

액체질소의 연속 누출 실험

한용식 · 김명배[†] · 르-두이 응옌 · 김민창 · 김창현 · 김태훈 · 도규형 · 최병일

한국기계연구원 신에너지플랜트연구소

Experiments of Continuous Release of Liquid Nitrogen

YONG-SHIK HAN, MYUNGBAE KIM[†], LE-DUY NGUYEN, MINCHANG KIM, CHANGHYUN KIM, TAE-HOON KIM, KYU HYUNG DO, BYUNG-IL CHOI

Department of Energy Plant Technology, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

[†]Corresponding author :
mbkim@kimm.re.kr

Received 5 October, 2023
Revised 24 October, 2023
Accepted 25 October, 2023

Abstract >> To evaluate the risk of leakage when using liquid hydrogen, a leakage test was conducted using liquid nitrogen in an outdoor environment rather than a laboratory environment. To assume a real-scale continuous leak, liquid nitrogen was allowed to leak for 5 minutes through a pipe with a diameter of 25.4 mm at a design spill rate of 60 L/min. The measurement system consisted of devices for climate conditions, LN2 spread and vapor clouds. The main experimental results are the liquid pool radius and the concentration of vapor cloud, and the radius of the liquid pool was compared with the numerical analysis results.

Key words : Liquid hydrogen(액체수소), Liquid nitrogen(액체질소), Real scale(실규모), Continuous release(연속 누출), Liquid pool(액체풀), Vapor cloud(증기운)

1. 서론

신에너지인 수소를 활용하기 위한 여러 가지 기술적, 제도적인 연구가 전 세계에서 활발하게 이루어지고 있다. 수소를 효과적으로 수송 또는 보관하기 위하여 액체수소의 취급이 절대적으로 필요한데, 액체수소는 수송 또는 사용 중에 누출되면 화재, 폭발의 위험성이 높아진다.

극저온 액체인 액체수소의 누출은 비교적 긴 시간 동안 지속해서 흘러나오는 연속 누출과 짧은 시간

동안 누출되는 순간 누출로 구분된다. 누출된 액체수소가 증발하여 공기와 혼합하여 증기운(vapor cloud)이 형성되면 예혼합 화염인 flash 화재와 증기운 폭발(vapor cloud explosion)이 발생할 수 있다. 공기와 예혼합되기 전에 발생하는 화재는 화구(fire ball), 제트 화재(jet fire), 분사 화재(spray fire) 등이 있다. 액체수소가 중력으로 인하여 지표면에 낙하하여 지표 위에 형성되는 풀 화재(pool fire)도 발생할 수 있다¹⁾.

이러한 액체수소의 누출 위험성을 파악하기 위하여 실험실에서의 기초적인 실험²⁾ 및 실규모(real scale)

의 실험이 영국의 Health and Safety Laboratory (HSL)³⁾, Norwegian Defence Research Establishment (FFI)⁴⁾에서 수행되었다. 주요 측정 내용은 기후 조건, 액체폭발의 크기 및 온도, 증기운의 농도 및 범위, 화재 및 폭발 관련 측정치이며, 실험 결과로 액체수소의 지표면 확산 범위, 화재 및 폭발의 영향 등을 평가하였다.

2. 실험 장치

본 실험에서는 액체수소 대신에 액체질소를 사용하여 화재, 폭발 관련된 부분을 제외하고 액체의 확산(spread)과 증기운의 특성에 대한 내용을 대상으로 한다. 실험 장치는 Fig. 1과 같이 액체질소 공급부와 측정부로 구분할 수 있다. 액체질소 공급부는 Fig. 2와 같이 액체질소 탱크, programmable logic controller 제어밸브와 구동을 위한 공기 압축기, 액체질소 가압을 위한 헬륨 탱크 등으로 구성된다.

측정부는 확산되는 액체질소의 위치를 추적하기 위하여 지표면에 근접하여 설치된 열전대, 증기운의 농도와 온도를 측정하기 위한 산소 센서 및 열전대, 기후 조건(공기 온도, 상대습도, 대기압력, 풍향 및 속도, 태양복사 강도)을 측정하기 위한 weather 센서 등으로 구성되어 있으며, 개념도는 Fig. 3과 같다.

누출된 액체의 확산을 추적하기 위하여 설치된 열전대는 Fig. 3과 같이 동서남북의 네 방향, 일정한 간격으로 28개가 설치되었으며 자세한 내용은 Table 1과 같다.

