 가연성 가스의 농도를 유지하도록 하고 있다. CNG, 수소 및 30%HCNG의 연소하한계(LFL)는 각각 4.8vol%, 4.0 vol% 그리고 4.7 vol%이다. 그러므로 CNG, 수소 그리고 HCNG의 25%LFL은 각각 1.2 vol%, 1.0 vol% 그리고 1.1175 vol%이다.

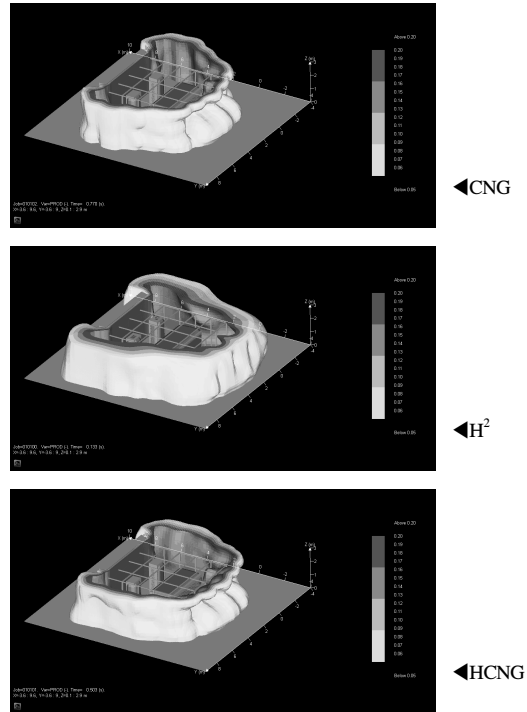


Fig. 7. Flame distribution of CNG, hydrogen and HCNG.

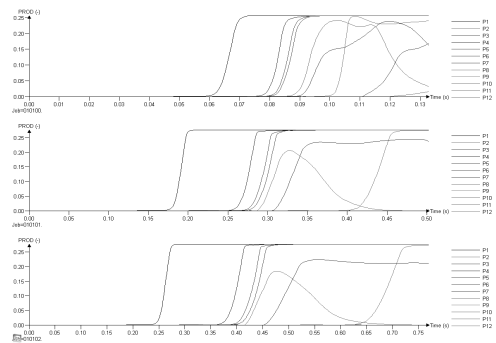


Fig. 8. Flame spread at the monitor points.

Fig. 9~11은 CNG, 수소 및 30% HCNG 연료가 1.0mm의 오리피스로부터 207bar의 고압으로 누출될 경우를 시뮬레이션 결과이다.

HCNG 누출제트의 각 모니터 포인트에서의 가스 농도는 P2 지점에서 1.2% 그리고 그 후단 P3, P4에서는 각각 0.5%, 0.3% 등으로 점점 낮은 농도분포를 보인다. 25%LFL은 P2 지점 이전에 형성되어 25%LFL한계

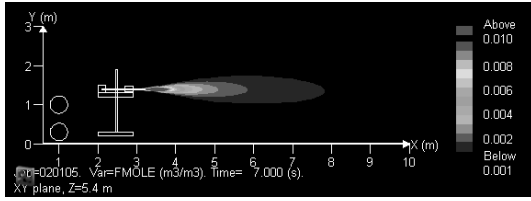


Fig. 9. HCNG release jet

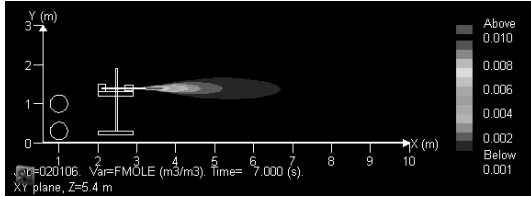


Fig. 10. H₂ release jet

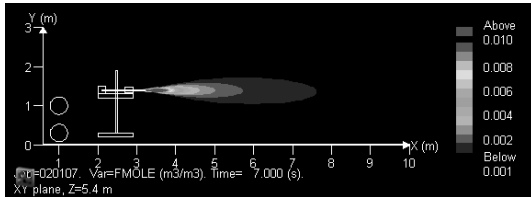


Fig. 11. CNG release jet

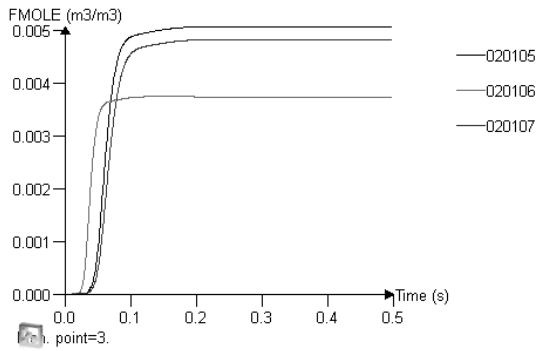


Fig. 12. Released gas concentration at P3.
(job020105: HCNG, job201106: H₂,
job020107: CNG).