증기운의 온도 측정을 위한 열전대는 Fig. 3과 같이 네 방향으로 수직 기둥 두 개마다 열전대를 두 개씩 설치하였으며, 총 16개의 열전대가 설치되었다.

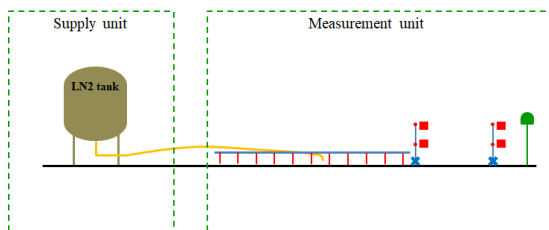
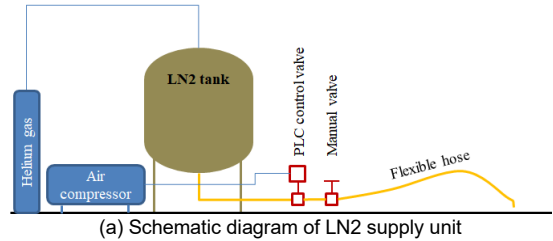
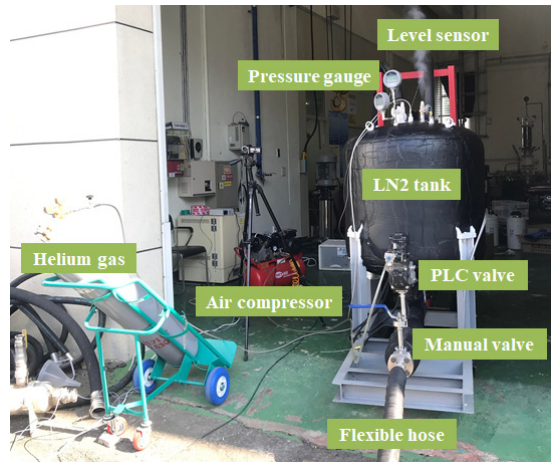


Fig. 1. Continuous release test apparatus

수직 기둥 사이의 거리는 2.8 m, 각 열전대 사이의 수직 거리는 0.2 m이다(Table 2).



(a) Schematic diagram of LN2 supply unit



(b) Photo of LN2 supply unit

Fig. 2. Details of LN2 supply unit

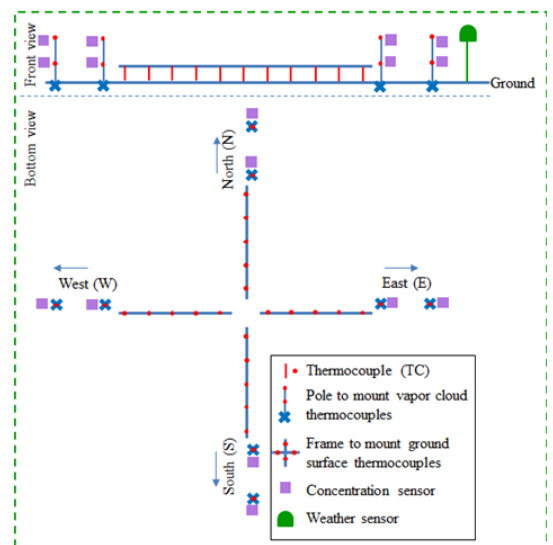


Fig. 3. Schematic diagram of measurement unit

증기운 농도 측정을 위한 산소 센서는 총 16개이며, 위치는 증기운 온도 측정 열전대와 동일하다. 각종 측정 센서가 설치된 사진을 Fig. 4에 제시하였다.

3. 실험 결과

3.1 실험 조건

액체질소를 이용한 누출 실험 조건은 공칭 유량

Table 1. Thermocouple positions for LN2 spread measurement

North	South	East	West
S_N_0.3* (N1)	S_S_0.3 (S1)	S_E_0.3 (E1)	S_W_0.3 (W1)
S_N_0.6 (N2)	S_S_0.6 (S2)	S_E_0.6 (E2)	S_W_0.6 (W2)
S_N_0.9 (N3)	S_S_0.9 (S3)	S_E_0.9 (E3)	S_W_0.9 (W3)
S_N_1.2 (N4)	S_S_1.2 (S4)	S_E_1.2 (E4)	S_W_1.2 (W4)
S_N_1.5 (N5)	S_S_1.5 (S5)	S_E_1.5 (E5)	S_W_1.5 (W5)
S_N_1.7 (N6)	S_S_1.7 (S6)	S_E_1.7 (E6)	S_W_1.7 (W6)
S_N_1.9 (N7)	S_S_1.9 (S7)	S_E_1.9 (E7)	S_W_1.9 (W7)

*S_N_0.3: S/Surface, N/North line, 0.3/Distance from the center (m)

Table 2. Thermocouple positions for vapor cloud temperature measurement

North	South	East	West
V_N_2.2_0.1* (N11)	V_S_2.2_0.1 (S11)	V_E_2.2_0.1 (E11)	V_W_2.2_0.1 (W11)
V_N_2.2_0.3 (N12)	V_S_2.2_0.3 (S12)	V_E_2.2_0.3 (E12)	V_W_2.2_0.3 (W12)
V_N_5_0.1 (N21)	V_S_5_0.1 (S21)	V_E_5_0.1 (E21)	V_W_5_0.1 (W21)
V_N_5_0.3 (N22)	V_S_5_0.3 (S22)	V_E_5_0.3 (E22)	V_W_5_0.3 (W22)

*V_N_2.2_0.1: V/Vapor, N/North line, 2.2/Distance from the center(m), 0.1/Height from ground(m)

60 L/min, 누출 시간 5분, 누출 직경 25.4 mm이며, 누출 방향 및 조건은 Table 3과 같이 특정한 높이에서 수직 하향(downward)과 수평(horizontal) 방향으로 누출된다. Table 4에 주변 조건을 정리하였다.

3.2 액체물의 확산 결과

저장 탱크로부터의 누출 유량을 정확히 계산하기 위하여 저장 탱크의 압력과 액체의 수위를 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5를 보면 실험 시작 후 300초 구간까지 저장 탱크의 압력이 비교적 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 모든 실험에서 300초에 누출을 종료하였다.

누출 유량은 측정된 수위 데이터로부터 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\dot{m} = \frac{(L_1 - L_2)\pi r^2}{t_2 - t_1} \times 10^{-3} \times 60 \quad (1)$$

여기서 \dot{m} 는 누출 유량(L/min), L_1, L_2 는 시간 t_1, t_2 (s)에서의 수위(cm), r 은 탱크의 내부 반경으로

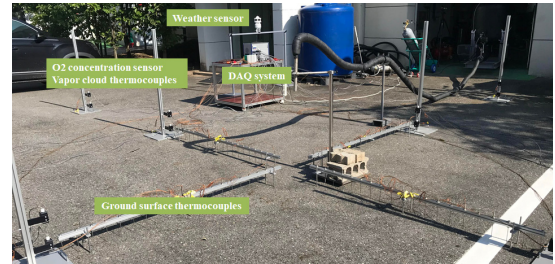


Fig. 4. Photo of measuring sensors

Table 3. Release height and direction

Test case	Release height above ground (m)	Release direction
1	0.86	Vertical
2	0.05	Vertical
3	0.86	Horizontal
4	0.05	Horizontal

400 cm이다. 수위계로부터 1초 단위로 데이터를 얻기 때문에 누출 유량도 1초 간격으로 계산된다. 다른 누출 조건에서도 Fig. 5와 같은 결과를 얻었다.

누출된 액체가 지표면에 충돌 또는 낙하한 후, 충돌 또는 낙하한 지점(원점)으로부터 확산되는 현상을 측정하기 위하여 지표면에 네 방향으로 열전대가 설치되어 있다. 열전대는 극저온의 액체질소와 만나면서 Fig. 6과 같이 온도가 급강하하므로, 액체풀의 위치를 알 수 있게 된다. 이를 이용하여 액체풀의 확산 형태를 Fig. 7에 표시하였다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 풀의 확산은 각 방향마다 균일하지 않다. 수치 계산 결과와 비교하기 위하여 모든 방향으로 동일한 확산 형태를 가지는 원형풀(circular pool)로 가정하여, 상당 반경(equivalent pool radius)을 다음과 같이 계산한다. Fig. 8에서와 같이 네 방향으로의 풀 확산 데이터로부터 다음의 식으로 상당 반경, R_{equi} 을 계산한다. 편의상 수직 누출 두

radius)을 다음과 같이 계산한다. Fig. 8에서와 같이 네 방향으로의 풀 확산 데이터로부터 다음의 식으로 상당 반경, R_{equi} 을 계산한다. 편의상 수직 누출 두