거리는 0.5m 이내로 예측된다. 100% 수소에 대하여는 P2 지점에서 1.0%, P3에서 0.37%, P4에서 0.24%, P5에서 0.17%의 농도분포를 보인다. 따라서 수소 누출제의 25%LFL 영역은 P2지점 근처에 형성되고 있다. CNG 누출제는 HCNG 누출제와 상당히 유사한

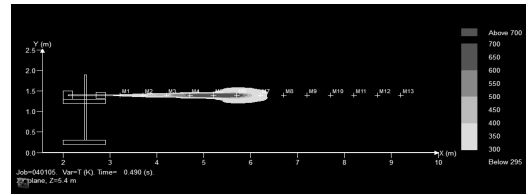


Fig. 13. CNG jet fire and flame temperature.

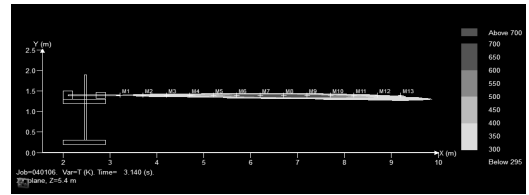
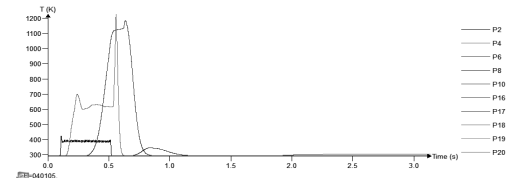


Fig. 14. H₂ jet fire and flame temperature.

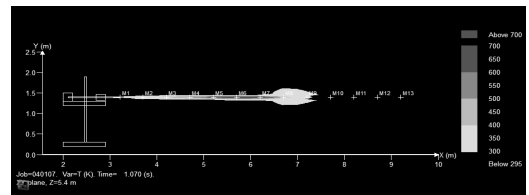
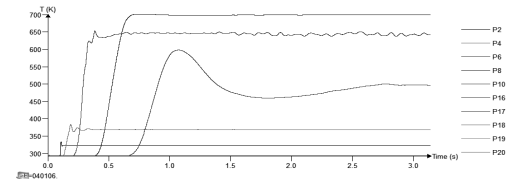
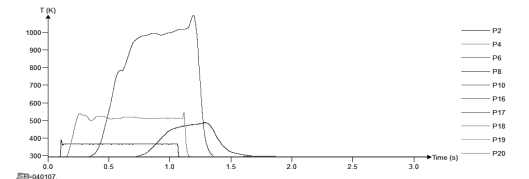


Fig. 15. HCNG jet fire and flame temperature.



분포를 보이고 있으며, Fig.12에서 모니터지점 P3에서 각 연료별 농도 비교를 통해 확인할 수 있다. 누출제트 분석 결과 25%LFL 한계거리는 수소가 약간 길지만 CNG 및 HCNG와 오차범위 안에서 동일한 수준임을 확인하였다.

3.4. 제트화염 해석 결과

Fig.13-15는 각각의 가스별 제트화염의 분포형태를 보여준다. 제트화염 분석을 통해 화염의 도달거리와 화염의 온도분포를 측정하였다. 제트화염의 형태를 보면 수소화염이 가장 멀리까지 도달하고 CNG화염은 수소 보다는 짧게 형성된다. HCNG가스의 제트화염은 수소 보다는 짧고 CNG보다는 길게 형성된다. 수소의 경우 매우 빠른 확산성과 연소속도로 인해 제트화염이 길게 형성되는 것으로 분석된다. HCNG의 경우는 CNG와의 혼합으로 확산성 및 연소속도가 저하되어 수소화염 보다 도달거리가 짧게 형성되었다. 화염의 최대온도는 CNG가 약 1,200℃, 수소는 약 430℃ 그리고 HCNG는 약 1,000℃로 분석되었다. 이러한 온도 차이는 연료의 발열량에 기인한 것으로(각 연료의 발열량: CNG 10,500kcal/Nm³, 30%HCNG 8,336/Nm³, 수소 3,055kcal/Nm³) 계산 결과는 이러한 경향을 잘 보여주고 있다. 제트화염 해석결과를 바탕으로 화염 경계 거리를 대기온도 보다 100℃ 높은 지점으로 가정할 때, 수소는 경계거리가 5.5m이고, CNG는 3.4m 그리고 HCNG는 3.9m로 파악된다.