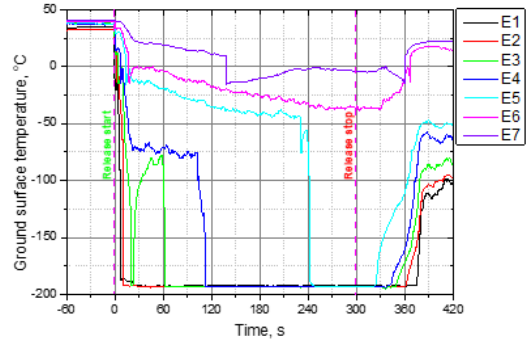


Fig. 6. Ground surface temp. w/ east line (vertical_0.86 m (1))

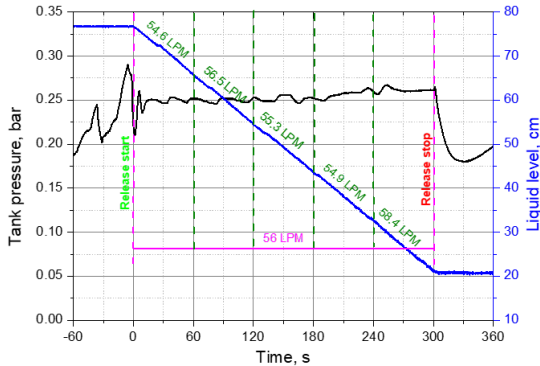


Fig. 5. Tank pressure and liquid level (vertical_0.86m (1))

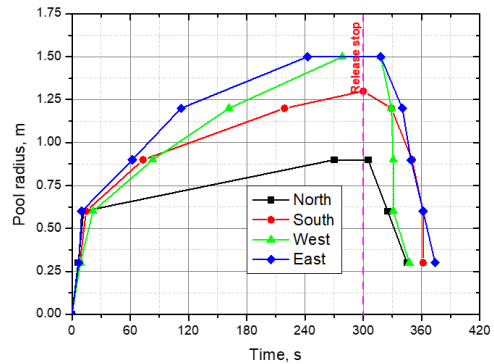


Fig. 7. Pool spreading (vertical_0.86m (1))

Table 4. Surrounding condition

Leak condition	Case	Weather condition					
		Ground surface temperature, °C	Ambient temperature, °C	Solar radiation, W/m ²	Relative humidity, %	Wind speed, m/s	Wind direction
Vertical_0.86 m	1	40	28	418	42	0.64	South-East
	2	38	28	475	38	0.53	East or West
Vertical_0.05 m	1	47	29	615	40	0.61	East-North-East
Horizontal_0.86 m	1	41	31	248	62	1.48	North-East
	2	33	25	274	38	0.59	South-East
	3	32	25	223	55	0.66	West-South-West
Horizontal_0.05 m	1	38	29	268	46	1.05	North-East
	2	38	30	170	58	0.42	North-North-East

가지, 수평 누출 두 가지 경우에 대한 데이터를 정리하여 Fig. 9에 제시하였다.

$$R_{equi.} = \frac{1}{2} \sqrt{(R_N R_W + R_W R_S + R_S R_E + R_E R_N)} \quad (2)$$

풀의 최대 크기, 형상 및 상당 반경을 Fig. 10에 정리하였다. 수직 누출과 수평 누출에서의 풀의 형상은 매우 다르게 나타나고 있는데 수평 누출의 경우에는 누출 방향으로의 모멘텀이 영향을 미치는 것으로 판단된다. 수직 누출은 수평 누출에 비하여 상대적으로 균일하게 확산되며, 누출 높이에 따른 풀의 형상에는

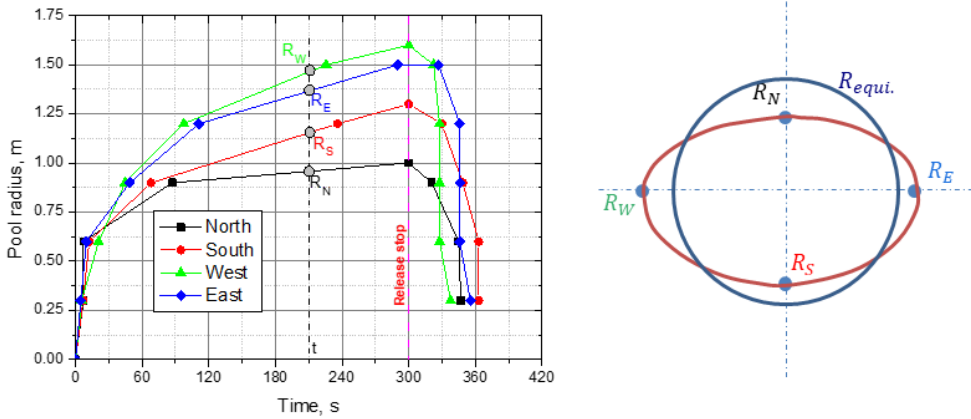


Fig. 8. Concept of equivalent pool radius

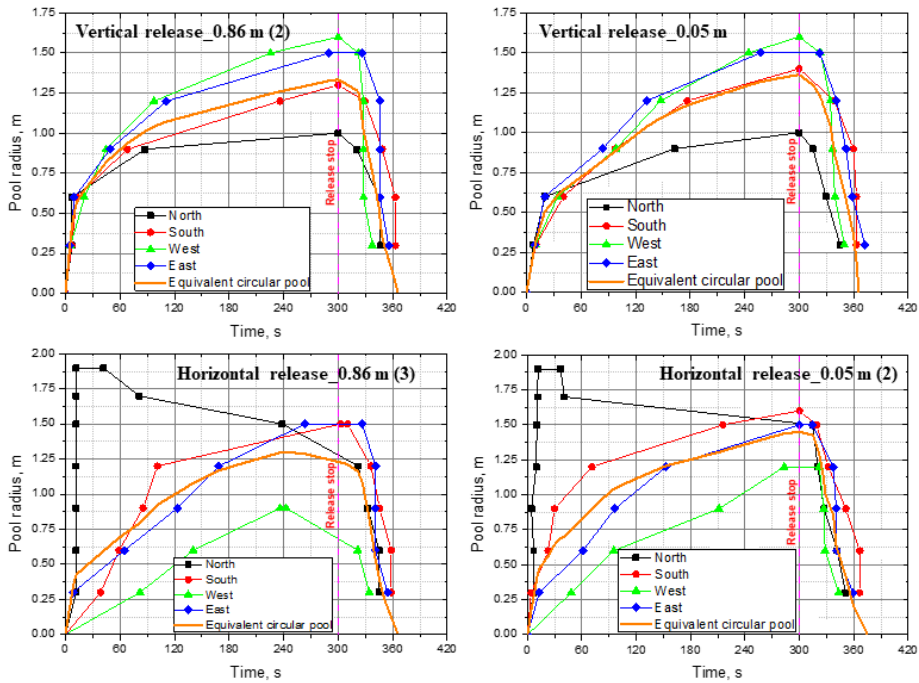


Fig. 9. Pool spreading of typical cases

차이가 없는 것을 알 수 있다. 최대 상당 반경은 각 경우 큰 차이를 보이지 않는데, 이로부터 최대 풀의 크기는 누출 유량에 의존하는 것을 예측할 수 있다.

실험 결과와 수치 모델 gas accumulation over spreading pools (GASP)⁵⁾, Process Hazard Analysis Software Tool (PHASt; DNV, Høvik, Norway)⁶⁾와의 비교를 통해 여러 가지 시사점을 얻을 수 있었다. 풀의 상당 반경에 관한 비교는 Fig. 11에 나타내었다. 실험 결과가 수치 모델들에 비하여 작게 나타나고 있으며, 300초에서 누출이 중단된 이후의 구간에서는 GASP 모델이 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. PHAST는 상업화된 모델로 누출이 중단된 이후의 결과는 신뢰하기 어려운 것을 알 수 있다.

Fig. 12에는 풀의 최대 반경을 표시하였다. 이를 보면, GASP 모델이 최대 반경을 나타내고 있다. 다른 조건에서도 유사한 결과를 얻었으며 Figs. 13, 14

에 수평 누출_0.86 m(3)에 대한 결과를 나타내었다.

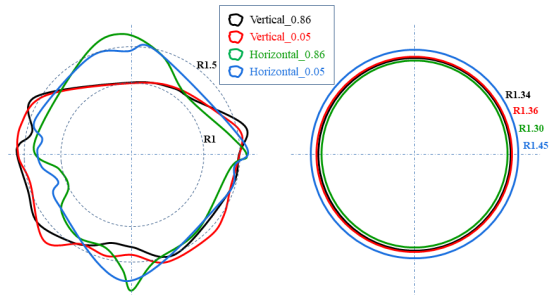


Fig. 10. Maximum size of pools and their equivalent radius

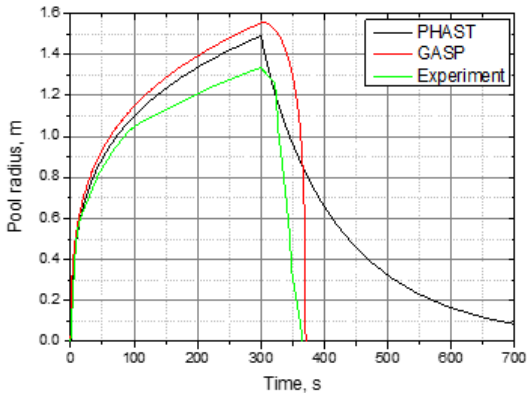


Fig. 11. Comparison of pool radius (vertical_0.86m(2))