IV. 결 론

본 연구는 3차원 위험성평가 시뮬레이션 툴을 활용하여 연료의 종류에 따른 충전소의 위험성을 비교 평가하였다. 일반적인 고압가스 충전소 레이아웃을 활용하여 연료를 CNG, 수소, 30%HCNG로 하였을 경우 충전소에서 가스누출에 의한 화재·폭발 상황을 모사하여 위험성을 비교 평가하였다. 그리고 가스별 누출제트에 의한 피해영향을 분석하였다. 피해영향분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 동일한 조건에서 수소, CNG, HCNG가 누출되어 화재·폭발이 발생할 경우 수소는 최대과압이 30kPa, HCNG는 3.5kPa 그리고 CNG는 0.4kPa의 과압이 측정되었다. HCNG의 과압이 CNG에 비해 7.75배 높게 측정되었으나, 수소에 비해서는 11.7%에 불과했다.

(2) 폭발 화염의 전파에 있어서 수소는 매우 빠른 화염전파 특성을 가지는 반면 30%HCNG와 CNG는 수소에 비해 전파속도 및 전파거리에서 비교적 완화된

속도 및 짧은 확산거리를 가지는 것으로 파악되었다.

(3) 누출제트의 25%LFL 도달거리는 수소, CNG, HCNG가 오차범위 안에서 동일한 수준으로 형성되었다. 제트화염의 경우 화염의 최대온도는 연료의 발열량에 비례하여 최대온도가 형성되었고, 화염경계거리는 수소가 5.5m, CNG가 3.4m이고 HCNG는 CNG 보다 약간 확장된 3.9m로 예측되었다.

본 연구는 기존의 충전소에 연료의 형태만 다르게 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 향후 기존의 CNG충전소에 HCNG공급을 위한 설비를 추가할 경우 위험성을 평가 비교하고자 한다. 이러한 위험성 평가 결과는 HCNG 충전소 기준을 제정하는데 기초자료로 유용하게 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 친환경자동차기술개발사업단(글로벌합 환경기술개발사업, 2011년~2016년)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Ko, Jae-Sun and Kim, Hyo, "The Fire Risk Assessment in Compressed Natural Gas Buses & Gas Station", *T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, 18(2), 57-67, (2004)
- [2] Sang-Hwa Jin, Tea-Woo Kim, In-Tae Kim, In-Won Kim and Yeong-Koo Yeo, "A Study on Reliability Analysis and Quantitative Risk Analysis for Liquefied Petroleum Gas Station", *KIGAS*, 5(4), 40-48, (2001)
- [3] Leem, Sa-Hwan and Huh, Yong-Jeong, "A Study on the Estimation of Human Damage Caused by Vapor Cloud Explosion(VCE) in LPG Filling Station", *KIGAS*, 14(2), 15-21, (2010)
- [4] Dal-Jae Park and Young-Soon Lee, "Consequence Analysis by Different DME-LPG Mixture Fuels", *KIGAS*, 15(2), 57-62, (2011)
- [5] Seungkyu Dan, Kyungjun Park, Tae-Ok Kim and Dongil Shin, "Explosion Simulations for the Quantitative Risk Analysis of New Energy Filling Stations", *KIGAS*, 15(1), 60-67, (2011)
- [6] Prankul Middha, Derek Engel and Olav R. Hansen, "Can the addition of hydrogen to natural gas reduce the explosion risk?", *Int. J. of Hydrogen Energy*, 36(3), 2628-2636, (2011)

- [7] Chang-Bong Jang, Hyang Jik Lee, Min-Ho Lee, Dong-Chul Min, Jong-Bae Back, Jae Wook Ko and Hyuck-Myun Kwon, "CFD Simulation Study to analyze the Dispersion and Explosion of Combustible Gas", *KIGAS*, 16(5), 58-65, (2012)
- [8] Safety Regulations for Automobile Pressure Vessels, Notice 2013-287, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, (2013)