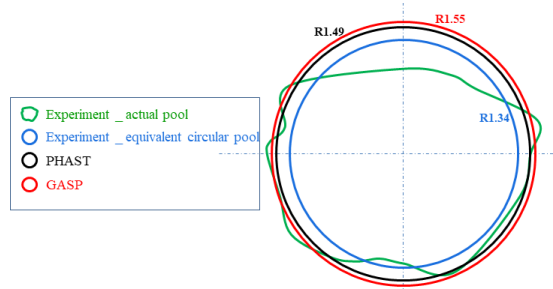


Fig. 12. Comparison of maximum radius (vertical_0.86 m(2))

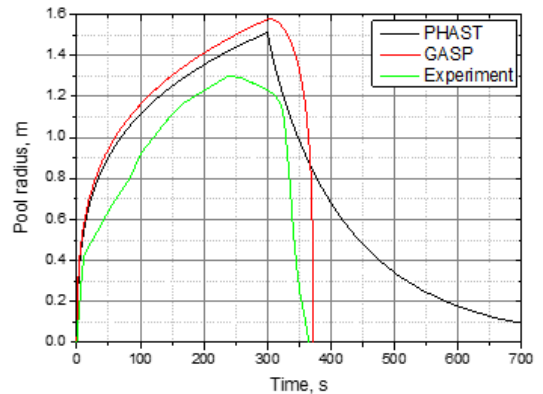


Fig. 13. Comparison of pool radius (horizontal 0.86 m(3))

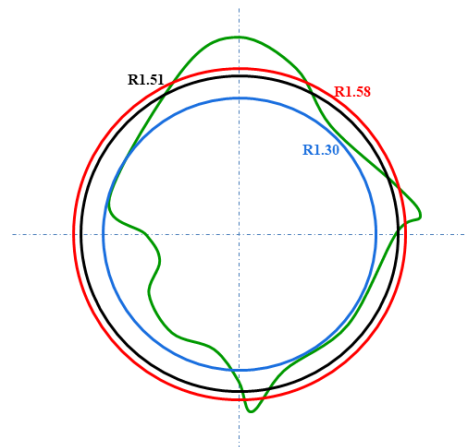


Fig. 14. Comparison of maximum radius (horizontal_0.86m(3))

3.3 증기운의 농도 및 온도 측정

증기운의 농도는 가연물질 경우 화재 및 폭발 가능성을 보여주는 물리량이기 때문에 중요한 의미를 가진다. 본 시험에서는 네 방향으로 4개소에 총 16개의 산소 농도를 측정하여 식 (3)을 통해 증기운의 농도로 환산하였다.

$$C_{N_2} = 100 - C_{O_2} \times \frac{100}{20.95} \quad (3)$$

여기서 C_{N_2} 는 증기운의 농도, C_{O_2} 는 측정된 산소 농도를 의미한다.

누출된 액체가 질소이기 때문에 공기 중에 포함된 질소를 제외하고 계산된 값이다. Fig. 15에 증기운의 농도를 나타내었다. 최대 농도는 대략 55-75% 수준이다. 네 방향 전부에서 지표면에 근접한 곳의 증기운 농도가 지표면에서 멀리 떨어진 곳보다 높게 측정되었는데, 누출된 지점에서부터 멀리 떨어질수록 누출되어 증발된 기체와 주위 공기와의 혼합이 증가

하기 때문이다. Fig. 16에는 증기운의 온도를 표시하였다. 증기운의 온도 범위는 -40°C에서 30°C이다. 다른 조건에서도 유사한 결과를 보인다.

모든 실험의 주요 결과를 Table 5에 정리하였다. 수직 누출에서 풀의 최대 크기는 누출의 높이에 따라 큰 차이가 없으나, 평균 누출 유량이 클수록 그 크기도 약간 증가한 것을 알 수 있다. 수평 누출의 경우 수직 누출과 다르게 경향성을 발견하기 어렵다.

증기운의 농도는 지표면에서 0.1, 0.3 m 높이에서 측정되었으며, 0.1 m 높이에서의 증기운 농도가 0.3 m에서 보다 크다는 것은 이미 언급하였다. 동일 높이에서 비교한 수직, 수평 누출의 경우 대략적으로 수직의 경우가 수평의 경우에 비하여 최대 농도가 큰 것을 알 수 있다. 다만, 수평 누출 0.05 m의 경우 두 가지의 데이터가 많이 다른 것은 누출 유량에 차이가 많기 때문이다. 즉 누출 유량이 많기 때문에 모든 방향에서의 최대 농도가 증가하였다.

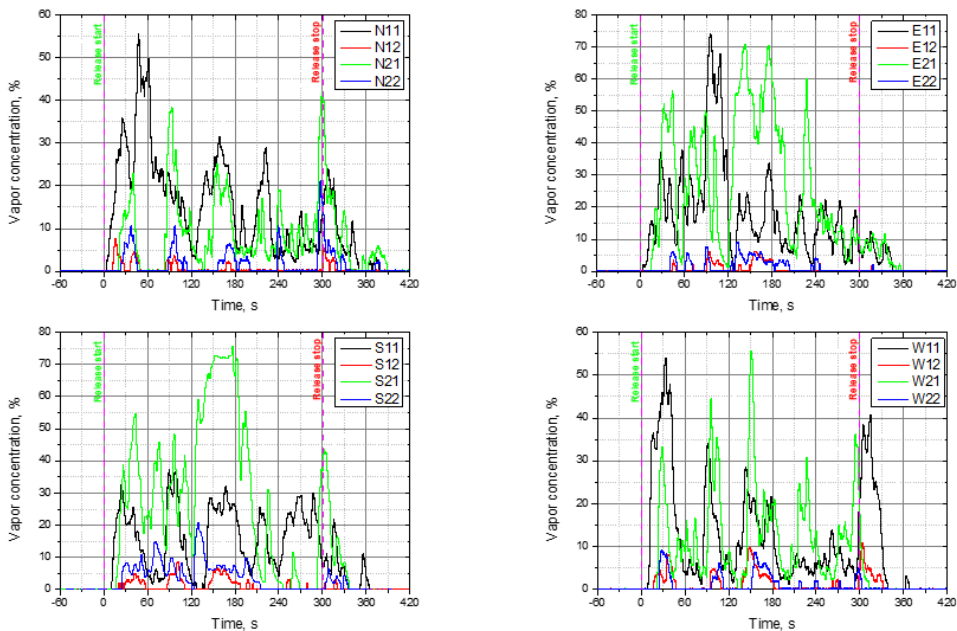


Fig. 15. Concentration of vapor cloud for the case, vertical_0.86 m (1)

4. 결론

액체수소의 운송 및 사용 중에 누출되는 사고의 안전성을 해석하기 위하여 우선적으로 액화질소를 이용하여 연속 누출을 가정한 실규모 실험을 옥외에서 진행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 수직 누출과 수평 누출에서의 풀의 형상은 매우 다르게 나타나고 있는데 수평 누출의 경우 누출

방향으로의 모멘텀이 확산에 기여하기 때문인 것으로 평가된다. 수직 누출은 수평 누출에 비하여 네 방향으로 균일하게 확산되며, 누출 높이에 따른 풀의 형상에는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 최대 상당 반경은 네 가지 경우에서 큰 차이를 보이지 않는데, 이로부터 최대 풀의 크기는 누출 방향과 상관없이 누출 유량에 주로 의존하는 것을 예측할 수 있다.

2) 액체풀의 반경에 대하여 실험 결과와 수치 모

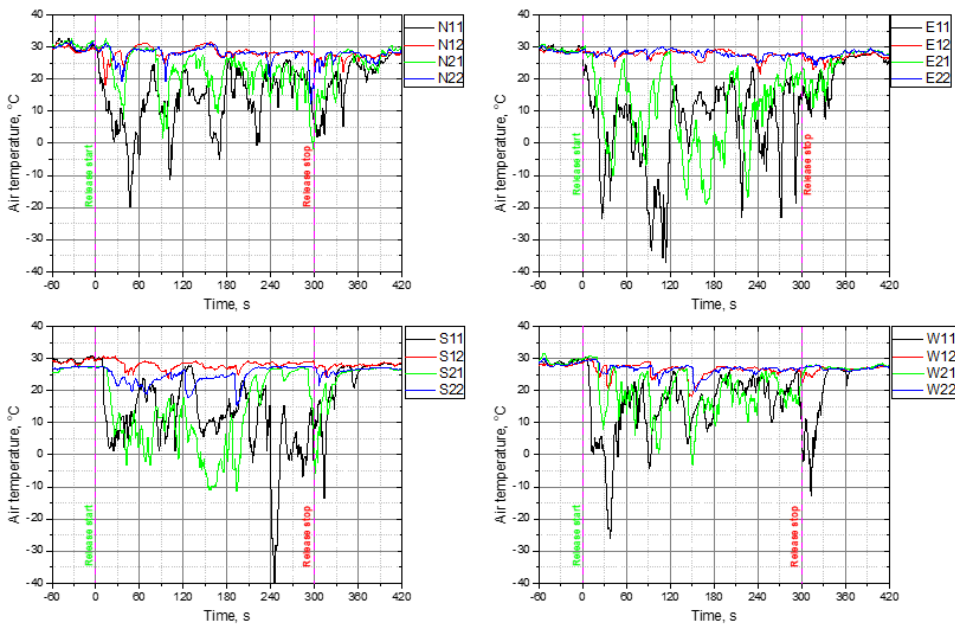


Fig. 16. Temperature of vapor cloud for the case, vertical_0.86 m(1)

Table 5. Main result

Leak condition	Case	Average spill rate, L/min	Maximum pool size, m	Maximum concentration, %			
				North	East	South	West
Vertical_0.86 m	1	56.0	3.0×2.2	56	74	76	56
	2	60.6	3.1×2.3	57	71	83	74
Vertical_0.05 m	1	62.3	3.1×2.4	44	74	77	57
Horizontal_0.86 m	1	61.4	2.8×3.0	55	57	29	28
	2	60.5	3.0×3.1	58	36	38	56
	3	60.4	2.9×3.6	65	53	32	42
Horizontal_0.05 m	1	57.2	3.5×2.4	53	47	72	43
	2	62.1	3.0×3.2	77	79	86	85

델을 비교한 결과, 실험에서 얻어진 상당 반경이 수치모델 GASP, PHAST에 비하여 전반적으로 작게 나타나고 있다. 누출 초기 약 50초까지는 세 가지 데이터가 잘 일치하고 있으며, 이후 중단되기 전까지 두 가지 수치 모델이 비교적 잘 일치하고 있다. 누출이 중단된 이후에는 GASP 모델이 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있고, PHAST는 실험 결과와 매우 다른 경향을 보였다. 액체질의 최대 상당 반경은 두 가지 수치 모델이 큰 차이를 보이지 않는다. 확산 초기의 실험 결과와 수치 모델 결과가 잘 일치하고, 이외의 구간에서는 전체적인 경향이 비슷하기 때문에 균일 확산을 가정하기 위한 상당 반경의 도입이 타당한 것을 알 수 있다.

3) 증기운의 최대 농도는 대략 55-75% 수준이다. 네 방향 전부에서 지표면에 근접한 곳에서의 증기운 농도가 지표면에서 멀리 떨어진 곳보다 크게 측정되었는데, 이는 누출된 지점에서부터 멀리 떨어질수록 누출되어 증발된 기체와 주위 공기와의 혼합이 증가하기 때문이다. 측정된 증기운의 온도 범위는 -40°C 에서 30°C 이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 및 한국에너지기술평가원의 지원을 받은 연구 프로그램(Grant number: 20215810100020)에 의하여 수행되었습니다.

References

1. American Petroleum Institute (API), "Overview of API RP 581: risk based inspection", API, 2016.
2. M. Kim, B. Choi, T. Kim, K. Do, Y. Han, and K. Chung, "Experimental study of the evaporation of spreading liquid nitrogen", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 29, No. 5, 2018, pp. 466-472, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.466>.
3. J. Hall, "Ignited releases of liquid hydrogen", Health and Safety Laboratory, 2014. Retrieved from <https://www.hse.gov.uk/Research/rpdf/rr987.pdf>.
4. J. Aaneby, T. Gjesdal, and Ø. A. Voie, "Large scale leakage of liquid hydrogen (LH2) - tests related to bunkering and maritime use of liquid hydrogen", Norwegian Defence Research Establishment (FFI), 2021. Retrieved from <https://www.ffi.no/en/publications-archive/large-scale-leakage-of-liquid-hydrogen-lh2-tests-related-to-bunkering-and-maritime-use-of-liquid-hydrogen>.
5. D. M. Webber, "A model for pool spreading and vaporization and its implementation in the computer code GASP", Health & Safety Executive (HSE), 1990. Retrieved from https://www.esrtechnology.com/images/srm/Webber_1987.pdf.
6. DNV, "Process Hazard Analysis Software Tool (PHAST) 8.23", DNV, 2020.